



**การเตรียมและสมบัติของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสมกับพอลิไวนิลคลอไรด์  
ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปโดยใช้ตัวทำละลาย  
กฤษฎา พัทชรสิทธิ์**

**Preparation and Properties of Epoxidized Natural Rubber/Poly (vinyl chloride)  
Blends by Solution Casting Technique**

Kritsada Phatcharosit

ภาควิชาวิศวกรรมยางและพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง อำเภอป่าพะยอม จังหวัดพัทลุง 93210  
Department of Rubber and Polymer Engineering, Faculty of Engineering, Thaksin University, Papayom, Phatthalung 93210  
Corresponding author. E-mail address: krit\_off@hotmail.com  
Received: 20 June 2016; Accepted: 10 August 2016

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงสมบัติของแผ่นฟิล์มบางที่เตรียมจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxidized Natural Rubber, ENR) และพอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly vinyl chloride, PVC) แผ่นฟิล์มบางผสมถูกเตรียมด้วยเทคนิคการขึ้นรูปโดยใช้ตัวทำละลาย จากสารละลาย ENR และ PVC ที่ใช้ไดเมทิลฟูมาเรท (DMF) และเตตระไฮโดรฟูแรน (THF) เป็นตัวทำละลาย ในงานนี้ได้ศึกษาสัดส่วนของ ENR/PVC (100/0, 75/25, 50:50, 25:75 และ 0/100) แผ่นฟิล์มบางจากส่วนผสมถูกเตรียมเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล เช่น สมบัติทนต่อแรงดึง สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารตัวอย่าง (Thermogravimetric Analysis, TGA) และเทคนิคการวิเคราะห์ทดสอบวัสดุโดยการวัดค่าพลังงานความร้อนและอุณหภูมิของสารตัวอย่าง (Differential scanning calorimetry, DSC) และโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แรงของอะตอม (Atomic force microscope, AFM) พบว่า ENR/PVC มีลักษณะเฉพาะที่เข้ากันได้และผสมเป็นเนื้อเดียวกันจากการตรวจสอบด้วยเทคนิค DSC, SEM และ AFM ส่งผลให้ค่าทนต่อแรงดึงสูงขึ้นเมื่อเติม PVC และสมบัติทางความร้อนของผสม ENR/PVC พบว่า แผ่นฟิล์มบาง ENR/PVC มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี

**คำสำคัญ:** ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ พอลิไวนิลคลอไรด์ เทคนิคการขึ้นรูปโดยใช้ตัวทำละลาย พอลิเมอร์ผสม

**Abstract**

The aim of this work is to improve the performance of epoxidized natural rubber (ENR) and poly (vinyl chloride) (PVC). The blended thin films were prepared by solution casting technique from solution mixture of ENR and PVC by using n,n-dimethylformamide (DMF) and tetrahydrofuran (THF) as a mix solvent. In this study, the ratio of ENR/PVC (100/0, 75/25, 50:50, 25:75 and 0/100) were prepared for mechanical testing such as tensile properties, thermal property determination using thermogravimetric analysis (TGA), differential scanning calorimetry (DSC) and morphology study using scanning electron microscope (SEM), atomic force microscope (AFM). It was found that ENR/PVC system shows characteristic of miscible blend and homogeneous phase observed via DSC, SEM and AFM resulting in a higher of tensile strength when addition of PVC and the thermal properties of the ENR/PVC blends results indicate that the ENR/PVC thin film has a good thermal stability.

**Keywords:** Epoxidized natural rubber, Poly (vinyl chloride), Solution casting technique, Polymer blend

**บทนำ**

พอลิเมอร์ผสมเป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันมาก โดยการนำพอลิเมอร์ 2 ชนิด ซึ่งอยู่ในสถานะที่เป็นของไหล ได้แก่ สารละลาย

(solution) หรือสารหลอมละลาย (molten) มาผสมให้อยู่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (blending) ได้เป็นพอลิเมอร์ผสม (polymer blend) ซึ่งมีสมบัติที่ดีของพอลิเมอร์แต่ละชนิดรวมกัน แต่การผสมจะต้องพิจารณาสภาพการเข้ากันได้ (compatibility) ของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน

ซึ่งบางชนิดสามารถเข้ากันได้ดี บางชนิดไม่สามารถเข้ากันได้ เนื่องจากโครงสร้างสายโซ่ที่แตกต่างกัน จึงไม่กระจายตัวอย่างอิสระเกิดการแยกชั้น (Paul, Barlow, & Keskkula, 1988)

การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ อีพอกไซด์ (ENR) ด้วยการผสมพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) ซึ่งมีสมบัติเป็นยางเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic elastomer, TPE) เป็นการรวมสมบัติของยางและพลาสติกเข้าด้วยกัน และได้มีงานวิจัยเพื่อปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสมพอลิไวนิลคลอไรด์มีการศึกษาโดย Sukkaew, Woothikanokkhan, & Thavarungkul (2001) (เป็นการปรับปรุงสมบัติการรับแรงกระแทกของยางธรรมชาติผสมพอลิไวนิลคลอไรด์ โดยใช้ ENR เป็นทั้งตัวผสมและสารช่วยผสม ซึ่งเตรียมในลักษณะของยางคอมปาวด์ พบว่า ENR/PVC (20:80) ให้สมบัติต้านทานแรงกระแทกสูงสุด คือ  $122 \text{ kJ/m}^2$  และได้ศึกษาความเข้ากันได้ (miscible blend) ด้วยเทคนิค DSC และ SEM พบว่า ENR/PVC เป็น miscibility เนื่องจากมีค่า  $T_g$  ค่าเดียวในการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของวัสดุ (Varughese, Nando, & De, 1989; Papanicolaou & Baxevonakis, 1991) และการผสมกันในอัตราส่วนต่างๆ (Ratnam & Zaman, 1999) พบว่า PVC ให้สมบัติการทนต่อแรงดึงที่สูง ทนต่อสารเคมี ในขณะที่ ENR ทนต่อการฉีกขาดที่ดีและทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) เข้ากับ PVC ได้ดี นอกจากนี้การเติมสารตัวเติมในแผ่นฟิล์ม Thermoplastic elastomer เป็นการปรับปรุงสมบัติพื้นฐานและสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ (Sanadi, Caulfield, Jacobson, & Rowell, 1995; Azeredo, 2009) และการใช้เทคนิคการขึ้นรูปโดยใช้ตัวทำละลายได้มีการศึกษาโดย Michal and Krystyna (1991) ศึกษาโครงสร้างของพอลิไวนิลคลอไรด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการขึ้นรูปโดยใช้ตัวทำละลายเพื่อใช้เป็นเมมเบรน และพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันมาเปรียบเทียบ พบว่า น้ำหนักโมเลกุล ความเข้มข้นของพอลิเมอร์และความดันในกระบวนการกรองส่งผลต่อสมบัติของเมมเบรน ส่วน Hiroshi, Kazuhiko, & Tadash (1993) เตรียมเมมเบรนพอลิไวนิลคลอไรด์ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปโดยใช้ตัวทำละลาย โดยแปรชนิดของตัวทำละลายและความเข้มข้นที่

แตกต่างกัน พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของการขึ้นรูปโดยใช้ตัวทำละลายและลักษณะทางสัณฐานวิทยา พบว่า ความหนาแน่นและผลึกของ PVC เพิ่มขึ้นเมื่อความหนืดเพิ่มขึ้น ลักษณะทางสัณฐานวิทยาจะมีลักษณะเฉพาะเมื่อขึ้นรูปโดยใช้ตัวทำละลาย และการซึมผ่านของสารละลาย การแพร่ของน้ำจะลดลงตามการเพิ่มผลึกของ PVC

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อต้องการปรับปรุงสมบัติเชิงกลและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติอีพอกไซด์โดยการผสมพอลิไวนิลคลอไรด์ ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปโดยใช้ตัวทำละลายเพื่อให้ได้แผ่นฟิล์มบางและทำการศึกษาปริมาณของ ENR ที่ผสมกับ PVC ที่มีผลต่อสมบัติแผ่นฟิล์มบาง โดยพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะมีสมบัติเชิงกลที่ดี สามารถแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่หลากหลายและช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ รวมทั้งเป็นแนวทางใหม่ในการพัฒนาวัสดุยางธรรมชาติอีกด้วย

## วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### การเตรียมแผ่นฟิล์มบาง

#### การเตรียมสารละลาย PVC

งานวิจัยนี้ใช้ PVC ที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่ 48,000 กรัม/โมล (บริษัท Sigma-Aldrich จำกัด) เตรียมสารละลายพอลิเมอร์ที่ความเข้มข้น 10% ละลายด้วยตัวทำละลาย DMF/THF (50:50 w/w) ให้ความร้อนกับสารละลายพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิประมาณ 50-55 °C กวนต่อเนื่อง จนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกันแล้วจะได้อายุสารละลาย PVC

#### การเตรียมสารละลาย ENR

ใช้ยางธรรมชาติ ENR-50 (บริษัท เมืองใหม่กัททรี จำกัด) เพื่อเตรียมสารละลาย ENR ที่ความเข้มข้น 10% ทำการตัดให้เป็นชิ้นเล็กๆ ละลายด้วยตัวทำละลาย DMF/THF (50:50 w/w) ให้ความร้อนกับสารละลาย ENR ที่อุณหภูมิประมาณ 60 °C กวนต่อเนื่อง จนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกันแล้วกรองสารละลายเพื่อเอาสิ่งสกปรกบางส่วนออกจะได้สารละลาย ENR

### การเตรียมแผ่นฟิล์มบาง

นำสารละลาย ENR และ PVC มาผสมอัตราส่วน ENR:PVC ที่ 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ



0:100 โดยน้ำหนักของสารละลายทั้งหมด กวนผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน นำสารละลายที่ได้ขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มบางเคลงบนแผ่นกระจกในตู้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่  $50 \pm 2\%$  ณ อุณหภูมิห้อง แล้วทำการปาดด้วยมีดปาด (casting knife) เพื่อให้สารละลายเป็นแผ่นที่สม่ำเสมอ ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนแผ่นฟิล์มแห้ง จากนั้นลอกแผ่นฟิล์มออกจากแผ่นกระจกและอบไล่ความชื้นและตัวทำละลายออกที่อุณหภูมิ  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 12 ชั่วโมง นำแผ่นฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปทำการศึกษสมบัติเชิงกลและลักษณะทางสัณฐานวิทยา

#### การทดสอบสมบัติของแผ่นฟิล์มบาง

##### สมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มบาง

แผ่นฟิล์มบางที่เตรียมได้จากงานวิจัยได้นำมาศึกษาการทดสอบสมบัติต้านแรงดึง (tensile strength) ตัดตัวอย่างขึ้นทดสอบเป็นรูปดัมเบลล์ตามมาตรฐาน ASTM D412 ด้วยเครื่องตัดขึ้นทดสอบ die C วัดความหนาของชิ้นตัวอย่าง 3 ตำแหน่ง หาค่าเฉลี่ยของความ

หนาที่วัดได้ จำนวน 5 ชิ้น/ตัวอย่าง แล้วนำไปทดสอบสมบัติการดึง โดยใช้ความเร็วในการดึง 100 มิลลิเมตรต่อนาที บันทึกค่าความเค้น ณ จุดขาด (stress at break) หรือค่าความทนต่อแรงดึง (tensile strength) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% elongation at break) ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าต่างๆ ดังนี้

ค่าความทนต่อแรงดึง (tensile strength) คือ ค่าแรงดึงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นทดสอบขาด (นิวตัน, N) เมื่อนำมาคำนวณต่อพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบขณะยังไม่ยืด ( $\text{mm}^2$ ) จะได้ค่าความทนต่อแรงดึงมีหน่วยเป็น  $\text{N}/\text{mm}^2$  หรือ เมกะพาสคาล (MPa) ในหน่วย SI เมื่อ maximum load คือ แรงดึงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นทดสอบขาด (นิวตัน) A คือพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบขณะยังไม่ยืด (ตารางมิลลิเมตร) ค่าความทนต่อแรงดึงมีหน่วยเป็น  $\text{N}/\text{mm}^2$  หรือ เมกะพาสคาล (MPa) ในหน่วย SI คำนวณได้จากสมการที่ (1)

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

การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) คือ ความสามารถของชิ้นทดสอบที่จะยืดออกได้โดยไม่เกิดการแตกหักเสียหาย จะแสดงค่าเป็นร้อยละหรือเปอร์เซ็นต์ของความยาวเดิม ซึ่งจะเกิดขึ้นทันทีที่มีการ

ขาดของชิ้นทดสอบ เมื่อ L คือ ระยะที่ขึ้นทดสอบสามารถยืดตัวได้จนขาด (มิลลิเมตร)  $L_0$  คือ ระยะกำหนดก่อนทำการทดสอบ (มิลลิเมตร) คำนวณได้จากสมการที่ (2)

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

##### ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นฟิล์มบาง

แผ่นฟิล์มบางที่เตรียมได้จากงานวิจัยได้นำมาศึกษา ลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยใช้เครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น SU-1500 และศึกษาลักษณะของพื้นผิวฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แรงของอะตอม (Atomic force microscope, AFM) รุ่น XE-70

##### สมบัติทางความร้อน

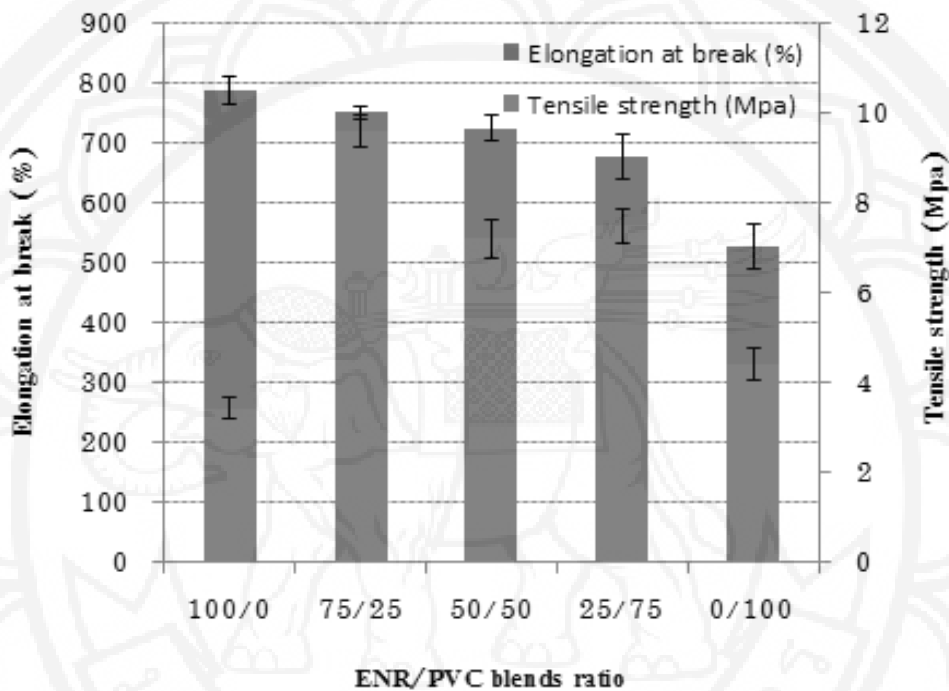
การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสารตัวอย่างโดย

ใช้เทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) (TA Instruments DSC 250, USA) ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ในอัตราความร้อน  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$  ทดสอบช่วงอุณหภูมิ  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  ถึง  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  และการวิเคราะห์การสลายตัวทางพอลิเมอร์ทำการศึกษาโดยใช้เทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA) (TA Instruments Q600, USA) ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ในอัตราความร้อน  $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$  ซึ่งทำการทดสอบจำนวน 2 ชิ้น/ตัวอย่าง

### ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบางด้วยเทคนิคการขึ้นรูปโดยใช้ตัวทำละลาย ซึ่งจากการทดลองการแปรสัดส่วนของ ENR/PVC ที่ 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 โดยน้ำหนักของสารละลายทั้งหมดพบว่า ค่าความทนต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติม PVC และมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเพิ่มสัดส่วนของ

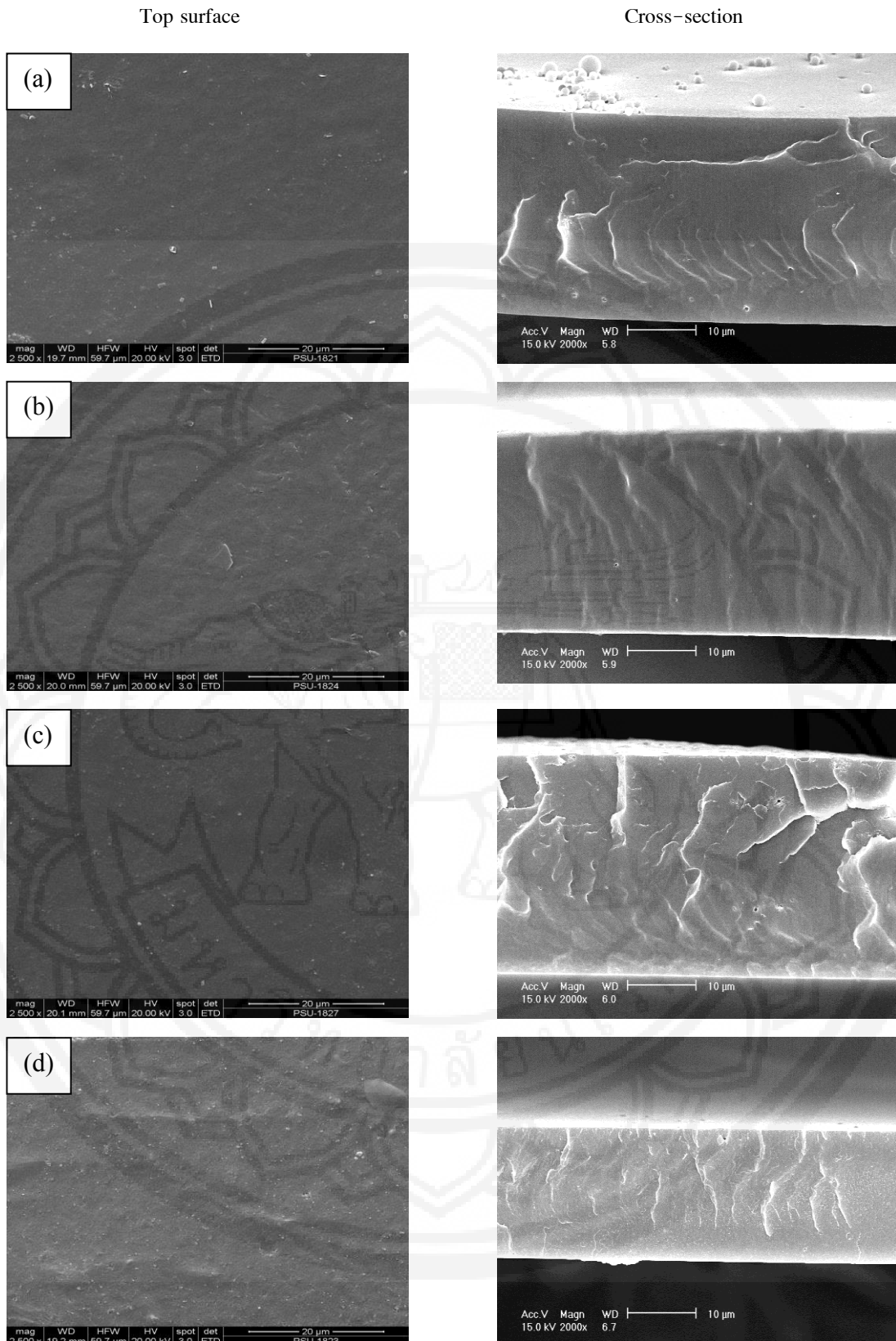
PVC โดยที่สัดส่วนของ ENR/PVC เท่ากับ 75/25 จะให้ค่าทนต่อแรงดึงสูงสุด ประมาณ 9.5 MPa อาจเนื่องมาจาก ENR/PVC เป็น miscible blend โดยความใสที่สามารถเห็นด้วยตาเปล่าและความเป็นเนื้อเดียวกันจากภาพ SEM เพราะ PVC เป็นพอลิเมอร์ที่มีขั้วและ ENR ก็มีขั้วเช่นกัน ทำให้สามารถผสมเข้ากันได้ง่าย



รูปที่ 1 ค่าความทนต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาด ของ ENR/PVC

จากรูปที่ 2 แสดงภาพ SEM micrograph ของแผ่นฟิล์มบาง ENR/PVC โดยแปรอัตราส่วนของ PVC พบว่าแผ่นฟิล์มบาง ENR/PVC มีลักษณะเหมือนกันไม่เห็นความแตกต่างของพอลิเมอร์ทั้งสอง (phase separation) เมื่อเปรียบเทียบกับ ENR ที่ไม่เติม PVC (100/0) เนื่องจาก ENR/PVC มีความเข้ากันได้เป็นเนื้อ

เดียวกัน (miscible blend) จึงไม่เกิดการแยกเฟสทำให้แผ่นฟิล์มบางที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบสมบัติค่าความทนต่อแรงดึง เมื่อเติม PVC ค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ ENR ที่ไม่เติม PVC (100/0)



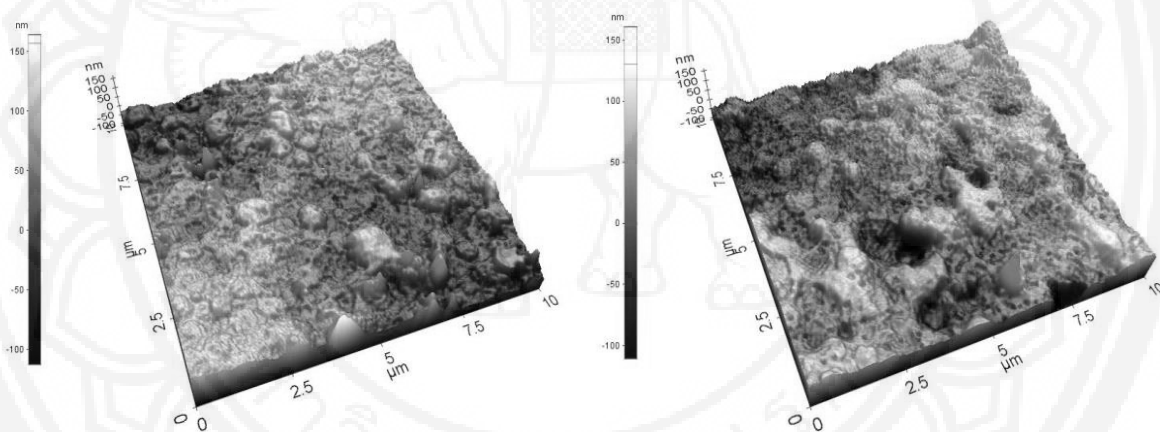
รูปที่ 2 ลักษณะลัทธิฐานวิทยาของแผ่นฟิล์มบาง ENR/PVC พื้นผิวด้านบนและภาพตัดขวาง โดยเทคนิคการขึ้นรูปโดยใช้ตัวทำละลาย (ENR/PVC ที่ (a) 100:0,(b) 75:25, (c) 50:50 และ (d) 25:75

ลักษณะพื้นผิวของแผ่นฟิล์มบาง ENR/PVC ทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แรงของอะตอม (AFM) ใช้ศึกษาผิวงานของวัสดุที่ให้ภาพที่มีความละเอียดสูงเป็นลักษณะภาพ 3 มิติ ได้เช่นเดียวกับเทคนิค Electron microscope จากการทดสอบแผ่นฟิล์มบาง ENR/PVC โดยใช้ปลายแหลมสัมผัสกับพื้นผิวเป็นระยะเวลาสั้น ๆ (noncontact mode หรือ tapping mode)

ดังรูปที่ 3 พบว่า พื้นผิวแผ่นฟิล์ม ENR ที่ไม่ได้เติม PVC (a) มีพื้นผิวค่อนข้างขรุขระน้อยกว่าพื้นผิวที่ทำการเติม PVC (b) โดยความขรุขระของพื้นผิวขึ้นอยู่กับสัดส่วนการเติม PVC หากมีสัดส่วน PVC ในปริมาณที่มาก ความขรุขระของพื้นผิวก็จะมากขึ้น และพื้นผิวที่ขรุขระเฉลี่ย ( $R_a$ ) และค่าเฉลี่ยกำลังสอง ( $R_q$ ) ของแผ่นฟิล์มบาง ENR/PVC จะแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พื้นผิวที่ขรุขระเฉลี่ย (roughness average,  $R_a$ ) และค่าเฉลี่ยกำลังสอง (root mean square,  $R_q$ ) ของแผ่นฟิล์มบาง ENR/PVC

แผ่นฟิล์ม	พื้นผิวที่ขรุขระเฉลี่ย ( $R_a$ ), nm		ค่าเฉลี่ยกำลังสอง ( $R_q$ ), nm		พื้นที่ผิว ( $\mu\text{m}^2$ )
	แกน X	แกน Y	แกน X	แกน Y	
PVC	37.9	41.7	51.4	62.3	102.2
ENR	22.5	11.5	31.2	12.2	100.9
ENR/PVC (50/50)	32.6	36.1	39.4	45.0	103.4



รูปที่ 3 ภาพ AFM ของ (a) ENR/PVC (100/0) และ (b) ENR/PVC (50/50)

การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของแผ่นฟิล์มบาง ENR/PVC แสดงในตารางที่ 2 พบว่า ค่า  $T_g$  ของ ENR =  $-22.73\text{ }^\circ\text{C}$  ในขณะที่ PVC =  $80.17\text{ }^\circ\text{C}$  โดยพบว่า ENR/PVC ที่ 75/25 w/w ให้ค่า  $T_g$  ค่าเดียว คือ  $10.38\text{ }^\circ\text{C}$  โดยอยู่ระหว่างค่า  $T_g$  ของ ENR และ PVC

แสดงให้เห็นว่า ENR/PVC มีความเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวกัน (miscible blend) ซึ่งสอดคล้องกับค่าความทนต่อแรงดึงและภาพ SEM เมื่อมีการเติม PVC ค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นและชิ้นงานไม่เกิดการแยกเฟสจากภาพ SEM

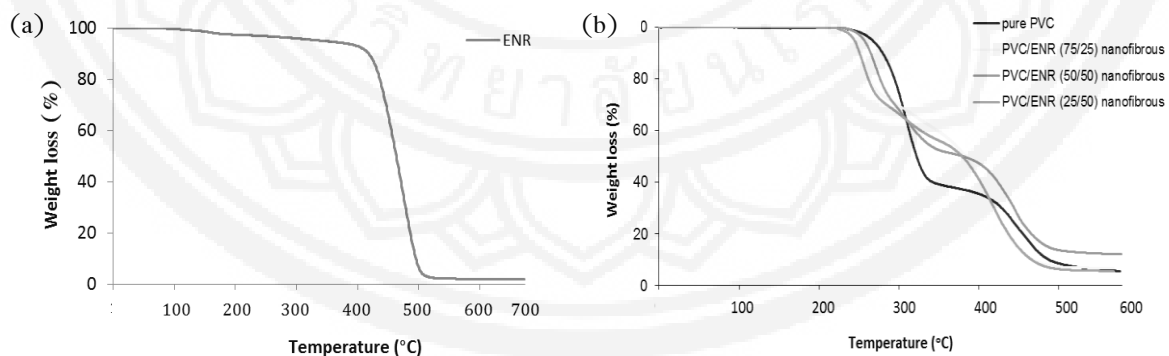


ตารางที่ 2  $T_g$  ของ ENR, PVC และ ENR/PVC ด้วยเทคนิค DSC

Polymer	Composition	$T_g$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
ENR	100%	-22.73
PVC	100%	80.17
ENR/PVC	75/25	10.38
ENR/PVC	25/75	43.60

การวิเคราะห์การสลายตัวด้วยความร้อนของแผ่นฟิล์มบาง ENR/PVC เป็นการวัดน้ำหนักที่สูญเสียไปของแผ่นฟิล์มบาง ENR/PVC โดยการเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราคงที่ภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อยเป็นฟังก์ชันระหว่างอุณหภูมิกับเวลา จากรูปที่ 4 พบว่าช่วงแรกที่อุณหภูมิตั้งแต่ 30 ถึง 200  $^{\circ}\text{C}$  แสดงถึงการระเหยของน้ำและตัวทำละลาย หลังจากนั้นการสลายตัวในช่วงที่สองจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 220  $^{\circ}\text{C}$  ซึ่งอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดของ ENR-50 อยู่ที่ 417  $^{\circ}\text{C}$  สำหรับ PVC ในช่วงแรกจะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 265.57  $^{\circ}\text{C}$  เป็นช่วงในการเกิดการปลดปล่อยของก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ ผ่านปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีนชัน (dehydrochlorination) โดยในขั้นตอนดังกล่าวจะเกิดโครงสร้างของหมู่พอลิอินเซ็น (polyene) ในโครงสร้าง PVC และช่วงที่สองสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 418.57  $^{\circ}\text{C}$  เกิดจากสารประกอบ

ไฮโดรคาร์บอน โดยสายโซ่โมเลกุลขนาดจากกันแล้วเข้าทำปฏิกิริยากันเป็นสารประกอบอะโรมาติกซึ่งจะเป็นส่วนของเถ้า (char) ทำให้เปอร์เซ็นต์สุดท้ายของสารไม่บริสุทธิ์ (Othman et al., 2013) และสำหรับ ENR/PVC ที่ 75/25 w/w เกิดการสลายตัวในช่วงแรกที่อุณหภูมิประมาณ 228  $^{\circ}\text{C}$  สูญเสียน้ำหนักคิดเป็น 27.51% และช่วงที่สองสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 392  $^{\circ}\text{C}$  สูญเสียน้ำหนักคิดเป็น 84% เมื่อเทียบกับ ENR/PVC ที่ 50/50 w/w พบว่า การสลายตัวในช่วงแรกอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 252  $^{\circ}\text{C}$  และช่วงที่สองอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 422  $^{\circ}\text{C}$  ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อมีการเติม PVC ผสมใน ENR แนวโน้มจะเลื่อนไปทางขวา เนื่องจากสามารถเพิ่มเสถียรทางความร้อนให้กับพอลิเมอร์ผสมและมีความสามารถเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ทำให้อุณหภูมิการสลายตัวสูงขึ้น แสดงว่า ENR/PVC มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้น



รูปที่ 4 กราฟ TGA ของแผ่นฟิล์มบาง (a) ENR-50 และ (b) ENR/PVC ที่อัตราส่วน 25/75, 50/50 และ 75/25 w/w ตามลำดับ



### สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้สามารถปรับปรุงสมบัติของแผ่นฟิล์มบางจากยาง ENR ให้มีสมบัติที่ดีขึ้นได้โดยการเติม PVC ผสมลงไป แล้วนำมาขึ้นรูปด้วยเทคนิคการขึ้นรูปโดยใช้ตัวทำละลาย โดยสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มบาง ENR/PVC มีค่าทนต่อแรงดึงที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์มบาง ENR แต่จะลดลงเมื่อสัดส่วนของ PVC เพิ่มขึ้นและสอดคล้องกับเทคนิค DSC และภาพ SEM ที่แผ่นฟิล์มบาง ENR/PVC มีความเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน (miscible blend) ไม่เกิดการแยกเฟส ทำให้สมบัติเชิงกลและเสถียรภาพทางความร้อนดีขึ้น

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมยางและพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณและสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ให้การสนับสนุนครุภัณฑ์ สถานที่และได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยโครงการวิจัยเงินรายได้มหาวิทยาลัยทักษิณ กองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยทักษิณ ประเภททุนพัฒนานักวิจัยรุ่นใหม่ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

### เอกสารอ้างอิง

Azeredo, H. M. C. (2009). Nanocomposites for food packaging applications. *Food Research International*, 42(9), 1240–1253.

Hiroshi, O., Kazuhiko, R., & Tadash, U. (1993) Influence of casting solution additive, degree of polymerization, and polymer concentration on poly (vinyl chloride) membrane properties and performance. *Journal of Membrane Science*, 83(2), 199–209.

Michal, B., & Krystyna, K. (1991). The influence of molecular mass of poly (vinyl chloride) on the structure and transport characteristics of ultrafiltration membranes. *Journal of Membrane Science*, 61, 131–156.

Othman, M. H., Mohamed, M., & Abdullah, I. (2013). Electrospinning of PVC with natural rubber Citation. *AIP conference Proceedings*, 1571(1). 926–931.

Papanicolaou, G. C., & Baxevanakis, C. (1991). Viscoelastic modelling and strain-rate behaviour of plasticized poly(vinyl chloride). *Journal of Materials Science*, 26(6), 4323–4330.

Paul, D. R., Barlow, J. W., & Keskkula, H. (1988). *Polymer Blends in Encyclopedia of Polymer Science and Engineering*. New York: John Wiley & Sons.

Ratnam, C. T., & Zaman, K. (1999). Stabilization of poly (vinyl chloride)/epoxidized natural rubber (PVC/ENR) blends. *Polymer Degradation and Stability*, 65(1), 99–105.

Sanadi, A. R., Caulfield, D. F., Jacobson, R. E., & Rowell, R. M. (1995). Renewable agricultural fibers as reinforcing fillers in plastics: mechanical properties of kenaf fiber-polypropylene composites. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 34(5), 1889–1896.

Varughese, K. T., Nando, G. B., & De, P. P. (1988). Miscible blends from rigid poly (vinyl chloride) and epoxidized natural rubber, part 2: studies on mechanical properties and SEM fractographs. *Journal of Materials Science*, 23(11), 3903–3909.

Sukkaew, W., Wootthikanokkhan, J., & Thavarungkul, N. (2001). Impact properties improvement of poly (vinyl chloride) by blending with natural rubber. In *Proceedings of the 39<sup>th</sup> Kasetsart University Annual Conference: Engineering*, (pp. 427–434). Bangkok: Kasetsart University.