สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานโครงการวิจัยของ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โดยทุนอุดหนุนงานวิจัย ปีงบประมาณ 2543

เรื่อง

การศึกษาปริมาณของสารปรับปรุงพื้นผิวที่เหมาะสม สำหรับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติม

โดย

ดร. สุภารัตน์ จำปา
ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

RCH
TP
1180
.P65
ส8385
เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 39609
วัน, เดือน, ปี - 8 มิ.ย. 2544
b.....
i.....
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการวิจัย การศึกษาปริมาณของสารปรับปรุงพื้นผิวที่เหมาะสำหรับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติม

ชื่อ-สกุลหัวหน้าโครงการวิจัย นางสาวสุภารัตน์ จำปา

คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชา เคมี สาขา เคมีอุตสาหกรรม

บทคัดย่อ

การศึกษาสมบัติการไหลและสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่บริสุทธิ์ และที่มีสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ทำการเตรียมตัวอย่างโดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ แล้วตรวจสอบอัตราส่วนที่แน่นอนโดยการเผา ชิ้นงานตัวอย่างจากเครื่องฉีดขึ้นรูปนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง เครื่องทดสอบความแข็งแรงกระแทก และเครื่องทดสอบความแข็ง ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) รวมทั้งสมบัติการไหลของตัวอย่างด้วยเครื่อง Capillary Rheometer พบว่าสมบัติส่วนใหญ่ด้อยลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อมี $CaCO_3$ 30 เปอร์เซ็นต์ในสารตัวอย่าง เช่น ลักษณะการขาดของชิ้นงานเป็นแบบแข็งเปราะ อุณหภูมิในการหลอมผลึก (T_m) ค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงกระแทก และค่าการบวมตัวของชิ้นงานมีค่าลดต่ำลง แต่ค่าความแข็งความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้น

เมื่อทำการปรับสภาพผิว $CaCO_3$ ด้วยกรดสเตียริก (SA) เพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ ให้ดีขึ้น โดยทำการเคลือบผิวของ $CaCO_3$ ด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง แล้วทำการผสมและทดสอบสมบัติเหมือนข้างต้น พบว่าลักษณะการขาดของชิ้นงานเป็นแบบเหนียว ค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ค่าความแข็งแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ SA จนถึงปริมาณประมาณ 1.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หากใช้ SA ปริมาณสูงกว่านี้สมบัติดังกล่าวมีค่าต่ำลง แต่ค่าความหนืดมีค่าลดลงและค่าความแข็งเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อSA เพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณ SA ที่เหมาะสมของ HDPE 70 ส่วนผสมกับ $CaCO_3$ 30 ส่วน คือ 1.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ $CaCO_3$ (ซึ่งเท่ากับ $CaCO_3$ ถูกเคลือบด้วย SA 2 ชั้นโดยประมาณ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title: A Study of Addition Level of Surface Modifier for HDPE filled with $CaCO_3$ Filler

Author : Miss Suparat Jumpa, Chenistry Department, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

This research concerns rheological and mechanical properties of unfilled and calcium carbonate ($CaCO_3$)-filled high density polyethylene (HDPE). The compounds were prepared using a twin-screw extruder and ashing determination was carried out to find accurate filler content in each compound. Test specimens were prepared using an injection moulding machine. Mechanical characteristics studies included tensile properties, impact strength and hardness. Some thermal properties of the compounds were investigated using a Differential Scanning Calorimeter (DSC). In addition, rheological properties were studied by a capillary rheometer. It was observed that most properties significantly decreased when 30 % by weight of $CaCO_3$ was incorporated into the compounds. For example, most specimens failed in brittle mode. The crystalline melting temperature (T_m), yield strength, elongation at break, tensile strength, impact strength and die swell decreased but hardness and viscosity increased.

Furthermore, $CaCO_3$ was coated with stearic acid (SA) for improving some properties. The coated $CaCO_3$ were prepared using a high speed mixer. Sample preparation and testing were similar to the untreated one. It was found that yield strength, elongation at break, hardness and impact strength increased with increasing SA content (in the range of 0 to 1.7 % by weight). However, those properties decreased when added SA over 1.7 % by weight. Viscosity decreased but hardness was not significantly affected when SA increased. Therefore, the suitable SA content for 70 parts of HDPE and 30 parts of $CaCO_3$ should be 1.7 % by weight of $CaCO_3$ ($CaCO_3$ is approximately coated 2 layers of SA).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
สารบัญ	ค
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงงานพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของโครงงานพิเศษ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE)	3
2.1.1ความเป็นมา	3
2.1.2 กระบวนการผลิตและตัวเร่งปฏิกิริยา	3
2.1.3 สมบัติทั่วไป	4
2.1.4 กระบวนการ และการประยุกต์ใช้งาน	5
2.2 แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$)	5
2.2.1 ความเป็นมา	5
2.2.2 การผลิต	6
2.2.3 สมบัติของแคลเซียมคาร์บอเนต	7
2.2.4 การประยุกต์ใช้งาน	7
2.3 กรดสเตียริก (Stearic acid ,SA)	8
2.3.1 ความเป็นมา	8
2.3.2 สมบัติทั่วไปของกรดสเตียริก	8
2.4 กระบวนการแปรรูปพลาสติก	9
2.4.1 การอัดรีด (Extrusion)	10
2.4.2 การฉีดขึ้นรูป (Injection molding)	11
2.5 เครื่องผสมชนิดความเร็วสูง	12
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	12
บทที่3 การทดลอง	16
3.1 สารเคมี	16
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	17

เอกสารนี้ใช้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
3.3 วิธีการทดลอง	17
3.3.1 การเตรียมสารตัวอย่าง	17
3.3.2 การตรวจสอบตัวอย่าง	19
3.3.2.1 การตรวจสอบสารเคมีที่ใช้	19
3.3.2.2 การตรวจสอบทางความร้อนของสารประกอบที่ผลิตได้	19
3.3.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของสารตัวอย่าง	19
บทที่ 4 ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง	21
4.1 ผลการวิเคราะห์รูปร่างของแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยเครื่อง SEM	21
4.2 ผลการหาพื้นที่ผิวของแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยเครื่อง AUTOSORB-1	22
4.3 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณที่แน่นอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและปริมาณกรดสเตียริกที่ใช้ในการเคลือบแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยเตาเผา	23
4.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC	24
4.5 ผลการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ไม่มีกรดสเตียริกและมีกรดสเตียริกเป็นสารปรับปรุงพื้นผิวในสารตัวอย่างด้วยเครื่อง SEM	25
4.6 ผลการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง	30
4.7 ผลการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทก	35
4.8 ผลการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง	37
4.9 การทดสอบการไหลด้วยเครื่องมือวัดสมบัติการไหล (Capillary Rheometer)	38
4.10 ผลการวิเคราะห์ค่าการบวมตัว (Die swell)	41
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	42
5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย	42
5.2 ข้อเสนอแนะ	43
เอกสารอ้างอิง	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

พลาสติก นับเป็นวัสดุที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันและเป็นวัสดุที่มีความสำคัญควบคู่ไปกับเหล็กและไม้ ทั้งนี้เพราะพลาสติกมีน้ำหนักเบา สามารถผลิต ดัดแปลง และแปรรูปได้ง่าย พลาสติกมีสมบัติเด่นต่างจากสารชนิดอื่น ๆ คือมีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก จึงทำให้พลาสติกมีสมบัติพิเศษหลาย ๆ อย่างพร้อมกัน เช่น สมบัติทางกายภาพ มีความแข็งแรง เหนียว ยืดหยุ่น สมบัติทางไฟฟ้า เป็นบางชนิดมีความฉนวนไฟฟ้าดี สมบัติทางเคมี มีความสามารถในการทนกรด ด่าง และสารเคมีอื่น ๆ

จากสมบัติข้างต้นนี้จึงทำให้ในปัจจุบันปริมาณการใช้งานพลาสติกมีค่อนข้างสูง เพราะพลาสติกถูกนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด เช่น ใช้ทำภาชนะบรรจุอาหาร อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ รองเท้า เครื่องใช้ในครัวเรือน ประตูและหน้าต่าง เป็นต้น กระบวนการแปรรูปพลาสติกที่นิยมในอุตสาหกรรมแบ่งเป็นหลายกระบวนการ เช่น การอัดรีด (Extrusion) การฉีดขึ้นรูป (Injection molding) การเป่าขึ้นรูป (Blow molding) การรีด (Calendering) การหล่อ (Casting) และการขึ้นรูปร้อน (Thermoforming) เป็นต้น แต่เนื่องจากพลาสติกเป็นสารที่สังเคราะห์ขึ้นมาโดยใช้วัตถุดิบจำพวกปิโตรเลียมซึ่งเป็นทรัพยากรที่มีจำนวนจำกัด และมีโอกาสที่จะหมดไปในอนาคต จึงทำให้ราคาพลาสติกมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อย ๆ จากการศึกษาพบว่าการใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ช่วยในการลดปริมาณการใช้พลาสติกลงซึ่งอาจส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตลดลง และในบางกรณีอาจใช้ช่วยในการปรับปรุงสมบัติบางประการของผลิตภัณฑ์ แต่จากการเพิ่มปริมาณสารตัวเติมจะทำให้การผสมเข้ากันของสารตัวเติมกับพลาสติกเป็นไปได้ยาก และถ้าปริมาณสารตัวเติมนั้นมีมากเกินไปจะทำให้สมบัติต่าง ๆ เปลี่ยนไปในทางลบ ดังนั้นในการเติมสารตัวเติมจะต้องใช้ในปริมาณที่พอเหมาะ และในทางอุตสาหกรรมนั้นมีการใช้สารปรับปรุงพื้นผิว (Surface modifiers) เพื่อเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวของสารตัวเติมในพลาสติก และช่วยปรับปรุงสมบัติบางประการของพลาสติก ซึ่งสารปรับปรุงพื้นผิวที่นิยมใช้ได้แก่ กรดสเตียริก (Stearic acid) หรือ เมทัลลิก สเตียเรท (Metallic stearate) เป็นต้น

การทดลองนี้ได้เลือกศึกษาสมบัติการไหลและสมบัติเชิงกลของพลาสติกที่มีสารตัวเติมเป็นองค์ประกอบในสภาวะที่เหมาะสม โดยพลาสติกที่ใช้ในการศึกษาคือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) เนื่องจากพลาสติกชนิดนี้เป็นที่นิยมนำมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่ง HDPE มากกว่าร้อยละ 40 ใช้ทำขวด และภาชนะอื่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ต้องใช้ความต้านทานสูง ทนต่อแรงเค้นสูง และอีกประมาณร้อยละ 20 ใช้ทำของเด็กเล่น เครื่องใช้ในครัว[1] นอกจากนี้ยังใช้ทำแผ่นฟิล์ม ถุงพลาสติก ฉนวนหุ้มสายไฟ และ วัสดุเคลือบผิว เป็นต้น ส่วนสารตัวเติมที่ใช้คือแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย คือได้จากหินแร่ธรรมชาติหรือจากการสังเคราะห์ มีความขาว ราคาถูก และมีให้เลือกหลายขนาด ในบางครั้งแคลเซียมคาร์บอเนตจะถูกเคลือบด้วยกรดสเตียริกเพื่อช่วยปรับสภาพผิว

1.2 วัตถุประสงค์

- ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับแคลเซียมคาร์บอเนต ที่มีสมบัติเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน
- ศึกษาปริมาณการใช้กรดสเตียริกที่เหมาะสมในการเคลือบบนแคลเซียมคาร์บอเนต
- ทดสอบสมบัติการไหล และสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ที่มีแคลเซียมคาร์บอเนต ที่ปรับปรุงพื้นผิวและไม่ปรับปรุงพื้นผิว

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เน้นการศึกษาสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ในเรื่องของความทนต่อแรงดึง ความทนทานต่อแรงกระแทก ความแข็งและสมบัติการไหล ซึ่งสามารถแบ่งย่อยได้ดังนี้

1. ศึกษาผลของปริมาณสารตัวเติม โดยใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมกับแคลเซียมคาร์บอเนต ขนาดอนุภาค 2.8 ไมครอน ในปริมาณต่าง ๆ ดังนี้ 10% 20% 30% และ 35% โดยน้ำหนัก

2. ศึกษาผลของปริมาณสารปรับปรุงพื้นผิวบนสารตัวเติม โดยใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมกับแคลเซียมคาร์บอเนต (ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ที่ทำให้สมบัติต่าง ๆ ด้อยลงอย่างเห็นได้ชัด) มีการเติมกรด สเตียริก ในปริมาณต่าง ๆ คือ 0.75% 1.5% และ 2.25% โดยน้ำหนักของแคลเซียมคาร์บอเนต หรือเท่ากับ 1 2 และ 3 ของจำนวนชั้นที่เคลือบ ตามลำดับ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- เพื่อพัฒนาความรู้เกี่ยวกับผลของสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ และนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับสารตัวเติม และพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ

-เพื่อเป็นการพัฒนาเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตปรับปรุงสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่มีส่วนเกี่ยวข้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE)

2.1.1ความเป็นมา

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจัดเป็นเทอร์โมพลาสติกประเภทพอลิโอเลฟิน ซึ่งได้มาจากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์ของเอทิลีน

$$n(CH_2 = CH_2) \xrightarrow{\text{polymerization}} -(CH_2CH_2)_n-$$

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงอาจเรียกว่า พอลิเอทิลีนเชิงเส้น (Linear polyethylene) เพราะพอลิเมอร์มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงเกือบตลอด (โซ่กิ่งบ้างแต่น้อยมาก) หรืออาจเรียกว่าพอลิเอทิลีนความดันต่ำ เพราะกระบวนเตรียมพอลิเมอร์ชนิดนี้ทั่วไปใช้ความดันต่ำกว่าการเตรียมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงนี้ผลิตขึ้นในเชิงการค้าตั้งแต่ปี ค.ศ. 1955 และได้มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก HDPE อย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน [1]

2.1.2 กระบวนการผลิต และตัวเร่งปฏิกิริยา

การผลิต HDPE ได้พัฒนามาเป็นลำดับขั้นในปัจจุบันมีการใช้อยู่ 3 กระบวนการคือ กระบวนการแบบสารละลาย (Solution process) กระบวนการแบบสถานะก๊าซ (Gas phase process) และกระบวนการแบบสารแขวนลอย (Slurry process) ซึ่งในกระบวนการทั้งหมดเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน แต่พบว่าสมบัติของเม็ด HDPE ที่ได้จากแต่ละกระบวนการจะแตกต่างกันไป ส่วนองค์ประกอบหลัก คือ เอทิลีนมอนอเมอร์ โคมอนอเมอร์ ตัวเร่งปฏิกิริยา (อาจมีมากกว่าหนึ่งองค์ประกอบ) และสารละลายไฮโดรคาร์บอนบางชนิดโดยใช้ไฮโดรเจนกับตัวเร่งปฏิกิริยาในการควบคุมน้ำหนักโมเลกุล [2]

สำหรับกระบวนการแบบสารแขวนลอย/เอทิลีน และตัวเร่งปฏิกิริยาจะเข้ามาในถังปฏิกรณ์ได้ HDPE ออกมาเป็นผง ลอยอยู่ในตัวทำละลาย จากนั้นนำไปแยกจากกันโดย 2 ขั้นตอน คือ ตัวทำละลายส่วนหนึ่งจะระเหยขึ้นไปแล้วใช้เครื่องเหวี่ยง จากนั้นทำให้แห้งเพื่อไล่เอาตัวทำละลายที่ตกค้างอยู่ออก แล้วนำมาอัดเป็นเม็ด [2]

ในปัจจุบันได้มีเทคโนโลยีเพื่อที่จะพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาแบบความดันต่ำที่ใช้กับ HDPE โดยแบ่งตามประเภทการใช้งานเป็น 2 ประเภท คือ กระบวนการฟิลลิปส์ (Phillips process) โดยใช้โครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะได้ HDPE ที่มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลในช่วงปานกลาง และกระบวนการซีเกลอร์ (Ziegler process) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือไทเทเนียมเต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตระคลอไรด์ ($TiCl_4$) กับ อะลูมิเนียม แอลคิล จะใช้ในการผลิต HDPE ที่มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลในช่วงแคบ [3]

2.1.3 สมบัติทั่วไป

HDPE มีความเป็นผลึกสูง เนื่องจาก มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรง และมีโซ่กิ่งน้อยมาก ไม่มีขั้ว มีสมบัติต้านทานทางเคมีสูง และไม่ดูดซึมของผสม ซึ่งจัดว่าเป็นสารที่ป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor barrier) ที่ดี โดยทำการประยุกต์ใช้ในเรื่องของบรรจุภัณฑ์ เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี HDPE ที่มีช่วงของน้ำหนักโมเลกุลปานกลางถึงสูง จะมีสมบัติทนทานต่อแรงกระแทกดีมาก [2]

สิ่งที่กำหนดสมบัติของ HDPE นั้นขึ้นกับ 4 ตัวแปร คือ ความหนาแน่น ดัชนีการไหล (MFI) การกระจายน้ำหนักโมเลกุล (MWD) และสารเติมแต่ง ดังมีรายละเอียดดังนี้

ความหนาแน่น เป็นตัวแปรที่สำคัญในการหาสมบัติของ HDPE โดย HDPE จะมีความหนาแน่นประมาณ 0.940-0.965 g/cm^3 พบว่าเมื่อความหนาแน่นสูงขึ้นจะทำให้สมบัติดังต่อไปนี้ คือ ความแข็งแรงจากการรับแรงดึง (Tensile Strength) การคงรูปหรือความแข็งแกร่ง (Rigidity) ความแข็ง (Hardness) ความทนทานต่อความร้อน และอุณหภูมิ (Heat Resistance) ความทนทานต่อสารเคมี ความทนต่อการแทรกซึมของก๊าซ มีลักษณะเป็นผิวเรียบ มันวาว และมีสมบัติทางกายภาพต่าง ๆ ดีขึ้น [2]

ค่าดัชนีการไหล (MFI) เป็นการวัดน้ำหนักโมเลกุล ถ้าดัชนีการไหลสูงแสดงว่ามีความหนืดน้อย สายโซ่โมเลกุลสั้น น้ำหนักโมเลกุลต่ำ แต่ถ้าดัชนีการไหลต่ำ แสดงว่ามีความหนืดสูงหรือน้ำหนักโมเลกุลสูง ปกติ HDPE จะมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 40,000-300,000 ซึ่งมีค่าดัชนีการไหลอยู่ในช่วง 0.02-100 กรัมต่อ 10 นาที ดัชนีการไหลมีผลต่อสมบัติเชิงกลของ HDPE เช่นความสามารถในการขึ้นรูปถ้าค่าดัชนีการไหลมาก การขึ้นรูปก็ง่ายเพราะความหนืดลดน้อยลง แต่สมบัติอื่น ๆ เช่น ความต้านทานต่อแรงกระแทกลดลง เพราะน้ำหนักโมเลกุลเล็กลง สายโซ่โมเลกุลมีขนาดสั้น ดังนั้นการรับแรงจึงไม่ดีเท่ากับโมเลกุลที่มีสายโซ่ยาว แต่เมื่อดัชนีการไหลเพิ่มขึ้นจะมีผลให้ค่าความต้านแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมลดลง [2]

การกระจายของน้ำหนักโมเลกุล (MWD) ของ HDPE จะอยู่ในช่วงแคบถึงกว้าง ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการแปรรูปที่ใช้ พบว่าถ้าการกระจายตัวกว้างจะทำให้ขึ้นรูปได้ง่าย เพราะส่วนที่เป็นโมเลกุลเล็ก ๆ จะเข้ามาช่วยหล่อลื่น ขณะเดียวกันจะทำให้การหดตัว และการงอตัวเพิ่มขึ้น เพราะมีสายโซ่ขนาดโมเลกุลไม่เท่ากัน มีทั้งสายโซ่แบบสั้นและยาวอยู่ด้วยกัน เวลาชิ้นงานได้รับความเย็นการตกผลึกจะไม่เท่ากัน ส่วนความต้านทานต่อแรงกระแทกจะลดลง และความต้านทานต่อแรงเค้นของสภาพแวดล้อมเพิ่มขึ้น โดยปกติถ้าทำการผลิต HDPE ที่มีค่าดัชนีการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่ำ หรือน้ำหนักโมเลกุลสูงจะทำให้ขึ้นรูปลำบากมาก ดังนั้นจึงต้องอาศัยการกระจายน้ำหนักโมเลกุลกว้างมากมาช่วย โดยการนำ HDPE ที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลที่มีช่วงแคบ 2 ชนิดมารวมกัน [2]

สารเติมแต่ง พลาสติกจำนวนมากจำเป็นต้องเติมสารเคมีหรือสารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ เพื่อให้สมบัติต่าง ๆ ดีขึ้น เช่น เติมสารปรับปรุงความทนทานต่อแรงกระแทกเพื่อเพิ่มความเหนียวเติมเส้นใยเสริมแรงเพื่อเพิ่มความแข็งแรง สารปรับปรุงสมบัติพลาสติก (plastic modifier) เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น เติมสารเสถียรภาพเพื่อเพิ่มความทนทานต่อแสงอัลตราไวโอเลต เติมสารเพื่อเพิ่มเนื้อและลดต้นทุนในการผลิต เติมสารให้สีเพื่อทำให้มีสีสัน และอื่น ๆ เป็นต้น [4]

2.1.4 กระบวนการ และการประยุกต์ใช้งาน

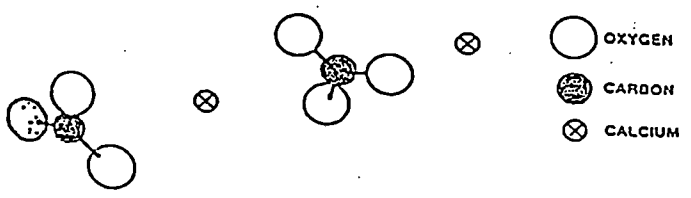
HDPE ถูกนำมาแปรรูปให้ได้รูปร่างตามผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เช่น ใช้ทำภาชนะ รองเท้า เครื่องใช้ในครัวเรือน ประตู และหน้าต่าง เป็นต้น โดยกระบวนการแปรรูปที่มีการใช้ HDPE มีด้วยกันหลายกระบวนการ เช่น ทำแผ่นฟิล์ม (Film) ฉีดขึ้นรูป (Injection molding) เป่าขึ้นรูป (Blow molding) ทำท่อ (Pipe Extrusion) ทำแผ่น (Sheet extrusion) เคลือบผิว (Coating) เป็นต้น [2]

2.2 แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$)

2.2.1 ความเป็นมา

ในปัจจุบันนี้มีการใช้สารตัวเติม (Filler) ใส่หรือผสมลงไปในพลาสติกกันอย่างกว้างขวาง ทั้งนี้เพื่อลดต้นทุน หรืออาจช่วยให้สมบัติบางประการของพลาสติกดีขึ้น ในการพิจารณาที่จะนำเอาสารตัวเติม มาใช้จะต้องคำนึงถึงผลต่างๆหลายประการ เช่น การกระจายตัวของสารในเนื้อพลาสติก การขัดสีของสารกับเครื่องจักร สมบัติต่างๆเมื่อผสมสารตัวเติมแล้วรวมทั้งปัญหาด้านความปลอดภัยจากละอองฝุ่น และที่สำคัญที่สุดคือด้านราคา $CaCO_3$ มีราคาถูก จึงทำให้มีความเหมาะสมที่จะนำมาศึกษาใช้งานเพราะ ไม่เป็นพิษ มีความขาว มีหลายขนาด และมีการใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม [5] $CaCO_3$ เป็นสารธรรมชาติที่เกิดจากการตกตะกอนของหินในทะเล เปลือกหอยและโครงกระดูกสัตว์น้ำ $CaCO_3$ เป็นสารทั่วไปที่ใช้เติมลงในพลาสติก ซึ่งมีหลายชื่อโดยแบ่งตามแหล่งกำเนิด เช่น หินอ่อน หินปูน หินปะการัง เปลือกหอย และชอล์ค หรือ แบ่งตามลักษณะโครงสร้างผลึก เช่น แคลไซท์ (Calcite) อะราโกไนท์ (Aragonite) และเมื่อมีแมกนีเซียมคาร์บอเนตอยู่ในโครงผลึกจะเรียก โดโลไมท์ [Dolomite, ($CaCO_3/MgCO_3$)] [6]

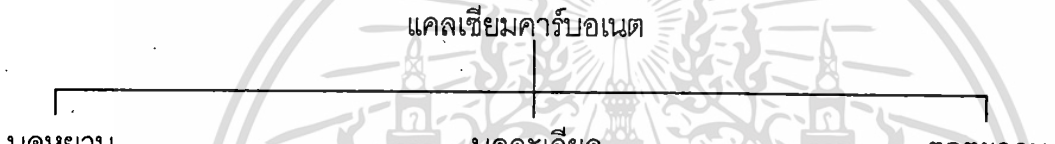
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของ $CaCO_3$ [6]

2.2.2 การผลิต

ในทางการค้าได้มีการผลิต $CaCO_3$ เป็น 3 เกรด และใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติกคือ แบบบดหยาบ แบบบดละเอียด และแบบตะกอน ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงเกรดของ $CaCO_3$ [6]

การสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตมี 3 วิธี

1. Solvey Process (Na_2CO_3)
2. Sodium Hydroxide Process
3. Carbonation Process

ใน 3 วิธีนี้ วิธี Carbonation Process เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด และได้ $CaCO_3$ โดยมี 3 ขั้นตอนย่อย ๆ ดังนี้

3.1 Calcination $CaCO_3 \longrightarrow CaO + CO_2$

3.2 Hydration $CaO + H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2$

3.3 Carbonation $Ca(OH)_2 + CO_2 \longrightarrow CaCO_3 + H_2O$

กระบวนการเริ่มจากการเผาหินปูนที่อุณหภูมิประมาณ 900°C จะได้คาร์บอนไดออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ (CaO หรือ Quick lime) หลังจากนั้นทำการแยกให้บริสุทธิ์ขึ้น CaO จะกลายเป็นสารแขวนลอยของหินปูน (Milk of lime) และน้ำ ผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสารแขวนลอยของหินปูนได้ $CaCO_3$ แยกขนาดอนุภาคด้วยการกรองโดยมีตัวกรองสุญญากาศแบบหมุน และตัวกรองใช้ความดันช่วยในการกำจัดน้ำ หลังจากนั้นทำให้แห้งโดยใช้ ช่องพ่นละอองน้ำแบบหมุน (Rotary tunnel spray) หรือการทำให้แห้งแบบรวดเร็ว (Flash dry) ในกระบวนการมักจะได้ $CaCO_3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปของอะราโกไนท์ (Aragonite) มีขนาดอนุภาค 0.2-2.0 ไมครอน ซึ่งสภาวะของปฏิกริยาจะมีผลต่อขนาดอนุภาค และการกระจายตัวของอนุภาคโดยถ้ามีความชื้นมากเกินไป จะทำให้อนุภาคกระจายตัวได้ไม่ดีเนื่องจากจะทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นระหว่างอนุภาค [6]

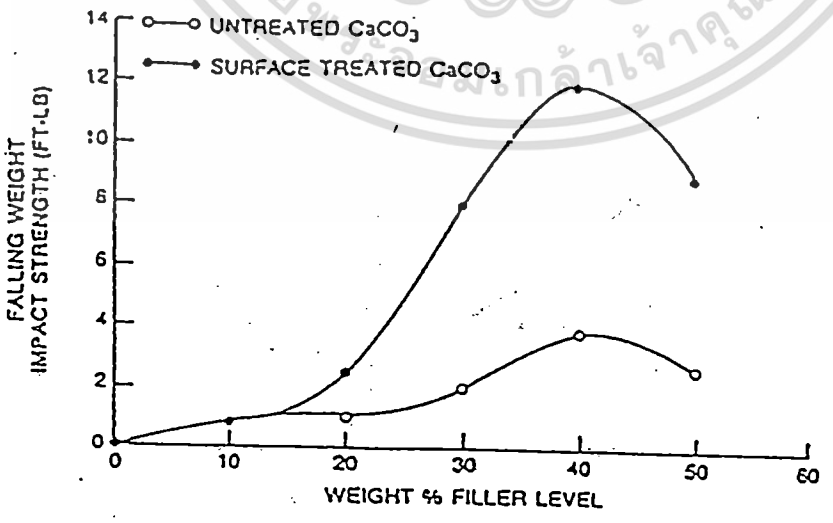
2.2.3 สมบัติของแคลเซียมคาร์บอเนต [5]

แคลเซียมคาร์บอเนตคุณภาพสูง จะต้องมีสมบัติดังนี้

- มีความบริสุทธิ์ ไม่มีโลหะหนักเจือปนที่จะเป็นตัวเร่งให้เกิดการเสื่อมสภาพของพลาสติก
- มีพื้นที่ผิวจำเพาะ ไม่ดูดซึมสารปรับปรุงสมบัติพลาสติก และสารเติมแต่งต่าง ๆ
- มีองศาความขาวสูงและการกระจายตัวดี (โดยเฉพาะชนิดที่มีการเคลือบ)
- เพิ่มความแข็งตึง (Stiffness) และมอดุลัสของความยืดหยุ่น
- เพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทก โดยเฉพาะชนิดที่มีการเคลือบ
- ไม่เป็นพิษ ไม่มีกลิ่น ทนความร้อนได้สูง 800 °C

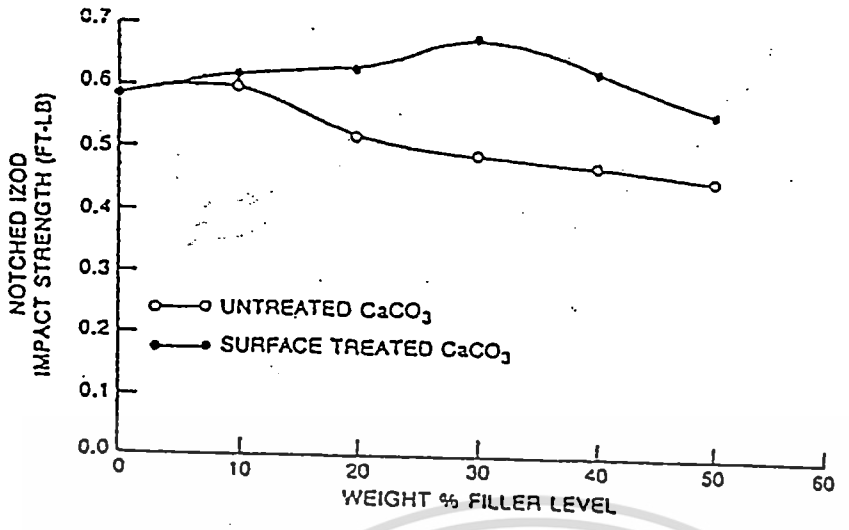
2.2.4 การประยุกต์ใช้งาน

$CaCO_3$ ใช้กับพอลิเอทิลีน (PE) และพอลิพรอพิลีน (PP) เพื่อลดต้นทุน $CaCO_3$ ที่บดแล้วเติมลงใน PE ทำให้สมบัติเชิงกลบางประการของ PE ลดลง เช่น ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) [6] การเติม $CaCO_3$ ในPP ในช่วง 20-40% โดยน้ำหนักจะช่วยเพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact strength) แต่ลดสมบัติการโค้งงอ (Flexural properties) [6] โดย $CaCO_3$ ที่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิว และพวกเกรดละเอียด จะมีการกระจายตัวใน PPได้ดีกว่า $CaCO_3$ ที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิว และเกรดหยาบ ซึ่งจะมีผลต่อความทนทานต่อแรงกระแทก [6] ดังรูปที่ 2.3 และ 2.4



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Falling weight impact strength กับปริมาณสารตัวเติม [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Notched izod impact strength กับปริมาณสารตัวเติม [6]

2.3 กรดสเตียริก (Stearic acid ,SA)

2.3.1 ความเป็นมา

กรดสเตรียริก (IUPAC Name = Octadecanoic, $C_{18}H_{36}O_2$) น้ำหนักโมเลกุล 284.48 กรดสเตียริกสามารถสังเคราะห์ได้จากการ ออกซิเดชันแอลกอฮอล์ปฐมภูมิ และ อัลดีไฮด์ (Oxidation primary alcohol and aldehyde) ดังสมการ [7]

$$R\text{-}CH_2\text{-}OH \xrightarrow{\text{Potassium permanganate}} R\text{-}\overset{\overset{O}{\|}}{C}\text{-}H \xrightarrow{\text{Potassium permanganate}} R\text{-}\overset{\overset{O}{\|}}{C}\text{-}OH$$

$[R = CH_3(CH_2)_{16}]$

2.3.2 สมบัติทั่วไปของกรดสเตียริก [7]

- จุดหลอมเหลว 69.3 °C
- จุดเดือด 361 °C
- ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) 0.847
- ความสามารถในการละลายน้ำ 0.1-1 กรัม/100 มิลลิลิตร ที่ 23 °C

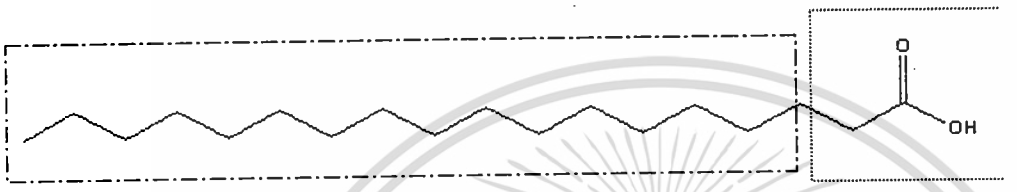
กรดสเตียริก (SA) เป็นกรดไขมันชนิดหนึ่ง ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน C_{18} และส่วนหมู่ฟังก์ชันของกรดซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยากับพื้นผิวของสารตัวเติมได้ SA มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจาก SA มีราคาถูก มีสมบัติช่วยในการปรับปรุงสมบัติเชิงกล ปรับปรุงสมบัติการไหล ช่วยในการกระจายตัวของสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ในพอลิเมอร์ ลดการดูดซึมของน้ำ พบว่าสารตัวเติมที่ทำการเคลือบผิวไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) มากกว่าสารตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เติมที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิว อย่างไรก็ตาม SA เกิดการดูดซับพื้นผิวระหว่างสารตัวเติม กับพอลิเมอร์ต่ำ และบางครั้งอาจเกิดการไม่ดูดซับ (Desorb) ในขณะหลอมระหว่างการผสม ทั้งนี้เนื่องจาก SA มีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่สั้นเกินไปที่จะเกิดการเกี่ยวพันกัน (Entangle) กับสายโซ่พอลิเมอร์ได้ กล่าวคือไม่มีปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้น [8]

..... ส่วนที่กระจายในวัฏภาคของ $CaCO_3$

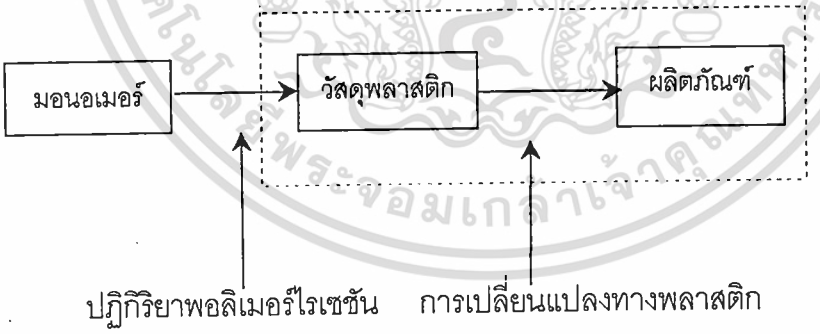
-.-.-.-.- ส่วนที่กระจายในวัฏภาคของ HDPE



รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างทางเคมีของ SA [8]

2.4 กระบวนการแปรรูปพลาสติก

กระบวนการแปรรูปพลาสติกเป็นการทำให้พลาสติก หรือวัสดุประเภทพอลิเมอร์ก่อให้เกิดประโยชน์ใช้สอยมากที่สุดโดยนำวัสดุประเภทพลาสติกไปผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางพอลิเมอร์ให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ดังรูปที่ 2.6 [9]

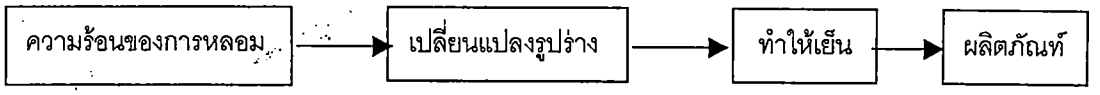


รูปที่ 2.6 แผนภาพกระบวนการแปรรูปพลาสติก [9]

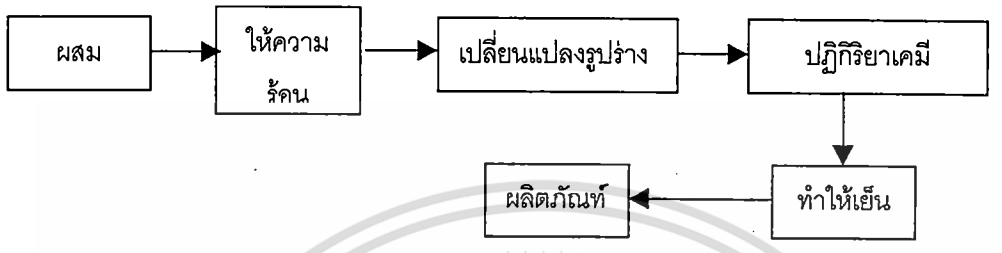
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนแปลงทางพลาสติกแบ่งตามชนิดของพลาสติก

-Thermoplastics[a]



-Thermosets[b] and rubbers[c]



รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงทางพลาสติก [10]

---

[a] Thermoplastics เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นโซ่ตรงหรือโซ่กิ่ง และไม่มีพันธะที่แข็งแรงเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่หลักทำให้สามารถนำไปหลอมขึ้นรูปและนำกลับมาใช้ใหม่ได้

[b] Thermosets เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นร่างแห นั่นคือ มีพันธะเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้มีความแข็งแรง และไม่สามรถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

[c] Rubbers เป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่น สามารถดึงให้มีความยาวมากขึ้นหลายเท่า (5-10 เท่า) ของความยาวเดิม มีความแข็งแรงเมื่อมีการทำให้เกิดโครงสร้างร่างแห [12]

ตัวอย่างของกระบวนการแปรรูปทางอุตสาหกรรมมีหลายกระบวนการ ซึ่งการทดลองนี้จะใช้เพียง 2 กระบวนการคือ การอัดรีด (Extrusion) และการฉีดขึ้นรูป (Injection molding)

2.4.1 การอัดรีด (Extrusion)

การอัดรีด (Extrusion) เป็นกระบวนการพื้นฐานที่นิยมใช้กันมากกระบวนการหนึ่ง เนื่องจาก ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการมีราคาถูกกว่ากระบวนการอื่น และสามารถทำการผลิตรูปร่างผลิต-ภัณฑ์ได้ตามต้องการ (เช่น แท่งกลม ฟิล์ม แผ่น เส้นใย และท่อ เป็นต้น) เป็นกระบวนการที่ทำได้อย่างต่อเนื่อง เครื่องอัดรีดจัดเป็นเครื่องมือที่มีจุดประสงค์หลากหลายในกระบวนการแปรรูปทางพลาสติก กล่าวคือเม็ดพลาสติกถูกป้อนเข้ามาในระหว่างสกรูของเครื่องอัดรีดและกระบอกใส่สกรู (Barrel) ถูกอัด หลอม ผสม และมาตรวัดด้วยความดันสวนทางที่เกิดขึ้นในระหว่างที่มีการไหลผ่านไปตามท่อ และออกทางหัวดายน์ ทั้งนี้โดยอาศัยความแตกต่างของความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวของสกรู และกระบอกใส่สกรูทำให้เกิดพลังงานการเฉือน (Shearing energy) ช่วยในการผสมและหลอมเหลว เครื่องอัดรีดที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin-Screw

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Extruder) ซึ่งจะมีสกรูอาร์คิมิเดียนอยู่ 2 สกรู โดยจัดจำแนกเครื่องอัดรีดตามลักษณะของสกรูคือ เครื่องอัดรีดแบบมีเฟืองไม่ตรงกัน (Non intermeshing) และเครื่องอัดรีดแบบมีเฟืองตรงกัน (Inter - meshing) โดยที่เครื่องอัดรีดแบบมีเฟืองตรงกันยังจำแนกตามทิศทางการเคลื่อนที่ของสกรูได้เป็น เครื่องอัดรีดแบบหมุนไปทางเดียวกัน (Co rotating) และเครื่องอัดรีดแบบหมุนสวนทางกัน(Counter rotating) [13]

2.4.2 การฉีดขึ้นรูป (Injection molding)

การฉีดขึ้นรูปเป็นเทคโนโลยีการแปรรูปที่สำคัญ และใช้กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากการฉีดขึ้นรูปมีข้อได้เปรียบกว่ากรรมวิธีการผลิตอื่น ๆ คือ สามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ดี และได้หลายลักษณะงาน กรรมวิธีการทำงานไม่ค่อยยุ่งยากมากนัก ราคาเครื่องจักรไม่แพงจนเกินไป ตลอดจนใช้พื้นที่ในการทำการผลิตไม่มาก นอกจากนี้ยังสามารถทำงานได้กับพลาสติกที่มีลักษณะเป็นเม็ด และผง และกับพลาสติกทุกประเภทคือ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) เทอร์โมเซต (Thermosets) และอีลาสโตเมอร์ (Elastomers) [14]

หลักการทำงานของเครื่องฉีดขึ้นรูป

จากระบบขับเคลื่อน (ระบบไฮดรอลิก) ของส่วนการยึดแม่พิมพ์จะดันให้แท่นยึดแม่พิมพ์ที่เคลื่อนที่ (Moving platen) วิ่งมาปิดกับแท่นยึดแม่พิมพ์ที่อยู่กับที่ (Stationary platen) ขณะที่ แม่พิมพ์ปิดอยู่นั้น ส่วนของการฉีดจะเริ่มทำงาน โดยสกรูจะหมุนเพื่อดึงเม็ดพลาสติกลงมาหลอม โดยใช้ความร้อนจากการเสียดสี และจากแถบความร้อน ในขณะที่เม็ดพลาสติกหลอมจะเคลื่อนตัวไปยังด้านหน้าตามเฟืองของสกรู และทำให้เกิดความดันขึ้น เนื่องจากสกรูมีการหมุนขับให้เม็ดพลาสติกหลอมเคลื่อนตัวมาข้างหน้าตลอดเวลา ดังนั้นจึงเกิดการสะสมของพอลิเมอร์ที่ด้านหน้าของสกรูมากขึ้น ทำให้ความดันสูงขึ้น จนกระทั่งสามารถดันให้สกรูถอยกลับ สกรูจะถอยหลังจนกระทั่งถึงระยะที่ตั้งไว้สกรูจึงหยุดหมุน จังหวะการฉีดแบ่งเป็น 2 จังหวะคือ การฉีดในจังหวะแรก สกรูจะทำหน้าที่คล้ายลูกสูบดันให้พอลิเมอร์หลอมไหลผ่านเข้าไปในแม่พิมพ์ การที่สกรูสามารถทำเช่นนี้ได้ เนื่องจากบริเวณหัวสกรูจะมีวาล์วป้องกันการไหลย้อนกลับ (Back flow valve) ป้องกันการไหลย้อนกลับของเม็ดพลาสติกหลอมขึ้น หลังจากนั้นจะทำการฉีดในจังหวะที่ 2 ซึ่งจะช่วยทำให้เม็ดพลาสติกหลอมไหลเข้าไปในชิ้นงานมากขึ้น เพื่อชดเชยกับส่วนที่หดตัวของชิ้นงาน

การเย็นตัวของพลาสติก (Cooling) เกิดจากการถ่ายเทความร้อนจากพลาสติกหลอมผ่านผนังของแม่พิมพ์ที่เย็น ซึ่งจะทำให้พลาสติกเย็นตัว และแข็งตัวถึงจุดที่สามารถจะกระทุ้งออกจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม่พิมพ์ได้ พบว่าการเย็นตัวของพลาสติกที่แตกต่างกัน จะทำให้เกิดการจัดเรียงโครงสร้างในโมเลกุลเกิดขึ้นแตกต่างกัน [13]

2.5 เครื่องผสมชนิดความเร็วสูง

เครื่องผสมชนิดความเร็วสูงเป็นเครื่องมือในการช่วยผสมสารตั้งแต่ 2 ชนิดให้เข้ากันได้ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการแปรรูปพลาสติกต่าง ๆ ภายในเครื่องผสมจะเกิดแรงเฉือนขึ้นมากในระหว่างการผสม ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนขึ้น และจำเป็นจะต้องควบคุมอุณหภูมิในการหล่อเย็น ความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างการผสมจะทำให้เกิดการดูดสารเติมแต่งเข้าไปในอนุภาคของพลาสติก เครื่องผสมชนิดความเร็วสูง ประกอบด้วยใบพัด (Impeller) ที่ต่อเข้ากับมอเตอร์โดยสามารถปรับความเร็ว-รอบได้สูงถึง 4,000 รอบต่อนาที อยู่ในห้องผสมด้านใน ระหว่างการผสมใบพัดจะกวนอนุภาคสารให้กระจายเป็นวงและกระทบกับผนังด้านบน ตกลงมาด้านล่างตรงกลางเหมือนการเคลื่อนที่ของของไหล โดยทั่วไปแล้วเวลาที่ใช้ในการผสมไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับสูตรผสม [16]

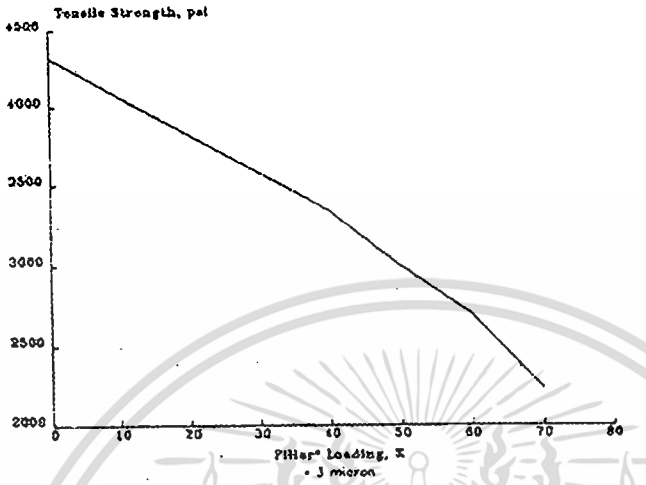
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kupfer และ Rozett [17] ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของ PP ที่ผสม$CaCO_3$ พบว่าเมื่อเพิ่ม $CaCO_3$ ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงลดลง (ดังรูปที่ 2.8) เพราะการเมื่อใช้ $CaCO_3$ ในปริมาณมากจะเกิดการแบ่งส่วนกันของ $CaCO_3$ กับ PP เป็นผลให้พื้นที่หน้าตัดของ PP ลดลงและเกิดการเลื่อนหลุดจาก $CaCO_3$ ได้ง่าย ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงลดลงและพบว่าอัตราการไหลลดลง เนื่องจาก $CaCO_3$ เกิดการยึดเกาะกับ PP ดังนั้นทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ยากขึ้น แต่มอดุลัสมีค่ามากขึ้นเพราะว่า $CaCO_3$ มีความแข็งหรือมีค่ามอดุลัสมากกว่า HDPE ดังนั้นเมื่อใช้ $CaCO_3$ จะมีผลทำให้ค่ามอดุลัสมากขึ้น และใช้ $CaCO_3$ ขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง อัตราการไหล และมอดุลัสยิ่งมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากตัว $CaCO_3$ จะทำหน้าที่เป็นตัวรับแรง ดังนั้นเมื่อ $CaCO_3$ มีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้มีความเข้มของแรงมากขึ้นในตัวพอลิเมอร์ จึงแตกหักได้ง่าย

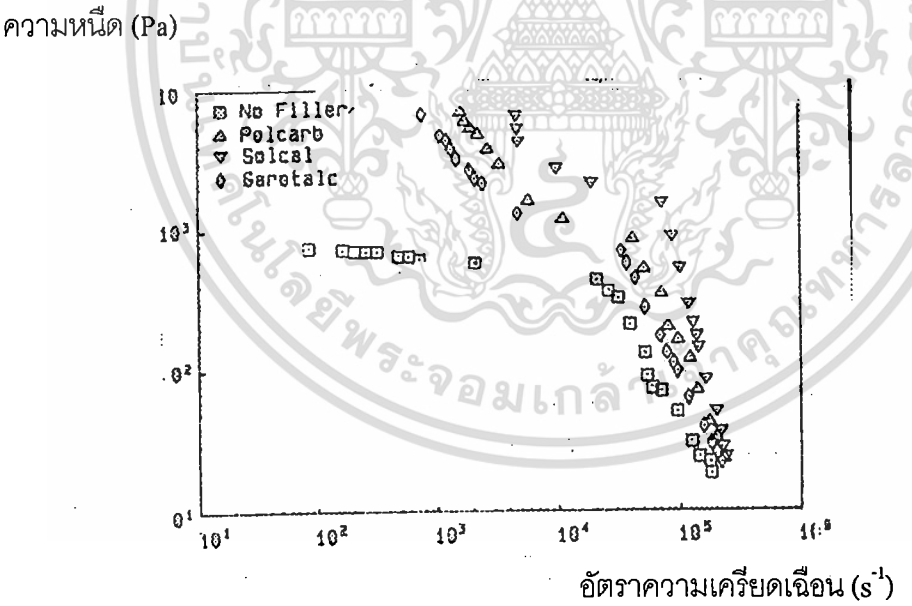
Sotherm และ Hodd [18] ทำการศึกษา PP ที่ทำการเติมสารตัวเติมประเภท $CaCO_3$ และ Talc ที่มีรูปร่าง และขนาดแตกต่างกัน แล้วนำมาทดสอบสมบัติการไหลด้วยเครื่อง Capillary Rheometer และ Cone and Plate Rheometer พบว่าเมื่อปริมาณ $CaCO_3$ มีมากขึ้นจะทำให้ความหนืดมีค่ามากขึ้น (เหตุผลเหมือนงานวิจัย[17]) โดยที่สารตัวเติมที่มีขนาดเล็กและมีลักษณะแบนราบเป็น 2 มิติจะมีความหนืดมากกว่า เมื่อเทียบต่อน้ำหนักที่เท่ากัน [ดังรูป2.9] ทั้งนี้เนื่องจากสารตัวเติมมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากสามารถเกิดแรงกระทำ (interaction) ระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติม หลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเมื่อปรับปรุงพื้นผิว $CaCO_3$ ด้วย SA พบว่าความหนืดที่วัดได้มีค่าลดลง กล่าวคือการปรับปรุงพื้นผิวเป็นการลดบริเวณที่เกิดแรงกระทำระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติมได้



รูปที่ 2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง กับปริมาณสารตัวเติม [17]



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืด กับค่าอัตราความครียดเฉือน [18] เมื่อปริมาณ และรูปร่างของสารตัวเติมเปลี่ยนไป

Maiti และ Jeyakumar [19] ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติการไหลของ HDPE ที่ผสมด้วย $CaCO_3$ พบว่าเมื่อปริมาณ $CaCO_3$ มากขึ้น ค่าความเค้น ณ จุดคราก (Yield stress) ค่า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยืดหยุ่น ณ จุดคราก (Yield elongation) ค่าแข็งแรง ณ จุดขาด (Breaking strength) และค่าความแตกต่างของความเค้นปกติ (Normal Stress difference) มีค่าลดลง แต่ค่ามอดุลัส (Young ' s modulus) และความหนืดมีค่ามากขึ้น หลังจากนั้นทำการเคลือบผิวของ $CaCO_3$ ด้วย Neopentyl (diallyl) neodecanoyl titanate (LICA 01) พบว่าค่าความเค้น ณ จุดคราก ค่าความยืดหยุ่น ณ จุดขาด ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และความหนืดลดลง โดยความหนืดที่ลดลงสังเกตได้ชัดเจนเมื่อมีปริมาณสารตัวเติมมากขึ้นเรื่อย ๆ ส่วนค่าอื่น ๆ มีการเปลี่ยนแปลงไม่ชัดเจน

Fekete และ Tudos [20] ทำการศึกษาแรงตึงผิวและสมบัติเชิงกลของพอลิโอลิฟิน (PO) ผสมกับ $CaCO_3$ พบว่าเมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวของ $CaCO_3$ จะทำให้แรงตึงผิวระหว่าง PO และ $CaCO_3$ ลดลง เนื่องจากการปรับปรุงพื้นผิว เป็นการลดความมีขั้วของ $CaCO_3$ ทำให้ $CaCO_3$ มีความสามารถในการเปียกที่พื้นผิว (Wettability) กับ PO ได้มากขึ้น และพบว่าค่าความเค้น ณ จุดคราก (Yield stress) ที่ได้มีค่าลดลงเมื่อเปอร์เซ็นต์การปกคลุมพื้นผิว (% Surface coverage) เพิ่มขึ้น

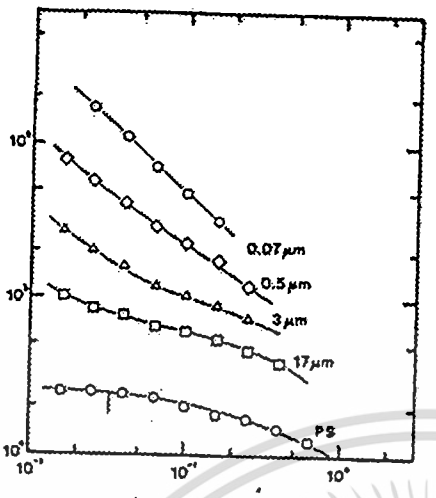
Santelices [21] ทำการศึกษาสมบัติการไหลของ PP ที่ผสมด้วย $CaCO_3$ พบว่าเมื่อปริมาณ $CaCO_3$ มากขึ้น จะทำให้ค่าความหนืดเพิ่มขึ้น (เหตุผลเหมือนงานวิจัยที่ [18]) แต่ค่าสมบัติยืดหยุ่นลดลงซึ่งแสดงจากค่าการบวมตัวของชิ้นงาน (Die swell) ที่มีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเติมสารตัวเติมมากขึ้นจะทำให้เกิดแรงกระทำระหว่าง $CaCO_3$ กับ PP มากขึ้น (ความหนืดมากขึ้น) กล่าวคือ $CaCO_3$ ขัดขวางการเคลื่อนตัวของสายโซ่ PP และเมื่อทำการปล่อยแรงออก $CaCO_3$ จะทำการขัดขวางการหดตัวกลับของสายโซ่โมเลกุล เป็นผลให้การบวมตัวของชิ้นงานลดลง

Suetsugo และ White [22] ทำการศึกษาถึงผลของขนาดอนุภาค และการปรับปรุงพื้นผิว $CaCO_3$ ที่มีต่อสมบัติการไหลของพอลิสไตรีน (PS) ทำการทดสอบสมบัติการไหลโดยใช้อัตราเฉือนต่าง ๆ กัน พบว่าเมื่อให้อัตราเฉือนมากขึ้น ค่าความหนืดจะมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อให้แรงเฉือนอย่างรวดเร็ว สายโซ่โมเลกุลจะเคลื่อนที่ออกจากกันได้ง่าย และเมื่อทำการผสม PS กับ $CaCO_3$ ค่าความหนืดจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของ $CaCO_3$ลดลง [ดังรูป2.10] ต่อมาศึกษาพบว่าการปรับปรุงพื้นผิวของ $CaCO_3$ ด้วย SA จะทำให้ความหนืดลดลง (เหตุผลเหมือนงานวิจัย[18])

Pukanszky และ Tudos [23] ศึกษาแรงกระทำระหว่างสารตัวเติม $CaCO_3$ และ PP โดยใช้กรดสเตียริก (SA ,น้ำหนักโมเลกุลต่ำ) และมาเลอิกแอนไฮไดร์ กราฟท์ พอลิพรอพิลีน (MA-g-PP, น้ำหนักโมเลกุลสูง) ซึ่งพบว่าทั้ง SA และ MA-g-PP มีโครงสร้างคล้ายกันคือประกอบไปด้วยสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน และหมู่ฟังก์ชันของกรด แต่พบว่าความยาวของสายโซ่ของ MA-g-PP ยาวกว่าสามารถเกิดการเกี่ยวพันทางกายภาพ กับสายโซ่พอลิเมอร์ (Physical entanglement) ได้ ทำให้ความหนาของชั้นระหว่างเฟส (Interphase layer) มากกว่า สามารถเกิดการถ่ายโอนแรงได้ดี ซึ่งจะพบว่าค่าความเค้นดึง (Tensile stress) มีค่าสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนืด (Pa)



อัตราความเครียดเฉือน (s^{-1})

รูปที่ 2.10 กราฟแสดงค่าความหนืดกับอัตราความเครียดเฉือนที่ขนาดของ $CaCO_3$ ต่างๆ[22]

Pukanszky และ Toth [24] ศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวและลักษณะของอนุภาคสารตัวเติม พบว่าประสิทธิภาพในการปรับปรุงและการกระจายตัวของสารตัวเติมนั้นไม่ได้ขึ้นกับ อุณหภูมิ เวลา ความเข้มของสารผสมเท่านั้น แต่ขึ้นกับชนิดและรูปร่างของเครื่องผสมด้วย และประสิทธิภาพในการปรับปรุงพื้นผิวจะขึ้นกับลักษณะทางเคมีของสารคู่ควบ (Coupling agent) เช่นใช้ SA เทียบกับไททาเนต พบว่า SA ให้ผลดีกว่าในด้านแรงตึงผิว และสมบัติแรงดึง กล่าวคือเมื่อพื้นผิวได้รับการปรับปรุงมากขึ้นจะส่งผลให้แรงตึงผิว ความแข็งแรงดึงลดลง

Han [25] ศึกษาสมบัติการไหลของ PP พบว่า PP ที่ผ่านเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่จะมีความหนืดลดลงเมื่อเทียบกับ PP บริสุทธิ์ (จากโรงงาน) กล่าวคือเมื่อ PP ผ่านเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ ทำให้ PP เกิดการเสียสภาพ (Degradation) สายโซ่โมเลกุลขาด การเคลื่อนที่ของสายโซ่ง่ายขึ้น หลังจากนั้นศึกษาการใช้ปริมาณ $CaCO_3$ ที่ต่างกัน พบว่าเมื่อปริมาณ $CaCO_3$มากขึ้น ทำให้ค่าความเค้นเฉือนหรือค่าความหนืดมากขึ้น แต่ค่าสมบัติยืดหยุ่นลดลง

Tremayne และ Rosevear [26] ศึกษาผลของ $CaCO_3$ ใน PP โดยใช้ $CaCO_3$ปริมาณต่างกัน พบว่าเมื่อใช้ $CaCO_3$ในปริมาณมากขึ้นจะทำให้ค่าความแข็งแรงดึง และค่าความทนทานต่อแรงกระแทกลดลง แต่ค่ามอดุลัสมีค่ามากขึ้น หลังจากนั้นทำการปรับปรุงพื้นผิวของ $CaCO_3$ ด้วย SA 2% โดยน้ำหนัก พบว่าค่ามอดุลัสและค่าความทนทานต่อแรงกระแทกมีค่ามากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก SA ช่วยในการกระจายตัวของอนุภาค $CaCO_3$ ในพอลิเมอร์ แต่ค่าความแข็งแรงดึงลดลง และทำการศึกษาต่อโดยเปลี่ยนแปลงปริมาณ SA ที่ใช้ในการปรับปรุงพื้น-ผิว พบว่าค่าต่าง ๆ ที่ได้ไม่แน่นอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 สารเคมี

ในงานวิจัยนี้สารเคมีที่ใช้มีด้วยกัน 3 ชนิด ดังนี้

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) จากบริษัทไทยพอลิเอทิลีนจำกัด (TPE)

   HDPE (MW = 279088, MWD = 11.22) H6205 JU

   สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) แสดงดังตารางที่ 3.1

2. แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) จากบริษัทสุรินทร์ออมย่า เคมิคอล จำกัด

   $CaCO_3$ ขนาดอนุภาค 2 ไมครอนเกรดไม่เคลือบ (Omyacab 2)

   สมบัติบางประการของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) แสดงดังตารางที่ 3.2

3. กรดสเตียริก เกรดการค้า

ตารางที่ 3.1 แสดงสมบัติบางประการของ HDPE [27]

สมบัติ	หน่วย	วิธีการทดสอบ	HDPE (H6205 JU)
ดัชนีการไหล	กรัม/10นาที	ASTM D1238	5.5
ความหนาแน่น	กรัม/ลบ.ซม.	ASTM D1505	0.962
ความต้านทานแรงดึงยืด	กก./ตร.ซม.	ASTM D638	310
ความต้านทานแรงดึงขาด	กก./ตร.ซม.	ASTM D638	220
ความยืดที่จุดขาด	%	ASTM D638	>500
ความสามารถในการทรงรูป	กก./ตร.ซม.	ASTM D747	11000
ความต้านแรงกระแทก	กก./ตร.ซม.	ASTM D256	5
ความแข็ง Shore D	-	ASTM D2240	67
จุดหลอมเหลว	องศาเซลเซียส	ASTM D2117	133
จุดอ่อนตัว	องศาเซลเซียส	ASTM D1525	127
จุดเปราะ	องศาเซลเซียส	ASTM D746	<-80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ตารางที่ 3.2 แสดงสมบัติบางประการของ $CaCO_3$ [28]

เกรด $CaCO_3$	Specific gravity(g/cm^3)	Mean partical size (μm)
Omyacab 2	2.7	2.8

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder, รุ่น PL-200; Intro Engineering)
2. เครื่องผสมชนิดความเร็วสูง (High speed mixer)
3. เครื่องฉีดพลาสติก (Injection molding machine, Cosmo รุ่นTTI 220/80 HITEC; Welltec Industrial Equipment)
4. เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile tester, LLOYD รุ่น LR 30K;LLOYD Instrument)
5. เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC-50 ;Shimadzu)
6. เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder, Bosco รุ่นA600 ;Bosco Engineering)
7. เครื่องวัดแรงกระแทก (Izod impact tester, Yasuda รุ่น 7697 ;Yasuda Seiki Seisakusho)
8. เครื่องวัดความแข็ง (Hardness tester , Shore D , Yasuda รุ่น 7689 ;Matsuzawa DXT)
9. เครื่องกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)
10. เครื่องมือวัดสมบัติการไหล (Capillary Rheometer)
11. เตาเผา (Furnace)
12. เครื่องวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว (Autosorb-1)

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมสารตัวอย่าง

ตัวอย่างที่เตรียมเพื่อใช้ในการทดลองนี้มีทั้งหมด 8 ตัวอย่าง ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงอัตราส่วนผสมของสารตัวอย่าง

ตัวอย่าง	ส่วนประกอบของสารตัวอย่าง
1	HDPE
2	HDPE+10%wt $CaCO_3$
3	HDPE+20%wt $CaCO_3$
4	HDPE+30%wt $CaCO_3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

39609

ตารางที่ 3.3 แสดงอัตราส่วนผสมของสารตัวอย่าง (ต่อ)

ตัวอย่าง	ส่วนประกอบของสารตัวอย่าง
5	HDPE+35%wt $CaCO_3$
6	HDPE+30%wt $CaCO_3$ (1%wt SA)
7	HDPE+30%wt $CaCO_3$ (2%wt SA)
8	HDPE+30%wt $CaCO_3$ (3%wt SA)

วิธีการเตรียมตัวอย่างแบ่งเป็น 2 ส่วนมีรายละเอียดดังนี้

1. การเตรียมสารตัวอย่างเพื่อหา % $CaCO_3$ ที่ทำให้สมบัติต่าง ๆ ของ HDPE ด้อยลง

ก) นำส่วนประกอบแต่ละชนิดผ่านเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ ที่อุณหภูมิหัวดายน์ 190°C ความเร็ว 15 รอบต่อนาที เมื่อสารผสมถูกอัดรีดออกมาจะถูกปล่อยให้เย็นตามธรรมชาติ (ไม่มีการใช้น้ำในการหล่อเย็นของสารผสม)

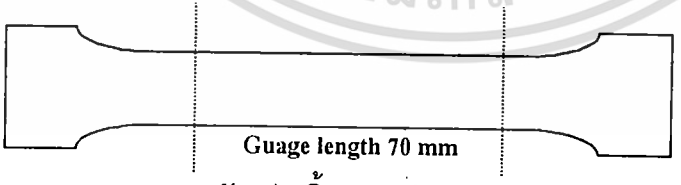
ข) นำไปบดในเครื่องบดพลาสติก

ค) แบ่งเม็ดพลาสติกที่บดได้นำไปฉีดขึ้นรูปดัมเบลล์ และรูปไอซอดที่มีรอยบาก ดังรูปที่ 3.1 ด้วยเครื่องฉีดพลาสติกที่อุณหภูมิ 190°C เป็นชิ้นงานสำหรับใช้ในการทดสอบขั้นต่อไป

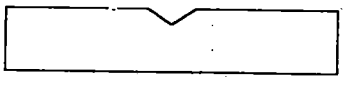
2. การเตรียมตัวอย่างเพื่อหา เปอร์เซ็นต์กรดสเตียริกที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการปรับปรุงพื้นผิว $CaCO_3$ และทำให้ HDPE มีสมบัติดีขึ้น

ง) นำสารตัวอย่างที่เตรียมได้จากข้อ1 ที่มีสมบัติด้อยลงอย่างเห็นได้ชัดเจน

จ) นำ $CaCO_3$ มาทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วย กรดสเตียริกโดยใช้เครื่อง High speed mixer ความเร็ว 1500 รอบต่อนาที และอุณหภูมิ 80 °C จากนั้นนำ $CaCO_3$ ที่ปรับปรุงพื้นผิวแล้วมาผสมกับ HDPE แล้วทำการเตรียมเหมือนกับ ก-ค ตามลำดับ



a) ตัวอย่างชิ้นงานรูปดัมเบลล์



b) ตัวอย่างชิ้นงานไอซอดที่มีรอยบาก

รูปที่3.1 แสดงชิ้นงานตัวอย่างรูปดัมเบลล์ และไอซอดที่มีรอยบาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การตรวจสอบตัวอย่าง

3.3.2.1 การตรวจสอบสารเคมีที่ใช้

ก) นำ HDPE มาหา MW และ MWD โดยส่งไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gel Permeation Chromatrograph (GPC) ที่กองฟิสิกส์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

ข) $CaCO_3$ โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) กำลังขยาย 1,000 และ 4,000 เท่า ตามลำดับ

ค) นำ $CaCO_3$ มาหาพื้นที่ผิว (Surface Area) ด้วยเครื่อง Autosorb-1

3.3.2.2 การตรวจสอบทางความร้อนของสารประกอบที่ผลิตได้

ก) ปริมาณที่แน่นอนของ $CaCO_3$ ที่มีอยู่ในสารประกอบ และปริมาณของ SA ที่ใช้เคลือบ $CaCO_3$: โดยนำครูซิเบิลมาอบที่อุณหภูมิ 600 ^{0}C ทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์เป็นเวลาครึ่งชั่วโมง ชั่งน้ำหนักครูซิเบิลด้วยเครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่งนำสารตัวอย่างมาใส่สูง 3 ใน 4 ของครูซิเบิลแล้วชั่งน้ำหนัก หลังจากนั้นนำครูซิเบิลมาเผาด้วยตะเกียงบุนเสนเป็นเวลา 45 นาที แล้วนำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 600 ^{0}C เป็นเวลา 45 นาที แล้วทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์เป็นเวลาครึ่งชั่วโมง นำมาชั่งน้ำหนักแล้วคำนวณหาปริมาณที่แน่นอนของสาร

ข) ศึกษาสมบัติทางความร้อน : โดยนำสารตัวอย่างที่ผลิตได้มาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC โดยใช้น้ำหนักสารตัวอย่างประมาณ 5-10 mg นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 50 ^{0}C ด้วยอัตราการให้ความร้อนเป็น 20 ^{0}C/min จนถึงอุณหภูมิสูงสุดคือ 180 ^{0}C และทำให้เย็นโดยการลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 20 ^{0}C/min จนถึงอุณหภูมิเริ่มต้น นำข้อมูลจากกราฟที่ได้มาหาค่าอุณหภูมิของการหลอมตัว (T_m) อุณหภูมิของการเกิดผลึก (T_c) ความร้อนของการหลอมตัว และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก [29]

ค) ศึกษาลักษณะการกระจายตัวของ $CaCO_3$ ในสารตัวอย่าง : โดยนำสารตัวอย่างที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปเป็นดัมเบลล์ มาแช่ในไนโตรเจนเหลวแล้วหักขณะที่ชิ้นงานยังเย็นตัวอยู่ หลังจากนั้นตัดเป็นชิ้น เพื่อนำพื้นผิวตรงรอยแตกมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM กำลังขยาย 1,000 เท่า

3.3.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของสารตัวอย่าง

ก) สมบัติความแข็งแรงดึง : นำตัวอย่างที่เตรียมเป็นดัมเบลล์มาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile tester) ที่ความเร็วการดึง 120 mm/min ระยะของการจับชิ้นงาน (Guage length) เป็น 70 mm ที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ASTM D638 [30] เพื่อหาค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield strength) ค่ายังมอดุลัส (Young 's modulus) และค่าการยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข) สมบัติความทนทานต่อแรงกระแทก : นำตัวอย่างที่เตรียมเป็น Notch izod มาทดสอบด้วยเครื่องวัดแรงกระแทก (Izod impact tester) จะได้ค่าความทนต่อแรงกระแทกในหน่วย kJ/m^2 ที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ASTM D256 [31]

ค) สมบัติความแข็ง : นำตัวอย่างที่เตรียมเป็นดัมเบลล์มาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบ Dead Load ชนิด Shore D ที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ASTM D2240 [32] จะได้ค่าความแข็งโดยตรงจากเครื่อง

ง) สมบัติการไหล : นำเม็ดสารผสมตัวอย่างมาทดสอบด้วยเครื่อง Capillary Rheometer อุณหภูมิ 190^0C หัวดายน์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm ความยาว 16 mm มุม 90^0 ตามมาตรฐาน ASTM D3835 [33] รวมทั้งศึกษาการบวมตัวของชิ้นงาน โดยตัดชิ้นงานที่ออกจากหัวดายน์ยาวประมาณ 1-2 ซม.ที่ความเร็วลูกสูบ 10 mm/min

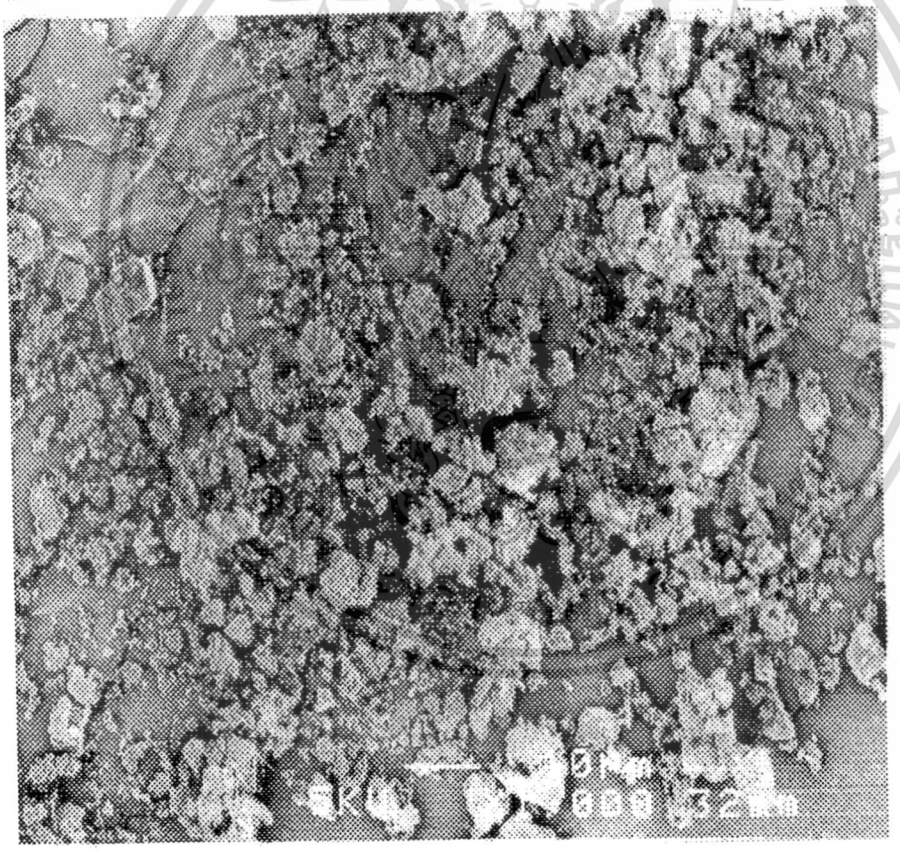
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง

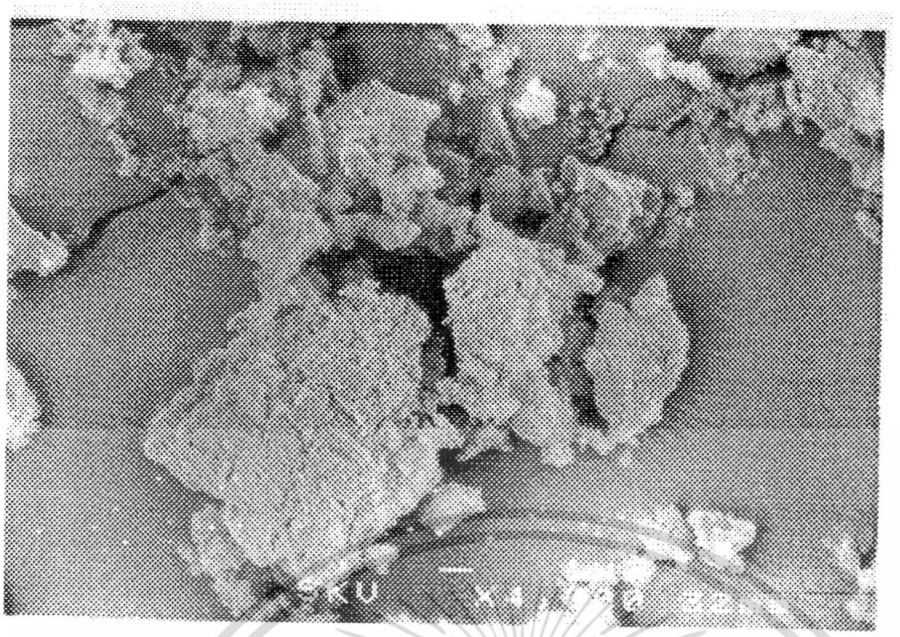
4.1 ผลการวิเคราะห์รูปร่างของแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยเครื่อง SEM

จากหัวข้อ 3.3.2.1.ข สามารถวิเคราะห์ รูปร่างของ $CaCO_3$ ด้วยเครื่อง SEM ใช้กำลังขยาย 1,000 และ 4,000 เท่าตามลำดับ พบว่ารูปร่างของ $CaCO_3$ ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นทรงกลม แต่เมื่อขยายอนุภาค $CaCO_3$ ด้วยกำลังขยายสูงขึ้น พบว่ารูปร่างของ $CaCO_3$ จะมีลักษณะเป็นทรงกลมมีเหลี่ยมมีมุมอยู่บ้าง และ $CaCO_3$ ผสมอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อน (agglomerates) มากกว่าจะอยู่เป็นอนุภาคเดี่ยว (single particles) เนื่องจากอนุภาคเดี่ยว ขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวมาก ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคมาก จึงเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (รูปที่ 4.1 และ 4.2)



รูปที่ 4.1 รูปร่าง $CaCO_3$ ขนาด 2.8 μm กำลังขยาย 1000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 รูปร่าง $CaCO_3$ ขนาด 2.8 μm กำลังขยาย 4000 เท่า

4.2 ผลการหาพื้นที่ผิว $CaCO_3$ ด้วยเครื่อง AUTOSORB-1

จากหัวข้อ 3.3.3.1.ค ก่อนที่จะทำการเคลือบ SA ลงบน $CaCO_3$ ต้องทำการหาพื้นที่ผิวของอนุภาค $CaCO_3$ ก่อนเพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณ SA ที่เหมาะสมในการเคลือบผิว ผลที่ได้เป็นค่าพื้นที่ผิวที่ได้โดยตรงจากเครื่อง โดยคำนวณจากสมการ BET

พื้นที่ผิวของอนุภาคของ $CaCO_3$ = 3.34 m^2/g

น้ำหนักโมเลกุลของ $CaCO_3$ = 100.1 g/mol

ในการทดลองนี้ใช้ $CaCO_3$ 2000 g ผสมกับ SA ในเครื่องผสมความเร็วสูง

ดังนั้น $CaCO_3$ 1 g มีพื้นที่ผิว 3.34 m^2

$CaCO_3$ 2000 g มีพื้นที่ผิว 6680 m^2 = 6.680 x 10^{21} nm^2

SA 1 อนุภาคครอบคลุมพื้นที่ 0.21 nm^2 [34]

น้ำหนักโมเลกุลของ SA = 284 g/mol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่าวคือ $CaCO_3$ พื้นที่ผิว 0.21 nm^2 ใช้ SA 1 อนุภาค

$CaCO_3$ พื้นที่ผิว $6.680*10^{21}$ nm^2 ใช้ SA $3.181*10^{22}$ อนุภาค

จาก SA $6.02*10^{23}$ อนุภาค (1โมล) มีน้ำหนัก 284 g

SA $3.181*10^{22}$ อนุภาค มีน้ำหนัก 15.01 g

เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์

$CaCO_3$ น้ำหนัก 2000 g ใช้ SA 15.01 g

เมื่อ $CaCO_3$ น้ำหนัก 100 g ใช้ SA 0.75 g

เพราะฉะนั้นในการเคลือบผิว $CaCO_3$ ให้มี SA อยู่ 1 ชั้นพอดีต้องใช้ SA เท่ากับ 0.75% โดยน้ำหนัก $CaCO_3$

4.3 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณที่แน่นอนของ $CaCO_3$ และปริมาณSA ที่ใช้ในการเคลือบ $CaCO_3$ด้วยเตาเผา

เมื่อทำการผสมสารประกอบเพื่อเตรียมสารตัวอย่างในอัตราส่วนตามที่กำหนดดังตาราง 3.3 จำเป็นจะต้องมีการตรวจสอบหาปริมาณที่มีอยู่จริงโดยใช้วิธีการดังที่กล่าวแล้วในข้อ 3.3.2.2.ก แล้วนำน้ำหนักที่ได้มาคำนวณดังนี้

$$\frac{[\text{น้ำหนักก่อนเผา (กรัม)} - \text{น้ำหนักหลังเผา (กรัม)}]}{\text{น้ำหนักก่อนเผา (กรัม)}} \times 100 = \text{ปริมาณสารที่เหลืออยู่}$$

(ในการคำนวณนี้ต้องทำการเปรียบเทียบปริมาณสารที่เหลืออยู่จากการเผา $CaCO_3$ 100 % และ HDPE 100 %) [35]

ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1แสดงปริมาณที่แน่นอนของ $CaCO_3$ และSA

ตัวอย่าง	ส่วนประกอบของสารตัวอย่าง	ปริมาณ$CaCO_3$ที่แน่นอน (%wt)	ปริมาณ SAที่แน่นอน (%wt)
1	HDPE	0	0
2	HDPE+10 %wt $CaCO_3$	9.5	0
3	HDPE+20 %wt $CaCO_3$	19.1	0
4	HDPE+30 %wt $CaCO_3$	28.9	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1แสดงปริมาณที่แน่นอนของ $CaCO_3$ และSA (ต่อ)

ตัวอย่าง	ส่วนประกอบของสารตัวอย่าง	ปริมาณ$CaCO_3$ที่แน่นอน (%wt)	ปริมาณ SA ที่แน่นอน (%wt)
5	HDPE+35 %wt $CaCO_3$	36.6	0
6	HDPE+30 %wt $CaCO_3$ (1.0 %wt SA)	28.5	0.67
7	HDPE+30 %wt $CaCO_3$ (2.0 %wt SA)	28.7	1.78
8	HDPE+30 %wt $CaCO_3$ (3.0 %wt SA)	28.8	2.57

จากตารางที่ 4.1 พบว่าปริมาณ $CaCO_3$ ที่มีอยู่จริงในสารประกอบตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดไว้ โดยปริมาณ $CaCO_3$ และ SA ที่มีอยู่จริงนั้นจะน้อยลงกว่าค่าที่กำหนดเพราะว่ามีสารบางส่วนติดอยู่ในภาชนะที่บรรจุก่อนทำการผสม ซึ่งมีการใส่สารเพิ่มเข้าไปบางส่วนแต่ก็ยังไม่พอ และ % SA ที่ลดลงเป็นเพราะการผสมด้วยเครื่องผสมความเร็วสูงในระบบปิดสารอาจติดค้างอยู่กับด้านข้าง และฝาภาชนะทำให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์น้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้

4.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC

เมื่อทำการเตรียมสารตัวอย่างดังตารางที่ 3.3 แล้วจากนั้นจึงนำมาวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนตามหัวข้อที่ 3.3.2.2 ข เพื่อศึกษาผลของ $CaCO_3$ และSA ที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของ HDPE จะได้ค่าอุณหภูมิของการหลอมเหลวของผลึก (T_m) อุณหภูมิของการตกผลึก (T_c) เอนทาลปีของการหลอมเหลวของผลึก (ΔH_f) และเอนทาลปีของการตกผลึก (ΔH_c) จากกราฟแล้วนำค่า (ΔH_f) และ (ΔH_f^0) มาคำนวณหา ค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%Crystallinity) ดังนี้ : เมื่อ

T_m คืออุณหภูมิของการหลอมเหลวของผลึก

T_c คืออุณหภูมิของการตกผลึก

ΔH_f คือเอนทาลปีของการหลอมเหลวของผลึก

ΔH_c คือเอนทาลปีของการตกผลึก

%Crys 1 คือเปอร์เซนต์ความเป็นผลึกที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง

%Crys 2 คือเปอร์เซนต์ความเป็นผลึกที่เกิดขึ้นใหม่

ΔH_f^0 คือเอนทาลปีของการหลอมเหลวของ HDPEที่มีความเป็นผลึก 100% =293J/g [36]

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

$$\%Crys\ 1,2 = \frac{\Delta H_{f,c}}{\Delta H_o} \times \frac{100}{[\,100 - \text{ปริมาณ } CaCO_3 \text{ที่มีอยู่จริงในตารางที่ 4.1}]} \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าสมบัติทางความร้อน

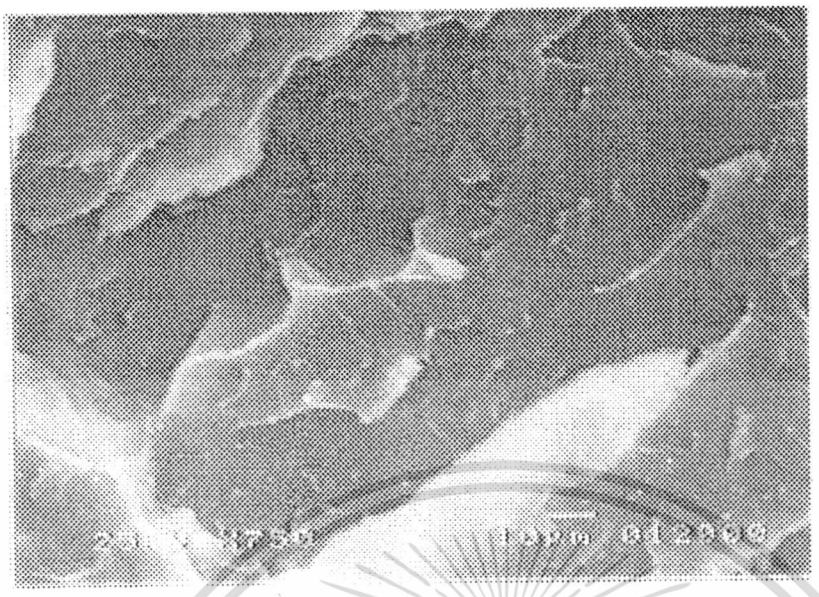
สารตัวอย่าง	T_m (°C)	ΔH_f (J/g)	%Crys 1	T_c (°C)	ΔH_c (J/g)	%Crys 2
0 %wt $CaCO_3$	151.7	136.17	46.47	118.3	142.74	48.72
10 %wt $CaCO_3$	146.8	119.18	44.94	119.4	125.12	47.18
20 %wt $CaCO_3$	144.7	123.5	52.10	119.8	125.92	53.12
30 %wt $CaCO_3$	142.4	109.56	41.05	119.7	112.56	42.17
35 %wt $CaCO_3$	146.1	105.69	56.96	119.9	102.69	57.43
30 %wt $CaCO_3$ (1 %wt SA)	146.3	94.99	45.34	119.2	97.93	46.75
30 %wt $CaCO_3$ (2 %wt SA)	144.1	108.76	52.06	119.1	114.42	54.77
30 %wt $CaCO_3$ (3 %wt SA)	143.0	104.75	50.21	119.4	111.25	53.33
SA	58.1	-	-	-	-	-

จากตารางที่ 4.2 พบว่า T_m ของสารประกอบที่มี $CaCO_3$ ผสมอยู่พบว่ามีค่าน้อยลงจาก HDPE บริสุทธิ์เนื่องจาก $CaCO_3$ ที่ผสมลงไปจะทำให้เกิด Nuclei ในการเกิดผลึกจำนวนมากจึงทำให้ผลึกเกิดขึ้นพร้อมกันโดยผลึกที่ได้มีขนาดเล็ก ส่วนค่า T_c ของสารประกอบที่มี $CaCO_3$ ผสมอยู่พบว่าจะมีค่าสูงขึ้นจาก HDPE บริสุทธิ์เนื่องจาก $CaCO_3$ ไปเพิ่มความหนืดของ HDPE และทำให้เกิด Nuclei ที่อุณหภูมิสูงกว่า HDPE บริสุทธิ์ [37] เพราะฉะนั้นค่า T_c จึงเพิ่มขึ้น ส่วน $CaCO_3$ มีผลต่อเปอร์เซนต์ความเป็นผลึกน้อยมากจึงสามารถสรุปว่า $CaCO_3$ ไม่ได้ทำหน้าที่เป็น Nucleating agent สำหรับ HDPE

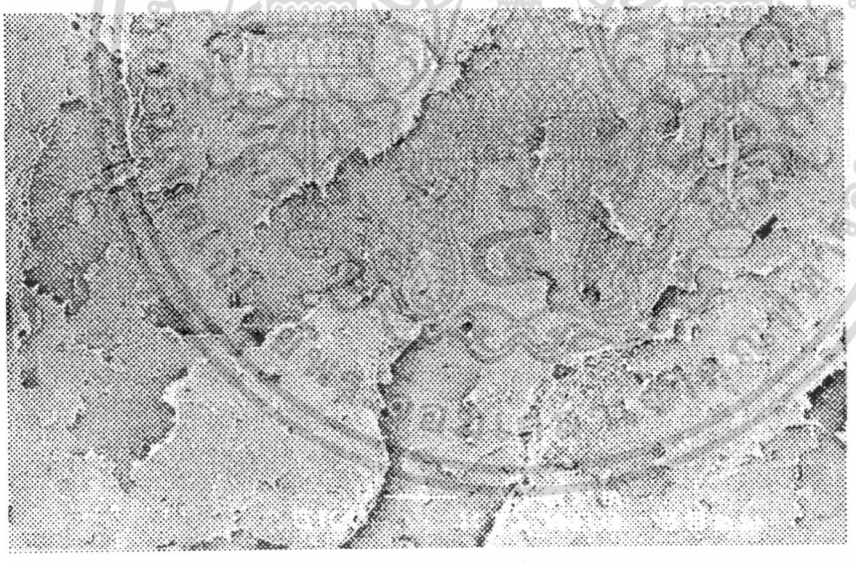
4.5 ผลการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของ $CaCO_3$ ที่ไม่มี SA และมี SA เป็นสารปรับปรุงพื้นผิวในสารตัวอย่างด้วยเครื่อง SEM

เมื่อทำการเตรียมสารตัวอย่างโดยใช้วิธีที่กล่าวในหัวข้อ 3.3.2.2.ค แล้วนำมาวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของ $CaCO_3$ ที่ไม่มี SA และมีSA เป็นสารปรับปรุงพื้นผิวในสารตัวอย่างด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่าดังแสดงในรูปที่ 4.3 - 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

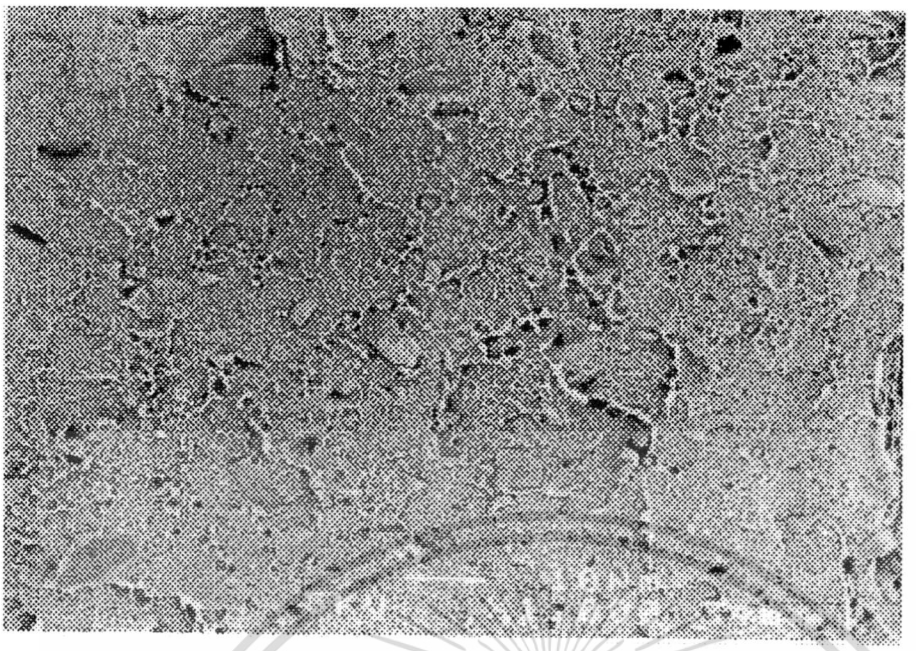


รูปที่ 4.3 รูป SEM ของ HDPE ที่ไม่มี $CaCO_3$ กำลังขยาย 750 เท่า [38]

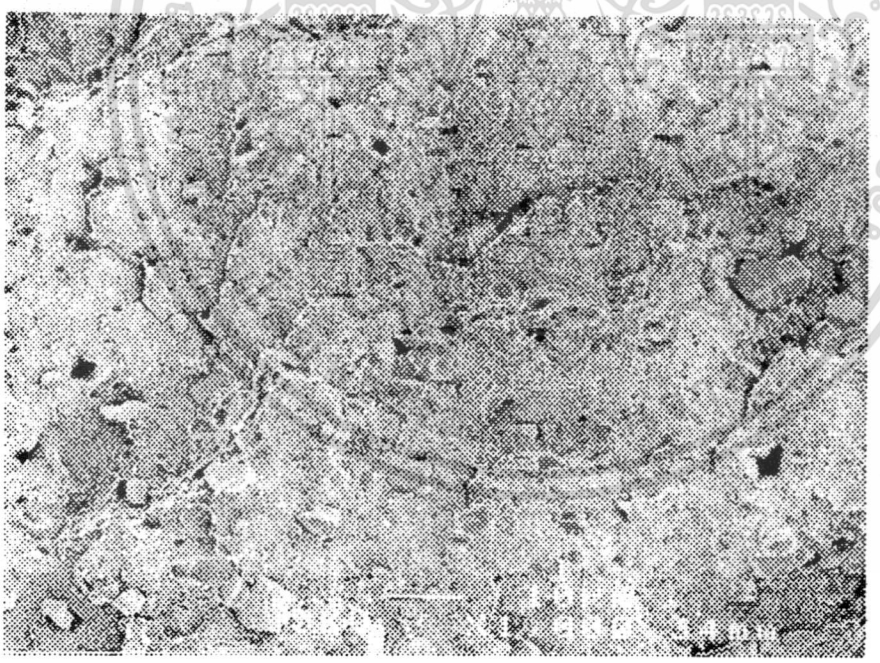


รูปที่ 4.4 รูป SEM ของ HDPE ที่มี $CaCO_3$ ปริมาณ 10 % โดยน้ำหนัก
กำลังขยาย 1,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

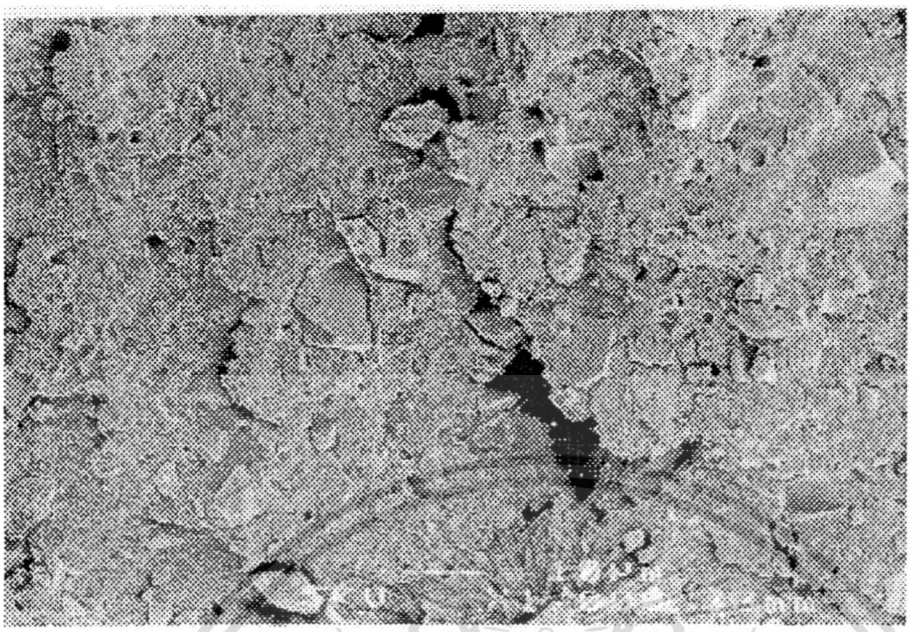


รูปที่ 4.5 รูป SEM ของ HDPE ที่มี $CaCO_3$ ปริมาณ 20 % โดยน้ำหนัก กำลังขยาย 1,000 เท่า



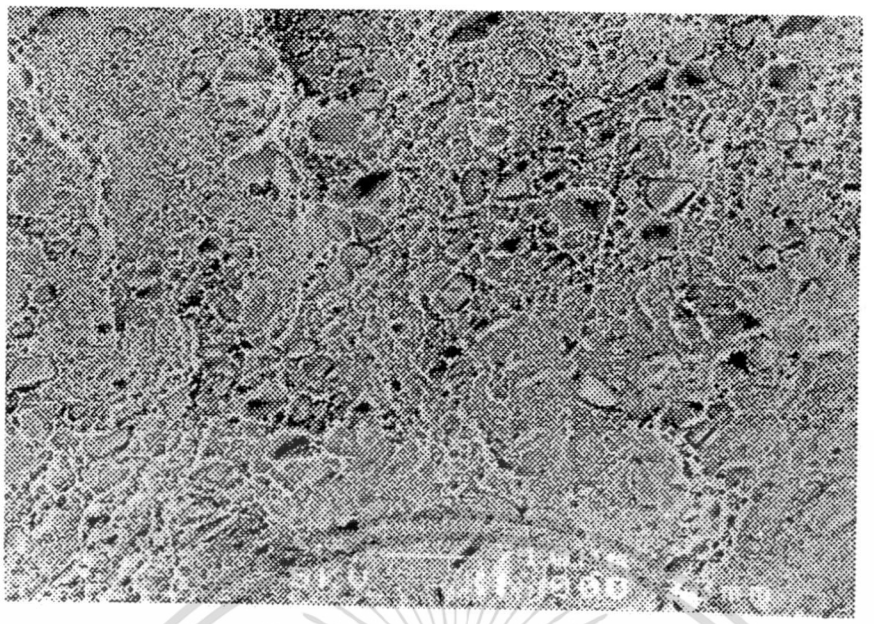
รูปที่ 4.6 รูป SEM ของ HDPE ที่มี $CaCO_3$ ปริมาณ 30 % โดยน้ำหนัก กำลังขยาย 1,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

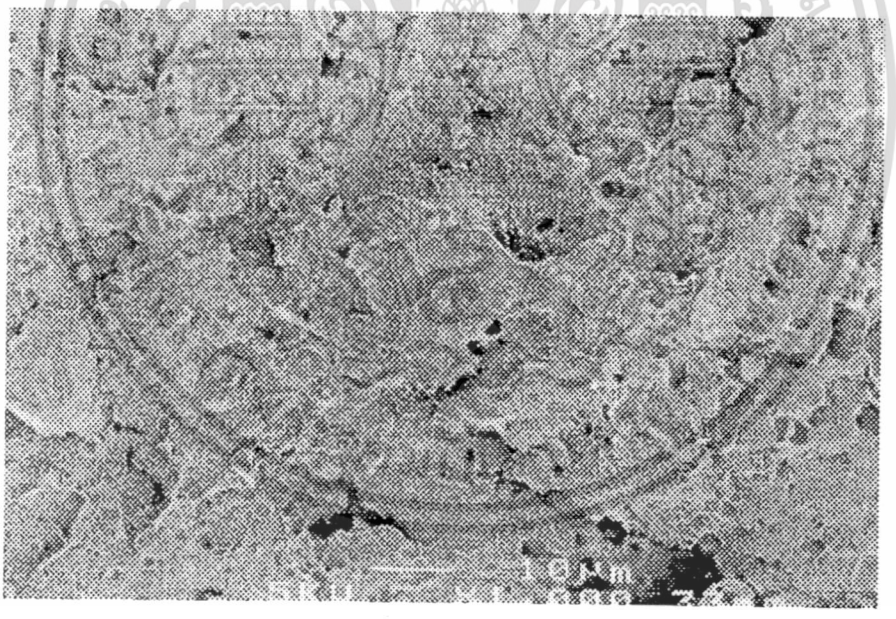


รูปที่ 4.7 รูป SEM ของ HDPE ที่มี $CaCO_3$ ปริมาณ 35 % โดยน้ำหนัก กำลังขยาย 1,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

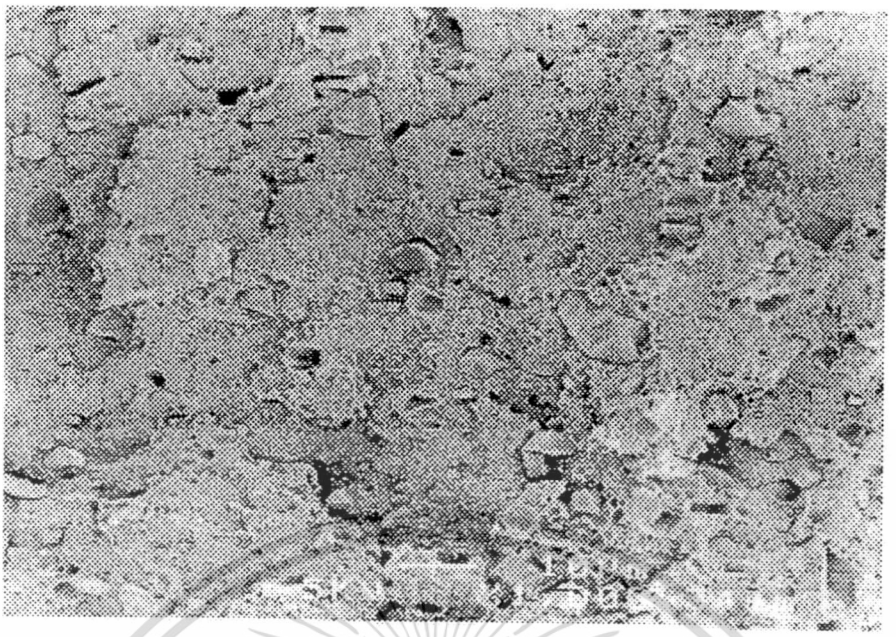


รูปที่ 4.8 รูป SEM ของ HDPE ที่มี $CaCO_3$ ปริมาณ 30 % โดยน้ำหนัก (ผสม 0.75 %wt SA) กำลังขยาย 1,000 เท่า



รูปที่ 4.9 รูป SEM ของ HDPE ที่มี $CaCO_3$ ปริมาณ 30 % โดยน้ำหนัก (ผสม 1.8 %wt SA) กำลังขยาย 1000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 รูป SEM ของ HDPE ที่มี $CaCO_3$ ปริมาณ 30 % โดยน้ำหนัก (ผสม 2.6 %wt SA) กำลังขยาย 1000 เท่า

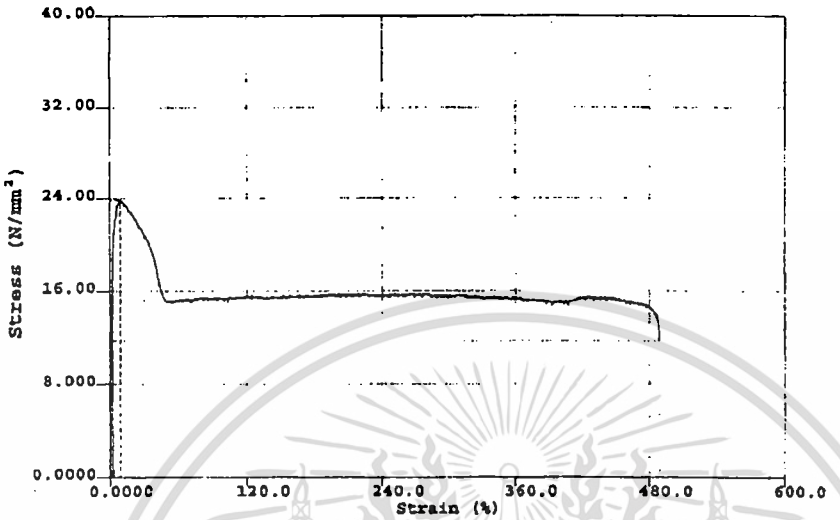
จากรูปที่ 4.3-4.7 พบว่าเมื่อปริมาณ $CaCO_3$ เพิ่มขึ้นจะพบว่า $CaCO_3$ มีแนวโน้มที่จะเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก $CaCO_3$ เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่มีขั้วจึงเกิดแรงดึงดูดระหว่างกัน หลังจากทำการปรับปรุงพื้นผิว $CaCO_3$ ด้วย SA (Dispersing Agent) แล้วพบว่าการกระจายตัวของอนุภาค $CaCO_3$ ใน HDPE มากขึ้น ดังรูปที่ 4.8-4.10 แต่จะเห็นว่าลักษณะการขาดของ HDPE ในสารประกอบนี้มีความใกล้เคียงกับ HDPE บริสุทธิ์มากขึ้น คือ มีลักษณะเป็นเส้นใยเกิดขึ้น แสดงว่า SA จะทำให้แรงกระทำระหว่างอนุภาคของ $CaCO_3$ กับ HDPE ลดลง และมีแนวโน้มของลักษณะการแตกหักเป็นแบบเหนียวมากขึ้น

4.6 ผลการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง

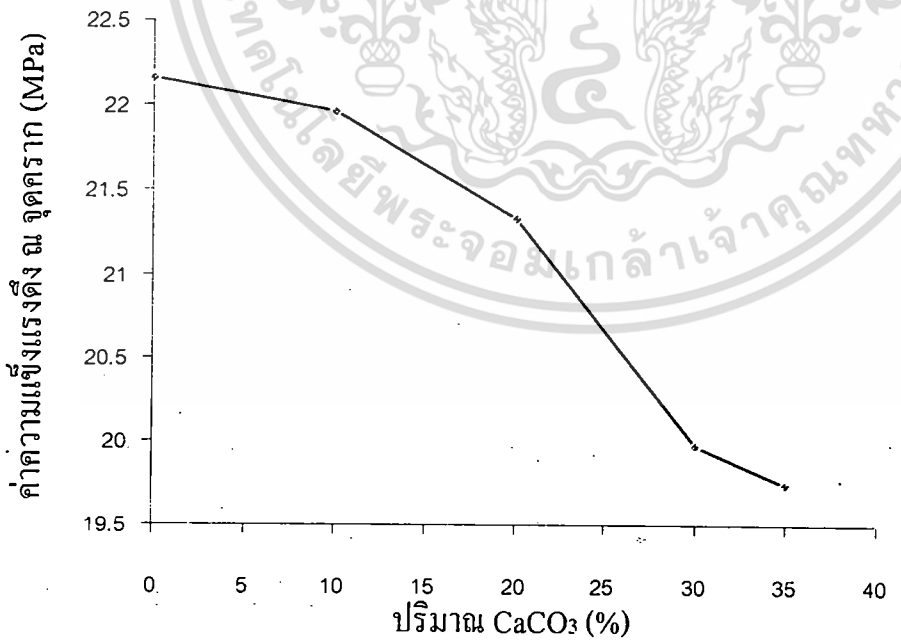
เมื่อเตรียมชิ้นงานโดยใช้วิธีที่กล่าวแล้วในหัวข้อที่ 3.3.3 ก แล้วนำมาทดสอบเพื่อศึกษาว่าปริมาณ $CaCO_3$ และ SA มีผลต่อสมบัติความแข็งแรงดึงของ HDPE อย่างไร จากข้อมูลที่ได้คือ ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (N/mm^2) ค่าความยาว ณ จุดขาด (mm) ค่าความแข็งแรงดึง (kN/m^2) และค่าความแข็งแรงที่ 1 เปอร์เซนต์การดึงยืด จากกราฟ Stress-Strain

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.11 - 4.17

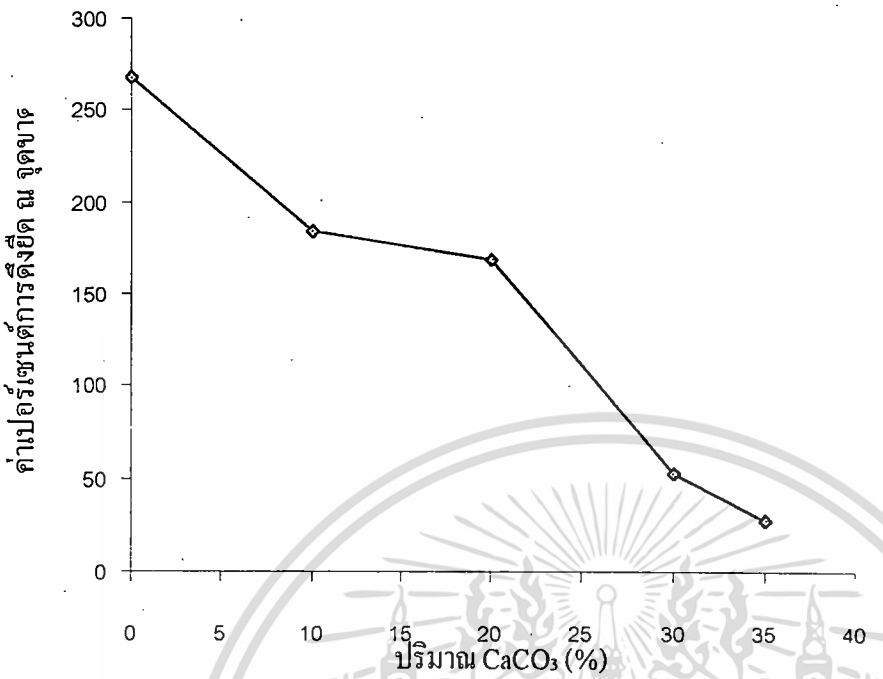


รูปที่ 4.11 กราฟตัวอย่างแสดงผลการทดสอบสมบัติความแข็งแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง

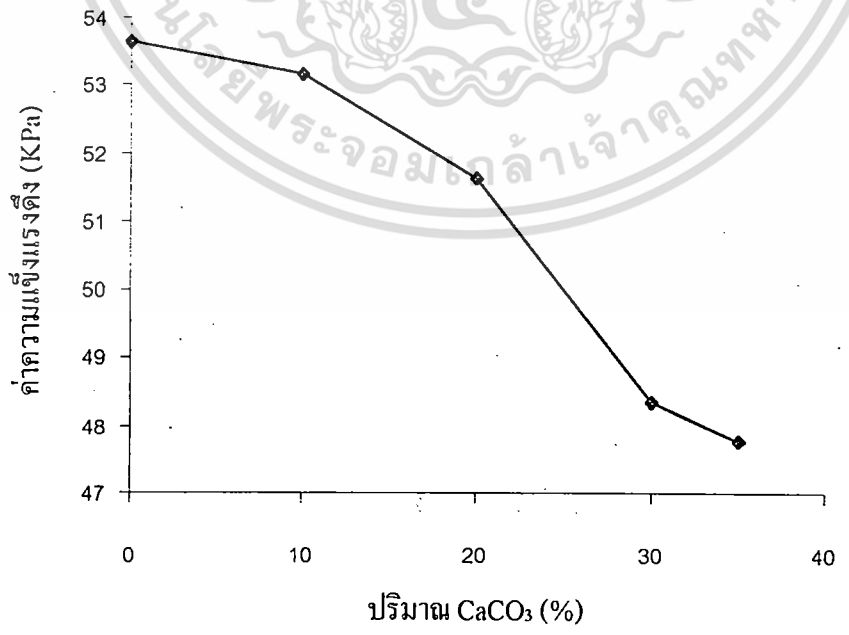


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (MPa) กับ ปริมาณ $CaCO_3$ (%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

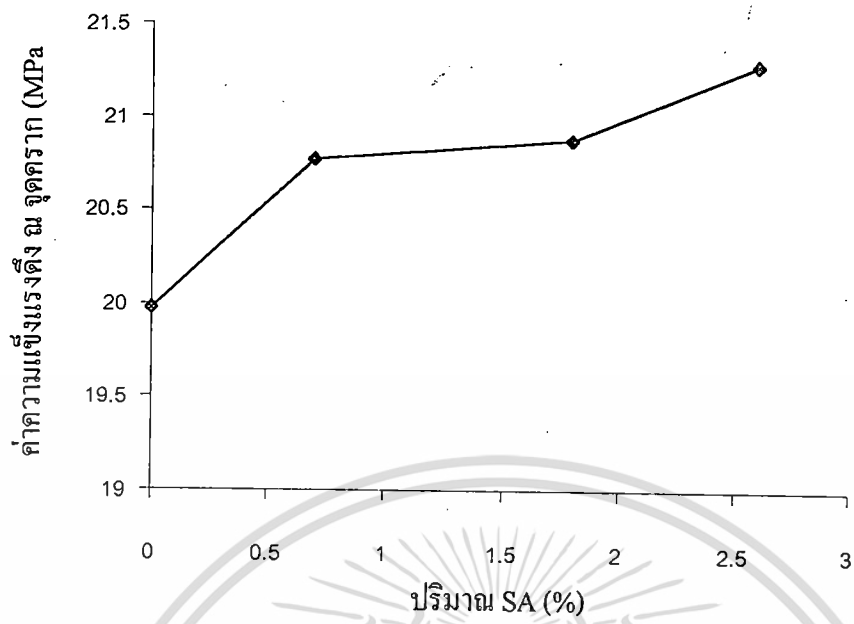


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด กับปริมาณ $CaCO_3$ (%)

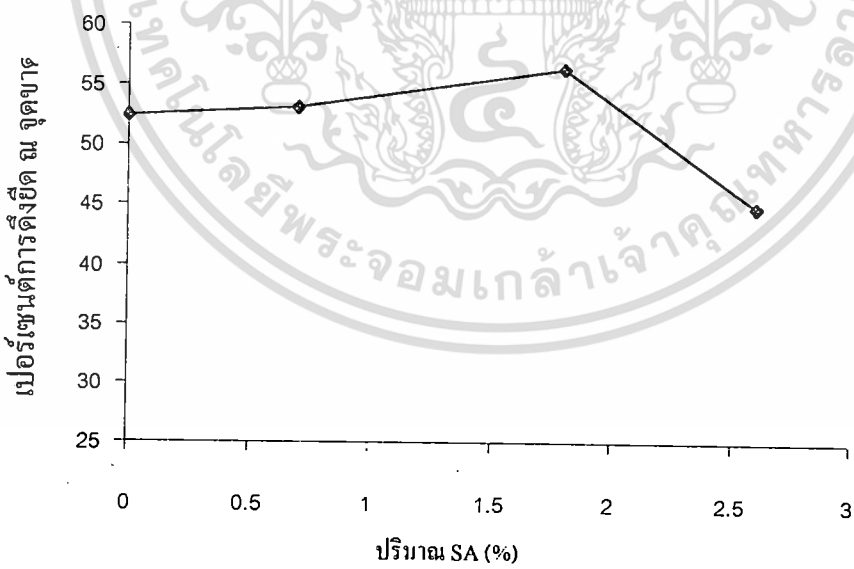


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง (KPa) กับปริมาณ $CaCO_3$ (%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

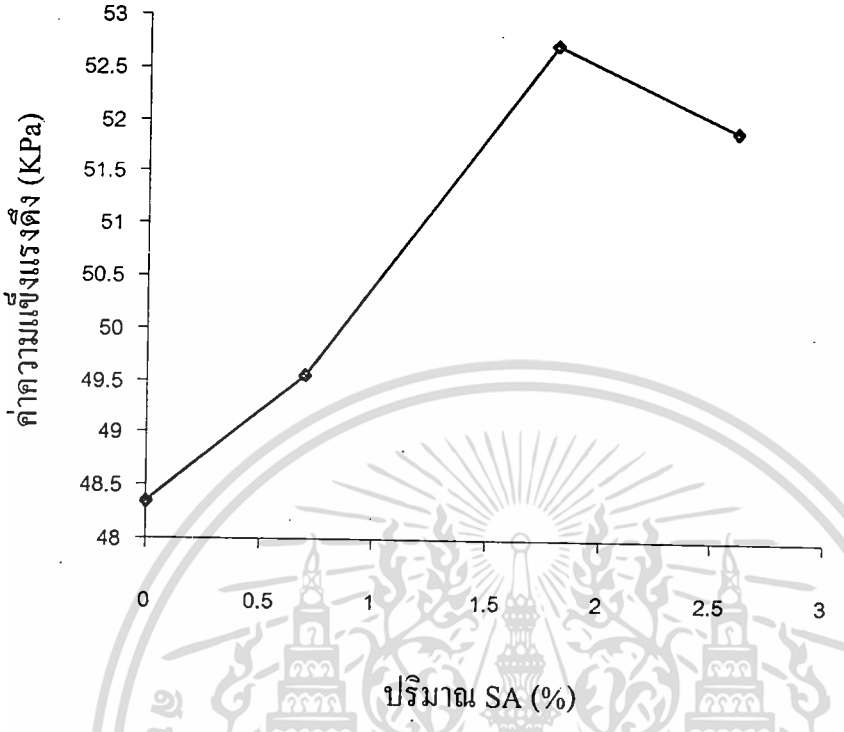


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (MPa) กับ ปริมาณ SA (%) ที่ใช้เคลือบ $CaCO_3$



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซนต์การดึงยืด ณ จุดขาด กับ ปริมาณ SA (%) ที่ใช้เคลือบ $CaCO_3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง (KPa) กับปริมาณ SA (%) ที่ใช้เคลือบ $CaCO_3$

จากรูปที่ 4.12-4.14 พบว่า เมื่อปริมาณ $CaCO_3$ เพิ่มขึ้น ทำให้สมบัติความแข็งแรงดึง (ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก เปอร์เซ็นต์ความยาว ณ จุดขาด และค่าความแข็งแรงดึง) ลดลง เนื่องจาก $CaCO_3$ มีแนวโน้มที่จะรวมกันเป็นก้อน เมื่อออกแรงดึง ทำให้เกิดช่องว่างภายในชิ้นงานได้ง่าย เป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน ทำให้ชิ้นขาดได้ง่าย

จากรูปที่ 4.15 พบว่า เมื่อปริมาณ SA ที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวของ $CaCO_3$ มากขึ้นทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดครากเพิ่มขึ้น เนื่องจาก SA ทำให้ $CaCO_3$ เกิดการกระจายตัวดีขึ้น สามารถรับแรงกระทำจากภายนอกได้มากขึ้น

จากรูปที่ 4.16-4.17 พบว่า เมื่อปริมาณ SA ที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิว $CaCO_3$ มีค่ามากขึ้นทำให้ค่าเปอร์เซนต์การดึงยืดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจาก SA จะทำให้ $CaCO_3$ สามารถกระจายตัวใน HDPE ได้ดี แต่เมื่อปริมาณ SA เพิ่มมากเกินพอทำให้ค่าเปอร์เซนต์การดึงยืดลดลง เมื่อชิ้นงานมีค่าความเครียด (Strain) มากขึ้นทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่ผ่านกัน และSA ที่มากเกินพอทำให้เกิดการลื่นไถลของสายโซ่ได้ง่ายขึ้นจึงทำให้ชิ้นงานเกิดการขาดได้ง่าย (รับแรงได้น้อย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 ผลการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทก

เมื่อทำการเตรียมชิ้นงานโดยวิธีที่กล่าวมาแล้วดังหัวข้อ 3.3.3 ข แล้วนำมาทดสอบสมบัติแรงกระแทกเพื่อศึกษาผลของปริมาณ $CaCO_3$ และSA ที่มีต่อสมบัติทนต่อแรงกระแทกของ HDPE อย่างไรซึ่งจะได้ค่าความทนทานต่อแรงกระแทก โดยเครื่องจะคำนวณมาจากสมการ

$$\alpha KI\ (kJ/m^2) = E / b(t-d) \times 1000$$

เมื่อ

E = พลังงานที่ทำให้ชิ้นงานแตกหัก (J)

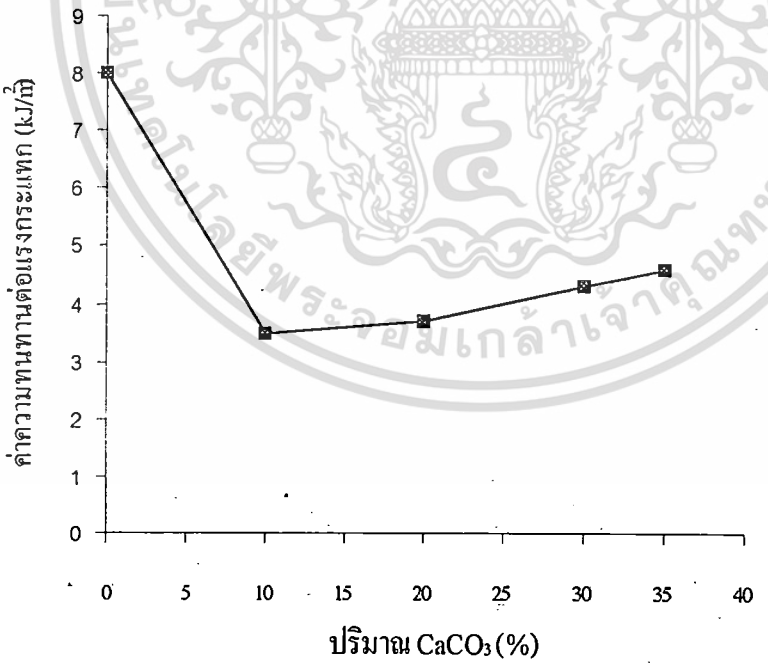
b = ความกว้างของชิ้นงาน (mm)

t = ความหนาของชิ้นงาน (mm)

d = ความลึกของ รอยบาก (mm)

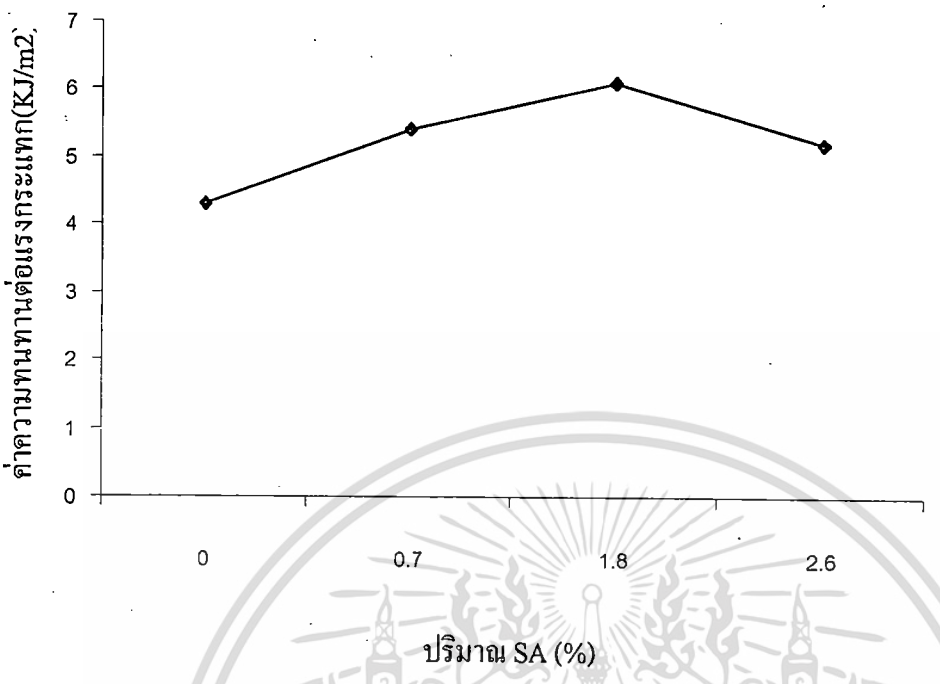
α = มุมในการตีชิ้นงาน

ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.18 และ 4.19



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงกระแทก (kJ/m^2) กับ ปริมาณ $CaCO_3$ (%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนมานต่อแรงกระแทก (KJ/m^2) กับปริมาณ SA (%) ที่ใช้เคลือบ $CaCO_3$

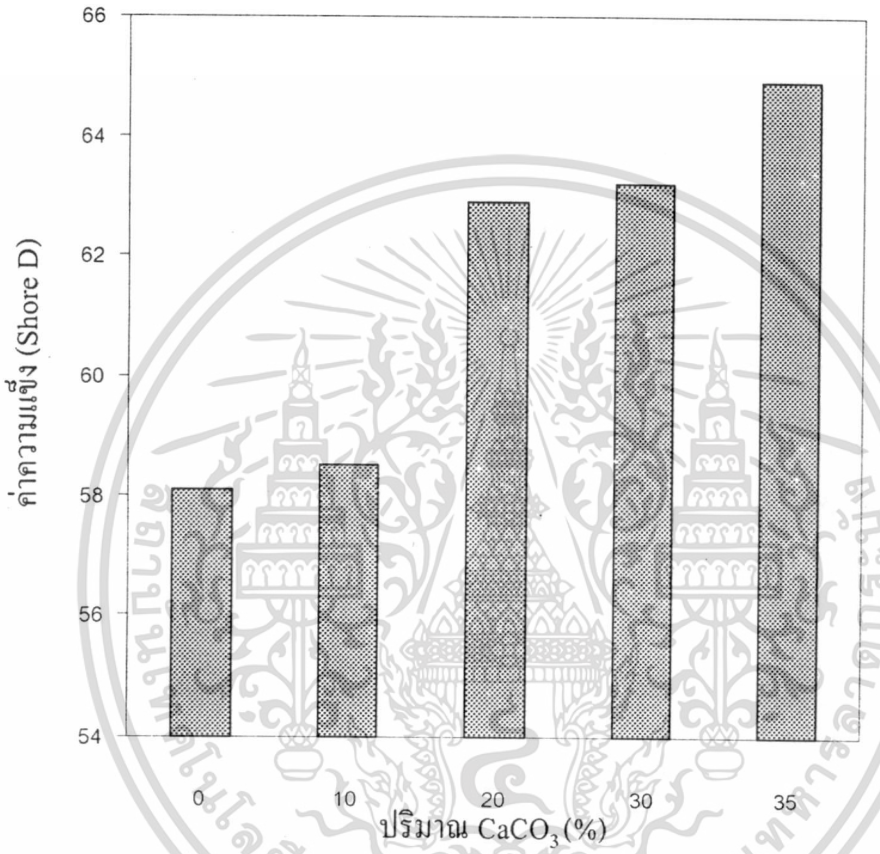
จากรูปที่ 4.18 พบว่าเมื่อปริมาณ $CaCO_3$ มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกมีค่าลดลง เนื่องจาก $CaCO_3$ ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้เหมือนกับ HDPE เมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอก จึงทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักได้ง่ายบริเวณที่มี $CaCO_3$ มาก

จากรูปที่ 4.19 พบว่าเมื่อปริมาณ SA ที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิว $CaCO_3$ มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกมีค่าสูงขึ้น (ประมาณ 1-2 %) ทั้งนี้เนื่องจาก SA จะทำให้ $CaCO_3$ สามารถกระจายตัวได้ดีใน HDPE แต่เมื่อปริมาณ SA เพิ่มขึ้นถึงค่าๆหนึ่งจะทำให้ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกมีค่าลดลง (ประมาณ 3 %) เนื่องจาก SA มีปริมาณที่มากเกินพอจะทำให้เกิดการลื่นไถลของสายโซ่พอลิเมอร์ขึ้นจึงทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักได้ง่าย (รับแรงกระแทกได้น้อย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

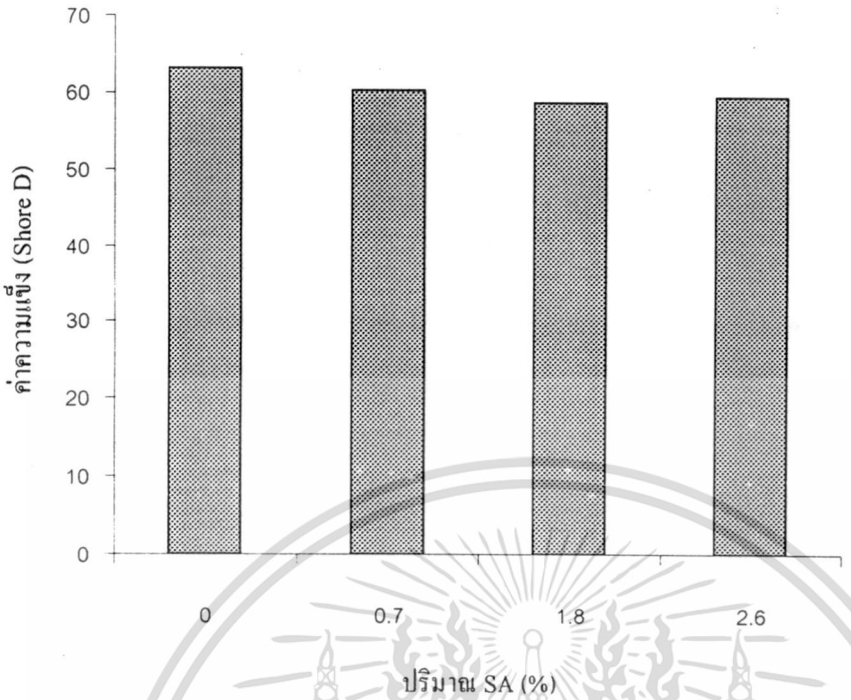
4.8 ผลการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง

เมื่อทำการเตรียมชิ้นงานโดยวิธีดังที่กล่าวมาแล้วในข้อ 3.3.3. ง จากนั้นนำมาทดสอบความแข็ง เพื่อศึกษาผลของปริมาณ $CaCO_3$ และSA ที่มีต่อสมบัติความแข็งของ HDPE อย่างไร ซึ่งจะได้ค่าโดยตรงจากเครื่องมือโดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.20 และ 4.21



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง กับปริมาณ $CaCO_3$ (%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



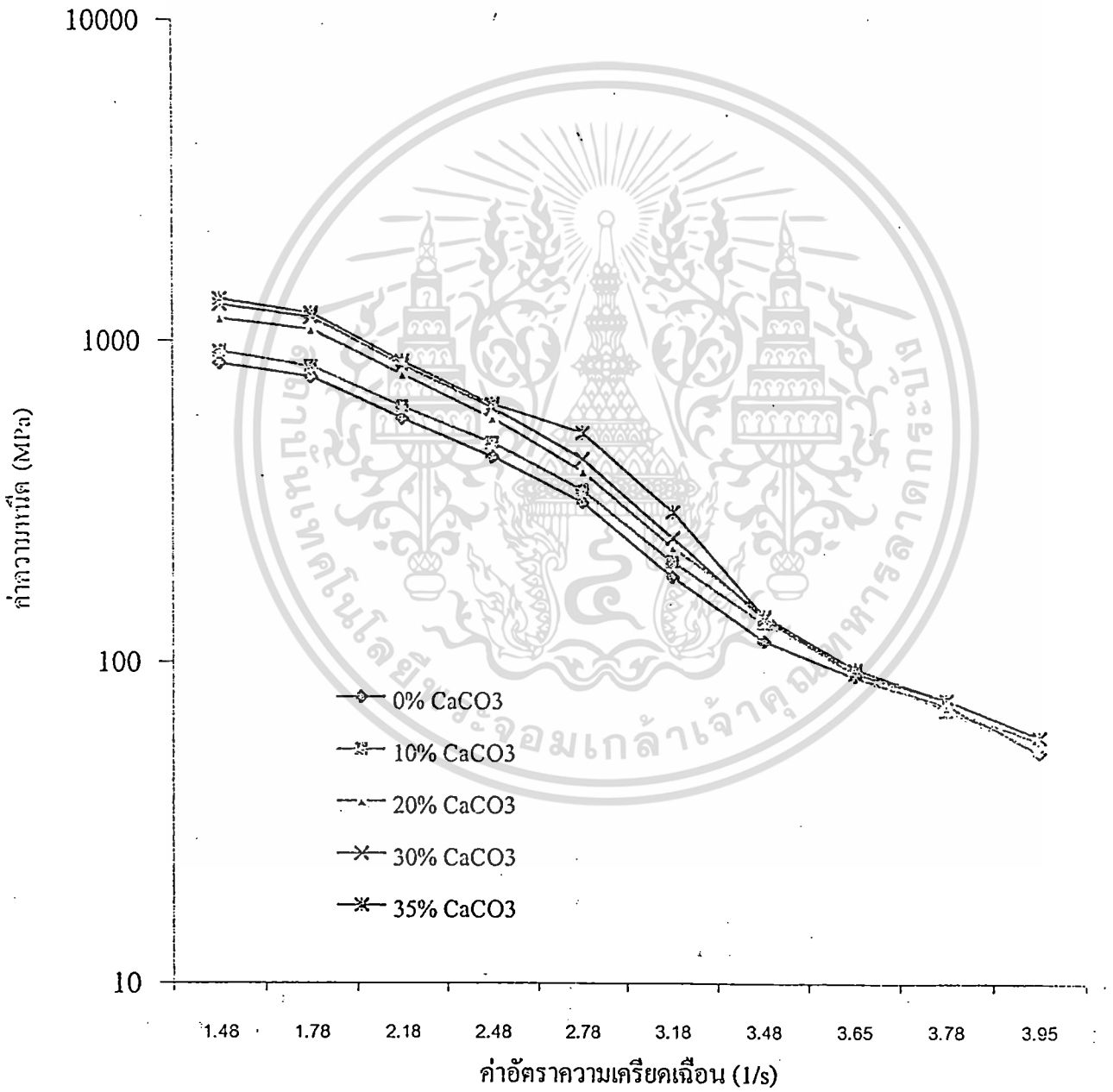
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับปริมาณ SA (%) ที่ใช้ในการเคลือบ $CaCO_3$

จากรูปที่ 4.20 และ 4.21 พบว่าเมื่อปริมาณ $CaCO_3$ มีค่ามากขึ้นจะทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น เนื่องจาก $CaCO_3$ มีค่ามอดุลัสสูงกว่า HDPE ส่วนปริมาณ SA ที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิว $CaCO_3$ มีผลต่อความแข็งน้อยมาก

4.9 การทดสอบการไหลด้วยเครื่องมือวัดสมบัติการไหล (Capillary Rheometer)

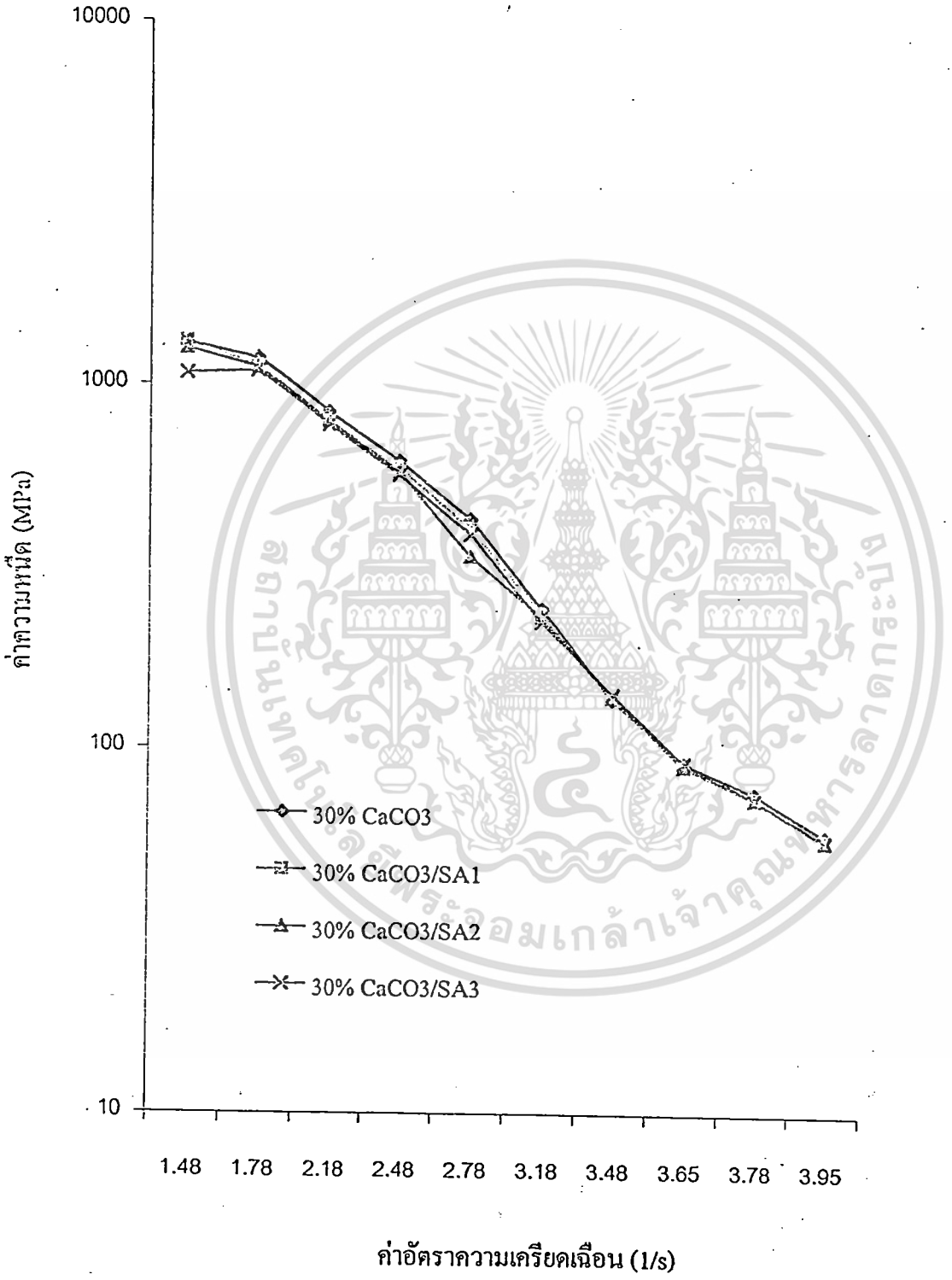
เมื่อทำการเตรียมสารตัวอย่างดังตารางที่ 3.3 แล้วจึงนำมาทดสอบสมบัติการไหลดังหัวข้อที่ 3.3.3. จ เพื่อศึกษาผลของปริมาณ $CaCO_3$ และ SA มีผลต่อสมบัติการไหลของ HDPE อย่างไร โดยดูค่าความหนืดที่อัตราความเครียดเฉือนต่าง ๆ จากเครื่องมือโดยตรง ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.22 และ 4.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืด (MPa) กับค่าอัตราความเครียดเฉือน (1/s) เมื่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตใน HDPE แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืด (MPa) กับค่าอัตราความเครียดเฉือน (1/s) เมื่อปริมาณ SA ที่ใช้เคลือบ $CaCO_3$แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.15-4.16 พบว่าเมื่อปริมาณของ $CaCO_3$ เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความหนืดมากขึ้น เนื่องจาก $CaCO_3$เป็นลักษณะของแข็งเมื่อทำการผสมลงในพอลิเมอร์และได้รับความร้อนสายโซ่พอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่ขึ้น $CaCO_3$ จะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ (แรงกระทำระหว่าง $CaCO_3$ กับ HDPE เพิ่มขึ้น) จึงทำให้ค่าความหนืดสูงขึ้น และเมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิว $CaCO_3$ ด้วย SA พบว่าเมื่อ SA เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความหนืดลดลงทั้งนี้เนื่องจาก SA จะทำให้แรงกระทำระหว่าง HDPE กับ $CaCO_3$ ลดลงรวมทั้งมีกรดอิสระเกิดขึ้นเมื่อปริมาณ SA มากเกินพอจึงทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นเป็นผลให้ค่าความหนืดลดลง ทั้งนี้เราสามารถสังเกตค่าความหนืดได้ชัดเจนที่อัตราความเค้นเฉือนต่ำๆเพราะว่าที่อัตราความเค้นเฉือนสูงๆสายโ ซ่พอลิเมอร์จะเกิดการคลายตัวออกจากกันและเคลื่อนไหวได้ง่ายซึ่งทำให้สายโซ่ขาดออกจากกัน

4.10 ผลการวิเคราะห์ค่าการบวมตัว (Die swell)

ได้จากการตัดสารตัวอย่างที่ออกมาจากเครื่องวัดสมบัติการไหลโดยตรง ผลการทดสอบที่ได้แสดงดังตาราง 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าการบวมตัวของชิ้นงาน

สารผสม HDPE	ค่าการบวมของชิ้นงาน
	ความเร็วของลูกสูบ 10 mm/min
0% $CaCO_3$	1.35
10% $CaCO_3$	1.23
20% $CaCO_3$	1.21
30% $CaCO_3$	1.18
35% $CaCO_3$	1.15
30% $CaCO_3$/SA1	1.18
30% $CaCO_3$/SA2	1.17
30% $CaCO_3$/SA3	1.15

จากตารางที่ 4.3 พบว่าเมื่อปริมาณ $CaCO_3$มากขึ้นค่าการบวมตัวจะลดลงทั้งนี้เนื่องจาก $CaCO_3$ จะขัดขวางการคืนตัวของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อออกจากหัวดายน์ของเครื่องวัดสมบัติการไหล และเมื่อเพิ่มปริมาณ SA ในการปรับปรุงพื้นผิว $CaCO_3$ มากขึ้นไม่ได้ช่วยให้ค่าการบวมตัวเพิ่มขึ้น แสดงว่าแรงกระทำระหว่างสายโซ่ลดลงและมีความสามารถในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

- พื้นที่ผิวของอนุภาค $CaCO_3$ ขนาด 2.8 μm มีค่าเท่ากับ 3.34 m^2/g ดังนั้นในการเคลือบพื้นผิว $CaCO_3$ 1 ชั้น ต้องใช้ SA 0.75 %wt
- เมื่อเพิ่มปริมาณ $CaCO_3$ มากขึ้น จุดหลอมเหลว มีค่าลดลง แสดงว่าเกิดผลึกขนาดเล็ก แต่พบว่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่า $CaCO_3$ ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (Nucleating agent) ในการเกิดผลึกให้กับ HDPE
- เมื่อเพิ่มปริมาณ $CaCO_3$ มากขึ้น อนุภาค $CaCO_3$ มีการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ลักษณะการขาดเป็นแบบเปราะ ทั้งนี้เนื่องจากมีอนุภาค $CaCO_3$ จำนวนมากจะเกิดแรงดึงดูดกันสูง แต่เมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วย SA การกระจายตัวของ $CaCO_3$ ดีขึ้น ทำให้มีลักษณะการขาดแบบเหนียว (เป็นเส้นใย) กล่าวคือ SA ทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระจาย (Dispersing agent) และช่วยลดแรงกระทำระหว่าง $CaCO_3$ กับ HDPE ด้วย
- เมื่อเพิ่มปริมาณ $CaCO_3$ มากขึ้นทำให้ค่าสมบัติความแข็งแรงดึงลดลง (ค่าแข็งแรง ณ จุดดราก เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงดึง) เนื่องจาก $CaCO_3$ รวมตัวเป็นกลุ่มก้อน ทำให้เกิดช่องว่างภายในชิ้นงานซึ่งเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงานทำให้ชิ้นงานรับแรงได้น้อย ขาดง่าย หลังจากปรับปรุงพื้นผิว $CaCO_3$ ด้วย SA ทำให้ค่าความแข็งแรง ณ จุดดราก เพิ่มขึ้น เนื่องจาก $CaCO_3$ สามารถกระจายตัวได้ดีขึ้น แต่พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และค่าความแข็งแรงดึง มีค่าสูงขึ้นที่สุดเนื่องจาก SA ทำให้ $CaCO_3$ กระจายตัวได้ดีแต่เมื่อปริมาณ SAมากเกินพอทำให้เกิดกรดอิสระ (Free acid) สายโซ่เกิดการลื่นไถลจากกันได้ง่าย ทำให้ชิ้นงานขาดได้ง่าย
- เมื่อเพิ่มปริมาณ $CaCO_3$ มากขึ้น ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกลดลง เพราะ $CaCO_3$ ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ในสภาวะการใช้งาน เมื่อมีแรงกระทำอย่างรวดเร็วจะทำให้ชิ้นงานแตกหักได้ง่าย แต่เมื่อปรับปรุงพื้นผิวด้วย SA ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกจะสูงขึ้นที่สุดเมื่อใช้ SA 1.7 %wt ของ $CaCO_3$ แล้วมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจาก SA ทำให้ $CaCO_3$ กระจายตัวได้ดีแต่เมื่อปริมาณ SA มากเกินพอทำให้เกิดกรดอิสระ (Free acid) สายโซ่เกิดการลื่นไถลจากกันได้ง่าย ทำให้ชิ้นงานขาดได้ง่าย
- เมื่อเพิ่มปริมาณ $CaCO_3$ มากขึ้น ค่าความแข็งมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก $CaCO_3$ มีค่ามอดุลัสมากกว่า HDPE
- ปริมาณ $CaCO_3$ มากขึ้น ค่าความหนืดมีค่ามากขึ้น เนื่องจาก $CaCO_3$ มีแรงดึงดูดกับ HDPE ทำให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการเคลื่อนที่ได้ยาก แต่เมื่อใช้ปริมาณ SA ในการปรับปรุงพื้นผิว มากขึ้น

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะทำให้ค่าความหนืดลดลง ทั้งนี้เนื่องจาก SA จะทำให้แรงกระทำระหว่าง HDPE กับ $CaCO_3$ ลดลง

- ปริมาณ $CaCO_3$ มากขึ้น ค่าการบวมตัวของชิ้นงานมีค่าลดลง เพราะ $CaCO_3$ ขัดขวางการหดกลับของชิ้นงาน และเมื่อปรับปรุงพื้นที่ผิว $CaCO_3$ ด้วย SA ในปริมาณมากขึ้น พบว่ามีผลต่อค่าการบวมตัวของชิ้นงานพียงเล็กน้อย แสดงว่า แรงกระทำระว่างสายโซ่ลดลงและมีความสามารถในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น

จากการทดลองทำการผสม $CaCO_3$ ขนาด 2.8 μm กับ HDPE พบว่าปริมาณ $CaCO_3$ 30 %wt จะทำให้สมบัติต่าง ๆ มีค่าด้อยลงอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นสูตรผสมดังกล่าวจึงถูกนำมาปรับปรุงพื้นผิวด้วย SA ซึ่งจะช่วยในการกระจายตัว ทำให้สมบัติต่าง ๆ มีค่าดีขึ้นและปริมาณ SA ที่เหมาะสมสำหรับระบบ HDPE / $CaCO_3$ ที่ศึกษาคือการปรับปรุงพื้นผิวด้วย SA 1.7 %wt ของ $CaCO_3$

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เลือกใช้สารตัวเติมชนิดอื่น กับ HDPE เพื่อประโยชน์ทางอุตสาหกรรม
2. ประยุกต์ใช้ $CaCO_3$ กับพอลิเมอร์ชนิดอื่น เพื่อความเหมาะสมในการใช้งาน
3. ใช้กรดไขมันชนิดอื่น ที่มีความยาวของสายโซ่โมเลกุลมากกว่า SA เพื่อปรับปรุงสมบัติที่ต้องการให้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. *วารสารพลาสติก*, พอลิเมอร์ทางอุตสาหกรรม 3 (2538): 30-33
2. โฉลก ปิงตระกูล "รายงานการสัมมนา HDPE บรรจุภัณฑ์ทันสมัย" ศูนย์บรรจุหีบห่อ สถาบันวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (2526): 1-6
3. R. Wolfe, "Plastic Handbook", 1990.
4. วิโรจน์ เตชะวิญญูธรรม "งานฉีดพลาสติก" กรุงเทพ, บริษัทซีเอ็ดยูเคชัน จำกัด (มหาชน) กรุงเทพ
5. *วารสารพลาสติก*, "สารเพิ่มเนื้อและสารเสริมแรง" 5 (2539): 45-50
6. E.Jesse, "Plastic Additives and Modifiers Handbook.1" (1996): 503-512
7. L.G.Wade , "Organic Chemistry" , Simon & Schuster, New Jersey (1995): 958,1213
8. Particulate-Filler Polymer Composites, (1995): 130-135
9. ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย , "เทคโนโลยีพอลิเมอร์ 1" , โครงการตำรา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (2542): 1
10. ดร. ชลลดา ฤตวิรุฬห์, " เอกสารประกอบการเรียนวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ 1"โครงการตำรา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (2542)
11.
12. เอกสารประกอบการเรียนวิชาฟิสิกส์พอลิเมอร์ ดร. อิทธิพล แจ้งชัด
13. ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย , "เทคโนโลยีพอลิเมอร์ 1" , โครงการตำรา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (2542): 86
14. สมหมาย ศิริเลิศสมบัติ "รายงานการสัมมนา HDPE บรรจุภัณฑ์ทันสมัย" ศูนย์บรรจุหีบห่อ สถาบันวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (2526): 118-120
15.
16. ดร. อิทธิพล แจ้งชัด, "เอกสารประกอบการเรียนวิชาปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์" , คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง(2541)
17. A.D.Kupfer and R.Rozett, Antec'84 (1984) : 191-194
18. G.R. Sothern and K.A. Hodd, "Processing of British PlasticFederation abd Plastic and Rubber Institute", Filplas Conference, Manchester (1989): 11/1-11/9
19. S.N. Maiti and R. Jeyakumar, *Journal of Polymer Material* (1990): 29-34
20. Fekete and Tudos, *Journal Apply of Polymer Science*.23 (1978): 26-39
21. Santelices,Antec'94 (1994): 3591
22. Y. Suetsugu and J.L. White, *Journal Apply of Polymer Science*. 28 (1983): 1481-1501
23. Pukanszky and Tudos, *Journal of Material Science*.8 (1989): 1040-1042

การจัดทำสำเนาเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

24. Fekete,Pukanszky and Toth, *Journal of Celloid and Interface Science.*135(1990): 200-208

25. C.D.Han, *J.Appl. Polym. Sci.* 18 (1974): 821-829

26. Hancock, Tremayne and Rosevear, *Journal of Polymer Science.*18 (1980): 3211-3217

27. บริษัทไทยพอลิเอทิลีน

28. บริษัทสุรินทร์ออมย่า เคมิคอล จำกัด

29. Annual Book of ASTM Standard 8.03(1988): 90-93

30. Annual Book of ASTM Standard 8.01(1988): 155-166

31. Annual Book of ASTM Standard 8.03(1988): 57-73

32. Annual Book of ASTM Standard 8.03(1988): 200-206

33. Annual Book of ASTM Standard 8.03(1996): 458-468

34. Papirer,E.,Schultz,J.,and Turchi,C.*European Polymer Journal,* 20(1984): 1155

35. "British Standard,BS 2782",Operations Instructions, Davenport England

36. "Encyclopedia of Polymer Science and Engineering", 4(1986): 487

37. Hill,.C.T.SPE,"Engineering Properties and Division" (1975)

38. นายพลชีพ ลิ้มพงษ์ และนายธำรงค์ศักดิ์ ลาภวิบูลย์สุข "วิทยานิพนธ์เรื่องการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่บริสุทธิ์ และที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติม", คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (2542): 38

39. ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย , "เทคโนโลยีพอลิเมอร์ 1" ,โครงการตำรา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (2542): 25-26

40. กรมวิทยาศาสตร์บริการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้