

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

#### 5.1 การเตรียมยางธรรมชาติดัดแปลงโมเลกุล

##### 5.1.1 ยางธรรมชาติอ็อกโซไซด์

ยืนยันการเกิดยางธรรมชาติอ็อกโซไซด์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) พบว่า เกิดพีคที่ตำแหน่งของหมู่เอพอกไซด์ คือ ที่เลขคลื่น 870 และ  $1240\text{ cm}^{-1}$  และจากการวิเคราะห์โครงสร้างยางธรรมชาติอ็อกโซไซด์ด้วยเทคนิคเทคนิคนิวเคลียสแมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี ชนิดโปรตอน ( $^1\text{H-NMR}$ ) พบว่า เกิดสัญญาณที่ Chemical shift เท่ากับ 2.7 ppm ผลการคำนวณปริมาณหมู่เอพอกไซด์ของยางธรรมชาติอ็อกโซไซด์จากการวิเคราะห์ด้วย FTIR และ  $^1\text{H-NMR}$  พบว่า ให้ผลใกล้เคียงกัน โดยปริมาณหมู่เอพอกไซด์ของยางธรรมชาติอ็อกโซไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาอ็อกซิเดชัน

##### 5.1.2 ยางธรรมชาติมาลิเอต

ยืนยันการเกิดยางธรรมชาติมาลิเอตด้วยเทคนิค FTIR พบว่าเกิดพีคที่ตำแหน่งหมู่ซัคซินิกแอนไฮไดรด์ คือ ที่เลขคลื่น  $1784$  และ  $1854\text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ นอกจากนี้ยังปรากฏพีคของหมู่คาร์บอนิลที่อยู่ในรูปการแตกออกของวงแหวนแอนไฮไดรด์ คือ ที่เลขคลื่น  $1736$  และ  $1710\text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ ผลการคำนวณอัตราส่วนการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของหมู่คาร์บอนิลทั้งหมด คือ ที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $(1784+1854+1736+1710\text{ cm}^{-1})/835\text{ cm}^{-1}$  พบว่า อัตราส่วนการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์ที่ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติมาลิเอต

#### 5.2 การเตรียมสารเพิ่มความเข้ากันได้

เตรียมที่ดัดแปลงโมเลกุลด้วยฟีนอลิกเรซิน (Phenolic modified EVA, PhHRJ-EVA) แล้วยืนยันการเกิดด้วยเทคนิค FTIR พบว่าเกิดพีคใหม่ขึ้นที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $3370\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบยืดของพันธะไฮโดรเจนของหมู่ฟีนอล ( $-\text{OH}$ ) และพบพีคที่  $1645\text{ cm}^{-1}$  จากการสั่นแบบยืดของพันธะ  $-\text{C}=\text{C}-$  ของวงแหวนอะโรมาติกในโมเลกุลฟีนอลิกเรซิน แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาของไดเมทิลอลฟีนอลิกเรซินกับ EVA

### 5.3 สมบัติของโคพอลิเมอร์ของเอทิลีนกับไวนิลอะซิเตท

จากการศึกษาสมบัติของ EVA ที่มีพอลิไวนิลอะซิเตท 3 ระดับ คือ 18, 22 และ 28 wt% พบว่า โมดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง ความแข็ง และความหนืดเชิงซ้อน มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มปริมาณพอลิไวนิลอะซิเตท แต่ความสามารถในการยืดและความสามารถในการคืนรูปเพิ่มขึ้น (ค่า Tension set ต่ำลง) แสดงว่าการเพิ่มปริมาณพอลิไวนิลอะซิเตทใน EVA ส่งผลให้ EVA มีสมบัติความยืดหยุ่นสูงขึ้น

### 5.4 การเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกจากการเบลนด์แบบปกติ

#### 5.4.1 การเบลนด์แบบปกติของ ADS/EVA

##### 5.4.1.1 อิทธิพลของปริมาณพอลิไวนิลอะซิเตทต่อสมบัติเชิงกลและพลวัต

พบว่า โมดูลัส ความแข็ง มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มปริมาณพอลิไวนิลอะซิเตท แต่ความสามารถในการยืดและความสามารถในการคืนรูปเพิ่มขึ้น (ค่า Tension set ต่ำลง) ส่วนความต้านทานต่อแรงดึง โมดูลัสสะสม และความหนืดเชิงซ้อน มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณพอลิไวนิลอะซิเตทส่งผลให้พอลิเมอร์เบลนด์มีสมบัติความยืดหยุ่นสูงขึ้น

##### 5.4.1.2 เปรียบเทียบการใช้และไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ในการเบลนด์

การใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ (PhHRJ-EVA) ใน ADS/EVA-18 พบว่าได้พอลิเมอร์เบลนด์ที่มีสมบัติ โมดูลัส ความเหนียวทน และความต้านทานต่อแรงดึงดีกว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่ไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ แต่ค่าความสามารถในการยืดจนขาดมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

##### 5.4.1.3 อิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ระหว่าง ADS/EVA

การเพิ่มสัดส่วน ADS ส่งผลให้พอลิเมอร์เบลนด์โมดูลัสที่ระยะยืดต่างๆ ความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืด ความแข็ง และความต้านทานต่อตัวทำลาย มีแนวโน้มลดลง แต่โมดูลัสสะสม ความหนืดเชิงซ้อน และความสามารถในการคืนรูปมีค่าเพิ่มขึ้น (ค่า Tension set และค่า Tan  $\delta$ ) แสดงว่าการใช้ ADS เป็นองค์ประกอบในการเบลนด์ทำให้ได้พอลิเมอร์เบลนด์ที่มีความยืดหยุ่นสูงและเป็นวัสดุที่นุ่ม นอกจากนี้พอลิเมอร์เบลนด์ที่อัตราส่วน ADS/EVA = 40/60, 50/50 และ 60/40 มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาแบบเฟสรวม

## 5.4.2 การเบลนด์ของ ENR/EVA

### 5.4.2.1 อิทธิพลของปริมาณหมู่อีพอกไซด์ใน ENR

การเบลนด์ EVA กับ ENR ที่มีหมู่อีพอกไซด์ระดับต่างๆ ได้แก่ 15, 25, 35, 40, 45 และ 55 % โดยโมล ทำให้ได้พอลิเมอร์เบลนด์ที่มีสมบัติ โมดูลัสที่ระยะยืดต่างๆ ความต้านทานต่อแรงดึง และความแข็งเพิ่มขึ้นจนกระทั่งปริมาณหมู่อีพอกไซด์ถึงระดับ 35 % โดยโมล จากนั้นสมบัติดังกล่าวมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณหมู่อีพอกไซด์มากกว่านี้ อย่างไรก็ตามความสามารถในการยืดจนขาด ความสามารถในการคืนรูป โมดูลัสสะสม และความหนืดเชิงซ้อน มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณหมู่อีพอกไซด์

### 5.4.2.2 อิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ระหว่าง ENR/EVA

พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง ENR/EVA ที่ใช้อัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ มีผลให้ได้พอลิเมอร์เบลนด์ที่มีสมบัติต่างๆ ในทำนองเดียวกันกับพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง ADS/EVA

## 5.4.3 การเบลนด์ของ MNR/EVA

### 5.4.3.1 อิทธิพลของปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์ในการเตรียม MNR

การเบลนด์ EVA กับ MNR ที่เตรียมด้วยมาลิอิกแอนไฮไดรด์ 3 ระดับ ได้แก่ 8, 10 และ 12 phr ทำให้ได้พอลิเมอร์เบลนด์ที่มี โมดูลัสที่ระยะยืดต่างๆ ความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการคืนรูป ความแข็ง โมดูลัสสะสม และความหนืดเชิงซ้อน เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณมาลิอิกแอนไฮไดรด์ ส่วนความสามารถในการยืดจนขาดมีแนวโน้มลดลง

### 5.4.3.2 อิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ระหว่าง MNR/EVA

พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง MNR/EVA ที่ใช้อัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ มีผลให้ได้พอลิเมอร์เบลนด์ที่มีสมบัติต่างๆ ในทำนองเดียวกันกับพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง ADS/EVA และ ENR/EVA

## 5.5 เปรียบเทียบสมบัติของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกจากการเบลนด์ EVA กับยางธรรมชาติรูปแบบต่างๆ ด้วยเทคนิคการเบลนด์แบบปกติ

### 5.5.1 สมบัติเชิงกล

พอลิเมอร์เบลนด์ของ ENR/EVA มีโมดูลัสที่ระยะยืดต่างๆ สูงที่สุด รองลงมาคือ MNR/EVA และ ADS/EVA ตามลำดับ แต่ ADS/EVA มีความสามารถในการยืดสูงกว่า ENR/EVA

และ MNR/EVA ส่วนความต้านทานต่อแรงดึงของ ADS/EVA มีค่าใกล้เคียงกับ ENR/EVA และ MNR/EVA มีความต้านทานต่อแรงดึงต่ำที่สุด นอกจากนี้ ENR/EVA และ MNR/EVA มีความสามารถในการคืนรูปสูงกว่า ADS/EVA

### 5.5.2 สมบัติเชิงพลวัต

ค่าโมดูลัสสะสมและความหนืดเชิงซ้อนของพอลิเมอร์เบลนด์จากการเบลนด์ ADS/EVA มีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ ENR/EVA และ MNR/EVA ตามลำดับ ส่วนค่า  $\tan \delta$  พบว่า ENR/EVA มีค่าต่ำที่สุด ADS/EVA มีค่าสูงที่สุด และ MNR/EVA มีค่าระหว่างกลาง ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ว่า ENR/EVA และ MNR/EVA มีความสามารถในการคืนรูปหรือความยืดหยุ่นสูงกว่า ADS/EVA

### 5.5.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

พอลิเมอร์เบลนด์จากการเบลนด์ EVA กับยางธรรมชาติทั้ง 3 รูปแบบมีลักษณะทางสัณฐานวิทยาแบบเฟสรวม แสดงว่าพอลิเมอร์เบลนด์ทั้ง 3 ชนิดมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ เมื่อเปรียบเทียบกับพบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ ENR/EVA มีขนาดอนุภาคยางเล็กที่สุดกระจายในเฟส EVA รองลงมาคือ MNR/EVA และ ADS/EVA ตามลำดับ แสดงว่าพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง ENR/EVA เกิดอันตรกิริยาระหว่างเฟสหรือมีความเข้ากันได้มากที่สุด

### 5.5.4 สมบัติเชิงความร้อน

#### 5.5.4.1 การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค DMTA

พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง ENR/EVA มีพิกของ  $\tan \delta$  พิกเดียว ซึ่งแตกต่างกับพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง ADS/EVA และ MNR/EVA ซึ่งมี 2 พิก แต่ค่า  $T_g$  ของเฟส EVA มีการเลื่อนมาในทิศทางอุณหภูมิต่ำลง แสดงว่าพอลิเมอร์ทั้ง 3 ชนิดมีความเข้ากันได้บางส่วน แต่ ENR/EVA น่าจะมีความเข้ากันได้ดีที่สุด

#### 5.5.4.2 การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค DSC

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC ให้ผลที่มีแนวโน้มในการทำงานเดียวกันกับเทคนิค DMTA แต่ค่าที่ได้ต่ำกว่าและบางกรณีไม่สามารถตรวจวัดได้ เนื่องจากเทคนิคทั้งสองมีรายละเอียดและการตอบสนองของโมเลกุลพอลิเมอร์ที่ต่างกัน ซึ่งเทคนิค DMTA ใช้การตอบสนองเชิงกลซึ่งน่าจะให้ผลการวิเคราะห์ได้แน่นอนกว่า นอกจากนี้พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง ENR/EVA มีปริมาณผลึกสูงที่สุด รองลงมาคือ MNR/EVA และ ADS/EVA ตามลำดับ ส่วนอุณหภูมิการหลอมผลึก ( $T_m$ ) ของพอลิเมอร์เบลนด์ทั้ง 3 ชนิดมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก



#### 5.5.4.3 การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิคเทคนิค TGA

พอลิเมอร์เบลนด์ทั้ง 3 ชนิดมีการสลายตัวเนื่องด้วยความร้อน 2 ช่วง ซึ่งช่วงแรกเป็นการสลายตัวของเฟสยางธรรมชาติและช่วงหลังคือการสลายตัวของเฟส EVA แสดงว่าการใช้ EVA เป็นองค์ประกอบในการเบลนด์สามารถเพิ่มความต้านทานต่อการสลายตัวจากความร้อนให้กับพอลิเมอร์เบลนด์ นอกจากนี้พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ ENR/EVA มีอุณหภูมิการสลายตัวจากความร้อน ( $T_d$ ) สูงที่สุด ส่วน MNR/EVA และ ADS/EVA มีพฤติกรรมการสลายตัวคล้ายกันมาก

#### 5.5.5 ความต้านทานต่อตัวทำละลาย

พอลิเมอร์เบลนด์ทั้ง 3 ชนิดมีระดับการบวมพองในตัวทำละลายทั้ง 3 ชนิด (โทลูอีนผสมไอโซออกเทน น้ำมันดีเซล และน้ำมันเครื่อง) ในทำนองเดียวกัน เมื่อพิจารณาตัวทำละลายชนิดเดียวกันพบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง ENR/EVA มีความต้านทานต่อตัวทำละลายสูงที่สุด รองลงมาคือ MNR/EVA และ ADS/EVA ตามลำดับ

### 5.6 การเตรียม TPVs จากการเบลนด์ยางธรรมชาติกับ EVA

#### 5.6.1 การเตรียม TPVs จากการเบลนด์ ADS/EVA

การเพิ่มปริมาณ ADS ใน TPVs จากการเบลนด์ ADS/EVA ส่งผลให้ TPVs มีโมที่ระยะยืดต่างๆ ความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืด ความแข็ง และความต้านทานต่อตัวทำละลาย มีแนวโน้มค่าลดลง แต่โมดูลัสสะสม ความหนืดเชิงซ้อน และความสามารถในการคืนรูปมีค่านวโน้มเพิ่มขึ้น (ค่า Tension set และ Tan  $\delta$  ลดลง) และพบว่า TPVs จากการเบลนด์ที่อัตราส่วน = 40/60, 50/50 และ 60/40 มีโมดูลัสช่วงสุดท้ายของการยืดสูงกว่าพอลิเมอร์เริ่มต้น (EVA และ ADS) นอกจากนี้พบว่าสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง ADS/EVA เป็นอนุภาคขางกระจายในเฟสต่อเนื่องของ EVA และเมื่อปริมาณ ADS เพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดอนุภาคขางเล็กลง

#### 5.6.2 การเตรียม TPVs จากการเบลนด์ ENR/EVA

TPVs จากการเบลนด์ ENR/EVA ที่ใช้อัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ มีสมบัติต่างๆ ในทำนองเดียวกันกับพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง ADS/EVA

#### 5.6.2 การเตรียม TPVs จากการเบลนด์ MNR/EVA

TPVs จากการเบลนด์ระหว่าง MNR/EVA ที่ใช้อัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ มีสมบัติต่างๆ ในทำนองเดียวกันกับพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง ADS/EVA และ ENR/EVA

## 5.7 เปรียบเทียบสมบัติ TPVs จากการเบลนด้อย่างธรรมชาติชนิดต่างๆกับ EVA

### 5.7.1 สมบัติเชิงกล

ความชันของกราฟที่ความเครียดประมาณ 0–100 % ของ TPVs จากการเบลนด์ ENR/EVA มีค่าสูงกว่า TPVs จากการเบลนด์ MNR/EVA และ ADS/EVA ตามลำดับ แต่เมื่อความเครียดสูงกว่า 200 % พบว่าโมดูลัสของ TPVs จากการเบลนด์ MNR/EVA มีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ TPVs จากการเบลนด์ ENR/EVA และ ADS/EVA ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 100 และ 200 % แต่ TPVs จากการเบลนด์ ADS/EVA มีความสามารถในการยืดสูงกว่า TPVs จากการเบลนด์ ENR/EVA และ MNR/EVA ส่วนความต้านทานต่อแรงดึงของ TPVs จากการเบลนด์ ENR/EVA มีค่าสูงกว่า TPVs จากการเบลนด์ ADS/EVA และ MNR/EVA ตามลำดับ นอกจากนี้ TPVs ทั้ง 3 ชนิดมีความแข็งและความสามารถในการคืนรูปในรูปแบบค่า Tension set ใกล้เคียงกัน

### 5.7.2 สมบัติเชิงพลวัต

โมดูลัสสะสมและความหนืดเชิงซ้อนของ TPVs จากการเบลนด์ ENR/EVA มีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ TPVs จากการเบลนด์ MNR/EVA และ ADS/EVA ตามลำดับ ส่วนค่า  $\tan \delta$  พบว่า TPVs จากการเบลนด์ ENR/EVA มีค่าต่ำที่สุด แต่ TPVs จากการเบลนด์ ADS/EVA มีค่าสูงที่สุด และ TPVs จากการเบลนด์ MNR/EVA มีค่าระหว่างกลาง ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ว่า TPVs จากการเบลนด์ ENR/EVA และ MNR/EVA มีความสามารถในการคืนรูปหรือความยืดหยุ่นสูงกว่า TPVs จากการเบลนด์ ADS/EVA

### 5.7.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

TPVs จากการเบลนด์ EVA กับยางธรรมชาติทั้ง 3 รูปแบบมีอนุภาคยางวัลคาไนซ์กระจายในเฟสต่อเนื่องของ EVA และพบว่า TPVs จากการเบลนด์ ENR/EVA มีขนาดอนุภาคยางเล็กที่สุด รองลงมาคือ TPVs จากการเบลนด์ MNR/EVA และ ADS/EVA ตามลำดับ แสดงว่าพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง ENR/EVA เกิดอันตรกิริยาระหว่างเฟสหรือมีความเข้ากันได้มากที่สุด

### 5.7.4 สมบัติเชิงความร้อน

#### 5.7.4.1 การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค DMTA

พบว่า TPVs จากการเบลนด์ ENR/EVA มีพีคของ  $\tan \delta$  เพียงพีคเดียว ซึ่งแตกต่างจาก TPVs จากการเบลนด์ ADS/EVA และ MNR/EVA ซึ่งมีพีค 2 พีค แต่ค่า  $T_g$  ของเฟส EVA มีการเลื่อนมาในทิศทางที่อุณหภูมิต่ำ แสดงว่าพอลิเมอร์ทั้ง 3 ชนิดมีความเข้ากันได้บางส่วน แต่ ENR/EVA น่าจะมีความเข้ากันได้ดีที่สุด

#### 5.7.4.2 การวิเคราะห์เชิงความร้อนด้วยเทคนิค DSC

TPVs ทั้ง 3 ชนิดมีอุณหภูมิการหลอมผลึก ( $T_m$ ) และปริมาณผลึกไม่แตกต่างกันมากนัก การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC ให้ผลที่มีแนวโน้มในทำนองเดียวกันกับเทคนิค DMTA แต่ได้ค่าที่ได้ต่ำกว่าและบางกรณีไม่สามารถตรวจวัดได้ พบว่า TPVs มีปริมาณผลึกน้อยกว่าการเตรียมแบบ

#### 5.7.4.3 การวิเคราะห์การสลายตัวจากความร้อนด้วยเทคนิค TGA

TPVs ทั้ง 3 ชนิดมีการสลายตัวเนื่องด้วยความร้อน 2 ช่วง ซึ่งช่วงแรกเป็นการสลายตัวของเฟสยางธรรมชาติและช่วงหลังคือการสลายตัวของเฟส EVA โดย EVA เป็นองค์ประกอบที่เพิ่มความต้านทานต่อการสลายตัวจากความร้อน พบว่า TPVs จากการเบลนด์ ENR/EVA มีอุณหภูมิการสลายตัวจากความร้อน ( $T_d$ ) สูงที่สุด ส่วน TPVs จากการเบลนด์ MNR/EVA และ ADS/EVA มีพฤติกรรมการสลายตัวคล้ายกัน

#### 5.7.5 ความต้านทานต่อตัวทำละลาย

TPVs ทั้ง 3 ชนิดมีระดับการบวมพองในตัวทำละลายทั้ง 3 ชนิด (โทลูอินผสมไอโซออกเทน น้ำมันดีเซล และน้ำมันเครื่อง) ในทำนองเดียวกัน เมื่อพิจารณาตัวทำละลายชนิดเดียวกัน พบว่า TPVs จากการเบลนด์ ENR/EVA มีความต้านทานต่อตัวทำละลายสูงที่สุด รองลงมาคือ TPVs จากการเบลนด์ MNR/EVA และ ADS/EVA ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบระดับการบวมพองในตัวทำละลายจากการเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก 2 เทคนิค พบว่า TPVs มีระดับการบวมพองในตัวทำละลายน้อยกว่าการเตรียมแบบปกติ