

การเตรียมและลักษณะเฉพาะของนาโนไฟเบอร์พอลิไวนิลคลอไรด์/
เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง
Preparation and Characterization of Electrospun Poly (Vinyl Chloride)/
Thermoplastic Polyurethanes Nanofibers

กฤษฎา พัชรสิทธิ์

Kritsada Phatcharasit

สาขาวิชาวิศวกรรมยางและพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง

Department of Rubber and Polymer Engineering, Faculty of Engineering, Thaksin University, Phatthalung Campus

Received : 23 September 2016

Accepted : 2 February 2017

Published online : 21 February 2017

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการเตรียมเส้นใยนาโนพอลิไวนิลคลอไรด์/เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (PVC/TPUs) ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง โดยทำการเตรียมสารละลายพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 15% w/w และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่ความเข้มข้น 10% w/w ทำการขึ้นรูปเส้นใยที่อัตราการไหล 5 mL/h. ความต่างศักย์ไฟฟ้า 12 kV. และระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงแผ่นรองรับ 18 cm. เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จะได้แผ่นฟิล์มบางนาโนไฟเบอร์ที่มีความหนาประมาณ 0.1 mm. พบว่า PVC/TPUs ผสมเข้ากันได้และเป็นเนื้อเดียวกันไม่เกิดการแยกเฟส ยืนยันได้จากการตรวจสอบด้วยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสารตัวอย่างโดยใช้เครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC) ทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงสูงขึ้นเมื่อเติม TPUs และตรวจสอบลักษณะบนพื้นผิวของเส้นใยนาโนด้วยโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) พบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของนาโนไฟเบอร์มีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อ TPUs ในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มมากขึ้น

คำสำคัญ : อิเล็กโตรสปินนิง เส้นใยนาโน พอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิยูรีเทน

*Corresponding author. E-mail : krit_off@hotmail.com

Abstract

The aim of this work is preparation of poly(vinyl chloride)/thermoplastic polyurethanes (PVC/TPUs) nanofibers by electrospinning method. Preparation of poly(vinyl chloride) and thermoplastic polyurethanes solution at 15% w/w and 10% w/w, respectively. Electrospinning was performed at flow rate 5 mL/h., applied voltage 12 kV. and tip to collector 18 cm. for 8 hr. to form thin film with thickness approximately not over than 0.1 mm. It was found that PVC/TPUs characteristic of miscible blend and homogeneous phase observed via differential scanning calorimetry (DSC) resulting in a higher of tensile strength when addition of TPUs and the surface topography of the nanofibers was examined by using scanning electron microscopy. It was found that the diameter of nanofibers increasing with increasing the amount of TPUs.

Keywords : electrospinning, nanofiber, poly(vinyl chloride), polyurethane

บทนำ

พอลิเมอร์เป็นวัสดุประเภทหนึ่งที่มีหลากหลายชนิดทั้งที่ได้จากธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ แต่ในบรรดาวัสดุพอลิเมอร์ทั้งหมด มีพอลิเมอร์กลุ่มหนึ่งที่เกิดจากการนำเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) มาผสมกับยาง หรือได้จากการเกิดโคโพลิเมอไรเซชัน (Copolymerization) ของส่วนที่อ่อน (Soft segment) กับส่วนที่แข็ง (Hard segment) กลายเป็นวัสดุกลุ่มผสม เรียกว่า เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic elastomer) หรือทีพีอี (TPE) ซึ่งวัสดุกลุ่มนี้กำลังมีบทบาทมากขึ้นในหลายอุตสาหกรรม (Kanchana-worawit, 2009) ยางเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (Thermoplastic polyurethanes, TPUs) เป็นยางเทอร์โมพลาสติกชนิดหนึ่ง มีลักษณะเป็นบล็อกโคโพลิเมอร์ที่ประกอบด้วยส่วนแข็ง (Hard segment) และส่วนอ่อน (Soft segment) โดยส่วนแข็งเป็นพันธะยูรีเทนที่ได้จากการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างไดไอโซไซยาเนตและสายไฮโดรคาร์บอน น้ำหนักโมเลกุลต่ำ ส่วนอ่อนเป็นพันธะเคมีของพอลิเอสเตอร์หรือพอลิอีเทอร์ (Pedrazzoli & Manas-Zloczower, 2016) ยางชนิดนี้มีราคาสูง แต่มีจุดเด่นเรื่องความทนทานต่อการสึกหรอ (Abrasion resistance) และการฉีกขาด (Tear strength) จึงเหมาะสำหรับทำพื้นรองเท้าหรือทดแทนชิ้นส่วนยางชนิดอื่นที่ไม่ทนทานต่อการสึกหรอ นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอื่น เช่น อุปกรณ์การแพทย์ ชิ้นส่วนยานยนต์ สายไฟและสายเคเบิล เป็นต้น (Nakason & Kaewsakul, 2008) ส่วนพอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly vinyl chloride, PVC) เป็นพลาสติกที่มีสมบัติแข็งแรง มีราคาถูกและง่ายต่อการขึ้นรูป ในปัจจุบันได้มีการนำพอลิไวนิลคลอไรด์มาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงสมบัติให้เหมือนกับไม้เพื่อใช้แทนไม้จากธรรมชาติ ในกระบวนการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบางในงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง ซึ่งเป็นกระบวนการอาศัยแรงทางไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดความต่างศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงทำให้สารละลายพอลิเมอร์กลายเป็นนาโนไฟเบอร์ หลักการทำงานของเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงจะให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงสูงแก่สารละลายพอลิเมอร์ ทำให้เกิดแรงผลักรังไฟฟ้าในสารละลายพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากหยดสารละลายรูปทรงกลมบนปลายเข็มจะเริ่มเปลี่ยนรูปร่างเป็นรูปโคน เมื่อแรงผลักรังไฟฟ้ามีค่ามากกว่าแรงตึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์ สารละลายจะพุ่งจากปลายของโคนไปยังวัสดุรองรับซึ่งต่อเข้ากับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าต่ำ สารละลายจะพุ่งเป็นแนวตรงในระยะหนึ่งและจะผ่านเข้าไปในส่วนของ Whipping instability ซึ่งจะเกิดการระเหยของตัวทำละลายได้เส้นใยของแข็งที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กจะตกซ้อนทับกันบนวัสดุรองรับใน

ลักษณะที่ไม่ได้ทอ (Non-woven) เส้นใยที่ได้จะขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ไฟฟ้า อัตราการไหล ความเข้มข้นของสารละลาย พอลิเมอร์ ความสามารถในการนำไฟฟ้าของสารละลาย เป็นต้น (Kang & Kang, 2016; Storti *et al.*, 2016)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำพอลิเมอร์มาขึ้นรูปด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง Lee และคณะ (Lee *et al.*, 2002) ทำการศึกษาผลของ PVC ในตัวทำละลายเตตระไฮโดรฟูแรน (THF) และไดเมทิลฟูมาเรท (DMF) ที่สัดส่วนของเตตระไฮโดรฟูแรน/ไดเมทิลฟูมาเรทที่ 100/0, 80/20, 60/40, 50/50, 40/60, 20/80 และ 0/100 โดยใช้ PVC ที่มีความเข้มข้น 10 - 15 wt% พบว่า การใช้ตัวทำละลายเตตระไฮโดรฟูแรนจะได้เส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 500 nm - 6 μ m ส่วนการใช้ตัวทำละลาย ไดเมทิลฟูมาเรทจะได้เส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 200 nm และสายละลายผสม (เตตระไฮโดรฟูแรน/ไดเมทิลฟูมาเรท) ที่ 80/20 และ 20/80 จะได้เส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่น้อยกว่า 1 μ m. Jung และ Lee (Jung & Lee, 2011) ทำการแปรปริมาณ PMMA/PVC ละลายพอลิเมอร์ผสมด้วยไดเมทิลฟูมาเรท พบว่า ที่ PVC อย่างเดียวจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เหมาะสมที่สุด ส่วนการเพิ่มปริมาณสารใน PMMA/PVC จะทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเติม PMMA ในงานวิจัยของ Zhong และคณะ (Zhong *et al.*, 2011) ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์มบางจาก PVDF (Poly vinyl difluoride)/PVC ที่อัตราส่วน 8:2 w/w เตรียมด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิงแล้วนำไปใช้ในสาร electrolyte พบว่า การดูดซึม electrolyte และ ionic conductivity ของ PEs (Polymer electrolyte) เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณ PVC เพิ่มขึ้น Kongsuk และคณะ (Kongsuk *et al.*, 2016) ทำการสังเคราะห์เส้นใยนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง โดยการเตรียมสารละลายคอปเปอร์อะซิเตตผสมกับ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (12 wt%) ให้ได้สารละลายคอปเปอร์อะซิเตต/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้น 4 wt% ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 14, 16 และ 18 กิโลโวลต์ พบว่า สันฐานวิทยาของเส้นใยมีลักษณะเรียงตัวแบบสุ่ม โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 50-300 nm. ผลจากการเผาแคลไซน์ พบว่า เส้นใยหลังเผาแคลไซน์มีการจับตัวกันแบบกลุ่มก้อนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1-10 μ m และเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยนาโนมีขนาดลดลง Malysheva และคณะ (Malysheva *et al.*, 2011) ศึกษาผลของโครงสร้างของ Poly(urethane-urea)s ทำปฏิกิริยาระหว่าง ผิวน้ำผสมของ PVC โดยทำการสังเคราะห์ Poly(urethane-urea)s ด้วยตัวทำละลายไดเมทิลฟูมาเรท และแปรปริมาณสัดส่วนของ PVC พบว่า PVC จะกระจายตัวในเฟสของ Poly(urethane-urea)s ในโครงสร้างส่วนที่มีความยืดหยุ่นและส่วนแข็งของ Poly(urethane-urea)s สามารถเข้ากันได้และทำปฏิกิริยาระหว่างผิวน้ำผสมของ PVC ได้ดี ทำให้อย่างเทอร์โมพลาสติกที่ได้มีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพที่ดี และการผสมของ PVC และ TPUs จากงานวิจัย Ha และคณะ (Ha *et al.*, 1998) ได้ทำการศึกษาสมบัติการแตกหักและสมบัติ PVC/TPUs ซึ่งทำการแปรปริมาณที่ 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50 และ 0/100 เตรียมด้วยเทคนิคการหลอมผสม (Melt blending) เมื่อปริมาณของ TPUs เพิ่มขึ้น พบว่า ค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการผสมระหว่างกัน และในส่วนของระยะยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน เพราะใน TPUs มีส่วนอ่อน (Soft segment) เพิ่มในพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น ส่วนค่าความแข็ง (Hardness) มีค่าลดลง ความเสถียรทางความร้อนดีขึ้นและการติดไฟลดลง เมื่อปริมาณของ TPUs เพิ่มขึ้น

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมแผ่นฟิล์มบางนาโนไฟเบอร์จากสารละลายพอลิเมอร์ระหว่าง TPUs และ PVC ที่ไม่เติมสารเคมีและทำการเติมสารเคมี เช่น ZnO, Stearic acid, TMTD, Winstay L และ Sulphur ซึ่งเป็นสารเคมีที่ช่วยในกระบวนการวัลคาไนเซชัน (Vulcanization process) ทำให้อย่างคงรูป (Vulcanizate) ด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง โดยทำการปรับปรุงสมบัติที่แข็งและเปราะของ PVC ด้วยการผสม TPUs ที่มีสมบัติด้านความแข็งแรงและสมบัติด้านความยืดหยุ่นเข้าไป และทำการศึกษาการแปรปริมาณ TPUs ที่ผสมกับ PVC ที่มีผลต่อสมบัติแผ่นฟิล์มบางนาโนไฟเบอร์

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมสารละลายพอลิเมอร์

งานวิจัยนี้ได้ใช้พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) ที่ K-value 580 (บริษัท ไทยพลาสติกและเคมีภัณฑ์ จำกัด) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPUs) (บริษัท ดาวเคมีคอลประเทศไทย จำกัด) เตรียมสารละลายพอลิเมอร์แต่ละชนิดในตัวทำละลายผสมระหว่างเตตระไฮโดรฟูแรน (THF)/ไดเมทิลฟูมาเรท (DMF) ที่อัตราส่วน 50:50 w/w โดยทำการเตรียมสารละลาย PVC ที่ความเข้มข้น 15% w/w และ TPUs ที่ความเข้มข้น 10% w/w ของสารละลายทั้งหมด ให้ความร้อนกับสารละลายพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการละลายที่อุณหภูมิ 50 °C กวนต่อเนื่องจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน นำสารละลายพอลิเมอร์ทั้งสองมาผสมและเติมสารเคมีต่างๆ แสดงดังตารางที่ 1 กวนต่อเนื่องจนเป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิห้องและเตรียมขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มบางนาโนไฟเบอร์ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง หลังจากนั้นทำการวัดคาบไซส์แผ่นฟิล์มบางและระเหยตัวทำละลายที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำมาทดสอบสมบัติ

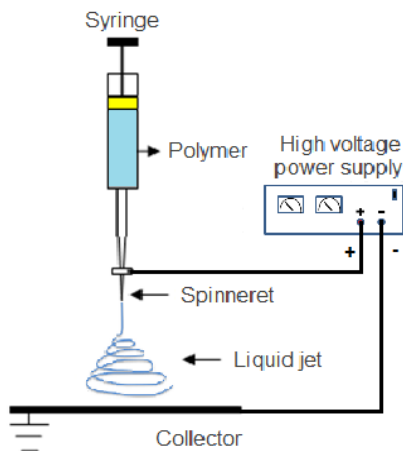
ตารางที่ 1 สูตรการเตรียมแผ่นฟิล์มบางนาโนไฟเบอร์ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง

สารเคมี	Parts per hundred of rubber (phr)						
15%PVC solution	100	90	80	70	90	80	70
10%TPUs solution	-	10	20	30	10	20	30
ZnO	-	-	-	-	4	4	4
Stearic acid	-	-	-	-	1	1	1
TMTD	-	-	-	-	2	2	2
Winstay L	-	-	-	-	1	1	1
Sulphur	-	-	-	-	3	3	3

2. กระบวนการขึ้นรูปด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง

กระบวนการขึ้นรูปด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดความต่างศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง (High voltage DC supply), หลอดบรรจุสารละลายที่ติดเข็มโลหะ (Syringe with metal needle) และวัสดุรองรับ (Collector) แสดงดังภาพที่ 1

การขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบางนาโนไฟเบอร์ทำการเตรียมโดยใช้เครื่อง eS-robot electrospinning ที่สามารถให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่ 30 kV. ที่อุณหภูมิห้อง และในงานวิจัยนี้จะใช้สภาวะการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบาง โดยกำหนดอัตราการไหล (flow rate) ที่ 0.5 mL/h., ความต่างศักย์ไฟฟ้า (voltage) ที่ 12 kV. และระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับวัสดุรองรับ (tip to collector) ที่ 18 cm. เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จะได้แผ่นฟิล์มบางนาโนไฟเบอร์ที่มีความหนาประมาณ 0.1 mm.



ภาพที่ 1 กระบวนการอิเล็กโทรสปินนิง (Electrospinning process)

3. การตรวจสอบลักษณะและสมบัติของแผ่นฟิล์มบาง

3.1 ตรวจสอบลักษณะสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มบางด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (LLOYD instrument LR10K) โดยตัดชิ้นงานทดสอบเป็นรูปดัมเบล (Dumbbell) โดยใช้เครื่องตัดชิ้นทดสอบแบบ Die C ตามมาตรฐาน ASTM D412 แล้ววัดความหนาด้วยเครื่องวัดความหนา (Thickness meter) โดยใช้ความเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตรต่ออนาที บันทึกค่าความเค้น ณ จุดขาด (Stress at break) หรือค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) และค่าเปอร์เซ็นต์ระยะยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) แล้วหาค่าเฉลี่ยของชิ้นทดสอบ 5 ตัวอย่าง การคำนวณหาความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength)

$$\text{Tensile strength} = \frac{\text{maximum load}}{A} \quad (1)$$

โดย maximum load คือ แรงดึงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นทดสอบขาด (นิวตัน)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบขณะยังไม่ยืด (ตารางมิลลิเมตร)

การคำนวณหาระยะยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)

$$\text{Elongation at break} = 100 \times \frac{(L - L_0)}{L_0} \quad (2)$$

โดย L คือ ระยะที่ชิ้นทดสอบสามารถยืดตัวได้จนขาด (มิลลิเมตร)
 L₀ คือ ระยะกำหนดก่อนทำการทดสอบ (มิลลิเมตร)

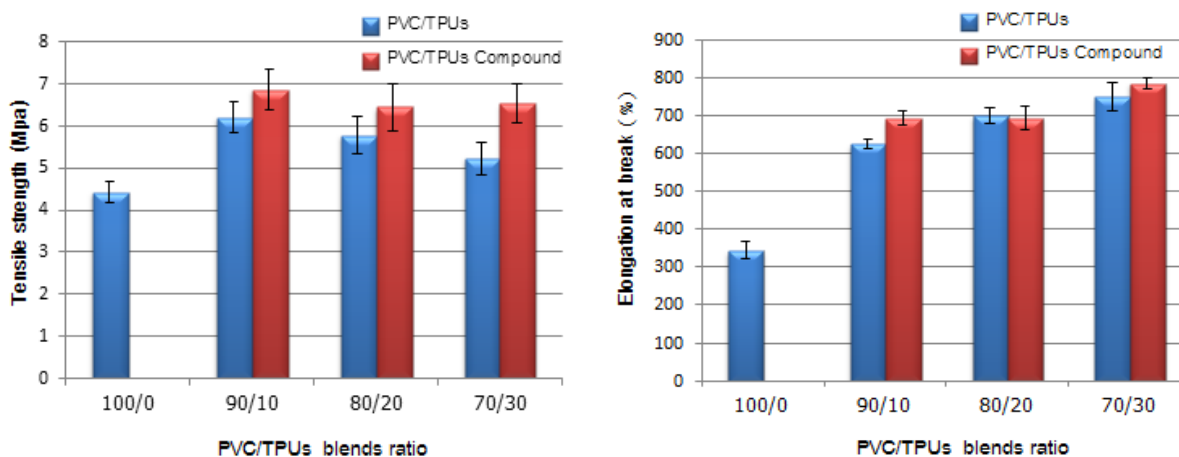
3.2 ตรวจสอบสมบัติลักษณะทางสัณฐานวิทยาเพื่อตรวจสอบพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field emission scanning electron microscope, FE-SEM) รุ่น Philips XL30 ประเทศญี่ปุ่น

3.3 ตรวจสอบสมบัติทางความร้อน การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสารตัวอย่างโดยใช้เทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) (TA Instruments DSC 250, USA) ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ในอัตราความร้อน 10 °C/นาที่ ทดสอบช่วงอุณหภูมิ -50 °C ถึง 600 °C

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

สมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มบาง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบางนาโนไฟเบอร์จากสารละลายพอลิเมอร์ระหว่าง PVC และ TPUs ที่ทำการเติมและไม่เติมสารเคมีด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง ซึ่งจากการทดลองการแปรอัตราส่วนของ PVC/TPUs ที่ 100/0, 90/10, 80/20 และ 70/30 โดยน้ำหนักของสารละลายทั้งหมด พบว่า ค่าความทนต่อแรงดึงทั้งการเติมและไม่เติมสารเคมีมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติม TPUs เปรียบเทียบกับ PVC ที่ 100/0 โดยน้ำหนักของสารละลายทั้งหมด และมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเพิ่มสัดส่วนของ TPUs โดยสัดส่วนที่มีการเติมสารเคมีจะมีค่าความทนต่อแรงดึงที่สูงกว่า เพราะเกิดการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันในเฟส TPUs ทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยง (crosslink) ระหว่างสายโซ่โพลีเมอร์ที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และจะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนของ PVC/TPUs เท่ากับ 90/10 จะให้ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดทั้งในสัดส่วนที่เติมและไม่เติมสารเคมี เนื่องจากสารละลายผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (miscible blend) เพราะ PVC เป็นพอลิเมอร์ที่มีขั้วและ TPUs ก็มีขั้วเช่นกัน จึงทำให้สามารถผสมเข้ากันได้ไม่เกิดการแยกเฟส ซึ่งสามารถยืนยันจากเทคนิค DSC

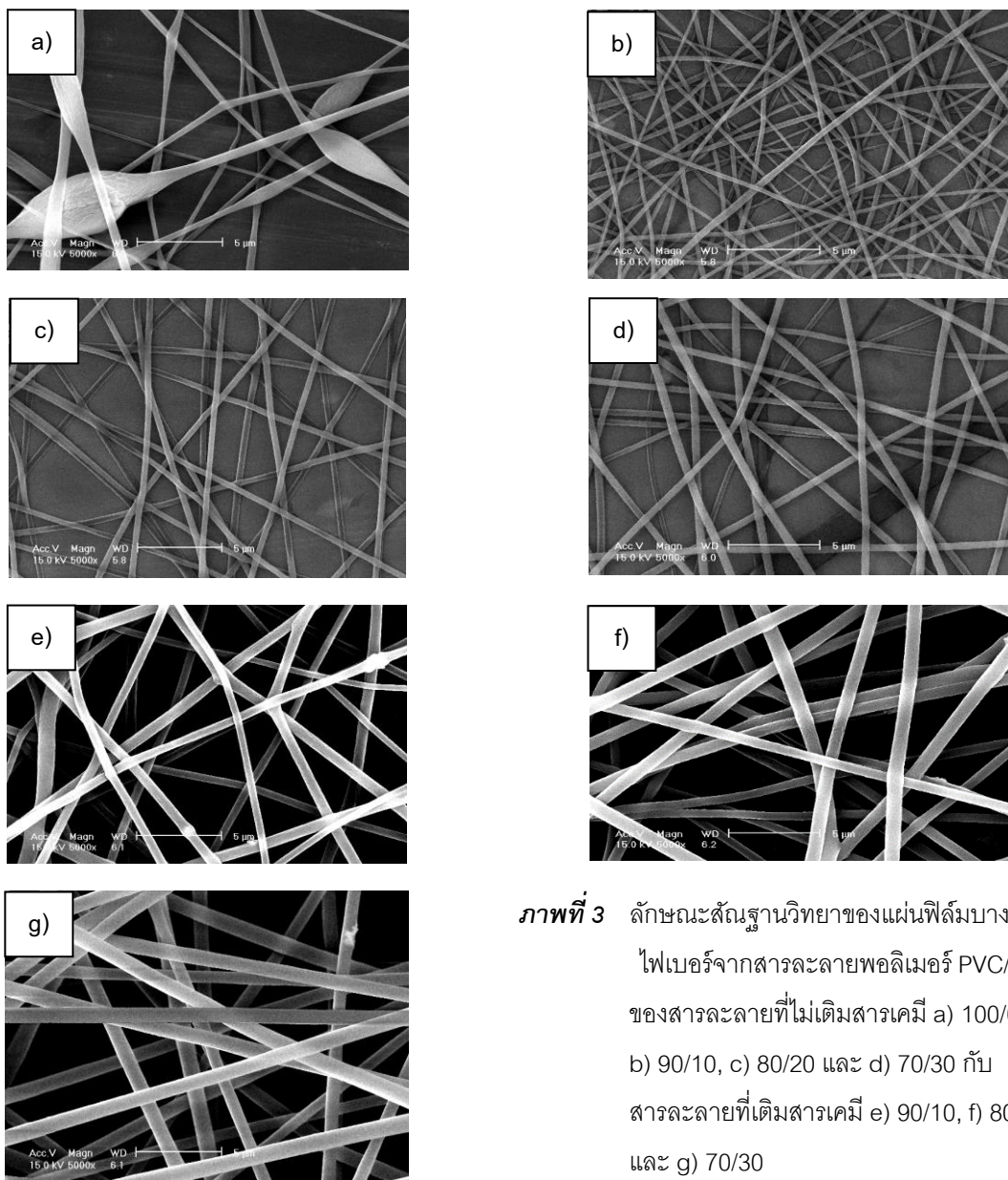


ภาพที่ 2 ค่าความทนต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของ PVC/TPUs

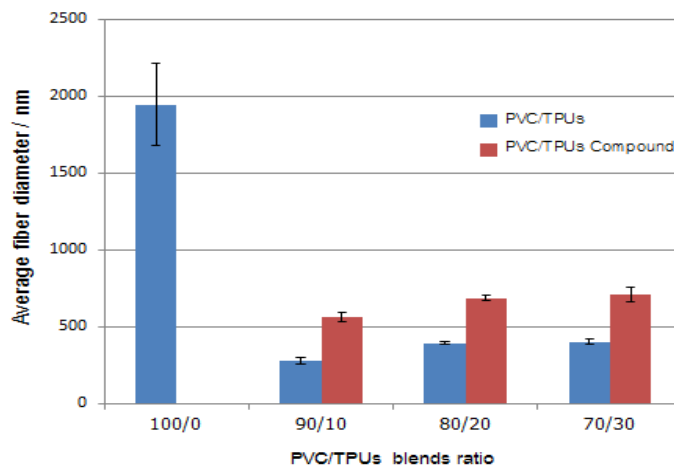
ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

จากภาพที่ 3 แสดงภาพ SEM micrograph ของแผ่นฟิล์มบางนาโนไฟเบอร์จากสารละลายพอลิเมอร์ PVC/TPUs จะเห็นได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของสัณฐานวิทยาขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ TPUs จากรูป b-g เมื่อเติมสัดส่วนของสารละลาย TPUs เข้าไปในสารละลาย PVC (ภาพ a) แล้วทำการขึ้นรูปด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง พบว่า เส้นใยที่ได้จะไม่ปรากฏเม็ด bead ซึ่งเป็นผลมาจากการการเติมสารละลาย TPUs ทำให้มีความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ซึ่งความเข้มข้นของ

สารละลายพอลิเมอร์จะส่งผลต่อความหนืดและแรงตึงผิวของสารละลาย ทำให้อัตราการไหลของสารละลายลดลงจึงมีแนวโน้มในการเกิด bead ลดลง แต่เมื่อความเข้มข้นของพอลิเมอร์ PVC/TPUs เพิ่มขึ้น ทำให้ความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นด้วย เส้นใยที่ได้จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้น (จากภาพที่ 4) โดยสารละลายพอลิเมอร์ PVC/TPUs ที่ 90/10 (ภาพ b) จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีขนาดเล็กกว่าสารละลายพอลิเมอร์ PVC/TPUs ที่ 70/30 (ภาพ d) ส่วนสารละลายพอลิเมอร์ PVC/TPUs (ภาพ e-g) ที่เติมสารเคมีที่ PVC/TPUs ที่ 90/10 (ภาพ e) มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีขนาดเล็กกว่าสารละลายพอลิเมอร์ PVC/TPUs ที่ 70/30 (ภาพ g)



ภาพที่ 3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของแผ่นฟิล์มบางนาโนไฟเบอร์จากสารละลายพอลิเมอร์ PVC/TPUs ของสารละลายที่ไม่เติมสารเคมี a) 100/0, b) 90/10, c) 80/20 และ d) 70/30 กับสารละลายที่เติมสารเคมี e) 90/10, f) 80/20 และ g) 70/30



ภาพที่ 4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย PVC/TPUs

สมบัติทางความร้อน

การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของแผ่นฟิล์มบางนาโนไฟเบอร์จากสารละลายพอลิเมอร์ PVC/TPUs ในตารางที่ 2 พบว่า ค่า glass transition temperature (T_g) ของ PVC = 80.17 °C ส่วน T_g ของ TPUs = -40 °C และจะเห็นได้ว่า PVC/TPUs ที่ 90/10 w/w ให้ค่า T_g ค่าเดียว คือ 57 °C และ PVC/TPUs compound ที่ 90/10 w/w ให้ค่า T_g ค่าเดียว คือ 63 °C โดยค่า T_g ที่ได้จะอยู่ระหว่าง PVC และ TPUs แสดงให้เห็นว่า PVC/TPUs มีความเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวกัน (miscible blend) ซึ่งสอดคล้องกับค่าความทนต่อแรงดึง เมื่อมีการเติม TPUs ค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ PVC (100/0) และขึ้นงานไม่เกิดการแยกเฟสจากภาพ SEM

ตารางที่ 2 ค่า T_g ของ PVC, TPUs และ PVC/TPUs ด้วยเทคนิค DSC

Polymer	Composition	T_g (°C)
PVC	100	80.17
TPUs	100	-40
PVC/TPUs	90/10	57
PVC/TPUs compound	90/10	63

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้สามารถปรับปรุงสมบัติของแผ่นฟิล์มบางนาโนไฟเบอร์จากสารละลายพอลิเมอร์ PVC/TPUs ได้โดยการเติมสารเคมีทำให้สมบัติค่าความทนต่อแรงดึงสูงขึ้นเมื่อเทียบกับ PVC/TPUs ที่ไม่เติมสารเคมี และการผสมสารละลาย TPUs เข้าไปในสารละลาย PVC ทำให้การเกิด bead ของเส้นใยหายไป เส้นใยมีลักษณะค่อนข้างเรียบ แต่ก็ทำให้เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของ TPUs ซึ่งสมบัติที่ได้ยืนยันได้จากเทคนิค SEM และ DSC ที่แผ่นฟิล์มบางนาโนไฟเบอร์จากสารละลายพอลิเมอร์ PVC/TPUs มีความเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวกัน (miscible blend) ไม่เกิดการแยกเฟสจึงทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมยางและพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุงและสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ให้การสนับสนุนครุภัณฑ์และสถานที่

เอกสารอ้างอิง

- Ha, C. S., Kim, Y., Lee, W. K., Cho, W. J., & Kim, Y. (1998). Fracture toughness and properties of plasticized PVC and thermoplastic polyurethane blends. *Polymer*, 39, 4765-4772.
- Jung, H. R., & Lee, W. J. (2011). Electrochemical characteristics of electrospun poly (methyl methacrylate)/poly (vinyl chloride) as gel polymer electrolytes for lithium ion battery. *Electrochimica Acta*, 58, 674-680.
- Kanchana-worawit, B. (2009). *Composites of plastics and rubber for the replacement*. Retrieved July 16, 2015, from <https://www.mtec.or.th/academic-services/mtec-knowledge/1002->. (In Thai)
- Kang, D. H., & Kang H. W. (2016). Surface energy characteristics of zeolite embedded PVDF nanofiber films with electrospinning process. *Applied Surface Science*, 387, 82-88.
- Kongsuk, C., Nakhong, R., & Poopanya, P. (2014). Preparation and characterization of copper oxide nanofibers by electrospinning technique. *Journal of Industrial Technology*, 4(2), 92-102. (In Thai)
- Lee, K. H., Kim, H. Y., La, Y. M., Lee, D. R., & Sung N. H. (2002). Influence of a mixing solvent with tetrahydrofuran and *N,N*-dimethylformamide on electrospun poly(vinyl chloride) nonwoven mats. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 40, 2259-2268.
- Malysheva, T. L., Golovan, S. V., & Starokadomsky, D. L. (2011). The effect of interfacial interactions on a structure and properties of polyurethane elastomer/poly(vinyl chloride) blends. *Open Journal of Organic Polymer Materials*, 3, 1-7.
- Nakason, C., & Kaewsakul, K. (2008). Thermoplastic elastomer based on natural rubber and ethylene-vinyl acetate copolymer blends. *Thesis submitted in fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science*. Prince of Songkla University, Thailand. (In Thai)
- Pedrazzoli, D., & Manas-Zloczower, I. (2016). Understanding phase separation and morphology in thermoplastic polyurethanes nanocomposites. *Polymer*, 90, 256-263.
- Storti, E., Roso, M., Modesti, M., Aneziris, C. G., & Colombo, P. (2016). Preparation and morphology of magnesium borate fibers via electrospinning. *Journal of the European Ceramic Society*, 36, 2593-2599.
- Zhong, Z., Cao, Q., Jing, B., Wang, X., Li, X., & Deng, H. (2011). Electrospun PVdF-PVC nanofibrous polymer electrolytes for polymer lithium-ion batteries. *Materials Science and Engineering B*, 177, 86-91.