

การเลือกใช้อุปกรณ์พีซีที่เหมาะสมสำหรับยางธรรมชาติ-โพลีเอทิลีนเบสส์น็ด
ซึ่งครอสลิงค์โดยการฉายรังสีแกมมา



นายชีวกัทร พรพิมลมิตร

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

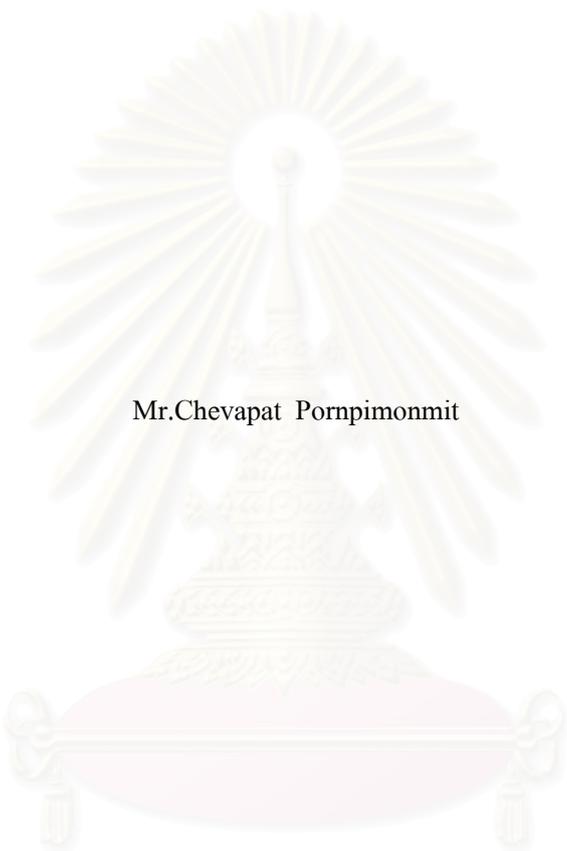
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-17-3440-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SELECTION OF A SUITABLE COMPATIBILIZER FOR NATURAL
RUBBER-POLYETHYLENE BLEND CROSSLINKED BY GAMMA IRRADIATION



Mr.Chevapat Pornpimonmit

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Nuclear Technology

Department of Nuclear Technology

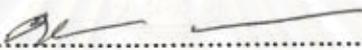
Faculty of Engineering

Academic Year 2005

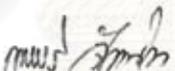
ISBN 974-17-3440-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเลือกใช้คอมเพทิบิลิเซชันที่เหมาะสมสำหรับยางธรรมชาติ-
โพลีเอทิลีนเบลนด์ซึ่งครอสลิงค์โดยการฉายรังสีแกมมา
โดย นายชีวภัทร์ พรพิมลมิตร
สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์

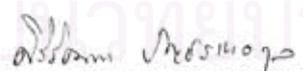
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

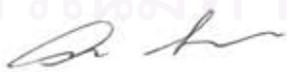

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ศิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์)

ชีวภัทร์ พรพิมลมิตร : การเลือกใช้คอมแพททิบิไลเซอร์ที่เหมาะสมสำหรับยางธรรมชาติ-โพลีเอทีลีนเบลนด์ซึ่งครอสลิงค์โดยการฉายรังสีแกมมา. (SELECTION OF A SUITABLE COMPATIBILIZER FOR NATURAL RUBBER-POLYETHYLENE BLEND CROSSLINKED BY GAMMA IRRADIATION) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ชยากริต ศิริอุปถัมภ์, 83 หน้า. ISBN 974-17-3440-9.

การวิจัยนี้เป็นการทดสอบหาคอมแพททิบิไลเซอร์ที่เหมาะสมของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติ-โพลีเอทีลีนความหนาแน่นต่ำหลังการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณต่างๆ โดยใช้คอมแพททิบิไลเซอร์สามชนิด ได้แก่ ยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำ ฟทาสิกแอนไฮไดรด์และมาเลอิกแอนไฮไดรด์ กราฟต์โพลีเอทีลีน จากการทดสอบการเข้ากันได้ของวัฏภาคยางและโพลีเอทีลีนความหนาแน่นต่ำโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่าการใช้คอมแพททิบิไลเซอร์ทำให้วัฏภาคมีขนาดเล็กลงและประสานกันได้ดีและยืนยันผลความเข้ากันได้ด้วยการหาอุณหภูมิการเป็นแก้วเพียงค่าเดียว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้คอมแพททิบิไลเซอร์ชนิดต่างๆ สามารถช่วยผสมให้ ยางธรรมชาติกับโพลีเอทีลีนความหนาแน่นต่ำเข้ากันได้ จากผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลจาก ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานต่อการยืดจนขาด ค่าโมดูลัส100%และความแข็ง พบว่าการใช้ฟทาสิกแอนไฮไดรด์ ปริมาณร้อยละ 1.0 ในสัดส่วนของยางธรรมชาติกับ โพลีเอทีลีนความหนาแน่นต่ำ 60:40 หลังการครอสลิงค์ด้วยรังสีแกมมา ปริมาณ 120 กิโลเกรย์ เป็นสัดส่วนการผสมและปริมาณรังสีที่เหมาะสมที่สุด สำหรับปริมาณคอมแพททิบิไลเซอร์ที่เหมาะสมในสัดส่วนอื่นจะแสดงค่าของสัดส่วนการบวมในตัวทำลายและดัชนีความเข้มของออกซิเจนสูงสุดที่สามารถถูกคิดไฟได้ พร้อมทั้งหาสัดส่วนความเป็นเจลเพื่อยืนยันผลการครอสลิงค์ด้วยรังสีแกมมาในแต่ละเงื่อนไข

ภาควิชา นิเวศลิขร์เทคโนโลยี
สาขาวิชา นิเวศลิขร์เทคโนโลยี
ปีการศึกษา 2548

ลายมือชื่อนิสิต.....ชีวภัทร์ พรพิมลมิตร
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....ชยากริต ศิริอุปถัมภ์

##4670651721 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD: NATURAL RUBBER / LOW DENSITY POLYETHYLENE / COMPATIBILIZER / LIQUID NATURAL RUBBER / PHTHALIC ANHYDRIDE / MALEIC ANHYDRIDE GRAFTED POLYETHYLENE / RADIATION CROSSLINKED

CHEVAPAT PORNPIMONMIT : SELECTION OF A SUITABLE COMPATIBILIZER FOR NATURAL RUBBER-POLYETHYLENE BLEND CROSSLINKED BY GAMMA IRRADIATION. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. CHYAGRIT SIRI-UPATHUM, 83 pp. ISBN 974-17-3440-9.

A study of a suitable compatibilizer for natural rubber (NR) and low density polyethylene (LDPE) was conducted. Compatibilizers are selected from: liquid natural rubber (LNR), phthalic anhydride (PA) and maleic anhydride grafted PE (MA-g-PE). The NR/LDPE blend at different concentration of the stabilizers so obtained were investigated by their photomicrographs using a scanning electron microscope (SEM) and their glass transition temperatures (T_g) by a differential scanning calorimetry (DSC). It was found that PA exhibited the best compatibilizer at a concentration of 1%, in 60/40 NR/LDPE after radiation crosslinked at 120 kGy. Mechanical properties, gel fractions, limiting oxygen index of the blends at various ratio with those mentioned compatibilizers at different concentrations were also determined to confirm the obtained results.



Department Nuclear Technology
Field of study Nuclear Technology
Academic year 2005

Student's signature.....*Chevapat P.*.....
Advisor's signature.....*Chyagrit S.*.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่ ความเข้าใจและกำลังใจอย่างดียิ่ง จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอพระคุณ รองศาสตราจารย์ เนรศรี จันทน์ขาว ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาตรวจสอบ แนะนำ เพื่อแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้อง

ขอกราบขอพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ให้โอกาส ให้ความกรุณา ให้คำปรึกษาและคำแนะนำ ด้วยความห่วงใยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ คุณมานิตย์ ช้อนสุข และ สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine สำหรับงานวิจัยเป็นอย่างดี

เนื่องจากทุนในการศึกษาระดับมหาบัณฑิตส่วนหนึ่งได้รับทุนอุดหนุนการศึกษาจากสมาคมนิสิตเก่าแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากบัณฑิตวิทยาลัย จึงขอขอบคุณสมาคมนิสิตเก่าแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและบัณฑิตวิทยาลัย มาไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณ คุณธนัญชัย พิรุณพันธ์ และ คุณวรรณวิมล ปาสาณพันธ์ สำหรับคำปรึกษาและคำแนะนำ ตลอดจนให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สารเคมี (Maleic anhydride) สำหรับงานวิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณคนัมพร อินทร์เนตร สำหรับความห่วงใยที่มีให้กันเสมอ พร้อมทั้งคอยเป็นกำลังใจและแรงผลักดัน ให้ผู้วิจัยผ่านช่วงเวลาที่ยากลำบากต่างๆไปได้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ รวมทั้งบุคลากรทุกคนในภาควิชานิเวศวิทยเทคโนโลยี ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือ พร้อมทั้งกำลังใจที่ดีตลอดมา

ขอกราบขอพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่คอยให้กำลังใจทำให้งานวิจัยนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ประโยชน์อันใดที่เกิดจาก งานวิจัยและวิทยานิพนธ์นี้ เป็นผลมาจากความกรุณาของท่าน ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 โครงสร้างและคุณสมบัติของยางธรรมชาติ.....	5
2.1.1 ยางธรรมชาติ.....	5
2.1.2 คุณสมบัติของยางธรรมชาติ.....	6
2.1.3 โครงสร้างหลักที่มีผลต่อคุณสมบัติของยางธรรมชาติ.....	6
2.2 โพลีเอทีลีน.....	8
2.2.1 โพลีเอทีลีนความหนาแน่นต่ำ.....	9
2.3 เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์.....	10
2.3.1 การเปรียบเทียบเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์กับเทอร์โมเซตรับเบอร์.....	11
2.3.2 ข้อดีของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์เมื่อเปรียบเทียบกับยาง.....	12
2.3.3 ความเข้ากันได้ของการผสมโพลีเมอร์.....	13
2.4 คอมแพททิบีไลเซอร์.....	14

2.4.1 การใช้โคโพลิเมอร์แบบกราฟต์และบล็อกเป็นคอมแพทิบิไลเซอร์.....	15
2.4.2 การใช้โพลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นคอมแพทิบิไลเซอร์.....	15
2.4.3 การใช้ปฏิกิริยารีดอกทีฟแบบลิ้นดเป็นคอมแพทิบิไลเซอร์.....	16
2.5 การประเมินความเข้ากันของโพลิเมอร์ผสม.....	16
2.5.1 การตรวจวัดอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน.....	16
2.5.2 การตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน.....	17
2.6 ขงธรรมชาติโมเลกุลต่ำ.....	19
2.6.1 การเตรียมขงธรรมชาติโมเลกุลต่ำจากผลพลอยได้จากกรรมวิธีการผลิตน้ำยางข้น.....	19
2.6.2 การเตรียมขงธรรมชาติโมเลกุลต่ำด้วยวิธีทางกลโดยใช้การบดขยงและความร้อน.....	20
2.6.3 การเตรียมขงธรรมชาติโมเลกุลต่ำด้วยวิธีทางเคมีจากน้ำยางข้น.....	21
2.7 คอมแพทิบิไลเซอร์ฟทาสิกแอนไฮไดรด์.....	22
2.8 คอมแพทิบิไลเซอร์มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์โพลิเอทีลีน.....	24
2.9 ต้นกำเนิดรังสีแกมมา.....	25
2.10 ทฤษฎีรังสีกับโพลิเมอร์.....	26
2.11 ทฤษฎีการครอสลิงค์โดยพลังงานรังสี.....	28
2.12 ผลของออกซิเจนที่มีต่อการครอสลิงค์.....	29
2.13 การเปรียบเทียบการครอสลิงค์โดยวิธีการทางรังสีและทางเคมี.....	30
3. วัสดุอุปกรณ์ สารเคมีและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	32
3.1 การเตรียม NR/LDPE blend และกระบวนการขึ้นรูป.....	32
3.2 กระบวนการฉายรังสี NR/LDPE blend ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปแล้ว.....	41
3.3 การประเมินการทดสอบความเข้ากันได้ของ NR/LDPE blend	42
3.4 การทดสอบความต้านทานแรงดึง ความต้านทานต่อการยืดจนขาด และค่าโมดูลัส100% ของ NR/LDPE blend.....	43
3.5 การทดสอบความแข็งของ NR/LDPE blend.....	44
3.6 การทดสอบสัดส่วนความเป็นเจลของ NR/LDPE blend.....	45
3.7 การทดสอบสัดส่วนการบวมน้ำมันของ NR/LDPE blend.....	47

3.8 การทดสอบดัชนีความเข้มของก๊าซออกซิเจนสูงสุดที่สามารถทำให้ ถูกติดไฟได้ของ NR/LDPE blend.....	48
4. ผลการทดลอง.....	50
4.1 ผลการศึกษาความเข้ากันได้ของ NR/LDPE blend.....	50
4.2 ผลการศึกษาค่าความต้านทานแรงดึงของ NR/LDPE blend โดยการเปลี่ยนแปลงชนิดและปริมาณของคอมแพททิบิไลเซอร์.....	52
4.3 ผลการศึกษาค่าความต้านทานต่อการยืดขนาดของ NR/LDPE blend โดยการเปลี่ยนแปลงชนิดและปริมาณของคอมแพททิบิไลเซอร์.....	54
4.4 ผลการศึกษาค่าโมดูลัส 100% ของ NR/LDPE blend โดยการเปลี่ยนแปลงชนิดและปริมาณของคอมแพททิบิไลเซอร์.....	56
4.5 ผลการศึกษาค่าความแข็งของ NR/LDPE blend โดยการ เปลี่ยนแปลงชนิดและปริมาณของคอมแพททิบิไลเซอร์.....	58
4.6 ผลการศึกษาสัดส่วนความเป็นเจลของ NR/LDPE blend โดยการเปลี่ยนแปลงชนิดและปริมาณของคอมแพททิบิไลเซอร์.....	60
4.7 ผลการศึกษาสัดส่วนการบวมน้ำมันของ NR/LDPE blend โดยการเปลี่ยนแปลงชนิดและปริมาณของคอมแพททิบิไลเซอร์.....	62
4.8 ผลการศึกษาดัชนีความเข้มของก๊าซออกซิเจนสูงสุดที่สามารถทำให้ถูก ติดไฟได้ของ NR/LDPE blend โดยการเปลี่ยนแปลงชนิดและ ปริมาณของคอมแพททิบิไลเซอร์.....	64
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	67
5.1 ผลความเข้ากันได้ของ NR/LDPE blend.....	67
5.2 ผลการทดสอบสัดส่วนความเป็นเจลของ NR/LDPE blend ที่เงื่อนไขต่างๆ หลังการฉายรังสีที่ปริมาณต่างๆ.....	68
5.3 ผลของการเลือกใช้ชนิดและปริมาณของคอมแพททิบิไลเซอร์ที่สัดส่วน ของ NR/LDPE blend หลังการฉายรังสีที่ปริมาณต่างๆ.....	69
5.4 ผลการทดสอบสัดส่วนการบวมน้ำมันของ NR/LDPE blend ที่เงื่อนไขต่างๆ หลังการฉายรังสีที่ปริมาณต่างๆ.....	72

5.5 ผลการทดสอบดัชนีความเข้มของก๊าซออกซิเจนสูงสุดที่สามารถ ทำให้ลุกติดไฟได้ (LOI) ของ NR/LDPE blend ที่เงื่อนไขต่างๆ หลังการฉายรังสีที่ปริมาณต่างๆ.....	72
5.6 สรุปผลการเลือกใช้คอมแพทิบิไลเซอร์ที่เหมาะสมของ NR/LDPE blend หลังการฉายรังสีที่ปริมาณต่างๆ.....	73
5.7 ข้อเสนอแนะ.....	73
รายการอ้างอิง.....	75
ภาคผนวก.....	78
ภาคผนวก ก Possible reaction of NR , LNR and PE to obtain (NR , LNR~g~PE) Using Liquid Natural Rubber as compatibilizer.....	79
ภาคผนวก ข Grafting reaction to obtain graft copolymer of NR and PE with PA linkage (NR~PA~PE) Using Pathalic Anhydride as compatibilizer.....	80
ภาคผนวก ค Grafting reaction to obtain graft copolymer of NR and PE with MA linkage (NR~MA~PE) Using Maleic Anhydride as compatibilizer.....	81
ภาคผนวก ง Grafting reaction to obtain graft copolymer of NR and PE with MA linkage (NR~MA~PE) Using MA~g~PE as compatibilizer.....	82

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	แสดงปริมาณรังสีเพื่อจุดประสงค์ต่างๆของการใช้ประโยชน์..... 27
2.2	ชนิดของโพลีเมอร์กับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเมื่อฉายรังสีในสูญญากาศ..... 28
2.3	ค่า G(X) และค่า G(S) ของโพลีเมอร์ชนิดต่างๆเมื่อฉายรังสีที่อุณหภูมิห้องภายใต้สูญญากาศหรือบรรยากาศไนโตรเจน..... 30
3.1	คุณสมบัติของเม็ดพลาสติกโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ POLENE D2022 32
3.2	คุณสมบัติของมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์โพลีเอทิลีน DuPont TM Fusabond ^R E MB226DE..... 33
3.3	คุณสมบัติทางกายภาพของฟทาลิกแอนไฮไดรด์ (phthalic anhydride AR-grade).. 33
3.4	อัตราการผสมยางธรรมชาติ/โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ โดยปราศจากคอมแพทิบิไลเซอร์..... 37
3.5	อัตราการผสมยางธรรมชาติ/โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ โดยใช้ยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำเป็นคอมแพทิบิไลเซอร์..... 37
3.6	อัตราการผสมยางธรรมชาติ/โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ โดยใช้ฟทาลิกแอนไฮไดรด์เป็นคอมแพทิบิไลเซอร์..... 38
3.7	อัตราการผสมยางธรรมชาติ/โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ โดยใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์ กราฟต์โพลีเอทิลีนเป็นคอมแพทิบิไลเซอร์..... 39

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	5
2.2	8
2.3	9
2.4	11
2.5	12
2.6	13
2.7	14
2.8	15
2.9	18
2.10	20
2.11	21
2.12	21
2.13	23
2.14	23
2.15	24
2.16	26
2.17	27
3.1	34
3.2	34
3.3	35
3.4	35
3.5	40

3.6 เครื่องฉายรังสีแกมมาจากโคบอลต์-60 ของบริษัท ISOTRON Co.,Ltd.....	41
3.7 เครื่องฉายรังสีแกมมาจากโคบอลต์-60 รุ่นBSV-06 ของบริษัท Institute of Isotope Co.,Ltd. Hungary. จากภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	41
3.8 เครื่องปิดผนึกสุญญากาศ House-hold vacuum sealer, D2-280A, Brother, China....	42
3.9 เครื่อง Universal Testing Machines ของบริษัท LLOYD INSTRUMENTS Ltd., รุ่น LLOYD LR5K.....	43
3.10 เครื่องซังอิเล็กตรอนิกส์ 5 ตำแหน่ง.....	45
3.11 ชุดอุปกรณ์การทดสอบสัดส่วนความเป็นเจล.....	46
3.12 เครื่อง Oxygen Index Tester.....	48
4.1 อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของการผสม NR/LDPE ในสัดส่วน 60/40 โดยใช้ยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำเป็นคอมแพทิบิไลเซอร์ในปริมาณ 15%.....	50
4.2 อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของการผสม NR/LDPE ในสัดส่วน 60/40 โดยใช้ฟทาลิกแอนไฮไดรด์เป็นคอมแพทิบิไลเซอร์ในปริมาณ 1.0%.....	51
4.3 อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของการผสม NR/LDPE ในสัดส่วน 60/40 โดยใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์โพลีเอทีลีนเป็นคอมแพทิบิไลเซอร์ในปริมาณ 32%.....	51
4.4 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยาย 3000 เท่าของการผสม NR/LDPE ในสัดส่วน 75/25 (ก) ปราศจากคอมแพทิบิไลเซอร์ (ข) ยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำ 10% (ค) ฟทาลิกแอนไฮไดรด์ 1.0% (ง) มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์โพลีเอทีลีน 32%.....	52
4.5 แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อค่าความต้านทานแรงดึงเมื่อใช้ยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำเป็นคอมแพทิบิไลเซอร์ในปริมาณต่างๆและที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE.....	53
4.6 แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อค่าความต้านทานแรงดึงเมื่อใช้ฟทาลิกแอนไฮไดรด์เป็นคอมแพทิบิไลเซอร์ในปริมาณต่างๆและที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE.....	53
4.7 แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อค่าความต้านทานแรงดึงเมื่อใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์โพลีเอทีลีนเป็นคอมแพทิบิไลเซอร์ในปริมาณต่างๆและที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE.....	54

4.8	แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อค่าความต้านทานต่อการยืดจนขาดเมื่อใช้ยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำเป็นคอมแพททึบิไลเซอร์ในปริมาณต่างๆ และที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE.....	55
4.9	แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อค่าความต้านทานต่อการยืดจนขาดเมื่อใช้ฟทาลิกแอนไฮไดรด์เป็นคอมแพททึบิไลเซอร์ในปริมาณต่างๆ และที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE.....	55
4.10	แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อค่าความต้านทานต่อการยืดจนขาดเมื่อใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์โพลีเอทีลีนเป็นคอมแพททึบิไลเซอร์ในปริมาณต่างๆและที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE.....	56
4.11	แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อค่าโมดูลัส 100% เมื่อใช้ยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำเป็นคอมแพททึบิไลเซอร์ในปริมาณต่างๆ และที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE.....	57
4.12	แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อค่าโมดูลัส 100% เมื่อใช้ฟทาลิกแอนไฮไดรด์เป็นคอมแพททึบิไลเซอร์ในปริมาณต่างๆ และที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE.....	57
4.13	แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อค่าโมดูลัส 100% เมื่อใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์โพลีเอทีลีนเป็นคอมแพททึบิไลเซอร์ในปริมาณต่างๆและที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE.....	58
4.14	แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อค่าความแข็งเมื่อใช้ยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำเป็นคอมแพททึบิไลเซอร์ในปริมาณต่างๆและที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE.....	59
4.15	แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อค่าความแข็งเมื่อใช้ฟทาลิกแอนไฮไดรด์เป็นคอมแพททึบิไลเซอร์ในปริมาณต่างๆและที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE.....	59
4.16	แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อค่าความแข็งเมื่อใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์โพลีเอทีลีนเป็นคอมแพททึบิไลเซอร์ในปริมาณต่างๆและที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE.....	60
4.17	แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อค่าความเป็นเจลเมื่อใช้ยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำเป็นคอมแพททึบิไลเซอร์ในปริมาณต่างๆและที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE.....	61
4.18	แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อค่าความเป็นเจลเมื่อใช้ฟทาลิกแอนไฮไดรด์เป็นคอมแพททึบิไลเซอร์ในปริมาณต่างๆและที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE.....	61

4.19	แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อค่าความเป็นเจลเมื่อใช้ มาเลอิกแอนไฮโดรด์กราฟต์โพลีเอทิลีนเป็นคอมแพทิบิไลเซอร์ ในปริมาณต่างๆและที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE.....	62
4.20	แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อสัดส่วนการบวมน้ำมันเมื่อใช้ ยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำเป็นคอมแพทิบิไลเซอร์ในปริมาณ 10% และที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE.....	63
4.21	แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อสัดส่วนการบวมน้ำมันเมื่อใช้ ฟทาลิกแอนไฮโดรด์เป็นคอมแพทิบิไลเซอร์ในปริมาณ 1.0% และที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE.....	63
4.22	แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อสัดส่วนการบวมน้ำมันเมื่อใช้ มาเลอิกแอนไฮโดรด์กราฟต์โพลีเอทิลีนเป็นคอมแพทิบิไลเซอร์ ในปริมาณ 32% และที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE.....	64
4.23	แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อค่า LOI เมื่อใช้ยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำ เป็นคอมแพทิบิไลเซอร์ในปริมาณ 10% และที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE.....	65
4.24	แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อค่า LOI เมื่อใช้ฟทาลิกแอนไฮโดรด์ เป็นคอมแพทิบิไลเซอร์ในปริมาณ 1.0% และที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE.....	65
4.25	แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อค่า LOI เมื่อใช้มาเลอิกแอนไฮโดรด์กราฟต์ โพลีเอทิลีนเป็นคอมแพทิบิไลเซอร์ในปริมาณ 32% และที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE.....	66

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

ในปัจจุบันโพลีเมอร์ผสมเป็นเทคนิคที่ใช้ในการแก้ปัญหาทางอุตสาหกรรม เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุให้ใช้งานด้านอุตสาหกรรมได้อย่างกว้างขวาง การเตรียมเทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับโพลีเมอร์นั้น นิยมกันมากในปัจจุบัน เนื่องจากจะทำให้ได้วัสดุที่มีคุณสมบัติโดยทั่วไปคล้ายยาง แต่สามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่ายเหมือนกับวัสดุพลาสติก อีกทั้งยังมีข้อดีในแง่การนำรีไซเคิลใหม่ได้ นอกจากนี้การผลิตวัสดุประเภทนี้จะมี ความสามารถในการผลิตค่อนข้างสูง เนื่องจากไม่มีขั้นตอนการทำคอมพาวด์ (compound) และยัง ง่ายต่อการนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องเอ็กทรูชัน (extrusion) อีกด้วย วัตถุประสงค์ของการทำโพลีเมอร์ ผสมคือ

- 1) เพื่อให้ได้วัสดุชนิดใหม่ โดยไม่ต้องทำการสังเคราะห์ใหม่ ดังนั้นจึงเป็นการ ประหยัดเวลาและลดต้นทุน
- 2) เพื่อรวมคุณสมบัติที่ดีของโพลีเมอร์แต่ละชนิดเข้าไว้ด้วยกัน โดยคุณสมบัติดังกล่าว ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนในการผสม

แต่อย่างไรก็ตามการผสมโพลีเมอร์สองชนิดแต่เพียงลำพังนั้น คุณสมบัติต่างๆ ของ โพลีเมอร์ที่ได้อาจไม่ดีเท่าที่ควร ทั้งนี้เนื่องมาจากข้อจำกัดในการเข้ากันได้ของโพลีเมอร์ผสม ดังนั้นการใช้คอมแพทิบิไลเซอร์ (compatibilizer) จึงนับเป็นวิธีการหนึ่งที่ทำเพื่อให้โพลีเมอร์ทั้ง สองชนิดเข้าผสมเป็นเนื้อเดียวกันในระดับโมเลกุล การปรับปรุงเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพ ใให้กับโพลีเมอร์ผสมเป็นการเพิ่มประโยชน์ในการนำมาใช้งานได้อย่างหลากหลาย การปรับปรุง คุณสมบัติของโพลีเมอร์ผสมด้วยกระบวนการฉายรังสีนับว่าเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่ได้รับการนิยมนิย มเพิ่มขึ้น เนื่องจากกระบวนการทางรังสีมีคุณสมบัติได้เปรียบเหนือกว่าวิธีการแบบดั้งเดิมคือ สามารถควบคุมกระบวนการได้ง่าย ไม่ต้องใช้สารเร่งปฏิกิริยาและไม่ทำให้เกิดความร้อนสะสม โดยทั่วไปรังสีที่ใช้คือรังสีแกมมาจากธาตุโคบอลต์-60 หรือลำอิเล็กตรอนจากเครื่องเร่งอนุภาครังสีสามารถทำให้วัสดุโพลีเมอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่างๆ แต่การเปลี่ยนแปลงจะ เกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณรังสีที่วัสดุได้รับและชนิดของโพลีเมอร์เป็นสำคัญ

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1.2.1 เพื่อหาชนิดและปริมาณของคอมแพททิบิไลเซอร์ที่เหมาะสมสำหรับการผสมยางธรรมชาติกับโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (NR/LDPE)

1.2.2 เพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกลของ NR/LDPE เบสหลังการครอสลิงค์โดยรังสีแกมมา

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.3.1 ทดลองหาคอมแพททิบิไลเซอร์ที่เหมาะสมระหว่าง NR/LDPE เลืออกจากยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำ, ฟทาสิกแอนไฮไดรด์ และ มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์โพลีเอทิลีน

1.3.2 ศึกษาผลของปริมาณรังสีที่มีต่อคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกลของ NR/LDPE เบสหลังที่ใช้คอมแพททิบิไลเซอร์ ชนิดและปริมาณต่างๆ

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาและค้นคว้าเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 หาชนิดและปริมาณของคอมแพททิบิไลเซอร์ที่เหมาะสมสำหรับ NR/LDPE เบสหลัง

1.4.3 ทำการขึ้นรูป NR/LDPE เบสหลังให้เป็นแผ่น

1.4.4 ฉายรังสีในปริมาณต่างๆเพื่อให้เกิดการครอสลิงค์

1.4.5 ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกลหลังการครอสลิงค์

1.4.6 นำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์

1.4.7 สรุปและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.1 Ibrahim Abdullam, Sahrim Ahmad และ Che Som Sulaiman [1] ได้ศึกษาถึงการผสมยางธรรมชาติ (NR) กับโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ในอัตราส่วนต่างๆ โดยเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิตยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำ (LNR) ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ พบว่าในอัตราส่วน 50/50 ของ NR/LLDPE โดย 20% ของ LNR ให้คุณสมบัติเชิงกลสูงสุด

1.5.2 H.M. Dahlan, MD. Khairul Zarman และ A. Ibrahim [2] ได้ศึกษาถึงผลกระทบการฉายอิเล็กตรอนปีระหว่าง ยางธรรมชาติ (NR) กับ โพลีเอทีลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ในอัตราส่วน 60/40 โดยใช้ยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำ เป็นคอมแพททิบไลเซอร์ โดยเปรียบเทียบผลต่างระหว่าง LNR-6 กับ LNR-16 โดยมีน้ำหนักโมเลกุล 4.80×10^5 และ 9.25×10^4 ตามลำดับโดยตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกล พบว่า LNR-6 ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุล 4.80×10^5 ให้คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกลสูงกว่า

1.5.3 วราภรณ์ ตันรัตนกุล และ วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา [3] ได้ศึกษาถึงการทำยางชนิดใหม่ที่มียางธรรมชาติ (NR) เป็นองค์ประกอบหลักโดยผสมกับโพลีเอทีลีนความหนาแน่นต่ำมาก (ULDPE) ซึ่งมีความหนาแน่น 0.868 กรัม/ซม³ ซึ่ง NR ผสมกับ ULDPE ในอัตราส่วน 70/30 60/40 และ 50/50 (wt/wt) ด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง วัลคาไนซ์ด้วยเครื่องอัด ตรวจสอบคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติทางกายภาพของยางผสมชนิดใหม่ โดยเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของยางผสมระหว่าง NR และ ยางเอสปีอาร์ (SBR) พบว่ายางผสม NR/ULDPE มีคุณสมบัติเชิงกลสูงกว่ายางผสม NR/SBR

1.5.4 ปาริชาติ ลิมศิลา [4] ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของน้ำหนักโมเลกุลและตัวช่วยประสานที่มีผลต่อการผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันและคุณสมบัติของโพลีเอทีลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่ผสมกับยางธรรมชาติ โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวช่วยประสาน และปริมาณส่วนผสมของโพลีเอทีลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นตรงและยางธรรมชาติในส่วนที่ผสมกัน จากการศึกษาพบว่า การเติมตัวช่วยประสานทำให้การกระจายตัวของยางธรรมชาติกระจายตัวได้ดีขึ้น ซึ่งบอกให้ทราบว่ามีการเพิ่มของแรงกระทำระหว่างสารทั้งสองที่เนื่องมาจากมาเลอิกแอนไฮไดรด์

1.5.5 บุญนีย์ จันทรงาม [5] ได้ศึกษาถึงพฤติกรรมการแตกหักของโพลีเมอร์ผสมระหว่างโพลีเอทีลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) กับยางธรรมชาติ (NR) โดยวิธีการผสมแบบมีอันตรกิริยา ด้วยการใส่ตัวริเริ่มปฏิกิริยาไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (DCP) และสารช่วยผสมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA) โดยศึกษาจากคุณสมบัติเชิงกลของโพลีเมอร์ผสมคือ คุณสมบัติการฉีกขาด คุณสมบัติการกระแทกและค่าความยืดจนขาด ต่อการเพิ่มปริมาณของ MA, DCP และยางธรรมชาติ ในอัตราส่วนผสม 90/10 และ 50/50 ของ LLDPE/NR พบว่าการเพิ่มขึ้นของ MA ทำให้ความต้านทานต่อการกระแทกและการฉีกขาดเพิ่มขึ้น การใส่ DCP ทำให้ค่าการกระแทกเพิ่มขึ้นแต่ค่าการฉีกขาดลดลง เนื่องจากส่วนค่าการฉีกขาดลดลงเมื่อปริมาณ NR มากขึ้น สำหรับค่าการกระแทกพบว่าปริมาณ NR มีผลต่อค่าที่ได้้น้อยมาก

1.5.6 C.P. Papadopoulou และ N.K. Kalfoglou [6] ได้ศึกษาถึงการผสมเทอร์โมพลาสติกโพลีเมอร์อัลลอยด์ระหว่าง โพลีโพรพิลีน (PP) กับโพลีเอทิลีนเทอร์เรฟทาเลต (PET) โดยใช้คอมแพทิบิไลเซอร์สามชนิดคือมาเลอิกแอนไฮไดรด์ กราฟต์โพลีโพรพิลีน (MA-g-PP), มาเลอิกแอนไฮไดรด์ กราฟต์โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (MA-g-LLDPE) และ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ กราฟต์ไฮโดรเจนเนตต์ เอสบีเอส บล็อกโคโพลีเมอร์ (MA-g-SEBS) ในปริมาณ 15% พบว่าคอมแพทิบิไลเซอร์ที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดสำหรับการผสมโพลีเมอร์อัลลอยด์ (PP/PET) ตามลำดับคือ MA-g-SEBS >> MA-g-LLDPE ≥ MA-g-PP

1.5.7 S. A. Pooley, G. S. Canessa และ B. L. Rivas [7] ได้ศึกษาถึงการเกิด ปฏิกิริยาโคโพลีเมอร์ไรซ์ตัวเอง โดยปราศจากสารเริ่มต้นปฏิกิริยา ระหว่าง ฟทาสิกแอนไฮไดรด์ กับ อะซิรีดีน หรือ 2-เมททิลเลซิรีดีน พบว่าเมื่อผ่านกระบวนการ Zwitterion copolymerization ภายใต้สภาวะไนโตรเจน ซึ่งบรรจุอยู่ในภาชนะปิดโดยการเปลี่ยนแปลงสารละลาย อะซิโตนไนติก อะซิโตน และ เบนซีน ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และทำการตรวจวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเครื่อง นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (Nuclear magnetic resonance, NMR) พบว่า ฟทาสิกแอนไฮไดรด์ กับ อะซิรีดีน หรือ 2-เมททิลเลซิรีดีน มีลักษณะเกิดการกราฟต์ระหว่างกัน โดยการใช้ฟทาสิกแอนไฮไดรด์ กับ อะซิรีดีน และสารละลายอะซิโตนไนติก จะให้เปอร์เซ็นต์การกราฟต์สูงสุด

1.5.8 H. Paulussen, H. Haitjema, R. van Asselt, P. Mylles, P. Adriaensens, J. Gelan และ D. Vanderzande [8] ได้ศึกษาถึงกลไกและลักษณะการสังเคราะห์ โพลีไอโซไทอะแนฟลีน (poly(isothianaphene)) โดยการใช้ ฟทาสิกแอนไฮไดรด์และไทโอนิง (thionating) เป็นตัวทำปฏิกิริยาจากการศึกษาพบว่า สารทำปฏิกิริยาไทโอนิงชนิดเดียวไม่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรซ์เซชันกับตัวเองได้ แต่เมื่อนำฟทาสิกแอนไฮไดรด์มาทำปฏิกิริยาร่วม จากการรวมตัวจะสามารถสังเคราะห์ โมโนเมอร์ชนิดใหม่ขึ้น ไตรไทโอฟทาสิกแอนไฮไดรด์ (tristhiophthalic anhydride) โมโนเมอร์ชนิดนี้ซึ่งวงไวดต่อการเกิดปฏิกิริยา จะไปทำให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการเชื่อมโยงกันอย่างกว้างๆ ผลจากการเกิดปฏิกิริยาจะทราบถึงกลไกการสังเคราะห์แบบใหม่ของโพลีไอโซไทอะแนฟลีน

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานของการผลิตเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ เช่น ทำเป็นฉนวนสายไฟฟ้า ยางโอริง เป็นต้น

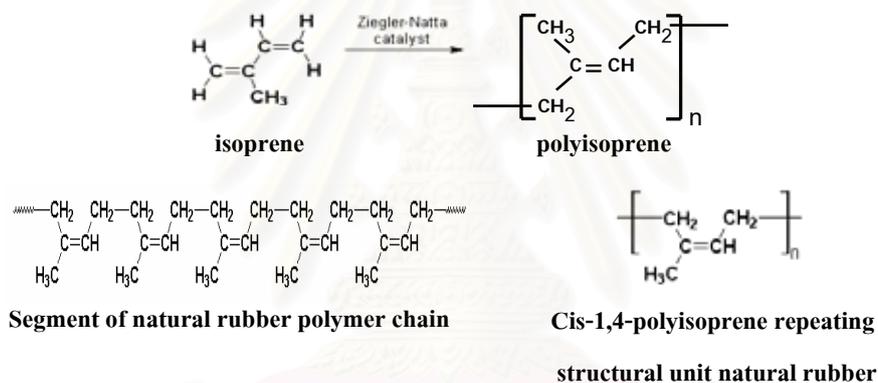
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครงสร้างและคุณสมบัติของยางธรรมชาติ

2.1.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR)

ยางธรรมชาติเป็นสารประกอบในกลุ่มโพลีเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ประกอบด้วยหน่วยย่อยชนิดเดียวกันที่ซ้ำกันเป็นจำนวนมาก โดยโครงสร้างทางเคมีของหน่วยย่อยของยางธรรมชาติประกอบด้วย คาร์บอน 5 อะตอมและไฮโดรเจน 8 อะตอม ซึ่งทางเคมีเรียกว่าไอโซพรีน (isoprene) หน่วยย่อยดังกล่าวเมื่อเกิดการเชื่อมโยงจะเรียกว่า โพลีไอโซพรีน (polyisoprene) [9]



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ

โมเลกุลของยางที่พบในธรรมชาติเป็นโพลีเมอร์ของ ซีส-1,4-โพลีไอโซพรีน (cis - 1,4- polyisoprene) เกือบทั้งหมด มีความถ่วงจำเพาะ 0.934 ที่ 20⁰ C และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อยางถูกยืดหรือเย็นตัวลง มีดัชนีหักเหของแสงเท่ากับ 1.5215–1.5238 ที่ 20⁰ C มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย ประมาณ 1.0 – 1.3 X10⁶ แต่มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลเป็นช่วงกว้างประมาณ 10⁴ – 10⁷ มีลักษณะเป็น 2 พีค (bimodal distribution) เมื่อวิเคราะห์โดยวิธีเจลเพอมีเอชันโครมาโตกราฟี พบว่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของยางจากต้นยางพันธุ์เดียวกันจะมีความคล้ายคลึงกัน เรียกได้ว่าเป็นลักษณะประจำพันธุ์ สาเหตุที่โมเลกุลยางในธรรมชาติมีลักษณะเป็นช่วงกว้างนี้ มีสมมติฐานว่าเกิดจากการแตกสาขา (branching) และการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง ทำให้เกิดเจลเฟส (gel phase) สังเกตได้ว่ายางธรรมชาติมีสารที่ไม่ใช่ยางปนอยู่ด้วย เมื่อละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ จะละลายได้ช้ามากและเมื่อกรองผ่านเยื่อกรองแล้ว นำเอาส่วนที่เหลืออยู่บนเยื่อกรองไปหาปริมาณไนโตรเจนพบว่าสูงกว่าส่วนที่ผ่านเยื่อกรองอย่างมีนัยสำคัญ

แสดงว่าโปรตีนที่ยึดเกาะกับโมเลกุลยางเป็นปัจจัยสำคัญทำให้เกิดการเชื่อมโยงและมีผลต่อโครงสร้างโมเลกุลยาง

2.1.2 คุณสมบัติของยางธรรมชาติ

ในปี 1983 Paul J. Flory ได้ให้ความหมายที่แสดงลักษณะที่เป็นเอกลักษณ์ของยางธรรมชาติเอาไว้ว่า ยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่มีการเปลี่ยนรูปได้มาก โดยไม่ถูกทำลายหรือฉีกขาด จึงมีคุณสมบัติด้านความเหนียวเหมือนว่าเป็นของเหลว ในขณะที่เดียวกันก็มีความสามารถในการคืนตัวสู่ขนาดเดิมได้ทันทีเมื่อแรงเค้นหยุดกระทำ ทำให้ยางมีคุณสมบัติของของแข็ง คือมีความยืดหยุ่น เมื่อรวมคุณสมบัติทั้งสองด้านนี้เข้าด้วยกันจึงมักเรียกยางว่าเป็น วัสดุวิสโคอีลาสติก (viscoelastic material) นอกจากนั้นยางยังมีลักษณะเด่นอื่นๆอีกหลายประการ พอสรุปได้ดังนี้ [10]

2.1.2.1 ยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ดึกดำบรรพ์คือ สามารถยืดตัว หดตัว หรือโค้งงอได้ดีและรวดเร็วเมื่อถูกแรงกระทำคุณสมบัตินี้ทำให้ของใช้หรือชิ้นส่วนที่ทำจากยางไม่ถูกทำลายเมื่อนำมาใช้ในงานที่มีแรงกระทำ

2.1.2.2 ยางธรรมชาติมีความสม่ำเสมอในโครงสร้างโมเลกุลทำให้ยางธรรมชาติตกผลึกได้เมื่อยืด ทำให้ยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่มีความต้านทานแรงดึงสูง มีโมดูลัสสูงและมีความแข็งแรงสูงเมื่อยืดหรือหดเต็มที่

2.1.2.3 ยางธรรมชาติสามารถกลับสู่รูปร่างและขนาดเดิมได้เกือบสมบูรณ์ เมื่อแรงภายนอกหยุดกระทำ ดังนั้นยางธรรมชาติจึงเป็นวัสดุที่มีการเสีรูปร่างทำให้มีความเหมาะสมในการใช้งานที่มีภาระการกระทำอย่างสม่ำเสมอแบบมีคาบ

2.1.2.4 ยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่ต้านทานต่อการสึกหรอได้ดีและมีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงกับผิวโลหะ ทำให้สามารถจับผิวโลหะและทนต่อการสึกหรอได้ดี

2.1.2.5 ยางธรรมชาติมีความสามารถป้องกันการซึมผ่านของ ของเหลวและก๊าซได้ดี จึงใช้เก็บบรรจุหรือกั้นของเหลวและก๊าซได้เป็นอย่างดี

2.1.2.6 ยางธรรมชาติมีคุณสมบัติด้านการเป็นตัวประสานได้แก่ การนำยางมาทำเป็นกาวยาง กาวยางชองจดหมาย กาวติดกล่องกระดาษและกาวรองเท้า เป็นต้น

2.1.2.7 ยางธรรมชาติมีคุณสมบัติด้านการเป็นฉนวนไฟฟ้า เป็นการใช้งานตามคุณสมบัติทางไฟฟ้าของยางธรรมชาติที่มีสภาพต้านทาน สามารถใช้หุ้มสายเคเบิลไฟฟ้าได้ดี โดยเฉพาะสายเคเบิลไฟฟ้าที่มีความต้องการโค้งงอมาก

2.1.3 โครงสร้างหลักที่มีผลต่อคุณสมบัติของยางธรรมชาติ

โครงสร้างของยางธรรมชาติมีพันธะคู่ที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา ทำให้ยางธรรมชาติเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายด้วย ออกซิเจนและ โอโซน ซึ่งเป็นสาเหตุของการเสื่อมสภาพของยาง ทำให้การออกสูตรยางจำเป็นต้องมีสารกันเสื่อมสภาพ (antioxidant) และสารต้านทานไอออนโซน

(antiozonate) นอกจากนี้ยางธรรมชาติจะประกอบไปด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนล้วน ทำให้ยางธรรมชาติไม่ทนน้ำมัน (จำพวกน้ำมันปิโตรเลียมหรือน้ำมันพืช) ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าลักษณะสิ่งแวดล้อมและลักษณะการใช้งานมีผลกระทบต่อ โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ เพราะฉะนั้นการเติมสารเคมีเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติตามลักษณะงาน นั้นจัดเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่ควรนึกถึง ซึ่งยางธรรมชาติสามารถทำปฏิกิริยากับสารเคมีต่างๆ พอจะสรุปได้ดังนี้ [11]

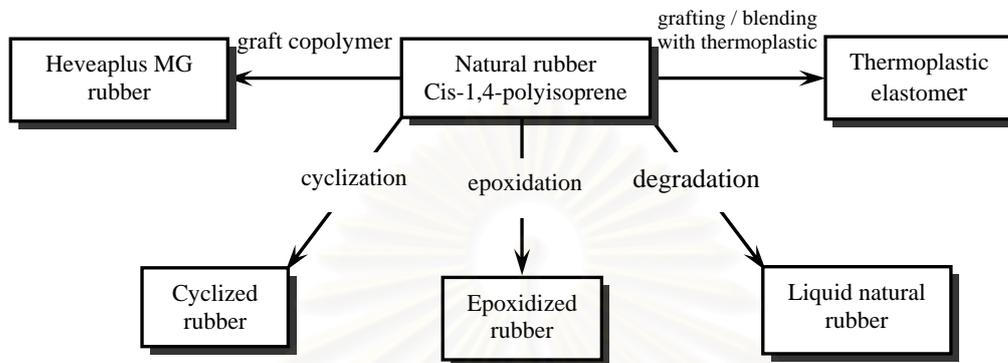
2.1.3.1 ปฏิกิริยาการกราฟต์โคโพลิเมอร์ (graft copolymer) เป็นการปรับสภาพ โครงสร้างยางธรรมชาติให้มีโครงสร้างโมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกคือ เมทิลเมทาไครเลต (methyl methacrylate) มาต่ออยู่กับโครงสร้างของยางธรรมชาติ โดยโครงสร้างของยางธรรมชาติ จะเป็นสายโซ่หลัก ส่วนโครงสร้างของ เมทิลเมทาไครเลต เป็นสายโซ่ที่มาต่อกับยางธรรมชาติ โดยยางชนิดนี้เรียกว่า ยางฮีเวียพลัส เอ็มจี (Heveaplus MG rubber) ยางที่ได้จะมีความแข็งเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีส่วนของเทอร์โมพลาสติกที่แข็งต่ออยู่ในโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ ใช้ทำ ฟองน้ำชนิดแข็งความหนาแน่นต่ำ ใช้ในอุตสาหกรรมรองเท้าและอุตสาหกรรมรถยนต์ ทำยาง พื้นรถ เป็นต้น

2.1.3.2 ปฏิกิริยาไซโคลซ์เซชัน (cyclization) การทำให้เกิด cyclized structure บน โครงสร้างโมเลกุลของยางด้วย $AlCl_3$ หรือ $FeCl_3$ ให้มีสัดส่วนของพันธะที่ไม่อิ่มตัวในโมเลกุล ของยางลดลง โดยการทำให้โมเลกุลของยางธรรมชาติเกิดการเชื่อมโยงกันเองเป็นแบบ วงแหวน ทำให้คุณสมบัติของยางเปลี่ยนไป ยางไซโคลซ์มีลักษณะเป็นผงหรือเป็นเรซินสีน้ำตาลอ่อนมี น้ำหนักโมเลกุลต่ำและมีความแข็งมากกว่ายางธรรมชาติทั่วไป จึงใช้ผสมกับยางอื่นเพื่อให้ได้ยาง ที่มีความแข็งความทนทานต่อกรด ด่าง และตัวทำละลายอินทรีย์ ใช้ในอุตสาหกรรมทำพื้นรองเท้า หรือยางสีที่ต้องการความแข็ง เช่น ลูกกอล์ฟยาง เป็นต้น

2.1.3.3 ปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน (epoxidation) การ epoxidized ยางธรรมชาติด้วย กรดฟอร์มิก เปอร์ออกซี (peroxy formic acid) จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับยางธรรมชาติ ตรงตำแหน่งพันธะคู่เกิดเป็นยางธรรมชาติอีพอกไซด์ ที่มีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้างของยาง ธรรมชาติ ยางที่ได้สามารถทนทานต่อโอโซนและการซึมของอากาศดี เพราะพันธะคู่ในโครงสร้าง ยางธรรมชาติมีปริมาณน้อยลง ยางธรรมชาติอีพอกซิเดชันมีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้างโมเลกุลทำ ให้ยางมีความเป็นขี้ผึ้งมากขึ้น ทำให้สามารถทนต่อน้ำมันได้ดีและทนทานต่อการซึมของอากาศได้ดี

2.1.3.4 ปฏิกิริยาการตัดสายโซ่โมเลกุลยาง (degradation) เป็นการทำให้โมเลกุล ของยางเล็กลง มีผลให้ยางธรรมชาติเปลี่ยนสภาพเป็นของเหลวที่หนืด อาจถือได้ว่าเป็นการ ปรับปรุงผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติอีกวิธีหนึ่ง ที่ช่วยให้สามารถนำยางธรรมชาติไปใช้ได้กว้างขึ้น เช่น ใช้เป็น คอมแพททิบิไลเซอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับโพลีเมอร์ เป็นต้น

นอกจากนี้การนำยางธรรมชาติไปผสมกับวัสดุอื่นเช่น พลาสติก ก็สามารถให้วัสดุใหม่ที่มีคุณสมบัติการใช้งานต่างออกไปเช่น เป็นยางเทอร์โมพลาสติกซึ่งสามารถนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่โดยไม่ต้องวัลคาไนซ์ ฉะนั้นการทำผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติจะทำได้เร็วและราคาถูกลง



รูปที่ 2.2 วิธีการประยุกต์ยางธรรมชาติโดยการเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุล

2.2 โพลีเอทีลีน (Polyethylene, PE)

โพลีเอทีลีนเป็นพลาสติกสังเคราะห์ประเภทเทอร์โมพลาสติกที่ประกอบด้วยโครงสร้างโมเลกุลคือ $(CH_2)_n$ จัดเป็นพลาสติกที่มีการใช้งานมากที่สุดประมาณ 32% ของพลาสติกทั้งหมด เพราะมีคุณสมบัติที่หลายประการคือ เมื่ออยู่ในรูปแผ่นบางสามารถพับงอได้ดีมาก มีความยืดตัวได้สูงถึง 500% ทนแดดทนไฟ มีลักษณะคล้ายขี้ผึ้ง ไม่มีกลิ่นและไม่มีพิษ ไม่เกาะติดน้ำ ราคาถูกเป็นฉนวนไฟฟ้าดีเยี่ยมเนื่องจากโมเลกุลของโพลีเอทีลีนไม่มีหมู่ที่มีขั้วเลย ทนความเย็นได้ถึง $-100^{\circ}F$ โดยไม่ทำให้สมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลง ความทนทานต่อสารเคมีดีเยี่ยม ขึ้นรูปง่าย เหนียว ยืดหยุ่น มีลักษณะใสเมื่อทำเป็นแผ่นบางและยอมให้อากาศผ่านได้น้อย จึงเหมาะกับการใช้งานบรรจุภัณฑ์ อีกทั้งสามารถทำเป็นสีต่างๆได้ตามต้องการ โพลีเอทีลีนในทางการค้าส่วนใหญ่ได้มาจากการโพลีเมอร์ไรซ์ ก๊าซเอทีลีนด้วยกระบวนการแบบรวมตัว ได้โพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และมีโครงสร้างเป็นได้ทั้งแบบเส้นและแบบกิ่ง ขึ้นกับกระบวนการที่ใช้ผลิต

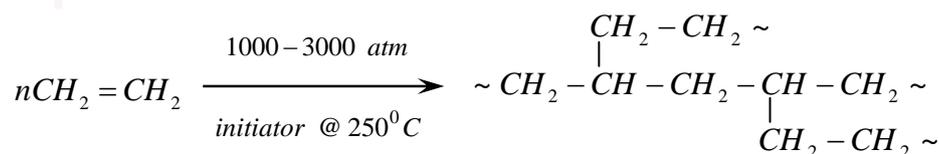
โพลีเอทีลีนได้ถูกสังเคราะห์ขึ้นเป็นครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ.1933 และ Fawcett ได้เสนอผลงานออกมาเมื่อปี ค.ศ.1935 ภายใต้ลิขสิทธิ์ของบริษัท อิมพีเรียล เคมีคัล อินดัสตรีหรือไอซีไอประเทศอังกฤษ ค.ศ.1936 และเป็นที่ยอมรับในปี ค.ศ.1937 จนกลางปี ค.ศ.1950 โพลีเอทีลีนในทางการค้าถูกผลิตขึ้นโดยกระบวนการความดันสูง (High Pressure Process) ซึ่งโพลีเอทีลีนที่ได้จะมีกิ่งก้านสาขา และน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยปานกลาง (ต่ำกว่า 50,000) จนปี ค.ศ.1954 วิธีการผลิตอีกสองวิธี ได้ถูกพัฒนาขึ้น โดยวิธีแรกใช้โลหะออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เรียกว่า กระบวนการฟิลิปส์

(Philips Process) วิธีที่สองใช้อะลูมิเนียมแอลคิล (aluminium alkyl) หรือสารที่ใกล้เคียงกัน เรียกว่า กระบวนการซีเกลอร์ (Ziegler Process) และจากกระบวนการเหล่านี้ ทำให้สามารถผลิตโพลีเอทีลีนที่มีความหนาแน่น ความแข็ง และจุดอ่อนตัวสูงขึ้น

ปลายปี ค.ศ.1970 ได้มีการค้นพบโพลีเอทีลีนความหนาแน่นต่ำแบบเส้น (linear low density polyethylene, LLDPE) ซึ่งมีสมบัติและโครงสร้างอยู่ระหว่างโพลีเอทีลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) และความหนาแน่นต่ำ (LDPE) LDPE ส่วนใหญ่ใช้ในการทำฟิล์ม นอกนั้นใช้ทำผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยการฉีด (injection) และอื่นๆ ส่วน HDPE จะถูกใช้ในงานฉีด และงานเป่า (blow molding) ส่วน LLDPE ใช้ทำฟิล์มแทน LDPE บางส่วนโพลีเอทีลีนจัดเป็นเทอร์โมพลาสติก ความยืดหยุ่น (flexibility) ของพันธะ C-C ทำให้มี T_g ก่อนข้างต่ำ ขึ้นกับปริมาณของส่วนที่เป็นอสัณฐานและผลึก โดย T_g จะมีค่าตั้งแต่ -130 ถึง 60 °C ซึ่งมีทั้งต่ำกว่าและสูงกว่าอุณหภูมิห้อง ดังนั้น โพลีเอทีลีนจึงมีลักษณะที่ยืดหยุ่นและแข็งกว่าปกติแล้วแต่ชนิดของโพลีเอทีลีนนั้นๆ คุณสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้าของ โพลีเอทีลีนจะดีเยี่ยม เพราะเป็น non polar material คุณสมบัติต่างๆ เช่น dielectric constant และ power factor จะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิและความถี่ โพลีเอทีลีนที่มีความหนาแน่นต่ำจะใสมากและบุนขึ้นเมื่อมีความหนาแน่นสูง และสามารถแบ่งประเภทของ โพลีเอทีลีนตามความหนาแน่นของโมเลกุล ได้เป็น LDPE, HDPE, MDPE และ LLDPE เป็นต้น พบว่าโพลีเอทีลีนที่มีความหนาแน่นสูงขึ้นจะมีคุณสมบัติต่อไปนี้สูงขึ้นด้วยเช่น ความต้านทานแรงดึง (tensile strength) ทนทานต่อการแทรกซึมของก๊าซ (barrier properties) ทนทานต่อความร้อนและอุณหภูมิ (heat resistance) ทนต่อสารเคมี (chemical resistance) ความแข็ง (hardness) ความคงรูป (rigidity) เสถียรภาพทางรูปร่าง (dimension stability) และคุณสมบัติทางกายภาพ เป็นต้น [12]

2.2.1 โพลีเอทีลีนความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene)

โพลีเอทีลีนความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene) เขียนย่อว่า LDPE หรือโพลีเอทีลีนความดันสูง (High pressure polyethylene) เป็นโพลีเอทีลีนที่เตรียมจากเอทีลีน โดยใช้ความดันสูงถึง 1,000 – 3,000 บรรยากาศ อุณหภูมิประมาณ 250 องศาเซลเซียส ใช้ออกซิเจน หรือเบนโซอินเปอร์ออกไซด์เพียงเล็กน้อยเป็นตัวเริ่มต้นปฏิกิริยา (initiator) ส่วนเอทีลีนโมโนเมอร์เตรียมมาจากน้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติ



รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของโพลีเอทีลีน

โพลีเอทีลีนอาจเตรียมในสารละลายโดยใช้เบนซีนหรือคลอโรเบนซีนเป็นตัวทำละลาย ภายใต้ภาวะของปฏิกิริยาทำนองเดียวกันกับกรณีที่ไม่ใช้ตัวทำละลาย

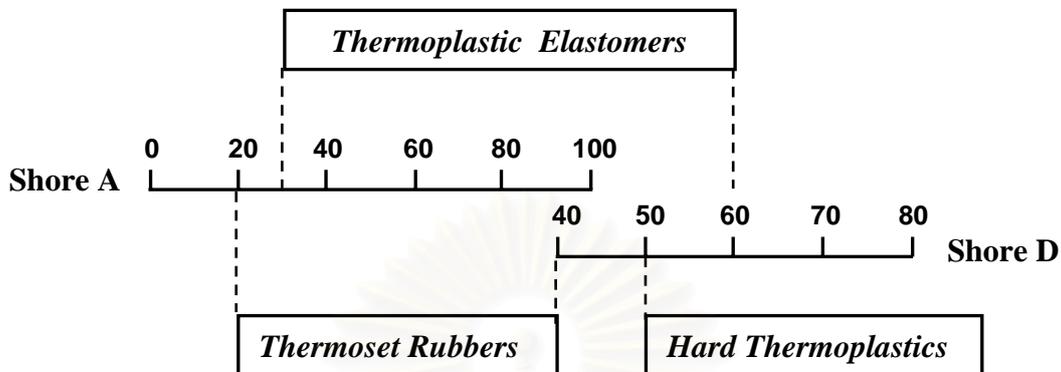
คุณสมบัติทางกายภาพของโพลีเอทีลีนแตกต่างกันออกไปบ้างขึ้นกับองค์ประกอบหรือปริมาณของ สาขาโซ่ โดยทั่วไปถ้าโมเลกุลมีสาขาโซ่มาก โพลีเมอร์มีความเป็นผลึกต่ำ เพราะมีโอกาสที่ อะตอมต่างๆในโมเลกุลจะจัดตัวอย่างเป็นระเบียบเพื่อเกิดลักษณะผลึกมีน้อยกว่าสมบัติทางกายภาพ เช่น ความหนาแน่น จุดหลอมตัว ความแข็ง ก็ต่ำลงด้วยเพราะความหนาแน่นต่ำกว่านี้เอง การแพร่ผ่านของก๊าซและความชื้นต่อโพลีเมอร์จะสูงกว่า อย่างไรก็ตามโพลีเอทีลีนที่เตรียมโดย กระบวนการใช้ความดันสูงมีความเป็นผลึกปานกลาง (ทั่วไปมีความเป็นผลึกร้อยละ 50 – 60) มีจุด หลอมเหลวประมาณ 115 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่น 0.910 – 0.925 กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร ไม่ละลายในตัวทำละลายหลายชนิดที่อุณหภูมิห้อง ทนต่อกรดแก่และเบสแก่ จาก คุณสมบัติดังกล่าวจึงนิยมนำโพลีเอทีลีนมาผลิตเป็นฟิล์มใช้สำหรับห่อของ ห่ออาหาร ทำถุงพลาสติก ผ้าปูโต๊ะ ใช้หุ้มสายไฟ สายเคเบิล เป็นต้น [13]

2.3 เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic elastomer, TPE)

เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์สามารถเตรียมได้จากการทำโพลีเมอร์ผสม (polymer blend) ระหว่างยางกับเทอร์โมพลาสติก ซึ่งทำให้วัสดุที่ได้มีทั้งส่วนที่แข็ง (hard segment) และส่วนที่อ่อน (soft segment) อยู่ร่วมกัน นอกจากนี้เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ยังสามารถเตรียมได้จาก การกราฟต์โคโพลีเมอร์อีกด้วย โดยให้มอนอเมอร์เกิดโคโพลีเมอร์เชนบนโมเลกุลของยาง ดังนั้น เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จึงเป็น วัสดุที่สามารถหลอมเหลวและขึ้นรูปได้เช่นเดียวกับเทอร์โม พลาสติกทั่วไป ซึ่งเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์สามารถเป็นไปได้อย่างและเทอร์โมพลาสติก เนื่องจากแสดงคุณสมบัติยืดหยุ่น (elastic property) เช่น การโค้งงอ (flexibility) การบิดเบี้ยว (distortion) ภายใต้แรงกระทำและสามารถที่คืนตัวกลับสู่รูปร่างเดิมได้หลังจากปล่อยแรงกระทำ ภายนอก ส่วนคุณสมบัติของเทอร์โมพลาสติกคือ สามารถหลอมเหลวได้ที่อุณหภูมิสูงและขึ้นรูป ด้วยกระบวนการอัดรีดได้ และที่ต่างจากยางคือ เศษชิ้นงานของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ ที่เหลือจากกระบวนการผลิตสามารถนำไปรีไซเคิลได้ ขณะที่เศษชิ้นงานของยางไม่สามารถ รีไซเคิลได้

จากรูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นคุณสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่หลอมซ้อนกับ ทั้งยางและเทอร์โมพลาสติกได้จากค่าความแข็ง แต่จะมีแนวโน้มมาทางยางมากกว่า ซึ่งเป็นเหตุให้ สามารถนำเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ ไปใช้ได้ทั้งในอุตสาหกรรมยางและเทอร์โมพลาสติก โดยเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จะประกอบไปด้วยโพลีเมอร์อย่างน้อยสองเฟสคือ เฟสที่เป็น ส่วนที่แข็งของเทอร์โมพลาสติก (hard thermoplastic phase) รวมตัวอยู่กับเฟสอ่อนนุ่มของยาง

(soft elastomer phase) ดังนั้นคุณสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จะมาจากคุณสมบัติของแต่ละเฟสและจากการทำปฏิกิริยากันเองของเฟสทั้งสอง



รูปที่ 2.4 ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ซึ่งเชื่อมซ้อนกับยางและเทอร์โมพลาสติก

คุณสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ขึ้นกับอุณหภูมิหลอมเหลวของเทอร์โมพลาสติกและอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) ของยางช่วงอุณหภูมิที่นำไปใช้งานจะอยู่ระหว่างอุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ซึ่งภายในช่วงอุณหภูมินี้เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จะแสดงคุณสมบัติของยางตามที่ต้องการ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว เฟสของเทอร์โมพลาสติกจะหลอมเหลว ทำให้เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์กลายเป็นของไหลและสามารถขึ้นรูปโดยเทคนิคที่ใช้กับเทอร์โมพลาสติกทั่วไปได้ แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน จะทำให้เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์เปราะ และสูญเสียคุณสมบัติของยางไป [14]

ก่อนที่จะตรวจสอบคุณสมบัติของโพลีเมอร์ผสม (ยาง/เทอร์โมพลาสติก) ควรพิจารณาคุณสมบัติของโพลีเมอร์แต่ละชนิดเสียก่อน เพราะคุณสมบัติของโพลีเมอร์ผสม จะขึ้นกับโพลีเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบ [9]

2.3.1 การเปรียบเทียบเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์กับเทอร์โมเซตรับเบอร์

เพื่อที่จะให้เข้าใจว่าเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ได้มีบทบาทแทนที่เทอร์โมเซตรับเบอร์หรืออย่างไร จึงได้เปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยของวัสดุทั้งสองประเภท

2.3.1.1 เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จะมีข้อดีกว่ายางดังนี้

2.3.1.1.1 กระบวนการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ง่ายกว่าและมีขั้นตอนการผลิตการผลิตรายกว่าดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับยางแล้ว จะพบว่าผลิตภัณฑ์จากยางมีขั้นตอนการผลิตยุ่งยากกว่ามาก

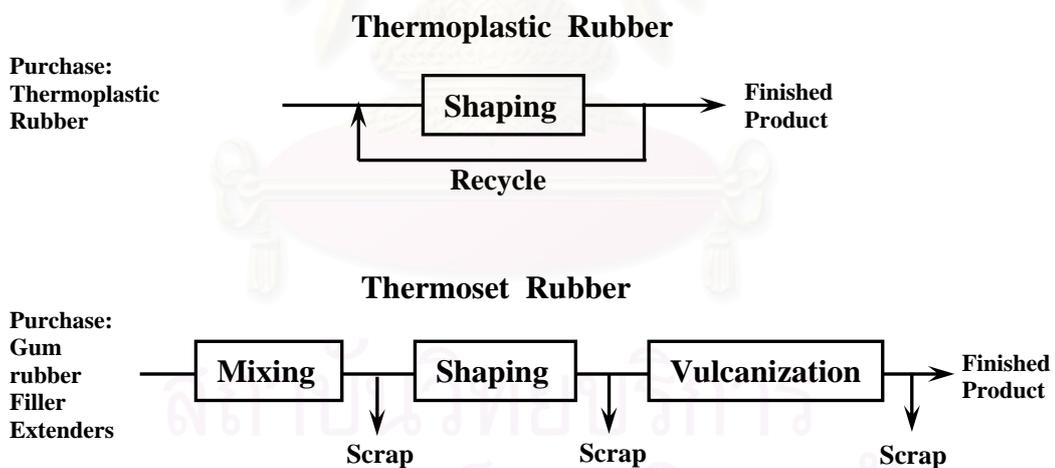
2.3.1.1.2 เวลาที่ใช้ในการผลิตเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์สั้นกว่าถึงแม้เวลาที่อยู่ในแม่พิมพ์จำเป็นต้องนานพอเพื่อหล่อเย็นชิ้นงาน แต่เวลาเหล่านี้ใช้เวลาเป็นวินาทีเท่านั้น แต่ถ้าเปรียบเทียบกับยางแล้ว จะใช้เวลาหลายนาทีที่อยู่ในแม่พิมพ์ เนื่องจากต้องมีขั้นตอนการวัลคาไนซ์ (vulcanization)

2.3.1.1.3 เศษชิ้นงานของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์สามารถนำไปรีไซเคิลได้ โดยส่วนใหญ่สามารถรีไซเคิลได้หลายครั้งโดยคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

2.3.1.1.4 การผลิตชิ้นงานจากเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จะใช้พลังงานน้อยกว่า เนื่องจากมีขั้นตอนการผลิตที่ง่ายและน้อยกว่า ซึ่งการผลิตจะเหมือนกับเทอร์โมพลาสติกคือ ถูกหลอมเหลวแล้วส่งเข้าสู่แม่แบบ จากนั้นจะถูกหล่อเย็นเพื่อให้ได้รูปร่างตามแบบ

2.3.1.1.5 เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ไม่จำเป็นต้องทำคอมพาวด์ ในขณะที่ยางจำเป็นต้องใส่สารเคมีเพื่อช่วยในการครอสลิงค์ (crosslinking agent) สารเพิ่มความเสถียรภาพ (stabilizer) สารช่วยกระบวนการผลิต (processing aid) และสารเติมแต่ง (additives) บางชนิดเช่น สารหน่วงไฟ (flame retardant) เป็นต้น

2.3.1.1.6 เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์สามารถใช้กระบวนการผลิตที่เหมือนกับเทอร์โมพลาสติกเรซินได้ ขณะที่บางวิธีไม่สามารถใช้กับยางได้



รูปที่ 2.5 การผลิตของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์มีเพียงขั้นตอนเดียวขณะที่เทอร์โมเซ็ตรับเบอร์จะมีสามขั้นตอนหรือมากกว่า

2.3.2 ข้อดีของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์เมื่อเทียบกับยาง

2.3.2.1 เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ส่วนใหญ่ต้องผ่านการทำให้แห้งก่อน ซึ่งเป็นขั้นตอนปกติในการผลิตชิ้นงานจากเทอร์โมพลาสติกและขั้นตอนนี้ไม่จำเป็นสำหรับวัสดุยาง

2.3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ผลิต ผลิตภัณฑ์เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ โดยทั่วไป มีราคาแพงกว่าเครื่องมือที่ใช้ผลิตจากยาง

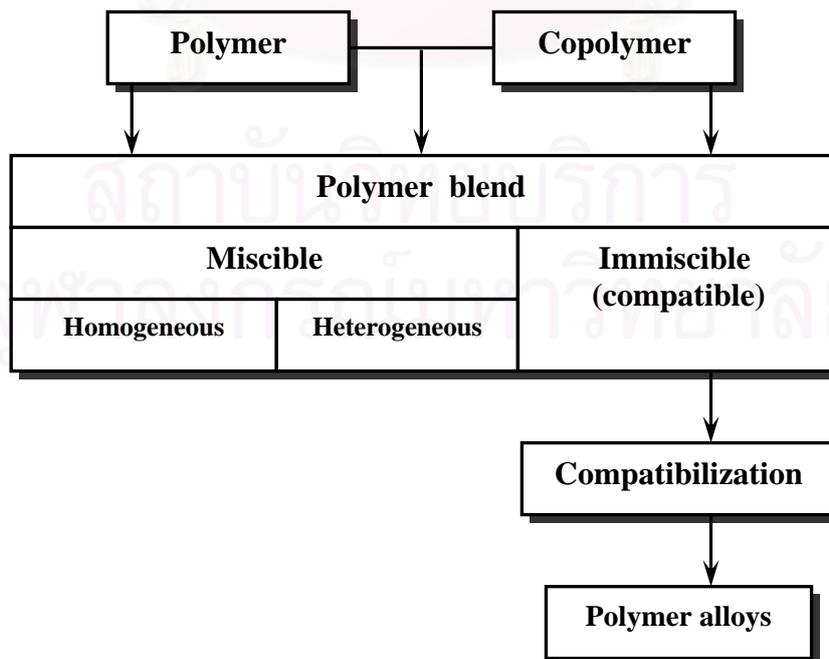
2.3.2.3 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์เป็นการผสมโพลิเมอร์ระหว่าง ยางกับเทอร์โมพลาสติก ดังนั้นต้องคำนึงถึงความเข้ากันได้ของโพลิเมอร์ทั้งสองชนิด ในขณะที่ยาง ไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงสาเหตุนี้

2.3.3 ความเข้ากันได้ของการผสมโพลิเมอร์

การผสมโพลิเมอร์สามารถแยกโพลิเมอร์ผสมออกเป็นสองประเภทคือ โพลิเมอร์ ผสมที่เข้ากันได้ (miscible blend) และโพลิเมอร์ผสมที่เข้ากันไม่ได้ (immiscible blend) แต่ผ่านการ ขึ้นรูปด้วยกันได้ เพราะไม่มีผลเสียต่อกันเช่น ไม่ทำให้โพลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งเสื่อมสภาพ ในทาง ปฏิบัติ สามารถพัฒนาปรับปรุงโพลิเมอร์เข้ากันไม่ได้นี้ โดยการเติม คอมแพทิบิไลเซอร์ (compatibilizer) สารที่ผสมให้โพลิเมอร์ผสมทั้งสองชนิดผสมเข้ากันได้ในระดับโมเลกุล

การผสมโพลิเมอร์มักจะพิจารณาความเข้ากันได้ (compatibility) ของการผสมเป็น หลัก กล่าวคือ จะต้องใช้โพลิเมอร์ที่หลังจากผ่านกระบวนการผสมแล้วต้องมีลักษณะทางสัณฐาน (morphology) ดังต่อไปนี้ [15]

1. เข้ากันได้อย่างสมบูรณ์ มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันและไม่สามารถสังเกตเห็น การแยกเฟสเลย
2. เข้ากันได้บางส่วน สังเกตเห็นการแยกเฟสบางส่วน แต่ที่จุดต่อระหว่างเฟส (interface) จะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันสูง



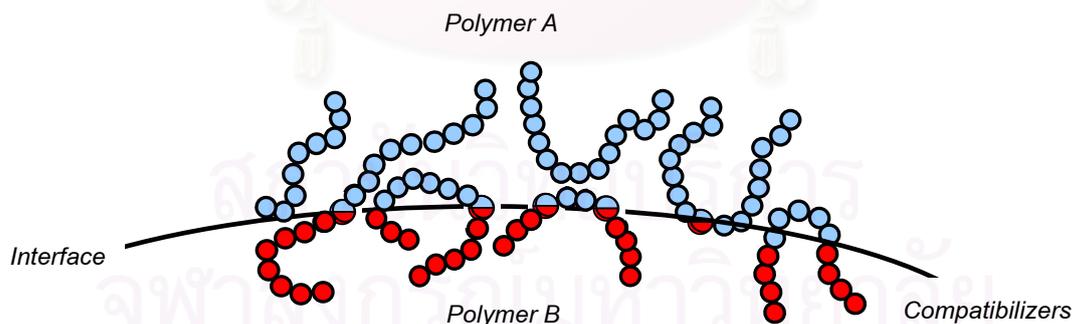
รูปที่ 2.6 แผนผังแสดงประเภทของโพลิเมอร์

ดังนั้นการเข้ากันได้จึงเป็นหัวใจของการเตรียมโพลีเมอร์ผสม การผสมโพลีเมอร์ที่เข้ากันไม่ได้หรือเข้ากันได้ไม่ดี จะเกิดผลเสียต่อคุณสมบัติของโพลีเมอร์ผสม เนื่องจากจะเกิดการแยกเฟสของโพลีเมอร์แต่ละชนิดอย่างชัดเจน ซึ่งแต่ละเฟสจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันต่ำ จึงทำให้โพลีเมอร์ผสมที่ได้ เกิดการแตกหัก (crack) ได้ง่ายและทำให้ตัวทำละลายแพร่เข้าไปในระบบได้ง่าย เนื่องจากการมีช่องว่างมากกว่าปริมาตรอิสระ (free volume) ของโพลีเมอร์เดิมแต่ละตัว

การเข้ากันได้ (compatibilization) ของการผสม เป็นปัจจัยหลักในการพัฒนาโพลีเมอร์ผสม โดยทั่วไปการเข้ากันได้หมายถึง การผสมเข้ากันได้ (miscibility) ในระดับโมเลกุลของโพลีเมอร์ที่นำมาผสม ไม่มีการแยกเฟสขององค์ประกอบที่ต่างกัน การเตรียมโพลีเมอร์ผสมจะได้ชนิดที่เข้ากันได้สมบูรณ์ หรือเกิดการแยกเฟส จะขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น กระบวนการผสม อุณหภูมิของการผสม ความเสถียรของระบบผสม และชนิดของโพลีเมอร์ เป็นสำคัญ

2.4 คอมแพทิบิไลเซอร์ (compatibilizer)

คุณสมบัติประจำตัวของโพลีเมอร์ส่วนใหญ่ ซึ่งเป็นสารน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งเป็นสาเหตุไม่เข้ากับสารอื่นๆ หลายชนิด ดังนั้นการผสมโพลีเมอร์กับโพลีเมอร์ส่วนใหญ่จึงได้โพลีเมอร์ผสมที่ไม่เข้ากันหรือเข้ากันเพียงบางส่วน ด้วยเหตุนี้ จึงจำเป็นต้องมีตัวกลางที่อยู่ระหว่างผิวโมเลกุลของโพลีเมอร์ทั้งสองซึ่งสามารถสร้างพันธะทางเคมีกับโพลีเมอร์ทั้งสอง และทำให้สถานะของโพลีเมอร์ผสมมีความเสถียร ตลอดจนเพิ่มพันธะยึดติดระหว่างผิวของโพลีเมอร์ สารดังกล่าวช่วยให้โพลีเมอร์ที่ไม่ผสมเข้ากันสามารถเข้ากันได้ในระดับโมเลกุล



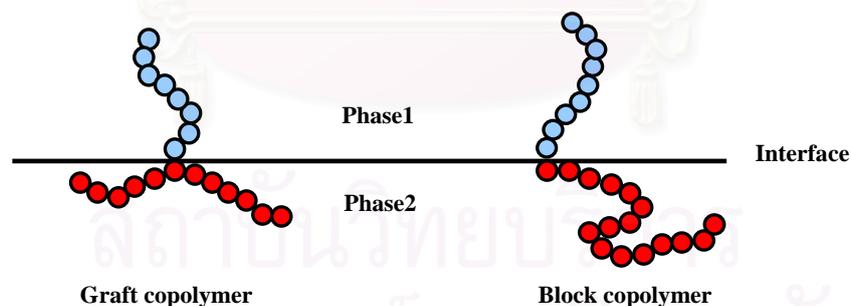
รูปที่ 2.7 การแทรกอยู่ที่ผิวระหว่างเฟสและการสร้างพันธะระดับโมเลกุลของคอมแพทิบิไลเซอร์

คอมแพทิบิไลเซอร์สามารถช่วยให้เกิดการเข้ากันได้โดยพันธะระดับโมเลกุลบนผิวของเฟสที่สัมผัสกันดังแสดงในรูปที่ 2.7 โมเลกุลของสารช่วยให้โพลีเมอร์ผสมเข้ากันสามารถแทรกซึมเข้าไปอยู่ที่พื้นผิวระหว่างโพลีเมอร์สองชนิดที่ผสมกัน ดังแสดงเป็น โมเลกุลสายโซ่สอง

ชนิดในรูปที่ 2.7 การทำปฏิกิริยาที่พื้นผิวโมเลกุลระหว่างเฟสของโพลีเมอร์ทั้งสองถูกเพิ่มสูงขึ้น โดยคอมแพททิบิไลเซอร์ซึ่งอยู่ตามพื้นผิวระหว่างเฟส คอมแพททิบิไลเซอร์มีหลายชนิดที่นิยมใช้ แบ่งเป็นสามประเภทหลักคือ [16]

2.4.1 การใช้โคโพลีเมอร์แบบกราฟต์และบล็อกเป็นคอมแพททิบิไลเซอร์

การเพิ่มการเข้ากันได้ของการผสมโพลีเมอร์ โดยใช้โคโพลีเมอร์แบบ กราฟต์และ บล็อกเป็นคอมแพททิบิไลเซอร์ เป็นวิธีการที่มีการศึกษาวิจัยและมีการผลิตโพลีเมอร์ผสมกันมากที่สุด โดยทั่วไปจะนิยมใช้โคโพลีเมอร์แบบบล็อกมากกว่า โดยเฉพาะโคโพลีเมอร์แบบบล็อกที่มี ส่วนของโมเลกุลที่มีลักษณะทางเคมีเหมือนกับโพลีเมอร์ที่ต้องการผสม โคลิโพลีเมอร์ที่ทำหน้าที่ เป็นคอมแพททิบิไลเซอร์จะมีอินเตอร์เฟส (interface) ของโพลีเมอร์ที่ผสมซึ่งแสดงดังรูป 2.8 โคลิโพลีเมอร์จะผสมส่วนที่มีธรรมชาติทางเคมีเหมือนกันเข้ากับโพลีเมอร์ แม้กลไกการเข้าทำ ปฏิกิริยาหรือไม่ทำปฏิกิริยาโดยตรงของคอมแพททิบิไลเซอร์จะซับซ้อนและบางครั้งยังไม่กระจ่างชัด แต่โดยทั่วไปสารดังกล่าวมักทำให้โพลีเมอร์ผสมเข้ากันได้บางส่วนหรือมากขึ้น โดยการเข้าไปทำ หน้าที่ดังนี้ ลดแรงตึงผิวระหว่างโพลีเมอร์ เพิ่มการยึดติดระหว่างเฟสของโพลีเมอร์ที่ผสมทั้งสอง ณ พื้นผิวระหว่างเฟส และทำให้เฟสที่กระจายเป็นอนุภาคที่มีเสถียรภาพมากขึ้น เป็นต้น ตัวอย่าง ของการใช้คอมแพททิบิไลเซอร์ชนิดนี้ในเตรียมโพลีเมอร์ผสม เช่น การเตรียมโพลีเมอร์ผสมจาก LDPE กับ PS โดยใช้ PS-g-LDPE เป็นคอมแพททิบิไลเซอร์ การเตรียมโพลีเมอร์ผสมจาก โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง กับ โพลีโพรไพลีน โดยใช้โคโพลีเมอร์แบบบล็อกของเอทิลีนกับ โพรไพลีน (ethylene-propylene copolymer) เป็นคอมแพททิบิไลเซอร์ เป็นต้น



รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงตำแหน่งของโคโพลีเมอร์แบบกราฟต์และแบบบล็อก ที่เป็นคอมแพททิบิไลเซอร์

2.4.2 การใช้โพลีเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นคอมแพททิบิไลเซอร์

เป็นการเตรียมคอมแพททิบิไลเซอร์ โดยการนำโพลีเมอร์ที่มีลักษณะทางเคมี เหมือนกับโพลีเมอร์ที่จะทำการผสม มาทำการดัดแปลงโมเลกุล โดยการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่ว่องไว ต่อปฏิกิริยาเคมีลงโมเลกุล ซึ่งหมู่ฟังก์ชันที่เพิ่มเข้าไปจะสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีกับโพลีเมอร์ชนิด

ที่สองที่นำมาทำการผสมได้ การตัดแปลงโมเลกุลทำได้โดยการทำปฏิกิริยาเคมีซึ่งมักจะทำในสถานะสารละลาย หรือทำโดยการใช้กระบวนการเอ็กซ์ทรูดตัดแปลงโมเลกุลในสถานะหลอม ตัวอย่าง การใช้โพลีเมอร์ที่มีการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันเป็นคอมแพทิบิไลเซอร์ของการผสม เช่น การตัดแปลงโมเลกุลโพลีโอลีฟินด์ โดยการทำปฏิกิริยากับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ทำให้เกิดหมู่คาร์บอนิลอิสระบนโมเลกุล ซึ่งโพลีเมอร์ที่ตัดแปลงแล้วชนิดนี้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีกับโพลีเอไมด์ โดยการทำปฏิกิริยากับหมู่เอมิโนในโมเลกุลโพลีเอไมด์ ดังนั้นคอมแพทิบิไลเซอร์ชนิดนี้ทำให้เกิดการผสมเข้ากันได้ดี ในการเตรียมโพลีเมอร์ผสมของโพลีโอลีฟินด์กับโพลีเอไมด์ โพลีเมอร์ที่มีการตัดแปลงโมเลกุลในลักษณะนี้มีขายในเชิงพาณิชย์ เพื่อใช้เป็นคอมแพทิบิไลเซอร์ของการผสมหลายชนิด เช่น กราฟต์โคโพลีเมอร์ของโพลีโอลีฟินด์กับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ เป็นต้น

2.4.3 การใช้ปฏิกิริยารีเอกทีฟเบลนด์เป็นคอมแพทิบิไลเซอร์

เป็นเทคนิคใหม่ของการผลิตโพลีเมอร์ผสม โดยปรับสภาพให้โพลีเมอร์ที่นำมาผสม ให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลต่างชนิดในสถานะหลอม (melt blending) เทคนิคนี้ใช้ในการผลิตโพลีเมอร์ในเชิงพาณิชย์ หลายชนิดเช่น โพลีเมอร์ผสมของโพลีคาร์บอนเนต (PC) กับโพลีเอสเตอร์ (PES) ซึ่งมีเทคนิคการผลิตหลายแบบและผลิตขายในชื่อการค้า Xenoy (ผลิตโดย General electric) , (Makroblend (ผลิตโดย Bayer) Ultrablend (ผลิตโดย BASF) ในขณะที่ทำการผสม พบว่าเกิดรีเอกทีฟเบลนด์ของโพลีเมอร์ทั้งสองชนิด โดยเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน (tranesterification) ระหว่าง PC กับ PES ตัวอย่างอื่นๆ ของรีเอกทีฟเบลนด์ เช่น การเตรียมโพลีเมอร์ผสมจากโพลีเอไมด์กับยางเอทีลิน โพรไฟลีน (EPR) ที่มีการตัดแปลงโมเลกุลด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (anhydride modified EPR) ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่เอมิโนของโพลีเอไมด์กับหมู่คาร์บอนิลอิสระบนโมเลกุลยาง EPR โพลีเมอร์ผสมชนิดนี้ มีคุณสมบัติทนต่อการกระแทกดีเยี่ยม

2.5 การประเมินความเข้ากันของโพลีเมอร์ผสม

การตรวจสอบความเข้ากันของโพลีเมอร์ผสมทำได้หลายวิธี แต่ละวิธีมีข้อดีและข้อจำกัดต่างๆ กัน การจะเลือกวิธีประเมินความเข้ากันของโพลีเมอร์ผสมก็ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติด้านความร้อนของโพลีเมอร์แต่ละชนิดที่เป็นองค์ประกอบ วิธีที่นิยมได้แก่

2.5.1 การตรวจวัดอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (Glass transition temperature, T_g)

อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน เป็นอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติจากโพลีเมอร์ที่นุ่มและโค้งงอได้เมื่อโพลีเมอร์อยู่ที่อุณหภูมิเหนือจุด T_g กลายมาเป็นโพลีเมอร์ที่แข็งเปราะคล้ายแก้ว เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าจุด T_g ทั้งนี้เนื่องจากการเคลื่อนขยับของโมเลกุลโพลีเมอร์

เมื่ออุณหภูมิเหนือจุด T_g ถูกหยุดไปในขณะที่โพลีเมอร์เย็นลงจนถึงอุณหภูมิต่ำกว่าจุด T_g การตรวจวัดค่า T_g เป็นวิธีหนึ่งที่นิยมกันมากในการประเมินความเข้ากันได้หรือไม่ของโพลีเมอร์ผสม ทั้งนี้เพราะวิธีที่ง่ายและให้ผลการทดสอบที่เชื่อถือได้ การตรวจวัดค่า T_g สามารถทำได้ โดยวิธีการตรวจวัดเชิงความร้อน

ในเชิงความร้อนอุณหภูมิ T_g อุณหภูมิที่โครงสร้างสายโซ่โมเลกุลของโพลีเมอร์มีพลังงานความร้อนเพียงพอที่จะเอาชนะพันธะยึดติดระหว่างโมเลกุล ทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนขยับหรือสั่นสะเทือนได้ ค่าและตำแหน่งของอุณหภูมิ T_g สามารถนำไปสู่ข้อมูลเกี่ยวกับโพลีเมอร์ผสม ตัวอย่างเช่น โพลีเมอร์ที่มีเฟสเดียวจะมีอุณหภูมิ T_g เพียงจุดเดียว อุณหภูมิ T_g ดังกล่าวเป็นค่าที่ขึ้นกับอัตราส่วนการผสมและเป็นค่าที่สะท้อนสภาวะการผสม โพลีเมอร์ผสมที่มีสองเฟสจะปรากฏมีอุณหภูมิ T_g สองค่าแตกต่างกัน โดยค่าที่ปรากฏแต่ละค่าจะเป็นจุด T_g ของแต่ละเฟส

วิธีการประเมินความเข้ากันได้หรือความไม่เข้ากันไม่ได้ของโพลีเมอร์ผสมโดยการตรวจวัดอุณหภูมิ T_g มีข้อจำกัด หากโพลีเมอร์ที่ผสมทั้งสองมีอุณหภูมิ T_g ใกล้เคียงกันมากและไม่สามารถแยกความแตกต่างของจุดทั้งสองได้ นอกจากนี้ การกลายสภาพเป็นผลึก (crystallization) ของโพลีเมอร์หนึ่งในระหว่างการตรวจวัดค่าอุณหภูมิ T_g ของโพลีเมอร์อีกตัวหนึ่งในโพลีเมอร์ผสมก็สามารถทำให้การตรวจวัดอุณหภูมิ T_g เบี่ยงเบนจากความเป็นจริงได้ โพลีเมอร์ผสมซึ่งผสมจากโพลีเมอร์สองชนิด อาจมีอุณหภูมิ T_g เพียงจุดเดียว แต่การวิเคราะห์พื้นฐานในระดับโมเลกุลอาจจะพบว่ามีสองเฟส แม้ว่าในความเป็นจริงอาจมีอุณหภูมิ T_g สองค่าแต่อาจมีการบดบังซึ่งมีผลทำให้การตรวจสอบอุณหภูมิ T_g ทำได้ยาก

วิธีที่นิยมใช้ในการตรวจวัดอุณหภูมิ T_g คือ การเปรียบเทียบความร้อนจำเพาะที่แตกต่างโดยใช้เครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC) หรืออาจใช้วิธีอื่นๆ เช่น การตรวจความเปลี่ยนแปลงของปริมาตรจำเพาะเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง หรือการตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงของค่าโมดูลัสเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน [17]

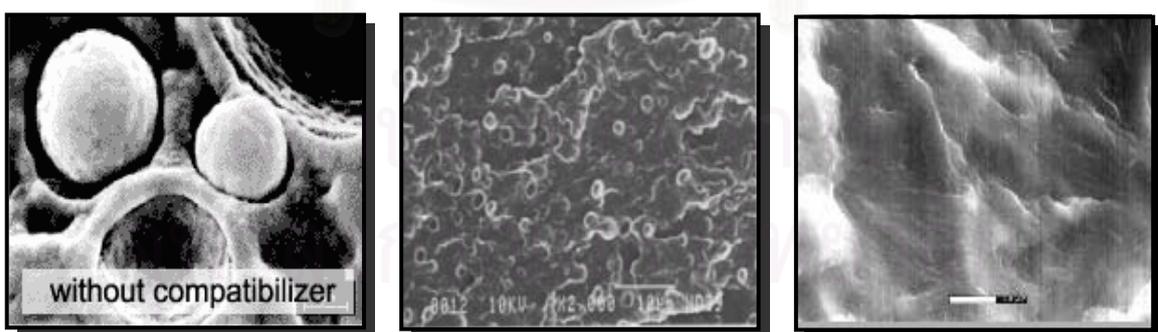
2.5.2 การตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning electron microscope)

การดูว่าระบบโพลีเมอร์ผสมมีความสามารถเข้ากันได้หรือไม่ ดูได้จากระดับขั้นของการผสมกันเป็นเนื้อเดียว ในทางปฏิบัติการเข้ากันได้ของส่วนผสมโพลีเมอร์ดูได้จากการที่โพลีเมอร์แต่ละชนิดไม่แยกตัวให้เห็น โพลีเมอร์ผสมที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันในระดับโมเลกุลถือเป็นโพลีเมอร์ที่เข้ากันไม่ได้ โพลีเมอร์ผสมที่เข้ากันได้จะสังเกตได้ง่ายๆ คือ ไม่แยกชั้นและสามารถนำไปใช้งานได้ทันที แต่ในทางทฤษฎีจำเป็นต้องศึกษาลักษณะการเข้ากันได้หรือไม่ และศึกษาคคุณสมบัติของโพลีเมอร์ผสมนั้นพร้อมศึกษาพื้นฐานโพลีเมอร์

โพลีเมอร์ผสมที่เข้าเป็นเนื้อเดียวจะประกอบด้วยเฟสเดียวในระดับโมเลกุล เช่น หากโมเลกุลของโพลีเมอร์ A ผสมกับโมเลกุลของโพลีเมอร์ B อย่างเข้าเป็นเนื้อเดียวกันก็จะปรากฏมีเฟสเดียวดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ก) ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายกับโพลีเมอร์สหพันธ์แบบสุ่ม การเข้าเป็นเนื้อเดียวกันจำเป็นต้องทำให้เกิดการดึงดูดระหว่างโพลีเมอร์ทั้งสองเพื่อเอาชนะแรงดึงดูดภายในโมเลกุลของโพลีเมอร์เดียวกัน การดึงดูดระหว่างโมเลกุลทั้งสองสามารถเกิดจากปฏิกิริยาของโพลีเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่เหมาะสมของโพลีเมอร์ทั้งสอง แต่เงื่อนไขนี้เกิดขึ้นได้ยากโพลีเมอร์เพียงบางชนิดเท่านั้นที่สามารถผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมด

ลักษณะอีกแบบหนึ่งของโพลีเมอร์ผสม ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ข) คือลักษณะโพลีเมอร์ที่ไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ทั้งนี้เกิดจากโพลีเมอร์ A ก่อตัวแยกออกจากโพลีเมอร์ B โพลีเมอร์ที่มีความเข้มข้นต่ำจะก่อตัวเป็นลักษณะไม่ต่อเนื่อง ในขณะที่โพลีเมอร์ที่มีความเข้มข้นสูงจะวางตัวเป็นลักษณะต่อเนื่อง นอกจากนี้ ความหนืดและวิธีการในการเตรียมของผสมยังสามารถมีผลของลักษณะของโพลีเมอร์ผสมที่ได้เช่นกัน

โดยทั่วไป โพลีเมอร์ผสมสองชนิดอาจเข้ากันได้เพียงบางส่วนเท่านั้น โพลีเมอร์ที่เข้ากันได้เพียงบางส่วนอาจเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสมบูรณ์ถ้าผสมในอัตราส่วนผสมที่น้อย แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมจะทำให้แยกของเฟสได้ ในโพลีเมอร์ผสมที่เป็นเนื้อเดียวกันจะมีเพียงบางส่วนที่อาจมีสองเฟส ซึ่งอาจไม่สามารถกำหนดขอบเขตที่ชัดเจนได้ เนื่องจากโพลีเมอร์ A สามารถฝังตัวในโพลีเมอร์ B อย่างชัดเจน หรือในทางกลับกัน ดังแสดงในรูป 2.9 (ข) โมเลกุลของโพลีเมอร์ทั้งสองที่ผสมกันตรงผิวสัมผัสจะทำให้เฟสไม่ต่อเนื่อง มีเสถียรภาพและไม่เปลี่ยนรูปร่างง่าย และมีการปรับปรุงพันธะยึดเกาะผิวสัมผัส [17]



(ก)

(ข)

(ค)

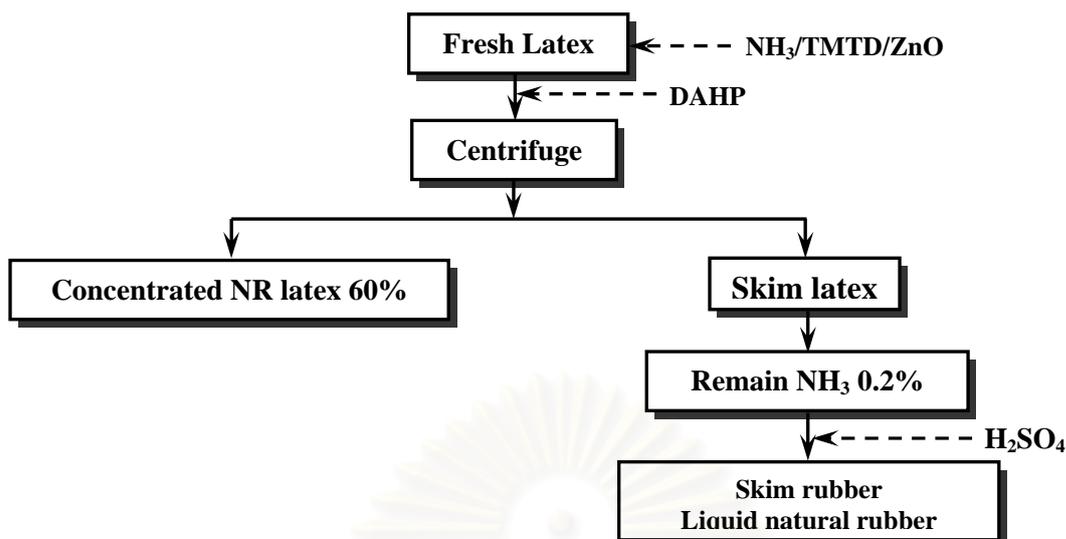
รูปที่ 2.9 ลักษณะของโพลีเมอร์ผสม (ก) ไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (ข) ผสมเป็นเนื้อเดียวกันบางส่วน (ค) ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน

2.6 ยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำ (Liquid natural rubber, LNR)

ยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำจัดเป็นคอมแพทิบิลิเซอร์ของยางธรรมชาติโดยมีชื่อย่อ เรียกว่า LNR (เดิมเรียกว่า DPR ซึ่งย่อมาจาก depolymerised rubber) ได้จากการนำยางธรรมชาติมาทำให้โมเลกุลของยางเกิดการสลายตัวตรงตำแหน่งพันธะคู่หรือเป็นกระบวนการตัดโซ่โมเลกุลของไอโซพรีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงให้มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำลงประมาณ 10^3-10^5 g/mol การเตรียมยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำสามารถเตรียมได้หลายวิธีพอจะสรุปได้ดังนี้

2.6.1 การเตรียมยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำจากผลพลอยได้จากกรรมวิธีการผลิตน้ำยางชั้นน้ำยางสดจากสวนรักษาสภาพน้ำยางด้วย แอมโมเนีย (ammonia, NH_3) เตตระเมทิลไทูรัม ไดซัลไฟด์ (tetramethyl thiuram disulphide, TMTD) และ ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide, ZnO) เมื่อนำน้ำยางเข้าโรงงานแล้วจะถ่ายลงถังรวม เก็บตัวอย่างตรวจสอบปริมาณเนื้อยางแห้งและปริมาณกรดไขมันระเหยได้ ในทางปฏิบัติโรงงานจะปล่อยให้ น้ำยางตกตะกอนธาตุแมกนีเซียม ซึ่งได้เติมด้วย ไดแอมโมเนีย ไฮโดรเจน ฟอสเฟต (diammonium hydrogen phosphate, DAHP) อย่างน้อยหนึ่งวันในการตกตะกอน ต่อจากนี้จะให้น้ำยางออกจากถังเก็บสู่การปั่นด้วยเครื่องปั่น น้ำยางที่ผ่านเข้าไปในเครื่องนี้จะถูกเหวี่ยงด้วย จากการหมุนด้วยความเร็ว 2000–3000 รอบ/นาที

น้ำยางซึ่งเบากว่าน้ำจะถูกเหวี่ยงขึ้นข้างบนและไหลออกทางช่องออกตอนบนของเครื่อง ส่วนน้ำจะถูกแยกออกไปช่องข้างล่างอีกช่องหนึ่ง โดยวิธีนี้น้ำยางจะแยกออกเป็นสองส่วน ส่วนหนึ่งคือ น้ำยางชั้นที่ต้องการและอีกส่วนหนึ่งเป็นผลพลอยได้คือ หางน้ำยาง (skim latex) ซึ่งยังคงมีปริมาณเนื้อยางอยู่บ้าง หางน้ำยางนี้จะถูกนำไปเก็บในบ่อพักที่มีอากาศถ่ายเทสะดวก เพื่อให้อากาศช่วยไล่ก๊าซแอมโมเนียออก หางน้ำยางควรเหลือแอมโมเนียเพียง 0.2% (ต่อน้ำหนักของหางยาง) จากนั้นจับให้หางน้ำยางเป็นก้อน ด้วยการเติมกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) เมื่อได้ก้อนยางจับตัวแล้วจึงนำไปผ่านการตัดย่อย แล้วจึงอบและอัดแท่ง ยางชนิดนี้เรียกว่า ยางสกิน (skim rubber) หรือยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำ (LNR) [18]



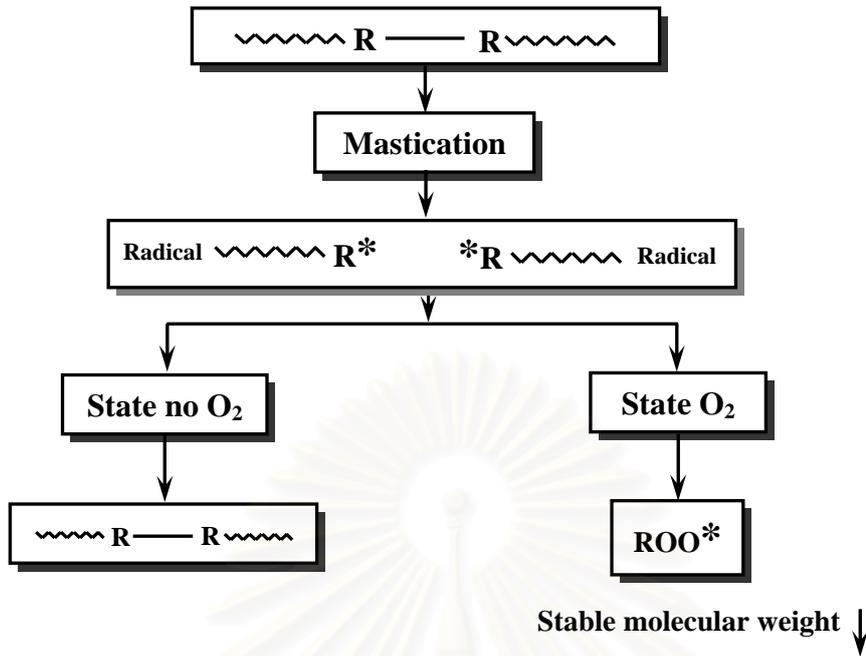
รูปที่ 2.10 การเตรียมยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำจากผลพลอยได้จากกรรมวิธีการผลิตน้ำยางข้น

2.6.2 การเตรียมยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำด้วยวิธีทางกลโดยใช้การบดยางและความร้อน การผลิตยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำด้วยยางแห้งมีการอธิบายเป็นครั้งแรกในปี 1923 Hardman ได้อธิบายกรรมวิธีการผลิตซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ

1. บดยางธรรมชาติให้มีความหนืดต่ำ
2. นำยางธรรมชาติที่บดเรียบร้อยแล้วมาแช่ให้พองตัวในน้ำมัน เป็นเวลาประมาณ 6-8 ชั่วโมงและควบคุมอุณหภูมิระหว่าง 120 – 140 องศาเซลเซียส และทำให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยการกวนพร้อมให้ความร้อนอีกที่อุณหภูมิระหว่าง 250 – 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง จึงจะได้ยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำ

2.6.2.1 กลไกปฏิกิริยาในยางธรรมชาติโดยวิธีการบด

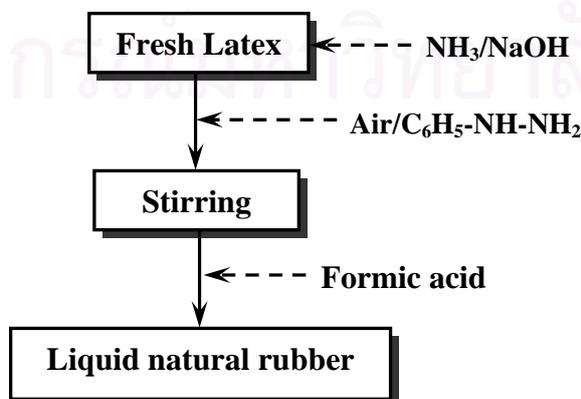
ขนาดโมเลกุลของยางที่บดจะเล็กลงขึ้นอยู่กับ ปริมาณออกซิเจนและอุณหภูมิ คือ ถ้าบดยางในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย หรือบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในยางจะเกิดการรวมตัวกันใหม่ ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของยางไม่ลดลง แต่การบดยางในบรรยากาศของออกซิเจน อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในยาง จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นอนุมูลเปอร์ออกไซด์และไฮเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide) หรือไดเปอร์ออกไซด์แบบวงแหวน (cyclic diperoxide) ทำให้โมเลกุลของยางจะถูกตัดขาดต่อไปเรื่อยๆและไม่สามารถกลับมาต่อกันใหม่อีก ดังนั้นการบดยางที่มีประสิทธิภาพจึงจำเป็นต้องกระทำในบรรยากาศที่มีออกซิเจนอยู่และอุณหภูมิมีผลต่อประสิทธิภาพการบดอย่างมาก ประสิทธิภาพของการบดยางจะสูงที่อุณหภูมิต่ำและที่อุณหภูมิสูงกว่า 120 องศาเซลเซียส ขึ้นไป ช่วงอุณหภูมิต่ำ การขาดของสายโมเลกุลยางเนื่องจากการขาดทางกล (mechanical rupture) ส่วนช่วงอุณหภูมิสูง การขาดของสายโมเลกุลยางเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidative degradation) [11]



รูปที่ 2.11 กลไกการเกิดปฏิกิริยาขณะบดยาง

2.6.3 การเตรียมยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำด้วยวิธีทางเคมีจากน้ำยางข้น

น้ำยางสดรักษาสภาพน้ำยางด้วย แอมโมเนีย (ammonia, NH_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) ใช้น้ำยางออกจากถังเก็บสู่การกวนด้วยเครื่องกวนเติม ฟีนิล ไฮดราซีน (phenyl hydrazine, $\text{C}_6\text{H}_5\text{-NH-NH}_2$) เพื่อเริ่มปฏิกิริยาดีโพลีเมอไรเซชัน (depolymerization) พร้อมเป่าอากาศให้กับถังกวนอย่างสม่ำเสมอเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ระหว่างปฏิกิริยาจะเกิดเปอร์ออกไซด์และไฮโดรเปอร์ออกไซด์ขึ้น ซึ่งสารเหล่านี้ทำให้โมเลกุลยางแตกออกได้เป็นโมเลกุลยางที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยประมาณ 20000 g/mol) หลังจากทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 24 ชั่วโมง น้ำยางที่ได้จะถูกถ่ายมายังถังพักพร้อมเติมกรดฟอร์มิก (formic acid) เพื่อให้ยางจับตัวเป็นก้อน เมื่อได้ก้อนยางจับตัวแล้วนำไปผ่านการล้าง ตัดย่อย แล้วจึงอบและอัดแท่ง จึงได้ยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำ [19]



รูปที่ 2.12 การเตรียมยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำด้วยวิธีทางเคมีจากน้ำยางข้น

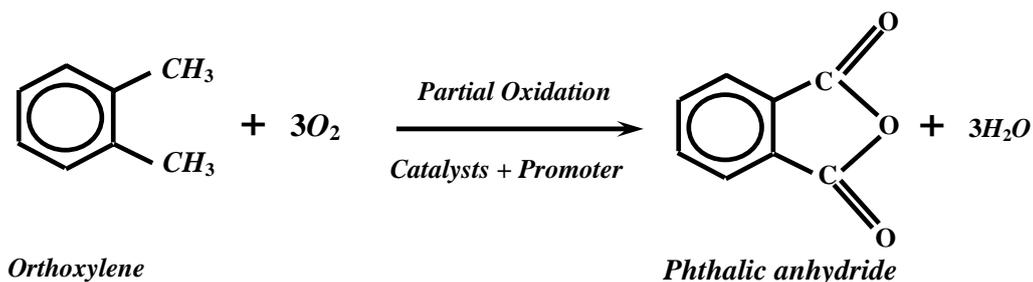
2.7 คอมแพททิไบไลเซอร์ฟทาลิกแอนไฮไดรด์ (Phthalic anhydride, PA)

ฟทาลิกแอนไฮไดรด์มีลักษณะเป็นผลึกแข็งสีขาว ไม่มีกลิ่นและเป็นหนึ่งในอนุกรมของสารประกอบแอนไฮไดรด์ โดยโครงสร้างทางเคมีของฟทาลิกแอนไฮไดรด์ประกอบด้วยคาร์บอน 8 อะตอม ไฮโดรเจน 4 อะตอมและออกซิเจน 3 อะตอม ($C_8H_4O_3$) มีอุณหภูมิจุดเดือดที่ 280 องศาเซลเซียส มีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวที่ 131 องศาเซลเซียส ฟทาลิกแอนไฮไดรด์จะทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งเป็นก๊าซได้ (ระเหิด) ที่สภาวะปกติ แต่เมื่ออยู่ในสภาวะปนเปื้อน ผงฝุ่นจากฟทาลิกแอนไฮไดรด์สามารถระเบิดขึ้นได้ถ้าความเข้มข้นของผงฝุ่นฟทาลิกแอนไฮไดรด์ต่อปริมาณอากาศมีความเข้มข้น ประมาณ 1.7-10.5% โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส [20] ผงฝุ่นที่เกิดจากฟทาลิกแอนไฮไดรด์มากกว่า 2 ppm เมื่อสัมผัสกับร่างกาย จะเกิดความเป็นพิษต่อร่างกาย เช่น เมื่อสารนี้สัมผัสกับน้ำจะกลายเป็น กรดฟทาลิก (Phthalic acid) ซึ่งมีฤทธิ์กัดกร่อนทำให้ผิวหนังเป็นผื่นแดง ปวดแสบปวดร้อนและเมื่อสูดดม ไอระเหยหรือ ผงฝุ่นของสารนี้เข้าไปจะก่อให้เกิดการระคายเคือง ไอ หายใจติดขัด ปวดศีรษะ เวียนศีรษะและเป็นสาเหตุทำให้เกิดโรคมะเร็ง เป็นต้น [21]

การสังเคราะห์ฟทาลิกแอนไฮไดรด์สามารถเตรียมได้ทั้งในสถานะสารละลายและสถานะก๊าซ ซึ่งในปี ค.ศ. 1917 ได้การจดสิทธิบัตรเป็นครั้งแรก หลังจากนั้นจึงได้พัฒนาและปรับปรุงการสังเคราะห์ฟทาลิกแอนไฮไดรด์ให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การใช้สารเร่งปฏิกิริยาและสารกระตุ้นปฏิกิริยาจึงเป็นวิธีที่ใช้ในการปรับปรุงการสังเคราะห์ เพื่อให้ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้คือ การสังเคราะห์ฟทาลิกได้ปริมาณสูงขึ้น โดยสารเร่งปฏิกิริยาทางเคมีที่นิยมใช้การสังเคราะห์ฟทาลิกแอนไฮไดรด์ในปัจจุบันคือ โมลิบดีนัม (molybdenum) และ แมงกานีสออกไซด์ (manganese oxides) [20]

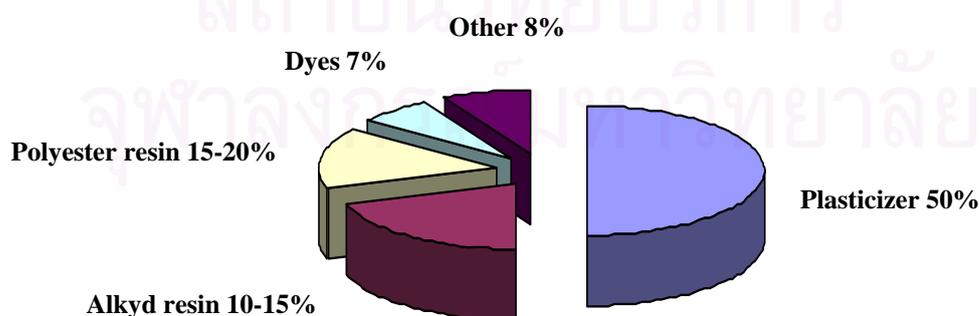
สารตั้งต้นที่เตรียมสังเคราะห์ฟทาลิกแอนไฮไดรด์มีด้วยกัน 2 ชนิดคือ ออร์โธไซลีน (orthoxylylene) และ แนฟทาลีน (naphthalene) โดยปัจจัยหลักที่ใช้ในการเลือกสารตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์ฟทาลิกแอนไฮไดรด์ คือ ปัจจัยทางผลผลิต การใช้ออร์โธไซลีนเป็นสารตั้งต้นจะได้ปริมาณฟทาลิกแอนไฮไดรด์สูงกว่าการใช้แนฟทาลีนเป็นสารตั้งต้น เนื่องจากคาร์บอนทุกอะตอมสามารถเปลี่ยนเป็นฟทาลิกแอนไฮไดรด์ได้ทั้งหมด[22] ซึ่งแตกต่างกับสารตั้งต้นแนฟทาลีน คาร์บอนอะตอมส่วนหนึ่งจะเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ดังเช่นการเตรียมออร์โธไซลีนและแนฟทาลีนเป็นสารตั้งต้นปริมาณ 1 kg จะได้ฟทาลิกแอนไฮไดรด์ 1.02 kg และ 0.95 kg ตามลำดับ

ซึ่งในปัจจุบันบริษัทผู้ผลิตจะเลือกใช้ออร์โธไซลีนเป็นสารตั้งต้นเกือบทั้งหมด ฟทาลิกแอนไฮไดรด์สามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (partial oxidation) ระหว่างออร์โธไซลีนกับออกซิเจนซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การสังเคราะห์ฟทาลิกแอนไฮไดรด์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน

การผลิตฟทาลิกแอนไฮไดรด์ ประมาณ 50% ของฟทาลิกแอนไฮไดรด์ ที่ผลิตได้ทั้งหมดใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิต พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ในกลุ่มของฟทาเลทพลาสติกไซเซอร์ (Phthalate plasticizer) ซึ่งสารประเภทนี้จะใช้ในอุตสาหกรรมการผลิต ผลิตภัณฑ์พลาสติกประเภทต่างๆ อาทิ เช่น ใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์ของโพลีไวนิล คลอไรด์ (Polyvinyl chloride, PVC) เป็นส่วนผสมที่ช่วยให้โพลิเมอร์มีความเหนียวแน่นและยืดหยุ่นมากขึ้น การผลิตฟทาลิกแอนไฮไดรด์ ประมาณ 15-20% ใช้ในการผลิตโพลีเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester) ซึ่งโพลีเอสเตอร์ประเภทนี้ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตไฟเบอร์กลาส (Fiberglass) ซึ่งจัดเป็นพลาสติกที่มีความแข็งแรงมาก ในเชิงพาณิชย์ได้นำพลาสติกประเภทนี้มาใช้ในการผลิตเครื่องสุขภัณฑ์และหินอ่อนสังเคราะห์ การผลิตฟทาลิกแอนไฮไดรด์ ประมาณ 10-15% ใช้ในการผลิตอัลคิดี เรซิน (alkyd resin) ซึ่งสารประเภทนี้จะใช้เป็นส่วนประกอบหลักของสารเคลือบในงานด้านศิลปกรรมและในอุตสาหกรรมการผลิตเรือ โดยสารนี้จะช่วยให้สารเคลือบแห้งเร็วโดยปราศจากฟองอากาศและติดก้น การผลิตฟทาลิกแอนไฮไดรด์ ประมาณ 7% ของการผลิตฟทาลิกแอนไฮไดรด์ทั้งหมดใช้ในการผลิต สีย้อม (dyes) และจำนวนการใช้ฟทาลิกแอนไฮไดรด์ที่เหลือ นำไปใช้ในห้องปฏิบัติการและอุตสาหกรรมประเภทต่างๆดังแสดงในรูปที่ 2.14 [20],[22]

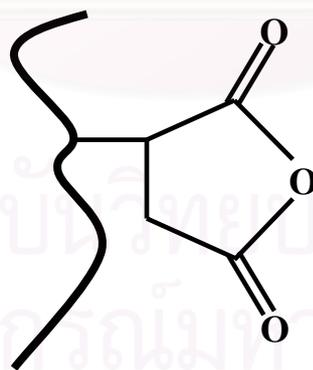


รูปที่ 2.14 การประยุกต์ฟทาลิกแอนไฮไดรด์ในอุตสาหกรรมต่างๆ

2.8 คอมแพททิบิไลเซอร์มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์โพลีเอทีลีน (Maleic anhydride grafted polyethylene, MA-g-PE)

มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์โพลีเอทีลีน สังเคราะห์ได้จาก การนำมาเลอิกแอนไฮไดรด์ไปกราฟต์บนสายโซ่โพลีเอทีลีน โดยทำให้เกิดอนุมูลอิสระบนสายโซ่โพลีเอทีลีนด้วยความร้อนและตัวเริ่มปฏิกิริยา อนุมูลอิสระของโพลีเอทีลีน ซึ่งว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา จะเกิดปฏิกิริยากับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ตรงบริเวณพันธะคู่ ดังนั้นจึงเป็นผลให้อนุมูลอิสระของโพลีเอทีลีนและหนึ่งอิเล็กตรอนจากมาเลอิกแอนไฮไดรด์ บริเวณพันธะคู่จะรวมตัวกันเกิดเป็นพันธะใหม่ขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่อการกราฟต์ ซึ่งเสนอโดย Gaylord and Mehta มีอยู่ด้วยกันสามปัจจัยหลักคือ สัดส่วนของปริมาณที่แตกต่างกันของโพลีเอทีลีนกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ สภาพของการเกิดปฏิกิริยาและความต่อเนื่องของการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โพลีเอทีลีน

คอมแพททิบิไลเซอร์มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์โพลีเอทีลีน จะทำหน้าที่ปรับปรุงการผสมของโพลีเมอร์ผสม ให้สามารถมีความเข้ากันได้เพิ่มขึ้น โดยลักษณะการใช้งานของสารนี้กับโพลีเมอร์ผสม โดยส่วนมากจะใช้สารนี้ผสมกับโพลีเมอร์ผสมที่มีโพลีเมอร์ตระกูลโพลีเอทีลีนเป็นส่วนผสมหลัก เพราะการเกิดปฏิกิริยาการกราฟต์ดังกล่าวจะช่วยให้โพลีเมอร์ตระกูลโพลีเอทีลีนเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น ในขณะที่มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่กราฟต์กับโพลีเมอร์ดังกล่าวพร้อมเกิดปฏิกิริยาได้อีก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสถานะและชนิดของโพลีเมอร์ เป็นสำคัญ [23-25]



Polyethylene chain Maleic anhydride

รูปที่ 2.15 โครงสร้างของมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์โพลีเอทีลีน

2.9 ต้นกำเนิดรังสีแกมมา (Gamma source)

รังสีแกมมาจัดเป็นรังสีที่ก่อให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนทางอ้อม (indirectly ionizing radiation) ในโรงงานการฉายรังสีแกมมาเชิงพาณิชย์จะใช้รังสีแกมมาจากโคบอลต์-60 เนื่องจากมีราคาถูก เมื่อเทียบกับไอโซโทปอื่นๆ ที่แผ่รังสีชนิดเดียวกันและมีครึ่งชีวิตที่พอเหมาะคือ 5.26 ปี โคบอลต์-60 มีความคงทนภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีปริมาณรังสีสูงและสามารถใช้งานได้แม้กระทั่งในอุณหภูมิสูงถึง 1000 องศาเซลเซียส [26] การเตรียมโคบอลต์-60 มีหลายบริษัททั้งในอเมริกาและแคนาดาที่มีความเชี่ยวชาญในการทำโคบอลต์-59 แบบเป็นเม็ดเล็กๆและแบบเป็นแท่งโดยใช้โคบอลต์ที่ทำเป็นผงและมีความบริสุทธิ์ถึงร้อยละ 99.9 เคลือบเม็ดและแท่งเหล่านั้นด้วยนิกเกิล เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโคบอลต์-59 กับออกซิเจน

ลักษณะของเม็ดหรือแท่งโคบอลต์ที่ใช้กันโดยทั่วไปมีสองลักษณะดังนี้

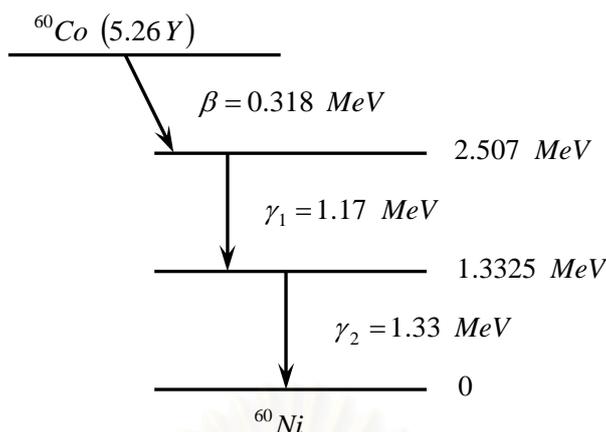
- สำหรับใช้ทางการแพทย์ เม็ดโคบอลต์จะทำเป็นรูปทรงกระบอกมีขนาด 1 มม. x 1 มม.
- สำหรับใช้ในทางอุตสาหกรรม จะทำเป็นแท่งยาวมีลักษณะเป็นทรงกระบอก

เช่นเดียวกับแบบเม็ด แต่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.4 มม. และสูง 25.5 มม.

เม็ดโคบอลต์ที่ใช้ในทางการแพทย์ ซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ดเหมือนทรายหยาบจะถูกเทใส่ลงในภาชนะที่มีรูปทรงที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน สำหรับแท่งโคบอลต์ที่ใช้ในทางอุตสาหกรรมจะถูกบรรจุเข้าไปในท่อที่ทำด้วยโลหะผสมเซอร์โคเนียมเรียกว่า เซอร์คาลอย (zircaloy) หลังจากบรรจุเรียบร้อยแล้ว ปลายทั้งสองจะถูกผนึกโดยการเชื่อม เพื่อใช้เป็นแท่งต้นกำเนิด แท่งต้นกำเนิดเหล่านี้จะถูกนำมารวมกันให้เป็นมัด

มัดของแท่งต้นกำเนิดเหล่านี้จะถูกนำไปใส่ลงในช่องอบนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เพื่อที่จะเปลี่ยนโคบอลต์-59 ให้เป็นโคบอลต์-60 ตามมาตรฐานการประกันคุณภาพและตามข้อกำหนดเฉพาะเดียวกัน

โคบอลต์-60 จะสลายตัวไปเป็นนิกเกิล-60 โดยการปลดปล่อยอนุภาคบีตา 0.318 MeV และสลายตัวต่อรังสีแกมมา 2 โฟตอนต่อการสลายตัวหนึ่งครั้ง โดยพลังงานโฟตอนทั้งสองเท่ากับ 1.17 MeV และ 1.33 MeV ตามลำดับหรือคิดเฉลี่ยให้พลังงานโฟตอน 12.5 MeV ต่อการสลายตัวหนึ่งครั้ง ซึ่งเราสามารถใช้ประโยชน์จากรังสีแกมมานี้ได้ในอุตสาหกรรมได้แก่ การฉายรังสีเวชภัณฑ์และการปรับปรุงโพลีเมอร์ เป็นต้น สรุปโดยรวมข้อดีของการใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา รังสีแกมมามีอำนาจทะลุทะลวงสูง (43.2 เซนติเมตร ต่อ 1 MeV ในอากาศ) จึงสามารถใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้อย่างกว้างขวาง เช่น ใช้วัดความหนาแน่น จากโรงงานผลิตพลาสติก ใช้สำรวจหลุมขุดเจาะ เพื่อหาแหล่งแร่ เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถฉายรังสีได้อย่างต่อเนื่องเมื่อสภาพได้เข้าและไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนเสริมต้นกำเนิดบ่อยครั้ง [27]



รูปที่ 2.16 แสดงแผนผังการสลายตัวของโคบอลต์-60 โดยสลายตัวให้รังสีบีตา พลังงาน 0.318 MeV และ รังสีแกมมาพลังงาน 1.17 และ 1.33 MeV

2.10 ทฤษฎีรังสีกับโพลีเมอร์ (Theory of radiation and polymer)

การแผ่รังสีจากนิวเคลียสและการเร่งอนุภาคอิเล็กตรอน เป็นต้นกำเนิดที่สำคัญของพลังงานที่ใช้ในกระบวนการทางเคมีเพื่อปรับปรุงโพลีเมอร์ รังสีก่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้มีการประยุกต์ใช้รังสีกับงานต่างๆหลายประเภท[28] ซึ่งลักษณะการใช้ประโยชน์จากรังสีขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการฉายรังสีที่การประยุกต์ผลิตภัณฑ์นั้นๆไปใช้ประโยชน์ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

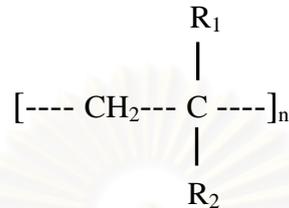
เมื่อพิจารณาการปรับปรุงคุณสมบัติโพลีเมอร์พบว่า การเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่สำคัญที่สุดที่เกิดขึ้นกับโพลีเมอร์ฉายรังสี คือ การครอสลิงค์ และการตัดทอนโมเลกุล (degradation) ซึ่งในด้านคุณสมบัติเชิงกล การครอสลิงค์ทำให้ความแข็ง (hardness) และความต้านทานแรงดึง (tensile strength) เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังลดค่าความยืดที่จุดขาด (elongation at break) และความสามารถในการละลายในตัวทำละลาย (solubility) ส่วนการตัดทอนโมเลกุลจะให้ผลด้านคุณสมบัติเชิงกลในทางตรงกันข้าม

นอกจากนี้ยังมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีอื่นๆ เกิดขึ้นภายหลังโพลีเมอร์ถูกฉายรังสี ได้แก่ การเกิดก๊าซ เช่น H_2 , CH_4 และ CO เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงพันธะเคมี (change in unsaturation) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นวง (cyclization) และ การรวมตัวกับออกซิเจน (oxidation)

การครอสลิงค์ และ การตัดทอนโมเลกุล เป็นกระบวนการทางเคมีรังสีที่ไม่สมดุล เพราะเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างและคุณสมบัติทางกายภาพของโพลีเมอร์ โดยการครอสลิงค์จะเพิ่มมวลโมเลกุล ในขณะที่การตัดทอนโมเลกุลจะลดมวลโมเลกุล

ตามกฎแล้วทั้งสองปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นทันทีทันใด โดยสัดส่วนของอัตราการเกิดจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของโพลีเมอร์ สภาพทางกายภาพและเงื่อนไขในการฉายรังสี แล้วโพลีเมอร์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงตามปฏิกิริยาใดปฏิกิริยาหนึ่งชัดเจน

ในกรณีที่โพลีเมอร์มีโครงสร้างซึ่งมีอะตอมของคาร์บอนเป็นสายโซ่หลัก และมีรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 2.17 ถ้า R₁ เป็นอะตอมของไฮโดรเจน และ R₂ เป็นอะตอมชนิดอื่น เมื่อโพลีเมอร์ถูกฉายรังสีจะเกิดการครอสลิงค์ขึ้น แต่ถ้า R₁ และ R₂ ไม่ใช่อะตอมของไฮโดรเจน เมื่อโพลีเมอร์ถูกฉายรังสีจะเกิดการตัดทอน โมเลกุล ขึ้น ตัวอย่างของการเกิดผลเนื่องจากรังสีในแต่ละโครงสร้างของโพลีเมอร์ [29] ดังแสดงในตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.17 โครงสร้างอะตอมหลักของโพลีเมอร์

ตารางที่ 2.1 แสดงปริมาณรังสีเพื่อจุดประสงค์ต่างๆของการใช้ประโยชน์ [28]

จุดประสงค์	ปริมาณรังสี (kGy)
เร่งอัตราการกลายพันธุ์ของพืช	0.01 – 0.1
ยับยั้งการงอกของหัวมันและหัวหอม	0.1 – 0.2
ควบคุมปริมาณปรสิตและแมลง	0.1 – 0.2
ชะลอการสุกของผลไม้และถนอมอาหารประเภทเนื้อสัตว์แช่แข็ง	2 – 5
ตัดทอนโครงสร้างโมเลกุลของสารเคมีที่เป็นส่วนประกอบภายในเครื่องสำอาง	2.5 – 10
หยุดยั้งการเจริญของเชื้อราบางชนิด	5 – 10
กำจัดสิ่งปนเปื้อนในเครื่องเทศ	7 – 10
ฆ่าเชื้อในผลิตภัณฑ์อาหารและยา	10 – 25
กำจัดเชื้อโรคที่อยู่ในอาหารสำหรับสัตว์ในห้องปฏิบัติการ	10 – 25
ฆ่าเชื้อแอนติบอดีในเส้นผมและผิวหนัง	20 – 25
ฆ่าเชื้อสำหรับเครื่องมือทางการแพทย์และเภสัชภัณฑ์	25 – 32
ถนอมอาหารให้ไว้ได้ระยะเวลายาวนานขึ้น	25 – 60
ปรับปรุงคุณสมบัติโพลีเมอร์	25 – 250
การตัดทอนโมเลกุลโพลีเมอร์	10 ² – 10 ³
ใช้ทดสอบความต้านทานรังสี	10 ³ – 10 ⁶

ตารางที่ 2.2 ชนิดของโพลิเมอร์กับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเมื่อนำรังสีในสูญญากาศ [30]

ชนิดโพลิเมอร์	โครงสร้างโมเลกุล	การเปลี่ยนแปลงทางเคมีเมื่อนำรังสี
Polyethylene	$---CH_2---CH_2---$	การครอสลิงค์
Polypropylene	$---CH_2---CH(CH_3)---$	การครอสลิงค์
Poly(vinyl fluoride)	$---CH_2---CHF---$	การครอสลิงค์
Poly(vinyl chloride)	$---CH_2---CHCl---$	การครอสลิงค์
Polyvinyl alcohol	$---CH_2---CH(OH)---$	การตัดทอนโมเลกุล
Polystyrene	$---CH_2---CH(C_6H_5)---$	การครอสลิงค์
Polyisobutylene	$---CH_2C(CH_3)_2---$	การตัดทอนโมเลกุล
Polytetrafluoroethylene	$---CF_2---CF_2---$	การตัดทอนโมเลกุล
Polytrifluorochloroethylene	$---CF_2---CFCl---$	การตัดทอนโมเลกุล
Polymethacrylamide	$---CH_2---C(CH_3)(CONH_2)---$	การตัดทอนโมเลกุล
Polymethacrylic acid	$---CH_2---C(CH_3)(CO_2H)---$	การตัดทอนโมเลกุล
Polymethacrylonitrile	$---CH_2---C(CH_3)(CN)---$	การตัดทอนโมเลกุล
Poly(methyl methacrylate)	$---CH_2(CH_3)(CO_2CH_3)---$	การตัดทอนโมเลกุล
Polyethylene oxide	$---CH_2---CH_2---O---$	การครอสลิงค์
Natural rubber	$---CH_2C(CH_3)=CHCH_2---$	การครอสลิงค์
Polyamides	$---CO---NH---$	การครอสลิงค์
Cellulose	$---C_6H_7O_2(OH)_3---$	การตัดทอนโมเลกุล
Cellulose acetate	$---C_6H_7O_2(OH)_{3-x}(OCOCH_3)_x---$	การตัดทอนโมเลกุล
Cellulose nitrate	$---C_6H_7O_2(OH)_{3-x}(ONO_2)_x---$	การตัดทอนโมเลกุล

2.11 ทฤษฎีการครอสลิงค์โดยพลังงานรังสี (Radiation cross linking)

การครอสลิงค์เป็นการเกิดพันธะเคมีที่มีการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่ของโพลิเมอร์ (Polymer chains) ระดับของการครอสลิงค์เป็นสัดส่วนกับปริมาณรังสีที่ฉาย กลไกของการครอสลิงค์ จะเปลี่ยนไปตามชนิดของโพลิเมอร์ที่เราศึกษา กลไกที่ยอมรับกันเป็นสากล คือ การแตกของพันธะเคมีของคาร์บอนและไฮโดรเจน (C-H) บนสายโพลิเมอร์ เพื่อเกิดเป็นอะตอมไฮโดรเจนตามด้วยการเข้าจับของอะตอมไฮโดรเจนที่สองจากสายโซ่ใกล้เคียง เพื่อเกิดเป็นโมเลกุล

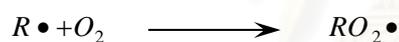
ไฮโดรเจน ดังนั้นสายโซ่โพลีเมอร์ที่มีอนุมูลอิสระที่อยู่ติดกันจะรวมกันเพื่อเกิดการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โพลีเมอร์ ผลจากการครอสลิงค์ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของโพลีเมอร์เพิ่มขึ้น ปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้นนำไปสู่การเกิดเป็นโพลีเมอร์แบบที่มีกิ่งก้านสาขา (branched polymer) และในที่สุดจะเกิดเป็นโพลีเมอร์แบบร่างแหสามมิติ (three-dimensional polymer network) [31]

2.12 ผลของออกซิเจนที่มีต่อการครอสลิงค์

ออกซิเจนที่มีอยู่ระหว่างการฉายรังสีโพลีเมอร์เป็นปัจจัยที่สำคัญ ซึ่งมีอิทธิพลต่อการแตกตัวด้วยรังสี (radiolysis) ของโพลีเมอร์ โดยเมื่อฉายรังสีโพลีเมอร์บางชนิด จะเกิดอนุมูลอิสระของโพลีเมอร์ ทำให้เกิดการครอสลิงค์ (crosslinking) ซึ่งถ้ามีออกซิเจนอยู่ระหว่างการฉายรังสี ออกซิเจนจะรวมตัวกับอนุมูลอิสระของโพลีเมอร์เกิดเป็นอนุมูลอิสระของเปอร์ออกซี ทำให้เกิดการตัดทอนโมเลกุล (degradation) ของโพลีเมอร์

ปฏิกิริยาการรวมตัวกับออกซิเจนจะเกิดขึ้นระหว่างการฉายรังสี หรือหลังการฉายรังสี ซึ่งจะเกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำโพลีเมอร์ที่ฉายรังสีแล้วด้วยความร้อน ผลที่เกิดขึ้นได้แก่ peroxy radicals ($RO_2 \bullet$), hydro peroxides (RO_2H) และ peroxides ($ROOR$) โดยมีหลักการเกิดดังนี้

เมื่อ radical เริ่มรวมตัวกับออกซิเจน



peroxy radicals จะเริ่มรวมตัวกับอะตอมของไฮโดรเจนจากโมเลกุลของโพลีเมอร์อื่น



ปฏิกิริยาสุดท้ายเป็นการรวมตัวกันของ peroxy radicals เกิดเป็น peroxide



ซึ่งเมื่อให้ความร้อนแก่โพลีเมอร์ ทั้ง RO_2H และ $ROOR$ จะสลายตัวให้อนุมูลอิสระ

ผลของออกซิเจนที่มีต่อการเกิด การตัดทอนโมเลกุลในโพลีเมอร์ต่างๆ จะไม่เหมือนกัน เช่น ออกซิเจนช่วยให้โพลีเอทิลีนมีโอกาสเกิดการลดทอนโมเลกุลได้ง่ายกว่าการครอสลิงค์ แต่กลับทำให้โพลีเมทิลเมทาไครเลต เกิดการลดทอนโมเลกุลได้ช้าลงมีรายงานว่าค่า G(S) จากการฉายรังสี โพลีเมทิลเมทาไครเลต ในสูญญากาศ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.54 scissions/100 eV สำหรับ เซลลูโลส (cellulose) จะให้ผลการเกิด การลดทอนโมเลกุลที่เหมือนกัน ทั้งที่มีและไม่มีออกซิเจน ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลของออกซิเจนไม่มีกฎแน่นอน โดยจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของ โพลีเมอร์แต่ละชนิด

อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของออกซิเจนในโพลีเมอร์ ซึ่งหาได้จากความสามารถในการละลาย ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ ปริมาณออกซิเจนในวัสดุ และอัตราการเข้า ออกของออกซิเจน ประสิทธิภาพของกระบวนการเหล่านี้จะได้รับผล

จากลักษณะโครงสร้างทั้งภายในและภายนอกของโพลีเมอร์ ย่านโครงสร้างที่ไม่สมบรูณ์ความหนาของตัวอย่าง ความดันของออกซิเจน อัตราเร็วของรังสีและอุณหภูมิขณะฉายรังสี เป็นต้น

อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของโพลีเมอร์ลดลงและมีความพรุนมากขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการที่ออกซิเจนเข้าสู่วัสดุได้มาก ดังนั้นโพลีเมอร์ที่มีลักษณะเป็นฟิล์มจะถูกออกซิเดชันมากขึ้น ได้เร็วกว่าโพลีเมอร์ที่เป็นเม็ด แผ่นหนา หรือแท่ง การที่ออกซิเจนไม่มีผลต่อการเกิดการลดทอนโมเลกุลในเซลล์โกลส เนื่องจากโครงสร้างที่แข็งและมีความเป็นผลึกสูง จึงจำกัดการเข้าสู่โมเลกุลของออกซิเจน [29]

ตารางที่ 2.3 ค่า G(X) และค่า G(S) ของโพลีเมอร์ชนิดต่างๆเมื่อฉายรังสีที่อุณหภูมิห้องภายใต้สูญญากาศหรือบรรยากาศในโครเจน [30]

โพลีเมอร์	G(X)	G(S)
โพลีเอทีลีน (Polyethylene)	3.0	0.88
โพลีเอทีลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Liner low density polyethylene)	2.53	0.4
โพลีโพรพิลีน (Polypropylene)	0.6	0.11
ยางธรรมชาติ (Natural rubber)	1.1	0.22
โพลีไวนิลคลอไรด์ (Poly(vinyl chloride))	2.15	–
โพลีสไตรีน (Polystyrene)	0.045	< 0.018
โพลีเมทิลเมทาครีเลต (Poly(methyl methacrylates))	–	1.22–3.5
โพลีไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane)	2.7	< 0.54
บิวทาไดอิน-สไตรีน โคโพลีเมอร์ (butadiene-styrene copolymer,77:23)	2.8	0.39
โพลีโพรพิลีนออกไซด์ (Polypropylene oxide)	0.15	0.22
ไนลอน-6 (Polycaprolactum,Nylon-6)	0.33	0.23

2.13 การเปรียบเทียบการครอสลิงค์โดยวิธีการทางรังสีและทางเคมี

กระบวนการทางรังสี มีคุณสมบัติที่พิเศษเหนือกว่าวิธีการแบบดั้งเดิมโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการเริ่มต้นปฏิกิริยา ซึ่งแตกต่างจากกระบวนการเริ่มต้นปฏิกิริยาเคมี โดยกระบวนการทางรังสีไม่ต้องใช้สารเร่งปฏิกิริยา (catalyst) หรือสารเติมแต่ง (additive) ในปฏิกิริยาเริ่มต้น โดยทั่วไปแล้วเทคนิคทางรังสี (radiation technique) จะเกี่ยวข้องกับการดูดกลืนพลังงาน (energy absorption) โดยสายโซ่หลักของโพลีเมอร์ และก่อให้เกิดอนุมูลอิสระ ในขณะที่กระบวนการทาง

เคมี อนุมูลอิสระจะถูกทำให้เกิดขึ้นโดยการสลายตัวของสารเริ่มต้นปฏิกิริยา (initiator) ในขณะที่กระบวนการทางรังสี เราสามารถปรับเปลี่ยนอัตราปริมาณรังสี (dose rate) ทำให้สามารถควบคุมปฏิกิริยาได้ดีกว่า และไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการปนเปื้อนของสารเริ่มต้นปฏิกิริยา [31] นอกจากนี้กระบวนการทางเคมียังก่อให้เกิดความร้อนสะสม เนื่องจากต้องใช้ความร้อนในการทำให้เกิดการแตกตัวของสารเริ่มต้นปฏิกิริยา ซึ่งทำให้โครงสร้างที่เป็นผลึก (crystalline) ส่วนใหญ่หลอมเหลว ดังนั้นหลังจากการเย็นตัวของโพลีเมอร์การกระจายตัวของสารประกอบจะกลายเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สัดส่วนของโครงสร้างที่เป็นผลึก (crystalline fraction) ลดลงอย่างมากในการประกอบสเต็ม ด้วยวิธีทางเคมี แต่สำหรับวิธีทางรังสีนั้นการเกิดของอนุมูลอิสระบนโพลีเมอร์ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ (หรือสามารถกล่าวได้ว่า พลังงานกระตุ้นจากกระบวนการเริ่มต้นปฏิกิริยาเป็นศูนย์) แต่จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นรังสีที่ทะลุผ่านเนื้อโพลีเมอร์ (polymer matrix) เป็นผลทำให้สัดส่วนของโครงสร้างที่เป็นผลึกทั้งก่อนและหลังการฉายรังสีจะใกล้เคียงกันมาก โดยปริมาณของโครงสร้างที่เป็นผลึกจะสัมพันธ์กับความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลว (heat of fusion) น้ำหนักโมเลกุลของผลิตภัณฑ์สามารถควบคุมได้ดีกว่าการใช้กระบวนการทางเคมี [32] นอกจากนี้เทคนิคทางรังสีสามารถที่จะใช้ในการก่อให้เกิดการริเริ่มปฏิกิริยาในสารตั้งต้นที่เป็นของแข็ง เราสามารถใช้รังสีในการตัดแปลงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป ถึงแม้ว่าราคาต่อหน่วยของการติดตั้งพลังงานรังสีจะสูงกว่าการใช้พลังงานความร้อนหรือพลังงานไฟฟ้าก็ตาม แต่เทคนิคทางรังสีได้รับการพิสูจน์ว่ามีประสิทธิภาพที่ดี และใช้เนื้อที่ในการติดตั้งอุปกรณ์น้อยกว่าวิธีทางเคมี [31]

บทที่ 3

วัสดุอุปกรณ์ สารเคมีและวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 การเตรียม NR/LDPE blend และกระบวนการขึ้นรูป

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1.1 เม็ดพลาสติกโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ POLENE D2022 จากบริษัท Thai Petrochemical Industry Public Co., Ltd มีรายละเอียดคุณสมบัติแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเม็ดพลาสติกโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ POLENE D2022

Typical data	Unit	Value	Test method
Property			
MFI 2.16/kg/190 ⁰ C	g/10min	0.25	ASTM D1238
Density	g/cm ³	0.921	ASTM D1505
Tensile strength at yield	N/mm ²	10	ASTM D638
Tensile strength at break	N/mm ²	16	ASTM D638
Ultimate elongation	%	700	ASTM D638
Vicat softening temperature	⁰ C	99	ASTM D1525

3.1.1.2 ยางธรรมชาติอัดแท่ง Standard Thai Test Rubber (STR-5L) จากบริษัท บ้านแพนรีเสิร์ซแลบบอราทอรี จำกัด

3.1.1.3 ยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำ Liquid natural rubber (LNR) M.W 1x10⁵ จากบริษัท บ้านแพนรีเสิร์ซแลบบอราทอรี จำกัด

3.1.1.4 มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์โพลีเอทิลีน DuPontTM Fusabond^R E MB226DE DuPont Canada Inc. มีรายละเอียดคุณสมบัติแสดงไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์โพลีเอทีลีน DuPont™ Fusabond^R E MB226DE

Typical data	Nominal values	Test method
Property		
Percent grafted with MA	0.9 %	DuPont Canada
Density	0.93 g/cm ³	ASTM D1505
Melt flow rate (190 ⁰ C/2.16kg)	1.5 g/10min	ASTM D1238
Melting point	120 ⁰ C(248 ⁰ F)	ASTM D3418
Vicat softening point	95 ⁰ C(203 ⁰ F)	ASTM D1525
Freezing point	102 ⁰ C(216 ⁰ F)	ASTM D3418
Durometer hardness (D)	60	ASTM D2240

3.1.1.5 ฟทาลิกแอนไฮไดรด์บริสุทธิ์ จากบริษัท Carlo Erba, Italy. มีรายละเอียดคุณสมบัติแสดงไว้ในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติทางกายภาพของฟทาลิกแอนไฮไดรด์ (phthalic anhydride AR-grade)

Physical properties	Data
Molecular formula	C ₈ H ₄ O ₃
Molecular weight	148.11 g/mol
Boiling point	280 ⁰ C
Melting point	131 ⁰ C
Water solubility	6.2 g/L @25 ⁰ C
Density	1.527 g/mL @20 ⁰ C

3.1.1.6 เครื่องบดผสมภายใน (Internal mixer) จากบริษัท Sparton APS Co., Ltd. Denmark. ปริมาตรความจุ 3000 ลบ.ซม. ของภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องบดผสมภายใน (Internal mixer)

3.1.1.7 เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) จากบริษัท Sparton APS Co., Ltd. Denmark.ของภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (Two roll mill)

3.1.1.8 เครื่องขึ้นรูปโพลีเมอร์เป็นแผ่น (Hot press) จากบริษัท GO TECH Co.,Ltd., Taiwan. ของภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องขึ้นรูปโพลีเมอร์เป็นแผ่น (Hot press)

3.1.1.9 ตู้อบ (Hot air dryer) จากบริษัท LENTON Thermal Design, England.
ของภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ตู้อบ (Hot air dryer)

3.1.1.10 เครื่องชั่งแบบละเอียด

3.1.1.11 ถาดอะลูมิเนียม

3.1.1.12 กรรไกรขนาดใหญ่

3.1.1.13 ถุงมือหนัง

3.1.1.14 ถุงซีปโพลีเอทิลีนขนาด 8 x12 ตารางนิ้ว

3.12 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1.2.1 เตรียมยางธรรมชาติ STR-5L โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและคอมแพททิไบไลเซอร์ ตามน้ำหนักที่ใช้ในแต่ละอัตราส่วน ตามตารางที่ 3.4, 3.5, 3.6 และ 3.7 ได้รับการออกแบบสัดส่วนและน้ำหนัก เพื่อปริมาตรรวมของ NR/LDPE/Compatibilizer blend (เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์) ในแต่ละอัตราส่วนคือประมาณ 3000 ลบ.ซม. ซึ่งเป็นปริมาณที่เหมาะสมกับความจุของเครื่องบดผสมภายใน

3.1.2.2 เตรียมยางธรรมชาติ STR-5L โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและคอมแพททิไบไลเซอร์ พร้อมให้ความร้อน โดยการอบด้วยตู้อบ Hot air dryer เพื่อไล่ความชื้นออก ณ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

3.1.2.3 บดยางธรรมชาติในข้อ 3.1.2.2 ให้โมเลกุลยางลดลงด้วยเครื่องบดผสมภายใน (Internal mixer) เป็นเวลา 5 นาที

3.1.2.4 (เฉพาะตารางที่ 3.5) ใส่คอมแพททิไบไลเซอร์ยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำ (Liquid natural rubber) ในข้อ 3.1.2.2 ลงบดผสมกับยางธรรมชาติ เพื่อให้ยางทำปฏิกิริยากับยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำก่อน เป็นเวลา 3 นาที

3.1.2.5 (เฉพาะตารางที่ 3.6) นำยางธรรมชาติออกจากเครื่องบดผสมภายใน แล้วนำมาบดกับเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) เพื่อเติมคอมแพททิไบไลเซอร์ฟทาสิกแอนไฮไดรด์ ด้วยวิธีการโรย โดยให้ช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง (nip gap) อยู่ประมาณ 2–3 มิลลิเมตร สังเกตให้ฟทาสิกแอนไฮไดรด์กระจายตามยางธรรมชาติอย่างทั่วถึง ใช้เวลาประมาณ 3 นาที

3.1.2.6 (เฉพาะตารางที่ 3.6) นำยางธรรมชาติในข้อ 3.1.2.7 เข้าไปบดในเครื่องบดผสมภายในต่อ เพื่อให้ยางธรรมชาติทำปฏิกิริยากับฟทาสิกแอนไฮไดรด์ก่อน ณ อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที

3.1.2.7 (เฉพาะตารางที่ 3.7) ใส่คอมแพททิไบไลเซอร์มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์ โพลีเอทิลีนในข้อ 3.1.2.2 ลงบดผสมกับยางธรรมชาติ เพื่อให้ยางธรรมชาติทำปฏิกิริยากับมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์โพลีเอทิลีนก่อน เป็นเวลา 3 นาที

3.1.2.8 นำโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำในข้อ 3.1.2.2 ลงไปบดผสมกับยางธรรมชาติเป็นเวลา 16 นาที โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 140 องศาเซลเซียส

3.1.2.9 นำ NR/LDPE blend ออกจากเครื่องบดผสมภายใน แล้วนำมาเข้าเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง เพื่อรีดให้ NR/LDPE blend เป็นแผ่น โดยปราศจากฟองอากาศและง่ายต่อการขึ้นรูป โดยให้ช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง อยู่ประมาณ 3 มิลลิเมตร

3.1.2.10 นำ NR/LDPE blend ในข้อ 3.1.2.9 ไปขึ้นรูปให้เป็นแผ่นขนาด 17x17 ตารางเซนติเมตร ด้วยเครื่องขึ้นรูปโพลีเมอร์เป็นแผ่น (Hot press) ณ อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันที่ 140 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 15 นาที

3.1.2.11 นำแม่พิมพ์ไปหล่อเย็นด้วยน้ำเป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นจึงแกะแม่พิมพ์ออก นำแผ่น NR/LDPE blend ใส่ถุงซิปลพร้อมติดฉลากและนำไปทดสอบความเข้ากันได้ เช่น ทดสอบหาค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน และ ทดสอบด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เป็นต้น

ตารางที่ 3.4 อัตราการผสมยางธรรมชาติ/โพลีเอทีลีนความหนาแน่นต่ำ โดยปราศจากคอมแพทิบิไลเซอร์

อัตราส่วนการผสม NR/LDPE	ปริมาณสารโดยน้ำหนัก (กรัม)		
	NR	LDPE	Compatibilizer
75/25	2250	750	0
70/30	2100	900	0
60/40	1800	1200	0
50/50	1500	1500	0

ตารางที่ 3.5 อัตราการผสมยางธรรมชาติ/โพลีเอทีลีนความหนาแน่นต่ำ โดยใช้ยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำเป็นคอมแพทิบิไลเซอร์

อัตราส่วนการผสม NR/LDPE	NR/LDPE/LNR	ปริมาณสารโดยน้ำหนัก (กรัม)		
		NR	LDPE	LNR
75/25	65/25/10	1950	750	300
	60/25/15	1800	750	450
	55/25/20	1650	750	600
70/30	60/30/10	1800	900	300
	55/30/15	1650	900	450
	50/30/20	1500	900	600

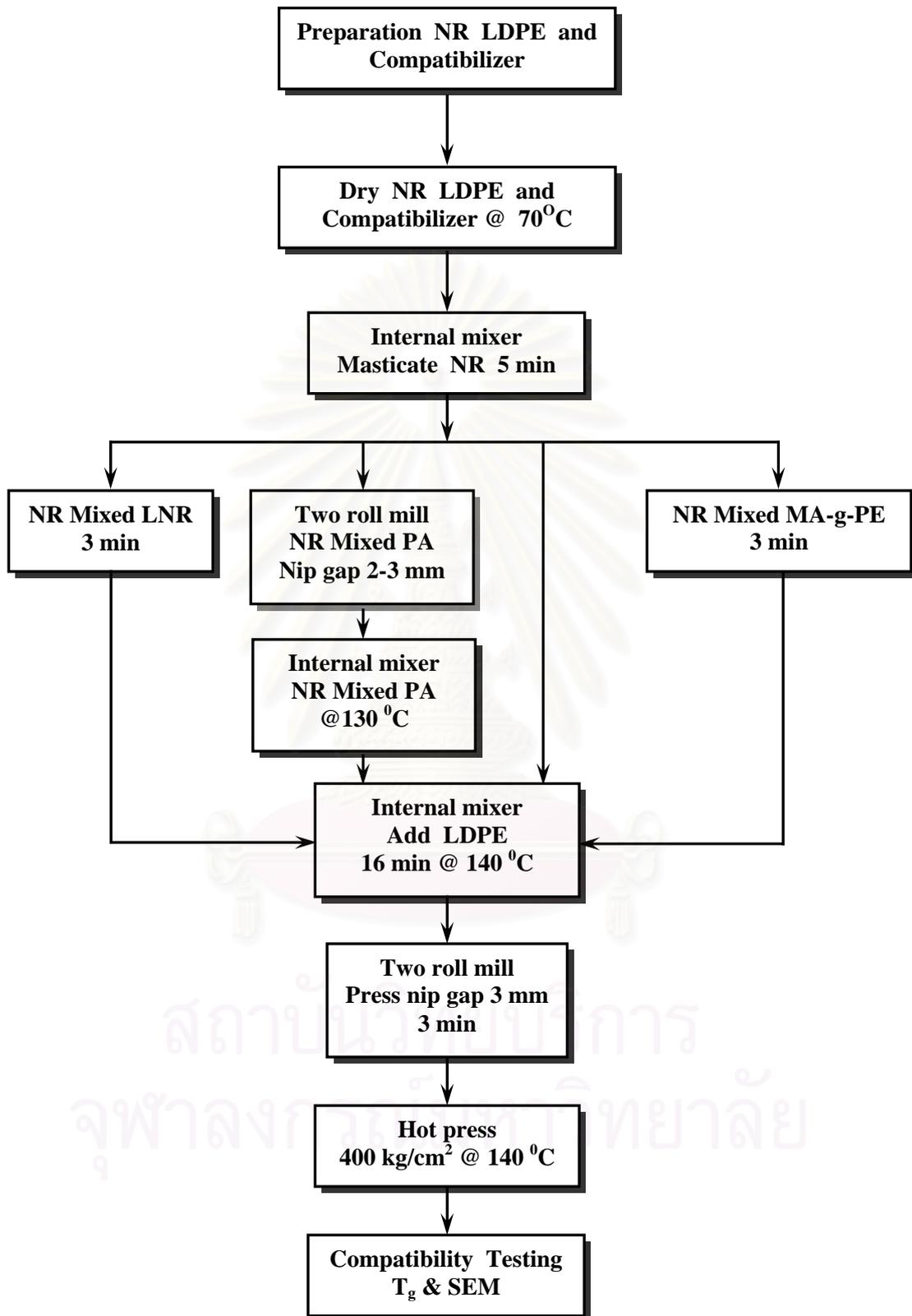
อัตราส่วนการผสม NR/LDPE	NR/LDPE/LNR	ปริมาณสาร โดยน้ำหนัก (กรัม)		
		NR	LDPE	LNR
60/40	50/40/10	1500	1200	300
	45/40/15	1350	1200	450
	40/40/20	1200	1200	600
50/50	40/50/10	1200	1500	300
	35/50/15	1050	1500	450
	30/50/20	900	1500	600

ตารางที่ 3.6 อัตราการผสมยางธรรมชาติ/โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ โดยใช้ฟทาติกแอนไฮไดรด์ เป็นคอมแพททิไบไลเซอร์

อัตราส่วนการผสม NR/LDPE	NR/LDPE/PA	ปริมาณสาร โดยน้ำหนัก (กรัม)		
		NR	LDPE	PA
75/25	74.625/24.875/0.5	2238.75	746.25	15
	74.250/24.750/1.0	2227.50	742.50	30
	73.875/24.625/1.5	2216.25	738.75	45
70/30	69.650/29.850/0.5	2089.50	895.50	15
	69.300/29.700/1.0	2079.00	891.00	30
	68.950/29.550/1.5	2068.00	886.50	45
60/40	59.700/39.800/0.5	1791.00	1194.00	15
	59.400/39.600/1.0	1782.00	1188.00	30
	59.100/39.400/1.5	1773.00	1182.00	45
50/50	49.750/49.750/0.5	1492.50	1492.50	15
	49.500/49.500/1.0	1485.00	1485.00	30
	49.250/49.250/1.5	1477.50	1477.50	45

ตารางที่ 3.7 อัตราการผสมยางธรรมชาติ/โพลีเอทีลีนความหนาแน่นต่ำโดยใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์
กราฟต์โพลีเอทีลีนเป็นคอมแพททิไบไลเซอร์

อัตราส่วนการผสม NR/LDPE	NR/LDPE/MA-g-PE	ปริมาณสารโดยน้ำหนัก (กรัม)		
		NR	LDPE	MA-g-PE
75/25	67.5/22.5/10	2025	675	300
	60.0/20.0/20	1800	600	600
	51.0/17.0/32	1530	510	960
70/30	63.0/27.0/10	1890	810	300
	56.0/24.0/20	1680	720	600
	47.6/20.4/32	1428	612	960
60/40	54.0/36.0/10	1620	1080	300
	48.0/32.0/20	1440	960	600
	40.8/27.2/32	1224	816	960
50/50	45.0/45.0/10	1350	1350	300
	40.0/40.0/20	1200	1200	600
	34.0/34.0/32	1020	1020	960

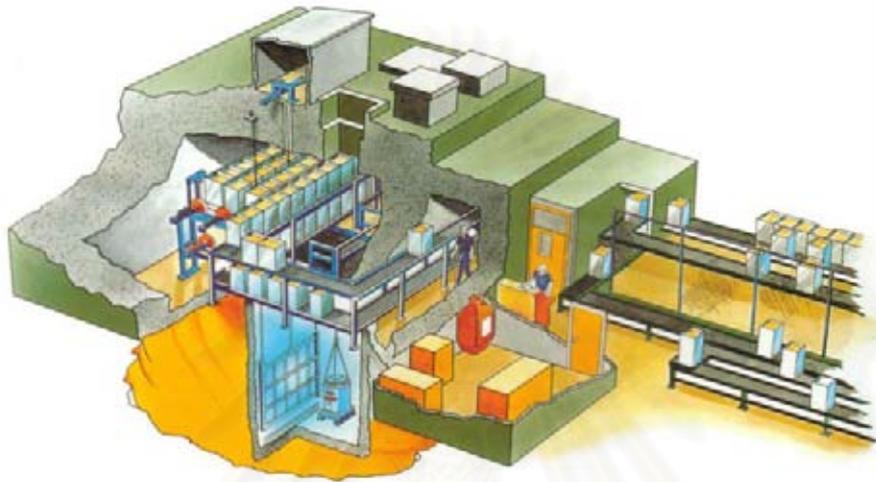


รูปที่ 3.5 แผนผังขั้นตอนวิธีการดำเนินงานวิจัยการเตรียม NR/LDPE blend และกระบวนการขึ้นรูป

3.2 กระบวนการฉายรังสี NR/LDPE blend ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปแล้ว

3.2.1 วัสดุอุปกรณ์

3.2.1.1 เครื่องฉายรังสีแกมมาจากโคบอลต์-60 ของบริษัท ISOTRON Co.,Ltd
ความแรงรังสี 1 MCi



รูปที่ 3.6 เครื่องฉายรังสีแกมมาจาก โคบอลต์-60 จากบริษัท ISOTRON Co.,Ltd

3.2.1.2 เครื่องฉายรังสีแกมมาจากโคบอลต์-60 รุ่น BSV-06 จากบริษัท Institute of Isotope Co., Ltd. Hungary ความแรงรังสี 4.5 kCi



รูปที่ 3.7 เครื่องฉายรังสีแกมมาจากโคบอลต์-60 รุ่น BSV-06 ของบริษัท Institute of Isotope Co., Ltd. Hungary. จากภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.1.3 ถุงผนึกสุญญากาศทำจากโพลีเอทิลีนขนาด 8x12 ตารางนิ้ว

3.2.1.4 เครื่องปิดผนึกสุญญากาศ House-hold vacuum sealer, D2-280A,
Brother, China.



รูปที่ 3.8 เครื่องปิดผนึกสุญญากาศ House-hold vacuum sealer, D2-280A, Brother, China.

3.2.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.2.2.1 นำ NR/LDPE blend ที่ผ่านการขึ้นรูปแล้ว บรรจุใส่ถุงผนึกสุญญากาศ

3.2.2.2 ทำการไล่อากาศในถุงผนึกสุญญากาศ เพื่อไม่ให้ออกซิเจนตกค้าง แล้วนำไปทำสุญญากาศ เป็นเวลา 5 วินาที และเวลาในการปิดผนึก 5 วินาที

3.2.2.3 นำ NR/LDPE blend ที่ได้จากข้อ 3.2.2.2 นำไปฉายรังสี ณ ปริมาณรังสี ตั้งแต่ 80 kGy ถึง 150 kGy

3.3 การประเมินการทดสอบความเข้ากันได้ของ NR/LDPE blend

3.3.1 วัสดุอุปกรณ์

3.3.1.1 เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) สำหรับหาค่า อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g)

3.3.1.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning electron microscope)

3.3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.3.2.1 ตัดแผ่น NR/LDPE blend ที่ผ่านการขึ้นรูปแล้ว ประมาณชิ้นทดสอบละ 10 มิลลิกรัม โดยวาง NR/LDPE blend ดังกล่าวในภาชนะบรรจุขึ้นทดสอบทำจากอะลูมิเนียม ให้

ความร้อนด้วยอัตรา 3 องศาเซลเซียสต่อนาที ช่วงอุณหภูมิที่ศึกษาคือ -40 องศาเซลเซียส ถึง 150 องศาเซลเซียส พร้อมจัดบันทึกผลอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g)

3.3.2.2 นำแผ่น NR/LDPE blend มาทดสอบด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน โดยนำ NR/LDPE blend ที่ผ่านการขึ้นรูปแล้ว นำชิ้นทดสอบมาสกัดด้วยสารละลายทูลอีนนาน 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง รมด้วยไอ OsO_4 และฉายด้วยทองคำบริสุทธิ์ [33] แล้วจึงทำการส่องหาความเข้ากันได้ดีของ NR/LDPE blend โดยจะสังเกตการไม่แยกเฟสซึ่งกันและกัน

3.4 การทดสอบความต้านทานแรงดึง ความต้านทานต่อการยืดจนขาด และ ค่าโมดูลัส100% ของ NR/LDPE blend

3.4.1 วัสดุอุปกรณ์

3.4.1.1 เครื่อง Universal testing machine รุ่น LLOYD LR5K ของบริษัท LLOYD INSTRUMENTS Ltd., จากสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ



รูปที่ 3.9 เครื่อง Universal Testing Machines ของบริษัท LLOYD INSTRUMENTS Ltd., รุ่น LLOYD LR5K

3.4.1.2 เครื่องตัดโพลีเมอร์เป็นรูปดัมเบลล์ Dumbell cutter, Mader Pressen., Taiwan.

3.4.1.3 ไมโครมิเตอร์สำหรับวัดความหนา

3.4.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.4.2.1 นำ NR/LDPE blend ที่ผ่านการขึ้นรูปแล้ว นำมาตัดเป็นชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ Die C ตามมาตรฐาน ASTM D412-98a [34]

3.4.2.2 วัดความหนาบริเวณ gauge length สามจุด พร้อมทั้งเฉลี่ยหาค่าความหนา

3.4.2.3 จับชิ้นทดสอบด้วยหัวจับให้แน่น เพื่อไม่ให้เกิดการบิดตัวขณะทำการทดสอบ

3.4.2.4 ดึงชิ้นทดสอบด้วยอัตราเร็ว 500 มิลลิเมตร/นาที รายงานผลเป็นแรงดึงต่อพื้นที่หน้าตัด (N/mm² และ MPa) จนชิ้นทดสอบขาดคุณสมบัติด้านทานแรงดึงแล้วบันทึกผล

$$\text{Tensile strength} = F/A$$

โดย $F =$ แรงดึงที่ทำให้ชิ้นทดสอบขาด (N)

$$A = \text{พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบขณะยังไม่ยืด (mm}^2\text{)}$$

$$\text{Elongation at break} = \frac{100 \times (L - L_0)}{L_0}$$

โดย $L =$ ระยะที่ชิ้นทดสอบถูกยืดตัวจนขาด (mm)

$$L_0 = \text{ระยะก่อนทำการทดสอบ (mm)}$$

โมดูลัส (modulus) หมายถึง ความเครียด (stress) ของชิ้นทดสอบเมื่อยืดออกค่าโมดูลัสหาได้ โดยการบันทึกแรงดึงขณะที่ชิ้นทดสอบถูกดึงยืดออก โดยค่าความยืด (elongation) ที่ 100%, 300% และ 500% เป็นต้น

3.5 การทดสอบความแข็งของ NR/LDPE blend

3.5.1 วัสดุอุปกรณ์

3.5.1.1 เครื่องวัดความแข็ง Zwick ประเภท Shore Durometer ความแข็งที่ทดสอบได้มีหน่วยเป็น Shore A

3.5.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

ตัดแผ่น NR/LDPE blend ที่ผ่านการขึ้นรูปและฉายรังสีแล้ว ขนาด 3x3 ตารางเซนติเมตร หนา 6 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM D2240-03 [35] จากนั้นนำมาทดสอบด้วยเครื่องวัดความแข็ง โดยให้หวักดค้างไว้ 10 วินาที แล้วจึงอ่านค่าความแข็งที่ได้

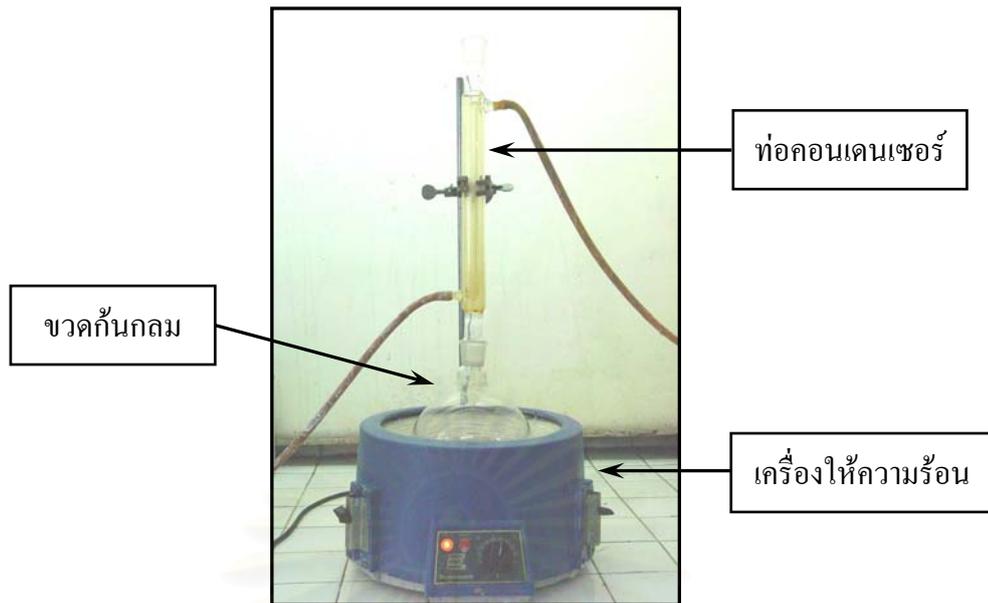
3.6 การทดสอบสัดส่วนความเป็นเจลของ NR/LDPE blend

3.6.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

- 3.6.1.1 เครื่องให้ความร้อน (Heating mantle)
- 3.6.1.2 ขวดก้นกลม (Round bottom flask) ขนาด 2000 มิลลิลิตร
- 3.6.1.3 ท่อคอนเดนเซอร์ (Reflux condenser)
- 3.6.1.4 ตัวจับยึดอุปกรณ์สำหรับ Reflux
- 3.6.1.5 ตู้อบ Hot air dryer
- 3.6.1.6 กอ่อง Sieve 100 mesh ขนาด 1.5x1.5x1.5 ลบ.ซม.
- 3.6.1.7 ถาดอะลูมิเนียม
- 3.6.1.8 บีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 3.6.1.9 สายยาง
- 3.6.1.10 สารละลายทูลูอีน Toluene AR-grade
- 3.6.1.11 สารละลายไซลีน Xylene AR-grade
- 3.6.1.12 เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ 5 ตำแหน่ง



รูปที่ 3.10 เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ 5 ตำแหน่ง



รูปที่ 3.11 ชุดอุปกรณ์การทดสอบสัดส่วนความเป็นเจล

3.6.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.6.2.1 ชั่งน้ำหนักกล่อง Sieve พร้อมติดฉลากและบันทึกค่า

3.6.2.2 ตัดแผ่น NR/LDPE blend ที่ผ่านการฉายรังสีแล้วให้เป็นชิ้นเล็กๆ พร้อมนำมาชั่งให้ได้น้ำหนัก ประมาณ 0.3 กรัมต่อกล่อง Sieve และบันทึกค่า

3.6.2.3 นำ NR/LDPE blend จากข้อ 3.4.2.1 บรรจุลงกล่อง Sieve

3.6.2.4 เทสารละลายทูลอีนและไซลีน ลงในขวดกั่นกลมในอัตราส่วน 1:1 ด้วยปริมาตร 700 มิลลิลิตร

3.6.2.5 นำกล่อง Sieve จากข้อ 3.4.2.3 บรรจุลงในขวดกั่นกลม พร้อมทั้งประกอบชุดทดสอบสัดส่วนความเป็นเจล เปิดสวิทช์ และ Reflux ไว้ 16 ชั่วโมง

3.6.2.6 นำกล่อง Sieve ออกจากขวดกั่นกลม พร้อมนำไปจัดความชื้น ด้วยการนำเข้าไปอบในตู้อบ Hot air dryer ณ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลง แล้วจึงนำมาชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกค่า

3.6.2.7 นำน้ำหนักของ NR/LDPE blend ก่อน Reflux และ หลัง Reflux มาคำนวณหาสัดส่วนความเป็นเจล

$$\% \text{ Gel Content} = (W_2/W_1) \times 100$$

โดย $W_1 =$ น้ำหนักก่อน Reflux (g)

$W_2 =$ น้ำหนักหลัง Reflux (g)

3.7 การทดสอบสัดส่วนการบวมน้ำมันของ NR/LDPE blend

3.7.1 วัสดุอุปกรณ์

3.7.1.1 ขวดแก้วปากกว้างทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร พร้อมฝาปิดอะลูมิเนียม

3.7.1.2 เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ 5 ตำแหน่ง

3.7.1.3 ตู้อบ Hot air dryer

3.7.1.4 บีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร

3.7.1.5 กระดาษทิชชู

3.7.1.6 คีมคีบ

3.7.1.7 สารละลายทูลูอิน Toluene AR-grade

3.7.1.8 สารละลายไซลีน Xylene AR-grade

3.7.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.7.2.1 ตัดแผ่น NR/LDPE blend ที่ผ่านการฉายรังสี โดยทำเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าให้ได้น้ำหนักประมาณ 0.5 กรัม พร้อมบันทึกค่า

3.7.2.2 เทสารละลายทูลูอินและไซลีนลงในขวดแก้วในอัตราส่วน 1:1 ด้วยปริมาตร 20 มิลลิลิตร พร้อมใส่ชิ้นทดสอบแล้วปิดฝาปล่อยให้อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง

3.7.2.3 ใช้คีมคีบชิ้นทดสอบออกมาพร้อมกับซับสารละลายด้วยกระดาษทิชชูกลับไปกลับมา 2 ครั้งและนำมาชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกค่า

3.7.2.4 นำค่าน้ำหนักก่อนการบวมน้ำมันและหลังการบวมน้ำมันไปคำนวณหาสัดส่วนการบวมน้ำมัน

$$\text{Swelling ratio (\%)} = \left[1 + \left(\frac{D_R}{D_T} \times \frac{W_2}{W_1} \right) - \frac{D_R}{D_T} \right] \times 100$$

โดย W_1 = น้ำหนักก่อนการบวมน้ำมัน (g)

W_2 = น้ำหนักหลังการบวมน้ำมัน (g)

D_R = ความหนาแน่นของยางและโพลีเอทีลีนความหนาแน่นต่ำ g/cm^3

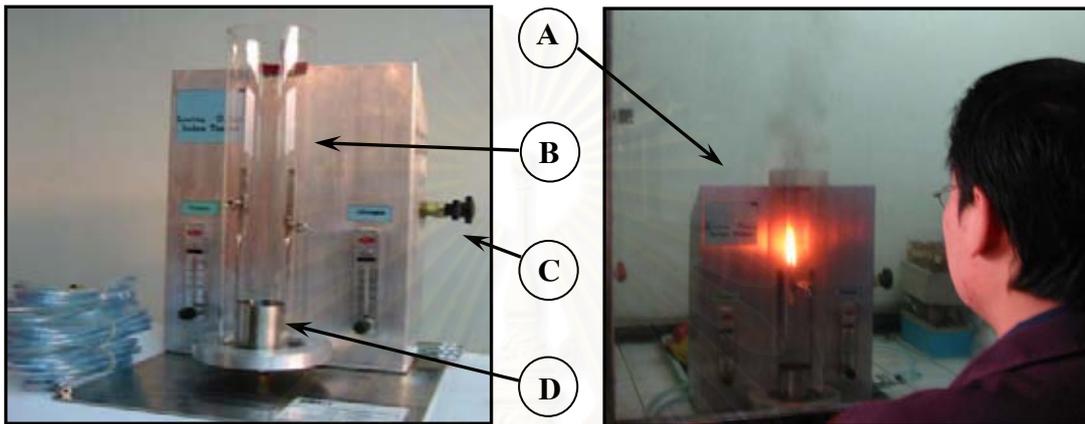
D_T = ความหนาแน่นของสารละลายทูลูอินและไซลีน g/cm^3

หมายเหตุค่า D_R และ D_T คำนวณจาก Weight fraction ของความหนาแน่นและอัตราส่วนผสม

3.8 การทดสอบดัชนีความเข้มของก๊าซออกซิเจนสูงสุดที่สามารถทำให้ลุกติดไฟได้ (Limiting Oxygen Index, LOI) ของ NR/LDPE blend

3.8.1 วัสดุอุปกรณ์

3.8.1.1 เครื่อง Oxygen Index Tester จากบริษัท ฟาไฮ สหกิจ จำกัด



รูปที่ 3.12 เครื่อง Oxygen Index Tester

A = ทดสอบการลุกไหม้ B = หลอดแก้ว C = วาล์วปรับตั้งอัตราการไหล D = อุปกรณ์จับชิ้นทดสอบ

3.8.1.2 ปืนจุดติดไฟด้วยก๊าซบิวเทน

3.8.1.3 ชุดท่อก๊าซไนโตรเจนและออกซิเจนพร้อมวาล์วชุดทำงาน

3.8.1.4 ก๊าซบิวเทนบริสุทธิ์

3.8.1.5 ก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ จากบริษัท TIG. Co., Ltd.

3.8.1.6 ก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์ จากบริษัท TIG. Co., Ltd.

3.8.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.8.2.1 ตัดแผ่น NR/LDPE blend ที่ผ่านการฉายรังสี ให้มีความยาว 140 มิลลิเมตร กว้าง 52 มิลลิเมตรและหนา 2 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM D2863-00 [36]

3.8.2.2 ปรับตั้งความดันของก๊าซไนโตรเจนและออกซิเจนที่ไหลออกจากถัง ด้วยวาล์วชุดทำงานให้มีความดัน 1 บาร์

3.8.2.3 ปรับตั้งอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนด้วยวาล์วจากเครื่อง Oxygen Index Tester 15 ลบ.ซม./วินาที

3.8.2.4 ปรับตั้งอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนด้วยวาล์วจากเครื่อง Oxygen Index Tester 5 ลบ.ซม./วินาที

3.8.2.5 นำชิ้นทดสอบไปติดตั้งภายในหลอดแก้วในแนวตั้ง โดยให้ส่วนบนสุดของหลอดแก้วห่างจากชิ้นทดสอบอย่างน้อย 100 มิลลิเมตร

3.8.2.6 นำปืนจุดติดไฟ โดยให้เปลวไฟลดบริเวณส่วนสูงสุดของชิ้นทดสอบ จนกระทั่งไฟเริ่มติดชิ้นทดสอบ ให้เริ่มจับเวลา

3.8.2.7 ถ้าไฟลุกติดชิ้นทดสอบ มากกว่า 50 มิลลิเมตร โดยใช้เวลาน้อยกว่า 3 นาที ให้ลดอัตราการไหลของออกซิเจนลง ในทางกลับกันเมื่อไฟลุกติดชิ้นทดสอบน้อยกว่า 50 มิลลิเมตร โดยใช้เวลามากกว่า 3 นาที ให้เพิ่มอัตราการไหลของออกซิเจนขึ้น ปรับตั้งจนกระทั่งไฟลุกติดชิ้นทดสอบเป็นเวลา 3 นาที พร้อมกับระบะการลุกติดไฟประมาณ 50 มิลลิเมตร

3.8.2.8 นำอัตราการไหลของไนโตรเจนและออกซิเจนมาคำนวณหาดัชนีการลุกติดไฟของออกซิเจน

$$LOI (\%) = \frac{(100 \times O_2)}{(O_2 + N_2)}$$

โดย O_2 = อัตราการไหลของออกซิเจน (cm^3 / s)

N_2 = อัตราการไหลของไนโตรเจน (cm^3 / s)

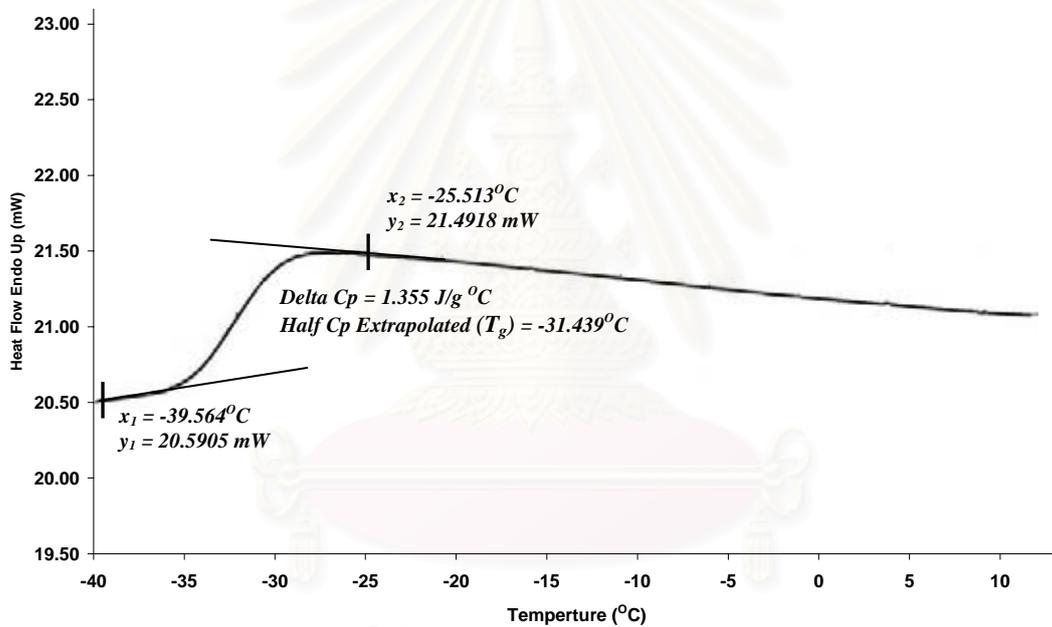
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลอง

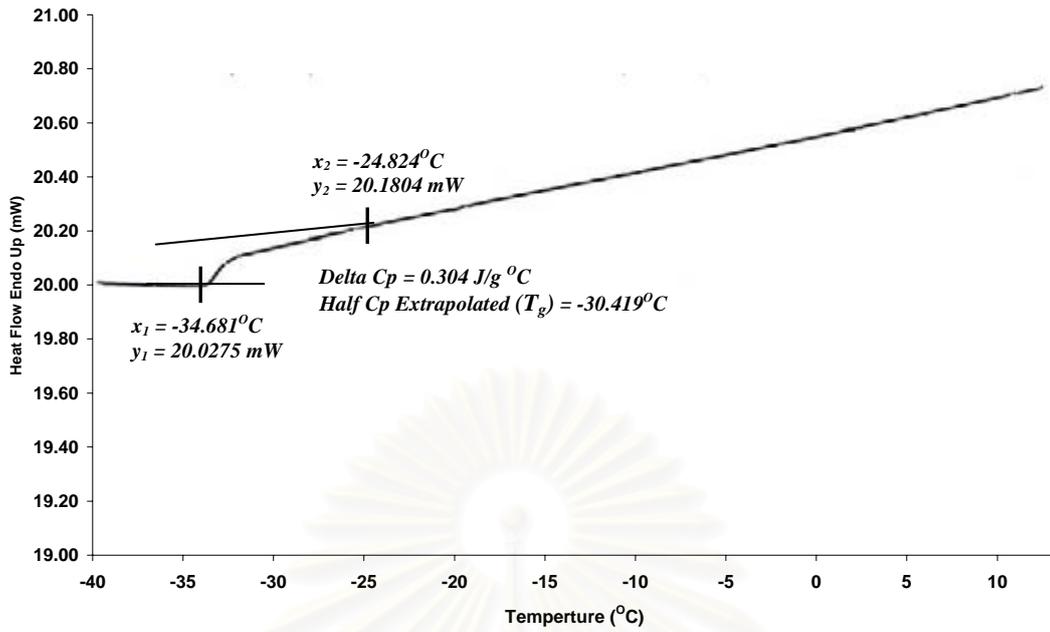
4.1 ผลการศึกษาความเข้ากันได้ของ NR/LDPE blend

จากการทดลองที่ 3.6 เป็นการศึกษาถึงความสามารถในด้านความเข้ากันได้ของการผสม NR/LDPE ก่อนการฉายรังสีพร้อมทั้งศึกษาสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงชนิดของคอมแพททิบิไลเซอร์ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.1, 4.2, 4.3 และ 4.4

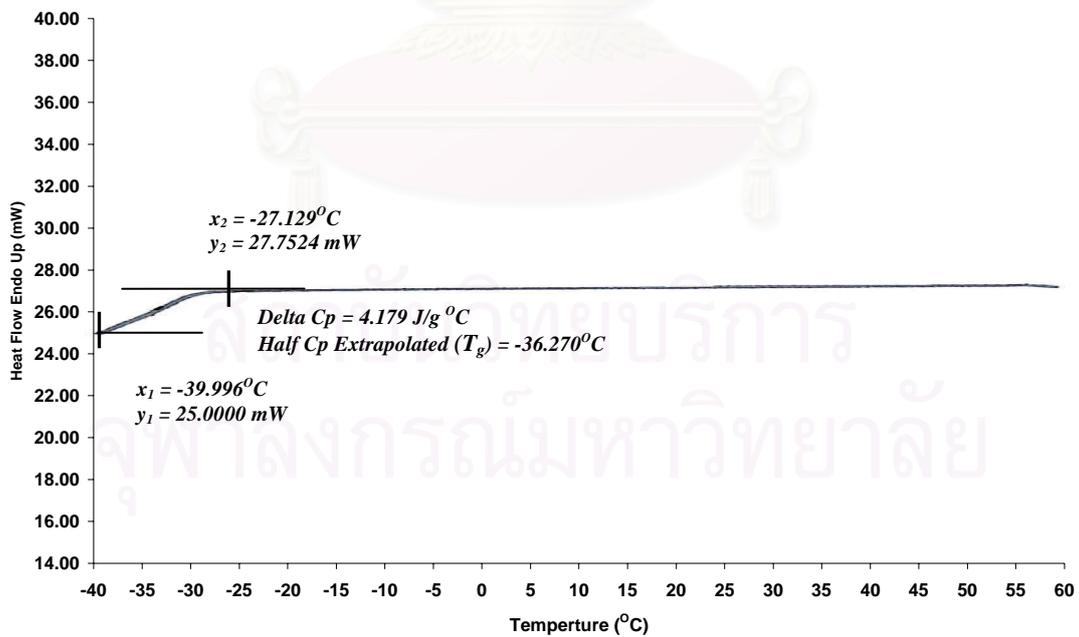


รูปที่ 4.1 อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของการผสม NR/LDPE ในสัดส่วน 60/40 โดยใช้ยางธรรมชาติ โมเลกุลต่ำเป็นคอมแพททิบิไลเซอร์ในปริมาณ 15%

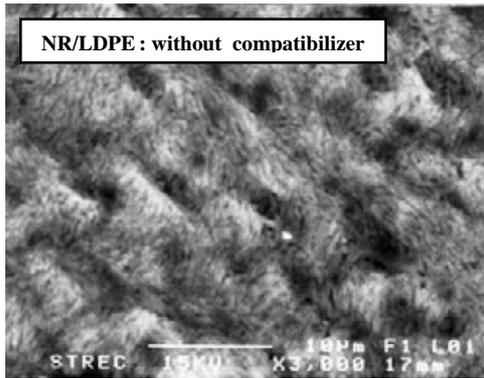
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



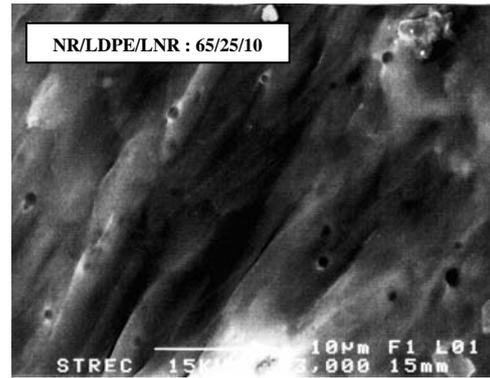
รูปที่ 4.2 อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของการผสม NR/LDPE ในสัดส่วน 60/40 โดยใช้ฟทาลิกแอนไฮไดรด์ เป็นคอมแพททิงโพลีเมอร์ในปริมาณ 1.0%



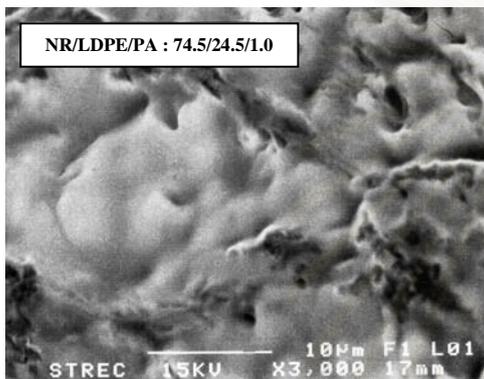
รูปที่ 4.3 อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของการผสม NR/LDPE ในสัดส่วน 60/40 โดยใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์ กราฟต์โพลีเอทิลีนเป็นคอมแพททิงโพลีเมอร์ในปริมาณ 32%



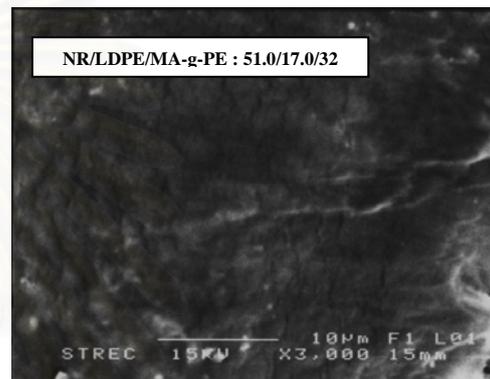
(ก)



(ข)



(ค)



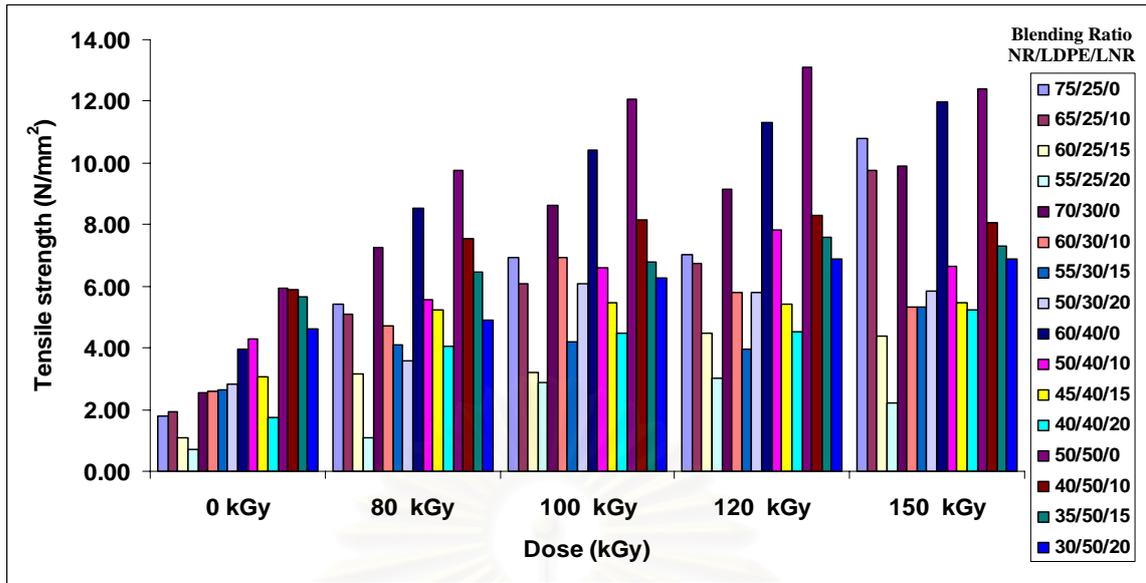
(ง)

รูปที่ 4.4 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยาย 3000 เท่าของการผสม NR/LDPE ในสัดส่วน 75/25 (ก) ปราศจากคอมแพทิบิไลเซอร์ (ข) ยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำ 10% (ค) ฟทาสิกแอนไฮไดรด์ 1.0% (ง) มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์โพลีเอทีลีน 32%

4.2 ผลการศึกษาค่าความต้านทานแรงดึงของ NR/LDPE blend โดยการเปลี่ยนแปลงชนิดและปริมาณของคอมแพทิบิไลเซอร์

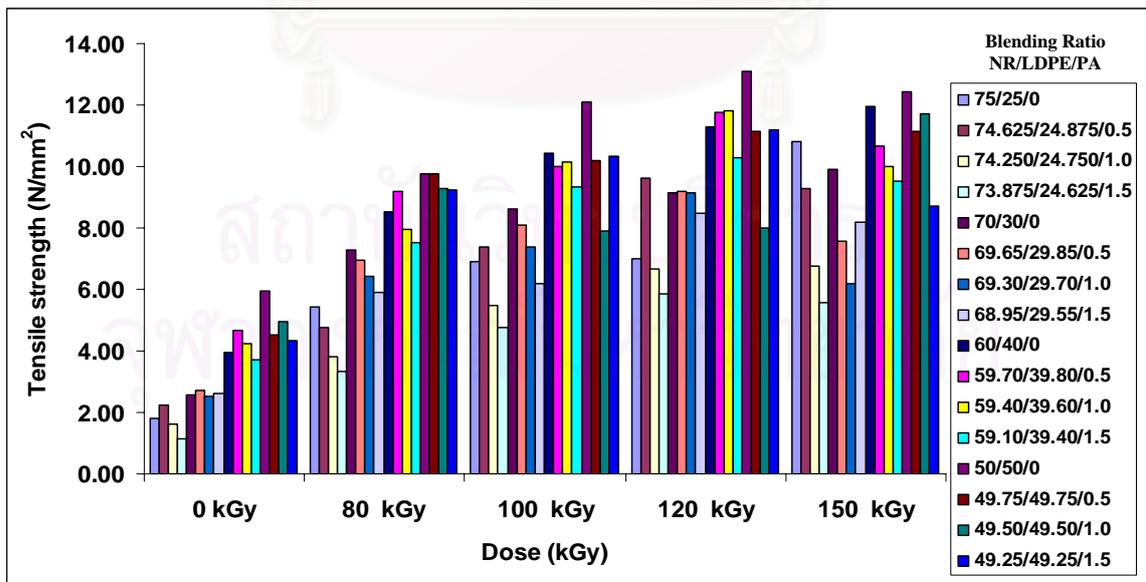
จากการทดลองที่ 3.4 เป็นการศึกษาถึงความสามารถในด้านความต้านทานแรงดึงของการผสม NR/LDPE ก่อนและหลังการฉายรังสี พร้อมทั้งศึกษาสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงชนิดและปริมาณของคอมแพทิบิไลเซอร์ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.5, 4.6 และ 4.7

จากผลการทดลองนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึง ระหว่างสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยปราศจากคอมแพทิบิไลเซอร์ กับสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยใช้ยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำเป็นคอมแพทิบิไลเซอร์ในปริมาณ 10%, 15% และ 20% แสดงดังรูปที่ 4.5



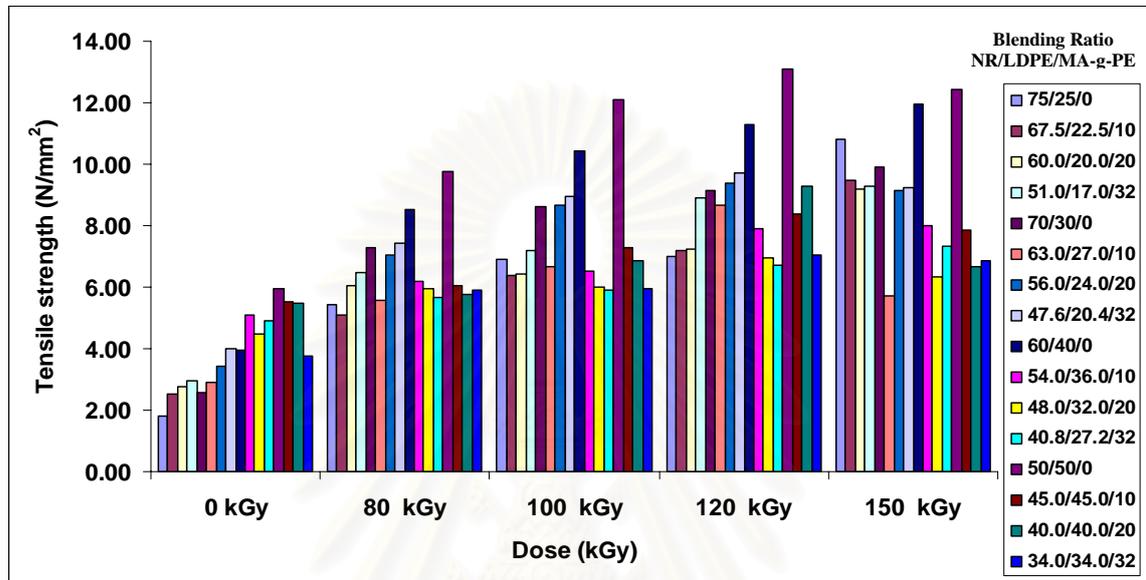
รูปที่ 4.5 แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อค่าความต้านทานแรงดึงเมื่อใช้ยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำเป็นคอมแพททิบิไลเซอร์ในปริมาณต่างๆและที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE

จากผลการทดลองนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึง ระหว่างสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยปราศจากคอมแพททิบิไลเซอร์ กับสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยใช้ฟทาสิกแอนไฮไดรด์เป็นคอมแพททิบิไลเซอร์ในปริมาณ 0.5%, 1.0% และ 1.5% แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อค่าความต้านทานแรงดึงเมื่อใช้ฟทาสิกแอนไฮไดรด์เป็นคอมแพททิบิไลเซอร์ในปริมาณต่างๆและที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE

จากผลการทดลองนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึง ระหว่างสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยปราศจากคอมแพททิบิไลเซอร์ กับสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์โพลีเอทีลีนเป็นคอมแพททิบิไลเซอร์ในปริมาณ 10%, 20% และ 32% แสดงดังรูปที่ 4.7

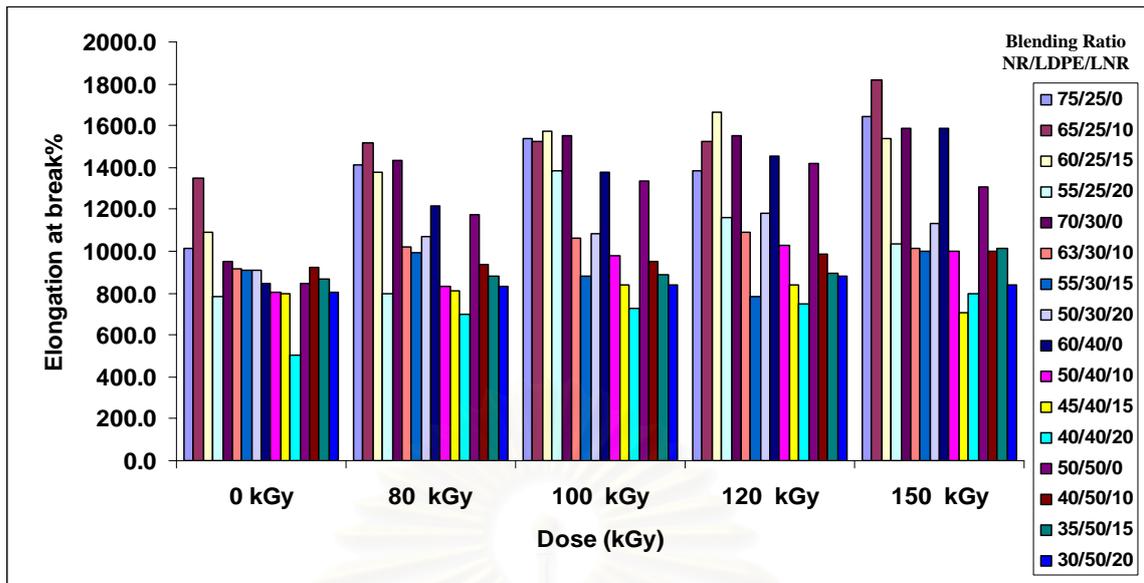


รูปที่ 4.7 แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อค่าความต้านทานแรงดึงเมื่อใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์โพลีเอทีลีนเป็นคอมแพททิบิไลเซอร์ในปริมาณต่างๆและที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE

4.3 ผลการศึกษาค่าความต้านทานต่อการยืดจนขาดของ NR/LDPE blend โดยการเปลี่ยนแปลงชนิดและปริมาณของคอมแพททิบิไลเซอร์

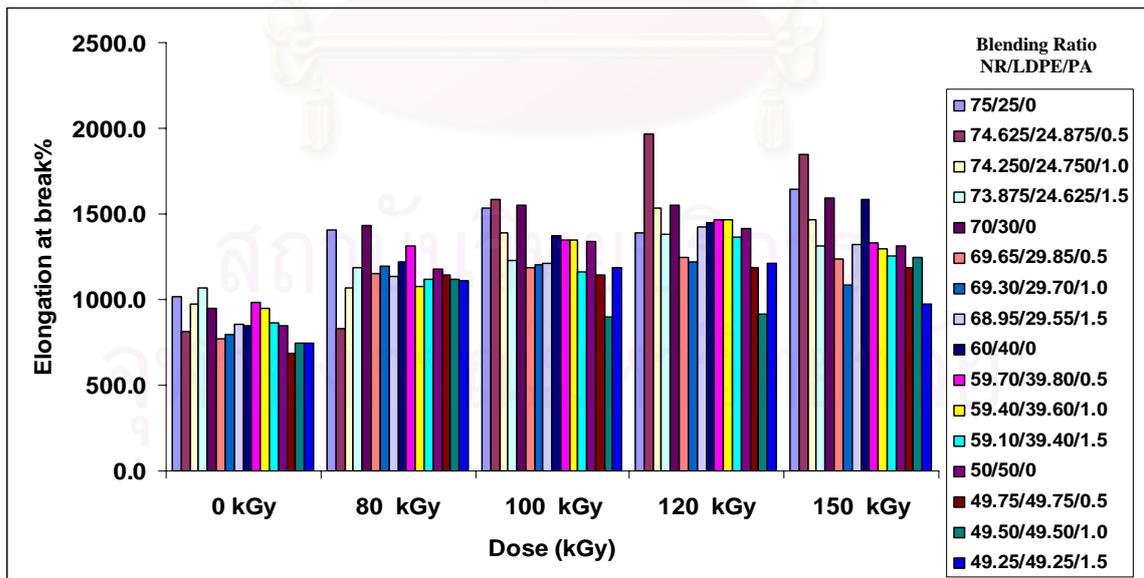
จากการทดลองที่ 3.4 เป็นการศึกษาถึงความสามารถในด้านความต้านทานต่อการยืดจนขาดของการผสม NR/LDPE ก่อนและหลังการฉายรังสี พร้อมทั้งศึกษาสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงชนิดและปริมาณของคอมแพททิบิไลเซอร์ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.8, 4.9 และ 4.10

จากผลการทดลองนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อการยืดจนขาด ระหว่างสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยปราศจากคอมแพททิบิไลเซอร์ กับสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยใช้ยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำเป็นคอมแพททิบิไลเซอร์ในปริมาณ 10%, 15% และ 20% แสดงดังรูปที่ 4.8



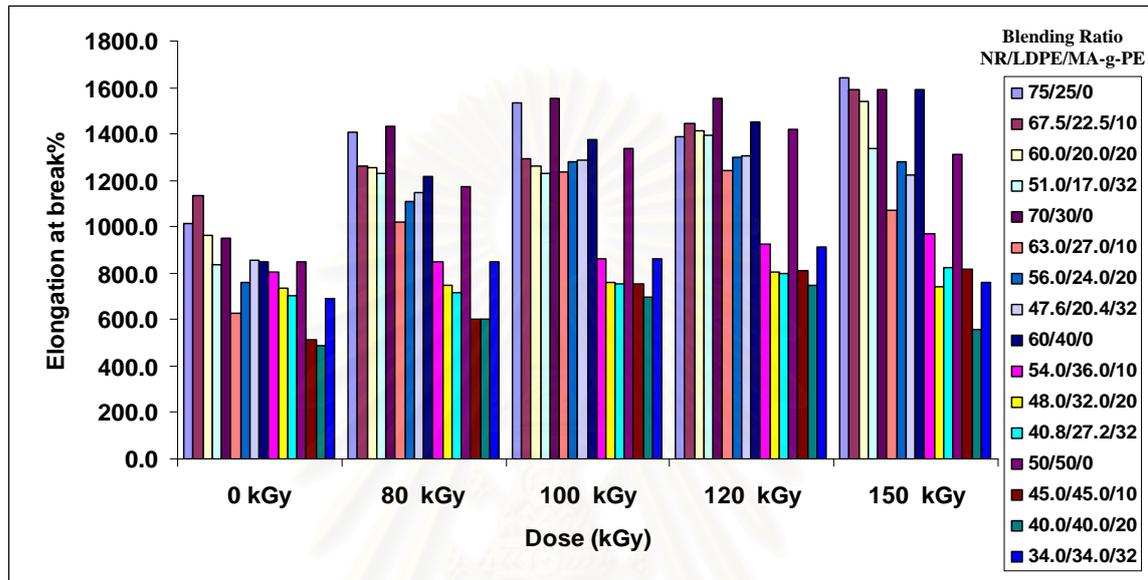
รูปที่ 4.8 แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อค่าความต้านทานต่อการยืดจนขาดเมื่อใช้ยางธรรมชาติ โมเลกุลต่ำเป็นคอมแพททิบิไลเซอร์ในปริมาณต่างๆและที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE

จากผลการทดลองนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อการยืดจนขาด ระหว่าง สัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยปราศจากคอมแพททิบิไลเซอร์ กับสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยใช้ฟทาสิกแอนไฮไดรด์เป็นคอมแพททิบิไลเซอร์ในปริมาณ 0.5%, 1.0% และ 1.5% แสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อค่าความต้านทานต่อการยืดจนขาดเมื่อใช้ฟทาสิกแอนไฮไดรด์เป็นคอมแพททิบิไลเซอร์ในปริมาณต่างๆและที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE

จากผลการทดลองนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อการยืดจนขาด ระหว่างสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยปราศจากคอมแพททิบิไลเซอร์ กับสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์โพลีเอทิลีนเป็นคอมแพททิบิไลเซอร์ในปริมาณ 10%, 20% และ 32% แสดงดังรูปที่ 4.10

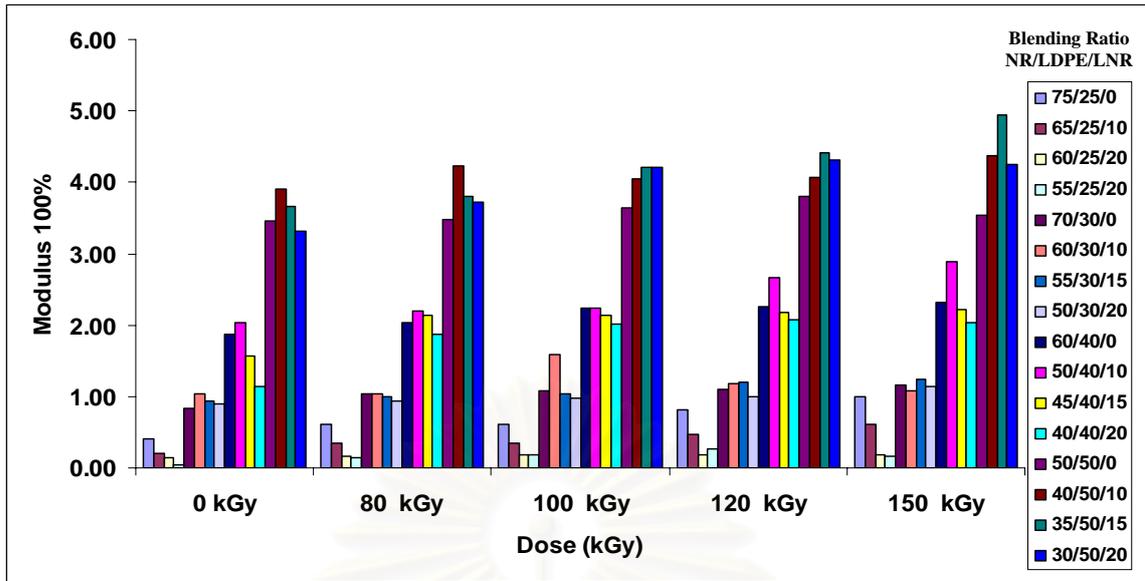


รูปที่ 4.10 แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อค่าความต้านทานต่อการยืดจนขาดเมื่อใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์โพลีเอทิลีนเป็นคอมแพททิบิไลเซอร์ในปริมาณต่างๆและที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE

4.4 ผลการศึกษาค่าโมดูลัส 100% ของ NR/LDPE blend โดยการเปลี่ยนแปลงชนิดและปริมาณของคอมแพททิบิไลเซอร์

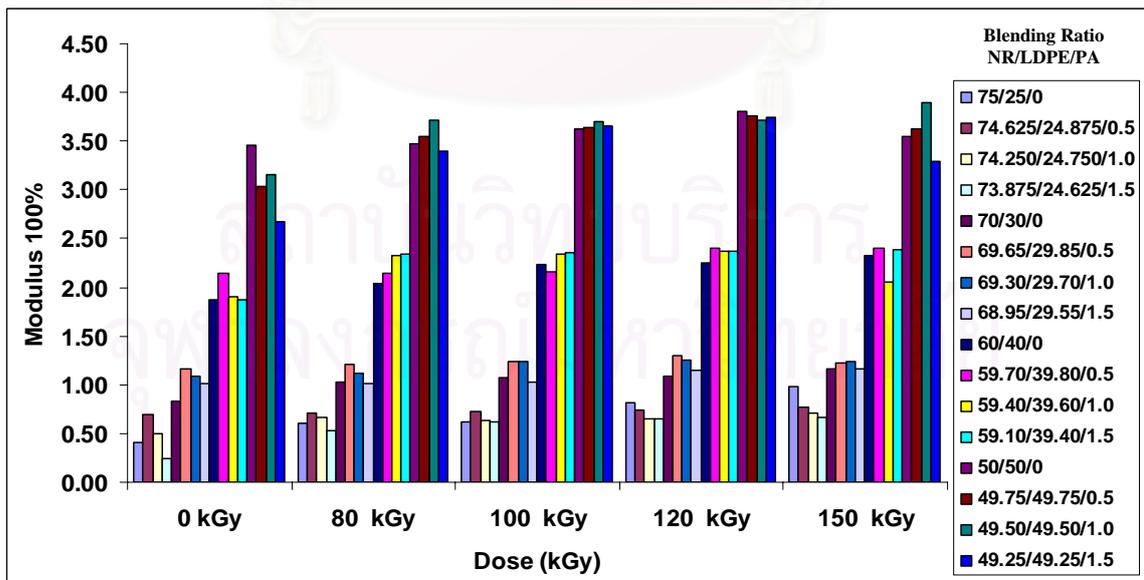
จากการทดลองที่ 3.4 เป็นการศึกษาถึงค่าโมดูลัส 100% ของการผสม NR/LDPE ก่อนและหลังการฉายรังสี พร้อมทั้งศึกษาสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงชนิดและปริมาณของคอมแพททิบิไลเซอร์ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.11, 4.12 และ 4.13

จากผลการทดลองนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบค่าโมดูลัส 100% ระหว่างสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยปราศจากคอมแพททิบิไลเซอร์ กับสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยใช้ยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำเป็นคอมแพททิบิไลเซอร์ในปริมาณ 10%, 15% และ 20% แสดงดังรูปที่ 4.11



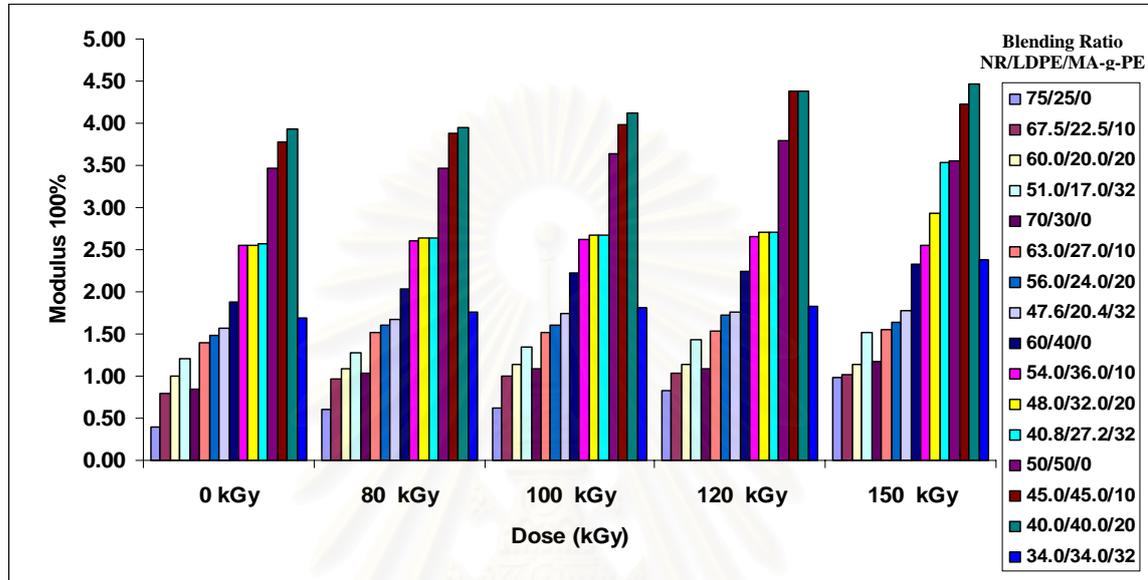
รูปที่ 4.11 แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อค่าโมดูลัส 100% เมื่อใช้ยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำเป็นคอมแพททึบไลเซอร์ในปริมาณต่างๆและที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE

จากผลการทดลองนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบค่าโมดูลัส 100% ระหว่างสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยปราศจากคอมแพททึบไลเซอร์ กับสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยใช้ฟทาสิกแอนไฮไดรด์เป็นคอมแพททึบไลเซอร์ในปริมาณ 0.5%, 1.0% และ 1.5% แสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อค่าโมดูลัส 100% เมื่อใช้ฟทาสิกแอนไฮไดรด์เป็นคอมแพททึบไลเซอร์ในปริมาณต่างๆและที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE

จากผลการทดลองนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบค่าโมดูลัส 100% ระหว่างสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยปราศจากคอมแพททิบิไลเซอร์ กับสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์โพลีเอทีลีนเป็นคอมแพททิบิไลเซอร์ในปริมาณ 10%, 20% และ 32% แสดงดังรูปที่ 4.13

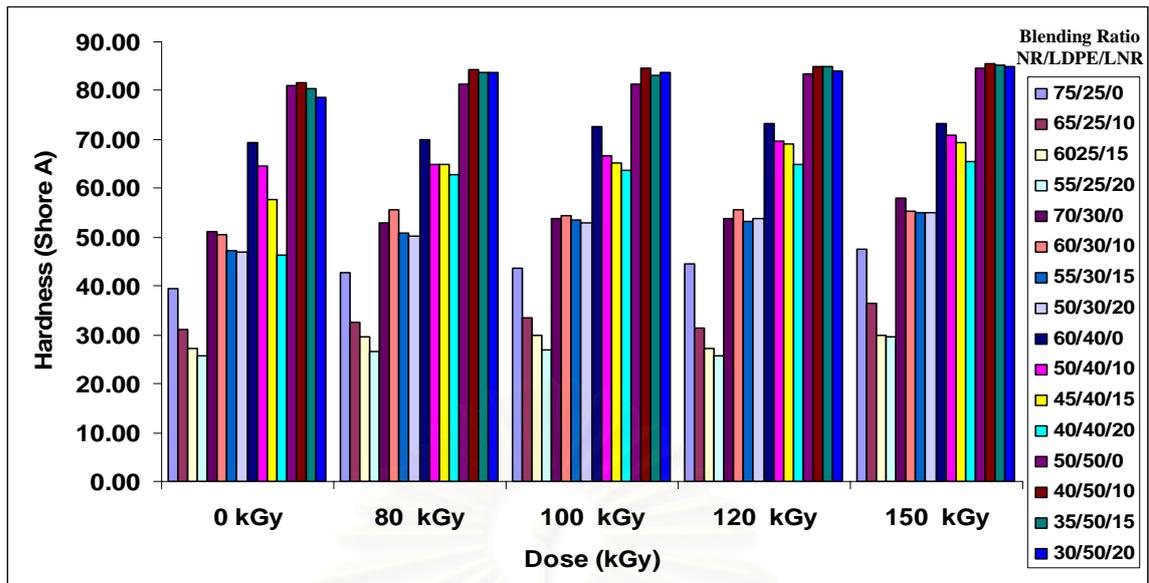


รูปที่ 4.13 แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อค่าโมดูลัส 100% เมื่อใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์โพลีเอทีลีนเป็นคอมแพททิบิไลเซอร์ในปริมาณต่างๆและที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE

4.5 ผลการศึกษาค่าความแข็งของ NR/LDPE blend โดยการเปลี่ยนแปลงชนิดและปริมาณของคอมแพททิบิไลเซอร์

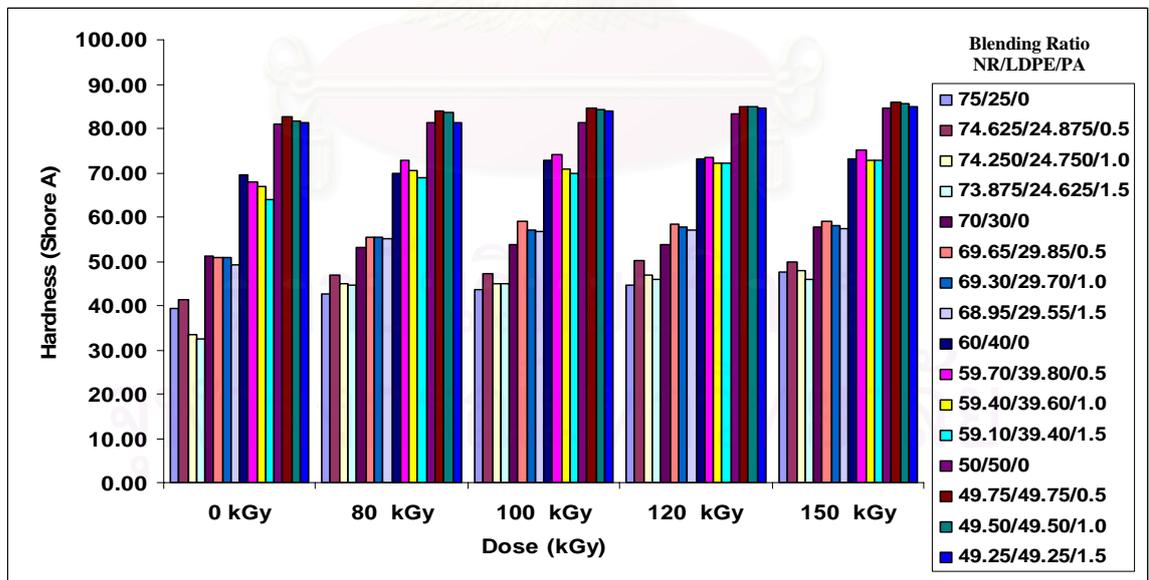
จากการทดลองที่ 3.5 เป็นการศึกษาถึงความสามารถในด้านความแข็ง ของการผสม NR/LDPE ก่อนและหลังการฉายรังสี พร้อมทั้งศึกษาสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงชนิดและปริมาณของคอมแพททิบิไลเซอร์ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.14, 4.15 และ 4.16

จากผลการทดลองนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบค่าความแข็ง ระหว่างสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยปราศจากคอมแพททิบิไลเซอร์ กับสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยใช้ยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำเป็นคอมแพททิบิไลเซอร์ในปริมาณ 10%, 15% และ 20% แสดงดังรูปที่ 4.14



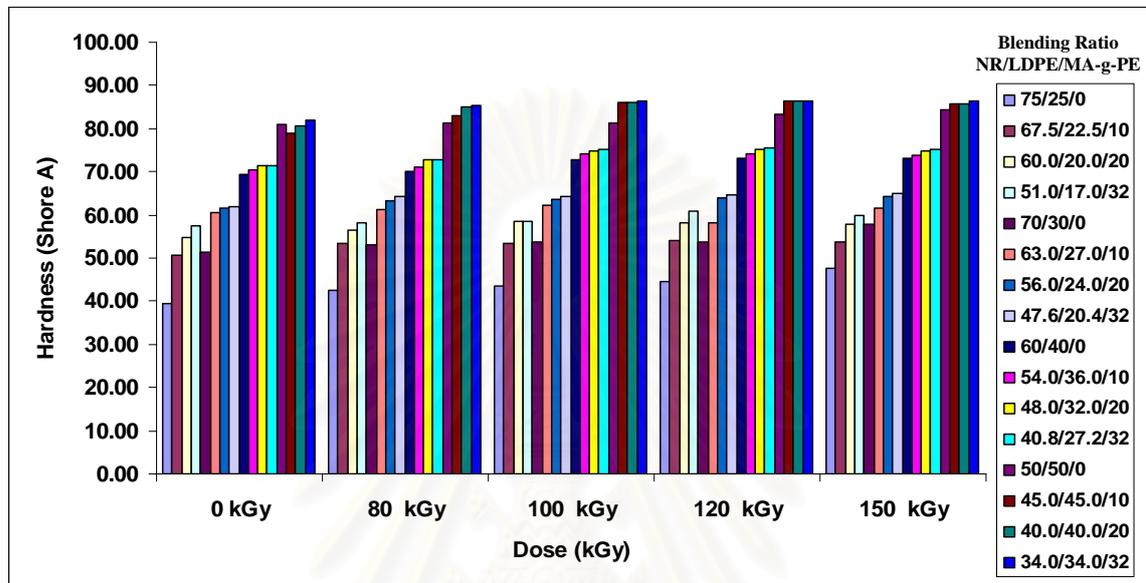
รูปที่ 4.14 แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อค่าความแข็งเมื่อใช้ยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำเป็นคอมแพททิบิไลเซอร์ในปริมาณต่างๆและที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE

จากผลการทดลองนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบค่าความแข็ง ระหว่างสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยปราศจากคอมแพททิบิไลเซอร์ กับสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยใช้ฟทาสิกแอนไฮไดรด์เป็นคอมแพททิบิไลเซอร์ในปริมาณ 0.5%, 1.0% และ 1.5% แสดงดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อค่าความแข็งเมื่อใช้ฟทาสิกแอนไฮไดรด์เป็นคอมแพททิบิไลเซอร์ในปริมาณต่างๆและที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE

จากผลการทดลองนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบค่าความแข็ง ระหว่างสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยปราศจากคอมแพททิบิไลเซอร์ กับสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์โพลีเอทีลีนเป็นคอมแพททิบิไลเซอร์ในปริมาณ 10%, 20% และ 32% แสดงดังรูปที่ 4.16

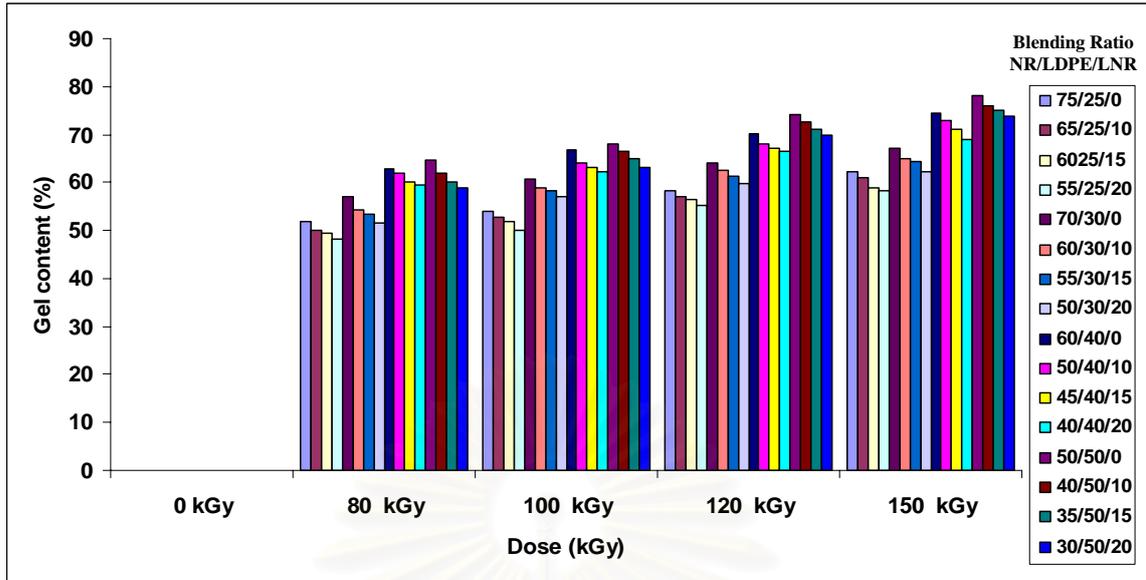


รูปที่ 4.16 แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อค่าความแข็งเมื่อใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์โพลีเอทีลีนเป็นคอมแพททิบิไลเซอร์ในปริมาณต่างๆและที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE

4.6 ผลการศึกษาสัดส่วนความเป็นเจลของ NR/LDPE blend โดยการเปลี่ยนแปลงชนิดและปริมาณของคอมแพททิบิไลเซอร์

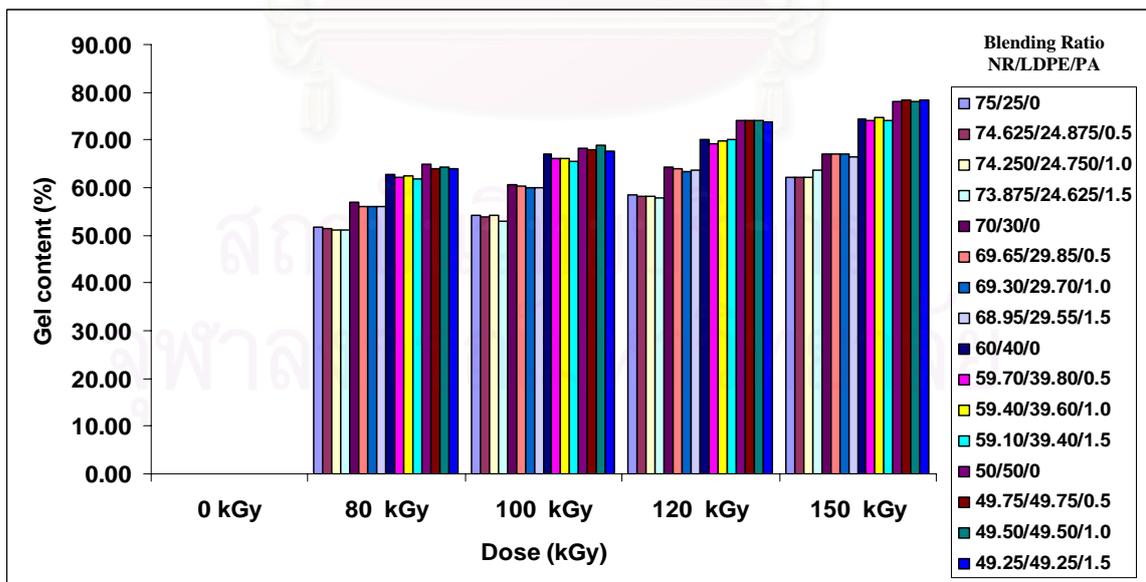
จากการทดลองที่ 3.6 เป็นการศึกษาถึงความสามารถในด้านสัดส่วนความเป็นเจล ของการผสม NR/LDPE ก่อนและหลังการฉายรังสี พร้อมทั้งศึกษาสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงชนิดและปริมาณของคอมแพททิบิไลเซอร์ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.17, 4.18 และ 4.19

จากผลการทดลองนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบสัดส่วนความเป็นเจล ระหว่างสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยปราศจากคอมแพททิบิไลเซอร์ กับสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยใช้ยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำเป็นคอมแพททิบิไลเซอร์ในปริมาณ 10%, 15% และ 20% แสดงดังรูปที่ 4.17



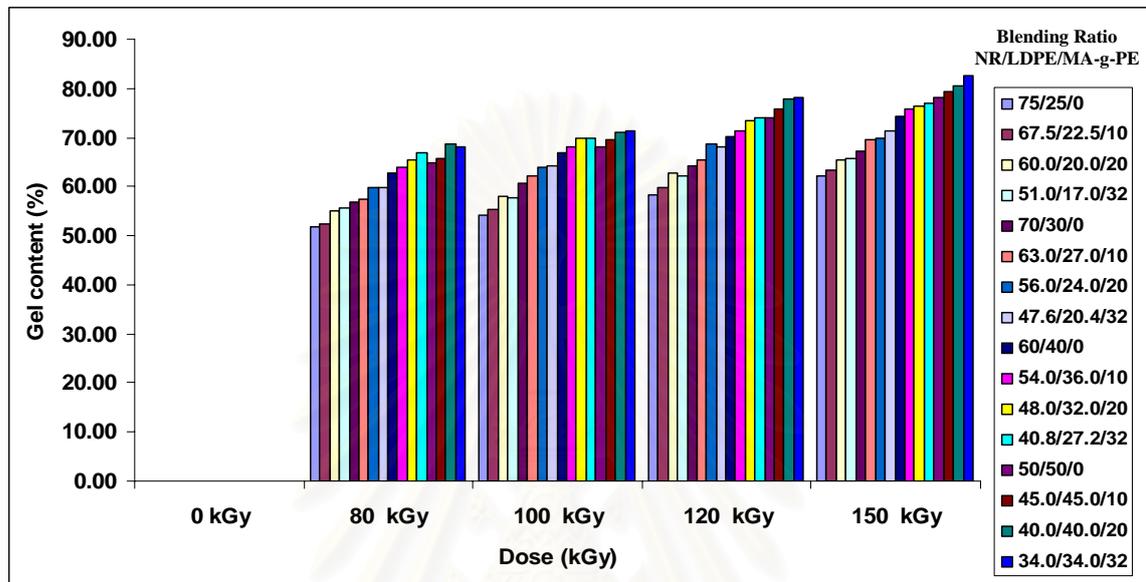
รูปที่ 4.17 แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อสัดส่วนความเป็นเจลเมื่อใช้ยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำเป็นคอมแพททึบไลเซอร์ในปริมาณต่างๆและที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE

จากผลการทดลองนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบสัดส่วนความเป็นเจล ระหว่างสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยปราศจากคอมแพททึบไลเซอร์ กับสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยใช้ฟทาสิกแอนไฮไดรด์เป็นคอมแพททึบไลเซอร์ในปริมาณ 0.5%, 1.0% และ 1.5% แสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อสัดส่วนความเป็นเจลเมื่อใช้ฟทาสิกแอนไฮไดรด์เป็นคอมแพททึบไลเซอร์ในปริมาณต่างๆและที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE

จากผลการทดลองนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบสัดส่วนความเป็นเจล ระหว่างสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยปราศจากคอมแพททึบิไลเซอร์ กับสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์โพลีเอทีลีนเป็นคอมแพททึบิไลเซอร์ในปริมาณ 10%, 20% และ 32% แสดงดังรูปที่ 4.19

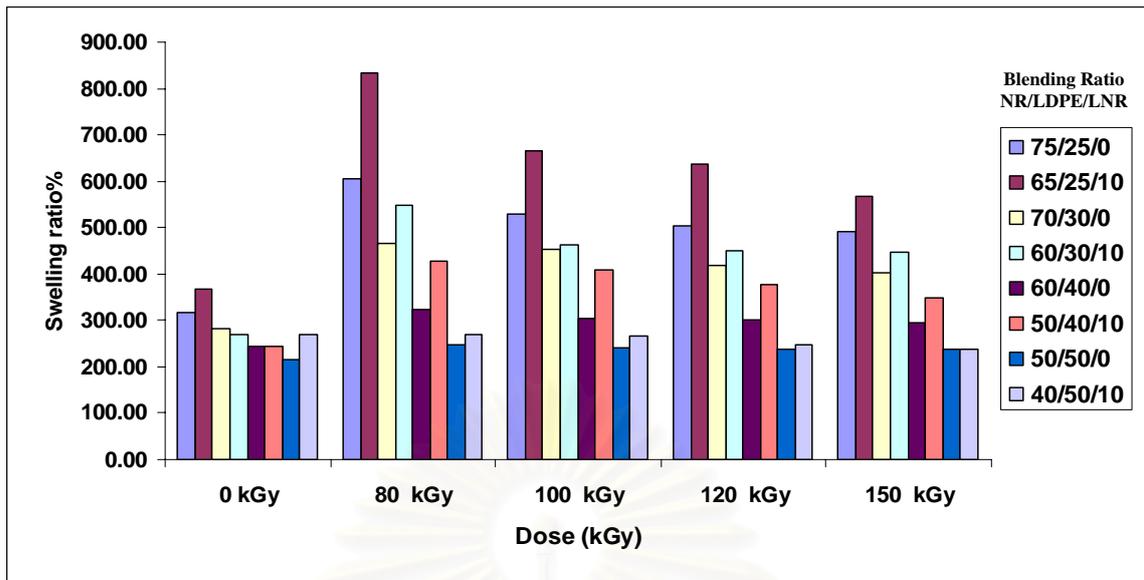


รูปที่ 4.19 แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อสัดส่วนความเป็นเจลเมื่อใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์โพลีเอทีลีนเป็นคอมแพททึบิไลเซอร์ในปริมาณต่างๆและที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE

4.7 ผลการศึกษาสัดส่วนการบวมน้ำมันของ NR/LDPE blend โดยการเปลี่ยนแปลงชนิดและปริมาณของคอมแพททึบิไลเซอร์

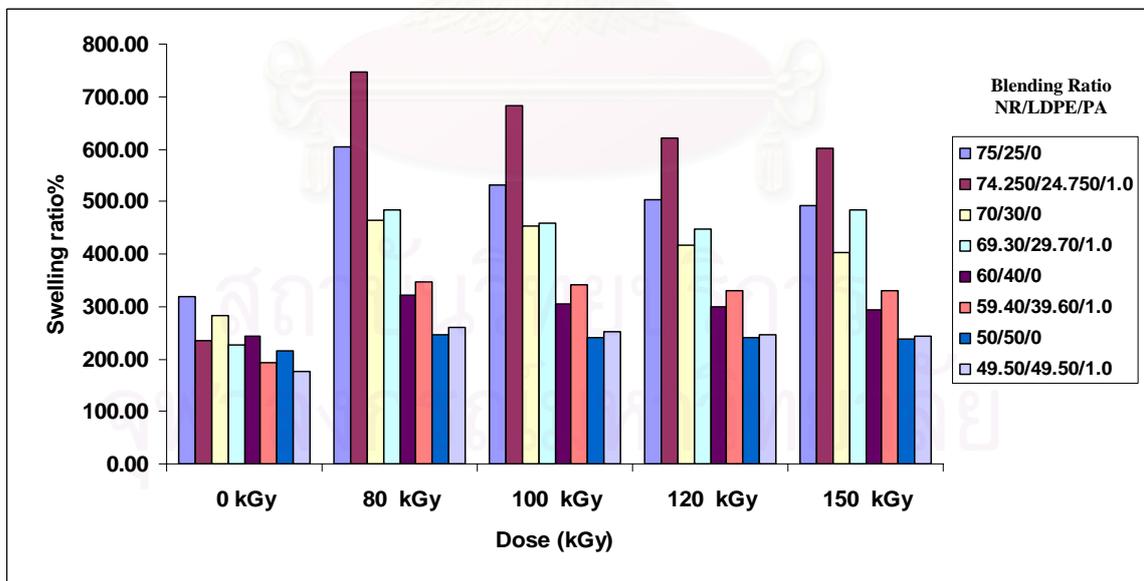
จากการทดลองที่ 3.7 เป็นการศึกษาถึงสัดส่วนการบวมน้ำมัน ของการผสม NR/LDPE ก่อนและหลังการฉายรังสี พร้อมทั้งศึกษาสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงชนิดของคอมแพททึบิไลเซอร์ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.20, 4.21 และ 4.22

จากผลการทดลองนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบสัดส่วนการบวมน้ำมัน ระหว่างสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยปราศจากคอมแพททึบิไลเซอร์ กับสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยใช้ยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำเป็นคอมแพททึบิไลเซอร์ในปริมาณ 10%แสดงดังรูปที่ 4.20



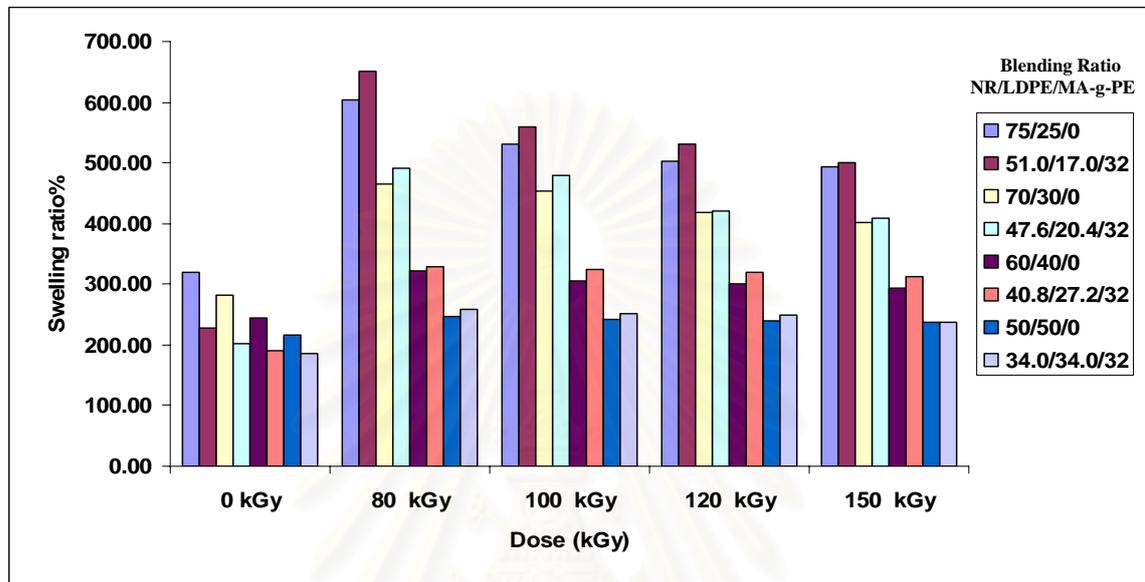
รูปที่ 4.20 แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อสัดส่วนการบวมน้ำมันเมื่อใช้ยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำเป็นคอมแพททึบไลเซอร์ในปริมาณ 10% และที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE

จากผลการทดลองนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบสัดส่วนการบวมน้ำมัน ระหว่างสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยปราศจากคอมแพททึบไลเซอร์ กับสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยใช้ฟทาสิกแอนไฮไดรด์เป็นคอมแพททึบไลเซอร์ในปริมาณ 1.0%แสดงดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อสัดส่วนการบวมน้ำมันเมื่อใช้ฟทาสิกแอนไฮไดรด์เป็นคอมแพททึบไลเซอร์ในปริมาณ 1.0% และที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE

จากผลการทดลองนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบสัดส่วนการบวมน้ำมัน ระหว่างสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยปราศจากคอมแพททิบิไลเซอร์ กับสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยมาเลอิกแอนไฮโดรคาร์บอเนตโพลีเอทีลีนเป็นคอมแพททิบิไลเซอร์ในปริมาณ 32% แสดงดังรูปที่ 4.22

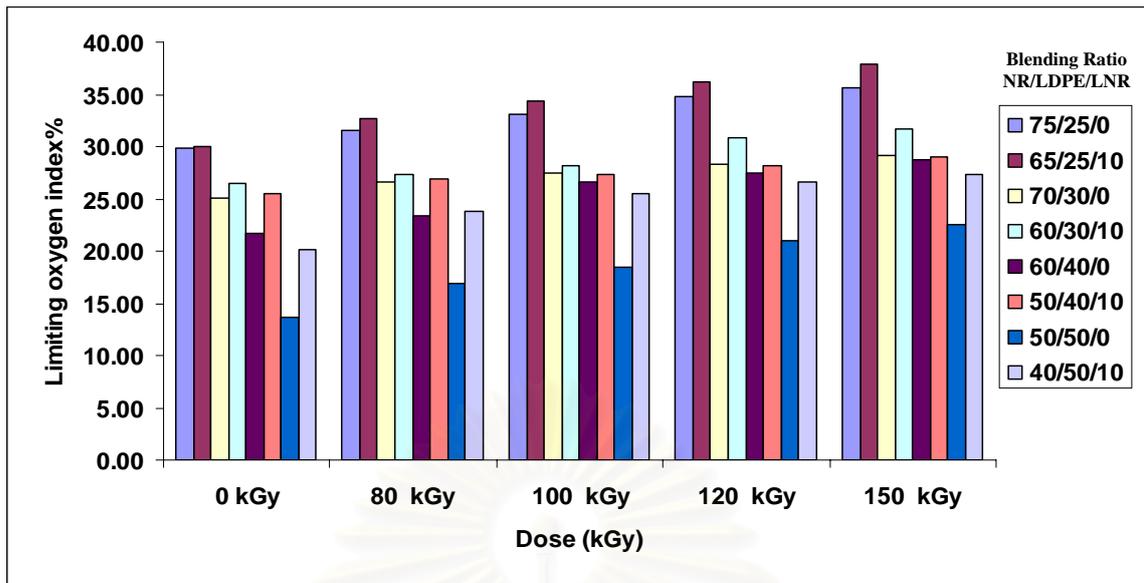


รูปที่ 4.22 แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อสัดส่วนการบวมน้ำมันเมื่อใช้มาเลอิกแอนไฮโดรคาร์บอเนตโพลีเอทีลีนเป็นคอมแพททิบิไลเซอร์ในปริมาณ 32% และที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE

4.8 ผลการศึกษาดัชนีความเข้มของก๊าซออกซิเจนสูงสุดที่สามารถทำให้ลู่กติดไฟได้ของ NR/LDPE blend โดยการเปลี่ยนแปลงชนิดและปริมาณของคอมแพททิบิไลเซอร์

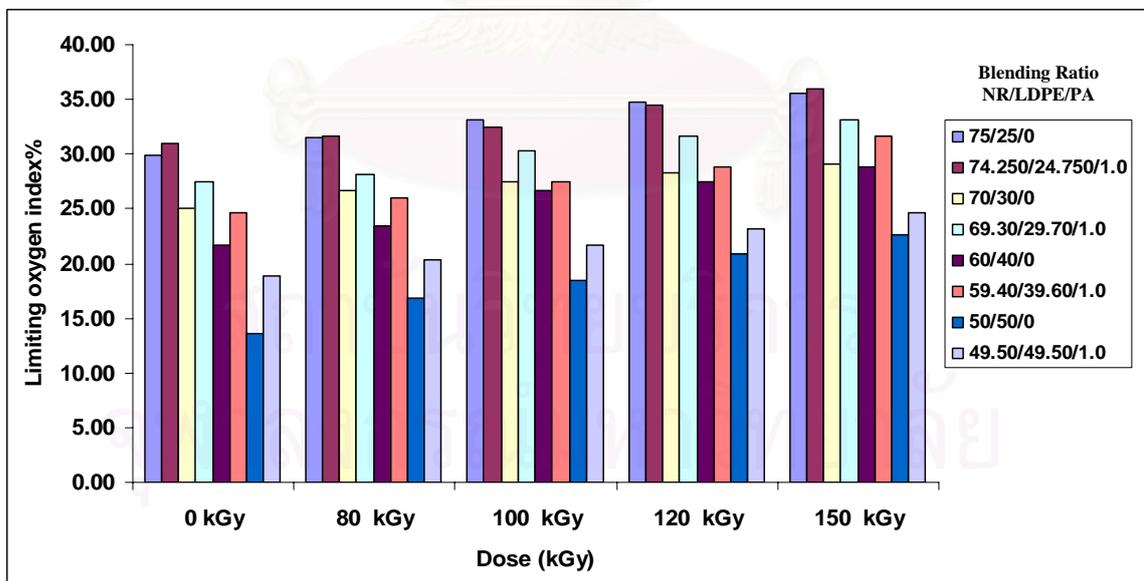
จากการทดลองที่ 3.8 เป็นการศึกษาถึงดัชนีความเข้มของก๊าซออกซิเจนสูงสุดที่สามารถทำให้ลู่กติดไฟได้ ของการผสม NR/LDPE ก่อนและหลังการฉายรังสี พร้อมทั้งศึกษาสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงชนิดของคอมแพททิบิไลเซอร์ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.23, 4.24 และ 4.25

จากผลการทดลองนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบค่า LOI ระหว่างสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยปราศจากคอมแพททิบิไลเซอร์ กับสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยใช้ยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำเป็นคอมแพททิบิไลเซอร์ในปริมาณ 10% แสดงดังรูปที่ 4.23



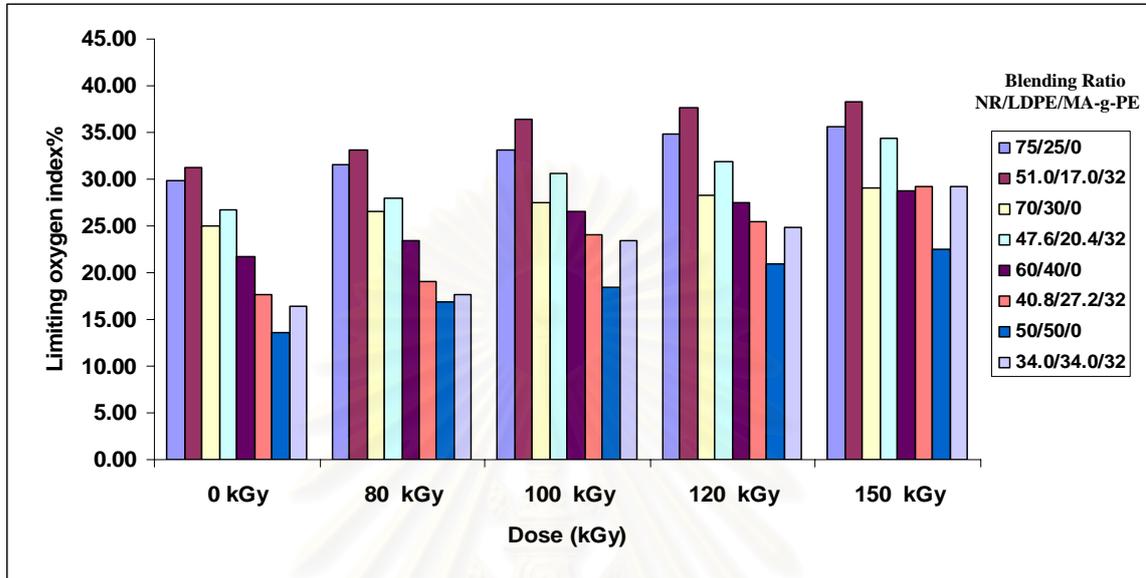
รูปที่ 4.23 แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อค่า LOI เมื่อใช้ยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำเป็นคอมแพททิบิลเซอร์ในปริมาณ 10% และที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE

ผลการทดลองนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบค่า LOI ระหว่างสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยปราศจากคอมแพททิบิลเซอร์ กับสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยใช้ฟทาสิกแอนไฮไดรด์เป็นคอมแพททิบิลเซอร์ในปริมาณ 1.0% แสดงดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อค่า LOI เมื่อใช้ฟทาสิกแอนไฮไดรด์เป็นคอมแพททิบิลเซอร์ในปริมาณ 1.0% และที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE

ผลการทดลองนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบค่า LOI ระหว่างสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยปราศจากคอมแพททิบิไลเซอร์ กับสัดส่วนการผสม NR/LDPE ต่างๆ โดยใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์โพลีเอทิลีนในปริมาณ 32% แสดงดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 แผนภูมิแสดงผลของปริมาณรังสีต่อค่า LOI เมื่อใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์โพลีเอทิลีนเป็นคอมแพททิบิไลเซอร์ในปริมาณ 32% และที่สัดส่วนต่างๆของ NR/LDPE

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 ผลความเข้ากันได้ของ NR/LDPE blend

อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) ของ NR/LDPE blend ในสัดส่วนการผสม 60/40 โดยเติมคอมแพทิบิไลเซอร์เป็น ยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำ 15% ฟทาสิกแอนไฮไดรด์ 1.0% และ มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์โพลีเอทีลีน 32% พบว่ามีอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ในแต่ละเงื่อนไขเพียงอุณหภูมิเดียว คือ -31.4 องศาเซลเซียส -30.4 องศาเซลเซียส และ -36.2 องศาเซลเซียส ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 พร้อมทำการยืนยันผลความเข้ากันได้ในระดับโมเลกุลด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) โดยเปลี่ยนสัดส่วนการผสม NR/LDPE เป็น 75/25 แต่สัดส่วนของคอมแพทิบิไลเซอร์ยังคงเดิม ผลจากการถ่ายภาพโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพบว่า เมื่อเติมคอมแพทิบิไลเซอร์ในสัดส่วนการผสมต่างๆของ NR/LDPE blend อนุภาคของเฟสจะประสานกันระหว่างเฟสได้ดี การยึดติดระหว่างเฟสดีไม่แสดงให้เห็นถึงการแยกเฟส ดังแสดงในรูปที่ 4.4

จากที่กล่าวมาข้างต้นผลความเข้ากันได้ ของ NR/LDPE blend โดยใช้คอมแพทิบิไลเซอร์ชนิดและปริมาณต่างๆ พอจะสรุปได้ดังนี้

5.1.1 อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของแต่ละเงื่อนไขมีเพียงจุดเดียว ดังนั้นเป็นการยืนยันได้ว่าระบบการผสมดังกล่าวเมื่อใช้คอมแพทิบิไลเซอร์ สามารถผสมเข้ากันได้ดี

5.1.2 การถ่ายภาพโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพบว่า สัณฐานของเฟสที่กระจายในแต่ละเงื่อนไข ยึดติดกันระหว่างเฟสดีไม่แสดงถึงการแยกเฟสใดๆ ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่าระบบผสมดังกล่าวเมื่อใช้คอมแพทิบิไลเซอร์ สามารถผสมเข้ากันได้ดี

ผลการทดสอบความเข้ากันได้นี้ เป็นการเลือกสัดส่วนการผสม NR/LDPE 60/40 และ 75/25 พร้อมทั้งสุ่มเลือกชนิดและปริมาณของคอมแพทิบิไลเซอร์ ผลปรากฏว่าจากการทดสอบความเข้ากันได้ ทั้งสองวิธีให้ผลตรงกันคือการผสม NR/LDPE โดยใช้คอมแพทิบิไลเซอร์ชนิดต่างๆ สามารถผสมเข้ากันได้ดีในระดับโมเลกุล (miscible blend) ดังนั้นในสัดส่วนการผสมใดๆ ก็จะมีแนวโน้มตรงกันกับผลดังกล่าว

5.2 ผลการทดสอบสัดส่วนความเป็นเจลของ NR/LDPE blend ที่เงื่อนไขต่างๆ หลังการฉายรังสีที่ปริมาณต่างๆ

สัดส่วนความเป็นเจลของ NR/LDPE blend หลังจากผ่านกระบวนการฉายรังสี หาได้จาก สัดส่วนน้ำหนักสุดท้ายของ NR/LDPE blend ภายหลังจากละลายในตัวทำละลายด้วย ทูโลอิน กับ ไซลีน ในสัดส่วน (1:1) ที่อุณหภูมิประมาณ 150 องศาเซลเซียส กับน้ำหนักก่อนการทำละลายของ NR/LDPE blend สัดส่วนความเป็นเจลที่ได้หมายถึง โครงสร้างภายในโพลิเมอร์ เกิดการเชื่อมโยงภายในโมเลกุลซึ่งกันและกัน (crosslinking) โดยผลที่แสดงถึง โครงสร้างโมเลกุลที่เกิดการเชื่อมโยงจากรังสี ดังแสดงในรูปที่ 4.17, 4.18 และ 4.19 พบว่า เมื่อปริมาณรังสีเพิ่มขึ้น ทำให้สัดส่วนความเป็นเจลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากรังสีทำให้เกิดการครอสลิงค์ของ NR/LDPE blend โดยการครอสลิงค์ส่วนใหญ่ จะเกิดในโครงสร้างอสัณฐาน (amorphous) และรอยต่อของส่วนที่เป็นอสัณฐานกับส่วนที่เป็นผลึก (crystalline) สังเกตว่าสัดส่วน NR/LDPE blend ที่มี NR สูงจะทำให้ สัดส่วนความเป็นเจลต่ำกว่า สัดส่วนที่มี NR อยู่ต่ำเนื่องจาก การฉายรังสีในสภาวะสูญญากาศ NR สามารถเกิดการครอสลิงค์ได้ต่ำกว่า PE โดยค่า G value (x-link) ของ NR และ PE คือ 1.1 และ 3.0 ตามลำดับ

ส่วนการใช้ LNR เป็นคอมแพททิบิไลเซอร์พบว่า เมื่อปริมาณของ LNR เพิ่มขึ้น สัดส่วนความเป็นเจลมีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก LNR หรือ skim rubber เป็นหางน้ำยางซึ่งเป็นโมเลกุลขนาดเล็กกว่า NR มากและเมื่อนำมาเป็นคอมแพททิบิไลเซอร์ของ NR/LDPE blend น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยจะมีค่าลดลง ทำให้เมื่อ NR/LDPE blend ผ่านกระบวนการฉายรังสี โครงสร้างโมเลกุลที่เกิดการครอสลิงค์จึงมีค่าต่ำกว่าสัดส่วนที่ไม่ใช้คอมแพททิบิไลเซอร์ (control)

ส่วนการใช้ PA เป็นคอมแพททิบิไลเซอร์พบว่า ไม่พบการเปลี่ยนแปลงหรือแนวโน้มใดๆที่ชัดเจนต่อสัดส่วนความเป็นเจล เนื่องจากสัดส่วนของ PA ที่ใช้เป็นคอมแพททิบิไลเซอร์มีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับสัดส่วนการผสม ดังนั้น เมื่อ NR/LDPE/PA blend ทำปฏิกิริยากับรังสีแกมมาที่ สัดส่วนใดๆจึงไม่พบแนวโน้มให้เห็นเด่นชัด

ส่วนการใช้ MA-g-PE เป็นคอมแพททิบิไลเซอร์พบว่า เมื่อปริมาณของ MA-g-PE เพิ่มขึ้น เป็นผลให้สัดส่วนความเป็นเจลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจาก MA-g-PE มีสัดส่วนของ MA กราฟต์ อยู่ปริมาณ 0.9% โดยส่วนที่เหลือเป็น PE ทำให้สัดส่วน NR/LDPE blend มีปริมาณ PE สูงขึ้น ดังนั้น เมื่อผ่านกระบวนการฉายรังสี PE ซึ่งว่องไวต่อการครอสลิงค์มากกว่า NR ในสภาวะสูญญากาศจึงทำให้ สัดส่วนความเป็นเจลจะมีแนวโน้มสูงขึ้นตามการเพิ่มปริมาณของ MA-g-PE

5.3 ผลของการเลือกใช้ชนิดและปริมาณของคอมแพททิบิลิเซอร์ที่สัดส่วนของ NR/LDPE blend หลังการฉายรังสีที่ปริมาณต่างๆ

5.3.1 ผลการใช้ยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำ (LNR) เป็นคอมแพททิบิลิเซอร์

ยางskim (skim rubber) หรือ ยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำ (LNR) ได้จากผลพลอยได้จากกรรมวิธี การผลิตน้ำยางข้น มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 100,000 ดาลตัน ลักษณะทางกายภาพของ LNR จะมีสีน้ำตาลเข้ม ก่อนข้างเหนียวเหนอะหนะ เมื่อเติมเข้าไป ในกระบวนการผสมจะสามารถเข้ากันกับ NR/LDPE ได้เป็นอย่างดี จากการสังเกตด้วยตาเปล่า แต่เมื่อนำมาผ่านกระบวนการขึ้นรูปพบว่าเกิดฟองอากาศกระจายอยู่รอบๆแผ่น สาเหตุเกิดจาก LNR เมื่อเก็บรักษาไว้นานจะเกิดแบคทีเรียขึ้น ซึ่งแบคทีเรียเมื่อได้รับความร้อนจากกระบวนการขึ้นรูป ทำให้เกิดเป็นก๊าซแทรกอยู่ในแผ่น NR/LDPE/LNR blend สามารถปรับปรุงและแก้ไขได้โดย หลังจากผ่านกระบวนการผสมให้นำ NR/LDPE/LNR blend เข้าไปรีดที่เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (two roll mill) โดยรีดไปในทางทิศเดียวกันเสมอ เพื่อไล่ฟองอากาศออกจนหมด แต่ถึงกระนั้นก็ตาม เมื่อนำ NR/LDPE/LNR blend มาผ่านกระบวนการขึ้นรูปอีกครั้ง ก็จะพบฟองอากาศอยู่ เพียงแต่มีจำนวนน้อยลงไปมากเท่านั้น ดังนั้นการตัดตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบควรเลือกบริเวณที่ไม่มีฟองอากาศปะปนอยู่

ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล จากความต้านทานแรงดึง ความต้านทานต่อการยืดขนาด ค่าโมดูลัส 100% และ ค่าความแข็ง พบว่าถึงแม้ LNR จะช่วยให้ NR/LDPE/LNR blend มีโครงสร้างอัสติฐานเข้ากันได้ดี แต่คุณสมบัติเชิงกลจะมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มของ LNR เนื่องจาก LNR มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ทำให้สัดส่วน NR/LDPE /LNR blend มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยลดลง ดังนั้นความแข็งแรงของโครงสร้างโมเลกุลจึงลดลงด้วยเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.5, 4.8 และ 4.14 ผลจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณรังสีต่อคุณสมบัติเชิงกลของ NR/LDPE/LNR blend ทุกๆ สัดส่วนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการครอสลิงก์เพิ่มขึ้น ซึ่งการครอสลิงก์ที่เพิ่มขึ้นนี้ ส่งผลให้โครงสร้างระหว่างโมเลกุลเกิดการเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน และ เกิดแรงยึดเกาะระหว่างโพลีเมอร์สูงขึ้น ดังนั้นความแข็งแรงของโครงสร้างโมเลกุล NR/LDPE/LNR blend จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณรังสีที่ได้รับ โดยการใช้ LNR10% ในสัดส่วน NR/LDPE blend 75/25 ที่ 150 kGy ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่ 9.754 MPa และ การใช้ LNR10% ในสัดส่วน NR/LDPE blend 50/50 ที่ 150 kGy ให้ค่าความแข็ง (shore A) สูงสุดที่ 85.40

5.3.2 ผลการใช้ฟθαติกแอนไฮไดรด์ (PA) เป็นคอมแพททิบิไลเซอร์

ฟθαติกแอนไฮไดรด์ (PA) มีลักษณะทางกายภาพเป็นเกล็ดสีขาวใช้เติมยางธรรมชาติ (NR) ในกระบวนการผสมบนเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง เพื่อให้ PA ทำปฏิกิริยากับ NR ก่อน จากนั้นจึงใส่โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ลงไปเพื่อทำปฏิกิริยาตามในเครื่องบดผสมภายใน (internal mixer) หลังจากผสมเสร็จ NR/LDPE/PA blend ที่ได้จะมีสีขาวค่อนข้างทึบเมื่อปล่อยให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้องจะสังเกตเห็น ผลึกรูปเข็มสีขาวกระจายอยู่ทั่วๆ ในเนื้อของ NR/LDPE/PA blend ในทุกสัดส่วนแสดงว่า PA สามารถทำปฏิกิริยาได้ทั่วทุกส่วนจากกระบวนการผสม จากนั้นนำ NR/LDPE /PA blend มาผ่านกระบวนการขึ้นรูปพบว่า ดัชนีการไหล (melt flow index) มีแนวโน้มดี เนื่องจากสามารถหลอมละลายและกระจายเต็มทั่วทั้งแผ่นแม่พิมพ์และไม่พบฟองอากาศใดๆเลย จากการสังเกตด้วยตาเปล่า

ผลการทดสอบคุณสมบัติความต้านทานแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 4.6 พบว่า ความต้านทานแรงดึงของ NR/LDPE/PA blend ที่ใช้ PA>1.0% ในทุกปริมาณรังสี จะไม่เพิ่มขึ้นต่อไปสังเกตได้ว่า การใช้ PA เป็นคอมแพททิบิไลเซอร์ทุกสัดส่วน และ ทุกปริมาณรังสี ในการทดสอบนี้จะพบว่า คุณสมบัติความต้านทานแรงดึงจะมีแนวโน้มต่ำกว่ากรณีที่ไม่ใช้คอมแพททิบิไลเซอร์ และ การใช้ PA1.0% ใน NR/LDPE blend 60/40 ที่ 120 kGy ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่ 11.79 MPa

ผลการทดสอบความต้านทานต่อการยืดจนขาด ดังแสดงในรูปที่ 4.9 พบว่า ในสัดส่วนที่มี NR สูง โดยมีปริมาณ PA0.5% ให้ค่าความต้านทานต่อการยืดจนขาดจะสูงกว่าค่า control ที่ปริมาณรังสีต่างๆ เช่น 120, 150 kGy แต่ในสัดส่วนที่มี NR ต่ำจะให้ค่าความต้านทานต่อการยืดจนขาดต่ำกว่า control ที่ปริมาณรังสีเดียวกัน และมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ PA เพิ่มขึ้น

ผลการทดสอบค่าโมดูลัส 100% ดังแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่า เมื่อปริมาณรังสีเพิ่มขึ้นค่าโมดูลัส 100% จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและเมื่อเพิ่มปริมาณ PA ในสัดส่วนที่มากขึ้นค่าโมดูลัส 100% ในส่วนรวมจะมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย

ผลการทดสอบค่าความแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 4.15 พบว่า เมื่อปริมาณรังสีเพิ่มขึ้นค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ค่าความแข็งจะขึ้นอยู่กับสัดส่วน LDPE ในสัดส่วนที่มี LDPE มากจะให้ค่าความแข็งสูงกว่าสัดส่วนที่มี LDPE ต่ำ เนื่องจาก LDPE มีความเป็นผลึกสูงทำให้ สัดส่วนการผสมมีค่าความแข็งสูงตาม และ เมื่อเพิ่มปริมาณ PA ในสัดส่วนที่มากขึ้น ค่าความแข็งจะลดลงเล็กน้อย โดยการใช้ PA0.5% ในสัดส่วน NR/LDPE blend 50/50 ที่ 150 kGy ให้ค่าความแข็ง (shore A) สูงสุดที่ 85.83

5.3.3 ผลการใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์โพลีเอทีลีน (MA-g-PE) เป็นคอมแพทิบิไลเซอร์

มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์โพลีเอทีลีน (MA-g-PE) มีลักษณะทางกายภาพเป็นเม็ดเรซินสีขาวอมเหลือง โดยเติมลงในกระบวนการผสมก่อนแล้วจึงเติม LDPE เพื่อทำปฏิกิริยาต่อ จากนั้นหลังจากผ่านกระบวนการผสม นำมารีดเป็นแผ่นด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง สังเกตได้ว่า NR/LDPE/MA-g-PE blend สามารถผสมเข้ากันได้ดี มีลักษณะมันวาวแต่แข็งกระด้าง มีสีเหลืองอ่อนมากจนเกือบขาว จากการสังเกตด้วยตาเปล่า จากนั้นนำ NR/LDPE/MA-g-PE blend มาผ่านกระบวนการขึ้นรูปพบว่า ดัชนีการไหล (melt flow index) มีแนวโน้มไม่ดี เนื่องจากสามารถไหลได้เต็มแบบแม่พิมพ์ได้บางส่วนเท่านั้น และการถอดแม่พิมพ์ออก ทำได้ยากเนื่องจากแผ่น NR/LDPE/MA-g-PE blend เกือบทั้งแผ่นจะติดกับแม่พิมพ์ สามารถปรับปรุงและแก้ไขได้โดยใช้ silicone oil ซิลิโคนบริเวณผิวแม่พิมพ์ก่อนการขึ้นรูป ผลทำให้สามารถถอดแม่พิมพ์ออกได้สะดวกมากขึ้นแต่ดัชนีการไหลยังคงเดิม ดังนั้นการเลือกตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบควรเลือกบริเวณที่ NR/LDPE/MA-g-PE blend ไหลเต็มแผ่น

ผลการทดสอบคุณสมบัติความต้านทานแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ MA-g-PE ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มลดลง สังเกตทุกสัดส่วนที่ใช้ MA-g-PE เป็นคอมแพทิบิไลเซอร์จะให้ค่าความต้านทานแรงดึงต่ำกว่า control เนื่องจาก MA-g-PE มีสัดส่วนของ MA กราฟต์อยู่ปริมาณ 0.9% โดยส่วนที่เหลือเป็น PE จึงทำให้ทุกสัดส่วนการผสม NR/LDPE blend มีความเป็นผลึกสูงขึ้นซึ่งจะไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติความต้านทานแรงดึง โดยการใส่ MA-g-PE 32% ในสัดส่วน NR/LDPE blend 70/30 ที่ 120 kGy ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่ 9.710 MPa

ผลการทดสอบความต้านทานต่อการยืดจนขาด ดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่า ผลการทดสอบมีความตรงกันกับ ค่าความต้านทานแรงดึง คือ เมื่อปริมาณ MA-g-PE เพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานต่อการยืดมีแนวโน้มลดลง โดยทุกสัดส่วนที่ใช้ MA-g-PE เป็นคอมแพทิบิไลเซอร์จะให้ค่าความต้านทานต่อการยืดต่ำกว่า control เช่นกัน

ผลการทดสอบค่าโมดูลัส 100% และ ค่าความแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 4.13 และ 4.16 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ MA-g-PE จะทำให้ค่าความแข็ง และ ค่าโมดูลัส 100% มีแนวโน้มสูงขึ้น ดังนั้นจึงวิเคราะห์ผลได้ว่า เมื่อใช้ MA-g-PE เป็นคอมแพทิบิไลเซอร์ของ NR/LDPE blend จะทำให้โครงสร้างออสซิลูชันมีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ดังนั้นโครงสร้างโมเลกุลจึงมีความยืดหยุ่นลดลง จึงเป็นเหตุให้ค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความต้านทานต่อการยืดมีแนวโน้มลดลง การใช้ MA-g-PE 32% ในสัดส่วน NR/LDPE blend 50/50 ที่ 150 kGy ให้ค่าความแข็ง (shore A) สูงสุดที่ 86.50

5.4 ผลการทดสอบสัดส่วนการบวมน้ำมันของ NR/LDPE blend ที่เงื่อนไขต่างๆหลังการฉายรังสีที่ปริมาณต่างๆ

การทดสอบสัดส่วนการบวมน้ำมันของ NR/LDPE blend ทำได้โดยหาสัดส่วนจากน้ำหนักหลังทิ้งไว้ให้บวมในตัวทำละลาย ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง กับน้ำหนักก่อนการบวม โดยผลของสัดส่วนการบวมน้ำมัน เลือกว่าใช้สัดส่วนที่เหมาะสมในแต่ละชนิดของคอมแพททิบิลิเซอร์ โดยสรุปจากคุณสมบัติความต้านทานแรงดึงเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งในแต่ละเงื่อนไข LNR10%, PA1.0% และ MA-g-PE 32% เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 4.20, 4.21 และ 4.22 ตามผลการทดสอบนี้ทุกชิ้นทดสอบที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการฉายรังสี (0 kGy) ไม่สามารถเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการฉายรังสีได้ เนื่องจาก NR/LDPE blend ที่ไม่ได้ฉายรังสีเกิดการละลายเข้าไปในตัวทำละลายที่ใช้ในการทดสอบ สัดส่วนการบวมน้ำมันที่ได้จึงใช้เปรียบเทียบเฉพาะ การเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากปริมาณรังสีที่แตกต่างกันและสัดส่วนการใช้คอมแพททิบิลิเซอร์กับสัดส่วนที่ไม่ใช้คอมแพททิบิลิเซอร์ พบว่าในทุกชิ้นทดสอบที่ไม่ใช้คอมแพททิบิลิเซอร์ ถึงแม้ว่าจะรับรังสีที่ปริมาณต่างๆ ชิ้นทดสอบที่ได้ส่วนหนึ่งจะละลายในตัวทำละลายได้เสมอ และ สำหรับทุกชิ้นทดสอบที่มีสัดส่วน NR/LDPE blend ที่ใช้คอมแพททิบิลิเซอร์ในการผสมสัดส่วนเดียวกัน เมื่อฉายรังสีในปริมาณสูงขึ้น จะให้สัดส่วนการบวมน้ำมันลดลง สำหรับชิ้นทดสอบที่ฉายรังสีในปริมาณเดียวกันพบว่า ในสัดส่วนที่มี LDPE สูงจะให้สัดส่วนการบวมน้ำมันต่ำกว่าชิ้นทดสอบที่มี NR สูงเสมอ

5.5 ผลการทดสอบดัชนีความเข้มของก๊าซออกซิเจนสูงสุดที่สามารถทำให้ออกซิไดซ์ได้ (LOI) ของ NR/LDPE blend ที่เงื่อนไขต่างๆหลังการฉายรังสีที่ปริมาณต่างๆ

ผลการทดสอบค่า LOI เป็นผลที่บ่งบอกถึงดัชนีความสามารถของก๊าซออกซิเจนสูงสุดภายในสถานะแวดล้อมที่สามารถ ทำให้โพลีเมอร์ออกซิไดซ์ได้ โดยชิ้นทดสอบที่ให้ค่า LOI สูงจะทนต่อการลุกไหม้ในสถานะแวดล้อมได้ดีกว่า ชิ้นทดสอบที่ให้ค่า LOI ต่ำ ผลการทดสอบค่า LOI จะทดสอบตามเงื่อนไขตามหัวข้อ 5.4 ดังแสดงในรูปที่ 4.23, 4.24 และ 4.25 พบว่า สำหรับชิ้นทดสอบ NR/LDPE blend ที่มีการใช้คอมแพททิบิลิเซอร์ในการผสมจะให้ค่า LOI ที่มีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อปริมาณรังสีเพิ่มขึ้น และ สำหรับชิ้นทดสอบที่มี NR ในสัดส่วนสูงที่ปริมาณรังสีเดียวกัน จะให้ค่า LOI สูงกว่าเสมอ

5.6 สรุปผลการเลือกใช้คอมแพททิบิไลเซอร์ที่เหมาะสมของ NR/LDPE blend หลังการฉายรังสีที่ปริมาณต่างๆ

การพิจารณาคอมแพททิบิไลเซอร์ที่เหมาะสมสำหรับ NR/LDPE blend ใช้คุณสมบัติเชิงกลจากคุณสมบัติความต้านทานแรงดึงเป็นดัชนีชี้วัดหลัก โดยเลือกจากคอมแพททิบิไลเซอร์ทั้งสามชนิดคือ ยางสกีหรือยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำ (LNR) ฟทาสิกแอนไฮไดรด์ (PA) และมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์โพลีเอทิลีน (MA-g-PE) ผลปรากฏว่า PA ในปริมาณ 1.0% ในสัดส่วน NR/LDPE blend 60/40 ในปริมาณรังสี 120 kGy ให้ผลความต้านทานแรงดึงเหนือคอมแพททิบิไลเซอร์ชนิดต่างๆ และ คุณสมบัติเชิงกลด้านอื่นๆ เช่น ความต้านทานต่อการยืด ค่าโมดูลัส 100% และ ค่าความแข็ง ให้ผลตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม “สายไฟฟ้าทองแดงหุ้มด้วยโพลีไวนิลคลอไรด์” มอก. 11-2536 [37] ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า PA เป็นคอมแพททิบิไลเซอร์ ที่เหมาะสมสำหรับ NR/LDPE blend มากที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้ โดยสัดส่วนการผสมและปริมาณรังสีที่เหมาะสมจะใช้ผลของ คุณสมบัติความต้านทานการดึงเป็นสิ่งสำคัญ ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น

ส่วนการใช้ MA-g-PE เป็นคอมแพททิบิไลเซอร์ ซึ่งคาดว่าจะให้คุณสมบัติความต้านทานแรงดึงสูง เช่นเดียวกับ PA แต่ผลกลับไม่เป็นเช่นนั้น เนื่องจากสัดส่วนการกราฟต์ MA มีปริมาณต่ำ 0.9% ทำให้สัดส่วนการผสมมี PE อยู่สูงมากเกินไป ซึ่งจะมีผลกับความแข็งของการผสมที่ได้ แต่กลับไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติความต้านทานแรงดึง

ส่วนการใช้ LNR เป็นคอมแพททิบิไลเซอร์ เป็นการพยายามนำยางสกี (skim rubber) ที่สามารถผลิตขึ้นได้ในประเทศ มีปริมาณมากและราคาไม่แพง มาทำการทดสอบ ผลปรากฏว่า คุณสมบัติเชิงกลด้านต่างๆมีแนวโน้มไม่เพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลที่ไม่เหมาะสมของ LNR จาก Dahlan H.M. และคณะ พบว่าน้ำหนักโมเลกุลของ LNR ที่เหมาะสมคือ 400,000 ดาลตัน

ส่วนการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพโดยเลือกเงื่อนไขสัดส่วนที่เหมาะสมของคอมแพททิบิไลเซอร์ ในแต่ละชนิดหลังการครอสลิงค์ด้วยรังสีพอจะสรุปได้ดังนี้

- สัดส่วนที่เหมาะสมของคอมแพททิบิไลเซอร์ในแต่ละชนิดคือ MA-g-PE 32%, LNR 10% และ PA 1.0% จะให้สัดส่วนการบวมน้ำมันในตัวทำละลายทูลออินและไซลีนต่ำสุดที่ 237.15%, 239.24% และ 243.90% ตามลำดับ โดยการใช้ MA-g-PE 32% จะให้ผลสัดส่วนการบวมน้ำมันในตัวทำละลายต่ำสุด จากการผสม NR/LDPE blend 50/50 ที่ปริมาณ 150 kGy โดยสัดส่วนการบวมน้ำมันในตัวทำละลายทูลออินกับไซลีน (1:1) จะลดลงตามปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้นและส่วนที่ไม่ใช้คอมแพททิบิไลเซอร์ จะละลายในตัวทำละลายได้บางส่วน

- ค่า Limiting oxygen index (LOI) สูงขึ้นตามปริมาณคอมแพททิบิไลเซอร์และปริมาณรังสีที่ได้รับ โดยค่า LOI ที่เหมาะสมสำหรับสัดส่วนของคอมแพททิบิไลเซอร์คือ MA-g-PE 32%, LNR 10% และ PA 1.0% จะให้ค่า LOI สูงสุดที่ 38.28%, 37.94% และ 35.88%

ตามลำดับ โดยในแต่ละเงื่อนไขจะใช้ NR/LDPE blend 75/25 ที่ปริมาณรังสี 150 kGy เช่นเดียวกัน ในทุกๆเงื่อนไข

5.7 ข้อเสนอแนะ

ยางสีกิมหรือยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำ (LNR) ควรจะทำให้เกิดการครอสลิงค์บางส่วนก่อน เพื่อให้โครงสร้าง ออสซิลูชันแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้นก่อนนำมาใช้เป็นคอมแพทิบิไลเซอร์

มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์โพลีเอทิลีน (MA-g-PE) ควรจะเลือกใช้สัดส่วนการกราฟต์ให้มีปริมาณ MA ให้สูงขึ้นซึ่ง MA จะช่วยเพิ่มการยึดเหนี่ยวระหว่างโครงสร้างโมเลกุลของโพลีเมอร์ทั้งสองชนิดให้มีความยืดหยุ่นและมีความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นและควรเลือกใช้โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำในกระบวนการผสมให้มีคุณสมบัติด้าน ดัชนีการไหล (MFI) เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของดัชนีการไหลจะช่วยให้ NR/LDPE blend มีความสามารถต่อกระบวนการขึ้นรูปสูงขึ้น

รายการอ้างอิง

1. Ibrahim Abdullam, Sahrim Ahmad and Che Som Sulaiman. Blending of Natural Rubber with Linear Low-Density Polyethylene. Journal of Applied Polymer Science. 58(1995) : 1125-1133.
2. H.M, Dahlan , M.D. Khairul Zaman and A. Ibrahim. Liquid natural rubber (LNR) as a compatibilizer in NR/LLDPE blends – II : the effects of electron – beam (EB) irradiation. Bangi : Radiation Physics and Chemistry. 64(2002) : 429-436.
3. V. Tanrattanakul and W. Udomkitchdecha. Development of Novel Elastomeric Blends Containing Natural Rubber and Ultra-Low-Density Polyethylene. Journal of Applied Polymer Science. Vol. 82(2001) : 650-660.
4. Parichart Limsila. Effect of molecular weight and compatibilizer on miscibility and properties of LLDPE/NR blends. Master Thesis Petroleum and Petrochemical College Chulalongkorn University, 1999.
5. Buchanee Chan-ngam. Fracture Behavior and morphology of LLDPE/NR blends prepared by reactive blending with maleic anhydride. Master Thesis Petroleum and Petrochemical College Chulalongkorn University, 2000.
6. C.P. Papadopoulou and N.K. Kalfoglou. Comparison of compatibilizer effectiveness for PET/PP blend: their mechanical, thermal and morphology characterization. Journal of Applied Polymer Science. 41(2000) : 2543-2555.
7. S. A. Pooley, G. S. Canessa and B. L. Rivas. Spontaneous copolymerization of phthalic anhydride with aziridine or 2-methylaziridine. Eur. Polym. J. 31(1995) : 547-553.
8. H. Paulussen, H. Haitjema, R. van Asselt, P. Mylle, P. Adriaensens, J. Gelan and D. Vanderzande. New mechanistic aspect on the formation of poly(isothianaphthene) from P₄S₁₀ and phthalic anhydride derivatives: carbon-carbon bond formation and cleavage via a cyclic reaction mechanism. Journal of Applied Polymer Science. 41(2000) : 3121-3127.
9. Fred W. Barlow. Rubber Compound principles, materials and techniques. 2nd edition. New York : Marcel Dekker, 1993.
10. Flory and Paul J. Principles of Polymer chemistry. Twelfth edition. United States : Cornell University Press, 1983.
11. เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรัมย์. การผลิตยางธรรมชาติ. ปัตตานี : สำนักวิทยบริการ มหาวิทยาลัย สงขลานครินทร์ วิทยาเขต ปัตตานี, 2543.

12. J.A. Brydson. Plastics Materials. New York : Van Nostrand Reinhold, 1970.
13. ชเนศ อินทรลักษณ์. การพัฒนาท่อโพลีเอทีลีน/เอทีลีนอะซิเตดหัดตัวได้ด้วยความร้อนโดยการฉายรังสีแกมมาจากโคบอลต์-60. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2545.
14. James E. Mark, Burak Erman and Frederick R. Eirich. Science and Technology of Rubber. 2nd edition. San Diego : Academic Press, 1994.
15. Utracki and Lerzek A. Polymer Alloys and Blends : Thermo dynamics and Rheology. New York : Hanser, 1990.
16. เจริญ นาคะสรรค์. เทคโนโลยีเบื้องต้นทางพลาสติก. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์โพธิ์เพช, 2546.
17. สิริจุฑารัตน์ โควาวีสารัช. การปรับสมบัติเชิงกลของโพลีเอไมด์โดยโพลีสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง. สถาบันวิจัยและพัฒนาคณะวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
18. วราภรณ์ ขจรไชยกุล. ยาง. กรุงเทพฯ : สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2536.
19. วาหิต ศาสตร์ระวาหิต. การแตกตัวด้วยความร้อนของยางธรรมชาติโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก-คาร์บอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2542.
20. Martyn S. Ray and Martin G. Sneesby. Chemical engineering design project. Australia : Gordon and Breach Science Publishers, 1998.
21. U.S. Environmental Protection Agency. Microsoft Internet Explorer[Online]. Available from : <http://www.epa.gov/chemfact/phtha-sd.pdf>[2005, July 9]
22. U.S. EPA. OPPT Chemical Fact Sheets (Phthalic Anhydride) Fact Sheet: Support Document (CAS No. 85-44-9). United States, 1994.
23. WVU Chemical Engineering. Microsoft Internet Explorer[Online]. Available from : <http://www.che.cemr.wvu.edu/publications/projects/maleic/ma-b.pdf>[2005, July 19]
24. Amanda Lee. Microsoft Internet Explorer[Online]. Available from : <http://www.che.lsu.edu/COURSES/4205/2000/Lee/paper.htm>[2005, July 19]
25. DuPont Company. Microsoft Internet Explorer[Online]. Available from : <http://www.dupont.com/industrial-polymers/plastics/selector/fuschart.html>[2005, May 9]
26. A. D. Jenkins. Progress in Polymer Science. Oxford : Pergamon Press, 1990.
27. สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย. โคบอลต์-60. กรุงเทพฯ : สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ, 2543.

28. F.J Ley and J. Grant , Processing by gamma radiation – operation of a multi – purpose service. Great Britain : Irradiation products limited, 1983.
29. ขวัญชนก จันทร์สว่าง. การย่อยสลายโมเลกุลของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรโดยกระบวนการฉายรังสีแกมมาร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์/ยูเรีย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิตศึกษาด้านเทคโนโลยีบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
30. Wood, R.J. and Alexei k. Pikaev. Applied Radiation Chemistry : radiation processing. United States : John Wiley & Sons, 1994.
31. พิริยาธร สุวรรณมาลา และ เกศินี เหมวิเชียร. นิวเคลียร์ปริทัศน์. ปีที่ 17 ฉบับที่ 2 เมษายน-มิถุนายน : สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ, 2547.
32. Singh,A. , and Silverman , J. Radiation processing of polymer. Munich : Oxford University Press, 1992.
33. Suratchana Thinakorn. Foaming process of high-density polyethylene and natural rubber blends. Master Thesis Petroleum and Petrochemical College Chulalongkorn University, 1998.
34. American Society of Testing and Materials. Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Rubbers and Thermoplastic Elastomers–Tension. ASTM D412-98a, 2002.
35. American Society of Testing and Materials. Standard Test Methods for Rubber Property- Durometer Hardness. ASTM D2240-03, 2003.
36. American Society of Testing and Materials. Standard Test Methods for Measuring the Minimum Oxygen Concentration to Support Candle - Like Combustion of Plastics. (Oxygen Index) ASTM D2863-00, 2000.
37. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. สายไฟฟ้าทองแดงหุ้มด้วยโพลีไวนิลคลอไรด์. มอก. 11-2536, 2536.
38. H. M. Dahlan, M. D. Khairul Zaman and A. Ibrahim. The morphology and thermal properties of liquid natural rubber (LNR) – compatibilized 60/40 NR/LLDPE blends. Journal of Applied Polymer Science. 8(2002) : 905-911.
39. ชยากริต ศิริอุปถัมภ์, นเรศร์ จันทน์ขาว, สุวิทย์ ปุณณชัยยะ, เดโช ทองอร่าม และ ไกรธีระ กิตติศรีไสว. การพัฒนาผลิตสายไฟฟ้าขนาดเล็กทนกระแสสูงโดยใช้โพลีเมอร์สังเคราะห์อย่างธรรมชาติเบสซินค์โครสลิงค์ด้วยรังสีแกมมาระดับโรงงานต้นแบบ. งานวิจัยภาครัฐร่วมเอกชน ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.



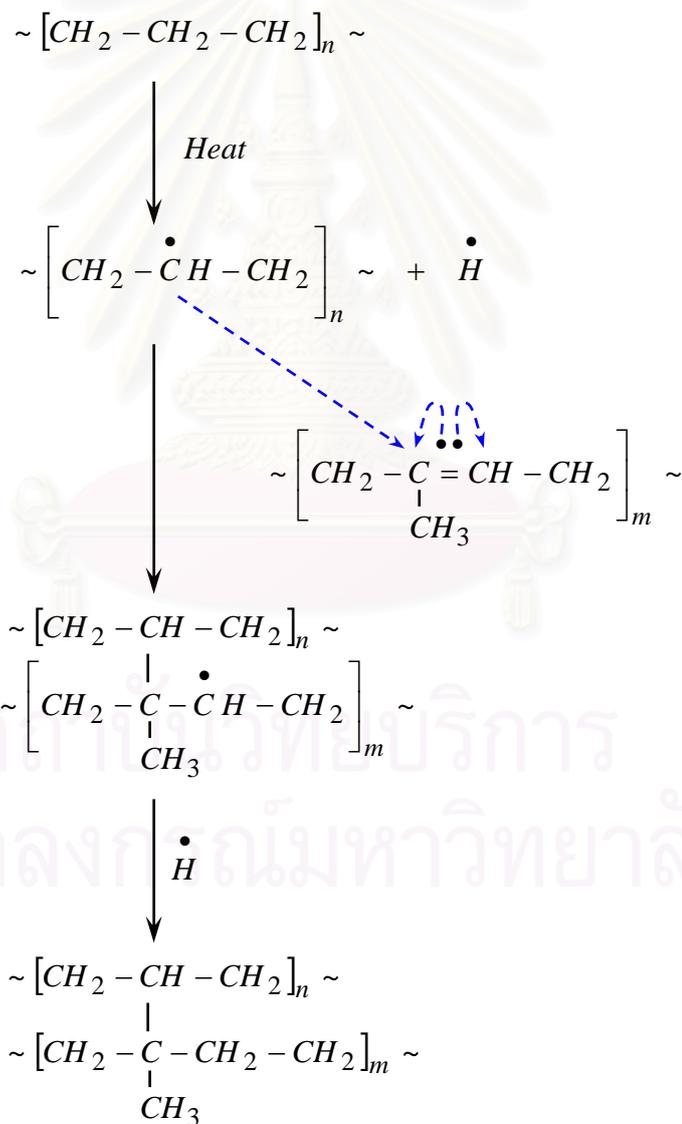
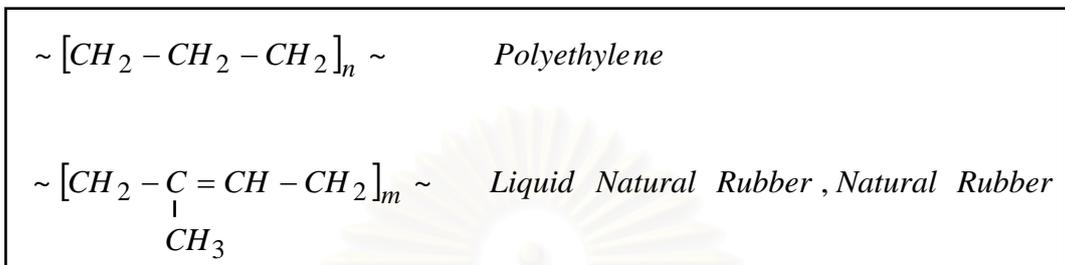
ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

Possible reaction of NR , LNR and PE to obtain (NR , LNR~g~PE) Using Liquid

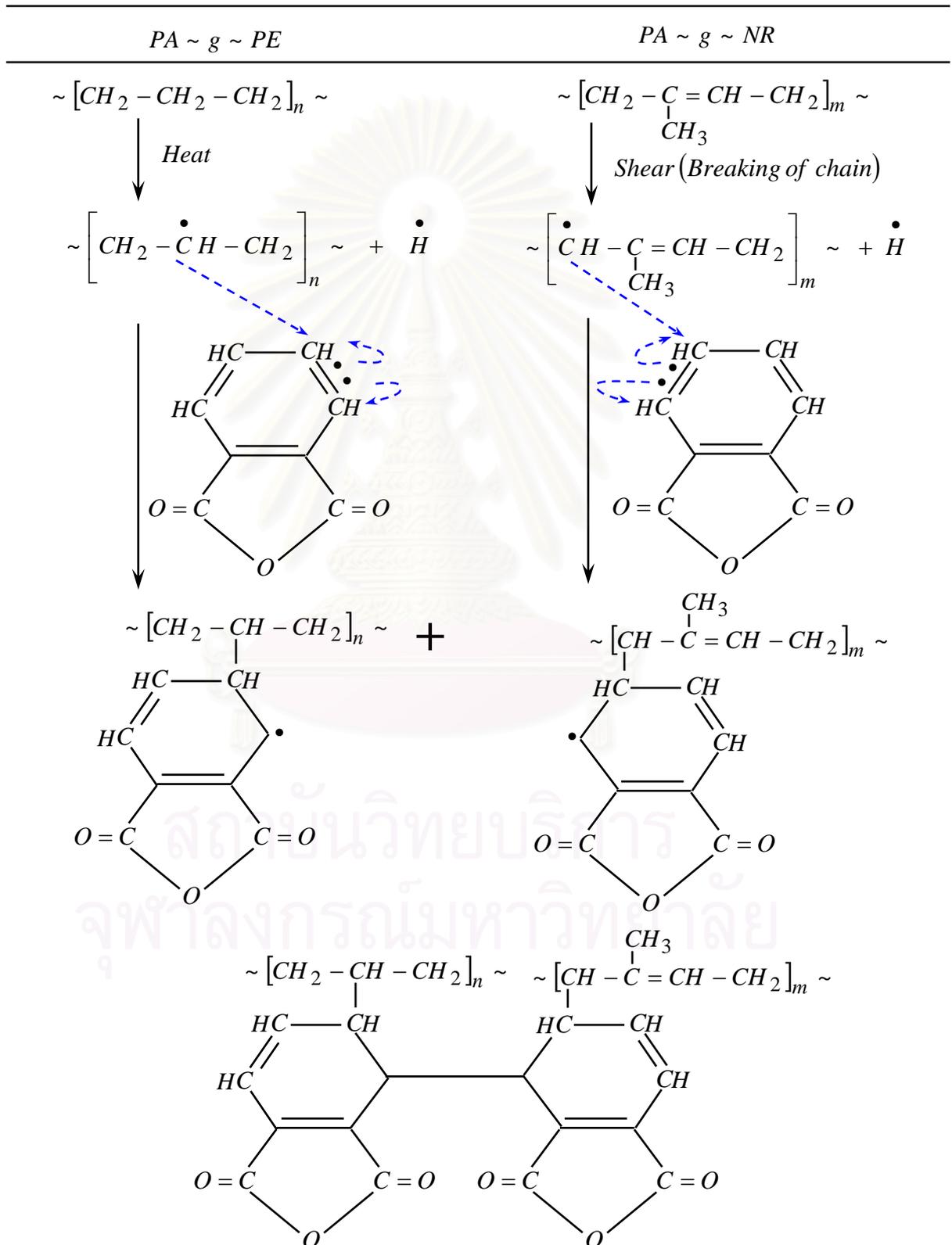
Natural Rubber as compatibilizer



ภาคผนวก ข

Grafting reaction to obtain graft copolymer of NR and PE with PA linkage

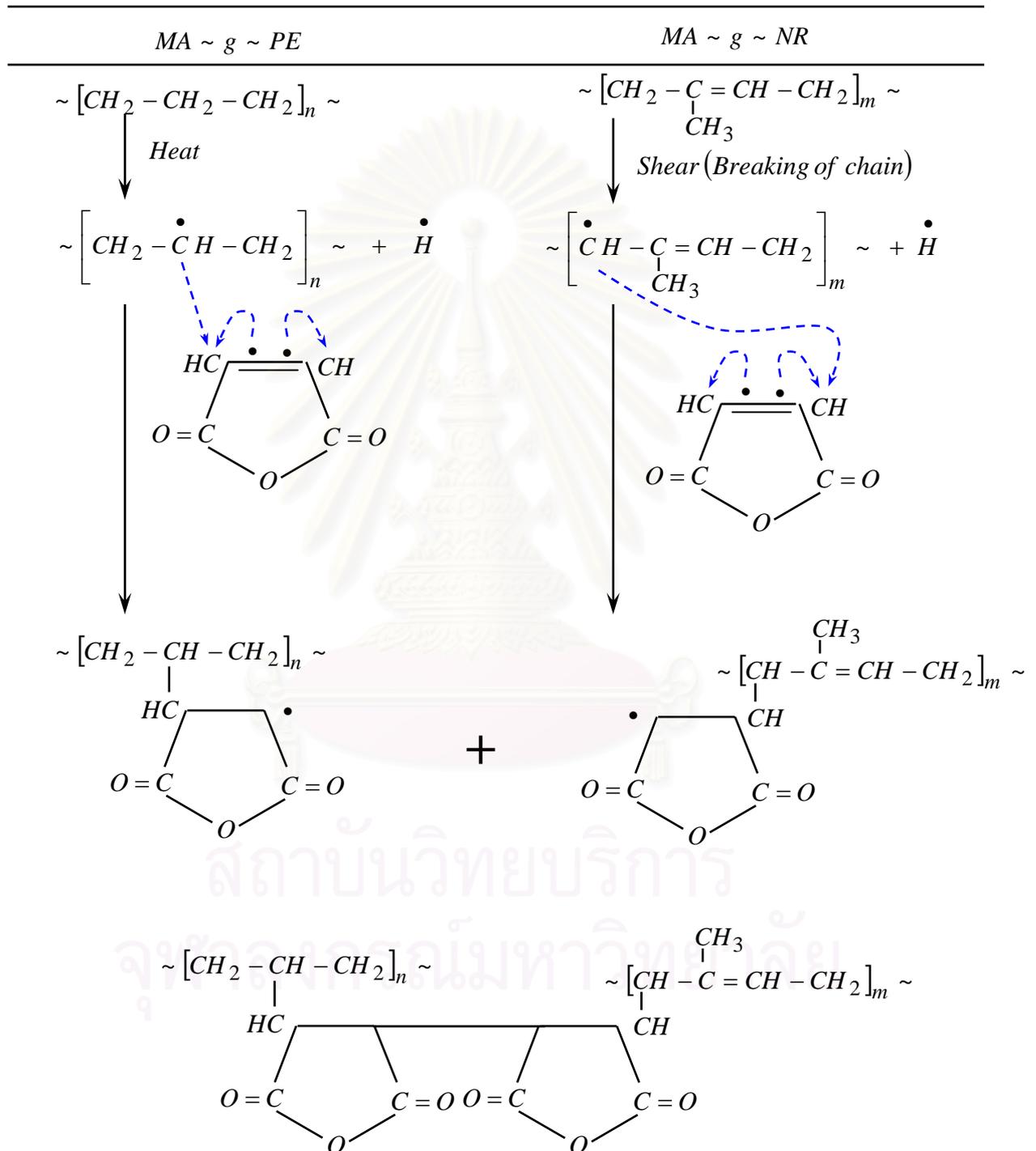
(NR~PA~PE) Using Pathalic Anhydride as compatibilizer



ภาคผนวก ค

Grafting reaction to obtain graft copolymer of NR and PE with MA linkage


(NR~MA~PE) Using Maleic Anhydride as compatibilizer



ภาคผนวก ง

Grafting reaction to obtain graft copolymer of NR and PE with MA linkage

(NR~MA~PE) Using MA~g~PE as compatibilizer



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชีวกภัทร์ พรพิมลมิตร เกิดเมื่อวันที่ 20 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2522 ที่โรงพยาบาลเพชรเวช กรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม ในปีการศึกษา 2544 สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2545 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2546 และจบการศึกษาในปีการศึกษา 2548



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย