

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาหาสูตรที่เหมาะสม ความเข้ากันได้ที่ดีของยางทั้งสองชนิดนี้ และศึกษาปัจจัยต่างๆของสารตัวเติมที่มีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกลของยางผสม

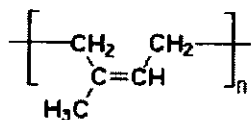
### 1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ยางธรรมชาติเป็นยางที่เหมาะสมในการผลิตวัตถุสำเร็จรูปทั่ว ๆ ไป ที่ไม่ต้องการคุณสมบัติพิเศษ เช่น คุณสมบัติพิเศษในการทนต่อน้ำมัน หรือทนต่อความร้อนที่อุณหภูมิสูง ๆ และการบดผสมสารเคมีกับยางธรรมชาติมีขีดจำกัดไม่สามารถทำให้ยางเพิ่มความต้านทานต่ออุณหภูมิสูงเช่นที่ 150°C เป็นระยะนานๆ แต่ยางธรรมชาติมีคุณสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่ายางชนิดอื่น นอกจากนี้ราคายางธรรมชาติยังถูกกว่ายางชนิดอื่น คุณสมบัติทั่ว ๆ ไปของยางธรรมชาติมีดังนี้

1. ความเค้นและความเครียด ณ จุดขาด สูงมาก
2. ความสามารถในการกระดอนดี
3. ค่า Compression set ปานกลาง
4. ความต้านทานต่อการซึมผ่านของก๊าซไม่ดี
5. ความต้านทานต่อการสึกหรอดีมาก
6. ความต้านทานต่อแรงฉีกขาดดีมาก
7. ความต้านทานต่อการเกิดรอยแตกดี
8. ความต้านทานต่อการปมเร่ง แสงแดด และโอโซนไม่ดี

ยางธรรมชาติเป็นยางที่มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี และราคาถูก จึงมีการนำยางธรรมชาติไปใช้ในงานยางรถยนต์ ทั้งในส่วนดอกยาง และแก้มยาง และชิ้นส่วนยานยนต์ เช่น ยางลูกหมาก ยางกันกระแทก เป็นต้น ซึ่งนับว่าเป็นตลาดหลักของการใช้งานของยางธรรมชาติ แต่อย่างไรก็ตามในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยียานยนต์ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น ทำให้มีความต้องการยางที่ทนความร้อนและสภาพอากาศได้สูงขึ้น เป็นเหตุให้ชิ้นส่วนงานที่เป็นยางธรรมชาติไม่ทนต่อสภาวะที่รุนแรงขึ้นนี้ จึงจำเป็นต้องนำยางสังเคราะห์ต่าง ๆ ที่มีสมบัติเด่นด้านการทนความร้อนและมีสมบัติที่ดีมาผสมกับยางธรรมชาติ เพื่อให้ได้ยางที่มีสมบัติที่ดีที่มาจากทั้งยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์

ยางธรรมชาติมีสูตรโครงสร้างทางเคมีคือ cis-1, 4-polyisoprene ดังนี้

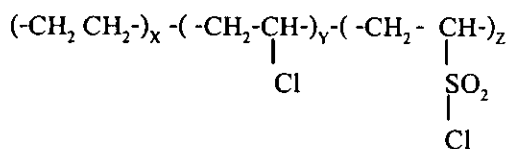


ยางธรรมชาติเป็นสารประกอบไอโซพรีน มีน้ำหนักโมเลกุล ( $M_n$ ) สูงเฉลี่ยประมาณ สองแสนถึงห้าแสน โดยที่  $n$  มีค่าตั้งแต่ 5,000 จนถึงประมาณ 15,000 มีความถ่วงจำเพาะ 0.934 ที่ 20°C และจะมีค่ามากขึ้นเมื่อยางถูกยืดหรือเย็นตัวลง มีดรรชนีหักเหของแสงเท่ากับ 1.5215 -1.5238 ที่ 20°C

โครงสร้างหลักที่มีผลกระทบต่อสมบัติของยาง คือ

1. ประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนล้วน ทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติไม่ทนน้ำมันปิโตรเลียมหรือน้ำมันพืช แต่จะเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี
2. พันธะคู่ที่วงวนในปฏิกิริยาทำให้สามารถวัลคาไนซ์ได้ด้วยกำมะถัน และทำให้ยางทำปฏิกิริยาได้ง่ายด้วยออกซิเจนและโอโซนซึ่งเป็นสาเหตุของการเสื่อมของยาง ทำให้การออกสูตรยางธรรมชาติจำเป็นต้องมีสารกันเสื่อม (antioxidant) และสารต้านโอโซน (antiozonant)
3. สายโซ่ที่เคลื่อนไหวหักงอไปมาได้ง่ายทำให้ยางธรรมชาติคงสภาพยืดหยุ่นได้ดี อาจจะสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิที่ต่ำมาก ยางธรรมชาติมีค่า Tg เท่ากับ  $-72^{\circ}\text{C}$  ซึ่งต่ำกว่ายางสังเคราะห์อื่น ๆ ยกเว้นเฉพาะยางบิวทาไดอินและยางซิลิโคนเท่านั้น
4. ความสม่ำเสมอในโครงสร้างโมเลกุล ทำให้ยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้เมื่อยืด ทำให้มีความต้านทานแรงดึงสูงมากและทำให้มีค่า green strength สูง และ tack ดี
5. น้ำหนักโมเลกุลสูงทำให้ยางมีความหนืดสูงเกินไปที่จะนำไปแปรรูปโดยตรง จึงต้องนำยางไปบดเพื่อให้ได้โมเลกุลเล็กลงก่อนนำไปใช้งาน

คลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีน (chlorosulfonated polyethylene, CSM) เป็นพอลิเอทิลีนที่ใส่คลอรีนและซัลเฟอร์ไดออกไซด์เข้าไปในโมเลกุล หรืออาจจะเรียกว่า เป็นยางคลอรีนเนตเตตพอลิเอทิลีนที่ใส่  $-\text{SO}_2\text{Cl}$  เข้าในโมเลกุล เป็นพวกอสัณฐาน (amorphous) เป็นยางที่วัลคาไนซ์ชันได้ มีชื่อการค้าว่า ไฮพาลอน (Hypalon) เตรียมโดยใช้พอลิเอทิลีนใส่สารละลายคาร์บอนเตตระคลอไรด์ ( $\text{CCl}_4$ ) ที่  $60^{\circ}\text{C}$  แล้วผ่านก๊าซคลอรีนลงไปจะได้คลอโรเอทิลีน การใส่คลอรีนเข้าไปในพอลิเอทิลีนทำให้สมบัติจุดเดือดลดลง ถ้าคลอรีนเกินกว่า 20 % พอลิเอทิลีนจะไม่เกิดผลึกและมีสมบัติเป็นยาง (rubbery) แล้วเติมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ลงไป โครงสร้างทางเคมีเป็นดังนี้



ค่า x,y,z จำนวนจากจำนวนคลอรีนและซัลเฟอร์ น้ำหนักโมเลกุลมีความสัมพันธ์กับความหนืด (intrinsic viscosity) ยางนี้เป็นยางไม่มีพันธะคู่ จึงทนต่อความร้อน โอโซนและสภาพดินฟ้าอากาศ คลอรีนทำให้ยางที่วัลคาไนซ์แล้วทนน้ำมันและสารเคมี CSMเป็นโมเลกุลมีขั้ว(polar) จึงเป็นฉนวนได้ปานกลาง การติดไฟเมื่อเอาไฟออกแล้วจะดับเองได้เนื่องจากคลอรีน

แม้ว่ายางธรรมชาติจะมีข้อดีในหลายๆด้าน แต่ยางธรรมชาติก็ยังมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งานบางประเภท เช่น ในงานที่ต้องสัมผัสกับแสงแดด และความร้อนสูง หรือในงานที่ต้องสัมผัสกับน้ำมัน เนื่องจากยางธรรมชาติมีข้อด้อย คือ จะเสื่อมสภาพได้เร็วกว่าโอโซน แสงแดด ความร้อนสูง และจะไม่ทนต่อสารละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น น้ำมัน ก๊าซโซลีน เป็นต้น ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงข้อด้อยของยางธรรมชาติ โดยนำยางธรรมชาติไปผสมกับยางสังเคราะห์ เพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของยางธรรมชาติให้ดีขึ้น สามารถนำไปใช้งานได้กว้างขึ้น ซึ่งมีนักวิจัยหลายๆท่านได้ทำการศึกษาในเรื่องนี้ เช่น

Zanzig และคณะ (1993) ศึกษาผลของ 1,4-polyisoprene-1,4-polybutadiene (IBR) ที่ใช้เป็นตัวช่วยเพิ่มความเข้ากันได้และสมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิบิวทาไดอิน (cis-1,4-polybutadiene : BR) โดยใช้เครื่อง DSC และเครื่อง TEM ในการตรวจสอบระดับความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด ยางผสมจะวัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์

และมีการเติมเขม่าดำลงในยางผสมด้วย แต่ปริมาณ IBR ที่เติมลงไป จะเติมได้ในปริมาณที่จำกัด และพบว่า ความเข้ากันได้ และสมบัติของยางผสมจะดีขึ้น เมื่อเติม IBR ในปริมาณน้อยๆ และยังช่วยให้การยึดเกาะของเขม่าดำในยางคอมพาสต์ดีขึ้น ด้วย

Asaletha และคณะ (1995) พบว่า ยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีน (Polystyrene : PS) ผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ยาก แต่สามารถเพิ่มความเข้ากันได้ให้ดีขึ้น โดยการเติม NR-g-PS ซึ่งผลของน้ำหนักโมเลกุลของไฮโมพอลิเมอร์ น้ำหนักโมเลกุลของโคพอลิเมอร์ ความเข้มข้นของโคพอลิเมอร์ สภาวะการแปรรูปและวิธีการเติม จะมีผลต่อลักษณะมอร์โฟโลยีของเฟสกระจาย ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ การเติมสารช่วยความเข้ากันได้ (compatibilizers) ลงไปในปริมาณน้อยๆ จะช่วยลดขนาดของเฟสกระจายให้เล็กลง ผลที่ได้จากการทดลองนี้จะนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎีของ Noolandi และ Hong การเติม NR-g-PS ลงไป ทำให้สมบัติเชิงกลของยางผสมดีขึ้น และสมบัติเชิงกลจะสัมพันธ์กับลักษณะมอร์โฟโลยีของระบบอีกด้วย ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจถึงลักษณะที่เป็นอยู่ของ NR-g-PS ระหว่างเฟสทั้งสอง

Ismail และคณะ (2000) ได้ทำการศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางผสม 2 ชนิด คือ ยางผสมระหว่างยาง ENR 25 กับยางธรรมชาติ (SMR L) และยางผสมระหว่างยาง ENR 50 กับยางธรรมชาติ (SMR L) ด้วยเครื่อง MDR โดยในยางผสมจะแปรปริมาณยาง ENR ตั้งแต่ 0 – 100% และทำการทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดทั้งก่อนและหลังอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยเตรียมชิ้นตัวอย่างแบบรูปจันทร์เสี้ยว และดึงชิ้นตัวอย่างด้วยความเร็ว 50 cm/min พบว่า เมื่อ ENR เพิ่มขึ้น เวลาสคอซและเวลาวัลคาไนซ์จะสั้นลง แต่ค่าทอร์คสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการที่พันธะคู่ถูกกระตุ้นด้วยหมู่ไอโซพรีนในยาง ENR และยังทำให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงมากขึ้นเช่นกัน โดยยาง ENR 50 จะค่าที่มากกว่ายาง ENR 25 เพราะมีหมู่ไอโซพรีนมากกว่า กล่าวคือ ยางผสมระหว่างยาง ENR 25 กับยางธรรมชาติมีเวลาสคอซและเวลาวัลคาไนซ์นานกว่ายางผสมระหว่างยาง ENR 50 กับยางธรรมชาติ และจากค่าทอร์คกับค่า loss tangent ที่ได้ ทำให้ทราบว่า ยางผสมจะมีสมบัติการกระดอนตัวดี เมื่อมีปริมาณยาง ENR น้อยกว่า 25% หรือมากกว่า 50% ส่วนค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดจะเพิ่มขึ้น เมื่อยาง ENR เพิ่มขึ้นถึง 50% เนื่องจากมีการกระจายพลังงานมากขึ้นตามปริมาณยาง ENR ซึ่งสังเกตได้จากค่า loss tangent ที่เพิ่มขึ้น แต่ความต้านทานต่อการฉีกขาดหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนมีค่าลดลง เพราะยาง ENR มีสมบัติหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนไม่ดี และยางผสมระหว่างยาง ENR 25 กับยางธรรมชาติ มีการเปลี่ยนแปลงหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนน้อยกว่ายางผสมระหว่างยาง ENR 50 กับยางธรรมชาติ เพราะยาง ENR 25 มีความต้านทานต่อการบ่มเร่งด้วยความร้อนดีกว่ายาง ENR 50

Zaharescu และคณะ (2000) ได้ศึกษาสมบัติทางความร้อนของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ (NR) กับยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนมอนอเมอร์ (Ethylene Propylene diene Monomer : EPDM) ด้วยเครื่อง DSC ใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 335 – 435 K แล้วคำนวณหาค่าความจุความร้อนจำเพาะตามวิธี O'Neill's method ซึ่งจะใช้อะลูมิเนียมเป็นสารมาตรฐาน พบว่า ความเสถียรทางความร้อนจะลดลง ถ้ามียางธรรมชาติอยู่ เพราะในยางธรรมชาติมีปริมาณของพันธะคู่อยู่มาก และในการจะดูผลของยางธรรมชาติต่อพฤติกรรมทางความร้อนของยางผสม สามารถทำได้ก็คือ วัดการดึงออกซิเจน ผลจากการทดลองนี้พบว่า สูตรของยางผสมที่ใช้จะมีผลต่อค่าความจุความร้อนจำเพาะและความเสถียรทางความร้อน และจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC และการวัดการดึงออกซิเจน จะทำให้ได้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับผลของอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลต่อพฤติกรรมทางเทอร์โมไดนามิกส์ (thermodynamic) ของยางผสม

Boochathum และคณะ (2001) ศึกษาลักษณะความเป็นผลึกของยางธรรมชาติ (cis-1,4-polyisopren) trans-1,4-polyisopren (TPI) และยางผสมของยางทั้งสองชนิด พบว่า การเชื่อมโยงด้วยซัลเฟอร์ในยางธรรมชาติ จะไปยับยั้งการเกิดผลึก (cold crystallization) แต่การดึงยึดจะทำให้เกิดความเป็นผลึกขึ้น ส่วนในยาง TPI ทั้งพันธะซัลเฟอร์และพันธะระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอน จะทำให้ความเป็นผลึกลดลง แต่การดึงยึดก็จะทำให้เกิดความเป็นผลึกเช่นกัน ดังนั้นการทนต่อแรงดึง

ของยางทั้งสองชนิดจึงขึ้นอยู่กับความเป็นผลึก กล่าวคือ ถ้ามีความเป็นผลึกสูง ก็จะทำให้การทนต่อแรงดึงสูง ในยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง TPI สมบัติด้านการทนต่อแรงดึงและมอดุลัสจะด้อยลง เนื่องจากสารช่วยในการวัลคาไนซ์มีไม่พอสำหรับยางทั้งสองชนิด

Isamail และคณะ (2001) ได้กล่าวถึงลักษณะการวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ (NR) กับยางคลอโรพรีน (Chloroprene : CR) และยางผสมระหว่างยาง ENR กับยาง CR โดยจะแปรค่าปริมาณของยาง NR และยาง ENR ตั้งแต่ 0 – 100% แล้วนำไปวิเคราะห์หาค่าต่างๆ จะได้ว่า ค่า Mooney scorch time,  $t_6$ , cure index และ  $\Delta E$  จะมีค่าต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้ (ซึ่งจะมีค่าอยู่ระหว่างค่านี้ของยางที่เป็นองค์ประกอบ) เพราะโมเลกุลของยาง ENR และยาง NR ทำให้อัตราการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น ส่วนค่ามอดุลัสแบบดึง (tensile modulus) ความแข็ง (hardness) และการทนต่อแรงดึง (tensile strength) จะมีค่าสูง โดยที่ค่ามอดุลัสแบบดึงและความแข็ง จะมีค่าสูงสุดที่อัตราส่วน 25/75 (ของยางผสม ENR/CR และ NR/CR) ในขณะที่ค่าความทนแรงดึงจะมีค่าสูงสุดที่อัตราส่วน 75/25 (ของยางผสม ENR/CR และ NR/CR) และพบว่า ที่อัตราส่วนเดียวกัน ยางผสม ENR/CR มีสมบัติดีกว่ายางผสม NR/CR

El-Sabbagh (2003) ได้ทำการศึกษาความเข้ากันได้ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ (NR) กับยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนมอนอเมอร์ (Ethylene Propylene Diene rubber : EPDM) โดยในการผสมยางจะใช้การฉายรังสีพลังงานสูง (รังสีแกมมา) เพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงขึ้นระหว่างโมเลกุลของยาง และทำการผสมโดยใช้สารพวก EPDM - g - MAH เป็นตัวช่วยให้ยางเข้ากันได้ (compatibilizer) หรือใช้ยางชนิดอื่นเป็นตัวช่วยให้เข้ากันได้ เช่น ยางบิวทีไดอีน (BR) ยางคลอริเนเตด และยาง CSM เป็นต้น ซึ่งในการศึกษาความเข้ากันได้ของยางผสมระหว่าง NR/EPDM จะใช้เครื่อง DSC, เครื่อง SEM และวัดความหนืดของยางผสม จากผลการวิเคราะห์พบว่า การเพิ่ม compatibilizer เพียงเล็กน้อย จะทำให้ยางเข้ากันได้มากขึ้นและสมบัติของยางผสมจะดีขึ้น

Kumnuantip และคณะ (2003) ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกลเชิงพลวัต (dynamic mechanical properties) ของยางธรรมชาติ 2 ชนิด คือ ยาง STRVS 60 กับยาง STR20CV ที่มีการเติมยางรีเคลมในปริมาณต่างๆ ลงไป โดยทำการศึกษาค่า loss tangent และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน พบว่า เมื่อปริมาณยางรีเคลมเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่า loss tangent ที่ตำแหน่งสูงสุด เลื่อนตำแหน่งไปด้านที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น และความกว้างของพีค loss tangent ที่ตำแหน่งสูงสุด จะมีค่าลดลง ซึ่งเนื่องมาจากเข้ามาค่าที่มีในยางรีเคลม และถ้าในยางรีเคลมมียาง SBR เล็กน้อย จะทำให้พีค loss tangent ที่ตำแหน่งสูงสุด มีความกว้างเพิ่มขึ้น และการที่ปริมาณยางรีเคลมเพิ่มขึ้นนี้ เป็นผลให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชันเพิ่มขึ้น และความหนาแน่นของการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากผลของเข้ามาค่าในยางรีเคลม และอัตราการบวมตัวของยางวัลคาไนซ์จะถึงจุดอิ่มตัวเร็วขึ้น เมื่อปริมาณยางรีเคลมเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากความหนาแน่นของการเชื่อมโยงและอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์กับตัวทำละลายที่เพิ่มขึ้น

Sirisinha และคณะ (2004) ศึกษาผลของ EPDM-g-MA (ใช้เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้) และสารแอนตี้ออกซิแดนท์ประเภทฟีนอลิก (phenolic) ต่อความต้านทานต่อน้ำมันและความต้านทานต่อการบวมเร่งด้วยความร้อนของยางผสมระหว่างยางคลอริเนเตดพอลิเอทิลีน (CPE) กับยางธรรมชาติ ที่อัตราส่วน 50/50 ซึ่งพบว่า EPDM-g-MA จะทำให้ขนาดเฟสของยางผสมมีขนาดเล็กลง เพราะ EPDM-g-MA จะช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ของยางผสมให้ดีขึ้น โดยสามารถใช้ได้สูงถึง 1.0 phr แต่ถ้าปริมาณมากกว่านี้ ขนาดของเฟสก็จะเริ่มใหญ่ขึ้น ส่วนการเติมสารแอนตี้ออกซิแดนท์ประเภทฟีนอลิก ทำให้ขนาดของเฟสลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากสารแอนตี้ออกซิแดนท์จะไปทำให้เฟสของยางธรรมชาติเสถียรต่อความร้อนได้ดีขึ้น ทำให้การรวมกันของเฟสยางธรรมชาติลดลง สำหรับความต้านทานต่อน้ำมันและความต้านทานการบวมเร่งด้วยความร้อน จะสัมพันธ์กับการทนต่อแรงดึงของยางผสมระหว่างยางคลอริเนเตดพอลิเอทิลีนกับยางธรรมชาติ ที่อัตราส่วน 50/50

ซึ่งจะขึ้นอยู่กับขนาดของเฟสยางธรรมชาติที่กระจายอยู่ในยาง CPE โดยที่ถ้าเฟสยางธรรมชาติมีขนาดเล็กกว่า ก็จะมี ความต้านทานต่อน้ำมันและความต้านทานการป่นร่งด้วยความร้อนสูงกว่า

Phewthogin และคณะ (2005) ได้ศึกษาสมบัติด้านการไหล (Rheological) ของยางผสมระหว่างยางคลอรีเนตเตดพอลิเอทธิลีน (Chlorinated polyethylene : CPE) กับยางธรรมชาติ ซึ่งทำการวัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์ และศึกษาสมบัติดังกล่าวด้วยเครื่อง Capillary rheometer และเครื่อง ODR พบว่า พฤติกรรมวิสโคเอลาสติก (viscoelastic) ของยาง CPE และยางผสมที่มีส่วนของยาง CPE มากกว่า จะแสดงพฤติกรรมแบบของไหลหนืด (viscous response) ซึ่งเป็นสมบัติที่ขึ้นอยู่กับเวลา แต่ในยางธรรมชาติและยางผสมที่มียางธรรมชาติมากกว่า พฤติกรรมวิสโคเอลาสติกจะขึ้นอยู่กับเวลา ไนซ์ที่เกิดขึ้นในส่วนของเฟสยางธรรมชาติ และการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติด้วยซัลเฟอร์ จะทำให้สมบัติที่ขึ้นอยู่กับเวลา เปลี่ยนไปเป็นสมบัติที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา และจากการทดลองพบว่า Santogard – PVI จะช่วยเพิ่มเวลาสคอชของยางพรีวัลคาไนซ์ให้นานขึ้น ซึ่งสามารถใช้ PVI ได้ถึง 1.0 phr ส่วนผลจากเครื่อง ODR พบว่า กราฟของยางผสมทุกอัตราส่วน มีช่วงวิสโคเอลาสติกที่กว้าง โดยก่อนที่จะเกิดการวัลคาไนซ์ของเฟสยางธรรมชาติ ยางผสมจะมีพฤติกรรมแบบของไหลหนืด กล่าวคือ ความถี่ที่ใช้ในการทดสอบจะมีผลต่อค่ามอดุลัสสะสมของยางผสม แต่เมื่อเกิดการวัลคาไนซ์แล้ว ค่ามอดุลัสสะสมจะไม่ขึ้นอยู่กับเวลาที่ทดสอบ ในขณะที่ยางผสมที่มียาง CPE มากกว่า ค่ามอดุลัสสะสมจะขึ้นอยู่กับเวลา สรุปคือ สมบัติวิสโคเอลาสติกของยางผสมจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของยางธรรมชาติในยางผสม สำหรับผลที่ได้จากเครื่อง Capillary rheometer นั้น ทำให้ทราบว่า เมื่ออัตราส่วนของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ทำให้ความหนืดแบบเนียนของยางผสมลดลง เนื่องจากผลของยางธรรมชาติที่มีความหนืดต่ำ

De และคณะ (1991) ทำการศึกษายางผสมระหว่างยางคลอโรซัลโฟเนตเตดพอลิเอทธิลีน (Chlorosulfonated polyethylene : CSM) และยางคาร์บอนอกซิเลทไนไตรล์ (Carboxylate nitrile rubber : XNBR) พบว่า ยางผสมระหว่างยางคลอโรซัลโฟเนตเตดพอลิเอทธิลีนกับยางคาร์บอนอกซิเลทไนไตรล์ สามารถเกิดการเชื่อมโยงระหว่างยางทั้งสองชนิดได้ในขณะที่กำลังขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง โดยไม่ต้องใช้สารช่วยในการคงรูป (Curing agent) ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์ผลได้ด้วยเครื่อง Monsanto rheometer เครื่อง FTIR spectroscopy และทดสอบการบวมตัว ส่วนการทดสอบความเข้ากันได้ (miscible blend) สามารถนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องทดสอบเชิงพลวัต และเครื่อง DSC ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ต่าง ๆ ดังกล่าว พบว่า ยางทั้งสองชนิดสามารถเข้ากันได้ และสามารถเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางทั้งสองชนิดนี้ได้ และเมื่อนำไปศึกษาสมบัติเชิงฟิลิกส์ จะพบว่า สมบัติเชิงฟิลิกส์ของยางผสมจะมีค่าอยู่ระหว่างสมบัติเชิงฟิลิกส์ของยางทั้งสองชนิด และในการทดลองได้มีการเสริมแรงด้วยเขม่าดำ

Mukhopadhyay (1991) ได้เตรียมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติอีพอกซิไดซ์ (Epoxidize natural rubber : ENR) และยางคลอโรซัลโฟเนตเตดพอลิเอทธิลีน (Chlorosulfonated Polyethylene : CSM) โดยใช้เครื่องบดสองลูกกลิ้ง แล้วนำไปวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิสูง เพื่อให้เกิดการวัลคาไนซ์ด้วยตัวเอง (self – vulcanize) โดยที่ไม่มีสารช่วยในการคงรูป (vulcanizing agent) แล้วนำไปศึกษาด้วยเครื่อง FTIR ซึ่งพบว่า ปฏิกริยาการเชื่อมโยงจะขึ้นอยู่กับเวลา อุณหภูมิ ระดับการเกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันในยาง ENR และสัดส่วนของยางทั้งสองชนิดในยางผสม จากนั้นจะนำไปทดสอบสมบัติเชิงฟิลิกส์เปรียบเทียบกับยางที่วัลคาไนซ์ในระบบปกติ และอาจเสริมแรงด้วยเขม่าดำ ซึ่งผลจากการทดสอบสมบัติเชิงฟิลิกส์จะพบว่า ยางผสมที่เกิดการวัลคาไนซ์ด้วยตนเอง จะให้ค่าการทนต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความแข็งและความต้านทานต่อการสึกหรอดีกว่ายาง ENR และสมบัติการคงตัวจะดีกว่ายาง CSM

Nichols และคณะ (1994) กล่าวถึง ผลของการป่นร่งที่มีต่อพฤติกรรมการแตกหักของยางคลอรีเนตเตดพอลิเอทธิลีน (Chlorinated polyethylene : CPE) และยางคลอโรซัลโฟเนตเตดพอลิเอทธิลีน (Chlorosulfonated Polyethylene : CSM) โดยวิเคราะห์พฤติกรรม thermooxidative aging ของยางคลอโรซัลโฟเนตเตดพอลิเอทธิลีนและยางคลอรีเนตเตดพอลิเอทธิลีนด้วยเครื่อง DSC และการทดสอบการฉีกขาด (Tear resistant) ซึ่งสามารถนำค่า thermal induction time และค่า

พลังงานการฉีกขาด มาคำนวณหาค่าอัตราการบ่มเร่งและค่าคงที่อัตรา (Rate constant) ได้ ซึ่งจากการทดสอบพบว่า พลังงานกระตุ้นที่คำนวณได้แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของกลไกการสลายตัวของวัสดุที่อุณหภูมิประมาณ 240°C และค่า thermal induction time สำหรับค่าพลังงานการฉีกขาดสามารถนำมาทำนายหาอายุของวัสดุพอลิเอทิลีนไดออกไซด์ได้ ในกรณีที่ยางเกิดความล้าเหลวขึ้นจะทำให้การขยายตัวของรอยแตกช้าลง และการลดลงของพลังงานการฉีกขาดทำให้ทราบว่า มีการเชื่อมโยงเกิดขึ้นในระหว่างการบ่มเร่ง

### 1.3 ปัญหาอุปสรรคและการแก้ไข

ไม่สามารถทำการทดลองเคลือบบนผ้าใบด้วยเทคนิคการเลเซอร์ริงได้ เนื่องจากความล่าช้าของการส่งมอบเครื่องเลเซอร์ ทำให้ไม่สามารถเพิ่มเติมอุปกรณ์ให้ความร้อนแก่ลูกกลิ้งได้ตามเวลาที่กำหนด ได้ทดลองเคลือบยางบนผ้าใบด้วยเครื่องอัดแต่ไม่สามารถควบคุมความหนาของยางให้บางและมีความหนาสม่ำเสมอทั้งสองด้านตามที่ต้องการ และโครงการวิจัยนี้มีระยะเวลาจำกัดที่ค่อนข้างสั้น ทำให้ไม่สามารถประกอบการประกอบเครื่องมือดังกล่าว ดังนั้น ควรจะมีการวิจัยเพิ่มเติมในอนาคต โดยนำสูตรที่เหมาะสมทดลองขึ้นรูปกับผ้าใบด้วยเครื่องเลเซอร์