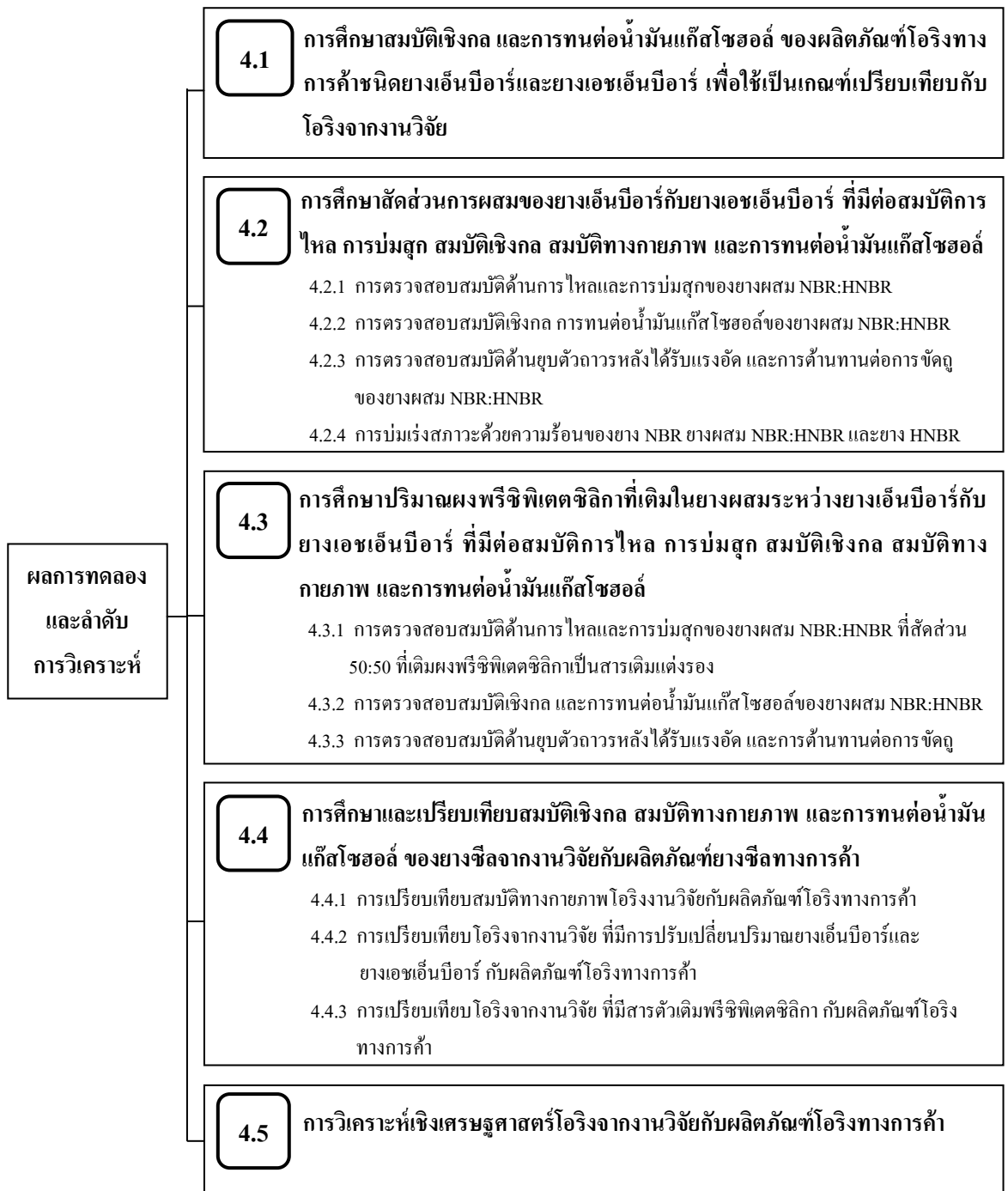


บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ผลการทดลองทั้งหมด และลำดับในการวิเคราะห์ผลการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลำดับผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 การศึกษาสมบัติเชิงกล และการทนต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์ ของผลิตภัณฑ์โอรังทางการค้าชนิดยางเอ็นปีอาร์และยางเอชเอ็นปีอาร์ เพื่อใช้เป็นเกณฑ์เปรียบเทียบกับโอรังจากงานวิจัย

งานวิจัยในส่วนนี้ เป็นการทดสอบสมบัติเชิงกล และการทนต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์ทางการค้าของผลิตภัณฑ์โอรังทางการค้าชนิดยางเอ็นปีอาร์และยางเอชเอ็นปีอาร์ ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สมบัติเชิงกล และการทนต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์ของผลิตภัณฑ์โอรังทางการค้า

สมบัติ	ชนิดผลิตภัณฑ์โอรังทางการค้า	
	ชนิดยางเอ็นปีอาร์	ชนิดยางเอชเอ็นปีอาร์
สมบัติก่อนการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ทางการค้า		
Modulus at 50% elongation (MPa)	4.6 ± 0	1.8 ± 0.1
Tensile strength (MPa)	14.4 ± 1.1	23.2 ± 0.6
Elongation at break (%)	167 ± 6	328 ± 2
Hardness (Shore A)	87 ± 1	81 ± 1
Compression set (%)	15	17
เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติภายหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ทางการค้าชนิด E10 ที่อุณหภูมิห้อง		
Change in Modulus at 50% elongation (%)	-35.3	-30.3
Change in Tensile strength (%)	-40.9	-73.4
Change in Elongation at break (%)	-29.9	-55.5
Change in Hardness (Shore A)	-7.0	-2.0
Swelling in Gasohol E10 (%)	+21.8	+28.1
เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติภายหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ทางการค้า ชนิด E20 ที่อุณหภูมิห้อง		
Change in Modulus at 50% elongation (%)	-33.4	-28.7
Change in Tensile strength (%)	-40.2	-73.2
Change in Elongation at break (%)	-31.7	-55.8
Change in Hardness (Shore A)	-5.0	-3.0
Swelling in Gasohol E20 (%)	+22.0	+28.0
เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติภายหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ทางการค้า ชนิด E85 ที่อุณหภูมิห้อง		
Change in Modulus at 50% elongation (%)	-11.2	-15.7
Change in Tensile strength (%)	-22.9	-52.7
Change in Elongation at break (%)	-25.1	-40.2
Change in Hardness (Shore A)	-5.0	-1.0
Swelling in Gasohol E85 (%)	+9.0	+8.9

จากตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงกลด้านความต้านแรงดึง ความแข็ง และการทนต่อน้ำมันแก๊สโซฮอลล์ทางการค้าชนิด E10, E20 และ E85 ของผลิตภัณฑ์โอรังทางการค้าชนิดยางเอ็นบีอาร์ จากบริษัท เพาเวอร์ ซิด จำกัด และยางเอชเอ็นบีอาร์ จากบริษัท ท็อปพาร์ท เทคดิงส์ (ไทยแลนด์) จำกัด ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก เท่ากับ 101.2 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 95 มิลลิเมตร และความหนา 3.1 มิลลิเมตร สภาวะการทดสอบที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 70 ชั่วโมง เพื่อนำผลการทดลองที่ได้เป็นเกณฑ์สำหรับเปรียบเทียบกับโอรังจากงานวิจัย โดยเฉพาะสมบัติสำคัญสำหรับผลิตภัณฑ์โอรังที่ใช้ในงานที่ต้องสัมผัสกับน้ำมันแก๊สโซฮอลล์ ดังนี้ สมบัติทางด้านการยุบตัวถาวรหลังได้รับแรงอัด ความต้านทานแรงดึงสูงสุด และการทนทานต่อการบวมตัวในน้ำมันแก๊สโซฮอลล์ E85 ที่มีปริมาณเอทานอลสูงๆ

4.2 การศึกษาสัดส่วนการผสมของยางเอ็นบีอาร์กับยางเอชเอ็นบีอาร์ ที่มีต่อสมบัติการไหล สมบัติการบ่มสุก สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และการทนต่อน้ำมันแก๊สโซฮอลล์

งานวิจัยในส่วนนี้ ศึกษาสมบัติการไหล สมบัติการบ่มสุก สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และการทนต่อน้ำมันแก๊สโซฮอลล์ทางการค้า ของยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์กับยางเอชเอ็นบีอาร์ ที่สัดส่วนต่างๆ ดังนี้ 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 ที่มีผงเขม่าดำเกรด N660 เป็นสารเติมแต่งหลักปริมาณคงที่ 60 ส่วนในร้อยส่วนของยาง ซึ่งให้ผลการตรวจสอบดังต่อไปนี้

4.2.1 การตรวจสอบสมบัติด้านการไหล และการบ่มสุกของยางผสม NBR:HNBR

ผลการทดลองในตารางที่ 4.2 แสดงสมบัติด้านการไหลตัว และการบ่มสุกของวัสดุผสมยางคอมปาวด์ระหว่างยางเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์ที่สัดส่วนต่างๆ พบว่า ปริมาณยางเอชเอ็นบีอาร์ไม่ส่งผลต่อระยะเวลาสกอร์ช (Scorch time; ts_1) ของยางผสม แต่ปริมาณยางเอชเอ็นบีอาร์ที่ผสมลงไปยางคอมปาวด์ ส่งผลต่อเวลาในการบ่มสุก (Cure time; tc_{90}) ของยางผสม เวลาในการบ่มสุกมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของยางเอชเอ็นบีอาร์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก ยางเอชเอ็นบีอาร์มีปริมาณพันธะคู่อยู่ในโครงสร้างโมเลกุลที่น้อยกว่ายางเอ็นบีอาร์ ทำให้ยางเอชเอ็นบีอาร์เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของพันธะข้ามได้ช้ากว่ายางเอ็นบีอาร์ [4] ส่วนสมบัติด้านความหนืดมูนิของยางคอมปาวด์ พบว่า ความหนืดของยางคอมปาวด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของยางเอชเอ็นบีอาร์ ทั้งนี้เนื่องจากวัตถุดิบยางเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์ที่ใช้ในงานวิจัยมีความหนืดเริ่มต้นที่แตกต่างกัน โดยยางเอชเอ็นบีอาร์มีค่าความหนืดมูนิเริ่มต้น 69.9 ML 1+4 สูงกว่ายางเอ็นบีอาร์ที่มีค่าความหนืดมูนิเริ่มต้น 55 ML 1+4

ตารางที่ 4.2 สมบัติด้านการไหลและการบ่มสุกของยางผสม NBR:HNBR

สัดส่วนยางผสม NBR:HNBR	Scorch time (ts_1) (min:sec)	Cure time (tc_{90}) (min:sec)	Mooney viscosity (ML 1+4) 100 °C
100:0	0:36	3:37	32.0
75:25	0:37	4:16	32.8
50:50	0:36	7:19	34.3
25:75	0:36	8:02	40.0
0:100	0:38	8:38	47.1

ตารางที่ 4.3 สมบัติด้านแรงบิด (Torque) ของยางผสม NBR:HNBR

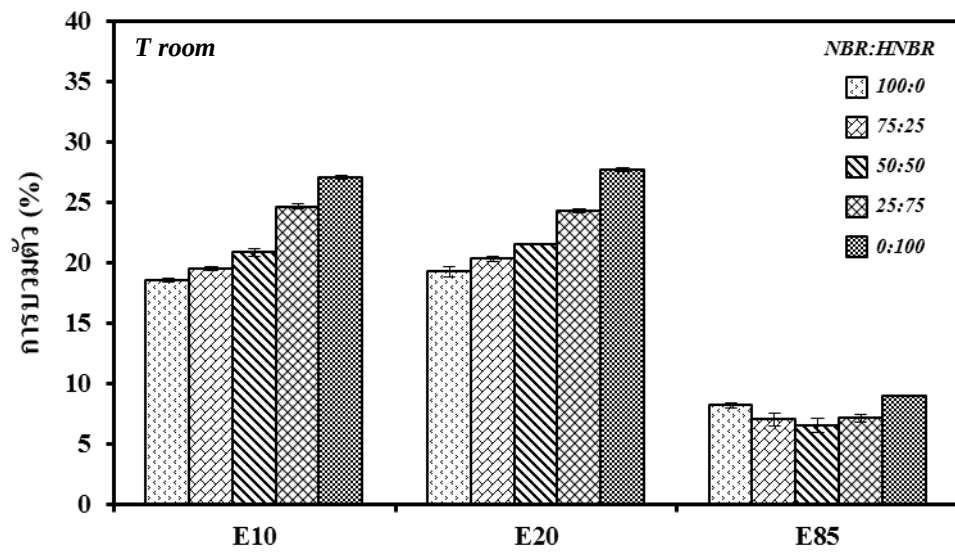
สัดส่วนยางผสม NBR:HNBR	Minimum torque; M_L (dN-m)	Maximum torque; M_H (dN-m)	Delta torque ($M_H - M_L$) (dN-m)
100:0	10.6	159.0	148.4
75:25	9.6	159.9	150.3
50:50	13.2	170.7	157.5
25:75	13.4	136.1	122.7
0:100	13.3	115.5	102.2

ในส่วน of สมบัติด้านแรงบิด (Torque) ที่ได้จากเครื่อง ODR ของยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์กับยางเอชเอ็นบีอาร์ แสดงดังในตารางที่ 4.3 เห็นได้ว่า ยางเอ็นบีอาร์บริสุทธิ์ (NBR 100%) มีค่าผลต่างแรงบิด (Delta torque) สูงกว่ายางเอชเอ็นบีอาร์บริสุทธิ์ (HNBR 100%) เนื่องจากค่าผลต่างแรงบิดบ่งบอกถึงระดับปริมาณความหนาแน่นของพันธะข้าม (Crosslink density) ในยาง [40] ดังนั้น จากการที่ยางเอ็นบีอาร์มีปริมาณพันธะอยู่ในโครงสร้างโมเลกุลที่สูงกว่ายางเอชเอ็นบีอาร์ ส่งผลทำให้ยางเอ็นบีอาร์สามารถเกิดปฏิกิริยาการเกิดพันธะข้ามได้มากกว่า ยางเอ็นบีอาร์จึงมีระดับความหนาแน่นของพันธะข้ามสูงกว่าของยางเอชเอ็นบีอาร์ โดยเมื่อพิจารณาระบบของยางผสม พบว่า เมื่อเติมยางเอชเอ็นบีอาร์ในเอ็นบีอาร์ที่ปริมาณ 25-50 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ค่าผลต่างแรงบิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่แสดงถึงระดับความหนาแน่นของพันธะข้ามในยางผสมที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจาก 1) การเติมยางเอชเอ็นบีอาร์ในยางเอ็นบีอาร์ที่ปริมาณ 25-50 เปอร์เซ็นต์ ไม่รบกวนการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของพันธะข้ามในยางเอ็นบีอาร์ แต่ช่วยเสริมทำให้ปริมาณพันธะข้ามของยางผสมในระบบเพิ่มขึ้น

2) การเติมยางเอชเอ็นบีอาร์ในยางเอ็นบีอาร์ที่ปริมาณ 25-50 เปอร์เซนต์ ส่งผลให้ยางคอมปาวด์อยู่ในรูปของระบบยางผสม ที่มีส่วนของยางเอ็นบีอาร์เป็นเฟสเมทริกซ์ (Matrix phase) และมีส่วนของยางเอชเอ็นบีอาร์เป็นเฟสกระจาย (Dispersed phase) ซึ่งจากเวลาในการบ่มสุกยางในตารางที่ 4.2 เห็นได้ว่ายางเอชเอ็นบีอาร์มีระยะเวลาในการบ่มสุกยางหรือปฏิกิริยาการเกิดพันธะข้ามที่ช้ากว่าในยางเอ็นบีอาร์ ดังนั้น ก่อนที่เฟสของยางเอชเอ็นบีอาร์จะเกิดการบ่มสุก สารเคมีในการบ่มสุกยางที่อยู่ในเฟสของยางเอชเอ็นบีอาร์ จึงสามารถเกิดการเคลื่อนที่ออกมายังเฟสของยางเอ็นบีอาร์ ซึ่งเป็นเฟสเมทริกซ์ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของพันธะข้ามได้เร็วกว่าในยางเอชเอ็นบีอาร์ ทำให้เฟสหลักของยางเอ็นบีอาร์มีสารเคมีในการบ่มสุกยางที่มากขึ้นกว่าปกติ ส่งผลทำให้เฟสของยางเอ็นบีอาร์มีปริมาณความหนาแน่นของพันธะข้ามที่เพิ่มสูงขึ้นด้วย จากนั้นเมื่อเติมยางเอชเอ็นบีอาร์ที่ปริมาณ 75 เปอร์เซนต์ พบว่า ผลต่างแรงบิดมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ที่บ่งบอกว่ายางผสมมีปริมาณความหนาแน่นของพันธะข้ามที่ลดลงด้วย ทั้งนี้เนื่องจาก 1) เมื่อเติมยางเอชเอ็นบีอาร์ในปริมาณมากถึง 75 เปอร์เซนต์ ส่งผลให้ยางเอ็นบีอาร์ถูกรบกวนระบบการเชื่อมขวางสายโซ่โมเลกุลยาง ทำให้ปริมาณความหนาแน่นการเชื่อมขวางพันธะข้ามของยางผสมโดยรวมลดลง 2) การเติมยางเอชเอ็นบีอาร์ในยางเอ็นบีอาร์ที่ปริมาณ 75 เปอร์เซนต์ ซึ่งเป็นปริมาณที่มาก ส่งผลให้เกิดการกลับเฟสกันของระบบยางผสม โดยส่วนของยางเอชเอ็นบีอาร์เป็นเฟสเมทริกซ์ และส่วนของยางเอ็นบีอาร์กลายมาเป็นเฟสกระจาย ทำให้เฟสเมทริกซ์ของยางเอชเอ็นบีอาร์มีปริมาณสารเคมีในการคงรูปยางที่ลดลง จากการที่สารเคมีเกิดการเคลื่อนที่ไปยังเฟสกระจายของยางเอ็นบีอาร์ ดังนั้น ระบบยางผสมโดยรวมจึงมีปริมาณความหนาแน่นของพันธะข้ามที่ลดลงด้วย

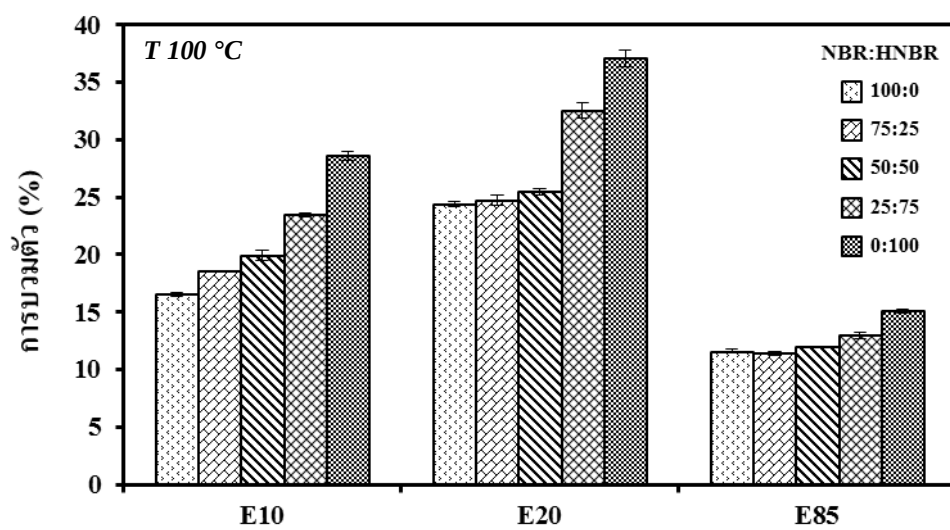
4.2.2 การตรวจสอบสมบัติเชิงกล และการทนต่อน้ำมันแก๊สโซฮอลล์ของยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์กับยางเอชเอ็นบีอาร์

การตรวจสอบสมบัติเชิงกลของยางผสม ดังนี้ การขูดตัวถาวรหลังได้รับแรงอัด การต้านทานต่อการขาด การต้านแรงดึง การต้านแรงฉีกขาด และความแข็ง ของยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์ ก่อนและหลังการแช่ในน้ำมันแก๊สโซฮอลล์ทางการค้าชนิด E10, E20 และ E85 ของบริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) โดยมีสภาวะการทดสอบ ดังนี้ 1) แซ่ขึ้นงานยางที่อุณหภูมิห้อง และ 2) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยทั้งสองสภาวะทดสอบเป็นเวลา 70 ชั่วโมง พร้อมกับทำการทดสอบการบวมตัว (Swelling) ในน้ำมันแก๊สโซฮอลล์ของยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์ที่สัดส่วนต่างๆ



ชนิดของน้ำมันแก๊สโซฮอล์

(ก)



ชนิดของน้ำมันแก๊สโซฮอล์

(ข)

รูปที่ 4.2 การบวมตัวของยางผสม NBR:HNBR ภายหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ ชนิด E10, E20 และ E85 (ก) ที่อุณหภูมิห้อง (ข) ที่อุณหภูมิ 100 °C

โดยรูปที่ 4.2 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์ที่ สัดส่วนต่างๆ ภายหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ ชนิด E10, E20 และ E85 ที่อุณหภูมิห้องและที่ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 70 ชั่วโมง ตามลำดับ การทดสอบที่อุณหภูมิห้อง แสดงในรูปที่

4.2 (ก) พบว่า ภายหลังการแช่ชิ้นงานยางในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E10 และ E20 เมื่อปริมาณยางเอชเอ็นบีอาร์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานยางมีการบวมตัวเพิ่มขึ้น เนื่องจาก การบวมตัวของยางในตัวทำละลายแปรผกผันกับระดับความหนาแน่นของพันธะข้าม (Crosslink density) ดังนั้น การที่ยางเอชเอ็นบีอาร์มีปริมาณพันธะอยู่ในโครงสร้างโมเลกุลที่ปริมาณค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับยางเอชเอ็นบีอาร์ ส่งผลให้ยางเอชเอ็นบีอาร์มีระดับความหนาแน่นของพันธะข้ามที่น้อยกว่า ยางเอชเอ็นบีอาร์ จึงมีการบวมตัวที่สูงกว่ายางเอชเอ็นบีอาร์ด้วย และนอกจากนี้ เป็นผลมาจากยางเอชเอ็นบีอาร์มีพารามิเตอร์การละลาย (Solubility parameter, δ) ที่บ่งชี้ความสามารถในการเข้ากันได้ของสารสองชนิด และการดูดซึมของเหลวแต่ละชนิดเข้าไปในยาง ที่ใกล้เคียงกับน้ำมันเบนซินหรือแก๊สโซฮอล์มากกว่ายางเอชเอ็นบีอาร์ ส่งผลให้ยางเอชเอ็นบีอาร์สามารถดูดซึมน้ำมันเบนซินได้ดีกว่ายางเอชเอ็นบีอาร์ ดังนั้น ยางเอชเอ็นบีอาร์จึงมีการบวมตัวในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ที่มีปริมาณน้ำมันเบนซินสูงๆ (E10 และ E20) ได้มากกว่ายางเอชเอ็นบีอาร์ด้วย ส่วนการแช่ในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E85 พบว่า ชิ้นงานยางมีเปอร์เซ็นต์การบวมตัวที่น้อยมากเมื่อเทียบกับการแช่ใน E10 และ E20 โดยเฉพาะยางผสมที่สัดส่วน 50:50 ที่มีการบวมตัวน้อยสุด เนื่องจากยางที่ใช้ในงานวิจัยกับตัวทำละลายเอทานอลมีค่าพารามิเตอร์การละลายที่แตกต่างกันมาก จึงทำให้ชิ้นงานยางมีความต้านทานต่อการบวมตัวในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E85 ที่มีปริมาณเอทานอลสูงๆ ได้เป็นอย่างดี [41] โดยค่าพารามิเตอร์การละลายของยางเอชเอ็นบีอาร์ ยางเอชเอ็นบีอาร์ น้ำมันเบนซิน เอทานอล และน้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E10, E20 และ E85 แสดงดังตารางที่ 4.4 ซึ่งพารามิเตอร์การละลายเป็นปัจจัยสำคัญที่บ่งบอกถึงการทนทานต่อการบวมตัวในตัวทำละลายของวัสดุ โดยถ้าผลต่างพารามิเตอร์การละลายของตัวทำละลายกับวัสดุยาง $((\delta_{\text{solvent}} - \delta_{\text{rubber}})^{1/2})$ มีค่ามาก แสดงว่า ยางสามารถทนทานต่อการบวมตัวในตัวทำละลายได้มากขึ้นด้วย [20] ซึ่งผลต่างพารามิเตอร์การละลายของยางและตัวทำละลายในงานวิจัย แสดงในตารางที่ 4.5 พบว่า ยางเอชเอ็นบีอาร์กับน้ำมันเบนซินและเอทานอล มีค่าผลต่างพารามิเตอร์การละลาย เท่ากับ 2.0 และ 2.4 ตามลำดับ ส่วนยางเอชเอ็นบีอาร์กับน้ำมันเบนซินและเอทานอล มีค่าผลต่างพารามิเตอร์การละลาย เท่ากับ 1.5 และ 2.7 ตามลำดับ เพราะฉะนั้น เห็นได้ว่าทั้งยางเอชเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์ มีค่าผลต่างพารามิเตอร์การละลายที่แตกต่างกับตัวทำละลายเอทานอลมากกว่าน้ำมันเบนซิน ส่งผลทำให้ยางมีความสามารถในการทนทานต่อการบวมตัวในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ E85 ที่มีปริมาณเอทานอลสูงๆ ได้ดีกว่าในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ E10 และ E20 ที่มีปริมาณน้ำมันเบนซินในปริมาณมาก โดยยางผสมระหว่างยางเอชเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์ที่สัดส่วนต่างๆ มีค่าการบวมตัวในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ E10 และ E20 อยู่ในช่วงระหว่าง 18-28 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าการบวมตัวใน E85 ไม่เกิน 9 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการทดสอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แสดงในรูปที่ 4.2 (ข) พบว่า ชิ้นงานยางมีค่าเปอร์เซ็นต์การบวมตัวที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก ที่อุณหภูมิสูงขึ้นสายโซ่โมเลกุลของยางสามารถเคลื่อนไหวได้ง่าย ทำให้ปริมาตรช่องว่าง (Free volume) ในยางเพิ่มขึ้น โดยที่โมเลกุลของน้ำมันสามารถแทรกตัวเข้าไปใน

เฟสยางได้ง่าย และในขณะเดียวกัน อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเป็นตัวเร่งให้โมเลกุลของน้ำมันแก๊สโซฮอล์มีพลังงานในการเคลื่อนที่แพร่เข้าไปในชิ้นงานยางได้มากยิ่งขึ้น ส่งผลให้ยางมีการบวมตัวเพิ่มขึ้นด้วย [42]

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์การละลายของยางและตัวทำละลายในงานวิจัย [41, 43, 44]

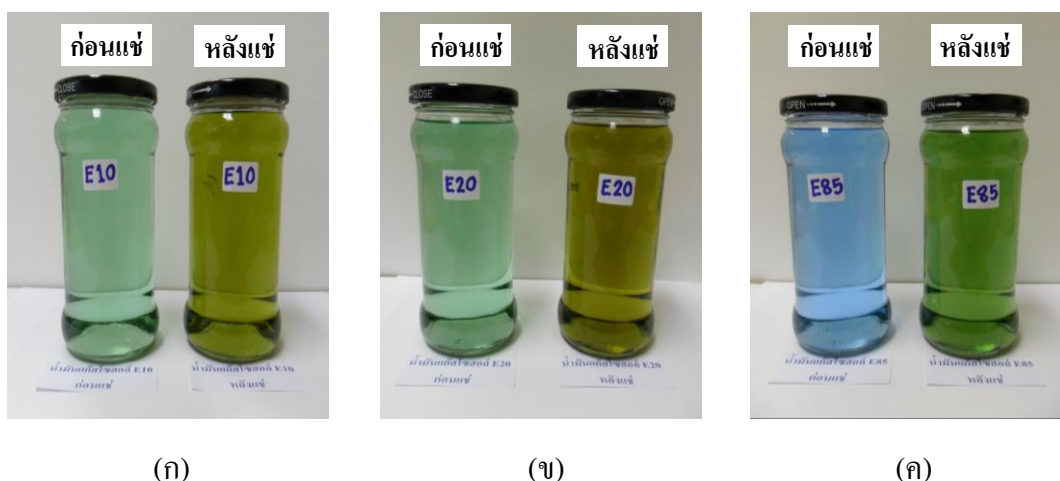
ชนิดของสาร	พารามิเตอร์การละลาย; δ (MPa ^{1/2})
ยางเอ็นปีอาร์ (NBR 40% ACN)	20.3
ยางเอชเอ็นปีอาร์ (HNBR 40% ACN)	18.8
น้ำมันเบนซิน	16.4
น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E10	17.4
น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E20	18.4
น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E85	24.7
เอทานอล	26.2

ตารางที่ 4.5 ผลต่างพารามิเตอร์การละลายของยางและตัวทำละลายในงานวิจัย

คู่ของยางและตัวทำละลาย	$(\delta_{\text{solvent}} - \delta_{\text{rubber}})^{1/2}$
ยางเอ็นปีอาร์ - น้ำมันเบนซิน	2.0
ยางเอชเอ็นปีอาร์ - น้ำมันเบนซิน	1.5
ยางเอ็นปีอาร์ - น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E10	1.7
ยางเอชเอ็นปีอาร์ - น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E10	1.2
ยางเอ็นปีอาร์ - น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E20	1.4
ยางเอชเอ็นปีอาร์ - น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E20	0.6
ยางเอ็นปีอาร์ - น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E85	2.1
ยางเอชเอ็นปีอาร์ - น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E85	2.4
ยางเอ็นปีอาร์ - เอทานอล	2.4
ยางเอชเอ็นปีอาร์ - เอทานอล	2.7

และจากการสังเกตลักษณะสีของน้ำมันแก๊สโซฮอล์ทั้งชนิด E10, E20 และ E85 ก่อนแช่และภายหลังการแช่ชิ้นงานยาง พบว่า น้ำมันแก๊สโซฮอล์ทั้งสามชนิดภายหลังการแช่มีสีที่เปลี่ยนไปจากเดิม ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ก-ค) ซึ่งอาจเกิดจากน้ำมันแก๊สโซฮอล์สามารถละลายกลุ่มสารเคมีหรือสารตัว

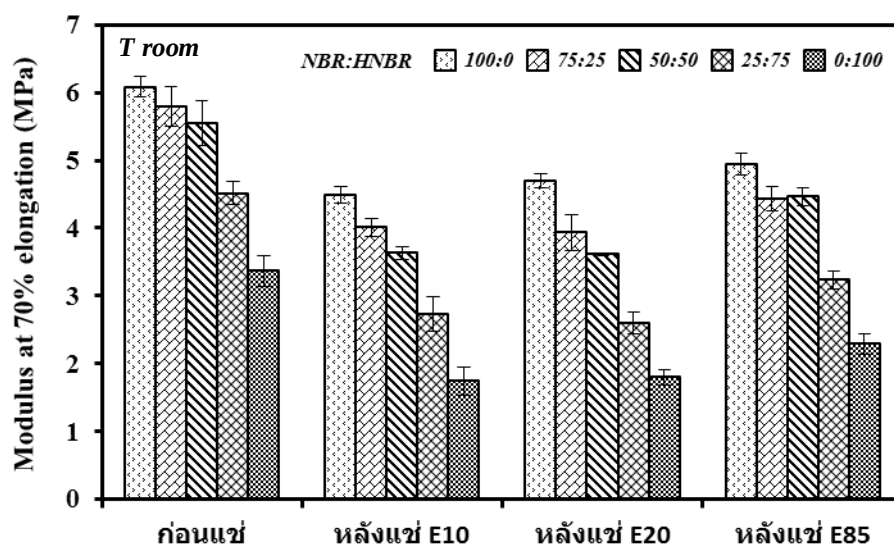
เดิมในยางออกมาจากชิ้นงานยางในระหว่างการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารเสริมสภาพพลาสติก (Plasticizer) ที่สามารถหลุดออกมาจากชิ้นงานยางได้ง่ายภายหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ [41] ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้สารเสริมสภาพพลาสติกชนิดไดออกทิลฟทาเลต หรือ DOP



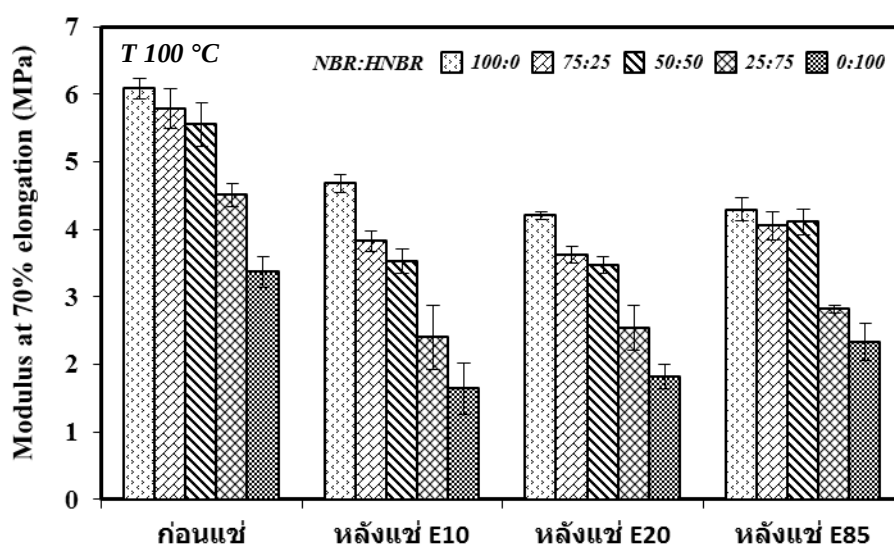
รูปที่ 4.3 ลักษณะสีของน้ำมันแก๊สโซฮอล์ก่อนแช่และภายหลังการแช่ชิ้นงานยางในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิดต่างๆ (ก) E10 (ข) E20 และ (ค) E85

สำหรับรูปที่ 4.4 แสดงมอดูลัสที่ระยะยืด 70 เปอร์เซ็นต์ ของยางผสมระหว่างยางเอ็นปีอาร์และยางเอชเอ็นปีอาร์ที่สัดส่วนต่างๆ ก่อนและหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ ชนิด E10, E20 และ E85 ที่สถานะอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 70 ชั่วโมง ตามลำดับ การทดสอบที่อุณหภูมิห้อง แสดงในรูปที่ 4.4 (ก) พบว่า เมื่อปริมาณยางเอชเอ็นปีอาร์เพิ่มขึ้น ทำให้ค่ามอดูลัสแรงดึงมีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก ยางเอชเอ็นปีอาร์มีปริมาณพันธะคู่อยู่ในโครงสร้างโมเลกุลที่น้อยกว่า ยางเอ็นปีอาร์ ส่งผลให้ยางเอชเอ็นปีอาร์มีปริมาณความหนาแน่นของพันธะข้ามที่น้อยกว่า นอกจากนี้ การที่โครงสร้างโมเลกุลยางเอชเอ็นปีอาร์มีสายโซ่หลักเป็นพันธะเดี่ยว ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของยางเอชเอ็นปีอาร์สามารถเคลื่อนไหว (Flexible) ได้มากกว่ายางเอ็นปีอาร์ จึงทำให้ค่ามอดูลัสลดลงตามปริมาณยางเอชเอ็นปีอาร์ที่เพิ่มขึ้น [3, 4] โดยหลังการแช่มีค่ามอดูลัสที่ต่ำกว่าก่อนแช่ ส่วนในกรณีที่แช่น้ำมัน E10, E20 และ E85 พบว่า ค่ามอดูลัสมีแนวโน้มลดลงทุกอัตราส่วนของยาง ทั้งนี้เนื่องจาก โมเลกุลน้ำมันแก๊สโซฮอล์สามารถเข้าไปแทรกอยู่ในโมเลกุลของยาง ซึ่งเป็นการเพิ่มความเค้น (Stress) ภายในเนื้อวัสดุยาง ทำให้ความแข็งแรงพันธะระหว่างโมเลกุลยางน้อยลง สายโซ่โมเลกุลยางจึงอยู่ห่างกันมากขึ้น ส่งผลให้ยางมีมอดูลัสแรงดึงลดลง โดยที่ยางผสมมีค่ามอดูลัสก่อนการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ ในช่วงระหว่าง 3.4-6.1 MPa และมีค่ามอดูลัสภายหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ อยู่ในช่วง 1.7-4.9 MPa ในส่วนของการทดสอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แสดงใน

รูปที่ 4.4 (ข) ผลการทดลองมีแนวโน้มทิศทางเดียวกับที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งค่าที่ได้แตกต่างกันไม่มาก เนื่องจาก ที่อุณหภูมิสูงโมเลกุลของน้ำมันแก๊สโซฮอลล์สามารถแทรกตัวเข้าไปให้โมเลกุลยางได้มากขึ้น ทำให้ความแข็งแรงพันธะระหว่างโมเลกุลยางลดลง แต่ในขณะเดียวกันที่อุณหภูมิสูงสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางสายโซ่โมเลกุลยางเพิ่มขึ้นหลังการบ่มสุก (Post curing) ส่งผลให้ค่ามอดุลัสที่ได้แตกต่างจากการทดสอบที่อุณหภูมิห้องเพียงเล็กน้อย



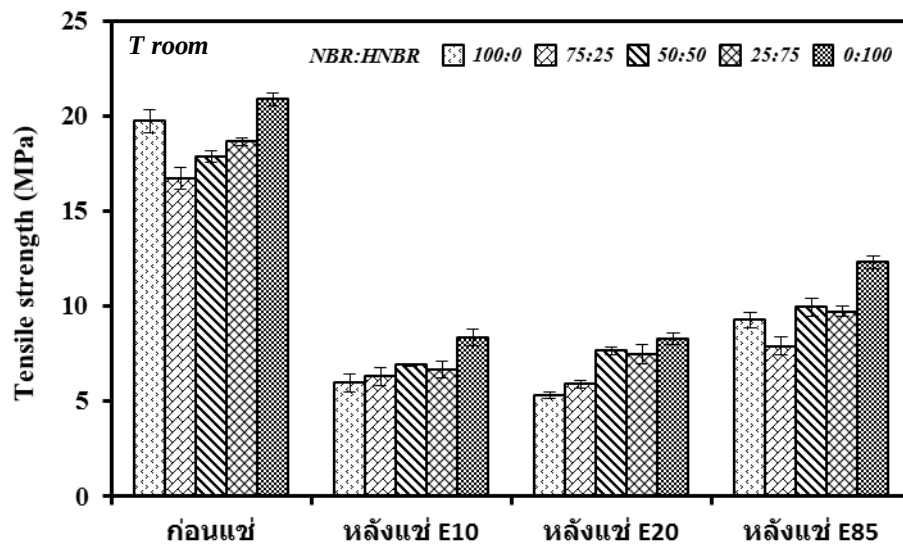
(ก)



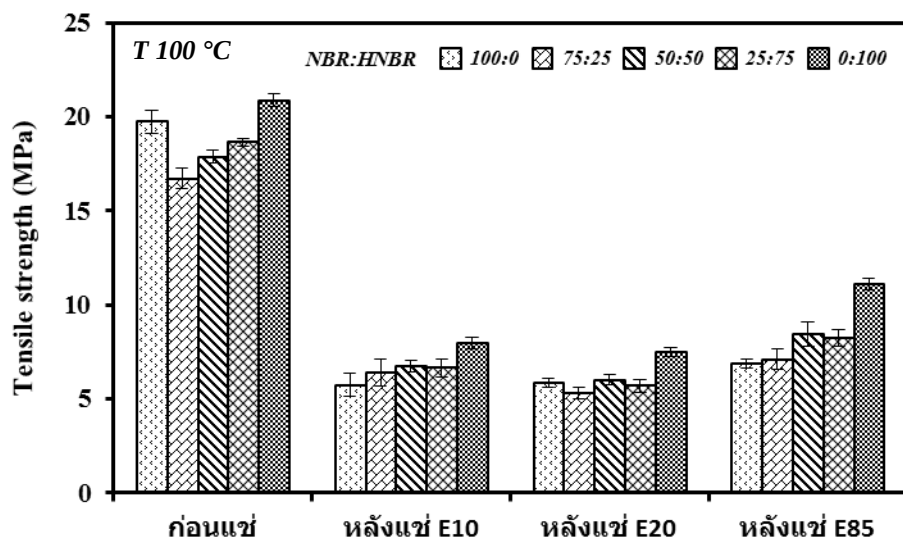
(ข)

รูปที่ 4.4 มอดุลัสที่ระยะยืด 70 เปอร์เซ็นต์ ของยางผสม NBR:HNBR ที่สัดส่วนต่างๆ ก่อนและหลังการแช่ในน้ำมันแก๊สโซฮอลล์ ชนิด E10, E20 และ E85 (ก) ที่อุณหภูมิห้อง (ข) ที่อุณหภูมิ 100 °C

ส่วนรูปที่ 4.5 แสดงความต้านแรงดึงของยางผสมระหว่างยางเอ็นปีอาร์และยางเอชเอ็นปีอาร์ที่สัดส่วนต่างๆ ก่อนและหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ ชนิด E10, E20 และ E85 ที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 70 ชั่วโมง ตามลำดับ ในรูปที่ 4.5 (ก) พบว่า ยางเอชเอ็นปีอาร์มีค่าความต้านแรงดึงมากกว่ายางเอ็นปีอาร์ ทั้งก่อนและหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ทั้งสามชนิด เนื่องจากยางเอชเอ็นปีอาร์มีสายโซ่หลักที่เป็นพันธะเดี่ยวมากกว่ายางเอ็นปีอาร์ สายโซ่โมเลกุลของยางเอชเอ็นปีอาร์จึงสามารถเคลื่อนไหว (Flexible) ที่เหนียวต่อการเกิดผลึกได้เมื่อถูกดึงยืด (Strain-induced crystallization) ได้ดีกว่ายางเอ็นปีอาร์ ส่งผลให้ยางเอชเอ็นปีอาร์มีสมบัติเชิงกลทางด้านการทนทานต่อแรงดึงที่สูง [3, 4, 45] ดังนั้น ยางเอชเอ็นปีอาร์จึงเป็นยางที่มีความแข็งแรงทนต่อการรับแรงดึงได้สูง โดยก่อนการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ ยางผสมที่สัดส่วนต่างๆ มีค่าความต้านทานแรงดึงที่ต่ำกว่ายางเอ็นปีอาร์และยางเอชเอ็นปีอาร์บริสุทธิ์ เนื่องจาก การเติมยางเอชเอ็นปีอาร์ในยางเอ็นปีอาร์ที่ปริมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ เป็นการทำให้ชิ้นงานยางอยู่ในรูปของระบบยางผสม ซึ่งเป็นการลดความเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุยาง ส่งผลให้ยางผสมระหว่างยางเอ็นปีอาร์กับยางเอชเอ็นปีอาร์ที่สัดส่วน 75:25 ค่าความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มลดลง แต่เมื่อเติมยางเอชเอ็นปีอาร์ที่ปริมาณ 50-75 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ระบบยางผสมเริ่มมีค่าความต้านทานแรงดึงที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก การมีอยู่ของเฟสยางเอชเอ็นปีอาร์ในยางผสมในปริมาณที่มาก ซึ่งเฟสของยางเอชเอ็นปีอาร์เป็นส่วนที่ช่วยทำให้ยางผสมมีความแข็งแรงสูงขึ้นตามปริมาณของยางเอชเอ็นปีอาร์ เนื่องจาก สมบัติของยางเอชเอ็นปีอาร์ที่มีความแข็งแรง ทำให้สมบัติโดยรวมของยางผสมเพิ่มขึ้น ส่วนกรณีที่แช่น้ำมัน E10, E20 และ E85 พบว่าค่าความต้านแรงดึงมีแนวโน้มลดลงจากก่อนแช่ในทุกสภาวะการทดสอบ เนื่องจาก น้ำมันแก๊สโซฮอล์สามารถแทรกเข้าไปในโมเลกุลของยาง ซึ่งเป็นการเพิ่มแรงกระทำหรือความเค้น (Stress) ภายในเนื้อวัสดุยาง ทำให้ความแข็งแรงพันธะระหว่างโมเลกุลยางลดลง สายโซ่โมเลกุลยางจึงอยู่ห่างกันมากขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานยางมีความต้านทานแรงดึงลดลง ในส่วนการทดสอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ข) ความต้านทานแรงดึงมีค่าลดต่ำลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจาก ที่อุณหภูมิสูงโมเลกุลของน้ำมันแก๊สโซฮอล์สามารถแทรกซึมแพร่เข้าไปในชิ้นงานยางได้มากขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงพันธะระหว่างโมเลกุลยางลดต่ำลง โดยที่พันธะเชื่อมขวางของโมเลกุลยางไม่ได้ถูกทำลาย และในขณะเดียวกันที่อุณหภูมิสูงยางผสมสามารถเกิดพันธะเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นหลังการบ่มสุก (Post curing) และยางเอชเอ็นปีอาร์ที่ใช้ในงานวิจัย มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนสูง [2] ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานยางลดลงจากการทดสอบที่อุณหภูมิห้องเพียงเล็กน้อย และเมื่อพิจารณาเฉพาะยางผสมภายหลังการแช่ที่สภาวะต่างๆ พบว่า ยางผสมที่สัดส่วน 50:50 ให้ค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงสุด โดยที่ยางผสมมีความต้านทานแรงดึงก่อนการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ อยู่ในช่วงระหว่าง 16-21 MPa และมีค่าความต้านทานแรงดึงภายหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ อยู่ในช่วงระหว่าง 5-13 MPa



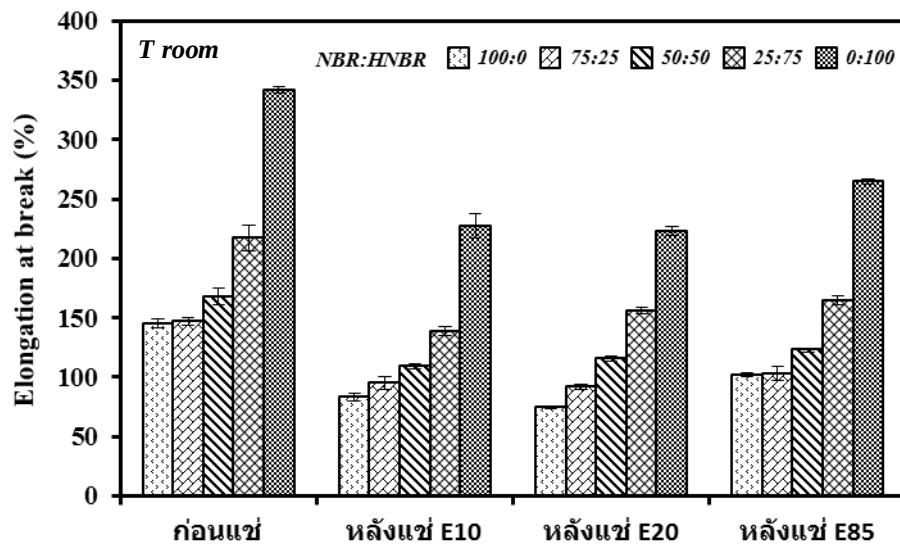
(ก)



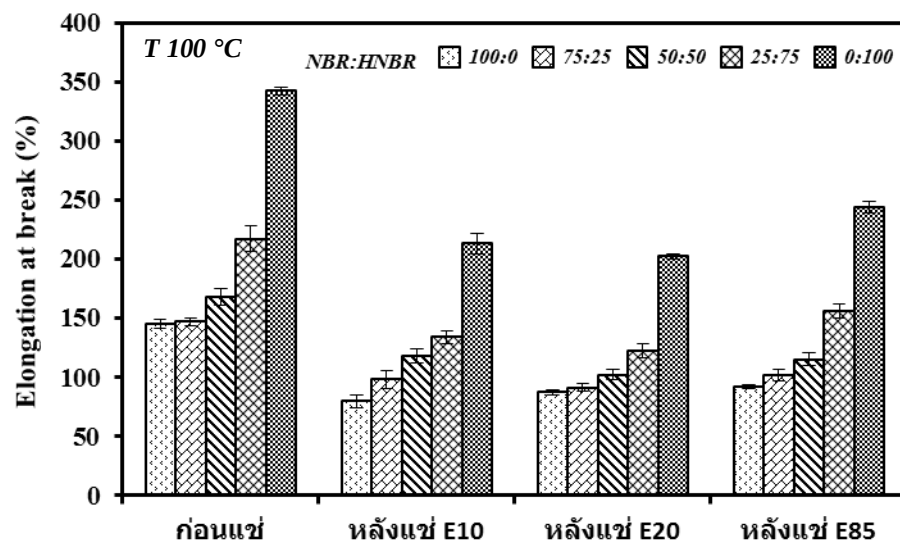
(ข)

รูปที่ 4.5 ความต้านแรงดึงของยางผสม NBR:HNBR ที่สัดส่วนต่างๆ ก่อนและหลังการแช่ในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ ชนิด E10, E20 และ E85 (ก) ที่อุณหภูมิห้อง (ข) ที่อุณหภูมิ 100 °C

สำหรับรูปที่ 4.6 แสดงการยึดตัว ณ จุดขาด ของยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์ที่ สัดส่วนต่างๆ ก่อนและหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ ชนิด E10, E20 และ E85 ที่อุณหภูมิห้อง และ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 70 ชั่วโมง ตามลำดับ การทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ดังรูปที่ 4.6 (ก) พบว่า เมื่อปริมาณยางเอชเอ็นบีอาร์เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้สมบัติการยึดตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย ทั้ง ก่อนแช่และภายหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ทั้งสามชนิด เนื่องจากยางเอชเอ็นบีอาร์มีสายโซ่หลัก



(ก)

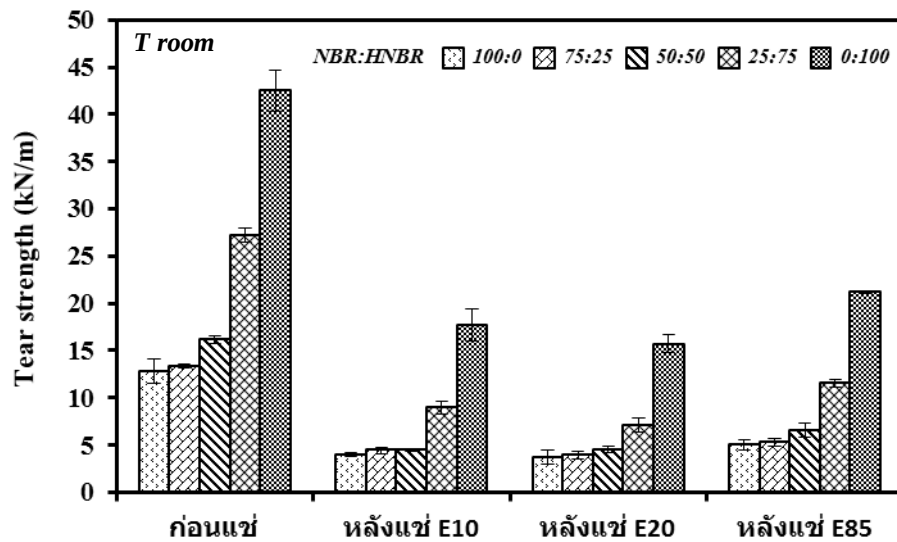


(ข)

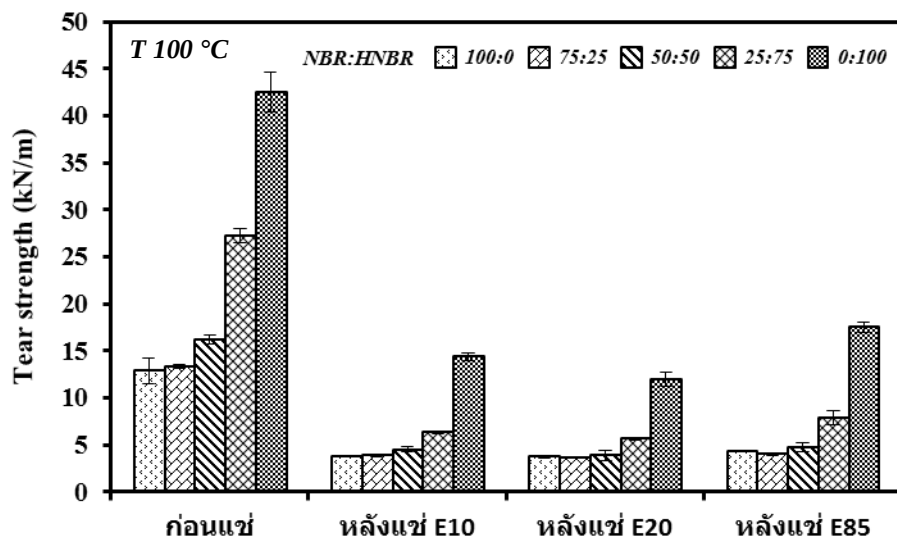
รูปที่ 4.6 การยืดตัว ณ จุดขาด ของยางผสม NBR:HNBR ที่สัดส่วนต่างๆ ก่อนและหลังการแช่ใน น้ำมันแก๊สโซฮอล์ ชนิด E10, E20 และ E85 (ก) ที่อุณหภูมิห้อง (ข) ที่อุณหภูมิ 100 °C

ที่เป็นพันธะเดี่ยวในปริมาณมากกว่ายางเอ็นบีอาร์ ทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางเอชเอ็นบีอาร์สามารถเคลื่อนไหว (Flexible) และดึงยืดได้มากกว่ายางเอ็นบีอาร์ ซึ่งสอดคล้องกับค่าความต้านแรงดึงในรูปที่ 4.5 (ก) ส่วนในกรณีที่แช่ในน้ำมัน E10, E20 และ E85 พบว่า ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลงทุกสัดส่วนของยางผสม เนื่องจาก น้ำมันแก๊สโซฮอล์เข้าไปแทรกอยู่ในโมเลกุลของยาง ซึ่งเป็นการเพิ่มความเค้น (Stress) ภายในเนื้อวัสดุยาง ทำให้ยางมีประสิทธิภาพลดลง โดยที่ยางผสมมีค่าการยืดตัว

ณ จุดขาด ก่อนการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอลล์ ในช่วงระหว่าง 140-350 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ภายหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอลล์ ในช่วงระหว่าง 70-270 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนการทดสอบที่สถานะอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ข) ผลการทดลองมีแนวโน้มเช่นเดียวกับที่อุณหภูมิห้อง



(ก)

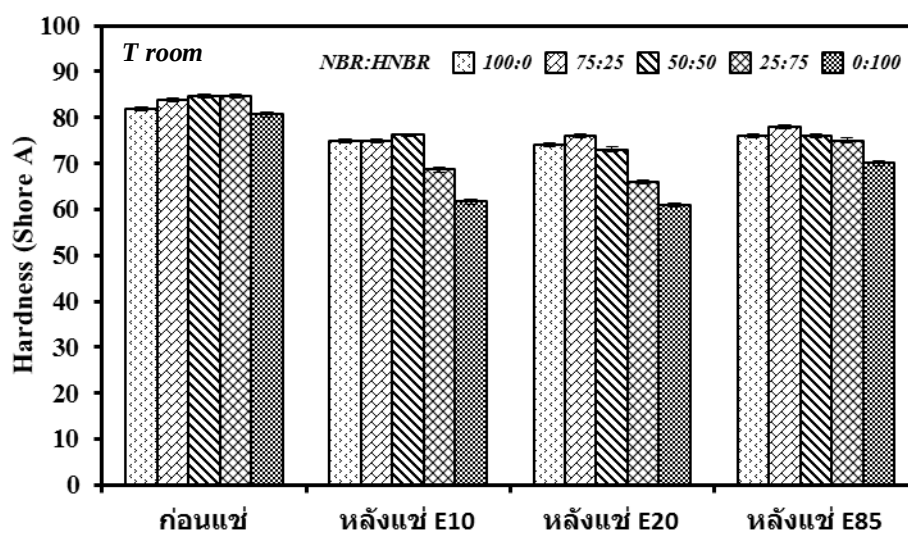


(ข)

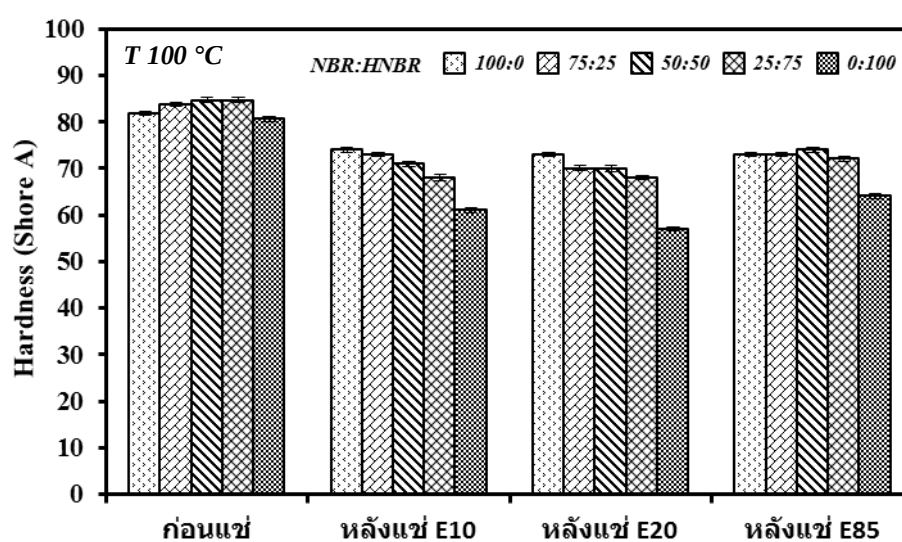
รูปที่ 4.7 ความต้านทานการฉีกขาดของยางผสม NBR:HNBR ที่สัดส่วนต่างๆ ก่อนและหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอลล์ ชนิด E10, E20 และ E85 (ก) ที่อุณหภูมิห้อง (ข) ที่อุณหภูมิ 100 °C

ส่วนรูปที่ 4.7 แสดงความต้านทานการฉีกขาดของยางผสมระหว่างยางเอ็นปีอาร์และยางเอชเอ็นปีอาร์ที่ สักส่วนต่างๆ ก่อนและหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ ชนิด E10, E20 และ E85 ที่อุณหภูมิห้อง และ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 70 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่า การทดสอบที่อุณหภูมิห้อง แสดง ในรูปที่ 4.7 (ก) ยางเอชเอ็นปีอาร์มีค่าความต้านทานการฉีกขาดสูงกว่ายางเอ็นปีอาร์ ทั้งก่อนและภายหลัง การแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ทั้งสามชนิด เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของยางเอชเอ็นปีอาร์สามารถ เคลื่อนไหว (Flexible) ที่เหนียวต่อการเกิดผลึกได้เมื่อถูกดึงยืด (Strain-induced crystallization) ได้ ดีกว่ายางเอ็นปีอาร์ [3, 4, 45] ซึ่งผลการทดลองมีแนวโน้มสอดคล้องกับค่าความต้านแรงดึงสูงสุดใน รูปที่ 4.5 ส่วนในกรณีที่แช่น้ำมัน E10, E20 และ E85 พบว่าค่าความต้านทานการฉีกขาดมีแนวโน้ม ลดลงทุกสภาวะ เนื่องจาก น้ำมันแก๊สโซฮอล์เข้าไปแทรกอยู่ในโมเลกุลของยาง ทำให้ความแข็งแรง พันธะระหว่างโมเลกุลลดลง ส่งผลต่อสมบัติด้านการต้านแรงฉีกขาดลดลงด้วย โดยที่ยางผสมมีค่า ความต้านทานการฉีกขาดก่อนการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ อยู่ในช่วงระหว่าง 12-43 kN/m และมีค่าความ ต้านทานการฉีกขาดภายหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ อยู่ในช่วงระหว่าง 3-22 kN/m ในส่วนการ ทดสอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ข) พบว่า ให้ค่าความต้านทานแรงฉีกขาด ที่ลดลงจากที่อุณหภูมิห้องเพียงเล็กน้อย เนื่องจาก โมเลกุลของน้ำมันแก๊สโซฮอล์สามารถเกิดการ แทรกตัวเข้าไปในชิ้นงานยางได้มากขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงพันธะระหว่างโมเลกุลยางลดต่ำลง แต่ในขณะเดียวกันที่อุณหภูมิสูงยางผสมสามารถเกิดพันธะเชื่อมขวางเพิ่มขึ้นหลังการบ่มสุก (Post curing) ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงฉีกขาดของชิ้นงานยางลดลงเพียงเล็กน้อย

จากรูปที่ 4.8 แสดงความแข็งที่ผิวของยางผสมระหว่างยางเอ็นปีอาร์และยางเอชเอ็นปีอาร์ ที่ สักส่วน ต่างๆ ก่อนและหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ ชนิด E10, E20 และ E85 ที่อุณหภูมิห้อง และที่ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 70 ชั่วโมง ตามลำดับ การทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ดังแสดงใน รูปที่ 4.8 (ก) พบว่า ยางเอ็นปีอาร์มีค่าความแข็งที่ผิวสูงกว่ายางเอชเอ็นปีอาร์ ทั้งก่อนแช่และภายหลัง การแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ทั้งสามชนิด เนื่องจาก ยางเอ็นปีอาร์มีปริมาณพันธะคู่อยู่ในโครงสร้าง โมเลกุลที่สูงกว่า ส่งผลทำให้ยางเอ็นปีอาร์มีระดับความหนาแน่นของการเชื่อมขวางโมเลกุลที่สูงกว่า ยางเอชเอ็นปีอาร์ โดยยางผสมระหว่างยางเอ็นปีอาร์และยางเอชเอ็นปีอาร์ก่อนแช่มีค่าความแข็งที่ผิวอยู่ ในช่วงระหว่าง 81-85 Shore A ส่วนในกรณีที่แช่น้ำมัน E10, E20 และ E85 พบว่า ค่าความแข็งมี แนวโน้มลดลงทุกสภาวะ เนื่องจาก น้ำมันสามารถแทรกเข้าไปในโมเลกุลของยาง ทำให้ความแข็งแรง พันธะระหว่างโมเลกุลยางลดลง ยางจึงมีค่าความแข็งลดลงด้วย โดยที่ยางผสมมีค่าความแข็งที่ผิว ภายหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ อยู่ในช่วงระหว่าง 61-78 Shore A ในส่วนการทดสอบที่ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ข) พบว่า ความแข็งของยางลดลงเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้ เนื่องจาก ที่อุณหภูมิสูงพันธะเชื่อมขวางของโมเลกุลยางไม่ได้ถูกทำลาย แต่มีความแข็งแรงพันธะ ลดลงเท่านั้น



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.8 ความแข็งที่ผิวของยางผสม NBR:HNBR ที่สัดส่วนต่างๆ ก่อนและหลังการแช่ในน้ำมัน
แก๊สโซฮอล์ ชนิด E10, E20 และ E85 (ก) ที่อุณหภูมิห้อง (ข) ที่อุณหภูมิ 100 °C

4.2.3 การตรวจสอบสมบัติด้านการยุบตัวถาวรหลังได้รับแรงอัด และการต้านทานต่อการกัดกร่อนของยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์กับยางเอชเอ็นบีอาร์

การตรวจสอบสมบัติด้านการยุบตัวถาวรหลังได้รับแรงอัด ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ชั่วโมง และสมบัติด้านการต้านทานต่อการกัดกร่อน ของยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์ที่สัดส่วนต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 การยุบตัวถาวรหลังได้รับแรงอัด และปริมาตรที่สูญเสียของยางผสม NBR:HNBR

สัดส่วนยางผสม NBR:HNBR	Compression set (%)	Volume loss (mm ³)
100:0	4.0 ± 0	94.9 ± 4.7
75:25	5.4 ± 0.2	102.5 ± 6.9
50:50	6.6 ± 0.8	96.5 ± 7.6
25:75	12.3 ± 0.5	78.5 ± 7.7
0:100	13.0 ± 0.2	61.2 ± 9.9

ตารางที่ 4.6 แสดงการยุบตัวถาวรหลังได้รับแรงอัด (Compression set) และปริมาตรที่สูญเสีย (Volume loss) ของยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์ที่สัดส่วนต่างๆ ผลการทดลองพบว่า การเติมยางเอชเอ็นบีอาร์ในยางเอ็นบีอาร์ที่ปริมาณ 25-50 เปอร์เซ็นต์ ไม่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การยุบตัวถาวรหลังได้รับแรงอัดของยางผสม โดยยางผสมมีค่าการยุบตัวถาวรหลังได้รับแรงอัดอยู่ในช่วงระหว่าง 4-7 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าการยุบตัวของยางที่ค่อนข้างน้อย (ค่าคืนกลับตัวที่ดี) เมื่อเทียบกับเกณฑ์จากการทดสอบผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้าที่กำหนดไว้ในตารางที่ 4.1 แต่เมื่อเพิ่มปริมาณยางเอชเอ็นบีอาร์ที่ 75-100 เปอร์เซ็นต์ พบว่า เปอร์เซ็นต์การยุบตัวถาวรหลังได้รับแรงอัดของยางผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ที่แสดงถึงการคืนกลับตัวของยางผสมที่ลดลง ทั้งนี้เนื่องจาก ระดับปริมาณความหนาแน่นการเชื่อมขวางสายโซ่โมเลกุลของยางผสมที่ลดต่ำลง ซึ่งให้ผลการทดลองที่สอดคล้องกับผลต่างแรงบิดในตารางที่ 4.3 โดยยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์กับยางเอชเอ็นบีอาร์ที่สัดส่วน 25:75 และยางเอชเอ็นบีอาร์บริสุทธิ์ มีค่าการยุบตัวถาวรหลังได้รับแรงอัด เท่ากับ 12 และ 13 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองโดยรวมเป็นค่าที่น้อย เมื่อเทียบกับเกณฑ์การทดสอบผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้า

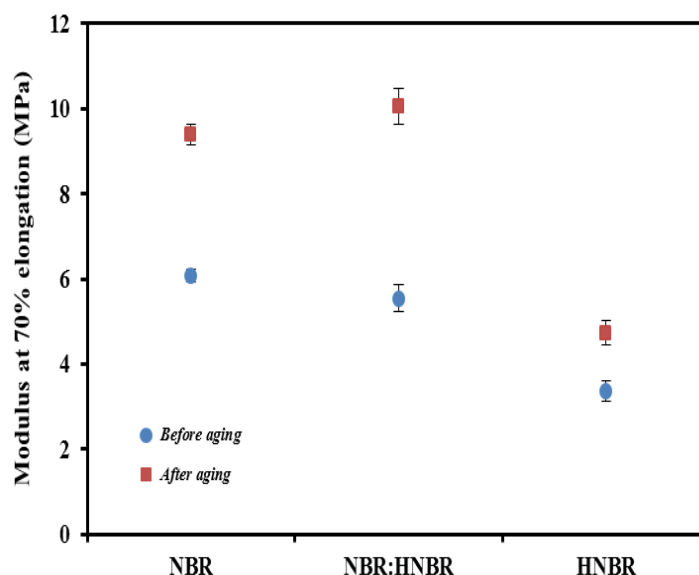
ในส่วนของสมบัติด้านความต้านทานต่อการขูด พบว่า การเพิ่มปริมาณยางเอชเอ็นบีอาร์ที่ 25 เปอร์เซ็นต์ หรือยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์ที่สัดส่วน 75:25 ความต้านทานต่อการขูดมีค่าลดลง หรือปริมาตรที่สูญเสียจากการขูดเพิ่มขึ้น เนื่องจาก การเติมยางเอชเอ็นบีอาร์ในยางเอ็นบีอาร์ เป็นการทำให้ชิ้นงานยางอยู่ในรูปของระบบยางผสม ซึ่งลดความเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุยาง ส่งผลให้ความแข็งแรงของระบบที่เป็นยางผสมลดลง ยางผสมจึงต้านทานต่อการขูดได้น้อยลงด้วย แต่เมื่อเพิ่มปริมาณยางเอชเอ็นบีอาร์ที่ 50-100 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ความต้านทานการขูดเพิ่มขึ้น หรือปริมาตรของยางที่หายไปเมื่อถูกขูดลดลง ซึ่งเป็นการลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะยางเอชเอ็นบีอาร์ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่มีค่าความต้านทานต่อการขูดสูงสุด ซึ่งให้ผลการทดลองที่สอดคล้องกับค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ในรูปที่ 4.5 เนื่องจาก ยางเอชเอ็นบีอาร์เป็นยางที่มีความแข็งแรง (Strength) สูง ส่งผลให้มีความต้านทานต่อการขูดที่ดี [2] ส่วนยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์กับยางเอชเอ็นบีอาร์ที่สัดส่วน 50:50 และ 25:75 ที่มีความต้านทานต่อการขูดเพิ่มขึ้น ก็เป็นผลจากการมีเฟสของยางเอชเอ็นบีอาร์ในยางผสมในปริมาณที่มาก ซึ่งยางเอชเอ็นบีอาร์มีความแข็งแรงสูง ดังนั้น เฟสของยางเอชเอ็นบีอาร์จึงช่วยเสริมให้ยางผสมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามยางเอชเอ็นบีอาร์เอง และนอกจากนี้ ยางเอชเอ็นบีอาร์ยังมีความสามารถในการยืดหยุ่นตามการขูดดี ซึ่งเป็นการลดการเสียหายของวัสดุได้ [4] โดยยางผสมมีค่าการสูญเสียเนื้อวัสดุ อยู่ในช่วงระหว่าง 61-103 ลูกบาศก์มิลลิเมตร

จากการดำเนินงานวิจัยในส่วนที่ 4.2.1-4.2.3 เป็นการเลือกสัดส่วนการผสมของยางเอ็นบีอาร์กับยางเอชเอ็นบีอาร์ที่เหมาะสมเพื่อนำไปศึกษาต่อในส่วนต่อไป โดยในงานนี้เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์โอริงที่ใช้ในงานสัมผัสกับน้ำมันแก๊สโซฮอล์ ดังนั้น จึงให้ความสนใจสมบัติการใช้งานด้านการยุบตัวถาวรหลังได้รับแรงอัดที่ต่ำ (สมบัติการคืนกลับตัวที่สูง) ความต้านทานแรงดึง และการทนต่อการบวมตัวในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E85 ที่มีปริมาณเอทานอลสูงๆ โดยพบว่า ยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์ที่สัดส่วน 50:50 สามารถต้านทานต่อการบวมตัวในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ E85 ได้ดี และในขณะเดียวกันให้สมบัติเชิงกลด้านความต้านทานแรงดึงที่ดี ดังนั้น จึงเลือกสัดส่วนการผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์ ที่ 50:50 เพื่อนำไปศึกษาต่อ

4.2.4 การบ่มเร่งสถานะด้วยความร้อนของยางเอ็นบีอาร์ ยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์กับยางเอชเอ็นบีอาร์ และยางเอชเอ็นบีอาร์

งานวิจัยในส่วนนี้ เป็นการทดสอบเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานยางเอ็นบีอาร์บริสุทธิ์ ยางเอชเอ็นบีอาร์บริสุทธิ์ และยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์กับยางเอชเอ็นบีอาร์ที่สัดส่วน 50:50 ที่เลือกสัดส่วนจากผลการทดลองในส่วนที่ 4.2.2-4.2.3 ในสภาวะก่อนและภายหลังการบ่มเร่งด้วย

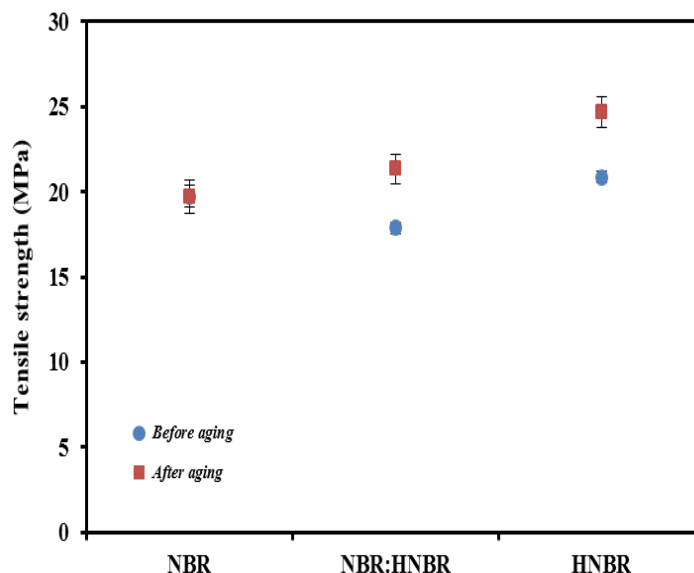
ความร้อน (Thermal aging) ในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ต่อเนื่องเป็นเวลา 360 ชั่วโมง โดยสนใจศึกษาถึงสมบัติเชิงกลของยางที่เปลี่ยนไป ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.9-4.13



รูปที่ 4.9 มอดุลัสของชิ้นงานยางในสภาวะก่อนและหลังการบ่มแรงด้วยความร้อน

รูปที่ 4.9 แสดงค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 70 เปอร์เซ็นต์ ของยางเอ็นปีอาร์ ยางเอชเอ็นปีอาร์ และยางผสมระหว่างยางเอ็นปีอาร์และยางเอชเอ็นปีอาร์ ที่สัดส่วน 50:50 ในสภาวะก่อนและหลังการบ่มแรงสภาวะด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 360 ชั่วโมง พบว่า ภายหลังการบ่มแรงสภาวะด้วยความร้อน วัสดุยางในทุกสูตรการผสมมีค่ามอดุลัสแรงดึงที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก สารเคมีในการบ่มสุกยางที่เหลืออยู่ที่ยังไม่ได้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางในการขึ้นรูป ทำให้เกิดปริมาณพันธะเชื่อมขวางเพิ่มขึ้นหลังการบ่มสุก (Post curing) [4, 46] โดยยางเอ็นปีอาร์มีการเปลี่ยนแปลงค่ามอดุลัสภายหลังการบ่มแรงด้วยความร้อนที่สูงกว่ายางเอชเอ็นปีอาร์ เนื่องจาก การที่ยางเอ็นปีอาร์มีสายโซ่หลักที่เป็นพันธะคู่ในปริมาณมากกว่ายางเอชเอ็นปีอาร์ ส่งผลให้ยางเอ็นปีอาร์สามารถเกิดการเสื่อมสภาพจากความร้อนได้ง่ายกว่าในยางเอชเอ็นปีอาร์ โดยที่ยางเอ็นปีอาร์และยางเอชเอ็นปีอาร์มีกลไกการเสื่อมสภาพจากความร้อนผ่านปฏิกิริยาการเกิดพันธะข้าม (Crosslink) ดังนั้น ยางเอ็นปีอาร์จึงมีปริมาณความหนาแน่นของพันธะข้ามที่เพิ่มขึ้น จากการเสื่อมสภาพของยางภายหลังการบ่มแรงสภาวะด้วยความร้อนที่มากกว่าในยางเอชเอ็นปีอาร์ ทำให้ยางเอ็นปีอาร์มีการเปลี่ยนแปลงค่ามอดุลัสภายหลังการบ่มแรงที่เพิ่มสูงขึ้นมากกว่าในยางเอชเอ็นปีอาร์ด้วย ในส่วนของยางผสมระหว่างยางเอ็นปีอาร์และยางเอชเอ็นปีอาร์ พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงค่ามอดุลัสภายหลังการบ่มแรงเพิ่มขึ้นสูงสุด เนื่องจาก สามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางหลังการบ่มสุกได้ของเฟสยางเอ็นปีอาร์และยางเอชเอ็นปีอาร์ในยางผสม โดยเฟสเมทริกซ์ของยางเอ็นปีอาร์ในระบบของยางผสมมีสารเคมีในการบ่มสุกยางที่หลงเหลืออยู่

มากกว่าปกติ จากการที่สารเคมีของเฟสยางเอชเอ็นบีอาร์เคลื่อนที่ออกมาในเฟสของยางเอ็นบีอาร์ในระหว่างการคงรูปยาง ส่งผลให้ระบบยางผสมมีปริมาณพันธะข้ามหลังการบ่มสุกที่เพิ่มขึ้นสูงสุดด้วย

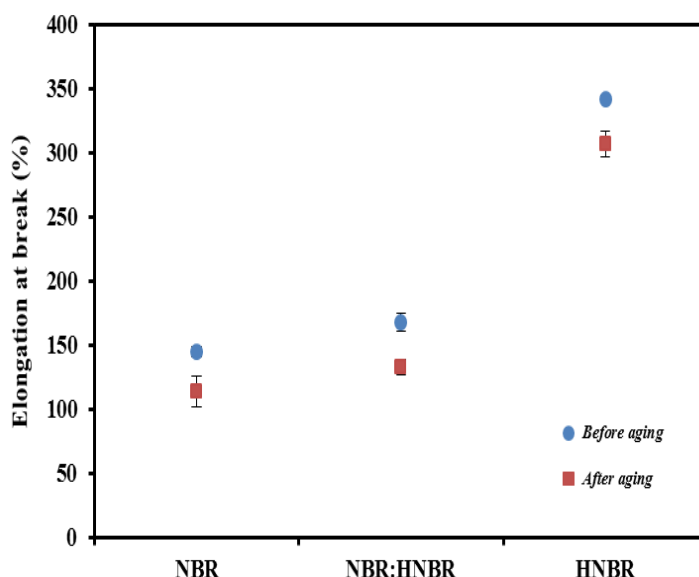


รูปที่ 4.10 ความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานยาง สภาวะก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน

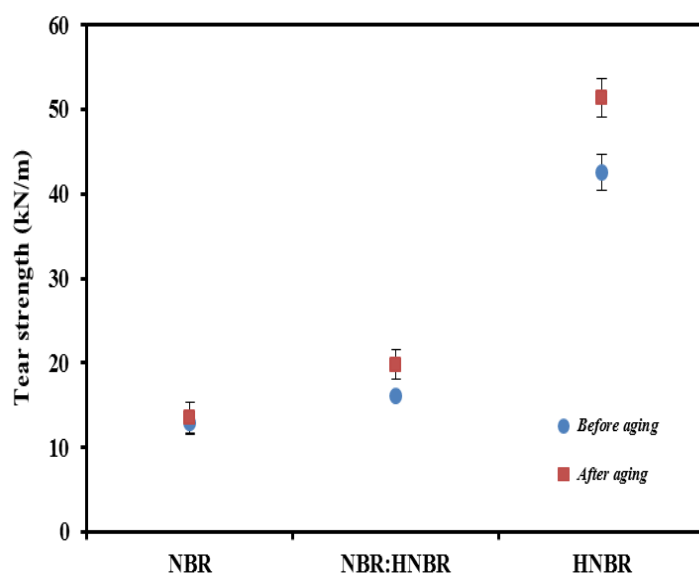
สำหรับรูปที่ 4.10 แสดงค่าความต้านทานแรงดึงของยางเอ็นบีอาร์ ยางเอชเอ็นบีอาร์ และยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์ ที่สัดส่วน 50:50 ในสภาวะก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 360 ชั่วโมง พบว่า ภายหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อน ยางผสมและยางเอชเอ็นบีอาร์บริสุทธิ์ มีค่าความต้านทานแรงดึงที่เพิ่มขึ้น ส่วนการบ่มเร่งยางเอ็นบีอาร์บริสุทธิ์มีค่าความต้านทานแรงดึงไม่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เนื่องจาก ยางเอชเอ็นบีอาร์มีสายโซ่หลักส่วนใหญ่ที่เป็นพันธะเดี่ยว ส่งผลให้มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนได้เป็นอย่างดี [2] ในส่วนของยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์กับยางเอชเอ็นบีอาร์ ความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจาก การมีอยู่ของเฟสยางเอชเอ็นบีอาร์จึงช่วยให้ยางผสมมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนที่ดีเช่นกัน ส่วนยางเอ็นบีอาร์มีสายโซ่หลักส่วนใหญ่ที่เป็นพันธะคู่ จึงมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนต่ำกว่ายางเอชเอ็นบีอาร์

รูปที่ 4.11 แสดงค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ของยางเอ็นบีอาร์ ยางเอชเอ็นบีอาร์ และยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์ ที่สัดส่วน 50:50 ในสภาวะก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 360 ชั่วโมง พบว่า ภายหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อน วัสดุยางในทุกสูตรการผสมมีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดที่ลดลง เนื่องจาก ชิ้นงานยางเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของของพันธะข้ามเพิ่มขึ้นหลังการบ่มสุก ทำให้ปริมาณพันธะเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น ยางมี

การยืดตัวลดลง [46] โดยครียางเอ็นบีอาร์ ยางเอชเอ็นบีอาร์ และยางผสม มีการเปลี่ยนแปลงค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ภายหลังจากการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนในช่วงการเปลี่ยนแปลงที่เป็นแนวโน้มเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบก่อนการบ่มเร่งสภาวะ



รูปที่ 4.11 การยืดตัว ณ จุดขาดของชิ้นงานยาง สภาวะก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน

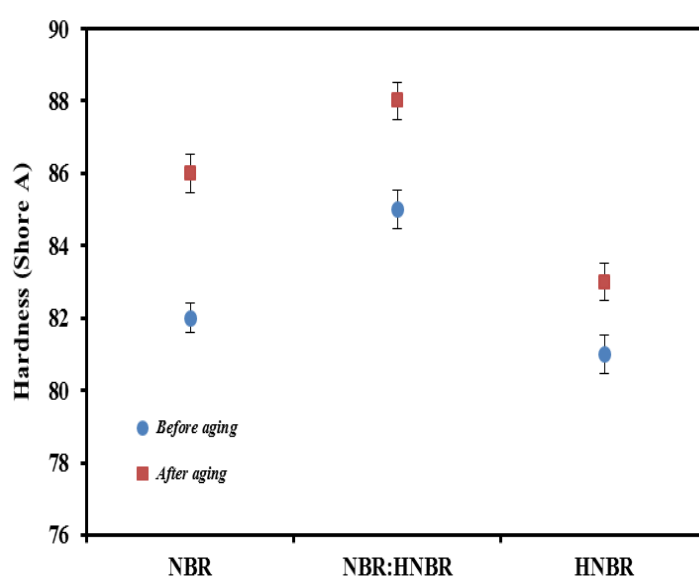


รูปที่ 4.12 ความต้านทานแรงฉีกขาดของชิ้นงานยาง สภาวะก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน

ส่วนรูปที่ 4.12 แสดงค่าความต้านทานแรงฉีกขาดของยางเอ็นบีอาร์ ยางเอชเอ็นบีอาร์ และยางผสม ระหว่างยางเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์ ที่สัดส่วน 50:50 ในสภาวะก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 360 ชั่วโมง พบว่า ยางเอชเอ็นบีอาร์บริสุทธิ์มี

การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานแรงฉีกขาด ภายหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนในช่วงที่สูงกว่ายางเอ็นปีอาร์บริสุทธิ์ เมื่อเทียบกับก่อนการบ่มเร่งด้วยความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับค่าความต้านทานแรงดึงในรูปที่ 4.10 โดยยางเอชเอ็นปีอาร์และยางผสม มีค่าความต้านทานแรงฉีกขาดที่เพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัด ส่วนยางเอ็นปีอาร์มีค่าความต้านทานแรงฉีกขาดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้ก่อนทำการบ่ม ทั้งนี้เนื่องจาก ยางเอชเอ็นปีอาร์มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนสูงกว่ายางเอ็นปีอาร์

และในส่วนรูปที่ 4.13 แสดงค่าความแข็งที่ผิวของยางเอ็นปีอาร์ ยางเอชเอ็นปีอาร์ และยางผสมระหว่างยางเอ็นปีอาร์และยางเอชเอ็นปีอาร์ ที่สัดส่วน 50:50 ในสภาวะก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 360 ชั่วโมง พบว่า ภายหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อน วัสดุยางทุกสูตรการผสมมีค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น ซึ่งให้ผลการทดลองสอดคล้องกับค่ามอดุลัสจากรูปที่ 4.9 เนื่องจาก ทั้งยางเอ็นปีอาร์ ยางผสม และยางเอชเอ็นปีอาร์ สามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของพันธะข้ามหลังการบ่มสุกได้ ส่งผลให้ปริมาณพันธะเชื่อมขวางในชิ้นงานยางเพิ่มขึ้น โดยยางเอ็นปีอาร์มีการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งภายหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่สูงกว่ายางเอชเอ็นปีอาร์ เนื่องจาก ยางเอ็นปีอาร์สามารถเกิดการเสื่อมสภาพจากความร้อนภายหลังการบ่มเร่งผ่านปฏิกิริยาการเกิดพันธะข้ามได้ง่ายกว่าในยางเอชเอ็นปีอาร์ ทำให้ยางเอ็นปีอาร์มีปริมาณพันธะข้ามจากการเสื่อมสภาพของยางภายหลังการบ่มเร่งที่เพิ่มมากขึ้นกว่าในยางเอชเอ็นปีอาร์ ที่ส่งผลให้ยางมีความแข็งและเปราะมากขึ้น ดังนั้น ยางเอ็นปีอาร์จึงมีการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งภายหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่สูงกว่าในยางเอชเอ็นปีอาร์ด้วย



รูปที่ 4.13 ความแข็งที่ผิวของชิ้นงานยาง สภาวะก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน

4.3 การศึกษาปริมาณผงพรีซิพิเตตซิลิกาที่เติมในยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์กับยางเอชเอ็นบีอาร์ ที่มีต่อสมบัติการไหล สมบัติการบ่มสุก สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และการทนต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์

ยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์กับยางเอชเอ็นบีอาร์ที่สัดส่วน 50:50 เป็นสัดส่วนที่ทำให้สมบัติเชิงกลโดยรวมและการทนต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์ที่เหมาะสม ดังนั้น จึงเลือกสัดส่วนการผสมของยางเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์ ที่ 50:50 ศึกษาผลการเติมสารตัวเติมพรีซิพิเตตซิลิกา (Precipitated silica; PSi) ที่มีต่อสมบัติการไหล สมบัติการบ่มสุก สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และการทนต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์ทางการค้าชนิด E10, E20 และ E85 โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณผงพรีซิพิเตตซิลิกาในยางผสมที่ปริมาณ 0, 10, 20, 30 และ 40 ส่วนในร้อยส่วนของยาง

4.3.1 การตรวจสอบสมบัติด้านการไหลและการบ่มสุกของยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์กับยางเอชเอ็นบีอาร์ที่สัดส่วน 50:50 ที่เติมผงพรีซิพิเตตซิลิกาเป็นสารเติมแต่งรอง

จากผลการศึกษาของปริมาณผงพรีซิพิเตตซิลิกาที่ใช้เป็นสารเติมแต่งรองในยางคอมปาวด์ ตั้งแต่ 0-40 ส่วนในร้อยส่วนของยาง ที่มีต่อระยะเวลาสกอรัช ระยะเวลาในการบ่มสุก ผลต่างแรงบิด และความหนืดของยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์ ที่สัดส่วน 50:50 และมีผงเขม่าดำเป็นสารเติมแต่งหลักที่ปริมาณคงที่ 60 ส่วนในร้อยส่วนของยาง ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 สมบัติการไหล การบ่มสุก ผลต่างแรงบิด และความหนืดของยางผสม NBR:HNBR ที่สัดส่วน 50:50 ที่เติมผงพรีซิพิเตตซิลิกาเป็นสารเติมแต่งรอง

Silica content (phr)	Scorch time (ts ₁) (min:sec)	Cure time (tc ₉₀) (min:sec)	Delta torque (dN-m)	Mooney viscosity (ML 1+4) 100 °C
0	0:36	7:19	36.3	34.3
10	0:38	6:17	39.9	44.7
20	0:37	5:59	47.6	54.1
30	0:36	5:43	54.6	69.1
40	0:44	5:24	50.5	82.4

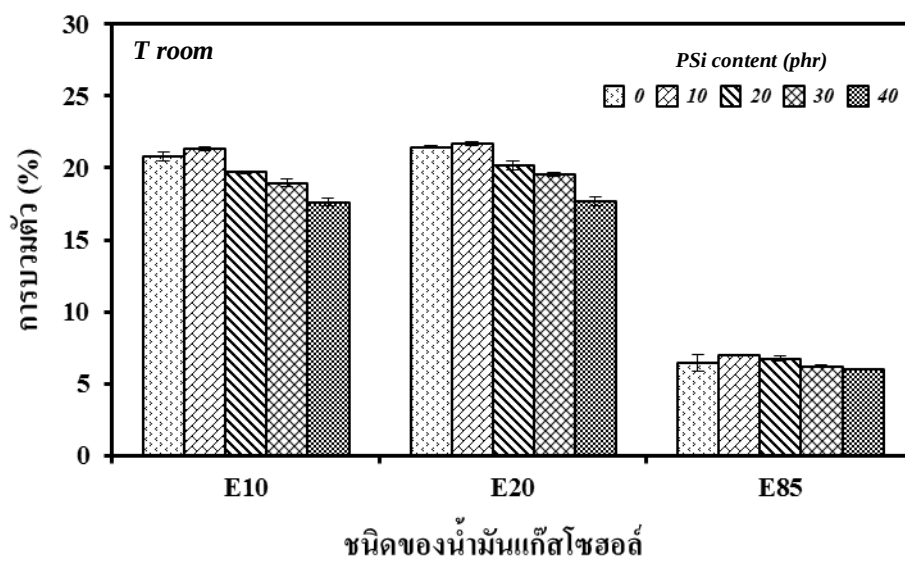
จากตารางที่ 4.7 แสดงสมบัติการไหล การบ่มสุก ผลต่างแรงบิด และความหนืดของยางผสมระหว่างยางเอ็นปีอาร์และยางเอชเอ็นปีอาร์ที่สัดส่วน 50:50 ที่เติมผงเขม่าดำเป็นสารเติมแต่งหลัก และผงฟริชพิเตตซิลิกาเป็นสารเติมแต่งรอง พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณผงฟริชพิเตตซิลิกาไม่ส่งผลต่อระยะเวลาสกอร์ช (Scorch time) ซึ่งระยะเวลาสกอร์ชของยางคอมปาวด์แต่ละสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน แต่การเพิ่มปริมาณฟริชพิเตตซิลิกา ส่งผลให้เวลาในการบ่มสุก (Cure time) ของยางผสมลดลง เนื่องจากความหนืดของยางคอมปาวด์ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ยางผสมมีความร้อนเนื่อง (Shear heating) ที่สูง และเกิดเป็นความร้อนสะสม (Thermal history) อยู่ในยางคอมปาวด์ ทำให้สารเคมีในการบ่มสุกยางเกิดการแตกตัวได้เร็วขึ้นเมื่อได้รับความร้อนในการขึ้นรูปยางผสมจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาการเกิดพันธะข้ามได้เร็วขึ้นด้วยและนอกจากนี้ การเพิ่มปริมาณผงฟริชพิเตตซิลิกา ยังส่งผลให้ผลต่างแรงบิด (Delta torque) ของยางผสมที่ได้จากเครื่อง MDR มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากผงฟริชพิเตตซิลิกาที่เติมลงไปเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง (Rigidity) สูงกว่าวัสดุเนื้อยาง [5] และยางผสมสามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางได้มากขึ้นตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น นอกจากการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลของยาง ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการเชื่อมขวางหลักแล้ว และมีบางส่วนเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางจากสารคู่ควบไซเลนกับโมเลกุลยางด้วย ที่ส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติม (Rubber-Filler interaction) [47] ส่วนสมบัติการไหลของยางผสมระหว่างยางเอ็นปีอาร์และยางเอชเอ็นปีอาร์ พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณผงฟริชพิเตตซิลิกา ส่งผลให้ความหนืด (Mooney viscosity) ของยางผสมเพิ่มขึ้น เนื่องจาก อนุภาคผงฟริชพิเตตซิลิกาไปขัดขวางการไหลตัวของยางคอมปาวด์

4.3.2 การตรวจสอบสมบัติเชิงกล และการทนต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์ของยางผสม

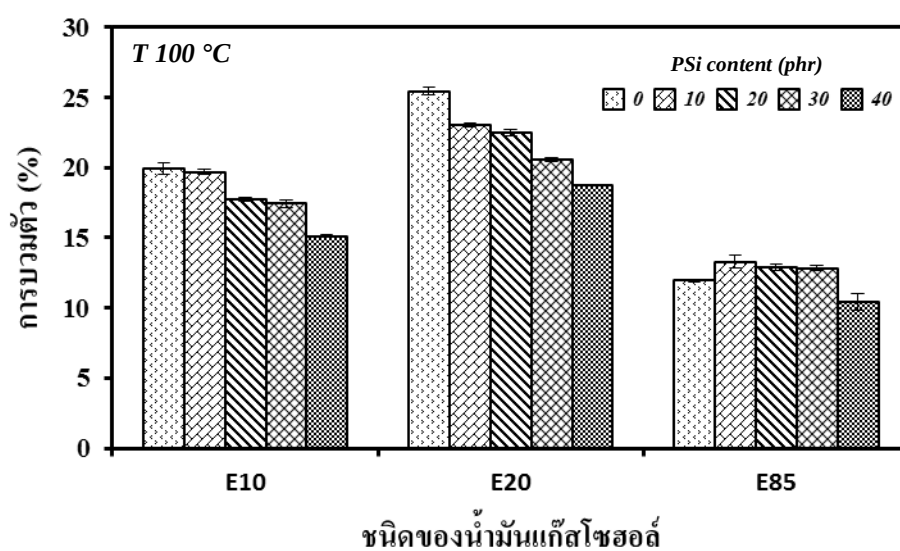
NBR:HNBR

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลและการทนต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์ ของชิ้นงานยางผสมระหว่างยางเอ็นปีอาร์และยางเอชเอ็นปีอาร์ ที่สัดส่วน 50:50 ที่เติมผงเขม่าดำเป็นสารเติมแต่งหลัก และผงฟริชพิเตตซิลิกาเป็นสารเติมแต่งรอง ก่อนและหลังการแช่ในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ ชนิด E10, E20 และ E85 ทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.14-4.19

รูปที่ 4.14 แสดงค่าการบวมตัวของยางผสมระหว่างยางเอ็นปีอาร์และยางเอชเอ็นปีอาร์ ที่สัดส่วน 50:50 ที่เติมผงฟริชพิเตตซิลิกาเป็นสารเติมแต่งรอง ภายหลังการแช่ในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E10, E20 และ E85 ที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 70 ชั่วโมง ตามลำดับ ผลการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (ก) พบว่า การเพิ่มปริมาณฟริชพิเตตซิลิกา ส่งผลให้วัสดุยางผสมสามารถต้านทานต่อการบวมตัวในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ทั้งสามชนิดเพิ่มขึ้น หรือมีการบวมตัวของยางผสมในน้ำมันแก๊สโซฮอล์มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจาก ปริมาณของเนื้อยางที่



(ก)

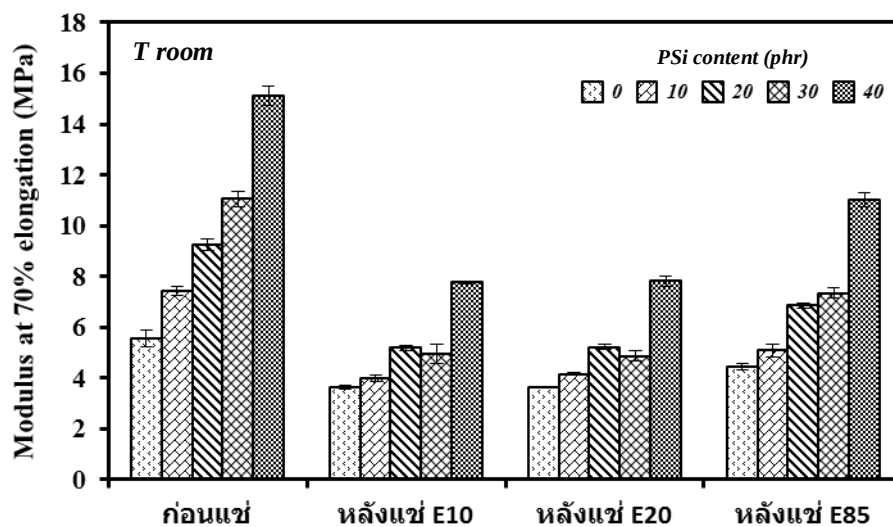


(ข)

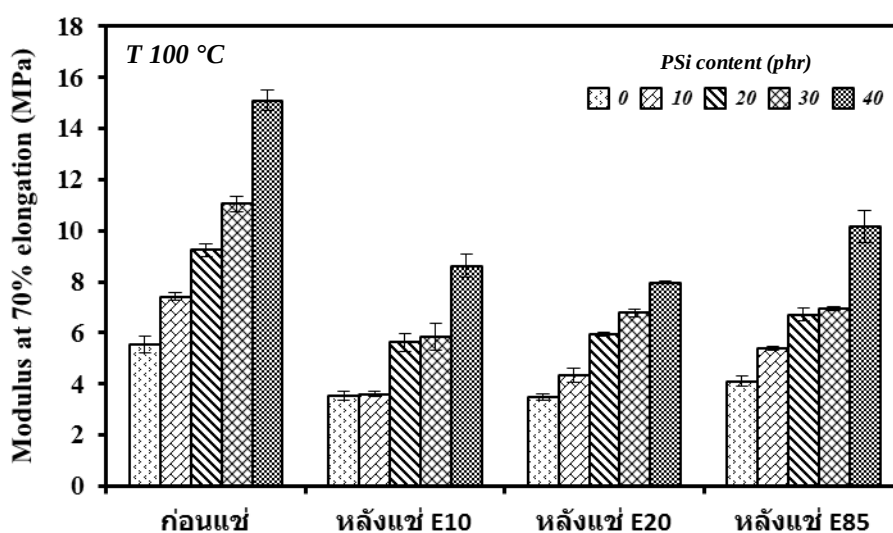
รูปที่ 4.14 การบวมตัวของยางผสม NBR:HNBR ที่สัดส่วน 50:50 ที่เติมผงฟริซิปิเตดซิลิกาเป็นสารเติมแต่งรอง ภายหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E10, E20 และ E85
(ก) ที่อุณหภูมิห้อง (ข) ที่อุณหภูมิ 100 °C

เป็นส่วนประกอบหลักลดลง หรือสัดส่วนการบวมตัวในเฟสยางลดลง โดยการบวมตัวเกิดขึ้นในเฟสเนื้อยางเท่านั้น ไม่เกิดขึ้นกับสารตัวเติมพรีซิพิตีเตชันซิลิกา ดังนั้น เมื่อเนื้อยางในระบบน้อยลงการบวมตัวจึงลดลงด้วย และการที่อนุภาคของผงพรีซิพิตีเตชันซิลิกามีการยึดเกาะกับเฟสยางที่ดี มีส่วนช่วยให้ยางมีความทนทานต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์ได้มากขึ้น [5] โดยวัสดุยางผสมมีเปอร์เซ็นต์การบวมตัวในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E85 ที่น้อยมาก เมื่อเทียบกับการบวมตัวในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E10 และ E20 เนื่องจาก ยางวัตถุดิบชนิดยางเอชเอ็นบีอาร์ที่ใช้ในงานวิจัยสามารถทนต่อตัวทำละลายเอทานอลได้เป็นอย่างดี [48] ซึ่งยางผสมที่มีการเติมสารตัวเติมพรีซิพิตีเตชันซิลิกา มีการบวมตัวในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ E10 และ E20 อยู่ในช่วงระหว่าง 17-22 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าการบวมตัวในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E85 ไม่เกิน 7 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการทดสอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (ข) พบว่า ชิ้นงานยางมีการบวมตัวเพิ่มขึ้น เนื่องจาก ที่อุณหภูมิสูง โมเลกุลของน้ำมันแก๊สโซฮอล์มีพลังงานในการแพร่เข้าไปให้โมเลกุลยางได้มากขึ้น

ในส่วนรูปที่ 4.15 แสดงค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 70 เปอร์เซ็นต์ ของยางผสมระหว่างยางเอชเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์ ที่สัดส่วน 50:50 ที่เติมผงพรีซิพิตีเตชันซิลิกาเป็นสารตัวเติมแต่งรอง ก่อนและหลังการแช่ในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ ชนิด E10, E20 และ E85 ที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 70 ชั่วโมง ตามลำดับ การทดสอบที่อุณหภูมิห้อง แสดงในรูปที่ 4.15 (ก) ผลการทดลองพบว่า ค่ามอดูลัสของยางผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณผงพรีซิพิตีเตชันซิลิกาเพิ่มขึ้น ทั้งก่อนและหลังการแช่ในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ทั้งสามชนิด เนื่องจากอนุภาคผงพรีซิพิตีเตชันซิลิกามีความแข็งแรง (Rigidity) มากกว่ายาง จึงส่งผลทำให้ค่ามอดูลัสของยางผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย [35] สอดคล้องกับค่าผลต่างแรงบิดที่เพิ่มขึ้น โดยหลังการแช่มีค่ามอดูลัสที่ต่ำกว่าก่อนแช่ เนื่องจาก โมเลกุลน้ำมันแก๊สโซฮอล์สามารถแทรกเข้าไปในชิ้นงานยาง ทำให้ความแข็งแรงพันธะระหว่างโมเลกุลยางลดลง ซึ่งยางผสมมีค่า มอดูลัสก่อนการแช่ในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ อยู่ในช่วงระหว่าง 5.5-15.1 MPa ส่วนในกรณีที่แช่ในน้ำมัน E10, E20 และ E85 พบว่าค่ามอดูลัสมีแนวโน้มลดลงทุกสภาวะ เนื่องจาก น้ำมันแก๊สโซฮอล์สามารถแทรกอยู่ในโมเลกุลของยาง ทำให้ความแข็งแรงพันธะระหว่างโมเลกุลยางลดลง ชิ้นงานยางจึงมีค่ามอดูลัสที่ลดลงด้วย โดยยางผสมมีค่ามอดูลัสภายหลังการแช่ในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ ในช่วงระหว่าง 3.6-11.0 MPa ในส่วนของการทดสอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.15 (ข) ผลการทดลองมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการทดสอบที่อุณหภูมิห้องซึ่งค่าที่ได้แตกต่างกันไม่มาก



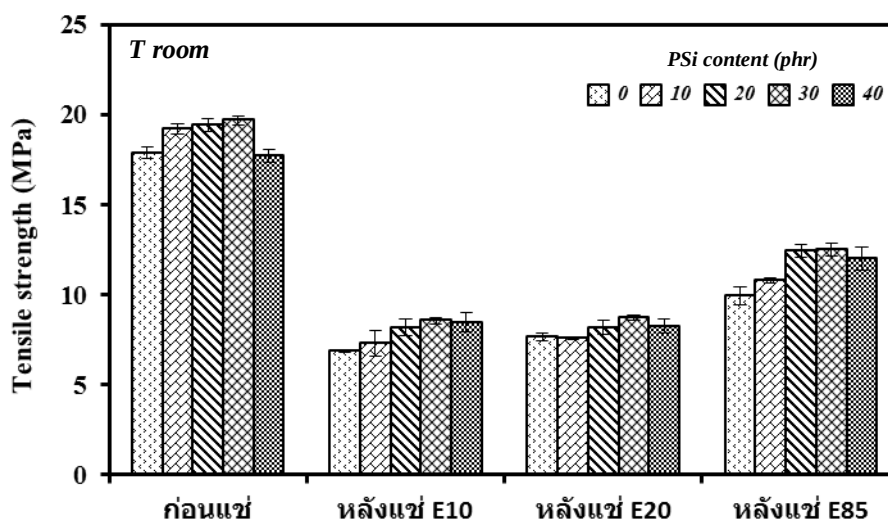
(ก)



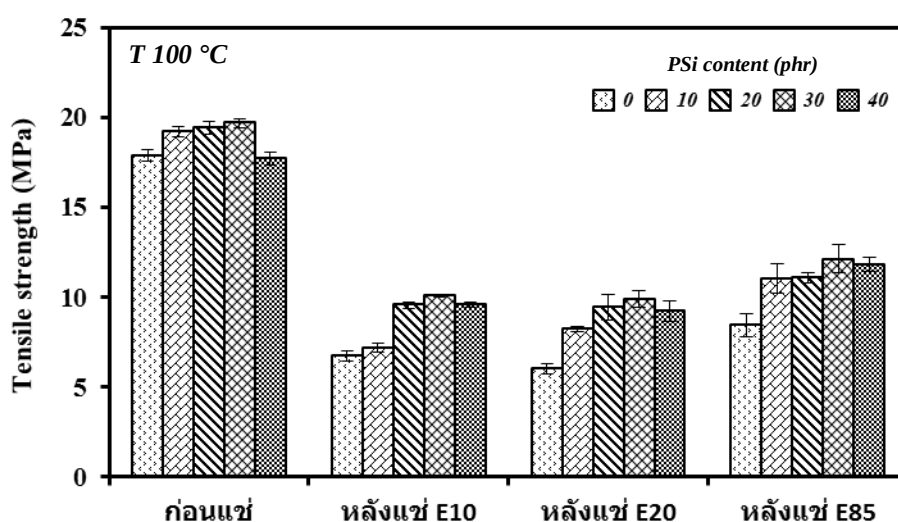
(ข)

รูปที่ 4.15 มอดุลัสที่ระยะยืด 70 เปอร์เซ็นต์ ของยางผสม NBR:HNBR ที่สัดส่วน 50:50 ที่เติมผงฟริชพิเตดซิลิกาเป็นสารเติมแต่งรอง ก่อนและหลังการแช่ในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ ชนิด E10, E20 และ E85 (ก) ที่อุณหภูมิห้อง (ข) ที่อุณหภูมิ 100 °C

สำหรับรูปที่ 4.16 แสดงความต้านแรงดึงของยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์ ที่สัดส่วน 50:50 ที่เติมผงฟริชพิเตดซิลิกาเป็นสารเติมแต่งรอง ก่อนและหลังการแช่ในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ ชนิด E10, E20 และ E85 ที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 70 ชั่วโมง ตามลำดับ การทดสอบที่อุณหภูมิห้องในรูปที่ 4.15 (ก) ผลการทดลองพบว่า เมื่อเติมปริมาณ



(ก)



(ข)

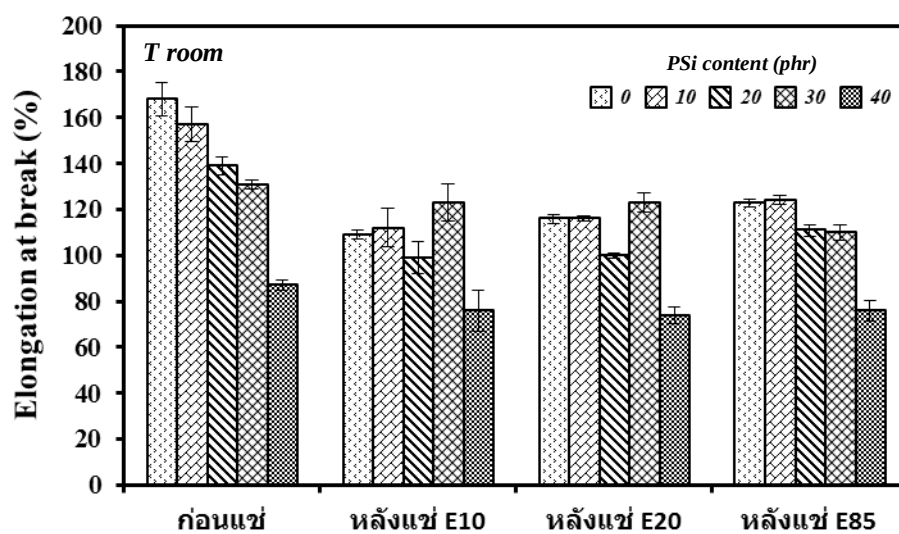
รูปที่ 4.16 ความต้านแรงดึงของยางผสม NBR:HNBR ที่สัดส่วน 50:50 ที่เติมผงฟริชพิเตดซิลิกาเป็นสารเติมแต่งรอง ก่อนและหลังการแช่ในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E10, E20 และ E85 (ก) ที่อุณหภูมิห้อง (ข) ที่อุณหภูมิ 100 °C

ผงฟริชพิเตดซิลิกาในยางผสมเพิ่มขึ้น ที่สัดส่วน 10-30 ส่วนในร้อยส่วนของยาง ส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงของยางผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคผงฟริชพิเตดซิลิกาสามารถเข้าไปเสริมแรงให้กับยาง [5, 49] และอนุภาคซิลิกามีการกระจายตัวในเฟสยางที่ดี ส่งผลให้เกิดการยึดเกาะที่ดีกับเฟสยาง แต่เมื่อเติมผงฟริชพิเตดซิลิกาที่ปริมาณมากกว่า 30 ส่วนในร้อยส่วนของยาง พบว่า ความ

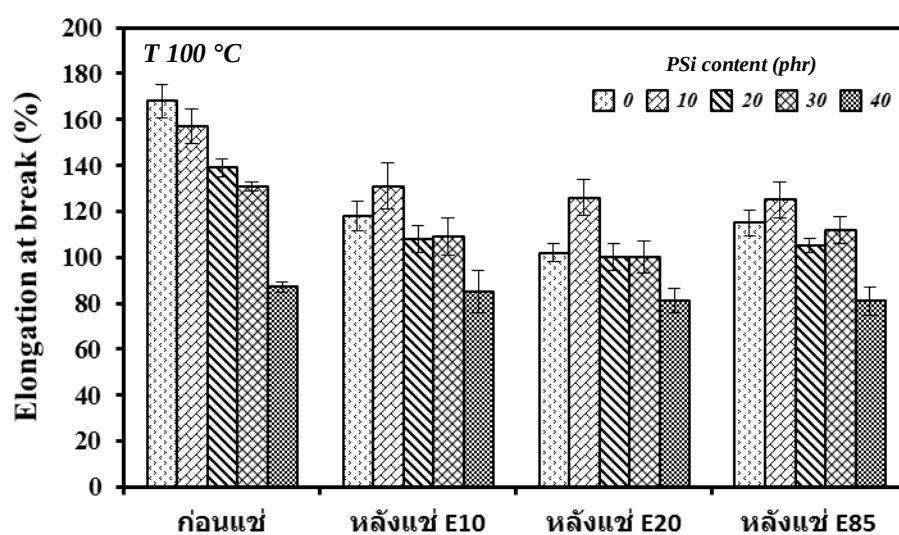
ต้านทานแรงดึงมีค่าลดลง เนื่องจาก อนุภาคของพรีซิพิตเตชันซิลิกาที่ปริมาณมาก ทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันเอง (Agglomerate) โดยยางผสมมีค่าความต้านทานแรงดึงก่อนการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอลล์ อยู่ในช่วงระหว่าง 17-20 MPa และมีค่าความต้านทานแรงดึงหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอลล์ อยู่ในช่วงระหว่าง 6-13 MPa ส่วนการทดสอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (ข) ความต้านทาน แรงดึงมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากการทดสอบที่อุณหภูมิห้องเพียงเล็กน้อย

ในส่วนรูปที่ 4.17 แสดงการยืดตัว ณ จุดขาด ของยางผสมระหว่างยางเอ็นปีอาร์และยางเอชเอ็นปีอาร์ ที่สัดส่วน 50:50 ที่เติมผงพรีซิพิตเตชันซิลิกาเป็นสารเติมแต่งรอง ก่อนและหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอลล์ ชนิด E10, E20 และ E85 ที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 70 ชั่วโมง ตามลำดับ ผลการทดสอบที่อุณหภูมิห้องแสดงในรูปที่ 4.17 (ก) พบว่า เมื่อปริมาณพรีซิพิตเตชันซิลิกาในยางผสมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการยืดตัวของยางมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากปริมาณเนื้อยางที่เป็นส่วนประกอบหลักลดลง ซึ่งยางผสมมีค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ก่อนการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอลล์ อยู่ในช่วงระหว่าง 80-170 เปอร์เซ็นต์ และยางผสมมีการยืดตัว ณ จุดขาด ภายหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอลล์ อยู่ในช่วง 70-130 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้การยืดตัวของยางผสมหลังแช่น้ำมันแก๊สโซฮอลล์มีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก น้ำมันแก๊สโซฮอลล์เข้าไปแทรกอยู่ในโมเลกุลของยาง ในส่วนผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ผลการทดลองมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง

จากรูปที่ 4.18 แสดงความต้านทานการฉีกขาดของยางผสมระหว่างยางเอ็นปีอาร์และยางเอชเอ็นปีอาร์ ที่สัดส่วน 50:50 ที่เติมผงพรีซิพิตเตชันซิลิกาเป็นสารเติมแต่งรอง ก่อนและหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอลล์ ชนิด E10, E20 และ E85 ที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 70 ชั่วโมง ตามลำดับ รูปที่ 4.18 (ก) ผลการทดลองพบว่า ก่อนแช่น้ำมันแก๊สโซฮอลล์ เมื่อเติมผงพรีซิพิตเตชันซิลิกาในยางผสมเพิ่มขึ้นถึงที่ปริมาณ 30 ส่วนในร้อยส่วนของยาง ส่งผลให้ความต้านทานแรงฉีกขาดของยางผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณพรีซิพิตเตชันซิลิกาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าสูงสุด 38 kN/m เนื่องจากอนุภาคผงพรีซิพิตเตชันซิลิกาสามารถเกิดการเสริมแรงให้กับเฟสยาง และเมื่อเพิ่มปริมาณพรีซิพิตเตชันซิลิกาที่ 40 ส่วนในร้อยส่วนของยาง พบว่า ความต้านทานแรงฉีกขาดลดลง เนื่องจาก เกิดการเกาะกลุ่มกันของสารตัวเติมพรีซิพิตเตชันซิลิกา ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงสูงสุดในรูปที่ 4.16 โดยยางผสมมีค่าความต้านทานการฉีกขาดภายหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอลล์ อยู่ในช่วงระหว่าง 4-13 kN/m ในส่วนการทดสอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แสดงในรูปที่ 4.18 (ข) พบว่า ค่าความต้านทานแรงฉีกขาดของยางผสมมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการทดสอบที่สภาวะอุณหภูมิห้อง

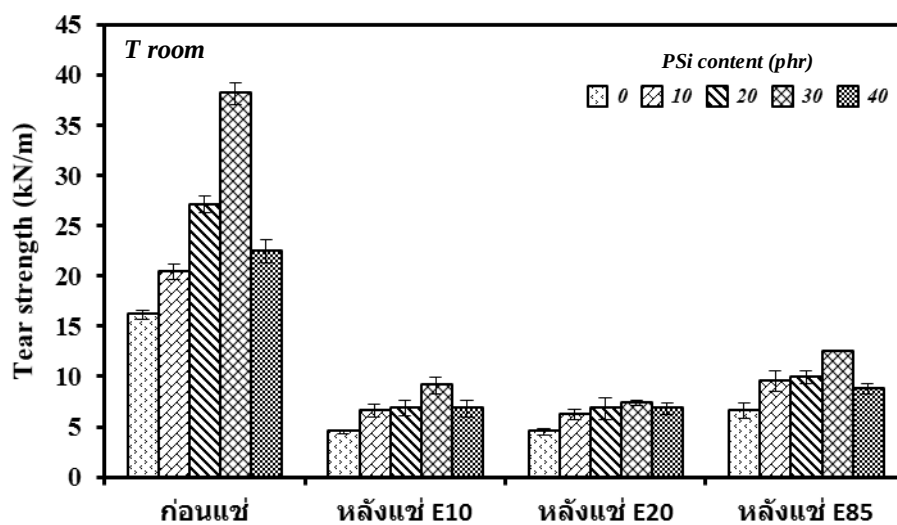


(ก)

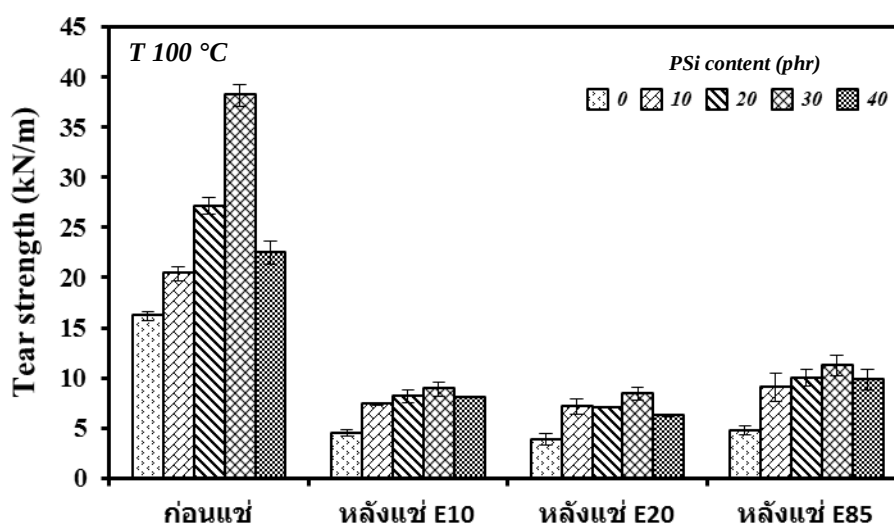


(ข)

รูปที่ 4.17 การยืดตัว ณ จุดขาด ของยางผสม NBR:HNBR ที่สัดส่วน 50:50 ที่เติมผงฟริชพิเตดซิลิกา เป็นสารเติมแต่งรอง ก่อนและหลังการแช่ในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E10, E20 และ E85 (ก) ที่อุณหภูมิห้อง (ข) ที่อุณหภูมิ 100 °C



(ก)

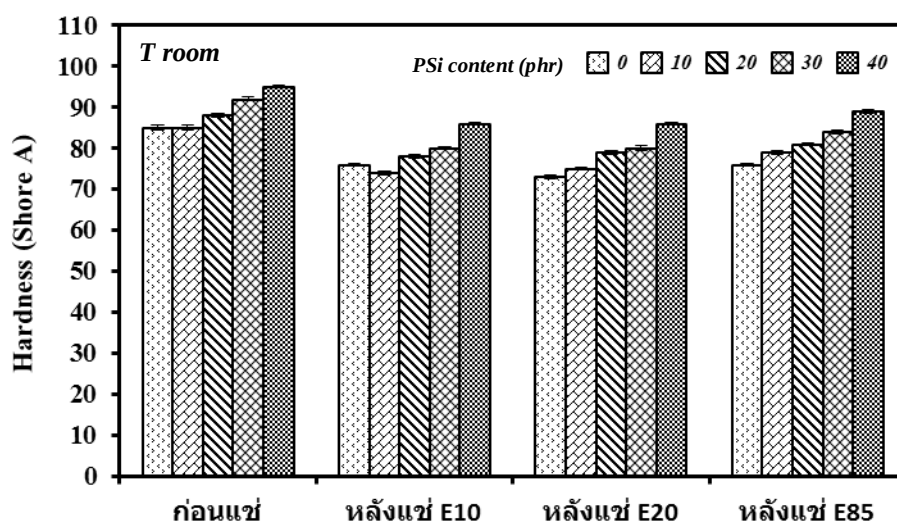


(ข)

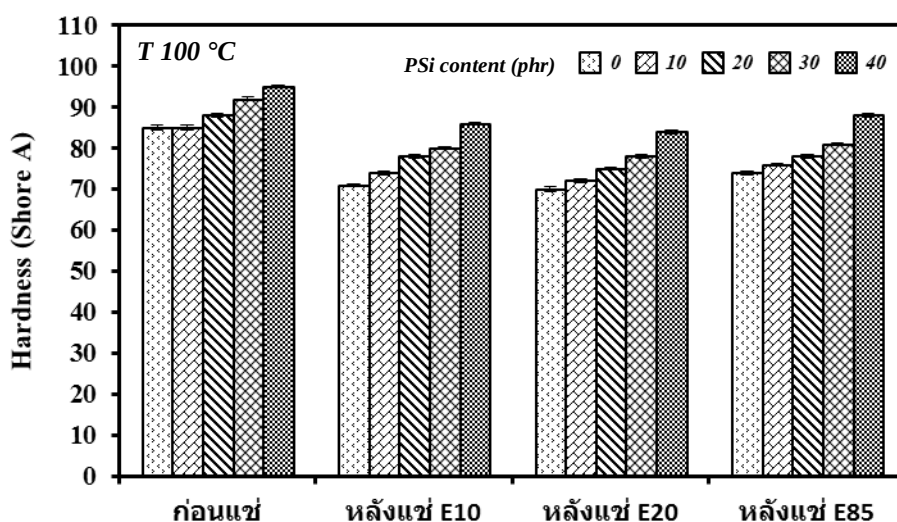
รูปที่ 4.18 ความต้านการฉีกขาดของยางผสม NBR:HNBR ที่สัดส่วน 50:50 ที่เติมผงฟริซิปิเตตซิลิกา เป็นสารเติมแต่งรอง ก่อนและหลังการแช่ในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E10, E20 และ E85 (ก) ที่อุณหภูมิห้อง (ข) ที่อุณหภูมิ 100 °C

สำหรับรูปที่ 4.19 (ก-ข) แสดงความแข็งแรงที่ผิวของยางผสมระหว่างยางเอ็นปีอาร์และยางเอชเอ็นปีอาร์ ที่สัดส่วน 50:50 ที่เติมผงฟริซิปิเตตซิลิกาเป็นสารเติมแต่งรอง ก่อนและหลังการแช่ในน้ำมัน แก๊สโซฮอล์ ชนิด E10, E20 และ E85 ที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 70 ชั่วโมง ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณฟริซิปิเตตซิลิกาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงที่ผิว

มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจาก อนุภาคผงพรีซิพิเตชันซิลิกาที่มีความแข็งแรงแรงมากกว่าเนื้อยาง ซึ่ง สอดคล้องกับค่ามอดุลัสที่เพิ่มขึ้น โดยยางผสมมีค่าความแข็งที่ผิวก่อนการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอลล์ อยู่ ในช่วงระหว่าง 85-95 Shore A และมีค่าความแข็งที่ผิวภายหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอลล์ลดลง เล็กน้อย โดยมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 70-90 Shore A ในส่วนการทดสอบยางผสมที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส พบว่า ชิ้นงานยางผสมให้ค่าความแข็งที่แตกต่างกับการทดสอบที่อุณหภูมิห้องเพียงเล็กน้อย



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.19 ความแข็งที่ผิวของยางผสม NBR:HNBR ที่สัดส่วน 50:50 ที่เติมผงพรีซิพิเตชันซิลิกาเป็น สารเติมแต่งรอง ก่อนและหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอลล์ชนิด E10, E20 และ E85
(ก) ที่อุณหภูมิห้อง (ข) ที่อุณหภูมิ 100 °C

4.3.3 การตรวจสอบสมบัติด้านยุบตัวถาวรหลังได้รับแรงอัด และการต้านทานต่อการขาดของยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์กับยางเอชเอ็นบีอาร์

การยุบตัวถาวรหลังได้รับแรงอัด และปริมาตรที่สูญเสียของยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์ที่สัดส่วน 50:50 ที่เติมผงเขม่าดำเป็นสารเติมแต่งหลัก และผงฟริชพิเตดซิลิกาเป็นสารเติมแต่งรอง โดยปรับเปลี่ยนปริมาณฟริชพิเตดซิลิกาที่ 0-40 ส่วนในร้อยส่วนของยาง แสดงในตารางที่ 4.8 ผลการทดลองพบว่า เมื่อฟริชพิเตดซิลิกาในยางผสมเพิ่มขึ้นที่ปริมาณ 10 ส่วนในร้อยส่วนของยาง ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยุบตัวถาวรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหรือวัสดุมีการคืนตัวกลับที่ลดลง เนื่องจากสัดส่วนปริมาณเนื้อยางที่ลดลง แสดงสมบัติความเป็นอีลาสติกของยางลดลงด้วย [49, 50] แต่ในกรณีเมื่อเติมผงฟริชพิเตดซิลิกาในยางผสมที่ปริมาณมากกว่า 10 ส่วนในร้อยส่วนของยางพบว่า ยางผสมมีการยุบตัวถาวรเมื่อได้รับแรงอัดลดลง เนื่องจาก อนุภาคผงฟริชพิเตดซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไฮดรอกไซด์ สามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางกับสายโซ่โมเลกุลของยาง ส่งผลให้ยางผสมมีปริมาณพันธะข้ามเพิ่มขึ้น ชิ้นงานยางจึงมีการคืนกลับตัวที่ดีขึ้นด้วย โดยยางผสมมีค่าการยุบตัวอยู่ในช่วงระหว่าง 6-10 เปอร์เซ็นต์ และเป็นค่าที่น้อยมาก ที่บ่งบอกถึงสมบัติการคืนตัวที่ดีของยางผสม ซึ่งผ่านเกณฑ์จากการทดสอบโอริงทางการค้าที่กำหนดไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.8 การยุบตัวถาวรหลังได้รับแรงอัด และปริมาตรที่สูญเสียของยางผสม NBR:HNBR ที่สัดส่วน 50:50 ที่เติมผงฟริชพิเตดซิลิกาเป็นสารเติมแต่งรอง

Precipitated silica content (phr)	Compression set (%)	Volume loss (mm ³)
0	6.6 ± 0.8	96.5 ± 7.6
10	10.2 ± 0.7	101.4 ± 8.1
20	8.0 ± 0.4	107.3 ± 1.8
30	8.1 ± 0.3	106.5 ± 5.2
40	7.7 ± 0.2	138.8 ± 9.2

ในส่วนสมบัติความต้านทานต่อการขาด พบว่า เมื่อปริมาณฟริชพิเตดซิลิกา (ปริมาณ 10-30 phr) ในยางผสมเพิ่มขึ้น ไม่ส่งผลต่อการสูญเสียเนื้อวัสดุยาง ซึ่งยางผสมมีค่าการสูญเสียเนื้อวัสดุอยู่ในช่วงระหว่าง 96-107 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ทั้งนี้เนื่องจาก อนุภาคผงฟริชพิเตดซิลิกามีการกระจายตัวที่ดีในเฟสยาง และมีการยึดเกาะระหว่างเฟสยางกับสารตัวเติม (Rubber-Filler interaction) ที่ดี แต่เมื่อเพิ่มปริมาณผงฟริชพิเตดซิลิกาที่มากกว่า 30 ส่วนในร้อยส่วนของยาง พบว่า ค่าการสูญเสียเนื้อวัสดุจาก

การขัดถูมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก เกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคพรีซิพิเตชันซิลิกา ส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมด้วยตัวเอง (Filler-filler interaction) มากขึ้น [51, 52] ทำให้การเสริมของอนุภาคพรีซิพิเตชันซิลิกาลดลงด้วย ซึ่งสอดคล้องกับค่าความต้านทานแรงดึงที่มีความแข็งแรงลดลง ดังนั้น ชิ้นงานยางจึงเกิดการนิกขาดและหลุดออกได้ง่ายขึ้น และสารตัวเติมพรีซิพิเตชันซิลิกาเกิดการหลุดออกเป็นกลุ่มก้อนเมื่อได้รับแรงขัดถู และนอกจากนี้ เป็นผลจากการเกิดกลไกการสึกหรอแบบขัดถูชนิด 3 ตัว (Three-body abrasive wear) ซึ่งเกิดจากการหลุดออกของกลุ่มก้อนพรีซิพิเตชันซิลิกานขนาดใหญ่ (Agglomerate) ที่มีอันตรกิริยากับยางต่ำกว่าอนุภาคพรีซิพิเตชันซิลิกานขนาดเล็กที่กระจายตัวได้ดีในเฟสยาง โดยอนุภาคพรีซิพิเตชันซิลิกาที่หลุดออกสามารถไปเพิ่มการขัดสีที่ผิวชิ้นงานให้เนื้อยางหลุดออกได้มากยิ่งขึ้น [52]

จากผลการดำเนินงานวิจัยในส่วนนี้ ที่ศึกษาปริมาณพรีซิพิเตชันซิลิกาที่เติมในยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์กับยางเอชเอ็นบีอาร์ ที่สัดส่วน 50:50 ที่มีต่อสมบัติการไหล สมบัติการบ่มสุก สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และการทนต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์ทางการค้า พบว่า การเติมปริมาณพรีซิพิเตชันซิลิกาที่ 30 ส่วนในร้อยส่วนของยาง ให้สมบัติเชิงกลโดยรวมเพิ่มขึ้น และความทนทานต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์ที่เหมาะสม ดังนั้น จึงเลือกยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์ที่สัดส่วน 50:50 ที่มีสารตัวเติมพรีซิพิเตชันซิลิกามีปริมาณ 30 ส่วนในร้อยส่วนของยาง ทำการทดสอบเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลกับชิ้นงานโอริงทางการค้า

4.4 การศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และการทนต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์ ของยางซีลจากงานวิจัยกับผลิตภัณฑ์ยางซีลทางการค้า

การศึกษสมบัติของยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์กับยางเอชเอ็นบีอาร์ที่สัดส่วน 50:50 ที่เติมและไม่เติมสารตัวเติมพรีซิพิเตชันซิลิกา โดยขึ้นรูปรูปแบบลักษณะของชิ้นงานโอริงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก เท่ากับ 102.9 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 96.7 มิลลิเมตร และความหนา 3.1 มิลลิเมตร เพื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และการทนต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์ ชนิด E10, E20 และ E85 เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์โอริงยางเอ็นบีอาร์ทางการค้าจากบริษัท เพาเวอร์ ซีล จำกัด และโอริงยางเอชเอ็นบีอาร์ทางการค้า จากบริษัท ท็อปพาร์ท เทคดิง (ไทยแลนด์) จำกัด

4.4.1 การเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพโอริงงานวิจัยกับผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้า

ตารางที่ 4.9 ลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์โอริงก่อนและหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอลล์

การตรวจสอบ	สภาวะ	NBR:HNBR 50:50	NBR:HNBR :PSi-30	NBR ทางการค้า	HNBR ทางการค้า
น้ำหนัก (กรัม)	ก่อนแช่	2.78	3.19	3.13	2.79
	แช่ E10	+0.47	+0.46	+0.67	+0.77
	แช่ E20	+0.48	+0.46	+0.69	+0.78
	แช่ E85	+0.15	+0.16	+0.28	+0.25
ลักษณะผิว	ก่อนแช่	เรียบ/มันเงา		เรียบ/มันเงา	
	แช่ E10	เรียบ/ผิวด้าน		เรียบ/ผิวด้าน	
	แช่ E20	เรียบ/ผิวด้าน		เรียบ/ผิวด้าน	
	แช่ E85	เรียบ/มันเงา		เรียบ/มันเงา	
สีผลิตภัณฑ์	ก่อนแช่	ดำ		ดำ	
	แช่ E10	ไม่เปลี่ยนแปลง		ไม่เปลี่ยนแปลง	
	แช่ E20	ไม่เปลี่ยนแปลง		ไม่เปลี่ยนแปลง	
	แช่ E85	ไม่เปลี่ยนแปลง		ไม่เปลี่ยนแปลง	
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ด้านนอก (มิลลิเมตร)	ก่อนแช่	102.9	102.9	101.2	100.6
	แช่ E10	+2.0	+2.9	+7.8	+10.4
	แช่ E20	+0.9	+3.0	+8.1	+10.4
	แช่ E85	ไม่เปลี่ยนแปลง	ไม่เปลี่ยนแปลง	+2.5	+4.4
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ด้านใน (มิลลิเมตร)	ก่อนแช่	96.7	96.7	95	94.4
	แช่ E10	+2.0	+2.6	+7.5	+10.1
	แช่ E20	+0.8	+2.7	+7.9	+10.1
	แช่ E85	ไม่เปลี่ยนแปลง	ไม่เปลี่ยนแปลง	+2.4	+4.4
ขนาด ความหนา (W) (มิลลิเมตร)	ก่อนแช่	3.1	3.1	3.1	3.1
	แช่ E10	+0.1	+0.3	+0.2	+0.3
	แช่ E20	+0.1	+0.3	+0.2	+0.3
	แช่ E85	ไม่เปลี่ยนแปลง	+0.2	+0.1	+0.1

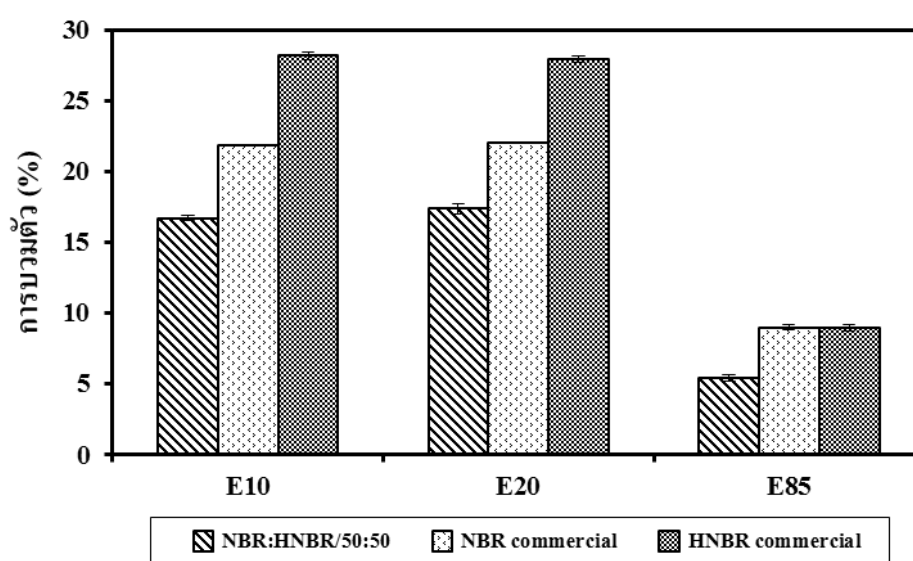
จากตารางที่ 4.9 แสดงลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์โอริงจากงานวิจัย ของยางผสมระหว่างยาง เอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์ ที่สัดส่วน 50:50 (NBR:HNBR) และยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์และ ยางเอชเอ็นบีอาร์ ที่มีสารตัวเติมฟริชพิเตตซิลิกา 30 ส่วนในร้อยส่วนของยาง (NBR:HNBR:PSi-30) เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้าชนิดยางเอ็นบีอาร์ และโอริงยางเอชเอ็นบีอาร์ ก่อนและหลัง การแช่ในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E10, E20 และ E85 ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 70 ชั่วโมง พบว่า โอริง ที่ได้จากงานวิจัยมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพทางด้านลักษณะผิว และสีของผลิตภัณฑ์ที่ ใกล้เคียงกับโอริงทางการค้า นอกจากนี้โอริงจากงานวิจัยยังมีการเปลี่ยนแปลงด้านขนาด และน้ำหนัก ภายหลังการแช่ที่น้อยกว่าโอริงทางการค้า โดยผลิตภัณฑ์โอริงมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพ ในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ E85 ที่น้อยมาก เมื่อเทียบกับการแช่ในน้ำมันชนิด E10 และ E20

4.4.2 การเปรียบเทียบโอริงจากงานวิจัย ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณยางเอ็นบีอาร์และยาง เอชเอ็นบีอาร์ กับผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้า

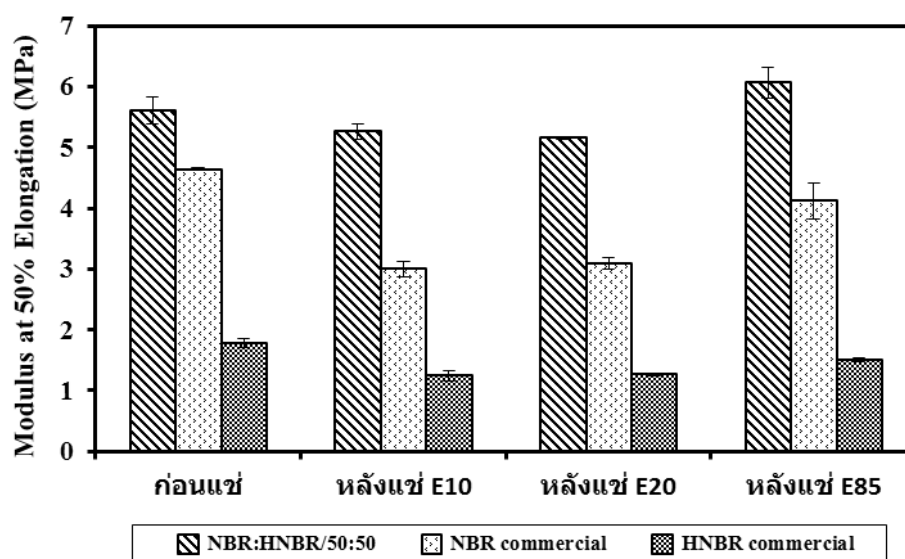
จากการทดสอบสมบัติด้านต่างๆ ตามมาตรฐานการทดสอบ ของวัสดุยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์ และยางเอชเอ็นบีอาร์ที่สัดส่วนต่างๆ พบว่ายางผสมแต่ละสูตรมีสมบัติเด่นเฉพาะที่ต่างกัน ดังนั้น จึงเลือกสูตรยางผสมที่มีสมบัติเด่นในแต่ละการทดสอบ ขึ้นรูปเป็นชิ้นงานในรูปแบบผลิตภัณฑ์โอริง เพื่อทำการทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และการทนต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์ ของโอริง งานวิจัยจากยางผสม เปรียบเทียบกับเกณฑ์การทดสอบของผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้า ชนิด ยางเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์ ตามที่ได้ทดสอบในงานวิจัยส่วนที่ 4.1

จากรูปที่ 4.20 แสดงค่าการบวมตัวของผลิตภัณฑ์โอริงของยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์และ ยางเอชเอ็นบีอาร์ ที่สัดส่วน 50:50 จากงานวิจัยเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้าชนิด ยางเอ็นบีอาร์ และยางเอชเอ็นบีอาร์ ภายหลังการแช่ในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E10, E20 และ E85 ที่ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 70 ชั่วโมง ผลการทดสอบพบว่า โอริงจากงานวิจัย มีความสามารถในการ ด้านทนต่อการบวมตัวในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ทั้งสามชนิด ที่ดีกว่าผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้าทั้งสอง ชนิด ทั้งนี้เนื่องจาก ชิ้นงานโอริงยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์ มีค่าการละลายที่ แตกต่างกับตัวทำละลายน้ำมันเบนซินหรือแก๊สโซลีน และเอทานอล ทำให้มีการบวมตัวน้อยกว่าโอริง ทางการค้า นอกจากนี้ยางเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์ที่เลือกนำมาใช้ในงานวิจัยเป็นยางที่มีปริมาณ อะคริไลไนไตรล์สูง (ACN 40%) กว่ายางโอริงทางการค้า โดยยางโอริงทางการค้าชนิดยางเอ็นบีอาร์ และยางเอชเอ็นบีอาร์ มีปริมาณอะคริไลไนไตรล์ประมาณ 33 เปอร์เซ็นต์ [48, 53] ซึ่งปริมาณของ อะคริไลไนไตรล์ช่วยให้ยางมีความแข็งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ยางผสมที่ได้มีความต้านทานต่อการบวมตัว

ในตัวทำละลายได้ดี [2] โดยยางเกรดที่มีปริมาณอะคริโลไนไตรล์สูงมีความเป็นผลึกมากกว่ายางเกรดที่มีปริมาณอะคริโลไนไตรล์ต่ำ [36] ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำมันแก๊สโซฮอล์สามารถแทรกซึมเข้าไปในชิ้นงานยางโอริงจากงานวิจัยได้ยากกว่าโอริงทางการค้า และการมีปริมาณอะคริโลไนไตรล์สูงยังแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่ไซยาไนด์ (Cyanide group; -CN) ในโครงสร้างโมเลกุลยางที่สูงด้วย ซึ่งหมู่ไซยาไนด์เป็นหมู่ข้างเคียงของสายโซ่โมเลกุลยางที่มีสภาพไฟฟ้าลบ (Electronegative side-group) สูงทำให้เกิดพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนและไนโตรเจน ($C\equiv N$) ที่แข็งแรงมาก ส่งผลให้ยางเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์ที่มีปริมาณอะคริโลไนไตรล์สูง มีความต้านทานต่อตัวทำละลายเพิ่มขึ้นด้วย [20] นอกจากนี้พบว่า ทั้งโอริงจากงานวิจัยและโอริงทางการค้ามีเปอร์เซ็นต์การบวมตัวในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ E85 ที่ต่ำมาก เมื่อเทียบกับการแช่ในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E10 และ E20 เนื่องจากยางเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์มีค่าการละลาย ที่แตกต่างกับตัวทำละลายเอทานอลมากกว่าน้ำมันเบนซิน ส่งผลให้ยางโอริงสามารถทนทานต่อการบวมตัวในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ E85 ที่มีปริมาณเอทานอลสูงๆ ได้ดี



รูปที่ 4.20 การบวมตัวของโอริงจากงานวิจัย เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้า หลังการแช่ในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E10, E20 และ E85

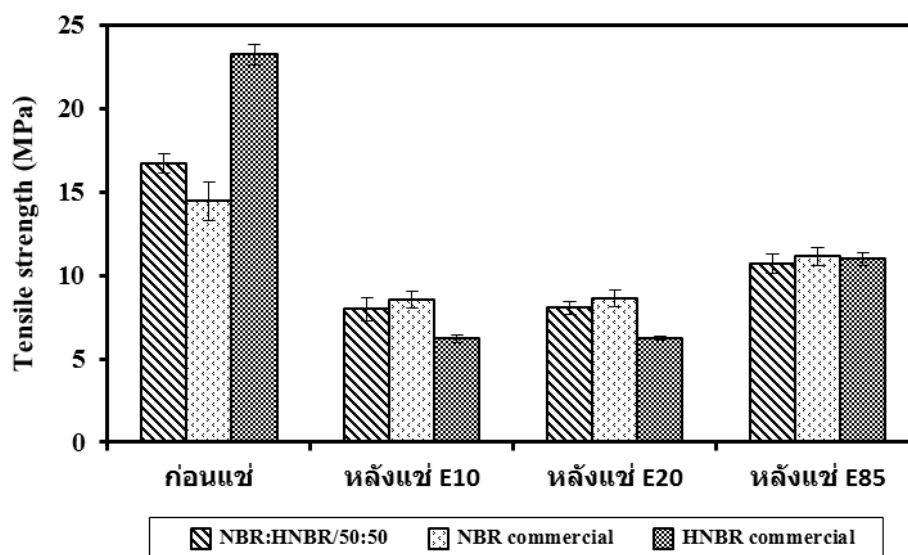


รูปที่ 4.21 โมดูลัสที่ระยะยืด 50 เปอร์เซ็นต์ ของโอริงจากงานวิจัย เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้า ก่อนและหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E10, E20 และ E85

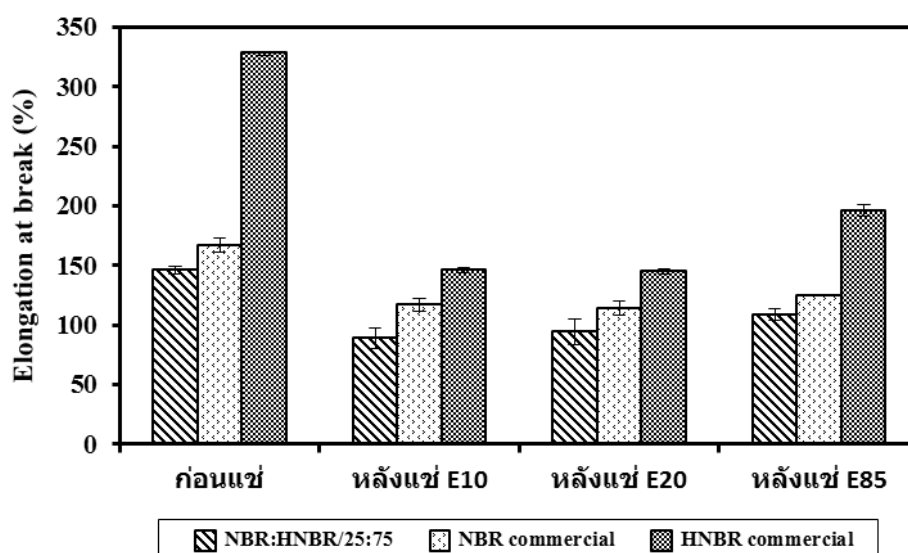
ส่วนรูปที่ 4.21 แสดงค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 50 เปอร์เซ็นต์ ของโอริงของยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์ ที่สัดส่วน 50:50 จากงานวิจัยเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้าชนิดยางเอ็นบีอาร์ และยางเอชเอ็นบีอาร์ ก่อนและหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E10, E20 และ E85 ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 70 ชั่วโมง พบว่า ผลิตภัณฑ์โอริงจากงานวิจัยมีค่าโมดูลัสที่สูงกว่าผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้าทั้งสองชนิด ทั้งก่อนแช่และภายหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิดต่างๆ เนื่องจาก ยางเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์ที่ผลิตเป็นชิ้นงาน โอริงในงานวิจัย มีปริมาณอะคริโลไนไตรล์ที่สูงกว่าผลิตภัณฑ์ยางโอริงทางการค้าทั้งสองชนิด ส่งผลให้ยางโอริงจากงานวิจัยมีสมบัติความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

สำหรับรูปที่ 4.22 แสดงค่าความต้านแรงดึงสูงสุดของโอริงของยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์ ที่สัดส่วน 50:50 จากงานวิจัยเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้าชนิดยางเอ็นบีอาร์ และโอริงยางเอชเอ็นบีอาร์ ก่อนและหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E10, E20 และ E85 ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 70 ชั่วโมง ผลการทดสอบพบว่า โอริงจากงานวิจัยให้ค่าความต้านทานแรงดึง อยู่ระหว่างผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้าชนิดยางเอ็นบีอาร์และเอชเอ็นบีอาร์ ทั้งก่อนแช่และภายหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ โดยที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงกว่าโอริงยางเอ็นบีอาร์ทางการค้า แต่มีค่าต่ำกว่าโอริงยางเอชเอ็นบีอาร์ทางการค้า เนื่องจาก ยางเอชเอ็นบีอาร์มีปริมาณพันธะเดี่ยวอยู่บนสายโซ่หลักของโมเลกุลมากกว่ายางเอ็นบีอาร์ ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของยางเอชเอ็นบีอาร์สามารถเคลื่อนไหว (Flexible) ที่เหนียวต่อการเกิดผลึกได้เมื่อถูกดึงยืด (Strain-

induced crystallization) ได้ดีกว่ายางเอ็นบีอาร์ ทำให้ยางเอชเอ็นบีอาร์มีความแข็งแรงสูง ดังนั้น เมื่อนำยางทั้งสองชนิดผสมกัน ยางผสมที่ได้จึงมีค่าความต้านทานแรงดึงอยู่ระหว่างสมบัติของยางเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์



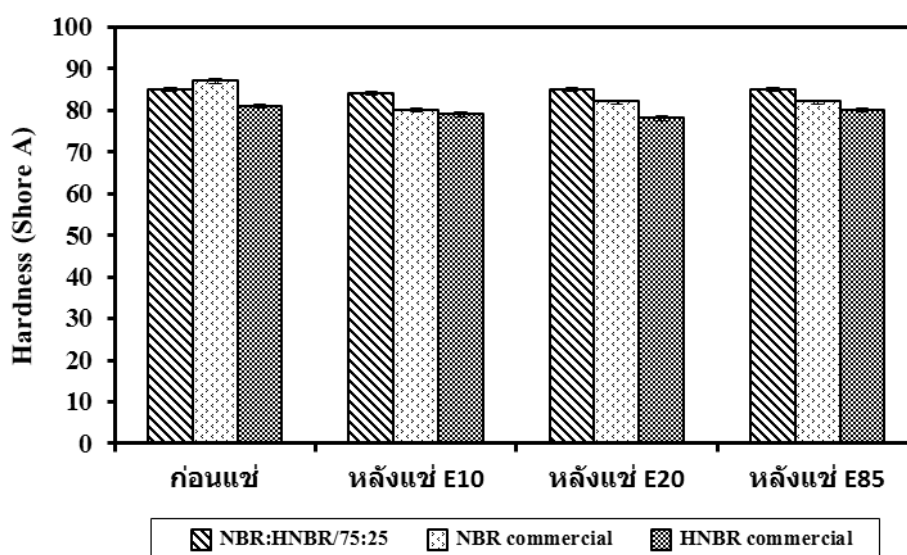
รูปที่ 4.22 ความต้านแรงดึงสูงสุดของโอริงจากงานวิจัย เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้า ก่อนและหลังการแช่ในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E10, E20 และ E85



รูปที่ 4.23 การยืดตัว ณ จุดขาด ของโอริงจากงานวิจัย เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้า ก่อนและหลังการแช่ในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E10, E20 และ E85

ส่วนรูปที่ 4.23 แสดงการยืดตัว ณ จุดขาด ของโอริงของยางผสมระหว่างยางเอ็นปีอาร์และยางเอชเอ็นปีอาร์ ที่สัดส่วน 25:75 จากงานวิจัยเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้าชนิดยางเอ็นปีอาร์และยางเอชเอ็นปีอาร์ ก่อนและหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E10, E20 และ E85 ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 70 ชั่วโมง พบว่า โอริงจากงานวิจัยมีการยืดตัว ณ จุดขาด ที่ต่ำกว่าผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้าทั้งสองชนิด ทั้งก่อนแช่และภายหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิดต่างๆ ทั้งนี้เนื่องจาก ยางโอริงจากงานวิจัยมีปริมาณอะคริโลไนไตรล์ในปริมาณที่สูงกว่ายางโอริงทางการค้า ซึ่งปริมาณของอะคริโลไนไตรล์เป็นส่วนที่เพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรงให้กับยาง ส่งผลให้ยางโอริงจากงานวิจัยมีการยืดตัวได้น้อยกว่ายางโอริงทางการค้าที่มีปริมาณอะคริโลไนไตรล์ที่ต่ำกว่า

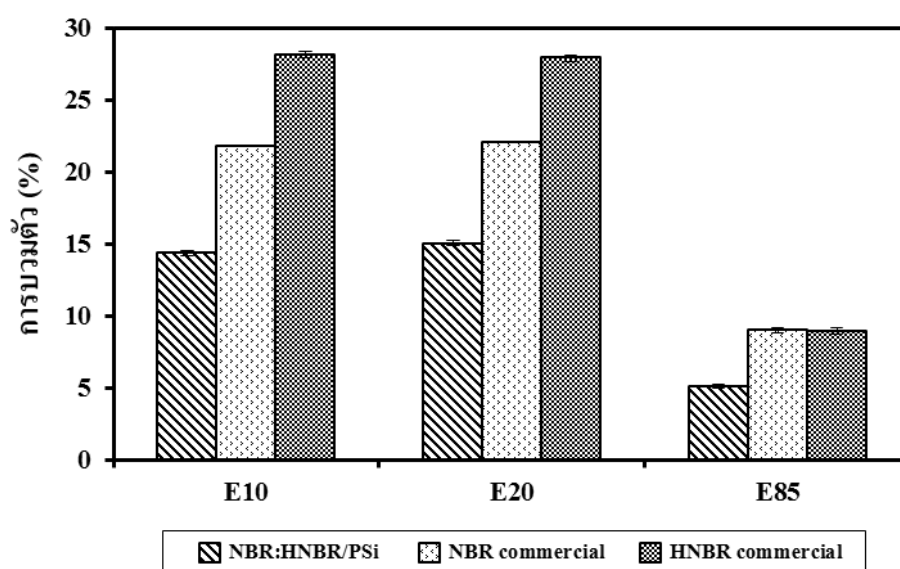
สำหรับรูปที่ 4.24 แสดงความแข็งที่ผิวของโอริงของยางผสมระหว่างยางเอ็นปีอาร์และยางเอชเอ็นปีอาร์ ที่สัดส่วน 75:25 จากงานวิจัยเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้าชนิดโอริงยางเอ็นปีอาร์ และโอริงยางเอชเอ็นปีอาร์ ก่อนและหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E10, E20 และ E85 ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 70 ชั่วโมง ผลการทดสอบพบว่า ภายหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิดต่างๆ โอริงจากงานวิจัยให้ค่าความแข็งที่ผิวสูงกว่าผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้าทั้งสองชนิด โดยมีค่าความแข็งในช่วงระหว่าง 84-85 Shore A



รูปที่ 4.24 ความแข็งที่ผิวของโอริงจากงานวิจัย เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้า ก่อนและหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E10, E20 และ E85

4.4.3 การเปรียบเทียบโอริงจากงานวิจัย ที่มีสารตัวเติมพรีซิพิเตตซิลิกา กับผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้า

จากผลการดำเนินงานวิจัยในส่วนที่ 4.2 และ 4.3 ได้ทำการเลือกยางผสมระหว่างยางเอ็นปีอาร์และยางเอชเอ็นปีอาร์ที่สัดส่วน 50:50 และมีสารตัวเติมพรีซิพิเตตซิลิกาที่ปริมาณ 30 ส่วนในร้อยส่วนของยาง ที่เป็นสูตรยางที่มีสมบัติเชิงกลโดยรวม และการทนต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์ที่เหมาะสม มาทำการขึ้นรูปชิ้นงานในรูปแบบโอริง เพื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้าชนิดยางเอ็นปีอาร์และยางเอชเอ็นปีอาร์ ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.25-4.29

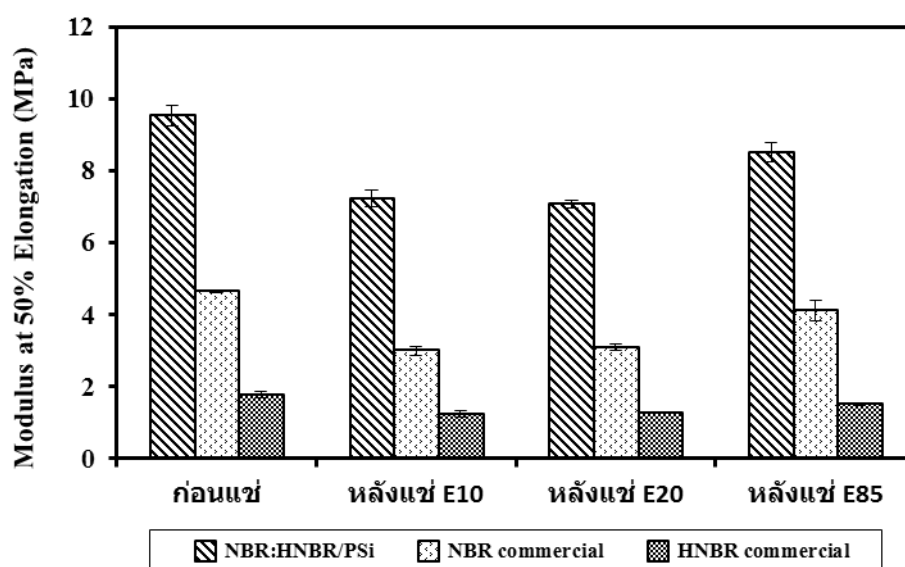


รูปที่ 4.25 การบวมตัวของโอริงจากงานวิจัย ที่มีสารตัวเติมพรีซิพิเตตซิลิกา เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้า ภายหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E10, E20 และ E85

จากรูปที่ 4.25 แสดงค่าการบวมตัวของโอริงของยางผสมระหว่างยางเอ็นปีอาร์และยางเอชเอ็นปีอาร์ ที่สัดส่วน 50:50 ที่มีสารตัวเติมพรีซิพิเตตซิลิกาปริมาณ 30 ส่วนในร้อยส่วนของยาง จากงานวิจัย เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้าชนิดยางเอ็นปีอาร์ และยางเอชเอ็นปีอาร์ ภายหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E10, E20 และ E85 ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 70 ชั่วโมง พบว่า ผลิตภัณฑ์โอริงยางผสมจากงานวิจัยมีเปอร์เซ็นต์การบวมตัวในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ น้อยกว่าผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้าทั้งสองชนิด หรือกล่าวได้ว่า โอริงจากงานวิจัยมีความสามารถในการต้านทานต่อการบวมตัวในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ทั้งสามชนิดได้ดีกว่าโอริงทางการค้า เนื่องจาก ยางผสมระหว่างยางเอ็นปีอาร์และยางเอชเอ็นปีอาร์จากงานวิจัยมีค่าการละลายแตกต่างกับตัวทำละลายแก๊สโซฮอล์และเอทานอลมากกว่า

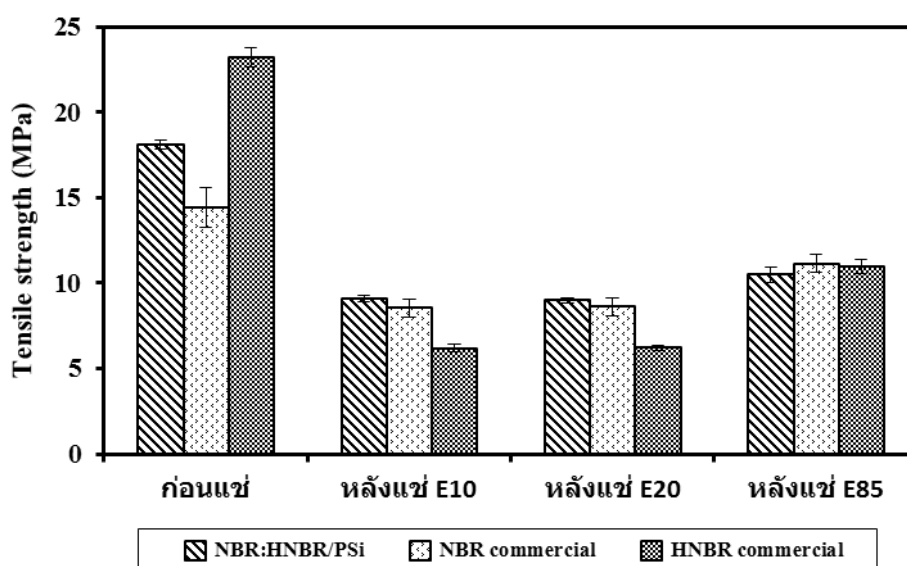
ยางโอรืงทางการค้าชนิดเตี๋ยๆ ของยางเอนปีอาร์และยางเอชเอนปีอาร์ นอกจากนี้มีการเติมสารตัวเติมฟริชปีเตดซิลิกาในยางผสม จึงช่วยทำให้สัดส่วนการบวมตัวในเฟสยางลดลง

ส่วนรูปที่ 4.26 แสดงค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 50 เปอร์เซนต์ ของโอรืงของยางผสมระหว่างยางเอนปีอาร์และยางเอชเอนปีอาร์ ที่สัดส่วน 50:50 ที่มีสารตัวเติมฟริชปีเตดซิลิกาปริมาณ 30 ส่วนในร้อยส่วนของยาง จากงานวิจัย เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์โอรืงทางการค้าชนิดยางเอนปีอาร์ และยางเอชเอนปีอาร์ ก่อนและหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอลล์ชนิด E10, E20 และ E85 ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 70 ชั่วโมง ผลการทดสอบพบว่า โอรืงจากงานวิจัยให้ค่ามอดูลัสที่สูงกว่าผลิตภัณฑ์โอรืงทางการค้าทั้งสองชนิดค่อนข้างมาก ทั้งก่อนแช่และภายหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอลล์ทั้งสามชนิด เนื่องจากยางเอนปีอาร์และยางเอชเอนปีอาร์ที่เลือกมาใช้ในงานวิจัย เป็นยางเกรดที่มีปริมาณอะครีโลไนไตรล์สูงกว่ายางโอรืงทางการค้า เป็นการเพิ่มสมบัติความแข็งแรงให้กับโมเลกุลของยางผสมจากงานวิจัย นอกจากนี้ มีการเติมสารเติมแต่งรองชนิดผงฟริชปีเตดซิลิกาในยางผสม โดยที่เป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับยางผสม ดังนั้นยางผสมจากงานวิจัยจึงมีค่ามอดูลัสที่สูงกว่าโอรืงทางการค้า



รูปที่ 4.26 มอดูลัสที่ระยะยืด 50 เปอร์เซนต์ ของโอรืงจากงานวิจัย ที่มีสารตัวเติมฟริชปีเตดซิลิกา เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์โอรืงทางการค้า ก่อนและหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอลล์ชนิด E10, E20 และ E85

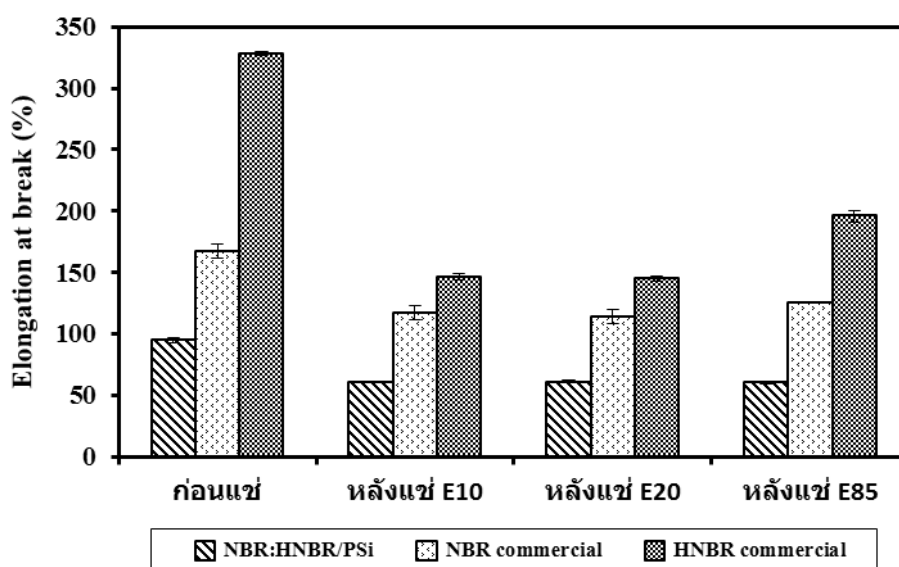
สำหรับรูปที่ 4.27 แสดงความต้านแรงดึงสูงสุดของผลิตภัณฑ์โอริงของยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์ และยางเอชเอ็นบีอาร์ ที่สัดส่วน 50:50 ที่มีสารตัวเติมพรีซิพิเตชันซิลิกาปริมาณ 30 ส่วนในร้อยส่วนของยาง จากงานวิจัย เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้าชนิดยางเอ็นบีอาร์ และยางเอชเอ็นบีอาร์ ก่อนและหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E10, E20 และ E85 ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 70 ชั่วโมง ผลการทดสอบพบว่า ในสภาวะก่อนการแช่โอริงในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ โอริงจากงานวิจัยให้ค่าความต้านทานแรงดึง มีค่าอยู่ระหว่างผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้าชนิดยางเอ็นบีอาร์ และยางเอชเอ็นบีอาร์ เนื่องจาก การที่ผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้าชนิดยางเอชเอ็นบีอาร์ สามารถตกผลึกได้เมื่อถูกดึงยืด (Strain-induced crystallization) ส่งผลให้โอริงทางการค้าชนิดยางเอชเอ็นบีอาร์มีความต้านทานแรงดึงที่สูงกว่าโอริงยางเอ็นบีอาร์ ดังนั้น ยางโอริงจากงานวิจัย ซึ่งเป็นยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์ จึงมีค่าความต้านทานแรงดึงอยู่ระหว่างยางเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์ ส่วนภายหลังจากการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ พบว่า โอริงจากงานวิจัยมีค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงกว่าผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้า หลังแช่ E10 และ E20 และให้ค่าความต้านทานแรงดึงเทียบเท่ากับโอริงทางการค้า หลังแช่ E85 เนื่องจาก ยางโอริงจากงานวิจัยมีการเติมผงพรีซิพิเตชันซิลิกา จึงเป็นการช่วยเสริมแรงให้กับยางผสมและอนุภาคซิลิกาสามารถยึดเกาะกับเฟสยางได้ดี



รูปที่ 4.27 ความต้านแรงดึงสูงสุดของโอริงจากงานวิจัย ที่มีสารตัวเติมพรีซิพิเตชันซิลิกา เปรียบเทียบกับโอริงทางการค้า ก่อนและหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E10, E20 และ E85

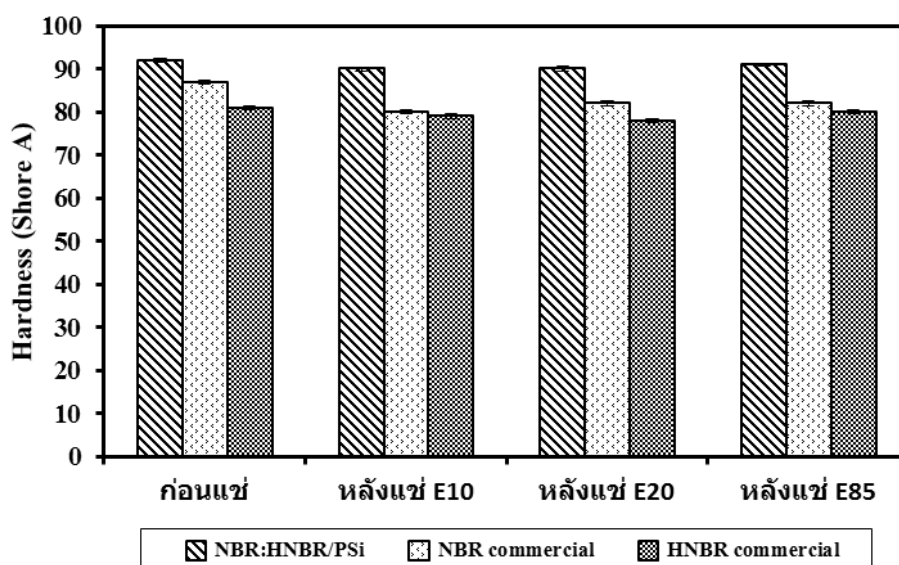
จากรูปที่ 4.28 แสดงค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของโอริงของยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์ ที่สัดส่วน 50:50 ที่มีสารตัวเติมพรีซิพิเตชันซิลิกาปริมาณ 30 ส่วนในร้อยส่วนของยาง

จากงานวิจัยเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้าชนิดยางเอ็นบีอาร์ และยางเอชเอ็นบีอาร์ ก่อนและหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E10, E20 และ E85 ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 70 ชั่วโมง พบว่า ชิ้นงานโอริงจากงานวิจัยมีค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ต่ำกว่าผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้า เนื่องจากยางโอริงจากงานวิจัยมีปริมาณอะคริโลไนไตรล์สูงกว่ายางโอริงทางการค้า ซึ่งเป็นการเพิ่มสมบัติความแข็งแรงให้กับยางโอริงจากงานวิจัย และการเติมผงฟริชพิเตดซิลิกาในยางผสม ทำให้สัดส่วนของเนื้อยางที่เป็นส่วนประกอบหลักลดลง ยางโอริงจากงานวิจัยจึงเกิดการยืดตัวได้น้อยกว่าโอริงทางการค้า



รูปที่ 4.28 การยืดตัว ณ จุดขาดของโอริงจากงานวิจัย ที่มีสารตัวเติมฟริชพิเตดซิลิกา เปรียบเทียบกับโอริงทางการค้า ก่อนและหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E10, E20 และ E85

รูปที่ 4.29 แสดงค่าความแข็งที่ผิวของโอริงของยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์ ที่สัดส่วน 50:50 ที่มีสารตัวเติมฟริชพิเตดซิลิกาปริมาณ 30 ส่วนในร้อยส่วนของยาง จากงานวิจัยเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้าชนิดยางเอ็นบีอาร์ และยางเอชเอ็นบีอาร์ ก่อนและหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E10, E20 และ E85 ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 70 ชั่วโมง ผลการทดสอบพบว่า โอริงจากงานวิจัยให้ความแข็งที่ผิวสูงกว่าผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้าทั้งสองชนิด ในทุกสภาวะการทดสอบ เนื่องจาก ยางเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์ที่นำมาใช้ในงานวิจัย มีปริมาณอะคริโลไนไตรล์สูงกว่ายางโอริงทางการค้าทั้งสองชนิด และผงฟริชพิเตดซิลิกาที่เติมในยางผสมเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง (Rigidity) มากกว่ายาง ส่งผลให้โอริงจากงานวิจัยมีความแข็งที่ผิวโดยรวมสูงกว่าโอริงทางการค้า ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับค่ามอดุลัสในรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.29 ความแข็งที่ผิวของผลิตภัณฑ์โอริงจากงานวิจัย ที่มีสารตัวเติมพรีซิพิเตดซิลิกา เปรียบเทียบกับโอริงทางการค้า ก่อนและหลังการแช่ในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E10, E20 และ E85

4.5 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์โอริงจากงานวิจัยกับผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้า

การดำเนินการในส่วนนี้ เป็นการศึกษาด้านเศรษฐศาสตร์ของวัสดุอย่างผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์จากงานวิจัย ที่สัดส่วน 50:50 และเติมพรีซิพิเตดซิลิกาปริมาณ 30 ส่วนในร้อยส่วนของยาง เป็นสารเติมแต่งรอง ซึ่งเป็นสัดส่วนและปริมาณที่ให้ค่าสมบัติเชิงกลโดยรวม และการทนต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์ที่เหมาะสม และนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานโอริง เพื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้า โดยมีการคำนวณราคาต้นทุนของวัตถุดิบและสารเคมีทั้งหมดของสูตรยางคอมปาวด์จากงานวิจัย ดังแสดงในตารางที่ 4.10 และทำการเปรียบเทียบราคากับผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้า ดังแสดงในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.10 การคำนวณราคาของสูตรยางผสม NBR:HNBR ที่สัดส่วน 50:50 จากงานวิจัย

สารเคมี	ปริมาณ (phr)	ราคา/กก (บาท)	ราคาตามปริมาณที่ใช้ในสูตรยาง (บาท)
1. ยางเอ็นบีอาร์ เกรด JSR N220S (ราคาขายวันที่ 1 กรกฎาคม 2554)	50.0 (g)	147.66	7.38
2. ยางเอชเอ็นบีอาร์ เกรด Therban (ราคาขายวันที่ 1 กรกฎาคม 2554)	50.0 (g)	957.65	47.88
3. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO)	5.0	125.00	0.63
4. ผงเขม่าดำ (Carbon black) เกรด N660	60.0	45.48	2.73
5. Dioctyl phthalate (DOP)	8.0	82.39	0.66
6. Trimethylolpropane Trimethacrylate (TMPTMA)	12.0	385.20	4.62
7. Antioxidant 6PPD (Santoflex 6PPD)	2.0	144.45	0.29
8. Dicumyl peroxide (DCP)	7.5	164.78	1.24
รวมราคาวัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในสูตรยาง (ไม่เต็มสารตัวเติมพรีซีพิตเตซิลิกา) เท่ากับ 65.43 บาทต่อสูตรยางต่อ 100 กรัม และเท่ากับ 654.30 บาทต่อ 1 กิโลกรัม			
ราคาสารตัวเติมพรีซีพิตเตซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน			
ราคาพรีซีพิตเตซิลิกา : 1 กิโลกรัม ราคา 35 บาท	ราคาตามปริมาณการใช้ในสูตรยาง : 30 กรัม ราคา 1.05 บาท		ราคารวมที่ใช้ ในสูตรยาง 2.9 บาท
ราคาสารคู่ควบไซเลน (Couplink 89) : 1 กิโลกรัม ราคา 45 บาท	ราคาตามปริมาณการใช้ในสูตรยาง : 1.2 กรัม ราคา 0.05 บาท		
ราคาเอทานอล 95% เกรดการค้า : 20 ลิตร ราคา 1,200 บาท	ราคาตามปริมาณการใช้ในสูตรยาง : 30 มิลลิลิตร ราคา 1.80 บาท		
รวมราคายางคอมปาวด์ที่มีสารตัวเติมพรีซีพิตเตซิลิกา เท่ากับ 68.33 บาทต่อสูตรยางต่อ 100 กรัม และเท่ากับ 683.30 บาทต่อ 1 กิโลกรัม			

ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบราคาของยางโอริงจากงานวิจัยกับผลิตภัณฑ์ยางโอริงทางการค้า

ผลิตภัณฑ์โอริงที่ศึกษา	ราคา (บาท)
ต้นทุนผลิตภัณฑ์โอริงที่ได้จากงานวิจัยต่อชิ้นผลิตภัณฑ์ (ไม่รวมค่าแรง/เครื่องจักร)	
▶ NBR:HNBR *	2.21
▶ NBR:HNBR:PSi-30 **	2.59
ต้นทุนผลิตภัณฑ์โอริงที่ได้จากงานวิจัยต่อชิ้นผลิตภัณฑ์ (รวมค่าแรง /เครื่องจักร)	
▶ NBR:HNBR	17.21
▶ NBR:HNBR:PSi-30	17.59
ผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้าต่อชิ้นงาน (รวมค่าแรง/เครื่องจักร)	
▶ NBR commercial จากบริษัท เพาเวอร์ ซิล จำกัด	14
▶ HNBR commercial*** จากบริษัท ท็อปพาร์ท เทคคิง (ไทยแลนด์) จำกัด	86
ผลิตภัณฑ์โอริงจากงานวิจัยมีราคาแพงกว่าผลิตภัณฑ์โอริงยางเอ็นบีอาร์ทางการค้า 22 เปอร์เซ็นต์ แต่มีราคาถูกกว่าโอริงยางเอชเอ็นบีอาร์ทางการค้า 378 เปอร์เซ็นต์	

* ยางคอมปาวด์จากงานวิจัย 1 กิโลกรัม สามารถผลิตยางโอริง ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก (OD) x เส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน (ID) x ความหนา (W) เท่ากับ 102.9 x 96.7 x 3.1 มิลลิเมตร ประมาณ 296 ชิ้น

** ยางคอมปาวด์จากงานวิจัย 1 กิโลกรัม ที่มีผงฟริชพิเตตซิลิกาเป็นสารเติมแต่งรอง สามารถผลิตยางโอริง ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก (OD) x เส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน (ID) x ความหนา (W) เท่ากับ 102.9 x 96.7 x 3.1 มิลลิเมตร ประมาณ 264 ชิ้น

*** นำเข้าจากประเทศไต้หวัน (GE MAO RUBBER INDUSTRIAL CO., LTD.)

จากการศึกษาราคาต้นทุนของสูตรยางคอมปาวด์จากงานวิจัย ดังแสดงในตารางที่ 4.10 พบว่า สูตรยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์ที่สัดส่วน 50:50 ที่เติมผงเขม่าดำเป็นสารเติมแต่งหลักเพียงชนิดเดียว (NBR:HNBR) ราคาประมาณ 654.30 บาท ต่อ 1 กิโลกรัม และยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์และยางเอชเอ็นบีอาร์ที่สัดส่วน 50:50 ที่เติมผงเขม่าดำเป็นสารเติมแต่งหลัก และเติมผงฟริชพิเตตซิลิกาชนิดปรับปรุงผิว ที่ปริมาณ 30 ส่วนในร้อยส่วนของยาง เป็นสารเติมแต่งรอง (NBR:HNBR:PSi-30) ราคาประมาณ 683.30 บาทต่อ 1 กิโลกรัม สามารถนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์โอริงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก (Outside diameter; OD) เท่ากับ 102.9 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน (Inside diameter; ID) เท่ากับ 96.7 มิลลิเมตร และความหนา (Cross section; W) 3.1 มิลลิเมตร ได้ประมาณ 296 และ 264 ชิ้น ตามลำดับ โดยเป็นการคำนวณปริมาณชิ้นงานโอริงที่ผลิตได้ในเชิงปริมาตรของยางคอมปาวด์ 1 กิโลกรัม เทียบกับปริมาตรของผลิตภัณฑ์โอริง ซึ่งถ้าคิดเป็นราคาของผลิตภัณฑ์โอริงจากงานวิจัย ดังแสดงในตารางที่ 4.11 พบว่า ยางผสมสูตรที่ไม่เติมผง

พรีซิพิเตตซิลิกา (NBR:HNBR) มีราคาต้นทุน (ไม่รวมค่าแรงงานและค่าเครื่องจักร) เท่ากับ 2.21 บาทต่อชิ้น ส่วนสูตรยางผสมที่มีการเติมผงพรีซิพิเตตซิลิกา (NBR:HNBR:PSi-30) มีราคาต้นทุน (ไม่รวมค่าแรงงานและค่าเครื่องจักร) เท่ากับ 2.59 บาทต่อชิ้น แต่ถ้าคิดค่าแรงงานและค่าเครื่องจักรในการผลิตโอริง ยางโอริงสูตร NBR:HNBR มีราคาเท่ากับ 17.21 บาทต่อชิ้น ส่วนยางสูตร NBR:HNBR:PSi-30 มีราคาเท่ากับ 17.59 บาทต่อชิ้น ซึ่งผลิตภัณฑ์โอริงจากงานวิจัยทั้งสองสูตร ทั้งชนิดที่เดิมและไม่เติมพรีซิพิเตตซิลิกามีราคาที่แตกต่างกันเล็กน้อย ส่วนผลิตภัณฑ์โอริงทางการค้าชนิดยางเอ็นบีอาร์ จากบริษัท เพาเวอร์ ซีล จำกัด มีราคา (รวมค่าแรงงานและค่าเครื่องจักร) เท่ากับ 14 บาทต่อชิ้น และโอริงทางการค้าชนิดยางเอชเอ็นบีอาร์ ที่นำเข้าจากประเทศไต้หวัน จำหน่ายโดยบริษัท ท็อปพาร์ท เทคคิง (ไทยแลนด์) จำกัด มีราคาเท่ากับ 86 บาทต่อชิ้น ดังนั้น เห็นได้ว่าราคาของผลิตภัณฑ์โอริงจากงานวิจัยมีราคาสูงกว่าโอริงทางการค้าชนิดยางเอ็นบีอาร์เพียงเล็กน้อย คิดเป็น 22 เปอร์เซ็นต์ หรือประมาณ 4 บาท แต่มีราคาต่ำกว่าโอริงทางการค้าชนิดยางเอชเอ็นบีอาร์ ที่เป็นยางมีสมรรถนะสูง ประมาณ 378 เปอร์เซ็นต์ โดยผลิตภัณฑ์โอริงจากงานวิจัยให้สมบัติเชิงกลโดยรวม และสามารถทนต่อน้ำมัน แก๊สโซฮอล์ที่เหนือกว่าโอริงทางการค้าทั้งสองประเภท