

ผลกระทบของการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลและสารทำให้เกิดฟองที่มีต่อสมบัติของยางธรรมชาติ: สันฐานวิทยา และสมบัติเชิงกลทั้งก่อนและหลังการบวมตัวในน้ำมันเชื้อเพลิง

ธนวิญญ์ ภาคอรธร¹ มนต์วิณ แก้วทิพย์¹ ยศวีร์ พูนจันทร์¹ และ สิริอร อิศรางกูร ณ อยุธยา^{1,2,3*}

¹ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้และพลังงานทางเลือก (CTAE), วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

³ ศูนย์วิจัยการออกแบบและวิศวกรรมสำหรับระบบรางและระบบการขนส่งสมัยใหม่, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: siriorn.i@cit.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ: 14 กรกฎาคม 2564; วันที่ทบทวนบทความ: 14 กันยายน 2564 ; วันที่ตอบรับบทความ: 20 ตุลาคม 2564

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 22 ธันวาคม 2564

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับผลของการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุล และสารทำให้เกิดฟองในปริมาณต่าง ๆ ที่มีต่อสันฐานวิทยาและสมบัติเชิงกลทั้งก่อนและหลังการบวมตัว ของยางธรรมชาติ เพื่อทำเป็นชั้นยางกันรั่วของถังน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดกันรั่วได้ด้วยตัวเอง โดยนำยางมาผสมกับสารเชื่อมโยงโมเลกุล (0.5 และ 1.5 phr) และสารทำให้เกิดฟอง (0 4 8 และ 12 phr) ที่สัดส่วนต่าง ๆ ด้วยเครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง นำยางที่ได้มาหาระยะเวลาที่ยางใช้ในการคงรูป (t_{c90}) ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง จากนั้นขึ้นรูปชิ้นงานยางด้วยเครื่องกดอัดด้วยความร้อน นำชิ้นงานที่ได้มาหาปริมาณรูพรุนและทดสอบสมบัติเชิงกล (ได้แก่ ค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุด ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด และค่ามอดุลัส) ทั้งก่อนและหลังการบวมตัว ด้วยกล้องจุลทรรศน์และเครื่องทดสอบแรงดึงยึดอเนกประสงค์ ตามลำดับ จากการทดลองสรุปได้ว่าการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลและสารทำให้เกิดฟอง ส่งผลต่อสันฐานวิทยาและสมบัติเชิงกลทั้งก่อนและหลังการบวมตัวในน้ำมันเชื้อเพลิง จากผลการทดลองสรุปได้ว่ายางสูตร NR2 ที่เติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลและสารทำให้เกิดฟองที่ปริมาณ 1.5 และ 4 phr ตามลำดับ เป็นยางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับทำเป็นชั้นยางกันรั่วดังกล่าว เพราะมีสัดส่วนของเนื้อยางและรูพรุนที่เหมาะสม ทำให้มีอัตราการบวมตัวเร็วสุด และมีความแข็งแรงสูงสุดทั้งก่อนและหลังการบวมตัว

คำสำคัญ: ยางธรรมชาติ; การบวมตัว; สารเชื่อมโยงโมเลกุล; สารทำให้เกิดฟอง; รูพรุน

Effect of Crosslinking Agent and Blowing Agent on the Properties of Natural rubber: Morphology and Mechanical Properties - Before and After Fuel Swelling

Tanawit Park-aut¹, Manussawin Kaewtip¹, Yotsawee Poonchan¹ and Siriorn Isarankura Na Ayutthaya^{1,2,3*}

¹ Department of Power Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

² Research Centre for Combustion Technology and Alternative Energy (CTAE), College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

³ Center for Design and Engineering for Railway and Modern Transport System, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

* Corresponding Author, E-mail: siriorn.i@cit.kmutnb.ac.th

Received: 14 July 2021; Revised 14 September 2021; Accepted: 20 October 2021

Online Published: 22 December 2021

Abstract: This research work studies the effect of crosslinking agent and blowing agent at various concentrations, on morphology and mechanical properties, as before and after fuel swelling, of the natural rubbers which applied as the self-sealing layer of the fuel tank. The rubbers were blended with the crosslinking agent (0.5 and 1.5 phr), and the blowing agent (0, 4, 8 and 12 phr) at various concentrations, by using a two-roll mill machine. The curing time (t_{c90}) of each rubber was measured by using an oscillating disk rheometer. The rubbers were fabricated by using a hot-press compression molding machine. Then, the rubbers were measured the porous content and the mechanical properties (such as ultimate tensile strength, elongation at break and modulus), as before and after fuel swelling, by using an optical microscope and a universal testing machine, respectively. It was found that the crosslinking agent and the blowing agent affected to morphology and mechanical properties of the rubbers, as before and after fuel swelling. From these results, it can be concluded that the best formula that proper to use as self-sealing materials was NR2, which was the rubber that blended with the crosslinking agent and the blowing agent at 1.5 and 4 phr, respectively. Because this rubber has a proper ratio of the rubber matrix and the porous, as a result, it has the highest rate of swelling and strength, as before and after fuel swelling.

Keywords: Natural rubber; Swelling; Crosslinking agent; Blowing agent; Porous



1. บทนำ

ปัจจุบันมีการพัฒนาเกี่ยวกับเทคโนโลยีด้านความปลอดภัยของอากาศยานอย่างต่อเนื่อง ซึ่งหนึ่งในเทคโนโลยีที่ช่วยทำให้อากาศยานมีความปลอดภัยมากขึ้น ได้แก่ ถังน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดกันรั่วได้ด้วยตัวเอง หรือ “Self-sealing Fuel Tank” โดยถังน้ำมันนี้ถูกใช้เพื่อลดความเสียหายที่เกิดจากการรั่วไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงขณะใช้งาน [1-3]

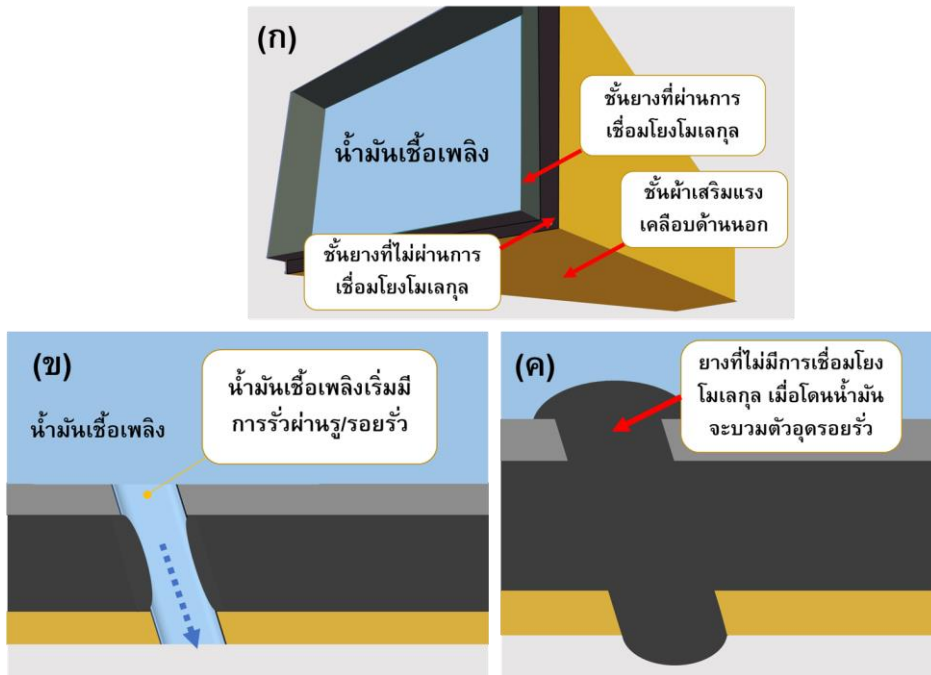
ถังน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดนี้ เริ่มมีการนำมาใช้งานทางทหารในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 และสงครามเกาหลี [1, 4] เมื่อถังน้ำมันเชื้อเพลิงของอากาศยานเกิดรอยรั่วหรือถูกยิงด้วยกระสุนปืน ถังน้ำมันชนิดนี้จะมีชั้นของวัสดุที่เกิดการบวมตัวเมื่อสัมผัสกับน้ำมัน ทำให้สามารถอุดรอยรั่วได้ [1, 5-7]

รูปที่ 1 แสดงหลักการของถังน้ำมันกันรั่ว เมื่อถังน้ำมันเชื้อเพลิงถูกเจาะหรือเกิดรอยรั่ว (รูปที่ 1 ข) น้ำมันเชื้อเพลิงจะไหลออกมาสัมผัสกับชั้นยาง ทำให้ยางบวมตัวจนปิดรูรั่วได้ (รูปที่ 1 ค) จึงช่วยลดการสูญเสียน้ำมันเชื้อเพลิง ลดความเสี่ยงต่อการติดไฟและระเบิด เพิ่มโอกาสในการนำอากาศยานลงจอดได้อย่างปลอดภัย [1, 3]

โดยทั่วไปถังน้ำมันดังกล่าวจะมีส่วนประกอบสำคัญคือชั้นของแผ่นยางและผ้าเสริมแรงหลายชั้น โดยชั้นในสุดที่ติดกับตัวถังน้ำมันเป็นชั้นของวัสดุยางที่ไม่ผ่านการวัลคาไนซ์ (Untreated Natural Rubber) ชั้นถัดมาเป็นชั้นของยางวัลคาไนซ์ (Vulcanized Rubber) และชั้นนอกสุดเป็นชั้นของผ้าเสริมแรง (Reinforced Fabric) (รูปที่ 1 ก) [4-5] โดยวัสดุชั้นในสุด

มักทำจากวัสดุที่ดูดซับน้ำมันเชื้อเพลิง (แก๊สโซลีนและเบนซิน) ได้อย่างรวดเร็ว มีการบวมตัวได้ดีเมื่อสัมผัสกับน้ำมันเชื้อเพลิง และบวมตัวได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ เพราะอากาศยานนั้นบินที่เพดานบินสูงซึ่งมีอากาศเย็นจัด โดยวัสดุที่บวมตัวดีในน้ำมันเชื้อเพลิงที่สภาวะดังกล่าวได้ดีที่สุด ได้แก่ ยางธรรมชาติ [4] แต่ในบางประเทศอาจมีข้อจำกัดในการผลิตยางธรรมชาติ ก็อาจใช้ยางสังเคราะห์ที่มีราคาสูงกว่า (เช่น ยางบิวตะไดอีน ยางพอลิยูรีเทน และยาง ไอโซพรีน ไอโซพรีน เป็นต้น) แทนได้ แม้ว่าจะมีอัตราการบวมตัวที่ช้ากว่ายางธรรมชาติ และใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้ไม่ดีเท่ายางธรรมชาติก็ตาม [4, 8]

ในช่วงเวลาต่อมา มีบริษัทเอกชนได้ทำการปรับปรุงรูปแบบของวัสดุกันรั่วให้มีการบวมตัวได้เร็วขึ้น โดยทำให้มีลักษณะเป็นเม็ดโฟมพอลิยูรีเทน (ที่ถูกประกบด้วยแผ่นพอลิยูรีเทน) เพราะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำมันเชื้อเพลิง ทำให้มีการบวมตัวเร็วขึ้น แต่เทคโนโลยีนี้มีข้อเสียที่น้ำหนักวลคือ หากเม็ดโฟมหลุดเข้าไปในถังน้ำมันและเคลื่อนตัวไปสู่ระบบท่อส่งน้ำมันที่มีขนาดเล็กและความกดเคี้ยว อาจทำให้ท่อส่งน้ำมันอุดตัน และไม่สามารถส่งน้ำมันไปยังเครื่องยนต์ได้ ทำให้เครื่องยนต์ดับขณะทำการบิน เป็นอันตรายต่อชีวิตนักบินและลูกเรือ [9] ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว จึงควรมีการออกแบบให้ชั้นยางมีความเป็นรูพรุนแทน ซึ่งจะช่วยให้ยางมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากเพียงพอ (บวมตัวได้เร็ว) แต่ก็ยังความต่อเนื่องและความแข็งแรงขณะบวมตัวได้อย่างเพียงพอที่จะไม่เกิดการขาดและหลุดเข้าไปในระบบท่อของน้ำมันเชื้อเพลิงได้ง่าย



รูปที่ 1 โครงสร้างถังน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดกันรั่วได้ด้วยตัวเอง (ก) น้ำมันรั่วไหลผ่านรู (ข) และยางกับน้ำมันเชื้อเพลิงทำปฏิกิริยากันทำให้ยางเกิดการบวมตัวอุดรูร้าว (ค)

งานวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาถึงความสามารถในการบวมตัวของยางในสารอินทรีย์ และพบว่าความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ขึ้นอยู่กับปริมาณการเชื่อมโยงโมเลกุล ปริมาณความเป็นรูพรุน รวมถึงชนิดและความหนืดของสารอินทรีย์ [8, 10-13] โดยในกรณีที่ยางไม่มีรูพรุน พบว่าการบวมตัวของยางแปรผกผันกับปริมาณการเชื่อมโยงโมเลกุลในเนื้อยาง [10-11] แต่ในกรณีที่ยางมีรูพรุนกลับพบว่าการบวมตัวของยางในสารอินทรีย์ไม่ได้แปรผกผันกับปริมาณการเชื่อมโยงโมเลกุลในเนื้อยางเพียงอย่างเดียว แต่จะมีส่วนผสมที่เหมาะสมที่ทำให้ยางมีการบวมตัวได้ดีที่สุด [13] ซึ่งหากมีปริมาณการเชื่อมโยงโมเลกุลที่มากเกินไป สายโซ่ที่เป็นร่างแหจำนวนมากจะทำให้

สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนตัวได้ยาก ทำให้ขนาดของรูพรุนในชิ้นงานมีขนาดเล็กลง และมีการดูดซับสารอินทรีย์ได้น้อยลง จึงบวมตัวลดลงด้วย แต่หากมีการเชื่อมโยงโมเลกุลน้อยเกินไป ยางจะยุบตัวไม่เกิดการทรงตัวเป็นรูปทรงที่ต้องการ เพราะความแข็งแรงของยางขึ้นอยู่กับปริมาณการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุล (Crosslinking Agent) โดยจะมีแนวโน้มที่แข็งแรงขึ้นเมื่อปริมาณสารเชื่อมโยงโมเลกุลเพิ่มมากขึ้น

นอกจากนี้ หากมีปริมาณรูพรุนมากเกินไป ก็จะยิ่งมีปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของยางมากขึ้นด้วย จึงจำเป็นที่จะต้องทำการทดลองเพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำไปใช้งานตามขอบเขตที่ต้องการ [8, 12] แต่อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยที่ได้กล่าวถึง



ทั้งหมดข้างต้น ชิ้นงานยางถูกนำมาทดสอบความแข็งแรงแบบทั่วไปเท่านั้น ไม่ได้มีการหาความแข็งแรงขณะยางบวมตัว เพราะงานวิจัยส่วนมากนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุอุดซับน้ำมันในท้องทะเล ซึ่งขอบเขตของงานต่างกับงานวิจัยนี้

จากข้อมูลข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะใช้ยางธรรมชาติมาทำการพัฒนาเป็นชั้นยางกันรั่ว เพื่อต้องการเพิ่มมูลค่าให้กับยางธรรมชาติของประเทศไทยให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานที่หลากหลายมากขึ้น โดยต้องการปรับปรุงให้ยางมีความเป็นรูพรุนที่เหมาะสมเพื่อให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสจำนวนมากและบวมตัวได้เร็ว อีกทั้งยังต้องมีความแข็งแรงทั้งก่อนและหลังการบวมตัว โดยขอบเขตของงานวิจัยนี้ คือศึกษาหาปริมาณรูพรุนและความแข็งแรงที่เหมาะสมของเนื้อยาง โดยการเติมสารทำให้เกิดฟอง (Blowing Agent) และเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลที่ปริมาณต่าง ๆ เพื่อให้ยางบวมตัวหลังการสัมผัสน้ำมันเชื้อเพลิงได้อย่างรวดเร็วและยังคงไว้ซึ่งความแข็งแรงทั้งก่อนและหลังการบวมตัวในน้ำมันเชื้อเพลิง

2. การดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

2.1.1 วัสดุและสารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ ยางธรรมชาติ (เกรด STR 5L) แบบยางก้อน สารซิงค์ออกไซด์ (ZnO) กรดสเตียริก (stearic acid) สารไดเมทิลบิวทิลฟีนิลฟีนิลลิ้นไดเอมีน (N-(1,3-dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylenediamine; 6PPD) สารโทลูอีนซัลโฟนิลไฮไดรไซด์ (Toluenesulfonyl Hydrazide)

สารไดเบนโซไทโอะซิลไดซัลไฟด์ (Dibenzothiazyl Disulfide; MBTS) สารเตตระเมทริลไธยูรามโมโนซัลไฟด์ (Tetramethylthiuram Monosulfide, TMTM) สารซัลเฟอร์ (Sulphur) และน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน 95

2.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll Mill) บริษัท ชัยเจริญการช่าง จำกัด (ประเทศไทย) เครื่องขึ้นรูปแบบกดอัดด้วยความร้อน (Hot Press Compression Molding) รุ่น MT80 บริษัท Labtech Engineering (ประเทศไทย) เครื่องทดสอบแรงดึงยืดอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) รุ่น AG-1 บริษัท SHIMADZU (ประเทศญี่ปุ่น) เครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง (Oscillating Disc- Rheometer, ODR) รุ่น GT-7070-S2 บริษัท GOTECH (ประเทศไทย) กล้องจุลทรรศน์แบบซุมสเตอริโอไมโครสโคป (Stereo Microscope Zoom, SMZ) รุ่น 745T บริษัท NIKON (ประเทศญี่ปุ่น) เครื่องชั่งแบบดิจิทัล (3 ตำแหน่ง) (Precision Balance) รุ่น ML204 บริษัท Mettler Toledo (ประเทศสวิตเซอร์แลนด์)

2.2 การเตรียมยางคอมปาวด์

การเตรียมยางคอมปาวด์ทำได้โดยนำยางธรรมชาติมาผสมกับสารเคมี ตามสัดส่วนที่แสดงในตารางที่ 1 ทำการผสมในเครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง โดยไม่ใช้ตัวควบคุมอุณหภูมิ (ทั้งนี้ อุณหภูมิเริ่มต้นของเครื่องผสมเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส) ความเร็วรอบในการหมุนของลูกกลิ้งเท่ากับ 40 รอบต่อนาที โดยทำการผสมสารเคมีชนิดต่าง ๆ ตามลำดับจากบนลงล่าง ตามตารางที่ 1



ตารางที่ 1 สูตรการผสมสารเคมียาง

ส่วนประกอบ	ปริมาณที่ใช้ (phr)							
	STD1	STD2	NR1	NR2	NR3	NR4	NR5	NR6
ยางธรรมชาติ (SRT 5L)	100	100	100	100	100	100	100	100
สารกระตุ้นปฏิกิริยาลูกขาว (White Seal)	4	4	4	4	4	4	4	4
สารกระตุ้นสำหรับตัวเร่ง (Stearic Acid)	2	2	2	2	2	2	2	2
สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ (6PPD)	1	1	1	1	1	1	1	1
สารทำให้เกิดฟอง (Sulfonyl Hydrazide)	0	0	4	4	8	8	12	12
สารเร่งปฏิกิริยาลูกขาว (MBTS)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
สารเร่งปฏิกิริยาลูกขาว (TMTM)	1	1	1	1	1	1	1	1
สารเชื่อมโยงโมเลกุล (Sulphur)	0.5	1.5	0.5	1.5	0.5	1.5	0.5	1.5

2.3 การหาสภาวะที่ทำให้ยางเกิดการคงรูป

นำยางคอมปาวด์สูตรต่าง ๆ ไปหาระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (Scorch Time, ts_2) ระยะเวลาที่ยางใช้ในการคงรูป (tc_{90}) และค่าผลต่างแรงบิด (MH-ML) โดยใช้เครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่งในการทดสอบ อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2084-01 จากนั้น นำอุณหภูมิและระยะเวลาที่ยางใช้ในการคงรูป tc_{90} ไปใช้ในการคงรูปยาง

2.4 การผลิตชิ้นรูปชิ้นงานยาง

นำยางคอมปาวด์ที่ได้ ไปทำการคงรูปให้เป็นชิ้นงานให้มีขนาด กว้างxยาวxหนา เท่ากับ 15x15x3 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบกดอัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส โดยใช้ระยะเวลาที่ยางใช้ในการคงรูป tc_{90} ตามที่ได้จากข้อ 2.3

2.5 การหาค่าร้อยละการบวมตัวของยาง

นำยางที่ผ่านกระบวนการคงรูปที่ได้ในแต่ละสูตร มาทดสอบการบวมตัวของชิ้นงาน โดยนำแผ่นยางมาตัดให้เป็นวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร

จำนวน 3 ชิ้นต่อ 1 สูตร ทำการชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำไปแช่ในน้ำมันเบนซิน (แก๊สโซลีน) ที่บรรจุในภาชนะที่มีฝาปิดมิดชิดที่ปริมาณน้ำมัน 100 มิลลิลิตร (รูปที่ 7 (ก)) เป็นเวลา 9 ชั่วโมง โดยในช่วง 3 ชั่วโมงแรก จะชั่งน้ำหนักห้ำกักันทุก 15 นาที และในช่วง 6 ชั่วโมงหลัง จะชั่งน้ำหนักห้ำกักันทุก 30 นาที และนำมาคำนวณร้อยละการบวมตัวดังสมการที่ (1)

$$Q_t = \left(\frac{\left(\frac{w_t - w_0}{w_0} \right) \times 100}{M_w} \right) \quad (1)$$

โดย Q_t คือ ร้อยละการบวมตัว

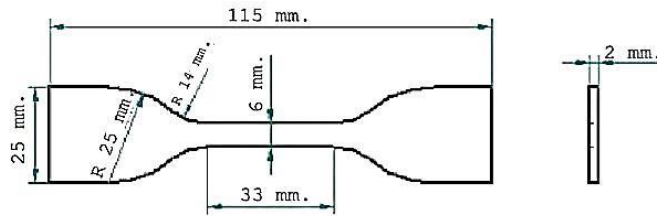
w_t คือ น้ำหนักชิ้นงานหลังแช่ (กรัม)

w_0 คือ น้ำหนักชิ้นงานก่อนแช่ (กรัม)

M_w คือ มวลโมเลกุลของน้ำมันเบนซิน ($114.23 \text{ g mol}^{-1}$)

2.6 การทดสอบสมบัติเชิงกลของยาง

นำแผ่นยางที่ขึ้นรูปได้จากข้อ 2.4 มาทำการเตรียมชิ้นงานให้มีขนาดตามมาตรฐาน ASTM D412 (Die C) (รูปที่ 2) จากนั้น นำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบ



รูปที่ 2 ชิ้นทดสอบตาม ASTM D412 (Die C)

โดยทำการดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงยืดอเนกประสงค์ ใช้ความเร็วการดึงที่ 500 มิลลิเมตรต่อนาที ทำการดึงจนชิ้นงานแยกขาดออกจากกัน สมบัติที่นำมาพิจารณา ได้แก่ ค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at Break) และค่ามอดุลัส (Modulus)

2.7 การศึกษาหาปริมาณและการกระจายตัวของรูพรุนในเนื้อยาง

เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการหาปริมาณและการกระจายตัวของรูพรุนในเนื้อยาง โดยนำยางคอมปาวด์ที่ผ่านการขึ้นรูปมาตัดขวาง เพื่อมาส่องดูพื้นที่บริเวณหน้าตัดเพื่อสังเกตการกระจายตัวและหาปริมาณของรูพรุนในเนื้อยางด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบซุมสเตอร์ไอไมโครสโคป ที่กำลังขยาย 300 เท่า จากนั้นทำการบันทึกภาพชิ้นงาน และใช้โปรแกรม Image J ในการคำนวณหาปริมาณร้อยละพื้นที่ของรูพรุน

3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้มี 2 ส่วน ส่วนแรกคือการหาสภาวะที่เหมาะสมในการคงรูปยางคอมปาวด์ ส่วนถัดมาคือการศึกษสมบัติต่าง ๆ ของยาง ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพ ร้อยละการบวมตัว สมบัติเชิงกลทั้งก่อนและหลังการบวมตัวในน้ำมันเบนซิน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 การหาสภาวะที่ใช้ในการคงรูปยาง

นำยางคอมปาวด์จากตารางที่ 1 มาหาระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (ts_2) ระยะเวลาที่ยางใช้ในการคงรูป (tc_{90}) และค่าผลต่างแรงบิด (MH-ML) ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแก้ว ที่ 160 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการคงรูปยาง โดยตารางที่ 2 คือสภาวะที่ได้จากยางสูตรต่าง ๆ

จากนั้น นำข้อมูลระยะเวลาในการคงรูปยางในตารางที่ 2 มาทำการคงรูปยางคอมปาวด์สูตรต่าง ๆ ด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบกดอัดด้วยความร้อน ให้ได้เป็นแผ่นชิ้นงานที่มีขนาดตามรายละเอียดในข้อ 2.4

ตารางที่ 2 ระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (ts_2) ระยะเวลาที่ยางใช้ในการคงรูป (tc_{90}) และค่าผลต่างแรงบิดของยางสูตรต่าง ๆ

สูตร	สารเชื่อมโยงโมเลกุล (phr)	สารทำให้เกิดฟอง (phr)	ts_2 (นาที)	tc_{90} (นาที)	MH-ML* (dN-m)
STD1	0.5	0	0.43	8.22	37.97
STD2	1.5	0	1.26	5.26	66.75
NR1	0.5	4	0.46	9.45	23.91
NR2	1.5	4	0.37	5.24	27.03
NR3	0.5	8	0.12	9.64	15.24
NR4	1.5	8	0.13	10.23	18.90
NR5	0.5	12	0.12	9.49	10.64
NR6	1.5	12	0.18	13.18	20.29

* MH-ML คือ ค่าผลต่างแรงบิด = แรงบิดสูงสุด - แรงบิดต่ำสุด






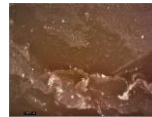

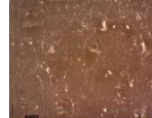







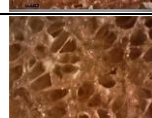


จากตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาในส่วนที่มีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลที่ 0.5 phr พบว่าแม้ว่าจะมีการเติมสารทำให้เกิดฟองในปริมาณที่ต่างกัน กลับพบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการคงรูปจะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เนื่องจากปริมาณสารเชื่อมโยงโมเลกุลมีปริมาณไม่มากจนเกินไปจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาการคงรูปได้ในช่วงเวลาพร้อมๆ กัน

ในทางตรงกันข้าม เมื่อพิจารณาในส่วนที่มีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลที่ 1.5 phr ซึ่งมากกว่าเติมถึงสามเท่า พบว่าการเติมสารทำให้เกิดฟองในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลทำให้ระยะเวลาที่ยางใช้ในการคงรูปมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น นั่นหมายความว่าฟองอากาศที่เกิดขึ้นขณะที่การทดสอบจะรบกวนปฏิกิริยาการคงรูปของยาง ซึ่งแก๊สที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานมีความเป็นฉนวนจึงให้ความร้อนโดยรวมลดลง ประกอบกับปริมาณสารเชื่อมโยงโมเลกุลมีปริมาณมาก จึงทำให้ใช้ระยะเวลาในการคงรูปมากขึ้น ตามปริมาณแก๊สหรือรูพรุนที่มากขึ้นด้วย นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาในส่วนค่าผลต่างแรงบิด พบว่าสูตรที่มีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลที่ 0.5 และ 1.5 phr มีแนวโน้มค่าผลต่างแรงบิดที่ลดลง เมื่อปริมาณสารทำให้เกิดฟองเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเกิดจากแก๊สหรือรูพรุนที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ จะลดความต่อเนื่องของเนื้อยางทำให้ค่าผลต่างแรงบิดมีแนวโน้มลดลงเมื่อยางมีรูพรุนมากขึ้น

3.2 ลักษณะทางกายภาพของยางสูตรต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานที่ได้ในข้อ 3.1 พบว่ายางแต่ละสูตรมีลักษณะรูพรุนในเนื้อยางแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ลักษณะทางกายภาพและรูพรุนของยางสูตรต่าง ๆ

สูตร	ลักษณะทางกายภาพภายนอก ^(ก)	ลักษณะรูพรุน ^(ข)	ร้อยละพื้นที่ของรูพรุน ^(ค)
STD1			0
STD2			0
NR1			7.04
NR2			10.66
NR3			13.05
NR4			15.20
NR5			47.34
NR6			19.93

หมายเหตุ:

- (ก) ภาพถ่ายลักษณะทางกายภาพภายนอกของยางสูตรต่างๆ
- (ข) โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของยางสูตรต่าง ๆ ที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์จุลทรรศน์อิเล็กตรอน
- (ค) ปริมาณร้อยละพื้นที่ของรูพรุนคำนวณได้จากการนำรูปในข้อ (ข) ไปคำนวณด้วยซอฟต์แวร์ ImageJ



ยางสูตร NR1 เป็นยางที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงโมเลกุลและมีปริมาณสารทำให้เกิดฟองเท่ากับ 0.5 และ 4 phr ตามลำดับ โดยเนื้อยางมีลักษณะเรียบเนียนและมีฟองอากาศภายในเนื้อยางเล็กน้อยคิดเป็นร้อยละ 7.04 ส่วนยางสูตร NR2 เป็นยางที่มีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลมากขึ้น คือ เท่ากับ 1.5 phr ซึ่งพบว่าเนื้อยางมีร้อยละพื้นที่ของรูพรุนภายในเนื้อยางเท่ากับ 10.66 ซึ่งมากกว่ายางสูตร NR1 แม้ว่าจะมีปริมาณสารทำให้เกิดฟองในปริมาณที่เท่ากัน เนื่องจากยางสูตร NR2 มีปริมาณสารเชื่อมโยงโมเลกุลมากกว่ายางสูตร NR1 จึงทำให้ยางมีอัตราการเชื่อมโยงโมเลกุลเร็วกว่าสอดคล้องกับผลของระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (t_{s2}) และระยะเวลาที่ยางใช้ในการคงรูป (t_{c90}) ของยางสูตร NR2 ที่ลดลง และมีค่าผลต่างแรงบิดที่มากขึ้น (ตารางที่ 2) เมื่อเทียบกับของยางสูตร NR1 จึงทำให้ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นภายในยางขณะขึ้นรูปเคลื่อนตัวออกจากเนื้อยางได้น้อยกว่า จึงทำให้มีปริมาณรูพรุนมากกว่ายางสูตร NR1

ยางสูตร NR3 และ NR4 เป็นยางที่มีการเติมสารทำให้เกิดฟองเพิ่มมากขึ้น โดยเติมที่ปริมาณ 8 phr แต่มีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลในปริมาณเช่นเดียวกับยาง NR1 และ NR2 คือ 0.5 และ 1.5 phr ตามลำดับ พบว่าเนื้อยางสูตร NR3 และ NR4 มีลักษณะรูพรุนกระจายอยู่ในเนื้อยางที่ปริมาณร้อยละ 13.05 และ 15.20 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ายาง NR4 จะมีปริมาณรูพรุนมากกว่า NR3 เล็กน้อย เนื่องจากมีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลในปริมาณที่มากกว่าจะทำให้เนื้อยางมีการเชื่อมโยงโมเลกุลในสัดส่วนที่มากกว่า ทำให้มีความความแข็งแรงขณะขึ้นรูปมากกว่า สอดคล้องกับผลของค่าผลต่างแรงบิด

(MH-ML) ของ NR4 มีค่ามากกว่า NR3 เล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ 2 ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นภายในเนื้อยางสูตร NR4 ขณะทำการขึ้นรูปเคลื่อนตัวออกจากเนื้อยางยากกว่า จึงทำให้มีปริมาณรูพรุนมากกว่ายางสูตร NR3 เล็กน้อย [8]

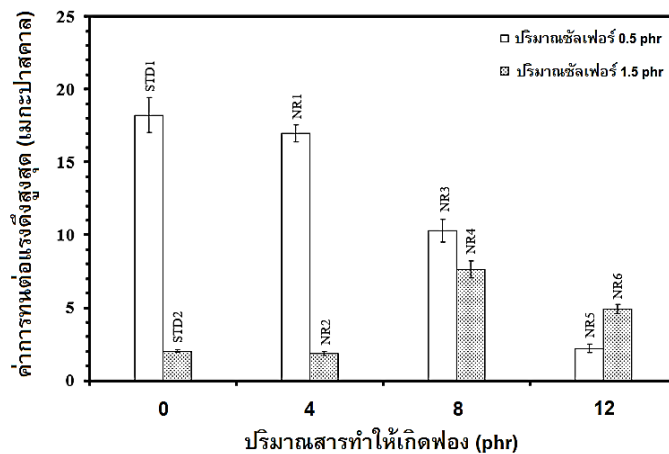
ในส่วนยางสูตร NR5 และ NR6 เป็นยางที่มีการเติมสารทำให้เกิดฟองที่มากขึ้นอีก โดยเติมที่ปริมาณ 12 phr และมีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลเหมือนกับการทดลองข้างต้น ซึ่งเติมที่ปริมาณ 0.5 และ 1.5 phr ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าเนื้อยางสูตร NR5 จะมีรูพรุนขนาดใหญ่อยู่ในมากกว่ายางสูตร NR6 เมื่อคำนวณออกมาพบว่ายางสูตร NR5 จะมีร้อยละพื้นที่ของรูพรุนเท่ากับ 47.34 ในขณะที่ยางสูตร NR6 จะมีร้อยละพื้นที่ของรูพรุนเท่ากับ 19.93 ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ เนื่องจากยางสูตร NR5 มีการเติมสารทำให้เกิดฟองในปริมาณที่มากถึง 12 phr แต่มีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลในปริมาณเพียง 0.5 phr จึงทำให้เนื้อยางขณะขึ้นรูปมีความแข็งแรงต่ำกว่า ในขณะที่ยางสูตร NR6 มีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลในปริมาณที่มากถึง 1.5 phr จึงทำให้เนื้อยางขณะขึ้นรูปมีความแข็งแรงมากกว่ามาก สอดคล้องกับค่าผลต่างแรงบิดในตารางที่ 2 ที่พบว่า NR5 มีค่าผลต่างแรงบิดน้อยกว่า NR6 เป็นอย่างมาก ด้วยเหตุนี้ เมื่อมีแก๊สจำนวนมากเกิดขึ้นในชิ้นงานอย่างรวดเร็ว ยางสูตร NR5 จึงต้านทานแรงดันจากแก๊สที่อยู่ภายในเนื้อยางได้น้อยกว่ายางสูตร NR6 ทำให้ยางสูตร NR5 มีฟองอากาศขนาดใหญ่ และมีร้อยละพื้นที่ของรูพรุนในเนื้อยางมากกว่ายางสูตร NR6 อย่างเห็นได้ชัด

เมื่อพิจารณาชิ้นงานยางที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงโมเลกุลในสัดส่วนที่น้อย (0.5 phr) และมีการเติมสารทำให้เกิดฟองในปริมาณไม่มาก คือ 4 และ 8 phr พบว่าเนื้อยางจะมีปริมาณรูพรุนไม่มากนัก ซึ่งมีค่าร้อยละพื้นที่ของรูพรุนเท่ากับ 7.04 และ 13.05 ตามลำดับ แต่หากเติมสารทำให้เกิดฟองในปริมาณมากขึ้นที่ปริมาณ 12 phr จะทำให้เนื้อยางมีปริมาณรูพรุนมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ คือมีปริมาณเท่ากับร้อยละ 47.34 นั้นหมายความว่าที่สัดส่วนนี้ แก๊สหรือรูพรุนที่เกิดขึ้นจะมีอิทธิพลมากกว่าความแข็งแรงของเนื้อยางอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาในมุมมองของยางที่มีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลในสัดส่วนที่มาก (1.5 phr) และมีการเติมสารทำให้เกิดฟองในปริมาณ 4, 8 และ 12 phr พบว่ามีร้อยละพื้นที่ของรูพรุนเท่ากับ 10.66, 15.20 และ 19.93 ตามลำดับ

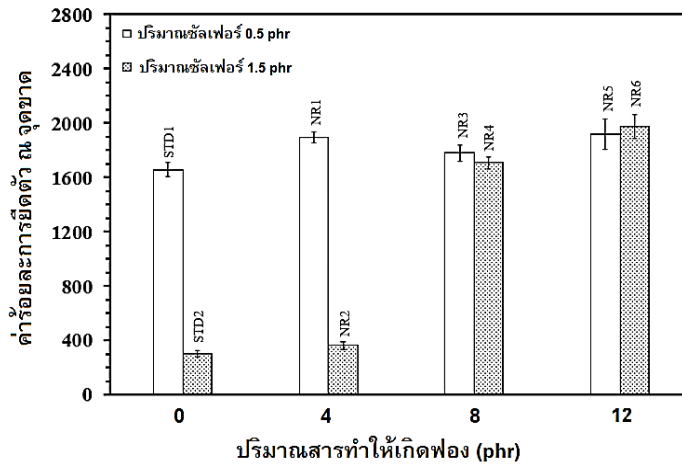
โดยลักษณะรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานทั้งหมดจะมีขนาดเล็ก นั้นหมายความว่า การเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลในปริมาณที่มากขึ้น [8] จะทำให้เนื้อยางขณะขึ้นรูปมีความแข็งแรงขึ้น จึงช่วยควบคุมขนาดของรูพรุนให้มีขนาดเล็กได้ทั่วทั้งชิ้นงานยาง หรืออาจกล่าวได้ว่าปริมาณของสารเชื่อมโยงโมเลกุลเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อขนาดของรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน

3.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล

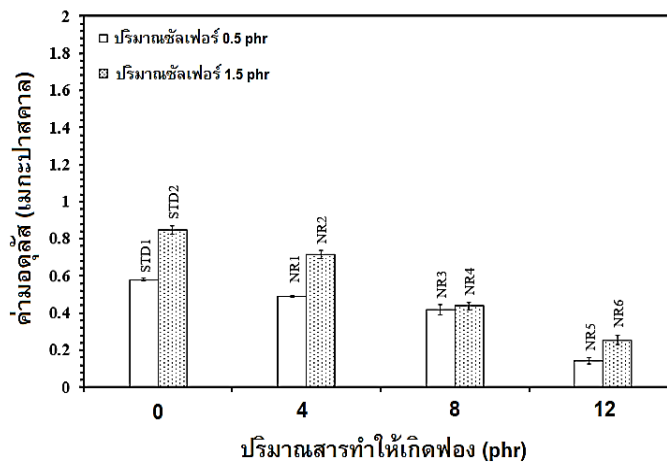
ในส่วนนี้จะอภิปรายผลเกี่ยวกับสมบัติเชิงกลของยางสูตรต่าง ๆ ที่ได้จากการขึ้นรูปในหัวข้อ 3.1 โดยค่าสมบัติเชิงกลที่ทำการทดสอบในงานวิจัยนี้ได้แก่ ค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุด ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด และค่ามอดุลัส ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 3 ถึง 5 และสามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3 กราฟแสดงค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุด



รูปที่ 4 กราฟแสดงค่าร้อยละการยึด ผน จุดขาด



รูปที่ 5 กราฟแสดงค่ามอดูลัส

เมื่อพิจารณาภาพรวมของสมบัติเชิงกลของยางทุกสูตรเปรียบเทียบกับกัน พบว่าแนวโน้มของค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุด และค่ามอดูลัส มีแนวโน้มลดลง และค่าร้อยละการยึดตัว ผน จุดขาด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของสารทำให้เกิดฟอง ที่เป็นเช่นนี้ เพราะว่ายางมีแนวโน้มของค่าร้อยละพื้นที่ของรูพรุนในเนื้อยางเพิ่มขึ้น ตามปริมาณการเติมสารทำ

ให้เกิดฟองที่มากขึ้น ทำให้ชิ้นงานยางมีปริมาณเนื้อยางต่อพื้นที่หน้าตัดลดลง ส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมมีค่าลดลง ทั้งนี้ หากพิจารณาในส่วนของสมบัติเชิงกลโดยละเอียด สามารถอธิบายได้ดังนี้

ในส่วนของยางสูตร STD1 และ STD2 เป็นสูตรยางที่ไม่มีการเติมสารทำให้เกิดฟอง แต่มีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลในปริมาณเท่ากับ 0.5 และ 1.5 phr



ตามลำดับ จากกราฟยางสูตร STD1 และ STD2 จะเห็นได้ว่ามีค่าการทนต่อทนแรงดึงสูงสุด เท่ากับ 18.22 ± 1.19 และ 2.02 ± 0.10 เมกะปาสคาล ตามลำดับ มีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดเท่ากับ ร้อยละ 1657.53 ± 50.06 และ 301.90 ± 21.62 ตามลำดับ มีค่ามอดูลัสเท่ากับ 0.58 ± 0.01 และ 0.85 ± 0.02 เมกะปาสคาล ตามลำดับ

จากผลการทดสอบพบว่า ยางสูตร STD1 มีค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุด และค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด มากกว่ายางสูตร STD2 อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากยางสูตร STD1 มีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลน้อยกว่า ยางสูตร STD2 จึงทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางสูตร STD1 ไม่ถูกยืดมากนัก ทำให้ขณะทำการดึงสายโซ่โมเลกุลมีโอกาสนในการจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบมากขึ้น จึงทำให้มีค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุดและค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด ได้มากกว่า [8, 14]

แต่เมื่อพิจารณาในส่วนของความแข็งของยาง ซึ่งพิจารณาจากค่ามอดูลัส จะเห็นได้ว่ายางสูตร STD2 มีค่าความแข็งมากกว่ายางสูตร STD1 เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของยางสูตร STD2 ถูกคงรูปด้วยสารเชื่อมโยงโมเลกุลในปริมาณที่มากกว่า ทำให้มีความหนาแน่นของโครงข่ายสามมิติมากกว่า จึงส่งผลให้ยางเกิดการคงรูปมากกว่า ทำให้สามารถทนต่อแรงดึงในช่วงต้นได้ดีกว่า แต่เมื่อเพิ่มแรงที่ใช้ในการดึงมากขึ้น ยางสูตร STD2 (ที่มีการคงรูปมากกว่า) จะไม่สามารถยืดตัวและจัดระเบียบเพิ่มเติมได้มากนัก จึงทำให้ค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุดมีค่าน้อยกว่า STD1 [8, 15-16] สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ ที่พบว่าวัสดุที่มีค่ามอดูลัสสูงจะเป็นชิ้นงานที่มีความแข็ง ซึ่งเกิด

จากการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลด้วยสายโซ่ซัลฟิดิก ที่มีขนาดสั้น [8, 17-19]

ในทำนองเดียวกัน เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลจากกราฟในรูปที่ 3 ถึง 5 ของยางสูตร NR1 และ NR2 แล้วทำการเปรียบเทียบกัน ทั้งในส่วน of ค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุด ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด และค่ามอดูลัส พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับการเปรียบเทียบกันของยางสูตร STD1 และ STD2 อันเนื่องมาจากพฤติกรรมของโครงสร้างการจัดเรียงโมเลกุลที่มีลักษณะเช่นเดียวกัน

แต่ทั้งนี้ทั้งนั้น เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบยาง NR1 และ NR2 กับยางสูตร STD1 และ STD2 พบว่าค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุด และค่ามอดูลัส ของยางสูตร NR1 และ NR2 จะมีค่าน้อยกว่ายางสูตร STD1 และ STD2 เล็กน้อย และมีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด มากกว่ายางสูตร STD1 และ STD2 เล็กน้อย นั้นเนื่องมาจากยางสูตร NR1 และ NR2 มีรูพรุนอยู่ในเนื้อเยื่อเล็กน้อย (มีร้อยละพื้นที่ของรูพรุนเท่ากับ 7.04 และ 10.66) ทำให้มีสัดส่วนของเนื้อเยื่อลดลง ค่าสมบัติเชิงกลโดยรวมข้างต้นจึงมีค่าลดลง

ยางสูตร NR3 และ NR4 เป็นสูตรยางที่มีการเติมสารทำให้เกิดฟองปริมาณ 8 phr และมีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลในปริมาณเท่ากับ 0.5 และ 1.5 phr ตามลำดับ โดยทั้งสองสูตรมีร้อยละการเกิดฟองอากาศภายในเนื้อเยื่อใกล้เคียงกัน จากกราฟในรูปที่ 3 ถึง 5 พบว่ายางทั้งสองสูตรมีสมบัติเชิงกลโดยรวมใกล้เคียงกัน เนื่องจากมีปริมาณฟองอากาศในเนื้อเยื่อที่ใกล้เคียงกัน นั้นหมายความว่าปริมาณสารเชื่อมโยงโมเลกุลที่แตกต่างกันไม่ส่งผลต่อค่าสมบัติเชิงกล



อย่างมีนัยสำคัญ หากมีการเติมสารทำให้เกิดฟองที่ปริมาณ 8 phr ที่เป็นเช่นนี้เพราะขณะทำการดึงชิ้นงาน สายโซโม่เลกุลของยางสูตร NR3 จะมีการจัดเรียงตัวได้ดีขึ้น ทำให้มีความแข็งแรงมากขึ้น จนใกล้เคียงกับยางสูตร NR4 ที่มีปริมาณการเชื่อมโยงโมเลกุลมากกว่า จึงทำให้มีสมบัติเชิงกลโดยรวมใกล้เคียงกัน [8, 14]

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบยางสูตร NR5 และ NR6 พบว่ายางสูตร NR5 มีค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุด และค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด น้อยกว่ายางสูตร NR6 โดยปัจจัยหลักที่ทำให้เป็นเช่นนี้ เนื่องจากยางสูตร NR5 มีปริมาณฟองอากาศมากกว่ายางสูตร NR6 อย่างมีนัยสำคัญ จึงทำให้ยาง NR5 มีปริมาณเนื้อยางต่อพื้นที่หน้าตัดน้อยกว่า นอกจากนี้ยาง NR5 ยังมีการเชื่อมโยงโมเลกุลน้อยกว่ายางสูตร NR6 ด้วย จึงส่งผลให้มีค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุด และค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด น้อยกว่ายางสูตร NR6

แต่เมื่อพิจารณาในส่วนของค่ามอดูลัส จะเห็นได้ว่ายางสูตร NR6 มีค่าความแข็งแรงมากกว่ายางสูตร NR5 ทั้งนี้ เนื่องจากสายโซโม่เลกุลของยางสูตร NR6 ถูกคงรูปด้วยสารเชื่อมโยงโมเลกุลในปริมาณที่มากกว่า ทำให้มีความหนาแน่นของโครงข่ายสามมิติมากกว่ายางจึงเกิดการคงรูปมากกว่า ส่งผลให้สามารถทนแรงดึงในช่วงต้นได้ดีกว่า จึงมีค่ามอดูลัสสูงกว่า แต่เมื่อเพิ่มแรงที่ใช้ในการดึงมากขึ้น ยางสูตร NR6 จะยืดตัวได้น้อยกว่า NR5 ทำให้ค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุดน้อยกว่า NR5 [8, 15-19]

3.4 การศึกษาร้อยละการบวมตัว

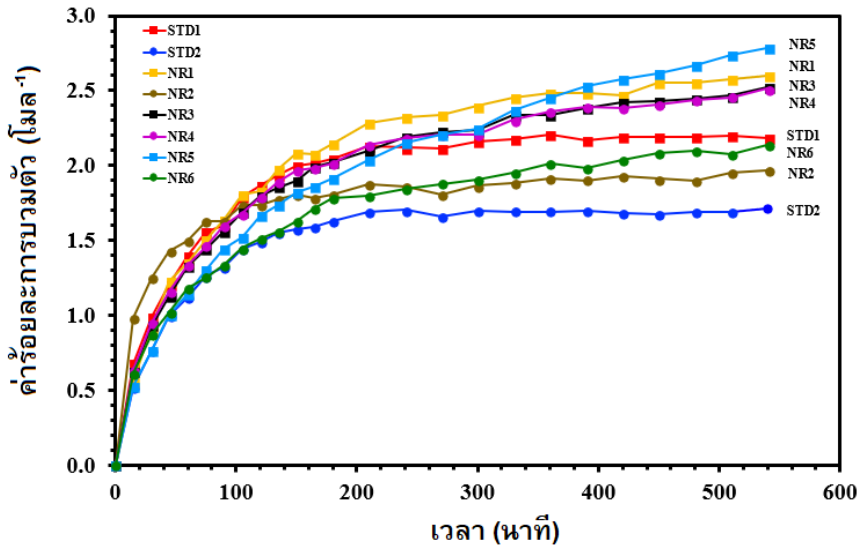
นำยางที่ผ่านกระบวนการทำให้ยางคงรูปมาทำการศึกษาร้อยละการบวมตัวเพื่อเปรียบเทียบ

การบวมตัวของยางแต่ละสูตรในน้ำมันเชื้อเพลิงที่เวลาต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยลักษณะชิ้นงานที่นำมาทำการทดลองนี้ ได้มาจากการกดตัดแม่พิมพ์กลมลงบนแผ่นยางที่ขึ้นรูปได้จากข้อ 2.4 ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ชิ้นงานที่เตรียมได้จึงมีผิวหน้าด้านบน-ล่าง ที่เรียบ ส่วนด้านข้างจะมีลักษณะเหมือนด้านในแผ่นยาง ซึ่งอาจมีความเรียบหรือมีรูพรุน ขึ้นกับสูตรของยางนั้น

จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการบวมตัวของยางในน้ำมัน พบว่าการดูดซับน้ำมันเข้าสู่ยางมี 2 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการดูดซับน้ำมันผ่านกลไกการเติมเต็มเข้าไปในรูพรุนของชิ้นงาน และอีกส่วนคือการดูดซับน้ำมันเข้าไปในเนื้อยางโดยตรง โดยดูดซับเข้าไปยังช่องว่างระหว่างสายโซโม่เลกุลของยาง [8, 20]

จากรูปที่ 6 เมื่อพิจารณาการบวมตัวในน้ำมันเชื้อเพลิงของยางสูตร STD1 และ STD2 ซึ่งเป็นยางที่ไม่มีการเติมสารทำให้เกิดฟองและมีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลที่ 0.5 และ 1.5 phr ตามลำดับ ซึ่งพบว่ายางสูตร STD1 และ STD2 มีค่าร้อยละการบวมตัวช่วง 15 นาทีแรก เท่ากับ 1.24 ± 0.60 และ 0.99 ± 0.49 โดยโมล ตามลำดับ จากนั้นเมื่อครบ 9 ชั่วโมง ยางสูตร STD1 และ STD2 มีค่าร้อยละการบวมตัวเท่ากับ 2.18 ± 0.08 และ 1.73 ± 0.05 โดยโมล ตามลำดับ

หมายความว่าปริมาณสารเชื่อมโยงโมเลกุลมีผลต่อการบวมตัวของยาง ทำให้ยางสูตร STD1 บวมตัวมากกว่า ยางสูตร STD2 เนื่องจากมีการเชื่อมโยงโมเลกุลน้อยกว่ายางสูตร STD2 จึงมีช่องว่างระหว่างสายโซโม่เลกุลที่มากกว่ายางสูตร STD2 [8, 20] ดังแสดงไว้ในรูปที่ 7 (ข-1)



รูปที่ 6 กราฟแสดงผลร้อยละการบวมตัวของยางสูตรต่าง ๆ ในน้ำมันแก๊สโซลีน

เมื่อพิจารณาการบวมตัวในน้ำมันเชื้อเพลิงของยางสูตร NR1 และ NR2 โดยทั้งสองสูตรมีการเติมสารทำให้เกิดฟองปริมาณ 4 phr เท่ากัน และมีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลในปริมาณ 0.5 และ 1.5 phr ตามลำดับ พบว่ายางสูตร NR2 จะมีค่าร้อยละการบวมตัวในช่วง 15 นาทีแรก มากกว่ายาง NR1 เนื่องจากยาง NR2 มีความเป็นรูพรุนมากกว่ายาง NR1 จึงทำให้มีพื้นที่ผิวบริเวณรอบชิ้นงานด้านข้างสัมผัสกับน้ำมันเชื้อเพลิงได้มากกว่า จึงเกิดการบวมตัวในช่วงแรกได้เร็วกว่ายาง NR1 [8, 20] แต่เมื่อเปรียบเทียบกับยาง NR2 กับยางสูตร NR3 NR4 NR5 และ NR6 พบว่า ถึงแม้ว่ายาง NR2 จะมีปริมาณรูพรุนน้อยกว่าสูตรดังกล่าว กลับพบว่ายาง NR2 มีอัตราเร็วในการบวมตัวในช่วง 15 นาทีแรกที่เร็วกว่าอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้ เนื่องจากยาง NR2 มีปริมาณเนื้อยางมากกว่า NR3 NR4 NR5 แต่ทั้งนี้ทั้งนั้น ก็ยังมีรูพรุนอยู่บ้าง จึงช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำมันเชื้อเพลิง

ได้ดีขึ้น ดังนั้น เมื่อสัมผัสกับน้ำมันเชื้อเพลิงจึงเกิดการบวมตัวในช่วงแรกได้เร็วกว่าชิ้นงานยางทั้งหมด ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6 และรูปที่ 7 (ข-2)

นั่นหมายความว่าปัจจัยของการบวมตัวในช่วง 15 นาทีแรกของยาง NR2 คือ ปริมาณเนื้อยางต่อพื้นที่ และปริมาณพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำมันเชื้อเพลิง (ปริมาณรูพรุน) ต้องมีอย่างเหมาะสม กล่าวคือ ปริมาณรูพรุนจะต้องไม่มากเกินไป ทั้งนี้ จะเห็นว่าปริมาณสารเชื่อมโยงโมเลกุลที่มากขึ้นในยาง NR2 จะไม่ส่งผลต่อการบวมตัวในช่วงแรก อันเนื่องมาจากปัจจัยสนับสนุนทั้งสองที่ได้กล่าวมา

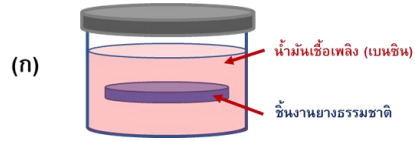
แต่เมื่อพิจารณาการบวมตัวในน้ำมันเชื้อเพลิงในช่วงหลังที่ครบ 9 ชั่วโมง พบว่ายางสูตร NR1 และ NR2 มีค่าร้อยละการบวมตัวเท่ากับ 2.60 ± 0.2 และ 1.97 ± 0.06 โดยโมล ตามลำดับ ซึ่งยาง NR1 จะมีการบวมตัวได้มากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ นั่นหมายความว่าปริมาณสารเชื่อมโยงโมเลกุลมีผลต่อ



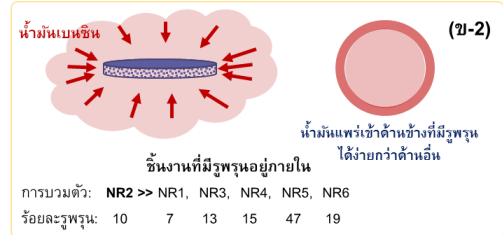
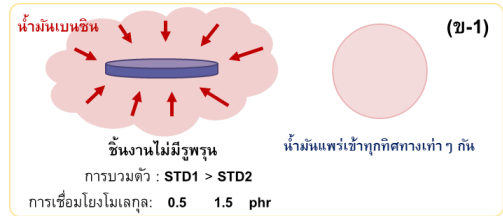
การบวมตัวของยางในช่วงทำย กล่าวคือหากมีปริมาณสารเชื่อมโยงโมเลกุลที่น้อย ยางจะมีการบวมตัวอย่างต่อเนื่องได้นานกว่าและอิมตัวช้ากว่า [8, 20-21] ดังแสดงไว้ในรูปที่ 7 (ค-1) รูปบน

เมื่อพิจารณาการบวมตัวในน้ำมันเชื้อเพลิงในส่วนของยางสูตร NR3 และ NR4 พบว่ายางทั้งสองสูตรมีการเติมสารทำให้เกิดฟองในปริมาณ 8 phr เท่ากัน และมีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลในปริมาณ 0.5 phr และ 1.5 phr ตามลำดับ (โดยยาง NR3 และ NR4 มีร้อยละพื้นที่ของรูพรุนใกล้เคียงกันคือ 13.05 และ 15.20 ตามลำดับ) พบว่ายางจะมีการบวมตัวเท่าๆ กัน ทั้งช่วงต้นและช่วงทำย กล่าวคือ เมื่อยางผ่านการแช่ในน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ยางสูตร NR3 และ NR4 มีค่าร้อยละการบวมตัวเท่ากับ 1.17 ± 0.57 และ 1.18 ± 0.57 โดยโมล ตามลำดับ จากนั้นเมื่อครบ 9 ชั่วโมง ยางสูตร NR3 และ NR4 มีค่าร้อยละการบวมตัวเท่ากับ 2.52 ± 0.21 และ 2.51 ± 0.2 โดยโมล ตามลำดับ

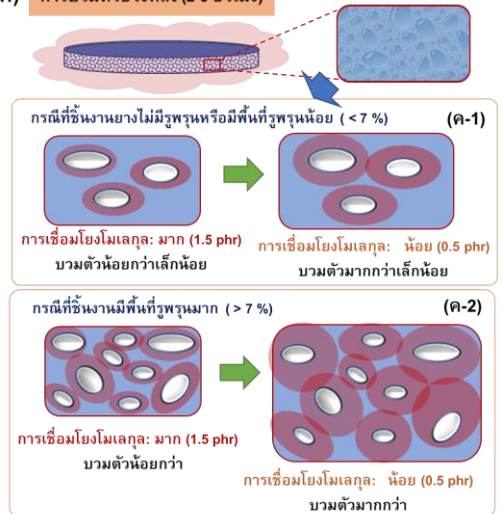
จะเห็นได้ว่ายางสูตร NR3 และ NR4 มีค่าร้อยละการบวมตัวช่วงต้นที่ค่อนข้างสูงและบวมตัวใกล้เคียงกันในช่วงทำย เพราะมีปริมาณรูพรุนใกล้เคียงกัน (มากกว่าร้อยละ 7) จึงทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสและปริมาณรูพรุนที่ดูดซับน้ำมันเชื้อเพลิงได้ใกล้เคียงกัน ทำให้มีร้อยละการบวมตัวเท่ากัน แต่จุดที่น่าสนใจคือ ทั้งสองสูตรมีปริมาณสารเชื่อมโยงโมเลกุลต่างกัน แต่กลับไม่ส่งผลกระทบต่อร้อยละการบวมตัวและอัตราเร็วในการบวมตัวของยาง อาจเป็นเพราะปัจจัยโดยรวม (ที่เกิดจากปัจจัยช่วงต้นและช่วงทำยรวมกัน) มีค่าใกล้เคียงกัน พฤติกรรมการบวมตัวของยาง NR3 และ NR4 แสดงไว้ในรูปที่ 7 (ข-2)



(ข) การบวมตัวช่วงแรก (15 นาทีแรก)



(ค) การบวมตัวช่วงหลัง (2-9 ชั่วโมง)



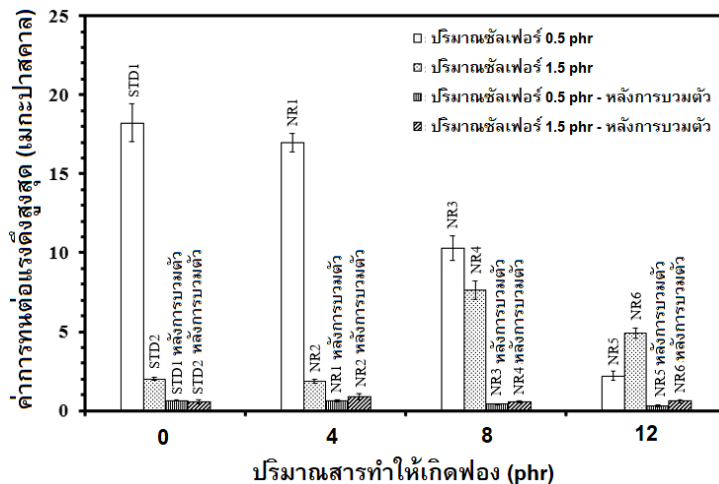
รูปที่ 7 ภาพประกอบการอธิบาย (ก) การแช่ชิ้นงานในน้ำมันเบนซิน (ข) พฤติกรรมการบวมตัวช่วงแรก และ (ค) พฤติกรรมการบวมตัวช่วงหลัง

ถัดมา เมื่อพิจารณาการบวมตัวในน้ำมันเชื้อเพลิงในส่วนของยางสูตร NR5 และ NR6 ซึ่งยางทั้งสองสูตรมีการเติมสารทำให้เกิดฟองปริมาณเท่ากันคือ 12 phr และมีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลในปริมาณ 0.5 และ 1.5 phr ตามลำดับ ในช่วงระยะเวลา 2 ชั่วโมงแรก ยางสูตร NR5 และ NR6 มีค่าเฉลี่ยร้อยละการบวมตัวเท่ากับ 1.04 ± 0.53 และ 1.03 ± 0.48 โดยโมล ตามลำดับ จากนั้นเมื่อครบ 9 ชั่วโมง มีค่าร้อยละการบวมตัวเท่ากับ 2.78 ± 0.35 และ 2.14 ± 0.17 โดยโมล ตามลำดับ นั่นคือยาง NR5 จะมีการบวมตัวช่วงท้ายๆ มากกว่ายาง NR6 โดยปัจจัยหลักที่ทำให้มีพฤติกรรมบวมตัวเช่นนี้เพราะว่าปริมาณการเชื่อมโยงโมเลกุลของยาง NR5 มีน้อยกว่า NR6 จึงทำให้ยาง NR5 มีช่องว่างระหว่างโมเลกุลมากกว่ายาง NR6 [8, 21] โดยพฤติกรรมบวมตัวของยาง NR5 และ NR6 ได้แสดงไว้ในรูปที่ 7 (ค-2)

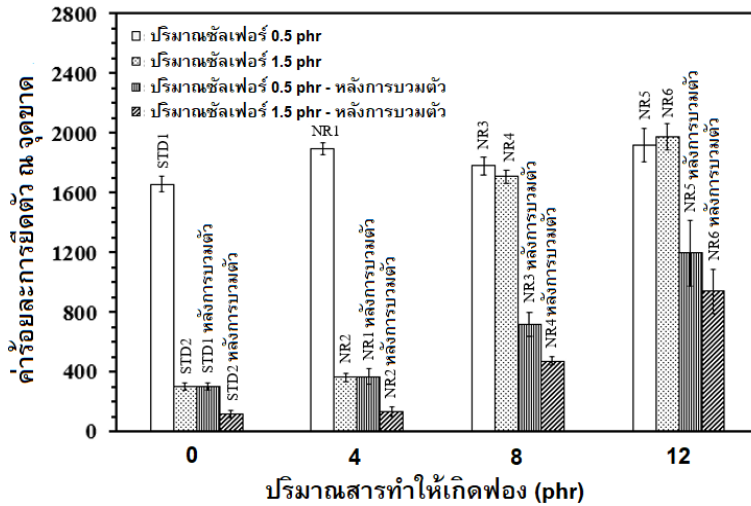
เมื่อพิจารณาจากยางสูตร NR4 เทียบกับ NR6 พบว่ายางสูตร NR6 มีค่าร้อยละการบวมตัวช่วงท้ายน้อยกว่ายางสูตร NR4 ทั้งที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงโมเลกุลปริมาณเท่ากัน (1.5 phr) ซึ่งเป็นผลมาจากยาง NR6 มีการเติมสารทำให้เกิดฟองที่มากกว่ายาง NR4 จึงทำให้ยาง NR6 มีปริมาณรูพรุนที่มากกว่าส่งผลให้มีเนื้อยางต่อหน่วยพื้นที่ในปริมาณที่น้อยกว่า [8, 21] ทำให้ยาง NR6 บวมตัวเร็วและเกิดสถานะการอิมัตว์ต่อพื้นที่เร็วกว่ายางสูตร NR4 (รูปที่ 7 (ค-2))

3.5 การทดสอบสมบัติเชิงกลของยางหลังการบวมตัวในน้ำมันแก๊สโซลีน

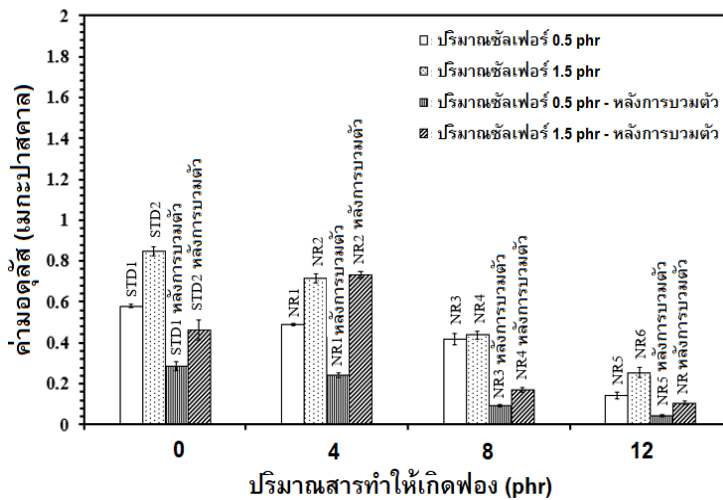
ค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุด ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด และค่ามอดูลัส ของยางสูตรต่างๆ ก่อนและหลังการบวมตัว ได้แสดงไว้ในรูปที่ 8 ถึง 10



รูปที่ 8 ค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุดของยางสูตรต่างๆ ทั้งก่อนและหลังยางบวมตัว



รูปที่ 9 ค่ายย่อยละการยึดตัว ณ จุดขาด ของยางสูตรต่างๆ ทั้งก่อนและหลังยางบวมตัว



รูปที่ 10 ค่ามอดูลัส ของยางสูตรต่างๆ ทั้งก่อนและหลังยางบวมตัว

จากรูปที่ 8 ถึง 10 พบว่าสมบัติเชิงกลหลังการบวมของยางสูตร STD1 STD2 NR1 NR2 NR3 NR4 NR5 และ NR6 ได้แก่ ค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุด ค่าร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาด และค่ามอดูลัส มีค่าต่ำกว่าก่อนการบวมตัว โดยสาเหตุที่ทำให้มีสมบัติเชิงกลดังกล่าวลดลงนั้น เกิดจากเมื่อยางสัมผัสกับ

น้ำมันเชื้อเพลิง โครงสร้างโมเลกุลของยางจะเกิดการดูดซับน้ำมันและเกิดการบวมตัว จึงทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางที่มีการเกี่ยวพันกันเกิดการคลายตัวออก จึงทำให้ยางหลังการบวมตัวมีค่าสมบัติเชิงกลน้อยกว่าก่อนการบวมตัว



ยางสูตร NR2 เป็นยางที่มีความน่าสนใจ เพราะมีอัตราการบวมตัวเร็วสุด (พิจารณาได้จากความชันของกราฟในรูปที่ 6) เมื่อเทียบกับยางสูตรอื่น และมีค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุดและค่ามอดูลัสสูงที่สุด โดยปัจจัยที่ทำให้ยาง NR2 บวมตัวได้เร็วสุด เพราะยางสูตรนี้มีปริมาณเนื้อยางค่อนข้างมากแต่ก็มีปริมาณรูพรุนในเนื้อยางน้อย (มากกว่า NR1) ดังนั้นเมื่อยางสัมผัสกับน้ำมัน จะขยายตัวได้ง่ายและอิสระกว่ายาง NR1 ในขณะที่สูตรอื่นๆ ที่มีปริมาณรูพรุนมากกว่าจะมีการบวมตัวน้อยกว่า เพราะมีสัดส่วนของเนื้อยางน้อยกว่า

ในส่วนของค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุด และค่ามอดูลัส หลังการบวมตัวของยางสูตร NR2 พบว่ามีค่าสูงสุด นั้นเป็นเพราะว่ายางสูตร NR2 มีสัดส่วนของเนื้อยางมากกว่า และมีรูพรุนน้อยกว่ายางสูตรอื่น

4. บทสรุป

จากการทดลองพบว่าสารเชื่อมโยงโมเลกุลและสารทำให้เกิดฟองมีผลกระทบต่อสัญญาณวิทยาลักษณะการบวมตัว และสมบัติเชิงกลทั้งก่อนและหลังการบวมตัว

เมื่อพิจารณายางที่มีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลในปริมาณน้อย พบว่าสารทำให้เกิดฟองที่เติมลงในยางจะไม่ส่งผลกระทบต่อระยะเวลาที่ยางใช้ในการคงรูป แต่จะส่งผลต่อค่าผลต่างแรงบิดที่เกิดขึ้นขณะทดสอบ แต่หากมีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลในปริมาณมากขึ้น พบว่าสารทำให้เกิดฟองจะส่งผลต่อระยะเวลาที่ยางใช้ในการคงรูปและค่าผลต่างแรงบิด

เมื่อพิจารณาในส่วนของรูพรุนของชิ้นงานยางที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงโมเลกุลในสัดส่วนที่น้อย และมีการเติมสารทำให้เกิดฟองในปริมาณไม่มาก พบว่า

ฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะมีผลต่อความแข็งแรงของเนื้อยาง สอดคล้องกับค่าผลต่างแรงบิดของยางที่มีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีปริมาณสารทำให้เกิดฟองมากขึ้น แต่เมื่อพิจารณาในมุมมองของยางที่มีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลในสัดส่วนที่มาก และมีการเติมสารทำให้เกิดฟองในปริมาณต่าง ๆ พบว่าสารเชื่อมโยงโมเลกุลเป็นปัจจัยหลักที่ควบคุมให้ยางมีรูพรุนขนาดเล็ก

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของยางทุกสูตร (ก่อนบวมตัว) พบว่าค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุดและค่ามอดูลัสมีแนวโน้มลดลง และค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของสารทำให้เกิดฟอง เพราะยางจะมีปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้น ทำให้ยางมีปริมาณเนื้อยางต่อพื้นที่หน้าตัดลดลง ส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมมีค่าลดลง

การบวมตัวของยางในน้ำมัน เกิดจากการดูดซับน้ำมันเข้าสู่ยาง 2 ส่วนหลัก ส่วนแรกเป็นการดูดซับน้ำมันผ่านกลไกการเติมเต็มไปในรูพรุนของชิ้นงาน อีกส่วนคือการดูดซับน้ำมันเข้าไปในเนื้อยางโดยตรง โดยดูดซับเข้าไปยังช่องว่างระหว่างสายโซ่โมเลกุล

ปัจจัยหลักที่ควบคุมการบวมตัวของชิ้นงานยางที่ไม่มีรูพรุนคือสารเชื่อมโยงโมเลกุล แต่หากเป็นชิ้นงานยางที่มีรูพรุน พบว่าปัจจัยหลักที่ควบคุมการบวมตัวช่วง 15 นาทีแรก คือปริมาณรูพรุน ส่วนการบวมตัวในช่วงท้าย พบว่าทั้งปริมาณการเชื่อมโยงโมเลกุลและปริมาณรูพรุนมีผลต่อการบวมตัวของยางทั้งสิ้น โดยยางที่มีการบวมตัวได้ดีที่สุด จะมีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลและสารทำให้เกิดฟองในปริมาณที่เหมาะสม นอกจากนี้ ความแข็งแรงก่อนและหลังการบวมตัวยังขึ้นอยู่กับปัจจัยของสารทั้งสองด้วยเช่นกัน



งานวิจัยนี้พบว่ายางสูตร NR2 เป็นยางที่มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการทำถังน้ำมันเชื้อเพลิงกันรั่วได้ด้วยตัวเอง เพราะมีอัตราการบวมตัวเร็วสุดเมื่อเทียบกับสูตรอื่น อีกทั้งยังมีค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุดและค่ามอดุลัสมากที่สุดเมื่อเทียบกับยางสูตรอื่น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ตามหนังสือสัญญาเลขที่ Res-CIT603/2021

ที่มงานวิจัยขอขอบคุณ บริษัท เคมี อินโนเวชั่น จำกัด ที่อนุเคราะห์วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย และกลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (Polymer Processing and Flow Research Group) มจร. ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือในงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] T.A. Underwood, W.S. Wickersham Jr. and R.W. Sutton, Self-sealing fuel cell wall, United State Patent, US3509016DA.
- [2] P.J. Dasher, Self-sealing fuel tank, United State Patent, US41778741A.
- [3] T.S. Ohnstad, R.A. Monk, Sealing-reaction, layer-effective, stealth liner for synthetic fuel container, United States Patent Application, US2009/0050629 A1.
- [4] L. Spenadel, Synthetic rubber for self-sealing fuel tanks, Applied Science Research Laboratory, 1959, 51(8), 935-936.
- [5] www.atltd.com/industries/defence-security/self-sealing-tanks. (Accessed on 14 February 2020)
- [6] R.A.Crawford, Self-sealing fuel tank construction, United State Patent, US47784843A.
- [7] www.hutchinsoninc.com/protected-fuel-tank/. (Accessed on 11 January 2020)
- [8] C.C. Chin, N.D.L. Musbah, I. Abdullah and A.M. Lazim, Characterization and evaluation of prudent liquid natural rubber-based foam for oil spill control application, Arabian Journal for Science and Engineering, 2018, 43, 6097–6108.
- [9] www.dsiac.org/articles/advances-in-self-sealing-fuel-tank-technology/. (Accessed on 25 January 2020)
- [10] M. Barkani and C. Hepburn, Determination of crosslink density by swelling in the castable polyurethane elastomer based on 1/4-cyclohexane diisocyanate and para-phenylene diisocyanate. Iranian Journal of Polymer Science and Technology, 1992, 1(1), 1–5.
- [11] A. Khalaf, A. Yehia, M. Ismail and H. El-Sabbagh, High performance oil resistant rubber, Open Journal of Organic Polymer Materials, 2012, 2(04), 88-93.



- [12] R. Maharsia, N. Gupta and H.D. Jerro, Investigation of flexural strength properties of rubber and nanoclay reinforced hybrid syntactic foams, *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 417(1), 249-258.
- [13] O. Okay, S. Durmaz and B. Erman, Solution cross-linked poly (isobutylene) gels: synthesis and swelling behavior, *Macromolecules*, 2000, 33(13), 4822-4827.
- [14] L.J. Gibson, Biomechanics of cellular solids, *Journal of Biomechanics*, 2005, 38(3), 377-399.
- [15] M. Krumova, D. Lopez, R. Benavente, C. Mijangos and J. Perena, Effect of crosslinking on the mechanical and thermal properties of poly (vinyl alcohol). *Polymer*, 2000, 41(26), 9265-9272.
- [16] J. He, Z. Zhang, H. Kristiansen, K. Redford, G. Fonnum and G. Modahl, Crosslinking effect on the deformation and fracture of monodisperse polystyrene-co-divinylbenzene particles. *Express Polymer Letters*, 2013, 7(4), 365-374.
- [17] G.R. Hamed, *Materials and compounds*. In: *Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components*, 3rd Ed., Hanser Books, OH, USA, 1992.
- [18] J. Bras, M.L. Hassan, C. Bruzesse, E.A. Hassan, N.A. El-Wakil and A. Dufresne, Mechanical, barrier, and biodegradability properties of bagasse cellulose whiskers reinforced natural rubber nanocomposites, *Industrial Crops and Products*, 2010, 32(3), 627-633.
- [19] H. Ismail, H.D. Rozman, R.M. Jaffri and Z.A.M. Ishak, Oil palm wood flour reinforced epoxidized natural rubber composites: the effect of filler content and size. *European Polymer Journal*, 1997, 33(10), 1627-1632.
- [20] D. Ceylan, S. Dogu, B. Karacik, S. D. Yakan, O. S. Okay and O. Okay, Evaluation of butyl rubber as sorbent material for the removal of oil and polycyclic aromatic hydrocarbons from seawater, *Environmental Science and Technology*, 2009, 43(10), 3846-3852.
- [21] H. Li, L. Liu, F. Yang, Hydrophobic modification of polyurethane foam for oil spill cleanup. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64(8), 1648-1653.