

ศึกษาการเตรียมน้ำมันละหุ่งตัดแปรจากเทคนิคการบ่มสุกด้วยรังสี
อัลตราไวโอเลตเพื่อเป็นสารปรับปรุงแรงกระแทกสำหรับพอลิสไตรีน

**STUDY THE PREPARATION OF MODIFIED CASTOR OIL VIA
ULTRAVIOLET CURING TO BE USED AS AN IMPACT MODIFIER
FOR POLYSTYRENE**

อรุณี ผลเจริญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ศึกษาการเตรียมน้ำมันละหุ่งตัดแปรจากเทคนิคการบ่มสุกด้วยรังสี
อัลตราไวโอเลตเพื่อเป็นสารปรับปรุงแรงกระแทกสำหรับพอลิเอสไทริน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ศึกษาการเตรียมน้ำมันละหุ่งดัดแปรจากเทคนิคการบ่มสุกด้วยรังสี
อัลตราไวโอเล็ตเพื่อเป็นสารปรับปรุงแรงกระแทกสำหรับพอลิสไตรีน
Study the Preparation of Modified Castor Oil via Ultraviolet Curing
to be Used as an Impact Modifier for Polystyrene

ชื่อ - นามสกุล

นายอาทิตย์ ผลเจริญ

สาขาวิชา

วิศวกรรมวัสดุ

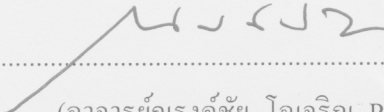
อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์กุลวดี สังข์สนิท, Ph.D.


ปีการศึกษา

2559

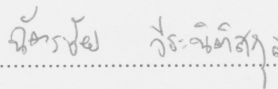
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....
(อาจารย์ณรงค์ชัย โอเจริญ, Ph.D.)

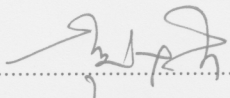
ประธานกรรมการ


.....
(อาจารย์กัลทิมา เชาว์ชาญชัยกุล, ปร.ด.)

กรรมการ


.....
(อาจารย์ฉัตรชัย วีระนิติสกุล, Ph.D.)

กรรมการ


.....
(อาจารย์กุลวดี สังข์สนิท, Ph.D.)

กรรมการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สิวกอ อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 19 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ศึกษาการเตรียมน้ำมันละหุ่งตัดแปรจากเทคนิคการบ่มสุกด้วยรังสีอัลตรา-
ไวโอเลตเพื่อเป็นสารปรับปรุงแรงกระแทกสำหรับพอลิस्टาไทริน

ชื่อ-นามสกุล นายอาฐิติ ผลเจริญ

สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์กุลวดี ตั้งขันนิต, Ph.D.

ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

สารปรับปรุงแรงกระแทกสำหรับพลาสติก โดยส่วนใหญ่สังเคราะห์จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียมที่มีการย่อยสลายได้ยากและใช้เวลาย่อยสลายนาน ดังนั้น จึงเกิดแนวคิดในการนำน้ำมันพืช มาตัดแปรด้วยเทคนิคการบ่มสุกด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต ให้มีลักษณะคล้ายวัสดุที่ยักนำมาใช้ปรับปรุงแรงกระแทก

งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการเตรียมน้ำมันละหุ่งตัดแปรด้วยการปรับโครงสร้างเคมี โดยการนำน้ำมันละหุ่งมาผสมสารละลายตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง โดยใช้อัตราส่วนการผสมสารละลายตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงในน้ำมันละหุ่งที่ 10 20 และ 30 ส่วนต่อร้อยโดยน้ำหนัก (phr) แล้วนำไปบ่มสุกด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดเอเป็นเวลา 15 นาที เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างให้มีลักษณะเชื่อมขวางบางส่วน แล้วนำไปคอมปาวด์กับพอลิस्टาไทรินด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งในอัตราส่วนน้ำมันละหุ่งตัดแปร 0 10 และ 20 phr เพื่อทำหน้าที่เป็นสารปรับปรุงแรงกระแทก

จากการศึกษา พบว่า น้ำมันละหุ่งตัดแปรที่ได้ไม่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายใดๆ และยังพบการลดลงของหมู่ไฮดรอกซิลที่น่าจะเป็นตำแหน่งที่เกิดการตัดแปรทำให้ได้โครงสร้างที่เกิดการเชื่อมขวางของน้ำมันละหุ่งตัดแปร และพบว่าพลาสติกคอมปาวด์มีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ค่าความเหนียว และการต้านทานการโก่งงอลดลงในขณะที่ค่าการต้านทานแรงกระแทกสูงขึ้น เมื่อผสมน้ำมันละหุ่งตัดแปรในปริมาณสูงขึ้น แสดงว่า น้ำมันละหุ่งตัดแปรสามารถเข้าไปแทรกตัวอยู่ในบริเวณออสฐานของพอลิस्टาไทริน และแสดงพฤติกรรมเป็นสารปรับปรุงแรงกระแทกที่ทำหน้าที่ดูดซับพลังงานเมื่อรับแรงกระแทก

คำสำคัญ : น้ำมันละหุ่งตัดแปร ตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง การบ่มสุกด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต

Thesis Title Study the preparation of modified castor oil via Ultraviolet curing to be used as an impact modifier for Polystyrene

Name-Surname Mr.Atiti Polcharoen

Program Materials Engineering

Thesis Advisor Miss Kullawadee Sungsanit, Ph.D.

Academic Year 2016

ABSTRACT

One limitation of general impact modifier additive in plastics manufacturing synthesized from petrochemical based industry is the difficulty and extended time duration to be degradable. To solve this problem, the concept to modify vegetable oil as an impact modifier additive is considered. To do this, Ultraviolet-A (UVA) irradiation, a curing process, is used so as to produce a rubber-like additive for impact modifier in Polystyrene.

The procedures to prepare modified castor oil via UVA curing process were following.: a) photo-initiator solution was mixed with castor oil in the ratios of 10, 20 and 30 portion per hundred ratios (phr), b) the mixtures were cured by using the UVA treatment for 15 minutes to partly transform the castor oil structural crosslinking, and c) the modified castor oil, an impact modifier, was compounded with polystyrene in melt blending in the ratios of 0, 10 and 20 phr, respectively by using two-roll mill process.

The results showed that the impact modifier was not soluble in any solvents, and the decreasing of hydroxyl groups which was probably at the cross-linked position was found. Moreover, three properties of compounded polystyrene, glass transition temperature, shear viscosity and flexural property were decreased, while its impact strength was remarkably increased. It directly varied to the ratios of the modified castor oil. These were due to the penetration of the modified castor oil into amorphous region of Polystyrene and the acting as an energy absorber in impact loading.

Keywords: Modified castor oil, Photo-initiator, UV curing

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาและความอนุเคราะห์จากหลายๆ ฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.กมลวดี สังข์สนิท เป็นอย่างสูงที่ให้ความรู้ แนะนำแนวทางในการทำวิจัย ขอขอบคุณ ดร.ณรงค์ชัย โอเจริญ และ ดร. ฉัตรชัย วีระนิติสกุล ที่เป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.กัลทิมา เชาว์ชาญชัยกุล ผู้ทรงคุณวุฒิที่ได้กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้ทำการศึกษาวิจัยนี้ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหะการ และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือในการเตรียมการและใช้ในการทดลอง ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการพลาสติก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอน และประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทางวิชาการต่างๆ

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่คอยให้ความช่วยเหลือ สนับสนุนในทุกๆด้าน และให้กำลังใจในการศึกษาจนประสบความสำเร็จ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ กมลวดี สังข์สนิท ผู้สนับสนุนทุนการศึกษา และเป็นທີ່ปรึกษาทางด้านการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ผู้วิจัย หวังว่างานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นประโยชน์และเป็นข้อมูลในการศึกษาสำหรับผู้ ที่สนใจ และขอขอบคุณ พี่ๆ น้องๆ และเพื่อนๆ ทุกๆท่านที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ใน ณ ที่นี้ด้วย

อาฉิฉิ ผลเจริญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(10)
สารบัญรูป.....	(12)
บทที่ 1 บทนำ.....	18
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	18
1.2 วัตถุประสงค์.....	19
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	20
1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับ.....	21
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและงานวิจัย.....	22
2.1 พอลิสไตรีน (Polystyrene).....	22
2.1.1 ลักษณะทั่วไปของพอลิสไตรีน.....	22
2.1.2 การสังเคราะห์พอลิสไตรีน.....	22
2.1.3 สมบัติของพอลิสไตรีน.....	25
2.1.4 การใช้งานพอลิสไตรีน.....	27
2.2 เทคนิคการปรับปรุงสมบัติของพอลิสไตรีน.....	31
2.2.1 การสังเคราะห์ร่วมกับพอลิเมอร์อื่นๆ(copolymerization).....	31
2.2.2 การเพิ่มสารเพิ่มสภาพพลาสติก.....	34
2.2.3 การทำพอลิเมอร์ผสม (Polymer blend).....	36

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3. น้ำมันละหุ่ง.....	39
2.3.1 กระบวนการผลิตและสังเคราะห์น้ำมันละหุ่ง	40
2.3.2 ประเภทน้ำมันละหุ่ง	41
2.3.3 สมบัติของน้ำมันละหุ่ง	42
2.3.4 การใช้งานน้ำมันละหุ่งในภาคอุตสาหกรรม	43
2.4 สารริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง(Photo-initiator).....	45
2.5 ตัวทำละลายสารริเริ่มปฏิกิริยา (Solvent for photoinitiator)	48
2.6 การบ่มด้วยรังสี	50
2.7. อุปกรณ์-เครื่องมือ สำหรับการวิจัย.....	53
2.7.1 ตู้บ่มสุกด้วยแสงอัลตราไวโอเลต	53
2.6.2พสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-Rolls Mill)	55
2.7.3 กระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัด	56
2.8 ทฤษฎีการทดสอบ.....	58
2.8.1 ทฤษฎีการทดสอบสมบัติเชิงกล.....	58
2.8.2 ทฤษฎีการทดสอบสมบัติทางกายภาพ.....	63
2.8.3 ทฤษฎีการทดสอบสมบัติทางความร้อน	74
2.8.4. การวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงพลวัต	78
2.8.5 ทฤษฎีการทดสอบโครงสร้างทางเคมี.....	79
2.8.6 ทฤษฎีการทดสอบทางเคมี.....	86
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	89
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	102
3.1. แผนการดำเนินงาน	102

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	105
3.3 แผนการดำเนินงาน	108
3.4 แผนผังแสดงขั้นตอนการตัดแปรน้ำมันละหุ่งด้วยสารริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง	109
3.5 ขั้นตอนการตัดแปรน้ำมันละหุ่งด้วยสารริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง	110
3.6 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน	112
3.7 ขั้นตอนการดำเนินงาน	114
3.8 การทดสอบทางกายภาพ	116
3.8.1 การทดสอบค่าความหนาแน่น	116
3.8.2. การทดสอบสมบัติการไหล.....	117
3.9 การทดสอบสมบัติทางความร้อน	118
3.9.1 การวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC)	118
3.10 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM.....	119
3.11 การทดสอบสมบัติเชิงกล	120
3.12 การวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงไดนามิก.....	122
3.13 ทดสอบวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี.....	124
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	127
4.1 การปรับปรุงสมบัติของพอลิस्टาไร์นโดยใช้ไขละหุ่งเป็นสารเติมแต่ง.....	127
4.1.1 การเตรียมพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง พอลิस्टาไร์นและไขละหุ่ง	127
4.1.2 การวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC).....	128
4.2.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry	140
4.2.3 การวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงพลวัต ด้วยเทคนิค DMA	141

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2.4 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค (FTIR).....	143
4.2.5 การวิเคราะห์ทางเคมีด้วยเทคนิค(LC-MS).....	144
4.2.6 การวิเคราะห์ทางเคมีด้วยเทคนิค CHN.....	144
4.3 การปรับปรุงสมบัติของพอลิสไตรีนโดยใช้น้ำมันละหุ่งคัดแปรเป็นสารเติมแต่ง	151
4.3.1 การเตรียมพลาสติกคอมปาวด์ระหว่างพอลิสไตรีนและน้ำมันละหุ่งคัดแปร	152
4.3.2 ผลการทดสอบค่าความหนาแน่น ด้วยเทคนิคชั่งน้ำ-ชั่งอากาศ	153
4.3.3. การศึกษาพฤติกรรมการไหลของพลาสติกคอมปาวด์.....	154
4.3.5 ผลการทดสอบการต้านทานการ โค้งงอ Flexural Strength.....	157
4.3.6 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก Impact Strength.....	158
4.3.7 ผลการทดสอบวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงพลวัต ด้วยเทคนิค DMA	161
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	163
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	163
5.2 ข้อเสนอแนะ	164
บรรณานุกรม.....	165
ภาคผนวก.....	170
ภาคผนวก ก วัสดุและสารเคมี.....	171
ภาคผนวก ข ผลการทดลองและรูปในการทดลอง	178
ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่	200
ประวัติผู้เขียน	218

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติทั่วไปของพอลิस्टาไทรินเกรด GPPS	27
ตารางที่ 2.2 แสดงข้อมูลการวัดความเข้มแสงของหลอดยี่ห้อ OSRAM	54
ตารางที่ 2.3 แสดงค่าความเข้มแสงที่วัดได้ภายในตู้บ่มสุก	54
ตารางที่ 2.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน	82
ตารางที่ 2.5 แสดงค่าการทดสอบการต้านแรงกระทำของ พอลิस्टาไทรินผสมยางธรรมชาติในอัตราส่วน ต่างๆ.....	93
ตารางที่ 2.6 แสดงขนาดของอนุภาคของ PB ที่กราฟใน PS ในแต่ละสูตร	96
ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงานของโครงการ	104
ตารางที่ 3.2 แสดงสูตรการผสมน้ำมันละหุ่งคัดแปร	110
ตารางที่ 3.3 สูตรการผสมการผสมพลาสติกคอมปาวด์	114
ตารางที่ 4.1 แสดงอัตราส่วนผสมพลาสติกคอมปาวด์ของ พอลิस्टาไทริน และ ไชละหุ่ง.....	127
ตารางที่ 4.2 สมบัติทางความร้อนของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง พอลิस्टาไทริน : ไชละหุ่ง ที่อัตราส่วน ต่างๆด้วยเทคนิค DSC.....	128
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการต้านทานการโค้งงอของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง พอลิस्टาไทริน และ ไชละหุ่ง ที่ปริมาณต่างๆ กัน ดังนี้.....	130
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระทำของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง พอลิस्टาไทริน และ ไชละหุ่งที่ปริมาณต่างๆ กัน ดังนี้.....	131
ตารางที่ 4.5 แสดงอัตราส่วนน้ำมันละหุ่งกับสารละลายริ่มปฏิกิริยาทางแสง	138
ตารางที่ 4.6 แสดงการทดสอบการละลายของน้ำมันละหุ่งคัดแปร.....	138
ตารางที่ 4.7 แสดงการวิเคราะห์ทางเคมีด้วยเทคนิค (LC-MS).....	144
ตารางที่ 4.8 แสดงค่า CHN ของน้ำมันละหุ่งคัดแปรในอัตราส่วนต่างๆ.....	144
ตารางที่ 4.9 แสดงอัตราส่วนผสมพลาสติกคอมปาวด์ของ พอลิस्टาไทรินและ น้ำมันละหุ่งคัดแปร.....	152

สารบัญตาราง(ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.10 แสดงความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมปาวด์พอลิสไตรีนกับน้ำมันละหุ่งดัดแปรในอัตราส่วนผสมต่างๆ	153
ตารางที่ 4.11 สมบัติทางความร้อนของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง พอลิสไตรีน : น้ำมันละหุ่งดัดแปร ที่อัตราส่วนต่างๆด้วยเทคนิค DSC	155
ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบการต้านทานการ โกงงอของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่างพอลิสไตรีน (PS) และ น้ำมันละหุ่งดัดแปร ที่ปริมาณต่างๆ กัน ดังนี้	157
ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทกของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่างพอลิสไตรีน (PS) และ น้ำมันละหุ่งดัดแปร ที่ปริมาณต่างๆ กัน ดังนี้	158



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงการผลิตเอทธิลเบนซีนจากอัลคิลเลชัน	23
รูปที่ 2.2 เอทธิลเบนซีนถูกดั่งไฮโดรเจนออก.....	24
รูปที่ 2.3 การสังเคราะห์ของพอลิสไตรีน	24
รูปที่ 2.4 โครงสร้างพอลิสไตรีน	25
รูปที่ 2.5 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากพอลิสไตรีน	28
รูปที่ 2.6 แสดงรูปตัวอย่าง โฟมอีพีเอส (EPS)	29
รูปที่ 2.7 แสดงรูปตัวอย่าง โฟมพีเอสพี (PSP)	29
รูปที่ 2.8 แสดงรูปตัวอย่าง Styrofoam	30
รูปที่ 2.9 แสดงการกระจายพลังงานแบบ Craze formation	36
รูปที่ 2.10 แสดงบริเวณรอยต่อระหว่างเฟสพอลิเมอร์และเฟสอีลาสโตเมอร์ใน polyblend	37
รูปที่ 2.11 การกระจายพลังงานด้วยกระบวนการหลอกลืน	37
รูปที่ 2.12 แสดงเฟสในพอลิเมอร์ผสม	37
รูปที่ 2.13 พอลิเมอร์เมทริกซ์ในลักษณะต่อกันเป็นร่างผึ้ง	38
รูปที่ 2.14 การกระจายตัวของสารทนแรงกระแทกอะคริลิก	38
รูปที่ 2.15 ตัวอย่างน้ำมันละหุ่ง	39
รูปที่ 2.16 ตัวอย่างต้นละหุ่ง	39
รูปที่ 2.17 สูตรโครงสร้างทางเคมีของน้ำมันละหุ่ง	40
รูปที่ 2.18 แสดงวัฏจักรในการใช้พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากน้ำมันที่มี triglyceride เป็นองค์ประกอบ	44
รูปที่ 2.19 แสดงการสังเคราะห์ alkyd polymer	44
รูปที่ 2.20 การแตกตัวให้อนุภาคอิสระของตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง	45
รูปที่ 2.21 สูตรโครงสร้างทางเคมี Bis Acyl Phosphine oxides (BAPO).....	46
รูปที่ 2.22 แสดงการดูดกลืนแสงของ Bis Acyl Phosphine oxides (BAPO).....	47
รูปที่ 2.23 แสดงลักษณะของสาร Bis Acyl Phosphine oxides (BAPO).....	48

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.24 สูตรโครงสร้างทางเคมี Hexanediol diacrylate (HDDA).....	48
รูปที่ 2.25 แสดงลักษณะของสาร Hexanediol diacrylate (HDDA).....	49
รูปที่ 2.26 กลไกการบ่มเร่งปฏิกิริยาดัวยรังสี.....	50
รูปที่ 2.27 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและปริมาณความถี่.....	51
รูปที่ 2.28 รังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ได้จากดวงอาทิตย์.....	52
รูปที่ 2.29 แสดงการทะลุทะลวงผ่านวัสดุของคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเล็ต.....	52
รูปที่ 2.30 ตู้บ่มสุกด้วยแสงอุลตราไวโอเล็ต.....	53
รูปที่ 2.31 แสดงการจัดวางหลอดในตู้บ่มสุกด้วยแสงอุลตราไวโอเล็ต.....	53
รูปที่ 2.32 แสดงความยาวคลื่นของหลอดยี่ห้อ OSRAM.....	55
รูปที่ 2.33 เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-Roll Mill).....	55
รูปที่ 2.34 เครื่องอัดแบบอัดโนมิตที่ใช้ในการอัดขึ้นงานทรงแบน.....	58
รูปที่ 2.35 การทดสอบการโค้งงอของพอลิเมอร์ (bend test).....	59
รูปที่ 2.36 Izod Impact Test.....	60
รูปที่ 2.37 Charpy Impact Test.....	61
รูปที่ 2.38 แนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับ Impact Transition Temperature และอิทธิพลของอุณหภูมิต่อความเหนียว (ความเหนียว-เปราะ) ของวัสดุ.....	62
รูปที่ 2.39 ลักษณะพื้นที่รอยแตกแบบเปราะและแบบเหนียวในการทดสอบแรงกระแทก.....	62
รูปที่ 2.40 ส่วนประกอบของเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM).....	64
รูปที่ 2.41 เครื่อง Scanning Electron Microscope.....	64
รูปที่ 2.42 รูปตัวอย่างแสดงรอยแตกหักของพอลิस्टาไทรนที่ได้จากการใช้ SEM.....	65
รูปที่ 2.43 รูปตัวอย่างแสดงขนาดอนุภาคของแร่โอลิมไนท์ที่กำลังขยาย100เท่า.....	65
รูปที่ 2.44 การไหลที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแผ่นประกบคู่ด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน.....	67
รูปที่ 2.45 การไหลที่เกิดจากความแตกต่างของความดันภายในท่อ.....	68

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนและอัตราเครียดเฉือนของของไหลในกลุ่มนอนนิวโตเนียน	69
รูปที่ 2.47 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดและค่าอัตราเครียดเฉือนของของไหลในกลุ่มนอนนิวโตเนียน	70
รูปที่ 2.48 เครื่องรีโอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราเครียดเฉือน.....	71
รูปที่ 2.49 เครื่อง capillary rheometer.....	72
รูปที่ 2.50 แสดงการจัดตั้งอุปกรณ์สำหรับทดสอบเพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะ	74
รูปที่ 2.51 หลักการทำงานของเครื่อง DSC.....	75
รูปที่ 2.52 ตัวอย่างกราฟเทอร์โมแกรมของพลาสติกคอมปาวด์	77
รูปที่ 2.53 เครื่องการวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงไดนามิก (DMA)	79
รูปที่ 2.54 ตัวอย่างกราฟการวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงไดนามิก (DMA)	79
รูปที่ 2.55 แสดงการทำงานของ interferometer.....	80
รูปที่ 2.56 การแทรกสอดของลำแสงที่สะท้อนกลับในกรณีที่เป็นแสงความถี่เดียว.....	81
รูปที่ 2.57 ตัวอย่างลักษณะกราฟที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR.....	85
รูปที่ 2.58 เครื่อง FTIR	85
รูปที่ 2.59 เครื่อง LC-MS.....	87
รูปที่ 2.60 หลักการทำงานของเครื่องมือวิเคราะห์ CHN.....	88
รูปที่ 2.61 เครื่อง CHN.....	88
รูปที่ 2.62 แสดงค่า Tensile Strength ของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง PS กับ SNS.....	90
รูปที่ 2.63 แสดงค่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง PS กับ SNS	90
รูปที่ 2.64 โครงสร้างทางเคมีของ Soft-N-Safe (SNS).....	91
รูปที่ 2.65 แสดงค่าการต้านทานแรงกระแทกของแผ่นฟิล์มพอลิสไตรีนที่เติมพลาสติกไซเซออร์แต่ละชนิด	92

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.66 แสดงค่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วของแผ่นฟิล์มพอลิสไตรีนที่เติมพลาสติกไซเซออร์แต่ ละชนิด	92
รูปที่ 2.67 กราฟการต้านทานแรงกระแทกของพอลิสไตรีนที่ผสมยางธรรมชาติในอัตราส่วนต่างๆ.....	94
รูปที่ 2.68 แสดงแผนผังของ interpenetrating polymer networks	94
รูปที่ 2.69 แสดงรูปถ่ายจาก SEM โดยแสดงภาพ interpenetrating polymer networks ของยางธรรมชาติ กับพอลิสไตรีน	95
รูปที่ 2.70 กราฟแสดงค่าการทดสอบการต้านทานแรงดึงของ พลาสติกคอมปาวด์ที่มีขนาดอนุภาค PB-g-PS แตกต่างกัน.....	96
รูปที่ 2.71 กราฟแสดงค่าการทดสอบการต้านทานแรงกระแทก(Impact strength).....	97
รูปที่ 2.72 ภาพถ่ายจาก TEM การกระจายตัวของ PB-g-PS ใน HIPS/PS (a – 100 nm , b – 180 nm , c – 230 nm และ d – 450 nm).....	98
รูปที่ 2.73 แสดงปฏิกิริยาของน้ำมันละหุ่งที่เติม bifunctional adipoyl chloride	99
รูปที่ 2.74 แสดงวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (TGA) ของน้ำมันละหุ่งที่ปรับโครงสร้างแบบร่างแห.....	100
รูปที่ 2.75 แสดงวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry ของน้ำมัน ละหุ่งที่ปรับโครงสร้างแบบร่างแห.....	101
รูปที่ 3.1 เม็ดพอลิสไตรีน (Polystyrene) เกรดเกรด GP 150.....	105
รูปที่ 3.2 น้ำมันละหุ่ง จาก บริษัท ไทยคลอสเตอร์ออยล์ จำกัด.....	105
รูปที่ 3.3 สารริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง Bis Acyl Phosphine oxides (BAPO)มีชื่อทางการค้าIRGACURE 819 จากบริษัท Ciba Specialty Chemicals	106
รูปที่ 3.4 ตัวทำละลาย Hexanediol diacrylate (HDDA)มีชื่อทางการค้า Laromer HDDA จากบริษัท BASF Corporation.....	106
รูปที่ 3.5 แผนการดำเนินงาน	108

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.6	แผนผังแสดงขั้นตอนการตัดแปรน้ำมันละหุ่งด้วยสารริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง	109
รูปที่ 3.7	ขั้นตอนการตัดแปรน้ำมันละหุ่งด้วยสารริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง	111
รูปที่ 3.8	แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมและวิเคราะห์น้ำมันละหุ่งตัดแปร	112
รูปที่ 3.9	แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน	113
รูปที่ 3.10	แสดงขั้นตอนการทำพลาสติกคอมปาวด์และการขึ้นรูปแผ่นทดสอบของพอลิสไตรีนกับน้ำมัน ละหุ่งที่ตัดแปร	115
รูปที่ 4.1	แสดงลักษณะตัวอย่างที่อัดขึ้นรูปของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่างพอลิสไตรีนกับไขละหุ่งใน อัตราส่วนต่างๆ	128
รูปที่ 4.2	เทอร์โมแกรมแสดงสมบัติทางความร้อนของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่างพอลิสไตรีน กับไขละหุ่ง	129
รูปที่ 4.3	ค่าการทดสอบการต้านทานการ โกงงอของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง PS : Castor Wax	130
รูปที่ 4.4	ค่าการทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก (Izod impact strength) ของพลาสติกคอมปาวด์ ระหว่าง PS : Castor Wax	132
รูปที่ 4.5	ลักษณะสัณฐานวิทยาของพลาสติกคอมปาวด์ผสมระหว่าง PS:Castor Wax	134
รูปที่ 4.6	กราฟแสดงค่าโมดูลัสสะสมต่ออุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่างพอลิสไตรีน กับไขละหุ่ง	135
รูปที่ 4.7	กราฟแสดงค่าแทนเคลต้าของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง PS : Castor Wax	136
รูปที่ 4.8	แสดงลักษณะน้ำมันละหุ่งตัดแปรในอัตราส่วนต่างๆ	137
รูปที่ 4.9	แสดงลักษณะน้ำมันละหุ่งตัดแปรที่แช่อยู่ในตัวทำละลาย THF	139
รูปที่ 4.10	เทอร์โมแกรมแสดงสมบัติทางความร้อนของน้ำมันละหุ่งตัดแปร	140
รูปที่ 4.11	กราฟแสดงค่าโมดูลัสสะสมต่ออุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นของน้ำมันละหุ่งตัดแปร	141
รูปที่ 4.12	กราฟแสดงค่าแทนเคลต้าของน้ำมันละหุ่งตัดแปร	142

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.13 กราฟการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของน้ำมันละหุ่งดัดแปรด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)	143
รูปที่ 4.14 แสดงค่า CHN ของน้ำมันละหุ่งดัดแปรในอัตราส่วนต่างๆ.....	145
รูปที่ 4.15 แสดงลักษณะพลาสติกคอมปาวด์ระหว่างพอลิสไตรีนกับน้ำมันละหุ่งดัดแปรในอัตราส่วนต่างๆ.....	153
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมปาวด์พอลิสไตรีนกับน้ำมันละหุ่งดัดแปรในอัตราส่วนผสมต่างๆ.....	154
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงพฤติกรรมการไหลของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่างพอลิสไตรีนกับน้ำมันละหุ่งดัดแปรในอัตราส่วนต่างๆ.....	154
รูปที่ 4.18 แสดงสมบัติทางความร้อนของพลาสติกคอมปาวด์.....	156
รูปที่ 4.19 ค่าการทดสอบการต้านทานการโก่งงอ (Flexural Strength)ของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง PS : น้ำมันละหุ่งดัดแปร.....	157
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงค่าการต้านทานแรงกระแทกพลาสติกคอมปาวด์ระหว่างพอลิสไตรีน (PS) และน้ำมันละหุ่งดัดแปร ที่ปริมาณต่างๆ	159
รูปที่ 4.21 ลักษณะสัญญาณวิทยาของพลาสติกคอมปาวด์ผสมระหว่างพอลิสไตรีน:น้ำมันละหุ่งดัดแปร ที่กำลังขยาย100 และ1000 เท่า.....	160
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงค่าโมดูลัสสะสมต่ออุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่างพอลิสไตรีนกับน้ำมันละหุ่งดัดแปร	161
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงค่าแทนเคลต้าของพลาสติกคอมปาวด์.....	162

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

พอลิสไตรีน (Polystyrene) เป็นหนึ่งในพอลิโอเลฟินที่ถูกใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากพอลิสไตรีนสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น กล่องโฟมใส่อาหาร อุปกรณ์เครื่องเขียนของเด็กเล่น และชิ้นส่วนยานยนต์ เป็นต้น โดยทั่วไปพอลิสไตรีนมีลักษณะการจัดเรียงตัวแบบอสัณฐาน และมีสมบัติที่เด่นคือ ความแข็งแรงสูง ทนต่อกรดและเบส โปร่งแสง อีกทั้งยังสามารถขึ้นรูปได้ง่าย แต่พอลิสไตรีนยังมีข้อด้อยหลายประการ เช่น เปราะแตกหักง่าย และทนต่อความร้อนได้ต่ำ จึงได้มีการปรับปรุงสมบัติของพอลิสไตรีนในรูปแบบต่างๆ เช่น โดยการสังเคราะห์ร่วมกับ พอลิเมอร์ตัวอื่นๆ ที่เรียกว่า สไตรีนโคพอลิเมอร์ หรือ การใช้สารเติมแต่งประเภทสารเพิ่มสภาพพลาสติก (Plasticizer) และสารเพิ่มแรงกระแทก (Impact Modifier) [1-3] ซึ่งสารเติมแต่งเหล่านี้ทำมาจากสารเคมีที่มาจากปิโตรเคมี จึงทำให้เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม

ปัจจุบันพอลิสไตรีนถูกแบ่งเกรดการใช้งานออกเป็น 2 เกรดหลักๆ คือ พอลิสไตรีนชนิดธรรมดา (General Purpose Polystyrene, GPPS) จะแข็งแต่เปราะ แต่ยังคงรักษาสมบัติทางแสง เมื่อเปรียบเทียบกับพลาสติกชนิดต่างๆ ไป อย่าง พอลิเอทิลีน (Polyethylene), (PE) หรือ พอลิโพรพิลีน (Polypropylene), (PP) [4] ส่วนพอลิสไตรีนชนิดพิเศษ เช่น ชนิดทนแรงกระแทก (High Impact Polystyrene, HIPS) และ โคพอลิเมอร์อื่นของพอลิสไตรีนจะมีความเหนียวกว่าแต่จะขาดสมบัติด้านความโปร่งแสง

ละหุ่ง เป็นพืชที่สามารถนำเมล็ดมาสกัดน้ำมันได้ เป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย น้ำมันละหุ่งเป็นน้ำมันพืชที่ได้จากเมล็ดละหุ่ง เมล็ดละหุ่งประกอบด้วย ส่วนของเปลือกหุ้ม (hull) ที่ไม่มีน้ำมัน มีน้ำหนัก 20 - 25 เปอร์เซ็นต์ และเนื้อใน ซึ่งมีสีขาว มีน้ำมัน 60 - 65 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นละหุ่งทั้งเมล็ดจึงมีปริมาณน้ำมัน 46 - 50 เปอร์เซ็นต์ ปกติภายในเมล็ดมีเอนไซม์ที่สามารถสกัดออกมาได้ด้วยอีเทอร์ เอนไซม์นี้จะย่อยน้ำมันให้เป็นกรดไขมันอิสระได้

น้ำมันละหุ่งมีคุณสมบัติเป็นกรด มีค่า pH 4.7 –5.0 เป็นวัตถุดิบที่สำคัญสำหรับอุตสาหกรรมเคมีและไม่สามารถหาน้ำมันชนิดอื่นมาทดแทน น้ำมันละหุ่งจัดอยู่ในพวกที่ไม่ระเหย (Non-drying type) และสามารถแปรรูปโดยกรรมวิธีทางเคมีได้ น้ำมันละหุ่งมีความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) และมีความหนืด (Viscosity) ที่คงที่ในสภาพอุณหภูมิสูงสูงกว่าน้ำมันพืชชนิดอื่น และเป็นสารที่มีคุณสมบัติพิเศษซึ่งสามารถใช้ประโยชน์ทางอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นน้ำมันที่มีความหนืดสูงมาก เหมาะที่จะใช้ผสมทำน้ำมันหล่อลื่นเครื่องจักรที่มีความร้อนสูง เช่น รถไฟและเครื่องบินไอพ่น เป็นต้น ใช้เป็นของเหลวในระบบไฮดรอลิก ใช้เป็นตัวเร่งสีให้แห้ง (Drying agent) ใช้ผสมทำสี ทำน้ำมันชักแห้ง น้ำมันขัดเงา ใช้ทำกรดเซบาซิก (Sebacic acid) ซึ่งใช้เป็นส่วนผสมทำพลาสติก ไนลอน และเส้นใยเทียม ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ใช้ทำสบู่ เครื่องสำอาง หนัเทียม เกสซ์กันท์ สีย้อมผ้า สารเคลือบป้องกันและใช้ในการผลิตสินค้าอุตสาหกรรมอีกมากมายหลายอย่าง[5]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Markus Klinger และคณะ [6] ได้นำน้ำมันละหุ่งที่ผสมด้วยกรดอะซิติกซึ่งทำให้ได้สารเพิ่มสภาพพลาสติก ที่มีชื่อทางการค้า SNS (Soft-N-Safe) นำมาปรับปรุงสมบัติของพอลิสไตรีนพบว่า มีสมบัติการต้านทานแรงกระแทกได้ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงคล้ายมีค่าลดลง เมื่อผสม SNS ลงไปในพอลิสไตรีน ดังนั้น งานวิจัยจึงมีแนวคิดในการตัดแปรน้ำมันละหุ่งมาใช้เป็นสารเติมแต่ง เพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิสไตรีน โดยการนำเทคนิคการบ่มสุกด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต มาใช้กับน้ำมันละหุ่งเพื่อให้ได้โครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่ขึ้น และมีสมบัติที่เหมาะสมกับการนำมาเป็นสารเติมแต่งในพอลิสไตรีน

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อเตรียมสารเติมแต่งชนิดปรับปรุงแรงกระแทกจากการตัดแปรน้ำมันละหุ่งโดยใช้เทคนิคการบ่มสุกด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต

1.2.2 เพื่อเตรียมพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง พอลิสไตรีน (Polystyrene) และน้ำมันละหุ่งที่ผ่านการตัดแปร โดยใช้เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง ที่ปริมาณการเติมน้ำมันละหุ่งที่ผ่านการตัดแปรในปริมาณ 0 10 และ 20 ส่วนต่อร้อยส่วนโดยน้ำหนัก

1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติของ พอลิสไตรีน (Polystyrene) ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยน้ำมัน
ละหุ่งตัดแปร ในปริมาณต่าง ๆ กัน เช่น การศึกษาสมบัติเชิงกล ความร้อน การไหล และ กายภาพ เป็น
ต้น

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ศึกษาสมบัติเบื้องต้นของพอลิสไตรีนเกรดชนิดและน้ำมันละหุ่งจาก บริษัท ไทยคาสเตอร์
ออยล์ จำกัด

1.3.2 ศึกษาการเตรียมสารเติมแต่งชนิดปรับปรุงแรงกระแทกจากการตัดแปรน้ำมันละหุ่งโดย
ใช้อัตราส่วนของสารละลายตัวเริ่มปฏิกิริยาทางแสง (photo-initiator solution) ที่ 10 20 และ 30 phr
โดยการใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง Bis Acyl Phosphine oxides (BAPO) และตัวทำละลายตัวริเริ่ม
ปฏิกิริยาทางแสง Hexanediol diacrylate (HDDA) ใช้การบ่มสุกด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 15 นาที
ในการตัดแปรน้ำมันละหุ่ง

1.3.3 ศึกษาสมบัติของน้ำมันละหุ่งที่ผ่านการตัดแปร โดยการทดสอบสมบัติทางความร้อน
และวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีและขนาดโมเลกุลของน้ำมันละหุ่ง

1.3.4 เตรียมพลาสติกคอมปาวด์ระหว่างพอลิสไตรีนและน้ำมันละหุ่งที่ผ่านการตัดแปร โดย
เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง ในปริมาณน้ำมันละหุ่งที่ผ่านการตัดแปร 0 10 และ 20 ส่วนต่อร้อยส่วนโดย
น้ำหนัก

1.3.5 ทดสอบสมบัติพลาสติกคอมปาวด์ เช่น อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ค่าความ
หนาแน่น ดัชนีการไหล การต้านทานการโค้งงอ การทนแรงกระแทก วิเคราะห์พื้นผิวการแตกหักของ
วัสดุคอมปาวด์ วิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงไดนามิก และ วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี เป็นต้น

1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับ

- 1.4.1 รู้วิธีเตรียมสารเติมแต่งชนิดปรับปรุงแรกกระทกจากการตัดแปรน้ำมันละหุ่งโดยใช้เทคนิคการบ่มสุกด้วยแสงอัลตราไวโอเลต
- 1.4.2 รู้จักสมบัติทั่วไปของพอลิस्टาไทรนเกรดชนิดและน้ำมันละหุ่ง
- 1.4.3 สามารถปรับปรุงสมบัติด้านทานแรงกระทกและอื่นๆของพอลิस्टาไทรนได้
- 1.4.4 สามารถเพิ่มคุณค่าการใช้งานน้ำมันละหุ่ง เป็นพลาสติกไซเซอร์เชิงชีวภาพ



บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและงานวิจัย

2.1 พอลิสไตรีน (Polystyrene)

2.1.1 ลักษณะทั่วไปของพอลิสไตรีน

พอลิสไตรีน เป็นโพลิเมอร์ที่จัดเป็นพวกเทอร์โมพลาสติกที่มีการจัดเรียงตัวภายในโมเลกุลเป็นแบบอะแทคติก (atactic) ทำให้อยู่ในรูปของโพลิเมอร์อสัณฐาน (amorphous) จึงมีลักษณะโปร่งแสงและใส นอกจากนี้ พอลิสไตรีนยังมีคุณสมบัติเด่นๆ อีกคือ มีความแข็งแรงมาก ไม่ยืดหยุ่น และเปราะ ไม่ดูดความชื้นและน้ำ ไม่มีรส ไม่มีกลิ่น เป็นฉนวนไฟฟ้า มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature, T_g) ประมาณ 100 องศาเซลเซียส จึงทนความร้อนได้ต่ำถ้าสัมผัสกับแสงแดดที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานๆ อาจเปลี่ยนเป็นสีเหลืองและเกิดรอยแตกได้ เมื่อต่อสารเคมี ทนต่อกรดแก่และเบสแก่ กันการซึมผ่านของก๊าซได้ดีแต่เปราะ อีกทั้งยังขึ้นรูปแบบต่างๆ ได้ง่ายอีกด้วย[7]

2.1.2 การสังเคราะห์พอลิสไตรีน

พอลิสไตรีนได้จากการสังเคราะห์สไตรีนมอนอเมอร์ด้วยวิธี โพลิเมอร์ไรเซชันแบบเติมได้เป็นพอลิสไตรีนชนิดธรรมดา (general purpose polystyrene GPPS) การนำพอลิสไตรีนมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ได้รับความนิยมมานาน เนื่องจากขึ้นรูปง่าย และมีความใส ทำให้มองเห็นผลิตภัณฑ์ที่บรรจุได้ชัดเจน พอลิสไตรีนทั่วไป ส่วนใหญ่ได้จากการบวนการผลิตแบบรวมมวล (mass) หรือ บัลค์ (bulk polymerization) แต่จะพบปัญหาการระบายความร้อน บางครั้งจึงเปลี่ยนมาผลิตโดยกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบแขวนลอย (suspension polymerization) ได้เม็ดพลาสติกขนาดเล็กออกมาโดยตรง แต่ควบคุมคุณภาพ ปริมาณ และ ขนาดยาก มักมีปัญหาเรื่องสีเพี้ยนไป ไม่ใสดังต้องการอีกทั้งไม่สามารถผลิตได้ต่อเนื่อง[7]

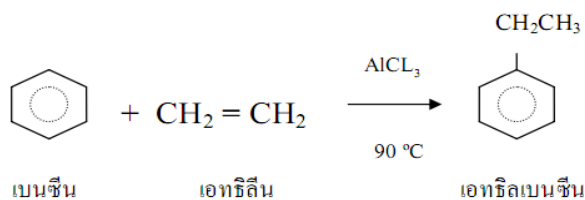
กระบวนการเกิดพอลิสไตรีน (Polymerization of styrene)

กระบวนการเกิดพอลิสไตรีนโดยทั่วไปเกิดจากสไตรีนมอนอเมอร์ชนิดเดียวกันเชื่อมพันธะระหว่าง C กับ C โดยการแตกพันธะคู่ของสไตรีนมอนอเมอร์ โดยขบวนการเกิดนั้นสามารถแบ่งออกเป็นได้ 3 ขั้นตอนดังนี้

1. ขั้นริเริ่ม (initiation step) โดยขั้นตอนนี้ใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาทำให้พันธะคู่ของสไตรีนมอนอเมอร์แตกออกเป็นพันธะเดี่ยวทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (Free-radical) สามารถทำปฏิกิริยาได้ว่องไว
2. ขั้นแผ่ขยาย (propagation step) ขั้นตอนนี้เป็นการทำปฏิกิริยาของสไตรีนมอนอเมอร์ที่เข้าไปกระทำที่ปลายสายโซ่ส่วนที่เป็นอนุมูลอิสระ (Free-radical) ทำให้สายโซ่ยาวอย่างรวดเร็ว
3. ขั้นสิ้นสุด (termination step) ในขั้นนี้เกิดปฏิกิริยาระหว่างปลายของสายโซ่ของสไตรีนที่เกิดเป็นอนุมูลอิสระ (Free-radical) มาเชื่อมต่อกันเองทำให้เกิดปฏิกิริยาสิ้นสุด [8]

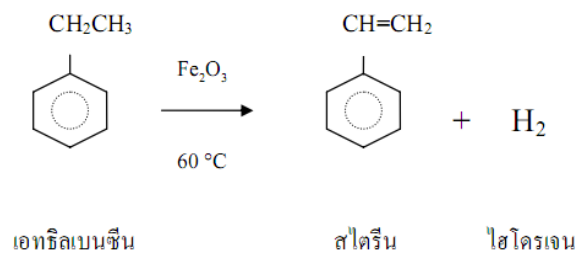
ขั้นตอนการผลิตสไตรีนมอนอเมอร์ แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ

ขั้นตอนที่ 1 ผลิตเอทิลเบนซีน (ethylbenzene) จากอัลคิลเลชัน (alkylation) ของเบนซีนถูกนำมาทำปฏิกิริยากับเอทิลีนในปฏิกิริยา Friedel-Crafts โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น $AlCl_3$



รูปที่ 2.1 แสดงการผลิตเอทิลเบนซีนจากอัลคิลเลชัน [8]

ขั้นตอนที่ 2 เอทิลเบนซีนถูกดึงไฮโดรเจนออก (dehydrogenated) เป็นสไตรีน (styrene) โดยให้ความร้อน และมีเหล็กออกไซด์ (iron oxide) หรือแมกนีเซียมออกไซด์ (magnesium oxide) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส สไตรีนที่ได้ยังมีความบริสุทธิ์ไม่เพียงพอ ต้องนำไปผ่านกระบวนการกลั่นจึงจะได้สไตรีนที่มีความบริสุทธิ์สูงสำหรับการผลิตพอลิสไตรีน

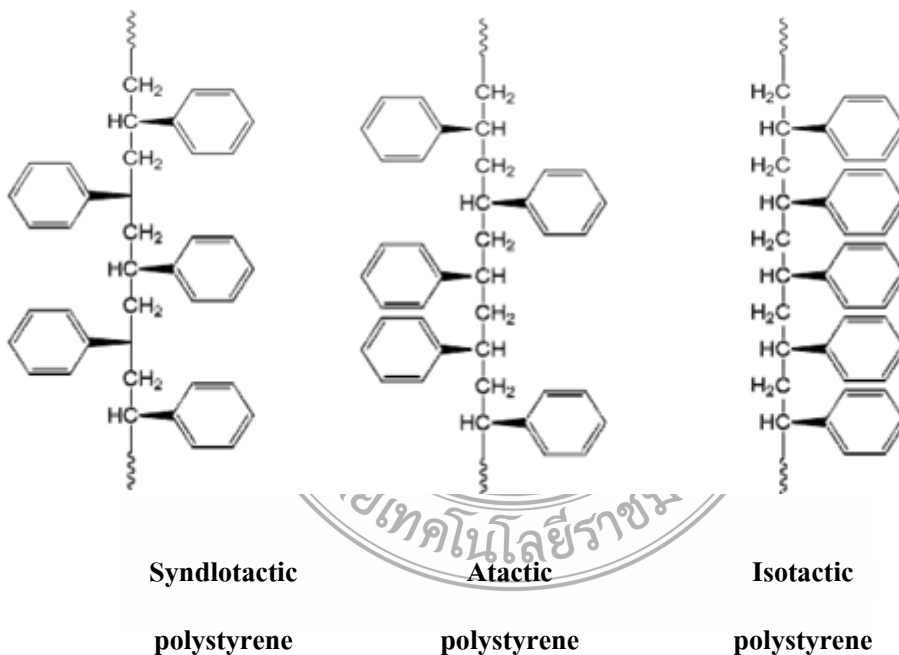


รูปที่ 2.2 เอทิลเบนซีนถูกดึงไฮโดรเจนออก[8]

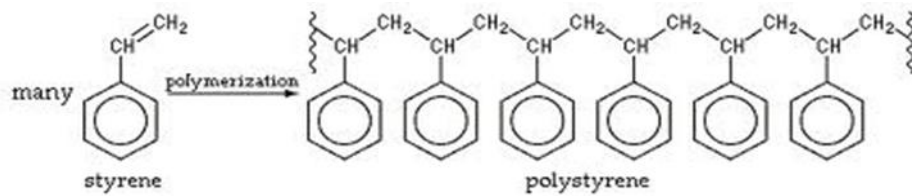
โครงสร้างของพอลิสไตรีน

พอลิสไตรีนทางการค้าเป็นพอลิเมอร์โซ่ตรงแบบอะแทคติก คือ การเรียงตัวของกลุ่ม ฟังก์ชันอะตอมไม่สม่ำเสมอในแนวทิศทางเดียวกัน[8]

โครงสร้างทางเคมี



รูปที่ 2.3 การสังเคราะห์ของพอลิสไตรีน [9]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างพอลิสไตรีน [9]

2.1.3 สมบัติของพอลิสไตรีน

สมบัติทางการไหล

พอลิสไตรีนเป็นของไหลแบบ non-Newtonian ที่มีคุณสมบัติเป็น viscoelastic คือพฤติกรรมดังกล่าวจะแสดงสมบัติของแข็ง ที่ยืดหยุ่น (elastic) และของเหลวหนืด (viscous) โดยที่สมบัติทางด้านการเปลี่ยนแปลงรูปร่างดังกล่าวขึ้นอยู่กับเวลา อุณหภูมิ ความเค้น (stress) และอัตราการความเครียด (strain rate) [10]

สมบัติทางกล

พอลิสไตรีนมีโครงสร้างเป็นอสัณฐานสูงจึงส่งผลให้มีความเปราะสูง เป็นพลาสติกที่มีความแข็ง มีน้ำหนักเบา มีความถ่วงจำเพาะ 0.89 - 1.1 มีความหดตัวน้อยมาก มีความคงรูปดี แต่เปราะ สามารถทำเป็นสีต่างๆได้ [10]

สมบัติทางความร้อน

เนื่องจากพอลิสไตรีนเป็นพอลิเมอร์อสัณฐานไม่มีส่วนของผลึกในโครงสร้างจึงไปปรากฏอุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature, T_m) มีแต่การเปลี่ยนอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว T_g (glass transition temperature) ที่ 100 องศาเซลเซียส แต่อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์ ออสัณฐานหากทำการให้อุณหภูมิที่สูงขึ้นก็จะทำให้เกิดการหลอมตัวได้เช่นกัน สำหรับอุณหภูมิการหลอมตัวของพอลิสไตรีนอยู่ในช่วง 158 – 180 องศาเซลเซียส[10]

สมบัติทางเคมี

พอลิสไตรีนจะมีความสามารถทนกรด ค้าง ได้อ่อนๆ ทนสารเคมีจำพวก Alcohol (เช่น methanol , ethanol) และ Aliphatic hydrocarbons (เช่น butane , hexane) ไม่ทำปฏิกิริยากับความชื้น(ไม่

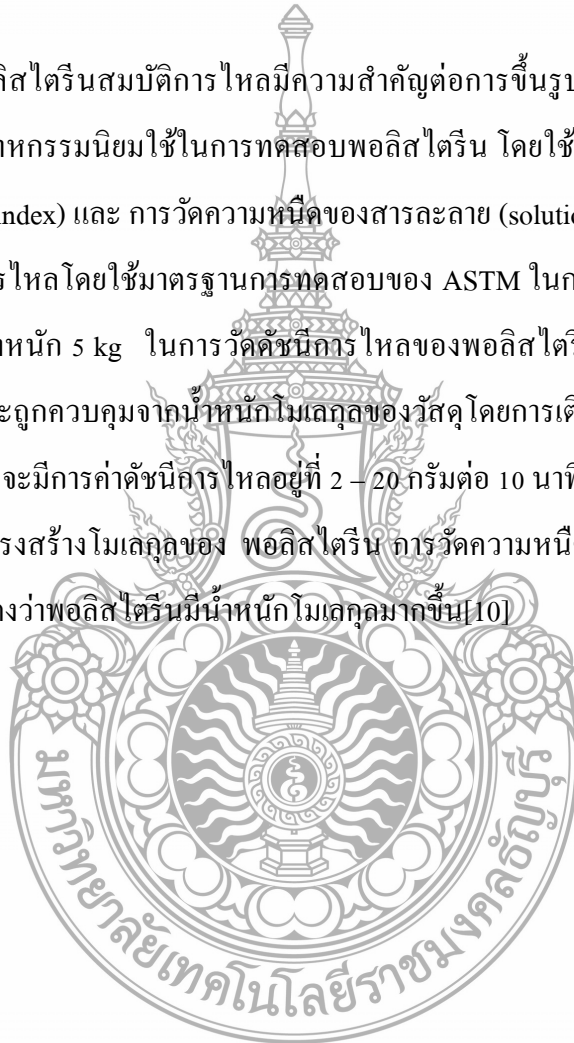
ดูดซับความชื้น) พอลิสไตรีนจะละลายในสารจำพวก Aromatic hydrocarbon (เช่น benzene , xylene) และ Chlorinated aliphatic hydrocarbon (เช่น chloroform , methylene) [10]

สมบัติทางแสง

พอลิสไตรีนถือได้ว่าเป็นพลาสติกที่มีความใสสูง มีค่าการหักเหแสง 1.58 – 1.59 และมีค่าความใส 88 – 90 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความทึบแสง 0.1 - 1.1 เปอร์เซ็นต์

การขึ้นรูปพอลิสไตรีนสมบัติการไหลมีความสำคัญต่อการขึ้นรูปพอลิสไตรีนเป็นอย่างมาก โดยได้มี 2 วิธีที่ภาคอุตสาหกรรมนิยมใช้ในการทดสอบพอลิสไตรีน โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์การวัดดัชนีการไหล (melt flow index) และ การวัดความหนืดของสารละลาย (solution viscosity)

การวัดดัชนีการไหลโดยใช้มาตรฐานการทดสอบของ ASTM ในการศึกษาโดยอุณหภูมิที่ 200 องศาเซลเซียส และใช้น้ำหนัก 5 kg ในการวัดดัชนีการไหลของพอลิสไตรีน ค่าดัชนีการไหลของพอลิสไตรีนโดยทั่วไปแล้วจะถูกควบคุมจากน้ำหนักโมเลกุลของวัสดุ โดยการเติมสารหล่อลื่นชนิด mineral oil พอลิสไตรีนโดยทั่วไปจะมีการค่าดัชนีการไหลอยู่ที่ 2 – 20 กรัมต่อ 10 นาที การละลายพอลิสไตรีนในตัวทำละลายเป็นศึกษาโครงสร้างโมเลกุลของ พอลิสไตรีน การวัดความหนืดของสารละลายโดยการใช้ตัวทำละลายที่เพิ่มขึ้นแสดงว่าพอลิสไตรีนมีน้ำหนักโมเลกุลมากขึ้น[10]



ตารางที่ 2.1 สมบัติทั่วไปของพอลิไสตรีนเกรด GPPS [10]

สมบัติทางกล	พอลิไสตรีน เกรด GPPS	หน่วย
Tensile strength	mN/m ²	34.5 – 48.3
Elongation at break	%	20 - 30
Modulus in tension	mN/m ²	2700-3450
Impact strength	J/m	37-59
Flexural strength	mN/m ²	48.3-75.8
Deflection	in	0.15-0.35
Hardness	Rockwell scale	M45 – M60
สมบัติทางไฟฟ้า และ อื่นๆ	พอลิไสตรีน เกรด GPPS	หน่วย
Dielectric strength	V/mill	500-700
Volume resistivity	Ω -cm	10 ¹⁷ - 10 ¹⁹
Dielectric constant	cps	2.45-2.65
Power factor of dissipation	cps	10 – 30*10 ⁻⁸
Arc resistance	S	60 -135
Heat distortion	°F	170-180
Water absorption	(in 24 hrs), %	0.03 – 0.04

2.1.4 การใช้งานพอลิไสตรีน

ผลิตภัณฑ์ทั่วไปที่ได้จากพอลิไสตรีน

พอลิไสตรีน มีลักษณะเป็นเหลว เป็นผง และเป็นของแข็ง เหมาะสำหรับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีต่างๆเช่น ขบวนการฉีดขึ้นรูป(injection molding) ขบวนการอัดรีด (Extrusion) เป็นต้น สามารถนำมาทำผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายเช่น บรรจุภัณฑ์ ภาชนะ ส่วนประกอบต่างๆในเครื่องไฟฟ้า ของเล่น อุปกรณ์การเรียน อุปกรณ์ทางการแพทย์ และอื่นๆ ตัวอย่างเช่น ถาดหลุมใส่ขนม กล่องบรรจุอาหารและผลไม้ ถ้วยจาน แก้วน้ำ ซ้อนส้อม อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ชิ้นส่วนในตู้เย็น ของเล่นเด็ก

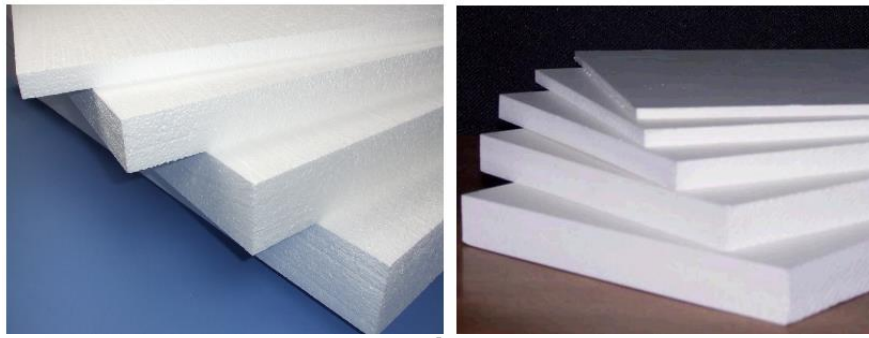
โมเดล ค้าปลีกสำหรับเด็ก ไม้บรรทัด ขวดหรือกระป๋องใส่ยา เฟอร์นิเจอร์บางอย่าง โฟมกันแตก สำหรับบรรจุภัณฑ์ ฉนวนความร้อน ฟิล์มห่อผักและผลไม้สด เนื่องจากมีความใสอากาศซึมผ่านได้ง่าย[7]



รูปที่ 2.5 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากพอลิสไตรีน[13-14]

พอลิสไตรีนผลิตภัณฑ์ที่ได้จากพอลิสไตรีนคือ โฟมพอลิสไตรีนซึ่งโฟมพอลิสไตรีนมีสมบัติที่เด่นคือ น้ำหนักเบา ขึ้นรูปง่าย ราคาถูก สามารถใช้เป็นฉนวนกันความร้อนได้ดี โดยในการขึ้นรูป โฟมพอลิสไตรีน มีอยู่ 2 ชนิดหลักๆคือ โฟมอีพีเอส (Expandable polystyrene, EPS) และ โฟม พีเอสพี (Polystyrene Paper, PSP)[48]

ชนิดแรก โฟมอีพีเอส (EPS) เป็นโฟมเกิดจากการใช้แก๊สเพนเทนช่วยในการขยายตัวของพอลิสไตรีน ได้เป็นเม็ดพลาสติกที่ฟูฟองแล้วนำไปอัดขึ้นรูป ลักษณะของโฟมชนิดนี้ จะมีลักษณะฟูฟอง เป็นแท่งหรือเป็นก้อน มีน้ำหนักเบา มักจะเอาไปใช้ ประโยชน์ในการทำภาชนะที่ต้องรับแรงดันหรือกระแทก เช่น หมวกกันน็อก ปลูกทรงคอสะพาน เป็นต้น[48]



รูปที่ 2.6 แสดงรูปตัวอย่าง โฟมอีทีเอส (EPS) [49]

ชนิดที่สอง โฟมพีเอสพี (PSP) เป็นโฟมที่ใช้สาร Chlorofluorocarbons (CFCs) เป็น สารช่วยในการขยายตัว จากนั้นก็ฉีดพลาสติกออกมาเป็นแผ่น ๆ แต่เนื่องจากสาร CFCs เป็นตัวการสำคัญที่ CH₂ สไตรีน (Styrene) ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม คือ ภาวะเรือนกระจก ดังนั้นในปัจจุบันจึงเปลี่ยนมาใช้ โพรเพน บิวเทน หรือ แก๊สหุงต้ม เป็นสารช่วยในการขยายตัวของพลาสติกแทน ลักษณะเด่นของโฟมชนิดพีเอสพี ก็คือเบา สามารถนำไปขึ้นรูปเป็นรูปต่าง ๆ ได้ง่าย ดังนั้นจึงนำมาใช้ในการผลิตกล่องโฟมบรรจุอาหาร[48]



รูปที่ 2.7 แสดงรูปตัวอย่าง โฟมพีเอสพี (PSP) [50]

นอกจากนั้นยังมี โฟมพอลิสไตรีนอีกชนิดหนึ่ง คือ Extruded polystyrene (XPS) มีชื่อทางการค้าที่แพร่หลาย คือ Styrofoam เป็นชนิดที่มีการเติมอากาศไว้ในช่องว่างตามเนื้อโฟมทำให้มีค่าการนำความร้อนต่ำ ใช้ในงาน ก่อสร้าง และใช้เป็นฉนวนกันความร้อนในอาคาร[48]



รูปที่ 2.8 แสดงรูปตัวอย่าง Styrofoam [51]

นอกจากนี้พอลิสไตรีนยังสามารถนำไปทำเป็น โคพอลิเมอร์ (copolymer) เช่น พลาสติกทนความร้อน Acrylonitrile – butadiene – styrene (ABS) และ Styrene – acrylonitrile copolymer (SAN) และยางสังเคราะห์ Styrene – butadiene rubber (SBR)[48]

อันตรายจากสไตรีน

การนำกล่องโฟม มาบรรจุอาหาร โดยเฉพาะอาหารที่ร้อนทำให้อากาศในกล่องโฟมเกิดการขยายตัวให้ สารพิษชนิดต่าง ๆ ออกมา เช่น สไตรีน (styrene) และเบนซีน (Benzene) สไตรีนเมื่อเกิดขึ้นจากการขยายตัวของกล่องโฟมมีผลต่อร่างกาย คือ ทำลายฮอร์โมนในร่างกาย มีผลต่อระบบประสาท เม็ดเลือดแดงและตับไต เมื่อถูกผิวหนังหรือเข้าตาจะทำให้ระคายเคือง การสูดเข้าไปจะมีอาการไอ และหายใจลำบาก เพราะไปทำให้เยื่อเมือกเกิดความระคายเคือง ปวดศีรษะ ง่วงซึม เป็นต้น สำหรับเบนซีน จัดเป็นพิษสาร ก่อมะเร็ง ที่มีอันตรายต่อผู้สูดดมหรือรับประทานเข้าไป คือ ทำให้เกิดอาการวิงเวียน คลื่นไส้หรือมีอาการ ปวดท้อง เนื่องจากกระเพาะถูกกระตุ้น เย็นศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียน ง่วงนอน ชัก หัวใจเต้นแรง และอาจ เสียชีวิตได้ การได้รับเบนซีนเป็นเวลานานจะมีผลทำให้เป็นโรคโลหิตจาง (Anemia) เนื่องจากเบนซีนจะเข้าไปทำลายไขกระดูก ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้จำนวนเม็ดเลือดลดลงและทำลายระบบภูมิคุ้มกันภายในร่างกายได้[48]

2.2 เทคนิคการปรับปรุงสมบัติของพอลิस्टาไทรีน

2.2.1. การสังเคราะห์ร่วมกับพอลิเมอร์อื่นๆ(copolymerization)

การเกิดโคพอลิเมอร์(copolymerization) คือ การนำมอนอเมอร์จำนวนตั้งแต่ 2 ชนิดหรือมากกว่ามาทำปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ด้วยกันเป็นสายโซ่โมเลกุลยาว ในบางกรณีการปรับปรุงคุณสมบัติบางอย่างของพอลิเมอร์ให้ดีขึ้นสามารถทำได้โดยการทำปฏิกิริยาการเกิดโคพอลิเมอร์ ผลที่ได้คือ โคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นจะมีสมบัติอยู่ระหว่างสมบัติของมอนอเมอร์คู่เดิมที่นำมาทำปฏิกิริยาเกิดโคพอลิเมอร์[53]

2.2.1.1. ความสำคัญของปฏิกิริยาการเกิดโคพอลิเมอร์

เนื่องจากโครงสร้างในสายโซ่ของโคพอลิเมอร์แตกต่างกับโครงสร้างของของผสมระหว่าง โสโมพอลิเมอร์ 2 ชนิด โคพอลิเมอร์จึงมีสมบัติแตกต่างกับโสมพอลิเมอร์ ดังนั้นการนำมอนอเมอร์ ต่างชนิดกันมาสังเคราะห์จึงมีประโยชน์มากทั้งในทางทฤษฎีและทางปฏิบัติ พอสรุปได้ดังนี้

- ผลิตภัณฑ์หรือพอลิเมอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาการเกิดโสมพอลิเมอร์อย่างเดียวกันมีจำกัด จึงเป็นการจำกัดชนิดของพอลิเมอร์และสมบัติของพอลิเมอร์ที่พึงได้ ขณะที่โคพอลิเมอร์เปิดโอกาสให้ได้ชนิดของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น และ โอกาสที่จะได้ผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มีสมบัติตามที่ต้องการมากขึ้น
- มอนอเมอร์ไว้นิลบางชนิด เช่น มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride) ซึ่งโดยปกติ ไม่อาจนำมาสังเคราะห์เป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงได้ แต่สามารถนำมอนอเมอร์ชนิดนี้ทำ ปฏิกิริยาเกิดเป็น โคพอลิเมอร์กับมอนอเมอร์อื่น ๆ บางชนิดได้ เช่น สไตรีน ไวนิลอะซิเตต เป็นต้น

- ความรู้จากปฏิกิริยาการเกิดโคพอลิเมอร์ทำให้สามารถเข้าใจสมบัติของมอนอเมอร์ และอนุพลของมอนอเมอร์ดีขึ้น เช่น ความว่องไวของมอนอเมอร์ อนุพลของมอนอเมอร์ แคทไอออน (cationic) และแอนไอออน (anionic) ทำให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของมอนอเมอร์กับความว่องไวได้ เป็นต้น จากการศึกษาปฏิกิริยาการเกิดโคพอลิเมอร์

-ในทางปฏิบัติการใช้เทคนิคการเกิดโคพอลิเมอร์นี้ ทำให้สามารถเลือกมอนอเมอร์ อัตราส่วนของมอนอเมอร์ที่ใช้ และสภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้ได้โคพอลิเมอร์ที่มีสมบัติตามที่ต้องการได้

ข้อได้เปรียบของปฏิกิริยาการเกิดโคพอลิเมอร์เทียบกับปฏิกิริยาการเกิดโฮโมพอลิเมอร์ ได้แก่ ธรรมชาติของสไตรีน พอลิสไตรีนเป็นพลาสติกที่มีสมบัติเปราะ มีจุดหลอมเหลวต่ำ มีแรงต้านทานการกระแทกต่ำมาก (แตกง่าย) ต้านทานต่อตัวทำละลายได้น้อย (ละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์) ขอบเขตการใช้ประโยชน์หรือการใช้งานพอลิสไตรีนจึงแคบมาก แต่ถ้านำสไตรีน มอนอเมอร์มาทำปฏิกิริยาการเกิดโคพอลิเมอร์กับมอนอเมอร์อื่น ๆ จะได้โคพอลิเมอร์ซึ่งไม่เพียงแต่จะได้พลาสติกที่มีสมบัติดีขึ้น ยังได้สารอีลาสโตเมอร์ (elastomer) ที่มีสมบัติดีด้วย เช่น สไตรีน โคพอลิเมอร์กับอะครีโลไนไตรล์ได้โคพอลิเมอร์ที่สามารถทนต่อแรงกระแทกดีขึ้นมาก และทนทานตัวทำละลายอินทรีย์ได้เป็นอย่างดี จึงเหมาะสำหรับทำเป็นภาชนะบรรจุตัวทำละลายอินทรีย์หรือท่อ ขนส่งน้ำมัน สไตรีนโคพอลิเมอร์กับบิวตะไดอิน ได้โคพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเป็นอีลาสโตเมอร์ ที่มีสมบัติคล้ายคลึงกับยางธรรมชาติ จึงเป็นยางสังเคราะห์ที่ใช้แทนยางธรรมชาติได้เป็นอย่างดี ยิ่งไปกว่านั้นถ้าหากใช้สไตรีนทำปฏิกิริยาการเกิดโคพอลิเมอร์กับบิวตะไดอินและอะครีโลไนไตรล์ จะได้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีดียิ่งขึ้นไปอีก

จากตัวอย่างข้างต้น จะเห็นได้ว่ากระบวนการเกิดโคพอลิเมอร์มีประโยชน์มาก เพราะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มีสมบัติดีขึ้นตามที่ต้องการได้ โดยการเลือกมอนอเมอร์ที่เหมาะสม (อาจจะ มากกว่ามอนอเมอร์ 2 ชนิดก็ได้) ผสมในอัตราส่วนและสภาวะของปฏิกิริยาที่เหมาะสม

2.2.1.2. การจำแนกประเภทของโคพอลิเมอร์

โคพอลิเมอร์สามารถจำแนกตามลักษณะการจัดหน่วยซ้ำกันออกเป็น 4 ประเภท คือ

- โคพอลิเมอร์แบบสุ่ม (random copolymer)

โคพอลิเมอร์ประเภทนี้มีหน่วยที่ซ้ำๆ กันของมอนอเมอร์ 2 ชนิดในสายโซ่ของของพอลิเมอร์จัดเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ เนื่องจากอนุมูลของมอนอเมอร์ 2 ชนิดไม่มีความ เอนเอียงว่า

จะว่องไวต่อมอนอเมอร์ตัวใดตัวหนึ่งมากกว่ากัน ถ้าให้ A และ B แทนหน่วยมอนอเมอร์ที่ต่างกัน 2 ชนิด โഴโครงสร้างของมอนอเมอร์นี้อาจแสดงได้ดังนี้

~AABABAAABBABBAABABBBA~

- โคพอลิเมอร์แบบสลับ (alternating copolymer)

โคพอลิเมอร์ประเภทนี้มีหน่วยที่ซ้ำ ๆ กันของมอนอเมอร์ 2 ชนิดในสายโซ่ของของพอลิเมอร์ จัดเรียงตัวสลับกันไป เนื่องจากอนุกรมของมอนอเมอร์แต่ละชนิดจะว่องไวต่อมอนอเมอร์ ชนิดอื่นมากกว่า ชนิดเดียวกัน โซโครงสร้างของมอนอเมอร์นี้อาจแสดงได้ดังนี้

~ABABABABABABABABAB~

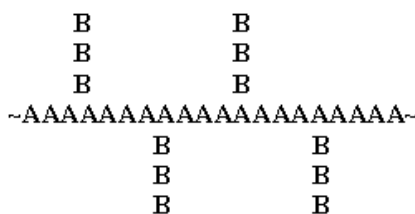
- โคพอลิเมอร์แบบบล็อก (Block copolymer)

โคพอลิเมอร์ประเภทนี้มีหน่วยที่ซ้ำ ๆ กันของมอนอเมอร์ 2 ชนิดในสายโซ่ของของ พอลิเมอร์ จัดเรียงตัวเป็นกลุ่มหรือบล็อกสลับกันไป เนื่องจากอนุกรมของมอนอเมอร์แต่ละชนิดจะ ว่องไวต่อมอนอ-เมอร์ ชนิดเดียวกันมากกว่าชนิดอื่น

~AAAABBBBAAAABBBBAAAA~

- โคพอลิเมอร์แบบตอกกิ่ง (graft copolymer)

โคพอลิเมอร์ประเภทนี้จะมีพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งเป็นสายโซ่แกนหลัก แล้วมีพอลิเมอร์ ชนิดอื่น มาต่อกับพอลิเมอร์ที่เป็นสายโซ่แกนหลัก คล้ายพอลิเมอร์แบบโซ่กิ่ง แต่ส่วนที่เป็นกิ่งกับส่วนที่เป็นสายโซ่แกนหลักจะเป็นพอลิเมอร์ต่างชนิดกัน



2.2.2. การเพิ่มสารเพิ่มสภาพพลาสติก

2.2.2.1 พลาสติกไซเซอ์ (Plasticizers)

พอลิเมอร์บางชนิดมีสมบัติแข็งเปราะ ไม่อ่อนตัว และแตกหักง่ายเมื่อได้รับแรงกระทำจึงทำให้ไม่เหมาะกับการใช้งานบางอย่างจนกว่าจะมีการทำให้พอลิเมอร์นั้นมีความอ่อนตัวเสียก่อนกระบวนการเพิ่มความอ่อนตัวให้กับพอลิเมอร์นี้เรียกว่า พลาสติกไซเซชัน และสารเติมแต่งที่ใส่เข้าไปเพื่อเพิ่มความอ่อนตัวนี้เรียกว่า พลาสติกไซเซอ์ ซึ่งพลาสติกไซเซอ์จะเพิ่มความอ่อนตัวความสามารถในการหักงอได้ และความสามารถในการยืดออกของพอลิเมอร์โดยการทำให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิห้องนอกจากนี้ พลาสติกไซเซอ์ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลของพลาสติก และลดความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลว ทำให้กระบวนการขึ้นรูปได้ง่าย

พลาสติกไซเซชันหมายถึง กรรมวิธีหรือกระบวนการที่ทำให้พอลิเมอร์เกิดการไหลแบบพลาสติก ซึ่งอาจทำได้โดยการให้ความร้อนหรือการใส่พลาสติกไซเซอ์ โดยพลาสติกไซเซอ์จะไปลดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ทำให้พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้มากขึ้นเป็นผลให้พอลิเมอร์อ่อนตัวและเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่ายขึ้น ซึ่งกระบวนการการผสมพลาสติกไซเซอ์เข้าไปในพอลิเมอร์โดยไม่ทำปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นระหว่างพลาสติกไซเซอ์และพอลิเมอร์เรียกว่า พลาสติกไซเซชันภายนอก และเรียกพลาสติกไซเซอ์ชนิดที่ผสมลงไปว่า พลาสติกไซเซอ์ภายนอก ซึ่งพลาสติกไซเซอ์ชนิดนี้จะช่วยให้พอลิเมอร์เกิดการไหลแบบพลาสติกโดยอำนาจการทำละลาย

สำหรับสารที่นำมาใช้เป็นพลาสติกไซเซอรฺ์ภายนอกมีหลายประเภทแต่ส่วนใหญ่คือ สารประกอบเอสเทอร์ โดยชนิดที่มีการผลิตมากที่สุดคือฟทาเลตเอสเทอร์ และสารที่มีการนำมาใช้มากที่สุดคือ ไค-2-เอทิลเฮกซิลฟเลต หรือมักเรียกกันว่า ไคออกทิลฟเลต

ข้อดีของพลาสติกไซเซอรฺ์ภายนอกคือ สามารถทำให้พอลิเมอร์มีความอ่อนตัวน้อยหรือมากตามความต้องการ ในการใช้งานได้โดยการปรับชนิดและปริมาณของพลาสติกไซเซอรฺ์ที่ใส่ลงไป อย่างไรก็ตามพลาสติกไซเซอรฺ์ภายนอกก็มีจุดอ่อนคือพลาสติกไซเซอรฺ์ที่ใช้อาจถูกสกัดออกจากพอลิเมอร์ได้[53]

ทฤษฎีการทำงานของพลาสติกไซเซอรฺ์

มีทฤษฎีอยู่หลายทฤษฎีที่อธิบายกลไกการทำงานของพลาสติกไซเซอรฺ์ภายนอกดังนี้

Lubricity Theory

ทฤษฎีนี้อธิบายการทำงานของพลาสติกไซเซอรฺ์ว่าทำหน้าที่เหมือนสารหล่อลื่น(lubricant) โดยไปลดแรงเสียดทานระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่เลื่อนไถลผ่านไปมาซึ่งกันและกัน

Gel Theory

ทฤษฎีนี้อธิบายไว้ว่า พลาสติกไซเซอรฺ์จะทำลายแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์โดยการแยกส่วนที่มีขั้วของพอลิเมอร์ให้อยู่ห่างกัน ดังนั้น พลาสติกไซเซอรฺ์จะต้องประกอบด้วยทั้งส่วนที่มีขั้วและไม่มีขั้ว โดยพลาสติกไซเซอรฺ์ส่วนที่มีขั้วจะเข้ายึดกับไดโพลหรือบริเวณมีขั้วของพอลิเมอร์ ในขณะที่พลาสติกไซเซอรฺ์ส่วนที่ไม่มีขั้วจะก้ำกับริเวณไดโพลของพอลิเมอร์ออกจากกัน

Free-Volume Theory

ทฤษฎีนี้อธิบายไว้ว่า พลาสติกไซเซอรฺ์จะเพิ่มที่ว่างหรือปริมาณอิสระระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้พอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น

สมบัติที่ต้องการของพลาสติกไฮเซออร์

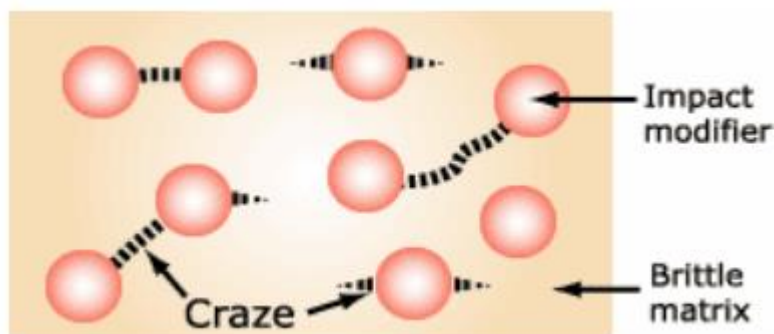
- สามารถเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์
- มีประสิทธิภาพ
- มีความคงตัวสูงอยู่กับพอลิเมอร์ได้นาน
- เสถียร ไม่ติดไฟ ไม่มีกลิ่น และ ไม่มีพิษ

2.2.3. การทำพอลิเมอร์ผสม (Polymer blend)

โดยทั่วไปสารเพิ่มความทนแรงกระแทกทำจากยางหรือพอลิเมอร์ที่มีอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ซึ่งเมื่อนำไปผสมกับพอลิเมอร์แล้ว สารเพิ่มความทนแรงกระแทกกระจายอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ (polymer matrix) และเรียกของผสมนี้ว่า polyblend

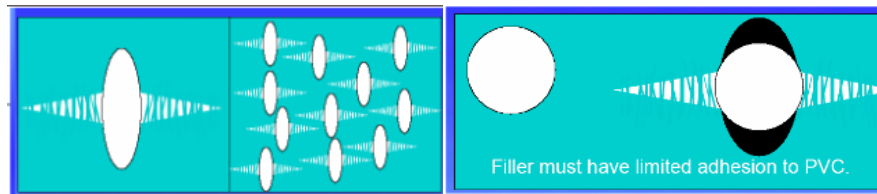
เมื่อพอลิเมอร์ผสมได้รับแรงกระแทกในขั้นแรกพลังงานเชิงกลที่เกิดขึ้นจะถูกดูดกลืนโดยพอลิเมอร์ก่อน ซึ่งถ้าพลังงานนี้ถูกถ่ายโอนไปให้สารเพิ่มความทนแรงกระแทกได้ พอลิเมอร์ก็จะไม่เกิดการแตกหักในทางตรงกันข้าม ถ้าพลังงานถูกถ่ายโอนไม่ได้ยังคงค้างอยู่ในพอลิเมอร์จะเป็นผลให้เกิดความเค้นขึ้นในพอลิเมอร์เมทริกซ์ซึ่งนำไปสู่การเกิดช่องว่างและเกิดการแตกหัก

Craze formation เป็นการกระจายพลังงานด้วยการเกิดช่องว่างเล็กๆ ที่มาจากกระบวนการดึงยืด (stretching process) เป็นผลทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้นภายใต้ความเครียดที่เกิดจากการ craze[53]



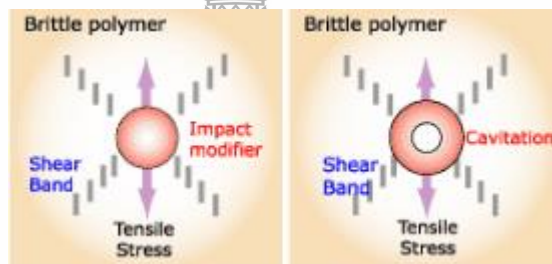
รูปที่ 2.9 แสดงการกระจายพลังงานแบบ Craze formation[54]

ซึ่งการที่ polyblend จะรับแรงกระแทกได้ดีบริเวณรอยต่อระหว่างเฟสพอลิเมอร์และเฟสอิลาสโตเมอร์ใน polyblend ทั้ง 2 ระบบจะต้องมีการยึดติดที่ดี



รูปที่ 2.10 แสดงบริเวณรอยต่อระหว่างเฟสพอลิเมอร์และเฟสอิลาสโตเมอร์ใน polyblend[54]

นอกจากนี้ยังมี Shear formation เป็นการกระจายพลังงานด้วยกระบวนการหลุดลื่น (slip process) ของสายโซ่พอลิเมอร์ matrix โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร



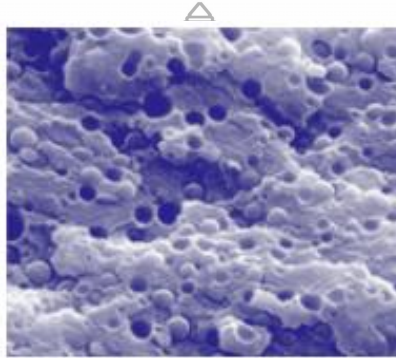
รูปที่ 2.11 การกระจายพลังงานด้วยกระบวนการหลุดลื่น[54]

แรงกระแทกที่ได้รับสามารถบอกความหมายทางอ้อมของความเข้ากันได้การยึดติดของเฟสพอลิเมอร์และเฟสของสารเติมแต่ง ซึ่งถ้ามีความเข้ากันได้เป็นเฟสเดียวจะรับแรงแล้วแตกไปพร้อมๆกัน เลขถ้าของ 2 เฟสเข้ากันได้ระดับหนึ่งสารเติมแต่งจะเป็นเฟสที่รับแรงและหยุดที่ตัวมันเองไม่ส่งต่อไปยังพอลิเมอร์แต่ถ้าของ 2 เฟสเข้ากันไม่ได้เลย จะเกิดช่องว่างระหว่างเฟสและเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหัก



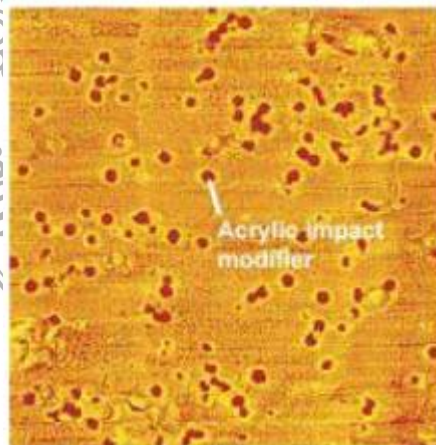
รูปที่ 2.12 แสดงเฟสในพอลิเมอร์ผสม[54]

ในกรณีที่ใช้สารเพิ่มความทนแรงกระแทกจากโคพอลิโอฟีน(copolyolefin impact modifiers) เช่น เอทิลีน-ไวนิลอะซิเลต โคพอลิเมอร์ (EVA) , เอทิลีน-โพรพิลีน-ไดอินเทอร์พอลิเมอร์ พบว่าสารเพิ่มความทนแรงกระแทกจะห่อหุ้มอนุภาคปฐมภูมิ(primary particles) ของพอลิเมอร์ระหว่างกระบวนการขึ้นรูปและกระจายอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ในลักษณะต่อกันเป็นรวงผึ้ง(Honeycombed network)



รูปที่ 2.13 พอลิเมอร์เมทริกซ์ในลักษณะต่อกันเป็นรวงผึ้ง[54]

ในกรณีที่ใช้สารเพิ่มความทนแรงกระแทกอะคริลิก(Acrylic impact modifiers) พบว่า อนุภาคของสารเพิ่มความทนแรงกระแทกซึ่งมีลักษณะทรงกลม จะกระจายอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์



รูปที่ 2.14 การกระจายตัวของสารทนแรงกระแทกอะคริลิก[54]

2.3. น้ำมันละหุ่ง[15]

ละหุ่ง เป็นพืชที่สามารถนำเมล็ดมาสกัดน้ำมันได้ เป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย น้ำมันละหุ่งเป็นน้ำมันพืชที่ได้จากเมล็ดละหุ่ง เมล็ดละหุ่งประกอบด้วย ส่วนของเปลือกหุ้มที่ไม่มีน้ำมัน มีน้ำหนัก 20 - 25 เปอร์เซ็นต์ และเนื้อใน ซึ่งมีสีขาว มีน้ำมัน 60 - 65 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นละหุ่งทั้งเมล็ดจึงมีปริมาณน้ำมัน 46 - 50 เปอร์เซ็นต์ ปกติภายในเมล็ดมีเอนไซม์ที่สามารถสกัดออกมาได้ด้วยอีเทอร์ เอนไซม์นี้จะข่อยน้ำมันให้เป็นกรดไขมันอิสระได้ (โดยที่ปริมาณกรดไขมันอิสระเกี่ยวข้องกับคุณภาพของน้ำมัน)

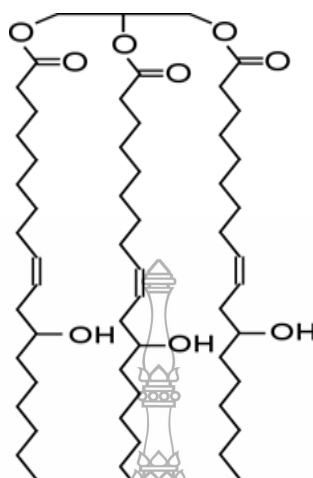


รูปที่ 2.15 ตัวอย่างน้ำมันละหุ่ง [16]



รูปที่ 2.16 ตัวอย่างต้นละหุ่ง [17]

สูตรโครงสร้าง



รูปที่ 2.17 สูตรโครงสร้างทางเคมีของน้ำมันละหุ่ง [18]

2.3.1 กระบวนการผลิตและสังเคราะห์น้ำมันละหุ่ง

ขั้นตอนการสังเคราะห์น้ำมันละหุ่งที่ใช้ในประเทศไทย แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

2.3.1.1. การเตรียมวัตถุดิบ (Preparation) ประกอบด้วยขั้นตอนย่อย คือ

- การทำความสะอาดและแยกสิ่งเจือปน
- การอบ เพื่อลดความชื้น ให้มีความชื้นประมาณ 3-4 เปอร์เซ็นต์
- การบีบอัดด้วยแรงไฮดรอลิก นำเมล็ดที่ลดความชื้นแล้ว ซึ่งมีน้ำมันประมาณ

45-55 เปอร์เซ็นต์ อัดด้วยแรงไฮดรอลิก เรียกว่า Filling Press จะได้น้ำมันส่วนหนึ่งที่มีสีใส จากนั้นทำการบีบอีกครั้งหนึ่งเรียกว่า Finishing Press จะได้น้ำมันที่มีสีเหลืองอ่อน กากที่จะได้จะมีน้ำมันเหลืออยู่ประมาณ 10-13 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นการอัดด้วยไฮดรอลิกนี้จะได้น้ำมันดิบ (Crude oil) กับกาก (cake) กากนี้จะนำไปใช้ในถังเพื่อรอการเตรียมการสำหรับการสกัดต่อไป ข้อสำคัญการอัดนี้ต้องควบคุมอุณหภูมิไม่ให้สูงเกิน 60 องศาเซลเซียส

2.3.1.2. การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction) กากที่ได้จากการบีบแล้ว 2 ครั้ง จะถูกนำมาบรรจุในถังสกัด (Extractor) ภายในถังแบ่งเป็นช่องสำหรับใส่กาก เมื่อถังหมุนไปตัวทำละลายหรือสารสกัด เรียกว่า เฮกเซน (Hexane) จะถูกฉีดผ่านกาก ผลที่ได้จากการสกัดมี 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นน้ำมันละหุ่งที่มีสารสกัดปนอยู่ ซึ่งจะแยกไหลลงสู่ก้นถัง และส่วนที่สองเป็นกากที่มีสารสกัดปนอยู่

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องแยกสารสกัดที่ปนอยู่จากทั้ง 2 ส่วน คือ การแยกสารสกัดออกจากกาก ทำได้โดยนำ กากที่สกัดเสร็จแล้ว ไปใส่ถังอบกาก (Toaster) ด้วยความร้อน 60 องศาเซลเซียส เพื่อไล่สารสกัด หรือเฮกเซนออก สารสกัดจะถูกส่งเข้าไปในเครื่องดักจับไอน้ำมัน (Absorbtor) เพื่อควบแน่นสารสกัดด้วยความเย็นกลายเป็นของเหลว สารสกัดที่อยู่ในสภาพของเหลวนี้ ต้องนำมาระเหยให้กลายเป็นไอก่อน แล้วจึงดักเก็บไอน้ำมันกลับมาใช้อีก จากนั้นนำกากไปผ่านไอน้ำร้อนประมาณ 120 องศาเซลเซียส และความดันไอน้ำ 3 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร นาน 1 ชั่วโมง

2.3.1.3. การทำให้บริสุทธิ์ (Refinery) น้ำมันที่ได้มี 2 ประเภท คือ น้ำมันที่ได้จากการอัดด้วยไฮดรอลิกมีสีค่อนข้างใส และน้ำมันที่ได้จากการสกัดมีสีเหลือง น้ำมันทั้งสองประเภทยังมีสิ่งเจือปนอยู่ เช่น กรดไขมันอิสระ น้ำ และกากเนื้อละหุ่ง เป็นต้น ขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ประกอบด้วย

- การกำจัดกรดไขมันอิสระ (Neutralization) โดยใช้ KOH ทำปฏิกิริยาเคมีกับกรดไขมัน ได้เป็นสบู่ แยกตัวออกจากไขมัน

- การฟอกสี (Bleaching) น้ำมันที่แยกกรดไขมันอิสระออกแล้วยังมีความขุ่นต้องนำไปต้มให้กลายเป็นไอน้ำมัน แล้วนำน้ำมันไปผ่านการฟอกสีจะได้น้ำมันใสมีสีเหลืองอ่อน

- การกรอง (Filter) นำน้ำมันมาผ่านตะแกรงละเอียด เพื่อแยกกากออกจะได้น้ำมันที่ใส นำเข้าเก็บในถังเก็บน้ำมันที่ได้แต่ละชั้นคุณภาพ

เมล็ดละหุ่งที่ผ่านกระบวนการทั้งหมดแล้ว จะได้น้ำมันประมาณ 45 เปอร์เซ็นต์ กาก 50 เปอร์เซ็นต์และอีก 5 เปอร์เซ็นต์ เป็นสิ่งเจือปนและความขุ่น

2.3.2 ประเภทน้ำมันละหุ่ง

การแบ่งประเภทของน้ำมันละหุ่ง สามารถแบ่งได้โดยใช้หลักการ 2 อย่าง ได้แก่ แบ่งตามคุณสมบัติของน้ำมันและแบ่งตามวิธีการสกัดน้ำมัน

การแบ่งประเภทตามคุณสมบัติของน้ำมันแบ่งออกได้ 5 ประเภท ดังนี้

1. เกรดยา มีสีเหลืองอ่อน ใช้ในอุตสาหกรรมทำยา เช่น ยาระบาย ยารักษาโรคอื่นๆ และเครื่องสำอาง
2. เกรด extra pale มีสีใส ใช้ในการผลิตเครื่องสำอาง และครีมใส่ผม

3. เกรด pale press มีสีใสคล้ายกับเกรด 2 เมื่อนำไปผ่านกระบวนการทางเคมีสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมได้อย่างกว้างขวาง เช่น ใช้ในการทำจารบี กริมขัดเงา ยาขัดรองเท้า อุตสาหกรรมทำสี และหมึกพิมพ์

4. เกรด No.1 มีสีใสปนเหลือง เมื่อผ่านกระบวนการทางเคมีสามารถใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้แก่ ใช้ในการทำหนังเทียม น้ำยาเคลือบผิว อุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องหนัง

5. เกรด Commercial มีสีเหลืองมากกว่าชนิดอื่นๆ ใช้ในอุตสาหกรรมทำยางแท่งกาวและพลาสติก

2.3.3 สมบัติของน้ำมันละหุ่ง[19]

น้ำมันละหุ่งมีคุณสมบัติเป็นกรด มีค่า pH 4.7–5.0 เป็นวัตถุดิบที่สำคัญสำหรับอุตสาหกรรมเคมี และไม่สามารถหาน้ำมันชนิดอื่นมาทดแทน น้ำมันละหุ่งจัดอยู่ในพวกที่ไม่ระเหย (Non-drying type) และสามารถแปรรูปโดยกรรมวิธีทางเคมีได้ น้ำมันละหุ่งมีความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) และมีความหนืด (Viscosity) ที่คงที่ในสภาพอุณหภูมิสูงสูงกว่าน้ำมันพืชชนิดอื่น มีสี Water – white ถึง Pale – straw ส่วนประกอบของกรดไขมันที่สำคัญของน้ำมันละหุ่ง ได้แก่ กรดไรซินอเลอิก (Ricinoleic acid) 80-90 เปอร์เซ็นต์ ($C_{17}H_{32}OH.COOH$) ซึ่งเป็นกรดไขมันที่มีลักษณะเฉพาะทำให้น้ำมันละหุ่งสามารถละลายได้ในแอลกอฮอล์ กรดโอเลอิก (Oleic acid) 3-4 เปอร์เซ็นต์ กรดลิโนเลอิก (Linoleic acid) 3-5 เปอร์เซ็นต์ กรดพาล์มิติก (Palmitic acid) 1 เปอร์เซ็นต์ กรดสเตียริก 0.3-1.0 เปอร์เซ็นต์ และกรดไดไฮดรอกซีสเตียริก (Dihydroxystearic acid) 0.6-1.8 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังมีสารโทโคฟีรอล (Tocopherol) ประมาณ 0.05 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตาม ส่วนประกอบต่างๆ เหล่านี้อาจแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับพันธุ์ อายุการเก็บเกี่ยว แหล่งปลูก กระบวนการสกัดน้ำมัน

ในประเทศไทยมีการกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของละหุ่ง 2 อย่าง คือ

1. น้ำมันละหุ่งสำหรับอุตสาหกรรมเรซิน สี และวานิช
2. ไขละหุ่ง เรียกย่อว่า เอชซีโอ (Hydrogenated castor oil, HCO) หรือเรียกว่าขี้ผึ้งเทียมจากน้ำมันละหุ่ง มีลักษณะเป็นเกล็ด หรือผงสีขาวถึงสีขาวนวล แบ่งเป็นสามชั้นคุณภาพ คือ ชั้นคุณภาพ 1 ชั้น

คุณภาพ 2 และชั้นคุณภาพ 3 เป็นวัตถุดิบที่ใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น เครื่องสำอาง จาระบี และสาร
ขัดพื้น เป็นต้น

สำหรับมาตรฐานน้ำมันละหุ่งที่ต่างประเทศยอมรับโดยทั่วไป มีดังนี้

ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity, 25°C/25°C) 0.945-0.965

ดัชนีหักเห (Refractive index, 25 °C) 1.473-1.477

ค่าไอโอดีน (Iodine number) 85-91

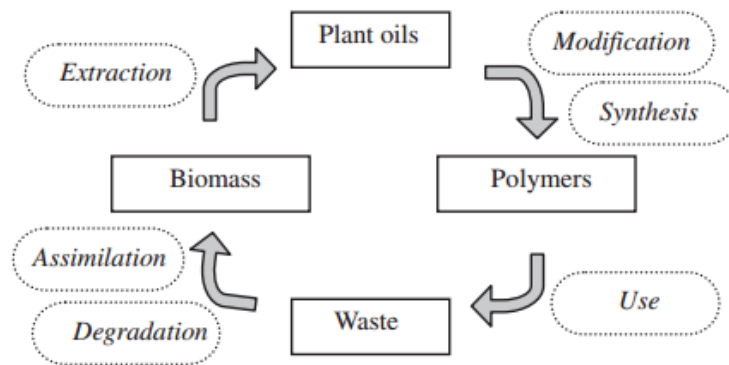
ค่าชะพอนิฟิเคชัน (Saponification number) 176-187

สารที่ชะพอนิฟายไม่ได้ (Unsaponifiable matter, %) < 1.0

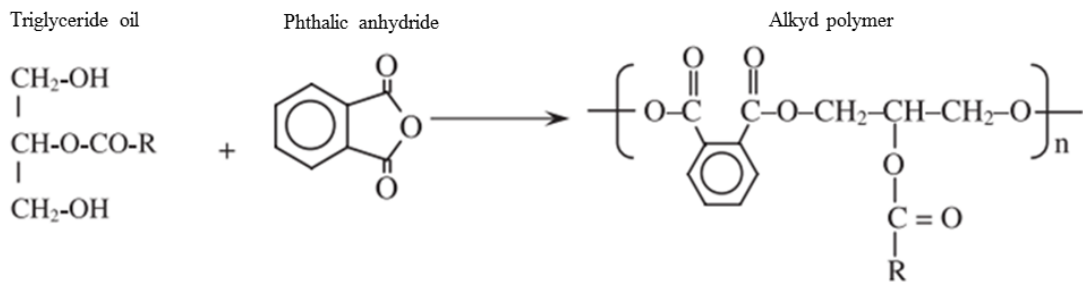
ค่าอะเซทิล (Acetyl value) 144-150

2.3.4 การใช้งานน้ำมันละหุ่งในภาคอุตสาหกรรม

น้ำมันละหุ่งซึ่งสกัดมาจากเมล็ดละหุ่งนั้น เป็นสารที่มีคุณสมบัติพิเศษซึ่งสามารถใช้ประโยชน์ทางอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นน้ำมันที่มีความหนืดสูงมากเหมาะที่จะใช้ผสมทำน้ำมันหล่อลื่นเครื่องจักรที่มีความร้อนสูง เช่น รถไฟและเครื่องบินไอพ่น เป็นต้น ใช้เป็นของเหลวในระบบไฮดรอลิก ใช้เป็นตัวเร่งสีให้แห้ง (Drying agent) ใช้ผสมทำสี ทำน้ำมันชักแห้ง น้ำมันขัดเงา ใช้ทำกรดเซบาคิก (Sebacic acid) ซึ่งใช้เป็นส่วนผสมทำพลาสติก โพลอน และเส้นใยเทียม ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ใช้ทำสบู่ เครื่องสำอาง หนังกเทียม เกสซ์ภัณฑ์ สีย้อมผ้า สารเคลือบป้องกันและใช้ในการผลิตสินค้าอุตสาหกรรมอีกมากมายหลายอย่าง ในงานวิจัยของ seniha และคณะ เกี่ยวกับการสังเคราะห์พอลิเมอร์จากไตรกลีเซอไรด์พอสรูปได้ว่าปัจจุบันมีการใช้แหล่งวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนได้ ในการเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้น เพราะเป็นแหล่งวัตถุดิบจากธรรมชาติซึ่งสามารถใช้ทดแทนน้ำมันปิโตรเลียมที่ใกล้จะหมดไป แหล่งวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนได้ เช่น ดอกทานตะวัน ฝ้าย ต้นแฟลกซ์ ซึ่งน้ำมันตามธรรมชาตินี้จะประกอบด้วย triglyceride เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงการสังเคราะห์พอลิเมอร์จากน้ำมัน triglyceride โดยวิธีการทางเคมีเป็นตัวช่วยสังเคราะห์พอลิเมอร์ของน้ำมันจากธรรมชาติ [20]



รูปที่ 2.18 แสดงวัฏจักรในการใช้พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากน้ำมันที่มี triglyceride เป็นองค์ประกอบ [20]



รูปที่ 2.19 แสดงการสังเคราะห์ alkyd polymer [20]

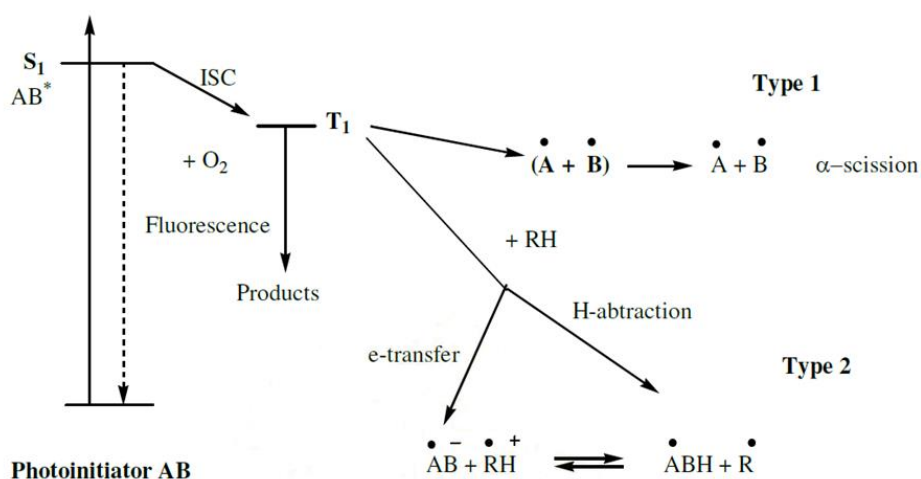


2.4 สารริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง(Photo-initiator) [21]

เป็นสารประกอบที่ทำหน้าที่ดูดกลืนแสงได้ แล้วเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวให้อนุภาคที่มีความว่องไวทำหน้าที่เป็นตัวริเริ่มหรือเป็นตัวเร่งในการเกิดปฏิกิริยาเคมี ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงด้านสมบัติการละลาย และสมบัติทางกายภาพ ซึ่งการดูดกลืนคลื่นแสงของตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง ต้องอยู่ในความยาวคลื่นเดียวกันกับรังสีอัลตราไวโอเล็ตโดยทั่วไปสามารถแบ่งตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงออกเป็น 2 ชนิดหลักๆ ได้แก่

2.4.1. ตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงชนิดอนุมูลอิสระ (Free Radical Photoinitiators)

แตกตัวให้อนุภาคอิสระ มักใช้กับโพลิโเมอร์ประเภท อะคริเลต เมทาคริเลต เมื่อโมเลกุลของตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงชนิดอนุมูลอิสระ (AB) ดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ต โมเลกุลจะถูกกระตุ้นไปยัง singlet state (S_1) จากนั้นจะเกิด intersystem crossing (ISC) แล้วโมเลกุลที่ถูกกระตุ้นนั้นจะตกมาอยู่ชั้น triplet state เพื่อให้อายุยืนยาวขึ้น ในระหว่างการเปลี่ยนชั้น สามารถเกิดการปล่อยฟลูออเรสเซน (Fluorescence) หรือเกิดการรวมตัวกับออกซิเจน ทำให้เกิดการสูญเสียอนุมูลอิสระได้ จากนั้นตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงที่ชั้น triplet state นี้สามารถแตกตัวให้อนุภาคอิสระได้ 2 วิธี คือ Norrish type I หรือ α - cleavage และ Norrish type II ดังแสดงในรูป 2.20 การแตกตัวให้อนุภาคอิสระของตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงจะเป็นแบบใดนั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงและชนิดของโพลิโเมอร์ที่ใช้



รูปที่ 2.20 การแตกตัวให้อนุภาคอิสระของตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง

2.4.2. ตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงชนิดประจุบวก (Cationic Photoinitiators)

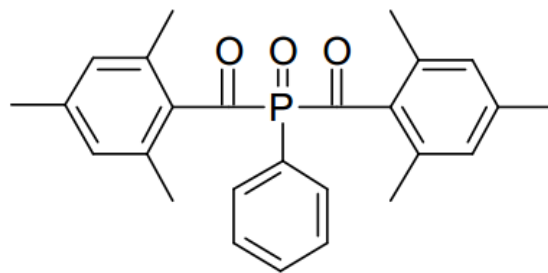
ตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงชนิดนี้รับพลังงานจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตแล้วแตกตัวให้ Bronsted acid หรือ Lewis acid เพื่อเกิดปฏิกิริยาขึ้นเริ่มต้น (Initiation) กับมอนอเมอร์หรือ โอลิโกเมอร์ตั้งต้นแล้วเกิดคาร์โบแคทไอออนที่มีความว่องไวก่อให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันต่อไปได้ มอนอเมอร์หรือโอลิโกเมอร์ตั้งต้นที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับสารริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงชนิดประจุบวกได้แก่ มอนอเมอร์ที่สามารถเปิดวงได้ เช่น อีพอกไซด์ ไซคลิกอีเทอร์ แลคโตน ไซคลิก-อัลไฟด์ และสารประกอบไวนิล เป็นต้น การใช้แสงเป็นตัวกระตุ้นใน กระบวนการขึ้นริเริ่ม จะเป็นข้อดีสำหรับเทคโนโลยีที่เกี่ยวกับการเชื่อมโยงสายโซ่โดยการใช้รังสี

จากที่กล่าวมาข้างต้นในงานวิจัยนี้ได้นำตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงมาใช้ในการตัดแปรรูปน้ำมันละหุ่งให้มีโครงสร้างเป็นร่างแหโดยใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางที่มีชื่อว่า Bis Acyl Phosphine oxides (BAPO) มีชื่อทางการค้า IRGACURE 819 จากบริษัท Ciba Specialty Chemicals และมีสมบัติดังนี้

การใช้งานทั่วไป

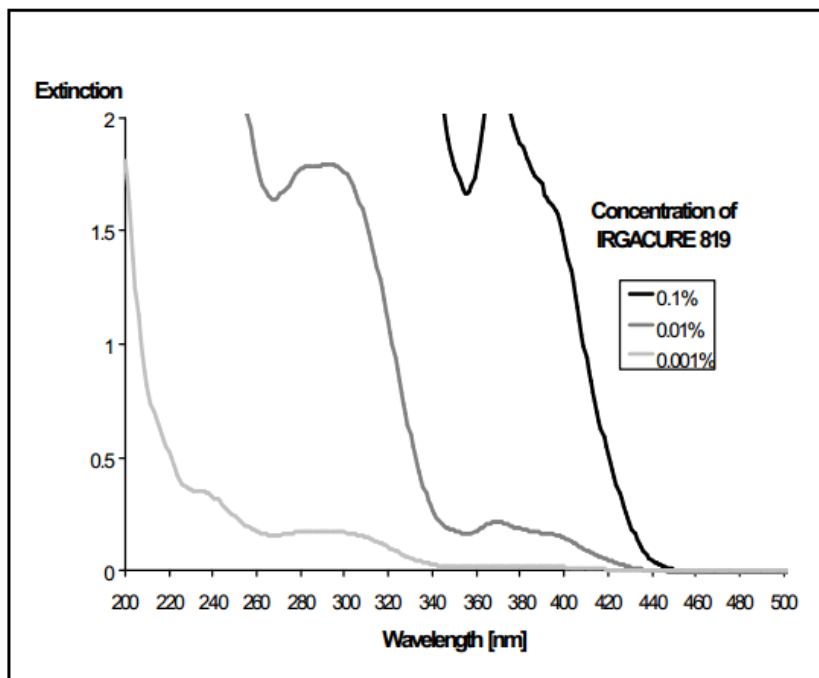
IRGACURE 819 เป็นสารที่สามารถทำปฏิกิริยาทางแสงได้ มักใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงในพอลิเอสเทอร์แบบไม่อิ่มตัวโดยใช้แสง UV เป็นทำปฏิกิริยาแบบ Free Radical

โครงสร้างทางเคมี



รูปที่ 2.21 สูตรโครงสร้างทางเคมี Bis Acyl Phosphine oxides (BAPO)[21]

ช่วงการดูดกลืนแสง



รูปที่ 2.22 แสดงการดูดกลืนแสงของ Bis Acyl Phosphine oxides (BAPO)[21]

สมบัติเชิงฟิสิกส์

มีลักษณะ

ผงสีเหลือง

อุณหภูมิหลอมเหลว

127-133 องศาเซลเซียส

มีน้ำหนักโมเลกุล

418.5

ความสามารถในการละลาย ที่ 20°C (กรัม/100 กรัม สารละลาย) ดังนี้

acetone	14	hexanedioldiacrylate (HDDA)	9
butylacetate	6	oligomeric acrylate	3
methanol	3		
toluene	22		

ตัวอย่างเช่น

BAPO 14 กรัม ละลายใน acetone 100 กรัม ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

BAPO 9 กรัม ละลายใน HDDA 100 กรัม ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.23 แสดงลักษณะของสาร Bis Acyl Phosphine oxides (BAPO)[22]

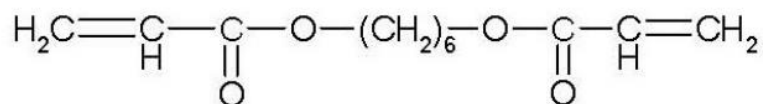
2.5 ตัวทำละลายสารริเริ่มปฏิกิริยา (Solvent for photoinitiator) [23]

Hexanediol diacrylate (HDDA) มีชื่อทางการค้า Laromer HDDA จากบริษัท BASF Corporation

การใช้งานทั่วไป

Laromer HDDA คือ acrylic acid ester ที่ใช้เจือจางสารเคลือบ หมึกพิมพ์ เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์และในการผลิตพอลิเมอร์

โครงสร้างทางเคมี



รูปที่ 2.24 สูตรโครงสร้างทางเคมี Hexanediol diacrylate (HDDA)[23]



รูปที่ 2.25 แสดงลักษณะของสาร Hexanediol diacrylate (HDDA)[23]

สมบัติของ HDDA

- มีลักษณะ : ใสไม่มีสี
- ความเป็นกรด : $\leq 0.05\%$
- ปริมาณน้ำ : $\leq 0.05\%$
- ความถ่วงจำเพาะ ที่ 25 องศาเซลเซียส : 1.015 g/cm^3
- จุดเดือด : 107 องศาเซลเซียส
- ค่าความจุความร้อนที่ 30 องศาเซลเซียส : 1.88 kJ/(kg K)
- เปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง : 8 – 11 องศาเซลเซียส
- ดัชนีการหักเหแสง ที่ 20 องศาเซลเซียส : 1.457

ความสามารถในการละลาย

Laromer HDDA ใน น้ำ 0.36 กรัม/ลิตร

น้ำ ใน Laromer HDDA ไม่ละลาย

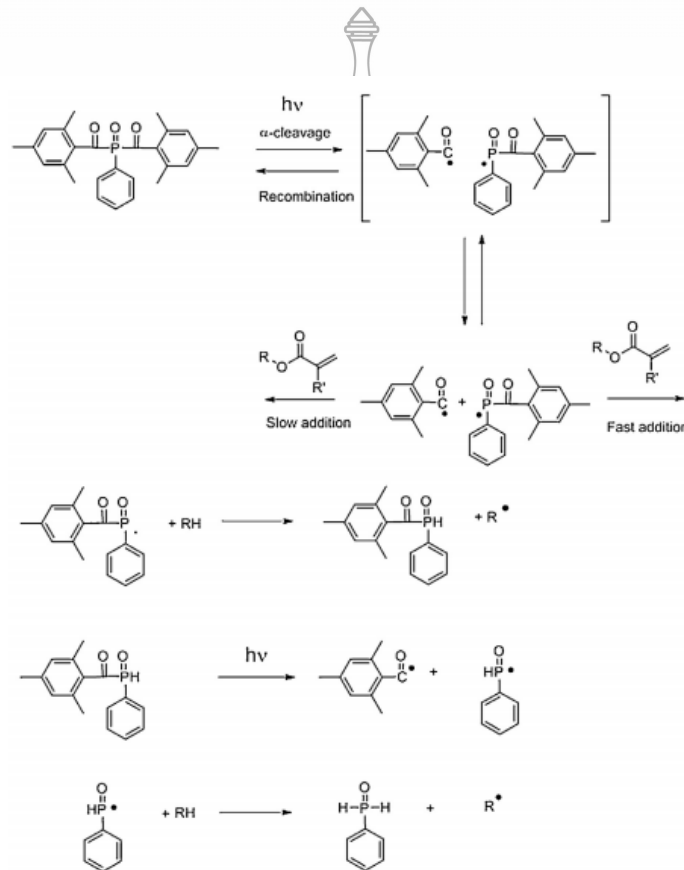
ความเข้ากันได้

สามารถผสมกับตัวทำละลายอินทรีย์ได้

2.6 การบ่มด้วยรังสี

2.6.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการบ่มด้วยรังสี

โดยทั่วไปการบ่มเร่งปฏิกิริยารังสี นั้นส่วนใหญ่ใช้ในงานเกี่ยวกับการเคลือบผิวและหมึกพิมพ์ ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอน, รังสีอัลตราไวโอเลต, แสงขาว หรือรังสีอื่นๆ ในการพอลิเมอไรซ์สารที่เป็นของเหลว โดยมีองค์ประกอบที่ไวต่อการฉายรังสีทำให้เกิดการเชื่อมขวางได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 กลไกการบ่มเร่งปฏิกิริยารังสี [57]

ต่อมาได้มีการปรับปรุงและประยุกต์ให้เหมาะสมต่อการนำมาใช้กับกระบวนการผลิตที่มีความหลากหลายทางการใช้งานมากยิ่งขึ้น ทรายใดที่สามารถฉายรังสีไปยังกระบวนการผลิตได้ เช่น เทคนิคการขึ้นด้วยกระบวนการพัน (Filament winding), การขึ้นรูปด้วยมือ (Hard lay-up) และ การขึ้นรูปแบบสุญญากาศ (Vacuum infusion) เป็นต้น [55]

การบ่มด้วยเทคนิครังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นที่นิยมใช้มากประมาณ 90% และอีก 10% ที่เหลือเป็นการใช้ลำแสงอิเล็กตรอน ส่วนการใช้แสงขาวนั้นพบน้อยมาก ซึ่งในงานวิจัยนี้ขอกล่าวเฉพาะการบ่มด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต [56]

2.6.2 รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet Radiation ; UV) [56]

รังสีอัลตราไวโอเล็ต เป็นรังสีที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 100 - 400 นาโนเมตร หรือช่วงต่อจากแสงสีม่วงอยู่ระหว่างรังสีเอ็กซ์ (X-rays) กับรังสีที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (Visible light) ซึ่งสเปกตรัมของรังสีอัลตราไวโอเล็ตนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 สเปกตรัมด้วยกัน ซึ่งได้แก่

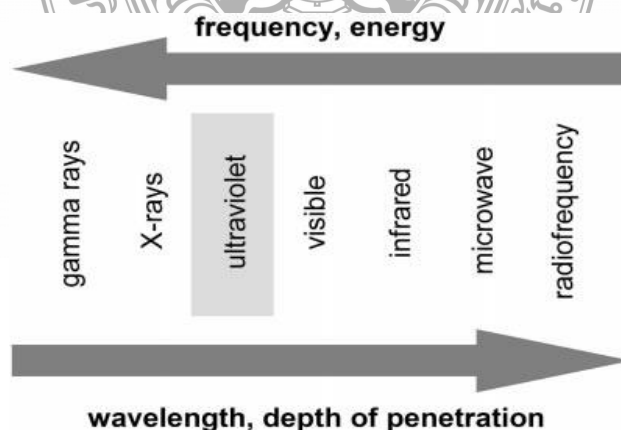
1. UV-C มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 100 – 280 นาโนเมตร เป็นรังสีที่มีอันตรายต่อร่างกายได้อย่างรุนแรง เช่น ผิวแดงไหม้เกรียม หรือเยื่อตาอักเสบ ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการฆ่าเชื้อ

2. UV-B มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 280 – 315 นาโนเมตร เป็นรังสีที่มีผลต่อร่างกายและสิ่งของได้ ก่อให้เกิดอาการไหม้ของผิวหนัง และมีการอักเสบของตาได้ แต่มีประโยชน์ในทางการแพทย์ เช่น รักษาโรคผิวหนังได้บางชนิด รวมถึงประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมเคมี

3. UV-A มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 315 – 380 นาโนเมตร เป็นรังสีที่ไม่มีอันตรายมากนัก ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน โดยเฉพาะทางด้านเคมีและฟิสิกส์

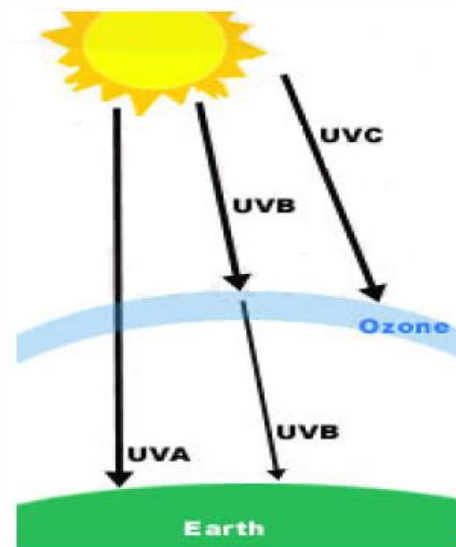
โดยทั่วไปรังสีที่มีความยาวคลื่นสั้น ความถี่จะสูง และรังสีที่มีความยาวคลื่นยาวจะมีความถี่ต่ำ

ผังรูปที่ 2.27

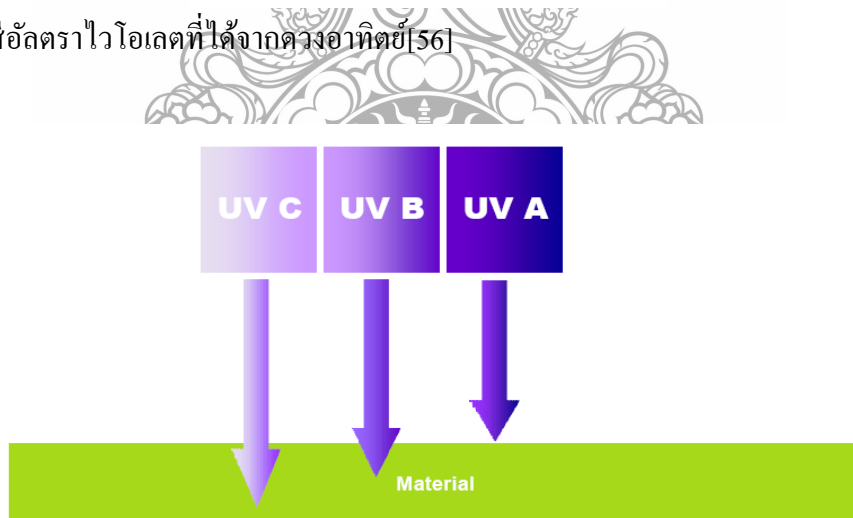


รูปที่ 2.27 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและปริมาณความถี่[56]

รังสีอัลตราไวโอเล็ตสามารถสร้างได้จากแหล่งพลังงานต่างๆ เช่น หลอดไฟ UV, หลอดแบล็คไลท์, หลอดชั้นแทน, หลอดฆ่าเชื้อ, หลอดคาร์บอนอาร์ค การเชื่อมโลหะและอุปกรณ์ในห้องทดลองหรือในธรรมชาติ ดวงอาทิตย์คือแหล่งที่ผลิตรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ใหญ่ที่สุด ซึ่งมีเพียง UV- B และ UV- A ที่สามารถผ่านโอโซนของโลกเข้ามาได้ ดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 รังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ได้จากดวงอาทิตย์[56]



รูปที่ 2.29 แสดงการทะลุทะลวงผ่านวัสดุของคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเล็ต[56]

2.7. อุปกรณ์-เครื่องมือ สำหรับการวิจัย

2.7.1 ตู้บ่มสุกด้วยแสงอัลตราไวโอเลต



รูปที่ 2.30 ตู้บ่มสุกด้วยแสงอุลตราไวโอเลต



รูปที่ 2.31 แสดงการจัดวางหลอดในตู้บ่มสุกด้วยแสงอุลตราไวโอเลต

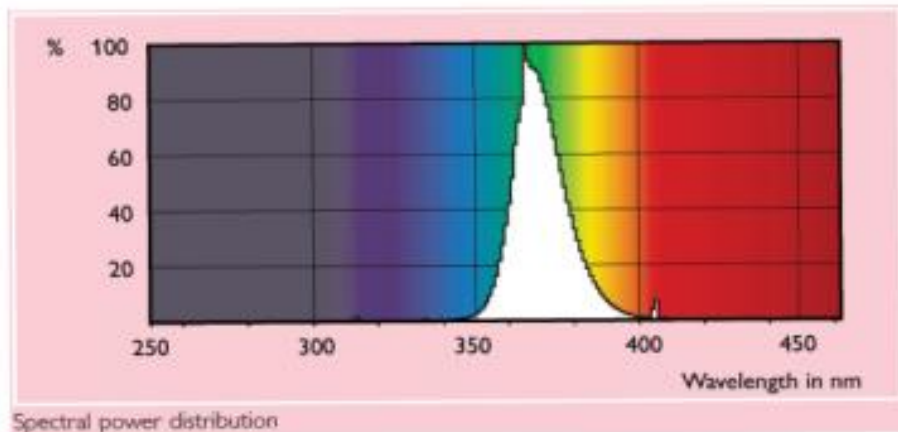
ตู้บ่มสุกนี้ภายนอกทำจากวัสดุสแตนเลสภายในตู้ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดรังสี UV-A โดยใช้หลอดไฟยี่ห้อ OSRAM ที่มีกำลังไฟ 300 W จำนวน 2 หลอด มีความยาวคลื่นอยู่ที่ 350 – 400 nm ดังรูปที่ 2.30 และ 2.31 ตารางที่ 2.2 แสดงถึงความเข้มแสงของหลอด และ ตารางที่ 2.3 แสดงความเข้มแสงภายในตู้บ่มสุก ตามลำดับ

ตารางที่ 2.2 แสดงข้อมูลการวัดความเข้มแสงของหลอดยี่ห้อ OSRAM

รุ่นหลอด	ระยะ	mw/cm ²	mJ/cm ²	mJ/cm2(วินาที)
UVA 300 W	5 cm	35	2100	60

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าความเข้มแสงที่วัดได้ภายในตู้บ่มสุก

ระยะห่างจากหลอด (cm)	หลอด 1 (mJ/cm ²)	ระหว่างหลอด (mJ/cm ²)	หลอด 2 (mJ/cm ²)
5	621	70	610
10	512	72	408
15	301	86	233
20	274	94	153
25	153	94	120



รูปที่ 2.32 แสดงความยาวคลื่นของหลอดยี่ห้อ OSRAM

2.6.2 ผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-Rolls Mill)[24]



รูปที่ 2.33 เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-Roll Mill)

เครื่องผสมแบบนี้ประกอบด้วยลูกกลิ้งสองลูกซึ่งทำจากเหล็กหล่อที่มีการเคลือบผิวให้มีความแข็งและลื่น ลูกกลิ้งทั้งสอง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 300-500 มิลลิเมตร และความยาวระหว่าง 800-1,500 มิลลิเมตร โดยวางขนานกันและ หมุนสวนทางกันด้วยความเร็วแตกต่างกันเล็กน้อย ในขณะที่ทำการผสมจะมีการให้ความร้อนแก่พลาสติกผ่านผิวลูกกลิ้งทั้งสอง โดยความร้อนของลูกกลิ้งมาจากชุดให้

ความร้อนไฟฟ้าหรือการไหลเวียนของน้ำร้อนหรือน้ำมันร้อนผ่านภายในลูกกลิ้ง ข้อดีของเครื่องผสมแบบนี้ คือ สามารถมองเห็นลักษณะและระดับการผสมเข้ากันของสารเติมแต่งและพลาสติกได้สามารถทำการผสมในปริมาณที่แตกต่างกันได้สะดวกในการทำความสะดวก รวมทั้งการผสมแบบนี้จะได้ผลิตภัณฑ์ในลักษณะแผ่น ซึ่งเหมาะสำหรับการแปรรูปต่อโดยบางเทคนิค เช่น การอัด (Compression Molding) สำหรับข้อเสียของเครื่องผสมแบบนี้ คือ ผู้ปฏิบัติงานต้องมีทักษะในการใช้เครื่องและมีความรู้เกี่ยวกับการคอมปาวด์สูง ต้องมีการช่วยผสมโดยการ ปาดพลาสติกให้เข้าไปอยู่ตรงกลางระหว่างลูกกลิ้งเสมอความสม่ำเสมอในการผสมในแต่ละครั้งค่อนข้างต่ำ และเกิดการสูญเสียสารเคมีหรือการปนเปื้อนได้ง่าย เนื่องจากการผสมในระบบเปิด

2.7.3 กระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัด

กระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีนี้เป็นวิธีเก่าแก่อีกชนิดหนึ่ง แต่ยังมีใช้ในการแปรรูปพลาสติกอย่างกว้างขวาง ในปัจจุบันนิยมใช้เทคนิคนี้ในการอัดเข้าเบ้าพลาสติกกลุ่มเทอร์โมเซต และขายนอกจากนี้ยังนิยมใช้เทคนิคนี้ในการแปรรูปเทอร์โมพลาสติกที่ทำการแปรรูปโดยเทคนิคอื่นได้ยาก เช่น การแปรรูปเทอร์โมพลาสติกที่มีการผสมไฟเบอร์ชนิดต่างๆ เช่น เส้นใยแก้ว และเส้นใยคาร์บอน เป็นต้น นอกจากนี้การแปรรูปพอลิเมอร์ในกลุ่มเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ก็นิยมใช้การอัดในการแปรรูป ในเทคนิคการอัด ใช้เครื่องอัดเข้าที่ไม่มี ความซับซ้อน ส่วนประกอบหลักของเครื่อง คือแผ่นเหล็กอัด (platens) จำนวนสองชุด ซึ่งแผ่นหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ลงได้อีกแผ่นจะถูกยึดติดกับที่ ทำให้สามารถทำการปิดและเปิดเข้าได้ เนื่องจากเข้าถูกยึดติดกับแผ่นเหล็กทั้งสองแผ่นนี้ ส่วนประกอบอื่นๆคือ อุปกรณ์ให้ความร้อน ระบบไฮดรอลิก และอาจจะมีอุปกรณ์หล่อเย็น ลักษณะเครื่องที่ใช้ในการแปรรูปพลาสติกโดยการอัด[24]

ข้อดีและข้อเสียของการแปรรูปพลาสติกโดยการอัด มีดังนี้

- เบ้าราคาถูกและผลิตได้ง่าย
- มีการสูญเสียวัสดุน้อยมาก กล่าวคือมีส่วนที่เป็น flash จากการอัดเพียงเล็กน้อย

(ประมาณ 2-5% เท่านั้น)

- โมเลกุลของพลาสติกเกิดการเรียงตัวใหม่ (orientation) น้อยมาก เนื่องในระหว่างการอัดเกิดการไหลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น การจัดเรียงตัวของโมเลกุลมีอิทธิพลต่อสมบัติของพลาสติกบางชนิดมาก

- เครื่องอัดมีราคาสูงกว่า เครื่องแปรรูปพลาสติกชนิดอื่นๆ
- ไม่เกิดเส้นรอยเชื่อม (weld line) บนชิ้นงาน เช่นเดียวกับการเกิดในการแปรรูปโดยการฉีดพลาสติกเข้าเบ้า (injection molding) เส้นรอยเชื่อมเป็นจุดอ่อนที่ทำให้ชิ้นงานแตกหักได้ง่าย ตัวอย่างของชิ้นงานที่แตกต่างกัน ที่ได้จากการอัด และการฉีดพลาสติกเข้าเบ้า
 - เบ้าที่ใช้ในการอัดไม่มีท่อวิ่ง (runners) ท่อนำ (sprue) และประตูเข้า (gates) จึงทำให้ไม่มีรอยตำหนิ (scars) บนชิ้นงาน ในตำแหน่งที่ต้องตัดส่วนประตูเข้าหลังจากถอดชิ้นงานออกจากเบ้า เช่นเดียวกับกรณีการฉีดเข้าเบ้า แม้ว่าการอัดจะมีข้อได้เปรียบดังได้กล่าวมาแล้ว แต่เทคนิคนี้ก็มีข้อเสียเปรียบหลายประการ สรุปได้ดังนี้
 - คอมปาวด์ในช่องว่างของเบ้ามีลักษณะเป็นของแข็งหรือกึ่งของแข็ง ดังนั้นในขณะที่ทำการอัด ทำให้เกิดความเครียดภายในเบ้าสูงมาก จึงไม่สามารถสอใดสักตัวใดๆ เช่น โลหะ ลงในเบ้าได้ จึงทำให้ไม่สามารถทำผลิตภัณฑ์แบบหุ้มโดยใช้เทคนิคนี้ได้ ทั้งนี้เนื่องจากจะทำให้โลหะที่ใส่ลงไปบิดเบี้ยว และเบ้าเกิดการเสียหายในขณะที่ทำการอัด
 - ไม่สามารถผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้ ตัวอย่างชิ้นงานที่กล่าวถึง เช่น ชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นแท่งเหลี่ยมยาวและมีขนาดเล็ก และแท่งทรงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางน้อย เป็นต้น ดังนั้นเทคนิคการอัด ใช้กับการผลิตชิ้นงานที่มีรูปทรงง่ายเท่านั้น
 - เวลาของวัฏจักรของการผลิต (cycle time) ค่อนข้างยาว
 - การผลิตชิ้นงานที่หนา ต้องใช้เวลานาน เนื่องจากคอมปาวด์มีสมบัติเป็นฉนวนความร้อน จึงต้องใช้เวลาในการแปรรูปเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์
 - จำเป็นต้องมีการตัด flash ทั้งเสมอ



รูปที่ 2.34 เครื่องอัดแบบอัตโนมัติที่ใช้ในการอัดชิ้นงานทรงแบน

2.8 ทฤษฎีการทดสอบ

2.8.1 ทฤษฎีการทดสอบสมบัติเชิงกล

2.8.1.1. การทดสอบความต้านทานการโค้งงอ (Flexural Strength) ตามมาตรฐาน ASTM

D790

ความสามารถของวัสดุที่จะสามารถทนต่อแรงที่ทำให้ตัวอย่างโค้งงอ โดยไม่เกิดการแตกหรือเสียหายของตัวอย่างเมื่อหุคให้แรง เป็นปัจจัยสำคัญสำหรับพอลิเมอร์ที่ถูกนำไปใช้งานบางประเภท เช่น ขางล้อรถ ล้อเฟือง โครงสร้างของยานยนต์ เรือ และเครื่องบิน เป็นต้น วิธีการทดสอบและค่า Flexural Strength สามารถหาได้จากสมการ[25]

$$\text{Flexural strength} = \frac{3FL}{2wh^2}$$

เมื่อ F = น้ำหนักที่ทำให้เกิดการแตกของพอลิเมอร์

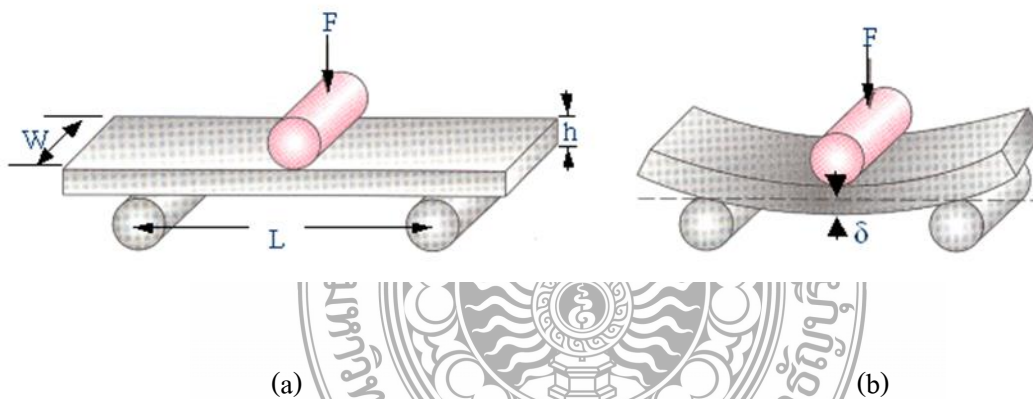
L = ระยะห่างระหว่างตำแหน่งของวัสดุที่รองรับตัวอย่าง

W = ความกว้างของตัวอย่าง

h = ความสูงของตัวอย่าง

โมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ในการทำให้ตัวอย่างโค้งงอสามารถคำนวณได้จากสมการข้างล่าง เมื่อ δ คือระยะที่ตัวอย่างเกิดการโค้งงอเมื่อถูกกดด้วยแรง F [25]

$$\text{Flexural modulus} = \frac{L^3 F}{4wh^3 \delta}$$

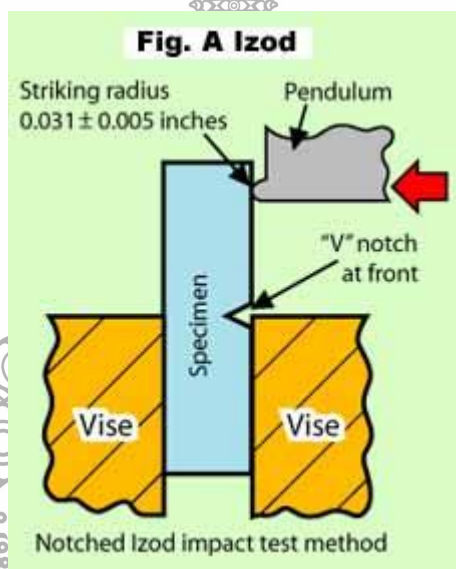


รูปที่ 2.35 การทดสอบการโค้งงอของพอลิเมอร์ (bend test)[24]

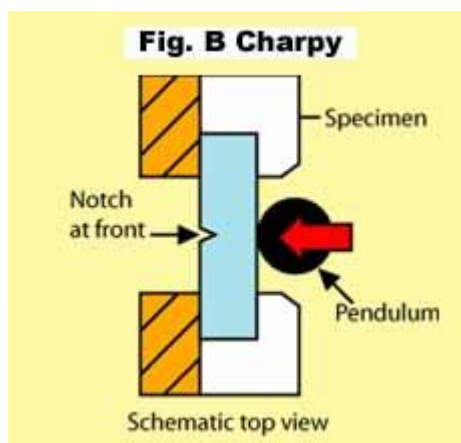
(a) ตัวอย่างก่อนใช้แรงกดให้โค้งงอ

(b) ค่า δ เมื่อตัวอย่างเกิดการโค้งงอ

2.8.1.2. การทดสอบการทนแรงกระแทก (Impact Testing) ตามมาตรฐาน ASTM D 256 เป็นการทดสอบเพื่อทำการวัดค่า Impact Energy, Impact Transition Temperature (ITT) และศึกษาผิวรอยแตก (Fracture Surface) ของวัสดุ โดยการตีขึ้นทดสอบขนาดมาตรฐาน จนเกิดการแตกหัก จุดประสงค์ในการทำการทดสอบเพื่อศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการรับแรงกระแทก (Dynamic Load) ของวัสดุ สำหรับค่าที่นิยมวัดมากที่สุดในการทดสอบแรงกระแทก คือ ค่า Impact Energy ซึ่งเป็นพลังงานที่วัสดุจะดูดซับไว้ได้เมื่อได้รับแรงกระแทก (Dynamic Impact Force) จนเกิดการแตกหัก โดยมีวิธีการทดสอบมีอยู่ 2 วิธี ได้แก่ Charpy Impact Test และ Izod Impact Test ดังนี้ [25]

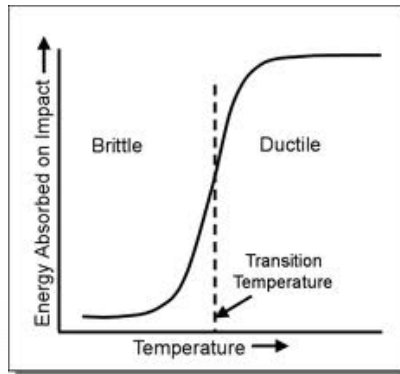


รูปที่ 2.36 Izod Impact Test [26]



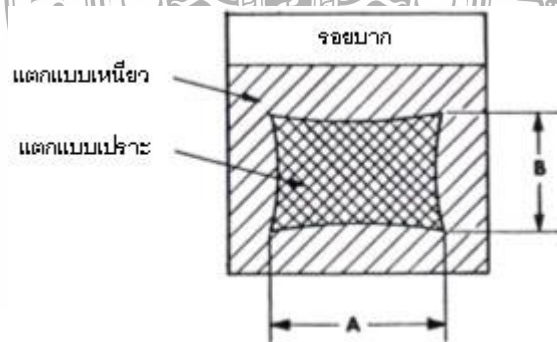
รูปที่ 2.37 Charpy Impact Test [26]

วิธีการทดสอบของทั้ง 2 ชนิดนี้คล้ายกัน คือ จะวางชิ้นงานทดสอบไว้รับแรงกระแทกจากการเหวี่ยงของลูกตุ้มที่น้ำหนักค่าหนึ่ง (น้ำหนักและขนาดของตุ้มน้ำหนักจะต้องเป็นไปตามที่มาตรฐานที่เลือกใช้ในการทำการทดสอบระบุไว้) พลังงานที่กระแทกขึ้นทดสอบขึ้นอยู่กับมวลของลูกตุ้ม และความเร็วของมันขณะกระแทก จุดกระแทกจะเป็นจุดต่ำสุดของการเหวี่ยง ซึ่งเป็นจุดที่ลูกตุ้มมีความเร็วสูงที่สุด เมื่อลูกตุ้มกระทบชิ้นทดสอบ ลูกตุ้มจะเสียพลังงานไปจำนวนหนึ่งในการทำให้ชิ้นทดสอบหัก ค่าพลังงานที่เสียไปนี้ก็คือ ค่า Impact Energy ข้อแตกต่างระหว่าง Charpy และ Izod ก็คือ การวางชิ้นงานทดสอบ โดย Charpy test จะวางชิ้นทดสอบไว้ในแนวระดับ และให้ลูกตุ้มตกกระแทกที่ด้านตรงข้ามกับรอยบาก ส่วน Izod Test จะวางชิ้นทดสอบไว้ในแนวตั้งและให้ลูกตุ้มกระแทกกับด้านที่มีรอยบาก ชิ้นทดสอบจะเป็นแท่งยาว มีพื้นที่ภาคตัดขวางเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส และมีรอยบากอยู่ตรงกลาง รอยบากนี้จะทำเป็นรูปตัว V, U หรือรูปรูกลุณแฉะ ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและมาตรฐานการทดสอบที่เลือกใช้ อุณหภูมิมีผลต่อความเหนียวอย่างมาก วัสดุเหนียวอาจจะเปลี่ยนเป็นวัสดุเปราะได้เมื่ออุณหภูมิต่ำลง ถ้าเรานำค่า Impact Energy มาพลอตกับอุณหภูมิ เราจะพบว่า มีอุณหภูมิอยู่ช่วงหนึ่งซึ่งมีค่าของ Impact Energy ลดลงอย่างรวดเร็ว ดังภาพ ค่าอุณหภูมิในช่วงนี้เรียกว่า Impact Transition Temperature (ITT)



รูปที่ 2.38 แนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับ Impact Transition Temperature และอิทธิพลของอุณหภูมิต่อความเหนียว (ความเหนียว-เปราะ) ของวัสดุ [26]

ค่า ITT นี้เป็นอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุจากวัสดุเหนียวมาเป็นวัสดุเปราะ คือ เปลี่ยนจากวัสดุเหนียวที่มีค่าพลังงานสูงมาเป็นวัสดุเปราะซึ่งมีพลังงานต่ำ โดยทั่วไปเราจะกำหนดค่า ITT เป็นค่าเดียว โดยวิธีในการกำหนดค่า ITT มีอยู่หลายวิธี เช่น การตรวจสอบผิวรอยแตก (Fracture Surface) ของชิ้นงานที่แตกหักจากการทดสอบแรงกระแทก หรือการกำหนดค่า ITT โดยใช้ อุณหภูมิที่ผิวรอยแตกของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกมีส่วนส่วนของพื้นที่ที่เกิดการแตกแบบเปราะ (Brittle Fracture) กับพื้นที่ที่แสดงการแตกแบบเหนียว (Ductile Fracture) เป็น 50:50 พอดี (ซึ่งมีชื่อเรียกเฉพาะว่า Fracture Appearance Transition Temperature - FATT)



รูปที่ 2.39 ลักษณะพื้นที่รอยแตกแบบเปราะและแบบเหนียวในการทดสอบแรงกระแทก[26]

สำหรับวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ กำหนดค่า Impact Energy ค่าหนึ่งขึ้นมาเป็นเกณฑ์ โดย
ควรมีค่ามากกว่าพลังงานที่วัสดุจะได้รับในระหว่างการใช้งาน ถ้าวัสดุทดสอบแล้วมีค่า Impact
Energy ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด ก็ถือว่าเป็นวัสดุเปราะซึ่งอาจเกิดการแตกหักได้ง่าย จึงไม่ควรจะนำมาใช้
งาน และกำหนดค่า ITT โดยให้มีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่ทดสอบได้ค่า Impact Energy เท่ากับเกณฑ์ที่กำหนด
พอดี (ITT ที่กำหนดโดยวิธีนี้เรียกว่า Ductility Transition Temperature) ค่าพลังงานแรงกระแทกที่ใช้เป็น
เกณฑ์ คือ 20 J

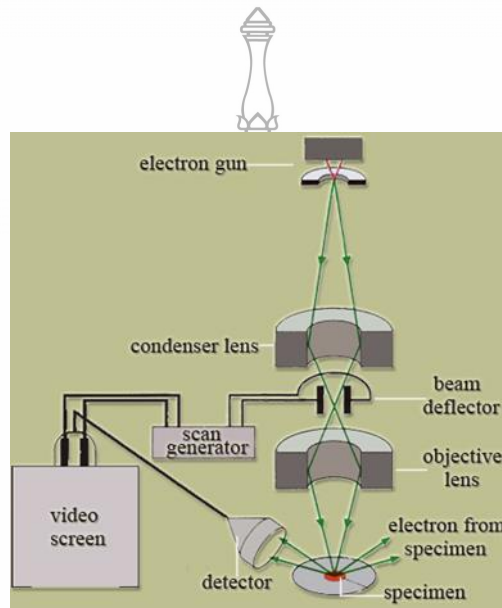
เนื่องจากแต่ละมาตรฐานการทดสอบ จะใช้ชิ้นทดสอบที่มีขนาดและลักษณะรอยบากที่ต่างกัน
ตลอดจนพลังงานที่ใช้ในการทดสอบก็ต่างกัน ดังนั้นจึงขึ้นอยู่กับความเหมาะสม ของการเลือกใช้
มาตรฐานต่างๆในการทดสอบ

2.8.2 ทฤษฎีการทดสอบสมบัติทางกายภาพ[27]

2.8.2.1. การศึกษาพื้นฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
(Scanning Electron Microscope (SEM))

เป็นเครื่องมือที่ใช้ส่องดูอนุภาคลักษณะของพอลิเมอร์ผสมด้วยกล้องจุลทรรศน์
อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ใช้ส่องวัตถุวัตถุที่มีขนาดเล็กขยายให้เห็นลักษณะ โครงสร้างพื้นผิวของ
ตัวอย่างให้ภาพลักษณะสามมิติ ศึกษาตัวอย่างที่มีขนาดตั้งแต่ 1 เซนติเมตร จนถึง 100 นาโนเมตร
โครงสร้างพื้นฐานและองค์ประกอบที่ทำให้เกิดการมองเห็นของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง
กราดจะคล้ายกับกล้องจุลทรรศน์ธรรมดาแบบสเตอริโอ กล้อง SEM มีแหล่งกำเนิดแสงเป็นอิเล็กตรอน ที่
ถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าในสภาพสุญญากาศ เพื่อให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงและมีพฤติกรรมคล้ายคลื่น
แสง สามารถบังคับให้คลื่นอิเล็กตรอนมีขนาดความยาวคลื่นที่สั้นมากๆ ได้เลนส์รวมแสงและเลนส์ใกล้
วัตถุ เป็นระบบเลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งควบคุมด้วยระบบไฟฟ้า จะทำหน้าที่ในการบีบลำแสง
อิเล็กตรอนให้เป็นรูปกรวยที่เล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ให้โฟกัสลงบนตัวอย่าง จากนั้นลำแสงรูปกรวย
จะถูกบังคับด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าชุดควบคุมการสแกนให้เคลื่อน ไปบนผิวตัวอย่าง ในแนวแกนนอน
และแกนตั้งเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าคล้ายระบบสแกนของโทรทัศน์ ในขณะที่เดียวกันสัญญาณอิเล็กตรอน
ทุติยภูมิที่เกิดขึ้น เมื่อลำแสงรูปกรวยเคลื่อนที่ไปบนผิวตัวอย่างจะถูกรวบรวมโดยอุปกรณ์วัดสัญญาณ ซึ่ง

จะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า แล้วผ่านท่อนำแสงไปยังเครื่องขยายแสง ถูกส่งต่อไปยังหลอดภาพปรากฏเป็นสัญญาณภาพขึ้นบนจอรับภาพ ลำแสงที่ส่องกราดเป็นเส้นบนจอรับภาพจะเคลื่อนไปในทิศทางและเวลาเดียวกันกับลำแสงอิเล็กตรอนที่ส่องกราดไปบนผิวตัวอย่างซึ่งถูกควบคุมด้วยระบบไฟฟ้ากำลังขยายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างขนาดความกว้างของเส้นสแกนบนจอรับภาพกับขนาดความกว้างของเส้นสแกนบนพื้นผิวตัวอย่าง

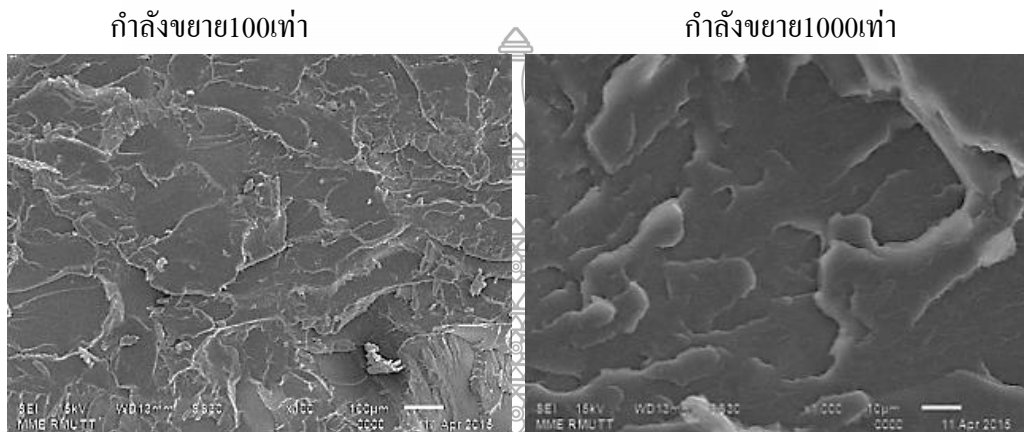


รูปที่ 2.40 ส่วนประกอบของเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)[28]

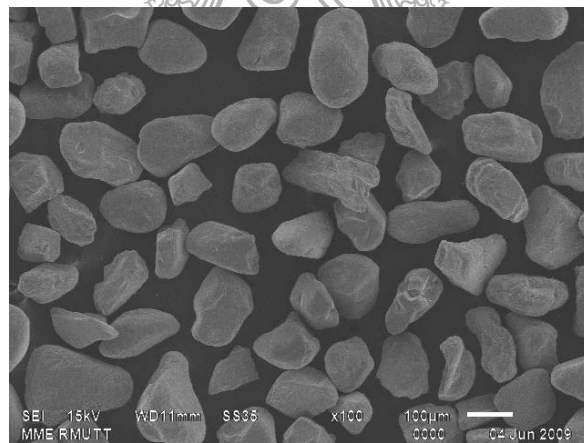


รูปที่ 2.41 เครื่อง Scanning Electron Microscope

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่ใช้ในการวิเคราะห์หี้อ JEOL รุ่น JSM-6510 มีกำลังขยาย 5 ถึง 300000 เท่า เป็นยิงอิเล็กตรอนมีกระแสอยู่ที่ 0.5 - 30 kV ที่ยึดชิ้นงานสามารถเคลื่อนที่ในแนว แกนX: 80 mm แกนY: 40 mm แกนZ: 5 mm ถึง 48 mm เอียง -10° to 90° หมุนได้: 360°



รูปที่ 2.42 รูปตัวอย่างแสดงรอยแตกหักของพอลิเอสเตอร์ที่ได้จากการใช้ Scanning Electron Microscope



รูปที่ 2.43 รูปตัวอย่างแสดงขนาดอนุภาคของแร่อลูมินาที่ กำลังขยาย100เท่า [29]

2.8.2.2 การวัดสมบัติการไหล (Rheology) [30]

รีโอโลยี (Rheology) หมายถึง การศึกษาการเสียรูปและการไหลของวัตถุอันเนื่องมาจากแรงที่มากระทำ เมื่อวัตถุดังกล่าวเกิดการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงที่มากระทำ เราอาจเรียกวัตถุนั้นว่าเป็นของไหล (fluids) โดยหากพิจารณาลักษณะของการไหลในรูปแบบต่างๆ เราสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

- การไหลแบบลามินาร์ (laminar flow) หมายถึง กระแสการไหลของของไหลที่มีรูปแบบที่แน่นอนตลอดระยะเวลาของการไหล ลักษณะของการไหลค่อนข้างเรียบง่ายและไม่ซับซ้อน

- การไหลแบบเทอร์บูเลนต์ (turbulent flow) หมายถึง กระแสการไหลของของไหลที่ไม่มีรูปแบบแน่นอนตลอดระยะเวลาของการไหล ลักษณะของการไหลค่อนข้างปั่นป่วนและซับซ้อน โดยเกิดจากการที่ของไหลมีการเปลี่ยนแปลงของเส้นทางการไหล (flow path) จากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง

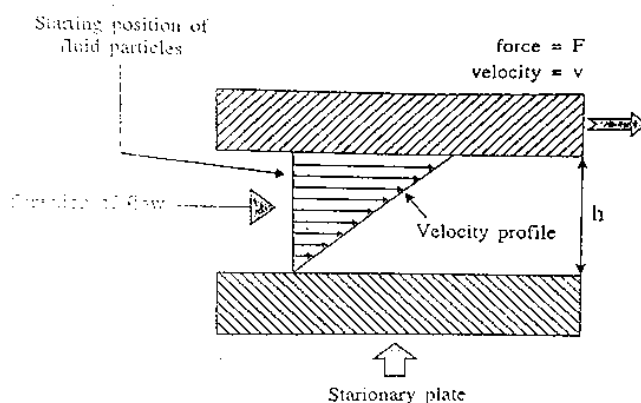
- การไหลแบบนิ่ง (steady flow) หมายถึง การที่ของไหล ณ ตำแหน่งๆ ของเส้นทางการไหล (flow path) มีความเร็วในการไหลคงที่ ตลอดระยะเวลาและความยาวของการไหล

- การไหลแบบไม่นิ่ง (non-steady flow) หมายถึง การที่ของไหล ณ ตำแหน่งๆ ของเส้นทางการไหล (flow path) มีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว ตลอดระยะเวลาและความยาวของการไหล

ในการพิจารณาการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบอันได้แก่ การไหลในรูปแบบที่เกิดจากแรงเฉือน (shear flow) และการไหลในรูปแบบที่เกิดจากแรงดึงหรือแบบยืด (elongation flow) โดยการไหลในรูปแบบแรกเป็นการไหลที่มีความสำคัญอย่างมาก เพราะเป็นการไหลที่เกิดขึ้นในเครื่องมือผสมและเครื่องมือขึ้นรูปชนิดต่างๆ ส่วนการไหลในรูปแบบที่เกิดจากแรงดึงมีความสำคัญในกระบวนการผลิตฟิล์มหรือกระบวนการเป่าขวด

การไหลในรูปแบบที่เกิดจากแรงเฉือน (shear flow) รูปแบบของการไหลแบบนี้เป็นการไหลในรูปแบบที่เกิดจากแรงเฉือนโดยการไหลในรูปแบบนี้ต้องมีผนังหรือผิวการไหล (plates หรือ surface) เข้าเกี่ยวข้องซึ่งการไหลรูปแบบนี้สามารถแบ่งย่อยอีกได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่การไหลที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแผ่นประกบคู่ด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน (flow between moving plates) และการไหลในท่อที่มีความแตกต่างของความดัน (pressure-driven flow)

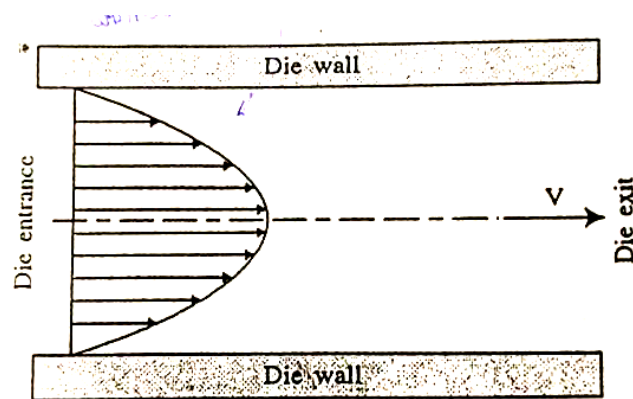
การไหลที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแผ่นประกบคู่ด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน การไหลที่เกิดจากแรงเฉือนในรูปแบบนี้ เกิดขึ้นเมื่อมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่แตกต่างกันของแผ่นประกบคู่ที่มีพอลิเมอร์หลอมเหลวอยู่ระหว่างกลาง ดังรูปที่ 2.44 จากรูปเห็นได้ว่าพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลอยู่ระหว่างแผ่นประกบคู่ที่มีระยะห่างเท่ากับ ความสูง(h) ด้วยความเร็วที่ต่างกัน โดยพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ติดอยู่กับแผ่นที่เคลื่อนที่ (moving plate) มีความเร็วสูงที่สุด และความเร็วจะลดลงเมื่อเข้าไปใกล้แผ่นที่อยู่กับที่ (fixed plate) ตัวแปรที่สำคัญของการไหลในรูปแบบนี้คือ ค่าของความเค้นเฉือน (shear stress) ที่เกิดขึ้นเท่ากันตลอดทั้งระนาบของแผ่นประกบ โดยไม่ขึ้นกับระยะห่าง ความสูง(h) ตัวอย่างการไหลในรูปแบบนี้ที่เห็นได้อย่างชัดเจนคือ การไหลของพอลิเมอร์ในช่วงเกลียวหนอนของเครื่องอัดรีด (extruder screw channel) โดยเกลียวหนอนสามารถเปรียบได้กับแผ่นที่เคลื่อนที่ ส่วนผนังของเครื่องอัดรีด เปรียบเสมือนแผ่นที่อยู่กับที่ ดังนั้น เมื่อเกลียวหนอนหมุนจะเกิดแรงเฉือนขึ้นกับพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ไหลอยู่ภายในเครื่องอัดรีด



รูปที่ 2.44 การไหลที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแผ่นประกบคู่ด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน[30]

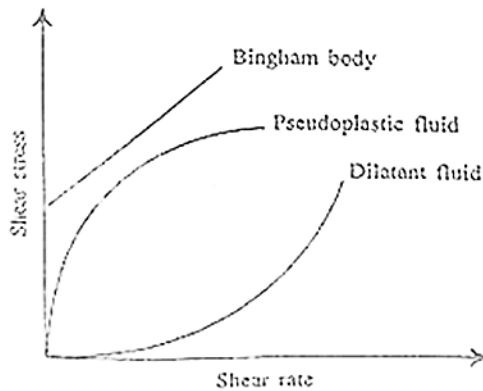
การไหลในท่อที่มีความแตกต่างของความดันการไหลในรูปแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีความแตกต่างของความดันภายในท่อ โดยพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลจากปลายด้านที่มีความดันสูงไปยังปลายท่อด้านที่มีความดันต่ำกว่าดังแสดงในรูปที่ 2.45 จากรูปเห็นได้ว่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งติดกับผนังท่อและต่ำสุดที่ตำแหน่งกลางท่อ ส่วนความเร็วของพอลิเมอร์หลอมเหลวมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งกลางท่อและต่ำสุดที่ตำแหน่งติดกับผนังท่อ ตัวอย่างการไหลในรูปแบบนี้ที่เห็นได้ชัด เช่น การไหลของน้ำประปาในท่อ โดยด้านปลายท่อส่งน้ำที่ห่างจากสถานีจ่ายน้ำจะมีแรงดันลดลงจากด้านที่ติดกับสถานีส่ง

น้ำ ตัวอย่างอื่นของการไหลในรูปแบบนี้ได้แก่ การไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวในแม่พิมพ์ และการไหลในหัวขึ้นรูป (extrusion die) ส่วนการคำนวณหาความเค้นเฉือน (shear stress) ความเครียดเฉือน (shear strain) และอัตราการเปลี่ยนความเครียดเฉือน (shear strain rate)



รูปที่ 2.45 การไหลที่เกิดจากความแตกต่างของความดันภายในท่อ[30]

ของไหลนอนนิวโตเนียน (non-Newtonian fluids) ของไหลที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้จะมีสมบัติไม่เหมือนกับของไหล Newtonian กล่าวคือ shear viscosity จะเปลี่ยนไปเมื่อมีการเปลี่ยนอัตราเครียดเฉือน (shear rate) โดยเราจะแบ่งของไหลในกลุ่มนี้ออกเป็นกลุ่มย่อยได้อีก 3 ประเภทคือ ของไหลไดเลแทน (dilatant fluid) ของไหลซูโดพลาสติก (pseudoplastic) และของไหลบิงแฮม (bingham) เป็นต้น โดยรูปที่ 2.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนและอัตราเครียดเฉือนของของไหลนอนนิวโตเนียน และรูปที่ 2.47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดและค่าอัตราเครียดเฉือนของของไหลนอนนิวโตเนียน



รูปที่ 2.46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนและอัตราเฉือนของของไหลในกลุ่มนอนนิวโตเนียน[30]

ของไหลชนิด Dilatant

ของไหลในกลุ่มนี้เป็นของไหลที่มีค่าความหนืดเฉือน (shear viscosity) สูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มค่าอัตราเฉือน (shear rate) ดังแสดงในรูปที่ 2.46 และ 2.47 โดยเชื่อกันว่ามีสาเหตุมาจากการที่โมเลกุลจับตัวเข้าด้วยกันหรือโมเลกุลมีการเกี่ยวพันกันหนาแน่นขึ้นเมื่อได้รับแรงกระทำตัวอย่างของไหลที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ได้แก่ ทรายชุ่มไปด้วยน้ำ เจลของพิววีซี สารแขวนลอยของไททานเนียมไดออกไซด์ และ น้ำแป้ง เป็นต้น

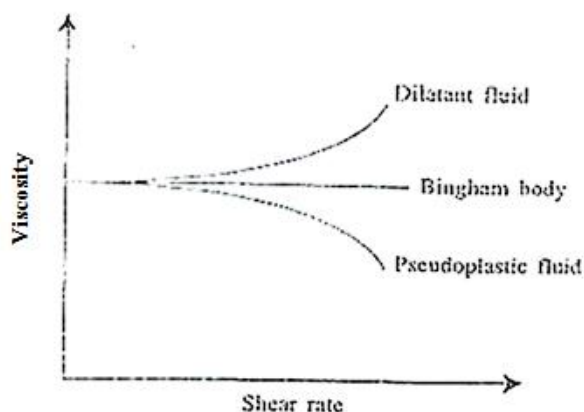
ของไหลชนิด Bingham

ของไหลที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้มีการไหลเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีค่าความเค้นเฉือนสูงเกินค่าหนึ่งซึ่งเรียกค่าความเค้นเฉือนนี้ว่า ความเค้นเฉือนคราก (yield stress) และเมื่อของไหลเกิดการไหลแล้ว จะมีพฤติกรรมการไหลในรูปแบบของนิวโตเนียนตามที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งสามารถแสดงใน รูปที่ 2.46 ตัวอย่างของของไหลที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ได้แก่ ซอสมะเขือเทศ สี ไขมันสัตว์ น้ำผลไม้ข้น โคลนตม ยาสีฟัน ตะกอนของเสีย เชื้อกระดาษ และ จาระบี เป็นต้น

ของไหลชนิด Pseudoplastic

ของไหลในกลุ่มนี้มีความสำคัญเป็นอย่างมาก เพราะพอลิเมอร์หลอมเหลวส่วนใหญ่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ ลักษณะที่สำคัญก็คือค่าความหนืดเฉือนของของไหลประเภทนี้ลดลงเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น หรือกล่าวได้อีกอย่างว่าอัตราการเพิ่มของค่าความเค้นเฉือนต่อการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราเฉือนมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.46 และ 2.47 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการลดลงของค่าความหนืดเมื่อเพิ่มค่าอัตรา

ครีมข้น ซึ่งสามารถอธิบายการลดลงของความหนืดเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ shear rate จะเห็นได้ว่า ขณะที่อัตราครีมข้นเพิ่มสูงขึ้น จะเกิดการคลายตัวของสายโซ่โมเลกุลที่พันกันมากขึ้น และส่งผลให้ค่าความหนืดของพอลิเมอร์ลดลง ตัวอย่างของของไหลที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ได้แก่ พอลิเมอร์หลอมเหลว สารละลาย พอลิเมอร์ หมึก และ เลือด เป็นต้น



รูปที่ 2.47 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดและค่าอัตราครีมข้นของของไหลในกลุ่มนอนนิวโตเนียน[30]

เครื่องรีโอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราครีมข้น (rate-controlled capillary rheometer) ลักษณะของเครื่องรีโอมิเตอร์ในกลุ่มที่นิยมมากที่สุดในการศึกษาสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว โดยหลักการเครื่องรีโอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราครีมข้นนี้ จะตรงข้ามกับแบบเครื่องรีโอมิเตอร์แบบควบคุมความเค้นเฉือนที่ได้กล่าวมาแล้ว นั่นคือเราจะควบคุม shear stress ก็จะได้คำนวณหาจากค่าของความดันตกคร่อมที่วัด ณ ตำแหน่งก่อนเข้าหัวขึ้นรูป (die) และด้วยเหตุนี้ข้อผิดพลาดที่เกิดจาก friction และจาก pressure drop ในกระบอกสูบจะไม่เกิด

-ด้านความสะดวกรวดเร็ว ในกรณีของเครื่องรีโอมิเตอร์แบบควบคุมความเค้นเฉือนผู้ทดสอบต้องทำการคำนวณค่า shear rate โดยอาศัยข้อมูลการทดสอบอื่นๆ ประกอบการคำนวณ เช่น ความหนาแน่นของพอลิเมอร์หลอมเหลว ซึ่งอาจต้องดำเนินการทดสอบอิสระ ทำให้ยุ่งยากต่อการทดสอบ หรือในกรณีที่ใช้ ball bearing การบรรจุพอลิเมอร์ลงใน barrel ทุกครั้งต้องมีการนำ ball bearing ออกมาทุกครั้ง ดังนั้น เครื่องรีโอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราครีมข้นน่าจะสะดวกเร็วกว่า

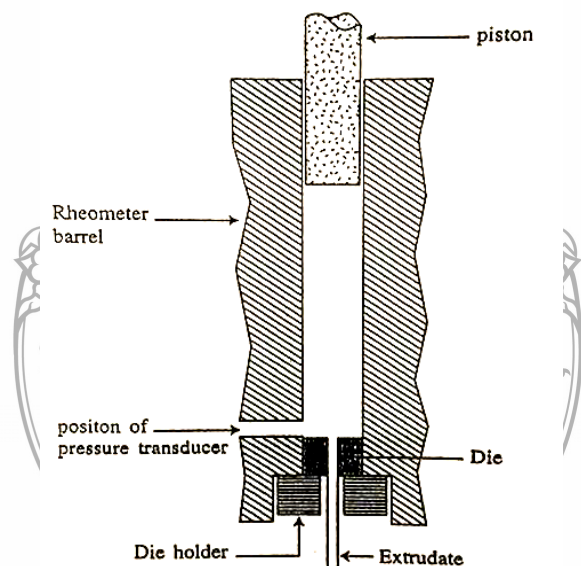
- ความผิดพลาดโดยรวม กรณีของเครื่องรีโอมิเตอร์แบบควบคุมความเค้นเฉือนต้องการข้อมูลเพิ่มเติมจากแหล่งอื่นมาประกอบการคำนวณ อาจส่งผลให้เกิดความผิดพลาดได้มากกว่ากรณีของเครื่องรีโอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราครีมข้น

โอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราเครียดเฉือน ที่ข้อมูลทั้งหมดมาจากแหล่งเดียวกัน ข้อมูลอื่นจากการทดลองแยกอิสระอาจเกิดความผิดพลาดเนื่องจากสมบัติของพอลิเมอร์ในสภาวะการทดสอบอาจแตกต่างกัน

- ความผิดพลาดจาก friction ที่บริเวณผนัง barrel หากทำการเลือกเครื่องรีโอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราเครียดเฉือน จะทำให้ลดข้อผิดพลาดเรื่อง friction และ pressure drop ที่วัดได้มากกว่าการใช้เครื่องรีโอมิเตอร์แบบควบคุมความเค้นเฉือน

- ช่วงการทดสอบ เครื่องรีโอมิเตอร์แบบควบคุมความเค้นเฉือนสามารถปรับย่านหรือช่วงการทดสอบได้สูง (ทั้งแบบระบบ piston และแบบ ball bearing) ดังนั้น บางครั้งผู้อ่านอาจเคยได้ยินเครื่อง rheometers ในชื่อเรียกว่า high shear viscometers ซึ่งก็หมายถึงเครื่องรีโอมิเตอร์แบบควบคุมความเค้นเฉือนเช่นกัน

- ราคาเครื่องถึงแม้ว่าเครื่องรีโอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราเครียดเฉือนค่อนข้างนิยมใช้แพร่หลายและสะดวกรวดเร็วกว่า แต่ในแง่ราคาแล้ว เครื่องรีโอมิเตอร์แบบควบคุมความเค้นเฉือนมีราคาต่ำกว่า



รูปที่ 2.48 เครื่องรีโอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราเครียดเฉือน[30]



รูปที่ 2.49 เครื่อง capillary rheometer

2.8.2.3 การวัดค่าความหนาแน่นด้วยเทคนิคชั่งน้ำ – ชั่งอากาศ

การวัดค่าความหนาแน่นได้จากค่าความถ่วงจำเพาะโดยนิยามแล้วค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) ของพอลิเมอร์จะหมายถึงสัดส่วนระหว่างน้ำหนักของวัสดุพอลิเมอร์ที่ทดสอบเทียบกับน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่าวัสดุ ณ อุณหภูมิที่กำหนด (เช่น 23 องศาเซลเซียส) ดังนั้นค่าความถ่วงจำเพาะจึงเป็นค่าที่ไม่มีหน่วย

ค่าความถ่วงจำเพาะถือเป็นจุดเด่นของวัสดุพอลิเมอร์เนื่องจากพอลิเมอร์จะมีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับวัสดุประเภทอื่น ๆ เช่น โลหะ หรือ เซรามิกส์ นอกจากนี้ในบางกรณีผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์จะมีการเติมสารเติมแต่ง (additive) ลงไปด้วยซึ่งจะส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นการวัดความถ่วงจำเพาะหรือความหนาแน่นของพอลิเมอร์จึงมีความสำคัญในแง่ของการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์

ตามมาตรฐาน ASTM D 792 แล้วการวัดค่าความถ่วงจำเพาะของพลาสติกสามารถทำได้ 2 วิธี ทั้งนี้ทั้งนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะรูปทรง (form) ของวัสดุที่จะทดสอบ โดยวิธีที่ 1 (method A) จะใช้กับวัสดุที่อยู่ในรูปของ sheet, rods, tubes หรือ ชิ้นงานที่ขึ้นรูปแล้ว

ในขณะที่วิธีที่ 2 (method B) จะพัฒนาขึ้นมาสำหรับใช้กับวัสดุที่อยู่ในรูปของผง (powder) หรือเกล็ด (flakes) หรือเม็ดพลาสติก (pellets) ที่ยังไม่ได้ขึ้นรูป

การทดสอบวิธีที่ 1 (method A)

วิธีนี้ ต้องการใช้เครื่องชั่งที่มีความละเอียดสูง โดยมีอุปกรณ์ที่สำคัญดังนี้

- ฐานรอง (stationary support) เพื่อที่จะใช้เป็นที่ยาวภาชนะบรรจุน้ำ (immersion vessel) บริเวณด้านล่างของตาชั่ง เพื่อไว้สำหรับจุ่มชิ้นงานทดสอบลงในภาชนะบรรจุน้ำนั้น (immersion vessel)
- ลวด (ที่ทนต่อการกัดกร่อนหรือเกิด corrosion ในของเหลวที่จะจุ่มชิ้นงานลงไป) โดยลวดดังกล่าว ใช้สำหรับแขวนชิ้นงานจากแขนของตาชั่งลงสู่ภาชนะบรรจุน้ำดังกล่าว
- ตัวถ่วง (sinker) เพื่อช่วยให้วัสดุที่จะทดสอบไม่ลอยอยู่บนของเหลวที่ต้องการจะจุ่มลงไป (ในกรณีที่วัสดุทดสอบมีค่า specific gravity < 1)

หาค่า ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity)

จากสูตร

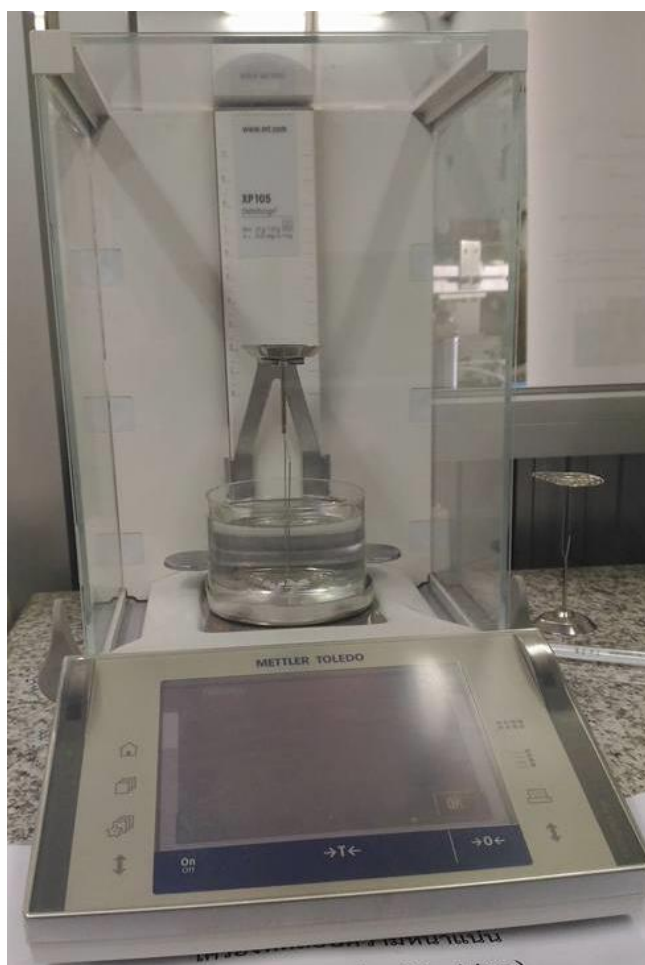
$$D = \left(\frac{A}{A - W} \right) \times d$$

เมื่อ D คือ ความถ่วงจำเพาะ

A คือ น้ำหนักชั่งบนอากาศ

W คือ น้ำหนักชั่งในของเหลว

d คือ ค่าความหนาแน่นของของเหลว



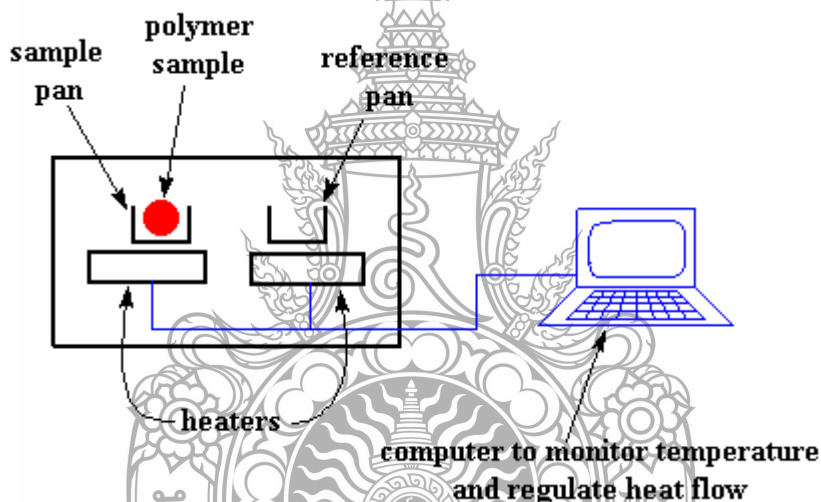
รูปที่ 2.50 แสดงการจัดตั้งอุปกรณ์สำหรับทดสอบเพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะ

2.8.3 ทฤษฎีการทดสอบสมบัติทางความร้อน

2.8.3.1 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค (Differential scanning calorimeter, (DSC)) เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ทดสอบวัสดุโดยการวัดค่าพลังงานความร้อน (Thermal Transition) และอุณหภูมิของสารตัวอย่างเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ หรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมี โดยที่พื้นที่ใต้กราฟที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงความร้อนของตัวอย่างการใช้ประโยชน์เครื่อง DSC (ที่อุณหภูมิทำงาน -170 องศาเซลเซียส ถึง -725 องศาเซลเซียส) จะใช้วิเคราะห์เกี่ยวกับพอลิเมอร์ได้หลายเรื่อง ดังนี้

- การหลอมละลาย (Melting Studies)
- ความเป็นผลึก (Crystallinity)
- อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition Studies)
- หาคความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat Studies)
- การผสมเข้ากันได้ดี (Blend Analysis and compatibility)
- ความคงต่อการถูกออกซิไดซ์ (Oxidative Stability Studies)
- การหาความบริสุทธิ์ (Purity Determination)
- การนำความร้อน (Thermal Conductivity Measurements)

หลักการการทำงานของเครื่อง DSC

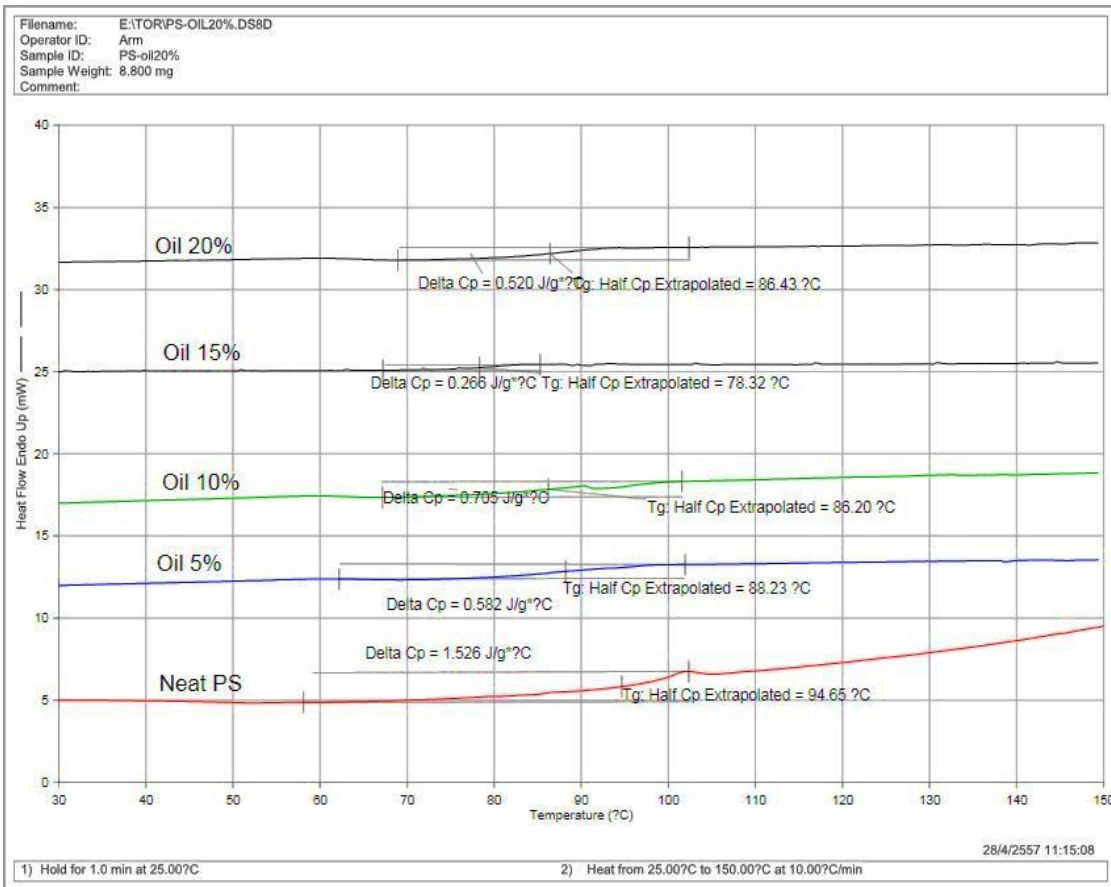


รูปที่ 2.51 หลักการทำงานของเครื่อง DSC

หลักพื้นฐานของ DSC ก็คือ นำถาด 2 ถาด ถาดแรกเป็นถาดที่บรรจุสารตัวอย่าง (Sample Pan) ถาดที่สองเป็นถาดอ้างอิง (Reference Pan) ซึ่งเป็นถาดเปล่า ปล่อยให้วางอยู่บนอุปกรณ์ให้ความร้อน (Furnace) ชนิดเดียวกัน ซึ่งวางอยู่ข้าง ๆ กัน เมื่อเริ่มการทดลองอุปกรณ์ให้ความร้อน จะเริ่มให้ความร้อนแก่ถาดทั้งสอง โดยเครื่อง DSC จะควบคุมอัตราการเพิ่มอุณหภูมิให้คงที่ (เช่น 10 องศาเซลเซียส ต่อ 1 นาที) แต่ที่สำคัญที่สุดก็คือ เครื่อง DSC จะควบคุมให้อุปกรณ์ให้ความร้อนทั้งสอง (อุปกรณ์ให้ความร้อนของถาดที่บรรจุสารตัวอย่างและของถาดอ้างอิง) เพิ่มอุณหภูมิถาดทั้งสองที่วางแยกกัน ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อนที่เท่ากันตลอดทั้งการทดลอง

สาเหตุที่ความร้อนของธาตุทั้งสองจะเพิ่มด้วยอัตราที่ไม่เท่ากันก็คือ ธาตุทั้งสองมีความแตกต่างกัน นั่นคือ ธาตุที่บรรจุสารตัวอย่างพอลิเมอร์อยู่ข้างใน แต่ธาตุอ้างอิงไม่มี สารตัวอย่างอยู่ข้างในทำให้ ธาตุที่บรรจุสารตัวอย่างจะมีสารในปริมาณที่มากกว่าธาตุอ้างอิงนั่นหมายความว่า อุปกรณ์ให้ความร้อนต้องให้ความร้อน ธาตุที่บรรจุสารตัวอย่างมากกว่าทำให้ธาตุอ้างอิง เพื่อที่จะคงอัตราการเพิ่มอุณหภูมิให้เท่ากัน ดังนั้นอุปกรณ์ให้ความร้อนที่อยู่ใต้ธาตุที่บรรจุสารตัวอย่างจะต้องทำงานหนักกว่าอุปกรณ์ให้ความร้อนที่อยู่ใต้ธาตุอ้างอิง คือมันต้องให้ความร้อนมากกว่า และการวัดความแตกต่างของปริมาณความร้อนจาก อุปกรณ์ให้ความร้อนทั้งสองนี้ ก็คือหน้าที่หลักของเครื่อง DSC และเพื่อให้เห็นภาพได้ง่าย เราจะสร้างกราฟ โดยมีแกน X เป็นค่าของอุณหภูมิ และแกน Y เป็นค่าของความแตกต่างของปริมาณความร้อนของ อุปกรณ์ให้ความร้อนทั้งสอง ณ อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง

โดยปกติแล้ว การทดสอบสารตัวอย่างทำโดยการเพิ่ม (หรือลด) อุณหภูมิสารตัวอย่างด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่คงที่ (เช่น 10°C ต่อ 1 นาที โดยเริ่มต้นที่ 25°C และสิ้นสุดการทดลองที่ 300°C หรือการรักษาอุณหภูมิสารตัวอย่างไว้คงที่ (Isothermal) เป็นระยะเวลาหนึ่ง (เช่น 200°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง) และสำหรับการทดลองส่วนใหญ่แล้ว บรรยากาศก็มีบทบาทสำคัญต่อผลการทดลองเช่นเดียวกับอุณหภูมิและอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ โดยส่วนใหญ่แล้วบรรยากาศที่ใช้ในการทดลองมีสองแบบคือ บรรยากาศเฉื่อย (Inert Atmosphere เช่น แก๊สไนโตรเจน) และบรรยากาศที่มีแก๊สออกซิเจน (Oxidizing Atmosphere เช่น แก๊สออกซิเจน หรืออากาศ) ความร้อนที่ไหลผ่านตัวอย่าง (Heat Flow) มีค่าสอดคล้องกับพลังงานที่ให้สารตัวอย่าง และถูกวัดในหน่วยมิลลิวัตต์ (milliwatts, mW) เมื่อนำค่าพลังงานมาคูณด้วยเวลา ผลลัพธ์ที่ได้คือปริมาณพลังงานที่ถูกแสดงในหน่วย มิลลิวัตต์วินาที (mW.s) หรือ มิลลิจูลล์ (mJ) พลังงานที่ให้สารตัวอย่างมีค่าสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (Enthalpy) ของสารตัวอย่าง เมื่อสารตัวอย่างดูดพลังงานเราเรียกว่า เอนทัลปี มีการเปลี่ยนแปลงแบบการเปลี่ยนแปลงประเภทดูดความร้อน (Endothermic) และเมื่อสารตัวอย่างคายพลังงานเราเรียกว่า เอนทัลปี มีการเปลี่ยนแปลงแบบการเปลี่ยนแปลงประเภทคายความร้อน (Exothermic) เมื่อสารตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การหลอมเหลว อุปกรณ์ให้ความร้อนต้องให้ความร้อน ธาตุที่บรรจุสารตัวอย่าง มากกว่าที่ให้ ธาตุอ้างอิง เพื่อที่จะคุมอุณหภูมิของ ธาตุที่บรรจุสารตัวอย่าง และ ธาตุอ้างอิง ให้เท่ากันความร้อนจะถูกส่งผ่านไปยัง ธาตุที่บรรจุสารตัวอย่าง มากกว่าหรือน้อยกว่าที่ถูกส่งผ่านไปยังธาตุอ้างอิง นั้น ขึ้นอยู่กับว่าความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้นเป็นแบบดูดความร้อนหรือแบบคายความร้อน



รูปที่ 2.52 ตัวอย่างกราฟเทอร์โมแกรมของพลาสติกคอมปาวด์

2.8.4. การวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงพลวัต

2.8.4.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงไดนามิก(Dynamic Mechanical Analyzer , DMA)

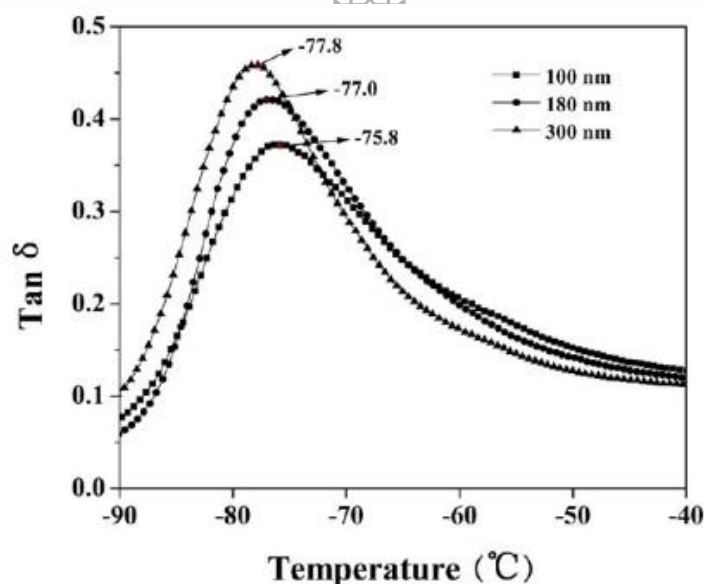
Dynamic Mechanical Analysis (DMA) หรือการวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงไดนามิกหมายถึงเทคนิคการทดสอบประเภทหนึ่งหรือเครื่องมือทดสอบที่ใช้วัดค่าสมบัติทางกายภาพของของแข็งและ พอลิเมอร์หลอมเหลวเพื่อให้ได้ค่ามอดูลัสและแดมปีง โดยสามารถกำหนดค่าให้วัดค่าแรง, ความเค้น, ความเครียด, ความถี่ และอุณหภูมิ นอกจากนี้ยังหมายถึงสมบัติทางรีโอโลยีของของแข็งและ Dynamic Mechanical Thermal Analysis (DMTA) หรือการวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงไดนามิกและความร้อน เมื่อใช้งานร่วมกับข้อมูลด้านการตอบสนองต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

ทฤษฎีเครื่องทดสอบ DMA นั้นจะให้แรงที่แกว่งไปมา (ความเค้น) แล้วทำการบันทึกการตอบสนองแบบที่แกว่งไปมาของตัวอย่างที่เกิดขึ้น โดยค่ามอดูลัสจะคำนวณจากการตอบสนองแบบยืดหยุ่น ตัวอย่างเช่น ตัวอย่างตอบสนอง ประสานกัน (in phase) กับความเค้นแบบวงรอบที่ป้อนเข้า ส่วนค่าแดมปีงจะคำนวณจากการตอบสนองแบบหนืด ตัวอย่างเช่น ตัวอย่างตอบสนอง ไม่ประสาน (out of phase) กับความเค้นแบบวงรอบที่ป้อนเข้าเครื่องมือตัวอย่างจะถูกจับยึดในตำแหน่งระหว่างอุปกรณ์จับยึดสองชุดหรือชิ้นส่วนที่ช่วยจำกัดขอบเขต จากนั้นแรงที่แกว่งไปมา (ไดนามิก) จะถูกให้แก่ตัวอย่างทดสอบ โดยการใช้มอเตอร์ไฟฟ้าในการเคลื่อนที่แบบหมุนรอบตัว (ไปและกลับ) หรือเชิงเส้น (ขึ้นและลง) โดยจำกัดค่าความถี่ (ความเร็วของการแกว่ง) และแรง (พลังงานที่ป้อนเข้ายังตัวอย่าง) ความเค้น (ระยะการเคลื่อนที่) ที่เกิดขึ้นจะถูกวัดค่าโดยอุปกรณ์ LVDT แต่สามารถใช้ทรานสดิวเซอร์วัดแรงได้เช่นกัน โดยทั่วไปจะสร้างเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสสะสม (Storage Modulus) และ Tan Delta (แดมปีง) กับอุณหภูมิ

นอกจากนี้ยังใช้คำนวณค่าอุณหภูมิกลายแก้ว T_g (การเปลี่ยนผ่านคล้ายแก้ว หรือการหลอมเหลวของส่วนอสัณฐาน) และค่าการเปลี่ยนผ่านปีढ़้า (การลดลงของมอดูลัสที่อุณหภูมิต่ำ)



รูปที่ 2.53 เครื่องการวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงไดนามิก (DMA)

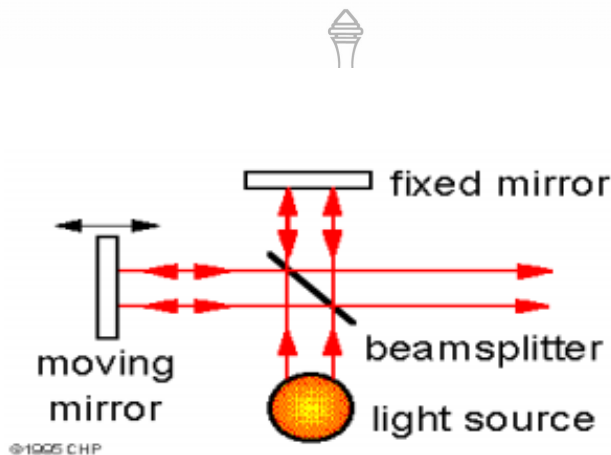


รูปที่ 2.54 ตัวอย่างกราฟการวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงไดนามิก (DMA) [34]

2.8.5 ทฤษฎีการทดสอบโครงสร้างทางเคมี

FTIR เป็นเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปีที่ใช้ อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (Michelson Interferometer) ในการทำหน้าที่แยกแสงที่ผ่านออกจากเซลล์บรรจุสารตัวอย่างออกเป็นความยาวคลื่นต่างๆ (แทนที่ใช้โมโนโครมาเตอร์ในกรณีของเครื่องมืออินฟราเรดแบบดิสเพอร์ซีฟหรือแบบลำแสงคู่) สำหรับในอุปกรณ์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์นั้น จะประกอบไปด้วยกระจกแบนราบ (planar mirrors) 2 แผ่นที่วางทำมุมตั้งฉากกัน โดยจะมี 1 แผ่นวางอยู่กับที่ (fixed mirror) ในขณะที่กระจกอีกหนึ่งแผ่นจะ

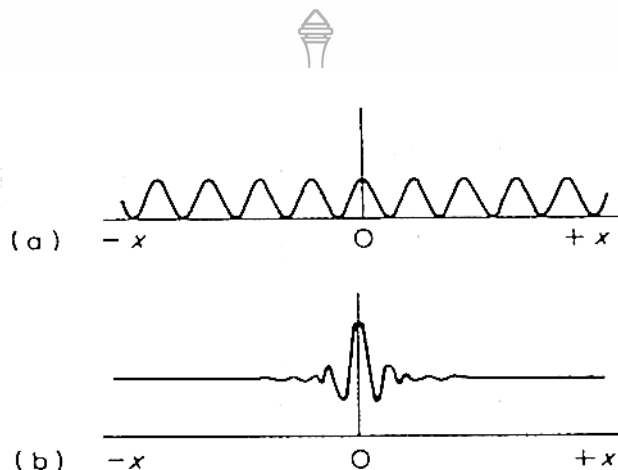
เคลื่อนที่กลับไปกลับมาด้วยความเร็วคงที่ในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบของผิวกระจกดังกล่าว (หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือเคลื่อนที่ขนานกับกระจกอีกแผ่นที่อยู่กับที่) นอกจากนี้ยังมีตัวแยกลำแสง (beam splitter) ซึ่งวางทำมุม 45 องศา อยู่ระหว่างกระจกทั้ง 2 แสดงในรูปที่ 2.55 ซึ่ง beam splitter นี้จะทำหน้าที่แบ่งแยกลำแสงที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงให้แยกออกเป็น 2 ส่วนกล่าวคือ 50 % ของลำแสงจะทะลุผ่าน beam splitter เข้าไปสู่ fixed mirror ในขณะที่อีก 50 % ของลำแสงที่เหลือจะหักเหไปสู่กระจกที่เคลื่อนที่[31]



รูปที่ 2.55 แสดงการทำงานของ interferometer

อนึ่งสำหรับอุปกรณ์ beam splitter นี้จะประกอบไปด้วยฟิล์มของโลหะ (เช่น Fe_2O_3 , Ge) บางที่เคลือบอยู่บนผิวของวัสดุรองรับ เช่น quartz, KBr, CsI เป็นต้น นอกจากนี้หากสังเกตให้ดีจะพบว่าบริเวณด้านล่างของ beam splitter จะมีตัวชดเชย (compensator) ซึ่งเป็นแผ่นวัสดุที่มีความหนาเป็น 2 เท่าของแผ่น beam splitter และจะทำหน้าที่ปรับหรือชดเชยระยะความยาวเส้นทางการเดินทางของแสง (optical path length) ทั้ง 2 แขนให้เท่ากัน ผลจากการแยกแสงและการสะท้อนของแสงในลักษณะดังกล่าวจะทำให้รูปแบบของคลื่น แสงที่จะเข้าสู่ดีเทคเตอร์ถูกรบกวนให้เปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้ทั้งนั้นขึ้นอยู่กับระยะทางของกระจกที่เคลื่อนที่ moving mirror หรือระยะ x ด้วย หรือขึ้นอยู่กับเวลาเนื่องจากการกระจกเดินทางด้วยความเร็วคงที่ ในกรณีที่แสงที่เข้ามาสู่อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์เป็นแสงที่มีความถี่เดียว (หรือมีความยาวคลื่นค่าเดียวซึ่งเรียกว่า mono-chromatic light) แสงที่ผ่านออกจากอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (Interferogram) จะมีลักษณะดังรูปซึ่งประกอบไปด้วยจุดสูงสุดของคลื่น (maximum) ซึ่งเกิดจากการที่ลำแสงที่เดินทางสะท้อนกลับมาจากกระจกทั้ง 2 มีช่วงคลื่นตรงกัน (in phase) และจุดต่ำสุดของคลื่น

(minimum) ซึ่งเกิดจากการที่แสงที่เดินทางกลับมาจากกระจกทั้ง 2 มีช่วงคลื่นที่ไม่ตรงกัน (out of phase) ซึ่งในกรณีนี้จะพบว่าที่ระยะทาง x ใดๆ ก็ตามแสงที่ได้จะมีความถี่คงที่ แต่ในกรณีที่แสงที่เดินเข้าสู่อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์เป็นแสงที่มีหลายความถี่หรือหลายความยาวคลื่น (polychromatic light หรือ broadband light source) แสงที่เกิดจากการรวมกันเพื่อจะออกไปสู่ดีเทคเตอร์ (Interferogram) นั้นจะถูกแยกออกเป็นความถี่ต่างๆ ขึ้นอยู่กับระยะทาง x แสดงดังรูป 2.56



รูปที่ 2.56 การแทรกสอดของลำแสงที่สะท้อนกลับในกรณีที่เป็นแสงความถี่เดียวและแสง polychromatic

ซึ่งสัญญาณของแสงที่รวมกันใหม่เพื่อจะเข้าสู่ดีเทคเตอร์ในลักษณะนี้มีลักษณะเป็น time domain (หรือกราฟคลื่น sine wave) ที่สัมพันธ์กับแกนระยะทางหรือเวลา เนื่องจากกระจกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ จะถูกถอดรหัสหรือแปลงไปเป็น frequency domain หรือกราฟที่สัมพันธ์กับแกนความถี่ โดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Fourier transform ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการแปลงจะถูกนำไปเขียนเป็นสเปกตรัมอินฟราเรด (กราฟระหว่างปริมาณความเข้มของแสงกับความถี่หรือเลขคลื่น) ต่อไปประเด็นสุดท้ายที่ต้องกล่าวถึงเกี่ยวกับเทคนิคฟูริเยร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด คือข้อดีของเทคนิคดังกล่าว ซึ่งได้แก่ความเร็วในการวิเคราะห์ (เมื่อเทียบกับการใช้ grating ในการแยกแสงแบบเดิม) โดยจะใช้เวลาในการวิเคราะห์ไม่นาน (วินาที) ในขณะที่การวิเคราะห์ด้วยเครื่องอินฟราเรดแบบลำแสงคู่หรือแบบดิสเพอร์ซีฟ (dispersive IR) จะใช้เวลาหลายนาที

โดยการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด ที่อยู่ในช่วงเลขคลื่น (Wave number) ประมาณ $12800 - 10 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้ง ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ รังสี

อินฟราเรด (Infrared radiation) เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า แต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้ รังสีอินฟราเรดอยู่ระหว่างช่วง Visible radiation กับ Microwave radiation โดยช่วงของรังสีอินฟราเรดแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่

1. Near Infrared (12800-4000 cm^{-1})
2. Middle Infrared (4000-200 cm^{-1})
3. Far Infrared (200-10 cm^{-1})

ช่วงของรังสีอินฟราเรดที่ใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ทางเคมีได้แก่ช่วง Middle IR เนื่องจากรังสีอินฟราเรดมีพลังงานค่อนข้างต่ำ เมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเข้าไปจะทำให้พันธะในโมเลกุลเกิดการสั่นและการหมุน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล การที่โมเลกุลจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้นั้นความถี่ของรังสีอินฟราเรดต้องเท่ากับความถี่การสั่นของโมเลกุลของสารนั้นๆ ซึ่งสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีค่าความถี่ของการสั่นที่จำเพาะและแตกต่างกันไปทำให้สามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสารอินทรีย์ได้

ตารางที่ 2.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

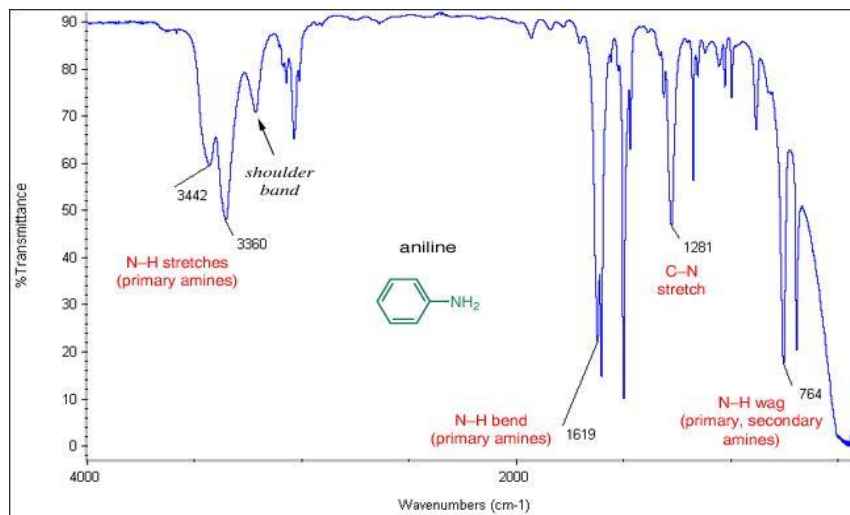
หมู่ฟังก์ชัน	ช่วงความยาวคลื่น (cm^{-1})
Alkanes;	
C-H Stretching	~ 3,000-2840
CH ₂ -Methylene gr.	~ 1493-1429 และ 725
CH ₃ -Methyl gr.	~ 1379-1366
** Peak ที่ได้จะ sharp และสูงปานกลาง	
Alkenes;	
= C-H Stretching	~ 3,125-3030
= CH ₂ OP-Bending	~ 1000-650
-C= C- Stretching	~ 1667-1613
** Peak ที่ได้จะ sharp และสูงปานกลาง	

หมู่ฟังก์ชัน	ช่วงความยาวคลื่น (cm ⁻¹)
Alkynes;	
≡C-H Stretching	~ 3100-3000
C≡C-Stretching	~ 2620-2100
-C≡C- Stretching กรณีเป็น monosubstituted acetylene	~ 2140-2100
-C≡C- Stretching กรณีเป็น	~ 2260-2190
Aromatics;	
C-H Stretching	~ 3100-3000
C-H OP-Bending	~ 900-675
C=C Stretching ภายใน ring 2 พิค	~1600 และ 1475
** จะมี overtone and combination band เล็กๆ	~2000-1650
Alcohols;	
O-H Stretching	~ 3650-3584
C-O Stretching	~ 1250-1000
** ถ้ามี H-bonding peak ที่! ได้จะ broad	
10 Alc. C-O	~1053
20 Alc. C-O	~1111
30 Alc. C-O	~1176
Carbonyl; C=O ของ	
Anhydride	~ 1818 และ 1750
Acid chloride	~ 1800
Ester	~ 1735
Aldehyde	~ 1725
Ketone	~ 1715
Amide	~ 1690

หมู่ฟังก์ชัน	ช่วงความยาวคลื่น (cm ⁻¹)
Carboxylic acid;	
O-H stretching very broad	~3300-2500
C-O Stretching	~ 1320-1210
O-H Bending -1	~ 1440-1395
Amide;	
N-H stretching	~ 3500-3100
C-O Stretching	~ 1670-1640
10 amide; peak ที่ได้จะเป็น doublet	
20 amide; จะมี peak เดียว	
Amine;	
N-H stretching	~ 3500-3300
10 amine; มี 2 peak ขนาดเล็ก	~3500 และ ~3400
20 amine; จะมี peak เดียวขนาดเล็ก	~ 3350-3310
30 amine; ไม่ดูดกลืน IR	
N-H Bending	~ 1650-1580
C-N Stretching	~ 1342-1020



การแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้แสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Wave number กับ Transmittance ซึ่งเรียกว่า Infrared spectrum



รูปที่ 2.57 ตัวอย่างลักษณะกราฟที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR [31]



รูปที่ 2.58 เครื่อง FTIR

2.8.6 ทฤษฎีการทดสอบทางเคมี

2.8.6.1 การวิเคราะห์ทางเคมีด้วยเทคนิค Liquid Chromatography - Mass Spectrometer (LC-MS) เป็นเทคนิคในการวิเคราะห์ทางเคมี โดยอาศัยเฟสเคลื่อนที่หรือเรียกว่า Mobile Phase ซึ่งมีสถานะเป็นของเหลว ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการนำพาสารตัวอย่างเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์ ซึ่งจะมีเฟสคงที่หรือ Stationary Phase ทำหน้าที่ “ดูดซับ” ให้องค์ประกอบต่างๆในสารตัวอย่างเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์ออกไปไปสู่ “เครื่องตรวจวัด” (Detector) ในเวลาที่แตกต่างกัน โดยอาศัยความเป็นสภาพขั้วสูงต่ำของสารในการแยก สำหรับตัว Detector ของ LC คือ UV/Vis spectrophotometry ตรวจวัดทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยอาศัยหลักการดูดกลืนแสงในช่วงรังสียูวีและช่วงวิซิเบิล ที่ความยาวคลื่น 190 – 800 nm ข้อดีก็คือใช้งานง่าย ไม่ซับซ้อน ต้นทุนไม่สูงมาก สามารถตรวจวัดสารประกอบอินทรีย์ได้หลายชนิด แต่มีข้อจำกัดจากตัว Detector เอง คือสามารถวิเคราะห์หาปริมาณสารในช่วงความเข้มข้น ppm ถึงประมาณ 1,000 ppb เท่านั้น (ถ้าตัววัดนี้ค่าที่ได้จะไม่แม่นยำ) และไม่สามารถตรวจวัดสารบางชนิดที่ไม่เสถียรเมื่ออยู่ใน Mobile phase ของ HPLC ได้ เช่น สปีชีส์บางอย่างของตัวยาที่กำลังไหลเวียนในกระแสเลือด เป็นต้น จึงได้มีการพัฒนา Detector ขึ้นมาเรื่อยๆ ทั้ง Fluorescence detection, Infrared (IR) detectors, electrochemical detectors และอื่นๆ

ปัจจุบันมีการนำ mass spectrometer (MS) มาใช้เป็น Detector ใน HPLC ซึ่งข้อดีของ LC-MS คือ นอกจากเราจะได้ Chromatogram หรือ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่สารใช้ในการเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์กับค่า Absorbance (ค่าการดูดกลืนแสง) ของสารนั้นแล้ว ยังได้ Mass Spectrum หรือ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามวลต่อประจุของสาร (m/Z) กับค่าความอุดมสัมพัทธ์ หรือ Relative abundance ซึ่งเราสามารถนำกราฟของ Mass Spectrum ไปเทียบใน LC-MS library ว่าในสารตัวอย่างที่เราสนใจมีสูตรทางเคมีคร่าวๆเป็นอย่างไร

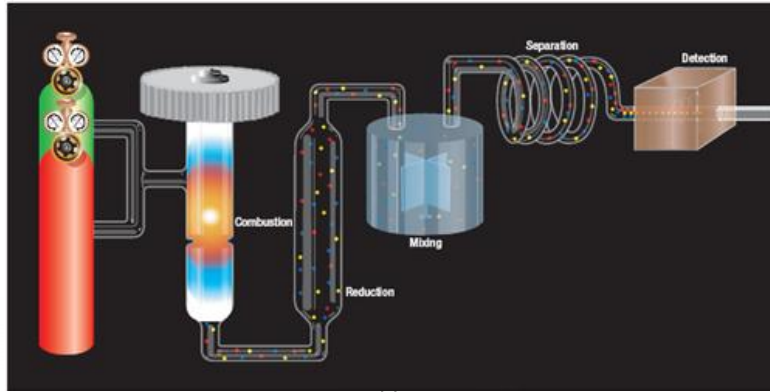


รูปที่ 2.59 เครื่อง LC-MS

2.8.6.2 การวิเคราะห์ทางเคมีด้วยเทคนิค CHN

เป็นเครื่องวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และ ไนโตรเจน (CHN analyzer) หรืออาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าเครื่องวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ (organic elemental analyzer) เป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้หาปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ต่างๆ ในเครื่องมือบางรุ่นสามารถใช้วิเคราะห์หาปริมาณซัลเฟอร์ (S) ได้ด้วย

หลักการทำงานของเครื่องมือในการหาปริมาณธาตุเหล่านี้อาศัยการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว (flash combustion) เพื่อเปลี่ยนธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ในตัวอย่างไปเป็นแก๊สที่สัมพันธ์กับธาตุนั้นๆ อย่างมีสัดส่วนที่แน่นอน เช่น ธาตุไนโตรเจนจะถูกเปลี่ยนไปเป็นแก๊สไนโตรเจน (N_2) ธาตุคาร์บอนจะถูกเปลี่ยนไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และธาตุไฮโดรเจนจะถูกเปลี่ยนเป็นไอน้ำ (H_2O) จากนั้นจึงแยกแก๊สผสมออกจากกันเพื่อหาปริมาณแก๊สแต่ละชนิดต่อไป ระบบเครื่องมือ CHN analyzer



รูปที่ 2.60 หลักการทำงานของเครื่องมือวิเคราะห์ CHN

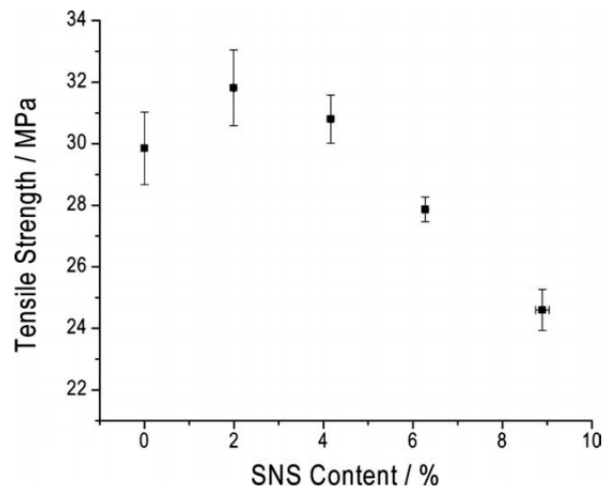


รูปที่ 2.61 เครื่อง CHN

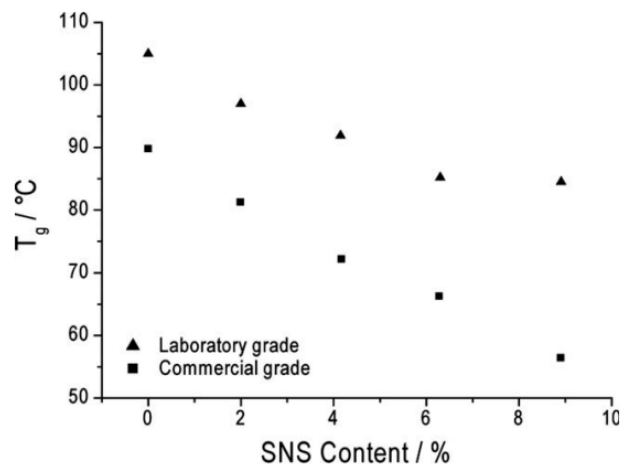


2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

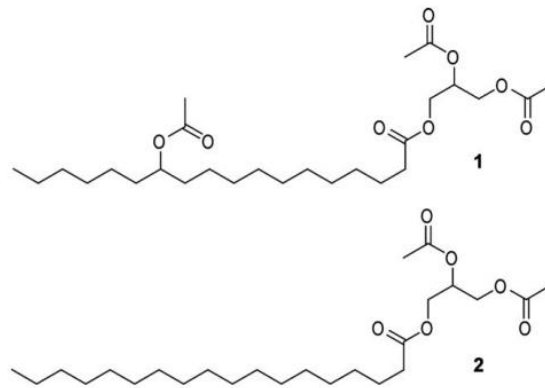
2.9.1 ปี ค.ศ. 2009 Markus Klinger, Lars Poulsen Tolbod, Peter R. Ogilby [6] ได้ทำการวิจัยเรื่อง การปรับปรุงสมบัติทางกลและการป้องกันซึมผ่านของออกซิเจน โดยใช้น้ำมันละหุ่งเป็นสารเติมแต่งในพอลิسترิน จากงานวิจัยนี้กล่าวถึงการใส่สารเติมแต่งจากน้ำมันละหุ่งมาผสมลงไปในพอลิسترิน โดยการเตรียมน้ำมันละหุ่งมาผสมกับกรดอะซิติกจะได้สารเติมแต่งที่ชื่อว่า Soft-N-Safe (SNS) และนำมาผสมในพอลิسترินที่อัตราส่วน 0 , 2.5 , 4.2 , 6.3 และ 8.9 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนัก จากนั้นมาทดสอบหาค่าแรงดึง (Tensile strength) , อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature T_g), ความหนาแน่น (Density) , การดูดซับ (Adsorption) และ การซึมผ่านของออกซิเจน (Oxygen diffusion) ค่าการทนต่อแรงดึงที่ได้ในการผสม Soft-N-Safe (SNS) ในพอลิسترิน อัตราส่วนที่มีค่าการทนต่อแรงดึงสูงที่มีค่าอัตราส่วนเท่ากับ 2.5 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักมีค่าการทนต่อแรงดึงมากที่สุด เมื่อเทียบอัตราส่วนอื่นๆ เมื่อผสมในอัตราส่วนที่มากขึ้นทำให้ค่าการทนต่อแรงดึงตกลงอย่างเห็นได้ชัด ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) เมื่อผสม Soft-N-Safe (SNS) ในพอลิسترินใน อัตราส่วน 0 , 2.5 , 4.2 , 6.3 , 8.9 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนัก ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) จะลดลงตามอัตราส่วนการผสมที่เพิ่มขึ้น สรุปได้การใช้ น้ำมันละหุ่งเป็นสารเติมแต่งทำให้พอลิسترินมีความยืดหยุ่นขึ้นพิจารณาได้จากค่าการทนต่อแรงดึงและค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ที่มีแนวโน้มลดลง



รูปที่ 2.62 แสดงค่า Tensile Strength ของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง PS กับ SNS[6]



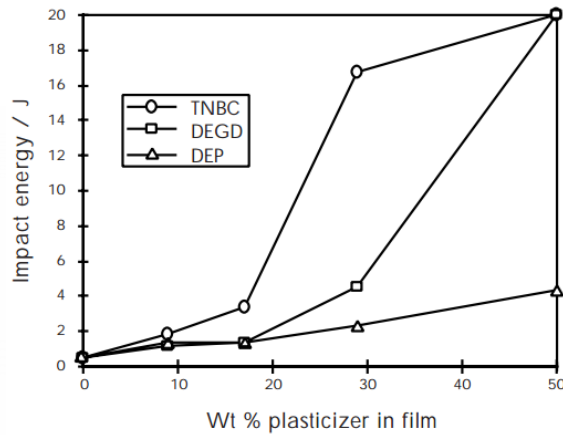
รูปที่ 2.63 แสดงค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะแก้วของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง PS กับ SNS[6]



รูปที่ 2.64 โครงสร้างทางเคมีของ Soft-N-Safe (SNS)

2.9.2. ปี ค.ศ. 1999 Jeffrey Csernica and Alisha Brown[32] ได้ทำการวิจัยศึกษา ผลของพลาสติกไซเซออร์ที่มีผลต่อคุณสมบัติของพอลิไทรินแบบแผ่นฟิล์ม จากงานวิจัยนี้ได้ใช้พลาสติกไซเซออร์ 3 ชนิด คือ diethyl phthalate (DEP), diethylene glycol dibenzoate (DEGD) และ tri-n-butyl citrate (TNBC) ผสมกับพอลิสไตรีน โดยเตรียมพอลิสไตรีนผสมกับพลาสติกไซเซออร์ที่อัตราส่วน 1:1 เปรอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้วนำไปทดสอบการรับแรงกระแทก (Impact testing) และทดสอบอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) โดยการทดสอบการรับแรงกระแทก (Impact testing) ใช้อัตราส่วนการผสม 0 , 10 , 20 , 30 , 40 และ 50 เปรอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งผลที่ได้คือ อัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ที่เติมลงไปปริมาณที่มากขึ้นก็ยิ่งทำให้ค่าด้านแรงกระแทกของพอลิสไตรีนเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ที่เติมลงไป การผสม TNBC จะมีค่าด้านทานแรงกระแทกสูงที่สุดรองลงมาคือ DEGD และต่ำสุดคือ DEP การวิเคราะห์ห่ออุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) โดยใช้พลาสติกไซเซออร์ผสมในอัตราส่วน 9 , 17 และ 29 เปรอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบที่ได้คือ DEP , DEGD และ TNBC ที่อัตราส่วนผสม 9 เปรอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะได้ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ค่าที่วัดได้คือ 24 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนการผสม 17 เปรอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้ววัดค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) DEP มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) เท่าเดิมคือ 24°C ส่วน DEGD , TNBC วัดค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ได้ 34 องศาเซลเซียส เห็นได้ว่าเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วนการผสม 29 เปรอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก วัดค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) โดยอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ที่วัดได้มีค่าดังนี้ (DEP =

40°C),(DEGD = 53°C),(TNBC = 55°C) จากค่าที่วัดได้เห็นได้ว่ายิ่งเพิ่มปริมาณพลาสติกไซเซอร์ที่เติมลงไปค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ก็เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 2.65 แสดงค่าการต้านทานแรงกระแทกของแผ่นฟิล์มพอลิस्टาไร์นที่เติมพลาสติกไซเซอร์แต่ละชนิด [32]

Plasticizer		T_g Depression/°C
Name	Wt %	
TNBC	9	24
	17	34
	29	55
DEGD	9	21
	17	34
	29	53
DEP	9	24
	17	24
	29	40

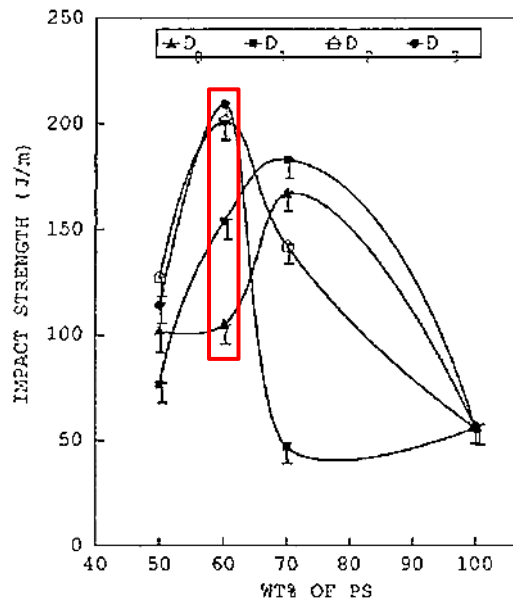
รูปที่ 2.66 แสดงค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของแผ่นฟิล์มพอลิस्टาไร์นที่เติมพลาสติกไซเซอร์แต่ละชนิด [32]

2.9.3. ปี ค.ศ. 2000 Aji P. Mathew, Sabu Thomas [33] ได้ทำการวิจัยศึกษา เรื่อง Izod impact behavior of natural rubber/polystyrene interpenetrating polymer networks จากงานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบค่า Impact Strength ของพอลิไทรินที่ผสมยางธรรมชาติที่มีโครงสร้างแบบร่างแห โดยการนำยางธรรมชาติไปผสมกับ DCP ที่เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาในอัตราส่วน 4 phr และผสม styrene monomer จากนั้นผสม DVB (divinylbenzene) ที่เป็นตัวเชื่อมขวางในอัตราส่วน 0 2 4 และ 6 phr ตามลำดับ แสดงในแผนผังรูปที่ 2.68 จากนั้นนำยางธรรมชาติที่ผสมแล้วไปบ่มสุกที่ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที จากนั้นนำไปผสม พอลิไทริน ในอัตราส่วนตามตารางที่ 2.5 จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติทางกล ด้วยการทดสอบการต้านทานแรงกระแทก (Impact Strength) และนำไปทดสอบวิเคราะห์พฤติกรรมการแตกหักด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy) ผลการทดสอบดังนี้

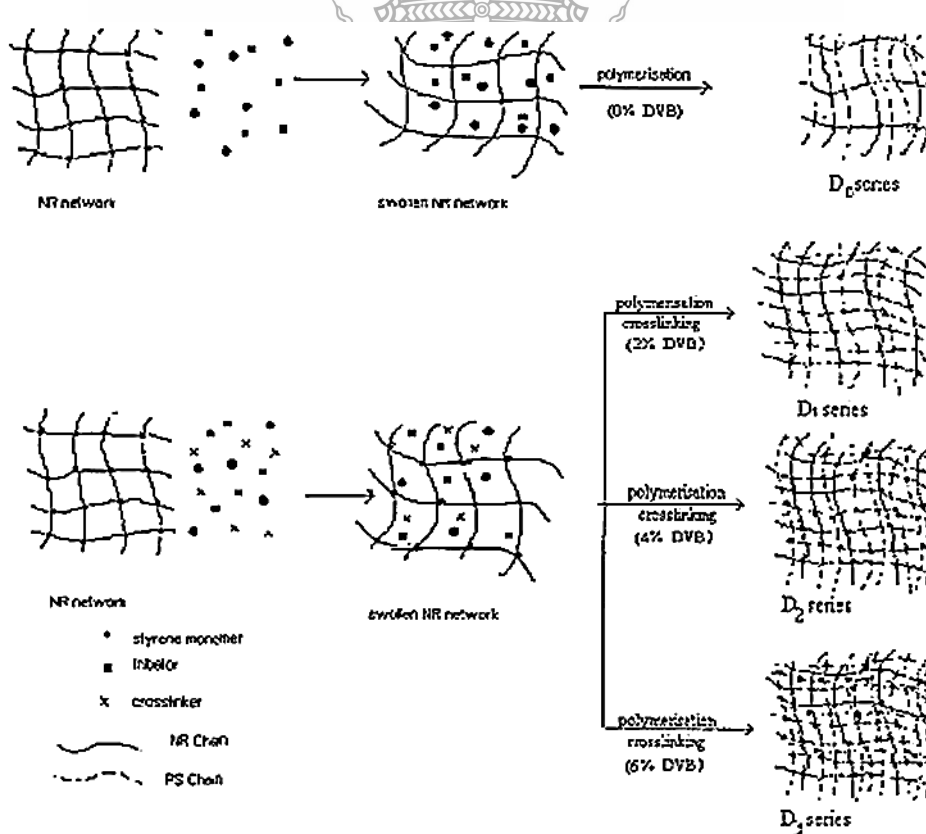
ตารางที่ 2.5 แสดงค่าการทดสอบการต้านทานแรงกระแทกของ พอลิไทรินผสมยางธรรมชาติในอัตราส่วนต่างๆ[33]

Sample code	DVB content (wt.%)	NR/PS ratio	Cross-link density (ν) $\times 10^4$ (g mol/cm ³)	Impact strength (J/m)	Resilience
PS	0	0:100	–	56	4.68
D ₀ N ₃₀	0	30:70	7.43	167	17.65
D ₀ N ₄₀	0	40:60	6.91	105	9.68
D ₀ N ₅₀	0	50:50	6.07	102	9.12
D ₁ N ₃₀	2	30:70	9.81	183	17.05
D ₁ N ₄₀	2	40:60	7.63	154	15.38
D ₁ N ₅₀	2	50:50	6.74	76.7	7.62
D ₂ N ₃₀	4	30:70	12.35	127	11.82
D ₂ N ₄₀	4	40:60	10.91	201	17.95
D ₂ N ₅₀	4	50:50	9.96	142	12.71
D ₃ N ₃₀	6	30:70	18.33	47	4.67
D ₃ N ₄₀	6	40:60	16.81	209	20.28
D ₃ N ₅₀	6	50:50	15.09	114	10.22

จากตารางที่ 2.5 และรูปที่ 2.67 แสดงค่าการทดสอบการต้านทานแรงกระแทกของ พอลิไทรินผสมยางธรรมชาติในอัตราส่วนต่างๆ โดยค่าการทนแรงกระแทกสูงสุดอยู่ที่อัตราส่วน D₃N₄₀ และค่าการทนแรงกระแทกที่ต่ำสุด D₃N₃₀ เรียงลำดับการทนแรงกระแทกได้ดังนี้ D₃N₄₀ > D₂N₄₀ > D₁N₄₀ > D₀N₄₀ แสดงว่าการเกิดการเชื่อมขวางในปริมาณที่มากขึ้นแสดงให้เห็นสมบัติการทนแรงกระแทกดีขึ้น

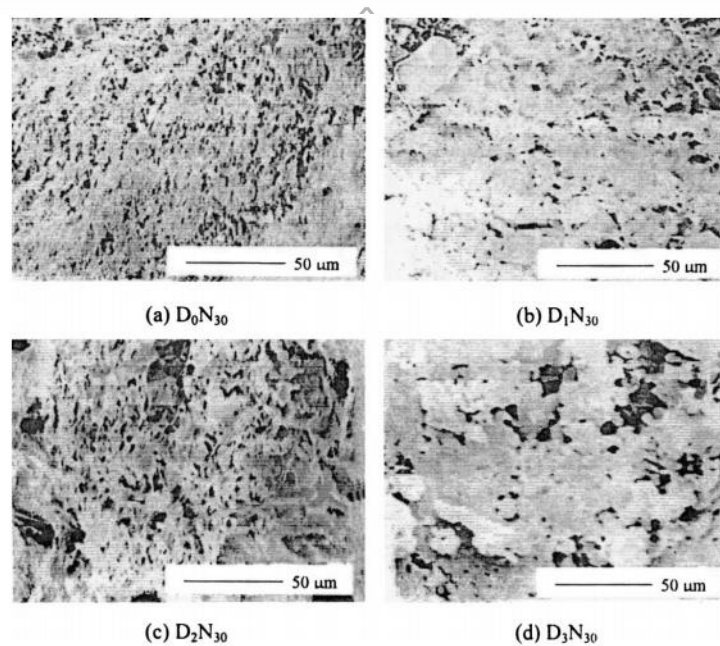


รูปที่ 2.67 กราฟการต้านทานแรงกระแทกของพอลิस्टาไร์นที่ผสมยางธรรมชาติในอัตราส่วนต่างๆ [33]



รูปที่ 2.68 แสดงแผนผังของ interpenetrating polymer networks [33]

จากรูปที่ 2.69 แสดงรูปถ่ายจาก SEM จากพื้นผิวของสูตร (a) D_0N_{30} และ (b) D_1N_{30} แสดงการกระจายตัวที่ดีเป็นการผสมที่เข้ากันได้ดี จากรูป (c) D_2N_{30} และ (d) D_3N_{30} แสดงให้เห็นถึงการรวมตัวกันเนื่องจากการเติมสารเชื่อมโยงที่มากทำให้เกิดการเชื่อมขวางที่มากทำให้การกระจายตัวเป็นกลุ่ม



รูปที่ 2.69 แสดงรูปถ่ายจาก SEM โดยแสดงภาพ interpenetrating polymer networks ของยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีน [33]

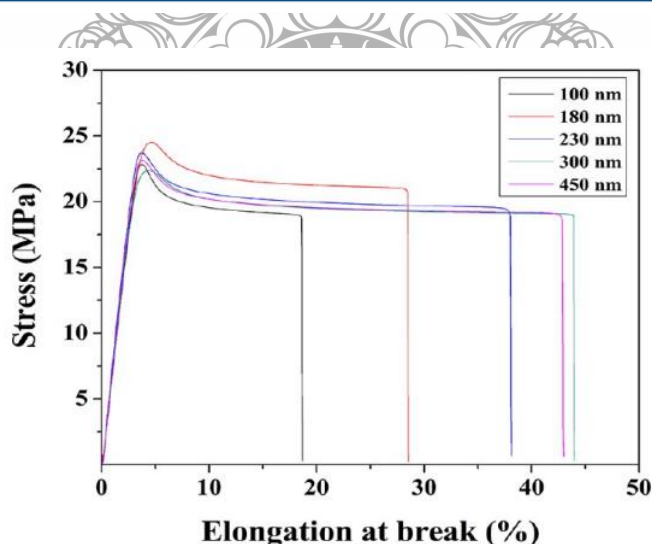
2.9.4 ปี ค.ศ. 2013 Yunjiao Deng และคณะ [34] ได้ทำงานวิจัยเรื่อง Co-toughened Polystyrene by Submicrometer-Sized Core-Shell Rubber Particles and Micrometer-Sized Salami Rubber Particles จากงานวิจัยนี้ทำการศึกษา โดยนำ พอลิบิวตะไดอินกราฟพอลิสไตรีน (PB-g-PS) ที่มีอนุภาค 100-450 nm ใช้เป็นสารปรับปรุงแรงกระแทกของพอลิสไตรีน โดยนำมาผสมกับ พอลิสไตรีน (PS) และ พอลิสไตรีนแบบทนแรงกระแทกสูง (HIPS) นำมาคอมปาวด์ในเครื่องผสมแบบสกรูคู่ (Twin-Screw Extruder) ในอัตราส่วนของพลาสติกคอมปาวด์ HIPS , PB-g-PS , PS ดังนี้ 500/200/300 (w/w) โดยในแต่ละสูตรจะทำการปรับเปลี่ยนแก๊ซขนาดของ PB-g-PS โดยใช้ขนาดดังตารางที่ 2.6 จากนั้นนำมาทดสอบสมบัติทางกล

การต้านทานแรงดึง(Tensile Test) และ การต้านทานแรงกระแทก (Impact strength) การทดสอบสมบัติทางกายภาพด้วยเครื่อง TEM

การเตรียม PB-g-PS โคพอลิเมอร์โดยใช้ตัวเร่งในปฏิกิริยา redox (cumene hydroperoxide and ferrous sulfate) ในกระบวนการ emulsion polymerization โดยเริ่มจาก น้ำ DI, PB latex, initiator, และ KOH ใส่ลงใน glass reactor หลังจากนั้นเติมในโตรเจนเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้เข้าไปแทนที่ออกซิเจนแล้วใส่สไตรีนลงไป หลังจากนั้น 3 ชั่วโมงใส่สารละลาย antioxidant จากนั้นตั้งอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นทำให้แห้งโดยใช้เตาอบที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้เป็นPB-g-PS โคพอลิเมอร์

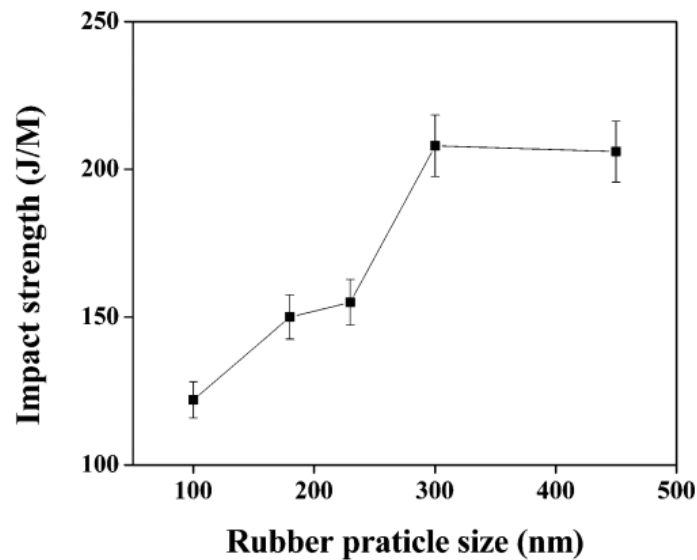
ตารางที่ 2.6 แสดงขนาดของอนุภาคของ PB ที่กราฟใน PS ในแต่ละสูตร[34]

sample	particle size of PB (nm)	polydispersity	GD (%)	GE (%)
PB-g-PS1	100	0.075	38.8	90.5
PB-g-PS2	180	0.072	36.7	85.6
PB-g-PS3	230	0.068	35.9	83.9
PB-g-PS4	300	0.071	34.4	80.3
PB-g-PS5	450	0.065	33.8	78.9



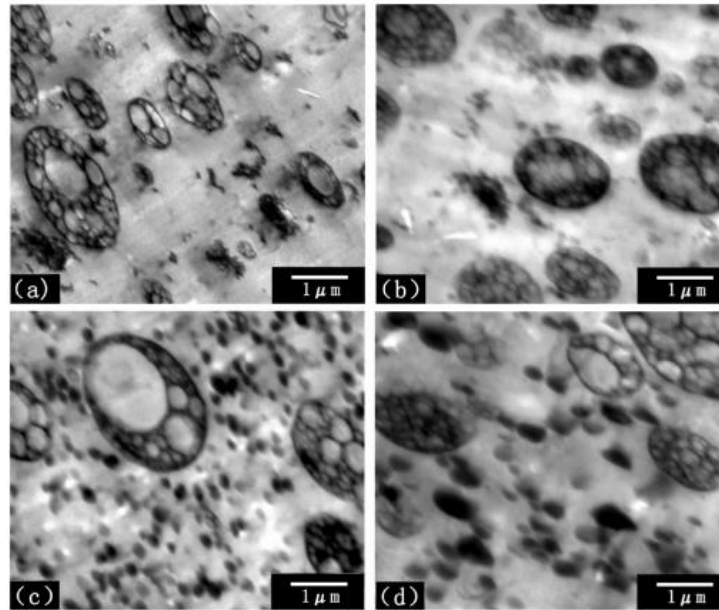
รูปที่ 2.70 กราฟแสดงค่าการทดสอบการต้านทานแรงดึงของ พลาสติกคอมปาวด์ที่มีขนาดอนุภาค PB-g-PS ต่างกัน[34]

จากรูปที่ 2.70 แสดงค่าการต้านทานแรงดึงของ พลาสติกคอมปาวด์ HIPS/PB-g-PS/PS พบว่าการต้านทานแรงดึงไม่ต่างกันมากนัก แต่ค่า elongation at break มีค่าเพิ่มมากขึ้น ตามขนาดของอนุภาค PB-g-PS ที่ผสมอยู่ในพลาสติกคอมปาวด์ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าของพลาสติกคอมปาวด์มีค่า elongation at break เพิ่มขึ้นแสดงว่าอนุภาคที่เพิ่มขึ้นทำให้พลาสติกคอมปาวด์สามารถยืดตัวได้มากขึ้น[34]



รูปที่ 2.71 กราฟแสดงค่าการทดสอบการต้านทานแรงกระแทก(Impact strength)[34]

จากรูปที่ 2.71 แสดงค่าการทดสอบการต้านทานแรงกระแทก ของพลาสติกคอมปาวด์ HIPS/PB-g-PS/PS พบว่าเมื่อเพิ่มขนาดของอนุภาคของ PB-g-PS ในพลาสติกคอมปาวด์ส่งผลให้ค่าการต้านทานแรงกระแทกเพิ่มมากขึ้น แสดงว่าอนุภาคที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลต่อการต้านทานแรงกระแทกได้ดีขึ้นนั่นเอง[34]

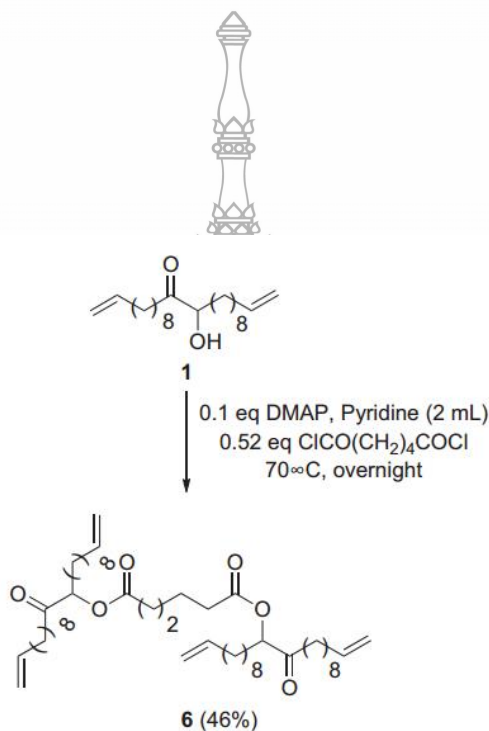


รูปที่ 2.72 ภาพถ่ายจาก TEM การกระจายตัวของ PB-g-PS ใน HIPS/PS (a – 100 nm , b – 180 nm , c – 230 nm และ d – 450 nm) [34]

2.9.5. ปี ค.ศ. 2012 Marijke Van der Steen , Inna Bretz , Stephan Kabasci , Christian V. Stevens [35] ได้ทำการวิจัยศึกษา เรื่อง Synthesis of biobased multivalent cross-linkers from a castor oil-derived C22-acyloin จากงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์สารชีวภาพจากน้ำมันมะพร้าว (C22-Acyloin) โดยใช้วิธีการเตรียม ดังนี้

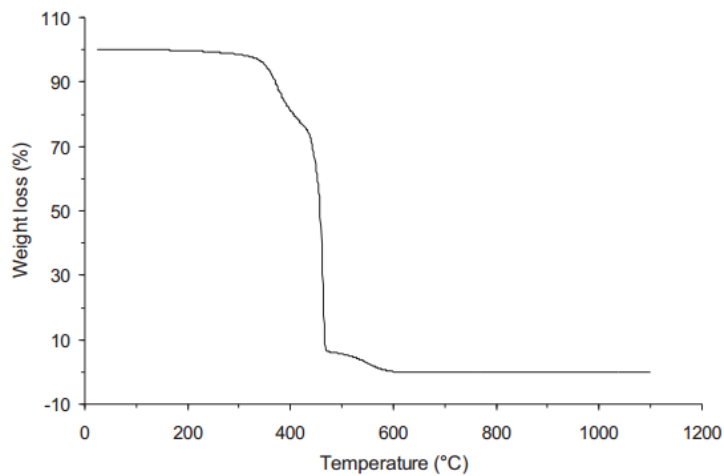
1. การเตรียม Acyloin ด้วย acid chlorides ในสถานะไนโตรเจนในสารละลาย Triethylamine โดยให้ความร้อน 70 องศาเซลเซียสภายใต้สภาวะการกวน
2. การเตรียม Acyloin โดยใช้ขบวนการ condensation กับ adipoyl chloride ในสถานะไนโตรเจนโดยใช้ pyridine ภายใต้สภาวะการกวนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส
3. การเตรียม Acyloin โดยใช้ขบวนการ condensation กับ acryloyl chloride ในสถานะไนโตรเจนโดยใช้ diisopropylethylamine ผสมที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะการกวน
4. การเตรียมโดยการใช้สารละลาย free radical มาทำปฏิกิริยา polymerization กับ acyloin acrylate ที่ไม่อิ่มตัวในสถานะไนโตรเจนโดยใช้ benzoylperoxide ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

จากการพัฒนาขบวนการ Acylation ในการทำ di และ tri cross-linkers ที่สูงขึ้นซึ่งในการ cross-linkers ทำให้ได้หลายขบวนการดังกล่าวมาข้างต้นซึ่งสามารถสรุปได้ว่างานวิจัยเป็นทางเลือกใหม่ในการทำให้เกิดการ cross-linkers ของน้ำมันเพื่อที่จะสังเคราะห์พอลิเมอร์จากพืชทดแทนหรือสารเติมแต่งในพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) และวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน Thermogravimetric Analysis (TGA)



รูปที่ 2.73 แสดงปฏิกิริยาของน้ำมันละหุ่งที่เติม bifunctional adipoyl chloride [35]

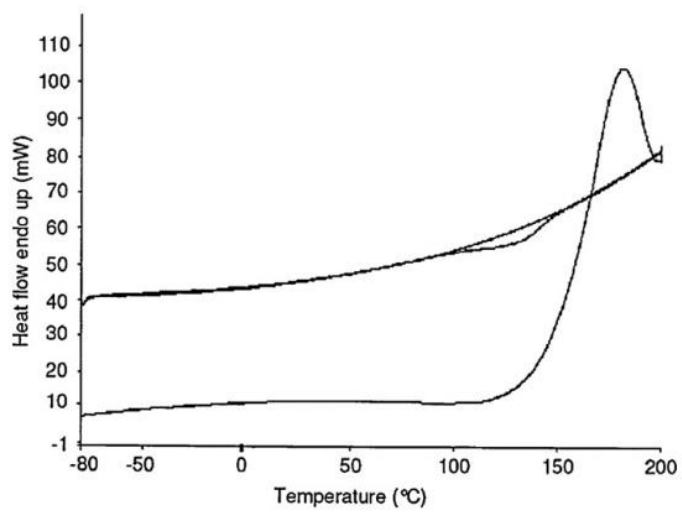




รูปที่ 2.74 แสดงวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร โดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (TGA) ของน้ำมันละหุ่งที่ปรับโครงสร้างแบบร่างแห[35]

จากรูปที่ 2.74 แสดงวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร โดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน(TGA) ของน้ำมันละหุ่งที่ปรับโครงสร้างแบบร่างแห มีการคายความร้อนอยู่ 2 ช่วง ช่วงแรกนั้นที่ 370 องศาเซลเซียส น้ำหนักลดลง 23 เปอร์เซ็นต์ และช่วงที่ 2 นั้นที่อุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส น้ำหนักลดลง 77 เปอร์เซ็นต์ที่ T_{max} การวิเคราะห์นี้แสดงถึงให้เห็นอุณหภูมิการเสื่อมสลายของน้ำมันละหุ่งที่ปรับโครงสร้างแบบร่างแห

จากรูปที่ 2.75 เป็นผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry ของน้ำมันละหุ่งที่ปรับโครงสร้างแบบร่างแหพบว่า จากกราฟนั้นไม่พบเฟสของอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ที่แน่ชัดและไม่พบจุดหลอมละลายหรืออุณหภูมิหลอมละลาย (T_m) ที่ต่ำกว่า 200 องศา-เซลเซียส การที่ไม่มีอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) นั้นแสดงถึงสมบัติของการเป็นเทอร์โมเซต



รูปที่ 2.75 แสดงวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry ของน้ำมัน
 ละหุ่งที่ปรับโครงสร้างแบบร่างแห[35]



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

วิธีการดำเนินงานในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิสไตรีน(Polystyrene,PS) เกรด GP 150 กับน้ำมันละหุ่งจากบริษัท ไทยคาสเตอร์ออยส์ จำกัด ปรับปรุงโครงสร้างโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงเป็นตัวปรับปรุงโครงสร้างน้ำมันละหุ่งให้เกิดโครงสร้างร่างแหเพื่อให้มีลักษณะยืดหยุ่นคล้ายยาง เริ่มจากการเตรียมวัสดุอุปกรณ์ และเครื่องจักรต่างๆที่ใช้ในการขึ้นรูปและการทดสอบตัวอย่าง โดยดำเนินการตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1. แผนการดำเนินงาน

- 3.1.1. ศึกษาค้นหาว่าข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 3.1.2. วางแผนการดำเนินงาน
- 3.1.3 จัดหาวัตถุดิบและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง
- 3.1.4 ปรับปรุงโครงสร้างน้ำมันละหุ่งด้วยสารริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงโดยเทคนิคการบ่มสุกด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต
- 3.1.5 ผสมวัตถุดิบระหว่าง เม็ดพอลิสไตรีนกับน้ำมันละหุ่งที่ตัดแปร ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง(Two Rolls Mill) ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส โดยผสมที่อัตราส่วน 0 10 และ 20 phr
- 3.1.6 นำพลาสติกคอมปาวด์ไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป(Compression Molding) ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส
- 3.1.6 ทดสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่างพอลิสไตรีนกับน้ำมันละหุ่งที่ปรับปรุงโครงสร้าง ดังนี้
 - 3.1.6.1. ทดสอบสมบัติทางกายภาพ (Physical properties)
 - เครื่องทดสอบพฤติกรรมการไหลของพลาสติกคอมปาวด์(Rheological Properties)
 - กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)
 - ทดสอบความหนาแน่นด้วยเทคนิคชั่งน้ำ - ชั่งอากาศ

3.1.6.2. ทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

- ทดสอบการต้านทานต่อการโก่งงอ (Flexural strength) ตามมาตรฐาน ASTM D 790
- ความทนทานต่อแรงกระแทก (Izod impact strength) ตามมาตรฐาน ASTM D 256

3.1.6.3. ทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

- อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature)

3.1.6.4 ทดสอบสมบัติทางกลเชิงไดนามิก

- การวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงไดนามิก Dynamic Mechanical Analysis (DMA)

3.1.6.4. ทดสอบวิเคราะห์ทางเคมี

- เทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)
- เทคนิค Liquid Chromatography - Mass Spectrometer (LC-MS)
- เทคนิค CHN

3.1.7. รวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ผลการทดลองอัตราส่วนระหว่างพอลิเอสไตรีนกับน้ำมัน

ละหุ่งว่าส่งผลต่อสมบัติในการรับแรงกระแทกมากน้อยเพียงใด

3.1.8. สรุปผลและจัดทำรูปเล่มรายงาน



ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงานของโครงการ

ขั้นตอนการดำเนิน กิจกรรม	2558												2559				
	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
3.1.1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูล และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	←→																
3.1.2. วางแผนการ ดำเนินงาน	←→																
3.1.3 จัดหาวัสดุและ เครื่องมือที่ใช้ในการ ทดลอง	←→																
3.1.4 คัดแปรน้ำมันละหุ่ง ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาทาง แสงให้น้ำมันมีเฟสคล้าย ยาง	←→																
3.1.5. ผสมวัสดุดิบ ระหว่าง เม็ดพอลิस्टาไทริน กับน้ำมันละหุ่งที่คัดแปร ด้วยเครื่องผสมแบบสอง ลูกกลิ้ง	←→																
3.1.6. ทดสอบสมบัติทำ การทดสอบชิ้นงานและ บันทึกข้อมูล	←→																
3.1.7. รวบรวมข้อมูลและ วิเคราะห์ผลการทดลอง	←→																
3.1.8. สรุปผลและจัดทำ รูปเล่มรายงาน	←→																
←→	แสดงแผนการดำเนินงานจริง																
←-----→	แสดงแผนการดำเนินงาน																

3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

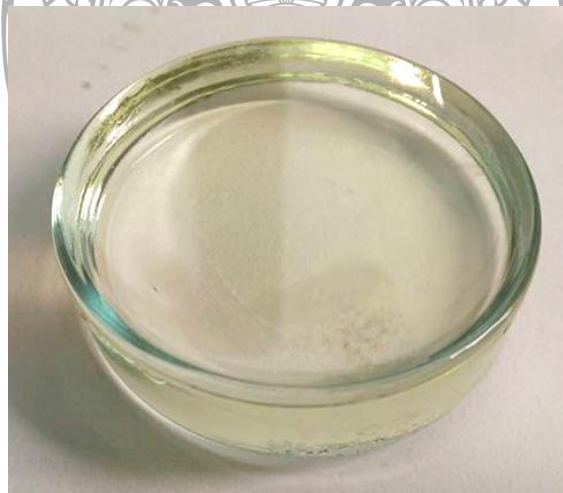
3.2.1 วัสดุคืบ

- 1) เม็ดพอลิสไตรีน (Polystyrene) เกรดชนิด GP 150



รูปที่ 3.1 เม็ดพอลิสไตรีน (Polystyrene) เกรดชนิด GP 150

- 2) น้ำมันละหุ่ง จาก บริษัท ไทยคาสเตอร์ออยล์ จำกัด



รูปที่ 3.2 น้ำมันละหุ่ง จาก บริษัท ไทยคาสเตอร์ออยล์ จำกัด

3) สารริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง Bis Acyl Phosphine oxides (BAPO) มีชื่อทางการค้า
IRGACURE 819 จากบริษัท Ciba Specialty Chemicals



รูปที่ 3.3 สารริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง Bis Acyl Phosphine oxides (BAPO) มีชื่อทางการค้า IRGACURE 819
จากบริษัท Ciba Specialty Chemicals

4) ตัวทำละลาย Hexanediol diacrylate (HDDA) มีชื่อทางการค้า Laromer HDDA จาก
บริษัท BASF Corporation



รูปที่ 3.4 ตัวทำละลาย Hexanediol diacrylate (HDDA) มีชื่อทางการค้า Laromer HDDA จากบริษัท
BASF Corporation

3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

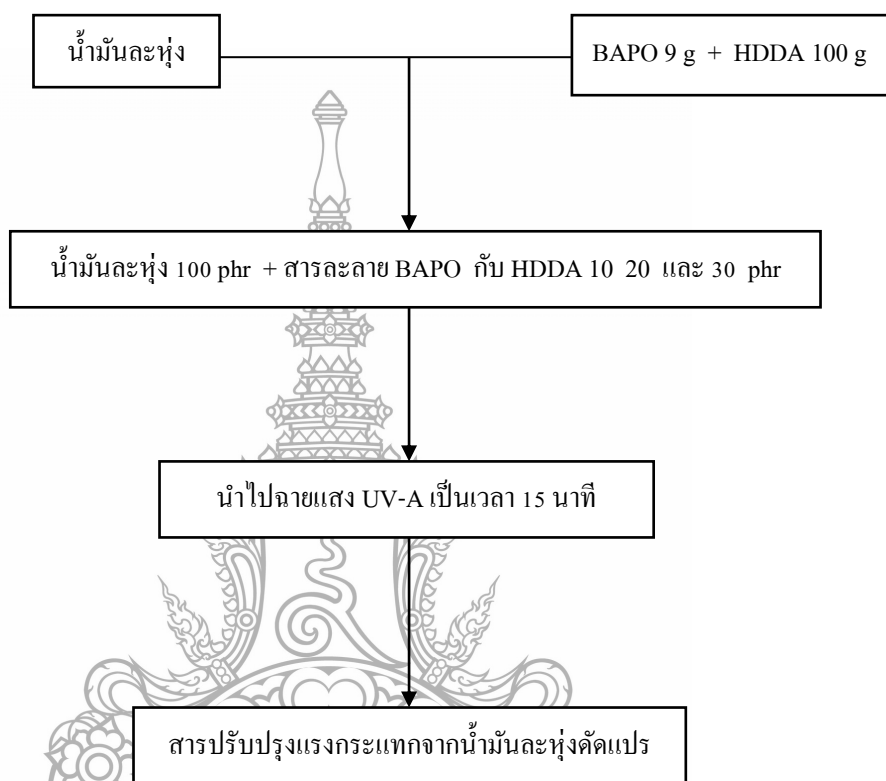
- 1) เครื่องชั่งน้ำหนักที่มีความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (ชื่อทางการค้า Mettler Machine รุ่น AT 200)
- 2) เครื่องชั่งน้ำหนักที่มีความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง
- 3) เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง บริษัท Lab Tech Engineering
- 4) เครื่องอัดขึ้นรูป บริษัท Lab Tech Engineering
- 5) ตู้มสุก UV-A
- 6) เครื่องทดสอบทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) ของ PERKIN ALMER รุ่น DSC 7
- 7) เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)
- 8) เครื่องทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก (Pendulum Impact Machine)
- 9) เครื่องทดสอบพฤติกรรมการไหลของพลาสติกคอมปาวด์ (rheology)
- 10) เครื่องทดสอบการต้านทานการโก่งงอ (flexural Testing Machine) ยี่ห้อ LLOYD รุ่น LR10k PLUS
- 11) สมบัติทางกลเชิงไดนามิก Dynamic Mechanical Analysis (DMA)
- 12) เครื่องทดสอบความหนาแน่นด้วยเทคนิคชั่งน้ำ – ชั่งอากาศ
- 13) เครื่องทดสอบวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี (Fourier Transfer Infrared Spectroscopy)
- 14) เครื่องทดสอบน้ำหนักโมเลกุล Liquid Chromatography - Mass Spectrometer (LC-MS)
- 15) เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (CHN)

3.3 แผนการดำเนินงาน



รูปที่ 3.5 แผนการดำเนินงาน

3.4 แผนผังแสดงขั้นตอนการตัดแปรน้ำมันละหุ่งด้วยสารริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง



รูปที่ 3.6 แผนผังแสดงขั้นตอนการตัดแปรน้ำมันละหุ่งด้วยสารริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง



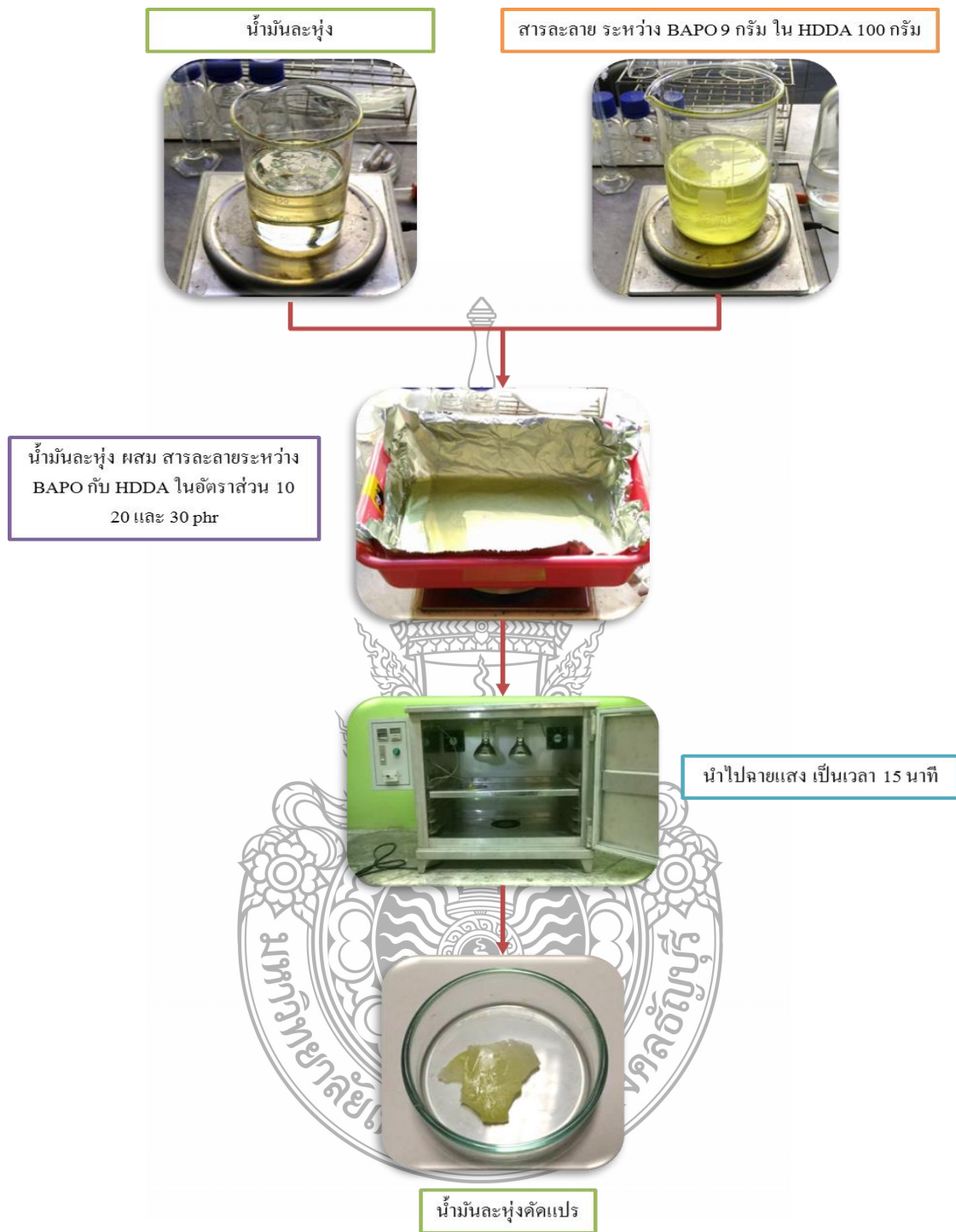
3.5 ขั้นตอนการตัดแปรน้ำมันละหุ่งด้วยสารริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง

นำสารริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง(BAPO) 9 กรัม ไปละลายในตัวทำละลายสารริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง(HDDA) 100 กรัม จากนั้นชั่งน้ำมันละหุ่ง 100 กรัม เติมสารละลายของสารริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงลงไปใต้น้ำมันละหุ่ง 10 20 และ 30 phr จากนั้นเทลงบนถาด นำน้ำมันละหุ่งที่เติมสารละลายของสารริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง นำไปฉายแสง UV-A ความเข้มแสงประมาณ 450-500 mJ/cm² ในตู้บ่มสุก แสดงดังรูปที่ 3.7

ตารางที่ 3.2 แสดงสูตรการผสมน้ำมันละหุ่งตัดแปร

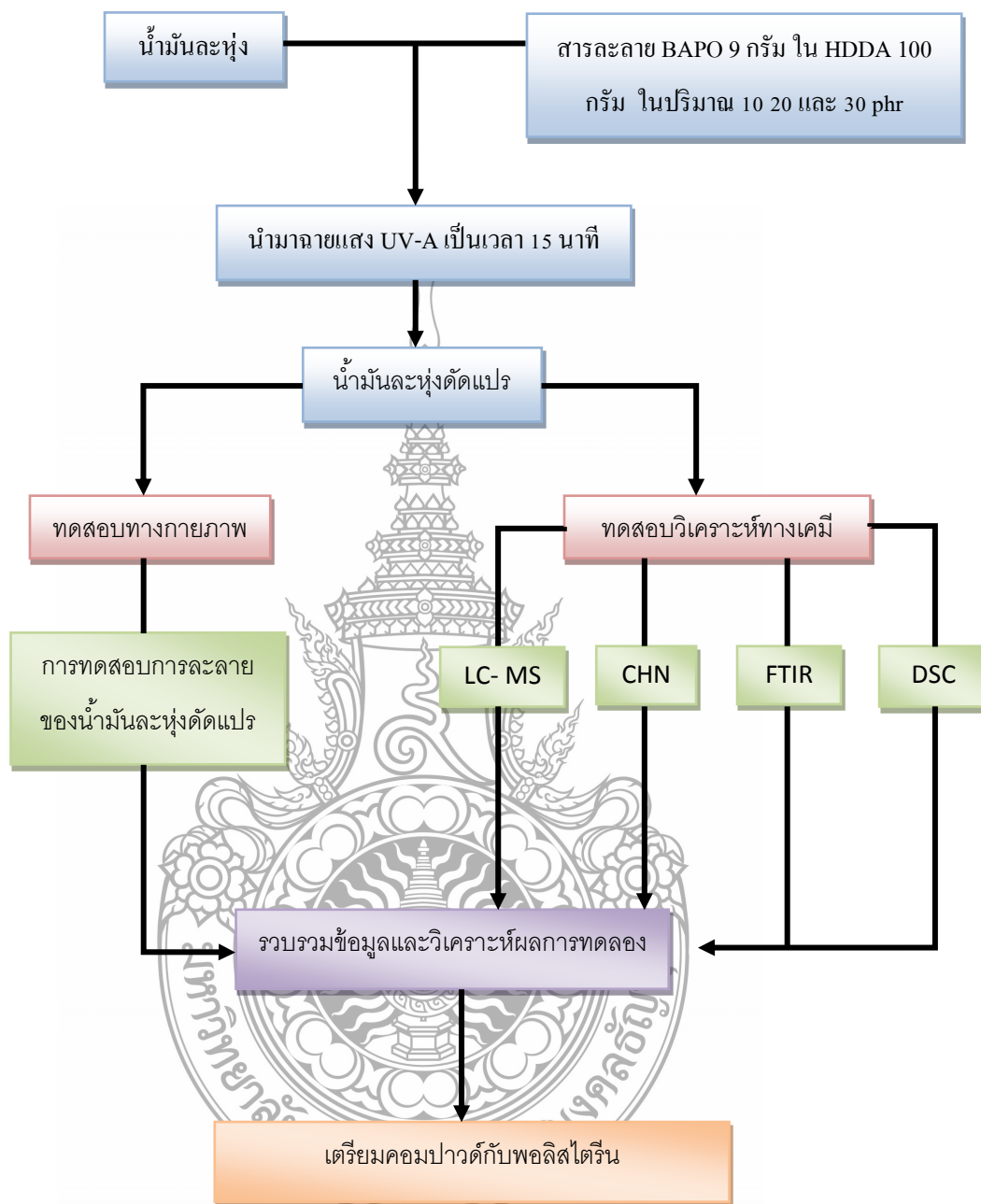
Code	น้ำมันละหุ่ง (กรัม)	สารละลายระหว่าง BAPO กับ HDDA (phr)
CM10	100	10
CM20	100	20
CM30	100	30



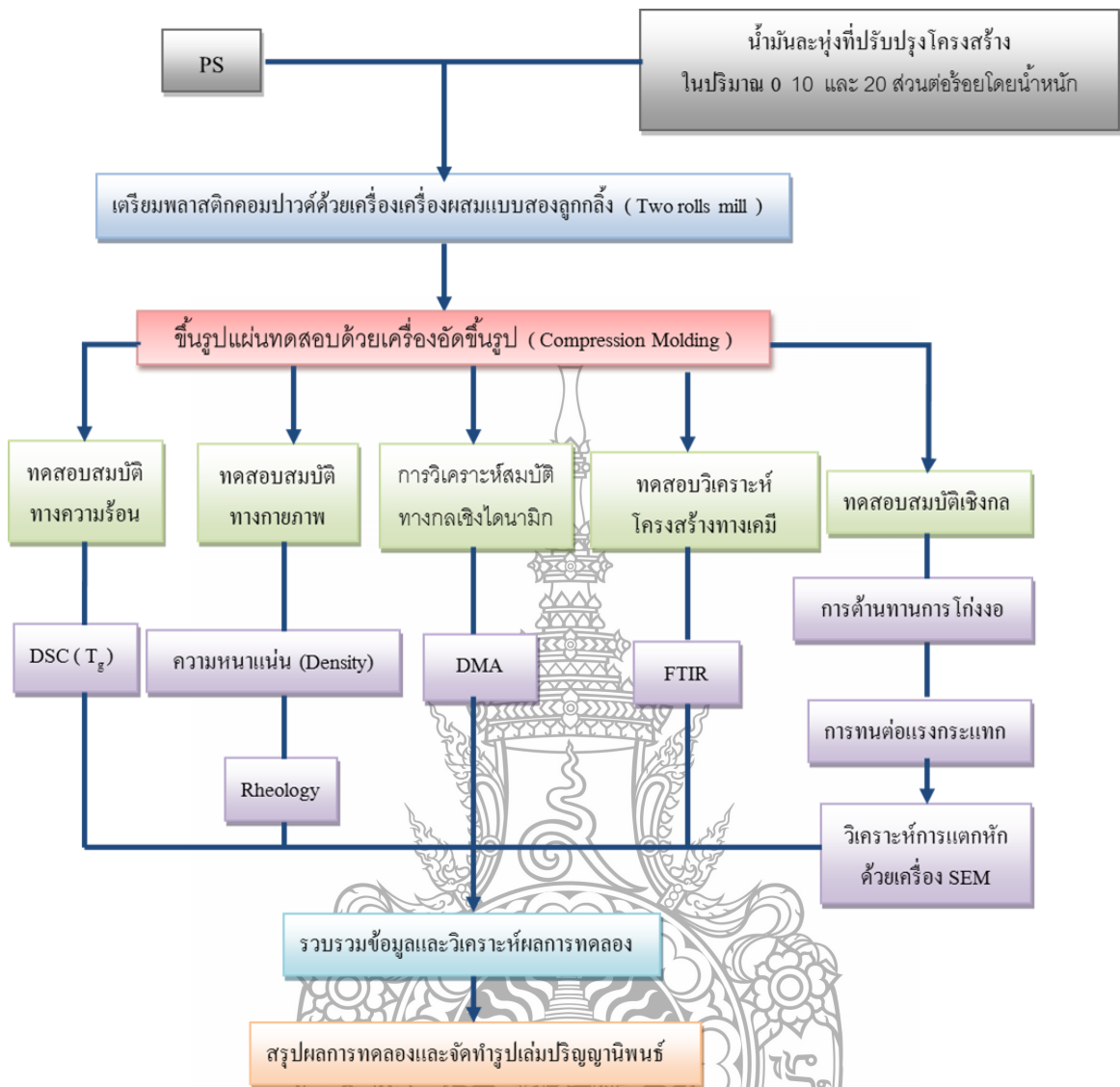


รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการตัดแปรน้ำมันละหุ่งด้วยสารริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง

3.6 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 3.8 แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมและวิเคราะห์น้ำมันละหุ่งดัดแปร



รูปที่ 3.9 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

3.7 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.7.1 การผสมพลาสติกคอมปาวด์ ชั่งเม็ดพอลิสไตรีนและน้ำมันละหุ่งที่ปรับปรุง โครงสร้างที่ อัตราส่วนผสมดังนี้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สูตรการผสมการผสมพลาสติกคอมปาวด์

Code	พอลิสไตรีน (phr)	น้ำมันละหุ่งดัด แปร (phr)	น้ำหนักพอลิสไตรีน (g)	น้ำหนักน้ำมันละหุ่งดัด แปร (g)
PSCM - 0	100	0	1000	0
PSCM - 10	100	10	1000	100
PSCM - 20	100	20	1000	200

3.7.2 นำเม็ดพอลิสไตรีนมาทำการผสมกับน้ำมันละหุ่งที่ปรับปรุงโครงสร้างโดยใช้เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งในอัตราส่วนตามตารางที่ 3.3 โดยใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปที่ 180 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปขึ้นรูปแผ่นชิ้นงานทดสอบโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.10 แสดงขั้นตอนการทำพลาสติกคอมปาวด์และการขึ้นรูปแผ่นทดสอบของพอลิสไตรีนกับน้ำมันละหุ่งที่คัดแปร

3.7.3 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิสไตรีนกับน้ำมัน
ละหุ่งด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป เพื่อใช้ในการทดสอบสมบัติต่างๆ

3.7.3.1. นำพลาสติกที่ได้จากขั้นตอนการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิสไตรีนกับ
น้ำมันละหุ่งที่ปรับปรุงโครงสร้างมาขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป โดยใส่ลงในแม่พิมพ์ขนาด 20×20×0.3
เซนติเมตร ประมาณ 180 กรัม เพื่อทำการอัดขึ้นรูป

3.7.3.2. กำหนดอุณหภูมิที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป ดังนี้

- ตั้งอุณหภูมิในการให้ความร้อนสำหรับการอัดขึ้นรูปที่ 200 องศาเซลเซียส
เป็นเวลา 8 นาที เพื่อให้เม็ดพลาสติกหลอมผสมกัน

- ทำการหล่อเย็นที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 6 นาที

3.7.3.3. นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ เพื่อนำไปเตรียมเป็นชิ้นทดสอบตามมาตรฐานการ
ทดสอบต่อไป

3.8 การทดสอบทางกายภาพ

3.8.1 การทดสอบค่าความหนาแน่น (เทคนิคชั่งน้ำ-ชั่งอากาศ, Specific Gravity, ASTM
D792)[26]

3.8.1.1. การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

- เตรียมเม็ดพลาสติกตัวอย่างที่จะใช้ทดสอบ

3.8.1.2. วิธีการทดสอบ

- ทำการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบตามคู่มือการใช้เครื่อง

- ตั้งค่าเครื่องชั่งเป็น 0.000 g

- วางเม็ดพลาสติก 1 เม็ดบนภาชนะสำหรับชั่งในอากาศ อ่านค่าน้ำหนัก

- เอาเม็ดพลาสติกออกจากภาชนะ และกด Tare เพื่อตั้งค่าเป็นศูนย์อีกครั้ง

- นำเม็ดพลาสติกที่ทดสอบก่อนหน้านี้ ทำการหย่อนลงในบีกเกอร์ โดยให้ตกลงใน

ตะแกรงลวดที่จมอยู่ในของเหลวที่ทราบค่าความหนาแน่น อ่านค่าน้ำหนัก

- คำนวณผลการทดสอบ

หาค่า ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) ดังสมการดังนี้

จากสูตร

$$D = \left(\frac{A}{(A - W)} \right) \times d$$

เมื่อ D คือ ความถ่วงจำเพาะ

A คือ น้ำหนักชั่งบนอากาศ

W คือ น้ำหนักชั่งในของเหลว

d คือ ค่าความหนาแน่นของของเหลว

3.8.2. การทดสอบสมบัติการไหล (Rheology) [26]

3.8.2.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

- ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบจะมีลักษณะเป็นเม็ดหรือเศษบดละเอียด
- ทำการชั่งเม็ดพลาสติกตัวอย่างน้ำหนัก 50 กรัม แล้วนำไปทำการทดสอบ

3.8.2.2 วิธีการทดสอบ

- เลือกเงื่อนไขให้เหมาะสมกับการทดลอง (180 องศาเซลเซียส)
- ตั้งอุณหภูมิเครื่องทดสอบและรออย่างน้อย 30 นาที เพื่อให้อุณหภูมิคงที่ (อุณหภูมิถึง 180 องศาเซลเซียส)
- ทาจาระบีที่ตัวรับคายแล้วนำไปขันติดตั้งที่ Barrel
- นำคายใส่ใน Barrel แล้วกดคายให้สุด
- ใส่เม็ดพลาสติกตัวหรือเศษบดละเอียดอย่างลงใน Barrel โดยจะค่อยๆ ไล่ลงไป โดยให้เม็ดพลาสติกหรือเศษบดละเอียดไหลเรียงลงไปอย่างมีระเบียบ อาจจะใช้แท่งเหล็กช่วยกดพลาสติกหรือเศษบดละเอียดลงไป เพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการหลอมเหลวละลาย และเกิดการอุดตัน
- นำ Piston มาติดตั้งบน Barrel แล้วกด Pressure ให้มีค่าประมาณ 0.1 MPa
- ตั้งค่า shear rate 5-3000 และกำหนดข้อมูล 30 ข้อมูล เพื่อให้เห็นความแตกต่าง
- กด start เพื่อทำการทดลอง และนำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟ และวิเคราะห์ผล

3.9 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

3.9.1 การวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC)

3.9.1.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นเม็ดหรือชิ้นส่วนของสารตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ ทำการชั่งน้ำหนักสารตัวอย่างให้มีน้ำหนักประมาณ 5-10 มิลลิกรัม บรรจุลงในภาชนะบรรจุตัวอย่าง (Pan) และใช้อุปกรณ์กดปิด Pan ให้แน่น แต่อย่าให้แน่นจนอากาศเข้าไม่ได้ แล้วนำมาทำการทดสอบ

3.9.1.2. วิธีการทดสอบ

- เปิดชุดทดสอบ DSC ซึ่งเป็นชุดทดสอบอันประกอบด้วย อุปกรณ์ให้ความร้อน (DSC7) ระบบควบคุม TAC7 (Controller) คอมพิวเตอร์ เครื่องพล็อตกราฟ เปิดแก๊สไนโตรเจน และการหล่อเย็น ตามลำดับ

- นำภาชนะ (Pan) บรรจุตัวอย่างทดสอบไปใส่ในเตา (Furnace) ของเครื่อง DSC ซึ่งมี 2 เตา โดยที่เตาหนึ่งสำหรับใส่ภาชนะเปล่าเป็นตัวอ้างอิง อีกเตาหนึ่งสำหรับใส่ภาชนะการทดสอบ

- ปิดฝาครอบเครื่อง DSC
- กำหนดค่าตัวแปร (Parameter) และเงื่อนไข (Condition) ที่ต้องการลงในโปรแกรมควบคุมการทำงาน

- เริ่มทำการทดสอบ เครื่องทดสอบจะให้ความร้อนตามอุณหภูมิและอัตราการให้ความร้อนที่กำหนดไว้ เมื่อสิ้นสุดการทดสอบโปรแกรมจะทำการบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ

- นำ Pan ตัวอย่างทดสอบออกจากเตาเครื่อง DSC แล้วจึงเริ่มทำการทดสอบสารตัวอย่างอื่นๆ ต่อไป

3.10 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

โดยทั่วไปจะใช้ลำอิเล็กตรอนสแกนไปบนผิวหน้าของชิ้นงานตัวอย่างที่เคลือบด้วยทองคำ และทำให้เกิดการกระเจิงของอิเล็กตรอน (Scattered electrons) และเกิดเป็นสัญญาณรูปภาพที่สามารถเห็นลักษณะผิวหน้าและลักษณะของการผสมหรือการกระจายตัวของผสมได้

3.10.1. การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

- นำตัวอย่างทดสอบไปวางบนแผ่นรองตัวอย่างที่ทำจากกระดาษฟอยล์และทาเคลือบกาวคาร์บอนที่ผิวขอบของชิ้นงานจนถึงแผ่นรอง

- นำไปเคลือบทอง (Gold sputtering) แล้วเริ่มทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM

3.10.2. วิธีการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope, SEM

- เปิดเครื่องสำรองไฟ เปิดเครื่อง Cooling รอจนกว่าอุณหภูมิลดเหลือ 20 องศาเซลเซียส

- บิดกุญแจ เปิดเครื่อง SEM

- เปิดคอม และ เปิดโปรแกรม JEOL Scanning Electron Microscope

- จากนั้นรอ จนกว่าคำว่า Wait.. เปลี่ยนเป็น Ready

- จากนั้นกดที่ VENT รอจนกว่าไฟสีเขียวจะหยุดกระพริบ

- ใสตัวอย่างเข้าไปในเครื่อง SEM

- จากนั้นกดที่ EVAC รอจนกว่าจะขึ้น Ready

- ปรับกระแสให้เป็น 15 kV กด HT ให้เป็น on

- จากนั้นปรับภาพให้ชัดเจน เลือกกำลังขยายตามต้องการ

- เลือกตำแหน่งที่ต้องการ กด Scan 3 และกด Freeze

- กด Save เพื่อบันทึกภาพ

3.11 การทดสอบสมบัติเชิงกล

3.11.1 การทดสอบการต้านทานแรงกระแทก (Izod Impact Strength) ASTM D 256

3.11.1.1. การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการต้านทานแรงกระแทก สามารถเตรียมได้โดยกระบวนการอัดขึ้นรูป ตามมาตรฐาน ASTM D 256 (ขนาดชิ้นงาน 3.17 x 12.7 x 64.5 มิลลิเมตร) ไม่ต้องทำการบากชิ้นงานทดสอบ โดยใช้ชิ้นงานทดสอบจำนวนตัวอย่างละประมาณ 10 ชิ้น

3.11.1.2 วิธีการทดสอบ

- หาค่าแรงเสียดทานของค้อนน้ำหนักที่ต้องการใช้ โดยการปล่อยค้อนน้ำหนักลงอย่างอิสระโดยไม่มีชิ้นงาน อ่านค่าพลังงานที่ได้ เพื่อนำไปลบออกจากค่าพลังงานที่อ่านได้จากการทดลองเมื่อมีชิ้นงาน

- ยกค้อนขึ้นพักไว้บนที่ยึด แล้วจับยึดชิ้นงานทดสอบตรงตำแหน่งตัวจับชิ้นงาน โดยให้รอยบากตรงมุมแหลมอยู่กึ่งกลาง

- กดปุ่มที่อยู่ข้างเครื่องพร้อมๆกัน เพื่อให้ค้อนตีกระแทกชิ้นงาน

- อ่านค่าพลังงานที่ทำให้ชิ้นงานแตกหัก ไปคำนวณค่าของการทนต่อแรง

กระแทก

การคำนวณหาค่าการทนแรงกระแทก ตามมาตรฐาน ASTM ดังสมการ 3.3

$$\text{ค่าทนแรงกระแทก (J/m)} = \frac{\text{พลังงานที่ใช้ (J)}}{\text{ความหนาเฉลี่ย (m)}} \quad (3.3)$$

3.11.2 การทดสอบการต้านทานการโก่งงอ ตามมาตรฐาน ASTM D 790

3.11.2.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการต้านทานการโก่งงอ สามารถเตรียมได้โดยกระบวนการอัดขึ้นรูป ตามมาตรฐาน ASTM D 790 (ขนาดชิ้นงาน 25 x 80 x 3 มิลลิเมตร) โดยใช้ชิ้นงานทดสอบจำนวนตัวอย่างละประมาณ 10 ชิ้น

3.11.2.2 วิธีการทดสอบ

- เลือกใช้โปรแกรมในการทดสอบ Qmat-testzone
- เลือก Open test method เลือก Tpoint จากนั้นคลิก OK
- ขั้นตอนต่อมา setting ค่าตามตัวแปรต่างๆลงในโปรแกรมควบคุม

การทำงานของเครื่องทดสอบ โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D 790 ดังนี้

Load Range 500 N

Displacement Range 50 mm

Speed 1.3 mm/min

Auto Return ON

Span 50 mm

Approach speed 0.01 mm/min

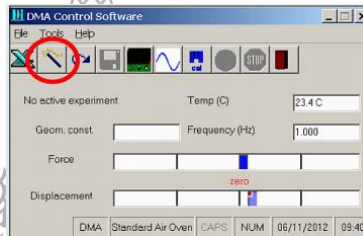
-เมื่อตั้งค่าเรียบร้อยแล้ว แล้วทำการวางชิ้นงานทดสอบบน Support Span และเริ่มทดสอบโปรแกรมจะบันทึกแรงกดและระยะกดสูงสุดเมื่อชิ้นงานเสียรูป บันทึกค่าการทดสอบ เช่น ค่าความต้านทานแรงกด (Flexural Strength) และ ค่าการต้านทานการเสียรูปแบบโก่งงอ (Flexural Modulus)

3.12 การวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงไดนามิก (DMA)

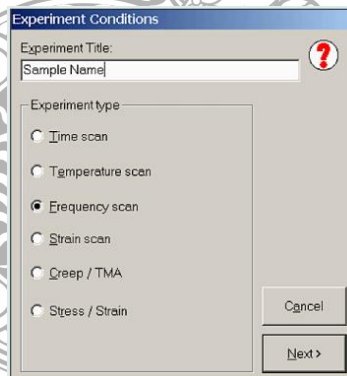
การวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงไดนามิก Dynamic Mechanical Analysis (DMA) ที่ห้อง Perkinelmer รุ่น DMA 8000 โดยเตรียมชิ้นงานทดสอบมีความหนา 3 mm ความกว้าง 10 mm ความยาว 25 mm ทำการทดสอบที่อุณหภูมิระหว่าง 30 – 150 องศาเซลเซียส โดยใช้โหมดการทดสอบแบบ Dual Cantilever Bending [36]

ขั้นตอนการใช้เครื่อง DMA 8000

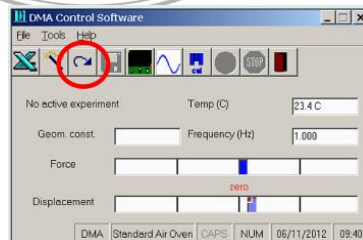
3.12.1. เลือกโปรแกรม DMA Control Software คลิกเลือกตามรูป



3.12.2. จะขึ้นหน้าต่าง Experiment Conditions ให้ชื่อตัวอย่างกด next

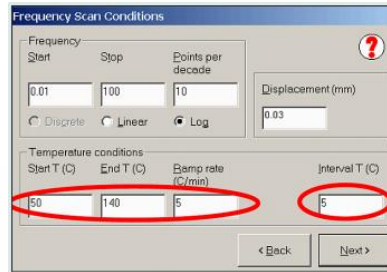


3.12.3. จากนั้นกดคลิกตามรูป

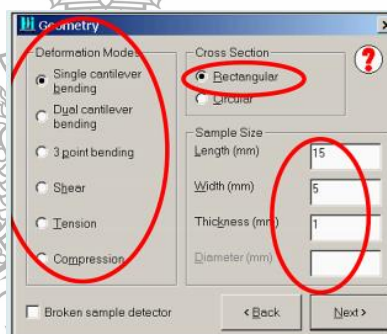


3.12.4. จะขึ้นหน้าต่าง Frequency Scan Conditions ตั้งค่าในช่อง Temp conditions และ

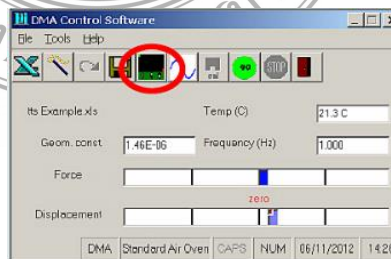
กด Next



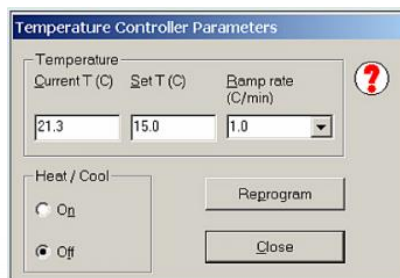
3.12.5. จะขึ้นหน้าต่าง Geometry เลือกโหมดการทดสอบที่ช่อง Deformation Modes ใส่ขนาดชิ้นงานทดสอบในช่อง Sample Size กด next



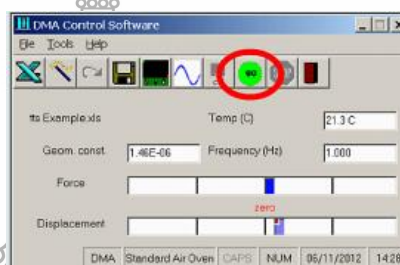
3.12.6. จากนั้นคลิกตามรูป



3.12.7. จะขึ้นหน้าต่าง Temperature Controller Parameter เอาไว้ดูอุณหภูมิ



3.12.8. จากนั้นได้อุณหภูมิที่เราเซตเอาไว้ จากนั้นกดปุ่ม Go

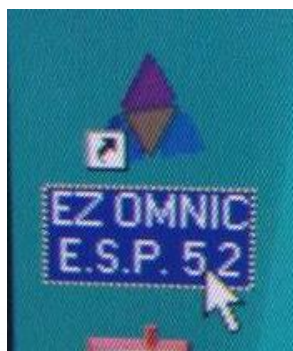


3.13 ทดสอบวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี

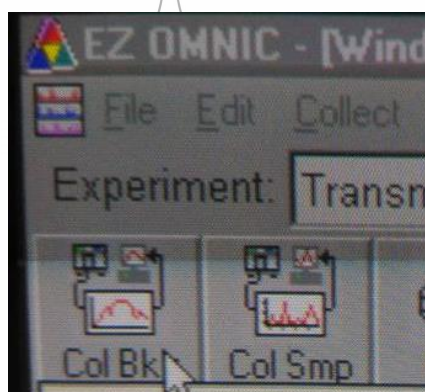
การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

โครงการนี้ ใช้เครื่อง FTIR ยี่ห้อ Thermo-Nicolet รุ่น Nexus 470 ทำการวิเคราะห์โดยใช้ตัวอย่างเป็นแผ่นฟิล์มบาง ที่ขึ้นรูปโดยการอัดขึ้นรูป ที่ความหนาอยู่ในช่วง 0.05-0.1 มิลลิเมตร และใช้เทคนิควิเคราะห์แบบทะลุผ่านออกมา (Transmission) สัมพันธ์กับช่วงความยาวคลื่นของรังสี ที่ช่วงความยาวคลื่น 400 - 4000 cm^{-1} โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้ [37]

1. เปิด stabilizer แล้วเปิดสวิทซ์ที่ตัวเครื่อง FT-IR และคอมพิวเตอร์
2. เปิด software โดยคลิกที่โปรแกรม



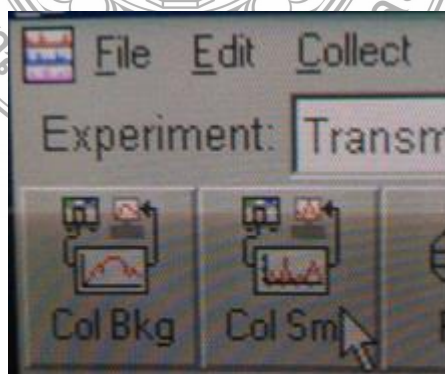
3. คลิก collect background, เครื่องจะทำการ review ถ้า background ถูกต้องแล้ว ให้กด collect



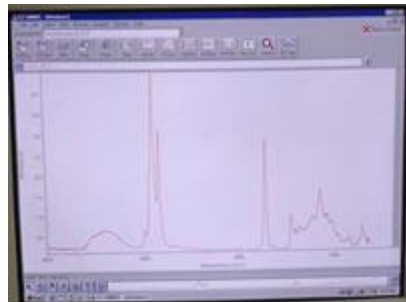
4. รอจนกระทั่งเครื่อง scan เสร็จ จะได้ spectrum ของ background จากนั้นก็สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ โดยเครื่องจะแจ้งให้เตรียม collect sample โดยนำตัวอย่างทดสอบที่เป็นน้ำมันละหุ่งและน้ำมันละหุ่งคัดแปร 10 20 และ 30 phr มาปายที่กระจก

5. ใส่ตัวอย่างในที่จับยึดตัวอย่างสำหรับเทคนิคการส่องผ่าน

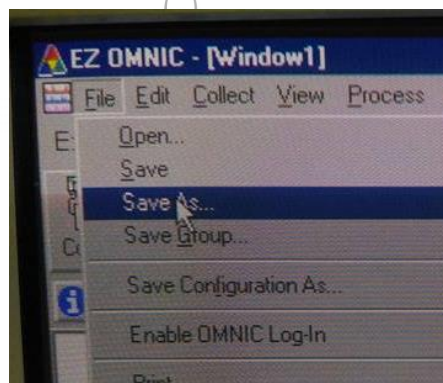
6. คลิก collect sample เครื่องจะทำการ scan



7. จนกระทั่งได้ spectrum ออกมา



7. ทำการบันทึกข้อมูลโดยกด save as ที่เมนู File



บทที่ 4

ผลการทดลอง และ วิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 การปรับปรุงสมบัติของพอลิสไตรีนโดยใช้ไขละหุ่งเป็นสารเติมแต่ง

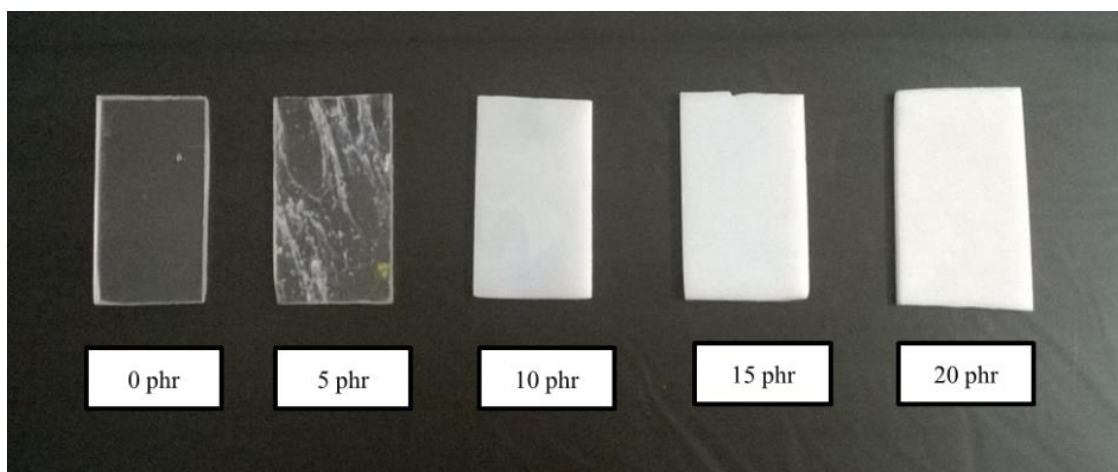
การวิจัยในส่วนนี้ทำขึ้นเพื่อเปรียบเทียบกับการใช้น้ำมันละหุ่งคัดแปรเป็นสารเติมแต่งในพอลิสไตรีน

4.1.1 การเตรียมพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง พอลิสไตรีนและไขละหุ่ง

การเตรียมพลาสติกคอมปาวด์ระหว่างพอลิสไตรีนและไขละหุ่งที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ กัน ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง โดยการชั่งน้ำหนักของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่างพอลิสไตรีน และ ไขละหุ่งที่อัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 4.1 ทำการหลอมผสมพลาสติกคอมปาวด์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two Rolls Mill) ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส จากนั้นนำพลาสติกคอมปาวด์ไปขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding) ที่ 200 องศาเซลเซียส ใช้แรงดันอัดขึ้นรูปที่ 150 kg/cm^2 คงที่ทุกอัตราส่วน ลักษณะแผ่นที่ได้แสดงดังรูป 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงอัตราส่วนผสมพลาสติกคอมปาวด์ของ พอลิสไตรีน และ ไขละหุ่ง

PS	Castor Wax (phr)
100	0
100	5
100	10
100	15
100	20



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะตัวอย่างที่อัดขึ้นรูปของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่างพอลิสไตรีนกับไขละหุ่งในอัตราส่วนต่างๆ

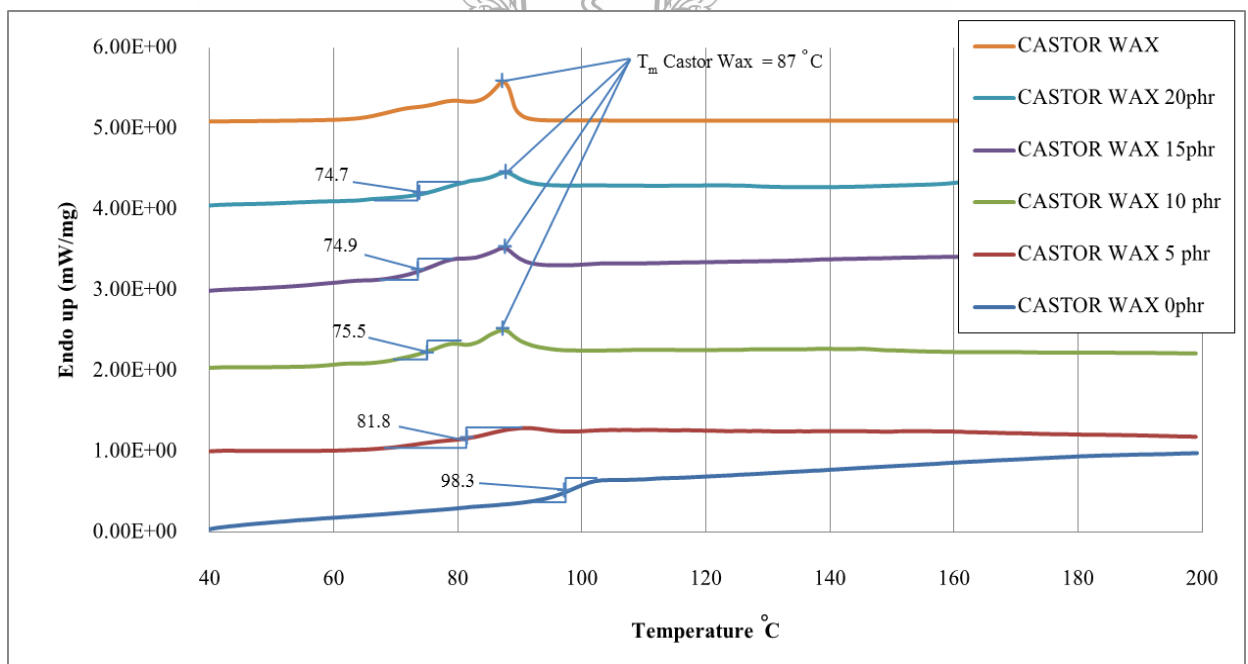
4.1.2 การวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC)

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางความร้อนของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง พอลิสไตรีน : ไขละหุ่ง ที่อัตราส่วนต่างๆด้วยเทคนิค DSC

ปริมาณ castor wax (phr)	T_g ($^{\circ}C$)
0	98.3
5	81.8
10	75.5
15	74.9
20	74.7

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2 แสดงสมบัติทางความร้อนของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่างพอลิสไตรีน กับไขละหุ่ง จะเห็นได้ว่าค่าการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว มีค่าอยู่ที่ช่วง 98.3 ถึง 74.7 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วนั้นมีค่าลดลงเมื่อเติมไขละหุ่งลงไปผสมในพอลิสไตรีน

ในปริมาณเพิ่มขึ้น จากกราฟในรูปที่ 4.2 ค่า T_g ของพอลิสไตรีนอยู่ที่ 98.3 องศาเซลเซียสและเมื่อผสมไข
 ละหุ่ลงลงในพอลิสไตรีนในปริมาณ 5 – 20 phr พบว่าค่า T_g มีค่าลดลงเป็นลำดับจาก 81.8 ถึง 74.7 องศา
 เซลเซียส ดังนั้นเห็นได้ว่าการเติมไขละหุ่ลงลงในพอลิสไตรีนมีผลให้การเปลี่ยนสถานะเกิดขึ้นได้ง่ายขึ้น
 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการกระจายตัวของไขละหุ่ที่มีอยู่ทั่วไปในพอลิสไตรีน และเมื่อได้รับอุณหภูมิเพิ่มขึ้น
 สายโซ่จะเกิดการหมุนรอบตัวเองง่ายขึ้น [6] ส่งผลให้ค่า T_g ลดลง นอกจากนี้ยังพบการเกิดพีคการดูด
 พลังงานความร้อนที่ตำแหน่งพีคประมาณ 87 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นพีคการหลอมเหลวของไขละหุ่ (T_m)
 นั้นหมายความว่า การใช้ปริมาณไขละหุ่ที่มากกว่า 5 phr ทำให้เกิดการแยกเฟสระหว่างพอลิสไตรีน ที่
 เป็นการจัดเรียงแบบอสัณฐานและเกิด โครงสร้างผลึกของไขละหุ่ ซึ่งเห็นได้ว่าเมื่อผสมไขละหุ่ใน
 อัตราส่วนที่มากขึ้นทำให้สีของพลาสติกคอมปาวด์มีความขาวขุ่นเพิ่มมากขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.1 เนื่องจาก
 ไขละหุ่มีลักษณะเป็นผงสีขาวแสดงถึงไขละหุ่ที่แทรกอยู่ในพอลิสไตรีน

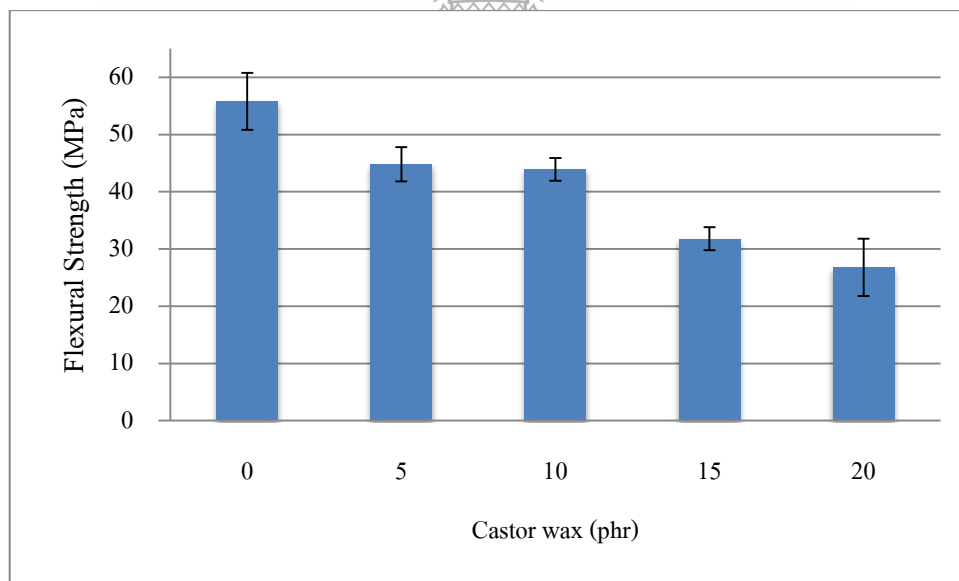


รูปที่ 4.2 เทอร์โมแกรมแสดงสมบัติทางความร้อนของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่างพอลิสไตรีน
 กับไขละหุ่

4.1.3. ผลการทดสอบการต้านทานการโค้งงอ Flexural Strength ASTM D 790

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการต้านทานการโค้งงอของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง พอลิสไตรีน และ ไชละหุ้ง ที่ปริมาณต่างๆ กัน ดังนี้

ปริมาณ ไชละหุ้ง (phr)	ค่าต้านทานการ โค้งงอ (MPa)
0	55.8 ± 5
5	44.8 ± 3
10	43.9 ± 2
15	31.8 ± 2
20	26.8 ± 5



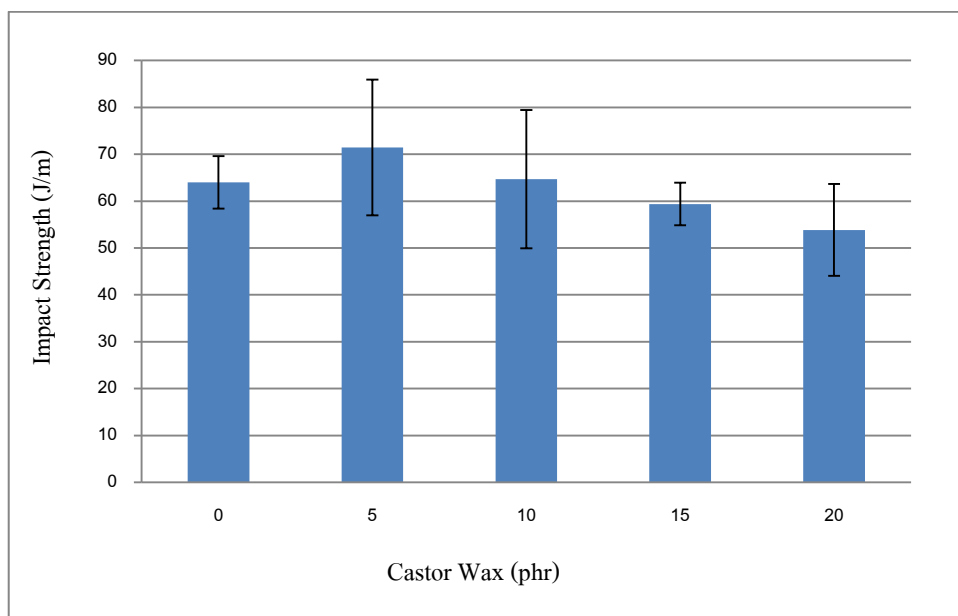
รูปที่ 4.3 ค่าการทดสอบการต้านทานการ โค้งงอของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง PS : Castor Wax

จากรูปที่ 4.3 แสดงการต้านทานการโค้งงอพบว่า ค่าการต้านทานการโค้งงอมีค่าลดลงตามลำดับเมื่อเติมใยละหุ่งในปริมาณมากขึ้น ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 55 – 27 MPa ทั้งนี้ เป็นเพราะการเข้าไปแทรกตัวของโมเลกุลใยละหุ่งระหว่างเฟสอสัณฐานในพอลิสไตรีน จึงทำให้ลดแรงดึงคู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิสไตรีนจึงส่งผลให้การต้านทานการโค้งงอลดลงตามลำดับ ดังงานวิจัยของAniruddha Chatterjee และคณะ[52] พบว่า การผสมอนุภาคนาโน CaCO_3 ในพอลิสไตรีนที่มากขึ้นทำให้เกิดการกระจายตัวแบบเกาะกลุ่มซึ่งส่งผลต่อการรับแรงที่ลดลง ซึ่งให้ผลกระทบบนแนวโน้มเดียวกันกับค่า T_g จากผลการวิเคราะห์อุณหภูมิ T_g ของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง PS กับ ใยละหุ่ง พบพิกัด T_m ของใยละหุ่งอย่างเห็นได้ชัดเมื่อผสมใยละหุ่งที่ 10 15 และ 20 phr แสดงให้เห็นว่าการใช้ใยละหุ่งมากกว่า 5 phr ทำให้เกิดการแยกเฟสระหว่าง PS กับ ใยละหุ่ง ทำให้ค่าความแข็งแรงลดลง เมื่อเพิ่มอัตราส่วนในการเติมใยละหุ่งที่เพิ่มขึ้น เพราะใยละหุ่งที่เติมเข้าไปได้เข้าไปแทรกในสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้ระยะห่างของสายโซ่โมเลกุลของพอลิสไตรีนเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ต้านทานการโค้งงอลดลง

4.1.4 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก Impact Strength (ASTM D 256)

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทกของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง พอลิสไตรีน และ ใยละหุ่งที่ปริมาณต่างๆ กัน ดังนี้

ใยละหุ่ง (phr)	ค่าต้านแรงกระแทก (J/m)
0	64.0±3
5	71.4± 7
10	64.6± 7
15	59.3± 2
20	53.8± 5



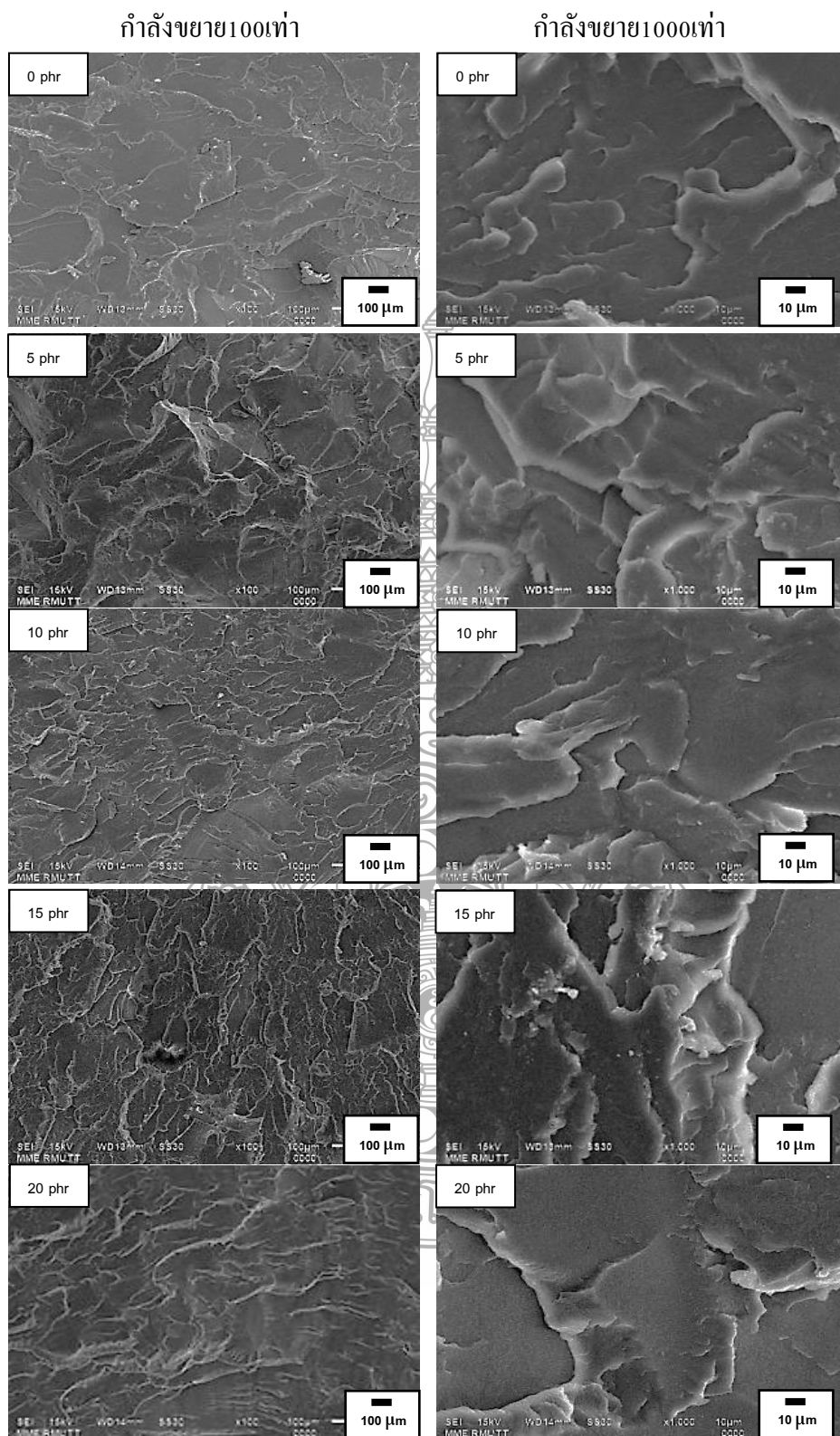
รูปที่ 4.4 ค่าการทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก (Izod impact strength) ของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง PS : Castor Wax

จากรูปที่ 4.4 แสดงค่าการต้านทานแรงกระแทกซึ่งเป็นการทดสอบการรับแรงโดยทันทีทันใดพบว่า ค่าการต้านทานแรงกระแทกของพลาสติกคอมปาวด์ มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 64 – 72 J/m ซึ่งพบค่าการต้านทานแรงกระแทกสูงสุด อยู่ที่ประมาณ 71.4 ± 7 J/m ที่ปริมาณการผสมไขละหุ่ง ปริมาณ 5 phr แต่กลับพบการต้านทานแรงกระแทกลดลงเป็นลำดับ เมื่อเพิ่มปริมาณไขละหุ่งที่ปริมาณ 10 15 และ 20 phr ซึ่งเห็นได้ว่าการใช้ปริมาณไขละหุ่งเพียง 5 phr ก็สามารถปรับปรุงการต้านทานแรงกระแทกของพอลิสไตรีนได้เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 10 แต่เมื่อใช้ในปริมาณมากขึ้นกลับพบการลดลงของการต้านทานแรงกระแทกเป็นลำดับ ซึ่งเป็นผลจากการเกิดโครงสร้างผลึกของไขละหุ่งระหว่างเฟส อสังฐานของพอลิสไตรีน ซึ่งเข้าไปขัดขวางการขยับตัวของสายโซ่ เพื่อดูดซับพลังงานกระแทกจึงส่งผลด้านผลการทดสอบอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ความสามารถในการรับแรงกระแทกจึงลดลงเมื่อใช้ในปริมาณสูงขึ้น

นอกจากนี้ จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวรอยแตกหักของตัวอย่างที่ทดสอบการต้านทานแรงกระแทกดังรูปที่ 4.5 พบว่าพอลิสไตรีนที่ผสมไขละหุ่งในอัตราส่วน 5 10 15 และ 20 phr ไม่พบการแยกเฟสเมื่อพิจารณาด้วยภาพถ่ายจากกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 100 และ 1000 เท่า แต่เมื่ออ้างอิงจาก

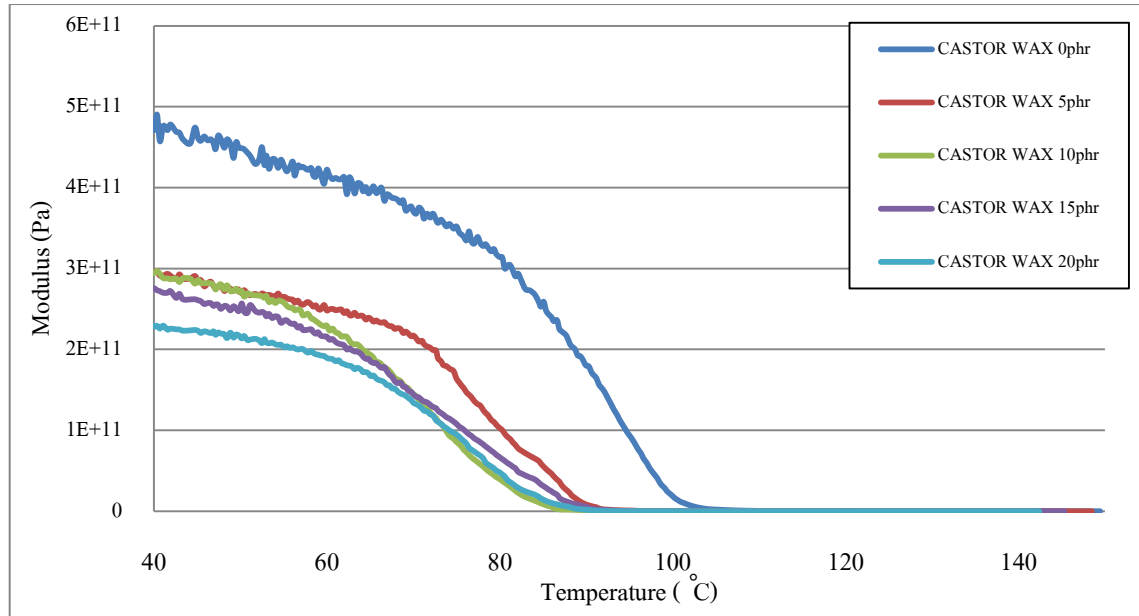
ผลทดสอบการต้านทานแรงกระแทกและการวิเคราะห์ค่า T_g นั้นพบว่า ในการผสมไซลอะฮุงที่ 5 phr มีค่าการต้านทานแรงกระแทกสูงสุดแสดงว่าเป็นปริมาณการผสมที่เหมาะสมที่สุด และยังพบพื้นผิวรอยแตกหักแบบขรุขระมากกว่า ซึ่งแสดงถึงรูปการแตกแบบเหนียวมากกว่า ต่างจากพลาสติกคอมปาวด์ที่มีปริมาณไซลอะฮุง 0 10 15 และ 20 phr มีพื้นผิวรอยแตกหักแบบราบเรียบส่วนใหญ่ซึ่งเป็นรอยแตกที่บ่งบอกถึงลักษณะความเปราะแตกหักได้ง่าย





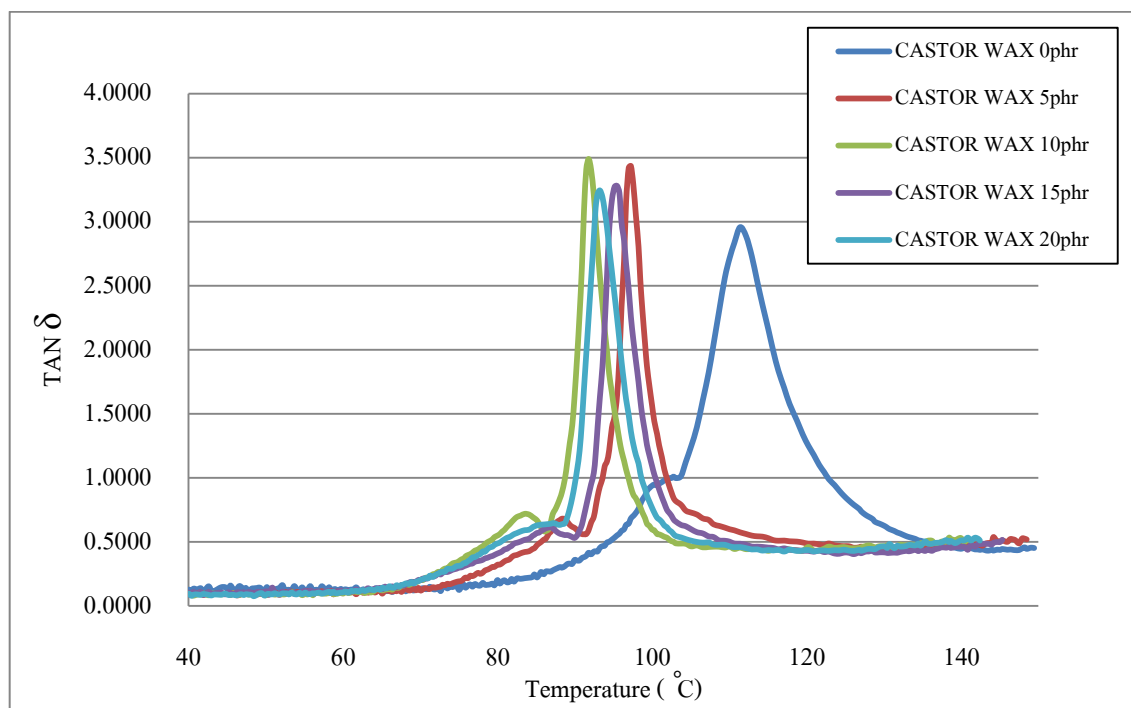
รูปที่ 4.5 ลักษณะสัณฐานวิทยาของพลาสติกคอมปาวด์ผสมระหว่าง PS:Castor Wax

4.1.4 ผลการทดสอบวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงไดนามิก DMA



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าโมดูลัสสะสมต่ออุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่างพอลิสไตรีนกับไขละหุ่ง

จากรูปที่ 4.6 แสดงค่าโมดูลัสสะสม (Storage Modulus) ที่เปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง พอลิสไตรีนกับไขละหุ่งพบว่า เมื่อผสมไขละหุ่งลงไป ในพอลิสไตรีน ในอัตราส่วน 5 10 15 และ 20 phr ค่าโมดูลัสสะสมมีค่าลดลงตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าไขละหุ่งทำให้พลาสติกคอมปาวด์ สามารถเสียรูปได้ง่ายขึ้นเมื่อได้รับความร้อนเพิ่มขึ้น เพราะค่าโมดูลัสของพลาสติกคอมปาวด์จะมีค่าลดลงตามไปเนื่องจากไขละหุ่งสามารถเข้าไปแทรกตัวอยู่ช่องระหว่างสายโซ่ แต่ไขละหุ่งที่อุณหภูมิห้องจะมีเฟสเป็นของแข็งจึงไม่สามารถทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ได้ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่สูงขึ้นไขละหุ่งเกิดการเปลี่ยนสถานะกลายเป็นของเหลวจึงทำให้ไขละหุ่งที่อยู่ในช่องว่างของสายโซ่กลายเป็นสารหล่อลื่นจึงทำให้สายโซ่เกิดการขยับตัวได้ง่ายขึ้นจึงทำให้เสียรูปได้ง่ายขึ้นจึงแสดงออกมาในค่าของโมดูลัสสะสมที่ลดลงตามปริมาณการเติมไขละหุ่งที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง [40-41]



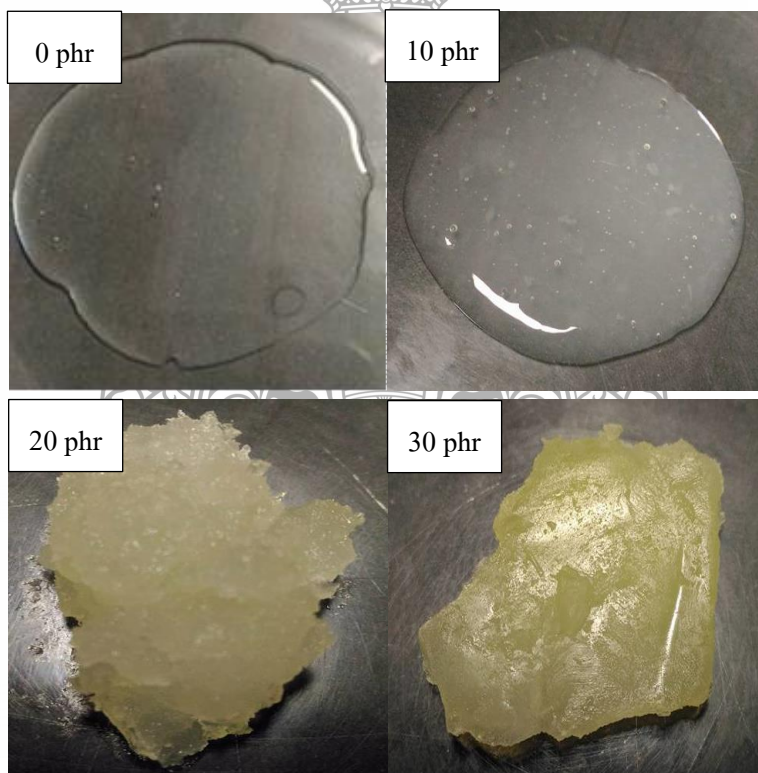
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าแทนเดลต้าของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง PS : Castor Wax

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่า TAN δ ดังรูปที่ 4.7 ซึ่ง TAN δ คืออัตราส่วนระหว่าง Loss Modulus กับ Storage Modulus พบว่าเมื่อผสมไขละหุ่งใน พอลิสไตรีนทำให้ค่า TAN δ มีค่าสูงขึ้น จากประมาณ 3.0 เป็นประมาณ 3.5 แสดงว่าพลาสติกคอมปาวด์มีความเป็นอีลาสติกสูงขึ้นเป็นเพราะพื้นที่บริเวณอَسันฐานของสายโซ่ของ พอลิสไตรีนมีไขละหุ่งเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างช่องว่างของสายโซ่ ทำให้สายโซ่อยู่ห่างกันและเมื่อให้อุณหภูมิเข้าไปไขละหุ่งทำหน้าที่หล่อลื่นสายโซ่ ทำให้สายโซ่สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายจึงทำให้มีความเป็นอีลาสติกสูงขึ้นกว่าการที่ไม่เติมไขละหุ่ง ซึ่งมีค่า TAN δ ที่ต่ำกว่า [41]

นอกจากนั้นค่า TAN δ ยังสามารถบ่งบอกถึงอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g^{DMA}) ของพลาสติกคอมปาวด์ ระหว่างพอลิสไตรีน กับ ไขละหุ่ง โดยค่า T_g ของพลาสติกคอมปาวด์ที่ปริมาณไขละหุ่ง 5 10 15 และ 20 phr จะอยู่ประมาณที่ 90°C ในขณะที่ค่า T_g ของพอลิสไตรีนจะอยู่ประมาณที่ 115°C [40-41] ดังนั้นเมื่อผสมไขละหุ่งลงไป ใน พอลิสไตรีนแล้วทำให้ค่า T_g ลดลงนั้นแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเป็นสารเพิ่มสภาพพลาสติก (plasticizer) และ การเป็นสารหล่อลื่น (lubricant) ภายในสายโซ่ ของไขละหุ่งกับพอลิสไตรีนได้ดี [43]

4.2 วิเคราะห์ผลการเตรียมน้ำมันละหุ่งตัดแปรโดยเทคนิคการป้อนสุกด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต

การเตรียมน้ำมันละหุ่งตัดแปร เริ่มจากเตรียมสารละลายระหว่างตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงโดยนำตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง Bis Acyl Phosphine oxides (BAPO) ปริมาณ 9 กรัม นำไปละลายในตัวทำละลาย Hexanediol diacrylate (HDDA) ปริมาณ 100 กรัม และนำไปกวนในที่มืดเป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายในปริมาณ 10 20 และ 30 phr ได้นำมาผสมกับน้ำมันละหุ่ง อัตราส่วนดังตารางที่ 4.5 จากนั้นนำไปเข้าสู่ฉายแสงที่มีช่วงความยาวคลื่น UV-A เป็นเวลา 15 นาที จึงได้น้ำมันละหุ่งตัดแปรในแต่ละอัตราส่วนแสดงดังรูปที่ 4.8 ซึ่งมีลักษณะเป็นเหนียวหนืดมากขึ้นเมื่อใช้ปริมาณสารละลายริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงขนาดสายโซ่โมเลกุลที่ยาวขึ้น หรือ อาจเป็นลักษณะโครงสร้างร่างแหบางส่วน ทั้งนี้ต้องการทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมในส่วนของ การละลาย และ โครงสร้างเคมีต่อไป



รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะน้ำมันละหุ่งตัดแปรในอัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ 4.5 แสดงอัตราส่วนน้ำมันละหุ่งกับสารละลายริเริ่มปฏิบัติการทางแสง

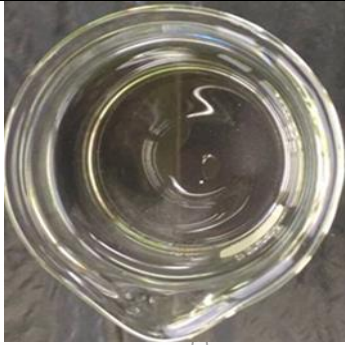

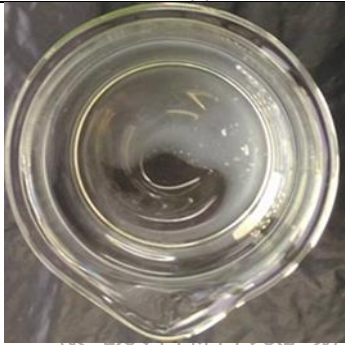





น้ำมันละหุ่ง (phr)	สารละลายริเริ่มปฏิบัติการทางแสง (phr)
100	10
100	20
100	30

4.2.1 การทดสอบความสามารถละลาย (Solubility) ของน้ำมันละหุ่งตัดแปร

จากการทดสอบการละลายน้ำมันละหุ่งตัดแปรโดยใช้วิธีการแช่น้ำมันละหุ่งตัดแปรที่ผสมสารละลายริเริ่มปฏิบัติการทางแสงที่ 20 phr โดยการชั่งน้ำหนักน้ำมันละหุ่งตัดแปร 0.05 g จากนั้นนำไปละลายในตัวทำละลาย Tetrahydrofuran , Chloroform , Dimethyl sulfoxide , Acetone , Hexane ในปริมาณ 50 ml แช่ทิ้งไว้ 5 วัน ผลปรากฏว่าน้ำมันละหุ่งตัดแปรไม่สามารถละลายตัวหรือแตกตัวยังคงอยู่ในสภาพเป็นก้อนดั้งเดิม แสดงดังตารางที่ 4.6 และ รูปที่ 4.9

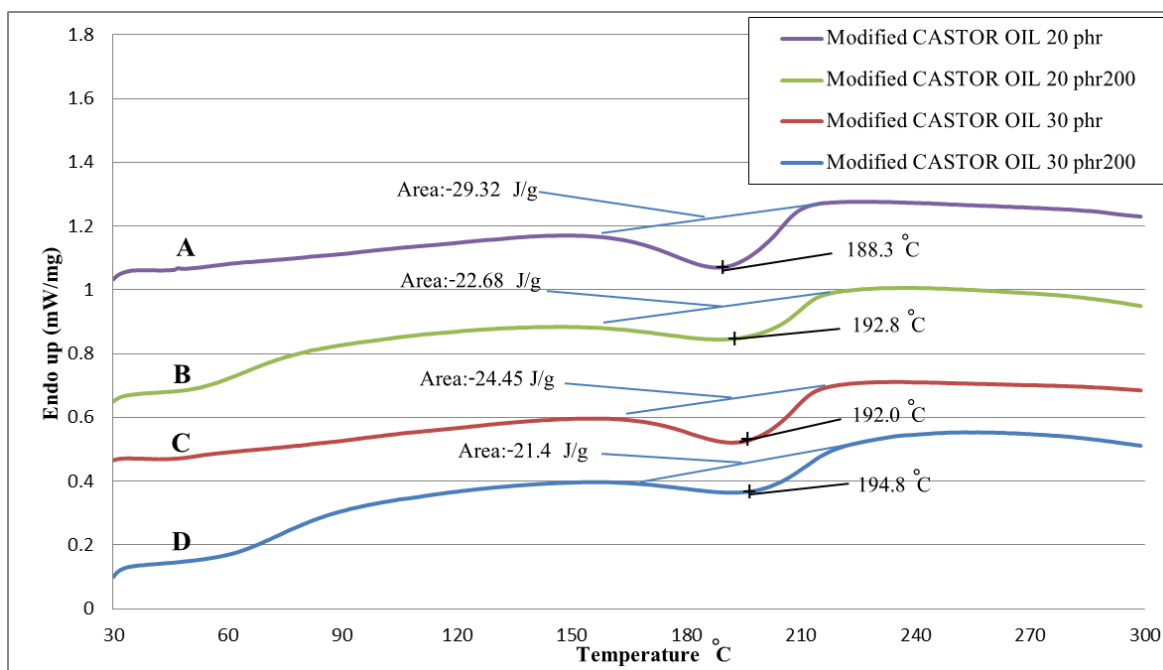
ตารางที่ 4.6 แสดงการทดสอบการละลายของน้ำมันละหุ่งตัดแปร

สารละลาย วัน	Tetrahydrofuran	Chloroform	Dimethyl sulfoxide	Acetone	Hexane
1	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย
2	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย
3	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย
4	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย
5	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย

	วันที่ 1	วันที่ 5
น้ำมันละหุ่ง		
น้ำมันละหุ่งตัดแปร 10 phr		
น้ำมันละหุ่งตัดแปร 20 phr		
น้ำมันละหุ่งตัดแปร 30 phr		

รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะน้ำมันละหุ่งตัดแปรที่แช่อยู่ในตัวทำละลาย THF

4.2.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry

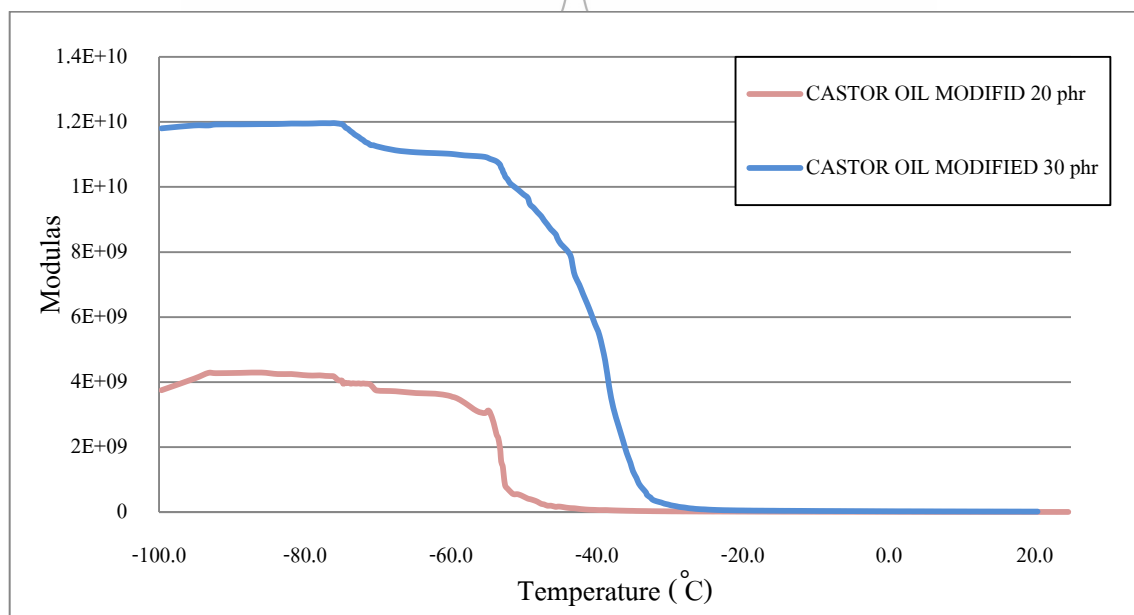


รูปที่ 4.10 เทอร์โมแกรมแสดงสมบัติทางความร้อนของน้ำมันละหุ่งดัดแปร

จากรูปที่ 4.10 เทอร์โมแกรมแสดงสมบัติทางความร้อนของน้ำมันละหุ่งดัดแปร โดยใช้ตัวอย่างน้ำมันละหุ่งดัดแปรที่ล้างน้ำมันละหุ่งส่วนเกินออกด้วยเมทานอล โดยมีรายละเอียดดังนี้ A คือ น้ำมันละหุ่งดัดแปรที่ 20 phr ล้างด้วยเมทานอล ไม่อบ, B คือ น้ำมันละหุ่งดัดแปรที่ 20 phr ล้างด้วยเมทานอล แล้วนำไปอบที่ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที, C คือ น้ำมันละหุ่งดัดแปรที่ 30 phr ล้างด้วยเมทานอล ไม่อบ, D คือ น้ำมันละหุ่งดัดแปรที่ 30 phr ล้างด้วยเมทานอล แล้วนำไปอบที่ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำไปวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของน้ำมันละหุ่งดัดแปร พบว่าเกิดพีคการคายความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 190 องศาเซลเซียส แสดงว่ามีการเกิดปฏิกิริยาของน้ำมันละหุ่งดัดแปรที่ 190 องศาเซลเซียส แสดงว่าการฉายแสงอัลตราไวโอเลตนั้นเป็นเพียงการริเริ่มปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของน้ำมันละหุ่งดัดแปรเมื่อให้อุณหภูมิที่ประมาณ 190 องศาเซลเซียส ทำให้น้ำมันละหุ่งดัดแปรเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางต่อได้ จากกราฟนั้นเป็นการเทียบกับระหว่างน้ำมันละหุ่งดัดแปรที่ผสมสารละลายตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงในอัตราส่วน 20 และ 30 phr และเทียบกับระหว่างนำไปอบที่ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที พบว่าตัวที่ผ่านการอบมีปริมาณการคายความร้อนจากปฏิกิริยาน้อยกว่าตัวที่ไม่ได้อบ ซึ่งสันนิษฐานได้ว่าการอบนั้นทำให้น้ำมันละหุ่งดัดแปรเกิดการเชื่อมขวางได้มากขึ้นนั่นเอง

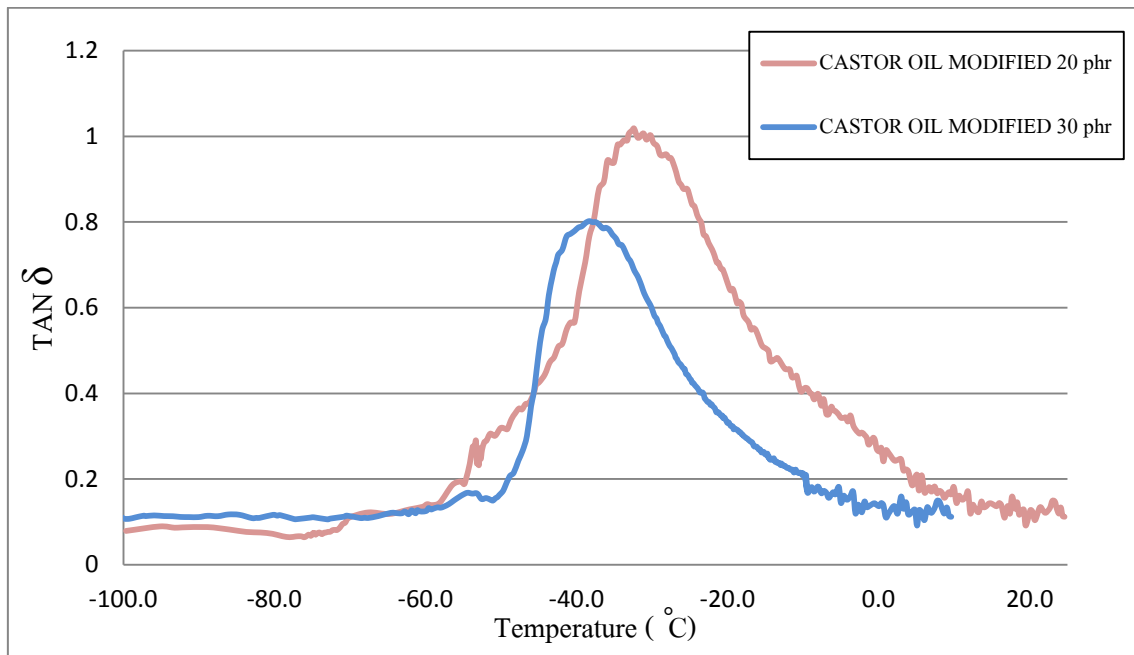
นอกจากนี้ยังพบว่า น้ำมันละหุ่งดัดแปรที่ 20 phr มีความสามารถในการผสมกับพอลิस्टาไทรินได้ดี เพราะมีการเชื่อมขวางที่น้อยจึงทำให้น้ำมันละหุ่งดัดแปรที่ 20 phr มีลักษณะเป็นของเหนียวหนืดน้อยกว่า น้ำมันละหุ่งดัดแปรที่ 30 phr ซึ่งทำให้น้ำมันละหุ่งดัดแปรที่ 20 phr มีความสามารถในการเข้ากันกับพอลิस्टาไทรินได้ดีกว่าน้ำมันละหุ่งดัดแปรที่ 30 phr

4.2.3 การวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงพลวัต ด้วยเทคนิค DMA



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่าโมดูลัสสะสมต่ออุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นของน้ำมันละหุ่งดัดแปร

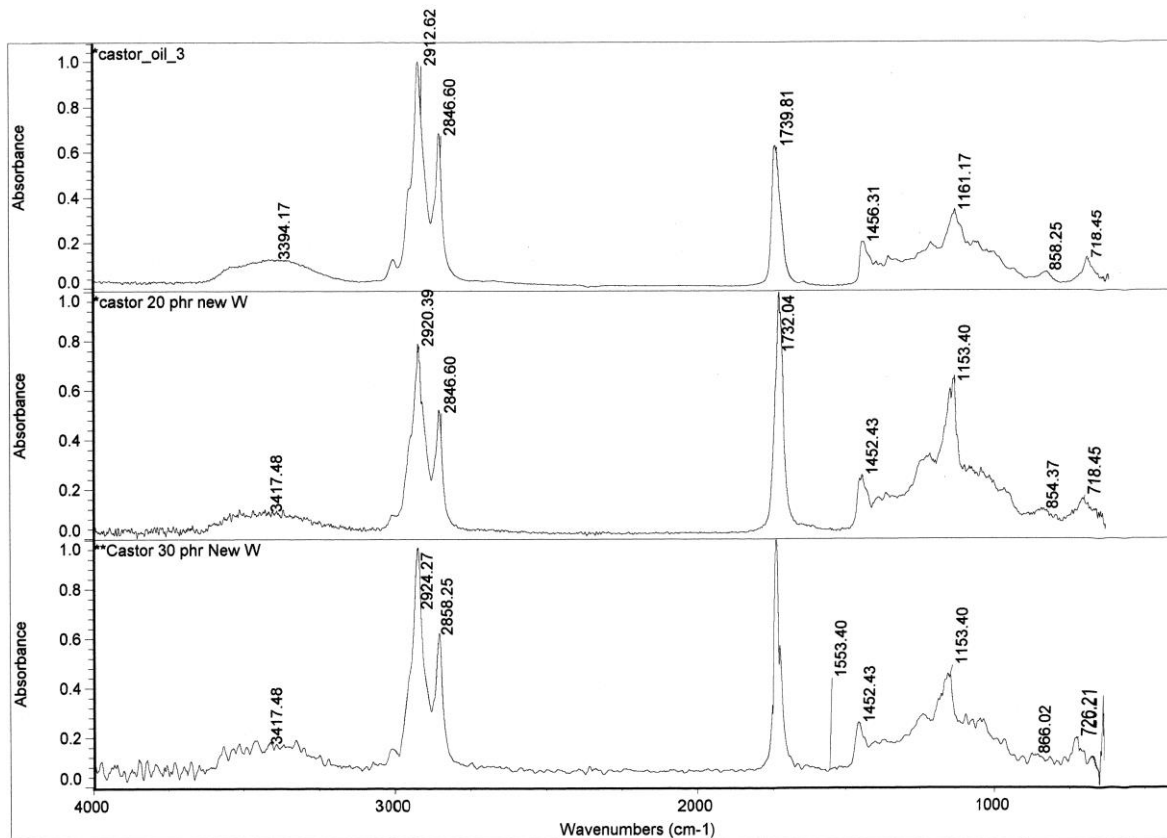
จากรูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่าโมดูลัสสะสมที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่ออุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นของน้ำมันละหุ่งดัดแปร จากกราฟค่าโมดูลัสสะสมพบว่าการเติมสารละลายตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงในอัตราส่วนที่เพิ่มสูงขึ้นจาก 20 และ 30 phr ทำให้ค่าโมดูลัสสะสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับทั้งนี้เพราะว่า เมื่อเติมสารละลายตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงในน้ำมันละหุ่งทำให้น้ำมันละหุ่งนั้นเปลี่ยนจากของเหลวไปเป็นของเหนียวหนืดอาจเป็นเพราะขนาดโมเลกุลที่ใหญ่ขึ้น ส่งผลให้มีการเสียบรูปได้ยากขึ้นหรือแข็งขึ้น เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิที่อุณหภูมิที่ได้รับเดียวกันแต่ทั้งนี้พบว่าอุณหภูมิที่อุณหภูมิประมาณ -30 ถึง -20 องศาเซลเซียส ค่าโมดูลัสสะสม มีค่าเท่าๆกันทั้งนี้อาจเป็นช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของทั้งสองสูตร [40-41]



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่าแทนเคลต้าของน้ำมันละหุ่งดัดแปร

เมื่อพิจารณาค่า $Tan \delta$ จากรูปที่ 4.12 บ่งบอกค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g)[40-41] ของน้ำมันละหุ่งดัดแปร ได้จากสูตร 20 และ 30 phr ของปริมาณสารละลายริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง มีค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) อยู่ที่ -33.7 และ -40.2 องศาเซลเซียสตามลำดับแสดงว่า การเติมสารละลายตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงในอัตราส่วนที่มากขึ้นนั้นทำให้ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วนั้นลดลง แต่ค่า $Tan \delta$ ของสูตร 20 phr แสดงถึงความมีอีลาสติกที่มากกว่าสูตร 30 phr ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพที่แสดงดังรูปที่ 4.8

4.2.4 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)



รูปที่ 4.13 กราฟการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของน้ำมันละหุ่งดัดแปรด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

จากรูปที่ 4.13 กราฟการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของน้ำมันละหุ่งดัดแปรด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ในการทดสอบ FTIR ซึ่งเป็นการวัดหมู่ฟังก์ชันองค์ประกอบของน้ำมันละหุ่งดัดแปรที่ผสมระหว่างน้ำมันละหุ่งกับสารละลายริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง จากการทดลองผลปรากฏดังรูปสังเกตได้ว่าในช่วง $3550 - 3200 \text{ cm}^{-1}$ (-OH) พีกช่วงที่ 3099 cm^{-1} (C=C) และพีก 2920 cm^{-1} (CH₂) มีค่าลดลง แต่พีกที่ 1732 cm^{-1} (C=O) และ พีกที่ 1153 cm^{-1} (C-O-C) กลับมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าเมื่อเติมสารละลายปฏิกิริยาทางแสงในอัตราส่วนที่ 20 phr ทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ตำแหน่ง (-OH) และ (C=C) ในโครงสร้างของน้ำมันละหุ่งโดยมีการเพิ่มขึ้นของ C=O แล C-O-C แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันที่เข้ามาทำปฏิกิริยา โดยตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชันอาจจะทำหน้าที่เชื่อมโยงภายในระหว่างสายโซ่โมเลกุล

ของน้ำมันละหุ่งจนเกิดเป็น โครงสร้างแบบร่างแหหรืออาจจะไปกระตุ้นทำให้น้ำมันละหุ่งเกิดการเชื่อมโยงภายในสายโซ่โมเลกุลตัวเอง

4.2.5 การวิเคราะห์ทางเคมีด้วยเทคนิค Liquid Chromatography - Mass Spectrometer (LC-MS)

ตารางที่ 4.7 แสดงการวิเคราะห์ทางเคมีด้วยเทคนิค Liquid Chromatography - Mass Spectrometer (LC-MS)

สูตร	m/z
Castor oil	955.763
Castor oil + sol BAPO/HDDA 10 phr	955.767
Castor oil + sol BAPO/HDDA 20 phr	955.766
Castor oil + sol BAPO/HDDA 30 phr	955.768

จากตารางที่ 4.7 แสดงการวิเคราะห์ทางเคมีด้วยเทคนิค Liquid Chromatography - Mass Spectrometer (LC-MS) แสดงถึงค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของน้ำมันละหุ่งดัดแปรแต่ละสูตรเทียบกับน้ำมันละหุ่งที่ไม่ได้ดัดแปรนั้น พบว่ามีค่าน้ำหนักโมเลกุลไม่ต่างกันเห็นได้จากค่า m/z ที่มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าการเติมสารละลายริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงนั้นไม่ส่งผลต่อน้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันละหุ่ง

4.2.6 การวิเคราะห์ทางเคมีด้วยเทคนิค CHN

ตารางที่ 4.8 แสดงค่า CHN ของน้ำมันละหุ่งดัดแปรในอัตราส่วนต่างๆ

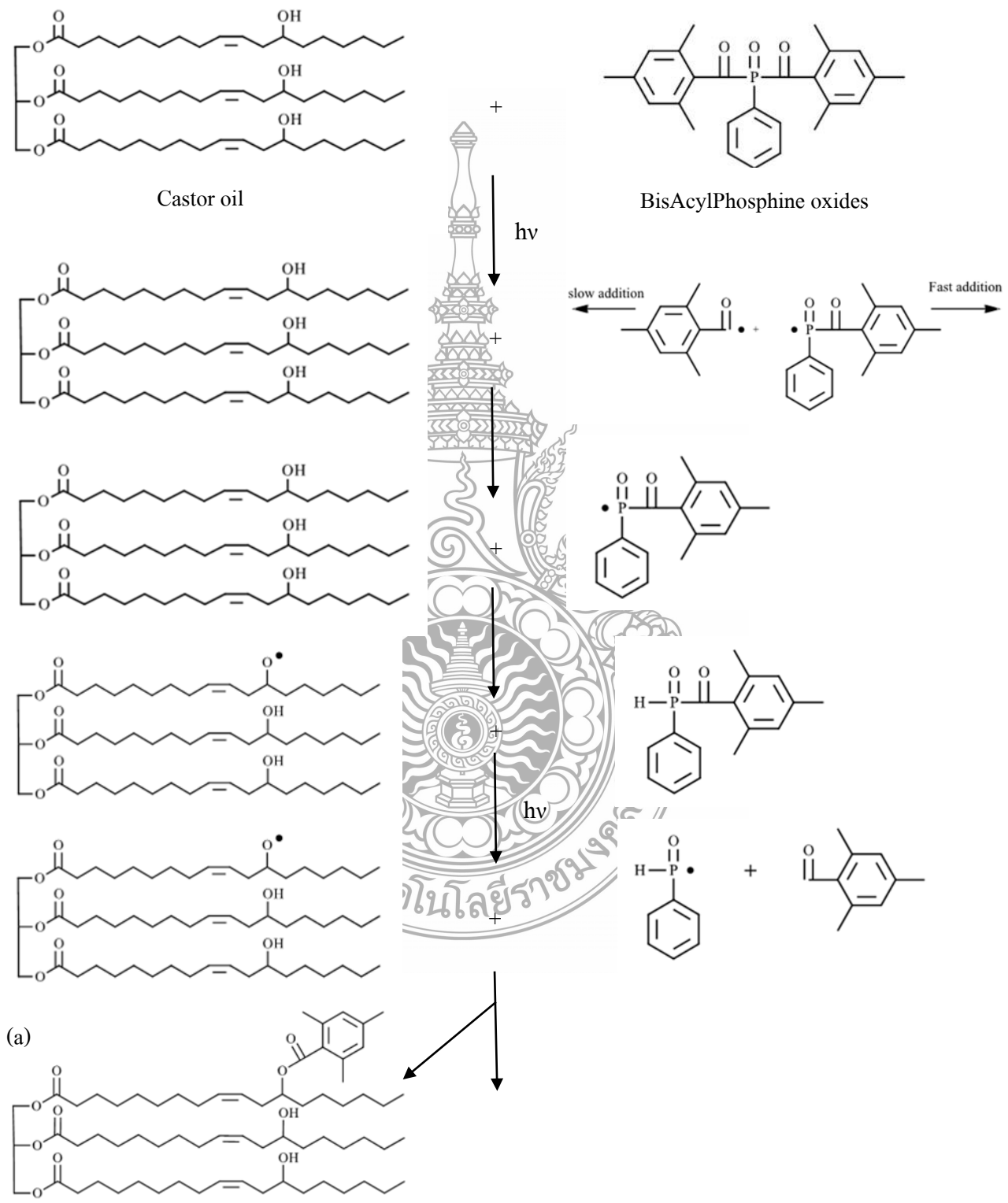
แสดงค่า CHN ของน้ำมันละหุ่งดัดแปรในอัตราส่วนต่างๆ			
สูตร	Carbon %	Hydrogen %	Oxygen%
Castor oil	72.47	4.55	23.01
Castor oil + sol BAPO/HDDA 10 phr	72.4	5.29	22.31
Castor oil + sol BAPO/HDDA 20 phr	71.63	8.43	19.94
Castor oil + sol BAPO/HDDA 30 phr	71.01	8.64	20.35

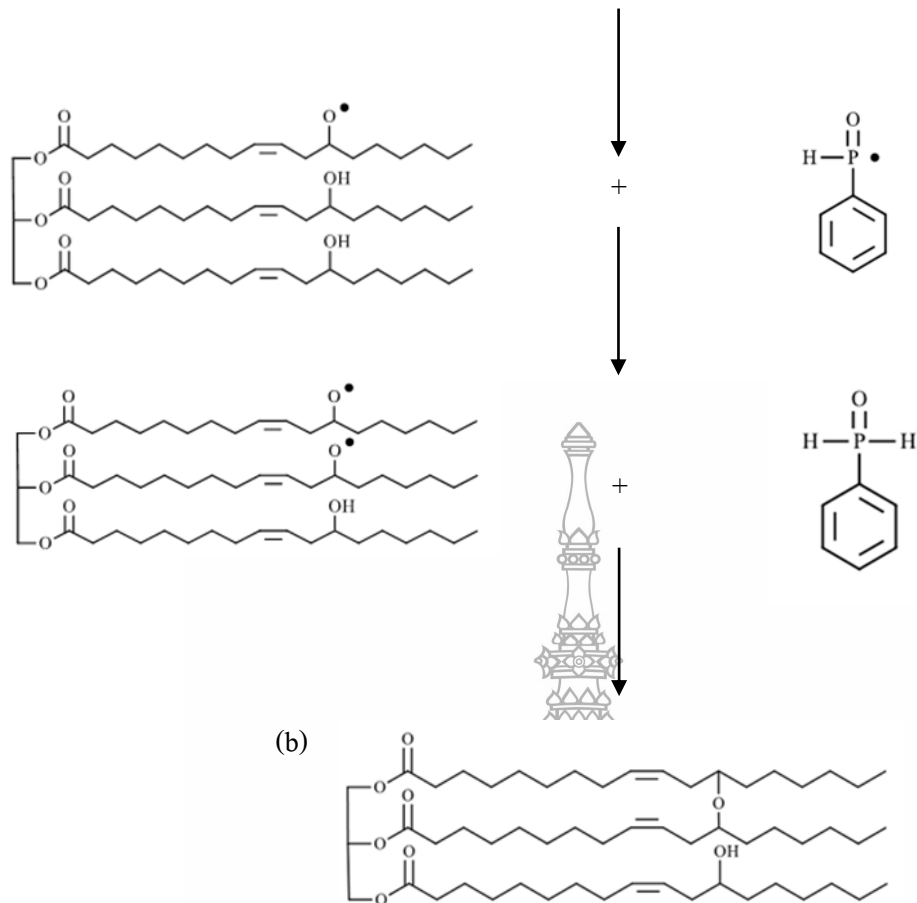
จากตารางที่ 4.8 แสดงค่า CHN ของน้ำมันละหุ่งคัดแปรในอัตราส่วนต่างๆ เป็นการวัดหาเปอร์เซ็นต์ธาตุที่มีอยู่ในโครงสร้างของน้ำมันละหุ่งคัดแปร เห็นได้ว่าค่า CHN ของน้ำมันละหุ่งคัดแปรนั้นมีเปอร์เซ็นต์ไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้นสอดคล้องกันกับการเติมสารละลายตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงในน้ำมันละหุ่ง เพราะสารละลายตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงมีจำนวนไฮโดรเจนอยู่มากจึงทำให้เมื่อเติมสารละลายตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงส่งผลให้มีเปอร์เซ็นต์ไฮโดรเจนมีเพิ่มขึ้น

TE	ID	WEIGHT	CARBON (%)	HYDROGEN (%)	NITROGEN (%)	ZR	NR	CR	HR
08 03 16	03	9.992	72.47%	4.55%	.05%	10166	10869	113605	127616
08 03 16	10	8.238	72.40%	5.29%	.05%	10182	10881	95501	108945
08 03 16	20	4.971	71.63%	8.43%	.07%	10200	10898	61421	74353
08 03 16	30	5.004	71.01%	8.64%	.04%	10203	10893	61312	74642

รูปที่ 4.14 แสดงค่า CHN ของน้ำมันละหุ่งคัดแปรในอัตราส่วนต่างๆ

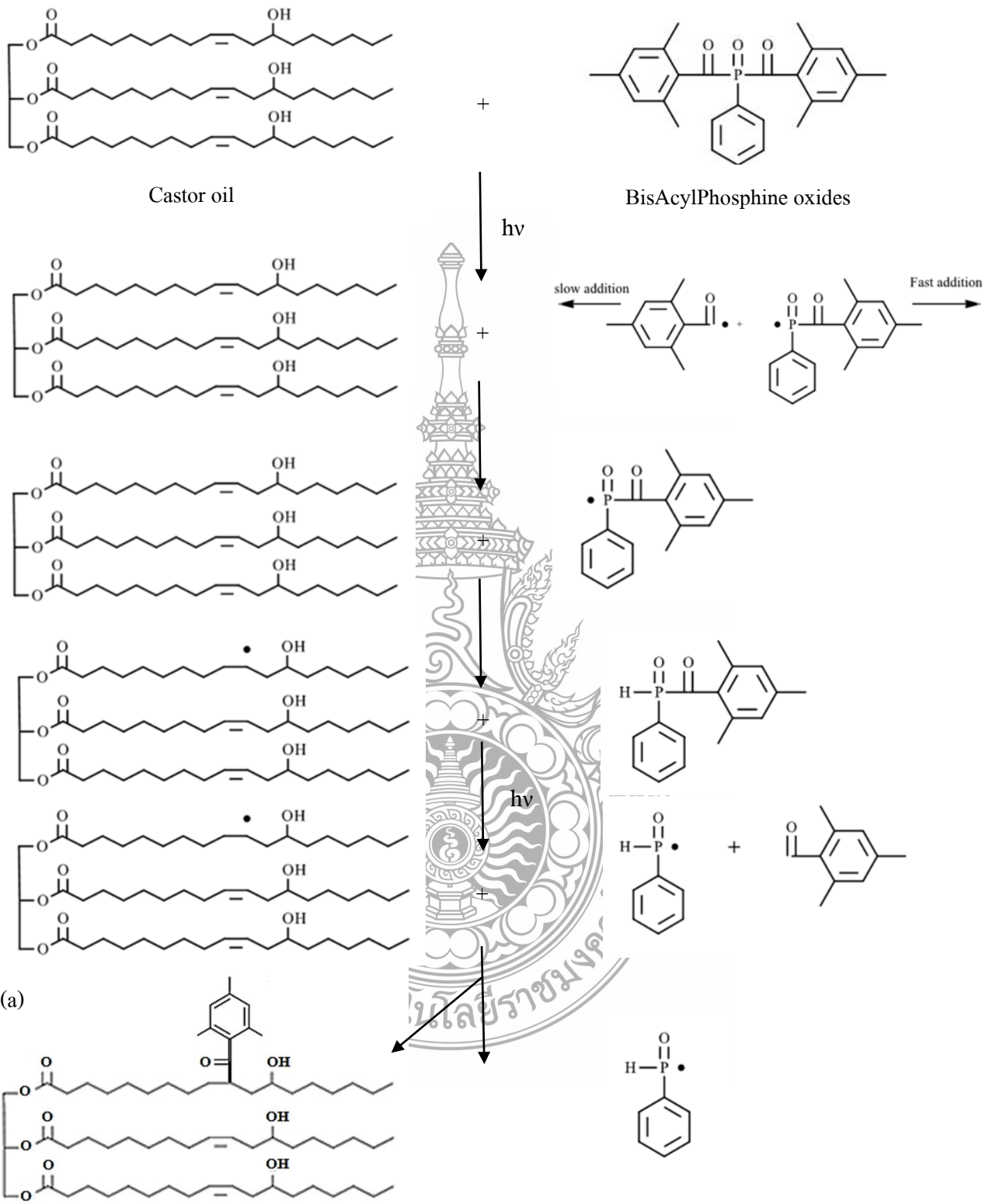
จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค FTIR LC-MS และ CHN สามารถวิเคราะห์
 ปฏิริยาการเกิดโครงสร้างของน้ำมันละหุ่งตัดแปร ดังนี้

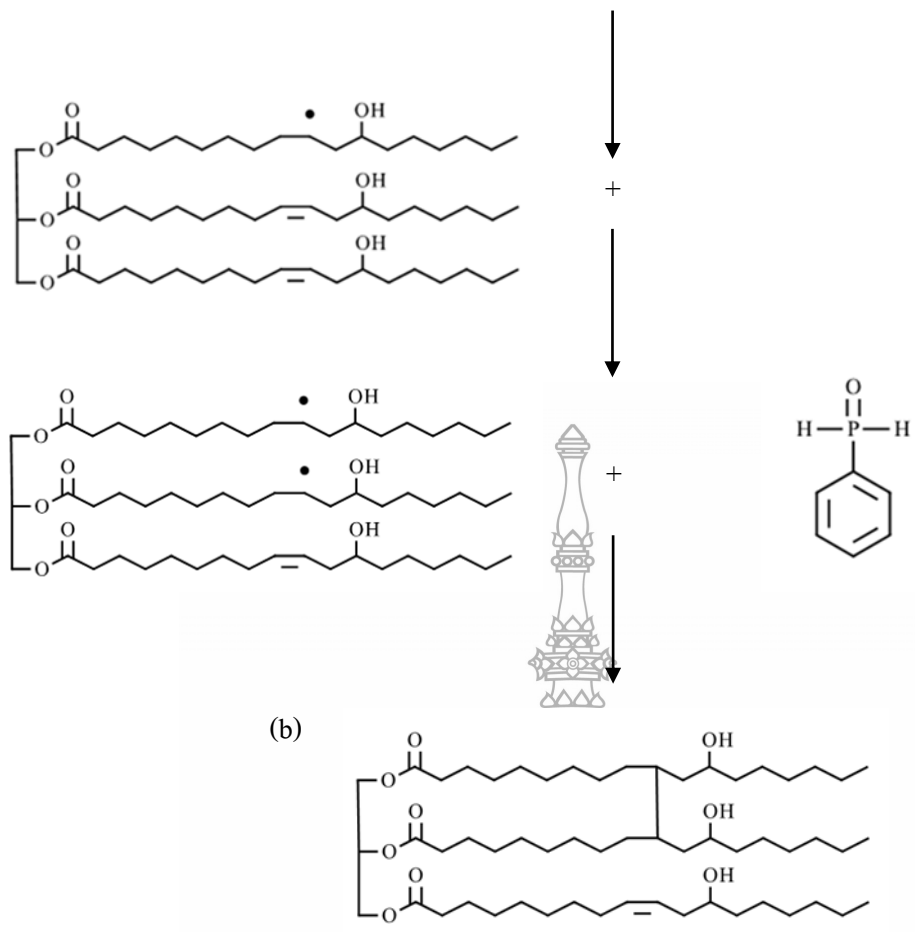




(b)

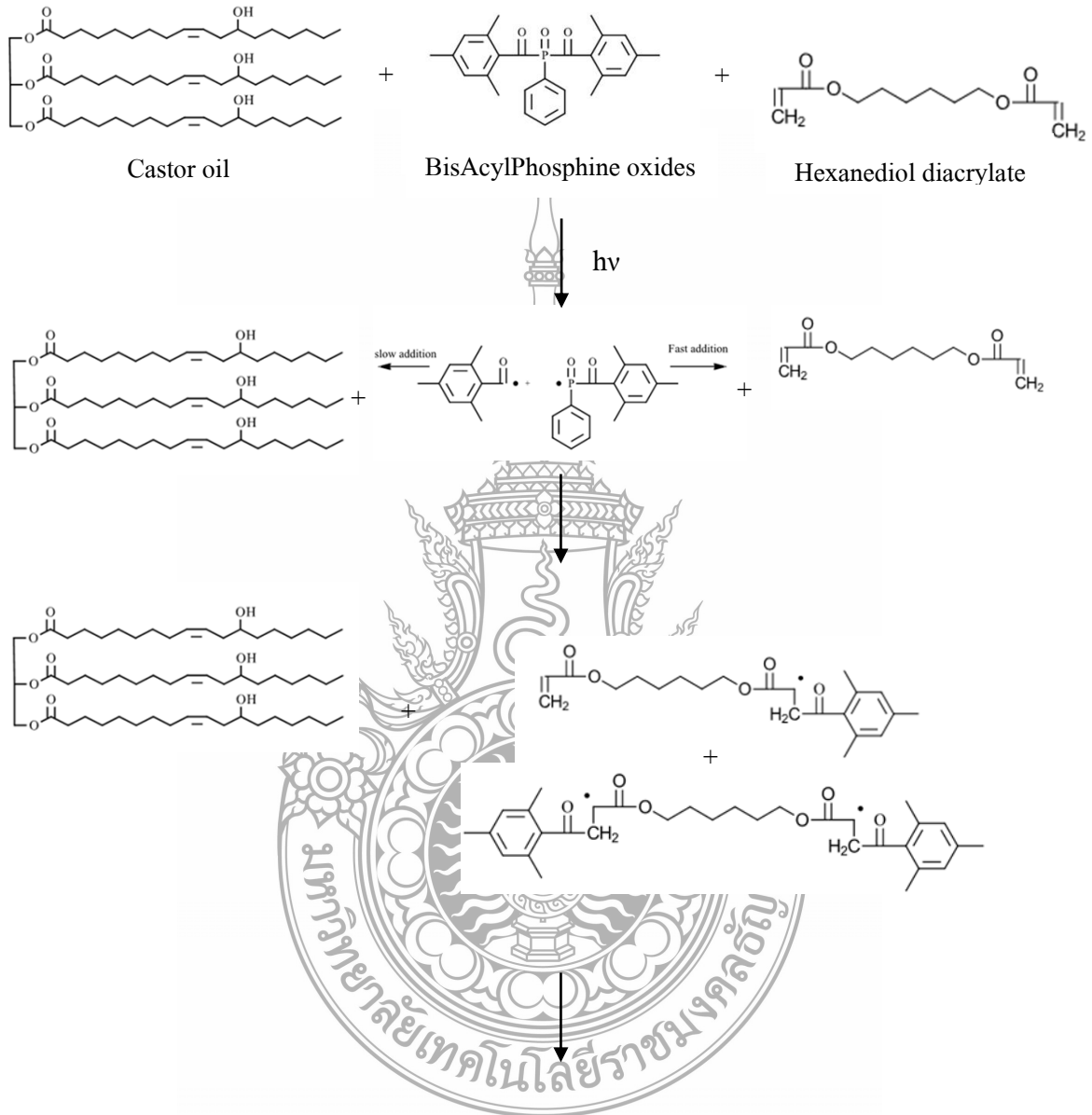
ปฏิกิริยาเคมีนี้เป็น การแสดงการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันละหุ่งกับตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง (BisAcylPhosphine Oxides) โดยตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงเมื่อโดนแสงจะทำให้เกิดการแตกตัวออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ 1. ส่วนที่ทำปฏิกิริยารวดเร็ว 2. ส่วนที่ทำปฏิกิริยาช้า ทั้ง 2 ส่วนนี้เมื่อแตกตัวออกจะมีอนุมูลอิสระส่วนที่ทำปฏิกิริยารวดเร็วจะทำหน้าที่ดึงไฮโดรเจนออกจากหมู่ -OH ทำให้ไฮโดรเจนหลุดออกเกิดเป็นอนุมูลอิสระที่โครงสร้างของน้ำมันละหุ่ง สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ 2 แบบ ดังนี้ 1. ส่วนที่เกิดปฏิกิริยาช้าของตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงที่มีอนุมูลอิสระอยู่ได้วิ่งมาจับจุดที่เป็นอนุมูลอิสระของน้ำมันละหุ่งทำให้เกิดเป็นโครงสร้างแบบ (a) 2. ตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงแตกตัวขั้นที่ 2 ทำให้เกิดอนุมูลอิสระทำให้ไปดึงไฮโดรเจนใน -OH อีกครั้งทำให้เกิดอนุมูลอิสระภายในโครงสร้างของน้ำมันละหุ่ง 2 ตำแหน่งทำให้เกิดการเชื่อมพันธะกันภายในโครงทางเคมีของน้ำมันละหุ่งดังปฏิกิริยาเคมีที่แสดงมาข้างต้น

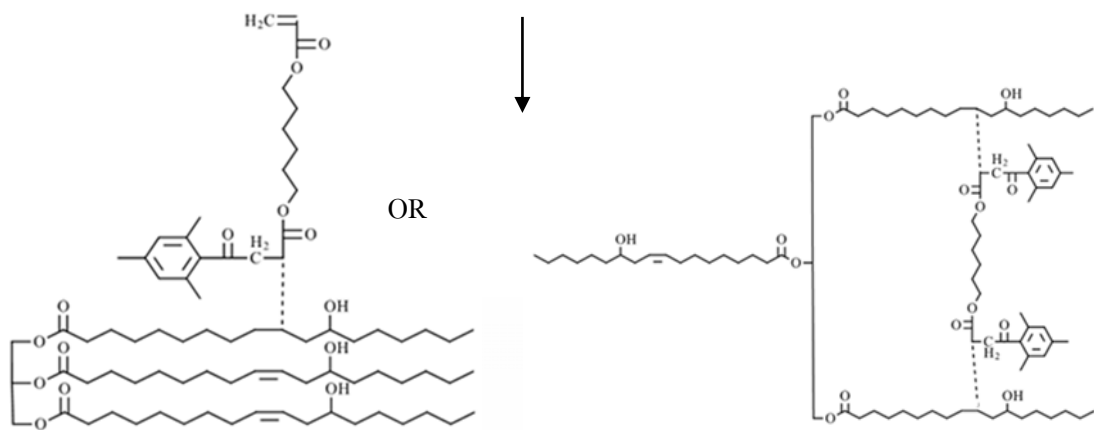




ปฏิกิริยานี้จะมีความแตกต่างจากปฏิกิริยาที่แล้วคือ ส่วนที่ทำให้ปฏิกิริยารวดเร็วจะทำหน้าที่ดึงไฮโดรเจนออกจากพันธะคู่ของน้ำมันละหุ่ง ทำให้ไฮโดรเจนหลุดออกเกิดเป็นอนุมูลอิสระที่โครงสร้างของน้ำมันละหุ่ง สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ 2 แบบ ดังนี้ 1. ส่วนที่เกิดปฏิกิริยาช้าของตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงที่มีอนุมูลอิสระอยู่ได้วิ่งมาจับจุดที่เป็นอนุมูลอิสระของน้ำมันละหุ่งทำให้เกิดเป็นโครงสร้างแบบ (a) 2. ตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงแตกตัวขั้นที่ 2 ทำให้เกิดอนุมูลอิสระทำให้ไปดึงไฮโดรเจนจากพันธะคู่ของน้ำมันละหุ่ง อีกครั้งทำให้เกิดอนุมูลอิสระภายในโครงสร้างของน้ำมันละหุ่ง 2 ตำแหน่งทำให้เกิดการเชื่อมพันธะกันภายในโครงทางเคมีของน้ำมันละหุ่งดังปฏิกิริยาเคมีที่แสดงมาข้างต้น

แสดงปฏิกิริยาการแสดงการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันละหุ่งกับสารละลายตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงระหว่าง BisAcylPhosphine oxides กับ Hexanediol diacrylate





ปฏิกิริยาเคมีนี้เป็นการแสดงการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันละหุ่งกับสารละลายตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงระหว่าง BisAcylPhosphine oxides กับ Hexanediol diacrylate เป็นการเกิดปฏิกิริยากันระหว่างสารละลายตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงก่อนแล้วจึงไปทำปฏิกิริยากับน้ำมันละหุ่ง เริ่มจากสารละลายตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงโดนแสงทำให้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง (BisAcylPhosphine oxides) เกิดการแตกตัวออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1. ส่วนที่ทำปฏิกิริยารวดเร็ว 2. ส่วนที่ทำปฏิกิริยาช้า ทั้ง 2 ส่วนนี้เมื่อแตกตัวออกจะมีอนุมูลอิสระส่วนที่ทำปฏิกิริยารวดเร็วจะทำหน้าที่ดึงไฮโดรเจนออกจากพันธะคู่ของตัวทำละลาย (Hexanediol diacrylate) ทำให้เกิดอนุมูลอิสระในโครงสร้างของตัวทำละลายจากนั้นส่วนที่ทำปฏิกิริยาช้าของตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงจะเข้ามาจับตรงอนุมูลอิสระของตัวทำละลาย แต่ตัวทำละลายก็ยังเหลืออนุมูลอิสระอยู่ในโครงสร้างทำให้สามารถไปทำปฏิกิริยากับน้ำมันละหุ่งได้ ดังแสดงในปฏิกิริยาเคมี

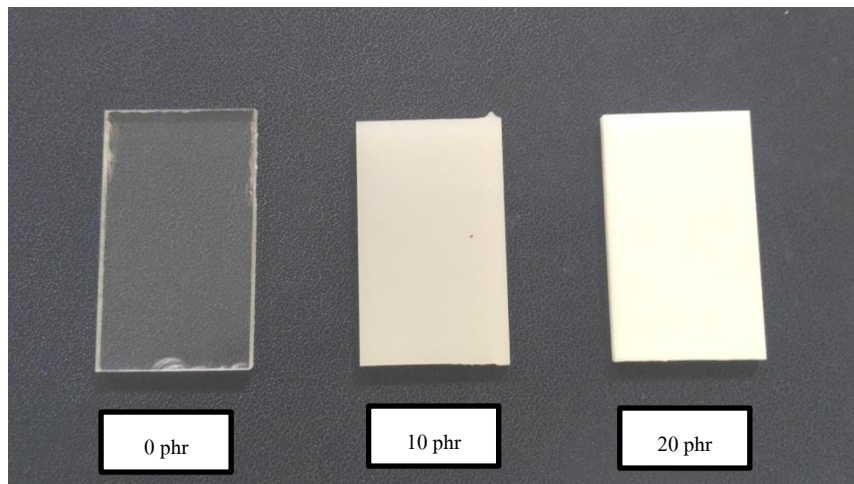
4.3 การปรับปรุงสมบัติของพอลิสไตรีนโดยใช้น้ำมันละหุ่งตัดแปรเป็นสารเติมแต่ง

4.3.1 การเตรียมพลาสติกคอมปาวด์ระหว่างพอลิสไตรีนและน้ำมันละหุ่งตัดแปร

การเตรียมพลาสติกคอมปาวด์ระหว่างพอลิสไตรีนและน้ำมันละหุ่งตัดแปรที่อัตราส่วนผสมต่างกัน ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง โดยการชั่งน้ำหนักของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่างพอลิสไตรีน และ น้ำมันละหุ่งตัดแปรที่อัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 4.9 และได้ทำการเลือกใช้น้ำมันละหุ่งตัดแปรที่ผสมสารละลายตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงที่ 20 phr ในการคอมปาวด์กับ พอลิสไตรีนเพราะเป็นอัตราส่วนที่น้ำมันละหุ่งตัดแปรไม่เหลวเกินไปและไปแข็งตัวมากเกินไปแสดงดังรูปที่ 4.8 จึงสามารถผสมกับพอลิสไตรีนได้ง่ายนั่นเอง จากนั้นทำการหลอมผสมพลาสติกคอมปาวด์ที่อัตราส่วนต่างๆ ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง(Two Rolls Mill) ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส จากนั้นนำพลาสติกคอมปาวด์ไปขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป(Compression Molding) ที่ 200 องศาเซลเซียส ใช้แรงดันอัดขึ้นรูปที่ 150 kg/cm^2 คงที่ทุกอัตราส่วน ลักษณะแผ่นที่ได้แสดงดังรูป 4.15

ตารางที่ 4.9 แสดงอัตราส่วนผสมพลาสติกคอมปาวด์ของ พอลิสไตรีนและ น้ำมันละหุ่งตัดแปร

PS (phr)	น้ำมันละหุ่งตัดแปร (phr)
100	0
100	10
100	20



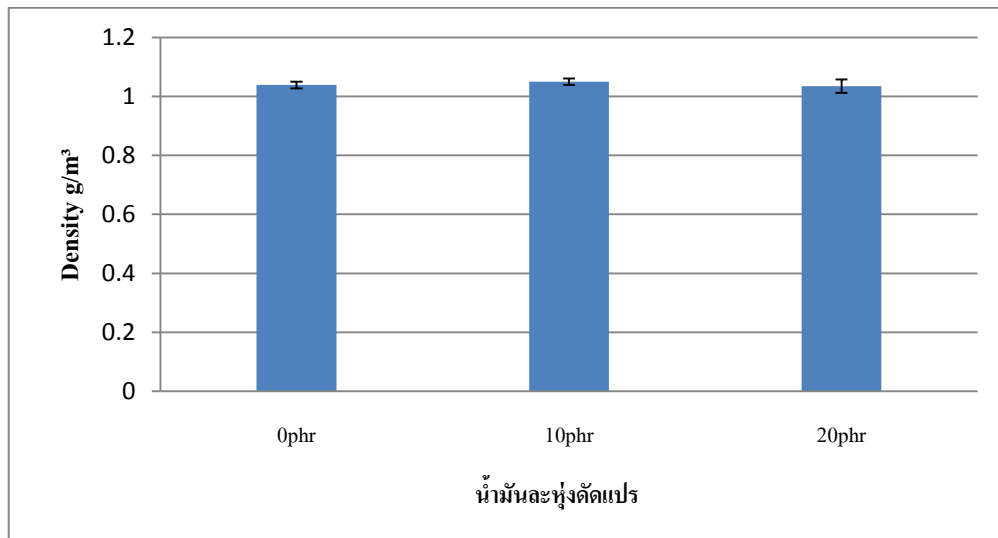
รูปที่ 4.15 แสดงลักษณะพลาสติกคอมปาวด์ระหว่างพอลิสไตรีนกับน้ำมันละหุ่งคัดแปรในอัตราส่วนต่างๆ

4.3.2 ผลการทดสอบค่าความหนาแน่น ด้วยเทคนิคชั่งน้ำ-ชั่งอากาศ, Specific Gravity, (ASTM D792)

ตารางที่ 4.10 แสดงความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมปาวด์พอลิสไตรีนกับน้ำมันละหุ่งคัดแปรในอัตราส่วนผสมต่างๆ

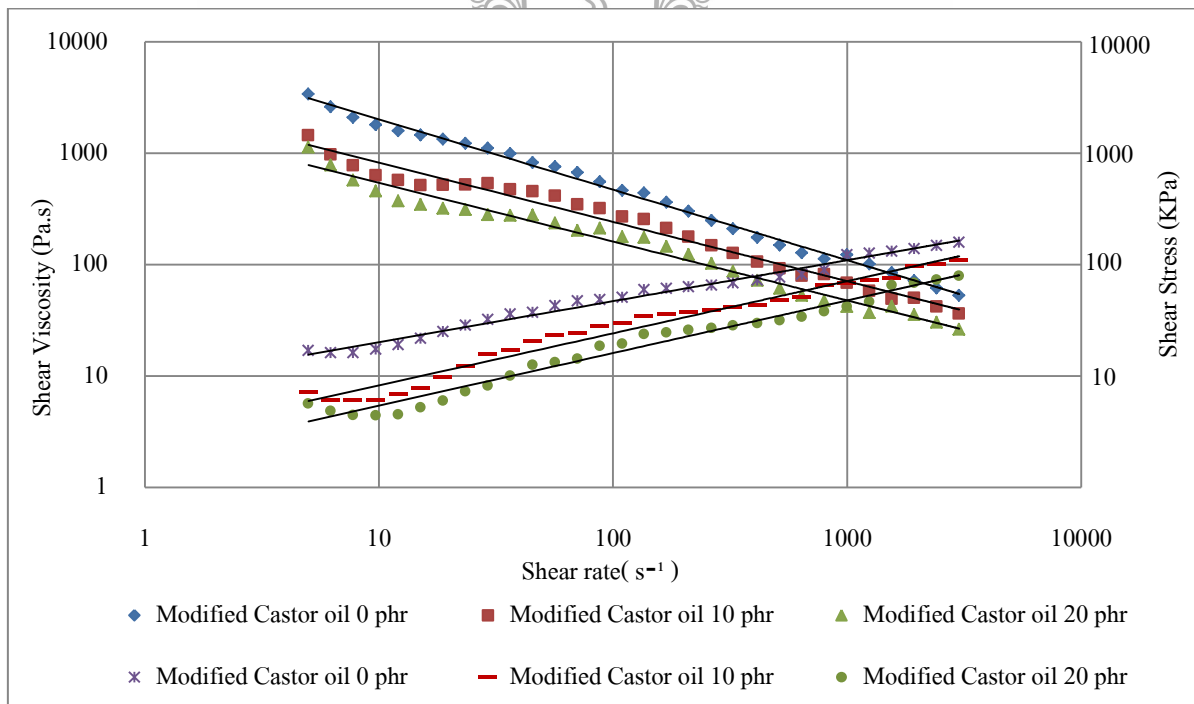
ปริมาณน้ำมันละหุ่ง (phr)	ค่าความหนาแน่น (g/cm^3)
0	1.04±0.01
10	1.05±0.01
20	1.04±0.02

จากข้อมูลในตารางที่ 4.10 พบว่าเมื่อผสมน้ำมันละหุ่งคัดแปรในอัตราส่วนต่างๆกันเช่น 10 และ 20 phr เมื่อเทียบกับสูตร 0 phr มีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกัน แสดงว่าการที่ผสมน้ำมันละหุ่งคัดแปรลงไปในพอลิสไตรีนไม่ส่งผลทำให้ค่าความหนาแน่นของพอลิสไตรีนเปลี่ยนไป



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมพาวด์พอลิไสไตรีนกับน้ำมันละหุ่งดัดแปรในอัตราส่วนผสมต่างๆ

4.3.3. การศึกษาพฤติกรรมการไหลของพลาสติกคอมพาวด์ (rheology)



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงพฤติกรรมการไหลของพลาสติกคอมพาวด์ระหว่างพอลิไสไตรีนกับน้ำมันละหุ่งดัดแปรในอัตราส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 4.17 กราฟแสดงพฤติกรรมการไหลของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่างพอลิสไตรีนกับน้ำมันละหุ่งตัดแปร พบว่าเมื่อให้ Shear rate ที่เพิ่มขึ้นค่า Shear Viscosity มีค่าลดลง แต่ค่า Shear Stress กับมีค่าสูงขึ้น แสดงว่าเมื่อพลาสติกคอมปาวด์ได้รับแรงเฉือน (Shear rate) ทำให้ค่าความหนืด (Shear Viscosity) ของพลาสติกคอมปาวด์มีค่าลดลงและมีความเครียดสูงขึ้น เห็นได้ว่าเมื่อผสมน้ำมันละหุ่งตัดแปรลงในพอลิสไตรีนในอัตราส่วน 10 และ 20 phr เมื่อนำมาเทียบกับ 0 phr พบว่าพลาสติกคอมปาวด์ที่ผสมน้ำมันละหุ่งตัดแปรนั้น มีค่าความหนืดต่ำกว่า 0 phr อย่างเห็นได้ชัด ค่าความหนืดลดลงตามอัตราส่วนการเติมน้ำมันละหุ่งที่เพิ่มมากขึ้น เป็นเพราะเมื่อเติมน้ำมันละหุ่งตัดแปรลงไปพอลิสไตรีน น้ำมันละหุ่งตัดแปรได้เข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่ของพอลิสไตรีนจึงทำให้สายโซ่ของพอลิสไตรีนอยู่ห่างกัน ทำให้สายโซ่ของพอลิสไตรีนสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นความหนืดจึงลดลง เป็นผลมาจากน้ำมันละหุ่งตัดแปรที่เติมเข้าไปทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มสภาพพลาสติก (Plasticizer) และสารหล่อลื่น [47]

4.3.4 การวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC)

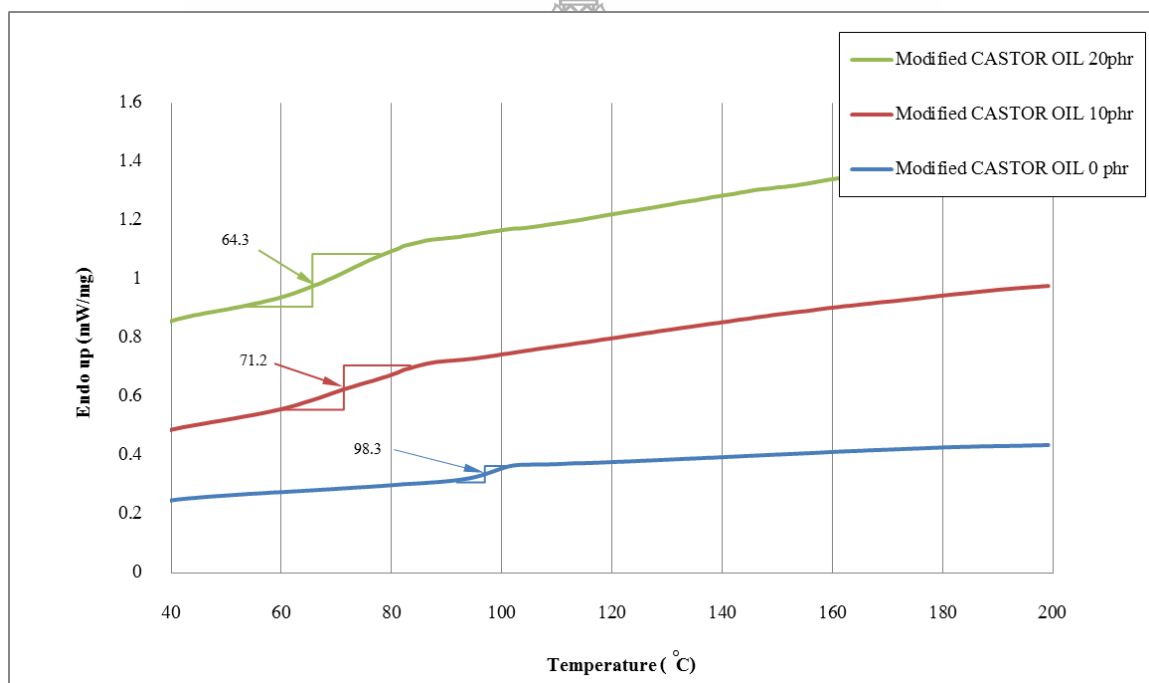
ตารางที่ 4.11 สมบัติทางความร้อนของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง พอลิสไตรีน : น้ำมันละหุ่งตัดแปร ที่อัตราส่วนต่างๆด้วยเทคนิค DSC

น้ำมันละหุ่งตัดแปร (phr)	PS + modified Castor oil T_g (°C)	PS + Castor WAX T_g (°C)
0	98.3	98.3
10	71.2	75.5
20	64.3	74.7

จากตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.18 แสดงสมบัติทางความร้อนของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่างพอลิสไตรีน กับน้ำมันละหุ่งตัดแปร จะเห็นได้ว่าค่าการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว มีค่าอยู่ที่ช่วง 98.3 ถึง 64.3 องศาเซลเซียส ซึ่งค่าการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วนั้นมีค่าลดลงเมื่อเติมน้ำมันละหุ่งตัดแปร ลงไปผสมในพอลิสไตรีนในปริมาณเพิ่มขึ้น จากกราฟในรูปที่ 4.18 ค่า T_g ของพอลิสไตรีนอยู่ที่ 98.3 องศาเซลเซียส และเมื่อผสมน้ำมันละหุ่งตัดแปร ลงในพอลิสไตรีนในปริมาณ 10 และ 20 phr พบว่าค่า T_g มีค่าลดลงเป็น

ลำดับจาก 71.2 ถึง 64.3 องศาเซลเซียส ดังนั้นเห็นได้ว่าการเติมน้ำมันละหุ่งดัดแปร ลงในพอลิสไตรีนมีผลให้การเปลี่ยนสถานะเกิดขึ้นได้ง่ายขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการกระจายตัวของน้ำมันละหุ่งดัดแปร ที่มีอยู่ทั่วไปในพอลิสไตรีน และเมื่อได้รับอุณหภูมิเพิ่มขึ้นสายโซ่จะเกิดการหมุนรอบตัวเองง่ายขึ้น [6] ส่งผลให้ค่า T_g ลดลง

เมื่อเทียบกันระหว่างน้ำมันละหุ่งดัดแปรกับไขละหุ่งที่ผสมในพอลิสไตรีน พบว่าน้ำมันละหุ่งดัดแปรสามารถเข้ากับพอลิสไตรีนได้ดีกว่าไขละหุ่งสังเกตได้จากกราฟในอัตราส่วนที่ 10 และ 20 phr น้ำมันละหุ่งดัดแปรไม่พบการแยกของฟิสิกในการวัดสมบัติทางความร้อนซึ่งต่างจากไขละหุ่ง ในอัตราส่วนที่ 10 15 และ 20 phr พบการแยกฟิสิกของ ไขละหุ่งอย่างชัดเจน

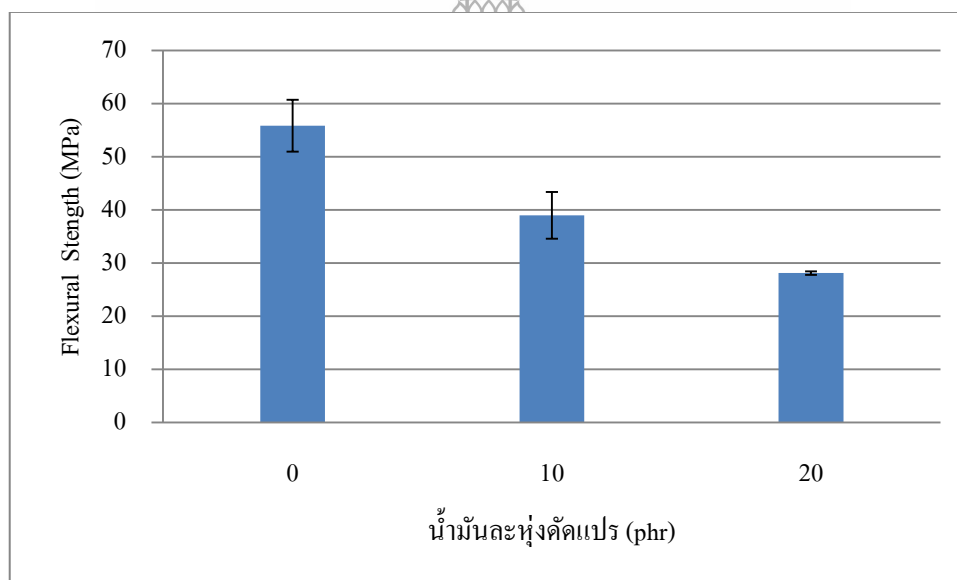


รูปที่ 4.18 แสดงสมบัติทางความร้อนของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่างพอลิสไตรีนกับน้ำมันละหุ่งดัดแปร

4.3.5 ผลการทดสอบการต้านทานการโก่งงอ Flexural Strength ASTM D 790

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบการต้านทานการโก่งงอของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่างพอลิสไตรีน (PS) และ น้ำมันละหุ่งดัดแปร ที่ปริมาณต่างๆ กัน ดังนี้

น้ำมันละหุ่งดัดแปร (phr)	ค่าต้านทานการโก่งงอ PS + modified Castor oil (MPa)	ค่าต้านทานการโก่งงอ PS + Castor WAX (MPa)
0	55.8 ± 5	55.8 ± 5
10	39.1 ± 4	43.9 ± 2
20	28.1 ± 1	26.8 ± 5



รูปที่ 4.19 ค่าการทดสอบการต้านทานการโก่งงอ (Flexural Strength) ของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง PS : น้ำมันละหุ่งดัดแปร

จากรูปที่ 4.19 แสดงการต้านทานการโก่งงอพบว่า ค่าการต้านทานการโก่งงอมีค่าลดลงตามลำดับ เมื่อเติมน้ำมันละหุ่งดัดแปรในปริมาณมากขึ้น ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 55 – 28 MPa ทั้งนี้ เป็นเพราะการเข้าไปแทรกตัวของโมเลกุลน้ำมันละหุ่งดัดแปรระหว่างเฟสอสัณฐานในพอลิสไตรีน จึงทำให้ลดแรงดึงดูระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิสไตรีนจึงส่งผลให้การต้านทานการโก่งงอลดลงตามลำดับ

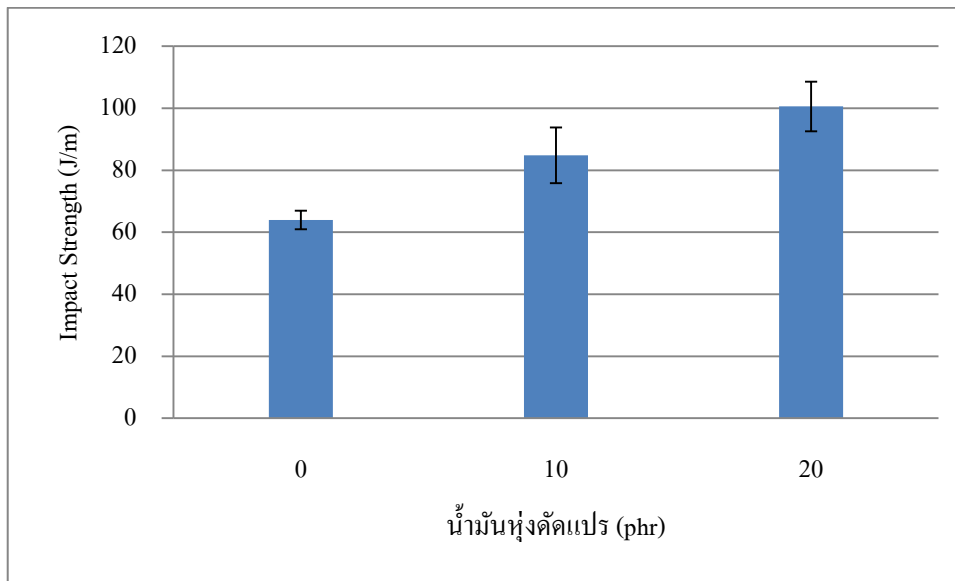
คังงานวิจัยของ R. Asaletha และคณะ พบว่าเมื่อเติมยางธรรมชาติลงไปนพอลิสไตรีนส่งผลให้เฟสยางเข้าไปอยู่ระหว่างเฟสพอลิสไตรีนจึงทำให้เฟสของพอลิสไตรีนอยู่ห่างกันจึงส่งผลให้มีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นความแข็งแรงลดลง[42] ซึ่งให้ผลกระทบในแนวโน้มนเดียวกันกับค่า T_g ของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง พอลิสไตรีน กับ น้ำมันละหุ่งคัดแปร

เมื่อเทียบกันระหว่างน้ำมันละหุ่งคัดแปรกับไขละหุ่งที่ผสมในพอลิสไตรีน พบว่าพอลิสไตรีนที่ผสมน้ำมันละหุ่งคัดแปรและไขละหุ่งมีแนวโน้มนของค่าการต้านทานการโก่งงอลดลง แต่พอลิสไตรีนที่ผสมน้ำมันละหุ่งคัดแปรสามารถเสีรูปร่างได้มากกว่าพอลิสไตรีนที่ผสมไขละหุ่งซึ่งดูได้จากภาพถ่าย SEM เห็นได้ว่ารอยแตกของพอลิสไตรีนที่ผสมน้ำมันละหุ่งคัดแปรมีการยืดก่อนขาด ซึ่งต่างจากพอลิสไตรีนที่ผสมไขละหุ่งมีรอยแตกแบบราบเรียบไม่มีการยืดตัวก่อนขาดแสดงถึงการแตกหักแบบเปราะ

4.3.6 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก Impact Strength ASTM D 256

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทกของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่างพอลิสไตรีน (PS) และ น้ำมันละหุ่งคัดแปร ที่ปริมาณต่างๆ กัน ดังนี้

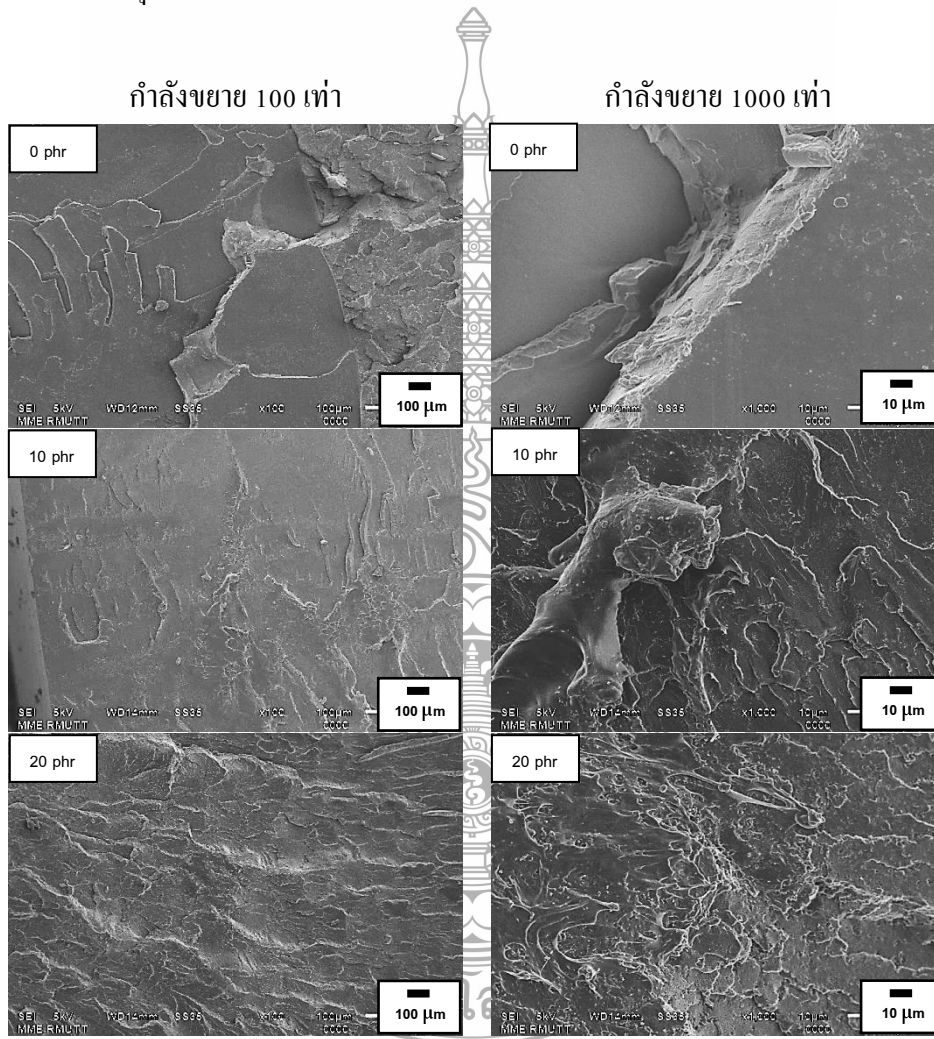
น้ำมันละหุ่งคัดแปร (phr)	ค่าต้านแรงกระแทก PS + modified Castor oil (J/m)	ค่าต้านแรงกระแทก PS + Castor wax (J/m)
0	64.0 ± 3	64.0 ± 3
10	84.8 ± 9	64.6 ± 7
20	100.6 ± 8	53.8 ± 5



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงค่าการต้านทานแรงกระแทกพลาสติกคอมปาวด์ระหว่างพอลิสไตรีน (PS) และ น้ำมันหุงตัดแปร ที่ปริมาณต่างๆ

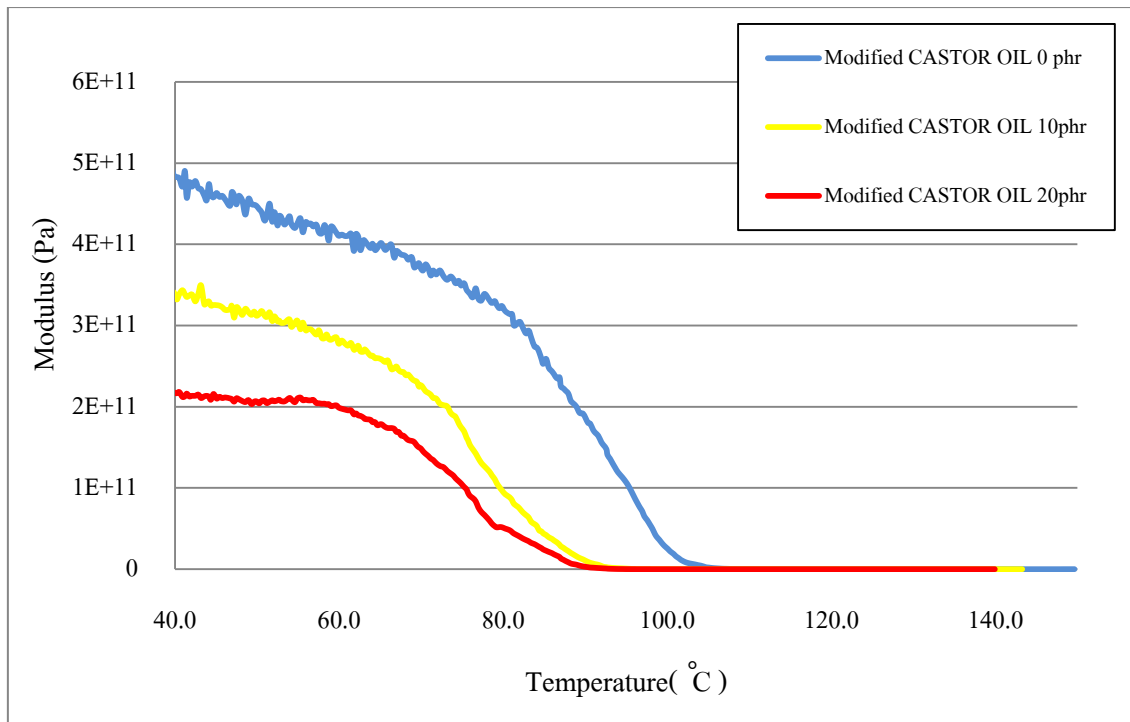
จากรูปที่ 4.20 กราฟแสดงค่าการต้านทานแรงกระแทกพบว่าค่าการต้านทานแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อผสมน้ำมันหุงตัดแปรลงในพอลิสไตรีน ปริมาณอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นที่ 10 และ 20 phr มีค่าประมาณ 85 และ 100 J/m ตามลำดับ ซึ่งค่าการต้านทานแรงกระแทกที่มีค่าสูงสุด อยู่ที่ประมาณ 100 J/m เมื่อเทียบกับพอลิสไตรีน มีค่าการต้านทานแรงกระแทกประมาณ 64 J/m ซึ่งค่าการต้านทานแรงกระแทกสูงขึ้นประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าน้ำมันหุงตัดแปรเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่ ทำหน้าที่ดูดซับแรงกระแทกคล้ายยางจึงทำให้มีค่าการต้านทานแรงกระแทกดีขึ้น [45] ซึ่งจากการดูลักษณะสีฐานวิทยาของพลาสติกคอมปาวด์ผสมระหว่าง พอลิสไตรีนกับ น้ำมันหุงตัดแปรแสดงดังรูปที่ 4.21 พบว่ารอยแตกที่ 0 phr มีรอยแตกแบบราบเรียบเป็นมุมคมซึ่งเป็นรอยแตกที่บ่งบอกถึงลักษณะความเปราะแตกหักได้ง่าย ซึ่งต่างจาก พอลิสไตรีนที่ผสมน้ำมันหุงในอัตราส่วน 10 และ 20 phr ซึ่งมีรอยแตกแบบขรุขระและยังมีลักษณะการยึดเกาะแตกหัก เกิดขึ้นชัดเจนทั่วบริเวณพื้นผิว แสดงให้เห็นว่าพลาสติกคอมปาวด์มีความเหนียวเพิ่มขึ้น และยังสามารถเห็นได้ว่าพลาสติกคอมปาวด์มีการเข้ากันได้ดีไม่พบการแยกเฟสของพอลิสไตรีน กับ น้ำมันหุงตัดแปร ซึ่งส่งผลให้สมบัติทางกลดีขึ้นสอดคล้องกับผลการต้านทานแรงกระแทกที่เพิ่มสูงขึ้น [46]

เมื่อเทียบกันระหว่างน้ำมันละหุ่งคัดแปรกับไขละหุ่งที่ผสมในพอลิस्टาไทริน พบว่าพอลิस्टาไทรินที่ผสมน้ำมันละหุ่งคัดแปรมีค่าการต้านทานแรงกระแทกเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเดิมในอัตราส่วนที่มากขึ้น ในทางกลับกันพอลิस्टาไทรินที่ผสมไขละหุ่งในอัตราส่วนที่มากขึ้นส่งผลให้ค่าการต้านทานแรงกระแทกนั้นลดลงตามลำดับ แสดงว่าน้ำมันละหุ่งคัดแปรมีความสามารถในการปรับปรุงแรงกระแทกได้ดีกว่าไขละหุ่งเมื่อวิเคราะห์จากภาพถ่าย SEM พบได้ว่าพอลิस्टาไทรินที่ผสมน้ำมันละหุ่งคัดแปรมีการยึดก่อนขาดซึ่งต่างจากพอลิस्टาไทรินที่ผสมไขละหุ่งมีรอยแตกแบบราบเรียบ ไม่มีการยึดตัวก่อนขาดแสดงถึงการแตกหักแบบเปราะ



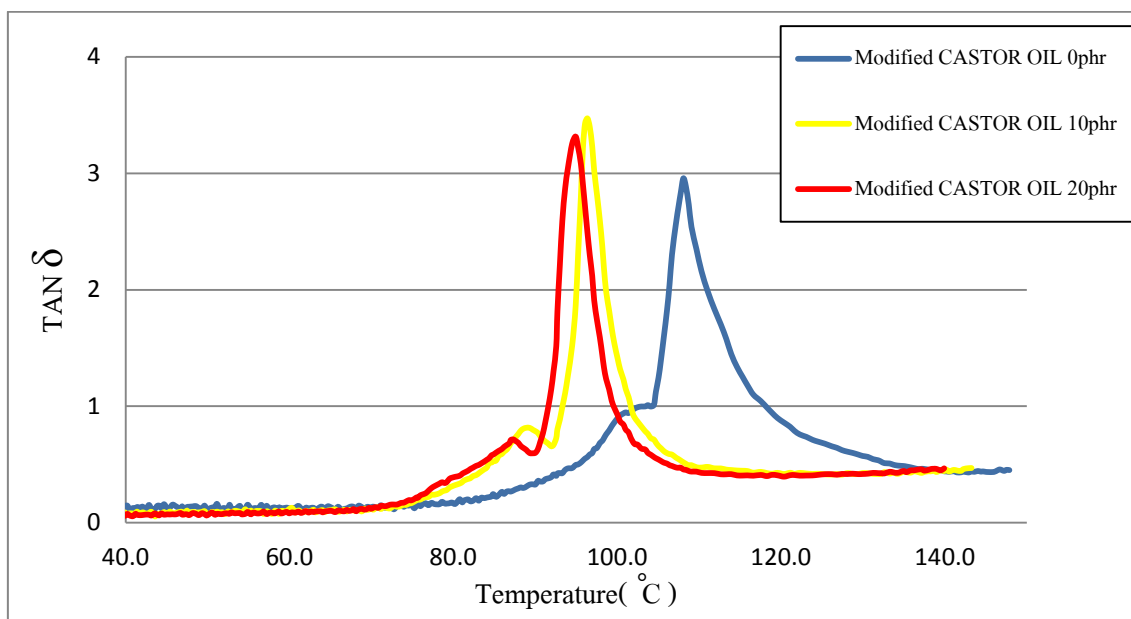
รูปที่ 4.21 ลักษณะสัณฐานวิทยาของพลาสติกคอมปาวด์ผสมระหว่างพอลิस्टาไทริน:น้ำมันละหุ่งคัดแปร ที่กำลังขยาย 100 และ 1000 เท่า

4.3.7 ผลการทดสอบวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงพลวัต ด้วยเทคนิค DMA



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงค่าโมดูลัสสะสมต่ออุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่างพอลิสไตรีนกับน้ำมันละหุ่งคัดแปร

จากรูปที่ 4.22 แสดงค่าโมดูลัสสะสม (Storage Modulus) ต่ออุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่างพอลิสไตรีนกับน้ำมันละหุ่งคัดแปร พบว่าเมื่อผสมน้ำมันละหุ่งคัดแปรลงไปในพอลิสไตรีน ในอัตราส่วน 10 และ 20 ส่วนต่อร้อยโดยน้ำหนัก ค่าโมดูลัสสะสมมีค่าลดลงตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าน้ำมันละหุ่งคัดแปรทำให้พลาสติกคอมปาวด์ สามารถเสียรูปได้ง่ายขึ้นเมื่อได้รับความร้อนเพิ่มขึ้น เพราะค่าโมดูลัสของพลาสติกคอมปาวด์ มีค่าลดลงตามเนื่องจากน้ำมันละหุ่งคัดแปรสามารถเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่ทำให้สายโซ่อยู่ห่างกันทำให้เคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น ทำให้เสียรูปได้ง่ายขึ้นค่าโมดูลัสจึงลดลง [40-41]



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงค่าแทนเดลต้าของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่างพอลิสไตรีนกับน้ำมันละหุ่งคัดแปร

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่า TAN δ ดังรูปที่ 4.23 ซึ่ง TAN δ คืออัตราส่วนระหว่าง Loss Modulus กับ Storage Modulus พบว่าค่า TAN δ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผสมน้ำมันละหุ่งคัดแปรใน พอลิสไตรีน แสดงว่ามีความเป็นอีลาสติกมากกว่าเป็นเพราะว่าโครงสร้างทางสายโซ่ของพอลิสไตรีน มีน้ำมันละหุ่งคัดแปรเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างช่องว่างของสายโซ่ทำให้สายโซ่มีระยะห่างกัน ดังนั้นเมื่อเพิ่มอนุหภูมิเข้าไปทำให้สายโซ่สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นจึงทำให้มีความเป็นอีลาสติกสูงขึ้นกว่าที่ไม่เติมไขละหุ่งคัดแปร ซึ่งมีค่า TAN δ ที่ต่ำกว่า [41]

นอกจากนั้นค่า TAN δ ยังสามารถบ่งบอกถึงอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g^{DMA}) ของพลาสติกคอมปาวด์ ระหว่างพอลิสไตรีน กับ น้ำมันละหุ่งคัดแปร โดยค่า T_g ของพลาสติกที่ปริมาณน้ำมันละหุ่ง 10 และ 20 อยู่ประมาณที่ 94 - 96 °C ตามลำดับ ในขณะที่ค่า T_g ของพอลิสไตรีน 0 phr อยู่ประมาณที่ 115 °C [40-41] ดังนั้นเมื่อผสมน้ำมันละหุ่งคัดแปรลงไป ใน พอลิสไตรีนแล้ว ทำให้ค่า T_g ลดลงนั้นแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเป็นสารเพิ่มสภาพพลาสติก (plasticizer) [43]

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การศึกษาการเตรียมและสมบัติของสารเติมแต่งชนิดปรับปรุงแรงกระแทกจากการตัดแปรรู้น้ำมันละหุ่ง โดยใช้เทคนิคการบ่มสุกด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตสรุปได้ดังนี้

- เมื่อเติมสารละลายตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงลงไปผสมในน้ำมันละหุ่ง ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ได้น้ำมันละหุ่งตัดแปรมีลักษณะเป็นของเหนียวหนืดคล้ายกับยางมากขึ้น

- น้ำมันละหุ่งตัดแปรที่ได้จากการเติมสารละลายตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงในปริมาณ 10 20 และ 30 phr ไม่สามารถละลายในตัวทำละลายใดๆ

- ปริมาณสารละลายตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงที่เพิ่มขึ้นทำให้ได้น้ำมันละหุ่งตัดแปรที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น สืบเนื่องจากการเปลี่ยนน้ำมันละหุ่งจากสถานะของเหลวกลายเป็นของเหนียวหนืด คล้ายยางมากขึ้นและมีค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g^{DMA}) อยู่ในช่วง -40 ถึง -30 องศาเซลเซียส

- ค่าโมดูลัสสะสม (storage modulus) เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนที่เติมสารละลายตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงเพิ่มมากขึ้นซึ่งแสดงถึงความเป็นอีลาสติกที่ลดลงของน้ำมันละหุ่งตัดแปรเมื่อเติมสารละลายตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของน้ำมันละหุ่งตัดแปรซึ่งการเติมสารละลายตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงเพิ่มขึ้นส่งผลให้น้ำมันละหุ่งตัดแปรเป็นของเหนียวคล้ายยางมากขึ้น

- อัตราส่วนที่เหมาะสมในการนำไปคอมปาวด์กับพอลิสไตรีนก็คืออัตราส่วนที่ 20 phr เพราะสามารถนำไปใช้คอมปาวด์ได้ง่ายและสามารถนำไปใช้ได้จริงในอุตสาหกรรมพลาสติกได้

5.1.2 การศึกษาการเตรียมและสมบัติของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง พอลิสไตรีน (Polystyrene) และน้ำมันละหุ่งที่ผ่านการตัดแปรสรุปได้ดังนี้

- การเตรียมพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง พอลิสไตรีน (Polystyrene) และน้ำมันละหุ่งที่ผ่านการตัดแปร สามารถใช้เทคนิคการผสมแบบสองลูกกลิ้ง

- จากการศึกษาสมบัติของ พอลิสไตรีน (Polystyrene) ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยน้ำมัน
ละหุ่งคัดแปร สรุปผลที่ได้มีดังนี้

- ค่าความหนาแน่นไม่มีการเปลี่ยนแปลง
- ค่าการต้านทานแรงกระแทกมีค่าสูงขึ้น
- ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) , ค่าการต้านทานการโก่งงอ (Flexural Strength) , ค่าความหนืดจากพฤติกรรมการไหลของพลาสติกคอมปาวด์ (rheology) , สมบัติทางกลเชิงไดนามิก ค่าโมดูลัสสะสม (storage modulus) และ $T_{g,DMA}$ มีค่าลดลง
- ในการทำพอลิเมอร์คอมปาวด์เมื่ออัตราส่วนที่ดีที่สุดที่ใช้ในการทดลองคือ 20 phr

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างหรือน้ำหนักโมเลกุลเป็นไปได้ยากเพราะน้ำมันละหุ่งคัดแปรไม่สามารถละลายในตัวทำละลายใดๆจึงไม่สามารถวิเคราะห์ได้อย่างแน่ชัด

5.2.2 การผสมโดยใช้เครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง ควรระวังไม่ให้พอลิเมอร์คอมปาวด์ร่วงหล่นจากลูกกลิ้งผสม ทำให้ได้ส่วนผสมที่ไม่ได้อัตราส่วนที่เรากำหนดและควบคุมเวลาในการคอมปาวด์ให้คงที่

5.2.3 การทำชิ้นงานทดสอบควรทิ้งไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมง เพราะพอลิสไตรีนเป็นวัสดุที่มีความเปราะมากเพื่อให้วัสดุทดสอบได้คลายความเครียดออกไป

5.2.4 ในการทดสอบวิเคราะห์น้ำมันละหุ่งคัดแปรนั้นควรทำให้น้ำมันละหุ่งคัดแปรบริสุทธิ์โดยการล้างด้วยน้ำมันละหุ่งส่วนเกินออกด้วย methanol

บรรณานุกรม

- [1] Caspar, A., et al., J. Chem. Educ., 1986.63.
- [2] Slough, G.A., J. Chem. Educ. , 1995. 72: p. 1031.
- [3] Scheirs, J.a.P., D. B. , Modern styrenic polymers: polystyrenes and styrenic copolymers. 2003, Chichester,UK: John Wiley & Sons.
- [4] Dorgan, J.R., H. Lehermeier, and M. Mang, Thermal and Rheological Properties of Commercial-Grade Poly(Lactic Acid). Journal of Polymers and the Environment, 2000. 8(1): p. 1-9.
- [5] “น้ำมันละหุ่ง” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
[http://www.doa.go.th/palm/linkTechnical/oil%20palm% 20processing.html](http://www.doa.go.th/palm/linkTechnical/oil%20palm%20processing.html)
- [6] Markus Klinger, Lars Poulsen Tolbod, Peter R. Ogilby . 2009. “Influence of a Novel Castor-Oil-Derived Additive on the Mechanical Properties and Oxygen Diffusivity of Polystyrene” Journal of Applied Polymer Science, Vol. 118, 1643–1650
- [7] อ.อำนาจ ลากเกษมสุข เอกสารประกอบการสอนวิชา Thermoplastic Resins
- [8] Kittima . 2555. การสังเคราะห์พอลิสไตรีน. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
research.rdi.ku.ac.th/world/cache/8a/KittimaANUA11.pdf
- [9] โครงสร้างและการสังเคราะห์พอลิสไตรีน [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
www.chemtube3d.com
- [10] “polystyrene Properties&uses” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
http://www.sbioinformatics.com/design_thesis/Polystyrene/polystyrene_Properties&uses.pdf
- [13] “พลาสติกในชีวิตประจำวัน” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
<http://kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book/book.php?book=28&chap=8&page=t28-8-infodetail06.html>
- [14] “polystyrene-PS” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
<http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1452/polystyrene-PS>

บรรณานุกรม(ต่อ)

[15] “น้ำมันละหุ่ง” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :

<http://www.doa.go.th/palm/linkTechnical/oil%20palm%20processing.html>

[16] “น้ำมันละหุ่ง” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/th/thumb/1/1b/Castor_oil

[17] “ต้นละหุ่ง” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก

http://i00.i.aliimg.com/photo/v0/149350964/Castor_oil_plant_Ricinus_communis_Seeds.jpg

[18] H. Meier Mutlu, Michael A. R., “Castor oil as a renewable resource for the chemical industry.”

Eur. J. Lipid Sci. Technol, 2010. 112 : pp. 10-30.

[19] เอกสารประกอบการสอนวิชา พืชน้ำมัน, ภาควิชาพืชศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์บางพระ (สุรินทร์) สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตสุรินทร์.

[20] F. Seniha Gu ner , Yusuf Yag , A. Tuncer Erciyas , Polymers from triglyceride oils . Prog. Polym. Sci. 31 (2006) 633–670

[21] Technical Data Sheet. “Ciba® IRGACURE® 819”, Ciba Specialty Chemicals.

[22] “IRGACURE 819” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://gbchems.en.ecplaza.net/15.jpg>

[23] Technical Data Sheet. “Laromer® HDDA”, BASF Corporation.

[24] รองศาสตราจารย์ บรรเลง ศรีนิล . 2552 . เทคโนโลยีพลาสติก.พิมพ์ครั้งที่ 22 .กรุงเทพฯ:สำนักพิมพ์ ส.ส.ท.

[25] ดร.จันทมัย สุวรรณประทีป . 2547.การทดสอบสมบัติทางกลของพลาสติก.กรุงเทพฯ:บริษัทพิมพ์ดี การพิมพ์ จำกัด .

[26] “การทดสอบสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์”[ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก

<http://www.seem.kmutt.ac.th/research/pentec/download/MTT656%20-Chapter%206%20Polymer%20testing1.pdf>

[27] Scanning Electron Microscope [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :

<http://www.amri.uno.edu/WZhou%20folder/WZhou/ElectronBeamNanolithography.htm>

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [28] “สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้มหาวิทยาลัยมหิดล scanning electron microscope (SEM)”. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://lib3.dss.sem.go.th/fulltext/>
- [29] วิษณุ เจริญถนอม และ คณะ .2559.การเตรียมแผ่นดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้วัสดุรีไซเคิล HDPEและวัสดุไมโครจากแร่ไทย.การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2559 หน้า 1300-1305.
- [30] ศ.ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ, เอกสารประกอบการสอนวิชา MMT 552 : Polymer Characterization and Analysis (Rheological Tests) ,คณะพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [31] คู่มือการใช้เครื่องมือ FTIR [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :<http://cste.sut.ac.th/articles/?p=294>
- [32] Jeffrey Csernica and Alisha Brown . 1999. “Effect of plasticizer on the properties of Polystyrene films” *Journal of Chemical Education* • Vol. 76 No. 11
- [33] Aji P. Mathew, Sabu Thomas . 2000. “Izod impact behavior of natural rubber/polystyrene interpenetrating polymer networks” *Materials Letters* 50 154–163
- [34] Yunjiao Deng, Guanghui Gao, Zhenguo Liu, Chunlei Cao, and Huixuan Zhang . 2013. “Co-toughened Polystyrene by Submicrometer-Sized Core/Shell Rubber Particles and Micrometer Sized Salami Rubber Particles” *Industrial & Engineering Chemistry Research*.52, 5079-5084
- [35] Marijke Van der Steen , Inna Bretz , Stephan Kabasci , Christian V. Stevens. 2012. “Synthesis of biobased multivalent cross-linkers from a castor oil-derived C22-acyloinb” *Industrial Crops and Products* 46 238–245
- [36] manual dma 8000 [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก:
http://www.perkinelmer.com/CMSResources/Images/44153336PRD_DMA8000_Time_Temperature_Superposition.pdf
- [37] คู่มือการใช้เครื่องมือ FTIR [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://cste.sut.ac.th/articles/?p=294>

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [38] ปิ่นสุภา ปีติรักษ์สกุลง. 2545. “การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์.” กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยรามคำแหง
- [39] *Plastics Materials*” edited by J.A.Brydson, Butterworths, Great Britain, 1989
- [40] ชลธิชา วโรกร1* และ อนงค์นาฏ สมหวังธนโรจน์ 2 “วิธีเพิ่มระยะเวลาทำงานของกาวอีพอกซี.” กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [41] ปิยะภรณ์ นิลทุ้ย1ศิริชัย ก้านกิ่ง1ณรงค์ฤทธิ สมบัติสมภพ2 และ เอกชัย วิมลมาลา3. 2555 “การศึกษาเชิงกลพลวัตและพฤติกรรมการคืนกลับตัวของยางอีลาสติคของยางเอ็นบีอาร์ที่มีผงเขม่าดำ เป็นสารเสริมแรงร่วมกับสารตัวเติมกลุ่มซิลิกาสำหรับการใช้งานในระบบไฮดรอลิก” กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [42] R. Asaletha , M.G. Kumaran , Sabu Thomas “Thermoplastic elastomers from blends of polystyrene and natural rubber: morphology and mechanical properties” *European Polymer Journal* 35 (1999) 253±271
- [43] M.C.S. Perera , U.S. Ishiaku , Z.A.M. Ishak “Thermal degradation of PVC/NBR and PVC/ENR50 binary blends and PVC/ENR50/NBR ternary blends studied by DMA and solid state NMR” *Polymer Degradation and Stability* 68 (2000) 393-402
- [44] K. Sungsanit and others, “Physical and rheological properties of plasticized linear and branched PLA,” 2010.
- [45] Azman Hassan a,* , Barry Haworth Impact properties of acrylate rubber-modified PVC:Influence of temperature
- [46] Epoxidized Vegetable Oils Plasticized Poly(lactic acid) Biocomposites: Mechanical, Thermal and Morphology Properties
- [47] Yee Bond Tee, “Toughening poly(lactic acid) and aiding the melt-compounding with bio- sourced plasticizers,” *science procedia* 2 289-295, 2014.

บรรณานุกรม(ต่อ)

[48] สมบัติของพอลิสไตรีน [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก:

<http://www.science.navy.mi.th/download/Styrene.pdf>

[49] โฟมอีพีเอส (EPS) [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: www.โฟมแผ่น.com

[50] โฟมพีเอสพี (PSP) [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก:

<http://healthfood.muslimthaipost.com/main/index.php?page=sub&category=66&id=25611>

[51] Styrofoam [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://www.save-on-crafts.com/styrofoam.html>

[52] Aniruddha Chatterjee , Satyendra Mishra “Nano-Calcium carbonate (CaCO₃)/Polystyrene (PS) core-shell nanoparticle: It’s effect on physical and mechanical properties of high impact polystyrene (HIPS)” J Polym Res (2013) 20:249

[53] รองศาสตราจารย์ อรุษา สรวารี. 2546. สารเติมแต่งพอลิเมอร์ เล่ม 1 .พิมพ์ครั้งที่ 1 .กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[54] การทำพอลิเมอร์ผสม [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :

http://elearning.su.ac.th/elearning-uploads/libs/document/51-9-impact-modifier_2db7.pdf

[55] T. Jung, M. Koehler, and D. Wostratzky, Curing of Composite Components by Ultraviolet Radiation: A Review, *SAMPE J.*, 34, 40 (1998)

[56] พิชญนันท์ ภู่เพียงใจ. 2549. “การเตรียมเรซินที่บ่มได้ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากน้ำมันเมล็ดปาล์ม.” วิทยานิพนธ์สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[57] Vincent Besse , Mathieu A. Derbannec, และคณะ “Photopolymerization study and adhesive properties of self-etch adhesives containing bis(acyl)phosphine oxide initiator” dental materials x x x (2 0 1 6) xxx–xxx <http://dx.doi.org/10.1016/j.dental.2016.01.005>

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

วัสดุและสารเคมี





GP150

General Purpose Polystyrene (GPPS)

Description:

GP150 is a general purpose grade of polystyrene resin for injection molding process with easy flow and good clarity. It is suitable for food packaging, electrical appliances (such as refrigerator food tray), household products, sanitary ware and etc. It also meets the requirement of food contact regulation.

Physical Properties:	Method	Unit	Value
Melt Flow Index (5 kg/200°C)	ASTM D1238	g/10min.	8.0
Tensile Strength at Yield (23°C)	ASTM D638	kg/cm ²	443
Flexural Strength at Yield (23°C)	ASTM D790	kg/cm ²	844
Flexural Modulus (23°C)	ASTM D790	×10 ⁴ kg/cm ²	3.23
Rockwell Hardness (1/4", 23°C)	ASTM D785	M-Scale	71
Heat Distortion Temperature (1/4", 18.6 kg/cm ²)	ASTM D648	°C	93
Vicat Softening Temperature (1/8", 1 kg)	ASTM D1525	°C	100
Flammability	UL-94	-	HB (3.0)

Processing Technique

Processing Temperature : 180-240 °C

****However, the actual processing conditions depend on mold design, power of machine, screw configurations and other environments.****

Remark: The values presented on the above are typical laboratory average, not to be construed as specifications and may vary within moderate ranges. The applicability or the accuracy of this information or the suitability of our products cannot be guaranteed because the conditions of use on the part or our uses are beyond our control.

Product Data sheet



บริษัท โอลิครีโพล จำกัด (มหาชน)
555/2 หมู่ 5 ถนนวิภาวดีรังสิต อาคาร 5 ชั้น 6 ถนนวิภาวดีรังสิต แขวงจตุจักร เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900 โทร. +66(0)2649-7000, 66(0)2649-7777 แฟกซ์: +66(0)2649-7002
IRPC Public Company Limited
555/2 Energy Complex Building B, 6th Floor, Vibhavadi Rangsit Road, Chatuchak, Bangkok 10900 THAILAND. TEL: +66(0)2649-7000, 66(0)2649-7777 FAX: +66(0)2649-7002 www.irpc.co.th, www.irpcmarket.com

REV. 20110601

Ciba Specialty Chemicals

Coating Effects Segment

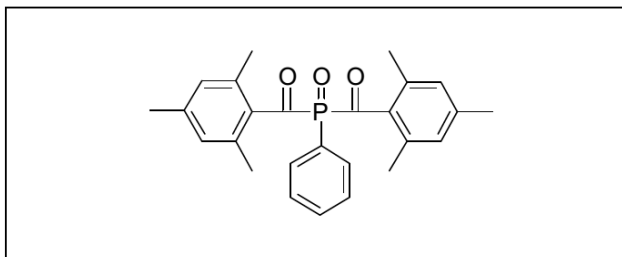


Ciba® IRGACURE® 819 Photoinitiator

General

IRGACURE 819 is a versatile photoinitiator for radical polymerisation of unsaturated resins upon UV light exposure. It is especially suited for white pigmented formulations, the curing of glass fiber reinforced polyester/styrene systems and for clearcoats for outdoor use in combinations with light stabilizers. Thick section curing is also possible with this photoinitiator.

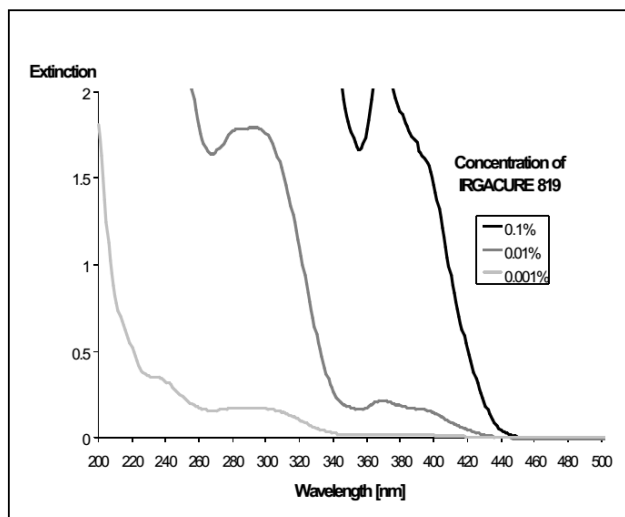
Chemical Structure



Bis(2,4,6-trimethylbenzoyl)-phenylphosphineoxide

Molecular weight: 418.5

Absorption Spectrum (% in Acetonitrile)



Ciba Specialty Chemicals

Coating Effects Segment



Ciba® IRGACURE® 819

Photoinitiator

Physical Properties

Appearance: yellow powder

Melting Point: 127-133 °C

Solubility at 20°C (g/100 g solution) :

acetone	14
butylacetate	6
methanol	3
toluene	22
hexanedioldiacrylate (HDDA)	9
oligomeric acrylate	3

Applications

IRGACURE 819 may be used, after adequate testing, in UV curable formulations for clear and for pigmented coatings on wood, metal, plastic, paper and optical fibers as well as for printing inks and preregs.

IRGACURE 819 exhibits at low concentrations an outstanding curing performance in highly opaque white and colored furniture coatings or screen inks containing rutile titanium dioxide or colored pigments and affords minimum yellowing after exposure to sufficient amounts of UV radiation. Additionally the outstanding absorption properties of IRGACURE 819 allow curing of thick sections.

IRGACURE 819 can be used in combination with other photoinitiators such as IRGACURE 184 or IRGACURE 651. With the latter it is especially suited to cure polyester/styrene resins as used for glass reinforced materials.

Due to its photosensitivity at longer wavelengths, IRGACURE 819 can easily be used in combinations with UV absorbers, e.g. TINUVIN 400. It is therefore ideally suited for use in weather-resistant UV curable coatings.

The amount of IRGACURE 819 required for optimum performance should be determined in trials covering a concentration range.

Ciba Specialty Chemicals

Coating Effects Segment



Ciba® IRGACURE® 819 Photoinitiator

Recommended concentrations:

Clear acrylate & UPES/styrene coatings:	0.1 - 0.2 % IRGACURE 819 + 1 - 2% IRGACURE 184
White acrylate & UPES/styrene furniture coatings:	0.5 - 1.0 % IRGACURE 819 + 1 - 2% IRGACURE 184
Colored acrylate formulations:	0.5 - 1.0 % IRGACURE 819 + 1 - 2% IRGACURE 651
White screen printing inks:	0.5 - 1.5 % IRGACURE 819 + 1 - 2% IRGACURE 184
Glass reinforced UPES/styrene prepregs :	0.2 - 0.4 % IRGACURE 819

Safety and Handling

IRGACURE 819 should be handled in accordance with good industrial practice. Detailed information is provided in the Safety Data Sheet.

IRGACURE 819 is sensitive to visible light and any exposure to sunlight should be avoided. Opened drums should be closed after use to protect the product against light.

Important Notice

The use of IRGACURE 819 in combination with α -hydroxyketones, like e.g. DAROCUR 1173 or IRGACURE 184 is covered by numerous patents or patent applications of Ciba Specialty Chemicals. Please check the specific situation in each country of concern.

IMPORTANT: The following supersedes Buyer's documents. SELLER MAKES NO REPRESENTATION OR WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. No statements herein are to be construed as inducements to infringe any relevant patent. Under no circumstances shall Seller be liable for incidental, consequential or indirect damages for alleged negligence, breach of warranty, strict liability, tort or contract arising in connection with the product(s). Buyer's sole remedy and Seller's sole liability for any claims shall be Buyer's purchase price. Data and results are based on controlled or lab work and must be confirmed by Buyer by testing for its intended conditions of use. The product(s) has not been tested for, and is therefore not recommended for, uses for which prolonged contact with mucous membranes, abraded skin, or blood is intended; or for uses for which implantation within the human body is intended.

Printing & Packaging Industrial Coatings

Technical Data Sheet

Laromer[®] HDDA

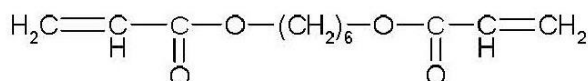
BASF
The Chemical Company

Product Description Laromer[®] HDDA is an acrylic acid ester used as a reactive diluent in energy curable coatings, inks, overprint varnishes, as a feedstock for synthesis, and for manufacturing polymers. It contains two polymerizable acrylate groups per molecule, which enables it to form copolymers.

Key Features & Benefits

- Good adhesion
- Good flexibility
- Excellent diluent

Chemical Structure Hexanediol diacrylate



Properties

Typical Characteristics	Properties
Appearance	clear liquid
Odor	ester – like
Assay (gas chromatography)	≥ 90%
Acidity, as acrylic acid (DIN EN ISO 2114, method B)	≤ 0.05%
Water content (K. Fischer, DIN 51777)	≤ 0.05%
Hazen/APHA color number (DIN ISO 6271)	≤ 50
Density at 25°C (DIN 51757, method 4.3)	1.015 g/cm ³
Boiling point (DIN EN ISO 3405)	107°C
Specific heat capacity at 30°C	1.88 kJ/(kg K)
Solidification point (ISO DIS 3841)	8 – 11°C
Refracting index n _D at 20°C (DIN EN ISO 489)	1.457
Solubility	of Laromer HDDA in water 0.36 g/l of water in Laromer [®] HDDA insoluble

Compatibility Can be mixed with most organic solvents.

These typical values should not be interpreted as specifications.

Applications

Laromer[®] HDDA contains two polymerizable acrylate groups per molecule, which enables it to form copolymers of, for example, acrylic or methacrylic acids and their salts, amides, esters, vinyl acetate, and styrene. Readily entering into addition reactions, it is also an important feedstock for chemical synthesis.

The polymerizable groups allow the product to be used as a crosslinking component in energy curable coatings, inks, and overprint varnishes where it also acts as a reactive diluent. During curing, Laromer® HDDA becomes part of the polymer structure.

Laromer® HDDA is recommended for applications such as:

- Pigment dispersions
- Printing inks for flexographic, digital, or silk-screen applications
- Overprint varnishes for commercial or publication applications
- Interior/exterior general industrial metal coating applications
- Interior/exterior wood coatings for floor, furniture, or millwork applications

Processing

Laromer® HDDA can be polymerized by the usual block, solution, suspension, and emulsion techniques. Removal of the stabilizer beforehand is generally not necessary. An excess of initiator can counteract its effect if needed.

Safety

General

The usual safety precautions when handling chemicals must be observed. These include the measures described in Federal, State, and Local health and safety regulations, thorough ventilation of the workplace, good skin care, and wearing of protective goggles.

Material Safety Data Sheet

All safety information is provided in the Material Safety Data Sheet for Laromer® HDDA.

Important

While the descriptions, designs, data and information contained herein are presented in good faith and believed to be accurate, they are provided for guidance only. Because many factors may affect processing or application/use, BASF recommends that the reader make tests to determine the suitability of a product for a particular purpose prior to use. **NO WARRANTIES OF ANY KIND, EITHER EXPRESSED OR IMPLIED, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, ARE MADE REGARDING PRODUCTS DESCRIBED OR DESIGNS, DATA OR INFORMATION SET FORTH, OR THAT THE PRODUCTS, DESCRIPTIONS, DESIGNS, DATA OR INFORMATION MAY BE USED WITHOUT INFRINGING THE INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS OF OTHERS.** In no case shall the descriptions, information, data or designs provided be considered a part of BASF's terms and conditions of sale. Further, the descriptions, designs, data, and information furnished by BASF hereunder are given gratis and BASF assumes no obligation or liability for the descriptions, designs, data or information given or results obtained, all such being given and accepted at the reader's risk.

Laromer is a registered trademark of BASF Group.

© BASF Corporation, 2010



Responsible Care®
Good Chemistry at Work

BASF Corporation is fully committed to the Responsible Care® initiative in the USA, Canada, and Mexico.

For more information on Responsible Care® goto:

U.S.: www.basf.us/responsiblecare_usa

Canada: www.basf.us/responsiblecare_canada

México: www.basf.us/responsiblecare_mexico

U.S. & Canada

BASF Corporation
1609 Biddle Avenue
Wyandotte, Michigan 48192
Phone: (800) 231-7868
Fax: (800) 392-7429
Email: polyorders@basf.com
Email: edtech_info@basf.com
www.basf.com

Mexico

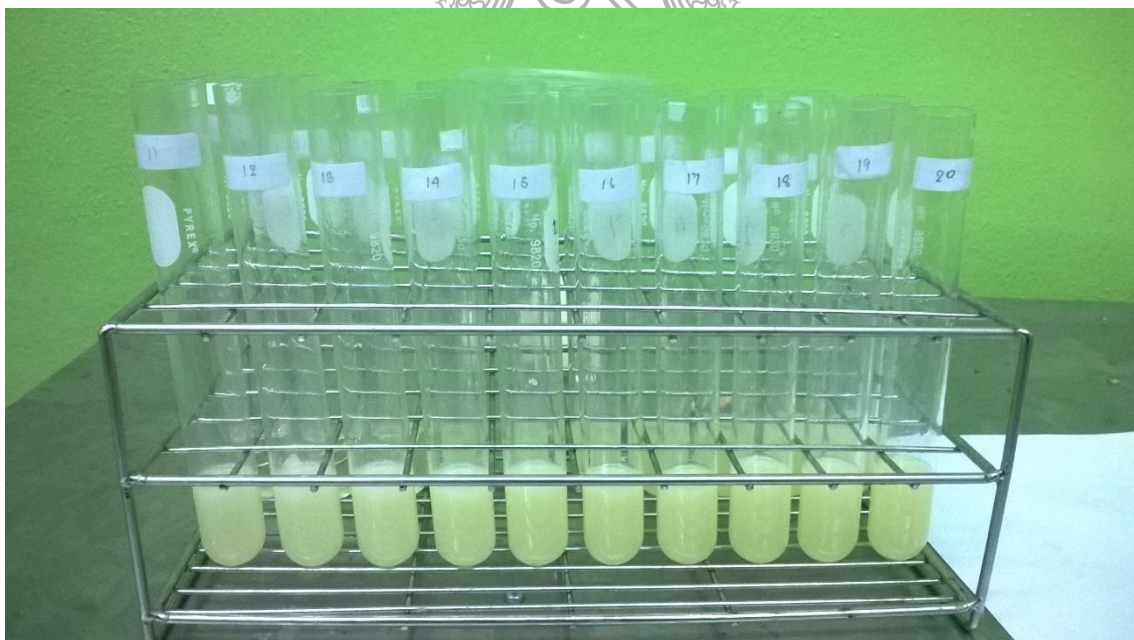
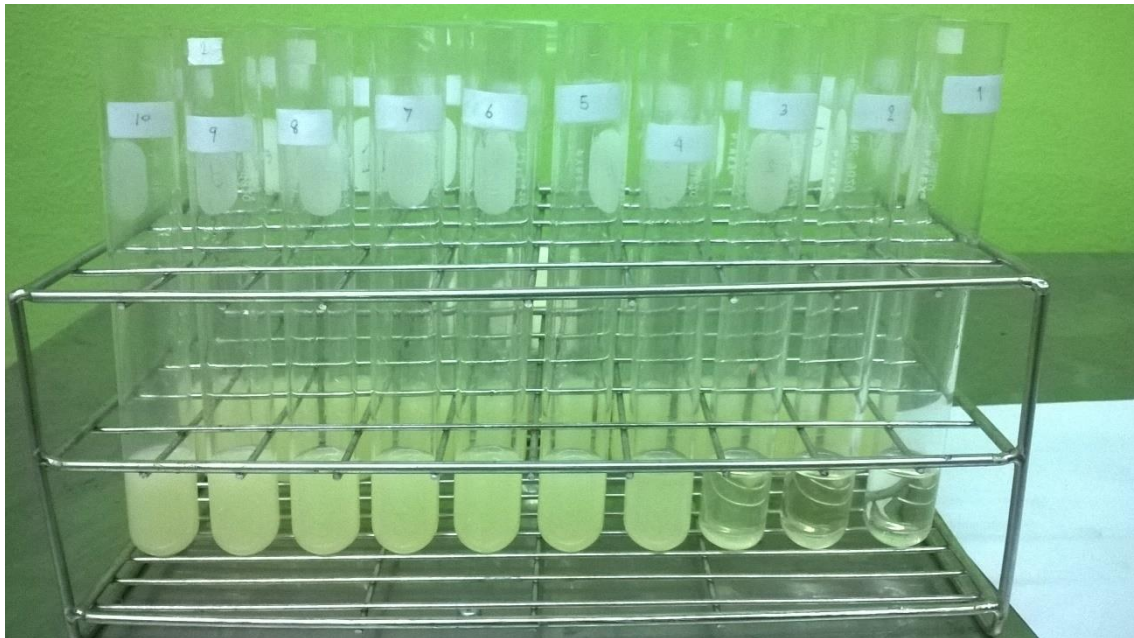
BASF Mexicana, S.A. de C.V.
Av. Insurgentes Sur # 975
Col. Ciudad de los Deportes
C.P. 03710
Mexico, D.F.
Phone: (52-55) 53-25-27-87
(52-55) 53-25-26-87
Fax: (52-55) 56-11-48-97

ภาคผนวก ข
ผลการทดลอง และ รูปในการทดลอง



การทดลองดัดแปรน้ำมันละหุ่งในอัตราส่วนต่างๆ

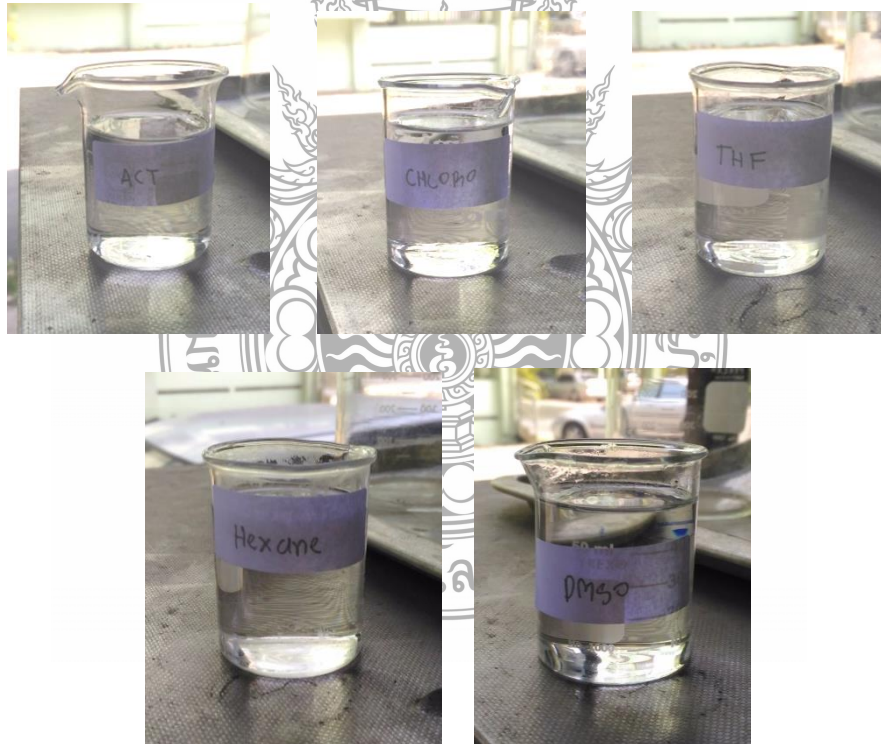
จาก 0 ถึง 40 phr โดยเพิ่มสารละลายตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงหลอดละ 2 phr จำนวน 20 สูตร



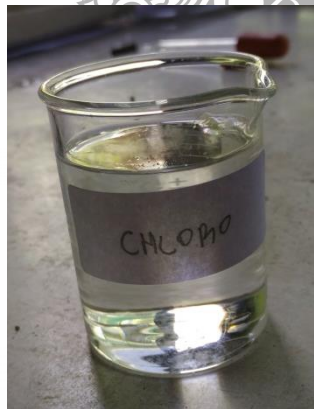
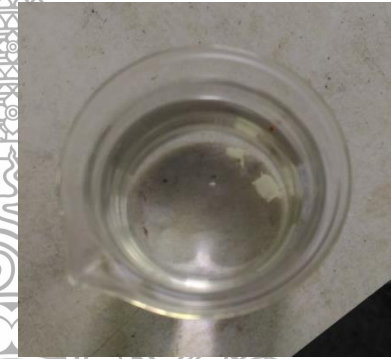
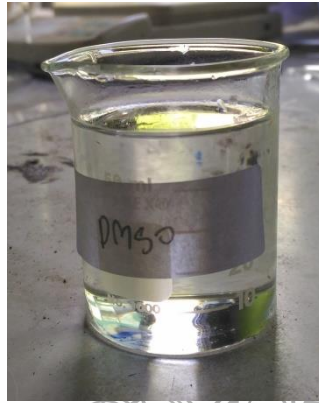
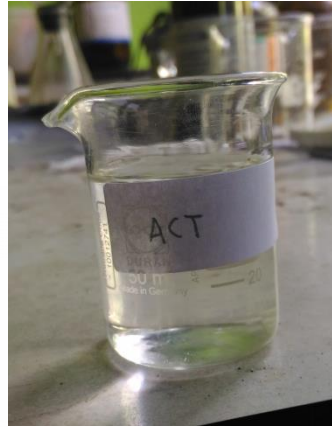
การทดลองการละลาย โดยใช้อัตราส่วนการละลาย ใช้สารละลาย 50 ml โดยชั่งสาร 0.05 g

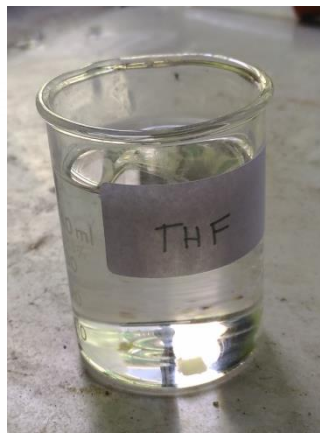


โดยใช้สารละลายดังนี้ Acetone , Chloroform , THF , Hexane , DMSO

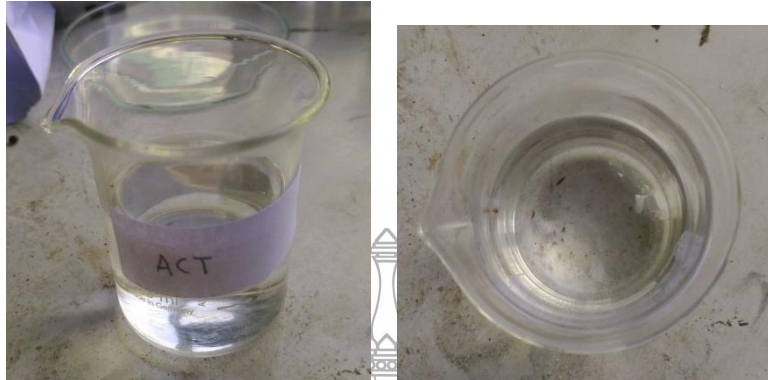


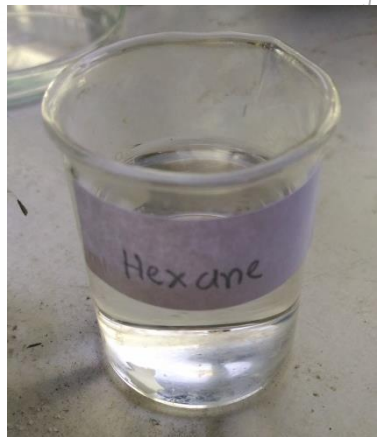
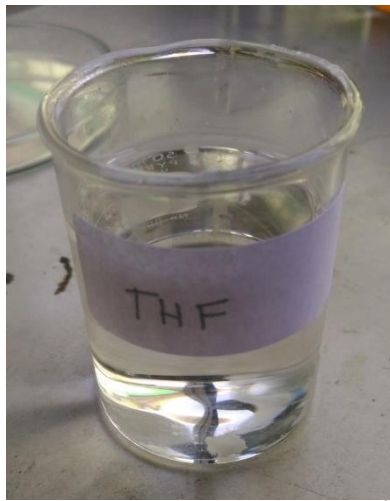
วันที่ 1



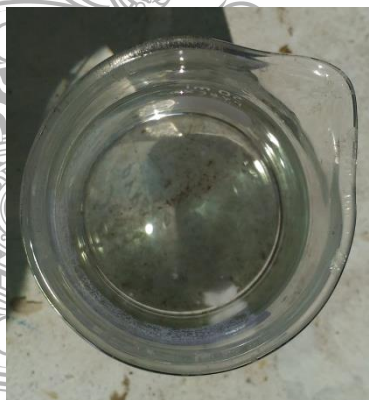


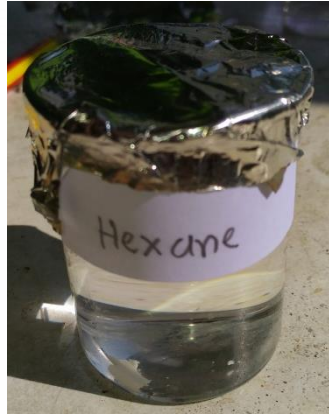
วันที่ 2



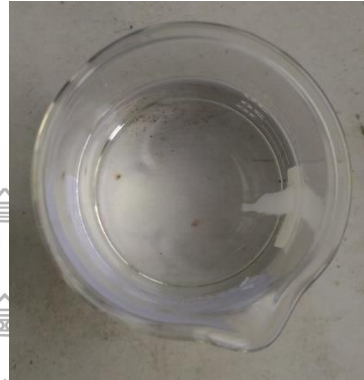


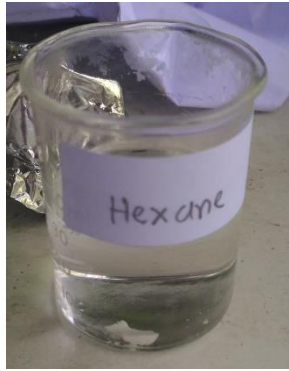
วันที่ 3



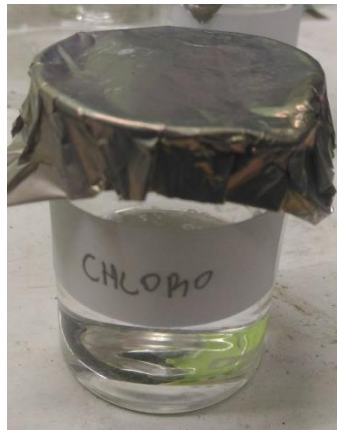
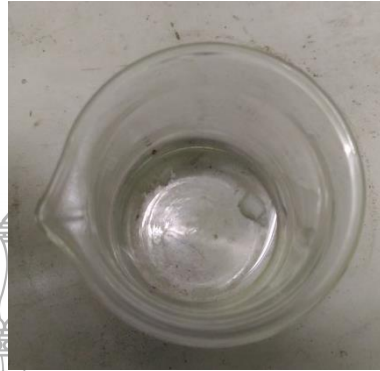


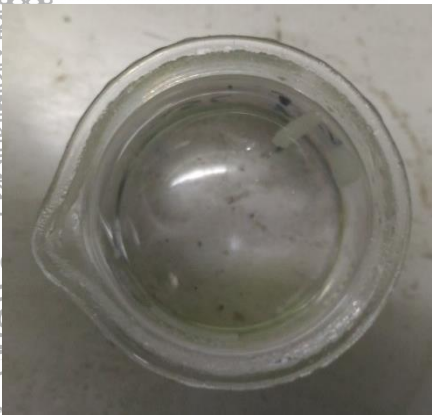
วันที่ 4





วันที่ 5





ผลการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิค (LC-MS)

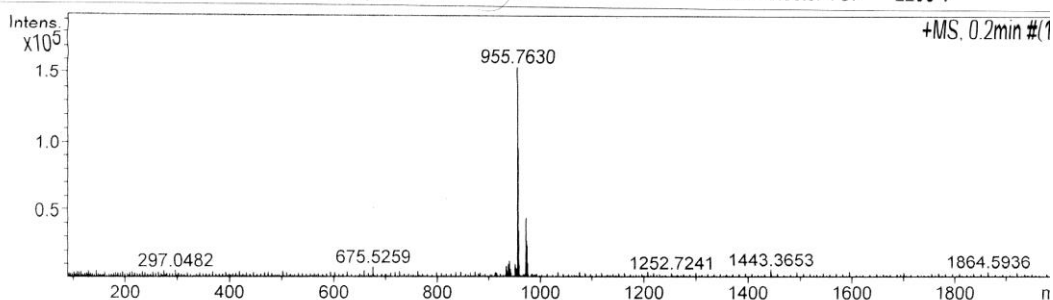
Mass Spectrum List Report

Analysis Info

Analysis Name OS590321001.d Acquisition Date 3/21/2016 2:37:10 PM
 Method esi_tune_wide_pos_20150911.m Operator Administrator
 Sample Name CASTOR OIL Instrument micrOTOF 72
 CASTOR OIL

Acquisition Parameter

Source Type ESI Ion Polarity Positive Set Corrector Fill 50 V
 Scan Range n/a Capillary Exit 180.0 V Set Pulsar Pull 337 V
 Scan Begin 50 m/z Hexapole RF 600.0 V Set Pulsar Push 337 V
 Scan End 3000 m/z Skimmer 1 70.0 V Set Reflector 1300 V
 Hexapole 1 25.0 V Set Flight Tube 9000 V
 Set Detector TOF 2295 V



#	m/z	I	I %	S/N	FWHM	Res.
1	129.7800	4853	3.1	6.7	0.0103	12589
2	145.0675	5033	3.2	6.9	0.0141	10287
3	297.0482	5080	3.3	7.7	0.0561	5296
4	675.5259	7910	5.1	12.4	0.1373	4921
5	933.7812	8374	5.4	12.3	0.1559	5990
6	934.7898	5593	3.6	8.1	0.1672	5592
7	937.7570	9997	6.4	14.8	0.1591	5896
8	938.7581	6558	4.2	9.5	0.1510	6218
9	939.7657	12536	8.1	18.6	0.1609	5842
10	940.7655	6951	4.5	10.1	0.1570	5992
11	941.7801	6534	4.2	9.5	0.1620	5813
12	950.8019	10168	6.6	15.0	0.1636	5813
13	951.8064	7986	5.1	11.7	0.1751	5436
14	953.7406	6684	4.3	9.8	0.1680	5675
15	955.7630	155203	100.0	235.2	0.1635	5845
16	956.7660	95680	61.6	144.9	0.1623	5896
17	957.7699	34835	22.4	52.5	0.1640	5839
18	958.7737	9337	6.0	13.8	0.1645	5827
19	971.7407	43782	28.2	66.2	0.1645	5908
20	972.7434	27645	17.8	41.7	0.1654	5880
21	973.7589	23534	15.2	35.4	0.1706	5708
22	974.7670	11012	7.1	16.4	0.1772	5501
23	1443.3653	5903	3.8	9.0	0.0981	14711
24	1864.5936	4715	3.0	7.3	0.0459	40652
25	2339.1801	5346	3.4	7.5	0.0388	60277
26	2339.3940	6705	4.3	9.5	0.0330	70838
27	2339.5899	5220	3.4	7.3	0.0658	35538
28	2339.6428	5049	3.3	7.1	0.0503	46508
29	2614.1757	4738	3.1	7.1	0.0421	62093
30	2868.6413	5288	3.4	8.1	0.0635	45146

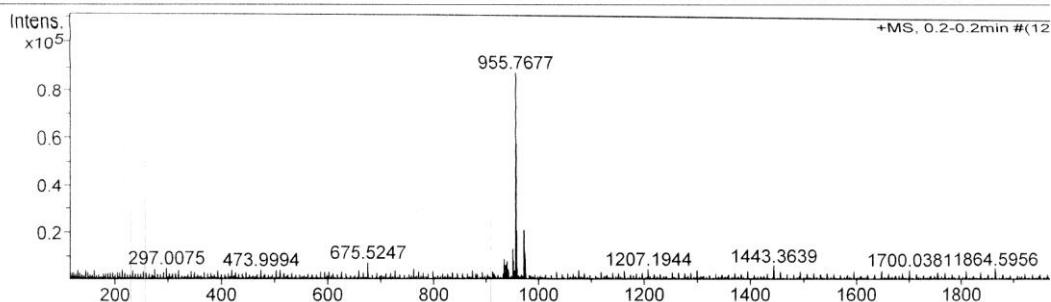
Mass Spectrum List Report

Analysis Info

Analysis Name	OS590321002.d	Acquisition Date	3/21/2016 2:42:45 PM
Method	esi_tune_wide_pos_20150911.m	Operator	Administrator
Sample Name	CASTOR 10 Phr	Instrument	micrOTOF 72
	CASTOR 10 Phr		

Acquisition Parameter

Source Type	ESI	Ion Polarity	Positive	Set Corrector Fill	50 V
Scan Range	n/a	Capillary Exit	180.0 V	Set Pulsar Pull	337 V
Scan Begin	50 m/z	Hexapole RF	600.0 V	Set Pulsar Push	337 V
Scan End	3000 m/z	Skimmer 1	70.0 V	Set Reflector	1300 V
		Hexapole 1	25.0 V	Set Flight Tube	9000 V
				Set Detector TOF	2295 V



#	m/z	I	I%	S/N	FWHM	Res.
1	296.8972	4849	5.6	8.0	0.0137	21665
2	297.0075	4975	5.7	8.2	0.0711	4177
3	297.0443	4680	5.4	7.7	0.0690	4304
4	675.5247	7179	8.2	12.4	0.1104	6119
5	762.2613	4642	5.3	7.8	0.0197	38682
6	933.7869	8829	10.1	14.9	0.1563	5973
7	934.7923	6359	7.3	10.6	0.1489	6277
8	937.7570	6389	7.3	10.7	0.1514	6196
9	939.7718	7786	8.9	13.1	0.1480	6350
10	941.7811	4490	5.1	7.4	0.1631	5775
11	950.8114	13051	14.9	22.3	0.1563	6083
12	951.8120	8319	9.5	14.1	0.1789	5319
13	955.7677	87369	100.0	151.6	0.1711	5585
14	956.7710	57138	65.4	99.0	0.1662	5757
15	957.7725	20777	23.8	35.7	0.1558	6148
16	958.7763	5290	6.1	8.8	0.1797	5334
17	971.7465	21033	24.1	36.2	0.1670	5820
18	972.7490	12816	14.7	21.9	0.1709	5692
19	973.7651	11253	12.9	19.2	0.1720	5661
20	974.7704	5840	6.7	9.8	0.1666	5852
21	1207.1944	4465	5.1	7.6	0.0260	46389
22	1443.3639	5689	6.5	9.5	0.0713	20232
23	2339.3716	5485	6.3	9.1	0.0341	68586
24	2339.5859	5313	6.1	8.8	0.0569	41109
25	2339.6402	4775	5.5	7.9	0.0442	52967
26	2531.3686	4523	5.2	7.9	0.0388	65319
27	2597.0965	4899	5.6	8.4	0.0392	66187
28	2799.1971	4540	5.2	7.7	0.0401	69834
29	2868.6252	5289	6.1	9.1	0.0593	48408
30	2938.1721	5409	6.2	9.5	0.0394	74576

Mass Spectrum List Report

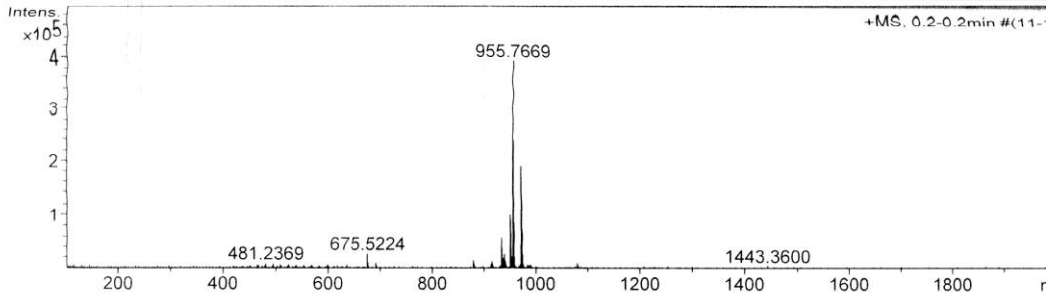
Analysis Info

Analysis Name OS590321003.d
 Method esi_tune_wide_pos_20150911.m
 Sample Name CASTOR 20 Phr
 CASTOR 20 Phr

Acquisition Date 3/21/2016 2:48:36 PM
 Operator Administrator
 Instrument micrOTOF 72

Acquisition Parameter

Source Type	ESI	Ion Polarity	Positive	Set Corrector Fill	50 V
Scan Range	n/a	Capillary Exit	180.0 V	Set Pulsar Pull	337 V
Scan Begin	50 m/z	Hexapole RF	600.0 V	Set Pulsar Push	337 V
Scan End	3000 m/z	Skimmer 1	70.0 V	Set Reflector	1300 V
		Hexapole 1	25.0 V	Set Flight Tube	9000 V
				Set Detector TOF	2295 V



#	m/z	I	I %	S/N	FWHM	Res.
1	675.5224	27009	6.8	54.7	0.1240	5448
2	676.5262	11543	2.9	23.1	0.1150	5884
3	691.4971	10220	2.6	20.5	0.1173	5893
4	879.7516	15582	3.9	27.4	0.1456	6044
5	880.7548	10004	2.5	17.3	0.1409	6252
6	913.7569	9275	2.3	15.4	0.1435	6367
7	915.7708	13633	3.4	23.0	0.1565	5852
8	933.7864	58629	14.8	100.2	0.1588	5879
9	934.7930	40769	10.3	69.5	0.1615	5789
10	935.7928	17140	4.3	28.8	0.1684	5559
11	937.7610	21112	5.3	35.7	0.1735	5406
12	938.7640	12894	3.3	21.5	0.1671	5618
13	939.7706	27819	7.0	47.3	0.1579	5951
14	940.7734	16016	4.0	26.9	0.1562	6022
15	941.7840	13149	3.3	22.0	0.1574	5984
16	950.8123	103365	26.1	179.8	0.1618	5876
17	951.8140	66010	16.7	114.6	0.1678	5674
18	952.8128	24729	6.2	42.4	0.1726	5519
19	953.7592	23079	5.8	39.6	0.1927	4950
20	954.7478	14378	3.6	24.4	0.2120	4503
21	955.7669	396279	100.0	694.5	0.1654	5779
22	956.7706	245658	62.0	430.5	0.1636	5847
23	957.7715	88633	22.4	154.9	0.1584	6048
24	958.7719	23079	5.8	39.7	0.1630	5882
25	971.7434	196300	49.5	348.1	0.1688	5756
26	972.7464	124136	31.3	220.0	0.1666	5840
27	973.7532	69295	17.5	122.5	0.1690	5763
28	974.7598	27618	7.0	48.4	0.1709	5703
29	975.7672	8481	2.1	14.3	0.1757	5553
30	1079.7763	10556	2.7	19.8	0.1867	5785

Mass Spectrum List Report

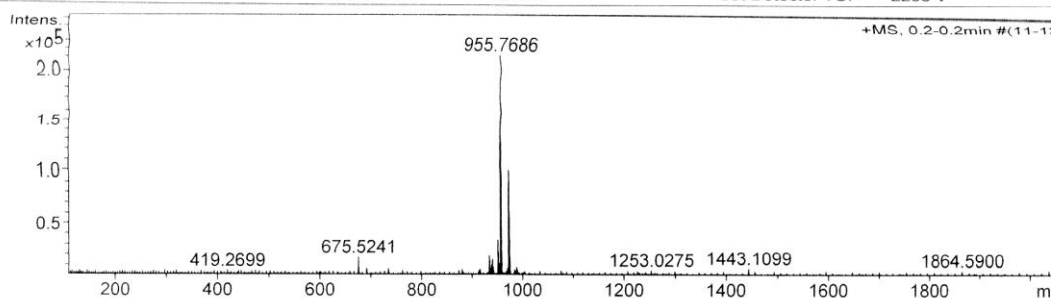
Analysis Info

Analysis Name OS590321004.d
 Method esi_tune_wide_pos_20150911.m
 Sample Name CASTOR 30 Phr
 CASTOR 30 Phr

Acquisition Date 3/21/2016 2:52:07 PM
 Operator Administrator
 Instrument micrOTOF 72

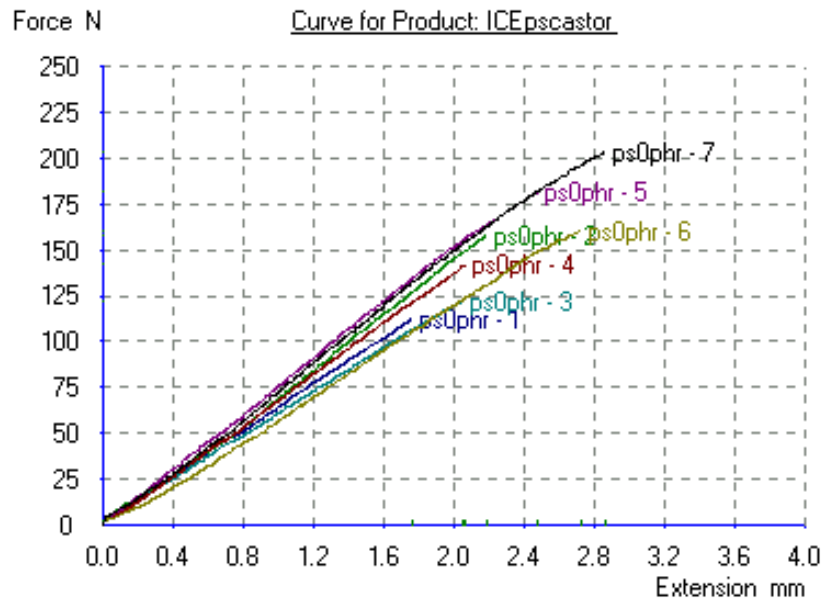
Acquisition Parameter

Source Type	ESI	Ion Polarity	Positive	Set Corrector Fill	50 V
Scan Range	n/a	Capillary Exit	180.0 V	Set Pulsar Pull	337 V
Scan Begin	50 m/z	Hexapole RF	600.0 V	Set Pulsar Push	337 V
Scan End	3000 m/z	Skimmer 1	70.0 V	Set Reflector	1300 V
		Hexapole 1	25.0 V	Set Flight Tube	9000 V
				Set Detector TOF	2295 V

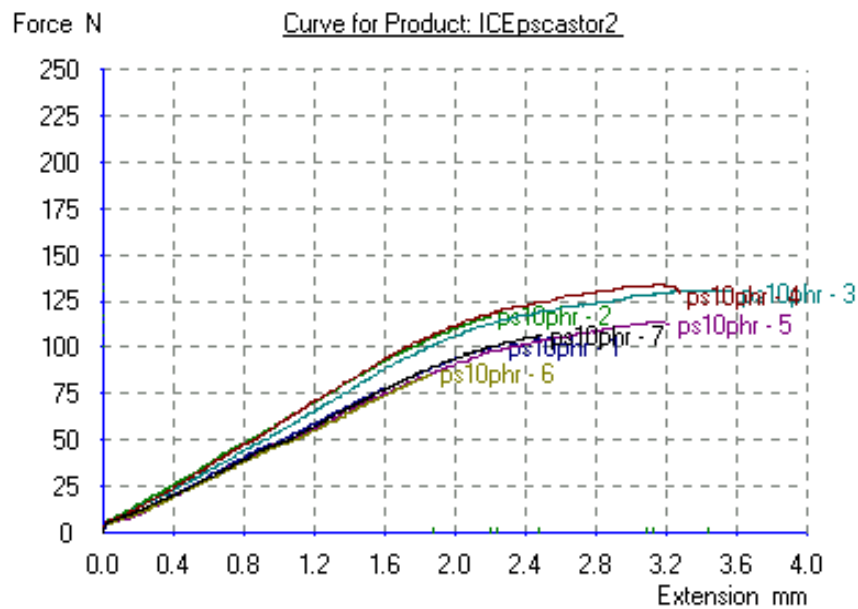


#	m/z	I	I%	S/N	FWHM	Res.
1	675.5241	17288	8.0	32.5	0.1242	5441
2	676.5245	7375	3.4	13.7	0.1065	6350
3	691.4997	6290	2.9	11.6	0.1230	5623
4	734.4769	6022	2.8	11.1	0.1239	5930
5	933.7873	19047	8.9	31.8	0.1578	5916
6	934.7924	13992	6.5	23.2	0.1534	6092
7	935.7897	6427	3.0	10.3	0.1601	5845
8	937.7620	9971	4.6	16.4	0.1719	5457
9	938.7638	6404	3.0	10.3	0.1537	6107
10	939.7680	15557	7.2	26.0	0.1557	6034
11	940.7749	7887	3.7	12.9	0.1591	5914
12	941.7813	7722	3.6	12.6	0.1593	5912
13	950.8133	33963	15.8	57.9	0.1623	5857
14	951.8140	23000	10.7	39.0	0.1647	5778
15	952.8120	8996	4.2	14.9	0.1749	5446
16	953.7526	11079	5.2	18.5	0.1863	5119
17	954.7543	7751	3.6	12.8	0.1980	4822
18	955.7686	214867	100.0	370.6	0.1639	5830
19	956.7710	132380	61.6	228.3	0.1626	5885
20	957.7728	46949	21.9	80.6	0.1588	6030
21	958.7746	11678	5.4	19.6	0.1632	5873
22	969.7449	6478	3.0	10.7	0.1745	5557
23	971.7440	102560	47.7	178.7	0.1639	5929
24	972.7470	62749	29.2	109.2	0.1646	5911
25	973.7532	34671	16.1	60.1	0.1673	5822
26	974.7588	13275	6.2	22.7	0.1714	5687
27	987.7496	7671	3.6	13.0	0.1668	5921
28	1443.1099	6109	2.8	11.9	0.0292	49394
29	2339.3669	5917	2.8	10.9	0.0347	67403
30	2339.5672	5555	2.6	10.2	0.0582	40193

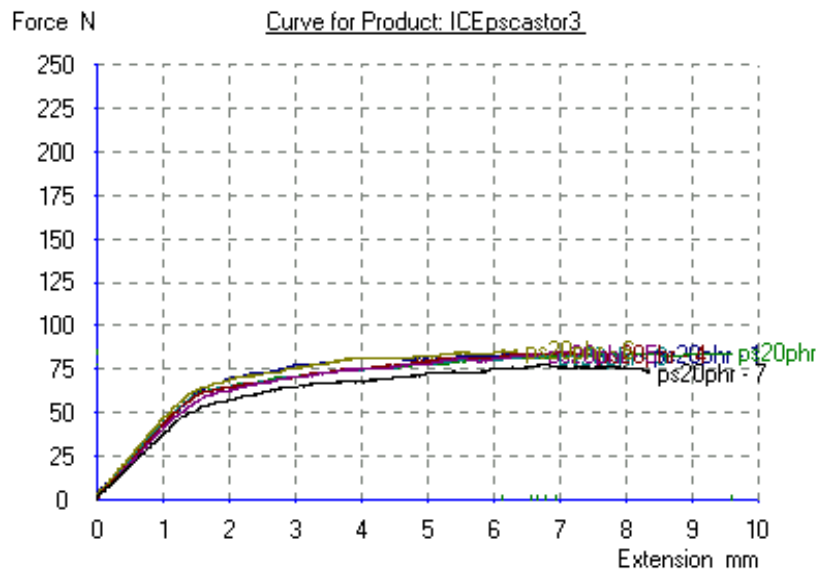
กราฟการต้านทานการโก่งงอของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่างพอลิไทรีนกับน้ำมันละหุ่งดัดแปร



Modified Castor oil 0 phr



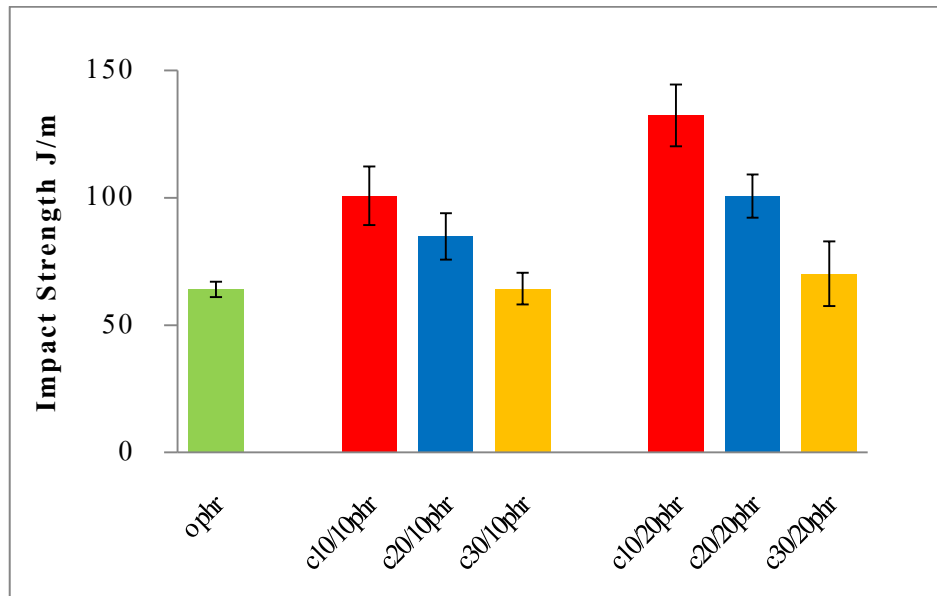
Modified Castor oil 10 phr



Modified Castor oil 20 phr



ค่าการทนแรงกระแทกของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่างน้ำมันละหุ่งตัดแปรในแต่ละสูตร



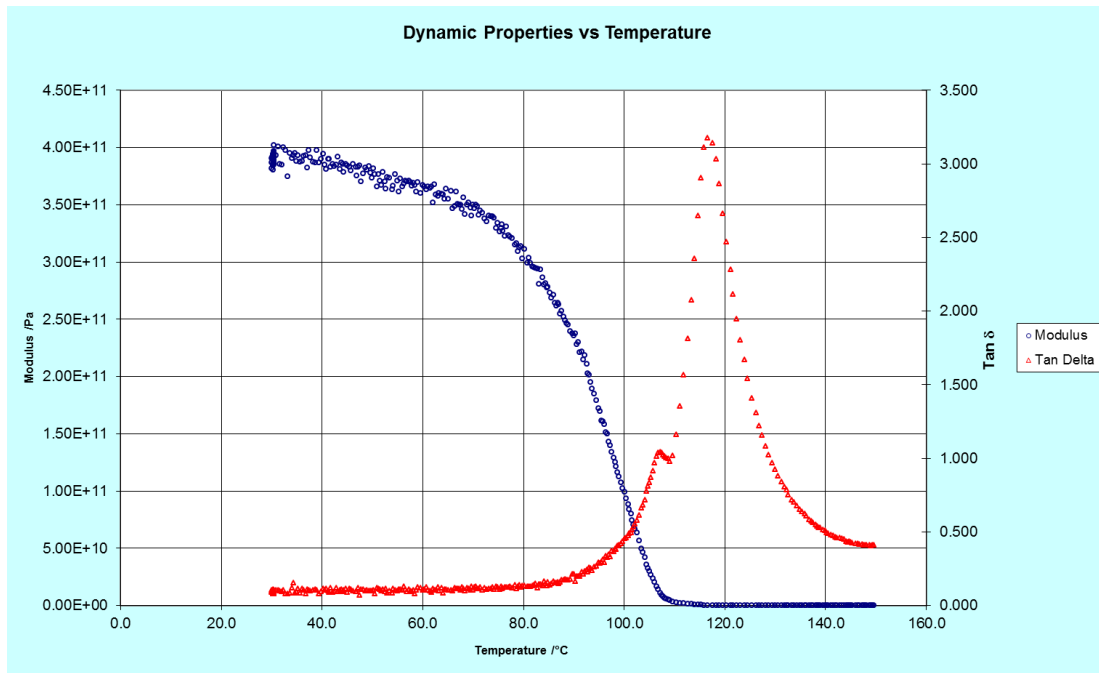
หมายเหตุ

C10 : น้ำมันละหุ่งตัดแปรที่ใส่สารละลายตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงในอัตราส่วน 10 phr

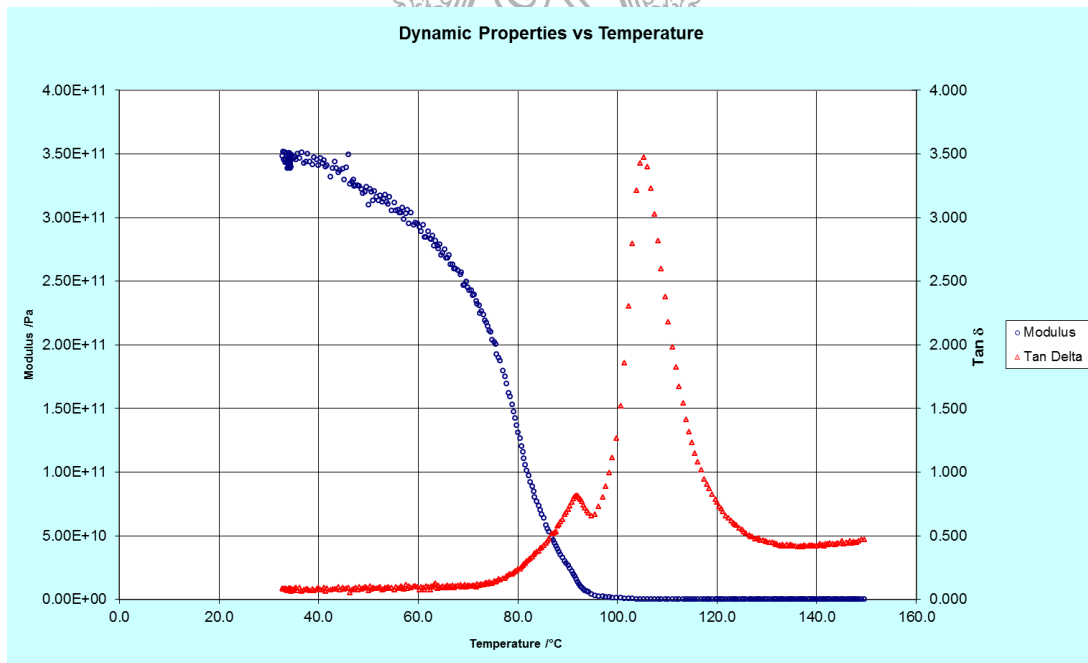
C20 : น้ำมันละหุ่งตัดแปรที่ใส่สารละลายตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงในอัตราส่วน 20 phr

C30 : น้ำมันละหุ่งตัดแปรที่ใส่สารละลายตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงในอัตราส่วน 30 phr

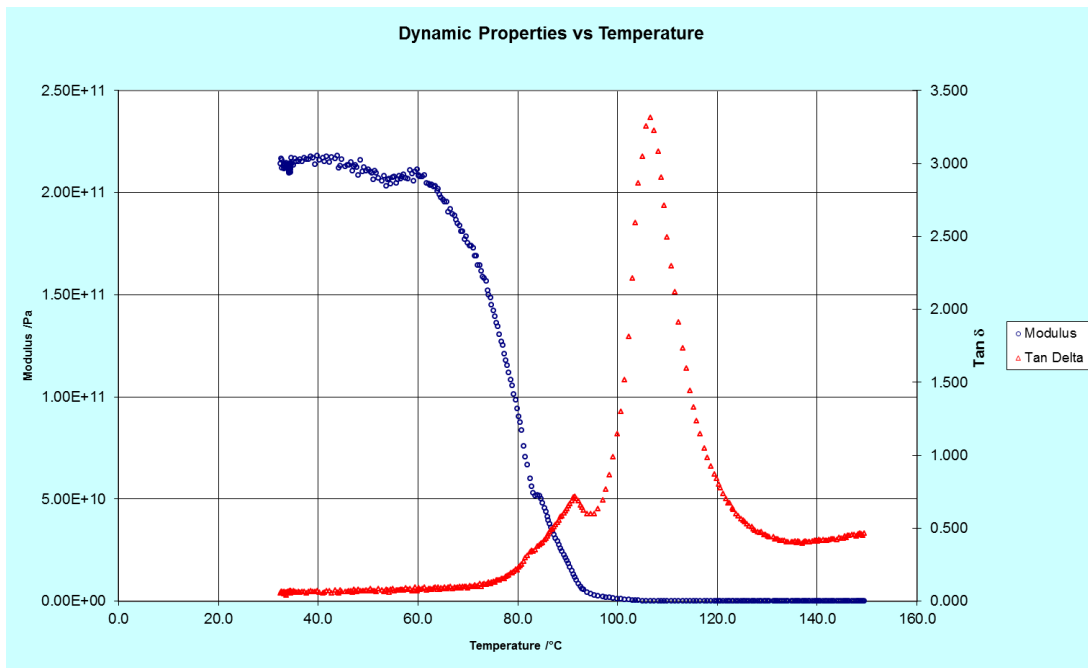
การวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงพลวัตด้วยเทคนิค DMA



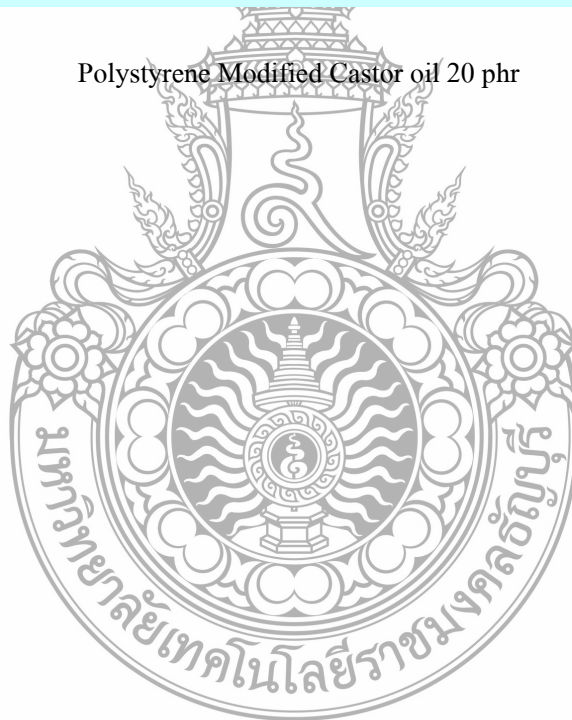
Polystyrene Modified Castor oil 0 phr



Polystyrene Modified Castor oil 10 phr



Polystyrene Modified Castor oil 20 phr



ภาคผนวก ค
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



Proceedings of IE Network Conference

เอกสารรวมบทความการประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม

IE NETWORK CONFERENCE

2015 6-7 August 2015 The Emerald Hotel Bangkok



Academics-Industrial Research Collaborations in order to be
Excellence in ASEAN

การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2558



ASEAN
Economic
Community

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและการจัดการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยศิลปากร



Minitab



THAILAND
SCIENCE
PARK

คณะกรรมการฝ่ายเลี้ยงต้อนรับและพิธีการ

1. อาจารย์ กวินธร สัยเจริญ	ประธานกรรมการ
2. อาจารย์ ดร.คณศ พลอยदनัย	กรรมการ
3. อาจารย์ ดร.วรฤทัย ชูเทียบ	กรรมการ
4. อาจารย์ ดร.ชูศักดิ์ พรสิงห์	กรรมการ
5. อาจารย์ บัญญัติ พันธุ์ประสิทธิ์เวช	กรรมการ
6. นางสาวยานิษฐ์ ตั้งธนาโชติพัฒน์	กรรมการ
7. นายสรวิทย์ เชื้อพิสุทธิกุล	กรรมการ
8. นางสาวณัฐธิดา นฤมลศิริ	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการฝ่ายเลขานุการ ลงทะเบียน สถานที่ และของที่ระลึก

1. อาจารย์ ดร.วรฤทัย ชูเทียบ	ประธานกรรมการ
2. อาจารย์ ดร.กัญจนา ทองสนิท	กรรมการ
3. อาจารย์ กวินธร สัยเจริญ	กรรมการ
4. อาจารย์ บัญญัติ พันธุ์ประสิทธิ์เวช	กรรมการ
5. นางสาวนวลอนงค์ साโคตร	กรรมการ
6. นางสาวเปรมทิพย์ อิ่มเอิบปฐม	กรรมการ
7. นางสาวณัฐธิดา นฤมลศิริ	กรรมการ
8. นายเจน พลินทร์สุคนธ์	กรรมการ
9. นายธเรชา คำแพงนนท์	กรรมการ
10. นายสรวิทย์ เชื้อพิสุทธิกุล	กรรมการ
11. นางสาวยานิษฐ์ ตั้งธนาโชติพัฒน์	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความวิชาการ

1. รศ.ดร.ประจวบ กล่อมจิตร	มหาวิทยาลัยศิลปากร	ประธานกรรมการ
2. ผศ.จันทร์เพ็ญ อนุรัตน์นนท์	มหาวิทยาลัยศิลปากร	กรรมการ
3. ผศ.วันชัย ลีลากวีวงศ์	มหาวิทยาลัยศิลปากร	กรรมการ
4. อ.ดร.กัญจนา ทองสนิท	มหาวิทยาลัยศิลปากร	กรรมการ
5. อ.ดร.คณศ พลอยदनัย	มหาวิทยาลัยศิลปากร	กรรมการ
6. อ.ดร.ชูศักดิ์ พรสิงห์	มหาวิทยาลัยศิลปากร	กรรมการ
7. อ.ดร.วรฤทัย ชูเทียบ	มหาวิทยาลัยศิลปากร	กรรมการ
8. อ.ดร.สิทธิชัย แซ่เหล่ม	มหาวิทยาลัยศิลปากร	กรรมการ

9.	ผศ.ดร.นภัตสว่างค์ โอสถศิลป์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
10.	ผศ.ดร.ณัฐชา ทวีแสงสกุลไทย	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
11.	อ.ดร.โอฬาร กิตติธีรพรชัย	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
12.	อ.ดร.พิศิษฐ์ จารุมณีโรจน์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
13.	อ.ดร.ไพโรจน์ ลดาวิจิตรกุล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
14.	รศ.ดร.จิตรา รุ้กิจการพานิช	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
15.	รศ.ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
16.	ผศ.ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
17.	ผศ.ดร.วิสุทธิ์ สุพิทักษ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน	กรรมการ
18.	อ.ดร.วรุณี หวังวัชรกุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน	กรรมการ
19.	ผศ.ดร.ชนะ วัชศิริ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน	กรรมการ
20.	อ.ปริญญา พัฒนสันต์พร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน	กรรมการ
21.	อ.ชัยมงคล ลิ้มเพียรชอบ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน	กรรมการ
22.	รศ.ดร.นิวิท เจริญใจ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
23.	รศ.ดร.เศรษฐ์ สัมภักตะกุล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
24.	อ.ดร.อนิรุท ไชยจารุวนิช	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
25.	ผศ.ดร.กรกฎ ไยบัวเทศ กิพยาวงศ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
26.	อ.ดร.วสวัชร นาคเขี้ยว	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
27.	อ.ดร.วิรัช วิสิทธิพานิช	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
28.	ผศ.ดร.รุ่งนิตร์ ชมภูอินโหว	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
29.	รศ.ดร.คมกฤต เล็กสกุล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
30.	รศ.ดร.อภิชาติ โสภางแดง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
31.	อ.ดร.ชนมเจริญ แสงวรัตน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
32.	ผศ.ดร.วิชาญ ช่วยพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ	กรรมการ
33.	อ.ดร.ฤทธิชัย เกาเนียม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ	กรรมการ
34.	ผศ.ดร.พิชัย จันทร์มณี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ	กรรมการ
35.	รศ.ดร.ณฐา คุปต์เสีียร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	กรรมการ
36.	อ.ดร.ระพี กาญจนะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	กรรมการ
37.	ผศ.สุรัตน์ ตริยวนพงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	กรรมการ
38.	อ.ดร.อนันท์ มีมนต์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	กรรมการ
39.	ผศ.ดร.ศิริชัย ต่อสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	กรรมการ
40.	ผศ.ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	กรรมการ
41.	อ.ดร.ชัยยะ ปราณิตพลกรัง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	กรรมการ
42.	ผศ.ศุภเอก ประมูลมาก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	กรรมการ
43.	ผศ.ศรีโร จารุกัญญา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	กรรมการ
44.	ผศ.กฤษณะ ทองศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	กรรมการ
45.	ผศ.จตุพร ใจดำรงค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	กรรมการ
46.	ผศ.ยงยุทธ คุลยกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	กรรมการ
47.	ผศ.เดช เหมือนขาว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	กรรมการ

48.	ผศ.ดร.ปณิธาน พีรพัฒนา	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
49.	ผศ.ดร.วีรพัฒน์ เศรษฐ์สมบูรณ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
50.	รศ.ดร.พรเทพ ขอบจายเกียรติ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
51.	ผศ.ดร.สุขอังกณา แดงกัณฑ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
52.	รศ.ดร.ศิวรินทร์ สุขโต	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
53.	รศ.ดร.ชาญณรงค์ สายแก้ว	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
54.	รศ.ดร.กาญจนา เศรษฐนันท์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
55.	ผศ.ดร.ป่าพจน์ เจริญอภิบาล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
56.	ผศ.ดร.ธนา ราษฎร์ภักดิ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
57.	ผศ.ดร.คมกฤษ ปิติฤกษ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
58.	ผศ.ดร.จิรวรรณ คล้อยภรณ์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	กรรมการ
59.	รศ.ดร.วุฒิชัย วงษ์ทัศน์กร	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	กรรมการ
60.	รศ.ดร.บุษบา พุกษาพันธุ์รัตน์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	กรรมการ
61.	รศ.ดร.เสมอจิตร์ หอมรสคุณธิ์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	กรรมการ
62.	ผศ.ดร.ภาณุ บุรณจารากร	มหาวิทยาลัยนเรศวร	กรรมการ
63.	อ.ดร.ขวัญนิธิ คำเมือง	มหาวิทยาลัยนเรศวร	กรรมการ
64.	ผศ.ศรีสัจจา วิทยศักดิ์	มหาวิทยาลัยนเรศวร	กรรมการ
65.	ผศ.ศิษฏา สิมารักษ์	มหาวิทยาลัยนเรศวร	กรรมการ
66.	รศ.ดร.เกษม พัฒนาปัญญาคุณ	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
67.	ผศ.ธีรวัฒน์ สมสิริกัญจนคุณ	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
68.	อ.ดร.ฤกษ์วิทย์ จันทรส	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
69.	ผศ.ดร. บรรหาญ ลีลา	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
70.	อ.ดร.จักรวาล คุณะติลก	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
71.	ผศ.จันทร์จา นาควชิระระกูล	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
72.	อ.ดร.กฤษดา ประสพชัยชนะ	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
73.	อ.ดร.บัญญัติ อริยะจรรยา	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
74.	อ.ดร.วรรณา อูทยารัตน์	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
75.	อ.ดร.สุนิสา คำสุข	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
76.	อ.ดร.ทนต์ศักดิ์ เทพสนธิ์	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
77.	อ.ดร.สัญญา ยิ้มศิริ	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
78.	อ.ดร.ศุภชัย ราษฎร์ศิริ	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
79.	อ.ธนา สาตรา	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
80.	ผศ.ดร.วนชัย ศีโรเวธนูกุล	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
81.	อ.ดร.จิรพรรณ เสี่ยงโรคาพาธ	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
82.	รศ.ดร.ดวงพรรณ ศฤงคารินทร์	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
83.	ผศ.ดวงยศ สุภักดิ์	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
84.	ผศ.ดร.เพ็ญจันทร์ จีริงจิตร์	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
85.	อ.ดร.พิษณุ มนัสปิติ	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
86.	ผศ.ดร.ธนวรรณ อัครไพบูลย์	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ

87.	อ.ต่อศักดิ์ อุทัยไขฟ้า	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
88.	อ.คิลปรัชญ์ วัฒนเสย	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
89.	อ.พรศพงษ์ แก่นณรงค์	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
90.	อ.สายสุนีย์ พงษ์พัฒนศึกษา	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
91.	อ.สมพร พรหมดวง	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
92.	อ.ประพล จิวะพรทิพย์	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
93.	ผศ.นุกูล อุบลบาน	มหาวิทยาลัยรามคำแหง	กรรมการ
94.	ผศ.พิศิษฐ์ แสง-ชูโต	มหาวิทยาลัยรามคำแหง	กรรมการ
95.	ผศ.ดร.กฤษดา พิศลยบุตร	มหาวิทยาลัยรามคำแหง	กรรมการ
96.	อ.ดร.เลิศเลขา ธนะชัยพันธ์	มหาวิทยาลัยรามคำแหง	กรรมการ
97.	ผศ.ดร.เจริญ เจตวิจิตร	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
98.	รศ.ดร.เสกสรร สุธรรมานนท์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
99.	รศ.ดร.ธเนศ รัตนวิไล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
100.	รศ.ดร.สมชาย ชูโณม	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
101.	รศ.ดร.วนิดา รัตนมณี	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
102.	ผศ.ดร.อรุณ สังข์พงศ์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
103.	ผศ.ดร.กลางเดือน โพชนา	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
104.	ผศ.สงวน ตั้งโพธิธรรม	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
105.	ผศ.พิเชฐ ตระการชัยศิริ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
106.	อ.ดร.วันฐมพงษ์ คงแก้ว	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
107.	ผศ.ดร.ชนะ เยี่ยงกมลสิงห์	มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย	กรรมการ
108.	ผศ.ดร.กาญจนา กาญจนสุนทร	มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย	กรรมการ
109.	อ.ดร.พัฒนชัย พฤกษ์กานนท์	มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย	กรรมการ
110.	อ.อรอุมา กอสนาน	มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย	กรรมการ
111.	อ.จรุงรัตน์ พันธุ์สุวรรณ	มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย	กรรมการ
112.	อ.วรลักษณ์ เสถียรรังษฤษฎ์	มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย	กรรมการ
113.	รศ.ดร.ระพีพันธ์ ปิตาคะโส	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
114.	ผศ.ดร.นุชสรา เกรียงกรกฎ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
115.	อ.ดร.จริยาภรณ์ อุ่นวงษ์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
116.	อ.ดร.ธารชุตตา พันธุ์นุกูล	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
117.	อ.ดร.ปรีชา เกรียงกรกฎ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
118.	ผศ.ดร.สมบัติ สินธุ์เขาวน	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
119.	ผศ.ดร.นลิน เพียรทอง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
120.	ผศ.ดร.วิภู ศรีสืบสาย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
121.	รศ.ดร.สิทธิพร พิมพ์สกุล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
122.	รศ.ดร.ฤดี มาสุจินท์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
123.	รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
124.	รศ.ดร.สกันธ์ คล่องบุญจิด	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
125.	อ.อรดี พุดติศรีวัฒนนท์	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต	กรรมการ

126.	ผศ.ดร.อำนาจ ผดุงศิลป์	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต	กรรมการ
127.	อ.ดร.สันต์ รัฐวิบูลย์	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต	กรรมการ
128.	อ.ดร.ณัฐพัชร์ อารีรัชกุลกานต์	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต	กรรมการ
129.	อ.ดร.สมหญิง งามพรประเสริฐ	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต	กรรมการ
130.	ผศ.ดร.ปัญญา พิทักษ์กุล	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต	กรรมการ
131.	ผศ.ดร.ไพฑูรย์ ศิริโอหาร	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์	กรรมการ
132.	อ.ชลิตา ชาญวิจิตร	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์	กรรมการ
133.	อ.จุฬาทิพย์ สีสานนพิพัฒน์	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์	กรรมการ
134.	ผศ.ดร.วิรัช รุ่งเรืองอนันต์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	กรรมการ
135.	ผศ.นราธิป แสงซ้าย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	กรรมการ
136.	ผศ.ดร.สุพัฒตรา เกษราพงศ์	มหาวิทยาลัยศรีปทุม	กรรมการ

กำหนดการประชุมวิชาการย้ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม

ประจำปี 2558

วันที่ 6 - 7 สิงหาคม 2558

ณ โรงแรม ดิเอมเมอร์อัลด์ กรุงเทพฯ

วันที่ 6 สิงหาคม 2558

08.00 - 09.00 น.	ลงทะเบียน
09.00 - 10.30 น.	- พิธีเปิดโดย อธิการบดี มหาวิทยาลัยศิลปากร - กล่าวต้อนรับโดย คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม - บรรยายพิเศษโดย ดร.เจนกฤษณ์ คณาธารณา ผู้ช่วยผู้อำนวยการ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ในหัวข้อเรื่อง "Science, Technology, and Innovation as a Vehicle for Thailand's Excellence in ASEAN"
10.30 - 10.45 น.	พักรับประทานอาหารว่าง
10.45 - 12.00 น.	บรรยายพิเศษโดย ศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย ปทุมนากุล รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและการถ่ายทอดเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในหัวข้อเรื่อง "ความร่วมมือทางวิชาการ และงานวิจัยในภาคธุรกิจของไทยและอาเซียน"
12.00 - 12.30 น.	บรรยายพิเศษโดย สภาวิศวกร ในหัวข้อเรื่อง "ขั้นตอนและวิธีการขอเลื่อนระดับเป็นสามัญและวุฒิวิศวกร สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม"
12.30 - 13.00 น.	พักรับประทานอาหารกลางวัน
13.00 - 15.00 น.	การนำเสนอบทความทางวิชาการ
15.00 - 15.15 น.	พักรับประทานอาหารว่าง
15.15 - 17.15 น.	การนำเสนอบทความทางวิชาการ
15.15 - 17.15 น.	ประชุมหัวหน้าภาควิชา/สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมทุกสถาบัน
18.30 - 23.00 น.	พิธีเปิดงานประชุมวิชาการย้ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2558 (IE Network Conference 2015) พร้อมชุดการแสดง

วันที่ 7 สิงหาคม 2558

08.00 - 09.00 น.	ลงทะเบียน
09.00 - 10.30 น.	การนำเสนอบทความทางวิชาการ
10.30 - 10.45 น.	พักรับประทานอาหารว่าง
10.45 - 12.00 น.	การนำเสนอบทความทางวิชาการ
12.00 - 13.00 น.	พักรับประทานอาหารกลางวัน
13.00 - 14.30 น.	การนำเสนอบทความทางวิชาการ
14.30 - 14.45 น.	พักรับประทานอาหารว่าง
14.45 - 17.00 น.	การนำเสนอบทความทางวิชาการ
17.00 น.	ปิดการประชุมวิชาการ

ตารางการนำเสนอผลงาน

วันที่ 7 สิงหาคม 2558

	ห้องมรกต	ห้องเพชรไพลิน	ห้องบุษราคัม	ห้องเพทาย	ห้องเพชรชมพู
09.00-09.15	ME 050	LS 141	MP 135	QE 148	OM 158
09.15-09.30	ME 021	LS 146	MP 072	QE 134	OM 198
09.30-09.45	ME 057	LS 181	MP 068	QE 195	OM 085
09.45-10.00	ME 163	LS 170	MP 145	QE 302	OM 180
10.00-10.15	ME 062	LS 196	MP 136	QE 304	OM 096
10.15-10.45	Break				
10.45-11.00	ME 166	LS 131	MP 092	QE 133	OM 207
11.00-11.15	ME 086	LS 300	MP 120	QE 093	OM 122
11.15-11.30	ME 107	LS 301	MP 199	QE 103	OM 049
11.30-11.45	ME 058	LS 042	MP 124	QE 115	OM 051
11.45-12.00	ME 139	WE 054	MP 016	QE 030	OM 053
12.00-13.00	พักรับประทานอาหารกลางวัน				
13.00-13.15	ME 105	WE 211	MP 044	QE 073	OM 063
13.15-13.30	ME 129	WE 306	MP 074	QE 184	OM 064
13.30-13.45	ME 087	WE 303	MP 088	QE 080	OM 162
13.45-14.00	ME 106	WE 305	MP 012	RT 079	OM 192
14.15-14.30	ME 104	WE 150	MP 156	RT 187	OM 100
14.30-14.45	Break				
14.45-15.00	ME 142	WE 116	MP 171	ME 168	OM 101
15.00-15.15	ME 143	WE 069	MP 172	ME 169	OM 113
15.15-15.30	ME 190	WE 065	MP 173	ME 152	OM 022
15.30-15.45	ME 094	WE 208	MP 130	ME 191	OM 161
15.45-16.00	ME 081	WE 011	MP 043	ME 167	OM 004
16.00-16.15	ME 056	WE 209	MP 118	WE 185	GS 023
16.15-16.30	ME 047	WE 210	WE 308	WE 307	WE 215
16.30-16.45				WE 309	

รหัสบทความ	ชื่อบทความ	ชื่อผู้ส่งบทความ	หน้า
ME 106	การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการอบต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของฟิล์มเคลือบ H-DLC, TISiXN และ AITIN	อนุลักษณ์ จันทรียอย ณัฐนันท์ มูลสระคู่	780
ME 107	การศึกษาอิทธิพลของธาตุซิลิคอนที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของฟิล์มเคลือบคาร์บอนคล้ายเพชรที่ถูกลบภายใต้อุณหภูมิสูง	นรินทร์ สุนทรพันธ์ กฤตพันธ์ จันทรี่เชิดชู วราวุธ ฤทธิแพทย์ ณัฐนันท์ มูลสระคู่	785
ME 129	แผ่นอัดเชิงประกอบจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและเส้นใยเพ็กสำหรับงานตกแต่งภายใน	สุปราณี เสือดาว สุนนมาลย์ เนียมกลาง	791
ME 139	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาของเปลือกหอยแครงและแคลเซียมคาร์บอเนตในการชุบแข็งมีดตัดอ้อยด้วยกระบวนการแพ็คเกจบูโรซิง	สุภัทรวีทย์ ศรีนอก ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ สมบัติ น้อยมิ่ง รสรินทร์ ดือขุนทด	796
ME 142	การพัฒนาพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิด เจลลาติน และเซลลูลอส สำหรับเป็นฟิล์มที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม	เกวลี นิลกำแหง อนันท์ มิมนต์ สุนนมาลย์ เนียมกลาง	804
ME 143	การพัฒนาวัสดุรีไซเคิลจากยางรีเคลมสำหรับเป็นตัวสะสมความร้อนในระบบทำความร้อนแสงอาทิตย์	อภิสิทธิ์ บาลเพียร รัชฎร ยาสุข สุนนมาลย์ เนียมกลาง สถาพร ทองวิค	810
ME 152	การปรับปรุงสมบัติของพอลิสไตรีนโดยใช้ไซลอะฟ่งเป็นสารเติมแต่ง	อาธิติ ผลเจริญ กุลวดี สังข์สินิท	816
ME 163	การชุบแข็งที่ผิวเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำโดยใช้เปลือกหอยแครงและเปลือกไข่ไก่เป็นสารเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการแพ็คเกจบูโรซิง	ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ สมบัติ น้อยมิ่ง สุภัทรวีทย์ ศรีนอก รสรินทร์ ดือขุนทด วรรณษา หอมจบก ชัยวัฒน์ พีรทัตสุวรรณ	822
ME 166	อิทธิพลของแรงตึงผิวและความหนืดของผิวสัมผัสที่มีต่อลักษณะการสึกหรอแบบขูดขีดของพอลิเอทิลีนชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูง	ณรงค์ฤทธิ์ สนใจธรรม นพณัช พวงมาลี	828



การปรับปรุงสมบัติของพอลิสไตรีนโดยใช้ไขละหุ่งเป็นสารเติมแต่ง Modification of Polystyrene by Compounding with Castor wax as an Additive

อาจิตติ ผลเจริญ กุลวดี สังข์สนิท*

ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คลองหก อ.
ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทร. 02-5493480 โทรสาร. 02-5494383

E-mail: kullawadee.s@en.rmutt.ac.th*

Atiti Polcharoen Kullawadee Sungsanit*

Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Klong , Thanyaburi , Pathumthani , 12110
Tel. 02-5493480 , Fax. 02-5494383
E-mail: kullawadee.s@en.rmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ไขละหุ่งเพื่อเป็นสารเติมแต่งสำหรับพลาสติกชนิดพอลิสไตรีน โดยทำการคอมปาวด์วัสดุทั้งสองชนิดแบบหลอมผสมด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง ที่อัตราส่วนของไขละหุ่ง คือ 0 , 5, 10, 15 และ 20 ส่วนต่อร้อยส่วนโดยน้ำหนัก(phr) จากการศึกษา พบว่า อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว(T_g) ของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่างพอลิสไตรีนและไขละหุ่ง มีค่าลดลงถึง 20 องศาเซลเซียส เมื่อผสมไขละหุ่งในปริมาณสูงขึ้น และยังสอดคล้องกับค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว(T_g^{DMA}) ซึ่งแสดงว่าไขละหุ่งสามารถเข้าไปแทรกตัวอยู่ในบริเวณช่องว่างระหว่างสายโซ่ของพอลิสไตรีนได้ นอกจากนี้ ยังส่งผลให้ค่าการต้านทานแรงกระแทกเพิ่มสูงขึ้นเมื่อผสมไขละหุ่งในอัตราส่วน 5 ส่วนต่อร้อยโดยน้ำหนัก ส่วนค่าการต้านทานการโก่งงอและค่าโมดูลัสการโก่งงอ นั้นก็มีการมีค่าสูงขึ้นเมื่อเติมไขละหุ่งที่ 5 ส่วนต่อร้อยโดยน้ำหนัก เช่นกัน ดังนั้น แสดงให้เห็นว่าไขละหุ่งซึ่งเป็นสารที่ได้มาจากธรรมชาติสามารถนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งสำหรับวัสดุพลาสติกได้

คำหลัก พอลิสไตรีน ไขละหุ่ง คอมปาวด์

Abstract

This research was conducted to investigate the possibility in using of castor wax as an additive for Polystyrene by melt blended with two rolls mill machine. The compounds were mixed of castor wax in ratio of 0, 5, 10, 15 and 20 phr (part per hundred ratio resin) respectively. A range of characterization techniques including transition temperature, impact resistance and flexural strength were studied. The results showed that the transition temperatures from both Differential Scanning Calorimetry (T_g^{DSC}) and Dynamic Mechanical Analysis (T_g^{DMA}) techniques are obviously decreased with increasing of castor wax contents. This was attributed to the enhanced segmental motion of the Polystyrene molecular chains by addition of castor wax. Moreover, impact strength of un-notched specimens was improved with 5 phr of castor wax and the flexural strength has also increase as well. To sum up, castor wax as a bio-based material has exhibited possibly to be used as an additive for plastics properties modification.

Keywords: polystyrene castor wax compound



1. บทนำ

พอลิสไตรีน (Polystyrene) เป็นหนึ่งในพอลิโอลิฟินที่ถูกใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากพอลิสไตรีนสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น กล่องโฟมใส่อาหาร อุปกรณ์เครื่องเขียน ของเด็กเล่น และชิ้นส่วนยานยนต์ เป็นต้น โดยทั่วไปพอลิสไตรีนมีลักษณะการจัดเรียงตัวแบบอสัณฐาน และมีสมบัติที่เด่นคือ ความแข็งแรงสูง ทนต่อกรดและเบส โปร่งแสง อีกทั้งยังสามารถขึ้นรูปได้ง่าย แต่พอลิสไตรีนยังมีข้อด้อยหลายประการ เช่น เปราะแตกหักง่าย และทนต่อความร้อนได้ต่ำ จึงได้มีการปรับปรุงสมบัติของพอลิสไตรีนในรูปแบบต่างๆ เช่น โดยการสังเคราะห์ร่วมกับพอลิเมอร์ตัวอื่นๆ ที่เรียกว่า สไตรีนโคพอลิเมอร์ หรือการใช้สารเติมแต่งประเภทสารเพิ่มสภาพพลาสติก (Plasticizer) [1-3] ซึ่งสารเติมแต่งเหล่านี้ทำมาจากสารเคมี จึงทำให้เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม

ปัจจุบัน ถูกแบ่งเกรดการใช้งานออกเป็น 2 เกรดหลักๆ คือ พอลิสไตรีนชนิดธรรมดา (General Purpose Polystyrene, GPPS) จะแข็งแต่เปราะ แต่ยังคงรักษาสมบัติทางแสง เมื่อเปรียบเทียบกับพลาสติกชนิดทั่วไปอย่าง โพลีเอทิลีน (Polyethylene), (PE) หรือ โพลีโพรพิลีน (Polypropylene), (PP) [4] ส่วนพอลิสไตรีนชนิดพิเศษ เช่น ชนิดทนแรงกระแทก (High Impact Polystyrene, HIPS) และโคพอลิเมอร์อื่นของพอลิสไตรีน จะมีความเห็นแย้งว่าแต่ละชนิดจะขาดสมบัติด้านความโปร่งแสง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการปรับปรุงสมบัติของพอลิสไตรีนด้วยไขละหุ่งที่เป็นสารเติมแต่งจากธรรมชาติ

2. วัสดุและวิธีการทดลอง

2.1 วัตถุประสงค์และการผสม

พอลิสไตรีน เกรด General Purpose Polystyrene, GPPS รหัส GP150 จากบริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) และไขละหุ่ง (Castor wax จากบริษัทไทยคาสเตอร์ออยส์ จำกัด) ผสมกันตามอัตราส่วนดัง ตารางที่ 1 ตารางที่ 1 แสดงอัตราส่วนผสมพลาสติกคอมปาวด์ของ PS และ Castor Wax

PS (phr)	Castor Wax (phr)
100	0
100	5
100	10
100	15
100	20

การทดลองนี้จึงจำกัดการผสมไขละหุ่งที่ 20 phr เพราะเมื่อเพิ่มอัตราส่วนไขละหุ่งที่เพิ่มมากขึ้นทำให้การคอมปาวด์ไขละหุ่งใน PS ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งเป็นไปได้ยาก เมื่อไขละหุ่งโดนความร้อนไขละหุ่งจะเป็นของเหลวและทำให้ไหลออกจากลูกกลิ้งร้อนในปริมาณมากทำให้การคอมปาวด์ควบคุมอัตราส่วนเป็นไปได้ยาก จึงจำกัดอัตราส่วนผสมอยู่ที่ 20 phr เท่านั้น

การเตรียมพลาสติกคอมปาวด์ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two Rolls Mill) ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส แล้วนำพลาสติกคอมปาวด์ที่ได้ไปเตรียมชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ใช้แรงดันอัดขึ้นรูปที่ 150 kg/cm² คงที่ทุกอัตราส่วน

2.2 การเตรียมพลาสติกคอมปาวด์

ซึ่งน้ำหนักของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง PS และ ไขละหุ่งที่อัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 1 ทำการหลอมผสมพลาสติกคอมปาวด์ที่อัตราส่วนต่างๆ ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two Rolls Mill) ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส จากนั้นนำพลาสติกคอมปาวด์ไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding) จากนั้นนำไปเตรียมเป็นชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบ โดยการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) ทดสอบสมบัติเชิงกล การวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงไดนามิก Dynamic Mechanical Analysis (DMA) ทดสอบทางกายภาพ การวิเคราะห์พฤติกรรมกรแตกหักด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscopy (SEM)

2.3 สมบัติทางความร้อน

ทำการทดสอบสมบัติทางความร้อนของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง PS และ ไขละหุ่ง ด้วยเทคนิคดีเฟอริเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี [5] โดยเตรียมตัวอย่างทดสอบประมาณ 5-15 mg จากนั้นนำตัวอย่างที่เตรียมใส่ลงในภาชนะอลูมิเนียม (Pan) แล้วนำไปอัดปิดฝา ตั้งค่าอุณหภูมิการทดสอบที่ 30 - 180 °C อัตราเพิ่มของอุณหภูมิ 10°C/min พลังงานที่วัดออกมาจะเป็น mW



2.4 สมบัติเชิงกล

ทำการทดสอบการต้านทานการโก่งงอ (Flexural Strength) ตามมาตรฐาน ASTM D 790 โดยขึ้นงานทดสอบมีความหนา 3 mm กว้าง 25 mm ยาว 80 mm โดยการทดสอบเป็นแบบกด 3 จุดที่ความเร็วของหัวกดขึ้นงาน 1.3 mm/min ความยาวของ support span 80 mm

ทำการทดสอบการทนแรงกระแทก (Impact Strength) ตามมาตรฐาน ASTM D 256 โดยขึ้นทดสอบมีความหนา 3 mm ความกว้าง 12.7 mm ความยาว 63.5 mm โดยไม่ต้องบาก โดยใช้ค้อน 2.0 J ตีขึ้นทดสอบ จับยึดไว้โดย clamp ในแนวตั้งและถูกตีด้วยค้อนน้ำหนักตามแรงเหวี่ยง ณ ตำแหน่งระหว่างจุดที่จับขึ้นทดสอบ [6]

2.5 การวิเคราะห์พฤติกรรมและการแตกหักด้วยเครื่อง

จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การวิเคราะห์พฤติกรรมและการแตกหักด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy) (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6510 โดยนำชิ้นงานจากการทดสอบการทนแรงกระแทก ทำการเคลือบทองบริเวณผิวที่แตกหักก่อนจะทำการศึกษาลักษณะพื้นผิวการแตกหักของตัวอย่าง โดยใช้กำลังไฟที่ 15 Kv โดยใช้กำลังขยาย 100 , 1000 เท่า

2.6 การวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงไดนามิก (DMA)

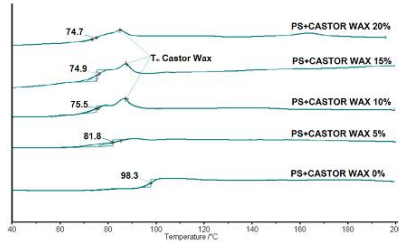
การวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงไดนามิก Dynamic Mechanical Analysis (DMA) ยี่ห้อ Perkinelmer รุ่น DMA 8000 โดยเตรียมชิ้นงานทดสอบมีความหนา 3 mm ความกว้าง 10 mm ความยาว 25 mm ทำการทดสอบที่อุณหภูมิระหว่าง 30 – 150 องศาเซลเซียส โดยใช้โหมดการทดสอบแบบ Dual Cantilever Bending

3. ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน

ตารางที่ 2 สมบัติทางความร้อนของพลาสติกคอมพาวด์ระหว่าง PS : ไชละหู่ ที่อัตราส่วนต่างๆด้วยเทคนิค DSC

PS+Castor Wax (phr)	Tg (°C)
0	98.3
5	81.8
10	75.5
15	74.9
20	74.7



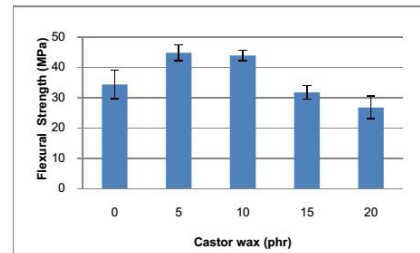
รูปที่ 1 เทอร์โมแกรมแสดงสมบัติทางความร้อนของพลาสติกคอมพาวด์ระหว่าง PS : Castor Wax

จากตารางที่ 1 และรูปที่ 2 แสดงสมบัติทางความร้อนของพลาสติกคอมพาวด์ระหว่าง PS กับ ไชละหู่ จะเห็นได้ว่าค่าการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว มีค่าอยู่ที่ช่วง 98.3 – 74.7 °C ซึ่งค่าการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วนั้นมีค่าลดลงเมื่อเติมไชละหู่ลงไปผสมใน PS จากการกราฟค่า T_g ของ PS อยู่ที่ 98.3 °C เมื่อผสมไชละหู่ลงใน PS ที่ปริมาณ 5 phr พบว่าค่า T_g 81.8 °C ซึ่งมีค่าลดลงจากนั้นเมื่อผสมไชละหู่ลงใน PS ที่ปริมาณ 10 15 และ 20 phr พบว่าค่า T_g มีค่าประมาณ 75 °C และยังคงสังเกตเห็นว่ามีฟิสิกส์ออกมาในตำแหน่งเดียวกันซึ่งเป็นฟิสิกส์ของอุณหภูมิหลอมเหลวของไชละหู่ (T_m) แสดงให้เห็นว่าไชละหู่เข้าไปแทรกตัวอยู่ช่องว่างระหว่างสายโซ่ของ PS จึงทำให้สายโซ่ของ PS เคลื่อนได้ง่ายขึ้นที่อุณหภูมิเดียวกันกับ PS ที่ไม่ได้ผสมไชละหู่ [7]

3.2 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

3.2.1 ผลการทดสอบการต้านทานการโก่งงอ

Flexural Strength



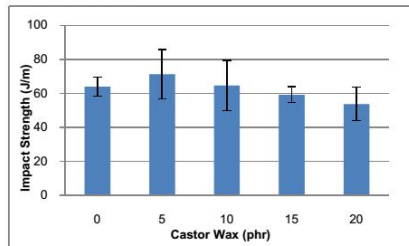
รูปที่ 2 ค่าการทดสอบการต้านทานการโก่งงอ (Flexural Strength) ของพลาสติกคอมพาวด์ระหว่าง PS : Castor Wax

จากรูปที่ 2 กราฟแสดงการต้านทานการโก่งงอ



พบว่าค่าการต้านทานการโค้งงอมีค่า 27 – 45 MPa ซึ่งการต้านทานการโค้งงอสูงสุดอยู่ที่ค่าประมาณ 45 MPa ที่ปริมาณไขละหุง 5 phr แต่เมื่อเพิ่มปริมาณไขละหุงที่ 10 15 และ 20 พบว่าการต้านทานการโค้งงอลดลง ตามลำดับ ซึ่งพิจารณาจากผลการวิเคราะห์อุณหภูมิ T_g ของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง PS กับ ไขละหุง พบที่ T_m ของไขละหุงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อผสมไขละหุงที่ 10 15 และ 20 phr แสดงให้เห็นว่าการใช้ไขละหุงมากกว่า 5 phr ทำให้เกิดการแยกเฟสระหว่าง PS กับ ไขละหุง ทำให้ค่าความแข็งแรงลดลง

3.2.2 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก Impact Strength

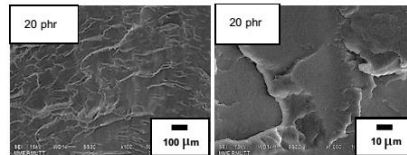
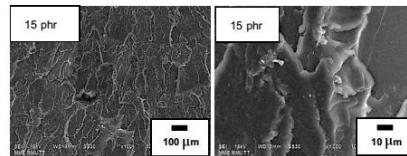
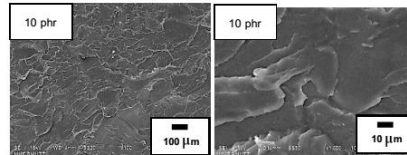
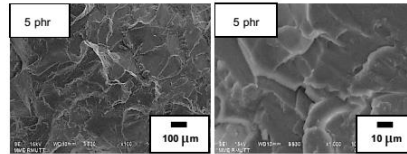
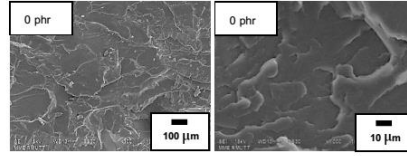


รูปที่ 3 ค่าการทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก (Izod impact strength) ของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง PS : Castor Wax

จากรูปที่ 3 กราฟแสดงค่าการต้านทานแรงกระแทกพบว่าค่าการต้านทานแรงกระแทก มีค่าประมาณ 45 – 70 J/m ซึ่งค่าการต้านทานแรงกระแทกที่มีค่าสูงสุด อยู่ที่ประมาณ 70 J/m ที่ปริมาณการผสมไขละหุงใน PS ที่ 5 phr พบว่าค่าการทนแรงกระแทกเมื่อเทียบกับ PS 0 ค่าการทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นไม่มาก แต่เมื่อเพิ่มไขละหุงที่ปริมาณ 10 15 และ 20 phr พบว่าค่าการทนแรงกระแทก ลดลงตามลำดับ ซึ่งจากการดูลักษณะสัณฐานวิทยาของพลาสติกคอมปาวด์ผสมระหว่าง PS กับ ไขละหุงแสดงดังรูปที่ 4 พบว่ารอยแตกของปริมาณไขละหุงที่ 5 phr มีรูปแบบการหักแบบฉิวขรุขระที่เห็นได้ชัดเจนกว่าอัตราส่วนของไขละหุง 10 15 และ 20 ซึ่งพื้นที่ผิวส่วนใหญ่เป็นรอยแตกแบบราบเรียบและมีรอยแตกหักแบบขรุขระเล็กน้อยซึ่งสอดคล้องกับผลการต้านทานแรงกระแทก

กำลังขยาย100เท่า

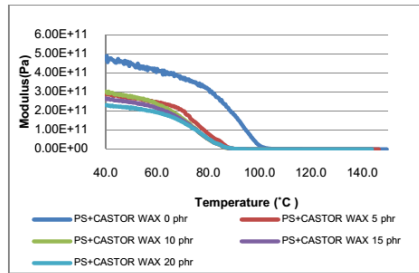
กำลังขยาย1000เท่า



รูปที่ 4 ลักษณะสัณฐานวิทยาของพลาสติกคอมปาวด์ผสมระหว่าง PS:Castor Wax ที่กำลังขยาย100 และ1000 เท่า

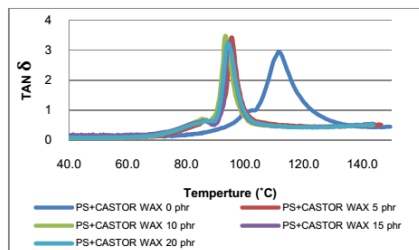


3.3 ผลการทดสอบวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงไดนามิก DMA



รูปที่ 5 กราฟแสดงค่าโมดูลัสสะสมต่ออุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น ของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง PS : Castor Wax

จากรูปที่ 5 แสดงค่าโมดูลัสสะสม (Storage Modulus) ต่ออุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง PS กับ ไชละหุ้ง พบว่าเมื่อผสม ไชละหุ้ง ลงไปใน PS ในอัตราส่วน 5 10 15 และ 20 ค่าโมดูลัสสะสมมีค่าลดลงตามลำดับ ซึ่งแสดงว่า ไชละหุ้ง ทำให้พลาสติกคอมปาวด์ สามารถเสียรูปได้ง่ายขึ้นเมื่อได้รับความร้อนเพิ่มขึ้น เพราะค่าโมดูลัสของพลาสติกคอมปาวด์จะมีค่าลดลงตามไปเนื่องจาก ไชละหุ้ง สามารถเข้าไปแทรกตัวอยู่ช่องระหว่างสายโซ่ แต่ ไชละหุ้ง ที่อุณหภูมิห้องจะมีเฟสเป็นของแข็งจึงไม่สามารถทำหน้าที่เป็นพลาสติกไฮเซออร์ได้ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่สูงขึ้น ไชละหุ้ง เกิดการเปลี่ยนสถานะกลายเป็นของเหลวจึงทำให้ ไชละหุ้ง ที่อยู่ในช่องว่างของสายโซ่กลายเป็นสารหล่อลื่นจึงทำให้สายโซ่เกิดการขยับตัวได้ง่ายขึ้นจึงทำให้เสียรูปได้ง่ายขึ้นค่าโมดูลัสจึงลดลง



รูปที่ 6 กราฟแสดงค่าแทนเจนต์ต้าของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง PS : Castor Wax

จากรูปที่ 6 กราฟแสดงค่า TAN δ ของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง PS กับ ไชละหุ้ง พบว่าค่า TAN δ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผสม ไชละหุ้ง ใน PS แสดงว่ามีความเป็นอีลาสติกมากกว่าเป็นเพราะโครงสร้างทางสายโซ่ของ PS มี ไชละหุ้ง เข้าไปแทรกอยู่ระหว่างช่องว่างของสายโซ่ ทำให้สายโซ่อยู่ห่างกันและเมื่อให้อุณหภูมิเข้าไป ไชละหุ้ง ทำหน้าที่หล่อลื่นสายโซ่ ทำให้สายโซ่สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายจึงทำให้ความเป็นอีลาสติกมากกว่าสูตร 0 phr ซึ่งมีค่า TAN δ ที่ต่ำกว่า แสดงว่าสูตร 0 phr มีการเกี่ยวพันของสายโซ่มากและมีคามชิดกันมาก จึงทำให้สายโซ่เกิดการเคลื่อนที่ได้ยากทำให้มีความเป็นอีลาสติกน้อย นอกจากนั้นค่า TAN δ ยังสามารถบอกอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g^{DMA}) ของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง PS กับ ไชละหุ้ง โดยค่า T_g ของอัตราส่วนที่ 5 10 15 และ 20 จะอยู่ประมาณที่ 90°C และค่า T_g ของ PS 0 จะอยู่ประมาณที่ 115 °C [8-9]

4. สรุป

จากการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของพอลิโอสทินโดยใช้ ไชละหุ้ง เป็นสารเติมแต่ง ด้วยอัตราส่วนของ ไชละหุ้ง 0 , 5, 10, 15 และ 20 ส่วนต่อร้อยส่วนโดยน้ำหนัก (phr) อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วลดลง การทนต่อแรงกระแทก และการต้านทานการโก่งงอ มีค่าเพิ่มขึ้นที่ปริมาณ ไชละหุ้ง ที่ 5 phr เมื่อผสม ไชละหุ้ง ปริมาณที่ 10 15 และ 20 พบว่าค่าการทนแรงกระแทก และค่าการต้านทานการโก่งงอลดลง ซึ่งสอดคล้องกับค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่ลดลง (T_g^{DMA}) แสดงว่า ไชละหุ้ง ที่แทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างของสายโซ่นั้นทำหน้าที่เป็นสารเติมแต่งชนิด สารหล่อลื่นภายใน (Internal Lubricant) จากงานวิจัยนี้ ส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดคืออัตราส่วนที่ 5 phr

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ(วช.) รหัสโครงการ 166327 ปี 2558 และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



เอกสารอ้างอิง

- [1] Caspar, A., et al., J. Chem. Educ., 1986.63.
- [2] Slough, G.A., J. Chem. Educ. , 1995. 72: p. 1031.
- [3] Scheirs, J.a.P., D. B. , *Modern styrenic polymers: polystyrenes and styrenic copolymers*. 2003, Chichester,UK: John Wiley & Sons.
- [4] Dorgan, J.R., H. Lehermeier, and M. Mang, *Thermal and Rheological Properties of Commercial-Grade Poly(Lactic Acid)*. Journal of Polymers and the Environment, 2000. 8(1): p. 1-9.
- [5] บัณฑิตศึกษา ปีที่ 13 ฉบับที่ 1. 2545. "การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์." กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยรามคำแหง
- [6] *Plastics Materials*" edited by J.A.Brydson, Butterworths, Great Britain, 1989
- [7] Markus Klinger, Lars Poulsen Tolbod, Peter R. Ogilby . 2009. "Influence of a Novel Castor-Oil-Derived Additive on the Mechanical Properties and Oxygen Diffusivity of Polystyrene" Department of Chemistry, Aarhus University.
- [8] ชลธิชา วโรกร^{1*} และ อนงค์นาฏ สมหวังชนโรจน์² "วิธีเพิ่มระยะเวลาทำงานของกาวอีพอกซี." กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [9] ปิยะภรณ์ นิลหุ้ย¹ศิริชัย ก้านกิ่ง¹ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ² และ เอกชัย วิมลมาลา³. 2555 "การศึกษาเชิงกลพลวัตและพฤติกรรมการคืนกลับตัวของยางเอ็นบีอาร์ที่มีผงเขม่าดำ เป็นสารเสริมแรงร่วมกับสารตัวเติมกลุ่มซิลิกาสำหรับการใช้งานในระบบไฮดรอลิก" กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี



Minitab



Industrial Engineering Network Conference 2015



เอกสารรวมบทความวิจัยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและการจัดการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์

เลขที่ 6 ถ.ราชมรรคดาใน ต.พระปฐมเจดีย์ อ.เมือง จ.นครปฐม 73000

โทร 0-3421-9362 Fax. 0-3421-9362 Email: ienetwork2015su@gmail.com

Website: <https://sites.google.com/va/silpakorn.edu/ienet2015/>, www.ienet-th.org/journals/, www.ienet-th.org



การประชุมวิชาการช่างานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2558

IE Network Conference 2015

ขอขอบเกียรติบัตรนี้ไว้เพื่อแสดงว่า

อาทิตย์ ผลเจริญ, กุลวดี สังข์สนิท

ได้เข้าร่วมการแสดงผลงานวิชาการในหัวข้อ

การปรับปรุงสมบัติของพอลิโอสไตร์นโดยใช้โลหะหุงเป็นสารเติมแต่ง
ระหว่างวันที่ 6-7 สิงหาคม 2558 ณ โรงแรม ดี เอ็มแอร์ลด์ กรุงเทพมหานคร

Rk

(รองศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร)
ประธานช่างานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2558

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	อาฉัตรี ผลเจริญ
วัน เดือน ปีเกิด	16 มกราคม 2534
ที่อยู่	476/44 ซอยลาดพร้าว 47 ถนนลาดพร้าว แขวงสะพานสอง เขตวังทองหลาง จังหวัด กรุงเทพมหานคร 10310
การศึกษา	ปริญญาตรี สาขา วิศวกรรมพลาสติก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์การทำงาน	เป็นผู้ช่วยนักวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พ.ศ. 2557 ถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	085-2185388
อีเมล	icefenderr@gmail.com

