

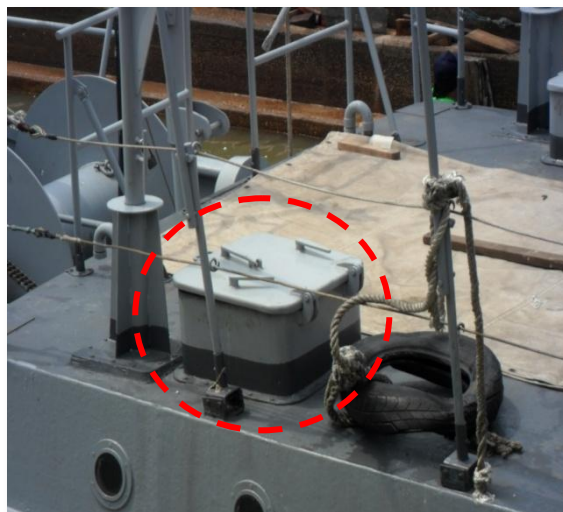
บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย

ในแต่ละปีทางอุตสาหกรรมเรือชนบุรีมีความต้องการยางขอบประตูเรือเป็นจำนวนมาก เนื่องจากยางขอบประตูเรือสามารถใช้ได้กับประตูเรือและ ประตูเล็กที่อยู่บนพื้นหรือเพดานเรือกับ ตัวเรือ (Hatch) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 แต่เดิมอุตสาหกรรมเรือชนบุรีสั่งซื้อยางขอบประตูเรือจากต่างประเทศ ซึ่งผลิตจากยางสังเคราะห์ แต่การสั่งซื้อจากต่างประเทศมักเกิดปัญหา ไม่ว่าจะเป็นในขั้นตอนของการจัดซื้อการจัดส่งสินค้าที่ล่าช้าและส่งผลให้อุตสาหกรรมเรือชนบุรีไม่สามารถเปลี่ยนยางขอบประตูเรือ ได้ทันตามกำหนดการใช้เรือ นอกจากนี้ยังมีเหตุมาจากการยกเลิกการผลิตยางขอบประตูเรือของ บริษัทผู้ผลิตเดิมที่เคยทำการซื้อขาย ทางโรงงานยางของอุตสาหกรรมเรือชนบุรีจึงได้ทำการผลิตยางขอบ ประตูเรือขึ้นเอง โดยเลือกใช้ยางธรรมชาติเป็นวัตถุดิบในการผลิต แต่เมื่อนำไปใช้งานแล้วพบว่า ยางขอบประตูเรือที่ผลิตจากยางธรรมชาตินั้น มีลักษณะแข็งกรอบและบางส่วนมีรอยแตกเกิดขึ้น บริเวณผิวของยางขอบประตูเรือ ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพของยางขอบประตูเรือ ลดลง และไม่สามารถกันละอองน้ำหรืออากาศจากภายนอกเข้าสู่ภายในเรือได้ ทางโรงงานยางของ อุตสาหกรรมเรือชนบุรีจึงจำเป็นต้องเพิ่ม การผลิตยางขอบประตูเรือเป็นจำนวนมากเพื่อให้เจ้าหน้าที่ของเรือ ต่าง ๆ เก็บไว้เป็นชิ้นส่วนสำรอง



(ก)



(ข)

รูปที่ 1.1 ยางขอบประตูเรือที่นำไปประกอบใช้งานกับ (ก) ประตูเรือและ (ข) ประตูเล็กที่อยู่บนพื้นหรือเพดานเรือ (ในวงกลมเส้นประ)



รูปที่ 1.2 รอยแตกที่พบได้ทั่วไปบนยางขอบประตูลูเรือ

ถึงแม้ยางธรรมชาติที่อุทหาเรือธนบุรีใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตยางขอบประตูลูเรือจะมีสมบัติทางกลที่ดี [1], [2] แต่มีข้อเสีย คือ ความไม่สามารถทนทานต่อความร้อนและความชื้นในระหว่างการใช้งาน จากการศึกษาเบื้องต้นหากนำยางธรรมชาติผสมกับยางสังเคราะห์ เช่น ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (Ethylene Propylene Diene Monomer, EPDM) หรือเรียกว่า ยางอีพิดีเอ็ม ซึ่งมีสมบัติเด่นในด้านของความทนทานต่อสิ่งแวดล้อมทั้งโอโซน ความร้อนและความชื้นในระหว่างการใช้งาน จะส่งผลให้ยางขอบประตูลูเรือมีอายุการใช้งานที่นานมากยิ่งขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับยางขอบประตูลูเรือที่ผลิตจากยางธรรมชาติเพียงชนิดเดียวและเมื่อทำการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของยางอีพิดีเอ็มให้มากยิ่งขึ้น จะส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีประสิทธิภาพในการต้านทานต่อสิ่งแวดล้อมที่ดีขึ้น แต่ในขณะเดียวกันเมื่อสัดส่วนยางธรรมชาติลดลงจะส่งผลให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมลดลง เช่น สมบัติความทนทานต่อแรงดึง และสมบัติความยืดหยุ่น [2], [3] และจากการศึกษาเบื้องต้นพบว่า ยางขอบประตูลูเรือที่ใช้งานโดยทั่วไปมีการอ้างอิงถึงมาตรฐาน MIL-R-900F ซึ่งเป็นมาตรฐานของวัสดุยางปะเก็นสำหรับการกันน้ำและอากาศที่ใช้ในกองทัพเรือของประเทศไทย [4], [5] ในโครงการการศึกษาวิจัยนี้จึงทำการศึกษาหาส่วนผสมของสารเคมีสำหรับการผลิตยางขอบประตูลูเรือที่มีสมบัติต้านทานต่อโอโซน ความร้อนและความชื้นจากการใช้งานให้เป็นไปตามมาตรฐาน MIL-R-900F อีกทั้งยังต้องการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของยางคงรูปว่ามีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร เมื่อทำการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของยางธรรมชาติต่อยางอีพิดีเอ็ม

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อพัฒนาสูตรเคมียางของยางขอบประตูลูเรือที่มีสมบัติตามมาตรฐาน MIL-R-900F

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของการเติมยางธรรมชาติต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมในยางธรรมชาติผสมยางอีพิดีเอ็ม

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้สูตรเคมีของยางขอบประตูเรือที่มียางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีสมบัติเป็นไปตามมาตรฐาน MIL-R-900F และมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ขึ้นรูปเป็นยางขอบประตูเรือส่งผลให้อู่ทหารเรือธนบุรี สามารถผลิตยางขอบประตูเรือไว้ใช้ได้เอง

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.4.1 ผลิตวัสดุยางขอบประตูเรือด้วยยางธรรมชาติ เกรด STR 5L ผสมกับยางอีพียีเอ็ม (Ethylene Propylene Diene Monomer, EPDM) เกรด Keltan 4551A โดยมียางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบหลัก
- 1.4.2 ปริมาณสารตัวเติมเป็นเขม่าดำเกรด N550 อยู่ในช่วง 55-75 phr
- 1.4.3 ขั้นตอนการผสมยางในการศึกษาเบื้องต้นจะใช้เครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two Roll Mill) ที่โรงงานยางของอู่ทหารเรือธนบุรี ส่วนการทดสอบจริงจะใช้เครื่องผสมแบบปิด (Internal Mixer) ที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย
- 1.4.4 ขั้นตอนการขึ้นรูปและคงรูปยางจะใช้แม่พิมพ์แบบกดอัด (Compression Molding) ที่โรงงานยางของอู่ทหารเรือธนบุรี

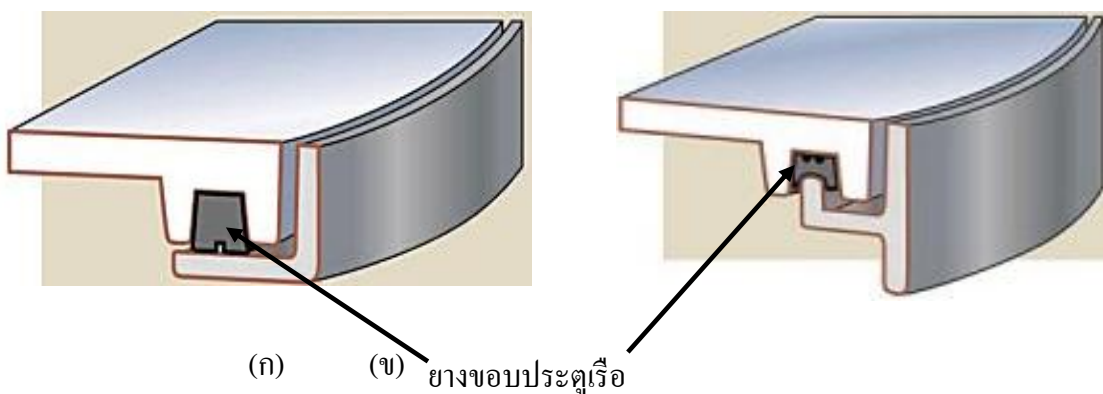
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางขอบประตูเรือ

ยางขอบประตูเรือ เป็นวัสดุที่ใช้สำหรับปิดช่องกันรั่วหรือทำให้รอยต่อปิดแน่น เพื่อป้องกันการรั่วซึมของของไหล (ของเหลวหรือก๊าซ) ที่ประตูและสามารถแบ่งลักษณะการใช้งานของยางขอบประตูเรือได้ 2 ลักษณะ [6] ดังแสดงในรูปที่ 2.1 คือ ยางขอบประตูเรือแบบ Compression Sealing Method อาศัยน้ำหนักของประตูกดไปยังยางขอบประตูเรือที่ติดอยู่กับขอบประตูเรือบนพื้นผิวของเรือ แรงกดนั้นส่งผลให้ยางขอบประตูเรือติดแน่นกับประตูจนของไหลไม่สามารถรั่วซึมไปยังอีกด้านได้

ยางขอบประตูเรือลักษณะนี้มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และยางขอบประตูเรือแบบ Knife Edge Sealing Method เมื่อประตูปิดจะไม่มีการกดน้ำหนักจากประตูไปยังยางขอบประตูเรือ แต่ที่ยางขอบประตูเรือจะมีหน้าแปลนที่มีลักษณะคล้ายสันมีดกดลงไปที่ยางขอบประตูเรือเมื่อมีแรง แรงจะกดลงไปที่ยางขอบประตูเรือจนทำให้เนื้อวัสดุสอดแทรกไปตามผิวหน้าสัมผัสที่คั่นอยู่และปิดผนึกกันรั่ว ทำให้มีประสิทธิภาพในการกันรั่วซึมที่ดี

ยางขอบประตูเรือที่ทางอุทหาเรือธนบุรีใช้ในปัจจุบันมีลักษณะการใช้งานแบบ Knife Edge Sealing Method เนื้อยางเป็นยางตันมีภาคตัดขวางเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 3 x1 ตารางเซนติเมตร ผลิตจากยางธรรมชาติแบบยางแท่งเป็นวัตถุดิบหลัก ทำการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal Mixer) และขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีด (Extruder) แล้วทำการคงรูปด้วยหม้ออบไอน้ำความดันสูง (Autoclave) รูปร่างของยางขอบประตูเรือดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 ยางขอบประตูเรือที่มีหลักการทำงานแบบ (ก) Compression Sealing Method และ (ข) Knife Edge Sealing Method [6]



รูปที่ 2.2 ยางขอบประตูเรือที่ใช้ภายในอุ้งทหารเรือธนบุรี

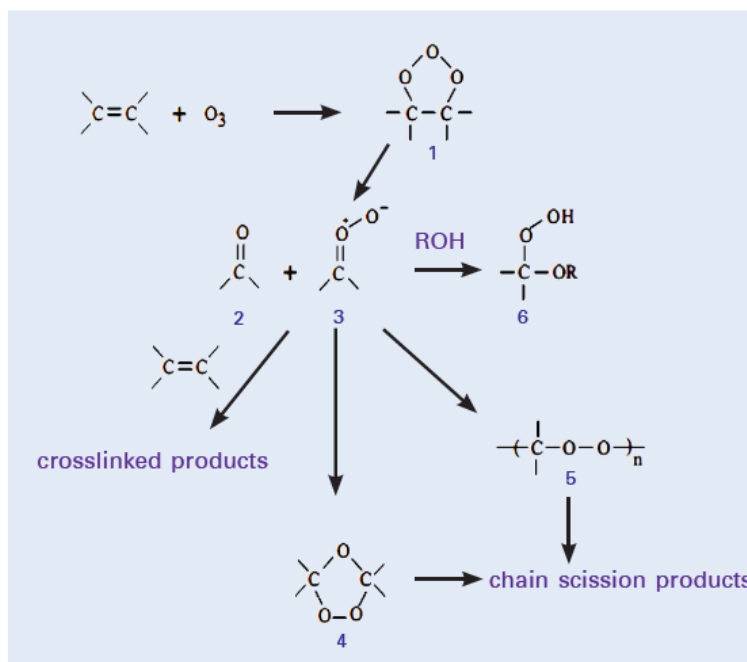
ในการแปรรูปยางธรรมชาติ (ยางดิบ) จะต้องนำยางธรรมชาติมาทำการเชื่อมโยง โมเลกุล หรือ การวัลคาไนซ์ (Vulcanization) หรือการทำให้ยางสุก (Curing) ซึ่งเป็นกระบวนการทางเคมีที่เปลี่ยนจากยางดิบที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นสายโซ่ตรง มีลักษณะอ่อนนุ่ม ยืดหยุ่นต่ำ ไม่แข็งแรง และไม่มีเสถียรภาพของรูปร่าง ไหลได้เมื่อทิ้งไว้นาน เป็นยางคงรูปที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบตาข่าย 3 มิติ มีความแข็งแรง ยืดหยุ่นสูง มีเสถียรภาพของรูปร่าง และทนอุณหภูมิสูง แต่เมื่อยางขอบประตูเรือที่ผลิตด้วยยางธรรมชาติผ่านการใช้งานจะเริ่มเกิดการเสื่อมสภาพ โดยยางขอบประตูเรือจะมีความแข็งแรงมากขึ้นและพบรอยแตกที่บริเวณผิวของยางขอบประตูเรือ ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ซึ่งการเสื่อมสภาพของยางขอบประตูเรื่อนั้นอาจเกิดจากปัจจัยต่าง ๆ [7], [8] ดังต่อไปนี้

1. การเสื่อมสภาพจากออกซิเจน (Oxygen Aging)

พันธะคู่ที่อยู่ในโมเลกุลของยางธรรมชาติจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ เรียกว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นที่พื้นผิวของยาง โดยมีอนุมูลเป็นปัจจัยสำคัญที่เร่งการเกิดปฏิกิริยาและอาจส่งผลให้ยางอ่อนลง (โมเลกุลของยางถูกตัดขาด) หรือยางอาจแข็งขึ้น (โมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมโยงมากขึ้น)

2. การเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซน (Ozone Aging)

โอโซนจะเข้าทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ของโมเลกุลยาง ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เมื่อผิวของยางขอบประตูเรือถูกดึงยืด การเข้าทำปฏิกิริยาของโอโซนจะ ทำให้เกิดรอยแตกในทิศทางที่ตั้งฉากกับแนวแรงดึง เมื่อยางขอบประตูเรือถูกดึงยืดมากขึ้นจะส่งผลให้เกิดรอยแตกบนพื้นผิวของยางมากยิ่งขึ้น

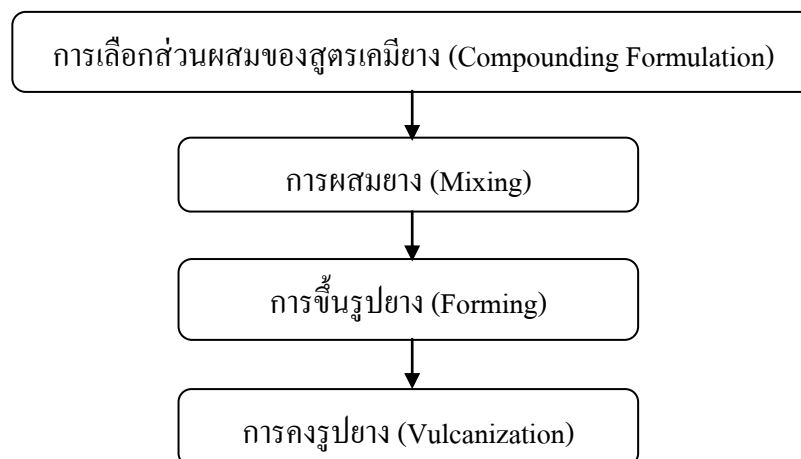


รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาระหว่างโอโซนกับพันธะคู่ของโมเลกุลยาง [8]

การป้องกันการเสื่อมสภาพของยางสามารถดำเนินการได้ 2 วิธีหลัก [8] ดังนี้

- การเติมสารเคมีเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของยางขอบประตู เรือ โดยสารเคมีเหล่านี้จะเข้าไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแต่วิธีนี้มีข้อจำกัดหลายด้าน เช่น สารเคมีที่ใช้อาจส่งผลให้ยางเปลี่ยนสีหรือสารเคมีอาจเคลื่อนตัวมาที่พื้นผิวและถูกชะออกจากพื้นผิวของยางระหว่างการใช้งานได้
- การใช้เทคโนโลยีพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากการเสื่อมสภาพของยางจะเกิดขึ้นกับพันธะคู่ในสายโซ่หลักของโมเลกุลยาง จึงนำเอายางอีพดีเอ็มที่มีเฉพาะพันธะเดี่ยวในสายโซ่หลักของโมเลกุลมาผสมด้วยเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านการทนทานต่อความร้อน และโอโซน

โดยทั่วไปการแปรรูปยางมีขั้นตอนหลักดังจะกล่าวในหัวข้อถัดไปดังแสดงในรูปที่ 2. 4 โดยในขั้นตอนการเลือกส่วนผสมของสูตรเคมียางนั้น มีองค์ประกอบต่าง ๆ มากมาย ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งแต่ละองค์ประกอบก็ส่งผลต่ออย่างคงรูปที่แตกต่างกันออกไป



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการแปรรูปจากยางดิบเป็นยางคงรูป [1]

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบหลักของสูตรเคมียาง [9]

ลำดับ	องค์ประกอบ
1	ยาง (Rubber)
2	สารทำให้คงรูป (Vulcanizing Agents)
3	สารตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelerators)
4	สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activators)
5	สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradants)
6	สารตัวเติม (Fillers)
7	สารทำให้ยางนิ่มและสารช่วยในกระบวนการผลิต (Plasticizers and Processing Aids)

2.2 ขั้นตอนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง

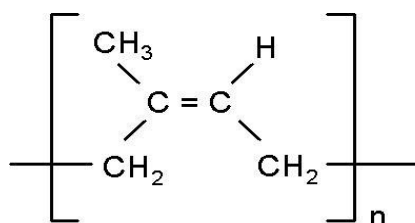
2.2.1 การเลือกส่วนผสมของสูตรเคมียาง

ยางดิบ คือ ยางที่ยังไม่ผ่านกระบวนการเชื่อมโยง ซึ่งยางดิบมีข้อจำกัดในการใช้งานมากมาย เช่น มีสมบัติเชิงกลที่ไม่ดีและสมบัติเชิงกลเหล่านี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ง่ายตามอุณหภูมิ และมีความทนทานต่อสารเคมีและตัวทำละลายต่าง ๆ ต่ำ ทั้งยังไม่สามารถคงรูปได้หลังจากขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ จึงมีความจำเป็นต้องพัฒนาหรือปรับปรุงคุณภาพของยางเพื่อให้เหมาะกับการใช้งาน [1] นั่นก็คือการเปลี่ยนสภาพจากยางดิบให้เป็นยางคงรูปหรือยางสุก ซึ่งการเปลี่ยนสภาพจากยางดิบให้เป็นยางสุกนอกจากจะใช้ยางเป็นวัตถุดิบหลักแล้วยังจำเป็นต้องใช้สารเคมีและสารตัวเติมต่าง ๆ มากมาย ซึ่งล้วน

แล้วแต่มีหน้าที่ที่แตกต่างกันออกไป ในการเลือกส่วนผสมของสูตรเคมีจำเป็นต้องเลือกใช้ชนิดและปริมาณของสารเคมีต่าง ๆ ด้วยความระมัดระวัง เพราะสารเคมีต่าง ๆ นอกจากจะมีผลโดยตรงต่อสมบัติของยางแล้วยังส่งผลต่อกระบวนการการผลิตและต้นทุนอีกด้วย โดยวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางหรือที่เรียกว่า สูตรเคมียาง สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มหลัก ๆ ดังนี้

2.2.1.1 ยาง (Rubber) ในปัจจุบันมีทั้งการนำเอาทั้งยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์มาใช้ในการผลิตยางขอบประตูเรือ ซึ่งยางแต่ละชนิดมีสมบัติที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นจึงต้องเลือกให้เหมาะสมและสอดคล้องกับการใช้งาน

ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 [10] โดยมีมอนอเมอร์จำนวน (n) ตั้งแต่ 15,000-20,000 หน่วยประกอบกันเป็นสายโซ่ โมเลกุล โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้าง การจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (Amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวก่อนข้างเป็นระเบียบ เช่น ที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อยางถูกยืด โมเลกุลของยางสามารถเกิดผลึก (Crystallize) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Crystallization) จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นยางก็จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (Strain Induced Crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดี นั่นคือ ยางจะมีความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear Resistance) ความทนทานต่อการขัดสี (Abrasion Resistance) สูงและความยืดหยุ่น (Elasticity) แม้ว่ายางธรรมชาติจะมีสมบัติที่ดีเหมาะสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ยางต่าง ๆ มากมาย แต่ยางธรรมชาติมีข้อเสียหลัก คือ เสื่อมสภาพเร็วภายใต้แสงแดดออกซิเจน โอโซน และความร้อน ดังที่กล่าวมาข้างต้น ดังนั้นในระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์การเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradants) จะช่วยยืดอายุการใช้งาน



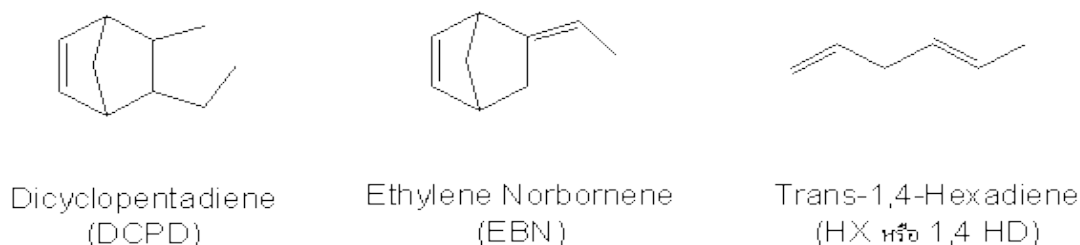
รูปที่ 2.5 มอนอเมอร์ $[C_5H_8]$ ที่จะประกอบกันเป็นสายโซ่
ในโครงสร้างของยางธรรมชาติ [10]

ยางสังเคราะห์ (Synthetic Rubber) คือ ยางที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีมีหลายชนิดซึ่งแต่ละชนิดมีสมบัติที่แตกต่างกันไป โดยปัจจุบันได้มีการนำยางสังเคราะห์มาใช้ในการผลิต

ยางขอบประตูเรือ การเลือกยางสังเคราะห์จึงต้องเลือกตามสมบัติเด่นให้ตรงตามลักษณะการใช้งาน [4, 5, 10] จากการศึกษาพบว่า ยางสังเคราะห์ที่มีความทนทานต่อโอโซนและความร้อนได้ดี คือ ยางเอทิลีน โพรพิลีน ไดอีน (Ethylene Propylene Diene Monomer, EPDM) หรือเรียกว่า ยางอีพีดีเอ็ม

ยางอีพีดีเอ็มเป็นยางสังเคราะห์ที่ได้มาจากการทำปฏิกิริยาโคโพลิเมอร์ไรเซชันระหว่างมอนอเมอร์ของ เอทิลีน (Ethylene) กับโพรพิลีน (Propylene) ซึ่งต่อมาได้มีการเติมมอนอเมอร์ไดอีน (Diene) ลงไปเล็กน้อยในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน ทำให้ได้ยางที่มีส่วนที่ไม่อิ่มตัวอยู่ใน

สายโซ่โมเลกุลและสามารถคงรูปได้ด้วยกำมะถัน ยางอีพีดีเอ็มมีหลายเกรด แต่ละเกรดแตกต่างกัน ที่สัดส่วนของเอทิลีน โพรพิลีน และไดอีนโดยทั่วไปยางชนิดนี้จะมีเอทิลีนอยู่ 45-85 % โมลและปริมาณของไดอีนอยู่ในช่วง 3-11 % โมล ชนิดของไดอีนที่ใช้อย่างกว้างขวางมี 3 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.6 คือ Dicyclopentadiene (DCPD) Ethylidene Norbornene (ENB) และ trans-1,4-hexadiene (1,4 HD) โดยชนิดที่ใช้มากที่สุดคือ ENB เพราะจะทำให้โมเลกุลของยางว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกำมะถัน (Sulphur vulcanization)



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของไดอีนที่มีอยู่ในยางอีพีดีเอ็ม [10]

เนื่องจากการจัดเรียงตัวของมอนอเมอร์ในสาย โซ่โมเลกุลเป็นแบบไม่มีรูปแบบ (Random) ทำให้ได้พอลิเมอร์อสัณฐาน (Amorphous) ยางชนิดนี้จึงไม่ตกผลึกส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงดึงค่อนข้างต่ำ และต้องอาศัยสารเสริมแรง (Reinforcing Filler) เข้าช่วย อย่างไรก็ตามยางที่มีสัดส่วนของเอทิลีนสูง จะมีการตกผลึกได้บ้าง จึงส่งผลให้ยางในสภาพยังไม่คงรูปมีความแข็งแรงสูง (High Green Strength) สามารถที่จะเติมน้ำมันและสารตัวเติมได้มาก แต่ข้อเสียของยางที่มีปริมาณเอทิลีนสูง คือ การบดผสมยางที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้ยากและสมบัติของยางที่อุณหภูมิต่ำจะไม่ดีเพราะการตกผลึกของยางจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง เนื่องจากยางอีพีดีเอ็มมีพันธะคู่ใน โมเลกุลน้อยมาก จึงทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาพอากาศออกซิเจน โอโซน แสงแดด และความร้อนได้ดี นอกจากนี้ยังทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากสารเคมีกรดและด่างได้ดีอีกด้วย โดยในโครงการการศึกษาวิจัยนี้เลือกใช้

ยางอีพิดีเอ็ม กรด Keltan 4551A ซึ่งเป็นกรดที่มีน้ำมันผสมอยู่ 50% ส่งผลให้การผสมยางและสารเคมีต่าง ๆ ทำได้ง่ายขึ้น สารเคมีต่าง ๆ แยกตัวและผสมเข้ากับยางได้ดี เนื่องจากน้ำมันที่ผสมอยู่ในยางอีพิดีเอ็มเป็นสารที่ช่วยผสมในกระบวนการผลิต

พอลิเมอร์ผสม (Polymer Blend) [1, 2, 3, 11] คือ พอลิเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปที่นำมาผสมด้วยวิธีเชิงกล อาจมีการเติมสารช่วยผสมที่เหมาะสมด้วย โดยพอลิเมอร์ที่มีการเติมสารช่วยผสมจะมีสมบัติการใช้งานดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสม การผสมพอลิเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปเป็นการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ให้เหมาะสมกับการใช้งานตามต้องการได้ อาจเป็นการผสมยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์ ยางสังเคราะห์กับยางสังเคราะห์หรือยาง (ยางธรรมชาติหรือยางสังเคราะห์) กับเทอร์โมพลาสติก โดยมีปัจจัยที่ต้องคำนึงถึง คือ การบดให้ยางธรรมชาตินิ่มเพื่อให้มีความหนืดอยู่ในระดับเดียวกับยางสังเคราะห์ มิฉะนั้นพอลิเมอร์ผสมก็จะมีคุณภาพต่ำกว่าที่ควรจะเป็นและการเลือกระบบการทำให้ยางคงรูปที่สอดคล้องกับยางทั้งสองชนิดที่ผสมกัน

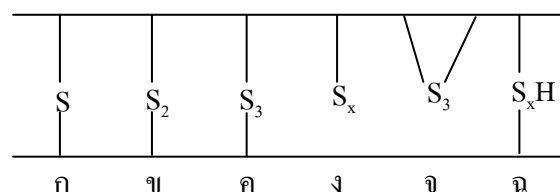
2.2.1.2 สารทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing agents) จะถูกผสมลงในยางเพื่อทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่เรียกว่า ปฏิกิริยาการคงรูปหรือปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่โมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมโยกัน ในลักษณะเหมือน เป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ซึ่งทำให้ยางเปลี่ยนสภาพจากอ่อนเหนียวหนืด และไหลได้ไปเป็นยางคงรูปที่มีความยืดหยุ่นสูงมีความทนทาน และมีสมบัติที่เสถียร ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนัก การคงรูปยางที่นิยมใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกเป็น 3 ระบบใหญ่ ๆ ได้แก่ ระบบที่ใช้กำมะถัน (Sulfur) ระบบที่ใช้เพอร์ออกไซด์ (Peroxide) และระบบที่ใช้สารเคมีอื่น ๆ เช่น โลหะออกไซด์ ซึ่งโครงการการศึกษาวิจัยนี้จะใช้ระบบการคงรูปด้วยกำมะถันซึ่งเป็นระบบที่ใช้กันมากที่สุด [1, 5, 12] เนื่องจากมีต้นทุนต่ำ การคงรูปเกิดขึ้นได้เร็ว และยางคงรูปที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี จึงนิยมใช้กับการคงรูปยางแทบทุกชนิดที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล เนื่องจากพันธะคู่เป็นตำแหน่งที่กำมะถันจะเข้าไปทำปฏิกิริยาและทำให้เกิดการเชื่อมโยทางเคมีขึ้นจึงไม่สามารถใช้ในการคงรูปยางที่ไม่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลได้ โดยอัตราเร็วของการคงรูปด้วยกำมะถันจะขึ้นกับปริมาณพันธะคู่ที่มีอยู่ในสายโซ่โมเลกุลของยาง โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเริ่มจากการนำยางมาผสมกับกำมะถันและให้ความร้อน ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นผ่านอนุมูลอิสระ โดยเริ่มแรกกำมะถัน (S_8) จะแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ ดังแสดงในสมการที่ 2.1 อิเล็กตรอนของอนุมูลอิสระซึ่งอยู่ที่ปลายด้านหนึ่งก็จะเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของยาง สายโซ่ที่ 1 ในขณะที่อิเล็กตรอนซึ่งอยู่ที่ปลายอีกด้านหนึ่งของอนุมูลอิสระก็จะเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของยางอีกสายโซ่หนึ่งเกิดเป็นการเชื่อมโยทางเคมี โดยปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นได้ช้ามาก จำเป็นต้องใช้กำมะถันในปริมาณที่สูงและต้องใช้อุณหภูมิสูงมาก ๆ จึงจะทำให้ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นได้ดี ส่งผลให้มีการพัฒนาสารเคมีต่าง ๆ เพื่อทำให้

เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น ยางมีระดับการคงรูป สูงและมีสมบัติเชิงกลที่ดี ได้แก่ สารตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelerator) และสารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activator)



ในระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน อาจมีโครงสร้างการเชื่อมโยงหลายรูปแบบเกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยจะแบ่งเป็นแบบต่าง ๆ [9], [13] ดังนี้

- ระบบการคงรูปแบบดั้งเดิม (Conventional Vulcanization: CV) เป็นระบบที่มีอัตราส่วนของปริมาณกำมะถันต่อสารตัวเร่งปฏิกิริยาสูง โดยการเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเป็นแบบพอลิซัลฟิดิก (Polysulfidic) ยางคงรูปที่ได้มีความยืดหยุ่นสูง มีสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงพลวัตและความต้านทานต่อการล้าตัว (Fatigue Resistance) ที่ดี
- ระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ (Efficient Vulcanization: EV) เป็นระบบที่มีอัตราส่วนของปริมาณกำมะถันต่อสารตัวเร่งปฏิกิริยาค่ำ การเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเป็นแบบมอนอซัลฟิดิก (Monosulfidic) หรือไดซัลฟิดิก (Disulfidic) ถึงแม้ยางคงรูปที่ได้จะมีสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงพลวัตที่ดีกว่าระบบการคงรูปแบบดั้งเดิม แต่ยางคงรูปที่ได้จะมีความทนทานต่อความร้อนที่ต่ำกว่า มีค่าการเสียรูปหลังการกดอัด (Compression Set) ที่ต่ำกว่า และมีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเมื่ออบคงรูปนานเกินไปได้ดี เนื่องจากพลังงานของพันธะของ C-S (~279 kJ/mol) มีค่าสูงกว่าพลังงานพันธะของ S-S (~206 kJ/mol) พันธะแบบมอนอซัลฟิดิกจึงทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนได้ดีกว่าแบบพอลิซัลฟิดิก
- ระบบการคงรูปแบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-Efficient Vulcanization: Semi-EV) เป็นระบบที่มีอัตราส่วนของปริมาณกำมะถันต่อสารตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ระหว่าง 2 ระบบ และยางคงรูปที่ได้จะมีสมบัติอยู่ระหว่างกลางของทั้ง 2 ระบบ



รูปที่ 2.7 โครงสร้างการเชื่อมโยงแบบต่าง ๆ (ก) มอนอซัลฟิดิก (ข) ไดซัลฟิดิก (ค) พอลิซัลฟิดิก เมื่อ x มากกว่าหรือเท่ากับ 3 (ง) สายโซ่กำมะถัน (จ) โครงสร้างแบบวง และ (ฉ) หมู่ไทออล (Thiol) [1]

2.2.1.3 สารตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelerators) โดยปกติปฏิกิริยาของยาง (ปฏิกิริยาระหว่างกำมะถันและยาง) จะเกิดขึ้นได้ช้ามากแม้ที่อุณหภูมิสูง ๆ อาจต้องใช้เวลานานเป็นชั่วโมงและใช้กำมะถันในปริมาณที่สูงมาก ยางคงรูปที่ได้จะมีสมบัติเชิงกลต่ำ จึงได้มีการใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อช่วยทำให้ปฏิกิริยาระหว่างยางและกำมะถันเกิดขึ้นได้เร็วขึ้น ลดระยะเวลาในการคงรูปยาง ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้กำมะถันในปริมาณที่สูงเกินไปและยางคงรูปที่ได้ก็มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้น ส่งผลให้ยางคงรูปที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น สำหรับโครงการการศึกษาวิจัยนี้ในเบื้องต้นได้ทำการทดลองโดยใช้ N-cyclohexyl-2-benzothiazyl-sulfenamide (CBS) และ Tetramethylthiuram Disulfide (TMTD)

2.2.1.4 สารกระตุ้นและสารหน่วงปฏิกิริยา (Activators and retarders)

สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activators) คือ สารเคมีที่ช่วยเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของยาง และสารหน่วงปฏิกิริยา (Retarders) คือ สารเคมีที่ช่วยเพิ่มระยะเวลาสกรอร์หรือระยะเวลาก่อนที่ยางจะเริ่มเกิดปฏิกิริยาของยาง ช่วยลดโอกาสของการเกิดยางตายทั้งในระหว่างการเก็บรักษายางคอมพาวด์และในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป ส่งผลให้สามารถเก็บยางคอมพาวด์ไว้ได้นานยิ่งขึ้นและทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปด้วยความปลอดภัยยิ่งขึ้น ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาสารตัวเร่งปฏิกิริยามากมายหลายชนิดให้ผู้ผลิตยางได้เลือกใช้ จึงมีการใช้สารหน่วงปฏิกิริยาในกรณีที่ต้องการทำเป็นเช่นนั้น โดยทั่วไปนิยมใช้ซิงก์ออกไซด์ (ZnO) เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาควบคู่กับกรดสเตียริก (Stearic Acid) ซึ่งเป็นสารที่ช่วยให้ซิงก์ออกไซด์ทำหน้าที่ได้เต็มประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น [2, 3, 9, 11, 14]

2.2.1.5 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradants) คือ สารเคมีที่ช่วยยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ยาง เนื่องจากเมื่อยางเสื่อมสภาพ สมบัติต่าง ๆ ของยางก็จะค่อย ๆ ลดลง โดยสารป้องกันการเสื่อมสภาพแต่ละตัวจะมีหน้าที่และประสิทธิภาพที่แตกต่างกัน ไม่ว่าจะเป็นสารป้องกันการออกซิเดชันและสารป้องกันโอโซน สารป้องกันยางเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากแสงยูวีและเนื่องจากการพ่นอง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีอายุการใช้งานที่นานขึ้น แต่โดยทั่วไปแล้วสารป้องกันการเสื่อมสภาพชนิดที่เปลี่ยนสีอย่างรุนแรงจะมีประสิทธิภาพในการป้องกันสูงกว่าชนิดที่ไม่เปลี่ยนสี ดังนั้นในโครงการการศึกษาวิจัยนี้จะทำการมุ่งเน้นไปที่การป้องกันการเสื่อมสภาพจากออกซิเจนและโอโซน เนื่องจากก๊าซทั้งสองชนิดจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่งผลให้สมบัติของยางค่อย ๆ ลดลง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

สารป้องกันโอโซน โอโซนจัดเป็นควาออกซิไดซ์ที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าออกซิเจนค่อนข้างมาก ถึงแม้ว่าในชั้นบรรยากาศจะมีโอโซนในปริมาณที่ค่อนข้างน้อย ประมาณ 2-3 ppm (parts per hundred million) แต่โอโซนก็สามารถทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพได้โดยการโจมตีโมเลกุลของ

ตรงตำแหน่งพันธะคู่และจะเข้าโจมตีเฉพาะพันธะคู่ด้านบน ดังนั้นสารที่ทำหน้าที่ป้องกันการเสื่อมสภาพจากโอโซนจึงเป็นสารที่เน้นป้องกันพันธะคู่บนของยางคงรูปโดยแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มหลัก ๆ ตามกลไกการทำงาน [8] คือ

— สารป้องกันทางกายภาพเป็นสารเคมีที่มีความเฉื่อยสูง สารเคมีจะเคลื่อนตัวออกมาที่ผิวของยางคงรูป ก่อให้เกิดเป็นแผ่นฟิล์มบาง ๆ เคลือบผิวยาง เรียกว่า การบลูม (Blooming) สารเคมีที่บลูมออกมาจะ ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้โอโซนเข้าทำปฏิกิริยากับยางคงรูป ตัวอย่างของสารป้องกันทางกายภาพ ได้แก่ ไซโซโครคาร์บอนหรือแว็กซ์ การป้องกันด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด เพราะไขมันที่เติมจะบลูมออกมาที่พื้นผิวของยางคงรูป ก่อให้เกิดเป็นแผ่นฟิล์มบางเคลือบป้องกันยางคงรูปจากการโจมตีของโอโซน ซึ่งในโครงการการศึกษาวิจัยนี้ได้เลือกใช้ไขพาราฟินและไขสเตียรียนทำงานร่วมกัน โดยไขพาราฟินเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นแบบเชิงเส้นที่มีสูตรโมเลกุล คือ C_nH_{2n+2} โดยค่าของ n อยู่ในช่วง 18-55 เนื่องจากมีน้ำหนักโมเลกุลเล็กจึงมีความสามารถในการละลายในยางสูง และสามารถบลูมออกมาสู่ผิวยางคงรูปได้อย่างรวดเร็ว แต่ถูกชะล้างหรือทำลายด้วยแรงเชิงกลได้ง่าย ส่วนไขสเตียรียนเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบกิ่งก้านสาขาที่มีน้ำหนักโมเลกุลมาก โดยค่า n อยู่ในช่วง 34-70 สามารถปกป้องยางคงรูปได้ดีที่อุณหภูมิสูง จึงนิยมใช้ไขทั้งสองชนิดผสมกัน เพื่อการใช้งานที่อุณหภูมิที่กว้างมากยิ่งขึ้น เนื่องจากมีน้ำหนักโมเลกุลใหญ่จึงเคลื่อนตัวออกมาสู่ผิวยางคงรูปได้ช้า แต่มีความทนทานต่อการชะล้างหรือทำลายที่ดีกว่าไขพาราฟิน

— สารป้องกันทางเคมีเป็นสารเคมีที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยากับโอโซนสูง สารเคมีจะเคลื่อนตัวออกมาที่ผิวยางคงรูป เมื่อทำปฏิกิริยากับโอโซนแล้วจะก่อให้เกิดสารประกอบใหม่ที่มีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์ม ซึ่งสารที่นิยมใช้กัน ได้แก่ สารประกอบในกลุ่มพาราฟีนิลีนไดเอมีน เนื่องจากเมื่อใช้สารประกอบกลุ่มนี้ร่วมกับไฮโดรคาร์บอนแล้วจะทำให้ประสิทธิภาพในการปกป้องยางสูงขึ้นค่อนข้างมาก เพราะไขมันจะทำหน้าที่เป็นตัวพาสารกลุ่มพาราฟีนิลีนไดเอมีน (Para-Phenylenediamines, PPDS) เคลื่อนตัวออกมายังพื้นผิวของยางได้ง่าย โดยในโครงการการศึกษาวิจัยนี้ได้เลือกใช้ไดเมทิลบิวทิล-ฟีนิลฟีนิลีนไดเอมีน (N-(1, 3-dimethylbutyl)-n-phenyl-p-phenylenediamine, 6PPD) เนื่องจากสารตัวนี้จะระเหยและถูกน้ำชะออกได้ยากกว่าสารตัวอื่น ๆ ส่งผลให้ระยะเวลาในการปกป้องยางสูงขึ้น

2.2.1.6 สารตัวเติม (Fillers) จะถูกเติมเข้าไปในยางเพื่อจุดประสงค์หลายอย่าง เช่น เพื่อเสริมแรงให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เพื่อให้ยางคอมพาวด์มีสมบัติเฉพาะที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิตหรือเพื่อลดต้นทุน สารตัวเติมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ ตามประสิทธิภาพของการเสริมแรง คือ สารตัวเติมเสริมแรง (Reinforcing Fillers) ซึ่งส่งผลให้ค่ามอดูลัสและความแข็งของยางสูงขึ้น ในขณะที่การยืดตัว ณ จุดขาดและสมบัติการกระด้างกระดอนของยางจะลดลง ได้แก่ เขม่าดำ (Carbon

Black) และซิลิกา (Silica) และอีกกลุ่มคือ สารตัวเติมไม่เสริมแรงหรือสารตัวเติมเฉื่อย ซึ่งส่งผลให้ความหนืดของยางเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่ส่งผลให้สมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของยางคงรูปด้อยลง ได้แก่ ทัลคัม (Talc) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และดินขาว (Clay) โดยในโครงการการศึกษาวิจัยนี้เลือกใช้ เมมาดำเกรด N550 [9] ซึ่งเป็นเกรดที่ทำให้ยางหดตัวหลังอัดผ่านตาย (Die) ต่ำ สามารถอัดผ่านตายได้อย่างรวดเร็วและได้ยางคงรูปที่มีผิวเรียบ

2.2.1.7 สารทำให้ยางนิ่มและสารช่วยในกระบวนการผลิต (Plasticizers and processing aids) จะช่วยให้ยางนิ่มลงหรือทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้อย่างขึ้นหรือทำให้สารตัวเติมสามารถเข้าไปผสมกับยางได้ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้เวลาและพลังงานที่ใช้ในการผลิตลดลง ซึ่งการเลือกใช้สารทำให้ยางนิ่มต้องพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นความเข้ากันได้กับยาง ประสิทธิภาพ ความต้านทานต่อการตกสี และราคา ในการวิจัยนี้เลือกใช้น้ำมันพาราฟินิก [13] เพราะเป็นน้ำมันที่เข้ากันได้ดีทั้งกับยางธรรมชาติและยางอีพียีเอ็ม

2.2.2 การผสมยาง

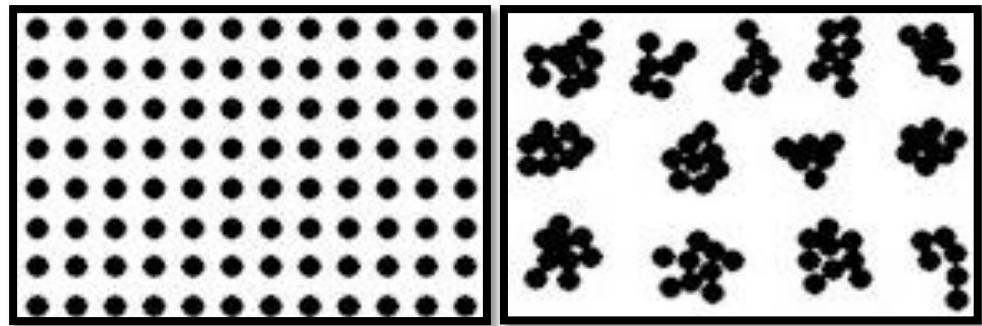
การผสมยางเป็นอีกขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ยาง เนื่องจากถ้าสารเคมีที่เติมมีการกระจายตัว (Distribution) หรือการแตกตัว (Dispersion) ได้ไม่ดี จะส่งผลต่อความสม่ำเสมอระดับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ยาง ดังนั้นการใช้กระบวนการผสมที่แตกต่างกัน ไม่ว่าจะเป็นการใช้เครื่องมือผสมคนละชนิดกัน การใช้สภาวะการผสมที่แตกต่างกัน รวมทั้งการจัดลำดับการเติมสารเคมีในเครื่องผสมที่แตกต่างกัน ย่อมส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ยางที่ได้มีสมบัติที่แตกต่างกันถึงแม้ว่าจะเป็นสูตรเดียวกันก็ตาม เนื่องจากยางที่นำมาผสมมีสถานะเป็นของแข็งและมีความหนืดสูงมาก จึงจำเป็นต้องทำการบดย่อยเพื่อลดความหนืดก่อนที่จะทำการเติมสารเคมีอื่น ๆ โดยเฉพาะยางธรรมชาติซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลสูง การบดย่อยจะทำให้ยางมีความหนืดต่ำลงหรือไหลได้มากขึ้น ส่งผลให้สารเคมีอื่น ๆ สามารถเข้าไปรวมเป็นเนื้อเดียวกัน (Incorporation) กับเนื้อยางได้ง่ายยิ่งขึ้น โดยในระหว่างบดยางโมเลกุลของยางจะถูกตัดด้วยแรงเฉือน ในขณะที่อุณหภูมิความหนืดของยางค่อนข้างสูง ดังนั้นแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะสูงขึ้นด้วย แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความหนืดยางลดลงส่งผลให้แรงเฉือนลดลงประสิทธิภาพในการบดย่อยยางที่เกิดจากแรงเฉือนก็จะลดลง [1]

เนื่องจากสารเคมีบางชนิดสามารถละลายในยางได้ง่ายเมื่อได้รับอุณหภูมิสูง แต่บางชนิดก็ไม่สามารถละลายเข้าไปในเนื้อยางได้ การผสมยางส่วนใหญ่จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะทำให้สารตัวเติมกระจายตัวและแตกตัวในยางได้ดี ดังแสดงในรูปที่ 2.8(ก) [15] โดยอัตราเร็วของการผสมระหว่างยางกับสารเคมีจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการไหลของยางหรือก็คือค่าความหนืดของยางนั่นเอง ซึ่งนอกจากความหนืดแล้วพื้นที่ผิวของยางก็มีผลต่ออัตราเร็วของการผสมกันระหว่างยางกับสารตัวเติมด้วย

การเพิ่มพื้นที่ผิวสามารถทำได้โดยการตัดยางให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ ก่อนใส่ลงในเครื่องผสมหรือการปรับสภาวะของการผสม เช่น การปรับลดความเร็วรอบในการหมุนโรเตอร์ให้ต่ำลง ซึ่งจะช่วยลดการฟุ้งกระจายของสารตัวเติมทำให้ยางกับสารตัวเติมผสมกันได้ดียิ่งขึ้น และการเพิ่มอุณหภูมิของการผสมซึ่งจะส่งผลให้ความหนืดของยางลดลง ยางกับสารตัวเติมจะผสมกันได้ดียิ่งขึ้น

หลังจากที่สารตัวเติมเข้ารวมกันกับยางแล้ว แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะทำให้สารเคมีกระจายตัวในเนื้อยางซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาของการผสม หากกระบวนการ การกระจายตัวเกิดขึ้นได้ไม่ดี ดังแสดงในรูปที่ 2.9(ก) [15] ยางคอมพาวด์ที่ได้จะมีสมบัติไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งก้อน ซึ่งจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ยางที่ได้มีคุณภาพไม่คงที่ ประสิทธิภาพในการกระจายตัวของสารเคมีจะขึ้นกับความสามารถในการไหลของยางในห้องผสม โดยทั่วไปยางที่มีความหนืดต่ำจะมีความสามารถในการไหลที่ดีจึงทำให้การกระจายตัวเกิดขึ้นได้ง่าย โดยลักษณะการกระจายตัวของสารเคมีที่ดีจะมีลักษณะดังแสดงในรูป 2.9(ข) [15] ดังนั้นปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อความหนืดหรือความสามารถในการไหลของยางจะส่งผลโดยตรงต่อการกระจายตัวของสารตัวเติม ซึ่งตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์ ความดันแรม และอัตราส่วนปริมาตรของยางคอมพาวด์ต่อปริมาตรของห้องผสม (ฟิลแฟกเตอร์, Fill Factor) เป็นต้น

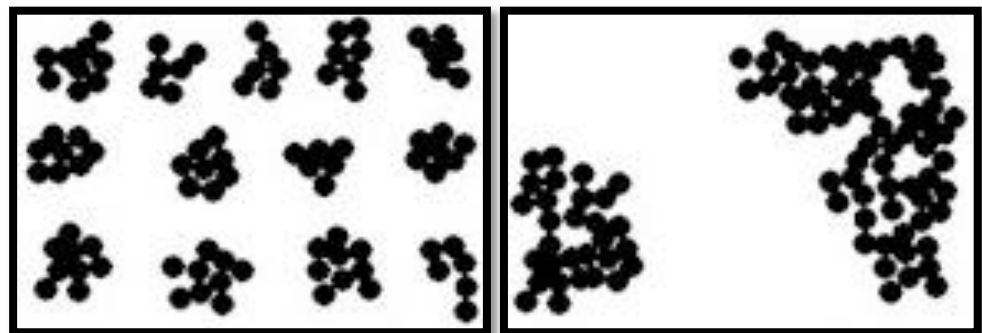
การแตกตัวของสารเคมีเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญมากในการผสมสารเคมีให้เข้ากับยาง เพราะการแตกตัวที่ดี ดังแสดงในรูปที่ 2.8(ก) [15] จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง การแตกตัว คือกระบวนการที่ทำให้สารเคมีซึ่งรวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่แตกตัวออกเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดเล็กลงด้วยแรงเฉือนที่เกิดจากเครื่องผสม จากนั้นกลุ่มก้อนขนาดเล็กนี้ก็จะกระจายตัวในเนื้อยางต่อไป เมื่อการผสมดำเนินต่อไปแรงเฉือนก็จะทำให้กลุ่มก้อนขนาดเล็กนี้แตกตัวต่อไปจนเป็นหน่วยที่เล็กที่สุดก็จะถือว่าการผสมเกิดขึ้นสมบูรณ์ การแตกตัวจะเกิดได้อย่างมีประสิทธิภาพก็ต่อเมื่อกระบวนการเข้ารวมตัวกันระหว่างยางและสารเคมีเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์และการแตกตัวนี้มักเกิดขึ้นพร้อม ๆ กับการกระจายตัว ถ้าหากกระบวนการการแตกตัวเกิดขึ้นได้ไม่ดี ดังแสดงในรูปที่ 2.8(ข) [15] ยางคอมพาวด์ที่ได้จะมีความหนืดสูง ส่งผลให้กระบวนการขึ้นรูปเป็นไปด้วยความยากลำบากและสิ้นเปลืองพลังงานในกระบวนการผลิตสูง ทั้งยังส่งผลทำให้ยางคงรูปที่ได้มีสมบัติเชิงกลต่ำ ซึ่งปัจจัยที่มีผลโดยตรงต่อการแตกตัวคือ แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในระหว่างการผสมและเวลาที่ใช้ในการผสมต้องนานเพียงพอที่จะทำให้สารเคมีแตกตัวและกระจายตัวในยางได้อย่างทั่วถึง แต่ก็ควรหลีกเลี่ยงการผสมที่นานเกินไป เพราะนอกจากจะสิ้นเปลืองพลังงานและเวลาในการผลิตแล้วยังส่งผลเสียต่อสมบัติเชิงกลอีกด้วยเพราะยางที่ได้รับแรงเฉือนนานมาก ๆ จะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ทั้งยังอาจทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพได้เนื่องจากได้รับอนุมูลอิสระสูงนานเกินไป



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.8 (ก) โมเดลแสดงลักษณะการผสมยางที่มีการกระจายตัวและการแตกตัวที่ดี และ (ข) มีการกระจายตัวที่ดีแต่มีการแตกตัวที่ไม่ดี [15]



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.9 (ก) โมเดลแสดงลักษณะการผสมยางที่มีการกระจายตัวที่ไม่ดี และ (ข) ดี [15]

เครื่องผสมยางเป็นเครื่องมือที่จะช่วยให้การผสมยางมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น จำเป็นต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะของผลิตภัณฑ์ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีและรูปร่างที่เหมาะสมกับการใช้งาน โครงการการศึกษาวิจัยนี้ได้เลือกใช้เครื่องผสมยาง 2 แบบ [1] คือ เครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง และเครื่องผสมระบบปิด โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two Roll Mill) เป็นเครื่องผสมระบบเปิด ประกอบด้วยลูกกลิ้ง 2 ลูก เรียงตัวในแนวนอนขนานกัน หมุนเข้าหากันด้วยความเร็วที่ต่างกัน ทำให้เกิดแรงเฉือนที่ค่อนข้างสูง สารเคมีต่าง ๆ เกิดการแตกตัวและการกระจายตัวผสมเข้ากับเนื้อยางได้ดี ในระหว่างผสมยาง ยางจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศค่อนข้างสูง ทำให้มีการระบายความร้อนที่ดี อย่างไรก็ตามเครื่องผสมชนิดนี้มีข้อเสียคือ การผสมใช้ระยะเวลาค่อนข้างนาน การควบคุมคุณภาพของการผสมในแต่ละครั้งทำได้ยาก เนื่องจากมีการฟุ้งกระจายของสารเคมีและคุณภาพของการผสมยังขึ้นกับทักษะความชำนาญของผู้ปฏิบัติการอีกด้วย

เครื่องผสมระบบปิด (Internal Mixer) มีส่วนประกอบหลัก ๆ 4 ส่วน ได้แก่ ห้องผสม (Chamber) โรเตอร์หรือตัวผสม (Rotor) แรมหรือแท่งกด (Ram) และระบบหล่อเย็น (Cooling System) โดยแรงเฉื่อยในการผสมจะเกิดขึ้นระหว่างปีกของโรเตอร์กับผนังของห้องผสม ขางและสารเคมีจะถูกบีบอัดผสมกันในสภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิอย่างเหมาะสม ทำให้สารเคมีแตกตัวและผสมกับยางได้ดียิ่งขึ้น ไม่เกิดการฟุ้งกระจายของสารเคมี ระยะเวลาในการผสมน้อยและผู้ปฏิบัติงานไม่จำเป็นต้องมีทักษะมากนัก ส่งผลให้ยางคอมพาวด์ที่ได้มีคุณภาพค่อนข้างสม่ำเสมอ และยังสามารถผสมยางคอมพาวด์ได้ในปริมาณมาก แต่ข้อเสียของเครื่องผสมชนิดนี้ คือ การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นได้ยาก ทำให้อุณหภูมิระหว่างผสมสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว มีการลงทุนสูงเนื่องจากเครื่องจักรมีราคาแพง

2.2.3 การขึ้นรูปยางและการคงรูป

หลังจากการผสมยางเสร็จสิ้นจนได้เป็นยางคอมพาวด์แล้วจะต้องนำไปขึ้นรูปตามต้องการและนำไปคงรูปต่อไป โดยโครงการการศึกษาวิจัยนี้ใช้การขึ้นรูปและการคงรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบกดอัดเพื่อให้ได้ชิ้นทดสอบตามที่มาตรฐาน MIL-R-900F [16] กำหนดไว้ การขึ้นรูปและคงรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบกดอัด (Compression Molding) [1] เป็นวิธีการขึ้นรูปพร้อมกับการคงรูปโดยอาศัยความร้อนและแรงอัด ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน วิธีนี้จะให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ก่อนจะนำยางไปใส่ในเบ้าพิมพ์ ความร้อนจากแม่พิมพ์จะทำให้ยางมีความหนืดต่ำลงไหลเต็มเบ้าพิมพ์จนทำให้เกิดปฏิกิริยาคงรูปต่อไป

2.3 มาตรฐาน MIL-R-900F

จากการค้นคว้าพบว่า การผลิตยางขอบประตูเรือจะใช้มาตรฐาน MIL-R-900F เป็นมาตรฐานอ้างอิงในการผลิต [16] ซึ่งมีการกำหนดสมบัติของวัสดุ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ทั้งนี้การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องจะอ้างอิงตามมาตรฐาน Federal Test Method [17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25]

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดตามมาตรฐาน MIL-R-900F [16]

สมบัติ	ข้อกำหนดมาตรฐาน MIL-R-900F
ความถ่วงจำเพาะ	ไม่เกิน 1.4
ความแข็ง (Shore A)	45±5
ความดันในการอุดรอยรั่ว (psi)	ไม่ต่ำกว่า 95
การเสีรูปลถวรหลังกคที่ 100°C 46 h(%)	ไม่เกิน 30
ความทนทานต่อแรงคัง (MPa)	6.9
การยัดตัว ณ จุคขาด (%)	300
<u>สมบัติหลังบ่มเร่ง (100°C, 46h)</u>	
ความแข็ง (Shore A)	ไม่เกิน 55
ความดันในการอุดรอยรั่ว (psi)	ไม่ต่ำกว่า 70
ร้อยละการคงอยู่ของความทนทานต่อแรงคัง (%)	ไม่ต่ำกว่า 75
ร้อยละการคงอยู่ของการยัดตัว ณ จุคขาด (%)	ไม่ต่ำกว่า 70
ปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงหลังแช่น้ำกลั่น 24 h(%)	-2 ถึง +5
ปริมาณสารถูกสกัดด้วยน้ำกลั่นเคือค (%)	ไม่เกิน 1
ความทนทานต่อโอโซน (100 pphm, 70h)	ไม่มีรอยแตกบนพื้นผิว

2.4 ทบทวนวรรณกรรม

กฤษณา คงศิลป์และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานต่าง ๆ โดยนำยางธรรมชาติมาผสมกับพอลิเมอร์ 4 ชนิด คือ ยางไนไทรล์ (NBR) ยางอีพดีเอ็ม (EPDM) พอลิพรอพิลีน (PP) และพอลิเอททีลีน (PE) และปรับสัดส่วนการผสมระหว่างยางธรรมชาติและพอลิเมอร์ทั้ง 4 ชนิด พบว่า สัดส่วนยางอีพดีเอ็มที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีความต้านทานต่อโอโซนดีขึ้น แต่ค่าความทนต่อแรงคังจะลดลง นอกจากนั้นยางอีพดีเอ็มยังสามารถรับสารตัวเติมได้ในปริมาณสูงอีกด้วย

ปฐมพงศ์ พันธกมล [3] ทำการศึกษาสมบัติการทนโอโซนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางอีพดีเอ็มซึ่งมีสัดส่วนของยางธรรมชาติต่อยางอีพดีเอ็ม 70:30 และ 80:20 โดยควบคุมให้ยางอีพดีเอ็มเป็นยางวิภูภาคต่อเนื่อง พบว่าที่สัดส่วน 70:30 พอลิเมอร์ผสมสามารถทนต่อโอโซนได้เนื่องจากยางอีพดีเอ็มเป็นวิภูภาคต่อเนื่อง และที่สัดส่วน 80:20 พอลิเมอร์ผสมไม่สามารถทนต่อ

โอโซนได้ เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่อ่อนนุ่มและสึกกร่อนได้ง่าย และสังเกตได้ว่า เมื่อมีสัดส่วนของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ค่าความทนต่อแรงดึงของชิ้นทดสอบก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกด้วย

Redfern และคณะ [4] ได้ทำการพัฒนายางขอบประตู เรือสำหรับป้องกันการรั่วซึมของน้ำ คิวและเปลวไฟ โดยอ้างอิงจาก 3 มาตรฐาน ได้แก่มาตรฐาน MIL-R-900F (Rubber Gasket Material) มาตรฐาน Federal Specification ZZ-R-765 และ มาตรฐาน Military Specification Mil-G-17927 โดยออกแบบให้ยางขอบประตู เรือมีหลายส่วน ซึ่งส่วนประกอบหลักเป็นยางซิลิโคน มี Crush Zone ซึ่งทำจากวัสดุอื่นที่มีความแข็งน้อยกว่ายางซิลิโคน และ Air Pocket เป็นช่องว่างขนาดเล็ก ทำหน้าที่รองรับแรงกดจากขอบประตูที่กดลงมา โดยยางขอบประตู เรือต้องทนความร้อนได้ไม่ต่ำกว่า 1,500 องศาฟาเรนไฮต์

Rowe และ McMulin [5] ได้ทำการพัฒนายางขอบประตู เรือสำหรับใช้กันเปลวไฟ โดยอ้างอิงจากมาตรฐาน MIL-R-900F ผลิตจากยางซิลิโคน โดยมีการออกแบบให้มีมุมตัดและช่องว่างในด้านที่สัมผัสกับร่องของยางขอบประตู เรือเพื่อช่วยในการรองรับแรงกดจากขอบประตูอีกด้านหนึ่ง ทั้งยังออกแบบให้ยางนี้มลงเพื่อความสะดวกรวดเร็วในการติดตั้ง

Arayaprane and Rempel [11] ทำการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งผสมจากยางธรรมชาติและยางอีพิดีเอ็ม โดยปรับอัตราส่วนที่ 100:0 75:25 50:50 25:75 และ 0:100 พบว่า เมื่ออัตราส่วนของยางอีพิดีเอ็มสูงขึ้น ค่า Tensile Strength และ Elongation at Break ของพอลิเมอร์ผสมจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด และพอลิเมอร์ผสมที่มีสัดส่วนของยางอีพิดีเอ็มที่สูงขึ้น เมื่อผ่านการบ่มแรงอุณหภูมิแล้ว สมบัติทางกลต่าง ๆ จะไม่เปลี่ยนแปลงจากก่อนการบ่มแรงอุณหภูมิมากนัก แสดงให้เห็นว่า ยางอีพิดีเอ็มทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความทนทานต่อความร้อนได้ดียิ่งขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบพอลิเมอร์ผสมที่ใช้และไม่ใช้พลาสติกไซเซอร (สารที่ทำให้ยางเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่ายขึ้น) ที่มีอัตราส่วนของยางธรรมชาติและยางอีพิดีเอ็ม 50:50 พบว่า พลาสติกไซเซอรสามารถช่วยให้ยางทั้งสองชนิดเข้ากันได้ง่ายขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของพลาสติกไซเซอรแล้ว ค่าการทดสอบสมบัติทางกลจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากยางทั้งสองชนิดเข้ากันได้ดีมากขึ้นนั่นเอง

Rohana Yahya และคณะ [12] ทำการศึกษาความแตกต่างของการคงรูปด้วยกัมมะถันแบบดั้งเดิมแบบประสิทธิภาพและเพอร์ออกไซด์ โดยทำการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 100°C นาน 2, 4, 6, 9, และ 12 วัน พบว่า ความหนาแน่นและชนิดของพันธะเชื่อมโยงมีผลเกี่ยวเนื่องไปยังสมบัติทางกลของยางคงรูป โดยยางที่คงรูปด้วยระบบกัมมะถันแบบประสิทธิภาพมีสมบัติทางกลลดลงเพียงเล็กน้อยหลังจากการบ่มแรง เนื่องจากความแข็งแรงของพันธะเชื่อมโยง ซึ่งส่วนมากจะเป็นแบบมอนอซัลไฟดิกและ

ไดซัลฟิดิกซึ่งจะต้องใช้พลังงานอย่างมากในการทำลายพันธะและยังมีพันธะเชื่อมโยงหนาแน่นมาก จะส่งผลให้ยางคงรูปที่ได้มีการบวมตัวน้อยอีกด้วย

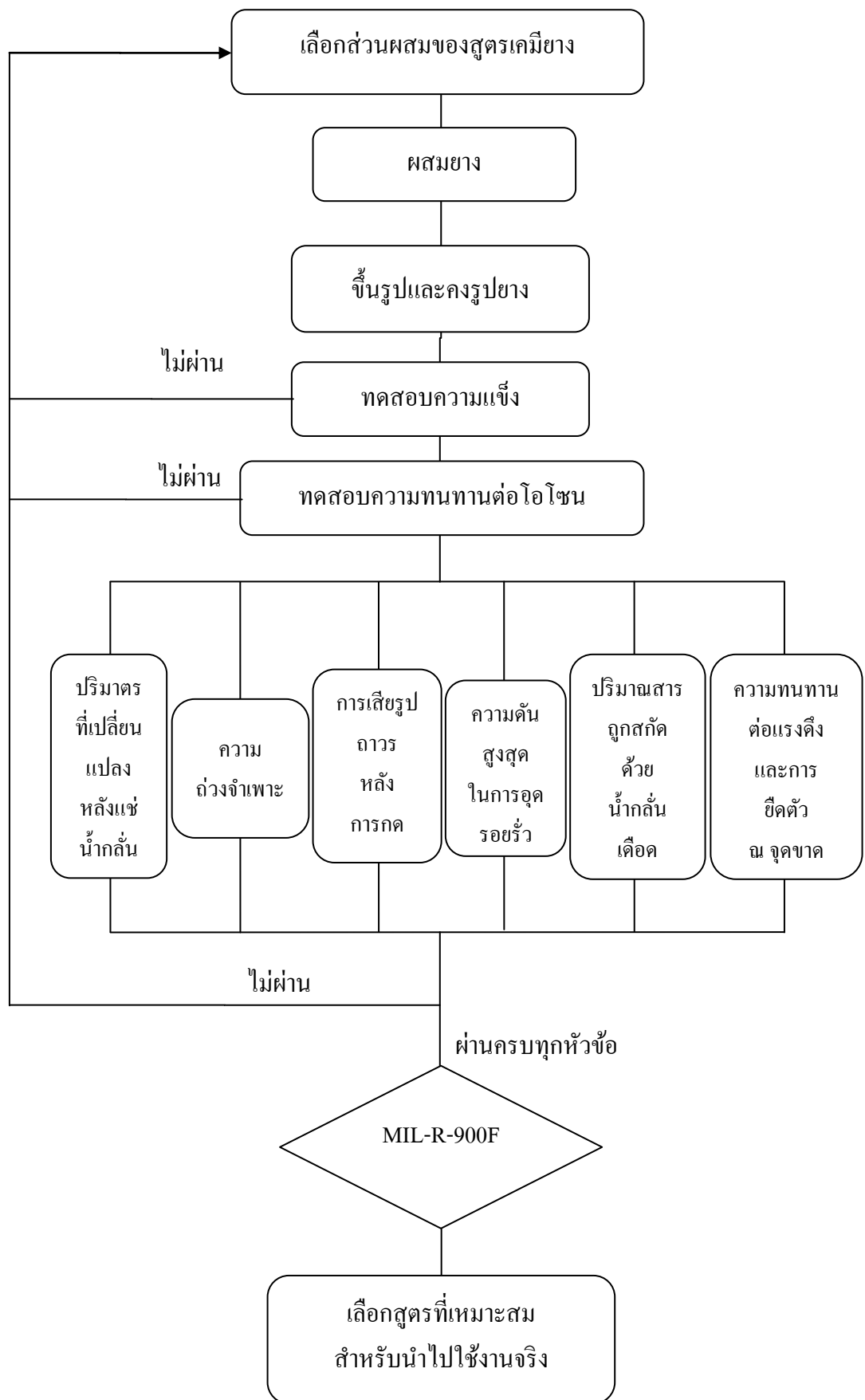
วุฒิชัย ไทยเจริญ [13] ได้ทำการศึกษา 3 ส่วนด้วยกัน คือ 1) ศึกษาผลของชนิดและปริมาณของ เขม่าดำ โดยเลือกใช้เขม่าดำ 4 เกรด คือ N220 N330 N339 และ N550 2) ศึกษาผลของชนิดและ ปริมาณของสารช่วยการแปรรูป 2 ชนิด คือ น้ำมันพาราฟินิกและน้ำมันอะโรมาติก 3) การวัลคาไนซ์ โดยศึกษาผลของปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยาและกำมะถัน โดยเลือก TBBS เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากมีความปลอดภัยต่อกระบวนการผลิตสูงเพราะมีเวลาเริ่มต้นของปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ ก่อนข้างยาวและให้ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงก่อนข้างสูงพบว่า ความแข็งแรงของยางวัลคาไนซ์ จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเขม่าดำ มีแนวโน้มไปตามกฎที่มีการยอมรับกันโดยทั่วไป คือ ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ประมาณ 1 Shore A ต่อปริมาณเขม่าดำที่เพิ่มขึ้น 2 phr ในขณะที่ความแข็งแรงจะลดลงประมาณ 1 Shore A เมื่อเพิ่มน้ำมัน 2 phr การใช้น้ำมันพาราฟินิกเป็นส่วนประกอบจะส่งผลให้ยางวัลคาไนซ์มีสมบัติ ต่าง ๆ ที่ดีกว่าการใช้น้ำมันอะโรมาติกทั้งก่อนและหลังบ่มเร่ง การเพิ่มปริมาณ TBBS จะส่งผลให้ ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงในยางเพิ่มขึ้นและการเพิ่มปริมาณกำมะถัน จะส่งผลให้ปริมาณ ของพันธะเชื่อมโยงในยางเพิ่มขึ้น

Schultz [14] ได้ทำการพัฒนาขบประตู่สำหรับใช้ในรถยนต์ ซึ่งอุณหภูมิในการใช้งานมี หลากหลายและสภาพอากาศเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา จึงเลือกใช้ พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride: PVC) เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพการใช้งาน

Sae-Oui และคณะ [26] ศึกษาความสามารถในกระบวนการผลิตและสมบัติทางกลของยางธรรมชาติ กับยางอีพิดีเอ็มด้วยอัตราส่วน 60:40 โดยใช้ตัวเร่ง 3 ชนิด คือ Santocure-TBBS Perkaci-TMTD Perkacit-MBT และ Perkacit-MBTS ด้วยการคำนวณค่าสัดส่วนการบวมตัว (Swelling Ratio) จาก น้ำหนักที่เปลี่ยนไปหลังจากแช่ในโทลูอีน พบว่า TBBS เป็นตัวเร่งที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากทำให้ ยางมีความปลอดภัยในกระบวนการผลิตสูงและช่วยให้ยางธรรมชาติและยางอีพิดีเอ็มมีระยะเวลา การคงรูปที่ใกล้เคียงกัน และส่งผลให้ยางมีสมบัติทางกลอยู่ในเกณฑ์ดีเมื่อเทียบกับตัวเร่งอีก 3 ชนิด อีกทั้งยังส่งผลให้ยางธรรมชาติและยางอีพิดีเอ็มผสมกันได้ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้ยางคงรูปที่ได้มีสมบัติ ทางกลที่ดีกว่าตัวเร่งชนิดอื่น ๆ อีกด้วย

บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

โครงการการศึกษาวิจัยนี้มีขั้นตอนการดำเนินงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เริ่มต้นด้วยการเลือกส่วนผสมของสูตรเคมียางหรือการออกสูตรเคมียาง โดยมีองค์ประกอบหลัก ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งแต่ละองค์ประกอบมีการระบุชนิดและปริมาณของสารเคมี จากนั้นทำการผสมยางดิบและสารเคมีต่าง ๆ ที่ได้ระบุไว้ในสูตรเคมียางให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน เรียกยางที่ผ่านขั้นตอนการผสมนี้ว่า ยางคอมพาวด์ นำยางคอมพาวด์ที่ได้ไปทำการขึ้นรูปให้เป็นรูปทรงตามที่แต่ละการทดสอบกำหนด เมื่อได้รูปทรงตามที่ต้องการแล้วให้นำยางคอมพาวด์ไปคงรูป โดยขั้นตอนการคงรูปนี้จะทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมต่อกันเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ จากนั้นนำยางคงรูปไปทดสอบวัดความแข็งซึ่งเป็นการทดสอบที่มีขั้นตอนไม่ซับซ้อน รวดเร็วและประหยัดค่าใช้จ่าย หากผลการทดสอบไม่ผ่านตามที่มาตรฐานกำหนดให้นำสูตรเคมียางนั้นไปปรับใหม่ หากผลการทดสอบผ่านตามที่มาตรฐานกำหนดจึงนำยางคงรูปไปทดสอบความทนทานต่อโอโซน เนื่องจากโอโซนเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้ยางขอบประตูเรือเสื่อมสภาพได้อย่างรวดเร็ว หากไม่ผ่านการทดสอบให้นำไปปรับสูตรเคมีอีกครั้ง แต่หากผ่านการทดสอบก็นำไปทดสอบสมบัติอื่น ๆ ต่อไป หากทดสอบแล้วพบว่า ผลการทดสอบของยางคงรูปไม่ผ่านการทดสอบใดการทดสอบหนึ่งให้นำสูตรยางเคมีนั้นไปปรับสูตรใหม่เสมอ หากผลการทดสอบของสูตรเคมียางใดผ่านการทดสอบทุกการทดสอบให้นำสูตรนั้นไปพิจารณาเพื่อทำการผลิตเป็นยางขอบประตูเรือต่อไป



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 การออกสูตรเคมียาง

3.1.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการผสมสูตรเคมียาง

เนื่องจากในสูตรเคมียางมีหลายองค์ประกอบ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และแต่ละองค์ประกอบก็มีสารเคมีมากมายหลายชนิดและหลายเกรด ในการออกสูตรเคมียางจึงจำเป็นต้องระบุชื่อสารเคมี เกรดที่เลือกใช้ และบริษัทที่จัดจำหน่าย เนื่องจากสารเคมีแต่ละตัวจะส่งผลให้ยางคงรูปมีสมบัติที่แตกต่างกันออกไป สำหรับโครงการการศึกษาวิจัยนี้มีรายละเอียดของสารเคมีที่ใช้การดำเนินการทั้งหมดดังต่อไปนี้

3.1.1.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) เกรด STR 5L

3.1.1.2 ยางสังเคราะห์อีพีดีเอ็ม (Ethylene Propylene Diene Monomer, EPDM)

ชื่อทางการค้า Keltan 4551A บริษัท เบรนน์แท็กอินกรีเดียนส์ จำกัด(ประเทศไทย)

3.1.1.3 ซิงก์ออกไซด์ (ZnO) ชื่อทางการค้า Zinkoxydaktiv บริษัท แลนเซส จำกัด

ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยา

3.1.1.4 กรดสเตียริก (Stearic Acid) ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาทำงานควบคู่กับซิงก์ออกไซด์

3.1.1.5 เขม่าดำ (Carbon Black, CB) เกรด N550 (FEF: Fast Extrusion Furnace) ทำหน้าที่เป็น

สารตัวเติมเสริมแรง ช่วยปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ของยางคงรูป

3.1.1.6 น้ำมันพาราฟินิก (Paraffinic Oil) ชื่อทางการค้า Flexon Process Oils

บริษัท เอสโซ่ จำกัด(ประเทศไทย) ทำหน้าที่เป็นสารเคมีที่ช่วยในกระบวนการผลิต

ทำให้สารเคมีต่าง ๆ แยกตัวได้ดีและเข้ากับยางได้ง่ายยิ่งขึ้น

3.1.1.7 ไขพาราฟิน (Paraffin Wax) บริษัท นิปปอน โซโก จำกัด ทำหน้าที่เป็นสารช่วยป้องกัน

การเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากโอโซน

3.1.1.8 ไขผลึกไมโครคริสตัลลิน (Microcrystalline Wax) ทำหน้าที่ป้องกันยางเสื่อมสภาพ

อันเนื่องมาจากโอโซน

- 3.1.1.9 พอลิเมอร์ของไทรเมทิลไดไฮโดรควิโนลีน (2, 2, 4-Trimethyl-1, 2-Dihydroquinoline, Polymerized, TMQ) ชื่อทางการค้า Vulkanox HS/LG บริษัท แลนเซส จำกัด เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากออกซิเจนและความร้อน
- 3.1.1.10 ไคเมทิลบิวทิลฟีนีลฟีนีลีนไดเอมีน (N-(1, 3-Dimethylbutyl)-N-Phenyl-P-Phenylenediamine, 6PPD) ชื่อทางการค้า Vulkanox 4020/LG บริษัท แลนเซส จำกัด เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากโอโซน
- 3.1.1.11 ไซโคลเฮกซิลเบนโซไทอะซัลไฟน์ไมด์ (N-Cyclohexyl-2-benzothiazyl-sulfenamide, CBS) ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยา
- 3.1.1.12 เทตระเมทิลไทูรัมไดซัลไฟด์ (Tetramethylthiuram Disulfide, TMTD) ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยา
- 3.1.1.13 บิวทิลเบนโซไทอะซัลไฟน์ไมด์ (N-Tert.butyl-2-Benzothiazole Sulfenamide, TBBS) ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยา
- 3.1.1.14 เทตระซัลไทูรัมไดซัลไฟด์ (Tetrabenzylthiuram Disulfide, TBzTD) ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยา
- 3.1.1.15 ไดฟีนีลกวานิดีน)Diphenyl Guanidine, DPG) ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยา
- 3.1.1.16 กำมะถัน (Sulphur, S₈) ทำหน้าที่เป็นสารทำให้ยางคงรูป

3.1.2 การเลือกส่วนผสมของสูตรเคมียาง

จากการศึกษาเบื้องต้นในหัวข้อ 2.2.1 และ 2.4 จึงทำการออกสูตรเคมียางดังแสดงในตารางที่ 3.2 เพื่อเป็นจุดเริ่มต้นของการดำเนินการดังที่กล่าวในขั้นตอน 2.2.1, 2.2.2 และ 2.2.3

ตารางที่ 3.1 สูตรเคมียางตั้งต้น (หน่วย: phr)

องค์ประกอบ	สูตร 1-1
NR	50
EPDM	50
Stearic Acid	1.5
CB (N550)	40
TMQ	1
6PPD	1.2
Paraffinic Oil	4
Paraffin Wax	1.5
CBS	1.5
TMTD	1
Sulphur	0.5

3.1.3 การปรับสูตรเคมียางครั้งที่ 1

ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบจากการออกสูตรเคมียาง สูตร 1-1 พบว่า ค่าความแข็งที่ได้ต่ำกว่าค่าที่มาตรฐาน MIL-R-900F กำหนด จึงทำการปรับสูตรเคมียางเพื่อเพิ่มความแข็ง โดยเพิ่มปริมาณขี้ผึ้งดำจาก 40 เป็น 60 phr ดังแสดงในตารางที่ 3.3 และยางคงรูปที่ได้เกิดปัญหาการบวมของสารเคมี จึงทำการปรับลดปริมาณของสารตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ตัว คือ TBBS และ TBzTD และเพิ่มสารตัวเร่งปฏิกิริยารอง คือ DPG เข้าไป ทั้งยังมีการเพิ่ม Microcrystalline Wax [8] เข้าไป เพื่อเป็นการเพิ่มความทนทานต่อโอโซนของยาง เนื่องจาก Microcrystalline Wax มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่า จึงถูกชะล้างได้ยากกว่า Paraffin Wax และมีการเปลี่ยนสารตัวเร่งปฏิกิริยา CBS เป็น TBBS เนื่องจาก TBBS จะทำให้ยางมีระยะเวลาสกร๊ชที่ยาวขึ้นและมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น นอกจากนี้ยังได้ทำการปรับเปลี่ยนสารตัวเร่งปฏิกิริยา TMTD เป็น TBzTD เนื่องจาก TMTD เป็นสารที่ทำให้เกิดมะเร็ง

ตารางที่ 3.2 สูตรเคมียาง 2 (หน่วย: phr)

องค์ประกอบ	สูตร 2-1
NR	50
EPDM	50
Stearic Acid	2
CB (N550)	60
TMQ	1
6PPD	1.2
Paraffin Wax	1.2
Microcrystalline Wax	1
TBBS	1.2
TBzTD	0.6
DPG	0.4
Sulphur	0.5

3.1.4 การปรับสูตรเคมียางครั้งที่ 2

ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบจากการออกสูตรเคมียาง สูตร 3 พบว่า ค่าความแข็งที่ได้อยู่ในช่วงที่มาตรฐาน MIL-R-900F กำหนด [16] และผลการทดสอบความทนทานต่อโอโซนของสูตรเคมียาง สูตร 3 พบว่า บริเวณผิวของชิ้นทดสอบไม่เกิดรอยแตกใด ๆ ถือว่าผ่านการทดสอบนี้ อย่างไรก็ตามทางโครงการการศึกษาวิจัยนี้มีความต้องการในการใช้ยางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบหลักในการผลิตยางขอบประตูเรือ จึงทำการปรับสูตรเคมียางให้สัดส่วนของยางธรรมชาติต่อยางสังเคราะห์อีพียดีเอ็มสูงขึ้นเป็น 70:30 และ 80:20 ดังแสดงในตารางที่ 3.4 และ 3.5 และปรับปริมาณของเขม่าดำเกรด N550 อยู่ในช่วง 55-75 phr

ตารางที่ 3.3 สูตรเคมียาง 3 (หน่วย: phr)

องค์ประกอบ	สูตร 3-1	สูตร 3-2	สูตร 3-3
NR	70		
EPDM	30		
Stearic Acid	2		
CB (N550)	55	65	75
Paraffinic Oil	20	30	40
TMQ	1		
6PPD	1.2		
Paraffin Wax	1.2		
Microcrystalline Wax	1		
TBBS	1.2		
TBzTD	0.6		
DPG	0.4		
Sulphur	0.5		

ตารางที่ 3.4 สูตรเคมียาง 4 (หน่วย: phr)

องค์ประกอบ	สูตร 4-1	สูตร 4-2	สูตร 4-3
NR	80		
EPDM	20		
Stearic Acid	2		
CB (N550)	55	65	75
Paraffinic Oil	30	40	50
TMQ	1		
6PPD	1.2		
Paraffin Wax	1.2		
Microcrystalline Wax	1		

ตารางที่ 3.4 (ต่อ) สูตรเคมียาง 4 (หน่วย: phr)

องค์ประกอบ	สูตร 4-1	สูตร 4-2	สูตร 4-3
TBBS	1.2		
TBzTD	0.6		
DPG	0.4		
Sulphur	0.5		

3.2 การผสมยาง

3.2.1 การผสมยางสำหรับสูตรเคมียางตั้งต้น

การผสมยางสูตรตั้งต้นด้วยเครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two Roll Mill) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 มีขั้นตอนการเติมวัตถุดิบต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

เริ่มด้วยการนำยางธรรมชาติ (ยางดิบ) รีดผ่านลูกกลิ้งจนกระทั่งความหนืดของยางธรรมชาติลดลงและสามารถพันลูกกลิ้งได้ครบรอบจึงใส่ยางอีพิตีเอ็ม (ยางดิบ) จากนั้นรีดยางทั้งสองชนิดผ่านลูกกลิ้งจนกระทั่งยางดิบทั้งสองชนิดเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน จึงปรับระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งทั้งสองให้มียางบางส่วนเหลืออยู่ที่บริเวณเหนือช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง เรียกว่า ยางเบงค์ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยปกติแล้วในระหว่างที่ทำการผสมยาง ยางเบงค์จะหมุนเวียนผ่านเข้าไปในช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นเมื่อใส่สารเคมีต่าง ๆ ที่ยางเบงค์ สารเคมีเหล่านั้นจะถูกเติมเข้าไปในยางด้วยเช่นกัน จากนั้นเติมซิงก์ออกไซด์และกรดสเตียริกในยางเบงค์ หลังจากเติมสารเคมีทุกครั้งจะต้องทำการกรีดยางที่อยู่บนผิวด้านหน้าของลูกกลิ้งแล้วทำการสลับไขว้เพื่อให้สารเคมีกระจายตัวในยางได้อย่างสม่ำเสมอ จากนั้นเติมเขม่าดำและน้ำมันพาราฟินิก โดยแบ่งเติมในปริมาณน้อย เมื่อเขม่าดำและน้ำมันผสมเป็นเนื้อเดียวกับยางแล้วจึงค่อยเติมส่วนที่เหลือที่ละน้อยจนหมด เมื่อส่วนผสมต่าง ๆ ผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกับยางเติมไซโครคริสตัลไลน์ TMQ และ 6PPD พร้อมกันเมื่อสารเคมีต่าง ๆ ผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกับยางแล้ว จึงค่อยเติม TBBS TBzTD DPG และกำมะถันทำการกรีดยางแล้วสลับไขว้ยางจนส่วนผสมต่าง ๆ มีการแตกตัวและกระจายตัวได้ดี จึงนำยางคอมพาวด์ไปรีดเป็นแผ่นเพื่อระบายความร้อน ก่อนจะนำไปขึ้นรูปต่อไป



รูปที่ 3.2 เครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้งที่โรงงานยาง อุทธารเรือธนบุรี



รูปที่ 3.3 การใส่สารเคมีในยางเบงค์ (ภายในวงกลมเส้นประ)

3.2.2 การผสมยางสำหรับสูตรเคมียาง 2 ถึง 4

เนื่องจากยางคงรูปที่ได้จากการผสมด้วยเครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้งมีก้อนสารเคมีปะปนอยู่ในเนื้อยางคงรูป แสดงให้เห็นว่า การแตกตัวและกระจายตัวของสารเคมีไม่ดีเท่าที่ควร จึงได้เปลี่ยนเป็นเครื่องผสมระบบปิด รุ่น Plasticorder 350E จำหน่ายโดยบริษัท บราเบนเดอร์ จำกัด ดังแสดงในรูปที่ 3.4 เนื่องจากเครื่องผสมระบบปิดจะมีการผสมที่รวดเร็วและยางคอมพาวด์ที่ได้ในแต่ละครั้งมีคุณภาพค่อนข้างสม่ำเสมอกว่าเมื่อเทียบกับการใช้เครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้งผสมยาง โดยกำหนดให้อัตราส่วนของปริมาตรของยางคอมพาวด์ต่อปริมาตรของห้องผสม (Fill Factor) เท่ากับ 0.8 อุณหภูมิเริ่มต้นในการผสมที่ 60°C และความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์ 40 รอบต่อนาที โดยใช้เวลาในการผสมแต่ละครั้ง 12 นาที โดยมีรายละเอียดของเครื่องมือและขั้นตอนในการผสมยาง ดังนี้

เริ่มต้นการผสมด้วยการใส่ยางธรรมชาติในเครื่องผสมระบบปิด เพื่อลดความหนืดของยางธรรมชาติ แล้วจึงใส่ยางสังเคราะห์อีพิตีเอ็ม เมื่อยางทั้งสองชนิดผสมเข้ากันจึงทำการใส่ซิงก์ออกไซด์ กรดสเตียริกและสารป้องกันการเสื่อมสภาพ เมื่อสารเคมีต่าง ๆ แตกตัวและผสมเป็นเนื้อเดียวกับยาง

จึงเริ่มใส่สารตัวเติมและน้ำมันในปริมาณครึ่งหนึ่งก่อน แล้วจึงค่อยใส่ส่วนที่เหลือหลังจากที่สารตัวเติมและน้ำมันในส่วนแรกผสมเข้ากับเนื้อยาง จากนั้นเติมกำมะถันและสารตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อสารเคมีต่าง ๆ ผสมเข้ากับเนื้อยางหมดแล้ว ให้นำยางคอมพาวด์ออกจากเครื่องผสมยางแล้วนำไปรีดเป็นแผ่นบาง ๆ ด้วยเครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.5 เพื่อช่วยถ่ายเทความร้อนให้กับยางคอมพาวด์ และเป็นการป้องกันยางตายเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากการผสมสูงเกินไป



รูปที่ 3.4 เครื่องผสมระบบปิด



รูปที่ 3.5 เครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง

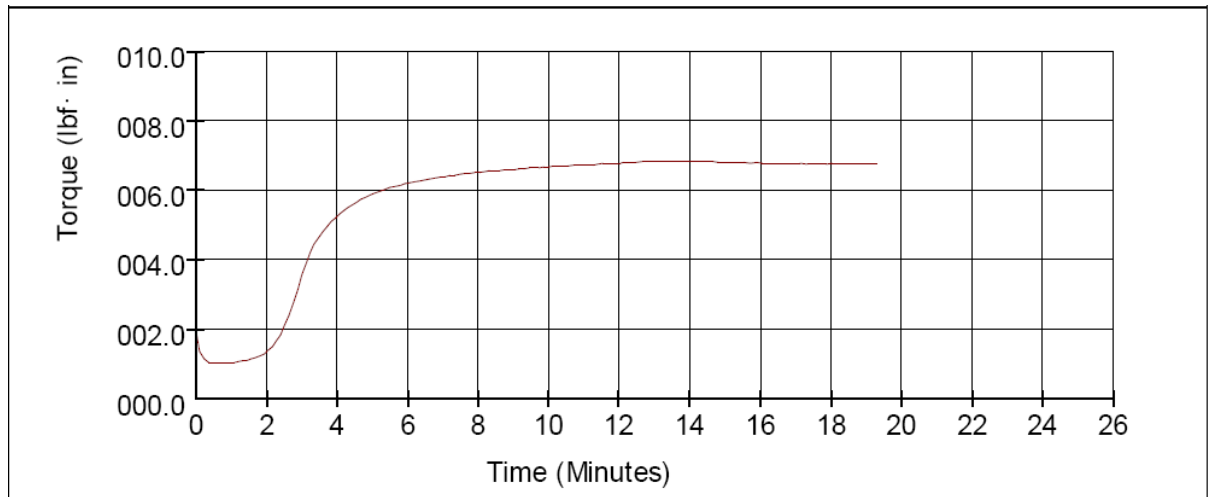
3.3 การขึ้นรูปและคงรูปยาง

3.3.1 ลักษณะการคงรูป

ภายหลังกระบวนการผสม ยางคอมพาวด์ที่ได้จะถูกนำไปทดสอบลักษณะการคงรูปก่อนทุกครั้ง เพื่อหาระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มยางให้สูง โดยใช้เครื่องรีโอมิเตอร์แบบค้ายเคลื่อนที่ (Moving Die Rheometer, MDR) จำหน่ายโดยบริษัท ซีจีเอ็นจีเนียร์ (ประเทศไทย) จำกัด ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยกำหนดอุณหภูมิที่ 160 องศาเซลเซียส ซึ่งตัวเครื่องจะประกอบด้วยค้ายบนและค้ายล่าง โดยหลังจากให้ความร้อนแก่ระบบจนถึงอุณหภูมิที่ตั้งไว้แล้ว นำชิ้นทดสอบประมาณ 3-5 ลูกบาศก์ เซนติเมตรวางไว้ระหว่างค้ายบนและค้ายล่าง เมื่อเริ่มการทดสอบ ค้ายล่างจะแกว่งไป-มาเป็นมุมแคบ ๆ 0.5 หรือ 1 องศา ด้วยความถี่ 1.7 Hz จากนั้นเครื่องจะเริ่มบันทึกค่าแรงบิดที่เปลี่ยนไปตามเวลา ผลที่ได้จะแสดงออกมาเป็นกราฟพร้อมบอกระยะเวลาที่ใช้ในการคงรูป โดยเลือกระยะเวลาสำหรับคงรูปที่ t_c 100 ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 เครื่องRheoTECH MD+



Parameter Results:

Test ID.	MH	MH-ML	ML	MSlope	Mx@ tc50	Tc (90)-Ts(1)	Tc90	Ts1	Ts2	Tc100	Tc10
nattakra-c50000	6.84	5.82	1.02	3.03	2.28	3.72	6.22	2.50	2.85	13.02	2.27

End of Report

รูปที่ 3.7 ผลที่ได้จากการทดสอบการศึกษาลักษณะการคงรูป
โดยเลือกใช้ระยะเวลา t_c 100 (ดังแสดงในวงกลม)

3.3.2 การขึ้นรูปและคงรูปยาง

ในโครงการการศึกษาวิจัยนี้เลือกทำการขึ้นรูปและคงรูปยางด้วยแม่พิมพ์แบบกดอัด (Compression Molding) ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งเป็นวิธีที่มีขั้นตอนไม่ยุ่งยากซับซ้อน โดยมีขั้นตอนการขึ้นรูปและคงรูปยางคือ อุ่นแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปยางด้วยเครื่องแม่พิมพ์กดอัดที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลานานอย่างน้อย 1 ชั่วโมง เพื่อให้อุณหภูมิภายในมีความสม่ำเสมอทั่วทั้งแม่พิมพ์ จากนั้นจึงใส่ยางคอมพาวด์ในแม่พิมพ์โดยให้มีปริมาณมากกว่าแม่พิมพ์เล็กน้อย จากนั้นกดอัดแม่พิมพ์โดยใช้ระยะเวลาในการคงรูปจากที่วัดได้จากเครื่อง RheoTECH MD+ ก่อนนำยางคงรูปที่ได้ไปตัดเป็นชิ้นทดสอบตามขนาดที่แต่ละการทดสอบกำหนดไว้



รูปที่ 3.8 แม่พิมพ์แบบกดอัด (Compression Molding)

3.4 การทดสอบยางคงรูป

สำหรับโครงการการศึกษาวิจัยนี้ ทำการทดสอบยางคงรูปโดยอ้างอิงจากมาตรฐาน MIL-R-900F [16] ตามที่ระบุในหัวข้อ 2.3 ตารางที่ 2.2 โดยการทดสอบต่าง ๆ อ้างอิงตามมาตรฐาน Federal Test Method ซึ่งมีรายละเอียดการทดสอบดังต่อไปนี้

3.4.1 การวัดค่าความแข็ง

การวัดค่าความแข็งดำเนินการตามวิธีการที่ระบุในมาตรฐาน Federal Test Method หมายเลข 3021 [17] โดยมีการกำหนดขั้นตอนทดสอบและวิธีการทดสอบ ดังนี้

ขั้นตอนทดสอบ ทรงแท่งสี่เหลี่ยม ขนาดกว้าง 19 มิลลิเมตร และยาว 19 มิลลิเมตร เป็นอย่างน้อย หนาไม่น้อยกว่า 6.35 มิลลิเมตร หรือทรงกระบอกหน้าตัดมีความยาว เส้นผ่านศูนย์กลางอย่างน้อย 19 มิลลิเมตร หนาไม่น้อยกว่า 6.35 มิลลิเมตร หาก ขั้นตอนทดสอบมีความหนาไม่พอสามารถซ้อนเพื่อให้ได้ความหนาตามที่กำหนดได้

วิธีการทดสอบ วัดความแข็งด้วย Durometer หน่วย Shore A ดังแสดงในรูปที่ 3.9 เริ่มทดสอบโดย กดเครื่องทดสอบลงบนชิ้นทดสอบ แท่งกดต้องกดลงห่างจากขอบของชิ้นทดสอบ อย่างน้อย 6.35 มิลลิเมตร และกดค้างไว้ประมาณ 15 วินาที อ่านค่าความแข็งที่วัดได้ ทำการทดสอบทั้งหมด 5 ครั้ง หาค่ามัธยฐานแล้วบันทึกค่าที่ได้



รูปที่ 3.9 Hardness Durometer

3.4.2 การวัดค่าความดันในการอุดรอยรั่ว

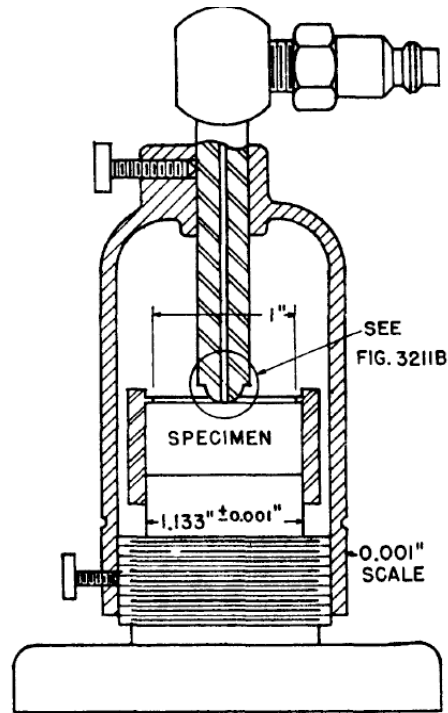
การวัดค่าความดันในการอุดรอยรั่วดำเนินการตามวิธีการที่ระบุในตามมาตรฐาน Federal Test Method หมายเลข 3211 [18] โดยมีการกำหนดขั้นตอนทดสอบและวิธีการทดสอบ ดังนี้

ขั้นตอนทดสอบ ทรงกระบอก หน้าตัดมีความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง 28.7 มิลลิเมตรและ

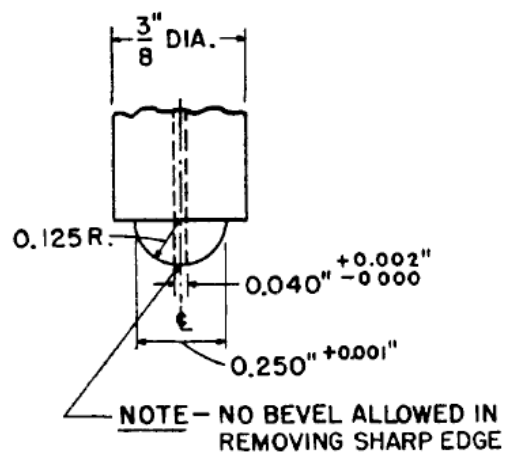
หนา 12.5 มิลลิเมตร

วิธีการทดสอบ ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความดันในการอุดรอยรั่วดังแสดงในรูปที่ 3.10 เริ่มต้นการทดสอบด้วยการวางชิ้นทดสอบเข้าไปในเครื่อง จากนั้นเลื่อนแท่งกดลง ดังแสดงในรูปที่ 3.11 จนสัมผัสกับพื้นผิวชิ้นทดสอบ เติมน้ำเข้าไปเหนือชิ้นทดสอบแล้วต่อท่อลมที่มีความดัน 1 psi เข้าไป จากนั้นก็ปรับระดับของแท่งกดจนได้อัตราการเกิดฟองอากาศ 1 ฟองทุก ๆ 10 วินาทีที่ผิวหน้าเหนือชิ้นทดสอบ บันทึกค่าระดับของแท่งกดที่ได้ (เรียกระดับนี้ว่า Zero Sealing Point) จากนั้นจึงเลื่อนแท่งกดกดลงบนชิ้นทดสอบจนได้ระดับความลึกของการกดประมาณ 1.6 มิลลิเมตรจากระดับ Zero Sealing Point ทิ้งไว้ 30 นาที จากนั้นเพิ่มความดันลมจนกระทั่งเกิดฟองอากาศมากมายแล้วจึงลดความดันให้เป็นศูนย์ก่อนที่จะเพิ่มความดันลมอย่างซ้ำ ๆ จนกระทั่งเกิดฟองอากาศในอัตรา 1 ฟองทุก ๆ 10 วินาที บันทึกเป็นค่าความดันในการอุดรอยรั่วก่อนบ่มแรง จากนั้นนำชิ้นทดสอบพร้อมอุปกรณ์ซึ่งยังคงกดชิ้นทดสอบอยู่เข้าไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 46 ชั่วโมง แล้ววางชิ้นทดสอบพร้อมเครื่องมือทดสอบไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 3 ชั่วโมง จากนั้นเพิ่มความดันลมจนกระทั่ง

เกิดฟองอากาศมากมายแล้วจึงลดความดันให้เป็นศูนย์ก่อนที่จะค่อย ๆ เพิ่มความดันลงอย่างช้า ๆ จนกระทั่งเกิดฟองอากาศในอัตรา 1 ฟองทุก ๆ 10 วินาที บันทึกเป็นค่าความดันในการอุดรอยรั่วหลังบ่มแรง ทำการทดสอบทั้งหมด 2 ครั้ง หาค่าเฉลี่ยแล้วบันทึกค่าที่ได้



รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบความดันในการอุดรอยรั่วตามที่
มาตรฐาน Federal Test Method 3211 กำหนด [18]



รูปที่ 3.11 ภาพแสดงลักษณะและขนาดของแท่งกดตามที่
มาตรฐาน Federal Test Method 3211 กำหนด [18]

3.4.3 การวัดค่าการเสียรูปถาวรหลังการกด

การวัดค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดดำเนินการตามวิธีการที่ระบุในตามมาตรฐาน Federal Test Method หมายเลข 3311 [19] โดยมีการกำหนดขั้นตอนทดสอบและวิธีการทดสอบ ดังนี้

ขั้นตอนทดสอบ ทรงกระบอก หน้าตัดมีความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง 28.6 มิลลิเมตร
หนา 12.7 มิลลิเมตร (t_0)

วิธีการทดสอบ กดขั้นตอนทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.12 โดยกดขั้นตอนทดสอบให้มีความหนา 8.9 มิลลิเมตร (t_s) จากนั้นจึงทำการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70°C เป็นระยะเวลา 22 ชั่วโมง ก่อนนำขั้นตอนทดสอบออกจากเครื่องกด ทิ้งไว้บนพื้นผิวที่เป็นฉนวน 30 นาที เพื่อให้ขั้นตอนทดสอบคืนตัว จากนั้นวัดความหนาของขั้นตอนทดสอบ (t_{30}) แล้วคำนวณหาค่าการเสียรูปถาวรหลังกด ด้วยสมการที่ 3.1 ทำการทดสอบทั้งหมด 2 ครั้ง หาค่าเฉลี่ยแล้วบันทึกค่าที่ได้

$$\frac{t_0 - t_{30}}{t_0 - t_s} * 100 \quad \dots\dots\dots \text{สมการที่ 3.1}$$



รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบการเสียรูปถาวรหลังการกด

3.4.4 การวัดค่าความทนทานต่อแรงดึง

การวัดค่าความทนทานต่อแรงดึงและการวัดค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ดำเนินการตามวิธีการที่ระบุในตามมาตรฐาน Federal Test Method หมายเลข 4111 [20] และ มาตรฐาน Federal Test Method หมายเลข 4121 [21] โดยมีการกำหนดขั้นตอนทดสอบและวิธีการทดสอบ ดังนี้

- ชั้นทดสอบ** ขนาดดังแสดงในมาตรฐาน Federal Test Method หมายเลข 4111
- วิธีการทดสอบ** นำชั้นทดสอบไปทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ดึงชั้นทดสอบจนขาดด้วยอัตราเร็วในการดึงคงที่ที่ 500 ± 50 มิลลิเมตร/นาที ในระหว่างการดึงเครื่องจะทำการวัดและบันทึกแรงดึงที่เปลี่ยนไปตามระยะการยืดตัวของยาง จากนั้นนำค่าไปคำนวณและพล็อตเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด พร้อมคำนวณหาความทนทานต่อแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาด ทำการทดสอบทั้งหมด 5 ครั้ง หาค่ามัธยฐานแล้วบันทึกค่าที่ได้



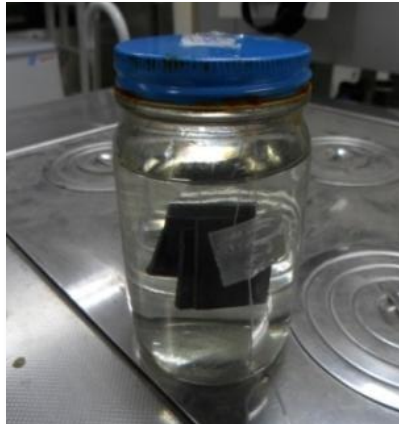
รูปที่ 3.13 Universal Testing Machine

3.4.5 การหาปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงหลังแช่น้ำกลั่น

การหาปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงหลังแช่น้ำกลั่นดำเนินการตามวิธีการที่ระบุในตามมาตรฐาน Federal Test Method หมายเลข 6211 [22] โดยมีการกำหนดชั้นทดสอบและวิธีการทดสอบ ดังนี้

- ชั้นทดสอบ** ทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดกว้าง 2.54 มิลลิเมตร ยาว 5.08 มิลลิเมตร
หนาไม่เกิน 1.6 มิลลิเมตร
- วิธีการทดสอบ** ชั่งน้ำหนักชั้นทดสอบ (W_1) นำชั้นทดสอบไปจุ่มอะซิโตนและล้างด้วยน้ำกลั่น
จากนั้นชั่งน้ำหนักชั้นทดสอบในน้ำกลั่น (W_2) แช่ชั้นทดสอบทิ้งไว้นาน $46 \pm 1/4$

ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 3.14 นำมาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง (W_3) นำขึ้นทดสอบไปจุ่มอะซิโตนและล้างด้วยน้ำกลั่นและชั่งน้ำหนัก (W_4) แล้วนำมาคำนวณด้วยสมการที่ 3.2 ทำการทดสอบทั้งหมด 3 ครั้ง หาค่ามัธยฐานแล้วบันทึกค่าที่ได้



รูปที่ 3.14 การทดสอบหาปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงหลังจากแช่น้ำกลั่น

$$\frac{(W_3 - W_4) - (W_1 - W_2)}{(W_1 - W_2)} * 100$$

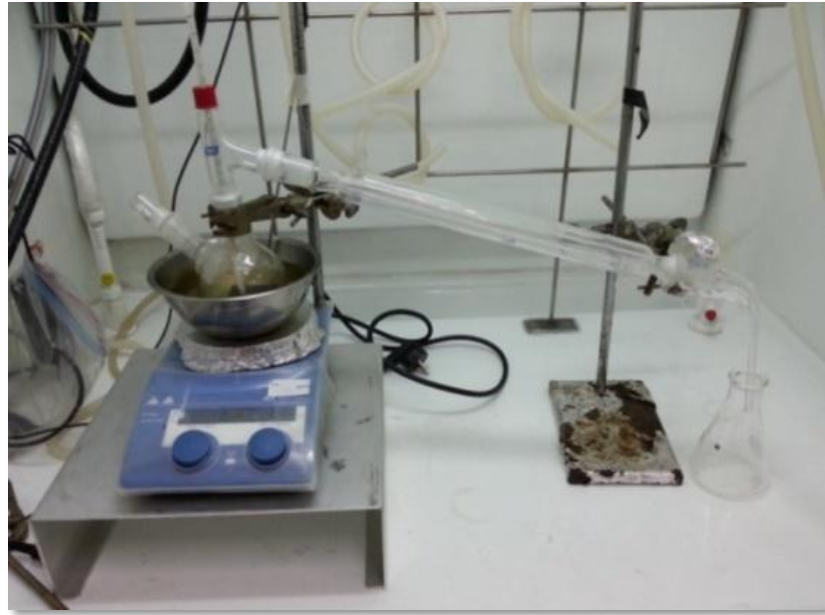
.....สมการที่ 3.2

3.4.6 การหาปริมาณสารถูกสกัดด้วยน้ำกลั่นเดือด

การหาปริมาณสารถูกสกัดด้วยน้ำกลั่นเดือดดำเนินการตามวิธีการที่ระบุในตามมาตรฐาน Federal Test Method หมายเลข 6621 [23] โดยมีการกำหนดขั้นตอนทดสอบและวิธีการทดสอบ ดังนี้

ขั้นตอนทดสอบ น้ำหนักประมาณ 10 กรัม หนาประมาณ 1.6 มิลลิเมตร

วิธีการทดสอบ นำขึ้นทดสอบ ชั่งน้ำหนัก (W_1) จากนั้นใส่ในน้ำเดือดซึ่งขั้นตอนต้องจมน้ำและสามารถเคลื่อนที่วนไปมาภายในภาชนะได้อย่างอิสระ โดยมีระบบควบคุมแน่นเพื่อรักษาปริมาตรน้ำให้คงที่นาน 1 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 3.15 จากนั้นนำน้ำที่ได้จากการสกัดรินใส่ขวดแก้วที่รู้น้ำหนักแล้ว ล้างขึ้นทดสอบด้วยน้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร และนำไปรวมกับน้ำที่สกัดไว้ตอนแรก นำสารละลายที่ได้ไประเหยแห้ง แล้วอบที่อุณหภูมิ $105 \pm 3^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นวางขึ้นทดสอบทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนัก (W_2) แล้วนำไปคำนวณด้วยสมการที่ 3.3 ทำการทดสอบทั้งหมด 2 ครั้ง หาค่าเฉลี่ยแล้วบันทึกค่าที่ได้



รูปที่ 3.15 การทดลองหาปริมาณสารถูกสกัดด้วยน้ำกลั่นเดือด

$$\frac{W_2}{W_1} * 100$$

.....สมการที่ 3.3

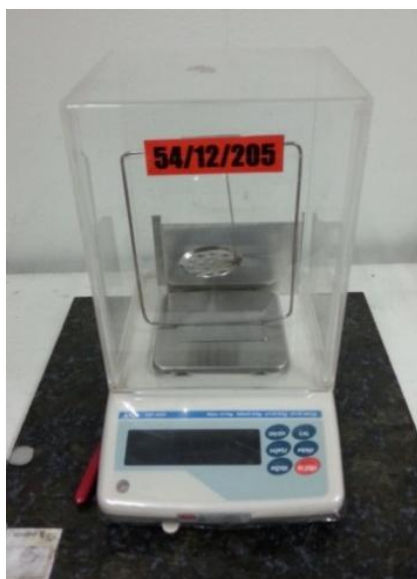
3.4.7 การหาค่าความถ่วงจำเพาะ

การหาค่าความถ่วงจำเพาะดำเนินการตามวิธีการที่ระบุในตามมาตรฐาน Federal Test Method

หมายเลข 14011 [24] โดยมีการกำหนดขั้นตอนทดสอบและวิธีการทดสอบ ดังนี้

ขั้นตอนทดสอบ หนัก 1 กรัม

วิธีการทดสอบ ทำการทดสอบด้วยเครื่อง Densimeter ดังแสดงในรูปที่ 3.16 ทำการทดสอบทั้งหมด 2 ครั้ง หาค่าเฉลี่ยแล้วบันทึกค่าที่ได้



รูปที่ 3.16 เครื่องวัดความถ่วงจำเพาะ

3.4.8 การทดสอบความทนทานต่อโอโซน

การทดสอบความทนทานต่อโอโซนดำเนินการตามวิธีการที่ระบุในตามมาตรฐาน ASTM

International หมายเลข D1149-07 [25] โดยมีการกำหนดขั้นตอนทดสอบและวิธีการทดสอบ ดังนี้

ขั้นตอนทดสอบ สี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 10 ± 0.03 มิลลิเมตร ยาว 100 ± 25 มิลลิเมตร

หนา $1.9-2.5$ มิลลิเมตร

วิธีการทดสอบ นำชิ้นทดสอบมาติดตั้งด้วยเครื่องมือดังแสดงในรูปที่ 3.17 ให้มีความยาวเพิ่มขึ้น 20% ของความยาวเดิม ดังเส้นสีขาวที่แสดงในรูปที่ 3.18 จากนั้นทำการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 40°C นาน 24 ชั่วโมง นำชิ้นทดสอบใส่ในเครื่องทดสอบความทนทานต่อโอโซน (UVC Ozone Aging Tester) ดังแสดงในรูปที่ 3.19 โดยปรับสภาวะภายในเครื่องให้มีความเข้มข้นของโอโซน 100 pphm (parts per hundred million by volume) อุณหภูมิ $40 \pm 1^{\circ}\text{C}$ นาน 70 ชั่วโมง จากนั้นส่งชิ้นทดสอบด้วยกำลังขยาย 7 เท่า หากพบรอยแตกที่ผิวชิ้นทดสอบ โดยมีทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของแรงดึง ก็ถือว่าไม่ผ่านตามมาตรฐานนี้ทำการทดสอบทั้งหมด 2 ครั้ง โดยแต่ละครั้งต้องไม่เกิดรอยแตกบริเวณผิวของชิ้นทดสอบ ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.17 เครื่องสำหรับจับยึดและดึงยึดขึ้นทดสอบ
ในการทดสอบความทนทานต่อไอโซน



รูปที่ 3.18 ผลการทดสอบความทนทานต่อไอโซน



รูปที่ 3.19 เครื่องทดสอบสมบัติความทนทานต่อไอโซน

บทที่ 4 ผลการดำเนินการ

4.1 สูตรเคมีตั้งต้น

ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบจากการออกสูตรเคมียาง สูตร 1-1 (ตามที่ระบุในหัวข้อ 3.1.2 ตาราง 3.2) จำนวน 5 ชิ้น แสดงในตารางที่ 4.1 ขงคกรรูปสูตร 1-1 มีค่าความแข็งเท่ากับ 38.5 Shore A (ใช้ค่ามัธยฐานในการรายงานผล ตามระบุในมาตรฐาน Federal Test Method หมายเลข 3021 [17]) ซึ่งค่าที่วัดได้ต่ำกว่าค่าที่มาตรฐาน MIL-R-900F กำหนดไว้คือ 45 ± 5 Shore A นอกจากนี้ ขงคกรรูปที่ได้เกิดการบวม ซึ่งมีลักษณะเป็นคราบที่พื้นผิวของขงคกรรูป ดังแสดงในรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบของสูตรเคมียาง 1-1 ก่อนการบ่มเร่ง (การวัดค่าความแข็งดำเนินการตามมาตรฐาน Federal Test Method หมายเลข 3021 [17])

ชิ้นงานทดสอบของ สูตรเคมียาง	ความแข็งก่อนการบ่มเร่ง (Shore A)	ค่ามัธยฐานของ ความแข็งก่อนการบ่มเร่ง
1-1	38	38.5
	38.5	
	38.5	
	39	
	39.5	



รูปที่ 4.1 ขงคกรรูปที่เกิดการบวม

จากความแข็งที่ต่ำกว่ามาตรฐาน จึงทำการแก้ไขด้วยการเพิ่มปริมาณเขม่าดำเข้าไป เมื่อทำการผสม เขม่าดำเข้ากับยางดิบ เนื้อยางดิบบางส่วนจะเข้าไปแทรกซึมภายในโครงสร้างของเขม่าดำ เมื่อคงรูปแล้วจะส่งผลให้ค่าความแข็งของยางสูงขึ้น

การบวมเป็นปัญหาที่มักพบในยางอีพียีเอ็ม เนื่องจากสารตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนใหญ่มีขีดความสามารถในการละลายในยางชนิดนี้ต่ำ สารเคมีส่วนเกินจึงเคลื่อนตัวออกมาที่พื้นผิวของยาง การแก้ปัญหาคือการบวมของยางจึงทำได้โดยปรับลดปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยาลงให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสม (ไม่เกินขีดความสามารถของการละลายในยาง) แต่เพื่อต้องการให้ระยะเวลาที่ใช้ในการคงรูปยางไม่นานจนเกินไป จึงเพิ่มสารตัวเร่งปฏิกิริยาทุติยภูมิเข้าไปอีกหนึ่งตัว [27]

4.2 การปรับสูตรเคมียาง ครั้งที่ 1

ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบจากการออกสูตรเคมียาง สูตร 2-1 (ตามที่ระบุในหัวข้อ 3.1.3 ตารางที่ 3.3) จำนวน 5 ชิ้น แสดงในตารางที่ 4. 2 ขงคงรูปสูตร 2-1 มีค่ามัธยฐานของความแข็งเท่ากับ 49 Shore A (ใช้ค่ามัธยฐานในการรายงานผลตามระบุในมาตรฐาน Federal Test Method หมายเลข 3021 [17]) ซึ่งค่าที่วัดได้ผ่านตามค่าที่มาตรฐาน MIL-R-900F กำหนดไว้คือ 45 ± 5 Shore A และเมื่อนำยางคงรูปไปทดสอบความต้านทานต่อโอโซนจำนวน 2 ชิ้นทดสอบ (ใช้ค่ามัธยฐานในการรายงานผลตามระบุในมาตรฐาน ASTM INTERNATIONAL หมายเลข D1149-07 [25]) พบว่าผลการทดสอบของสูตรเคมียาง 2-1 ซึ่งมีสัดส่วนยางธรรมชาติต่อยางอีพียีเอ็มเท่ากับ 50:50 ไม่เกิดรอยแตกขึ้นบริเวณผิวของชิ้นทดสอบทั้ง 2 ชิ้นทดสอบ ซึ่งผ่านตามที่มาตรฐาน MIL-R-900F กำหนด ดังแสดงในรูปที่ 4.2 แต่ทางโครงการการศึกษาวิจัยนี้ต้องการส่งเสริมการใช้ยางธรรมชาติเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับยางธรรมชาติซึ่งเป็นยางที่พบได้มากในประเทศไทย จึงได้ทำการปรับสูตรเคมียางโดยเพิ่มสัดส่วนของยางธรรมชาติต่อยางอีพียีเอ็มเป็น 70:30 และ 80:20 ส่วน และทำการทดสอบต่อไป

ตารางที่ 4.2 ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบจากการปรับสูตรครั้งที่ 1

ชิ้นงานทดสอบของ สูตรเคมียาง	ความแข็งก่อนการบ่มเร่ง (Shore A)	ค่ามัธยฐานของ ความแข็งก่อนการบ่มเร่ง
2-1	49	49
	49	
	49	
	49.5	
	49.5	



รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบความทนทานโอโซนของสูตรเคมียาง 2-1 ตามระบุใน
มาตรฐาน ASTM INTERNATIONAL หมายเลข D1149-07] 25]

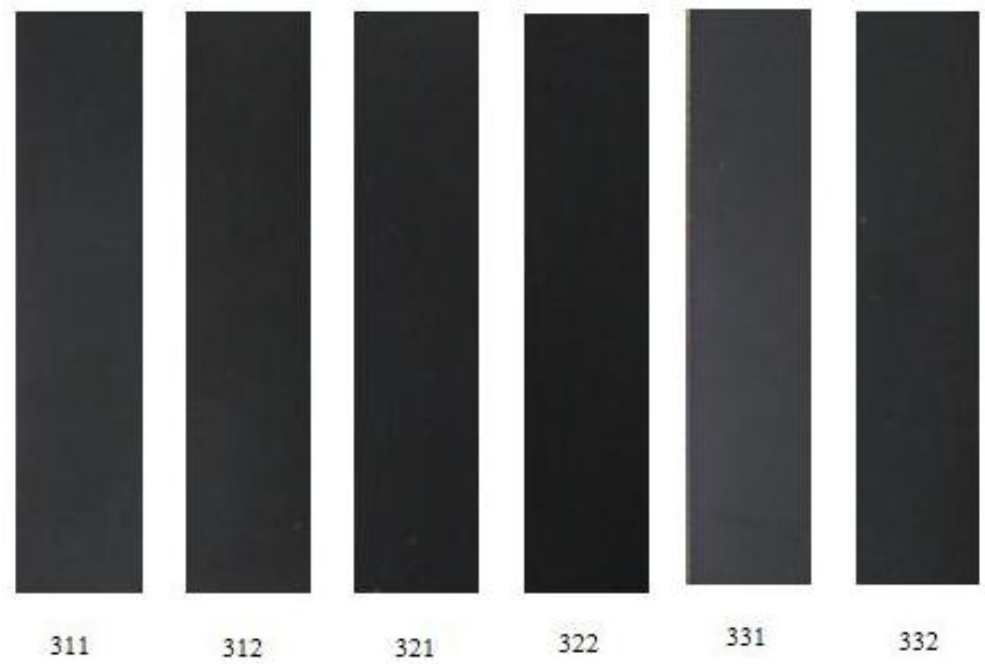
4.3 การปรับสูตรเคมียาง ครั้งที่ 2

จากการออกสูตรเคมียาง สูตร 3 และ สูตร 4 ตามที่ระบุในหัวข้อ 3.1.4 ตารางที่ 3.4 และ 3.5 เมื่อนำไปทดสอบวัดความแข็งเป็นจำนวน 5 ชิ้นทดสอบ ได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.3 และผลการทดสอบโดยละเอียดในภาคผนวก ก ตารางที่ ก-1 พบว่า สูตรเคมียางทั้ง 6 สูตรมีค่าความแข็งอยู่ในช่วงที่มาตรฐาน MIL-R-900F กำหนด คือ 45 ± 5 Shore A แต่เนื่องจากสูตรเคมียางที่ 3-1 และ 4-1 มีค่ามัธยฐานของความแข็งก่อนการบ่มเร่ง 49.4 และ 49 Shore A ซึ่งค่าความแข็งที่ได้ใกล้เคียงเกินจากค่าที่กำหนดโดยมาตรฐาน คือ 45 ± 5 Shore A จึงไม่นำสูตรยางดังกล่าวไปทำการศึกษาสมบัติอื่นๆต่อไป

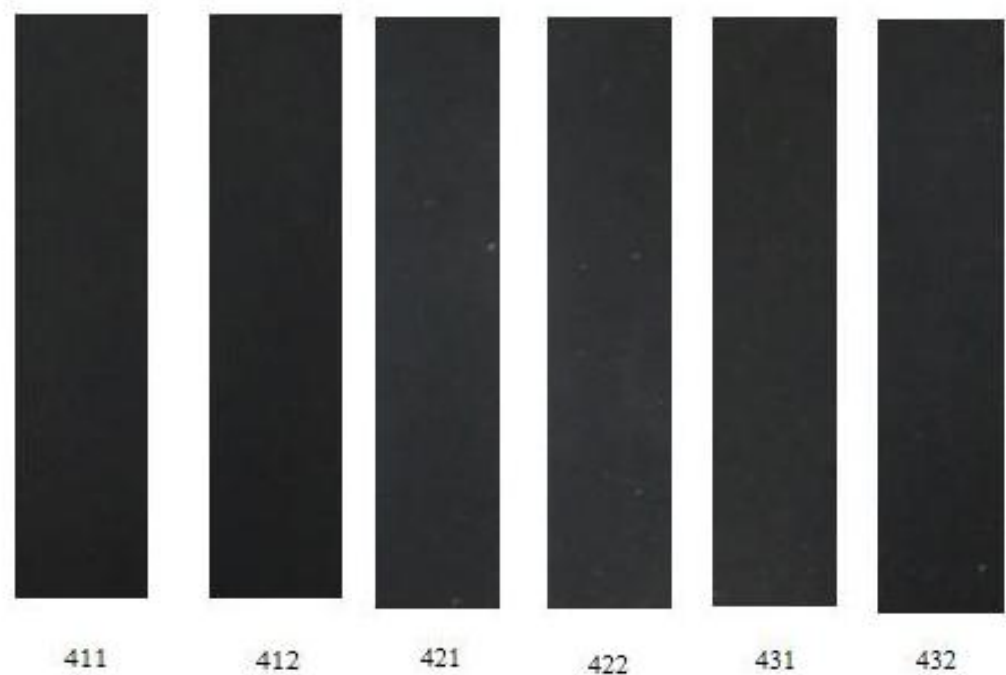
จากนั้นทำการทดสอบความทนทานต่อโอโซนของสูตรเคมียาง สูตร 3-2 3-3 4-2 และ 4-3 สูตรละ 2 ชิ้นทดสอบ พบว่า ผ่านตามมาตรฐานทุกสูตร (ไม่เกิดรอยแตกบริเวณผิวยาง) ผลการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 จากนั้นทำการทดสอบสมบัติอื่น ๆ ของ 4 สูตรที่เหลือต่อไป โดยผลการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 4.4 4.5 และ 4.6 และผลการทดสอบโดยละเอียดในภาคผนวก ก ตารางที่ ก- 2 ถึง ก-8 พบว่า สูตรเคมียางทั้ง 4 สูตร ผ่านการทดสอบสมบัติเกือบทุกข้อ ยกเว้นการทดสอบสมบัติความต้านในการอุดรอยร้าว ซึ่งสูตรที่ 3-3 และ 4-3 มีผลการทดสอบต่ำกว่าค่าที่มาตรฐานกำหนด เนื่องจากการใช้น้ำมันพาราฟินิกซึ่งเป็นสารเคมีที่ช่วยในกระบวนการผลิตจะส่งผลให้ยางคงรูปมีค่ามอดูลัสที่ลดลง ซึ่งค่ามอดูลัสจะสัมพันธ์กับความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างของยางคงรูป ดังนั้นเมื่อในสูตรเคมียาง 3-3 และ 4-3 มีการใช้น้ำมันในปริมาณมากจนเกินไป ย่อมส่งผลให้ยางคงรูปไม่สามารถคืนตัวได้ดีเท่าที่ควร ค่าการทดสอบสมบัติความต้านสูงสุดในการอุดรอยร้าวจึงได้น้อยกว่าที่มาตรฐาน MIL-R-900F กำหนด [16]

ตารางที่ 4.3 ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบจากการปรับสูตรครั้งที่ 2

ค่าที่กำหนดโดย มาตรฐาน MIL-R-900F	ค่ามัธยฐานของ ความแข็งก่อนการบ่มเร่ง (Shore A)					
	3-1	3-2	3-3	4-1	4-2	4-3
45±5 Shore A	49.5	46	46.5	49	46	45.5



รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบความต้านทานต่อโอโซนของสูตรเคมียาง 3



รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบความทนทานต่อโอโซนของสูตรเคมียาง 4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ก่อนการบ่มเร่ง ของสูตรเคมียาง 3-2, 3-3, 4-2 และ 4-3

สมบัติ	ค่าที่กำหนดโดย มาตรฐาน MIL-R-900F	ชิ้นงานทดสอบของสูตรเคมียาง			
		3-2	3-3	4-2	4-3
ความถ่วงจำเพาะ	ไม่เกิน 1.4	1.07	1.07	1.06	1.06
ความทนทานต่อแรงดึง (psi)	ไม่ต่ำกว่า 6.9	12.5	10	12.6	10.7
การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	ไม่ต่ำกว่า 300	1799	1684	1736	1673
การเสียรูปถาวรหลังการกด (%)	ไม่เกิน 30	13.7±3.2	12.5±1.7	13.7	9.13
ความดันในการอุดรอยร้าว (psi)	ไม่ต่ำกว่า 90	110±7.0	103.5±2.12	115	89.5±0.7

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ก่อนการบ่มเร่งของสูตรเคมียาง 3-2, 3-3, 4-2 และ 4-3

สมบัติ	ค่าที่กำหนด โดยมาตรฐาน MIL-R-900F	ชิ้นงานทดสอบของสูตรเคมียาง			
		3-2	3-3	4-2	4-3
ปริมาตรที่เปลี่ยนแปลง หลังแช่น้ำกลั่น (%)	2 ถึง -5	0.2	-0.7	0.6	0
ปริมาณสารถูกสกัดด้วย น้ำกลั่นเดือด (%)	ไม่เกิน 1	0.6	0.65±0.1	0.6	0.7
ความทนทานต่อโอโซน	ไม่มีรอยแตก	ไม่มี รอยแตก	ไม่มี รอยแตก	ไม่มี รอยแตก	ไม่มี รอยแตก

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบสมบัติต่าง ๆ หลังการบ่มเร่งของสูตรเคมียาง 3-2, 3-3, 4-2 และ 4-3

สมบัติ	มาตรฐาน MIL-R-900F	ชิ้นงานทดสอบของสูตรเคมียาง			
		3-2	3-3	4-2	4-3
ความแข็ง (Shore A)	ไม่เกิน 55	47.5	46	45	45
การเปลี่ยนแปลง ความทนทานต่อแรงดึง (%)	ไม่ต่ำกว่า 75	11.1	10.6	12.2	10.6
การเปลี่ยนแปลงการยืดตัว ณ จุดขาด (%)	ไม่ต่ำกว่า 70	1746	1659	1609	1609
ความดันในการอุดรอยร้าว (psi)	ไม่ต่ำกว่า 70	83.5±0.7	61±1.41	75±7.07	50

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การเพิ่มสัดส่วนของเขม่าดำจาก 40 เป็น 60 phr และการลดปริมาณของสารตัวเร่งปฏิกิริยาในสูตรเคมียางตั้งต้น ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบอยู่ในช่วงที่มาตรฐาน MIL-R-900F กำหนด และยังคงรูปที่ได้ไม่เกิดการบวมและไม่พบรอยแตกบริเวณผิวเมื่อนำไปทดสอบความต้านทานโอโซน และเมื่อทำการปรับสัดส่วนของยางธรรมชาติกับยางอีพียีเอ็ม จาก 50:50 เป็น 70:30 และ 80:20 และปรับปริมาณเขม่าดำให้อยู่ในช่วง 55-75 phr ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบที่มีปริมาณเขม่าดำ 55 phr มีค่าใกล้เคียงเกินมาตรฐาน MIL-R-900F กำหนด จึงนำชิ้นงานทดสอบที่มีปริมาณเขม่าดำ 65 และ 75 ไปทดสอบความทนทานต่อโอโซนและพบว่า ผิวชิ้นทดสอบไม่เกิดรอยแตกใด ๆ และเมื่อนำสูตรเคมียางของชิ้นทดสอบนี้ไปทดสอบในการทดสอบอื่น ๆ ตามที่ระบุในมาตรฐาน MIL-R-900F พบว่า สูตรเคมียางที่ผ่านตามข้อกำหนดของมาตรฐาน MIL-R-900F คือ สูตรเคมียางที่มีสัดส่วนของยางธรรมชาติต่อยางอีพียีเอ็มเท่ากับ 70:30 มีสัดส่วนเขม่าดำและน้ำมันเท่ากับ 65:30 และสูตรเคมียางที่มีสัดส่วนยางธรรมชาติต่อยางอีพียีเอ็ม 80:20 และสัดส่วนเขม่าดำและน้ำมัน 65:30

จากการพิจารณาถึงอิทธิพลของการเติมยางธรรมชาติต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมในยางธรรมชาติผสมยางอีพียีเอ็ม โดยพิจารณา จากผลการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ตามที่ระบุในมาตรฐาน MIL-R-900F พบว่า ผลการทดสอบชิ้นงานทดสอบของสูตรเคมียางที่มี สัดส่วนยางธรรมชาติต่อยางอีพียีเอ็ม 70:30 และ 80:20 มีค่าใกล้เคียงกัน ทุกการทดสอบ และถึงแม้จะมีการเพิ่มสัดส่วนของยางธรรมชาติและลดสัดส่วนของยางอีพียีเอ็มลงก็ไม่ส่งผลต่อสมบัติใด ๆ ของชิ้นงานทดสอบจากสูตรเคมียาง 3 และ 4

5.2 ข้อเสนอแนะ

เพื่อให้ได้สูตรเคมียางที่เหมาะสมกับการนำไปผลิตเป็นยางขอบประตูเรือของอุทหาเรือธนบุรี ควรนำสูตรยางเคมีที่ผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน MIL-R-900F ทั้งสองสูตรไปผลิตเป็นยางขอบประตูเรือและนำไปทดสอบการใช้งานในสภาวะจริง แต่เนื่องจากโครงการการศึกษาวินิจฉัยนี้มีข้อจำกัดทางด้านระยะเวลาในการดำเนินการจึงไม่สามารถนำไปทดสอบในสภาวะจริงได้

เอกสารอ้างอิง

1. พงษ์ธร แซ่อู๋ และชาคริต สิริสิงห์, 2550, ยาง กระบวนการผลิตและการทดสอบ, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค), สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 164 หน้า.
2. กฤษณา คงศิลป์ และคณะ, 2550, เทคโนโลยีการผลิตยางผสมยางธรรมชาติ, ศูนย์วิจัยยางสงขลา และสำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลการเกษตร, 12 หน้า.
3. ปฐมพงศ์ พันธุ์กมล, 2554, “การศึกษาผลของสัดส่วนความหนืดของยางผสมต่อความต้านทานต่อไอโซนของยางธรรมชาติและยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM)”, วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ยาง, ปีที่ 5, ฉบับที่ 2 เมษายน-มิถุนายน 2554.
4. Redfern, R., Pappas, C. and Cassario, L., 2008, **All Purpose Seal**, US. Patent, No. 7,451,714 B1.
5. Rowe, M.D. and McMullin F. A., 1996, **Fluidtight Door Gasket**, US. Patent, No. 5,553,871.
6. Freeman Marine Equipment, Inc., **Hatch Sealing Methods [Online]**, Available: <http://www.freemanmarine.com/Hatches2400SealingMethods.htm> [2012, April 17].
7. อุทัย เทพสุวรรณ, 2554, “การประลัยของผลิตภัณฑ์ยาง (Rubber Product Failure)”, วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง, ปีที่ 5, ฉบับที่ 1 มกราคม-มีนาคม 2554.
8. พงษ์ธร แซ่อู๋ และ อุทัย เทพสุวรรณ, 2553, “ไอโซน.....ภัยร้ายของผลิตภัณฑ์ยาง”, วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง, ปีที่ 4 ฉบับที่ 2 เมษายน-มิถุนายน 2533.
9. พงษ์ธร แซ่อู๋, 2005, **สารเคมียาง**, พิมพ์ครั้งที่ 2, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สวทช.), 150 หน้า.
10. พงษ์ธร แซ่อู๋, **ชนิดของยางและการใช้งาน [Online]**, Available: <http://www.rubbercenter.org/files/technologys.pdf> [2014, June 20].

11. Arayaprane, W. and Rempel, G.L., “Properties of NR/EPDM Blends with or without Methyl Methacrylate-Butadiene-Styrene (MBS) as a Compatibilizer”, **International Journal of Materials & Structural Reliability**, Vol.5, No.1, March 2007, page 1-12.
12. Rohana Yahya, Y.S., Azura, A.R. and Ahmad, Z., “Effect of Curing Systems on Thermal Degradation Behaviour of Natural Rubber (SMR CV 60)”, **Journal of Physical Science**, Vol. 22(2), 2011.
13. วุฒิชัย ไทยเจริญ, “การศึกษาการพัฒนายางคอมพาวด์”, **วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**, ปีที่ 3, ฉบับที่ 4 ตุลาคม-ธันวาคม 2552.
14. Schultz, F.R., 2002, **Hatch Cover Gasket**, US. Patent, No. 6,494,338.
15. Islam Mollah, M.T., **The Mechanical Aspects of Reactive Processing (Compatibilization) of Compounding of Fiber Forming Polymer Blends** [Online],
Available: <http://www.textiletoday.com.bd/magazine/228> [2014, 2 July].
16. มาตรฐาน Military Specification, MIL-R-900F, Available:
http://everyspec.com/MIL-PRF/MIL-PRF-000100-09999/MIL-PRF-900F_5183/ [28/3/2555].
17. มาตรฐาน Federal Test Method Standards Std. No. 601, Method 3021,
Available: http://everyspec.com/FED-STD/FED-STD-601_14290/ [2012, 30 March].
18. มาตรฐาน Federal Test Method Standards Std. No. 601, Method 3211,
Available: http://everyspec.com/FED-STD/FED-STD-601_14290/ [2012, 30 March].
19. มาตรฐาน Federal Test Method Standards Std. No. 601, Method 3311,
Available: http://everyspec.com/FED-STD/FED-STD-601_14290/ [2012, 30 March].
20. มาตรฐาน Federal Test Method Standards Std. No. 601, Method 4411,
Available: http://everyspec.com/FED-STD/FED-STD-601_14290/ [2012, 30 March].

21. มาตรฐาน Federal Test Method Standards Std. No. 601, Method 4121,
Available: http://everyspec.com/FED-STD/FED-STD-601_14290/ [2012, 30 March].

22. มาตรฐาน Federal Test Method Standards Std. No. 601, Method 6211,
Available: http://everyspec.com/FED-STD/FED-STD-601_14290/ [2012, 30 March].

23. มาตรฐาน Federal Test Method Standards Std. No. 601, Method 6621,
Available: http://everyspec.com/FED-STD/FED-STD-601_14290/ [2012, 30 March].

24. มาตรฐาน Federal Test Method Standards Std. No. 601, Method 14011,
Available: http://everyspec.com/FED-STD/FED-STD-601_14290/ [2012, 30 March].

25. มาตรฐาน American Society for Testing and Material, 2012, “Standard Test Methods for Rubber Deterioration Cracking in an Ozone Controlled Environment”, ASTM International, Method D1149-07, Available: [http://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?D1149+07\(2012\)](http://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?D1149+07(2012)) [2012, 13 April].

26. Sae-oui, P., Sirisinha, C., Thepsuwan, U. and Thapthong, P., 2007, “Influence of accelerator type on properties of NR/EPDM blends”, **Polymer Testing**, Vol. 26, pp. 1062-1067.

27. บล๊อค โอเคเนชั่น, 2012, ยางเอทธิลีนโพรพิลีนไดอีน (Ethylene Propylene Diene Rubber, **EPDM**), Available: <http://www.oknation.net/blog/print.php?id=633135> [2012, 15 December].

ภาคผนวก ก.

ผลทดสอบยางคงรูปตามมาตรฐาน MIL-R-900F

ตารางที่ ก.1 ความแข็งของชิ้นงานทดสอบของสูตรเคมียาง 3 และ 4 ก่อนและหลังการบ่มเร่ง
 (การวัดค่าความแข็งดำเนินการตามมาตรฐาน Federal Test Method Standard
 หมายเลข 3021 [17])

ชิ้นงานทดสอบ ของสูตรเคมียาง	ความแข็งก่อน การบ่มเร่ง (Shore A)	ค่ามัธยฐานของ ความแข็ง ก่อนการบ่มเร่ง (Shore A)	ความแข็งหลัง การบ่มเร่ง (Shore A)	ค่ามัธยฐานของ ความแข็ง หลังการบ่มเร่ง (Shore A)
3-1	49 49.5 49.5 49.5 49.5	49.5	-	-
3-2	46 46 46 46 46.5	46	47 47 47.5 47.5 47.5	47.5
3-3	46 46 46.5 46.5 46.5	46.5	45 45 46 46 47	46

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) ความแข็งของชิ้นงานทดสอบของสูตรเคมียาง 3 และ 4 ก่อนและหลังการบ่มเร่ง
(การวัดค่าความแข็งดำเนินการตามมาตรฐาน Federal Test Method Standard
หมายเลข 3021 [17])

ชิ้นงานทดสอบ ของสูตรเคมียาง	ความแข็งก่อน การบ่มเร่ง (Shore A)	ค่ามัธยฐานของ ความแข็ง ก่อนการบ่มเร่ง (Shore A)	ความแข็งหลัง การบ่มเร่ง (Shore A)	ค่ามัธยฐานของ ความแข็ง หลังการบ่มเร่ง (Shore A)
4-1	48 48.9 49 49 49	49	-	-
4-2	45.5 46 46 46.5 46.5	46	45 45 45 45 46	45
4-3	45 45.5 45.5 46 46	45.5	45 45 45 46 46	45

ตารางที่ ก.2 ค่าความดันในการอุดรอยร้าวของสูตรเคมียาง 3 และ 4 ก่อนและหลังการบ่มเร่ง
(การวัดค่าความดันในการอุดรอยร้าวดำเนินการตามมาตรฐาน Federal Test Method
Standard หมายเลข 3211 [18])

ชิ้นงาน ทดสอบของ สูตรเคมียาง	ค่าความดันใน การอุดรอยร้าว ก่อนการบ่มเร่ง (psi)	ค่าเฉลี่ยของค่าความ ดันในการอุดรอยร้าว ก่อนการบ่มเร่ง (psi)	ค่าความดันใน การอุดรอยร้าว หลังการบ่มเร่ง (psi)	ค่าเฉลี่ยของค่าความ ดันในการอุดรอยร้าว หลังการบ่มเร่ง (psi)
3-2	115	110±7.0	83	83.5± 0.7
	105		84	
3-3	102	103.5±2.12	60	61±1.41
	105		62	
4-2	115	115	80	75±7.07
	115		70	
4-3	90	89.5±0.7	50	50
	89		50	

ตารางที่ ก.3 ค่าการเสียรูปถาวรหลังกดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสของสูตรเคมียาง 3 และ 4
(การวัดค่าการเสียรูปถาวรหลังกดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสดำเนินการตามมาตรฐาน
Federal Test Method Standard หมายเลข 3311 [19])

ชิ้นงานทดสอบของ สูตรเคมียาง	ค่าการเสียรูปถาวรหลังกด ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (%)	ค่าเฉลี่ยของค่าการเสียรูปถาวรหลังกด ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (%)
3-2	16	13.7±3.2
	11.4	
3-3	13.7	12.5±1.7
	11.4	
4-2	13.7	13.7
	13.7	
4-3	9.13	9.13
	9.13	

ตารางที่ ก.4 ค่าความทนทานต่อแรงดึงของสูตรเคมียาง 3 และ 4 ทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่ง
(การวัดค่าความทนทานต่อแรงดึงดำเนินการตามมาตรฐาน Federal Test Method
Standard หมายเลข 4111 [20])

ชิ้นงาน ทดสอบของ สูตรเคมียาง	ค่าความทนทาน ต่อแรงดึง ก่อนการบ่มเร่ง (psi)	ค่ามัธยฐานของ ค่าความทนทานต่อ แรงดึงก่อนการบ่มเร่ง (psi)	ค่าความทนทาน ต่อแรงดึง หลังการบ่มเร่ง (psi)	ค่ามัธยฐานของ ค่าความทนทานต่อ แรงดึงหลังการบ่มเร่ง (psi)
3-2	11.8	12.5	9.8	11.1
	12.2		10.7	
	12.5		11.1	
	12.6		11.5	
	12.8		12.2	
3-3	9.5	10	10.1	10.6
	9.5		10.3	
	10		10.6	
	10.8		10.6	
	11		11.1	
4-2	12.2	12.6	9.9	12.2
	12.4		11.7	
	12.6		12.2	
	12.7		12.4	
	13.2		13	
4-3	10.4	10.7	10.2	10.6
	10.7		10.6	
	10.7		10.6	
	10.9		10.7	
	11.7		12.1	

ตารางที่ ก.5 ค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของสูตรเคมียาง 3 และ 4 ทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่ง

(การวัดค่าการยึดตัว ณ จุดขาดดำเนินการตามมาตรฐาน Federal Test Method Standard

หมายเลข 4121 [21])

ชิ้นงานทดสอบ ของ สูตรเคมียาง	ค่าการยึดตัว ณ จุดขาด ก่อนการบ่มเร่ง (%)	ค่ามัธยฐานของ ค่าการยึดตัว ณ จุดขาด ก่อนการบ่มเร่ง (%)	ค่าการยึดตัว ณ จุดขาด หลังการบ่มเร่ง (%)	ค่ามัธยฐานของ ค่าการยึดตัว ณ จุดขาด ก่อนการบ่มเร่ง (%)
3-2	1761 1789 1799 1840 1888	1799	1649 1667 1746 1756 1812	1746
3-3	1654 1679 1684 1750 1756	1684	1651 1654 1659 1666 1740	1659
4-2	1708 1728 1736 1750 1769	1736	1457 1557 1609 1652 1652	1609
4-3	1625 1645 1673 1711 1713	1673	1526 1591 1609 1617 1629	1609

ตารางที่ ก.6 ปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงหลังแช่น้ำกลั่นของสูตรเคมียาง 3 และ 4 ทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่ง (การวัดปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงหลังแช่น้ำกลั่นดำเนินการตามมาตรฐาน Federal Test Method Standard หมายเลข 6211 [22])

ชิ้นงานทดสอบของ สูตรเคมียาง	ปริมาตรที่เปลี่ยนแปลง หลังแช่น้ำกลั่น (%)	ค่ามัธยฐานของปริมาตรที่ เปลี่ยนแปลงหลังแช่น้ำกลั่น (%)
3-2	0.2	0.2
	0.2	
	0.3	
3-3	-0.1	-0.7
	-0.7	
	0.0	
4-2	0.1	0.6
	0.6	
	1.6	
4-3	-0.12	0
	0	
	0	

ตารางที่ ก.7 ปริมาณสารถูกสกัดด้วยน้ำกลั่นเดือดของสูตรเคมียาง 3 และ 4 (การวัดปริมาณสารถูกสกัดด้วยน้ำกลั่นเดือดดำเนินการตามมาตรฐาน Federal Test Method Standard หมายเลข 6621 [23])

ชิ้นงานทดสอบของ สูตรเคมียาง	ปริมาณสารถูกสกัด ด้วยน้ำกลั่นเดือด (%)	ค่าเฉลี่ยของปริมาณสารถูกสกัด ด้วยน้ำกลั่นเดือด (%)
3-2	0.6	0.6
	0.6	
3-3	0.6	0.65±0.07
	0.7	
4-2	0.6	0.6
	0.6	
4-3	0.7	0.7
	0.7	

ตารางที่ ก.8 ค่าความถ่วงจำเพาะของสูตรเคมียาง 3 และ 4 (การวัดค่าความถ่วงจำเพาะดำเนินการตาม
มาตรฐาน Federal Test Method Standard หมายเลข 14011 [24])

ชิ้นงานทดสอบ ของสูตรเคมียาง	ค่าความถ่วงจำเพาะ	ค่าเฉลี่ยของ ค่าความถ่วงจำเพาะ
3-2	1.06 1.07	1.07
3-3	1.06 1.07	1.07
4-2	1.05 1.06	1.06
4-3	1.06 1.06	1.06

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล นางสาวฐกานต์ โกสะกะ

วัน เดือน ปีเกิด 26 มีนาคม 2528

ประวัติการศึกษา

ระดับมัธยมศึกษา ประโยค มัธยมศึกษาตอนปลาย

โรงเรียนสุราษฎร์ธานี พ.ศ.2545

ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ พ.ศ.2551

ระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาการออกแบบและผลิตแบบบูรณาการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ.

2557

ประวัติการทำงาน พนักงานขาย (Sale Engineer)

บริษัท มหานครเทรดดิ้ง จำกัด พ.ศ. 2551-2555