

การใช้สารช่วยผสมปรับปรุงสมบัติพอลิเอทิลีนชนิด
ความหนาแน่นสูงที่มีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต



นายธนเรศ ประเสริฐวงศ์
นายธราศรัย แสงภักดี

เลขที่.....
เลขทะเบียน **43889**
วัน, เดือน, ปี **17 ต.ค. 2545**

b.....
i.....

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2544

Using Compatibilizer for Property Modification of
 CaCO_3 – Filled HDPE



A Special 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
2001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การใช้สารช่วยผสมปรับปรุงสมบัติพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่
มีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต

นักศึกษา นายธนเรศ ประเสริฐวงษ์ รหัส 41052028
 นายธราศรัย แสงภักดี รหัส 41052030

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สุภารัตน์ รักชลธี

ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2544

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต


.....
(ผศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย) หัวหน้าภาควิชาเคมี


.....
(ผศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด) ประธานกรรมการ


.....
(ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์) กรรมการ


.....
(ดร.สุภารัตน์ รักชลธี) อาจารย์ที่ปรึกษา

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การใช้สารช่วยผสมปรับปรุงสมบัติพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต	
นักศึกษา	นายธนเรศ ประเสริฐวงษ์	รหัส 41052028
	นายธราศรัย แสงภักดี	รหัส 41052030
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ์	
ภาควิชา	เคมี	
ปีการศึกษา	2544	

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษามวลของการเติมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (HDPE-g-MA) และ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยกรดอะคริลิก (HDPE-g-AA) ซึ่งเป็นสารช่วยผสม ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการไหลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นสารตัวเติม โดยปริมาณ CaCO_3 เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และทำการศึกษเปรียบเทียบกับการใช้ CaCO_3 ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก (SA) โดยปริมาณสารช่วยผสมที่ใช้คือ 0.1 0.25 0.5 1.0 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ CaCO_3 ทำการผสมส่วนประกอบต่างๆ ด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่แล้วนำไปบดด้วยเครื่องบดพลาสติก ศึกษาสมบัติการไหลด้วยเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์ และเตรียมชิ้นงานตัวอย่างจากเครื่องฉีดขึ้นรูป เพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าการเติม CaCO_3 ทำให้ค่ามอดุลัส ความแข็ง และความเหนียวเพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงดึง การดึงยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงกระแทกของ HDPE ลดลง การเพิ่มขึ้นของปริมาณสารช่วยผสมส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น แต่จะทำให้ค่าการดึงยืด ณ จุดขาด และค่าความแข็งแรงกระแทกลดลง ส่วนการทดสอบสมบัติความเหนียวของสารให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน การใช้ HDPE-g-AA ให้สมบัติที่ดีกว่าการใช้ HDPE-g-MA ในปริมาณเท่ากัน โดยการใช้ HDPE-g-AA 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด

Special Project Title	Using Compatibilizers for modified CaCO ₃ - Filled HDPE
Name	Mr. Tanarate Prasertwong Mr. Tharasai Sangpakdee
Special Project Advisor	Dr. Suparat Rukchonlatee
Department	Chemistry
Academic Year	2001

Abstract

This research studied the effects of maleic anhydride grafted high density polyethylene (HDPE-g-MA) and acrylic acid grafted high density polyethylene (HDPE-g-AA) (used as compatibilizers) on mechanical and rheological properties of CaCO₃-filled HDPE. CaCO₃ content was 20% by weight. A comparative study with stearic acid coated CaCO₃ was also carried out. Compatibilizer contents were 0.1, 0.25, 0.5, 1.0, and 2.0 % by weight of CaCO₃. All compounds were mixed using a twin-screw extruder and ground using a grinding machine. Capillary rheometer was used to determine rheological properties. An injection molding machine was used to prepare testing specimens for examination of mechanical properties. It was found that an addition of CaCO₃ increased modulus, hardness, and viscosity, but decreased tensile strength, elongation at break, and impact strength of HDPE. Increasing in compatibilizer content increased tensile strength but lowered elongation at break and impact strength of HDPE compounds. However, viscosities of those compounds were similar. At similar compatibilizer contents, HDPE-g-AA showed better properties than HDPE-g-MA. The best properties of CaCO₃-filled HDPE were observed when using 0.1% HDPE-g-AA.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่าย ทางผู้จัดทำโครงการพิเศษจึงใคร่ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ ดร.สุภาร์ตน์ รักชลธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาให้คำปรึกษา ความรู้ ความห่วงใยเอาใจใส่ และคำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนความช่วยเหลือในการดำเนินงานโครงการพิเศษนี้มาตลอด

ขอขอบพระคุณ ดร.อิทธิพล แจ่มชัด และดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ อาจารย์คณะกรรมาการที่ให้ ความกรุณาตรวจทาน และแก้ไขโครงการฉบับนี้ให้มีความครบถ้วนสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณบริษัท ไทยพอลิเอทิลีน จำกัด บริษัท สุรินทร์ออมยา เคมีคอล จำกัด และบริษัท TOA UNI CHEMICAL MANUFACTURING, LTD จำกัดที่ให้ความอนุเคราะห์เม็ดพลาสติก แคลเซียมคาร์บอเนต และสารช่วยผสม ตามลำดับ

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ทุกท่านที่ช่วยอำนวยความสะดวกและช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษ

ขอขอบพระคุณ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือวิทยาศาสตร์

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่น้อง เพื่อนๆ ทุกท่าน และบุคคลที่นอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้วที่คอยเป็นกำลังใจตลอดมา ผู้จัดทำโครงการพิเศษขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ธนเรศ ประเสริฐวงษ์

ธราศรัย แสงภักดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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	2
1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE)	4
2.1.1 บทนำ	4
2.1.2 กระบวนการผลิตและตัวเร่งปฏิกิริยา	4
2.1.3 สมบัติทั่วไป	6
2.1.4 การประยุกต์ใช้งานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11
2.2 แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO ₃)	12
2.2.1 บทนำ	12
2.2.2 การปรับปรุงพื้นผิว	14
2.2.3 สมบัติทั่วไป	15
2.2.4 การประยุกต์ใช้งานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
2.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride grafted high density polyethylene, HDPE-g-MA)	20
2.3.1 บทนำ	20
2.3.2 กระบวนการผลิตและสมบัติทั่วไป	21
2.3.3 การประยุกต์ใช้งาน	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
2.4 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยกรดอะคริลิก (Acrylic acid grafted high density polyethylene, HDPE-g-AA)	29
2.4.1 บทนำ	29
2.4.2 กระบวนการผลิตและสมบัติทั่วไป	30
2.5 กระบวนการผสมโดยใช้ เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่	31
2.6 การฉีดขึ้นรูปโดยใช้ Injection Molding	33
บทที่ 3 การทดลอง	35
3.1 สารเคมี	35
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	36
3.3 การเตรียมสารตัวอย่าง	37
3.4 การทดสอบสมบัติของสารตัวอย่าง	37
3.4.1 ปริมาณที่แน่นอนของ CaCO_3 ที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง	37
3.4.2 สมบัติทางความร้อน	38
3.4.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของสารตัวอย่าง	38
3.4.4 การทดสอบสมบัติการไหลของสารตัวอย่าง	38
3.4.5 การศึกษาลักษณะการกระจายตัวของ CaCO_3 ในสารตัวอย่าง	39
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	40
4.1 ผลการหาปริมาณที่แน่นอน CaCO_3	40
4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน	41
4.3 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึง	43
4.4 ผลการทดสอบความแข็งแรงกระแทก	46
4.5 ผลการทดสอบความแข็ง	47
4.6 ผลการทดสอบสมบัติการไหล	48
4.7 ผลการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO_3 ในสารตัวอย่าง	54
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	59
5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย	59
5.2 ข้อเสนอแนะ	60
เอกสารอ้างอิง	61
ภาคผนวก	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 อิทธิพลของความหนาแน่นของพอลิเมอร์ต่อสมบัติของพอลิเอทิลีน ในเกรดต่างๆ	9
ตารางที่ 2.2 ปริมาณการใช้สารตัวเติมใน USA	14
ตารางที่ 2.3 สมบัติของ microporous บนแผ่นของ PP	16
ตารางที่ 2.4 ระยะระหว่างพื้นผิวของ HDPE/CaCO ₃ (CaCO ₃ มีขนาด 7.44 μm)	18
ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ HDPE	35
ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ CaCO ₃	36
ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของสารช่วยผสม HDPE-g-MA และ HDPE-g-AA	36
ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนผสมของ HDPE CaCO ₃ และ สารช่วยผสม	37
ตารางที่ 4.1 ปริมาณที่แน่นอนของ CaCO ₃ ในสารตัวอย่าง	41
ตารางที่ 4.2 ค่าสมบัติทางความร้อน	42

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างของพอลิเอทิลีน	4
รูปที่ 2.2 ผลของความหนาแน่นที่มีต่อสมบัติของพอลิเอทิลีน	7
รูปที่ 2.3 การประยุกต์ใช้พอลิเอทิลีนตามความหนาแน่นและดัชนีการหลอมเหลว (Melt index)	11
รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างของแคลเซียมคาร์บอเนต	12
รูปที่ 2.5 ลักษณะโครงสร้างของ HDPE-g-MA	21
รูปที่ 2.6 ลักษณะโครงสร้างของ HDPE-g-AA	30
รูปที่ 2.7 ลักษณะของ Intermeshing counter-rotating screw	32
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปกับเปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของ CaCO ₃ (%wt)	40
รูปที่ 4.2 กราฟตัวอย่างแสดงผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC ของ HDPE	42
รูปที่ 4.3 กราฟตัวอย่างแสดงการทดสอบสมบัติการรับแรงดึง	43
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง (Mpa) กับปริมาณ สารช่วยผสม (%wt)	44
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดกับปริมาณ สารช่วยผสม (%wt)	44
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัส (Mpa) กับปริมาณสารช่วยผสม (%wt)	45
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงกระแทก (KJ/m ²) กับปริมาณ สารช่วยผสม (%wt)	46
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง (Shore D) กับปริมาณ สารช่วยผสม (%wt)	47
รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่า Shear Viscosity ของสารตัวอย่างเมื่ออัตรา ความเครียดเพิ่มขึ้น	48
รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบค่า Shear Viscosity ของสารตัวอย่างเมื่ออัตรา ความเครียดเพิ่มขึ้น	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบค่า Shear Viscosity ของสารตัวอย่างเมื่ออัตรา ความเครียดเฉือนเพิ่มขึ้น	50
รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบค่า Shear Viscosity และ Elongation viscosity	52
รูปที่ 4.13 HDPE 100%wt กำลังขยาย 1000 เท่า	54
รูปที่ 4.14 HDPE ที่มี CaCO ₃ ปริมาณ 20%wt กำลังขยาย 1000 เท่า	54
รูปที่ 4.15 HDPE ที่มี CaCO ₃ ปริมาณ 20%wt (ผสม 1.0%wt SA) กำลังขยาย 1000 เท่า	55
รูปที่ 4.16 HDPE ที่มี CaCO ₃ ปริมาณ 20%wt (ผสม 0.1%wt HDPE-g-MA) กำลังขยาย 1000 เท่า	55
รูปที่ 4.17 HDPE ที่มี CaCO ₃ ปริมาณ 20%wt (ผสม 0.5%wt HDPE-g-MA) กำลังขยาย 1000 เท่า	56
รูปที่ 4.18 HDPE ที่มี CaCO ₃ ปริมาณ 20%wt (ผสม 2.0%wt HDPE-g-MA) กำลังขยาย 1000 เท่า	56
รูปที่ 4.19 HDPE ที่มี CaCO ₃ ปริมาณ 20%wt (ผสม 0.1%wt HDPE-g-AA) กำลังขยาย 1000 เท่า	57
รูปที่ 4.20 HDPE ที่มี CaCO ₃ ปริมาณ 20%wt (ผสม 0.5%wt HDPE-g-AA) กำลังขยาย 1000 เท่า	57
รูปที่ 4.21 HDPE ที่มี CaCO ₃ ปริมาณ 20%wt (ผสม 2.0%wt HDPE-g-AA) กำลังขยาย 1000 เท่า	58

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ

ปัจจุบัน พอลิเมอร์จัดเป็นวัสดุสำคัญ ที่มีความจำเป็นอย่างมากในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ตัวอย่างเช่น เสื้อผ้าเครื่องนุ่งห่ม รถยนต์ อุปกรณ์ไฟฟ้า-สื่อสาร วัสดุเกษตรกรรม วัสดุก่อสร้าง อุตสาหกรรมอาหาร ยาและเวชภัณฑ์ บรรจุภัณฑ์ต่างๆ เป็นต้น ล้วนแต่ใช้พอลิเมอร์เป็นส่วนประกอบหลัก วัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้มีอยู่ในหลายรูปแบบ เช่น ของเหลว เส้นใย พิล์ม ผง เม็ด และวัสดุประกอบหรือคอมโพสิต (Composites) และอื่นๆ เราอาจแบ่งพอลิเมอร์ได้เป็นสองประเภทใหญ่ๆ คือ พอลิเมอร์สังเคราะห์ (Synthetic polymers) และพอลิเมอร์จากธรรมชาติ (Natural polymers) พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีความสำคัญยิ่งต่อการใช้ชีวิตของมนุษย์ และมีความเกี่ยวข้องกับศาสตร์ในหลากหลายสาขาวิชา เช่น เคมี ฟิสิกส์ วัสดุ และอื่นๆ พอลิเมอร์มีสมบัติที่ดีคือมีน้ำหนักเบา มีความทนทาน สามารถทำการผลิต ดัดแปลง และแปรรูปได้ง่าย และมีสมบัติที่เด่นกว่าวัสดุชนิดอื่นๆ คือ มีน้ำหนักโมเลกุลที่สูงจึงทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติที่พิเศษหลายอย่าง เช่น มีความแข็งแรง ยืดหยุ่น เหนียว เป็นฉนวนทางไฟฟ้า สามารถทนกรด ทนด่าง และสารเคมี เป็นต้น ในส่วนของสมบัติที่ไม่ดีหรือไม่ตรงกับงานที่นำพอลิเมอร์ไปใช้นั้นสามารถปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ได้ โดยการเติมสารเติมแต่ง (Additives) เช่น สารต่อต้านการออกซิไดซ์ สารหล่อลื่น พลาสติกไซเซอร์ สารหน่วงการติดไฟ สารตัวเติม สารเสริมแรง เป็นต้น

พอลิเมอร์นั้นได้มาจากวัตถุดิบจากปิโตรเลียม ซึ่งเป็นทรัพยากรที่มีจำนวนจำกัด มีโอกาสที่จะหมดไปในอนาคต และจะทำให้มีราคาแพงส่งผลให้ราคาของพอลิเมอร์สูงขึ้น จึงได้มีการศึกษาความเป็นไปได้ที่จะใช้พอลิเมอร์ในปริมาณที่น้อยลง โดยการเติมสารตัวเติม (Fillers) ซึ่งได้ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ทำหน้าที่ลดต้นทุนและสามารถลดการหดตัวในแม่พิมพ์และปรับปรุงสมบัติอีกหลายด้าน โดยปกติปริมาณของสารตัวเติมจะไม่เกิน 40% โดยน้ำหนัก [1] เพราะถ้ามากกว่านั้นจะทำให้การผสมและการกระจายตัวของสารตัวเติมในพอลิเมอร์เป็นไปได้ยากขึ้น ส่งผลให้สมบัติต่างๆ ด้อยลง ดังนั้นจึงควรเติมสารตัวเติมในปริมาณที่เหมาะสม

สารตัวเติมในอุตสาหกรรมพลาสติกจัดเป็นประเภทต่างๆ ได้หลายเกรด แต่ละเกรดมีความแตกต่างกันในเรื่องต่อไปนี้ [1]

- 1) ขนาดของอนุภาคและการกระจายขนาด อนุภาคที่มีขนาดเล็กทำให้มีสมบัติความแข็งแรงดีและค่ามอดูลัสสูง อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ทำให้สารประกอบมีความแข็งแรงน้อยกว่าก่อนการผสมสารตัวเติม

- 2) รูปร่างของอนุภาค และความพรุน อนุภาคที่มีผิวเรียบนั้นยากแก่การที่จะยึดติดกับพอลิเมอร์ ในขณะที่อนุภาคที่มีรูพรุนจะดูดซับสารตัวเติมชนิดอื่นที่ผสมอยู่ในพอลิเมอร์ไว้ทำให้ประสิทธิภาพของสารตัวเติมเหล่านั้นลดลง
- 3) ธรรมชาติทางเคมีพื้นผิวของสารตัวเติม
- 4) สิ่งปนเปื้อน เช่น ชี้น้ำมันและไอออนของโลหะ อาจก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density Polyethylene, HDPE) เป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ที่มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงนั้นไม่มีขั้ว ด้วยเหตุนี้เองทำให้สมบัติการยึดเกาะระหว่างผิวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับวัสดุชนิดอื่นจึงไม่ดี สามารถแก้ปัญหาได้หลายวิธี เช่น การปรับปรุงพื้นผิว การใช้สารควบคู่ (Coupling agent) การใช้สารช่วยผสม (Compatibilizer) เป็นต้น สารตัวเติมที่นิยมใช้กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง คือ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาง่าย ได้มาจากหินแร่ธาตุ หรือจากการสังเคราะห์ มีความขาว ราคาถูก และมีหลายขนาด จากงานวิจัยของ J. Suwanprateeb [2] พบว่าเมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้นทำให้ค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้นเนื่องจาก CaCO_3 มีค่ามอดุลัสมากกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง แต่ค่าความแข็งแรงดึง การดึงยืด ณ จุดขาด และความทนทานต่อแรงกระแทกลดลง เนื่องจาก CaCO_3 มีแนวโน้มที่จะเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนและแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง CaCO_3 และ HDPE ไม่ใช่แรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงนัก เมื่อออกแรงดึงทำให้เกิดช่องว่างระหว่างรอยต่อของ HDPE กับ CaCO_3 ได้ง่ายจะกลายเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน ซึ่งสามารถแก้ไขได้หลายวิธี เช่น การเติม UHMWPE (Ultrahigh molecular weight polyethylene) ซึ่ง UHMWPE มีความแข็งแรงมากกว่า หรือทำการเติมสารช่วยผสม HDPE-g-MA หรือ HDPE-g-AA ทำให้แรงยึดติดระหว่างอนุภาคของพอลิเมอร์และสารตัวเติมดีขึ้นส่งผลให้เกิดการกระจายตัวที่ดีของสารตัวเติมในพอลิเมอร์

โครงการพิเศษฉบับนี้ศึกษาเกี่ยวกับการใช้สารช่วยผสมปรับปรุงสมบัติพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติม โดยสารช่วยผสมที่ใช้คือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (HDPE-g-MA) และ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยกรดอะคริลิก (HDPE-g-AA)

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษาสมบัติการไหลและสมบัติเชิงกลของ HDPE ที่มีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติม และใช้สารช่วยผสมคือ HDPE-g-MA และ HDPE-g-AA
- 2) ศึกษาเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสม
- 3) ศึกษาหาปริมาณของสารช่วยผสมที่เหมาะสมกับระบบ HDPE/ CaCO_3 เท่ากับ 80/20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของการเติมสารช่วยผสมคือ HDPE-g-MA และ HDPE-g-AA ต่อสมบัติการไหล อุณหภูมิการหลอมเหลว และสมบัติเชิงกล ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติม ซึ่งสามารถแบ่งย่อยได้ดังนี้

1) ศึกษาผลของปริมาณสารช่วยผสมใน HDPE กับ CaCO_3

ทำการใส่สารช่วยผสมลงไปเป็นปริมาณ 0.1% 0.25% 0.5% 1.0% และ 2.0% โดยน้ำหนักของสารตัวเติม ลงใน HDPE/ CaCO_3 โดยปริมาณของ CaCO_3 ที่ใช้เท่ากับ 20% โดยน้ำหนักของ HDPE

2) ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ที่มีผลเนื่องมาจากการใช้สารช่วยผสม 2 ชนิด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้เรียนรู้ถึงวิธีการปรับปรุงการผสมของพอลิเมอร์และสารตัวเติม ซึ่งไม่สามารถเกิดการผสมเข้ากันได้โดยการเติมสารช่วยผสมลงไป
- 2) สารช่วยผสมช่วยให้การผสมระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติมเข้ากันได้ดีขึ้นและสมบัติต่างๆ ดีขึ้น ก็จะเป็นแนวทางที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้ในด้านการลดต้นทุนในการผลิต เพราะมีการใช้พอลิเมอร์ในปริมาณที่ลดลง
- 3) เป็นแนวทางในการคิดค้นการปรับปรุงสมบัติด้านต่างๆ ของพอลิเมอร์ด้วยสารตัวเติมชนิดต่างๆ โดยมีการใช้สารช่วยผสมทำให้เกิดการเข้ากันได้ดีขึ้น

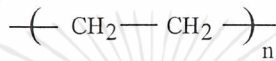
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE)

2.1.1 บทนำ [3]

พอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์ประเภทโอเลฟินส์ที่มีการผลิตมากที่สุดในบรรดาวัสดุที่เป็นเทอร์โมพลาสติก โดยเตรียมได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเติม (Addition polymerisation) ซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างของพอลิเอทิลีน

โครงสร้างของพอลิเอทิลีนจะประกอบด้วยหน่วยที่ซ้ำกันของเอทิลีนมอนอเมอร์ (Ethylene monomer) โดยชื่อของพอลิเอทิลีนถูกเรียกตามระบบ IUPAC

พอลิเอทิลีนสามารถแบ่งได้หลายชนิด โดยแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันในโครงสร้าง พฤติกรรม และการประยุกต์ใช้งาน

- พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) 0.915-0.935 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
- พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) 0.941-0.967 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
- พอลิเอทิลีนเชิงเส้นชนิดความหนาแน่นต่ำ (LLDPE) 0.910-0.925 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
- พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมาก (VLDPE) 0.880-0.912 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
- พอลิเอทิลีนชนิดมวลโมเลกุลสูง (HMWPE) และสูงมาก (UHMWPE) มวลโมเลกุล 200,000-500,000 สำหรับHMWPE และ 3,000,000 สำหรับ UHMWPE

2.1.2 กระบวนการผลิตและตัวเร่งปฏิกิริยา [3]

1) กระบวนการซีเกลอร์ (Ziegler process)

กระบวนการนี้เกิดพอลิเมอไรเซชันโดยกลไกแบบ Catalyst-monomer coordinate complex

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Coordinate catalyst เป็นสารประกอบเชิงซ้อน โดยการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง (1) สารประกอบของโลหะทรานซิชันในหมู่ที่ 4-8 ของตารางธาตุ (เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา) กับ (2) สารประกอบออร์แกนอเมทัลลิก (Organometallic compound) ในหมู่ที่ 1-3 ของโลหะ (เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วม) ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กันโดยทั่วไปได้แก่ ไทเทเนียมเตตระคลอไรด์อะลูมิเนียมอัลคิล

ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันจะดำเนินไปอย่างต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์ซึ่งมีไฮโดรคาร์บอนเหลว ความดันที่ใช้ต่ำประมาณ 2-4 บรรยากาศ และอุณหภูมิ 50-75 °C ที่สภาวะนี้ พอลิเมอร์จะไม่เกิดการละลาย และเกิดเป็นของเหลวข้น (Slurry) หลังจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันสิ้นสุดลง ตัวเร่งจะถูกยุติโดยแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล เอทานอล หรือโพรพานอล และถูกสกัดโดยกรดไฮโดรคลอริกในแอลกอฮอล์ ทำการแยกพอลิเมอร์โดยการเหวี่ยงให้ตกตะกอน (Centrifugation) และทำให้แห้ง

ในกระบวนการนี้มวลโมเลกุลของพอลิเมอร์จะถูกควบคุมโดยอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน โดยอัตราส่วนของอะลูมิเนียม-ไทเทเนียมในตัวเร่ง หรือใช้สารช่วยให้เกิดการถ่ายโอนของสายโซ่ (Chain transfer agent) ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ไฮโดรเจน

โครงสร้างของพอลิเมอร์ที่ได้จะมีหมู่เอทิลเพียง 5-7 หมู่ต่ออะตอมของคาร์บอน 1000 อะตอม และไม่ปรากฏโซ่กิ่งที่เป็นหมู่บิวทิล โดยพอลิเมอร์จะมีความหนาแน่นประมาณ 0.945 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

2) กระบวนการฟิลลิปส์ (Phillip process)

ในกระบวนการนี้ใช้สารประกอบโลหะทรานซิชัน เช่น โคโรเมียมออกไซด์ โดยมีซิลิกา หรือ ซิลิกาอะลูมินา (มีซิลิกา 75-90%) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การเปลี่ยนแปลง 2 อย่างที่สำคัญ คือกระบวนการจะเป็นแบบ Solution หรือ Slurry นั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยานั้นมีความสำคัญมากในการควบคุมมวลโมเลกุลของพอลิเอทิลีน ในกระบวนการแบบ Solution จะทำที่อุณหภูมิ 130-160 °C ซึ่งจะมากกว่าจุดหลอมเหลวของพอลิเอทิลีน จึงทำให้พอลิเมอร์สามารถละลายได้ โดยตัวทำละลายที่ใช้คือไฮโดรคาร์บอนเหลว เช่น ไซโคลเฮกเซน ส่วนในกระบวนการแบบ Slurry จะใช้อุณหภูมิ 90-100 °C ซึ่งจะต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของพอลิเอทิลีน ดังนั้นความสามารถในการละลายจึงน้อยลง

ความดันที่ใช้โดยทั่วไป 14-35 บรรยากาศ ซึ่งอยู่ระหว่างกระบวนการความดันสูงและกระบวนการซีเกลอร์

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่ได้มีความหนาแน่นสูง (0.96 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) และมีโครงสร้างเชิงเส้นที่เกือบสมบูรณ์ โดยมีหมู่เมทิล 3 หมู่ต่ออะตอมของคาร์บอน 1000 อะตอม และไม่ปรากฏโซ่กิ่งที่เป็นหมู่เอทิลและบิวทิล

3) กระบวนการสแตนดาร์ด ออยล์ (Standard oil company (Indiana) process)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่คล้ายคลึงกับกระบวนการฟิลลิปส์มาก โดยกระบวนการนี้จะเป็นแบบ Solution โดยใช้เมทัลออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โมลิบดีนัมไดออกไซด์ บนตัวพวยง เช่น อะลูมินา อุณหภูมิที่ใช้ 200-300 °C และความดันที่ใช้โดยทั่วไป 40-100 บรรยากาศ พอลิเมอร์ที่ได้มีความหนาแน่น 0.96 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีโครงสร้างเชิงเส้นที่เกือบสมบูรณ์เช่นเดียวกับกระบวนการของฟิลลิปส์

4) กระบวนการยูเนียนคาร์ไบด์ก๊าซเฟส (Union Carbide gas phase process)

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่ผลิตโดยกระบวนการก๊าซเฟส เอทิลีนจะถูกป้อนเข้าสู่กระบวนการในเวลาเดียวกับ Fluidizing gas อุณหภูมิที่ใช้ 75-100 °C และความดันที่ใช้โดยทั่วไป 7-20 บรรยากาศ โดยจะใช้โลหะทรานซิชันที่มีประสิทธิภาพสูงแบบฟิลลิปส์ (โคโรเนียมออกไซด์) หรือแบบซีเกลอร์ (ไทเทเนียม) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เม็ดของพอลิเอทิลีนจะเกิดบนอนุภาคของตัวเร่งซึ่งอยู่ใน Fluidized bed

พอลิเอทิลีนที่ได้จากกระบวนการนี้มีความหนาแน่น 0.94-0.96 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

5) กระบวนการเมทัลโลซีน (Metallocene-based process)

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งที่ใหม่ที่สุด โดยความแปลกใหม่ของกระบวนการนี้ จะมีความแม่นยำในการควบคุมลักษณะที่เหมือนกันของความยาวของสายโซ่ องศาความเป็นกิ่ง และ Stereoregularity ของพอลิเมอร์

กระบวนการเมทัลโลซีนเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพมาก โดยปริมาณผลผลิตที่ได้มากคือได้พอลิเมอร์ 1 ตันต่อกรัมของตัวเร่งต่อชั่วโมง

เมทัลโลซีนจะมีสูตร L_2MX_2 โดย M คือโลหะทรานซิชันหมู่ 4 เช่นไทเทเนียม X คือหมู่ฮาโลเจน หรือ อัลคิล ฟีนิล เบนซิล และ L คือลิแกนด์

เมทัลโลซีนเชิงซ้อนที่ใช้จะมี 2 ประเภทคือ ระบบ Bicomponent และระบบ Single component โดยในระบบ Bicomponent นั้นผลผลิตจะมากที่ระหว่างอุณหภูมิ 0-40 °C แต่จะมีมวลโมเลกุลมากที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งจะใช้ไฮโดรเจนในการควบคุมมวลโมเลกุล ส่วนในระบบ Single component อุณหภูมิที่เหมาะสมจะอยู่ระหว่าง -20-15 °C

2.1.3 สมบัติทั่วไป [3]

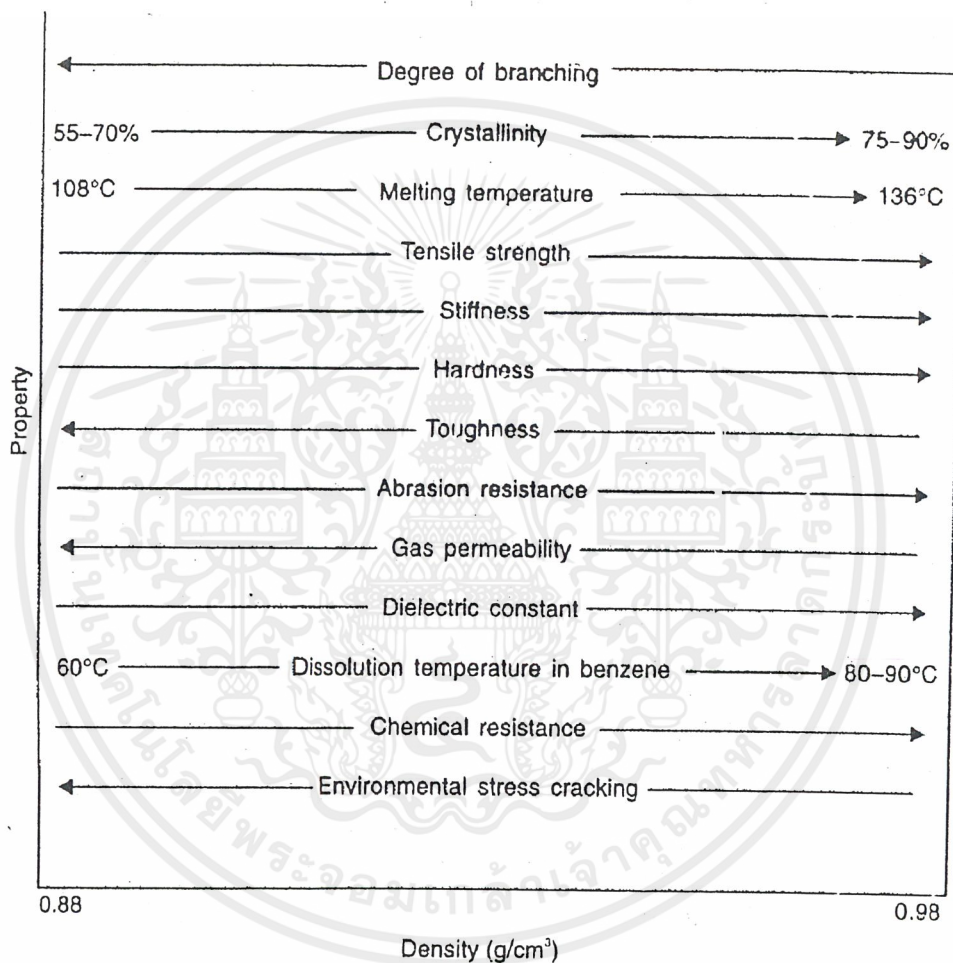
1) สมบัติทางเชิงกลและความร้อน

ปัจจัยหลักทางด้านโครงสร้างในการหาสมบัติของพอลิเอทิลีนคือ องศาความเป็นกิ่งของสายโซ่ที่สั้นและยาว มวลโมเลกุลเฉลี่ย และการกระจายตัวของพอลิเมอร์

ลักษณะที่สำคัญอย่างหนึ่งในการหาสมบัติและพฤติกรรมของพอลิเอทิลีนในเกรดที่ต่างกันคือกึ่งนั่นเอง จำนวนและความยาวของกิ่งได้ถูกควบคุมโดยชนิดและตัวแปรต่างๆในกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิเมอร์ไรเซชัน (อุณหภูมิ ความดัน ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) หรือตัวริเริ่ม (Initiator) และสารช่วยให้เกิดการถ่ายโอนของสายโซ่ (Transfer agent) เป็นต้น) โซ่กิ่งจะขัดขวางสายโซ่ของพอลิเมอร์จากการอัดตัวที่เป็นระเบียบและเหนียวแน่น และมีผลต่อความหนาแน่นของพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นจะพิจารณาจากองศาความเป็นกิ่งของพอลิเมอร์ก่อนเป็นอันดับแรก โดยความหนาแน่นต่ำจะมีองศาความเป็นกิ่งที่สูง ผลของความหนาแน่นต่อสมบัติของพอลิเอทิลีนได้ถูกแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ผลของความหนาแน่นที่มีต่อสมบัติของพอลิเอทิลีน

การที่มีกิ่ง จะทำให้ไปรบกวนความสามารถในการตกผลึกของพอลิเมอร์ องศาความเป็นผลึกของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) จะอยู่ที่ 55-70% เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ซึ่งจะอยู่ที่ 75-90% ช่วงของ T_m ของพอลิเอทิลีน จะอยู่ระหว่าง 108-136°C โดยจะขึ้นกับองศาความเป็นผลึก ดังนั้นจุดหลอมเหลวที่ต่ำคือลักษณะเฉพาะสำหรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของพันธะ C-C ที่ยืดหยุ่นและปราศจากแรงระหว่างโมเลกุลที่แข็งแรง T_g ซึ่งคือความสัมพันธ์ต่อการไหลของส่วนที่ยาวในอสัณฐาน (Amorphous)

ค่าความร้อนจำเพาะ (C_p) ของพอลิเอทิลีนจะสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกส่วนใหญ่ และเป็นค่าที่ขึ้นกับอุณหภูมิอย่างมาก ค่า 2.3 J/g คือค่าเฉพาะที่อุณหภูมิห้อง และ 2.9 J/g คือค่าเฉพาะที่อุณหภูมิ 120-140°C (ทั้งสองค่านี้สำหรับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(LDPE)) ซึ่งค่านี้มีความสำคัญต่อกระบวนการของพอลิเอทิลีน

สมบัติอื่นๆ ที่ขึ้นกับความเป็นผลึก (Crystallinity) เช่น ความแข็งเหนียว (Stiffness) ความแข็ง (Hardness) ความแข็งแรงต่อการฉีกขาด (Tear strength) ความแข็งแรงดึง ณ จุดควาก (Tensile strength at yield) ค่ามอดุลัสของยัง (Young's modulus) และความต้านทานต่อสารเคมีจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นขององศาความเป็นผลึก ส่วนการซึมผ่านของของเหลวและก๊าซ ความยืดหยุ่น (Flexibility) และความเหนียว (Toughness) จะลดลงภายใต้สภาวะเดียวกัน

พอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์ไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้วแต่มีความเป็นผลึก ไม่มีตัวทำละลายที่อุณหภูมิห้องและการละลายจะเกิดขึ้นได้เฉพาะในขณะให้ความร้อนในตัวทำละลายเท่านั้น องศาความเป็นผลึกที่มากจะทำให้อุณหภูมิของการละลายสูงขึ้น การละลายของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) จะอยู่ที่ 60°C ส่วนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) จะอยู่ที่ 80-90°C เพราะมีผลึกมากกว่า

ผลของการมีกิ่งจะขึ้นกับขนาดของสายโซ่กิ่ง (Side chain branches) ซึ่งสายโซ่ที่สั้นจะมีผลต่อองศาความเป็นผลึก และความหนาแน่นของพอลิเมอร์ ส่วนโซ่กิ่งที่ยาวจะมีผลเด่นชัดในเรื่องการกระจายตัวของพอลิเมอร์ (Polydispersity) โซ่กิ่ง (Side chain) ของพอลิเมอร์บางที่จะยาวเท่ากับสายโซ่หลักและจะทำให้การกระจายตัวของมวลโมเลกุลมีช่วงกว้าง ถ้าพอลิเมอร์มีมวลโมเลกุลที่สูงขึ้นและมีลักษณะเป็นดังที่กล่าวมา จะทำให้ค่าการกระจายตัวของมวลโมเลกุล (MWD) มีลักษณะที่กว้าง

อัตราส่วนของน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (M_w) ต่อน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน (M_n) คือค่าการกระจายน้ำหนักโมเลกุล (MWD) ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1.9 ถึง 100 แต่สำหรับพอลิเอทิลีนส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 20-50 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) จะมีค่าการกระจายตัวของมวลโมเลกุล (MWD) 4-15 ค่าการกระจายตัวของมวลโมเลกุล (MWD) ที่สูงของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เป็นผลมาจากโซ่กิ่งที่ยาว ซึ่งในบางครั้งสมบัติ (Properties) ที่แสดงไม่สามารถสรุปว่าเกิดจากการมีโซ่กิ่ง หรือการมีการกระจายน้ำหนักโมเลกุล (MWD) ที่กว้าง หากพอลิเมอร์มีค่าการกระจายตัวของมวลโมเลกุล (MWD) ต่ำลงจะนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ความเหนียว

(Toughness) จุดนิ่มตัว (Softening point) และความต้านทานต่อการแตกหักจากความเค้นในสภาวะแวดล้อม (Resistance to environmental stress cracking)

สายโซ่ที่ยาวจะมีอิทธิพลต่อสมบัติการไหล (Flow properties) โมเลกุลของโซ่กิ่งที่ยาวจะอัดตัวกันแน่นมากและมีแนวโน้มที่จะเกิดการเกี่ยวพันกับโมเลกุลอื่นน้อย ส่งผลให้ความหนืดขณะหลอมเหลว (Melt viscosity) น้อยกว่าพอลิเมอร์ที่ไม่มีโซ่กิ่ง

ปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อสมบัติของการหลอมเหลวคือมวลโมเลกุล เมื่อมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้นส่งผลให้ ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ความแข็งแรงต่อการฉีกขาด (Tear strength) ความเหนียวที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature toughness) ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) และ อุณหภูมิที่จุดอ่อนตัว (Softening temperature) เพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามสมบัติการไหล (Fluidity of the melt) และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Coefficient of friction) จะลดลง

ตารางที่ 2.1 อิทธิพลของความหนาแน่นของพอลิเมอร์ต่อสมบัติของพอลิเอทิลีนในเกรดต่างๆ

Property	LLDPE	LDPE	HDPE	UHMW-PE	Polymethylene
Density (g/cm ³)	0.910-0.925	0.915-0.935	0.941-0.967	0.930	0.980
Melting temperature (°C)	125	106-112	130-133	132	136
Tensile strength (MPa)	14.0-21.0	6.9-17.2	18.0-30.0	20.0-41.0	34.5
Elongation at break (%)	200-1200	100-700	100-1000	300	500
Flexural modulus (MPa)	248-365	415-795	689-1654	—	—
Izoid impact strength (J/m)	—	0.67-21.00	27.00-160.00	No break	—
Hardness (Shore D)	41-53	45-60	60-70	—	—

2) การเสื่อมสภาพ

พอลิเอทิลีนมีความต้านทานต่อสารเคมีได้เหมือนพาราฟินส์ ในทางตรงกันข้ามพอลิเอทิลีนจะไวต่อการออกซิเดชัน ดังที่เกิดในออกซิไดซิงเอเจนท์ที่แรง (Strong oxidizing agent) เช่น กรดไนตริกเข้มข้น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรือโปตัสเซียมเปอร์แมงกานेट หรือภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต ความต้านทานต่อการออกซิเดชันจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น เพราะพอลิเมอร์ที่ไม่มีกิ่งจะมีการซึมผ่านของก๊าซน้อยลง และมีจำนวนอะตอมเทอร์ติารีคาร์บอน (Tertiary carbon atom) ในโมเลกุลน้อย (ซึ่งเป็นจุดที่ไวต่อการเข้าทำปฏิกิริยา)

กระบวนการออกซิเดชันเป็นกลไกแบบอนุมูลอิสระ (Free radical) โดยปฏิกิริยานี้จะเป็นแบบตัวเร่งปฏิกิริยาแบบอัตโนมัติ (Auto catalytic) ในการเกิดออกซิเดชันจะเกิดปฏิกิริยาขึ้น 2 ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยกัน คือ (1) เป็นการขาดของสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งจะทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ลดลง เนื่องจากการลดลงของมวลโมเลกุล (2) ในปฏิกิริยาออกซิเดชันขั้นที่สูงขึ้น จะเกิดจากการรวมตัวของอนุมูลอิสระ (Free radical) ทำให้เกิดการเชื่อมโยงของพอลิเมอร์ (Crosslinking)

การที่ชิ้นงานพอลิเอทิลีนได้รับความเค้น (Stress) หรือความเครียด (Strain) และแช่อยู่ในของเหลวประเภทแอลกอฮอล์ ซัลเฟอร์เนตแอลกอฮอล์ ไฮโดรคาร์บอนเหลว เอสเทอร์ คีโตน และน้ำมัน เป็นต้น จะทำให้พอลิเมอร์เกิดรอยแตก (Crack) ในเวลาอันสั้น เมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่อยู่ในสภาวะดังกล่าว

3) สารเติมแต่งและกระบวนการ

ส่วนมากพอลิเอทิลีนมักถูกใช้โดยไม่มีการใส่สารเติมแต่ง (Additive) ใดๆ แต่บางที่สารเติมแต่ง (Additive) จะถูกใส่ลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ สำหรับการประยุกต์ใช้งาน โดยเฉพาะเรื่อง การเป็นฉนวนไฟฟ้า พอลิเอทิลีนจะถูกผสมกับสารป้องกันการออกซิเดชัน (Antioxidant) ซึ่งจะป้องกันการเสียหายจากการออกซิเดชัน ฟีนอล (จำนวน 0.1%) จะใช้เพื่อป้องกันการขาดของสายโซ่จากการออกซิเดชัน โดยจะขัดขวางอนุมูลอิสระของไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide) ซึ่งจะทำให้เกิดการออกซิเดชัน และกระบวนการเพิ่มขึ้นของกระบวนการออกซิเดชันโดยอนุมูลอิสระของอะโรมาติกจากฟีนอลจะเสถียรแต่จะไม่เสถียรต่อการเพิ่มขึ้นของ Oxidative chain

สารตัวเติมประเภทเสริมแรง เช่น เขม่าดำ (Carbon black) หรือสารคู่ควบ (Coupling agent) เช่น Silane และ Tiatnate จะถูกเติมลงในพอลิเอทิลีนในบางครั้ง สัต้องเลือกใช้อย่างรอบคอบ เพื่อให้แน่ใจว่าจะไม่เร่งการออกซิเดชัน โดยทั่วไปสีจะเป็นองค์ประกอบพวกโคบอลต์ แคดเมียม แมงกานีส เหล็ก และ โครเมียม

การไหม้ของพอลิเอทิลีนจะใช้ฮาโลเจเนทคอมพาวด์ (Halogenated compound) และแอนทิโมไนไตรออกไซด์ (SbO_3) เป็นสารป้องกันการไหม้ไฟ (Flame retarder) เป็นต้น ส่วนสารเติมแต่งอื่นๆ เช่น Antistatic agent ชนิดไกลคอล อัลคิล เอสเทอร์ ถูกใช้อย่างมาก เพื่อลดการดึงดูดฝุ่น Antiblocking agent (ซิลิกา) ถูกใช้เพื่อป้องกันการติดกันระหว่างชั้นฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) Slip agent ถูกใช้เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างชั้นฟิล์ม

การเติมแบ่ง 10-40% ลงใน พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เป็นวัสดุไบโอดีเกรเดชัน (Biodegradation material) ถูกใช้สำหรับถุง และใช้สำหรับคลุมพืชผล แบ่งจะสลายตัวในดินที่ชื้น ในระยะเวลา 5 ปี ซึ่งจะเหลือเศษของพอลิเอทิลีน และถูกดูดซึมในดิน

ผลผลิตที่มีค่า Dielectric constant ประมาณ 1.45 จะใช้ทำ Dielectric material ซึ่งได้จากพอลิเอทิลีนที่มีลักษณะเป็นเซลล์ (Cellular) สารที่ช่วยให้พองตัว (Blowing agent) เช่น 4,4-oxy-bis-benzenesulfonohydrazide และ azocarbonamide ถูกใส่ลงในพอลิเมอร์ โดยจะสลายตัวในกระบวนการอัดรีด และ เปลี่ยนเป็นก๊าซขึ้นไปสู่ Cellular extrudate

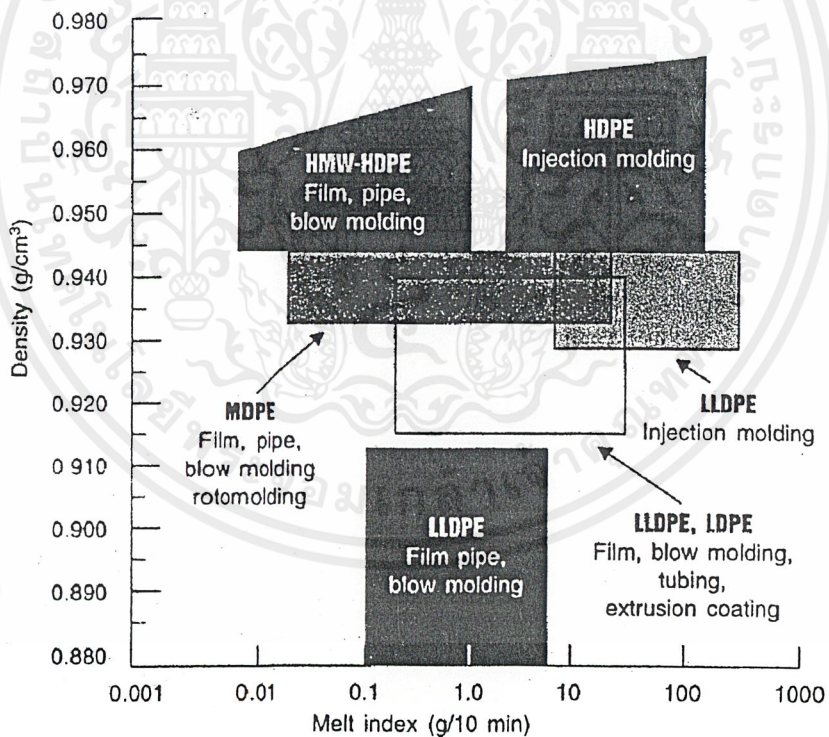
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิเอทิลีนจะใช้กระบวนการอัดรีด (Extrusion) การเป่าขึ้นรูป (Blow molding) และการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) การหดตัว (Mold shrinkage) ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เป็น 1.5-5.0% และของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เป็น 2.5-6.0% ซึ่งค่อนข้างจะมีค่าที่สูง เนื่องจากการตกผลึกของวัสดุ

2.1.4 การประยุกต์ใช้งาน [3]

พอลิเอทิลีนได้ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องจากเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี ทนต่อสารเคมี กระบวนการที่ง่าย และราคาถูก โดยส่วนใหญ่แล้ว พอลิเอทิลีนจะใช้ทำเป็นฟิล์มสำหรับบรรจุหีบห่อและในอุตสาหกรรมเพาะปลูก

พอลิเอทิลีน (โดยเฉพาะพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)) เป็นวัสดุที่ได้จากการฉีดที่สำคัญ ใช้อย่างแพร่หลายในผลิตภัณฑ์ต่างๆเช่น ของเล่น หีบห่อต่างๆ รวมถึงอุปกรณ์ทางการแพทย์ด้วย พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ยังถูกใช้อย่างกว้างขวางในการเป่าขวดนม เครื่องใช้ในครัว และท่อยา



รูปที่ 2.3 การประยุกต์ใช้พอลิเอทิลีนตามความหนาแน่นและดัชนีการหลอมเหลว (Melt index)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอบเขตของการใช้พอลิเอทิลีนในทางอื่น คือการทำท่อก๊าซ พอลิเอทิลีนยังถูกใช้เป็นเส้นใยสำหรับแหดักปลา เชือกและผ้า

สมบัติการเป็นฉนวนที่ดีเยี่ยมของพอลิเอทิลีนนั้นทำให้ถูกใช้ในสายเคเบิล ใช้หุ้มสายโทรเลข (สายเคเบิลใต้น้ำ) และใช้เป็นเรดาร์ทางอากาศ

2.2 แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3)

2.2.1 บทนำ

แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ถูกนำมาใช้มากกับพลาสติก เนื่องจากมีราคาถูกและมีอยู่อย่างมากมายตามธรรมชาติ พลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตนั้นค่อนข้างต่ำ ส่วนใหญ่ถูกนำมาใช้ในรูปของสารตัวเติม (Filler) ซึ่งควรมีคุณสมบัติที่ดูดซับพลาสติกไฮเซอรีได้ดี ไม่มีน้ำเกิดขึ้นขณะกระบวนการเกิดผลึก ต้องทนอุณหภูมิในช่วงที่ใช้กับกระบวนการของพลาสติกได้ มีความอ่อนนุ่ม ให้สีขาวที่ดีและบริสุทธิ์ [4]



รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างของแคลเซียมคาร์บอเนต [5]

สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตอาจแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบอย่างกว้างๆ ดังนี้

1. สารตัวเติมแร่แคลเซียมคาร์บอเนต (Mineral CaCO_3 Filler)

สามารถแบ่งย่อยๆได้เป็น 3 ชนิด คือ

1.1 Whiting

Whiting เป็นผงสีขาวที่ได้จากการบดและจัดอยู่ในพวกซอลล์ ซึ่งมีความบริสุทธิ์พอๆ กับ CaCO_3 ที่ได้จากรวมชาติที่เกิดจากตะกอนของกระดูกของสิ่งมีชีวิตที่มีขนาดเล็กจนตามองไม่เห็น ที่ทับถมกันเป็นเวลาหลาย 10 ล้านปี จากการบดแห้งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 1 ถึง 5 μm ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นสารตัวเติมสำหรับ PVC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 หินปูน หินอ่อน และแคลไซต์

หินปูนเป็นรูปแบบ CaCO_3 ที่พบมากที่สุดตามธรรมชาติ เกิดจากการตกตะกอนของ Foraminifera ซึ่งแรกเริ่มจะเกิดการตกตะกอนและรวมเข้าด้วยกันโดยความร้อนและความดัน หินอ่อนและแคลไซต์มีความแข็ง โครงผลึกแน่นกระชับแตกต่างจากหินปูน และมีความบริสุทธิ์เพียงพอสำหรับการบดและนำมาผลิตเป็นสารตัวเติม หินปูนนั้นจะมีความหยาบมากที่สุด ดังนั้นจึงมีความสามารถในการดูดซับน้ำมันและพลาสติกไฮเซอรัได้น้อยที่สุดและให้สีขาวที่ไม่ดี ซึ่งหินอ่อนและแคลไซต์ให้สีขาวที่ดีแต่ก็มีความสามารถในการดูดซับน้ำมันต่ำกว่า Whiting

เกรดของแคลเซียมคาร์บอเนตแบ่งออกโดยกระบวนการผลิตแบบเปียกและแห้ง กระบวนการผลิตแบบเปียกจะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพที่ดีกว่า ขนาดของอนุภาคที่ได้ดีกว่า และการกระจายของขนาดอนุภาคสม่ำเสมอกว่า แต่มีข้อเสียคือมีราคาที่สูงกว่ากระบวนการผลิตแบบแห้ง

1.3 โดโลไมต์ (Dolomite)

โดโลไมต์เป็นหินปูนที่มี Magnesium carbonate (MgCO_3) ประมาณ 45% หรือน้อยกว่า อาจเรียกกันอีกชื่อหนึ่งว่า Magnesium limestone โดโลไมต์ที่ใช้ผลิตเป็นสารตัวเติมจะให้สีที่ดีและมีสมบัติในการดูดซับพลาสติกไฮเซอรัที่สูงกว่าหินอ่อน โดยโดโลไมต์ที่ดีมีคุณภาพที่สุดพบได้ใน Scandinavia

2. แคลเซียมคาร์บอเนตแบบตกตะกอน (Precipitated CaCO_3)

แคลเซียมคาร์บอเนตแบบตกตะกอน ปกติจะใช้ในรูปแบบที่มีการเคลือบผิวเพื่อป้องกันการรวมกันเป็นก้อน และช่วยให้เกิดการกระจายตัวที่ดีในพอลิเมอร์ ซึ่งข้อดีของกระบวนการตกตะกอนคือการเคลือบผิวอนุภาคสามารถกระทำร่วมในกระบวนการผลิตได้เลยไม่ต้องแยกออกมาเป็นอีกส่วนหนึ่ง แต่ข้อเสียคือมีราคาที่สูง [4]

ตารางที่ 2.2 ปริมาณการใช้สารตัวเติมใน USA [6]

Filler/reinforcement	1980 (1000 t)	1985 (1000 t)	1990 (1000 t)	Mean annual growth rate 1980/1990 (%/a)
Carbonates	1100	1780	2900	10.2
Silicates				
Talc	110	180	300	10.0
Asbestos	235	300	365	4.5
Kaolin	76	100	130	5.5
Mica	0.5	0.5	0.6	3.0
Miscellaneous	8	13	21	10.0
Silicon dioxide	40	75	140	13.6
Various minerals	11	13	15	2.5
Al(OH ₃)	150	210	295	7.0
Carbon Black	28	32	36	2.7
Organic fillers (nut shells, wood flour, corn cobs etc)	105	140	187	6.0
Glass fibers	455	670	980	8.0
Glass spheres, hollow glass sphere etc.	7	15	31	15.7
Carbon fibers, aramide fibers, whiskers etc.	1.2	2.5	5.5	16.0
Total	2326.7	3531.0	5406.1	8.8

2.2.2 การปรับปรุงพื้นผิว

การปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริกเป็นกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวที่มีการใช้กันมานานที่สุด และยังคงมีกันใช้กันอย่างกว้างขวางอยู่ โดยเฉพาะกับสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต การปรับปรุงพื้นผิวมีข้อดีหลายประการดังนี้

1. สารตัวเติมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวนั้นทำให้สามารถกระจายตัวได้ง่ายและทั่วถึงในพอลิเมอร์ในระหว่างกระบวนการผสมและกระบวนการผลิต
2. การปรับปรุงพื้นผิวช่วยในเรื่องทำให้ระยะระหว่างพื้นผิวระหว่างสารตัวเติมและเมทริกซ์ใกล้กันมากขึ้น [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ช่วยในเรื่องการป้องกันพื้นผิวเกิดการแตก (Crack) รอยบุ๋ม (Notch) และอื่นๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการนำไปใช้งานและเป็นการทำให้วัสดุที่มีความแข็งแรง
4. ช่วยในเรื่องการกำจัดรอยตำหนิและรอยขีดข่วนบนพื้นผิว
5. ป้องกันสารตัวเติมจากน้ำและความชื้นที่จะทำให้เป็นจุดอ่อนแอบนคอมโพสิต
6. ช่วยทำให้พันธะระหว่างพื้นผิวมีความแข็งแรงขึ้น ดังนั้นจึงทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น [7]

2.2.3 สมบัติทั่วไป

เคลือบคาร์บอนเนตที่ใช้เป็นสารตัวเติมควรมีสมบัติต่างๆ ดังนี้ [5]

- มีความบริสุทธิ์สูงและไม่มีไฮดรอกซิลของโลหะหนัก ซึ่งสามารถเร่งปฏิกิริยาทำให้พอลิเมอร์เสื่อมสภาพเร็วขึ้น
- มีพื้นที่ผิวจำเพาะไม่ดูดซึมสารปรับปรุงสมบัติพลาสติกและสารเติมแต่งต่างๆ
- ต้องไม่เกิดการรวมตัวกันเป็นก้อน
- มีระดับของความขรุขระที่สูง
- ไม่มีความคมที่จะทำให้เกิดการขีดข่วนกับเครื่องจักร (Mohr hardness ประมาณ 3)
- มีความสามารถในการกระจายตัวที่ดี (ในเกรดที่ทำการเคลือบผิว) และส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางด้านไฟฟ้าเล็กน้อยของผลิตภัณฑ์สุดท้าย
- เพิ่มความเหนียวและมอดูลัสยืดหยุ่น
- ลดการหดตัว
- ปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุ
- เพิ่มความแข็งแรงกระแทก (ในเกรดที่ทำการเคลือบผิว)
- ไม่อันตราย ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ทนอุณหภูมิถึง 600°C
- มีราคาถูก

2.2.4 การประยุกต์ใช้งาน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การประยุกต์ใช้งาน [8]

- ใช้ในอุตสาหกรรมของ PVC เช่น สายไฟฟ้าและสายเคเบิล, ท่อ, PVC compound
- ใช้ในอุตสาหกรรมของ PE และ PP
- ใช้ในอุตสาหกรรมของยาง เช่น สายไฟฟ้า, Rubber sheet, ชิ้นส่วนของอุตสาหกรรม, ชิ้นส่วนของรองเท้า, ยางรถยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ใช้ในอุตสาหกรรมของสีทา เช่น สีน้ำ, สีน้ำมัน, สีอิมัลชัน, สารกันรั่ว (Sealants), วัสดุทารองพื้น (Primer)
- ใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง (Building materials)
- และในอุตสาหกรรมอื่นๆ อีกมากมาย

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

S. Nago และคณะ [9] ทำการศึกษาลักษณะของ Microporous บน Polypropylene sheet ที่มี CaCO_3 เป็นสารตัวเติม พบว่าเมื่อขนาดอนุภาคของ CaCO_3 ลดลงส่งผลให้ความหนาของ PP sheet ลดลง เปอร์เซ็นต์ของ Microporous เพิ่มขึ้น และขนาดของ Microporous จะเล็กกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ CaCO_3 ที่มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า

ตารางที่ 2.3 สมบัติของ microporous บนแผ่นของ PP

Sample No.	CaCO_3 Fillers		Thickness (l) (μm)	Porosity (%)	Maximum pore size (D_{max}) (μm)
	Mean Particle size (μm)	Relative number of particle			
1	3.00	1.0	216	67	3.8
2	1.70	5.5	200	68	2.3
3	0.80	52.8	250	70	1.6
4	0.08	52800.0	50	72	0.5

S.N. Maiti และ P.K. Mahapatro [10] ทำการศึกษากิจกรรมของการใช้ CaCO_3 ที่มีและไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วย Titanate coupling agent ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของ Isotactic polypropylene (i-PP) พบว่าค่ามอดูลัสมีค่ามากขึ้นเมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้น และจะคงที่ที่ค่าหนึ่ง เมื่อใช้ CaCO_3 ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวค่ามอดูลัสจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของ CaCO_3 ต่ำๆ ประมาณ 0.04 ซึ่ง CaCO_3 ที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิว ค่ามอดูลัสจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอเมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้น ปัญหาอีกอย่างที่พบคือเมื่อเติม CaCO_3 ลงไปพบว่าการส่งผ่านของแรงที่ไม่ดีที่บริเวณระหว่างพื้นผิวของ CaCO_3 กับ i-PP เนื่องจากไม่มีแรงยึดติดระหว่างพอลิเมอร์และสารตัวเติม เมื่อสารตัวเติมรวมตัวกันเป็นก้อนซึ่งทำให้ไม่สามารถรับแรงกดอัดได้ทำให้เกิดเป็นจุดอ่อนแอบนชิ้นงานส่งผลให้ค่าความแข็งแรงลดลง การยืด (Elongation) มีค่าลดลงเมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้นเนื่องจากมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยการใช้ CaCO_3 ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวจะมีค่าการยืดยาวที่สูงกว่า CaCO_3 ที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความแข็งแรงกระแทกเพิ่มขึ้นที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของ CaCO_3 น้อยๆ เนื่องจาก CaCO_3 ทำให้ส่วนที่ไม่เป็นผลึก (Amorphous) ของ i-PP เพิ่มขึ้นทำให้ดูดกลืนพลังงานได้มากขึ้น แต่เมื่อปริมาณของ CaCO_3 เพิ่มขึ้นมากๆ จะทำให้ค่าความแข็งแรงกระแทกลดลงเนื่องจาก CaCO_3 เกิดการจับกันเองเป็นก้อนกลายเป็นจุดอ่อนแอบนชิ้นงาน ซึ่ง CaCO_3 ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวมันจะมีค่าความแข็งแรงกระแทกมากกว่า CaCO_3 ที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิว

J. Suwanprateeb และคณะ [11] ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของ CaCO_3 ที่มีผลต่ออัตราเร็วการดึงยืด พบว่าเมื่อปริมาณของ CaCO_3 เพิ่มขึ้น คอมโพสิตจะเปลี่ยนจากลักษณะเหนียว กลายเป็นแข็งแต่เปราะที่อัตราส่วนโดยปริมาตรเท่ากับ 0.2 ค่าความเค้น และความเครียดลดลงในขณะที่ค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของ CaCO_3 ต่ำๆ คือ 0.1 และ 0.2 ค่าความเครียดลดลงเมื่ออัตราเร็วการดึงยืด (Strain rate) เพิ่มขึ้น แต่เมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของ CaCO_3 เพิ่มขึ้นเกินกว่า 0.2 ค่าความเครียดจะคงที่ถึงแม้ว่าจะเพิ่มอัตราเร็วการดึงยืด ค่ามอดุลัสของยังเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราเร็วการดึงยืดเพิ่มขึ้น แต่เมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของ CaCO_3 มากกว่า 0.1 ค่ามอดุลัสของยังจะมีค่าลดลง

K. Liao และคณะ [12] ทำการศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวของ CaCO_3 เพื่อใช้ในการผสมกับพอลิพรอพิลีนด้วย Dimeric aluminate ทำในขวด 3 คอ ที่มีใบพัดกวน โดยใช้ CaCO_3 และ Dimeric aluminate ทำการกวน 10 นาที จากนั้นนำ CaCO_3 ที่เคลือบด้วย Dimeric aluminate มาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 120°C นานประมาณ 2 ชั่วโมง พบว่าเมื่อปริมาณ Dimeric aluminate เพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนืดลดลงอย่างมาก และจะคงที่ที่ค่าๆ หนึ่ง เนื่องมาจากการเคลือบด้วย Dimeric aluminate ทำให้อนุภาคของ CaCO_3 มีความเป็นขั้วลดลง ดังนั้นจึงป้องกันการจับเป็นก้อน ส่งผลเกิดการกระจายตัวที่ดีในตัวกลางที่เป็นของเหลวที่ไม่มีขั้ว เมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้นความหนืดจะเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงยืดของการผสมที่ใช้ CaCO_3 ที่มีการเคลือบผิวจะมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อยในกรณีที่ใช้ CaCO_3 ที่ไม่มีการเคลือบผิว แต่ความแข็งแรงกระแทกและค่าการดึงยืด ณ จุดขาด ของการใช้ CaCO_3 ที่มีการเคลือบผิวจะมีค่าสูงกว่าการใช้ CaCO_3 ที่ไม่มีการเคลือบผิว

Y. Wang และ J. Wang [13] ทำการศึกษาการเติม CaCO_3 ที่มีการปรับปรุง และไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วย Titanium coupling agent ลงในพอลิพรอพิลีน พบว่าความหนืดจะขึ้นกับอัตราความเครียดเฉือน เมื่ออัตราความเครียดเฉือนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนืดลดลงทั้งในส่วนที่มีการปรับปรุงและไม่มีการปรับปรุงของ CaCO_3 ที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของ CaCO_3 ต่ำๆ พบ

ว่า ความเหนียวจะมีค่าคงที่ ในช่วงที่ค่าอัตราความเครียดเฉือนต่ำ และความเหนียวจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราความเครียดเฉือนเพิ่มขึ้น โดยความเหนียวของการใช้ CaCO_3 ที่มีการปรับปรุง จะมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ CaCO_3 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงในสภาวะเดียวกัน เนื่องจากการปรับปรุงพื้นผิวของ CaCO_3 ทำให้เกิดการลดลงของอันตรปฏิกิริยาระหว่างพอลิเมอร์และสารตัวเติม ทำให้พอลิเมอร์และสารตัวเติมเข้ากันได้ดีขึ้น ทำให้ความเหนียวมีค่าต่ำกว่า

Q. Fu และคณะ [14] ทำการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของ CaCO_3 และขนาดของ CaCO_3 ที่มีต่อค่าความแข็งแรงกระแทกของวัสดุที่ได้จากการผสมระหว่าง HDPE และ CaCO_3 การผสมนั้นใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ที่อุณหภูมิ 150°C นาน 10 นาที จากนั้นนำมาทำการกดอัดที่อุณหภูมิ 180°C พบว่าการใช้ขนาดของ CaCO_3 ที่เล็กกว่า นั้นจะมีความแข็งแรงกระแทกมากกว่าการใช้ CaCO_3 ที่มีขนาดใหญ่เนื่องมาจาก CaCO_3 ที่มีขนาดอนุภาคใหญ่จะมี Stress field รอบๆ อนุภาคนั้นกว้าง ดังนั้นรอยแตกจะเกิดการขยายได้อย่างรวดเร็วรอบๆ อนุภาคของ CaCO_3 ระยะห่างระหว่าง HDPE กับ CaCO_3 ในส่วนของขนาดอนุภาคที่เล็กจะมีระยะห่างน้อยกว่าซึ่งส่งผลให้ค่าความแข็งแรงกระแทกมากกว่าการใช้ CaCO_3 ที่มีขนาดอนุภาคใหญ่

ตารางที่ 2.4 ระยะห่างระหว่างพื้นผิวของ HDPE/ CaCO_3 (CaCO_3 มีขนาด $7.44 \mu\text{m}$) [14]

CaCO_3 (wt%)	Concentration (vol %)	Interparticle Distance (μm)		Impact strength (J/m)
		Measured by SEM	Calculated	
10	3.8	9.4-10.0	10.4	106
20	8.1	6.0-6.5	6.4	110
30	13.1	4.5-4.9	4.4	430
40	19.0	2.8-3.3	3.0	615

จากตารางพบว่าเมื่อปริมาณและความเข้มข้นของ CaCO_3 เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งแรงกระแทกเพิ่มขึ้น

Q. Fu และ G. Wang [15] ทำการศึกษาการเพิ่มความเหนียวของ HDPE ด้วยการเติม CaCO_3 พบว่าทำให้ค่าความเหนียวและค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น การใช้ CaCO_3 แบบไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ (Coupling agent) ส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้มีความแข็งแรงเปราะ แต่เมื่อมีการปรับปรุง CaCO_3 ด้วยฟอสเฟต จะทำให้การยึดติดระหว่าง HDPE และ CaCO_3 ดีขึ้น ทำให้การ

กระจายตัวของ CaCO_3 ดีขึ้น ปริมาณของฟอสเฟตที่เหมาะสมคือประมาณ 2 %wt ซึ่งจะเกิดการปกคลุมของฟอสเฟตบน CaCO_3 อย่างทั่วถึง การใช้ CaCO_3 ที่มีขนาดเล็กลงทำให้ความหนาของชั้นยึดติดลดลงด้วย ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงกระแทกเพิ่มขึ้น

S. Guo และคณะ [16] ทำการศึกษาการเติม ethylene – acrylic acid (EAA) ลงไปในการผสมของพอลิเมอร์กับสารตัวเติม เพื่อพัฒนาแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวของพอลิเมอร์และสารตัวเติม พอลิเมอร์ที่ใช้คือ HDPE สารตัวเติมที่ใช้ คือ CaCO_3 , STC (ของผสมของ Sericit, Tridymite และ Cristobalite) และ Illite เมื่อเติม EAA ในปริมาณที่เล็กน้อย หมู่ Carboxylic acid ใน EAA สามารถเกิดปฏิกิริยากับ CaCO_3 , ออกไซด์ของโลหะใน STC และ Illite ค่า Yield strength เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ EAA เพิ่มขึ้น โดยจะเพิ่มถึงค่าหนึ่งจากนั้นจะมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่า EAA นั้นสามารถเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวได้ ความเหนียวจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติม EAA เนื่องจาก EAA เกิดพันธะเคมีกับพื้นผิวของสารตัวเติมในพอลิเมอร์ ทำให้สมบัติด้านการยึดเกาะดีขึ้นจึงส่งผลให้ความเหนียวเพิ่มขึ้น EAA ช่วยให้การกระจายตัวของสารตัวเติมในพอลิเมอร์ดีขึ้น เนื่องมาจากการเติม EAA ทำให้แรงตึงผิว (Surface tension) ของสารตัวเติมลดลงทำให้เกิดการกระจายตัวดีขึ้น

J. Suwanprateeb [2] ทำการศึกษาลของการเติม UHMWPE (Ultrahigh molecular weight polyethylene) ใน HDPE ที่มี CaCO_3 เป็นสารตัวเติมโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) ช่วยในการผสม พบว่าเมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้นทำให้ค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้นเนื่องจาก CaCO_3 มีค่ามอดูลัสมากกว่า HDPE แต่ค่าความแข็งแรง การดึงยึด ณ จุดขาด และความแข็งแรงกระแทกลดลง เนื่องจากแรงยึดเกาะระหว่างพื้นผิว (Interface adhesion) ระหว่าง CaCO_3 และ HDPE ไม่แข็งแรง เมื่อเติม UHMWPE จะช่วยเพิ่มค่าความสามารถในการยึด ณ จุดขาด และความแข็งแรงกระแทก โดยไม่ทำให้ค่ามอดูลัสหรือความแข็งแรงลดลง เพราะว่าความแข็งแรงของ UHMWPE มากกว่า HDPE ความเหนียวจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ UHMWPE เพิ่มแต่จะมีค่าลดลงเมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของ CaCO_3 เพิ่มขึ้น

J. Lei และ R. Zhou [17] ทำการศึกษการใช้ HDPE ที่ผ่านการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต (uHDPE) ทำให้เกิดหมู่ที่มีขั้วขึ้นบน HDPE เช่น $>\text{COOH}$, $>\text{C}=\text{O}$, $-\text{OOH}$, และ $-\text{OH}$ โดยความมีขั้วมากหรือน้อยนั้นขึ้นกับเวลาที่ทำการฉายรังสี ทำให้อันตรกิริยาระหว่างพื้นผิว (Interface interaction) ของ HDPE และ CaCO_3 ดีขึ้น โดยเมื่อเติม u500HDPE (หรือ HDPE ที่ผ่านการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตนาน 500 ชั่วโมง) ในปริมาณที่เล็กน้อยประมาณ 3 % ทำให้ค่าความแข็งแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดึงเพิ่มขึ้นจาก 16.7 ไปเป็น 25.2 MPa ค่าความแข็งแรงกระแทกเพิ่มขึ้นจาก 210 เป็น 431 J/m แต่เมื่อเติมลงไปมากกว่า 3% ค่าความแข็งแรงกระแทกจะมีค่าลดลงแต่ความแข็งแรงดึงยังเพิ่มเหมือนเดิม

H. Huang [18] ทำการศึกษาถึงการใช้ถังปฏิกรณ์ระบบเคมีเชิงกล (Pan-Milling) ในการบดผสม HDPE กับ CaCO_3 พบว่าในกรณีที่ไม่ทำการบดนั้น CaCO_3 มีการรวมกันเป็นก้อนเมื่อทำการบดพบว่า HDPE/ CaCO_3 มีโครงสร้างเป็นเส้นใยทำให้อันตรปฏิกิริยาระหว่างพื้นผิวของ HDPE และ CaCO_3 แข็งแรงกว่า เนื่องจากการบดทำให้ออกซิเจนสามารถเข้าไปอยู่ในสายโซ่ของ HDPE เพิ่มขึ้นทำให้การยึดติดระหว่าง HDPE ที่ไม่มีขั้ว และ CaCO_3 ที่มีขั้วนั้นแข็งแรงขึ้น การใช้ Pan-mill ทำให้ความเหน็ดลดลง ช่วยปรับปรุงสมบัติในกระบวนการผลิตของผสมระหว่าง HDPE / CaCO_3 ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และมอดุลัสลดลงเล็กน้อย

S. Jumpa [19] ทำการศึกษาค่าผลของการเติม CaCO_3 ลงใน HDPE ต่อค่าความเหน็ดเนื่องจากแรงเฉือน (Shear viscosity) และความเหน็ดเนื่องจากแรงดึงยืด (Elongation viscosity) พบว่าการเติม CaCO_3 ทำให้ความเหน็ดทั้งสองชนิดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค CaCO_3 กับสายโซ่ HDPE

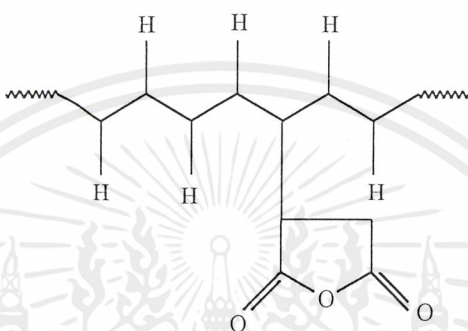
ดารินและพิทยา [20] ทำการศึกษาค่าผลของการเคลือบผิวของสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ที่มีต่อสมบัติการไหลและสมบัติเชิงกลของ HDPE โดยใช้กรดสเตียริกเป็นสารปรับปรุงพื้นผิว พบว่าใช้ CaCO_3 30 %wt ของสารประกอบ และทำการเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกในปริมาณ 1.7 %wt ของ CaCO_3 จะทำให้ค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงกระแทกเพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งแรง ความเหน็ดมีค่าลดลง

2.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride grafted high density polyethylene, HDPE-g-MA)

2.3.1 บทนำ

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ที่มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวาง แต่เป็นการยากที่จะทำการผลิตเป็นพอลิเมอร์ผสมหรือคอมโพสิต เนื่องจาก HDPE มีลักษณะที่ไม่มีขั้วทำให้ผลการทดลองที่ได้จากการผสม HDPE กับวัสดุชนิดอื่นที่มีขั้วมักมีสมบัติด้านแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวที่ไม่ดี แต่สามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยการเติมวัสดุตัวที่สามที่ใช้ใน

การเพิ่มคุณสมบัติการเข้ากันได้ยกตัวอย่างเช่น ในการผลิตคอมโพสิตนั้นสารตัวเติมได้รับการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ (Coupling agent) และสำหรับกรณีของพอลิเมอร์ผสม จะมีการเติมสารช่วยผสม (Compatibilizer) ลงไป ซึ่งสารคู่ควบนั้นช่วยสนับสนุนการยึดติดระหว่างพอลิเมอร์และสารเสริมแรงอนินทรีย์ ทำให้สมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิตดีขึ้น สำหรับพอลิโอฟีนส์ ที่มีการปรับปรุงด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA) ได้มีการใช้กันอย่างกว้างขวางในรูปของสารช่วยผสมสำหรับการผสมระหว่างพอลิโอฟีนส์กับพอลิเอไมด์ โดย MA จะไปเกิดปฏิกิริยากับหมู่เอมีนของพอลิเอไมด์ทำให้การผสมเกิดการเข้ากันได้ดีขึ้น [21]



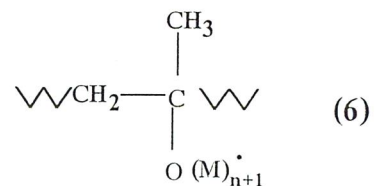
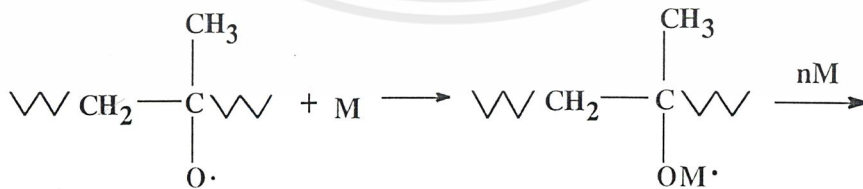
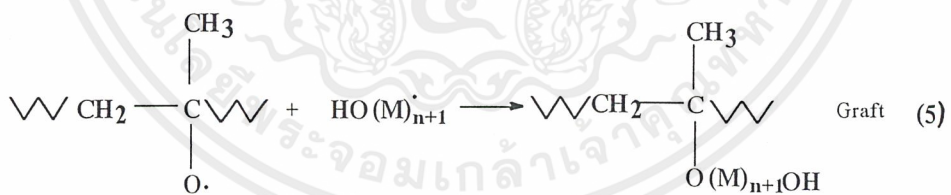
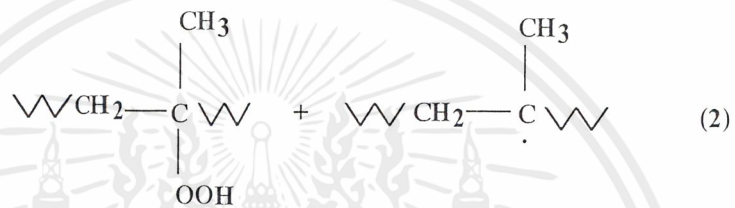
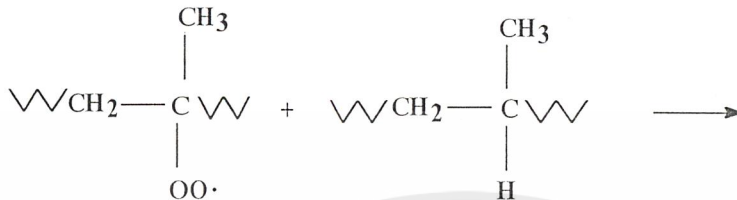
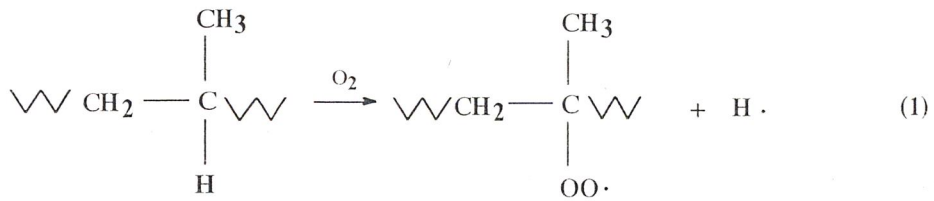
รูปที่ 2.5 ลักษณะโครงสร้างของ HDPE-g-MA [22]

2.3.2 กระบวนการผลิตและสมบัติทั่วไป

Sachin N. Sathe และคณะ [23] ทำการศึกษาการตอก maleic anhydride (MA) บน Isotactic polypropylene (i-PP) โดยใช้ benzoyl peroxide เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา และโทลูอีนเป็นตัวทำละลาย ทำในขวดก้นกลมสี่คอที่มีไบพดกวน คอนเดนเซอร์ เทอร์โมมิเตอร์ ในสภาวะไนโตรเจน โดยละลาย i-PP ประมาณ 2.5 %w/v ในโทลูอีนที่อุณหภูมิ 110°C เมื่อ i-PP ละลายเป็นเนื้อเดียวกับโทลูอีนแล้วจึงเติม benzoyl peroxide 0.15 %w/v ตามด้วยสารละลายของ MA ที่ละลายในโทลูอีน 1.25 %w/v ทำการปั่นกวนเป็นเวลา 6 ชั่วโมงเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา แล้วทำให้แห้งภายใต้การลดความดันที่อุณหภูมิ 80°C โดยพบว่าเปอร์เซ็นต์การตอกเพิ่มขึ้นในตอนต้นเมื่อความเข้มข้นของ MA เพิ่มขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นของ MA เพิ่มเกิน 1.25 %w/v จะทำให้เปอร์เซ็นต์การตอกคงที่ เนื่องจากจำนวนอนุมูลอิสระบน i-PP ทำปฏิกิริยากับ MA หมดแล้วเมื่อให้เวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การตอกเพิ่มขึ้นในตอนแรก เมื่อตัวริเริ่มปฏิกิริยาถูกใช้หมดทำให้ไม่เกิดการตอกเพิ่มขึ้นเมื่อให้เวลามากขึ้น เมื่อให้อุณหภูมิมากขึ้นเปอร์เซ็นต์การตอกเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมินั้นทำให้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาเกิดการแตกออกทำให้จำนวนอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นเป็นสาเหตุให้เปอร์เซ็นต์การตอกเพิ่มขึ้น

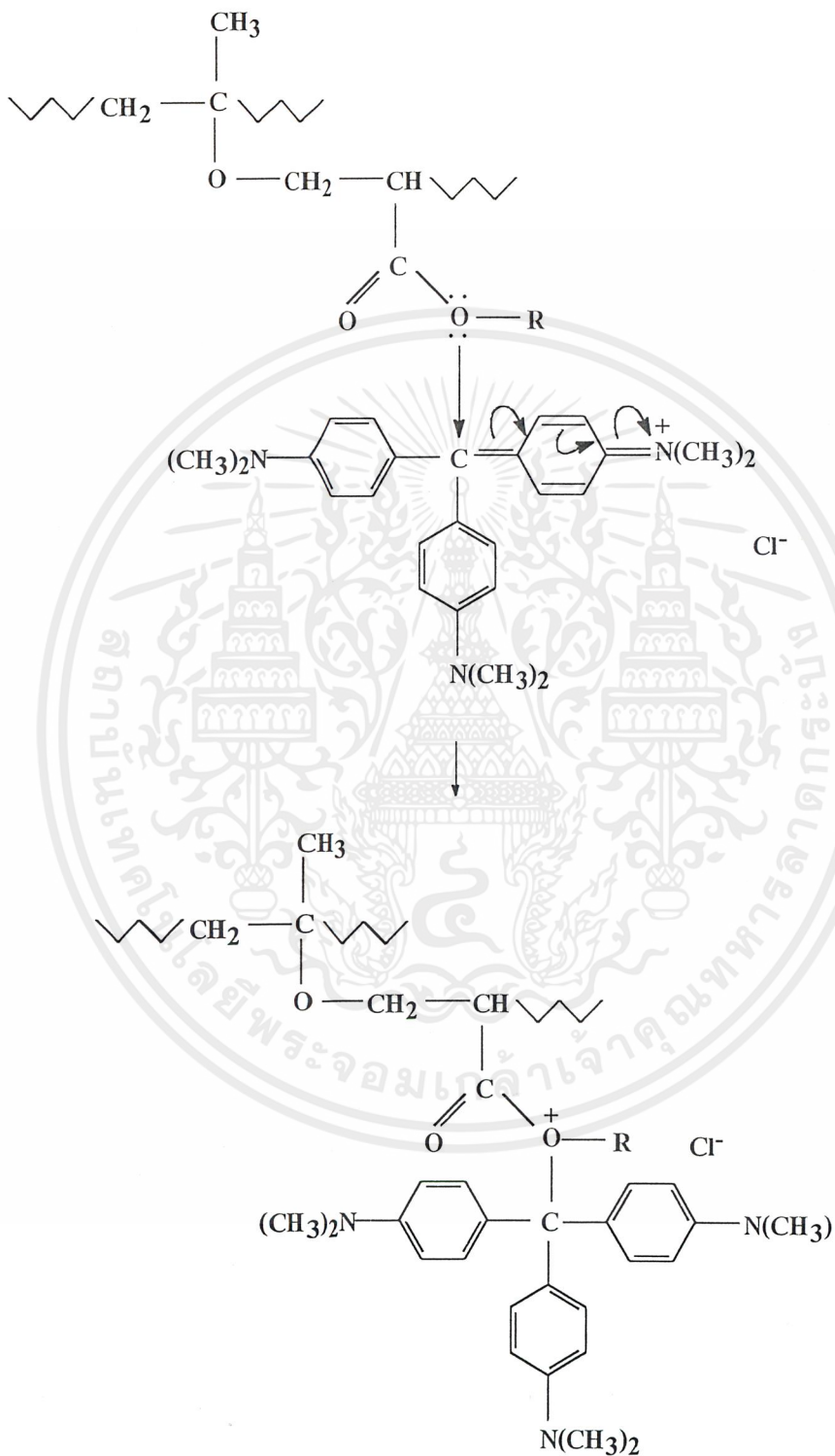
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I. K. Mehta , B. N. Misra และ G. S. Chavhan [24] ทำการศึกษาการต่อกิ่งของ Isotactic polypropylene (i-PP) ด้วย Maleic anhydride (MA) และ Ethyl acrylate (EA) ด้วยการฉายรังสีแกมมาในสภาวะที่มีอากาศพบว่าทำให้เกิดหมู่ Hydroperoxide เนื่องจากออกซิเจนในอากาศ บนสายโซ่ของ PP (ปฏิกิริยา 1 และ 2) เมื่อให้ความร้อน Hydroperoxide จะเกิดการแยกออกเป็น Macroradical และ Hydroxyl radical (\bullet OH) (ปฏิกิริยา 3) โดย Hydroxyl radical บางที่อาจเป็นตัวริเริ่มการเกิด Vinyl polymerization (ปฏิกิริยา 4) โดยไวนิลพอลิเมอร์ ที่เกิดขึ้นสามารถเกิดปฏิกิริยากับ Active site ของพอลิเมอร์ทำให้เกิดเป็น Graft copolymer ขึ้น (ปฏิกิริยา 5) หรืออีกทางหนึ่ง ไวนิลมอนอเมอร์ สามารถเกิดปฏิกิริยากับ Active site ได้โดยตรงเกิดเป็น Graft copolymer ได้เหมือนกัน (ปฏิกิริยา 6) จากการศึกษาพบว่าเปอร์เซ็นต์การต่อกิ่งของ MA และ EA มากขึ้นเมื่อการรับรังสีมากขึ้น แต่จะสูงสุดแค่ค่าหนึ่งจากนั้นค่าจะลดลง โดยอัตราเร็วในการต่อกิ่งของ MA จะสูงกว่า EA เมื่อความเข้มข้นของ MA มากขึ้นเปอร์เซ็นต์การต่อกิ่งจะเพิ่มขึ้นด้วย โดยสูงสุดที่ 578% ที่ความเข้มข้น 147.2×10^{-2} mol/l กรณีของ EA เมื่อความเข้มข้นของ EA เพิ่มขึ้นเปอร์เซ็นต์การต่อกิ่งจะเพิ่มขึ้นและจึงลดลง โดยสูงสุดที่ 272% ที่ความเข้มข้น 122.6×10^{-2} mol/l โดยอัตราการต่อกิ่งของ MA ที่สูงกว่า EA เนื่องจาก MA สามารถละลายในน้ำที่ใช้เป็นตัวกลางได้มากกว่า EA ทำให้ง่ายแก่การสัมผัสกับ Active site เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเปอร์เซ็นต์การต่อกิ่งของ EA และ MA จะลดลง โดยเปอร์เซ็นต์การต่อกิ่งของ MA จะสูงสุดประมาณ 612% ที่อุณหภูมิ 95°C และ EA จะสูงสุดที่ประมาณ 352% ที่อุณหภูมิ 115°C ปริมาณน้ำที่ใช้ที่ทำให้เปอร์เซ็นต์การต่อกิ่งสูงสุดประมาณ 20 ml โดยน้ำช่วยให้เกิดพันธะไฮโดรเจนกับ PP hydroperoxide ทำให้เกิดการบวมของ PP ส่งผลให้การต่อกิ่งง่ายขึ้น เมื่อให้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเปอร์เซ็นต์การต่อกิ่งของ MA และ EA เพิ่มขึ้น แต่เมื่อถึงที่ 180 นาที เปอร์เซ็นต์การต่อกิ่งจะคงที่อาจเนื่องมาจาก Active site ถูกใช้ไปหมดแล้วในการเกิดปฏิกิริยาเป็น Grafted copolymer



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พฤติกรรมการณ์ย้อมสีของ PP ไม่สามารถเกิดการย้อมสีได้ แต่เมื่อทำการต่อถึง MA บน PP การย้อมสี crystal violet สามารถย้อมได้ดังสมการ [24]

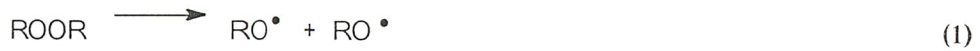


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

S.H.P. BETTINI และ J.A.M. AGNELLI [25] ทำการศึกษาการต่อกิ่งของ Maleic anhydride (MA) บน polypropylene (PP) โดยใช้เครื่อง Haake torque rheometer System 90 อุณหภูมิ 180°C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนจากนั้นทำการอัดร้อนที่อุณหภูมิ 180°C ให้เป็นฟิล์มบางๆ จากนั้นทำการตัดเป็นเม็ดขนาดเล็ก

Reaction Mechanism Proposed

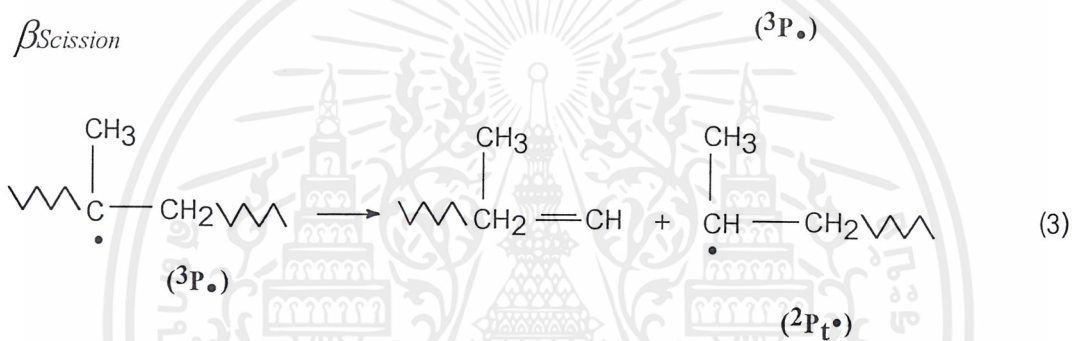
Decomposition of the Initiator



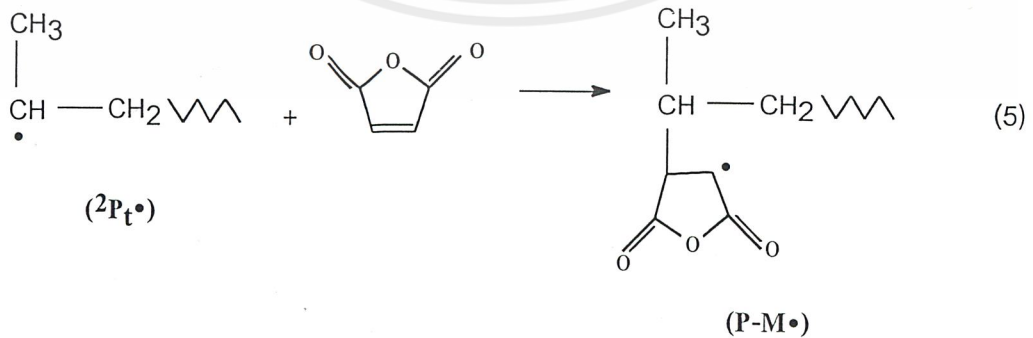
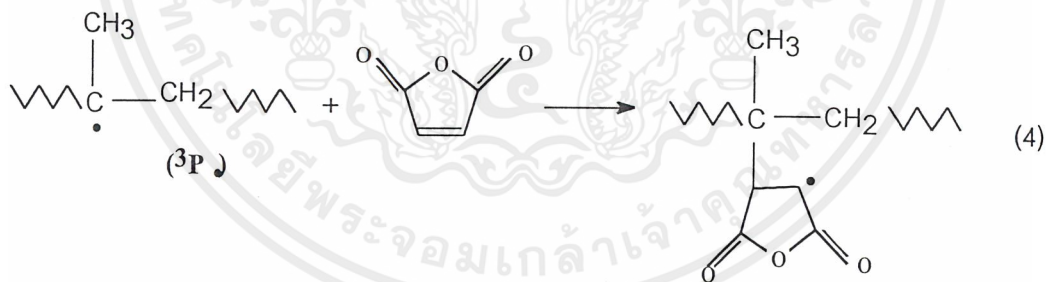
Abstraction of Hydrogen



β Scission

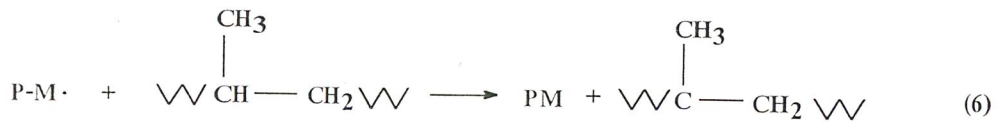


Grafting of Maleic Anhydride

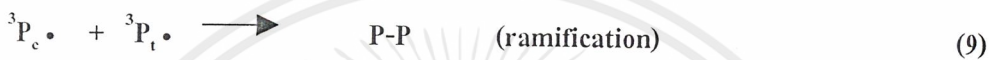
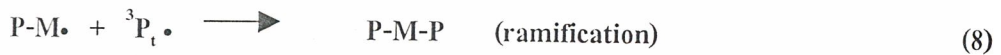
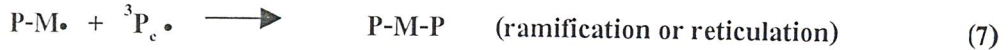


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Chain Transfer



Termination by Combination



Termination by Disproportioning



เปอร์ออกไซด์ ซึ่งใช้เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยานั้นไม่เสถียรต่อความร้อน จะเกิดการแตกออกของพันธะระหว่างออกซิเจนกับออกซิเจน (O-O) (ปฏิกิริยา 1) เกิดเป็นอนุมูลอิสระขึ้น จากนั้นอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะไปดึงอะตอมของไฮโดรเจนจากสายโซ่ของ PP ทำให้เกิด Macroradical ขึ้น (ปฏิกิริยา 2) ในกรณีที่ความเข้มข้นของ MA น้อยๆ โอกาสที่ MA จะไปเกิดปฏิกิริยากับ Macroradical จึงลดลงทำให้แนวโน้มที่จะเกิด β scission ก่อน (ปฏิกิริยา 3) จากนั้น MA จึงเข้าไปทำปฏิกิริยากับ Macroradical หลังจากการขาดของสายโซ่ (ปฏิกิริยา 5) เนื่องจากความเข้มข้นของ Succinic และ Polymeric macroradical ต่ำ ทำให้แนวโน้มที่จะเกิดการสิ้นสุดปฏิกิริยาแบบ combination (ปฏิกิริยา 7 - 9) น้อย ซึ่งน่าจะเกิดแบบถ่ายโอนสายโซ่ (Chain transfer) (ปฏิกิริยา 6) มากกว่า Succinic secondary carbon radical (PM \cdot) นั้นว่องไวน้อยกว่า Secondary macroradical (${}^2P_t\cdot$) ทำให้โอกาสที่จะเกิด Combination ลดลง จะเกิดแบบถ่ายโอนสายโซ่มากกว่า ในกรณีที่ความเข้มข้นของ MA มากขึ้นทำให้ MA จะเกิดปฏิกิริยากับ Macroradical ก่อนเกิด β scission เมื่อความเข้มข้นของเปอร์ออกไซด์มากขึ้นทำให้ปริมาณของ Macroradical เพิ่มขึ้นเปอร์เซ็นต์การตอ่กของ MA จึงเพิ่มขึ้น และเมื่อให้เวลามากขึ้นในการทำปฏิกิริยาทำให้โอกาส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ MA จะเกิดปฏิกิริยากับ Macroradical จึงเพิ่มขึ้นด้วย ความเร็วของใบพัดกวนที่เร็วช่วยให้เกิดการกระจายตัวของ MA ดีขึ้นการผสมจึงเกิดได้ดีขึ้น

Y. Wang และคณะ [26] ทำการศึกษาโครงสร้างและสมบัติของ HDPE-MA โดยการตอกิ่งของ MA บน HDPE ทำที่อุณหภูมิ 139°C นาน 90 นาที ในไซลีนที่ร้อน โดยเติม HDPE 60 g MA 30 g และ Dicumyl peroxide (DCP) ซึ่งเป็นตัวควบคุมองศาการตอกิ่ง จากนั้นทำการตกตะกอนใน acetone และล้างด้วย acetone หลายๆ ครั้ง พบว่าอุณหภูมิในการหลอมเหลว (T_m) ของ HDPE-MA มีค่าลดลงแต่ไม่มากเนื่องมาจากผลึกของ PE ที่เกิดขึ้นนั้นไม่สมบูรณ์ เนื่องมาจากหมู่ MA จะขัดขวางกระบวนการเกิดผลึก เมื่อปริมาณ MA ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ Yield strength ลดลงเนื่องมาจากความเป็นผลึกลดลง การเพิ่มขึ้นของความแข็งแรง ณ จุดขาด และการลดลงของค่าการดึงยืด ณ จุดขาดอาจเนื่องมาจากอันตรปฏิกิริยาระหว่างหมู่ MA ที่มีขั้ว

Chi-Wen และ W. Lee [27] ทำการศึกษาการตอกิ่ง Maleic anhydride (MA) บน Isotactic polypropylene (i-PP) โดยใช้เครื่อง Brabender Plasticorder ที่อุณหภูมิ 160°C ใช้ Dicumyl peroxide (DCP) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา พบว่าองศาการตอกิ่งอยู่ในช่วง 0.078 – 0.368% และมีค่าความแข็งแรงยึดติดสูงสุด 159 kg/cm² ที่องศาการตอกิ่ง 0.217% เปอร์เซ็นต์การตอกิ่งต่ำๆ นั้นส่งผลให้หมู่ MA มีจำนวนไม่เพียงพอสำหรับเกิดพันธะ และมีความแข็งแรงยึดติดที่ต่ำ เมื่อเปอร์เซ็นต์การตอกิ่งมีค่าสูงมากๆ บางทีจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงยึดติดที่ลดลง เนื่องมาจากปริมาณการตอกิ่งที่สูงนั้นนำไปสู่การลดลงของความทนทานของการยึดติดอันเนื่องมาจากเกิดการดูดซับน้ำ ส่งผลให้พื้นผิวเกิดการเสียหายและมีความทนทานที่ไม่ดี

2.3.3 การประยุกต์ใช้งาน

J. I. Kim และ คณะ [21] ทำการศึกษาการผสมผงของยางที่เคลือบกับ HDPE โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder) ผงของยางมีการปรับปรุงพื้นผิวด้วย Acrylamide (AAM) โดยใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต ใช้ PP-g-MA เป็นสารช่วยผสม (Compatibilizer) เมื่อทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าสมบัติการดึงยืด และสมบัติด้านการทนทานต่อแรงกระแทกจะลดลงเมื่อเติมผงยางมากขึ้น เนื่องจากเกิดการแยกเฟสระหว่าง HDPE และ ผงของยาง แต่ส่วนของยางที่มีการปรับปรุงพื้นผิวที่ผสมกับ HDPE และ สารช่วยผสมจะมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า โดยเฉพาะ ค่าความสามารถในการยืด ณ จุดขาด (Tensile strain at break) จะมีค่าแตกต่างกันมาก เนื่องมาจาก AAM ที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวจะเกิดปฏิกิริยากับ MA ของสารช่วยผสม ทำให้ HDPE ผสมรวมกับผงของยางได้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P. Matzinocs [28] ทำการศึกษาการผสม LDPE และ starch โดยใช้ HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสม ผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) จากนั้นนำมาเข้าเครื่อง Injection moulding และ Film blowing สมบัติเชิงกลนั้นขึ้นกับความสามารถในการกระจายตัวของ Starch ใน LDPE ซึ่งความเป็นจริงนั้น LDPE ไม่เกิดปฏิกิริยากับ Starch และไม่เกิดการรวมกันทำให้มีสมบัติเชิงกลที่ต่ำ แต่เมื่อเติม PE-g-MA หมู่ Maleic anhydride (MA) จะไปเกิดปฏิกิริยากับหมู่ Hydroxyl ของ Starch ส่วนด้านของ PE ในสารช่วยผสมนั้นจะไปรวมกับ LDPE ที่เป็น Matrix ทำให้เกิดการกระจายตัวที่ดีของ Starch ใน LDPE จากการทดสอบสมบัติเชิงกล ในส่วนของ Injection moulding นั้นความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสของยังจะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากการส่งผ่านของแรงจาก LDPE ซึ่งอ่อนแอไปยังส่วนของ Starch ที่แข็งแรงกว่าแต่จะมากที่สุดแค่ 30 wt% Starch จากนั้นค่าจะลดลง เนื่องจากเมื่อปริมาณ Starch มากขึ้น การกระจายตัวของ Starch ก็จะไม่ดี แต่ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดลดลงเมื่อปริมาณ Starch เพิ่มขึ้น ในส่วนของ Film blowing ค่าความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดลดลงเมื่อปริมาณ Starch เพิ่มขึ้นเนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ เครื่อง Injection moulding นั้นมีการให้ความดันแก่ของผสมที่มากกว่าความดันที่ใช้ใน Film blowing ทำให้เกิดการผสมกันที่ดีกว่า ซึ่งเมื่อมองจากฐานฐานวิทยาขนาดของ Starch จะมีขนาดใหญ่กว่าตัวอย่างที่ได้จาก Injection moulding ซึ่งเป็นจุดบกพร่องเป็นสาเหตุทำให้สมบัติของฟิล์มลดลง แต่ค่ามอดุลัสของยังเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ Starch เพิ่มขึ้น

D. Bikiaris และ C. Panayiotou [29] ทำการศึกษาการผสม LDPE กับ PLST (Plasticized starch) โดยใช้ PE-g-MA ที่มี Maleic anhydride 0.4% และ 0.8% เป็นสารช่วยผสม โดย Starch นั้นช่วยทำให้อัตราการสลายตัวทางชีวภาพสูงขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงดึงยืด และการดึงยืด ณ จุดขาดลดลง เนื่องจาก LDPE และ Starch มีการยึดเกาะกันที่ไม่ดีแต่สามารถปรับปรุงได้โดยการเติม PE-g-MA พบว่าเมื่อมีการเติม PE-g-MA ทำให้สามารถใส่ Starch ได้ถึง 20-30%wt ซึ่งปกติใส่ได้ไม่เกิน 15%wt การที่ PLST มีค่าความแข็งแรงดึงยืดต่ำอาจเนื่องมาจาก Glycerine ที่ใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) ใน PLST มีค่าความแข็งแรงดึงยืดที่ต่ำส่งผลให้ PLST มีค่าความแข็งแรงดึงยืดที่ต่ำด้วย เมื่อเติม PE-g-MA ที่มีหมู่ Maleic anhydride 0.4% พบว่าค่าความแข็งแรงดึงยืดจะลดลงแต่ไม่มากเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสม ส่วนกรณีที่มีหมู่ Maleic anhydride 0.8% พบว่าค่าความแข็งแรงดึงยืดไม่มีการลดลงซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ LDPE บริสุทธิ์ การเติมสารช่วยผสมนั้นยังช่วยทำให้ค่าการดึงยืด ณ จุดขาดมากกว่าในกรณีที่ไม่เติมสารช่วยผสม แต่ก็ยังมีค่าต่ำกว่า LDPE ที่บริสุทธิ์

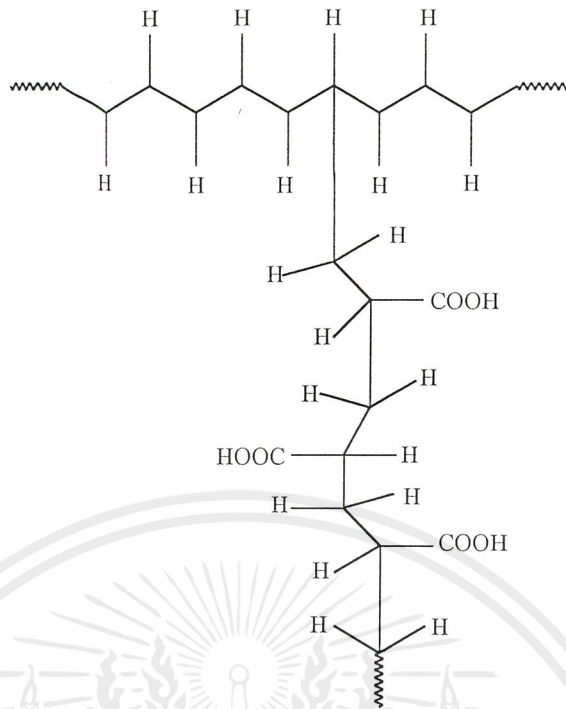
J. M. Lusinchi และคณะ [30] ทำการศึกษาการผสม HDPE กับ poly(ethylene terephthalate) (PET) โดยมีการต่อกิ่งของ Maleic anhydride (MA) บน HDPE โดยไม่มีการใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) ชั้นแรกพันธะคู่ของ MA จะเกิดปฏิกิริยากับ Macroradical ของ HDPE จากนั้น Succinic anhydride จะเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) ของ PET โดยไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยานุเมอสิส การเติม MA ช่วยปรับปรุงความแข็งแรง ณ จุดขาด และ ค่าการดึงยืด ณ จุดขาด ของ HDPE/PET และทำให้เกิดการกระจายตัวของ PET ใน HDPE สม่่าเสมอกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่เติม MA

ปรมินทร์ และประภษฎ์ [31] ทำการศึกษาการผสม HDPE-g-MA ลงใน HDPE ที่มี CaCO_3 พบว่าเมื่อเติม HDPE-g-MA ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงมากกว่าสูตรที่ไม่ทำการปรับปรุงพื้นผิว เนื่องจากส่วนที่เป็น HDPE จะเกิดการเกี่ยวพันกับ HDPE Matrix ทำให้สายโซ่มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดลดลง เนื่องจากเมื่อเกิดการเกี่ยวพันกันของสายโซ่จะเกิดการคลายตัวออกจากกันได้ยาก ค่าความแข็งแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเนื่องจาก HDPE-g-MA จะทำให้ CaCO_3 กระจายตัวได้ดีแต่เมื่อปริมาณ HDPE-g-MA เพิ่มขึ้นจะเกิดการเกี่ยวพันกันของสายโซ่มากเกินไปเมื่อรับแรงแบบทันทีทันใด สายโซ่จะคลายตัวไม่ทันทำให้ค่าความแข็งแรงกระแทกลดลง

2.4 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยกรดอะคริลิก (Acrylic acid grafted high density polyethylene, HDPE-g-AA)

2.4.1 บทนำ

การต่อกิ่งของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ด้วยกรดอะคริลิก (AA) เป็นสิ่งที่มีความสำคัญต่อการปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของพอลิเอทิลีน ซึ่ง HDPE-g-AA สามารถใช้เป็นสารช่วยผสมในการผสมพอลิเอทิลีนกับพอลิเอไมด์ พอลิเอสเทอร์ หรือพอลิเมอริกที่มีขั้วชนิดอื่นๆ หรือใช้เพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวของการผสมกับพวกโลหะ เซรามิก แก้ว และอื่นๆ [32]



รูปที่ 2.6 ลักษณะโครงสร้างของ HDPE-g-AA [22]

2.4.2 กระบวนการผลิตและสมบัติทั่วไป

K. Kaji และคณะ [33] ทำการศึกษาการตอ่กิ่งของ Acrylic acid (AA) บน Ultrahigh molecular weight (UHMW) high strength polyethylene fiber โดยใช้การฉายรังสี มี Mohr salt's เป็นตัวยับยั้ง นำ UHMWPE fiber มาใส่ในหลอดแก้วเพื่อป้องกันการหดตัวระหว่างการเกิดปฏิกิริยา นำมาใส่ในถุง PE โดยภายในถุงจะมีก๊าซไนโตรเจน ทำการปิดปากถุง แล้วนำมาผ่านการฉายรังสี หลังจากการฉายรังสีเอาหลอดแก้วออกจากถุงแล้วมาใส่ใน Glass ampule จากนั้นนำมาใส่ใน 50% ของสารละลาย AA จำนวน 6 ml ที่มี Mohr salt's เป็นตัวยับยั้งปฏิกิริยา จากนั้นทำการปิดปากถุง แล้วจุ่มในน้ำที่มีอุณหภูมิ และเวลาต่างๆ กัน หลังจากปฏิกิริยาสิ้นสุด นำไฟเบอร์มาล้างด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้องแล้วจุ่มในน้ำที่มีอุณหภูมิ 50°C เพื่อกำจัดโฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer) ทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องแล้วจึงใส่ในเตาอบสูญญากาศที่อุณหภูมิ 50°C จากการทดลองพบว่า เปอร์เซ็นต์การตอ่กิ่งเพิ่มขึ้นเมื่อให้เวลาในการตอ่กิ่งเพิ่มขึ้นซึ่งจะเพิ่มถึงค่าหนึ่งแล้วจึงคงที่โดยจะคงที่ที่เปอร์เซ็นต์การตอ่กิ่งมากหรือน้อยนั้นขึ้นกับปริมาณของการรับรังสี ถ้าปริมาณการรับรังสีมาก เปอร์เซ็นต์การตอ่กิ่งก็จะเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของ Mohr salt's ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การตอ่กิ่งในตอนท้ายๆ ลดลงเนื่องจากไอออนของเหล็กที่อยู่ใน Mohr salt's สามารถเกิดปฏิกิริยากับอนุมูลของพอลิเมอร์ที่เกิดจากการฉายรังสีได้ จากการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่า การดึงยืด (Elongation) ลดลงเนื่องมาจากตอนฉายรังสีทำให้เกิดการแตกของสายโซ่ การทดสอบความเสถียรต่อความร้อนพบว่า เมื่อเปอร์เซ็นต์การตอกิ่งเพิ่มขึ้น การการแตกของ โฟเบอร์ จะเกิดที่อุณหภูมิสูงขึ้น

H. L. Huang และคณะ [32] ทำการศึกษาสมบัติการไหลของ LLDPE-g-AA พบว่าเมื่อให้ความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนืดลดลง ซึ่งเป็นสมบัติของ Pseudoplastic fluid โดยความหนืดของ LLDPE จะสูงกว่า LLDPE-g-AA ที่อุณหภูมิในช่วง 170 – 200°C แต่เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าช่วงนี้ LLDPE-g-AA จะมีความหนืดสูงกว่า เมื่อปริมาณการตอกิ่งสูงขึ้นจะทำให้ขนาดและความสมบูรณ์ของสเฟียรูไลต์ (Spherulite) ลดลงเนื่องมาจาก AA ขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ LLDPE ในระหว่างกระบวนการเกิดผลึก

K. Olafsen และคณะ [34] ทำการศึกษาการตอกิ่งด้วยกรดอะคริลิก (Acrylic acid, AA) บนพอลิเอทิลีนที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วย Corona treatment จะเกิดหมู่เปอร์ออกไซด์ขึ้นที่ผิวของฟิล์ม LDPE ซึ่งเป็นริเริ่มปฏิกิริยาการตอกิ่งกับ AA นำฟิล์มที่ทำ Corona treatment มาใส่ในส่วนที่เป็นอากาศเหนือสารละลาย AA ที่อุณหภูมิ 95°C มีการไล่ก๊าซออกซิเจนด้วยก๊าซไนโตรเจน เมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดลงนำฟิล์ม LDPE มาสกัดด้วยเมทานอลเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ใน Soxhlet extractor โดยพบว่าเมื่อให้เวลาในการทำปฏิกิริยากับ AA คงที่เท่ากับ 10 นาที และทำการ Corona treatment ที่เวลาต่างๆ พบว่าเมื่อใช้เวลา 90 วินาที ปริมาณของหมู่เปอร์ออกไซด์จะสูงสุดจากนั้นจึงลดลง และเมื่อให้เวลาในการ Corona treatment คงที่เท่ากับ 90 วินาที แล้วให้เวลาในการทำปฏิกิริยากับ AA ต่างๆ กัน พบว่า เวลาที่ทำให้เปอร์เซ็นต์การตอกิ่งสูงสุดคือ 60 นาที

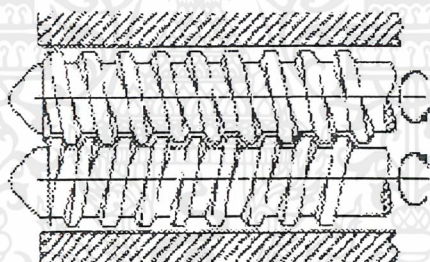
2.5 กระบวนการผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหอนคู่ (Twin-screw extruder)

ในปี ค.ศ. 1930 ที่ประเทศอิตาลี ได้มีการใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหอนคู่ เป็นครั้งแรก สำหรับใช้ในกระบวนการแปรรูปพอลิเมอร์ R. Colombo ได้ทำการพัฒนาเครื่องอัดรีดเกลียวหอนคู่แบบหมุนไปทางเดียวกัน (Co-rotating twin screw extruder) และ C. Pasquetti ได้ทำการพัฒนาเครื่องอัดรีดเกลียวหอนคู่แบบหมุนสวนทางกัน (Counter-rotating twin screw extruder) ในตอนแรกนั้น เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหอนคู่ มีปัญหาเกี่ยวกับเครื่องจักรข้อจำกัดที่สำคัญมากคือ การออกแบบตลับผลึก (Thrust bearing) เนื่องจากมีที่ว่างจำกัด ทำให้ยากแก่การออกแบบตลับผลึกให้อยู่ในแนวแกนที่ดี ต่อมาในปี ค.ศ. 1960 ได้มีการพัฒนาตลับผลึกสำหรับใช้งานกับ เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหอนคู่ แต่ถึงอย่างไรก็ตามเครื่องอัดรีด

แบบเกลียวหนอนคู่ก็ยังมี thrust bearing rating ที่ต่ำกว่า เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว [35]

เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ มีการแบ่งเป็น Co-rotating และ Counter-rotating โดยจะแตกต่างกันที่ ทิศทางการหมุนของสกรูคือ Co-rotating นั้นสกรูจะหมุนในทิศทางเดียวกัน และ Counter-rotating สกรูสองอันจะหมุนสวนทางกัน การแบ่งอีกอย่างคือเครื่องอัดรีดแบบเฟืองตรงกัน (Intermeshing) และเครื่องอัดรีดแบบเฟืองไม่ตรงกัน (Non-meshing) รูปแบบของ Non-meshing ประกอบด้วยสกรูเดี่ยว 2 อันอยู่เคียงข้างกัน หลักการทำงานคล้าย เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว ดังนั้น Non-meshing จึงไม่ใช่ Twin-screw ที่แท้จริง ซึ่งอาจจะอธิบายเป็น “ Double screw ” รูปแบบของ Meshing หรือ Intermeshing มีการแบ่งย่อยอีกเป็น Conjugated และ Non-conjugated ขึ้นกับว่า Meshing flight จะเข้าไปอยู่ใน Channel ในบริเวณที่ Mesh กันได้หมดหรือไม่

ในโครงการพิเศษนี้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ที่ใช้เป็นแบบ Intermeshing counter-rotating screw โดย Counter-rotating นั้น Flight ของทั้งสองสกรูจะอยู่ใกล้ชิดกัน ลักษณะของ Flight จะไม่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งปกติจะเป็นสามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมคางหมู [36]



These two screws rotate opposite to one another.

รูปที่ 2.7 ลักษณะของ Intermeshing counter-rotating screw [37]

การประยุกต์ใช้งานของ เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ แบ่งเป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ ใช้ในการอัดรีดวัสดุที่อ่อนไหวต่อความร้อน เช่น PVC และ ใช้กับกระบวนการที่เฉพาะของพอลิเมอร์ เช่น Compounding , Devolatilization และอื่นๆ กระบวนการอัดรีดของ เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ จะใช้ Fitting flight และ Channel ที่แคบ กระทำที่ความเร็วรอบของสกรูไม่สูงมากคืออยู่ในช่วงประมาณ 10 rpm โดยมีข้อดีที่เหนือกว่าเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวหลายประการคือ มีการป้อน (Feed) ที่ดีกว่า ลักษณะการลำเลียงหรือการพามีลักษณะที่เป็นการเคลื่อนที่แบบกระจัดทางบวก (Positive conveyance) มากกว่า มี Residence time ที่สั้นกว่า และมี

Residence time distribution (RTD) spectrum ที่แคบ การที่มีการผสมที่ดีกว่า และมีพื้นที่ผิวในการส่งผ่านความร้อนที่กว้างกว่า ทำให้ง่ายแก่การควบคุมอุณหภูมิที่เก็บสะสมไว้ ซึ่งเป็นกุญแจสำคัญในการอัดรีดวัสดุที่ไวต่อความร้อน เครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ที่ใช้โดยส่วนใหญ่เป็นเครื่องอัดรีดแบบเฟืองตรงกัน (Intermeshing) รองลงมาคือ เครื่องอัดรีดแบบหมุนสวนทางกัน (Counter-rotating) และมีการใช้ Co-rotating twin screw extruder บ้างในบางกรณี

แต่ละกระบวนการที่เฉพาะของพอลิเมอร์ที่มีการใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ มักมีความแตกต่างกันไปตามการออกแบบ เช่น High-speed intermeshing co-rotating extruder ใช้ประโยชน์ในการ Compounding, Continuous chemical reactor และ Devolatilization จะทำให้ความเร็วรอบสูงๆ โดยความเร็วรอบของสกรูจะมีค่ามากที่สุดอยู่ในช่วง 300 – 600 rpm Non-intermeshing extruder ใช้ในการ Mixing, Chemical reaction และ Devolatilization [35]

2.6 การฉีดขึ้นรูปโดยใช้ Injection Molding [38]

การฉีดขึ้นรูปเป็นกระบวนการแปรรูปพลาสติกและอีลาสโตเมอร์ไปเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปที่มีรูปร่างต่างๆ เป็นกระบวนการผลิตที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางมีประสิทธิภาพในการแปรรูปพอลิเมอร์สูง สามารถทำการผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่มีขนาดต่างๆ กัน และมีรูปร่างซับซ้อนได้อย่างมีคุณภาพดีเยี่ยม โดยใช้แม่พิมพ์ที่มีหลายช่องว่างและใช้เครื่องฉีดขึ้นรูปพอลิเมอร์ที่ควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อควบคุมปริมาณพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ฉีดเข้าไปในช่องว่างของแม่พิมพ์และเครื่องฉีดขึ้นรูปต้องมีระบบควบคุมการปิดเปิดแม่พิมพ์ที่ดี ซึ่งจะช่วยให้มีกำลังการผลิตสูง และไม่สิ้นเปลืองแรงงานในการควบคุมเครื่อง

เครื่องฉีดขึ้นรูป และแม่พิมพ์มีราคาสูงมาก ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้การผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปมีราคาเหมาะสม จำเป็นต้องดำเนินการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เป็นจำนวนมากประมาณ 10,000 – 100,000 ชิ้น การฉีดขึ้นรูปสามารถประยุกต์ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุพอลิเมอร์ได้อย่างกว้างขวาง เช่น เทอร์โมพลาสติก เทอร์โมเซต และอีลาสโตเมอร์ เป็นต้น

การฉีดขึ้นรูปพอลิเมอร์ที่มีลักษณะและรูปร่างแตกต่างกัน จำเป็นต้องพิจารณาถึงประสิทธิภาพของเครื่องฉีดขึ้นรูป อุปกรณ์ประกอบเครื่อง ว่ามีความเหมาะสมต่อกระบวนการฉีดขึ้นรูปให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้หรือไม่ เช่น การฉีดขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติก และเทอร์โมเซตที่มีลักษณะเป็นโฟมหรือผสมสารตัวเติมหรือผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์สำเร็จรูปที่มีรูปร่างยุ่งยากซับซ้อนและมีโลหะอยู่ภายใน หรือผลิตภัณฑ์พลาสติกที่มีพอลิเมอร์หลายชนิดอยู่ในชิ้นส่วนเดียว

ปัจจุบันเครื่องฉีดขึ้นรูปได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพ และคุณภาพดีเยี่ยม สามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ พลาสติกที่นำไปใช้งานด้านวิศวกรรมซึ่งต้องการความเที่ยงตรงสูงมาก โดย

จะทำการควบคุมกระบวนการผลิตด้วยเครื่องควบคุมคอมพิวเตอร์ ในการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ เพื่อทำการผลิตผลิตภัณฑ์ให้ได้มาตรฐานที่กำหนด

หลักการพื้นฐานของกระบวนการฉีดขึ้นรูปคือ การผลิตพอลิเมอร์หลอมในปริมาณที่กำหนด และฉีดเข้าไปในช่องว่างรูปร่างต่างๆ ของแม่พิมพ์ที่เปิดอยู่ หลังจากทำให้พอลิเมอร์หลอมภายในแม่พิมพ์เย็นตัว แม่พิมพ์จะเปิดออก แกนโลหะจะกระทุ้งผลิตภัณฑ์สำเร็จออกจากแม่พิมพ์ จากนั้นแม่พิมพ์จะปิดอีกครั้งหนึ่ง เพื่อเตรียมไว้สำหรับการฉีดขึ้นรูปครั้งต่อไป

เครื่องฉีดขึ้นรูปต้องมีหลักการขั้นพื้นฐานที่สำคัญ 3 ประการ ดังนี้คือ

1. เครื่องฉีดขึ้นรูปจะต้องมีความสามารถในการผลิตพอลิเมอร์หลอมที่มีเนื้อเดียวกันในปริมาณที่กำหนด
2. เครื่องฉีดขึ้นรูปจะต้องมีความสามารถในการฉีดพอลิเมอร์หลอมในปริมาณที่กำหนดเข้าไปในช่องว่างของแม่พิมพ์ที่เปิดอยู่ และจะต้องมีความดันเพียงพอในระหว่างการเย็นตัวของพอลิเมอร์หลอมภายในแม่พิมพ์ เพื่อช่วยให้มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบภายในแม่พิมพ์
3. เครื่องฉีดขึ้นรูปจะต้องมีกลไกในการนำผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์สำเร็จรูปออกจากแม่พิมพ์ได้อย่างปลอดภัยและไม่เกิดตำหนิบนผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีด้วยกัน 3 ประเภท ดังนี้

1. พอลิเมอร์ : ที่ใช้ในงานวิจัยคือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) จากบริษัท ไทยพอลิเอทิลีน จำกัด (TPE) สมบัติบางประการของ HDPE แสดงดังตารางที่ 3.1 [39]

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ HDPE [39]

สมบัติ	หน่วย	วิธีทดสอบ	HDPE (H6105JU)
ดรรชนีการไหล	กรัม/10 วินาที	ASTM D1238	5.5
ความหนาแน่น	กรัม/ลบ.ซม.	ASTM D1505	0.961
ความต้านทานแรงดึงยืด	กก./ตร.ซม.	ASTM D 638	310
ความต้านทานแรงดึงขาด	กก./ตร.ซม.	ASTM D 638	170
ความยืดที่จุดขาด	%	ASTM D 638	>500
มอดุลัสการโค้งงอ	กก./ตร.ซม.	ASTM D 790	13000
ความต้านทานแรงกระแทก	กก.-ซม/ซม	ASTM D 256	5
ความแข็ง, Shore D		ASTM D2240	66
ความต้านทานแรงเค้นจากสิ่งแวดล้อม	F ₅₀ , ซม.	ASTM D1693	4
จุดหลอมเหลว	องศาเซลเซียส	ASTM D2117	133
จุดอ่อนตัวไวแคท	องศาเซลเซียส	ASTM D1525	127
จุดเปราะ	องศาเซลเซียส	ASTM D 746	<-60

2. สารตัวเติม : ใช้แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) จากบริษัทสุรินทร์ออมยา เคมิคัล จำกัด สมบัติบางประการของแคลเซียมคาร์บอเนตแสดงดังตารางที่ 3.2 [40]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ CaCO₃ [40]

สมบัติ	หน่วย	CaCO ₃ (OMYACARB-2T)	CaCO ₃ (OMYACARB-2)
Mean partical size	µm	2.7	2.8
Specific gravity (ISO787/10)	g/cm ³	2.7	2.7
Acid Insolubles	%	1.0	0.0

3. สารช่วยผสม : สารช่วยผสมที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 2 ชนิด ดังนี้

- Maleic anhydride grafted High Density Polyethylene (HDPE-g-MA) polybond® Grade 3009
 - Acrylic acid grafted High Density Polyethylene (HDPE-g-AA) polybond® Grade 1009
- จาก บริษัท TOA UNI CHEMICAL MANUFACTURING, LTD จำกัด สมบัติบางประการของสารช่วยผสมทั้งสองชนิดแสดงดังตารางที่ 3.3 [22]

ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของสารช่วยผสม HDPE-g-MA และ HDPE-g-AA [22]

สารเคมี	Melt flow rate (g/10 min)	wt % MA	wt % AA
HDPE-g-MA	5	1	–
HDPE-g-AA	6	–	6

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder, รุ่น PL-200; IntroEngineering)
2. เครื่องฉีดพลาสติก (Injection molding machine, Cosmo รุ่น TTi 220/80 HITEC; Welltec Industrial Equipment)
3. เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal tester, LLOYD รุ่น LR 30K; LLOYD Instrument)
4. เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC-50; Shimadzu)
5. เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder, Bosco รุ่น A600; Bosco Engineering)
6. เครื่องวัดแรงกระแทก (Impact tester, Yasuda รุ่น 7697; Yasuda Seiki Seisakusho)
7. เครื่องวัดความแข็ง (Hardness tester, Shore D, Yasuda รุ่น 7689; Matsuzawa DXT)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, รุ่น JSM-5410; JEOL)
9. เครื่องวัดสมบัติการไหลคาปิลารี-รีโอมิเตอร์ (Capillary Rheometer, Rosand Precision Co.,Ltd)

3.3 การเตรียมสารตัวอย่าง

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนผสมของ HDPE CaCO₃ และ สารช่วยผสม

	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5	สูตร 6	สูตร 7	สูตร 8
HDPE (%wt)	100	80	80	80	80	80	80	80
CaCO ₃ (%wt)	0	0	20	20	20	20	20	20
CaCO ₃ +SA (%wt)	0	20	0	0	0	0	0	0
สารช่วยผสม (%โดยน้ำหนักสารตัวเดิม)	0.00	0.00	0.00	0.10	0.25	0.50	1.00	2.00

หมายเหตุ สารช่วยผสมที่ใช้มี 2 ตัว คือ HDPE-g-MA และ HDPE-g-AA

1. ทำการชั่งส่วนประกอบต่างๆ ตามตารางข้างบน
2. นำส่วนประกอบแต่ละชนิดมาทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ โดยตั้งอุณหภูมิที่หัวตาย 190°C ความเร็ว 7 รอบต่อนาที เมื่อสารผสมถูกอัดรีดออกมาจะมีการใช้น้ำในการหล่อเย็น
3. นำสารผสมที่ได้ไปบดด้วยเครื่องบดพลาสติก
4. แบ่งสารผสมที่ผ่านการบดไว้ส่วนหนึ่งแล้วนำสารที่เหลือมาทำการฉีดเป็นชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นรูปดัมเบลล์ และรูปที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีรอยบากตรงกลางชิ้นงานเป็นชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของสารตัวอย่าง ด้วยเครื่องฉีดพลาสติกที่อุณหภูมิหัวตาย 190°C

3.4 การทดสอบสมบัติของสารตัวอย่าง

3.4.1 ปริมาณที่แน่นอนของ CaCO₃ ที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง

นำครุชชีเปิดมาอบที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงทิ้งให้เย็นจนถึงอุณหภูมิ 150°C นำไปทิ้งให้เย็นต่อในเดซิเคเตอร์อย่างน้อยเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมงครึ่ง ชั่งน้ำหนักครุชชีเปิดด้วยเครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง นำสารตัวอย่างมาใส่ประมาณไม่เกินครึ่งของความสูงของครุชชีเปิด แล้วชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำมาเผาที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงทิ้งให้เย็นจนถึงอุณหภูมิ 150°C แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำมาทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์อย่างน้อยหนึ่งชั่วโมงครึ่ง ทำการชั่งน้ำหนักของครุซีเบลและคำนวณปริมาณสารที่หายไปเพื่อใช้ในการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของ CaCO_3 ที่มีอยู่

3.4.2 สมบัติทางความร้อน

ทำการชั่งสารตัวอย่างที่ตัดจากชิ้นงานที่ได้จากเครื่องฉีดพลาสติกมาประมาณ 5–10 mg นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ เริ่มต้น 50°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน $20^\circ\text{C}/\text{min}$ [45] จนถึงอุณหภูมิสูงสุดคือ 180°C และทำการลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา $20^\circ\text{C}/\text{min}$ จนถึงอุณหภูมิเริ่มต้น นำข้อมูลที่ได้จากกราฟที่ได้มาหาค่าอุณหภูมิในการหลอมตัวของผลึก (T_m) อุณหภูมิของการเกิดผลึก (T_c) ความร้อนของการหลอมตัว (ΔH_f) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%Crystallinity)

3.4.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของสารตัวอย่าง

1. สมบัติความแข็งแรงดึง

นำตัวอย่างที่ได้จากเครื่องฉีดพลาสติกที่เตรียมเป็นรูปดัมเบลล์ มาทดสอบความแข็งแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal tester) ที่ความเร็วในการดึง $150\text{ mm}/\text{min}$ ระยะของการจับชิ้นงาน (Gauge length) เป็น 70 mm ที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ASTM D638 [42] เพื่อหาการยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) ค่ามอดุลัส (Tensile modulus) และความแข็งแรงดึง (Tensile strength)

2. สมบัติความแข็งแรงกระแทก

นำตัวอย่างที่ได้จากเครื่องฉีดพลาสติกที่เตรียมเป็นแท่งที่มีรอยบากอยู่ตรงกลางชิ้นงาน มาทดสอบความแข็งแรงกระแทกด้วยเครื่องวัดแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod impact tester) ที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ASTM D256 [43] ซึ่งค่าความแข็งแรงกระแทกแบบ Izod ที่ได้มีหน่วยเป็น kJ/m^2

3. สมบัติความแข็ง

นำตัวอย่างที่เป็นรูปดัมเบลล์มาทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบ Dead Load ชนิด Shore D ที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ASTM D2240 [44]

3.4.4 การทดสอบสมบัติการไหลของสารตัวอย่าง

นำสารตัวอย่างที่ผ่านการบดเป็นเม็ด มาทดสอบสมบัติการไหลด้วยเครื่อง Capillary Rheometer ที่อุณหภูมิ 190°C ลูกสูบเคลื่อนที่ลงด้วยอัตราที่คงที่ ใช้อัตราความเครียดเฉือน (shear rate) อยู่ในช่วง $30 - 3000\text{ s}^{-1}$ ตามมาตรฐาน ASTM D3835 [41] ใช้หัวดายแบบเรียบ (180°) เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.5 ลักษณะของการกระจายตัวของ CaCO_3 ในสารตัวอย่าง

นำสารตัวอย่างที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปเป็นรูปดัมเบลล์มาแช่ในไนโตรเจนเหลว จากนั้นทำการหักขณะที่ชิ้นงานขณะเย็นอยู่ หลังจากนั้นตัดเป็นชิ้นงานเพื่อนำพื้นผิวตรงรอยแตกมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



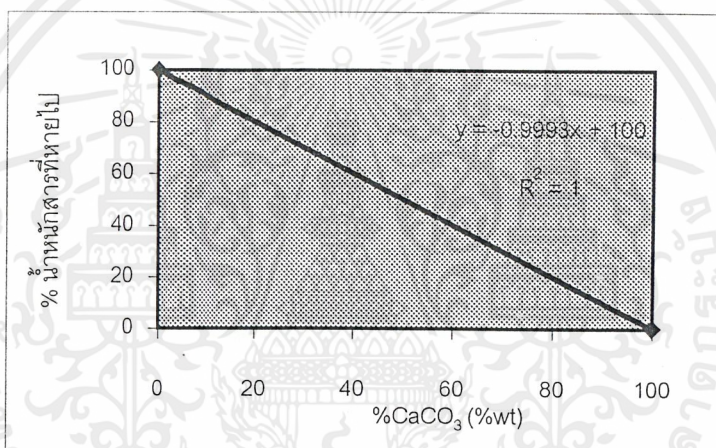
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการหาปริมาณที่แน่นอน CaCO_3

เมื่อทำการเตรียมตัวอย่างตามวิธีที่กล่าวในหัวข้อ 3.4.1 จากนั้นนำมาทดสอบเพื่อหาปริมาณที่แน่นอนของ CaCO_3 ที่มีอยู่ในสารตัวอย่างในแต่ละสูตร โดยนำเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักสารที่หายไปของการเผา HDPE 100%wt และการเผา CaCO_3 100%wt มาวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักสารที่หายไปกับเปอร์เซ็นต์ของ CaCO_3 ที่มีอยู่โดยพบว่าเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักสารที่หายไปของ HDPE และ CaCO_3 เท่ากับ 99.86 และ 0.22 %wt ตามลำดับ นำข้อมูลที่ได้มาวาดกราฟ



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปกับเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ CaCO_3 (%wt)

จากกราฟจะได้สมการเส้นตรง $y = -0.9993x + 100$ จากนั้นนำเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักสารที่หายไปในแต่ละสูตรมาแทนที่ค่า y ทำให้สามารถหาค่า x ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์ของ CaCO_3 ที่มีอยู่จริงได้เช่น สูตร HDCA20 ค่าเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักสารที่หายไปมีค่า 83.125 %wt ซึ่งน้ำหนักสารที่หายไปนี้คือ HDPE นำไปแทนในสมการ

$$y = -0.9993x + 100$$

$$83.13 = -0.9993x + 100$$

$$x = 16.88$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณที่แน่นอนของ CaCO_3 ในสูตร HDCA20 มีค่าเท่ากับ 16.88 %wt คำนวณเช่นเดียวกันนี้ในสูตรที่เหลือ

ตารางที่ 4.1 ปริมาณที่แน่นอนของ CaCO_3 ในสารตัวอย่าง

สารตัวอย่าง	สัญลักษณ์	ค่าเฉลี่ย% น้ำหนักสารที่หายไป (%wt)	ปริมาณ CaCO_3 (%wt)
100%wt HDPE	HD	99.8	0.0
100%wt CaCO_3	CA	0.2	100.0
HDPE+20%wt CaCO_3 (SA)	HDCA20SA	83.9	16.1
HDPE+20%wt CaCO_3	HDCA20	83.1	16.9
HDPE+20%wt CaCO_3 (0.1%wt HDPE-g-MA)	HDCA20MA01	83.4	16.6
HDPE+20%wt CaCO_3 (0.5%wt HDPE-g-MA)	HDCA20MA05	80.8	19.2
HDPE+20%wt CaCO_3 (2.0%wt HDPE-g-MA)	HDCA20MA2	85.1	14.9
HDPE+20%wt CaCO_3 (0.1%wt HDPE-g-AA)	HDCA20AA01	83.7	16.4
HDPE+20%wt CaCO_3 (0.5%wt HDPE-g-AA)	HDCA20AA05	81.7	18.3
HDPE+20%wt CaCO_3 (2.0%wt HDPE-g-AA)	HDCA20AA2	81.4	18.6

4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

เมื่อทำการเตรียมสารตัวอย่างดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.4.2 จากนั้นนำมาทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลของ CaCO_3 และสารช่วยผสมที่มีต่อค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิในการเกิดผลึก (T_c) ความร้อนของการหลอมเหลวของผลึก (ΔH_f) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%Crystallinity) ดังนี้ เมื่อ

T_m คือ อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก

T_c คือ อุณหภูมิในการเกิดผลึก

ΔH_f คือ ความร้อนของการหลอมเหลวของผลึก

ΔH_c คือ ความร้อนของการเกิดผลึก

%Crys คือ เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง

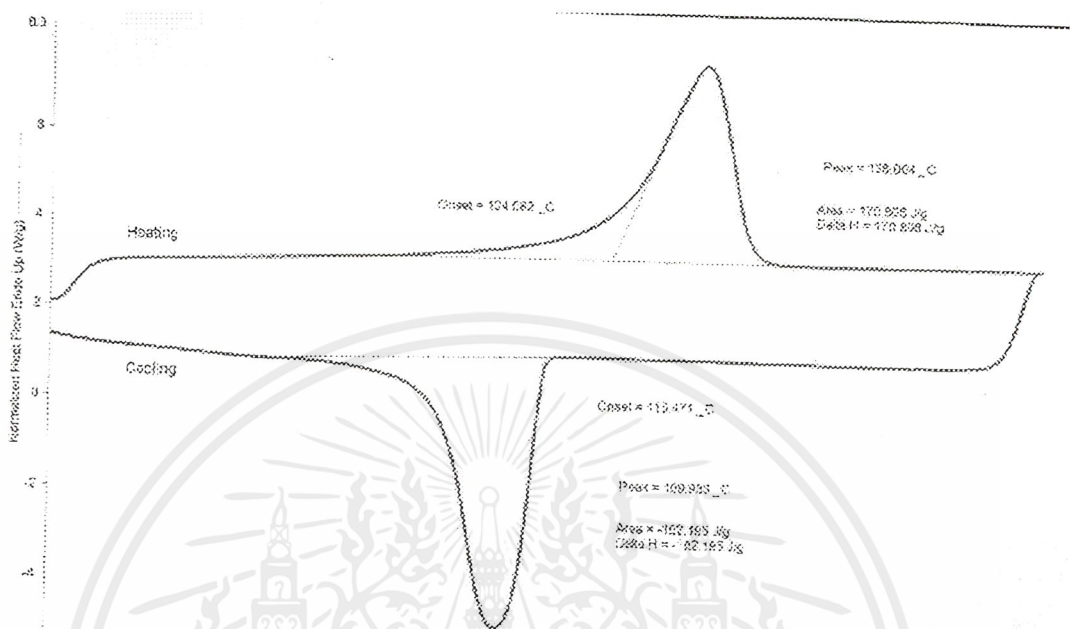
ΔH_f^0 คือ ความร้อนของการหลอมเหลวผลึกของ HDPE ที่มีความเป็นผลึก 100%
= 293 J/g [43]

$\Delta H_{f,c}$ (J/g) = $\frac{\text{พื้นที่ใต้ Peak ของการ heating หรือ cooling (mJ)}}{\text{น้ำหนักสารตัวอย่าง (mg)}}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\%Crys = \frac{\Delta H_{fc}}{\Delta H_i^0} \times \frac{100}{(100 - \text{ปริมาณ } CaCO_3 \text{ ที่มีอยู่จริงในตารางที่ 4.1})} \times 100$$

ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟตัวอย่างแสดงผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC ของ HDPE

ตารางที่ 4.2 ค่าสมบัติทางความร้อนที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC

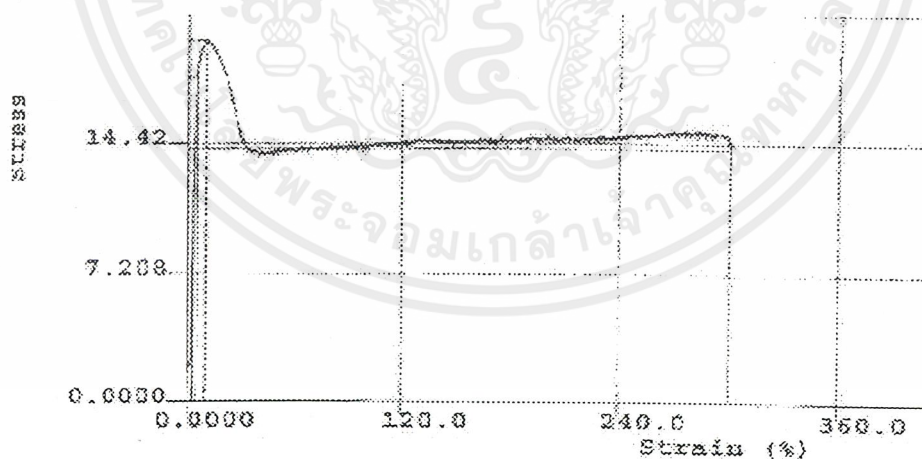
สารตัวอย่าง	T_m ($^{\circ}C$)	ΔH_f (J/g)	%Crys	T_c ($^{\circ}C$)
HDPE	136	170	59	110
HDPE+20%wt $CaCO_3$	134	139	57	112
HDPE+20%wt $CaCO_3$ (SA)	133	142	58	112
HDPE+20%wt $CaCO_3$ +0.1 %wt HDPE-g-MA	134	140	57	112
HDPE+20%wt $CaCO_3$ +0.5 %wt HDPE-g-MA	134	135	57	112
HDPE+20%wt $CaCO_3$ +2.0 %wt HDPE-g-MA	134	142	57	112
HDPE+20%wt $CaCO_3$ +0.1 %wt HDPE-g-AA	135	138	56	111
HDPE+20%wt $CaCO_3$ +0.5 %wt HDPE-g-AA	133	137	57	112
HDPE+20%wt $CaCO_3$ +2.0 %wt HDPE-g-AA	132	133	56	113

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

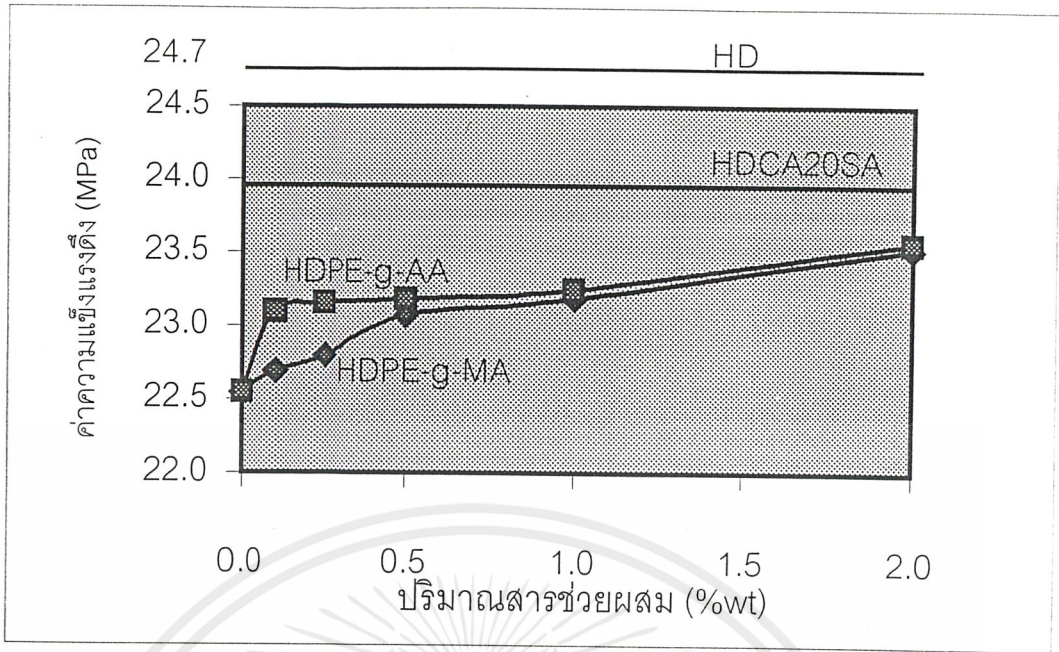
จากตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่อทำการผสม CaCO_3 ลงใน HDPE ทำให้ค่า T_m ลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีเติม CaCO_3 เนื่องจาก CaCO_3 ที่เติมลงไปจะทำให้เกิดนิวคลีโอ (Nuclei) หรือบริเวณที่มีระเบียบขนาดเล็กจำนวนมากทำให้ผลึกเกิดขึ้นพร้อมกัน โดยผลึกที่ได้มีขนาดเล็กและไม่มีความสมบูรณ์ ส่วนค่า T_c ของสารตัวอย่างที่มี CaCO_3 ผสมอยู่พบว่ามีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยจาก HDPE บริสุทธิ์เนื่องจากการผสม CaCO_3 ทำให้ความหนืดของ HDPE สูงขึ้นทำให้เกิดนิวคลีโอที่อุณหภูมิสูงกว่าในกรณีที่ไม่มีเติม CaCO_3 ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกในสูตรที่มีการผสม CaCO_3 มีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกใกล้เคียงกับ HDPE บริสุทธิ์จึงสามารถสรุปว่า CaCO_3 ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (Nucleating agent) สำหรับ HDPE ในสูตรที่ทำการผสมสารช่วยผสมทั้ง HDPE-g-MA และ HDPE-g-AA พบว่าสารช่วยผสมทั้งสองชนิดให้ผลการทดลองที่ทำนองเดียวกันคือเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกมีค่าใกล้เคียงกับ HDPE บริสุทธิ์ ส่วนค่า T_c ที่สูงขึ้นเป็นผลเนื่องมาจากการเติม CaCO_3

4.3 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึง

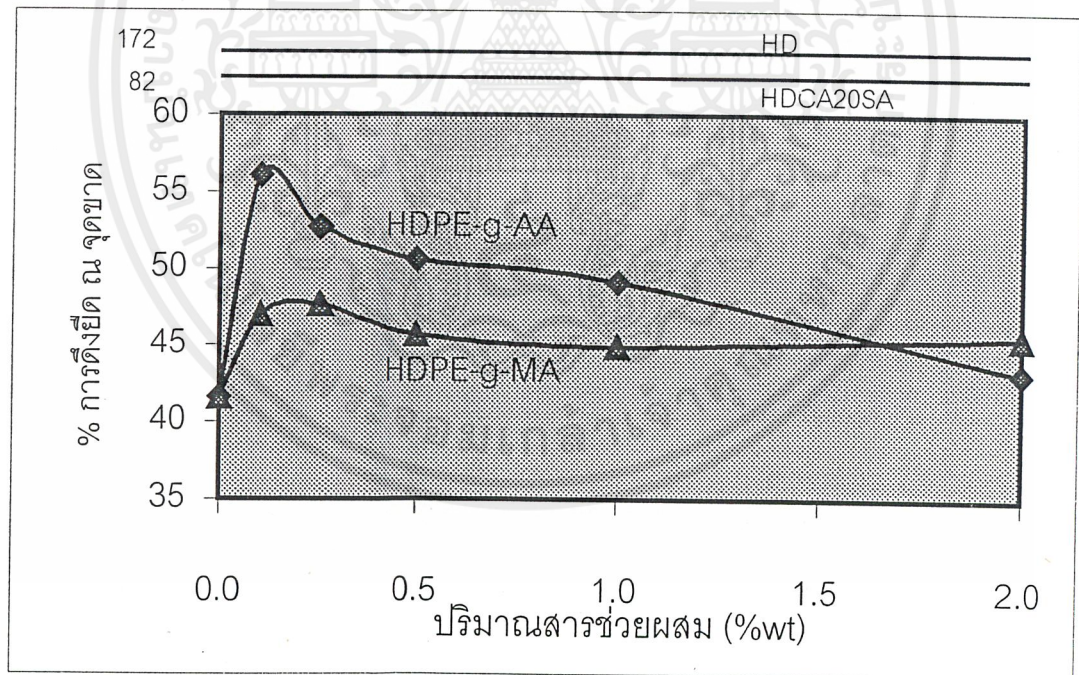
เมื่อทำการเตรียมตัวอย่างโดยใช้วิธีที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.4.3 ข้อ 1 จากนั้นนำมาทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลของ CaCO_3 ที่มีและไม่มี การปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริกและการใช้สารช่วยผสม (HDPE-g-MA และ HDPE-g-AA) ที่มีต่อสมบัติการดึงยึด เช่น ความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด และค่ามอดุลัส



รูปที่ 4.3 กราฟตัวอย่างแสดงการทดสอบสมบัติการรับแรงดึง

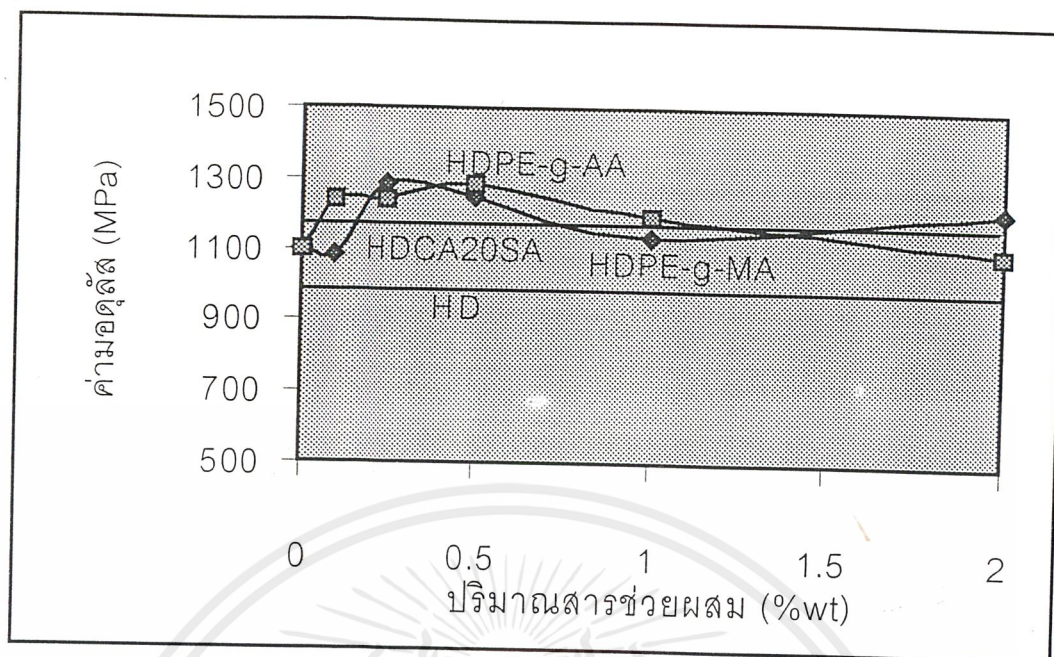


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง (MPa) กับปริมาณสารช่วยผสม (%wt)



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดกับปริมาณสารช่วยผสม (%wt)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัส (MPa) กับปริมาณสารช่วยผสม (%wt)

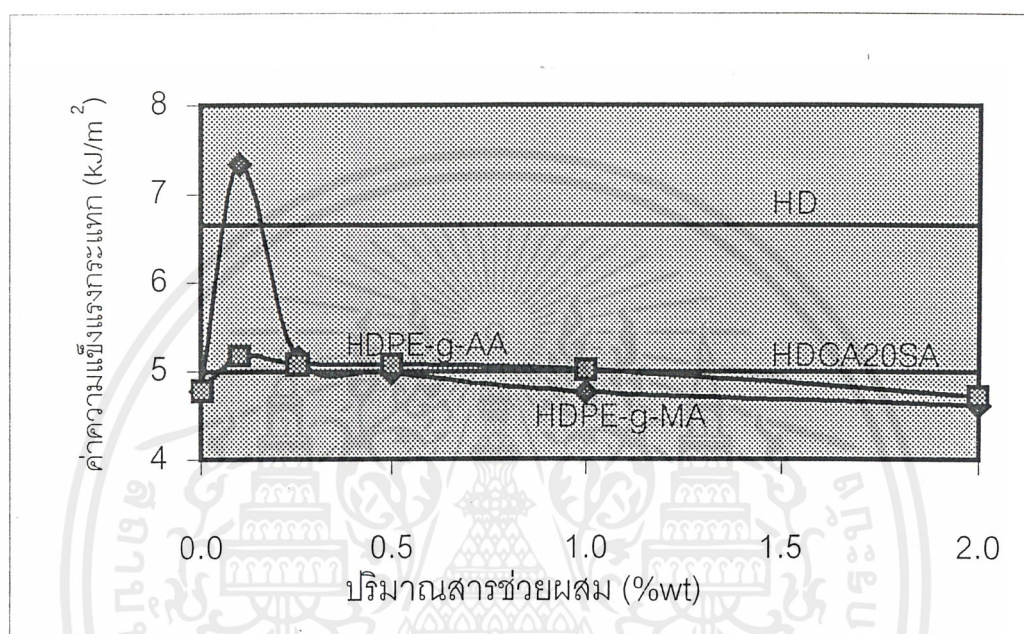
จากรูปที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 พบว่าเมื่อทำการผสม CaCO_3 ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ๓ จุดขาดลดลงเมื่อเทียบกับ HDPE บริสุทธิ์ เนื่องจาก CaCO_3 มีแนวโน้มที่จะเกิดการรวมกันเป็นก้อนและแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง CaCO_3 และ HDPE ไม่ใช่แรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงนัก เมื่อออกแรงดึงทำให้เกิดช่องว่างระหว่างรอยต่อของ HDPE กับ CaCO_3 ได้ง่าย ซึ่งจะกลายเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน ส่วนค่ามอดุลัสมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจาก CaCO_3 มีค่ามอดุลัสที่สูงกว่า HDPE โดยเมื่อใช้ CaCO_3 ที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดเตียริกจะให้ค่าความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ๓ จุดขาด และค่ามอดุลัสที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับการผสม CaCO_3 ที่ไม่ทำการปรับปรุงพื้นผิวเนื่องจากกรดเตียริกช่วยลดความเป็นขั้วของ CaCO_3 ลง ทำให้สามารถเกิดการกระจายตัวใน HDPE ได้มากขึ้นจึงสามารถรับแรงกระทำจากภายนอกได้มากขึ้น เมื่อทำการเติมสารช่วยผสมลงไปพบว่า เมื่อปริมาณสารช่วยผสมเพิ่มขึ้นทั้งในกรณีของ HDPE-g-MA และ HDPE-g-AA ค่าความแข็งแรงดึงไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ๓ จุดขาดมีค่าลดลงอาจเนื่องมาจากเมื่อปริมาณสารช่วยผสมเพิ่มขึ้นอาจจะมีสารช่วยผสมบางส่วนที่มากเกินไปที่ไม่อยู่ระหว่างวัฏภาคของ HDPE และ CaCO_3 เกิดการรวมตัวกันเป็นอีกวัฏภาคหนึ่งแยกออกมาซึ่งกลายเป็นจุดอ่อนแอบนชิ้นงานในที่สุด สูตรที่ผสม HDPE-g-AA จะให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ๓ จุดขาดที่มากกว่าสูตรที่ผสม HDPE-g-MA เนื่องจาก HDPE-g-AA มีเปอร์เซ็นต์ของ AA เท่ากับ 6% แต่ HDPE-g-MA มีเปอร์เซ็นต์ของ MA เท่ากับ 1% ส่งผลให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตรที่ผสม HDPE-g-AA มีการยึดเหนี่ยวกันระหว่าง HDPE และ CaCO_3 ดีกว่าเพราะมี HDPE-g-AA มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า

4.4 ผลการทดสอบความแข็งแรงกระแทก

เมื่อทำการเตรียมตัวอย่างดังวิธีที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.4.3 ข้อ 2 จากนั้นทำการทดสอบเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของ CaCO_3 และสารช่วยผสมที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงกระแทก



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงกระแทก (kJ/m^2) กับปริมาณสารช่วยผสม (%wt)

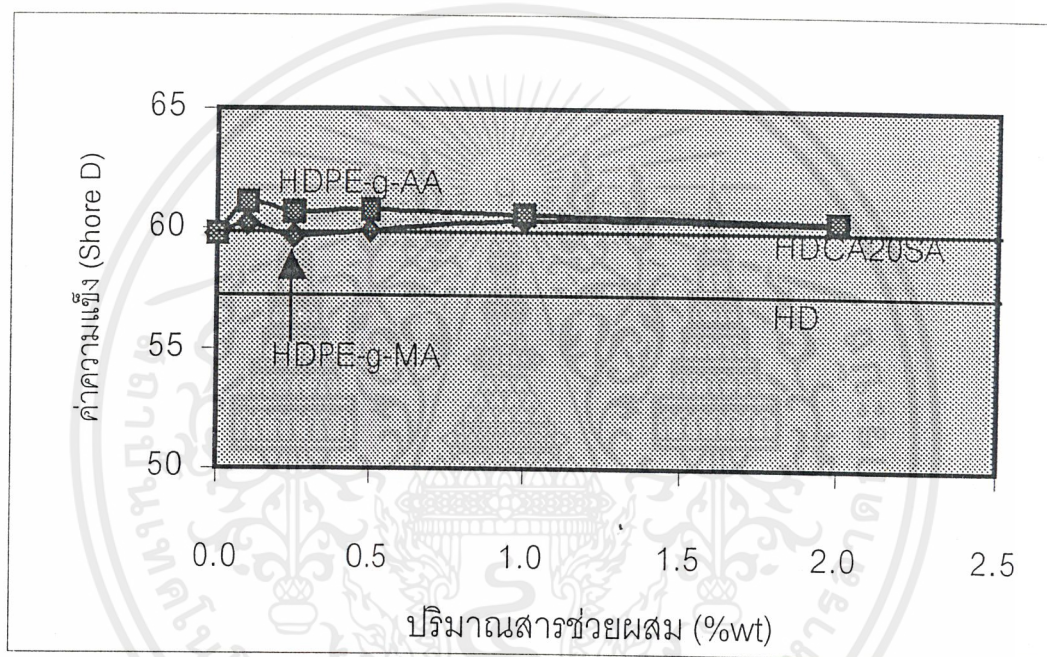
จากรูปที่ 4.7 พบว่า เมื่อทำการผสม CaCO_3 ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตรียริกส่งผลให้ค่าความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับ HDPE บริสุทธิ์ เพราะ CaCO_3 ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้น้อยกว่า HDPE มากในสภาวะการใช้งาน เมื่อมีแรงกระทำอย่างรวดเร็วจะทำให้ชิ้นงานแตกหักได้ง่าย การใช้ CaCO_3 ที่เคลือบผิวด้วย SA จะทำให้ค่าความแข็งแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้ CaCO_3 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงพื้นผิว เนื่องจาก SA ช่วยให้การกระจายตัวของ CaCO_3 มีแนวโน้มที่ดีขึ้น สารช่วยผสมทั้งสองชนิดที่เติมลงไปจะให้ค่าความแข็งแรงกระแทกที่ใกล้เคียงกัน เมื่อปริมาณสารช่วยผสมเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งแรงกระแทกลดลงเนื่องจากสายโซ่อาจเกิดการเกี่ยวพันกันมากเกินไป เมื่อรับแรงที่ทันใดสายโซ่จะคลายตัวไม่ทันทำให้เกิดการเสียหายได้ง่าย ค่าความแข็งแรงกระแทกจึงลดลง เมื่อปริมาณสารช่วยผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มขึ้นทั้งในกรณีของ HDPE-g-MA และ HDPE-g-AA ค่าความแข็งแรงกระแทกมีแนวโน้มมีค่าลดลงเล็กน้อยอาจเนื่องมาจากเมื่อปริมาณสารช่วยผสมเพิ่มขึ้นอาจจะมีสารช่วยผสมบางส่วนที่มากเกินไปที่ไม่อยู่ระหว่างวิภาคของ HDPE และ CaCO_3 เกิดการรวมตัวกันเป็นอีกวิภาคหนึ่งแยกออกมาซึ่งกลายเป็นจุดอ่อนแอนขึ้นงานในที่สุด

4.5 ผลการทดสอบความแข็ง

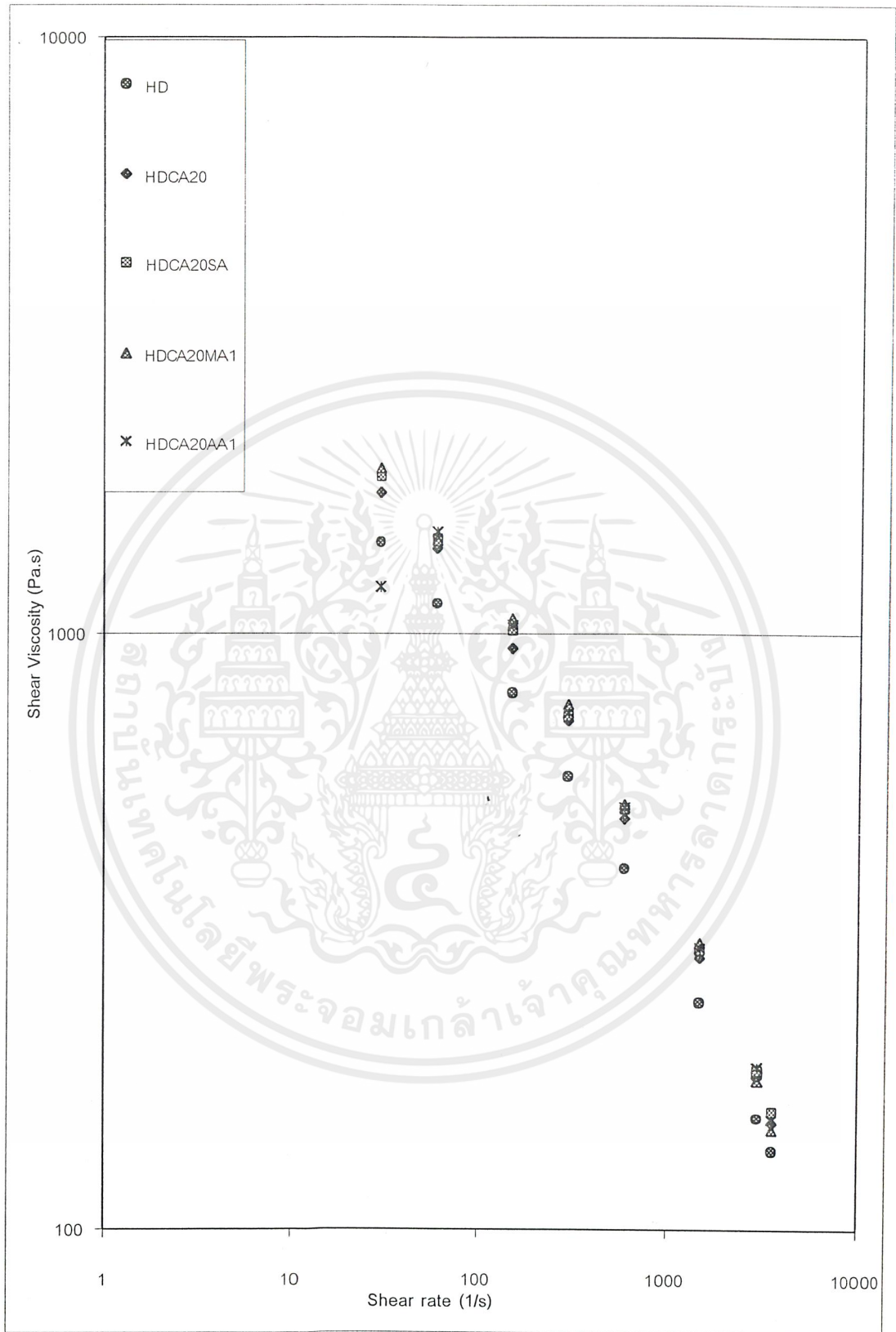
เมื่อทำการเตรียมตัวอย่างดังวิธีที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.4.3 ข้อ 3 จากนั้นนำมาทดสอบความแข็งเพื่อศึกษาอิทธิพลของ CaCO_3 และสารช่วยผสม ที่มีต่อสมบัติความแข็งของ HDPE ซึ่งจะให้ค่าตรงจากเครื่องมือ โดยผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง (Shore D) กับปริมาณสารช่วยผสม (%wt)

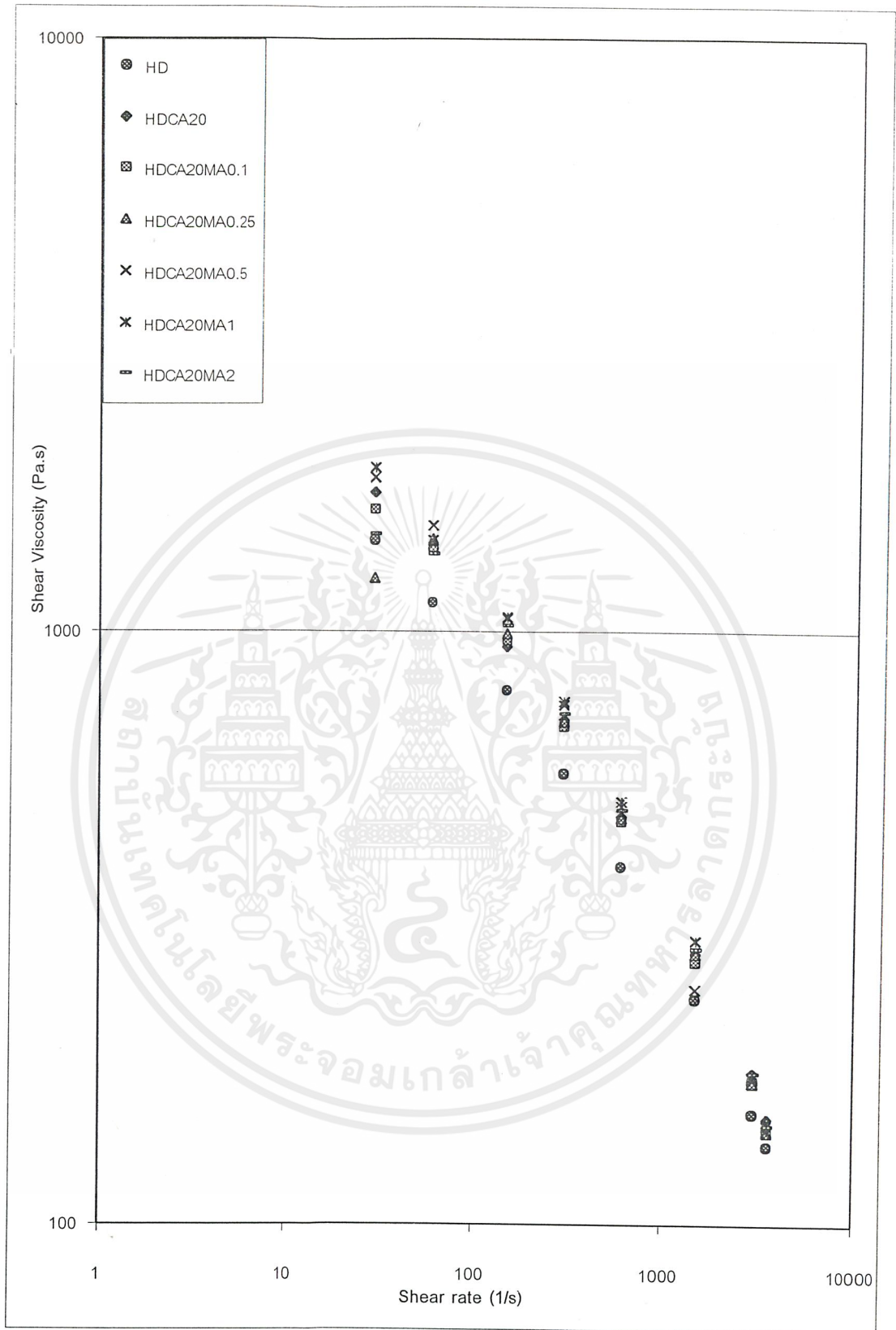
จากรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่อเติม 20%wt CaCO_3 ส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ HDPE บริสุทธิ์เนื่องมาจาก CaCO_3 มีค่าความแข็งสูงกว่า HDPE การใช้สารช่วยผสมทั้ง HDPE-g-MA และ HDPE-g-AA พบว่ามีผลต่อค่าความแข็งไม่มากนัก อาจเนื่องมาจากปริมาณสารช่วยผสมที่ใช้มีปริมาณน้อยเกินไป

4.6 ผลการทดสอบสมบัติการไหล



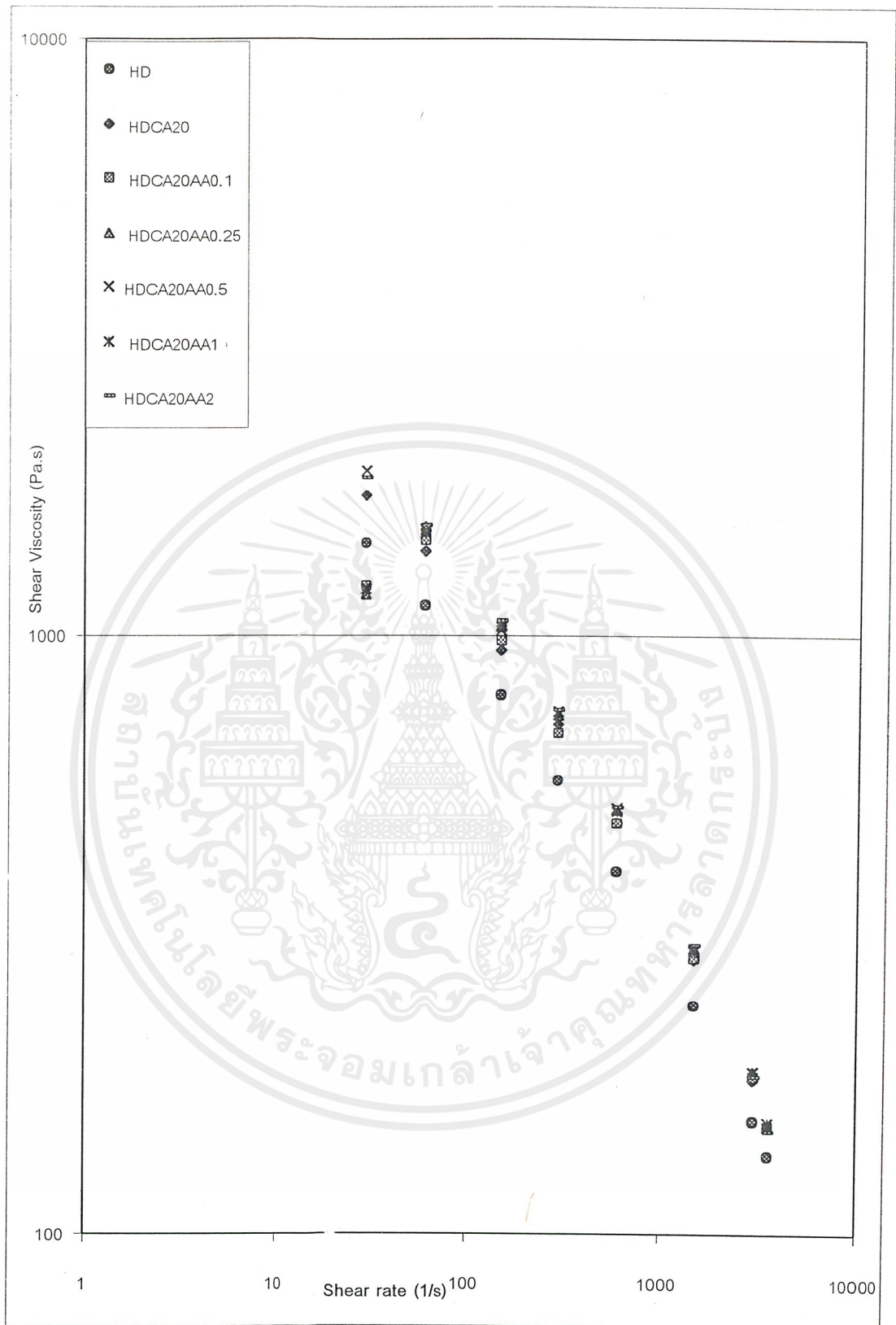
รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่า Shear Viscosity ของสารตัวอย่างเมื่ออัตราความเครียดเฉือนเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบค่า Shear Viscosity ของสารตัวอย่างเมื่ออัตราความเครียดเฉือนเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



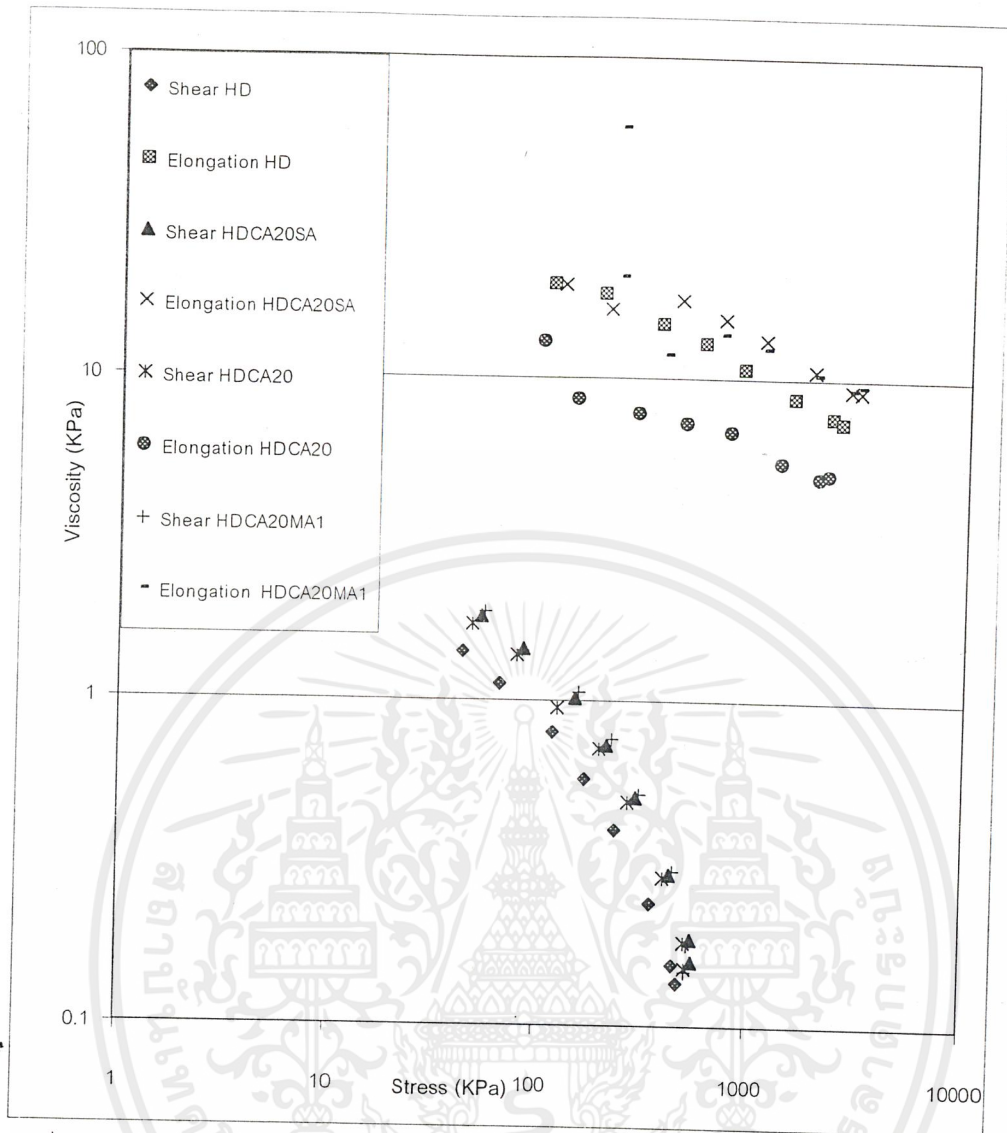
รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบค่า Shear Viscosity ของสารตัวอย่างเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9 4.10 และ 4.11 จะเห็นได้ว่า เมื่ออัตราความเครียดเฉือน (Shear strain rate หรือ shear rate) เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า Shear viscosity ลดลงเนื่องจากเกิดการคลายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ (Chain disentanglement) แสดงว่าสารตัวอย่างทุกตัวแสดงพฤติกรรมเป็น Pseudoplastic

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า Shear viscosity ของสารตัวอย่าง พบว่าสูตร HDPE บริสุทธิ์มีค่าน้อยที่สุด ส่วนสูตร ที่มี CaCO_3 เป็นองค์ประกอบจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน และสูงกว่าสูตร HDPE บริสุทธิ์ เนื่องจาก CaCO_3 จะยึดเกาะกับ HDPE ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้ยากขึ้น สำหรับการเติมสารช่วยผสม HDPE-g-MA และ HDPE-g-AA ในปริมาณต่างๆ ค่าที่ได้จะใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับ HDPE ที่มีการเติม CaCO_3 เพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณของสารช่วยผสมมากที่สุด 2 % ซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยมาก จึงทำให้ค่า Shear viscosity ที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนัก





รูปที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบค่า Shear viscosity และ Elongation viscosity

จากกราฟจะเห็นได้ว่า เมื่อค่าความเค้น (Stress) ของสารตัวอย่างสูงขึ้น จะพบว่าทั้งค่า Shear viscosity และ Elongation viscosity มีค่าลดต่ำลงเนื่องจากการคลายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ (Chain disentanglement)

จากการใช้สมการของ Cogswell และ Power law model เข้าช่วยแก้ไขสมการ เราจะได้กราฟดังภาพที่ 4.12 พบว่าจากกราฟ Shear viscosity ทำให้เรารู้ว่าสารตัวอย่างประพฤติตัวเป็น Pseudoplastic (หรือ Shear-Thinning) และจากกราฟ Elongation viscosity สารตัวอย่างจะประพฤติตัวเป็น Tension-Thinning นั่นคือ ค่าความหนืดลดลงเมื่อแรงกระทำภายนอกมากขึ้น

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า Elongation viscosity ของสารตัวอย่างแต่ละตัวเมื่อให้ความเค้น พบว่าสารตัวอย่างที่มีความหนืดน้อยที่สุดคือ HACA20 ซึ่งผลที่ได้ตรงข้ามกับ Shear viscosity ที่เมื่อทำการเติม CaCO_3 จะทำให้เกิดการขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ ทำให้ความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

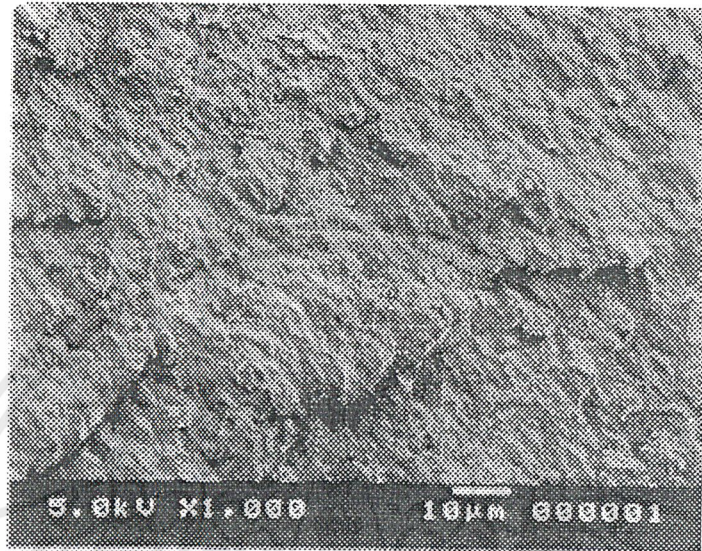
หนืดเพิ่มขึ้น แต่จากงานวิจัยที่ผ่านมาของ S. Jumpa [19] ทำการศึกษาค่า Elongation viscosity จากการดึงขึ้นงานในอ่างน้ำมันที่อุณหภูมิสูง ซึ่งการเปลี่ยนรูปร่างแบบ Elongation flow เพียงอย่างเดียวพบว่า เมื่อทำการเติม CaCO_3 จะทำให้ค่า Elongation viscosity เพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาค CaCO_3 ไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ เช่นเดียวกับที่พบในการเพิ่มขึ้นของ Shear viscosity แต่ผลการทดลองที่ได้ตรงกันข้ามกับงานวิจัยนี้ ทั้งนี้เกิดจากวิธีการวิเคราะห์หาค่า Elongation viscosity ในงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการไหลลู่เข้า (Convergent flow analysis) ซึ่งข้อมูลพื้นฐานนำมาจาก การเปลี่ยนรูปร่าง Shear flow และ Elongation flow รวมกัน และอาจจะมีผลมาจากการเพิ่มขึ้นของความร้อนเนื่องจากแรงเฉือน (Shear heating effect) จึงทำให้ผลการทดลองที่ได้ไม่เป็นแนวโน้มเดียวกันกับ S. Jumpa [19]



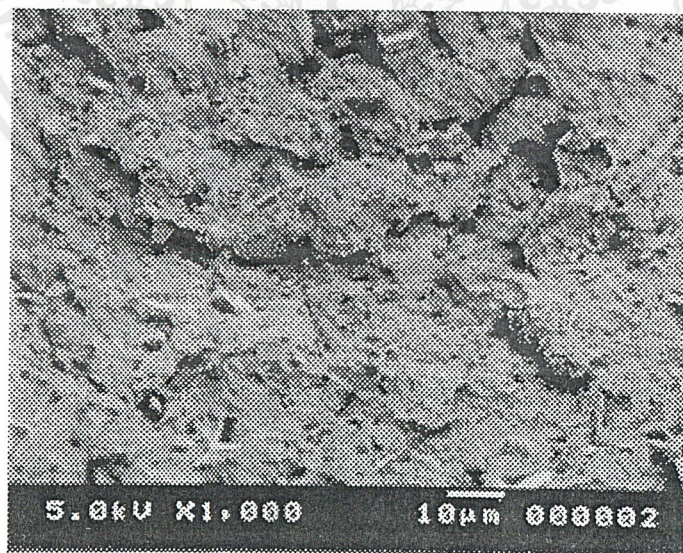
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 ผลการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO_3 ในสารตัวอย่าง

เมื่อทำการเตรียมสารตัวอย่างดังวิธีที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.4.5 แล้วนำมาวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO_3 ที่ไม่มี SA และมี SA เป็นสารปรับปรุงพื้นผิว และ HDPE-g-MA และ HDPE-g-AA เป็นสารช่วยผสมในสารตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 4.13 – 4.21

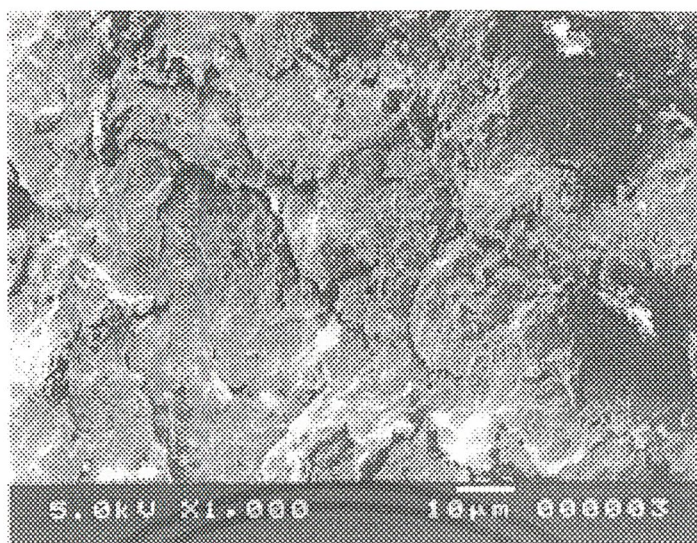


รูปที่ 4.13 HDPE 100%wt กำลังขยาย 1000 เท่า

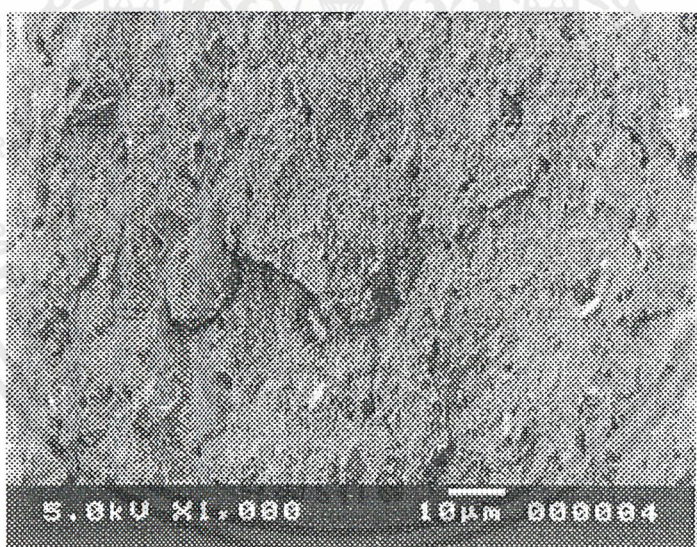


รูปที่ 4.14 HDPE ที่มี CaCO_3 ปริมาณ 20%wt กำลังขยาย 1000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

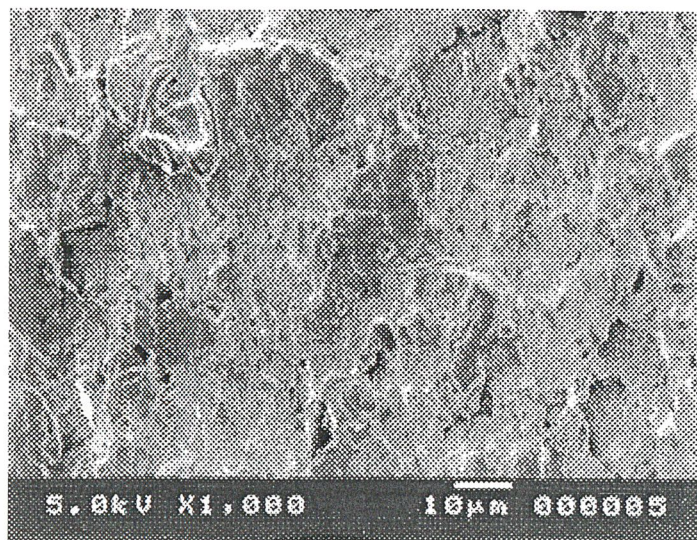


รูปที่ 4.15 HDPE ที่มี CaCO_3 ปริมาณ 20%wt (ผสม 1.0%wt SA) กำลังขยาย 1000 เท่า

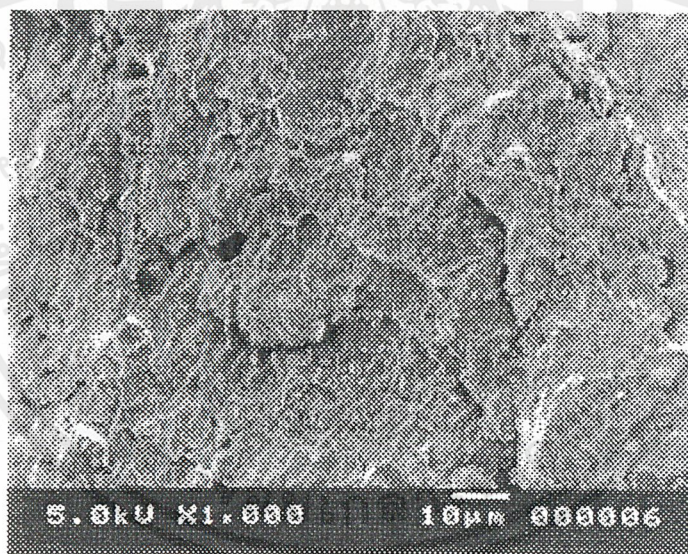


รูปที่ 4.16 HDPE ที่มี CaCO_3 ปริมาณ 20%wt (ผสม 0.1%wt HDPE-g-MA) กำลังขยาย 1000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

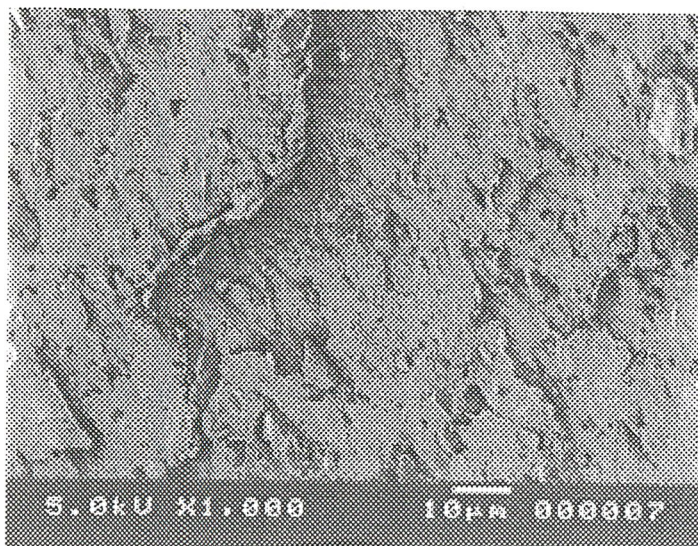


รูปที่ 4.17 HDPE ที่มี CaCO_3 ปริมาณ 20%wt (ผสม 0.5%wt HDPE-g-MA) กำลังขยาย 1000 เท่า

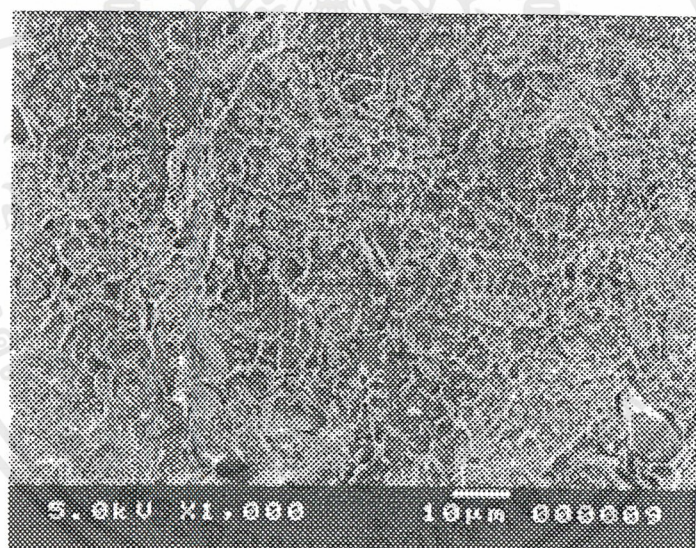


รูปที่ 4.18 HDPE ที่มี CaCO_3 ปริมาณ 20%wt (ผสม 2.0%wt HDPE-g-MA) กำลังขยาย 1000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

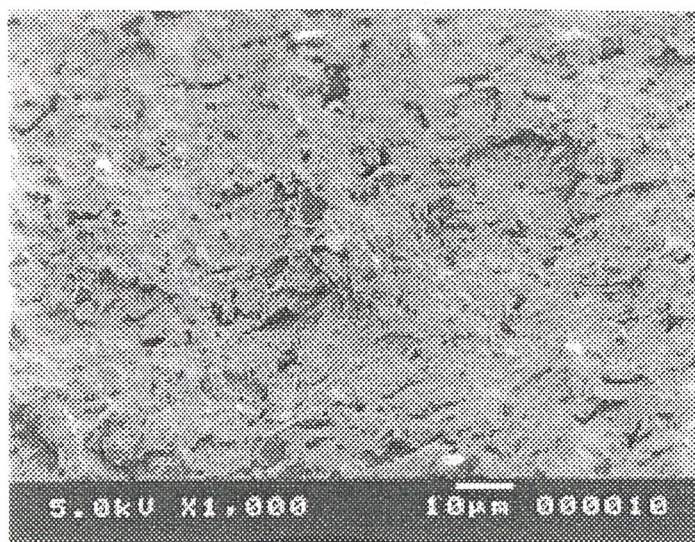


รูปที่ 4.19 HDPE ที่มี CaCO_3 ปริมาณ 20%wt (ผสม 0.1%wt HDPE-g-AA) กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 4.20 HDPE ที่มี CaCO_3 ปริมาณ 20%wt (ผสม 0.5%wt HDPE-g-AA) กำลังขยาย 1000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 HDPE ที่มี CaCO_3 ปริมาณ 20%wt (ผสม 2.0%wt HDPE-g-AA) กำลังขยาย 1000 เท่า

จากรูปที่ 4.13 – 4.15 พบว่าเมื่อผสม CaCO_3 ที่ไม่มี SA ลงใน HDPE CaCO_3 จะมีแนวโน้มการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน เนื่องจาก CaCO_3 เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีขั้ว แต่ HDPE เป็นสารประกอบอินทรีย์ ทำให้ CaCO_3 เกิดการกระจายตัวใน HDPE ได้ค่อนข้างยากเนื่องจากมีแรงดึงดูดระหว่างอนุภาค แต่เมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวของ CaCO_3 ด้วย SA ทำให้การกระจายตัวของ CaCO_3 ดีขึ้น การเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาค CaCO_3 ลดลง เนื่องจาก SA ช่วยลดความเป็นขั้วของ CaCO_3 โดยหมู่ฟังก์ชันของกรดจะเกิดอันตรปฏิกิริยากับพื้นผิวของ CaCO_3 ทำให้ CaCO_3 เข้ากับ HDPE ได้ดีขึ้น

จากรูปที่ 4.16 – 4.21 พบว่าเมื่อทำการผสมสารช่วยผสมทั้ง HDPE-g-MA และ HDPE-g-AA การเกาะกันเป็นก้อนของ CaCO_3 ลดลงมีการกระจายตัวดีขึ้นเมื่อเทียบกับ CaCO_3 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงพื้นผิว แต่เมื่อปริมาณสารช่วยผสมเพิ่มขึ้นก็ไม่เห็นความแตกต่างมากนัก

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

เมื่อทำการเติม CaCO_3 พบว่าค่ามอดุลัส และค่าความแข็งเพิ่มขึ้น เนื่องจาก CaCO_3 มีค่ามอดุลัสและค่าความแข็งที่มากกว่า HDPE โดย SA และสารช่วยผสมมีผลต่อค่าความแข็งและค่ามอดุลัสน้อยมาก แต่การเติม CaCO_3 ส่งผลให้ค่าความเหนียวเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคของ CaCO_3 ขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ ค่าความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ค่าความแข็งแรงกระแทก มีค่าลดลง เนื่องจาก CaCO_3 มีแนวโน้มที่จะเกิดการรวมกันเป็นก้อนและแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง CaCO_3 และ HDPE ไม่ใช่แรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงนัก และจากการทดสอบสมบัติทางความร้อนพบว่า CaCO_3 ไม่ได้เป็นสารก่อผลึก เนื่องจากเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของสารตัวอย่างไม่ว่ามีหรือไม่มี CaCO_3 จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่ใกล้เคียงกัน

การเติม CaCO_3 ที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก (SA) จะให้ค่าความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด และค่ามอดุลัสที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับการผสม CaCO_3 ที่ไม่ทำการปรับปรุงพื้นผิว เนื่องจากกรดสเตียริกช่วยลดความเป็นขรุขระของ CaCO_3 ลง ทำให้สามารถเกิดการกระจายตัวใน HDPE ได้มากขึ้นจึงสามารถรับแรงกระทำจากภายนอกได้มากขึ้น การเติมสารช่วยผสมทั้งสองชนิดจะให้แนวโน้มผลการทดลองที่เหมือนกันคือ เมื่อปริมาณสารช่วยผสมเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากในสารช่วยผสมจะมีส่วนที่เป็น HDPE อยู่ซึ่งอาจจะยาวพอที่จะทำให้เกิดการเกี่ยวพันกันของสายโซ่เพิ่มขึ้น ทำให้สายโซ่มีความแข็งแรงมากขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลงเนื่องจากสายโซ่เกี่ยวพันกันมากทำให้เวลารับแรงดึงจึงเกิดการคลายตัวของสายโซ่มากขึ้น จากการที่สายโซ่อาจเกิดการเกี่ยวพันกันมากเกินไป เมื่อรับแรงที่ทันใดสายโซ่จะคลายตัวไม่ทันทำให้เกิดการเสียสภาพง่าย ค่าความแข็งแรงกระแทกจึงลดลง สูตรที่ผสม HDPE-g-AA จะให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดที่มากกว่าสูตรที่ผสม HDPE-g-MA เนื่องจาก HDPE-g-AA มีเปอร์เซ็นต์ของ AA เท่ากับ 6% แต่ HDPE-g-MA มีเปอร์เซ็นต์ของ MA เท่ากับ 1% ส่งผลให้สูตรที่ผสม HDPE-g-AA มีการยึดเหนี่ยวกันระหว่าง HDPE และ CaCO_3 ดีกว่าเพราะมี HDPE-g-AA มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าการใช้สารช่วยผสมส่งผลให้สมบัติเชิงกลดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้ CaCO_3 ที่ไม่ได้ปรับปรุงเลย แต่ถ้าเปรียบเทียบกับกรณีทำการปรับปรุงพื้นผิว CaCO_3 ด้วยกรดสเตียริก พบว่า CaCO_3 ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย SA ให้ค่าความแข็งแรงดึงและการดึงยืด ณ จุดขาดที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่ใช้สารช่วยผสม ส่วนสมบัติอื่นๆ มีค่าใกล้เคียงกัน

ปริมาณสารช่วยผสมทั้ง HDPE-g-MA และ HDPE-g-AA ที่เหมาะสมคือ 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสารตัวเติม เนื่องจากให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด และค่ามอดุลัสที่มากกว่า ส่วนสมบัติอื่นๆ ก็ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับปริมาณสารช่วยผสมอื่นๆ และที่เลือกปริมาณนี้เพราะคำนึงถึงต้นทุนในการผลิต

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เปลี่ยนสารตัวเติมเป็นชนิดอื่น หรือเปลี่ยนขนาดอื่นเพราะขนาดของ CaCO_3 ที่ใช้อยู่ไม่ได้ช่วยเสริมแรง
2. อาจทำการใช้สารปรับปรุงพื้นผิวหลายชนิดพร้อมกัน หรืออาจใช้ร่วมกับสารช่วยผสม หรือสารคู่ควบเพื่อให้สมบัติต่างๆ ดีขึ้น
3. ปัญหาการติดของสารตัวเติมบนสกรูของเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่อาจแก้ได้โดยใช้ Strave Feeding System



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. ผศ.ดร. มาลินี ชัยศุภกิจสินธ์, "เคมีพอลิเมอร์", โครงการตำรา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง (2541)
2. J. Suwanprateeb, *J. Appl. Polym. Sci.*, 1999, 75, 1503-1513
3. D. Feldman and A. Barbalata *Synthetic Polymers : Technology, properties, application*, Chapman & Hall, London, 1996
4. W.V. Titow *PVC Plastics Properties, Processing, and Applications*, Elsevier Applied Science, London, 1990
5. E. Jesses *Plastic Additive and Modifiers Handbook 1*, 1996 : 503-512
6. R. Gachter and H. Muller *Plastics Additives*, Hanser Publishers, Munich, 1990
7. A. V. Shenoy *Rheology of Filled Polymer Systems*, Kluwer Academic Publishers, London, 1999
8. เอกสารบริษัท SUN MINERALS SDN. BHD.
9. S. Nago, S. Nakamura, and Y. Mizutani, *J. Appl. Polym. Sci.*, 1992, 45, 1527-1535
10. S. N. Maiti and P. K. Mahapatro, *J. Appl. Polym. Sci.*, 1991, 42, 3101-3110
11. J. Suwanprateeb, S. Tiemprateeb, S. Kangwantrokool and K. Hemachandra, *J. Appl. Polym. Sci.*, 1998, 70, 1717-1724
12. K. Liao, X. Chen, and C. Zheng, *J. Appl. Polym. Sci.*, 1995, 57, 1245-1250
13. Y. Wang and J. Wang, *Polym. Eng. Sci.*, 1999, 39, 190-197
14. Q. Fu, G. Wang, and J. Shen, *J. Appl. Polym. Sci.*, 1993, 49, 673-677
15. Q. Fu and G. Wang, *J. Appl. Polym. Sci.*, 1993, 49, 1985-1988
16. S. Guo, X. Chen, J. Wu, and G. Chen, *Polym.-Plast. Technol. Eng.*, 2000, 39(2), 305-315
17. J. Lei and R. Zhou, *Polym. Eng. Sci.*, 2000, 40(7), 1529-1533
18. H. Huang, *J. Appl. Polym. Sci.*, 1999, 74, 1459-1464
19. S. Jumba, "Elongational Rheometry and processing of filled polyethylene melts", Ph.D. Thesis, Loughborough University, UK, 1998
20. นางสาวดาริน วงศ์วัตนะเศรษฐ์ และนายพิทยา เหลืองวนิชประชา "ผลของการเคลือบผิวสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีผลต่อสมบัติการไหล และสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นสูง", โครงการพิเศษ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542

21. J. I. Kim, S. H. Ryu, and Y. W. Chang, *J. Appl. Polym. Sci.*, 2000, **77**, 2595-2602
22. เอกสารบริษัท TOA UNI CHEMICAL MANUFACTURING , LTD จำกัด
23. S. N. Sathe, G. S. Srinivasa Rao, and S. Devi, *J. Appl. Polym. Sci.*, 1994, **53**, 239-245
24. I. K. Mehta, B. N. Misra, and G. S. Chauhan, *J. Appl. Polym. Sci.*, 1994, **54**, 1171-1178
25. S. H. P. Bettini and J. A. M. Agnelli, *J. Appl. Polym. Sci.*, 1999, **74**, 247-255
26. Y. Wang, D. Ji, C. Yang, H. Zhang, C. Qin, and B. Huang, *J. Appl. Polym. Sci.*, 1994, **52**, 1411-1417
27. C. Lin and W. Lee, *J. Appl. Polym. Sci.*, 1998, **70**, 383-387
28. P. Matzinos, D. Bikiaris, S. Kokkou, and C. Panayiotou, *J. Appl. Polym. Sci.*, 2001, **79**, 2548-2557
29. D. Bikiaris, and C. Panayiotou, *J. Appl. Polym. Sci.*, 1998, **70**, 1503-1521
30. J. M. Lusinchi, B. Boutevin, N. Torres, and J. J. Robin, *J. Appl. Polym. Sci.*, 2001, **79**, 874-880
31. นายปรมินทร์ ช้างเพชร และนายประภฤษฎี แสงทองอินทชัย "การปรับปรุงสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติม", โครงการพิเศษ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543
32. H. L. Huang, Z. H. Yao, J. H. Yang, Y. Wang, D. A. Shi, and J. H. Yin, *J. Appl. Polym. Sci.*, 2001, **80**, 2538-2544
33. K. Kaji, Y. Abe, M. Murai, N. Nishioka, and K. Kosai, *J. Appl. Polym. Sci.*, 1993, **47**, 1427-1438
34. K. Olafsen, A. Stori, and D. A. Tellefsen, *J. Appl. Polym. Sci.*, 1992, **46**, 1673-1676
35. C. Rauwendaal *Polymer Extrusion*, Carl Hanser Verlag, Munich, 1986
36. DH. Morton-Jones *Polymer Processing*, Chapman and Hall Ltd, 1989
37. F. Martelli, Ph.D. *Twin-screw Extruder : A Basic Understanding*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1983
38. ผศ.ดร. นิพนธ์ วงศ์วิเศษศิริกุล *ปฏิบัติการเคมีอุตสาหกรรม*, โครงการตำรา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
39. เอกสารบริษัท ไทยพอลิเอทิลีน จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

40. เอกสารบริษัท สุรินทร์ออย่า เคมีคัล จำกัด
- 41 *Annual Book of ASTM Standard*, Vol 8.03 (1992) : 201-210
- 42 *Annual Book of ASTM Standard*, Vol 8.01 (1988) : 155-166
- 43 *Annual Book of ASTM Standard*, Vol 8.03 (1988) : 52-73
- 44 *Annual Book of ASTM Standard*, Vol 8.03 (1988) : 200-206
- 45 *Annual Book of ASTM Standard*, Vol 8.03 (1988) : 90-93
- 46 "British Standard, BS2782", Operations Instructions, Davenport England



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบสมบัติต่างๆของสารตัวอย่าง

1.1 ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength)

สารตัวอย่าง	ค่าความแข็งแรงดึง (MPa)						
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
HD	24.5	24.9	25.4	24.7	24.0	24.7	0.53
HDCA20SA	24.5	24.2	24.0	23.5	23.5	24.0	0.43
HDCA20	22.4	22.6	22.3	22.5	22.9	22.5	0.22
HDCA20MA01	23.2	22.8	23.0	22.3	22.2	22.7	0.43
HDCA20MA025	22.6	23.3	22.7	22.2	23.2	22.8	0.45
HDCA20MA05	23.7	23.6	22.0	23.8	22.3	23.1	0.85
HDCA20MA1	23.8	22.8	22.6	23.4	23.2	23.2	0.50
HDCA20MA2	23.6	23.4	23.2	23.5	24.0	23.5	0.28
HDCA20AA01	23.3	22.4	22.8	23.3	23.5	23.1	0.45
HDCA20AA025	23.1	23.2	23.2	23.2	23.1	23.2	0.06
HDCA20AA05	23.4	22.9	23.2	22.9	23.5	23.2	0.27
HDCA20AA1	23.1	23.3	23.1	23.0	23.7	23.2	0.27
HDCA20AA2	22.9	23.7	23.8	23.6	23.9	23.6	0.41

1.2 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break)

สารตัวอย่าง	ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด						
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
HD	191	155	191	163	158	171	18.0
HDCA20SA	79	44	70	89	80	72	17.5
HDCA20	37	46	35	35	43	39	5.2
HDCA20MA01	20	38	41	35	102	47	31.7
HDCA20MA025	44	53	53	48	41	48	5.3
HDCA20MA05	44	57	39	50	38	46	7.7
HDCA20MA1	45	43	47	50	39	45	4.2
HDCA20MA2	38	45	53	49	43	46	5.8
HDCA20AA01	48	64	79	42	47	56	15.1
HDCA20AA025	50	60	52	44	58	53	6.6
HDCA20AA05	52	39	50	51	61	51	7.8
HDCA20AA1	49	46	56	54	45	50	4.5
HDCA20AA2	40	41	41	46	47	43	3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำออกไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ค่ามอดุลัส

สารตัวอย่าง	ค่ามอดุลัส (MPa)						
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
HD	910	1059	1054	1004	910	987	74.0
HDCA20SA	1150	1032	1221	1150	1310	1173	102.5
HDCA20	1057	951	1089	1052	1334	1097	142.5
HDCA20MA01	945	1054	1001	1036	1384	1084	172.9
HDCA20MA025	1358	1210	1273	1206	1364	1282	76.7
HDCA20MA05	1334	1302	904	1294	1392	1245	194.6
HDCA20MA1	780	1232	1288	1094	1282	1135	213.4
HDCA20MA2	1400	1187	1145	1190	1163	1217	103.9
HDCA20AA01	1296	1178	1365	1256	1097	1238	104.0
HDCA20AA025	906	1101	1332	1522	1345	1241	239.7
HDCA20AA05	1290	1310	1399	1052	1358	1282	135.3
HDCA20AA1	1056	1192	1302	1208	1230	1197	89.6
HDCA20AA2	1212	1089	1100	1166	916	1097	112.7

1.4 ค่าความแข็งแรงต่อแรงกระแทก (Impact strength)

สารตัวอย่าง	ค่าความแข็งแรงต่อแรงกระแทก (kJ/m ²)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
HD	6.89	6.52	6.54	6.58	6.72	6.75	6.59	6.88	6.68	0.155
HDCA20SA	5.25	5.06	4.89	4.87	4.85	4.57	5.23	5.20	4.99	0.171
HDCA20	4.86	4.81	4.84	4.65	4.68	4.85	4.60	4.65	4.74	0.096
HDCA20MA01	7.31	7.33	7.09	7.12	7.22	7.08	7.12	7.31	7.20	0.108
HDCA20MA025	5.09	5.10	5.09	5.12	5.31	5.12	5.08	5.06	5.12	0.095
HDCA20MA05	5.08	5.09	5.12	4.85	4.71	4.68	4.70	5.04	4.91	0.181
HDCA20MA1	4.74	4.74	4.70	4.85	4.69	4.84	4.65	4.70	4.74	0.063
HDCA20MA2	4.52	4.52	4.51	4.73	4.75	4.60	4.58	4.58	4.60	0.123
HDCA20AA01	5.38	5.11	5.13	5.08	5.08	5.12	5.13	5.12	5.14	0.127
HDCA20AA025	5.27	5.27	5.10	4.88	4.84	5.08	5.07	5.07	5.07	0.206
HDCA20AA05	5.04	5.05	5.06	5.23	4.93	5.07	4.95	5.12	5.06	0.108
HDCA20AA1	4.71	4.95	5.08	5.11	5.13	5.09	4.85	5.06	5.00	0.175
HDCA20AA2	4.70	4.69	4.69	4.81	4.65	4.70	4.73	4.69	4.71	0.060

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ค่าความแข็ง (Hardness)

สารตัวอย่าง	ค่าความแข็ง (Shore D)						
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
HD	56.0	58.5	57.0	57.5	58.0	57.4	0.96
HDCA20SA	59.0	60.0	60.0	59.5	60.5	59.8	0.57
HDCA20	60.0	61.0	59.0	59.5	59.5	59.8	0.76
HDCA20MA01	60.0	60.0	61.0	59.5	60.5	60.2	0.57
HDCA20MA025	60.5	59.0	59.5	59.5	60.0	59.7	0.57
HDCA20MA05	59.0	60.5	60.0	60.0	60.0	59.9	0.55
HDCA20MA1	61.0	60.7	60.0	60.0	60.0	60.3	0.48
HDCA20MA2	61.0	60.0	60.5	59.3	60.5	60.3	0.64
HDCA20AA01	60.5	60.5	61.0	61.5	62.0	61.1	0.65
HDCA20AA025	60.5	60.0	61.0	61.5	60.5	60.7	0.57
HDCA20AA05	61.0	61.0	61.0	60.5	60.5	60.8	0.27
HDCA20AA1	61.0	61.0	60.0	60.5	60.5	60.6	0.42
HDCA20AA2	60.0	60.0	60.5	60.5	60.5	60.3	0.27

ภาคผนวก ข. การวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการไหลลูเข้า

2.1 การคำนวณโดยใช้เทคนิคการไหลลูเข้า

2.1.1 การคำนวณค่า Shear stress

$$\tau = \frac{(P_L - P_0)R}{2L}$$

เมื่อ P_L = ความดันที่ตกลง ของหัวดายยาวเท่ากับ L

P_0 = ความดันที่ตกลง ของหัวดายยาวเท่ากับศูนย์

R = รัศมีของหัวดาย

L = ความยาวของหัวดาย

2.1.2 การคำนวณค่า Shear strain rate

$$\gamma = \frac{4Q}{\pi R^3}$$

เมื่อ Q = อัตราการไหลเชิงปริมาตร (Volumetric flow rate)

R = รัศมีของหัวดาย

2.1.3 การคำนวณค่า Shear viscosity

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma}$$

เมื่อ τ = ความเค้นเฉือน (Shear stress)

γ = อัตราความเครียดเฉือน (Shear strain rate)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 การคำนวณค่า Power law index

$$\tau = K\gamma^n$$

$$\log\tau = \log K + n\log\gamma$$

เมื่อ n = Power law index

2.1.5 การคำนวณค่า Elongational stress

$$\sigma_E = \frac{3(n+1)}{8} P_o$$

2.1.6 การคำนวณค่า Elongational viscosity

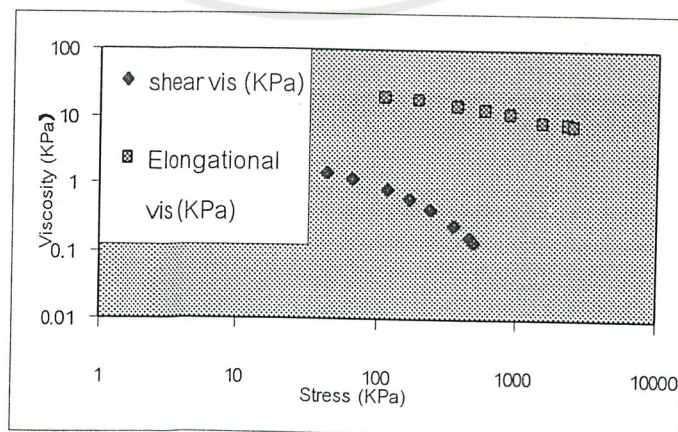
$$\lambda = \frac{9}{32} \frac{(n+1)^2}{\eta} (P_o)^2 (\dot{\gamma})^2$$

เมื่อ η = Shear viscosity

2.2 ผลการทดสอบสมบัติการไหลของสารตัวอย่างโดยใช้เทคนิคการไหลลู่ว้ำ

2.2.1 HD

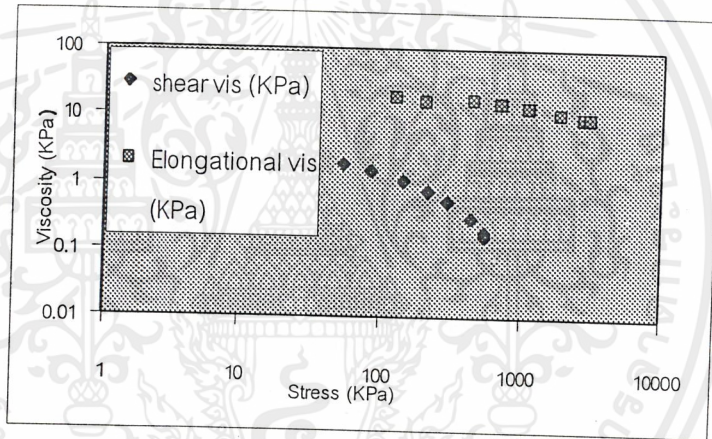
Shear rate (1/s)	P_o (KPa)	P_L (KPa)	Shear Visc (KPa.s)	n	Elongational stress (KPa)	Elongational visc (KPa.s)
30	199	3030	1.42	0.499	111.88	1.961687E+01
60	341	4630	1.12	0.499	191.71	1.828279E+01
150	647	8260	0.79	0.499	363.74	1.483641E+01
300	1025	12030	0.57	0.499	576.26	1.287392E+01
600	1566	16980	0.40	0.499	880.41	1.072792E+01
1500	2721	25740	0.24	0.499	1529.75	8.674352E+00
3000	4089	33660	0.15	0.499	2298.84	7.625752E+00
3600	4515	35740	0.14	0.499	2538.33	7.338088E+00



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 HDCA20SA

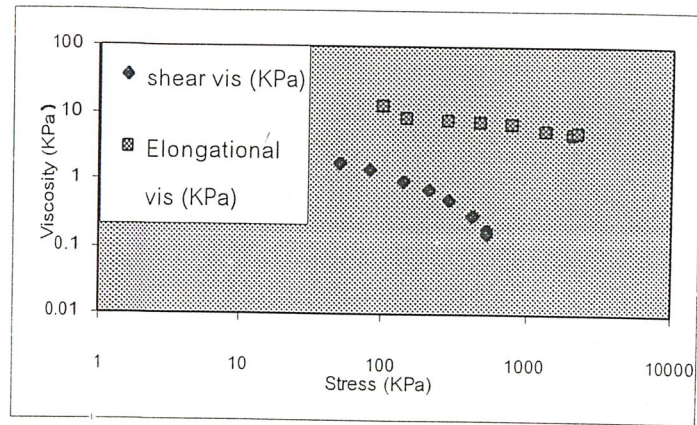
Shear rate (1/s)	P_o (KPa)	P_L (KPa)	Shear Visc (KPa.s)	n	Elongational stress (KPa)	Elongational visc (KPa.s)
30	227	3720	1.82	0.486	126.50	1.953853E+01
60	370	5880	1.44	0.486	206.18	1.644777E+01
150	804	10520	1.01	0.486	448.03	1.762587E+01
300	1270	15240	0.73	0.486	707.71	1.529476E+01
600	1964	21350	0.50	0.486	1094.44	1.318230E+01
1500	3363	31660	0.29	0.486	1874.03	1.058946E+01
3000	4980	40590	0.19	0.486	2775.11	9.230742E+00
3600	5505	41990	0.16	0.486	3067.66	9.174003E+00



2.2.3 HDCA20

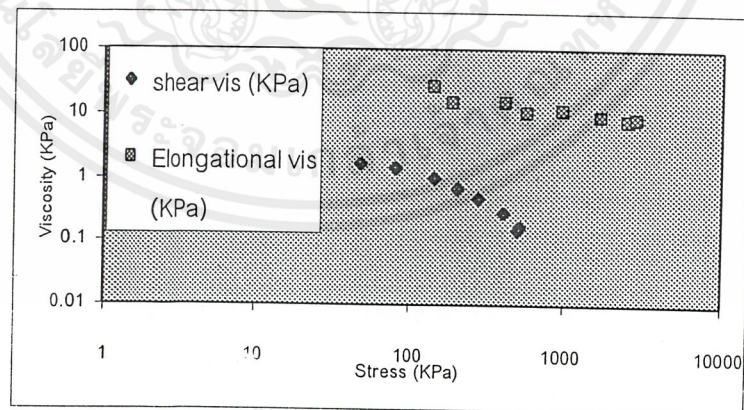
Shear rate (1/s)	P_o (KPa)	P_L (KPa)	Shear Visc (KPa.s)	n	Elongational stress (KPa)	Elongational visc (KPa.s)
30	179	3450	1.71	0.493	100.18	1.307009E+01
60	261	5550	1.38	0.493	146.08	8.603636E+00
150	512	9550	0.94	0.493	286.56	7.753618E+00
300	858	14500	0.71	0.493	480.21	7.214587E+00
600	1387	20050	0.49	0.493	776.29	6.887253E+00
1500	2379	29810	0.29	0.493	1331.50	5.515912E+00
3000	3598	38300	0.18	0.493	2013.76	4.987040E+00
3000	3598	38300	0.18	0.493	2013.76	4.987040E+00
3600	3981	38810	0.15	0.493	2228.12	5.066975E+00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2.2.4 HDCA20MA01

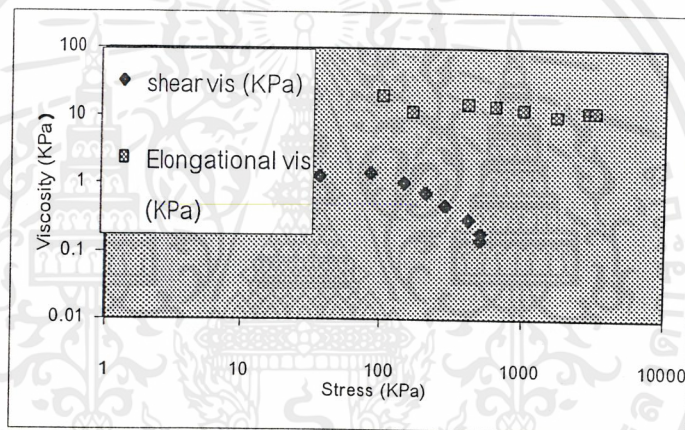
Shear rate (1/s)	P_o (KPa)	P_L (KPa)	Shear Visc (KPa.s)	n	Elongational stress (KPa)	Elongational visc (KPa.s)
30	251	3330	1.60	0.489	140.11	2.724973E+01
60	341	5590	1.37	0.489	190.35	1.471314E+01
150	737	10010	0.97	0.489	411.41	1.556840E+01
300	1040	14310	0.69	0.489	580.55	1.083757E+01
600	1754	20140	0.48	0.489	979.13	1.112142E+01
1500	3068	29740	0.28	0.489	1712.63	9.385221E+00
3000	4537	38070	0.17	0.489	2532.67	8.159259E+00
3600	5042	38060	0.14	0.489	2814.57	8.531061E+00



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5 HDCA20MA025

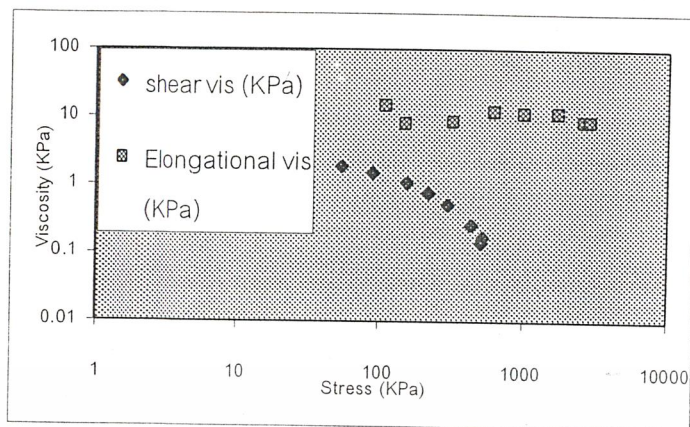
Shear rate (1/s)	P_o (KPa)	P_L (KPa)	Shear Visc (KPa.s)	n	Elongational stress (KPa)	Elongational visc (KPa.s)
30	180	2540	1.23	0.516	102.32	1.889515E+01
60	299	5800	1.43	0.516	169.96	1.120580E+01
150	720	10240	0.99	0.516	409.27	1.501489E+01
300	1154	14640	0.70	0.516	655.96	1.360935E+01
600	1797	20420	0.49	0.516	1021.46	1.195166E+01
1500	3112	30560	0.29	0.516	1768.94	9.728790E+00
3000	5170	38530	0.17	0.516	2938.76	1.104244E+01
3600	5669	38730	0.14	0.516	3222.40	1.116689E+01



2.2.6 HDCA20MA05

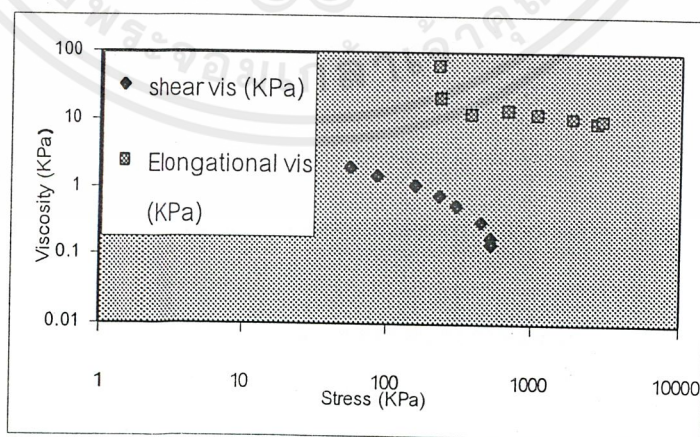
Shear rate (1/s)	P_o (KPa)	P_L (KPa)	Shear Visc (KPa.s)	n	Elongational stress (KPa)	Elongational visc (KPa.s)
30	199	3680	1.81	0.467	109.48	1.470974E+01
60	271	6060	1.51	0.467	149.09	8.194733E+00
150	588	10670	1.05	0.467	323.50	8.853304E+00
300	1164	15550	0.75	0.467	640.39	1.216403E+01
600	1826	21250	0.51	0.467	1004.60	1.108272E+01
1500	3211	31490	0.25	0.467	1766.57	1.111387E+01
3000	4786	38820	0.18	0.467	2633.08	8.694630E+00
3600	5281	38540	0.14	0.467	2905.41	9.027614E+00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2.2.7 HDCA20MA1

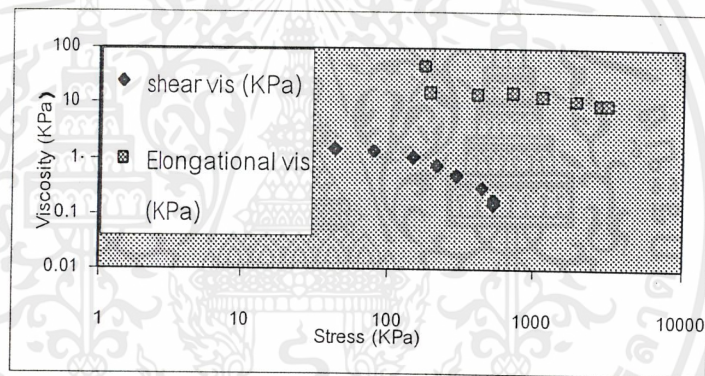
Shear rate (1/s)	P_o (KPa)	P_L (KPa)	Shear Visc (KPa.s)	n	Elongational stress (KPa)	Elongational visc (KPa.s)
30	410	4020	1.88	0.472	226.24	6.049384E+01
60	418	5870	1.42	0.472	230.66	2.080906E+01
150	679	10080	1.05	0.472	374.68	1.183266E+01
300	1240	15800	0.76	0.472	684.25	1.372240E+01
600	1949	21720	0.51	0.472	1075.48	1.247991E+01
1500	3385	32300	0.30	0.472	1867.89	1.029658E+01
3000	4967	39230	0.18	0.472	2740.85	9.357590E+00
3600	5463	39330	0.15	0.472	3014.55	9.540104E+00



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.8 HDCA20MA2

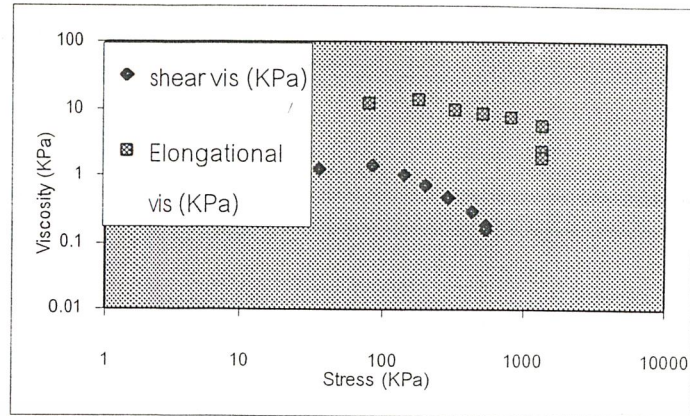
Shear rate (1/s)	P_o (KPa)	P_L (KPa)	Shear Visc (KPa.s)	n	Elongational stress (KPa)	Elongational visc (KPa.s)
30	310	3120	1.46	0.507	175.18	4.668222E+01
60	340	5510	1.35	0.507	192.13	1.522471E+01
150	728	10520	1.02	0.507	411.38	1.474539E+01
300	1270	15230	0.73	0.507	717.66	1.574100E+01
600	1960	21170	0.50	0.507	1107.57	1.362471E+01
1500	3327	31410	0.29	0.507	1880.05	1.073767E+01
3000	4908	39470	0.18	0.507	2773.45	9.496323E+00
3600	5411	39410	0.15	0.507	3057.69	9.775188E+00



2.2.9 HDCA20AA01

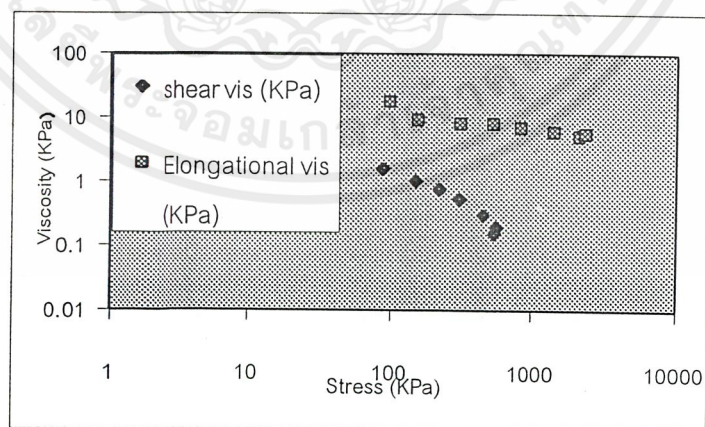
Shear rate (1/s)	P_o (KPa)	P_L (KPa)	Shear Visc (KPa.s)	n	Elongational stress (KPa)	Elongational visc (KPa.s)
30	140	2450	1.20	0.529	80.29	1.192152E+01
60	322	5850	1.44	0.529	184.66	1.316974E+01
150	561	9940	0.98	0.529	321.73	9.415376E+00
300	901	14140	0.69	0.529	516.71	8.606245E+00
600	1390	20000	0.48	0.529	797.15	7.284867E+00
1500	2385	30080	0.29	0.529	1367.77	5.764031E+00
3000	2385	38650	0.18	0.529	1367.77	2.275483E+00
3600	2385	38800	0.15	0.529	1367.77	1.909404E+00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2.2.10 HDCA20AA025

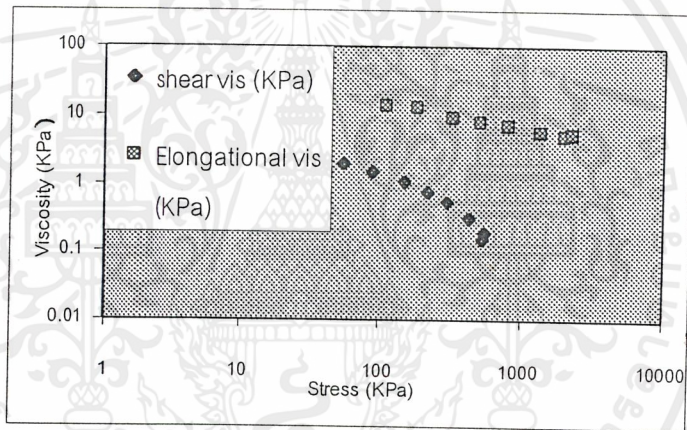
Shear rate (1/s)	P_o (KPa)	P_L (KPa)	Shear Visc (KPa.s)	n	Elongational stress (KPa)	Elongational visc (KPa.s)
30	170	2410	1.17	0.530	97.56	1.814010E+01
60	279	6090	1.51	0.530	160.11	9.410800E+00
150	529	10460	1.03	0.530	303.57	7.921583E+00
300	912	15090	0.74	0.530	523.36	8.243301E+00
600	1412	21020	0.51	0.530	810.29	7.143841E+00
1500	2461	31250	0.30	0.530	1412.28	5.913638E+00
3000	3681	39450	0.19	0.530	2112.39	5.322577E+00
3600	4076	39060	0.15	0.530	2339.06	5.562080E+00



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.11 HDCA20AA05

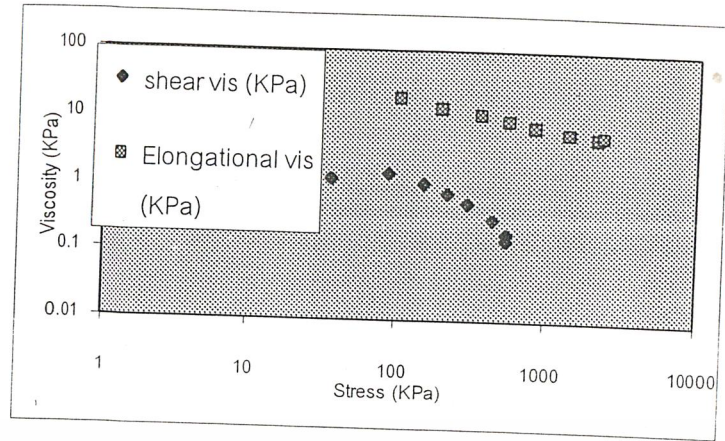
Shear rate (1/s)	P_o (KPa)	P_L (KPa)	Shear Visc (KPa.s)	n	Elongational stress (KPa)	Elongational visc (KPa.s)
30	198	3790	1.87	0.476	109.58	1.425833E+01
60	331	6070	1.49	0.476	183.18	1.248317E+01
150	591	10360	1.02	0.476	327.07	9.349241E+00
300	933	15220	0.74	0.476	516.35	7.964413E+00
600	1443	21230	0.52	0.476	798.59	6.877045E+00
1500	2453	30980	0.30	0.476	1357.55	5.512027E+00
3000	3656	39560	0.19	0.476	2023.32	4.864921E+00
3600	4079	38930	0.15	0.476	2257.42	5.197698E+00



2.2.12 HDCA20AA1

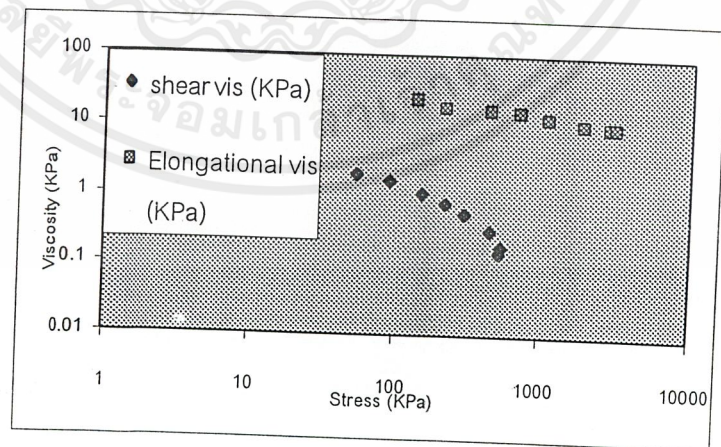
Shear rate (1/s)	P_o (KPa)	P_L (KPa)	Shear Visc (KPa.s)	n	Elongational stress (KPa)	Elongational visc (KPa.s)
30	180	2470	1.19	0.531	103.32	1.988709E+01
60	339	5990	1.47	0.531	194.59	1.428224E+01
150	627	10490	1.03	0.531	359.91	1.120909E+01
300	959	15110	0.74	0.531	550.48	9.134443E+00
600	1458	20930	0.51	0.531	836.91	7.671954E+00
1500	2458	30900	0.30	0.531	1410.92	5.978087E+00
3000	3719	39650	0.19	0.531	2134.75	5.412635E+00
3600	4115	39440	0.15	0.531	2362.06	5.616493E+00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2.2.13 HDCA20AA2

Shear rate (1/s)	P_o (KPa)	P_L (KPa)	Shear Visc (KPa.s)	n	Elongational stress (KPa)	Elongational visc (KPa.s)
30	250	3760	1.83	0.473	138.09	2.321166E+01
60	401	6240	1.52	0.473	221.50	1.793603E+01
150	802	10910	1.05	0.473	443.00	1.656512E+01
300	1298	15680	0.75	0.473	716.98	1.524780E+01
600	2000	21900	0.52	0.473	1104.75	1.308200E+01
1500	3426	32560	0.30	0.473	1892.44	1.048894E+01
3000	5089	40160	0.18	0.473	2811.04	9.611294E+00
3600	5649	39880	0.15	0.473	3120.37	1.011154E+01



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้