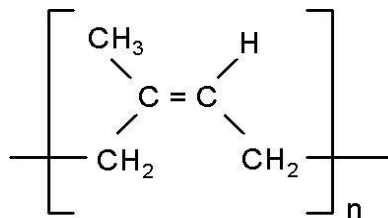


## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber)

ยางธรรมชาติโดยทั่วไปหมายถึงยางที่ได้จากยางพารา (*Hevea brazilliensis*) ในทางเคมียางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่มีหน่วยซ้ำเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ที่ประกอบด้วยคาร์บอน 5 อะตอมและไฮโดรเจน 8 อะตอม เขียนเป็นสูตรเคมีคือ  $C_5H_8$  ซึ่งเรียกว่า ไอโซพรีน แต่ละหน่วยของไอโซพรีนต่อกันเป็น พอลิไอโซพรีน ดังแสดงดังในรูปที่ 2.1 ซึ่งมีโมเลกุลยาวและมีน้ำหนักโมเลกุลสูงโดยเฉลี่ยประมาณหนึ่งแสนถึงห้าแสน และมีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลกว้าง โดย  $n$  มีค่าตั้งแต่ 5,000 – 15,000



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างยางธรรมชาติแบบ cis-1,4-polyisoprene

#### 2.1.1 สมบัติโดยทั่วไปของยางธรรมชาติ (Properties of natural rubber)

##### 2.1.1.1 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

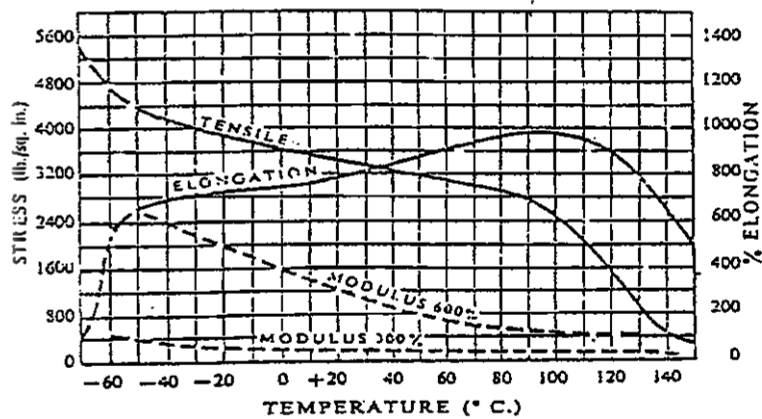
ยางธรรมชาติเป็นยางที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีโครงสร้างที่จัดเรียงอย่างมีระเบียบ ทำให้สามารถตกผลึกได้ง่ายเมื่อได้รับแรงดึง ยางธรรมชาติจึงมีสมบัติความทนต่อแรงดึงสูง มีความสามารถในการยืดได้สูงโดยธรรมชาติโดยไม่ต้องเติมสารเสริมแรงใดๆ ซึ่งสมบัติดังกล่าวนี้ยังตั้งเคราะห์หลายๆชนิด เช่นยางไนไตรล์หรือยาง EPDM ยังถือว่าด้อยกว่า โดยยางธรรมชาติมีความสามารถในการยืดประมาณ 700-800% จากระยะยืดเริ่มต้น [3] และมีความทนต่อแรงดึงประมาณ 400 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดได้ดีแม้ที่อุณหภูมิสูง ทำให้แทบจะไม่เกิดการฉีกขาดของยางธรรมชาติขณะดึงออกมาจากแม่พิมพ์ [4]

##### 2.1.1.2 สมบัติเชิงพลวัตและความสามารถในการขึ้นรูป (Dynamic and processing ability)

ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดี มีความร้อนสะสมขณะใช้งานต่ำ เหมาะสำหรับนำไปเป็นส่วนประกอบยางรถยนต์และงานที่ต้องมีการรับแรงแบบไม่คงที่ หรือเป็นช่วงๆ และยังสามารถขึ้นรูปได้ดีทำให้สามารถนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ได้หลายหลาก

### 2.1.1.3 สมบัติความทนต่อการเสื่อมสภาพ (Aging properties)

ยางธรรมชาติมีความทนต่อความร้อนได้ไม่มากนัก เมื่อได้รับความร้อนสมบัติของยางธรรมชาติจะมีค่าค่อยๆ ลดแปรผันตามอุณหภูมิดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ยาง [5]

และนอกจากความร้อนแล้วยางธรรมชาติยังมีความทนต่อสารเคมีหรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วได้ต่ำ เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติประกอบไปด้วยอะตอมของไฮโดรเจนและคาร์บอนจึงสามารถละลายได้ดีในสารละลายที่ไม่มีขั้ว นอกจากนี้ยังเสื่อมสภาพได้ง่ายด้วยความร้อนหรือโอโซน เพราะยางธรรมชาติมีพันธะคู่ที่ไม่อิ่มตัวและวงไวต่อการเกิดปฏิกิริยาอยู่ในสายโซ่โมเลกุลเป็นจำนวนมาก

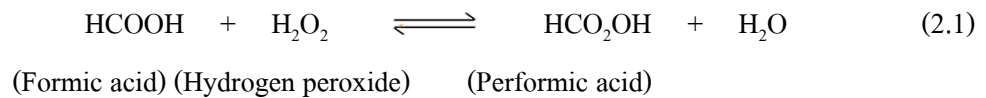
## 2.2 การปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติ

### 2.2.1 การตัดแปรโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ

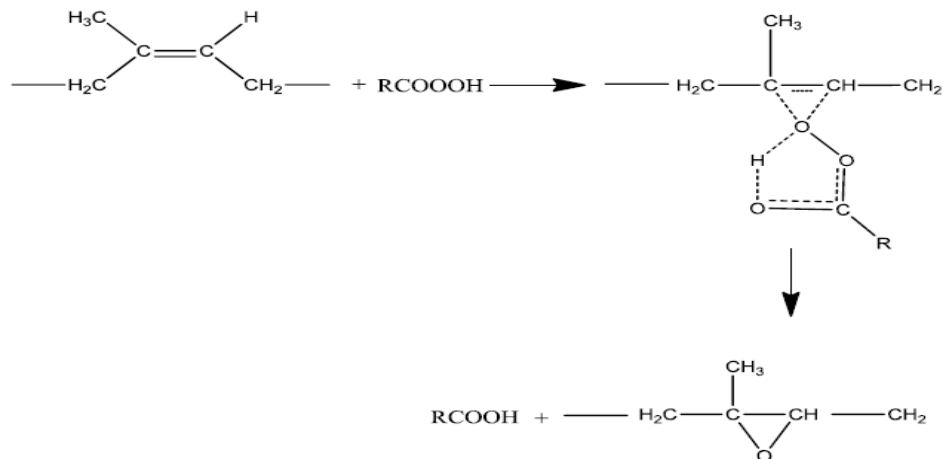
จากหัวข้อที่ 2.1.1.3 จะเห็นว่ายางธรรมชาติมีสมบัติที่คืออยู่หลายประการ แต่ก็มีข้อด้อยอยู่เช่นกันคือไม่ทนต่อความร้อน ละลายได้ง่ายในสารเคมีและตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วโดยเฉพาะน้ำมัน ดังนั้นจึงทำให้ไม่สามารถนำยางธรรมชาติไปใช้งานประเภทที่ต้องมีการสัมผัสกับน้ำมัน ตัวทำละลายหรือความร้อนได้ทำให้ขอบเขตการใช้งานลดลง ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นวิธีการตัดแปลงโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติให้มีความทนต่อสารเคมีและสิ่งแวดล้อมมากขึ้น โดยหนึ่งในวิธีการที่เป็นที่นิยมคือการนำน้ำยางธรรมชาติมาเพิ่มหมู่ฟังก์ชันด้วยปฏิกิริยาอ็อกซิเดชัน

### 2.2.1.1 ปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน

การเพิ่มหมู่ฟังก์ชันให้แก่ยางธรรมชาติด้วยการนำมาทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันกลายเป็นยางธรรมชาติอีพอกซิไดซ์ (Epoxidized natural rubber, ENR) เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการดัดแปรโครงสร้างของน้ำยางธรรมชาติ โดยใช้กรดเปอร์ออกซีเป็นสารเคมีในการทำปฏิกิริยา เช่น กรดเปอร์เบนโซอิก (Perbenzoic acid) เป็นต้น แต่ในงานวิจัยนี้จะใช้กรดเปอร์ฟอร์มิก (Performic acid) ซึ่งได้จากการนำเอากรดฟอร์มิก (Formic acid) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) มาทำปฏิกิริยา กลายเป็นกรดเปอร์ฟอร์มิกดังสมการที่ 2.1 [6]



โดยกลไกของปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน ซึ่งเป็นที่ยอมรับเขียนโดย Bartlett ได้เสนอไว้ว่า อิเล็กโตรฟิลิกจะทำปฏิกิริยากับกรดเปอร์ฟอร์มิก ที่ตำแหน่งพันธะคู่ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันของยางธรรมชาติกับกรดเปอร์ฟอร์มิก [7]

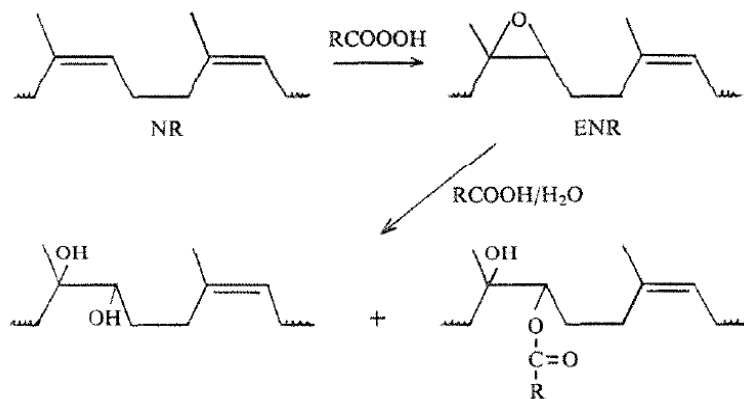
ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณของหมู่อีพอกซีที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันได้แก่ อัตราส่วนโดย mol ของน้ำยางธรรมชาติต่อกรดฟอร์มิกต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์รวมไปถึงเวลาในการสังเคราะห์ ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อสมบัติของยาง ENR ที่สังเคราะห์ได้ โดยในงานวิจัยของ Khansawai และคณะ [8] ได้ทำการดัดแปรโมเลกุลน้ำยางธรรมชาติด้วยปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันโดยใช้กรดฟอร์มิกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยอัตราส่วนของกรดฟอร์มิกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อหน่วยไอโซพรีนของน้ำยางสดเท่ากับ 0.50 และ 0.75 พบว่าปริมาณอีพอกไซด์ที่ได้สูงขึ้นเมื่อระยะเวลาที่ใช้

ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และจากการศึกษาการสลายตัวเนื่องจากความร้อนพบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการสลายตัวและอุณหภูมิที่เกิดอัตราการสลายตัวสูงสุดของยาง ENR จะมีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติอีพอกซิไดซ์หรือยาง ENR ที่สังเคราะห์ได้ตามรูปที่ 2.3 จะมีความเป็นขี้วมมากขึ้น ทำให้ยางที่ได้มีสมบัติความทนต่อน้ำมันและสารละลายไม่มีขี้วมมากขึ้น ทนต่อการเสื่อมสภาพด้วยความร้อนมากขึ้นทำให้มีขอบเขตการใช้งานได้มากขึ้น เช่นในงานวิจัยของ Kittipoom และคณะ [9] ได้ทำการศึกษา การคัดแปรให้ยางธรรมชาติ มีขี้วมมากขึ้น โดยเติมหมู่อีพอกไซด์บนโมเลกุลของยางแล้วนำไปใช้ผลิตถุงมือยางธรรมชาติ โดยนำยางธรรมชาติที่คัดแปรโดยการเติมหมู่อีพอกไซด์มาจุ่มเคลือบบนฟิล์มยางธรรมชาติเพื่อปรับปรุงให้ทนน้ำมันได้มากขึ้น ซึ่งพบว่าฟิล์มที่เกิดจากการเคลือบ ENR บนยางธรรมชาติ มีค่า % การบวมตัวในน้ำมันน้อยกว่าฟิล์มจากยางธรรมชาติอย่างเดียวประมาณ 50% ทั้งนี้เพราะความมีขี้วมของ ENR ที่ขัดขวางการซึมผ่านของน้ำมัน นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Johnson และ Thomas [10] ได้ทำการศึกษาวิธีการปรับปรุงยางธรรมชาติ โดยใช้ปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน โดยจากการทดลองพบว่า เมื่อร้อยละของปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ยางธรรมชาติที่ได้มีค่าความคงทนต่อสารเคมีเพิ่มมากขึ้น และมีค่าความสามารถในการเคลื่อนไหวยของสายโซ่ลดลงตามปริมาณของหมู่อีพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วมีค่าเพิ่มขึ้นจาก -72 เป็น -47 และ -27 °C

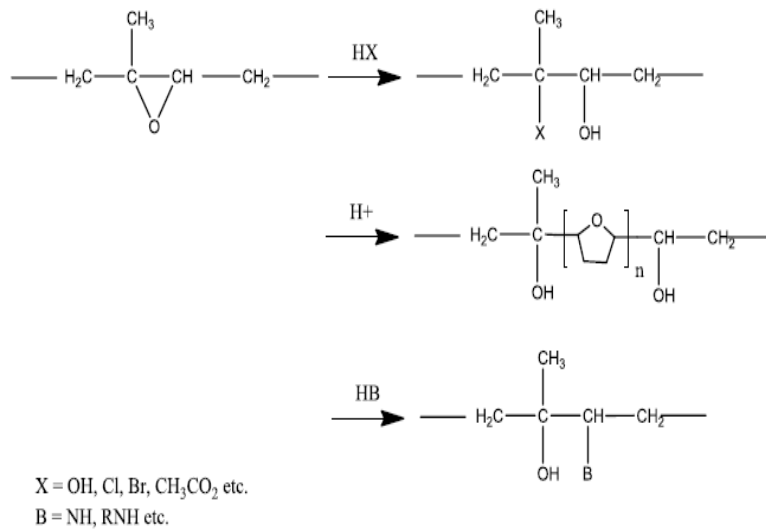
#### 2.2.1.2 ปฏิกิริยาการเปิดวงอีพอกไซด์ (Epoxide ring opening)

หมู่อีพอกไซด์หรือวงอีพอกไซด์บนยางธรรมชาติอีพอกซิไดซ์หรือยาง ENR นั้นสามารถเกิดการเปิดวงได้เนื่องจากวงอีพอกไซด์มีความไม่เสถียรซึ่งเป็นผลมาจากมีความเครียดวงสูงทำให้วงอีพอกไซด์สามารถแตกวงออกได้ตลอดเวลา เช่นในระหว่างปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันก็สามารถเกิดการเปิดวงอีพอกไซด์ได้เช่นกัน โดยในงานวิจัยของ Gelling [11] ได้ทำการเสนอกฎการเปิดวงของหมู่อีพอกไซด์ในระหว่างปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาการเปิดวงอีพอกไซด์ในระหว่างปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน [11]

จากรูปที่ 2.4 เมื่อน้ำยางธรรมชาติกลายเป็นยาง ENR หมู่อิพอกซีที่เกิดขึ้นอาจถูกเปิดวงในระหว่างการทำปฏิกิริยาคัวยกรดเปอร์ฟอร์มิกที่เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับเป็นกรดฟอร์มิก หรืออาจจะถูกเปิดวงด้วยน้ำโดยมีอุณหภูมิเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำใหยาง ENR ที่สังเคราะห์ได้มีหมู่มฟังก์ชันอื่นนอกจากหมู่อิพอกซีด้วยเช่นหมู่ไฮดรอกซิล (OH) หรือหมู่คาร์บอนิล (C=O) จากที่กล่าวมาสามารถใช้การเปิดวงอิพอกซีที่เกิดขึ้นนี้เป็นสารเริ่มต้นในการดัดแปร โครงสร้างของยางธรรมชาติให้มีหมู่มฟังก์ชันชนิดต่างๆได้ ขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคมีที่เข้าทำปฏิกิริยาดังรูปที่ 2.5 ต่อไปนี้



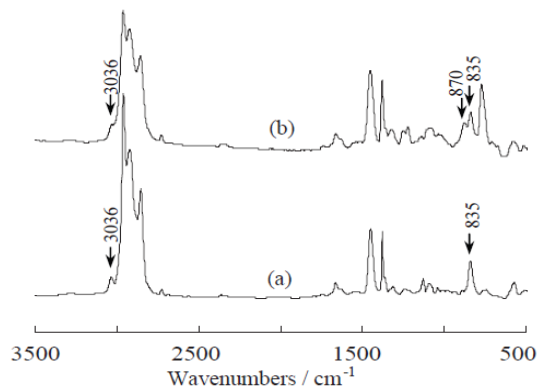
รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาการเปิดวงอิพอกซีด้วยสารเคมีชนิดต่างๆ [7]

จากที่กล่าวมาในงานวิจัยนี้จึงได้มีแนวคิดในการดัดแปร โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติเริ่มต้นจากสังเคราะห์น้ำยางธรรมชาติ ด้วยปฏิกิริยาอิพอกซิเดชันให้กลายเป็นน้ำยางธรรมชาติอิพอกไซด์ หรือยาง ENR จากนั้นจะใช้ปฏิกิริยาการเปิดวงอิพอกไซด์ ในการดัดแปรหมู่มฟังก์ชันบนยาง ENR โดยใช้กรดคลอโรอะซิดิกที่อุณหภูมิห้องหรือโดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C

### 2.2.1.3 การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติที่ผ่านการเพิ่มหมู่มฟังก์ชัน

การตรวจวิเคราะห์หาโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไปของยางธรรมชาติที่ถูกดัดแปลง โมเลกุลสามารถตรวจวิเคราะห์ได้จากหลายเทคนิค โดยในงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิค Fourier Transform Infrared-Spectroscopy (FTIR) และเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) ในการตรวจวัดผลของการดัดแปรโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ โดยเทคนิค FTIR เป็นหนึ่งในเทคนิควิเคราะห์ที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์เกี่ยวกับโครงสร้างของสารอินทรีย์ สามารถตรวจวัดหมู่มฟังก์ชันของสารอินทรีย์ได้อย่างแม่นยำ ที่ผ่านมามีหลายงานวิจัยที่ใช้เทคนิค FTIR ในการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของยางที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างโมเลกุลยกตัวอย่างเช่น ในงานวิจัยของ Nor และ Ebdon

[12] ซึ่งได้ทำการตัดแปลงโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติโดยใช้ปฏิกิริยาโอโซนไลซิส (Ozonolysis) ในการตัดสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติที่ตำแหน่งพันธะคู่ แล้วใช้เทคนิค FTIR ในการตรวจวิเคราะห์ ผลที่ได้พบว่ายางธรรมชาติที่ผ่านการทำปฏิกิริยาโอโซนไลซิสจะมีหมู่ฟังก์ชันเกิดขึ้นได้แก่หมู่คาร์บอนิล ปรากฏสัญญาณที่เลขคลื่นประมาณ  $1700\text{ cm}^{-1}$  และหมู่ไฮดรอกซิลที่เลขคลื่นประมาณ  $3400\text{ cm}^{-1}$  ในงานวิจัยของ Yoksan [13] ซึ่งเป็นการนำน้ำยางธรรมชาติมาทำปฏิกิริยาอ็อกซิเดชัน แล้วนำไปทำการตรวจวัดด้วยเทคนิค FTIR ผลที่ได้พบว่ายางธรรมชาติที่ผ่านการทำปฏิกิริยาอ็อกซิเดชัน จะปรากฏสัญญาณที่ประมาณ  $870\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นของวงอ็อกไซค์ และพบว่าสัญญาณที่ตำแหน่งประมาณ  $835\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นของพันธะคู่ในยางธรรมชาติจะมีความเข้มลดลง แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาอ็อกซิเดชันเกิดขึ้นที่ตำแหน่งพันธะคู่ของยางธรรมชาติ โดยกราฟ FTIR ของยางธรรมชาติที่ผ่านปฏิกิริยาอ็อกซิเดชันแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 FTIR สเปกตร้า ของ (a) ยางธรรมชาติ (b) ยาง ENR [13]

นอกจากเทคนิค FTIR แล้วอีกเทคนิคหนึ่งที่สามารถใช้ในการตรวจสอบผลของการตัดแปลงโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติคือเทคนิค DSC ซึ่งเป็นเทคนิคการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน โดยการวัดการเปลี่ยนแปลงของ Heat flow ของตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งสามารถใช้ตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของตัวอย่างได้ เช่น อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) อุณหภูมิการหลอมเหลว ( $T_m$ ) และอุณหภูมิการสลายตัว ( $T_d$ ) เป็นต้น โดยเทคนิคนี้สามารถใช้ในการตรวจหาปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นบนสายโซ่โมเลกุลของตัวอย่างยางได้ โดยจากงานวิจัยของ Klinklai และ Kunyawut [14] ได้ใช้เทคนิค DSC หาปริมาณของหมู่อ็อกซิของยาง ENR ที่สังเคราะห์ได้ที่สภาวะต่างๆ โดยพบว่าเมื่อปริมาณของหมู่อ็อกซิเพิ่มขึ้นจาก 16.5% เป็น 33.0% ค่า  $T_g$  ของยางที่วัดได้จากเทคนิค DSC จะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก  $-41.6$  เป็น  $-23.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  แสดงว่าหมู่ฟังก์ชันที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ยางเกิดอันตรกิริยาภายใน โมเลกุลมากขึ้น ทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น หรือกล่าวได้ว่าปริมาณของหมู่อ็อกซิบนยางธรรมชาติสัมพันธ์โดยตรงกับค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ดังนั้นเทคนิค DSC จึงสามารถใช้ในการเปรียบเทียบผลของการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่มีต่อยางธรรมชาติได้ จากที่กล่าวมาจะ

เห็นว่าเทคนิค FTIR และเทคนิค DSC สามารถใช้ในการตรวจหาลักษณะโครงสร้างของยางธรรมชาติที่ผ่านการตัดแปลง โครงสร้างโมเลกุลด้วยการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันได้เป็นอย่างดี

## 2.2.2 เทคโนโลยียางผสม (Rubber blend technology)

### 2.2.2.1 ความหมายของเทคโนโลยียางผสม

เทคโนโลยียางผสม คือ เทคโนโลยีในการผลิตยางชนิดใหม่ที่เกิดจากการนำยางตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกัน เพื่อให้ได้ยางผสมใหม่ที่มีสมบัติตรงตามความต้องการ เทคโนโลยียางผสมมีการใช้กันมานานแล้วในอุตสาหกรรมยาง โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อ 1) นำสมบัติที่ดีของยางแต่ละชนิดมารวมกัน ซึ่งสมบัติเหล่านี้จะไม่สามารถหาได้จากยางเพียงชนิดใดชนิดหนึ่งเช่นการผสมยางธรรมชาติที่มีสมบัติไม่ทนต่อการเสื่อมสภาพด้วยความร้อนและโอโซนกับยางสังเคราะห์เช่นยางอะคริลิก (ACM) ที่ทนต่อความร้อนได้ดีเพื่อให้ได้ยางธรรมชาติที่สามารถทนต่อความร้อนได้ดีขึ้นหรือ 2) เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิตโดยการใช้ยางที่มีราคาถูกลงกว่ายางอีกชนิดผสมเข้าไปเพื่อลดปริมาณการใช้ลงหรือ 3) ปรับปรุงสมบัติการแปรรูป ของยางเพื่อให้กระบวนการผลิตง่ายขึ้น [15] นอกจากนี้ที่กล่าวมาแล้วที่ผ่านมายังมีการนำยางชนิดต่างๆ มาผสมกันอีกมาก ยกตัวอย่างเช่นการนำยางธรรมชาติมาผสมกับ

- ยางบิวตาไดอิน (BR) ซึ่งมีคุณสมบัติด้านความทนทานต่อการขูด
- ยางไนไตรล์ (NBR) ซึ่งมีคุณสมบัติด้านความทนทานต่อน้ำมัน
- ยางอีพดีเอ็ม (EPDM) ซึ่งมีคุณสมบัติความทนทานต่อความร้อนและ โอโซนของยาง

### 2.2.2.2 วิธีการเตรียมยางผสม

การเตรียมยางผสมสามารถทำได้ 3 วิธีได้แก่ การผสมในรูปของน้ำยาง (Latex blending) การผสมในรูปของสารละลาย (Solution blending) และการผสมในรูปของยางแห้ง (Dry blending)

#### 1. การผสมในรูปของน้ำยาง

เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพเนื่องจากของผสมสามารถจะเกิดการกระจายตัวได้ดีและเข้ากันได้อย่างทั่วถึง และใช้พลังงานน้อยในการผสมแต่จะต้องให้ความสนใจกับการใช้สารลดแรงตึงผิว หรือสบู่ทั้งชนิดและปริมาณเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำยางเสียสภาพและเกิดการจับตัวเป็นก้อนเสียก่อนอย่างไรก็ตามการผสมในรูปของน้ำยางนี้มีข้อเสียในเรื่องของต้นทุนเพราะการจับตัว การเอาน้ำออกและการทำให้แห้ง ล้วนแล้วแต่เป็นกระบวนการที่ต้องใช้ต้นทุนสูง

## 2. การผสมในรูปของสารละลาย

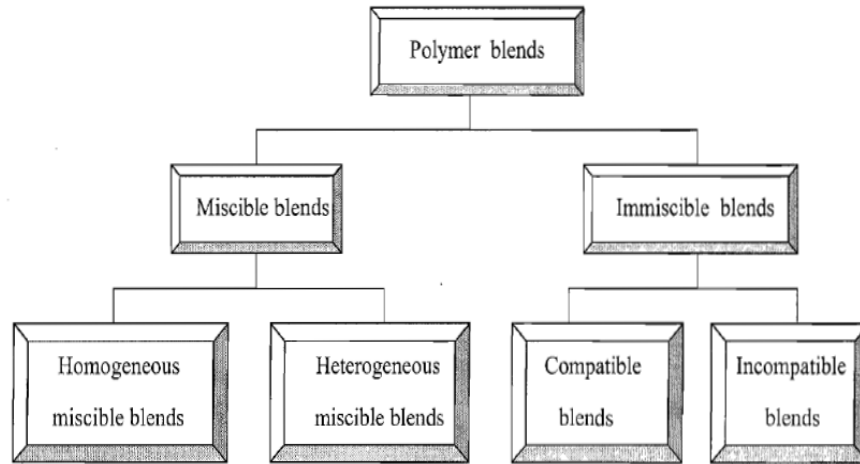
เป็นการนำยามาผสมกันในรูปของสารละลายจากนั้นจึงค่อยแยกยางผสมนี้ออกจากตัวทำละลาย โดยการตกตะกอนด้วยสารที่ไม่ใช่ตัวทำละลายหรือทำให้ตัวทำละลายระเหยออกจนหมดการเตรียมยางผสมโดยวิธีนี้มีข้อเสียหลายอย่าง ได้แก่ ตัวทำละลายมีราคาแพงและการแยกยางผสมทำได้ยาก การทำให้ยางแห้งต้องใช้พลังงานมากทำให้มีต้นทุนสูง ดังนั้นการเตรียมยางผสมในรูปของสารละลายนี้ จึงมักใช้เพื่อการวิจัยเท่านั้น (ในกรณีที่มีตัวอย่างยางน้อย)

## 3. การผสมในรูปของยางแห้ง

ยางผสมส่วนใหญ่มักจะเตรียมด้วยวิธีนี้เพราะเป็นวิธีที่ง่าย สะดวกและประหยัดโดยสามารถใช้เตรียมเฉพาะยางผสมหรือใช้ในการเตรียมยางคอมพาวด์โดยการผสมยางและสารเคมีเข้าไปด้วยการผสมอาจทำในเครื่องผสมยางแบบปิดหรือเครื่องผสมยางแบบเปิด

### 2.2.2.3 ประเภทของยางผสม

พอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) หรือในที่นี้คือยางผสมสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทคือ ยางที่ผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียว (Miscible blend) และยางที่ไม่ผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียว (Immiscible blend) ยางที่ผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียว จะแบ่งย่อยออกไปได้อีก 2 ประเภทคือ แบบ Homogeneous blend เป็นพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากยางชนิดเดียวกันแต่คนละเกรดมาผสมกัน และแบบ Heterogeneous blend ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกันที่ได้จากสารตั้งต้นที่ต่างชนิดกัน ส่วนยางที่ไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน จะสามารถแบ่งออกไปได้เป็นอีก 2 แบบคือแบบ Compatible blend คือเป็นการผสมแบบแยกเฟสโดยมีการยึดเกาะอย่างเหนียวแน่นระหว่างเฟส และแบบ Incompatible blend เป็นการผสมแบบแยกเฟสโดยที่ไม่เกิดการยึดเกาะระหว่างเฟส โดยทั่วไปแล้วยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์นั้นจะเป็นยางผสมที่เป็นการผสมแบบที่ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน และหากเปรียบเทียบกันแล้วสมบัติของยางที่ผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียวหรือมีการยึดเหนี่ยวระหว่างเฟส จะดีกว่าสมบัติของยางผสมที่ไม่สามารถผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียวหรือไม่เกิดอันตรกิริยาระหว่างเฟสได้ [16] โดยประเภทของยางผสมสามารถสรุปออกมาเป็นแผนผังได้ดังรูปที่ 2.7 ดังนี้

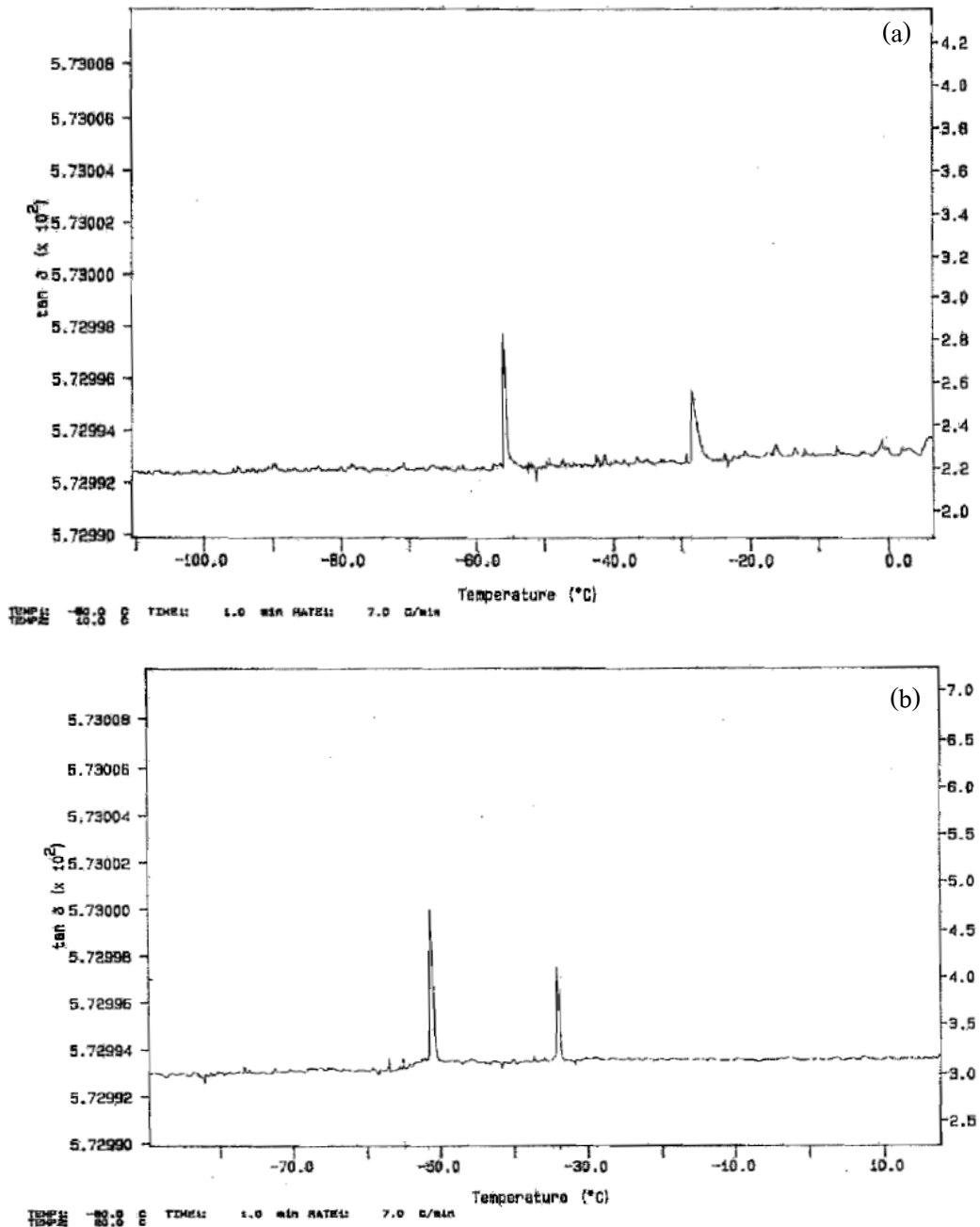


รูปที่ 2.7 แผนผังประเภทของยางผสม [4]

#### 2.2.2.4 ความแตกต่างระหว่างชนิดของยางผสม

ยางผสมแบบ Miscible blend แตกต่างจากยางผสมแบบ Compatible blend ตรงที่ยางผสมที่ผสมเข้ากันได้แบบ Miscible blend นั้นยางจะละลายผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียวอย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้สมบัติของยางที่นำมาผสมกันแสดงสมบัติออกมาเป็นสมบัติเดียว ในขณะที่ยางผสมแบบ Compatible blend นั้นยางที่ผสมกันจะไม่ได้ละลายหรือหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสมบูรณ์ แต่ก็สามารถที่จะเกิดอันตรกิริยาระหว่างเฟสของกันและกันได้ดีและเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกัน โดยความแตกต่างระหว่างยางผสมแบบ Miscible blend และแบบ Compatible blend สามารถวัดได้จากหลายวิธีเช่นการวัดสมบัติทางความร้อนโดยใช้เทคนิค DSC หรือโดยใช้เทคนิค Dynamic mechanical analysis (DMA) โดยดูจากค่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วหรือค่า  $T_g$  ซึ่งหากเป็นยางผสมที่สามารถผสมเข้ากันได้แบบ Miscible blend แล้ว ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วของยางผสม จะแสดงออกมาเป็นค่าเดียวบ่งบอกถึงสมบัติของยางผสมที่รวมเป็นหนึ่งเดียวกันแต่หากเป็นยางผสมแบบ Compatible blend ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วของยางผสมจะแยกออกเป็นสองค่าแต่ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วจะมีการขยับเลื่อนเข้ามาใกล้กันมากขึ้นหรือมีผลต่างของค่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วน้อยลง โดยทั่วไปแล้วการนำยางคนละชนิดมาผสมกันนั้นยางผสมที่ได้ จะเป็นยางผสมแบบ Immiscible blend เป็นส่วนใหญ่เนื่องเพราะยางที่มีโครงสร้างโมเลกุลที่ต่างกันหรือมีสมบัติที่ต่างกันแทบจะเป็นไปไม่ได้เลย ที่จะผสมละลายหลอมรวมเข้ากันเป็นเนื้อเดียวอย่างสมบูรณ์ แต่จะเป็นยางผสมแบบ Compatible blend หรือ Incompatible blend ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ ปัจจัย ดังเช่นในงานวิจัยของรัชพานี [16] ซึ่งเป็นการศึกษาแนวทางการประยุกต์ใช้ยางธรรมชาติที่มีหมู่ฟังก์ชันมาผสมกับยางสังเคราะห์คือยางอะคริลิก โดยการนำน้ำยางธรรมชาติไปผ่านปฏิกิริยาโอโซโนไลซิส เกิดหมู่ฟังก์ชันขึ้น แล้วนำไปผสมกับยางอะคริลิก พบว่าค่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วของยางผสมมีแนวโน้มเลื่อนเข้าใกล้กันมากกว่าการใช้ยางธรรมชาติมาผสมกับยาง

อะคริลิก แสดงให้เห็นว่ายางผสมระหว่างยางธรรมชาติที่มีหมู่ฟังก์ชันกับยางอะคริลิกเป็นแบบ Compatible blend ในขณะที่ยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางอะคริลิกเป็นแบบ Incompatible blend ยกตัวอย่างเทอร์โมแกรมของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติที่มีหมู่ฟังก์ชันกับยางอะคริลิกเทียบกับของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางอะคริลิกที่วัดโดยใช้เทคนิค DMA แสดงในรูปที่ 2.8 (a) และ (b) ดังรูป



รูปที่ 2.8 เทอร์โมแกรมของ (a) ยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางอะคริลิก และ (b) ยางผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ผ่านการทำปฏิกิริยาไอโซโนไลซิสกับยางอะคริลิก [16]

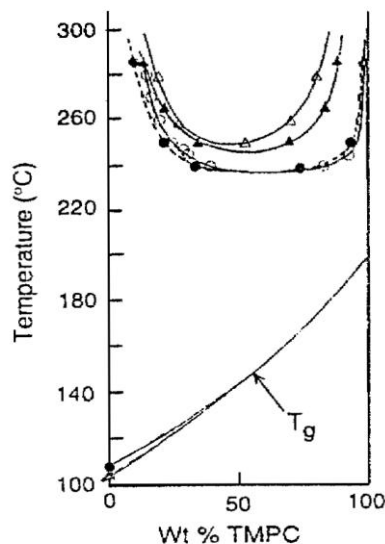
### 2.2.2.5 ปัจจัยที่มีต่อความสามารถในการผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียวของยางผสม

#### 1. อุณหภูมิและสัดส่วนของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการผสม

อุณหภูมิในการผสมมีผลต่อความเข้ากันได้ของยางผสม โดยเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการผสมสูงขึ้นก็จะทำให้ยางแต่ละชนิดไหลได้ดีขึ้นทำให้สามารถผสมเข้ากันได้ดีขึ้น และนอกจากอุณหภูมิแล้วสัดส่วนของยางผสมแต่ละชนิดที่นำมาผสมกันก็มีผลต่อความเข้ากันได้เช่นกัน โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ายางผสมจะสามารถเข้ากันได้ดีที่สุดที่อัตราส่วนที่มียางชนิดหนึ่งในปริมาณที่มากกว่าในขณะที่ยางอีกชนิดหนึ่งจะทำหน้าที่เป็นเหมือนเมทริกซ์ที่กระจายอยู่ในเนื้อยาง เช่นในงานวิจัยของ Park และคณะ [17] ได้ศึกษาถึงสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยางอะคริลิกและยางธรรมชาติอพอกไชด์จากการทดลองพบว่าที่อัตราส่วนของยางผสมระหว่างยางอะคริลิกต่อยางธรรมชาติอพอกไชด์เท่ากับ 25/75 จะทำให้ได้ยางผสมที่มีค่าแรงบิดสูงสุด และพบว่าค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเป็นค่าเดียว อันแสดงถึงการเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวระหว่างยางทั้งสองชนิด

#### 2. น้ำหนักโมเลกุล (molecular weight, $M_w$ ) ของยางที่นำมาผสม

หากยางหรือพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันมีน้ำหนักโมเลกุลมากจะทำให้สายโซ่โมเลกุลไม่สามารถเกี่ยวพันกันได้ ทำให้การผสมเกิดขึ้นได้ไม่ดีเท่าที่ควร โดยผลของน้ำหนักโมเลกุลที่มีต่อการผสมสามารถอธิบายได้จากรูปร่างของเฟสไดอะแกรมที่เปลี่ยนแปลงไปดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ผลของน้ำหนักโมเลกุลที่มีต่อเฟสไดอะแกรม [4]

จากรูปที่ 2.9 ซึ่งเป็นเฟสไดอะแกรมแบบ LCST ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิสไตรีน (PS) กับ tetramethyl bisphenol-A polycarbonate (TMPC) ซึ่ง PS จะมีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่างกัน โดยเส้น  $\Delta$  เป็นเส้น LCST เมื่อใช้ PS ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 32,000 g ต่อ mol มาผสมกับ TMPC และเส้น  $\bullet$  เป็น

เส้น LCST เมื่อใช้ PS ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 42,000 gต่อmolมาผสมกับ TMPC โดยจะเห็นว่าเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PS สูงขึ้น ช่วงกราฟที่พอลิเมอร์เกิดการแยกเฟสของเฟสไดอะแกรมจะมีค่ากว้างมากขึ้นหรือช่วงที่พอลิเมอร์ผสมเกิดการแยกเฟสจะมีช่วงกว้างมากขึ้น

### 3. ระบบการวัลคาไนซ์ (Vulcanization system)

พอลิเมอร์ผสมระหว่างยางกับยางมีความยุ่งยากซับซ้อน ในแง่ของการผสมมากกว่าการผสมพลาสติกกับพลาสติกเนื่องจากขึ้นรูปยาง ต้องมีกระบวนการคงรูปยางหรือทำให้ยางเกิดพันธะเชื่อมโยง เรียกว่า “Vulcanization” โดยการผสมสารเคมีต่างๆ เช่น

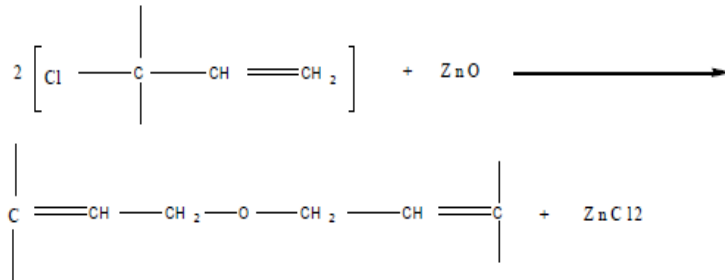
- **สารเสริมความแข็งแรง (Filler)** เป็นสารที่ใช้ผสมกับยางเพื่อช่วยเสริมแรง ให้ผลิตภัณฑ์ยาง เรียกว่า สารตัวเติมเสริมแรง (Reinforcing filler) ได้แก่ ผงเขม่าดำ เกรดต่างๆ และ ผงเขม่าขาว หรือซิลิกา เป็นต้น
- **สารทำให้ยางคงรูป (Curing agent)** สารวัลคาไนซ์เป็นสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลตรงตำแหน่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา สารวัลคาไนซ์ที่สำคัญต่อยางธรรมชาติ ได้แก่ กำมะถัน (Sulfur) เป็นสารที่นิยมใช้มากที่สุด
- **สารเร่งให้ยางคงรูป (Accelerator)** สารเร่งปฏิกิริยาเป็นสารเคมีที่ช่วยให้การเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เร็วขึ้น ลดปริมาณของกำมะถันที่ต้องใช้ และลดอุณหภูมิการคงรูปยาง
- **สารเสริมตัวเร่งปฏิกิริยา (Activator)** เป็นสารที่เติมลงสารประกอบยางเพียงเล็กน้อย เพื่อให้สารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปมีความว่องไวต่อปฏิกิริยามากขึ้นนอกจากนี้ ยังช่วยในกระจายตัวของสารเคมีต่างๆ ในเนื้อยางและช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ให้ดีขึ้น
- **สารป้องกันยางเสื่อม (Antidegradants)** เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของยาง โดยเฉพาะยางธรรมชาติจะมีพันธะคู่ค่อนข้างมาก ดังนั้นยางจึงมีสภาพที่อ่อนแอต่อการถูกโอโซน แสงแดด ทำลายให้เสื่อมสภาพ การเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างของสารในกลุ่มนี้ ได้แก่ IPPD (N-Isopropyl-N'-phenyl-p-phenylenediamine) และ BHT (2,6-Di-tert-Butyl(-p-cresol)) เป็นต้น [4]

เมื่อผสมยางกับสารเคมีเหล่านี้แล้ว ยางที่ได้จะเรียกว่า “ยางคอมปาวด์” โดยหากนำยางคอมปาวด์นี้ไปให้ความร้อนภายใต้ความดันยางจะเกิดพันธะเชื่อมโยงหรือเกิดการคงรูปขึ้น และเรียกยางที่ผ่านกระบวนการคงรูปแล้วว่า “ยางวัลคาไนเซท” ซึ่งการวัลคาไนเซทยางจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญ 4 ประการคือ

1. ยางเปลี่ยนโครงสร้างจากแบบเชิงเส้นเป็นแบบร่างแห ทำให้มีความแข็งแรงมากขึ้น
2. ทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์หลายๆชนิด
3. ทำให้สมบัติเชิงกล เช่นความทนแรงดึงและความต้านทานการฉีกขาดเพิ่มขึ้น



สารอินทรีย์คือ 2-mercaptoimidazoline หรือ Ethylene Thio Urea (ETU) โดยกลไกของการเกิดพันธะเชื่อมโยงของยางคลอโรพรีนเป็นดังรูปที่ 2.11 ดังนี้



รูปที่ 2.11 การเชื่อมโยงยางคลอโรพรีนด้วยซิงค์ออกไซด์ [19]

จากที่กล่าวมาจะเห็นว่ายางแต่ละชนิดจะมีระบบการวัลคาไนซ์ที่แตกต่างกัน โดยการที่ยางมีระบบการวัลคาไนซ์ที่ต่างกันเมื่อนำมาผสมกันแล้วนำไปทำให้เกิดการคงรูปพบว่ามีแนวโน้มที่ยางจะเกิดการแยกเฟสกัน ดังนั้นยางผสมที่จะนำมาผสมกันจึงควรมีระบบที่ใช้ในการวัลคาไนซ์เหมือนหรือแตกต่างกันไม่มากนักเพื่อป้องกันการแยกเฟสของยางผสมขณะที่ทำการผสมยาง เช่นยางธรรมชาติกับยางไนไตรล์หรือยางอีพิตีเอ็ม อย่างไรก็ตามยางผสมระหว่างยางที่มีระบบการวัลคาไนซ์ต่างกันได้ก็นำมาใช้ผสมกันได้โดยขึ้นอยู่กับสัดส่วนของยางที่นำมาผสมและสูตรของสารเคมีที่ใช้ในการคงรูป เช่นในงานวิจัยของ Sae-oui และคณะ [20] ได้ศึกษาผลของสัดส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีนที่มีต่อการเสื่อมสภาพด้วยน้ำมัน, โอโซนและความร้อน ผลที่ได้พบว่าการผสมยางคลอโรพรีนลงไปยางธรรมชาติช่วยให้ยางมีความทนต่อความร้อน, น้ำมันและโอโซนได้ดีขึ้นที่อัตราส่วนของยางคลอโรพรีนต่อยางธรรมชาติ 75:25 โดยน้ำหนัก

#### 4. วิธีการหรือลำดับในการผสม

เนื่องจากยางแต่ละชนิดจะมีสูตรของสารเคมีที่ใช้ในการคงรูปที่แตกต่างกันไป แม้จะเป็นยางที่มีระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันเหมือนกันก็ตาม โดยปัญหาจากการกระจายตัวของสารเคมีที่ใช้ในการคงรูปในยางแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ดังนั้นวิธีการผสมยางจึงมีผลต่อสมบัติของยางผสม โดยในงานวิจัยของ Wootthikanokkhan และ Tunjongnawin [1] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของวิธีการผสมส่วนผสมของยางต่อสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางอะคริลิก โดยวิธีการผสมส่วนผสมของยางมีทั้งหมด 3 แบบ โดยแบบที่ 1 จะทำการผสมส่วนผสมทั้งหมดลงไปยางพร้อมๆ กัน ส่วนวิธีการผสมแบบที่ 2 จะทำการผสมสารโดยแยกกันระหว่างยางแต่ละชนิด แล้วผสมกำมะถัน ลงไปเป็นตัวสุดท้าย และวิธีการผสมแบบที่ 3 จะทำการผสมกำมะถันกับยางอะคริลิกก่อนและจึงนำไปผสมกับยางธรรมชาติ โดยจากการทดลองพบว่าวิธีการผสมแบบที่ 2 และ 3 ทำให้ยางมีความทนต่อแรงดึงสูงกว่าวิธีการผสมแบบที่ 1 และยังทำให้ค่ามอดูลัส เพิ่มขึ้นประมาณ 500 kPa

### 5. ความแตกต่างระหว่างขั้วของยางที่นำมาผสม

นอกจากปัจจัยของอุณหภูมิและสัดส่วนของยางแต่ละชนิดที่ใช้ในการผสม, น้ำหนักโมเลกุลของยาง, วิธีการผสมและความแตกต่างของระบบการวัลคาไนซ์จะมีผลต่อความเข้ากันได้ของยางผสมแล้ว ปัจจัยอีกประการที่มีผลต่อความเข้ากันได้และสมบัติของยางผสมคือ สภาพขั้วของยางแต่ละชนิดที่นำมาผสม เนื่องจากการผสมยางใช้หลักเดียวกันกับการผสมสารละลายหรือหลักการดูดซับของสารเคมีคือสารที่มีสภาพขั้วเหมือนกันเมื่อนำมาผสมกัน จะสามารถละลายหรือถูกดูดซับได้ดีกว่ายางที่มีสภาพขั้วแตกต่างกัน โดยการผสมยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์นั้นมักจะประสบกับปัญหานี้ เพราะยางธรรมชาติเป็นยางที่ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจนซึ่งไม่มีความเป็นขั้ว ในขณะที่ยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่เป็นยางที่มีความเป็นขั้วสูงกว่า ทำให้เมื่อนำมาผสมกันแล้วโมเลกุลของยางจะไม่เกิดอันตรกิริยาระหว่างกัน ทำให้ไม่สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้ [20] เช่นในงานวิจัยของสรารุณี [4] ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติมในคอมโพสิตและวัลคาไนเซทของยางผสม โดยพบว่ายางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์ได้แก่ยางไนไตรล์และยางอะคริลิก จะไม่สามารถผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกันได้เนื่องจากความแตกต่างระหว่างความเป็นขั้วโดยยางธรรมชาติเป็นยางที่ไม่มีขั้วในขณะที่ยางไนไตรล์และยางอะคริลิกเป็นยางที่มีขั้ว ส่งผลให้อันตรกิริยาระหว่างยางผสมมีค่าต่ำอย่างแทบจะไม่เกิดอันตรกิริยาระหว่างกัน และยังไม่เกิดขั้วอันตรกิริยาระหว่างยางกับอนุภาคของเขม่าดำซึ่งเป็นสารตัวเติมอีกด้วย

ดังนั้นจึงได้มีการค้นหาวิธีการเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างยางผสม เช่นการเติมสารช่วยผสมหรือ Coupling agent ซึ่งช่วยทำให้เฟสของยางแต่ละชนิดสามารถกระจายตัวไปในเฟสของกันและกันได้มากขึ้นเช่นในงานวิจัยของชัชวาลย์ และคณะ [21] ได้ศึกษาอิทธิพลของสารช่วยประสานซึ่งก็คือยางคลอโรพรีนที่มีต่อสมบัติการไหลความหนาแน่นของพันธะข้ามและสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง NBR โดยผลที่ได้พบว่าสารช่วยประสานยาง ENR หรือสารช่วยประสานยางคลอโรพรีนช่วยทำให้ยางธรรมชาติผสมเข้ากันกับยาง NBR ได้ดีขึ้นสมบัติเชิงกลของยางมีค่าดีขึ้น ความหนาแน่นของพันธะข้ามมีค่าเพิ่มมากขึ้น หรือในงานวิจัยของ Onyeagoro [22] ได้ทำการศึกษาผลของการใช้ยาง ENR มาเป็นสารช่วยประสานระหว่างยางธรรมชาติกับยางไนไตรล์ โดยผลที่ได้พบว่ายาง ENR สามารถช่วยทำให้ยางธรรมชาติกับยางไนไตรล์เข้ากันได้ดีขึ้น โดยดูได้จากค่าความทนต่อแรงดึงและค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ของยางผสมซึ่งมีค่าดีขึ้นเมื่อมีการผสมยาง ENR ลงไป

หรืออีกวิธีหนึ่งคือการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันให้แก่ยางธรรมชาติแล้วจึงนำไปผสมกับยางสังเคราะห์ เช่นงานวิจัยของรัชพานี [16] ซึ่งเป็นการศึกษาแนวทางการประยุกต์ใช้ยางธรรมชาติที่มีหมู่ฟังก์ชันมาผสมกับยางสังเคราะห์คือยางอะคริลิก โดยการนำน้ำยางธรรมชาติไปผ่านปฏิกิริยาไอโซ-

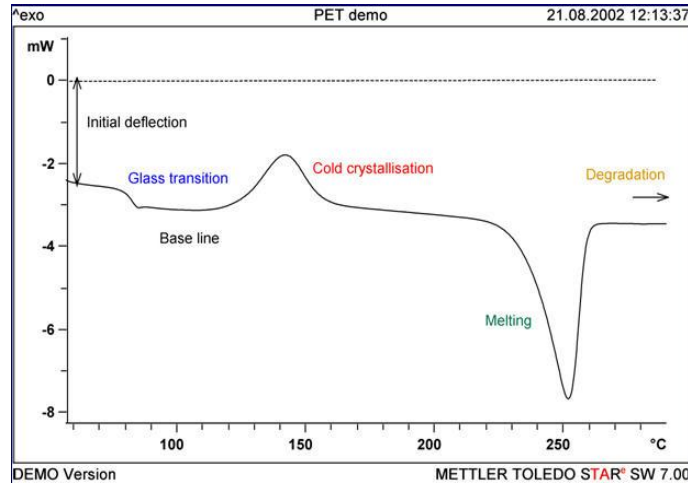
ไนไลซิส ทำให้สายโซ่โมเลกุลสั้นลง เกิดหมู่คาร์บอนิลและคีโตนที่ปลายสายโซ่ แล้วนำไปผสมกับยางอะคริลิก พบว่าค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของยางผสมมีแนวโน้มเลื่อนเข้าใกล้กันมากกว่าการใช้ยางธรรมชาติมาผสมกับยางอะคริลิก แสดงให้เห็นว่ายางธรรมชาติที่มีหมู่ฟังก์ชันสามารถผสมเข้ากันกับยางอะคริลิกได้ดีกว่ายางธรรมชาติ หรืออีกกรณีหนึ่งในงานวิจัยของ Ismail และ Leong [2] ได้นำยางธรรมชาติอีพอกซีไคซ์หรือยาง ENR มาผสมกับยางคลอโรพรีนแล้วทำการวัดสมบัติด้านพฤติกรรมการคงรูปหรือวัฏคาไนซ์และสมบัติเชิงกลเทียบกับยางธรรมชาติโดยพบว่ายางผสมระหว่างยาง ENR กับยางคลอโรพรีนมีพฤติกรรมการวัฏคาไนซ์และสมบัติเชิงกลที่ดีกว่ายางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีนและในงานวิจัยของ นิลุบล [23] ได้ศึกษาสมบัติความทนน้ำมันของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางไนไตรล์เทียบกับยางผสมระหว่างยาง ENR กับยางไนไตรล์ ผลที่ได้พบว่ายางผสมระหว่างยาง ENR กับยางไนไตรล์สามารถทนต่อน้ำมันได้ดีกว่ายางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางไนไตรล์

## 2.3 การศึกษาความเข้ากันได้ของยางผสม (Miscibility of rubber blend)

### 2.3.1 การวิเคราะห์จากค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วโดยใช้เทคนิค Differential-Scanning Calorimetry (DSC)

เนื่องจากยางเป็นสาร โมเลกุลใหญ่จึงมีเพียง 2 สถานะเท่านั้น คือ ของแข็งและของเหลวขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ แต่จะไม่สามารถเปลี่ยนไปอยู่ในสถานะก้ำกึ่งได้ เนื่องจากยางมีจุดเดือดสูงกว่า อุณหภูมิการสลายตัว (Degradation temperature) โดยปกติยางจะอยู่ในสถานะของแข็งที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งจะประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึก (Crystal) และส่วนอสัณฐาน (Amorphous) ขึ้นกับการจัดเรียงตัวของสายโซ่ว่าเป็นระเบียบมากน้อยเพียงใด ซึ่งลักษณะการจัดเรียงตัวและปริมาณผลึกนี้ส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางความร้อนที่สำคัญ คือ อุณหภูมิจุดหลอมเหลว ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สายโซ่ของยางเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว และสมบัติทางความร้อนที่สำคัญอีกประการของพอลิเมอร์ คือ อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว เนื่องจากยางประกอบด้วยสายโซ่ยาวที่เกิดการเกี่ยวโยงกันไปมาจำนวนมาก เมื่อให้ความร้อนจนสูงกว่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลว จะทำให้สายโซ่สามารถไหลได้ กลายเป็นพอลิเมอร์หลอมเหลว ซึ่งมีความหนืดสูงเนื่องจากเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่ที่สัมผัสกันในขณะที่เกิดการไหล แต่หากอุณหภูมิต่ำกว่านี้ สายโซ่จะไม่สามารถไหลผ่านกันได้ แต่ยังมีพลังงานมากพอที่จะเคลื่อนไหวหรือเกิดการสั้นของสายโซ่เฉพาะส่วน โดยเฉพาะบริเวณปลายสายโซ่ซึ่งมีอิสระมากกว่า ส่งผลให้อยู่ในสถานะของแข็งที่อ่อนหยุ่น จึงเรียกว่าอยู่ในสถานะคล้ายยาง (Rubbery-state) แต่เมื่อลดอุณหภูมิลงมากกว่านี้ จนต่ำกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว สายโซ่พอลิเมอร์จะเคลื่อนไหวได้น้อยมาก จึงอยู่ในสถานะของแข็งที่เปราะคล้ายแก้ว เรียกว่าสถานะคล้ายแก้ว

(Glassy state) ซึ่งพอลิเมอร์ทุกชนิดจะแสดง  $T_g$  แต่มีเฉพาะ Semi-crystalline polymer เท่านั้นที่แสดง  $T_m$  ยกตัวอย่างกราฟแสดงค่า  $T_g$  และ  $T_m$  ของ Poly (Ethylene Terephthalate) (PET) ในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงเทอร์โมแกรมของ PET เมื่อวัดด้วยเทคนิค DSC [24]

ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วสามารถใช้ในการหาความเข้ากันได้ของยางผสมได้โดยตามหลักการแล้วยางผสมที่ผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียว จะมีสมบัติอยู่ตรงกลางระหว่างสมบัติของยางตั้งต้นแต่ละชนิดที่นำมาผสม เช่นหากยางที่นำมาผสมกันมีความเข้ากันได้ดีสมบัติต่างๆ รวมไปถึงสมบัติทางความร้อนจะรวมเป็นค่าเดียว ทำให้ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วของยางผสมมีแนวโน้มปรากฏเป็นค่าเดียว ในทางกลับกันหากยางที่นำมาผสมกันไม่สามารถละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วของยางผสมจะแยกออกเป็นสองค่า ยิ่งผลต่างของค่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว ( $\Delta T_g$ ) มีค่ามากเท่าไรก็ยิ่งบ่งบอกถึงความเข้ากันได้ของยางผสม โดยในงานวิจัยของ Nawawi [25] ได้ใช้เทคนิค DSC ในการศึกษาความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PEO และยางธรรมชาติพอกซีไคซ์ที่มีปริมาณหมู่เอพอกไซด์ 25% mol (ENR-25) โดยพบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PEO และยาง ENR-25 ไม่สามารถผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ โดยพิจารณาจากค่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วที่ปรากฏแยกออกเป็นสองค่า

นอกจากนี้ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วยังบ่งบอกถึงอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางที่นำมาผสมกันได้อีกด้วย โดยหากยางที่นำมาผสมกันมีอันตรกิริยาระหว่างกันมากสายโซ่โมเลกุลจะยิ่งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ค่า  $T_g$  จึงมีการเลื่อนไปทางที่สูงขึ้น ยกตัวอย่างเช่น พอลิโพรพิลีน (PP) มีอันตรกิริยาภายในโมเลกุลต่ำกว่า Poly (Vinyl Chloride) (PVC) เนื่องจากโมเลกุลของ PP มีอันตรกิริยาแบบแรงกระจายตัวซึ่งแข็งแรงน้อยกว่าแบบแรงคู่ควบใน PVC ทำให้สายโซ่ของ PVC เคลื่อนไหวหรือสั่นได้ยากกว่าจึงมี  $T_g$  สูงกว่า ปัจจัยต่อมา คือ ปริมาณของผลึกหากพอลิเมอร์มีปริมาณ

ผลึกสูงขึ้น การเกิดผลึกนี้จะช่วยยึดสายโซ่พอลิเมอร์ให้สั้นหรือเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น จึงทำให้  $T_g$  สูงขึ้น นอกจากนี้การเกิดพันธะเชื่อมโยงเป็นโครงสร้างร่างแห ก็ส่งผลให้ค่า  $T_g$  ของพอลิเมอร์สูงขึ้น ด้วยเหตุผลเดียวกัน เนื่องจากจุดที่ยึดสายโซ่พอลิเมอร์เข้าด้วยกันนั้น จำกัดอิสระในการเคลื่อนไหวของสายโซ่ [26]

### 2.3.2 การวิเคราะห์จากอันตรกิริยาภายในโมเลกุลระหว่างยางผสมโดยใช้เทคนิค Rubber-Process Analyser (RPA)

ความเข้ากันได้ของยางผสม นอกจากจะพิจารณาได้จากอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของยางผสมแล้ว ยังสามารถพิจารณาได้จากอันตรกิริยาภายในโมเลกุลระหว่างยางผสม โดยหากยางผสมชนิดใดมีอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่โมเลกุลด้วยกันมาก ก็จะมีแนวโน้มที่ยางผสมนั้นจะสามารถผสมเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยอันตรกิริยาภายในโมเลกุลระหว่างยางผสมสามารถวัดได้ โดยใช้เครื่อง RPA โดยการนำยางผสมแต่ละชนิดมาทำการกดอัดด้วยหัวตายที่อุณหภูมิ  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 30 นาที เมื่อยางผสมได้รับแรงเฉือนจากหัวตายแล้ว โมเลกุลของยางผสมจะถูกกระตุ้นให้เกิดการเคลื่อนไหวและเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่โมเลกุลของกันและกัน ยิ่งยางผสมนั้นมีอันตรกิริยาหรืออันตรกิริยาระหว่างกันมากเท่าไร จะยิ่งส่งผลทำให้เกิดแรงบิดต่อต้านที่ยางผสมกระทำกับหัวตายมากขึ้นเท่านั้น และหากยางผสมชนิดใดสามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันได้ดีแล้วยางผสมนั้นก็จะมีแนวโน้มผสมเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวกันได้ดี [16] สายโซ่โมเลกุลของยางแต่ละชนิดมีแนวโน้มเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น โดยอันตรกิริยาภายในยางผสมนั้นจะถูกวัดออกมาในรูปของค่าแรงบิดที่ยางผสมกระทำต่อหัวตาย แบ่งออกเป็นค่าแรงบิดสูงสุด ( $S'_{\max}$ ) กับค่าแรงบิดต่ำสุด ( $S'_{\min}$ ) หากผลต่างระหว่างแรงบิดระหว่างค่าแรงบิดสูงสุด ( $S'_{\max}$ ) กับค่าแรงบิดต่ำสุด ( $S'_{\min}$ ) ของยางผสมชนิดใดมีค่ามากก็แปลว่ายางผสมนั้น มีอันตรกิริยาภายในระหว่างโมเลกุลมาก

### 2.3.3 การวิเคราะห์จากค่าอีลาสติคโมดูลัส และความสามารถในการไหลของยางผสม โดยใช้เทคนิค RPA

ยางเป็นวัสดุที่มีสมบัติความเป็นยืดหยุ่นหนืด (Viscoelasticity) คือเป็นวัสดุที่แสดงทั้งความหนืดและความยืดหยุ่นร่วมกัน คือเมื่อยางได้รับแรงหรือพลังงานเช่นแรงเฉือน (Shear force) ยางสามารถที่จะสะสมพลังงานของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือมีความสามารถในการคืนรูปร่างเดิมได้ โดยพลังงานที่ถูกเก็บสะสมอยู่ในโมเลกุลจะเรียกว่า ค่าอีลาสติคโมดูลัส (Elastic modulus,  $G'$ ) ในขณะที่เดียวกันโมเลกุลของยางอีกส่วนหนึ่งเมื่อได้รับพลังงานก็สามารถเกิดการเคลื่อนไหวเปลี่ยนรูปไปตามแรงนั้นหรือเกิดการไหลได้ โดยพลังงานส่วนที่ไม่ถูกเก็บสะสมไว้ในยางเรียกว่า ค่าวิสคอสโมดูลัส (Viscous modulus,  $G''$ ) [27] โดยทั้งค่า  $G'$  และค่า  $G''$  นี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของปัจจัยภายนอกที่มากกระทำกับยางเช่น การเปลี่ยนความถี่ของการออกแรงเฉือนหรือการ

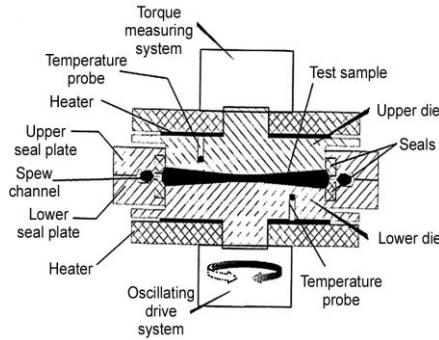
เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $G'$  และค่า  $G''$  แสดงออกมาในรูปของสมการเชิงซ้อน [28] ได้ดังนี้

$$G^* = G' + iG'' \quad (2.2)$$

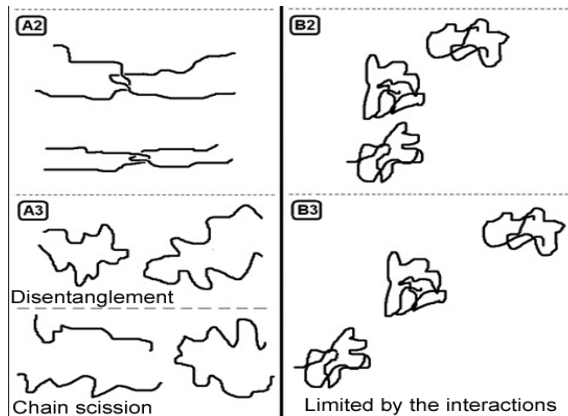
เมื่อ  $G^*$  = Complex modulus of elasticity (kPa)  
 $G'$  = Elastic or storage modulus (kPa)  
 $G''$  = Viscous or loss modulus (kPa)  
 $i$  =  $(-1)^{-2}$

และเมื่อนำค่า  $G''$  มาหารด้วยค่า  $G'$  ก็จะได้ค่าๆ หนึ่งซึ่งบ่งบอกถึงสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของยางก็คือค่า  $\tan \delta$  โดยค่านี้จะเป็นค่าบ่งบอกถึงความสามารถในการไหลของยางแต่ละชนิด หากยางชนิดใดมีค่า  $\tan \delta$  มาก ก็แปลว่ายางนั้นสามารถไหลได้ดี [27]

โดยค่า  $G'$  และค่า  $\tan \delta$  ของยางภายใต้สภาวะการทดสอบโดยการเปลี่ยนความถี่ของการออกแรงเฉือน (Frequency sweep) หรือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Temperature sweep) สามารถหาได้จากเทคนิค RPA โดยการนำตัวอย่างยางมาใส่ในเครื่องจากนั้นตัวอย่างจะถูกให้แรงเฉือนโดยหัวคายนัดรูปที่ 2.13 ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของยางเกิดการเปลี่ยนแปลงการไหล โดยค่า  $G'$  และค่า  $\tan \delta$  รวมไปถึงค่าผลต่างของค่า  $\tan \delta$  ( $\Delta \tan \delta$ ) [16] ของยางผสมภายใต้สภาวะดังกล่าว สามารถใช้บ่งบอกถึงความสามารถหรือพฤติกรรมการไหล (Rheology) ของยางซึ่งมีความสัมพันธ์กับอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางผสมได้ โดยยางผสมที่สามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันได้ดีนั้น จะส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนไหวได้ยากมากกว่ายางผสมที่ไม่เกิดอันตรกิริยาระหว่างกัน แม้เมื่อได้รับปัจจัยภายนอกที่มากกระตุ้นเช่นการเปลี่ยนแปลงความถี่ของการให้แรง หรือการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิก็ตามดังรูปที่ 2.14 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อโซ่โมเลกุลของยางถูกกระตุ้นให้เกิดการเคลื่อนไหวจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างกัน โดยหากโมเลกุลของยางผสมเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันมากก็จะส่งผลให้ยางไหลได้ยากขึ้นและทำให้ค่าผลต่างของค่า  $\tan \delta$  ของยางผสมที่เกิดอันตรกิริยาระหว่างกันได้ดีมีค่าน้อยกว่ายางผสมที่ไม่เกิดอันตรกิริยาระหว่างกัน



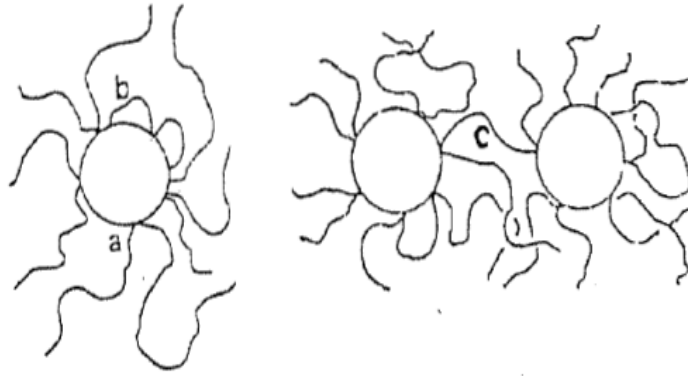
รูปที่ 2.13 ภาพตัดขวางของหัวคายของเครื่อง RPA [29]



รูปที่ 2.14 ลักษณะการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลของยางเมื่อมีการปรับเปลี่ยนความเครียดของหัวคาย [29]

### 2.4 อันตรกิริยาระหว่างเขม่าดำกับยางผสม

สารตัวเติมเสริมแรง (Reinforcing filler) เป็นสารที่นิยมใช้ผสมกับยางเพื่อเพิ่มสมบัติหลายๆ ประการของยางให้ดีขึ้นเช่นสมบัติเชิงกล เป็นต้น ดังนั้นความเข้ากันได้ระหว่างสารตัวเติมกับยางสามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันหรือเข้ากันได้ดีเพียงใด ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่นลักษณะทางโครงสร้างของสารตัวเติมทั้งขนาดอนุภาคของเขม่าดำ ลักษณะ โครงสร้างทางเคมีที่พื้นผิวของเขม่าดำ และ โครงสร้างของยางเช่นความเป็นขั้ว น้ำหนักโมเลกุล ล้วนแล้วแต่มีผลต่อการเข้ากันได้ของยางกับเขม่าดำทั้งสิ้น โดยรูปแบบของการเชื่อมติดกันของยางกับอนุภาคเขม่าดำเป็นดังรูปที่ 2.15



**รูปที่ 2.15** แสดงการเกาะติดของโมเลกุลของยางกับเขม่าดำ (a) การเกาะติดกับโมเลกุลของยางกับผิวเขม่าดำตำแหน่งเดียว (Single attachment) (b) การเกาะติดกับโมเลกุลของยางกับผิวเขม่าดำหลายตำแหน่ง (Multiple attachment) (c) การเกาะติดกับโมเลกุลของยางกับระหว่างอนุภาคเขม่าดำ (Inter-particle attachment) [4]

นอกจากปัจจัยดังที่กล่าวมาแล้วอันตรกิริยาระหว่างเขม่าดำกับยางผสมสามารถใช้อธิบายถึงอันตรกิริยาระหว่างยางผสมได้เช่นกัน เนื่องจากได้มีงานวิจัยที่ผ่านมากล่าวไว้ว่าเมื่อนำยางธรรมชาติกับยางไนไตรล์มาผสมกัน แล้วนำมาผสมกับเขม่าดำพบว่ายิ่งเพิ่มปริมาณของยางไนไตรล์มากขึ้นจะทำให้ค่าบาวด์รับเบอร์ของยางผสมมีค่าลดลงกว่าค่าบาวด์รับเบอร์ของยางธรรมชาติหรือยางไนไตรล์เอง ซึ่งเป็นเพราะยางธรรมชาติเป็นยางที่ไม่มีขั้วในขณะที่ยางไนไตรล์มีความเป็นขั้วสูงกว่าดังนั้นยางทั้งสองชนิดนี้เมื่อนำมาผสมกันจะไม่เกิดอันตรกิริยาระหว่างกัน แต่กลับไปกีดกันซึ่งกันและกันในการที่จะเกิดอันตรกิริยากับอนุภาคของเขม่าดำส่งผลให้ ค่าบาวด์รับเบอร์ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางไนไตรล์มีค่าต่ำ [4] ดังนั้นหากยางผสมชนิดใดเกิดอันตรกิริยาหรือสามารถผสมเข้ากันได้ดีจะทำให้ยางผสมนั้นสามารถเกิดอันตรกิริยากับอนุภาคของเขม่าดำได้ดีเช่นกัน โดยอันตรกิริยาระหว่างเขม่าดำกับยางผสมสามารถศึกษาได้จากค่าบาวด์รับเบอร์และ Strain sweep

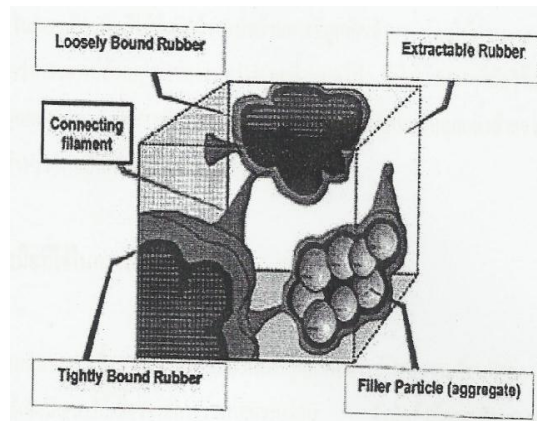
#### 2.4.1 การศึกษาจากค่าบาวด์รับเบอร์ (Bound rubber) [4]

บาวด์รับเบอร์ เป็นตัวแปรสำคัญในกลไกการเสริมแรงในยาง โดยบาวด์รับเบอร์คือ ส่วนของยางที่ไม่สามารถแยกออกจากสารตัวเติมเมื่อถูกสกัดด้วยตัวทำละลาย เช่น โทลูอีนที่ระยะเวลาหนึ่ง ณ อุณหภูมิห้อง โดยเมื่อผสมสารตัวเติมในยางทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับผิวของอนุภาคสารตัวเติม ซึ่งส่วน Tightly bound rubber เป็นส่วนที่โมเลกุลยางเกิดอันตรกิริยากับผิวของสารตัวเติม ส่วน Loosely bound rubber เป็นส่วนที่เกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของยางเอง และ Extractable rubber เป็นส่วนที่โมเลกุลของยางเองเป็นอิสระซึ่งจะถูกสกัดออกจากตัวทำละลายดังแสดงในรูปที่ 2.16 โดยค่าบาวด์รับเบอร์สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 2.2 [30] ดังนี้

$$\% \text{ Bound rubber} = \left[ \frac{W_{ig} - W_f}{W_r} \right] \times 100 \quad (2.3)$$

เมื่อ  $W_{ig}$  = น้ำหนักของตัวอย่างยางคอมโพสิตหลังถูกแช่ในโทลูอีนแล้วอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง  
 $W_f$  = น้ำหนักของเขม่าดำในตัวอย่างคอมโพสิตปริมาณ 0.5 g  
 $W_r$  = น้ำหนักของยางในตัวอย่างคอมโพสิตปริมาณ 0.5 g

ทั้งนี้ โมเลกุลของยางสามารถเกาะติดกับผิวของอนุภาคสารตัวเติมได้หลายตำแหน่ง อันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมกับยางขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น สภาพขี้ของสารตัวเติมและวิธีการผสมในงานวิจัยของ Lina และคณะ [30] ได้ทำการศึกษาอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคตัวเติมประเภทซิลิกา กับยาง SSBR โดยพิจารณาจากค่าบาวด์รับเบอร์ ผลที่ได้พบว่าซิลิกาที่ปรับปรุงสภาพแล้วจะสามารถผสมเข้ากันและกระจายตัวไปในยาง SSBR ได้ดีกว่าซิลิกาแบบปกติสรุปจากค่าบาวด์รับเบอร์ที่สูงกว่า

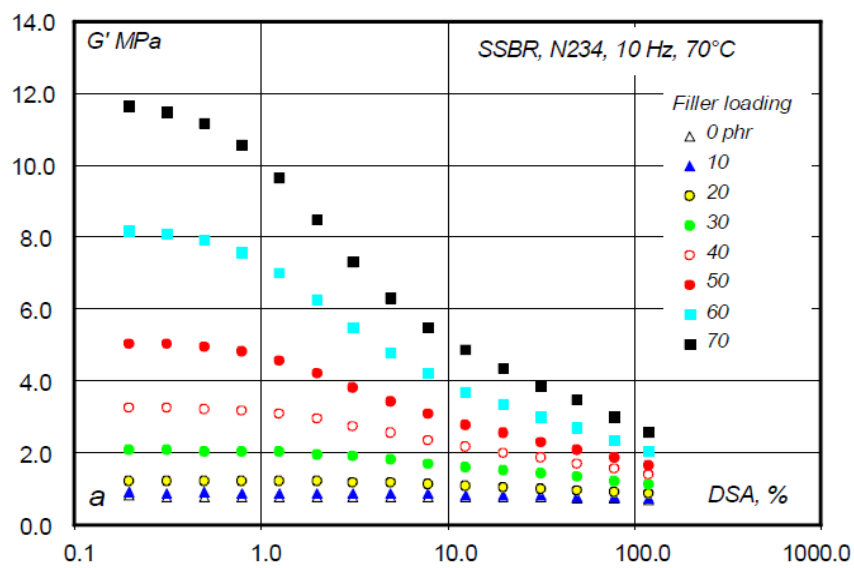


รูปที่ 2.16 การเกิดอันตรกิริยาในยางคอมโพสิตที่มีฟิลเลอร์ผสมอยู่ [4]

#### 2.4.2 Strain Sweep

อันตรกิริยาระหว่างยางกับอนุภาคเขม่าดำสามารถศึกษาได้จากการนำยางที่ผสมเขม่าดำหรือยางคอมโพสิตมาทำการให้แรงเฉือนของหัวค้ายด้วยเทคนิค RPA ภายใต้การเปลี่ยนแปลงความเครียดหรือองศาการแกว่งของหัวค้าย (% strain) แล้วพิจารณาค่าอิลาสติกมอดูลัส ( $G'$ ) ที่เปลี่ยนแปลงไปภายใต้ความเครียดนั้นๆ โดยในงานวิจัยของ Karrabi และ Gezaz [29] ได้อธิบายถึงปัจจัยที่มีผลต่อค่าอิลาสติกมอดูลัสของยางที่ผสมเขม่าดำหรือยางคอมโพสิต ภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงความเครียดไว้ว่าขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาระหว่างเขม่าดำกับเขม่าดำและอันตรกิริยาระหว่างยางกับอนุภาคเขม่าดำ หากยางเกิดอันตรกิริยากับอนุภาคของเขม่าดำได้ดี ก็จะส่งผลให้เขม่าดำสามารถแทรกเข้าไปยึดจับกับสายโซ่โมเลกุลของยางได้ดีส่งผลให้ปริมาตรโดยรวมของยางมีค่าเพิ่มมากขึ้น

ทำให้ความเป็นอีลาสติกของยางสูงขึ้นและพบว่าที่ความเครียดต่ำๆ ยางจะมีค่ามอดูลัสสะสมสูง แต่เมื่อความเครียดเพิ่มมากขึ้นค่าอีลาสติกมอดูลัสจะมีค่าลดลง เนื่องจากโครงสร้างตาข่ายของเขม่าดำกับเขม่าดำจะถูกทำลายลงส่งผลให้ค่ามอดูลัสมีค่าลดลง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “Payne effect” ค่ามอดูลัสสะสมในช่วงความเครียดสูงๆ (มากกว่า 10%) จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของยางที่ถูกยึดจับอยู่กับอนุภาคเขม่าดำ โดยหากยางสามารถยึดจับอยู่กับอนุภาคเขม่าดำได้มากก็จะทำให้ค่ามอดูลัสสะสมที่ความเครียดสูงมีค่ามากกว่ายางที่ยึดจับกับเขม่าดำได้ไม่ดีซึ่งก็ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีในการผสมยางกับเขม่าดำ ขนาดอนุภาคของเขม่าดำ และสภาพผิวของเขม่าดำ โดยตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงของค่ามอดูลัสภายใต้ระดับความเครียดต่างๆแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ปรากฏการณ์ Payne effect ของคอมโพสิตของยาง SSBR ที่ผสมเขม่าดำ [31]

จากรูปที่ 2.17 พบว่ายาง SSBR เมื่อผสมเขม่าดำลงไปปริมาณที่มากขึ้น ค่ามอดูลัสสะสมภายใต้การเปลี่ยนแปลงความเครียดของหัวด้าย จะมีค่าสูงกว่ายาง SSBR ที่ผสมเขม่าดำลงไปน้อยกว่า ปรากฏการณ์นี้อธิบายได้ว่าเป็นเพราะอนุภาคของเขม่าดำเข้าไปแทรกกระจายอยู่ระหว่างโมเลกุลของยาง SSBR มากขึ้นส่งผลให้ยางมีสมบัติความเป็นอีลาสติกหรือมีความยืดหยุ่นสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าอีลาสติกมอดูลัสของยางมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้จากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงปัจจัยที่มีผลต่อค่าอีลาสติกมอดูลัสของยางที่ผสมเขม่าดำหรือยางคอมโพสิต ขึ้นอยู่กับปริมาณของเขม่าดำที่สามารถเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณของเขม่าดำและความสามารถในการกระจายตัวเข้าไปผสมกับยาง

## 2.5 สมบัติของยางผสมวัลคาไนเซท (Rubber-blended vulcanizates)

### 2.5.1 พฤติกรรมการคงรูป (Cure characteristics)

การทดสอบพฤติกรรมการขึ้นรูปของยางคอมปาวด์ จะใช้เครื่อง “Rubber Process Analyzer (RPA)” โดยการวัลคาไนซ์หรือการทำให้ยางสุกเป็นกระบวนการนำสารประกอบยาง มาทำให้ร้อนสารวัลคาไนซ์จะเริ่มเกิดปฏิกิริยา ในตอนเริ่มต้นนี้จะใช้ระยะเวลาหนึ่งซึ่งอาจจะช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้และชนิดของสารเคมีที่ใช้ โดยถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นระยะเวลาดังกล่าวจะสั้นลง ระยะเวลาช่วงนี้เป็นช่วงเวลาที่ยังเริ่มต้นก่อนที่สารเคมีจะเข้าไปทำปฏิกิริยาก่อนให้เกิดการเชื่อมโยง ทำให้ยางแข็งขึ้น ระยะเวลาที่ยังเกิดการแข็งตัวอย่างเห็นได้ชัด เรียกว่า เวลาสกอร์ช ( $t_s$ ) แปลว่ายางเริ่มเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน ซึ่งเมื่อสารเคมีทำปฏิกิริยากับยางต่อไปยางก็จะแข็งขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงเวลา ณ จุดที่ยางมีแรงบิดสูงจนถึงร้อยละ 90 ของมอดุลัสสูงสุด ซึ่งระยะเวลาดังกล่าวถือว่าเป็นเวลาที่ยางเกิดปฏิกิริยาการเกิดพันธะเชื่อมโยงไป 90% (Optimum cure time,  $t_{90}$ ) โดยขั้นตอนของการเกิดพันธะเชื่อมโยงของยางแสดงในรูปที่ 2.18 ทั้งนี้ยางแต่ละชนิดจะมีความเร็วในการเกิดการคงรูปที่ต่างกัน โดยความเร็วของการเกิดพันธะเชื่อมโยงหรืออัตราการเกิดพันธะเชื่อมโยงสามารถหาได้จากสมการที่ 2.3 [32] ดังนี้

$$\text{Cure Rate Index} = 100/(t_{90} - t_{s2}) \quad (2.4)$$

เมื่อ Cure Rate Index (CRI) = ดัชนีการคงรูป

$t_{90}$  = Optimum cure time (min)

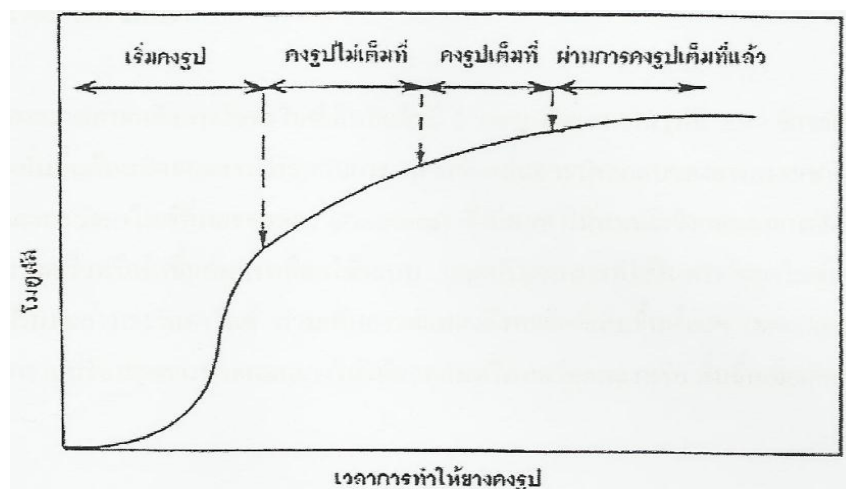
$t_{s2}$  = Scorch time (min)

เมื่อนำค่าแรงบิดสูงสุดมาหักลบกับค่าแรงบิดต่ำสุดจะสามารถบอกถึงปริมาณของพันธะเชื่อมโยงหรือความแข็งของยางที่ผ่านการคงรูปได้ โดยในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ายางผสมที่เข้ากันได้ดีจะทำให้พฤติกรรมการคงรูปมีลักษณะแตกต่างไปจากยางผสมที่เข้ากันได้ไม่ดี โดยยางผสมที่เข้ากันได้ดีจะมีอัตราการคงรูปสูงกว่าและมีปริมาณของพันธะเชื่อมโยงสูงกว่า ตัวอย่างเช่นในงานวิจัยของ Ismail และ Leong [2] พบว่ายางผสมระหว่างยาง ENR กับยางคลอโรพรีนจะมีอัตราการเกิดพันธะเชื่อมโยงสูงกว่ายางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน รวมไปถึงมีผลต่างแรงบิดสูงกว่ายางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน

### 2.5.2 สมบัติเชิงกลและสมบัติความทนต่อการเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์ยาง

สมบัติเชิงกลของยางที่เคยมีการทำการทดสอบมีหลายสมบัติด้วยกัน เช่นค่ามอดูลัส (Modulus), ค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile strength), ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) รวมไปถึงค่าความแข็ง (Hardness) ซึ่งสมบัติเชิงกลดังกล่าวสามารถหาได้จากเครื่องทดสอบแรงดึงและเครื่องทดสอบความแข็ง (Durometer) ในส่วนของการทดสอบการเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์ยางสามารถทดสอบได้หลากหลายแบบ ขึ้นอยู่กับว่าต้องการจะศึกษาสมบัติความทนต่อการเสื่อมสภาพด้านไหน เช่นการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน การเสื่อมสภาพด้วยตัวทำละลาย เป็นต้น ซึ่งสมบัติเชิงกลและสมบัติความทนต่อการเสื่อมสภาพของยางผสม สามารถบ่งบอกถึงความเข้ากันได้ระหว่างยางแต่ละชนิดที่นำมาผสมได้เช่นกัน ตัวอย่างเช่นในงานวิจัยของ Ismail และ Leong [2] พบว่ายางผสมระหว่างยาง ENR กับยางคลอโรพรีนจะมีสมบัติเชิงกลได้แก่ ค่ามอดูลัส ค่าความแข็ง และค่าความทนต่อแรงดึงที่วัดได้จากเครื่องทดสอบแรงดึงหรือ “Universal testing machine” สูงกว่ายางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงระดับความเข้ากันได้ระหว่างยาง ENR กับยางคลอโรพรีนที่เหนือกว่ายางธรรมชาติ

นอกจากนี้ ในงานวิจัยของ รัชพานี [16] ยังพบว่ายางผสมระหว่างน้ำยางธรรมชาติ ที่ผ่านการทำปฏิกิริยาไอโซโนโลซิสกับยางอะคริลิก สามารถเกิดอันตรกิริยากับยางอะคริลิกได้ดีกว่ายางธรรมชาติ และยางผสมที่ได้จะมีคุณสมบัติความทนต่อการเสื่อมสภาพด้วยความร้อนและน้ำมันเหนือกว่ายางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางอะคริลิก โดยพิจารณาจาก % ความแตกต่างของค่าสมบัติเชิงกลก่อนและหลังการเสื่อมสภาพด้วยความร้อนและน้ำมัน ซึ่งในงานวิจัยดังกล่าวได้ให้เหตุผลไว้ว่าเป็นเพราะยางธรรมชาติที่มีหมู่ฟังก์ชันสามารถผสมเข้ากันได้ดีกับยางอะคริลิกได้ดีกว่ายางธรรมชาติอันเป็นผลมาจากอันตรกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชันนั่นเอง

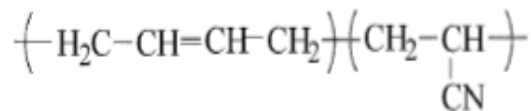


รูปที่ 2.18 ขั้นตอนต่างๆ ของการวัลคาไนซ์ [7]

## 2.6 ยางสังเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัย

### 2.6.1 ยางไนไตรล์ (Acrylonitrile butadiene rubber, NBR)

เป็นยางที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยยางไนไตรล์ มีส่วนประกอบเป็นสายพอลิเมอร์ที่ไม่อิ่มตัวของหมู่อะคริโลไนไตรล์ และบิวทาไดอีน ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 โครงสร้างของยางไนไตรล์ [4]

ยางไนไตรล์มีหลายชนิด โดยความแตกต่างที่สำคัญเกิดจากสัดส่วนของหมู่อะคริโลไนไตรล์ ที่ต่างกัน ซึ่งจะส่งผลทำให้ยางไนไตรล์ ที่ได้มีสมบัติที่ต่างกันออกไป ในแง่ของผู้ผลิตยาง จึงจำเป็นที่จะต้องมีการปรับสัดส่วนของอะคริโลไนไตรล์ ให้มีความเหมาะสม เพื่อให้ได้สมบัติของยางที่เหมาะสม โดยสัดส่วนอะคริโลไนไตรล์ในยาง NBR มีผลต่อสมบัติของยาง NBR ที่ต่างกัน ทำให้ได้ยาง NBR ในเกรดที่ต่างกัน โดยถ้ามีสัดส่วนของ % โดย mol ของหมู่อะคริโลไนไตรล์ ในยาง NBR สูงขึ้นจะมีผลทำให้ยาง มีสมบัติต่างๆ ดังนี้

- ก. ความทนทานต่อตัวทำละลาย, น้ำมัน และน้ำมันเชื้อเพลิงสูงขึ้น
- ข. ทำให้อัตราการเกิดพันธะเชื่อมโยงในกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยกำมะถันสูงขึ้น
- ค. ทำให้ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ และอากาศลดลง
- ง. ทำให้ความสามารถของพื้นผิวยางในการทนทานต่อการสึกหรอสูงขึ้น
- จ. ทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางไนไตรล์มีค่าสูงขึ้น
- ฉ. ทำให้อายุการใช้งานของยางในการใช้งานกับความร้อนยาวนานขึ้น
- ช. สามารถเข้ากับสายพอลิเมอร์ที่มีขั้วได้ดียิ่งขึ้น

ในทางการค้าเกรดของยางไนไตรล์จะแบ่งออกตามปริมาณของหมู่อะคริโลไนไตรล์ในยางไนไตรล์ ยิ่งปริมาณหมู่อะคริโลไนไตรล์มาก ยางก็จะสามารถทนต่อน้ำมัน ได้ดียิ่งขึ้น โดยเกรดของยางไนไตรล์สามารถแบ่งออกได้เป็นสามเกรดคือ ยางไนไตรล์เกรดที่มีปริมาณของหมู่อะคริโลไนไตรล์สูง, ยางไนไตรล์เกรดที่มีปริมาณของหมู่อะคริโลไนไตรล์ปานกลาง และยางไนไตรล์เกรดที่มีปริมาณของหมู่อะคริโลไนไตรล์ต่ำ โดยยางไนไตรล์แต่ละเกรดสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1-2.3

ตารางที่ 2.1 ยางไนไตรล์เกรดที่มีปริมาณหมู่อะคริโลไนไตรล์สูง [33]

<High acrylonitrile>				
Grade	Acrylonitrile content (%)	Mooney viscosity $ML_{1+4}$ (100 °C)	Characteristics	Application
JSR N222L	43	45	Good processability, gas impermeability, low mold fouling	Various packings, fuel hoses, freon hoses
JSR N222S H	43	85	Low flow, low mold fouling	
JSR N220S	41	56	Typical high AN NBR	Various packings, gaskets, hoses, PVC blends, adhesives
JSR N220H	41	80	High mooney type N220S	

ตารางที่ 2.2 ยางไนไตรล์เกรดที่มีปริมาณหมู่อะคริโลไนไตรล์ปานกลาง [33]

<Medium acrylonitrile>				
Grade	Acrylonitrile content (%)	Mooney viscosity $ML_{1+4}$ (100 °C)	Characteristics	Application
JSR N241	29	56	Low mold fouling	Oil seal, gasket, diaphragm, hoses
JSR N241H	29	75	High mooney type of N241	

ตารางที่ 2.3 ยางไนไตรล์เกรดที่มีปริมาณหมู่อะคริโลไนไตรล์ต่ำ [33]

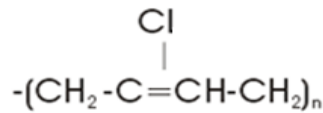
<Low acrylonitrile>				
Grade	Acrylonitrile content (%)	Mooney viscosity $ML_{1+4}$ (100°C)	Characteristics	Application
JSR N250S	20	63	Water resistance, low metal corrosion	Various industrial goods, aircraft parts
JSR N250SL	20	43	Low mooney type N250S	
JSR N260S	15	62	Super cold resistance, water resistance	

นอกจากที่กล่าวมานี้แล้วยังมียางไนไตรล์เกรดพิเศษซึ่งมีปริมาณหมู่อะคริโลไนไตรล์สูงมาก ซึ่งมีราคาสูงมีความทนต่อความร้อนและทนต่อน้ำมัน ได้ดีมาก และยังมียางไนไตรล์ที่อยู่ในรูปของผงและรูปของน้ำยางอีกด้วย

ระบบการวัลคาไนซ์ของยางไนไตรล์นั้น จะมีระบบเหมือนๆ กันกับของยางธรรมชาติโดยสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการคงรูปได้แก่ สารเสริมความแข็งแรง โดยทั่วไปจะใช้ผงเขม่าดำ (Carbon black), สารทำให้ยางคงรูป ใช้สารเดียวกันกับที่ใช้ในการคงรูปยางธรรมชาติคือ กำมะถัน, สารเร่งให้ยางคงรูป สารเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในระบบการคงรูปยางไนไตรล์ได้แก่ TMTD ส่วนระบบการคงรูปของยางธรรมชาติมักจะนิยมใช้สารเร่งปฏิกิริยาเป็น CBS ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาสองชนิดนี้สามารถใช้ร่วมกันได้ สารเสริมตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ใช้ในระบบการคงรูปของยางไนไตรล์หรือยางธรรมชาติจะใช้เหมือนกัน คือ ซิงค์ออกไซด์ และกรดสเตียริก

### 2.6.2 ยางคลอโรพรีน (Chloroprene rubber, CR)

ยางคลอโรพรีนมีชื่อทางการค้าว่า นีโอพรีน เป็นยางที่สังเคราะห์จากมอนอเมอร์ของคลอโรพรีน ภายในโมเลกุลมีอะตอมของคลอรีน ทำให้ยางคลอโรพรีนเป็นยางที่มีขี้ว โดยโครงสร้างของยางคลอโรพรีนเป็นดังในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 โครงสร้างของยางคลอโรพรีน [34]

ยางคลอโรพรีนนับเป็นยางสังเคราะห์ชนิดแรกที่ผลิตขึ้นในเชิงการค้าและยังคงใช้กันจนถึงปัจจุบัน บริษัท DuPont เป็นผู้ผลิตยางคลอโรพรีนรายใหญ่ มาตั้งแต่ปี พ.ศ.2475 จนถึงพ.ศ.2503 ต่อมาจึงได้มีบริษัท Bayer เริ่มผลิตยางคลอโรพรีนที่มีชื่อทางการค้าว่า Baypren ออกมาจำหน่าย และตามมาด้วยผู้ผลิตในประเทศญี่ปุ่น 2-3 บริษัท ได้แก่ บริษัท Denka Kagaku ผลิตยางคลอโรพรีนที่มีชื่อทางการค้าว่า Denka และบริษัท Toya Soda ผลิตยางคลอโรพรีนที่มีชื่อทางการค้าว่า Skyprene เป็นต้น

โดยยางคลอโรพรีนสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มตามชนิดของสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์และในแต่ละกลุ่มยังสามารถแบ่งย่อยออกเป็นเกรดต่างๆ ได้อีก ดังนี้

1. ยางคลอโรพรีนกลุ่มที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ (Sulfur-modified หรือ S-grades)

กลุ่มนี้จะใช้กำมะถันเป็นตัวควบคุมขนาดโมเลกุล โดยกำมะถันที่เติมเข้าไปจะทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันร่วม (Copolymerization) และแทรกอยู่ในสายโซ่พอลิเมอร์ในรูปของ  $S_x$  ( $x = 2-6$ ) จากนั้นจึงเติมสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มไทอูเรมไดซัลไฟด์ไฟต์ลงไป ตัวอย่างยางคลอโรพรีนของบริษัท DuPont ได้แก่ยางชนิด G

2. ยางคลอโรพรีนกลุ่มที่ไม่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ (Non sulfur-modified grades)

ยางคลอโรพรีนกลุ่มนี้มีหลายเกรด เช่น เกรด Mercaptan modified (M-grades) ยางกลุ่มนี้จะมีความหนืดมูนนี้ (ML 1+4 ที่ 100 °C) ประมาณ 30-140 MU และการตกผลึกมีตั้งแต่เล็กน้อยไปจนถึงปานกลางและเกรด Xanthogen-Disulfide (XD-grades) เป็นกลุ่มที่ผลิตด้วยโมดิไฟเออร์ชนิดพิเศษ ยางกลุ่มนี้จะมี ความหยุ่นตัว (Nerve) ต่ำหรือมีการยืดหยุ่นน้อยกว่ายาง CR เกรด M ทำให้สามารถทำการอัดรีด (Calendar) ได้ง่ายกว่า

3. ยางคลอโรพรีนกลุ่ม Precrosslinked Grades

เป็นเกรดที่ประกอบด้วยพอลิคลอโรพรีนที่สามารถละลายได้ และพอลิคลอโรพรีนที่เชื่อมโยงพันธะซึ่งการทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงขึ้นบางส่วนก่อน จะช่วยลดความเป็นยาง หรือความหยุ่นตัวของยางคอมพาวด์ลงทำให้ยางคลอโรพรีนกลุ่มนี้มีการบวมพองต่ำ หลังผ่านการเอกซ์ทรูดผลิตภัณฑ์ที่ได้มีผิวเรียบ สมบัติโดยทั่วไปของยางคลอโรพรีนได้แก่

- สามารถตกผลึกได้เมื่อได้รับแรงดึง ทำให้มีความทนทานต่อแรงดึงและการขัดถูสูง
- ทนต่อสภาพอากาศ และความร้อน ได้ดี ทนการบวมพองในน้ำมันได้ปานกลางถึงดี
- ไม่ทนต่อน้ำมันเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน ฟอสเฟตเอสเทอร์ คีโตน อัลดีไฮด์ และตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอน ที่มีวงแหวนที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ
- การซึมผ่านของก๊าซต่ำกว่ายางธรรมชาติและยาง SBR แต่สูงกว่ายาง NBR และ ยาง IIR อุณหภูมิการใช้งานอยู่ระหว่าง -40 ถึง 140 °C

เนื่องจากสมบัติการทนต่อความร้อน ทนต่อน้ำมัน และสภาพอากาศ ยางชนิดนี้จึงถูกนำมาใช้ในการผลิต ยางซีล ยางพันลูกกลิ้ง สายพานลำเลียงในเหมืองแร่ สายพานรูปตัววี ยางขอบหน้าต่าง ขอบหลังคา และยางปลอกสายเคเบิล เป็นต้น โดยการเลือกใช้ยางคลอโรพรีนเกรดต่างๆ ให้เหมาะสมกับการคอมพาวด์และสมบัติการวัลคาไนซ์ที่ต้องการเป็นสิ่งสำคัญ โดยตารางที่ 2.5 เป็นการเลือกเกรดยางคลอโรพรีนให้ได้สมบัติการวัลคาไนซ์ตามที่ต้องการ

ตารางที่ 2.4 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางคลอโรพรีนเกรดต่างๆ [34]

สมบัติ	เกรด
ความทนต่อแรงดึงและการฉีกขาดได้ดีที่สุด	เกรด M และเกรด XD
การเสียรูปถาวรหลังกดอัดต่ำที่สุด	เกรด M
ความทนต่อความร้อน ได้ดีที่สุด	เกรด M
ความทนต่ออุณหภูมิต่ำได้ดีที่สุด	เกรด M และเกรด XD ที่มีการตกผลึกช้า
ความยืดหยุ่นสูงสุด	เกรด S
สมบัติเชิงพลวัตดีที่สุด	เกรด S และเกรด XD
การยึดติดกับเส้นใยและโลหะได้ดีที่สุด	เกรด S

ระบบการวัลคาไนซ์ของยางคลอโรพรีนจะแตกต่างจากยางธรรมชาติและยางไนไตรล์ เนื่องจากหมู่คลอรีนในสายโซ่โมเลกุลของยางคลอโรพรีน ทำให้พันธะคู่ของยางคลอโรพรีนไม่สามารถเกิดพันธะเชื่อมโยงด้วยกำมะถันได้ ดังนั้นยางคลอโรพรีนจึงต้องทำการวัลคาไนซ์ด้วยสารเคมีอื่นที่ไม่ใช่กำมะถันคือการใช้สารประกอบจำพวก “Metallic Oxides” เป็นสารที่ทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยง ร่วมกับการใช้สารเร่งปฏิกิริยาสารอินทรีย์คือ ETU

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นิลบล [23] ได้ศึกษาสมบัติความทนน้ำมันของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางไนไตรล์เทียบกับยางผสมระหว่างยาง ENR กับยางไนไตรล์ ผลที่ได้พบว่ายางผสมระหว่างยาง ENR กับยางไนไตรล์สามารถทนต่อน้ำมันได้ดีกว่ายางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางไนไตรล์และการผสมยาง ENR ลงไปผสมกับยางธรรมชาติและยางไนไตรล์ ทำให้สมบัติความทนต่อน้ำมันของยางผสมเพิ่มมากขึ้นและถือเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ยางไนไตรล์เพื่อนำมาผสมกับยางธรรมชาติทำให้ยางธรรมชาติมีความทนต่อน้ำมันมากขึ้นและช่วยลดต้นทุนการผลิตลงได้

Gan และ Hamid [35] ได้ศึกษาวิธีการเปิดวงอ็อกไซค์ของน้ำยางธรรมชาติอ็อกซิไดซ์หรือยาง ENR ภายใต้สภาวะกรดและความร้อนสูง ผลที่ได้จากการทดลองพบว่าวงอ็อกไซค์ของยาง ENR ถูกเปิดวงออกกลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิลหรือไดออล โดยสามารถตรวจวัดได้จากเทคนิค NMR และเทคนิค FTIR โดยพบว่า%การแตกวงอ็อกไซค์ไปเป็นไดออลสูงสุดเมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานาน 24 ชั่วโมง

Johnson และ Thomas [10] ได้ศึกษาวิธีการปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติ (natural rubber, NR) โดยใช้ปฏิกิริยาอ็อกซิเดชัน ซึ่งจะส่งผลให้ยางธรรมชาติที่ได้กลายเป็นยางธรรมชาติอ็อกซิไดซ์ (ENR) ซึ่งทำให้ยางที่ได้มีสมบัติที่ดีขึ้นเช่น ทนต่อน้ำมัน, ป้องกันการซึมผ่านของอากาศ โดยตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือยาง ENR-25 and ENR-50 จากการทดลองพบว่าเมื่อร้อยละของปฏิกิริยาอ็อกซิเดชันเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ยางธรรมชาติที่ได้มีค่าความคงทนต่อสารเคมีมากขึ้น และมีค่าความสามารถในการเคลื่อนไหวของสายโซ่ลดลงตามปริมาณของหมู่อ็อกไซค์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วมีค่าเพิ่มขึ้นจาก  $-72$  เป็น  $-47$  และ  $-27$  °C

Park และคณะ [17] ได้ศึกษาถึงสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยางอะคริลิกและยางธรรมชาติอ็อกไซค์ โดยใช้เครื่องผสมยางแบบปิดและแบบสองลูกกลิ้ง แล้วนำยางผสมที่ได้ไปทำการวัลคาไนซ์ แล้วหาค่าเวลาในการเกิดพันธะเชื่อมโยงที่เหมาะสม จากนั้นจึงหาค่าแรงบิดสูงสุด รวมไปถึงสมบัติเชิงกลอื่นๆ จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนของยางผสมระหว่างยางอะคริลิกต่อยางธรรมชาติอ็อกไซค์เท่ากับ 25/75 ทำให้ได้ยางผสมที่มีค่าแรงบิดสูงสุด และพบว่าค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วค่าเดียว แสดงถึงการเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวระหว่างยางทั้งสองชนิด

Ismail และ Leong [2] ได้ศึกษาพฤติกรรมในการเกิดพันธะเชื่อมโยง และสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน เปรียบเทียบกับของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติอ็อกซิไดซ์ที่มี % mol ของหมู่อ็อกซิไดซ์เท่ากับร้อยละ 50 โดยโมล (ENR-50) กับยางคลอโรพรีน โดย

พบว่ายางผสมระหว่างยาง ENR-50 กับยางคลอโรพรีน มีปริมาณของพันธะเชื่อมโยง และมีความเข้ากันได้ดีกว่ายางผสมระหว่างยางธรรมชาติ NR กับยางคลอโรพรีน

สรารุณี [4] ได้ศึกษาอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติมในคอมพอลิเมอร์และวัลคาไนเซชันของยางผสม โดยนำเขม่าดำมาเพิ่มหมู่ฟังก์ชันแล้วใช้เป็นสารเสริมแรงในยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางไนไตรล์และยางธรรมชาติกับยางอะคริลิกผลที่ได้พบว่า ยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางไนไตรล์และยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางอะคริลิกผสมเข้ากันได้ไม่ดึ้นัก โดยสังเกตได้จากค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ที่แยกออกเป็นสองค่าและยังพบว่าการที่ยางทั้งสองชนิดนี้ไม่สามารถผสมเข้ากันได้ดียังส่งผลทำให้อันตรกิริยาระหว่างยางผสมกับอนุภาคของเขม่าดำมีค่าลดลง โดยพิจารณาจากค่าบาวด์รับเบอร์ของยางผสมที่ลดลงจากค่าบาวด์รับเบอร์ของยางธรรมชาติและยางไนไตรล์หรือยางอะคริลิก

Wootthikanokkhan และ Tunjongnawin [1] ได้ศึกษาผลกระทบของวิธีการผสมส่วนผสมของยางต่อการกระจายตัวของพันธะเชื่อมโยง และสมบัติของการทนต่อแรงดึงของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางอะคริลิก โดยใช้ กำมะถัน, MBT, ZnO, และ กรดสเตียริก เป็นส่วนผสมของยางธรรมชาติและใช้สเตียเรท เป็นส่วนผสมของยางอะคริลิก โดยปริมาณทั้งหมดของ sulfur ในยางผสมเท่ากับ 2.5 phr. วิธีการผสมส่วนผสมของยางมีอยู่ด้วยกันทั้งหมด 3 แบบ โดยแบบที่ 1 จะทำการผสมส่วนผสมทั้งหมดลงไปเป็นยางพร้อมๆ กัน ส่วนวิธีการผสมแบบที่ 2 จะทำการผสมสารโดยแยกกันระหว่างยางแต่ละชนิด แล้วผสมกำมะถันลงไปเป็นตัวสุดท้าย และวิธีการผสมแบบที่ 3 จะทำการผสมกำมะถันกับยางอะคริลิกก่อน และจึงนำไปผสมกับยางธรรมชาติ โดยจากการทดลองพบว่าวิธีการผสมแบบที่ 2 และ 3 ทำให้ยางมีค่าความทนต่อแรงดึงสูงกว่าวิธีการผสมแบบที่ 1 และยังทำให้ค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาความแตกต่างของการบวมตัวของยางทั้งสองชนิด พบว่าค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของเฟสยางอะคริลิกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปลี่ยนวิธีการผสมจากวิธีที่ 1 เป็น 2 และ 3

รัชพานี [16] ได้ศึกษาแนวทางการประยุกต์ใช้ยางธรรมชาติที่มีหมู่ฟังก์ชันในยางผสมและยางวัลคาไนเซชัน โดยการนำน้ำยางธรรมชาติมาทำปฏิกิริยาไอโซโนไลซิสทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติแตกออกที่ตำแหน่งพันธะคู่โดยผลจากเทคนิค FTIR พบว่ายางธรรมชาติที่ผ่านการทำปฏิกิริยาไอโซโนไลซิสจะปรากฏหมู่คาร์บอนิลขึ้นที่ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ  $1700\text{ cm}^{-1}$  และพบว่าเมื่อนำยางนี้ไปผสมกับยางอะคริลิก ยางผสมที่ได้มีแนวโน้มที่จะผสมเข้ากันได้ดีกว่ายางธรรมชาติ เมื่อพิจารณาจากค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและเมื่อนำยางผสมวัลคาไนเซชันไปทดสอบสมบัติความทนต่อการเสื่อมสภาพด้วยความร้อนและน้ำมันพบว่ายางผสมระหว่างยางธรรมชาติที่มีหมู่

ฟังก์ชันกับยางอะคริลิกจะมีความทนต่อการเสื่อมสภาพได้ดีกว่ายางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางอะคริลิก

Khansawai และคณะ [8] ได้ศึกษาการตัดแปรรวมของน้ำยางธรรมชาติด้วยกระบวนการอ็อกซิเดชันสามารถทำได้ภายใต้ระบบของกรดฟอร์มิคและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยทำให้น้ำยางมีเสถียรภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีขั้วอัตราส่วนโมลของกรดฟอร์มิคและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อหน่วยไอโซพรีนของน้ำยางสดเท่ากับ 0.50 และ 0.75 ตามลำดับพบว่าปริมาณอ็อกซิเดชันที่ได้สูงขึ้นเมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และได้ปริมาณอ็อกซิเดชันสูงสุดที่เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 6 ชั่วโมง เท่ากับ 30 % mol และจากการศึกษาการสลายตัวเนื่องจากความร้อนพบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการสลายตัวและอุณหภูมิที่เกิดอัตราการสลายตัวสูงสุดของยาง ENR มีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติ

Kittipoom และคณะ [9] ได้ทำการศึกษา การตัดแปรรูปยางธรรมชาติ (NR) มีขั้วมากขึ้นโดยเติมหมู่อ็อกซิเดชันบนโมเลกุลของยางแล้วนำไปใช้ในถุงมือยางธรรมชาติที่มีข้อด้อยในเรื่องความทนน้ำมันเนื่องจากความไม่มีขั้วในโมเลกุล โดย ได้เตรียมยางธรรมชาติอ็อกซิไดซ์ ในรูปน้ำยางให้มี % อ็อกซิเดชันเป็น 20, 40 และ 50 จากนั้นนำน้ำยาง ENR ไปผสมสูตรเช่นเดียวกับน้ำยางธรรมชาติเพื่อเตรียมฟิล์มบางแบบจุ่ม เพื่อการใช้งานในรูปถุงมือยาง พบว่าเมื่อใช้ ENR ที่มีหมู่อ็อกซิเดชันเพิ่มขึ้น ฟิล์ม NR ที่เคลือบด้วย ENR จะมีความทนน้ำมันดีขึ้น ค่า % การบวมตัวในน้ำมันน้อยกว่าฟิล์มจาก NR อย่างเดียวประมาณ 50% ทั้งนี้จะมาจากความมีขั้วของ ENR ที่ขัดขวางการซึมผ่านของน้ำมัน

Sae-oui และคณะ [20] ได้ศึกษาผลของสัดส่วนของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีนที่มีต่อการเสื่อมสภาพด้วยน้ำมัน, โอโซนและความร้อน โดยใช้ซิลิกาเป็นสารเสริมแรง โดยผลที่ได้พบว่าอนุภาคซิลิกาสามารถกระจายตัวในเนื้อยางคลอโรพรีนได้ดีกว่ายางธรรมชาติ ผลิตภัณฑ์ยางคลอโรพรีนมีปริมาณของพันธะเชื่อมโยงมากกว่ายางธรรมชาติ และยังมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่ายางธรรมชาติและพบว่าการผสมยางคลอโรพรีนลงไปยางธรรมชาติช่วยทำให้น้ำยางมีความทนต่อความร้อน, น้ำมันและโอโซนได้ดีขึ้น

ชัชวาลย์ และคณะ [21] ได้ศึกษาอิทธิพลของสารช่วยประสานต่อ สมบัติการไหล ความหนาแน่นของพันธะข้าม และสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ กับยางไนไตรล์โดยใช้สารช่วยประสาน คือยางคลอโรพรีนและยาง ENR ผลการทดลองพบว่า การเติมสารช่วยประสานทำให้ค่าความหนืดของยางผสมเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในกรณีของสารช่วยประสานยาง ENR อย่างไรก็ตามพบว่า การเติมสารช่วยประสานไม่ส่งผลต่อเวลาในการไหล เวลาในการคงรูป แต่ส่งผลให้ความ

หนาแน่นของพันธะข้ามและสมบัติเชิงกลโดยรวมเพิ่มขึ้น โดยการเติมสารช่วยประสาน 5 phr เป็นปริมาณที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้

Yoksan [13] ได้นำน้ำยางธรรมชาติมาทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน แล้วนำไปทำการตรวจวัดด้วยเทคนิค FTIR ผลที่ได้พบว่ายางธรรมชาติที่ผ่านการทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันจะปรากฏสัญญาณที่ตำแหน่งประมาณ  $870\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นสัญญาณของหมู่เอพอกไซด์และยังปรากฏสัญญาณที่ประมาณ  $1100\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นสัญญาณของ C-O-C ของ Cyclic ethers และพบว่าสัญญาณที่ตำแหน่งประมาณ  $835\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นของพันธะคู่ในยางธรรมชาติจะมีความเข้มลดลง แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งพันธะคู่ของยางธรรมชาติ

Klinklai และ Kunyawut [14] ได้ศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติ/PLA/ENR โดยปรับเปลี่ยนปริมาณของหมู่เอพอกซิ โดยการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของกรดฟอร์มิกต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แล้วใช้เทคนิค DSC ในการหาปริมาณหมู่เอพอกซิผลการทดลองพบว่าค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของยาง ENR มีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณของหมู่เอพอกซิที่เพิ่มขึ้น

Onyeagoro [22] ได้ศึกษาผลของปริมาณซิงค์ออกไซด์และปริมาณสัดส่วนของยางธรรมชาติกับยางไนไตรล์และยาง ENR โดยผลที่ได้พบว่ายางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางไนไตรล์ที่ไม่ได้ทำการผสมยาง ENR ลงไปมีค่าความทนต่อแรงดึงและค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ต่ำที่สุดแสดงว่ายางธรรมชาติกับยางไนไตรล์ผสมเข้ากันได้ไม่ดี และพบว่าเมื่อผสมยาง ENR ลงไปจะช่วยทำให้สมบัติเชิงกลของยางผสมมีค่าเพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นถึงความเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติกับยางไนไตรล์ที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อผสมยาง ENR ลงไป และพบว่าสมบัติเชิงกลของยางผสมมีค่าสูงที่สุดเมื่อใช้ปริมาณของยางธรรมชาติต่อยางไนไตรล์ต่อยาง ENR เท่ากับ 100:70:30