

การปรับปรุงสมบัติพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผสม  
แคลเซียมคาร์บอเนตเพื่องานฉีดยานฉีดขึ้นรูป



นายโชคชัย ผลแก้ว  
นายธนพร สุขพิงธรรม

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 49290  
วัน, เดือน, ปี 18 ก.พ. 2547

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

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในห้องสมุดเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Property Modification of  $\text{CaCO}_3$  – Filled HDPE  
for Injection Molding Application



A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the

Degree of Bachelor of Science

Department of Chemistry

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การปรับปรุงสมบัติพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผสมแคลเซียม  
คาร์บอเนตเพื่อใช้ในงานฉีดขึ้นรูป

นักศึกษา นายโชคชัย ผลแก้ว รหัส 42050074  
นายชนพร สุขพึงธรรม รหัส 42050080

ภาควิชา เคมี  
สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม  
ปีการศึกษา 2545  
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สุภารัตน์ รัชชลธิ์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ ผศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจันทร์	
กรรมการ ดร.ชลลดา ถูตวิรุฬห์	
กรรมการ ดร.สุภารัตน์ รัชชลธิ์	



(รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วรรณมงคลชัย)

หัวหน้าภาควิชาเคมี

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การปรับปรุงสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตเพื่อใช้ในงานฉีดขึ้นรูป		
นักศึกษา	นายโชคชัย ผลแก้ว	รหัสด	42050074
	นายธนพร สุขพิงธรรม	รหัสด	42050080
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ์		
ภาควิชา	เคมี		
ปีการศึกษา	2545		

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของการเติมสารกลุ่มซิลิโคน ( $\gamma$ -aminopropyltriethoxysilane) ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการไหลของของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่มีแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) เป็นสารตัวเติม (ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ทำการศึกษาเปรียบเทียบกับสูตรที่มีการปรับปรุงด้วยสารช่วยกระจายตัวกรดสเตียริก (SA ปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) หรือสารช่วยผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (HDPE-g-MA ปริมาณ 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) โดยปริมาณสารกลุ่มซิลิโคนที่ใช้คือ 1 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ  $\text{CaCO}_3$  โดยใช้เครื่องผสมชนิดความเร็วสูงก่อนทำการผสมส่วนผสมต่างๆ ด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวทวนก่อนนำไปกดด้วยเครื่องกดพลาสติก ศึกษาสมบัติการไหลด้วยคาปีลารีรีโอมิเตอร์ และเตรียมชิ้นงานตัวอย่างจากเครื่องฉีดขึ้นรูป เพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าการเติม  $\text{CaCO}_3$  ทำให้ค่าความหนืด โมดูลัส และความแข็งเพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงกระแทกของสารตัวอย่างลดลง ค่าความหนืดของ HDPE/ $\text{CaCO}_3$  ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการใช้สารเติมแต่งชนิดอื่นๆ เพิ่มเข้าไป เมื่อมีการใช้กรดสเตียริก HDPE-g-MA หรือสารกลุ่มซิลิโคน ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่าโมดูลัสสูงของ HDPE/ $\text{CaCO}_3$  เพิ่มขึ้น การเพิ่มปริมาณสารกลุ่มซิลิโคนจนถึง 5 เปอร์เซ็นต์ ไม่ส่งผลให้สมบัติเชิงกลที่ศึกษาเปลี่ยนแปลง การใช้ HDPE-g-MA คู่กับสารกลุ่มซิลิโคน 1 เปอร์เซ็นต์ ให้สมบัติเชิงกลของ HDPE/ $\text{CaCO}_3$  (80/20) ที่ดีกว่าการใช้สารเติมแต่งเพียงชนิดใดชนิดหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Special Project Title</b>	Property Modification of CaCO <sub>3</sub> -filled HDPE for Injection Molding Application
<b>Name</b>	Mr. Chokchai Polkaew Mr. Thanaporn Sookpuengtham
<b>Special Project Advisor</b>	Dr. Suparat Rukchonlatee
<b>Department</b>	Chemistry
<b>Academic Year</b>	2002

### Abstract

This research studied effects of silane coupling agent ( $\gamma$ -aminopropyltriethoxysilane) on mechanical and rheological properties of CaCO<sub>3</sub>-filled HDPE. CaCO<sub>3</sub> content was fixed at 20% by weight. The comparative study was carried out with CaCO<sub>3</sub>-filled HDPE modified by a dispersing agent (stearic acid, SA 1% by weight) or modified by a compatibilisers (maleic anhydride grafted high density polyethylene, HDPE-g-MA 0.1% by weight). Silane coupling agent contents were varied in a range of 1, 3 and 5% by weight of CaCO<sub>3</sub>. Mixing was carried out using a high speed mixer. All compounds were prepared using a twin-screw extruder and ground using a plastic grinder machine. Rheological properties were studied using a capillary rheometer. An injection molding machine was employed for specimen preparation for mechanical characteristics. It was found that an addition of CaCO<sub>3</sub> increased viscosity, modulus and hardness but decreased tensile strength, %elongation at break and impact strength of the samples. However, viscosity of HDPE/CaCO<sub>3</sub> was not significantly changed when adding another additives. Tensile strength and modulus of HDPE/CaCO<sub>3</sub> increased with incorporation of stearic acid, HDPE-g-MA or silane coupling agent. The addition of silane coupling agent up to 5% by weight did not importantly improved mechanical properties. The use of both HDPE-g-MA (0.1% wt) and silane coupling agent (1% wt) showed better mechanical properties of HDPE/CaCO<sub>3</sub> (80/20) than the use of either one.

## กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการพิเศษสำเร็จได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลือ ความร่วมมือตลอดจนคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์แก่คณะผู้จัดทำจากบุคคลและองค์กรต่างๆ

ขอขอบพระคุณ ดร.สุภรัตน์ รักชลธิ เป็นอย่างสูงที่ให้คำปรึกษา ช่วยแก้ไขปัญหา เอาใจใส่ดูแล และให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษนี้มาตลอด

ขอขอบคุณ ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ และ ผศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด อาจารย์คณะกรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ ที่ช่วยกรุณาตรวจทาน แก้ไขโครงการฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ บริษัท ไทยพอลิเอทิลีน จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ บริษัท สุรินทร์ออมยา เคมีคัล จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ บริษัท ออฟติมอล เทค จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และคุณสุจิตใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ ที่ให้คำแนะนำการใช้เครื่องมือสำหรับทดสอบและคอยอำนวยความสะดวกตลอดการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เทคโนโลยีพอลิเมอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องทดสอบพฤติกรรมการไหล

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีทุกท่านที่คอยช่วยเหลือให้การทำให้โครงการพิเศษนี้ดำเนินไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยห่วงใย ให้กำลังใจ ตลอดจนเพื่อนๆ ทุกคนที่คอยช่วยเหลือ ให้กำลังใจตลอดการทำโครงการพิเศษ

นายโชคชัย ผลแก้ว

นายธนพร สุขพึงธรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	
2.1.1 บทนำ	3
2.1.2 สมบัติทั่วไป	4
2.1.3 การประยุกต์ใช้งาน	5
2.2 แคลเซียมคาร์บอเนต	
2.2.1 บทนำ	5
2.2.2 การปรับปรุงพื้นผิว	7
2.2.3 สมบัติทั่วไป	8
2.2.4 การประยุกต์ใช้งาน	8
2.3 สารช่วยผสม	
2.3.1 บทนำ	9
2.3.2 สมบัติทั่วไป	10
2.3.3 การประยุกต์ใช้งาน	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4	สารคู่ควบประเภทไชนเลน	
2.4.1	บทนำ	10
2.4.2	สมบัติทั่วไป	12
2.4.3	การประยุกต์ใช้งาน	12
2.5	กระบวนการแปรรูปพลาสติก	12
2.5.1	การอัดรีด	14
2.5.2	การฉีดขึ้นรูป	15
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
บทที่ 3	การทดลอง	
3.1	สารเคมี	21
3.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	22
3.3	การเตรียมสารตัวอย่าง	23
3.4	การทดสอบสมบัติของสารตัวอย่าง	24
3.4.1	ปริมาณที่แน่นอนของ แคลเซียมคาร์บอเนตที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง	24
3.4.2	สมบัติทางความร้อน	24
3.4.3	การทดสอบสมบัติเชิงกลของสารตัวอย่าง	24
3.4.4	การทดสอบสมบัติการไหลของสารตัวอย่าง	26
3.4.5	การศึกษาลักษณะการกระจายตัวของ แคลเซียมคาร์บอเนตในสารตัวอย่าง	26
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	
4.1	ผลการหาปริมาณที่แน่นอนของแคลเซียมคาร์บอเนต	27
4.2	ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน	29
4.3	ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึง	31
4.4	ผลการทดสอบความแข็งแรงกระแทก	35
4.5	ผลการทดสอบความแข็ง	36
4.6	ผลการทดสอบสมบัติการไหล	37
4.7	ผลการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตในสารตัวอย่าง	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย	43
5.2 ข้อเสนอแนะ	44
เอกสารอ้างอิง	45
ภาคผนวก	47



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่กับเกลียวหนอนเดี่ยว	15
ตารางที่ 2.2 สารคู่ควบไซเลนประเภท Organofunctional 8 ชนิด	18
ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	21
ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของแคลเซียมคาร์บอเนต	22
ตารางที่ 3.3 สูตรสารตัวอย่างที่เตรียม	23
ตารางที่ 4.1 ปริมาณที่แน่นอนของแคลเซียมคาร์บอเนต	28
ตารางที่ 4.2 ค่าสมบัติทางความร้อนที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC	30
ตารางที่ 4.3 ค่าความแข็งแรงดึง	32
ตารางที่ 4.4 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด	32
ตารางที่ 4.5 ค่ามอดุลัส	33
ตารางที่ 4.6 ค่าความแข็งแรงกระแทก	35
ตารางที่ 4.7 ค่าความแข็ง	36
ตารางที่ 4.8 ค่า Power law index	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การเกิดพอลิเมอร์ของพอลิเอทิลีน	3
รูปที่ 2.2 ลักษณะ โครงสร้างของแคลเซียมคาร์บอเนต	5
รูปที่ 2.3 ลักษณะ โครงสร้างของ HDPE-g-MA	9
รูปที่ 2.4 สูตร โครงสร้างทางเคมีทั่วไปของสารคู่ควบไซเลน	11
รูปที่ 2.5 กลไกการทำงานของสารคู่ควบไซเลนเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ	12
รูปที่ 2.6 แผนภาพกระบวนการแปรรูปพลาสติก	13
รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงทางพลาสติก	13
รูปที่ 2.8 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของสารคู่ควบกับเรซิน	17
รูปที่ 2.9 ความสามารถในการกระจายตัวของ $\text{CaCO}_3$ ที่ปรับปรุงพื้นผิวและใช้สารคู่ควบ	19
รูปที่ 4.1 กราฟตัวอย่างแสดงผลการวิเคราะห์ HDPE ด้วยเครื่อง TGA	27
รูปที่ 4.2 กราฟตัวอย่างแสดงผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของ HDPE ด้วยเครื่อง DSC	29
รูปที่ 4.3 กราฟตัวอย่างแสดงการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของ HDPE	31
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงกับปริมาณสารคู่ควบไซเลน	32
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดกับปริมาณสารคู่ควบไซเลน	32
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสกับปริมาณสารคู่ควบไซเลน	33
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกระแทกกับปริมาณสารคู่ควบ	35
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับปริมาณสารคู่ควบ	36
รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่าความหนืดเนื้อที่แท้จริงของสารตัวอย่าง HDPE/ $\text{CaCO}_3$ ที่มีการเติมสารช่วยกระจายตัว (SA) สารช่วยผสม (HDPE-g-MA) หรือสารคู่ควบไซเลน	37
รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบค่าความหนืดเนื้อที่แท้จริงของสารตัวอย่าง HDPE/ $\text{CaCO}_3$ ที่มีการเติมสารคู่ควบไซเลนและ สารช่วยผสม (HDPE-g-MA)	38
รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบค่าความหนืดเนื้อที่แท้จริงของสารตัวอย่าง HDPE/ $\text{CaCO}_3$ ที่มีการเติมสารคู่ควบไซเลนและ สารช่วยกระจายตัว (SA)	38
รูปที่ 4.12 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวของตัวอย่างที่แตกหักที่อุณหภูมิต่ำ กำลังขยาย 1000 เท่า ของ HDPE/ $\text{CaCO}_3$ ที่มีสารเติมแต่งเพิ่ม 1 ชนิด	41
รูปที่ 4.13 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวของตัวอย่างที่แตกหักที่อุณหภูมิต่ำ กำลังขยาย 1000 เท่า	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ของ HDPE/ $\text{CaCO}_3$  ที่มีสารเติมแต่งเพิ่ม 2 ชนิด นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

พอลิเมอร์เป็นวัสดุที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายและมีแนวโน้มของการใช้งานเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งหนึ่งในพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันมากคือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) เนื่องจากมีสมบัติที่เด่นคือ มีน้ำหนักเบา สามารถทำการผลิตตัดแปลงและแปรรูปได้ง่าย และมีน้ำหนักโมเลกุลช่วงกว้างมีสมบัติพิเศษหลายอย่าง เช่น มีความแข็งแรงยืดหยุ่น เหนียว เป็นฉนวนทางไฟฟ้า สามารถทนกรด ทนด่าง และสารเคมี เป็นต้น ในส่วนข้อด้อยหรือสมบัติที่ไม่ตรงกับงานที่จะนำไปใช้ของพอลิเมอร์นั้นสามารถปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ได้โดยการเติมสารเติมแต่ง (Additives) เช่น สารต่อต้านการออกซิไดซ์ สารหล่อลื่น สารหน่วงการติดไฟ สารเสริมแรง สารตัวเติม เป็นต้น

พอลิเมอร์นั้นได้มาจากกระบวนการทางปิโตรเลียม ซึ่งจัดเป็นวัสดุที่มีจำนวนจำกัดและเป็นไปได้ที่จะหมดไปในอนาคต จึงส่งผลให้มีราคาของพอลิเมอร์สูงขึ้นด้วย ทำให้ต้นทุนในการผลิตมีราคาที่สูงเพิ่มขึ้น ในทางอุตสาหกรรมจึงพยายามที่จะทำการลดการใช้พอลิเมอร์โดยมีการเลือกที่จะเติมสารตัวเติมลงไป นอกจากนี้สารตัวเติมบางชนิดยังช่วยในการลดต้นทุนการผลิต ซึ่งสารตัวเติมที่นิยมใช้คือ แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) เพราะ  $\text{CaCO}_3$  เป็นสารที่มีราคาถูก เป็นสารสีขาว มีให้เลือกหลายเกรดหลายขนาด และไม่มีกลิ่นอีกด้วย [1] แต่เนื่องด้วย HDPE เป็นสารที่ไม่มีขี้ผึ้ง  $\text{CaCO}_3$  เป็นสารที่มีขี้ผึ้งจึงส่งผลให้ความสามารถในการที่จะผสมรวมกันเป็นไปได้ยาก จึงมีการแก้ปัญหาในการผสมกันโดยการเติมสารเติมแต่งลงไป ได้แก่ การเติมสารช่วยกระจายตัว (Dispersing agents) เช่น กรดสเตียริก (SA) หรือมีการเติมสารช่วยผสม (Compatibilizers) เช่น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (HDPE-g-MA) หรือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยกรดอะคริลิก (HDPE-g-AA) และ/หรือการเติมสารคู่ควบ (Coupling agents) เช่น ไซเลนและไททานต หรืออาจจะมี การใช้สารเติมแต่งมากกว่า 1 ชนิด

ในโครงการพิเศษฉบับนี้ศึกษาเกี่ยวกับการใช้สารเติมแต่งชนิดต่างๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมโดยสารเติมแต่งที่ใช้ได้แก่ สารช่วยกระจายตัวคือ SA สารช่วยผสมคือ HDPE-g-MA และสารคู่ควบคือ Silane coupling agent

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษาสมบัติเชิงกล และสมบัติการไหลของ HDPE ที่มีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตและใช้สารเติมแต่งชนิดต่างๆ คือ สารช่วยกระจายตัว (SA) สารช่วยผสม (HDPE-g-MA) และสารคู่ควบ (Silane coupling agent)
- 2) ศึกษาหาปริมาณของสารคู่ควบที่เหมาะสมกับระบบ HDPE/ CaCO<sub>3</sub> เท่ากับ 80/20

## 1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการไหลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติม ปริมาณการเติม 20% โดยทำการศึกษาผลการเติมสารช่วยกระจายตัว (SA) ปริมาณ 1% โดยน้ำหนักของ CaCO<sub>3</sub> สารช่วยผสม (HDPE-g-MA) ปริมาณ 0.1% โดยน้ำหนักของ CaCO<sub>3</sub> และสารคู่ควบไซเลน ปริมาณ 1 3 และ 5% โดยน้ำหนักของ CaCO<sub>3</sub> โดยทำการศึกษาผลการเติมสารเติมแต่งแต่ละตัวและผลของการใส่สารเติมแต่งร่วมกัน

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้เรียนรู้ถึงวิธีการปรับปรุงการผสมของพอลิเมอร์ และสารตัวเติม ซึ่งไม่สามารถเกิดการผสมเข้ากันได้โดยการเติมสารคู่ควบลงไป
- 2) เป็นแนวทางในการคิดค้น การปรับปรุงสมบัติด้านต่างๆ ของพอลิเมอร์ด้วยสารตัวเติมชนิดต่างๆ โดยมีการใช้สารคู่ควบ ร่วมกับสารเติมแต่งชนิดอื่นทำให้เกิดการเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น

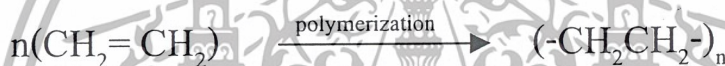
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง [2]

##### 2.1.1 บทนำ

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) จัดเป็นเทอร์โมพลาสติกประเภทพอลิโอเลฟิน ซึ่งได้มาจากกระบวนการการเกิดพอลิเมอร์ของพอลิเอทิลีน



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของเอทิลีน

การผลิต HDPE ใน ปัจจุบันมี 3 กระบวนการคือ

1) กระบวนการซีเกลอร์ (Ziegler process) กระบวนการนี้ใช้ตัวเร่งของซีเกลอร์แนคตา (Ziegler-natta catalyst) ซึ่งตัวเร่งโดยทั่วไปที่ใช้ ได้แก่ ไทเทเนียมเตตระคลอไรด์อลูมิเนียมอัลกิล ที่ความดัน 2-4 บรรยากาศ และอุณหภูมิ 50-75°C ในตัวกลางเฉื่อย เช่น น้ำมันเบนซิน เฮปเทน หรือ โทลูอีน และบรรยากาศเฉื่อย เช่น บรรยากาศของไนโตรเจน เนื่องจากพอลิเอทิลีนไม่ละลายในตัวทำละลายในตัวกลางเฉื่อย ดังนั้นเมื่อเกิดเป็นพอลิเมอร์แล้วจะตกตะกอนออกมา และตัวเร่งของซีเกลอร์แนคตาจะถูกทำลายโดยการเติมแอลกอฮอล์ สารทั้งหมด (ยกเว้นพอลิเมอร์) จะถูกสกัดไปโดยกรดไฮโดรคลอริกในแอลกอฮอล์และนำพอลิเมอร์ไปเหวี่ยงให้ตกตะกอน (Centrifugal) และทำให้แห้ง

พอลิเมอร์ที่ได้แตกต่างจากพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากกระบวนการที่ใช้ความดันสูงมาก กล่าวคือมีสาขาโซ่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น จากการศึกษาโครงสร้างโดยวิธีอินฟราเรดสเปคโตรสโคปีพบว่า มีหมู่เอทิลเพียง 5-7 หมู่ ต่อคาร์บอนอะตอม 1000 อะตอมเท่านั้น และไม่ปรากฏโซ่กิ่งที่เป็นหมู่บิวทิล

2) กระบวนการฟิลลิปส์ (Phillips process) กระบวนการนี้ใช้โซเดียมออกไซด์ที่มีซิลิกา หรืออลูมินา เป็นตัวเร่งในตัวกลางเฉื่อย เช่น โซโคลเฮกเซน สภาพของปฏิกิริยาอยู่ระหว่างกลางของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการความดันสูงที่ใช้เตรียมพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำและกระบวนการซีเกลอร์ ความดันที่ใช้ทั่วไป 30-40 บรรยากาศ และอุณหภูมิ 90-160 °C พบว่าพอลิเอทิลีนที่ได้มีโครงสร้างเชิงเส้นตรงเกือบสมบูรณ์

3) กระบวนการสแตนดาร์ด ออยล์ (Standard oil process) กระบวนการนี้คล้ายคลึงกับ กระบวนการฟิลลิปส์มาก ตัวเร่งที่ใช้คือ โมลิบดีนัมไตรออกไซด์ บนตัวพองเช่น อะลูมินา ไททาเนียม ไดออกไซด์ หรือเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ ความดันที่ใช้ 40-100 บรรยากาศ และอุณหภูมิของปฏิกิริยา อยู่ในช่วง 200-300 °C พอลิเมอร์ที่ได้มีโครงสร้างเชิงเส้นตรงเกือบสมบูรณ์

### 2.1.2 สมบัติทั่วไป

HDPE มีความเป็นผลึกสูงเนื่องจากมีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรง และมีโซ่กิ่งน้อยมาก ไม่มีขั้ว มีสมบัติต้านทานเคมีสูงและไม่ดูดซึมของผสม ซึ่งจัดได้ว่าเป็นสารป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor barrier) ที่ดี เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี HDPE ที่มีช่วงของน้ำหนักโมเลกุลปานกลาง-สูง จะมีสมบัติทนทานต่อการกระแทกดีมาก

เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเชิงเส้นตรงเกือบตลอด โซ่พอลิเมอร์จึงมีความเป็นระเบียบมาก เป็นเหตุให้พอลิเมอร์นั้นมีความเป็นผลึกสูง (มากกว่า 90%) ความหนาแน่นและจุดหลอมตัว สูงกว่าพอลิเอทิลีนที่เตรียมได้โดยกระบวนการใช้ความดันสูง ทั่วไปความหนาแน่น 0.95-0.97 g/cm<sup>3</sup> มีจุดหลอมตัว 135 °C มีความแข็งแรงสูงกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ มีสมบัติความแข็งจุดอ่อนตัว ความต้านทานแรงดึงสูง แต่มีความทนทานต่อแรงกระแทก การยืด ฉ ความยืดหยุ่น และความใสต่ำกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

สมบัติทางฟิสิกส์ - สมบัติทางแสง (Optical properties) เนื่องจาก HDPE มีความเป็นผลึกสูง และมีดัชนีหักเหจากส่วนที่เป็นอสัณฐานต่างกันมาก ดังนั้นแผ่นฟิล์มบางๆของ HDPE จะโปร่งแสง ขณะที่แผ่นฟิล์มบางๆของ LDPE จะโปร่งใส

สมบัติทางเคมี - การละลาย ที่อุณหภูมิห้องจะไม่ละลายในตัวทำละลายแม้จะบวมขึ้นก็ตาม แต่จะละลายในตัวทำละลายผสมตั้งแต่ 2 ชนิด ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 30-40 °C

- การสลายตัว HDPE ค่อนข้างคงตัวเมื่อให้ความร้อน แต่เมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมีที่อุณหภูมิสูงในก๊าซที่มีความเฉื่อยปานกลาง หรือในสุญญากาศจะเกิดการแตกและเชื่อมระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์ โดยจะเห็นชัดที่อุณหภูมิสูงกว่า 290-300 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การไหลของ HDPE ที่หลอมเหลว HDPE ที่หลอมเหลวจะมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 10,000 ที่อุณหภูมิระหว่าง 140 -200° C จะเป็นการไหลแบบ Non-newtonian liquid ความหนืดจะลดลงเมื่อความเร็วของไหลเพิ่มขึ้นและมีอัตราเฉือนต่ำมาก แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 300° C จะมีการไหลแบบ Newtonian liquid

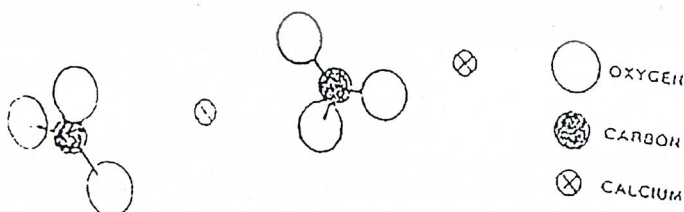
### 2.1.3 การประยุกต์ใช้งาน

ในการประยุกต์ใช้งานของ HDPE โดยจะใช้ในงานขึ้นรูปโดยการเป่าเกือบ 40% ของงานทั้งหมด ในงานเกี่ยวกับชิ้นงานที่ใช้ความต้านทานสูงและทนความเค้นสูง เช่น ภาชนะบรรจุกรดและเบส เคมีภัณฑ์ ส่วนในงานฉีดขึ้นรูปอีกประมาณ 20% ของทั้งหมด เช่น ในการทำของเล่น เครื่องใช้ในบ้าน ฟิล์ม เชือก ฉนวนหุ้มไฟฟ้า สายเคเบิล เป็นต้น

## 2.2 แคลเซียมคาร์บอเนต

### 2.2.1 บทนำ

แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) นิยมนำมาใช้อย่างแพร่หลายกับพลาสติก เนื่องจาก  $\text{CaCO}_3$  มีราคาที่ถูกและมีอยู่มากมายตามธรรมชาติ เป็นวัสดุที่มีสีขาว มีให้เลือกอยู่หลายเกรด หลายขนาด และไม่มีกลิ่น พลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตนั้นค่อนข้างที่จะต่ำ นิยมนำมาใช้ในรูปของสารตัวเติม (Fillers) ซึ่งควรมีสมบัติที่ดูดซับพลาสติกไฮเซอริได้ต่ำ ไม่มีน้ำเกิดขึ้นขณะกระบวนการเกิดผลึก ต้องทนอุณหภูมิในช่วงที่ใช้กับกระบวนการของพลาสติกได้ มีความอ่อนนุ่ม [1]



รูปที่ 2.2 ลักษณะ โครงสร้างของแคลเซียมคาร์บอเนต [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CaCO<sub>3</sub> พบมากในธรรมชาติเกิดอยู่ในแบบของ หินปูน, หินอ่อน, ชอล์ก, หอย, เปลือกหอย กาบ และไข่มุก

กระบวนการผลิต CaCO<sub>3</sub> สามารถแบ่งออกเป็น 7 ประเภท [4] ดังนี้ คือ

1. แคลเซียมคาร์บอเนตบริสุทธิ์ (Purified ground CaCO<sub>3</sub>)
2. แคลเซียมคาร์บอเนตจากกระบวนการบดแห้งแบบหยาบ (Dry processed coarser CaCO<sub>3</sub>)
3. แคลเซียมคาร์บอเนตจากการตกตะกอนโดยใช้โซเดียมไบคาร์บอเนต (Precipitated CaCO<sub>3</sub> by Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> process)
4. แคลเซียมคาร์บอเนตจากการตกตะกอนโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Precipitated CaCO<sub>3</sub> by NaOH process)
5. แคลเซียมคาร์บอเนตจากการตกตะกอนโดยใช้กระบวนการรีคาร์บอเนชัน (Precipitated CaCO<sub>3</sub> by recarbonation)
6. แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดเคลือบผิว (Surface-coated CaCO<sub>3</sub>)
7. แคลเซียมคาร์บอเนตจากกระบวนการที่มีการกระจายตัวในของเหลว (CaCO<sub>3</sub> dispersed in liquids)

สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตอาจแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบอย่างกว้างๆ ดังนี้

1. แร่แคลเซียมคาร์บอเนต (Mineral CaCO<sub>3</sub>)

สามารถแบ่งย่อยๆ ได้เป็น 3 ชนิด คือ

#### 1.1 Whiting

Whiting เป็นผงสีขาวที่ได้จากการบดและจัดอยู่ในพวกชอล์ก ซึ่งมีความบริสุทธิ์พอๆ กับ CaCO<sub>3</sub> ที่ได้จากธรรมชาติที่เกิดจากตะกอนของกระดุกของสิ่งมีชีวิตที่มีขนาดเล็กจนตามองไม่เห็นอยู่ในช่วง 1 ถึง 5  $\mu\text{m}$  อยู่ในช่วงที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นสารตัวเติมสำหรับพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC)

#### 1.2 หินปูน หินอ่อน และแคลไซต์

หินปูนเป็นรูปแบบ CaCO<sub>3</sub> ที่พบมากที่สุดตามธรรมชาติ เกิดจากการตกตะกอนของ Foraminifera ซึ่งแรกเริ่มจะเกิดการตกตะกอนและรวมเข้าด้วยกันโดยความร้อนและความดัน หินอ่อนและแคลไซต์มีความแข็ง โครงผลึกแน่นกระชับแตกต่างจากหินปูน และมีความบริสุทธิ์เพียงพอสำหรับการบดและนำมาผลิตเป็นสารตัวเติมหินปูนนั้นจะมีความหยาบมากที่สุด ดังนั้นจึงมีความสามารถใน

การดูดซับน้ำมันและพลาสติกไฮเซอรัได้น้อยที่สุดและให้สีขาวที่ไม่ดี ซึ่งหินอ่อนและแคลไซต์ให้สีขาวที่ดีแต่ก็มีความสามารถในการดูดซับน้ำมันต่ำกว่า Whiting

เกรดของแคลเซียมคาร์บอเนตแบ่งออกโดยกระบวนการผลิตแบบเปียกและแห้ง กระบวนการผลิตแบบเปียกจะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพที่ดีกว่า ขนาดของอนุภาคที่ได้ดีกว่า และการกระจายของอนุภาคสม่ำเสมอกว่า แต่มีข้อเสียคือมีราคาที่สูงกว่ากระบวนการผลิตแบบแห้ง

### 1.3 โดโลไมต์ (Dolomite)

โดโลไมต์เป็นหินปูนที่มี Magnesium carbonate ( $MgCO_3$ ) ประมาณ 45% หรือน้อยกว่าอาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Magnesium limestone โดโลไมต์ที่ใช้ผลิตเป็นสารตัวเติมจะให้สีที่ดีและมีสมบัติในการดูดซับพลาสติกไฮเซอรัที่สูงกว่าหินอ่อน

## 2. แคลเซียมคาร์บอเนตเกรดตกตะกอน (Precipitated $CaCO_3$ )

แคลเซียมคาร์บอเนตแบบตกตะกอน ปกติจะใช้ในรูปแบบที่มีการเคลือบผิวเพื่อป้องกันการรวมกันเป็นก้อน และช่วยให้เกิดการกระจายตัวที่ดีในพอลิเมอร์ ซึ่งข้อดีของกระบวนการตกตะกอนคือ การเคลือบผิวอนุภาคสามารถกระทำร่วมในกระบวนการผลิตได้เลยไม่ต้องแยกออกมาเป็นอีกส่วนหนึ่ง แต่ข้อเสียคือมีราคาที่สูง [1]

### 2.2.2 การปรับปรุงพื้นผิว

การปรับปรุงพื้นผิวแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดสเตียริกเป็นกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวที่มีการใช้กันมานานและยังมีใช้กันอย่างต่อเนื่องและกว้างขวางการปรับปรุงพื้นผิวมีข้อดีหลายประการดังนี้

1. สารตัวเติมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวนั้นทำให้สามารถกระจายตัวได้ง่ายและทั่วถึงในพอลิเมอร์ในระหว่างกระบวนการผสมและกระบวนการผลิต
2. การปรับปรุงพื้นผิวช่วยในเรื่องทำให้ระยะระหว่างพื้นผิวระหว่างสารตัวเติมและเมทริกซ์ใกล้เคียงกันมากขึ้น [1]
3. ช่วยในเรื่องการป้องกันพื้นผิวเกิดการแตก (Crack) รอยบุ๋ม (Notch) และอื่นๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการนำไปใช้งานและเป็นการทำให้วัสดุมีความแข็งแรง
4. ช่วยในเรื่องการกำจัดรอยตำหนิและรอยขีดข่วนบนพื้นผิว
5. ป้องกันสารตัวเติมจากน้ำและความชื้นที่จะทำให้เป็นจุดอ่อนแอบนคอมโพสิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ช่วยทำให้พันธะระหว่างพื้นผิวมีความแข็งแรงขึ้น ดังนั้นจึงทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น [5]

### 2.2.3 สมบัติทั่วไป

แคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้เป็นสารตัวเติมควรมีสมบัติต่างๆ ดังนี้ [3]

- มีความสามารถในการกระจายตัวที่ดี (ในเกรดที่ทำการเคลือบผิว) และส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางด้านไฟฟ้าเล็กน้อยของผลิตภัณฑ์สุดท้าย
- เพิ่มความเหนียวและมอดูลัสยืดหยุ่น
- มีความบริสุทธิ์สูงและไม่มีไอออนของโลหะหนัก ซึ่งสามารถเร่งปฏิกิริยาทำให้พอลิเมอร์เสื่อมสภาพเร็วขึ้น
- มีพื้นที่ผิวจำเพาะ ไม่ดูดซึมสารปรับปรุงสมบัติพลาสติกและสารเติมแต่งต่างๆ
- ต้องไม่เกิดการรวมตัวกันเป็นก้อน
- มีระดับของความขรุขระที่สูง
- ไม่มีความคมที่จะทำให้เกิดการขัดถูกับเครื่องจักร (Mohr hardness ประมาณ 3)
- ลดการหดตัว
- ปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุ
- เพิ่มความแข็งแรงกระแทก (ในเกรดที่ทำการเคลือบผิว)
- มีราคาถูก
- ไม่อันตราย ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ทนอุณหภูมิสูง 800-900°C

### 2.2.4 การประยุกต์ใช้งาน [6]

- ใช้ในอุตสาหกรรมของ PVC เช่น สายไฟฟ้าและสายเคเบิล, ท่อ
- ใช้ในอุตสาหกรรมของ PE และ PP
- ใช้ในอุตสาหกรรมของยาง เช่น สายไฟฟ้า, Rubber sheet, ชิ้นส่วนของรองเท้า, ยางรถยนต์
- ใช้ในอุตสาหกรรมของสีทา เช่น สีน้ำ, สีน้ำมัน, สีอิมัลชัน, สารกันรั่ว (Sealants), วัสดุทาองพื้น (Primer)
- ใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง
- และในอุตสาหกรรมอื่นๆ อีกมากมาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

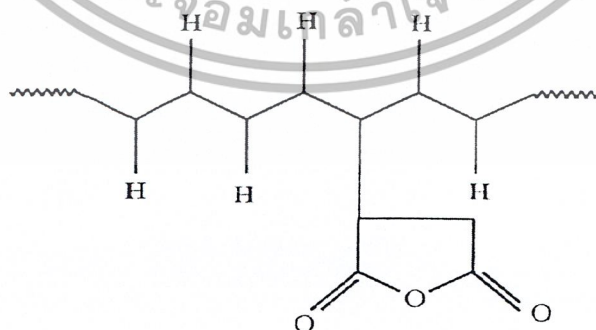
## 2.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์

### 2.3.1 บทนำ

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วส่งผลให้เมื่อทำการผสมรวมกับวัสดุอื่นที่มีขั้วมักมีสมบัติด้านแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวไม่ดี แต่สามารถที่จะทำการแก้ไขได้โดยการเติมสารอีกชนิดลงไปเพื่อทำการเพิ่มคุณสมบัติการเข้ากันได้ ในกรณีของพอลิเมอร์ผสม จะมีการเติมสารช่วยผสม (Compatibilizers) ลงไปทำให้สมบัติต่างๆ ดีขึ้นสำหรับพอลิโอเลฟิน ที่มีการปรับปรุงด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA) โดย MA จะไปเกิดปฏิกิริยากับหมู่เอมีนของพอลิเอไมด์ทำให้เกิดการเข้ากันได้ดีขึ้น [7]

มาเลอิกแอนไฮไดรด์พอลิเมอร์เตรียมโดยปฏิกิริยา 2 ชนิดคือ การพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น (Condensation polymerisation) และพอลิเมอไรเซชันแบบการเติม (Addition polymerisation) ต่อมาพบว่าสามารถเกิดการพอลิเมอไรเซชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV radiation) ทำให้เกิดตัวริเริ่มปฏิกิริยาโดยการฉายรังสีและตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่เป็นอนุภาคอิสระ

พอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ เป็นการต่อกิ่งพอลิเอทิลีนซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่เสถียรแล้วซึ่งจะทำให้คุณสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ (Physicochemical properties) ดีขึ้น โดยการเพิ่มความเปราะบางของพอลิเอทิลีน โดยทำให้มีความเปราะบางมากขึ้น และความสามารถในการยึดติดเพิ่มขึ้น พบว่าแอนไฮไดรด์เป็นส่วนที่เกิดการเชื่อมโยง เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี [8]



รูปที่ 2.3 ลักษณะ โครงสร้างของ HDPE-g-MA [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 สมบัติทั่วไป [8]

- เพิ่มความเป็นขั้วบวก (Hydrophilicity) ให้มากขึ้น
- เพิ่มความสามารถในการยึดติด
- เพิ่มความสามารถในการต้านทานความร้อน
- เพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้กับพอลิเมอร์อื่นๆ รวมทั้งสารตัวเติม (Fillers)
- เป็นส่วนที่เกิดการเชื่อมโยง
- เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี

### 2.3.3 การประยุกต์ใช้งาน [8]

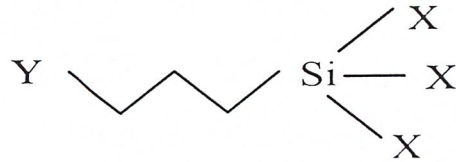
- ใช้ในการเคลือบผิวหน้า
- เป็นสารที่ใช้ในการยึดติด
- เป็นสารตัวเติมที่ใช้ในสารหล่อลื่น

## 2.4 สารคู่ควบประเภทไซเลน

### 2.4.1 บทนำ

ในกระบวนการผสมพอลิเมอร์และวัสดุต่างชนิดลงไปอาจมีผลของการรวมกันทำให้สมบัติต่างๆ รวมถึงสมบัติเชิงกล เช่นในกรณีของ HDPE ซึ่งเป็นสารที่ไม่มีขั้ว เมื่อนำมารวมกับสารอีกตัวที่มีขั้วก็จะมีผลทำให้การรวมกันได้ไม่ดี และการกระจายตัวก็ไม่ดีด้วย วิธีหนึ่งที่สามารถแก้ไขได้ก็คือ การเติมสารคู่ควบลงไป โดยสารคู่ควบที่นิยมใช้มีอยู่หลายประเภท เช่น ไททานต และไซเลน โดยสารคู่ควบทำหน้าที่เป็นเสมือนสะพานเชื่อมระหว่างวัฏภาค 2 วัฏภาค ช่วยในการยึดเกาะระหว่างวัฏภาคเพื่อเพิ่มความแข็งแรง โดยวัฏภาคทั้งสองคือ สารประกอบพวกอินทรีย์และสารประกอบพวกอนินทรีย์ [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Y : Organofunctional Group จะหันหน้า/ทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์

X : Alkoxy Group จะหันหน้า/ทำปฏิกิริยากับสารตัวเติม

รูปที่ 2.4 สูตรโครงสร้างทางเคมีทั่วไปของ Organofunctional silane [10]

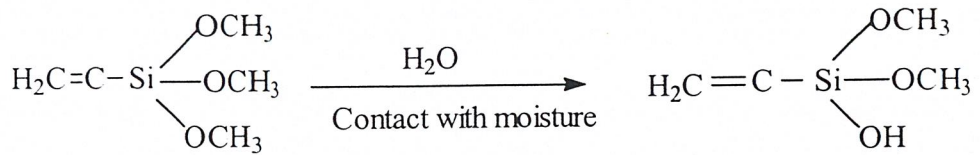
พอลิเมอร์จำพวกสารอินทรีย์ ที่นิยมเลือกใช้เป็นเรซินคือ

- อีพอกซี เรซิน (Epoxy resin)
- พอลิเอสเทอร์ เรซิน (Polyester resin)
- ยูรีเทน เรซิน (Urethane resin)
- ฟีนอลิก เรซิน (Phenolic resin)
- พอลิพอฟิลีน เรซิน (Polypropylene resin)
- พอลิเอไมด์ เรซิน (Polyamide resin)
- อะคริลิก เรซิน (Acrylic resin)

ในส่วนของสารประกอบพวกอนินทรีย์ ที่นิยม ได้แก่

- แก้ว
- ไมก้า (Mica)
- ดินขาว (Clay)
- ซิลิเกต (Silicates)
- ผงแร่ลีน (Talc)
- โลหะ (Metals)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างกลไกการทำงานของ สารกึ่งควบประเภทไซเลนเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ [10]

#### 2.4.2 สมบัติทั่วไปของสารกึ่งควบประเภทไซเลน

- ช่วยปรับปรุงการกระจายตัวของสารตัวเติมในพอลิเมอร์ให้ดีขึ้น
- ช่วยลดและควบคุมอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิต
- ช่วยลดการสลายตัวทางความร้อนในขั้นตอนก่อนการเชื่อมโยงสมบูรณ์
- ปรับปรุงสมบัติการต้านทานการคืบคลานจากสิ่งแวดล้อม
- ปรับปรุงสมบัติการเปียกในกระบวนการ
- ปรับปรุงสมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งแรงเชิงขาด ความแข็งแรงดึง เบอร์เซนต์การยึด ณ จุดขาด ความต้านทานแรงกระแทก การเสถียรภาพเนื่องจากความร้อน

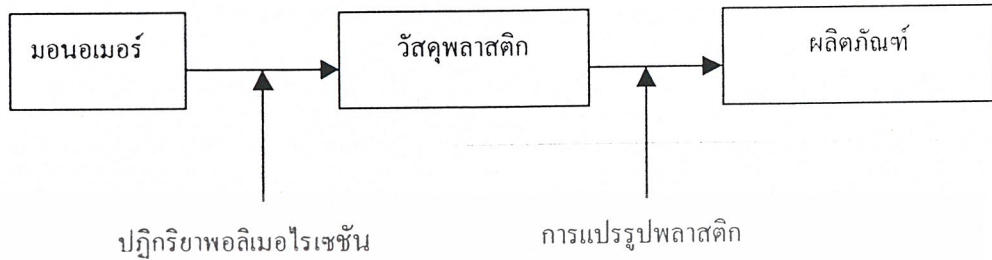
#### 2.4.3 การประยุกต์ใช้งาน [10]

สารกึ่งควบไซเลนจะนิยมใช้ในงานช่วยในการยึดเกาะ หรือยึดติด ในกระบวนการผลิตเส้นใย แก้ว พลาสติกเสริมแรง งานเคลือบผิว ชิ้นส่วนรถยนต์ ผลิตภัณฑ์พลาสติก และ เทอร์โมพลาสติก

### 2.5 กระบวนการแปรรูปพลาสติก

กระบวนการแปรรูปพลาสติกเป็นการทำให้พลาสติก หรือวัสดุประเภทพอลิเมอร์ก่อให้เกิดประโยชน์ใช้สอยมากที่สุดโดยนำวัสดุประเภทพลาสติกไปผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางพอลิเมอร์ให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ดังรูปที่ 2.6

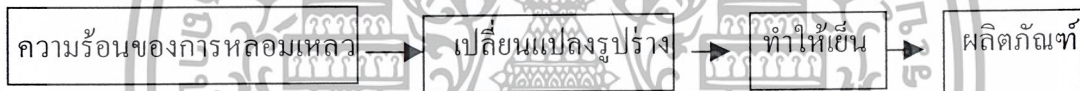
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แผนภาพกระบวนการแปรรูปพลาสติก [11]

การเปลี่ยนแปลงทางพลาสติกแบ่งตามชนิดของพลาสติก

- เทอร์โมพลาสติก เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงหรือโซ่กิ่ง และไม่มีพันธะที่แข็งแรงเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่หลัก ทำให้สามารถนำไปหลอมขึ้นรูปและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ [11]



- เทอร์โมเซต และยาง

เทอร์โมเซต เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นร่างแห นั่นคือมีพันธะเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้มีความแข็งแรงและไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ [12]

ยาง เป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่น สามารถดึงให้มีความยาวเพิ่มขึ้นหลายเท่า (5-10 เท่า) ของความยาวเดิม มีความแข็งแรงเมื่อมีการทำให้เกิดโครงสร้างร่างแห [12]



รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงการแปรรูปพลาสติก [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.1 การอัดรีด

การอัดรีด (Extrusion) เป็นกระบวนการที่นิยมใช้เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายถูก และสามารถผลิตรูปร่างได้ตามต้องการ (เช่น แท่งกลม พิล์ม แผ่น เส้นใย และท่อ เป็นต้น) เป็นกระบวนการที่สามารถทำได้ง่ายต่อเนื้อ เครื่องอัดรีดจัดเป็นเครื่องมือที่มีจุดประสงค์หลากหลายในกระบวนการแปรรูปทางพลาสติก กล่าวคือ เม็ดพลาสติกถูกป้อนเข้ามาในระหว่างเกลียวหนอนของเครื่องอัดรีดและกระบอกใส่สกรู (Barrel) ถูกอัด หลอม ผสมและมาตรวัดด้วยความดันสวนสวนทางที่เกิดขึ้นในระหว่างที่มีการไหลผ่านไปตามท่อ และออกทางหัวดายน์ ทั้งนี้โดยอาศัยความแตกต่างของความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวของเกลียวหนอน และกระบอกใส่เกลียวหนอนทำให้เกิดพลังงานความเฉือน (Shearing energy) ช่วยในการผสมและหลอมเหลว เครื่องอัดรีดที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) ซึ่งจะมีเกลียวหนอนอยู่ 2 เกลียวหนอน โดยจัดจำแนกเครื่องอัดรีดตามลักษณะของเกลียวหนอนคือ เครื่องอัดรีดแบบมีเฟืองไม่ตรงกัน (Non-intermeshing) และเครื่องอัดรีดแบบมีเฟืองตรงกัน (Intermeshing) โดยที่เครื่องอัดรีดแบบมีเฟืองตรงกัน ยังจำแนกตามทิศทางการเคลื่อนที่ของเกลียวหนอนได้เป็นเครื่องอัดรีดแบบหมุนไปทางเดียวกัน (Co-rotating) และเครื่องอัดรีดแบบหมุนสวนทางกัน (Counter-rotating) [11]

การนำเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่มาใช้มีประโยชน์ดังนี้คือ

1. เป็นที่แพร่หลาย สามารถควบคุมการเฉือนของพอลิเมอร์ได้ โดยการใช้โปรแกรมเกลียวหนอน (Screw programming) ซึ่งอาศัยความตรงกันของความเฉือน และความว่องไวต่ออุณหภูมิของพอลิเมอร์
2. เวลาในการกระจายตัวต่ำ สามารถควบคุมปฏิกิริยาได้ง่ายเหมาะสำหรับการทำ PVC Compound (counter-rotating)
3. การพาวัสดุเป็นไปในทางบวก มีลักษณะคล้ายๆกับการนำเกียร์ปัมมาช่วยนำพาวัสดุให้เคลื่อนที่ไปตามเกลียวหนอน
4. จัดเป็นการทำงานที่อาศัยหลักของการระบายอากาศ เนื่องจากก๊าซสามารถถูกกำจัดออกไปได้โดยง่าย หรืออาจใช้ทางระบายอากาศเป็นที่เดิมสารตัวเติมต่างๆ ทำหน้าที่เป็นส่วนป้อนวัสดุทุติยภูมิ อย่างไรก็ตาม เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่มีขีดจำกัดในการนำไปใช้โดยสามารถแสดงเปรียบเทียบกับเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวได้ ดังตารางที่ 2.1 [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่กับเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว [11]

ลักษณะ	เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว	เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่
รูปแบบการไหล	Drag flow	Positive Conveyance
เวลาและการกระจายตัว	ปานกลาง / กว้าง	ต่ำ / แคบ
การผสมโดยรวม	ต่ำ - ปานกลาง	ดี
ความเนียนในช่องทางเกลียวหนอน	สูง	ต่ำ
ผลของความดันกลับที่มีต่อปริมาณที่ได้	ลดปริมาณที่ได้	มีผลเพียงเล็กน้อยต่อปริมาณที่ได้

### 2.5.2 การฉีดขึ้นรูป

การฉีดขึ้นรูป (Injection molding) เป็นที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีข้อได้เปรียบกว่าการผลิตวิธีอื่นๆ คือ สามารถผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้ดี และหลากหลายลักษณะงาน กรรมวิธีไม่ยุ่งยาก ราคาเครื่องจักรไม่แพงจนเกินไป ตลอดจนใช้พื้นที่ในการผลิตไม่มาก นอกจากนี้ยังสามารถทำงานได้กับพลาสติกที่มีลักษณะเป็นเม็ดและเป็นผง และกับพลาสติกทุกประเภทคือ เทอร์โมเซต เทอร์โมพลาสติก และอีลาสโตเมอร์ [13]

จากระบบขับเคลื่อน (ระบบไฮดรอลิก) ของส่วนการยึดแม่พิมพ์จะดันให้แท่นยึดแม่พิมพ์ที่เคลื่อนที่ (Moving platen) วิ่งมาปิดกับแท่นยึดแม่พิมพ์ที่อยู่กับที่ (Stationary platen) ขณะที่แม่พิมพ์ปิดอยู่นั้น ส่วนของการฉีดจะเริ่มทำงาน โดยเกลียวหนอนจะหมุนเพื่อดึงเม็ดพลาสติกลงมาหลอมโดยใช้ความร้อนจากการเสียดสี และจากแถบความร้อน ในขณะที่เม็ดพลาสติกหลอมจะเคลื่อนตัวไปยังด้านหน้าตามเฟืองของเกลียวหนอน และทำให้เกิดความดันขึ้น เนื่องจากเกลียวหนอนมีการหมุนขับให้เม็ดพลาสติกหลอมเคลื่อนตัวมาข้างหน้าตลอดเวลา ดังนั้นจึงเกิดการสะสมของพอลิเมอร์ที่ด้านหน้าของเกลียวหนอนมากขึ้น ทำให้ความดันสูงขึ้น จนกระทั่งสามารถดันให้เกลียวหนอนถอยกลับ เกลียวหนอนจะถอยจนถึงระยะที่ตั้งไว้เกลียวหนอนจึงหยุดหมุน

จังหวะการฉีดแบ่งเป็น 2 จังหวะคือ การฉีดในจังหวะแรก เกลียวหนอนจะทำหน้าที่คล้ายลูกสูบดันให้พอลิเมอร์หลอมไหลผ่านเข้าไปในแม่พิมพ์ การที่เกลียวหนอนสามารถทำเช่นนี้ได้เนื่องจากบริเวณหัวเกลียวหนอนจะมีวาล์วป้องกันการไหลย้อนกลับ (Back flow valve) หลังจากนั้นจะทำการฉีด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในจังหวะที่สองซึ่งจะช่วยทำให้เม็ดพลาสติกหลอมไหลเข้าไปในชิ้นงานมากขึ้น เพื่อชดเชยกับส่วนที่หดตัวของชิ้นงาน

การเย็นตัวของพลาสติก (Cooling) เกิดจากการถ่ายเทความร้อนจากพลาสติกหลอมผ่านผนังของแม่พิมพ์ที่เย็น ซึ่งจะทำให้พลาสติกเย็นตัว

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Fuad และคณะ [14] ได้ทำการศึกษาการใช้สารคู่ควบชนิดต่างๆ เช่น ไททานेट (LICA<sup>®</sup> 38), เซอร์โคเนต (NZ<sup>®</sup> 44) และไซเลน (Prosil<sup>®</sup> 2020 และ Prosil<sup>®</sup> 9234) ลงในสารตัวเติมขี้เถ้าแกลบชนิดสีขาว (WRHA) ที่ผสมกับเมตริกซ์ PP โดยมีสารตัวเติม 10-40% โดยน้ำหนัก แล้วนำมาทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมทำให้ค่าดัชนีการไหลลดลง ยกเว้นในกรณีที่ใช้ Prosil<sup>®</sup> 2020 จะมีค่าดัชนีการไหลเพิ่มขึ้นและพบว่าการใช้ LICA<sup>®</sup> 38, NZ<sup>®</sup> 44 และ Prosil<sup>®</sup> 9234 มีค่าดัชนีการไหลลดลง ตามลำดับ จึงสามารถทำการขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น และเมื่อเติมสารตัวเติมปริมาณมากขึ้นพบว่ามีค่ามอดูลัสโค้งงอสูงขึ้น โดยการใช้สารคู่ควบ NZ<sup>®</sup> 44 ให้ค่าสูงที่สุด และ Prosil<sup>®</sup> 9234, LICA 38, Prosil<sup>®</sup> 2020 ให้ค่าลดลง ตามลำดับ และการเติม LICA<sup>®</sup> 38, Prosil<sup>®</sup> 2020 และ Prosil<sup>®</sup> 9234 ทำให้มีสมบัติการยึดดีแต่การเติม NZ<sup>®</sup> 44 ทำให้สมบัติการดึงยึดต่ำลง โดยปริมาณสารตัวเติมที่เหมาะสมคือ 30-40% โดยน้ำหนัก และพบว่าเมื่อเติมสารตัวเติมปริมาณมากขึ้นทำให้ค่าความแข็งแรงกระแทกลดลง เมื่อปริมาณสารตัวเติม 20% โดยน้ำหนัก พบว่า Prosil<sup>®</sup> 9234 จะมีค่าความแข็งแรงกระแทกสูงกว่า LICA<sup>®</sup> 38, Prosil<sup>®</sup> 2020 และ NZ<sup>®</sup> 44 ตามลำดับ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการยึดดีระหว่างสารตัวเติมกับเมตริกซ์ที่มีการใช้สารคู่ควบต่างชนิดกัน ให้ผลที่แตกต่างกัน

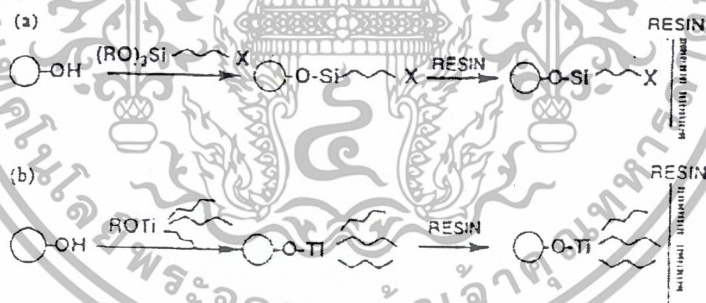
Liu และคณะ [15] ได้ทำการศึกษาผลของขนาดของอนุภาค (d) ของ CaCO<sub>3</sub> และ สัดส่วนเชิงปริมาตร (V<sub>c</sub>) ของ CaCO<sub>3</sub> โดยที่อนุภาคกระจายตัวบน HDPE เมตริกซ์ พบว่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารคู่ควบต่อ CaCO<sub>3</sub> ที่ให้ค่าความเหนียวสูงที่สุดคือ 0.05 และค่าความเหนียวขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค สัดส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคและการกระจายตัวของอนุภาค CaCO<sub>3</sub> ในการทดลองใช้ CaCO<sub>3</sub> 5 ขนาด และสารคู่ควบ คือ Isopropyltriisostearoyl titanate พบว่า CaCO<sub>3</sub> ที่มีขนาดอนุภาคเล็กให้ค่าความแข็งแรงกระแทกสูงที่สุด และเมื่อขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นค่าที่ได้จะลดลง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วขนาดอนุภาคที่เล็กและมีการกระจายตัวที่ดี จะช่วยเพิ่มความเหนียวให้แก่วัสดุ

Demjen และคณะ [16] ได้ทำการศึกษาถึงอันตรกิริยาระหว่าง CaCO<sub>3</sub>/PP โดยใช้สารคู่ควบไซเลนที่มีหมู่ฟังก์ชันที่แตกต่างกัน พบว่าการใช้สารคู่ควบไซเลนที่มีหมู่ฟังก์ชันอะมิโน (Amino) มีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแข็งแรงดึงยึดมากกว่าไซเลนที่มีหมู่ฟังก์ชันของวงเบนซีน และมากกว่าสูตรที่ไม่ได้ใช้สารคู่ควบ ไซเลนและสารคู่ควบไซเลนที่มีหมู่ Methacrylo ตามลำดับ สาเหตุที่สารคู่ควบไซเลนพวก Methacrylo มีค่าความแข็งแรงดึงต่ำ เพราะมีพันธะคู่ซึ่งทำปฏิกิริยากับ PP ซ้ำมาก ต่างจากพวกไซเลนที่มีหมู่ ฟังก์ชันอะมิโน เมื่อเกิดปฏิกิริยาเอมีนปฏุมภูมิจะเปลี่ยนไปเป็นเอไมด์ทุติยภูมิ ซึ่งไปรวมกับหมู่คาร์บอก ซิลเกิดปฏิกิริยาแบบควบแน่น ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการใช้สารคู่ควบไซเลนที่มีหมู่ อะมิโนจึงให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงที่สุด

Hussian และคณะ [17] ได้ทำการศึกษาผลของการเคลือบไททานเนียมไดออกไซด์ด้วยสารคู่ควบ ไซเลนเปรียบเทียบกับสารคู่ควบไททานเนตที่ใช้ฟอกซีเรซินเป็นเมทริกซ์ พบว่าสูตรที่เคลือบด้วยสารคู่ ควบไททานเนตมีค่ามอดูลัสของยังใกล้เคียงกับสูตรที่เคลือบด้วยไซเลน แต่ค่าความแข็งแรงดึงของของ สูตรที่เคลือบด้วยไททานเนตสูงกว่าสูตรที่เคลือบด้วยไซเลน เนื่องจากไททานเนตเป็นโซ่ตรงที่ยาวกว่าจึงมี ความยืดหยุ่นมากกว่าทำให้อนุภาคอินทรีย์ผสมเข้ากับเรซินได้ดี การทำงานของสารคู่ควบไททานเนตมี ประสิทธิภาพดีกว่าไซเลนเนื่องจากไททานเนตมีส่วนที่สามารถทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ 3 ส่วน (Reactive site) แต่ ไซเลนมีเพียง 1 ส่วน ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของสารคู่ควบกับเรซิน [17] a) ไซเลน b) ไททานเนต

Demjen และคณะ [18] ได้ทำการศึกษาดังอันตรกิริยา เมื่อใช้สารคู่ควบไซเลนประเภท ที่มีหมู่ ฟังก์ชันชนิดสารอินทรีย์ (Organofunction) 8 ชนิดตามตารางที่ 2.2 ลงในวัสดุคอมโพสิต PP/CaCO<sub>3</sub> สารคู่ควบแต่ละตัวมีผลในการเพิ่มความแข็งแรงและลดความสามารถในการเปลี่ยนรูป โดยผลขึ้นกับ การเกิดปฏิกิริยาเคมีของ Organofunction ในสารคู่ควบ แต่ในกรณีที่มีหมู่ฟังก์ชันเหมือนกัน จะพิจารณา ที่ขนาด พบว่าขนาดของ Organofunction ที่เล็ก (ACPTES และ MPTMS) ทำให้การยึดติดของสารตัว เติบโตที่พื้นผิวดีขึ้น การเกิดโครงสร้างแบบ Polysiloxane มีผลจากขนาดของหมู่ Organofunction ถ้ามี ขนาดใหญ่ จะจัดโครงสร้างแบบ Polysiloxane แต่ถ้ามีขนาดเล็กจะเกิดการเปิดโซ่ Polysiloxane และค่า

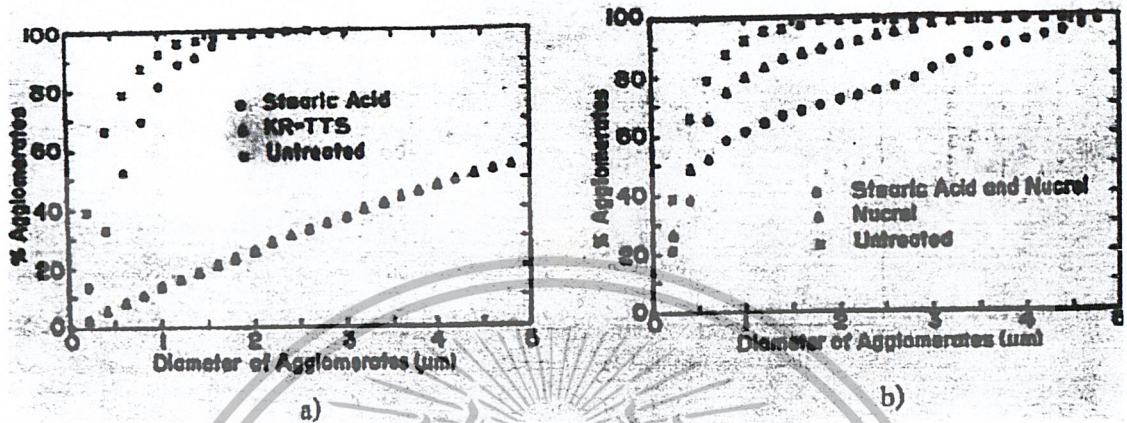
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแข็งแรงสามารถดูได้จากการเกิดปฏิกิริยาของหมู่ Organofunction ไฮเลนที่มีหมู่อะมิโนที่เป็นเอมีนปฐมภูมิมีการยึดติดที่ดีสารคู่ควบไฮเลนส่วนใหญ่ รวมทั้ง AMPTES เมื่อเคลือบบนผิว CaCO<sub>3</sub> จะจัดเรียงโมเลกุลในลักษณะตั้งฉากกับผิวCaCO<sub>3</sub>ทำให้ลดความมีขั้วของCaCO<sub>3</sub>ดังนั้นการกระจายตัวของ CaCO<sub>3</sub> น่าจะดีขึ้น และขนาดของ Organofunction ที่มีขนาดเล็กซึ่งมีมวลโมเลกุลสูง ทำให้เกิดการยึดติดที่ดี

ตารางที่ 2.2 สารคู่ควบไฮเลนประเภท Organofunctional 8 ชนิด [18]

Coupling agent	Formula
SPTES	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{16}-\text{COO}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{Si}(\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_3)_3$
PPTES	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_7-\text{COO}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{Si}(\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_3)_3$
ACTES	$\text{CH}_3-\text{COO}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{Si}(\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_3)_3$
MPTMS	$\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)-\text{COO}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{Si}(\text{O}-\text{CH}_3)_3$
CVBS	$\text{CH}_2=\text{CH}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CH}_2-\text{NH}(\text{CH}_3)-\text{NH}(\text{CH}_3)-\text{Si}(\text{O}-\text{CH}_3)_3, \text{HCl}$
GPTES	$\text{CH}_3-\text{CH}(\text{O}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CH}_2-\text{NH}(\text{CH}_3)-\text{NH}(\text{CH}_3))- \text{Si}(\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_3)_3$
CHAPTMS	$\text{C}_6\text{H}_{11}-\text{NH}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{Si}(\text{O}-\text{CH}_3)_3$
AMPTEs	$\text{NH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{Si}(\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_3)_3$

Dealy และคณะ [19] ได้ทำการศึกษาความสามารถในการกระจายตัวแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO<sub>3</sub>) ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก (SA) และที่มีการใช้สารคู่ควบ Triisostearoyl methyl titanate (KR-TTS) และ Copolymer of methacrylic acid-ethylene (Nucrel) พบว่า CaCO<sub>3</sub> รวมตัวกันเป็นก้อน Agglomerates แต่เมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก จะทำให้ Agglomerates มีขนาดลดลง เมื่อใช้สารคู่ควบ KR-TTS พบว่าขนาดของ Agglomerates จะมีขนาดเล็กที่สุด ซึ่งแสดงว่า CaCO<sub>3</sub> จะมีการกระจายตัวดีที่สุด ขณะที่การใช้ SAและสารคู่ควบร่วมกับ CaCO<sub>3</sub> จะช่วยให้ CaCO<sub>3</sub> มีการกระจายตัวดีขึ้น ดังรูปที่ 2.9 a) ใช้ KR-TTS เป็นสารคู่ควบ b) ใช้ Nucrel เป็นสารคู่ควบ



รูปที่ 2.9 ความสามารถในการกระจายตัวของ  $\text{CaCO}_3$  ที่ปรับปรุงพื้นผิวและใช้สารก่อกวน [19]

Demjen และคณะ [20] ได้ทำการศึกษาผลของ PP/ $\text{CaCO}_3$  ที่มีการเติมสารก่อกวนไซเลนที่มีหมู่ฟังก์ชันแตกต่างกันทั้ง 8 ชนิด พบว่า สารก่อกวนไซเลนที่มีหมู่ฟังก์ชันอะมิโนจะเกิดปฏิกิริยาเคมีของหมู่อะมิโนกับหมู่คาร์บอกซิลที่อยู่บนสายโซ่ PP ส่งผลให้ความแข็งแรงดึงสูงกว่า  $\text{CaCO}_3$  ที่ไม่มีการเติมสารก่อกวนไซเลนเล็กน้อยเนื่องจากเป็นสารก่อกวนชนิด Reactive treatment ซึ่งจะเพิ่มแรงดึงผิวของสารตัวเติม แต่เปอร์เซ็นต์การยึด ฉ จุดขาดจะลดลงอย่างมาก และเมื่อใช้สารก่อกวนไซเลนที่ไม่มีหมู่ฟังก์ชันอะมิโน พบว่าจะลดการยึดติดระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติมทำให้ความแข็งแรงดึงต่ำกว่า  $\text{CaCO}_3$  ที่ไม่มีการเติมสารก่อกวนไซเลนเล็กน้อย แต่เปอร์เซ็นต์การยึด ฉ จุดขาดจะสูงกว่า

ชนเรศ และธราศรัย [21] ได้ทำการศึกษาผลของการใช้สารช่วยผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (HDPE-g-MA) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงชนิดต่อกิ่งด้วยกรดอะคริลิก (HDPE-g-AA) ที่มีผลต่อสมบัติการไหลและสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่มีแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) เป็นสารตัวเติมในปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ HDPE ปริมาณสารช่วยผสมที่ใช้คือ 0.1 0.25 0.5 1.0 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ  $\text{CaCO}_3$  พบว่าการเติม  $\text{CaCO}_3$  20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักลงใน HDPE ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงกระทำระหว่างพื้นผิวสัมผัสของ HDPE กับ  $\text{CaCO}_3$  การใช้สารช่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผสมทั้ง HDPE-g-MA และ HDPE-g-AA ในปริมาณ 0-2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักไม่มีผลต่อค่าความเหนียว ค่าความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงกระแทกลดลงเมื่อมี  $\text{CaCO}_3$  ผสมอยู่เพราะแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นระหว่าง  $\text{CaCO}_3$  กับ HDPE ไม่แข็งแรง ส่วนค่า มอดุลัส และค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจาก  $\text{CaCO}_3$  มีค่ามอดุลัส และความแข็งที่สูงกว่า HDPE และ  $\text{CaCO}_3$  ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (Nucleating agents) สำหรับ HDPE เนื่องจากเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกมีค่าใกล้เคียงกัน การใช้สารช่วยผสมในปริมาณน้อย ทำให้สมบัติส่วนใหญ่ดีขึ้น การใช้ HDPE-g-AA ให้ค่าความแข็งแรงดึง และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ที่มากกว่าการใช้ HDPE-g-MA เล็กน้อย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การทดลอง

#### 3.1 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีด้วยกัน 5 ประเภท ดังนี้

1. พอลิเมอร์ : พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) จากบริษัทไทยพอลิเอทิลีน จำกัด (TPE) สมบัติบางประการของ HDPE แสดงดังตารางที่ 3.1 [22]

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ HDPE

สมบัติ	หน่วย	วิธีทดสอบ	HDPE (H6105JU)
ดัชนีการไหล	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
มอดูลัสการโค้งงอ	กก./ตร.ซม.	ASTM D 790	13000
ความต้านทานแรงกระแทก	กก.-ซม./ซม.	ASTM D 256	5
ความแข็ง, Shore D		ASTM D2240	66
ความต้านทานแรงดันจากดิ่งแฉก	F <sub>50</sub> , ซม.	ASTM D1693	4
จุดหลอมเหลว	องศาเซลเซียส	ASTM D2117	133
จุดอ่อนล้าไวแตก	องศาเซลเซียส	ASTM D1525	127
จุดเปราะ	องศาเซลเซียส	ASTM D 746	<-60

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

2. สารตัวเติม : แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO<sub>3</sub>) จากบริษัทสุรินทร์ออมยา เคมิคัล จำกัด สมบัติบางประการของแคลเซียมคาร์บอเนตแสดงดังตารางที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ CaCO<sub>3</sub> [23]

สมบัติ	หน่วย	CaCO <sub>3</sub> (OMYACARB-2T)	CaCO <sub>3</sub> (OMYACARB-2)
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย	µm	2.7	2.8
ค่าความถ่วงจำเพาะ (ISO787/10)	g/cm <sup>3</sup>	2.7	2.7
Acid insolubles	%	1.0	0.0

3. สารช่วยผสม : พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (HDPE-g-MA) Polybond® Grade 3009 ซึ่งมีค่า Melt flow index เท่ากับ 5 g/ 10 min และมีปริมาณของ MA เท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4. สารคู่ควบ : สารคู่ควบประเภทไซเลน (Silane coupling agents,  $\gamma$ -aminopropyltriethoxysilane) จากบริษัท ออฟติมอล เทคโนโลยี จำกัด เกรด Silquest® A1100 Silane ซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 0.946, จุดเดือดเท่ากับ 217 °C มีสีเหลืองอ่อน และไม่มีการมีกลิ่น มีสูตรโครงสร้างทางเคมี คือ  $N_2HCH_2CH_2CH_2Si(OCH_2CH_3)_3$

### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวทวนคู่ (Twin-screw extruder, รุ่น PL-200; Intro engineering)
2. เครื่องฉีดพลาสติก (Injection molding machine, Cosmo รุ่น TTi 220/80 HITEC; Welltec industrial equipment)
3. เครื่องทดสอบแรงกดแรงดึง (Universal testing machine, LLOYD รุ่น LR 30k; LLOYD Instrument)
4. เครื่อง Differential scanning calorimeter รุ่น Pyris Diamond DSC : บริษัท Perkin elmer instrument
5. เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder, Bosco รุ่น A600; Bosco engineering)
6. เครื่องวัดแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod impact tester, Yasuda รุ่น 7697; Yasuda seiki seisakusho)
7. เครื่องวัดความแข็ง (Hardness durometer, Shore D, Yasuda รุ่น 7689; Matsuzawa DXT)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, รุ่น LEO 1455VP)
9. เครื่องวัดสมบัติการไหลคาปิลารีโอมิเตอร์ (Capillary rheometer, Rosand rheometer Type Rh 7/2 บริษัท Rosand precision Ltd.
10. เครื่องผสมชนิดความเร็วสูง (High speed mixer รุ่น LMX 1000)
11. เครื่อง Thermogravimetric analyzer (รุ่น Pyris 1 TGA : บริษัท Perkin elmer instrument)

### 3.3 การเตรียมสารตัวอย่าง

ตารางที่ 3.3 สูตรสารตัวอย่างที่เตรียม (% โดยน้ำหนัก)

องค์ประกอบ (%wt)	สูตร													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
HDPE	100	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
CaCO <sub>3</sub>			20	20	20	20	20					20	20	20
CaCO <sub>3</sub> + (SA 1%wt)		20						20	20	20	20			
PE-g-MA (% CaCO <sub>3</sub> )				0.1								0.1	0.1	0.1
Silane (% CaCO <sub>3</sub> )					1	3	5	1	3	5		1	3	5

1. ทำการชั่งสารต่างๆ ตามตารางที่ 3.3 เตรียมสูตรละ 1000 g
2. ในสูตรที่ไม่มีไซเลนจะนำส่วนประกอบแต่ละชนิดมาทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ ส่วนสูตรที่ต้องใช้ไซเลนจะต้องมีการผสมไซเลนและ CaCO<sub>3</sub> โดยใช้เครื่องผสมชนิดความเร็วสูงที่ความเร็ว 2500 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาที 2 ครั้ง หลังจากนั้นจึงนำส่วนผสมต่างๆ ไปเข้าเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่โดยตั้งอุณหภูมิที่หัวตาย 190 °C ความเร็ว 7 รอบต่อนาที เมื่อสารผสมถูกอัดรีดออกมาจะมีการใช้น้ำในการหล่อเย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำสารผสมที่ได้ไปบดด้วยเครื่องบดพลาสติก

4. แบ่งสารผสมที่ผ่านการบดเป็นสองส่วน โดยส่วนหนึ่งจะนำมาทำการฉีดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานรูปคัมเบลล์ และรูปที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีรอยบากตรงกลางชิ้นงานเพื่อเป็นชิ้นงานที่เก็บไว้ใช้ศึกษาสมบัติเชิงกลของสารตัวอย่างด้วยเครื่องฉีดพลาสติกที่อุณหภูมิหัวคาย  $190^{\circ}\text{C}$  อีกส่วนที่เหลือจะนำไปทำการทดสอบสมบัติการไหล

### 3.4 การทดสอบสมบัติของสารตัวอย่าง

#### 3.4.1 ปริมาณที่แน่นอนของ $\text{CaCO}_3$ ที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง

ทำการชั่งสารตัวอย่างที่ตัดจากชิ้นงานที่ได้จากเครื่องฉีดพลาสติกประมาณ 10-30 mg นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิสูงสุดที่  $600^{\circ}\text{C}$  ด้วยอัตราการให้ความร้อน  $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$  วิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ของสารที่เหลือเพื่อหาปริมาณที่แน่นอนของ  $\text{CaCO}_3$  โดยใช้เครื่อง TGA

#### 3.4.2 สมบัติทางความร้อน

ทำการชั่งสารตัวอย่างที่ตัดจากชิ้นงานที่ได้จากเครื่องฉีดพลาสติกมาประมาณ 5-10 mg นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ เริ่มต้น  $50^{\circ}\text{C}$  ด้วยอัตราการให้ความร้อน  $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$  [24] จนถึงอุณหภูมิสูงสุดคือ  $180^{\circ}\text{C}$  และทำการลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา  $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$  จนถึงอุณหภูมิเริ่มต้นนำข้อมูลที่ได้จากกราฟที่ได้มาหาค่าอุณหภูมิในการหลอมตัวของผลึก ( $T_m$ ) อุณหภูมิของการเกิดผลึก ( $T_c$ ) ความร้อนของการหลอมเหลว ( $\Delta H_f$ ) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%Crystallinity) โดยใช้เครื่อง DSC

#### 3.4.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของสารตัวอย่าง

##### 1. สมบัติความแข็งแรงดึง

นำตัวอย่างที่ได้จากเครื่องฉีดพลาสติกที่เตรียมเป็นรูปคัมเบลล์ มาทดสอบความแข็งแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงที่ความเร็วในการดึง 150 mm/min ระยะของการจับชิ้นงาน (Gauge length) เป็น 70 mm ที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ASTM D638 [25] เพื่อหาการยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) ค่ามอดูลัส (Tensile modulus) และความแข็งแรงดึง (Tensile strength) โดยใช้เครื่อง Universal testing machine

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

% Elongation at break คือ ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด

$$\% \epsilon_b = \frac{L-L_0}{L_0} \times 100$$

L

เมื่อ  $L_0$  คือ ความยาวของชิ้นงานก่อนการดึงยืด

L คือ ความยาวของชิ้นงานหลังการดึงยืด

Tensile strength at yield คือ ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรหรือเสียสภาพเท่ากับความเค้นสูงสุดเกิดที่จุดคราก (Yield)

Modulus คือ อัตราส่วนของความเค้นและความเครียด (ในการทดลองนี้ใช้ค่าในช่วงเริ่มต้น)

$$E = \frac{\text{Stress}(\sigma)}{\text{Strain}(\epsilon)} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1}$$

เมื่อ  $\sigma$ , Stress คือ ค่าแรงที่กระทำต่อพื้นที่ หน่วย  $\text{N/m}^2$

$\epsilon$ , Strain คือ ผลที่แสดงออกมาในรูปการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในช่วงเริ่มต้น

## 2. สมบัติความแข็งแรงกระแทก

นำตัวอย่างที่ได้จากเครื่องฉีดพลาสติกที่เตรียมเป็นแท่งที่มีรอยบากอยู่ตรงกลางชิ้นงาน มาทดสอบความแข็งแรงกระแทกด้วยเครื่องวัดแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod impact tester) ที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ASTM D256 [26] ซึ่งค่าความแข็งแรงกระแทกแบบ Izod ที่ได้มีหน่วยเป็น  $\text{kJ/m}^2$

## 3. สมบัติความแข็ง

นำตัวอย่างที่เป็นรูปดัมเบลล์มาทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง ชนิด

Shore D ที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ASTM D2240 [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 3.4.4 การทดสอบสมบัติการไหลของสารตัวอย่าง

นำสารตัวอย่างที่ผ่านการบดเป็นเม็ด มาทดสอบสมบัติการไหลด้วยเครื่อง Capillary rheometer ที่อุณหภูมิ  $190^{\circ}\text{C}$  ลูกสูบเคลื่อนที่ลงด้วยอัตราที่คงที่ ใช้อัตราความเครียดเฉือน (Shear strain rate) อยู่ในช่วง  $30\text{-}3000\text{ s}^{-1}$  ตามมาตรฐาน ASTM D3835 [28] ใช้หัวคายแบบเรียบ ( $180^{\circ}$ ) เส้นผ่านศูนย์กลาง  $1\text{ mm}$  ความยาว  $16\text{ mm}$

#### 3.4.5 ลักษณะของการกระจายตัวของ $\text{CaCO}_3$ ในสารตัวอย่าง

นำสารตัวอย่างที่ผ่านการฉีกชั้นรูปคัมเบลล์มาแช่ในไนโตรเจนเหลว จากนั้นทำการหักชิ้นงานขณะที่เย็นอยู่ หลังจากนั้นตัดชิ้นงานเพื่อนำพื้นผิวตรงรอยแตกมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการหาปริมาณที่แน่นอนของ $CaCO_3$

เมื่อทำการเตรียมตัวอย่างตามวิธีที่กล่าวในหัวข้อ 3.4.1 จากนั้นนำมาทดสอบเพื่อหาปริมาณที่แน่นอนของ  $CaCO_3$  ที่มีอยู่ในสารตัวอย่างแต่ละสูตร



รูปที่ 4.1 กราฟตัวอย่างแสดงผลการวิเคราะห์ HDPE ด้วยเครื่อง TGA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ปริมาณที่แน่นอนของ  $\text{CaCO}_3$  ในสารตัวอย่าง

สารตัวอย่าง	สัญลักษณ์	น้ำหนักสาร ที่หายไป (%wt)	ปริมาณ $\text{CaCO}_3$ (%wt)
100%wt HDPE	HD	100	0
HDPE+20%wt $\text{CaCO}_3$ +1%wt SA	HDCASA	77	23
HDPE+20%wt $\text{CaCO}_3$	HDCA	82	18
HDPE+20%wt $\text{CaCO}_3$ +0.1%wt HDPE-g-MA	HDCAMA	82	18
HDPE+20%wt $\text{CaCO}_3$ +1%wt Silane(% $\text{CaCO}_3$ )	HDCASI 1	83	17
HDPE+20%wt $\text{CaCO}_3$ +3%wt Silane(% $\text{CaCO}_3$ )	HDCASI 3	77	23
HDPE+20%wt $\text{CaCO}_3$ +5%wt Silane(% $\text{CaCO}_3$ )	HDCASI 5	78	22
HDPE+20%wt $\text{CaCO}_3$ +1%wt SA+1%wt Silane (% $\text{CaCO}_3$ )	HDCASASI 1	78	22
HDPE+20%wt $\text{CaCO}_3$ +1%wt SA+3%wt Silane (% $\text{CaCO}_3$ )	HDCASASI 3	79	21
HDPE+20%wt $\text{CaCO}_3$ +1%wt SA+5%wt Silane (% $\text{CaCO}_3$ )	HDCASASI 5	77	23
HDPE+20%wt $\text{CaCO}_3$ +1%wt SA+0.1%wt HDPE-g-MA (% $\text{CaCO}_3$ )	HDCASAMA	79	21
HDPE+20%wt $\text{CaCO}_3$ +0.1% wt HDPE-g-MA (% $\text{CaCO}_3$ )+1%wt Silane (% $\text{CaCO}_3$ )	HDCAMASI 1	80	20
HDPE+20%wt $\text{CaCO}_3$ +0.1%wt HDPE-g-MA (% $\text{CaCO}_3$ )+3%wt Silane (% $\text{CaCO}_3$ )	HDCAMASI 3	78	22
HDPE+20%wt $\text{CaCO}_3$ +0.1%wt HDPE-g-MA (% $\text{CaCO}_3$ )+5%wt Silane (% $\text{CaCO}_3$ )	HDCAMASI 5	78	22

ค่าเปอร์เซ็นต์ของ  $\text{CaCO}_3$  ที่วัดได้มีค่าเบี่ยงเบนจากที่กำหนดไว้เท่ากับ  $\pm 3$  %wt บอกให้ทราบว่าการผสม HDPE กับ  $\text{CaCO}_3$  เป็นเทคนิคที่เหมาะสมในการผสม HDPE กับ  $\text{CaCO}_3$  ให้ได้อัตราส่วนที่แน่นอนคือ 80:20 ตามที่ต้องการ

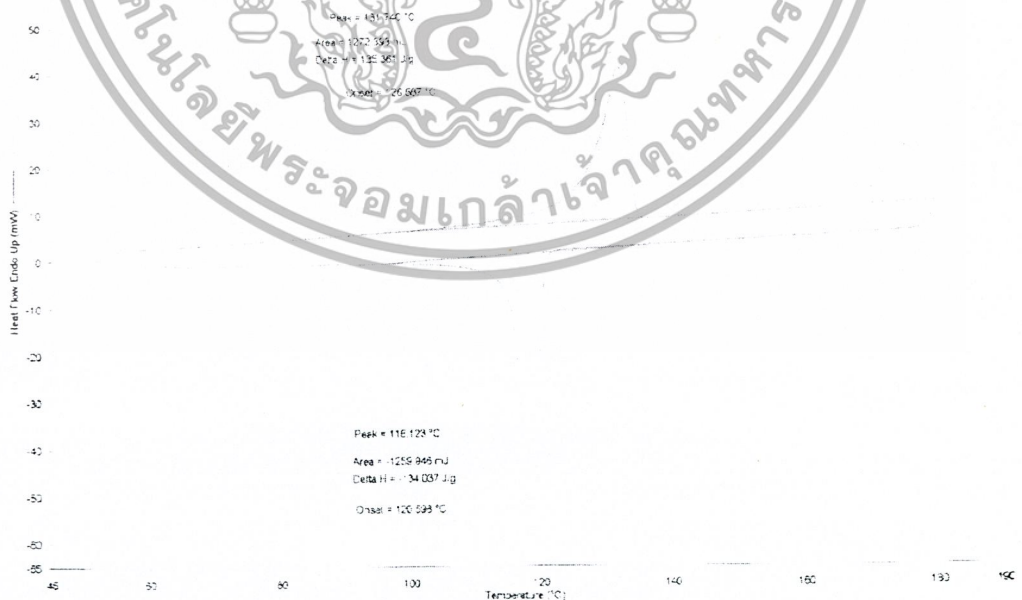
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.

#### 4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

เมื่อทำการเตรียมตัวอย่างตามวิธีที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.4.2 จากนั้นนำมาทดสอบเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของ  $\text{CaCO}_3$  และสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ที่มีผลต่อค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก ( $T_m$ ) อุณหภูมิการเกิดผลึก ( $T_c$ ) ความร้อนของการหลอมเหลวของผลึก ( $\Delta H_f$ ) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (% Crystallinity) ดังนี้ เมื่อ

- $T_m$  คือ อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก  
 $T_c$  คือ อุณหภูมิในการเกิดผลึก  
 $\Delta H_f$  คือ ความร้อนของการหลอมเหลวของผลึก  
 %Crys คือ เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง  
 $\Delta H_f^0$  คือ ความร้อนของการหลอมเหลวผลึกของ HDPE ที่มีความเป็นผลึก 100%  
 $= 293 \text{ J/g}$  [29]  
 $\% \text{Crys} = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^0} \times 100$

ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟตัวอย่างแสดงผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC ของ HDPE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

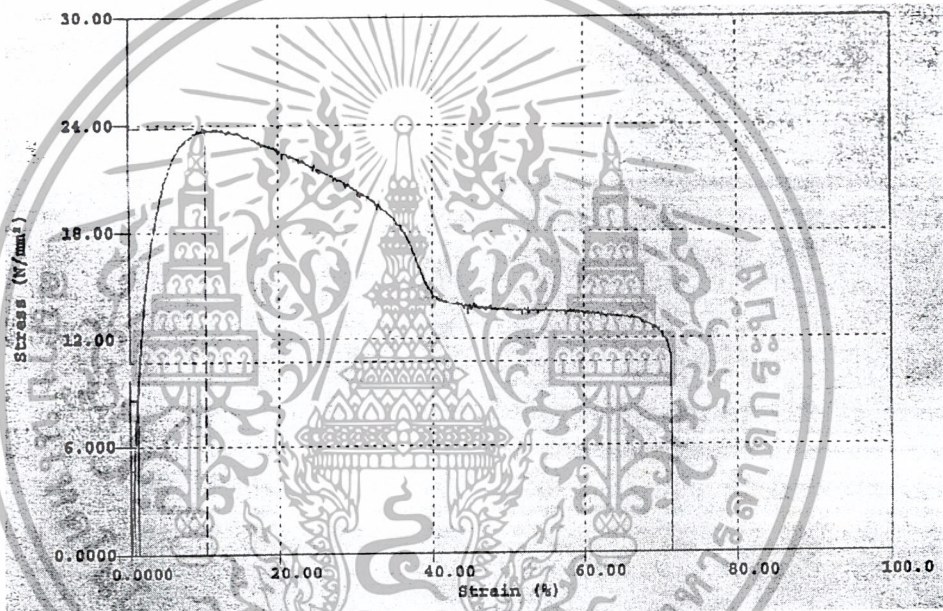
ตารางที่ 4.2 ค่าสมบัติทางความร้อนที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC

สารตัวอย่าง	% CaCO <sub>3</sub> ที่แน่นอน	T <sub>m</sub> (°C)	ΔH <sub>f</sub> (J/g)	%Crys	T <sub>c</sub> (°C)
HD	0	132	138	47	118
HDCASA	23	131	118	52	119
HDCA	18	133	126	52	118
HDCAMA	18	131	128	53	119
HDCASI 1	17	132	129	53	118
HDCASI 3	23	131	99	44	119
HDCASI 5	22	132	103	45	119
HDCASASI 1	22	130	99	43	119
HDCASASI 3	21	130	97	42	119
HDCASASI 5	23	130	120	53	119
HDCASAMA	21	130	120	52	119
HDCAMASI 1	20	131	109	47	119
HDCAMASI 3	22	130	119	52	119
HDCAMASI 5	22	130	115	51	118

จากตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่อมีการผสม CaCO<sub>3</sub> ลงใน HDPE ค่าอุณหภูมิในการเกิดผลึก (T<sub>c</sub>) และอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T<sub>m</sub>) ที่ได้มีค่าที่ใกล้เคียงกันกับกรณีที่ไม่มีการเติม CaCO<sub>3</sub> ถึงแม้ว่ามีการเติมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ลงไปด้วยก็ตาม ผลที่ได้ยังถือว่าใกล้เคียงกันแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของการเกิดผลึก (T<sub>c</sub>) ขนาดและความสมบูรณ์ของผลึกที่เกิดขึ้นของแต่ละตัวอย่างมีความใกล้เคียงกัน ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%Crystallinity) ในทุกตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงเท่ากับ ± 5% ไม่มีแนวโน้มที่แน่นอน แสดงว่า CaCO<sub>3</sub> ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (Nucleating agent) สำหรับ HDPE ส่วนในสูตรที่มีการผสมสารก่อบรรเทาไหลลงไป พบว่าให้ผลการทดลองในทำนองเดียวกัน คืออุณหภูมิในการเกิดผลึก (T<sub>c</sub>) อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T<sub>m</sub>) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกมีค่าใกล้เคียงกับ HDPE บริสุทธิ์

### 4.3 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึง

เมื่อทำการเตรียมตัวอย่างโดยใช้วิธีที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.4.3 ข้อ 1 จากนั้นนำมาทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลของ  $\text{CaCO}_3$  ที่มีและไม่มี การปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดเตียริก การใช้สารช่วยผสม (HDPE-g-MA) และการใช้สารกักควบไซเลน ที่มีต่อสมบัติการรับแรงดึง เช่น ความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และค่ามอดุลัส

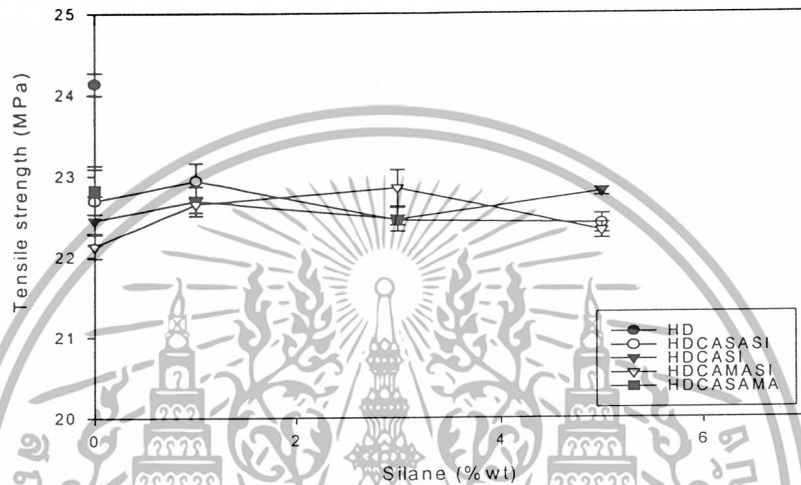


รูปที่ 4.3 กราฟตัวอย่างแสดงการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของ HDPE

จากกราฟตัวอย่างพบว่าในทงทุกสูตรจะให้ค่าสูงสุดที่จุดคราก (Yield point) ดังนั้น ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Tensile strength) คือ ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile stress at yield)

ตารางที่ 4.3 ค่าความแข็งแรงดึง

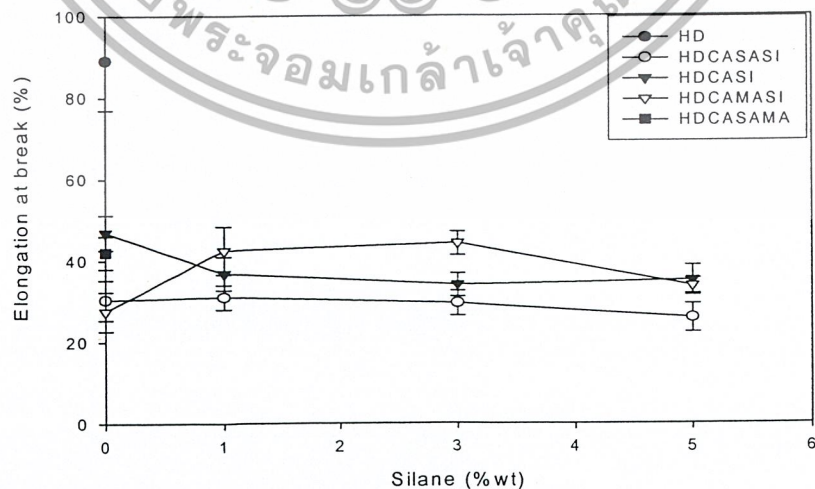
สูตร	HD	HDCA	HDCASA	HDCAMA	HDCASAMA
Tensile Strength (MPa)	24.13	22.45	22.69	22.13	22.83



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง (MPa) กับปริมาณสารคู่ควบไซเลน (%wt)

ตารางที่ 4.4 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด

สูตร	HD	HDCA	HDCASA	HDCAMA	HDCASAMA
Elongation at break (%)	88.97	46.92	30.35	27.54	42.00

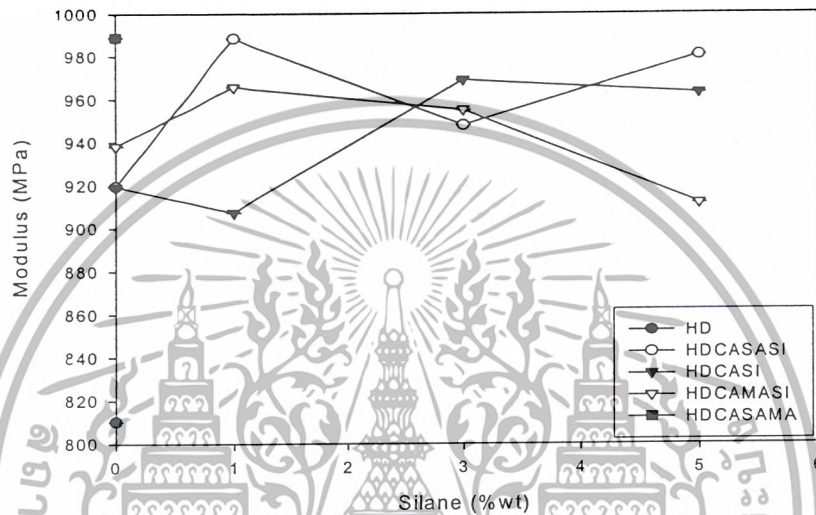


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด กับปริมาณสารคู่ควบไซเลน (%wt)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ค่ามอดุลัส

สูตร	HD	HDCA	HDCASA	HDCAMA	HDCASAMA
Modulus (MPa)	810.2	919.2	919.4	938.1	988.8



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัส (MPa) กับปริมาณสารคู่ควบไซเลน (%wt)

จากตารางที่ 4.3 และ 4.4 พบว่าเมื่อทำการผสม  $\text{CaCO}_3$  ลงใน HDPE (สูตร HDCA) ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดลดลง เมื่อเทียบกับ HDPE บริสุทธิ์ เนื่องจาก  $\text{CaCO}_3$  มีขั้วแต่ HDPE ไม่มีขั้วแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารทั้งสองจึงไม่แข็งแรงนัก เมื่อออกแรงดึงทำให้เกิดช่องว่างระหว่างรอยต่อของ HDPE และ  $\text{CaCO}_3$  ได้ง่าย ซึ่งกลายเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน เมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก (สูตร HDCASA) หรือมีการใช้สารช่วยผสม (สูตร HDCAMA) เพียงอย่างเดียว พบว่าความแข็งแรงดึงมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด จะมีค่าที่ลดลงเมื่อเทียบกับสูตร HDCA จากงานวิจัยที่ผ่านมา [19] พบว่าการใช้ SA ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ที่สูงกว่าไม่ใช้ SA เนื่องจาก SA ช่วยให้การกระจายตัวของ  $\text{CaCO}_3$  ดีขึ้นซึ่งตรงกันข้ามกับผลการทดลองในงานวิจัยนี้ อาจเนื่องจากเปอร์เซ็นต์ของ  $\text{CaCO}_3$  ที่แท้จริง ที่มีอยู่ในสูตร HDCASA มีค่ามากกว่าในสูตร HDCA (เท่ากับ 18%) ซึ่งอาจเป็นผลให้การกระจายตัวของ  $\text{CaCO}_3$  ในสูตร HDCASA ไม่ดีเท่ากับ  $\text{CaCO}_3$  ในสูตร HDCA เมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริกและใช้สารช่วยผสม (สูตร HDCASAMA) จะส่งผลให้ความแตกต่างระหว่างขั้วของ  $\text{CaCO}_3$  และ HDPE ลดลง พบว่าค่าความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเติมสารคู่ควบไซเลนลงในปริมาณต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(รูปที่ 4.4) จะพบว่าค่าความแข็งแรงดึงจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันทุกๆ ที่ Demjen [16] พบว่าการใช้สารคู่ควบไซเลนตัวเดียวกันนี้ ( $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{Si}(\text{OCH}_2\text{CH}_3)_3$ ) จะให้ค่าความแข็งแรงดึงของ PP/ $\text{CaCO}_3$  เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ PP บริสุทธิ์ เหตุผลว่า PP จะเกิดการเสียสภาพได้เป็นกรดคาร์บอกซิลิกที่ปลายของสายโซ่ ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับหมู่เอมีน (Amine) ของไซเลนส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้น ส่วน HDPE มีโอกาสเสียสภาพระหว่างกระบวนการผสมได้น้อยกว่า จึงทำให้เกิดปฏิกิริยากับหมู่ amine ของไซเลนได้ยากกว่า หรือไม่เกิดเลย ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงของ HDPE/ $\text{CaCO}_3$  มีค่าใกล้เคียงกัน จากรูปที่ 4.5 พบว่าเปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาดโดยรวมของสูตร HDCAMASI มีค่าสูงกว่าสูตร HDCASI และสูตร HDCASASI ตามลำดับ อาจเนื่องมาจากว่าไซเลนน่าจะช่วยเสริมการทำงานของสารช่วยผสม ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาดจะดีกว่าการใช้ไซเลนเพียงตัวเดียว งานวิจัยที่ผ่านมา [19] รายงานว่าขนาดกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ (Agglomerates) ของ  $\text{CaCO}_3$  จะลดลงเมื่อมีการเคลือบผิวของ  $\text{CaCO}_3$  ด้วย SA และจะลดลงยิ่งขึ้นเมื่อมีการเคลือบผิวของ  $\text{CaCO}_3$  ด้วย SA และสารช่วยผสม Copolymer of methacrylic acid-ethylene (Nucrel<sup>®</sup>)

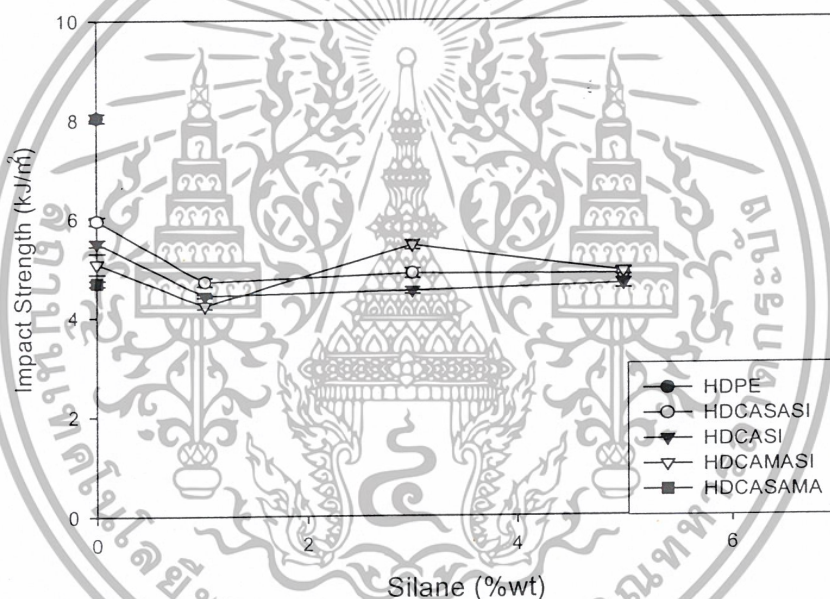
จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 พบว่าสูตร HDCA มีค่ามอดุลัสมากกว่าสูตร HD เนื่องจาก  $\text{CaCO}_3$  มีค่ามอดุลัสที่สูงกว่า HDPE เมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวด้วย SA (สูตร HDCASA) ค่ามอดุลัสจะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับสูตร HDCA แต่เมื่อมีการเติมสารช่วยผสมจะให้ค่ามอดุลัสที่เพิ่มสูงขึ้น และเมื่อมีการเติมทั้ง SA และ MA (สูตร HDCASAMA) จะช่วยทำให้ความแตกต่างระหว่างขั้วของ  $\text{CaCO}_3$  และ HDPE ลดลงยิ่งขึ้นส่งผลให้มีการกระจายตัวของ  $\text{CaCO}_3$  ดีขึ้น ค่ามอดุลัสจึงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสูตร HDCA หรือมีการเติมสารเติมแต่งเพียงชนิดเดียว การใช้สารคู่ควบในปริมาณต่างๆ พบว่าในสูตร HDCASI จะให้ค่ามอดุลัสสูงสุด เมื่อเติมไซเลนปริมาณ 3-5 %wt ในสูตร HDCASASI จะมีค่ามอดุลัสสูงสุดเมื่อมีปริมาณไซเลน 1 %wt และ HDCAMASI จะมีค่ามอดุลัสสูงสุดเมื่อปริมาณไซเลน 1 %wt

#### 4.4 ผลการทดสอบความแข็งแรงกระแทก

เมื่อทำการเตรียมตัวอย่างดังวิธีที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.4.3 ข้อ 2 จากนั้นทำการทดสอบความแข็งแรงกระแทกเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของ  $\text{CaCO}_3$  และการใช้สารเติมแต่งชนิดต่างๆ

ตารางที่ 4.6 ค่าความแข็งแรงกระแทก ( $\text{kJ/m}^2$ )

สูตร	HD	HDCA	HDCASA	HDCAMA	HDCASAMA
ความแข็งแรงกระแทก ( $\text{kJ/m}^2$ )	8.04	5.50	5.95	5.08	4.69



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกระแทก ( $\text{kJ/m}^2$ ) กับปริมาณสารเคลือบ (%wt)

จากตารางที่ 4.6 พบว่า เมื่อทำการผสม  $\text{CaCO}_3$  ลงไปจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงกระแทกลดลงเมื่อเทียบกับ HDPE บริสุทธิ์ เพราะ  $\text{CaCO}_3$  มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมเป็นมุม และ  $\text{CaCO}_3$  เองก็สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้น้อยกว่า HDPE ในสภาวะการใช้งาน เมื่อมีแรงกระทำจากภายนอกมากระทำอย่างรวดเร็วจะทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักได้ง่าย ส่วน  $\text{CaCO}_3$  ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก (สูตร HDCASA) จะมีค่าความแข็งแรงกระแทกที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสูตร HDCA เนื่องจาก SA เคลือบที่พื้นผิวของ  $\text{CaCO}_3$  ช่วยลดความแตกต่างระหว่างผิวของ  $\text{CaCO}_3$  และ HDPE ลงจึงทำให้  $\text{CaCO}_3$  เกิดการกระจายตัวได้ดีขึ้น แต่เมื่อมีการใช้สารช่วยผสม (สูตร HDCAMA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

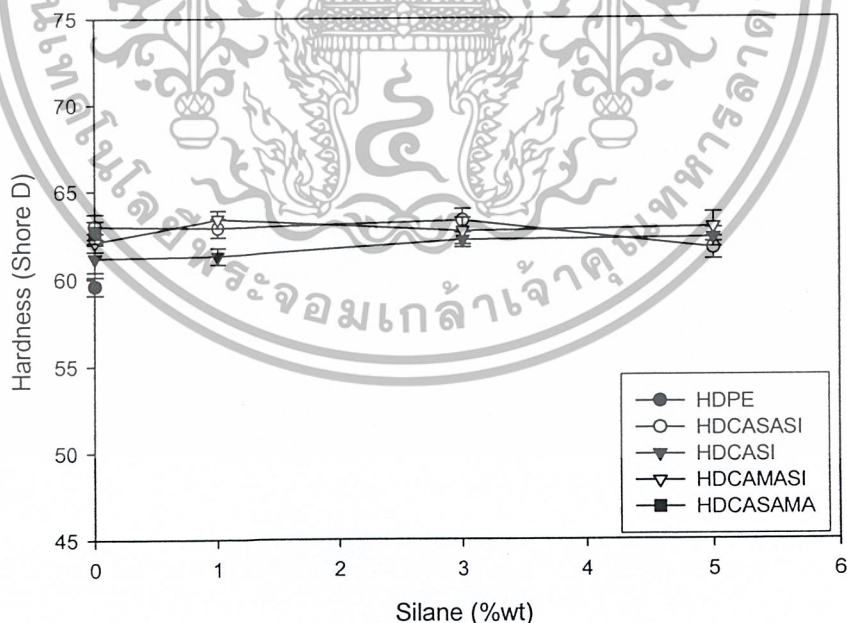
และใช้ SA ผสมสารช่วยผสม (สูตร HDCAMASA) ค่าความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ สูตร HDCA การใช้สารคู่ควบไซเลนเพียงอย่างเดียวและใช้คู่กับสารอื่น ทำให้ค่าความแข็งแรงกระแทกน้อยกว่าค่าของสูตร HDCA ส่วนการเพิ่มปริมาณไซเลน (1-5%wt) ไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรงกระแทก

#### 4.5 ผลการทดสอบความแข็ง

เมื่อทำการเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.4.3 ข้อ 3 จากนั้นนำมาทดสอบความแข็งเพื่อศึกษาอิทธิพลของ  $\text{CaCO}_3$  และสารคู่ควบที่มีผลต่อสมบัติความแข็งของ HDPE โดยผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.8

ตารางที่ 4.7 ค่าความแข็ง (Shore D)

สูตร	HD	HDCA	HDCASA	HDCAMA	HDCASAMA
ความแข็ง (Shore D)	59	61	63	62	62

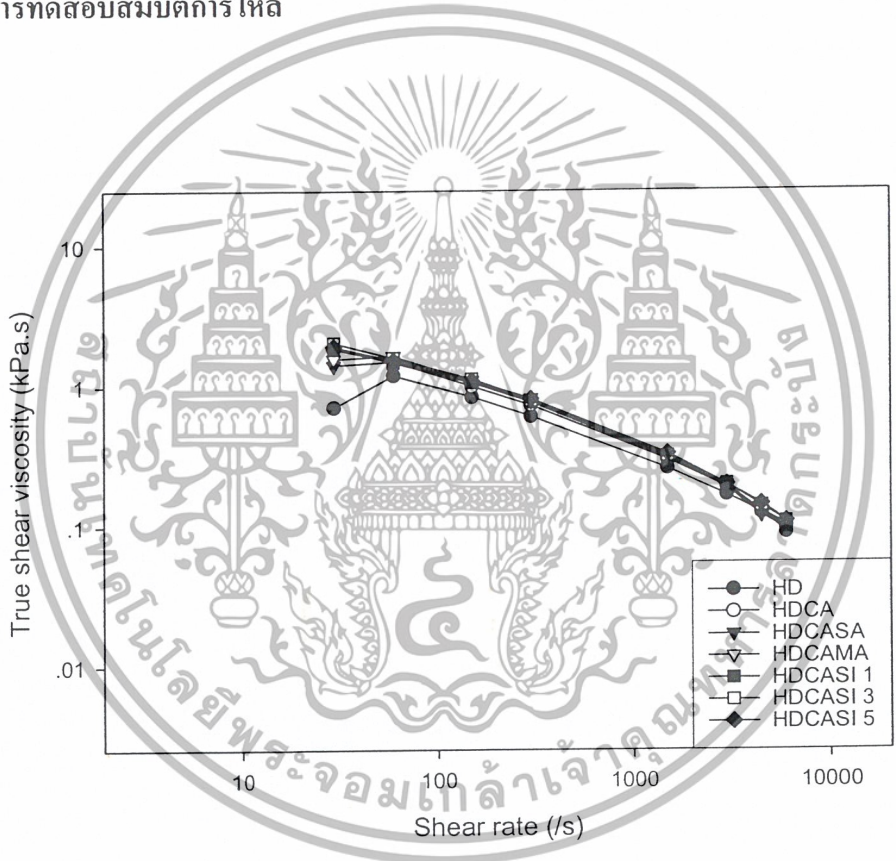


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง (Shore D) กับปริมาณสารคู่ควบ (%wt)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

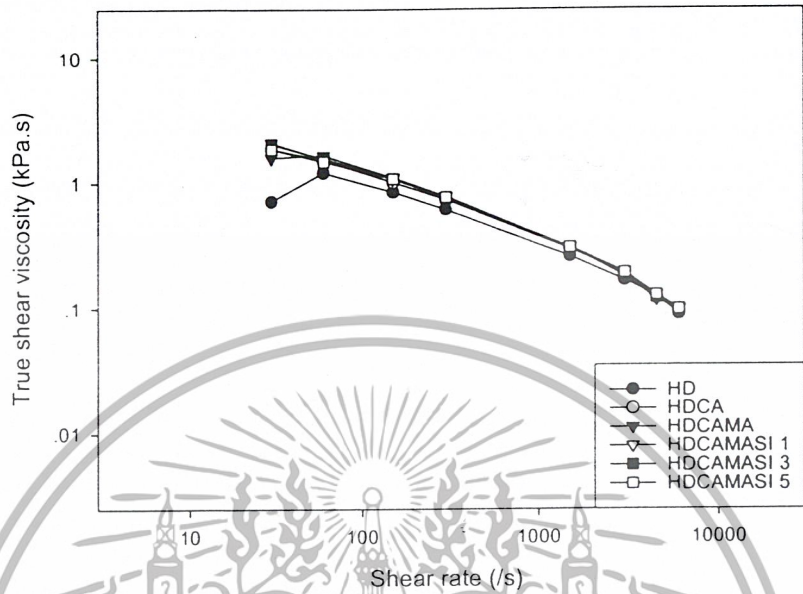
จากตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่อมีการเติม  $\text{CaCO}_3$  20 %wt พบว่าเมื่อมีการเติม  $\text{CaCO}_3$  20 %wt จะส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ HDPE บริสุทธิ์เนื่องจากอนุภาค  $\text{CaCO}_3$  มีค่าความแข็งที่สูงกว่า HDPE ส่วนในสูตรอื่นๆ ค่าความแข็งที่ได้ใกล้เคียงกันกับสูตร HDCA เพราะมีปริมาณ  $\text{CaCO}_3$  ที่แท้จริงอยู่ในช่วง 17-23 % wt

#### 4.6 ผลการทดสอบสมบัติการไหล

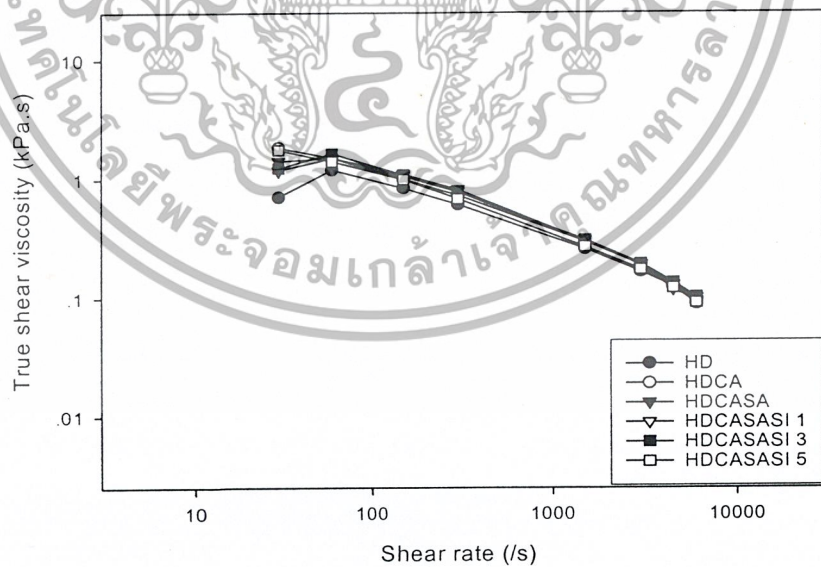


รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่าความหนืดเฉือนที่แท้จริง ของสารตัวอย่าง HDPE/  $\text{CaCO}_3$  ที่มีการเติม SA HDPE-g-MA หรือสารคู่ควบไซเลน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบค่าความหนืดเฉือนที่แท้จริงของสารตัวอย่าง HDPE/CaCO<sub>3</sub> ที่มีการเติมสารคู่ควบไซเลนและ HDPE-g-MA



รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบค่าความหนืดเฉือนที่แท้จริงของสารตัวอย่าง HDPE/CaCO<sub>3</sub> ที่มีการเติมสารคู่ควบไซเลนและ SA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9 ถึง 4.11 จะเห็นได้ว่า เมื่ออัตราการความเครียดเฉือน (Shear strain rate หรือ shear rate) เพิ่มขึ้นค่าความหนืดเฉือนที่แท้จริง (True shear viscosity) ลดลงเนื่องจากเกิดการคลายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ (Chain disentanglement) เมื่อได้รับความร้อนจะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวตามแนวแรงสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น นั่นคือสายโซ่ด้านทานต่อแรงเฉือนน้อยลง ค่าความหนืดจึงลดลง แสดงว่าสารตัวอย่างทุกตัวแสดงพฤติกรรมเป็น Pseudoplastic

การหาค่าความเป็น Pseudoplastic (Pseudoplasticity) ของสูตรตัวอย่างสามารถทำได้ตามสมการ Power law model

$$\tau = K\dot{\gamma}^n$$

เมื่อ  $n$  คือ Power law index  $\tau$  คือ shear rate

$K$  คือ Consistency index  $\dot{\gamma}$  คือ shear strain rate

ค่า Pseudoplasticity สามารถดูได้จาก  $n$  ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 หากค่า  $n$  มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่าสารตัวอย่างแสดงสมบัติเป็น Pseudoplastic มากขึ้น

ตารางที่ 4.8 ค่า Pseudoplasticity (Power law index) ของสารตัวอย่าง

สูตร	$n$
HD	0.55
HDCASA	0.46
HDCA	0.44
HDCAMA	0.45
HDCASI 1	0.44
HDCASI 3	0.44
HDCASI 5	0.45
HDCASASI 1	0.49
HDCASASI 3	0.48
HDCASASI 5	0.44
HDCASAMA	0.40
HDCAMASI 1	0.42
HDCAMASI 3	0.43
HDCAMASI 5	0.45

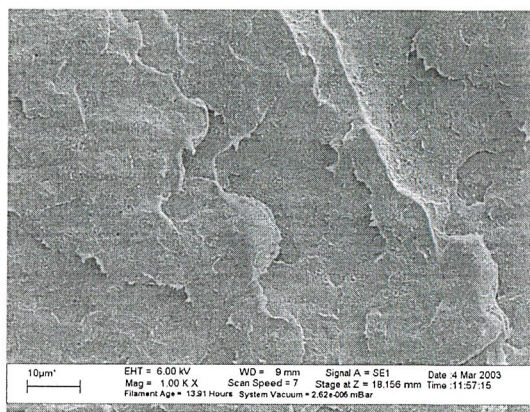
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.8 จะเห็นว่าค่า Power law index ( $n$ ) ของสารตัวอย่างที่มี  $\text{CaCO}_3$  เป็นองค์ประกอบมีค่าน้อยกว่าค่าของสูตร HD เล็กน้อย แสดงว่าการใส่  $\text{CaCO}_3$  ทำให้ HDPE มีความเป็น Pseudoplastic มากขึ้น สารตัวอย่างที่มี  $\text{CaCO}_3$  เป็นองค์ประกอบทุกสูตรมีความว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลง Shear rate พอๆ กันเพราะค่า  $n$  ที่ได้ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.40-0.49

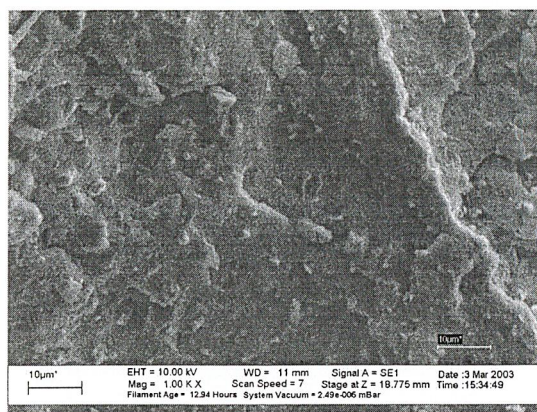
#### 4.7 ผลการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของ $\text{CaCO}_3$ ในสารตัวอย่าง

เมื่อทำการเตรียมสารตัวอย่างดังวิธีที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.4.5 นำมาวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของ ที่ไม่มี SA และมี SA เป็นสารปรับปรุงพื้นผิว มีไซเลนเป็นสารก่อกวนและ HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมในสารตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 4.12 และ 4.13

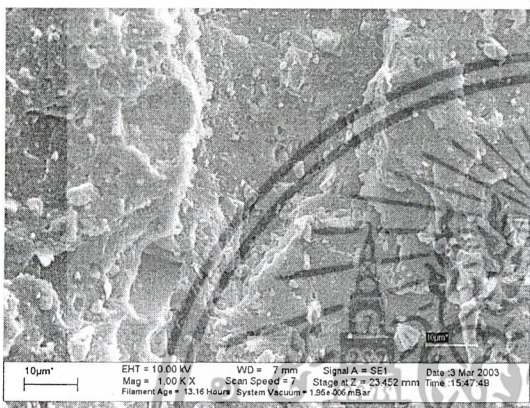
จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 พบว่าเมื่อผสม  $\text{CaCO}_3$  ลงใน HDPE  $\text{CaCO}_3$  มีการกระจายตัวที่ดีในทุกสูตรซึ่งจะมองเห็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่บ้างในรูป (f) แต่ก็ไม่ได้บ่งบอกว่าการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ (Agglomerate) กรดสเตียริก (SA) ช่วยลดความแตกต่างระหว่างขั้วลงซึ่งเมื่อดูจากรูปที่ 4.12 (b) และ (c) จะเห็นถึงการกระจายตัวมากขึ้นซึ่งเหมือนกันกับรูปอื่นๆ แสดงว่า  $\text{CaCO}_3$  ที่ใช้ในปริมาณ 20 %wt ยังไม่เป็นที่ปัญหาในการกระจายตัวของ  $\text{CaCO}_3$  แต่เมื่อมีการเติม MA คู่กับไซเลนในสูตร HDCAMASI ส่งผลให้อนุภาคของ  $\text{CaCO}_3$  โดยเฉลี่ยเล็กกว่า เมื่อเทียบกับ สูตรที่มีการเติม SA และไซเลน แสดงว่าสารช่วยผสมทำงานก่อกวนกับไซเลนได้ดี ส่วนสูตร HDCASAMA ขนาดอนุภาค ส่วนใหญ่จะมีขนาดเล็กเช่นเดียวกัน



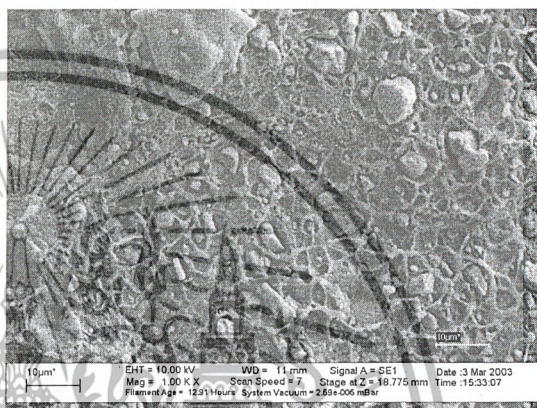
(a) HD



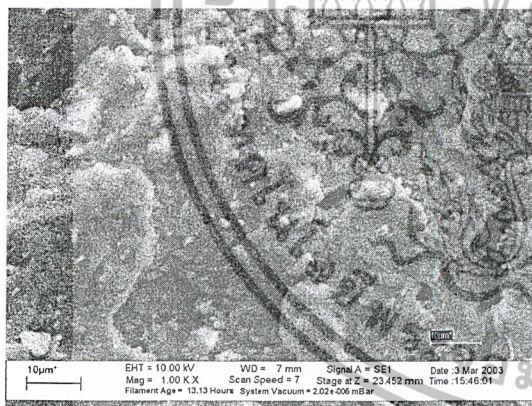
(e) HDCASI 1



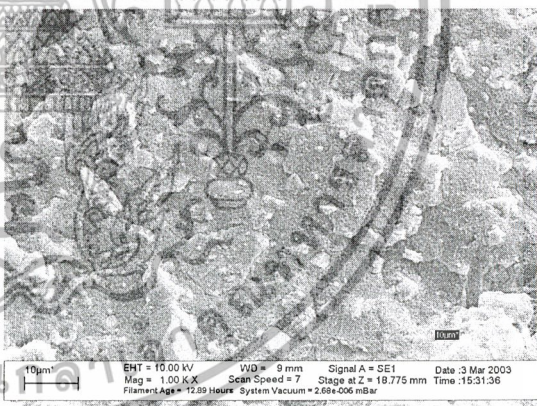
(b) HDCASA



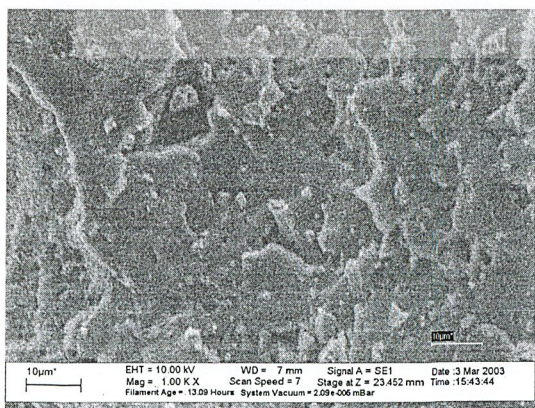
(f) HDCASI 3



(c) HDCA



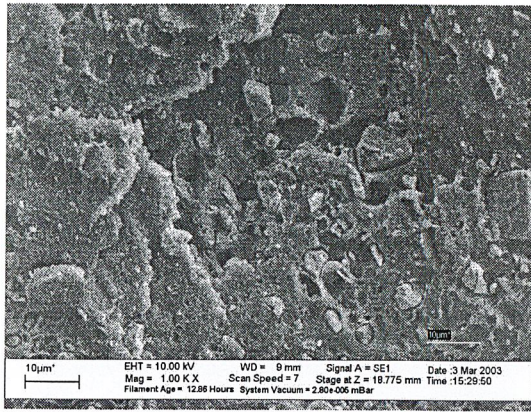
(g) HDCASI 5



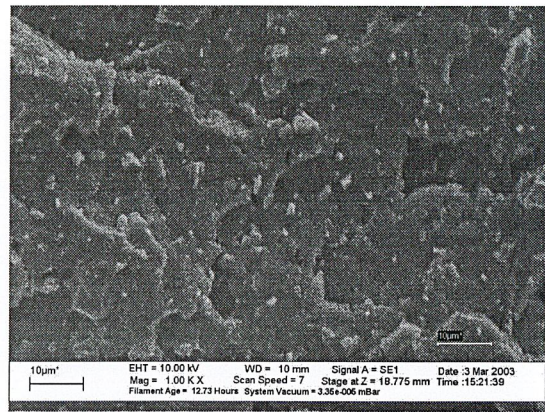
(d) HDCAMA

รูปที่ 4.12 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวของตัวอย่างที่แตกหักที่อุณหภูมิต่ำ กำลังขยาย 1000 เท่าของ HDPE/CaCO<sub>3</sub> ที่มีสารเติมแต่งเพิ่ม 1 ชนิด

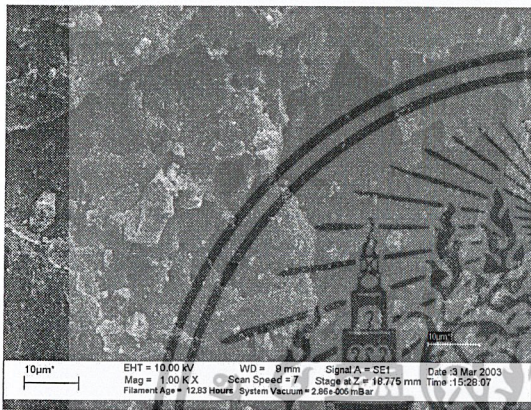
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



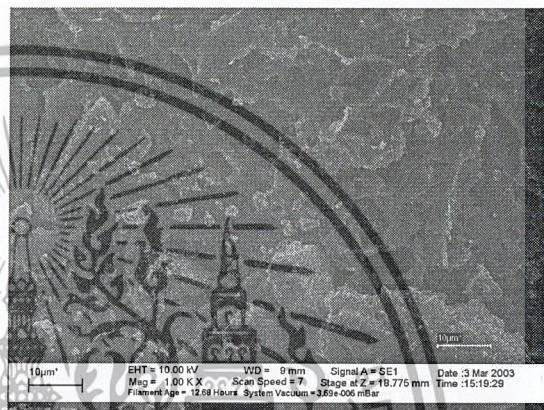
(a) HDCASASI 1



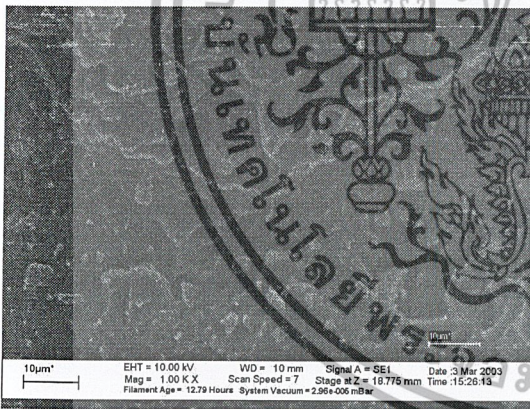
(e) HDCAMASI 1



(b) HDCASASI 3



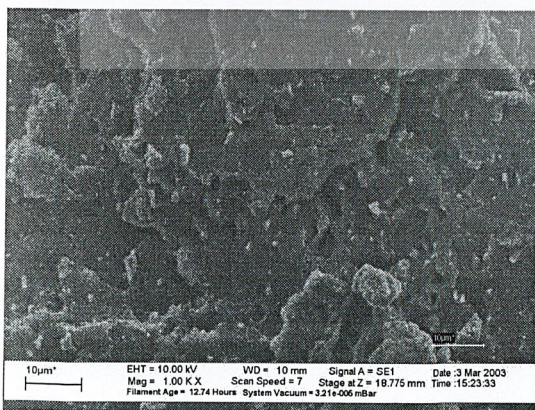
(f) HDCAMASI 3



(c) HDCASASI 5



(g) HDCAMASI 5



(d) HDCAMASA

รูปที่ 4.13 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวของตัวอย่างที่แตกหักที่อุณหภูมิต่ำ กำลังขยาย 1000 เท่าของ HDPE/CaCO<sub>3</sub> ที่มีสารเติมแต่งเพิ่ม 2 ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของ HDPE ที่มีการเติม  $\text{CaCO}_3$  พบว่าการเติม  $\text{CaCO}_3$  ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ค่าความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลงเนื่องจาก HDPE เป็นสารอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว ส่วน  $\text{CaCO}_3$  เป็นสารอนินทรีย์ที่มีขั้ว ความแตกต่างระหว่างขั้วทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่าง  $\text{CaCO}_3$  และ HDPE ไม่แข็งแรง ค่ามอดูลัสและค่าความแข็งของสารตัวอย่างเพิ่มขึ้นเพราะ  $\text{CaCO}_3$  มีค่ามอดูลัสและค่าความแข็งที่มากกว่า HDPE เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของสารตัวอย่างทุกสูตรมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

การใช้กรดสเตียริก (SA 1%wt) ช่วยลดความเป็นขั้วของ  $\text{CaCO}_3$  ทำให้  $\text{CaCO}_3$  สามารถเกิดการกระจายตัวใน HDPE ได้ดีขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสของสารตัวอย่างสูงกว่าเมื่อใช้  $\text{CaCO}_3$  ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุง การเติมสารช่วยผสม HDPE-g-MA (0.1%wt) หรือสารคู่ควบไซเลน  $\gamma$ -aminopropyltriethoxysilane ให้แนวโน้มที่เหมือนกันโดยที่สารทั้งสองทำให้ความแตกต่างระหว่างขั้วของ  $\text{CaCO}_3$  และ HDPE ลดลงทำให้เกิดการผสมดีขึ้น การเพิ่มปริมาณสารคู่ควบไซเลนจนถึง 5 %wt ไม่ส่งผลให้สมบัติเชิงกลที่ศึกษาเปลี่ยนแปลง เมื่อมีการใช้สารเติมแต่งสองชนิด พบว่าเมื่อมีการใช้สารคู่ควบไซเลนคู่กับ HDPE-g-MA ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดที่สูงสุด ส่วนค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อมีการใช้ HDPE-g-MA คู่กับกรดสเตียริก ให้ค่ามอดูลัสที่ดีกว่าการเติมสารชนิดใดชนิดหนึ่ง ส่วนผลการทดสอบสมบัติการไหลพบว่าสารตัวอย่างทุกตัวมีพฤติกรรมเป็น Pseudoplastic และมีความหนืดใกล้เคียงกันเมื่อมีการเติม  $\text{CaCO}_3$  และความหนืดที่ได้มีมากกว่าความหนืดของ HDPE การศึกษาการกระจายตัวของ  $\text{CaCO}_3$  พบว่าในสูตรที่มีการใช้ HDPE-g-MA คู่กับสารคู่ควบไซเลนเห็นอนุภาค  $\text{CaCO}_3$  โดยเฉลี่ยที่เล็กกว่าการใช้ SA หรือ สารคู่ควบไซเลนเพียงอย่างเดียว แสดงว่าสารช่วยผสมสามารถทำงานคู่กับสารคู่ควบไซเลน ได้ดี

จากการทดลองทั้งหมด สามารถสรุปได้ว่า สูตรที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติของ HDPE/ $\text{CaCO}_3$  เท่ากับ 80/20 คือสูตรที่มีการใช้สารช่วยผสม HDPE-g-MA (0.1 %wt) คู่กับสารคู่ควบไซเลน โดยปริมาณสารคู่ควบไซเลนเพียง 1 เปอร์เซ็นต์จะให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดแล้วสำหรับในงานฉีดขึ้นรูป แต่ผลที่ได้ยังไม่เห็นค่าที่ชัดเจนอาจเนื่องมาจากชนิดของพอลิเมอร์ที่เราใช้โดยพอลิเมอร์ที่เราเลือกใช้คือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าประโยชน์ของการนำ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาที่แท้จริงกับสารคู่ควบไซเลน ผลที่ได้จึงน่าจะเกิดเนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างขั้วเท่านั้น  
ค่าที่ได้จึงเห็นความแตกต่างที่ไม่ชัดเจน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการใช้ปริมาณ  $\text{CaCO}_3$  ให้มากขึ้นเพื่อช่วยลดต้นทุนในการผลิต ทั้งนี้ต้องมีการศึกษาถึงปริมาณสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ด้วยเพื่อให้สมบัติของสารตัวอย่างอยู่ในช่วงของการใช้งานได้
2. ควรมีการศึกษารูปแบบการประยุกต์การใช้งานของ HDPE ที่มีคาร์บอนเติม  $\text{CaCO}_3$  ในอัตราส่วน 80/20 เพื่องานขึ้นรูปในเทคนิคต่างๆ เช่น เทคนิคการทำฟิล์ม เทคนิคเป่าขึ้นรูป เป็นต้น
3. ควรมีการเปลี่ยนชนิดของสารคู่ควบไซเลนให้มีความยาวของสายโซ่มากขึ้น



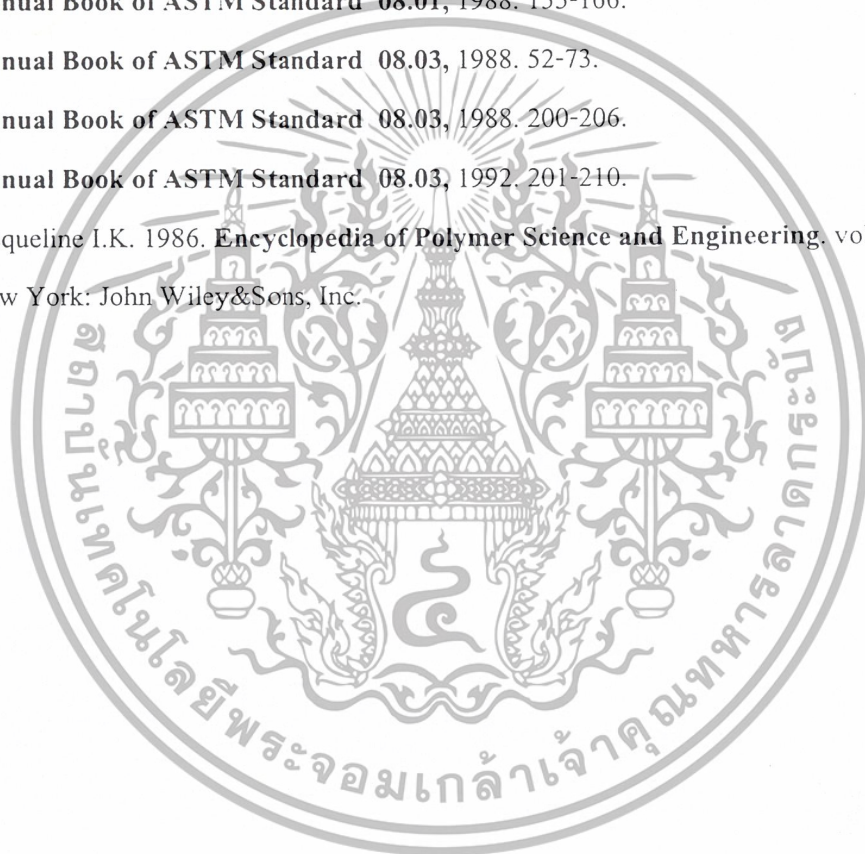
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

1. Rotheron R. 1995. **Particulate Filled Polymer Composites**. pp.47-51. Essex: Longman Scientific&Technical.
2. วารสารพลาสติก. 2538. พอลิเมอร์ทางอุตสาหกรรม3 : 30-33.
3. Jesses E. 1996. **Plastic Additive and Modifiers Handbook 1**. pp.503-512. London : Chapman&Hall
4. Kummer P., Crowe G. **Handbook of Fillers and Reinforcement for Plastic**. pp.81-91.
5. Shenoy A.V. 1999. **Rheology of Filled Polymer System**. London: Kluwer Academic Publishers.
6. เอกสารบริษัท SUN MINERALS SDN.BHD.
7. Kim J.I., Ryu S.H., Chang Y.W. 2000. **J.Appl Polym Sci**. 77: 2595-2602.
8. Kim J.I., Ryu S.H., and Chang Y.W. 1994. **J.Appl Polym Sci**. 53: 239-245.
9. เอกสารบริษัท TOA UNICHEMICAL MANUFACTURING, LTD จำกัด.
10. เอกสารบริษัท ออฟติมอล เทคโนโลยี จำกัด.
11. สมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2542. **เทคโนโลยีพอลิเมอร์1**. กรุงเทพฯ:โครงการตำรา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
12. อิทธิพล แจ่มชัด. 2544. **เอกสารประกอบการเรียนวิชาฟิสิกส์พอลิเมอร์**. คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
13. สมหมาย สิริเลิศสมบัติ. 2526. **รายงานการสัมมนา HDPE บรรจุภัณฑ์ทันสมัย**. ศูนย์บรรจุหีบห่อ สถาบันวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.
14. Fuad M.Y.A., Ismail Z., Ishak Z.A.M., Omar A.K.M. 1995. **J.Polym Eur**. 9: 885-893.
15. Liu Z.H., Kwok K.W., Li R.K.Y., Choy C.L. 2002. **Polymer**. 43: 2501-2506.
16. Demjen Z., Pukanszky B., Nagy J. **Polymer**. 1999. 40: 1763-1773.
17. Hussain M., Nakhira A., Nishijima S., Nihara K.1996. **Material Letters**. 26: 299-303.
18. Demjen Z., Pukanszky B., Foldes E., Nagy J.1997. **J. Colloid Interface Sci**. 190: 427-436.
19. Dealy J.M., MIJANGOS-SANTIAGO F. 1991. **Polym Eng. Sci**. 31:1176-1181.
20. Demjen Z., Pukanszky B., Nagy J.1998. **Composites** . 323-329.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

21. ชนเรศ ประเสริฐวงษ์, ทรายศรีแสงภักดี. 2544. ผลของชนิดของสารช่วยผสมต่อสมบัติของ HDPE ที่ผสม  $\text{CaCO}_3$ . โครงการงานพิเศษ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
22. เอกสารบริษัท ไทยพอลิเอทิลีน จำกัด.
23. เอกสารบริษัท สุรินทร์ออมย่า เคมีคัล จำกัด.
24. Annual Book of ASTM Standard 08.03, 1988. 90-93.
25. Annual Book of ASTM Standard 08.01, 1988. 155-166.
26. Annual Book of ASTM Standard 08.03, 1988. 52-73.
27. Annual Book of ASTM Standard 08.03, 1988. 200-206.
28. Annual Book of ASTM Standard 08.03, 1992. 201-210.
29. Jacqueline I.K. 1986. Encyclopedia of Polymer Science and Engineering, vol 10. New York: John Wiley & Sons, Inc.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก

### ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบสมบัติต่างๆ ของสารตัวอย่าง

#### 1.1 ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength)

สารตัวอย่าง	ค่าความแข็งแรงดึง (MPa)							
	1	2	3	4	5	6	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
HDPE	23.64	24.17	24.14	24.54	23.86	24.41	24.13	12.03
HDCASA	23.92	21.25	22.07	23.25	22.95	22.71	22.69	4.93
HDCASA	22.17	22.16	22.90	22.29	23.05	23.11	22.45	4.33
HDCAMA	21.46	22.01	22.22	22.48	22.33	22.29	22.13	4.83
HDCASI (1)	22.45	23.36	22.67	22.91	22.06	22.67	22.69	4.09
HDCASI (3)	22.58	22.08	22.94	22.26	22.79	22.11	22.46	2.84
HDCASI (5)	22.65	22.91	22.66	22.79	22.91	22.87	22.80	3.65
HDSASI (1)	22.43	23.82	23.07	23.17	22.65	22.48	22.94	3.00
HDSASI (3)	22.33	22.33	22.74	22.49	22.42	22.40	22.45	3.04
HDSASI (5)	22.28	22.54	22.63	22.73	21.93	22.35	22.41	3.45
HDSAMA	21.57	23.18	23.22	22.58	23.68	22.71	22.83	4.01
HDCAMASI (1)	22.89	22.70	22.68	22.19	22.74	22.72	22.65	5.89
HDCAMASI (3)	22.57	22.04	22.60	23.08	23.46	23.37	22.85	2.89
HDCAMASI (5)	22.28	22.51	22.03	22.44	22.05	22.62	22.32	1.88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break)

สารตัวอย่าง	ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด							
	1	2	3	4	5	6	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
HDPE	121.7	72.15	68.26	68.41	71.48	131.8	88.97	0.13
HDCASA	44.01	15.37	15.54	37.23	32.59	37.33	30.35	0.37
HDCASA	27.69	56.69	49.88	55.34	48.87	43.05	46.92	0.30
HDCAMA	39.80	16.58	13.66	35.65	20.73	38.80	27.54	0.14
HDCASI (1)	36.15	33.90	35.02	41.62	38.55	34.80	36.84	0.17
HDCASI (3)	20.65	38.62	39.73	35.66	32.90	36.45	34.00	0.14
HDCASI (5)	21.26	29.09	38.73	40.81	46.38	34.27	35.09	0.04
HDSASI (1)	35.23	25.62	19.44	40.19	32.73	32.93	31.03	0.21
HDSASI (3)	18.30	27.02	28.94	41.15	28.90	32.81	29.52	0.06
HDSASI (5)	23.08	31.44	11.85	26.44	25.44	36.91	25.86	0.11
HDSAMA	41.23	26.03	40.51	40.44	48.23	55.58	42.00	0.29
HDCAMASI (1)	22.38	50.62	37.73	41.81	65.24	36.98	42.46	0.09
HDCAMASI (3)	40.23	39.66	49.84	55.30	36.45	43.74	44.20	0.22
HDCAMASI (5)	25.12	37.81	33.66	37.34	32.99	35.34	33.71	0.09

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.3 ค่ามอดุลัส

สารตัวอย่าง	ค่ามอดุลัส (MPa)							
	1	2	3	4	5	6	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
HDPE	810.2	804.0	822.2	808.8	789.0	826.8	810.2	0.00
HDCASA	946.2	914.6	931.8	915.2	912.4	897.8	919.4	0.05
HDCASA	897.2	871.4	924.4	945.2	949.2	931.6	919.2	0.08
HDCAMA	917.8	952.0	951.8	975.0	930.2	902.2	938.1	0.02
HDCASI (1)	870.4	902.6	921.6	918.0	904.8	926.2	907.2	0.01
HDCASI (3)	989.4	956.2	950.2	992.8	958.8	969.2	968.8	0.02
HDCASI (5)	968.6	1006.4	952.2	969.8	915.0	967.0	962.2	0.01
HDSASI (1)	961.2	983.6	991.0	993.4	1013.8	986.0	988.4	0.01
HDSASI (3)	923.8	939.8	923.6	977.4	978.0	948.0	947.8	0.07
HDSASI (5)	997.8	994.2	982.6	995.6	912.0	994.0	980.4	0.07
HDSAMA	1039.4	922.4	967.2	1000.2	1000.2	1007.4	988.8	0.12
HDCAMASI (1)	955.8	951.2	968.4	947.6	983.2	984.4	965.6	0.01
HDCAMASI (3)	943.6	965.2	924.4	931.2	991.0	975.0	955.0	0.01
HDCAMASI (5)	920.0	921.0	906.4	916.6	884.4	920.6	911.5	0.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ค่าความแข็งแรงต่อแรงกระแทก (Impact strength)

สารตัวอย่าง	ค่าความแข็งแรงต่อแรงกระแทก (kJ/m <sup>2</sup> )										ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
HDPE	8.54	8.16	8.51	8.07	7.84	7.96	7.88	7.78	7.93	7.72	8.04	0.09
HDCASA	5.72	5.69	6.19	6.16	5.76	5.94	5.57	6.21	6.24	6.00	5.95	0.07
HDCASA	5.59	5.22	5.08	5.55	5.76	5.78	5.45	5.60	5.56	5.44	5.50	0.06
HDCAMA	5.16	5.89	6.17	4.58	5.42	5.23	5.26	4.39	4.01	4.64	5.08	0.21
HDCASI (1)	4.43	4.25	4.45	4.63	4.47	4.51	4.49	4.37	4.34	4.36	4.43	0.03
HDCASI (3)	4.60	4.60	4.33	4.81	4.12	4.52	4.48	4.68	4.72	4.46	4.53	0.06
HDCASI (5)	4.82	4.92	5.20	4.79	4.45	4.41	4.64	4.20	4.69	4.38	4.65	0.09
HDSASI (1)	4.35	4.83	4.43	4.80	4.75	5.12	5.03	4.82	4.53	4.48	4.71	0.08
HDSASI (3)	4.93	5.09	4.85	4.99	5.10	4.70	4.85	4.53	5.45	4.29	4.88	0.10
HDSASI (5)	5.25	4.92	4.59	5.19	5.01	4.64	4.46	4.62	5.26	4.51	4.85	0.10
HDSAMA	4.86	4.67	4.86	4.44	4.83	4.51	4.85	4.87	4.63	4.42	4.69	0.05
HDCAMASI (1)	4.39	4.43	3.86	4.10	4.26	4.23	4.27	4.28	4.03	4.46	4.23	0.05
HDCAMASI (3)	5.75	5.37	5.48	5.24	5.68	5.13	5.22	5.71	5.88	5.02	5.45	0.09
HDCAMASI (5)	4.92	4.63	4.74	5.1	4.97	5.27	4.88	4.49	5.03	4.93	4.90	0.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ค่าความแข็ง (Hardness)

สารตัวอย่าง	ค่าความแข็ง (Shore D)										ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
HDPE	58	59	59	61	57	62	60	59	59	62	60	0.5
HDCASA	61	62	66	64	65	64	59	65	61	63	63	0.7
HDCASA	56	62	64	64	59	62	60	62	63	60	61	0.8
HDCAMA	61	63	64	63	62	60	62	64	63	59	62	0.5
HDCASI (1)	60	62	62	61	59	61	63	61	64	60	61	0.5
HDCASI (3)	63	61	64	63	61	62	62	64	62	60	62	0.4
HDCASI (5)	62	63	62	61	63	64	59	63	65	61	62	0.5
HDSASI (1)	60	65	63	62	63	64	65	64	62	61	63	0.5
HDSASI (3)	60	65	65	67	64	63	64	62	62	61	63	0.7
HDSASI (5)	64	63	58	63	60	62	59	63	62	63	62	0.6
HDSAMA	58	63	62	64	62	65	64	63	62	64	63	0.6
HDCAMASI (1)	60	64	65	65	64	65	63	62	63	63	63	0.5
HDCAMASI (3)	62	64	65	60	65	64	64	58	64	61	63	0.7
HDCAMASI (5)	58	62	64	59	65	62	63	65	66	65	63	0.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข. การวิเคราะห์โดย Capillary rheometer

### 2.1 การคำนวณ

#### 2.1.1 การคำนวณค่า Shear stress

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

เมื่อ  $P_L$  = ความดันที่ตกลง ของหัวคายยาวเท่ากับ L

$P_0$  = ความดันที่ตกลง ของหัวคายยาวเท่ากับศูนย์

R = รัศมีของหัวคาย

L = ความยาวของหัวคาย

#### 2.1.2 การคำนวณค่า Shear strain rate

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

เมื่อ Q = อัตราการไหลเชิงปริมาตร (Volumetric flow rate)

R = รัศมีของหัวคาย

#### 2.1.3 การคำนวณค่า Shear viscosity

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

เมื่อ  $\tau$  = ความเค้นเฉือน

$\dot{\gamma}$  = อัตราความเค้นเฉือน (Shear strain rate)

#### 2.1.4 การคำนวณค่า Power law index

$$\tau = K\dot{\gamma}^n$$

$$\log \tau = \log K + n \log \dot{\gamma}$$

เมื่อ n = Power law index

## 2.2 ผลการทดสอบสมบัติการไหลของสารตัวอย่าง

### 2.2.1 HD

Shear rate (1/s)	$P_0$ (kPa)	$P_L$ (kPa)	Shear Visc (kPa.s)	n	Shear Stress (kPa)
30	58	1420	0.71	0.55	21.32
60	209	4830	1.2	0.55	72.12
150	533	8610	0.84	0.55	126.13
300	937	12670	0.61	0.55	183.25
1500	2874	27660	0.26	0.55	387.35
3000	4404	36210	0.17	0.55	496.98
4500	5556	41420	0.12	0.55	560.44
6000	6585	40720	0.09	0.55	533.27

### 2.2.2 HDSA

Shear rate (1/s)	$P_0$ (kPa)	$P_L$ (kPa)	Shear Visc (kPa.s)	n	Shear Stress (kPa)
30	90	2820	1.423	0.46	42.70
60	80	5860	1.505	0.46	90.33
150	159	10730	1.101	0.46	165.14
300	80	15820	0.820	0.46	245.99
1500	3184	32280	0.303	0.46	455.24
3000	5060	40950	0.187	0.46	560.84
4500	6353	40340	0.118	0.46	530.98
6000	7386	43610	0.094	0.46	566.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.3 HDCA

Shear rate (1/s)	$P_0$ (kPa)	$P_L$ (kPa)	Shear Visc (kPa.s)	n	Shear Stress (kPa)
30	90	3660	1.857	0.44	55.71
60	239	6030	1.509	0.44	90.53
150	609	10250	1.005	0.44	150.70
300	1144	15220	0.733	0.44	219.93
1500	3360	31850	0.297	0.44	445.19
3000	5062	41360	0.189	0.44	567.15
4500	6395	41720	0.123	0.44	551.98
6000	7455	44000	0.095	0.44	571.08

## 2.2.4 HDCAMA

Shear rate (1/s)	$P_0$ (kPa)	$P_L$ (kPa)	Shear Visc (kPa.s)	n	Shear Stress (kPa)
30	0	3030	1.577	0.45	47.31
60	130	6480	1.653	0.45	99.16
150	570	11110	1.097	0.45	164.63
300	1145	16140	0.781	0.45	234.32
1500	3401	32700	0.305	0.45	457.74
3000	5221	42300	0.193	0.45	579.39
4500	6530	42770	0.126	0.45	566.23
6000	7626	45360	0.098	0.45	589.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.5 HDCASI(1)

Shear rate (1/s)	$P_0$ (kPa)	$P_L$ (kPa)	Shear Visc (kPa.s)	n	Shear Stress (kPa)
30	136	3800	1.907	0.44	57.21
60	331	6030	1.484	0.44	89.04
150	752	10960	1.064	0.44	159.57
300	1268	16070	0.771	0.44	231.35
1500	3568	33010	0.307	0.44	460.09
3000	5331	42060	0.191	0.44	573.95
4500	6709	43460	0.128	0.44	574.28
6000	7831	46660	0.101	0.44	606.69

## 2.2.6 HDCASI(3)

Shear rate (1/s)	$P_0$ (kPa)	$P_L$ (kPa)	Shear Visc (kPa.s)	n	Shear Stress (kPa)
30	0	3960	2.060	0.44	61.81
60	0	6150	1.602	0.44	96.12
150	357	11230	1.133	0.44	169.89
300	763	16040	0.795	0.44	238.63
1500	2584	33090	0.318	0.44	476.70
3000	4004	42280	0.199	0.44	598.11
4500	5137	45000	0.138	0.44	622.88
6000	6134	47100	0.107	0.44	640.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.7 HDCASI(5)

Shear rate (1/s)	$P_0$ (kPa)	$P_L$ (kPa)	Shear Visc (kPa.s)	$n$	Shear Stress (kPa)
30	189	3900	1.933	0.45	58.00
60	190	6090	1.536	0.45	92.14
150	220	10760	1.097	0.45	164.60
300	261	15870	0.813	0.45	243.87
1500	873	32510	0.330	0.45	494.34
3000	3959	42070	0.199	0.45	595.42
4500	5157	46350	0.143	0.45	643.64
6000	6140	47390	0.107	0.45	644.52

## 2.2.8 HDSASI(1)

Shear rate (1/s)	$P_0$ (kPa)	$P_L$ (kPa)	Shear Visc (kPa.s)	$n$	Shear Stress (kPa)
30	0	2280	1.188	0.49	35.63
60	241	6000	1.501	0.49	90.03
150	637	10850	1.063	0.49	159.52
300	1125	16080	0.779	0.49	233.74
1500	3415	32750	0.306	0.49	458.29
3000	5181	41920	0.191	0.49	574.07
4500	6493	43410	0.128	0.49	576.83
6000	7708	46110	0.100	0.49	600.09

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.9 HDSASI(3)

Shear rate (1/s)	$P_o$ (kPa)	$P_L$ (kPa)	Shear Visc (kPa.s)	n	Shear Stress (kPa)
30	0	2390	1.242	0.48	37.27
60	231	6540	1.644	0.48	98.64
150	693	11130	1.087	0.48	163.12
300	1209	16170	0.779	0.48	233.73
1500	3461	33040	0.308	0.48	462.22
3000	5205	42400	0.194	0.48	581.10
4500	6545	45340	0.135	0.48	606.20
6000	7720	46820	0.102	0.48	610.89

## 2.2.10 HDSASI(5)

Shear rate (1/s)	$P_o$ (kPa)	$P_L$ (kPa)	Shear Visc (kPa.s)	n	Shear Stress (kPa)
30	90	3480	1.764	0.44	52.91
60	130	5560	1.414	0.44	84.82
150	478	10010	0.993	0.44	148.94
300	1002	14140	0.684	0.44	205.33
1500	2999	28940	0.270	0.44	405.25
3000	4582	37900	0.174	0.44	520.58
4500	5576	40560	0.122	0.44	546.61
6000	6589	41500	0.091	0.44	545.51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.11 HDSAMA

Shear rate (1/s)	$P_0$ (kPa)	$P_L$ (kPa)	Shear Visc (kPa.s)	n	Shear Stress (kPa)
30	220	4380	2.170	0.40	65.08
60	399	6570	1.606	0.40	96.35
150	768	10870	1.053	0.40	157.88
300	1178	15200	0.730	0.40	219.12
1500	3274	31410	0.293	0.40	439.69
3000	4906	38830	0.177	0.40	530.00
4500	6182	38450	0.112	0.40	504.19
6000	7220	42310	0.091	0.40	548.33

## 2.2.12 HDCAMASI(1)

Shear rate (1/s)	$P_0$ (kPa)	$P_L$ (kPa)	Shear Visc (kPa.s)	n	Shear Stress (kPa)
30	183	4180	2.080	0.42	62.41
60	340	6240	1.537	0.42	92.20
150	720	10950	1.066	0.42	159.84
300	1234	15990	0.768	0.42	230.50
1500	3433	32930	0.307	0.42	460.85
3000	5183	39730	0.180	0.42	539.74
4500	6424	39880	0.116	0.42	522.67
6000	7562	44250	0.096	0.42	573.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.13 HDCAMASI(3)

Shear rate (1/s)	$P_0$ (kPa)	$P_L$ (kPa)	Shear Visc (kPa.s)	n	Shear Stress (kPa)
30	161	4070	2.034	0.43	61.02
60	369	6350	1.557	0.43	93.40
150	767	11130	1.080	0.43	161.96
300	1230	15660	0.752	0.43	225.50
1500	3482	32890	0.306	0.43	459.47
3000	5188	41110	0.187	0.43	561.25
4500	6554	41120	0.120	0.43	540.06
6000	7658	45080	0.098	0.43	584.78

## 2.2.14 HDCAMASI(5)

Shear rate (1/s)	$P_0$ (kPa)	$P_L$ (kPa)	Shear Visc (kPa.s)	n	Shear Stress (kPa)
30	370	3920	1.847	0.45	55.42
60	391	6040	1.471	0.45	88.25
150	478	10790	1.074	0.45	161.06
300	562	15360	0.771	0.45	231.18
1500	2884	32300	0.306	0.45	459.66
3000	5021	41970	0.192	0.45	577.30
4500	6151	42750	0.127	0.45	571.85
6000	7196	44790	0.098	0.45	587.43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้