

พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และไนลอน6 โดยมี เทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติอีพ็อกซีไคซ์เป็นตัวเชื่อมประสาน

พรศรี เพศยางกูร*

บทคัดย่อ

ในการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาลักษณะทางโครงสร้างพื้นฐานวิทยา สมบัติเชิงกล และสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ กับไนลอน6 โดยมีเทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์ชนิด TPENR ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสาน จากการศึกษาสมบัติทางโครงสร้างพื้นฐานวิทยาพบว่า พอลิเมอร์ผสมระหว่างไนลอน6 และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำไม่สามารถเข้ากันได้ขนาดขององค์ประกอบย่อยที่เป็นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่กระจายตัวอยู่ในองค์ประกอบหลัก (ไนลอน6) มีขนาดใหญ่ และมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมลดลง แต่หลังจากเติมเทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์ชนิด TPENR ซึ่งเป็นตัวเชื่อมประสานลงไปในพอลิเมอร์ผสมเพียงเล็กน้อย (0.5 ส่วนในร้อยส่วน) สามารถทำให้พอลิเมอร์ผสมระหว่างไนลอน6 และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเข้ากันได้ช่วยทำให้ขนาดขององค์ประกอบย่อยที่กระจายตัวอยู่ในองค์ประกอบหลักลดลง และกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอมากขึ้น จึงสามารถส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมในระบบที่ไม่มีตัวเชื่อมประสาน นอกจากนี้ ในการศึกษาสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ผสมยังพบว่าประสิทธิภาพของเทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์ยังช่วยทำให้พอลิเมอร์ผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีขึ้น โดยเห็นได้จากการเพิ่มขึ้นของค่าความเค้นเฉือน และความหนืด ดังนั้นจากผลการศึกษานี้สามารถแสดงให้เห็นได้ว่าปริมาณของเทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์สำหรับใช้เป็นตัวเชื่อมประสานเพียงร้อยละ 0.5 ถึง 1 โดยน้ำหนัก ก็เพียงพอในการปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ผสม

คำสำคัญ : พอลิเมอร์ผสม, ตัวเชื่อมประสาน, เทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์, ยางธรรมชาติอีพ็อกซีไคซ์

Blends of Low-density Polyethylene with Nylon6 Compatibilized with Thermoplastic Epoxidized Natural Rubber

Pornsri Pakeyangkoon *

Abstract

This work studied phase morphology, mechanical properties and rheological properties of Nylon6/LDPE blends using thermoplastic epoxidized natural rubber (TPENR) which was derived from LDPE and Epoxidized Natural Rubber (ENR) as compatibilizer. The results indicated that Nylon6/LDPE blends are incompatible leading to poor resulting properties of the obtained materials. However, addition of a small amount (0.5 wt.%) of TPENR improved the compatibility of Nylon6/LDPE blends; the uniformity and maximum reduction of dispersed phase size were observed. This situation leads to improvement the mechanical properties of Nylon6/LDPE blends. Moreover, it was demonstrated that the rheological properties including shear stress and shear viscosity increased when compared with non-compatibilized blends. It could be concluded from this study that thermoplastic epoxidized natural rubber (TPENR) was effective compatibilizer for blends of Nylon6 with LDPE. Only 0.5 to 1 wt.% of thermoplastic elastomer was sufficient to produce the maximum reduction in dispersed phase size that leading to improve the resulting properties of compatible blends.

Keywords: Polymer blend, Compatibilizer, Thermoplastic elastomer, Epoxidized natural rubber

Department of Mechanical Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of North Bangkok.

* Corresponding author E-mail: pornsrip@kmutnb.ac.th Received 2 May 2012, Accepted 27 August 2012

1. บทนำ

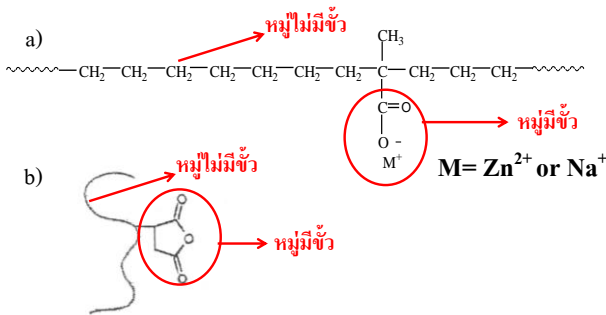
สืบเนื่องจากคุณสมบัติของบางประการของพอลิเมอร์ชนิดเดี่ยวแต่ละชนิดที่ใช้เป็นวัสดุในการผลิตบรรจุภัณฑ์ (Packaging) และพลาสติกในเชิงวิศวกรรม (Engineering plastic) อาทิเช่น ความไม่แข็งแรงคงทน ไม่ทนต่อแรงกระแทก และไม่ทนต่อสารเคมีบางชนิด เป็นต้น ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายหลักเพื่อเพิ่มศักยภาพของวัสดุเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมประเภทพลาสติกในเชิงวิศวกรรมและบรรจุภัณฑ์โดยมุ่งพัฒนากระบวนการผลิตพอลิเมอร์ผสมสองชนิดเพื่อช่วยในการปรับปรุงคุณสมบัติทั้งทางเชิงกล และเชิงกายภาพ ซึ่งจะเป็นการตอบสนองความต้องการ และแก้ไขปัญหาของภาคอุตสาหกรรมที่มีความต้องการวัสดุพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น โดยในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low-density Polyethylene: LDPE) กับพอลิเอไมด์ 6 (Polyamide6: PA6) หรือไนลอน 6 (Nylon6) อันเป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการนำมาใช้งานในหลากหลายอุตสาหกรรม แต่อย่างไรก็ตามการผสมพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันสามารถทำได้ยากเนื่องจากสมบัติทางเคมีที่แตกต่างกัน ทำให้คุณสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไม่เป็นไปตามที่ต้องการ ดังนั้นในงานวิจัยต่างๆจึงระบุไว้ว่าจำเป็นต้องมีการใช้ตัวเชื่อมประสานซึ่งมีส่วนที่มีขั้วและไม่ขั้วอยู่ในโครงสร้างเดียวกัน เพื่อเป็นตัวช่วยในการเชื่อมประสานพอลิเมอร์สองชนิดที่มีความแตกต่างกันในเชิงกายภาพให้สามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้เป็นอย่างดี อาทิเช่น เซอร์ลีน ไอโอโนเมอร์ (Surlyn® Ionomer) มาเลอิก แอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride) กราฟต์โคพอลิเมอร์ของหมู่มาเลอิก แอนไฮไดรด์บนสายโซ่พอลิโอเลฟิน โคพอลิเมอร์ของมาเลอิก แอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride functionalized styrene-ethylene-co-butylene-styrene) block copolymer) และพอลิโอเลฟินที่ปรับปรุงโครงสร้างทางเคมี อาทิเช่นการเติมหมู่อะคลิเลท เป็นต้น โดยผลจากการเติมตัวเชื่อมประสาน

ในพอลิเมอร์ผสมส่งผลให้ขนาดอนุภาคของพอลิเมอร์สัดส่วนย่อยในสัดส่วนหลักมีขนาดเล็กลง อีกทั้งยังสามารถกระจายตัวในพอลิเมอร์สัดส่วนหลักได้อย่างสม่ำเสมอและเข้ากันได้เป็นอย่างดี จึงเป็นการส่งผลให้คุณสมบัติทั้งทางเชิงกล และเชิงกายภาพของพอลิเมอร์ผสมสามารถถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น [1-7]

นอกจากตัวเชื่อมประสานที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ขางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ (Epoxidized Natural Rubber: ENR) ก็สามารถนำมาใช้เป็นตัวเชื่อมประสานได้ โดยมีผลงานวิจัยในการทำพอลิเมอร์คอมพอสิต ระหว่างยางธรรมชาติ (Natural Rubber: NR) และออร์กาโนคลอ (Organoclay) [8] แสดงให้เห็นว่ายางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์สามารถช่วยให้อยางธรรมชาติ และออร์กาโนคลอเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น จึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ได้มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดในการเพิ่มประสิทธิภาพของ พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับไนลอน 6 โดยใช้ เทอร์โมพลาสติก อีพอกซีไดซ์ (Thermoplastic Epoxidized Natural Rubber: TPENR) ที่ได้จากการผสมระหว่าง LDPE และยาง ENR เป็นตัวเชื่อมประสาน เนื่องจากเทอร์โมพลาสติก อีพอกซีไดซ์ ที่ได้จากการผสมระหว่าง LDPE กับยาง ENR มีโครงสร้างส่วนที่มีความมีขั้วสูง (จากยาง ENR) และส่วนที่ไม่มีขั้ว (จาก LDPE) ทำให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวเชื่อมประสานในการทำพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ ไนลอน 6 ได้เป็นอย่างดี สำหรับเทอร์โมพลาสติก อีพอกซีไดซ์นี้ ไม่เพียงแต่แสดงคุณสมบัติสำหรับใช้เป็นตัวเชื่อมประสานเท่านั้น แต่ยังสามารถช่วยเพิ่มสมบัติความยืดหยุ่น และอ่อนนุ่มให้กับผลิตภัณฑ์ได้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย [9] จากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมที่ได้มาขึ้นรูปเพื่อศึกษาสมบัติเชิงกล และเชิงกายภาพ เพื่อเป็นข้อมูลในการนำไปประยุกต์ใช้ และเพิ่มศักยภาพวัสดุสำหรับผลิตเป็นพลาสติกในเชิงวิศวกรรม และบรรจุภัณฑ์ต่อไปในอนาคต

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับตัวเชื่อมประสานที่นิยมใช้ในระบบพอลิเมอร์ผสมได้แก่ ไอโอโนเมอร์ (Ionomer) และกราฟต์โคพอลิเมอร์ของหมู่มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Graft copolymer of Maleic anhydride) เป็นต้น (ดูรูปที่ 1) ซึ่งในโครงสร้างของสารช่วยผสมทั้งสองชนิดจะประกอบไปด้วยส่วนที่มีขั้ว และไม่มีขั้ว อยู่ในโครงสร้างเดียวกัน จึงส่งผลให้สามารถปรับปรุงโครงสร้างของพอลิเมอร์ผสมให้สามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดียิ่งขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 1 โครงสร้างของตัวเชื่อมประสาน a) ไอโอโนเมอร์ b) กราฟต์โคพอลิเมอร์ของหมู่มาเลอิก แอนไฮไดรด์

โดยรายงานการวิจัยต่างๆ สำหรับการเลือกใช้ตัวเชื่อมประสานในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมมีดังนี้

พอลิโอเลฟินที่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างโดยกระบวนการกราฟต์โคพอลิเมอร์ไรเซชันกับสารประเภทต่างๆ อาทิเช่น Butyl acrylate Acrylic acid Methacrylic acid และ Polyethylene oxide เป็นต้น ก็สามารถแสดงคุณสมบัติในการทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง พอลิเอไมด์ และพอลิโอเลฟิน โดยมีรายงานสนับสนุนผลการวิจัยดังกล่าวจากนักวิทยาศาสตร์ในหลากหลายกลุ่มซึ่งระบุตรงกันว่าตัวเชื่อมประสานชนิดดังกล่าวสามารถลดแรงตึงผิว และส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมทั้งสองชนิดเข้ากันได้เป็นอย่างดี [10-13]

ในปี 1993 R. Armet และคณะ [2] ได้แสดงผลการศึกษาสมบัติของตัวเชื่อมประสานชนิดมาเลอิก แอนไฮไดรด์ ที่มี

การปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีโดยวิธีโคพอลิเมอร์ไรเซชัน

(Maleic anhydride functionalized styrene - (ethylene - co - butylenes - styrene) block copolymer; MA/SEBS) จากผล

การศึกษาพบว่าพอลิเมอร์ชนิดดังกล่าวสามารถทำหน้าที่ตัวเชื่อมประสานในพอลิเมอร์ผสมระหว่างไนลอน 6 และพอลิเอทิลีนได้เป็นอย่างดี ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลการทดสอบโครงสร้างสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์

อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) โดยแสดงให้เห็นว่าตัวเชื่อมประสานสามารถ

ปรับปรุงลักษณะโครงสร้างของ พอลิเมอร์ผสมให้มีการ

กระจายตัวของพอลิเมอร์สัดส่วนย่อย และสามารถเข้ากัน

กับ พอลิเมอร์สัดส่วนหลักได้ดียิ่งขึ้น

ปี 2002 สุริรัตน์ แสงวิจิตร และคณะ [3] ได้ทำการศึกษา

พอลิเมอร์ผสมระหว่างไนลอน 6 และ HDPE โดยใช้มาเลอิก

แอนไฮไดรด์ เป็นตัวเชื่อมประสาน โดยจากผลการศึกษาพบว่าเมื่อทำการเติมฟิวซาบอนด์ (Fusabond®) ซึ่งเป็น

HDPE ที่ได้รับการปรับปรุงโครงสร้างด้วย มาเลอิก แอนไฮไดรด์ เป็นตัวเชื่อมประสานในพอลิเมอร์ผสมนั้น สามารถ

ปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมให้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ใส่ตัวเชื่อมประสาน จากผล

การศึกษาที่ได้นั้นสามารถบ่งชี้ได้ว่าการเติมตัวเชื่อมประสานเข้าไปในพอลิเมอร์ผสมสามารถช่วยทำให้ไนลอน

6 และ HDPE รวมเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีขึ้น จึงส่งผลให้คุณสมบัติที่ได้ดีขึ้นตามไปด้วย ซึ่งในปีถัดมาผลการวิจัย

ของ พรศรี เพ็ชฌายกุล และคณะ [4] ได้ผลที่สอดคล้องกับงานวิจัยดังกล่าวมาแล้วข้างต้น โดยผลการศึกษาที่ได้รับระบุว่า

กรรมพหุคริติกที่ทำให้เป็นกลางโดยโลหะโซเดียม หรือ ไอโอโนเมอร์ 8527 ซึ่งมีสายโซ่หลักเป็น LDPE และหมู่คาร์บอกซิเลตสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานในพอลิ

เมอร์ผสมระหว่าง ไนลอน 6 และ LDPE ได้เป็นอย่างดี จึงส่งผลให้สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของพอลิ

เมอร์ผสมที่มีไอโอโนเมอร์เป็นตัวเชื่อมประสานมีสมบัติที่ดีขึ้น ในปี 2004 พัชรียา สุริยะไชย และคณะ [8] ได้

ทำการศึกษาผลของยางธรรมชาติกราฟต์ด้วยไกลซีดิลเมทาคริเลต และสไตรีนสำหรับเป็นตัวเชื่อมประสานของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ (NR) และพอลิเมทิลเมทาคริเลต (Polymethylmethacrylate: PMMA) ซึ่งระบุไว้ว่าเทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์จาก NR/PMMA เป็นวัสดุที่น่าสนใจสำหรับงานขึ้นรูปเป็นส่วนประกอบของรถยนต์ โดยวัสดุผสมนี้รวมสมบัติการขึ้นรูปง่ายของ PMMA และสมบัติยืดหยุ่นของยาง NR เข้าไว้ด้วยกัน แต่เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR/PMMA เกิดอินเทอร์เฟซ (Interface) และความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยาง และพลาสติก ดังนั้นจึงปรับปรุงความเข้ากันได้โดย การเติมกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่เหมาะสมสำหรับเป็นตัวเชื่อมประสาน ซึ่งในงานวิจัยดังกล่าวได้มีการใช้กราฟต์โคพอลิเมอร์ของไกลซีดิล เมทาคริเลต และสไตรีนบนน้ำยางธรรมชาติเป็นตัวเชื่อมประสาน (Compatibilizer) ได้ผลสรุปว่า สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม เช่น ความต้านทานแรงดึง ความยืดเมื่อขาด ความต้านทานแรงฉีกขาด ความแข็งแรง และความต้านทานแรงกระแทก ขึ้นกับปริมาณของตัวเชื่อมประสานที่เติมลงไป ในพอลิเมอร์ผสม NR/PMMA โดยปริมาณของตัวเชื่อมประสานที่เหมาะสมที่สามารถทำให้พอลิเมอร์ผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน และให้สมบัติเชิงกลที่ดีคือ ปริมาณ 5-10 ส่วน ในพอลิเมอร์ผสมร้อยละ

ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxidized Natural Rubber: ENR) ซึ่งเป็นยางที่ได้จากปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน (Epoxidation คือการเติมออกซิเจนเข้าไปในโมเลกุลของยางตรงบริเวณพันธะคู่ เกิดเป็นวงแหวนอีพอกไซด์) ก็สามารถนำมาใช้เป็นตัวเชื่อมประสานได้เป็นอย่างดี ซึ่งผลงานวิจัยในเรื่องดังกล่าวได้ถูกเผยแพร่ใน ปี 2004 โดย P. L. Teh และคณะ [9] โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (ENR) เป็นตัวเชื่อมประสานในการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตระหว่าง ยางธรรมชาติ (Natural rubber) และออร์แกนอเคลย์ โดยพบว่ายาง ENR สามารถใช้เป็นตัวเชื่อมประสานในการเตรียม พอลิเมอร์คอมพอสิต

ดังกล่าวได้เป็นอย่างดี จึงส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมพอสิต อาทิเช่น ความทนต่อแรงดึงสูงขึ้น เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมระบบที่ไม่มีตัวเชื่อมประสาน

2.3 เทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์

เทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์ ซึ่งเป็นชื่อเรียก พอลิเมอร์ ประเภทหนึ่งที่สามารถรวมเอาคุณสมบัติที่ดีของทั้งยาง และพลาสติกเข้าไว้ด้วยกัน กล่าวคือสามารถขึ้นรูปได้เหมือนพลาสติกทั่วไป (โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการ Vulcanization) ในขณะที่มีคุณสมบัติที่ยืดหยุ่นอ่อนนุ่มเหมือนยางทั่วไปขณะใช้งาน ทำให้สามารถนำไปใช้ทดแทนยาง และยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้เหมือนพลาสติกทั่วไปอีกด้วย ดังรายงานการวิจัยในปี 2008 โดย V. Tanrattanakul และคณะ [14] ที่ได้ระบุว่าการผสมระหว่างพลาสติกชนิด ไนลอน 6 กับยาง ENR เข้าด้วยกันสามารถปรับปรุงคุณสมบัติการต้านทานแรงกระแทกได้ ทั้งนี้เป็นผลมาจากคุณสมบัติของยางธรรมชาติที่มีความเหนียว และยืดหยุ่นค่อนข้างดี จึงทำให้วัสดุผสมสามารถทนต่อแรงกระแทกได้สูงขึ้น อย่างไรก็ตามความต้านทานต่อแรงกระแทกที่เพิ่มสูงขึ้นสำหรับระบบไนลอน 6/ENR นั้นเป็นผลมาจากแรงกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างหมู่ที่มีขั้วของไนลอน 6 และยาง ENR ทำให้วัสดุผสมระหว่าง ไนลอน 6/ENR สามารถเข้ากันได้เป็นอย่างดี ดังนั้นจึงส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงกระแทกมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย

ในปัจจุบันการเตรียมเทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์จากยางประเภทต่างๆ กำลังได้รับความสนใจค่อนข้างมาก เนื่องจากคุณสมบัติเด่นของเทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์ ดังนั้นนอกจากตัวเชื่อมประสานที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น เทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์ก็เป็นวัสดุอีกประเภทหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวเชื่อมประสานสำหรับการเตรียมพอลิเมอร์ผสม จึงทำให้เกิดแนวความคิดสำหรับงานวิจัยนี้ในการเลือกใช้เทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Thermoplastic Epoxidized Natural Rubber: TPENR) ที่ได้จากการผสมระหว่าง LDPE

และยาง ENR ให้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวเชื่อมประสานของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับ ไนลอน 6 เนื่องจาก TPENR ที่ได้จากการผสมระหว่าง LDPE กับ ENR มีส่วนที่มีความแข็งสูง (จากยาง ENR) และส่วนที่ไม่มีแข็ง (จาก LDPE) อยู่ในโครงสร้างเดียวกัน ทำให้สามารถใช้เป็นตัวเชื่อมประสานในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม และส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และไนลอน 6 สามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ ดังนั้นคุณสมบัติทั้งทางเชิงกล และเชิงกายภาพก็จะถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นตามไปด้วย

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

พอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low-density Polyethylene (LDPE); Thai Polyethylene Co., Ltd) ไนลอน 6 (Nylon6 หรือ PA6; UBE Group (Thailand) Co., Ltd) และยางธรรมชาติ อีพ็อกซิไดซ์ (Epoxidized Natural Rubber (ENR-50); Muang Mai Guthrie Public Co., Ltd)

3.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม และการทดสอบคุณสมบัติ

ขั้นที่ 1 เตรียมเทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ (TPENR) จาก LDPE และยาง ENR-50 ในอัตราส่วน LDPE ต่อ ยาง ENR-50 เป็น 90:10 เพื่อนำมาใช้เป็นตัวเชื่อมประสาน โดยใช้เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two roll mill)

ขั้นที่ 2 ในการศึกษาครั้งนี้ได้เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง Nylon6 และ LDPE ในอัตราส่วน 80:20 เนื่องจากเพื่อเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมประเภทพลาสติกเชิงวิศวกรรมจึงศึกษาระบบพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ Nylon6 เป็นองค์ประกอบหลัก โดยเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างผสม LDPE กับ Nylon6 ในอัตราส่วนต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 และใช้ TPENR เป็นตัวเชื่อมประสานการเตรียม พอลิเมอร์ผสมจะถูกเตรียมโดยใช้เครื่องผสม

แบบสกรูคู่ (Twin screw extruder) และอุณหภูมิที่ใช้ในการผสมคือ 235 องศาเซลเซียส

ขั้นที่ 3 นำพอลิเมอร์ผสมทั้งสองชนิด (ระบบที่ไม่ใช้ตัวเชื่อมประสาน; Nylon6/LDPE และระบบที่ใช้ตัวเชื่อมประสาน; Nylon6/LDPE/TPENR) ที่เตรียมได้มาขึ้นรูปโดยกระบวนการอัด (Compression molding) ที่อุณหภูมิ 235 องศาเซลเซียส และเตรียมตัวอย่างชิ้นงานตามมาตรฐานสากลเพื่อใช้ในการศึกษาสมบัติเชิงกล และเชิงกายภาพ

ขั้นที่ 4 ศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล และการไหลของพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องมือต่างๆ ดังนี้

การวิเคราะห์โครงสร้างสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) รุ่น JEOL5200-2AE (MP152001) ที่กำลังขยาย 500 เท่า โดยตัวอย่างจะถูกเคลือบด้วยผงทองคำก่อนการนำไปศึกษา

การทนต่อแรงดึง (Tensile Properties) ของพอลิเมอร์ผสม ตัวอย่างต่างๆ ถูกนำมาศึกษาคุณสมบัติเชิงกลด้วยเครื่อง Instron Universal Testing Machine (UTM) ตามมาตรฐาน ASTM D638 โดยใช้ความเร็วในการดึง 50 มม./นาที และ gauge length 50 มิลลิเมตร

การทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod Impact Properties) ด้วยเครื่อง Pendulum Impact Tester การบากชิ้นงาน และระยะการวางชิ้นงานใช้มาตรฐานในการทดสอบ ASTM D256 โดยขึ้นทดสอบถูกวางในแนวตั้ง การตีของค้อนจะตีเข้าบริเวณรอยบากโดยตรง

การทดสอบสมบัติความแข็ง (Hardness) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2240 เป็นการทดสอบความแข็งแบบ Shore D ซึ่งขนาดชิ้นงานตามมาตรฐานควรจะมี ความหนาอย่างน้อย 6 มิลลิเมตร เริ่มจากการวางชิ้นงานทดสอบตามแนวราบ แล้วทำการกดเครื่องมือทดสอบลงบนชิ้นงาน หลังจากนั้นอ่านค่าความแข็งของวัสดุจากสเกล โดย

ทำการวัดซ้ำๆ กัน 10 ครั้งที่จุดต่างๆ บนชิ้นงานทดสอบ แล้วจดบันทึกผล

การศึกษาพฤติกรรมการไหลในขณะหลอมเหลวของ พอลิเมอร์ผสม โดยใช้เครื่องคาปิลลารีรีโอมิเตอร์ (Capillary Rheometer) รุ่น CEAST Rheologic 5000 โดยมีค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของ barrel เท่ากับ 15 และ 300 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยเลือกใช้ die ที่มีค่าอัตราส่วน L/D (length-to-inner diameter ratio) เท่ากับ 20/1 ทำการทดสอบ โดยพลาสติกจะถูกหลอมที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส และถูกดันลงมาตาม barrel ด้วย piston ตามอัตราเร็ว (100-1400 sec⁻¹) ที่กำหนดไว้

ขั้นที่ 5 เก็บข้อมูล และวิเคราะห์เปรียบเทียบสมบัติเชิงกล และการไหลของพอลิเมอร์ผสม พร้อมทั้งสรุปผล

ตารางที่ 1 อัตราส่วนของ Nylon6, LDPE และตัวเชื่อมประสาน (TPENR) สำหรับเตรียมพอลิเมอร์ผสม

ระบบพอลิเมอร์ผสม	อัตราส่วน (%โดยน้ำหนัก)		
	Nylon6	LDPE	TPENR
Nylon6/LDPE	80	20	0
Nylon6/LDPE/TPENR	80	20	0.5
	80	20	1
	80	20	3
	80	20	5

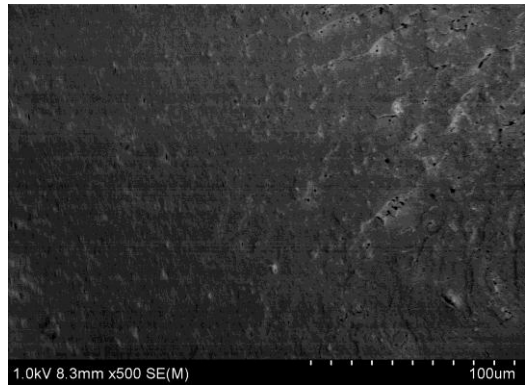
4. ผลการวิจัย

ผลการดำเนินงานของการศึกษาสมบัติในด้านต่างๆของ พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับ Nylon6 โดยใช้เทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์ชนิด TPENR เป็นตัวเชื่อมประสาน ซึ่งจากการทดสอบคุณสมบัติในด้านต่างๆ เช่น ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานวิทยา สมบัติเชิงกล และการไหลของพอลิเมอร์ผสมที่ได้เป็นดังต่อไปนี้

4.1 ผลการศึกษาโครงสร้างพื้นฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์ชนิด TPENR สำหรับใช้เป็น

ตัวเชื่อมประสาน ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับ Nylon6

ในการศึกษานี้ได้ทำการเตรียมตัวเชื่อมประสานชนิดเทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติอีพอกซีไคซ์ (Epoxidized Natural Rubber: ENR) ซึ่งก็คือ TPENR โดยอัตราส่วนที่ทำการผสมคือ พลาสติกชนิด LDPE ต่อยาง ENR เท่ากับ 90:10 ซึ่งจากภาพทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงให้เห็นว่ายาง ENR สามารถผสมกับพลาสติก LDPE ได้เป็นอย่างดี (ดูรูปที่ 2) ทั้งนี้เนื่องจากยาง ENR มีส่วนที่ไม่มีขั้วอยู่ในโครงสร้างเช่นเดียวกับพลาสติก LDPE อีกทั้งปริมาณของยางที่ใส่ลงไปเพียง 10 % โดยน้ำหนักเท่านั้น จึงสามารถเข้ากันได้เป็นอย่างดี และสามารถนำมาใช้เป็นตัวเชื่อมประสานสำหรับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับ Nylon6 เพื่อทำการศึกษาในขั้นต่อไป

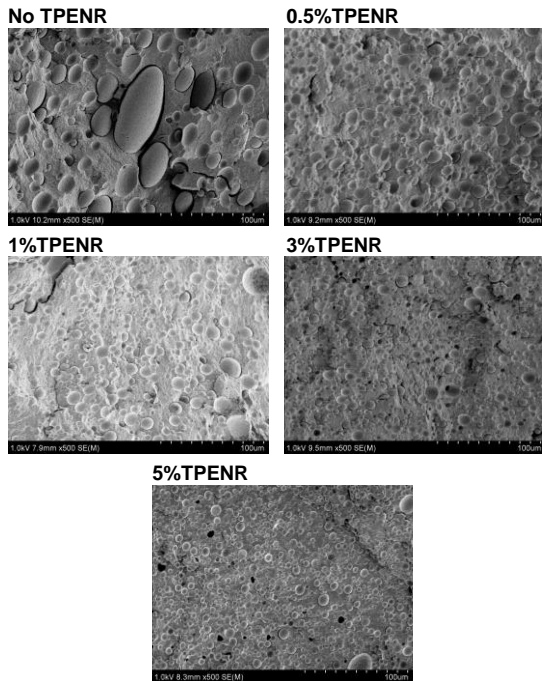


รูปที่ 2 ลักษณะทางโครงสร้างพื้นฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์ชนิด TPENR

4.2 การศึกษาผลของปริมาณของตัวเชื่อมประสานต่อคุณสมบัติในด้านต่างๆ ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับ Nylon6 โดยใช้เทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์ชนิด TPENR เป็นตัวเชื่อมประสานในอัตราส่วนต่างๆ

4.2.1 ผลการศึกษาความเข้ากันได้ทางโครงสร้างของพอลิเมอร์ผสมโดยการใช้อุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

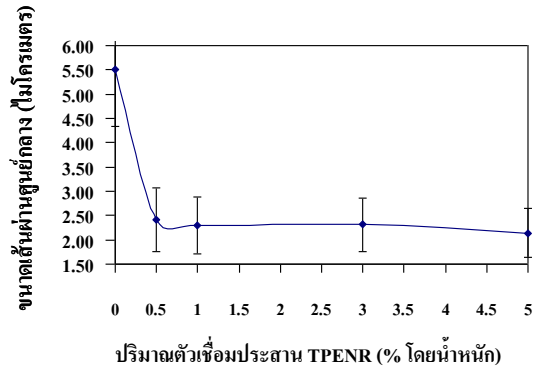
ผลของปริมาณเทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์ชนิด TPENR ที่ใช้เป็นตัวเชื่อมประสานสำหรับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับ Nylon6 แสดงให้เห็นโดยภาพทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ลักษณะทางโครงสร้างสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับ Nylon6 โดยมี TPENR เป็นตัวเชื่อมประสานในอัตราส่วนต่างๆ

จากภาพแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการใช้ตัวเชื่อมประสานชนิด TPENR ทำให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ Nylon6 สามารถเข้ากันได้ และรวมกันเป็นเนื้อเดียวกันได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างส่วนที่มีขี้ของยาง ENR และส่วนที่มีขี้ของ Nylon6 อีกทั้งเป็นผลจากส่วนที่ไม่มีขี้ของ TPENR และ LDPE ในพอลิเมอร์ผสมก็สามารถเข้ากันได้เป็นอย่างดี ทำให้ลดแรงดึงที่ผิวระหว่างองค์ประกอบหลัก และองค์ประกอบย่อย [3-4, 15-16] โดยขนาดของอนุภาคย่อย LDPE ที่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์หลัก Nylon6 มีแนวโน้มที่ขนาดเล็กลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อมี

การใช้ TPENR ในปริมาณเพียง 0.5% โดยน้ำหนัก จากนั้นขนาดของอนุภาคย่อย LDPE จะค่อนข้างคงที่เมื่อปริมาณของตัวเชื่อมประสานเพิ่มมากขึ้นจาก 0.5 ถึง 5% โดยน้ำหนัก (ดูรูปที่ 4)

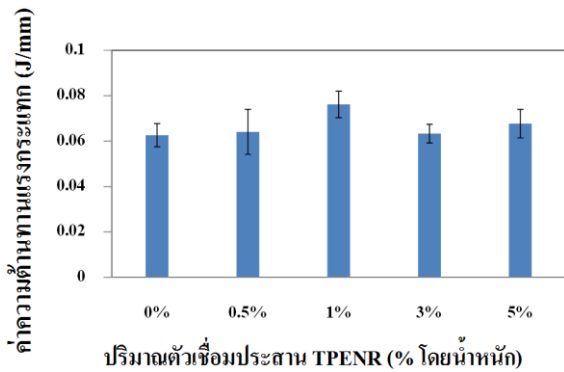


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเชื่อมประสาน และขนาดของเฟสย่อย LDPE ที่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์หลัก Nylon6 ในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับ Nylon6

4.2.2 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties)

4.2.2.1 ผลการทดสอบความต้านทานแรงกระแทก (Impact Testing)

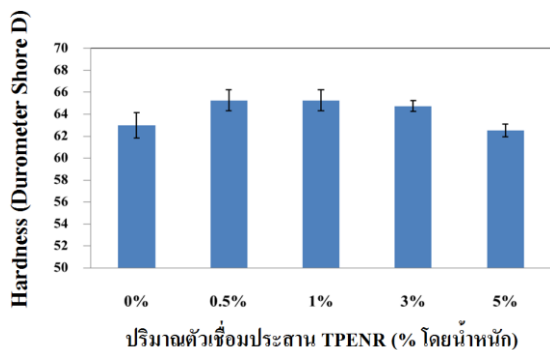
ผลการทดสอบความต้านทานแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับ Nylon6 โดยมี TPENR เป็นตัวเชื่อมประสานแสดงในรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใส่ TPENR ในระบบพอลิเมอร์ผสมค่าความต้านทานแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับระบบที่ไม่ใส่ตัวเชื่อมประสาน ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากลักษณะโครงสร้างของ TPENR ที่มีทั้งส่วนที่มีขี้ และไม่มีขี้อยู่ด้วยกัน ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างส่วนที่มีขี้ของยาง ENR และส่วนที่มีขี้ของ Nylon6 ทำให้พอลิเมอร์ผสมเกิดการยึดเกาะเข้ากันได้ดีมาก ซึ่งส่งผลให้เกิดการดูดซับพลังงานมากขึ้นตามไปด้วย [15] จึงทำให้ TPENR สามารถทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยปริมาณของ TPENR ที่ทำให้ได้ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงสุดอยู่ที่ 1% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับ Nylon6 และปริมาณตัวเชื่อมประสาน TPENR ในอัตราส่วนต่างๆ

4.2.2.2 ผลการทดสอบการทดสอบความแข็ง (Hardness Testing)

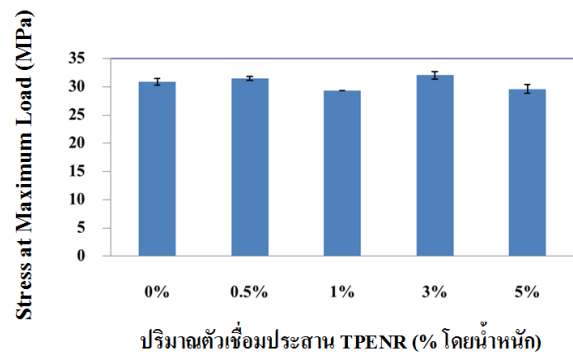
จากรูปที่ 6 แสดงผลการทดสอบความแข็งต่อแรงกดของ พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับ Nylon6 โดยมี TPENR เป็นตัวเชื่อมประสาน จากผลการทดสอบแสดงว่า พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ Nylon6 ในระบบที่มีการใช้ตัวเชื่อมประสานมีค่าความแข็งต่อแรงกดที่เพิ่มมากขึ้นเพียงเล็กน้อยโดยมีค่าเพิ่มจาก 63 เป็น 65 (Shore D) และค่าความแข็งที่สูงที่สุดอยู่ที่การใส่ตัวเชื่อมประสานเพียง 0.5% โดยน้ำหนัก เนื่องมาจาก TPENR ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานใน พอลิเมอร์ผสมทำให้พอลิเมอร์ผสมสามารถเข้ากันได้ดีมากขึ้น ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีความแข็งเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย [15]



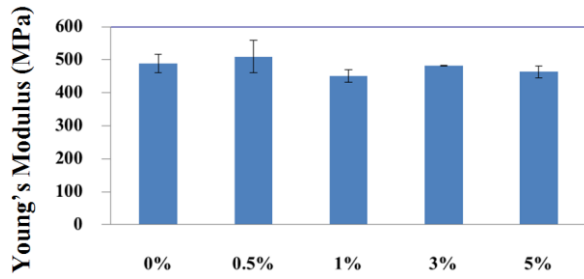
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับ Nylon6 และปริมาณตัวเชื่อมประสาน TPENR ในอัตราส่วนต่างๆ

4.2.2.3 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile Testing)

การศึกษาสมบัติการทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับ Nylon6 โดยมี TPENR เป็นตัวเชื่อมประสานในอัตราส่วนต่างๆ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของ TPENR ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานในพอลิเมอร์ผสม ที่ส่งผลต่อสมบัติการทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมซึ่งได้แก่ ความต้านทานแรงดึงสูงสุด และยังสัมพันธ์กับค่าคงที่การยืดตัวในรูปที่ 7 และรูปที่ 8 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ TPENR เป็นตัวเชื่อมประสานในปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่สามารถส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และค่าคงที่สัมพันธ์เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับระบบที่ไม่ใส่ตัวเชื่อมประสาน ซึ่งเป็นผลจากอิทธิพลของตัวเชื่อมประสานที่ช่วยในการลดขนาดขององค์ประกอบย่อยที่กระจายตัวอยู่ในองค์ประกอบหลัก ทำให้พอลิเมอร์ผสมเกิดการยึดเกาะเข้ากันได้ดีมากขึ้น และมีความสามารถในการส่งผ่านแรงระหว่างพื้นผิวเพิ่มขึ้น ทำให้สมบัติการทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระบบที่มีตัวเชื่อมประสานจึงสูงขึ้น [3-4, 15]



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ Nylon6 โดยมี TPENR เป็นตัวเชื่อมประสานในอัตราส่วนต่างๆ



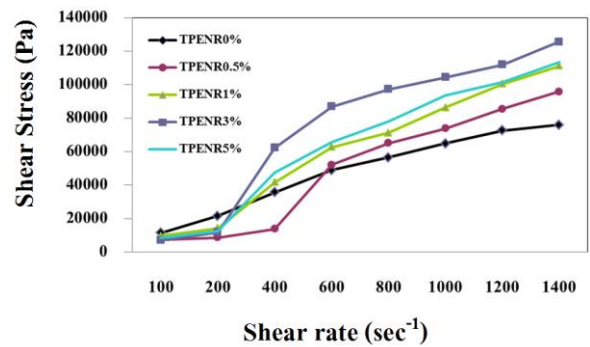
ปริมาณตัวเชื่อมประสาน TPENR (% โดยน้ำหนัก)

รูปที่ 8 การเปรียบเทียบค่ายังส์มอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ Nylon6 โดยมี TPENR เป็นตัวเชื่อมประสานในอัตราส่วนต่างๆ

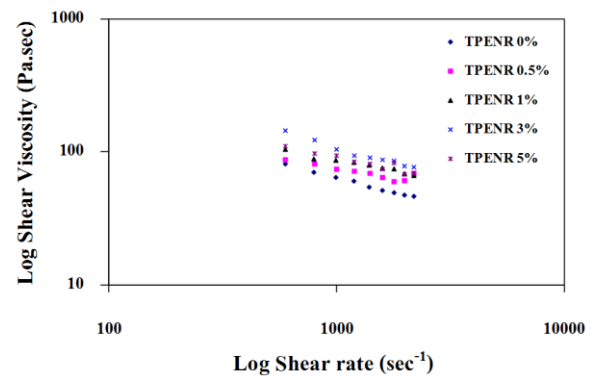
4.2.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ผสม (Rheological Properties)

ผลการทดสอบคุณสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับ Nylon6 โดยมี TPENR เป็นตัวเชื่อมประสานในอัตราส่วนต่างๆ โดยใช้เครื่องคาพิลลารีรีโอมิเตอร์ (Capillary Rheometer) ที่อุณหภูมิในการทดสอบคือ 240 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 9 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราเฉือน และความเค้นเฉือนของพอลิเมอร์ผสม โดยจากรูปแสดงให้เห็นว่าความเค้นเฉือนจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้นจาก 100 ถึง 1400 sec⁻¹ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่าความเค้นเฉือนของพอลิเมอร์ผสมที่มีการใช้ตัวเชื่อมประสานพบว่าเมื่อปริมาณของตัวเชื่อมประสานเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเค้นเฉือนมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นด้วยว่าพอลิเมอร์ผสมแสดงพฤติกรรมการไหลเป็นแบบนอนนิวทอนเนียน กล่าวคือเมื่ออัตราเฉือนที่ให้ต่อพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้โมเลกุลเกิดการจัดเรียงตัวเกิดการพันกันเองน้อยลง ทำให้ค่าความหนืดลดลง และไหลได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ค่าความหนืดของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ TPENR เป็นตัวเชื่อมประสานมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 10 ทั้งนี้เนื่องมาจากประสิทธิภาพของ TPENR ที่ใช้เป็นตัวเชื่อมประสานส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ Nylon6 สามารถเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น และช่วยเพิ่มแรงยึด

เหนียวระหว่างเฟสให้มากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่ออัตราส่วนของตัวเชื่อมประสานเพิ่มขึ้นจนถึงค่าๆ หนึ่งค่าความหนืดของพอลิเมอร์ผสมจะมีแนวโน้มลดลง โดยค่าความหนืดของพอลิเมอร์ผสมสูงสุดคือ พอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม TPENR ในอัตราส่วน 3% โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อปริมาณตัวเชื่อมประสานที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการลื่นไถลออกจากกันได้ง่ายขึ้น จึงส่งผลให้ความหนืดของพอลิเมอร์ผสมลดลง [17]



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือน และความเค้นเฉือนของพอลิเมอร์ผสม ระหว่าง LDPE และ Nylon6 โดยมี TPENR เป็นตัวเชื่อมประสานในอัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราเฉือน และค่าความหนืดของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ Nylon6 โดยมี TPENR เป็นตัวเชื่อมประสานในอัตราส่วนต่างๆ

5. บทสรุปงานวิจัย

การศึกษาสมบัติในด้านต่างๆของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับ Nylon6 โดยใช้เทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์ชนิด TPENR เป็นตัวเชื่อมประสาน สามารถสรุปโดยรวมคือ TPENR สามารถทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานสำหรับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง Nylon6 และ LDPE ได้เป็นอย่างดี ซึ่งสามารถยืนยันได้จากภาพสัณฐานวิทยาที่แสดงให้เห็นว่าขนาดของอนุภาคย่อย LDPE ที่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์หลัก Nylon6 มีแนวโน้มที่มีขนาดเล็กลงอย่างเห็นได้ชัด และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอเมื่อมีการใช้ TPENR ในปริมาณเพียง 0.5% โดยน้ำหนัก โดยปริมาณที่เหมาะสมที่สามารถทำให้โครงสร้างของพอลิเมอร์ผสมเข้ากันได้เป็นอย่างดี และปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกล และการไหลได้ดีในระดับหนึ่งคือที่ปริมาณตัวเชื่อมประสานประมาณ 0.5-1 % โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม ทั้งนี้เนื่องมาจากความมีขั้วที่ได้จากหมู่ฟังก์ชันของยาง ENR ซึ่งมีความมีขั้วสูงทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างส่วนที่มีขั้วของยาง ENR และส่วนที่มีขั้วของ Nylon6 ทำให้พอลิเมอร์ผสมเกิดการยึดเกาะเข้ากันได้ดีมากขึ้น จึงทำให้ TPENR สามารถทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานได้ อย่างไรก็ตามคุณสมบัติในด้านๆ ต่างของพอลิเมอร์ผสมที่มี TPENR เป็นตัวเชื่อมประสานก็สามารถมีการปรับปรุงขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมระบบที่ไม่มีตัวเชื่อมประสาน

6. เอกสารอ้างอิง

- [1]. N. Papke and J. Karger-Kocsis, “Thermoplastic Elastomers based on Compatibilized Poly(ethylene terephthalate) Blends: Effect of Rubber Type and Dynamic Curing”, *Polymer*, 42, 2006, pp.1109-1120.
- [2]. R. Armat, and A. Moet, “Morphological Origin of Toughness in Polyethylene-Nylon-6 Blends”, *Polymer*, 34, 1993, pp.977-985.
- [3]. S. Sangwigit, M. Nithitanakul and B. P. Grady, “Blend of Carboxylate Acid Polymer Based on High-Density Polyethylene with Nylon” Thesis Submitted for the Degree of Master of Science, The Petroleum and Petrochemical College, Chulalongkorn University, 2006.
- [4]. P. Pakeyangkoon, M. Nithitanakul and B. P. Grady, “Blends of Low-Density Polyethylene with Nylon Compatibilized with Sodium-Neutralized Carboxylate Ionomer: Phase Morphology and Mechanical Properties”, *Proceedings of the 7th World Congress of Chemical Engineering (Glasgow 2005)*, Glasgow, Scotland.
- [5]. G. Fairley and R.E. Prud’homme, “A contribution to the Understanding of Polyethylene/Ionomer/Polyamide-6 Blends” *Polymer Engineering and Science*, 27(2), 1987, pp.1495-1503.
- [6]. R. Gadekar, A. Kulkarni and J.P. Jog, “Blends of Nylon with Polyethylene: Effect of Compatibilization on Mechanical and Dynamic Mechanical Properties”, *Journal of Applied Polymer Science*, 69, 1997, pp.161-168.
- [7]. B. Jurkowski, K. Kelar and D. Ciesielska, “Influence of Chemical and Mechanical Compatibilization on Structure and Properties of Polyethylene/Polyamide Blends”, *Journal of Applied Polymer Science*, 69, 1998, pp.719-727
- [8]. P. Suriyachai, P. Prasassrakich and S. Kiatkamjornwong, “Natural Rubber-g-Glycedyl Methacrylate/Styrene as a Compatibilizer in Natural Rubber/PMMA Blends” *Rubber Chemistry and Technology*, 77, 2004, pp.914-930.

- [9]. P.L. Teh, “Effect of Epoxidized Natural Rubber as a Compatibilizer in Melt Compounded Natural Rubber-Organoclay Nanocomposite” *European Polymer Journal*, 40, 2004, pp.2513-2521.
- [10]. W.J. Macknight, and R.W. Lenz, “Binary Alloys of Nylon6 and Ethylene-Methacrylic Acid Copolymer: Morphological, Thermal and Mechanical Analysis” *Polymer Engineering and Science*, 25, 1985, pp.1124-1134.
- [11]. H. Raval, S. Devi, Y.P. Singh and M.H. Mehta, “Relationship Between Morphology and Properties of PA6/LDPE blends: Effect of the Addition of Functionalized LDPE”, *Polymer*, 31, 1991, pp.493-500.
- [12]. A. Hallden, B. Ohlsson and B. Weaalen, “Poly(ethylene-graft-ethylene oxide) (PE-PEO) and Poly(ethylene-co-acrylic acid) (PEAA) as Compatibilizers in Blends of LDPE and Polyamide6”, *Journal of Applied Polymer Science*, 78, 2000, pp.2416-2424.
- [13]. A. Valenza, A.M. Visco, and D. Acierno, “Characterization of Blends with Polyamide6 and Ethylene Acrylic Acid Copolymers at Different Acrylic Acid Content”, *Polymer Testing*, 21, 2002, pp.101-109.
- [14]. V. Tanrattanakul, N. Sungthong and P. Raksa, “Rubber Toughening of Nylon6 with Epoxidized Natural Rubber”, *Polymer Testing*, 27, 2008, pp.794-800.
- [15]. P. Leewajanakul, R. Pattanaolarn, J.W. Ellis, M. Nithitanakul and B.P. Grady, “Use of Zinc-Neutralized Ethylene/Methacrylic Acid Copolymer Ionomers as Blend Compatibilizers for Nylon6 and Low-density Polyethylene”, *Journal of Applied Polymer Science*, 89, 2003, pp.620-629.
- [16]. A. Lahor, M. Nithitanakul and B.P. Grady, “Blends of Low-density Polyethylene with Nylon Compatibilized with a Sodium-neutralized Carboxylate Ionomer”, *European Polymer Journal*, 40, 2004, pp.2409-2420.
- [17]. S. Charoenpongpool, M. Nithitanakula, B.P. Grady, “Melt-Neutralization of Maleic Anhydride Grafted on High-Density Polyethylene Compatibilizer for Polyamide-6/High-density Polyethylene Blend: Effect of Neutralization Level on Compatibility of the Blend”, *Polymer Bulletin*, 2012, pp.1-17.