

ส่วนที่ 1 รายละเอียดโครงการ

1. ชื่อโครงการวิจัย การผลิตฉนวนไฟฟ้าแรงสูงจากวัสดุยางพารา (Study of High Voltage Insulator using Natural Rubber)

2. หน่วยงานหลักที่รับผิดชอบงานวิจัย และสถานที่ตั้งพร้อมทั้งชื่อหน่วยงานและลักษณะของการ
ร่วมงานวิจัยกับหน่วยงานอื่น (ถ้ามี)

หน่วยงานวิจัยหลัก

ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ธัญบุรี ต.คลอง 6อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 5-3480-2549-0 โทรสาร 3483-2549-0

หน่วยงานวิจัยร่วม

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

3. คณะผู้วิจัย บทบาทของนักวิจัยแต่ละคนในการทำวิจัย และสัดส่วนที่ทำการวิจัย (%)

ที่ปรึกษาโครงการ

ผศ.ดร.สมชัย หิรัญโรดม (Asst. Prof. Dr. Somchai Hiranvarodom)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวหน้าโครงการ

ผศ. ดร. ฉัตรชัย กันยาวัธ (Asst. Prof. Dr. Chatchai Kunyawut)

บทบาท วางแผนการวิจัย เตรียมเอกสารและตรวจผลการทดลอง สัดส่วนที่ทำวิจัย 40%

ผู้วิจัยหลัก

ดร. วารุณี อริยวิริยะนันท์ (Dr.Warunee Ariyawiriyanan)

บทบาท ร่วมเตรียมเอกสาร ขึ้นรูปชิ้นงาน ทดสอบเชิงกล สัดส่วนที่ทำวิจัย 40%

ผู้วิจัยร่วมวิจัย

ดร. บุญยัง ปลั่งกลาง (Dr.Boonyang Plangklang)

บทบาท ทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าและวิเคราะห์ผลการทดลอง สัดส่วนที่ทำวิจัย 20%

4. ประเภทของการวิจัย การวิจัยและพัฒนา

5. สาขาวิชาการและกลุ่มวิชาที่ทำการวิจัย สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย

6. คำสำคัญ (keywords) ของโครงการวิจัย

ยางธรรมชาติ (Natural Rubber), ฉนวนไฟฟ้า (Insulator) , ไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage)

ส่วนที่ 2 เนื้อหาโครงการ

บทคัดย่อ

เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศที่ผลิตยางธรรมชาติได้มากเป็นอันดับต้นๆของโลก โดยยางธรรมชาติที่ผลิตได้ส่วนใหญ่ใช้เป็นวัตถุดิบหลักในอุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมก่อสร้าง และอุตสาหกรรมเกษตร สมบัติอย่างหนึ่งของยางธรรมชาติคือ การที่ยางธรรมชาติมีการนำไฟฟ้าที่ต่ำ ซึ่งอยู่ในช่วงความเป็นฉนวนไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้ทางคณะผู้ทำวิจัยจึงได้มีแนวคิดเพื่อจะศึกษานำยางธรรมชาติมาผลิตเป็นฉนวนทางไฟฟ้าแรงสูงเพื่อนำไปขึ้นรูปทำเป็นฉนวนในการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง โดยนำยางธรรมชาติมาผสมกับยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนเพื่อทำให้อย่างผสมที่ได้มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนและโอโซนสูงขึ้น การวิจัยนี้ทำการเตรียมฉนวนไฟฟ้าจากยางธรรมชาติ โดยนำยางธรรมชาติมาผสมกับยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน(EPDM) ในอัตราส่วน NR (100)/EPDM (0), NR (80)/EPDM (20), NR (60)/EPDM (40), NR (50)/EPDM (50), NR (40)/EPDM (60), NR (20)/EPDM (80) และ NR (0)/EPDM (100) ร่วมกับสารเติมแต่งอื่นๆ มาผสมกันแล้วทำการวัลคาไนซ์ จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าได้แก่การทดสอบสภาพความต้านทานเชิงพื้นผิวโดยค่าการทดสอบที่พบคืออัตราส่วน NR (80)/EPDM (20) ได้ค่าเท่ากับ $0.8 \times 10^{16} \Omega / \text{cm}^2$ และการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าซึ่งจากการทดสอบที่ได้เท่ากับ 19.64 kV/mm ซึ่งมีค่าสูงมากพอสำหรับนำมาใช้เป็นฉนวนไฟฟ้า ที่ระบบจำหน่ายแรงดันไฟฟ้า 380/220 โวลต์ ส่วนการทดสอบสมบัติเชิงกลได้แก่การทดสอบความแข็งจากกราฟเปรียบเทียบสัดส่วนของยาง EPDM ที่ 50 phr จะให้ค่าความแข็งมากที่สุดที่ 63 Shore A และในการทดสอบสมบัติทางความร้อนพบว่า การปรับปรุงสมบัติความทนทานต่อความร้อนของยางจะเกิดขึ้นอย่างมีนัยสำคัญก็ต่อเมื่อมีการผสมยาง EPDM ลงไปในยางธรรมชาติ พบว่าที่สัดส่วนการผสมดังกล่าวนั้น ยางผสมมีวิฤภาคของยาง EPDM เป็นเมทริกซ์จึงส่งผลทำให้อย่างผสมมีสมบัติความทนทานต่อความร้อนที่สูงขึ้น ซึ่งข้อมูลที่ได้จะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาวัสดุที่ทำจากยางธรรมชาติ เพื่อเพิ่มมูลค่าแก่ยางธรรมชาติ และเป็นการลดปริมาณการใช้ยางสังเคราะห์ที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีราคาค่อนข้างสูงอีกด้วย

ABSTRACT

Thailand is considered to be one of the most famous major rubber distributors in the world. Most of the natural rubbers in Thailand are generally produced for automobile industry, construction industry, agricultural industry and etc. One of the excellent properties of natural rubber is its low electrical conducting, which can be transformed and made as insulator. In this regard, we try to study and modify natural rubber in order to apply as a high voltage electrical insulation. This insulator can be made by combination of natural rubber and Ethylene-Propylene Diene Rubber. These combinations will naturally make the insulator more resistance to thermal degradation and ozone more. This research is aimed to make an experiment on natural electrical insulator by combining natural rubber (NR) with Ethylene-Propylene Diene Rubber (EPDM) with the ratio of 100/0, 80/20, 60/40, 50/50, 40/60, 20/80 and 0/100, respectively. All rubber compounds were mixed through two roll mill to prepare vulcanized rubber compounding. The electrical properties of resulting rubber were investigated. It was found that the surface resistivity and dielectric strength of NR/EPDM (80/20) was $0.8 \times 10^{16} \Omega/\text{cm}^2$ and 19.64 kV/mm, respectively. This dielectric strength was higher enough to be an insulator for high voltage pressure at 380/220 Volts. The mechanical properties of the rubber compounding were observed. It was found that mixture of EPDM 50 wt% showed the highest hardness of 63 Shore A. The thermal properties are incredibly important for the resistance improvement to thermal aging of natural rubber.

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศไทยเป็นอย่างมาก ยาง ผลิตภัณฑ์ยาง และผลิตภัณฑ์จากไม้ยางพารา เป็นสินค้าส่งออกที่สร้างรายได้ให้กับประเทศ คิดเป็นมูลค่ารวมกว่า 135,280 ล้านบาท โดยประเทศผู้ส่งออกยางหลักๆ ของตลาดโลก คือ ไทย อินโดนีเซีย มาเลเซีย และเวียดนาม ประเทศไทยมีการส่งออกยางประมาณ 2.042 ล้านตัน หรือประมาณ 40% ของตลาดการส่งออกยางทั่วโลก ซึ่งประเทศไทยสามารถขยายส่วนแบ่งในตลาดการส่งออกยางโลกได้อีก จากวิกฤตเรื่องของราคาน้ำมันในตลาดโลกสูงขึ้น ทำให้ราคายางสังเคราะห์ขยับสูงขึ้นเช่นกัน ความต้องการใช้ยางพาราเพื่อทดแทนยางสังเคราะห์ก็จะเพิ่มมากขึ้น จึงเป็นโอกาสที่ดีของประเทศไทยในการที่จะเร่งพัฒนาคุณภาพของวัตถุดิบยาง และผลิตภัณฑ์ยาง นอกจากยางจะเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญแล้ว ปริมาณความต้องการใช้ยางในประเทศก็สูงเช่นกัน ด้วยปัจจุบันประเทศไทยได้กลายเป็นฐานการผลิตของอุตสาหกรรมยางในยานพาหนะ และเป็นผู้ผลิตและส่งออกผลิตภัณฑ์ถุงมือยางรายใหญ่ของโลก ประกอบกับมีการใช้ยางธรรมชาติในอุตสาหกรรมอื่นๆ อีกมากมาย ตัวอย่างเช่น วงการแพทย์ วงการวิทยาศาสตร์ วงการก่อสร้าง วงการสื่อสาร การขนส่ง ตลอดจนของใช้ต่างๆ ภายในบ้าน อะไหล่รถยนต์ ยางยืด สายพาน รองเท้า ฯลฯ การนำยางธรรมชาติไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ นั้น จะต้องมีการปรับปรุงคุณภาพยางให้เหมาะสม โดยการเพิ่มสารเติมแต่งลงไปในยางธรรมชาติ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานในลักษณะที่แตกต่างกันไป การคิดประดิษฐ์ผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ จากยางธรรมชาติ เพื่อทดแทนวัสดุอื่นๆ จึงเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ยาง และพัฒนาศักยภาพทางด้านอุตสาหกรรมในฐานะที่ประเทศไทยเป็นผู้นำตลาดยางของโลก [1]

เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศที่ผลิตยางธรรมชาติได้มากเป็นอันดับต้นๆ ของโลก โดยยางธรรมชาติที่ผลิตได้ส่วนใหญ่ใช้เป็นวัตถุดิบหลักในอุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมก่อสร้าง และอุตสาหกรรมเกษตร เป็นต้น คุณสมบัติอย่างหนึ่งของยางธรรมชาติคือ การที่ยางธรรมชาติมีการนำไฟฟ้าที่ต่ำ ซึ่งอยู่ในช่วงความเป็นฉนวนไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้ทางคณะผู้ทำวิจัยจึงได้มีแนวคิดเพื่อจะศึกษานำยางธรรมชาติมาผลิตเป็นฉนวนทางไฟฟ้าแรงสูงเพื่อนำไปขึ้นรูปทำเป็นฉนวนในการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง โดยนำยางธรรมชาติมาผสมกับยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน(EPDM) เพื่อทำให้ง่ายผสมที่ได้มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนและโอโซนสูงขึ้น

แม้ว่ายางธรรมชาติ (NR) จะเป็นยางที่มีสมบัติเชิงกลดีเยี่ยมและมีความยืดหยุ่นสูง แต่เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่ในปริมาณสูง ดังนั้นยางธรรมชาติจึงมีข้อด้อยหลักคือเกิดการเสื่อมสภาพได้ง่ายโดยเฉพาะการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากออกซิเจน ความร้อน และโอโซน ซึ่งข้อด้อยดังกล่าวทำให้การใช้งานของยางธรรมชาติค่อนข้างจำกัด ด้วยเหตุนี้ จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยียาง

ผสม (Rubber Blend) โดยการนำยางธรรมชาติไปผสมกับยางสังเคราะห์ชนิดอื่น เพื่อที่จะปรับปรุงข้อดีของยางธรรมชาติดังกล่าว ซึ่งยางสังเคราะห์ที่นิยมนำมาใช้ผสมกับยางธรรมชาติต้องเป็นยางสังเคราะห์ชนิดที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลในปริมาณที่น้อยมากหรือไม่มีพันธะคู่อยู่เลย เช่น ยางเอทธิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM) หรือยางเอทธิลีนโพรพิลีน (EPM) เพราะยางสังเคราะห์เหล่านี้จะทำให้ยางผสมที่ได้มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนและโอโซนสูงขึ้น [2]

การส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังในปัจจุบันจะต้องแปลงแรงดันไฟฟ้าส่งจ่ายในระบบไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage) ซึ่งในประเทศไทยมีระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงขนาดพิกัด 500 kV ซึ่งเป็นระบบแรงดันสูงพิเศษก่อนที่จะลดแรงดันลงมาสู่ระดับจำหน่ายที่ 22 kV และจะจ่ายให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าทั่วไปที่ 380/220 V จะเห็นว่าการส่งจ่ายไฟฟ้านั้นมีความจำเป็นต้องส่งในระดับพิกัดแรงสูง ดังนั้นจึงมีความยุ่งยากและซับซ้อนในการติดตั้งระบบเพื่อไม่ให้เกิดอันตรายต่อบุคคลและสิ่งมีชีวิต โดยส่วน ประกอบสำคัญที่ป้องกันไฟฟ้าแรงสูงไม่ให้เกิดอันตรายกับสิ่งมีชีวิตคือ ฉนวนไฟฟ้า (Insulator) ซึ่งมีอยู่หลายแบบจากวัสดุหลายชนิดแตกต่างกันตามวัตถุประสงค์ในการใช้งานดังรูปที่ 1-1



รูปที่ 1-1แสดงตัวอย่างฉนวนไฟฟ้าแรงสูง

โดยปัจจุบันในการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงหรือชั่วคราวไฟฟ้าแรงสูงต่างๆ ฉนวนที่ใช้ส่วนใหญ่จะต้องมีความเหนียวยืดหยุ่นซึ่งจะเป็นพวกยางฉนวนสังเคราะห์ เช่น ยางซิลิโคน (Silicone rubber) ยางเอทธิลีนโพรพิลีน (Ethylene Propylene Rubber, EPR) หรือวัสดุโพลีเมอร์ เช่น โพลีเอทธิลีนที่มีโครงร่างตาข่ายสูง (Crosslinked Polyethylene, XLPE) รวมไปถึงเทอร์โมเซตติงพลาสติกเป็นต้น ซึ่งมีราคาสูงและส่วนใหญ่นำเข้าจากต่างประเทศ ด้วยสาเหตุดังกล่าวทางผู้วิจัยจึงเห็นว่าการนำยางธรรมชาติมาพัฒนาเพื่อผลิตเป็นฉนวนไฟฟ้าแรงสูงจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยส่งเสริมการใช้ยางธรรมชาติที่ผลิตในประเทศไทย รวมทั้งการได้ฉนวนไฟฟ้าที่ใช้ในระบบส่งไฟฟ้ากำลังซึ่งผลิตได้ภายในประเทศด้วย [3]

ดังนั้นโครงการนี้จึงมุ่งทดลอง การเตรียมฉนวนไฟฟ้าจากยางธรรมชาติ โดยนำยางธรรมชาติมาผสมกับยางเอทธิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM) และสารเติมแต่งอื่นๆ มาผสมกันแล้วทำการวัลคาไนซ์ จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า และทดสอบการเสื่อมสภาพในการใช้งาน เพื่อหา

สัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ต่อไป ซึ่งข้อมูลที่ได้จะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาวัสดุที่ทำจากยางธรรมชาติ เพื่อเพิ่มมูลค่าแก่ยางธรรมชาติ และเป็นการลดปริมาณการใช้ยางสังเคราะห์ที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีราคาค่อนข้างสูงอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ความสามารถในการทนทานไฟฟ้าแรงสูงของวัสดุยางธรรมชาติผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM)

1.2.2 เพื่อเป็นการส่งเสริมให้นายางธรรมชาติมาใช้ในการผลิตเป็นฉนวนไฟฟ้าแทนการใช้ยางสังเคราะห์ซึ่งมีราคาค่อนข้างสูง

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 เพื่อศึกษาสมบัติความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่มีผลต่อสนามไฟฟ้าแรงสูงของฉนวนที่เตรียมจากยางธรรมชาติผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM) ในอัตราส่วนของการผสมระหว่าง NR/EPDM เท่ากับ 100/0 80/20 60/40 50/50 40/60 20/80 และ 0/100

1.3.2 การผสมยางคอมปาวด์ด้วยสารตัวเติม ได้แก่ ZnO, Stearic acid, TMQ, 6PPD, MBTS, DPG และ Sulphur ด้วยเครื่อง Two Roll Mill และขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยเครื่อง Compression Molding

1.3.3 ทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าคือ การทดสอบหาค่าสภาพความต้านทานเชิงพื้นผิวและการทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า

1.3.4 ทดสอบสมบัติเชิงกลคือ การทดสอบหาค่าความแข็ง ด้วยเครื่อง Durometer แบบ shore A

1.3.5 ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA) เพื่อหาค่าอุณหภูมิการสลายตัว

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 มีเทคโนโลยีในการเตรียมวัสดุฉนวนไฟฟ้าจากยางธรรมชาติขึ้นเองได้

1.4.2 ช่วยเพิ่มมูลค่า และเพิ่มผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ

1.4.3 สามารถนำไปต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์ในทางอุตสาหกรรมได้

บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

ปี 2008 พงษ์ธร แซ่อูย ชาคริต สิริสิงห และคณะ [4] ได้ทำการศึกษาผลของปริมาณเอทิลีนในยาง EPDM และสัดส่วนของการผสมต่อสมบัติเชิงกล ความทนทานต่อความร้อน และความต้านทานต่อโอโซนของยางผสม NR/EPDM โดยเริ่มต้นการทดลองด้วยการนำยางธรรมชาติไปผสมกับยาง EPDM ที่มีปริมาณเอทิลีนแตกต่างกัน 2 เกรด คือ EPDM 4770P และ EPDM 4570 โดยมีสัดส่วนของการผสมระหว่าง NR/EPDM เท่ากับ 100/0 80/20 60/40 40/60 20/80 และ 0/100 หลังจากการผสมเคมียาง จึงนำยางคอมพาวด์ส่วนหนึ่งไปทดสอบสมบัติความสามารถในการขึ้นรูปและนำยางคอมพาวด์ส่วนที่เหลือไปขึ้นรูปและคงรูปเพื่อทดสอบสมบัติต่าง ๆ ต่อไป จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มปริมาณเอทิลีนในยาง EPDM แม้จะส่งผลทำให้ยางผสมมีความยืดหยุ่นน้อยลง แต่ก็ส่งผลทำให้ยางผสมที่ได้มีความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด โมดูลัส และความแข็งสูงขึ้น ซึ่งการปรับปรุงสมบัติเชิงกลดังกล่าวคาดว่าจะเกิดจากการเสริมแรงของผลึกที่มีอยู่ในยาง EPDM เกรดที่มีปริมาณเอทิลีนสูงนั่นเอง จากการศึกษาผลของสัดส่วนการผสมพบว่า การผสมยาง EPDM ลงไปในสัดส่วนที่ไม่เกินร้อยละ 40 โดยน้ำหนักส่งผลทำให้ยางผสมมีสมบัติในกระบวนการผลิต เช่น ความหนืด พลังงานที่ใช้ในการผสม รวมถึงลักษณะการคงรูปที่ใกล้เคียงกับยางธรรมชาติ เนื่องจากที่สัดส่วนการผสมดังกล่าวยางผสมยังคงมีวัฏภาคของยางธรรมชาติเป็นเมทริกซ์ แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM จนถึงร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก (หรือสูงกว่า) สมบัติในกระบวนการผลิตของยางผสมก็จะเริ่มเปลี่ยนแปลงและเข้าใกล้สมบัติของยาง EPDM มากขึ้น เนื่องจากเกิดการกลับกันของวัฏภาค เมื่อพิจารณาผลของสัดส่วนการผสมต่อสมบัติเชิงกลพบว่า การเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM เกรดที่มีปริมาณเอทิลีนต่ำลงไปจะส่งผลทำให้ยางผสมมีสมบัติเชิงกลน้อยลงอย่างรวดเร็ว (เบี่ยงเบนจากกฎของการผสม) ทั้งนี้คาดว่าเกิดจากความไม่สมดุลของการคงรูประหว่างวัฏภาค แต่การเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM เกรดที่มีปริมาณเอทิลีนสูงลงไปจะส่งผลทำให้การเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลของยางผสมเป็นไปตามกฎของการผสม ผลการทดลองยังชี้ให้เห็นว่า ตัวแปรหลักที่ควบคุมสมบัติความทนทานต่อความร้อนและโอโซนของยางผสมคือสัดส่วนของการผสมเท่านั้น ไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณเอทิลีนในยาง EPDM แต่อย่างใด

ปี 2004 M. Ehsani และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงกล, ความร้อน, ไดนามิกส์ และสมบัติทางไฟฟ้า โดยจะนำวัสดุที่ได้มาผลิตเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ใช้ภายนอก เช่น silicone, EPDM และ alloys of silicone-EPDM โดยจะนำพอลิเมอร์ที่กล่าวมานี้มาใช้ในการผลิตฉนวนไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งผลที่ได้จากกระบวนการไดนามิกส์จะแสดงผลเก็บไว้ และจะมีการเพิ่มส่วนผสมของ EPDM เข้าไปในกระบวนการ ผลที่ได้จะแสดงให้เห็นจากการทดสอบค่า TGA ที่เป็นอักษรย่อของการ

ทดสอบการเสื่อมสภาพด้วยความร้อนของ silicone rubber โดยจะทำการปรับปรุงให้ดีขึ้นจากการผสม EPDM ลงไป การผสม silicone – EPDM เข้าด้วยกันจะให้ผลดีในการช่วยลดแรงดันทางไฟฟ้าสูงๆเมื่อเปรียบเทียบกับ silicone rubber พื้นผิวและปริมาณความต้านทานของ silicone rubber จะถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นจากการผสม EPDM ลงไป ซึ่งคุณสมบัติเชิงกลของ EPDM คือมีความทนทาน และมีความยืดหยุ่นเพื่อป้องกันการแตกหักของ silicone การนำฉนวนที่ทำมาจากพอลิเมอร์มาใช้ในงานกลางแจ้งได้รับความนิยมน้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากใช้งานได้ดี มีคุณสมบัติในการทนต่อสภาพอากาศและน้ำหรือสภาพที่มีความชื้นและที่มีผลกระทบต่อตัวฉนวน ทนไฟแรงสูง และมีน้ำหนักเบาเมื่อเปรียบเทียบกับฉนวนที่ทำจากกระเบื้อง ลักษณะฉนวนที่ทำจากพอลิเมอร์ประกอบด้วย 3 ส่วนคือระบบการเสริมแรงด้วยใยแก้ว โลหะที่นำมาใช้และการสลายตัวของพอลิเมอร์ในสภาวะอากาศต่างๆ ใยแก้วจะทำหน้าที่ปกป้องการสลายตัวของพอลิเมอร์จากสิ่งแวดล้อม และทำหน้าที่ปล่อยกระแสไฟฟ้าออกไปจากพื้นผิว โดยปกติการที่พอลิเมอร์สลายตัวนั้นจะถูกกำหนดให้มีการออกแบบพื้นผิวให้น้อยลง ความแตกต่างของพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ในการทำฉนวน ฉนวนที่ไม่ใช่เซรามิกจะถูกเติมด้วย ethylene – propylene rubber (EPR) ถูกผลิตขึ้นครั้งแรกโดยบริษัทในฝรั่งเศส และอเมริกา (1975-1980) ในปี 1976 Rosenthal ในเยอรมัน และ Reliable ในอเมริกา และปี 1983 ได้มีการคิดค้น silicone rubber (SIR) และ Ohio Brass นำเสนอเกี่ยวกับส่วนประกอบส่วนผสมเบื้องต้นของ ethylene-propylene-diene rubber (EPDM) และ silicone rubber ถูกผลิตขึ้นในปี 1986 ซึ่งอาจจะเป็นไปได้ว่าจะนำคุณสมบัติของ EPDM และ SIR มารวมกัน silicone rubber มีคุณสมบัติในการป้องกันน้ำได้ดี ดังนั้นฉนวนจาก SIR จะป้องกันไฟฟ้าเมื่ออยู่ในสภาพเปียกชื้นได้ดี และนำมาประยุกต์ใช้งานกันอย่างกว้างขวาง แต่ว่ามีราคาค่อนข้างสูง

เนื่องจาก EPDM เป็นการรวมตัวกันของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าดีกว่า สามารถที่จะบดงอได้เมื่ออยู่ในช่วงอุณหภูมิกว้าง ด้านทานความชื้นดีและนำมาใช้ในการเป็นฉนวน HV ซึ่ง EPDM มีความสามารถในการทนแสง UV และสามารถกันน้ำได้ดี ดังนั้นจึงสมควรที่จะต้องให้สารประกอบรวมเข้าด้วยกันเพื่อให้มีสมบัติทางไฟฟ้าดี และสมบัติเชิงกลที่ดีเนื่องจากปัจจุบันนี้ EPDM สามารถกันน้ำได้เพราะมีส่วนผสมของ silicone ด้วย การศึกษาเกี่ยวกับการเกิดวัลคาไนซ์ของเปอร์ออกไซด์มีตัวอย่างดังนี้เช่น silicone rubber, EPDM rubber และการผสมกันของส่วนผสมหลายอย่างเป็นเวลานานที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ซึ่ง silicone จะแสดงให้เห็นถึงความไวต่อการเสื่อมสภาพ ในขณะที่ EPDM และของผสมจะป้องกันการยืดตัวและการแตกหักได้ 100% ในช่วงเวลาและอุณหภูมิต่างๆในการทดสอบงานนี้จะแสดงให้เห็นถึงสมบัติต่างๆ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกลของไดนามิกส์ และสมบัติทางไฟฟ้าของ silicone, EPDM และส่วนผสมอื่นที่แตกต่างกันไป

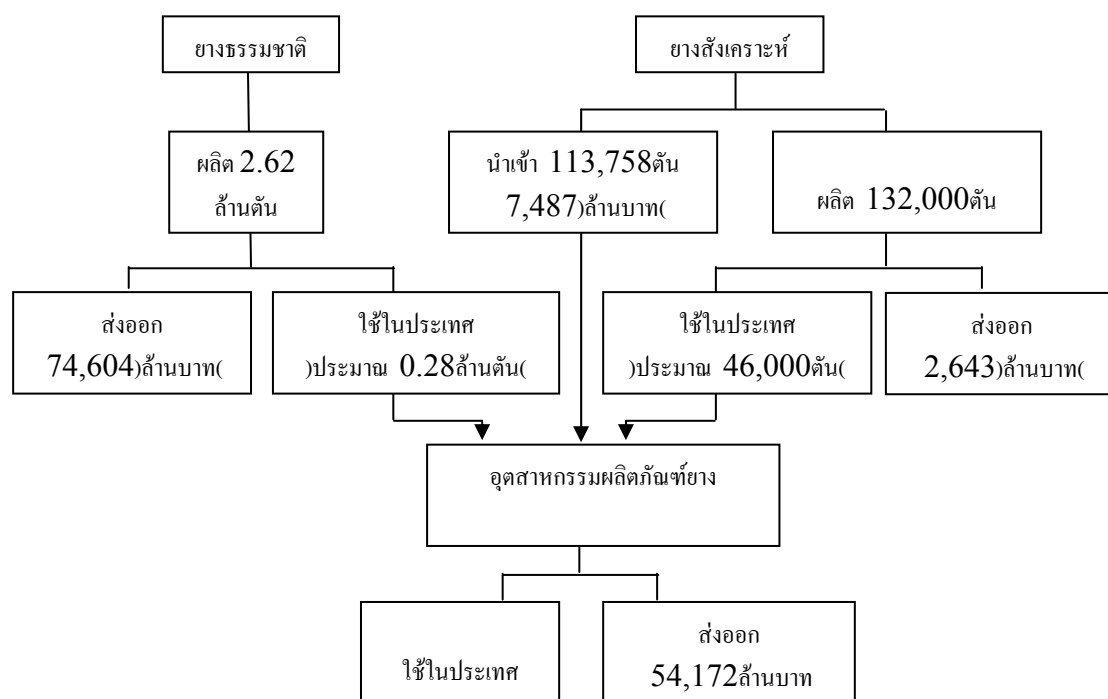
ปี 2006 K. Siderakis , D. Agoris[6] การศึกษาการดำเนินการของฉนวนพอลิเมอร์ไฟฟ้าแรงดันสูงที่การทดสอบ rotating wheel dip test (RWDT) และอิทธิพลของการเสื่อมสภาพพื้นผิวจะประเมินค่าโดยวิธีนี้เช่นเดียวกับการวัดของ flashover จะดำเนินการ หลังและก่อนทดสอบ tracking

คือผลสรุปซึ่งการเสื่อมสภาพพื้นผิวของวัสดุฉนวนพอลิเมอร์จะสัมพันธ์กันโดยตรงไปสู่การปล่อยกระแสไฟฟ้าส่วนหนึ่งและการสูญเสียน้ำหนัก การรั่วของกระแสไฟฟ้าที่พื้นผิวของตัวอย่าง จะใช้เป็นประโยชน์ในการประเมินค่าลักษณะการเสื่อมสภาพโดยเฉพาะใน RWDT การวิเคราะห์ตัวอย่างจะไม่ได้รับผลโดย dry flashover voltage ถึงอย่างไรก็ตามข้อเท็จจริงนั้น การเสื่อมสภาพพื้นผิวของการทดสอบ tracking มีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป

2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับยางธรรมชาติและการใช้งาน

2.2.1. ยางกับเศรษฐกิจไทย

ยางธรรมชาติจัดเป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย ปัจจุบันประเทศไทยเป็นประเทศผู้ผลิตและส่งออกยางธรรมชาติอันดับหนึ่งของโลก โดยในปี พ.ศ 2545 .ไทยมีปริมาณการผลิตประมาณ 2.62 ล้านตัน ข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการนำยางธรรมชาติออกไปแปรรูปให้เป็นผลิตภัณฑ์เพื่อเพิ่มมูลค่าเพียงแค่ประมาณร้อยละ 10 เท่านั้น แต่ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากยางดิบสามารถทำรายได้ให้ประเทศจากการส่งออกสูง ดังนั้น จึงเป็นที่ชัดเจนว่าอุตสาหกรรมการแปรรูปยางดิบให้เป็นผลิตภัณฑ์นั้นมีความสำคัญอย่างมาก ประเทศไทยจึงควรเร่งพัฒนาและสนับสนุนอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางให้ขยายใหญ่ขึ้น

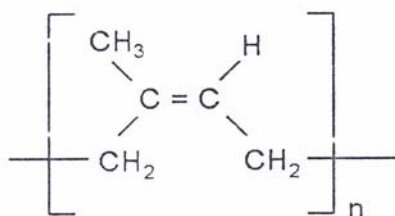


รูปที่ 2-1 แสดงแผนผังโครงสร้างของอุตสาหกรรมยางของประเทศไทย ในปี พ.ศ2545 .

จากรูปจะเห็นได้ว่าแม้ประเทศไทยจะเป็นประเทศผู้ผลิตและส่งออกยางธรรมชาติมากที่สุดในโลก แต่ไทยยังมีความจำเป็นต้องใช้ยางสังเคราะห์เป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางบางชนิดด้วยกัน เพราะยางธรรมชาติแม้จะมีสมบัติเชิงที่ดีแต่มีข้อเสียหลักคือไม่ทนน้ำมัน ความร้อนและสภาพอากาศ ดังนั้น จึงไม่สามารถนำยางธรรมชาติไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางบางประเภทที่ต้องการสมบัติดังกล่าว ยางสังเคราะห์ใช้ในอุตสาหกรรมยางของไทยมีอยู่หลายชนิด ซึ่งส่วนใหญ่ยังคงต้องนำเข้า ยกเว้นยางสไตรีนบิวตาไดอีน (SBR) และยางบิวตาไดอีน (BR) ที่สามารถผลิตได้เองในประเทศไทย

2.2.2. โครงสร้างของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมี คือ อซิส-4,1-โพลิไอโซพรีน (Cis-1, 4-Polyisoprene) กล่าวคือในโมเลกุลของ 1 โมเลกุลจะประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีน (C_5H_8) มาต่อกันเป็นสายยาว (แบบเส้นตรง (โดยทั่วไปยางธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 200,000 ถึง 400,000 และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างมาก ยางธรรมชาติมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.93g/cm^3 ที่อุณหภูมิ 20°C การเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ประมาณ 72°C นั้นความหมายว่าหากนำยางธรรมชาติไปเก็บไว้ในที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 72°C สมบัติของยางธรรมชาติจะเปลี่ยนจากที่เคยยืดหยุ่นไปเป็นของแข็งเปราะคล้ายแก้ว



รูปที่ 2-2 แสดงสูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ

จากรูปจะเห็นว่าใน 1 หน่วย ของไอโซพรีนจะมีพันธะคู่และมีหมู่แอลฟาเมทธิลีน ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกัมมันตอยู่ ดังนั้น พันธะคู่ที่มีอยู่ในโมเลกุลของยางจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการคงรูปด้วยกัมมันต อย่างไรก็ตาม พันธะคู่เหล่านี้ยังสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ได้อีก เช่น ออกซิเจน หรือโอโซน ทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพ หรืออาจทำให้ปฏิกิริยากับไฮโดรเจน คลอรีน ไฮโดรเจนคลอไรด์ เป็นต้น ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างยางกับสารเคมีต่างๆ เหล่านี้จะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน แต่ในบางสภาวะ เช่น ที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อยางถูกยืด โมเลกุลของยางบางส่วนสามารถจัดเรียงตัวได้อย่างค่อนข้างเป็น

ระเบียบ ขางจึงสามารถเกิดผลึกได้ การเกิดผลึก เนื่องจากอุณหภูมิต่ำหรือที่เรียกว่า “Low temperature crystallization” จะพบในกรณีที่เก็บขางไว้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 20°C เป็นเวลานาน โดยขางจะมีอัตราเร็วในการตกผลึกสูงสุดที่อุณหภูมิประมาณ 26°C การตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำนี้จะทำให้ขางแข็งมากขึ้น ทำให้ไม่สามารถนำขางไปผสมให้เข้ากับสารเคมีหรือสารตัวเติมอื่นๆ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ผลึกที่เกิดขึ้นก็จะถูกทำลาย ขางจะอ่อนตัวลงและกลับสู่สภาพเดิม ด้วยเหตุนี้ ประเทศในเมืองหนาวจึงต้องนำขางธรรมชาติมาอบที่อุณหภูมิประมาณ $70-50^{\circ}\text{C}$ เพื่อให้ขางอ่อนก่อนที่จะนำไปใช้ในกระบวนการผลิตต่อไป ส่วนการผลึกเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัวหรือที่เรียกว่า “Strain-indexed crystallization” จะพบเมื่อขางถูกยืดจนมีความยาวมากกว่าความยาวตั้งต้นประมาณ 3-2 เท่า การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัวของขางจะทำให้ขางมีสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน กล่าวคือ ขางจะเปลี่ยนจากสภาพโปร่งแสงไปเป็นทึบแสง ซึ่งจะสังเกตได้ง่ายในขางคงรูปที่ไม่มีการเติมสารตัวเติม นอกจากนี้การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัวยังทำให้ขางคงรูปมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น นั่นคือ ขางจะมีความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการขัดถูสูงขึ้น

2.2.3. สมบัติทั่วไปของขางธรรมชาติ

(1) **ความยืดหยุ่น** สมบัติความยืดหยุ่นเป็นลักษณะเด่นอีกประการหนึ่งของขางธรรมชาติ กล่าวคือ ขางธรรมชาติที่คงรูปแล้วจะมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับขางหมดไป ขางจะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิมได้อย่างรวดเร็ว

(2) **ความเหนียวติดกัน** ขางธรรมชาติมีสมบัติดีเยี่ยมในด้านความเหนียวติดกันซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ขางล้อรถยนต์

(3) **ความทนทานต่อแรงดึง** เนื่องจากโมเลกุลของขางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูง จึงทำให้ขางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้ง่ายเมื่อถูกยืด ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับขาง ดังนั้น ขางธรรมชาติจึงมีค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงมาก โดยที่ไม่ต้องใช้สารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วย การเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปก็จะช่วยทำให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงขึ้น ซึ่งสมบัตินี้จะแตกต่างจากขางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ที่มักมีค่าความทนทานต่อแรงดึงต่ำ จึงไม่สามารถนำไปใช้งานในทางวิศวกรรมได้ นอกจากนี้จะมีการเติมสารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วยเท่านั้น

(4) **ความทนทานต่อการฉีกขาด** เนื่องจากขางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้เมื่อถูกยืด ดังนั้น ขางธรรมชาติจึงมีความทนทานต่อการฉีกขาดของขางสูงขึ้น

(5) **สมบัติเชิงพลวัต** ขางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดี ขางมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนต่ำในระหว่างการใช้งาน นอกจากนี้ขางธรรมชาติยังมีความต้านทานต่อการล้าตัวที่สูงมากอีกด้วย

(6) ความต้านทานต่อการขจัดขุย ขางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการขจัดขุยสูง แต่ยังคงน้อยกว่ายาง SBR เล็กน้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ชนิดอื่นๆ พบว่ายางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการขจัดขุยอยู่ในกลุ่มที่สูงมาก

(7) ความเป็นฉนวนไฟฟ้า ขางธรรมชาติมีค่าความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงมาก โดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสูงถึง 10^{15} หรือ 10^{16} Ohm.cm

(8) ความทนทานต่อของเหลวและสารเคมี เนื่องจากองค์ประกอบของยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้น ขางดิบจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน และโทลูอีน เป็นต้น ความสามารถในการละลายนี้จะลดลงถ้าเกิดการคงรูปเนื่องจากการเชื่อมโยงทางเคมีของโมเลกุลเกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายสามมิติในยางคงรูปจะไปขัดขวางกระบวนการละลายของยาง ขางคงรูปเกิดการบวมตัวในตัวทำละลายนี้เท่านั้น การบวมตัวของยางดังกล่าวจะทำให้สมบัติเชิงกลของยางด้อยลงด้วยเหตุนี้ยางธรรมชาติจึงไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่างๆ แต่ยางจะทนทานต่อของเหลวที่มีขั้ว เช่น อะซิโตนหรืออัลกอฮอล์ นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังทนต่อการกัดและค้างเงืองจางได้ดี แต่ไม่ทนต่อการครูดในตริกและกรดกำมะถันเข้มข้น

(9) การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่มากทำให้ยางว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา ดังนั้น ขางธรรมชาติจึงถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังไม่ทนต่อโอโซนเพราะเมื่อยางถูกยืดและได้รับโอโซนนานๆ จะเกิดรอยแตกขนาดเล็กจำนวนมากที่บริเวณพื้นผิวในทิศตั้งฉากกับทิศทางการยืดตัวของยาง ด้วยเหตุนี้ในระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิดและไปลงเพื่อยืดอายุการใช้งานของยางธรรมชาติ

(10) การหักงอที่อุณหภูมิต่ำ ขางธรรมชาติยังคงรักษาสมบัติความยืดหยุ่นหรือความสามารถในการหักงอได้แม้ที่อุณหภูมิต่ำมากๆ ซึ่งยางที่มีสมบัตินี้ที่ดีกว่ายางธรรมชาติมีเพียง 2 ชนิด คือ ยางบิวตาไดอิน และยางซิลิโคน

(11) Compression set ขางธรรมชาติมีค่า Compression set ก่อนข้างด้าทั้งที่มีค่าของอุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูงปานกลาง อย่างไรก็ตาม Compression set ที่อุณหภูมิต่ำของยางธรรมชาติจะสูงขึ้นเนื่องจากยางอาจเกิดการตกผลึกทำให้ความยืดหยุ่นของยางเริ่มสูญเสียไปในขณะที่ค่า Compression set ที่อุณหภูมิของยางธรรมชาติจะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากยางธรรมชาติไม่ทนต่อความร้อนยางจึงเกิดความเสื่อมสภาพ ซึ่งจะส่งผลทำให้สมบัติ Compression set ด้อยลง

(12) อุณหภูมิของการใช้งาน ขางธรรมชาติสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 55°C จนถึง 70°C อย่างไรก็ตาม หากเก็บยางไว้ที่อุณหภูมิต่ำนานๆ ยางอาจเกิดการตกผลึกซึ่งจะทำให้ยางแข็งขึ้นและสูญเสียความยืดหยุ่นไป แต่เมื่ออุณหภูมิการใช้งานสูงเกินไป สมบัติเชิงกลต่างๆ ก็จะด้อยลงเนื่องจากความร้อนจะทำให้ยางเกิดความเสื่อมสภาพ ในบางกรณีที่มีการออกสูตรผสมเคมียางได้อย่างเหมาะสม มีการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพลงไป (ยางธรรมชาติอาจสามารถนำไปใช้งานได้อย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิสูงถึง 90°C หรืออาจสูงถึง 100°C) ในกรณีที่ยางได้รับอุณหภูมิสูงเป็นช่วงๆ เท่านั้น(

2.2 4.การผสมเคมียาง

ยางดิบตามลำพังจะมีขีดจำกัดในการใช้งานเนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำและมีลักษณะทางกายภาพที่ไม่เสถียร โดยสมบัติต่างๆ จะแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างมาก กล่าวคือ ยางจะอ่อนตัวและเหนียวเมื่อร้อน แต่จะแข็งเปราะที่อุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้ การใช้ประโยชน์จากยางจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่างๆ เช่น กำมะถัน ผงเขม่าดำ และสารตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น หลังจากการผสมเคมียาง ยางผสมที่ได้หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่ายางคอมพาวด์ จะถูกนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน กระบวนการนี้เรียกว่ากระบวนการดักถั่วแล้วจะเรียกว่า “ยางสุกหรือยางคงรูป” ซึ่งสมบัติของยางคงรูปที่ได้นี้จะเสถียรไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนักและมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น แม้ว่ายางธรรมชาติสามารถคงรูปได้ด้วยเพอร์ออกไซด์หรือการใช้รังสีที่มีพลังงานสูง แต่ระบบการคงรูปด้วยกำมะถันก็ยังเป็นระบบที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง เมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ ยางธรรมชาติต้องการปริมาณกำมะถันมากกว่าแต่ต้องการปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยกว่า เพราะในยางธรรมชาติมีสารประกอบอินทรีย์บางตัวที่สามารถเร่งปฏิกิริยาคงรูปได้

ยางธรรมชาติเป็นของแข็งที่มีความเหนียวและความหนืดสูงมาก การผสมสารเคมีให้เข้ากับยางจึงเป็นไปได้ยาก ด้วยเหตุนี้ ก่อนการผสมเคมีจึงต้องทำการบดยางหรือลดความหนืดของยางด้วยการตัดโมเลกุลของยางด้วยกระบวนการเชิงกล นั่นคืออาศัยแรงเฉือนในเครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll mill) หรือในเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) ขั้นตอนการบดยางเพื่อลดความหนืดของยางก่อนการผสมเคมีนี้ เรียกว่า “มาสดีเลชั่น” ปกติการบดยางที่อุณหภูมิห้องจะให้ประสิทธิภาพการบดที่ดี เพราะยางจะมีความหนืดสูงส่งผลทำให้เกิดแรงเฉือนสูง โมเลกุลยางก็จะเกิดการฉีกขาดได้ดี แต่ที่อุณหภูมิสูงยางจะมีความหนืดลดลงซึ่งจะส่งผลทำให้แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในระหว่างการผลิตลดลงด้วย ประสิทธิภาพในการบดยางอันเนื่องมาจากแรงเชิงกลจึงลดลง แต่ในบางครั้งก็สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบดยางที่อุณหภูมิสูงได้เช่นกัน โดยการเติมสารแปปไทเซอร์ลงไปเล็กน้อย เพราะสารเคมีดังกล่าวจะช่วยทำให้โมเลกุลยางที่ถูกตัดขาดไปแล้วไม่สามารถกลับเข้าไปทำปฏิกิริยารวมกันใหม่ เนื่องจากการบดยางที่มากเกินไปจะทำให้ยางอ่อนเกินไป ซึ่งจะส่งผลทำให้ยางไม่สามารถรับสารตัวเติมได้ในปริมาณมาก ยางคงรูปที่ได้จึงมีความยืดหยุ่นสมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงพลวัตที่ไม่ดี ดังนั้น การบดยางจึงควรทำเท่าที่จำเป็น เพราะนอกจากจะทำให้ยางคงรูปที่ได้มีสมบัติที่ดีแล้ว ยังช่วยลดต้นทุนในการผลิตอีกด้วย

2.2 5.การผสมยางธรรมชาติกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น

เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นยางที่ไม่มีขั้ว จึงสามารถผสมให้เข้ากันได้ดีกับยางที่ไม่มีขั้วชนิดต่างๆ ได้ดี เช่น ยางไสตรีนบิวตาไดอีน ยางพอลิไอโซพรีน และยางบิวตาไดอีน นอกจากนั้น บางครั้งอาจผสมกับยางไนไตรล์ได้ในระดับหนึ่ง (ควรใช้ยางไนไตรล์เกรดที่มีปริมาณอะคริโลไนไตรล์ต่ำ และถ้าเป็นไปได้ควรทำการเติมสารช่วยให้เข้ากันลงไปด้วยเล็กน้อยเพื่อให้ยางธรรมชาติและยาง

ไนไตรล์เข้ากันได้ดียิ่งขึ้น (การนำยางธรรมชาติมาผสมกับยางสังเคราะห์จะเป็นการรวมเอาสมบัติที่ดีของทั้งยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ไว้ด้วยกัน คือ สมบัติที่ดีของยางธรรมชาติที่จะถูกส่งผ่านไปให้ยางสังเคราะห์ ได้แก่ ความสามารถในการขึ้นรูปที่ดี ความเหนียวติดกัน สมบัติเชิงพลวัต รวมถึงความร้อนสะสมที่ต่ำในระหว่างการใช้งาน ในทำนองเดียวกันสมบัติที่ดีของยางสังเคราะห์บางประการก็จะถูกถ่ายทอดให้แก่ยางธรรมชาติ เช่น ความต้านทานต่อการขีดถู)เมื่อผสมกับยางบิวตาไดอิน (ความทนทานต่อความร้อน)เมื่อผสมกับยางไนไตรล์ หรือยางเอทธิลีนโพรพิลีนไดอินนอเมอร์ (ความทนทานต่อน้ำมัน)เมื่อผสมกับยางไนไตรล์ (หรือความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องจากโอโซน)เมื่อผสมกับยางเอทธิลีนโพรพิลีนไดอินนอเมอร์ (เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม ในการผสมยางธรรมชาติให้เข้ากับยางสังเคราะห์นั้น ผู้ผสมจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยต่างๆ ที่อาจมีผลโดยตรงต่อสมบัติของยางผสมอัน ได้แก่ ความหนืดและระบบการคงรูปของยางที่จะนำมาผสมกัน โดยทั่วไปแล้วก่อนที่จะนำยางทั้งสองชนิดมาผสมเข้าด้วยกันนั้นควรทำการบดยางธรรมชาติให้มีความหนืดตั้งต้นใกล้เคียงกับยางสังเคราะห์ก่อน เพราะจะทำให้ยางทั้งสองชนิดนั้นผสมเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น ส่วนการผสมยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์บางตัวที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลน้อย เช่น ยางบิวไทล์หรือยางเอทธิลีนโพรพิลีนไดอินนอเมอร์ ก็ควรเลือกระบบการคงรูปให้เหมาะสม ไม่เช่นนั้นยางทั้งสองชนิดซึ่งมีสมบัติการคงรูปที่แตกต่างกันมากนี้อาจเกิดการแยกเฟสกันในช่วงกระบวนการคงรูปได้ การเลือกใช้ยางสังเคราะห์เกรดที่มีปริมาณพันธะคู่สูงอาจช่วยบรรเทาปัญหาที่เกิดขึ้นจากระบบการคงรูปได้ นอกจากความหนืดและระบบการคงรูปแล้ว ในความสามารถในการกระจายตัวของสารตัวเติมหรือสารเคมีในแต่ละเฟสของยางที่จะนำมาผสมกันด้วย)โดยเฉพาะสารตัวเร่งปฏิกิริยา (เพราะสารตัวเติมหรือสารตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดจะมีความเป็นขั้วแตกต่างกันและสารเคมีเหล่านี้ก็ชอบที่จะอยู่ในเฟสของยางที่มีความเป็นขั้วใกล้เคียงกับตัวมันเองเท่านั้น ซึ่งการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอขององค์ประกอบเหล่านี้ในยางแต่ละเฟสอาจทำให้สมบัติของยางผสมที่ได้ต่ำกว่าที่ควรจะเป็น

2.2 6.การใช้งานของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติมีสมบัติทั้งเชิงกลและเชิงพลวัตที่ดี อย่างไรก็ดี ยางธรรมชาติก็มีข้อด้อยคือไม่ทนต่อความร้อน สภาพอากาศ น้ำมัน และสารเคมีอื่นๆ ทำให้ยางสังเคราะห์ชนิดต่างๆ เริ่มเข้ามามีบทบาทสำคัญแทนที่ยางธรรมชาติ อย่างไรก็ดีตามผลิตภัณฑ์ยางบางประการยังคงจำเป็นต้องใช้ยางธรรมชาติเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิต เนื่องจาก

(1 ยางธรรมชาติมีสมบัติดีเยี่ยมในด้านความทนทานต่อแรงดึงแม้ไม่ได้เติมสารตัวเติมเสริมแรงและมีความยืดหยุ่นสูงมาก จึงเหมาะที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ถังมือยาง ถังยางอนามัย ลูกโป่ง และยางรัดของ เป็นต้น

(2) ยางธรรมชาติมีสมบัติทั้งเชิงกลและเชิงพลวัตที่ดี มีความยืดหยุ่นสูงในขณะที่มีความร้อนสะสมที่เกิดขณะใช้งานต่ำและมีสมบัติความเหนียวติดกันที่ดี จึงเหมาะที่จะนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด เช่น ยางล้อรถบรรทุก ยางล้อรถยก ยางล้อเครื่องบิน ฝ้ายาง ยางกันกระแทก ทำเรือ หรือใช้ผสมกับยางสังเคราะห์ในการผลิตยางล้อรถยนต์ เป็นต้น

(3) ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อการฉีกขาดสูงทั้งที่อุณหภูมิต่ำและสูง จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางกระเปาะน้ำร้อน เนื่องจากในการแกะชิ้นงานออกจากเบ้าพิมพ์ในระหว่างกระบวนการผลิตจะต้องดึงชิ้นงานออกจากเบ้าพิมพ์ในขณะที่ร้อน ยางที่ใช้จึงต้องมีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดขณะความร้อนสูง[7]

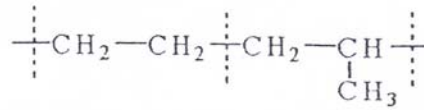
2.3 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน

2.3.1 โครงสร้าง การผลิต และสมบัติของยาง EPDM

เป็นที่ทราบกันว่าทั้งพอลิเอทิลีน (PE) และพอลิโพรพิลีน (PP) ต่างก็มีสมบัติเป็นพลาสติกที่อุณหภูมิห้องเนื่องจากพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดดังกล่าวสามารถตกผลึกได้ง่าย แต่หากทำการป้องกันการตกผลึกของพอลิเอทิลีนโดยการเติมมอนอเมอร์อีกชนิดหนึ่งลงไปในระหว่างกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันก็จะได้พอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่มีโครงสร้างของโมเลกุลแบบอสัณฐานและมีสมบัติเป็นยางที่มีความยืดหยุ่นสูง

ในระยะแรกเริ่มที่ได้มีการสังเคราะห์พอลิเมอร์จากการทำปฏิกิริยาโคพอลิเมอร์ไรเซชันระหว่างมอนอเมอร์ของเอทิลีน (ethylene) กับโพรพิลีน (propylene) จะได้พอลิเมอร์ที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐานและมีสมบัติเป็นยางเรียกว่ายาง EPM เนื่องจากโมเลกุลของยางชนิดนี้ไม่มีส่วนที่อึดตัว (ไม่มีพันธะคู่) ดังนั้น ยางชนิดนี้จึงมีสมบัติเด่นในด้านความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากแสงแดด ออกซิเจน ความร้อน โอโซน และสารเคมี อย่างไรก็ตาม ข้อเสียหลักของยางชนิดนี้ก็คือไม่สามารถใช้กำมะถันในการคงรูปได้ (เพราะไม่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล) การทำให้ยางคงรูปจึงต้องใช้เพอร์ออกไซด์เท่านั้น ปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนาชนิดใหม่โดยการมอนอเมอร์ตัวที่สามคือไดอีนลงไปเล็กน้อยในระหว่างการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ทำให้ยางที่ได้มีส่วนที่ไม่อึดตัวอยู่ในสายโซ่โมเลกุลยางจึงสามารถคงรูปได้ด้วยกำมะถันและเรียกยางชนิดนี้ว่ายาง EPDM

เนื่องจากไดอีนที่เติมลงไปไม่ได้ไปแทรกอยู่ที่สายโซ่หลักของโมเลกุล แต่จะเกาะอยู่กับสายโซ่หลักเป็นลักษณะกิ่งก้านสาขา ด้วยเหตุนี้ แม้ว่าตำแหน่งพันธะคู่จะเกิดการแตกตัวอันเนื่องมาจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น แสงแดด ออกซิเจน โอโซน ฯลฯ แต่สายโซ่หลักก็ยังคงเหมือนเดิมหรือได้รับผลกระทบน้อยมาก ด้วยเหตุนี้ยาง EPDM จึงมีสมบัติเด่นในด้านการทนทานต่อความร้อน แสงแดด ออกซิเจน และโอโซนได้เป็นอย่างดี

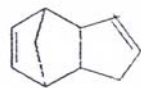


Ethylene unit Propylene unit

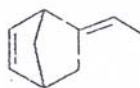
รูปที่ 2-3 แสดงสูตรโครงสร้างของยาง EPM

2.3.2 การแบ่งเกรด

ยาง EPDM มีหลายเกรด แต่ละเกรดแตกต่างกันที่สัดส่วนของเอทิลีนและโพรพิลีน รวมถึงปริมาณของไดอิน โดยทั่วไป ยางชนิดนี้จะมีเอทิลีนอยู่ในช่วง 85-45% โมล (หรือ 80-40% โดยน้ำหนัก) แต่ละเกรดที่มีขายกันโดยทั่วไปจะมีปริมาณเอทิลีนอยู่ประมาณ 70-50% โมลและมีปริมาณของไดอินอยู่ในช่วง 11-3% โมล แม้ว่าไดอินที่ใช้กันอย่างกว้างขวางจะมีอยู่ 3 ชนิด คือ dicyclopentadiene (DCPD) ethylidene norbornene (ENB) และ tran-1, 4-hexadiene (1,4 HD) แต่ชนิดที่ใช้กันมากที่สุด ได้แก่ ENB เนื่องจากจะทำให้โมเลกุลของยางว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ เซชันหรือปฏิกิริยาการขาดด้วยกำมะถันสูงที่สุด แม้ว่าการใช้ 1,4HD จะทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาการขาดได้ช้ากว่า ENB แต่สมบัติบางประการของยางจะดีกว่า เช่น ความทนทานต่อความร้อน รวมถึงการบดผสม และการขึ้นรูปยางก็จะทำได้ง่ายกว่าเนื่องจากโมเลกุลของยางมีโครงสร้างเป็นเส้นตรง (linear molecules) ส่วนการใช้ DCPD จะทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาการขาดได้ช้าที่สุด



Dicyclopentadiene
(DCPD)



Ethylidene Norbornene
(ENB)



Trans-1, 4-Hexadiene
(HX หรือ 1, 4 HD)

รูปที่ 2-4 แสดงสูตรโครงสร้างของไดอินที่มีอยู่ในยาง EPDM

สัดส่วนของเอทิลีนและโพรพิลีนในยางก็มีผลกระทบโดยตรงต่อสมบัติของยาง กล่าวคือ ยางเกรดที่มีปริมาณเอทิลีนสูงจะมีความแข็งแรงในสภาพที่ยังไม่คงรูปสูง แต่เมื่อปริมาณของเอทิลีนลดลง ยางก็เริ่มจะนิ่มและยืดหยุ่นมากขึ้น

นอกจากจะมีการแบ่งเกรดตามชนิดและปริมาณของไดอินและสัดส่วนของเอทิลีนและโพรพิลีนแล้ว ยังมีการแบ่งเกรดยาง EDPM ตามความหนืด (น้ำหนักโมเลกุล) อีกด้วย โดยทั่วไป สามารถแบ่งแยกตามความหนืดดังนี้ได้ 3กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

.1 ยางเกรดที่มีความหนืดต่ำถึงปานกลาง (low-medium viscosity) โดยมีค่าความหนืด ML(1+4) @100 °C อยู่ในช่วง 25 ถึง 60

.2 ยางเกรดที่มีความหนืดปานกลางถึงสูง (medium-high viscosity) โดยมีค่าความหนืด ML(1+4) @125 °C อยู่ในช่วง 60 ถึง 100

.3 ยางเกรดที่มีความหนืดสูงมาก (very high viscosity) โดยมีค่าความหนืด ML(1+4) @125 °C อยู่ในช่วง 100 ถึง 200

ยางเกรดที่มีความหนืดต่ำแม้ว่าจะสามารถนำไปแปรรูปได้ง่าย แต่ยางจะมีความสามารถในการรับสารตัวเติมได้ในปริมาณปานกลางเท่านั้น จึงเหมาะกับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง ส่วนยางเกรดที่มีความหนืดสูงจะมีความสามารถรับสารตัวเติมและน้ำมันได้ในปริมาณมาก จึงเหมาะสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีราคาถูกลง

2.3.3 สมบัติทั่วไป

ยาง EMP และ EPDM มีค่าความหนาแน่นที่อุณหภูมิห้องค่อนข้างต่ำกว่ายางชนิดอื่น ๆ คือ ประมาณ 0.87-0.86g/cm³ และมีค่าอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วประมาณ 60- °C ส่วนสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ แสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของยาง EPM

สมบัติทางกายภาพ	
ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (/°C)	2.2x10 ⁻⁴
ค่าความร้อนจำเพาะ (cal/g °C)	0.52
การแพร่ความร้อน (cm ² /s)	9.2x10 ⁻⁴
การนำความร้อน (cal /cm.s. °C)	8.5x10 ⁻⁴
ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (ohm.cm)	5-10x10 ¹⁶
Dielectric strength (kV/mm)	30-35

ความยืดหยุ่น (elasticity) ยาง EDPM มีค่าความยืดหยุ่นสูงกว่ายางสังเคราะห์ชนิดอื่น ๆ แต่ยังคงต่ำกว่ายางธรรมชาติ

ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) เนื่องจากการจัดเรียงตัวของมอนอเมอร์ในสายโซ่โมเลกุลเป็นแบบไม่มีรูปแบบ ทำให้ได้พอลิเมอร์อสัณฐาน ยางชนิดนี้ไม่สามารถตกผลึกได้ ส่งผลให้ยางมีค่าความทนทานต่อแรงดึงค่อนข้างต่ำและต้องอาศัยการเติมตัวเสริมแรงเข้าช่วย โดยค่าความ

ทนทานต่อแรงดึงของยางที่ได้รับการเสริมแรงจะสูงหรือต่ำมากน้อยเพียงไรก็ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารตัวเติมที่ใช้

ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength) เมื่อได้รับการเสริมแรงด้วยสารตัวเติมที่เหมาะสม ยาง EPDM จะมีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดสูง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง ๆ ยางชนิดนี้จะมีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดใกล้เคียงกับยางธรรมชาติ

Compression set ยาง EPDM มีค่า Compression set ต่ำมาก โดยเฉพาะในยางเกรดที่มี ENB ในปริมาณที่สูงและได้รับการคงรูปด้วยระบบเพอร์ออกไซด์หรืออาจคงรูปด้วยระบบกำมะถันที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวสูง ๆ แต่ว่าค่า Compression set ของยางที่คงรูปด้วยระบบเพอร์ออกไซด์จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่ค่า Compression set ของยางที่คงรูปด้วยระบบกำมะถันจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

สมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) ยาง EPDM มีสมบัติเชิงพลวัตที่ดีมากและมีความต้านทานการล้าตัวสูง โดยเฉพาะในยางที่ได้รับการคงรูปด้วยระบบกำมะถันจะมีสมบัติเชิงพลวัตใกล้เคียงกับยาง SBR

ความต้านทานการเสื่อมสภาพ (aging properties) ยาง EPDM มีพันธะคู่ในโมเลกุลน้อยมาก ดังนั้น ยางชนิดนี้จึงทนต่อการเสื่อมสภาพอากาศ ออกซิเจน โอโซน แสงแดดและความร้อนได้เป็นอย่างดี (ดีกว่ายาง SBR และ NBR แต่ด้อยกว่ายางซิลิโคน) นอกจากนี้ยาง EPDM ยังทนต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากสารเคมี กรด และด่างได้ดีอีกด้วย ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพดังกล่าวขึ้นอยู่กับปริมาณของไดอินที่มีอยู่ในโมเลกุล ยาง EPDM เกรดที่มีปริมาณไดอินต่ำจะมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพสูง (จึงไม่จำเป็นต้องเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพ) แต่ว่าในยางเกรดที่มีปริมาณไดอินค่อนข้างสูง อาจจำเป็นต้องเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากออกซิเจนและแสงแดดลงไปด้วย อย่างไรก็ตาม ยางชนิดนี้ทุกเกรดมีความทนทานต่อโอโซนดีมาก จึงไม่จำเป็นต้องเติมสารป้องกันโอโซน (antiozonants) ลงไปส่วนระบบการคงรูปก็มีผลกระทบโดยตรงต่อความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนและโอโซนของยาง เพราะยางที่คงรูปด้วยระบบเพอร์ออกไซด์จะมีความทนทานต่อความร้อนและโอโซนสูงกว่ายางที่คงรูปด้วยระบบกำมะถัน

ความทนทานต่อน้ำมันและสารเคมี (oil and chemical resistance) จากลักษณะโครงสร้างโมเลกุล จะเห็นว่ายาง EPM และ EPDM เป็นยางไม่มีขั้ว ดังนั้น ยางจึงไม่ทนทานต่อน้ำมันหรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว (เช่นเดียวกับยางธรรมชาติและยาง SBR) แต่จะทนต่อตัวทำละลายที่มีขั้วได้ดี ยางชนิดนี้จึงทนต่อกรด ด่าง น้ำ อัลกอฮอล์ น้ำมันไฮดรอลิก และตัวทำละลายที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบได้เป็นอย่างดี มีความทนทานต่อน้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์ได้ปานกลาง แต่ไม่ทนทานต่อตัวทำละลายที่มีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ กรดอนินทรีย์เข้มข้น ตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ตรง (aliphatic hydrocarbon solvents) และตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนที่มีวงแหวน (aromatic hydrocarbon solvents) เป็นต้น

ความเป็นฉนวน (insulation) จากตารางจะเห็นว่ายางชนิดนี้มีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสูงมาก ดังนั้น ยางจึงมีความเป็นฉนวนและยังสามารถรักษาสมบัติความเป็นฉนวนได้ดีแม้ที่อุณหภูมิสูง ๆ นอกจากนี้ ยางชนิดนี้ยังดูดซึมน้ำได้น้อยมาก จึงเหมาะสำหรับใช้ในการผลิตยางหุ้มสายเคเบิลในกรณีที่สายเคเบิลนั้นต้องสัมผัสกับน้ำ เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างยาง EPM กับยาง EPDM พบว่ายาง EPM มีความเป็นฉนวนสูงกว่ายาง EPDM เล็กน้อย

การหักงอที่อุณหภูมิต่ำ (low temperature flexibility) ยาง EPDM มีสมบัติด้านการหักงอที่อุณหภูมิต่ำดีใกล้เคียงกับยางธรรมชาติ

อุณหภูมิของการใช้งาน (service temperature) ยาง EPDM ที่ได้รับการคงรูปด้วยกำมะถันจะมีอุณหภูมิสูงสุดในการใช้งานต่ำกว่ายางที่ได้รับการคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์ โดยทั่วไป ยาง EPDM สามารถนำไปใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิตั้งแต่ 40°C ถึง 150°C ประสิทธิภาพจะทนต่ออุณหภูมิที่ 165°C ได้นาน 1 เดือน หรือที่ 125°C ได้นาน 1 ปี และที่ 100°C ได้นาน 5 ปี ทั้งนี้ สมบัติความทนทานต่อความร้อนของยางยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ ด้วย เช่น การเลือกใช้ชนิดของสารป้องกันการเสื่อมสภาพและปริมาณของไดอินในยาง เป็นต้น

2.3.4 การผสมเคมียาง

ยาง EPDM สามารถคงรูปได้โดยใช้เพอร์ออกไซด์หรือใช้กำมะถันกร่วมกับสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวสูง อย่างไรก็ตาม หากต้องการคงรูปยางโดยใช้ระบบเพอร์ออกไซด์ ยาง EPDM ที่ใช้ควรเป็นเกรดที่มีสัดส่วนของพอลิเอทิลีนสูง เพราะหมู่เมทิลในพอลิโพรพิลีนจะไปขัดขวางการเกิดการเชื่อมโยงด้วยเพอร์ออกไซด์ ในทางตรงกันข้าม มันจะทำให้เกิดการตัดสายโซ่ของโมเลกุลแทน ดังนั้น ยางเกรดที่เหมาะสมสำหรับการคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์จึงควรมีปริมาณพอลิเอทิลีนสูงกว่า 50% โมล นอกจากนี้ ชนิดของไดอินในโมเลกุลก็มีผลกระทบต่ออัตราเร็วในการคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์เช่นกัน เพราะยาง DCP-EPDM จะมีอัตราเร็วในการคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์สูงกว่ายาง ENB-EPDM (แม้ว่ายางชนิดนี้จะมีอัตราเร็วในการคงรูปด้วยกำมะถันต่ำกว่าก็ตาม)

การคงรูปยาง EPM หรือยาง EPDM ด้วยเพอร์ออกไซด์จำเป็นต้องมีการเติมสารกระตุ้นลงไปด้วยเล็กน้อยเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของการเชื่อมโยง โดยสารกระตุ้นจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระที่เกิดจากการแตกตัวของเพอร์ออกไซด์ จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องต่าง ๆ มากมาย สารกระตุ้นที่นิยมใช้กันมากได้แก่ กำมะถัน สารตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกตัวให้กำมะถัน อะโครเลต และควิโนน เป็นต้น

สำหรับการคงรูปด้วยระบบกำมะถัน ปริมาณของกำมะถันและสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของไดอินที่มีอยู่ในโมเลกุล สำหรับยาง ENB-EPDM ส่วนใหญ่แล้วจะใช้กำมะถัน (หรือสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกตัวให้กำมะถัน) ประมาณ 0.2 ถึง 2.0 phr นอกจากนี้ หากต้องการให้ยางเกิดการคงรูปได้เร็วและมีระดับของการคงรูปสูงก็ไม่ควรใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาเพียงตัวเดียว แต่ควรใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาหลาย ๆ ตัวร่วมกันเพื่อให้เกิดผลแบบเสริม (synergistic effect) สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่ม

ที่นิยมใช้ร่วมกันได้แก่ กลุ่มโซอะโซล กลุ่มไซยูเรม และกลุ่มไดไฮโอคาร์บาเมต ปัญหาหลักที่มักพบในยาง EPDM คือปัญหาเรื่องการบลูมมาที่พื้นผิวของสารตัวให้ค่ามะถันลงให้ต่ำกว่า 0.8phr หรือสังเกตว่าสารตัวเร่งปฏิกิริยาตัวใดที่บลูมและทำการปรับลดปริมาณของสารตัวเร่งปฏิกิริยานั้น ๆ ให้อยู่ในระดับที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหา

โดยทั่วไป ยาง EPDM มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอยู่แล้วจึงไม่จำเป็นต้องเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพลงไป อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ใช้ยางเกรดที่มีปริมาณไดอินสูง ๆ และต้องการให้ยางคงรูปที่ได้มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพสูงมาก ๆ ก็สามารถเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพที่เป็นอนุพันธ์ของเอมีนลงไปได้

นอกจากสารตัวเติมเสริมแรงที่ใช้กันโดยทั่วไปแล้วในบางครั้ง การใช้ calcined clay หรือ CaCO_3 เป็นสารตัวเติมก็ก่อให้เกิดผลดีหลายประการ กล่าวคือ นอกจากจะช่วยลดต้นทุนของการผลิตแล้วยังช่วยปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปของยางคอมพาวด์อีกด้วย สารตัวเติมทั้งสองชนิดดังกล่าวสามารถกระจายตัวในยางได้ง่าย ราคาถูก และไม่มีผลต่อลักษณะการคงรูปของยาง นอกจากนี้ calcined clay ยังช่วยทำให้ยางคงรูปที่ได้มีการดูดซึมน้ำต่ำซึ่งเป็นสมบัติที่จำเป็นสำหรับการทำปลอกหุ้มสายเคเบิลอีกด้วย ส่วน hard clay ไม่นิยมนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางชนิดนี้ เพราะแม้ว่าสารตัวเติมชนิดนี้จะช่วยเสริมแรงในยางแต่ว่ามันจะทำให้อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของยางลดลง

ยาง EPDM เกรดที่มีสัดส่วนของเอทิลีนสูงสามารถดกผลึกได้เล็กน้อย จึงส่งผลให้ยางมีความแข็งแรงในสภาพที่ยังไม่คงรูปสูง สามารถที่จะเติมน้ำมันและสารตัวเติมได้มาก ซึ่งในบางครั้งอาจเติมสารตัวเติมได้มากถึง 2 เท่าของปริมาณยางที่ใช้ (200 phr) จึงนับว่าเป็นจุดเด่นของยางชนิดนี้ อย่างไรก็ตาม ยางเกรดที่มีปริมาณเอทิลีนสูงก็มีข้อเสียคือการบดผสมยางที่อุณหภูมิต่ำจะทำได้ยากและสมบัติของยางที่อุณหภูมิต่ำจะไม่ดี เพราะเมื่ออุณหภูมิต่ำลง อัตราการดกผลึกของยางก็จะเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ยางสูญเสียความยืดหยุ่นไปอย่างรวดเร็ว สำหรับในกรณีที่ต้องการทำการผสมยางสูตรที่มีปริมาณสารตัวเติมสูง ๆ ก็ควรใช้เทคนิคการผสมแบบกลับด้าน (upside-down mixing technique)

2.3.5 การผสมยาง EPDM กับพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ

ยาง EPDM สามารถนำไปผสมกับยางชนิดอื่น ๆ ได้อย่างหลากหลาย ส่วนใหญ่แล้วมักนำยาง EPDM ไปผสมกับยางไดอิน เช่น ยางธรรมชาติ IR SBR B๓ และ NBR โดยใช้ยาง EPDM ประมาณ 30% โดยน้ำหนักเพื่อปรับปรุงสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากโอโซนของยางไดอิน อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับยางไดอิน ยาง EPDM มีพันธะคู่อยู่น้อยและคงรูปได้ช้ากว่า ดังนั้นการนำยางไดอินมาผสมกับยาง EPDM จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงระบบการคงรูปด้วย ไม่เช่นนั้นยางอาจเกิดแยกเฟสหรือยางผสมที่ได้จะมีสมบัติเชิงกลไม่เป็นที่น่าพอใจ โดยทั่วไป ยาง EPDM ที่ใช้ในการผสมควรเป็นยาง ENB-EPDM เกรดที่มีปริมาณ ENB สูง (เพราะจะทำให้ยางคงรูปได้เร็ว) และควรใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาของรูปสูงหรืออาจใช้เพอร์ออกไซด์ในการคงรูป การนำยาง

EPDM มาผสมกับยาง NBR จะทำให้ได้ยางผสมที่สามารถทนน้ำมันและทนต่อสภาพอากาศได้ดี ซึ่งสามารถนำไปใช้แทนยาง CR ได้ ยาง EPM หรือยาง EPDM เกรดที่มีปริมาณไดอินต่ำ สามารถนำไปผสมกับพอลิเมอร์ที่ไม่มีพันธะคู่ได้เช่น การผสมยาง EPDM กับพอลิโอเลฟิน (เช่น พอลิโพรพิลีน) ได้เป็นยางเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic elastomer ,TPE) ซึ่ง TPE ที่ได้นี้จะมีสมบัติคล้ายยางแต่จะมีกระบวนการขึ้นรูปเหมือนพลาสติกและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ (recycle) ได้

2.3.6 การใช้งาน

ยาง EPDM ส่วนมากนิยมใช้ในการผลิตยางขึ้นส่วนรถยนต์ เช่น ยางขอบหน้าต่าง ยางขอบประตู แก้มยางรถยนต์ ท่อยางของหม้อน้ำรถยนต์ (radiator hose) เป็นต้น ยาง EPDM ยังถูกใช้ในการผลิตท่อยางของเครื่องซักผ้า สายพานลำเลียง แผ่นยางกันน้ำ แผ่นยางมุงหลังคา จนวนหุ้มสายเคเบิล (โดยเฉพาะที่มีความต่างศักย์สูง ๆ) และใช้ผสมกับพลาสติกเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของพลาสติก [8] เช่น เพิ่มความเหนียวและความต้านทานต่อแรงกระแทก (impact resistance) เป็นต้น

2.4 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการผสมยางธรรมชาติกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น

2.4.1 การผสมยางธรรมชาติกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น

ยางธรรมชาติเป็นยางที่มีสมบัติเด่นด้านความเหนียวติดกันที่ดี, สมบัติด้านการขึ้นรูปที่ดี, ความร้อนสะสมในขณะการใช้งานต่ำ เป็นต้น แต่ก็มีสมบัติบางประการที่เป็นข้อด้อย ดังนั้นในการแก้ไขข้อด้อยนั้น สามารถทำได้โดยการเลือกเอาสมบัติที่ดีจากยางสังเคราะห์ชนิดอื่นมาทดแทน เช่น สมบัติด้านความทนทานต่อการขัดถูของยางบิวตาไดอิน (BR), สมบัติความทนทานต่อน้ำมันของยางไนไตรล์ (NBR), สมบัติความทนทานต่อความร้อนและโอโซนของยาง EPDM เป็นต้น โดยการผสมยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์เหล่านี้เข้าด้วยกัน แต่การที่จะผสมให้เข้ากันได้นั้นยางสังเคราะห์ชนิดนั้น ๆ ต้องไม่มีความเป็นขั้วเหมือนกับยางธรรมชาติ จึงจะทำให้ยางผสมรวมเข้ากันเป็นเฟสเดียวกันได้ดีขึ้น เช่น ยาง BR, SBR, EPDM และ NBR (เกรดที่มีอะคริโลไนไตรล์ต่ำ ๆ)

2.4.2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล ความทนทานต่อความร้อน และความต้านทานต่อโอโซนของยางผสม NR/EPDM

แม้ว่ายางธรรมชาติ (NR) จะเป็นยางที่มีสมบัติเชิงกลดีเยี่ยมและมีความยืดหยุ่นสูง แต่ยางธรรมชาติก็มีข้อด้อยหลักคือเสื่อมสภาพได้ง่าย เนื่องจากในยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่ในปริมาณมากจึงไม่ทนต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากออกซิเจน ความร้อน และโอโซน ซึ่งข้อด้อยดังกล่าวทำให้การใช้งานของยางธรรมชาติค่อนข้างจำกัด เพราะไม่สามารถนำยางธรรมชาติไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องมีการใช้งานกลางแจ้งหรือที่ต้องสัมผัสกับโอโซน ด้วยเหตุนี้ จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยียางผสม (Rubber Blend) โดยการนำยางธรรมชาติไปผสมกับยางสังเคราะห์ชนิดอื่น ๆ เพื่อที่จะปรับปรุงข้อด้อย

ของยางธรรมชาติดังกล่าว ซึ่งยางสังเคราะห์ที่นิยมนำมาใช้ผสมกับยางธรรมชาติคือยาง EPDM เพราะยาง EPDM มีปริมาณพันธะคู่อยู่น้อยมาก ดังนั้น จึงทำให้ยางผสม NR/EPDM มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนและโอโซนสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การผสมยางธรรมชาติกับยาง EPDM แม้จะทำให้ยางผสมที่ได้มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพสูงขึ้น แต่สมบัติเชิงกลของยางผสมที่ได้มักมีค่าต่ำ โดยเฉพาะค่าความทนทานต่อแรงดึง ทำให้เกิดข้อจำกัดในการนำยางผสมดังกล่าวไปใช้งานในทางวิศวกรรม ด้วยเหตุนี้ โครงการวิจัยนี้จึงเน้นที่จะศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่อาจมีผลต่อสมบัติเชิงกลของยางผสม NR/EPDM โดยมีจุดประสงค์หลักเพื่อนำองค์ความรู้ที่ได้ไปปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางผสม NR/EPDM ซึ่งตัวแปรที่จะถูกศึกษาในโครงการนี้ได้แก่ 1) เกรดของยาง EPDM ที่จะนำมาผสม 2) ศึกษาผลของปริมาณเอทิลีนและปริมาณของไดอิน (2) อัตราส่วนการผสม 3) ระบบการคงรูป 4) สภาพของการผสม (ศึกษาผลของความเร็วยรอบของโรเตอร์และระยะเวลาที่ใช้ในการผสม (และ 5) ชนิดและปริมาณของสารตัวเติม ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยอาจนำไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ทำจากยางผสม NR/EPDM เช่น ท่อยางที่มีการกำหนดสี หรือ ยางปิดน้ำฝน เป็นต้น นอกจากนี้ หากสามารถพัฒนายางผสม NR/EPDM ที่มีสมบัติเชิงกลดีและมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนและโอโซนสูง ก็จะสามารถนำยางผสมคู่นี้ไปใช้แทนยางสังเคราะห์ในการผลิตผลิตภัณฑ์บางประเภทได้อีกด้วย ซึ่งจะเป็นการสนับสนุนให้ประเทศไทยมีการใช้ยางธรรมชาติในการผลิตผลิตภัณฑ์มากยิ่งขึ้น

2.4.3 โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบยางธรรมชาติทนความร้อน/โอโซน

แม้ว่ายางธรรมชาติ (NR) จะเป็นยางที่มีสมบัติเชิงกลดีเยี่ยมและมีความยืดหยุ่นสูง แต่ยางธรรมชาติก็มีข้อด้อยหลักคือเสื่อมสภาพได้ง่าย เนื่องจากในยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่ในปริมาณมาก จึงไม่ทนต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากออกซิเจน ความร้อน และโอโซน ซึ่งข้อด้อยดังกล่าวทำให้การใช้งานของยางธรรมชาติค่อนข้างจำกัด เพราะไม่สามารถนำยางธรรมชาติไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องมีการใช้งานกลางแจ้งหรือที่ต้องสัมผัสกับโอโซน ด้วยเหตุนี้ จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยียางผสม (Rubber Blend) โดยการนำยางธรรมชาติไปผสมกับยางสังเคราะห์ชนิดอื่น ๆ เพื่อที่จะปรับปรุงข้อด้อยของยางธรรมชาติดังกล่าว ซึ่งยางสังเคราะห์ที่นิยมนำมาใช้ผสมกับยางธรรมชาติต้องเป็นยางสังเคราะห์ที่มีปริมาณพันธะคู่อยู่น้อยมากหรือไม่มีพันธะคู่อยู่เลย เช่น ยาง EPDM หรือยาง EPM เพราะยางสังเคราะห์เหล่านี้จะทำให้ยางผสมที่ได้มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนและโอโซนสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการผสมยางธรรมชาติกับยาง EPDM ในสัดส่วน 60/40 จะทำให้ยางมีความทนทานต่อโอโซนได้ดี แต่ว่าสมบัติความทนทานต่อความร้อนของยางก็ยังไม่เป็นที่น่าพอใจ ทั้งนี้เนื่องจากในยางผสมดังกล่าวมียางธรรมชาติเป็นเมทริกซ์ในขณะที่ยางสังเคราะห์เป็นวัฏภาคที่กระจายตัว ด้วยเหตุนี้ โครงการวิจัยนี้จึงเน้นที่จะศึกษาและพัฒนายางธรรมชาติทนความร้อนและโอโซนต้นแบบที่ได้จากการนำยางธรรมชาติไปผสมกับยางสังเคราะห์ชนิดต่าง ๆ เช่น EPDM EPM PU และ Q

โดยมีสัดส่วนของยางธรรมชาติในปริมาณที่ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 60 และมีเป้าหมายหลักที่จะทำให้สถานวิทย์ของยางผสมที่ได้นั้นมียางธรรมชาติเป็นวัตถุดิบที่กระจายตัวอยู่ในยางสังเคราะห์ หากโครงการวิจัยนี้ประสบความสำเร็จ ก็จะเป็นการสร้างนวัตกรรมใหม่ในการผลิตยางธรรมชาติทนความร้อน ทำให้สามารถนำยางธรรมชาติไปใช้งานได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น ซึ่งหากสามารถผลิตยางธรรมชาติทนความร้อนและโอโซนไปใช้ได้จริงในเชิงพาณิชย์ ก็จะก่อให้เกิดประโยชน์ต่อประเทศอย่างมากเพราะนอกจากจะเป็นการเพิ่มปริมาณการใช้ยางธรรมชาติภายในประเทศแล้ว ยังช่วยลดปริมาณการนำเข้ายางสังเคราะห์จากต่างประเทศอีกด้วย[9]

2.5 การออกสูตรยาง

การออกสูตรยางเป็นสิ่งที่สำคัญมากต่อคุณภาพและต้นทุนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ การออกสูตรยางจำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับสมบัติของยาง หน้าที่และความจำเป็นของการใช้สารเคมีผสมยาง รวมทั้งต้องพิจารณาถึงราคาของสารเคมีที่จะใช้ว่าเหมาะสมหรือคุ้มกับการผลิตผลิตภัณฑ์นั้นๆ เพราะต้นทุนการผลิตก็เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงเป็นสิ่งแรกสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไปในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง พื้นฐานของส่วนผสมของสูตรประกอบด้วยสารกลุ่มต่างๆ ดังนี้

2.5.1 สารทำให้ยางคงรูป (vulcanizing agent or curing agent)

สารกลุ่มนี้จะทำให้โมเลกุลของยางเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้ยางอยู่ในสถานะที่ยึดหยุ่นได้สูงหรืออาจใช้คำว่า “คงรูป” แต่ตามโรงงานมักเรียกกันว่า “ยางสุก” สารทำให้ยางคงรูปแบ่งเป็น 2 ระบบใหญ่ๆ ได้แก่ ระบบที่ใช้กำมะถัน (sulphur) นิยมใช้ในยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ที่มีพันธะคู่ในโมเลกุล และระบบที่ใช้เปอร์ออกไซด์ (peroxide) ซึ่งนิยมใช้ในยางที่มีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลต่ำ นอกจาก 2 ระบบดังกล่าว ยังมีการใช้สารคงรูปพวกโลหะออกไซด์ เช่น แมกนีเซียมออกไซด์และสังกะสีออกไซด์ (MgO/ZnO) ในยางสังเคราะห์บางชนิด เช่น ยางนิโอพรีน

- ระบบยางคงรูปโดยกำมะถัน (sulphur vulcanization system)

เป็นระบบที่เหมาะสมสำหรับการทำให้ยางที่มีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลสูงคงรูป เช่น ยางธรรมชาติหรือยาง SBR เพราะพันธะคู่คือบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาคrosslinking ด้วยกำมะถัน การทำให้ยางคงรูปด้วยกำมะถันจะทำให้ยางที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี แต่มีความทนทานต่อความร้อนต่ำ ระบบนี้ประกอบด้วย

- กำมะถัน ซึ่งเป็นสารคงรูป

- สารเร่งให้ยางคงรูป (accelerator) เช่น TMTD (tetramethyl thiuram disulphide) MBT (2-mercaptobenzothiazole) และ CBS (n-cyclohexylbenzothiazole-2-sulphenamide) เป็นต้น

- สารกระตุ้นสารเร่ง (activator) ได้แก่ สารอินทรีย์พวกซิงค์ออกไซด์ (ZnO) สารอินทรีย์พวกกรด สเตอริก (steric acid) และสารที่เป็นด่าง นิยมใช้ในสูตรที่มีสารที่เป็นกรดหรือซิลิกา รวมอยู่ด้วย (ได้แก่ สาร DEG (diethylene glycol)

- ระบบเปอร์ออกไซด์ (peroxide system)

ระบบนี้สามารถใช้ในการทำให้อย่างเกือบทุกชนิดคงรูปโดยเฉพาะยางสังเคราะห์ที่ไม่มีหรือมีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลต่ำ ยางที่คงรูปด้วยระบบนี้จะมีสมบัติเชิงกลที่ไม่ดีนัก ต้นทุนสูงกว่าระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน และยางคงรูปที่ได้มักมีกลิ่นของ (acetophenone) ซึ่งเป็นผลพลอยได้ (by-product) จากการทำปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน แต่ว่ายางจะมีความทนทานต่อความร้อนสูง

2.5.2 สารป้องกันยางเสื่อม (antidegradants)

เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของยางทั่วไป โดยเฉพาะยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ จะมีพันธะคู่อยู่ค่อนข้างมาก ดังนั้นยางจึงมีสภาพที่อ่อนแอต่อการถูกปัจจัยต่างๆ เช่น โอโซน แสงแดด ออกซิเจนทำลายให้เสื่อมสภาพการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างของสารในกลุ่มป้องกันยางเสื่อมสภาพ ได้แก่ IPPD (N-Isopropyl-N'-phenyl-p-phenylene diamine) TMQ (2,2,4-Trimethyl-1,2-dihydroquinoline, polymerized) และ BHT (2,6-Di-tert-Butyl (-p-cresol)) เป็นต้น

2.5.3 สารตัวเติม (filler)

สารตัวเติมเป็นสารที่ใช้ผสมกับยางเพื่อช่วยเสริมแรง (reinforcement) ให้ผลิตภัณฑ์ยางหรือเพื่อช่วยลดต้นทุนการผลิต สารตัวเติมที่ช่วยเสริมแรงจะเรียกว่า สารเสริมแรง (reinforcing filler) ซึ่งจะเป็นสารที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก มีพื้นที่ผิวสูง (ได้แก่ ผงเขม่าดำ (carbon black) เกรดต่างๆ และผงเขม่าขาวหรือ ซิลิกา เป็นต้น ส่วนสารตัวเติมที่ไม่ช่วยเสริมแรง (inert filler or non-reinforcing filler) แต่นิยมใช้เพื่อลดต้นทุนการผลิต ได้แก่ ดินขาว (clay) แป้ง แคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น

2.5.4 สารช่วยในกระบวนการผลิต (processing aids)

สารกลุ่มนี้ทำหน้าที่เฉพาะตัวต่างๆ กัน เช่น สารที่ช่วยให้ยางนํ้าในระหว่างการบดผสม ได้แก่ พวกน้ำมัน (oils) และสารเคมีย่อยยาง (peptizer) เช่น pepton22 สารบางตัวช่วยควบคุมไม่ให้ยางมีความหยุ่นตัว (nerve) สูงมากเกินไปเพราะจะทำให้สารเคมีที่เป็นผงเข้าเนื้อยางได้ยากในระหว่างการบดผสม เพราะยางจะพันลูกกลิ้งยาก สารพวกนี้ ได้แก่ factice เป็นต้น

2.5.5 สารกลุ่มอื่นๆ (miscellaneous ingredients)

สารกลุ่มนี้โดยทั่วไปแล้วไม่จำเป็นต้องใช้ในการออกสูตร แต่ในบางกรณีที่ต้องการให้ยางมีสมบัติพิเศษบางประการจำเป็นต้องมีการเติมสารเคมีบางตัวเข้าช่วย

- สารหน่วง (retarder) จะใช้เมื่อต้องการชะลอไม่ให้ยางที่กำลังบดผสมคงรูปเสียก่อน (scorch) หรือที่เรียกว่า ยางตาย ตัวอย่างของสารหน่วงได้แก่ benzoic acid หรือ salicylic acid เป็นต้น

- สารทำให้เกิดฟอง (blowing agent) ใช้สำหรับการทำให้ยางฟูในการทำยางพองน้ำ ตัวอย่างของสารกลุ่มนี้ได้แก่ สาร sodium bicarbonate หรือ dinitrosopentamethylene tetramine เป็นต้น

- สารทำให้เกิดสี (pigments) อาจเป็นสีอนินทรีย์ เช่น cadmium sulphide (ให้สีแดงเข้ม-ส้มและเหลือง) chromium oxide (ให้สีเขียวเข้ม) และ titanium dioxide (ให้ยางมีสีขาว มีความสว่าง หรือช่วยให้ยางสีต่างๆ มีสีที่สดขึ้น (ส่วนสีที่เป็นสีอินทรีย์ จะให้สีสดทนต่อความร้อนได้ดีกว่าสีอนินทรีย์

การออกสูตรยางจะกำหนดปริมาณสารต่างๆ ในสัดส่วนต่อยาง 100 ส่วน) โดยน้ำหนัก (และเรียกเป็น phr หรือ pphr (part per hundred of rubber) ตารางที่ 3 แสดงหน้าที่และปริมาณการใช้สารต่างๆ

ตารางที่ 2.2 แสดงหน้าที่และปริมาณการใช้สารต่างๆ

สมบัติที่ต้องการ	สารเคมี	ปริมาณการใช้ (phr)
สมบัติความยืดหยุ่น (elasticity)	สารทำให้ยางคงรูป (vulcanizing crosslink agents)	1-3.5
	สารกระตุ้น (activator)	1-5
	สารเร่ง (accelerator)	0.5-2.5
ป้องกันยางเสื่อมอันเนื่องมาจาก O ₂ , O ₃	สารป้องกันยางเสื่อม เช่น 6 PPD, Flectol H, Antioxidant 2246, Wingstay L, Vulkanox MB	1-4
เสริมความแข็งแรงให้ยาง	สารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคเล็ก เช่น เขม่าดำ (Carbon black) เขม่าขาว (Silica)	10-100
ลดความหนืด (viscosity) ของยางดิบ	บดให้นิ่ม (Mastication) และ/หรือเติมสารย่อยยาง (Chemical peptizer)	0.1-1.5
เชื่อมติดผ้า โลหะ กระเบื้อง	สารพวกเป็นตัวเชื่อม (bonding agent) และต้องทำความสะอาด หรือมีวิธีการพิเศษ treat ผิวของสิ่งที่ต้องการเชื่อม	2-10
สี	สีอนินทรีย์ หรือสีอินทรีย์	ตามความเข้มที่ต้องการ
ลดต้นทุน	สารตัวเติมชนิดราคาถูก ยางรีเคลม เศษยางคงรูป	10-200 , 10-100, 5-50

ฟองพูน)cellular structure)	สารฟองอินทรีย์สารหรือนินทรีย์สาร	0.5-20 5-30
ลดอันตรายจากการติดไฟ (self extinguishing)	สารลดการติดไฟ เช่น พวกล phosphates, antimony salts,halogenated organics, borates (antimonytrioxide and chlorinated wax – มักใช้กับยางธรรมชาติ)	1-20
ฉนวนกันไฟฟ้า	สารพวกไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า เช่น สารตัวเติม พวกรั่วธาตุ น้ำมัน ไฮโดรคาร์บอน	5-50
กันไฟฟ้าสถิตย์	สารกันไฟฟ้าสถิตย์ เช่น พวกลเอสเทอร์ที่มีขั้ว เชม่าดำ	0.1-2.0, 1-5
ตัวนำไฟฟ้า	สารตัวนำไฟฟ้า เช่น เชม่าดำ อนุภาคโลหะและเกลือโลหะ	10-50
ป้องกันแบคทีเรีย	สารป้องกันเชื้อรา เช่น สารพวก Chlorinated phenol	0.5-5.0

ตารางที่ 2.3 แสดงส่วนประกอบและปริมาณของยางและสารเคมีต่างๆ ในสูตรผลิตภัณฑ์ยางพื้นฐาน

ส่วนประกอบ	ปริมาณ)phr)
ยาง)ชนิดเดียว หรือ 2 ชนิดขึ้นไป (rubber)	100
กำมะถัน)sulphur)	2.5-3.5
สารกระตุ้น)activator)	1-5
สารเร่งให้ยางคงรูป)ชนิดเดียว หรือ 2 ชนิดขึ้นไป (accelerator)	0.5-2.0
สารตัวเติม)filler)	(ตามที่ต้องการ)
สารทำให้ยางนิ่ม)plasticizer)	5-10
สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ)anti-degradant)	1-2

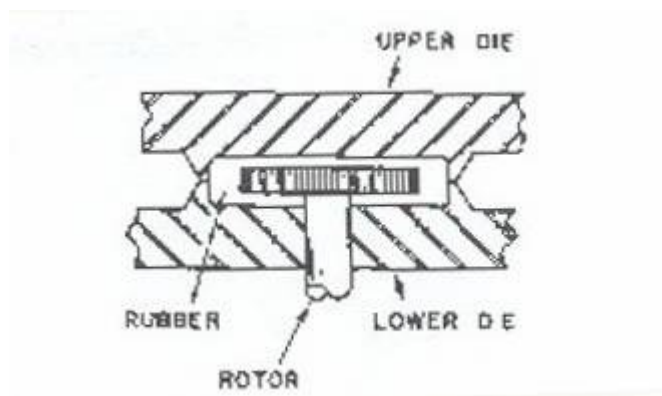
สัดส่วนการใช้สารต่างๆ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดและประสิทธิภาพของสารเคมี กระบวนการที่จะขึ้นรูปคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการออกสูตรยางที่ถูกต้องเหมาะสมนั้นจำเป็นต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจในสมบัติ หน้าที่และปริมาณของทั้งยางและสารเคมีต่างๆ เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตาม

ตามสูตรยางที่ดีเพียงอย่างเดียวไม่ได้หมายความว่า จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีเสมอไป เพราะยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่ต้องศึกษาและทำความเข้าใจอีกหลายประการ [10]

2.5.6 การบดยางให้นิ่ม (mastication)

เมื่อได้สูตรที่เหมาะสมแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ การบดผสมสารเคมีต่างๆ ให้เข้ากับเนื้อยาง สมบัติของยางที่สำคัญสำหรับการบดผสมคือความหนืด (viscosity) ถ้ายางมีความหนืดสูงจะทำให้การบดผสมเป็นไปได้ยากเนื่องจากสารเคมีจะเข้าผสมกับยางได้ยากและจะใช้พลังงานในการบดผสมสูง ด้วยเหตุนี้ก่อนการใส่สารเคมีลงไปจึงต้องมีการลดความหนืดโดยการบดยางให้นิ่ม (mastication) ซึ่งภาษาชาวบ้านเรียกว่า การตียาง ในบางกรณีอาจมีการเติมสารช่วยย่อยโมเลกุลหรือ peptizer เพื่อให้ยางนิ่มเร็วขึ้น โดยทั่วไปการบดยางจะกระทำในเครื่องบดซึ่งอาจใช้เครื่องบดระบบปิด (internal mixer) หรือเครื่องบดระบบเปิด (two-roll mill) ขั้นตอนนี้ยางถูกทำให้นิ่มโดยโมเลกุลของยางถูกทำให้ฉีกขาด เพราะแรงเฉือนจากเครื่องบดและจะใช้ระยะเวลาในการบดนานเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับความหนืดเริ่มต้นของยาง ถ้ายางมีความหนืดสูงมาก) โดยเฉพาะยางธรรมชาติ (ก็ต้องบดนาน อุณหภูมิของการบดควรจะต่ำกว่า 100 °C เพื่อป้องกันยางเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน

ค่าความหนืดของยางสามารถวัดค่าได้โดยใช้เครื่อง Mooney viscometer ใช้หลักการหมุน (rotate) ยางด้วยแกน rotor ของเครื่องภายใต้การควบคุมอุณหภูมิของขึ้นทดสอบ มักวัดความหนืดในรูปของ Mooney viscosity ML (1+4) 100 °C (M = Mooney, L = Large rotor, 1 = preheat time (min), 4 = ระยะเวลาการหมุนของ rotor ก่อนทำการอ่านค่าความหนืดและวัดที่ 100 °C)



รูปที่ 2-5 แสดงลักษณะของเครื่อง Mooney viscometer

2.5.7 การทดสอบยาง

การทดสอบที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมยางแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่ การทดสอบคุณภาพยางดิบ การทดสอบสมบัติในกระบวนการผลิต (processibility) และการทดสอบสมบัติของยางที่คงรูปแล้ว (vulcanize properties)

- การทดสอบคุณภาพของยางดิบ

จะทดสอบสมบัติทางกายภาพของยางส่วนใหญ่ถ้าเป็นยางธรรมชาติจะมีการทดสอบสิ่งเจือปน ความชื้น และสารประกอบบางอย่าง เช่น ไนโตรเจน พวงเกล้า ความอ่อนตัวและดัชนีความอ่อนตัวของยาง (plasticity and plasticity retention index) ค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) ส่วนยางสังเคราะห์มักทดสอบค่าความหนืดมูนนี่

- การทดสอบสมบัติในกระบวนการผลิต

สมบัติที่จำเป็น ได้แก่ ความนิ่ม-แข็งของยาง ซึ่งแสดงในรูปของค่าความหนืดมูนนี่ กรณีที่ต้องการศึกษาการไหล (rheology) ก็ต้องใช้เครื่อง capillary rheometer ในการศึกษาลักษณะการคงรูปของยางก็จะวัดโดยใช้เครื่อง oscillating disc rheology หรือ moving die rheology เป็นต้น

- การทดสอบสมบัติของยางคงรูป

สมบัติพื้นฐานของยางคงรูปที่ต้องทดสอบ ได้แก่ สมบัติการดึงยาง (tensile properties) เช่น ค่าความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ค่าโมดูลัส (modulus) และค่าความยืดสูงสุด (elongation at break) สมบัติการทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength) ความแข็ง (hardness) การหักงอ (flex cracking) การล้าตัว (fatigue) การต้านทานโอโซน (ozone resistance) การกระเด็น (rebound resilience) ความทนทานต่อการขัดสี (abrasion resistance) การยุบตัว (compression set) การเกิดความร้อนสะสม (heat build-up) เป็นต้น [11]

2.6 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเป็นฉนวนไฟฟ้า

วัสดุฉนวนไฟฟ้าซึ่งทำหน้าที่ป้องกันกระแสไฟฟ้าไม่ให้ไหลผ่านจากตัวหนึ่งไปยังอีกตัวหนึ่ง ฉนวนไฟฟ้าที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในปัจจุบันส่วนใหญ่จะผลิตมาจากวัสดุพอลิเมอร์ เนื่องจากวัสดุพอลิเมอร์ มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดี และนอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติอื่นอีกที่เหมาะสม เช่น การขึ้นรูปง่าย ทนต่อการกัดกร่อนสูง และมีน้ำหนักเบา ฉนวนพอลิเมอร์ทั่วไปมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าต่ำและมีความยืดหยุ่นสูงเหมาะสำหรับวัสดุหุ้มสายไฟ อย่างไรก็ตาม ไม่ใช่พอลิเมอร์ทุกชนิดที่จะใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าได้อย่างสมบูรณ์อุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้าทั่วไป การไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านฉนวนเพียงเล็กน้อย สามารถยอมรับได้แต่ในเครื่องมือวัดทางอิเล็กทรอนิกส์บางอย่าง ที่ต้องการความเที่ยงตรงมากๆ การไหลของกระแสไฟฟ้าเพียงน้อยนิดผ่านฉนวนที่มีคุณภาพต่ำ ก็อาจจะทำให้เครื่องนั้นเสียหรือลดความแม่นยำลงได้ ดังนั้น การทดสอบเพื่อให้ทราบว่าวัสดุตัวไหนมีค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) หรือมีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ดีมาก/น้อย แตกต่างกันอย่างไร จึงมีความจำเป็นเพื่อที่เราจะได้เลือกใช้วัสดุให้เหมาะสมกับงาน

2.6.1 สภาพการนำไฟฟ้าเชิงปริมาตร

สภาพการนำไฟฟ้าของชิ้นงานเป็นไปตามสมการ

$$\sigma = \frac{LI}{AV} \quad (2.1)$$

σ หมายถึง สภาพการนำไฟฟ้า ($\Omega \cdot \text{cm}$)⁻¹, V หมายถึง ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์, V)

I หมายถึง กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์, A), L หมายถึง ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (ซม. (และ

A หมายถึง พื้นที่หน้าตัดขั้วไฟฟ้า) ซม.².

2.6.2 สภาพการนำไฟฟ้าเชิงพื้นผิว

$$\sigma = \frac{LI}{DV} \quad (2.2)$$

σ หมายถึง สภาพการนำไฟฟ้า (Ω)⁻¹, V หมายถึง ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์, V)

I หมายถึง กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์, A), L หมายถึง ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (ซม. (และ

D หมายถึง ความยาวขั้วไฟฟ้า) ซม. (

โดยทั่วไปสภาพความต้านทานไฟฟ้า แบ่งเป็น 4 ประเภท คือ

(1) **ความต้านทานเชิงปริมาตร (Volume Resistance)** คือ อัตราส่วนระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้า (Voltage) ระหว่าง 2 ขั้วไฟฟ้า ที่อยู่บนพื้นผิวตรงกันข้ามกันของชิ้นทดสอบกับกระแสไฟฟ้า (Current) ที่วัดได้ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ในเวลาจำเพาะค่าหนึ่งโดยไม่รวมค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าบริเวณผิวของชิ้นทดสอบ และไม่นำค่าของผลอันเนื่องมาจาก Polarization Effect ที่อาจเกิดขึ้นได้ที่ขั้วไฟฟ้ามาคิดคำนวณ

(2) **สภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร (Volume Resistivity)** คือ ค่าที่คำนวณจากอัตราส่วนของค่าการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าเกรเดียน (Voltage Gradient) ซึ่งคำนวณจากค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้วัดหารด้วยค่าความหนาของชิ้นทดสอบ (กับค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current Density) ที่ใช้อย่างไรก็ตามค่าการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าเกรเดียนจริง (True Voltage Gradient) นั้นต่างจากค่าที่ใช้วัด เนื่องจากมีผลของการสัมผัสกันระหว่างขั้วไฟฟ้ากับชิ้นทดสอบมาเกี่ยวข้องด้วย

(3) **ความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว (Surface Resistance)** คือ อัตราส่วนโดยตรงระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการวัดของขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว บนผิวของชิ้นทดสอบกับค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 นั้น หลังจากเวลาที่ใช้วัดค่าหนึ่ง โดยไม่สนใจผลของการเกิด Polarization ที่ขั้วไฟฟ้า

(4) สภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว (Surface Resistivity) คือค่า Surface Resistance ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ หรือเป็นอัตราส่วนระหว่างค่า Voltage Gradient และค่ากระแสต่อหนึ่งหน่วยความกว้างของกระแส (Current Path)

ทั้งค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า (Volume Resistivity) และสภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว (Surface Resistivity) อาจจะขึ้นอย่างมากกับปัจจัยของระยะเวลาของศักย์ไฟฟ้าที่ใช้วัดอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่สำคัญความชื้นที่อยู่ในชั้นทดสอบ นอกจากนี้ยังขึ้นกับรูปทรงทางเรขาคณิตของขั้วไฟฟ้าที่ใช้ และระดับความแรงของศักย์ไฟฟ้าที่ใช้วัดด้วย

2.6.3 หน่วยการวัดค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า

ในระบบหน่วยพื้นฐานของ SI ค่าสภาพของค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร จะมีค่าเป็น Ohm-Meter ($\Omega \cdot m$) ซึ่งเป็นการลดหน่วยสมการมาจาก $\Omega m^2 / m$ โดยทั่วไปมักจะใช้หน่วยเป็น $\Omega \cdot cm$ มากกว่า โดยที่วัสดุฉนวนโดยทั่วไปจะมีค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร โดยประมาณเป็น $10^{18} \Omega \cdot cm$ ซึ่งจะจัดอยู่ในกลุ่มพลาสติกประเภทไม่มีขั้ว (Non-polar Plastic) ตัวอย่างเช่น PTFE, PE, PS และอื่นๆ ซึ่งในการวัดทดสอบค่า สภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร ในตัวอย่างพลาสติกพวกนี้ค่อนข้างยาก เนื่องจากมีค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรที่สูงมากๆ

สำหรับหน่วย SI ของสภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวจะมีหน่วยเป็น Ω เนื่องจากเป็นการลดค่าสมการหน่วยมาจาก $\Omega m / m$ ซึ่งในบางครั้งอาจจะหมายถึงค่า “ Ω per square”

เนื่องจากมีความแตกต่างกันของค่าความต้านทานที่วัดในแต่ละครั้ง ในสภาวะการทดสอบที่แตกต่างกัน ความสม่ำเสมอของรูปทรงของชิ้นทดสอบ ถึงแม้ว่าจะตัดมาจากแผ่นตัดอย่างเดียวกันก็ตาม ดังนั้น ค่าที่วัดได้จากชิ้นทดสอบแต่ละชิ้นยากที่จะทำให้ค่าใกล้เคียงกันในระดับน้อยกว่า 10% โดยส่วนมากจะได้ค่าที่แตกต่างกันค่อนข้างมาก ทำให้มีผู้ทดสอบบางรายมักจะอ้างอิงค่าสภาพความต้านทาน ในรูปของค่า Logarithm ซึ่งเหมาะสมสำหรับการนำเสนอผลการทดสอบในรูปของตารางหรือรูปกราฟ อย่างไรก็ตามในอุตสาหกรรมในการพิจารณาว่าวัสดุสองชนิดจะมีค่าสภาพความต้านทานต่างกัน)ในการใช้เป็นฉนวนไฟฟ้า (หรือไม่อย่างไร ก็ต่อเมื่อมีค่าสภาพความต้านทานที่วัดได้ต่างกันอย่างน้อยครึ่งหนึ่ง 50)%

2.6.4 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานของฉนวนไฟฟ้า

(1 ความแตกต่างของวัสดุ (Inherent Variation in Materials))

ในการวัดค่าความต้านทานของวัสดุต่างๆ ซ้ำกัน ที่สภาวะเดียวกัน มักจะพบว่ามีความแปรผันของค่าที่วัดได้มากกว่า 10% อันเนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอของชิ้นทดสอบเอง วิธีการที่จะทำให้ค่าการแปรผันของค่าที่วัดได้ลดลงอาจจะกระทำได้โดยพยายามเตรียมชิ้นทดสอบให้มีความสม่ำเสมอกันมากที่สุด ไม่ว่าจะเป็นขนาด ความหนา วิธีการปรับสภาพชิ้นทดสอบ เป็นต้น

(2 อุณหภูมิ)

ค่าความต้านทานของฉนวนไฟฟ้าจะเปลี่ยนตามอุณหภูมิ โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิกับค่าความต้านทานเป็นไปตามสมการที่ 2.3 ซึ่งได้มาจากสมการของ Arrhenius

$$R(t) = B e^{\frac{m}{t}} \quad (2.3)$$

เมื่อ R คือ ค่าความต้านทานของวัสดุฉนวนไฟฟ้าหรือของระบบ B คือ ค่าคงที่ Proportion Constant, m คือ ค่า Activation Constant และ T คือ ค่าอุณหภูมิ (K)

ค่าของ m เป็นค่าเฉพาะ สำหรับวัสดุแต่ละชนิด หากได้ความชันของกราฟเส้นตรงที่ได้จากพล็อตระหว่างค่า Natural Logarithm ของค่าความต้านทานกับส่วนกลับของค่าอุณหภูมิสมบูรณ์ดังสมการ 2.4

$$\ln R = \ln B = m \frac{1}{T} \quad (2.4)$$

การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานกับอุณหภูมิจาก T และ T สามารถคำนวณได้โดยอาศัยผลต่างของสมการที่ 2.5 ได้ดังนี้

$$\ln \left[\frac{R_2}{R_1} \right] = \left[\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right] m = \left[\frac{\Delta T}{T_1 T_2} \right] m \quad (2.5)$$

ซึ่งสมการ 2.5 จะใช้ได้ในช่วงอุณหภูมิที่วัสดุตัวอย่างยังไม่เกิดการเปลี่ยนสถานะ

(3 อุณหภูมิ และความชื้น (Temperature and Humidity))

สำหรับวัสดุที่เป็นฉนวนที่เป็นของแข็งไดอิเล็กตริก (Dielectric Materials) ค่าความต้านทานจะลดลง เมื่ออุณหภูมิและความสัมพันธ์ เพิ่มขึ้น 7-5 โดยเฉพาะค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร จะไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมาก ส่วนค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว จะไวต่อการเปลี่ยนแปลง ค่าความชื้นสัมพันธ์ โดยการเปลี่ยนแปลงทั้ง 2 กรณี จะเป็นการเปลี่ยนแปลงแบบ Exponential สำหรับวัสดุบางประเภท ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก 25 องศาเซลเซียส ไปเป็น 100 องศาเซลเซียส ในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นสัมพันธ์ด้วย (ค่าความต้านทานอาจเปลี่ยนแปลงไปโดยแฟกเตอร์ 100,000 เท่า โดยปกติถ้ามีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะอุณหภูมิ จะทำค่าตัวเลขแฟกเตอร์น้อยกว่านี้ แต่ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นสัมพันธ์เปลี่ยนจาก 25% ไปเป็น 90% ค่าความต้านทานจะเพิ่มขึ้นด้วยแฟกเตอร์ของ 1,000,000 หรือมากกว่า โดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นสัมพันธ์จะมีผลเฉพาะที่ผิวของชิ้นทดสอบเท่านั้น) ผลต่อความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว (เนื่องจากกระบวนการที่ความชื้นจะถูกดูดซึมเข้าไปในเนื้อในของชิ้นทดสอบนั้น เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นได้ช้ามากจึงทำให้มีผลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรค่อนข้างน้อย

(4 เวลาในการให้กระแส (Time of Electrification))

การวัดค่าความต้านทานของวัสดุที่เป็น Dielectric มีพื้นฐานไม่ต่างจากการวัดค่าความต้านทานตัวนำไฟฟ้า (Conductor) ยกเว้น จะต้องมีการเพิ่มตัวแปรเสริม (Parameter) บางตัวลงไป เช่น

ระยะเวลาที่ให้กระแสไหลลงขึ้นทดสอบ (Time of Electrification) หรือค่าความต่างศักย์เกรเดียน (Voltage Gradient) เป็นต้น สำหรับการวัดค่าความต้านทานของวัสดุตัวอย่างที่เป็น Dielectric จะต้องมีการขึ้นทดสอบหรือ (Unknown Resistance) เข้ากับตัวต้านทานมาตรฐานเป็นลักษณะอนุกรม โดยที่ตัวต้านทานมาตรฐานที่ต่อเข้าควรมีความต้านทานต่อเพื่อให้ค่าศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมขึ้นทดสอบ มีค่ามากพอเมื่อใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกัน สำหรับการวัดขึ้นทดสอบจะพบค่ากระแสไฟฟ้าที่ผ่านขึ้นทดสอบ อาจจะมีค่าน้อยกว่า ค่าที่สังเกตได้ในนาที่แรกไป 0.01% เหตุผลการลดลงของค่ากระแสไฟฟ้าสำหรับวัสดุที่เป็น Dielectric เนื่องมาจากการดูดซับประจุของวัสดุ)เกิด Polarization ระหว่างระนาบการเปลี่ยนแปลงปริมาตร และอื่นๆ (และการเคลื่อนที่แบบกวาดของไอออน (Sweep of Mobile Ions) เข้าหาขั้วไฟฟ้า โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสที่ไหลบนขึ้นทดสอบกับเวลาเป็น ดังนี้

$$I(t) = At \quad (2.6)$$

เมื่อ A คือค่าคงที่ของกระแสที่ 1 หน่วยเวลาและ m คือค่าคงที่ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 เวลาที่ทำให้ค่ากระแสลดลงไป 1% อาจจะใช้เวลาเพียงไม่กี่วินาทีจนถึงเป็นชั่วโมงขึ้นอยู่กับลักษณะของวัสดุทดสอบ ดังนั้น เพื่อให้การทดสอบสามารถเปรียบเทียบกันได้ จึงต้องมีการระบุระยะเวลาสำหรับการให้กระแสไฟฟ้า (Time of Electrification) สำหรับการวัดค่าความต้านทาน โดยปกติจะใช้ระยะเวลาในการวัดเท่ากับ 1 นาที่

(5 ขนาดความต่างศักย์ (Magnitude of Voltage))

ทั้งค่า ความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร และความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของขึ้นทดสอบอาจมีความไวต่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้วัด Voltage Gradient มีค่าเท่ากันตลอดสำหรับการวัดค่าความต้านทาน ที่ต้องการผลการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าที่ควรใช้อยู่ในช่วงไม่เกิน 5% ของค่าที่กำหนด โดยปกติศักย์ไฟฟ้าที่จะใช้วัดจะเป็น ,5,000 ,2,500 ,1,000 ,500 ,250 ,100 10,000 และ 15,000V แต่ที่นิยมใช้มากที่สุดจะเป็น 100 และ 500V สำหรับค่าศักย์ไฟฟ้าที่สูงกว่านี้จะใช้ศึกษาคุณลักษณะ Voltage-Resistance หรือ Voltage-Conductance ของวัสดุหรือใช้ในกรณีที่ต้องการเพิ่มค่าความไวในการวัด สำหรับขึ้นทดสอบที่มีความชื้นอยู่สูง การใช้ศักย์ไฟฟ้าที่สูงในการวัดจะทำให้เกิดการสลายตัวของโครงสร้างของตัวอย่างทดสอบด้วยไฟฟ้า (Electrolysis) ได้ หรือการเคลื่อนย้ายของหมู่ไอออน (Ions Migration) ซึ่งจะทำให้ค่าความต้านทานที่วัดได้ต่ำกว่าที่เป็นจริง [12]

2.7 การทดสอบการหาอุณหภูมิและเวลาคงรูปของยาง

2.7.1 เครื่องหาอุณหภูมิและเวลาคงรูปของยาง

เมื่อก้าวถึงเครื่องจักรและเครื่องมือที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางจะพบว่ามียูมามากมายหลายชนิด เครื่องจักรและเครื่องมือเหล่านั้นต่างก็มีความสำคัญและมีความจำเป็นในแต่ละขั้นตอนการทำผลิตภัณฑ์ยาง แต่เครื่องจักรและเครื่องมือบางอย่างก็เหมาะในการทำผลิตภัณฑ์ยางบางชนิดเท่านั้น เช่น ผลิตภัณฑ์ท่อยาง ผลิตภัณฑ์ยางรถยนต์ ผลิตภัณฑ์ยางสำหรับยางเชิงวิศวกรรม ก็จะใช้เครื่องจักรและเครื่องมือบาง

ชนิดที่เหมือนกันและแตกต่างกันออกไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของผลิตภัณฑ์นั้น ถึงแม้ว่าโรงงานอุตสาหกรรมบางจะทำผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะแตกต่างกันดังที่กล่าวข้างต้น แต่ทุกโรงงานมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการหาอุณหภูมิและเวลาคงรูปของยาง (Rheometer)

เครื่องหาอุณหภูมิและเวลาคงรูปของยาง เป็นเครื่องที่ใช้หาอุณหภูมิและเวลาที่ใช้สำหรับการทำให้ยางคงรูป (Vulcanize หรือ Cure) มีประโยชน์มากเพราะทำให้โรงงานรู้ถึงเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำผลิตภัณฑ์ ไม่ว่าจะเป็นผลิตภัณฑ์ยางชนิดใดหรือมีสูตรการผลิตก็สูตรก็ตาม ทั้งนี้เพื่อให้ผลิตภัณฑ์นั้นมีคุณภาพดี ใช้งานทนทานและเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด ยิ่งไปกว่านั้นการรู้ถึงเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำผลิตภัณฑ์ยังก่อให้เกิดการประหยัดค่าใช้จ่าย ลดความเสียหายและลดการสูญเสียชิ้นงานให้น้อยที่สุด นอกจากนั้นเครื่องหาอุณหภูมิและเวลาคงรูปของยาง ยังช่วยให้โรงงานสามารถพัฒนาสูตรใหม่ๆ เพื่อพัฒนาคุณภาพผลิตภัณฑ์ให้ดียิ่งขึ้นหรือพัฒนาให้เกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ ได้อีกด้วย [13]

ในปัจจุบันเครื่องหาอุณหภูมิและเวลาคงรูปของยางที่นิยมใช้งานมีอยู่ 2 แบบ คือ

แบบที่ 1 Oscillating Disk Rheometer (ODR) ที่ต้องใช้การหมุนของ Rotor เป็นส่วนสำคัญในการทำงาน

แบบที่ 2 Moving Die Rheometer (MDR) ที่ไม่ต้องใช้ Rotor แต่ใช้การเคลื่อนไหวของ Die เป็นหลักในการทำงาน

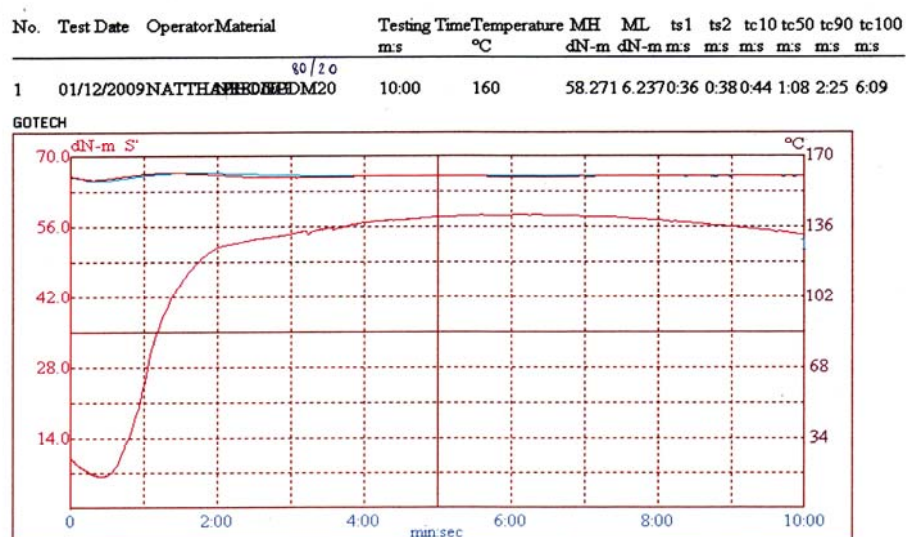




รูปที่ 2-6 แสดงเครื่อง Moving Die Rheometer (MDR)

2.7.2 การอ่าน และการแปลผลจากกราฟ

โดยทั่วไปในการพัฒนาสูตรยางที่จะนำไปทำผลิตภัณฑ์ยางนั้นจะต้องนำยางไปหาอุณหภูมิและเวลาทรงรูปที่เหมาะสมในการผลิตเชิงพาณิชย์ ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้เครื่องหาอุณหภูมิและเวลาทรงรูปของยาง ผลการวิเคราะห์แสดงออกมาในลักษณะเป็นกราฟ ดังรูป



รูปที่ 2-7 กราฟแสดงผลจากเครื่อง MDR

คำอธิบาย

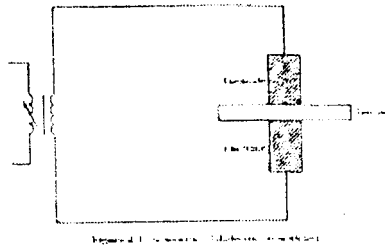
S'	=	กราฟของทอร์กของความยืดหยุ่น (torque of elasticity) กับเวลา
S''	=	กราฟของทอร์กของความหนืด (torque of viscosity) กับเวลา
Temp.	=	อุณหภูมิที่ยางเกิดปฏิกิริยาทางรูป หรือ อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ
ML	=	Lowest modulus of elasticity
	=	ค่าที่ทอร์กความยืดหยุ่นต่ำสุด (minimum torque of elasticity)
MH	=	Highest modulus of elasticity
	=	ค่าที่ทอร์กความยืดหยุ่นสูงสุด (maximum torque of elasticity)
TD@ML	=	Tan delta at ML
	=	อัตราส่วนของ S''/S' ที่ ML
TD@MH	=	อัตราส่วนของ S''/S' ที่ MH
Ts1	=	Scorch time 1
	=	เวลาที่ยางเริ่มเกิดปฏิกิริยาทางรูป จุดที่ 1
Ts2	=	Scorch time 2
	=	เวลาที่ยางเริ่มเกิดปฏิกิริยาทางรูป จุดที่ 2
Tc10	=	เวลาที่ยางเกิดปฏิกิริยาทางรูปไป 10%
Tc50	=	เวลาที่ยางเกิดปฏิกิริยาทางรูปไป 50%
Tc90	=	เวลาที่ยางเกิดปฏิกิริยาทางรูปไป 90%
CRI	=	ดัชนีอัตราเร็วในการคงรูป (Cure rate index) = $100/(tc90-ts1)$

2.8 การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า

2.8.1 การวัดค่าการคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (ASTM D 149, IEC 243-1)

ค่าความแข็งแรงของการเป็นฉนวนไฟฟ้า (Dielectric Strength) คือ การวัดแรงดันไฟฟ้าที่วัสดุฉนวนสามารถทนได้ก่อนเกิดการพังทลาย (Breakdown) แสดงค่าเป็น Volts per unit thickness (V/mm)

การพังทลาย (Breakdown) หมายถึง การที่กระแสไฟฟ้าปริมาณมากๆ ไหลผ่านวัสดุซึ่งถูกทดสอบ อย่างกะทันหัน ซึ่งรู้ได้โดยการใช้เครื่องมือวัด หรือสังเกตด้วยตา



รูปที่ 2-8 แสดงการทดสอบการพังทลาย (Breakdown)

วัสดุที่ใช้ทดสอบจะถูกวางให้อยู่ระหว่างขั้วของเครื่องรูปทรงกระบอก ซึ่งเป็นตัวให้กระแสไฟฟ้า ความหนาอยู่ระหว่าง 0.8 ถึง 3.2 mm. (0.032 ถึง 0.125 inch)

สามารถทดสอบได้ 3วิธี

- .1short time ป้อนแรงดันไประยะเวลาสั้นๆ แรงดันเพิ่มจาก 0จนวัสดุพังทลาย โดยมีอัตราการเพิ่มแรงดันที่แน่นอน
- .2show-rate ป้อนแรงดัน 50% ของแรงดันที่ทำให้พังทลายจนวัสดุพังทลายโดยมีอัตราเพิ่มแรงดันที่แน่นอน
- .3step by step ป้อนแรงดันทีละขั้น แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเริ่มที่ 50% ของแรงดันพังทลายที่ได้ จากการทดสอบโดยวิธีแรก และป้อนแรงดันไฟฟ้าจนวัสดุพังทลายตามเวลาที่กำหนดและบันทึกระดับแรงดัน โดยมีอัตราการเพิ่มแรงดันที่แน่นอนบางครั้งทดสอบในน้ำมันเพื่อป้องกันการ Arc ของ electrode

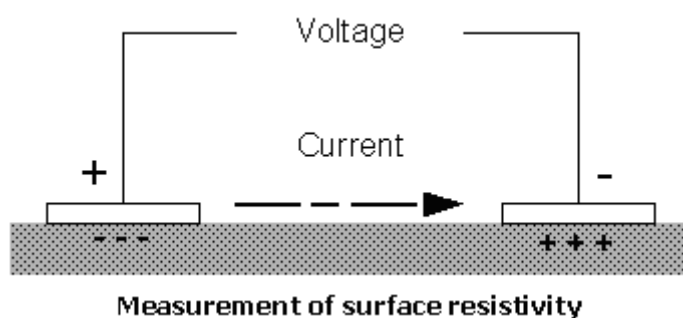
ปัจจัยที่มีผลต่อการทดสอบ

- 1) Specimen Thickness ชิ้นงานที่หนากว่าต้องการแรงดันไฟฟ้าที่สูงกว่าเพื่อที่จะทำลายวัสดุ
- 2) Temperature ค่า Dielectric strength จะลดลงเมื่ออุณหภูมิของวัสดุเพิ่มขึ้น
- 3) Humidity ความชื้นที่เกิดขึ้นที่ผิวของวัสดุทำให้ค่า Dielectric strength ลดลง

- 4) Electrode ลักษณะ electrode geometry, พื้นที่ของ electrode และชนิดของวัสดุที่ใช้ทำ electrode
- 5) Time อัตราของแรงดันที่ให้ และวิธีทดสอบที่ใช้
- 6) Mechanical stress ถ้าวัสดุมีความเค้นตึงทำให้ค่าลดลง
- 7) Processing

2.8.2 การวัดค่าความต้านทานเชิงพื้นผิว (ASTM D 257, IEC 93)

การวัดค่าความต้านทานเชิงพื้นผิว (Surface Resistivity) เป็นค่าการต้านทานการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าที่รั่วไปตามพื้นที่ผิวของวัสดุจนมีหน่วยเป็น Ω/cm^2 และวัสดุที่มีค่า Surface Resistivity ที่สูง จะทำให้การรั่วของกระแสต่ำ



รูปที่ 2-9 แสดงการวัดค่าความต้านทานเชิงพื้นผิว [14]

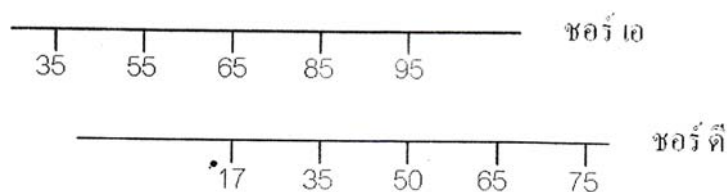
2.9 การทดสอบความแข็ง (Hardness)

ความแข็งเป็นสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของยางซึ่งมักจะใช้ร่วมกับสมบัติแรงดึงในการกำหนดคุณภาพของยาง ความแข็งจะแตกต่างจากความแข็งเกร็ง (stiffness) เพราะความแข็งเป็นการวัดความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างเฉพาะที่บริเวณพื้นผิวเท่านั้น แต่ความแข็งเกร็งเป็นการวัดความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างของยางทั้งก้อน หลักการพื้นฐานของการวัดค่าความแข็งก็คือจะนำหัวกด (indenter) ไปกดลงบนชิ้นทดสอบภายใต้สภาวะที่กำหนด ความลึกของการทะลุทะลวงของหัวกด (depth of penetration) จะสะท้อนถึงค่าความแข็งของยางเพราะยางที่มีความแข็งแรงก็จะมีความลึกของการทะลุทะลวงต่ำ

เครื่องวัดความแข็งที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง มี 2 แบบ คือ เครื่องดูโรมิเตอร์ (durometer) ซึ่งมีหลายแบบ เช่น แบบชอร์ เอ (shore A) และแบบชอร์ ดี (shore D) และเครื่องวัดความแข็งในหน่วย IRD (International Rubber Hardness Degree) เนื่องจากเครื่องดูโรมิเตอร์ส่วนใหญ่ใช้แรงกดจากสปริงจึงมีความแม่นยำต่ำกว่าเครื่องความแข็งในหน่วย IRHD ซึ่งใช้น้ำหนักที่คงที่เป็นตัวกดอย่างไรก็ตาม

เครื่องคูโรมิเตอร์ก็ยังเป็นเครื่องมือใช้กันมากที่สุดในโรงงานอุตสาหกรรมเนื่องจากตัวเครื่องมีราคาก่อนข้างต่ำ

เครื่องคูโรมิเตอร์แบบชอร์ เอ นิยมใช้ความแข็งสำหรับยางทั่วไปที่มีความแข็งต่ำกว่า 90ชอร์ เอ แต่สำหรับยางที่มีความแข็งสูงกว่านี้ก็จะนิยมใช้เครื่องวัดแบบชอร์ ดี รูปที่ 2-22 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งระหว่างชอร์ เอ และ ชอร์ ดี อย่างไรก็ตาม ผู้ทดสอบควรตระหนักไว้เสมอว่าค่า 100ชอร์ เอ เท่าค่า 100ชอร์ ดี ดังนั้น สเกลจาก 100- 95ของชอร์ เอ จึงเปรียบเท่ากับสเกลจาก 100-50ของชอร์ ดี

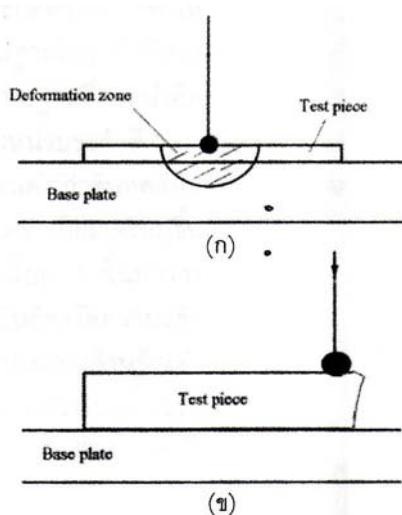


รูปที่ 2-10 แสดงการเปรียบเทียบสเกลความแข็งของ Shore A และ Shore D

รูปที่ 2-23_แสดงตัวอย่างเครื่องวัดความแข็งแบบตั้งโต๊ะพร้อมทั้งลักษณะของหัวกดชนิดต่างๆ ขึ้นทดสอบที่นำมาทดสอบควรมีผิวเรียบทั้งด้านบนและด้านล่างและพื้นที่ทั้งสองต้องขนานกัน ค่าความแข็งที่อ่านได้จะขึ้นอยู่กับขนาดขึ้นทดสอบโดยเฉพาะความหนาเพราะถ้าขึ้นทดสอบบางมากเกินไปก็จะทำให้ผลการวัดที่ได้มีความผิดพลาดสูง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อกดหัวกดลงบนขึ้นทดสอบ ยางที่อยู่ในบริเวณรอบๆจุดที่ถูกกดจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเพื่อตอบสนองต่อแรงกด)เป็นรัศมีรูปครึ่งวงกลมดังแสดงในรูปที่ 2-24(หากขึ้นตัวอย่างบางมากเกินไป การตอบสนองต่อแรงกดก็จะไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะจากยางเท่านั้น แต่จะรวมการตอบสนองที่เกิดจากฐานกดซึ่งเป็นโลหะที่มีความแข็งมากๆเข้าไปด้วย ในกรณีเช่นนี้ยางก็จะมีความต้านทานต่อการทะลุทะลวงของหัวกดสูงกว่าปกติ ส่งผลให้ค่าความแข็งที่วัดได้มีค่าสูงกว่าความเป็นจริง ในทำนองกลับกัน การวัดค่าความแข็ง ณ บริเวณที่ชิดขอบของขึ้นงานทดสอบมากเกินไปก็จะส่งผลทำให้ค่าความแข็งที่วัดได้มีค่าต่ำกว่าความเป็นจริงเพราะยางสามารถยุบตัวหรือเปลี่ยนรูปร่างได้ง่าย ณ บริเวณขอบ



รูปที่ 2-11 แสดงเครื่องวัดความแข็งและลักษณะของหัวกดแบบต่างๆ



รูปที่ 2-12 แสดงลักษณะการตอบสนองต่อแรงกดของชิ้นทดสอบในกรณีที่

- (ก) ชิ้นทดสอบบางมากเกินไป และ
- (ข) ทำการวัดชิดขอบของชิ้นทดสอบมากเกินไป

สำหรับการวัดค่าความแข็งด้วยเครื่องคูโรมิเตอร์ (ในหน่วยชอร์) มาตรฐาน ASTM D 2240 ได้กำหนดไว้ว่าชิ้นงานทดสอบควรมีความหนาอย่างน้อย 6 มิลลิเมตร (ชิ้นงานทดสอบอาจเตรียมจากการนำยางแผ่นเรียบหลายๆแผ่นมาซ้อนกันจนได้ความหนาตามต้องการ อย่างไรก็ตาม การเตรียมชิ้นงานทดสอบแบบนี้จะใช้ได้เฉพาะในกรณีที่แผ่นยางทั้งหมดสามารถแนบกันได้สนิทเท่านั้น (และชิ้นงานทดสอบควรมีขนาดทางด้านข้าง (Lateral dimension) ที่สูงเพียงพอให้ผู้ทดสอบสามารถวัดความแข็งของยางในบริเวณที่ห่างจากขอบอย่างน้อย 12 มิลลิเมตรได้ การกดหัวกดลงบนชิ้นทดสอบควรกระทำด้วยความรวดเร็วและต้องออกแรงกดให้มากพอที่จะทำให้ฐานของหัวกดแนบสนิทกับชิ้นทดสอบแล้ว

จึงอ่านค่าความแข็งภายใน 1 วินาที โดยทั่วไป ผู้ทดสอบควรทำการวัดค่าความแข็งอย่างน้อย 5 จุดบนชิ้นทดสอบและรายงานค่าเฉลี่ยที่วัดได้ อย่างไรก็ดี ผู้ทดสอบควรตระหนักไว้ว่าผลการทดสอบอาจมีการแปรปรวนได้เนื่องจากค่าความแข็งได้จากการวัดด้วยเครื่องมือชนิดนี้ขึ้นอยู่กับค่าหลายอย่าง เช่น ความเร็วของการกดหัวกดลงบนชิ้นทดสอบระยะเวลาการอ่านค่าความแข็ง และแรงที่ใช้กดหัวกด เป็นต้น การเพิ่มความเร็วของการกดหัวกดจะทำให้ความแข็งของยางที่วัดได้จากเครื่องมือค่าสูงขึ้น (เช่นเดียวกันกับการกระโดดลงน้ำจากแผ่นกระดานซึ่งผู้กระโดดจะรู้สึกว่ามีน้ำมีความแข็งมากขึ้นหากกระโดดจากที่สูงเพราะความเร็วของผู้ขณะสัมผัสกับน้ำจะสูงขึ้นตามลำดับความสูง (ส่วนระยะเวลาที่อ่านค่าความแข็งก็จะมีผลอย่างมากต่อค่าที่วัดได้เช่นกันเพราะโดยทั่วไปแล้ว การอ่านค่าทันทีหลังจากที่ฐานของหัวกดแนบสนิทกับชิ้นทดสอบก็อาจทำให้ค่าที่ได้สูงกว่าการอ่านค่าหลังจาก 3-2 วินาที การลดลงของค่าความแข็งตามเวลาจะขึ้นได้เร็วหรือช้าเพียงใดขึ้นอยู่กับสมบัติวิสโคอีลาสติกของยางสำหรับยางที่มีความยืดหยุ่นสูง) มืองค์ประกอบส่วนที่เป็นของแข็งยืดหยุ่นสูง) ค่าความแข็งที่วัดได้ก็จะเปลี่ยนแปลงน้อยมากตามเวลาที่อ่านค่า แต่สำหรับยางที่มีความยืดหยุ่นต่ำก็จะพบว่าค่าความแข็งที่วัดได้จะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วตามเวลาที่อ่านค่า ส่วนปัจจัยสุดท้ายที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งที่อ่านได้คือแรงที่ใช้ในการกดหัวกด ในเชิงทฤษฎีแล้ว มาตรฐานได้ระบุว่าแรงที่ใช้ในการกดควรมีค่าสูงเพียงพอที่จะทำให้ฐานของหัวกดแนบกันสนิทกับชิ้นทดสอบ แต่ในทางปฏิบัติแล้วผู้ทดสอบแต่ละคนก็จะออกแรงกดที่แตกต่างกันทำให้เกิดความแปรปรวนของค่าที่อ่านได้เพราะแรงกดที่สูงก็อาจทำให้ค่าที่อ่านได้สูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น มาตรฐาน ASTM จึงได้เสนอแนะให้นำน้ำหนักมาตรฐานไปวางไว้ที่ตรงกลางของแกนที่หัวกดเพื่อลดความแปรปรวนของผลการทดสอบที่อาจเกิดขึ้นได้ ซึ่งน้ำหนักมาตรฐานที่แนะนำคือ 1 กิโลกรัมสำหรับการทดสอบในหน่วยชอร์ เอ และ 5 กิโลกรัมสำหรับการทดสอบในหน่วยชอร์ ดี

สำหรับการวัดความแข็งในหน่วย IRHD มาตรฐาน ASTM D 1415 ได้กำหนดไว้ว่าชิ้นทดสอบควรมีขนาดด้านข้างไม่น้อยกว่า 20 มิลลิเมตร และมีความหนาไม่ต่ำกว่า 4 มิลลิเมตร (นิยมเตรียมชิ้นทดสอบที่มีความหนา 10-8 มิลลิเมตร) ในบางกรณีผู้ทดสอบอาจนำยางผิวเรียบ 2 ชิ้นมาวางประกบกันเพื่อทำให้ได้ชิ้นทดสอบที่มีความหนาตามต้องการได้ อย่างไรก็ดี หากต้องการวัดค่าความแข็งของชิ้นทดสอบที่บางมากๆ หรือชิ้นงานทดสอบที่มีความหนาสูงกว่า 4 มิลลิเมตร แต่มีขนาดทางด้านข้างต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนดหรือชิ้นทดสอบที่ไม่มีผิวแบบราบ เช่น ยางโอริง ผู้ทดสอบควรใช้เครื่องมือวัดขนาดเล็กที่เรียกว่า micro IRHD instrument แทน โดยทั่วไป การวัดความแข็งในหน่วย IRHD จะทำการวัด 3 หรือ 5 จุดบนชิ้นทดสอบและรายงานค่ากลาง

การวัดค่าความแข็งควรทำที่อุณหภูมิห้อง (ในช่วง $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$) และในการรายงานผลการทดสอบ นั้น ควรมีการระบุขนาดของชิ้นทดสอบ ชนิดของเครื่องมือที่ใช้ อุณหภูมิ และลักษณะของพื้นผิว) เช่น ได้จากการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์หรือได้จากการขัดผิวให้เรียบ (เป็นต้น สำหรับค่าความแข็งที่วัดได้จากชิ้นทดสอบที่ไม่ได้มาตรฐานเรียกว่าค่าความแข็งที่ปรากฏ (apparent hardness) ส่วนค่าความ

แข็งที่วัดได้จากขั้นตอนทดสอบที่ได้มาตรฐานเรียกว่าค่าความแข็งมาตรฐาน (standard hardness) ค่าความแข็งปรากฏของยางชนิดเดียวกันอาจมีค่าต่างกันขึ้นอยู่กับรูปร่างและความหนา ส่วนค่าความแข็งที่วัดได้จากพื้นผิวโค้ง เช่น ยางโอริง จะเป็นค่าเฉพาะที่ใช้กับชิ้นส่วนนั้นๆ เท่านั้น ซึ่งค่าที่ได้อาจจะแตกต่างจากค่าความแข็งมาตรฐานมากถึง 10IRHD หรืออาจมากกว่านั้น [15]

2.10 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA)

การวิเคราะห์ด้วย Thermo – gravimetric ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารเมื่อมีการให้ความร้อนหรือที่อุณหภูมิคงที่เทียบกับอุณหภูมิ ซึ่งมีผลต่อการศึกษาทางด้านเคมีและทางกายภาพที่ปรากฏเนื่องจากการกระทำของอุณหภูมิ TGA สามารถที่จะกำหนดวัสดุที่นำมาใช้ในการผลิต การออกแบบผลิตภัณฑ์ และอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์โดยการทดสอบด้วยเวลาสั้นๆ (<60 min) ในการทดสอบเริ่มจากการตัดชิ้นงานที่จะนำมาทดสอบให้เป็นชิ้นเล็กๆ (10 mg) ใช้วัดได้ตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 1500 °C โดยให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ (10 °C/min) ใน nitrogen atmosphere ในขณะที่น้ำหนักของตัวอย่างชิ้นงานจะแสดงขึ้นมาบนหน้าจอคอมพิวเตอร์อย่างต่อเนื่อง โดย TGA สามารถใช้ในการศึกษาสมบัติต่างๆดังนี้ [16]

1. การสูญเสียของน้ำ สารละลาย หรือพลาสติกไซเซอร์
2. กระบวนการดีคาร์บอซิเลชัน
3. การไพโรไลซิส
4. การออกซิเดชัน
5. การสลายตัว
6. %ฟิลเลอร์หรือเถ้า
7. %ถ่านโค้กจากตัวเร่งปฏิกิริยา
8. %คาร์บอนในน้ำมัน
9. %การระเหยในสารอนินทรีย์



รูปที่ 2-13 แสดงเครื่องทดสอบ (Thermogravimetric Analysis ;TGA)

บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัตถุดิบและสารเคมี

3.1.1 วัสดุและสารเคมี

1) ยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัยนี้เราได้เลือกใช้ยางธรรมชาติที่มีลักษณะเป็นยางแท่ง เกรด STR20

2) ยางเอพริลีนโพรพิลีน (EPDM)

ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท โกลบอล คอนเน็คชั่นส์ จำกัด (มหาชน) (โดยยาง EPDM ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นชนิด Vistalon5601

3) สารเคมีขึ้นรูปยาง

- กำมะถัน (Sulphur)

- Stearic acid

- ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) โดยได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท ยูนิเวนเจอร์ จำกัด

- MBTS โดยได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท ท็อปไฟว์ จำกัด ซึ่งสาร MBTS เป็นสารตัวเร่งสำหรับการ cure โดยใช้กำมะถัน

- DPG โดยได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท ท็อปไฟว์ จำกัด ซึ่งสาร DPG เป็นสารตัวเร่งเสริมสำหรับการ cure โดยใช้กำมะถัน

- TMQ โดยได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท ท็อปไฟว์ จำกัด โดย TMQ เป็นสารแอนติออกซิแดนท์ (Antioxidant)

- 6PPD โดยได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท ท็อปไฟว์ จำกัด โดย 6PPD เป็นสารแอนติโอโซนแนนท์ (Antiozonant)

ในการออกแบบการทดลองเราได้เลือกใช้วัสดุและสารเคมีดังแสดงในตารางที่ 3.2 ซึ่งเป็นสูตรอัตราส่วนสารเคมีที่ใช้ในการขึ้นรูปยางธรรมชาติชนิดแผ่น

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมสารเคมีที่ใช้ในการขึ้นรูปยาง

วัสดุและสารเคมี	สูตรที่ 1 phr	สูตรที่ 2 phr	สูตรที่ 3 phr	สูตรที่ 4 phr	สูตรที่ 5 phr	สูตรที่ 6 phr	สูตรที่ 7 phr
ยางธรรมชาติ (STR20)	100	80	60	50	40	20	-
ยางเอทธิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM)	-	20	40	50	60	80	100
ZnO	5	5	5	5	5	5	5
Stearic	2	2	2	2	2	2	2
TMQ	2	-	-	-	-	-	-
6PPD	2	-	-	-	-	-	-
MBTS	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
DPG	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Sulphur	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5

3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้วิจัย

- เครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ (LAB TECH ENGINEERING COMPANY LTD.)
- เครื่องอัดไฮโดรลิก (LAB TECH ENGINEERING COMPANY LTD.)
- แม่พิมพ์ขึ้นรูปยางขนาด กว้าง×ยาว×สูง เท่ากับ 20×20×0.3 เซนติเมตร
- เครื่องมือหาอุณหภูมิและเวลาทรงรูปของยาง (GOTECH GT – M2000)
- เครื่องมือวัดสภาพความต้านทานเชิงพื้นผิว (Flat metal plates HP 16008A)
- เครื่องมือวัดความทนต่อแรงดันไฟฟ้า (High voltage breakdown tester 100 kV)
- เครื่องมือวัดความแข็ง แบบ Shore A (PACIFIC TRANSDUCER CORP.)
- เครื่องมือวัดสมบัติทางความร้อน

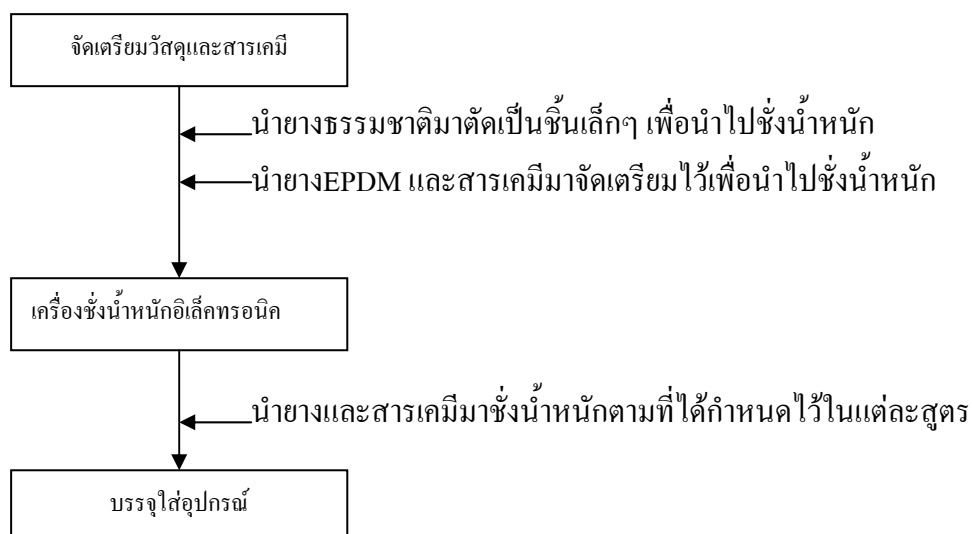
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

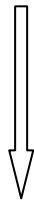
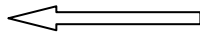
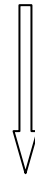
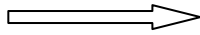
3.2.1 การเตรียมวัสดุและสารเคมี

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนของวัสดุและสารเคมีแต่ละชนิด

วัสดุและสารเคมี	สูตรที่ 1 กรัม	สูตรที่ 2 กรัม	สูตรที่ 3 กรัม	สูตรที่ 4 กรัม	สูตรที่ 5 กรัม	สูตรที่ 6 กรัม	สูตรที่ 7 กรัม
ยางธรรมชาติ (STR20)	250	200	150	125	100	50	-
ยางเอทธิลีนโพรพิลีนไดอิน (EPDM)	-	50	100	125	150	200	250
ZnO	12.5	12.5	12.	12.5	12.5	12.5	12.5
Stearic	5	5	5	5	5	5	5
TMQ	5	-	-	-	-	-	-
6PPD	5	-	-	-	-	-	-
MBTS	3	3	3	3	3	3	3
DPG	2	2	2	2	2	2	2
Sulphur	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25

ขั้นตอนการดำเนินงานที่ 1 : การเตรียมวัสดุและสารเคมี



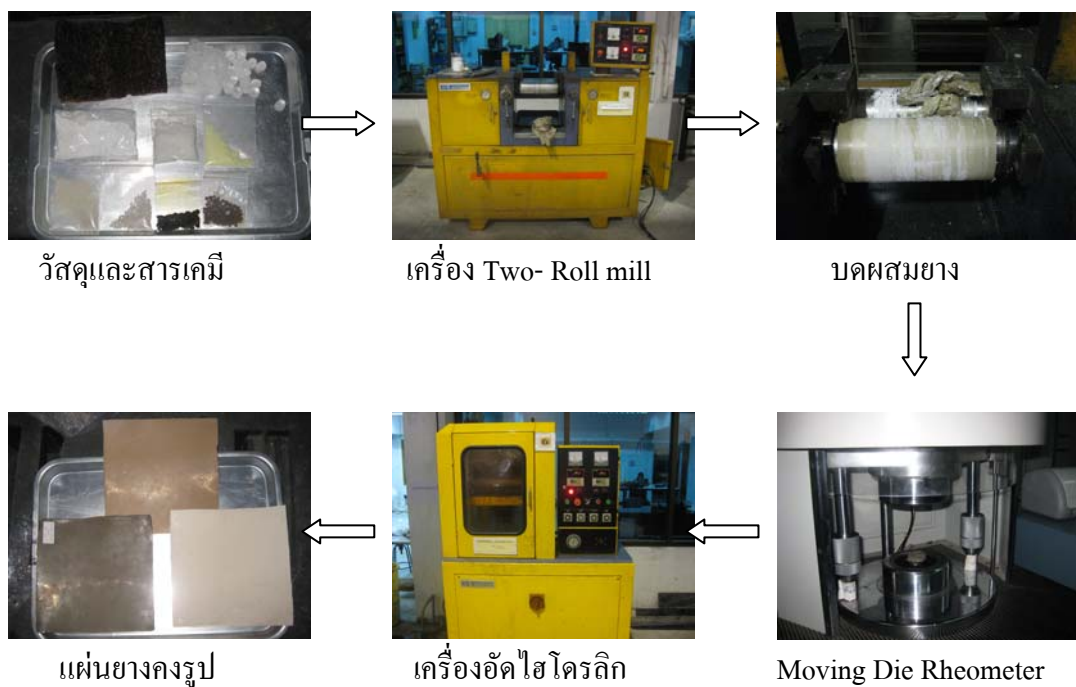


รูปที่ 3-1 แสดงขั้นตอนการเตรียมวัสดุและสารเคมี

3.2.2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

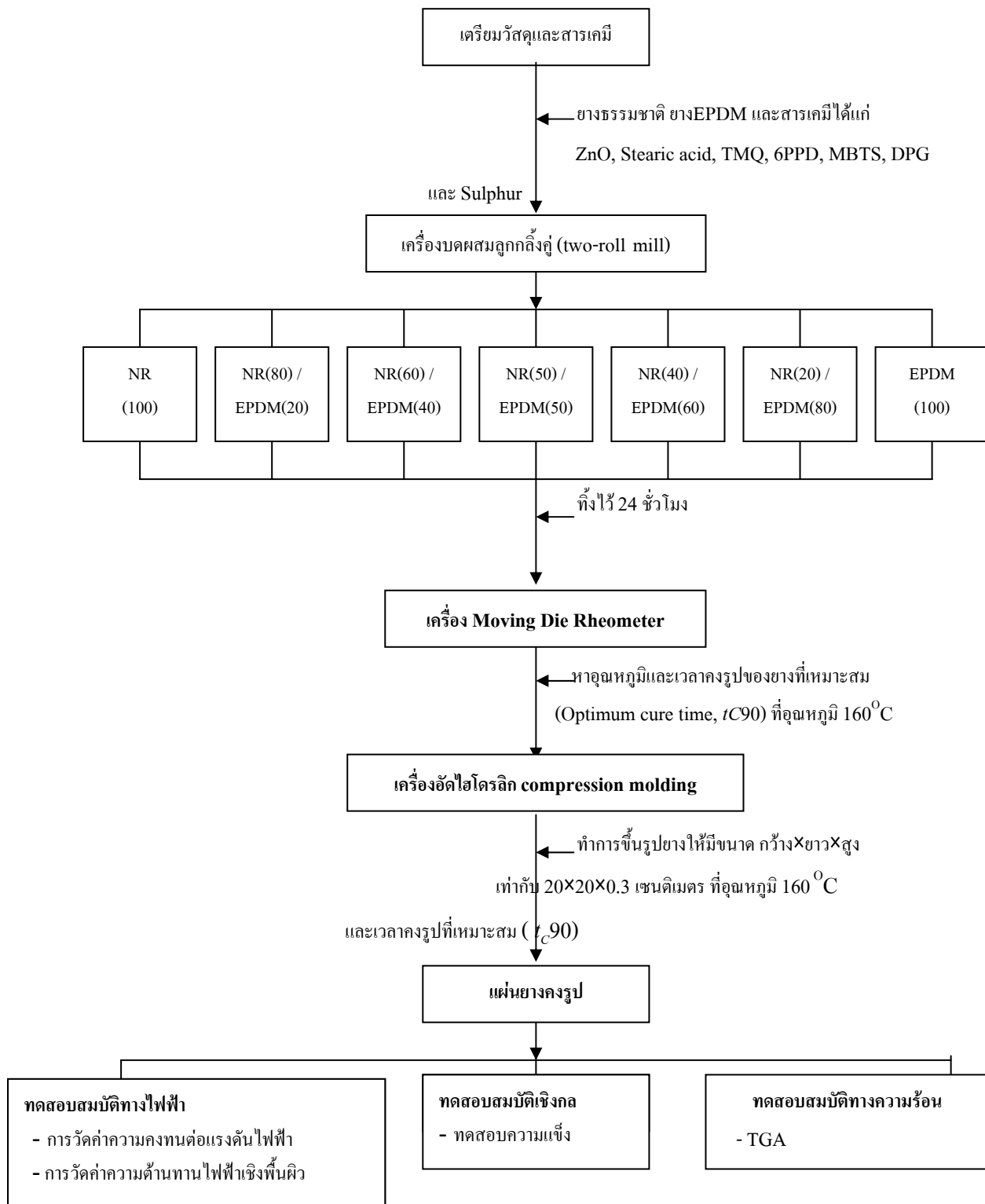
เมื่อทำการเตรียมวัสดุและสารเคมีเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการนำวัสดุและสารเคมีไปทำการบดผสมเข้าด้วยกัน โดยจะทำการบดผสมด้วยเครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ (Two- Roll mill) เป็นเครื่องบดขยงที่ประกอบด้วยลูกกลิ้งสองลูกกลิ้งบีบอัดและบดขยงให้โมเลกุลของยางเกิดการขาด ทำให้ขนาดของโมเลกุลยางที่ใหญ่และยาวลดลง ทำให้ยางนิ่มลง และสามารถแปรรูปยางได้และยังสามารถนำสารเคมีผสมเข้าไปในยางเพื่อให้ได้สมบัติตามที่ต้องการได้ ในการบดผสมยางด้วยเครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ (Two- Roll mill) จะตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 60 °C โดยเริ่มด้วยการผสมยางธรรมชาติและยาง EPDM เมื่อเวลาผ่านไป 7 นาที จึงเติมซิงก์ออกไซด์และกรดสเตียริก เมื่อเวลาผ่านไป 4 นาที จึงใส่สารตัวเร่งปฏิกิริยาและกำมะถันบดผสมให้เข้ากัน โดยเวลารวมทั้งหมดในการผสมอยู่ที่ 23 นาที

เมื่อทำการผสมวัสดุและสารเคมีเข้าด้วยกันขั้นตอนต่อไปก็จะนำยางคอมพาวด์ไปทำการทดสอบเพื่อหาระยะเวลาสกอ์ช (Scorch time, t_{s2}) และระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสม (Optimum cure time, t_{c90}) ด้วยเครื่อง Moving Die Rheometer (MDR TechPRO MD+) ที่อุณหภูมิ 160°C จากนั้นนำยางคอมพาวด์ไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกที่อุณหภูมิ 160°C ตามระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสมของยางในแต่ละสูตรก็จะได้ชิ้นงานออกมาเป็นแผ่นที่มีขนาด กว้าง×ยาว×สูง เท่ากับ 20×20×0.3 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3-2



รูปที่ 3-2 แสดงขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ขั้นตอนการดำเนินงานที่ 2 : การเตรียมชิ้นงานทดสอบ



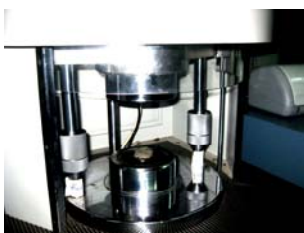
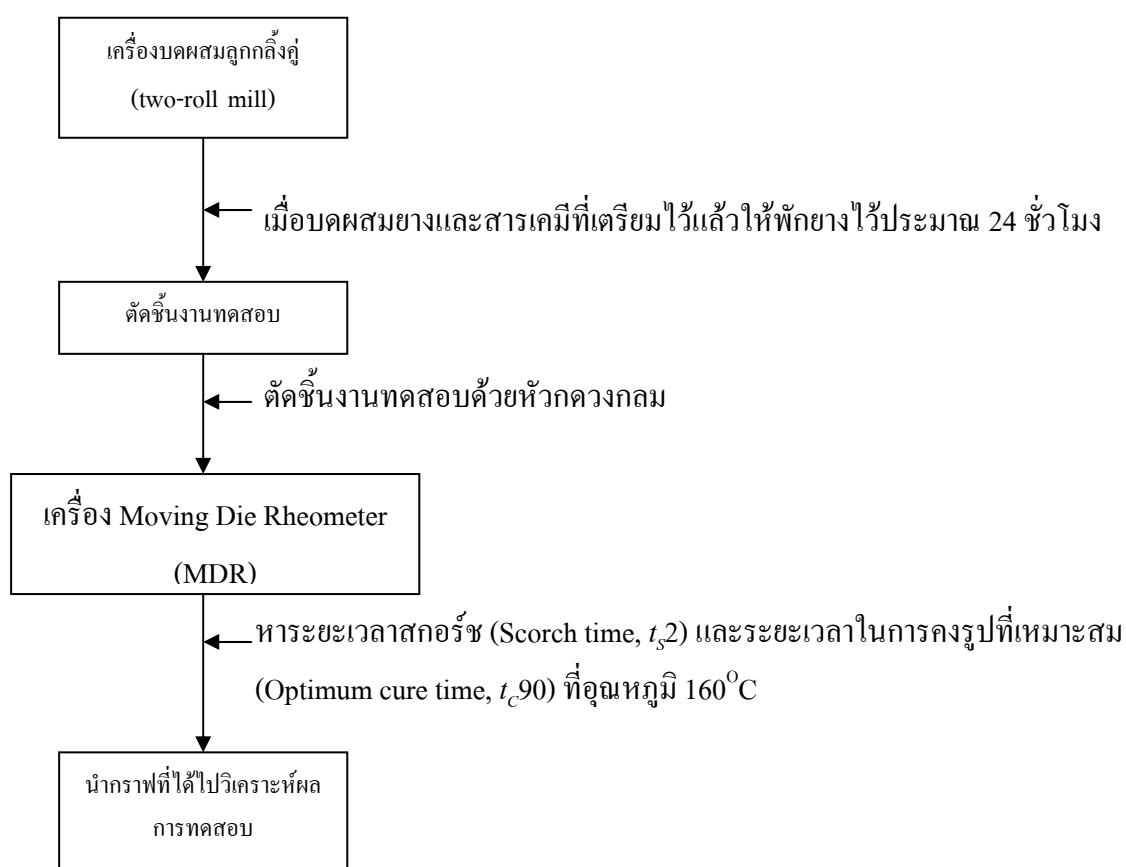
รูปที่ 3-3 แสดงแผนผังการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

3.3 วิธีการทดสอบ

3.3.1 การทดสอบการหาอุณหภูมิและเวลาคงรูปของยาง

เครื่องหาอุณหภูมิและเวลาคงรูปของยาง เป็นเครื่องที่ใช้หาอุณหภูมิและเวลาที่ใช้สำหรับการทำให้ยางคงรูป (Vulcanize หรือ Cure) มีประโยชน์ในการรู้ถึงเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำผลิตภัณฑ์ การรู้ถึงเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำผลิตภัณฑ์ยังก่อให้เกิดการประหยัดค่าใช้จ่าย ลดความเสียหายและลดการสูญเสียชิ้นงานให้น้อยที่สุด

ขั้นตอนการดำเนินงานที่ 3 : การทดสอบการหาอุณหภูมิและเวลาคงรูปของยาง



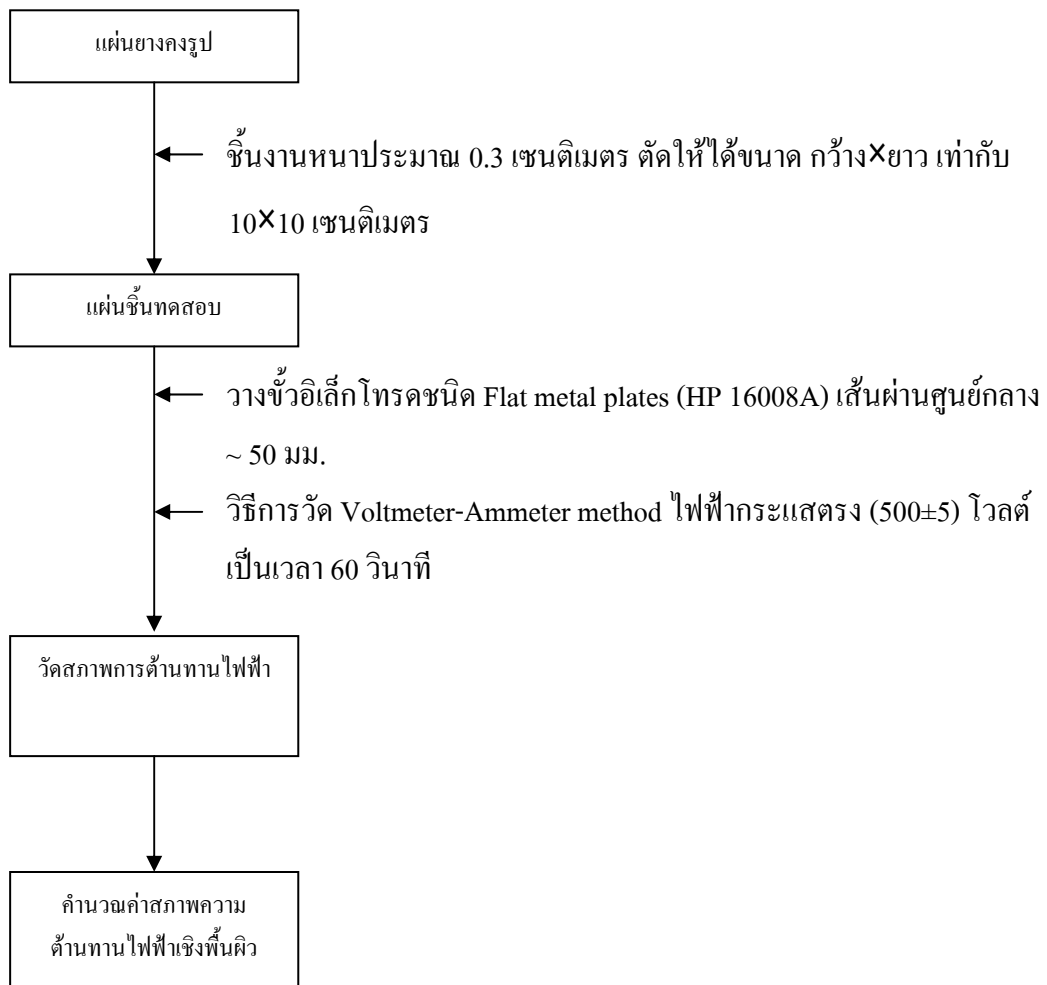
รูปที่ 3-4 แสดงการทดสอบการหาอุณหภูมิและเวลาคงรูปของยางด้วยเครื่อง Moving Die Rheometer

3.3.2 การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า

1) การวัดค่าความต้านทานเชิงพื้นผิว (Surface Resistivity Measurement)

ชิ้นงานก่อนทำการวัดค่าความต้านทานเชิงพื้นผิว ให้ใช้ชิ้นงานที่มีความหนา 0.3 เซนติเมตร ทำการตัดให้มีขนาด กว้าง×ยาว เท่ากับ 10×10 เซนติเมตร

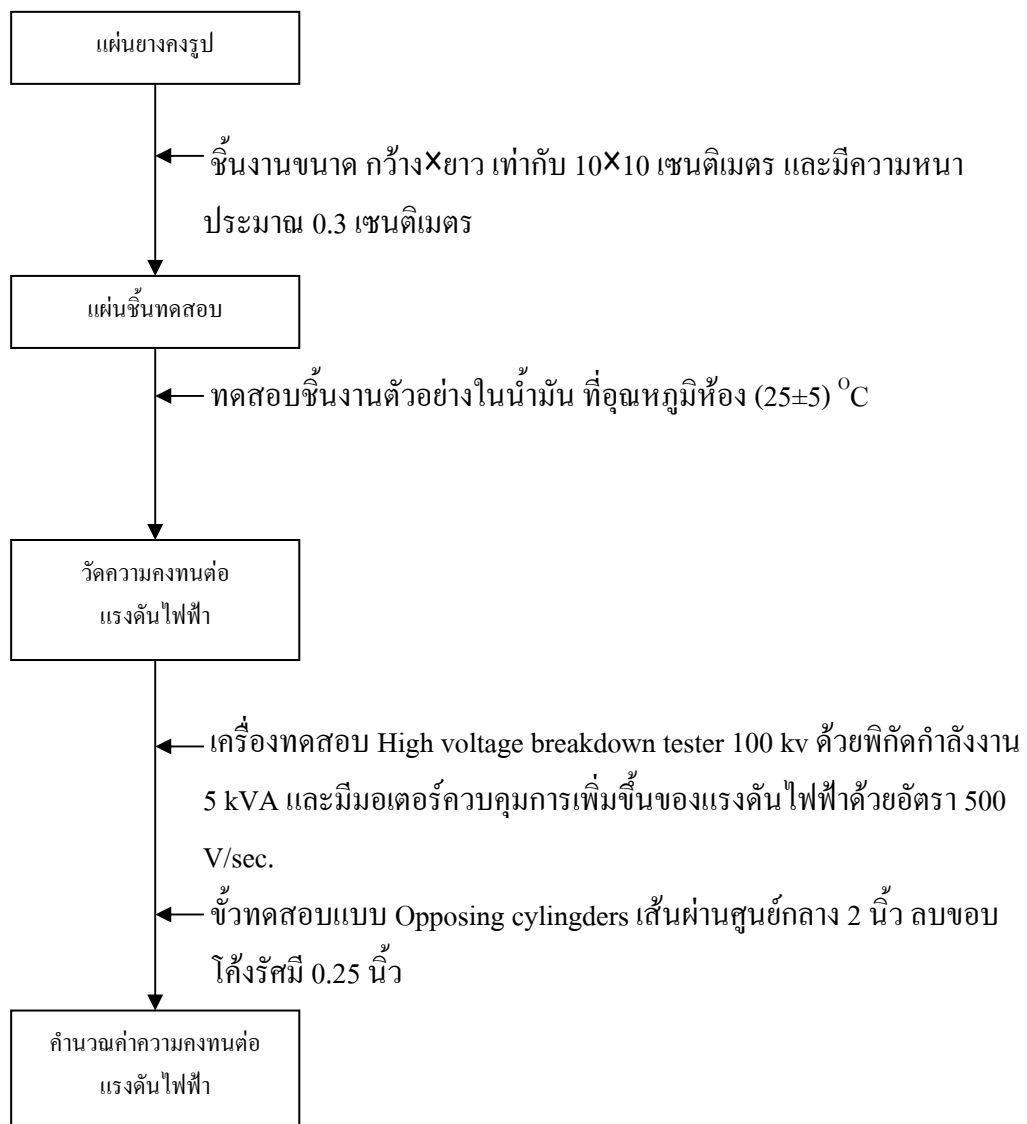
ขั้นตอนการดำเนินงานที่ 4 : การวัดค่าความต้านทานเชิงพื้นผิว



2) การวัดค่าความทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength Measurement)

ชิ้นงานก่อนทำการวัดค่าความทนต่อแรงดันไฟฟ้า ใช้ชิ้นงานขนาด กว้าง×ยาว เท่ากับ 10×10 เซนติเมตร และมีความหนาประมาณ 0.3 เซนติเมตร จากนั้นวางชิ้นงานตัวอย่างบนชุดอุปกรณ์ทดสอบ โดยให้แรงดันไฟฟ้าไปเรื่อยๆ จนชิ้นงานไม่สามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้และทำให้ชิ้นงานทะลุก็จะได้ค่าความทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงสุดออกมา ดังแสดงในแผนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงานที่ 5 : การวัดค่าความทนต่อแรงดันไฟฟ้า



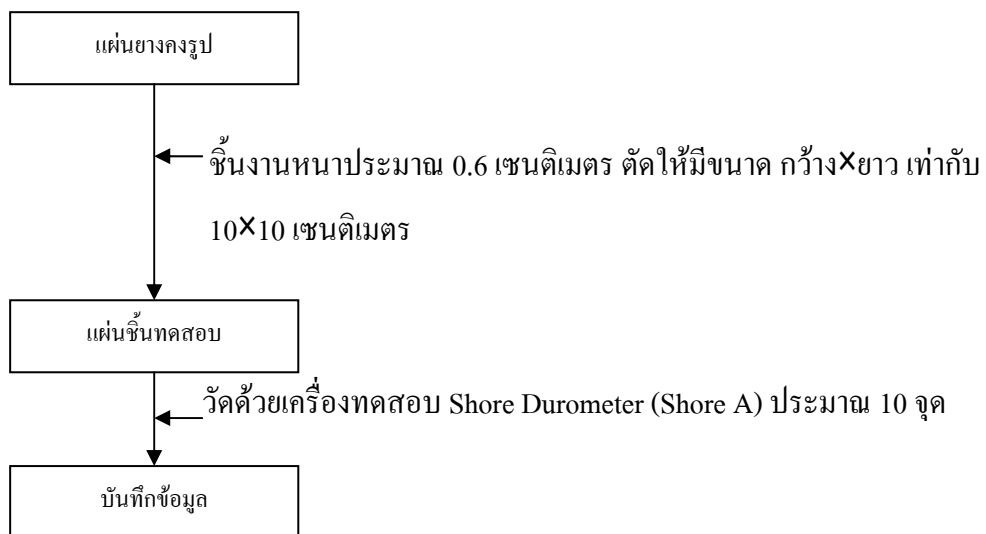


รูปที่ 3-5 แสดงการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า

3.3.3 การทดสอบความแข็ง (Hardness)

ชิ้นงานที่ใช้สำหรับวัดความแข็งซึ่งค่าความต้านทานต่อแรงกระทำที่กดลงผิวหน้าของยาง โดยใช้ Shore Durometer (Shore A) เป็นเครื่องมือวัดความแข็งที่เหมาะสมกับวัสดุประเภทยาง โดยชิ้นงานทดสอบที่ใช้มีความหนาประมาณ 0.6 เซนติเมตร

ขั้นตอนการดำเนินงานที่ 6 : การทดสอบความแข็ง

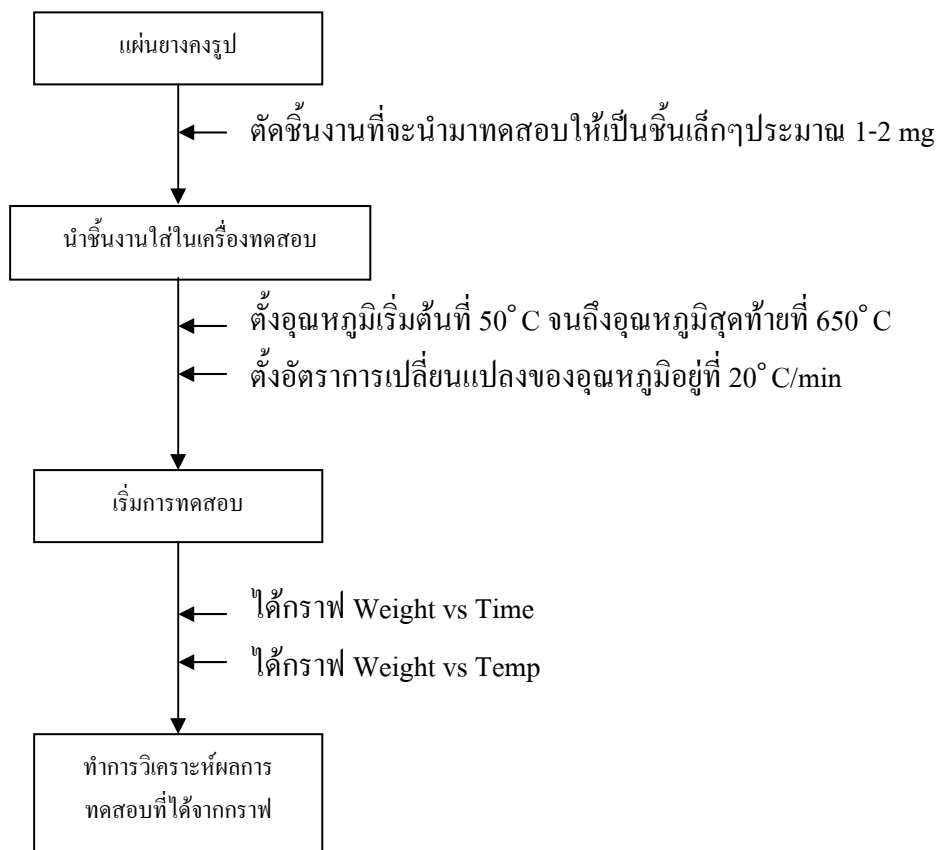


รูปที่ 3-6 แสดงเครื่องมือการทดสอบความแข็งแบบ Shore Durometer (Shore A)

3.3.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อน Thermogravimetric Analysis (TGA)

การวิเคราะห์ด้วย Thermo – gravimetric ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารเมื่อมีการให้ความร้อนหรือที่อุณหภูมิคงที่เทียบกับอุณหภูมิ ซึ่งมีผลต่อการศึกษาด้านเคมีและทางกายภาพที่ปรากฏเนื่องจากการกระทำของอุณหภูมิ TGAสามารถที่จะกำหนดวัสดุที่นำมาใช้ในการผลิต การออกแบบผลิตภัณฑ์ และอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์โดยการทดสอบด้วยเวลาสั้นๆ (<60 min) ในการทดสอบเริ่มจากการตัดชิ้นงานที่จะนำมาทดสอบให้เป็นชิ้นเล็กๆ (10 mg) ใช้วัดได้ตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 1500° C โดยให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ (20° C/min) ใน nitrogen atmosphere ในขณะที่น้ำหนักของตัวอย่างชิ้นงานจะแสดงขึ้นมานบนหน้าจอคอมพิวเตอร์

ขั้นตอนการดำเนินงานที่ 7: การทดสอบสมบัติทางความร้อน



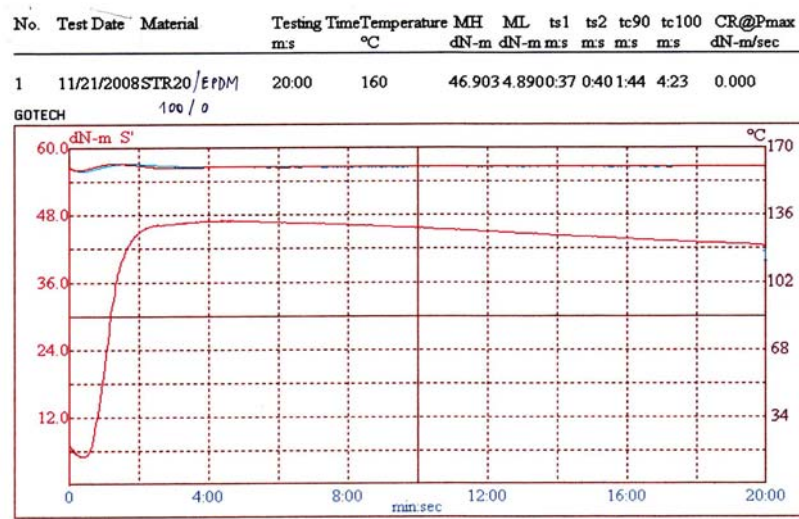
รูปที่ 3-7 แสดงเครื่องมือการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analysis

บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

วิเคราะห์ข้อมูลในบทนี้จะนำข้อมูลที่ได้จากการเตรียมฉนวนไฟฟ้าจากยางธรรมชาติ โดยใช้ยางธรรมชาติผสมเข้ากับยางEPDM ตามอัตราส่วนดังนี้ NR(100), NR(80)/EPDM(20), NR(60)/EPDM(40), NR(50)/EPDM(50), NR(40)/EPDM(60), NR(20)/EPDM(80) และ EPDM(100) ตามลำดับ มาทำการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า ทดสอบความแข็ง และทดสอบสมบัติทางความร้อน และนำผลการทดสอบที่ได้มาวิเคราะห์ ดังนี้

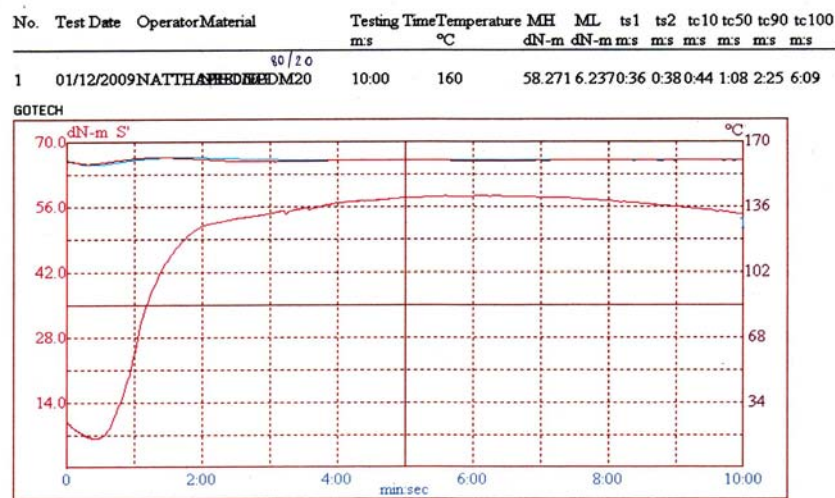
4.1 การทดสอบการหาอุณหภูมิและเวลาคงรูปของยาง

4.1.1 การทดสอบการหาอุณหภูมิและเวลาคงรูปของยางธรรมชาติผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอิน (EPDM) ที่สัดส่วน NR (100)/EPDM (0)



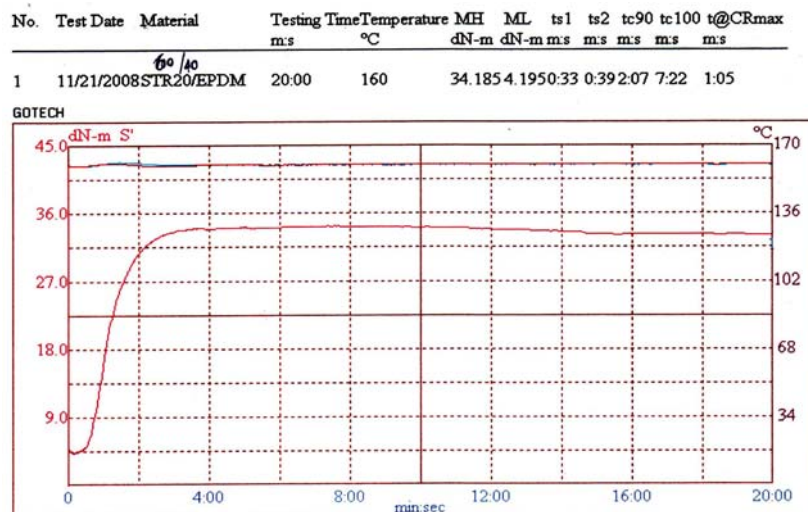
รูปที่ 4-1 แสดงกราฟการทดสอบการหาอุณหภูมิและเวลาคงรูปของยางธรรมชาติผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอิน (EPDM) ที่สัดส่วน NR (100)/EPDM (0)

4.1.2 การทดสอบการหาอุณหภูมิและเวลาคงรูปของยางธรรมชาติผสมยางเอทรีลีนโพรพิลีนไดอิน (EPDM) ที่สัดส่วน NR (80)/EPDM (20)



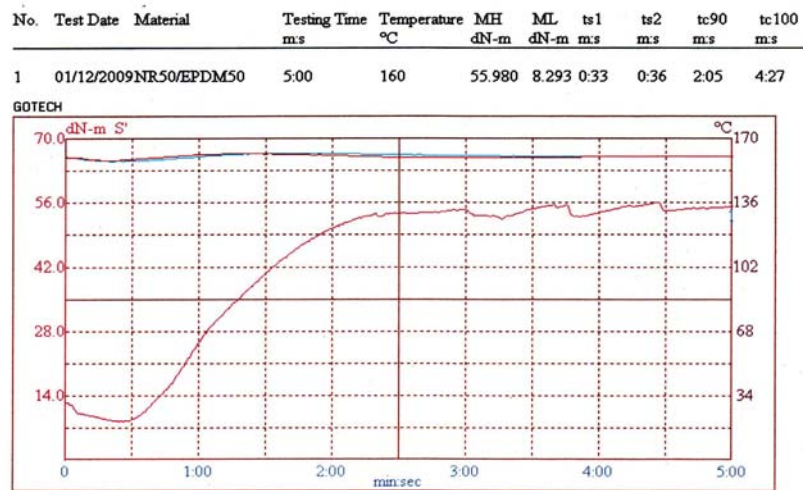
รูปที่ 4-2 แสดงกราฟการทดสอบการหาอุณหภูมิและเวลาคงรูปของยางธรรมชาติผสมยางเอทรีลีนโพรพิลีนไดอิน (EPDM) ที่สัดส่วน NR (80)/EPDM (20)

4.1.3 การทดสอบการหาอุณหภูมิและเวลาคงรูปของยางธรรมชาติผสมยางเอทรีลีนโพรพิลีนไดอิน (EPDM) ที่สัดส่วน NR (60)/EPDM (40)



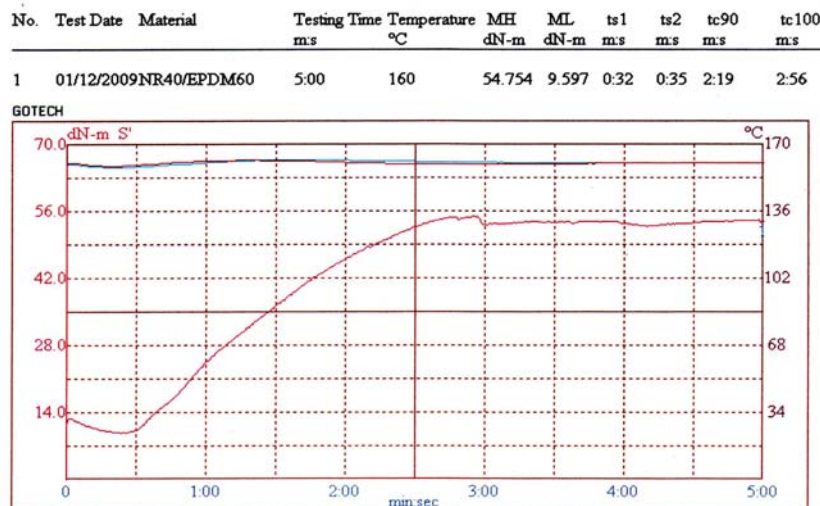
รูปที่ 4-3 แสดงกราฟการทดสอบการหาอุณหภูมิและเวลาคงรูปของยางธรรมชาติผสมยางเอทรีลีนโพรพิลีนไดอิน (EPDM) ที่สัดส่วน NR (60)/EPDM (40)

4.1.4 การทดสอบการหาอุณหภูมิและเวลาคงรูปของยางธรรมชาติผสมยางเอทรีลีนโพรพิลีนไดอิน (EPDM) ที่สัดส่วน NR (50)/EPDM (50)



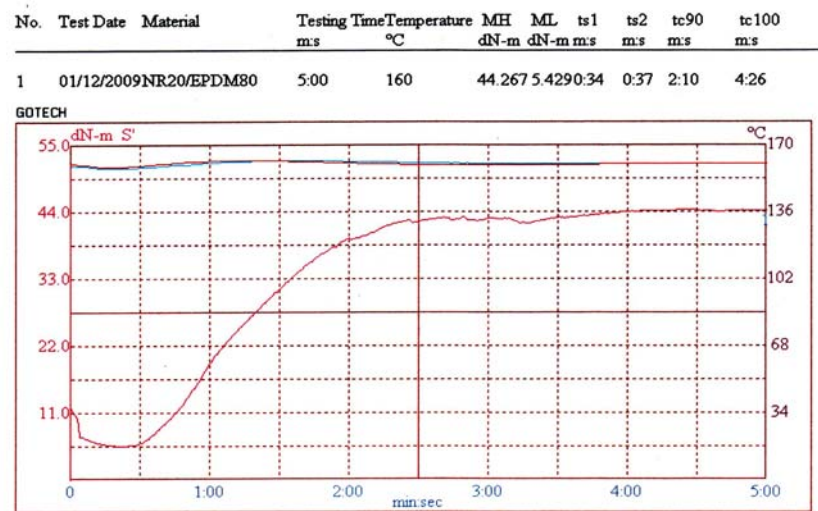
รูปที่ 4-4 แสดงกราฟการทดสอบการหาอุณหภูมิและเวลาคงรูปของยางธรรมชาติผสมยางเอทรีลีนโพรพิลีนไดอิน (EPDM) ที่สัดส่วน NR (50)/EPDM (50)

4.1.5 การทดสอบการหาอุณหภูมิและเวลาคงรูปของยางธรรมชาติผสมยางเอทรีลีนโพรพิลีนไดอิน (EPDM) ที่สัดส่วน NR (40)/EPDM (60)



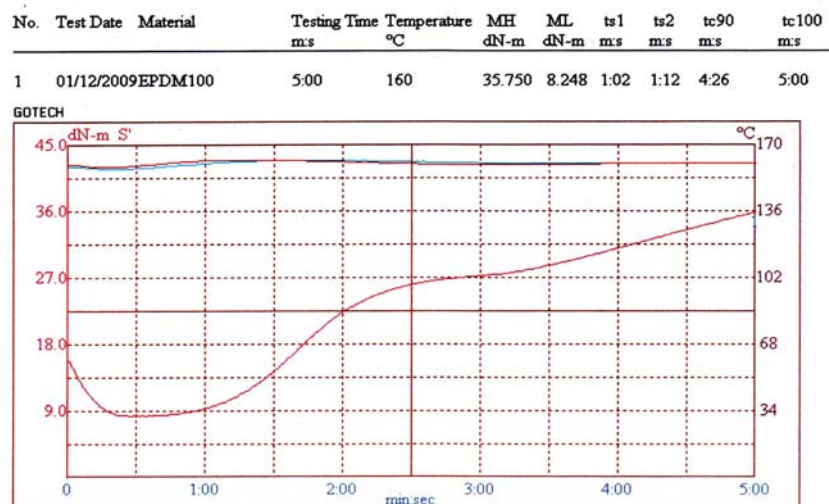
รูปที่ 4-5 แสดงกราฟการทดสอบการหาอุณหภูมิและเวลาคงรูปของยางธรรมชาติผสมยางเอทรีลีนโพรพิลีนไดอิน (EPDM) ที่สัดส่วน NR (40)/EPDM (60)

4.1.6 การทดสอบการหาอุณหภูมิและเวลาการรูปของยางธรรมชาติผสมยางเอทรีลีนโพรพิลีนไดอิน (EPDM) ที่สัดส่วน NR (20)/EPDM (80)



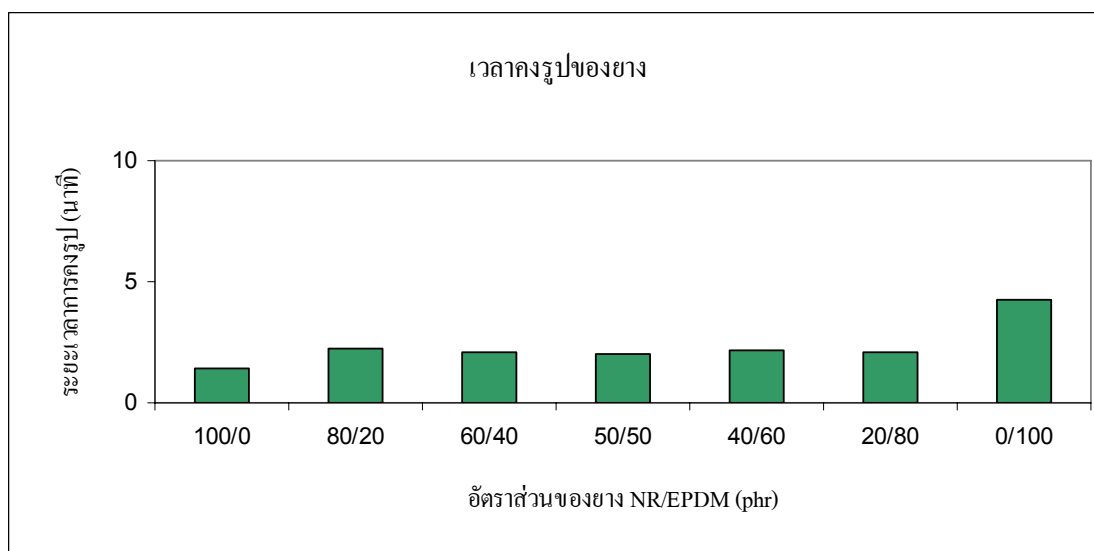
รูปที่ 4-6 แสดงกราฟการทดสอบการหาอุณหภูมิและเวลาการรูปของยางธรรมชาติผสมยางเอทรีลีนโพรพิลีนไดอิน (EPDM) ที่สัดส่วน NR (20)/EPDM (80)

4.1.7 การทดสอบการหาอุณหภูมิและเวลาการรูปของยางธรรมชาติผสมยางเอทรีลีนโพรพิลีนไดอิน (EPDM) ที่สัดส่วน EPDM (100)



รูปที่ 4-7 แสดงกราฟการทดสอบการหาอุณหภูมิและเวลาการรูปของยางธรรมชาติผสมยางเอทรีลีนโพรพิลีนไดอิน (EPDM) ที่สัดส่วน NR (0)/EPDM (100)

จากกราฟแสดงการทดสอบการหาอุณหภูมิและเวลาการรูปของยางธรรมชาติผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM) ที่สัดส่วนต่างๆ สามารถนำมาเปรียบเทียบการหาระยะเวลาในการการรูปที่เหมาะสม (Optimum cure time, t_{c90}) ที่อุณหภูมิ 160°C ได้ดังกราฟแสดงต่อไปนี้



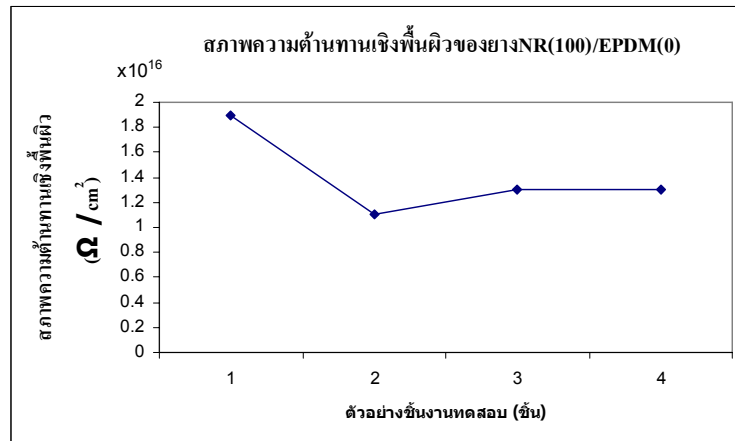
รูปที่ 4-8 แสดงกราฟการเปรียบเทียบการหาระยะเวลาในการการรูปที่เหมาะสมของแต่ละอัตราส่วน

เมื่อนำยางคอมพาวด์ที่ได้ไปทำการทดสอบการหาอุณหภูมิและเวลาการรูปของยางธรรมชาติผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM) ที่สัดส่วนต่างๆ พบว่าที่อัตราส่วนของยาง NR(100)/EPDM(0) จะใช้เวลาในการการรูปเร็วที่สุดเนื่องจากยางธรรมชาติมีพันธะคู่ในปริมาณที่สูงกว่า ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาการรูปด้วยกำมะถันได้เร็วกว่ายาง EPDM ซึ่งมีปริมาณพันธะคู่อยู่น้อย ดังนั้น จึงพบว่ายางธรรมชาติมีระยะเวลาสกอร์ชและระยะเวลาในการการรูปที่เหมาะสมต่ำกว่ายาง EPDM มาก จากผลการทดลองยังชี้ให้เห็นว่าค่าระยะเวลาสกอร์ชและระยะเวลาในการการรูปที่เหมาะสมมีลักษณะคงที่ซึ่งผลการทดสอบที่ได้จะแตกต่างกับงานวิจัยที่ใช้ศึกษา โดยผลการทดสอบของงานวิจัยที่ใช้ศึกษาพบว่าระยะเวลาสกอร์ชและระยะเวลาในการการรูปของยางจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆตามการเพิ่มอัตราส่วนของยาง EPDM ลงไปในยางผสม ซึ่งผลที่ได้ออกมามีความแตกต่างกันอาจเนื่องมาจากกระบวนการในการขึ้นรูปยางของงานวิจัยนี้ใช้การบดผสมด้วยเครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ ซึ่งเป็นเครื่องบดผสมระบบเปิด แต่งานวิจัยที่ใช้ศึกษาจะใช้เครื่องบดผสมในระบบปิดซึ่งทำให้ผลการทดสอบที่ได้มีความแตกต่างกัน

4.2 การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า

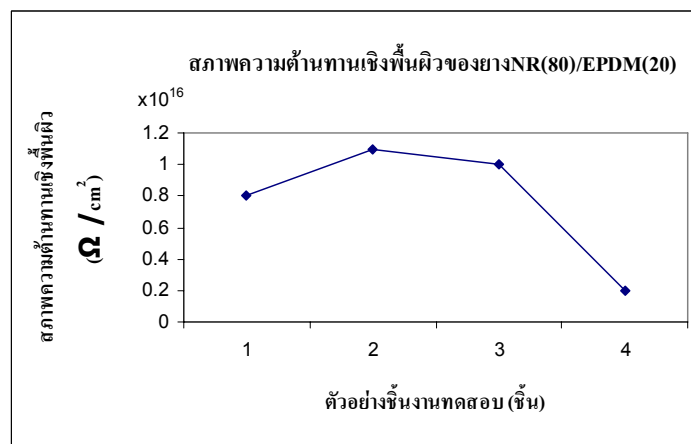
4.2.1 การวัดค่าความต้านทานเชิงพื้นผิว (Surface Resistivity Measurement)

1) สภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของยางธรรมชาติ NR (100) ผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน EPDM (0)



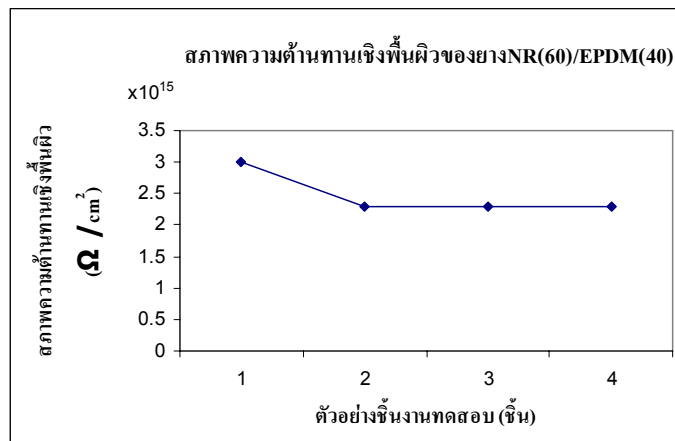
รูปที่ 4-9 แสดงกราฟการทดสอบสภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของยางธรรมชาติ NR (100) ผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน EPDM (0)

2) สภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของยางธรรมชาติ NR (80) ผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน EPDM (20)



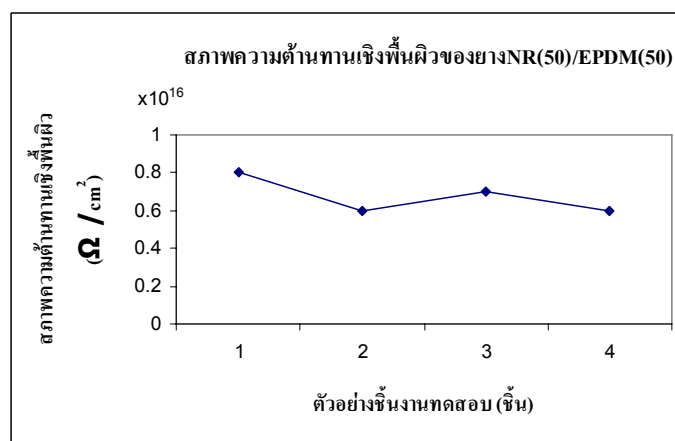
รูปที่ 4-10 แสดงกราฟการทดสอบสภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของยางธรรมชาติ NR (80) ผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน EPDM (20)

3) สภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของยางธรรมชาติ NR (60) ผสมยางเอทธิลีนโพรพิลีนไดอีน EPDM (40)



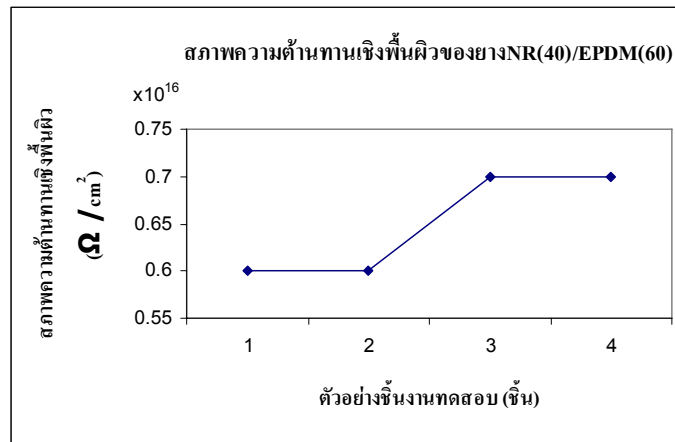
รูปที่ 4-11 แสดงกราฟการทดสอบสภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของยางธรรมชาติ NR (60) ผสมยางเอทธิลีนโพรพิลีนไดอีน EPDM (40)

4) สภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของยางธรรมชาติ NR (50) ผสมยางเอทธิลีนโพรพิลีนไดอีน EPDM (50)



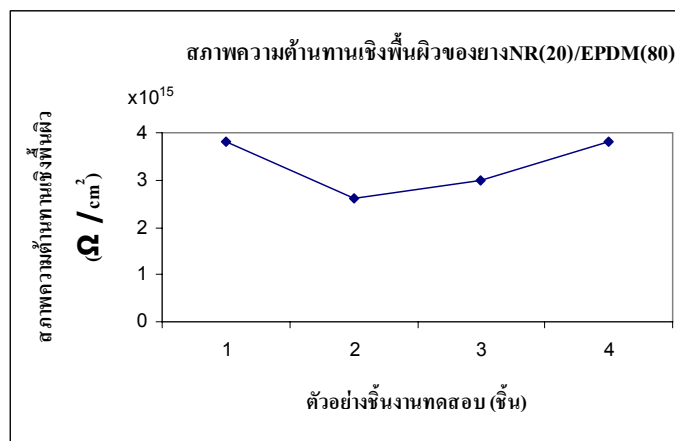
รูปที่ 4-12 แสดงกราฟการทดสอบสภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของยางธรรมชาติ NR (50) ผสมยางเอทธิลีนโพรพิลีนไดอีน EPDM (50)

5) สภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของยางธรรมชาติ NR (40) ผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน EPDM (60)



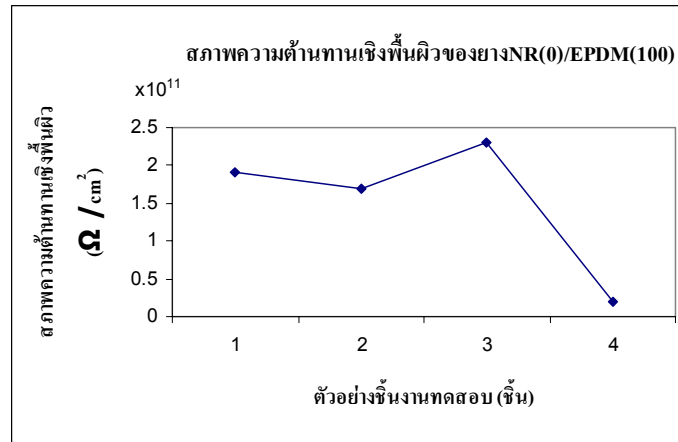
รูปที่ 4-13 แสดงกราฟการทดสอบสภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของยางธรรมชาติ NR (40) ผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน EPDM (60)

6) สภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของยางธรรมชาติ NR (20) ผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน EPDM (80)



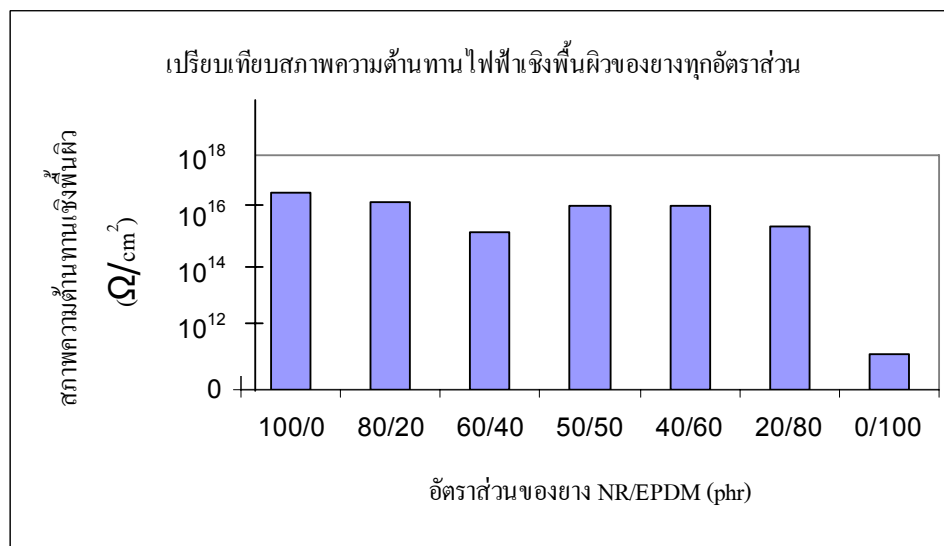
รูปที่ 4-14 แสดงกราฟการทดสอบสภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของยางธรรมชาติ NR (20) ผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน EPDM (80)

7) สภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของยางธรรมชาติ NR (0) ผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน EPDM (100)



รูปที่ 4-15 แสดงกราฟการทดสอบสภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของยางธรรมชาติ NR (0) ผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน EPDM (100)

จากกราฟแสดงการทดสอบสภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของยางธรรมชาติผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM) ที่อัตราส่วนต่างๆ สามารถนำมาเปรียบเทียบ ได้ดังกราฟแสดงผลต่อไปนี้

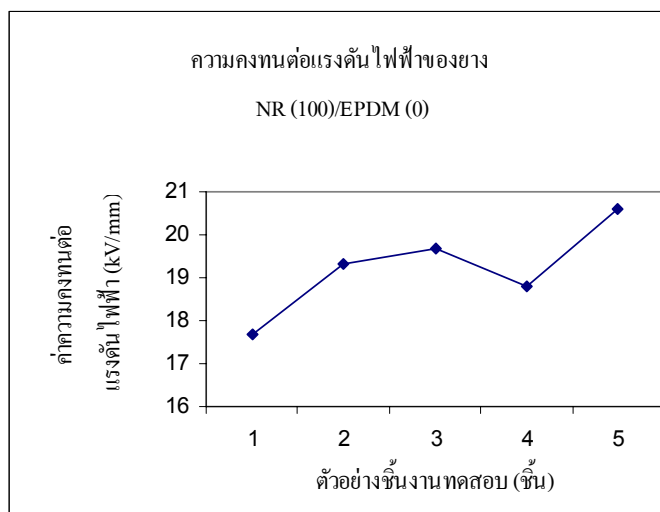


รูปที่ 4-16 แสดงกราฟการเปรียบเทียบสภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของยางธรรมชาติผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนที่อัตราส่วนต่างๆ

จากกราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบสภาพความต้านทานเชิงผิว ตามมาตรฐาน ASTM D257 พบว่าสภาพความต้านทานเชิงพื้นผิวที่ได้ออกมามีค่าความต้านทานต่อการนำกระแสสูง โดยเฉพาะการผสมยางในอัตราส่วน NR (100)/EPDM (0) เป็นอัตราส่วนที่ได้ค่าเฉลี่ยออกมามากที่สุดจากการทดสอบ ซึ่งมีสภาพความต้านทานเชิงพื้นผิวเท่ากับ $1.4 \times 10^{16} \Omega / \text{cm}^2$ ซึ่งมากพอสำหรับการเป็นฉนวนในระบบไฟฟ้า

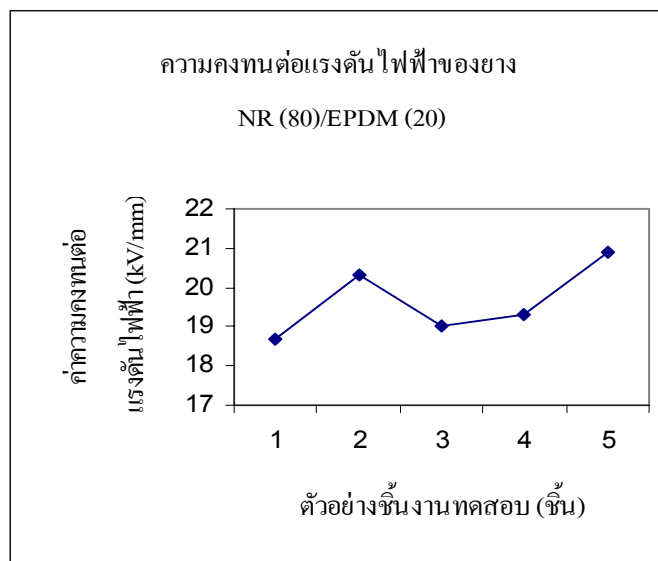
4.2.2 การวัดค่าความทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength Measurement)

1) ความทนต่อแรงดันไฟฟ้าของยางธรรมชาติ NR (100) ผสมยางเอทธิลีนโพรพิลีนไดอีน EPDM (0)



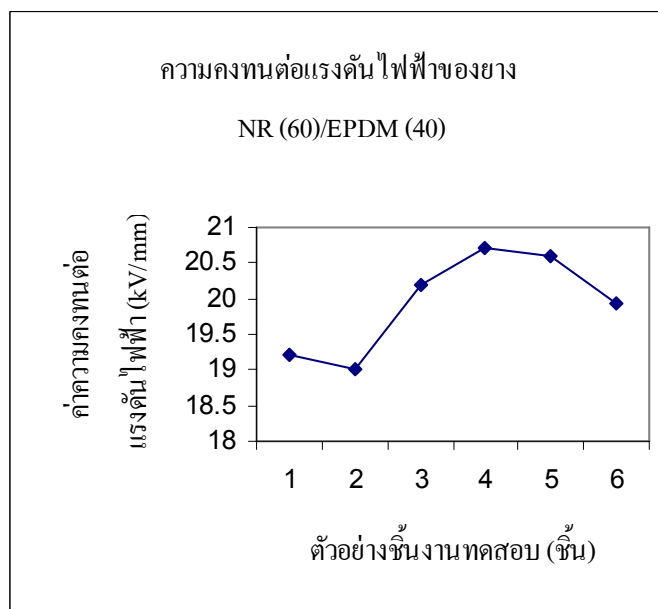
รูปที่ 4-17 แสดงกราฟการทดสอบความทนต่อแรงดันไฟฟ้าของยางธรรมชาติ NR (100) ผสมยางเอทธิลีนโพรพิลีนไดอีน EPDM (0)

2) ความทนต่อแรงดันไฟฟ้าของยางธรรมชาติ NR (80) ผสมยางเอทิลีนโพรพิลีน
ไดอีน EPDM (20)



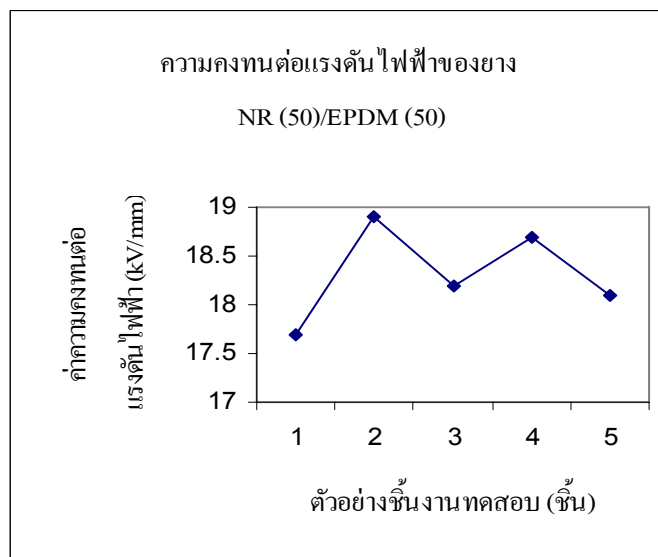
รูปที่ 4-18 แสดงกราฟการทดสอบความทนต่อแรงดันไฟฟ้าของยางธรรมชาติ NR (80) ผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน EPDM (20)

3) ความทนต่อแรงดันไฟฟ้าของยางธรรมชาติ NR (60) ผสมยางเอทิลีนโพรพิลีน
ไดอีน EPDM (40)



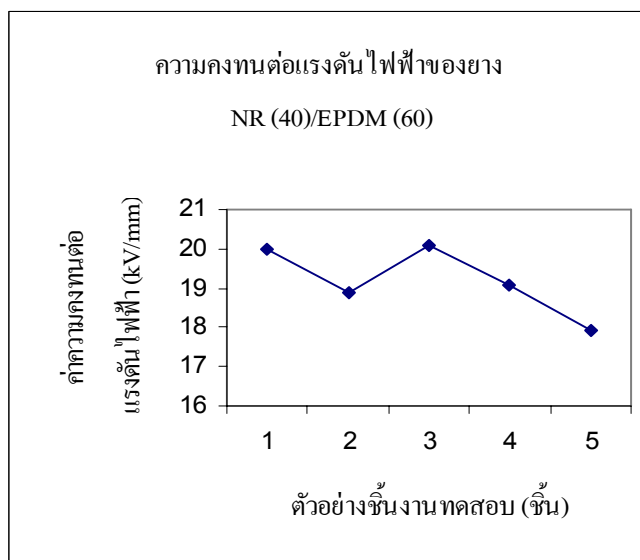
รูปที่ 4-19 แสดงกราฟการทดสอบความทนต่อแรงดันไฟฟ้าของยางธรรมชาติ NR (60) ผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน EPDM (40)

4) ความทนต่อแรงดันไฟฟ้าของยางธรรมชาติ NR (50) ผสมยางเอทิลีนโพรพิลีน
ไดอิน EPDM (50)



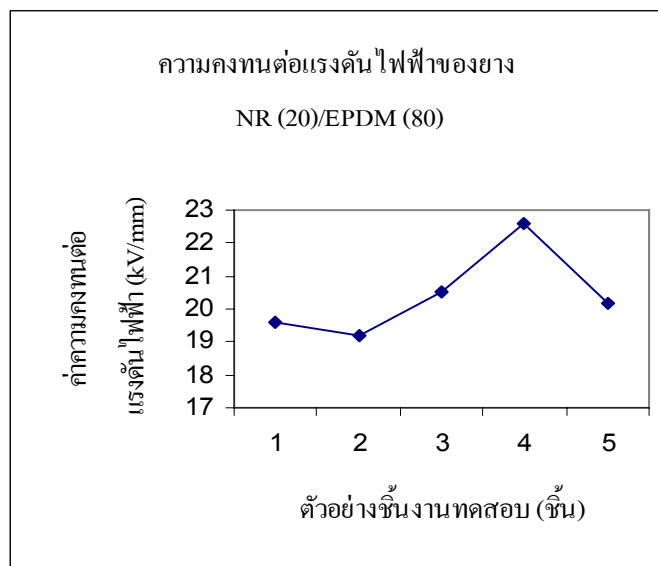
รูปที่ 4-20 แสดงกราฟการทดสอบความทนต่อแรงดันไฟฟ้าของยางธรรมชาติ NR (50) ผสม
ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอิน EPDM (50)

5) ความทนต่อแรงดันไฟฟ้าของยางธรรมชาติ NR (40) ผสมยางเอทิลีนโพรพิลีน
ไดอิน EPDM (60)



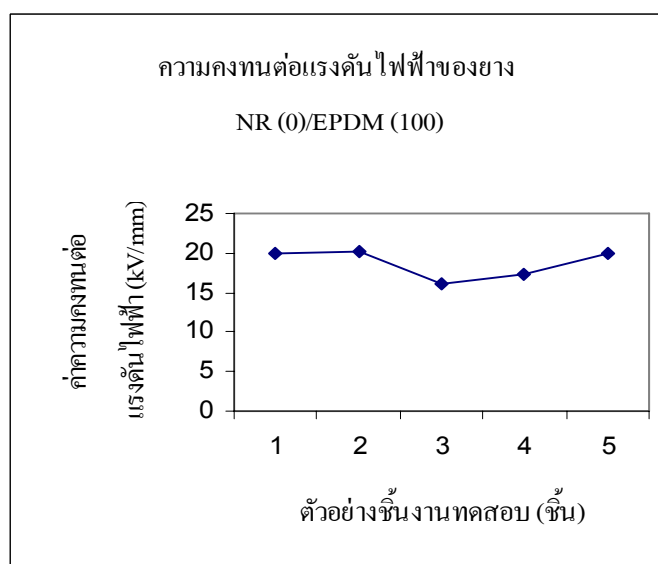
รูปที่ 4-21 แสดงกราฟการทดสอบความทนต่อแรงดันไฟฟ้าของยางธรรมชาติ NR (40) ผสม
ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอิน EPDM (60)

6) ความทนต่อแรงดันไฟฟ้าของยางธรรมชาติ NR (20) ผสมยางเอทรีลีนโพรพิลีน
ไดอีน EPDM (80)



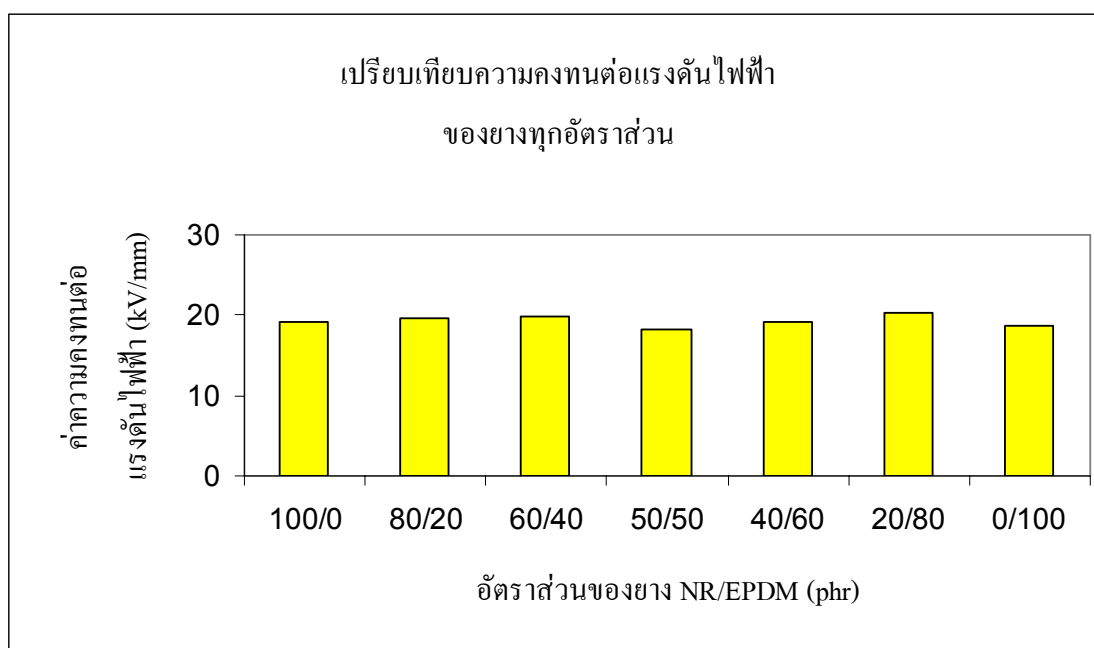
รูปที่ 4-22 แสดงกราฟการทดสอบความทนต่อแรงดันไฟฟ้าของยางธรรมชาติ NR (20) ผสม
ยางเอทรีลีนโพรพิลีนไดอีน EPDM (80)

7) ความทนต่อแรงดันไฟฟ้าของยางธรรมชาติ NR (0) ผสมยางเอทรีลีนโพรพิลีน
ไดอีน EPDM (100)



รูปที่ 4-23 แสดงกราฟการทดสอบความทนต่อแรงดันไฟฟ้าของยางธรรมชาติ NR (0) ผสม
ยางเอทรีลีนโพรพิลีนไดอีน EPDM (100)

จากกราฟแสดงการทดสอบความทนต่อแรงดันไฟฟ้าของยางธรรมชาติผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM) ที่อัตราส่วนต่างๆ สามารถนำมาเปรียบเทียบ ได้ดังกราฟแสดงผลต่อไปนี้



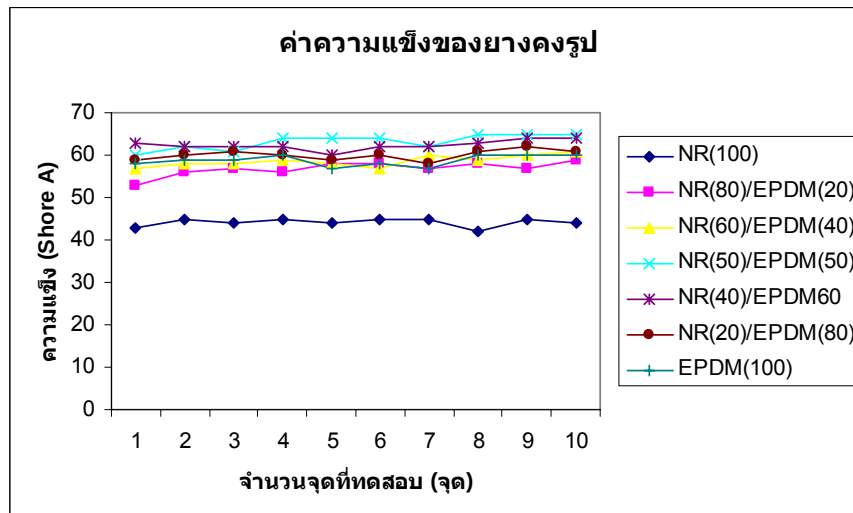
รูปที่ 4-24 แสดงกราฟการเปรียบเทียบความทนต่อแรงดันไฟฟ้าของยางธรรมชาติผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนที่อัตราส่วนต่างๆ

จากกราฟเปรียบเทียบค่าความทนต่อแรงดันไฟฟ้าของยางธรรมชาติผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนในแต่ละอัตราส่วน ทำให้สามารถเปรียบเทียบความเป็นฉนวนไฟฟ้าของยางได้คือ ยางธรรมชาติที่ผสมกับยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนที่อัตราส่วน NR (20)/EPDM (80) มีค่าความทนต่อแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 20.42 kV/mm ซึ่งมีค่าสูงมากพอสำหรับนำมาใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแรงดันไฟฟ้า 380/220 Volt

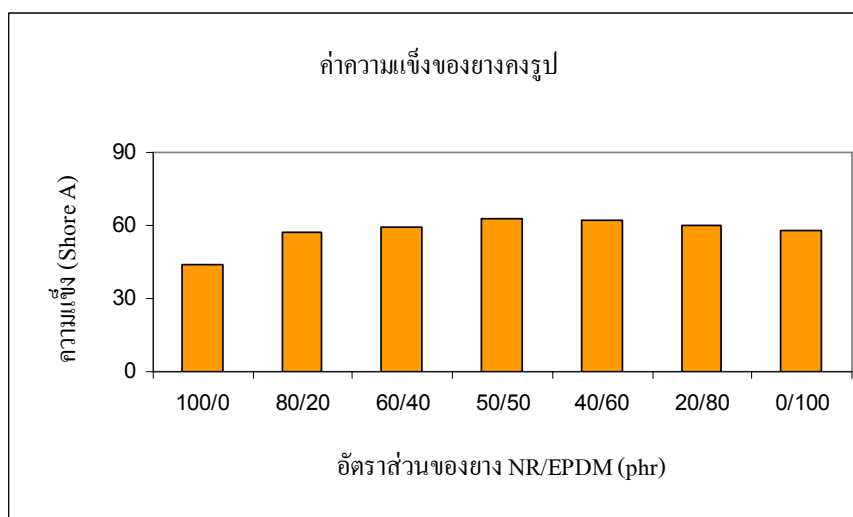
4.3 การทดสอบสมบัติทางกล

4.3.1 การทดสอบความแข็ง (Hardness)

ความแข็งของยางธรรมชาติผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน แสดงตามอัตราส่วนของยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM)



รูปที่ 4-25 กราฟแสดงค่าความแข็งของยางธรรมชาติผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนที่อัตราส่วนต่างๆ

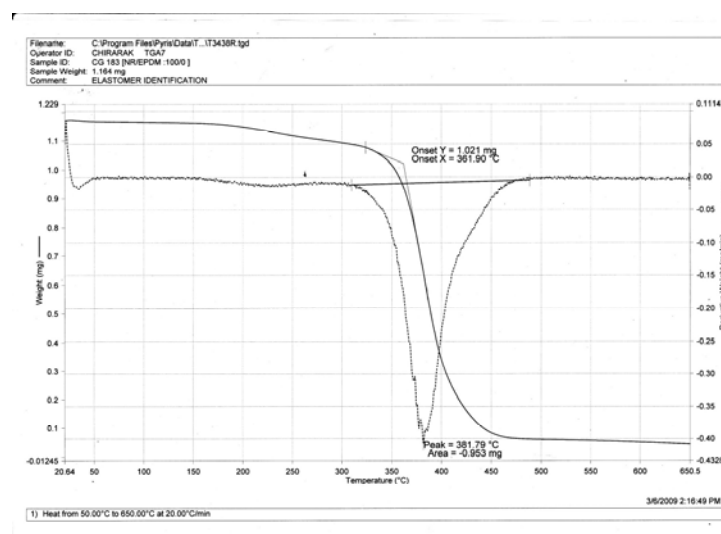


รูปที่ 4-26 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งของยางธรรมชาติผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนที่อัตราส่วนต่างๆ

จากกราฟจะสังเกตเห็นได้ว่าค่าความแข็งของยางผสมที่ได้จากยาง EPDM เป็นไปตามกฎของการผสม กล่าวคือยางผสมที่ได้จะมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM จากกราฟเปรียบเทียบสัดส่วนของยาง EPDM ที่ 50 phr จะให้ค่าความแข็งมากที่สุดที่ 63 Shore A ซึ่งพบว่าการเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM จาก 0 ถึง 20 phr โดยสัดส่วนของยาง EPDM ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งของยางผสมมากนัก แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM ให้สูงกว่า 20 phr ก็จะพบว่าค่าความแข็งของยางเริ่มสูงขึ้นตามสัดส่วนของ EPDM ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดสอบที่ได้จะแตกต่างจากงานวิจัยที่ใช้ศึกษา โดยในงานวิจัยที่ใช้ศึกษาพบว่าการเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM จาก 0 ถึง 40 phr โดยน้ำหนัก ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งของยางผสมอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM ให้สูงกว่า 60 phr ก็จะพบว่าค่าความแข็งของยางเริ่มสูงขึ้นตามสัดส่วนของ EPDM ที่เพิ่มขึ้น

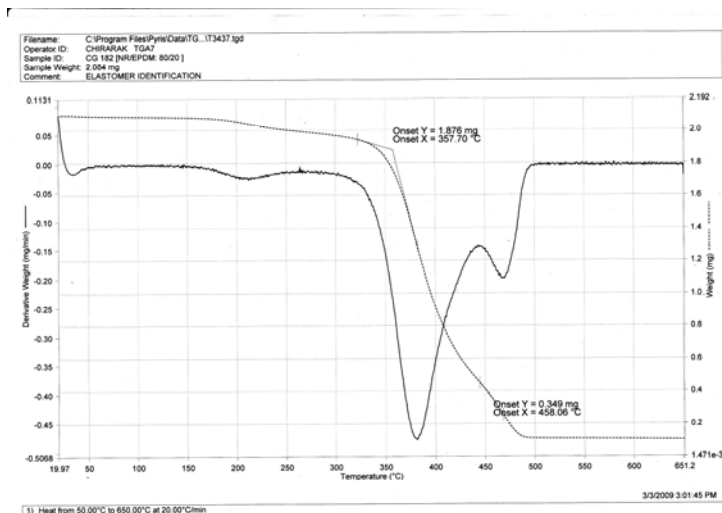
4.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA)

4.1.1 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติ NR (100) ผสมยางเอทรีลีนโพรพิลีนไดอีน EPDM (0)



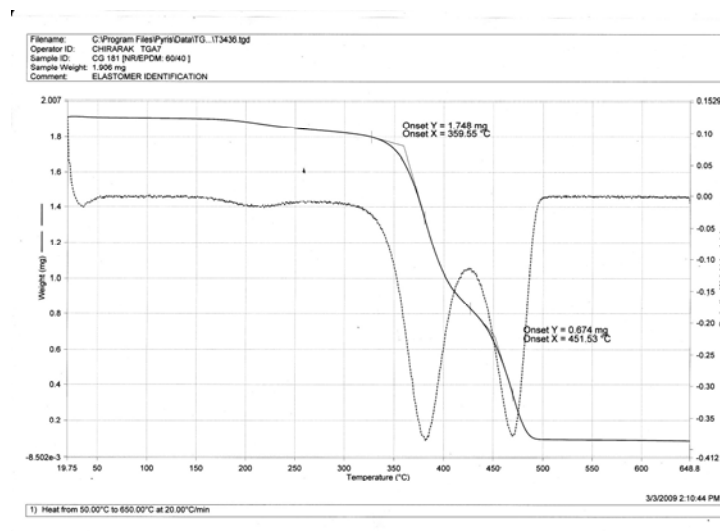
รูปที่ 4-27 กราฟแสดงสมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติ NR (100) ผสมยางเอทรีลีนโพรพิลีนไดอีน EPDM (0)

4.1.2 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติ NR (80) ผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน EPDM (20)



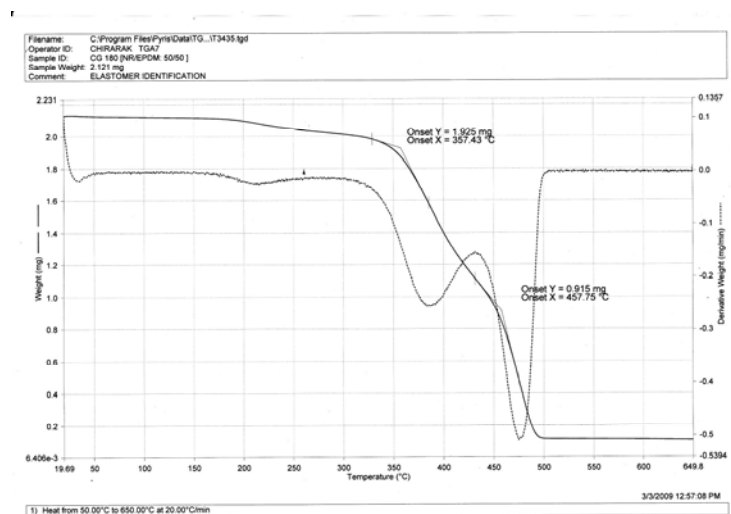
รูปที่ 4-28 กราฟแสดงสมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติ NR (80) ผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน EPDM (20)

4.1.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติ NR (60) ผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน EPDM (40)



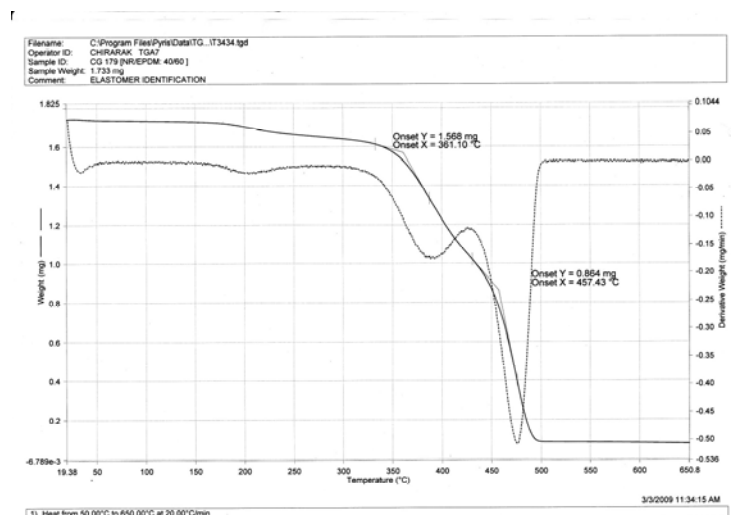
รูปที่ 4-29 กราฟแสดงสมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติ NR (60) ผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน EPDM (40)

4.1.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติ NR (50) ผสมยางเอทิลีน โพรพิลีน ไดอีน EPDM (50)



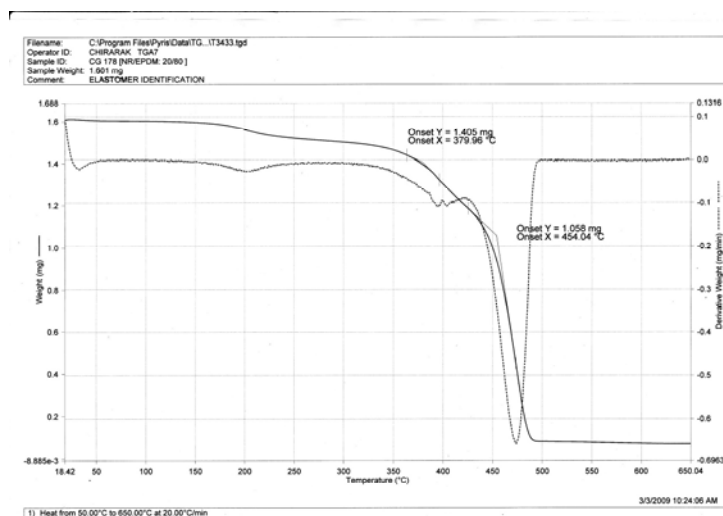
รูปที่ 4-30 กราฟแสดงสมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติ NR (50) ผสมยางเอทิลีน โพรพิลีน ไดอีน EPDM (50)

4.1.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติ NR (40) ผสมยางเอทิลีน โพรพิลีน ไดอีน EPDM (60)



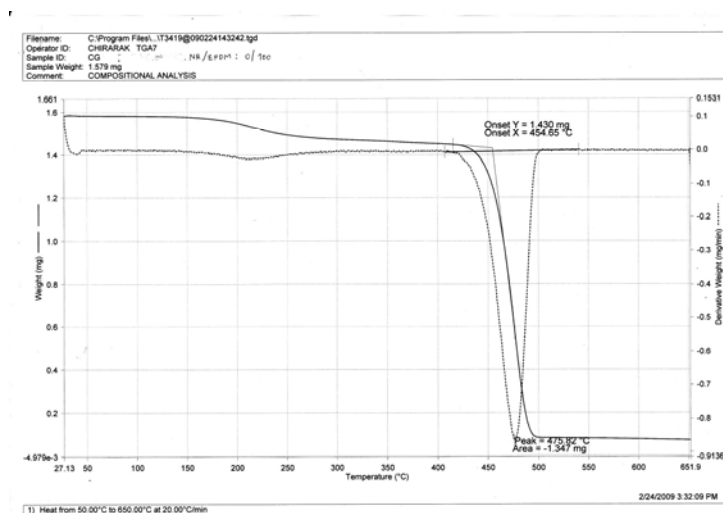
รูปที่ 4-31 กราฟแสดงสมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติ NR (40) ผสมยางเอทิลีน โพรพิลีน ไดอีน EPDM (60)

4.1.6 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติ NR (20) ผสมยางเอทิลีน โพรพิลีน ไดอิน EPDM (80)



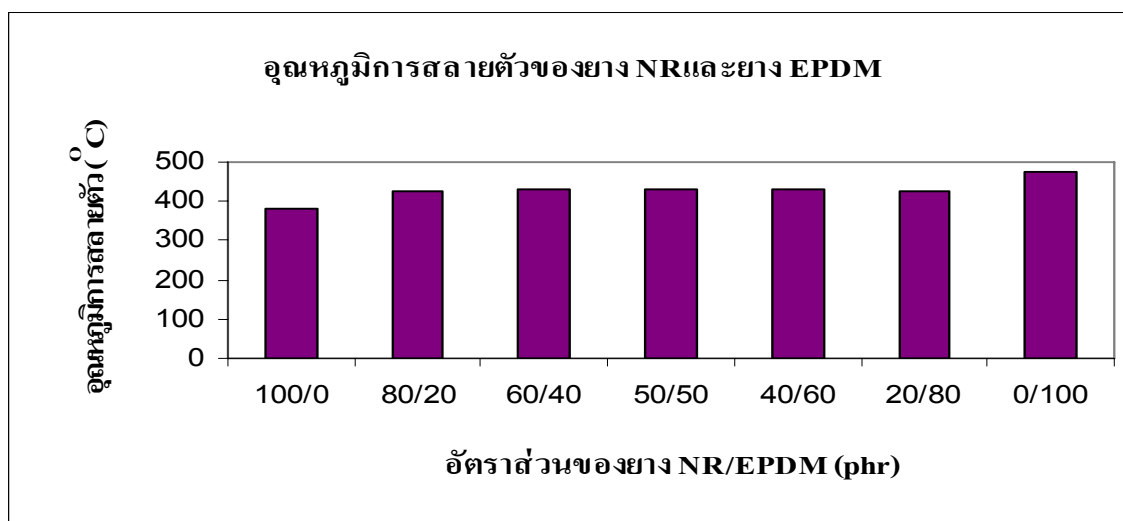
รูปที่ 4-32 กราฟแสดงสมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติ NR (20) ผสมยางเอทิลีน โพรพิลีน ไดอิน EPDM (80)

4.1.7 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติ NR (0) ผสมยางเอทิลีน โพรพิลีน ไดอิน EPDM (100)



รูปที่ 4-33 กราฟแสดงสมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติ NR (0) ผสมยางเอทิลีน โพรพิลีน ไดอิน EPDM (100)

จากกราฟแสดงการทดสอบสมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM) ที่อัตราส่วนต่างๆ สามารถนำมาเปรียบเทียบ ได้ดังกราฟแสดงผลต่อไปนี้



รูปที่ 4-34 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนที่อัตราส่วนต่างๆ

จากการพิจารณาสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนของยางผสม โดยที่อัตราส่วน 100/0 จะทนต่ออุณหภูมิการสลายตัวได้ต่ำที่สุดอยู่ที่ 381.79°C และที่อัตราส่วน 0/100 จะทนต่ออุณหภูมิการสลายตัวได้สูงสุดอยู่ที่ 475.82°C จากผลการทดสอบพบว่า การปรับปรุงสมบัติความทนทานต่อความร้อนของยางจะเกิดขึ้นอย่างมีนัยสำคัญก็ต่อเมื่อมีการผสมยาง EPDM ลงไปในยางธรรมชาติ จะพบว่าที่สัดส่วนการผสมดังกล่าว นั้น ยางผสมมีวิฤภาคของยาง EPDM เป็นเมทริกซ์จึงส่งผลทำให้ยางผสมมีสมบัติความทนทานต่อความร้อนที่สูงขึ้น

บทที่ 5สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุป

ภายใต้เงื่อนไขการทดลองนี้พบว่าสมบัติในกระบวนการผลิตของยางผสมขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน เมื่อนำยางผสมที่ได้ไปทำการทดสอบการหาอุณหภูมิและเวลาคงรูปของยางธรรมชาติผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM) ที่สัดส่วนต่างๆ พบว่าที่อัตราส่วนของยาง NR(100)/EPDM(0) จะใช้เวลาในการคงรูปเร็วที่สุดเนื่องจากยางธรรมชาติมีพันธะคู่ในปริมาณที่สูงกว่า ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกัมมันต์ได้เร็วกว่ายาง EPDM ซึ่งมีปริมาณพันธะคู่น้อย ในการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าพบว่าที่อัตราส่วนการผสมของยาง NR (80)/EPDM (20) มีค่าสภาพความต้านทานเชิงพื้นผิวและมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ $0.8 \times 10^{16} \Omega / \text{cm}^2$ และ 19.64 kV/mm ตามลำดับซึ่งมีค่าสูงมากพอสำหรับนำมาใช้เป็นฉนวนไฟฟ้า ที่ระบบจำหน่ายแรงดันไฟฟ้า 220/380 โวลต์ และเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำไปใช้ในการผลิตเป็นฉนวนไฟฟ้าแรงสูง เนื่องจากยางผสมในอัตราส่วน NR (80)/EPDM (20) มีส่วนผสมของยางธรรมชาติมากที่สุดซึ่งตรงกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้และเพื่อเป็นการส่งเสริมให้นายางธรรมชาติมาใช้ในการผลิตเป็นฉนวนไฟฟ้าแทนการใช้ยางสังเคราะห์

ในการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าค่าความแข็งของยางผสมที่ได้จากยาง EPDM เป็นไปตามกฎของการผสม กล่าวคือยางผสมที่ได้จะมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอัตราส่วนของยาง EPDM โดยอัตราส่วนของยาง NR/ EPDM ที่ 50/50 phr จะให้ค่าความแข็งมากที่สุดที่ 63 Shore A และในการทดสอบสมบัติทางความร้อนพบว่า การปรับปรุงสมบัติความทนทานต่อความร้อนของยางจะเกิดขึ้นอย่างมีนัยสำคัญก็ต่อเมื่อมีการผสมยาง EPDM ลงไปในยางธรรมชาติ จะพบว่าที่สัดส่วนการผสมดังกล่าวนี้ ยางผสมมีวิฤภาคของยาง EPDM เป็นเมทริกซ์จึงส่งผลทำให้ยางผสมมีสมบัติความทนทานต่อความร้อนที่สูงขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ก่อนที่จะนำยางผสมไปทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกควรนำยางผสมที่ได้ไปทำการทดสอบการหาหะยะเวลาสกอ์ช (Scorch time, t_{s2}) และระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสม (Optimum cure time, t_{c90}) ด้วยเครื่อง Moving Die Rheometer (MDR)

5.2.2 ในการขึ้นรูปยางคอมพาวด์ ควรขึ้นรูปแผ่นยางให้มีขนาดความกว้าง และยาวให้มากขึ้น เพื่อนำมาทำการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า ไม่ให้เกิดการดิสชาร์จตามผิวได้ง่าย

5.2.3 ก่อนที่จะนำยางคงรูปไปทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าควรนำไปอบด้วยความร้อนเพื่อไล่ความชื้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค), **ความรู้เบื้องต้นด้านวัสดุ**, งานฝึกอบรมศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ, 2544, หน้า 68-84.
- [2] วรากรณ์ ขจรไชยกุล, **ยางธรรมชาติ: การผลิตและการใช้งาน**, สำนักงานกองทุนการวิจัย (สกว.), พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ 176, 2549, หน้า
- [3] Charles A Harper. **Handbook of Plastics, Elastomers and Composites**. 2nd Edition, McGraw-Hill, Inc. Printed in USA. 1992.
- [4] พงษ์ธร แซ่อูย, ชاکริต สิริสิงห์ และคณะ, “ผลของปริมาณเอทิลีนในยางเอทิลีนโพรพิลีนไดออกไซด์ (EPDM) และสัดส่วนการผสมต่อสมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ (NR) และยางเอทิลีนโพรพิลีนไดออกไซด์ **Effects of ethylene content in EPDM and blend ratio on properties of NR/EPDM blends**”, 2008.
- [5] M.Ehsani, “**An investigation of dynamic mechanical, thermal and electrical properties of housing materials for outdoor polymeric insulators**”, 2004.
- [6] K. Siderakis, D. Agoris, “**Tracking Resistance by the RWDT and Flashover Characteristics of Polymeric Materials of Outdoor HV Insulator**”, 2006.
- [7] พงษ์ธร แซ่อูย .ชนิด สมบัติ และการใช้งานของยาง. พิมพ์ครั้งที่ 2 .กรุงเทพฯ : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค)
- [8] เสาวรณ ชัยจุลจิตร, “**เทคโนโลยียาง**”, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [9] วันชัย เลิศวิจิตรจรัส, “**Rubber & Plastic**”, ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2549.
- [10] พรพรรณ นิธิอุทัย ,**สารเคมีสำหรับยาง** ,คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (วิทยาเขตปัตตานี) ,(พ.ศ.2528.
- [11] “**แผนแม่บทอุตสาหกรรมรายสาขา: สาขาผลิตภัณฑ์ยาง**” หน่วยเทคโนโลยียาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ,สิงหาคม พ.ศ.2545.
- [12] ล้ารวย สังข์สะอาด ,**วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง** ,พิมพ์ครั้งที่ 3 ,กรุงเทพฯ ,2549.
- [13] “การทดสอบการหาอุณหภูมิและเวลาคงรูปของยาง”, [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก:
<http://www.microrheometer.com/movingdierheometer.htm>
- [14] อำนวย ลากเกษมสุข ,**เอกสารประกอบคำบรรยายวิชา Plastics Testing and Analysis**, ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

- [15] นุชนาฏ ฐ ระนอง ,การทดสอบสมบัติของยาง ,สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร ,กรุงเทพฯ, 2001.
- [16] วารุณี อริยวิริยะนันท์ ,Instrumental Analysis of Plastics)การวิเคราะห์พลาสติก ,(ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณองค์กรและบุคคลต่างๆ ที่ให้ความอนุเคราะห์โครงการวิจัยนี้ให้ดำเนินการไปได้ด้วยดี

ภาควิชาวิศวกรรมพลาสติกและโลหะการ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี และภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คณาจารย์และเจ้าหน้าที่ในภาควิชาฯ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้คำปรึกษา การทดสอบ การขึ้นรูปต่างๆ รวมทั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ทำให้โครงการนี้ดำเนินไปด้วยดี

ขอขอบคุณบริษัท โกลบอล คอนเน็คชั่นส์ จำกัด (มหาชน) , (บริษัท ยูนิเวนเจอร์ จำกัด และบริษัท ท็อปไฟว์ จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการสนับสนุนด้านวัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และกรมวิทยบริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่ได้ให้คำแนะนำที่ดีในการนำชิ้นงานไปทดสอบ

ท้ายนี้คณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่สนับสนุนเงินทุนวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2552 ทำให้โครงการนี้ดำเนินไปด้วยดี

คณะผู้วิจัย