

อิทธิพลของสารช่วยผสมที่มีต่อสมบัติของยางธรรมชาติ
ชนิดเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมได้จาก
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและยางธรรมชาติ



นางสาวปัทมา

ผลโยธิน

นางสาวณัฐนันท์

นิมยังดี

นางสาวสุรีย์พร

กุลตั้งกิจเสรี

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....43882
วัน, เดือน, ปี.....17 ต.ค. 2545

.b.....
.i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

**Effects of Compatibilizers on Properties of Thermoplastic
Natural Rubber (TPNR) prepared from
Low Density Polyethylene (LDPE) and Natural Rubber (NR)**



Miss Pattama

Pholyothin

Miss Nattanan

Nimyangdee

Miss Sureeporn

Kultangkitseree

**A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirement for the Degree of Bachelor of Science
Department of Chemistry
Faculty of Science
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang**

2001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

อิทธิพลของสารช่วยผสมที่มีต่อสมบัติของยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมได้จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและยางธรรมชาติ

นักศึกษา

นางสาวปีพมา ผลโยธิน รหัส 41052047
นางสาวณัฐนันท์ นิ่มยังดี รหัส 41052065
นางสาวสุรีย์พร กุลตั้งกิจเสรี รหัส 41052095

ภาควิชา

เคมี

อาจารย์ผู้ควบคุมโครงการพิเศษ

ผศ.ดร. อิทธิพล แจ่มชัด

อาจารย์ผู้ควบคุมโครงการพิเศษร่วม

รศ.ดร. ปราณี ภิญโญชีพ
ดร. ชลลดา ฤตวิรุพห์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

(ผศ. ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย)

หัวหน้าภาควิชาเคมี

คณะกรรมการผู้ตรวจสอบ โครงการพิเศษ

(ดร. สุภารัตน์ รักชลธิ์)

ประธานกรรมการ

(ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร)

กรรมการ

(ผศ. ดร. อิทธิพล แจ่มชัด)

กรรมการ

(รศ. ดร. ปราณี ภิญโญชีพ)

กรรมการ

(ดร.ชลลดา ฤตวิรุพห์)

กรรมการ

ลิขสิทธิภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

อิทธิพลของสารช่วยผสมที่มีต่อสมบัติของยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมได้จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและยางธรรมชาติ

นักศึกษา

นางสาวปัทมา ผลโยธิน รหัส 41052047

นางสาวณัฐนันท์ นิมยังดี รหัส 41052065

นางสาวสุรียพร กุลตั้งกิจเสรี รหัส 41052095

อาจารย์ผู้ควบคุมโครงการพิเศษ

ผศ.ดร. อิทธิพล แจ่มชัด

อาจารย์ผู้ควบคุมโครงการพิเศษร่วม

รศ.ดร. ปราณี ภิญโญชีพ

ดร. ชลลดา ฤตวิรุฬห์

ปริญญา

วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขา

เคมีอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา

2544

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ (Thermoplastic elastomers, TPEs) จากการผสมยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) ทำให้ได้ยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic natural rubber, TPNR) ซึ่งสามารถเตรียมได้จากการนำยางธรรมชาติผสมสูตรใส่ในเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง แล้วนำไปผสมกับ LDPE ในเครื่องผสมระบบปิด ในงานวิจัยนี้ได้เลือกสูตรผสมระหว่างยางธรรมชาติกับ LDPE คือ 60:40 โดยศึกษาปริมาณสารเชื่อมโยงไดควิมิลเปอร้ออกไซด์ (DCP) และความเร็วรอบโรเตอร์ต่างกัน พบว่า ที่ปริมาณ DCP 0.5 phr และความเร็วรอบโรเตอร์ 60 รอบ/นาที ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด จากนั้นทำการศึกษาปริมาณสารตัดสายโซ่ และสารช่วยผสม 2 ชนิด คือ ยางธรรมชาติชนิดอีพอกซีไดซ์ (ENR) และสารช่วยผสมร่วมระหว่าง ENR และพอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PE-g-MA) จากการทดลองพบว่า เมื่อเติมสารตัดสายโซ่ทำให้สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มลดลง ส่วนสารช่วยผสมชนิดที่ 1 ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด ส่วนชนิดที่ 2 ให้ค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก และเมื่อนำ TPNR มาผ่านการขึ้นรูปใหม่ด้วยการฉีดขึ้นรูป ทำให้สมบัติเชิงกลลดลงเพียงเล็กน้อย จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง TGA พบว่าอุณหภูมิในการสลายตัวของ TPNR จะมี 2 ช่วง คือ ช่วงอุณหภูมิ 320-430°C และ 430-510°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ยางผสมสูตรและ LDPE เกิดการสลายตัวตามลำดับ ส่วนการศึกษาด้วยเครื่อง DSC พบว่าการเติมสารตัดสายโซ่และสารช่วยผสมทำให้ความเป็นผลึกของ LDPE ลดลงและการศึกษาด้วยเครื่อง

DMTA พบว่า ค่า T_g อยู่ในช่วง -49.3°C ถึง -54.7°C และค่า $\tan \delta$ อยู่ในช่วง 0.3-0.4 จากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) พบว่าเมื่อมีการเติมสารช่วยผสมทำให้การกระจายตัวของเม็ดพลาสติก LDPE ในวัสดุของยางผสมสูตรดีขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | | | |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------|
| Special Project Title | Effect of Compatibilizers on Properties of Thermoplastic Natural Rubber (TPNR) prepared from Low Density Polyethylene (LDPE) and Natural Rubber (NR) | | |
| Student Names | Miss Pattama Pholyothin | Student ID. | 41052047 |
| | Miss Nattanan Nimyangdee | | 41052065 |
| | Miss Sureeporn Kultangkitserree | | 41052095 |
| Special Project Adviser | Asst.Prof.Dr. Ittipol Jangchud | | |
| Special Project Co-adviser | Assoc.Prof.Dr. Pranee Phinyocheep | | |
| | Dr. Chonlada | | Ritvirulh |
| Degree | Bachelor of Science (Industrial Chemistry) | | |
| Department | Chemistry | | |
| Academic Year | 2001 | | |

Abstract

This research work focused on improving properties of a thermoplastic elastomer (TPE) prepared from natural rubber (NR) and low density polyethylene (LDPE) known as thermoplastic natural rubber (TPNR). Prior to mixing NR with LDPE, the NR compounds were prepared by using a two-roll mill and blended with LDPE in an internal mixer. The blend ratio of 60:40 (NR: LDPE weight ratio) was selected for studying the effects of amount of dicumyl peroxide (DCP) and rotor speed. It was found that the optimum mechanical properties of TPNR were found at 0.5 phr DCP loading and 60 rpm rotor speed. Then amount of peptizer and two compatibilizers (ENR and ENR mixed with PE-g-MA) were investigated. It was revealed that mechanical properties of TPNR were decreased as peptizer loading increased. However, ENR compatibilizer improved mechanical properties. Unexpectedly, the mixed compatibilizer (ENR/PE-g-MA) showed insignificant change in mechanical properties. In addition, recycling ability of TPNR was tested by reinjection molding

and was found a slightly drop in properties. The thermal properties of the blends were examined by TGA, DSC and DMTA. From the TGA thermogram, two temperatures step were revealed at 320-430^oC and 430-510^oC responded to NR and LDPE decomposition, respectively. The DSC results showed that the degree of crystallinity of the blends was decreased when peptizer or compatibilizers was added. From DMTA results, T_g values were in a range of -49.3^oC to -54.7^oC and tan δ values were 0.3-0.4. SEM micrographs showed that LDPE dispersion in NR phase was improved when the compatibilizers were included.



กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. อธิธิพล แจ่มชัด ที่กรุณารับเป็นที่ปรึกษาโครงการงานพิเศษ คอยให้คำปรึกษาแนะนำตลอดการทำโครงการงาน

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. ปราณี ภิญโญชีพ ที่กรุณารับเป็นที่ปรึกษาโครงการงานพิเศษร่วม และให้ความอนุเคราะห์ในการส่งกระดาษช่วยผสม

ขอขอบพระคุณ ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ ที่กรุณารับเป็นที่ปรึกษาโครงการงานพิเศษร่วม พร้อมคำปรึกษาและกำลังใจที่มีให้ตลอดเวลา

ขอขอบพระคุณ ดร.สุภรัตน์ รักชลธิ และ ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร ที่กรุณาให้คำปรึกษาและตรวจแก้ไขโครงการงานพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ช่วยประสิทธิประสาทวิชาความรู้ และให้คำปรึกษา คอยช่วยเหลืองานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณ คุณกฤษณะ เกษประคิษฐ์ และ คุณสุคใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่ประจำอาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์เทคโนโลยีที่คอยอำนวยความสะดวกตลอดการทำโครงการงาน

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีทุกท่านที่คอยอำนวยความสะดวกตลอดการทำโครงการงาน

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง SEM

ขอขอบพระคุณ ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง DSC

ขอขอบพระคุณ บริษัทเอ็นเอส อิเล็กทรอนิกส์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง SEM

ขอขอบพระคุณ บริษัทไบเออร์ ประเทศไทย จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการมอบสารคัดสายโซ่

ขอขอบคุณ คุณสุพิชญ์ ปัญญาวัฒน์พงศ์ ที่คอยช่วยเหลือ ให้คำแนะนำและข้อมูลต่าง ๆ ตลอดการทำโครงการงาน งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ และพี่ ๆ ทุกคนที่คอยช่วยเหลือเป็นกำลังใจและอยู่เป็นเพื่อนทำโครงการงานจนศึกคืน

นอกจากนี้ยังมีบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลืออีกมาก ซึ่งมีได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ทางคณะผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

นางสาวปีพมา ผลโยธิน

นางสาวณัฐนันท์ นิมยังดี

นางสาวสุรียัพร กุลตั้งกิจเสรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

| | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ก |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | ค |
| กิตติกรรมประกาศ | จ |
| สารบัญ | ฉ |
| สารบัญรูป | ช |
| สารบัญตาราง | ฐ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ | 4 |
| 1.3 ขอบเขตงานวิจัย | 4 |
| 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ | 5 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 6 |
| 2.1 เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic Elastomers; TPEs) | 6 |
| 2.1.1 ชนิดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ | 7 |
| 2.1.2 สมบัติและการประยุกต์ใช้งานเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic elastomer; TPE) | 7 |
| 2.2 วัสดุที่ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติก | 9 |
| 2.2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber; NR) | 9 |
| 2.2.2 สารเติมแต่ง (Additives) | 11 |
| 2.2.3 พอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE) | 29 |
| 2.2.4 สารช่วยผสม (Compatibilizers) | 30 |
| 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 34 |
| บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย | 38 |
| 3.1 แผนการดำเนินการ | 38 |
| 3.2 สารเคมีและอุปกรณ์ | 40 |
| 3.3 วิธีการทดลอง | 42 |
| 3.4 แผนการทำงานวิจัย | 49 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ | 50 |
| 4.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติก | 50 |
| 4.2 การศึกษาการเตรียมยางผสมสูตร | 54 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.3. ศึกษาชนิด ปริมาณ และวิธีการในการผสมสารช่วยผสม เพื่อเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ | 64 |
| 4.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อน | 80 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ | 84 |
| เอกสารอ้างอิง | 87 |
| ภาคผนวก ก สภาวะที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่อง Injection molding | I |
| ภาคผนวก ข การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DSC | III |
| ภาคผนวก ค การหาอุณหภูมิในการหลอมเหลวของ LDPE ด้วยเครื่องบราเวนเดอร์พลาสติกอร์เคอร์ | VI |
| ภาคผนวก ง การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย TGA | IX |
| ภาคผนวก จ การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DMTA | XV |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

| | หน้า | |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 1.1 | อัตราการเติบโตของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ทั่วโลก ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970-1990 และแนวโน้มการเติบโตในอนาคต | 2 |
| รูปที่ 1.2 | ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจาก TPEs | 3 |
| รูปที่ 2.1 | โครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ | 6 |
| รูปที่ 2.2 | ช่วงความแข็งกคของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ ยางชนิดเทอร์โมเซตและพลาสติก | 8 |
| รูปที่ 2.3 | กระบวนการผลิตเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์เปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตยางเทอร์โมเซต | 9 |
| รูปที่ 2.4 | สูตรโครงสร้างของยางธรรมชาติ | 10 |
| รูปที่ 2.5 | กลไกปฏิกิริยาเชื่อมโยงยางด้วยกำมะถัน (ไม่มีสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง) | 14 |
| รูปที่ 2.6 | โครงสร้างของยางเมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน แสดงพันธะเชื่อมโยงมอนอซัลฟิดิก (Monosulfidic linkage, -S-) พอลิซัลฟิดิก (Polysulfidic linkage, -S _y - เมื่อ y มีค่า 3-8) โครงสร้างเป็นวง (Cyclic) และโครงสร้างห้อย (Dangling) ไม่เกิดการเชื่อมโยง | 16 |
| รูปที่ 2.7 | กราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) แสดงผลของปริมาณกำมะถัน | 17 |
| รูปที่ 2.8 | กลไกการเชื่อมโยงยางด้วยสารประกอบเปอร์ออกไซด์ | 19 |
| รูปที่ 2.9 | กราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) แสดงความแตกต่างของการเชื่อมโยงแบบไม่ใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง และใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง รวมทั้งการเชื่อมโยงในอุดมคติ (Ideal crosslink) ที่ต้องการ | 21 |
| รูปที่ 2.10 | กราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) แสดงความแตกต่างของการเชื่อมโยงแบบใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง แบบเร็วยิ่งยวด แบบธรรมดา และแบบช้า | 22 |
| รูปที่ 2.11 | สูตรโครงสร้างพอลิเอทิลีน | 29 |
| รูปที่ 2.12 | โครงสร้างของ ENR | 31 |
| รูปที่ 2.13 | ลักษณะโครงสร้างของ HDPE-g-MA | 33 |
| รูปที่ 4.1 | ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของ TPNR กับความเร็วโรเตอร์ของเครื่องบราเบนเดอร์พลาสติกอร์เคอร์ | 52 |
| รูปที่ 4.2 | ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดกับความเร็วโรเตอร์ของเครื่องบราเบนเดอร์พลาสติกอร์เคอร์ | 52 |
| รูปที่ 4.3 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกคกับความเร็วยืดรอบโรเตอร์ของเครื่องบราเบนเดอร์พลาสติกอร์เคอร์ | 53 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| | | |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 4.4 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสกับความเร็วรอบโรเตอร์ของเครื่องบรอนเดอร์พลาสติกอร์เคอร์ | 53 |
| รูปที่ 4.5 | ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของ TPNR กับปริมาณสารเชื่อมโยง | 56 |
| รูปที่ 4.6 | ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด ของ TPNR กับปริมาณสารเชื่อมโยง | 56 |
| รูปที่ 4.7 | ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกด ของ TPNR กับปริมาณสารเชื่อมโยง | 57 |
| รูปที่ 4.8 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสของ TPNR กับ ปริมาณสารเชื่อมโยง | 57 |
| รูปที่ 4.9 | ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เจลของ TPNR กับ ปริมาณสารเชื่อมโยง | 58 |
| รูปที่ 4.10 | สัณฐานวิทยาของ TPNR กำลังขยาย 1500 เท่า ปริมาณ DCP 0.5, 1.0, 1.5 phr ตามลำดับ | 59 |
| | a) Virgin TPNR / DCP 0.5 phr b) Vigin TPNR / DCP 1.0 phr | |
| | c) Virgin TPNR / DCP 1.5 phr d) 1 st recycled TPNR / DCP 0.5 phr | |
| | e) 2 nd recycled TPNR / DCP 0.5 phr | |
| รูปที่ 4.11 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของ TPNR กับปริมาณสารตัดสายโซ่ | 61 |
| รูปที่ 4.12 | ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด ของ TPNR กับปริมาณสารตัดสายโซ่ | 61 |
| รูปที่ 4.13 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของ TPNR กับปริมาณสารตัดสายโซ่ | 62 |
| รูปที่ 4.14 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสของ TPNR กับปริมาณสารตัดสายโซ่ | 62 |
| รูปที่ 4.15 | ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เจลของ TPNR กับปริมาณสารตัดสายโซ่ | 63 |
| รูปที่ 4.16 | สัณฐานวิทยาของ TPNR (NR/LDPE = 60/40, DCP 0.5 phr) ที่มีปริมาณสารตัดสายโซ่ต่างกัน ที่กำลังขยาย 1500 เท่า | 64 |
| | a) Peptiser 0 phr b) Peptiser 1 phr | |
| | c) Peptiser 2 phr d) Peptiser 3 phr | |
| รูปที่ 4.17 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของ TPNR กับปริมาณ ENR | 66 |
| รูปที่ 4.18 | ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาดของ TPNR กับปริมาณ ENR | 67 |
| รูปที่ 4.19 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสของ TPNR กับปริมาณ ENR | 67 |
| รูปที่ 4.20 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของ TPNR กับปริมาณ ENR | 68 |
| รูปที่ 4.21 | ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เจลของ TPNR กับปริมาณ ENR | 68 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| | | |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 4.22 | <p>สัณฐานวิทยาของ TPNR (NR/LDPE = 60/40, DCP 0.5 phr) ที่มีปริมาณ ENR 1 2 และ 3 phr กำลังขยาย 1500 เท่า</p> <p>a) TPNR ที่มีปริมาณ ENR 0 phr b) TPNR ที่มีปริมาณ ENR 1 phr</p> <p>c) TPNR ที่มีปริมาณ ENR 2 phr d) TPNR ที่มีปริมาณ ENR 3 phr</p> | 69 |
| รูปที่ 4.23 | <p>ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของ TPNR กับปริมาณสารช่วยผสมร่วม (การผสมวิธีที่ 1)</p> | 71 |
| รูปที่ 4.24 | <p>ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด ของ TPNR กับปริมาณสารช่วยผสมร่วม (การผสมวิธีที่ 1)</p> | 72 |
| รูปที่ 4.25 | <p>ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของ TPNR กับปริมาณสารช่วยผสมร่วม (การผสมวิธีที่ 1)</p> | 72 |
| รูปที่ 4.26 | <p>ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสของ TPNR กับปริมาณสารช่วยผสมร่วม (การผสมวิธีที่ 1)</p> | 73 |
| รูปที่ 4.27 | <p>ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เจลของ TPNR กับปริมาณสารช่วยผสมร่วม (การผสมวิธีที่ 1)</p> | 73 |
| รูปที่ 4.28 | <p>สัณฐานวิทยาของ TPNR (NR/LDPE = 60/40, DCP 0.5 phr) ที่มีปริมาณสารช่วยผสม-ร่วมระหว่าง ENR และ PE-g-MA โดยใช้วิธีการผสมวิธีที่ 1 ที่กำลังขยาย 1500 เท่า</p> <p>a) TPNR ที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสมร่วม</p> <p>b) TPNR ที่มีปริมาณสารช่วยผสมร่วม 1 phr</p> <p>c) TPNR ที่มีปริมาณสารช่วยผสมร่วม 2 phr</p> <p>d) TPNR ที่มีปริมาณสารช่วยผสมร่วม 3 phr</p> | 74 |
| รูปที่ 4.29 | <p>ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของ TPNR กับปริมาณสารช่วยผสมร่วม (การผสมวิธีที่ 2)</p> | 76 |
| รูปที่ 4.30 | <p>ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด ของ TPNR กับปริมาณสารช่วยผสมร่วม (การผสมวิธีที่ 2)</p> | 76 |
| รูปที่ 4.31 | <p>ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของ TPNR กับปริมาณสารช่วยผสมร่วม (การผสมวิธีที่ 2)</p> | 77 |
| รูปที่ 4.32 | <p>ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เจลของ TPNR กับปริมาณสารช่วยผสมร่วม (การผสมวิธีที่ 2)</p> | 77 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| | | |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ 4.33 | ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เจลของ TPNR กับปริมาณสารช่วยผสมร่วม (การผสมวิธีที่ 2) | 78 |
| รูปที่ 4.34 | สัณฐานวิทยาที่พื้นผิวของ TPNR (NR/LDPE = 60/40, DCP 0.5 phr) ที่มีปริมาณสารช่วยผสมร่วมระหว่าง ENR และ PE-g-MA โดยใช้วิธีการผสมวิธีที่ 2 ที่กำลังขยาย 1500 เท่า | 79 |
| | a) TPNR ที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสมร่วม | |
| | b) TPNR ที่มีปริมาณสารช่วยผสมร่วม 1 phr | |
| | c) TPNR ที่มีปริมาณสารช่วยผสมร่วม 2 phr | |
| | d) TPNR ที่มีปริมาณสารช่วยผสมร่วม 3 phr | |
| รูปที่ ข.1 | เทอร์โมแกรม DSC ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ | III |
| รูปที่ ข.2 | เทอร์โมแกรม DSC ของ TPNR มีปริมาณ DCP 0.5 phr | III |
| รูปที่ ข.3 | เทอร์โมแกรม DSC ของ TPNR มีปริมาณ DCP 0.5 phr ปริมาณสารตัดสายโซ่ 0.75 phr | IV |
| รูปที่ ข.4 | เทอร์โมแกรม DSC ของ TPNR มีปริมาณ DCP 0.5 phr ปริมาณ ENR 3 phr | IV |
| รูปที่ ข.5 | เทอร์โมแกรม DSC ของ TPNR มีปริมาณ DCP 0.5 phr ปริมาณสารช่วยผสมร่วม 3 phr (การผสมวิธีที่ 1) | V |
| รูปที่ ข.6 | เทอร์โมแกรม DSC ของ TPNR มีปริมาณ DCP 0.5 phr ปริมาณสารช่วยผสมร่วม 3 phr (การผสมวิธีที่ 2) | V |
| รูปที่ ค.1 | พลาสติกแกรมของ LDPE ที่ 140°C | VI |
| รูปที่ ค.2 | พลาสติกแกรมของ LDPE ที่ 150°C | VII |
| รูปที่ ค.3 | พลาสติกแกรมของ LDPE ที่ 160°C | VIII |
| รูปที่ ง.1 | เทอร์โมแกรม TGA ของ LDPE | IX |
| รูปที่ ง.2 | เทอร์โมแกรม TGA ของ PE-g-MA | IX |
| รูปที่ ง.3 | เทอร์โมแกรม TGA ของ ยางผสมสูตร | X |
| รูปที่ ง.4 | เทอร์โมแกรม TGA ของ TPNR / DCP 0.5 phr (Virgin) | X |
| รูปที่ ง.5 | เทอร์โมแกรม TGA ของ TPNR / DCP 0.5 phr (1 st recycled) | XI |
| รูปที่ ง.6 | เทอร์โมแกรม TGA ของ TPNR / DCP 0.5phr (2 nd recycled) | XI |
| รูปที่ ง.7 | เทอร์โมแกรม TGA ของ TPNR / DCP 1.0 phr (Virgin) | XII |
| รูปที่ ง.8 | เทอร์โมแกรม TGA ของ TPNR / DCP 1.5 phr (Virgin) | XII |

สารบัญรูป (ต่อ)

| | | |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| รูปที่ ง.9 | เทอร์โมแกรม TGA ของ TPNR / DCP 0.5 phr / Peptizer 0.75 phr | XIII |
| รูปที่ ง.10 | เทอร์โมแกรม TGA ของ TPNR / DCP 0.5 phr / ENR 3 phr | XIII |
| รูปที่ ง.11 | เทอร์โมแกรม TGA ของ TPNR / DCP 0.5 phr / ENR+PE-g-MA 3 phr (การผสมวิธีที่ 1) | XIV |
| รูปที่ ง.12 | เทอร์โมแกรม TGA ของ TPNR / DCP 0.5 phr / ENR+PE-g-MA 3 phr (การผสมวิธีที่ 2) | |
| รูปที่ จ.1 | เทอร์โมแกรม DMTA ของยางธรรมชาติ | XV |
| รูปที่ จ.2 | เทอร์โมแกรม DMTA ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ | XV |
| รูปที่ จ.3 | เทอร์โมแกรม DMTA ของ TPNR มีปริมาณ DCP 0.5 phr | XVI |
| รูปที่ จ.4 | เทอร์โมแกรม DMTA ของ TPNR มีปริมาณ DCP 0.5 phr ผ่านการรีไซเคิลครั้งที่ 1 | XVI |
| รูปที่ จ.5 | เทอร์โมแกรม DMTA ของ TPNR มีปริมาณ DCP 0.5 phr ผ่านการรีไซเคิลครั้งที่ 2 | XVII |
| รูปที่ จ.6 | เทอร์โมแกรม DMTA ของ TPNR มีปริมาณ DCP 1.0 phr | XVII |
| รูปที่ จ.7 | เทอร์โมแกรม DMTA ของ TPNR มีปริมาณ DCP 1.5 phr | XVIII |
| รูปที่ จ.8 | เทอร์โมแกรม DMTA ของ TPNR มีปริมาณ DCP 0.5 phr ปริมาณสารตัดสายโซ่ 0.75 phr | XVIII |
| รูปที่ จ.9 | เทอร์โมแกรม DMTA ของ TPNR มีปริมาณ DCP 0.5 phr ปริมาณ ENR 3 phr | XIX |
| รูปที่ จ.10 | เทอร์โมแกรม DMTA ของ TPNR มีปริมาณ DCP 0.5 phr ปริมาณ สารช่วยผสมร่วม 3 phr (การผสมวิธีที่ 1) | XIX |
| รูปที่ จ.11 | เทอร์โมแกรม DMTA ของ TPNR มีปริมาณ DCP 0.5 phr ปริมาณสารช่วยผสมร่วม 3 phr (การผสมวิธีที่ 2) | XX |

สารบัญตาราง

| | | |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ตารางที่ 2.1 | การแบ่งชนิดของพอลิเอทิลีนตามลักษณะ โครงสร้างของสายโซ่ | 29 |
| ตารางที่ 3.1 | สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ | 41 |
| ตารางที่ 3.2 | ยางผสมสูตรที่ใช้ในการทดลอง | 43 |
| ตารางที่ 3.4 | ระยะเวลาในการทำงานวิจัย | 49 |
| ตารางที่ 4.1 | เวลาที่ใช้ในการหลอมเหลว LDPE ที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วย เครื่องบราเบนเคอร์พลาสติกอร์เคอร์ | 51 |
| ตารางที่ 4.2 | Scorch time และ Cure time ที่มีปริมาณ DCP 0.5 1.0 และ 1.5 phr โดยเชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 140-160°C | 54 |
| ตารางที่ 4.3 | ความหนืดของยางผสมสูตร เมื่อมีปริมาณสารตัดสายโซ่ 0.25 0.50 และ 0.75 phr | 50 |
| ตารางที่ 4.4 | ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย TGA | 80 |
| ตารางที่ 4.5 | ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DSC | 81 |
| ตารางที่ 4.6 | ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DMTA | 82 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

เป็นที่ทราบกันดีว่ายางสุกหรือยางที่ผ่านขบวนการวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) มีสมบัติที่ดีและมีประโยชน์มากมายแต่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เนื่องจากยางสุกเป็นพอลิเมอร์จำพวกเทอร์โมเซต (Thermoset) มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ (3-Dimensional network) มีข้อจำกัด คือ

- มีข้อจำกัดสำหรับเครื่องมือขึ้นรูปและการเชื่อมโยงของยาง
- เศษเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตและยางเสื่อมสภาพไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Recycling)
- ต้องทำการเชื่อมโยง ทำให้กระบวนการผลิตยุ่งยากและใช้เวลานาน

จากข้อจำกัดต่างๆของยาง จึงมีการคิดค้นวัสดุชนิดใหม่เพื่อนำมาใช้ทดแทน ดังนั้นยางเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในส่วนนี้ เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic elastomer; TPE) คือ วัสดุที่มีสมบัติยืดหยุ่นคล้ายยาง แต่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้เหมือนพลาสติก ซึ่งเป็นวัสดุชนิดใหม่ที่รู้จักดีในอุตสาหกรรมต่าง ๆ และมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ [1] เช่น อุตสาหกรรมชิ้นส่วนรถยนต์ รองเท้า เครื่องใช้อุปโภค เป็นต้น

ในปัจจุบันประเทศไทยสามารถผลิตยางธรรมชาติได้มากเป็นอันดับหนึ่งของโลก โดยมีการผลิตมากกว่า 2.3 ล้านตันต่อปี [2] คิดเป็นร้อยละ 30 ของการผลิตของโลก โดยยางธรรมชาติสามารถใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ยางเพื่อใช้งานในประเทศและเพื่อการส่งออก การส่งออกผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติสามารถนำรายได้เข้าประเทศปีหนึ่ง ๆ มากกว่าแสนล้านบาท ทั้งยางดิบและผลิตภัณฑ์ยางแปรรูป อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางแปรรูปมีความสำคัญอย่างยิ่งเนื่องจากสามารถเพิ่มมูลค่าให้ยางดิบได้มาก จึงควรได้รับการผลักดันสนับสนุนให้มีการขยายตัวของอุตสาหกรรมการผลิตยางธรรมชาติแปรรูปในประเทศ

เป็นเวลากว่า 40 ปีมาแล้วที่มีการนำเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic Elastomers; TPEs) ชนิดแรกมาใช้งานในสหรัฐอเมริกา จากนั้นมีการนำเทอร์โมพลาสติกมาใช้อย่างต่อเนื่องในปริมาณที่เพิ่มขึ้นกว่า 2,000 พันล้านปอนด์ในปี ค.ศ. 1998 [3]

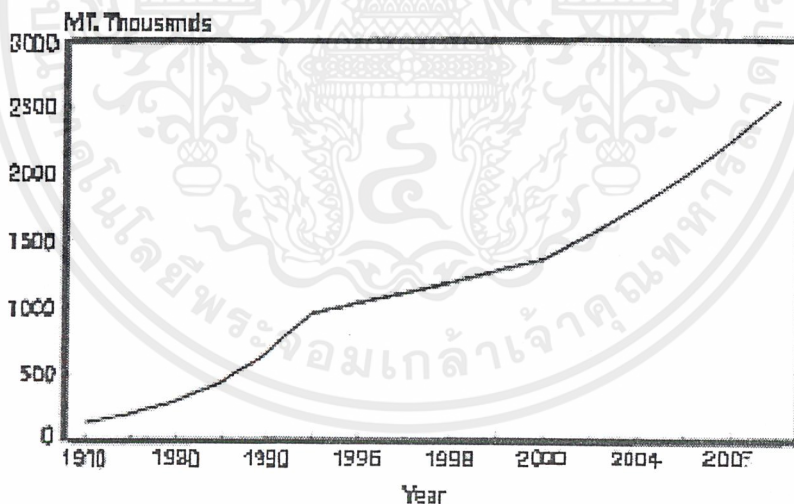
ค.ศ. 1950-1959 มีการสังเคราะห์เทอร์โมพลาสติกขึ้นครั้งแรก โดยชนิดแรกที่มีการสังเคราะห์ขึ้นคือ เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (Thermoplastic polyurethane; TPU) [4]

ค.ศ. 1960 บริษัทเชลล์ (Shell Development Company) ได้ผลิต TPE ชนิดอื่นเข้าสู่ตลาด คือ เทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ร่วมของ สไตรีน-ไดอีน แบบบล็อก (Thermoplastic Styrene-diene block copolymer)

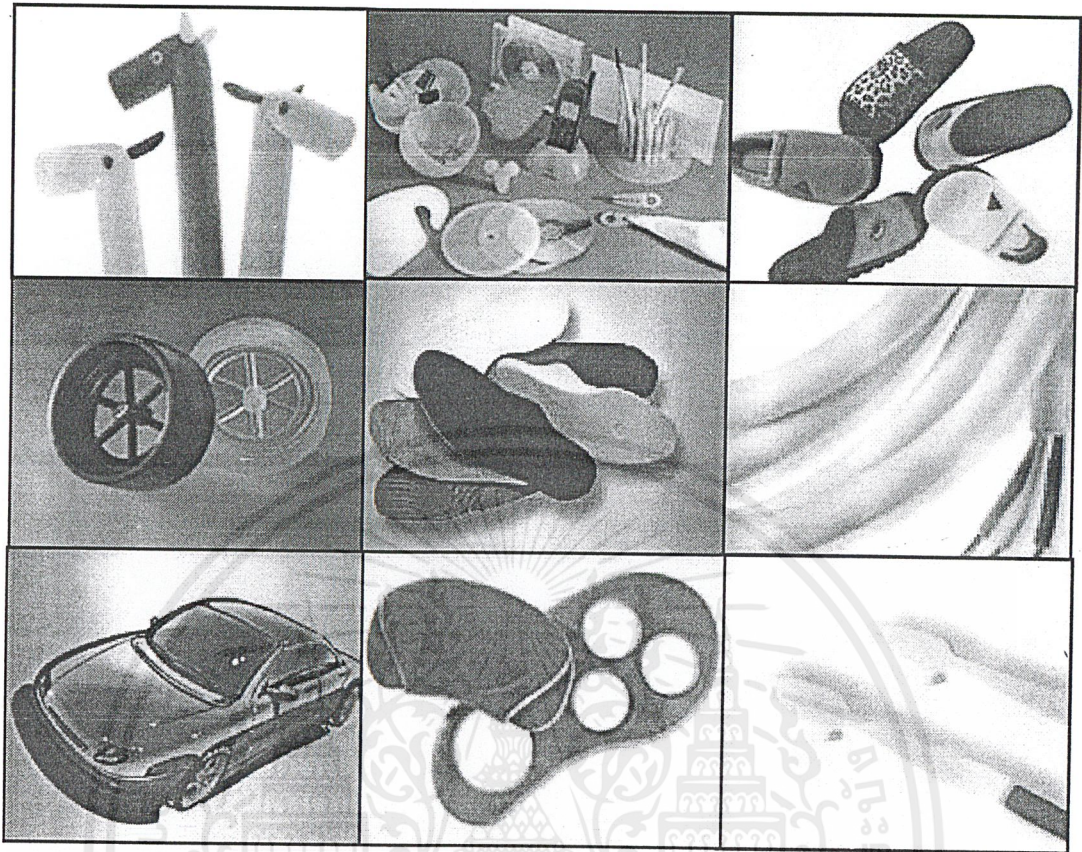
ค.ศ. 1970 บริษัทดูปองท์ (duPont de Nemours & Company) ได้ผลิตเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ร่วมของพอลิเอสเทอร์ (Copolyester (COP) TPEs) และบริษัทยูนิรอยัล (Uniroyal Company) ได้ทำการผลิตเทอร์โมพลาสติกพอลิโอเลฟินอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic polyolefin-elastomers; TPOs) ต่อมา มีการนำพอลิไวนิลคลอไรด์และยางไนไตรล์มาผสมเพื่อพัฒนาให้วัสดุมีสมบัติคล้ายยางและสามารถขึ้นรูปได้เหมือนเทอร์โมพลาสติก หลังจากนั้นบริษัทมอนซันโต (Monsanto Chemical Company) ได้ทำการผลิตอีลาสโตเมอริกอัลลอยด์ (Elastomeric alloys; EAS) หรือที่รู้จักกันในปัจจุบันคือ เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนเซต (Thermoplastic vulcanizates) ซึ่งมีองค์ประกอบของเทอร์โมพลาสติกและยางที่มีการเชื่อมโยง

ค.ศ. 1980 ได้มีการผลิตอีลาสโตเมอริกพอลิเอไมด์ (Elastomeric polyamides; PEBAs) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีสมบัติในการใช้งานและราคาสูง

ในระหว่างปี ค.ศ. 1970-1990 อัตราการเติบโตทั่วโลกของ TPEs คิดเป็น 8.9 % ต่อปี และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ



รูปที่ 1.1 อัตราการเติบโตของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ทั่วโลก ตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1970-1990 และแนวโน้มการเติบโตในอนาคต



รูปที่ 1.2 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจาก TPEs

ข้อดีของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์

1. สามารถใช้แทนวัสดุจำพวกยาง แต่สามารถขึ้นรูปได้ง่ายเหมือนเทอร์โมพลาสติก
2. ลดเวลาในการขึ้นรูปเมื่อเทียบกับการผลิตยางวัลคาไนซ์
3. กระบวนการผลิตเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ไม่ยุ่งยากและมีขั้นตอนการผลิตน้อยกว่ายางวัลคาไนซ์
4. สามารถใช้กับเครื่องมือในการผลิตเทอร์โมพลาสติกต่างๆไปได้โดยไม่ต้องเพิ่มขั้นตอนในการเชื่อมโยง (Vulcanization)
5. สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Recycle)
6. ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติหลากหลายตามต้องการ
7. สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างซับซ้อนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อจำกัดของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

1. สำหรับอุตสาหกรรมยางจะต้องมีการเพิ่มเครื่องมือเข้ามาช่วยในการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ ใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบเดียวกับเทอร์โมพลาสติก
2. เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ส่วนใหญ่ต้องทำให้แห้งก่อนการขึ้นรูปเหมือนกับ การขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติก ซึ่งไม่จำเป็นสำหรับการผลิตเทอร์โมเซต ดังนั้นต้องมีเครื่องมือเพื่อให้แห้งสำหรับการผลิตเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์
3. เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์มีช่วงอุณหภูมิในการใช้งานที่ต่ำกว่าเทอร์โมเซต

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมและสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในสัดส่วน 60:40 โดยใช้ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide; DCP) เป็นสารเชื่อมโยง และมีการใช้สารช่วยผสม คือ ยางธรรมชาติชนิดอีพอกไซด์ (Epoxidized Natural Rubber; ENR) และ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride grafted high density polyethylene; HDPE-g-MA) เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติก (TPNR) ให้ดีขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการเตรียมยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติก (TPNR) จากยางธรรมชาติ (NR) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)
2. เพื่อศึกษาผลของการเติมสารตัดสายโซ่ (Peptizer) และสารช่วยผสม (Compatibilizer) ที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ ของ TPNR
3. เพื่อศึกษาสมบัติต่างๆของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน ล้วนฐานวิทยา เป็นต้น

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาอุณหภูมิและความเร็วรอบของโรเตอร์ที่เหมาะสมในการเตรียม TPNR ที่มีสมบัติที่ดี
2. ศึกษาปริมาณสารเชื่อมโยงที่เหมาะสมในการเตรียม TPNR
3. ศึกษาปริมาณสารตัดสายโซ่ (Peptizer) และสารช่วยผสม (Compatibilizer) ที่เหมาะสมที่เติมลงใน TPNR

4. เปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่มีการเติมและไม่มีการเติมสารตัดสายโซ่หรือสารช่วยผสม

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. เพื่อให้ทราบถึงวิธีการปรับปรุงและกระบวนการผลิตเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เหมาะสม
2. ส่งเสริมการผลิต TPNR ในระดับอุตสาหกรรม เป็นการเพิ่มมูลค่าทางธรรมชาติให้สูงขึ้น และมีการใช้งานมากขึ้น ก่อให้เกิดการพัฒนาประเทศทั้งทางเศรษฐกิจและสังคม
3. ใช้ความรู้ที่ได้ปรับปรุงสมบัติทางธรรมชาติและ TPNR ชนิดอื่น ๆ เพื่อใช้ในงานอุตสาหกรรมทดแทนยางวัลคาไนซ์ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการความยืดหยุ่นสูง เช่น อุตสาหกรรมยางรถยนต์



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic Elastomers; TPEs) [1,4]

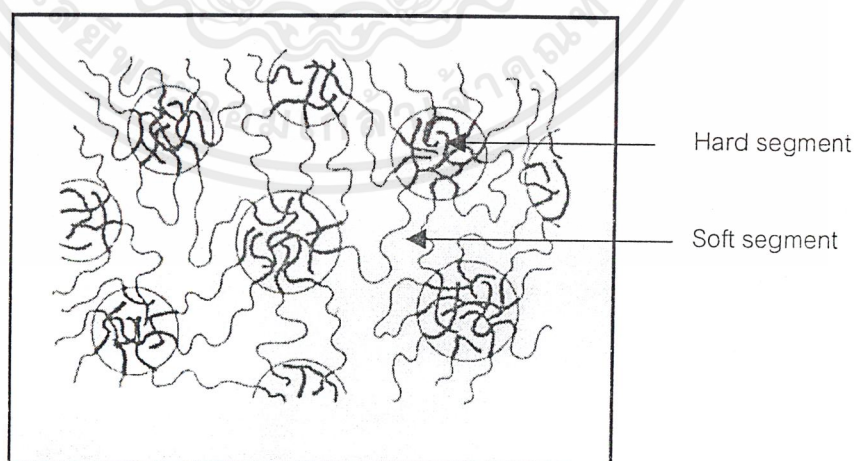
เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีสมบัติเด่นเทียบกับยางที่วัลคาไนซ์หรือเชื่อมโยงแล้ว คือสามารถผ่านกระบวนการขึ้นรูปโดยใช้เทคนิคเดียวกับพลาสติก ใช้สารเติมแต่ง (Additives) ในปริมาณไม่มาก ใช้เวลาในการผสมสั้น สามารถนำเศษและของเสียกลับมาใช้ใหม่ได้โดยไม่ทำให้เกิดการสูญเสียและมีสมบัติคงเดิม พลังงานที่ใช้ในการขึ้นรูปต่ำ สามารถควบคุมรูปร่างให้เป็นไปตามความต้องการได้ง่ายและมีน้ำหนักเบากว่ายางเทอร์โมเซตที่ปริมาณเท่ากัน

วิธภาคของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ ประกอบด้วย

1) ส่วนแข็ง (Hard segment) ซึ่งเป็นส่วนของเทอร์โมพลาสติกที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ที่อุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิใช้งาน แต่สามารถเปลี่ยนแปลงเป็นของไหลได้เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิขึ้นรูป ส่วนแข็งมีความสำคัญในการสร้างบริเวณแข็ง (Rigid region) ที่ทำหน้าที่คล้ายกับการเชื่อมโยงทางกายภาพ (Physical crosslink)

2) ส่วนอ่อน (Soft segment) มีลักษณะเป็นอสัณฐาน (Amorphous) คล้ายยาง มีอิสระในการเคลื่อนที่ได้มากกว่าส่วนแข็งและมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature; T_g) ที่ต่ำ ทำให้เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีความยืดหยุ่นคล้ายยาง มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างต่ำ

ส่วนแข็งและส่วนอ่อนของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์แสดงได้ ดังรูปที่ 2.1



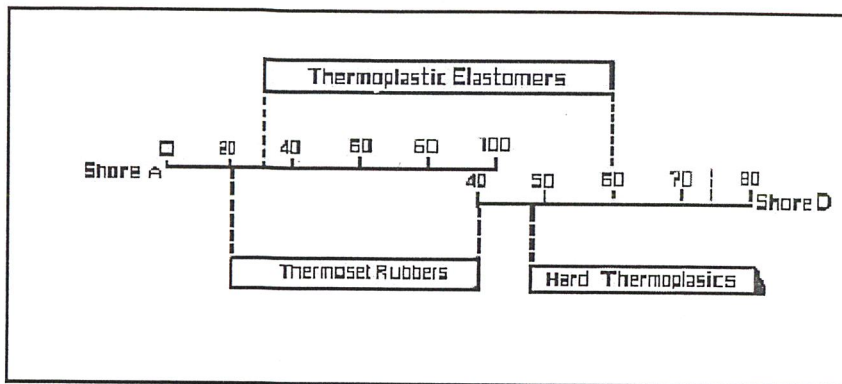
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ [5]

2.1.1 ชนิดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ [4]

- เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPEs) สามารถแบ่งออกได้เป็น 6 ประเภท ได้แก่
- 1) เทอร์โมพลาสติกพอลิโอเลฟินอีลาสโตเมอร์ (*Thermoplastic Polyolefin Elastomer; TPO*) เป็นพอลิเมอร์ผสมทางเชิงกลระหว่างพอลิโอเลฟินกับอีลาสโตเมอร์ เช่น พอลิเมอร์ผสมระหว่างไอโซแทกติกพอลิพรอพิลีน (PP) กับยางเอทิลีน-พรอพิลีน-ไดอีน (EPDM)
 - 2) เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เซด (*Thermoplastic Vulcanizate; TPV*) ต่างจาก TPO ในส่วนของวัฏภาคยางที่มีการเชื่อมโยงสูงกว่า TPO สมรรถนะของ TPV จะใกล้เคียงกันกับยางเทอร์โมเซต
 - 3) เทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อีลาสโตเมอร์ (*Thermoplastic Polyester Elastomer*) เป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อก ซึ่งประกอบด้วยส่วนแข็งและส่วนอ่อน โดยส่วนแข็ง คือ พอลิอัลคิลีนเทอเรพทาเลท และส่วนอ่อน คือ พอลิอัลคิลีนอีเทอร์
 - 4) เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ (*Thermoplastic Polyurethane Elastomer*) เป็นพอลิเมอร์โรเซชันแบบขั้นระหว่างไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกับไดไอโซไซยานาต
 - 5) เทอร์โมพลาสติกพอลิเอไมด์อีลาสโตเมอร์ (*Thermoplastic Polyamide Elastomer*) เป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกที่มีสองโครงสร้าง คือ พอลิอีเทอร์สลับกับพอลิเอไมด์และพอลิเอสเทอร์สลับกับพอลิเอไมด์
 - 6) เทอร์โมพลาสติกพอลิ(สไตรีน-ไดอีน) อีลาสโตเมอร์ (*Thermoplastic Poly(styrene-diene) Elastomer*) เป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกที่มีความหนืดไหลสูงมากส่วนที่เป็นอีลาสโตเมอร์ คือ โมเลกุลที่มีพันธะคู่ ส่วนแข็ง คือ พอลิสไตรีน

2.1.2 สมบัติและการประยุกต์ใช้งานเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic elastomer; TPE) [1]

เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ มีจุดเริ่มต้นมาจากความพยายามค้นคว้าหาวัสดุใหม่ที่มีสมบัติอยู่ระหว่างยางและพลาสติก คือสามารถขึ้นรูปหรือทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆได้ โดยใช้กระบวนการเดียวกับที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปของเทอร์โมพลาสติกทั่วไป แต่มีสมบัติพิเศษ คือ มีสมบัติยืดหยุ่นและสามารถโค้งงอได้ (Flexibility) มีการกระดอนดี (Resilience) ซึ่งมีสมบัติเฉพาะตัวของยาง เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีค่าความแข็งอยู่ในช่วงระหว่างยางกับพลาสติกสามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ช่วงความแข็งกดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ ยางชนิดเทอร์โมเซต และพลาสติก [2]

เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีสมบัติเด่นกว่าวัสดุอื่น [2] เช่น

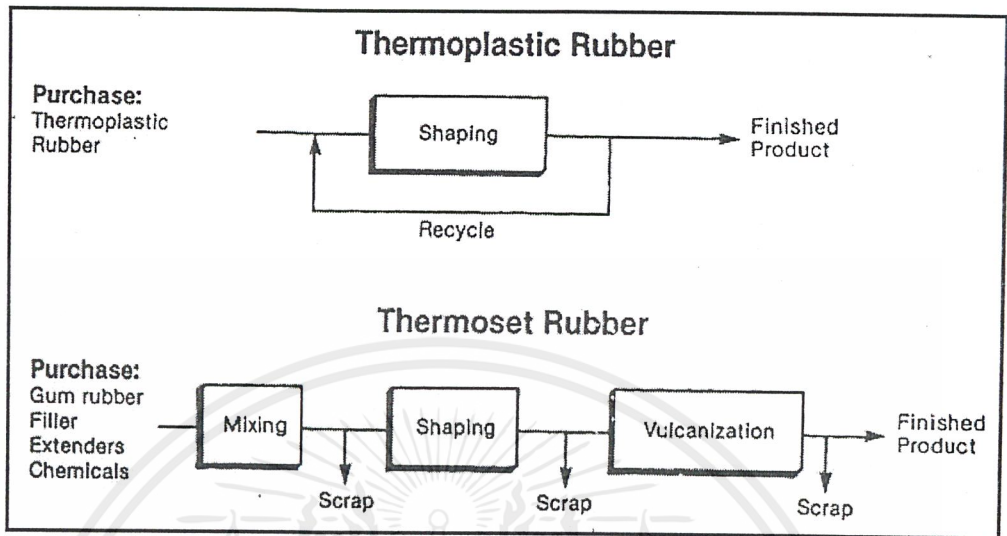
- มีความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำกว่าพลาสติกชนิดอื่น ๆ เช่น โพลีไวนิลคลอไรด์ โพลียูรีเทน และพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ
- มีสมบัติที่อุณหภูมิสูงกว่าโพลีไวนิลคลอไรด์ เอทิลีน ไวนิลอะซิเตต โพลีเอทิลีน และพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ
- มีความทนทานต่อแรงกระแทกดีกว่าพลาสติกทั่วไป เช่น โพลีพรอพิลีน
- มีความหนาแน่นต่ำกว่าพลาสติกอื่น ๆ เช่น โพลีไวนิลคลอไรด์ และพอลียูรีเทน และมีราคาถูกกว่าพอลียูรีเทน
- มีต้นทุนการผลิตต่ำกว่ายางวัลคาไนซ์
- สามารถทนทานต่อน้ำและสารเคมีได้ดี

จากสมบัติข้างต้นจึงมีการนำเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมด้านต่าง ๆ ดังนี้

- ใช้ทดแทนยางวัลคาไนซ์ในผลิตภัณฑ์ที่ไม่จำเป็นต้องมีความยืดหยุ่นสูง และความแข็งแรงมาก ๆ
- ใช้แทนพลาสติกที่มีความยืดหยุ่น เช่น โพลีเอทิลีน ไวนิลอะซิเตต โพลียูรีเทน และโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เป็นต้น

เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์สามารถขึ้นรูปได้เหมือนกับเทอร์โมพลาสติก ซึ่งมีใช้ในอุตสาหกรรมด้านใหม่ ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมรถยนต์กระบวนการขึ้นรูปหลายวิธีด้วยกัน เช่น การอัดรีด (Extrusion) การอัดขึ้นรูป (Compression molding) การฉีดขึ้นรูป (Injection molding) และการเป่าขึ้นรูป (Blow molding) เป็นต้น ซึ่งกระบวนการในการขึ้นรูป

เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์นั้นมีเพียงขั้นตอนเดียว เมื่อเทียบกับยางเทอร์โมเซตที่ใช้ขั้นตอนในการขึ้นรูปหลายขั้นตอน ดังรูปที่ 2.3



รูป 2.3 กระบวนการผลิตเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์เปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตยางเทอร์โมเซต [2]

การประยุกต์ใช้งานเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

- ใช้แทนยางที่มีสมบัติเชิงกลดี เช่น ใช้เคลือบล้อ แผ่นไดอะแฟรม ข้อต่อ อุปกรณ์กันกระแทก เป็นต้น
- ใช้เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้า เช่น ฉนวนหุ้มสายเคเบิลหรือสายไฟ
- ใช้เป็นอุปกรณ์รถยนต์ เช่น ข้อต่อ วัสดุหุ้มสายเบรก ที่ปิดลูกลมอัด โนมัตติ
- ใช้เป็นวัสดุในการผลิตท่อที่ใช้ในอุตสาหกรรม

2.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติก [2]

วัตถุดิบหลักที่ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติก ประกอบด้วยยางธรรมชาติ (Natural Rubber) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene) สารเชื่อมโยง (Vulcanizing agents) และสารเติมแต่ง (Additives) ต่างๆ

2.2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber; NR) [5]

ยางธรรมชาติมีโครงสร้างโมเลกุลเป็นแบบ Cis-1,4 polyisoprene ได้จากต้นยางธรรมชาติหรือยางพารา (Hevea Brasiliensis) ในน้ำยาง (Latex) มีปริมาณเนื้อยางแห้ง (Dry rubber content; DRC) ประมาณ 35% โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังประกอบด้วยสารประกอบเคมีที่ไม่ใช่ยาง เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 สารเติมแต่ง (Additives) [5]

สารเติมแต่ง หมายถึง สารเคมีต่าง ๆ ที่ผสมลงไปในยาง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตามต้องการ ยางที่ผสมสารเคมีแล้วไม่สามารถนำไปใช้งานได้เว้นแต่สารเคมีเหล่านั้นทำปฏิกิริยากับยางก่อน การให้สารเคมีทำปฏิกิริยากับยาง สามารถเร่งได้ด้วยการให้ความร้อน ยางที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยากับสารเคมี เรียกว่า ยางดิบหรือยางไม่คงรูป (Green compound หรือ Uncured compound) ส่วนยางที่เข้าทำปฏิกิริยากับสารเคมีแล้ว เรียกว่า ยางคงรูป (Vulcanized rubber หรือ Cured rubber)

2.2.2.1 สารเชื่อมโยง (Crosslinking agent)

สารทำใหยางคงรูปหรือสารเชื่อมโยงที่เป็นที่นิยมได้แก่ กำมะถัน (Sulfur) และไดคิวมีลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide) เป็นสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยง (Crosslink) ระหว่างโมเลกุลของยาง เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางให้ดีขึ้น ปฏิกิริยานี้เรียกว่า การทำใหยางสุก หรือ วัลคาไนเซชัน (Curing หรือ Vulcanization)

วัลคาไนเซชัน (Vulcanization) หรือการเชื่อมโยง (Crosslinking) เป็นสิ่งที่จำเป็นที่สุดอย่างหนึ่งของกระบวนการผลิตขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง เนื่องจากผลิตภัณฑ์ขึ้นรูปต่าง ๆ ของยางไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ถ้ายางไม่ผ่านขบวนการทำใหยางสุกหรือวัลคาไนเซชัน เพราะยางไม่แข็งตัว ไม่คงรูป ไหลได้ เสียดสภาพ เหนียวติด (Sticky) ไม่สามารถรับแรงหรือทำให้เปลี่ยนรูปร่างอย่างมากมาย

การเชื่อมโยงยางค้นพบครั้งแรกในปี 1841 โดยนายชาร์ลส์ กู๊ดเยียร์ (Charles Goodyear) ที่เมืองสปริงฟิลด์ รัฐแมสซาชูเซต ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยการให้ความร้อนแก่ยางธรรมชาติผสมกับกำมะถัน อีกหนึ่งปีต่อมาที่ประเทศอังกฤษนายโทมัส แฮนค็อกค็อก (Thomas Hancock) ค้นพบการทำใหยางสุกเช่นเดียวกัน การค้นพบปฏิกิริยาเชื่อมโยงนี้ถือเป็นการปฏิวัติอุตสาหกรรมยาง เนื่องจากการเชื่อมโยงทำใหยางมีสมบัติต่าง ๆ ดีขึ้นอย่างมาก ทำให้สามารถประยุกต์ใช้งานยางได้มากมาย เช่นยางรถยนต์ สายพาน ท่อ เป็นต้น นอกจากนี้การค้นพบการเชื่อมโยงทำให้เกิดความตื่นตัวในวงการวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรมยาง เป็นจุดก่อให้เกิดการพัฒนาสังเคราะห์ยางชนิดใหม่และการเชื่อมโยงวิธีอื่น ๆ เช่น เปอร์ออกไซด์ ฟีนอลิก เป็นต้น

สารเชื่อมโยง (Vulcanizing agents) ได้แก่ กำมะถัน (Sulfur) เปอร์ออกไซด์ (Peroxides) หรือสารประกอบออกไซด์ของโลหะบางชนิด นิยมใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators) และสารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Activators) ผสมเข้ากับยาง แล้วทำการใหอุณหภูมิสูงภายหลังการขึ้นรูปเป็นรูปร่างผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ อุณหภูมิสูงจะทำให้สารเชื่อมโยงต่าง ๆ เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันเชื่อมโยงโครงสร้างโมเลกุลยาง เปลี่ยนโครงสร้างจากสายโซ่ตรง ให้เป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ มีเสถียรภาพของรูปร่างและมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น การเชื่อมโยงทำใหยางมีสมบัติเปลี่ยนไปกล่าวคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีค่าความแข็งแรง (Strength) เพิ่มขึ้น
- มีมอดุลัส (Modulus) เพิ่มขึ้น
- มีความยืดหยุ่น (Elasticity) ดีขึ้น
- มีฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ลดลง
- มีเซต (Set) หรือการเปลี่ยนขนาดถาวรเมื่อได้รับแรงลดลง หรือมีเสถียรภาพของรูปร่างเพิ่มขึ้น
- เหนียวติด (Sticky) น้อยลง
- เปลี่ยนเป็นเทอร์โมเซต ไม่ละลายในตัวทำละลายใด ๆ ทนต่อความร้อน แสงและการใช้งานนานขึ้น

2.2.2.1.1 การเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน (Sulfur Vulcanization)

การเชื่อมโยงสามารถทำได้หลายวิธี ที่นิยมที่สุดได้แก่การเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน (Sulfur, S) เนื่องจากกำมะถันมีราคาถูก ละลายได้ดีในยาง ที่สำคัญที่สุดคือยางส่วนมากที่นิยมใช้เป็นยางที่ไม่อิ่มตัว มีพันธะคู่จำนวนมาก (High-diene) เช่นยางธรรมชาติ (NR) ยางสไตรีนบิวตะไดอิน (SBR) และยางบิวตะไดอิน (BR) เป็นต้น จึงว่องไวต่อการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน โดยใช้ร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators) และสารกระตุ้น (Activators) ได้แก่กรดสเตียริกและซิงค์ออกไซด์ (Stearic acid /ZnO)

กำมะถันสามารถเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงได้ดีกับยางที่ไม่อิ่มตัวมีพันธะคู่และมีอะตอมของไฮโดรเจนที่ตำแหน่งอะลิลิก (Allylic hydrogen) หรือตำแหน่งคาร์บอนที่ถัดจากพันธะคู่ เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา ยางที่มี Allylic hydrogen มาก เกิดการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันได้ ว่องไวกว่ายางที่มี Allylic hydrogen น้อย ตัวอย่างเช่นยางธรรมชาติ (NR) หรือพอลิไอโซพรีนมี Allylic hydrogen 7 อะตอมในโครงสร้าง เกิดการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันได้ว่องไวกว่ายางบิวตะไดอิน (BR) ซึ่งมี Allylic hydrogen 4 อะตอม

ชนิดของกำมะถัน

กำมะถันที่ใช้ในการเชื่อมโยงยางมี 2 ชนิดคือ

1. กำมะถันชนิดละลาย (Soluble sulfur) เป็นผงสีเหลือง ความหนาแน่น 2.07 g/cm^3 เป็นกำมะถันในรูปผลึก rombik (Rhombic) โครงสร้างเป็นวงแหวน (Cyclic or ring structure) ประกอบด้วยกำมะถัน 8 อะตอม (S_8) เกิดการแตกตัวของวงแหวนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 150°C (300°F) เป็นชนิดที่นิยมใช้ทั่วไป เนื่องจากมีราคาถูก ใช้ในปริมาณน้อย ปกติใช้กำมะถันประมาณ 1-3 phr ถ้าใส่กำมะถันมากเกินไปจะทำให้เกิดการ “บลูม” (Bloom)

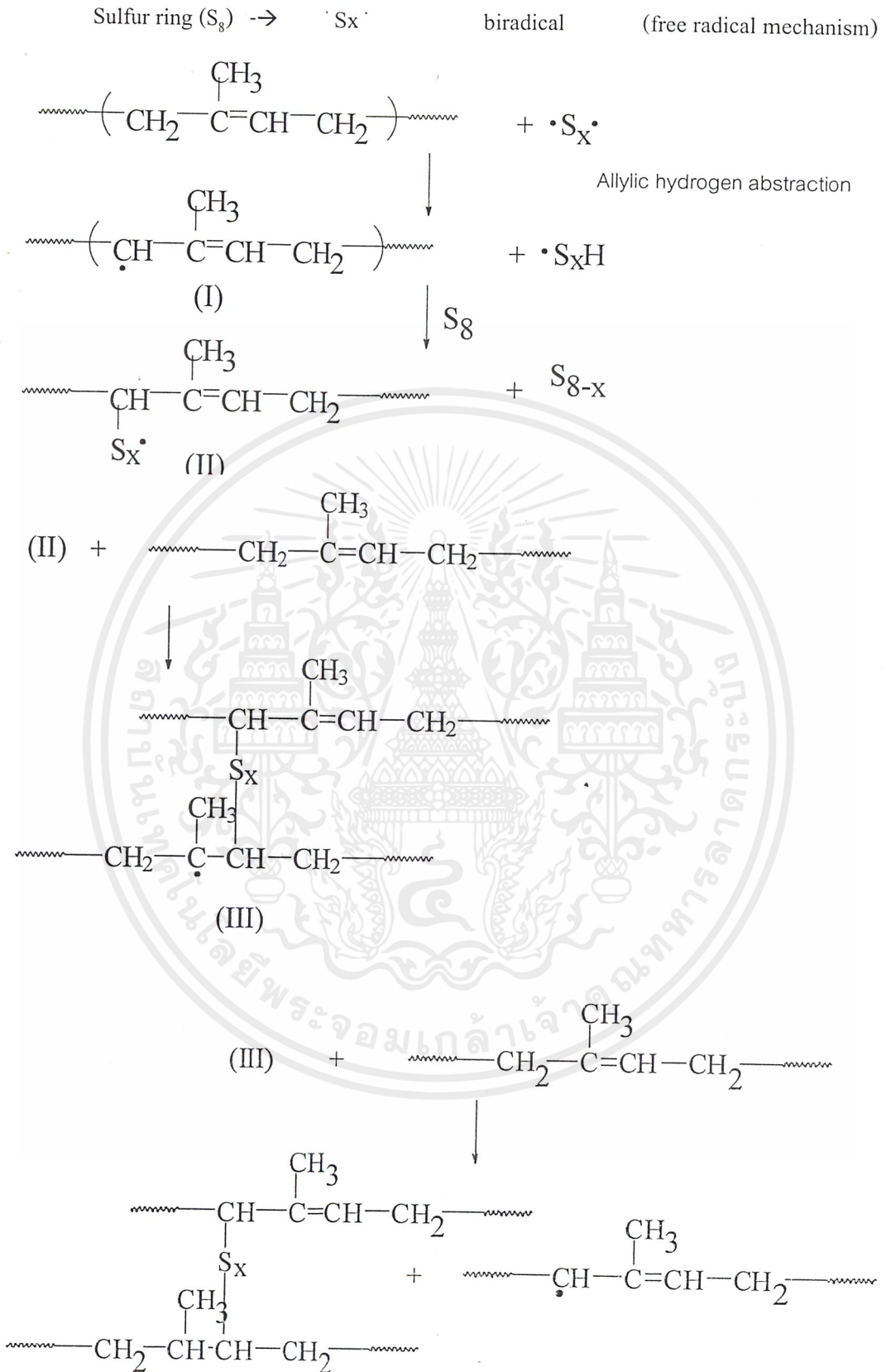
การบลูม (Bloom) เป็นปรากฏการณ์ที่กำมะถันเกิดการแพร่ (Diffusion) จากภายในออกมา กระทบเป็นผลึกที่ผิวของผลิตภัณฑ์ เห็นเป็นรอยคราบสีเหลือง เกิดเนื่องจากปริมาณกำมะถันใน ยางมากเกินไป ทำให้ความสามารถในการละลาย (Solubility) ของกำมะถันในยางเกินขอบเขต เนื่องจากความสามารถในการละลายแปรผันตามอุณหภูมิ ขณะผสมมีอุณหภูมิสูงทำให้ ความสามารถในการละลายเพิ่ม แต่เมื่อขึ้นรูปเสร็จอุณหภูมิลดลงความสามารถในการละลายลดลง ทำให้กำมะถันแพร่ออกมายังผิวหน้าของผลิตภัณฑ์อย่าง ข้อเสียของการเกิดการบลูมคือ

- เกิดคราบสีเหลืองที่ผิวนอก ทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่สวยงาม
- เกิดการสูญเสียของกำมะถันที่ใส่ ไม่เกิดการเชื่อมโยงอย่างมีประสิทธิภาพ
- ความสามารถในการยึดติด (Tack หรือ Tackiness) ที่ผิวหน้าลดลง

2. **กำมะถันชนิดไม่ละลาย (Insoluble sulfur)** เป็นผงสีเหลือง ความหนาแน่น 1.92 g/cm^3 เป็นกำมะถันในรูปอสัณฐาน (Amorphous) โครงสร้างใหญ่กึ่งเสถียร (Metastable polymer) น้ำหนัก โมเลกุลประมาณ 100,000-300,000 ไม่ละลายในตัวทำละลายและยาง จึงได้ชื่อว่าเป็นกำมะถันชนิด ไม่ละลาย จะผสมเข้ากับยางได้ยากกว่ากำมะถันชนิดละลาย แต่เมื่อผสมเข้ากันแล้วจะเกิด โครงสร้าง ที่ซับซ้อน (Complex structure) กับยาง ทำให้ไม่เกิดการบลูม (Bloom) หรือแพร่ออกมาที่ผิวหน้า จึงนิยมใช้กำมะถันชนิดนี้เมื่อต้องการใส่กำมะถันในปริมาณมากเช่นยางชนิดแข็งมาก ข้อจำกัดของ กำมะถันชนิดนี้คือมีราคาแพง (แพงกว่าชนิดแรกประมาณ 5 เท่า) นอกจากนี้กำมะถันชนิดไม่ละลาย อาจเปลี่ยนโครงสร้างเป็นกำมะถันชนิดละลายได้ที่อุณหภูมิสูงเกิน 100°C (210°F) จึงต้องควบคุม อุณหภูมิผสมไม่ให้สูงเกิน ถ้าต้องการใช้ประโยชน์กำมะถันชนิดไม่ละลาย

กลไกปฏิกิริยาเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน

กลไกปฏิกิริยาเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน เมื่อไม่ใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กลไกปฏิกิริยาเชื่อมโยงแบบวงด้วยกำมะถัน (ไม่มีสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง)

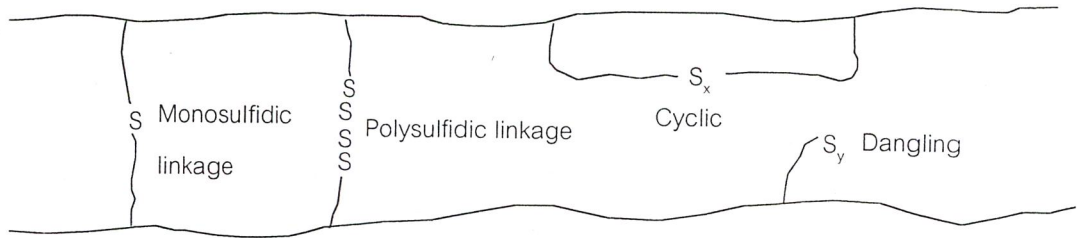
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำมะถันเกิดการแตกตัวเข้าทำปฏิกิริยาเชื่อมโยงกับสายโซ่โพลีเมอร์ของยาง สามารถเกิดพันธะเชื่อมโยงได้ในหลายลักษณะดังรูปที่ 2.6 คือ

1. เกิดพันธะเชื่อมโยงกำมะถันอะตอมเดี่ยวหรือ โมโนซัลฟิดิก (Monosulfidic linkage)
2. เกิดพันธะเชื่อมโยงกำมะถันหลายอะตอมหรือพอลิซัลฟิดิก (Polysulfidic linkage)
3. เกิดการเชื่อมโยงบนสายโซ่เดียวกัน ทำให้เกิดโครงสร้างเป็นวง (Ring) หรือไซคลิก (Cyclic)
4. เกิดการเชื่อมโยงด้านเดียว ทำให้เกิดโครงสร้างห้อย (Dangling)

การเกิดพันธะเชื่อมโยงแบบกำมะถันอะตอมเดี่ยวหรือพันธะเชื่อมโยงโมโนซัลฟิดิก (Monosulfidic linkage) นับเป็นการเชื่อมโยงที่มีประสิทธิภาพ (Efficiency vulcanization, EV) นั่นคือใช้กำมะถันปริมาณน้อย แต่ได้พันธะเชื่อมโยงจำนวนมาก ยางที่เกิดการเชื่อมโยงด้วยพันธะชนิดนี้จะมีสมบัติที่ดี สมบัติไม่เปลี่ยนแปลงแม้ว่าจะใช้งานเป็นเวลานาน (Good aging properties) มีการเปลี่ยนแปลงหรือรูปร่างถาวร (Permanent set) ต่ำ และมีเสถียรภาพทางความร้อนสูง ทั้งนี้เนื่องจากพันธะระหว่างกำมะถันกับคาร์บอน (S-C bond) ของการเชื่อมโยงแบบ Monosulfidic เป็นพันธะที่แข็งแรง มีความเสถียรสูง (C-S มีพลังงานพันธะ 66 kcal/mol) ในขณะที่พันธะเชื่อมโยงแบบพอลิซัลฟิดิก (Polysulfidic linkages) หรือใช้กำมะถันหลายอะตอมในหนึ่งพันธะเชื่อมโยง ทำให้เกิดการเชื่อมโยงได้เช่นกัน แต่ใช้กำมะถันปริมาณมาก นอกจากนี้พันธะระหว่างอะตอมของกำมะถัน (S-S bond) เป็นพันธะที่ไม่แข็งแรง (S-S มีพลังงานพันธะ 49 kcal/mol) สามารถถูกทำลายได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อนหรือได้รับแรง อาจเกิดการเปลี่ยนตำแหน่ง (Rearrangement) และเปลี่ยนโครงสร้างของพันธะเชื่อมโยง (เช่น Polysulfidic linkages ถูกทำลายและเกิดการเชื่อมโยงใหม่แบบ Monosulfidic linkages) เป็นผลให้ยางที่เชื่อมโยงด้วยพันธะ Polysulfidic มีสมบัติบางประการไม่ดี เช่น

- สมบัติเปลี่ยน ไปเมื่อใช้งานเป็นเวลานาน (Poor aging properties)
- อาจเกิดการ บลุ่ม (Bloom) ของกำมะถัน
- เกิดการเปลี่ยนแปลงถาวร (Permanent set) เมื่อได้รับแรง
- ใช้เวลาเชื่อมโยง (Cure time) นาน เพื่อให้ได้ปริมาณการเชื่อมโยงที่ต้องการ เนื่องจากใช้กำมะถันปริมาณมาก



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของยางเมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน แสดงพันธะเชื่อมโยงมอนอซัลไฟดิก (Monosulfidic linkage, -S-) พอลิซัลไฟดิก (Polysulfidic linkage, -S_y- เมื่อ y มีค่า 3-8) โครงสร้างเป็นวง (Cyclic) และโครงสร้างห้อย (Dangling) ไม่เกิดการเชื่อมโยง

การที่กำมะถันเกิดปฏิกิริยาแล้วได้โครงสร้างเป็นวงหรือไซคลิก (Cyclic) และโครงสร้างห้อย (Dangling) เกิดการเชื่อมโยงด้านเดียว นับเป็นการเชื่อมโยงที่ไม่มีประสิทธิภาพ เพราะโครงสร้างที่เกิดไม่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง โครงสร้างเหล่านี้เกิดเมื่อกำมะถันมีมากเกินไป (Excessive sulfur) ส่งผลให้ยางที่มีโครงสร้างเหล่านี้มากจะมีสมบัติบางประการต่ำ เช่นเดียวกับยางที่มีพันธะเชื่อมโยง Polysulfidic เช่น สมบัติเปลี่ยนแปลงอย่างมากเมื่อใช้งานเป็นเวลานาน (Poor aging properties) เกิดการเปลี่ยนขนาดอย่างถาวร (Permanent set) มาก เป็นต้น

ปกติการเชื่อมโยงที่ต้องการเพื่อให้สายโซ่โมเลกุลยางมีความแข็งแรงเพียงพอต่อการใช้งาน เป็นผลิตภัณฑ์ยางคือ การมีพันธะเชื่อมโยง 1 พันธะในทุก ๆ 200 หน่วยโครงสร้างมอนอเมอร์ของยาง (Monomer units) หรือยางมีน้ำหนักโมเลกุลระหว่างจุดเชื่อมโยง (Molecular weight between crosslinks, M_c) ประมาณ 8,000 ถึง 12,000 g/mol

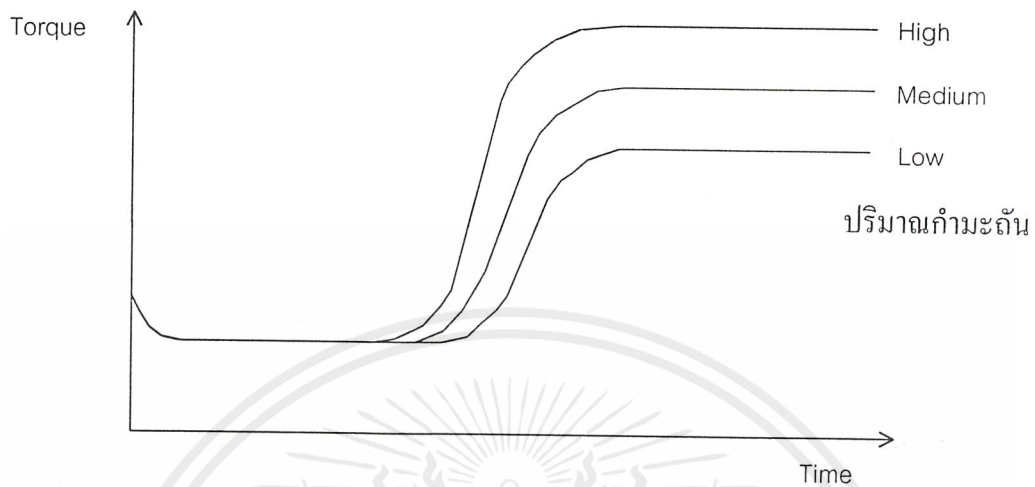
ปริมาณการเชื่อมโยงในยางสามารถระบุได้โดยใช้ “องศาการเชื่อมโยง” (Degree of vulcanization) หรือความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density) ซึ่งสัมพันธ์กับจำนวนพันธะเชื่อมโยงในหนึ่งหน่วยปริมาตรของยาง ยางที่เกิดพันธะเชื่อมโยงมาก มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูง มีองศาการเชื่อมโยงสูง และมีน้ำหนักโมเลกุลระหว่างจุดเชื่อมโยง (M_c) น้อยนั่นเอง เทคนิคการหาองศาการเชื่อมโยงจะกล่าวในตอนต่อไป

ผลของการเพิ่มปริมาณกำมะถัน

การเพิ่มปริมาณกำมะถันในการเชื่อมโยงยาง ส่งผลให้องศาการเชื่อมโยงของยางเพิ่มสูงขึ้น รวมทั้งมีแนวโน้มที่จะเกิดพันธะเชื่อมโยงแบบพอลิซัลไฟดิก (Polysulfidic) มากขึ้น ซึ่งองศาการเชื่อมโยงจะมีผลอย่างมากต่อสมบัติของยาง เช่น สมบัติเชิงกล การบวมตัว (Swell) ในตัวทำละลาย เป็นต้น ผลของปริมาณกำมะถันที่มีผลต่อกราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) แสดงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังรูปที่ 2.7 กล่าวคือเมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถัน ส่งผลให้เวลาเริ่มเชื่อมโยงหรือเวลาสคอร์ช (Scorch time) ลดลง และความแข็งหรือมอดุลัส (Plateau modulus) ของยางเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลเนื่องจากองค์ประกอบของการเชื่อมโยงที่เพิ่มสูงขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 2.7 กราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) แสดงผลของปริมาณกำมะถัน

2.2.2.1.2 การเชื่อมโยงยางด้วยเปอร์ออกไซด์ (Peroxide Vulcanization)

การเชื่อมโยงยางด้วยสารประกอบเปอร์ออกไซด์เริ่มมีใช้ตั้งแต่ต้น ค.ศ.1950s วิธีเชื่อมโยงนี้มีข้อเด่นเหนือการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันคือ

- สามารถใช้ได้ทั้งยางที่อิ่มตัว (Saturated rubbers) และยางที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated rubbers) นิยมใช้โดยเฉพาะยางอิ่มตัวที่ไม่มีหมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเชื่อมโยง เช่น ยางเอทิลีนพรอพิลีน (EPM) และยางซิลิโคน (Q)
- ยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์มีเสถียรภาพมากกว่า มีสมบัติการทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน (Heat-aging properties) ดีกว่า
- ยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ มีการเปลี่ยนรูปถาวรหรือเซต (Permanent set) น้อยกว่า
- ยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ มีสมบัติความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature flexibility) ดีกว่า
- สามารถใช้เชื่อมโยงผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องการสีธรรมชาติ ยางใส หรือสีขาว ไม่เป็นสีเหลืองเนื่องจากกำมะถัน และสีที่ได้มีความเสถียร มีการเปลี่ยนสีผลิตภัณฑ์เนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเลต (UV light discoloration) น้อยกว่า

เนื่องจากพันธะที่เกิดจากการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์เป็นพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอน (C-C bonds) ซึ่งมีพลังงานพันธะสูง มีความเสถียรต่อความร้อนและแรงกระทำใดมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อเอกสารอย่างใดอย่างหนึ่งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทียบกับพันธะที่เกิดจากการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันทั้งแบบ โมโนซัลฟิดิกและพอลิซัลฟิดิก (C-S bonds และ S-S bonds ตามลำดับ) ทำให้ยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์มีความเสถียรมากกว่าอย่างไรก็ดี การเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์มีข้อจำกัดบางประการคือ

- ในการเชื่อมโยงยางด้วยเปอร์ออกไซด์เกิดกลิ่นเหม็นที่ไม่พึงปรารถนาของสารที่ปลดปล่อยออกมาเช่น อะซิโตนฟีโนน (Acetophenone) ในระหว่างเชื่อมโยงยาง และในผลิตภัณฑ์ยาง
- เปอร์ออกไซด์เป็นสารเคมีอันตราย ต้องเพิ่มความระมัดระวังในการใช้และการเก็บรักษา
- สารประกอบเปอร์ออกไซด์ว่องไวต่อปฏิกิริยากับสารเติมแต่งชนิดอื่นในยาง มากกว่ากำมะถัน ดังนั้นจึงมีข้อจำกัดและต้องมีความรอบคอบในการเลือกใช้สารเคมียาง เช่น การเลือกใช้สารหล่อลื่นหรือน้ำมัน (Oils) สารแอนติออกซิแดนท์ (Antioxidants) เป็นต้น
- ไม่ควรเลือกใช้เทคนิคการให้ความร้อนที่มีบรรยากาศของออกซิเจนในการเชื่อมโยงยาง เช่น เทคนิคการให้ความร้อนเชื่อมโยงโดยใช้อากาศร้อน (Hot air cures) เนื่องจากอนุมูลอิสระที่เคลื่อนย้ายจากเปอร์ออกไซด์ไปยังสายโซ่พอลิเมอร์ในปฏิกิริยาเชื่อมโยงอาจถูกออกซิไดซ์เนื่องจากออกซิเจนในบรรยากาศ ทำให้เกิดหมู่ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide) และไม่เกิดการเชื่อมโยง กล่าวคือยางเกิดการเสถียรภาพ (Degradation) สลายตัวเนื่องจากความร้อนนั่นเอง
- ยางบิวทิล (Butyl rubber, IIR) เกิดปฏิกิริยาเสถียรภาพ (Degradation) เมื่อเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากเกิดเป็นอนุมูลของคาร์บอนตติยภูมิ (Tertiary carbon radicals) เสถียร เกิดการขาดของสายโซ่ที่ตำแหน่งเบต้า (β -scission reaction) นำไปสู่การเสื่อมสภาพของสายโซ่พอลิเมอร์ จึงมีข้อยกเว้น ไม่สามารถใช้สารประกอบเปอร์ออกไซด์ในการเชื่อมโยงยางบิวทิล (IIR)

มีสารประกอบเปอร์ออกไซด์หลายชนิดที่สามารถใช้ได้ในการเชื่อมโยงยาง เช่น ไดอะซิลเปอร์ออกไซด์ (Diacyl peroxides) และเปอร์ออกซีเอสเทอร์ (Peroxy esters) อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติสารเปอร์ออกไซด์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยางได้แก่

- ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP)
- ไดบิวทิลเปอร์ออกไซด์ (Di-*t*-butyl peroxide, DBP)
- ไดเมทิลไดบิวทิลเปอร์ออกซีเฮกเซน (2,5-dimethyl-2,5-di(*t*-butyl-peroxy) hexane)

สารประกอบเปอร์ออกไซด์ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (DCP) มีจำหน่ายทั้งในรูปผงของแข็งและของเหลว ความบริสุทธิ์ประมาณ 90-99% เนื่องจากเปอร์ออกไซด์มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาสูง จึงมีจำหน่ายในรูปของผสมกับสารตัวกลางเฉื่อยบางชนิดเช่นแคลเซียม

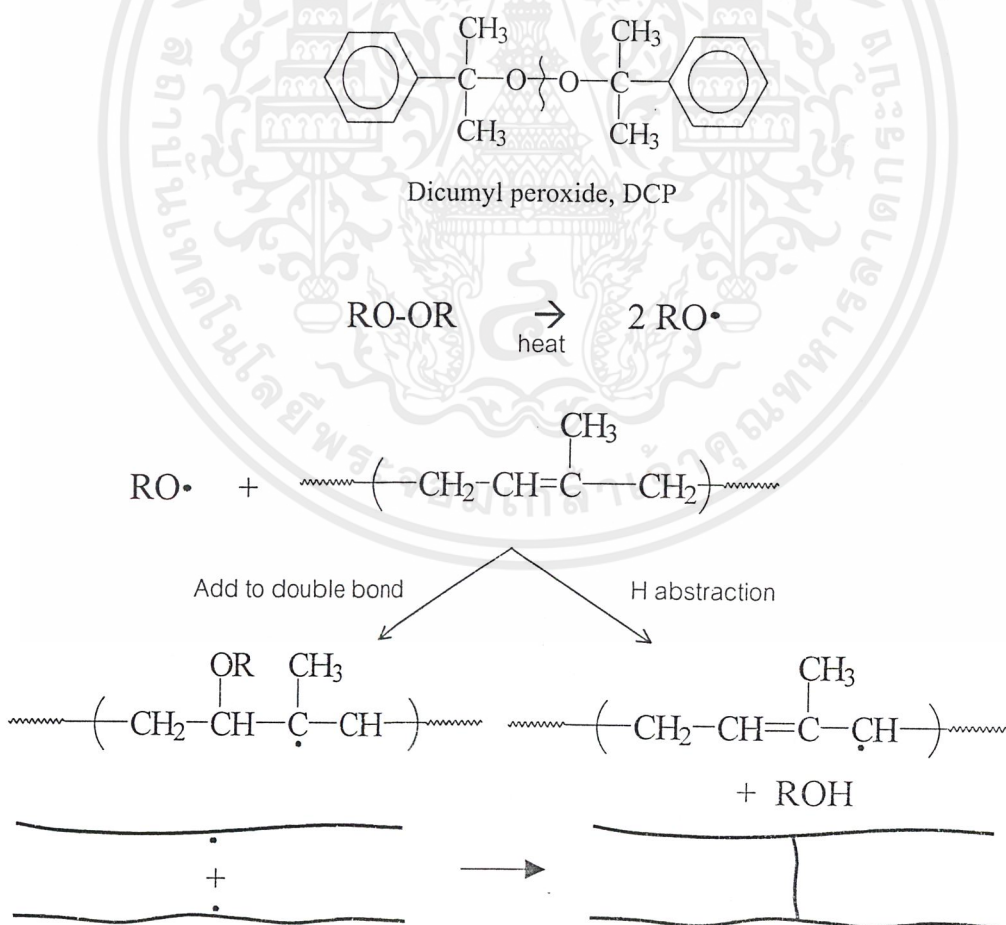
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอเนต (Calcium carbonate) ความเข้มข้น 40-50% และใช้ในรูปของผสมพร้อมสารเพิ่มเนื้อไดบิวทิลเปอร์ออกไซด์ (DBP) นิยมน้อยกว่าเนื่องจากกลายเป็นไอง่ายขณะใช้งาน ส่วนไดเมทิลไดบิวทิลเปอร์ออกไซด์เฮกเซนนิยมใช้เชื่อมโยงที่อุณหภูมิสูง (180°C) เนื่องจากมีเสถียรภาพทางความร้อนมากกว่า และไม่มีกลิ่นเหม็นของสารอะซิโตนไฟโนน

ในการใช้งานสารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์ ควรหลีกเลี่ยงการเก็บสารที่อุณหภูมิสูง (เกิน 40°C) เพื่อหลีกเลี่ยงการเสื่อมสภาพ นอกจากนี้ควรเก็บให้ห่างจากแหล่งให้ความร้อนและไฟฟ้าสถิตย์ เนื่องจากเปอร์ออกไซด์ติดไฟง่ายและดับไฟยาก

กลไกการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์

กลไกการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์เริ่มต้นจากปฏิกิริยาโฮโมไลติก-ดีคอมโพสิชัน (Homolytic decomposition) สลายตัวเนื่องจากความร้อน แตกตัวเกิดเป็นอนุมูลอัลคอกซี (Alkoxy radicals, RO•) สองตัว ซึ่งเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชื่อมโยง ดังรูปที่ 2.8 ในกรณีใช้สารประกอบเปอร์ออกไซด์เชื่อมโยงอย่างไม่อิ่มตัว เช่นยางธรรมชาติ (NR) อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับพันธะคู่บนสายโซ่เกิดเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีอนุมูล (Polymer radicals หรือ Macro-radicals) จากนั้นเกิดการรวมกันของอนุมูลที่อยู่ต่างสายโซ่ เกิดเป็นพันธะเชื่อมโยงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กลไกการเชื่อมโยงด้วยสารประกอบเปอร์ออกไซด์

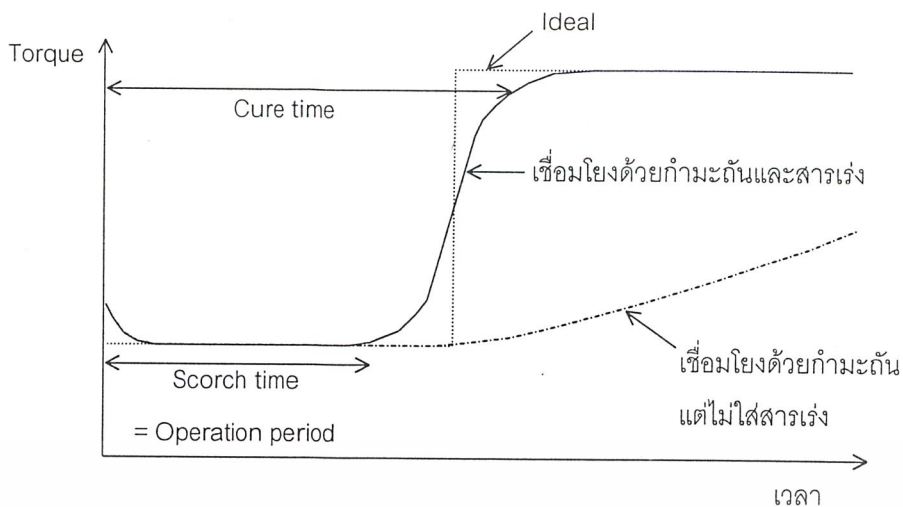
นอกจากอนุมูลอิสระเข้าทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งพันธะคู่ในยางไม่อิ่มตัวแล้ว อนุมูลอิสระยังเข้าจับไฮโดรเจนในตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาอย่างง่าย (เช่นที่ Allylic hydrogen) เกิดเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีอนุมูล เช่นเดียวกับในกรณีใช้สารประกอบเปอร์ออกไซด์เชื่อมโยงยางที่อิ่มตัว การรวมกันของอนุมูลที่อยู่ต่างสายโซ่ทำให้เกิดเป็นพันธะเชื่อมโยงเช่นเดียวกัน

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่า เปอร์ออกไซด์มีความไวต่อปฏิกิริยา การใส่สารเคมีบางชนิด เช่น สารหล่อลื่นหรือน้ำมัน (Oils) และสารแอนติออกซิแดนซ์ (Antioxidants) อาจเกิดปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระในขณะที่เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยง เป็นผลให้เกิด “ปรากฏการณ์เจือจางการเชื่อมโยง” (Dilute crosslinking effect) ให้ความหนาแน่นเชื่อมโยงน้อยกว่าที่ควรจะเป็น นอกจากนี้ควรหลีกเลี่ยงการใส่สารเติมแต่งที่เป็น “กรด” เช่นสารตัวเติมซิลิกา (Silica) หรือเขม่าดำ (Carbon black) ที่เป็นกรด เนื่องจากกรดสามารถเร่งให้เปอร์ออกไซด์สลายตัวแบบไม่เกิดอนุมูลอิสระ (Nonradical-generating decomposition) ทำให้เกิดการสูญเสียของสารเชื่อมโยง เปอร์ออกไซด์ เช่นเดียวกับสารเติมแต่งอื่น เช่นแอนติออกซิแดนซ์ อาจหยุดปฏิกิริยา หรือเปลี่ยนแปลงอนุมูลอิสระระหว่างเกิดปฏิกิริยาไม่ให้เกิดปฏิกิริยากับสายโซ่พอลิเมอร์ เป็นผลให้ไม่เกิดพันธะเชื่อมโยงหรือเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงน้อย

ประสิทธิภาพการเชื่อมโยงยางด้วยเปอร์ออกไซด์ขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลาย (Solubility) ของเปอร์ออกไซด์ในยางและจำนวนของหมู่ฟังก์ชันและไฮโดรเจนของโครงสร้างยางที่สามารถถูกจับด้วยอนุมูลอิสระ ปกติในการเชื่อมโยงยางด้วยเปอร์ออกไซด์นิยมใช้ปริมาณไม่เกิน 2.5 phr (ส่วนในร้อยส่วนของยาง) ที่อุณหภูมิเชื่อมโยงตั้งแต่ 150-230°C การใช้อุณหภูมิสูงจะใช้เวลาน้อยลงประมาณ 2.5 เท่า ทุก 10°C ที่เพิ่มขึ้น แต่จะเสี่ยงกับการเสียสภาพของยางและต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้น การใช้สารเชื่อมโยงปริมาณมาก จะทำให้ใช้ยางมีความหนาแน่นเชื่อมโยงมากเกินไป (Over-cure) ทำให้สมบัติบางประการลดลง เช่นความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) เป็นต้น

2.2.2.2 สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators)

สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง หรือ Accelerators คือสารเคมีที่ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงให้ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Crosslinking rate) เร็วขึ้น ทำให้เวลาเชื่อมโยง (Cure time) เร็วขึ้น การเชื่อมโยงมีประสิทธิภาพมากขึ้น และใช้กัมมะถันปริมาณน้อยลง พิจารณารูปที่ 2.9 การใช้สารเชื่อมโยง (เช่นกัมมะถัน) เพียงอย่างเดียวสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงได้ แต่ใช้เวลานานมาก (อาจใช้เวลาเป็นวัน) ถึงจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงที่สมบูรณ์ เนื่องจากอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงต่ำ การใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงจะช่วยเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาและลดเวลาเชื่อมโยงอย่างมาก (อาจลดเวลาจากหลายชั่วโมงเหลือเพียงไม่กี่นาที) ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเชื่อมโยง



รูปที่ 2.9 กราฟการเชื่อม โยง (Cure curve) แสดงความแตกต่างของการเชื่อม โยงแบบไม่ใช้สารเร่ง ปฏิกริยาเชื่อม โยง และ ใช้สารเร่งปฏิกริยาเชื่อม โยง รวมทั้งการเชื่อม โยงในอุดมคติ (Ideal crosslink) ที่ต้องการ

จากรูปที่ 2.9 แสดงกราฟการเชื่อม โยง (Cure curve) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด (Torque) กับเวลา ได้จากเครื่องวัดการเชื่อม โยงเช่นเครื่อง ODR (Oscillating disc rheometer) สามารถใช้ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการขึ้นรูปและเกิดการเชื่อม โยงสมบูรณ์ การใส่ยางผสมสูตร ประกอบงานหมุนแล้วให้อุณหภูมิสูง (เท่ากับอุณหภูมิเชื่อม โยง เช่น 150°C) และศึกษาแรงบิดของ งานหมุนที่ใช้ทำให้เกิดการหมุนไปมาที่มุมคงที่ (1,3 หรือ 5 องศา) เทียบกับเวลา จุดที่แรงบิดเริ่ม เพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับจุดที่เริ่มเกิดปฏิกริยาเชื่อม โยง ยางเปลี่ยนโครงสร้างจากสายโซ่ตรงเป็นสายโซ่กึ่ง หรือเกิดร่างแหสามมิติทำให้ความหนืดของยางเพิ่มขึ้นจึงใช้แรงบิดงานหมุนเพิ่มขึ้น จะทำให้ สามารถทราบเวลาเริ่มเกิดการเชื่อม โยงหรือ เวลาสกอร์ช (Scorch time) เวลาที่มีความสำคัญ เนื่องจากยางจะสามารถเคลื่อนที่ได้หรือไหลได้ก่อนถึงจุดนี้ เมื่อ Scorch time ผ่านไปยางเริ่ม เชื่อม โยง ไม่สามารถไหลได้สะดวก ดังนั้นกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องการไหลของยาง ต้องทำให้เสร็จสิ้นก่อน Scorch time เช่น การฉีดขึ้นรูป (Injection molding) การอัดขึ้นรูป (Compression molding) เป็นต้น เมื่อแรงบิดขึ้นสูงสุดและคงที่ ทำให้ทราบเวลาที่เกิดปฏิกริยา เชื่อม โยงสมบูรณ์หรือ เวลาการเชื่อม โยง (Cure time)

ชนิดของสารเร่งปฏิกริยาเชื่อม โยง

สารเร่งปฏิกริยาเชื่อม โยงมีหลายชนิด แต่ละชนิดมีสมบัติที่แตกต่างกัน เช่นเวลาเริ่มเกิด การเชื่อม โยงหรือเวลาสกอร์ช (Scorch time) อัตราเร็วการเชื่อม โยง (Cure rate) เวลาเชื่อม โยง สมบูรณ์ (Cure time) ความสามารถในการละลายในยาง (Solubility) ความเป็นพิษ (Toxicity) เป็นต้น ดังนั้นการเลือกชนิดสารเร่งที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญมากต่อการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง

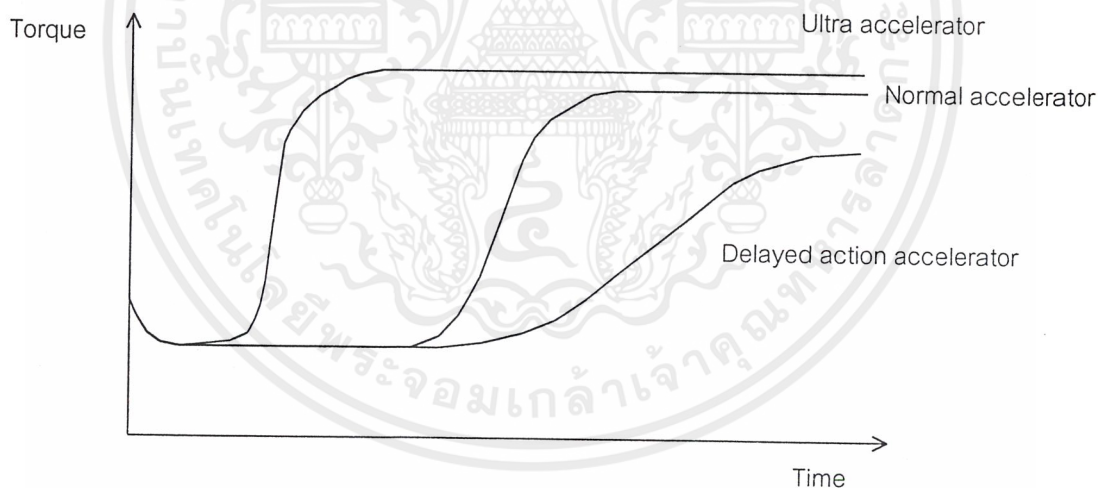
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการใช้งานสารเร่งในอุตสาหกรรมยาง อาจใช้สารเร่งมากกว่าหนึ่งชนิดร่วมกัน สารเร่งที่ใช้ปริมาณมากกว่าเป็นสารเร่งหลักหรือ “สารเร่งปฐมภูมิ” (Primary accelerators) ส่วนสารเร่งที่ใช้ปริมาณน้อยกว่าเรียกว่าเป็น “สารเร่งทุติยภูมิ” (Secondary accelerators) หรือคิกเกอร์ (Kickers) สารเร่งทั้งสองอาจเกิดปฏิกิริยาเสริมกันที่เรียกว่า “ปรากฏการณ์ซินเนยจิสติก” (Synergistic effects) ทำให้ได้อัตราการเชื่อมโยงที่มากกว่าสารเร่งแต่ละชนิดรวมกัน

มาตรฐานASTM ได้แบ่งสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงเป็น 6 กลุ่มดังนี้

- | | |
|------------|-------------------------------------------------------------------|
| กลุ่มที่ 1 | ซัลฟีนามาไมด์ (Sulfenamides) |
| กลุ่มที่ 2 | ไทเอโซล (Thiazoles) |
| กลุ่มที่ 3 | กัวนิดีน (Guanidines) |
| กลุ่มที่ 4 | ไดไทโอคาร์บาเมต (Dithiocarbamates) |
| กลุ่มที่ 5 | ไทยูเรมไดซัลไฟด์ (Thiuram disulfides) |
| กลุ่มที่ 6 | ไทยูเรมชนิดอื่นที่ไม่ใช่ไดซัลไฟด์ (Thiuram other than disulfides) |

ทั้งนี้ยังมีอีกสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงอีกสองกลุ่มที่ไม่ได้รวมอยู่ด้วยเนื่องจากมีปริมาณการใช้ที่น้อยและมีความเป็นพิษ (Toxicity) ได้แก่ อัลดีไฮด์เอมีน (Aldehyde amines) และไทโอยูเรีย (Thioureas)



รูปที่ 2.10 กราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) แสดงความแตกต่างของการเชื่อมโยงแบบใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง แบบเร็วยิ่งยวด แบบธรรมดา และแบบช้า

2.2.2.3 สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Activators)

สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Activators) เป็นสารเคมีที่ทำหน้าที่กระตุ้นหรือเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators) อีกทีหนึ่ง ดังนั้นอาจเรียกลักษณะนี้ว่าสารกระตุ้นสารเร่ง (Accelerator activators)

สารกระตุ้นที่นิยมใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมยางในปัจจุบันได้แก่ “ซิงค์ออกไซด์ร่วมกับกรดสเตียริก” (ZnO/Stearic acid) เนื่องจากมีราคาไม่แพงและมีประสิทธิภาพสูงในการทำงานสามารถใช้ได้กับยางทั่วไป ซิงค์ออกไซด์ทำปฏิกิริยากับกรดสเตียริกเกิดเป็น “ซิงค์สเตียเรต” (Zinc stearate) ซึ่งสามารถละลายได้ในยาง และช่วยเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง เนื่องจากเป็นซิงค์ไอออน (Zinc ions) ที่อยู่ในรูปที่ละลายได้ในยาง

ลักษณะสำคัญของตัวกระตุ้นคือมีความเป็นด่าง (Alkaline) นอกจากการใช้ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นสารกระตุ้นแล้ว อาจใช้ซิงค์ออกไซด์ของลิเทียม (Li_2O) แมกนีเซียม (MgO) และสารจำพวกเอมีน (Amines) โดยปกติในอุตสาหกรรมปริมาณการใช้ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) คือ 2-4 phr เนื่องจากศึกษาพบว่าการใช้ปริมาณ ZnO เกิน 4 phr มีผลเพียงเล็กน้อยต่อการกระตุ้นการเชื่อมโยง

ส่วนประกอบของสารกระตุ้นนอกจาก ZnO คือกรดไขมัน (Fatty acid) ที่มีจำนวนคาร์บอน 12-18 อะตอม เช่นกรดสเตียริก (เกิดเป็นซิงค์สเตียเรต) กรดลอริก (เกิดเป็นซิงค์ลอรีเอต) (Zinc laurate) โดยปกติใช้กรดสเตียริกในอุตสาหกรรมยางประมาณ 1-3 phr และใช้ปริมาณน้อยลง (1-2 phr) เมื่อใช้กับยางที่อิมมัตวเช่น EPDM นอกจากกรดสเตียริกจะทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นในการเชื่อมโยงแล้ว กรดสเตียริกยังทำหน้าที่เป็น “สารหล่อลื่น” (Lubricants) ในการผสมยางทำให้ความเหนียวของยางลดลง

กลไกการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน ร่วมกับสารเร่ง (ใช้ตัวย่อว่า Ac = Accelerators) และสารกระตุ้น เริ่มแรกสารเร่งเกิดปฏิกิริยารวมตัวกัน (ได้ Ac-Ac) จากนั้นเกิดปฏิกิริยาแทรกตัว (Insertion) ของส่วนของโมเลกุลกำมะถัน (Sulfur fragment, S_x) (จากวงแหวนกำมะถัน S_8 แตกตัวไป S_x คงเหลือ S_{8-x} ที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา) จากนั้นโมเลกุลสารเร่งพร้อมส่วนของกำมะถัน (Ac- S_x -Ac) หรืออาจเรียกได้ว่าเป็นสารเร่งที่มีกำมะถัน (Sulfur-modified accelerators) เข้าทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งอัลไลลิกไฮโดรเจน (Allylic hydrogens) ของสายโซ่โมเลกุลของยางซึ่งว่องไวต่อปฏิกิริยา ขั้นตอนหนึ่งที่สารกระตุ้นจะช่วยเร่งปฏิกิริยาโดยไอออนของซิงค์ (Zn^{2+}) จากซิงค์สเตียเรต (Zinc stearate) ซึ่งละลายในยาง อันเกิดจากซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และกรดสเตียริก (Stearic acid) จะไปกระตุ้นการแตกออกของพันธะระหว่างสารเร่งกับกำมะถัน (Ac-S bonds) ทำให้ได้สายโซ่ของยางที่มีกำมะถันพร้อมสารเร่งติดที่ตำแหน่ง Allylic (Rubber- S_x -Ac) จากนั้นกลไกปฏิกิริยาเกิดซ้ำจากการแตกของพันธะระหว่างสารเร่งกับกำมะถัน (Ac-S bonds) ที่ปลายอีกข้างหนึ่งเกิดปฏิกิริยากับสายโซ่โมเลกุลอื่น ๆ ของยาง ทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงด้วยกำมะถันในที่สุด ทั้งนี้สารเร่งเมื่อหลุดออกสามารถเกิดปฏิกิริยาใหม่กับกำมะถันต่อไปได้

2.2.2.4 สารตัวเติม (Fillers)

สารตัวเติม (Fillers) หมายถึงสารอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ยางแล้วใส่ลงไปยาง เช่น เขม่าดำ (Carbon black) แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) และซิลิกา (Silica) เป็นต้น สารตัวเติมที่ใส่ลงไปยาง ใส่เพื่อวัตถุประสงค์ต่าง ๆ ดังนี้

- 1) เพื่อลดต้นทุน
- 2) เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของยาง
- 3) เพื่อช่วยในกระบวนการผลิต
- 4) ลดการพองตัวของยางในน้ำมัน
- 5) เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของยาง

2.2.2.5 สารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids)

สารที่จัดอยู่ในกลุ่มสารช่วยกระบวนการผลิต ได้แก่ สารที่ทำให้ยางนิ่มโดยช่วยลดน้ำหนักรีดของยางหรือเปปไทเซอร์ (Peptizers) สารที่ทำให้ยางนิ่มโดยช่วยหล่อลื่นโมเลกุลยางหรือพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers) สารช่วยเพิ่มสมบัติการเหนียวติด (Tackifiers) เป็นต้น สารช่วยกระบวนการผลิตเหล่านี้มีส่วนสำคัญมาก ดังต่อไปนี้

- 1) ช่วยเร่งอัตราและควบคุมองศาการลดขนาดของสารเขม่าดำ (Carbon black) ในเนื้อยาง
- 2) ช่วยเพิ่มการแพร่กระจายของพวกสารเพิ่มเนื้อโดยเฉพาะเขม่าดำ (Carbon black) ในเนื้อยาง
- 3) ช่วยลดความยืดหยุ่นของยางที่ยังไม่ได้ผ่านปฏิกิริยาทำให้คงรูป
- 4) สามารถทำให้ยางมีความเหนียวติดกันเองดีขึ้น
- 5) อำนวยความสะดวกในระหว่างการผลิต โดยเฉพาะด้านการเตรียมตัวอย่างใส่ในแม่พิมพ์

2.2.2.5.1 พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers)

พลาสติกไซเซอร์ เป็นสารที่ใส่เข้าไปในยางเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและความสามารถในการใช้งานเรียกว่า พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers) โดยมีหน้าที่ดังนี้

- 1) เพื่อช่วยในกระบวนการขึ้นรูปยาง เนื่องจากการเติมสารตัวเติมต่าง ๆ เข้าไปในยางทำให้ยางแข็งขึ้น สารพลาสติกไซเซอร์ทำให้ยางทั้งที่คงรูปแล้วและยางที่ยังไม่คงรูปอ่อนลง ทำให้การไหลของยางเข้าแม่พิมพ์ ตลอดจนกระบวนการแปรรูปง่ายขึ้น
- 2) เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของยาง ยางที่ใส่สารพลาสติกไซเซอร์จะนิ่มขึ้นทำให้มอดุลัสลดลง เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดสูงขึ้น และมีความยืดหยุ่นสูงขึ้น

- 3) เพื่อลดต้นทุน การใส่สารตัวเติมลงไปในยางปริมาณมาก ๆ ทำให้ยางแข็งจนไม่สามารถใส่สารตัวเติมลงไปได้อีก แต่ถ้าเติมสารพลาสติกไซเซอร์เข้าไป ช่วยให้สามารถใส่สารตัวเติมเพิ่มได้อีก จึงเป็นการลดต้นทุนลง
- 4) เพื่อการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ ยางบางชนิดแข็งตัวที่อุณหภูมิต่ำ เช่น ยางไนไตรล์และยางคลอโรพรีน ถ้าหากใส่สารพลาสติกไซเซอร์ทำให้ยางมีความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำลงไป และสามารถขยายขอบเขตการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำลงไปอีก
- 5) เพื่อลดพลังงานในกระบวนการขึ้นรูปยาง การใส่สารพลาสติกไซเซอร์ลงไปในยางทำให้ยางนิ่มขึ้น ดังนั้นพลังงานที่ต้องใช้ในการผสมยาง ขึ้นรูปยาง รวมทั้งอุณหภูมิในการขึ้นรูปยางลดลง

สารพลาสติกไซเซอร์แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1) สารช่วยทำให้ยางนิ่มทางเคมี (Chemical plasticizers)

สารช่วยทำให้ยางนิ่มทางเคมี เป็นสารเคมีที่เมื่อใส่เข้าไปในยางในปริมาณน้อย ทำให้ยางนิ่มและลดเวลาของการบดยางลง หรือเรียกว่า สารตัดสายโซ่โมเลกุลหรือเปปไทเซอร์ (Peptizers) นิยมใช้กับยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ที่มีความหนืดสูง ซึ่งมีโมเลกุลใหญ่และขึ้นรูปได้ยาก ปริมาณสารที่ใช้ประมาณ 2 phr หรือน้อยกว่า มักใส่สารเคมีประเภทนี้ลงไปในยางเมื่อเริ่มต้นการผสมหรือบดในเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง และปล่อยให้สารเคมีนี้ทำปฏิกิริยากับยางเป็นระยะเวลาสั้น ๆ ก่อนที่ใส่สารอื่นลงไป ตัวอย่างสารตัดสายโซ่โมเลกุล (Peptizers) ได้แก่ Aktiplast[®] 8 ซึ่งเป็นสารตัดสายโซ่โมเลกุลที่มีประสิทธิภาพสูงในการลดน้ำหนักของยางธรรมชาติสามารถใช้ผสมบนเครื่องบดแบบสองลูกกลิ้งหรือในเครื่องผสมภายในที่อุณหภูมิต่ำหรือสูงก็ได้ และยังสามารถตัดสายโซ่ยางสังเคราะห์ เช่น SBR (Styrene- butadiene rubber) และ IR (Synthetic polyisoprene)

2) สารช่วยทำให้ยางนิ่มทางกายภาพ (Physical plasticizers)

สารช่วยทำให้ยางนิ่มทางกายภาพ เป็นสารพลาสติกไซเซอร์ที่ใส่เข้าไปแล้ว ทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่นระหว่างโมเลกุลยาง ทำให้โมเลกุลของยางเคลื่อนไหวได้ง่ายยางนิ่มลง ขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น เป็นสารที่ไม่เกิดปฏิกิริยากับยาง สามารถผสมเข้ากันได้กับยางและสารอื่นๆ

2.2.2.5.2 เปปไทเซอร์ (Peptizers)

เปปไทเซอร์ทำหน้าที่โดยเร่งปฏิกิริยาการตัดของสายโซ่ (Chain scission) ของยางทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง เป็นผลทำให้ความหนืดของยางลดลง เกิดการผสมได้ง่ายขึ้น นิยมใส่เพื่อลดเวลาในการบดย่อย (Mastication) โดยเฉพาะยางดิบที่แข็งเนื่องจากมีน้ำหนักโมเลกุลมาก เช่น

ยางธรรมชาติ (NR) ปริมาณเปปไทเซอรัที่ใส่ประมาณ 1-3 phr ตัวอย่างเปปไทเซอรัที่นิยม ได้แก่ กรดซัลโฟนิก (Sulfonic acid) เพนตะคลอโรโรไทโอฟินอล (Pentachlorothiophenol) เป็นต้น

2.2.2.6 สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ (Protective agents)

ช่วงอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ที่ทำจากยาง เกิดการเสื่อมสภาพขึ้นเรื่อย ๆ การเสื่อมสภาพของยาง (Rubber degradation) เกิดเนื่องจากโมเลกุลของยางถูกทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยออกซิเจนและ/หรือโอโซน การเสื่อมสภาพของยางเกิดขึ้นช้ามากถ้าไม่มีตัวเร่ง แต่ในธรรมชาติมีแสง ความร้อน และความไม่บริสุทธิ์ของโลหะ ล้วนเป็นตัวเร่งตามธรรมชาติที่ทำให้ยางเสื่อมสภาพเร็วมากขึ้น นอกจากนี้ในกระบวนการผลิต ช่วงที่มีการอบยาง (Aging) ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนแปลง หรืออาจเกิดการเปลี่ยนแปลงในทุกส่วนของผลิตภัณฑ์ เช่น เกิดรอยแตกที่ผิวผิวแข็ง และสูญเสียความแข็ง ซึ่งกระบวนการเสื่อมสภาพของยาง สามารถแบ่งออกเป็น 6 แบบได้แก่

- 1) เสื่อมสภาพเนื่องจากตั้งทิ้งไว้นาน (Self aging)
- 2) เสื่อมสภาพเนื่องจากการกระตุ้นของโลหะที่เป็นตัวเร่ง
- 3) เสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน (Heat aging)
- 4) เสื่อมสภาพเนื่องจากแสง (Light aging)
- 5) เสื่อมสภาพเนื่องจากการพับไปมา (Flex aging)
- 6) เกิดรอยแตกเนื่องจากบรรยากาศ (Atmospheric aging)

ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง เพื่อเป็นการป้องกันยางเสื่อมสภาพ เพิ่มความทนทานของยางให้ดีขึ้นไปจากเดิม จำเป็นต้องมีการเติมสารป้องกันยางเสื่อมสภาพ โดยใช้สารแอนติออกซิแดนท์ (Antioxidant) หรือสารแอนติโอโซนแนนท์ (Antiozonant) ซึ่งสารทั้ง 2 ชนิด ทำให้อายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ยางนานขึ้น

สารแอนติออกซิแดนท์ (Antioxidant) เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพของยาง เนื่องจากออกซิเจน (Oxygen, O₂) เข้าทำปฏิกิริยากับยาง ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) สารแอนติออกซิแดนท์ สามารถแบ่งออกเป็น 2 พวกใหญ่ คือ

สารแอนติออกซิแดนท์ชนิดตกสี (Staining antioxidant)

สารแอนติออกซิแดนท์ชนิดตกสี เป็นสารประกอบเอมีน (Amine) หรืออนุพันธ์ของเอมีน เป็นสารที่มีประสิทธิภาพสูง แต่เมื่อใช้ทำผลิตภัณฑ์ยางมีสีคล้ำ หรือตกสี นิยมใช้กับยางที่มีสีดำ สารแอนติออกซิแดนท์ชนิดนี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดคือ

- 1) Ketone-amine condensates
- 2) Aldehyde-amine condensates

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) Secondary aromatic amine

สารแอนติออกซิแดนซ์ชนิดไม่ตกสี (Non-Staining antioxidant)

สารแอนติออกซิแดนซ์ชนิดไม่ตกเป็นสารแอนติออกซิแดนซ์ที่เป็นสารประกอบฟีนอล (Phenol) หรืออนุพันธ์ของฟีนอล ใช้กับยางทั่วไปที่ไม่มีสีดำ ไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์ยางสีตกและไม่เปลี่ยนสียาง สารแอนติออกซิแดนซ์ชนิดนี้ สามารถแบ่งออกเป็น 4 ชนิด คือ

- 1) Substituted phenol สมบัติการเป็นแอนติออกซิแดนซ์ไม่ดี เช่น BHT Vulkanox[®] และ Montaclere[®]
- 2) Phenolic sulphide มีความทนทานต่อความร้อนปานกลาง เช่น Santowhite crystals[®] และ Antage[®] RC
- 3) Phenol-aldehyde condensate เป็นสารแอนติออกซิแดนซ์ที่มีสมบัติเท่ากับชนิดเอมีน คือ ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาจากออกซิเจน ทนทานต่อความร้อน ทนทานต่อการหักงอ ไม่เปลี่ยนสียาง
- 4) Hydroquinone derivatives เป็นสารแอนติออกซิแดนซ์ที่อ่อนสำหรับยางที่คงรูปแล้ว เหมาะที่ใช้กับยางที่ไม่คงรูปและกาว โดยการป้องกันไม่ให้ผิวยางที่คงรูป แห้งจนติดกันไม่ได้ เมื่อนำไปประกอบด้วยกัน เช่น Santovar[®] O และ Antage[®] DAH

สารแอนติโอโซนแนนท์ (Antiozonant) เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพของยางเนื่องมาจากโอโซน (Ozone, O₃) ปกติปริมาณ โอโซนมีปริมาณน้อย ประมาณ 3-4 ppm แต่มีผลต่อยางโดยทำให้ยางเกิดรอยแตก

สารแอนติโอโซนแนนท์ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. Para-phenylene diamine สารแอนติโอโซนแนนท์ชนิดที่สำคัญ และใช้กันอย่างกว้างขวาง ได้แก่ N-isopropyl-N-phenyl-p-phenylenediamine (IPPD) สารนี้เป็นทั้งสารแอนติโอโซนแนนท์ และออกซิแดนซ์ โดยปกติใช้สารนี้ในปริมาณ 2-3 phr เช่น Permax[®] IPPD, Santoflex[®] IP ข้อเสียของสารชนิดนี้คือ เกิดการตกสี เหมาะที่ใช้ในผลิตภัณฑ์ที่มีสีคล้ำ แต่ในผลิตภัณฑ์ที่มีสีจางหรือสีขาว ถ้าป้องกันปฏิกิริยาที่เกิดจากโอโซน ต้องใช้ยางบางชนิดที่มีความทนทานต่อโอโซน เช่น ยาง EPDM โดยใช้ยาง EPDM ล้วน ๆ หรือใช้ยางอื่นผสมกับยาง EPDM เป็นการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดจากโอโซนโดยไม่ใช้สารแอนติโอโซนแนนท์

2. ขี้ผึ้งพาราฟิน (Paraffin wax) เป็นสารขี้ผึ้งที่เมื่อเติมลงในยาง เกิดการซึมออกมาที่ผิวยาง กลายเป็นแผ่นฟิล์มบาง ๆ ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้โอโซนสัมผัสกับยาง ทำให้ยางมีความทนทานต่อโอโซน ขี้ผึ้งพาราฟินที่ใช้ในการป้องกันไม่ให้โอโซนทำปฏิกิริยากับยาง ควรมี

สมบัติดังนี้ คือ ต้องซึมออกมาที่ผิวยาง ได้อย่างรวดเร็ว ต้องเกาะยึดแน่นกับผิวยาง และต้องมีปริมาณมากพอสมควรที่ทำให้ผิวของยางมีขี้ผึ้งอยู่ตลอดเวลา เช่น Amorphous microcrystalline wax

2.2.2.7 สารชนิดอื่น ๆ

การใช้สารอื่น ๆ ดังที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้ขึ้นอยู่กับความต้องการในสมบัติพิเศษบางประการ เช่น

สารปรับความแข็ง (Stiffeners)

สารปรับความแข็งนี้ช่วยปรับความแข็ง โดยเฉพาะกับยาง ที่มี Plasticity ต่ำ ปริมาณที่ใช้เพียงเล็กน้อย ตัวอย่างสารพวกนี้ ได้แก่ พวก Dihydrazine sulphate ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงมาก จึงใช้ในปริมาณ 1/4-1/8 phr

สารหน่วงการติดไฟ (Flame-retardant)

สารหน่วงการติดไฟนี้ได้แก่ Chlorinate materials และซีลีเนียม (Se) อย่างไรก็ตามควรระมัดระวังในการใช้สารเหล่านี้เพราะเป็นสารพิษ

สารให้สีและผงสี (Colorants and Pigments)

สารให้สีและผงสี ทำให้เกิดสีต่าง ๆ มีจำหน่ายพร้อมทั้งคำชี้แจงการใช้ ผลิตภัณฑ์ยางประเภทสีต่าง ๆ ควรจะใช้สาร Non-staining antioxidant เพื่อให้สีของยางสะอาด ทำเป็นสีที่ต้องการได้ การใช้ Lithopone[®] (ZnS/ BaSo) หรือ Titanium oxide ช่วยให้ยางมีสีสดใสยิ่งขึ้น

สารแทกซิไฟเออร์ (Tackifiers)

สารแทกซิไฟเออร์เป็นสารทำให้เกาะติดช่วยให้เกิดความเหนียวติดดีขึ้น ได้แก่พวก Wood resins, Coumarone resins และ Pine tar เป็นต้น

สารทำให้เกิดฟอง (Blowing agents)

สารทำให้เกิดฟองเป็นสารที่ให้ก๊าซที่อุณหภูมิขณะที่ยางเกิดการคงรูป จึงทำให้ยางเกิดเป็นฟองอากาศขึ้น สารนี้ใช้กับผลิตภัณฑ์ยางพวกที่ต้องการให้เป็นรูพรุน ตัวอย่างสารทำให้เกิดฟอง ได้แก่ โซเดียมไบคาร์บอเนต ซึ่งให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารอินทรีย์บางชนิดให้ก๊าซไนโตรเจน ส่วนพวกแอมโมเนียมคาร์บอเนตชนิดเม็ด (Pellets) ให้ก๊าซแอมโมเนีย ขนาดของรูพรุนที่เกิดขึ้นในยางนั้นควบคุมได้ด้วยชนิดสารที่ให้ก๊าซและอัตราเร่งของการเกิดก๊าซ

สารเพิ่มการยึดติด (Bonding agents)

การใช้สารเพิ่มการยึดติด จำกัดเฉพาะงานบางอย่าง เช่น การใช้ Manganese หรือ Cobalt resinoleates เพื่อช่วยการเชื่อมโยงของยางกับแผ่นทองเหลืองหรือสังกะสี และใช้ Resorcinol formaldehyde/Latex เพื่อช่วยปรับปรุงการยึดติดของยางติดกับเนื้อของ Rayon Polyester เป็นต้น

สารระงับกลิ่น (Deodorants)

สารระงับกลิ่น เป็นสารที่ใช้เพื่อช่วยระงับกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ในการผลิตยาง ซึ่งอาจเป็นสารพวกอะโรมาติก

2.2.3 พอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE) [6]

พอลิเอทิลีน มีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.1 เกิดจากการพอลิเมอไรเซชันของเอทิลีนมอนอเมอร์ โดยใช้กระบวนการที่แตกต่างกัน ทำให้ได้พอลิเอทิลีนชนิดต่าง ๆ จุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์ที่ได้ขึ้นกับความหนาแน่นของพอลิเมอร์ ที่อุณหภูมิห้องพอลิเอทิลีนไม่ละลายในตัวทำละลายใด ๆ แต่ถ้าให้อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องพอลิเมอร์สามารถพองตัวและละลายได้ในพาราไซลีน (p-Xylene) ไตรคลอโรเบนซีน (Trichlorobenzene) เดคาเคน (Decane) และเดคาลิน (Decalin) ทนทานต่อกรด-ด่างและสารออกซิไดซ์แต่ไม่ทนกับสภาพแวดล้อม อุณหภูมิสูงและรังสี เมื่อขีดข่วนสามารถเกิดรอยได้ พอลิเอทิลีนเป็นวัสดุไม่มีขั้วจึงไม่นำไฟฟ้า สามารถแบ่งตามลักษณะโครงสร้างของสายโซ่ได้ 3 แบบ ดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.11 สูตรโครงสร้างพอลิเอทิลีน [6]

ตารางที่ 2.1 การแบ่งชนิดของพอลิเอทิลีนตามลักษณะโครงสร้างของสายโซ่ [6]

| พอลิเมอร์ | โครงสร้างของสายโซ่ | ความเป็นผลึก | กระบวนการผลิต | ความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซ.ม.) |
|-----------|------------------------|--------------|---------------|----------------------------|
| LDPE | เชิงเส้น/มีโซ่กิ่งมาก | ~50% | ใช้ความดันสูง | 0.912-0.94 |
| LLDPE | เชิงเส้น/มีโซ่กิ่งน้อย | >50% | ใช้ความดันต่ำ | 0.92-0.94 |
| HDPE | เชิงเส้น | <90% | ใช้ความดันต่ำ | >0.958 |

1) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene; LDPE)

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำผลิตได้จากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันของเอทิลีนแบบอนุกรมอิสระโดยใช้ความดันสูง อุณหภูมิ 150-200°C บางครั้งเรียกว่า พอลิเอทิลีนความดันสูง พอลิเมอร์ที่ได้มีโซ่กิ่งเป็นจำนวนมาก ทำให้พอลิเมอร์ชนิดนี้มีความเป็นผลึกน้อย ความหนาแน่นต่ำ จุดหลอมเหลวต่ำและมีช่วงกว้าง 80-110°C มีความอ่อนนุ่ม โค้งงอง่าย

2) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low Density Polyethylene; LLDPE)

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นผลิตจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบซีเกลอร์-แนททา (Ziegler-Natta) หรือแบบฟิลิปป์ (Phillips) โดยใช้ความดันต่ำ ในกระบวนการผลิตมีการใส่โคมอนอเมอร์จำพวกอัลคีน (1-Alkene) เช่น 1-Butene 1-Hexene และ 1-Octene ลงไปประมาณร้อยละ 10 ทำให้มีสายโซ่คาร์บอนสั้น ๆ เกิดขึ้นที่พอลิเมอร์หลัก นอกจากนี้ยังมีผลทำให้ความสม่ำเสมอของโมเลกุลและความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น สมบัติโดยทั่วไปคล้ายพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ แต่มีความแข็งแรงมากกว่า จึงนิยมใช้ในการผลิตฟิล์ม

3) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene; HDPE)

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผลิตได้จากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบซีเกลอร์-แนททา (Ziegler-Natta) หรือแบบฟิลิปป์ (Phillips) โดยใช้ความดันต่ำ บางครั้งเรียกว่า พอลิเอทิลีนความดันต่ำ มีโครงสร้างแบบเชิงเส้นที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลอย่างสม่ำเสมอ มีโซ่กิ่งน้อยและสั้น จึงมีความเป็นผลึกสูง จุดหลอมเหลวสูงประมาณ 120-135°C มีความแข็งแรงมาก นิยมใช้ใน การเป่าขวดและบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ ทำฟิล์ม ท่อและขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีด

2.2.4 สารช่วยผสม (Compatibilizers) [7]

จากการศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่ เป็นแบบพอลิเมอร์ผสมที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blends) จึงเป็นผลให้พอลิเมอร์ผสมมีข้อบกพร่องดังนี้

- 1) มีสมบัติการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาค (Interfacial adhesion) ที่ไม่ดี
- 2) มีค่าความตึงผิวที่พื้นผิวระหว่างสองวัฏภาค (Interfacial tension) สูง
- 3) มีสัณฐานวิทยา (Morphology) ที่ไม่เสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูป
- 4) สมบัติเชิงกลต่ำ

จากข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น ทำให้นักวิทยาศาสตร์มีความสนใจในการแก้ไขข้อจำกัดเหล่านี้ โดยมีการนำสารช่วยผสม (Compatibilizers) มาใช้ เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ (Compatibility) โดยความสามารถในการเข้ากันได้ หมายถึงความสามารถในการเกี่ยวพัน หรือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

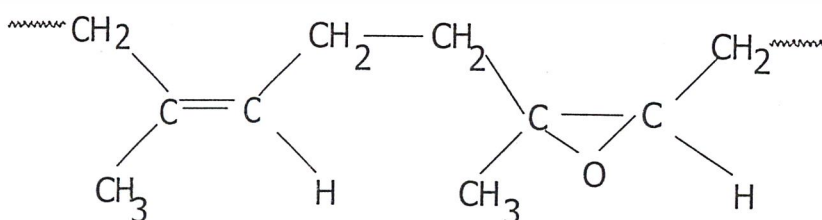
การทำปฏิกิริยาเคมีขณะทำการผสมกันของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน แต่ไม่ใช่ความสามารถในการละลายรวมเป็นเนื้อเดียวกัน และให้ผลในการช่วยลดความตึงผิวที่พื้นผิวระหว่างสองภูมิภาคทำให้พอลิเมอร์ผสมมีสถานะวิทยาที่เสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูป มีภูมิภาคกระจาย (Dispersed phase) ที่มีขนาดเล็ก และทำให้มีสมบัติการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างภูมิภาคดีขึ้น ซึ่งวิธีการที่สามารถทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ดีขึ้น แบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ

1) Non-reactive Blending คือ การเติมสารช่วยผสมลงในพอลิเมอร์ผสม [11] ทั้งนี้สารช่วยผสมที่ใช้ควรมีสสูตร โครงสร้างที่เหมือนกับพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน เพื่อให้เกิดการเกี่ยวพัน (Entanglement) กับภูมิภาคทั้งสองของพอลิเมอร์ผสม โดยไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี ดังนั้นสารช่วยผสมที่นิยมใช้คือพอลิเมอร์ร่วมแบบโคโบล็อก แบบไตรโบล็อก แบบกราฟท์ หรือแบบสุ่ม ตัวอย่างเช่น การใช้พอลิเมอร์ร่วมของพอลิสไตรีนกับพิวทาไดอินแบบโคโบล็อกเป็นสารช่วยผสมในพอลิเมอร์ของพอลิสไตรีนกับพอลิเอทิลีน เป็นต้น

2) Reactive Blending เป็นวิธีการที่ไม่มีการแยกขั้นตอนของการเติมสารช่วยผสม [11] เนื่องจากพอลิเมอร์ที่นำมาผสมนั้นมีหมู่ที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีขณะทำการผสม เช่น พอลิเมอร์ผสมของพอลิคาร์บอนเนตกับพอลิเอสเทอร์ หรืออาจเกิดการเปลี่ยนแปลง (Modify) โดยการกราฟท์พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งให้มีหมู่ที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ตัวอย่างเช่น การกราฟท์พอลิเอทิลีนด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride) หรือ กรดอะคริลิก (Acrylic acid) ซึ่งทำให้มีหมู่คาร์บอกซิลที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเอไมด์

2.2.4.1 ยางธรรมชาติแบบอีพอกซีไดซ์ (Epoxidized Natural Rubber; ENR) [5]

ยางธรรมชาติแบบอีพอกซีไดซ์ เป็นการดัดแปรให้ยางธรรมชาติมีหมู่อีพอกซี (Epoxy groups) ในโครงสร้างแบบสุ่ม (Random) ในปริมาณที่กำหนด เช่น ENR-10, ENR-25 และ ENR-50 มีหมู่อีพอกซี 10, 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โมล (% mole) ตามลำดับ โครงสร้างของ ENR แสดงได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของ ENR [5]

ยาง ENR ผลิตโดยการทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน (Epoxidation) นำยางธรรมชาติด้วยตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing agents) เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) การทำให้ยางธรรมชาติมีหมู่เอพอกซิเพิ่มมากขึ้นทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติเปลี่ยนแปลงดังนี้

- อุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature; T_g) เพิ่มขึ้น (ENR-25 มี $T_g = -45^\circ\text{C}$ ส่วน ENR 50 มี $T_g = -20^\circ\text{C}$)
- ยางหนักขึ้น มีความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity; SG) สูงขึ้น (ENR-25 มี SG = 0.97 ส่วน ENR 50 มี SG = 1.03)
- ความทนน้ำมัน (Oil resistance) ของยางเพิ่มขึ้น สมบัติคล้ายกับยางคลอโรพรีน (Chloroprene rubber; CR)
- การซึมผ่านของก๊าซ (Gas permeability) ต่ำลง คล้ายกับยางบิวทิล (Butyl rubber; IIR)
- ความมีขี้ของยางเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณหมู่เอพอกซิที่มีอยู่ในโครงสร้าง มีประโยชน์ในการใช้งานประเภทสารยึดติดหรือกาว (Adhesives) และผลิตพอลิเมอร์ผสม (Polymer blends) กับพอลิเมอร์ที่มีขี้ เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride; PVC)

วิธีการเตรียม ENR [8]

นำยางธรรมชาติ (Latex) ที่มีปริมาณยางแห้ง (Dry rubber content; DRC) 60% มา 250 มิลลิลิตร กรองเอาสิ่งสกปรกออก แล้วเติมกรดเทอริก (Teric acid) 3% โดยน้ำหนักของปริมาณยางแห้ง ซึ่งกรดเทอริกทำหน้าที่เป็นสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) โดยค่อย ๆ ละลายกรดเทอริกด้วยน้ำจนมีปริมาณ 250 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำสารที่ได้ไปใส่ใน Reactor ที่อุณหภูมิ 70°C เติมฟีนิลไฮดราซีน (Phenylhydrazine) แล้วลดอุณหภูมิให้เหลือ 60°C แบ่งสารออกมาบางส่วนแล้วตกตะกอนด้วยเมทานอล (Methanol) นำไปอบ จากนั้นนำไปหาน้ำหนักโมเลกุลโดยใช้เครื่องวัดความหนืด Viscometer เมื่อได้น้ำหนักโมเลกุลที่ต้องการแล้ว ลดอุณหภูมิใน Reactor ให้เหลือ 50°C เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) และกรดฟอร์มิก (Formic acid) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน (Epoxidation) นำไปตกตะกอนด้วยเมทานอล แล้วนำไปอบในตู้อบสูญญากาศที่อุณหภูมิ 60°C

2.2.4.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์

(Maleic anhydride grafted high density polyethylene; HDPE-g-MA)

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ที่มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวาง แต่เป็นการยากที่จะทำการผลิตเป็นพอลิเมอร์ผสมหรือคอมโพสิต เนื่องจาก HDPE มีลักษณะที่ไม่มีขี้ทำให้ผลการทดลองที่ได้จากการผสม HDPE กับวัสดุชนิดอื่นที่มีขี้มักมีสมบัติต้านแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวที่ไม่ดี แต่สามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยการเติมวัสดุตัวที่สามที่ใช้ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเพิ่มสมบัติการเข้ากันได้ยกตัวอย่างเช่น ในการผลิตคอมพอสิตนั้นสารตัวเติมได้รับการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ (Coupling agents) ซึ่งสารคู่ควบนั้นช่วยสนับสนุนการยึดติระหว่างพอลิเมอร์และ สารเสริมแรงอนินทรีย์ ทำให้สมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์คอมพอสิตดีขึ้น และสำหรับกรณีของพอลิเมอร์ผสม มีการเติมสารช่วยผสม (Compatibilizers) ลงไป เช่น พอลิโอลิฟินส์ที่มีการต่อกิ่งด้วย มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA) ได้มีการใช้กันอย่างกว้างขวางในรูปของสารช่วยผสมสำหรับการผสมระหว่างพอลิโอลิฟินส์กับพอลิเอไมด์ โดย MA สามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่เอมีนของพอลิเอไมด์ทำให้การผสมเกิดการเข้ากันได้ดีขึ้น [9]

รูปที่ 2.13 ลักษณะโครงสร้างของ HDPE-g-MA



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

H.M. Dahlan M.D. Khairul Zaman และ A. Ibrahim [10] ศึกษาผลของน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติชนิดเหลว (Liquid natural rubber; LNR) ที่ใช้เป็นสารช่วยผสมในพอลิเมอร์ผสม NR/LLDPE LNR เป็นสารช่วยผสมที่มีประสิทธิภาพสูงในการเตรียมยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติก เนื่องจากหมู่ฟังก์ชัน ได้แก่ -OH -OOH และ C=O ในสายโซ่ไอโซพรีนของ LNR สามารถช่วยปรับปรุงการผสมของยางธรรมชาติกับพอลิโอเลฟิน ในงานวิจัยนี้ทำการเตรียมยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติกโดยมีอัตราส่วน NR/LLDPE เท่ากับ 60/40 โดยใช้เครื่องบราเวนเดอร์พลาสติกอร์เดอร์ ในแต่ละครั้งทำการผสมได้ 60 กรัม โดยเติม LNR ลงไป 15% ของปริมาณยางแห้ง อุณหภูมิที่ใช้ในการผสม 135°C ความเร็วรอบของโรเตอร์ 55 รอบต่อนาที ทำการผสมโดยเติมยางลงในเครื่องผสมก่อนเป็นเวลา 1 นาทีจากนั้นจึงเติม LNR ลงไปผสมต่อเป็นเวลา 3 นาทีก่อนที่จะเติม LLDPE ลงไป ใช้เวลาในการผสมทั้งหมด 15 นาที หาน้ำหนักโมเลกุลของ LNR โดยใช้ Gel permeation chromatography; GPC จากงานวิจัยพบว่า LNR ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่สุด คือ $M_w 7.59 \times 10^4$ และ $M_n 4.03 \times 10^4$ ซึ่งเตรียมใช้วิธี UV radiation เป็นเวลา 60 ชั่วโมง ให้ค่าความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดต่ำที่สุด ซึ่ง LNR ที่เติมลงไปไม่ได้ทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสมแต่ทำหน้าที่เหมือนพลาสติกไซเซออร์อยู่ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ลดอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่ ในส่วนของ LNR ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง คือ $M_w 4.8 \times 10^5$ และ $M_n 1.66 \times 10^5$ เตรียมได้จาก UV radiation 6 ชั่วโมง ให้ค่าความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดสูงที่สุดเท่ากับ 7.3 MPa และ 592% ตามลำดับ ถ้าเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลของ LNR มากกว่า $M_w 4.8 \times 10^5$ และ $M_n 1.66 \times 10^5$ พบว่าสมบัติเชิงกลมีค่าลดลง เนื่องจากอันตรกิริยาที่เกิดจาก LNR ขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุล ถ้าน้ำหนักโมเลกุลน้อยจะมีพื้นที่ระหว่างวัฏภาค (Interphasing area) มาก ส่งผลให้เกิดการยึดติดเชิงกายภาพ (Physical adhesion) และสมบัติการเปียก (Wetting properties) ดีขึ้น นอกจากนี้โมเลกุลยังสามารถเคลื่อนที่ได้มากขึ้น ดังนั้นจึงเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลของเมทริกซ์ได้ง่าย

I. Abdullah S. Ahmad และ C.S. Sulaiman [11] ศึกษาการเตรียมและสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ระหว่างพอลิเอทิลีนเชิงเส้นชนิดความหนาแน่นต่ำ (LLDPE) และยางธรรมชาติ โดยใช้ยางธรรมชาติชนิดเหลว (Liquid Natural Rubber; LNR) เป็นสารช่วยผสมซึ่งเป็นสายโซ่ของพอลิไอโซพรีนเหมือนกับยางธรรมชาติแต่สั้นกว่าและมีหมู่ที่มีความว่องไว เช่น -OH ซึ่งทำปฏิกิริยากับอนุภาคของพลาสติก จึงทำให้เกิดการเชื่อมโยงกันระหว่างอนุภาคของพลาสติกกับส่วนของยาง งานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบปริมาณ LNR ที่ 5 10 15 และ 20% โดยน้ำหนักและทำการผสมยางธรรมชาติกับ LLDPE ที่ 2 อัตราส่วน คือ 50:50 และ 60:40 โดย

ผสมที่อุณหภูมิ 135 °C และความเร็วรอบที่ 55 รอบต่อนาที เตรียมโดยเติมยางลงไปเครื่องบราวนเดอร์พลาสติกอร์เดอร์เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นเติม LNR ลงไปผสมเป็นเวลา 2 นาที แล้วจึงเติม LLDPE ลงไปเวลาที่ใช้ในการผสมทั้งหมดคือ 15 นาที นำตัวอย่างไปขึ้นรูปโดยการกดอัดด้วยความดัน 7 kN ที่อุณหภูมิ 140 °C เป็นเวลา 2 นาที จากการทดสอบด้วยเครื่อง Scanning electron microscope พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ LNR ทำให้การกระจายตัวของอนุภาคพลาสติกและความเป็นเนื้อเดียวกันของการผสมดีขึ้น และที่ LNR 10% ในอัตราส่วนการผสม 50/50 ให้ค่าความเครียด ณ จุดขาด สูงถึง 1,000%

H. Ismail J.M. Nizam และ H.P.S. Abdul Khalil [12] ศึกษาผลของสารช่วยผสมที่มีต่อสารตัวเติมและสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิเอทิลีนเชิงเส้นชนิดความหนาแน่นต่ำ ที่อัตราส่วน 30:70 สารตัวเติมและสารช่วยผสมที่ใช้ คือ ขี้เถ้าแกลบข้าวขาว (White rice hush ash; WRHA) และพอลิพรอพิลีนเอทิลีนอะคริลิกแอซิด (Poly-(propylene-ethylene-acrylic acid; PPEAA) ทำการผสมโดยใช้เครื่องผสมโรเลอร์เบลด (Roller blade mixer) ที่อุณหภูมิ 150 °C ความเร็วรอบโรเตอร์ 55 รอบต่อนาที ผสมเป็นเวลา 13 นาที จากนั้นนำมาขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding) ที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 15 นาที จากการทดลองพบว่าค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด และค่าความแข็งแรงกดมีค่ามากขึ้นเมื่อมีการเติมสารช่วยผสม เนื่องจาก PPEAA เข้าไปช่วยปรับปรุงการเชื่อมโยงระหว่างสารตัวเติมกับเมทริกซ์ ในขณะที่เมื่อมีการเพิ่มปริมาณสารตัวเติมค่าความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง ส่วนค่าความแข็งแรงกดมีค่าเพิ่มขึ้น จากการศึกษาสถาบันวิทยาพบว่าพอลิเมอร์ผสมที่เติม WRHA แต่ไม่มีการเติมสารช่วยผสม PPEAA การกระจายตัวและการเข้ากันของสารตัวเติมค่อนข้างต่ำ เนื่องจาก WRHA เป็นสารที่มีขี้ผึ้งยากที่จะผสมเข้ากันกับ NR/LLDPE ซึ่งไม่มีขี้ผึ้ง แต่เมื่อมีการเติมสารช่วยผสม PPEAA จะช่วยปรับปรุงการเกิดพันธะ (Interfacial bonding) ระหว่าง WRHA กับ NR/LLDPE เนื่องจากหมู่เอทิลีนใน PPEAA ช่วยให้เกิดอันตรกิริยาและการเข้ากันได้ ในเมทริกซ์ของ NR/LLDPE นอกจากนี้หมู่อะคริลิกใน PPEAA ยังเกิดการเชื่อมโยงทางเคมีกับหมู่ไฮดรอกซิลของ WRHA อีกด้วย

I. Abdullah S. Ahmad C.S. Sulaiman S. Kohjiya และ J.R. Yoon [13] ทำการศึกษาสมบัติสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติ (Natural rubber; NR) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density poly ethylene; HDPE) ที่มีการเติมยางธรรมชาติชนิดเหลว (Liquid natural rubber; LNR) เป็นสารช่วยผสม ทำการผสมโดยใช้เครื่องบราวนเดอร์พลาสติกอร์เดอร์ที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 15 นาที โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ HDPE/NR ระหว่าง 20/80 และ 45/55 จากนั้นนำไปขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่อุณหภูมิ 130°C ความดัน 7 kN เป็นเวลา 2 นาที จากการทดสอบพบว่า การเชื่อมโยงจะมากขึ้นตามปริมาณของ LNR ที่เติมลงไป ค่าความเค้นและความเครียดสูงสุดที่วัดได้ประมาณ 7.5 MPa และ 100% ตามลำดับ ค่าความแข็งแรงดึงมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ LNR และมีค่าสูงสุดเมื่อปริมาณ LNR 27% ถ้าเพิ่มมากกว่านี้ค่าจะตกลง ค่าความแข็งแรงกมมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มี การเติม LNR จากการตรวจวิเคราะห์สมบัติทางพลวัต (Dynamic analysis) ให้ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่างสารทั้งสองชนิด คือ ประมาณ -55°C โดยค่า T_g ของยาง และ HDPE เท่ากับ -45 และ -110°C ตามลำดับ โดย LNR แทรกตัวเข้าไปเกิดการเชื่อมโยงภายในยางธรรมชาติและระหว่างพื้นผิวของยางธรรมชาติและพอลิเอทิลีน ทำให้เกิดแรงยึดติดระหว่าง ภูมิภาคทั้งสอง ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่จะส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติชนิดเทอร์โม-พลาสติก โดยแรงยึดติดระหว่างภูมิภาคทั้งสองขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของ พอลิเมอร์ผสมและปริมาณที่เหมาะสมของ LNR

S. Al-Malaika และ E.J. Amir [14] ทำการศึกษาถึงผลของสภาวะในกระบวนการผลิต และชนิดของเครื่องผสมที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและ พอลิพรอพิลีน (PP) ที่ทำการผสมที่อัตราส่วนต่างๆจากการทดลองพบว่า การใช้ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide) 0.3% ในพอลิเมอร์ผสมที่มียางธรรมชาติ 60% ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจะให้ สมบัติเชิงกลดีที่สุด ส่วนเครื่องผสมที่มีอัตราแรงเฉือนสูง (Buss-Ko kneader) ส่งผลให้พอลิเมอร์ ผสมมีสมบัติเชิงกลดีกว่าเมื่อเทียบกับเครื่องผสมระบบปิดที่ใช้ในห้องทดลอง (Hampden-Rapra torque rheometer) การนำมาขึ้นรูปใหม่ (Remolding) ทำให้ความเสถียรในการหลอมเหลว (Melt stability) และสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมลดลง การนำมามีคขึ้นรูป (Reinjection) ทำให้สมบัติ ต่าง ๆ ลดลงมากเมื่อเทียบกับการอัดขึ้นรูปใหม่ (Recompression)

Q. Chaun Y. Jinghua และ H. Baotong [15] ได้ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติพอลิเมอร์ ผสมจากยางธรรมชาติและพอลิเอทิลีนเชิงเส้นชนิดความหนาแน่นต่ำ (LLDPE) โดยมีพอลิเมอร์ ร่วมของพอลิเอทิลีนต่อกับพอลิไอโซพรีนแบบไดบล็อก (polyethylene-b-polyisoprene diblock copolymer; PE-b-PI) เป็นสารช่วยผสม เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น เตรียมโดยใช้ LLDPE ลงไปในเครื่องบราวนเดอร์พลาสติกอร์เดอร์ที่อุณหภูมิ 130°C ให้เกิดการหลอมเหลว จากนั้นใส่ ยางธรรมชาติและสารเติมแต่งลงไปผสมเป็นเวลา 3 นาที แล้วจึงเติม PE-b-PI ลงไปผสมต่อเป็น เวลา 5 นาที นำตัวอย่างไปขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป จากการทดสอบพบว่าสมบัติเชิงกลของ พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้มีค่าสูงขึ้นเมื่อมีการเติม PE-b-PI ในปริมาณที่เหมาะสมเท่านั้น ถ้าเติมมาก ไปจะทำให้สมบัติตกลงและที่อัตราส่วนของ NR/LLDPE/PE-b-PI เป็น 45/50/5 จะมีสมบัติเชิงกล สูงที่สุด จากการศึกษาด้วย Scanning electron microscopy (SEM) และ transmission

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

electron microscopy (TEM) พบว่าเมื่อไม่มีการเติม PE-b-PI สามารถเห็นรอยต่อระหว่างวัฏภาคของ NR และ LLDPE ชัดเจน แต่เมื่อมีการเติม PE-b-PI ทำให้วัฏภาคระหว่าง NR และ LLDPE ไม่แบ่งแยกกันชัดเจน เนื่องจากสารช่วยผสมนี้ช่วยลดแรงตึงผิว (Interface tension) และเพิ่มแรงยึดเหนี่ยว (Adhesion) ระหว่าง 2 วัฏภาค



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการดำเนินการ

โครงการพิเศษนี้จะศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติ และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) โดยเน้นการปรับปรุงสมบัติของ TPNR ด้วย เปปไทเซอร์ (Peptizers) และสารช่วยผสม (Compatibilizers) งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยต่อเนื่อง จากงานวิจัยของ นายจิระ เขียนอบล นางสาวพัชรี ศรีวงษ์ และนายไพโรจน์ บุญประโกลก [18] ซึ่งงานวิจัยนี้มีขอบเขตการวิจัยดังต่อไปนี้

ตอนที่ 1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติก

1. ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ใช้ในการหลอมเหลวพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ
 - 1.1. ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ใช้ในการหลอมเหลวพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC)
 - 1.2. ศึกษาเวลาที่ใช้ในการหลอมเหลวพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำด้วยเครื่องบราเบนเดอร์พลาสติกอร์เดอร์ (Brabender Plasticorder)
2. ศึกษาความเร็วรอบโรเตอร์ที่เหมาะสมของเครื่องบราเบนเดอร์พลาสติกอร์เดอร์

ตอนที่ 2 การศึกษาการเตรียมยางผสมสูตร

1. ศึกษาปริมาณสารเชื่อมโยงที่เหมาะสมในการเตรียมยางธรรมชาติผสมสูตร
 - 1.1. ศึกษาปริมาณสารเชื่อมโยงที่เหมาะสม ในการเตรียมยางธรรมชาติผสมสูตรด้วยเครื่องวัดสมบัติการคงรูปของยาง (Rotorless rheometer : Curelastometer[®])
 - 1.2. ศึกษาปริมาณสารเชื่อมโยงที่เหมาะสมจากสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้
2. ศึกษาปริมาณสารตัดสายโซ่ (Peptizers) ที่เหมาะสมในยางผสมสูตรเพื่อใช้ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

ตอนที่ 3 ศึกษาชนิด ปริมาณ และวิธีการในการผสมสารช่วยผสม เพื่อเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

1. การใช้ยางธรรมชาติแบบอีพอกซีไดซ์ (Epoxydized natural rubber ; ENR) เป็นสารช่วยผสม

3.2 สารเคมีและอุปกรณ์

สารเคมี

1. ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) ชนิดยางแผ่นรมควันชั้นสอง (2-Grade Ribbed Smoke Sheet, RSS) จากส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
2. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene; LDPE) Epolene[®] เกรดฉีดขึ้นรูป (Injection grade, LD1807F) จากบริษัท ไทยพอลิเอทิลีน จำกัด สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ แสดงดังตารางที่ 3.1
3. สารป้องกันการเสื่อมสภาพ เออร์แกนอกซ์ (Irganox[®] 1010) จากบริษัท Ceba-Kike Co.,Ltd
4. พอลิเอทิลีนแวกซ์ (PE Wax) จากบริษัท P&M Associate Co.,Ltd
5. ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide; DCP) จากบริษัท Aldrich Co.,Ltd
6. เปปไทเซอร์ (Peptizer) Aktiplast[®] จากบริษัท Rhein Chemie Ltd.
7. ยางธรรมชาติชนิดอีพอกซิไดซ์ (Epoxidized Natural rubber; ENR) จากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (M_v) = 22,800 ปริมาณหมู่อีพอกซิ 3% โดยโมล
8. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride grafted high density polyethylene; HDPE-g-MA) บริษัท TOA Uni Chemical Manufacturing Ltd. Polybond[®] Grade 3009 MFI = 5 กรัม/10 นาที %MA= 1% wt.
9. ไซลีน (Xylene) บริษัท Carlo erba reagenti S.R.I. montedison group
10. คลอโรฟอร์ม (Chloroform) บริษัท Merck Ltd.

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

| สมบัติ | หน่วย | ค่า | วิธีการทดสอบ |
|--------------------------------------------------------|--------------|-------|--------------|
| ดรรชนีการไหล (MFI) (Melt flow index) | กรัม/10 นาที | 7 | ASTM D 1238 |
| ความหนาแน่น (Density) | กรัม/ลบ.ซม. | 0.918 | ASTM D 1505 |
| ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break) | กก./ตร.ซม. | 110 | ASTM D 638 |
| เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) | % | 500 | ASTM D 638 |
| มอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus) | กก./ตร.ซม. | 1,650 | ASTM D 790 |
| ความแข็งกด (Shore A) (Hardness) | - | 48 | ASTM D 2240 |
| จุดหลอมเหลว (T_m) (Melting point) | องศาเซลเซียส | 106 | ASTM D 2117 |
| จุดอ่อนตัว (HDT) (Softening point) | องศาเซลเซียส | 90 | ASTM D 1525 |

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

อุปกรณ์

1. เครื่องบดพลาสติก (Grinding machine) บริษัท Bosco Engineering Ltd.
2. เครื่องบดละเอียด บริษัท F.Kurt Retsch GmbH & Co. KG
3. เครื่องบราเบนเดอร์พลาสติกอร์เดอร์ (Brabender plasticorder) บริษัท C.Melchers & Coperation
4. เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) บริษัท แลบทศเคนจิเนียร์ริง จำกัด
5. เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding machine) บริษัท Welltec Industrial Equipment Ltd (Cosmo)
6. เครื่องวัดสมบัติการคงรูปของยาง (Rotorless rheometer :Curelastometer[®]) บริษัท Nichigo Shigi Model II F
7. เครื่องวัดความหนืด (Mooney viscometer) บริษัท Shimadzu จำกัด Model SMV-201

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal tensile tester) บริษัท Intro LLOYD Instruments จำกัด
9. เครื่องวัดความแข็งกด (Hardness tester) บริษัท Intro Enterprise จำกัด
10. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน Differential scanning calorimeter (DSC)
รุ่น DSC-7 บริษัท Perkin Elmer จำกัด
11. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscope (SEM)
รุ่น JSM-5800LV
12. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน Dynamic mechanical thermal analyzer (DMTA)
รุ่น DMTA-V บริษัท Rheometric Scientific จำกัด
13. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน Thermogravimetric analyzer (TGA) รุ่น TGA 51
บริษัท TA Instruments
14. ตู้อบสุญญากาศ (Low skin temperature vacuum ovens) บริษัท Hotpack Corporation

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติก

3.3.1.1 ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ใช้ในการหลอมเหลวพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

- 1) ศึกษาหาสภาวะการหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยใช้เครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC)
 1. นำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) มาชั่งน้ำหนักประมาณ 6-8 มิลลิกรัม
 2. ทำการศึกษาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 40°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) เป็น $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ จนถึงอุณหภูมิสูงสุดคือ 160°C และทำให้เย็นโดยการลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ จนถึงอุณหภูมิเริ่มต้น
 3. นำข้อมูลจากกราฟที่ได้มาหาค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (% Crystallinity)
- 2) ศึกษาเวลาในการหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยใช้เครื่องบราเวนเดอร์พลาสติกอร์เคอร์
 1. ชั่งพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ประมาณ 50 กรัม
 2. นำมาใส่เครื่องผสมบราเวนเดอร์พลาสติกอร์เคอร์
 3. ทำการศึกษาที่ช่วงอุณหภูมิ 140- 160°C ที่ความเร็วรอบโรเตอร์ 40-80 รอบ/นาที (rpm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. นำผลที่ได้มาหาเวลาที่ทำให้พอลิเอทิลีนหลอมเหลวหมด

3.3.2 การเตรียมยางผสมสูตร

ทำการเตรียมยางผสมสูตร โดยแบ่งการเตรียมยางออกเป็น 2 ระบบ

ระบบที่ 1 ศึกษาการเตรียมยางผสมสูตรที่ไม่มีการเติมสารตัดสายโซ่ (Peptizer)

ระบบที่ 2 ศึกษาการเตรียมยางผสมสูตรที่มีการเติมสารตัดสายโซ่ (Peptizer)

การเตรียมยางผสมสูตร

1. ตัดยางและซังสารเคมีต่าง ๆ ตามตารางที่ 3.2 เพื่อทำการหาสูตรที่เหมาะสมในการเตรียมยางผสมสูตร

ตารางที่ 3.2 ยางผสมสูตรที่ใช้ในการทดลอง

| สาร | อัตราส่วนโดยน้ำหนัก (ส่วนในร้อยส่วนของยาง, phr) | |
|---------------------------|-------------------------------------------------|------------------|
| | ระบบที่ 1 | ระบบที่ 2 |
| Natural rubber | 100 | 100 |
| PE Wax | 1 | 1 |
| Irganox [®] 1010 | 1 | 1 |
| DCP | 0.5, 1.0, 1.5 | 0.5 |
| Peptizer | - | 0.25, 0.50, 0.75 |

2. ทำการผสมยางผสมสูตรเริ่มจากการนำยางธรรมชาติมาบดย่อย (Mastication) ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) จนกระทั่งยางพันรอบลูกกลิ้งทำการกรีดพับยางเป็นเวลา 10 นาที
3. จากนั้นเติม PE wax และเออร์กันอกซ์ โดยระบบที่ 2 มีการเติมสารตัดสายโซ่ลงไปด้วยที่ปริมาณต่าง ๆ แล้วทำการบดผสมโดยการกรีดพับยางเพื่อให้เกิดการผสมและสารที่เติมมีการกระจายตัวดี ใช้เวลาประมาณ 10 นาที
4. เติมสารเชื่อมโยงคือ DCP ลงไปในยาง ทำการบดผสมต่อไปจนยางมีความอ่อนตัวและสารมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ใช้เวลาในขั้นตอนนี้ประมาณ 5 นาที
5. เมื่อผสมยางกับสารต่าง ๆ เสร็จเรียบร้อยแล้ว ตัดยางออกไปตามแนวยาวของลูกกลิ้งแล้วดึงยางผสมสูตรที่ได้ออกจากลูกกลิ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. นำยางธรรมชาติผสมสูตรที่ได้ไปทดสอบสมบัติในการสึกตัวของยางผสมสูตร โดยใช้เครื่องวัดสมบัติการคงรูป (Rotorless rheometer : Curelaster[®]) โดยศึกษาที่อุณหภูมิ 150°C เพื่อหาค่า Scorch time และ Cure time

3.3.3 ศึกษาชนิด ปริมาณ และวิธีการในการผสมสารช่วยผสม เพื่อเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

1. เตรียมยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติก โดยใส่พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำก่อนในเครื่องบราเวนเดอร์ที่ความเร็วโรเตอร์ 40 60 และ 80 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 150°C จนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเกิดการหลอมเหลวหมด แล้วจึงใส่ยางผสมสูตร โดยใช้เวลาในการผสมอยู่ในช่วงเวลาที่ไม่เกิน Scorch time ที่ได้จากเครื่องวัดการคงรูปของยาง

2. ในกรณีที่ต้องการศึกษาชนิดและปริมาณของสารช่วยผสม สามารถแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ระบบ คือ

ระบบที่ 1 สารช่วยผสม คือยางธรรมชาติชนิดอีพอกซีไดซ์ (Epoxidized Natural Rubber; ENR) โดยทำการเติม ENR ลงไปพร้อมกับยางผสมสูตร โดยปริมาณของสารช่วยผสมที่ใช้ คือ 1 2 และ 3 phr

ระบบที่ 2 สารช่วยผสมที่ใช้เป็นการร่วมกันระหว่าง ENR และ PE-g-MA แบ่งการทดลองออกเป็น 2 วิธี ตามวิธีการผสม

วิธีที่ 1 ในการผสมยางผสมสูตรกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เติม PE-g-MA ลงไปพร้อมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำลงในเครื่องบราเวนเดอร์พลาสติกอร์เดอร์ทำการผสมเป็นเวลา 2 นาทีจากนั้นเติม ENR ลงไปพร้อมกับยางผสมสูตรทำการผสมต่ออีกเป็นเวลา 3 นาที โดยกำหนดอัตราส่วนของ ENR: PE-g-MA เท่ากับ 1:3 และปริมาณของสารช่วยผสมที่เติมลงในยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติก คือ 1 2 และ 3 phr

วิธีที่ 2 ทำการเตรียมสารช่วยผสมระหว่าง ENR กับ PE-g-MA ก่อน โดยใช้อัตราส่วนของ ENR: PE-g-MA = 1:3 เริ่มการผสมโดยการนำ ENR ที่มีน้ำหนักประมาณ 10 กรัม ละลายด้วยตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม ให้ได้ของเหลวที่มีลักษณะเหนียว แล้วนำไปผสมกับ PE-g-MA ที่บดละเอียดแล้วน้ำหนัก 30 กรัมผสมให้เข้ากันดี นำไปอบด้วยตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ประมาณ 4 ชั่วโมง เพื่อระเหยตัวทำละลายออก นำสารช่วยผสมที่เตรียมได้เติมลงในเครื่องบราเวนเดอร์พลาสติกอร์เดอร์พร้อมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำทำการผสมเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นจึงเติมยางธรรมชาติผสมสูตรลงไปผสมต่ออีกเป็นเวลา 3 นาที

3. นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้มาบดด้วยเครื่องบด (Grinding machine) เพื่อนำไปขึ้นรูปโดยใช้กระบวนการฉีดขึ้นรูป

3.3.4 การขึ้นรูป TPNR ที่เตรียมได้

ทำการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้จากข้อ 3.3.3 โดยใช้กระบวนการฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding machine) โดยใช้สภาวะตามในภาคผนวก ก

3.3.5 การทดสอบสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้

1. การทดสอบสมบัติเชิงกล

- การทดสอบแรงดึง (Tensile tests) ตามมาตรฐาน ASTM D638 ซึ่งงานตัวอย่างรูปดัมเบลล์ (Dumbbell shape) โดยกำหนดสภาวะเครื่องทดสอบ ดังนี้

| | | |
|------------------------------|-----|------------------|
| ความเร็วในการดึง | 100 | มิลลิเมตรต่อนาที |
| ความยาวเกจ (Gauge length) | 7 | เซนติเมตร |
| ค่าแรงสูงสุดที่เครื่องรับได้ | 1 | กิโลนิวตัน |
| จำนวนชิ้นที่ใช้ทดสอบ | 6 | ชิ้นงาน |

ผลการทดสอบที่ได้นำมาหาค่าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เท่ากับความเค้นสูงสุด (Maximum stress) ของวัสดุที่รับได้เมื่อให้แรงดึง (หน่วยเป็นแรงต่อพื้นที่) หาได้จากสมการ

$$\text{ค่าความแข็งแรงดึง} = \frac{F}{A} \quad \dots(3.1)$$

เมื่อ F = แรงที่ใช้ในการดึง ณ จุดขาด (N)

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (m^2)

2. เปอร์เซ็นต์การยืดออก ณ จุดขาด (% Elongation at break) หาได้จากสมการ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด} = \frac{(L - L_0)}{L_0} \times 100 \quad \dots(3.2)$$

เมื่อ L = ความยาวสุดท้ายของชิ้นงาน (m)

L_0 = ความยาวเกจ (Gauge length) (m)

3. มอดูลัสแบบยืดหยุ่น (Modulus of elasticity)

มอดูลัสยืดหยุ่น คืออัตราส่วนของความเค้นต่อความเครียด ในช่วง Proportional limit หรือช่วงที่ความเค้นมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับความเครียด (หน่วยเป็นแรงต่อพื้นที่) หาได้จากสมการ

$$\text{มอดูลัสแบบยืดหยุ่น} = \text{ความเค้น/ความเครียด} \quad \dots(3.3)$$

- การทดสอบความแข็งกด (Hardness tests)

โดยการนำชิ้นงานที่เตรียมได้มาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งกด แบบน้ำหนักคงที่ ชนิด Shore A ที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ASTM D2240 ซึ่งอ่านค่าความแข็งกดได้โดยตรงจากเครื่อง รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 10 ครั้งต่อ 1 ตัวอย่าง

2. การทดสอบสมบัติทางความร้อน

Thermogravimetric Analyzer (TGA)

- ชั่งตัวอย่างประมาณ 10-20 มิลลิกรัม
- อัตราการให้ความร้อน 20°C/min
- ช่วงอุณหภูมิ 200-600°C

Differential scanning calorimeter (DSC)

- ชั่งตัวอย่างประมาณ 6-8 มิลลิกรัม
- อัตราการให้ความร้อน 20°C/min
- ช่วงอุณหภูมิ 40 -160°C
- หาค่าจุดหลอมเหลว (T_m) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (% Crystallinity) ของ พอลิเอทิลีนในเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมได้

คำนวณเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพอลิเอทิลีน 100% จากสมการ ดังต่อไปนี้

$$\% \text{Crystallinity} = \frac{\Delta H_f / 0.4}{\Delta H_f^0} \times 100 \quad \dots(3.4)$$

เมื่อ

ΔH_f = เอนทาลปีของการหลอมเหลวพอลิเอทิลีน
ตัวอย่าง (J/g)

ΔH_f^0 = เอนทาลปีของการหลอมเหลวพอลิเอทิลีนที่มี
ความเป็นผลึก 100% ซึ่งมีค่าเท่ากับ 293 J/g [17]

Dynamic Mechanical Thermal Analyzer (DMTA)

- ตัดชิ้นงานให้มีความกว้าง ประมาณ 8.5 มิลลิเมตร หนา 2.4 มิลลิเมตร
- พันปลายชิ้นงานทั้งสองด้านด้วยฟอยด์อลูมิเนียม แล้วนำชิ้นงานไปใส่ในเฟรม (Frame) ขนาดกลาง แล้วหมุนเกลียว (Nut) โดยใช้แรง 30 kN และใช้ Geometry เป็น single cantilever
- ตั้งอุณหภูมิเครื่องให้อยู่ระหว่าง -100 ถึง 40°C และความถี่ในการสั่นชิ้นงาน เท่ากับ 3 Hz ค่า strain ที่ใช้เท่ากับ 0.03 อัตราการให้ความร้อน $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$
- หาอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) จากกราฟ

3. การศึกษาสัณฐานวิทยาของ TPNR

ศึกษาสัณฐานวิทยาของ TPNR ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) โดยดูจากภาพตัดขวางตัวอย่างที่แตกหักที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) สามารถเตรียมตัวอย่างได้ดังนี้

- นำยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมได้มาหักที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic crack) โดยแช่ชิ้นงานในไนโตรเจนเหลว (liquid nitrogen) 10 นาที แล้วหัก ชิ้นงานเป็นชิ้นเล็ก ๆ โดยอย่าให้รอยที่หักถูกสัมผัส
- นำชิ้นงานที่เตรียมได้มาสกัดด้วยตัวทำละลายไซลีน (Xylene) ที่อุณหภูมิสูง 135°C เป็นเวลา 5 วินาที เพื่อกำจัดวัฏภาคของพลาสติก (LDPE) และวัฏภาคของยางที่ไม่เกิดการเชื่อมโยงออก
- นำไปอบในตู้อบสูญญากาศที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
- จากนั้นทำการเคลือบชิ้นงานด้วยทองคำ
- นำชิ้นงานไปทดสอบด้วย SEM

5. การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เจล

การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เจล (% Gel) ทำโดยการเตรียมตัวอย่างขนาดประมาณ $3 \times 5 \times 1$ มิลลิเมตร ซึ่งตัวอย่างหาน้ำหนักที่แน่นอน (W_0) จากนั้นใส่ตัวอย่างในซองอลูมิเนียมขนาดเล็ก แล้วนำไปแช่ไว้ในตัวทำละลายไซลีน ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลานาน 8 ชั่วโมง แล้วนำชิ้นงานมาอบโดยใช้ตู้อบสูญญากาศ ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งน้ำหนักที่แน่นอนอีกครั้ง (W) แล้วนำมาคำนวณตามสูตรข้างล่าง โดยหาค่าเฉลี่ยจากตัวอย่าง 3 ชิ้นงานต่อ 1 สูตร

$$\%Gel = \left(\frac{W}{W_0} \right) \times 100 \quad \dots(3.5)$$

เมื่อ W คือ น้ำหนักของตัวอย่างหลังอบ (กรัม)

W_0 คือ น้ำหนักของตัวอย่างก่อนสกัดด้วยตัวทำละลาย (กรัม)



3.4 แผนการทำงานวิจัย

ขั้นตอนในการทำงานวิจัยนี้สามารถแบ่งตามช่วงเวลาต่าง ๆ ดังนี้

ตารางที่ 3.3 ระยะเวลาในการทำงานวิจัย

| ขั้นตอนการทำวิจัย | เดือนที่ | | | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----|----|----|----|---|----|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและจัดเตรียมสารเคมี | ←→ | | | | | | | | |
| ศึกษาสภาวะการหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ | | ←→ | | | | | | | |
| ศึกษาการเตรียมยางผสมสูตร -ศึกษาปริมาณสารตัดสายโซ่ -การเตรียมยางผสมสูตร -ทดสอบเวลาที่ใช้ในการคงรูป | | | ←→ | | | | | | |
| ศึกษาสภาวะการเตรียม TPNR ในการผสมที่เหมาะสม ได้แก่ -ศึกษาปริมาณสารช่วยผสม -เวลาที่ใช้ในการผสม -ความเร็วรอบของสกรูในเครื่องผสมระบบปิด | | | | ←→ | | | | | |
| ศึกษาเวลาที่ใช้ในการคงรูปของ TPNR ที่ได้ | | | | | ←→ | | | | |
| ทำการขึ้นรูปและทดสอบสมบัติของ TPNR ที่เตรียมได้ | | | | | ←→ | | | | |
| การวิเคราะห์ผลการทดลองและเขียนโครงการพิเศษ | | | | | | | ←→ | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

จากการดำเนินงานวิจัยศึกษาอิทธิพลของสารช่วยผสมที่มีต่อสมบัติของยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติก (TPNR) ที่เตรียมได้จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และยางธรรมชาติ โดยการศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา ผลการวิจัยแสดงดังต่อไปนี้

4.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติก

4.1.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการหลอมเหลวพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

ในการผสมยางธรรมชาติกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ซึ่งเป็นเทอร์โมพลาสติก การผสมจะทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อทำการหลอมเหลวพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ที่อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม ก่อนทำการผสมกับยางธรรมชาติผสมสูตร ดังนั้นในช่วงแรกของงานวิจัย จึงจำเป็นต้องศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการหลอมเหลวพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำก่อน

4.1.1.1 ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการหลอมเหลวพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC)

การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC เป็นการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน โดยการหาอุณหภูมิในการหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวหรือความร้อนที่ใช้ในการเกิดผลึก (ΔH) และยังทราบถึงเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของวัสดุได้

จากการวิจัย เมื่อนำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำไปศึกษาอุณหภูมิในการหลอมเหลว พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึกของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ประมาณ 108°C (ภาคผนวก ข)

4.1.1.2 ศึกษาเวลาที่ใช้ในการหลอมเหลวพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยใช้เครื่อง

บราเบนเดอร์พลาสติคอร์ดเดอร์ (Brabender Plasticorder)

การศึกษาเวลาที่ใช้ในการหลอมเหลวพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่อุณหภูมิ $140-160^{\circ}\text{C}$ ด้วยเครื่องบราเบนเดอร์พลาสติคอร์ดเดอร์ ที่ความเร็วรอบโรเตอร์ 60 รอบต่อนาที การหลอมเหลว LDPE อยู่ในช่วงระหว่าง 1.0- 1.3 นาที ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และภาคผนวก ก

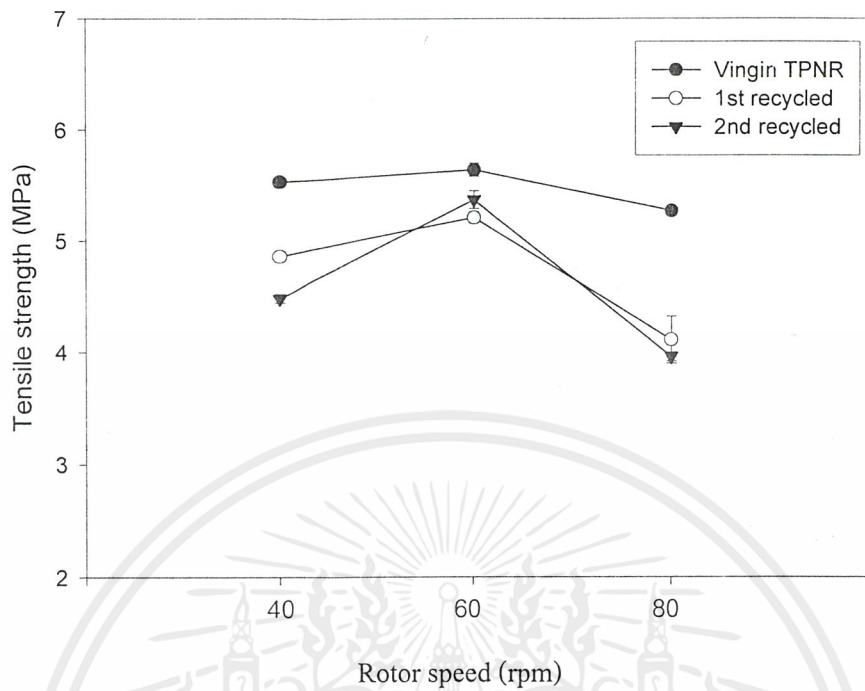
ตารางที่ 4.1 เวลาที่ใช้ในการหลอมเหลว LDPE ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ด้วยเครื่องบราเบนเดอร์ พลาสติกอร์เดอร์

| อุณหภูมิ (°C) | เวลาที่ใช้ในการหลอมเหลว (นาที) |
|------------------|-----------------------------------|
| 140 | 1.3 |
| 150 | 1.2 |
| 160 | 1.0 |

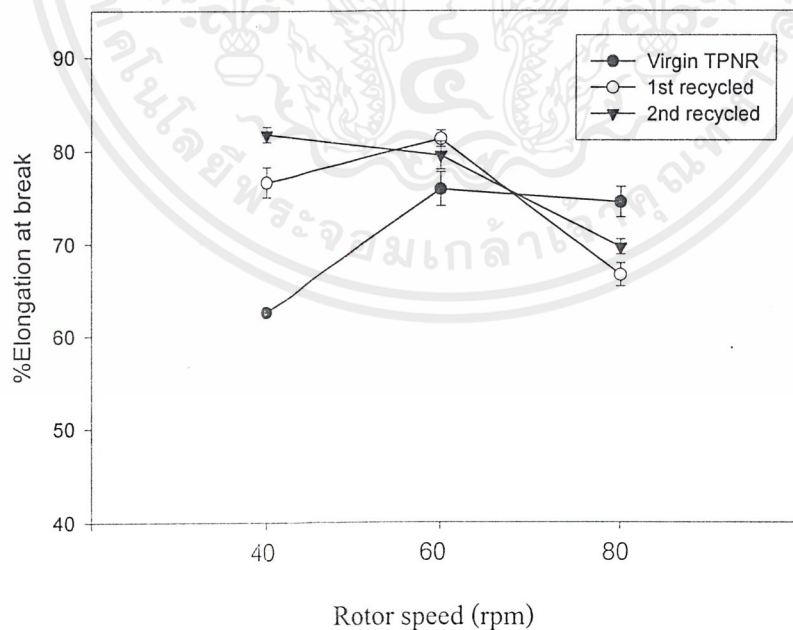
4.1.2 ศึกษาความเร็วรอบโรเตอร์ที่เหมาะสมของเครื่องบราเบนเดอร์พลาสติกอร์เดอร์

การเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ด้วยเครื่องบราเบนเดอร์พลาสติกอร์เดอร์ โดยอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิเอทิลีน เท่ากับ 60/40 ปริมาณสารเชื่อมโยง 0.5 phr ที่อุณหภูมิ 150 °C ความเร็วรอบโรเตอร์ (Rotor speed) 40 60 และ 80 รอบต่อนาที ใช้เวลาในการผสม 5 นาที แล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้ในแต่ละสูตร พบว่าสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมได้นั้น มีสมบัติสูงที่สุดเมื่อใช้ความเร็วรอบโรเตอร์ที่ 60 รอบต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 4.1 – 4.4

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของ TPNR พบว่าค่าความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและสูงสุดที่ความเร็วรอบโรเตอร์ 60 ต่อนาที ส่วนค่าความแข็งแรงดัดและค่ามอดูลัสมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก อาจเนื่องมาจากที่ความเร็วรอบโรเตอร์ 60 รอบต่อนาที แรงเฉือน (Shear stress) ที่เกิดขึ้นจากโรเตอร์ทำให้ยางธรรมชาติและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำสามารถกระจายตัวเข้ากันได้ดี ซึ่งมีผลทำให้สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ดี แต่เมื่อใช้ความเร็วรอบโรเตอร์สูงขึ้น สมบัติเชิงกลลดลง อาจมีสาเหตุมาจากผลของแรงเหวี่ยง หรือการลื่นไถล (Slip) ของโรเตอร์กับของผสม ทำให้การผสมและการกระจายตัวไม่ดี และเมื่อนำ TPNR มาผ่านการรีไซเคิล พบว่าค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัส และความแข็งแรงดัดลดลงเล็กน้อย (น้อยกว่า 10%) เนื่องจากการผ่านกระบวนการรีไซเคิลทำให้ TPNR ได้รับความร้อนเพิ่มมากขึ้น เกิดการขาดของสายโซ่ (Chain scission) ส่วนเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจาก TPNR ได้รับความร้อนและแรงเฉือนเพิ่มมากขึ้น การกระจายตัวของพลาสติกในวัฏภาคยางดีขึ้น ทำให้รับแรงและกระจายแรงได้ดีขึ้น

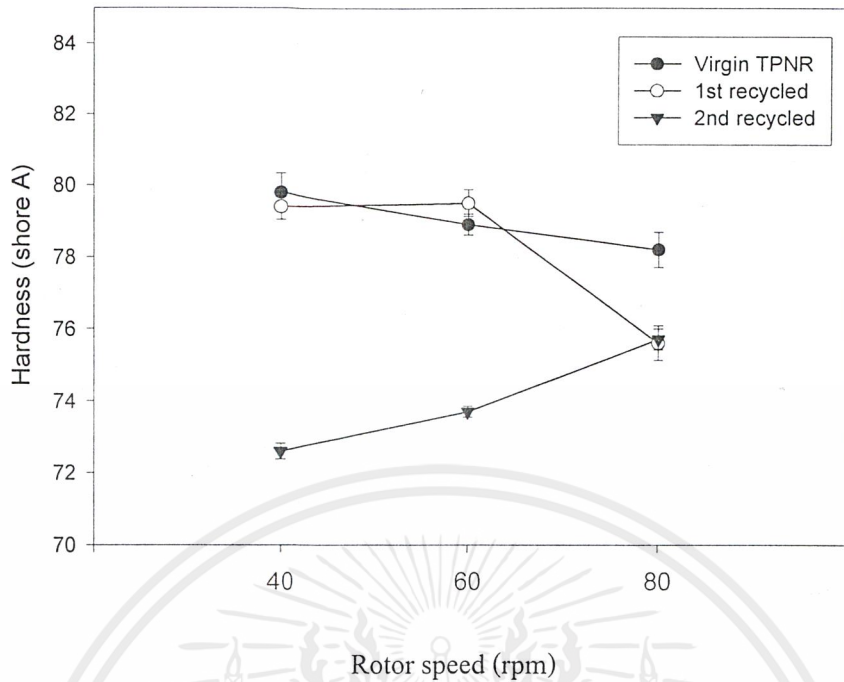


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของ TPNR กับความเร็วรอบโรเตอร์ของเครื่องบราเนเตอร์พลาสติกอร์เคอร์

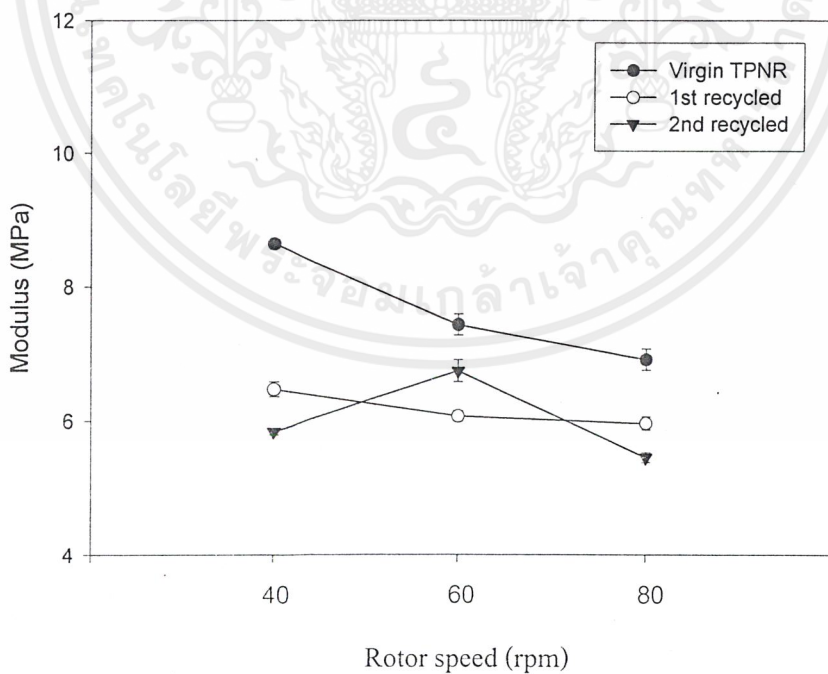


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดกับความเร็วโรเตอร์ของเครื่องบราเนเตอร์พลาสติกอร์เคอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกคกับความเร็วรอบโรเตอร์ของเครื่องบราเวน-เดอร์พลาสติกอร์เคอร์



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสกับความเร็วรอบโรเตอร์ของเครื่องบราเวน-เดอร์พลาสติกอร์เคอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การศึกษาการเตรียมยางผสมสูตร

ในการผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เพื่อเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ ต้องหลอมเหลวพอลิเอทิลีนก่อนทำการผสมกับยางธรรมชาติ และสิ่งที่ต้องพิจารณาต่อมา คือ ระยะเวลาในการผสม ซึ่งต้องผสมให้ LDPE กับ NR เข้ากันได้ดี ก่อนที่ Yang จะเกิดการเชื่อมโยงสมบูรณ์ ดังนั้นจำเป็นต้องหาระยะเวลาที่ Yang เริ่มเชื่อม โยง (Scorch time) ที่เหมาะสม

4.2.1 การศึกษาปริมาณสารเชื่อมโยงที่เหมาะสมในการเตรียมยางธรรมชาติผสมสูตร

4.2.1.1 การศึกษาปริมาณสารเชื่อมโยงที่เหมาะสมในการเตรียมยางธรรมชาติผสมสูตรด้วยเครื่องวัดสมบัติการคงรูปของยาง (Curelastometer)

เมื่อพิจารณตารางที่ 4.2 พบว่าที่อุณหภูมิเดียวกันแต่ใช้ปริมาณสารเชื่อม โยงแตกต่างกัน ค่า Scorch time (t_{s2}) และ Cure time (t_{90}) สิ้นลง และเมื่อพิจารณาที่ปริมาณสารเชื่อม โยงเท่ากันพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิในการเชื่อม โยงทำให้ค่า Scorch time และ Cure time สิ้นลงเช่นกันเนื่องจาก DCP แยกตัวเป็นอนุมูลอิสระได้เร็วขึ้น เกิดการเชื่อม โยงได้ดีกว่า ดังนั้นจึงเลือกใช้ DCP 0.5 phr ที่อุณหภูมิ 150°C ซึ่งได้ค่า Scorch time (t_{s2}) และ Cure time (t_{90}) ที่เหมาะสม กล่าวคือมี Scorch time 2.5 นาที และ Cure time 21 นาที เนื่องจากระยะเวลา 2.5 นาทีน่าจะนานเพียงพอที่พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและยางผสมสูตรเกิดการผสมกันได้ก่อนที่ Yang จะเกิดการเชื่อม โยงเป็นโครงร่างสามมิติขึ้น โดยการพิจารณาเลือกปริมาณสารเชื่อม โยง พิจารณาร่วมกับสมบัติเชิงกลของ TPNR ที่มีปริมาณสารเชื่อม โยงแตกต่างกันด้วย

ตารางที่ 4.2 Scorch time และ Cure time ของ TPNR ที่มีปริมาณ DCP 0.5 1.0 และ 1.5 phr โดย เชื่อม โยงที่อุณหภูมิ 140-160 °C

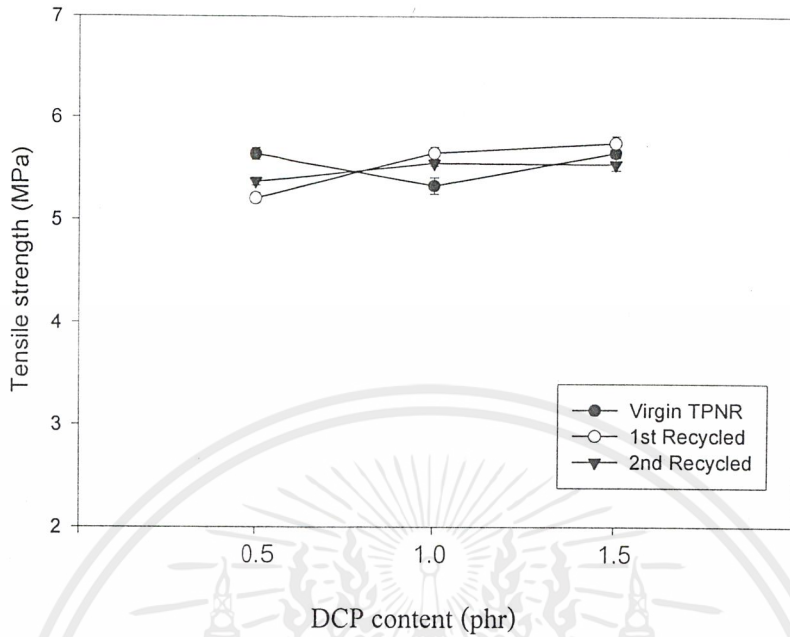
| Vulcanizing Temperature (°C) | DCP (phr) | Time (min) | |
|------------------------------|-----------|-------------|-----------|
| | | Scorch time | Cure time |
| 140 | 0.5 | 4.0 | 21.3 |
| | 1.0 | 3.4 | 21.1 |
| | 1.5 | 2.4 | 22.4 |
| 150 | 0.5 | 2.5 | 21 |
| | 1.0 | 3 | 19.4 |
| | 1.5 | 2.3 | 20.2 |
| 160 | 0.5 | 2.0 | 16 |
| | 1.0 | 2.1 | 14.1 |
| | 1.5 | 1.3 | 11.4 |

4.2.1.2 ศึกษาปริมาณ DCP ที่เหมาะสมจากสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

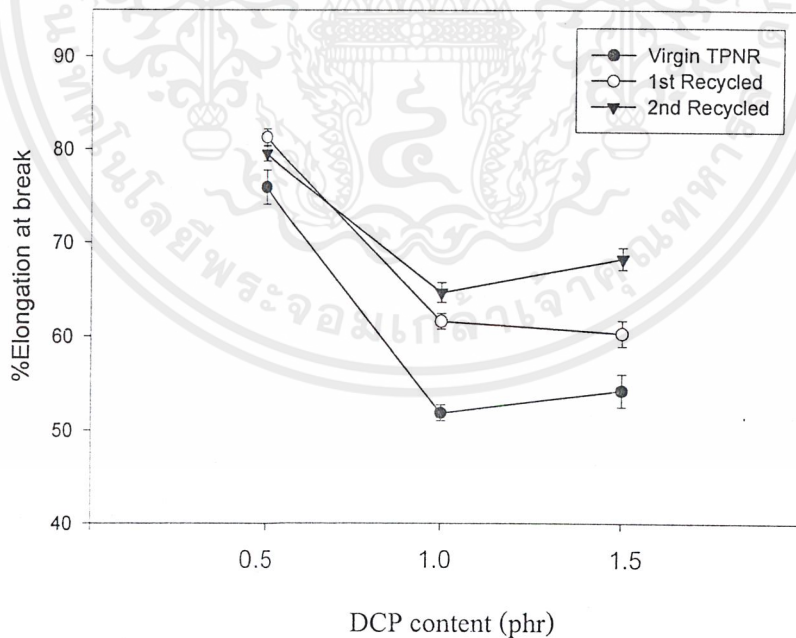
การเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ด้วยเครื่องบราเบนเดอร์พลาสติกอร์เคอร์ที่อุณหภูมิ 150 °C เวลาในการผสม 5 นาที ความเร็วรอบโรเตอร์ 60 รอบต่อนาที โดยที่บางผสมสูตรมีปริมาณ DCP แตกต่างกัน คือ 0.5 1.0 และ 1.5 phr นำ TPNR ไปขึ้นรูปแล้วทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้ในแต่ละสูตร พบว่าสมบัติเชิงกลและเปอร์เซ็นต์เจลของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 - 4.9

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของ TPNR พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยง (DCP) ทำให้ค่ามอดูลัสและเปอร์เซ็นต์เจลเพิ่มขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดลดลง เนื่องจากปริมาณ DCP ที่มากขึ้นทำให้เกิดการเชื่อมโยงเพิ่มมากขึ้น สายโซ่เคลื่อนที่ได้ยาก ส่วนค่าความแข็งแรงดึงและค่าความแข็งแรงกดเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เพราะปริมาณ DCP ที่เติมลงไปเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงมากนัก และเมื่อนำ TPNR มาผ่านการรีไซเคิล พบว่าสมบัติเชิงกลโดยรวมเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก

ประกอบกับผลที่ได้จากการศึกษาฐานวิทยาศาสตร์ พบว่า ช่องว่างสีดำซึ่งเป็นส่วนของ LDPE ที่ถูกสกัดออกจากขางมีขนาดเล็กและการกระจายตัวดีขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณ DCP และเมื่อผ่านการรีไซเคิล เนื่องจากเมื่อผ่านการขึ้นรูปโดยเครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding machine) ทำให้ได้รับแรงเฉือนซ้ำเป็นผลให้วัฏภาคของ LDPE ที่มีขนาดใหญ่เปลี่ยนเป็นขนาดเล็กและการกระจายตัวดีขึ้น ดังรูปที่ 4.10

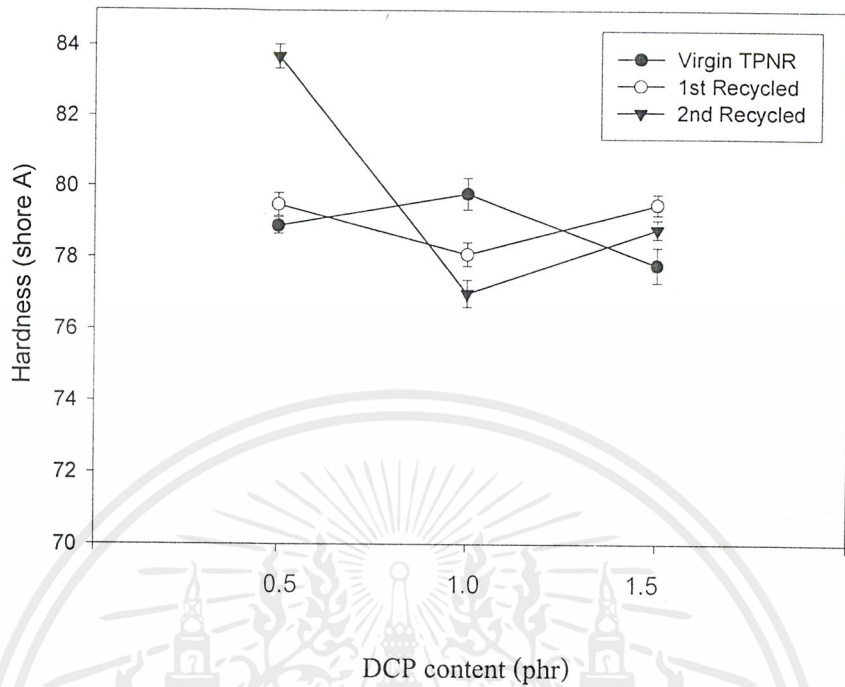


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของ TPNR กับปริมาณสารเชื่อมโยง

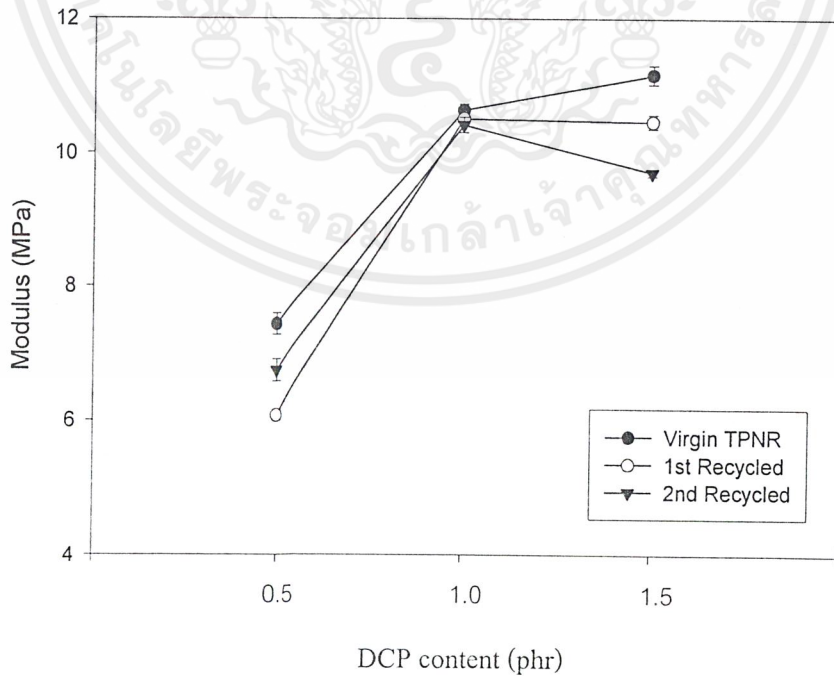


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ของ TPNR กับปริมาณสารเชื่อมโยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

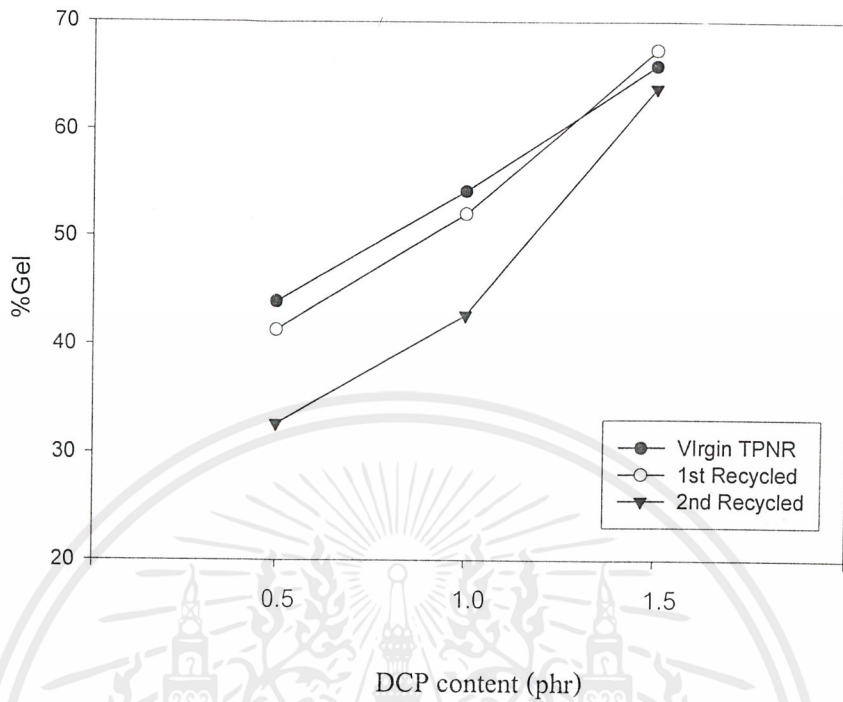


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกด ของ TPNR กับปริมาณสารเชื่อมโยง



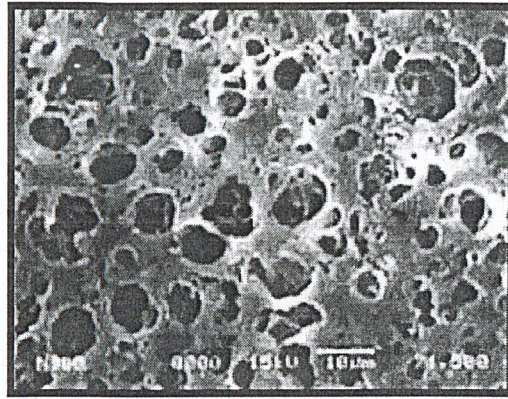
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสของ TPNR กับ ปริมาณสารเชื่อมโยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

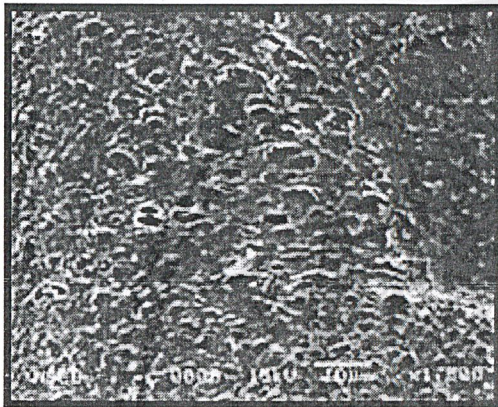


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เจลของ TPNR กับปริมาณสารเชื่อมโยง

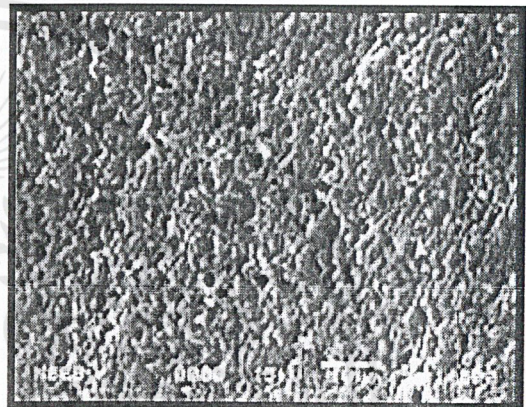
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



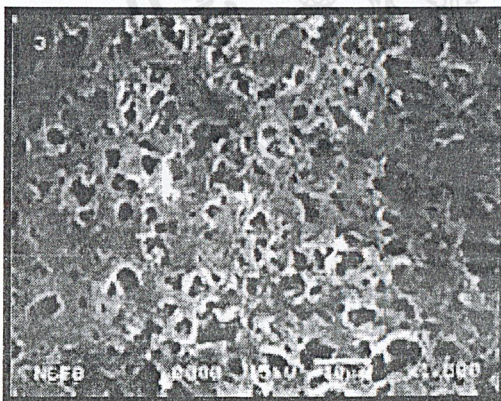
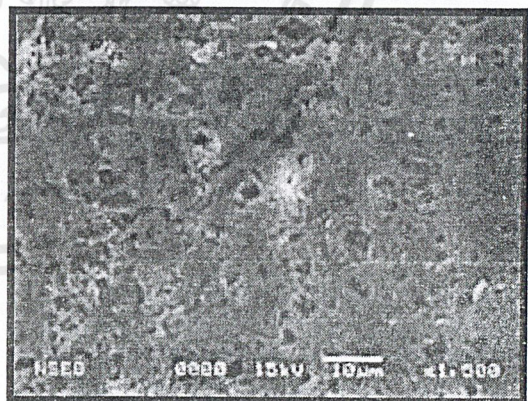
a) Virgin TPNR / DCP 0.5 phr



b) Virgin TPNR / DCP 1.0 phr



c) Virgin TPNR / DCP 1.5 phr

d) 1st recycled TPNR / DCP 0.5 phre) 2nd recycled TPNR / DCP 0.5 phr

รูปที่ 4.10 สัณฐานวิทยาของ TPNR กำล้างขยาย 1500 เท่า ปริมาณ DCP 0.5, 1.0, 1.5 phr ตามลำดับ

- a) Virgin TPNR / DCP 0.5 phr b) Virgin TPNR / DCP 1.0 phr
 c) Virgin TPNR / DCP 1.5 phr d) 1st recycled TPNR / DCP 0.5 phr
 e) 2nd recycled TPNR / DCP 0.5 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การศึกษาปริมาณสารตัดสายโซ่ที่เหมาะสมในยางผสมสูตร เพื่อใช้ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

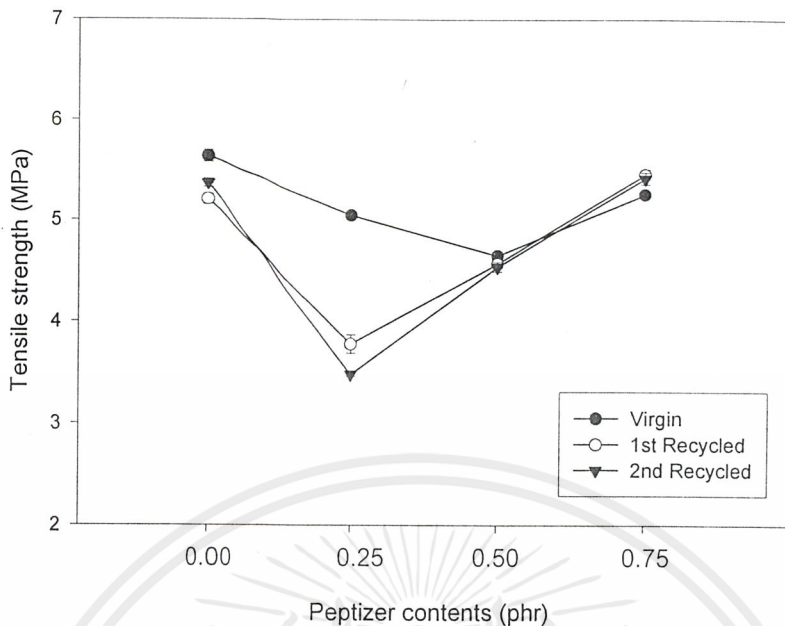
เตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากยางผสมสูตรที่มีปริมาณสารตัดสายโซ่ (Peptizer) 0.25 0.50 และ 0.75 phr ด้วยเครื่องบราเวนเดอร์พลาสติกอร์เคอร์ที่อุณหภูมิ 150 °C ความเร็วรอบ-โรเตอร์ 60 รอบต่อนาที เวลาในการผสม 5 นาที จากการทดลองพบว่า ความหนืดของยางผสมสูตรลดลง เมื่อปริมาณสารตัดสายโซ่ในยางผสมสูตรเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ความหนืดของยางผสมสูตร เมื่อไม่มีและมีปริมาณสารตัดสายโซ่ 0.25 0.50 และ 0.75 phr

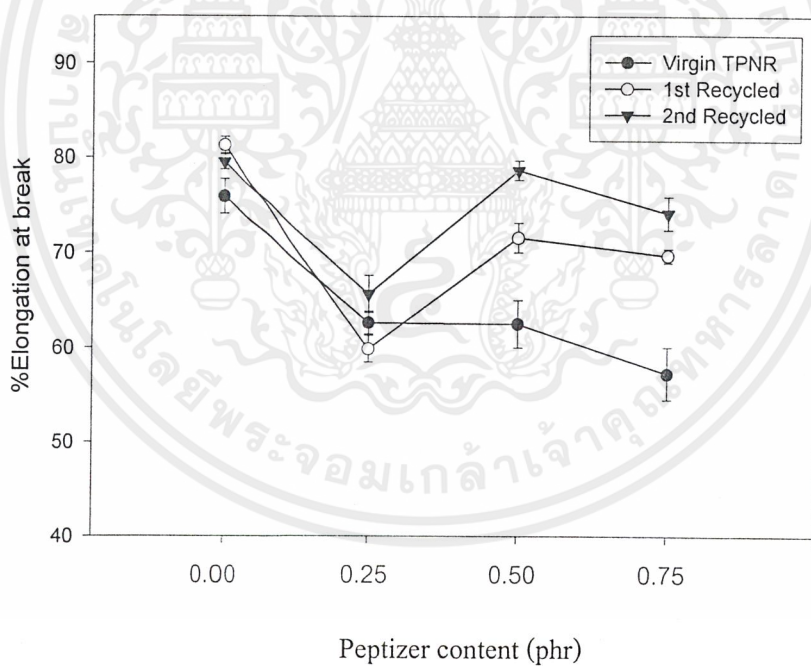
| ปริมาณสารตัดสายโซ่ (phr) | ความหนืด ML 1+4 (100°C) |
|--------------------------|-------------------------|
| 0.00 | 35.2 |
| 0.25 | 16.1 |
| 0.50 | 11.6 |
| 0.75 | 4.1 |

การเพิ่มปริมาณสารตัดสายโซ่แล้วทำให้ความหนืดของยางผสมสูตรลดลง เนื่องจากสารตัดสายโซ่ทำหน้าที่ตัดสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของยางลดลง ส่งผลให้ความหนืดลดลงด้วย

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของ TPNR พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัดสายโซ่ (Peptizer) ทำให้สมบัติเชิงกลโดยรวมและเปอร์เซ็นต์เจลมีแนวโน้มลดลง (รูปที่ 4.11 – 4.15) เนื่องจากผลของน้ำหนักโมเลกุลที่ลดลงของยางธรรมชาติทำให้การเกี่ยวพัน (Chain entanglement) ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ลดลง และเมื่อนำ TPNR มาผ่านการรีไซเคิลพบว่าสมบัติเชิงกลโดยรวมเพิ่มขึ้น เนื่องจากการผ่านกระบวนการรีไซเคิลทำให้ TPNR ได้รับความร้อนและแรงเฉือนเพิ่มมากขึ้น การกระจายตัวของวัฏภาคพลาสติกดีขึ้น ทำให้ในวัฏภาคยางเกิดการเชื่อมโยงมากขึ้น

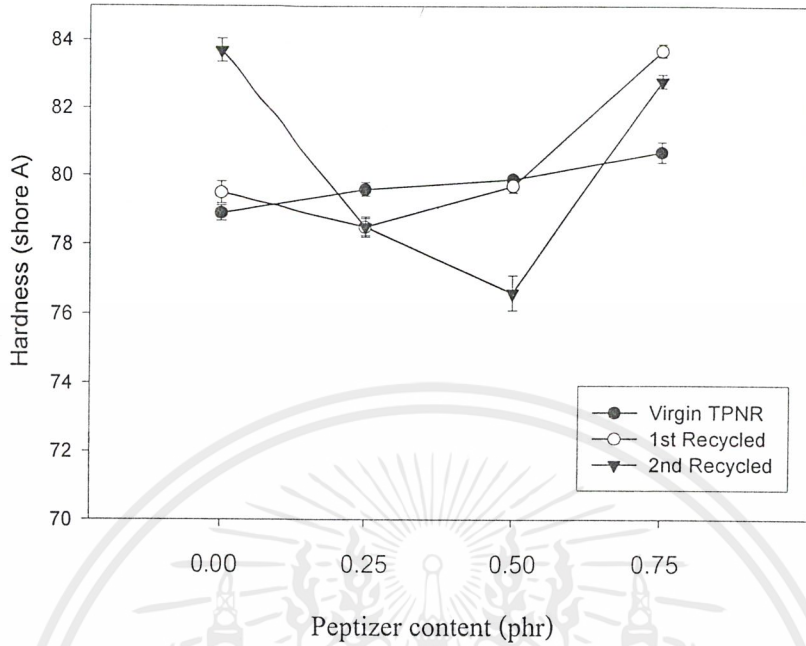


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของ TPNR กับปริมาณสารตัดสายโซ่

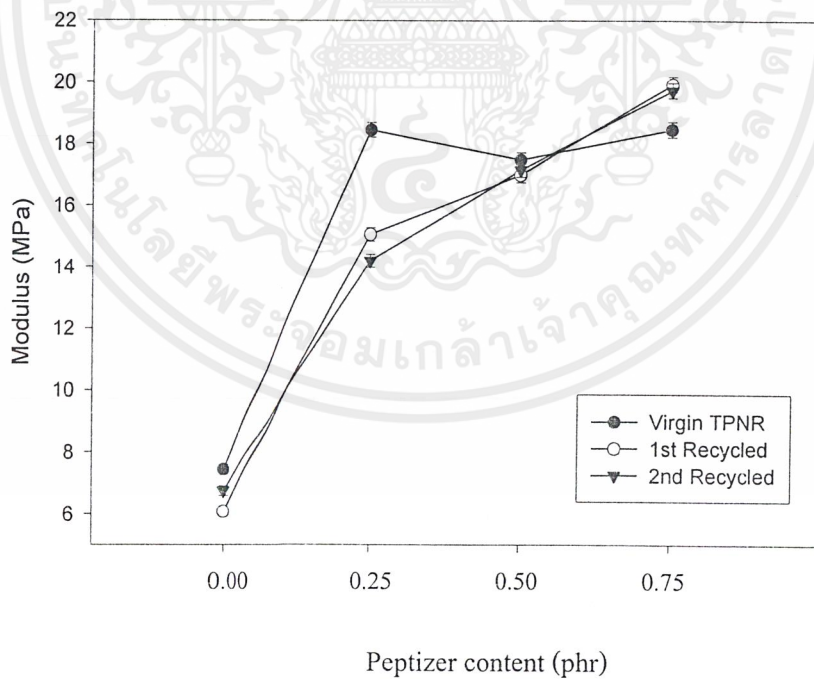


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ของ TPNR กับปริมาณสารตัดสายโซ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

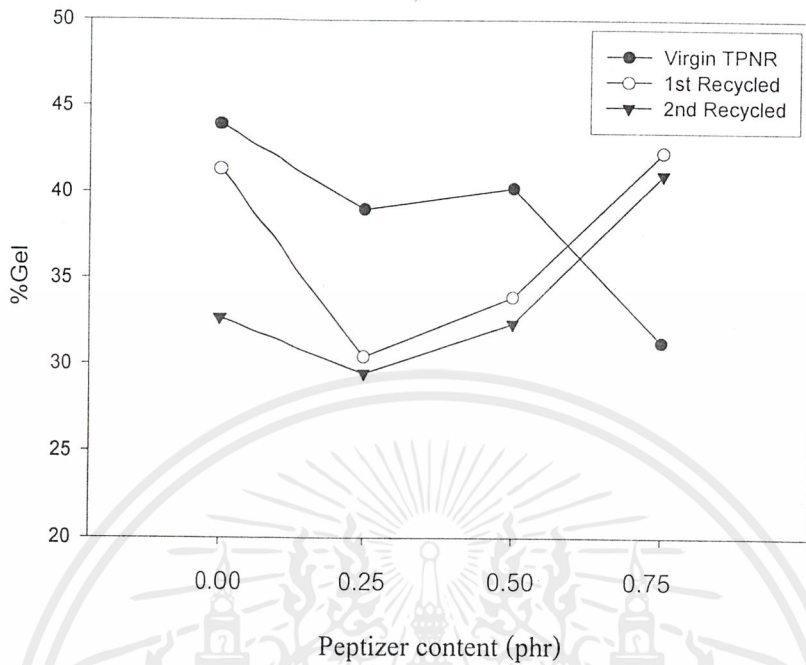


รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของ TPNR กับปริมาณสารตัดสายโซ่



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสของ TPNR กับปริมาณสารตัดสายโซ่

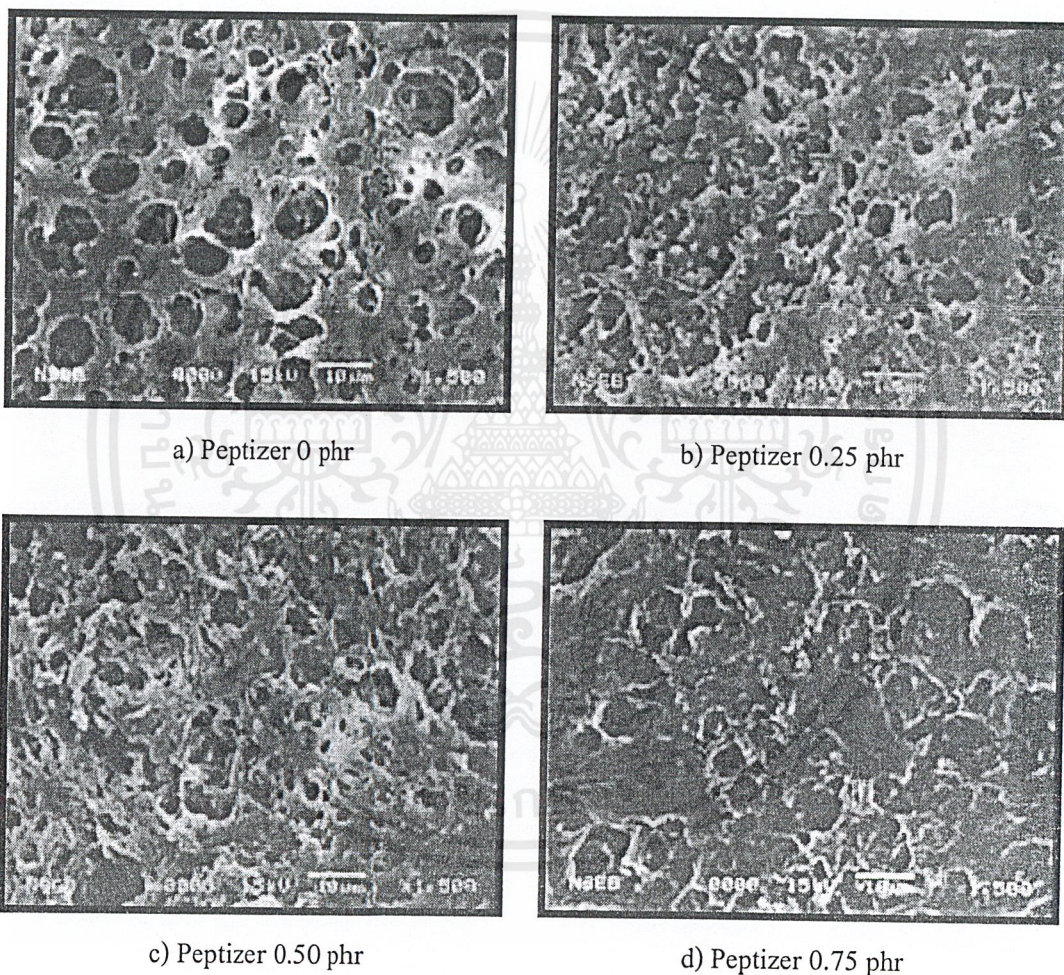
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เจลของ TPNR กับปริมาณสารตัดสายโซ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาสัณฐานวิทยาของ TPNR ที่มีปริมาณสารตัดสายโซ่ (Peptizer) จากรูปที่ 4.16 แสดงสัณฐานวิทยาของ TPNR ที่มีปริมาณสารตัดสายโซ่ 0.25 0.50 และ 0.75 phr ตามลำดับ พบว่า LDPE มีขนาดเล็กลงเมื่อเติมสารตัดสายโซ่ 0.25 และ 0.50 phr เนื่องจากสารตัดสายโซ่ (Peptizer) ทำหน้าที่ตัดสายโซ่โมเลกุลของยาง ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของยางลดลงความหนืดลดลงเข้าใกล้ความหนืดของ LDPE ทำให้เกิดการกระจายตัวที่ดีแต่เมื่อเติมสารตัดสายโซ่ 0.75 phr ทำให้ LDPE มีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากความหนืดของยางที่ลดลงมากทำให้ในระหว่างการผสมจึงเกิดแรงเฉือนน้อย ทำให้การผสมไม่ดี LDPE กระจายตัวไม่สม่ำเสมอและอาจมารวมตัวกันทำให้วัฏภาคของ LDPE มีขนาดใหญ่



รูปที่ 4.16 สัณฐานวิทยาของ TPNR (NR/LDPE = 60/40, DCP 0.5 phr) ที่มีปริมาณสารตัดสายโซ่ต่างกัน ที่กำลังขยาย 1500 เท่า

a) Peptizer 0 phr b) Peptizer 1 phr c) Peptizer 2 phr d) Peptizer 3 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3. ศึกษาชนิด ปริมาณ และวิธีการในการผสมสารช่วยผสม เพื่อเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

การเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ มีปัญหาในการผสม ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วมักไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน จึงเป็นผลให้เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้มีข้อบกพร่อง คือ สมบัติการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาค (Interfacial adhesion) ไม่ดี ค่าความตึงผิวที่พื้นผิวระหว่างสองวัฏภาค (Interfacial tension) สูง ทำให้สมบัติเชิงกลต่ำ ดังนั้นจึงนำสารช่วยผสมมาใช้ เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ (Compatibility) และทำให้สมบัติการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาคดีขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาอิทธิพลของสารช่วยผสมที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

การนำสารช่วยผสมมาปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่มีประสิทธิภาพเมื่อเลือกชนิดของสารช่วยผสมที่เหมาะสมกับชนิดของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ รวมทั้งการเลือกปริมาณและวิธีการผสมของสารช่วยผสมที่ใช้ด้วย การศึกษาสารช่วยผสมในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ ระบบที่ 1 ใช้ยางธรรมชาติแบบอีพอกซีไดซ์ (ENR) เป็นสารช่วยผสม และระบบที่ 2 สารช่วยผสมที่ใช้เป็นสารช่วยผสมร่วมระหว่าง ENR และ PE-g-MA เพื่อหาสารช่วยผสมที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

4.3.1. ยางธรรมชาติแบบอีพอกซีไดซ์ (Epoxydized Natural Rubber; ENR) เป็นสารช่วยผสม

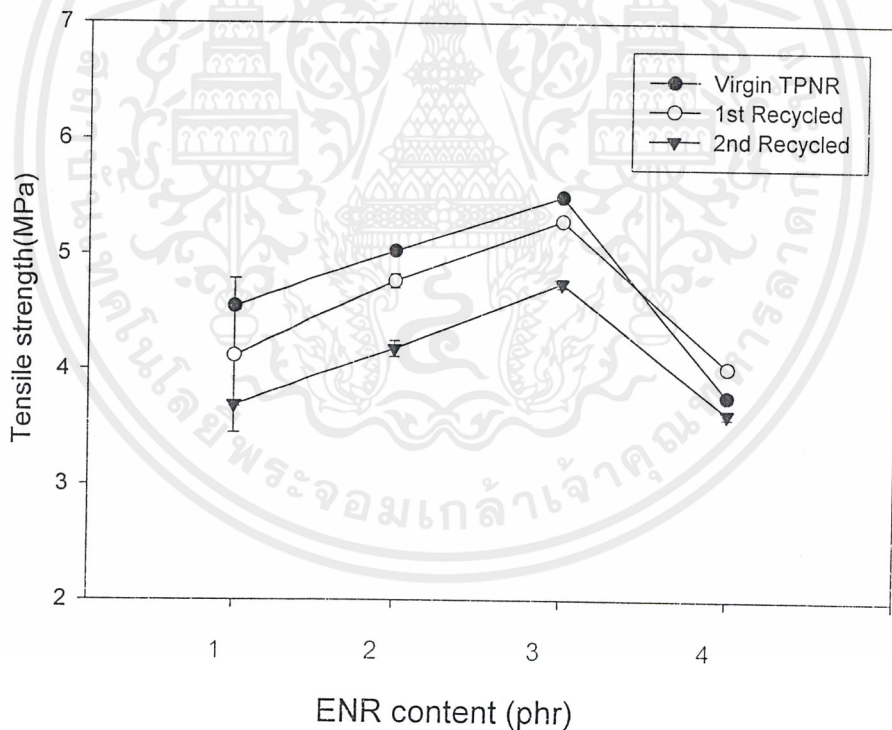
ยางธรรมชาติแบบอีพอกซีไดซ์ เป็นยางธรรมชาติที่ถูกตัดแปรให้มียูนิทอีพอกซีในโครงสร้าง เตรียมได้จากปฏิกิริยาอีพอกซีเดชัน มีประโยชน์ในการใช้งานประเภทสารยึดติดหรือกาว และใช้ผลิตพอลิเมอร์ผสม การเตรียมยางเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ส่วนนี้ ใช้ ENR เป็นสารช่วยผสม โดยเติม ENR ลงไปพร้อมกับยางผสมสูตรในช่วงการผสมด้วยเครื่องบราเวนเดอร์-พลาสติกอร์เดอร์ โดยผสมที่อุณหภูมิ 150 °C ความเร็วรอบโรเตอร์ 60 รอบต่อนาที เวลาในการผสม 5 นาที นำไปขึ้นรูปแล้วทดสอบสมบัติเชิงกล ดังแสดงในรูปที่ 4.17-4.21

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของ TPNR พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ ENR ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ค่าความแข็งกดและค่ามอดูลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและสูงสุดที่ปริมาณ 2 phr เนื่องจาก ENR เข้าไปแทรกในวัฏภาคของยาง ทำให้วัฏภาคของยางมีความหนืดลดลง เข้าใกล้เคียงกับ LDPE สมบัติจึงดีขึ้น และในขณะที่ผสมเกิดอนุมูลอิสระของเปอร์ออกไซด์ (Peroxide radical) และหรือหมู่ไฮดรอกซี (Hydroxy group) บนสายโซ่พอลิเมอร์ซึ่งอนุมูลอิสระนี้สามารถเกิดพันธะโคเวเลนต์ (Covalent bond) กับ ENR ที่วงอีพอกไซด์ (Epoxyde ring) ได้ ทำให้สมบัติเชิงกลสูงขึ้น แต่เมื่อปริมาณ ENR เพิ่มขึ้นเป็น 3 phr ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง มอดูลัส ค่าความแข็งกดและเปอร์เซ็นต์เจลลดลง อาจเนื่องมาจาก ENR มีส่วนที่มีขี้ขี้ คือ หมู่อีพอกซี (Epoxy group) ดังนั้นเมื่อเติมในปริมาณมากเกินไป ความมีขี้ขี้ของ ENR เพิ่มขึ้น จึงไม่รวมตัวกับวัฏภาคยางและพลาสติก

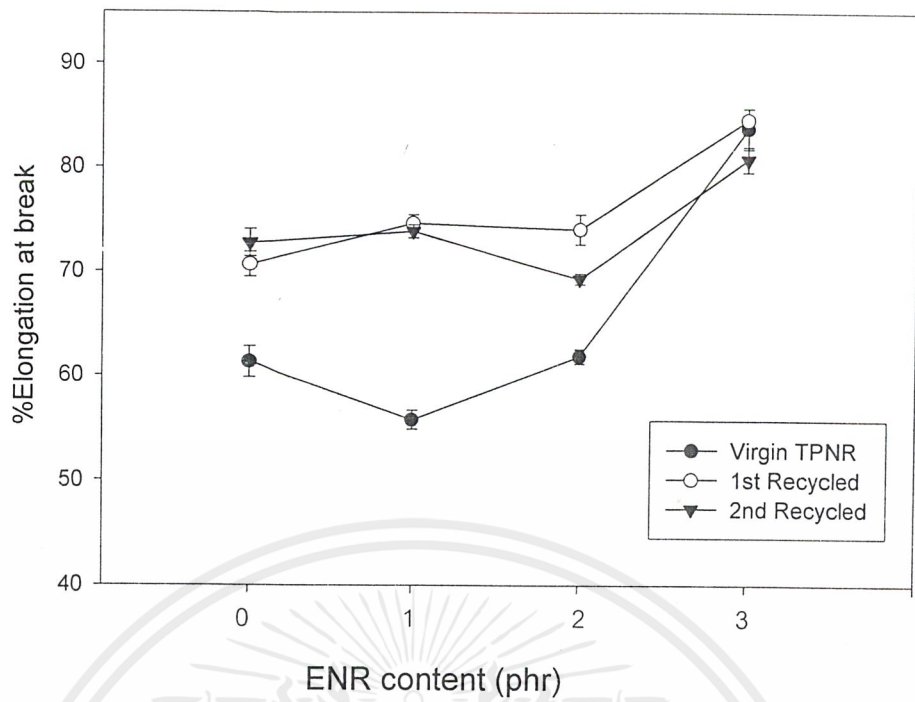
ซึ่งไม่มีขั้ว (Non-polar) หรือ ENR อาจทำหน้าที่คล้ายพลาสติกไซเซออร์ เพราะ ENR ที่ใช้เป็นชนิดที่เตรียมให้มีน้ำหนักโมเลกุลค่อนข้างต่ำ ($\bar{M}_v = 22,800$) จึงสามารถแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่ในพอลิเมอร์ผสม ทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ผ่านกันได้ง่าย รับและกระจายแรงดี ยึดหยุ่นมากขึ้น เป็นผลให้เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดเพิ่มมากขึ้นด้วย

ผลของการศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ ENR ขนาดของ LDPE มีแนวโน้มเล็กลงและการกระจายตัวดีขึ้น และที่ ENR ปริมาณ 3 phr LDPE มีขนาดเล็กที่สุด สมบัติโดยรวมมีค่าลดลงยกเว้น เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด อาจเนื่องมาจากขนาดของวัฏภาคที่กระจายตัวอยู่ในขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก ถ้าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคไม่แข็งแรงเมื่อให้แรงเข้าไปทำให้เกิดการขาดได้ง่าย ดังแสดงในรูปที่ 4.22

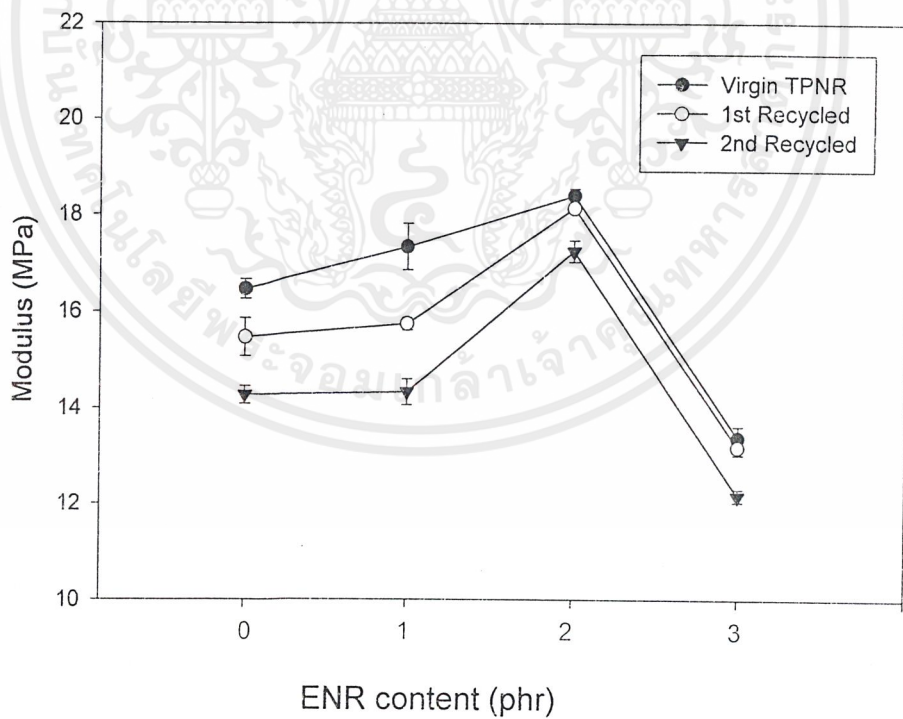
เมื่อนำ TPNR มาผ่านการรีไซเคิลพบว่า สมบัติเชิงกลต่าง ๆ มีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อย (น้อยกว่า 10%) เนื่องจากเมื่อจำนวนครั้งของการรีไซเคิลเพิ่มมากขึ้น อาจเกิดการเสียหาย (Degrade) บางส่วน เป็นผลมาจาก TPNR ได้รับความร้อนสูงขณะทำการขึ้นรูป



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของ TPNR กับปริมาณ ENR

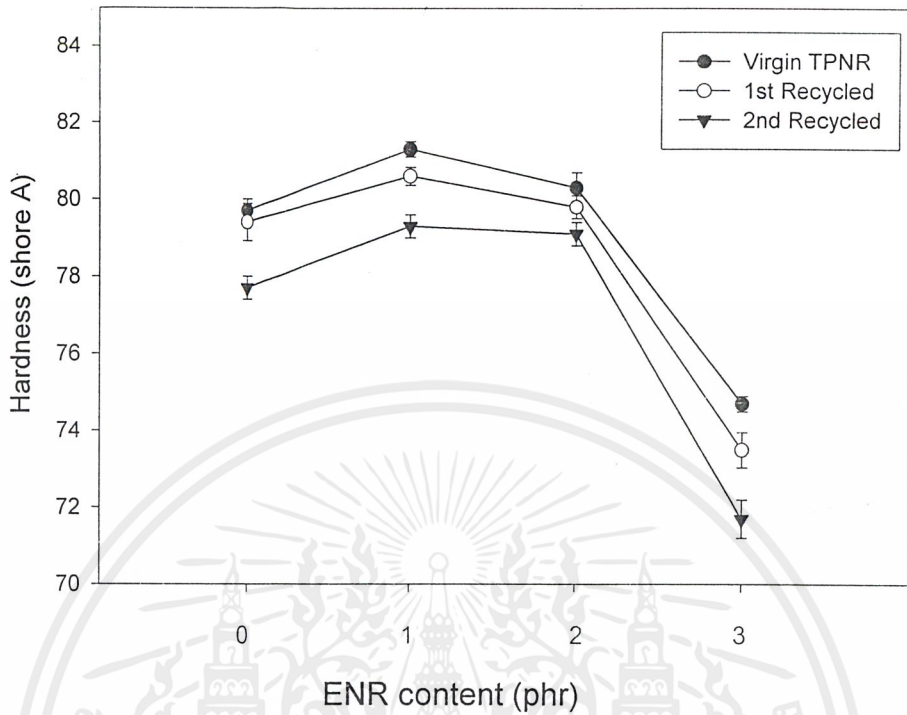


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของ TPNR กับปริมาณ ENR

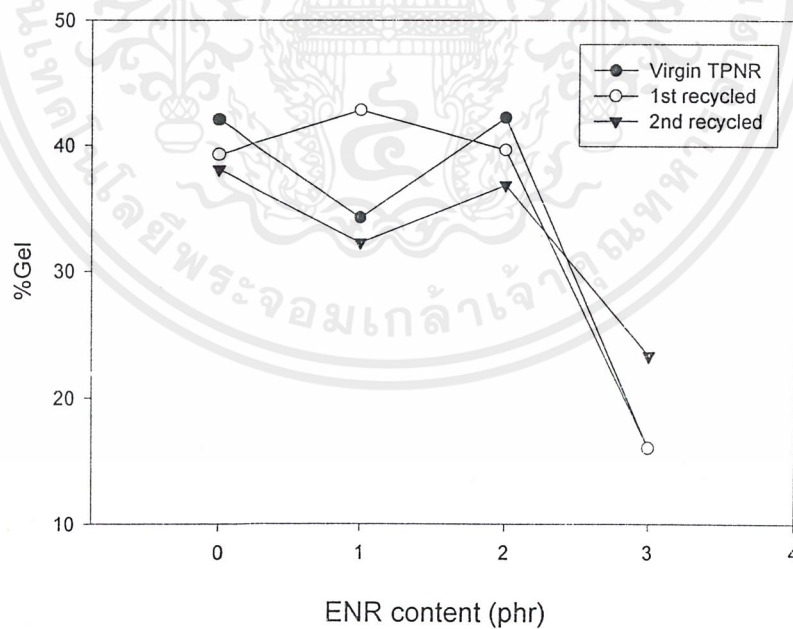


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสของ TPNR กับปริมาณ ENR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

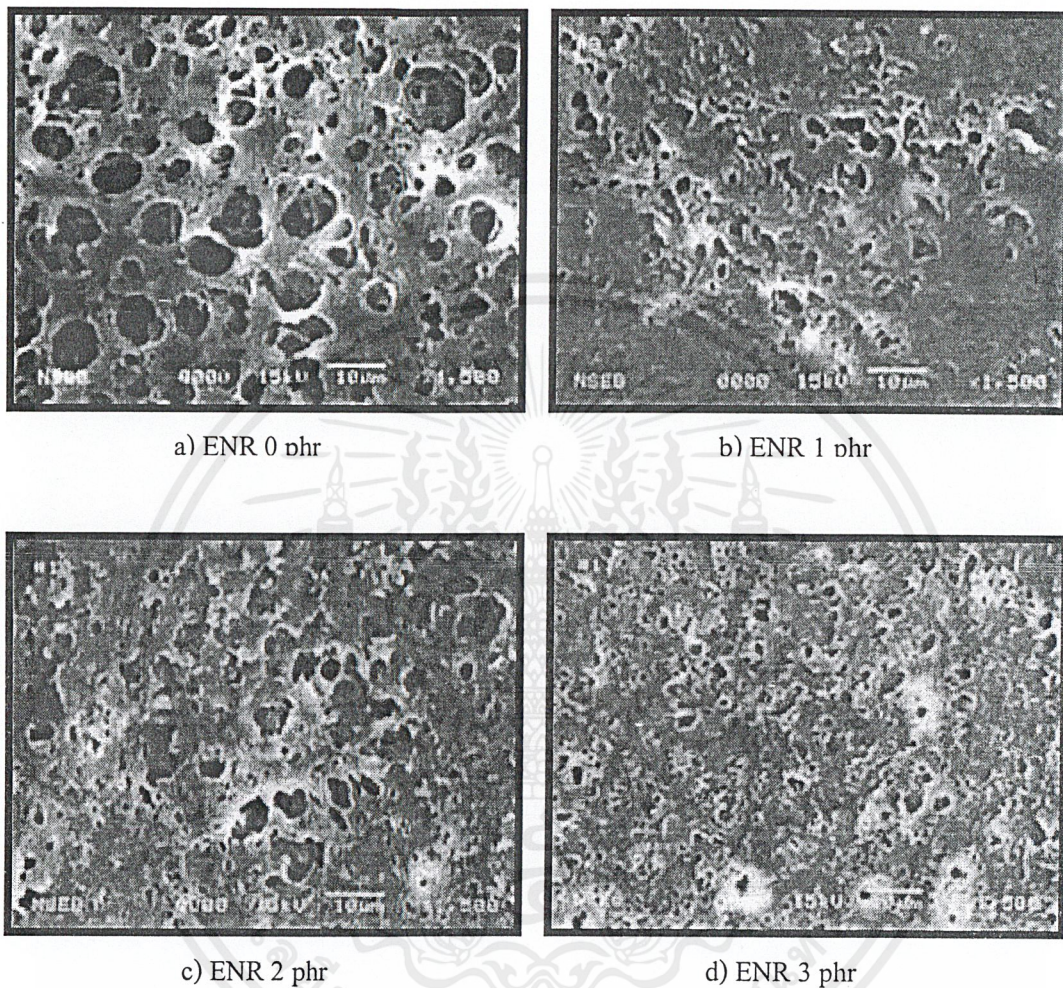


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของ TPNR กับปริมาณ ENR



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เจลของ TPNR กับปริมาณ ENR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 สัณฐานวิทยาของ TPNR (NR/LDPE = 60/40, DCP 0.5 phr) ที่มีปริมาณ ENR

1 2 และ 3 phr กำลังขยาย 1500 เท่า

a) TPNR ที่มีปริมาณ ENR 0 phr b) TPNR ที่มีปริมาณ ENR 1 phr

c) TPNR ที่มีปริมาณ ENR 2 phr d) TPNR ที่มีปริมาณ ENR 3 phr

4.3.2 การใช้สารช่วยผสมระหว่างยางธรรมชาติชนิดอีพอกซีไดซ์ (Epoxydised Natural Rubber; ENR) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PE-g-MA) เป็นสารช่วยผสม

การใช้ยางธรรมชาติชนิดอีพอกซีไดซ์ (Epoxydised Natural Rubber; ENR) เป็นสารช่วยผสมน่าจะมีประสิทธิภาพดีเมื่อใช้ผลิตภัณฑ์ผสม (Polymer blends) กับพอลิเมอร์ที่มีขี้ และจากผลการทดลองข้างต้น ENR ทำหน้าที่คล้ายพลาสติกไซเซอร์ ช่วยให้วิภาคของยางมีความยืดหยุ่น ENR เข้าไปรวมอยู่กับส่วนที่เป็นยางเท่านั้น ไม่ปรับปรุงสมบัติการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวิภาคของยางกับพลาสติก ด้วยเหตุนี้จึงต้องหาส่วนที่มาเชื่อมระหว่างวิภาคของยางและพลาสติก โดยเลือก พอลิเอทิลีนชนิดต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PE-g-MA) ซึ่งคาดว่าส่วนของมาเลอิกแอนไฮไดรด์จะเชื่อมกับหมู่อีพอกซีของ ENR และพอลิเอทิลีน (PE) จะเกี่ยวพันกับวิภาคของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) โดยกำหนดให้อัตราส่วนของ ENR:PE-g-MA เท่ากับ 1:3 เนื่องจาก ENR ที่มีเปอร์เซ็นต์อีพอกซีไดซ์ 3 เปอร์เซ็นต์ และ PE-g-MA มีเปอร์เซ็นต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ 1%

ขั้นตอนในการผสมสารช่วยผสมลงในยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติก แบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

วิธีที่ 1 ทำการผสม PE-g-MA ลงไปพร้อมกับ LDPE จากนั้นใส่ ENR ลงไปพร้อมกับยางผสมสูตร

วิธีที่ 2 เตรียมสารช่วยผสมระหว่าง ENR และ PE-g-MA ก่อนแล้วจึงนำสารที่เตรียมได้ใส่ลงไปพร้อมกับ LDPE ในขั้นตอนการผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

4.3.2.1 การใช้สารช่วยผสมระหว่างยางธรรมชาติชนิดอีพอกซีไดซ์ (Epoxydised Natural Rubber; ENR) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PE-g-MA) เป็นสารช่วยผสม โดยการผสมแบบวิธีที่ 1

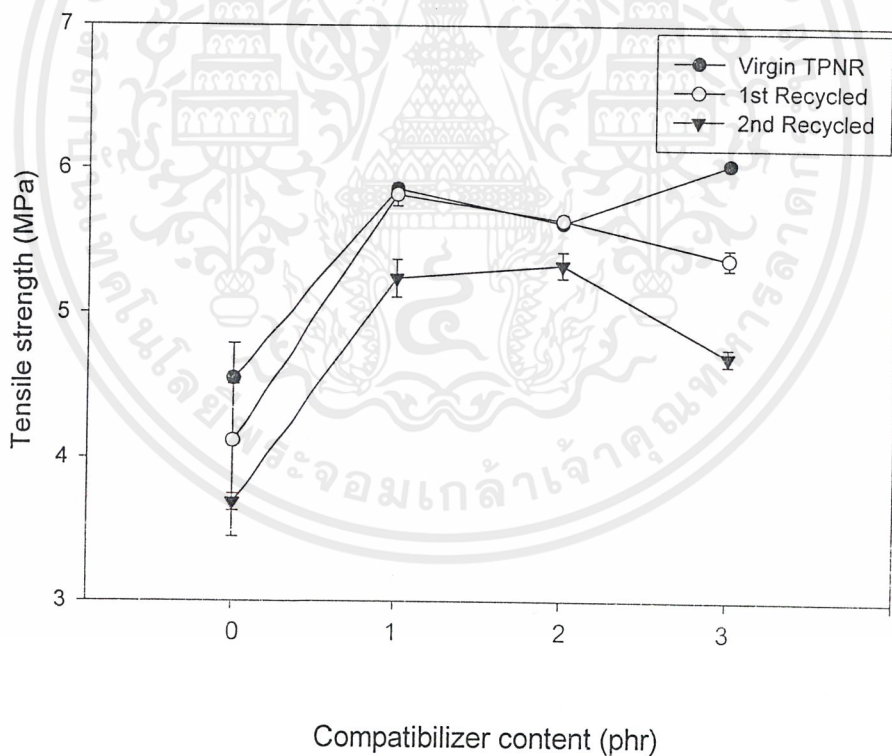
การเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ด้วยเครื่องบราวนเดอร์พลาสติกอร์เดอร์ที่มีความเร็วรอบโรเตอร์ 60 รอบต่อนาที อุณหภูมิที่ใช้ในการผสม 150°C และเวลาในการผสม 5 นาที โดย TPNR มีปริมาณสารช่วยผสมรวม 1 2 และ 3 phr

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมรวม เปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด ค่าความแข็งแรงและค่าเปอร์เซ็นต์เจลมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก อาจเนื่องมาจาก PE-g-MA และ ENR ที่เติมลงไปไม่ทำปฏิกิริยากันและ/หรือไม่ได้เข้าไปแทรกอยู่ระหว่างพื้นผิวของทั้งสองวิภาคจึงไม่ช่วยเพิ่มแรงยึดติดระหว่างวิภาค ส่วนค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสมีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากในสารช่วยผสมรวมมีส่วนของ PE-g-MA ที่เป็นวิภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

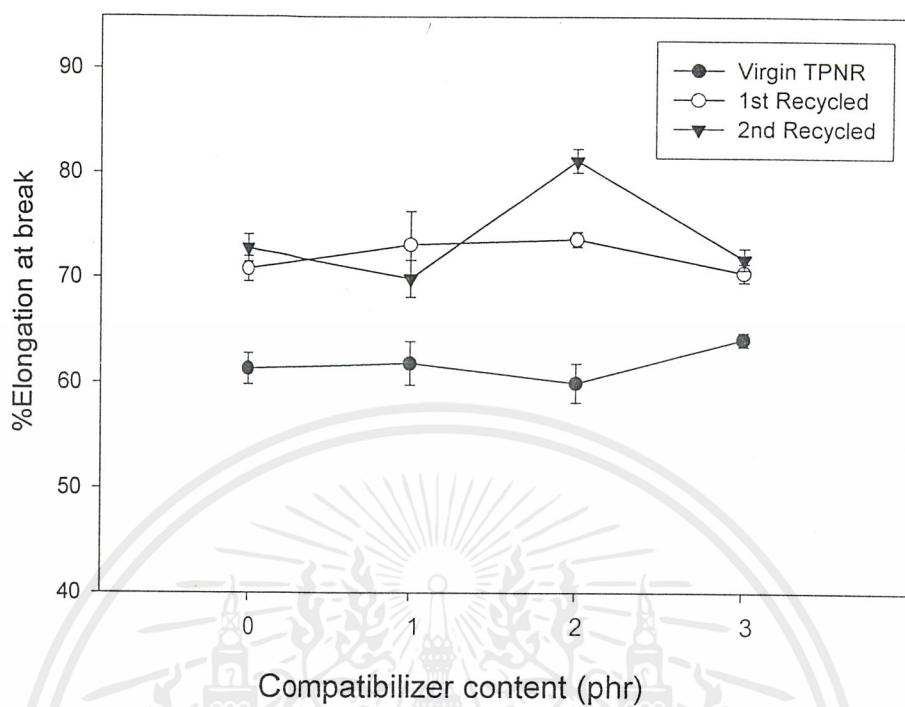
ของพลาสติกเพิ่มเข้ามา ซึ่งเป็นส่วนแข็งในโครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เมื่อนำ TPNR มาผ่านการรีไซเคิลพบว่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ มีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อย เช่นเดียวกับกรณีที่ใช้ ENR เป็นสารช่วยผสม

จากรูปที่ 4.28 แสดงสัมพันธภาพที่พื้นผิวของ TPNR ที่มีปริมาณสารช่วยผสมร่วม 1 2 และ 3 phr พบว่าเมื่อปริมาณสารช่วยผสมร่วมเพิ่มมากขึ้น ปริมาณ ENR เพิ่มมากขึ้น ทำให้การกระจายตัวดีขึ้น เนื่องจากในการผสมเกิดแรงเฉือน เกิดการผสมดีขึ้น ทำให้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่แตกออกเป็นขนาดเล็ก แต่ในการผสมแต่ละบริเวณได้รับแรงเฉือนไม่เท่ากัน บริเวณที่เกิดแรงเฉือนน้อย อนุภาคที่มีขนาดเล็กอาจกลับมารวมตัวกันเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ได้ ดังนั้นเมื่อเติมสารช่วยผสมลงไป สารช่วยผสมอาจจะเรียงตัวอยู่ระหว่างพื้นผิวของแต่ละภูมิภาค ช่วยป้องกันไม่ให้อนุภาคเล็ก ๆ ที่กระจายตัวอยู่กลับมารวมกัน ดังนั้นภูมิภาคของ LDPE จึงมีขนาดเล็กลง เมื่อปริมาณสารช่วยผสมมากขึ้น

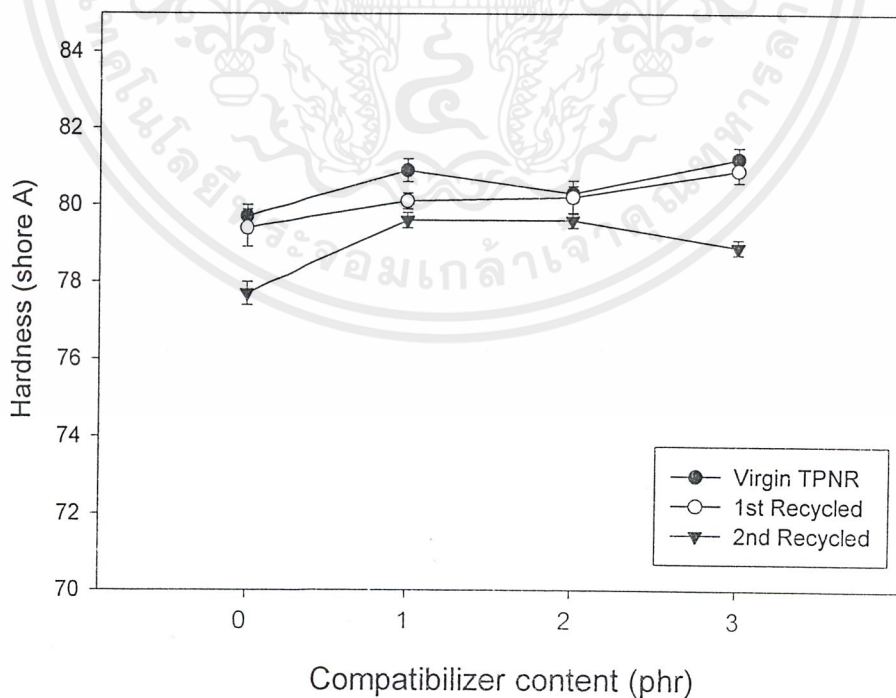


รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของ TPNR กับปริมาณสารช่วยผสมร่วม (การผสมวิธีที่ 1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

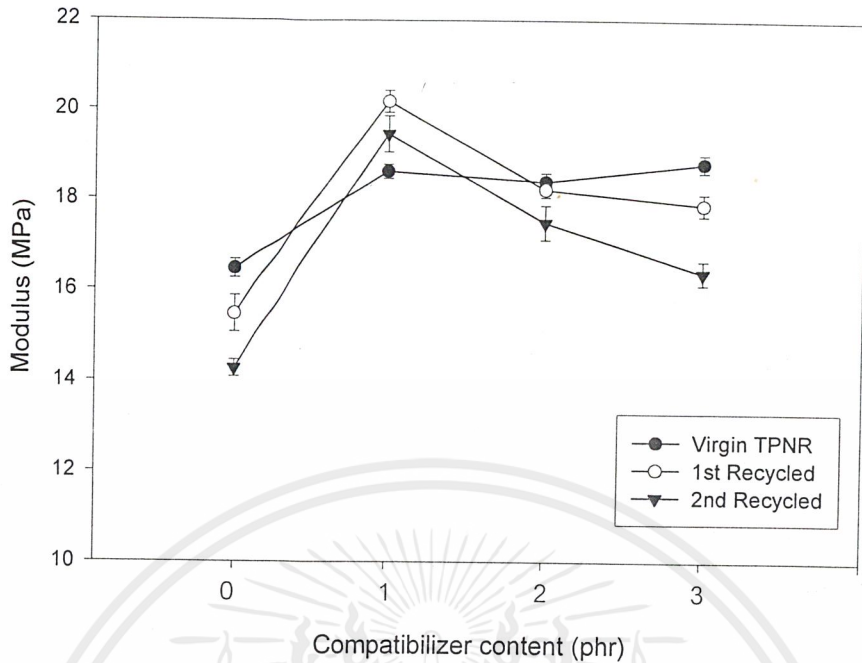


รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ของ TPNR กับปริมาณสารช่วยผสมร่วม (การผสมวิธีที่ 1)

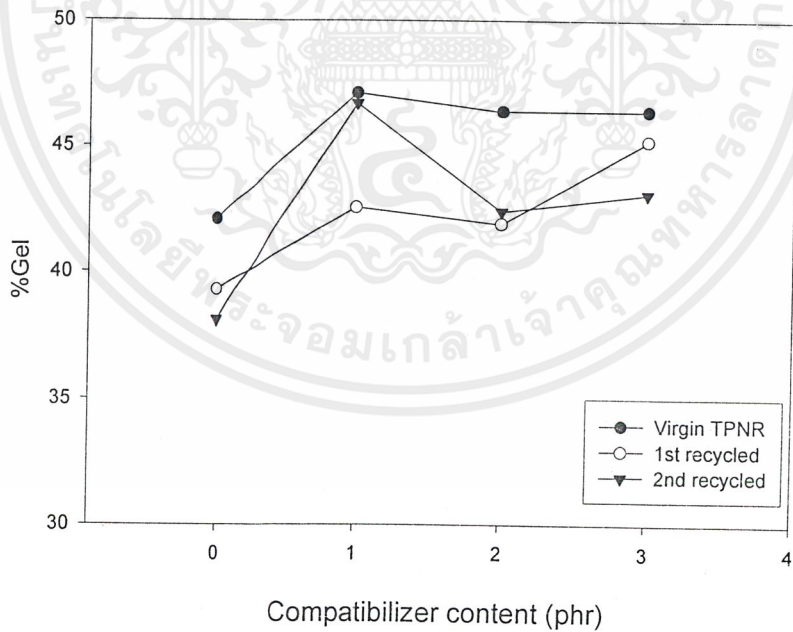


รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของ TPNR กับปริมาณสารช่วยผสมร่วม (การผสมวิธีที่ 1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

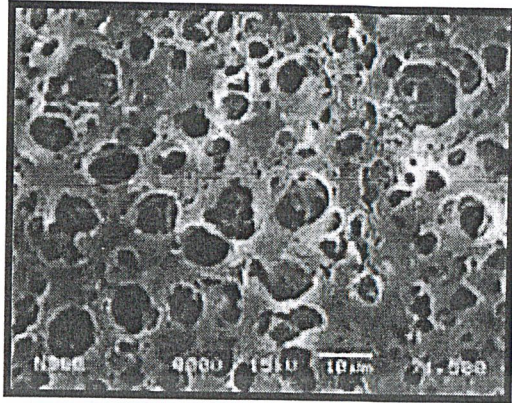


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความมอดุลัสของ TPNR กับปริมาณสารช่วยผสมรวม (การผสมวิธีที่ 1)

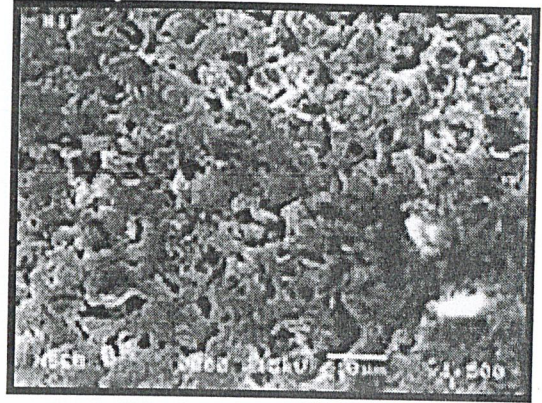


รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เจลของ TPNR กับปริมาณสารช่วยผสมรวม (การผสมวิธีที่1)

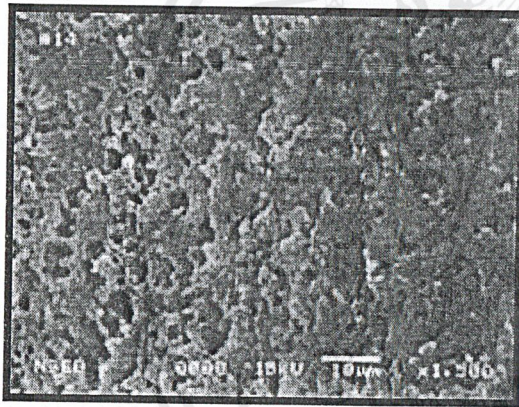
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



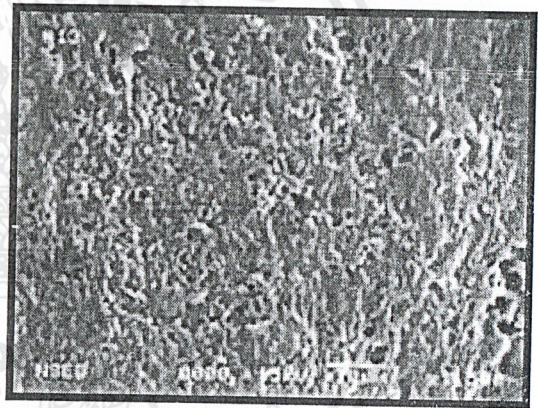
a) สารช่วยผสมร่วม 0 phr



b) สารช่วยผสมร่วม 1 phr



c) สารช่วยผสมร่วม 2 phr



d) สารช่วยผสมร่วม 3 phr

รูปที่ 4.28 สัณฐานวิทยาของ TPNR (NR/LDPE = 60/40, DCP 0.5 phr) ที่มีปริมาณสารช่วยผสมร่วมระหว่าง ENR และ PE-g-MA โดยใช้วิธีการผสมวิธีที่ 1 ที่กำลังขยาย 1500 เท่า

- a) TPNR ที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสมร่วม b) TPNR ที่มีปริมาณสารช่วยผสมร่วม 1 phr
 b) TPNR ที่มีปริมาณสารช่วยผสมร่วม 2 phr d) TPNR ที่มีปริมาณสารช่วยผสมร่วม 3 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2.2 การใช้สารช่วยผสมระหว่างยางธรรมชาติชนิดอีพอกซีไดซ์ (Epoxydised Natural Rubber; ENR) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PE-g-MA) เป็นสารช่วยผสม โดยการผสมแบบวิธีที่ 2

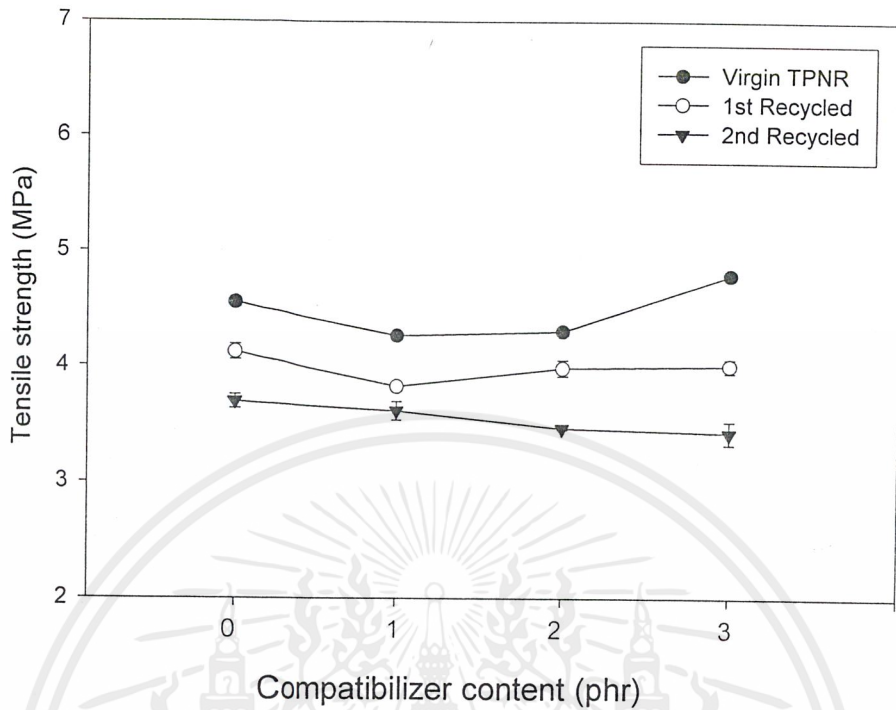
จากผลการทดลองของวิธีที่ 1 พบว่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากสารช่วยผสมทั้งสองชนิดไม่ทำปฏิกิริยากัน ดังนั้นจึงเปลี่ยนวิธีการผสมมาเป็นวิธีที่ 2 เพื่อให้สารทั้งสองชนิดทำปฏิกิริยากันก่อนแล้วจึงนำมาใช้เป็นสารช่วยผสมร่วมในการเตรียม TPNR

จากการทดสอบสมบัติของ TPNR ที่เตรียมได้พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมร่วม โดยการผสมวิธีที่ 2 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ค่าความแข็งแรงดัด เปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่อเทียบกับ TPNR ที่ไม่มีสารช่วยผสม เนื่องจากสารช่วยผสมร่วมไม่ได้เข้าไปแทรกอยู่ระหว่างวัฏภาคของยางและพลาสติก จึงไม่เพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัฏภาค ส่วนค่าความแข็งแรงดัด และค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งมีเหตุผลเดียวกับกรณีที่ใช้สารผสมร่วม โดยการผสมวิธีที่ 1

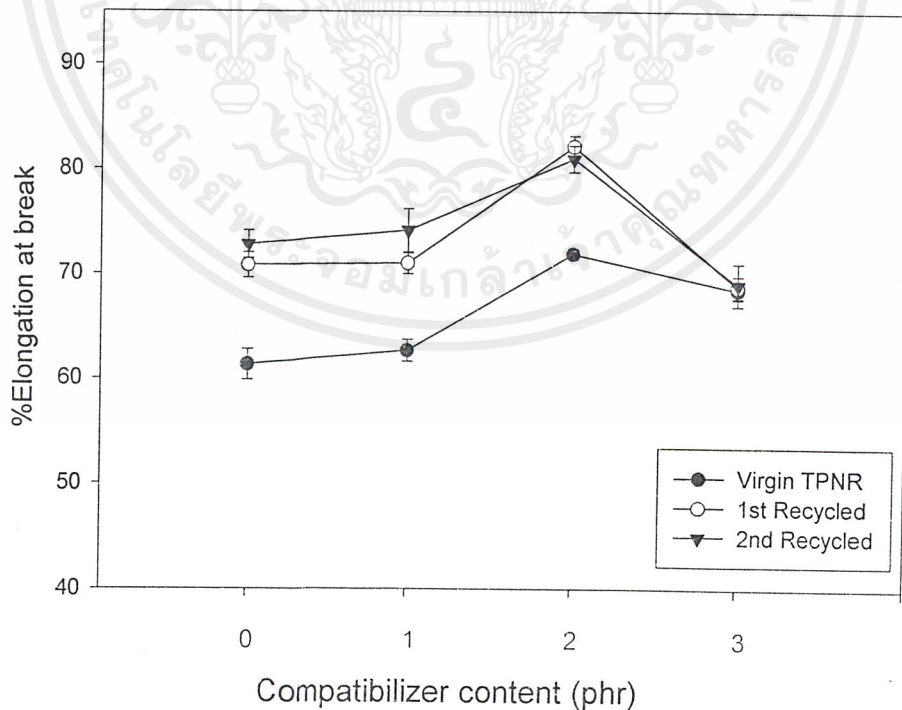
ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์เจลมีแนวโน้มลดลง อาจเนื่องมาจาก สารช่วยผสมร่วมในวิธีนี้ นำมาผสมกันก่อน สารช่วยผสมร่วมอาจเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน ไม่ช่วยให้มีการเชื่อมโยงระหว่างวัฏภาคของยางและพลาสติก และไม่กระจายตัวไปอยู่ระหว่างพื้นผิวของวัฏภาค เมื่อทำการสกัดด้วยตัวทำละลาย สารช่วยผสมตรงส่วนนี้อาจหลุดออกไป

เมื่อนำ TPNR มาผ่านกระบวนการรีไซเคิลพบว่า มีแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณีที่ใช้สารผสมร่วม โดยการผสมวิธีที่ 1

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมร่วมทำให้วัฏภาคของ LDPE มีขนาดเล็กลงและการกระจายตัวดีขึ้น เหตุผลเช่นเดียวกับกรณีที่ใช้สารผสมร่วม โดยการผสมวิธีที่ 1

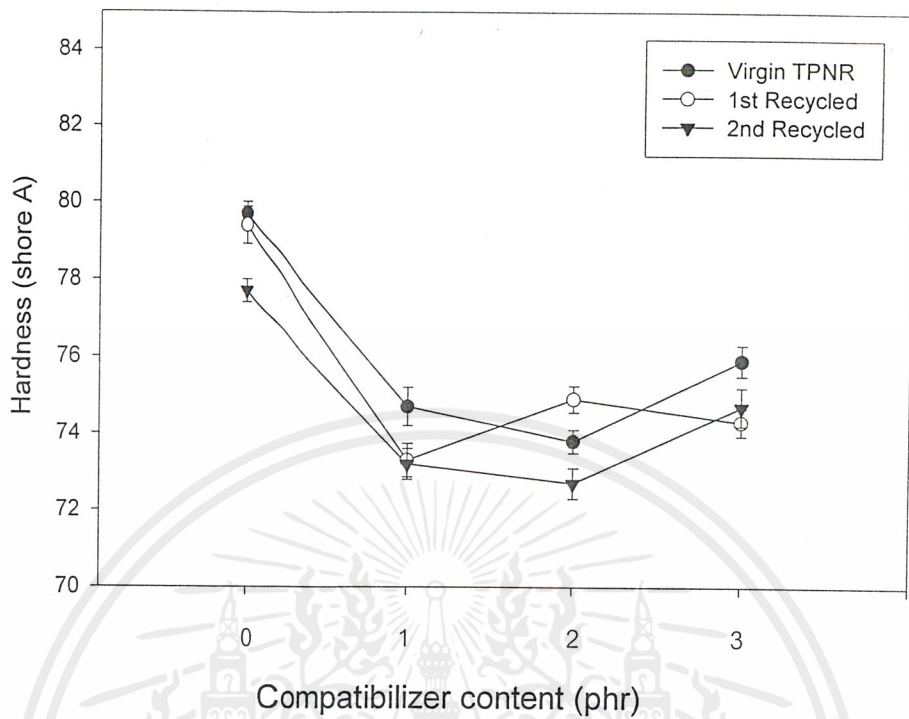


รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของ TPNR กับปริมาณสารช่วยผสมร่วม (การผสมแบบที่ 2)

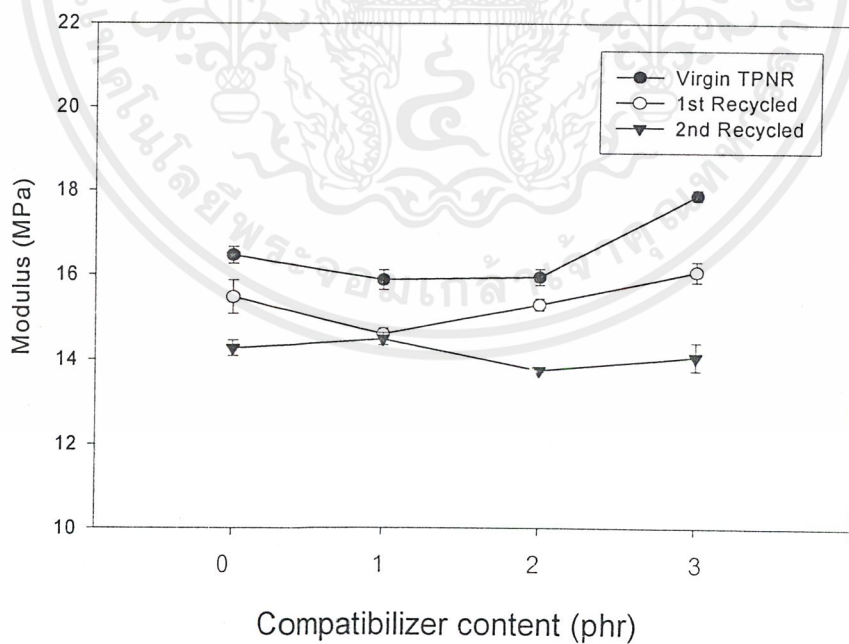


รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของ TPNR กับปริมาณสารช่วยผสม (ผสมแบบที่ 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

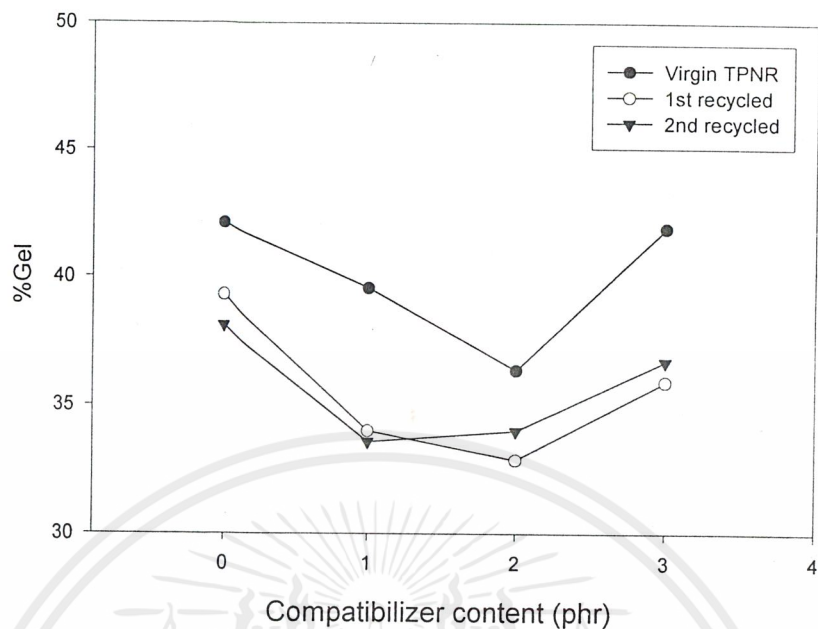


รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของ TPNR กับปริมาณสารช่วยผสมร่วม (การผสมแบบที่ 2)



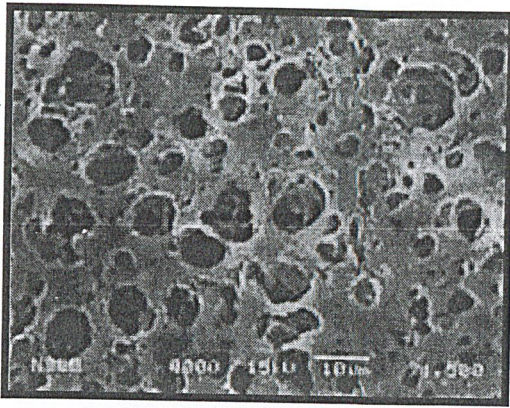
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสของ TPNR กับปริมาณสารช่วยผสมร่วม (การผสมแบบที่ 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

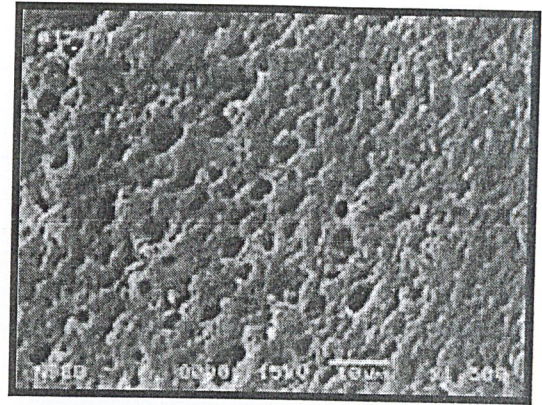


รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เจลของ TPNR กับปริมาณสารช่วยผสมร่วม (การผสมวิธีที่ 2)

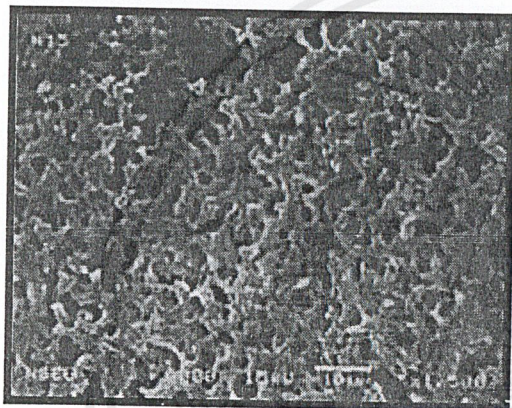
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



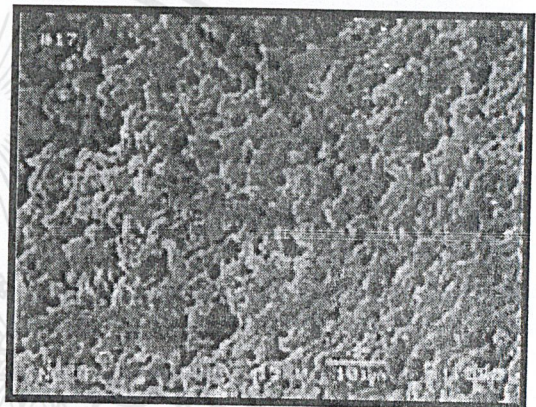
a) สารช่วยผสมร่วม 0 phr



b) สารช่วยผสมร่วม 1 phr



c) สารช่วยผสมร่วม 2 phr



d) สารช่วยผสมร่วม 3 phr

รูปที่ 4.34 สัณฐานวิทยาที่พื้นผิวของ TPNR (NR/LDPE = 60/40, DCP 0.5 phr) ที่มีปริมาณสารช่วยผสมร่วมระหว่าง ENR และ PE-g-MA โดยใช้วิธีการผสมวิธีที่ 2 ที่กำลังขยาย 1500 เท่า

- a) TPNR ที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสมร่วม b) TPNR ที่มีปริมาณสารช่วยผสมร่วม 1 phr
c) TPNR ที่มีปริมาณสารช่วยผสมร่วม 2 phr d) TPNR ที่มีปริมาณสารช่วยผสมร่วม 3 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermal Analysis)

4.4.1 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย Thermogravimetric Analyzer (TGA)

TGA เป็นเทคนิคหนึ่งของการวิเคราะห์โดยอาศัยหลักความร้อน (Thermal Analysis, TA) นำมาใช้ประโยชน์มากโดยเฉพาะการหาความทนทานต่อความร้อน (Thermal Stability) และหาองค์ประกอบทางเคมีของสาร

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย TGA

| สารตัวอย่าง | อุณหภูมิสูงสุด ในการสลายตัว ช่วงที่ 1 (°C) | อุณหภูมิสูงสุด ในการสลาย ตัวช่วงที่ 2 (°C) | อุณหภูมิใน การสลายตัว ช่วงที่ 1 (°C) | อุณหภูมิใน การสลายตัว ช่วงที่ 2 (°C) |
|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Low density polyethylene | - | 483 | 420-510 | - |
| PE-g-MA | - | 492 | 415-520 | - |
| NR + DCP 0.5 phr | 390 | - | 325-465 | - |
| NR/LDPE + DCP 0.5 phr / Virgin | 384 | 473 | 320-425 | 425-505 |
| NR/LDPE + DCP 0.5 phr /1 st Recycled | 390 | 478 | 335-430 | 430-505 |
| NR/LDPE + DCP 0.5 phr /2 nd Recycled | 391 | 479 | 340-425 | 425-505 |
| NR/LDPE + DCP 1.0 phr / Virgin | 392 | 482 | 330-430 | 430-505 |
| NR/LDPE + DCP 1.5 phr / Virgin | 392 | 483 | 325-430 | 430-510 |
| NR/LDPE + DCP 0.5 phr+ Peptizer0.75 phr | 390 | 480 | 330-430 | 430-510 |
| NR/LDPE + DCP 0.5 phr+3%ENR 3 phr | 389 | 484 | 325-430 | 430-505 |
| NR/LDPE+ DCP 0.5 phr + mixed compatibilizer 3 phr (Method I) | 391 | 487 | 330-440 | 440-510 |
| NR/LDPE + DCP 0.5 phr+ mixed compatibilizer 3 phr (Method II) | 360 | 460 | 310-410 | 410-495 |

เนื่องจาก TPNR เป็นพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR ซึ่งมีอุณหภูมิในการสลายตัวสูงสุดที่ 390°C และ LDPE มีอุณหภูมิในการสลายตัวสูงสุดที่ 483°C ดังนั้น TPNR จึงมีอุณหภูมิในการสลายตัวสูงสุด 2 ค่า คือ ที่ 384°C และ 473°C เมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยงมีผลทำให้อุณหภูมิสูงสุดในการสลายตัวมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากเกิดการเชื่อมโยงมากขึ้น โครงสร้างมีความแข็งแรง ต้องใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนในการเริ่มสลายตัวสูงขึ้น ส่วน TPNR ที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิล อุณหภูมิในการสลายตัวสูงสุดใกล้เคียงกับ TPNR ที่ยังไม่ได้ผ่านการรีไซเคิล และเมื่อเติมสารตัดสายโซ่โมเลกุล ENR และสารช่วยผสมรวมลงไปมีผลทำให้อุณหภูมิสูงสุดในการสลายตัวเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

4.4.2 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย Differential Scanning Calorimeter (DSC)

การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC เป็นการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน โดยการหาอุณหภูมิในการหลอมเหลว (T_m) ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวหรือความร้อนที่ใช้ในการเกิดผลึก (ΔH_f) และยังสามารถทราบถึงเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของวัสดุได้

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DSC

| สารตัวอย่าง | T_m ($^{\circ}\text{C}$) | ΔH_f (J/g) | % Crystallinity |
|------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------|--------------------|
| Low density polyethylene | 108 | 94.25 | 32 |
| NR/LDPE + DCP 0.5 phr | 108 | 36.95 | 32 |
| NR/LDPE + DCP 0.5 phr + Peptizer 0.75 phr | 108 | 23.70 | 20 |
| NR/LDPE + DCP 0.5 phr + 3%ENR 3 phr | 108 | 23.33 | 20 |
| NR/LDPE + DCP 0.5 phr + mixed compatibilizer 3 phr (Method I) | 108 | 34.02 | 29 |
| NR/LDPE + DCP 0.5phr + mixed compatibilizer 3 phr (Method II) | 108 | 24.49 | 21 |

การคำนวณเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่ 100% LDPE

$$\% \text{ Crystallinity} = \frac{\Delta H_f / 0.4}{\Delta H_f^0} \times 100 \quad \dots(3.4)$$

เมื่อ ΔH_f = เอนทาลปีของการหลอมเหลวพอลิเอทิลีน
ตัวอย่าง (J/g)

ΔH_f^0 = เอนทาลปีของการหลอมเหลวพอลิเอทิลีนที่มี
ความเป็นผลึก 100% ซึ่งมีค่าเท่ากับ 293 J/g [17]

ตัวอย่างการคำนวณ เช่นที่ปริมาณ DCP 0.5 phr

$$\% \text{ Crystallinity} = \frac{36.95 / 0.4}{293} \times 100 = 31.53\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางผลการทดลองพบว่า เมื่อทำการผสมระหว่างยางธรรมชาติ (NR) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เพื่อเตรียมเป็นยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติก (TPNR) แล้วเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ลดลง เนื่องจากมียางธรรมชาติเข้าไปแทรกระหว่างสายโซ่ของ LDPE ขัดขวางการจัดเรียงตัวของ LDPE เมื่อพิจารณากรณีที่ใส่สารตัดสายโซ่ลงใน TPNR เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ TPNR ลดลง เนื่องจากสารตัดสายโซ่เข้าไปลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ (NR) ทำให้ NR เข้ากันได้ดีกับ LDPE การกระจายตัวของ LDPE ในวัฏภาคยางเกิดได้ดีขึ้น สายโซ่โมเลกุลของ LDPE มีการจัดเรียงตัวกันได้ยากกว่าเดิม การตกผลึกจึงลดลง และน้อยกว่ากรณีที่ไม่มีเติมสารตัดสายโซ่ สำหรับกรณีที่ศึกษาสารช่วยผสม สารช่วยผสมที่ใช้คือ ENR และ สารช่วยผสมร่วม (ENR + PE-g-MA) พบว่าสารช่วยผสมร่วมทำให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ LDPE ลดลง เนื่องจากสารช่วยผสมร่วมเข้าไปแทรกระหว่างวัฏภาคระหว่าง NR และ LDPE ทำให้การกระจายของ LDPE ดีขึ้น ทำให้ LDPE มีโอกาสจัดเรียงตัวได้ยาก การเกิดผลึกของ LDPE จึงลดลง

4.4.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย Dynamic Mechanical Thermal Analyzer (DMTA)

การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DMTA เป็นการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนเชิงกล โดยเป็นการหาอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) และค่า $\tan \delta$ ซึ่งบอกถึงความยืดหยุ่น

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DMTA

| สารตัวอย่าง | T_g ($^{\circ}\text{C}$) | $\tan \delta$ |
|----------------------------------------------------------------|------------------------------|---------------|
| NR + DCP 0.5 phr | -49.0 | 1.30 |
| NR/LDPE + DCP 0.5 phr / Virgin | -50.8 | 0.39 |
| NR/LDPE + DCP 0.5 phr / 1 st Recycled | -49.3 | 0.41 |
| NR/LDPE + DCP 0.5 phr / 2 nd Recycled | -49.0 | 0.43 |
| NR/LDPE + DCP 1.0 phr / Virgin | -50.5 | 0.40 |
| NR/LDPE + DCP 1.5 phr / Virgin | -49.5 | 0.40 |
| NR/LDPE + DCP 0.5 phr + Peptizer 0.75 phr | -51.9 | 0.37 |
| NR/LDPE + DCP 0.5 phr + 3%ENR 3 phr | -50.9 | 0.42 |
| NR/LDPE + DCP 0.5 phr + Mixed compatibilizer 3 phr (Method I) | -54.7 | 0.37 |
| NR/LDPE + DCP 0.5 phr + Mixed compatibilizer 3 phr (Method II) | -51.4 | 0.38 |

จากการทดสอบ เมื่อมีการเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยงใน TPNR พบว่าค่า T_g ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เนื่องจากปริมาณ DCP ที่เติมลงไปแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ส่วน TPNR ที่ผ่านการรีไซเคิล มีค่า T_g ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แสดงว่าเกิดการเชื่อมโยงมากขึ้นเมื่อผ่านการรีไซเคิล น่าจะไม่มีผลต่อค่า T_g ของ TPNR และเมื่อเติมสารตัดสายโซ่ (Peptizer) ทำให้ค่า T_g ลดลงเล็กน้อย เนื่องจากสารตัดสายโซ่ไปลดน้ำหนักโมเลกุลของ TPNR สายโซ่เคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น ส่วนการเติมสารช่วยผสมชนิดอีพอกซีไดซ์ (ENR) และสารช่วยผสมร่วมวิธีที่ 1 ทำให้ค่า T_g ลดลงเล็กน้อยเช่นกัน เนื่องจาก ENR ช่วยทำให้ความเข้ากันได้ของยางธรรมชาติและ LDPE มีมากขึ้นทำให้สายโซ่ของยางเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นและเมื่อเปลี่ยนการผสมสารช่วยผสมร่วมมาเป็นวิธีที่ 2 พบว่า ค่า T_g เพิ่มขึ้น เนื่องจากการผสมวิธีนี้ทำให้เกิดการยึดกันของสายโซ่ระหว่าง ENR กับ PE-g-MA และเมื่อเติมลงไปใน TPNR ทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้ยาก

ส่วนค่า $\tan \delta$ ของยางธรรมชาติ มีค่าสูงกว่า TPNR เนื่องจาก TPNR เป็นการผสมกันระหว่างส่วนของยางและพลาสติกซึ่งมีความแข็ง ทำให้ความยืดหยุ่นของ TPNR มีค่าลดลง



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากการศึกษาผลของสารช่วยผสม ที่มีต่อสมบัติของยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติก (TPNR) ที่เตรียมได้จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และยางธรรมชาติ (NR) โดยแบ่งประเด็นศึกษาออกเป็น 7 ประเด็น ดังนี้

1. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติก

ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผสม TPNR ด้วยเครื่องบราเนนเคอร์พลาสติกอร์เคอร์ ได้เวลาที่ใช้ในการหลอมเหลว LDPE เท่ากับ 1.5 นาที ที่อุณหภูมิ 150°C

เมื่อศึกษาความเร็วรอบโรเตอร์ในการผสม TPNR พบว่าที่ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที ให้สมบัติเชิงกลสูงสุด

2. การศึกษาการเตรียมยางผสมสูตร

ศึกษาปริมาณสารเชื่อมโยงที่เหมาะสมในการเตรียมยางธรรมชาติผสมสูตรด้วยเครื่องวัดสมบัติการคงรูปของยาง โดยใช้ปริมาณ DCP 0.5 1.0 และ 1.5 phr เชื่อมโยงที่อุณหภูมิ $140-160^{\circ}\text{C}$ พบว่าที่ปริมาณสารเชื่อมโยงแตกต่างกัน ให้ค่า Scorch time (t_{s2}) และ Cure time (t_{90}) ไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นจึงเลือก DCP 0.5 phr ซึ่งได้ค่า Scorch time (t_{s2}) 2.5 นาที และ Cure time (t_{90}) 21 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสม เนื่องจากระยะเวลาดังกล่าวนานเพียงพอที่พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและยางผสมสูตรเกิดการผสมกันได้ ก่อนที่ยางจะเกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงร่างสามมิติขึ้น

ศึกษาปริมาณ DCP ที่เหมาะสมในการเตรียมยางธรรมชาติผสมสูตรจากสมบัติเชิงกลของ TPNR ที่เตรียมได้ ทำการเตรียม TPNR ด้วยเครื่องบราเนนเคอร์พลาสติกอร์เคอร์ โดยใช้ยางผสมสูตรที่มีปริมาณ DCP แตกต่างกัน คือ 0.5 1.0 และ 1.5 phr แล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าที่ปริมาณ DCP เท่ากับ 0.5 phr ให้ค่าสมบัติเชิงกลสูงสุด

ศึกษาปริมาณสารตัดสายโซ่ที่เหมาะสมในยางผสมสูตร เพื่อใช้ในการเตรียม TPNR โดยเตรียมจากยางผสมสูตรที่มีปริมาณสารตัดสายโซ่ 0.25 0.50 และ 0.75 phr พบว่า การเติมสารตัดสายโซ่ลงในยางผสมสูตรทำให้สมบัติเชิงกลลดลง

3. การศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

จากการศึกษาชนิดและปริมาณของสารช่วยผสมที่ 1 2 และ 3 phr พบว่าเมื่อใช้ ENR เป็นสารช่วยผสมในปริมาณ 3 phr ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดสูงสุดที่ 84% ส่วนค่าความแข็ง-

แรงดึง ค่ามอดุลัสและความแข็งแรงกมิกค่าสูงที่มีปริมาณ ENR 2 phr ในกรณีที่ใช้สารช่วยผสมเป็นสารช่วยผสมร่วมระหว่าง ENR กับ PE-g-MA พบว่าการผสมแบบวิธีที่ 1 ทำให้ TPNR ที่เตรียมได้มีค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสสูงขึ้น ส่วนเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดและค่าความแข็งแรงกมิกไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ส่วนการผสมแบบวิธีที่ 2 สมบัติเชิงกลโดยรวมไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมร่วม

4. การทดสอบสมบัติทางความร้อน

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA) พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการสลายตัวของ TPNR ที่เตรียมได้มี 2 ช่วง โดยที่ช่วงอุณหภูมิ 325-420°C เป็นอุณหภูมิที่ยางธรรมชาติเกิดการสลายตัว ส่วนช่วงที่ 2 อยู่ในช่วง 420-510°C เป็นช่วงอุณหภูมิที่ LDPE สลายตัว

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) พบว่าเมื่อเตรียมเป็น TPNR แล้วความเป็นผลึกของ LDPE ลดลง เนื่องจากยางไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของผลึก LDPE

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Dynamic Mechanical Thermal Analyzer (DMTA) พบว่าค่า T_g ของ TPNR ที่มีการเติมสารช่วยผสมมีค่าน้อยกว่า T_g ของ TPNR ที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสม ส่วนค่า $\tan \delta$ ของ TPNR มีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย และพบว่า TPNR มีค่า $\tan \delta$ น้อยกว่ายางธรรมชาติ เนื่องจากมีความยืดหยุ่นลดลง เป็นผลมาจาก LDPE ที่เติมลงไปนั่นเอง

5. การศึกษาสัณฐานวิทยาของ TPNR ที่เตรียมได้

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของ TPNR ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่า เมื่อมีการเติมสารช่วยผสม วัฏภาคของ LDPE ที่กระจายตัวในวัฏภาคของยางมีขนาดเล็กลง และการกระจายตัวดีขึ้น

6. การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เจล

จากการศึกษาเปอร์เซ็นต์เจล (% Gel) เมื่อปริมาณสารเชื่อมโยง (DCP) เพิ่มขึ้น มีผลทำให้เปอร์เซ็นต์เจลมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการเชื่อมโยงมากขึ้น เมื่อนำ TPNR มาผ่านการรีไซเคิลพบว่าทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ (Chain scission) จึงทำให้การเชื่อมโยงลดลง สำหรับกรณีที่มีการเติมสารตัดสายโซ่ (Peptizer) ทำให้เปอร์เซ็นต์เจลลดลง เนื่องจากสารตัดสายโซ่ทำหน้าที่ลดน้ำหนักโมเลกุลของยาง การเชื่อมโยงจึงลดลง เมื่อเติมสารช่วยผสมชนิดต่าง ๆ ลงใน TPNR มีแนวโน้มทำให้เปอร์เซ็นต์เจลลดลง เนื่องจากสารช่วยผสมเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างวัฏภาคของยางธรรมชาติและ LDPE ทำให้การเชื่อมโยงลดลง

7. การรีไซเคิล

เมื่อนำ TPNR มาผ่านการรีไซเคิล พบว่าสมบัติเชิงกลโดยรวมเปลี่ยนแปลงทั้งเพิ่มขึ้นและลดลงไม่ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ ในกรณีที่สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น เนื่องจาก TPNR ได้รับความร้อนและแรงเอกซาร์นี้ เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนียนซ้ำอาจทำให้เกิดการเชื่อมโยมมากขึ้น ส่วนในกรณีที่มีสมบัติลดลง เนื่องจากเกิดการเสียหายของสาย โഴพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อนเป็นเวลานาน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาถึงความหนืดและการไหลของวัสดุยางและพลาสติก เพื่อให้เกิดการผสมเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น
2. ควรศึกษาถึงชนิดของสารช่วยผสมเพิ่มเติม เช่น Ethylene octene copolymer, PE-g-PI เพื่อเพิ่มความแข็งแรงระหว่างวัสดุ
3. ควรศึกษาถึงน้ำหนักโมเลกุลของสารช่วยผสมที่มีผลต่อสมบัติของ TPNR



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. นิพนธ์ วงศ์วิเศษสิริกกุล “ปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์” คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ พ.ศ. 2537.
2. วราภรณ์ ขจรไชยกูล “การออกแบบสูตรยางและกระบวนการผลิต” ส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กรุงเทพฯ พ.ศ. 2541.
3. P. Laokijcharoen, “Overview and Classification of Thermoplastic Elastomers”, Seminar on Using Thermoplastic Elastomer, by National metal and materials technology center (MTEC), 2001.
4. C. A. Harper, “ Handbook of Plastics, Elastomers, and Composites”, 3 rd ed., McGraw – Hill Book CO., New York, 1998.
5. อิทธิพล แจ่มซัด “เทคโนโลยีการยาง” เอกสารประกอบการสอนวิชาเทคโนโลยีการยาง ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ พ.ศ. 2542.
6. C.S. Joseph, “Polymeric Material Encyclopedia”, Boca Raton: CRC Press, New York, 1994.
7. ชลลดา ฤตวิรุฬห์ “ปฏิบัติการเคมีอุตสาหกรรม 2” คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ พ.ศ. 2537.
8. P. Phinyocheep and S. Duangthong, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol 78, 1478-1485, 2000
9. G.I. Kim, S.H. Ryn and Y.W. Chang, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 77, 2595-2602, 2000
10. H.M. Dahlam, M.D.K. Zaman and A. Ibrahim, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.78, 1776-1782, 2000
11. I. Abdullah, S. Ahmad and C. S. Sulaman, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.58, 1125-1133, 1995
12. H. Ismail, J.M. Nizam and H.P.S.A. Khalil, *Polymer Testing* ,Vol.20, 125-133(2001)
13. S. Ahmad, I. Abdullah, C.S. Sulaiman, S. Kohjiya and J. R. Yoon , *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.51, 1357-1363(1994)
14. S. Al-Malaika and E.J. Amir, *Journal of Natural Rubber Research*, Vol.1, No.2, 104-121,1986

15. Q. Chaun, Y. Jinghua and H. Baotong, *Journal of Polymer*, Vol.31, 663-667,1990
16. จิระ เขียนอุบล พัทรี ศรีวงษ์ และไพโรจน์ บุญประโกลก “การศึกษาเทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง” โครงการงานพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ พ.ศ.2543
17. John Wiley & Sons, Inc., “Encyclopedia of Polymer Science and Engineering”, New York , 4, 487, 1986



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

สภาวะที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่อง Injection molding machine

TIME PROGRAMING

| | | | | | |
|---------------------|---|----|---------------|---|-----|
| DIE CLS/OPN TIME | : | 60 | MELTING TIME | : | 150 |
| SID-COR ACT TIME | : | 0 | DECOMPRS TIME | : | 20 |
| 1 ST STG INJ TIME | : | 20 | COOLING TIME | : | 180 |
| 2 ND STG INJ TIME | : | 10 | EJECTOR COUNT | : | 1 |
| 3 RD STG INJ TIME | : | 5 | SCW FWD TIME | : | 0 |
| EJECT FWD DLY TIME: | : | 10 | SCW BWD TIME1 | : | 0 |
| MELTING DLY TIME | : | 5 | SCW BWD TIME2 | : | 0 |
| EJE BKD DLY TIME | : | 20 | ALARM TIME | : | 500 |

PRESSURE PROGRAMING

| | | | | | |
|----------------|---|----|---------------|---|----|
| DIE CLSPRESR | : | 50 | DECOMP PRESR | : | 30 |
| CLS LOW PRESR | : | 30 | PLUNGER PRESR | : | 30 |
| CLS HI PRESR | : | 80 | EJECTOR PRESR | : | 50 |
| DIE OPN PRESR | : | 50 | SCW-IN PRESR | : | 20 |
| 1 ST INJ PRESR | : | 75 | DIE ADJ PRESR | : | 80 |
| 2 ND INJ PRESR | : | 75 | | | |
| 3 RD INJ PRESR | : | 75 | | | |
| MELTING PRESR | : | 50 | | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PROGRAMING FLOW SPEED

| | | | | | |
|---------------|---|----|------------------|---|----|
| RAPID CLS SPD | : | 40 | 1 ST STG INJ SPD | : | 80 |
| HIGH CLS SPD | : | 15 | 2 ND STG INJ SPD | : | 80 |
| CLAMPING SPD | : | 15 | 3 RD STG INJ SPD | : | 80 |
| DIE OPN SLW1 | : | 10 | MELTING SPD | : | 35 |
| RAPID OPN SPD | : | 25 | DECOMP SPD | : | 20 |
| DIE OPN SLW2 | : | 15 | EJECTOR SPD | : | 20 |
| PLUNGER SPD | : | 10 | SCREW-IN SPD | : | 0 |
| DIE ADJ SPD | : | 25 | DIE CHANGE SPD | : | 50 |

PROGRAMING TEMPERATURES

| PROGRAMED TEMP | | CURRENT TEMP |
|----------------|---|--------------|
| NOZZLE | : | 190 |
| ZONE 1 | : | 180 |
| ZONE 2 | : | 170 |
| ZONE 3 | : | 0 |
| ZONE 4 | : | 0 |
| ZONE 5 | : | 0 |
| ZONE 6 | : | 0 |

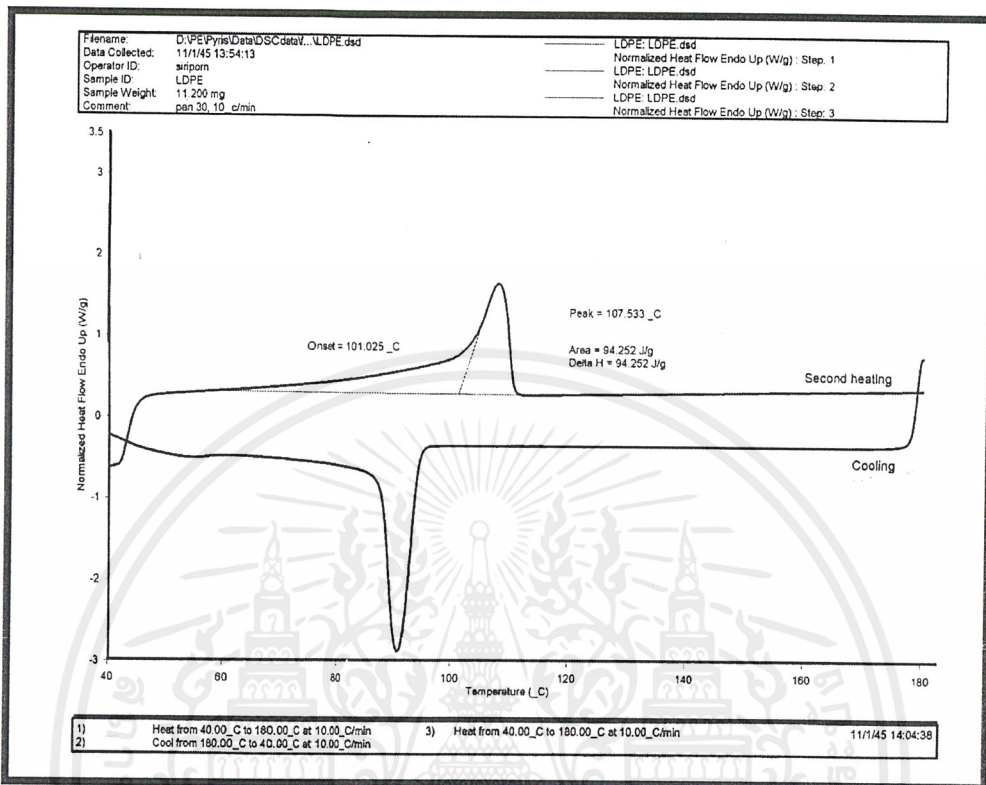
PROGRAMME OPTIONS

| | | | | |
|-------------|---|---|------------|------------------------|
| DIE CLS SPD | : | 1 | 1 = HI SPD | 2 = FASTSPD |
| PLUNGER SPD | : | 2 | 1 = USE | 2 = NO USE |
| ROBOTS | : | 2 | 1 =USE | 2 = NO USE |
| SCRW | : | 2 | 1 =USE | 2 = NO USE |
| EJECTOR | : | 1 | 1 =USE | 2 = NO USE 3 = SLD-COR |
| SID-COR | : | 2 | 1 = TIME | 2 = TRAVEL |

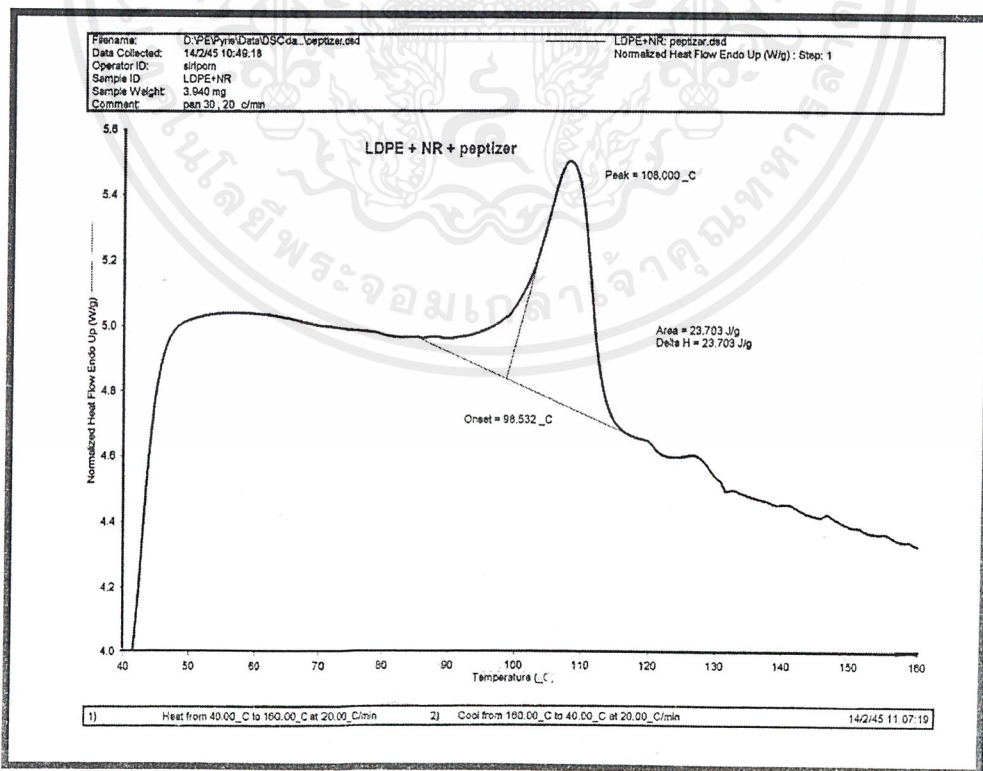
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DSC

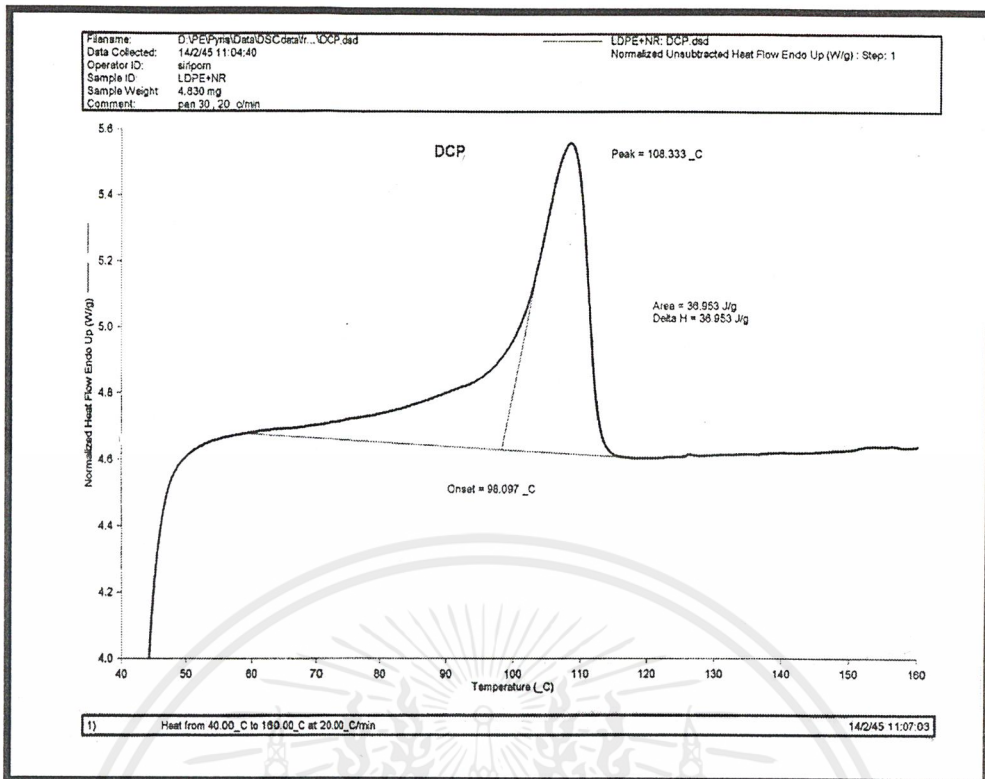


รูปที่ ข.1 เทอร์โมแกรม DSC ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

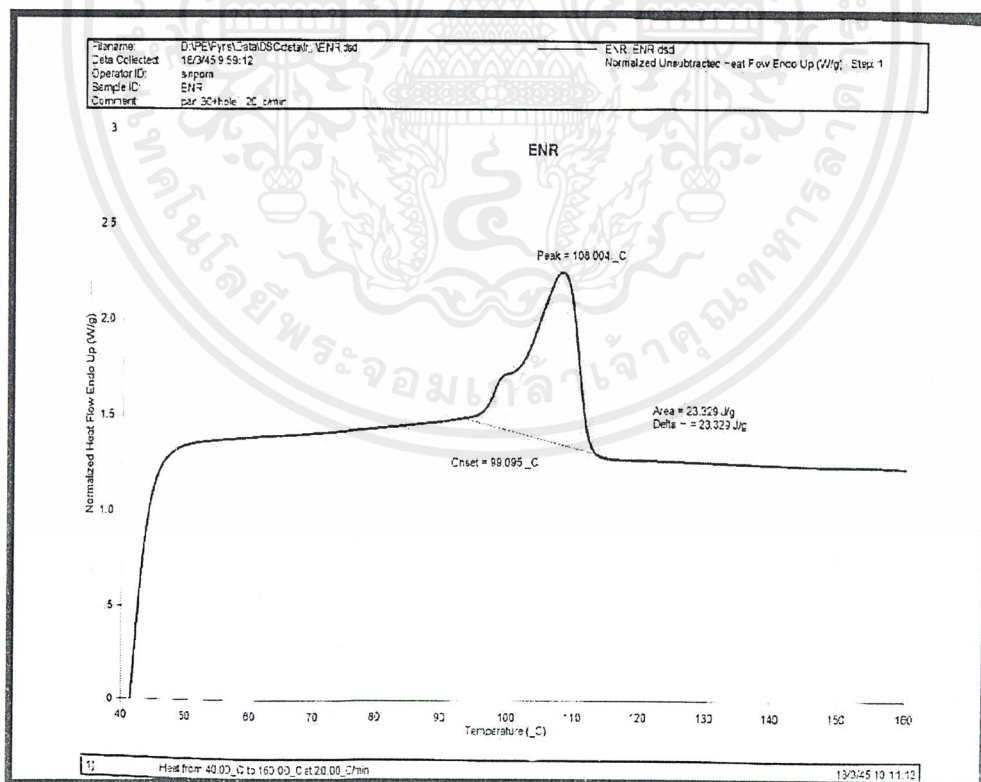


รูปที่ ข.2 เทอร์โมแกรม DSC ของ TPNR มีปริมาณ DCP 0.5 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

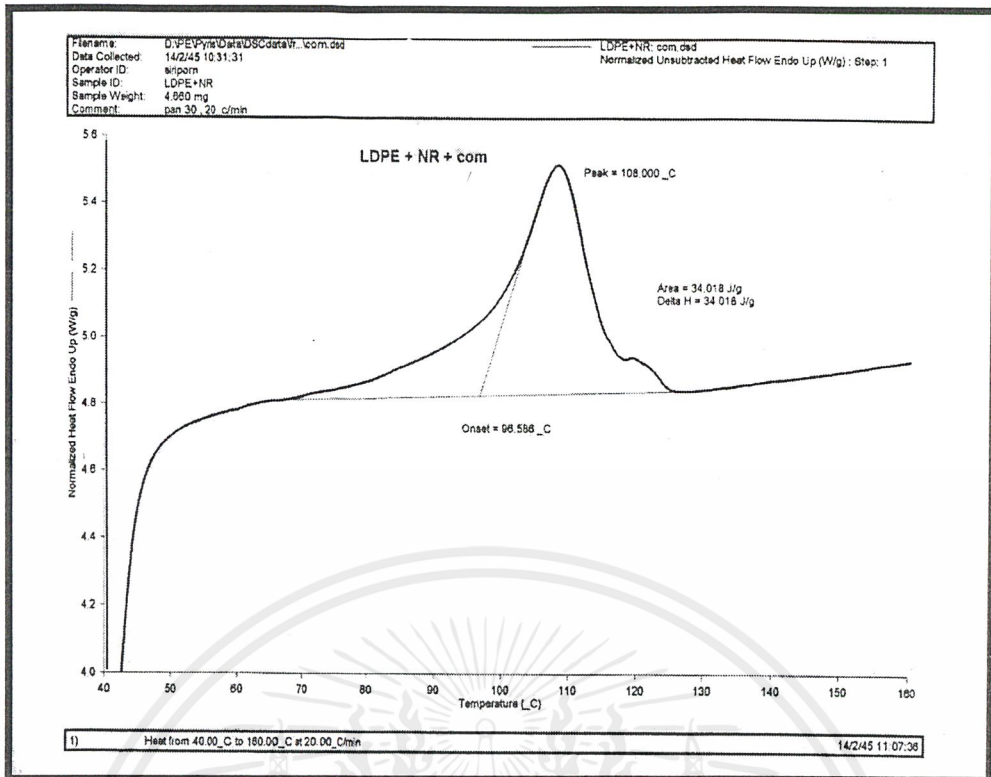


รูปที่ ข.3 เทอร์โมแกรม DSC ของ TPNR มีปริมาณ DCP 0.5 phr ปริมาณสารตัดสายโซ่ 0.75 phr

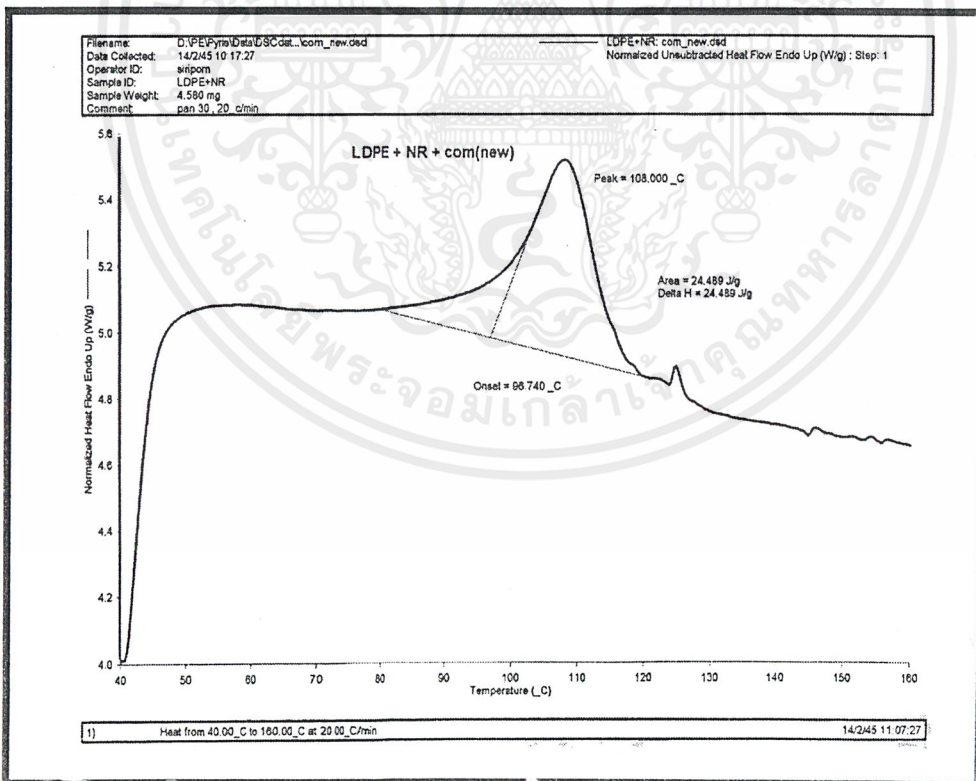


รูปที่ ข.4 เทอร์โมแกรม DSC ของ TPNR มีปริมาณ DCP 0.5 phr ปริมาณ ENR 3 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.5 เทอร์โมแกรม DSC ของ TPNR มีปริมาณ DCP 0.5 phr ปริมาณสารช่วยผสมรวม 3 phr (การผสมวิธีที่ 1)

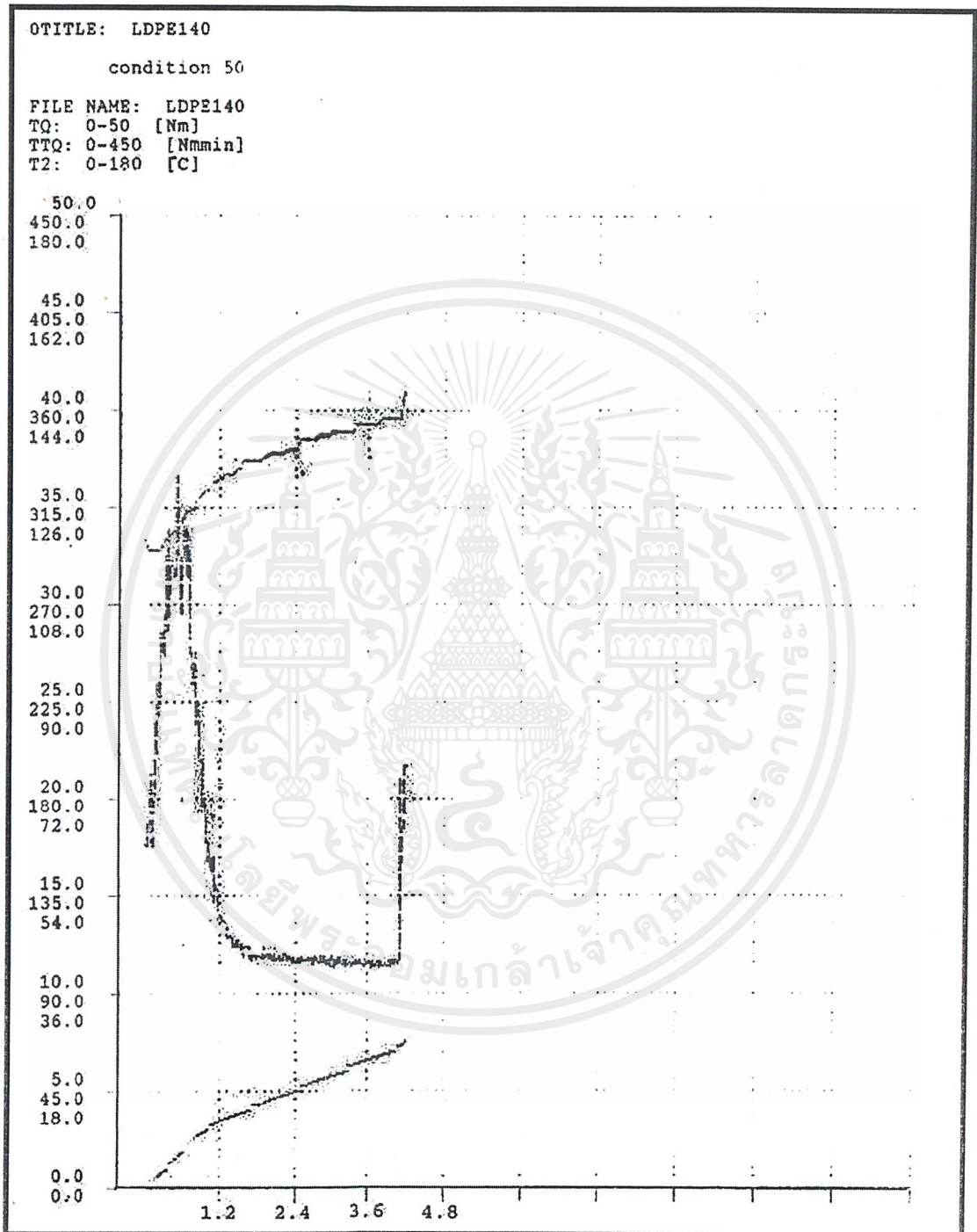


รูปที่ ข.6 เทอร์โมแกรม DSC ของ TPNR มีปริมาณ DCP 0.5 phr ปริมาณสารช่วยผสมรวม 3 phr (การผสมวิธีที่ 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

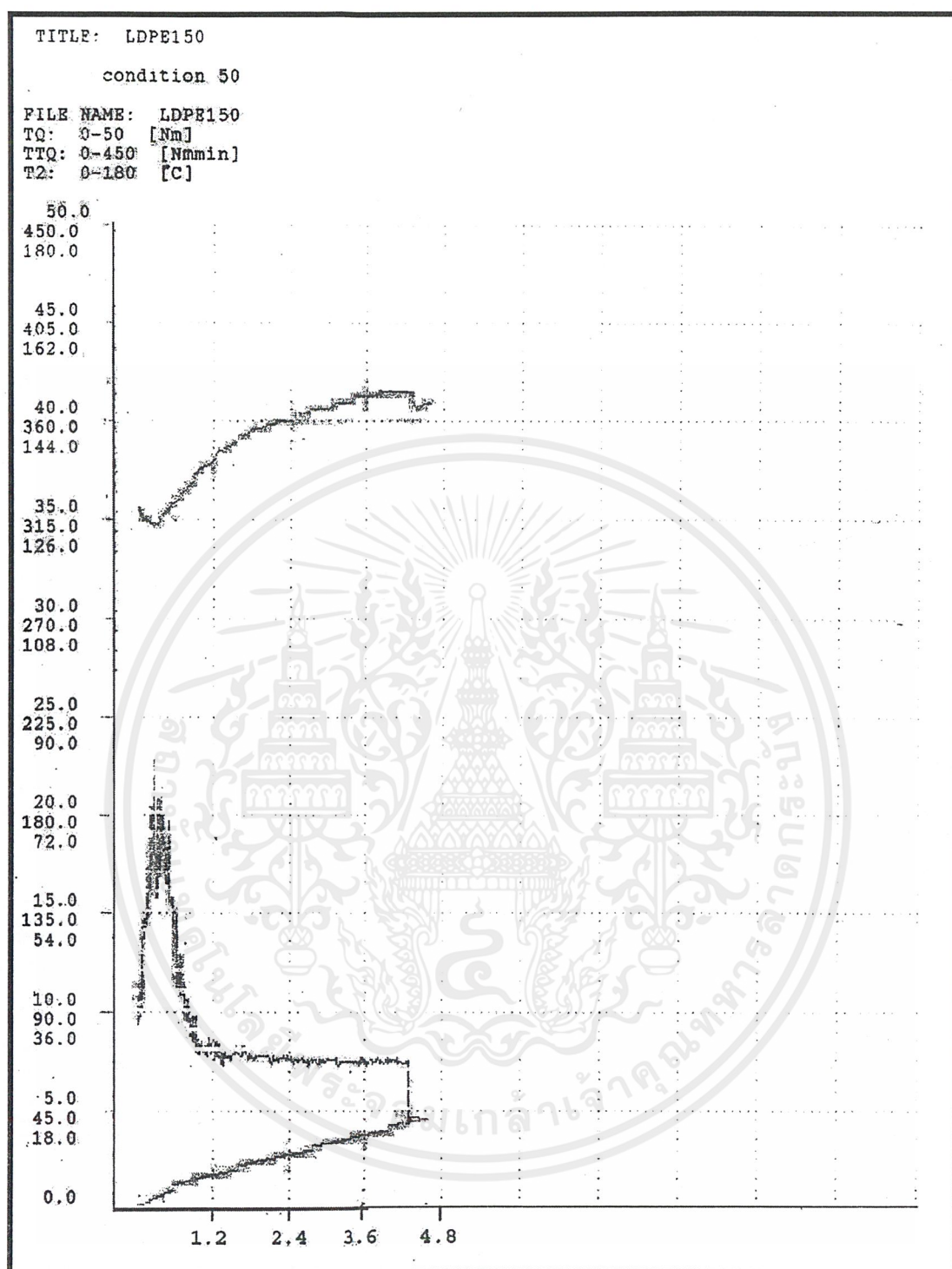
ภาคผนวก ค

การหาอุณหภูมิการหลอมเหลวของ LDPE ด้วยเครื่องบราเวนเดอร์พลาสติกอร์เดอร์



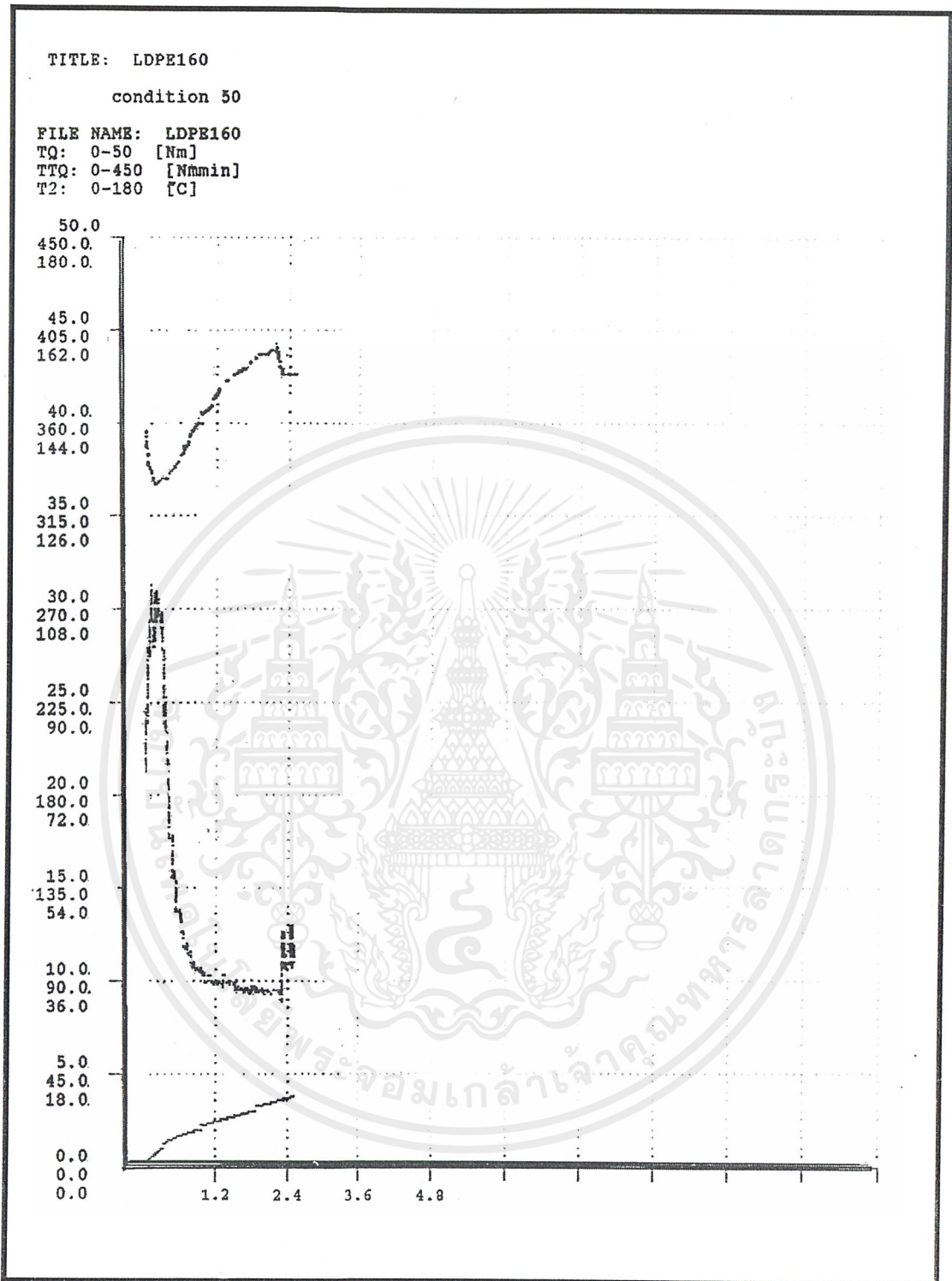
รูปที่ ค.1 พลาสติกเกรดของ LDPE ที่อุณหภูมิ 140 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.2 พลาสโตแกรมของ LDPE ที่ 150°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

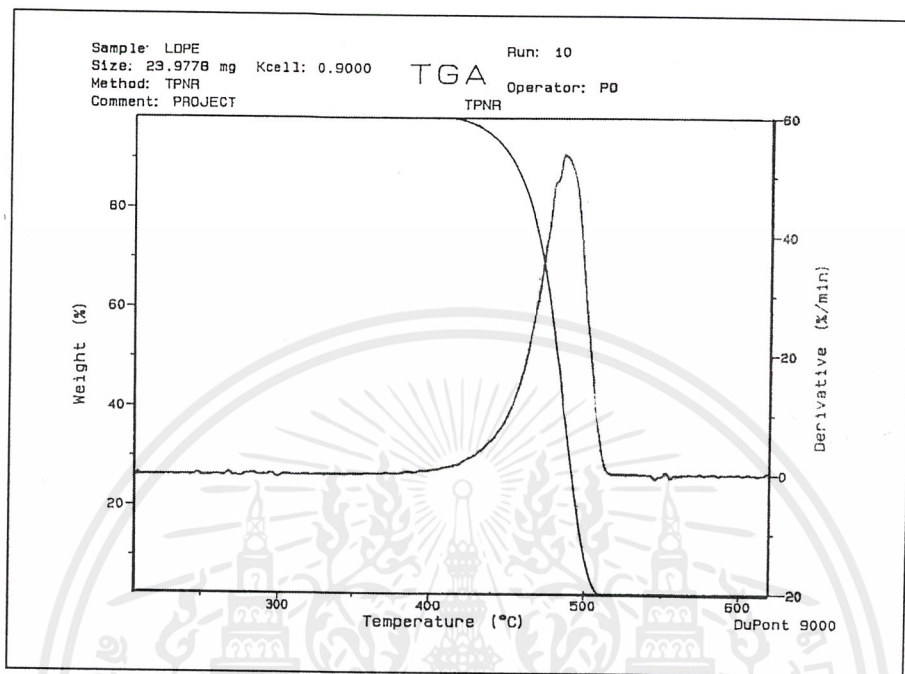


รูปที่ ค.3 พลาสต์แกรมของ LDPE ที่ 160°C

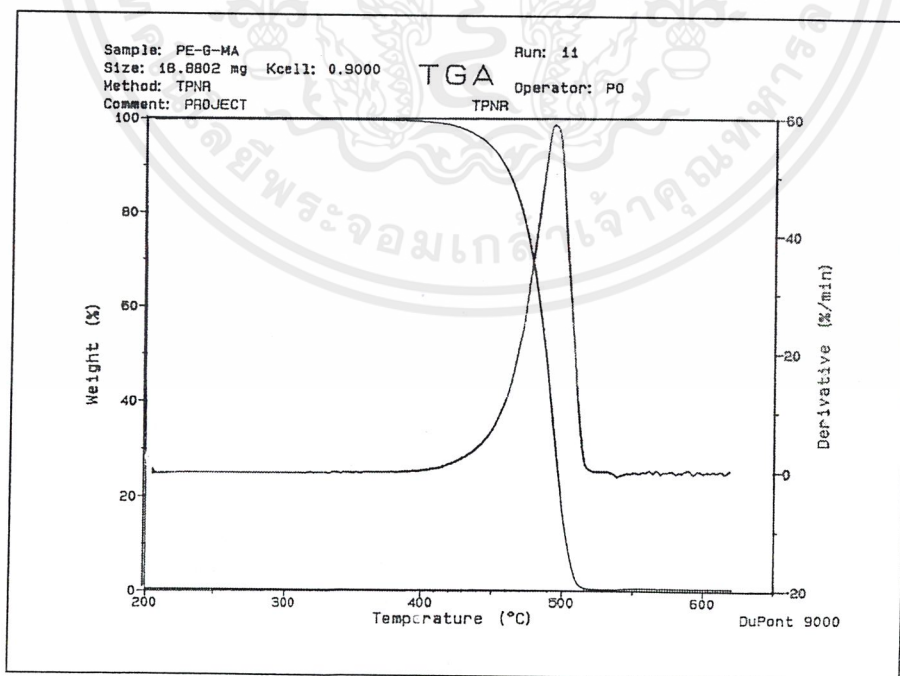
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย TGA

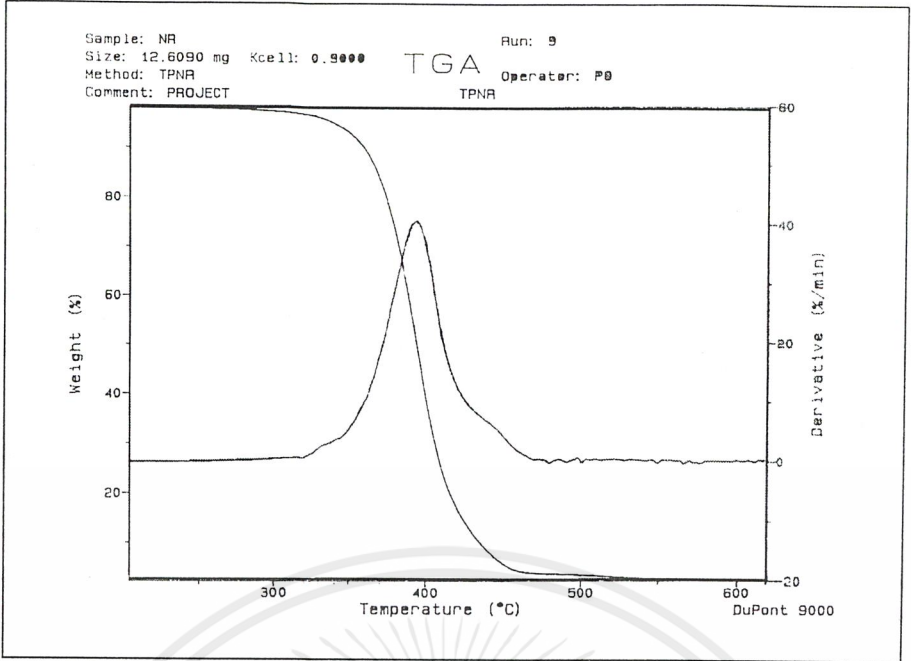


รูปที่ ง.1 เทอร์โมแกรม TGA ของ LDPE

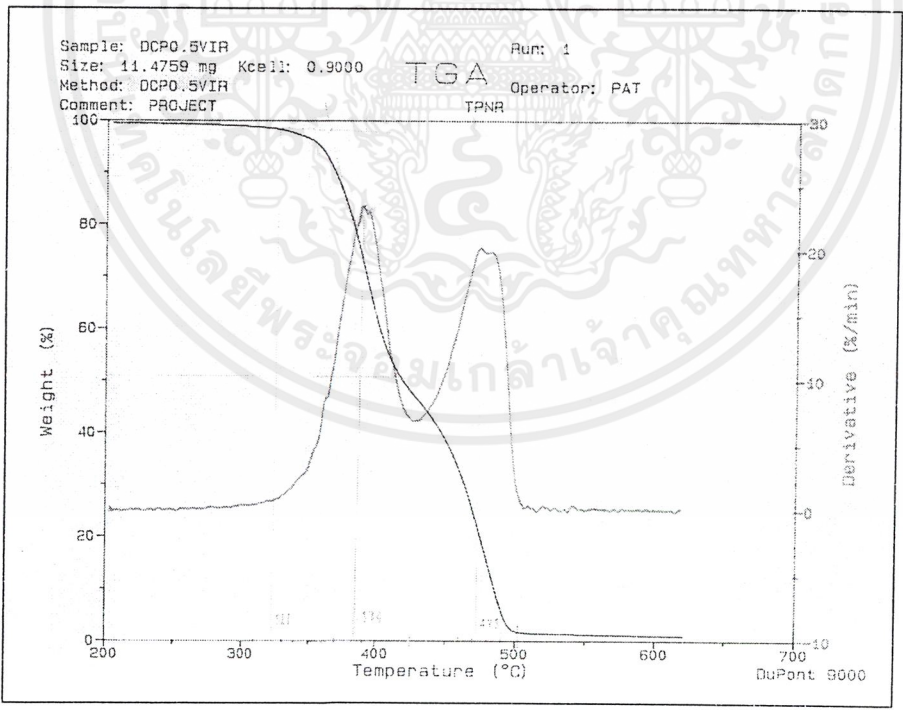


รูปที่ ง.2 เทอร์โมแกรม TGA ของ PE-g-MA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

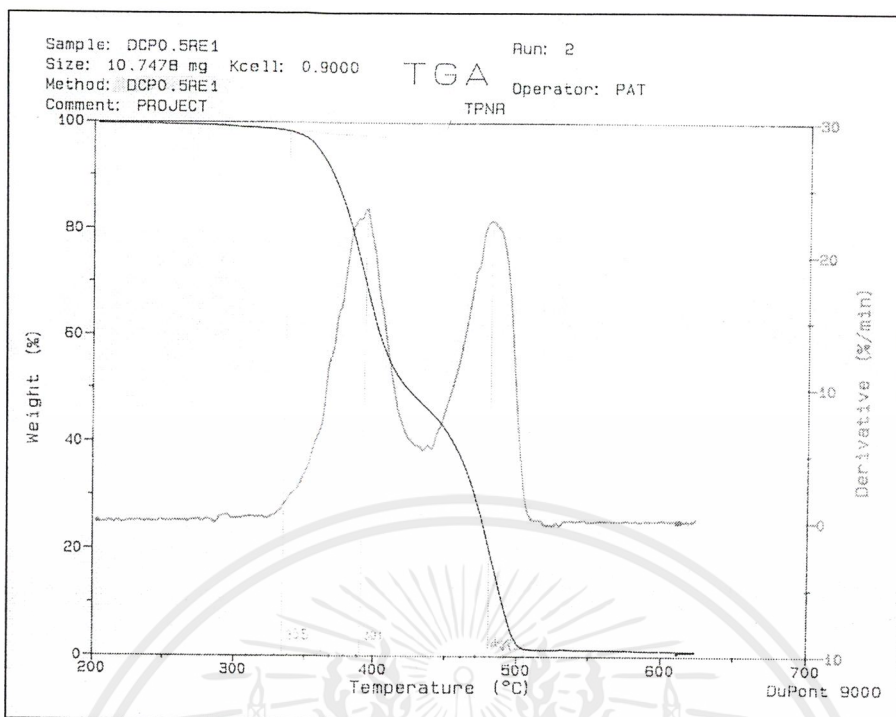


รูปที่ ๓.3 เทอร์โมแกรม TGA ของ ยางผสมสูตร

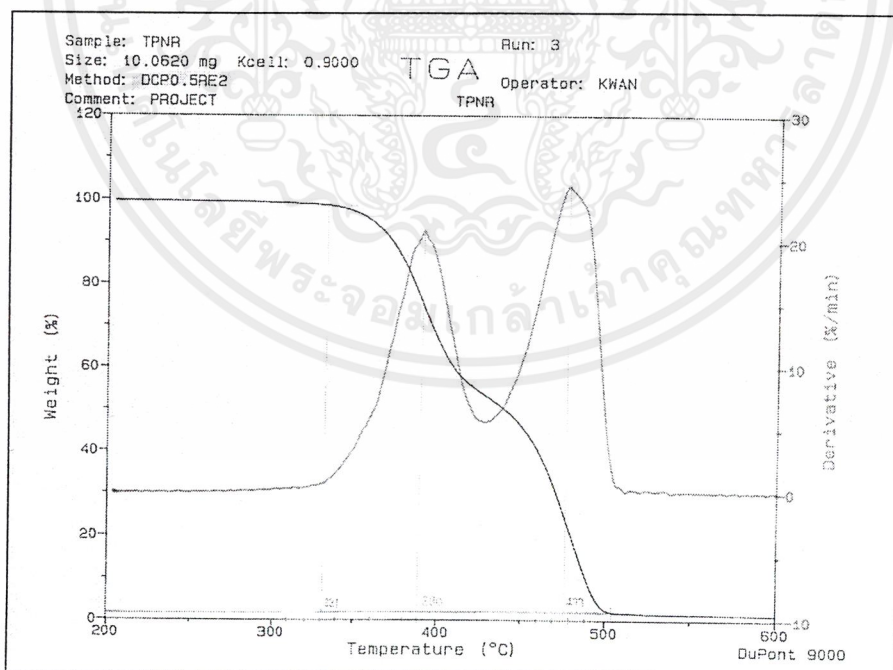


รูปที่ ๓.4 เทอร์โมแกรม TGA ของ TPNR / DCP 0.5 phr (Virgin)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

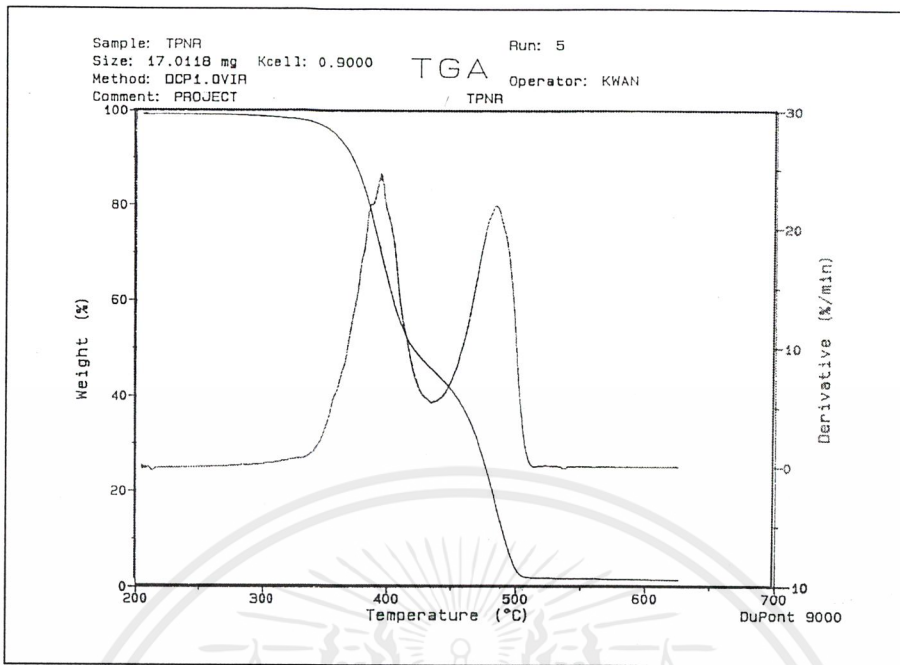


รูปที่ ๓.5 เทอร์โมแกรม TGA ของ TPNR / DCP 0.5 phr (1st recycled)

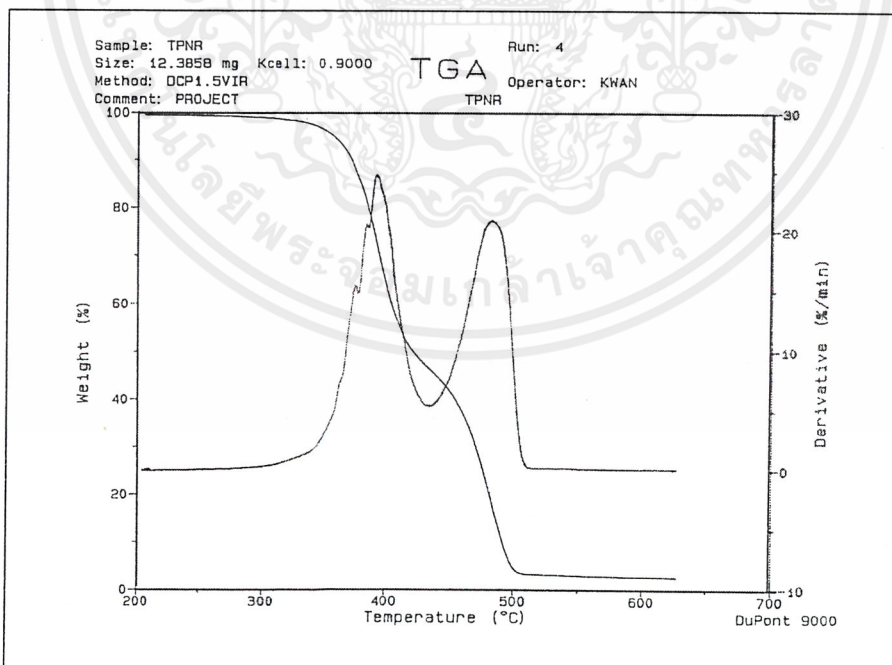


รูปที่ ๓.6 เทอร์โมแกรม TGA ของ TPNR / DCP 0.5phr (2nd recycled)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

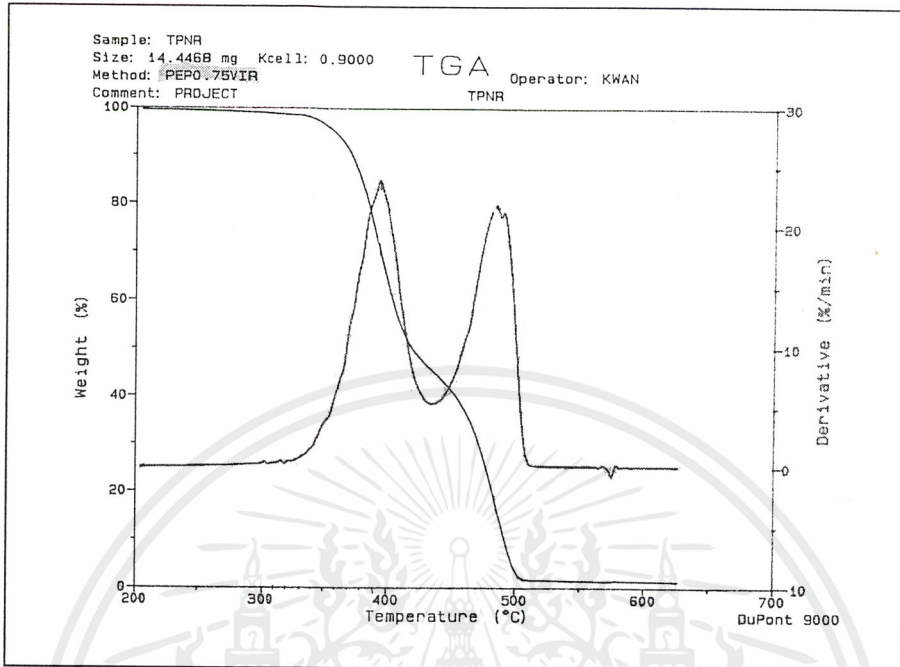


รูปที่ ง.7 เทอร์โมแกรม TGA ของ TPNR / DCP 1.0 phr (Virgin)

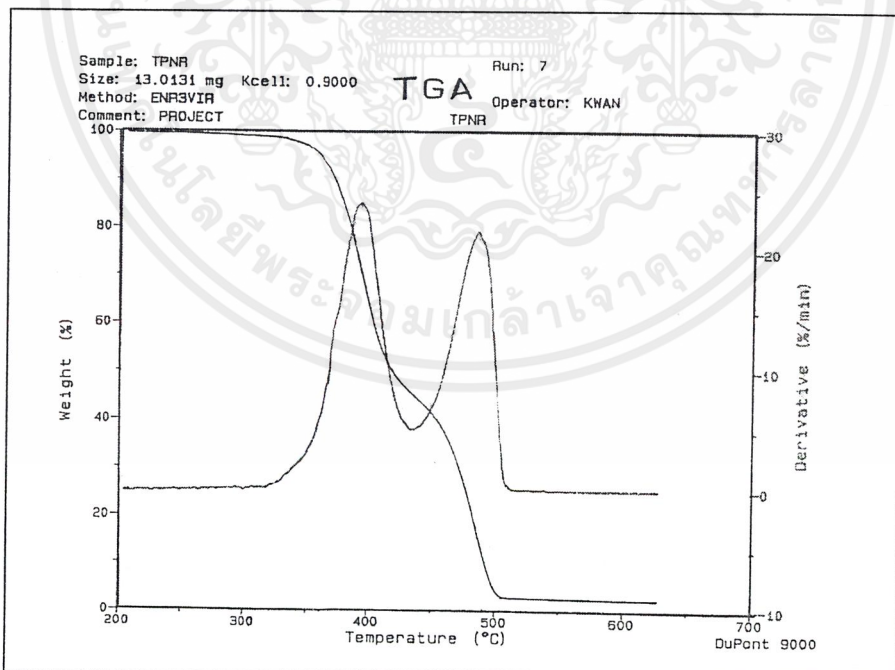


รูปที่ ง.8 เทอร์โมแกรม TGA ของ TPNR / DCP 1.5 phr (Virgin)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

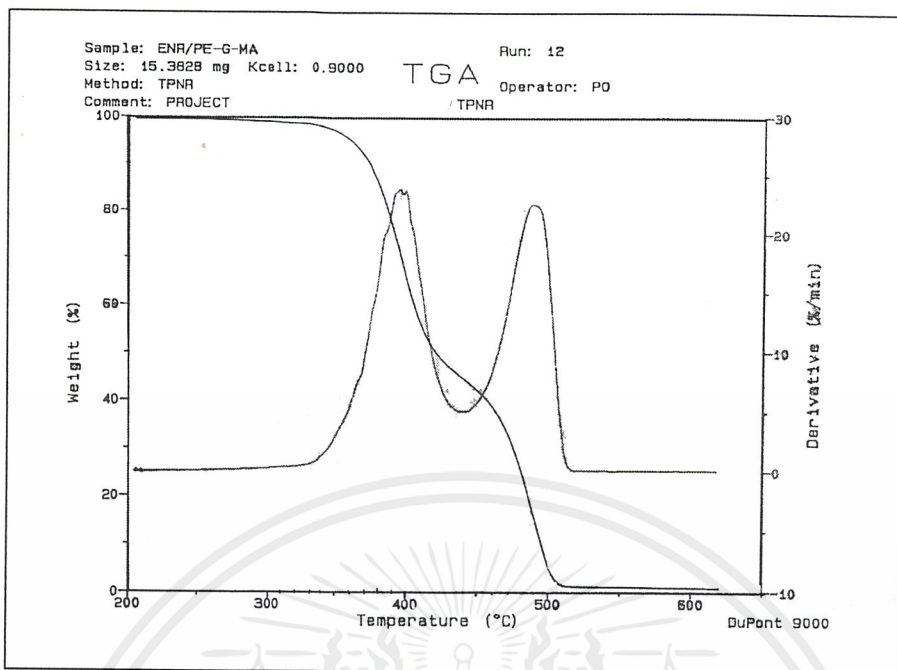


รูปที่ ๙.๙ เทอร์โมแกรม TGA ของ TPNR / DCP 0.5 phr / Peptizer 0.75 phr

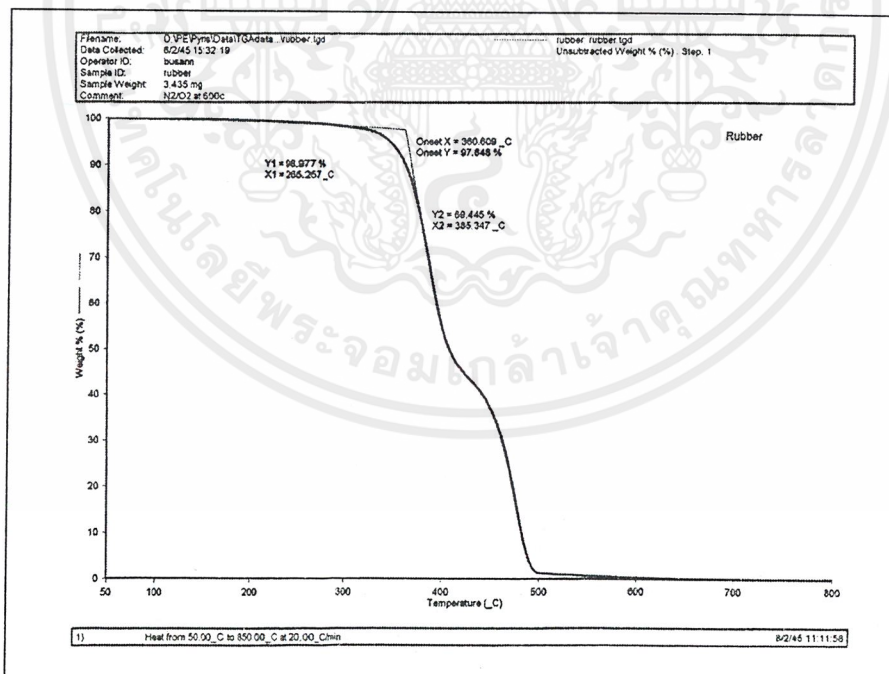


รูปที่ ๙.๑๐ เทอร์โมแกรม TGA ของ TPNR / DCP 0.5 phr / ENR 3 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง.11 เทอร์โมแกรม TGA ของ TPNR / DCP 0.5 phr / ENR+PE-g-MA 3 phr (การผสมวิธีที่ 1)

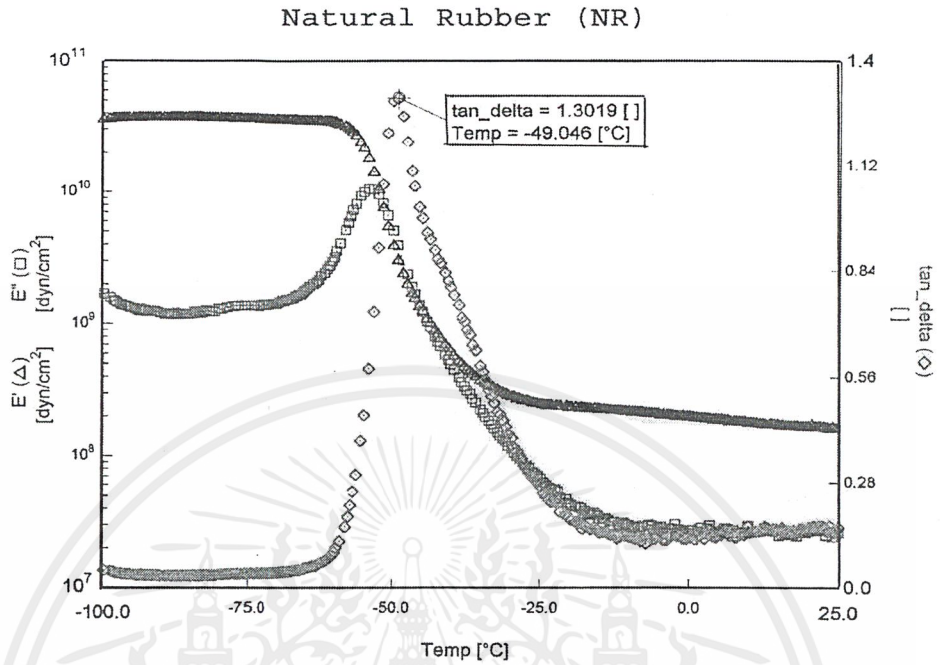


รูปที่ ง.12 เทอร์โมแกรม TGA ของ TPNR / DCP 0.5 phr / ENR+PE-g-MA 3 phr (การผสมวิธีที่ 2)

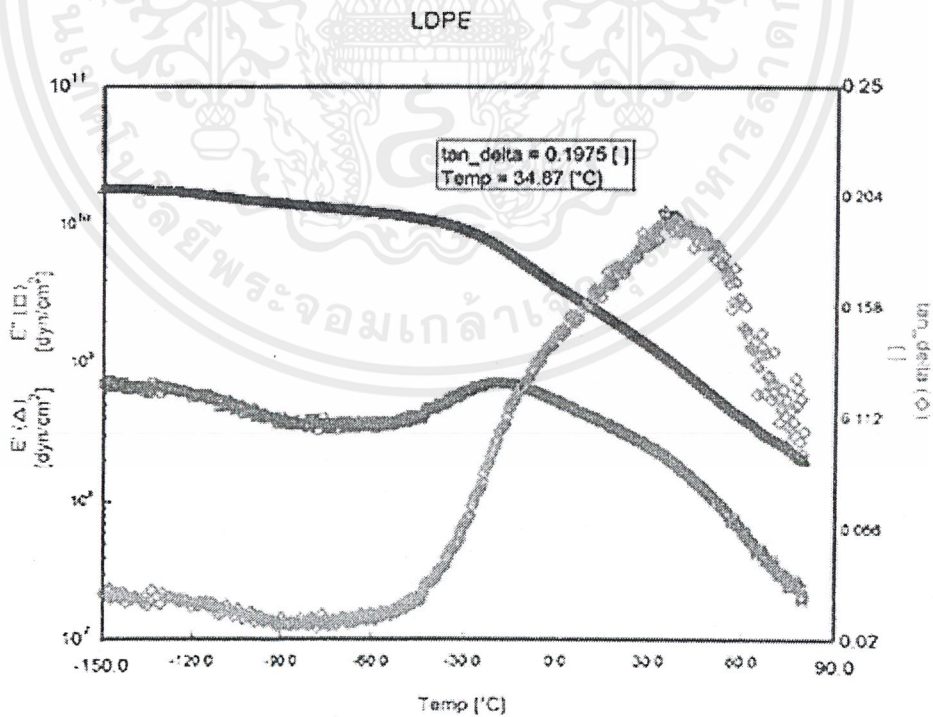
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DMTA

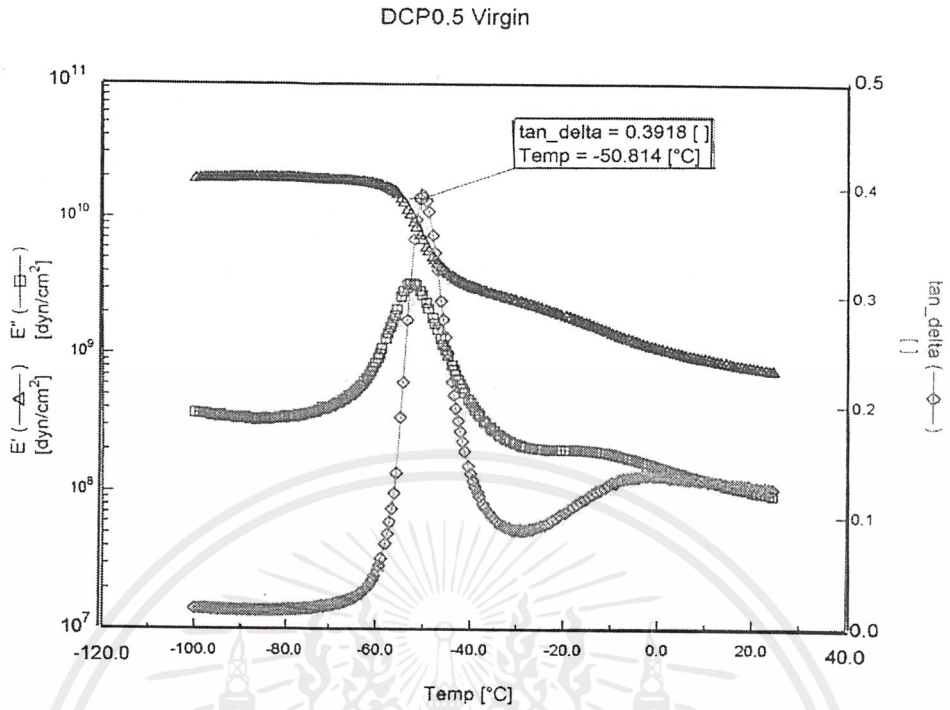


รูปที่ จ.1 เทอร์โมแกรม DMTA ของยางธรรมชาติ

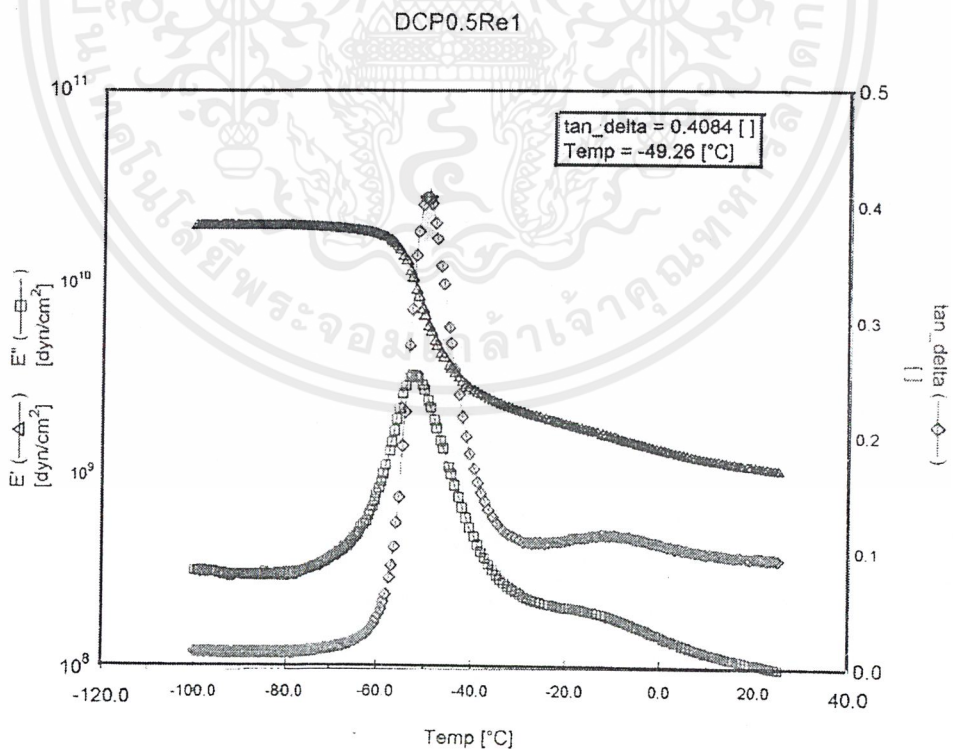


รูปที่ จ.2 เทอร์โมแกรม DMTA ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

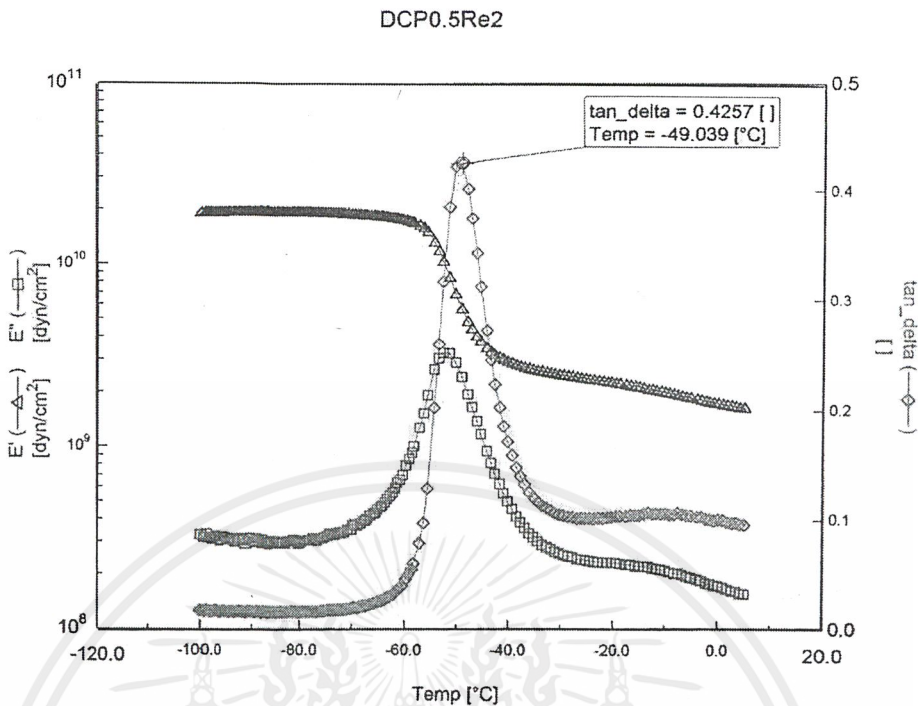


รูปที่ จ.3 เทอร์โมแกรม DMTA ของ TPNR มีปริมาณ DCP 0.5 phr

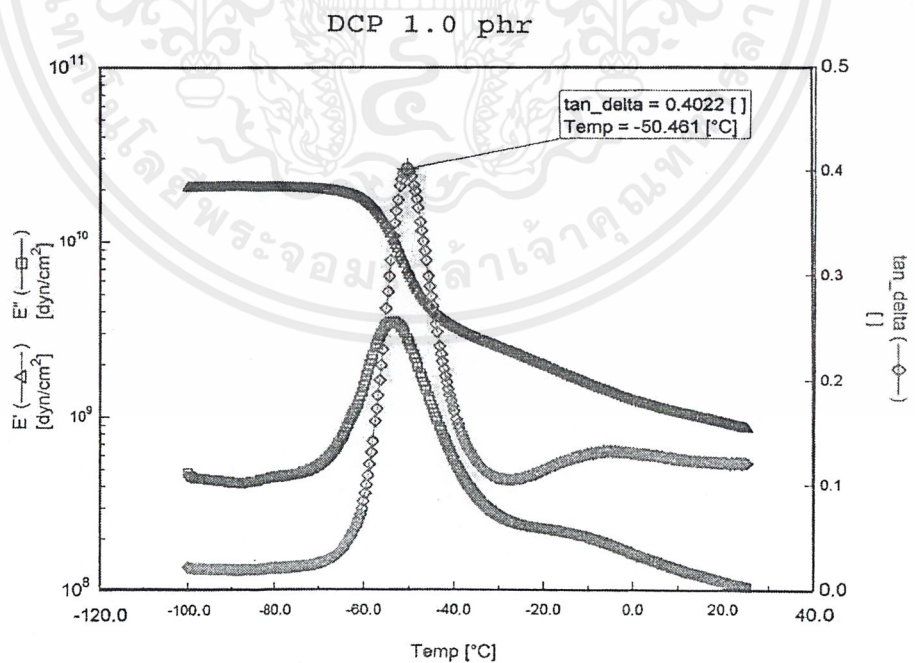


รูปที่ จ.4 เทอร์โมแกรม DMTA ของ TPNR มีปริมาณ DCP 0.5 phr ผ่านการรีไซเคิลครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

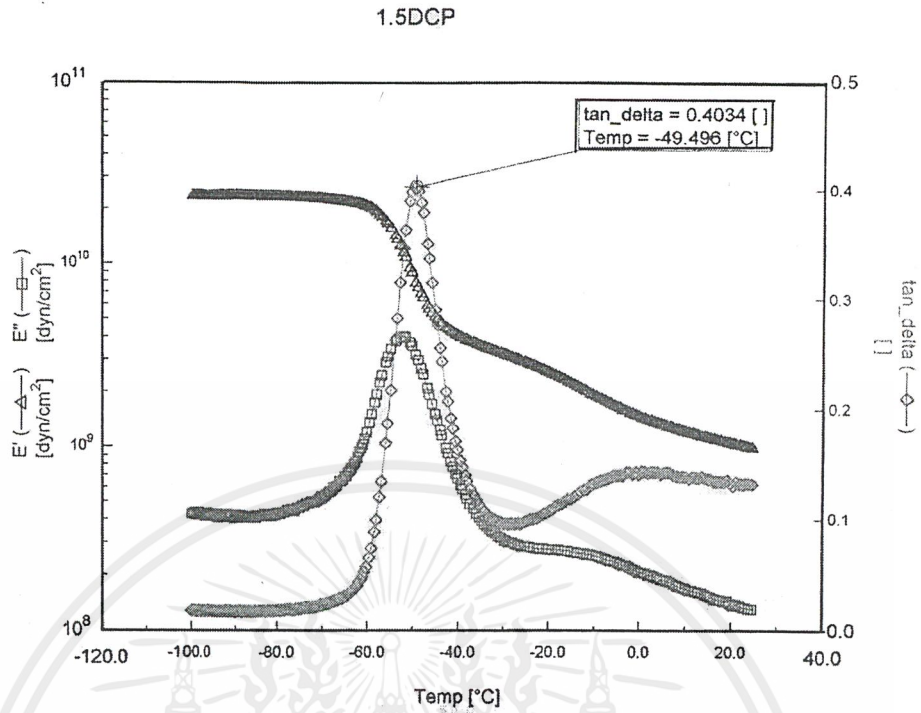


รูปที่ จ.5 เทอร์โมแกรม DMTA ของ TPNR มีปริมาณ DCP 0.5 phr ผ่านการรีไซเคิลครั้งที่ 2

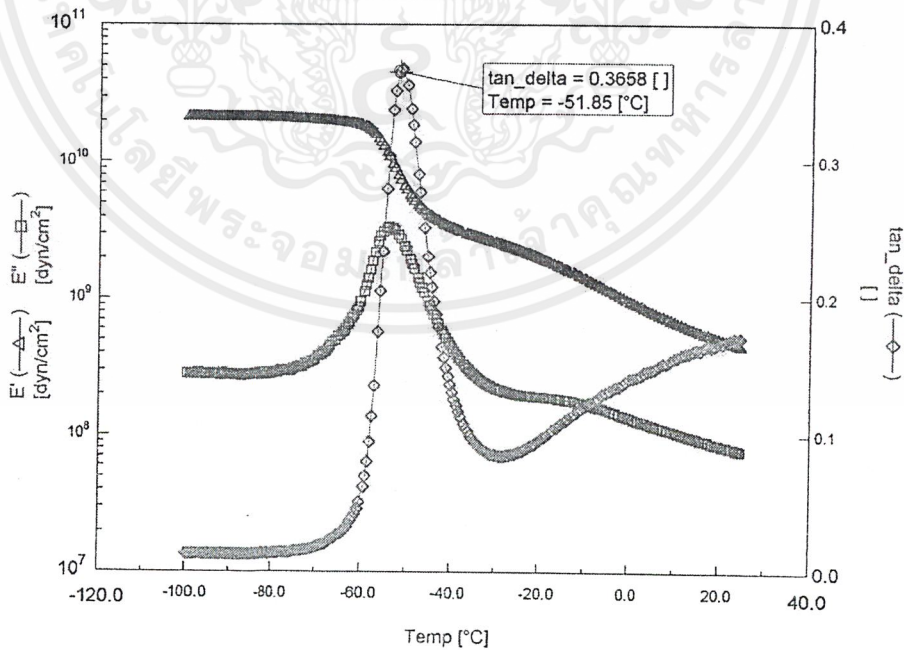


รูปที่ จ.6 เทอร์โมแกรม DMTA ของ TPNR มีปริมาณ DCP 1.0 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

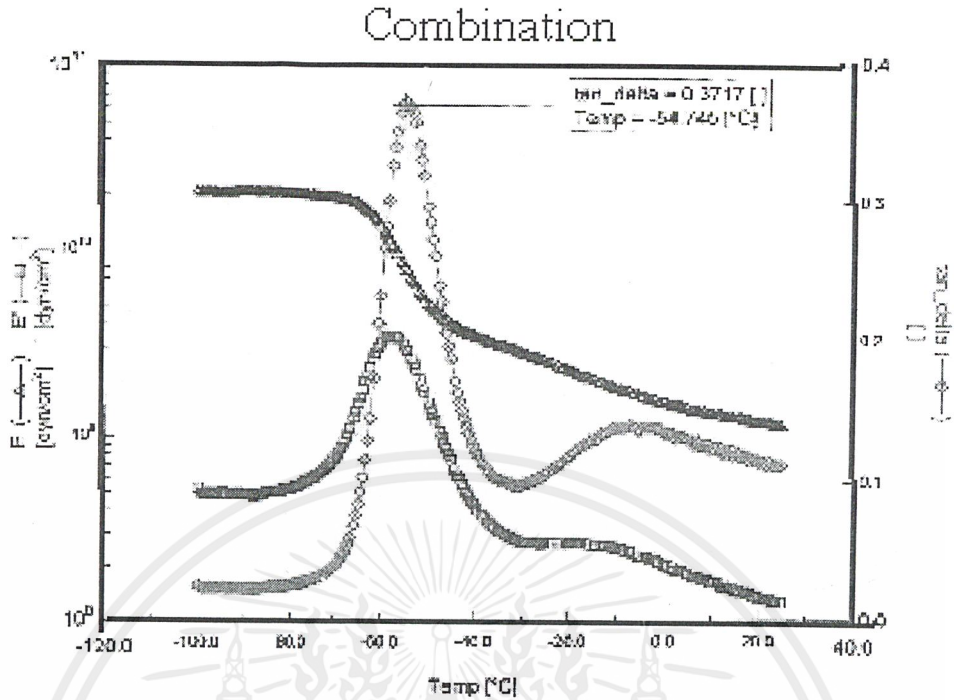


รูปที่ ๑.7 เทอร์โมแกรม DMTA ของ TPNR มีปริมาณ DCP 1.5 phr
Peptizer 0.75 phr



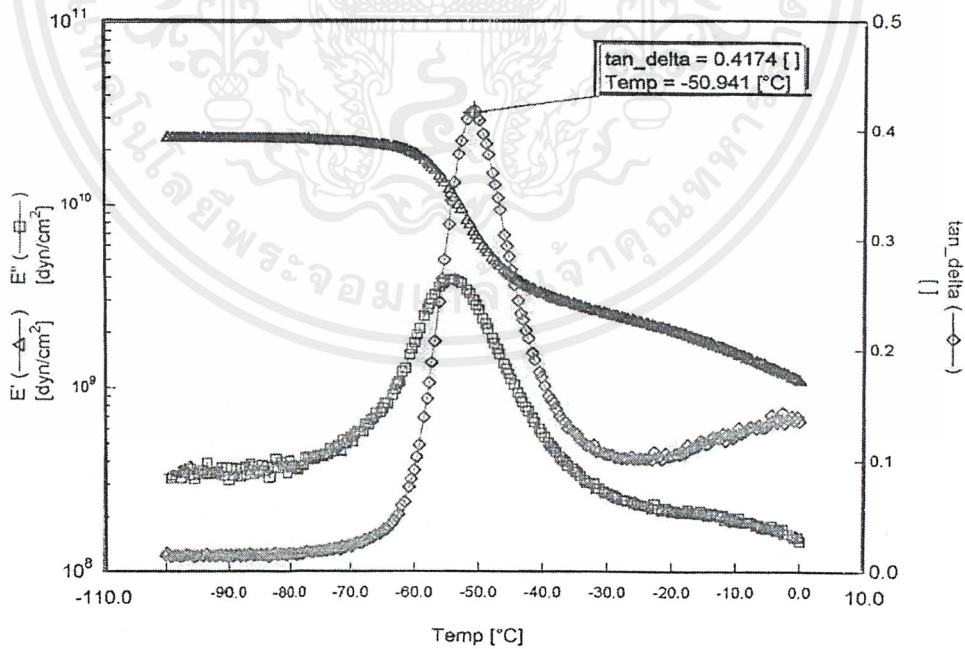
รูปที่ ๑.8 เทอร์โมแกรม DMTA ของ TPNR มีปริมาณ DCP 0.5 phr ปริมาณสารตัดสายโซ่ 0.75 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



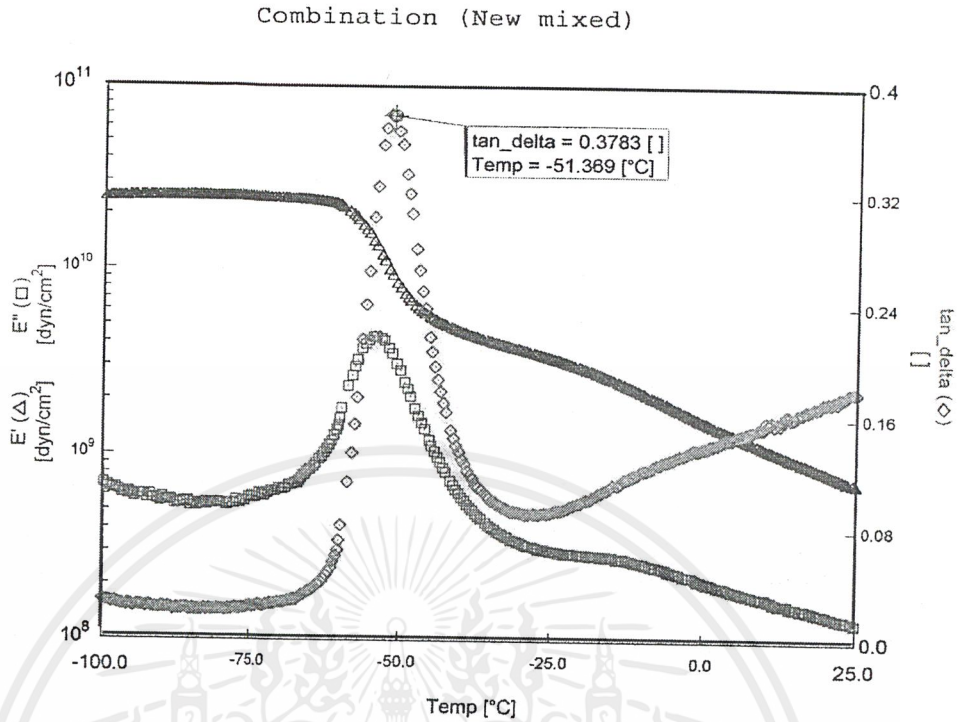
รูปที่ จ.9 เทอร์โมแกรม DMTA ของ TPNR มีปริมาณ DCP 0.5 phr ปริมาณ ENR 3 phr

3% ENR 3 phr



รูปที่ จ.10 เทอร์โมแกรม DMTA ของ TPNR มีปริมาณ DCP 0.5 phr ปริมาณสารช่วยผสมร่วม 3 phr (การผสมวิธีที่ 1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ.11 เทอร์โมแกรม DMTA ของ TPNR มีปริมาณ DCP 0.5 phr ปริมาณสารช่วยผสมร่วม 3 phr (การผสมวิธีที่ 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้