

ผลของรังสีแกมมาและสารเติมแต่งที่มีต่อพอลิเมอร์ผสม  
ของพอลิโอเลฟินและพอลิสไตรีน

EFFECTS OF GAMMA RAY AND ADDITIVES ON HETEROGENEOUS  
BLENDS OF POLYOLEFINS AND POLYSTYRENE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเคมีประยุกต์  
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2541

ISBN 974-622-331-3

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....31665  
วัน, เดือน, ปี.....21 ส.ค. 2541

สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECTS OF GAMMA RAY AND ADDITIVES ON HETEROGENEOUS  
BLENDS OF POLYOLEFINS AND POLYSTYRENE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED CHEMISTRY  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

1998

ISBN 974-622-331-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไปว่ากรณีใดที่เห็น สิ่งนี้ช่วยแก้ไขข้อบกพร่องและต้องการแจ้งถึงเจ้าของเอกสารหรือผู้ที่มีอำนาจแก้ไข



**COPYRIGHT 1998**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของรังสีแกมมาและสารเติมแต่งที่มีต่อพอลิเมอร์ผสมของพอลิโอลิฟินและพอลิสไตรีน
นักศึกษา	นางสาวสุดกมล สุวรรณพะโยม รหัสประจำตัว 38064104
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีประยุกต์
พ.ศ.	2541
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ พอลิพรอพิลีน กับพอลิสไตรีน โดยศึกษาปรับปรุงการรวมเป็นเนื้อเดียวกันด้วยการเติมสารช่วยผสมสไตรีน-บิวทาไดอีน-สไตรีน (SBS) เอทิลีนไวนิลแอลซีเตด (EVA) และการฉายรังสีแกมมา ที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางสัณฐานวิทยา รวมทั้งการศึกษาผลของสารตัวเติม  $CaCO_3$  ผลการศึกษาพบว่า การเติมสารช่วยผสม SBS EVA ให้เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ความทนทานต่อแรงกระแทกดีขึ้นตามปริมาณสารช่วยผสม โดยเฉพาะ SBS เมื่อเทียบกับไม่เติมสารช่วยผสม และการฉายรังสีแกมมาในช่วงความเข้มรังสี 40-180 kGy ให้ความทนแรงดึง และมอดุลัสดีขึ้นเมื่อเทียบกับไม่ฉายรังสีแกมมา การศึกษาโดยหาเปอร์เซ็นต์เจลยืนยันว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ พอลิพรอพิลีน และสารช่วยผสมเกิดการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นตามความเข้มรังสี โดยที่พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเกิดการเชื่อมโยงได้มากกว่าสารช่วยผสม และพอลิพรอพิลีน ตามลำดับ ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนโดย DSC พบว่าในระบบไม่มีสารช่วยผสม  $T_m$ ,  $T_c$ ,  $\Delta H_m$  และ  $\Delta H_c$  ลดลงตามปริมาณ PS ที่เพิ่มขึ้น และในระบบมีสารช่วยผสม  $T_m$ ,  $T_c$  เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย  $\Delta H_m$ ,  $\Delta H_c$  ลดลงตามปริมาณสารช่วยผสมที่เพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย SEM พบว่าการเติมสารช่วยผสมทำให้วัฏภาคกระจายตัวมีขนาดเล็กลง และมีการกระจายดีขึ้น ขณะที่การฉายรังสีไม่ปรากฏการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่เด่นชัด การศึกษาผลของการเติม  $CaCO_3$  พบว่าในระบบไม่มีสารช่วยผสม ที่ปริมาณ  $CaCO_3$  สูงกว่า 12% โดยน้ำหนักสมบัติเชิงกลลดลงตามปริมาณ  $CaCO_3$  ที่เพิ่มขึ้น และในระบบมีสารช่วยผสม SBS  $CaCO_3$  จะทำให้บทบาทของ SBS ต่อสมบัติเชิงกลในพอลิเมอร์ผสมลดลงตามปริมาณ SBS

Thesis Title	EFFECTS OF GAMMA RAY AND ADDITIVES ON HETEROGENEOUS BLENDS OF POLYOLEFINS AND POLYSTYRENE
Student	Sudkamon Suwanpayom Student ID. 38064104
Degree	Master of Science
Programme	Applied Chemistry
Year	1998
Thesis Advisor	Assist.Prof.Dr.Malinee Chaisupakitsin

## ABSTRACT

The immiscible blends of low density polyethylene, polypropylene and polystyrene were investigated. In this study, the immiscibility of polymer blends was improved by the addition of compatibilizers, i.e., styrene-butadiene-styrene (SBS) and ethylene vinyl acetate (EVA). The effects of gamma-ray irradiation and  $\text{CaCO}_3$  on morphology, thermal and mechanical properties were investigated. The results showed that the compatibilizers improved both elongation at break and impact strength of the blends, particularly in the system containing SBS. While, radiation in the dose range of 40-180 kGy improved both tensile strength and modulus of the polymer blends. Gel content indicated that degree of crosslinking in LDPE was higher than those in compatibilizers and PP.

The results of thermal properties from DSC showed that  $T_m$ ,  $T_c$ ,  $\Delta H_m$  and  $\Delta H_c$  of the system without compatibilizers decreased with increasing of PS content. The system with compatibilizers displayed the small change of  $T_m$  and  $T_c$  while  $\Delta H_m$  and  $\Delta H_c$  decreased with increasing of compatibilizers. SEM analysis illustrated that the addition of compatibilizers lead to a finer and more dispersed phase morphology, whereas the radiation technique did not effects morphology .

In the case of the system without compatibilizers,  $\text{CaCO}_3$  content more than 12% by weight reduced mechanical properties of the blends. While, the mechanical properties of the system with SBS plus  $\text{CaCO}_3$  decreased with the increasing of SBS content.

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เป็นผลมาจากได้รับคำปรึกษา และการชี้แนะตลอดจนการดูแลเอาใจใส่ แก่ปัญหาในระหว่างการทดลองจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มาลินี ชัยศุภกิจสินธ์ อาจารย์ที่ปรึกษางานวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.ต้องจิตต์ คิดชอบ ดร.อิทธิพล แจ่มชัด และคุณมานิต ช้อนสุข ที่กรุณาให้คำแนะนำ มุมมองในการแก้ปัญหา พร้อมทั้งเสียสละเวลาอันมีค่ายิ่งในการเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ ที่ช่วยเหลือ ให้คำแนะนำในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือ

ขอกราบขอบพระคุณ สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้เอื้อเฟื้อเครื่องมือ และสถานที่ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่เคารพรักยิ่ง ตลอดจนพี่ ๆ น้อง ๆ และเพื่อนสนิท มิตรสหายทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจที่ดียิ่งตลอดการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คุณค่า และประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สุดกมล สุวรรณพะโยม

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	6
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	6
<b>บทที่ 2 วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>7</b>
2.1 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.2 พอลิเมอร์เบล็นและพอลิเมอร์อัลลอยด์.....	13
2.3 วิธีการเตรียมพอลิเมอร์ผสม.....	15
2.3.1 การผสมทางเชิงกล.....	15
2.3.2 การผสมโดยใช้ตัวทำละลาย.....	15
2.4 ประเภทของพอลิเมอร์ผสม.....	15
2.4.1 พอลิเมอร์ผสมที่เป็นเนื้อเดียวกัน.....	15
2.4.2 พอลิเมอร์ผสมที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน.....	16
2.4.3 พอลิเมอร์ผสมที่เป็นเนื้อเดียวกันบางส่วน.....	17
2.5 การรวมเข้ากันได้ทางอุณหพลศาสตร์.....	17
2.6 การรวมเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมทางเชิงกลและทางเคมี.....	21
2.6.1 การรวมเข้ากันทางเชิงกล.....	21
2.6.2 การรวมเข้ากันทางเคมี.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ **IV** ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 สารช่วยผสม.....	23
2.7.1 ประเภทของสารช่วยผสม.....	24
2.7.2 น้ำหนักโมเลกุลและรูปร่างของสารช่วยผสม.....	27
2.8 การวัดความสามารถในการผสมเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม.....	28
2.8.1 ปฏิกิริยาการที่เกี่ยวกับแสง.....	29
2.8.2 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว.....	29
2.8.3 เทคนิค นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์และอินฟราเรด สเปกโตรสโกปี.....	31
2.8.4 ไมโครสโกปี.....	32
2.9 เทคนิคการฉายรังสี.....	33
2.9.1 ประเภทของการฉายรังสี.....	33
2.9.2 หน่วยวัดปริมาณรังสี.....	34
2.9.3 ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงเมื่อฉายรังสี.....	35
2.9.4 ผลของรังสีที่มีต่อพอลิเมอร์.....	35
2.9.5 ข้อดีข้อเสียของการฉายรังสี.....	38
2.9.6 ผลของรังสีที่มีต่อพอลิเอทิลีน พอลิพรอพิลีน และพอลิสไตรีน.....	39
2.9.7 การฉายรังสีพอลิเมอร์ผสม.....	41
2.10 สารตัวเติมในพอลิเมอร์ผสม.....	41
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>43</b>
3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	43
3.1.1 พอลิเมอร์หลัก.....	43
3.1.2 สารช่วยผสม.....	44
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้.....	44
3.3 การดำเนินงานวิจัย.....	45
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง.....</b>	<b>49</b>
4.1 สมบัติเชิงกล.....	49
4.2 เปอร์เซ็นต์เจล.....	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 สมบัติทางความร้อน.....	80
4.4 สมบัติทางสัณฐานวิทยา.....	82
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>91</b>
5.1 ระบบพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีสารช่วยผสม.....	91
5.2 ระบบพอลิเมอร์ผสมที่มีสารช่วยผสม.....	92
5.3 ระบบพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีสารช่วยผสมเมื่อผ่านการฉายรังสี.....	93
5.4 ระบบพอลิเมอร์ผสมที่มีสารช่วยผสมเมื่อผ่านการฉายรังสี.....	93
<b>เอกสารอ้างอิง.....</b>	<b>99</b>
<b>ภาคผนวก.....</b>	<b>103</b>
ภาคผนวก ก.....	104
ภาคผนวก ข.....	105
ภาคผนวก ค.....	129
ภาคผนวก ง.....	137
ภาคผนวก จ.....	154
<b>ประวัติผู้เขียน.....</b>	<b>164</b>

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงการปรับปรุงและพัฒนาสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสม.....	4
2.1 แสดงการเลือกใช้สารช่วยผสมกับระบบต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสม.....	24
2.2 แสดงผลของรังสีที่มีต่อพอลิเมอร์ประเภทอีลาสโตเมอร์.....	37
2.3 แสดงผลของรังสีที่มีต่อพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก.....	38
3.1 แสดงสมบัติของพอลิเมอร์หลัก.....	43
3.2 แสดงสมบัติของสารช่วยผสม.....	44
4.1 แสดงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE 50/50 เมื่อไม่มีและมีแคลเซียมคาร์บอเนต 4% และ 12% โดยน้ำหนัก.....	76
ข.1 แสดงเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ความทนแรงดึง มอดุลัส และความทนทานต่อแรงกระทำของพอลิสไตรีนกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ไม่มีและมีสารช่วยผสม...	105
ข.2 แสดงเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ความทนแรงดึง มอดุลัส และความทนทานต่อแรงกระทำของพอลิสไตรีนกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ไม่มีและมีสารช่วยผสม เมื่อมีการฉายรังสีในสภาวะมีอากาศที่ความชื้นต่ำ.....	107
ข.3 แสดงเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ความทนแรงดึง มอดุลัส และความทนทานต่อแรงกระทำของพอลิสไตรีนกับพอลิพรอพิลีนที่ไม่มีและมีสารช่วยผสม เมื่อมีการฉายรังสีในสภาวะมีอากาศที่ความชื้นต่ำ.....	114
ข.4 แสดงเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ความทนแรงดึง มอดุลัส และความทนทานต่อแรงกระทำของพอลิสไตรีนกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ อัตราส่วน 50/50 ที่ไม่มี และมีสารช่วยผสม เมื่อมีการฉายรังสีที่ความชื้นต่างกัน.....	118
ข.5 แสดงเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ความทนแรงดึง มอดุลัส และความทนทานต่อแรงกระทำของพอลิสไตรีนกับพอลิพรอพิลีน อัตราส่วน 50/50 ที่ไม่มีและมีสารช่วยผสม เมื่อมีการฉายรังสีที่ความชื้นต่างกัน.....	122
ข.6 แสดงเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ความทนแรงดึง มอดุลัส และความทนทานต่อแรงกระทำของพอลิสไตรีนกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่อัตราส่วนต่างกัน เมื่อมีการเติมสารช่วยผสม SBS 10% และ 30% และมีการฉายรังสีในสภาวะสุญญากาศที่ความชื้น10kGy.....	124

# สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.7 แสดงเปอร์เซ็นต์การตั้งยัด ณ จุดขาด ความทนแรงดึง มอดุลัส และความทนทานต่อแรง กระแทกของพอลิสไตรีนกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ อัตราส่วน 50/50 ที่ไม่มี และมีสารช่วยผสม เมื่อมีการฉายรังสีในสภาวะสุญญากาศที่ความเข้ม 30 kGy.....	125
ข.8 แสดงเปอร์เซ็นต์การตั้งยัด ณ จุดขาด ความทนแรงดึง มอดุลัส และความทนทานต่อแรง กระแทกของพอลิสไตรีนกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ อัตราส่วน 50/50 เมื่อมี ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตต่างกัน.....	126
ข.9 แสดงเปอร์เซ็นต์การตั้งยัด ณ จุดขาด ความทนแรงดึง มอดุลัส และความทนทานต่อแรง กระแทกของพอลิสไตรีนกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ อัตราส่วน 50/50 เมื่อไม่มี และมีสารช่วยผสม และมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตต่างกัน.....	127
ค.1 แสดงเปอร์เซ็นต์เจลของพอลิสไตรีนกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ทุกอัตราส่วน เมื่อไม่มีและมีสารช่วยผสม เมื่อมีการฉายรังสีในสภาวะมีอากาศที่ความเข้ม 30 kGy.....	129
ค.2 แสดงเปอร์เซ็นต์เจลของพอลิสไตรีนกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ อัตราส่วน 50/50 เมื่อไม่มีและมีสารช่วยผสม เมื่อมีการฉายรังสีในสภาวะมีอากาศที่ความเข้ม ต่างกัน.....	131
ค.3 แสดงเปอร์เซ็นต์เจลของพอลิสไตรีนกับพอลิพรอพิลีน อัตราส่วน 50/50 เมื่อไม่มีและ มีสารช่วยผสม เมื่อมีการฉายรังสีในสภาวะมีอากาศที่ความเข้มต่างกัน.....	135
ง.1 แสดงค่า $T_m$ , $T_g$ , $\Delta H_c$ และ $\Delta H_m$ ที่ได้จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนของ พอลิเมอริ์ผสม.....	137

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงชนิดและปริมาณพลาสติกที่ใช้ในประเทศไทย.....	1
1.2 แสดงแผนผังวิธีการนำเอาพลาสติกกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่.....	2
2.1 แสดงโครงสร้างจุลภาคของพอลิเมอร์เบลิน.....	13
2.2 แสดงความสัมพันธ์ของพอลิเมอร์เบลินและพอลิเมอร์อัลลอยด์.....	14
2.3 แสดงโครงสร้างจุลภาคของการผสมพอลิเมอร์ A และพอลิเมอร์ B.....	16
2.4 แสดงการสร้างสัมพันธ์ของ SP จากสัมพันธ์ของ SS และ PP.....	19
2.5 แสดงปัจจัยที่ช่วยในการรวมเข้ากันได้ที่มีต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม.....	22
2.6 แสดงโครงสร้างจุลภาคของสไตรีน-บิวทาไดอีน-สไตรีน.....	26
2.7 แสดงการแพร่ของสารช่วยผสมที่มีโครงสร้างต่างกัน.....	28
2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วกับองค์ประกอบ ในพอลิเมอร์ผสม.....	30
2.9 แสดงความสามารถในการแยกของเทคนิคต่าง ๆ ที่ใช้ตรวจวัดความเป็นเนื้อเดียวกัน.....	33
2.10 แสดงผลของรังสีที่ทำให้เกิดจุดบกพร่องในโครงสร้างหลักของพอลิเมอร์.....	35
2.11 แสดงการเชื่อมโยงของพอลิบิวทาไดอีน.....	36
2.12 แสดงผลของรังสีที่ทำให้เกิดการตอกกิ่งของมอนอเมอร์ (B) กับพอลิเมอร์ชนิดที่ต่างกัน (A).....	36
2.13 แสดงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิเมอร์.....	37
4.1 แสดงเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ .....	49
4.2 แสดงความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ.....	51
4.3 แสดงมอดูลัสของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ .....	52
4.4 แสดงความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ.....	53
4.5 แสดงเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ เมื่อนำรังสีที่ความเข้ม 10, 20 และ 30 kGy.....	55
4.6 แสดงความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ เมื่อนำรังสี ที่ความเข้ม 10, 20 และ 30 kGy.....	56

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 แสดงมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ เมื่อฉายรังสีที่ความเข้ม 10, 20 และ 30 kGy.....	57
4.8 แสดงความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ เมื่อฉายรังสีที่ความเข้ม 10, 20 และ 30 kGy.....	58
4.9 แสดงเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม PS/PP ที่อัตราส่วนต่าง ๆ เมื่อฉายรังสีที่ความเข้ม 10, 20 และ 30 kGy.....	59
4.10 แสดงความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PS/PP ที่อัตราส่วนต่าง ๆ เมื่อฉายรังสีที่ความเข้ม 10, 20 และ 30 kGy.....	60
4.11 แสดงมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสม PS/PP ที่อัตราส่วนต่าง ๆ เมื่อฉายรังสีที่ความเข้ม 10, 20 และ 30 kGy.....	61
4.12 แสดงความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PS/PP ที่อัตราส่วนต่าง ๆ เมื่อฉายรังสีที่ความเข้ม 10, 20 และ 30 kGy.....	62
4.13 แสดงเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE 50/50 ที่ความเข้มรังสีต่าง ๆ .....	63
4.14 แสดงความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE 50/50 ที่ความเข้มรังสีต่าง ๆ .....	64
4.15 แสดงมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE 50/50 ที่ความเข้มรังสีต่าง ๆ .....	65
4.16 แสดงความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE 50/50 ที่ความเข้มรังสีต่าง ๆ.....	66
4.17 แสดงเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม PS/PP 50/50 ที่ความเข้มรังสีต่าง ๆ .....	67
4.18 แสดงความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PS/PP 50/50 ที่ความเข้มรังสีต่าง ๆ .....	68
4.19 แสดงมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสม PS/PP 50/50 ที่ความเข้มรังสีต่าง ๆ .....	69
4.20 แสดงความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PS/PP 50/50 ที่ความเข้มรังสีต่าง ๆ.....	70
4.21 แสดงความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE เมื่อฉายรังสีในอากาศ และสุญญากาศที่ความเข้ม 10 kGy.....	72
4.22 แสดงเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE 50/50	

เอกสารนี้เมื่อมีการเติม CaCO<sub>3</sub> ในปริมาณต่าง ๆ การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าไม่จำเป็นต้องใช้ประโยชน์จากคาร์บอนดำในการศึกษาครั้งนี้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 แสดงความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE 50/50 เมื่อมีการเติม $\text{CaCO}_3$ ในปริมาณต่าง ๆ .....	73
4.24 แสดงมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE 50/50 เมื่อมีการเติม $\text{CaCO}_3$ ในปริมาณต่าง ๆ .....	74
4.25 แสดงความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE 50/50 เมื่อมีการเติม $\text{CaCO}_3$ ในปริมาณต่าง ๆ .....	74
4.26 แสดงเปอร์เซ็นต์เจลของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ที่ไม่มี และมีสารช่วยผสม เมื่อฉายรังสีในอากาศ ที่ความเข้มรังสีต่าง ๆ .....	77
4.27 แสดงเปอร์เซ็นต์เจลของพอลิเมอร์ผสม PS/PP ที่ไม่มี และมีสารช่วยผสม เมื่อฉายรังสีในอากาศ ที่ความเข้มรังสีต่าง ๆ .....	78
4.28 แสดงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ .....	80
4.29 แสดงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE 50/50 ที่ไม่มี และมีสารช่วยผสม.....	81
4.30 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ.....	82
4.31 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/PP ที่อัตราส่วนต่าง ๆ.....	83
4.32 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ที่อัตราส่วน 50/50 เมื่อไม่มี และมีสารช่วยผสม SBS .....	84
4.33 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ที่อัตราส่วน 50/50 เมื่อไม่มี และมีสารช่วยผสม EVA.....	85
4.34 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/PP ที่อัตราส่วน 50/50 เมื่อไม่มี และมีสารช่วยผสม SBS.....	86
4.35 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ที่อัตราส่วน 50/50 เมื่อฉายรังสีที่ความเข้มต่าง ๆ .....	87
4.36 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/PP ที่อัตราส่วน 50/50 เมื่อฉายรังสีที่ความเข้มต่าง ๆ .....	88
4.37 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE/SBS 50/50/30 เมื่อไม่ฉาย และฉายรังสี 10 kGy.....	89

# สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.38 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE/EVA 50/50/30 เมื่อไม่ฉาย และฉายรังสีที่ 10 kGy.....	89
4.39 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/PP/SBS 50/50/30 เมื่อไม่ฉาย และฉายรังสี.....	90
5.1 แสดงโครงสร้างจุลภาคของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE.....	91
5.2 แสดงโครงสร้างจุลภาคของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ในระบบที่มีสารช่วยผสม SBS และEVA.....	92
ง.1 แสดงสมบัติทางความร้อนของ SBS และ EVA.....	139
ง.2 แสดงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ.....	141
ง.3 แสดงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE/10%SBS ที่อัตราส่วนต่าง ๆ .....	143
ง.4 แสดงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE/20%SBS ที่อัตราส่วนต่าง ๆ .....	145
ง.5 แสดงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE/30%SBS ที่อัตราส่วนต่าง ๆ .....	147
ง.6 แสดงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE/10%EVA ที่อัตราส่วนต่าง ๆ .....	149
ง.7 แสดงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE/20%EVA ที่อัตราส่วนต่าง ๆ .....	151
ง.8 แสดงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE/30%EVA ที่อัตราส่วนต่าง ๆ .....	153
จ.1 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์หลักและสารช่วยผสม.....	154
จ.2 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE/SBS ที่อัตราส่วน 100/0 และ 0/100.....	155
จ.3 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE/SBS ที่อัตราส่วน 70/30 และ 30/70.....	156
จ.4 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE/EVA ที่อัตราส่วน 100/0 และ 0/100.....	157
จ.5 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE/SBS ที่อัตราส่วน 70/30 และ 30/70.....	158
จ.6 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE/SBS ที่อัตราส่วน 70/30 และ 30/70 เมื่อฉายรังสีที่ 10 kGy.....	159
จ.7 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE/SBS ที่อัตราส่วน 70/30 และ 30/70 เมื่อฉายรังสีที่ 30 kGy.....	160

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
จ.8 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE/EVA ที่อัตราส่วน 70/30 และ 30/70 เมื่อฉายรังสีที่ 10 kGy.....	161
จ.9 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE/SBS ที่อัตราส่วน 70/30 และ 30/70 เมื่อฉายรังสีที่ 30 kGy.....	162
จ.10 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/PP/SBS.....	163

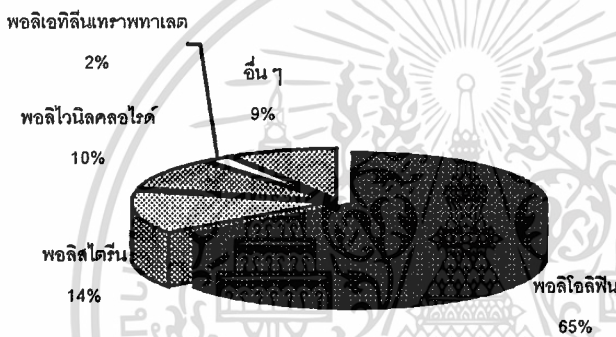


# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยมีการส่งเสริมอุตสาหกรรมปิโตรเคมีอย่างมาก จึงก่อให้เกิดการพัฒนาอุตสาหกรรมทางด้านพลาสติกเพิ่มมากขึ้น พลาสติกที่ถูกนำมาใช้มากได้แก่พลาสติกประเภทพอลิโอเลฟิน [ พอลิเอทิลีน พอลิพรอพิลีน ] 65 % และพอลิสไตรีน 14 % ดังแสดงในรูปที่ 1.1

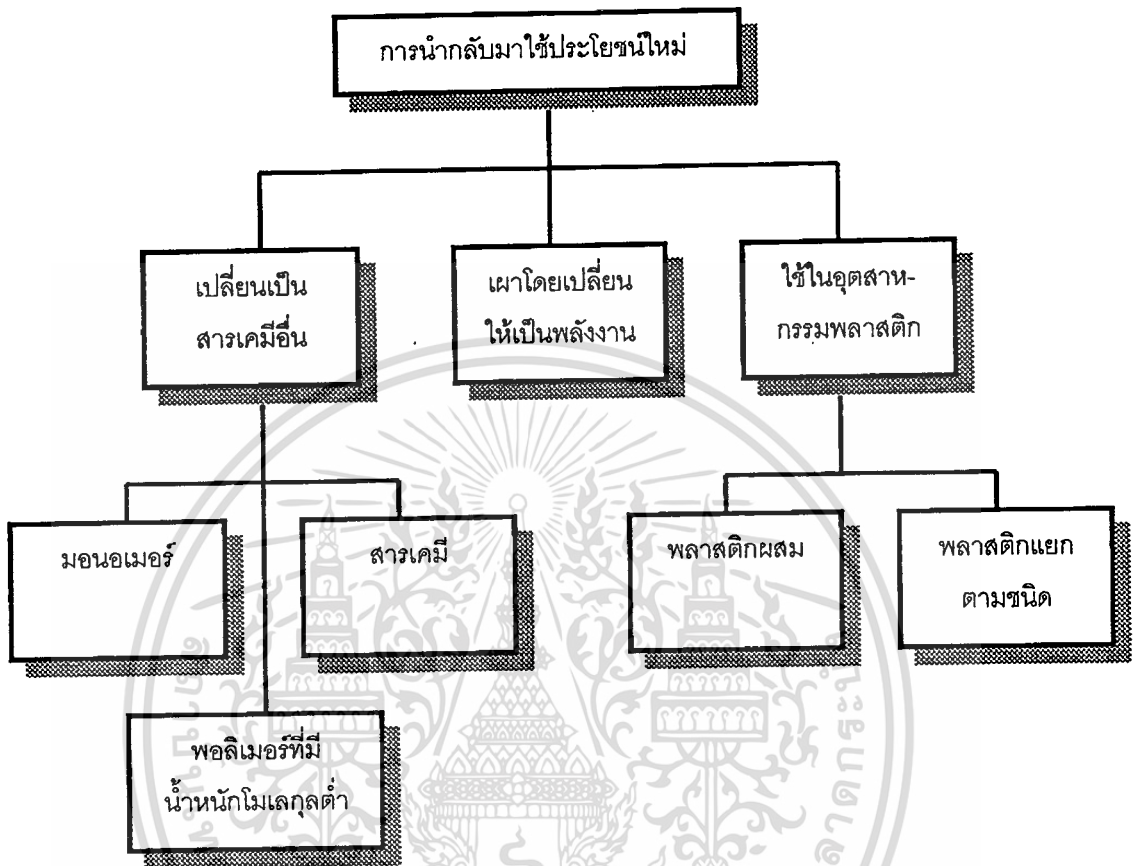


รูปที่ 1.1 แสดงชนิดและปริมาณพลาสติกที่ใช้ในประเทศไทย

ซึ่งพลาสติกเหล่านี้นำมาใช้มากในรูปพลาสติกบรรจุภัณฑ์ เช่น ขวดบรรจุเบียร์ ขวดน้ำดื่ม ชนิดขุ่น (พอลิเอทิลีน) ถ้วยและชามบะหมี่สำเร็จรูป (พอลิพรอพิลีน) กล่องโฟม ถ้วยน้ำ ในห้างสรรพสินค้า ถ้วยไอศกรีม และขวดโยเกิร์ต (พอลิสไตรีน) ฯลฯ ปัจจุบันพลาสติกบรรจุภัณฑ์เหล่านี้ได้กลายเป็นปัญหาขยะที่สำคัญยิ่งของเมืองใหญ่ ๆ เนื่องจากพลาสติกสลายตัวในธรรมชาติได้ช้า แนวทางหนึ่งที่ใช้บรรเทาปัญหาขยะล้นเมืองคือการนำพลาสติกเหล่านี้กลับมาใช้ใหม่ ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน ได้แก่ การใช้วิธีการแยกประเภทขยะแล้วนำกลับมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อีกครั้งหนึ่ง ผลิตภัณฑ์ใหม่ที่ได้มีสมบัติใกล้เคียงกันกับสมบัติเชิงกลของพลาสติกเดิม แต่ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงในการแยกประเภทของพลาสติก ดังนั้นวิธีการนี้จึงไม่เป็นที่น่าสนใจมากนัก อีกวิธีหนึ่งที่มีความสนใจในการนำเอาพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ คือการผสมพลาสติกซึ่งเป็นการนำพลาสติกมาใช้โดยไม่แยกประเภท เพราะนอกจากเป็นการใช้ทรัพยากรจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีอย่างคุ้มค่าแล้วยังลดต้นทุนการผลิต และสามารถขยายประเภทของสินค้าให้ได้ผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลาสติกที่มีสมบัติแตกต่างจากพลาสติกเดิม ซึ่งสมบัติดังกล่าวเป็นการรวมเอาสมบัติที่ดีของไฮโมพอลิเมอร์แต่ละชนิดเข้าด้วยกัน



รูปที่ 1.2 แสดงแผนผังวิธีการนำพลาสติกกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ [1]

ในประเทศไทยพอลิเมอร์ผสมเริ่มมีการศึกษามาตั้งแต่ปลายปี พ.ศ. 2523 คิดเป็นพอลิเมอร์ผสมของ พอลิโอฟีนประมาณ 60-70% พอลิเมอร์ชนิดอื่นประมาณ 23% และมีการพัฒนาเป็นอย่างมากจนสามารถผลิตจำหน่ายเชิงพาณิชย์ได้ในปี พ.ศ. 2530 โดยที่อัตราการใช้พอลิเมอร์ผสมอยู่ระหว่าง 9-11% และอัตราการใช้พอลิเมอร์ผสมในเชิงวิศวกรรมมีประมาณ 13-17% ต่อปี ในขณะที่อัตราการใช้ไฮโมพอลิเมอร์ในอุตสาหกรรม มีเพียง 2-4% ต่อปี อุตสาหกรรมพอลิเมอร์มีแนวโน้มมุ่งไปยังระบบที่มีความสลับซับซ้อนมากขึ้น เพื่อที่จะให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติสูงสุดตามวัตถุประสงค์ของการทำงาน [2] ปัจจุบันมีการวิจัยและพัฒนาโดยการปรับปรุงการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะพอลิเมอร์ผสมของพอลิโอฟีนและพอลิสไตรีน เพราะนอกจากจะเป็นการพัฒนาพอลิเมอร์ที่มีสมบัติจำเพาะแล้วยังเป็นแนวทางในการนำพลาสติกเหลือใช้หรือขยะพลาสติกที่มีในปริมาณมากกลับมาใช้ใหม่ได้อีกทางหนึ่งด้วย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### จุดประสงค์ของการผสมพอลิเมอร์

- เพื่อขยายขีดความสามารถของพอลิเมอร์ที่มีราคาถูกให้มีสมบัติทางวิศวกรรมเพื่อนำไปใช้ประโยชน์เป็นพอลิเมอร์ที่มีราคาแพง
- เพื่อปรับปรุงวัสดุให้มีสมบัติตามต้องการ เช่น การทนต่อแรงกระแทก การทนทานต่อสภาวะอากาศ และอุณหภูมิ
- เพื่อเป็นการนำพลาสติกที่เหลือใช้แล้วทิ้ง หรือเศษพลาสติกกลับมาใช้ให้คุ้มค่า
- เพื่อปรับปรุงองค์ประกอบของการผสมผสานตามความต้องการของลูกค้า และสร้างวัสดุที่มีเอกลักษณ์พิเศษเฉพาะที่จะนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์

โดยทั่วไปแล้วพอลิเมอร์ผสมจะไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน ( immisible blend ) คือมีการแยกวัฏภาคของพอลิเมอร์ที่ทำการผสม เพราะแรงยึดระหว่างผิวของพอลิเมอร์แต่ละชนิดหรือแรงกระทำระหว่างกันมีน้อยมาก ส่งผลให้สมบัติเชิงกลต่ำกว่าพอลิเมอร์ก่อนนำมาผสม ดังนั้นการปรับปรุงแรงยึดระหว่างผิวจึงเป็นสิ่งสำคัญในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมเพื่อให้สมบัติที่ดีตามต้องการ การปรับปรุงพอลิเมอร์ผสมที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน สามารถทำได้ดังนี้

- เปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของพอลิเมอร์โดยพอลิเมอร์หนึ่งหรือพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดก่อนที่จะนำมาผสมกัน โดยอาศัยเทคนิคการกราฟท์ พอลิเมอร์โซ่สั้นร่วม หรือใส่สารที่ช่วยในการเกิดปฏิกิริยาเคมี เพื่อให้พอลิเมอร์ผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้มากขึ้น
- เติมสารช่วยผสมเพื่อช่วยละลาย และลดแรงตึงผิว ( surface tension ) ระหว่างวัฏภาคที่แยกกันอยู่ของพอลิเมอร์หลัก และทำให้ขนาดอนุภาคของวัฏภาคกระจายตัวลดลง ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมกันดียิ่งขึ้น
- การใช้รังสีพลังงานสูง เช่นรังสีแกมมา และรังสีอิเล็กตรอน ปรับปรุงแรงยึดระหว่างพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากเมื่อได้รับพลังงานสูงจะเกิดการรวมตัวของอนุมูลอิสระ

ตารางที่ 1.1 แสดงการปรับปรุงและการพัฒนาสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสม [3]

ลำดับที่	สมบัติของพอลิเมอร์	พอลิเมอร์หลัก	พอลิเมอร์ที่เติมเพื่อปรับปรุงพอลิเมอร์หลัก
1	ความทนทานต่อแรงกระแทก	PVC, PP, PE, PC, PA, PPE, TPE PS PVC ABS	ABS, ASA, SBS,EPR, EPDM, PBR, SAN, Polyolefin, HIPS Rubber CPE, EVA, NBR, ABS, Acrylic PVC, PC
2	การเปลี่ยนแปลงเนื่อง จากความร้อน ความ แข็งตึง	PC, PA ABS, SAN	TPE, PPE PC, CPE
3	ความทนทานต่อการ ติดไฟ	ABS, Acrylics, PE	PVC, CPE CPE
4	ความทนทานต่อตัว ทำละลาย และสาร เคมี	PC, PA, PPE PP	TPE Butyl, EPDM
5	การรับแรง	Polyolefins	PA, EVOH,
6	กระบวนการผลิต	PPE HT thermoplastics PET, PA, PC PVC	Styrenics LCP, TPU PE, PB, MBS, EVOH CPE, Acrylics
7	ความต้านทานต่อการ ขีดถู	ABS Acetal, PC, Nylon 66	PUR PTFE
8	ลดต้นทุนการผลิต	PMMA PC	PET ABS, PET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## หมายเหตุ

ABS	อะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน โคพอลิเมอร์
ASA	อะคริโลไนไตรล์-สไตรีน-อะคริเลต โคพอลิเมอร์
CPE	คลอริเนต พอลิเอทิลีน
EPDM	เอทิลีนพรอพิลีนไดอีน เทอร์พอลิเมอร์
EPR	ยางเอทิลีน-พรอพิลีน
EVA	เอทิลีน-ไวนิลแอสีเตต โคพอลิเมอร์
EVOH	เอทิลีน-ไวนิลแอลกอฮอล์ โคพอลิเมอร์
HIPS	พอลิสไตรีนทนต่อแรงกระแทกสูง
MBS	เมทิลเมทาคริเลต-บิวทาไดอีน-สไตรีน โคพอลิเมอร์
NBR	ยางไนไตรล์
PA	พอลิเอไมด์
PC	พอลิคาร์บอเนต
PE	พอลิเอทิลีน
PET	พอลิเอทิลีนทราฟทาเลต
PMMA	พอลิเมทิลเมทาคริเลต
PP	พอลิพรอพิลีน
PS	พอลิสไตรีน
PTFE	พอลิเตตราฟลูออโรเอทิลีน
PUR	พอลิยูรีเทน
PVC	พอลิไวนิลคลอไรด์
SAN	สไตรีน-อะคริโลไนไตรล์ โคพอลิเมอร์
SBS	สไตรีน-บิวทาไดอีน-สไตรีน บล็อก โคพอลิเมอร์
TPE	เทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อเสนอแนะแนวทางหนึ่งในการลดปัญหาขยะเนื่องจากพลาสติก โดยอาศัยหลักการของเทคนิคพอลิเมอร์ผสม และเทคโนโลยีการฉายรังสีมาประยุกต์ใช้เข้าด้วยกัน
- 1.2.2 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำรังสีแกมมาไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงแรงยึดระหว่างพอลิเมอร์ผสมแทนการใช้สารเคมี
- 1.2.3 เพื่อพัฒนาพลาสติกที่มีสมบัติเชิงกลหลากหลายจากเดิม สามารถเลือกใช้ได้ตรงตามวัตถุประสงค์
- 1.2.4 เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุง และเพิ่มมูลค่าให้กับขยะพลาสติกที่จะนำมาแปรสภาพเป็นผลิตภัณฑ์ใช้อีกครั้งหนึ่ง

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาผลของอัตราส่วนผสม
- 1.3.2 ศึกษาชนิด และปริมาณสารช่วยผสมของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่าง ๆ
- 1.3.3 ศึกษาเปรียบเทียบผลของความเข้มรังสีแกมมาที่ 10, 20, และ 30 kGy เมื่อมี และไม่มีสารช่วยผสม ในทุกอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม
- 1.3.4 ศึกษาเปรียบเทียบผลของความเข้มรังสีแกมมาในช่วง 10 - 240 kGy ที่อัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม 50/50
- 1.3.5 ศึกษาเปรียบเทียบผลของการฉายรังสีในสภาวะที่ไม่มี และมีออกซิเจน ที่ความเข้มรังสีแกมมา 10 kGy
- 1.3.6 ศึกษาเปรียบเทียบผลของการใช้สารช่วยผสมกับการใช้รังสีแกมมา
- 1.3.7 ศึกษาผลสารตัวเติมเมื่อไม่มี และมีสารช่วยผสมในอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม 50/50

## บทที่ 2

# วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ปีพ.ศ. 2342 Gupta และ Purwar [4] ศึกษาถึงพอลิเมอร์ผสมของพอลิพรอพิลีนกับ 10% โดยน้ำหนักของพอลิสไตรีน พบว่าอดุลล์ และความทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับพอลิพรอพิลีนบริสุทธิ์ ขณะที่ความทนแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดลดลง Mucha [4] สันนิษฐานว่าพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวมีแรงกระทำระหว่างกัน เพราะอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิสไตรีนเพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว และอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของพอลิพรอพิลีนลดลง

ปีพ.ศ. 2516 Locke C.E. และ Paul D.R. [5] ศึกษาถึงการปรับปรุงพอลิเมอร์ผสมที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิสไตรีนกับพอลิเอทิลีน โดยเติมพอลิเมอร์ร่วมที่ผ่านการตอกลงของพอลิเมอร์ผสมดังกล่าว และผ่านกระบวนการฉายรังสีที่ความเข้ม 0.5 Mrad จากการทดลองทำการผสมพอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 50/50 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ให้สมบัติเชิงกลต่ำสุดในเครื่องผสมระบบปิด (Brabender) ที่อุณหภูมิ 170°C ความเร็วรอบ 20 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาที พบว่า พอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงด้วยวิธีดังกล่าว มีความแข็งแรง และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดเพิ่มมากขึ้น

ปีพ.ศ. 2517 Spenadel [6] ได้รายงานผลของรังสีที่ทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยง เนื่องจากรังสีของพอลิเมอร์ผสมของพอลิพรอพิลีนกับยางเอทิลีน-พรอพิลีน (PP/EPR) พบว่ารังสีทำให้เกิดการเชื่อมโยงภายในพอลิเมอร์มากกว่าการตัดขาดของสายโซ่ และเมื่อเติมไตรเมทิลอัลไซโพรเพน ไตรเมทิล อะโครเลต (TMPT) และเขม่าดำทำให้การเชื่อมโยง และความทนแรงดึงสูงขึ้น ส่วนการเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นระหว่างพอลิเอทิลีนกับยางเอทิลีน-พรอพิลีน (PE/EPR) มีค่าความต้านทานต่อการบิดเบือนเนื่องจากความร้อนสูงขึ้น ซึ่งนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมรถยนต์ และอุปกรณ์ด้านทานกระแสไฟฟ้า

ปีพ.ศ. 2519 Schultz และ Mankin [6] ศึกษาการฉายรังสีพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมทิลเมทาโครเลต (PMMA) กับพอลิสไตรีน พบว่า อัตราการตัดขาดของสายโซ่ PMMA ในพอลิเมอร์ผสมมีค่าใกล้เคียงกับ PMMA บริสุทธิ์ แต่เมื่อนำพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวมาผ่านกระบวนการทำให้แห้งโดยใช้ความเย็น (freeze drying) อัตราการตัดขาดของสายโซ่จะลดต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากวิฤภาคของพอลิเมอร์ผสมมีความใกล้ชิดกันมากขึ้น Garrett และคณะ [6] ได้ทำการทดลองโดยใช้คู่พอลิเมอร์ผสมเดียวกัน พบว่าพอลิสไตรีนจะทำหน้าที่ป้องกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รังสีที่ก่อให้เกิดการตัดขาดของสายโซ่ PMMA และลดลงตามปริมาณพอลิस्टาไดรีนที่เพิ่มขึ้น และมีการทดลองปรับปรุงแรงยึดระหว่างผิวโดยการใช้รังสีแกมมาของพอลิเมอร์ผสมของ PS/LDPE และ PS/EPDM ที่อัตราส่วน 80/20 ผสมพอลิเมอร์โดยเครื่องอัดฉีดแบบเกลียวหนอนอนคู๋ ศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย SEM พบว่ารังสีทำให้พอลิเมอร์ผสมของ PS/LDPE และ PS/EPDM เกิดการเชื่อมโยงที่วัฏภาคของ LDPE หรือ EPDM ซึ่งองค์การเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อความเข้มรังสีมากกว่าหรือเท่ากับ 500 kGy แต่ที่ความเข้มนี้วัฏภาค PS เกิดการเสื่อมสภาพ การเชื่อมโยงระหว่างคู่พอลิเมอร์ผสมมีน้อย เนื่องจากพอลิस्टาไดรีนเสถียรต่อรังสี ทำให้ไม่มีแรงกระทำภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์ผสม จากผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับการทดลองของ Garrett [6] ที่กล่าวไว้ข้างต้น และพอลิเมอร์ผสมที่มีพอลิस्टาไดรีนเป็นองค์ประกอบหลัก สัณฐานวิทยาจะเสถียรที่ความเข้มของรังสีต่ำ ในกรณีมีสารช่วยผสม สารช่วยผสมจะทำหน้าที่ป้องกันการแยกวัฏภาคระหว่างคู่พอลิเมอร์ผสมทำให้สัณฐานวิทยาเสถียร ตัวอย่างเช่นการเชื่อมโยงในพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกของ สไตรีน-บิวทาไดอีน ( SB ) ทำให้ลักษณะทางสัณฐานวิทยามีความเสถียรสูงกว่าในพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีสารช่วยผสม ภายใต้สภาวะการทดลองเดียวกัน สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/EPDM/SB ที่ได้รับรังสีที่ความเข้มต่าง ๆ ภายหลังจากทำการฉีดขึ้นรูปมีความแตกต่างขององค์การเชื่อมโยงน้อยมาก ( องค์การเชื่อมโยงของ EPDM สูงสุดประมาณ 55% ) สมบัติความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PS/EPDM/SB เมื่อได้รับรังสีเพิ่มขึ้นตามความเข้มของรังสีคือเพิ่มขึ้นจาก 5 สูงสุดที่ 14 kJ/m<sup>2</sup> ซึ่งสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของแรงยึดระหว่างผิว ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากเกิดพันธะเคมีของบิวทาไดอีนใน SB กับ EPDM ที่มีการเชื่อมโยงแล้ว

ปีพ.ศ. 2524 Lindsey และคณะ [7] ศึกษาพอลิเมอร์ผสมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และพอลิस्टาไดรีน โดยมีพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกของ สไตรีน-เอทิลีน-บิวทาไดอีน-สไตรีน ( SEBS ) เป็นสารช่วยผสม ทำการผสมพอลิเมอร์ด้วยเครื่องผสมระบบปิด ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที พบว่า สารช่วยผสมทำให้ความสามารถดึงเป็นเส้นได้ ( ductility ) เพิ่มขึ้น แต่ความแข็งแรง และมอดุลัสลดต่ำลง

ปีพ.ศ. 2526 Rizzo และคณะ [8] ได้ศึกษาผลรังสีแกมมาในสภาวะสูญญากาศของพอลิเมอร์ผสมของพอลิพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ พบว่าความเข้มรังสีช่วง 300-1500 kGy มีการเชื่อมโยงของทั้งพอลิพรอพิลีนและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และในปีเดียวกันเขาได้ศึกษาสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมไอโซเทคติกพอลิพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเมื่อได้รับรังสี พอลิเมอร์ผสมเตรียมในเครื่องผสมระบบปิด ( Haake Plasticorder ) ที่อุณหภูมิ 200 °C และความเร็วรอบ 30, 60 และ 120 รอบ/นาที เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศึกษาถึงการทำให้เย็นลงที่อุณหภูมิต่างกันโดย ใส่น้ำแข็ง ( ice-quenched ) และปล่อยให้เย็นที่ อุณหภูมิต่ำ ( air-cooled ) พบว่าในช่วงความเข้มรังสี 25-100 kGy เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุด ขาดของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นตามความเข้มรังสี ตัวอย่างที่ใส่น้ำแข็งลดลงเร็วกว่าตัวอย่างที่ ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิต่ำ และลดลงมากเมื่อพอลิเมอร์ผสมมีไอโซเทคติกพอลิพรอพิลีนเป็น องค์ประกอบหลัก ในขณะที่เมื่อมีพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเป็นองค์ประกอบหลัก ( มากกว่า 30% โดยน้ำหนัก ) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดจะเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความ เข้มรังสีในช่วงนี้ทำให้ไอโซเทคติกพอลิพรอพิลีนเกิดการตัดขาดของสายโซ่ และขณะเดียวกันก็ทำ ให้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเกิดการเชื่อมโยง ซึ่งมีผลให้ความทนแรงดึง และมอดุลัส เปลี่ยนแปลงน้อยต่อการฉายรังสีในช่วงนี้ อุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิการตกผลึกเมื่อรับรังสี พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีค่าคงที่ ส่วนไอโซเทคติกพอลิพรอพิลีนลดลงมากตามความ เข้มรังสี แสดงให้เห็นว่ารังสีมีผลต่อไอโซเทคติกพอลิพรอพิลีนมากกว่าพอลิเอทิลีนชนิด ความหนาแน่นต่ำ

ปีพ.ศ. 2527 Nguyen และ Kaush [6] ได้ศึกษาคู่พอลิเมอร์ที่รวมเป็นเนื้อเดียวกันของ PMMA กับสไตรีน-อะคริไลไนไตรล์ ( SAN ) ในอัตราส่วน 50/50 โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อฉายรังสี แกมมาในสภาวะสุญญากาศ อัตราการตัดขาดของสายโซ่ PMMA ลดลงจากที่ไม่ผสม SAN

ปีพ.ศ. 2530 Liu Dogyuan และคณะ [9] ได้ศึกษาการฉายรังสีแกมมาบนฟิล์มพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูง หนา 3 มิลลิเมตร พบว่า ปริมาณของส่วนที่ไม่ละลาย ( gel fraction ) เพิ่มขึ้นตามความเข้มรังสี ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น แต่ความเป็นผลึกลดลง ปริมาณของส่วน ที่ไม่ละลายเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความเข้มรังสีต่ำกว่า 100 kGy และคงที่เมื่อความเข้มรังสีสูงกว่า 100 kGy สมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็งแรง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเพิ่มขึ้นที่ความเข้มรังสีต่ำ และลดลงที่ความเข้มรังสีสูง ส่วน ค่าดัชนีการละลาย ( melt index ) ลดลง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงให้สมบัติเชิงกลสูงสุดที่ ความเข้มของรังสี 180 kGy

ปีพ.ศ. 2530 Tomas และคณะ [6] ได้ศึกษาผลของรังสีแกมมาที่มีต่อสมบัติเชิงกลของ พอลิเมอร์ผสมของพอลิเอทิลีนไวนิลเอซีเตดกับพอลิพรอพิลีน พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มี องค์ประกอบของพอลิพรอพิลีนมากกว่า 50% โดยน้ำหนัก จะเกิดการตัดขาดของสายโซ่ ทำให้ สมบัติเชิงกล ได้แก่ ความทนแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดลดลง ในกรณีพอลิเมอร์ ผสมที่มีองค์ประกอบของเอทิลีนไวนิลเอซีเตดมากกว่า 70% โดยน้ำหนัก จะมีปฏิกิริยาแข่งขันกัน ระหว่างการเชื่อมโยงของวัฏภาคเอทิลีนไวนิลเอซีเตด และการตัดขาดสายโซ่ของพอลิพรอพิลีน เป็นผลให้สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นที่ความเข้มรังสีต่ำ และคงที่หรือลดลงเล็กน้อยที่ความเข้มรังสีสูง

ปีพ.ศ. 2533 Wenig และ Colleagues [4] ได้ศึกษาพลศาสตร์การตกผลึกของพอลิเมอร์ผสมของพอลิสไตรีนกับพอลิพรอพิลีน พบว่าความหนาแน่นของนิวเคลียสที่ก่อให้เกิดผลึกลดลงเมื่อพอลิสไตรีนเพิ่มขึ้น และอัตราการเติบโตของสเฟียรูไลท์พอลิพรอพิลีนเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

ปีพ.ศ. 2534 Lopez D. และ Burillo G. [10] ได้ศึกษาผลของรังสีแกมมาที่มีต่อพอลิสไตรีนเมื่อเติม สารช่วยผสมของมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันัลหลายหมู่ โดยทำการทดลองกับสารช่วยผสม 2 กลุ่มคือ กลุ่มของหมู่ไวโนลฟังก์ชันัล ได้แก่ ไตรเมทิลโพรเพน ไตรเมทาโครเลท ( TMPTM ) และกลุ่มของอัลลิล คาร์บอนेट ได้แก่ ไดเอทิลีนไกลคอล บิส-อัลลิล คาร์บอนेट ( DEGBAC ) และ พรอพิลีนไกลคอล บิส-อัลลิล คาร์บอนेट ( PGBAC ) พบว่าเมื่อเทียบที่อัตราความเข้มรังสีเท่ากัน พอลิสไตรีนให้ค่าความเข้มรังสีต่ำสุดที่ทำให้เกิดเจล ( incipient gel;  $rg$  ) สูงกว่าพอลิเมอร์ผสมของพอลิสไตรีนกับสารช่วยผสม กล่าวคือ  $rg$  ของพอลิสไตรีนเกิดที่ 270 kGy วัดการเชื่อมโยงของโมเลกุลได้ 0.03 ในขณะที่  $rg$  ของพอลิสไตรีนกับสารช่วยผสม PGBAC, DGBAC, และ TMPTM ให้ค่า  $rg$  ที่ต่ำกว่า ตามลำดับ และต่ำลงตามปริมาณสารช่วยผสมที่เพิ่มขึ้น

ปีพ.ศ. 2536 Wu C. J. และคณะ [11] ได้ศึกษาถึงการปรับปรุงพอลิเมอร์ร่วมแบบ 3 บล็อกของ SEBS ด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ จากนั้นนำมาใช้เป็นสารช่วยผสมของพอลิเมอร์ของไนลอน-6 กับ SEBS พบว่าสัณฐานวิทยา ความทนทานต่อแรงกระแทกขึ้นกับ ปริมาณ และอัตราส่วนการต่อกิ่งของมาลิกแอนไฮไดรด์บน SEBS พอลิเมอร์ผสมที่มีสารช่วยผสม ให้ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกสูงกว่าไนลอน 6 ประมาณ 30 เท่า

ปีพ.ศ. 2537 Hlavata และ Horak [4] ใช้เทคนิค WAXD และ SAXD ศึกษาความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมของพอลิพรอพิลีนกับพอลิสไตรีนชนิดทนต่อแรงกระแทกสูงพบว่าความเป็นผลึกของพอลิพรอพิลีนในพอลิเมอร์ผสมมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย และลดลงเมื่อเติมองค์ประกอบที่ 3 ของ SB หรือ SBS

ปีพ.ศ. 2537 Changhail. และคณะ [12] ได้ศึกษาการใช้รังสีแกมมาปรับปรุงแรงระหว่างผิวของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันของไอโซเทกติกพอลิพรอพิลีนกับ ซิส 1,4-พอลิบิวทาไดอิน โดยเติม TAIC พอลิเมอร์ผสมเตรียมโดยใช้ two-roll mixer ที่อุณหภูมิ 180 °C พบว่าที่ความเข้มรังสี 10 kGy ต่อชั่วโมง มอนอเมอร์ TAIC เกิดการเชื่อมโยง หรือเกิดการต่อกิ่งขึ้นระหว่าง TAIC กับไอโซเทกติกพอลิพรอพิลีน และซิส 1,4-พอลิบิวทาไดอิน ทำให้แรงยึดติดระหว่างพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นและเพิ่มขึ้นตามความเข้มรังสี

ปีพ.ศ. 2538 Molina และคณะ [13] ได้ศึกษาการใช้ พอลิไวโนลิมิดาโซล เป็นสารช่วยผสมในพอลิเมอร์ผสมของพอลิเอทิลีนกับพอลิสไตรีน พบว่าในสภาวะการหลอมเหลว พอลิไวโนลิมิดาโซล ช่วยให้พอลิเมอร์ผสมกันได้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อพอลิเมอร์ผสมมีปริมาณพอลิเอทิลีนสูงและในทางตรงกันข้าม ในสภาวะที่เป็นของแข็งพอลิไวโนลิมิดาโซลไม่ช่วยปรับปรุงการเป็นเอกสารเป็นเอกสารที่สั่นไหวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า เมื่อนุญตาเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ผสม Hlavata และคณะ [13] ได้ศึกษาการผสมเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ผสมของพอลิสไตรีนชนิดทนต่อแรงกระแทกสูง ( ที่มีพอลิวิทาไดอินเป็นองค์ประกอบ ) โดยใช้ SB และ SBS เป็นสารช่วยผสม พบว่า สารช่วยผสมที่เป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบ 3 บล็อก มีผลต่อการสร้างชั้นระหว่างผิว ( interfacial layer ) มากกว่าพอลิเมอร์ร่วมแบบ 2 บล็อก และพอลิเมอร์ร่วมแบบ 3 บล็อก ยังช่วยปรับปรุงความทนทานต่อแรงกระแทก และการดึงยึดที่จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมอีกด้วย พอลิวิทาไดอินที่มีอยู่ในพอลิสไตรีนทนต่อแรงกระแทกสูง สามารถเข้ากันได้กับสารช่วยผสมทั้งสอง นอกจากนี้ส่วนของพอลิวิทาไดอินยังทำหน้าที่ปรับปรุงความเหนียวในวัฏภาคของสไตรีน หรืออาจกล่าวได้ว่าพอลิวิทาไดอินมีส่วนช่วยในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม

ปีพ.ศ. 2538 Topolkaev [14] ได้ศึกษาการใช้พอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกของพอลิสไตรีนและพอลิวิทาไดอิน หรือพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกของพอลิวิทาไดอินที่เติมไฮโดรเจนกับพอลิสไตรีนเป็นสารช่วยผสมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น กับพอลิสไตรีน โดยแบ่งชนิดของสารช่วยผสม เป็นสารช่วยผสมที่มีความเป็นผลึก ได้แก่ SEB และ SEBS กับสารช่วยผสมที่ไม่มีความเป็นผลึก ได้แก่ SB และ SBS เตรียมพอลิเมอร์ผสมในเครื่องผสมระบบปิด ที่อุณหภูมิ 175 °C ความเร็วรอบ 52 รอบ/นาที พบว่าสารช่วยผสมพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกช่วยปรับปรุงความทนต่อแรงเค้น แรงเครียด และเพิ่มแรงยึดติดระหว่างวัฏภาคของ LLDPE กับ PS เมื่อเติมสารช่วยผสม SEB หรือ SEBS มีผลทำให้ขนาดอนุภาคของ PS ลดลงมากกว่าเมื่อเติมสารช่วยผสม SB หรือ SBS

ปีพ.ศ. 2539 Mitsuyoshi [4] ได้ศึกษาการผสมแบบหลอมเหลวของไอโซแทกติกพอลิพรอพิลีน (IPP) กับพอลิสไตรีน 0-3% โดยน้ำหนัก 3 ชนิดคือ ชนิดที่มีค่าดัชนีการไหล ต่ำกว่า, เท่ากัน และสูงกว่าพอลิพรอพิลีน การผสมใช้เครื่องฉีดขึ้นรูป อุณหภูมิกระบอกฉีด 200-280 °C พบว่าอุณหภูมิความเป็นผลึก และความร้อนแฝงของความเป็นผลึกลดลงเมื่อปริมาณพอลิสไตรีนเพิ่มขึ้นมอดูลัสของการโค้งงอ และความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิกระบอกฉีดลดลง อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวเนื่องจากความร้อน ( heat distortion temperature ;HDT ) เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิกระบอกฉีดลดลง และเมื่ออุณหภูมิกระบอกฉีดต่ำ HDT เพิ่มขึ้นสูงสุดที่พอลิสไตรีน 5% โดยน้ำหนัก และจะลดลงตามพอลิสไตรีนที่เพิ่มขึ้น ในกรณีที่อุณหภูมิกระบอกฉีดสูง พอลิเมอร์จะมีการหดตัวน้อยและลดลงเมื่อผสมพอลิสไตรีน ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมของพอลิสไตรีนกับพอลิพรอพิลีนลดลงตามปริมาณพอลิสไตรีนที่เพิ่มขึ้น

ปีพ.ศ.2540 Kroezeและคณะ [15] สังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกของพอลิวิทาไดอินและพอลิสไตรีน ได้แก่ EB โดยส่วนที่เป็นพันธะคู่ของพอลิวิทาไดอินได้รับการเติมไฮโดรเจน จากนั้นนำมาใช้เป็นสารช่วยผสมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิสไตรีนที่อัตราส่วนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10/90 โดยน้ำหนัก เตรียมพอลิเมอร์ผสมในเครื่องอัดเกลียวหนอนคู่ขนาน ที่อุณหภูมิ 160 °C ความเร็วของสกรู 75 รอบ/นาทีเป็นเวลา 5 นาที พบว่า เมื่อเติมสารช่วยผสมที่ได้จากการสังเคราะห์เพียง 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสามารถปรับปรุงสมบัติความทนแรงดึง และแรงเครียดของพอลิเมอร์ผสมได้ และเมื่อเติมสารช่วยผสม 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถปรับปรุงความเหนียวของพอลิเมอร์ผสมนี้ได้ถึง 10 เท่าเทียบกับเมื่อไม่เติมสารช่วยผสม

ปีพ.ศ. 2540 เสาวรภัย และคณะ [16] ได้ศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนกับพอลิเมอร์ฟลักเหลว โดยใช้ SEBS เป็นสารช่วยผสม พอลิเมอร์ผสมเตรียมได้โดยใช้เครื่องอัดเกลียวหนอนคู่ขนาน ทำให้เป็นเม็ดอัดผ่านแล้วทำให้เป็นฟิล์ม พบว่าการใช้สารช่วยในการผสมช่วยให้มอดูลัสสูงขึ้นโดยใช้เทคนิคทางอินฟราเรด ในการวัดการจัดเรียงตัวของโมเลกุลเกิดขึ้น

ปี พ.ศ. 2540 Hayashi S. และคณะ [17] ได้ศึกษาผลของสารตัวเติมที่มีต่อพอลิเมอร์ผสมที่เป็นเนื้อเดียวกันของยางธรรมชาติกับยาง SBR พบว่าการเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ผสมที่มีเขม่าดำ หรือซิลิกา สัมพันธ์กับโครงสร้างทางจุลภาคของยาง SBR และจะเปลี่ยนไปตามชนิดของสารตัวเติมที่ใช้

ปีพ.ศ. 2540 จันทิมา ประทีปแสง และคณะ [18] ได้ศึกษาความสามารถของสารช่วยผสมของ SBS สำหรับพอลิเมอร์ผสมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับพอลิสไตรีนใช้แล้วองค์ประกอบทั้งหมดนำมาผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดสกรูคู่แบบหมุนตามกัน (L/D=30) ผลการศึกษาความสามารถในการไหลของพอลิเมอร์ผสมหลอมเหลว พบว่าค่าดังกล่าวลดลงเมื่อปริมาณ SBS เพิ่มขึ้น การศึกษาโดย FTIR ยืนยันว่าไม่มีพันธะเคมีในพอลิเมอร์ผสมทั้งคู่ที่ไม่มี และมี SBS ผลการศึกษาโดย DSC ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิสไตรีน อุณหภูมิหลอมเหลว และปริมาณผลึกของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงในพอลิเมอร์ผสมทั้งคู่ที่ไม่มี และมี SBS จากการวิเคราะห์ด้วย SEM พบว่า การเติม SBS ทำให้วัฏภาคกระจายตัวมีขนาดเล็กลง และการกระจายดีขึ้น การทดสอบโดยการดึงแสดงให้เห็นว่าค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่นสำหรับพอลิเมอร์ผสมทุกชุดลดลงเมื่อมีการเติม SBS เพิ่มขึ้น พอลิเมอร์บางชุดแสดงการเปลี่ยนแปลงสมบัติจากเปราะไปเป็นอ่อนเหนียว โดยมีค่าความเครียดที่จุดแตกหักเพิ่มขึ้น 300-400 % [18]

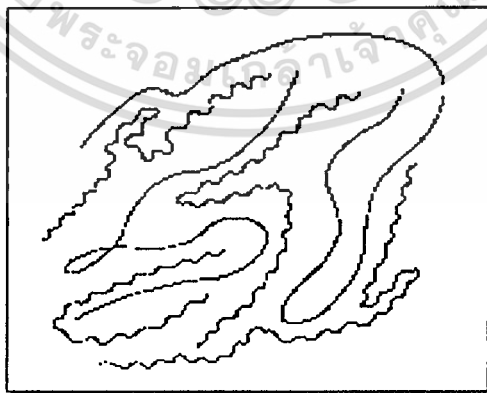
ปี พ.ศ. 2540 วิไลพร และคณะ [19] ได้พัฒนาการผลิตสารประกอบพีวีซีที่มีสมบัติคล้ายยางจากการผสมพีวีซีกับยางไนไตรล์ (NBR) เข้าด้วยกัน แล้วให้สมบัติที่ดีกว่าพีวีซีชนิดเดิม โดยศึกษาถึงผลของแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีต่อสารประกอบพีวีซี พบว่าการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตช่วยให้การไหลของสารประกอบพีวีซีดีขึ้น เปอร์เซ็นต์การบวมที่หัวฉีดลดลงตามปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้น ซึ่งตรงกันข้ามกับสมบัติเชิงกล ค่าความแข็งวัดในหน่วย Shore A และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดจะให้ค่าสูงสุด Fellahi และคณะ [20] ได้ศึกษาการทำฟิล์มที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่า สมบัติเชิงกล ได้แก่ ความเค้นที่จุดขาด ให้ผลตรงข้ามกับเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด และความทนต่อแรงกระแทก กล่าวคือ ความเค้นที่จุดขาดลดลง เมื่อ BUR เพิ่มขึ้น และDDR ลดลง ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด และความทนต่อแรงกระแทกลดลง เมื่อ BUR ลดลง และDDR เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก เมื่อเพิ่ม DDR มากขึ้นทำให้การจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโมเลกุลเพิ่มสูงขึ้น เป็นผลให้ฟิล์มที่ได้มีความแข็งแรงมากขึ้น สมบัติเชิงกลอีกประการหนึ่งที่ได้ทำการทดสอบ คือความต้านทานการฉีกขาด ซึ่งได้มีการพิจารณาทั้งในทิศเดียวกัน และทิศตั้งฉากกับการขึ้นรูป พบว่าความต้านทานการฉีกขาดในทิศเดียวกันกับการขึ้นรูป มีค่าน้อยกว่าความต้านทานการฉีกขาดในทิศตั้งฉาก และเพิ่มขึ้น เมื่อ BUR เพิ่มขึ้นและDDR ลดลง และเห็นได้ว่าพอลิเมอร์ที่ผ่านกระบวนการผสมซ้ำ 3 ครั้งในเครื่องอัดรีด จะให้ความทนแรงดึง ความทนต่อแรงกระแทก และความต้านทานการฉีกขาด สูงกว่าพอลิเมอร์ที่ผ่านกระบวนการผสมเพียง 1 ครั้ง และจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเติมสารช่วยผสม คาร์บอน (Kraton G 1701) ในปริมาณ 5% โดยน้ำหนัก

## 2.2 พอลิเมอร์เบลิน และพอลิเมอร์อัลลอยด์

พอลิเมอร์ผสม (พอลิเมอร์เบลิน) หมายถึงพอลิเมอร์ [21,22] หรือโคพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแตกต่างกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมเข้าด้วยกัน โดยที่พอลิเมอร์ หรือโคพอลิเมอร์ในองค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณน้อยจะต้องมีปริมาณไม่น้อยกว่าสองเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสม โครงสร้างของพอลิเมอร์หลักที่นำมารวมกันนี้อยู่รวมกันโดยที่ไม่เกิดพันธะโคเวเลนต์ระหว่างกัน แสดงได้ดังรูปที่ 2.1

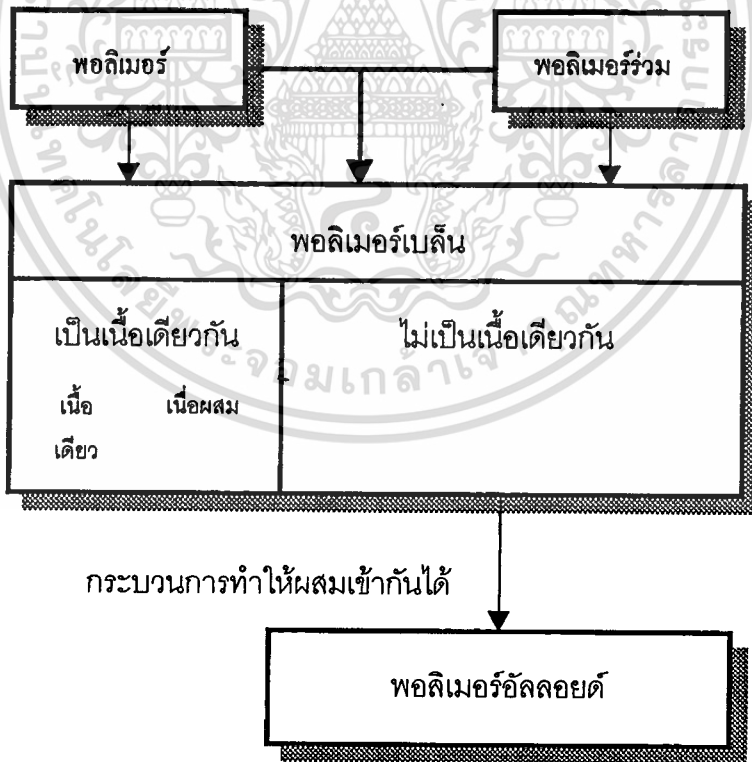


รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างจุลภาคของพอลิเมอร์เบลิน

พอลิเมอร์ผสมมีทั้งที่ผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และเป็นเนื้อเดียวกัน พอลิเมอร์ผสมที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันเมื่อผ่านกระบวนการปรับปรุงแรงยึดระหว่างผิว หรือปรับปรุงลักษณะทางสัณฐานวิทยาแล้วจะทำให้ผสมเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น เรียกพอลิเมอร์ผสมนี้ว่า พอลิเมอร์อัลลอยด์ คำว่า พอลิเมอร์เบลิน และ พอลิเมอร์อัลลอยด์ แตกต่างกันทั้งทางด้านความสามารถในการรวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันทางอุณหพลศาสตร์ ( thermodynamic ) และสมบัติของผลิตภัณฑ์ ความสัมพันธ์ของพอลิเมอร์เบลิน และอัลลอยด์ แสดงได้ดังรูปที่ 2.2

พอลิเมอร์อัลลอยด์ เป็นพอลิเมอร์ผสมที่มีการรวมกันแบบเสริมกัน คือรวมเอาสมบัติที่ดีของพอลิเมอร์แต่ละชนิดเข้าไว้ด้วยกัน การรวมเป็นเนื้อเดียวกันทางอุณหพลศาสตร์ระหว่างพอลิเมอร์สูง แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสูง และให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วเพียงค่าเดียว

สำหรับพอลิเมอร์เบลิน การรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้ในทางอุณหพลศาสตร์ระหว่างพอลิเมอร์น้อยกว่าพอลิเมอร์อัลลอยด์ ให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วหลายค่า และโดยทั่วไปแล้วสมบัติของพอลิเมอร์เบลินจะขึ้นกับสัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ที่นำมาผสม



รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ของพอลิเมอร์เบลิน และพอลิเมอร์อัลลอยด์

## 2.3 วิธีการเตรียมพอลิเมอร์ผสม [2,23]

2.3.1 การผสมทางเชิงกล ( mechanical blending ) เป็นการผสมที่นำพอลิเมอร์มาหลอมรวมกัน พอลิเมอร์ที่นำมาใช้จะมีลักษณะเป็นเม็ด หรือเป็นผงก็ได้ ในการหลอมพอลิเมอร์เข้าด้วยกัน กรณีที่พอลิเมอร์เป็นอสังฐานอุณหภูมิที่ใช้ต้องสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (  $T_g$  ) และกรณีที่พอลิเมอร์เป็นกึ่งผลึก อุณหภูมิที่ใช้ต้องสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว (  $T_m$  ) วิธีนี้เป็นที่นิยมมาก ทั้งนี้เนื่องจากเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย ค่าใช้จ่ายน้อย และไม่มีการปนเปื้อน แต่ข้อเสียของวิธีนี้ คือพอลิเมอร์อาจเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องมาจากอุณหภูมิที่ใช้ค่อนข้างสูง ซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดต่ำลง

2.3.2 การผสมโดยใช้ตัวทำละลาย ( solvent blending ) เป็นการผสมที่นำพอลิเมอร์ที่จะมาผสมละลายในตัวทำละลายโดยใช้อุณหภูมิ และแรงเฉือนต่ำ จากนั้นกำจัดตัวทำละลายออกทำเป็นแผ่นฟิล์ม ส่วนใหญ่แล้วจะใช้ในการผสมที่ต้องการผลิตภัณฑ์ปริมาณน้อย หรือใช้กับคู่พอลิเมอร์ที่ไม่สามารถผสมแบบเชิงกลได้ ซึ่งอาจจะทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันสามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้ เนื่องจากความสามารถของการละลายในตัวทำละลายของคู่พอลิเมอร์ผสมแตกต่างกัน ทั้งนี้อาจแก้ไขได้โดยการเปลี่ยนชนิดของตัวทำละลาย หรือตกตะกอนพอลิเมอร์ผสมในตัวทำละลาย วิธีนี้จะลดการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ แต่ก็อาจจะมี การปนเปื้อนจากตัวทำละลาย

## 2.4 ประเภทของพอลิเมอร์ผสม

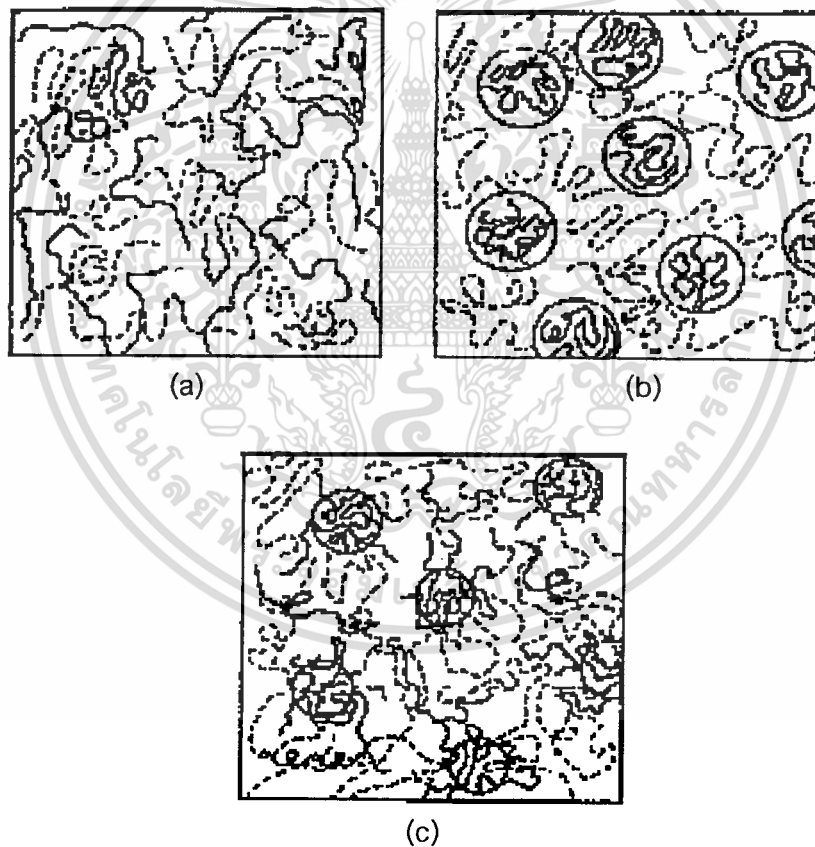
พิจารณาตามลักษณะพื้นฐานวิทยา ได้แก่ องค์การกระจายตัวของวัฏภาคหลัก รูปร่าง และขนาดของอนุภาคที่กระจายตัวในพอลิเมอร์ผสม ซึ่งลักษณะดังกล่าวขึ้นอยู่กับสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ และลักษณะการไหลตัว ( rheological characteristic ) ของพอลิเมอร์หลักที่เป็นองค์ประกอบในพอลิเมอร์ผสม รวมถึงวิธีการผสม สภาพะในการผสม สารช่วยผสม และกระบวนการขึ้นรูป สามารถแบ่งประเภทของพอลิเมอร์ผสมในทางพื้นฐานวิทยาได้ 3 ประเภท

2.4.1 พอลิเมอร์ผสมที่เป็นเนื้อเดียวกัน ( miscible polymer blend ) พอลิเมอร์จะละลายเข้าด้วยกัน คือสามารถผสมรวมกันได้ในระดับของโมเลกุล พอลิเมอร์ 2 ชนิดอาจมีหมู่ฟังก์ชันที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างพอลิเมอร์นั้นๆ พอลิเมอร์ผสมจะปรากฏให้เห็นเป็นระบบที่มี 1 วัฏภาค ดังรูปที่ 2.3 (a) แสดงโมเลกุลของพอลิเมอร์ชนิด A ที่ผสมรวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกับโมเลกุลของพอลิเมอร์ชนิด B พอลิเมอร์ผสมชนิดนี้มีลักษณะเหมือนกับพอลิเมอร์ร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบแรนดอม ตัวอย่างเช่น พอลิเมอร์ผสมของ พอลิสไตรีน กับ พอลิ ( 2,6-ไดเมทิล 1,4-ฟีนิลีน ออกไซด์ )

2.4.2 พอลิเมอร์ผสมที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ( immiscible polymer blend ) พอลิเมอร์ ไม่ละลายเข้าด้วยกัน พอลิเมอร์ผสมปรากฏให้เห็นเป็นระบบที่มี 2 วัฏภาค ดังรูปที่ 2.3 (b) แสดง โมเลกุลของพอลิเมอร์ชนิด A ที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกับโมเลกุลของพอลิเมอร์ชนิด B ตัวอย่างเช่น พอลิเมอร์ผสมของ ไนลอน กับ พอลิ (อะโครโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน ) หรือ พอลิสไตรีนกับ พอลิเอทิลีน ซึ่งพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวมีแรงยึดเหนี่ยว ( interaction ) และแรงยึดติดระหว่างผิว ( interfacial adhesive ) ของพอลิเมอร์แต่ละชนิดน้อยมาก โดยที่พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งมีลักษณะ เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง ( continuous phase หรือ external phase ) และมีพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งเป็น วัฏภาคกระจายตัว ( disperse phase ) กระจายตัวอยู่ภายในวัฏภาคต่อเนื่องอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างจุลภาคของการผสมพอลิเมอร์ A และพอลิเมอร์ B

- (a) ของผสมที่เป็นเนื้อเดียวกัน                      (b) ของผสมที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน  
(c) ของผสมที่เป็นเนื้อเดียวกันบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 พอลิเมอร์ผสมที่เป็นเนื้อเดียวกันบางส่วน ( partially miscible polymer blend ) เป็นพอลิเมอร์ผสมที่อยู่ระหว่าง 2.3.1 และ 2.3.2 บางส่วนของพอลิเมอร์หนึ่งละลายได้ในบางส่วนของอีกพอลิเมอร์หนึ่ง พอลิเมอร์ผสมจะเป็นเนื้อเดียวกันต่อเมื่ออนุภาคของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมมีขนาดเล็ก แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนในการผสมด้วยเช่นกัน พอลิเมอร์ผสมปรากฏให้เห็นเป็น 2 วัฏภาค ดังรูปที่ 2.3 (c) แสดงโมเลกุลของพอลิเมอร์ชนิด A ทั้งที่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน และไม่เนื้อเดียวกับโมเลกุลของพอลิเมอร์ชนิด B

## 2.5 การรวมเข้ากันได้ทางอุณหพลศาสตร์

การที่พอลิเมอร์จะผสมเป็นเนื้อเดียวกัน หรือไม่เนื้อเดียวกันนั้น ขึ้นกับหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น จลนพลศาสตร์ ( kinetics ) ของกรรมวิธีในการผสม อุณหภูมิ เวลาที่ใช้ในการผสม ตลอดจนการเติมสารเติมแต่งอื่นๆ อย่างไรก็ตามหลักเบื้องต้นที่ควรนำมาพิจารณาถึงการผสมเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ คือ อุณหพลศาสตร์ ซึ่งได้อธิบายถึงกระบวนการที่สามารถเกิดขึ้นได้เอง ที่อุณหภูมิ และความดันคงที่ โดยใช้พลังงานอิสระของการผสม ดังสมการ

$$\Delta G_{mix} = \Delta H_{mix} - T \Delta S_{mix} \leq 0 \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\Delta G_{mix}$  เป็นพลังงานอิสระของการผสม

$\Delta H_{mix}$  เป็นเอนทัลปีของการผสม

$\Delta S_{mix}$  เป็นเอนโทรปีของการผสม

นั่นคือการผสมจะเข้ากันได้ดีถ้าผลต่างระหว่าง  $\Delta H_{mix}$  และ  $T \Delta S_{mix}$  มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับศูนย์ ซึ่งเป็นไปได้ 2 กรณีคือ

กรณีที่ 1 ถ้าค่าเอนโทรปีของการผสมมีค่าสูงหรือเป็นค่าบวก ค่าเอนทัลปีของการผสมจะต้องมีค่าเป็นศูนย์ ติดลบ หรือเป็นบวก แต่  $|\Delta H_{mix}| < |T \Delta S_{mix}|$

กรณีที่ 2 ถ้าค่าเอนโทรปีของการผสมมีค่าต่ำมากหรือเป็นค่าติดลบ ค่าเอนทัลปีของการผสมจะต้องมีค่าเป็นค่าติดลบ และ  $|\Delta H_{mix}| > |T \Delta S_{mix}|$

ทฤษฎีของ ฟลอรีและฮักกินส์ ( Flory Huggins ) [24,27]

เป็นทฤษฎีใช้อธิบาย การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีและเอนทัลปีในการผสมระหว่างตัวทำละลายกับพอลิเมอร์ และสามารถที่จะนำมาประยุกต์ใช้ได้กับพอลิเมอร์ผสม โดยกำหนดให้โมเลกุลพอลิเมอร์มีเซกเมนต์ที่โค้งงอได้ และแต่ละเซกเมนต์มีขนาดเท่ากับโมเลกุลของตัวทำละลาย ทฤษฎีของฟลอรีและฮักกินส์ มีพื้นฐานมาจากทฤษฎี รัทเลอร์ ไชลูชัน ที่อธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี และเอนทัลปีในการผสมระหว่างตัวทำละลายกับโมเลกุลขนาดเล็ก

ค่าเอนโทรปี เป็นพลังงานในการผสมระหว่างตัวทำละลายกับพอลิเมอร์ แสดงถึงการจัดเรียงตัวของโมเลกุล เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\Delta S_{\text{mix}} = -R ( n_s \ln \phi_s + n_p \ln \phi_p ) \quad (2.2)$$

เมื่อ  $\phi_s$  และ  $\phi_p$  เป็นสัดส่วนโดยปริมาตรของตัวทำละลาย และพอลิเมอร์  
 $n_s$  และ  $n_p$  เป็นจำนวนโมลของตัวทำละลาย และพอลิเมอร์

เศษส่วนโดยปริมาตรของพอลิเมอร์

$$\phi_p = \frac{n_p M V_s}{n_p M V_s + n_s V_s} = \frac{n_p M}{n_p M + n_s} \quad (2.3)$$

เศษส่วนโดยปริมาตรของตัวทำละลาย

$$\phi_s = \frac{n_s V_s}{n_s V_s + n_p M V_s} = \frac{n_s}{n_s + n_p M} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $M$  เป็นจำนวนเซกเมนต์ในแต่ละสายโซ่พอลิเมอร์

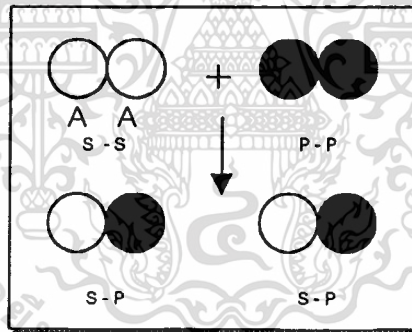
$V_s$  เป็นปริมาตรของแต่ละเซกเมนต์

ค่าเอนทาลปี เป็นพลังงานในการผสมระหว่างตัวทำละลายกับพอลิเมอร์ แสดงถึงการเกิดอันตรกิริยาของโมเลกุลระหว่างกรรมวิธีการผสม ในพอลิเมอร์ผสม 2 ชนิด จะมีการสัมผัสกัน 3 แบบ คือ S-S, P-P และ S-P ดังรูปที่ 2.4 และให้อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นเป็น  $\epsilon_{SS}$ ,  $\epsilon_{PP}$  และ  $\epsilon_{SP}$  ตามลำดับ

$$\Delta\epsilon_{SP} = [\epsilon_{SP} - (\epsilon_{SS} + \epsilon_{PP}) / 2] \quad (2.5)$$

จำนวนของการสัมผัสระหว่างเซกเมนต์และโมเลกุลของตัวทำละลายมีค่าเท่ากับ  $z n_s \phi_p$  เมื่อ  $z$  เป็น coordination number

$$\Delta H_{mix} = z \Delta\epsilon_{SP} n_s \phi_p \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.4 แสดงการสร้างสัมผัสของ SP จากสัมผัสของ SS และ PP

ให้  $\chi_{SP}$  เป็นพารามิเตอร์ในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างตัวทำละลายกับพอลิเมอร์

$$\chi_{SP} = z \Delta\epsilon_{sp} / RT \quad (2.7)$$

$$\Delta H_{mix} = RT n_s \phi_p \chi_{SP} \quad (2.8)$$

ค่าพลังงานอิสระ ในการผสมระหว่างตัวทำละลายกับพอลิเมอร์

$$\Delta G_{\text{mix}} = RT [n_s \ln \phi_s + n_p \ln \phi_p + n_s \phi_p \chi_{sp}] \quad (2.9)$$

ค่าพลังงานอิสระของพอลิเมอร์ผสม โดยทั่วไปในพอลิเมอร์ผสม การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของการผสมคิดต่อหน่วยปริมาตร  $\Delta G_{\text{mix}}^V$  และพลังงานในการเกิดอันตรกิริยาต่อหน่วยปริมาตร  $B_{12}$  ดังสมการ

$$\Delta G_{\text{mix}}^V \equiv \Delta G_{\text{mix}} / V \equiv \Delta G_{\text{mix}} / (n_1 V_1 + n_2 V_2) \quad (2.10)$$

$$B_{12} \equiv RT \chi_{12} / V_1 \quad (2.11)$$

เมื่อ  $V$  เป็นปริมาตรของของผสม

$V_i$  เป็น molar volume ขององค์ประกอบ  $i$

สมการการเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระของพอลิเมอร์ผสม เขียนได้ดังนี้

$$\Delta G_{\text{mix}}^V = RT [(\phi_1 / V_1) \ln \phi_1 + (\phi_2 / V_2) \ln \phi_2] + B_{12} \phi_1 \phi_2 \quad (2.12)$$

สำหรับพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง อัตราส่วนของ  $\phi_1 / V_1$  และ  $\phi_2 / V_2$  มีค่าน้อยมาก ทำให้เอนโทรปีของการผสมมีค่าน้อย (สองเทอมแรกในสมการ) ตัดทิ้งได้ ดังนั้นความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมจะขึ้นกับพารามิเตอร์ในการเกิดอันตรกิริยาเท่านั้น ดังสมการ

$$\Delta G_{\text{mix}}^V = B_{12} \phi_1 \phi_2 \quad (2.13)$$

พอลิเมอร์จะรวมเข้ากันได้ก็ต่อเมื่อ พารามิเตอร์ในการเกิดอันตรกิริยามีค่าเป็นลบ แต่โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างของพอลิเมอร์ไม่มีขั้ว (เป็นไฮโดรคาร์บอน) ทำให้ดึงดูดซึ่งกันและกันได้ไม่ดี

ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจะไม่ดึงดูดกับพอลิเมอร์ที่มีขั้ว ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ในการเกิดอันตรกิริยาจึงเป็นบวก พอลิเมอร์ผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน พอลิเมอร์ส่วนใหญ่ที่นำมาใช้ในชีวิตประจำวันเป็นพอลิเมอร์ชนิดนี้ ดังนั้นจึงเป็นปัญหาในการใช้เทคนิคพอลิเมอร์ผสมแก้ปัญหาขยะพลาสติก แต่เมื่อมีการเติมสารช่วยผสมประเภทพอลิเมอร์ร่วมแบบลึกลับที่มีองค์ประกอบทางเคมีเหมือนคู่พอลิเมอร์ผสมลงไป ในพอลิเมอร์ผสม การหลอมเข้าในบางส่วนของสารช่วยผสมกับพอลิเมอร์ผสมทำให้ค่าพารามิเตอร์  $B_{12}$  เป็นลบ ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน

สำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์ที่มีขั้ว ในทางอุณหพลศาสตร์แตกต่างจากพอลิเมอร์หลักที่ไม่มีขั้ว โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่มีขั้วอาจจะมีหมู่ฟังก์ชันหลาย ๆ หมู่ฟังก์ชัน ด้วยเหตุนี้จึงมีแรงยึดเหนี่ยวจำเพาะ ( specific-interaction ) ได้แก่ แรงยึดเหนี่ยวไดโพล-ไดโพล ( dipole-dipole interaction ) แรงยึดเหนี่ยวไดโพล-ไอออน ( ion-dipole interaction ) พันธะไฮโดรเจน ( hydrogen bonding ) ปฏิกิริยากรด-เบส ( acid-base reaction ) หรือ การถ่ายโอนประจุ ( charge ) ทำให้สามารถดึงดูดกับพอลิเมอร์อื่นในการผสมได้ดี  $B_{12}$  ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเป็นลบ ดังนั้นพอลิเมอร์ผสมที่มีองค์ประกอบหลักเป็นพอลิเมอร์ที่มีขั้วจึงผสมเป็นเนื้อเดียวกัน

## 2.6 การรวมเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมทางเชิงกลและทางเคมี [28]

การผสมเป็นเนื้อเดียวกันขึ้นกับกระบวนการผสม การไหลขององค์ประกอบ แรงดึงระหว่างผิวของการหลอมเหลว ที่เหมาะสมในแต่ละคู่พอลิเมอร์ผสม จากปัจจัยดังกล่าวจะนำไปสู่การปรับปรุงแรงยึดติดระหว่างผิว ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และสมบัติเชิงกลขององค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันให้มีสมบัติเชิงกลตรงตามความต้องการ แสดงได้ดังรูปที่ 2.5

### 2.6.1 กระบวนการช่วยการรวมเข้ากันทางเชิงกล

วิธีนี้เป็นการพัฒนาลักษณะทางสัณฐานวิทยา โดยปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิต ได้แก่การปรับเปลี่ยนเครื่องมือที่ใช้ในการผสม เช่น เครื่องผสมภายใน เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ สภาวะที่ใช้ในการผสม เช่น ความเร็วรอบ อุณหภูมิ เวลา และความดันที่ใช้ในการผสม วิไลพร และคณะ [19] ได้ศึกษาถึงเวลาที่ใช้ในการผสม และชนิดของเครื่องมือที่ใช้ในการผสมพีวีซีกับยางไนไตรล์ พบว่าเวลาที่ใช้ในการผสมมีผลต่อสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม และสมบัติเชิงกลจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการผสม นอกจากนี้พบว่าการใช้เครื่องผสมแบบบานมูรี จะให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าการผสมโดยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ ทั้งนี้พอลิเมอร์ผสมจะต้องมีอัตราส่วนในการผสมโดยน้ำหนักใกล้เคียงกัน ตัวอย่างเช่นพอลิเมอร์ผสมของพอลิเอทิลีน กับพอลิสไตรีน ที่อัตราส่วน 50/50 การเกี่ยวพันทางเชิงกลส่งผลให้ลักษณะทางสัณฐานวิทยาเสถียรที่  $180^{\circ}\text{C}$  กระบวนการนี้เกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

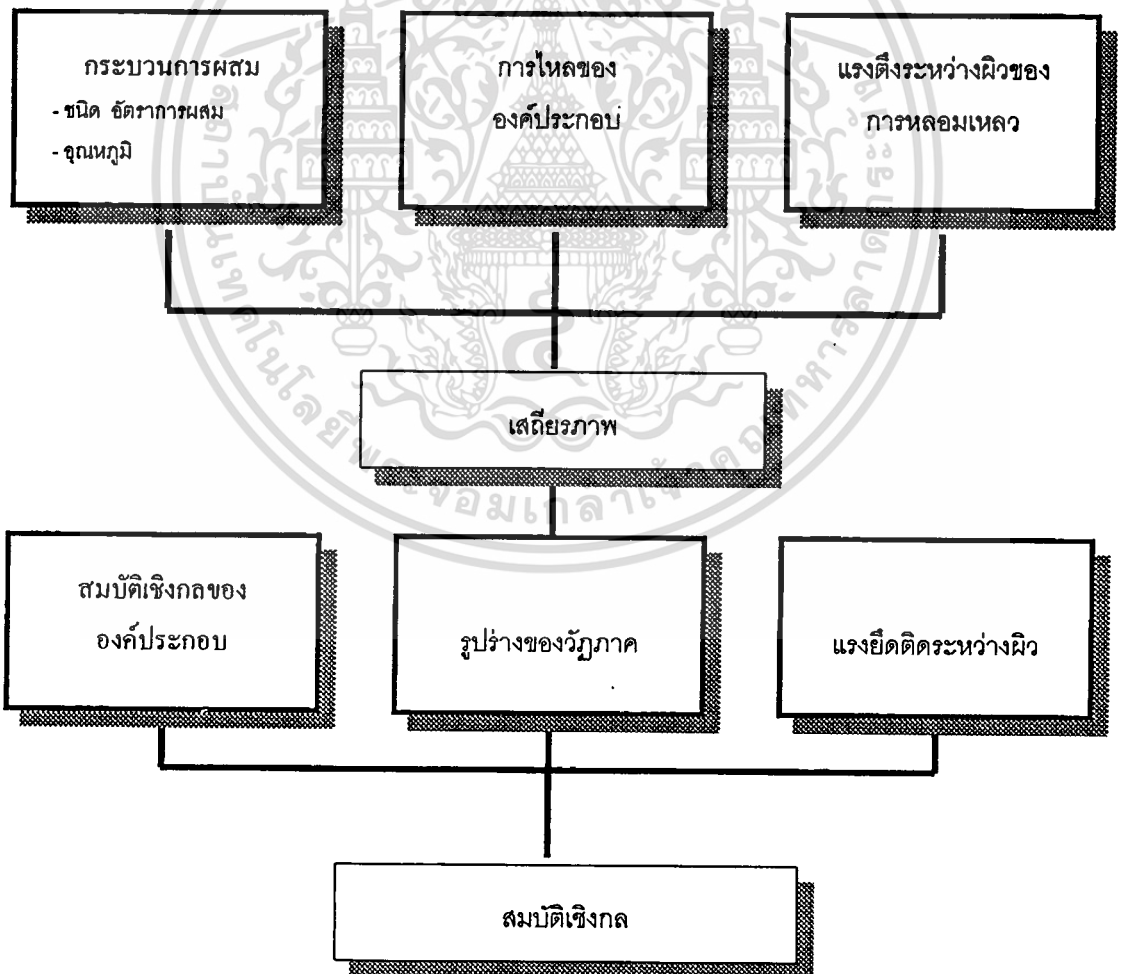
$$\frac{\phi_1}{\phi_2} = \frac{\eta_1}{\eta_2} = \lambda \quad (2.14)$$

เมื่อ  $\phi_1$  และ  $\phi_2$  เป็นเศษส่วนปริมาตรในการผสมของพอลิเมอร์ที่ 1 และ 2

$\eta_1$  และ  $\eta_2$  เป็นความหนืดของพอลิเมอร์ที่ 1 และ 2

$\lambda$  เป็นอัตราส่วนความหนืดของพอลิเมอร์ที่ 1 และ 2

จากเงื่อนไขดังกล่าวข้างต้น จะทำให้สถานการณ์วิทยาเสถียรได้ก็ต่อเมื่อเลือกใช้ความหนืด และ อัตราส่วนของเศษส่วนปริมาตรใกล้เคียงกันระหว่างพอลิเมอร์หลัก และพอลิเมอร์ที่เป็นวัฏภาค กระจายตัว



รูปที่ 2.5 แสดงปัจจัยที่ช่วยในการรวมเข้ากันได้ที่มีต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6.2 การรวมเข้ากันทางเคมี

อันตรกิริยาทางเคมีจะเกิดขึ้นได้เมื่อมีการทำปฏิกิริยาทางเคมีของหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งจะเป็นการส่งเสริมการยึดติดของสองวัสดุภาคโดยอาศัยปฏิกิริยาทั่วไป เช่นปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่าง พอลิเอสเทอร์ กับ พอลิเอไมด์ การรวมกันของสองพอลิเมอร์ดังกล่าวจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงแบบร่างแห (interpenetrating network) ที่เสถียร หรือเกิดการเชื่อมโยงทางเคมี (chemical crosslink) ทำให้มีการสร้างพอลิเมอร์ร่วม หรือมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นระหว่างพอลิเมอร์หนึ่งกับอีกพอลิเมอร์หนึ่ง

ตัวอย่าง ปฏิกิริยาทางเคมีที่สามารถเกิดขึ้นได้ในระหว่างการผสมได้แก่ [29]

- การสร้างพอลิเมอร์ร่วมแบบกราฟท์ หรือแบบบล็อก ด้วยพันธะเคมี โดยการเติมสารเริ่มต้นที่เป็นอนุมูลอิสระลงไปในพอลิเมอร์ผสม
- การสร้างพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อก ด้วยการทำปฏิกิริยาระหว่างสายโซ่หลักของพอลิเมอร์ที่มีขั้ว (interchange reaction)
- การผสมที่มีการใช้แรงเฉือนสูง อาจจะทำให้บางสายโซ่ของพอลิเมอร์แตกออกจากกัน และสามารถรวมกันเป็นโครงสร้างใหม่โดยอาศัยกลไกของอนุมูลอิสระ ผลที่เกิดขึ้นมีลักษณะเช่นเดียวกับการผสมพอลิโอฟีนในสภาวะการผสมที่รุนแรง

## 2.7 สารช่วยผสม [30]

สารช่วยผสม หมายถึง สารที่ผสมลงไปในพอลิเมอร์เพื่อช่วยในการละลาย และลดแรงตึงผิวระหว่างวัสดุภาคที่แยกกันอยู่ของพอลิเมอร์หลักทั้งสองชนิด ทำให้ขนาดของอนุภาคในวัสดุภาคกระจายตัวลดลง ส่งผลให้พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดผสมเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่เสถียร ไม่มีการแยกวัสดุภาคระหว่างการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ และให้สมบัติเชิงกลดีขึ้นเมื่อเทียบกับระบบพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ดังนั้นการปรับปรุงแรงยึดระหว่างผิวโดยเติมสารช่วยผสม จึงเป็นสิ่งสำคัญในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม การเติมสารช่วยผสม เป็นวิธีที่นิยมกันมากเนื่องจากเป็นวิธีที่ได้สะดวก และให้สมบัติตรงตามความต้องการในการนำไปใช้ประโยชน์ ตัวอย่างเช่น การเติมพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อก หรือกราฟท์ที่มีองค์ประกอบทางเคมีเหมือนกับพอลิเมอร์ผสม ทำให้เกิดการยึดเกาะด้วยพันธะเคมีระหว่างวัสดุภาค ความหนาของชั้นที่พื้นผิวเพิ่มขึ้น หรือการเติมสารที่มีองค์ประกอบไดออกซิเจนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ จะไปช่วยส่งเสริมการเป็นเนื้อเดียวกัน ตัวอย่างสารช่วยผสม แสดงไว้ดังตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงการเลือกใช้สารช่วยผสมกับระบบต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสม

พอลิเมอร์ผสม		สารช่วยผสม
พอลิเมอร์ A	พอลิเมอร์ B	
HDPE	PBT	PEI
	PC	SEBS
	PEC	SEBS
	PET	EVA
		SEBS
	PP	EPR
		SEBS
		PE-g-PP
	PS	SEBS
PS,PET	SEBS	
LDPE	PA-6	PP-g-MA
		EMA
	PP	EPR
	PS	PE-g-PS
NBR	PP	PP-g-NBR
PA-6	EPDM	EPDM-g-MA
	PP	PP-g-AA
		PP-g-MAA
		PHFA
	PS	PHFA
	PS-g-MA	
PBT	PS	PS-b-PBT
	PPO	PS-b-PBT
PP	PS	SEBS
PPO	PEEK-C	PEO-PS-PEO
	PS	SEBS

### 2.7.1 ประเภทของสารช่วยผสม แบ่งเป็น 2 ประเภท ได้ดังนี้

2.7.1.1 พอลิเมอร์ร่วมที่ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเมอร์หลักในพอลิเมอร์ผสม มีโครงสร้างทางเคมีเช่นเดียวกับพอลิเมอร์หลักทั้งสองชนิด เช่น พอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกของ A-B โดยที่ บล็อก A จะละลายอยู่ในพอลิเมอร์ A ส่วน บล็อก B จะละลายอยู่ในพอลิเมอร์ B ทำให้แทรกเข้าไปอยู่ได้ทั้งสองวัฏภาค และทำตัวเป็นสะพานเชื่อมระหว่างวัฏภาคทั้งสอง ที่นิยมนำมาใช้กันอย่างกว้างขวาง ได้แก่ สไตรีน-บิวทาไดอีน-สไตรีน สไตรีน-(เอทิลีน-บิวทาไดอีน-สไตรีน) ซึ่งใช้เป็นสารช่วยผสม ระหว่างพอลิสไตรีน กับพอลิเอทิลีน หรือพอลิสไตรีน กับพอลิพรอพิลีน

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิเมอร์ร่วมอื่น ๆ ที่มีโครงสร้างทางเคมีแตกต่างจากพอลิเมอร์ที่นำมาผสมก็มีประสิทธิภาพช่วยในการผสมได้ดีเช่นเดียวกัน ถ้าพอลิเมอร์ร่วมเหล่านั้นมีแรงยึดเหนี่ยวจำเพาะที่สามารถรวมเข้ากันได้กับพอลิเมอร์หลักเพียงหนึ่งหรือสองชนิด

2.7.1.2 พอลิเมอร์ร่วมที่ทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์หลักในพอลิเมอร์ผสม เช่น พอลิเมอร์ร่วมของ C-D ในพอลิเมอร์ผสมของ A-B พอลิเมอร์ร่วมของ C-D จะทำปฏิกิริยาในแต่ละพอลิเมอร์ ถ้า C รวมเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ A D จะรวมเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ B ซึ่งถือได้ว่า เป็นสารช่วยผสมที่มีประสิทธิภาพมาก ทั้งนี้เพราะเมื่อผ่านกรรมวิธีการขึ้นรูปจะทำให้สัณฐานวิทยาของการผสมมีความเสถียร สารที่มีสมบัติช่วยผสมแบบนี้จะก่อให้เกิดโครงร่างแหหรือวัลคาไนซ์ ในการผสม ทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่มีความแข็งแรงและมีเสถียรภาพสูง ทั้งนี้ขึ้นกับพอลิเมอร์หลักในพอลิเมอร์ผสม พอลิเมอร์ร่วมในกลุ่มนี้ได้แก่

- พอลิเมอร์ร่วมที่มีหมู่วงไวต่อการทำปฏิกิริยาต่ออยู่ในโครง หรือ ปลายสายโซ่ของพอลิเมอร์ร่วม ตัวอย่างหมู่วงไว ได้แก่ มาลิกแอนไฮไดรด์ ไวนิลแอซีเตต กรดฟูมาริก กรดคาร์บอกซิลิก โครงสร้างพอลิเมอร์ร่วมแบบนี้ทั้งที่เป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อก และแบบแรนดอม เช่น สไตรีน-มาลิกแอนไฮไดรด์ และเอทิลีนไวนิล-แอซีเตต เป็นสารช่วยผสมระหว่างพอลิสไตรีน กับพอลิเอทิลีน เอทิลีน-พโรพิลีน เทอพอลิเมอร์เป็นสารช่วยผสมระหว่างพอลิเอทิลีน กับพอลิพโรพิลีน และเอทิลีน-พโรพิลีน เทอพอลิเมอร์ ที่ผ่านการตอกกับมาลิกแอนไฮไดรด์ เป็นสารช่วยผสมระหว่างพอลิเมอร์มีขั้ว กับไม่มีขั้ว

- พอลิเมอร์ร่วมที่ผ่านการตอกกับมอนอเมอร์ เตรียมได้โดยการเติมตัวริเริ่ม โดยทั่วไปใช้เปอร์ออกไซด์ ทำให้เกิดอนุมูลอิสระบนพอลิเมอร์หลักหนึ่ง หรือสองชนิดที่นำมาผสมกัน จากนั้นเติมมอนอเมอร์ลงไปตอกกับอนุมูลอิสระของพอลิเมอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาข้างต้น

สารที่มีสมบัติช่วยผสมในการทำวิทยานิพนธ์ ได้แก่ พอลิสไตรีน-บิวทาไดอีน-สไตรีน [1,31]

SBS เป็นเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ ซึ่งมีโครงสร้างเป็น 3 บล็อก ประกอบด้วย 2 ภูมิภาค ได้แก่ ภูมิภาคแข็ง และภูมิภาคอ่อน ส่วนของพอลิสไตรีน ( ภูมิภาคแข็ง ) มีประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 10,000 - 30,000 และอยู่ด้านข้างทั้งสองด้านของภูมิภาคอ่อน ส่วนของ 1,4-พอลิบิวทาไดอีน ( ภูมิภาคอ่อน ) มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 30,000 - 100,000 ภูมิภาคแข็งมีรูปร่างทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.01-0.03 ไมครอน ( รูปร่างที่มีลักษณะเป็นแท่งกลมและเป็นแผ่นก็พบอยู่ด้วย ) ทำหน้าที่เชื่อมโยงทางกายภาพให้เกิดโครงร่างตาข่าย ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการกระจายของอนุภาคสารตัวเติมเสริมแรงในการเพิ่มความแข็งแรง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้กับพอลิเมอร์ การเชื่อมโยงโดยวัฏภาคแข็งจะทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิสไตรีนลดลง

โดยทั่วไปสารที่เป็นพลาสติกอิลาสโตเมอร์ เช่น SBS จะมีสมบัติง่ายต่อกระบวนการขึ้นรูปและใช้เทคนิคเดียวกับเทอร์โมพลาสติก ใช้สารเติมแต่งใส่ในพอลิเมอร์ไม่มาก ใช้เวลาในการผสมสั้น สามารถนำเศษและของเสียกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยไม่ทำให้เกิดการสูญเสียและมีสมบัติคงเดิม พลังงานที่ใช้ในการขึ้นรูปต่ำ สามารถควบคุมรูปร่างให้เป็นไปตามความต้องการได้ง่าย และที่ปริมาณเท่ากันจะมีน้ำหนักเบากว่ายางเทอร์โมเซต

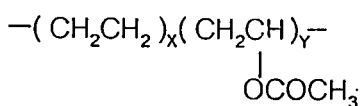
สูตรโครงสร้างทั่วไปของ สไตรีน-บิวทาไดอีน-สไตรีน เขียนได้ดังนี้



รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างจุลภาคของสไตรีน-บิวทาไดอีน-สไตรีน

เอทิลีน-ไวนิลแอสเตต [32,33]

สูตรโครงสร้างเป็นดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอทิลีน-ไวนิลเอซีเตต เตรียมได้จากพอลิเมอไรเซชันร่วมระหว่างเอทิลีน กับไวนิลเอซีเตต ซึ่งโดยทั่วไปเป็นการพอลิเมอไรเซชันแบบอนุกรมอิสระ ใช้สารตั้งต้นเป็นเปอร์ออกไซด์ หรือเปอร์เอสเทอร์ เอทิลีน-ไวนิลเอซีเตต มีหลายเกรดแตกต่างกันในเรื่องปริมาณไวนิลเอซีเตต ซึ่งอยู่ในช่วง 5 - 50% ปริมาณของไวนิลเอซีเตตเป็นตัวบ่งบอกว่าพอลิเมอร์จะมีสมบัติอยู่ในช่วงของเทอร์โมพลาสติก หรืออีลาสโตเมอร์ เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิโอเลฟินอื่น เช่น LDPE EVA จะมีความเหนียว ความโค้งงอ ลักษณะของการยึดติด และการทนทานต่อการแตกหักได้ดีกว่า EVA มีความเป็นขั้วมากแต่มีความเป็นผลึกน้อย นำมาใช้ในรูปภาชนะบรรจุที่บด หุ้มลวด หุ้มสายเคเบิล ใช้ในงานเคลือบและใช้ในกระบวนการผสมสารเติมแต่งในพอลิเมอร์ ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โดยการฉีด และการเป่า เอทิลีน-ไวนิลเอซีเตต สามารถใช้ผสมในพอลิเอทิลีน โดยจะมีประโยชน์ช่วยเพิ่มความสามารถในการโค้งงอ และมีความยืดหยุ่น

## 2.7.2 น้ำหนักโมเลกุลและรูปร่างของสารช่วยผสม [29,30]

สารช่วยผสมมีมากมาย การเลือกจะต้องพิจารณาถึง น้ำหนักโมเลกุล ปริมาณ และลักษณะรูปร่างโมเลกุล

2.7.2.1 ผลของน้ำหนักโมเลกุล เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการพิจารณาเลือกใช้สารช่วยผสม เพราะมีผลต่อการรวมเข้ากันได้ กล่าวคือ พอลิเมอร์ร่วมที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถจะแทรกเข้าไปในแต่ละวัฏภาคได้ง่าย แต่ทั้งนี้ความยาวของสายโซ่ของพอลิเมอร์ร่วมนั้นต้องพอเพียงที่จะก่อให้เกิดการเกี่ยวพันกับโมเลกุลขององค์ประกอบหลักในพอลิเมอร์ผสม ( ความยาว  $\approx 15-20$  หน่วย ) และน้ำหนักโมเลกุลของสารช่วยผสมมีผลต่อความหนืดในการหลอมเหลว กล่าวคือ ถ้าน้ำหนักโมเลกุลสูง ความหนืดมาก และถ้าน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ความหนืดน้อย ดังนั้นสารช่วยผสมที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะมีการกระจายของวัฏภาคหนึ่งไปอีกวัฏภาคหนึ่งเพิ่มมากขึ้น และมีการกระจายขนาดอนุภาคอย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้แล้วยังต้องคำนึงถึงเวลาในการแพร่ไปอยู่ระหว่างผิวของพอลิเมอร์ผสมด้วย ซึ่งสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ต้องใช้เวลาในการแพร่ยาวนานกว่าสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ฉะนั้นในการพิจารณาเลือกน้ำหนักโมเลกุลของสารช่วยผสมต้องสมดุลกับเวลาที่ใช้ในการผสม

2.7.2.2 ลักษณะรูปร่างของโมเลกุล สารช่วยผสมต้องรวมเข้ากับองค์ประกอบของแต่ละวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสมได้ เช่น พอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อก หรือกราฟท์ที่มีองค์ประกอบทางเคมีเหมือนกับองค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสม ลักษณะรูปร่างที่แตกต่างกันของพอลิเมอร์ร่วมดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกล และความสามารถในการแพร่เข้าไปอยู่ระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสมแตกต่างกันไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fayt [29] ศึกษาการใช้พอลิเมอร์ร่วมที่มีองค์ประกอบทางเคมีเหมือนกับองค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสม เป็นสารช่วยผสมของพอลิเมอร์ผสมของพอลิเอทิลีน กับพอลิสไตรีน พบว่าพอลิเมอร์ร่วมแบบ 2 บล็อก แบบโซ่ตรงจะช่วยเสริมสมบัติเชิงกล สมบัติการยึดติดระหว่างวัฏภาค และสามารถแพร่เข้าไปอยู่ระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสมได้อย่างรวดเร็ว พอลิเมอร์ร่วมแบบกราฟท์ จะช่วยเสริมสมบัติเชิงกล สมบัติการยึดติดระหว่างวัฏภาคต่ำกว่าแบบ 3 บล็อก และพอลิเมอร์ร่วมแบบสตาร์

Leibler [29] ศึกษาพอลิเมอร์ร่วมแบบ 2 บล็อก ที่มีโครงสร้างสมมาตรกับไม่สมมาตรเป็นสารช่วยผสม พบว่า พอลิเมอร์ร่วมแบบ 2 บล็อก ที่มีโครงสร้างสมมาตรให้ผลการยึดติดระหว่างวัฏภาคแข็งแรงกว่าโครงสร้างที่ไม่สมมาตร แต่เมื่อมีการบ่ม (cure) พอลิเมอร์ร่วมแบบ 2 บล็อกที่มีโครงสร้างสมมาตรจะมีการเคลื่อนตัวออกจากบริเวณระหว่างผิว ขณะที่โครงสร้างที่ไม่สมมาตรจะอยู่ในรูปของไมเซล ซึ่งสามารถกระจายตัวไปยังองค์ประกอบอื่นได้



รูปที่ 2.7 แสดงการแพร่ของสารช่วยผสมที่มีโครงสร้างต่างกัน

## 2.8 การวัดความสามารถในการผสมเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม [34,36]

การตรวจวัดองค์ประกอบของการเข้ากันได้ และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างวัฏภาคมีความสำคัญมากต่อสมบัติ และพฤติกรรมของพอลิเมอร์ผสม เทคนิคโดยทั่วไปจะศึกษาถึงสัณฐานวิทยา และการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม ดังนี้

การตรวจวัดความขุ่น ถ้าของผสมขุ่นแสดงว่าระบบมีการแยกออกจากกันเป็นหลายวัฏภาค เทคนิคที่อาศัยการกระเจิงแสง ตรวจวัดได้ในระดับโครงสร้างโมเลกุล ใช้ความยาวคลื่นสั้น ประมาณ 0.1-0.3 นาโนเมตร ได้แก่ เอกซ์-เรย์ เทอมัล นิวตรอน เทคนิคสมอล-แองเจิล เอกซ์-เรย์ สเกตเทอร์ริง ( SAXS ) และ สมอล-แองเจิล นิวตรอน สเกตเทอร์ริง ( SANS ) สามารถวัดได้ในระดับ 5 และ 50 นาโนเมตร ตามลำดับ และเทคนิค ไวต์-แองเจิล เอกซ์-เรย์ สเกตเทอร์ริง ( WAXS ) สามารถวัดได้ละเอียดระดับโมเลกุล ( 0.1-1 nm )

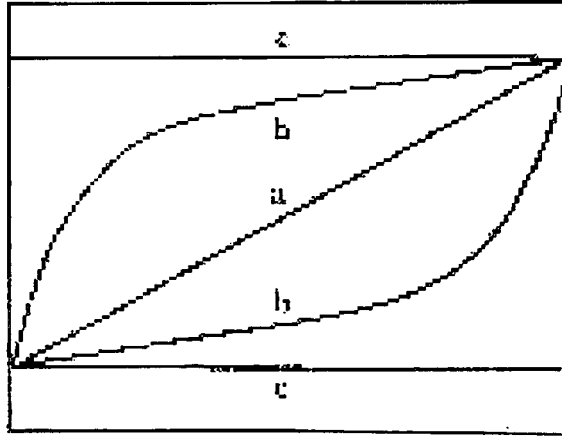
**2.8.1 ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับแสง** เป็นการทดสอบที่อาศัยการตรวจวัดค่าดัชนีหักเห ( refractive indices :  $n_m$  ) ตรวจวัดได้ละเอียดระดับไมครอน พอลิเมอร์ผสมเป็นเนื้อเดียวกันจะมีดัชนีหักเหเพียง 1 ค่า แต่ถ้าพอลิเมอร์ผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน กล่าวคือ พอลิเมอร์หนึ่งมีลักษณะเป็นวัฏภาคที่กระจายตัวอยู่ในอีกพอลิเมอร์หนึ่ง ทำให้เกิดการกระเจิงแสงของอนุภาคกระจายตัว ส่งผลให้มีค่าดัชนีหักเหมากกว่า 1 ค่า การทดสอบวิธีนี้อาจทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันมีลักษณะเหมือนเป็นเนื้อเดียวกัน เนื่องจาก

- ฟิล์มที่ทดสอบมีลักษณะบางมาก
- อนุภาคของพอลิเมอร์ที่กระจายตัวมีขนาดเล็กมาก ทำให้การกระเจิงแสงลดลง
- พอลิเมอร์ในพอลิเมอร์ผสมมีดัชนีหักเหเหมือนกัน แต่การกระเจิงแสงไม่เท่ากัน

### 2.8.2 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว : $T_g$

อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์ คือ อุณหภูมิที่โมเลกุลของสายโซ่เกิดการสั่นเมื่อได้รับพลังงานอย่างพอเพียง และตำแหน่งของอุณหภูมิขึ้นกับธรรมชาติของพอลิเมอร์ เทคนิคที่ใช้วัดอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ได้แก่ ไดอิลคทริก รีแล็คเซชัน การทดสอบเชิงกล นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่ง แคลอริคเมทรี และดิฟเฟอเรนเชียล เทอมัล อแนลไลซิส ซึ่งจำกัดในการวัดอยู่ในช่วง 2-15 นาโนเมตร ถ้าในระบบพอลิเมอร์ผสม ปรากฏเห็นค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว 2 ค่า แสดงว่าพอลิเมอร์ผสมแยกออกเป็น 2 วัฏภาค ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วกับองค์ประกอบของพอลิเมอร์แสดงดังรูปที่ 2.8 ความแตกต่างของอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (  $\Delta T_g$  ) มีความสำคัญมาก ดังนั้นเทคนิคการวัดอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วจะไม่นำมาใช้กับระบบพอลิเมอร์ผสมที่มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่างกันเพียง 20 °K ความกว้างของอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเป็นตัวบ่งชี้ความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม คือในระบบของผสมที่สามารถเข้ากันได้จะให้ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วแคบ ขณะที่ในระบบของผสมที่เข้ากันไม่ได้จะให้ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วกว้าง ศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว : Tg



องค์ประกอบพอลิเมอร์ผสม

รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วกับองค์ประกอบ

ในพอลิเมอร์ผสม

เมื่อ A แทนพอลิเมอร์ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน B แทนพอลิเมอร์ผสมเป็นเนื้อเดียวกันบางส่วน

C แทนพอลิเมอร์ผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

สมการแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วของของผสมที่เป็นเนื้อเดียวกัน และอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วของแต่ละองค์ประกอบ ( Fox equation ) ดังนี้

$$\frac{1}{T_g} = \sum_{i=1}^n \frac{W_i}{T_{g_i}} \quad (2.15)$$

เมื่อ  $W_i$  เป็นสัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบ  $i$

$n$  เป็นจำนวนองค์ประกอบ

สมการของ Utracki และ Jukes กล่าวไว้ดังนี้

$$\frac{\ln T_g}{T_g} = \sum_{i=1}^n \frac{W_i \ln T_{g_i}}{T_i} \quad (2.16)$$

Parada และ Perces กล่าวว่าของผสมที่เข้ากันได้จะให้ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วสูงกว่าค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของแต่ละองค์ประกอบ ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงระหว่างโมเลกุลของแต่ละองค์ประกอบ

**2.8.3 เทคนิค นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ และอินฟราเรด สเปกโตรสโกปี**  
จะตรวจวัดได้ในระดับโมเลกุล

**2.8.3.1 นิวเคลียร์แมกเนติก สเปกโตรสโกปี** เป็นเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับการวัดระดับพลังงานที่แตกต่างกันของนิวเคลียสที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก ใช้ในการศึกษาสูตรโครงสร้างของสาร พารามิเตอร์ที่ใช้ตรวจสอบความเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ผสม ได้แก่ ค่าเฉลี่ยของครึ่งชีวิตของกระบวนการ สปิน-แลคทิกซ์ รีแล็คเซชัน เรียกว่า  $T_1$  และของ สปิน-สปิน รีแล็คเซชัน เรียกว่า  $T_2$  โดยที่  $T_1$  หมายถึง นิวเคลียสที่มีพลังงานสูงเกิดการสูญเสียพลังงานแก่สิ่งแวดล้อม  $T_2$  หมายถึง นิวเคลียสที่มีพลังงานสูงเกิดการสูญเสียพลังงานโดยส่งผ่านไปยังนิวเคลียสข้างเคียงที่มีค่า  $\Delta E$  เท่ากันจึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงประชากรในสถานะของสปินทั้งสอง การจัดเรียงตัวของโมเลกุลจะบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของการส่งผ่านพลังงานด้วยกระบวนการสปิน-แลคทิกซ์ รีแล็คเซชัน ตัวอย่างเช่น การจัดเรียงตัวของโมเลกุลค่อนข้างอิสระ การส่งผ่านพลังงานด้วยกระบวนการ สปิน-แลคทิกซ์ รีแล็คเซชัน ไม่มีประสิทธิภาพ  $T_1$  จะมาก ทำให้ นิวเคลียร์แมกเนติก สเปกตรัม มีฟีกของการดูดกลืนคมชัดดี ในขณะที่โมเลกุลอยู่อย่างไม่อิสระจะทำให้  $T_1$  น้อย ฟีก นิวเคลียร์แมกเนติก สเปกตรัมกว้าง จากหลักการดังกล่าวสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการตรวจสอบความเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ผสมได้

**2.8.3.2 อินฟราเรด สเปกโตรสโกปี** เป็นเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของสาร อินฟราเรดสเปกตรัม ขึ้นกับธรรมชาติของโมเลกุล และอนุภาคที่มีอันตรกิริยาเฉพาะระหว่างหมู่ฟังก์ชันของคู่พอลิเมอร์ ดังนั้นในการตรวจสอบความเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ผสม จึงสังเกตได้จากการเปลี่ยนตำแหน่ง และลักษณะของฟีกการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด ที่เกิดจากการแกว่งไปมาของการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่ของโมเลกุล ตัวอย่างการตรวจสอบการดูดกลืนหมู่คาร์บอนิล ใน พอลิเอสเทอร์ กรณีที่เกิดพันธะไฮโดรเจนกับพอลิเมอร์อื่น เป็นผลให้ค่าคงที่แรงของพันธะ  $C=O$  ลดลง และความถี่ของการดูดกลืนหมู่คาร์บอนิลก็ลดลงด้วย และในกรณีที่หมู่คาร์บอนิลรวมตัวกันเองได้แก่ คาร์บอกซิลิกเอซิด หรือรวมกับหมู่ฟังก์ชันอื่นในพอลิเมอร์ ได้แก่  $C=O \dots HN$  ในพอลิเอไมด์ ผลการเปลี่ยนตำแหน่งในการดูดกลืนหมู่คาร์บอนิลจะขึ้นกับจำนวน และชนิดของการเกิดอันตรกิริยา

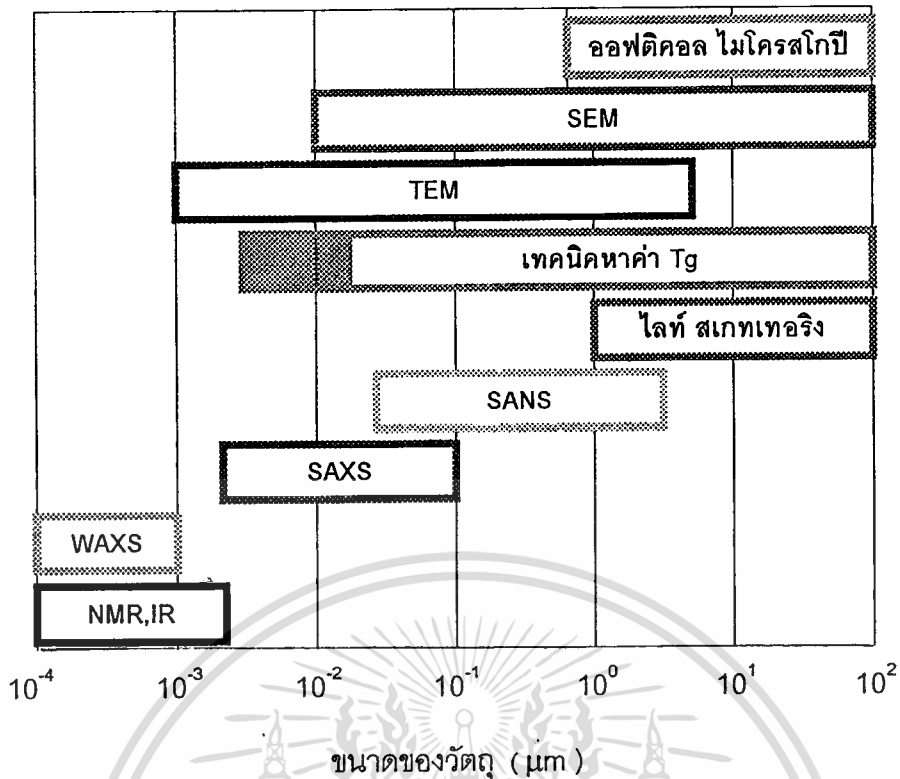
**2.8.4 ไมโครสโกปี** เป็นวิธีที่สำคัญและนิยมใช้ในการทำนายสมบัติของพอลิเมอร์ผสม วิธีนี้เหมาะสำหรับพอลิเมอร์ผสมที่มีขนาดอนุภาคเล็ก ซึ่งถือได้ว่าพอลิเมอร์ผสมนี้มีลักษณะพิเศษ เพราะการใช้วิธีอื่นที่กล่าวไว้ในข้างต้นอาจจะทำให้เข้าใจผิดได้ว่าเป็นพอลิเมอร์ผสมที่ผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน แบ่งได้เป็น ออฟทิกัล หรือ ไลท์ ไมโครสโกปี (OM) สแกนนิ่ง อิเล็กตรอน ไมโครสโกปี (SEM) และ ทรานสมิสชัน อิเล็กตรอน ไมโครสโกปี (TEM)

**2.8.4.1 ออฟทิกัล ไมโครสโกปี** เป็นเทคนิคที่ใช้ตรวจสอบขนาดของวิภาค และการกระจายวิภาค แต่ไม่สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับอันตรกิริยาระหว่างผิว และความสามารถในการเข้ากันได้ของ 2 วิภาค การเตรียมตัวอย่างเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ทำได้ง่าย แต่เทคนิคนี้ไม่มีประสิทธิภาพพอเพียงในการตรวจวัดวิภาคที่มีอนุภาคขนาดเล็ก หรือพอลิเมอร์ผสมในระดับอนุภาค อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของวิธีนี้ยังขึ้นกับเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ โพลาริซ์-ไลท์ เฟสคอนทราสต์ ดิฟเฟอเรนเชียล อินเทอร์เฟส คอนทราสต์ และ ฟลูออเรสเซนต์

**2.8.4.2 สแกนนิ่ง อิเล็กตรอน ไมโครสโกปี** เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางในการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวิภาคพอลิเมอร์ ข้อมูลที่ได้จะปรากฏให้เห็นที่บริเวณพื้นผิวของตัวอย่าง มีกำลังขยาย  $20-10^5$  เท่า ความสามารถในการแยกประมาณ 20 นาโนเมตร ซึ่งสูงกว่า ออฟทิกัล ไมโครสโกปี ถึง 50 เท่า และง่ายต่อการเตรียมตัวอย่างทดสอบ

**2.8.4.3 ทรานสมิสชัน อิเล็กตรอน ไมโครสโกปี** เป็นเทคนิคที่ใช้ตรวจสอบโครงสร้างผลึก การจัดเรียงตัว และลักษณะสัณฐานวิทยา โดยใช้  $OsO_4$  และ  $RuO_4$  เป็นตัวย้อมสี ทำให้เห็นการแยกของวิภาคชัดเจนขึ้น ความสามารถในการแยกอยู่ในช่วง 2-3 นาโนเมตร ซึ่งสูงกว่า ออฟทิกัล ไมโครสโกปี และ สแกนนิ่ง อิเล็กตรอน ไมโครสโกปี การเตรียมตัวอย่างจะต้องเตรียมเป็นฟิล์มบางน้อยกว่า 1 ไมโครเมตร

ความสามารถในการเข้ากันได้ และ อันตรกิริยาระหว่างผิว อาจตรวจวัดได้โดยใช้เทคนิค ไมโครสโกปีรวมกับการใช้เทคนิคอื่น Utracki ได้ประมาณช่วงในการใช้เทคนิคเหล่านี้ศึกษา สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม แสดงได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงความสามารถในการแยกของเทคนิคต่าง ๆ ที่ใช้ตรวจวัดความเป็นเนื้อเดียวกัน

## 2.9 เทคนิคการฉายรังสี

การนำรังสีพลังงานสูงมาใช้ประโยชน์เป็นเทคนิคที่ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพราะเป็นการนำพลังงานที่ธาตุกัมมันตรังสีปล่อยออกมาใช้อย่างคุ้มค่าเกิดประโยชน์สูงสุด พลังงานจากรังสีก่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงและปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของวัสดุ การใช้รังสีเป็นการลดการใช้สารเคมีจึงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย นอกจากนี้เทคนิคการฉายรังสีสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปเรียบร้อยแล้วซึ่งเทคนิคอื่นไม่อาจทำได้

### 2.9.1 ประเภทของการฉายรังสี แบ่งเป็น 2 ประเภท ดังนี้ [36]

2.9.1.1 รังสีที่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน ( ionizing radiation ) เกิดจากไอโซโทปรังสี ได้แก่ โคบอล-60 สทรอนเดียม-90 และซีเซียม-137 พลังงานในกลุ่มนี้ได้แก่

- รังสีแกมมาเป็นพลังงานที่แผ่ออกจากนิวเคลียสของอะตอมธาตุกัมมันตภาพรังสีในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นเดียวกับแสงสว่างจากดวงอาทิตย์ โมเลกุล

ที่รังสีผ่านจะแตกตัวเป็นไอออนได้มาก มีอำนาจในการทะลุทะลวงสูง แต่ไม่นิยมใช้เนื่องจากแหล่งกำเนิดรังสีควบคุมยาก เวลาในการทำงานนาน

- ตัวเร่ง ลำอิเล็กตรอน เป็นเครื่องมือที่ก่อให้เกิดการแตกตัวอีกชนิดหนึ่ง เกิดจากการให้ความร้อนกับแผ่นโลหะจนอิเล็กตรอนหลุดออกมา สามารถควบคุมปริมาณของอิเล็กตรอนและใช้สะดวกกว่ารังสีแกมมา นิยมนำมาใช้ในงานด้านพอลิเมอร์

2.9.1.2 รังสีที่ไม่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน ( nonionizing radiation ) เกิดจากเครื่องเร่งอิเล็กตรอน ได้แก่ เรโซแนนท์ ทรานสปอเนออร์ อิเล็กตรอนจากเครื่องเหล่านี้มีอำนาจในการทะลุทะลวงน้อยกว่ารังสีไอโซโทป แต่จะควบคุมการทำงานได้ง่ายกว่า และสามารถปิดเครื่องได้เมื่อไม่ต้องการใช้งาน โดยทั่วไปแล้วนำมาใช้ในงานที่ต้องการความรวดเร็วในการผลิต เช่น การให้ความร้อน การทำให้แห้ง และการบ่ม พลังงานในกลุ่มนี้ได้แก่

- รังสีอัลตราไวโอเล็ต ต้นกำเนิดของรังสี ได้แก่ พลาสมา-อาร์ค คาร์บอน-อาร์ค และหลอดทังสเทน มีพลังงานในการทะลุทะลวงพอเพียงสำหรับแผ่นฟิล์มบาง และบริเวณพื้นผิวของพลาสติกเท่านั้น ใช้ในงานเคลือบและงานพิมพ์

- รังสีอินฟราเรด หรือพลังงานความร้อนนำมาใช้ในงาน เทอโมฟอร์มิง การอัดรีดแผ่นฟิล์ม การจัดเรียงตัว ลามิเนตติ้ง การทำให้แห้ง และการบ่ม

- พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า นำมาใช้ในงานเชื่อมผลิตภัณฑ์ ให้ความร้อนแก่พลาสติกผสมโลหะก่อนผ่านกระบวนการผลิต การบ่มเพื่อการยึดติด

- พลังงานความถี่คลื่นวิทยุ นำมาใช้ในงาน ให้ความร้อนพลาสติกก่อนผ่านกระบวนการผลิต การบ่มเรซิน การขยายตัวเม็ดพอลิสไตรีน การหลอม หรือ การยึดติดพลาสติกด้วยความร้อน และการทำให้แห้ง

- ไมโครเวฟ นำมาใช้ในงาน การบ่ม การให้ความร้อนก่อนผ่านกระบวนการผลิต การหลอม และการทำให้แห้ง

2.9.2 หน่วยวัดปริมาณรังสี [38] ปริมาณรังสีหมายถึงพลังงานรังสีที่ถูกดูดกลืนต่อหน่วยมวลสารของตัวกลางหรือวัตถุที่ได้รับรังสี เรียกว่า แอพซอพโดส หรือ โดส มีหน่วยเป็น แรด ( rad ) วัตถุใดได้รับรังสีแล้วรังสีนั้นถ่ายเทพลังงานให้แก่วัตถุมีค่าเท่ากับ 100 เอิริก ( erg ) ต่อกรัมของวัตถุ หมายความว่าวัตถุนั้นได้รับรังสี 1 แรด หรือ ในหน่วย S.I. เรียกว่า เกรย์ ( gray )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งหมายถึง การถ่ายเทพลังงานของรังสีให้แก่วัตถุมีค่าเท่ากับ 1 จูล ( joule ) ต่อมวลสาร 1 กิโลกรัม

1,000 แรด เท่ากับ 1.0 กิโลแรด ( krad )

100 กิโลแรด เท่ากับ 1.0 กิโลเกรย์ ( kGy )

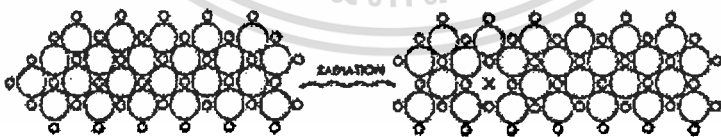
1 กิโลเกรย์ เท่ากับ 0.1 เมกกาแรด ( Mrad )

### 2.9.3 ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงเมื่อฉายรังสี

- ความเข้มของรังสีที่ใช้
- ปริมาณก๊าซออกซิเจนขณะทำการฉายรังสี
- เสถียรภาพของอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นระหว่างการฉายรังสี
- โครงสร้างทางเคมีและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์

### 2.9.4 ผลของการฉายรังสีที่มีต่อพอลิเมอร์ [37]

2.9.4.1 ทำลายโครงสร้างของพอลิเมอร์ และการเสื่อมสภาพ การฉายรังสีทำให้พันธะโคเวเลนต์ในโซ่พอลิเมอร์ เกิดการแตกหัก ( cracking ) เกิดการแตกร้าว ( crazing ) เกิดสีซีดจาง ( discoloration ) แข็ง ( hardening ) เปราะ ( embrittlement ) และทำให้สมบัติอื่น ๆ ลดลง เช่น มวลโมเลกุล การกระจายมวลโมเลกุล โซ่กิ่งสาขา ความเป็นผลึก แต่การละลายเพิ่มขึ้น หรือการฉายรังสีอาจมีผลทำให้อะตอมหลุดออกจากวัสดุที่เป็นของแข็ง เป็นเหตุให้เกิดการแทนที่ที่ว่างด้วยอะตอมอื่น เกิดจุดบกพร่องในโครงสร้างโมเลกุลหลัก เป็นการทำลายโครงสร้างของพอลิเมอร์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกล เคมี และทางไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.10

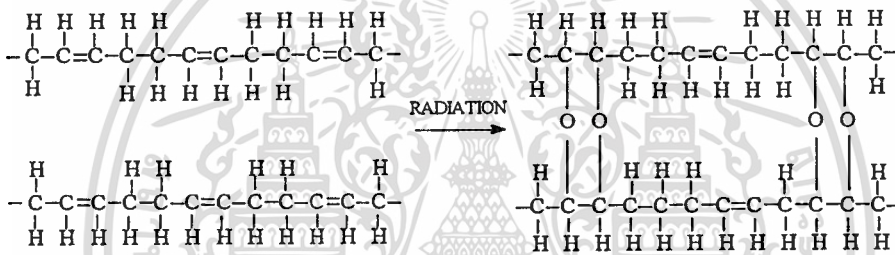


รูปที่ 2.10 แสดงผลของรังสีที่ทำให้เกิดจุดบกพร่องในโครงสร้างหลักของพอลิเมอร์

2.9.4.2 การฉายรังสีช่วยปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ ทำได้โดยควบคุมปริมาณวิธี และเทคนิคการฉายรังสี ทำให้อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจากการแตกหักของพันธะคาร์บอนเกิดการเชื่อมโยง และเกิดโซ่กิ่งสาขา ผลดีที่เกิดจากพันธะเชื่อมโยง ได้แก่ ความทนทานต่อความร้อน เสถียรต่ออนุมูลอิสระใช้งานสูงขึ้น และมีการไหลเย็น การแตกหักเนื่องจากความเค้น ( stress เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

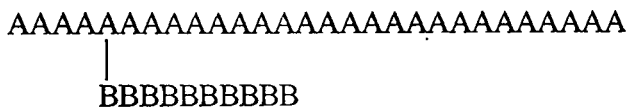
cracking) การแตกหักเนื่องจากอุณหภูมิ (temperature cracking) ลดลง สำหรับโมเลกุล อีลาสโตเมอร์เกิดการเชื่อมโยง หรือเกิดโซ่กิ่งสาขามากๆทำให้สูญเสียสภาพยืดหยุ่นพอลิเมอร์ แข็ง และเปราะ สมบัติทางกายภาพของวัสดุเทอร์โมพลาสติกเมื่อผ่านการฉายรังสีคล้ายคลึงกับ วัสดุเทอร์โมเซต ดังตารางที่ 2.11 ปริมาณรังสีที่ช่วยให้พอลิเมอร์เกิดการเชื่อมโยงขึ้นกับชนิดของ พอลิเมอร์ เช่น พอลิเอทิลีน 20 - 30 Mrads พอลิไวนิลคลอไรด์ 5 - 8 Mrads พอลิไวนิลลิทีน คลอไรด์ 8 - 16 Mrads เอทิลีนไวนิลแอกซีเตต 10 - 15 Mrads และ เอทิลีนคลอโรไตรฟลูออไรด์ เอทิลีน 6 - 10 Mrads

2.9.4.3 การฉายรังสีทำให้เกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน เมื่อได้รับรังสีพันธะโคเวเลนต์ จะเกิดการแตกหักให้อนุมูลอิสระ อนุมูลอิสระเหล่านี้เกิดการรวมตัวเป็นพอลิเมอร์ นิยมนำมาใช้ กับงานบ่ม งานเคลือบ และงานยึดติด



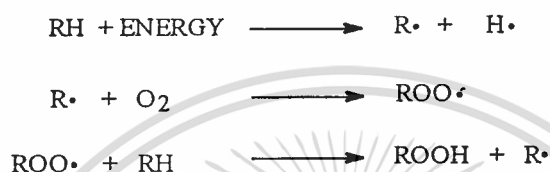
รูปที่ 2.11 แสดงการเชื่อมโยงของพอลิเอทิลีน

2.9.4.4 การฉายรังสีทำให้เกิดการตอกรัง ทำได้โดยการฉายรังสีพอลิเมอร์หลักจาก นั้นเติมมอนอเมอร์ที่ต่างชนิดกับพอลิเมอร์หลัก แล้วทำการฉายรังสีอีกครั้งหนึ่ง ตัวอย่างเช่นการ ฉายรังสีช่วยให้เกิดการตอกรังของมอนอเมอร์ชนิดหนึ่ง ( B ) บนสายโซ่หลัก ( A ) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งพอลิเมอร์ที่ผ่านการตอกรังจะมีสมบัติผสมของ A และ B และถ้าเลือกชนิดและความเข้มข้นของรังสีที่เหมาะสม การฉายรังสีอาจทำให้ปฏิกิริยาการตอกรังเกิดที่พื้นผิวบาง ๆ หรืออาจเกิดการ ตอกรังอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน



รูปที่ 2.12 แสดงผลของรังสีที่ทำให้เกิดการตอกรังของมอนอเมอร์(B) กับ พอลิเมอร์ชนิดที่ต่างกัน(A)

2.9.4.5 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิเมอร์ พอลิเมอร์สามารถสลายตัวได้ ที่ความเข้มของรังสีสูงในสภาวะที่ปราศจากออกซิเจน และการสลายตัวของพอลิเมอร์จะเกิดขึ้นได้เร็วเมื่อมีออกซิเจน เนื่องจากพอลิเมอร์สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการเร่งด้วยตัวเอง ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นเริ่มต้นจะเกิดขึ้นในอัตราช้า แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นที่ละน้อยจนกระทั่งมีค่าคงที่ กล่าวคือเมื่อพอลิเมอร์ได้รับพลังงานจะเกิดการสลายพันธะให้พอลิเมอร์อนุมูลอิสระ ซึ่งสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศได้เปอร์ออกซิออนอนุมูลอิสระ (ROO•) และเปอร์ออกซิออนอนุมูลอิสระจะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องกับพอลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิเมอร์

ตารางที่ 2.2 แสดงผลของรังสีที่มีต่อพอลิเมอร์ประเภทอีลาสโตเมอร์

ชนิดของพอลิเมอร์	ปริมาณความเข้มของรังสีที่ทำให้พอลิเมอร์เริ่มเสื่อมสภาพ (Mrad)	ปริมาณความเข้มของรังสีที่ทำให้พอลิเมอร์เสื่อมสภาพ 25% (Mrad)
Polyacrylic	2-4	10-15
Butyl	2-3	10
Chlorosulfonated polyethylene	-	30
EPDM (ethylene-propylene-diene)	10	100+
Fluoroelastomer	5	50-70
Natural	10	100-200
Nitrile	-	100
Polychloroprene (Neoprene)	6	50
Silicones	-	50-100
Styrene-butadiene	6-8	100+
Urethane	20	600-800

ตารางที่ 2.3 แสดงผลของรังสีที่มีต่อพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก

ชนิดของพอลิเมอร์	ความเสถียรต่อรังสี	ปริมาณความเข้มของรังสีที่ทำให้พอลิเมอร์เสื่อมสภาพ ( Mrads )
ABS	ดี	100
Acetals	ไม่ดี	1-2
Acrylics		
PMMA	ปานกลาง	5
Others	ปานกลาง	10
Amides		
Aliphatic	ปานกลาง	50-100
Aromatic	ดีมาก	1000
Cellulosics	ปานกลาง	20
Polycarbonate	ดี	100+
Polyesters (aromatic)	ดี	100
Polyolefins		
Polyethylene	ดี	100
Polypropylene	ปานกลาง	10
Polymethylpentene	ดี	30-50
Copolymer	ดี	50
Polystyrene	ดีมาก	1000
Copolymer	ดี	100-500
Polysulfones	ดีมาก	1000
Polyvinyls		
PVC	ดี	50-100
Copolymer	ปานกลาง	10-40

## 2.9.5 ข้อดี-ข้อเสียของการฉายรังสี

### 2.9.5.1 ข้อดีของการฉายรังสี

- ปฏิกริยาเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าการใช้กระบวนการทางเคมี
- ปฏิกริยาเกิดขึ้นได้ที่สภาวะปกติ ความดันบรรยากาศ
- มอนอเมอร์เกิดการพอลิเมอไรเซชันได้โดยไม่ต้องใช้ตัวเร่ง สารกระตุ้น หรือองค์ประกอบทางเคมีอื่น ที่อาจเป็นผลทำให้พอลิเมอร์ไม่บริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

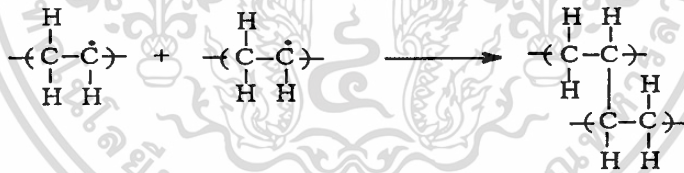
- ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นถูกรบกวนเล็กน้อยจาก สี สารตัวเติม สารต้านออกซิเจน และสารประกอบอื่นที่เติมลงไปในพอลิเมอร์
- การเชื่อมโยง และการต่อกิ่งสามารถทำได้โดยตรงหลังจากขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ เป็น ฟิล์ม ท่อ และ อื่นๆ ง่ายต่อการทำให้เกิดปฏิกริยาที่ผิวของวัสดุ
- ไม่มีการสะสมของสารเคมีในผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์

### 2.9.5.2 ข้อเสียของการฉายรังสี

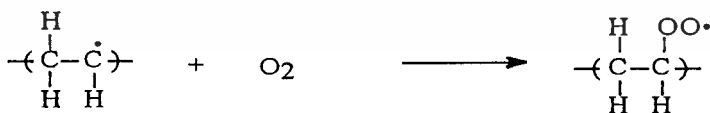
- ราคาค่าก่อสร้างแพง
- ต้องมีการควบคุม และป้องกันอันตรายที่เกิดจากรังสีอย่างเคร่งครัด รวมทั้ง ต้องฝึกบุคลากรให้มีความชำนาญ และเพิ่มความระมัดระวังในการใช้เครื่อง ควบคุมต้นกำเนิดรังสี [37]

### 2.9.6 ผลของรังสีที่มีต่อพอลิเอทิลีน พอลิพรอพิลีน และพอลิสไตรีน

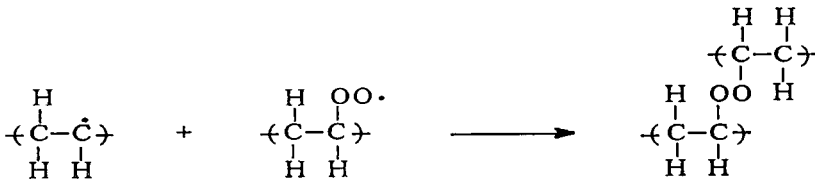
พอลิเอทิลีน เกิดการเชื่อมโยงได้เมื่อมีการควบคุม และจำกัดปริมาณออกซิเจนในขณะ ฉายรังสี หรือฉายรังสีที่ความเข้มสูง และเกิดการแตกหักของสายโซ่เมื่อฉายรังสีที่ความเข้มต่ำใน สภาวะมีออกซิเจน ปฏิกริยาการรวมตัวของอนุมูลอิสระ ( recombination ) ก่อให้เกิดพันธะ เชื่อมโยง



การฉายรังสีพอลิเอทิลีนที่ความเข้มต่ำ ทำให้เกิดเปอร์ออกไซด์มากกว่าเกิดปฏิกริยาการรวมตัว

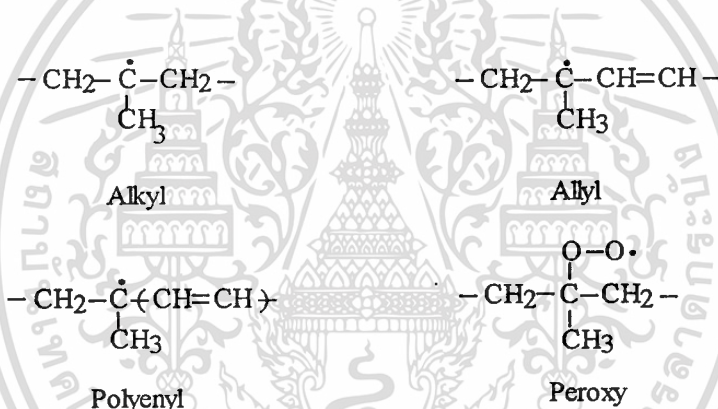


การฉายรังสีที่ความเข้มสูง จะเกิดการแข่งขันกันระหว่างปฏิกริยาการรวมตัวกับการเกิด เปอร์ออกไซด์ และเกิดปฏิกริยาใหม่ขึ้นระหว่างอนุมูลอิสระของพอลิเอทิลีนกับอนุมูลอิสระของ เปอร์ออกไซด์

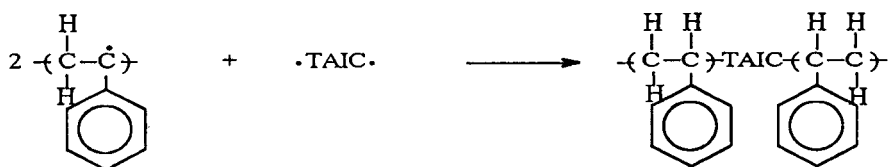


อย่างไรก็ตามที่ความเข้มข้นสูง ปฏิริยาการรวมตัวจะเกิดขึ้นในปริมาณมากกว่า เนื่องจากออกซิเจนแพร่เข้าทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระได้ช้า ปริมาณอนุมูลอิสระของเปอร์ออกไซด์จึงลดลง ดังนั้นจะได้ว่าพันธะเชื่อมโยงของพอลิเอทิลีนเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น

**พอลิพรอพิลีน** เกิดการเชื่อมโยงได้เท่ากับการแตกสลายพันธะของสายโซ่ โดยขึ้นกับความเข้มข้นที่ใช้ การเชื่อมโยงเกิดขึ้นลักษณะเดียวกับพอลิเอทิลีน และการแตกสลายพันธะเกิดจากการสลายตัวของอนุมูลอิสระ อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นเมื่อผ่านการฉายรังสีแสดงได้ดังนี้



**พอลิสไตรีน** มีสมบัติทนรังสีค่อนข้างสูง พิจารณาจากตารางที่ 2.1 เนื่องจากมีอะโรมาติก พอลิสไตรีนเสื่อมสลายได้เมื่อนายรังสีที่ความเข้มข้นสูงในอากาศ และเกิดการเชื่อมโยงภายในโมเลกุล เมื่อนายรังสีในสุญญากาศ (ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นลักษณะเดียวกับพอลิเอทิลีน) หรือเกิดการเชื่อมโยงเมื่อมีการเติมสารประเภทสารช่วยในการเชื่อมโยง เช่น ไทรอลลิล ไอโซไซยานูเรท (TAIC) แสดงได้ดังนี้



## 2.9.7 การฉายรังสีพอลิเมอร์ผสม

2.9.7.1 การฉายรังสีพอลิเมอร์ผสมที่เป็นเนื้อเดียวกัน การรวมเป็นเนื้อเดียวกัน มีขีดจำกัดในช่วงของ องค์ประกอบ อุณหภูมิ หรือความดัน ดังนั้นในการฉายรังสีจึงเป็นการขยาย ช่วงของการรวมเป็นเนื้อเดียวกันให้กว้างขึ้น หรือสมบูรณ์มากขึ้น โดยการทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยง ภายในพอลิเมอร์หนึ่งในสองพอลิเมอร์ที่นำมาผสม Nishi และ Kwei [37] ศึกษาพอลิเมอร์ผสม ระหว่างพอลิไวนิลเมทิลอีเทอร์ ( PVME ) กับ พอลิสไตรีน ที่อัตราส่วน 50/50 โดยใช้รังสีแกมมา ทำให้เกิดการเชื่อมโยงภายในสายโซ่ PVME พบว่า คู่พอลิเมอร์ผสมสามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้ ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างขึ้น

2.9.7.2 การฉายรังสีพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เป็นการปรับปรุง สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม โดยทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยง การศึกษาฉายรังสีพอลิเมอร์ผสมของ พอลิเอทิลีนกับบิสลาซโตนเมอร์ พบว่าทำให้การแยกวัฏภาคลดลง ความแข็งแรง และความทนทาน ต่อความร้อนเพิ่มขึ้น

## 2.10 สารตัวเติมในพอลิเมอร์ผสม [39]

พอลิเมอร์ก่อนที่จะนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ตามต้องการนิยมผสมด้วยสารเติมแต่งต่างๆ เพื่อช่วยในการผลิต เพิ่มสีส่น และเพิ่มสมบัติบางประการให้เหมาะต่อการใช้งาน เช่น ทำให้ แข็งขึ้น ยืดหยุ่นได้ ราคาถูกลง ป้องกันการย่อยสลาย ช่วยให้การบวนการแปรรูปง่ายขึ้น เป็นต้น สารเติมแต่งมีหลายประเภท เช่น

สารตัวเติม ( fillers ) ได้แก่ สารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ ที่ทำหน้าที่ช่วยเพิ่มความเหนียว ลดต้นทุน ลดการหดตัวในแม่พิมพ์ และปรับปรุงสมบัติอีกหลายด้าน ขนาด รูปร่างของสารตัวเติม มีอิทธิพลต่อพอลิเมอร์อย่างมาก สารตัวเติมที่เป็นแผ่น และแท่ง มีค่าอัตราส่วนของความยาวต่อ เส้นผ่านศูนย์กลาง ( aspect ratio ) ต่ำ จึงขัดขวางการจัดตัวของพอลิเมอร์ สารตัวเติมที่เป็น เส้นใยมีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความยาวสูง ให้ความแข็งแรงสูงขึ้น และมีสมบัติเป็น แอนไอโซโทรปิก สารตัวเติมทรงกลมไม่มีอัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง ทำให้ พอลิเมอร์มีสมบัติเป็นไอโซโทรปิก สารตัวเติมในอุตสาหกรรมพลาสติกจัดเป็นประเภทต่าง ๆ ได้ หลายเกรด แต่ละเกรดมีความแตกต่างกันดังนี้

- ขนาดอนุภาค และการกระจาย อนุภาคขนาดเล็กทำให้วัสดุมีสมบัติทนต่อแรงดึง ค้ำมอดุลัส และความแข็งแรงสูง อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ทำให้วัสดุมีความแข็งแรง น้อยกว่าก่อนการผสมสารตัวเติม
- รูปร่างของอนุภาค และความพรุน ตัวอย่างเช่น ดินเหนียวมีลักษณะเป็นแผ่นจึงทำให้ ผลิตภัณฑ์เป็นแอนไอโซโทรปิก ส่วนอนุภาคที่มีผิวเรียบยากที่จะยึดติดกับพอลิเมอร์ อนุภาคที่มีรูพรุนสามารถที่จะดูดซับสารตัวเติมชนิดอื่นที่ผสมอยู่ในพอลิเมอร์ไว้ทำให้ ประสิทธิภาพของสารตัวเติมเหล่านั้นลดลง
- ธรรมชาติทางเคมี พื้นผิวของสารตัวเติมมีความสำคัญมาก สารตัวเติมชนิดแร่ ( mineral filler ) มีหมู่ที่มีขั้ว เช่นไฮดรอกซิลทำให้สามารถดึงดูดกับน้ำได้ดี แต่ร่วมกับ พอลิเมอร์ยากจึงต้องนำมาปรับผิวเสียก่อน ตัวอย่างเช่น แคลเซียมคาร์บอเนตเคลือบ ผิวด้วยกรดสเตียริก หมู่คาร์บอกซิลิกของกรดสเตียริกจะทำปฏิกิริยากับสารตัวเติม ส่วนด้านที่เป็นอะลิฟาติกของกรดสเตียริกจะทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์
- สิ่งปนเปื้อน ตัวอย่างเช่น ซัลเฟอร์ และไอออนของโลหะ เช่น Cu, Mg, Fe อาจก่อให้เกิด ปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่วน Pb สามารถทำปฏิกิริยากับสารเติมแต่งที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ ประกอบได้ทำให้พลาสติกมีสีซีดจาง

สามารถแบ่งสารตัวเติมตามสมบัติของวัสดุหลังการผสมเป็น 2 ประเภท ได้แก่

- สารตัวเติมที่มีสมบัติช่วยเสริมแรง ใช้เพื่อลดต้นทุน เพิ่มความแข็งแรง ความทนทาน ต่อแรงกระแทก และความแข็งดึง เช่น เหม่ดำที่ผสมในยาง
- สารตัวเติมที่ไม่มีสมบัติช่วยเสริมแรง ใช้เพิ่มปริมาณเพื่อลดต้นทุนการผลิต เพิ่มค่า มอดุลัส ความแข็งแรง ทำให้พอลิเมอร์มีสี ปรับปรุงความเป็นฉนวนไฟฟ้า และช่วย ให้กระบวนการผลิตทำได้ง่าย รวมทั้งยังทำให้ผลิตภัณฑ์น่าใช้ เช่น แคลเซียม คาร์บอเนต ดินเหนียวซึ่งใช้ลดการยึดเกาะ ( tack ) ของยาง

# บทที่ 3

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีรายละเอียด ดังนี้

3.1.1 พอลิเมอร์หลัก ได้แก่ พอลิสไตรีน พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และ พอลิพรอพิลีน

พอลิสไตรีน

STYRON 656D

บริษัท PACIFIC PLASTICS (THAILAND) Co. LTD.

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

POLENE JJ 4324 บริษัท TPI. Co. LTD.

พอลิพรอพิลีน

General-Purpose Polypropylene: PRO-FAX 6331

บริษัท HMC. Co. LTD.

ตารางที่ 3.1 แสดงสมบัติของพอลิเมอร์หลัก

สมบัติที่ทดสอบ	ชนิดของพอลิเมอร์	พอลิสไตรีน	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	พอลิพรอพิลีน
Melt Flow Rate, g/10min		8.0	5.5	
Melt Flow Index 2.16kg/190°C,g/10min				12
Vicat Softening Temperature, °C		99	95	-
Tensile Strength at Break ,N/mm <sup>2</sup>		6100	> 11	
Tensile Strength at Yield ,psi (MPa)				5,000 (34)
Elongation at Break ,%		> 150	>600	
Elongation at Yield ,%				10
Notched Izod Impact Strength, ft·lbs/in (J/m)		-	-	0.5 (25)

3.1.2 สารช่วยผสม ได้แก่ สไตรีน - บิวทาไดอีน - สไตรีน (SBS) และ พอลิเมอร์ร่วมของ เอทิลีน - ไวนิลแอซีเตต (EVA)

สไตรีน-บิวทาไดอีน-สไตรีน CARIFLEX TR-1101 บริษัท SHELL ELASTOMER Co. LTD.

เอทิลีน-ไวนิลแอซีเตต Ethylene-Vinyl Acetate Copolymer บริษัท NIPPON UNICAR Co. LTD.

ตารางที่ 3.2 แสดงสมบัติของสารช่วยผสม

สมบัติที่ทดสอบ	สารช่วยผสม	สไตรีน-บิวทาไดอีน-สไตรีน	เอทิลีน-ไวนิลแอซีเตต
Melt Index , g/cc			2.0
Melt Flow rate, 200 <sup>o</sup> /5kg:g/10min		< 1	
Modulus 300% : Mpa		2.9	
Stiffness Modulus, kg/cm <sup>2</sup>			500
Tensile Strength, Mpa		33	
Tensile Strength, kg/cm <sup>2</sup>			150
Elongation, %		880	650
Hardness Shore A		72	92
Shore D		-	33
Vicat Softening Temperature, °C		-	61

### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้

1. เครื่องผสมระบบปิด ( Brabender Plasti Corder ) รุ่น PL 2100  
บริษัท BRABENDER OHG DUISBURG Co. LTD.
2. เครื่องฉีดขึ้นรูป ( Injection Molding ) รุ่น COSMO  
บริษัท WELLTEC INDUSTRIAL EQUIPMENT Co. LTD.
3. เครื่องทดสอบแรงดึง 30 kN รุ่น LR 30K บริษัท LLOYD INSTRUMENTS Co. LTD.
4. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน ( Differential Scanning Colorimeter: DSC )  
รุ่น DSC-50 บริษัท SHIMADZU Co., LTD.
5. เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) : รุ่น JSM6400  
บริษัท JEOL Co. LTD. จากศูนย์เครื่องมือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เครื่องทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก  
บริษัท YASUDA SEIKI SEISAKUSHO Co. LTD.
7. เครื่องฉายรังสีแกมมา รุ่น GAMMACELL 220  
บริษัท NORDION INTERNATIONAL INC จากสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ
8. เครื่องไม้ตัดพลาสติก บริษัท BOSCO ENGINEERING Co. LTD.
9. เครื่องแยกขนาด ( Test Sevea ) บริษัท RETSCH Co. LTD.
10. เครื่องชุดสกัดหาเปอร์เซ็นต์เจล

### 3.3 การดำเนินงานวิจัย

#### ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม

1. เตรียมพอลิเมอร์ผสมของ PS/LDPE ที่มีอัตราส่วนของพอลิเมอร์ ดังนี้
  - ระบบพอลิเมอร์ผสมของ PS/LDPE 100/0, 70/30, 50/50, 30/70 และ 0/100
  - ระบบพอลิเมอร์ผสมที่มีสารช่วยผสม SBS หรือ EVA ทำได้โดยเติมสารช่วยผสม 10%, 20% และ 30% โดยน้ำหนักลงไปในทุกอัตราส่วนของพอลิเมอร์
2. ผสมพอลิเมอร์ในข้อ 1 ในเครื่องผสมระบบปิด โดยใช้เครื่อง Brabender Plasticorder ซึ่งต่ออยู่กับเครื่องอัดรีดแบบเกลียวทวนคู่ ( twin screw extruder ) สภาวะที่ใช้ในการผสมเป็นดังนี้ อุณหภูมิที่ใช้ในการผสม

190°C	180°C	170°C	160°C
-------	-------	-------	-------

ความเร็วรอบในการผสม 10 รอบ/นาที

เมื่อพลาสติกออกจากเครื่องผสม ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำมาเข้าเครื่องไม้ตัด เพื่อย่อยให้พลาสติกมีขนาดเล็กลง และใกล้เคียงกัน

3. นำพลาสติกที่ได้มาฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน เป็นรูปดัมเบลล์สำหรับทดสอบความทนต่อแรงดึง และรูปชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงกระแทก โดยใช้เครื่องฉีดขึ้นรูป

## ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาอิทธิพลของรังสี

นำชิ้นงานพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 1 และชิ้นงานพอลิเมอร์ผสม PS/PP จากโครงการพิเศษเรื่องการใช้สารช่วยผสมในการปรับปรุงแรงยึดติดระหว่างผิวของพอลิเมอร์ผสม [28] ฉายรังสีที่ปริมาณความเข้มรังสี และสภาวะที่แตกต่างกัน ดังนี้

### 1. สภาวะที่มีอากาศ

- ฉายรังสีที่ทุกอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE และ PS/PP โดยใช้ความเข้มรังสีที่ 10, 20 และ 30 kGy.

- ฉายรังสีพอลิเมอร์ผสมเฉพาะที่อัตราส่วนของพอลิเมอร์หลัก PS/LDPE และ PS/PP เป็น 50/50 โดยใช้ความเข้มรังสีที่ 40, 50, 60, 120, 180 และ 240 kGy.

### 2. สภาวะสุญญากาศ

- ฉายรังสีชิ้นงานพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE เฉพาะตัวอย่างที่ใช้ทดสอบสมบัติความทนทานต่อแรงกระแทก โดยใช้ความเข้มรังสีต่ำ ที่ 10 และ 30 kGy.

## ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาผลของปริมาณสารตัวเติมในพอลิเมอร์ผสม

1. เตรียมพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ที่อัตราส่วน 50/50 โดยเติมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว ( sevea 230 mesh ) ลงไปในปริมาณที่แตกต่างกัน ดังนี้ 4, 12, 20, 28, 36 และ 44% โดยน้ำหนัก

2. เตรียมพอลิเมอร์ผสมที่มีสารช่วยผสม SBS และ EVA ในอัตราส่วนเช่นเดียวกับข้อ 1 ในขั้นตอนที่ 1 จากนั้นเติมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต 4 และ 12% โดยน้ำหนัก

3. นำพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากข้อ 1 และ 2 ในขั้นตอนที่ 3 นี้ ฉีดขึ้นรูปโดยใช้สภาวะเช่นเดียวกับข้อ 2 ในขั้นตอนที่ 1

## ขั้นตอนที่ 4 ศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ชิ้นงานที่เตรียมในขั้นตอนที่ 1, 2 และ 3 นำมาทดสอบดังต่อไปนี้

### ทดสอบสมบัติเชิงกล

1. ทดสอบความทนแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และ ค่ามอดุลัส ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ตาม ASTM D 638M ใช้ชิ้นงานในการทดสอบของแต่ละระบบ 4 ชิ้น สภาวะของเครื่องทดสอบเป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-Load cell : 30 kN

Test speed : 5 mm/min

-Gauge length : 70 mm

คำนวณค่าสมบัติเชิงกล จากสมการ

$$\text{ความทนแรงดึง} = F / A$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด} = 100 \times (L - L_0) / L_0$$

$$\text{มอดุลัสเริ่มต้น} = \frac{F / A}{\Delta L / L_0}$$

เมื่อ F เป็นแรงที่อ่านได้ ณ จุดขาด

A เป็นพื้นที่หน้าตัดของชิ้นตัวอย่างที่ทำการทดสอบ

$L_0$  เป็นความยาวเริ่มต้นของชิ้นตัวอย่าง

L เป็นความยาวที่จุดขาด

2.ทดสอบสมบัติความทนทานต่อแรงกระแทก ตาม ASTM D256 ทำการทดสอบสมบัติความทนทานต่อแรงกระแทกของแต่ละระบบ โดยใช้ชิ้นงานในการทดสอบระบบละ 4 ชิ้น

ทดสอบสมบัติทางความร้อน

นำพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้มาทำการทดสอบสมบัติทางความร้อน ด้วยเครื่อง DSC อัตราการให้ความร้อนที่  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  และอัตราการทำให้เย็น  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  ศึกษาพอลิเมอร์ผสมทั้งก่อนและหลังฉายรังสี โดยเลือกศึกษาเฉพาะที่ความเข้มของรังสีที่ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด

-อ่านค่า  $T_m$  และ  $T_c$  จากกราฟ

-คำนวณ  $\Delta H_m$  และ  $\Delta H_c$  โดยใช้โปรแกรมการคำนวณในเครื่อง DSC

ทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา

นำชิ้นงานที่แตกหักจากการทดสอบสมบัติความทนทานต่อแรงกระแทก ทดสอบด้วยเครื่อง SEM เพื่อดูพื้นผิวที่แตกหัก

## ขั้นตอนที่ 5 การหาเปอร์เซ็นต์เจล

นำชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี หลังจากทดสอบสมบัติความทนทานต่อแรงกระแทก มาทดสอบหาเปอร์เซ็นต์เจลระบบละ 1 ชิ้น ทำการชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของตัวอย่าง ไม่เกินกว่า 0.5 กรัม ใส่ลงในแผ่นตะแกรงทองเหลืองขนาด 1.5 X 2 นิ้ว แล้วพับขอบปิดชิ้นงานห่อเป็นรูปสี่เหลี่ยม ชั่งน้ำหนักห่อตะแกรงที่มีสารตัวอย่างบรรจุอยู่ภายใน ใส่ลงในขวดก้นกลม เติมสารต้านออกซิเจนจำนวนเล็กน้อย ( ปลายช้อนตักสาร ) เติมตัวทำละลายไซลีนให้ท่วมชิ้นตัวอย่าง สกัดเป็นเวลา 18 ชั่วโมง แล้วจึงนำออกจากขวดก้นกลม นำห่อตะแกรงที่ได้ไปอบให้แห้งในตู้อบสุญญากาศเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำมาชั่งน้ำหนัก เวลาที่ใช้สกัดรวมทั้งหมด 72 ชั่วโมง โดยเปลี่ยนตัวทำละลายทุก 18 ชั่วโมง ทำการสกัดซ้ำและอบแห้งหลายๆครั้ง จนกระทั่งน้ำหนักสารที่เหลืออยู่คงที่ นำค่าของน้ำหนักที่ชั่งได้ไปคำนวณเปอร์เซ็นต์การเกิดเจล ดังนี้

$$\% \text{ เจล } = \frac{\text{น้ำหนักพอลิเมอร์หลังสกัด}}{\text{น้ำหนักพอลิเมอร์ก่อนสกัด}} \times 100$$

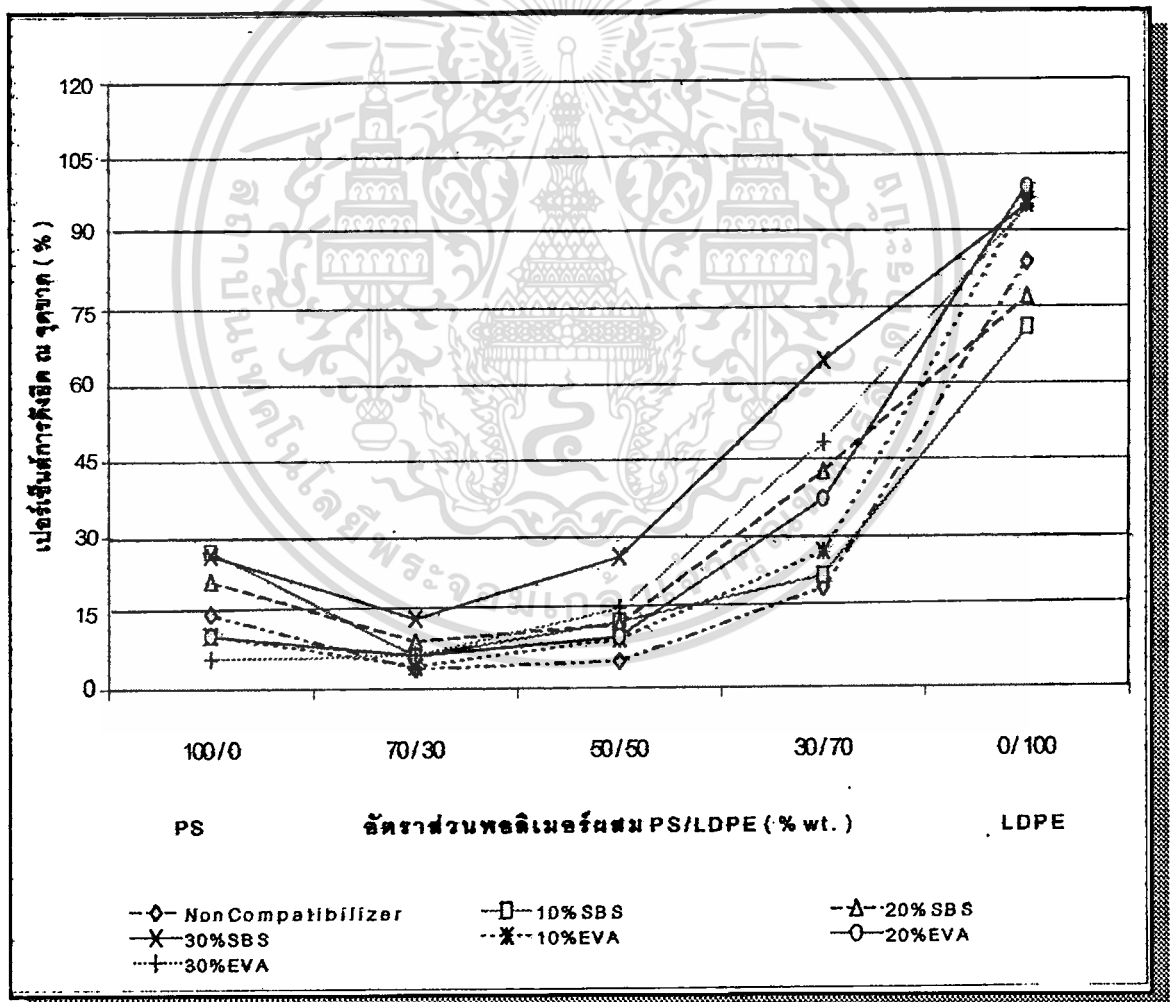
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

ศึกษาถึงผลของรังสีแกมมา และสารเติมแต่งที่มีต่อพอลิเมอร์ผสม แบ่งตามสมบัติที่ทำการทดสอบ ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางสัณฐานวิทยา

#### 4.1 สมบัติเชิงกล

##### 4.1.1 ผลของอัตราส่วน ชนิด และปริมาณของสารช่วยผสม ที่มีต่อพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE

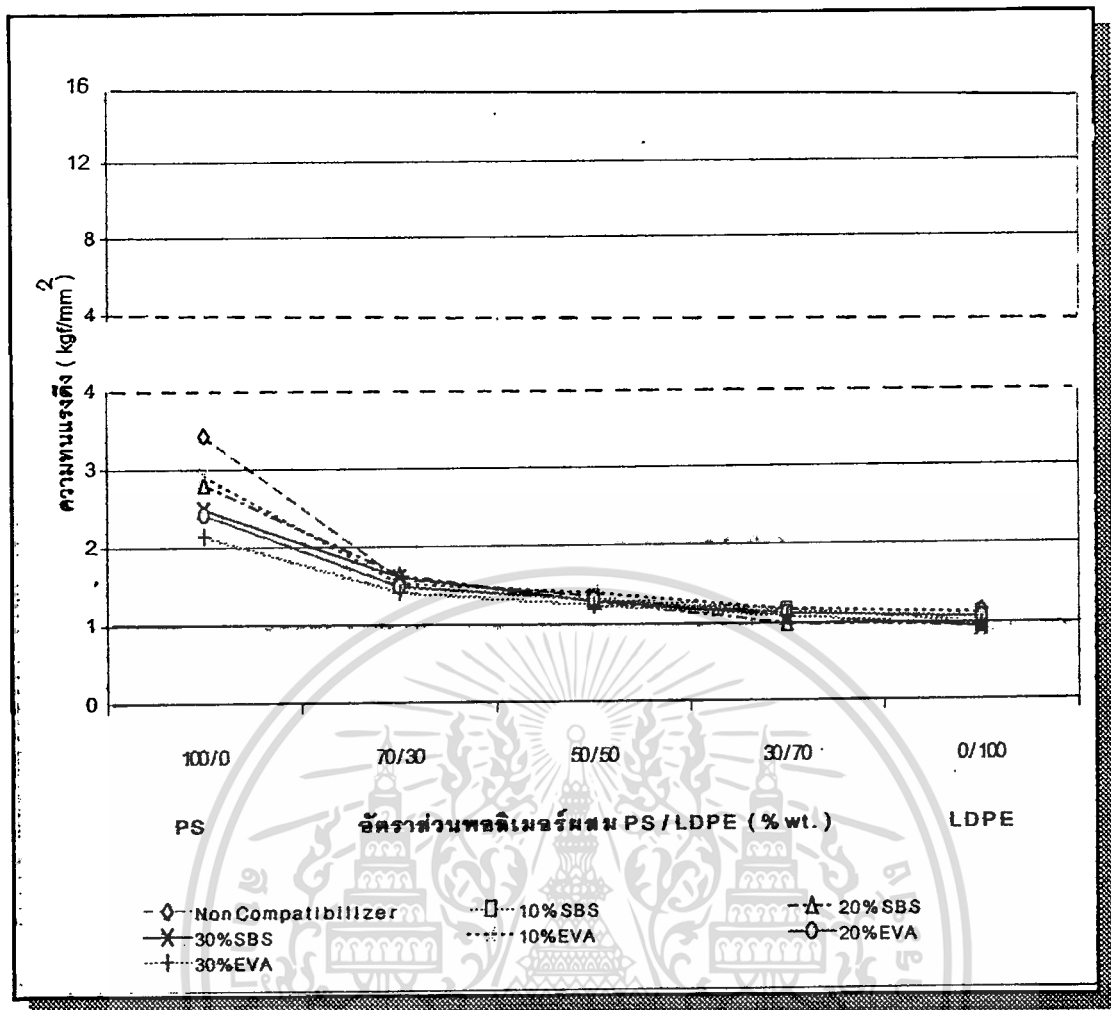


รูปที่ 4.1 แสดงเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.1 พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีเพียง 2 องค์ประกอบ ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมเมื่อมีสารช่วยผสม SBS และ EVA เป็นองค์ประกอบ และพอลิเมอร์ผสมที่มี LDPE เป็นองค์ประกอบหลักจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่มี PS เป็นองค์ประกอบหลัก เนื่องจาก LDPE เป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก ( semi-crystalline polymer ) สามารถยืดตัวออกได้มาก แต่เมื่อเติมองค์ประกอบอื่นลงไปเป็นองค์ประกอบหลัก ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดลดลง เนื่องจากพอลิเมอร์อื่นที่ไม่ใช่ขององค์ประกอบหลักเข้าไปขัดขวางการยืดตัวขององค์ประกอบหลักในขณะที่ถูกดึง ทำให้เปอร์เซ็นต์การดึงยืดลดต่ำลง

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารช่วยผสม SBS และ EVA พบว่า เปอร์เซนต์การดึงยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มใกล้เคียงกันในทุกอัตราส่วน และเปอร์เซนต์การดึงยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นตามปริมาณ SBS และ EVA ที่เพิ่มขึ้นจาก 10%, 20% และ 30% ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากส่วนของบิวทาไดอีน ใน SBS และส่วนของเอทิลีน ใน EVA เป็นส่วนที่ยืดตัวได้เพิ่มมากขึ้นตามปริมาณ SBS และ EVA ที่ใช้

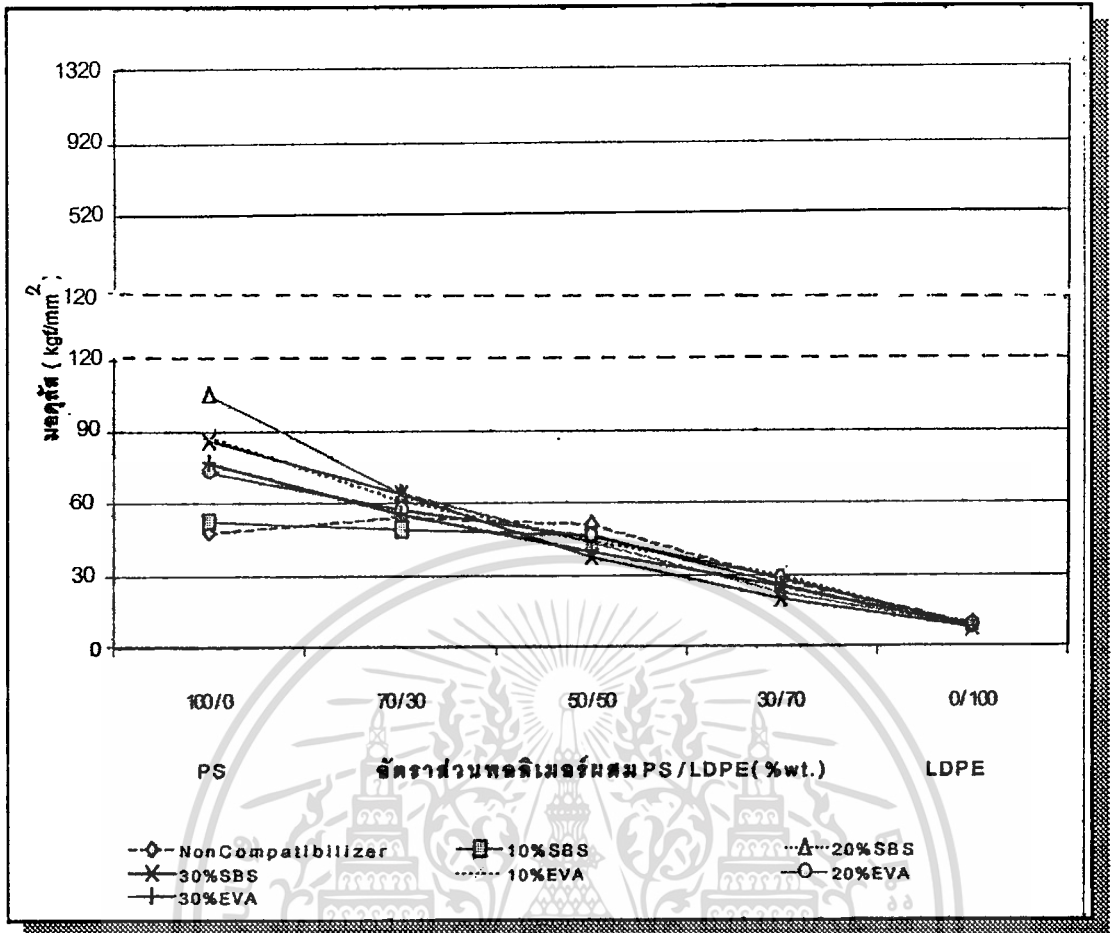
ในกรณีของพอลิเมอร์ผสมที่มี PS เป็นองค์ประกอบหลัก จะเห็นว่าเมื่อมีการเติม EVA เปอร์เซนต์การดึงยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นน้อยมาก แม้ว่า จะเติม EVA มากถึง 30% เนื่องจาก EVA ไม่สามารถรวมเข้ากันได้กับ PS ดังนั้นเปอร์เซนต์การดึงยืด ณ จุดขาดที่อ่านได้จึงเป็นเปอร์เซนต์การดึงยืดที่ได้จาก PS ในพอลิเมอร์ผสม



รูปที่ 4.2 แสดงความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

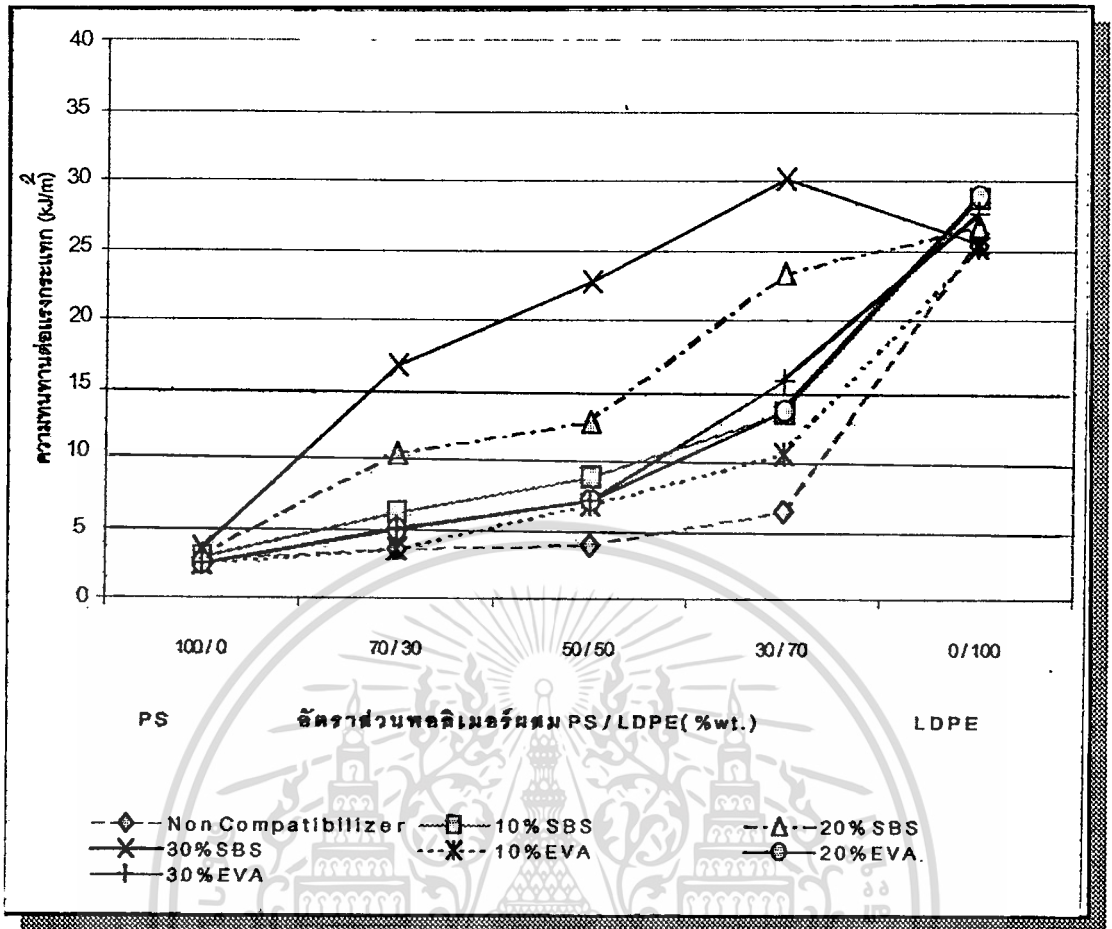
จากรูปที่ 4.2 พบว่าความทนแรงดึงลดลงตามปริมาณ LDPE ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความทนแรงดึงเริ่มต้นของพอลิเมอร์อัสฐานมีค่ามากกว่าพอลิเมอร์ที่เป็นกิ่งผลึก

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารช่วยผสม SBS และ EVA พบว่าที่ทุกอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม เมื่อเติม SBS และ EVA จะให้ความทนแรงดึงใกล้เคียงกันและใกล้เคียงกับเมื่อไม่เติมสารช่วยผสม ยกเว้น เมื่อมี PS เป็นองค์ประกอบหลักจะมีค่าลดลงตามปริมาณ SBS และ EVA ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติม SBS และ EVA มีสมบัติเป็นอิลาสโตเมอร์ จึงลดความแข็งกระด้างของ PS ลง แต่จะส่งผลเพียงเล็กน้อยเมื่อมี LDPE เป็นองค์ประกอบในพอลิเมอร์ผสม



รูปที่ 4.3 แสดงมอดุลลิตของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.3 พบว่ามอดุลลิตให้ผลใกล้เคียงกับความหนาแน่นดัง กล่าวคือพอลิเมอร์ผสมที่มี PS เป็นองค์ประกอบหลักจะให้มอดุลลิตสูงกว่าเมื่อมี LDPE เป็นองค์ประกอบ และจะลดลงตามปริมาณ LDPE ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเติม SBS และ EVA มอดุลลิตมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ SBS และ EVA ที่เพิ่มขึ้น แสดงว่าการเติมสารช่วยผสมที่มีสมบัติเป็นอีลาสโตเมอร์ลงในพอลิเมอร์อสังฐาน ช่วยให้พอลิเมอร์ผสมมีการยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น มอดุลลิตจึงลดลง



รูปที่ 4.4 แสดงความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.4 พบว่าระบบของพอลิเมอร์ผสมให้ความทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณ LDPE และสารช่วยผสม ที่เพิ่มมากขึ้น โดยที่ในระบบมีสารช่วยผสมให้ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกจะสูงกว่าระบบไม่มีสารช่วยผสม เนื่องจาก LDPE และสารช่วยผสม เหนียว มีสมบัติในการรับแรงที่ดี

เมื่อเปรียบเทียบสารช่วยผสม SBS และ EVA พบว่า ระบบที่มี SBS ให้ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกสูงกว่าระบบที่มี EVA เนื่องจาก SBS มีส่วนของพอลิสไตรีน 2 ส่วน กระจายตัวอยู่ใน PS ของพอลิเมอร์ผสม และมีส่วนบิวทาไดอีนกระจายตัวอยู่ใน LDPE ของพอลิเมอร์ผสม จึงอาจกล่าวได้ว่าพอลิเมอร์ผสมนี้มีการกระจายตัวได้ดี โดยที่ยึดติดกันด้วยส่วนที่รับแรง ( butadiene ) ดังนั้นจึงสามารถรับและกระจายแรงได้ดี ในขณะที่ EVA มีเพียงส่วนของพอลิเอทิลีนที่กระจายตัวใน LDPE พอลิเมอร์จึงแยกออกเป็น 2 ส่วน โดยมีส่วนของ PS ที่ไม่สามารถรับ และกระจายแรงได้ ดังนั้นระบบที่มี SBS จึงรับ และกระจายแรงได้ดีกว่าระบบที่มี EVA ให้ความทนทานต่อแรงกระแทกสูงกว่าระบบที่มี EVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่เติมสารช่วยผสม ลงใน PS หรือ LDPE ความทนทานต่อแรงกระแทกเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับเมื่อไม่เติมสารช่วยผสม เนื่องจากการเติมสารช่วยผสมเพียง 10, 20 และ 30% โดยน้ำหนักลงไปโพลีเมอร์ที่มีเพียง 1 ภูมิภาค ความทนทานต่อแรงกระแทกที่อ่านได้ยังคงเป็นความทนทานต่อแรงกระแทกของโพลีเมอร์หลักชนิดนั้น ๆ

สรุป ผลของอัตราส่วน ชนิด และปริมาณสารช่วยผสมต่อโพลีเมอร์ผสมของ PS/LDPE ดังนี้

อัตราส่วนมีผลมากต่อสมบัติเชิงกล กล่าวคือ ระบบที่มี PS เป็นองค์ประกอบหลัก ให้เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ความทนทานต่อแรงกระแทกต่ำ และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณ LDPE ที่เพิ่มขึ้น ส่วนความทนแรงดึง และ โมดูลัสสูง มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ LDPE ที่เพิ่มขึ้น

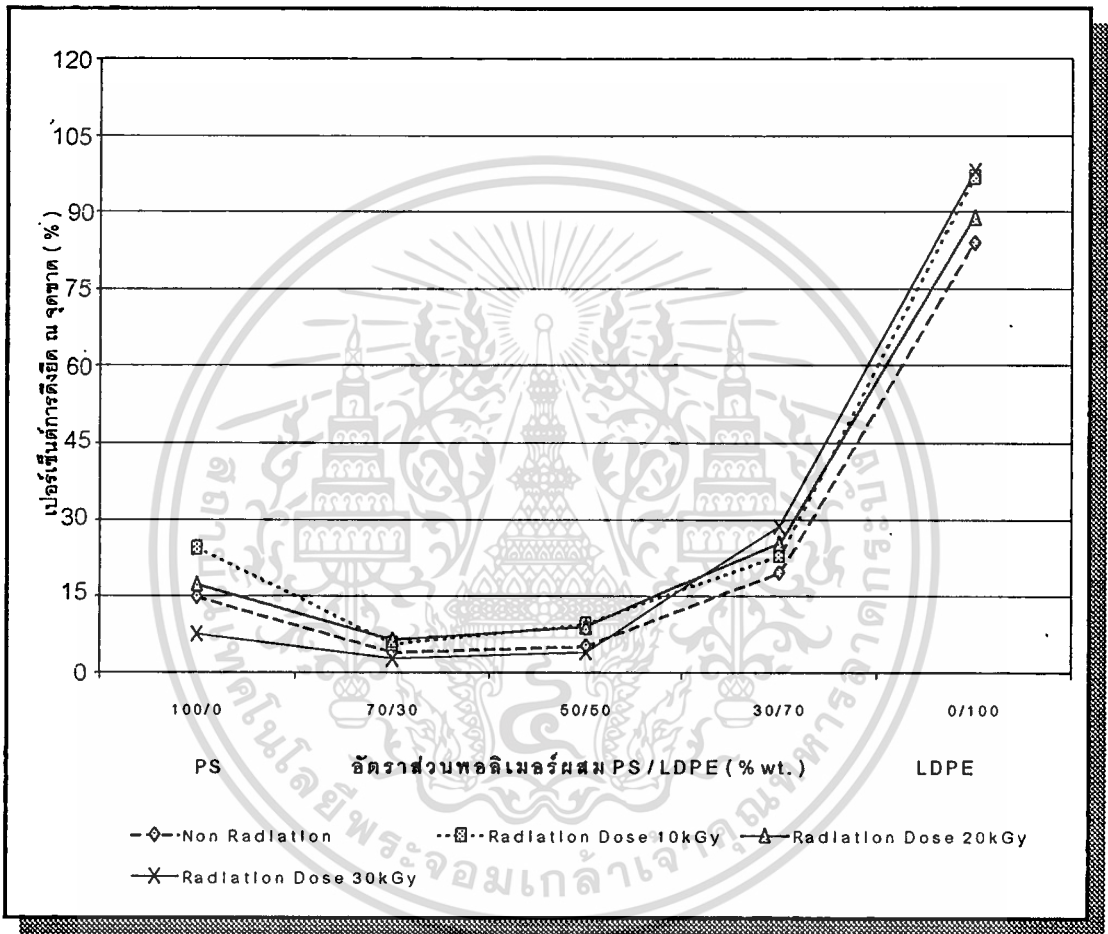
ชนิด และปริมาณสารช่วยผสมมีผลมากต่อสมบัติเชิงกล กล่าวคือ ระบบมีสารช่วยผสม SBS และ EVA เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ความทนทานต่อแรงกระแทกสูงกว่าระบบไม่มีสารช่วยผสม และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณ SBS และ EVA ที่เพิ่มขึ้น ส่วนความทนแรงดึง โมดูลัสต่ำกว่าระบบที่ไม่มีสารช่วยผสม และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณ SBS และ EVA ที่เพิ่มขึ้น

จากการศึกษาผลของอัตราส่วน ชนิด และปริมาณสารช่วยผสม จะได้ว่าโพลีเมอร์ผสมของ PS/LDPE/SBS ที่อัตราส่วน 30/70/30 ให้ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกสูงสุด

## 4.1.2 ผลของรังสี

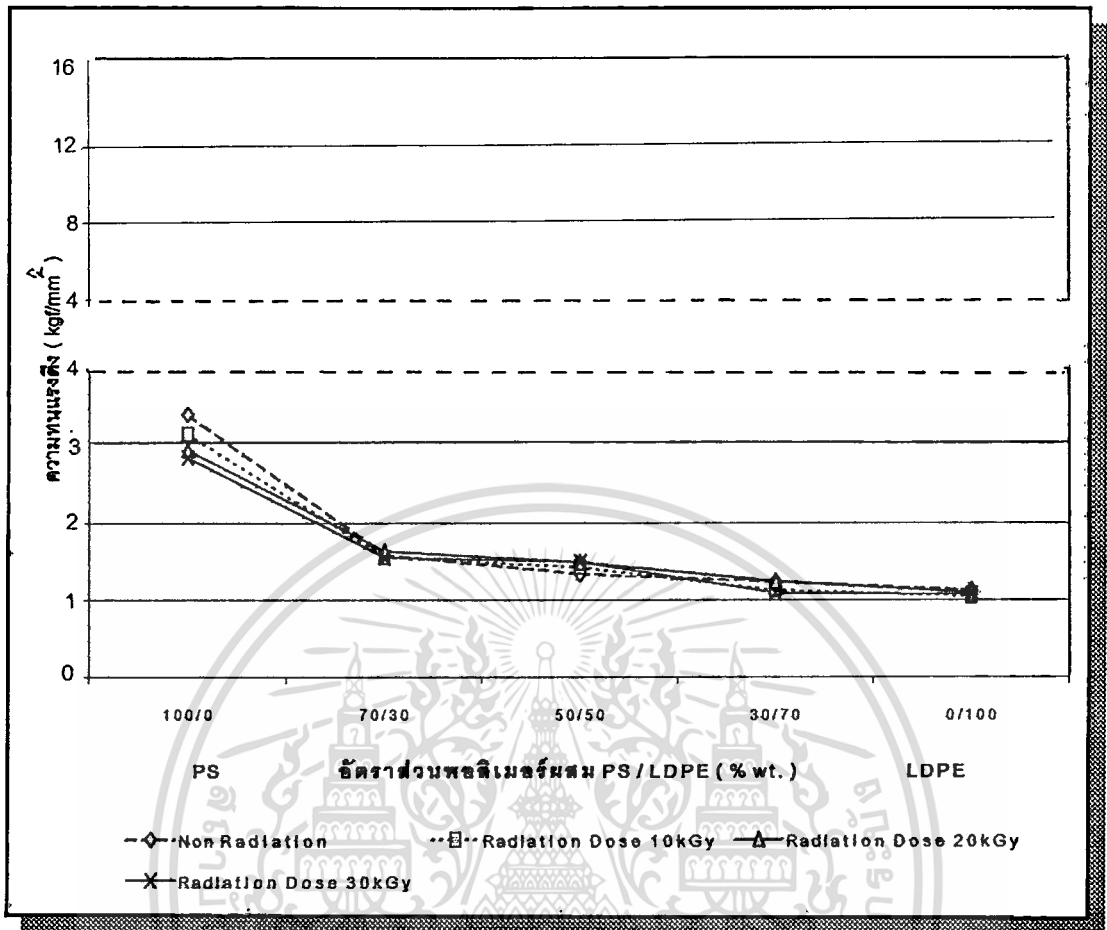
### 4.1.2.1 ผลการฉายรังสีในอากาศของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE และ PS/PP เมื่อไม่มีสารช่วยผสม ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

- กรณีของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE



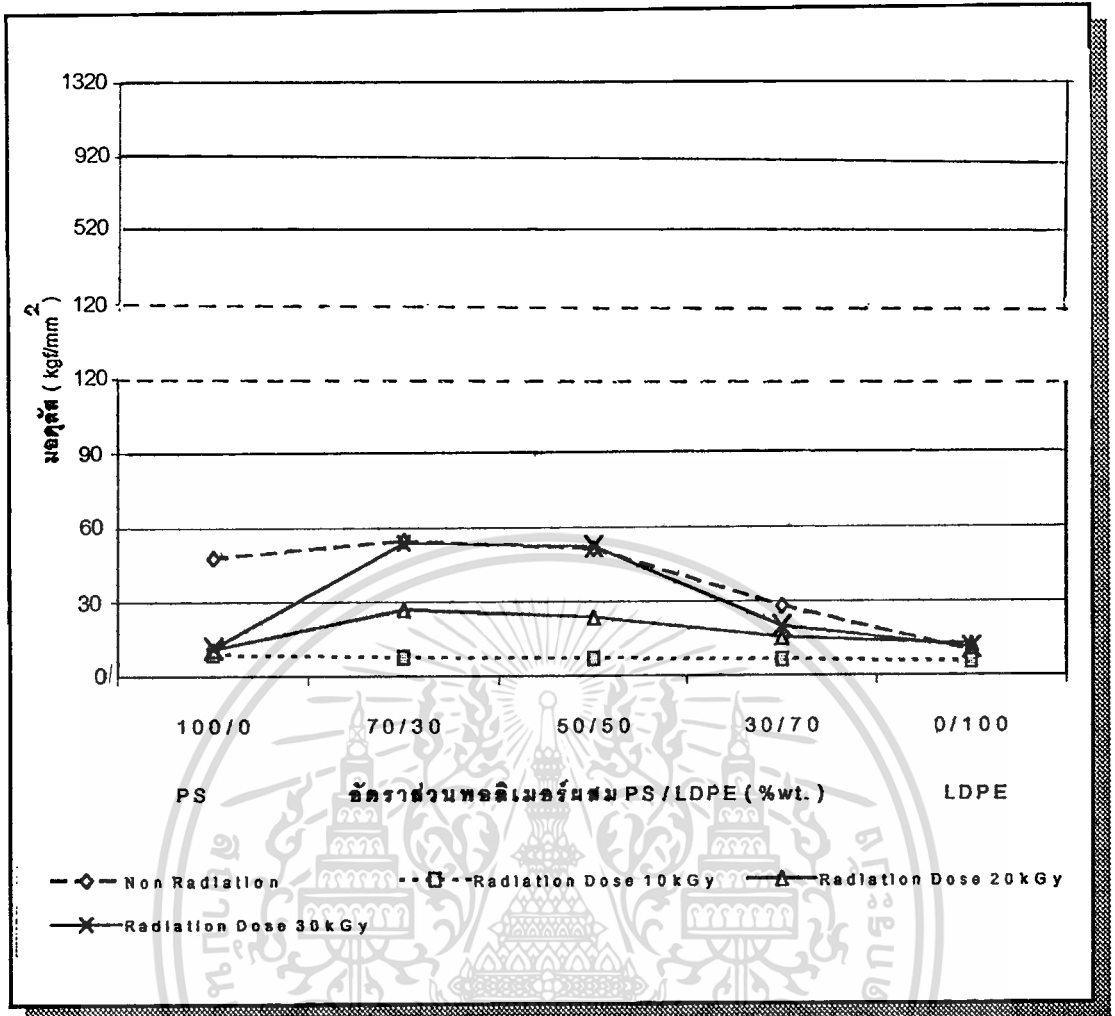
รูปที่ 4.5 แสดงเปอร์เซ็นต์การดิ่งยัด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ เมื่อฉายรังสีที่ความเข้ม 10, 20 และ 30 kGy

จากรูปที่ 4.5 พบว่า ที่ความเข้มรังสี 10, 20 และ 30 kGy ในทุกอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม เปอร์เซ็นต์การดิ่งยัด ณ จุดขาด ให้ค่าใกล้เคียงกับเมื่อไม่ฉายรังสี แสดงว่าที่ความเข้มรังสีดังกล่าว ไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในโมเลกุลของ PS และ LDPE



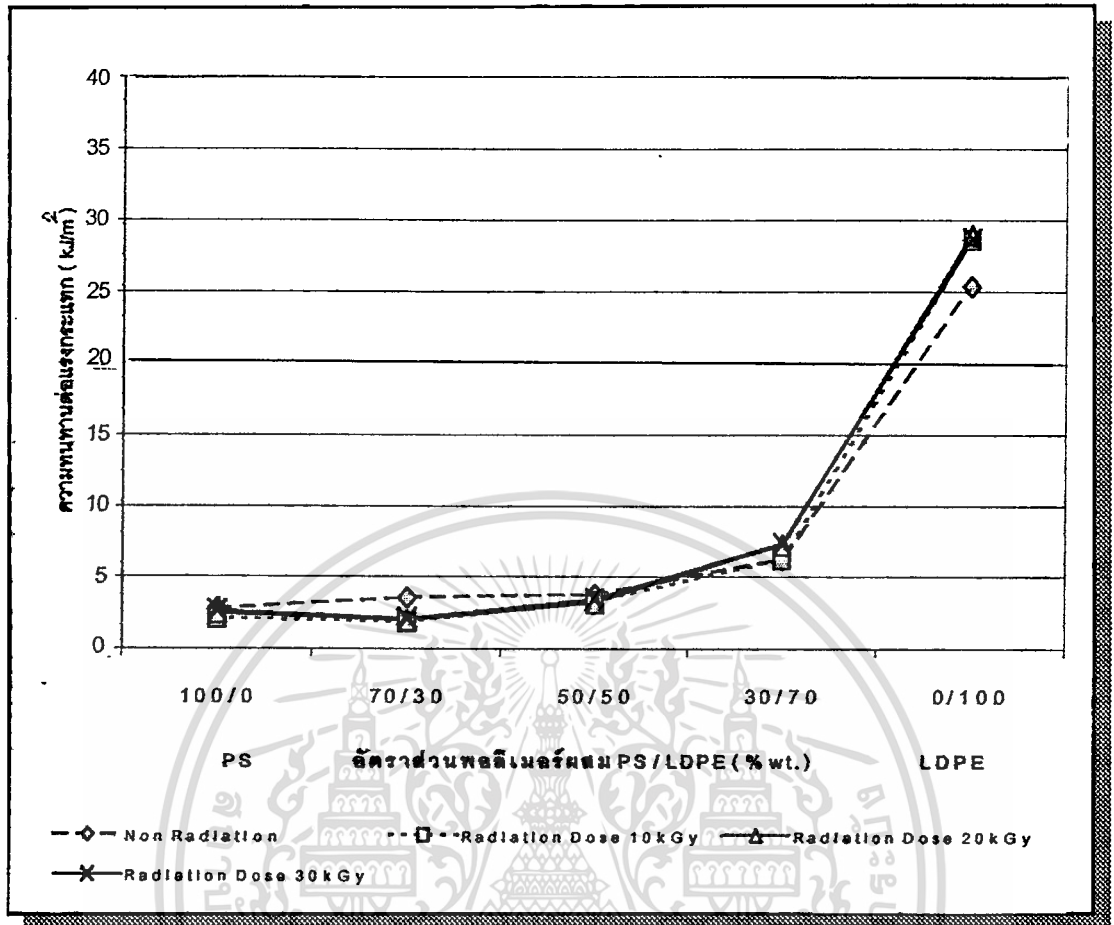
รูปที่ 4.6 แสดงความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ เมื่อฉายรังสีที่ความเข้ม 10, 20 และ 30 kGy

จากรูปที่ 4.6 พบว่า ให้ผลเช่นเดียวกับเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด กล่าวคือ ที่ความเข้มรังสี 10, 20 และ 30 kGy ในทุกอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม ความทนแรงดึงให้ค่าใกล้เคียงกับเมื่อไม่ฉายรังสี)



รูปที่ 4.7 แสดงมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ เมื่อฉายรังสีที่ความเข้ม 10, 20 และ 30 kGy

จากรูปที่ 4.7 พบว่า มอดุลัสของ PS จะลดลงเมื่อได้รับรังสี แสดงว่าที่ความเข้มดังกล่าวรังสี ทำให้ความเครียดของ PS เปลี่ยนแปลงมาก ในขณะที่มอดุลัสของ LDPE ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง นั่นคือ การเปลี่ยนแปลงของความเค้นต่อความเครียดคงที่



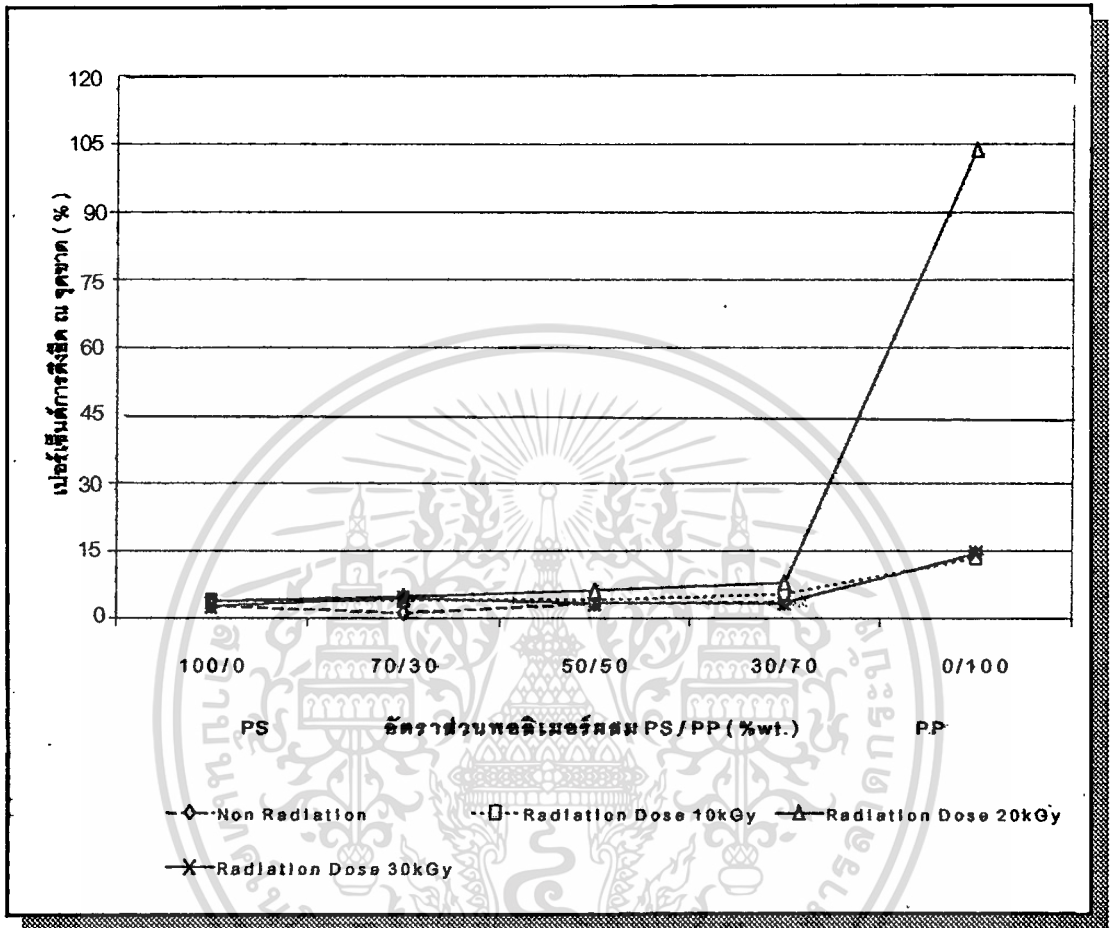
รูปที่ 4.8 แสดงความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ เมื่อฉายรังสีที่ความเข้ม 10, 20 และ 30 kGy

จากรูปที่ 4.8 พบว่า ให้ผลเช่นเดียวกับเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ความทนแรงดึง และมอดุลัส กล่าวคือ ที่ความเข้มรังสี 10, 20 และ 30 kGy ในทุกอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม ความทนทานต่อแรงกระแทกให้ค่าใกล้เคียงกับเมื่อไม่ฉายรังสี

สรุป ความเข้มรังสีต่ำ อัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE มีผลน้อยต่อ เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ความทนแรงดึง และความทนทานต่อแรงกระแทก แต่มีผลมากกับมอดุลัส เมื่อเทียบกับไม่ฉายรังสี

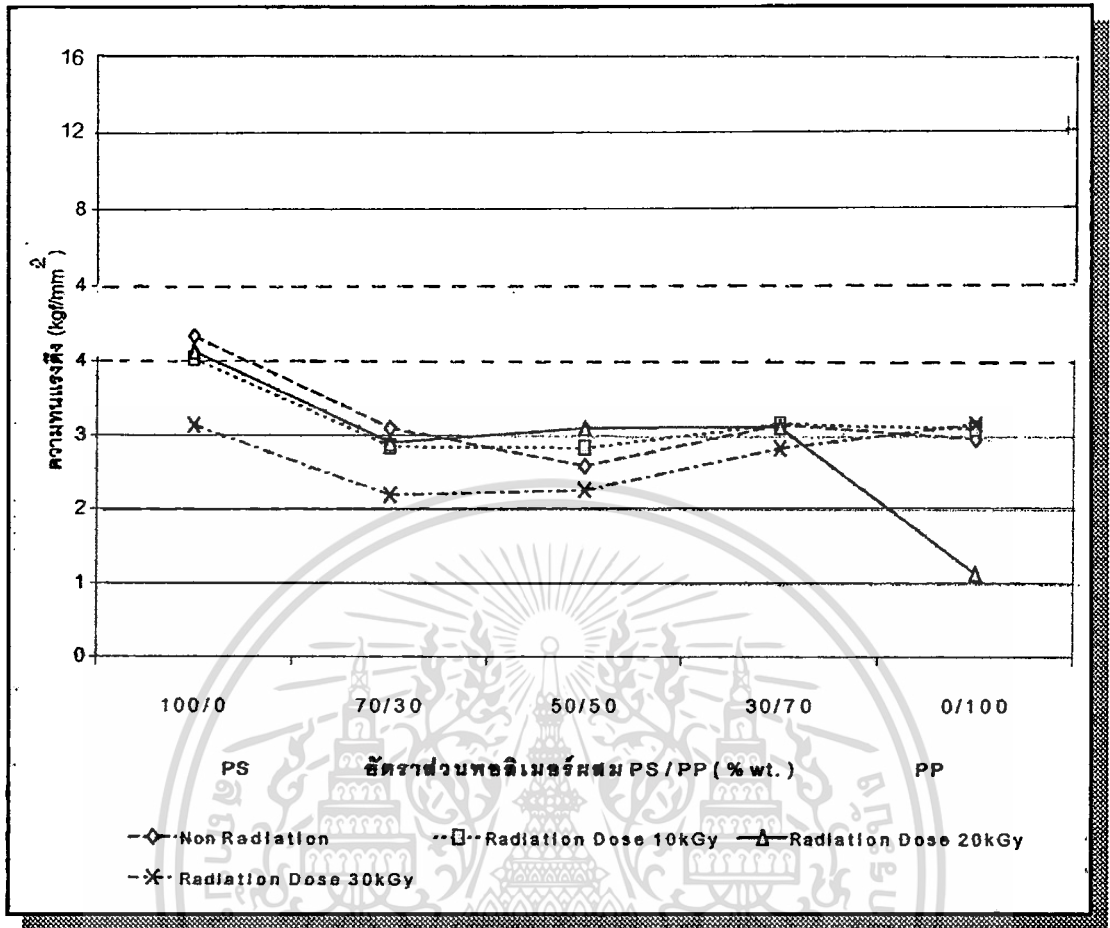
ผลของรังสีที่มีต่อสารช่วยผสม PS/LDPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ มีแนวโน้มเช่นเดียวกับเมื่อไม่เติมสารช่วยผสม ( พิจารณาได้จากภาคผนวก ข )

- กรณีของพอลิเมอร์ผสม PS/PP ( อุณหภูมิในการผสมต่างจาก PS/LDPE )



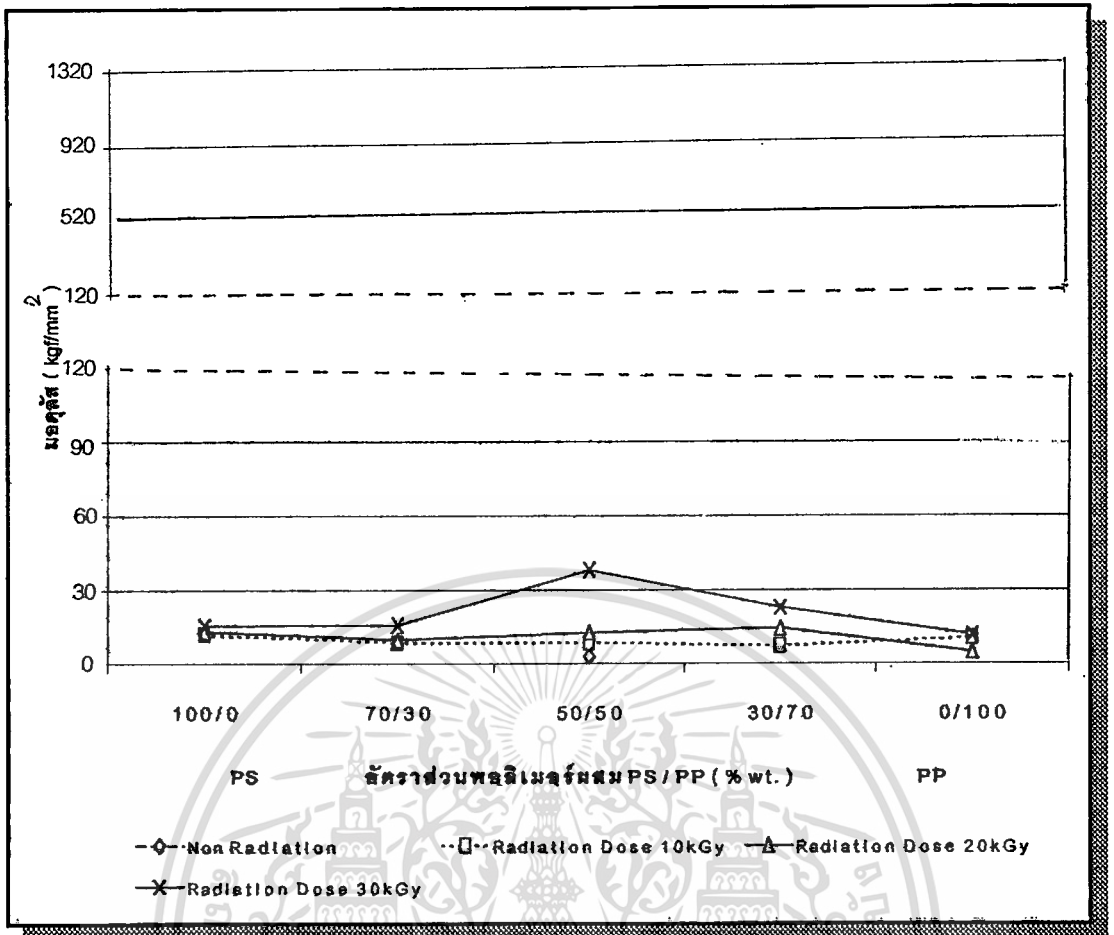
รูปที่ 4.9 แสดงเปอร์เซ็นต์การดิ่งยัด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม PS/PP ที่อัตราส่วนต่าง ๆ เมื่อฉายรังสีที่ความเข้ม 10, 20 และ 30 kGy

จากรูปที่ 4.9 พบว่า ที่ความเข้มรังสี 10, 20 และ 30 kGy ในทุกอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม เปอร์เซ็นต์การดิ่งยัด ณ จุดขาด ให้ค่าใกล้เคียงกับเมื่อไม่ฉายรังสี แสดงว่าที่ความเข้มรังสีดังกล่าว ไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในโมเลกุลของ PS และ PP



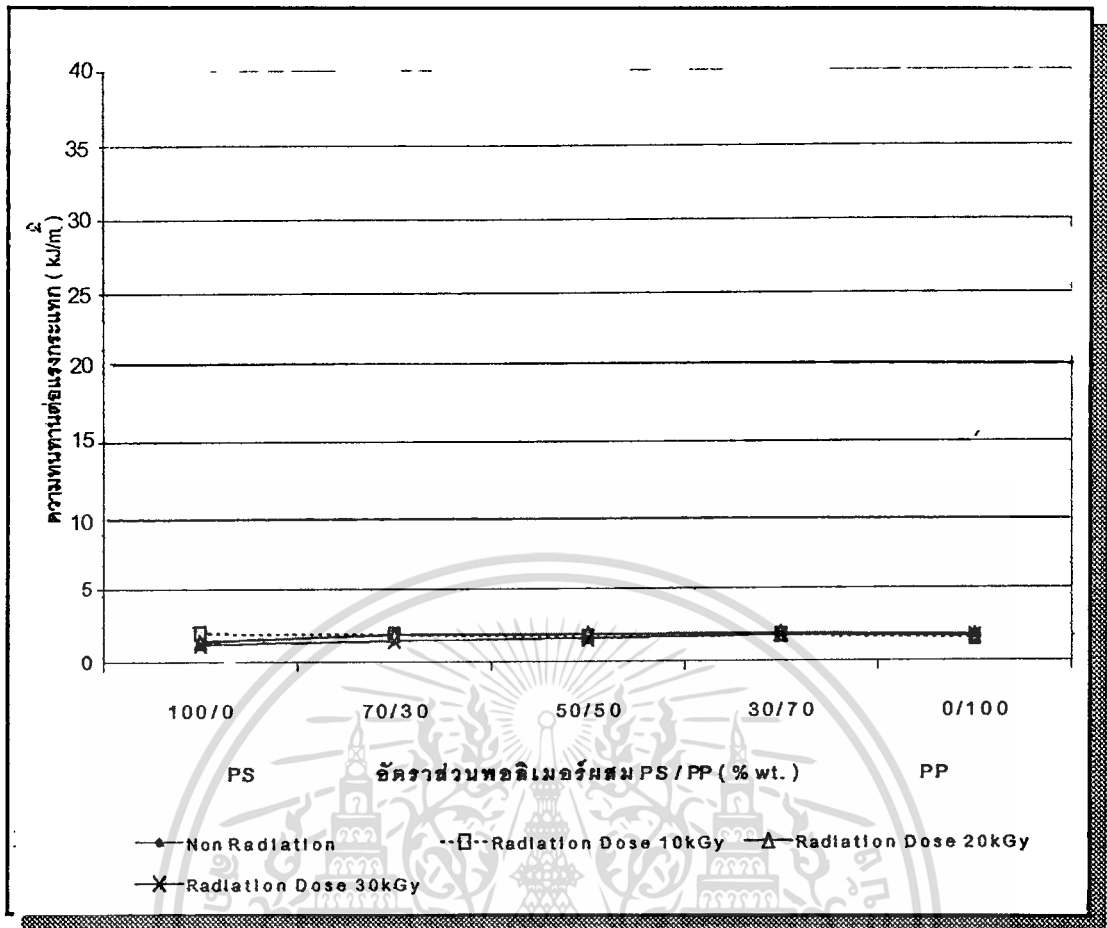
รูปที่ 4.10 แสดงความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PS/PP ที่อัตราส่วนต่าง ๆ เมื่อฉายรังสี ที่ความเข้ม 10, 20 และ 30 kGy

จากรูปที่ 4.10 พบว่า ให้ผลเช่นเดียวกับเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด กล่าวคือ ที่ความเข้มรังสี 10, 20 และ 30 kGy ในทุกอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม ความทนแรงดึงให้ค่าใกล้เคียงกับเมื่อไม่ฉายรังสี



รูปที่ 4.11 แสดงมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสม PS/PP ที่อัตราส่วนต่าง ๆ เมื่อฉายรังสีที่ความเข้ม 10, 20 และ 30 kGy

จากรูปที่ 4.11 พบว่า ให้ผลเช่นเดียวกับเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด และความทนแรงดึง กล่าวคือ ที่ความเข้มรังสี 10, 20 และ 30 kGy ในทุกอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม มอดุลัสให้ค่าใกล้เคียงกับเมื่อไม่ฉายรังสี



รูปที่ 4.12 แสดงความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PS/PP ที่อัตราส่วนต่าง ๆ เมื่อฉายรังสีที่มีความเข้ม 10, 20 และ 30 kGy

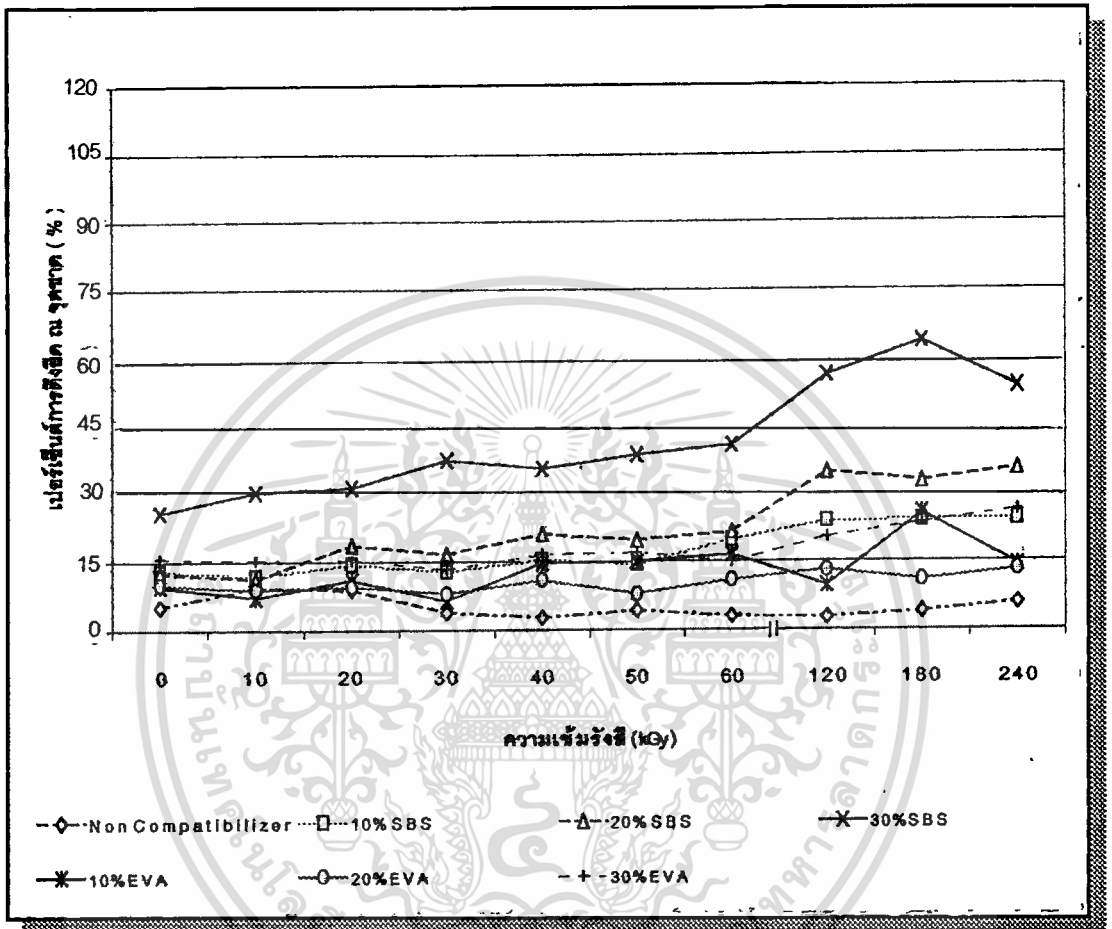
จากรูปที่ 4.12 พบว่า ให้ผลเช่นเดียวกับเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ความทนแรงดึง และ มอดุลัส กล่าวคือ ที่ความเข้มรังสี 10, 20 และ 30 kGy ในทุกอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม ความทนทานต่อแรงกระแทกให้ค่าใกล้เคียงกับเมื่อไม่ฉายรังสี

สรุป ความเข้มรังสีต่ำ อัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม PS/PP มีผลน้อยต่อ เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ความทนแรงดึง มอดุลัส และความทนทานต่อแรงกระแทก เมื่อเทียบกับเมื่อไม่ฉายรังสี

ผลของรังสีที่มีต่อสารช่วยผสม PS/PP ที่อัตราส่วนต่าง ๆ มีแนวโน้มเช่นเดียวกับเมื่อไม่เติม สารช่วยผสม ( พิจารณาได้จากภาคผนวก ข )

#### 4.1.2.2 ผลของการฉายรังสีในอากาศตั้งแต่ความเข้ม 0-240 kGy ที่มีต่อชนิด และปริมาณสารช่วยผสม PS/LDPE และ PS/PP ที่อัตราส่วน 50/50

- กรณีของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE

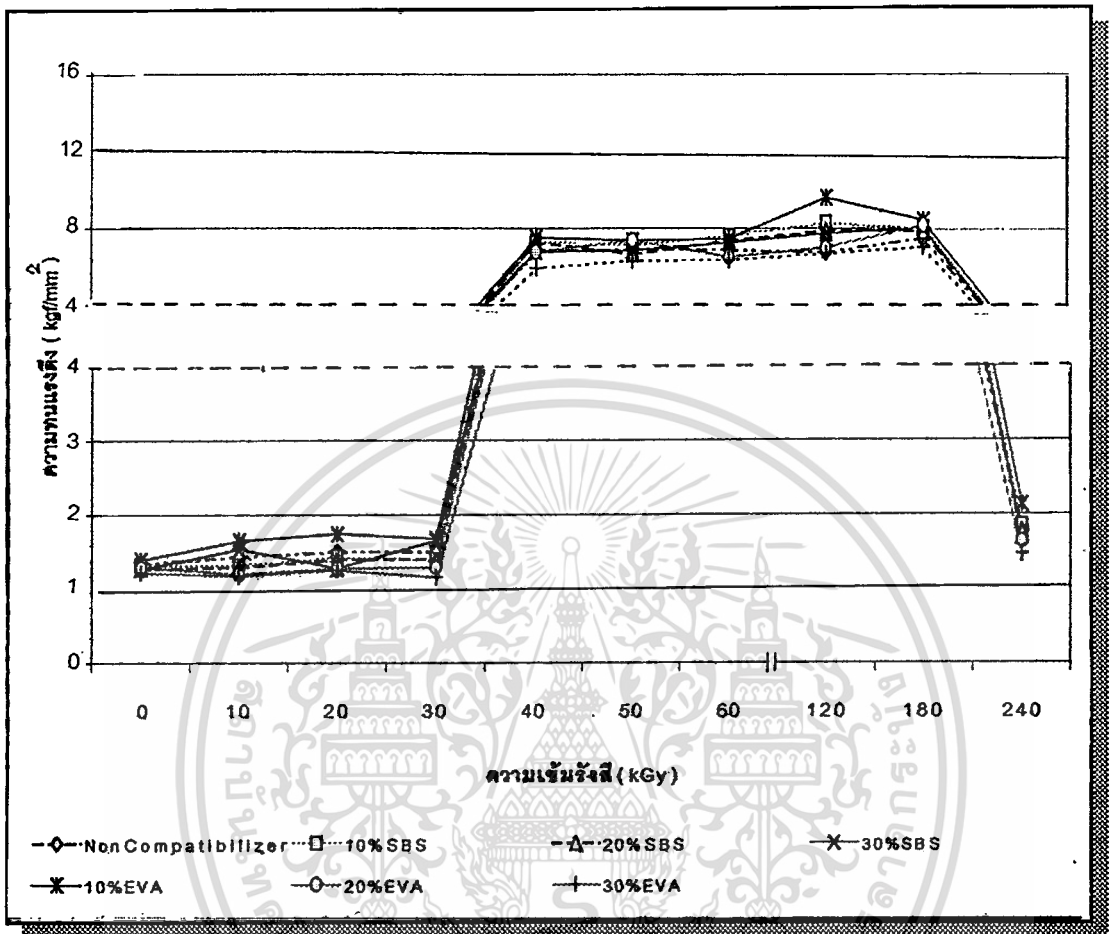


รูปที่ 4.13 แสดงเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาดของ PS/LDPE 50/50 ที่ความเข้มรังสีต่าง ๆ

รูปที่ 4.13 พบว่าในระบบไม่มี และมีสารช่วยผสม EVA ความเข้มรังสีมีผลน้อยต่อเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด แต่ในระบบที่มีสารช่วยผสม SBS ที่ความเข้มรังสีเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาดเพิ่มตามปริมาณสารช่วยผสมที่เพิ่มขึ้น แสดงว่าในระบบที่ไม่มี และมีสารช่วยผสม EVA มีการเชื่อมโยงของ LDPE, LDPE-EVA และ EVA-EVA ตามลำดับ ซึ่งการเชื่อมโยงดังกล่าว ทำให้แรงยึดระหว่างสายโซ่แข็งแรงมากขึ้น แต่พอลิเมอร์ผสมยังคงแยกเป็น 2 ภูมิภาค คือ ภูมิภาคของ PS และภูมิภาคที่เกิดการเชื่อมโยง ดังนั้นความเข้มรังสีจึงไม่ทำให้เปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาดเปลี่ยนแปลงไปจากเมื่อไม่ฉายรังสี ในขณะที่ระบบที่มีสารช่วยผสม SBS การเชื่อมโยงที่เกิดจาก LDPE LDPE-SBS หรือ SBS-SBS ทำให้พอลิเมอร์มีแรงยึดระหว่างสายโซ่ทั่วทั้ง

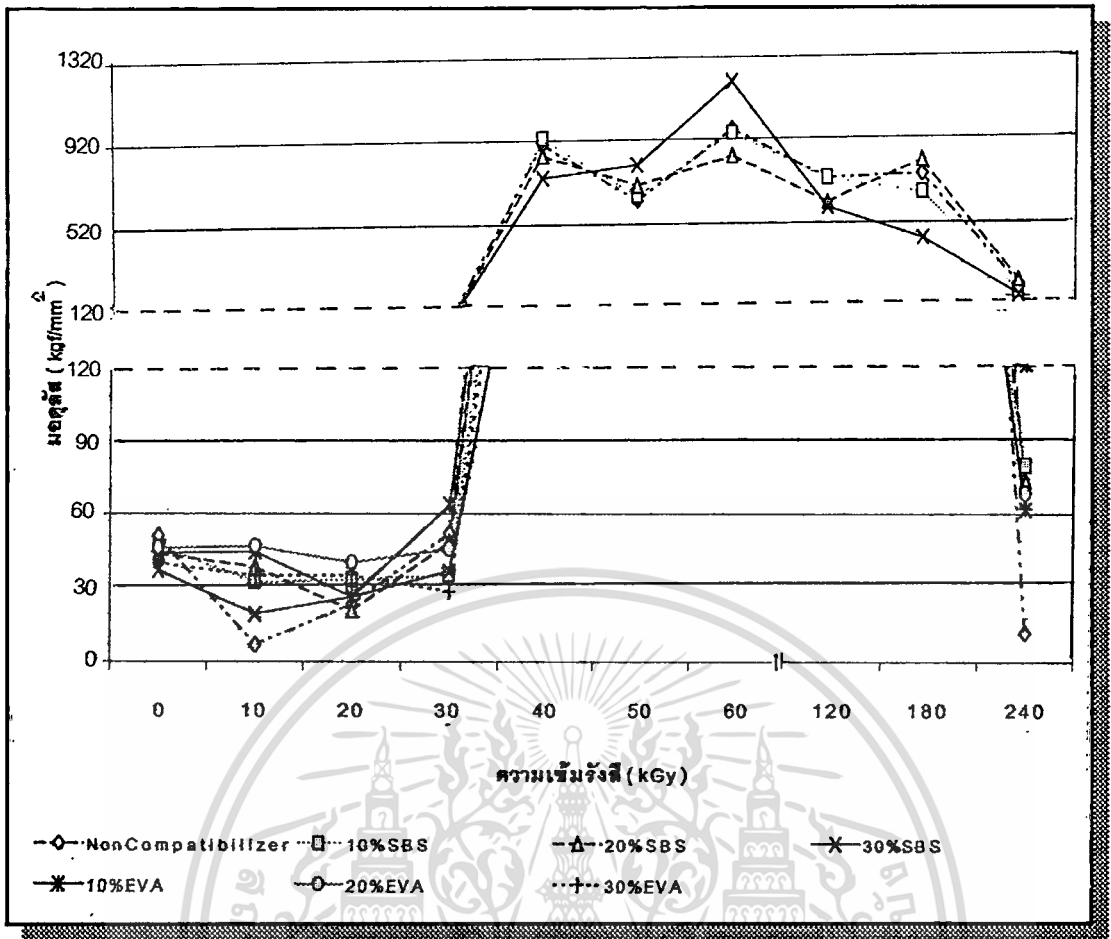
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบ พอลิเมอร์ผสมเข้ากันได้มากขึ้น และส่วนของบิวทาไดอีน ที่ทำหน้าที่ประสานระหว่างสายโซ่ ยังทำให้การดึงยืดสูงขึ้นตามปริมาณ SBS ที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย



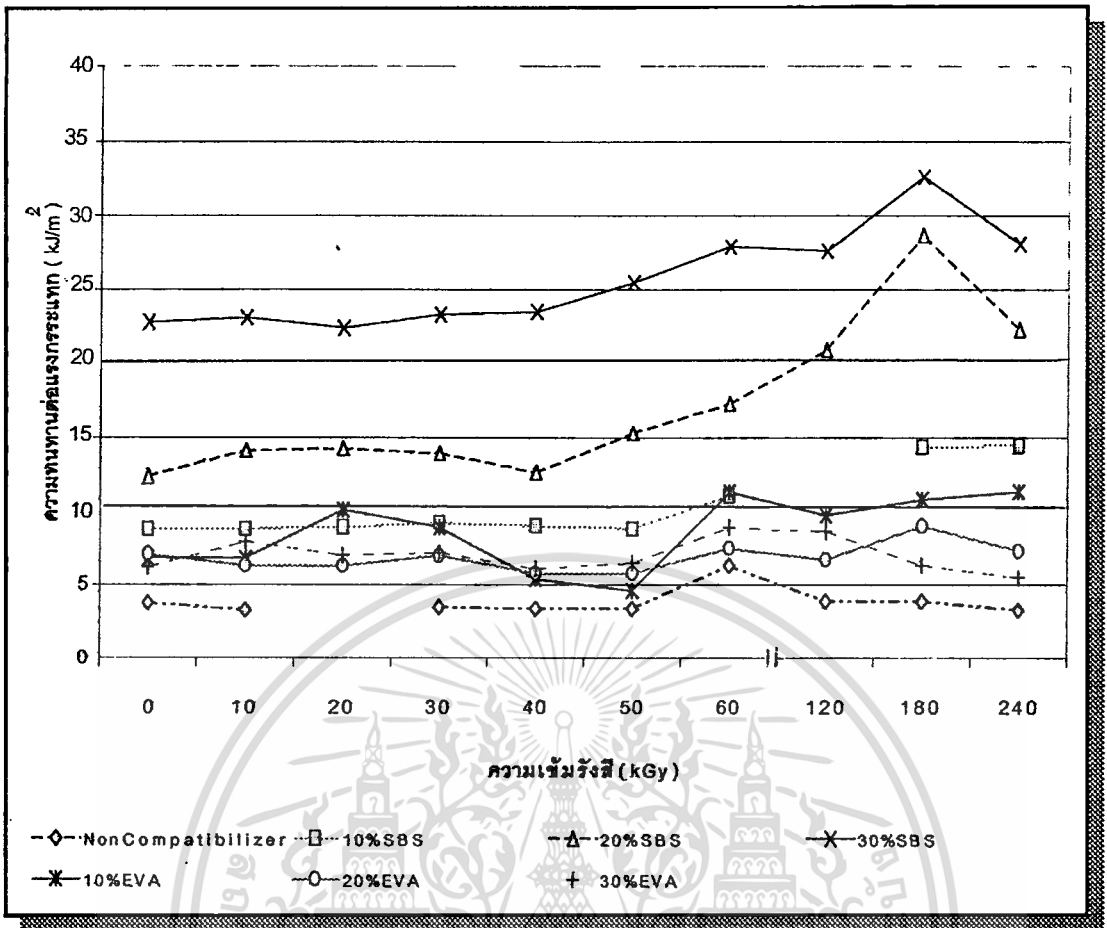
รูปที่ 4.14 แสดงความทนแรงดึงของ PS/LDPE 50/50 ที่ความเข้มรังสีต่างๆ

รูปที่ 4.14 พบว่าในทุกะบบของพอลิเมอร์ผสม ที่ความเข้มรังสีต่ำ ( 10-30 kGy ) ความทนแรงดึงไม่เปลี่ยนแปลงจากเมื่อไม่ฉายรังสี แต่จะเพิ่มขึ้นมากที่ความเข้มรังสีในช่วง 40-180 kGy จากนั้นลดลงที่ความเข้มสูงกว่า 180 kGy แสดงว่าที่ความเข้มรังสีต่ำ พอลิเมอร์ไม่เกิดการเชื่อมโยง ในขณะที่ความเข้มรังสีในช่วง 40-180 kGy เกิดการเชื่อมโยงของ LDPE, EVA และ SBS เพิ่มขึ้น ทำให้ความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น แต่ความทนแรงดึงจะไม่เพิ่มขึ้นตามการเชื่อมโยง เนื่องจาก LDPE, EVA และ SBS สามารถดึงยืดได้ ดังนั้นความแข็งแรงที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมโยงจะหักล้างกับความสามารถในการดึงยืดที่เพิ่มขึ้น และที่ความเข้มสูงกว่า 180 kGy เกิดการเชื่อมโยงมากจนทำให้พอลิเมอร์เปราะ ความทนแรงดึงจึงลดลงมาก



รูปที่ 4.15 แสดงมอดุลัสของ PS/LDPE 50/50 ที่ความเข้มรังสีต่างๆ

จากรูปที่ 4.15 พบว่ามอดุลัสให้ลักษณะเส้นกราฟใกล้เคียงกับความทนแรงดึง กล่าวคือ ในทุกระบบพอลิเมอร์ผสม ที่ความเข้มรังสีต่ำ ( 10-30 kGy ) มอดุลัสไม่เปลี่ยนแปลงจากเมื่อไม่ฉายรังสี และเพิ่มขึ้นมากที่ความเข้มรังสีในช่วง 40-180 kGy แสดงว่าความเข้มรังสีในช่วง 40-180 kGy ค่าความทนแรงดึงเปลี่ยนแปลงมากกว่าการดึงยึด ณ จุดขาด แต่ลดลงตามสารช่วยผสม จากนั้นลดลงที่ความเข้มรังสีสูงกว่า 180 kGy แสดงว่าเมื่อเกิดการเชื่อมโยงของ SBS หรือ EVA ส่วนของบิวทาไดอีน และเอทิลีนไวนิลเอซีเตต มีความยืดหยุ่นทำให้มอดุลัสลดลง และพบว่า SBS ให้มอดุลัสน้อยกว่า EVA แสดงว่า ส่วนบิวทาไดอีนให้ความยืดหยุ่นมากกว่าเอทิลีนไวนิลเอซีเตต



รูปที่ 4.16 แสดงความทนทานต่อแรงกระแทกของ PS/LDPE 50/50 ที่ความเข้มรังสีต่างๆ

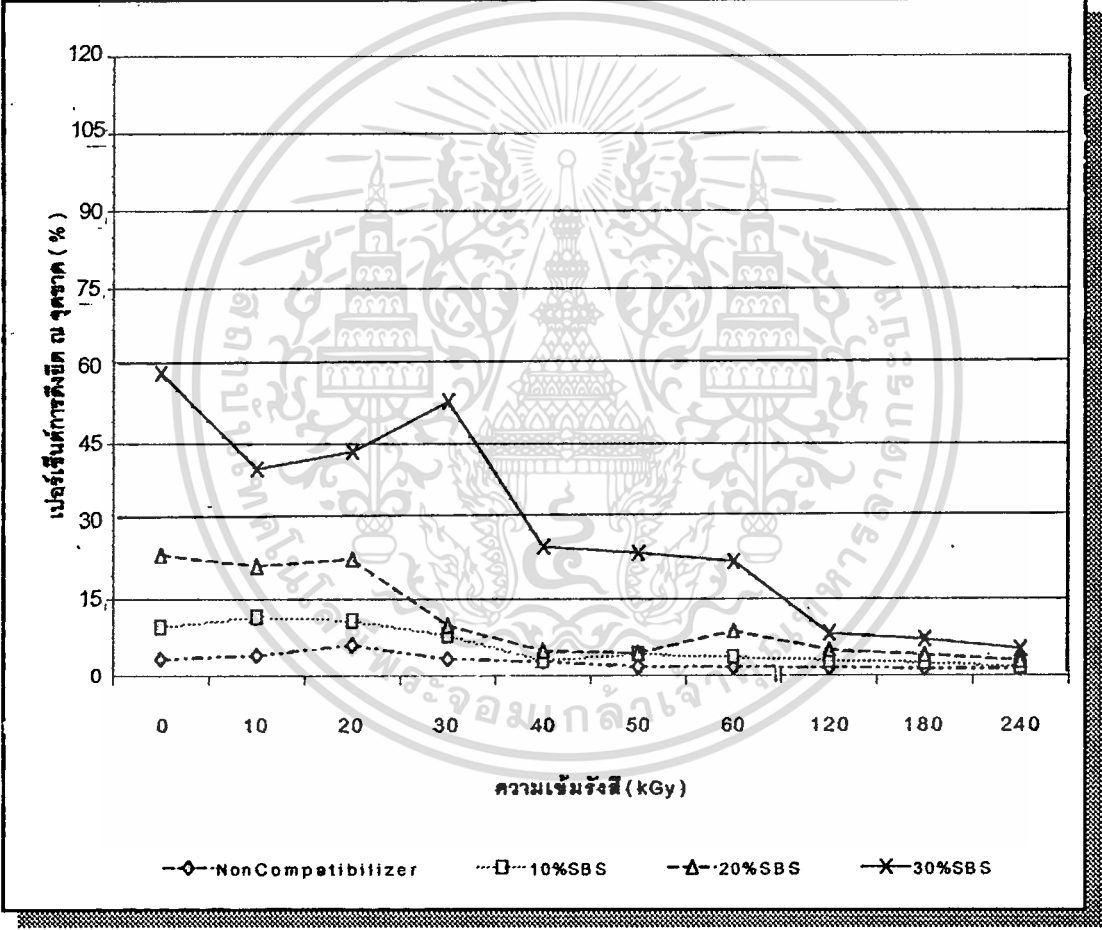
จากรูปที่ 4.16 พบว่าในระบบที่ไม่มี และมีส่วนช่วยผสม EVA ความเข้มรังสีมีผลน้อยต่อความทนทานต่อแรงกระแทก และในระบบมีส่วนช่วยผสม SBS ความเข้มรังสีเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นตามปริมาณ SBS แสดงว่าในกรณีใช้ SBS PS/LDPE กระจายตัวเข้ากันได้ดี เมื่อความเข้มรังสีเพิ่มขึ้น และเกิดการเชื่อมโยงของ LDPE, LDPE-SBS และ SBS-SBS ร่วมด้วย ส่งผลให้มีการยึดระหว่างสายโซ่แข็งแรงมากขึ้น ดังนั้นจึงสามารถรับ และกระจายแรงได้ดีขึ้น ขณะที่ในระบบที่ไม่มี และมีส่วนช่วยผสม EVA การเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นไม่ได้ทำให้พอลิเมอร์ผสมเข้ากันได้ ยังคงแยกออกเป็น 2 วัฏภาค ทำให้การรับ และกระจายแรงไม่ดีเท่ากับระบบที่มีส่วนช่วยผสม SBS

สรุป ความเข้มรังสีมีผลน้อยมากต่อเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด และความทนทานต่อแรงกระแทก โดยเฉพาะในระบบที่ไม่มีส่วนช่วยผสม และที่ความเข้มรังสี 10, 20 และ 30 kGy ไม่มีผลต่อความทนแรงดึง และมอดุลัส ความเข้มรังสีในช่วง 40-180 kGy ความทนแรงดึง และ

มอดุลัสสูงขึ้นมากอยู่ในระดับเดียวกัน แต่ที่ความเข้มรังสีสูงกว่า 180 kGy ความทนแรงดึง และมอดุลัสลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว ( ใกล้เคียงกับเมื่อไม่ฉายรังสี )

ที่ทุกความเข้มรังสี ชนิด และปริมาณสารช่วยผสม มีผลมากต่อเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ความทนทานต่อแรงกระแทก และเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารช่วยผสม SBS ให้ค่าสูงกว่า EVA แต่มีผลน้อยต่อความทนแรงดึง ส่วนที่ความเข้มต่ำ ( 10-30 kGy ) และความเข้มรังสีสูงกว่า 180 kGy มีผลน้อยต่อมอดุลัส ความเข้มรังสีในช่วง 40-180 kGy ทำให้มอดุลัสเพิ่มขึ้น แต่จะลดลงตามปริมาณสารช่วยผสม และ EVA ให้มอดุลัสสูงกว่า SBS

- กรณีของพอลิเมอร์ผสม PS/PP

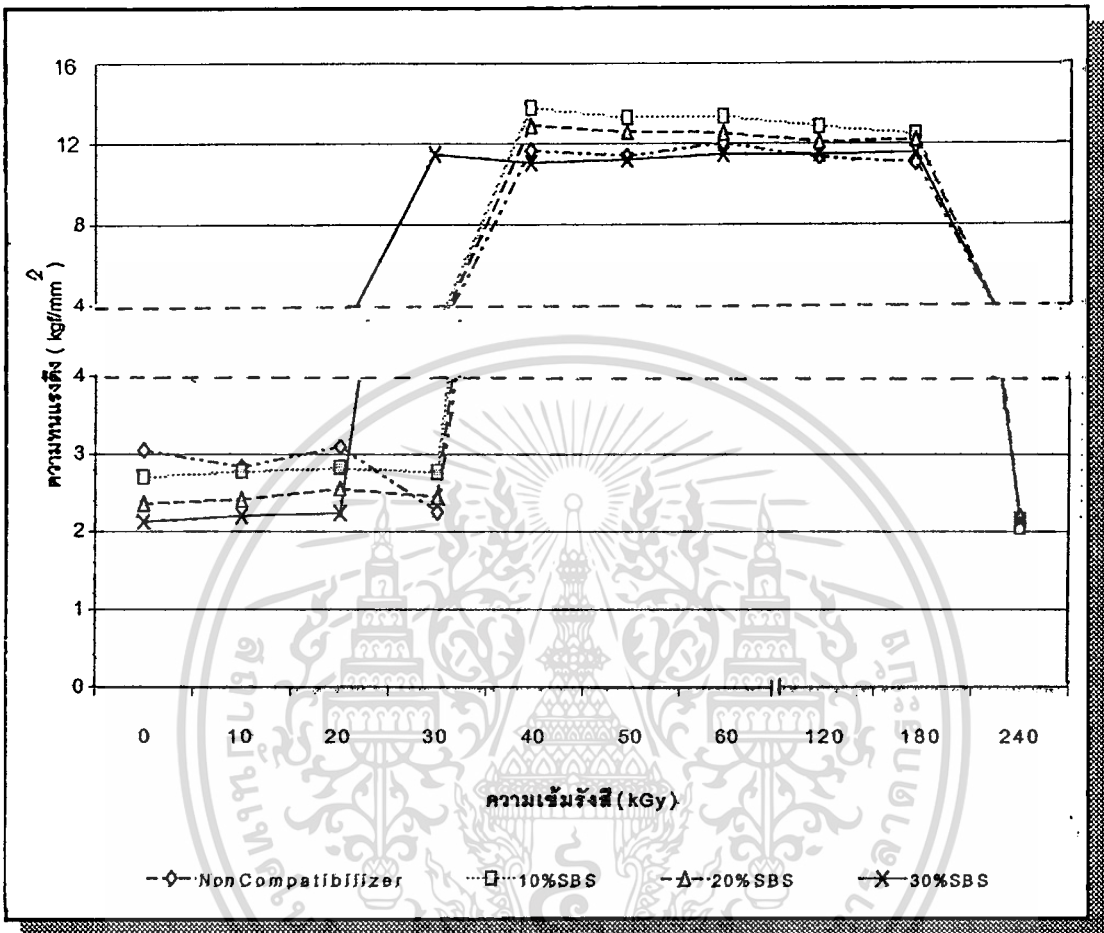


รูปที่ 4.17 แสดงเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด PS/PP ที่ความเข้มรังสีต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.17 พบว่าในทุกระบบพอลิเมอร์ผสม ที่ความเข้มรังสีเพิ่มขึ้นส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดลดลง และเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารช่วยผสม SBS แสดงว่าที่ความเข้มรังสีเพิ่มขึ้น PP และ SBS เกิดการเชื่อมโยงมากขึ้น แรงยึดระหว่างสายโซ่แข็งแรงขึ้น ทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

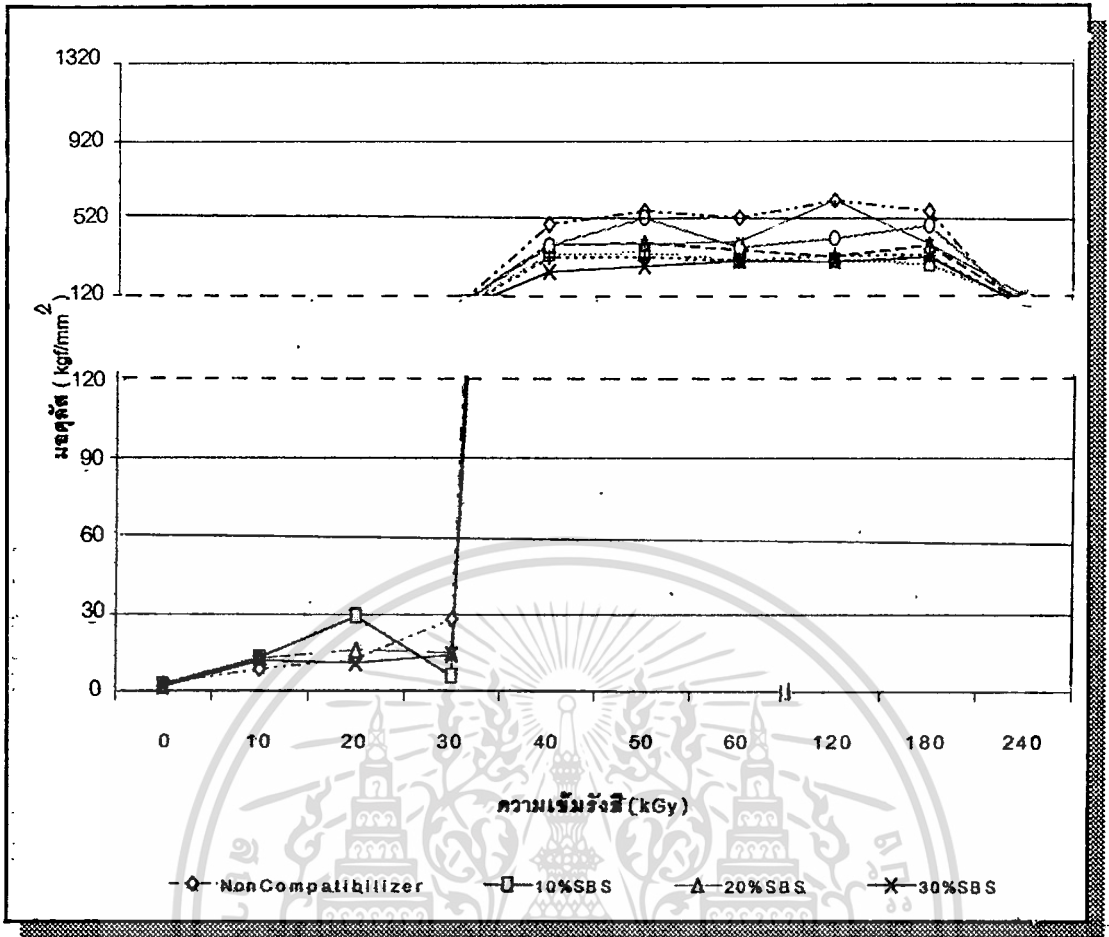
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดลดลง แต่ในกรณีมี SBS ความแข็งแรงที่เกิดจากแรงยึดระหว่างสายโซ่จะหักล้างกับความสามารถในการดึงยืดของบิวทาไดอีน ทำให้เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด สูงขึ้นตามปริมาณ SBS



รูปที่ 4.18 แสดงความทนแรงดึงของ PS/PP 50/50 ที่ความเข้มรังสีต่างๆ

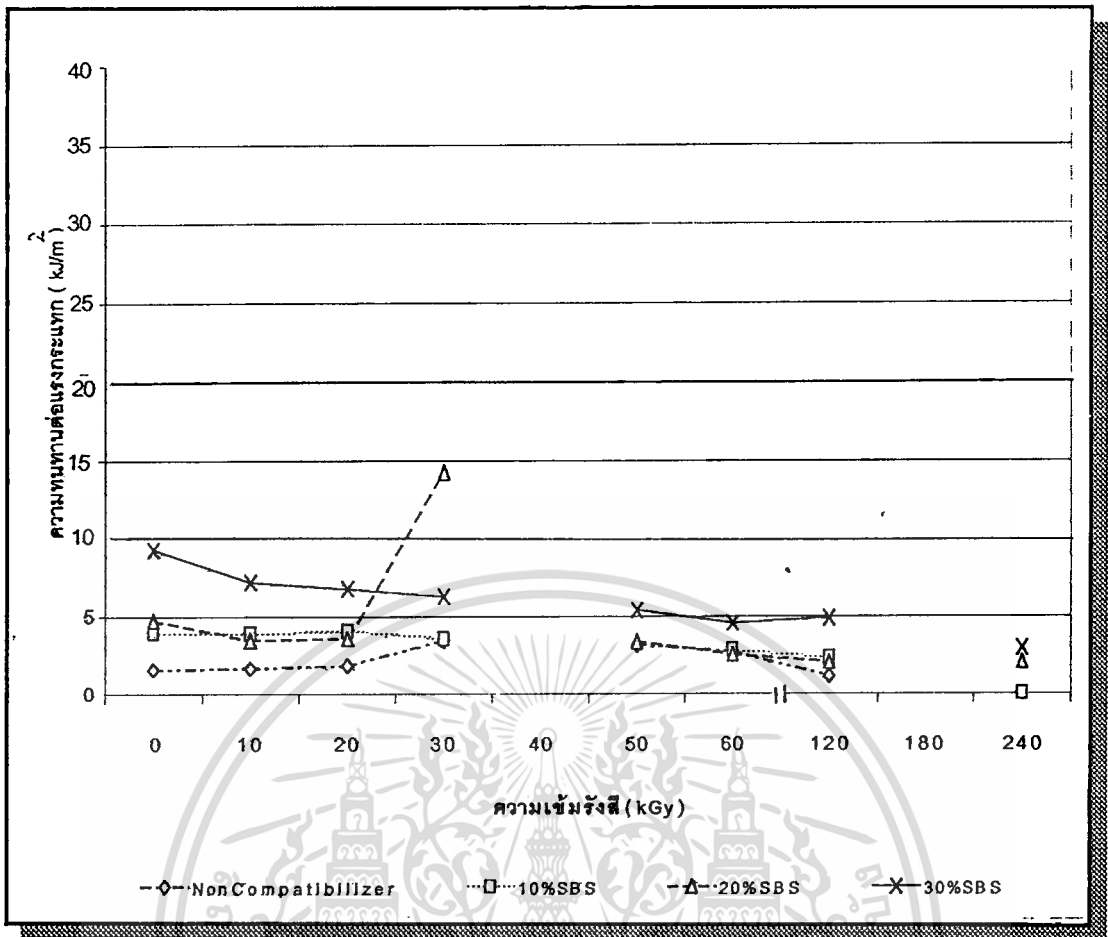
จากรูป 4.18 พบว่าในทุกระบบพอลิเมอร์ผสม ที่ความเข้มรังสีต่ำ ( 10-30 kGy ) มีผลน้อยมากต่อความทนแรงดึง ที่ความเข้มรังสีในช่วง 40-180 kGy ความทนแรงดึงเพิ่มขึ้นมากแต่ลดลงตามปริมาณ SBS ที่เพิ่มขึ้น จากนั้นลดลงที่ความเข้มรังสีสูงกว่า 180 kGy แสดงว่าที่ความเข้มรังสีต่ำ PP และ SBS ไม่เกิดการเชื่อมโยง ส่งผลให้ความทนแรงดึงเท่ากับเมื่อไม่ฉายรังสี ในขณะที่ความเข้มรังสีในช่วง 40-180 kGy SBS และ PP เกิดการเชื่อมโยง แรงยึดระหว่างสายโซ่เพิ่มขึ้น ความทนแรงดึงจึงเพิ่มสูงขึ้นมาก และที่ความเข้มสูงกว่า 180 kGy เกิดการเชื่อมโยงมาก ทำให้พอลิเมอร์ผสมเพราะ ความทนแรงดึงจึงลดลงมาก แต่ในกรณีมี SBS ความแข็งแรงที่เกิดจากแรงยึดระหว่างสายโซ่จะหักล้างกับความสามารถในการดึงยืดของบิวทาไดอีน ทำให้เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ต่ำลงตามปริมาณ SBS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 แสดงมอดุลัสของ PS/PP 50/50 ที่ความเข้มรังสีต่างๆ

จากรูปที่ 4.19 พบว่ามอดุลัสให้เส้นกราฟใกล้เคียงกับความทนแรงดึง กล่าวคือในทุกระบบพอลิเมอร์ผสม ที่ความเข้มรังสีต่ำ ( 10-30 kGy ) มอดุลัสไม่เปลี่ยนแปลงจากเมื่อไม่ฉายรังสี และเพิ่มขึ้นมากที่ความเข้มรังสีในช่วง 40-180 kGy แต่ลดลงตามสารช่วยผสม SBS จากนั้นลดลงที่ความเข้มรังสีสูงกว่า 180 kGy แสดงว่าเมื่อเกิดการเชื่อมโยงของ SBS ส่วนของบิวทาไดอีน มีความยืดหยุ่นทำให้มอดุลัสลดลง



รูปที่ 4.20 แสดงความทนทานต่อแรงกระแทกของ PS/PP 50/50 ที่ความเข้มรังสีต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.20 พบว่าความทนทานต่อแรงกระแทกให้ลักษณะเส้นกราฟใกล้เคียงกับเปอร์เซ็นต์การดัดยัด ณ จุดขาด กล่าวคือที่ความเข้มรังสีเพิ่มขึ้น ความทนทานต่อแรงกระแทกลดลง แสดงว่าที่ความเข้มรังสีเพิ่มขึ้น PP และ SBS เกิดการเชื่อมโยง แรงยึดระหว่างโมเลกุลแข็งแรงขึ้น การรับแรงไม่ดี ความทนทานต่อแรงกระแทกจึงลดลง

สรุป ผลของความเข้มรังสีต่อเปอร์เซ็นต์การดัดยัด ณ จุดขาด และความทนทานต่อแรงกระแทก พบว่าพอลิเมอร์ผสม PS/PP 50/50 มีแนวโน้มตรงกันข้ามกับ PS/LDPE ที่อัตราส่วนเดียวกัน กล่าวคือระบบของพอลิเมอร์ผสม PS/PP เปอร์เซนต์การดัดยัด ณ จุดขาด และความทนทานต่อแรงกระแทกลดลงตามความเข้มรังสีที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ระบบพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE เปอร์เซนต์การดัดยัด ณ จุดขาด และความทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นตามความเข้มรังสีที่เพิ่มขึ้น ส่วนผลของความเข้มรังสีต่อสมบัติความทนแรงดึง และมอดุลัส พบว่าพอลิเมอร์ทั้งสองระบบมีแนวโน้มเหมือนกัน กล่าวคือ ที่ความเข้มรังสีต่ำ ( 10-30 kGy ) ความทนแรงดึง และมอดุลัสไม่เปลี่ยนแปลงจากเมื่อไม่ฉายรังสี ที่ความเข้มรังสี 40-180 kGy ความทนแรงดึง และมอดุลัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

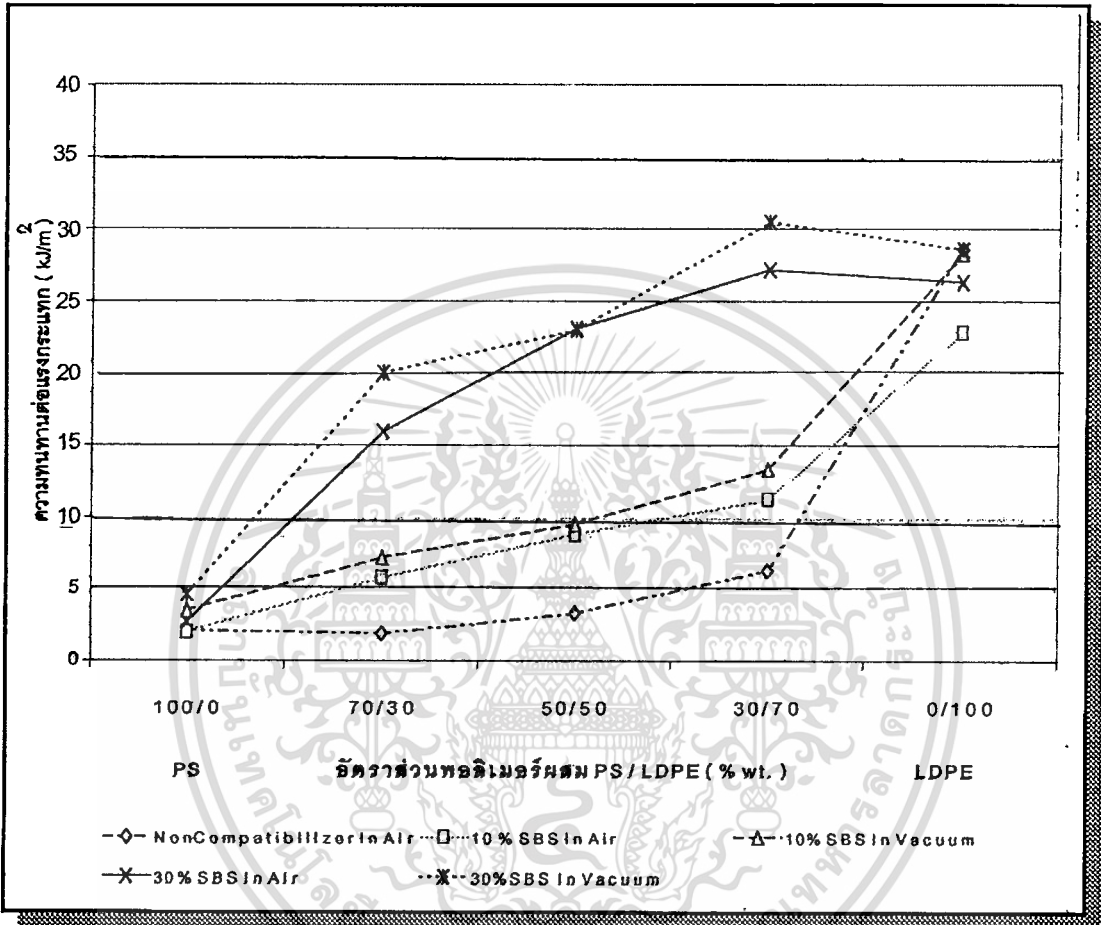
สูงสุดอยู่ในระดับเดียวกัน และที่ความเข้มมากกว่า 180 kGy ความทนแรงดึง และมอดุลัสลดลง (ใกล้เคียงกับเมื่อไม่ฉายรังสี) ทั้งนี้อาจกล่าวได้ว่าการเชื่อมโยงที่เกิดจาก LDPE และ PP ส่งผลต่อความทนแรงดึง และมอดุลัสคล้ายกัน แต่การเชื่อมโยงที่เกิดจาก PP ให้ความทนแรงดึง และมอดุลัสสูงกว่า LDPE

ผลของปริมาณสารช่วยผสมของ PS/PP ที่ทุกความเข้มรังสี ให้ผลเช่นเดียวกับ PS/LDPE กล่าวคือ เมื่อปริมาณสารช่วยผสมเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด และความทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มสูงขึ้น และผลที่มีต่อความทนแรงดึง และมอดุลัส ก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน แต่ PS/PP จะให้ผลที่เด่นชัดกว่า กล่าวคือ ปริมาณสารช่วยผสมไม่มีผลที่ความเข้มรังสีต่ำ (10-30 kGy) และที่ความเข้มรังสีสูงกว่า 180 kGy แต่มีผลที่ความเข้มรังสีในช่วง 40-180 kGy คือมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสารช่วยผสมที่เพิ่มขึ้น



#### 4.1.2.4 ศึกษาอิทธิพลของออกซิเจน โดยฉายรังสีในอากาศ และสุญญากาศ ของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ที่ความเข้มรังสีต่ำ

- เปรียบเทียบการฉายรังสีในอากาศกับสุญญากาศของทุกอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม

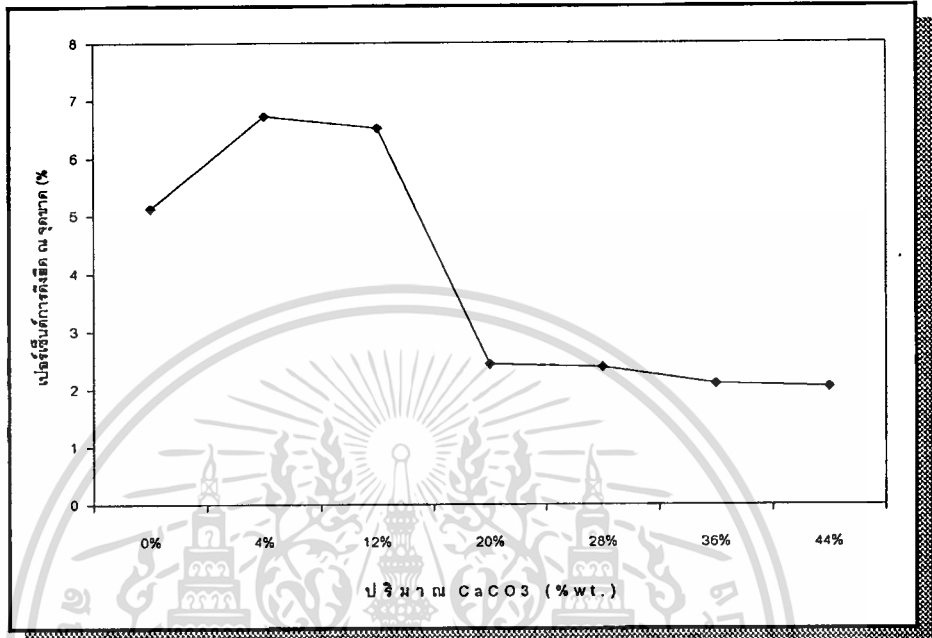


รูปที่ 4.21 แสดงความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE เมื่อฉายรังสีในอากาศ และสุญญากาศ ที่ความเข้มรังสี 10 kGy

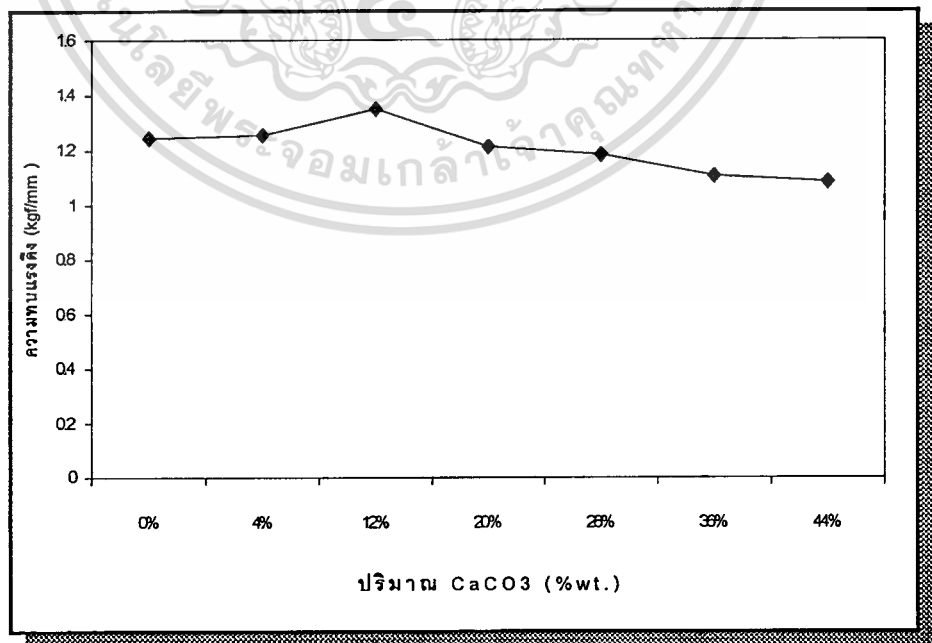
จากรูปที่ 4.12 พบว่าเมื่อฉายรังสีในสุญญากาศให้ความทนทานต่อแรงกระแทกสูงกว่าเมื่อฉายรังสีในอากาศ เนื่องจากการฉายรังสีในสุญญากาศจะหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และยังช่วยเร่งอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นให้สามารถเคลื่อนที่ได้คล่องตัวกว่า โอกาสในการรวมกันของอนุมูลอิสระจึงมากกว่าด้วย

### 4.1.3 ผลของสารตัวเติม

#### 4.1.3.1 ผลของปริมาณ $\text{CaCO}_3$ ต่อพอลิเมอร์ผสมของ PS/LDPE ที่อัตราส่วน 50/50



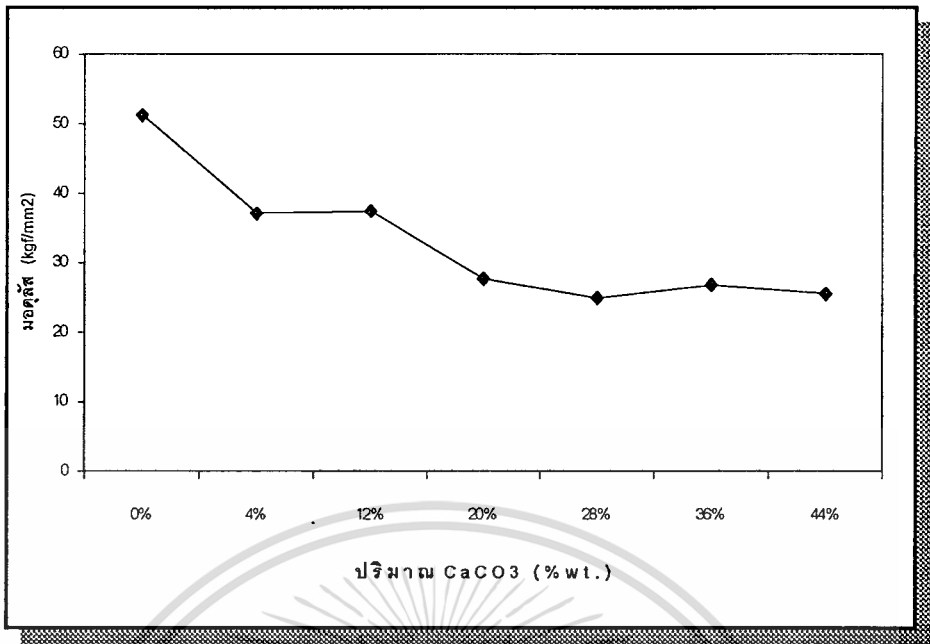
รูปที่ 4.22 แสดงเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE 50/50 เมื่อมีการเติม  $\text{CaCO}_3$  ในปริมาณต่าง ๆ



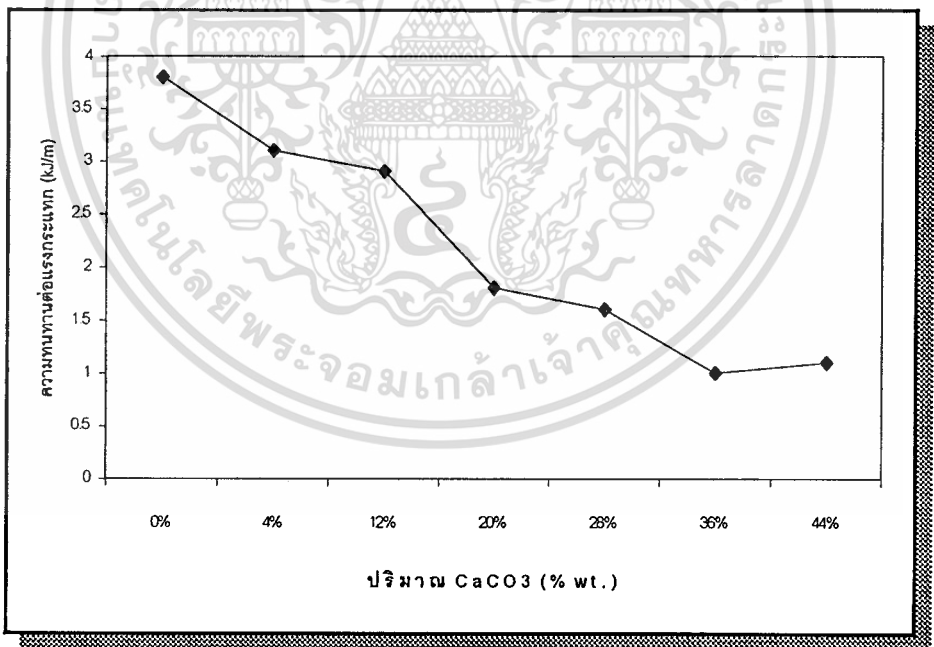
รูปที่ 4.23 แสดงความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE 50/50 เมื่อมีการเติม  $\text{CaCO}_3$  ในปริมาณต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 แสดงมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE 50/50 เมื่อมีการเติม  $\text{CaCO}_3$  ในปริมาณต่าง ๆ



รูปที่ 4.25 แสดงความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE 50/50 เมื่อมีการเติม  $\text{CaCO}_3$  ในปริมาณต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.22-4.25 พบว่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ความทนแรงดึง มอดุลัส และความทนทานต่อแรงกระแทกลดลงตามปริมาณ  $\text{CaCO}_3$  ที่เพิ่มขึ้น และลดลงมากที่ปริมาณ  $\text{CaCO}_3$  สูงกว่า 12% โดยน้ำหนัก เนื่องจาก  $\text{CaCO}_3$  จะขัดขวางการเคลื่อนไหวภายในโมเลกุลพอลิเมอร์ จึงทำให้พอลิเมอร์แข็ง ซึ่งผลของ  $\text{CaCO}_3$  ที่มีต่อพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดที่นำมาผสมกันแตกต่างกัน คือ  $\text{CaCO}_3$  ทำให้ PS ซึ่งเป็นพอลิเมอร์อัสฐานที่เคลื่อนที่ยาก มีสมบัติแข็ง และเปราะ เป็นพอลิเมอร์ที่เปราะมากขึ้น ในขณะที่ทำให้ LDPE ซึ่งอ่อนนุ่ม เป็นพอลิเมอร์ที่แข็งขึ้น ดังนั้น ผลของ  $\text{CaCO}_3$  ต่อพอลิเมอร์ผสมสองชนิดดังกล่าว คือเพิ่มความแข็ง และเปราะ จึงทำให้เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด และความทนทานต่อแรงกระแทกลดลงตามปริมาณ  $\text{CaCO}_3$  ที่เพิ่มขึ้น แต่  $\text{CaCO}_3$  ที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ทำให้ความทนแรงดึงเปลี่ยนแปลงมากนัก ในขณะที่ทำให้มอดุลัสลดลงเป็นเพราะ เมื่อ  $\text{CaCO}_3$  มากกว่า 12 % โดยน้ำหนัก เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดลดลงอย่างมาก ดังนั้นค่ามอดุลัสจึงลดลงตามปริมาณ  $\text{CaCO}_3$  ที่เพิ่มขึ้นดังกล่าว



#### 4.1.3.2 ผลของ $\text{CaCO}_3$ ที่มีต่อพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE 50/50 เมื่อไม่มี และมี สารช่วยผสม

ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE 50/50 เมื่อไม่มี และมี  $\text{CaCO}_3$  4% และ 12 % โดยน้ำหนัก

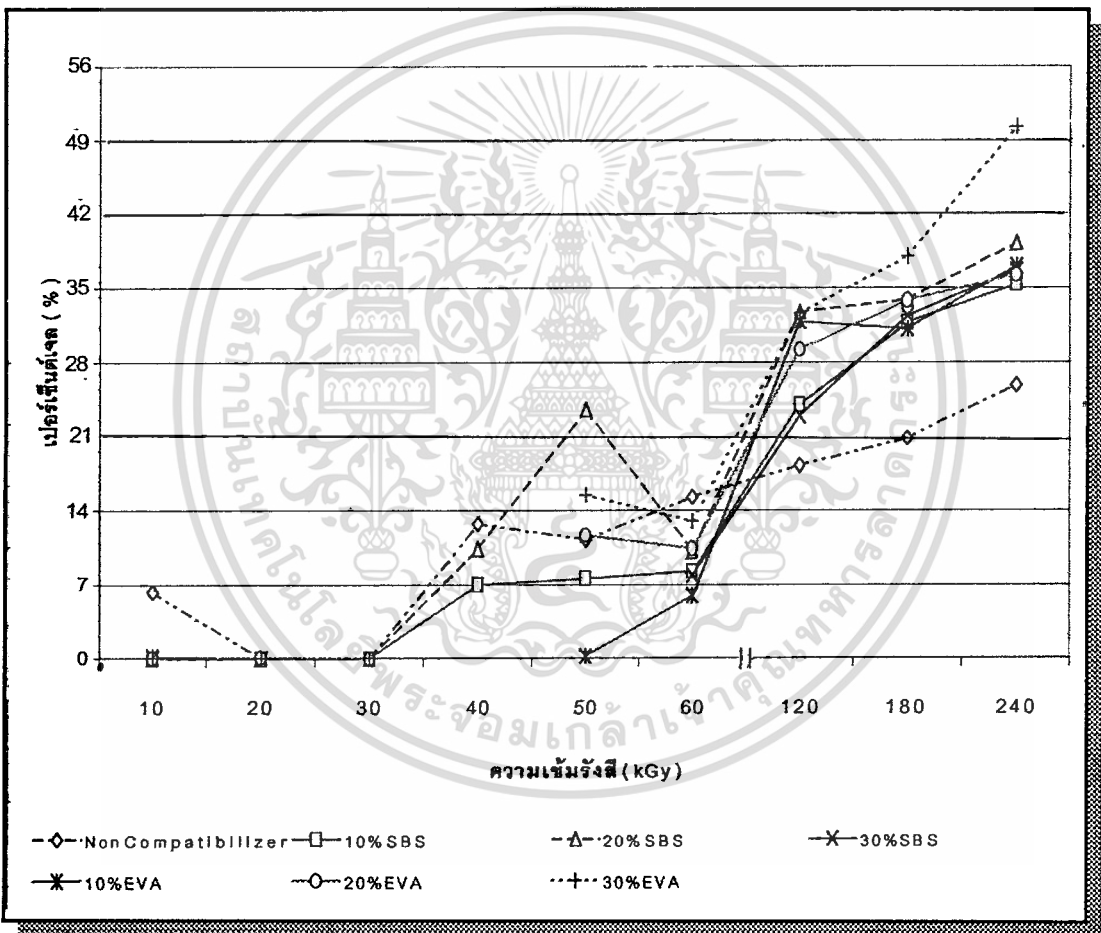
สมบัติเชิงกล ปริมาณ $\text{CaCO}_3$ (%wt.)	พอลิเมอร์ผสม PS/LDPE	เปอร์เซ็นต์การ ดึงยืด ณ จุด ขาด (%)	ความทนแรงดึง ( kgf/mm <sup>2</sup> )	มอดุลัส ( kgf/mm <sup>2</sup> )	ความทนทาน ต่อแรงกระแทก ( kJ/m )
ไม่มี $\text{CaCO}_3$	ไม่เติมสารช่วย ผสม	5.12	1.34	51.21	3.80
	10 % SBS	12.92	1.32	46.60	8.80
	30 % SBS	25.86	1.27	37.01	22.80
4 %	ไม่เติมสารช่วย ผสม	6.72	1.25	37.02	3.10
	10 % SBS	10.72	1.27	30.37	7.20
	30 % SBS	15.38	1.07	35.17	18.00
12 %	ไม่เติมสารช่วย ผสม	6.51	1.35	37.38	2.90
	10 % SBS	9.75	1.27	45.73	5.30
	30 % SBS	19.41	1.15	45.47	19.30

จากตารางที่ 4.1 พบว่าในทุกสมบัติเชิงกล เมื่อมี  $\text{CaCO}_3$  ในพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE 50/50 จะทำให้สมบัติของ SBS ในพอลิเมอร์ผสมลดลงตามปริมาณ SBS หรือตรงข้ามกับก่อนใส่  $\text{CaCO}_3$  ทั้ง 4% และ 12 % โดยน้ำหนัก แสดงว่า  $\text{CaCO}_3$  จะไปขัดขวางการกระจายตัวของ SBS

สรุป พอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ที่อัตราส่วน 50/50 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ความทนแรงดึง โมดูลัส และความทนทานต่อแรงกระแทกลดลงตามปริมาณ  $\text{CaCO}_3$  ยกเว้นที่ปริมาณ  $\text{CaCO}_3$  12% โดยน้ำหนักมีผลน้อยต่อสมบัติเชิงกลดังกล่าว และถ้าเติม  $\text{CaCO}_3$  ลงในพอลิเมอร์ผสมที่มีสารช่วยผสม เช่น SBS ทำให้บทบาทของ SBS ในพอลิเมอร์ผสมลดลง

## 4.2 เปอร์เซ็นต์เจล

### 4.2.1 เปอร์เซ็นต์เจลของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ที่อัตราส่วน 50/50

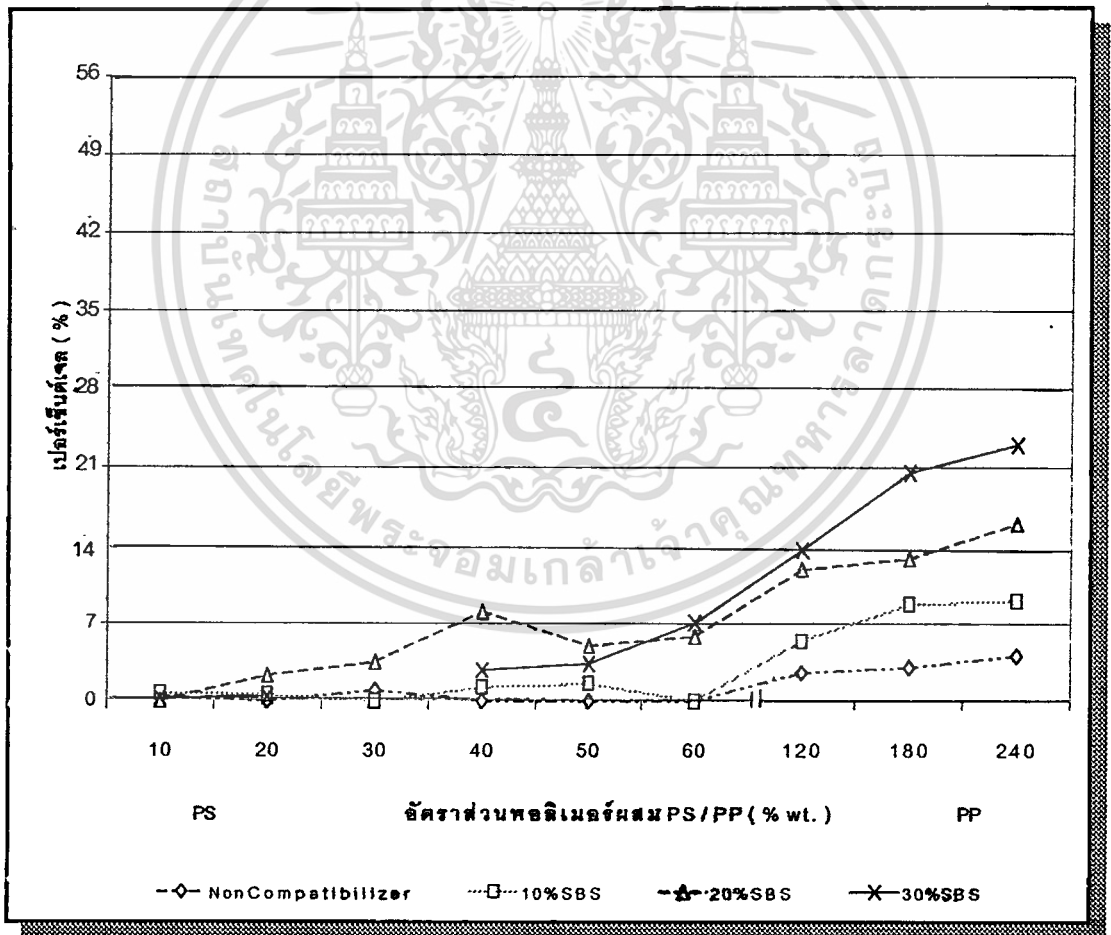


รูปที่ 4.26 แสดงเปอร์เซ็นต์เจลของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ที่ไม่มี และมีส่วนช่วยผสม เมื่อฉายรังสีในอากาศ ตั้งแต่ความเข้มรังสีต่าง ๆ

จากรูป 4.26 พบว่าที่ความเข้มรังสีสูงกว่า 30 kGy ในทุกระบบพอลิเมอร์ผสม เปอร์เซ็นต์เจลเพิ่มขึ้นตามความเข้มรังสี และมีผลน้อยต่อสารช่วยผสม ยกเว้นที่ความเข้มรังสีสูงกว่า 120 kGy ในระบบไม่มีสารช่วยผสม เปอร์เซ็นต์เจลต่ำที่สุด และระบบมีสารช่วยผสม EVA 30 % โดยน้ำหนักการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปอร์เซ็นต์เจลสูงสุด กล่าวคือเปอร์เซ็นต์เป็นตัวบ่งบอกถึงการเชื่อมโยง เมื่อเปอร์เซ็นต์เจลมากกว่าการเชื่อมโยงมาก แสดงว่าเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น เกิดอนุมูลอิสระมากขึ้น ทำให้โอกาสในการเกิดการเชื่อมโยงสูงขึ้น และที่ความเข้มข้นสูงกว่า 120 kGy ระบบไม่มีสารช่วยผสมเกิดการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นในอัตราต่ำกว่าในทุกระบบ แสดงว่าอนุมูลอิสระ LDPE ลดน้อยลง ส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงในอัตราที่น้อยลง ในขณะที่ระบบมีสารช่วยผสมมีอนุมูลอิสระของ LDPE และสารช่วยผสมจึงเกิดการเชื่อมโยงในอัตราที่มากกว่า โดยเฉพาะสารช่วยผสม EVA EVA มีความเป็นผลึกมาก อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นมีโอกาสเกิดการเชื่อมโยงได้สูง และสามารถเกิดการเชื่อมโยงกับ LDPE ได้อีกทางหนึ่งด้วย ทำให้ในระบบที่มี EVA เกิดการเชื่อมโยงในอัตราที่สูงตามปริมาณ EVA และสูงกว่าในระบบไม่มี และมีสารช่วยผสม SBS

#### 4.2.2 เปอร์เซ็นต์เจลของพอลิเมอร์ผสม PS/PP ที่อัตราส่วน 50/50



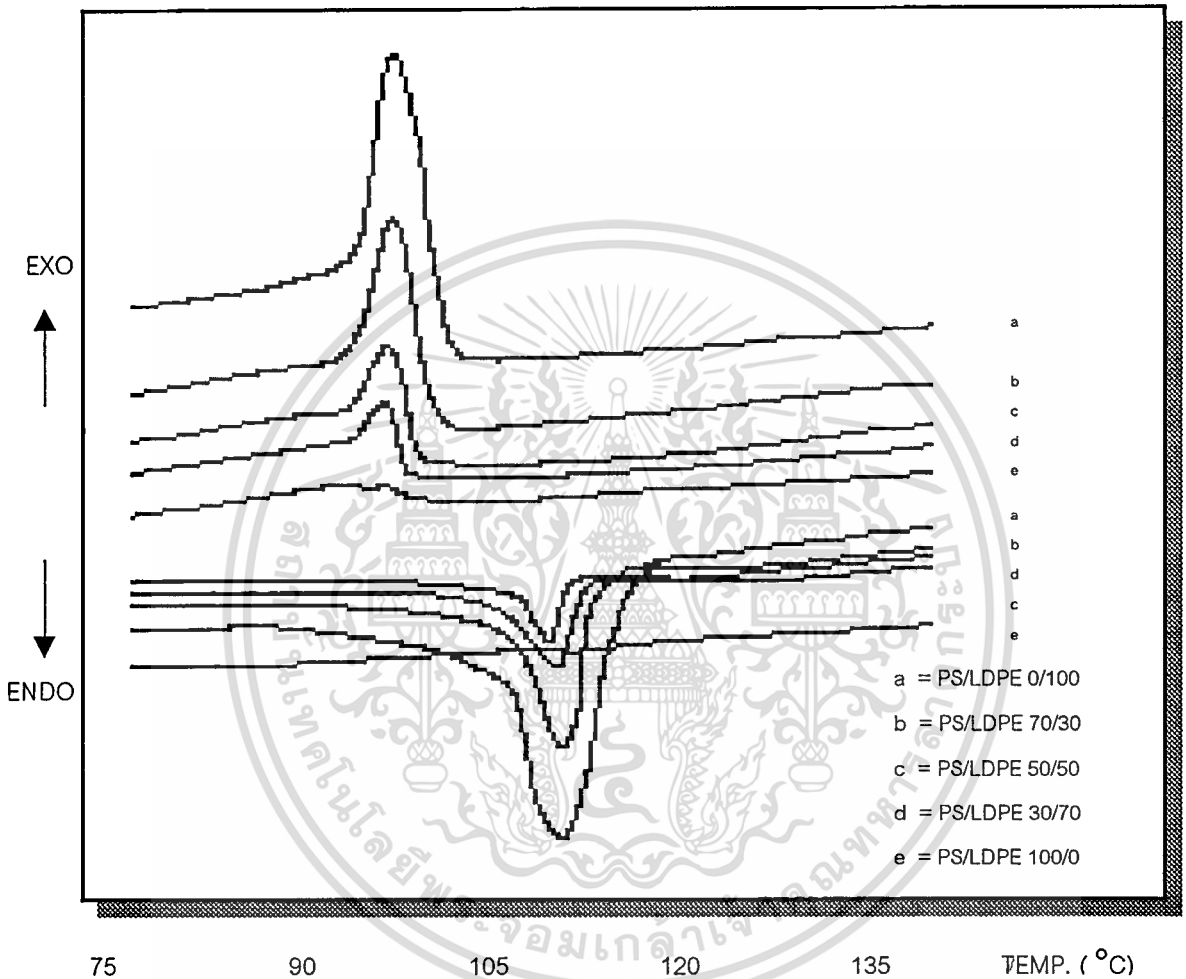
รูปที่ 4.27 แสดงเปอร์เซ็นต์เจลของพอลิเมอร์ผสม PS/PP ที่ไม่มี และมีสารช่วยผสม เมื่อฉายรังสีในอากาศ ตั้งแต่ความเข้มข้นต่าง ๆ

จากรูป 4.27 พบว่าในทุกระบบพอลิเมอร์ผสม เปอร์เซ็นต์เจลเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้น และปริมาณสารช่วยผสม SBS แสดงว่าเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น เกิดอนุมูลอิสระมากขึ้น ทำให้โอกาสในการเกิดการเชื่อมโยงสูงขึ้น และในระบบ SBS มีทั้งอนุมูลอิสระของ PP และ SBS จึงเกิดการเชื่อมโยงในอัตราที่มากกว่า

สรุป เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเปอร์เซ็นต์เจลของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE กับ PS/PP ที่อัตราส่วน 50/50 พบว่า PS/LDPE ให้เปอร์เซ็นต์เจลที่สูงกว่า PS/PP มาก และในระบบของ PS/LDPE ความเข้มข้นมีผลน้อยต่อเปอร์เซ็นต์เจลในสารช่วยผสม ยกเว้นที่ความเข้มข้นสูงกว่า 120 kGy รังสีมีผลต่อสารช่วยผสม ซึ่งพิจารณาได้จาก ระบบไม่มีสารช่วยผสม ให้เปอร์เซ็นต์เจลต่ำสุด และระบบมีสารช่วยผสม EVA เปอร์เซ็นต์เจลสูงกว่า SBS แสดงว่าความเข้มข้นสูงกว่า 120 kGy EVA เกิดพันธะเชื่อมโยงได้ดีกับ EVA หรือ LDPE ในขณะที่ระบบ PS/PP แม้ว่าเปอร์เซ็นต์เจลเพิ่มขึ้นตามปริมาณ SBS แต่ก็น้อยกว่าระบบ PS/LDPE แสดงว่าที่ความเข้มข้นเดียวกัน LDPE มีส่วนทำให้เกิดการเชื่อมโยงมากกว่า SBS และ PP ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากความเป็นอิสระ หรือมีโซ่กิ่งของ LDPE

## 4.3 สมบัติทางความร้อน

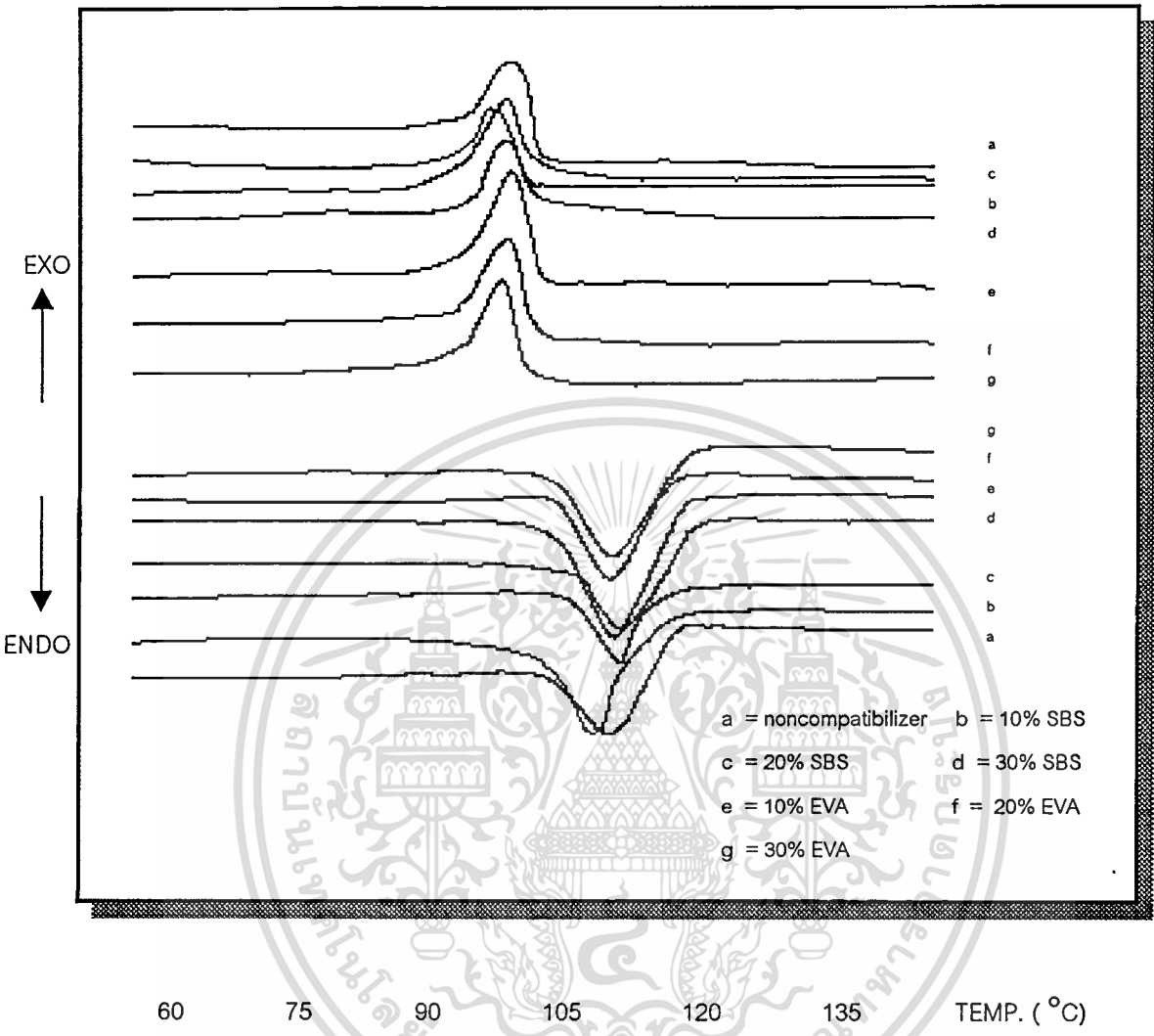
### 4.3.1 ผลของอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE



รูปที่ 4.28 แสดงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.28 พบว่า PS จะไม่ปรากฏพีก เนื่องจากพอลิเมอร์ดังกล่าวเป็นอสัณฐาน ดังนั้น พีกที่ปรากฏจึงเป็นพีกของ LDPE  $T_m$ ,  $T_c$  และ  $\Delta H_m$ ,  $\Delta H_c$  ที่ทุกอัตราส่วนมีค่าลดลงตาม ปริมาณ PS ที่เพิ่มขึ้น แสดงว่า PS จะขัดขวางการตกผลึกของ LDPE

4.3.2 ผลของชนิด และปริมาณสารช่วยผสมของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ที่อัตราส่วน 50/50



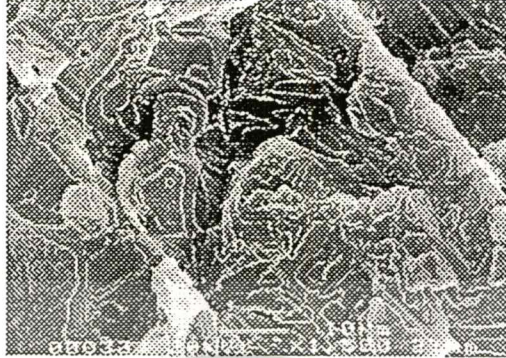
รูปที่ 4.29 แสดงสมบัติทางความร้อนของ PS/LDPE 50/50 ที่ไม่มี และมีสารช่วยผสมต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.29 พบว่า สารช่วยผสม SBS จะไม่ปรากฏพีก เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ออสถฐาน และ Tm, Tc ของระบบมีสารช่วยผสมให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับระบบไม่มีสารช่วยผสม ΔHm และ ΔHc ของระบบไม่มีสารช่วยผสมมีค่ามากกว่าระบบมีสารช่วยผสม และมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสารช่วยผสมที่เพิ่มขึ้น แสดงว่าสารช่วยผสมจะไปขัดขวางการตกผลึกของพอลิเมอร์ผสม

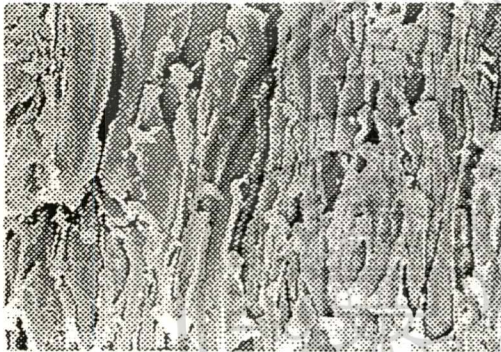
สรุป ในระบบไม่มีสารช่วยผสม Tm, Tc และ ΔHm, ΔHc ของ LDPE ที่ทุกอัตราส่วน มีค่าลดลงตามปริมาณ PS ที่เพิ่มขึ้น และในระบบมีสารช่วยผสม SBS และ EVA มีผลน้อยต่อ Tm, Tc แต่จะมีผลทำให้ ΔHm, ΔHc มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสารช่วยผสมที่เพิ่มขึ้น

## 4.4 สมบัติทางสัณฐานวิทยา

### 4.4.1 ผลของอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสมที่มีต่อสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม



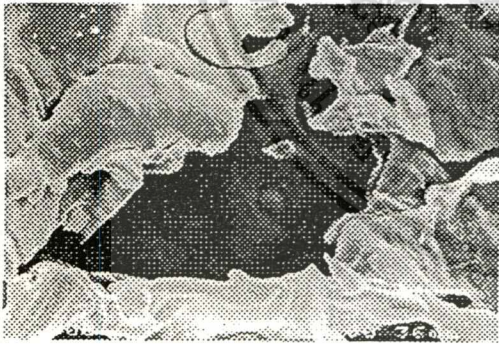
PS/LDPE 100/0



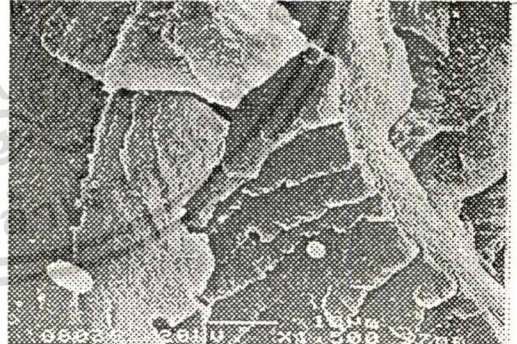
PS/LDPE 70/30



PS/LDPE 50/50



PS/LDPE 30/70

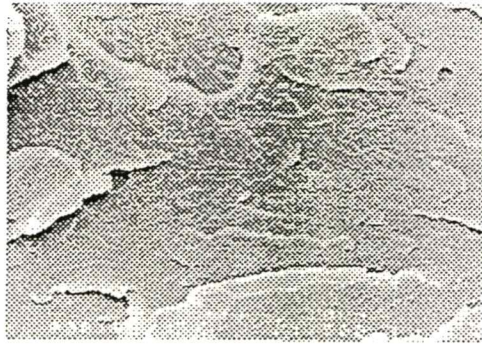


PS/LDPE 0/100

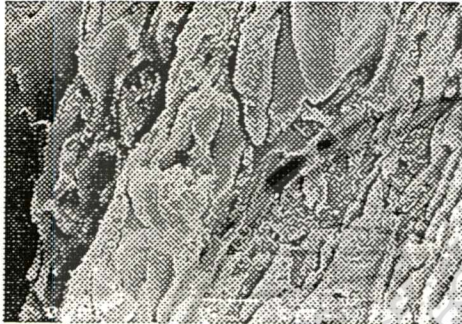
รูปที่ 4.30 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ (X 1,500 เท่า)

จากรูปที่ 4.30 พบว่าในระบบพอลิเมอร์ที่มีสององค์ประกอบ ปรากฏเห็นการกระจายตัวอยู่อย่างหลวม ๆ ของสองภูมิภาค คือภูมิภาคที่มองเห็นเป็นส่วนแข็งของ PS และภูมิภาคที่มองเห็นเป็นแผ่นของ LDPE โดยที่พอลิเมอร์ที่มีอยู่ในปริมาณมากจะทำหน้าที่เป็นภูมิภาคต่อเนื่อง และพอลิเมอร์ที่มีปริมาณน้อยเป็นภูมิภาคกระจายตัว

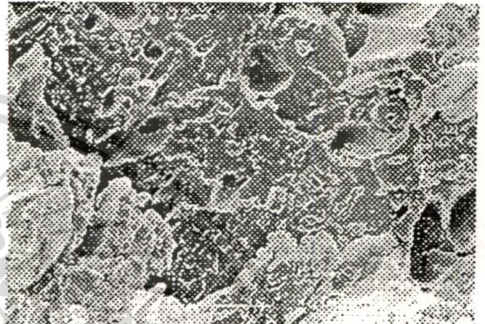
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



PS/PP 100/0



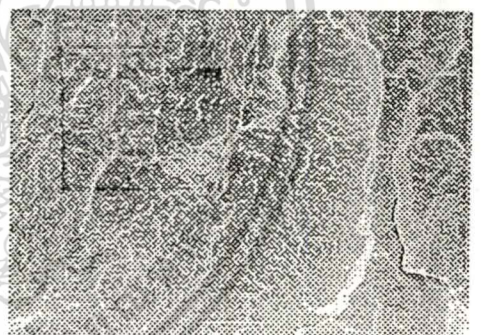
PS/PP 70/30



PS/PP 50/50



PS/PP 30/70

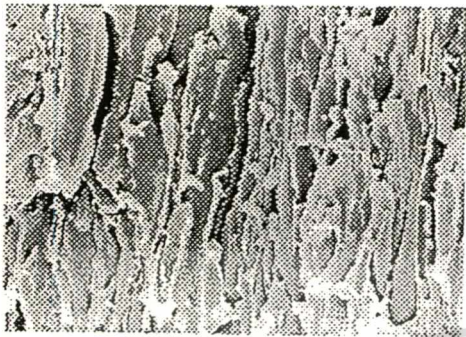


PS/PP 0/100

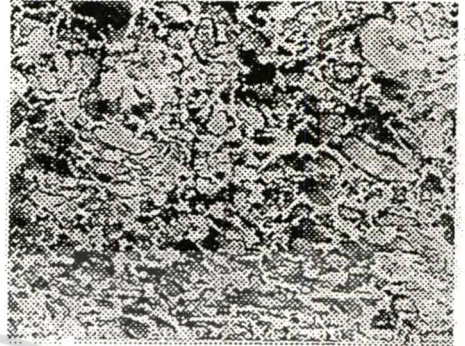
รูปที่ 4.31 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/PP ที่อัตราส่วนต่าง ๆ (X 1,500 เท่า)

จากรูปที่ 4.31 พบว่าในระบบพอลิเมอร์ที่มีสององค์ประกอบ ปรากฏเห็นการกระจายตัวอยู่อย่างหลวม ๆ ของสองวัฏภาค คือวัฏภาคที่มองเห็นเป็นส่วนแข็งของ PS และวัฏภาคที่มองเห็นเป็นแผ่นกระด้างของ PP โดยที่พอลิเมอร์ที่มีอยู่ในปริมาณมากจะทำหน้าที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง และพอลิเมอร์ที่มีปริมาณน้อยเป็นวัฏภาคกระจายตัว

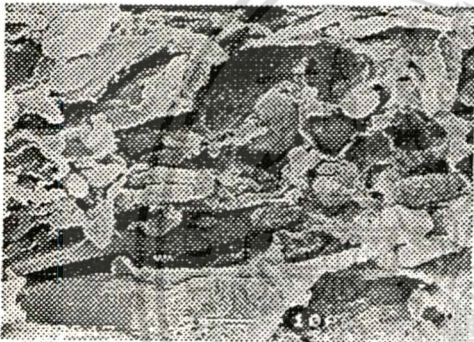
#### 4.4.2 ผลของชนิด และปริมาณสารช่วยผสมที่มีต่อสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม



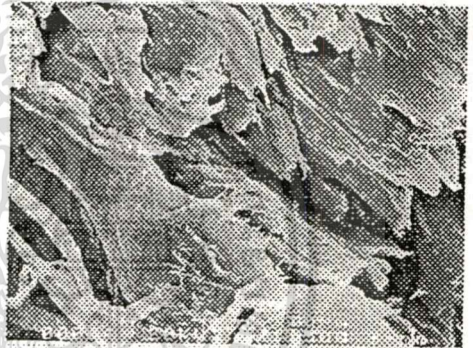
PS/LDPE/SBS 50/50/0



PS/LDPE/SBS 50/50/10



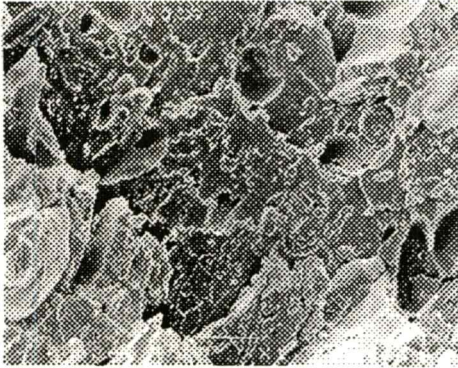
PS/LDPE/SBS 50/50/20



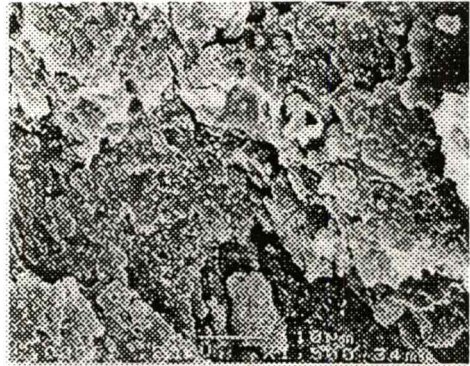
PS/LDPE/SBS 50/50/30

รูปที่ 4.32 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของระบบพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน PS/LDPE 50/50 ที่ไม่มี และมีสารช่วยผสม SBS (X 1,500 เท่า)

จากรูปที่ 4.32 พบว่า เมื่อเติม SBS มีผลทำให้วิฤภาคกระจายตัวมีขนาดเล็กลง สามารถกระจายตัวได้ดีขึ้นตามปริมาณ SBS ที่เพิ่มขึ้น



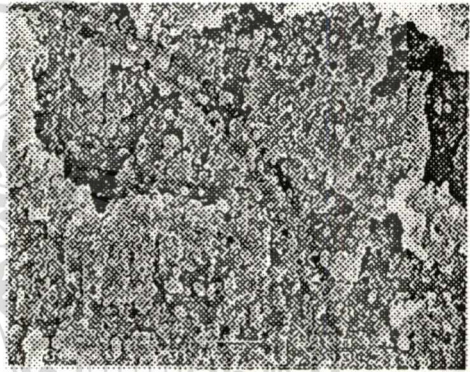
PS/PP/SBS 50/50/0



PS/PP/SBS 50/50/10



PS/PP/SBS 50/50/20

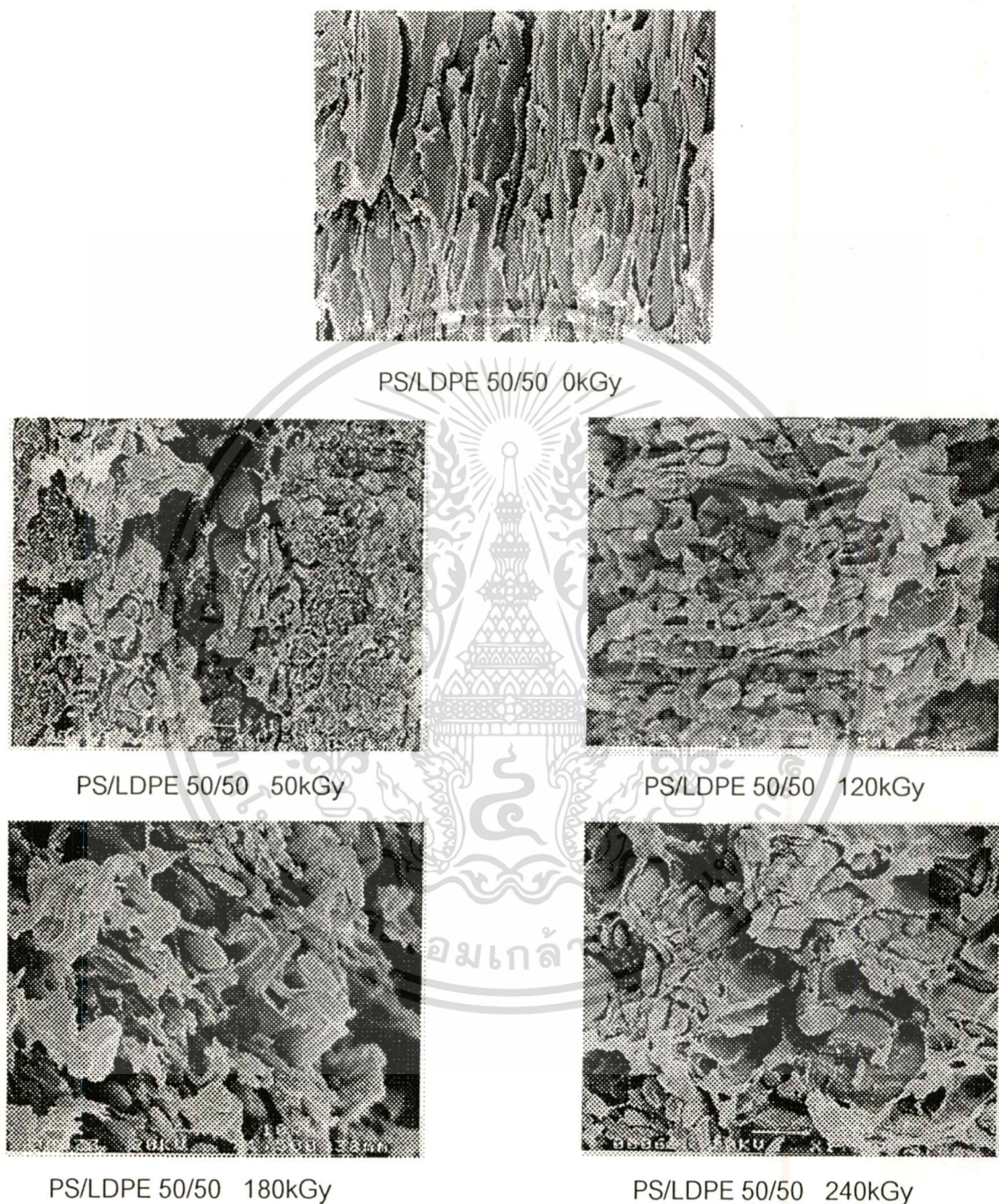


PS/PP/SBS 50/50/30

รูปที่ 4.34 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของระบบพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน PS/PP 50/50 ที่ไม่มีและมีสารช่วยผสม SBS (X 1,500 เท่า)

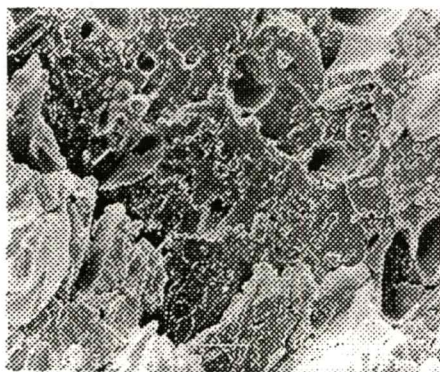
จากรูปที่ 4.34 พบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาเช่นเดียวกับในระบบพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE กล่าวคือ มีผลทำให้ภูมิภาคกระจายตัวมีขนาดเล็กลง และสามารถกระจายตัวได้ดีขึ้นตามปริมาณ SBS ที่เพิ่มขึ้น

#### 4.4.3 ผลของปริมาณความเข้มข้นที่มีต่อสัณฐานวิทยาของระบบพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมสารช่วยผสม

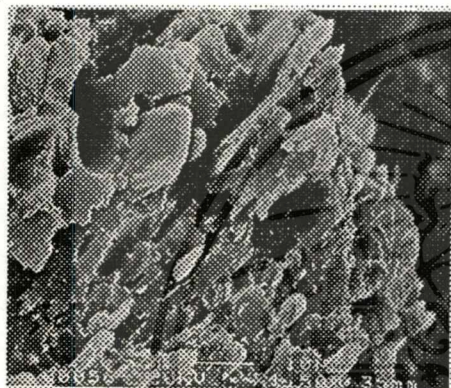


รูปที่ 4.35 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE 50/50 เมื่อฉายรังสีที่ความเข้มต่าง ๆ (X 1,500 เท่า)

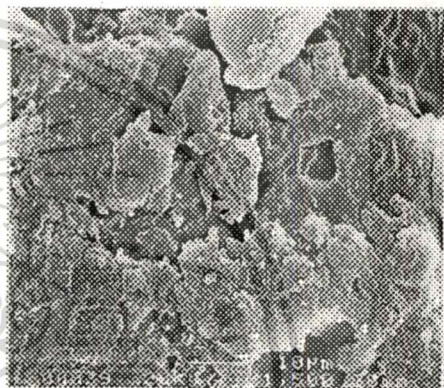
จากรูปที่ 4.35 พบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาปรากฏการเปลี่ยนแปลงไม่เด่นชัด มีแนวโน้มของการเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น แต่ยังคงเห็นเป็น 2 ภูมิภาคเช่นเดียวกับเมื่อไม่ฉายรังสี โยชนด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



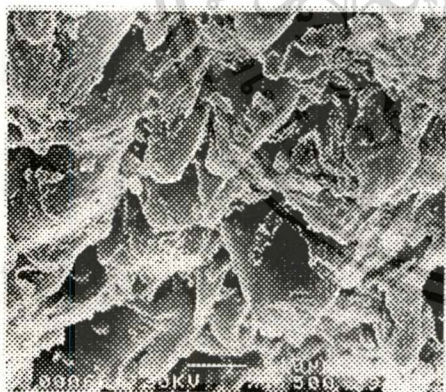
PS/PP 50/50 0 kGy



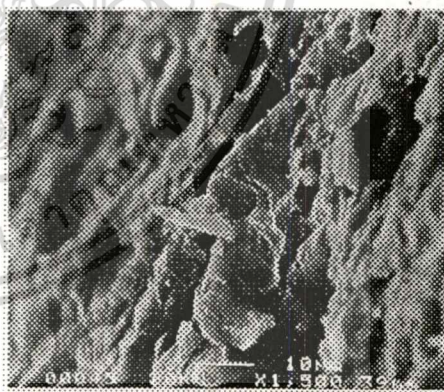
PS/PP 50/50 50kGy



PS/PP 50/50 120kGy



PS/PP 50/50 180kGy



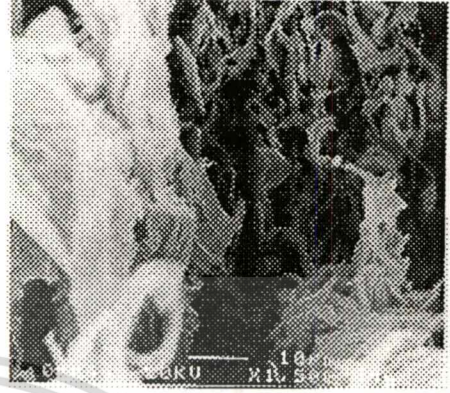
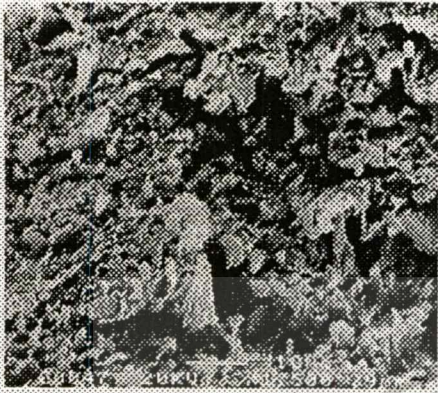
PS/PP 50/50 240kGy

รูปที่ 4.36 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/PP 50/50 เมื่อฉายรังสีที่ความเข้มต่าง ๆ (X 1,500 เท่า)

จากรูปที่ 4.36 พบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ผสมของ PS/LDPE กล่าวคือ ไม่ปรากฏการเปลี่ยนแปลงที่เด่นชัด มีแนวโน้มของการเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น แต่ยังคงเห็นเป็น 2 ภูมิภาคเช่นเดียวกับเมื่อไม่ฉายรังสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

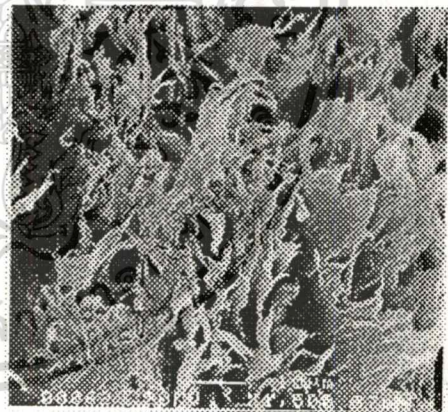
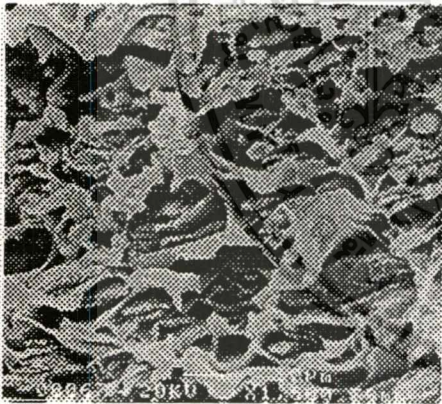
#### 4.4.4 ผลของรังสีที่มีต่อสัณฐานวิทยาของระบบพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารช่วยผสม



PS/LDPE/SBS 50/50/30 0kGy

PS/LDPE/SBS 50/50/30 10kGy

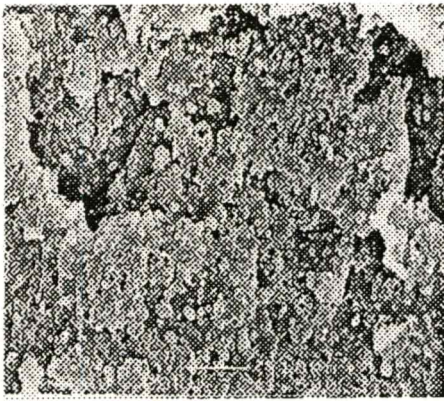
รูปที่ 4.37 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE/SBS 50/50/30 เมื่อไม่ฉาย และฉายรังสี (X 1,500 เท่า)



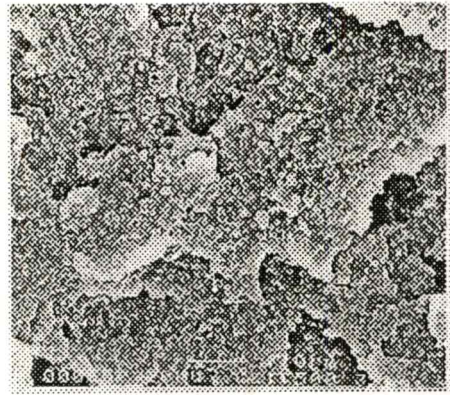
PS/LDPE/EVA 50/50/30 0kGy

PS/LDPE/EVA 50/50/30 20kGy

รูปที่ 4.38 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE/EVA 50/50/30 เมื่อไม่ฉายและฉายรังสี (X 1,500 เท่า)



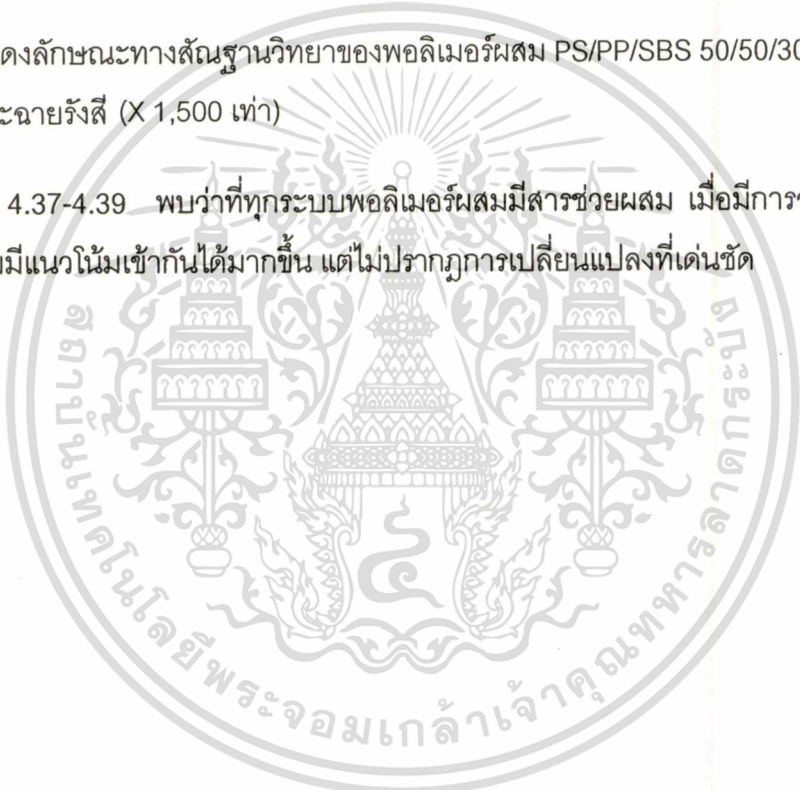
PS/PP/SBS 50/50/30 0kGy



PS/PP/SBS 50/50/30 20kGy

รูปที่ 4.39 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/PP/SBS 50/50/30 เมื่อไม่ฉายและฉายรังสี (X 1,500 เท่า)

จากรูปที่ 4.37-4.39 พบว่าที่ทุกระบบพอลิเมอร์ผสมมีสารช่วยผสม เมื่อมีการฉายรังสีทำให้พอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มเข้ากันได้มากขึ้น แต่ไม่ปรากฏการเปลี่ยนแปลงที่เด่นชัด

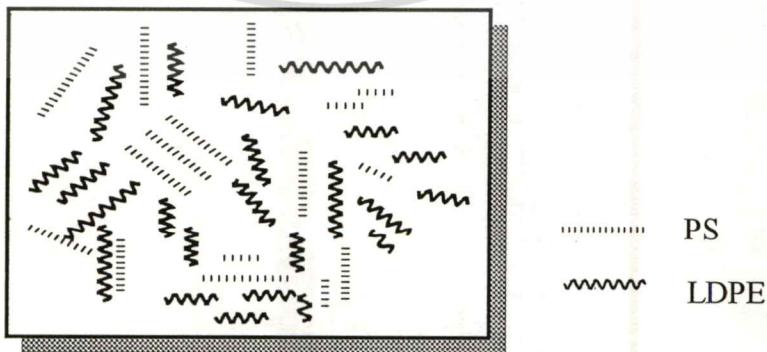


## สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

การศึกษาการรวมเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิสไตรีนกับพอลิโพลิฟิน โดยการปรับปรุงแรงยึดติดระหว่างผิว ด้วยสารช่วยผสม และรังสีแกมมา ซึ่งในงานวิจัยได้ศึกษาถึง อัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม ชนิด ปริมาณสารช่วยผสม และปริมาณความเข้มรังสีที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และลักษณะทางสัณฐานวิทยา สรุปได้ดังนี้

### 5.1 ระบบพอลิเมอร์ผสมไม่มีสารช่วยผสม

สมบัติเชิงกลขึ้นกับสมบัติเฉพาะด้านของพอลิเมอร์ที่นำมาผสม กล่าวคือ เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ความทนทานต่อแรงกระแทก เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความทนแรงดึง และมอดุลัสลดลงตามปริมาณ LDPE ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้างของ LDPE มีลักษณะเป็นกิ่งผลึก ดังนั้นจึงมีการจัดเรียงตัวของโซ่โมเลกุลอย่างเป็นระเบียบ แน่นหนา ทำให้เกิดการโค้งงอ หรือมีความยืดหยุ่น ส่วนโครงสร้างของพอลิสไตรีนมีลักษณะเป็นอสัณฐาน การจัดเรียงตัวของโซ่โมเลกุลไม่เป็นระเบียบ แข็ง และเปราะ สมบัติทางความร้อนจาก DSC Thermogram  $T_m$ ,  $T_c$  และ  $\Delta H_c$   $\Delta H_m$  ของพอลิเมอร์ผสม จะลดลงตามปริมาณพอลิสไตรีนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากพอลิสไตรีนจะไปขัดขวางการตกผลึกของพอลิเอทิลีน สมบัติทางสัณฐานวิทยา สันนิษฐานผลจาก DSC ที่ว่าพอลิเมอร์ผสมทั้งสองชนิดเข้ากันไม่ได้ กล่าวคือ จะปรากฏให้เห็นวัฏภาคเป็นสองวัฏภาคอย่างชัดเจน ดังนี้

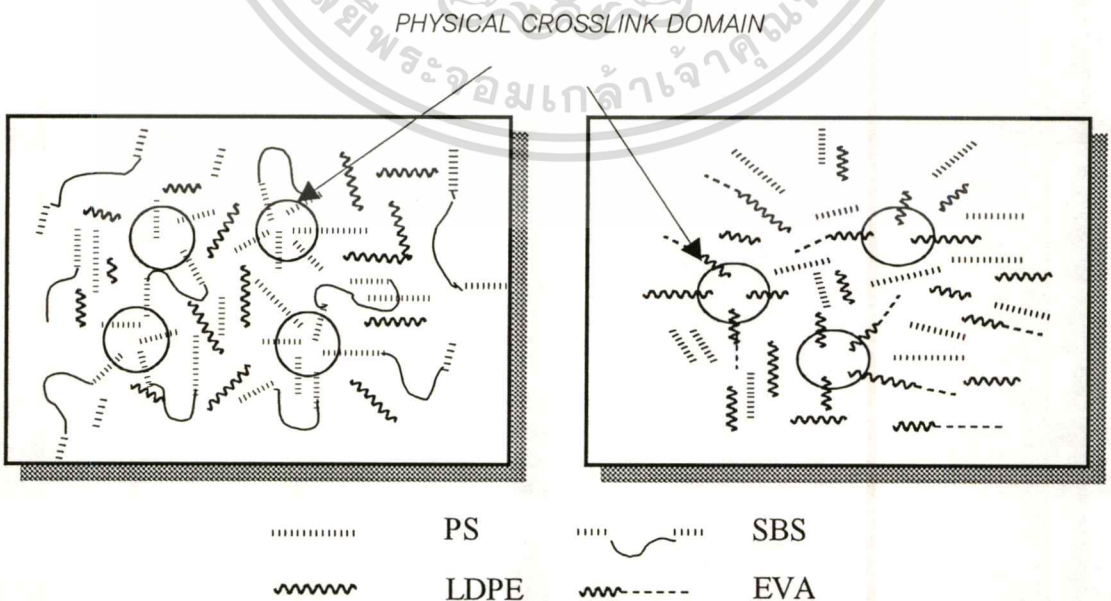


รูปที่ 5.1 แสดงโครงสร้างจุลภาคของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ระบบพอลิเมอร์ผสมที่มีสารช่วยผสม

สมบัติเชิงกลขึ้นกับสมบัติเฉพาะของพอลิเมอร์ที่นำมาผสม เช่นเดียวกับระบบที่ไม่มีสารช่วยผสม แต่จะให้ เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ความทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มสูงขึ้น และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณ SBS, EVA ที่เพิ่มมากขึ้น ความทนแรงดึง มอดุลัสต่ำลง และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณ SBS, EVA ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก SBS และ EVA มีส่วนที่มีโครงสร้างเหมือนกับพอลิเมอร์หลักในพอลิเมอร์ผสมจึงทำให้พอลิเมอร์ผสมเข้ากันได้มากขึ้น ในขณะที่เดียวกันก็มีส่วนของบิวทาไดอีน ใน SBS และส่วนของเอทิลีน ใน EVA ที่ นิ่ม ยืดตัวได้เพิ่มขึ้นมาในพอลิเมอร์ผสม โดยที่ SBS จะมีผลต่อสมบัติเชิงกลมากกว่า EVA เนื่องจาก SBS เข้ากันได้กับพอลิเมอร์ผสมดีกว่า และส่วนของบิวทาไดอีนก็ยืดตัวได้มากกว่า EVA พอลิเมอร์ผสมของ PS/LDPE/SBS ที่อัตราส่วน 30/70/30 ให้ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกสูงสุด สมบัติทางความร้อน  $T_m$  และ  $T_c$  ของระบบมีสารช่วยผสมให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับระบบที่ไม่มีสารช่วยผสม ส่วน  $\Delta H_m$  และ  $\Delta H_c$  ในระบบไม่มีสารช่วยผสมมีค่ามากกว่าระบบที่มีสารช่วยผสม และมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสารช่วยผสมที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากสารช่วยผสมจะไปขัดขวางการตกผลึกของพอลิเอทิลีนเช่นเดียวกับพอลิสไตรีน ลักษณะทางสัณฐานวิทยาจะสังเกตเห็นการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมมากขึ้นเมื่อมีการเติมสารช่วยผสม เนื่องจาก SBS และ EVA จะทำหน้าที่คล้ายเป็นตัว physical crosslink ช่วยในการเชื่อมโยงระบบ ทำให้เกิดการกระจายระหว่างวัฏภาคทั้งสองชนิดได้ดีขึ้น ดังนี้



รูปที่ 5.2 แสดงโครงสร้างจุลภาคของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ในระบบที่มีสารช่วยผสม SBS และ EVA ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 ระบบพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีสารช่วยผสมเมื่อผ่านการฉายรังสี

ระบบพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ที่ไม่มีสารช่วยผสมเมื่อมีการฉายรังสี เปอร์เซนต์การดึงยืด ณ จุดขาด และความทนทานต่อแรงกระแทก ไม่เปลี่ยนแปลง หรือลดลงเล็กน้อยที่ทุกความเข้มรังสี ความทนแรงดึง และมอดุลัสไม่เปลี่ยนแปลงที่ความเข้มรังสีต่ำ ( 10-30 kGy ) และเพิ่มขึ้นมากที่ความเข้มรังสีในช่วง 40-180 kGy จากนั้นลดลงที่ความเข้มรังสีสูงกว่า 180 kGy เนื่องจากรังสีทำให้เกิดการเชื่อมโยงขึ้นภายใน LDPE ทำให้พอลิเมอร์ผสมแข็งแรงมากขึ้น และการเชื่อมโยงจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มรังสีที่เพิ่มขึ้น การเชื่อมโยงเกิดขึ้นมากที่ความเข้มรังสีสูงกว่า 180 kGy ทำให้พอลิเมอร์ผสมเปราะ สมบัติเชิงกลทั้งหมดของพอลิเมอร์ผสมลดลง ซึ่งสามารถยืนยันการเกิดการเชื่อมโยงได้จากเปอร์เซ็นต์เจล กล่าวคือเปอร์เซ็นต์เจลที่ความเข้มรังสีต่ำมีค่าน้อยมาก และจะสูงขึ้นตามความเข้มรังสีที่เพิ่มขึ้น ลักษณะทางสัณฐานวิทยาเมื่อมีการฉายรังสี ไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่เด่นชัด แต่มีแนวโน้มของการเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบการปรับปรุงการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างการเติมสารช่วยผสมกับการฉายรังสี พบว่าเปอร์เซนต์การดึงยืด ณ จุดขาด ความทนทานต่อแรงกระแทกของระบบที่มีสารช่วยผสมให้ค่ามากกว่าระบบที่ไม่มีสารช่วยผสมเมื่อมีการฉายรังสี ส่วนความทนแรงดึง และมอดุลัสให้ผลที่ตรงกันข้าม เปรียบเทียบลักษณะทางสัณฐานวิทยา พบว่าระบบที่มีสารช่วยผสมมีความเข้ากันได้มากกว่าระบบพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีสารช่วยผสมเมื่อมีการฉายรังสี กล่าวคือสารช่วยผสมทำให้วัฏภาคกระจายตัวมีขนาดเล็กลง ในขณะที่รังสีปรากฏให้เห็นลักษณะของการเข้ากันได้ไม่เด่นชัด

ระบบพอลิเมอร์ผสม PS/PP ที่ไม่มีสารช่วยผสมเมื่อมีการฉายรังสี สมบัติเชิงกล และลักษณะทางสัณฐานวิทยาให้ผลเช่นเดียวกับระบบพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE

### 5.4 ระบบพอลิเมอร์ผสมที่มีสารช่วยผสมเมื่อผ่านการฉายรังสี

ระบบพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ที่มีสารช่วยผสมเมื่อมีการฉายรังสี เปอร์เซนต์การดึงยืด ณ จุดขาด และความทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น ตามความเข้มรังสีที่เพิ่มขึ้น ความทนแรงดึง และมอดุลัส ให้ผลเช่นเดียวกับการฉายรังสีระบบที่ไม่มีสารช่วยผสม เนื่องจาก SBS และ EVA เกิดการเชื่อมโยงร่วมกับ LDPE หรือเกิดการเชื่อมโยงกับตัวมันเองมากขึ้นเมื่อความเข้มรังสีเพิ่มขึ้น สายโซ่ที่ยาวขึ้น และมีส่วนของบิวทาไดอีน หรือส่วนเอทิลีนไวนิลเอซีเตตภายในสายโซ่ จะส่งผลให้สมบัติดังกล่าวเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณสารช่วยผสมที่เพิ่มขึ้นด้วย โดยที่ SBS จะให้ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

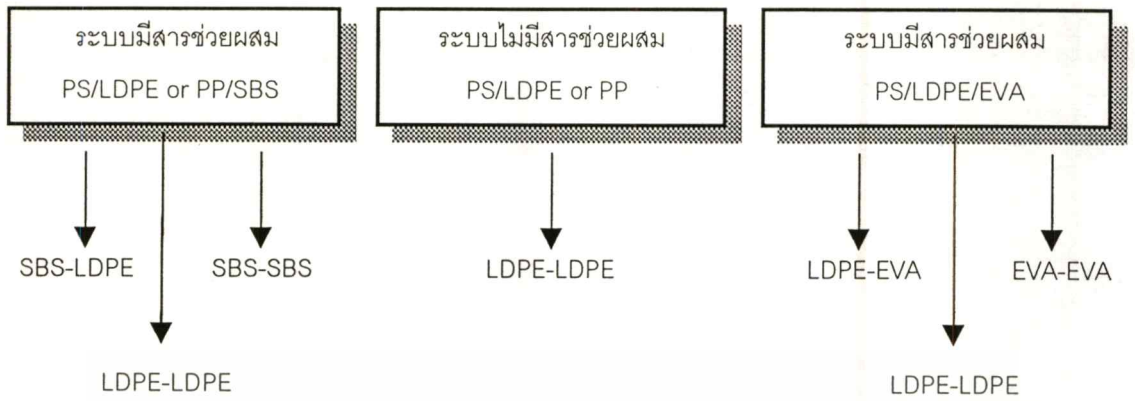
สูงกว่า EVA เนื่องจากส่วนของบิวทาไดอินใน SBS ช่วยในการเชื่อมโยงมากกว่าเอทิลีนไวนิล-แอซีเตต การเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นจากสารช่วยผสมจะไม่ทำให้ความทนแรงดึง มอดุลัสเพิ่มขึ้น เนื่องจากในสารช่วยผสมมีส่วนประกอบของส่วนที่ยืดหยุ่นได้ ดังนั้นความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นจากการเชื่อมโยงจะหักล้างกับความสามารถในการดึงยืดของสารช่วยผสม ดังนั้นจะได้ว่าในระบบมีสารช่วยผสม ความเข้มรังสีที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อความทนแรงดึง และมอดุลัสน้อยมาก ซึ่งสามารถยืนยันการเกิดการเชื่อมโยงได้จากเปอร์เซ็นต์เจล

เมื่อเปรียบเทียบการปรับปรุงการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมด้วยการเติมสารช่วยผสมร่วมกับการฉายรังสี พบว่าสมบัติเชิงกลทั้งหมดให้ค่ามากกว่าระบบพอลิเมอร์ผสมเดียวกันที่ไม่ผ่านการฉายรังสี เนื่องจากภายในการเข้ากันได้ของทั้งสองวัฏภาคยังมีการเชื่อมโยงเกิดขึ้นด้วย ดังนั้นจึงทำให้มีการเกี่ยวพันกันมากขึ้น โมเลกุลของพอลิเมอร์ผสมเข้ากันได้มากยิ่งขึ้น เปรียบเทียบลักษณะทางสัณฐานวิทยา พบว่ามีการเข้ากันได้มากขึ้นเล็กน้อย แต่ไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงอย่างเด่นชัด

ระบบพอลิเมอร์ผสม PS/PP มีสารช่วยผสมเมื่อมีการฉายรังสี สมบัติเชิงกลของเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ความทนทานต่อแรงกระทำลดลงตามความเข้มรังสีที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลที่ได้ตรงข้ามกับระบบพอลิเมอร์ผสมของ PS/LDPE เนื่องจากการเชื่อมโยงระหว่างสารช่วยผสมกับ PP ทำให้พอลิเมอร์แข็งแรงมาก ซึ่ง PP ทำหน้าที่ขัดขวางการยืดตัวของสารช่วยผสม ในขณะที่การเชื่อมโยงระหว่างสารช่วยผสมกับ LDPE จะส่งเสริมการเชื่อมโยงของพอลิเมอร์ผสม ส่วนความทนแรงดึง มอดุลัส และลักษณะทางสัณฐานวิทยาให้ผลเช่นเดียวกับระบบพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE

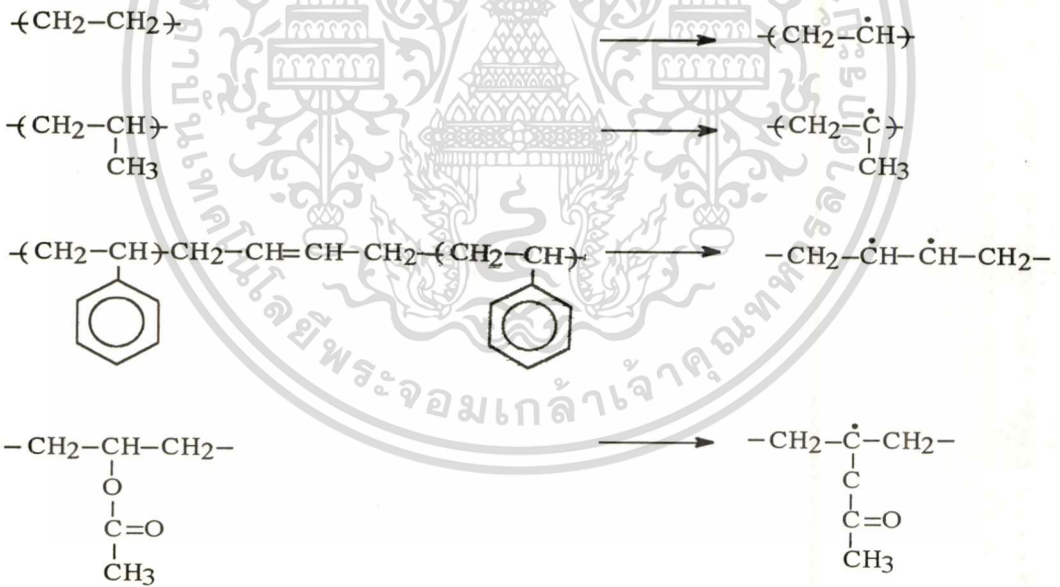
ผลจากการปรับปรุงความเข้ากันได้โดยใช้รังสีนั้น พบว่าความเข้มรังสีที่ใช้เพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงและให้สมบัติเชิงกลที่ดีเมื่อมีการฉายรังสีในอากาศค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงได้ศึกษาถึงการฉายรังสีในสุญญากาศเพื่อต้องการให้เกิดการเชื่อมโยงที่ความเข้มรังสีต่ำ จากการศึกษาที่ความเข้มรังสีเดียวกัน การฉายรังสีในสุญญากาศให้ความทนทานต่อแรงกระทำดีกว่าการฉายรังสีในอากาศในทุกอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากการฉายรังสีในสุญญากาศจะหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ และยังช่วยเร่งอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นให้สามารถเคลื่อนที่ได้คล่องตัวกว่า โอกาสในการรวมกันของอนุมูลอิสระจึงมากกว่า

กลไกการเกิดการเชื่อมโยงภายในพอลิเมอร์ผสมเมื่อมีการฉายรังสี



รูปที่ 5.3 แสดงความเป็นไปได้ในการเกิดการเชื่อมโยงของแต่ละระบบพอลิเมอร์ผสมเมื่อได้รับรังสี

การเกิดอนุมูลอิสระ



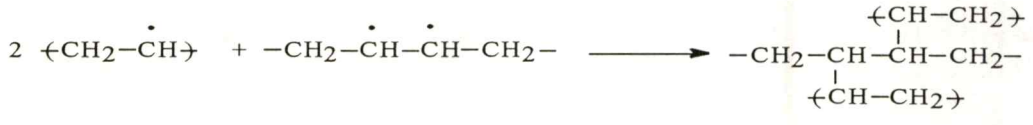
การเกิดการเชื่อมโยง

CROSSLINK PE-PE

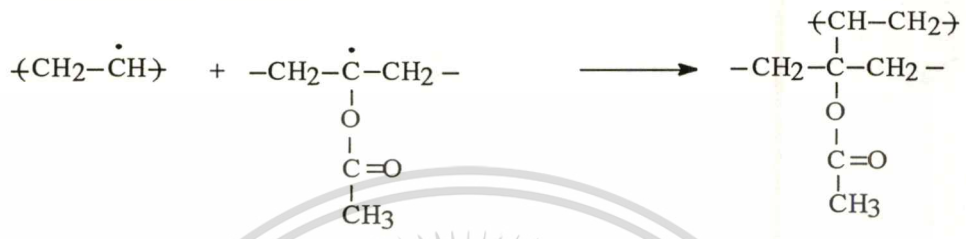


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CROSSLINK PE-SBS



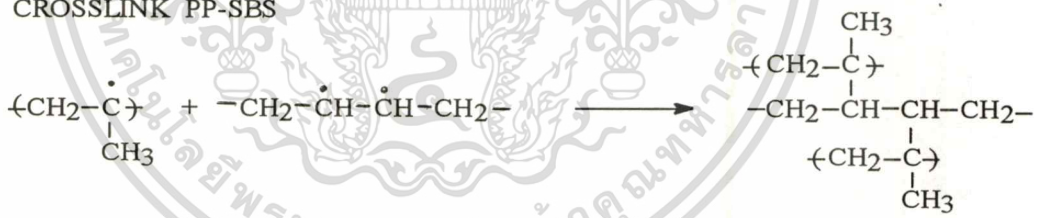
CROSSLINK PE-EVA



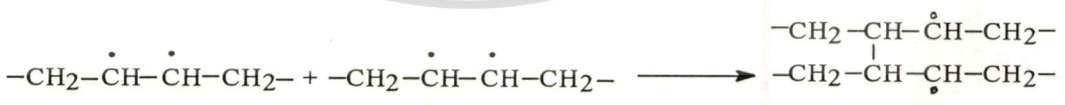
CROSSLINK PP-PP



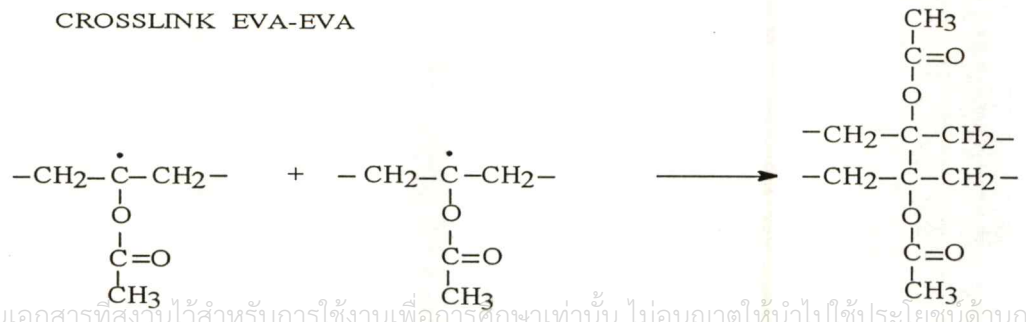
CROSSLINK PP-SBS



CROSSLINK SBS-SBS



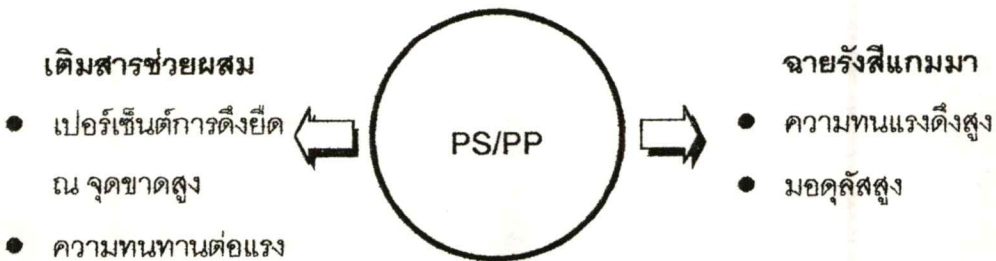
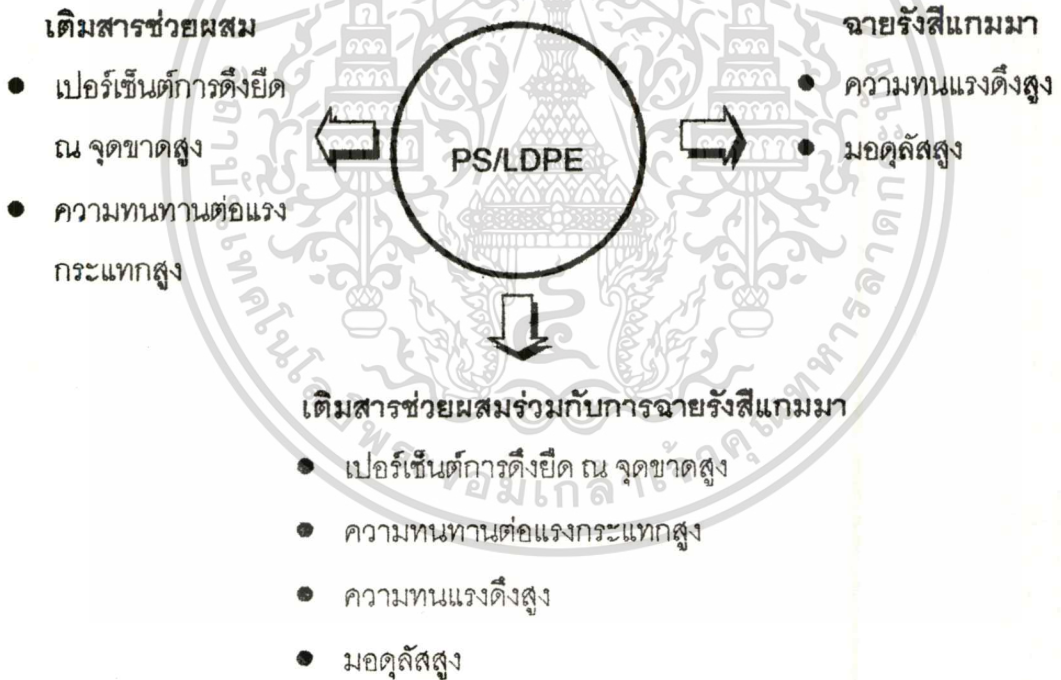
CROSSLINK EVA-EVA



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากการศึกษาปรับปรุงการเข้ากันของพอลิเมอร์ผสมด้วยการเติมสารช่วยผสม และการฉายรังสีแล้ว การศึกษาถึงผลของ  $\text{CaCO}_3$  ต่อสมบัติเชิงกลก็เป็นสิ่งสำคัญในการนำพอลิเมอร์ที่ได้ไปใช้งานอย่างคุ้มค่า  $\text{CaCO}_3$  ทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ที่อัตราส่วน 50/50 ลดลงตามปริมาณ  $\text{CaCO}_3$  ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก  $\text{CaCO}_3$  จะขัดขวางการเคลื่อนไหวยภายในโมเลกุลพอลิเมอร์ ให้อยู่นิ่งมากขึ้น ทำให้ PS ซึ่งเป็นพอลิเมอร์อัสฐานที่เคลื่อนที่ยาก มีสมบัติแข็ง และเปราะ เป็นพอลิเมอร์ที่เปราะมากขึ้น ในขณะที่ทำให้ LDPE ซึ่งอ่อนนุ่ม เป็นพอลิเมอร์ที่แข็งขึ้น ยกเว้น  $\text{CaCO}_3$  12% โดยน้ำหนัก ซึ่งถือได้ว่าเป็นปริมาณที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน กล่าวคือ จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับเมื่อไม่เติม  $\text{CaCO}_3$  ส่วนผลของ  $\text{CaCO}_3$  ในพอลิเมอร์ผสมที่มีสารช่วยผสม SBS ส่งผลให้บทบาทของ SBS ในพอลิเมอร์ผสมลดลง หรือตรงข้ามกับเมื่อไม่เติม  $\text{CaCO}_3$  แสดงว่า  $\text{CaCO}_3$  จะขัดขวางการกระจายตัวของ SBS

**แผนภาพสรุปผลการวิจัย**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข้อเสนอแนะ

1. ควรใช้ GPC เพื่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์หลักก่อน และหลังการฉายรังสี เพื่อยืนยันการเกิดการสลายพันธะภายในโมเลกุลพอลิเมอร์ผสม
2. ควรผลิตพอลิเมอร์ผสมโดยใช้สภาวะที่ได้จากการทดลองครั้งนี้ จากขยะพลาสติก เพื่อดูแนวโน้ม และความเป็นไปได้ในการนำเทคนิคพอลิเมอร์ผสม และเทคนิคการฉายรังสีมาใช้กับพลาสติกเหลือใช้แล้วทิ้งให้สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้



## เอกสารอ้างอิง

1. นิพนธ์ วงศ์วิเศษศิริกุล. ปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2537.
2. Coran A.Y. "Polymer Blends and Alloys." Polymer Blends Toward 2000. August, 1997. p. 1.
3. Finlayson K., Deanin R.D. Advances in Polymer Blends and Alloys Technology. New York : Technomic. 1992.
4. Fujuyama M. "Structure and Properties of Injection Moldings of Polypropylene/ Polystyrene Blend." Plastics Research Laboratory. July, 1996. pp. 1015-1027.
5. Lock C.E. and Paul D.R. "Graft Copolymer Modification of Polyethylene-Polystyrene Blends. II. Properties of Modified Blends." J. Appl. Polym. Sci. vol. 17, 1973. pp. 2791-2800.
6. Singh A. and Siliverman J., Gisbergen J. and Overbergh N. Radiation Processing of Polymers. New York : Hanser. 1992.
7. Lindsey C.R., Paul D.R. and Bralow J.W. "Mechanical Properties of HDPE-PS-SEBS Blends." J. Appl. Polym. Sci. vol. 26, 1981. pp. 1-8.
8. Rizzo G., Spadaro G. and Aeierno D. "Physico Chemical Properties of  $\gamma$ -Irradiated LDPE-iPP Blends." Radiat. Phys. Chem. vol. 21, 1983. pp. 349-353.
9. Dongyuan L. "The Effect of Radiation Cross-linking on the Mechanical Properties of Polyethylene Sheets." Radiat. Phys. Chem. vol. 29, 1987. pp. 175-177.
10. Lopez D. and Burillo G. Radiation Effects on Polymers. Washington, DC : American Chemical Society. 1991.
11. Wu C., Ku J.F. and Cy. C. "Rubber-Toughened Polyamide-6 The Influences of Compatibilizer on Morphology and Impact Properties." Polym. Eng. Sci. vol. 33, 1993. pp. 1329-1335.
12. Changhai L., Huili Y. and Changchun X. J. "Enhanced Interfacial Radiation-induced Reaction for Improving the Interfacial Adhesion of Incompatible Polymer Blends PP/BR." Symposium on Radiation Chemistry. November, 1994.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. Jesus M.N., Morales E. and La Mantia F.P. "Characterization of Blend of Polyethylene/Polystyrene/Polyvinylimidazole." Polym. Networks. Blends. vol. 5, 1995. pp. 141-145.
14. Topolkaev T. "Block Copolymers as Compatibilizers of Blends of Linear Low Density Polyethylene and Polystyrene." J. Polym. Sci. Part B : Polym. Phys. vol. 33, 1995. pp. 667-683.
15. Kroeze E., Ten Brinke G. and Hadziioannu. "Compatibilization of Low-Density Polyethylene/polystyrene Blends by Segmented EB(PS-block-EB)<sub>n</sub> Block Copolymer." Polym. Bulletin. vol. 38, 1997. pp. 203-210.
16. Limcharoen S.B. "Thermoplastics-Liquid Crystalline Polymer Blend : Processing, Characterisation and Properties of in situ. Composite Films." Polymer Blends Toward 2000. August, 1997. pp. 95-105.
17. Hayashi S. "The Compatibility of SBR with NR." Polymer Blends Toward 2000. August, 1997. pp. 88.
18. จันทิมา ประทีปเสน, วรฤกษ์ สิงห์เสนี, พรรณี รุ่งเรืองจิตสุข และสลักใจ เมืองน้อย. "การศึกษาความสามารถในการเป็นสารประสานของสไตรีน-บิวทาไดอีน-สไตรีน ไตรบล็อกโคโพลิเมอร์ สำหรับพอลิเมอร์ผสมระหว่างโพลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและโพลีสไตรีนที่ใช้แล้ว." การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23. ตุลาคม 2540. หน้า 312-313.
19. Chetanehan W., Sutthitavil W. and Chantasatrasumy N. "The Effect of Composition and Mixing type on Morphology of PVC/NBR Blends." Polymer Blends Toward 2000. August, 1997. pp. 58-70.
20. Said F., Saadi B. and Ammar B. "Use of Particular Rheological Composition Concept for the Development of Industrial LDPE/PS Blends." Advanced in Polymer Blend and Alloys Technology. n.d. pp. 117-131.
21. Utracki L.A. Polymer Alloys and Blends. New York : Hanser. 1990.
22. Raymond B.S. and Charles E.C. Polymer Chemistry. 2nd ed. New York : Marcel Dekker. 1987.

23. ปิยะลักษณ์ เตรียมพานิชย์กุล, วิชา ฐานานุศักดิ์ และอมรรัตน์ ศรีไพจิตร. "พอลิเอทิลีนผสม." วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2534.
24. Kroschwitz J. High Performance Polymer and Composites. New York : Wiley-Interscience. 1987.
25. Andrews G.D. and Subramanian P.M., Stein R.S. Emerging Technologies in Plastics Recycling. Washington DC : American Chemical Society. 1992.
26. Petr M. Introduction to Macromolecular Science. Texas : Austin. 1989.
27. Paul C.P. and Michael M.C. Fundamentals of Polymer Science. Pennsylvania : Lancaster. 1994.
28. จีราพร เมฆบริสุทธิ, นรินทร์ สาระภิมย์ และศศิวิมล เวียงสา. "การใช้สารช่วยผสม (Compatibilizer) ในการปรับปรุงแรงยึดติดระหว่างผิวของพอลิเมอร์ผสม." วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2539.
29. Rungruangpornpong N. "Effect of Compatibilisers on the Mechanical Properties and Morphology of PP/HDPE Blends." M.D.Thesis of University of Mahidol. 1997.
30. Cheremisinoff N.P., Markham R.L. Elastomer Technology Handbook. New Jersey : Morganville. 1993.
31. Walker B.M. Handbook of Thermoplastic Elastomer. 2 nd ed. New York : Van Nostrand Reinhold. 1992.
32. Edenbaum J. Plastics Additives and Modifiers Handbook. New York : Van Nostrand Reinhold. 1992.
33. Henderson A.M. "Ethylene-Vinyl Acetate (EVA) Copolymer : A General Review." Electrical Insulation Magazine. vol. 9, 1993. pp. 30-38.
34. Manson J.A. and Sperling L.H. Polymer Blends and Composites. New York : Plenum Press. 1976.
35. Gedde U.W. Polymer Physics. 2 nd ed. Sweden : Stockholm. 1996.
36. แม้น อมรสิทธิ์ และอมร เพชรสม. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ชวนพิมพ์. 2535.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

37. Singh A. and Silverman J. Radiation Processing of Polymer. New York : Hanser. 1992.
38. ยูรีพร เปรมพิรกุล. "การวัดการกระจายของปริมาณรังสีภายในภาชนะฉายรังสีจากต้นกำเนิดรังสีแกมมาโคบอลต์-60 ด้วยสารละลายสีเรดิโอโครมิก." วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2527.
39. มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์. เคมีพอลิเมอร์. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2540.





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

สภาวะในการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบความทนแรงดึง และชิ้นงานทดสอบความทนทานต่อแรง  
กระแทกของพอลิเมอร์ผสม พอลิस्टาไร์น กับ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

### อุณหภูมิในการฉีดขึ้นรูป ( TEMPERATURE PROGRAMMING )

NOZZLE	TEMP.	190
ZONE 1	TEMP.	180
ZONE 2	TEMP.	170

### เวลาในการฉีดขึ้นรูป ( TIME PROGRAMMING )

DIE CLS/OPN	TIME	60	MELTING	TIME	120
SID-COR ACT	TIME	0	DECOMPRS	TIME	2
1 <sup>ST</sup> STG INJ	TIME	20	COOLING	TIME	200
2 <sup>ND</sup> STG INJ	TIME	15	EJECTOR	COUNT	2
3 <sup>RD</sup> STG INJ	TIME	5	SCW. FEW.	TIME	0
EJE.FWD.DLY	TIME	0	SCW. BWD.	TIME1	0
MEL.FWD.DLY	TIME	0	SCW. BWD	TIME2	0
EJE.BKD.DLY	TIME	0	ALARM	TIME	500

### ความเร็วในการฉีดขึ้นรูป ( PROGRAMMING FLOW SPEED )

RAPID CLS.	SPD.	25	1 <sup>ST</sup> STG. INJ.	SPD.	30
HIGH CLS.	SPD.	15	2 <sup>ND</sup> STG. INJ.	SPD.	20
CLAMPING	SPD.	15	3 <sup>RD</sup> STG. INJ.	SPD.	25
DIE OPN.	SLW.1	10	MELTING	SPD.	35
RAPID OPN.	SPD.	25	DECOMP.	SPD.	50
DIE OPN.	SLW.	15	EJECTOR	SPD.	20
PLUNGER	SPD.	30	SCREW-IN	SPD.	0
DIE ADJ.	SPD.	25	DIE CHANGE	SPD.	0

### ความดันในการฉีดขึ้นรูป ( PRESSURE PROGRAMMING )

DIE CLS.	PRESR.	50	MELTIN	PRESR.	70
CLS. LOW	PRESR.	30	DECOMP.	PRESR.	25
CLS HI.	PRESR.	20	PLUNGER	PRESR.	25
DIE OPN.	PRESR.	60	EJECTOR	PRESR.	40
1 <sup>ST</sup> INJ.	PRESR.	58	SCW.-IN	PRESR.	0
2 <sup>ND</sup> INJ.	PRESR.	55	DIE ADJ.	PRESR.	80
3 <sup>RD</sup> INJ.	PRESR.	35			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

สมบัติเชิงกลของพอลิเมออร์ผสม และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ ข.1 แสดง เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ความทนแรงดึง มอดุลัส และความทนทางต่อแรงกระแทกของพอลิเมออร์ผสมพอลิสไตรีน กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ไม่มีและมีส่วนช่วยเหลือผสม

ตัวอย่าง พอลิเมออร์	อัตราส่วน พอลิเมออร์ผสม (%wt.)	เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%)		ความทนแรงดึง (kgf/mm <sup>2</sup> )		มอดุลัส (kgf/mm <sup>2</sup> )		ความทนทางต่อแรงกระแทก (kJ/m <sup>2</sup> )	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
COMPATIBILIZER	100/0	14.63	2.33	3.47	0.23	47.75	10.11	2.80	0.20
	70/30	3.84	0.43	1.59	0.06	54.61	1.38	3.60	0.94
	50/50	5.12	0.92	1.34	0.03	51.21	1.47	3.80	0.35
	30/70	19.49	5.13	1.24	0.10	27.88	0.54	6.30	0.39
	0/100	83.90	4.65	1.13	0.02	9.61	0.43	25.40	0.25
10 % SBS	100/0	27.10	1.82	3.01	0.08	52.49	9.46	3.00	0.14
	70/30	6.40	0.20	1.50	0.05	49.24	8.33	6.20	0.33
	50/50	12.92	0.66	1.32	0.08	46.60	8.11	8.80	0.47
	30/70	21.90	6.30	1.15	0.01	26.19	3.98	13.40	0.58
	0/100	70.91	3.15	0.98	0.04	8.21	1.15	28.80	2.71
20% SBS	100/0	21.16	2.95	2.81	0.06	105.43	11.10	3.10	0.32
	70/30	9.33	1.12	1.63	0.03	64.63	4.99	10.40	0.63
	50/50	12.51	0.93	1.28	0.02	43.74	2.51	12.80	0.84
	30/70	42.52	6.50	0.98	0.16	22.98	3.41	23.40	1.04
	0/100	77.02	4.26	0.95	0.09	8.52	0.41	26.70	1.97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง พอลิเมอริก	อัตราส่วน พอลิเมอริกผสม (%wt.)	เปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด (%)		ความทนแรงดึง (kgf/mm <sup>2</sup> )		มอดุลัส (kgf/mm <sup>2</sup> )		ความทนทานต่อแรงกระแทก (kJ/m <sup>2</sup> )	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
30 % SBS	100/0	26.36	4.89	2.48	0.07	85.90	7.13	3.60	0.48
	70/30	13.73	1.99	1.61	0.04	63.54	0.62	16.80	0.74
	50/50	25.86	2.34	1.27	0.02	37.01	1.76	22.80	1.26
	30/70	64.56	2.16	1.07	0.01	19.27	0.67	30.10	1.82
10 % EVA	0/100	95.00	3.32	0.92	0.01	7.44	0.43	25.50	2.02
	100/0	10.51	3.54	2.92	0.09	87.78	10.27	2.50	0.12
	70/30	4.31	0.41	1.53	0.02	61.24	3.64	3.60	0.95
	50/50	9.65	1.42	1.39	0.19	43.95	3.72	6.80	0.71
20 % EVA	30/70	26.67	3.76	1.16	0.05	29.75	3.29	10.40	0.79
	0/100	95.92	2.22	1.10	0.01	8.36	0.54	25.20	1.84
	100/0	10.45	0.68	2.42	0.03	73.57	4.48	2.50	0.14
	70/30	6.44	0.89	1.49	0.04	57.64	2.37	4.90	0.47
30 % EVA	50/50	10.02	0.86	1.30	0.03	45.99	4.82	7.10	0.93
	30/70	37.10	4.09	1.10	0.10	28.15	1.02	13.60	1.29
	0/100	98.58	3.41	1.05	0.03	8.63	0.17	28.90	2.13
	100/0	5.80	0.66	2.14	0.02	76.97	6.75	2.40	0.15
30 % EVA	70/30	6.54	0.70	1.42	0.01	55.67	3.41	5.10	0.52
	50/50	15.63	1.97	1.22	0.02	40.08	5.29	7.10	1.03
	30/70	48.24	2.37	1.07	0.07	25.22	0.67	15.70	0.90
	0/100	95.12	5.85	0.95	0.01	8.10	0.50	27.70	1.31

ตารางที่ ข.2 แสดงเปอร์เซ็นต์การตั้งยัด ณ จุดขาด ความหนาแน่นตั้ง มอดุลัส ความทนทานต่อแรงกระแทก ของพอลิเมอร์ผสมพอลิสไตรีน กับ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ไม่มี และมีส่วนช่วยผสม เมื่อมีการฉายรังสีในสภาวะมีอากาศที่ความเข้มข้น

ตัวอย่าง พอลิเมอร์	ความเข้มข้น รังสี (kGy)	อัตราส่วน พอลิเมอร์ ผสม(%wt)	เปอร์เซ็นต์การตั้งยัด ณ จุดขาด (%)		ความหนาแน่นตั้ง (kgf/mm <sup>2</sup> )		มอดุลัส (kgf/mm <sup>2</sup> )		ความทนทานต่อแรง กระแทก (kJ/m <sup>2</sup> )	
			ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
NON COMPATIBILIZER	10 kGy	100/0	24.33	2.55	3.16	0.05	8.66	0.55	2.10	0.00
		70/30	5.52	0.82	1.56	0.12	7.51	1.14	1.90	0.20
		50/50	9.37	0.23	1.43	0.16	6.91	1.85	3.30	0.20
		30/70	22.84	2.71	1.13	0.03	6.36	2.09	6.30	1.00
	20 kGy	0/100	96.73	3.58	1.05	0.21	5.57	0.38	28.60	4.46
		100/0	17.20	0.60	2.95	0.05	10.51	2.53	2.50	0.19
		70/30	6.34	0.52	1.64	0.03	26.89	2.36	2.00	0.20
		50/50	8.89	2.11	1.50	0.19	23.49	3.05	3.20	0.31
	30 kGy	30/70	25.34	1.60	1.25	0.01	15.23	1.10	7.30	2.01
		0/100	88.87	13.98	1.10	0.03	12.49	3.37	28.90	3.81
100/0		7.41	2.68	2.89	0.15	11.24	6.87	2.70	0.11	
70/30		2.58	0.85	1.56	0.22	53.72	7.69	2.10	0.36	
	30 kGy	50/50	3.87	1.28	1.50	0.11	52.24	8.20	3.50	0.56
		30/70	28.63	3.18	1.09	0.09	19.90	6.30	7.40	1.54
		0/100	97.99	0.14	1.07	0.11	11.18	1.82	28.70	4.02

ตารางที่ ๑.2 (ต่อ)

ตัวอย่าง พอลิเมอร์	ความเข้ม รังสี (kGy)	อัตราส่วน พอลิเมอร์ ผสม(%wt)	เปอร์เซ็นต์การดึงยึด		ความทนแรงดึง (kgf/mm <sup>2</sup> )		มอดุลัส (kgf/mm <sup>2</sup> )		ความทนทานต่อแรง กระแทก (kJ/m <sup>2</sup> )	
			ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
10 % SBS	10 kGy	100/0	28.36	4.84	2.88	0.08	37.16	8.00	2.00	0.33
		70/30	7.26	0.93	1.67	0.09	44.51	6.92	5.80	0.52
		50/50	11.84	0.25	1.32	0.15	32.46	0.54	8.80	1.48
		30/70	25.85	1.15	1.10	0.16	22.13	2.40	11.20	0.69
		0/100	92.73	5.22	1.04	0.81	7.93	0.33	22.80	0.95
		100/0	30.06	3.30	2.93	0.02	51.17	11.95	2.10	0.11
	70/30	7.83	0.77	1.74	0.01	46.90	7.26	5.50	0.49	
	50/50	14.39	2.34	1.43	0.03	33.06	5.32	8.90	0.96	
	30/70	25.22	2.08	1.17	0.02	23.24	1.80	11.50	0.79	
	0/100	92.63	3.70	0.99	0.02	7.03	0.53	26.30	1.88	
	100/0	30.48	0.84	2.88	0.10	43.39	12.60	2.60	0.13	
	70/30	7.64	0.46	1.66	0.02	47.77	6.72	6.00	0.07	
50/50	12.86	1.85	1.39	0.52	35.23	1.94	9.20	0.68		
30/70	26.79	1.33	1.17	0.02	21.25	2.78	12.20	0.61		
0/100	97.21	1.83	1.02	0.02	8.53	0.64	25.70	1.60		

10 % SBS

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

ตัวอย่าง พอลิเมอร์	ความเข้ม รังสี (kGy)	อัตราส่วน พอลิเมอร์ ผสม(%wt)	เปอร์เซ็นต์การตั้งยัด ณ จุดขาด (%)		ความทนแรงดึง (kgf/mm <sup>2</sup> )		มอดุลัส (kgf/mm <sup>2</sup> )		ความทนทานต่อแรง กระแทก (kJ/m <sup>2</sup> )	
			ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
พอลิเมอร์	10 kGy	100/0	28.33	3.12	2.44	0.04	27.82	3.36	2.40	0.20
		70/30	9.74	0.48	1.67	0.03	33.93	14.00	10.30	2.65
		50/50	11.21	1.65	1.30	0.05	38.52	1.24	14.10	0.76
		30/70	46.47	4.30	1.15	0.03	23.03	1.83	22.80	0.59
พอลิเมอร์	20 kGy	0/100	98.33	3.79	1.13	0.04	8.58	0.33	29.80	5.15
		100/0	25.44	2.66	2.69	0.10	11.27	2.42	2.30	0.07
		70/30	13.35	0.64	1.71	0.02	27.38	2.41	10.90	0.93
		50/50	18.68	1.08	1.40	0.01	20.98	1.48	14.20	1.15
พอลิเมอร์	30 kGy	30/70	54.58	4.81	1.09	4.99	5.65	0.58	26.40	0.57
		0/100	102.41	6.06	1.01	0.01	4.50	0.16	26.60	2.72
		100/0	9.94	3.71	2.76	0.11	30.75	11.20	2.70	0.50
		70/30	9.93	2.10	1.91	0.05	41.98	6.61	10.10	0.33
พอลิเมอร์	30 kGy	50/50	16.72	0.39	1.40	0.14	48.66	7.21	13.90	0.40
		30/70	51.63	3.71	1.16	0.03	14.91	0.85	23.30	1.45
พอลิเมอร์		0/100	102.96	7.59	0.96	0.10	8.22	0.63	26.40	3.10

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

ตัวอย่าง พอลิเมอร์	ความเข้ม รังสี (kGy)	อัตราส่วน พอลิเมอร์ ผสม(%wt)	เปอร์เซ็นต์การดัดยิด ณ จุดขาด (%)		ความทนแรงดึง (kgf/mm <sup>2</sup> )		มอดุลิตี (kgf/mm <sup>2</sup> )		ความทนทานต่อแรง กระแทก (kJ/m <sup>2</sup> )	
			ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
30 % SBS	10 kGy	100/0	16.71	5.10	1.96	0.20	23.62	3.46	2.70	0.14
		70/30	17.67	1.40	1.72	0.98	49.86	9.87	15.90	2.68
		50/50	30.55	1.06	1.54	0.15	19.37	5.11	23.10	0.40
		30/70	75.95	6.22	1.49	0.21	14.78	0.94	27.20	2.74
	0/100	109.38	5.86	1.50	0.18	8.40	0.40	26.30	1.28	
	100/0	31.43	1.58	2.30	0.08	12.63	0.72	2.40	0.30	
	70/30	21.64	0.88	1.66	0.02	37.86	6.05	16.70	1.29	
	50/50	31.52	1.41	1.28	0.01	26.38	1.59	22.40	0.73	
	30/70	76.44	2.94	1.07	0.01	15.44	1.16	28.80	1.54	
	0/100	120.77	3.55	0.95	0.01	4.49	0.16	24.20	2.06	
	100/0	25.01	2.73	2.41	0.08	19.54	1.30	2.50	0.61	
	70/30	28.29	1.66	1.34	0.05	39.72	8.23	18.00	0.89	
50/50	37.45	1.00	1.65	0.04	36.68	4.58	23.30	1.78		
30/70	72.20	10.08	1.06	0.01	13.93	0.88	31.40	1.50		
0/100	119.80	5.61	0.93	0.02	7.98	0.17	22.80	2.20		

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

ตัวอย่าง พอลิเมอร์	ความเข้ม รังสี (kGy)	อัตราส่วน พอลิเมอร์ ผสม(%wt)	เปอร์เซ็นต์การดัดยัด ณ จุดขาด (%)		ความหนาแน่นแข็ง (kg/mm <sup>3</sup> )		มอดุลัส (kgf/mm <sup>2</sup> )		ความทนทานต่อแรง กระแทก (kJ/m <sup>2</sup> )	
			ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
10 % EVA	10 kGy	100/0	2.74	0.31	2.67	0.50	17.82	5.24	3.50	0.33
		70/30	2.71	0.07	1.59	0.04	21.76	7.42	4.40	0.41
		50/50	7.05	1.25	1.64	0.05	44.64	5.40	6.80	0.69
		30/70	23.47	0.55	1.19	0.60	22.65	3.03	10.50	0.94
	0/100	93.80	17.23	1.10	0.04	10.66	1.45	30.50	3.50	
	20 kGy	100/0	14.55	5.27	3.03	5.27	28.19	0.03	3.50	0.00
		70/30	5.92	0.45	1.61	8.51	16.78	5.44	5.10	0.39
		50/50	11.00	1.47	1.74	0.02	26.55	3.96	10.10	1.44
		30/70	30.09	4.32	1.25	3.22	7.84	1.54	12.50	0.64
	30 kGy	0/100	111.87	4.45	1.12	0.02	4.60	0.70	31.50	2.05
		100/0	2.70	0.38	2.54	0.40	30.99	5.54	2.30	0.07
		70/30	2.80	0.25	2.34	0.14	54.17	3.40	3.90	0.43
50/50		6.32	1.82	1.67	0.02	63.73	11.67	6.10	0.14	
30/70	29.53	1.51	1.21	0.02	24.79	2.00	10.30	0.78		
0/100	110.98	4.72	1.06	6.06	8.41	0.24	28.20	1.89		

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

ตัวอย่าง พอลิเมอร์	ความเข้ม รังสี (kGy)	อัตราส่วน พอลิเมอร์ ผสม(%wt)	เปอร์เซ็นต์การดึงยึด		ความทนแรงดึง (kgf/mm <sup>2</sup> )		มอดุลัส (kgf/mm <sup>2</sup> )		ความทนทานต่อแรง กระแทก (kJ/m <sup>2</sup> )	
			ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
20% EVA	10 kGy	100/0	8.12	2.49	2.43	0.03	45.83	8.42	2.50	0.27
		70/30	3.14	0.51	1.32	0.05	47.62	1.58	5.40	0.86
		50/50	8.92	1.11	1.24	0.11	46.80	4.17	6.30	0.74
		30/70	45.69	9.06	1.13	0.02	20.89	4.78	11.60	0.86
		0/100	104.10	2.56	1.07	0.02	8.50	0.35	30.00	3.14
		100/0	2.55	0.31	2.39	0.04	9.45	6.75	2.30	0.08
	70/30	4.46	1.15	1.51	0.02	22.70	7.08	4.20	0.24	
	50/50	9.45	0.44	1.28	0.02	34.21	11.38	6.30	0.79	
	30/70	45.32	0.91	1.20	0.10	24.31	2.56	11.90	1.41	
	0/100	111.35	3.09	1.08	0.01	8.34	0.28	29.40	2.99	
	100/0	3.15	0.57	2.65	0.16	11.55	5.66	2.20	0.11	
	70/30	4.03	1.22	1.48	0.02	51.28	10.86	4.10	0.55	
50/50	7.90	1.45	1.30	0.03	45.74	6.48	6.00	0.45		
30/70	39.02	6.35	1.21	0.03	24.79	8.06	12.30	1.99		
0/100	113.18	3.38	1.05	0.01	8.23	0.29	30.40	2.06		

ตารางที่ ข.3 แสดงเปอร์เซ็นต์การดัดยั้ง ณ จุดขาด ความหนาแน่นแรงดัด มอดุลลิต ความทนทานต่อแรงกระแทก ของพอลิเมอริผสมพอลลิตไตรีน กับ พอลิพรอพิลีนที่ไม่ม่ และมีสารช่วยผสม เมื่อมีการฉายรังสีในสภาวะที่มีความเข้มต่ำ

ตัวอย่างพอลิเมอริ	ความเข้มรังสี (kGy)	อัตราส่วนพอลิเมอริผสม(%wt)	เปอร์เซ็นต์การดัดยั้ง ณ จุดขาด (%)		ความหนาแน่นแรงดัด (kgf/mm <sup>2</sup> )		มอดุลลิต (kgf/mm <sup>2</sup> )		ความทนทานต่อแรงกระแทก (kJ/m <sup>2</sup> )	
			ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
NON COMPATIBILIZER	10 kGy	100/0	3.80	0.64	4.03	0.62	12.15	0.47	2.00	0.48
		70/30	4.04	0.36	2.85	0.60	8.92	0.86	1.90	0.24
		50/50	4.05	0.04	2.83	0.19	8.85	0.79	1.70	0.07
	20 kGy	30/70	5.45	0.16	3.16	0.02	7.41	0.95	1.80	0.13
		0/100	13.52	1.38	3.09	0.09	10.79	0.94	1.60	0.45
		100/0	3.76	0.54	4.14	0.72	13.48	1.27	1.40	0.56
	30 kGy	70/30	4.85	0.50	2.90	0.19	9.91	1.22	1.90	0.11
		50/50	6.13	0.28	3.10	0.16	12.89	1.10	1.90	0.00
		30/70	7.93	0.65	3.12	0.15	14.79	2.00	1.90	0.08
		0/100	103.75	1.97	1.13	0.04	5.19	0.82	1.80	0.33
30 kGy	100/0	2.75	1.67	3.14	0.06	15.77	2.01	1.20	0.33	
	70/30	4.45	1.14	2.19	0.01	16.06	1.65	1.50	0.33	
	50/50	3.34	1.47	2.26	0.11	38.22	0.94	1.60	0.01	
	30/70	3.40	0.38	2.83	0.25	22.97	1.53	1.80	0.09	
0/100	14.35	1.00	3.16	0.15	11.91	1.82	1.70	0.40		

NON COMPATIBILIZER

ตารางที่ ข.3 (ต่อ)

ตัวอย่าง พอลิเมอร์	ความเข้มข้น รังสี (kGy)	อัตราส่วน พอลิเมอร์ ผสม(%wt)	เปอร์เซ็นต์การดัดยัด ณ จุดขาด (%)		ความทนแรงดึง (kgf/mm <sup>2</sup> )		มอดุลัส (kgf/mm <sup>2</sup> )		ความทนทานต่อแรง กระแทก (kJ/m <sup>2</sup> )	
			ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
10% SBS	10 kGy	100/0	26.02	3.71	2.70	0.28	12.84	1.83	2.50	0.20
		70/30	7.36	1.02	2.77	0.08	13.17	1.59	3.60	0.37
		50/50	11.64	2.53	2.77	0.14	13.23	1.41	3.90	0.52
		30/70	10.83	1.06	2.70	0.05	13.56	1.87	2.70	0.57
		0/100	19.02	7.78	2.61	0.02	10.67	1.08	3.70	0.66
	100/0	36.21	3.88	3.26	0.45	40.48	17.69	2.50	0.00	
	70/30	5.63	0.51	2.80	0.04	49.02	4.28	3.90	0.38	
	50/50	10.87	2.51	2.82	0.04	29.39	11.50	4.10	0.49	
	30/70	9.75	0.95	2.80	0.01	33.20	2.22	2.30	0.08	
	0/100	28.35	4.73	2.60	0.04	33.90	1.36	3.50	0.88	
20 kGy	100/0	27.76	7.96	3.01	0.12	15.41	6.51	2.40	0.10	
	70/30	6.72	1.03	2.81	0.01	7.09	1.04	3.50	0.40	
	50/50	8.02	1.07	2.76	0.01	6.33	0.18	4.20	0.33	
	30/70	11.05	1.55	2.70	0.14	6.10	1.16	2.80	0.21	
	0/100	30.28	6.50	2.67	0.04	15.49	1.08	3.50	0.66	
30 kGy	100/0	27.76	7.96	3.01	0.12	15.41	6.51	2.40	0.10	
	70/30	6.72	1.03	2.81	0.01	7.09	1.04	3.50	0.40	
	50/50	8.02	1.07	2.76	0.01	6.33	0.18	4.20	0.33	
	30/70	11.05	1.55	2.70	0.14	6.10	1.16	2.80	0.21	
	0/100	30.28	6.50	2.67	0.04	15.49	1.08	3.50	0.66	

ตารางที่ ข.3 (ต่อ)

ตัวอย่าง พอลิเมอร์	ความเข้ม รังสี (kGy)	อัตราส่วน พอลิเมอร์ ผสม(%wt)	เปอร์เซ็นต์การตั้งยี่ด ณ จุดขาด (%)		ความหนาแรงดึง (kgf/mm <sup>2</sup> )		มอดุลัส (kgf/mm <sup>2</sup> )		ความทนทานต่อแรง กระแทก (kJ/m <sup>2</sup> )	
			ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
20 % SBS	10 kGy	100/0	25.71	4.41	2.61	0.02	13.86	1.35	2.30	0.07
		70/30	4.15	1.14	2.43	0.03	20.29	0.66	5.30	0.46
		50/50	21.44	1.39	2.41	0.04	13.14	1.56	3.50	0.18
		30/70	28.15	6.37	2.46	0.04	10.35	1.86	3.60	0.34
		0/100	39.70	3.80	2.30	0.05	11.00	3.39	3.90	0.25
	20 kGy	100/0	21.09	2.94	2.46	0.04	13.13	1.39	2.40	0.63
		70/30	11.27	0.83	2.47	0.02	11.14	0.95	4.80	0.30
		50/50	22.81	2.10	2.55	0.03	16.34	1.01	3.60	0.46
		30/70	20.11	1.84	2.51	0.03	14.37	2.54	3.40	0.23
		0/100	33.55	8.24	2.42	0.14	8.40	1.03	4.00	0.19
30 kGy	100/0	23.91	1.89	2.50	0.06	13.43	3.55	2.30	0.10	
	70/30	3.87	0.28	2.29	0.02	12.81	1.11	5.00	0.54	
	50/50	9.93	0.86	2.45	0.08	15.42	3.18	3.50	0.26	
	30/70	13.15	2.44	2.48	0.01	22.44	0.16	3.30	0.43	
	0/100	44.95	10.99	2.35	0.04	18.14	2.74	4.50	0.20	

ตารางที่ ข.3(ต่อ)

ตัวอย่าง พอลิเมอร์	ความเข้ม รังสี (kGy)	อัตราส่วน พอลิเมอร์ ผสม(%wt)	เปอร์เซ็นต์การดึงยึด		ความทนแรงดึง		มอดุลัส		ความทนทานต่อแรง กระแทก (kJ/m <sup>2</sup> )	
			ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
30 % SBS	10 kGy	100/0	19.37	2.75	2.51	0.02	22.07	1.96	5.60	2.41
		70/30	8.99	1.07	2.40	0.05	7.87	0.89	12.80	0.23
		50/50	40.11	6.13	2.20	0.01	12.11	2.10	7.20	1.04
		30/70	116.38	54.58	2.15	0.05	10.98	2.71	4.10	0.48
	0/100	55.73	12.17	2.08	0.03	7.94	1.17	3.70	0.45	
	20 kGy	100/0	28.97	4.94	2.50	0.02	12.83	2.59	8.10	2.62
		70/30	29.62	4.78	2.18	0.02	8.56	0.89	12.50	1.77
		50/50	43.47	8.94	2.26	0.02	11.42	0.99	6.80	0.15
		30/70	194.53	16.18	2.17	0.05	13.28	0.37	3.70	0.30
	0/100	550.58	119.53	2.29	0.11	28.61	4.15	3.30	0.27	
30 kGy	100/0	31.63	7.93	2.31	0.06	8.85	2.17	7.20	2.23	
	70/30	22.37	5.27	2.24	0.01	8.36	1.07	12.20	0.98	
	50/50	53.20	9.57	2.24	0.07	14.59	0.97	7.00	0.54	
	30/70	45.27	17.25	2.18	0.08	11.47	2.29	4.00	0.14	
0/100	136.03	53.13	2.23	0.03	11.86	0.42	4.30	0.56		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่มีการรับประกันใดๆอีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๗.4 แสดงเปอร์เซ็นต์การดัดยัด ณ จุดขาด ความทนแรงดึง มอดุลัส ความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมพอลิเอสไตร์กับ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ อัตราส่วน 50/50 ที่ไม่มี และมีสารช่วยผสม เมื่อมีการฉายรังสีในสภาวะที่มีความเข้มต่างกัน

ตัวอย่าง พอลิเมอร์	ความเข้ม รังสี (kGy)	เปอร์เซ็นต์การดัดยัด ณ จุดขาด (%)		ความทนแรงดึง (kgf/mm <sup>2</sup> )		มอดุลัส (kgf/mm <sup>2</sup> )		ความทนทานต่อแรงกระแทก (kJ/m <sup>2</sup> )	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
NON COMPATIBILIZER	10kGy	9.37	0.23	1.43	0.16	6.91	1.85	3.30	0.20
	20kGy	8.89	2.11	1.50	0.19	23.49	3.05	3.20	0.31
	30kGy	3.87	1.28	1.50	0.11	52.24	8.20	3.50	0.56
	40kGy	2.70	0.12	6.83	0.09	491.47	13.11	-	-
	50kGy	4.13	2.12	6.88	1.18	559.03	156.94	3.40	0.51
	60kGy	2.95	0.84	6.84	1.50	524.76	591.88	3.40	0.25
	120kGy	2.67	0.31	6.73	0.07	612.05	218.94	6.30	0.74
	180kGy	4.00	2.15	7.51	0.15	556.30	122.82	3.90	1.88
10% SBS	240kGy	5.90	2.21	1.77	0.23	11.82	13.58	3.90	2.17
	10kGy	11.84	0.25	1.32	0.15	32.46	0.54	8.80	1.48
	20kGy	14.39	2.34	1.43	0.03	33.06	5.32	8.90	0.96
	30kGy	12.86	1.85	1.39	0.52	35.23	1.94	9.20	0.68
	40kGy	15.38	1.92	7.29	0.14	335.93	27.48	-	-
	50kGy	14.34	0.98	7.13	0.13	343.43	55.29	9.00	0.31
	60kGy	19.79	1.61	7.61	0.21	302.16	63.46	8.80	0.64
	120kGy	23.90	2.86	8.26	1.38	299.58	951.75	11.00	0.83
180kGy	24.20	2.51	7.99	0.04	282.13	85.32	-	-	
240kGy	24.49	3.13	1.84	0.01	79.53	1.10	14.30	1.05	

ตารางที่ ข.4 (ต่อ)

ตัวอย่าง พอลิเมอร์	ความเข้ม รังสี (kGy)	เปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด (%)		ความทนแรงดึง (kgf/mm <sup>2</sup> )		มอดุลัส (kgf/mm <sup>2</sup> )		ความทนทานต่อแรงกระแทก (kJ/m <sup>2</sup> )	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
20 % SBS	10kGy	11.21	1.65	1.30	1.30	38.52	1.24	14.10	0.76
	20kGy	18.68	1.08	1.40	0.01	20.98	1.27	14.20	1.48
	30kGy	16.72	0.39	1.40	0.14	48.66	7.21	13.90	0.39
	40kGy	21.06	3.74	7.26	0.07	380.15	47.94	-	-
	50kGy	19.77	1.58	6.64	1.37	392.4	68.07	12.60	0.12
	60kGy	21.56	2.99	7.35	0.08	355.55	44.55	15.50	1.65
	120kGy	34.73	8.87	7.87	0.71	324.25	63.42	17.30	1.90
	180kGy	32.43	5.76	7.86	0.86	381.55	80.62	20.90	1.04
30 % SBS	240kGy	35.44	3.02	1.77	0.15	13.03	13.03	28.70	6.90
	10kGy	30.55	1.06	1.54	0.15	19.37	5.11	23.10	0.40
	20kGy	31.52	1.41	1.28	0.01	26.38	1.59	22.40	0.75
	30kGy	37.45	1.00	1.65	0.04	36.68	4.58	23.30	1.78
	40kGy	35.62	4.07	6.77	0.21	242.03	97.29	-	-
	50kGy	38.49	3.09	6.84	0.09	271.23	41.93	23.50	1.83
	60kGy	40.70	1.72	7.26	0.27	299.33	31.51	25.50	1.03
	120kGy	56.19	1.22	7.73	0.12	295.63	36.02	27.90	1.62
180kGy	63.63	1.15	8.03	0.19	320.60	47.32	27.60	0.67	
240kGy	53.72	2.56	1.70	0.03	61.70	3.14	32.60	0.98	

ตัวอย่าง พอลิเมอร์	ความเข้ม รังสี (kGy)	เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%)		ความทนแรงดึง (kgf/mm <sup>2</sup> )		มอดุลัส (kgf/mm <sup>2</sup> )		ความทนทานต่อแรงกระแทก (kJ/m <sup>2</sup> )	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
10 % EVA	10kGy	7.05	1.25	1.64	0.05	44.64	5.40	6.80	0.69
	20kGy	11.00	1.47	1.74	0.02	26.55	3.96	10.10	1.44
	30kGy	6.32	1.81	1.67	0.02	63.73	11.67	8.90	0.14
	40kGy	14.64	3.61	7.54	0.33	369.53	24.22	-	-
	50kGy	14.90	2.08	7.37	0.03	385.98	67.42	5.40	0.39
	60kGy	16.50	2.80	7.44	0.18	399.80	43.53	4.60	0.43
	120kGy	9.66	2.34	9.60	0.20	612.93	25.55	11.30	3.50
	180kGy	25.78	2.96	8.45	0.06	386.10	99.88	9.70	0.30
20 % EVA	240kGy	14.18	1.02	2.12	0.04	120.48	17.45	10.80	1.30
	10kGy	8.92	1.11	1.21	0.11	46.80	4.17	6.30	0.74
	20kGy	9.45	0.44	1.28	0.02	40.29	11.37	6.30	0.80
	30kGy	7.90	1.45	1.30	0.03	45.74	6.48	7.00	0.45
	40kGy	10.84	1.89	6.76	0.06	379.20	22.08	-	-
	50kGy	7.85	2.95	7.34	0.63	523.00	236.32	5.80	1.44
	60kGy	10.81	2.50	6.52	0.07	369.25	68.80	5.80	0.92
	120kGy	13.04	0.82	7.01	25.55	414.30	110.79	7.50	0.84
180kGy	10.85	8.66	8.16	1.43	482.75	429.71	6.70	1.28	
	240kGy	13.18	5.05	1.63	0.07	68.43	12.65	9.00	0.66

ตารางที่ ๗.4 (ต่อ)

ตัวอย่าง พอลิเมอร์	ความเข้ม รังสี (kGy)	เปอร์เซ็นต์การดัดยิด ณ จุดขาด (%)		ความทนแรงดึง (kgf/mm <sup>2</sup> )		มอดุลัส (kgf/mm <sup>2</sup> )		ความทนทานต่อแรงกระแทก (kJ/m <sup>2</sup> )	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
	10kGy	57.38	1.11	1.18	0.04	34.88	0.44	7.90	0.88
	20kGy	26.33	3.88	1.25	0.01	35.06	1.82	7.00	1.19
	30kGy	23.61	1.98	1.15	0.02	28.55	4.70	7.20	0.28
	40kGy	20.52	2.02	5.89	0.16	317.60	18.56	-	-
	50kGy	14.94	1.61	6.30	0.21	321.60	20.10	6.10	0.65
	60kGy	17.02	3.67	6.34	0.12	299.13	23.56	6.50	0.64
	120kGy	16.61	4.28	6.70	0.27	328.10	73.36	8.90	1.54
	180kGy	13.35	1.70	7.01	0.15	331.70	25.30	8.60	1.21
	240kGy	15.47	0.79	1.46	0.01	62.10	4.15	6.30	6.04



ตารางที่ ข.5 แสดงเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ความทนแรงดึง มอดุลัส ความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอริสผสมพอลิสไตรีน กับ พอลิพรอพิลีน อัตราส่วน 50/50 ที่ไม่มี และมีสารช่วยผสม เมื่อมีการฉายรังสีในสภาวะมีอากาศที่ความเข้มข้นต่างกัน

ตัวอย่าง พอลิเมอร์	ความเข้มข้น รังสี (kGy)	เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%)		ความทนแรงดึง (kgf/mm <sup>2</sup> )		มอดุลัส (kgf/mm <sup>2</sup> )		ความทนทานต่อแรงกระแทก (kJ/m <sup>2</sup> )	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
NON COMPATIBILIZER	10kGy	4.05	0.04	2.83	0.19	8.85	0.79	1.70	0.07
	20kGy	6.13	0.28	3.10	0.16	12.89	1.10	1.90	0.00
	30kGy	3.34	1.47	2.26	0.11	38.22	0.94	3.50	0.01
	40kGy	2.84	3.81	11.65	1.50	902.54	104.44	-	-
	50kGy	1.89	0.53	11.33	1.30	618.35	298.18	3.20	0.95
	60kGy	1.80	0.96	12.01	0.25	969.25	51.06	2.80	1.20
	120kGy	1.65	0.13	11.30	0.61	722.98	93.68	1.20	0.89
	180kGy	1.50	0.88	11.01	0.45	741.22	72.06	-	-
10% SBS	240kGy	1.49	0.24	2.19	0.18	183.37	16.64	-	-
	10kGy	11.64	2.53	2.78	0.14	13.23	1.41	3.90	0.52
	20kGy	10.87	2.51	2.82	0.04	29.39	11.50	4.10	0.49
	30kGy	8.02	1.07	2.76	0.01	6.33	0.18	3.60	0.33
	40kGy	2.84	0.59	13.79	0.11	929.00	307.16	-	-
	50kGy	4.27	0.45	13.29	0.23	643.80	270.60	-	-
	60kGy	3.68	0.98	13.34	0.05	948.73	316.05	2.90	0.54
	120kGy	3.10	0.69	12.84	0.04	722.81	146.50	2.40	0.64
	180kGy	2.61	0.19	12.47	0.43	647.83	188.89	-	-
	240kGy	1.90	0.22	2.05	0.56	145.21	103.56	0.1	0.00

ตารางที่ ๗.5 (ต่อ)

ตัวอย่าง พอลิเมอร์	ความเข้ม รังสี (kGy)	เปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด (%)		ความหนาแน่นแข็งดึง (kg/mm <sup>3</sup> )		มอดุลัส (kgf/mm <sup>2</sup> )		ความทนทานต่อแรงกระแทก (kJ/m <sup>2</sup> )	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
20 % SBS	10kGy	21.44	1.39	2.41	0.04	13.14	1.56	3.50	0.18
	20kGy	22.81	2.10	2.55	0.03	16.34	1.01	3.60	0.46
	30kGy	9.93	0.86	2.45	0.08	15.42	3.18	14.20	0.26
	40kGy	5.00	2.83	12.89	0.50	849.21	215.22	-	-
	50kGy	4.52	1.56	12.56	0.21	694.21	62.02	3.40	0.21
	60kGy	8.81	2.65	12.51	0.15	838.80	168.74	2.60	0.08
	120kGy	5.10	5.91	12.10	0.24	603.25	119.05	2.10	0.51
	180kGy	4.19	0.31	12.18	0.26	811.40	73.78	-	-
	240kGy	3.03	0.36	2.20	0.93	201.59	59.68	2.10	0.84
	30 % SBS	10kGy	40.11	6.13	2.20	2.20	12.11	2.10	7.20
20kGy	43.47	8.94	2.26	0.02	11.42	0.99	6.80	0.15	
30kGy	53.20	9.57	2.24	0.07	14.59	0.97	6.30	0.54	
40kGy	25.11	9.08	11.47	0.24	735.58	55.70	-	-	
50kGy	23.94	11.08	11.01	0.08	794.70	152.44	5.40	0.53	
60kGy	22.27	6.98	11.18	0.10	1200.97	349.66	4.60	0.31	
120kGy	8.38	0.19	11.43	0.11	576.9	153.92	4.90	0.43	
180kGy	7.26	0.76	11.52	0.27	418.70	96.96	-	-	
240kGy	5.29	0.63	2.15	0.11	126.12	78.03	3.00	1.02	

ตารางที่ ข.8 แสดงเปอร์เซ็นต์การตั้งยัด ณ จุดขาด ความหนาแน่นแรงดึง มอดุลัส ความหนาแน่นต่อแรงกระทำของพอลิเมอร์ผสมพอลิไธรีน กับ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ที่อัตราส่วน 50/50 เมื่อมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตต่างกัน

ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (%wt.)	เปอร์เซ็นต์การตั้งยัด ณ จุดขาด (%)		ความหนาแน่นแรงดึง (kg/mm <sup>2</sup> )		มอดุลัส (kg/mm <sup>2</sup> )		ความหนาแน่นต่อแรงกระทำ (kg/cm <sup>3</sup> )	
	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
4	6.72	1.07	1.25	0.33	37.02	5.26	3.10	0.84
12	6.51	1.14	1.35	0.07	37.38	3.53	2.90	0.29
20	2.42	0.19	1.21	0.28	27.63	135.5	1.80	0.17
28	2.37	0.12	1.18	0.22	24.84	26.5	1.60	0.24
36	2.09	0.22	1.11	0.93	26.69	153.6	1.00	0.28
44	2.04	0.15	1.08	0.16	25.40	307.6	1.10	0.19

ตารางที่ ข.9 แสดงเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด ความทนทานต่อแรงดึง มอดุลัส ความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

ที่อัตราส่วน 50/50 เมื่อไม่มี และมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตต่างกัน

ตัวอย่าง พอลิเมอร์	ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (%wt.)	อัตราส่วน พอลิเมอร์ ผสม (%wt.)	เปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด (%)		ความทนแรงดึง (kgf/mm <sup>2</sup> )		มอดุลัส (kgf/mm <sup>2</sup> )		ความทนทานต่อแรงกระแทก (kJ/m <sup>2</sup> )	
			ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
NON COMPATIBILIZER	4	100/0	3.77	0.72	4.35	0.18	75.74	7.93	2.80	0.43
		70/30	9.17	0.63	2.31	0.04	70.58	15.49	1.50	0.19
		50/50	6.72	1.07	1.25	0.33	37.02	5.26	3.10	0.84
		30/70	19.53	1.71	1.10	0.01	30.78	4.90	4.50	0.41
		0/100	100.40	5.46	1.09	0.01	7.44	0.58	24.50	1.73
	12	100/0	3.97	0.97	4.44	0.30	54.65	7.00	2.20	0.06
		70/30	3.51	0.15	1.59	0.02	46.00	4.36	2.20	0.13
		50/50	6.51	1.14	1.35	0.07	37.38	3.53	2.90	0.29
		30/70	16.65	1.08	1.02	0.02	31.76	8.12	4.90	0.57
		0/100	84.29	9.14	1.11	0.06	13.88	1.65	29.60	1.95
10 % SBS	4	100/0	29.36	3.63	2.87	0.35	52.86	8.56	3.20	0.54
		70/30	14.68	0.98	1.71	0.01	50.21	6.35	4.30	0.63
		50/50	10.72	1.52	1.27	0.03	30.37	0.69	7.20	1.05
		30/70	22.17	3.91	1.03	0.02	18.34	5.61	14.80	1.14
		0/100	85.05	2.46	0.99	0.01	8.12	0.35	27.20	1.63
	12	100/0	25.87	1.91	2.88	0.10	67.71	25.23	3.20	0.35
		70/30	6.56	0.90	1.43	0.15	47.81	4.28	4.20	0.29
		50/50	9.75	0.18	1.27	0.04	45.73	4.77	5.30	0.67
		30/70	19.22	1.79	0.98	0.01	24.17	1.21	8.30	0.74
		0/100	85.93	1.69	0.90	0.02	10.62	2.59	28.70	0.83

ตัวอย่าง พอลิเมอร์	ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (%wt.)	อัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม (%wt.)	เปอร์เซ็นต์การดัดงอ (%)		ความหนาแน่นแข็ง (kg/mm <sup>3</sup> )		มอดุลัส (kgf/mm <sup>2</sup> )		ความทนทานต่อแรงกระแทก (kJ/m <sup>2</sup> )	
			ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
33	4	100/0	22.50	7.95	2.40	0.06	8.35	1.59	4.10	0.42
		70/30	16.09	0.89	1.68	0.05	37.08	3.15	15.20	1.07
		50/50	15.38	0.89	1.07	0.05	35.17	14.48	18.00	1.42
		30/70	73.79	5.73	0.96	0.04	10.31	1.65	29.40	1.98
30	4	0/100	90.89	5.46	1.07	0.03	7.80	0.19	29.90	1.33
		100/0	12.42	2.42	2.36	0.02	77.87	14.90	4.00	0.35
		70/30	19.10	2.68	1.83	0.02	112.90	10.83	12.80	0.68
		50/50	19.41	6.76	1.15	0.03	45.47	3.95	19.30	1.66
03	12	30/70	69.04	8.38	0.98	0.03	9.72	1.28	22.00	1.63
		0/100	81.36	4.18	0.86	3.88	8.09	0.67	29.50	4.93



## เปอร์เซ็นต์เจดของพอลิเมออร์ผสมที่ผ่านการฉายรังสี

ตารางที่ ค.1 แสดงเปอร์เซ็นต์เจด ของพอลิเมออร์ผสมพอลิสไตรีน กับ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ทุกอัตราส่วน ที่ไม่มี และมีสารช่วยผสม เมื่อมีการฉายรังสีในสภาวะมีอากาศที่ ความเข้ม 30 kGy

ตัวอย่างพอลิเมออร์	อัตราส่วน พอลิเมออร์ผสม (%wt.)	เปอร์เซ็นต์เจด ที่ 18 ชั่วโมง (%)	เปอร์เซ็นต์เจด ที่ 32 ชั่วโมง (%)	เปอร์เซ็นต์เจด ที่ 54 ชั่วโมง (%)	เปอร์เซ็นต์เจด ที่ 72 ชั่วโมง (%)
NON COMPATIBILIZER	100/0	0.68	0.68	0.68	0.68
	70/30	0.60	0.60	0.60	0.60
	50/50	0.62	0.62	0.62	0.62
	30/70	0.61	0.61	0.61	0.61
	0/100	0.59	0.59	0.59	0.59
10 % SBS	100/0	0.72	0.72	0.72	0.72
	70/30	0.71	0.71	0.71	0.71
	50/50	0.67	0.67	0.67	0.67
	30/70	0.60	0.60	0.60	0.60
	0/100	0.62	0.62	0.62	0.62
20 % SBS	100/0	0.60	0.60	0.60	0.60
	70/30	0.62	0.62	0.62	0.62
	50/50	0.69	0.69	0.69	0.69
	30/70	0.66	0.66	0.66	0.66
	0/100	0.61	0.61	0.61	0.61

ตารางที่ ค.1 (ต่อ)

ตัวอย่างพอลิเมอร์	อัตราส่วน พอลิเมอร์ผสม (%wt.)	เปอร์เซ็นต์เจล ที่ 18 ชั่วโมง (%)	เปอร์เซ็นต์เจล ที่ 32 ชั่วโมง (%)	เปอร์เซ็นต์เจล ที่ 54 ชั่วโมง (%)	เปอร์เซ็นต์เจล ที่ 72 ชั่วโมง (%)
30 % SBS	100/0	0.58	0.58	0.58	0.58
	70/30	0.69	0.69	0.69	0.69
	50/50	0.60	0.60	0.60	0.60
	30/70	0.69	0.69	0.69	0.69
	0/100	0.72	0.72	0.72	0.72
10 % EVA	100/0	0.59	0.58	0.58	0.58
	70/30	0.60	0.60	0.60	0.60
	50/50	0.61	0.61	0.61	0.61
	30/70	0.60	0.60	0.60	0.60
	0/100	0.76	0.76	0.76	0.76
20 % EVA	100/0	0.82	0.82	0.82	0.82
	70/30	0.69	0.69	0.69	0.69
	50/50	0.63	0.63	0.63	0.63
	30/70	0.67	0.67	0.67	0.67
	0/100	0.88	0.88	0.88	0.88
30 % EVA	100/0	0.78	0.78	0.78	0.78
	70/30	0.68	0.68	0.68	0.68
	50/50	0.61	0.61	0.61	0.61
	30/70	0.67	0.67	0.67	0.67
	0/100	0.80	0.80	0.80	0.80

ตารางที่ ค.2 แสดงเปอร์เซ็นต์เจล ของพอลิเมอร์ผสมพอลิสไตรีน กับ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ อัตราส่วน 50/50 ที่ไม่มี และมีสารช่วยผสม เมื่อมีการฉายรังสีในสภาวะมีอากาศที่ ความเข้มต่างกัน

ตัวอย่างพอลิเมอร์	ความเข้มของรังสี (kGy)	เปอร์เซ็นต์เจล ที่ 18 ชั่วโมง (%)	เปอร์เซ็นต์เจล ที่ 32 ชั่วโมง (%)	เปอร์เซ็นต์เจล ที่ 54 ชั่วโมง (%)	เปอร์เซ็นต์เจล ที่ 72 ชั่วโมง (%)
NON COMPATIBILIZER	10 kGy	6.44	6.24	6.35	6.31
	20 kGy	0.85	0.80	0.00	0.00
	30 kGy	0.61	0.55	0.00	0.00
	40 kGy	15.88	13.22	12.98	12.75
	50 kGy	17.48	11.73	11.45	11.27
	60 kGy	19.25	16.22	15.92	15.30
	120 kGy	23.89	14.54	18.31	18.27
	180 kGy	26.24	21.81	20.95	20.80
	240 kGy	32.28	26.89	26.13	25.81

ตารางที่ ค.2 (ต่อ)

ตัวอย่างพอลิเมอร์	ความเข้มข้นของรังสี (kGy)	เปอร์เซ็นต์เจล ที่ 18 ชั่วโมง (%)	เปอร์เซ็นต์เจล ที่ 32 ชั่วโมง (%)	เปอร์เซ็นต์เจล ที่ 54 ชั่วโมง (%)	เปอร์เซ็นต์เจล ที่ 72 ชั่วโมง (%)
10 % SBS	10 kGy	0.04	0.06	0.06	0.00
	20 kGy	0.02	0.00	0.00	0.00
	30 kGy	0.22	0.00	0.00	0.00
	40 kGy	8.62	7.59	7.05	7.05
	50 kGy	10.71	9.54	7.77	7.58
	60 kGy	13.18	9.28	8.63	8.27
	120 kGy	32.51	25.39	24.21	23.91
	180 kGy	45.29	35.21	34.02	31.7652
20 % SBS	240 kGy	72.86	37.24	35.93	35.31
	10 kGy	0.00	0.00	0.00	0.00
	20 kGy	0.20	0.00	0.00	0.00
	30 kGy	0.65	0.00	0.00	0.00
	40 kGy	11.59	10.99	10.46	10.43
	50 kGy	29.17	24.08	23.69	23.51
	60 kGy	15.19	10.65	10.29	10.22
	120 kGy	38.48	34.09	32.93	32.75
180 kGy	47.10	38.93	34.93	33.89	
240 kGy	49.31	43.47	40.60	39.28	

ตารางที่ ค.2 (ต่อ)

ตัวอย่างพอลิเมอร์	ความเข้มของรังสี (kGy)	เปอร์เซ็นต์เจด ที่ 18 ชั่วโมง (%)	เปอร์เซ็นต์เจด ที่ 32 ชั่วโมง (%)	เปอร์เซ็นต์เจด ที่ 54 ชั่วโมง (%)	เปอร์เซ็นต์เจด ที่ 72 ชั่วโมง (%)
30 % SBS	10 kGy	0.00	0.00	0.00	0.00
	20 kGy	0.00	0.00	0.00	0.00
	30 kGy	0.00	0.00	0.00	0.00
	40 kGy	-	-	-	-
	50 kGy	-	-	-	-
	60 kGy	12.36	8.11	7.93	7.93
	120 kGy	31.84	23.94	22.95	22.91
	180 kGy	47.75	34.72	33.34	32.40
	240 kGy	44.80	38.41	37.09	36.67
	10 kGy	0.38	0.19	0.19	0.19
10 % EVA	20 kGy	0.00	0.00	0.00	0.00
	30 kGy	0.00	0.00	0.00	0.00
	40 kGy	-	-	-	-
	50 kGy	0.62	0.40	0.40	0.25
	60 kGy	9.91	6.60	6.30	6.01
	120 kGy	39.77	33.03	31.89	31.85
	180 kGy	35.38	32.71	31.30	31.16
	240 kGy	41.35	38.39	37.70	37.12

## ตารางที่ ค.2 (ต่อ)

ตัวอย่างพอลิเมอร์	ความเข้มของรังสี (kGy)	เปอร์เซ็นต์เจล ที่ 18 ชั่วโมง (%)	เปอร์เซ็นต์เจล ที่ 32 ชั่วโมง (%)	เปอร์เซ็นต์เจล ที่ 54 ชั่วโมง (%)	เปอร์เซ็นต์เจล ที่ 72 ชั่วโมง (%)
20 % EVA	10 kGy	0.25	0.04	0.02	0.00
	20 kGy	0.21	0.11	0.34	0.07
	30 kGy	0.30	0.00	0.00	0.00
	40 kGy	-	-	-	-
	50 kGy	16.05	11.16	10.76	11.66
	60 kGy	20.94	17.20	10.90	10.42
	120 kGy	34.16	30.19	28.60	29.21
	180 kGy	37.28	34.80	34.36	33.81
	240 kGy	45.11	39.90	36.53	36.24
	10 kGy	0.00	0.00	0.00	0.00
30 % EVA	20 kGy	0.00	0.00	0.00	0.00
	30 kGy	0.43	0.00	0.00	0.00
	40 kGy	-	-	-	-
	50 kGy	19.05	16.84	15.99	15.53
	60 kGy	21.50	13.98	13.14	12.98
	120 kGy	36.90	34.58	32.31	32.62
	180 kGy	39.25	38.72	38.55	38.00
	240 kGy	52.84	51.07	50.85	50.25

ตารางที่ ค.3 แสดงเปอร์เซ็นต์เจล ของพอลิเมอร์ผสมพอลิไธรีน กับ พอลิพรอพิลีน อัตราส่วน 50/50 ที่ไม่มี และมีการช่วยผสม เมื่อมีการฉายรังสีในสภาวะมีอากาศที่ความเข้มข้นต่างกัน

ตัวอย่างพอลิเมอร์	ความเข้มข้นของรังสี (kGy)	เปอร์เซ็นต์เจล ที่ 72 ชั่วโมง (%)
NON COMPATIBILIZER	10 kGy	0.34
	20 kGy	0
	30 kGy	0.95
	40 kGy	0
	50 kGy	0
	60 kGy	0
	120 kGy	2.58
	180 kGy	3.04
	240 kGy	4.07
	10% SBS	10 kGy
20 kGy		0.55
30 kGy		0
40 kGy		1.21
50 kGy		1.58
60 kGy		0
120 kGy		5.39
180 kGy		8.72
240 kGy		9.03

ตารางที่ ค.3 (ต่อ)

ตัวอย่างพอลิเมอร์	ความเข้มของรังสี (kGy)	เปอร์เซ็นต์โพลีที่ 72 ชั่วโมง (%)
20 % SBS	10 kGy	0
	20 kGy	2.31
	30 kGy	3.52
	40 kGy	8.07
	50 kGy	4.97
	60 kGy	5.80
	120 kGy	11.86
	180 kGy	12.80
30 % SBS	240 kGy	15.93
	10 kGy	0.26
	20 kGy	0.40
	30 kGy	-
	40 kGy	2.77
	50 kGy	3.35
	60 kGy	7.08
	120 kGy	13.58
180 kGy	20.50	
240 kGy	22.99	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

ตารางที่ ง.1 แสดงค่า  $T_m$ ,  $T_c$ ,  $\Delta H_m$  และ  $\Delta H_c$  ที่ได้จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม

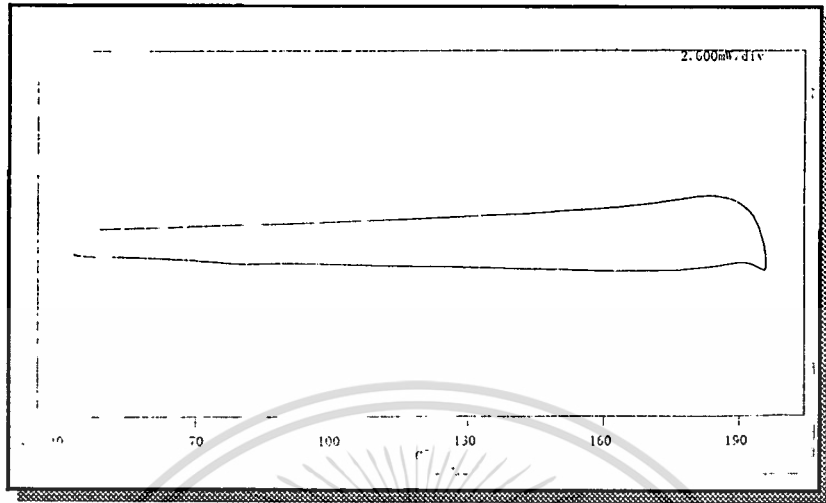
ตัวอย่างพอลิเมอร์	อัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม (wt.)	$T_m$	$T_c$	$\Delta H_m$	$\Delta H_c$
NON COMPATIBILIZER	100/0	-	-	-	-
	70/30	109.0	97.4	120.43	96.16
	50/50	111.1	97.1	269.30	202.21
	30/70	112.1	97.5	353.21	320.37
	0/100	112.3	97.7	698.08	611.22
10% SBS	100/0	-	-	-	-
	70/30	107.9	97.0	89.21	69.13
	50/50	110.0	97.1	176.63	155.81
	30/70	111.8	97.2	377.88	305.44
	0/100	113.5	37.1	535.84	502.13
20 % SBS	100/0	-	-	-	-
	70/30	108.9	96.9	122.69	72.30
	50/50	110.7	96.8	179.97	161.22
	30/70	111.5	97.6	341.44	275.76
	0/100	113.1	97.8	470.55	467.98
30% SBS	100/0	-	-	-	-
	70/30	110.8	97.0	296.87	260.07
	50/50	109.4	97.6	158.09	134.85
	30/70	110.5	97.40	417.83	295.54
	0/100	112.8	97.6	375.95	313.56

ตารางที่ ง.1 (ต่อ)

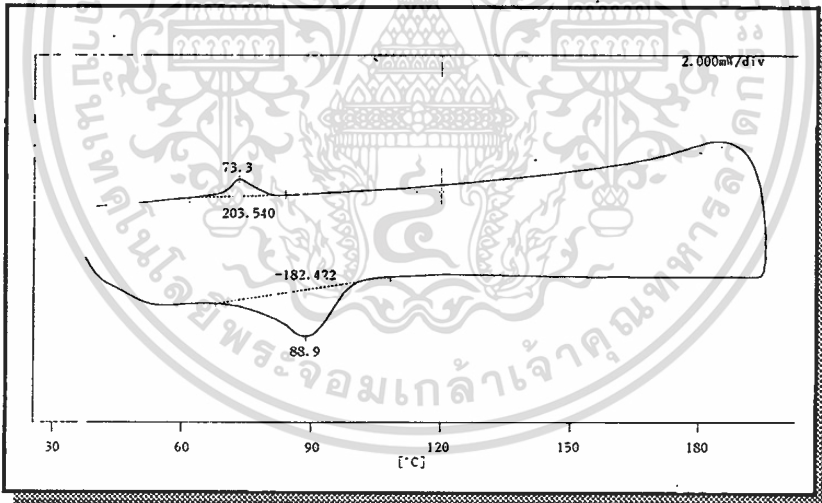
ตัวอย่าง พอลิเมอร์	อัตราส่วน พอลิเมอร์ผสม (wt.)	T <sub>m</sub>	T <sub>c</sub>	ΔH <sub>m</sub>	ΔH <sub>c</sub>
10 % EVA	100/0	-	-	-	-
	70/30	108.7	96.9	139.21	89.25
	50/50	110.1	96.8	266.40	185.50
	30/70	110.6	97.7	334.68	179.95
	0/100			555.75	500.88
20 % EVA	100/0	-	-	-	-
	70/30	109.1	97.5	66.56	70.60
	50/50	110.4	97.1	217.56	171.38
	30/70	112.0	97.2	308.97	242.82
	0/100	112.3	97.4	568.31	359.21
30 % EVA	100/0	-	-	-	-
	70/30	110.0	97.5	66.26	86.72
	50/50	109.7	97.5	231.15	136.74
	30/70	111.2	96.9	273.15	195.11
	0/100	112.2	97.7	493.79	379.82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สมบัติทางความร้อน ( DSC Thermograms )



(a)



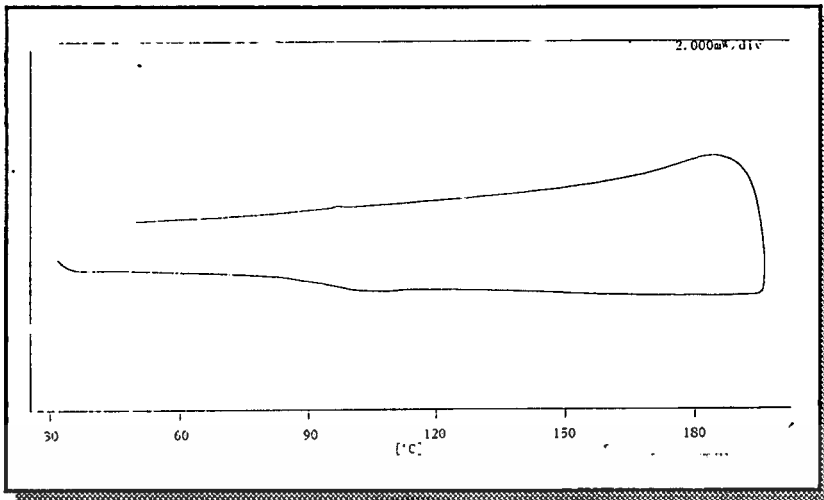
(b)

รูปที่ ง.1 แสดงสมบัติทางความร้อนของ SBS และ EVA

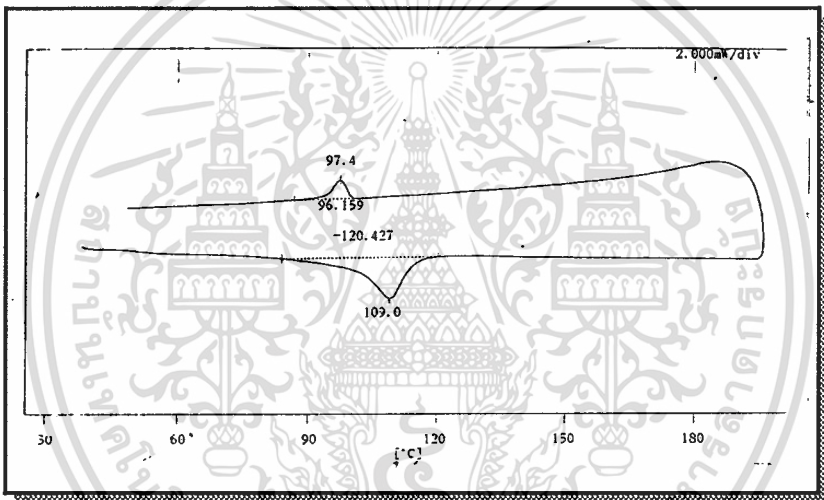
(a) SBS

(b) EVA

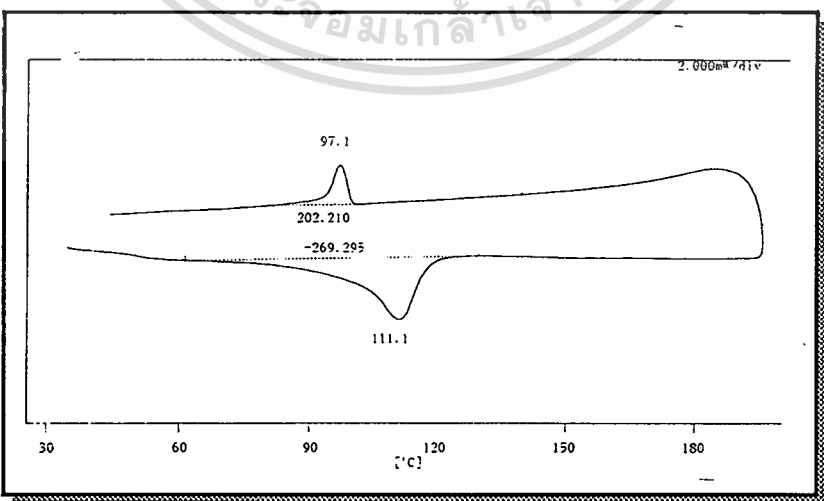
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)

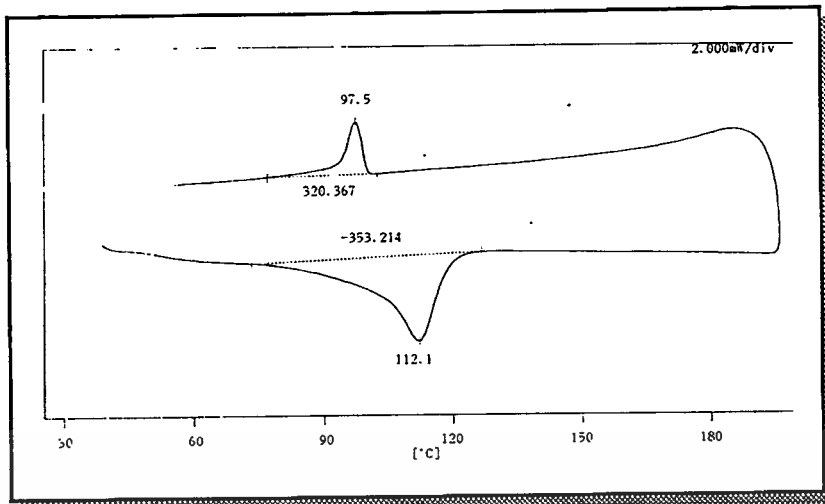


(b)

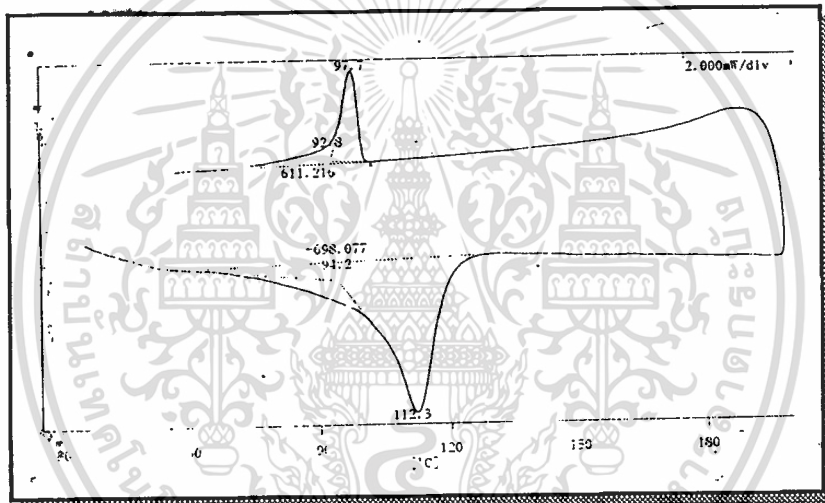


(c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(d)



(e)

รูปที่ ง.2 แสดงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

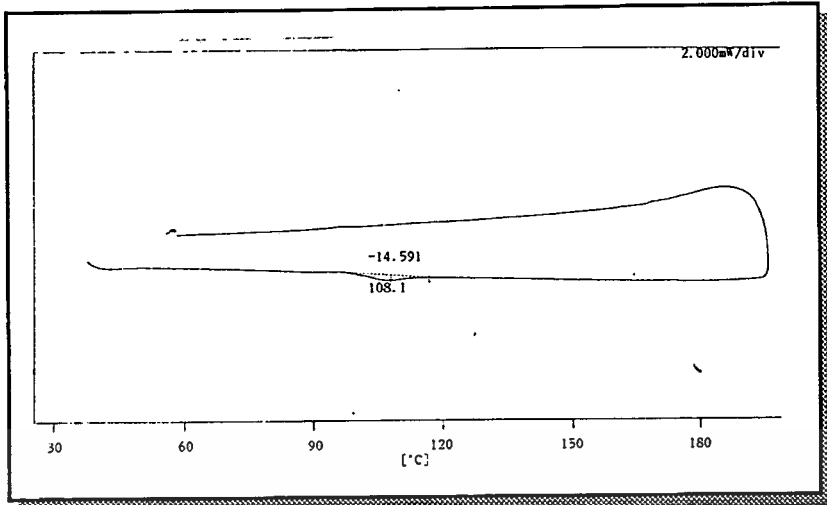
(a) PS/LDPE 100/0

(b) PS/LDPE 70/30

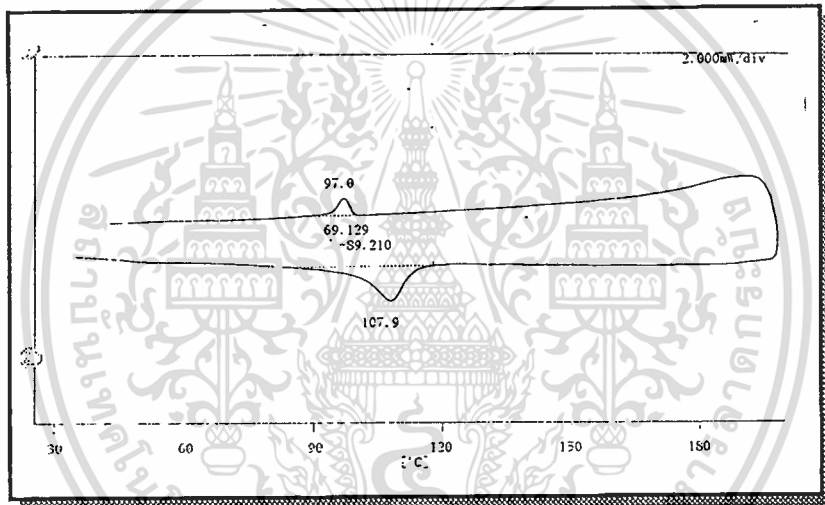
(c) PS/LDPE 50/50

(d) PS/LDPE 30/70

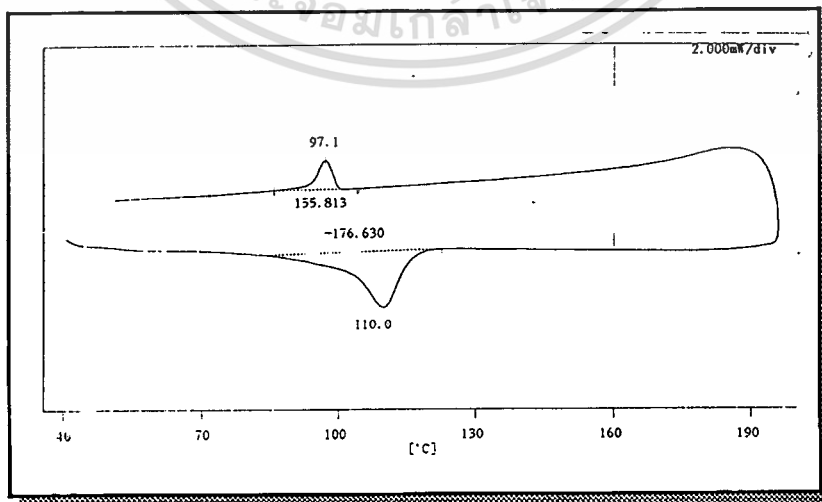
(e) PS/LDPE 0/100



(a)

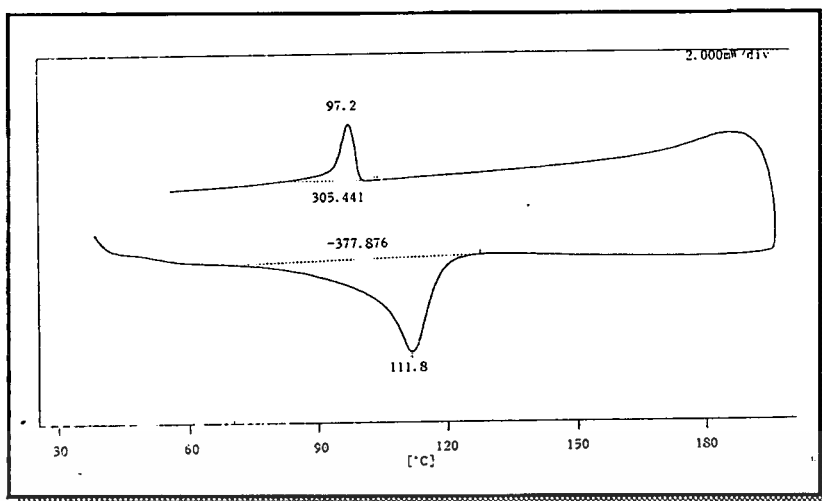


(b)

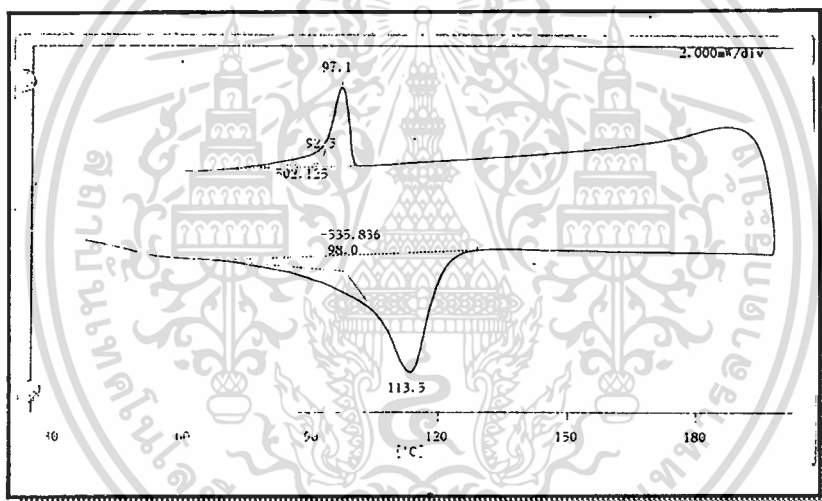


(c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(d)



(e)

รูปที่ ง.3 แสดงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE/10%SBS ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

(a) PS/LDPE/SBS 100/0/10

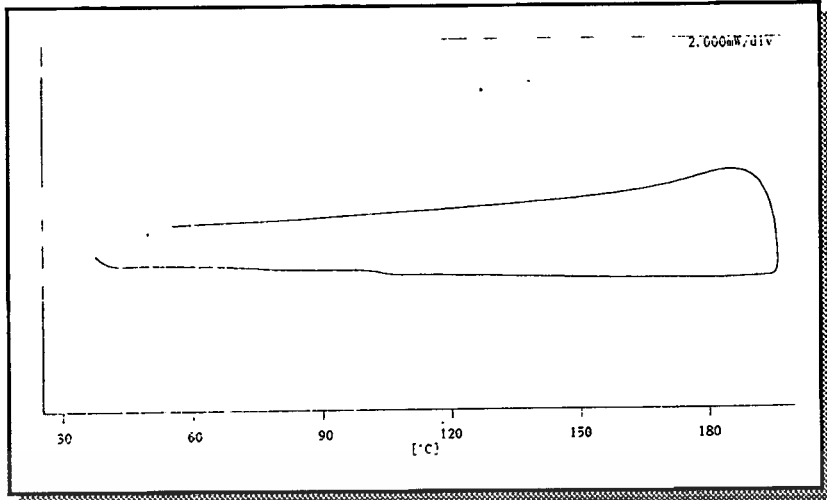
(b) PS/LDPE/SBS 70/30/10

(c) PS/LDPE/SBS 50/50/10

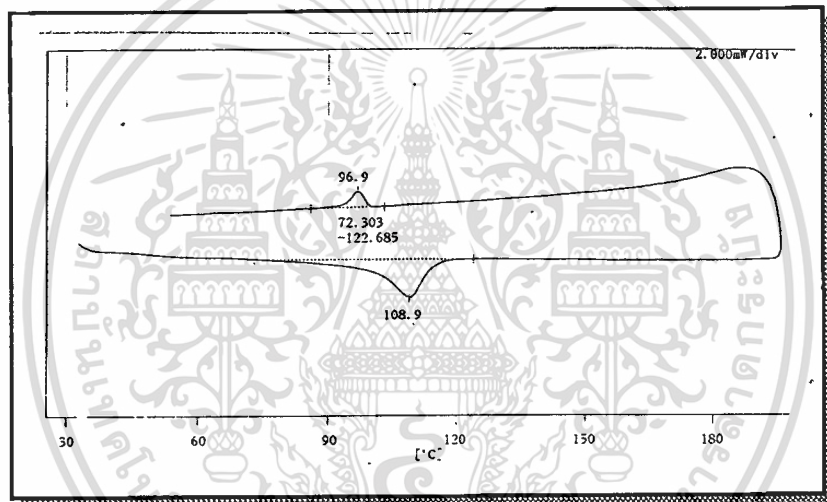
(d) PS/LDPE/SBS 30/70/10

(e) PS/LDPE/SBS 0/100/10

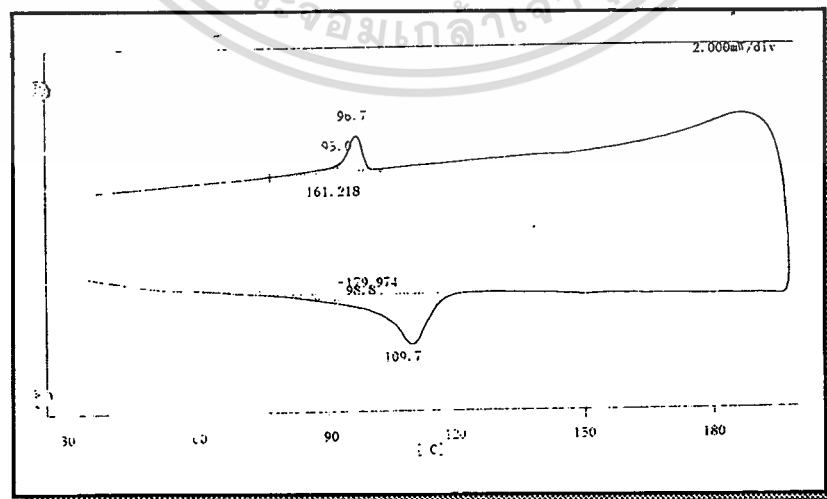
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)

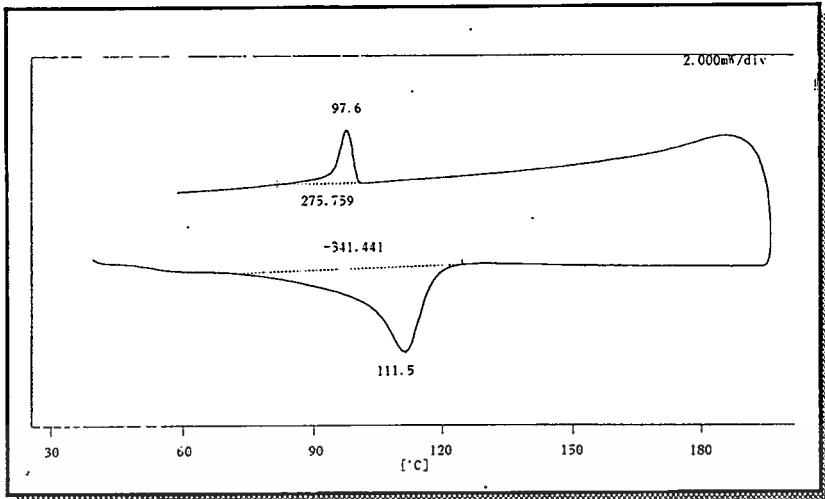


(b)

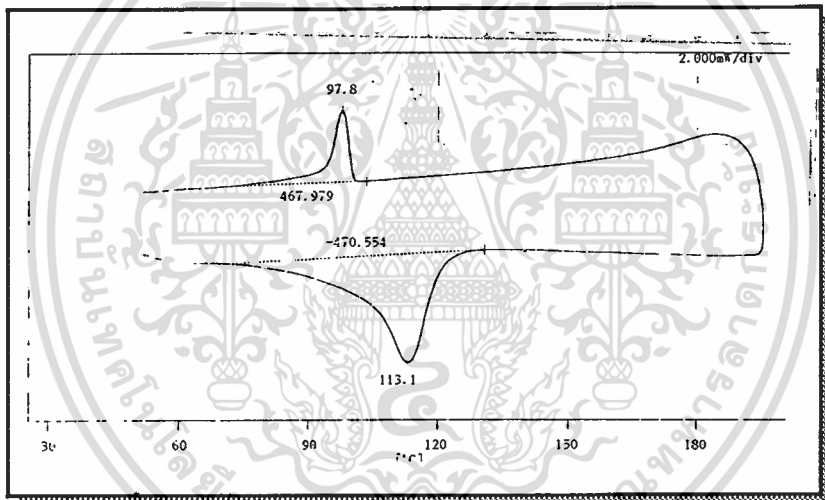


(c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(d)



(e)

รูปที่ 4 แสดงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE/20%SBS ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

(a) PS/LDPE/SBS 100/0/20

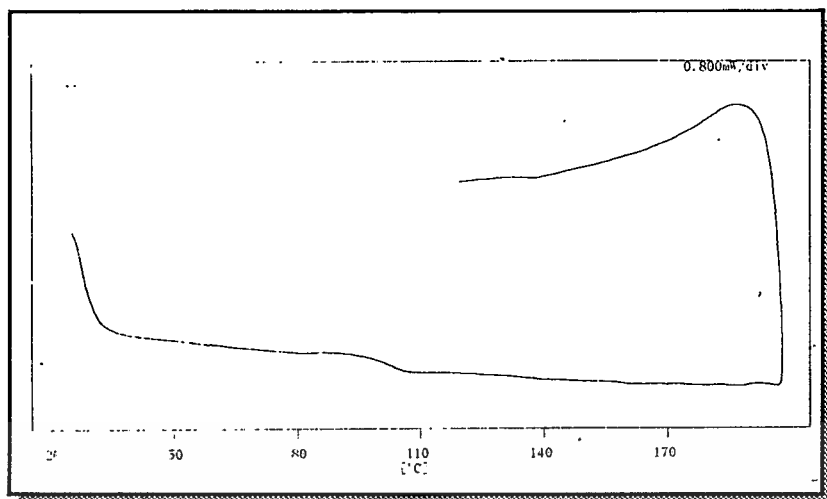
(b) PS/LDPE/SBS 70/30/20

(c) PS/LDPE/SBS 50/50/20

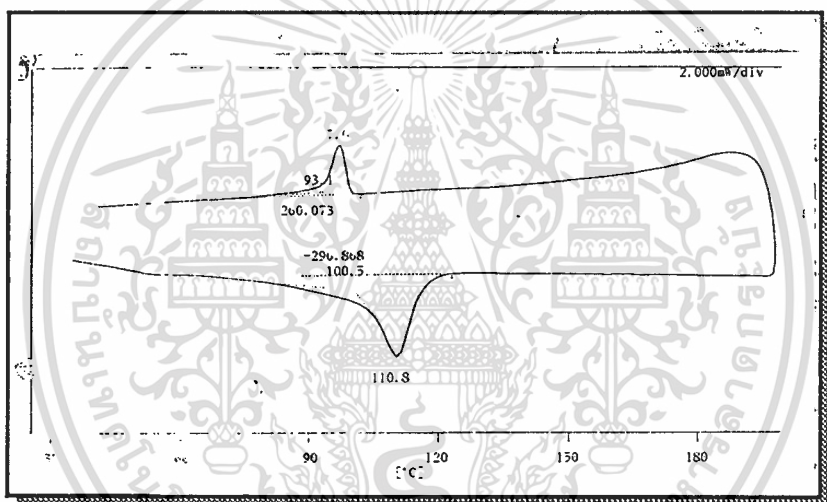
(d) PS/LDPE/SBS 30/70/20

(e) PS/LDPE/SBS 0/100/20

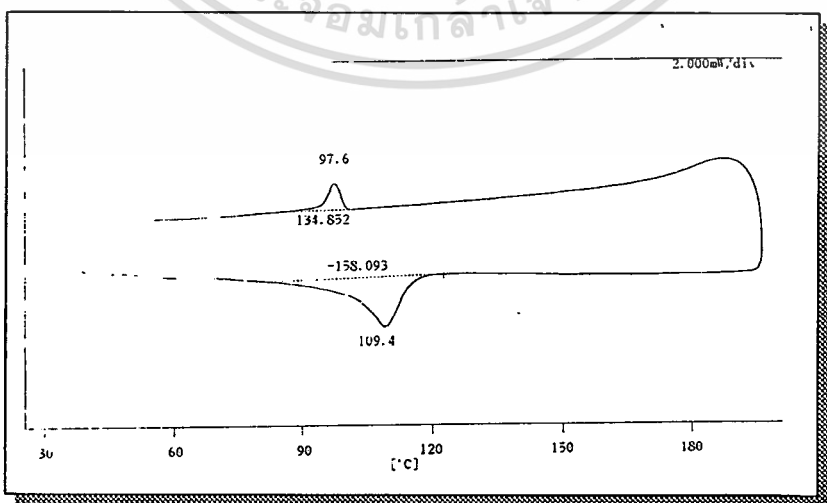
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)

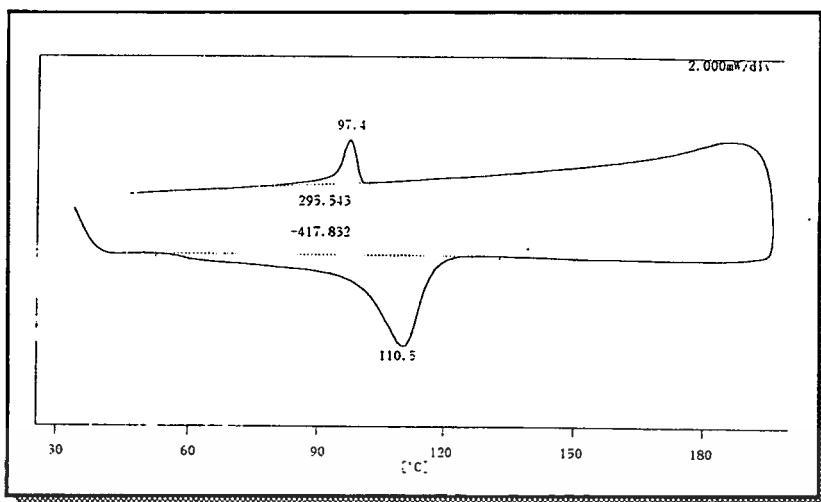


(b)

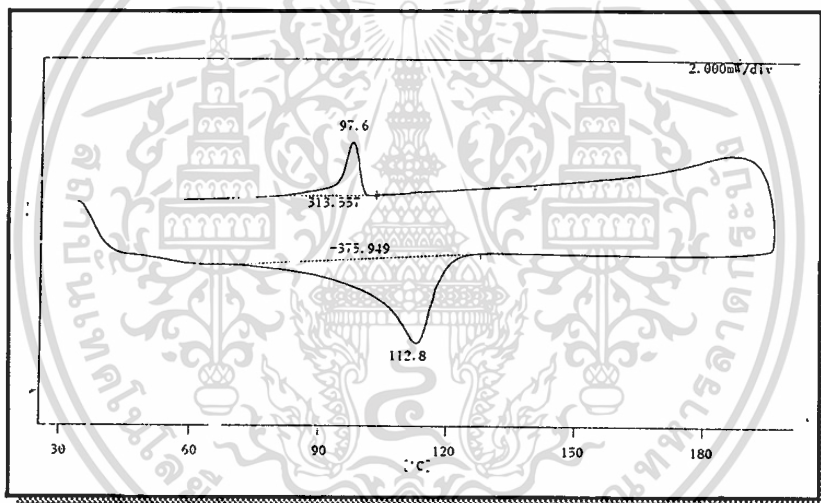


(c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(d)



(e)

รูปที่ 5.5 แสดงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE/30%SBS ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

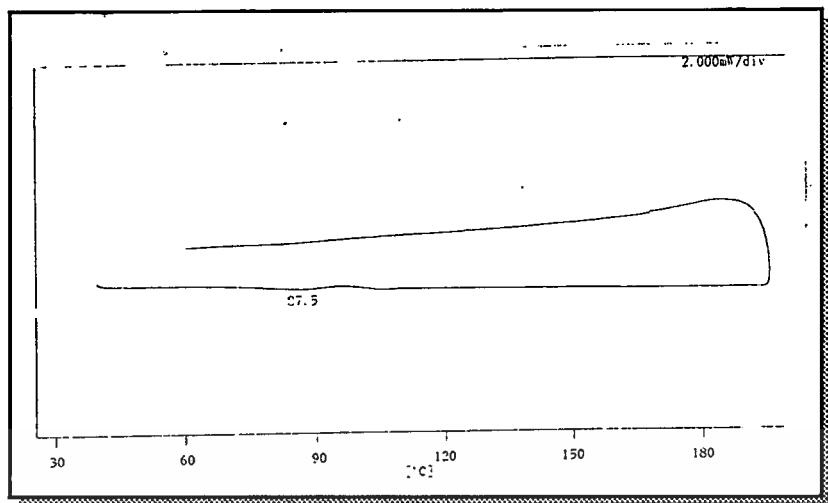
(a) PS/LDPE/SBS 100/0/30

(b) PS/LDPE/SBS 70/30/30

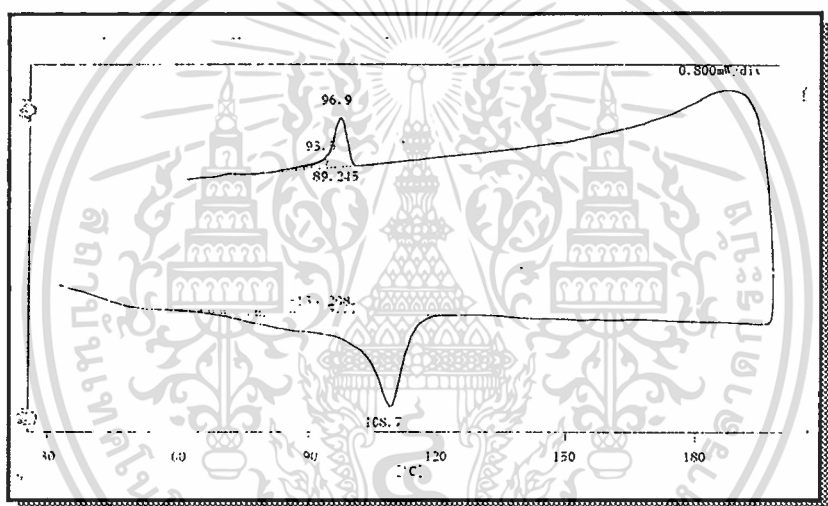
(c) PS/LDPE/SBS 50/50/30

(d) PS/LDPE/SBS 30/70/30

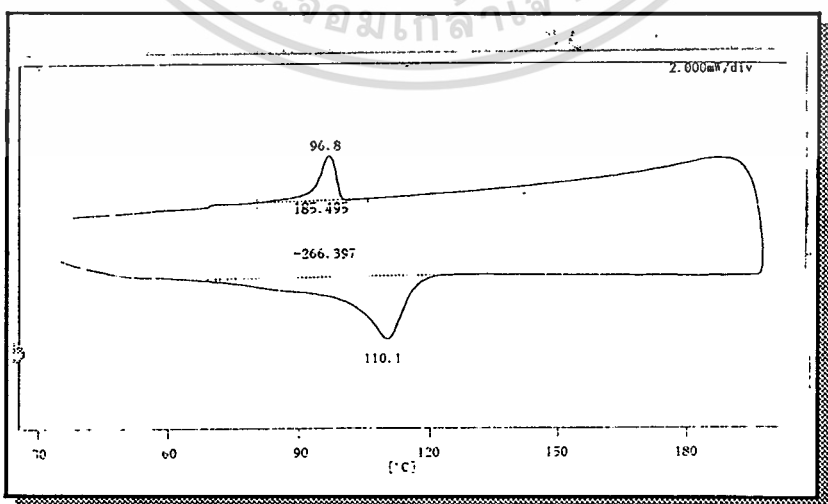
(e) PS/LDPE/SBS 0/100/30



(a)

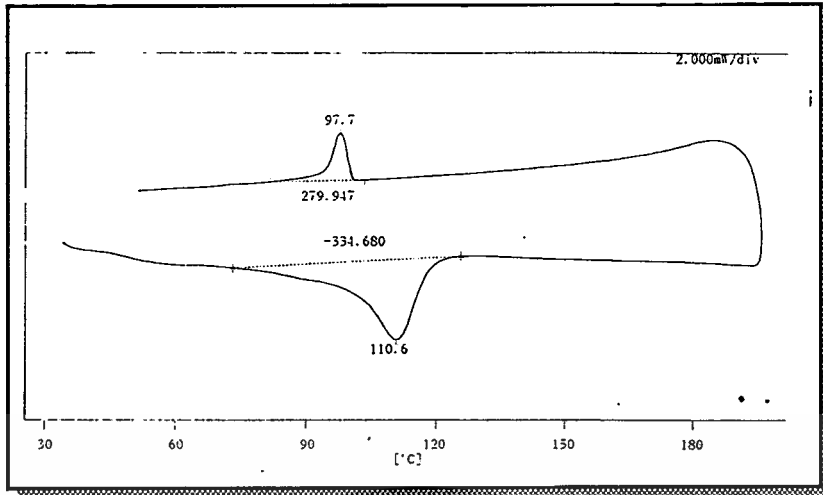


(b)

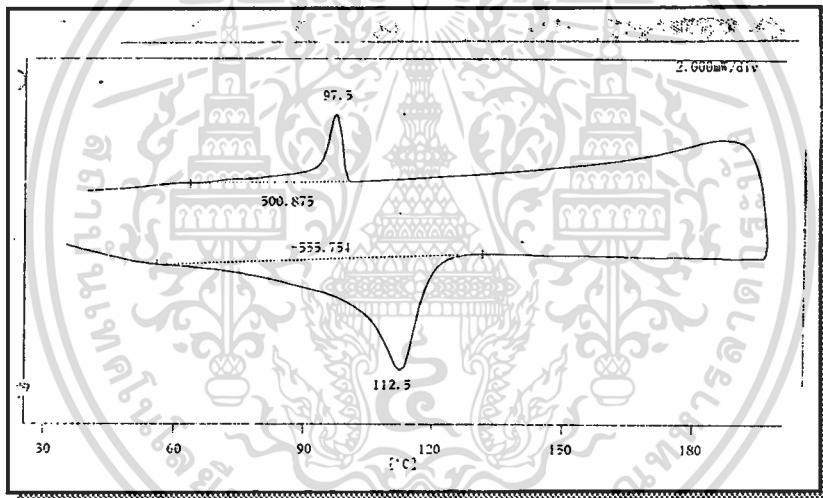


(c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(d)



(e)

รูปที่ ง.6 แสดงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE/10%EVA ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

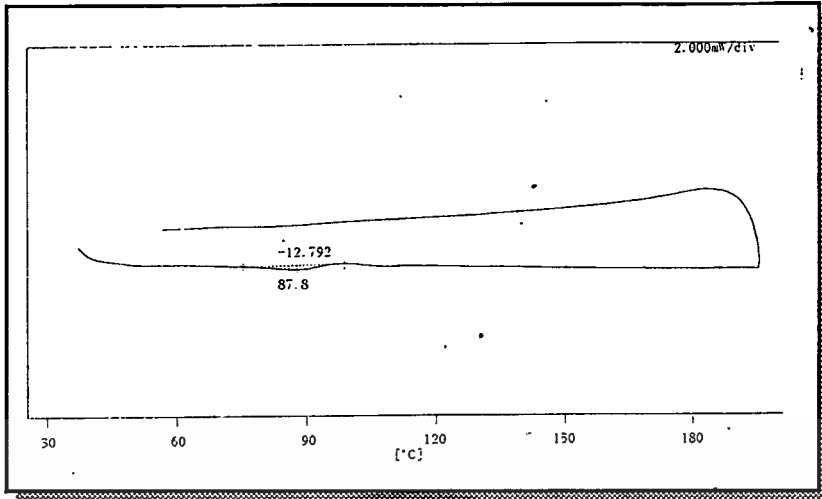
(a) PS/LDPE/EVA 100/0/10

(b) PS/LDPE/EVA 70/30/10

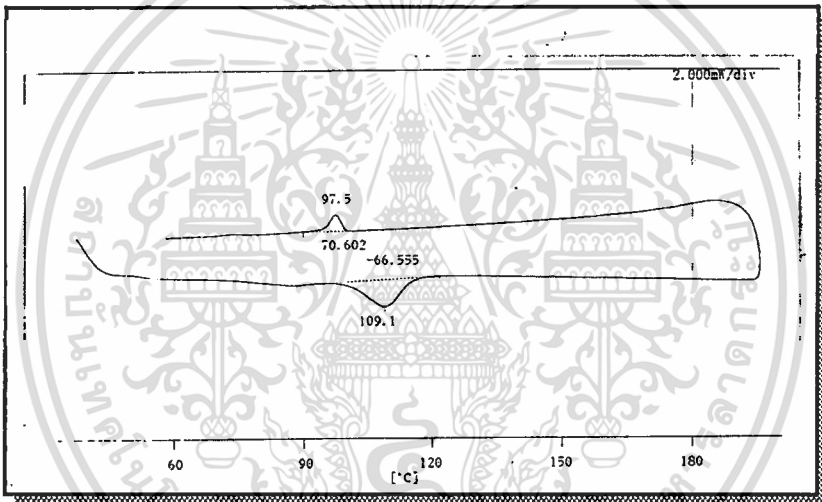
(c) PS/LDPE/EVA 50/50/10

(d) PS/LDPE/EVA 30/70/10

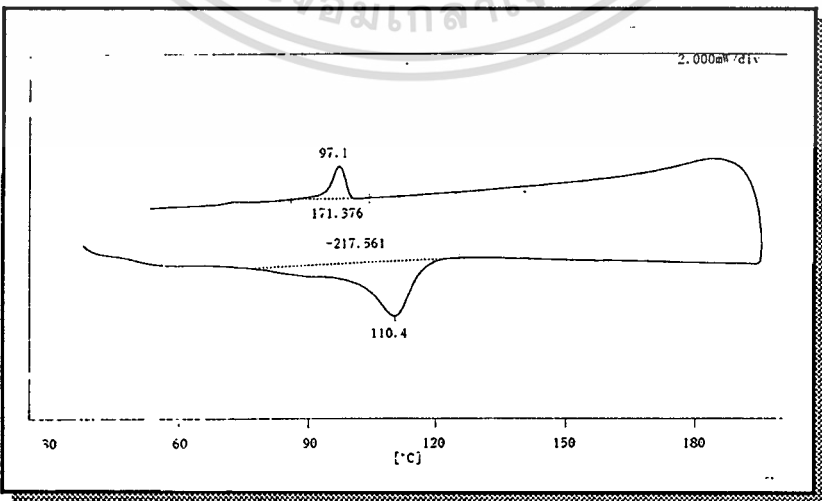
(e) PS/LDPE/EVA 0/100/10



(a)

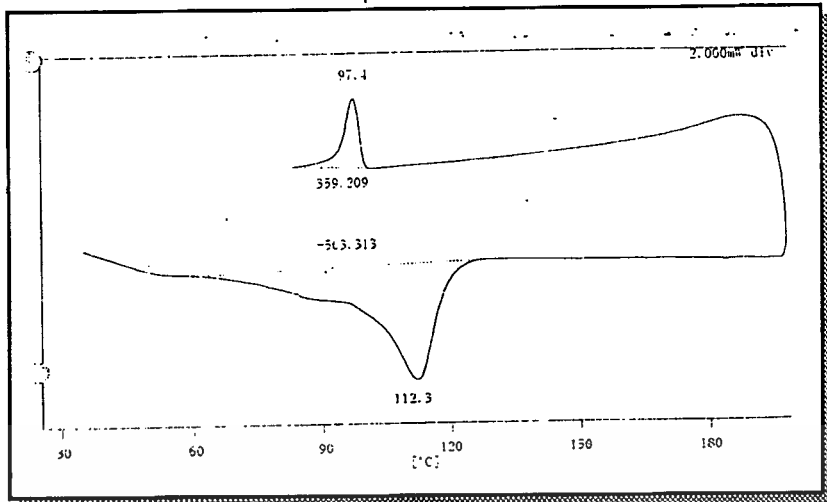


(b)

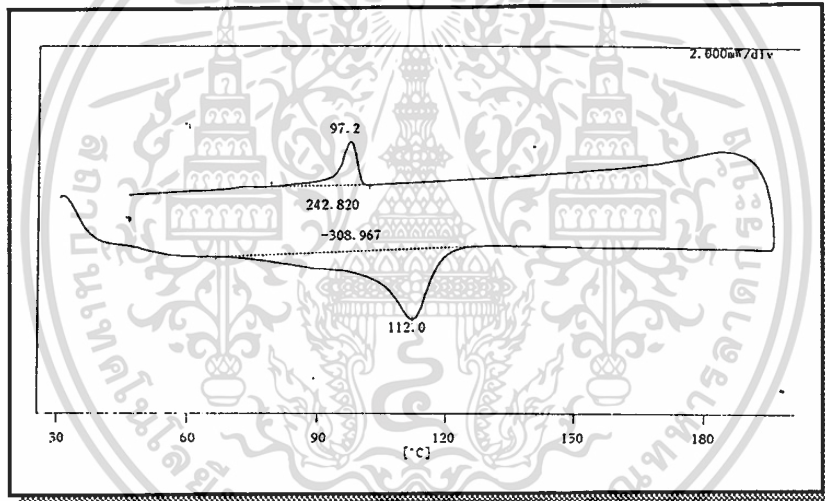


(c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(d)



(e)

รูปที่ ง.7 แสดงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE/20%EVA ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

(a) PS/LDPE/EVA 100/0/20

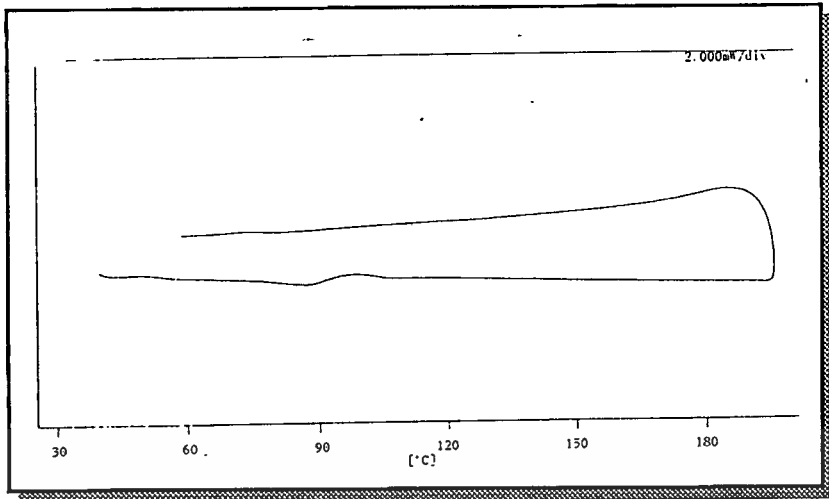
(b) PS/LDPE/EVA 70/30/20

(c) PS/LDPE/EVA 50/50/20

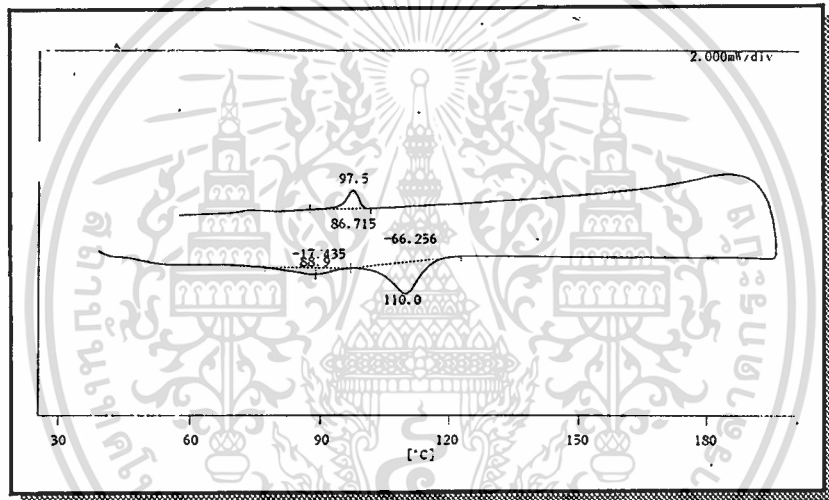
(d) PS/LDPE/EVA 30/70/20

(e) PS/LDPE/EVA 0/100/20

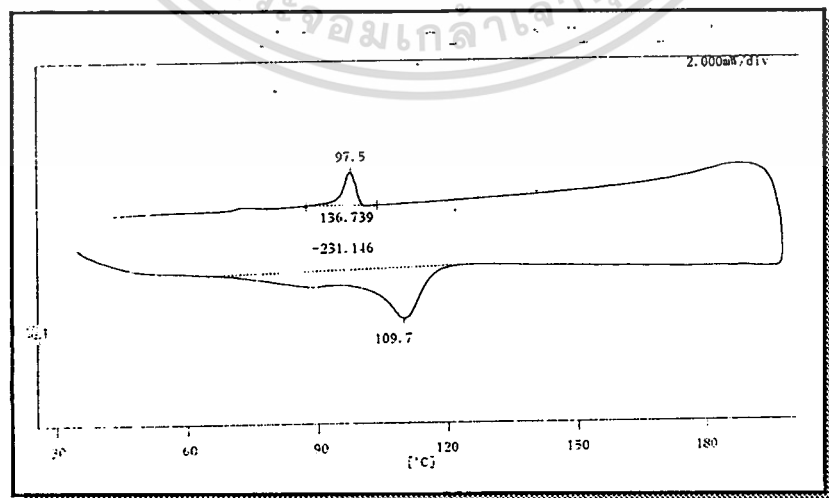
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)

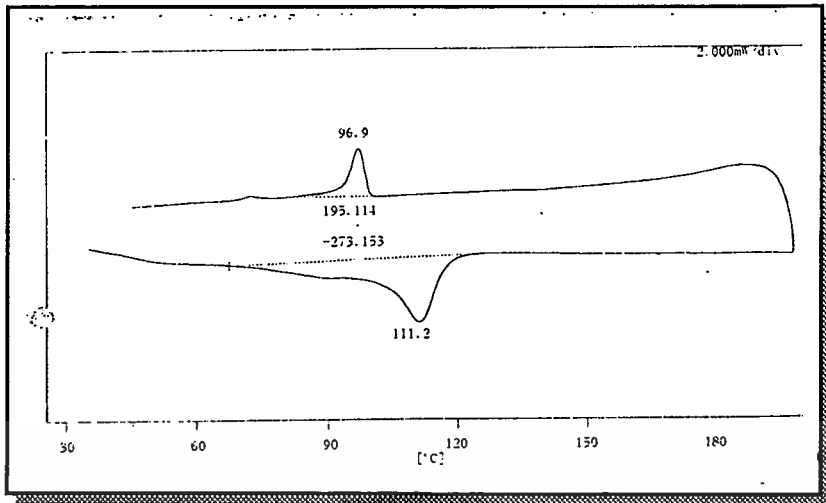


(b)

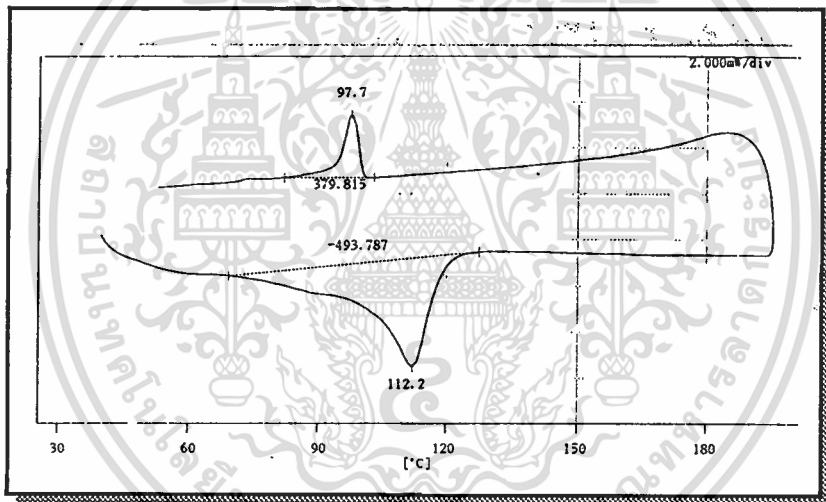


(c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(d)



(e)

รูปที่ 8 แสดงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE/30%EVA ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

(a) PS/LDPE/EVA 100/0/30

(b) PS/LDPE/EVA 70/30/30

(c) PS/LDPE/EVA 50/50/30

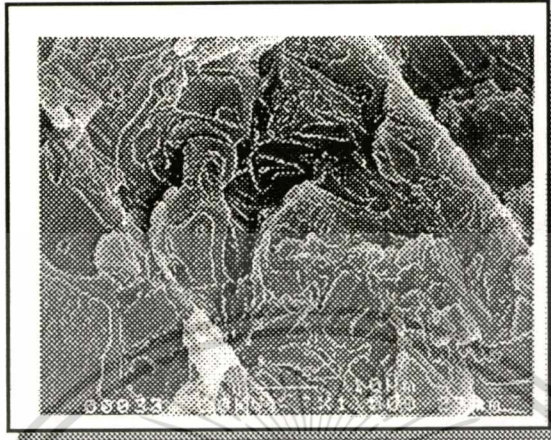
(d) PS/LDPE/EVA 30/70/30

(e) PS/LDPE/EVA 0/100/30

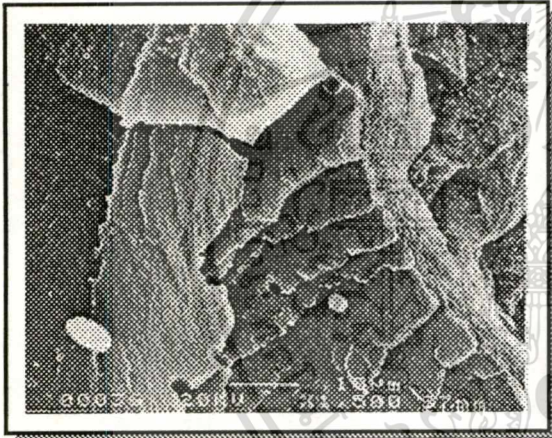
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก จ

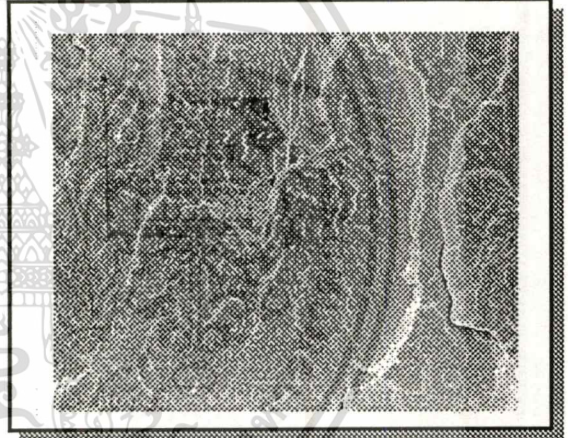
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมของพอลิสไตรีนกับพอลิโอลิฟิน



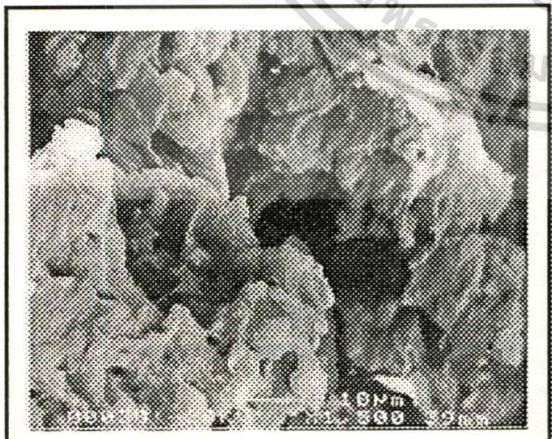
(a)



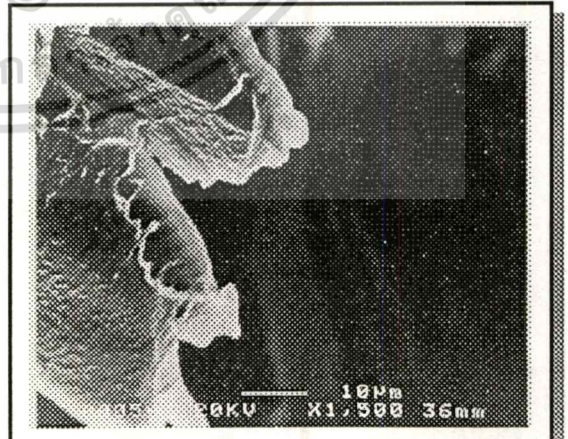
(b)



(c)



(d)



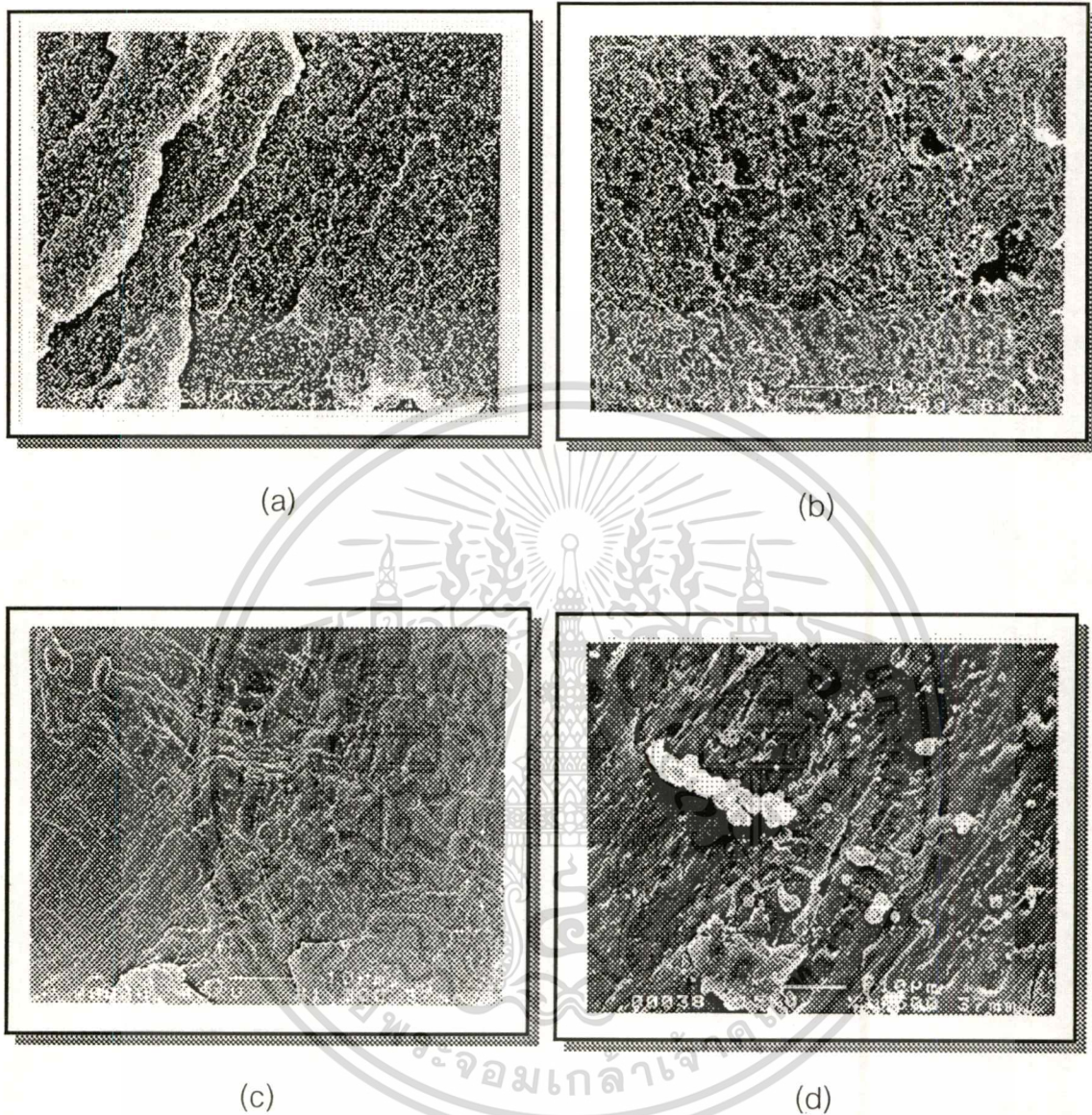
(e)

รูปที่ จ.1 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์หลักและสารช่วยผสม (X 1,500 เท่า)

(a) PS (b) LDPE (c) PP (d) SBS (e) EVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



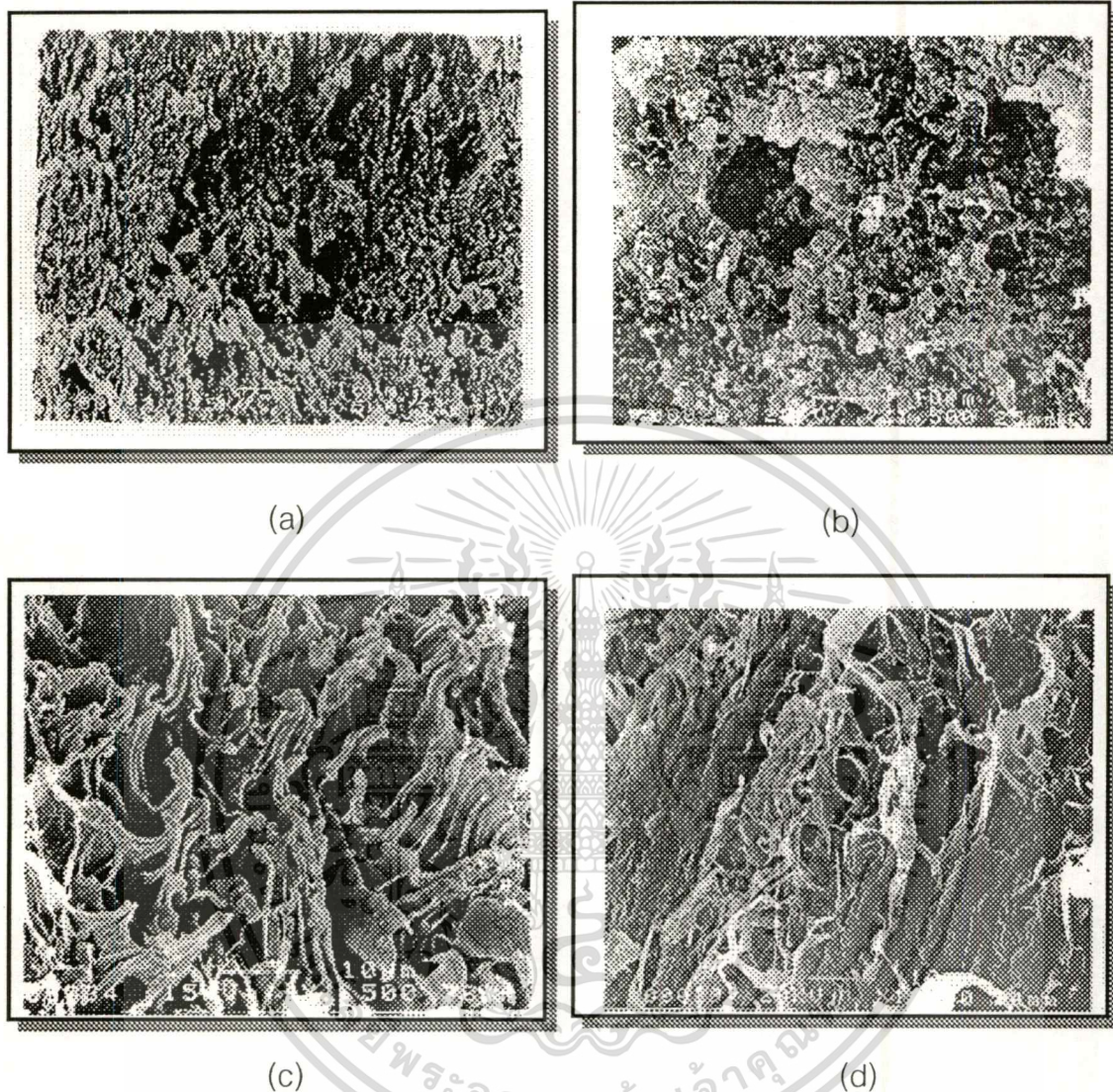
รูปที่ ๑.๒ แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE/SBS ที่อัตราส่วน 100/0 และ 0/100 (X 1,500 เท่า)

(a) PS/LDPE/SBS : 100/0/10

(b) PS/LDPE/SBS : 100/0/30

(c) PS/LDPE/SBS : 0/100/10

(d) PS/LDPE/SBS : 0/100/30



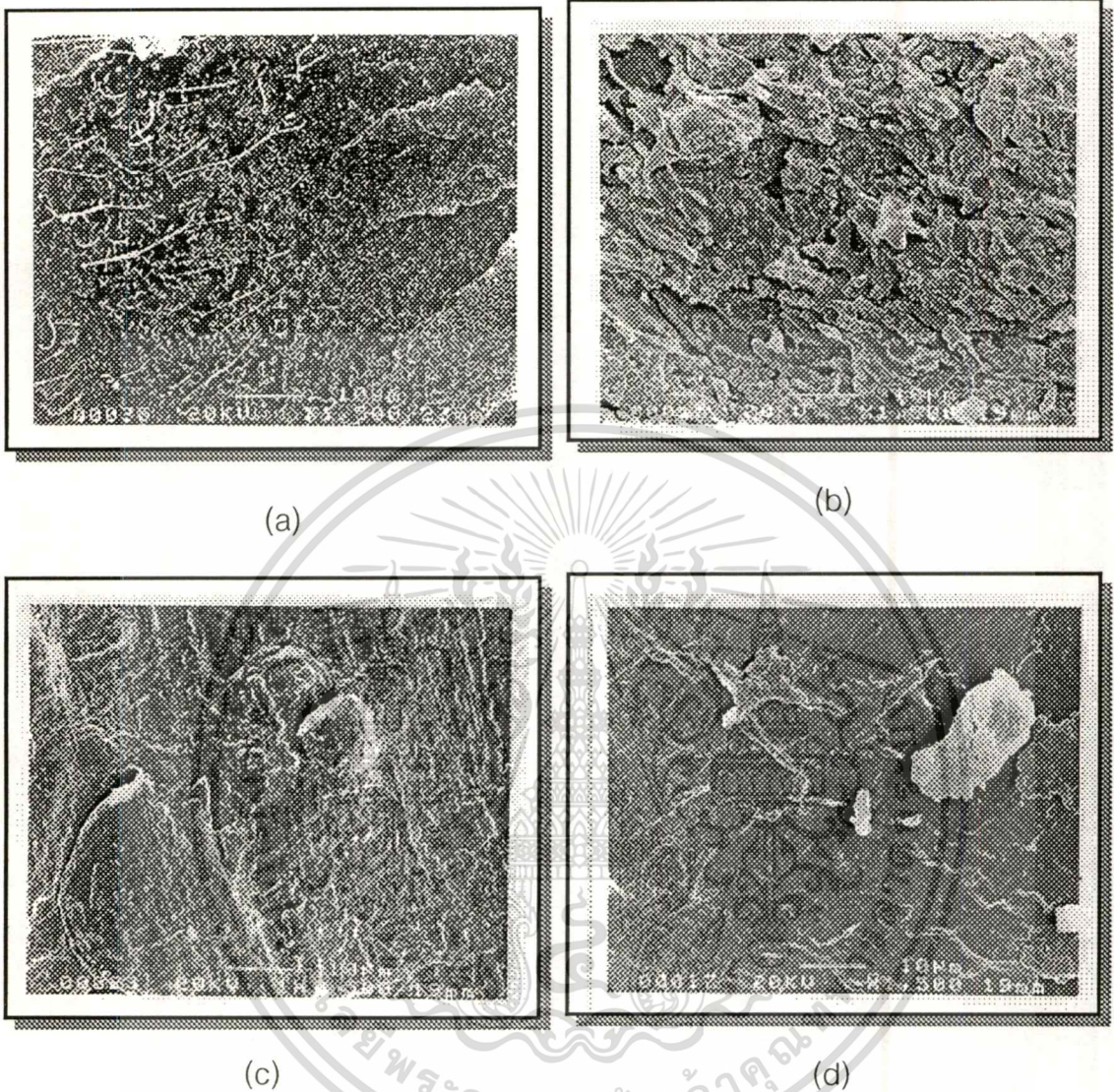
รูปที่ ๑.3 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE/SBS ที่อัตราส่วน 70/30 และ 30/70 (X 1,500 เท่า)

(a) PS/LDPE/SBS : 70/30/20

(b) PS/LDPE/SBS : 70/30/30

(c) PS/LDPE/SBS : 30/70/20

(d) PS/LDPE/SBS : 30/70/30



รูปที่ ๑.๔ แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE/EVA ที่อัตราส่วน

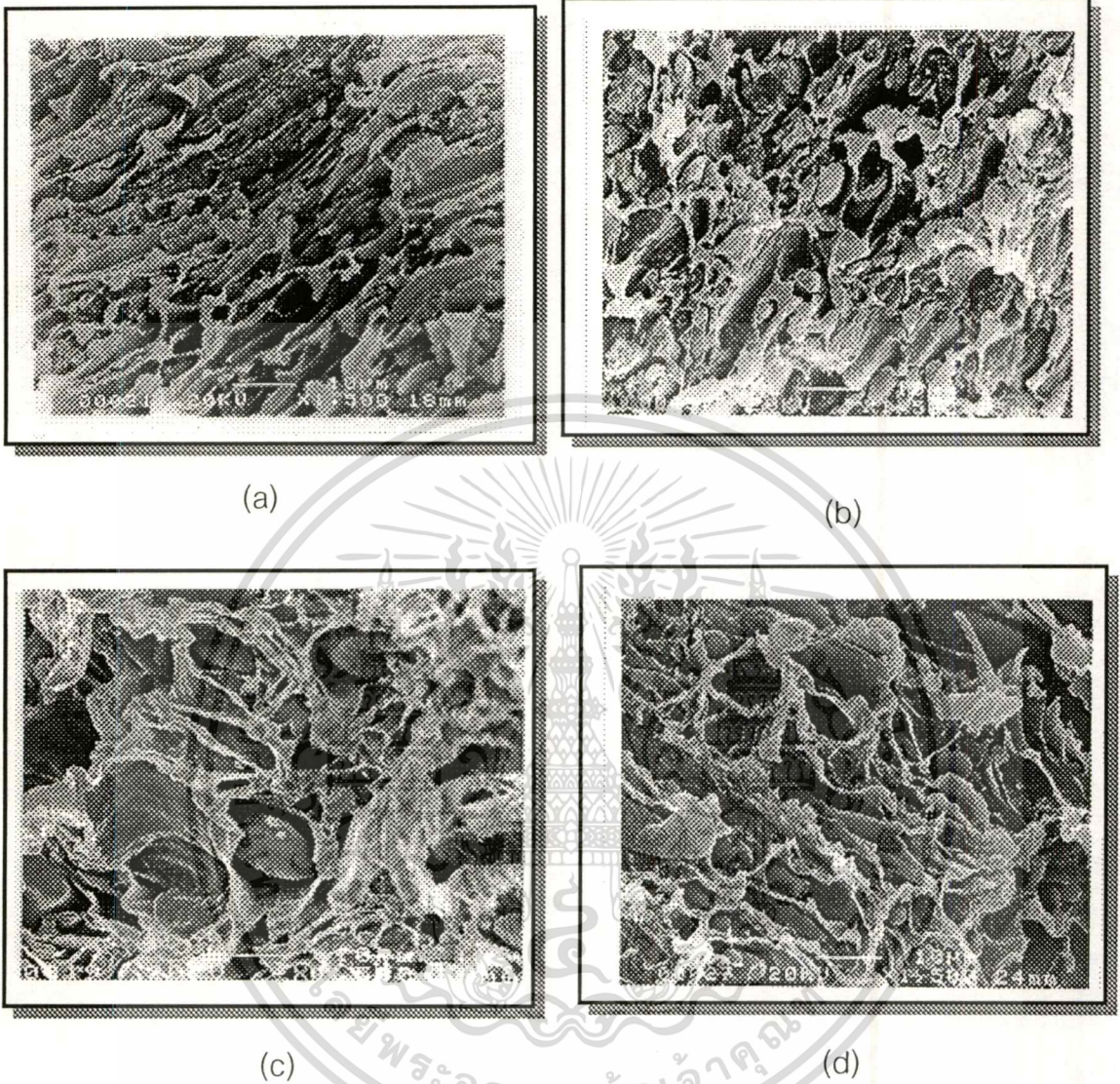
100/0 และ 0/100 (X 1,500 เท่า)

(a) PS/LDPE/EVA : 100/0/10

(b) PS/LDPE/EVA : 100/0/30

(d) PS/LDPE/EVA : 0/100/10

(c) PS/LDPE/EVA : 0/100/30



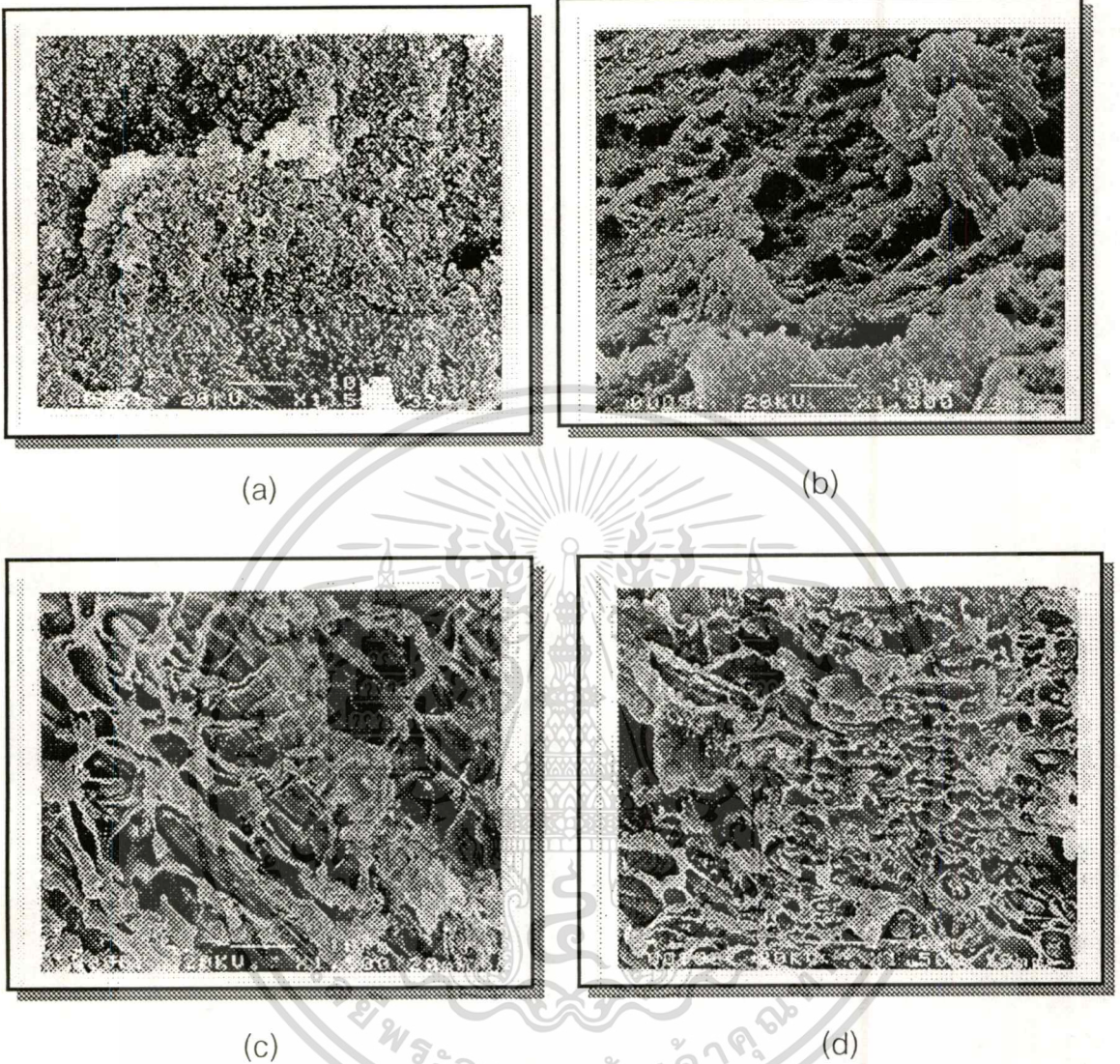
รูปที่ ๑.5 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE/EVA ที่อัตราส่วน 70/30 และ 30/70 (X 1,500 เท่า)

(a) PS/LDPE/EVA : 70/30/20

(b) PS/LDPE/EVA : 70/30/30

(c) PS/LDPE/EVA : 30/70/20

(d) PS/LDPE/EVA : 30/70/30



รูปที่ ๑.6 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE/SBS ที่อัตราส่วน

70/30 และ 30/70 เมื่อมีการฉายรังสีที่ 10 kGy (X 1,500 เท่า)

(a) PS/LDPE/SBS : 70/30/10 : 10 kGy (b) PS/LDPE/SBS : 70/30/30 : 10 kGy

(c) PS/LDPE/SBS : 30/70/10 : 10 kGy (d) PS/LDPE/SBS : 30/70/30 : 10 kGy

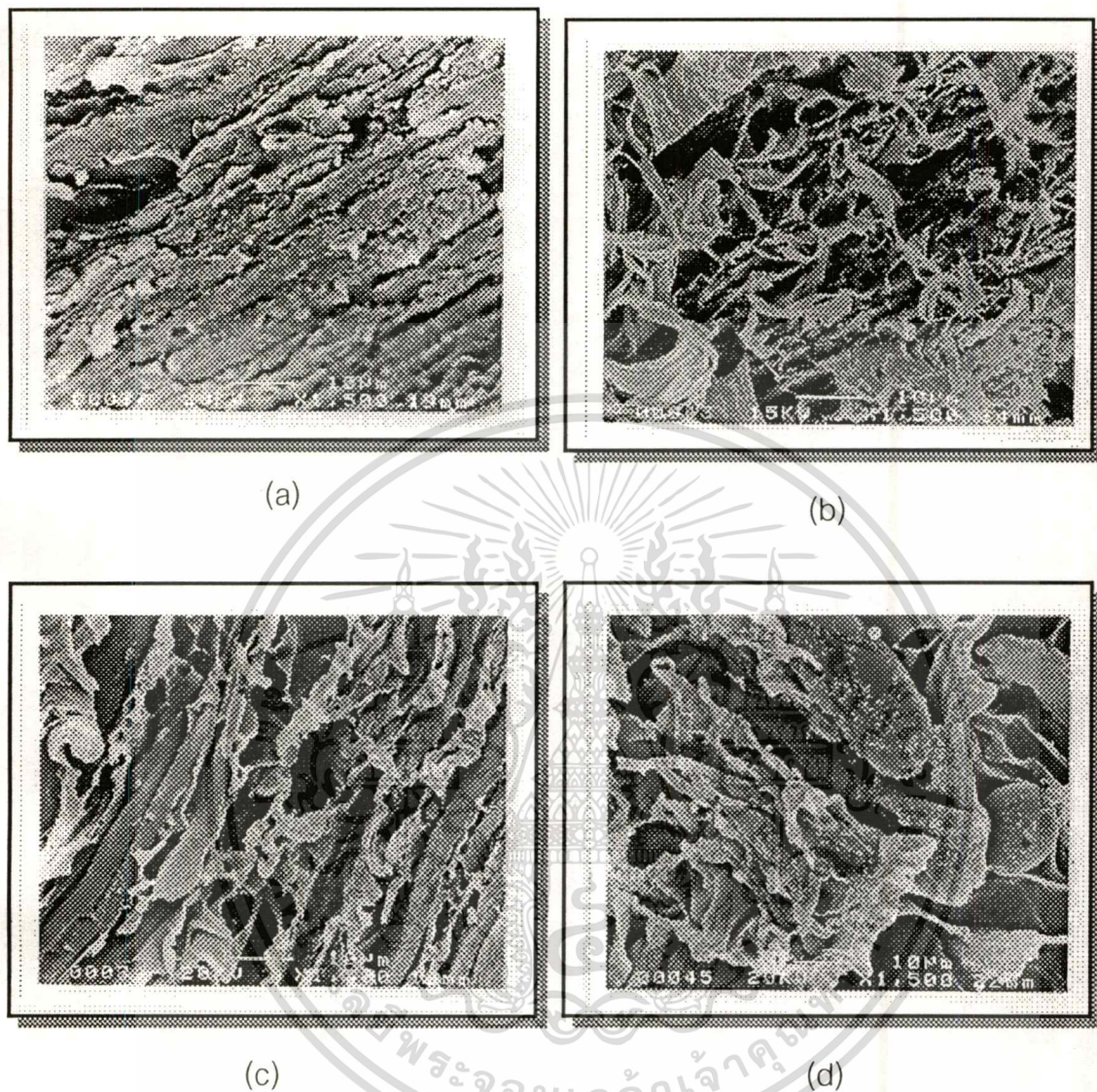


รูปที่ ๗.๗ แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE/SBS ที่อัตราส่วน 70/30 และ 30/70 เมื่อมีการฉายรังสีที่ 30 kGy (X 1,500 เท่า)

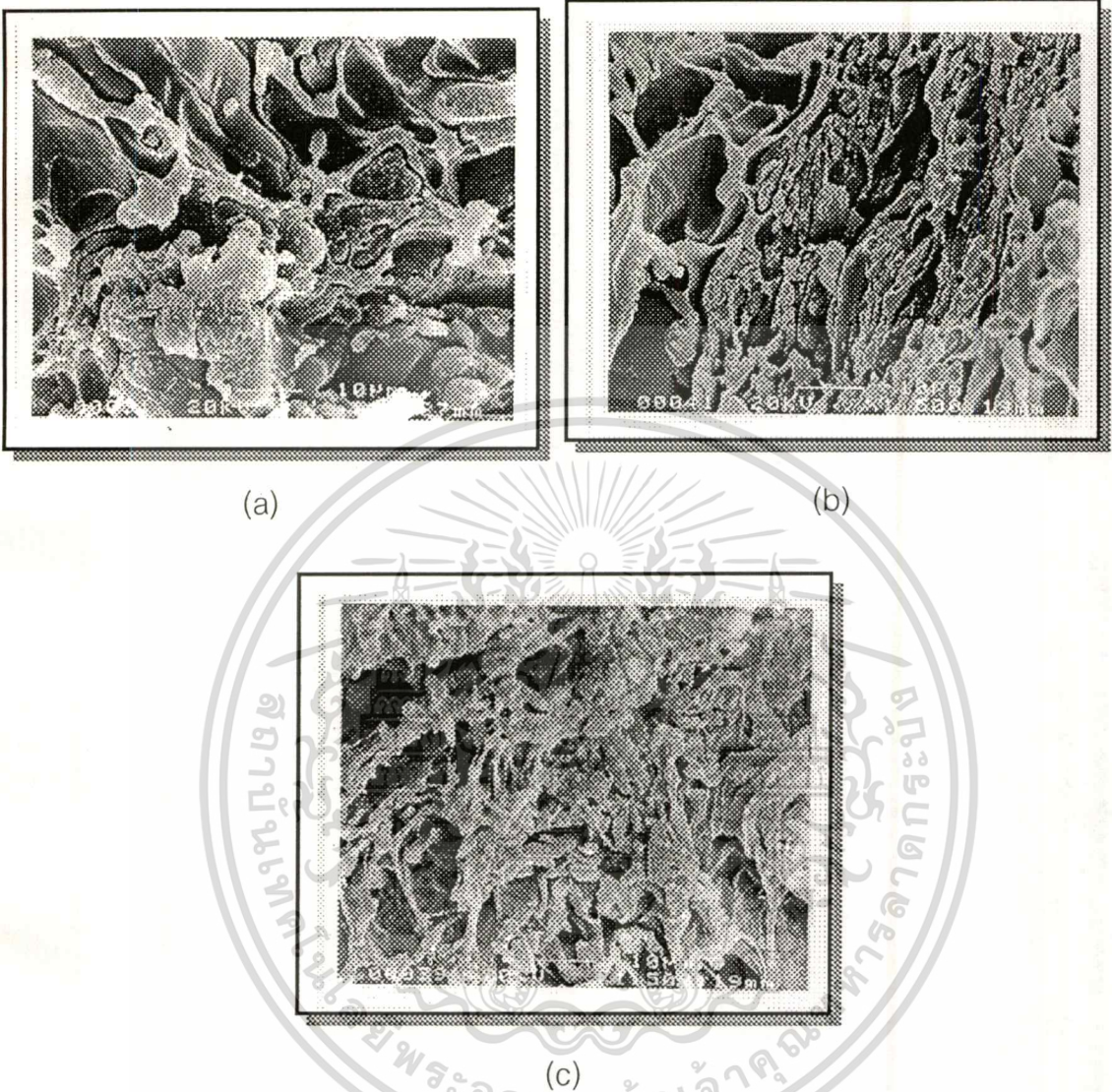
(a) PS/LDPE/SBS : 70/30/10 : 30 kGy (b) PS/LDPE/SBS : 70/30/30 : 30 kGy

(c) PS/LDPE/SBS : 30/70/30 : 30 kGy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



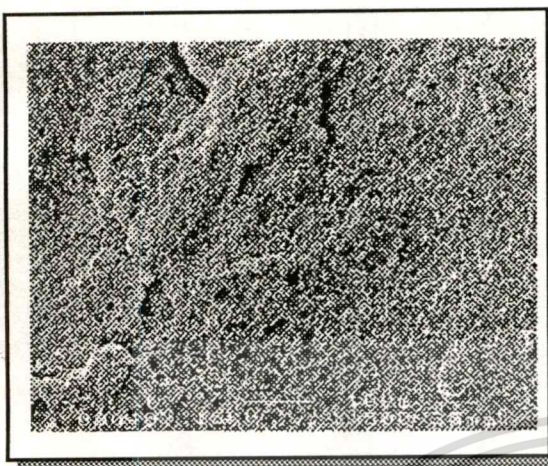
รูปที่ ๑.๘ แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE/EVA ที่อัตราส่วน 70/30 และ 30/70 เมื่อมีการฉายรังสีที่ความเข้ม 10 kGy (X 1,500 เท่า)  
 (a) PS/LDPE/EVA : 70/30/10 10 kGy    (b) PS/LDPE/EVA : 70/30/30 10 kGy  
 (c) PS/LDPE/EVA : 30/70/10 10 kGy    (d) PS/LDPE/EVA : 30/70/30 10 kGy



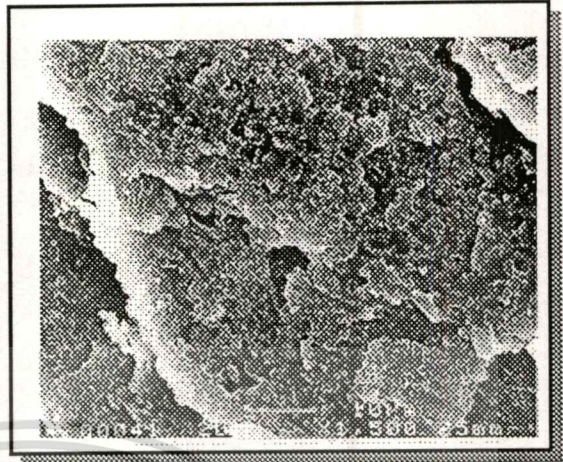
รูปที่ จ.9 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/LDPE/EVA ที่อัตราส่วน 70/30 และ 30/70 เมื่อมีการฉายรังสีที่ 30 kGy (X 1,500 เท่า)

(a) PS/LDPE/EVA : 70/30/10 30 kGy    (b) PS/LDPE/EVA : 70/30/30 30 kGy

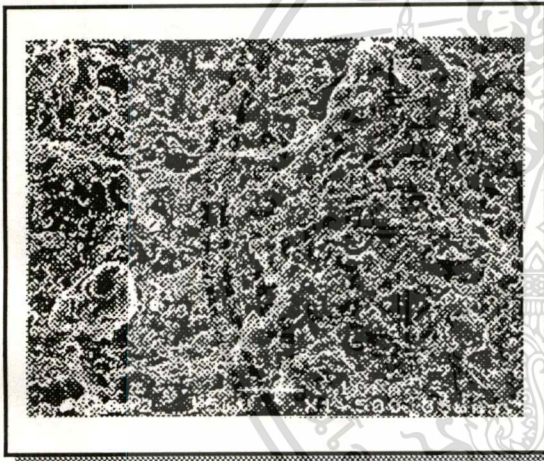
(c) PS/LDPE/EVA : 30/70/30 30 kGy



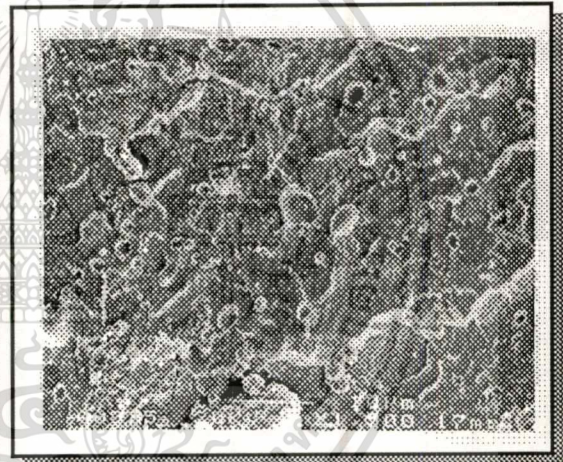
(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ ๑.10 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PS/PP/SBS (X 1,500 เท่า)

(a) PS/PP/SBS : 100/0/30

(b) PS/PP/SBS : 70/30/20

(c) PS/PP/SBS : 30/70/20

(d) PS/PP/SBS : 0/100/10

## ประวัติผู้เขียน

นางสาวสุดกมล สุวรรณพะยอม เกิดเมื่อวันที่ 7 มีนาคม พ.ศ. 2516 ที่จังหวัดนครศรีธรรมราช สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต เอกเคมี จากสถาบันราชภัฏจันทรเกษม ปีการศึกษา 2538 ปัจจุบันเป็นนักศึกษา สาขาวิชาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้