



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การใช้เอทิลีนไวนิลอะซิเตทโคพอลิเมอร์ในการปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิต
จากพอลิเอทิลีน/แบเรียมซัลเฟต

Use of ethylene vinyl acetate copolymer for property modification of
polyethylene/barium sulfate composite

นางสุภารัตน์ รักขลธิ์

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัย
จากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2561
คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การใช้เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ในการปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิต

จากพอลิเอทิลีน/แบเรียมซัลเฟต

Use of ethylene vinyl acetate copolymer for property modification of
polyethylene/barium sulfate composite

นางสุภารัตน์ รักชลธิ

600267245

RC00080

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัย
จากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2561
คณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ การใช้เอทิลีน ไวนิลอะซิเตต โคพอลิเมอร์ในการปรับปรุงสมบัติของคอม โพลิตจาก
พอลิเอทิลีน/แบเรียมซัลเฟต

แหล่งเงิน งบประมาณเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์

ประจำปีงบประมาณ 2561 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000 บาท

ระยะเวลาทำวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2560 ถึง 30 กันยายน 2561

หัวหน้าโครงการวิจัย

นางสุภารัตน์ รักชลธิ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์)

สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้เอทิลีน ไวนิลอะซิเตต โคพอลิเมอร์ (EVA) ในการปรับปรุง
สมบัติของคอม โพลิตจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ผสมแบเรียมซัลเฟต
(BaSO₄) การเตรียมสูตรผสม LLDPE/EVA/BaSO₄ โดยการใช้ปริมาณ BaSO₄ คงที่เท่ากับ 25 ส่วน
ในร้อยละของพอลิเมอร์ (php) และปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่าง LLDPE กับ EEA เท่ากับ 95/5,
90/10, และ 85/15 การผสมสูตรทำได้โดยใช้เครื่องผสมระบบปิด จากนั้นนำไปขึ้นรูปชิ้นงาน
คอม โพลิตโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูป จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นของ EVA ไม่ส่งผลต่อความ
หนาแน่นของคอม โพลิต LLDPE/EVA/BaSO₄ จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนพบว่า คอม โพลิต
ทุกสูตรผสมมีอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมผลึก อุณหภูมิในการตกผลึกใหม่ และปริมาณความเป็น
ผลึกของ LLDPE ใกล้เคียงกัน และพบว่าการมีอยู่ของ EVA ช่วยให้ความสามารถในการผสมเข้ากัน
ระหว่าง LLDPE และ BaSO₄ ดีขึ้น โดยหมู่ VA ใน EVA จะทำให้ความมีขั้วของพอลิเมอร์ผสม
เพิ่มขึ้น การเพิ่มปริมาณ EVA ทำให้การดึงยึด ณ จุดขาด และความแข็งแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้น
อย่างมาก ในขณะที่ยังมอดูลัส และความแข็งกดมีค่าลดลง นอกจากนี้พบว่า การเพิ่มขึ้นของ EEA
ส่งผลให้สมบัติความต้านทานแรงเค้นเนื่องจากสภาพแวดล้อม (ESCR) ของคอม โพลิตมีค่าเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : คอม โพลิต แบเรียมซัลเฟต พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น เอทิลีน ไวนิลอะซิเตต โคพอลิ
เมอร์

Research Title: Use of ethylene vinyl acetate copolymer for property modification of polyethylene/barium sulfate composite

Researcher: Mrs. Suparat Rukchonlatee

Faculty: Science

Department: Chemistry

ABSTRACT

This research studied on property improvement of linear low density polyethylene (LLDPE)/barium sulfate (BaSO_4) by using ethylene vinyl acetate copolymer (EVA). The BaSO_4 content was constant at 25 parts per hundred of polymer (php) and the weight ratio of LLDPE/EVA blends were varied at 95/5, 90/10 and 85/15. All compounds were prepared using an internal mixer and specimens were prepared via an injection molding process. The results revealed that the increasing of EVA did not affect on density of LLDPE/ BaSO_4 composites, the crystalline melting temperature, recrystallization temperature and % crystallinity of LLDPE. The presence of EVA improved the compatibility between LLDPE and BaSO_4 , this could be attributed to the presence of polar part of vinyl acetate group in EVA made polymer blend has higher polarity. From mechanical properties, the results indicated that %elongation at break and impact strength were increased dramatically with increasing EVA but Young's modulus and hardness were decreased. In addition, the increasing EEA contents improved environmental stress cracking resistance (ESCR) of the composites.

Keywords : Composite, BaSO_4 , LLDPE, EVA

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง การใช้เอทิลีน ไวนิลอะซิเตต โคพอลิเมอร์ในการปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิตจากพอลิเอทิลีน/แบเรียมซัลเฟต (Use of ethylene vinyl acetate copolymer for property modification of polyethylene/barium sulfate composite) ดำเนินงานได้เป็นอย่างดี โดยได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประจำปี งบประมาณ 2561 (สัญญาเลขที่ 2561-01-05-45) ผู้วิจัยขอขอบคุณ นางสาวเมธาวิ อุตตสุรดี นักศึกษาปริญญาโท นักวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของภาควิชาเคมีทุกท่านในการอำนวยความสะดวก และช่วยให้งานสำเร็จลุล่วงด้วยดี

นางสุภารัตน์ รักชลธิ
หัวหน้าโครงการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา III ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญภาพ	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 คอมโพลีเมอร์	4
2.1.1 องค์ประกอบหลักของคอมโพลีเมอร์	4
2.1.1.1 ส่วนเสริมแรง	4
2.1.1.2 เมทริกซ์	5
2.1.2 การแบ่งชนิดของคอมโพลีเมอร์	5
2.1.2.1 การแบ่งตามลักษณะของส่วนเสริมแรง	6
2.1.2.1 การแบ่งตามลักษณะการเกิดคอมโพลีเมอร์	6
2.1.3 การประยุกต์ใช้งานคอมโพลีเมอร์	7
2.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น	7
2.2.1 ลักษณะโดยทั่วไปของ LLDPE	8
2.2.2 สมบัติโดยทั่วไปของ LLDPE	9
2.2.3 การใช้งาน LLDPE	9
2.3 เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (EVA)	10
2.3.1 ลักษณะโดยทั่วไปของ EVA	10
2.3.2 สมบัติโดยทั่วไปของ EVA	10
2.3.3 การประยุกต์ใช้งาน EVA	11
2.4 แบเรียมซัลเฟต (BaSO ₄)	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา IV จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.1 ลักษณะโดยทั่วไปของ $BaSO_4$	11
2.4.2 การแบ่งประเภทของ $BaSO_4$	12
2.4.3 กระบวนการแต่งแร่แบไรท์.....	13
2.4.4 สมบัติโดยทั่วไปของ $BaSO_4$	14
2.4.5 การใช้งาน $BaSO_4$	15
2.5 กระบวนการฉีดขึ้นรูป	16
2.5.1 หน่วยของกระบวนการฉีดขึ้นรูป.....	16
2.5.2 รอบการทำงานของกระบวนการฉีดขึ้นรูป.....	17
2.5.3 พารามิเตอร์ที่สำคัญในกระบวนการฉีดขึ้นรูป.....	17
2.6.3.1 อุณหภูมิ (พลาสติกหลอมเหลวและแม่พิมพ์).....	18
2.6.3.2 เวลา (ฉีด ย้ำรักษาความดันและหล่อเย็น).....	18
2.6.3.3 ความดัน (ฉีด ย้ำรักษาความดันและแม่พิมพ์).....	18
2.6.3.4 ความเร็ว (ฉีดและปิด-เปิดแม่พิมพ์).....	18
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	29
3.1 สารเคมี	29
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	30
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	32
3.3.1 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์	32
3.3.2 กระบวนการฉีดขึ้นรูป.....	32
3.3.3 การวิเคราะห์หาความหนาแน่นของตัวอย่าง	33
3.3.4 การวิเคราะห์ปริมาณ $BaSO_4$ ในชิ้นงานตัวอย่าง.....	35
3.3.5 การหาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการตกผลึก และปริมาณผลึก.....	35
3.3.6 การศึกษาสัณฐานวิทยาของคอม โปสิต.....	36
3.3.7 การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง.....	36
3.3.8 การทดสอบสมบัติการรับแรงกระแทก.....	37
3.3.9 การทดสอบความแข็งกด.....	38
3.3.10 การทดสอบสมบัติความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	39
4.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ BaSO ₄ และความหนาแน่นของคอม โพลีต.....	39
4.2 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน	39
4.3 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของคอม โพลีต.....	40
4.3.1 การศึกษาการกระจายตัวของ EVA ใน LLDPE.....	40
4.3.2 การศึกษาการกระจายตัวของ BaSO ₄ ในคอม โพลีต LLDPE/EVA/BaSO ₄ ...	40
4.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของคอม โพลีต.....	42
4.5 ความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม.....	45
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	46
5.1 สรุปผลการวิจัย	46
5.2 ข้อเสนอแนะ	46
เอกสารอ้างอิง	47
ภาคผนวก - สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินโครงการวิจัย	51
ประวัตินักวิจัย	52

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อดีและข้อเสียของพอลิเมอร์คอมโพสิต.....	6
2.2 ตัวอย่างการใช้งานของคอมโพสิตในอุตสาหกรรมต่างๆ	7
2.3 ชนิดและสมบัติทั่วไปของพอลิเอทิลีนชนิดต่างๆ.....	8
2.4 คุณสมบัติของแบเรียมซัลเฟตสำหรับใช้ในทางอุตสาหกรรมตามมาตรฐาน ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ประเทศไทย (มอก.846-2532)...	13
2.5 ตัวแปรทางจลนศาสตร์ของ Avrami จากสมการของ Avrami สำหรับ กระบวนการตกผลึกแบบกระบวนการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิคงที่ (Isothermal)..	19
2.6 สมบัติทางความร้อนของ HDPE สูตรต่างๆ.....	22
2.7 สูตรผสม PP/BaSO ₄ ที่เตรียม.....	22
2.8 ความเป็นผลึก และสมบัติเชิงกลของ Neat PP และ PP/BaSO ₄	27
3.1 สมบัติบางประการของ LDPE.....	29
3.2 สมบัติบางประการของ EVA.....	30
3.3 สมบัติบางประการของ BaSO ₄	30
3.4 สูตรผสมที่เตรียมเทียบเป็นส่วนในร้อยละของพอลิเมอร์.....	32
4.1 ปริมาณของ BaSO ₄ และความหนาแน่นของชิ้นงานคอมโพสิต LLDPE/BaSO ₄ และ LLDPE/EVA/BaSO ₄	39
4.2 T _m , T _c และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ LLDPE ในคอมโพสิต LLDPE/BaSO ₄ และ LLDPE/EVA/BaSO ₄	40
4.3 ค่าความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมของคอมโพสิต LLDPE/EVA/BaSO ₄ ใน Tergitol™ NP-9 Surfactant at 50°C.....	45

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 โครงสร้างทางเคมีของ LLDPE	8
2.2 โครงสร้างทางเคมีของเอทิลีน ไวนิลอะซิเตด โคพอลิเมอร์ (EVA).....	10
2.3 ภาพขยายของ BaSO ₄ จากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	11
2.4 ภาพตัวอย่างการใช้งาน BaSO ₄	16
2.5 หน่วยของกระบวนการฉีดขึ้นรูป.....	17
2.6 Stress-Deformation ของตัวอย่างต่างๆ.....	20
2.7 การเปลี่ยนแปลงปริมาตร (ΔV) กับ Axial strain สำหรับคอมโพสิตสูตรต่างๆ ที่ 10% โดยปริมาตรของ BaSO ₄	20
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง K _{IC} กับปริมาณ BaSO ₄ (% โดยน้ำหนัก) ในคอมโพสิต HDPE.....	21
2.9 อัตราการเติบโตของผลึกสเฟียรูไลต์ของ Neat PP และ PP/BaSO ₄	23
2.10 Wide angle X-ray diffractograms ของ Neat PP และ PP/BaSO ₄ ที่มีปริมาณ BaSO ₄ 24% โดยน้ำหนัก	24
2.11 ปริมาณความเป็นผลึกของ Neat PP และ PP/BaSO ₄ สูตรต่างๆ.....	25
2.12 ค่า Yield stress และ Young's modulus ของ PP/BaSO ₄ สูตรต่างๆ.....	25
2.13 ความแข็งแรงกระแทกแบบชาร์ปีของ Neat PP และ PP/BaSO ₄ สูตรต่างๆ.....	25
2.14 SEM micrographs แสดงพื้นผิวแตกหักหลังการรับแรงกระแทกของ PP และ PP/BaSO ₄ สูตรต่างๆ ที่มีปริมาณ BaSO ₄ 24% โดยน้ำหนัก.....	26
2.15 SEM micrographs แสดงพื้นผิวแตกหักของ PP/BaSO ₄ ที่มี BaSO ₄ 24% โดย น้ำหนักร.....	27
3.1 การจัดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบเพื่อหาความหนาแน่น.....	34
3.2 ลักษณะและการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ ESCR.....	38
4.1 SEM micrographs แสดงการกระจายตัวของ EVA ใน LLDPE ของพื้นผิวที่แตกหัก (กำลังขยาย 6000 เท่า).....	41
4.2 SEM micrographs แสดงการกระจายตัวของ BaSO ₄ และ EVA ใน LLDPE ของพื้นผิว ที่แตกหัก (กำลังขยาย 6000 เท่า)	41
4.3 สมบัติการรับแรงดึงของคอมโพสิต LLDPE/EVA/BaSO ₄	43
4.4 ความแข็งแรงกดของคอมโพสิต LLDPE/EVA/BaSO ₄	44
4.5 สมบัติการรับแรงกระแทกของคอมโพสิต LLDPE/EVA/BaSO ₄	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VIII ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันนี้พอลิเมอร์เป็นที่รู้จักกันดีเพราะได้รับความนิยมและมีการใช้ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพอลิเมอร์กันอย่างแพร่หลาย พอลิเมอร์มีบทบาทต่อชีวิตประจำวัน และอุตสาหกรรมหลายๆ ด้าน ทั้งนี้เพราะพอลิเมอร์สามารถผลิต คัดแปลง แปรรูปได้ง่าย มีความแข็งแรง ทนทาน อย่างไรก็ตามการใช้พอลิเมอร์เพียงอย่างเดียวไม่สามารถให้สมบัติตามที่ต้องการได้ ในผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ส่วนใหญ่จึงต้องมีการผสมสารเติมแต่ง (Additives) เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติต่างๆ ให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยพบว่าในการใช้งานบางกรณีต้องการวัสดุที่มีความถ่วงจำเพาะสูงเพื่อนำไปใช้ในงานถ่วงน้ำหนัก เช่น ยางรองฐานกรวยป้ายจราจร และฐานยางหรือฐานพลาสติกยึดเสาสำหรับแบ่งเขตแดน เพื่อไม่ให้วัสดุล้มได้ง่ายเมื่อลมพัด จึงมีการนำเอาพอลิเมอร์มาผสมกับวัสดุชนิดหนึ่งที่เรียกว่าสารตัวเติม (Fillers) ซึ่งส่วนใหญ่มักจะมีน้ำหนักสูงกว่าพอลิเมอร์ เช่นแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) หรือแบเรียมซัลเฟต (BaSO_4) จึงช่วยเพิ่มความหนาแน่นของวัสดุ อีกทั้งสารตัวเติมส่วนใหญ่มีราคาถูกกว่าพอลิเมอร์ ทำให้การใส่สารตัวเติมลงไปยังมีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนในกระบวนการผลิตอีกด้วย

การใช้สารตัวเติมมีข้อจำกัดในเรื่องปริมาณการใช้ เนื่องจากการเติมสารตัวเติมในปริมาณมากทำให้มีโอกาที่สารตัวเติมกระจายตัวในพอลิเมอร์ได้ไม่ดี ส่งผลให้สารตัวเติมมีโอกาสรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน และถ้าใส่สารตัวเติมในปริมาณมากเกินไป จะส่งผลให้วัสดุมีสมบัติเชิงกลลดลง นอกจากนี้การเติมสารตัวเติมยังมีข้อจำกัดในเรื่องความแตกต่างระหว่างขั้วพอลิเมอร์เมตริกซ์ และสารตัวเติม ในกรณีที่มีความแตกต่างระหว่างขั้วมาก ทำให้ใส่สารตัวเติมได้ในปริมาณน้อย ดังนั้นจึงต้องใช้สารตัวเติมในปริมาณที่เหมาะสม และนิยมใช้สารช่วยกระจายตัว (Dispersing agent) เช่น กรดสเตียริกมาเคลือบอนุภาคของสารตัวเติมเพื่อให้เกิดการกระจายตัวที่ดีขึ้น [1] นอกจากนี้ยังอาจมีการใช้สารเติมแต่งประเภทอื่นๆ เพิ่ม เช่น สารช่วยผสม (Compatibilizer) เพื่อช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างสารตัวเติมและพอลิเมอร์

งานวิจัยก่อนหน้า [2] ทำการเตรียมและปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear low density polyethylene, LLDPE) ที่มีสารตัวเติมแบเรียมซัลเฟต (Barium sulfate, BaSO_4) ซึ่งมีความหนาแน่นสูง (ประมาณ 4.5 g/cm^3) เป็นองค์ประกอบ ให้มีความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนาแน่นสูง และมีสมบัติเชิงกล และความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม (ESCR) ที่ดีขึ้น เพื่อใช้ในงานถ่วงน้ำหนักในการใช้งานการประมงทางทะเล หรือผลิตเป็นกระชังเพาะเลี้ยงปลา โดยพบว่า การเติม BaSO_4 ทำให้ ESCR ของวัสดุคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น มีสาเหตุมาจากการมีอยู่ของ BaSO_4 ทำให้รอยแตกต้องเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ ทำให้มีพื้นที่หรือระยะทางในการขยายรอยแตกเพิ่มขึ้น ทำให้การเสียดสภาพของวัสดุเกิดขึ้นได้ช้าลง ในขณะที่ค่าการดึงยึด ณ จุดขาด และความแข็งแรงกระแทกของวัสดุลดลงอย่างมาก ซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของขั้ว ทำให้ LLDPE และ BaSO_4 มีความเข้ากันได้ต่ำ อนุภาค BaSO_4 มีการกระจายตัวไม่ดีใน LLDPE และไม่เกิดอันตรกิริยาต่อกัน จึงได้มีการใช้สารช่วยกระจายตัวกรดสเตียริก (Steric acid, SA) และสารช่วยผสมพอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride grafted polyethylene, LLDPE-g-MA) จากผลการทดลองพบว่า การใช้ SA ช่วยทำให้ BaSO_4 กระจายตัวได้ดีขึ้นใน LLDPE ในขณะที่การใช้ LLDPE-g-MA สามารถปรับปรุงการยึดติดระหว่างวัฏภาค และเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุคอมโพสิตได้ แต่การใช้ SA และ LLDPE-g-MA ไม่สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติการรับแรงกระแทกของวัสดุให้ดีขึ้นได้

งานวิจัยนี้จึงต้องการแก้ไขปัญหาดังกล่าว ด้วยการใช้ระบบพอลิเมอร์ผสม โดยเลือกใช้เอทิลีนไวไนลอะซีเตต โคพอลิเมอร์ (EVA) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง ซึ่งน่าจะช่วยให้วัสดุคอมโพสิตมีความแข็งแรงกระแทกที่สูงขึ้นได้ โดยนำ LLDPE มาผสมกับ EVA ในอัตราส่วน 95/15, 90/10 และ 85/15 โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม และมีปริมาณ BaSO_4 25 php และทำการศึกษาสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิต LLDPE/EVA/ BaSO_4

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาการใช้เอทิลีนไวไนลอะซีเตต โคพอลิเมอร์ (EVA) ในการปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิต LLDPE/ BaSO_4

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เตรียมคอมโพสิต LLDPE/EVA/ BaSO_4 โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ LLDPE/EVA เป็น 95/15, 90/10 และ 85/15 โดยน้ำหนัก โดยใช้ BaSO_4 25 php (Part per hundred of polymer)
2. ขึ้นรูปชิ้นงานคอมโพสิต LLDPE/EVA/ BaSO_4 จากกระบวนการฉีดขึ้นรูป
3. ศึกษาความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยใช้ Density kit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ศึกษาสมบัติทางความร้อนของคอม โพลีตด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) และเทคนิค Thermal gravimetric analysis (TGA)
5. ศึกษาสมบัติการรับแรงดึงด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM)
6. ศึกษาสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกด้วยเครื่อง Izod impact tester
7. ศึกษาความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งกด (Hardness tester)
8. ศึกษาสัณฐานวิทยาของคอม โพลีตที่ขึ้นรูปได้ด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM)
9. ศึกษาสมบัติความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม (ESCR) ของชิ้นงานคอม โพลีต

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถปรับปรุงสมบัติของคอม โพลีต LDPE/EVA/BaSO₄ ให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น โดยเฉพาะความแข็งแรงแรงกระแทกของคอม โพลีต
2. เพื่อนำไปเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่ผลิตพอลิเมอร์ที่ต้องการความถ่วงจำเพาะสูงหรือผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่นำไปใช้ในงานถ่วงน้ำหนัก

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คอมโพสิต [3]

คอมโพสิต (Composite) หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยองค์ประกอบสองส่วน (หรือมากกว่า) ที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด (Distinct components) อยู่ด้วยกัน และมีสมบัติแตกต่างกันอย่างชัดเจน เมื่อผสมเป็นคอมโพสิตแล้วจะมีความแข็งแรงมากกว่าแต่ละองค์ประกอบย่อย วัสดุคอมโพสิตชนิดพอลิเมอร์คอมโพสิตมีสมบัติที่ดีหลายประการ ที่สำคัญที่สุด คือ มีความแข็งแรงสูงแต่น้ำหนักเบา เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นๆ เช่น โลหะ ปัจจุบันจึงมีการใช้งานวัสดุคอมโพสิตเป็นโครงสร้างและรับแรงสำหรับงานวิศวกรรม เช่น ใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องบิน รถยนต์ เรือ เฟอร์นิเจอร์ ฯลฯ นอกจากนี้คอมโพสิตยังมีสมบัติที่หลากหลาย เนื่องจากมีคอมโพสิตหลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของวัสดุคอมโพสิต ดังนั้นจึงสามารถเลือกใช้วัสดุคอมโพสิตให้เหมาะสมกับงานแต่ละประเภทได้

2.1.1 องค์ประกอบหลักของคอมโพสิต

คอมโพสิตประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลัก คือ

2.1.1.1 ส่วนเสริมแรง

ส่วนเสริมแรง (Reinforced part) คือ ส่วนที่เป็น โครงสร้างที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุคอมโพสิต หมายถึง เป็นส่วนรับแรงหลักของวัสดุคอมโพสิต วัสดุที่เป็นส่วนเสริมแรงจะมีความแข็งแรงและมอดูลัสสูง โดยที่ลักษณะของส่วนเสริมแรงมีหลายแบบ ตัวอย่างเช่น ส่วนเสริมแรงแบบแผ่น แบบเป็นก้อน หรือผงที่มีขนาดเล็ก แต่ที่นิยมใช้มากที่สุด คือ ส่วนเสริมแรงแบบเส้นใย (Fiber) ชนิดต่างๆ นอกจากเส้นใยแล้ว ในปัจจุบันนิยมใช้ส่วนเสริมแรงแบบผงที่มีขนาดเล็กเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งอนุภาคนาโนเมตร (Nanoparticles) เนื่องจากเมื่อเติมลงไปวัสดุจะทำให้วัสดุมีสมบัติเชิงกลที่ดี มีค่ามอดูลัส และความแข็งแรงสูง และมีสมบัติทางแสง (Optical property) ที่ดี ไม่กระเจิงแสง ทำให้สามารถนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความใสได้ นอกจากนี้การใช้ส่วนเสริมแรงแบบผงจะทำให้วัสดุมีสมบัติในทุกทิศทางเหมือนกัน หรือ Isotropic property ซึ่งแตกต่างจากการใช้เส้นใย ซึ่งมักจะมีความแข็งแรงตามแนวเส้นใยมากกว่าตามขวางเส้นใย

2.1.1.2 เมตริกซ์

เมตริกซ์ (Matrix) คือ ส่วนที่ยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกันให้อยู่ในตำแหน่ง และการเรียงตัวที่กำหนด มักมีความแข็งแรงและมอดุลัสน้อยกว่าส่วนเสริมแรง เมตริกซ์เป็นองค์ประกอบที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางถ่ายเทแรงที่ได้รับ (Load transfer medium) ไปสู่ส่วนเสริมแรง นอกจากนี้เมตริกซ์ทำหน้าที่ปกป้องส่วนเสริมแรงจากการเสียดสีเนื่องจากสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น เป็นต้น วัสดุเมตริกซ์ที่ใช้ในการผลิตวัสดุคอมโพสิตมีมากมายหลายชนิดและมีสมบัติหลากหลาย ซึ่งอาจแบ่งชนิดของวัสดุเมตริกซ์ได้ 3 ชนิด คือ พอลิเมอร์ โลหะ และเซรามิกส์ พอลิเมอร์เมตริกซ์ที่นิยมใช้ในคอมโพสิต คือ พอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซต (Thermosets) เนื่องจากใช้สารตั้งต้นน้ำหนักโมเลกุลต่ำ มีความเหนียวต่ำ สามารถผสมกับส่วนเสริมแรง ขึ้นรูปได้ง่าย ตัวอย่างเทอร์โมเซตที่นิยมใช้ ได้แก่ อีพอกซีเรซิน (Epoxy resins) ไวนิลเอสเทอร์ (Vinyl esters) ฟีนอลิก (Phenolics) และพอลิอิมิด (Polyimides) เริ่มจากการใช้มอนอเมอร์ (Monomers) หรือ โอลิโกเมอร์ (Oligomers) ที่มีหลายหมู่ฟังก์ชัน ทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์เกิดเป็นพอลิเมอร์โครงสร้างร่างแหสามมิติ ซึ่งไม่สามารถหลอมเหลวนำกลับมาขึ้นรูปใหม่ได้ ส่วนพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติกนิยมใช้เป็นเมตริกซ์สำหรับคอมโพสิต เนื่องจากการใช้งานบางประเภทต้องการความเหนียวหรือต้องการสมบัติการรับแรงกระแทกของวัสดุ เช่น การผลิตกันชนรถยนต์โดยใช้ PP เสริมแรงด้วยไฟเบอร์กลาส (Fiber glass) [10] หรือใช้ทำเป็นวัสดุสำหรับตกแต่งภายในที่ต้องการความเหนียว และมีความทนทาน หรือนำไปอัดซ้อนกับวัสดุอื่นเพื่อเพิ่มความแข็งแรง [11] เป็นต้น การที่พอลิเมอร์เทอร์โมพลาสติกสามารถขึ้นรูปได้หลายครั้ง ทำให้สามารถนำวัสดุเศษหรือของเสียจากการผลิตมาบดหรือนำผลิตภัณฑ์ที่ใช้แล้วมาผสมกับพอลิเมอร์ใหม่ และหลอมด้วยความร้อนเพื่อขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนการผลิต และเป็นหนทางหนึ่งในการช่วยลดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม การใช้วัสดุโลหะเป็นเมตริกซ์สำหรับคอมโพสิตนิยมใช้กับเส้นใยโลหะเป็นส่วนเสริมแรง ซึ่งมีความแข็งแรงสูง แต่มีข้อจำกัด คือ น้ำหนักของวัสดุสูง ตัวอย่างเมตริกซ์โลหะที่นิยมใช้ คือ อะลูมิเนียม (Aluminium) ไททาเนียม (Titanium) แมกนีเซียม (Magnesium) และทองแดง (Copper) ซึ่งการใช้โลหะและเซรามิกส์เป็นเมตริกซ์นิยมใช้กับคอมโพสิตที่ใช้งานอุณหภูมิสูงและทนต่อสารเคมี

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนชนิดของเมตริกซ์จะทำให้ได้วัสดุคอมโพสิตที่มีสมบัติแตกต่างกัน ดังนั้นการเลือกใช้เมตริกซ์ชนิดใดนั้นขึ้นอยู่กับสมบัติในการประยุกต์ใช้งานเป็นสำคัญ

2.1.2 การแบ่งชนิดของคอมโพสิต

การแบ่งชนิดของคอมโพสิตสามารถแบ่งวัสดุคอมโพสิตได้หลายแบบ โดยสามารถแบ่งชนิดของคอมโพสิตได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.1 การแบ่งตามลักษณะของส่วนเสริมแรง

1. คอมโพสิตแบบเส้นใย (Fibrous composites) คือ คอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็น เส้นใย (Fibers) อาจเป็นเส้นใยยาว (Long fibers) หรือเส้นใยสั้น (Short fibers) มักเป็นเส้นใยขนาดเล็ก มีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง ทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงตามแนวการเรียงตัวของเส้นใยสูงกว่าแนวอื่นๆ

2. คอมโพสิตแบบแผ่นหรือลามิเนต (Laminar composites) คือ คอมโพสิตที่ประกอบด้วยชั้นหรือแผ่นของวัสดุที่ยึดติดกันด้วยตัวเชื่อมเมตริกซ์ มีลักษณะเป็นชั้นๆ คล้ายแผ่นประกบ หรือเป็น โครงสร้างคล้ายรังผึ้ง

3. คอมโพสิตแบบเป็นก้อน (Particulate composites) คือ คอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเม็ด (Beads) แผ่น (Flake) หรือผง (Powder) ที่มีขนาดเล็ก

2.1.2.2 การแบ่งตามลักษณะการเกิดคอมโพสิต

1. คอมโพสิตจากธรรมชาติ (Natural composites) คือ วัสดุคอมโพสิตที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ไม้เป็นคอมโพสิตของเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose) เป็นส่วนเสริมแรง โดยมีสารจากพวกลิกนิน (Lignin) เป็นเมตริกซ์ยึดเซลลูโลสไว้ด้วยกัน ส่วนกระดูกและฟันเป็นคอมโพสิตของผลึกแข็งอนินทรีย์ เช่น ไฮดรอกซีแอปาทิต (Hydroxyapatite) อยู่ในเมตริกซ์ของสารอินทรีย์เหนียวคอลลาเจน (Collagen) เป็นต้น

2. คอมโพสิตจากการสังเคราะห์ (Synthetic composites) คือ วัสดุคอมโพสิตที่ได้จากการสังเคราะห์ เช่น พลาสติกเสริมแรง วัสดุไฟเบอร์กลาส เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของพอลิเมอร์คอมโพสิต [3, 4]

ข้อดี	ข้อเสีย
1. ช่วยลดน้ำหนักของวัสดุ	1. วัสดุดิบและเครื่องมือในการขึ้นรูป คอมโพสิตมีราคาสูง
2. มีสมบัติต่อน้ำหนักสูง เช่น ความแข็งแรงต่อน้ำหนัก	2. มีสมบัติในแนวขวางของการจัดเรียงตัวของส่วนเสริมแรงต่ำ กรณีใช้เส้นใยเป็นส่วนเสริมแรง
3. สามารถทำให้มีสมบัติแข็งแรงเฉพาะในทิศทางที่ต้องการได้	3. มีสมบัติด้านความเหนียวต่ำ
4. มีอายุการใช้งานนาน ด้านทานการสึกกร่อน	4. มีผลเสียกับสิ่งแวดล้อมเมื่อส่วนที่เป็นเมตริกซ์สังเคราะห์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้เกิดการเสียหาย
5. สามารถเพิ่มหรือลดสมบัติการนำความร้อนและการนำไฟฟ้า	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 การประยุกต์ใช้งานคอมโพลีเมอร์ [3]

ในการประยุกต์ใช้งานวัสดุคอมโพลีเมอร์ ทั้งชนิดและการออกแบบรูปร่างและโครงสร้างของคอมโพลีเมอร์สามารถประยุกต์ได้กับการใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ (ดังแสดงในตารางที่ 2.2) เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ (Automotive) เครื่องบิน (Aircraft) ยานอวกาศ (Aerospacecraft) และอุปกรณ์กีฬา (Sporting goods) เป็นต้น การที่มีการใช้งานคอมโพลีเมอร์ทดแทนวัสดุอื่นๆ เช่น โลหะ เนื่องจากมีน้ำหนักเบา ผลิตภัณฑ์คอมโพลีเมอร์มีชิ้นส่วนน้อยชิ้นไม่ต้องการการประกอบมาก สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างการใช้งานของคอมโพลีเมอร์ในอุตสาหกรรมต่างๆ [3]

อุตสาหกรรม	ตัวอย่างการใช้งาน
เครื่องบิน	ประตู ปีก ใบพัด หางเสือ ตัวเครื่อง
ยานอวกาศ	กระสวยอวกาศ สถานีอวกาศ
ยานยนต์	ตัวถัง ส่วนประกอบเครื่องยนต์ กันชน
เรือ	ตัวถังเรือ คาค้ำ
เคมี	ท่อส่งสารเคมี ถังเก็บ
อุปกรณ์ก่อสร้าง	ฝ้าผนัง ประตู เฟอร์นิเจอร์ โตะ เก้าอี้ บันได
อุปกรณ์ไฟฟ้า	แผงวงจรไฟฟ้า ก่อตั้งคอมพิวเตอร์

2.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น [5]

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) เป็นพอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) ชนิดหนึ่งซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของพอลิโอเลฟินส์ เป็นพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากเอทิลีนอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนแบบไม่อิ่มตัว (Unsaturated aliphatic hydrocarbon) พอลิเอทิลีน ผลิตขึ้นในทางการค้าครั้งแรกในปี ค.ศ. 1939 เป็นพอลิเอทิลีนที่มีกิ่งก้านสาขาชนิดความหนาแน่นต่ำ เรียกว่า พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) พอลิเอทิลีนถูกค้นพบขึ้นในครั้งแรกในปี ค.ศ. 1933 โดย Dawcett และ Gibson ที่ Imperial chemical industries Ltd., (ICI) ประเทศอังกฤษ โดยจากการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับปฏิกิริยาเคมีที่มีความดันสูงๆ และได้ค้นพบพอลิเอทิลีน โดยบังเอิญจากปฏิกิริยาของเอทิลีนกับเบนซัลดีไฮด์ ภายใต้ความดันบรรยากาศหลายบรรยากาศ ปัจจุบันมีการผลิตพอลิเอทิลีนให้เหมาะสมกับการใช้งาน พอลิเอทิลีนสามารถแบ่งตามโครงสร้างทั่วไป ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ชนิดและสมบัติทั่วไปของพอลิเอทิลีนชนิดต่างๆ [6]

พอลิเมอร์	โครงสร้างทั่วไป	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ความเป็นผลึก (%)
LDPE	เชิงเส้นมีโซ่กิ่งมาก	0.92-0.94	ประมาณ 50
LLDPE	เชิงเส้นมีโซ่กิ่งน้อย	0.92-0.94	ประมาณ 50
HDPE	เชิงเส้นมีโซ่กิ่งน้อยมาก	0.95	ประมาณ 90

พอลิเอทิลีนจัดเป็นพลาสติกจำพวกเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) และมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ประมาณ -130 ถึง 60°C พอลิเอทิลีนจึงมีลักษณะทั้งยืดหยุ่น และแข็งที่สภาวะปกติ สำหรับอุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature, T_m) ของพอลิเอทิลีนมีค่าประมาณ 108-133°C

2.2.1 ลักษณะโดยทั่วไปของ LLDPE

LLDPE เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่มีโซ่กิ่ง แต่ต่างจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เนื่องจากมีจำนวนโซ่กิ่งน้อยกว่า และลักษณะของกิ่งจะสั้น LLDPE สามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันร่วมระหว่างเอทิลีนมอนอเมอร์กับสายโซ่ยาวๆ ของโอดีฟิน เช่น บิวทีน (Butene) เฮกซีน (Hexene) และออกทีน (Octene) โดยใช้อุณหภูมิและความดันต่ำ สมบัติของ LLDPE จะอยู่ระหว่าง LDPE และ HDPE



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของ LLDPE [7]

2.2.2 สมบัติโดยทั่วไปของ LLDPE

- ความต้านทานต่อแรงกระแทกที่อุณหภูมิต่ำ ประมาณ -40°C พลาสติก LLDPE ที่มีดัชนีการไหลเดียวกันกับ LDPE จะมีความต้านทานแรงกระแทกดีกว่า
- มีความต้านทานแรงเจาะทะลุดีกว่า LDPE ถึง 60%
- LDPE จะค่าแรงต้านการดึงต่ำกว่า LLDPE ประมาณ 50% ซึ่งถ้าผสม LLDPE ใน LDPE จะทำให้ค่าแรงต้านการดึงของถุงพลาสติกสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีความแข็งแรงของรอยเชื่อม (Seal strength) สูงกว่า LDPE มาก ซึ่งเป็นประโยชน์ การทำฟิล์มหลายชั้น
- มีความต้านทานสารเคมี (Chemical resistance) สูงกว่า LDPE เนื่องจากมีปริมาณผลึกสูงกว่า
- มีสมบัติ ESCR ที่ดี เนื่องจาก LLDPE มีโซ่กิ่งที่ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันกับ โอลิฟิน ค่า ESCR จะเพิ่มขึ้น เมื่อมีจำนวนโซ่กิ่งเพิ่มขึ้น หรือมีความยาวของโซ่กิ่งเพิ่มขึ้น [8]
- เมื่อนำ LLDPE ไปเกิดพันธะเชื่อมโยงโดยใช้สารเคมี เช่น ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP) หรือผ่านรังสี สามารถทำให้วัสดุมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและมีสมบัติ ESCR เพิ่มขึ้น [9]

2.2.3 การใช้งาน LLDPE [10]

- ฟิล์ม และชีท (Film and sheet) ในการบรรจุหีบห่อฟิล์ม และชีทจะต่างกันตรงความหนา โดยสามารถใช้ได้ทั้งในลักษณะเป็นฟิล์มเดี่ยวๆ และฟิล์มหนาหลายชั้น
- นิยมใช้ทำเป็นฟิล์มเคลือบเมทัลไลซ์ (Metalized film) โดยการนำฟิล์ม LLDPE พันเคลือบด้วยละอองอะลูมิเนียมในระบบสุญญากาศ นิยมใช้ในการผลิตบรรจุภัณฑ์สำหรับช่วยยืดอายุผลิตภัณฑ์ เช่น ซองบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป และซองขนมขบเคี้ยว
- ใช้ทำฟิล์มป้องกันรอยขีดข่วน (Protection film) เช่น ฟิล์มติดหน้าปัดนาฬิกา หรือติดชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์
- ผลิตภัณฑ์แบบเป่า (Blow molding product) เช่น ขวดบีบ
- ผลิตภัณฑ์แบบฉีด (Injection molding product) เช่น ฝาขวด ตะกร้า ภาชนะบรรจุใช้ในตู้เย็น เครื่องใช้ในบ้าน และในครัวเรือน
- ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยง (Rotational molding process) เช่น ถังเก็บน้ำบนดิน ถังแช่แข็ง ถังบำบัดน้ำเสีย ของเล่น กรวยจราจร เรือคายัค ของตกแต่งต่างๆ ตลอดจนถังน้ำมันเครื่องยนต์
- นำมาใช้เป็นวัสดุเคลือบสายไฟและสายเคเบิล เนื่องจาก LLDPE มีสมบัติความเป็นฉนวนทางไฟฟ้าที่ดี
- ใช้งานในทางการแพทย์ เช่น แผงบรรจุยา และสายน้ำเกลือ
- ใช้ผลิตท่อส่งน้ำชลประทาน เนื่องจาก LLDPE มีความเหนียวสูงและสามารถรับแรงดันน้ำได้ดี
- ใช้ทำบ่อพลาสติกสำหรับการเกษตร หรือการเพาะเลี้ยงสัตว์ และทำพลาสติกสำหรับปูบ่อน้ำ หรือปูหน้าดินสำหรับเก็บน้ำ

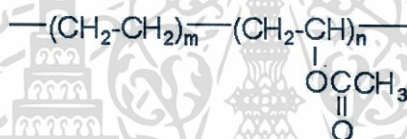
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 เอทิลีนไวนิลอะซิเตดโคพอลิเมอร์ (EVA) [11]

2.3.1 ลักษณะโดยทั่วไปของ EVA

EVA เป็นเทอร์โมพลาสติกในกลุ่มพอลิโอเลฟินส์ เนื่องจากเป็นโคพอลิเมอร์ระหว่างเอทิลีนกับไวนิลอะซิเตด มีเอทิลีนเป็นเนื้อหลักประมาณ 75-90% และไวนิลอะซิเตดเป็นตัวเสริมแต่งทำให้เกิดความยืดหยุ่น โดยลดการเกิดผลึก (Crystallinity) พบว่า ถ้าปริมาณเอทิลีนมากกว่า 75% จะทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติแข็ง

EVA เกิดจากการทำปฏิกิริยาพอลิเมโรไซเซชันภายใต้ความดันสูงของเอทิลีนและไวนิลอะซิเตด โดยอุณหภูมิและความดันที่ใช้ต่ำกว่าของกรณีปฏิกิริยาพอลิเมโรไซเซชันของเอทิลีนเดี่ยว สารก่ออนุมูลอิสระที่นิยมใช้คือ Azo-bis-isobutyronitrile, Organic peroxides และ Persulfates โครงสร้างของ EVA แสดงดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของเอทิลีนไวนิลอะซิเตดโคพอลิเมอร์ (EVA) [12]

2.3.2 สมบัติโดยทั่วไปของ EVA

- เป็นเทอร์โมพลาสติก มีลักษณะเป็นเม็ดใสจนถึงขุ่น
- มีความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ประมาณ 0.926-0.95
- สามารถละลายได้ในสารละลายอะโรมาติก (Aromatic) และคลอริเนตไฮโดรคาร์บอน (Chlorinated hydrocarbon) ที่อุณหภูมิสูง
- จุดเปราะ (Brittle point) อยู่ ณ อุณหภูมิที่ต่ำกว่า -20°C
- จุดอ่อนตัว (Softening point) อยู่ระหว่าง $60-80^{\circ}\text{C}$
- มีค่า T_g ตั้งแต่ -20°C (ของโฮโมพอลิเมอร์) จนถึง 20°C
- ค่าความแข็งกด (Hardness) Shore D เท่ากับ 17-45
- ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เท่ากับ 2.9-19.6 MPa
- ค่าการดึงยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) เท่ากับ 500-700%
- มีความโค้งงอที่อุณหภูมิสูง
- มีความสามารถในการสปริงตัวได้ดี โดยไม่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน
- ทนต่อสภาวะการใช้งาน การชะล้าง และมีอายุการใช้งานสูง
- สามารถให้สีได้ง่ายและสวยงาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ขึ้นรูปได้ง่าย
- มีความยืดหยุ่นและ โกงงอได้ดี โดยไม่ต้องใช้พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer)

2.3.3 การประยุกต์ใช้งาน EVA

- EVA ที่มีน้ำหนัก โมเลกุลและจุดอ่อนตัว (Softening point) ต่ำ มักใช้เป็น Wax additive ในงานเคลือบกระดาษ นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารยึดติด และพลาสติกไซเซอร์
- EVA ที่มีสมบัติคล้ายยาง มักใช้ในงานบรรจุภัณฑ์ประเภทอาหารและผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์
- EVA ใช้ในงานผลิตรองเท้าและเบาะรองนั่ง
- ปริมาณ ไวนิลอะซิเตตน้อยกว่า 7% จะได้ฟิล์มที่มีความเหนียว ใส มีความมันวาว

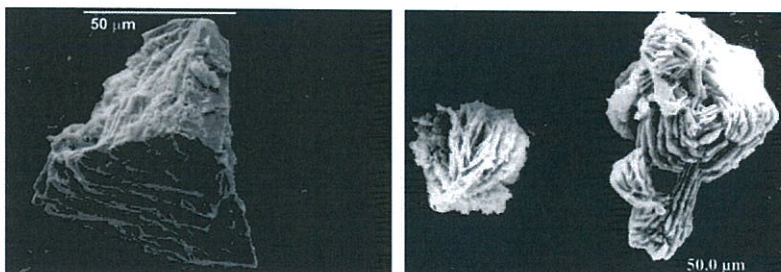
2.4 แบเรียมซัลเฟต [13]

2.4.1 ลักษณะโดยทั่วไปของ BaSO₄

แบเรียมซัลเฟต (Barium sulfate, BaSO₄) มีสูตรเคมีคือ BaSO₄ มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 233.34 g/mol ประกอบด้วย

	ธาตุ (%wt)	สารประกอบออกไซด์ (%wt)
<u>Barium</u>	Ba 58.84	BaO 65.70
<u>Sulfur</u>	S 13.74	SO ₃ 34.30
<u>Oxygen</u>	O 27.42	

BaSO₄ เป็นกากแร่ในสายแร่โลหะ มักเกิดร่วมกับเงิน ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง โคบอลต์ แมงกานีส และแอนทิโมนี บางครั้งอาจพบเกิดเป็นสายแร่ตัดผ่านหินปูนมีแคลไซต์ปะปนหรือพบการเกิดเป็นก้อนแร่ตกค้าง (Residual messes) ในดินเหนียวที่ซ้อนอยู่บนหินปูนหรือเป็นวัตถุประสานในหินทราย



ภาพที่ 2.3 ภาพขยายของ BaSO₄ จากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 การแบ่งประเภทของ BaSO₄ [15-16]

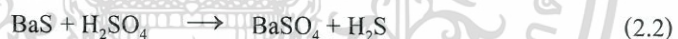
แบเรียมซัลเฟตแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

ประเภท 1 : แบเรียมซัลเฟตที่ได้จากธรรมชาติ มี 2 ชั้นคุณภาพ คือ ชั้นคุณภาพ 1 และชั้นคุณภาพ 2

ประเภท 2 : แบเรียมซัลเฟตที่ได้จากการสังเคราะห์ ซึ่งแบเรียมซัลเฟตในเชิงพาณิชย์เกือบทั้งหมดได้จากการนำแร่แบไรต์ (Mineral barite) ซึ่งมักจะมีสิ่งเจือปนสูงมาผ่านกระบวนการ ปฏิริยาการโบเทอรั่มอลรีดักชัน (Carbothermal reduction : heating with coke) เพื่อให้ได้แบเรียมซัลไฟด์ (Barium sulfide, BaS) ดังแสดงในสมการที่ 2.1



จากนั้นเป็นขั้นการทำปฏิกิริยากับน้ำ (Hydration) ซึ่ง BaS สามารถละลายได้ในน้ำ และถูกเปลี่ยนเป็นสารประกอบออกไซด์ (Oxide) ในรูปของ คาร์บอเนต และเฮไลด์ (Halide) จากนั้นเติม H₂SO₄ เพื่อตกตะกอน BaSO₄ ทำให้ได้ BaSO₄ ที่มีความบริสุทธิ์สูง โดย BaSO₄ ที่ตกตะกอนได้เรียกว่า บลังฟิซซ์ (Blanc fixe)



โดยคุณลักษณะทางฟิสิกส์และเคมีเป็นไปตามตารางที่ 2.4

การผลิตแร่แบไรต์ในประเทศมีการผลิตหลายเกรดตามความต้องการใช้ [17] ได้แก่

1. เกรดเคมี (Chemical grade) คือ แบไรต์บดที่มีส่วนประกอบของแบเรียมซัลเฟตตั้งแต่ร้อยละ 91 ขึ้นไปและมีความขาว ตั้งแต่ร้อยละ 80 ขึ้นไป
2. เกรดโคลนเจาะ (Drilling mud grade) คือ แบไรต์บดที่มีส่วนประกอบของแบเรียมซัลเฟต ต่ำกว่าร้อยละ 91 หรือมีความขาวต่ำกว่าร้อยละ 80
3. แบไรต์ก้อน (Unground grade) คือ แบไรต์ที่ได้จากธรรมชาติซึ่งส่วนใหญ่ได้มาจากการทำเหมืองแร่ดิบ และถูกจัดส่งไปยังโรงงานเพื่อลดขนาด แบไรต์ชนิดนี้มีความบริสุทธิ์ต่ำ มีสิ่งเจือปนสูง

ตารางที่ 2.4 คุณลักษณะของแบเรียมซัลเฟตสำหรับใช้ในทางอุตสาหกรรมตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์
อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ประเทศไทย (มอก.846-2532) [16]

รายการ ที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด			วิธีการ ทดสอบ ตาม
		ประเภท 1		ประเภท 2	
		ชั้น คุณภาพ 1	ชั้น คุณภาพ 2		
1	แบเรียมซัลเฟต ร้อยละโดย น้ำหนักไม่น้อยกว่า	95	95	97	ASTM 715
2	เกลือแบเรียมที่ละลายได้ในกรด (คำนวณเป็น แบเรียมคาร์บอเนต) ร้อยละโดยน้ำหนักไม่เกิน	2.24	2.24	-	-
3	ความเป็นกรด-ด่าง ไม่น้อยกว่า	3.5	3.5	3.5	ASTM D1208
4	สารที่ละลายได้ในน้ำ ร้อยละโดย น้ำหนักไม่เกิน	0.2	0.2	0.2	ASTM D1208
5	ความชื้นและสารที่ระเหยได้ ร้อย ละโดยน้ำหนักไม่เกิน	0.5	0.5	0.5	ASTM D280
6	ขนาด	เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้ซื้อกับ ผู้ขาย			
7	ซิลิกาอิสระ ร้อยละโดยน้ำหนักไม่ เกิน	2.0	2.0	2.0	ASTM D7 ถ
8	การดูดกลืนน้ำมัน กรัมต่อตัวอย่าง 100 กรัม	< 12	<12	12-14	ISO 787/5
9	ความขาวสว่าง ร้อยละไม่น้อยกว่า	85	80	95	-

2.4.3 กระบวนการแต่งแร่แบไรต์ [18]

ในกระบวนการแต่งแร่แบไรต์เพื่อส่งให้กับลูกค้าซึ่งมีข้อกำหนดเกี่ยวกับสมบัติ
ของแร่ที่จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การกำหนดขนาดอนุภาคแร่และการกำหนดปริมาณ
ต่างๆ คือ $BaSO_4$, Fe_2O_3 , $SrSO_4$, SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นต้น สำหรับกระบวนการแต่งแร่แบไรต์เพื่อ
นำไปใช้ประโยชน์มีอยู่ 3 วิธีหลักๆ คือ

1. Hand sorting methods เป็นการคัดแยกแร่แบไรต์ออกจากมลทินหรือกากแร่ด้วยมือ การคัดแยกแร่ด้วยวิธีนี้จะใช้กับแร่แบไรต์ที่มีความบริสุทธิ์สูง (BaSO_4 สูงประมาณ 80-90%) และนำไปใช้ในอุตสาหกรรมที่ไม่ต้องการความละเอียดถูกต้องสูงมากนัก เช่น นำไปใช้ในการทำโคลนผงที่ใช้ในการขุดเจาะน้ำมันและก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น

2. Gravity methods การแต่งแร่ด้วยวิธีนี้อาศัยความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะของแร่แบไรต์เพื่อแยกแร่แบไรต์ออกจากมลทินอื่นๆ การแต่งแร่ด้วยวิธีนี้มีขีดจำกัดในเรื่องของขนาดอนุภาคซึ่งควรมีขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอน ข้อดีของการแต่งแร่ด้วยวิธีนี้คือลงทุนน้อย เสียค่าใช้จ่ายต่ำ ไม่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม สำหรับการแต่งแร่ด้วยวิธีนี้ แร่ที่มีความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะมากจะสามารถแยกตัวออกจากกันได้ดี โดยการปล่อยให้จมตัวลงผ่านตัวกลาง เช่น น้ำ หรืออากาศ อัตราการแยกตัวเนื่องจากความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะทำให้มีอัตราการแยกตัวแตกต่างกันซึ่งสามารถหาค่าพิกัดที่จะแยก (Concentration criterion) ได้ดังนี้

$$\text{Concentration criterion} = (D_h - D_p) / (D_f - D_p) \quad (2.3)$$

เมื่อกำหนดให้

D_h คือ ความถ่วงจำเพาะของแร่หนัก

D_f คือ ความถ่วงจำเพาะของตัวกลางที่เป็นของไหล

D_p คือ ความถ่วงจำเพาะของแร่เบา

3. Flotation methods สำหรับการแต่งแร่แบไรต์ โดยวิธีลอยแร่เป็นวิธีการแต่งแร่ที่ทำให้ผิวแร่แบไรต์มีสภาพไม่เปียกน้ำ (Hydrophobic) โดยการเคลือบด้วยสารหรือน้ำยาเคมี เมื่อผิวแร่แบไรต์สัมผัสกับอากาศหรือฟองอากาศจะทำให้แร่แบไรต์ลอยขึ้น สำหรับขั้นตอนของการลอยแร่แบไรต์มีดังนี้

- ทำให้ผิวแร่แบไรต์ไม่เปียกน้ำ
- ทำให้แร่แบไรต์เกิดการกระจายตัวและเกิดฟองอากาศ
- ทำให้เกิดการแยกและกวาดเอาแร่แบไรต์ที่ลอยได้ออก

2.4.4 สมบัติโดยทั่วไปของ BaSO_4 [13]

สี	ขาว ไม่มีสี เหลือง แดง น้ำเงินอ่อน
ความวาว	วาวแบบแก้ว – ไข่มุก
ความแข็ง	3-3.5 Mohs
ความถ่วงจำเพาะ	4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างผลึก	ผลึกรูปแผ่นในระนาบ (001) และผลึก รูปเพชรมักแสดงลักษณะ 1 st และ 2 nd Order prism ผลึกรูปแผ่นแบบ Crested barite หรือ Barite rose
จุดหลอมเหลว	1580°C
ค่าการละลาย (K_{sp})	1.0842×10^{-10} (25°C)
ความสามารถในการละลายในน้ำ	0.0002448 g/100 mL (20°C)
ความสามารถในการละลาย	ไม่ละลายในแอลกอฮอล์ สามารถ ละลายในกรดซัลฟูริกเข้มข้น (Concentrated sulfuric acid)

2.4.5 การใช้งาน BaSO₄ [19]

- ใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมพลาสติก เช่น ในงานฟิล์ม งานเป่า และงาน
ฉีดขึ้นรูป เพื่อปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อกรดต่าง

- นำไปผสมกับยางเพื่อผลิตภัณฑ์หนักสำหรับถ่วงท่อ ยางแผ่น ยางหุ้มฉนวน ยาง
รองฐานกรวยป้ายจราจร

- ผสมไปในพอลิเมอร์สำหรับทำฐานพลาสติกยึดเสาสำหรับเบ่งเขตแดน

- นำไปผสมใน PE เพื่อผลิตเป็นกระชังเพาะเลี้ยงปลาสำหรับใช้ในงานประมง

- นำไปผสมกับซีเมนต์เพื่อทำบรรจุภัณฑ์เก็บสารกัมมันตภาพรังสี

- ใช้ในงานเคลือบเงา เพื่อลดการแผ่รังสีจากจอคอมพิวเตอร์ และ โทรศัพท์

- นำไปผสมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol, PVA) สำหรับทำเป็น

สารเคลือบภาพวาด [20]

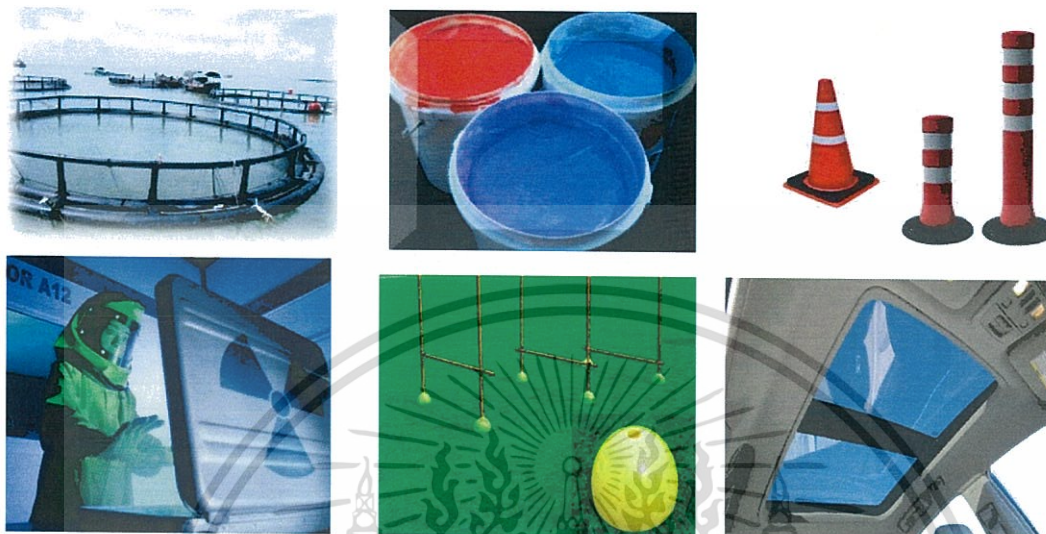
- ใช้ผลิตเป็นเส้นใยนาโนคอมโพสิต โดยใช้พอลิยูรีเทน (Polyurethane, PU) และ
พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (Polyvinylidene fluoride, PVDF) สำหรับทำอุปกรณ์ป้องกันอันตรายจาก
รังสีในงานรังสีวินิจฉัย [21]

- ส่วนผสมของ BaSO₄ ใช้เป็นพื้นสีขาวสำหรับการผลิตสี โดยจะนำไปผสมกับ
ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และ โซเดียมซัลเฟต (Na₂SO₄)

- ใช้ BaSO₄ เกรดนาโน ผสมกับพอลิเมอร์ที่มีความโปร่งใส (Transparent
polymer) สำหรับทำเป็นกระจกด้านข้างรถ (Side windows) และกระจกหลังคารถ (Sunroof) แทน
การใช้กระจก โดย BaSO₄ จะช่วยเพิ่มความทนทานต่อการขีดข่วน และสามารถกันรังสี UV ได้
บางส่วน [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เป็นส่วนผสมที่ช่วยเพิ่มความหนาแน่นให้ของเหลวที่ใช้ในการผลิตบ่อน้ำมัน



ภาพที่ 2.4 ภาพตัวอย่างการใช้งาน $BaSO_4$ [1, 19, 23]

2.5 กระบวนการฉีดขึ้นรูป [24]

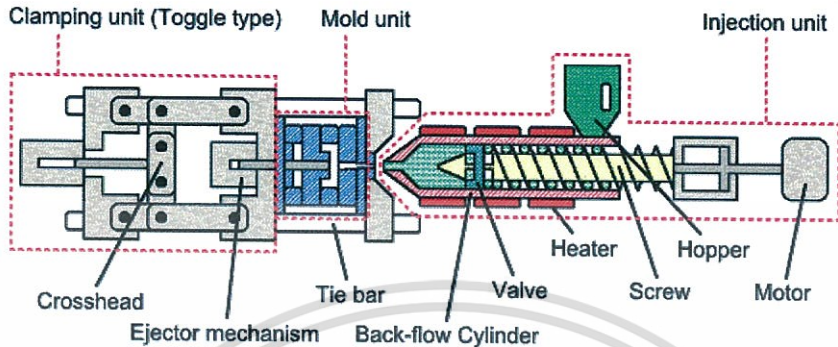
กระบวนการฉีดขึ้นรูปเป็นเทคโนโลยีการแปรรูปที่นิยมใช้งานกันอย่างกว้างขวาง และสะดวกในการเปลี่ยนเม็ดพลาสติก และอิลาสโตเมอร์ไปเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป วิธีการนี้มีข้อดีคือสามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน และมีรายละเอียดมากได้ ทำได้ทั้งชิ้นงานที่มีขนาดเล็กและใหญ่ สามารถทำการผลิตได้ในอัตราเร็วสูง และใช้แรงงานในการควบคุมดูแลต่ำ

กระบวนการฉีดขึ้นรูปสามารถประยุกต์ใช้งานแปรรูปวัสดุพอลิเมอร์ได้ทุกชนิด ได้แก่ เทอร์โมพลาสติก เทอร์โมเซต วัสดุประกอบอิลาสโตเมอร์ และเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

2.5.1 หน่วยของกระบวนการฉีดขึ้นรูป [25]

โดยทั่วไปกระบวนการฉีดขึ้นรูปประกอบด้วยหน่วยที่สำคัญ 3 ส่วน ดังแสดงในภาพที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.5 หน่วยของกระบวนการฉีดขึ้นรูป [26]

- หน่วยการฉีด (Injection unit) ทำหน้าที่ในการหลอมพลาสติก และฉีดพลาสติกที่หลอมนั้นเข้าไปสู่แม่พิมพ์
- หน่วยแม่พิมพ์ (Mold unit) เป็นบริเวณที่ทำให้ผลิตภัณฑ์เย็นตัว และกำหนดรูปร่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้
- หน่วยยึดแม่พิมพ์ (Clamping unit) ทำหน้าที่ทำหน้าที่เคลื่อนเปิด-ปิดแม่พิมพ์ในจังหวะการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติก และยึดแม่พิมพ์ให้ปิดสนิทขณะที่มีการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ และขณะที่พลาสติกเย็นตัว

2.5.2 รอบการทำงานของกระบวนการฉีดขึ้นรูป

รอบการทำงานของกระบวนการฉีดขึ้นรูปประกอบด้วย 9 ขั้นตอน เริ่มต้นจากแม่พิมพ์ปิด หน่วยการฉีดเคลื่อนที่เข้ามาชิดหน่วยแม่พิมพ์ ฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ ย้ำรักษาความดัน (Hold on pressure) หล่อเย็น หลอม และป้อนพลาสติกใหม่ หน่วยการฉีดถอยหลังกลับแม่พิมพ์เปิด และปลดชิ้นงานเป็นขั้นตอนสุดท้าย

2.5.3 พารามิเตอร์ที่สำคัญในกระบวนการฉีดขึ้นรูป

กระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติกเพื่อเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ พบว่าพารามิเตอร์ที่สำคัญซึ่งมีอิทธิพลต่อรอบการทำงาน รวมทั้งคุณภาพของชิ้นงานขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์หลัก 4 ประการ คือ

2.5.3.1 อุณหภูมิ (พลาสติกหลอมเหลวและแม่พิมพ์)

อุณหภูมิของพลาสติกหลอมเหลวส่วนใหญ่จะใช้เป็นช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติกแต่ละชนิด หรืออาจสอบถามข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต เนื่องจากถ้าใช้อุณหภูมิในการแปรรูปต่ำเกินไป อาจทำให้พลาสติกไม่ไหลเข้าหัวฉีด ในทางตรงกันข้ามถ้าใช้อุณหภูมิสูงอาจทำให้พลาสติกเกิดการเสียดสภาพได้ ส่วนอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่เลือกขึ้นกับชนิดของพลาสติกเช่นกัน กล่าวคือถ้าเป็นเทอร์โมพลาสติกจะใช้อุณหภูมิของแม่พิมพ์ต่ำ แต่ถ้าเป็นเทอร์โมเซตใช้อุณหภูมิของแม่พิมพ์สูง

2.5.3.2 เวลา (ฉีด ย้ำรักษาความดันและหล่อเย็น)

เวลาในการฉีดพลาสติกขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่ของเกลียวหนอน ส่วนเวลาในการย้ำรักษาความดัน ถ้าใช้เวลานานอาจทำให้ชิ้นงานเกิดรอยยุบที่ผิวได้ แต่ถ้าใช้เวลานานเกินไปอาจทำให้เกิดความเค้นสะสมภายในชิ้นงาน เวลาในการหล่อเย็นมีความสำคัญในการรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะพลาสติกที่มีความเป็นผลึก เนื่องจากถ้าเวลาในการหล่อเย็นสั้นทำให้เกิดผลึกไม่สมบูรณ์อาจทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงไม่ดี

2.5.3.3 ความดัน (ฉีด ย้ำรักษาความดันและแม่พิมพ์)

ความดันในการฉีดพลาสติกมีผลต่อการเติมเต็มในแม่พิมพ์ ความดันต่ำคือความดันของพลาสติกหลอมเหลวที่อยู่ด้านหน้าของปลายเกลียวหนอน ซึ่งควรมีค่าเท่าใดขึ้นกับความหนืดของพลาสติก ความดันของแม่พิมพ์ คือความดันที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์เมื่อมีการฉีดพลาสติกหลอมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์

2.5.3.4 ความเร็ว (ฉีดและปิด-เปิดแม่พิมพ์)

ความเร็วในการฉีดเป็นตัวควบคุมความดันฉีด กล่าวคือถ้าใช้ความเร็วในการฉีดสูง ความดันฉีดจะมีค่ามากเช่นกัน ส่วนความเร็วในการเปิดแม่พิมพ์ไม่ค่อยมีผลต่อแม่พิมพ์ แต่จะมีผลต่อชิ้นงาน คือถ้าเปิดแม่พิมพ์เร็วเกินไป อาจทำให้ชิ้นงานถูกครูดเป็นรอย

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chen, X. และคณะ [27] ศึกษาพฤติกรรมการหลอมเหลว และการตกผลึกของ HDPE ที่มี BaSO₄ เป็นสารตัวเติม โดยใช้ BaSO₄ เกรดนาโน ที่มีขนาดอนุภาค 40 nm และเคลือบด้วย Sodium stearate เป็นสารช่วยกระจายตัว โดยผสม HDPE กับสารตัวเติมที่ปริมาณ 1, 2, 3, 4 และ 5% โดยน้ำหนัก ซึ่งแทนด้วย HDPE1, HDPE2, HDPE3, HDPE4 และ HDPE5 ตามลำดับ ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Isothermal crystallization process ได้กำหนดอุณหภูมิที่ใช้ในการตกผลึก (Crystallization temperature, T_c) ที่อุณหภูมิ 113, 116, 119 และ 122°C

จากผลการทดลอง (แสดงในตารางที่ 2.5) พบว่าการเติมอนุภาค $BaSO_4$ ทำให้ Crystallization kinetic constant (K) เพิ่มขึ้น และใช้เวลาในการตกผลึกเพื่อให้ได้ปริมาณผลึก 50% ($t_{1/2}$) ลดน้อยลง เนื่องจาก $BaSO_4$ ทำหน้าที่เป็น Heterogeneous nucleating agent ทำหน้าที่เร่งให้เกิดการตกผลึกใน HDPE และพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ $BaSO_4$ จาก 1 เป็น 2% โดยน้ำหนัก ค่า K มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และ $t_{1/2}$ มีแนวโน้มลดลง แสดงว่า $BaSO_4$ ทำหน้าที่เร่งให้เกิดการตกผลึกใน HDPE ที่มีปริมาณสารตัวเติมต่ำๆ และจากการศึกษาสมบัติทางความร้อนพบว่า การเติม $BaSO_4$ ที่ 1 และ 2% โดยน้ำหนัก จะทำให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวผลึก (T_m) มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าผลึกของ HDPE มีความสมบูรณ์มากขึ้น แต่เมื่อเติม $BaSO_4$ 3% โดยน้ำหนัก กลับทำให้ค่า T_m ลดลง แสดงว่า HDPE มีความหนาของชั้น lamella ลดลง หรือผลึกมีความสมบูรณ์น้อยลง

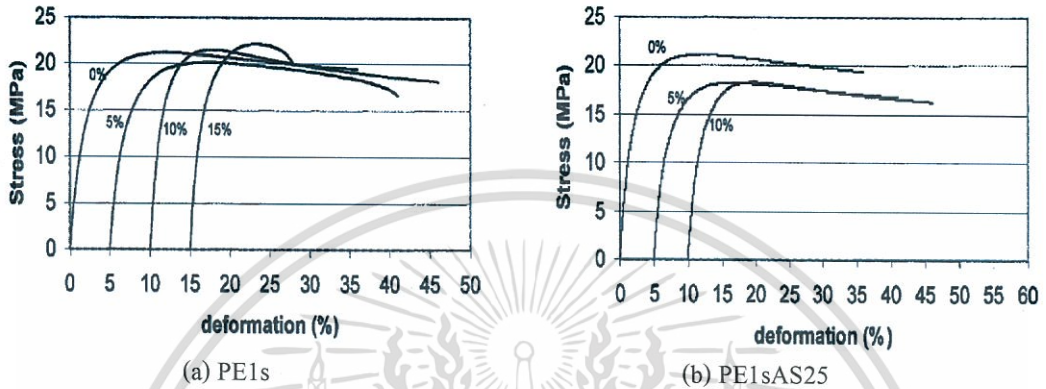
ตารางที่ 2.5 ตัวแปรทางจลนศาสตร์ของ Avrami จากสมการของ Avrami สำหรับกระบวนการตกผลึกแบบกระบวนการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิกคงที่ (Isothermal) [27]

Sample	T_m (°C)	T_c (°C)	K (min)	$t_{1/2}$ (min)
HDPE1	139.4	122	0.02	0.78
		119	1.04	0.22
		116	1.27	0.14
		113	1.54	0.11
HDPE2	149.5	122	0.09	0.70
		119	1.09	0.20
		116	1.44	0.13
		113	1.71	0.10
HDPE3	141.1	122	0.04	0.74
		119	1.05	0.21
		116	1.34	0.13
		113	1.59	0.11

Bianchi, F. และคณะ [28] ศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของ HDPE ที่มี $BaSO_4$ ที่มีขนาดอนุภาค 0.25 μm เป็นสารตัวเติม โดยผสม HDPE กับ $BaSO_4$ ในช่วง 5-15% โดยปริมาตร และศึกษาผลของ Surface agent ชนิดต่างๆ ได้แก่ Surfactant (DA),

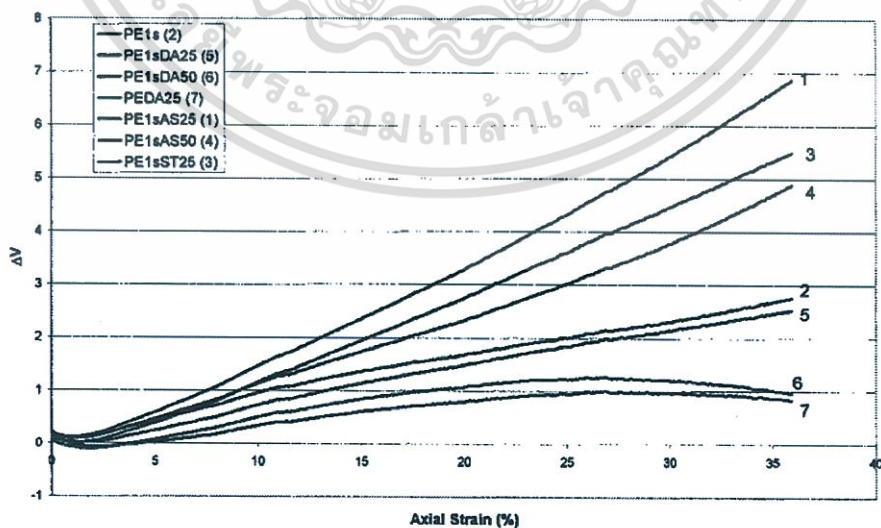
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fatty acid (AS) และ Salt of fatty acid (ST) โดยกำหนดให้ชื่อย่อ PEXXY เมื่อ XX คือชนิดของ Surface agent, YY คือปริมาณของ Surface agent เป็น % โดยน้ำหนัก และให้ 1s แทน BaSO₄ ที่ไม่ได้เคลือบด้วย Surface agent



ภาพที่ 2.6 Stress-Deformation ของตัวอย่างต่างๆ [28]

จากผลการทดลอง (ภาพที่ 2.7) พบว่า PE1s เมื่อเพิ่มปริมาณ BaSO₄ ทำให้ค่า Yield stress และ Young's modulus เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ HDPE ที่ไม่มีการเติม BaSO₄ แต่ในสูตร PE1sAS25 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ BaSO₄ ทำให้ค่า Yield stress และ Young's modulus ลดลง เนื่องจากการเคลือบอนุภาค BaSO₄ ด้วย Fatty acid ทำให้เกิดการหลุดออก (Debonding) ระหว่าง Matrix กับสารตัวเติมบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคก่อนที่จะเริ่มเกิดการเสียสภาพแบบพลาสติก (Plastic deformation)



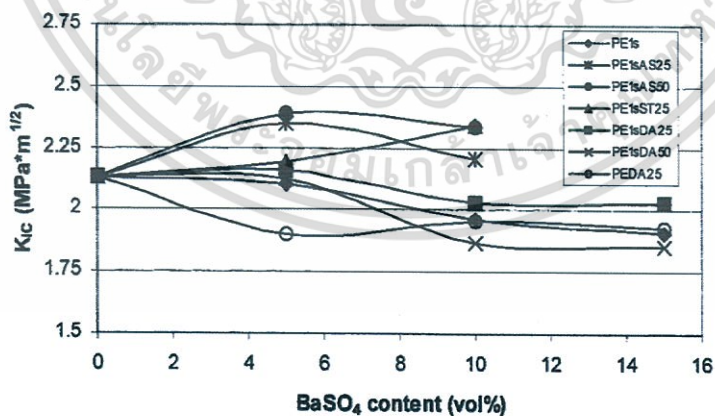
ภาพที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงปริมาตร (ΔV) กับ Axial strain สำหรับคอมโพสิตสูตรต่างๆ ที่ 10%

โดยปริมาตรของ BaSO₄ [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลอง (ภาพที่ 2.7) พบว่า PE1sAS25 (1), PE1sST25 (3) และ PE1sAS50 (4) มีลักษณะกราฟก่อนข้างเป็นเส้นตรง คือมีการเพิ่ม Axial strain ไปพร้อมกับการเพิ่มของ ΔV แสดงว่าเมื่อตัวอย่างถูกดึงยืดจะเกิดเครซ (Craze) ขึ้นซึ่งมีลักษณะเป็นช่องว่าง (Microvoids) และจะมีขนาดเพิ่มขึ้น (ΔV เพิ่มขึ้น) เมื่อมีการหลุดออกกระหว่าง Matrix กับสารตัวเติม ภายในช่องว่าง ประกอบไปด้วยเส้นใยขนาดเล็ก (Microfibril) การเกิด Microfibril ทำให้วัสดุสามารถรับและกระจายแรงได้ เนื่องจากเกิดการเสียสภาพแบบ Shear yielding

จากผลการทดสอบ Linear elastic fracture mechanism (LEFM) ดังแสดงในภาพที่ 2.8 พบว่า PE1sAS25, PE1sST25 และ PE1sAS50 มีค่า Fracture toughness (K_{IC}) ที่สูงกว่าการใช้ $BaSO_4$ ที่ไม่มีการเคลือบผิวในสูตร PE1s เนื่องจากมีการกระจายตัวของอนุภาคดีกว่า ทำให้วัสดุสามารถรับและกระจายแรงได้ดีก่อนเกิดการแตกหัก และจากการศึกษาสมบัติทางความร้อนจาก DSC (ดังแสดงในตารางที่ 2.6) พบว่าตัวอย่างทุกสูตรมี T_m และ T_c ใกล้เคียงกับ HDPE แสดงว่า Surface agent ทุกชนิดไม่มีผลในการช่วยทำให้เกิดการตกผลึกของ HDPE แต่การเติม $BaSO_4$ มีผลทำให้ปริมาณความเป็นผลึก (X_c) ของ HDPE เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แสดงว่า $BaSO_4$ ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกใน HDPE และในสูตร PE1sAS25, PE1sST25 และ PE1sAS50 พบว่าการเติม $BaSO_4$ ลงไปใน HDPE โดยการเคลือบ $BaSO_4$ ด้วย Fatty acid และ Salt of fatty acid ส่งผลให้วัสดุสามารถรับแรงกระแทกได้ดีขึ้น



ภาพที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{IC} กับปริมาณ $BaSO_4$ (% โดยน้ำหนัก) ในคอมโพสิต HDPE [28]

ตารางที่ 2.6 สมบัติทางความร้อนของ HDPE สูตรต่างๆ [8]

Name	T _m (°C)	ΔH _f (J/g)	T _c (°C)	ΔH _c (J/g)	x _c
HDPE	132.5	171.9	116.2	172.9	0.58
PE1s	131.6	192.4	116.7	183.7	0.66
PE1sDA25	131.0	172.0	116.2	173.9	0.59
PE1sDA50	131.5	196.4	116.2	183.5	0.67
PE1sDA25	130.7	196.3	115.7	178.7	0.67
PE1sAS25	132.9	202.0	117.4	185.4	0.68
PE1sAS50	132.4	196.5	116.7	193.5	0.67
PE1sST25	133.2	197.5	116.3	188.8	0.67

Wang, K. และคณะ [29] ศึกษาเกี่ยวกับขนาดของผลึกและอัตราการเติบโตของผลึก PP ที่มี BaSO₄ ขนาดอนุภาค 1.29 μm เป็นสารตัวเติม โดยใช้ชนิดของสารปรับปรุงพื้นผิวที่แตกต่างกัน โดยในทุกตัวอย่างจะประกอบด้วย BaSO₄ 0.5% โดยน้ำหนัก ซึ่งเตรียมผ่านสองขั้นตอน ในขั้นตอนแรกเตรียมสูตรเข้มข้นโดยใช้ PP หรือ PP-g-MA เติม BaSO₄ 80% โดยน้ำหนัก โดยใช้เครื่องผสมสองลูกกลิ้งในการผสม จากนั้นนำ Virgin PP ไปผสมกับสูตรเข้มข้น โดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่แบบหมุนตามกันในการผสม จะได้สูตรดังแสดงในตารางที่ 2.7

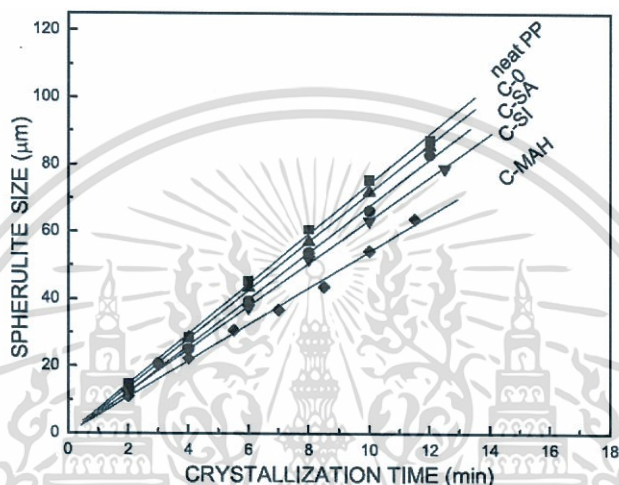
ตารางที่ 2.7 สูตรผสม PP/BaSO₄ ที่เตรียม [46]

Formula	Composition
C-0	PP/BaSO ₄ 0.5 %wt
C-SA	PP/BaSO ₄ 0.5 %wt/SA 1 %wt
C-SI	PP/BaSO ₄ 0.5 %wt/Silane 1 %wt
C-MAH	PP/BaSO ₄ 0.5 %wt/PP-g-MA 1 %wt

จากผลการทดลอง (ภาพที่ 2.9) พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลึกสเฟียรูไลต์มีความสัมพันธ์แบบเป็นเส้นตรง เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น และจะหยุดเมื่อผลึกเกิดการชนกัน ซึ่งพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลึก PP ทุกสูตรผสมมีค่าน้อยกว่าใน Neat PP เนื่องจากการเติม BaSO₄ ลงไปจะไปลดอัตราการเติบโตของผลึก โดยสังเกตจากความชันของกราฟที่มีค่าลดลง เนื่องจาก BaSO₄ จะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ ทำให้มีการจัดเรียงตัวยากขึ้น นอกจากนี้การใช้สารปรับปรุงพื้นผิวต่างชนิดกันส่งผลถึงอัตราการเกิดผลึก

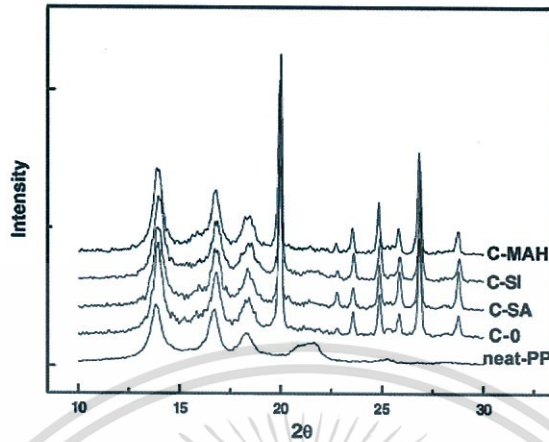
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ PP คือถ้าสารปรับปรุงพื้นผิวมีอันตรกิริยาตรงบริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคที่มีความแข็งแรงมาก จะส่งผลให้อัตราการขยายตัวของผลึกลดน้อยลง เนื่องจากบริเวณที่มีอันตรกิริยาที่แข็งแรงจะเหมือนกับการถูกเชื่อมโยงทางกายภาพ ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้ยากทำให้ได้ผลึกที่มีขนาดเล็ก



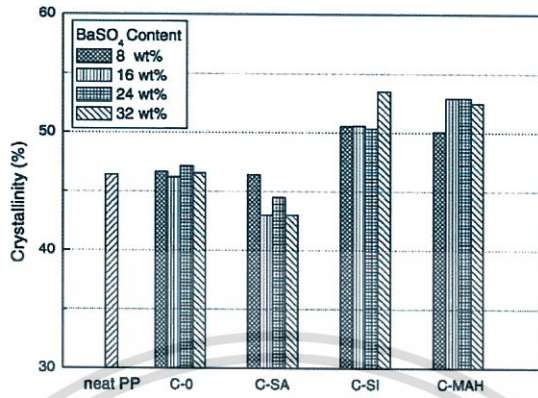
ภาพที่ 2.9 อัตราการเติบโตของผลึกสเฟียรูไลต์ของ Neat PP และ PP/BaSO₄ [29]

จากการศึกษาผลของปริมาณ BaSO₄ [31] ในช่วง 0-32 % โดยน้ำหนัก และผลของสารช่วยผสมชนิดต่างๆ ที่มีผลต่อความเป็นผลึก สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกล จากผลการทดลอง Wide-angle x-ray diffraction (WAXD) (ภาพที่ 2.10) พบว่า Neat PP มีพีคผลึกแบบ α -form 3 พีค (110), (040), และ (130) ที่มุม 2θ เท่ากับ 13.95°, 16.90° และ 18.40° ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลึกที่มีขนาดใหญ่และมีความสมบูรณ์ ส่วนใน PP/BaSO₄ จะพบพีคที่ 2θ เท่ากับ 20.05° และที่มากกว่า 22.75° ซึ่งเป็นการ Reflection ที่ (300) ที่เกิดจากผลึกแบบ β -form ของ PP ซึ่งเป็นผลึกขนาดเล็กและมีความสมบูรณ์ของผลึกน้อยกว่า และพบว่าเมื่อมีอันตรกิริยาระหว่างวัฏภาค (Interfacial interaction) มากจะทำให้ได้ผลึกขนาดเล็กจำนวนมาก เนื่องจาก PP ที่อยู่บริเวณรอบๆ BaSO₄ จะมีการเกี่ยวพันกันบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคซึ่งจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ พอลิเมอร์ทำให้ความสมบูรณ์ของผลึกลดน้อยลง โดยความแข็งแรงตรงบริเวณรอยต่อของ C-MA > C-SI > C-SA > C-0

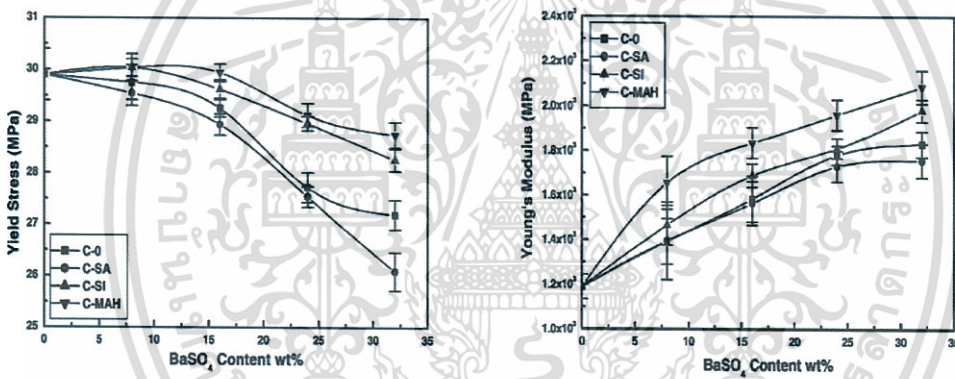


ภาพที่ 2.10 Wide angle X-ray diffractograms ของ Neat PP และ PP/BaSO₄ ที่มีปริมาณ BaSO₄ 24% โดยน้ำหนัก [31]

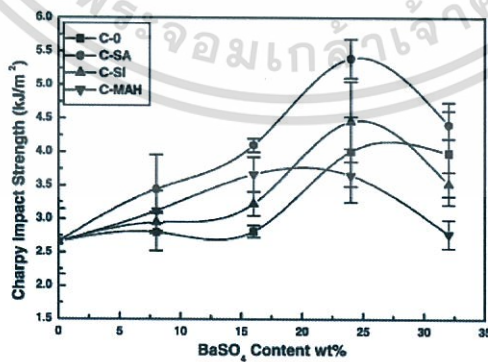
จากการศึกษาสมบัติเชิงกล (ภาพที่ 2.11-2.13) [31, 32] พบว่าการเพิ่มปริมาณ BaSO₄ ในช่วงตั้งแต่ 16% โดยน้ำหนักเป็นต้นไป จะส่งผลให้ค่า Yield stress ลดลง เนื่องจากค่า Yield stress เกี่ยวข้องอย่างมากกับการยึดติดระหว่างวัฏภาค การเติม BaSO₄ ที่มีขั้วลงใน PP ที่ไม่มีขั้ว ทำให้การยึดติดระหว่างวัฏภาคไม่ดี ทำให้เมื่อวัสดุได้รับแรงดึงยึดแล้วเกิดการเสียหายตรงบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคได้ง่าย แต่การเพิ่มปริมาณ BaSO₄ ทำให้ค่า Young's modulus มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจาก BaSO₄ มีความแข็งมากกว่า PP ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เมตริกซ์ สำหรับการใส่สารปรับปรุงพื้นผิวต่างชนิดกันมีผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุ โดย C-MAH และ C-SI มีค่า Yield stress และ Young's modulus ที่สูงกว่าสูตรอื่นๆ เนื่องจากมีการยึดติดระหว่างวัฏภาคที่ดี โดยหมู่ฟังก์ชันแอนไฮไดรด์ ในมาเลอิก (Maleic anhydride, MAH) หรือหมู่ไซลันอล (Silanol) ในไซเลนสามารถเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้ว (Dipole-dipole force) กับ BaSO₄ ได้ ประกอบกับ C-MAH และ C-SI เป็นสูตรที่มีความเป็นผลึกสูงกว่าสูตรอื่นๆ (ดังแสดงในตารางที่ 2.8)



ภาพที่ 2.11 ปริมาณความเป็นผลึกของ Neat PP และ PP/BaSO₄ สูตรต่างๆ [31]



ภาพที่ 2.12 ค่า Yield stress และ Young's modulus ของ PP/BaSO₄ สูตรต่างๆ [31]

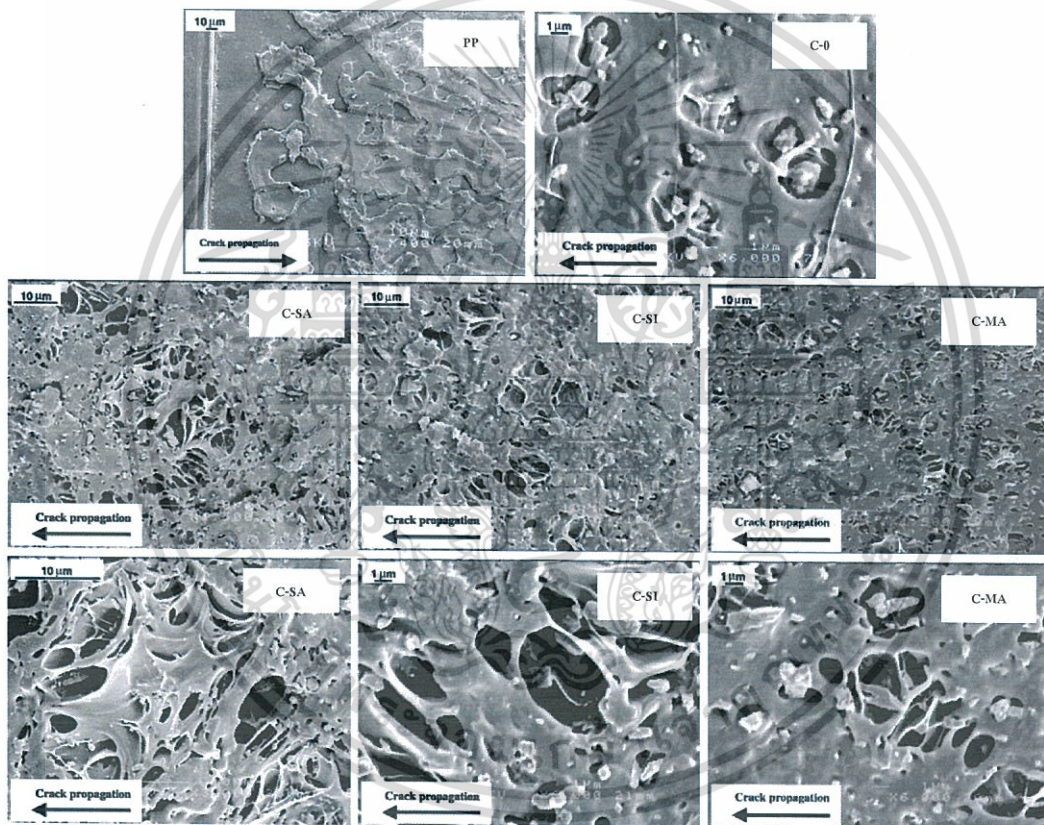


ภาพที่ 2.13 ความแข็งแรงกระแทกแบบชาร์ปีของ Neat PP และ PP/BaSO₄ สูตรต่างๆ [31]

การทดสอบความแข็งแรงกระแทกพบว่า PP/BaSO₄ ทุกสูตรมีค่าความแข็งแรงกระแทก

มากกว่า Neat PP เนื่องจาก Neat PP เกิดการแตกแบบเปราะ (Brittle failure) ซึ่งยืนยันได้จาก SEM เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เชิงพาณิชย์ การค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

micrographs ในภาพที่ 2.14 ในขณะที่ PP/BaSO₄ เมื่อได้รับแรงกระทำจะเกิดเครข และเกิดการหลุดออกระหว่างพอลิเมอร์และสารตัวเติม (Debonding-cavitation) ใน PP Matrix ที่อยู่บริเวณรอยต่อระหว่างภูมิภาค ส่งผลให้เกิดเส้นใย (Ligament) ระหว่างช่องว่าง ซึ่งยืนยันได้จาก SEM micrographs ในภาพที่ 2.14 เส้นใยที่เกิดขึ้นมีความหนาน้อยกว่าพอลิเมอร์บริเวณอื่น ทำให้เมื่ออยู่ภายในระนาบเดียวกันกับแรงเค้น (Plane-stress) จะชอบเกิดการเสียสภาพแบบ Shear yielding โดยจะเกิดการยืดออกของเส้นใยซึ่งสามารถกระจายพลังได้สูงก่อนเกิดการแตกหัก



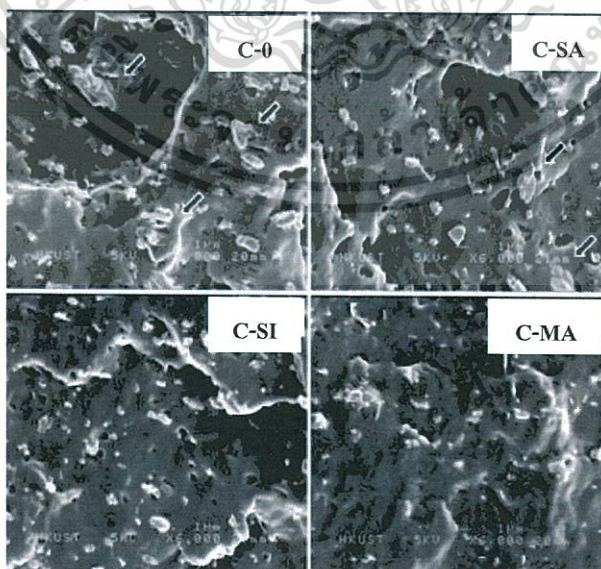
ภาพที่ 2.14 SEM micrographs แสดงพื้นผิวแตกหักหลังการรับแรงกระทำของ PP และ PP/BaSO₄ สูตรต่างๆ ที่มีปริมาณ BaSO₄ 24% โดยน้ำหนัก [31]

นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้สารปรับปรุงผิวต่างชนิดกันส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงของวัสดุ โดย C-SA มีค่าความแข็งแรงกระแทกสูงกว่าสูตรอื่นๆ เนื่องจากการยึดติดระหว่างภูมิภาคปานกลาง (Moderate adhesion) และเป็นสูตรที่มีความเป็นผลึกต่ำที่สุดทำให้เกิดการเสียรูปได้ง่ายเมื่อได้รับแรงกระทำ ซึ่งยืนยันจาก SEM micrographs ในภาพที่ 2.14 จะเห็นว่า C-SA มีช่องว่างที่เกิดจาก Debonding-cavitation จำนวนมาก นอกจากนี้การใช้ SA เป็นสารช่วยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระจายตัว ทำให้อุณหภูมิของ BaSO₄ มีการกระจายตัวได้ดี ซึ่งยืนยันจาก SEM micrographs ในภาพที่ 2.15 ส่งผลให้วัสดุมีความต่อเนื่องในการส่งผ่านแรงกระทำที่ได้รับก่อนเกิดการเสียหาย จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นทำให้ C-SA สามารถรับแรงกระแทกได้สูงที่สุด ในขณะที่ C-MAH และ C-SI มีการยึดติดระหว่างวัฏภาคที่ดี ซึ่งยืนยันจาก SEM micrographs ในภาพที่ 2.15 จะเห็นว่า BaSO₄ มีการกระจายตัวที่ดี และฝังแน่นอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ มี BaSO₄ จำนวนน้อยมากที่ถูกดึงออกมา การยึดติดระหว่างวัฏภาคที่ดี ประกอบกับความเป็นผลึกที่สูง ส่งผลให้วัสดุเกิดการเสียรูปได้ยากเมื่อได้รับแรงกระแทก ทำให้ Debonding-cavitation เกิดขึ้นได้ช้ากว่า C-SA ซึ่งยืนยันจาก SEM micrographs ในภาพที่ 2.14 พบว่ามีช่องว่างที่เกิดขึ้นน้อยกว่า C-SA ทำให้ C-MAH และ C-SI รับแรงกระแทกได้น้อยกว่า C-SA

ตารางที่ 2.8 ความเป็นผลึก และสมบัติเชิงกลของ Neat PP และ PP/BaSO₄ [32]

Sample code	X _c (%)	Yield strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Impact strength (kJ/m ²)
Neat PP	46.4	29.9	1.19	2.7
C-0	47.1	27.7	1.78	4.0
C-SA	44.5	27.5	1.73	5.4
C-SI	50.3	28.3	1.81	4.5
C-MAH	52.9	28.7	1.96	3.7



ภาพที่ 2.15 SEM micrographs แสดงพื้นผิวแตกหักของ PP/BaSO₄ ที่มี BaSO₄ 24% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมธาวิ อุตตสุรดี [2] ทำการปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิตที่เตรียมจาก LLDPE โดยใช้ BaSO_4 เป็นสารตัวเติม พบว่าค่าความหนาแน่นของคอมโพสิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ BaSO_4 เพิ่มขึ้นตามกฎของของผสม และพบว่าคอมโพสิต LLDPE/ BaSO_4 ทุกสูตรผสมมีปริมาณความเป็นผลึกเคียงใกล้เคียงกัน เมื่อปริมาณ BaSO_4 เพิ่มขึ้น อนุภาค BaSO_4 มีการกระจายตัวไม่ดีใน LLDPE โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสูตรที่มีปริมาณ BaSO_4 สูงๆ และมีการยึดติดระหว่างวัฏภาคไม่ดี เนื่องจากความแตกต่างของความถี่ช่วงระหว่าง 2 วัฏภาค และพบว่าเมื่อปริมาณ BaSO_4 เพิ่มขึ้น ยังมีมอดูลัสและความแข็งเพิ่มขึ้น ในขณะที่การดึงยืด σ จุดขาด และความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลง ผลจากการศึกษา ESCR พบว่าค่า ESCR เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ BaSO_4 เพิ่มขึ้น ผลของการใช้สารช่วยกระจายตัว SA และสารช่วยผสม LLDPE-g-MA ในคอมโพสิต พบว่า SA ช่วยให้ BaSO_4 มีการแตกกระจายใน LLDPE ดีขึ้น แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกล และค่า ESCR พบว่าสูตรที่มีการใช้ LLDPE-g-MA ช่วยให้การยึดติดระหว่างวัฏภาคดีขึ้น โดย MA เกิดแรงระหว่างขั้วกับ BaSO_4 และ LLDPE เกิดการเกี่ยวพันกับพอลิเมอร์เมทริกซ์เพิ่มขึ้น ความแข็งแรงดึง σ จุดคราก และยังมีมอดูลัสเพิ่มขึ้น ในขณะที่การดึงยืด σ จุดขาด และความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้สารปรับปรุงพื้นผิว SA สามารถช่วยเพิ่มการกระจายตัวของสารตัวเติมในเมทริกซ์ได้ดีขึ้น การใช้ PE-g-MA สามารถช่วยให้เกิดการผสมที่ดี และยังสามารถปรับปรุงการยึดติดระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์เมทริกซ์และสารตัวเติมที่มีความแตกต่างระหว่างขั้วได้ ส่งผลให้วัสดุที่ได้มีความแข็งและมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่พบว่าความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิตมีค่าลดลงอย่างมาก ในงานวิจัยนี้จึงทำการปรับปรุงคอมโพสิต LLDPE/ BaSO_4 ด้วยการใช้สารช่วยผสม EVA และศึกษาค่าความหนาแน่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และศึกษา ESCR ของวัสดุ

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น เกรดชนิดขึ้นรูป LL8420A, บริษัท พีทีที โพลีเอทิลีน จำกัด

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ LLDPE*

สมบัติ	InnoPlus LL8420A	หน่วย	วิธีการทดสอบ
ดัชนีการไหล (Melt Index, 190°C, 2.16 kg)	20	g/10min	ASTM D1238
ความหนาแน่น (Density)	0.924	g/cm ³	ASTM D792
จุดหลอมเหลว (Melting point)	123	°C	ASTM D3418
จุดอ่อนตัว (Vicat softening point)	92	°C	ASTM D1525
ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile strength at yield)	12	MPa	ASTM D638
ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break)	8	MPa	ASTM D638
การดึงยืด ณ จุดคราก (Elongation at yield)	20	%	ASTM D638
การดึงยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)	300	%	ASTM D638
มอดุลัส (1% Secant modulus)	310	MPa	ASTM D638
ความแข็ง (Hardness, shore D)	53	-	ASTM D2240
ความแข็งแรงกระแทก (Notched izod impact strength)	400	J/m	ASTM D256
ความต้านทานแรงแก่นจากสภาพแวดล้อม (ESCR, 100% Igepal, F ₅₀ Bent strip test : 100% Igepal, 3.2 mm. specimen, no slit, 50°C)	150	Hours	ASTM D1693

*ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

2. เอทิลีนไวนิลอะซิเตต (EVA) เกรด UL00728CC, บริษัท ExxonMobile Chemical จำกัด

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ EVA*

สมบัติ	UL00728CC	หน่วย
ไวนิลอะซิเตต (Vinyl acetate)	27.5	wt%
ครรชนีการไหล (Melt flow rate, 190°C /2.16 kg)	7	g/10min
ความหนาแน่น (Density)	0.952	g/cm ³
การดึงยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)	100	%

*ข้อมูลจากบริษัทผู้จำหน่าย

3. แบเรียมซัลเฟต เกรดตกตะกอน SY 1250 (ไม่มีการเคลือบผิว), บริษัท TITANOS จำกัด

ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของ BaSO₄*

สมบัติ	SY 1250	หน่วย
ลักษณะ (Appearance)	ผงสีขาว	-
ขนาด (Median diameter)	3.0	μm
ความหนาแน่น (Specific gravity)	4.5	g/cm ³
ค่า pH	6.5-9.0	-
ค่าคงที่การละลายน้ำ (Water soluble substances)	<0.3	%
การดูดซับน้ำมัน (Oil absorption)	15-30	g/cm ³
ปริมาณ BaSO ₄	>98	%

4. โนนิลฟีนอล พอลิเอทิลีน ไกลคอล อีเทอร์ (Nonylphenol polyethylene glycol ether) เกรด Tergitol® NP-9, บริษัท ซิกม่า-อัลดริช (ประเทศไทย) จำกัด

5. โทลูอิน เกรดการค้า, บริษัท แล็บชีสเต็มส์ จำกัด

6. ไนโตรเจนเหลว

7. Surfactant Pervitro 75% เกรด ARTNR ME-72409, บริษัท เมทเตอร์-โทเลโด (ประเทศไทย) จำกัด

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer, รุ่น MX500-D75L90, Chareon Tut Co., Ltd.)

2. เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder, รุ่น 5HP, Bosco Engineering Co., Ltd.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เครื่องปั๊มลม (รุ่น Bebicon 400, Hitachi Co., Ltd.)
4. เครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก (Injection molding machine, รุ่น TTI 200/80, บริษัท
ประทานกิจถาวร จำกัด)
5. เครื่อง Density kit (รุ่น ML-DNY-43, Mettler-toledo Co., Ltd.)
6. เครื่อง Thermal gravimetric analyzer (TGA, รุ่น TG 209 F3 Tarsus[®], Netzsch Co.,
Ltd.)
7. เครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC, รุ่น DSC 204 F1 Phoenix[®] (ASC),
Netzsch Co., Ltd.)
8. เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine, UTM, รุ่น LR5K,
Lloyd Instrument Ltd.)
9. เครื่องวัดความแข็งกด (Hardness tester, รุ่น DSTFDDR, Italia Co., Ltd.)
10. เครื่องทดสอบสมบัติการรับแรงกระแทก (Izod impact tester, รุ่น Yasuda 199311,
Yasuda seiki seisakusho Ltd.)
11. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM, รุ่น
JSM-5410LV, JEOL Co., Ltd.)
12. เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonik[™] Cleaner model , Output frequency : 44-48 KHz,
Fisher scientific worldwide Co., Ltd.)
13. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath, รุ่น ISOTEMP 228, Fisher scientific Co., Ltd.)
14. ตู้อบลมร้อน (Universal oven, รุ่น ML204, Memmert (Germany) Co., Ltd.)
15. เครื่องทำรอยบาก (Ceast, รุ่น Yasuda No. 7686, Yasuda seiki seisakusho Ltd.)
16. เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Mastersizer χ , รุ่น MSX15, Malvern Instruments Ltd.)
19. บีกเกอร์ขนาด 100 ml, 150 ml และ 3000 ml
20. ไมโครมิเตอร์ และเวอร์เนียสคาลิปเปอร์
21. เดซิเคเตอร์
23. เครื่องชั่งละเอียด
25. หลอดหยด
26. แท่งแก้วคนสาร
27. เทอร์โมมิเตอร์
28. แท่งจับยึดชิ้นงาน (ใช้ในการทดสอบ ESCR)
29. ฟอर्सิป (Forceps)
30. อลูมิเนียมฟอยล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์

เตรียมพอลิเมอร์ผสมสูตรเพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ โดยผสมตามอัตราส่วนดังตารางที่ 3.4

ซึ่งส่วนผสม LLDPE และ EVA ตามตารางที่ 3.4 โดยมีปริมาณ BaSO₄ เท่ากับ 25 phr ในคอมโพสิตทุกสูตร โดยเตรียมสูตรละ 700 กรัม ในการผสมแต่ละครั้ง ใช้ปริมาณสารผสมรวม 350 กรัม เขย่าเพื่อให้ผสมกัน จากนั้นนำมาเทใส่ในเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) โดยตั้งสภาวะของเครื่องดังนี้

- อุณหภูมิที่ใช้ในการผสม 170 °C
- ความเร็วรอบ (Rotor speed) 60 rpm
- เวลาที่ใช้ในการผสม 30 min

นำสูตรผสมที่ผ่านการผสมแล้ว ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปบดให้มีขนาดเล็กเพื่อนำไปฉีดขึ้นรูปต่อไป

ตารางที่ 3.4 สูตรผสมที่เตรียมเทียบเป็นส่วนในร้อยละของพอลิเมอร์

สูตร	ส่วนประกอบของสารตัวอย่าง (phr)		
	LLDPE	EVA	BaSO ₄
LL90EA10	90	10	
LLB25	100	-	25
LL95EA5B25	95	5	25
LL90EA10B25	90	10	25
LL85EA15B25	85	15	25

3.3.2 กระบวนการฉีดขึ้นรูป

นำพอลิเมอร์ผสมสูตรที่บดแล้วไปฉีดขึ้นรูปโดยใช้เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding machine) โดยตั้งสภาวะของเครื่องดังนี้

อุณหภูมิในการฉีดขึ้นรูป (°C)

Nozzle Temp.	190
Zone 1 Temp.	180
Zone 2 Temp.	170

เวลาในการฉีดขึ้นรูป (s)

1 st STG INJ	20
2 nd STG INJ	20
3 rd STG INJ	20
COOLING	300

ความเร็วในการฉีดขึ้นรูป (%)

1 st STG ING	30
2 nd STG ING	30
3 rd STG ING	30

ความดันในการฉีดขึ้นรูป (kg/cm²)

1 st INJ	30
2 nd INJ	30
3 rd INJ	30

3.3.3 การวิเคราะห์หาความหนาแน่นของตัวอย่าง

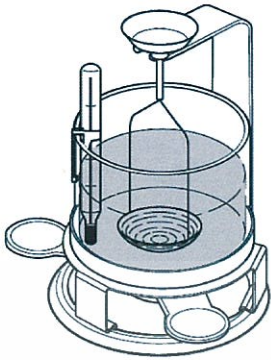
หาความหนาแน่นของตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM D792 (Method A) [33] ด้วยการใช้เครื่องชั่งที่มีความละเอียด (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) ประกอบกับ Density kit ความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่างจะถูกกำหนดจากของเหลวที่ทราบความหนาแน่น (ρ_0) โดยในการทดลองใช้น้ำกลั่นและทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 22.4°C ($\rho_0 = 0.9977 \text{ g/cm}^3$ at 22.4°C)

ขั้นตอนการทดสอบมีดังนี้ [34]

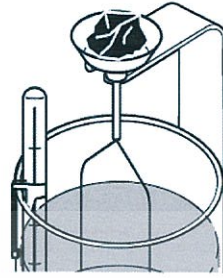
1. เตรียมชิ้นงานตัวอย่างในแต่ละสูตรขนาดประมาณ 5 X 5 X 3 mm³
2. จัดเตรียมอุปกรณ์ดังแสดงในภาพที่ 3.1 (a)
3. หยด Surfactant Pervitro 75% ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารที่ทำให้เปียก (Wetting agent) ประมาณ 3 หยด ซึ่ง Wetting agent จะทำให้น้ำกลั่นแพร่ไปบนชิ้นงานตัวอย่างได้ดีขึ้น โดย Surfactant จะไปลดความตึงผิวของน้ำกลั่น
4. ก่อนทำการทดสอบต้องรอจนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำกลั่นคงที่
5. ชั่งชิ้นงานตัวอย่างในอากาศโดยวางชิ้นงานตัวอย่างบน Pan ดังแสดงในภาพที่

3.1 (b) กดบันทึกค่าน้ำหนักที่ชั่งได้

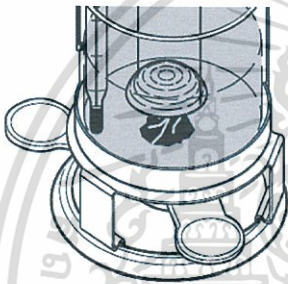
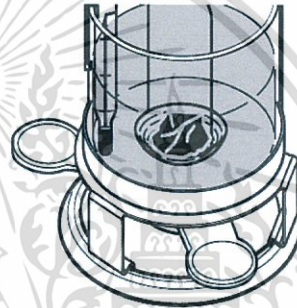
เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของบริษัทฯ ใช้สำหรับการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) ลักษณะการจัดวางเครื่องมือ



(b) การชั่งตัวอย่างในตัวกลางอากาศ

(c) ลักษณะการจัดวาง Basket สำหรับ การชั่งตัวอย่างที่มี ρ น้อยกว่าน้ำกลั่น(d) ลักษณะการจัดวาง Basket สำหรับ การชั่งตัวอย่างที่มี ρ มากกว่าน้ำกลั่น

ภาพที่ 3.1 การจัดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบเพื่อหาความหนาแน่น [34]

6. หลังจากนั้นชั่งชิ้นงานตัวอย่างในน้ำกลั่น

6.1 กรณีที่ตัวอย่างที่นำมาทดสอบมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำกลั่น ให้จัดวาง Basket แบบคว่ำ Basket ดังภาพที่ 3.1 (c) จากนั้นใส่ตัวอย่างลงไปใต้น้ำกลั่นโดยค่อยๆ ใช้แท่งแก้วคนต้นตัวอย่างให้อยู่ภายใต้ Basket ก่อนทำการกดบันทึกน้ำหนัก ต้องมั่นใจว่าวัสดุที่นำมาทดสอบไม่ลอยอยู่บนน้ำกลั่น และไม่มีฟองอากาศเกิดขึ้น

6.2 กรณีที่ตัวอย่างที่นำมาทดสอบมีค่าความหนาแน่นมากกว่าน้ำกลั่น ให้จัดวาง Basket แบบหงาย ดังภาพที่ 3.1 (d) จากนั้นใส่ตัวอย่างลงไปบน Basket และกดบันทึกน้ำหนัก

7. หลังจากวัดน้ำหนักของตัวอย่างในตัวกลางที่เป็นอากาศและในตัวกลางที่เป็นน้ำกลั่นแล้ว กดปุ่มคำนวณ เครื่อง Density kit จะแสดงค่าความหนาแน่นของตัวอย่าง

ค่าความหนาแน่นของตัวอย่าง (ρ) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{ความหนาแน่นของตัวอย่าง : } \rho = \frac{A}{A-B} (\rho_0 - \rho_L) + \rho_L \quad (3.1)$$

$$\text{ปริมาตรของตัวอย่าง : } V = \frac{\alpha (A-B)}{(\rho_0 - \rho_L)} \quad (3.2)$$

เมื่อ ρ	=	ความหนาแน่นของตัวอย่าง
A	=	น้ำหนักของตัวอย่างที่ชั่งในอากาศ
B	=	น้ำหนักของตัวอย่างที่ชั่งในของเหลว
V	=	ปริมาตรของตัวอย่าง
ρ_0	=	ความหนาแน่นของของเหลวที่ทราบความหนาแน่น
ρ_L	=	ความหนาแน่นของอากาศ (0.0012 g/cm ³)
α	=	Weight correction factor (0.99985)

3.3.4 การวิเคราะห์ปริมาณ BaSO₄ ในชิ้นงานตัวอย่าง

นำชิ้นงานที่ได้จากเครื่องฉีดขึ้นรูปมาหาปริมาณ BaSO₄ โดยใช้เครื่อง TGA โดยใช้น้ำหนักสารประมาณ 5-10 mg นำมาให้ความร้อน ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10°C/min จากอุณหภูมิห้อง จนถึงอุณหภูมิ 800°C เพื่อกำจัดสารอินทรีย์อื่นๆ ออกไป ภายใต้บรรยากาศของอากาศ (Air) นำข้อมูลที่ได้จากกราฟมาหาปริมาณ BaSO₄ ที่แน่นอนตามมาตรฐาน ASTM D1131 [35]

3.3.5 การหาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการตกผลึก และปริมาณผลึก

ตัวอย่างจากชิ้นงานฉีดขึ้นรูปมาศึกษาสมบัติทางความร้อน โดยใช้เครื่อง DSC ชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 5-10 mg นำมาให้ความร้อน ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10°C/min จากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิสูงสุดคือ 180°C และทำให้เย็น โดยการลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 10°C/min จนถึงอุณหภูมิห้อง นำข้อมูลจากกราฟที่ได้มาหาค่าอุณหภูมิของการหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกตามมาตรฐาน ASTM E794 [36]

$$\text{Heat of fusion, } \Delta H_f \text{ (J/g)} = \frac{\text{พลังงานความร้อนในการหลอมเหลวผลึก (ที่ตำแหน่ง } T_m \text{) (J)}}{\text{น้ำหนักสารตัวอย่าง (g)}} \quad (3.4)$$

$$\text{Heat of fusion } \Delta H_{\text{Normalised}} \text{ (J/g)} = \frac{\Delta H_f \times 100 \text{ (J/g)}}{100\% - \% \text{ โดยน้ำหนักของสารที่ไม่ใช่ PE}} \quad (3.5)$$

$$\text{ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ (\%)} = \frac{\Delta H_{\text{Normalised}} \times 100}{\Delta H_f^0} \quad (3.6)$$

เมื่อ ΔH_f คือ พลังงานความร้อนในการหลอมเหลวผลึก (ที่ตำแหน่ง T_m)
 ΔH_f^0 คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึกของ PE ที่มีความเป็นผลึก 100%
 มีค่าเท่ากับ 293 J/g [37]
 $\Delta H_{\text{Normalised}}$ คือ พลังงานความร้อนในการหลอมเหลวผลึกของพอลิเอทิลีนในของผสม
 โดยคิดเทียบปริมาณของพอลิเอทิลีน 100% โดยน้ำหนัก

3.3.6 การศึกษาสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต

นำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปนำไปแช่ในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นหักชิ้นงานในขณะที่ชิ้นงานยังเย็นอยู่ นำชิ้นงานส่วนพื้นที่ภาคตัดขวางไปเคลือบด้วยทองคำแล้วนำไปวิเคราะห์การกระจายตัวของ BaSO₄ ด้วยเครื่อง SEM

3.3.7 การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง

การทดสอบค่าความแข็งแรงดึง ค่ายังมอดุลัส และค่าร้อยละการดึงยืด ตามมาตรฐาน ASTM D638 [38] โดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ใช้สภาวะที่ทดสอบดังนี้

- โหลดเซลล์ (Load cell)	5	kN
- ความเร็วในการดึง (Test speed)	300	mm/min
- ระยะของการจับชิ้นงาน (Gauge length)	35	mm

หมายเหตุ ใช้ความเร็วในการดึง 300 mm/min เนื่องจาก LLDPE ที่ใช้ในการทดลองเป็นเกรดฉีดขึ้นรูป (MFI = 20 g/10min) การทดสอบที่ความเร็วต่ำกว่านี้ พบว่าชิ้นงานไม่ขาดในระยะการยึดที่ถูกจำกัดด้วยความสูงของเครื่องมือทดสอบ

ค่าความแข็งแรงดึง, ค่ายังมอดุลัส และร้อยละการดึงยืด สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile strength at yield)} = F_{\text{at yield}} / A \quad (3.7)$$

$$\text{ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break)} = F_{\text{at break}} / A \quad (3.8)$$

$$\text{ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก (\%Elongation at yield)} = \frac{(l_{\text{at yield}} - l_0) \times 100}{l_0} \quad (3.9)$$

$$\text{ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (\%Elongation at break)} = \frac{(l_{\text{at break}} - l_0) \times 100}{l_0} \quad (3.10)$$

$$\text{ค่า Young's Modulus (Young's Modulus)} = \frac{\text{ความเค้น (Stress)}}{\text{ความเครียด (Strain)}} \quad (3.11)$$

เมื่อ	$F_{\text{at yield}}$	=	แรงดึงยืดชิ้นงาน ณ จุดคราก
	$F_{\text{at break}}$	=	แรงดึงยืดชิ้นงาน ณ จุดขาด
	A	=	พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง (mm^2)
	$l_{\text{at yield}}$	=	ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานหลังทำการดึงชิ้นงานตัวอย่าง ณ จุดคราก
	$l_{\text{at break}}$	=	ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานหลังทำการดึงชิ้นงานตัวอย่าง ณ จุดขาด
	l_0	=	ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานก่อนดึงชิ้นงาน (Gauge length) เท่ากับ 35 mm

หมายเหตุ ค่า Young's Modulus คำนวณจากค่าความชันเริ่มต้น (ที่ 0.5 และ 1% การดึงยืด)

3.3.8 การทดสอบสมบัติการรับแรงกระแทก

การทดสอบความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 256 [39] โดยในการทดสอบใช้มาตรฐานแบบไอซอด (Izod type) ชิ้นงานตัวอย่าง 10 ชิ้นในแต่ละสูตร ทำการบากชิ้นงานที่นำมาทดสอบเป็นรูปตัววี (V notch) โดยมีรัศมีร่องบาก (Root radius) 0.254 mm และมีความลึก 2.54 mm ด้วยเครื่องทำรอยบาก ค่าความแข็งแรงกระแทกของตัวอย่างที่มีรอยบาก (Notched samples) สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{ความแข็งแรงกระแทก (W}_k\text{)} = W/A_k \quad (3.12)$$

$$W_k = \text{ค่าความแข็งแรงกระแทกของตัวอย่างที่มีรอยบาก (kJ/m}^2\text{)}$$

$$W = \text{ค่าพลังงานกระแทกที่วัดได้ (kJ)}$$

$$A_k = \text{พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างที่หักรอยรอยบากแล้ว (m}^2\text{)}$$

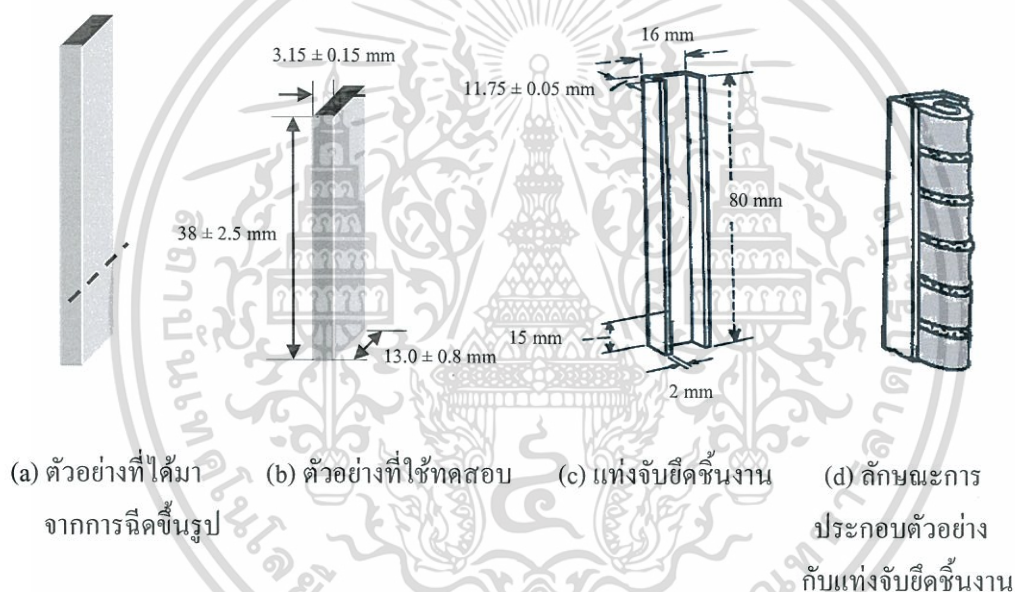
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.9 การทดสอบความแข็งแรง

นำชิ้นงานที่ฉีดขึ้นรูปที่มีความหนาประมาณ 3.15 mm มาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงแบบ Dead load ชนิด Shore D ที่อุณหภูมิห้อง กดตัวอย่างเป็นเวลา 3 วินาที แล้วอ่านค่าที่วัดได้ ตามมาตรฐาน ASTM D2240 [40]

3.3.10 การทดสอบสมบัติความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม

นำชิ้นงานที่ฉีดขึ้นรูป (ภาพที่ 3.2 (a)) จำนวน 10 ชิ้นต่อ 1 สูตร มาตัดปลายด้านหนึ่งออกให้มีความยาวของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ 38 ± 2.5 mm ดังภาพที่ 3.2 (b) โดยใช้คัตเตอร์



ภาพที่ 3.2 ลักษณะและการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ ESCR [50]

จากนั้นค่อยๆ งดชิ้นงานตัวอย่าง และนำไปใส่ในแท่งจับยึดชิ้นงาน ดังภาพที่ 3.2 (c) แช่ตัวอย่างในบีกเกอร์ขนาด 3000 ml ที่มี 100% Nonylphenol polyethylene glycol ether ปริมาณ 700 ml บรรจุอยู่ จากนั้นนำภาชนะไปใส่ในอ่างน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 50°C สังเกตการเปลี่ยนแปลงของชิ้นงานตัวอย่าง และจดบันทึกเวลาเมื่อสังเกตเห็นรอยแตกเกิดขึ้นในตัวอย่าง เพื่อนำไปหาค่าความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม (ESCR) ตามมาตรฐาน ASTM D1693 [51] โดยรายงานค่าความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม F_{50} คือ เวลาที่มีตัวอย่าง 5 ชิ้นเกิดรอยแตกขึ้น

หลังจากที่ตัวอย่างที่ทดสอบเกิดการแตกหัก ให้นำตัวอย่างไปศึกษาลักษณะการเสียหายของชิ้นงานบริเวณภาคตัดขวางโดยใช้เทคนิค SEM

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ BaSO₄ และความหนาแน่นของคอมโพลิต

จากตารางที่ 4.1 การหาปริมาณ BaSO₄ ด้วยเทคนิค TGA พบว่าปริมาณ BaSO₄ ในคอมโพลิตทุกสูตรผสมมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณที่ต้องการ (25 php) เมื่อนำตัวอย่างไปหาค่าความหนาแน่น พบว่าสูตร LL กับ LL90EA10 มีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน เนื่องจาก EVA มีความหนาแน่น (0.952 g/cm³) ใกล้เคียงกับความหนาแน่นของ LLDPE (0.924 g/cm³)

เมื่อพิจารณาสูตรคอมโพลิตที่มีปริมาณ BaSO₄ เท่ากันคือ 25 php แต่มีปริมาณ EVA แตกต่างกัน (LL95EA5B25, LL90EA10B25 และ LL85EA15B25) พบว่ามีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกัน และมีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกับ LLB25 เนื่องจากความหนาแน่นของ LLDPE และ EVA มีค่าใกล้เคียงกันดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น

ตารางที่ 4.1 ปริมาณของ BaSO₄ และความหนาแน่นของชิ้นงานคอมโพลิต LLDPE/BaSO₄ และ LLDPE/EVA/BaSO₄

สูตรผสม	ปริมาณ BaSO ₄ ที่ต้องการ		ปริมาณ BaSO ₄ ที่พบ		ความหนาแน่น (g/cm ³)	
	php	%wt	php	%wt	ค่าจากการทดลอง	ค่าตามทฤษฎี
LL	-	-	-	-	0.926±0.001	0.924
LL90EA10	-	-	-	-	0.932±0.002	0.929
LLB25	25	20.00	23.53	18.82	1.090±0.002	1.086
LL95EA5B25	25	20.00	23.93	19.14	1.090±0.001	1.092
LL90EA10B25	25	20.00	25	24.61	1.091±0.002	1.101
LL85EA15B25	25	20.00	24	24.13	1.091±0.002	1.100

4.2 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน

จากตารางที่ 4.2 พบว่าสูตรคอมโพลิตที่มีการเติม EVA ทุกสูตร มี T_m ของ LLDPE แต่ไม่พบ T_m ของ EVA (T_m = 76.8°C) (ดูได้จากภาพผนวก ก) แสดงว่า EVA ไม่สามารถเกิดผลึกเมื่ออยู่ในระบบของคอมโพลิตนี้ นั่นคือ EVA แสดงความเป็นอสัณฐานในระบบ LLDPE/EVA และเนื่องจาก LLDPE และ EVA เป็น Immissible blend ซึ่ง EVA ไม่เข้าไปรบกวนการเกิดผลึกของ LLDPE ซึ่งยืนยันได้จากค่า T_m และความเป็นผลึกของคอมโพลิตที่มีการเติม EVA ทุกสูตรมีค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใกล้เคียงกันกับ LLDPE แม้ว่ามีการวิจัย [60] ที่มีการระงับการเกิดผลึกร่วม (Co-crystallization) ของ PE กับ EVA (ที่มีปริมาณหมู่ไวนิลอะซิเตต (VA) เท่ากับ 9 %wt) ในพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วน PE/EVA เท่ากับ 90/10 แต่ในงานวิจัยนี้ใช้ EVA ที่มีปริมาณ VA เท่ากับ 27.5 %wt ความเข้ากันได้ของ EVA กับ LLDPE จึงน้อย ทำให้ไม่เกิดผลึกร่วมขึ้นในระบบที่ทำการศึกษา

ตารางที่ 4.2 T_m , T_c และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ LLDPE ในคอมโพสิต LLDPE/BaSO₄ และ LLDPE/EVA/BaSO₄

สูตร	T_m (°C)	T_c (°C)	ความเป็นผลึก (%)
LL	129.6	107.9	35
LL90EA10	128.1	108.2	39
LLB25	128.4	108.9	34
LL95EA5B25	131.2	107.3	33
LL90EA10B25	127.9	108.1	37
LL85EA15B25	128.6	107.9	35

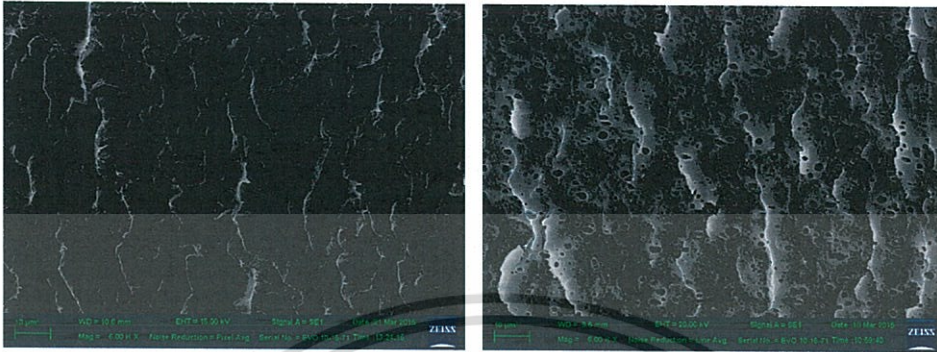
4.3 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของคอมโพสิต

4.3.1 การศึกษาการกระจายตัวของ EVA ใน LLDPE

จากการศึกษาการกระจายตัวของ EVA ใน LLDPE จากภาพที่ 4.1 (a) แสดงพื้นที่ตัดขวางของ LLDPE/EVA ก่อนสกัด จะเห็นว่าไม่มีช่องว่างเกิดขึ้น ไม่เห็นการแยกวัฏภาค การสกัดเพื่อดูการกระจายตัวของ EVA ซึ่งเป็นวัฏภาคกระจาย ทำให้เกิดช่องว่างที่แสดงในภาพที่ 4.1 (b) ซึ่งเป็นบริเวณที่เคยมีวัฏภาคของ EVA อยู่ พบว่า EVA มีรูปร่างส่วนใหญ่เป็นทรงกลม และมีการกระจายตัวที่ดีใน LLDPE จากการที่เห็นเป็น 2 วัฏภาคเป็นการยืนยันว่าระบบพอลิเมอร์ผสมของ LLDPE/EVA เป็นแบบ Immiscible blend

4.3.2 การศึกษาการกระจายตัวของ BaSO₄ ในคอมโพสิต LLDPE/EVA/BaSO₄

จากภาพที่ 4.2 (a), (c) และ (e) แสดงรูปก่อนสกัด EVA พบว่าอนุภาค BaSO₄ มีการกระจายตัวดี เนื่องจากการเพิ่ม EVA ซึ่งเป็นวัฏภาคที่มีขั้วเข้าไปใน LLDPE ทำให้เกิดการผสมเข้ากันที่ดีขึ้น โดย EVA มี VA ซึ่งมีขั้วสูงสามารถเข้ากันได้ดีกับ BaSO₄ และมี PE ซึ่งเป็นวัฏภาคที่ไม่มีขั้ว ซึ่งสามารถเข้ากันได้ดีกับ LLDPE หลังจากทำการสกัดวัฏภาคของ EVA ออก (ภาพที่ 4.2 (b), (d) และ (f)) พบว่าไม่เห็นอนุภาค BaSO₄ เหลืออยู่ แสดงว่าอนุภาค BaSO₄ เกิดการหลุดออกไปในระหว่างการสกัดพร้อมกับ EVA



(a) LL90EA10 ก่อนสกัด

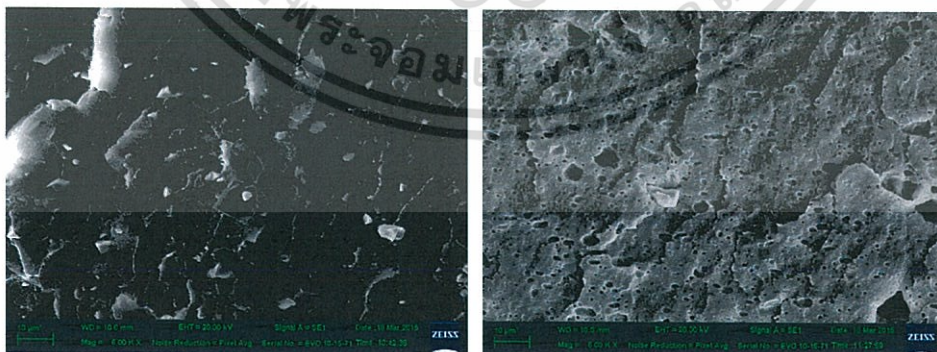
(b) LL90EA10 หลังสกัด

ภาพที่ 4.1 SEM micrographs แสดงการกระจายตัวของ EVA ใน LLDPE ของพื้นผิวที่แตกหัก (กำลังขยาย 6000 เท่า)



(a) LL95EA5B25 ก่อนสกัด

(b) LL95EA5B25 หลังสกัด

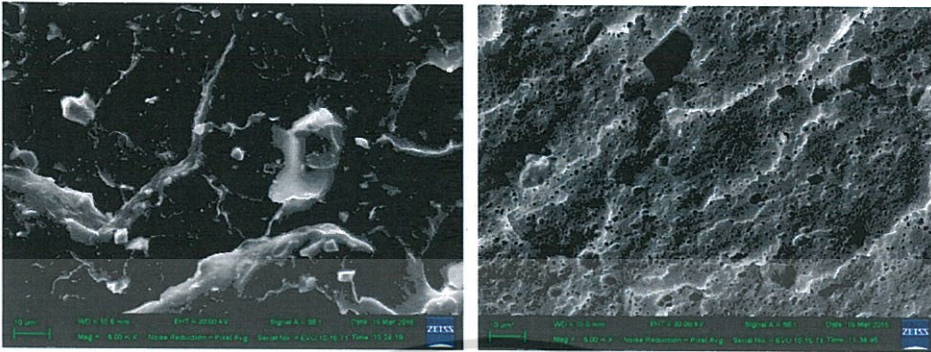


(c) LL90EA10B25 ก่อนสกัด

(d) LL90EA10B25 หลังสกัด

ภาพที่ 4.2 SEM micrographs แสดงการกระจายตัวของ BaSO_4 และ EVA ใน LLDPE ของพื้นผิวที่แตกหัก (กำลังขยาย 6000 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(e) LL85EA15B25 ก่อนสัคตัด

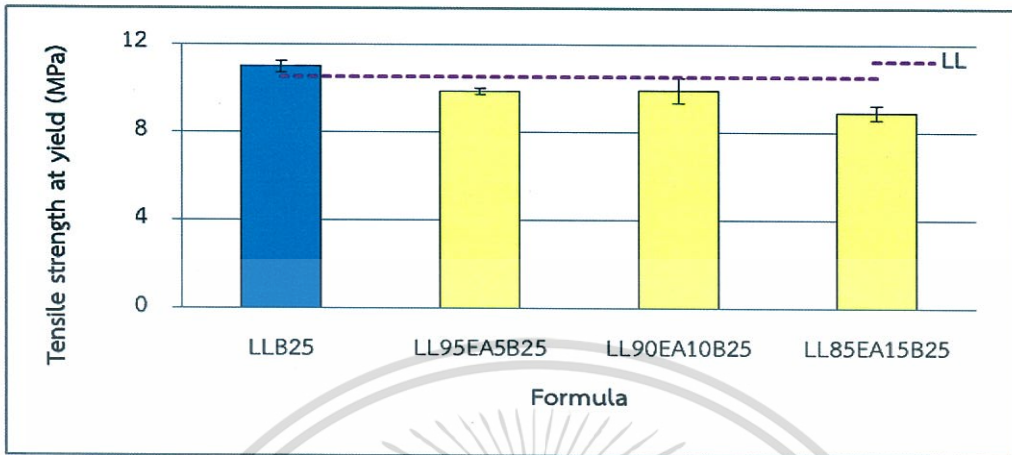
(f) LL85EA15B25 หลังสัคตัด

ภาพที่ 4.2 (ต่อ) SEM micrographs แสดงการกระจายตัวของ BaSO_4 และ EVA ใน LLDPE ของพื้นผิวที่แตกหัก (กำลังขยาย 6000 เท่า)

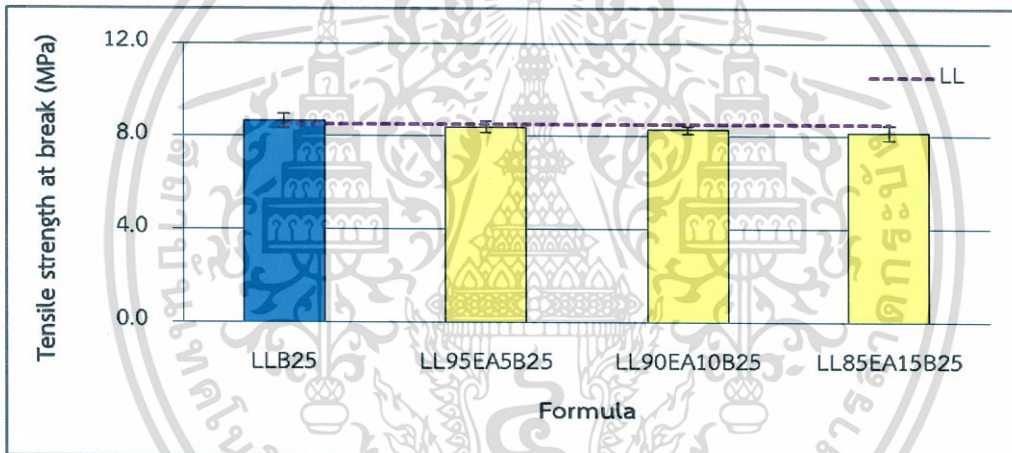
4.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต

จากภาพที่ 4.3 พบว่าการเติม EVA ลงไปใน LLDPE/ BaSO_4 ทำให้ความเข้ากันได้ของ LLDPE กับ BaSO_4 ดีขึ้น อย่างไรก็ตามการที่ EVA แสดงความเป็นอสัณฐานที่มีความยืดหยุ่นในระบบพอลิเมอร์ผสม ทำให้วัสดุเกิดการเสีรูปร่างได้ง่ายทำให้มีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก และยังมีมอดูลัสมีแนวโน้มลดลง ส่วนค่าความสามารถในการดึงยืดมีค่าแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ EVA เพิ่มขึ้น

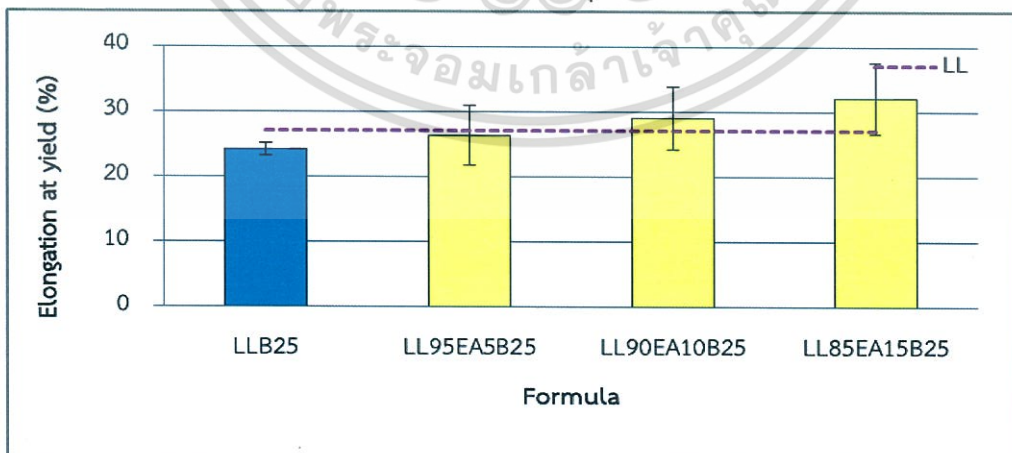
จากการศึกษาสมบัติการรับแรงกระแทกในภาพที่ 4.5 พบว่าการเติม EVA ลงไปทำให้ความแข็งแรงกระแทกเพิ่มขึ้นอย่างมาก และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณ EVA เพิ่มขึ้น เนื่องจาก EVA มีสมบัติคล้ายยางมีความยืดหยุ่น มีความแข็งแรงน้อยกว่า LLDPE และ BaSO_4 เมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกอย่างรวดเร็ว EVA สามารถรับแรงกระทำและใช้แรงกระทำที่ได้รับไปใช้ในการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง นอกจากนี้การใช้ EVA ช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ของ LLDPE กับ BaSO_4 ส่งผลให้มีจุดบกพร่อง (Defects) ของคอมโพสิตลดลง ทำให้มีความต่อเนื่องในการรับส่งแรงกระทำได้ดีขึ้น



(a) ความแข็งแรง ณ จุดคราก



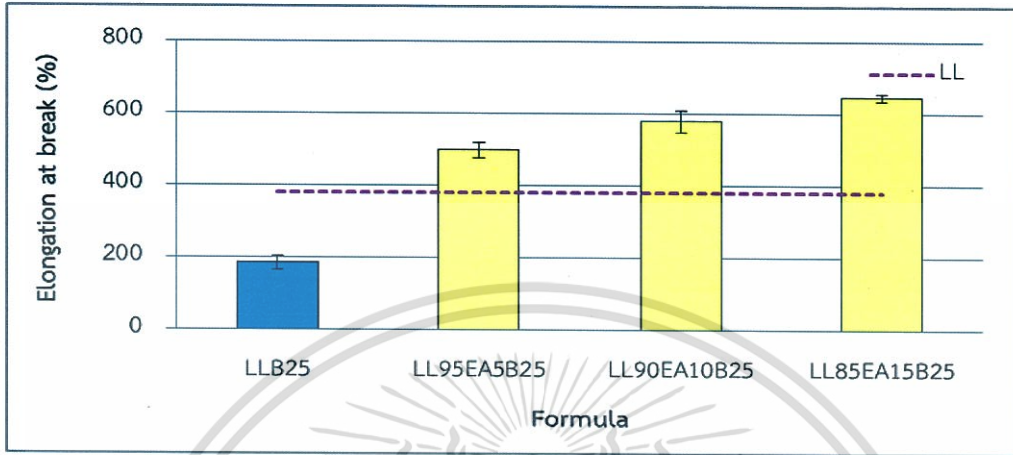
(b) ความแข็งแรง ณ จุดขาด



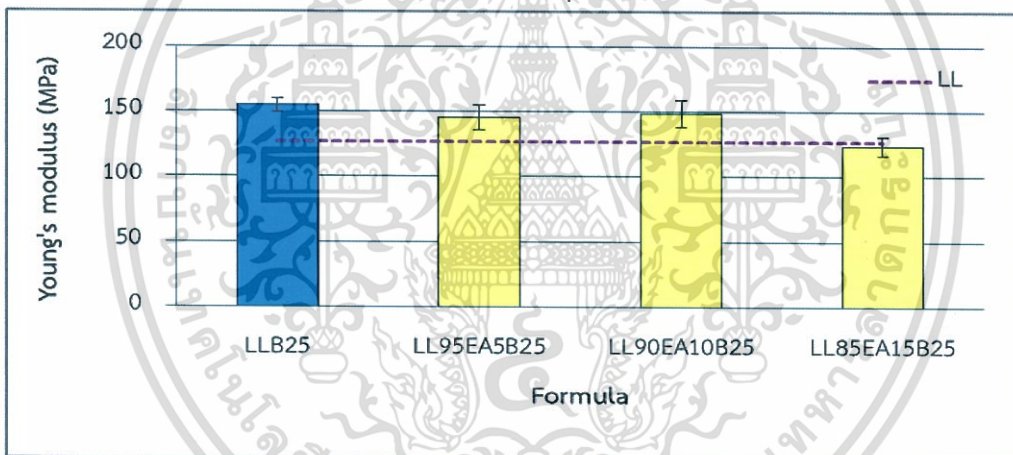
(c) การดึงยืด ณ จุดคราก

ภาพที่ 4.3 สมบัติการรับแรงดึงของคอมโพสิต LLDPE/EVA/BaSO₄

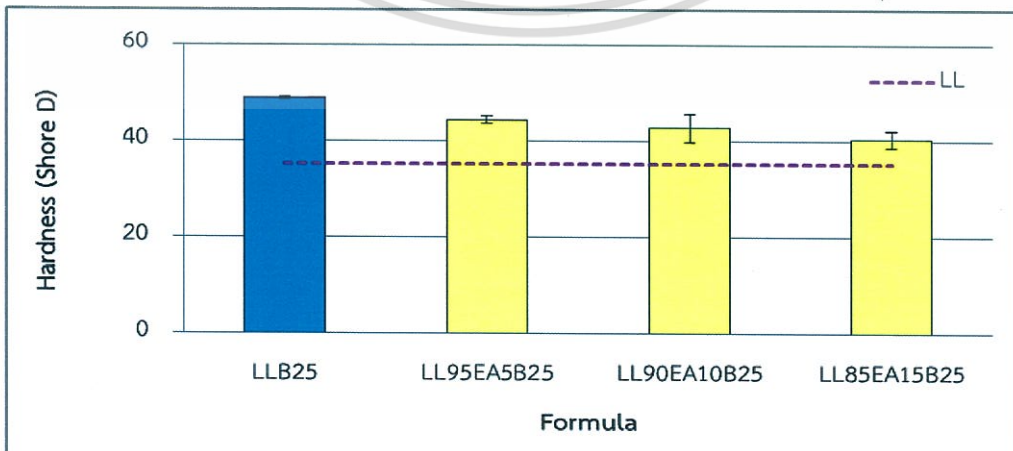
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



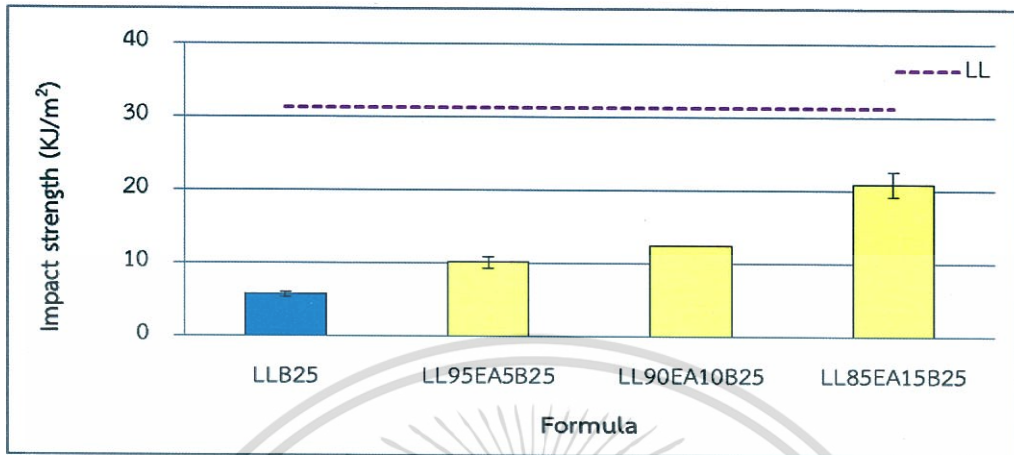
(d) การดึงยืด ณ จุดขาด



(e) ยั่งมอดุลัส

ภาพที่ 4.3 (ต่อ) สมบัติการรับแรงดึงของคอมโพลีเมอร์ LLDPE/EVA/BaSO₄

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของบริษัทฯ ซึ่งขอสงวนสิทธิ์ในข้อมูลและเนื้อหา
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.5 สมบัติการรับแรงกระแทกของคอมโพลีเมอร์ LLDPE/EVA/BaSO₄

4.5 ความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม

จากผลการทดลองพบว่า คอมโพลีเมอร์ที่ผสม EVA ลงไป ไม่เกิดการเสียหายในระยะเวลาที่ทำการทดสอบ (ESCR, F₅₀ >3,200 ชั่วโมง) เป็นผลมาจากการมีอยู่ของวัฏภาค EVA ซึ่งมีความยืดหยุ่นสูงสามารถทนต่อแรงเค้นจากการดัดงอได้ดี ทำให้จุดศูนย์รวมแรงเค้นของวัสดุมีน้อยลง ทำให้เกิดรอยแตกได้ยากขึ้น และนอกจากนี้มีส่วนผสมจาก EVA ทำให้สภาพผิวของวัสดุเพิ่มขึ้นทำให้ Stress cracking agent ต้องใช้เวลานานในการแพร่เข้ามาในวัสดุส่งผลให้ ESCR ของวัสดุเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก

ตารางที่ 4.3 ค่าความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมของคอมโพลีเมอร์ LLDPE/EVA/BaSO₄ ใน Tergitol™ NP-9 Surfactant at 50°C

สูตร	ESCR, F ₅₀ (h)
LL	2
LL90EA10	>3200
LLB25	244
LL95EA5B25	>3200
LL90EA10B25	>3200
LL85EA15B25	>3200

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิตจาก LLDPE/BaSO₄ ด้วยการใช้สารช่วยผสม EVA จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการใช้ระบบพอลิเมอร์ผสม LLDPE/EVA ที่มีปริมาณ BaSO₄ 25 php พบว่า EVA ไม่เกิดผลึกในคอมโพสิต LLDPE/EVA/BaSO₄ คอมโพสิตทุกสูตรผสมมีปริมาณความเป็นผลึกใกล้เคียงกัน และพบว่า EVA กระจายตัวได้ดีใน LLDPE และช่วยให้ความสามารถในการผสมเข้ากันระหว่าง LLDPE และ BaSO₄ ดีขึ้น โดยหมู่ VA ใน EVA จะทำให้ความมีขั้วของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น และพบว่าเมื่อปริมาณ EVA เพิ่มขึ้น การดึงยืดและความแข็งแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก ในขณะที่ความแข็งแรงดึง ยังมอดุลัส และความแข็งลดลง เนื่องจาก EVA มีสมบัติยืดหยุ่นคล้ายยาง ทำให้เสียรูปได้ง่ายกว่า LLDPE ผลจากการศึกษา ESCR พบว่าวัสดุไม่เกิดการเสียหายในระหว่างการทดสอบ (ESCR, F₅₀ >3,200 ชั่วโมง)

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรเลือกใช้ BaSO₄ เกรดนาโน เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติการรับแรงกระแทกของคอมโพสิต LLDPE/BaSO₄ ให้ดีขึ้น
2. ควรเพิ่มความเร็วยอบ และเวลาในการผสม เพื่อให้อนุภาค BaSO₄ มีการแตกตัว และมีการกระจายตัวได้ดีขึ้นใน LLDPE แต่ควรระวังเพราะอาจจะทำให้พอลิเมอร์เกิดการเสียหายได้
3. ควรปรับเปลี่ยนชนิดของ Stress cracking agent ให้เหมาะสมกับตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดสอบ ESCR

เอกสารอ้างอิง

- [1] Paul, S. 1996. Surface Coatings : Science & Technology. 2nd ed. Michigan : John Wiley & Sons.
- [2] เมธาวิ อดตสุรดี. 2558. “การปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิตแอตแอลดีฟือ/แบเรียมซัลเฟต ด้วยสารช่วยผสมและอีวีเอ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] Sami, M.D. 2012. “Using of Fiber Composite of Polypropylene to Manufacturing Cars Bumpers.” *IJANS*. 3(2) : 111-113.
- [4] Paul, D.R. and Bucknall, C.B. 2000. **Polymer Blends**. 1. New York : John Wiley & Son.
- [5] Work, W.J. 2004. “Definition of Terms Related to Polymer Blends, Composites, and Multiphase Polymeric Materials.” *Pure Appl. Chem*. 76 : 1985-2007
- [6] Jacqueline, I. and Kroschwitz, J. 1995. **High performance Polymers and Composite**. New York : Plenum press.
- [7] Billmeyer, F.W. 1984. **Textbook of Polymer Science**. New York : John Wiley & Sons.
- [8] Seymour, R.B. 1992. **Polymer Chemistry an Introduction**. 3rd ed. New York : Dekker.
- [9] วันชาติ ปรีชาติวงศ์. 2554. พอลิเมอร์ (Polymer). [Online]. Available : www.gocities.com/thaimafia/orchem/polymer.ppt.
- [10] Soares, J. Abbott, R. and Kim, J. 2000. “Environmental Stress Cracking Resistance of Polyethylene : The Use of CRYSTAF and SEC to Establish Structure–Property Relationships.” *J. Polym. Sci., Polym. Phys.* 38 : 1267-1275.
- [11] Brydson, J.A. 1999. **Plastic Materials**. 7th ed. Oxford : Butterworth Heinemann.
- [12] Armstrong, R.B. 2012. New EVAL[®] EVOH Resins for Flexible Packaging. [Online]. Available : <http://www.tappi.org/content/eneletters/eplace/2004/27-1Armstrong.pdf>.
- [13] Ariffin, K.S. 2015. Mineral Perindustrian. [Online]. Available : <http://mineral.engusm.my/web%20halaman%20mineral/Baryte.pdf>.
- [14] Paytan, A. Mearon, S. Cobb, K. and Kastner, M. 2002. Origin of Marine Barite Deposits : Sr and Isotope Characterization. [Online]. Available : http://eesc.columbia.edu/w4937/Readings/paytan_et_al_2002.pdf.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2548. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 846-2548. แบบเรียกซัพพลายสำหรับอุตสาหกรรม. [Online]. Available : <http://www2.rid.go.th/research/vijais/moa/fulltext/TIS846-2548.pdf>
- [16] Kresse, R. Baudis, U. Jager, P. Riechers, H.H. Wagner, H. Winkler, J. and Wolf, H.U. 2007. **Barium and Barium Compounds**. Weinheim : Wiley-VCH.
- [17] Bianchil, F. Lazzeri, A. Pracella, M. D'Aquino, A. and Ligeri, G. 2004. "Physical-Mechanical and Thermal Properties of Polyethylene Toughened with Submicron BaSO₄ Particles." *Macromol. Symp.* 218 : 191-200.
- [18] กลุ่มส่งเสริมและพัฒนาเทคโนโลยีสำนักงานอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่กระทรวงอุตสาหกรรม. 2552. การเปรียบเทียบความเหมือน-ความต่างระหว่างแร่แบไรต์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศกับแร่ที่ผลิตได้ในประเทศไทย. [Online]. Available : <http://www1.dpim.go.th/dt/pper/000001266810852.pdf>
- [19] Wang, K. Jingshen, W. Ye, L. and Zeng, H. 2005. **Microstructure and Fracture Behavior of Polypropylene/Barium Sulfate Composites**. [Online]. Available : <http://www.interscience.wiley.com>.
- [20] Hadi, A.G. Lafta, F. Hashim, A. Hakim, H. Al-Zuheiry, A.I.O. Salman, S.R. and Ahmed, H. "Study the Effect of Barium Sulphate on Optical Properties of Polyvinyl Alcohol (PVA)." 2013 *J. Appl. Polym. Sci.* 1(2) : 52-55.
- [21] นพวรรณ ชนัญพานิช และอุทุมมา มัชชะเนมี. 2554. แผ่นเส้นใยนาโนคอมโพสิตป้องกันรังสีเอกซ์. [Online]. Available : http://www.nst.or.th/nst-conf/nst/nst12/PC/final_full_PC10_Noppavan_Chanunpanich_23Jun2011.pdf
- [22] Tawansi, A. El-Khodary, A. and Abdelnaby, M.M. 2005. "A Study of the Physical Properties of FeCl₃ Filled PVA." *Curr. Appl. Phys.* 5 : 572-578.
- [23] Ariffin, K.S. 2001. **Mineral Perindustrian : Barite (Barium)**. [Online]. Available : <http://lidarmax.altervista.org/lidar/SCIE%20CHIMICHE/BARIO%20generici/Baryte.pdf>
- [24] Kahar, A.W.M. Ismail, H. and Othman, N. 2012. "Effects of Polyethylene- Grafted Maleic Anhydride as a Compatibilizer on the Morphology and Tensile Properties of (Thermoplastic Tapioca Starch)/(High Density Polyethylene)/(NaturalRubber) Blends." *J. Vinyl. Addit. Tech.* 18(1) : 65-70.

- [25] Warya., Romli, M. Suryani, A. Yuliasih, I. and Johan, S. 2013. "Using of a Compatibilizer to Improve Morphological, Physical and Mechanical Properties of Biodegradable Plastic from Thermoplastic Starch/LLDPE Blends." *IJET-IJENS*. 13(01): 115-122.
- [26] Pankai, A. Araujo, E.M. and Tomas, J.A.M. 2015. **Rheological Behavior of PA6/PEGAA/LDPE Blend and the Effect of the Mixing Sequence on the Mechanical Properties and Morphology.** [Online]. Available : http://www.researchgate.net/profile/Tomas_Melo/publication/OGICAL267559243_RHEOLOGICAL_BEHAVIOR_OF_PA6PEGAALDPE_BLEND_AND_THE_EFFECT_OF_THE_MIXING_SEQUENCE_ON_THE_MECHANICAL_PROPERTIES_AND_MORPHOLOGY/links/54c791d00cf25ba91c797809.pdf.
- [27] Zhanhai, Y. Zhihui, Y. Guoen, S. Chaozhong, L. Jin, T. Luquan, R. and Jinghua, Y. 2002. "Morphology, Thermal Behavior, and Mechanical Properties of PA6/UHMWPE Blends with HDPE-g-MAH as a Compatibilizing Agent." *J. Appl. Polym. Sci.* 75(2) : 232-238.
- [28] อธิพิพล แจ่มชัด. 2544. เอกสารประกอบการสอนวิชาพอลิเมอร์คอมโพสิต. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [29] Pankaj, A. Andre, W.B. Edleide, M. and Tomas, J.A. 2010. "Influence of Reactive Compatibilizers on the Rheometrical and Mechanical Properties of PA6/LDPE and PA6/HDPE Blends." *J. Mater. Sci.* 45(2) : 496.
- [30] Wang, K. Wu, J. and Zeng, H. 2003. "Radial Growth Rate of Spherulites in Polypropylene Barium Sulfate Composites." *Eur. Polym. J.* 39 : 1647-1652.
- [31] Hui, Y.H. and Sherkat, F. 2006. **Handbook of Food Science Technology, and Engineering.** 3. the United states of America : CRC Press.
- [32] Utracki, L.A. 2002. **Polymer Blends Handbook.** 1. Dordrecht : Kluwer Academic.
- [33] Douglas, M.B. 1996. **Plastic Injection Molding : Manufacturing Process Fundamentals.** Dearborn : Society of Manufacturing Engineers.
- [34] อธิพิพล แจ่มชัด, ชลลดา ฤตวิรุพห์, จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร, สุภารัตน์ รักชลธิ์ และสมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2553. **ปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์.** กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [35] Polyplastics Co., Ltd. 2001. **Polyplastics Solution Platform for Engineering Plastics.** [Online]. Available : <http://www.xcentricmold.com/aboutinjectmold.php>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [36] Chen, X. Shi, J. Wang, L. Shi, H. Liu, Y. and Wang, L. 2010. "Isothermal Crystallization Kinetics and Melting Behavior of Modified High-Density Polyethylene/Barium Sulfate Nanocomposites." *Polym. Compos.* 32(2) : 177-184.
- [37] Wang, K. Wu, J. and Zeng, H. 2003. "Radial Growth Rate of Spherulites in Polypropylene Barium Sulfate Composites." *Eur. Polym. J.* 39 : 1647-1652.
- [38] Chen, Y. 2014. "Investigations on Environmental Stress Cracking Resistance of HDPE/EVA and LDPE/EVA Blends." *J. Appl. Polym. Sci.* 131(4): 39880(1-8).
- [39] American Standard for Testing and Materials. 2007. Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement : ASTM D792-08. *Annual Book of ASTM Standards.* 08.01.
- [40] Mettler-Toledo, LLC. 2010. **Density Kit for Solids and Liquids Determination.** [Online]. Available : [http://th.mt.com/th/th/home/supportive_content/product_instructions/NC_density_OI/_jcr_content/download/file.res/Operating_Instructions_Density%20Kit_\(OP-EN\).pdf](http://th.mt.com/th/th/home/supportive_content/product_instructions/NC_density_OI/_jcr_content/download/file.res/Operating_Instructions_Density%20Kit_(OP-EN).pdf).
- [41] American Standard for Testing and Materials. 1992. Standards Test Method for Composition Analysis by Thermogravimetry : ASTM D1131. *Annual Book of ASTM Standards.* 14(02) : 712-716.
- [42] Faker, M. Aghjeh, R. Ghaffari, M. and Seyyedi, A. 2008. "Rheology, Morphology and Mechanical Properties of Polyethylene/Ethylene Vinyl Acetate Copolymer (PE/EVA) Blends." *Polymer.* 44 : 1834-1842.

ภาคผนวก

สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย

1. การเบิกจ่ายงบประมาณ

งวดที่ 1 42,500 บาท .85 % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน 1 ตุลาคม 2560.....

งวดที่ 2 7,500 บาท .15 % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน 6 มิถุนายน 2561.....

2. สรุปงบประมาณค่าใช้จ่าย

หมวดค่าใช้จ่าย	ค่าใช้จ่าย (บาท)
งบบุคลากร :ค่าจ้างชั่วคราว	-
งบดำเนินงาน	-
ค่าตอบแทน	-
ค่าใช้สอย	36,000.00
ค่าวัสดุ	14,000.36
ค่าสาธารณูปโภค	-
งบลงทุน: ค่าครุภัณฑ์	-
รวมงบประมาณที่จ่ายไปแล้ว	50,000.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัตินักวิจัย

ประวัติส่วนตัว

นางสุภารัตน์ รักชลธิ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชา เคมี คณะวิทยาศาสตร์

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วทบ. (เกียรตินิยม)	เคมีอุตสาหกรรม	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	พ.ศ. 2535
MSc	Polymer Science and Technology	Loughborough University	พ.ศ. 2537
PhD	Polymer Rheology	Loughborough University	พ.ศ. 2541

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ

- Polymer Processing and Compounding

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
พ.ศ. 2536-2541	ทุนเรียนปริญญาโท-เอก ๓ สาขาอาณาจักร	กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
พ.ศ. 2543	ทุนวิจัย พัฒนา และวิศวกรรมขนาดเล็ก	ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)
พ.ศ. 2547	ทุนวิจัยงบรายได้ คณะวิทยาศาสตร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2548	ทุนวิจัยงบรายได้ คณะวิทยาศาสตร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2550	ทุนวิจัยความร่วมมือกับเอกชน	บริษัท เวสเทิร์นดิจिटอล (ประเทศไทย) จำกัด
พ.ศ. 2552	ทุนงบประมาณแผ่นดิน	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2553	ทุนวิจัยความร่วมมือกับเอกชน	บริษัท เวสเทิร์นดิจिटอล (ประเทศไทย) จำกัด
พ.ศ. 2555-2557	ทุนวิจัยงบรายได้ คณะวิทยาศาสตร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. Haworth, B. and Jumpa, S., Understanding Elongational Flow Properties of Filled Polymer Melts for Plastics Blow Molding, *Food, Cosmetics and Drug Packaging*, 21(11), 213, 1998.
2. Haworth, B. and Jumpa, S., Extensional Flow Characterization and Extrusion Blow Molding of High Density Polyethylene Modified by Calcium Carbonate, *Plastics Rubber and Composites*, 28(8), 363, 1999.
3. Haworth, B. and Jumpa, S., Melt-State Elongational Rheometry of Mineral-Filled Polyethylene, *Polymer Testing*, 19(4), 459, 2000.
4. สุภารัตน์ รักชลธี ชนเรศ ประเสริฐวงศ์ และธราศรัย แสงภักดิ์, “ผลของชนิดของสารช่วยผสมต่อสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต”, *วารสารเทคโนโลยีสุรนารี*, 9(4), 253, 2545.
5. สุภารัตน์ รักชลธี กังสาด บัญตรา ญัฐนิชาธิ์ ศิริเจียรนัย และกัญญาวิวี สุวรรณชัย, “สมบัติของฟิล์มพอลิเอทิลีนที่ผสมสารเติมแต่งซีโอไลต์”, *วารสารวิทยาศาสตร์ มข.*, 30(4), 262, 2545.
6. สุภารัตน์ รักชลธี ปรมินทร์ ช้างเพชร และประภฤษฎ์ แสงทองอินทรีย์, “สมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารช่วยผสม”, *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*. 12(1), 27, 2546.
7. สุภารัตน์ รักชลธี พงษ์ธร แซ่ฮุย ธีระชาติ ก่อตระกูล และปานหทัย ชื่นพุดิ, ผลของเถ้าแกลบในสารตัวเติมผสมต่อสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ, *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*. 12(2), 13, 2546.
8. สุภารัตน์ รักชลธี ธีระชาติ ก่อตระกูล ปานหทัย ชื่นพุดิ และพงษ์ธร แซ่ฮุย, อิทธิพลของเถ้าแกลบในสารตัวเติมผสมต่อความสามารถในการขึ้นรูปและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ, *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์*. 12(3), 50, 2547.
9. Rukchonlatee, S., Amornsakchai, T. and Limpong, P., Properties of Calcium Carbonate- Filled Polyethylene Bottles Produced from Extrusion Blow Molding Process, *KMITL Science Journal*, 6(2b), 582, 2006.
10. Monprasit, P., Ritvirulh, C., Sooknoi, T., Rukchonlatee, S., Fuongfuchart, A. and Sirikittikul, D., Selective ethylene permeable zeolite composite double-layered film for novel modified atmosphere packaging, *Polymer Engineering and Science.*, 51(7), 1264, 2011. (Impact factor 2009: 1.248)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเสนอผลงานวิชาการ

1. Haworth, B. and Jumpa, S., Elongational Rheometry of Filled Polyethylene Melts, Loughborough Fillers Symposium II, 17th–18th September 1996, Loughborough, UK.
2. Haworth, B. and Jumpa, S., Processing Behavior of Filled HDPE for Blow Molding, Advances in Blow Molding: New Materials and Processes, 30th June – 1st July 1998, Loughborough, UK
3. Haworth, B., Jumpa, S., and Miller, N.A., Proceeding International Conference “PPS-15”, S’Hertogenbosch, The Netherlands, 1999, Polymer Processing Society, Paper 132.
4. Jumpa, S and Haworth, B., Extrusion Blow Moulding of CaCO₃-Filled HDPE Compounds, PPS Symposium, Thailand, P-50, 1999.
5. Jangchud, I. and Rukchonlatee, S., Porous Water Pipe made from Ground Rubber Tire (GRT) and High Density Polyethylene (HDPE): Rheology and Water Irrigation, *The 8th Pacific Polymer Conference Proceedings*, November 24-27, Bangkok, Thailand, 120, 2003.
6. Rukchonlatee, S., Water Vapor Permeability, Rheological and Mechanical Properties of Zeolite NaA –filled Linear Low Density Polyethylene, *The 8th Pacific Polymer Conference Proceedings*, November 24-27, Bangkok, Thailand, 134, 2003.
7. Ochaikul, D., Rukchonlatee, S., Soisant, P., Aramruang, S., and Fapratanchai, T., Paper Production and Properties from Bacterial Cellulose *Acetobacter xylinum* TISTR 967, *The 1st KMITL International Conference Proceedings*, August 25-26, Bangkok, Thailand, Vol.1, 153, 2004.
8. ระพี เจริญสูงเนิน ปุณณมา ศิริพันธ์ โนน ชลลดา ฤทธิวิรุฬห์ และสุภารัตน์ รักชลธิ์, การเตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่างพอลิ(สไตรีน-บิวทาไดอีน-สไตรีน) กับมอนตม์อริลโลไนต์ด้วยเทคนิคการหล่อแบบสารละลาย, การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 (TICe 17), 29-30 ตุลาคม, เชียงใหม่, 2550.
9. อภิษฐา เจริญประเสริฐ ปุณณมา ศิริพันธ์ โนน สุภารัตน์ รักชลธิ์ และชลลดา ฤทธิวิรุฬห์, ผลของสารช่วยผสมต่อสมบัติของวัสดุประกอบนาโน LDPE/MMT, การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 (TICe 17), 29-30 ตุลาคม, เชียงใหม่, 2550.
10. Monprasit, P., Ritvirulh, C., Rukchonlatee, S., Sooknoi, T. and Fuongfuchart, A., Study on Ethylene Gas Permeability of Double-layer Composite Film, *Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON)*, January 14-16, Naresuan University, Phitsanulok, Thailand, 82, 2009.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. ดวงใจ โอชัยกุล สุภารัตน์ รักชลธิ นवलพรรณ ณ ระนอง และพิชพันธ์ พงษ์สกุล, ผลของไคโตซานต่อการผลิตกระดาษจากเซลลูโลสแบคทีเรียและสมบัติที่ได้, การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48, เล่มที่ 6 สาขาวิทยาศาสตร์, กรุงเทพฯ, 313-320, 2552.
12. Moungrmee, N., Rukchonlatee, S. and Sooknoi, T, Improvement on Tensile Properties of Water-Permeable LDPE Film with EVA as Co-Matrix and Non-Reinforcing Zeolite Filler, *The 6th International Symposium on Advance Material in Asia-Pacific Rim (ISAMAP)*, November 21-23, Bangkok, Thailand, 121, 2009.
13. Monprasit, P., Ritvirulh, C., Rukchonlatee, S., Sooknoi, T. and Fuongfuchart, A., Tensile Properties of the Zeolite Composite Double-Layered Film, *The 6th International Symposium on Advance Material in Asia-Pacific Rim (ISAMAP)*, November 21-23, Bangkok, Thailand, 156, 2009.
14. Laowakul, S., Sooknoi, T., Ritvirulh, C., Rukchonlatee, S. and Fuongfuchart, A., Study on Tensile Properties of SEBS/LDPE and SEBS/OPP double-layer films for Packaging Application, *The 6th International Symposium on Advance Material in Asia-Pacific Rim (ISAMAP)*, November 21-23, Bangkok, Thailand, 163, 2009.
15. Laowakul, S., Ritvirulh, C., Sooknoi, T., Rukchonlatee, S., Fuongfuchart, A. and Sirikittikul, D., Ethylene Transmission Rate through Zeolite Modified Double-Layered Films for Packaging of Fresh Produces, *The 7th International Symposium on Advanced Materials in Asia-Pacific (ISAMAP)*, September 30-October 1, Ishikawa, Japan, 45, 2010.
16. Moungrmee, N., Sooknoi, T. and Rukchonlatee, S., Improved Water Vapor Permeability of Fresh Produces Packaging Film: Zeolite A-Filled LDPE/EVA, *The 7th International Symposium on Advanced Materials in Asia-Pacific (ISAMAP)*, September 30-October 1, Ishikawa, Japan, 49, 2010.
17. Rukchonlatee, S., Amornsakchai, T. and Payaksiri, N., Investigation on Extrusion Blow Molding Process and Properties of Modified CaCO₃-Filled HDPE Bottles, *The 7th International Symposium on Advanced Materials in Asia-Pacific (ISAMAP)*, September 30-October 1, Ishikawa, Japan, 147, 2010.
18. สมยศ รัตนไพบูลย์กิจ, ตะวัน สุขน้อย, ชลลดา ฤตวิรุฬห์ และสุภารัตน์ รักชลธิ, फिल्मพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ย่อยสลายได้ด้วยแสง, การประชุมวิชาการระดับชาติ “วิทยาศาสตร์วิจัย” ครั้งที่ 4, ณ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์, 12-13 มีนาคม, พิษณุโลก, 2554.

19. Jaisomboon, N., Sooknoi, T., Rukchonlatee, S., Enhancement of Water Vapor Permeation of LLDPE Film with EVA as Dispersed Phase, *The 38th Congress on Science and Technology of Thailand (STT38)*, October 17-19, Chiang Mai, Thailand, E_E0007, 2012.
20. Wiwattananukul, R., Sooknoi, T., Rukchonlatee, S. and Ritvirulh, C., Improved the ethylene transmission rate of LLDPE/SEBS blend film, *The Proceedings Pure and Applied Chemistry International Conference 2013 (PACCON 2013)*, January 23-25, Bangsaen, Thailand, 1033, 2013.
21. Chitraruwatkul, J., Ochaikul, D., Rukchonlatee, S. and Janvikul, W., Studied on Preparation and Antibacterial Activity of Zinc Oxide/Cellulose Composite Films, *International Conference on Engineering, Applied Science and Technology 2013 (ICEAST 2013)*, August 21-24, The Sukosol, Bangkok, Thailand, 2013.
22. Rukchonlatee, S., Napradit, S., Manusongtanakul, P., Juntima, S and Sooknoi, T., Effect of LLDPE/LDPE Ratio on Processability and Properties of LLDPE/LDPE/EVA Films, *2013 International Symposium on Technology for Sustainability (ISTS2013)*, November 20-21, IVE/VTC, Tsing Yi, Hong Kong, China, ID100, pp.114-115, 2013.
23. Pinsakul, S., Rukchonlatee, S., Monvisade, P. and Chaianit, V., Modified Plastisol Inks Based on Ethylene Vinyl Acetate and Ethylene Methyl Acrylate Copolymers, *2013 International Symposium on Technology for Sustainability (ISTS2013)*, November 20-21, IVE/VTC, Tsing Yi, Hong Kong, China, ID71, pp.73-74, 2013.
24. Sirichantan, T., Sooknoi, T., Yamaguchi, M. and Rukchonlatee, S., Enhancement of Water Vapor Permeation of LDPE Film with EMA as Dispersed Phase, *The Proceeding MACRO 2014 (2014 IUPAC World Polymer Congress)*, July 6 – 11, Chiang Mai International Convention and Exhibition Center (CMICE), Chiang Mai, Thailand, pp. 169-172, 2014.
25. Pinsakul, S., Monvisade, P., Rukchonlatee, S. and Chaianit, V., Potential Use of Modified Plastisol Inks Based on EVA/EVOH, *The Proceeding MACRO 2014 (2014 IUPAC World Polymer Congress)*, July 6 – 11, Chiang Mai International Convention and Exhibition Center (CMICE), Chiang Mai, Thailand, pp. 174-177, 2014.
26. Uttasuradee, M., Sooknoi, T. and Rukchonlatee, S., Improved Water Vapor Permeability of LDPE Films using EVOH or EVA Blends, *The Proceeding MACRO 2014 (2014 IUPAC World Polymer Congress)*, July 6 – 11, Chiang Mai International Convention and Exhibition Center (CMICE), Chiang Mai, Thailand, pp. 215-217, 2014.

27. Uttasuradee, M. and Rukchonlatee, S., Property Improvement of Linear Low Density Polyethylene/ Barium Sulfate Composites for Sea Fishery Application, *The Proceedings of Pure and Applied Chemistry International Conference 2015 (PACCON 2015)*, January 21-23, Bangkok, Thailand, pp. 416-419, 2015.
28. Sahassanon, T. Rukchonlatee, S., Sooknoi, T. and Ritvirulh, C., Improvement of Ethylene Permeation in LLDPE/SEBS Film with Zeolite Y, *The Proceedings of Pure and Applied Chemistry International Conference 2015 (PACCON 2015)*, January 21-23, Bangkok, Thailand, pp. 432-435, 2015.
29. Makphon, K., Ruckchonlatee, S., Sooknoi, T., Yamaguchi, M. and Ritvirulh, C., Study on LLDPE/SEBS/modified zeolite ZSM-5 blends for ethylene permeation improvement of packaging film, *The proceedings of The International Polymer Conference of Thailand (PCT-6)*, June 30- July 1, Patumwan Princess Hotel, Bangkok, Thailand, pp. 353-358, 2016.
30. Kunjit, P., Sooknoi, T., Maluangnont, T., Ruckchonlatee, S. and Ritvirulh, C., Photodegradable film prepared from LDPE/TiO₂ nanotube, *The proceedings of The International Polymer Conference of Thailand (PCT-6)*, June 30- July 1, Patumwan Princess Hotel, Bangkok, Thailand, pp. 452-456, 2016.
31. Amutnanon, P., Monvisade, P., Rukchonlatee, S. and Chaiyanit, V., Modified plastisol ink based on EVA/NR and EVA/ENR, *The proceedings of The International Polymer Conference of Thailand (PCT-6)*, June 30- July 1, Patumwan Princess Hotel, Bangkok, Thailand, pp. 267-272, 2016.
32. Rukchonlatee, S., Ochaikul, D., Suankaew, C. and Janvikul, W., Mangosteen shell extract/bacterial cellulose mat as potential antibacterial wound dressings, *The 14th International Symposium on Biocontrol and Biotechnology*, Saint-Petersburg, Pushkin, Russian Federation, Russia, 6 – 9 November, 2016.
33. Ritvirulh, C., Hongthong, K., Makphon, K., Rungroang C., Rukchonlatee, S. and Sooknoi, T., Selective Ethylene Permeability of LLDPE/SEBS/Zeolite ZSM-5 Films, *The 11th SPSJ International Polymer Conference (IPC2016)*, Fukuoka International Congress Center, Fukuoka, Japan, 13 – 16 December, 2016.
34. Rukchonlatee, S., Sonpoo, T., Deesamer, S. and Sooknoi, T., Improvement of Mechanical and Water Vapor Permeability Properties of LDPE/EVA/EVOH Films with Zeolite A, *The 11th SPSJ International Polymer Conference (IPC2016)*, Fukuoka International Congress Center, Fukuoka, Japan, 13 – 16 December, 2016.

35. Mahawanjarn, P., Piamsuwansiri, S., Pongtanapaisan, O., Ruckchonlatee, S., Sooknoi, T. and Ritvirulh, C., Photodegradable Film Prepared from LDPE/TiO₂ and LDPE/Hydrophobic TiO₂, The 11th SPSJ International Polymer Conference (IPC2016), Fukuoka International Congress Center, Fukuoka, Japan, 13 – 16 December, 2016.
36. Ruckchonlatee, S., Jaisomboon, N. and Sooknoi, T., Improvement of Water Vapor Permeability of LLDPE/EVA Film with Zeolite A as Filler, Key Engineering Materials, 730, 31-36, 2017.
37. Sonpoo, T. and Ruckchonlatee, S. Effect of Ethylene Vinyl Acetate Copolymer on Mechanical Properties of Bottles produced from High Density Polyethylene Mixed with Calcium Carbonate, The proceedings of The International Polymer Conference of Thailand (PCT-7), June 1-2, Amari Watergate Hotel, Bangkok, Thailand, pp. 170-174, 2017.
38. Makphon, K., Na Lampoon, C., Phanthong, P., Tumsa, R., Ritvirulh, C., Sooknoi, T. and Ruckchonlatee, S., Effect of Poly (Styrene-Ethylene-Butylene-Styrene) Type on Ethylene Gas Permeation Property of Linear Low Density Polyethylene Film, The proceedings of The International Polymer Conference of Thailand (PCT-7), June 1-2, Amari Watergate Hotel, Bangkok, Thailand, pp. 175-179, 2017.

บทความวิชาการที่เผยแพร่

1. สุภารัตน์ จำปา, “เครื่อง Uniaxial Elongational Rheometer สำหรับศึกษาสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว”, วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง, 10(1), 8, 2543.

งานแปลหนังสือ

1. สุภารัตน์ จำปา อะลูมิเนียม นานมีบุ๊กส์ กรุงเทพฯ 2542.
2. จินดา อุดชาชน ตะวัน สุชน้อย อธิพิล แจ้งซัด สุภารัตน์ จำปา และชลลดา ฤทธิวิรุฬห์ เคมี่ หลักสูตร แห่งชาติระดับมัธยมศึกษา (GCSE) ของประเทศอังกฤษ นานมีบุ๊กส์ กรุงเทพฯ 2542.

งานเขียนและเรียบเรียงหนังสือ

1. สุภารัตน์ รักชลธิ (กองบรรณาธิการ) สารระ...อะโรเมติกส์เฉลิมพระเกียรติ บริษัทอะโรเมติกส์ (ประเทศไทย) จำกัด 2549.
2. อธิพิล แจ้งซัด ชลลดา ฤทธิวิรุฬห์ สุภารัตน์ ปรัชญาวารากร สุภารัตน์ รักชลธิ และสมศักดิ์ วร มงคลชัย ปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้