บทความวิจัย

อิทธิพลของสารช่วยในกระบวนการผลิตต่อสมบัติของยางเอทธิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM)

วีนัสรินทร์ อินทร์ติยะ[1,2*] อุทัย เทพสุวรรณ์[1,2] ชาคริต สิริสิงห[2,3] และ พงษ์ธร แซ่อุย[1,2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลของสารช่วยในกระบวนการผลิตแต่ละชนิดต่อสมบัติของยางเอทธิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM) ที่ได้รับการเสริมแรงด้วยเขม่าดำ โดยสารช่วยในกระบวนการผลิตที่เลือกนำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้มี 3 ชนิด คือ น้ำมันอะโรมาติก น้ำมันพาราฟินนิก และ Ultraflow 500 ซึ่งในระหว่างการศึกษาได้ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณของสารช่วยในกระบวนการผลิตทั้ง 3 ชนิดตั้งแต่ 0 ถึง 8 ส่วนในร้อยส่วนของยาง (phr) หลังจากผสมเคมียางเรียบร้อยแล้วจึงนำยางคอมพาวด์ที่ได้ไปทดสอบสมบัติอื่นๆ ต่อไป จากการศึกษาพบว่าการเติมสารช่วยในกระบวนการผลิตทั้ง 3 ชนิดลงไปในยางคอมพาวด์ส่งผลให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้ง่ายยิ่งขึ้น เนื่องจากทั้งค่าความหนืดและพลังงานที่ใช้ในการผสมต่างก็มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตามปริมาณของสารช่วยในกระบวนการผลิต ผลการศึกษายังบ่งชี้ว่าสารช่วยในกระบวนการผลิตทั้ง 3 ชนิดดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงสมบัติในกระบวนการผลิตไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ดี พบว่าการเติมน้ำมันอะโรมาติกและน้ำมันพาราฟินนิกไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อลักษณะการคงรูปของยาง แต่การเติม Ultraflow 500 จะส่งผลทำให้ยางเกิดการคงรูปได้ช้าลง นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมสารช่วยในกระบวนการผลิตทั้ง 3 ชนิดส่งผลทำให้ยางมีสมบัติความทนทานต่อแรงดึงด้อยลง อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองบ่งชี้ว่า Ultraflow 500 ทำให้ยางมีความทนทานต่อการฉีกขาดและมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพจากความร้อนสูงกว่าน้ำมันอะโรมาติกและน้ำมันพาราฟินนิก

คำสำคัญ: สารช่วยในกระบวนการผลิต ความสามารถในกระบวนการผลิต สมบัติเชิงกล เอทธิลีนโพรพิลีนไดอีน สมบัติความทนทานต่อความร้อน

[1] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย จ.ปทุมธานี

[2] ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล จ.นครปฐม

[3] ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

[*] ผู้นิพนธ์ประสานงาน, e-mail: weenusai@mtec.or.th

Effects of Processing Aids on Properties of Ethylene Propylene Diene Monomer (EPDM)

Weenusarin Intiya[1,2*], Uthai Tepsuwan[1,2], Chakrit Sirisinha[2,3] and Pongdhorn Sae-Oui[1,2]

ABSTRACT

This research aims to study and compare the influences of various processing aids on properties of carbon black-filled EPDM. Three types of commercial processing aids, i.e., aromatic oil, paraffinic oil and Ultraflow 500 were selected. In this study, the amount of each processing aids was varied from 0 to 8 parts per hundred of rubber (phr). After mixing, a portion of the compound was used for processability test and the rest was used for mechanical property determination. The results revealed that all types of the processing aids could improve processability of the rubber compound, i.e., both viscosity and mixing energy were found to decrease with increasing processing aids content. Surprisingly, the processability improvement was not significantly dependent on processing aids type. It is also found that the presence of aromatic or paraffinic oil had no significant effect on cure properties of the rubber compound whereas the addition of Ultraflow 500 caused cure retardation. It is also elucidated from the results that deterioration of tensile strength was obvious with the addition of the processing aids. However, compared with aromatic and paraffinic oils, Ultraflow 500 imparted the rubber vulcanizate with higher tear strength and greater ageing resistance.

Keywords: processing aids, processability, mechanical property, Ethylene-Propylene Diene Monomer (EPDM), ageing resistance

[1]National Metal and Materials Technology Center, Thailand Science Park, Pathumthani

[2]Research and Development Center for Thai Rubber Industry, Faculty of Science, Mahidol University, Salaya Campus, Nakornprathom

[3]Department of Chemistry, Faculty of Science, Mahidol University

[*]Corresponding author, email: weenusai@mtec.or.th

บทนำ

ยางเอทธิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM) เป็นยางสังเคราะห์ที่นิยมเลือกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมยาง เนื่องจากเป็นยางที่มีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลน้อยมากจึงทำให้ยางชนิดนี้มีสมบัติที่โดดเด่นในด้านความทนทานต่อความร้อน โอโซน แสงแดด สารเคมี และรังสีอัลตราไวโอเลต ซึ่งนับเป็นข้อดีประการสำคัญ ดังนั้นการนำยางชนิดนี้มาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ยางจึงไม่จำเป็นต้องเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพ (antidegradant) ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงนิยมนำยางสังเคราะห์ชนิดนี้มาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์สำหรับใช้งานภายนอกอาคาร เช่น ปลอกหุ้มสายไฟ ปลอกหุ้มสายเคเบิ้ล [1, 2, 7] เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ยาง EPDM นั้นก็ยังมีข้อด้อยทางด้านสมบัติทางกลอยู่บ้าง คือ มีสมบัติความทนทานต่อแรงดึงที่ค่อนข้างต่ำ

เป็นที่ทราบกันดีว่ายาง EPDM มีราคาค่อนข้างแพง เพราะต้องนำเข้าจากต่างประเทศจึงส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตสูงตามไปด้วย โดยทั่วไปการลดต้นทุนในกระบวนการผลิตมีหลายแนวทางด้วยกัน ซึ่งหนึ่งในนั้นก็คือการลดต้นทุนทางด้านวัตถุดิบโดยการนำเทคโนโลยียางผสมมาประยุกต์ใช้ เช่น การนำยางธรรมชาติซึ่งมีราคาถูกกว่ามาผสมกับยาง EPDM เหล่านี้ เป็นต้น นอกจากนี้เนื่องจากยาง EPDM จัดเป็นยางที่สามารถรองรับสารตัวเติมได้ในปริมาณที่สูงมาก ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวทำให้ผู้ประกอบการสามารถออกสูตรเคมียางเพื่อลดต้นทุนในการผลิตได้ อย่างไรก็ดี การเติมสารตัวเติมลงไปในปริมาณสูงๆ นั้นอาจส่งผลทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้ด้วยความยากลำบาก การเติมสารช่วยในกระบวนการผลิตลงไปในสัดส่วนที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ เพราะสารช่วยในกระบวนการผลิตนอกจากจะช่วยทำให้ยางสามารถรองรับสารตัวเติมได้มากขึ้นแล้ว ยังส่งผลทำให้ปริมาณพลังงานที่ต้องใช้ในระหว่างกระบวนการผลิตลดลงอีกด้วย นอกจากนี้ ยังได้มีการรายงานว่าสารช่วยในกระบวนการผลิตบางชนิดสามารถเพิ่มอัตราเร็วในการคงรูปของยางให้สูงขึ้นได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ [4, 5]

ปัจจุบันสารช่วยในกระบวนการผลิตที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางมีหลายประเภท ได้แก่ พลาสติ-ไซเซอร์ และเพปไทเซอร์ เป็นต้น โดยสารทำให้ยางนิ่มจำพวกน้ำมันมิเนอรัล ซึ่งได้แก่ น้ำมันอะโรมาติก น้ำมันแนฟทานิก และน้ำมันพาราฟินนิก จัดเป็นพลาสติไซเซอร์ที่นิยมนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถหาซื้อได้ง่ายและมีราคาถูก อย่างไรก็ตามด้วยข้อจำกัดบางประการของน้ำมันมิเนอรัล เช่น สีที่ค่อนข้างเข้มของน้ำมันอะโรมาติก จึงได้มีการทดลองนำน้ำมันชนิดต่างๆ ที่มีสมบัติใกล้เคียงกันมาใช้ทดแทน เช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมัน cardanol รวมถึงของเหลวที่ได้จากเปลือกของเม็ดมะม่วงหิมะพานต์ (cashew nut shell liquid) [3, 6, 8] เป็นต้น นอกจากน้ำมันมิเนอรัลแล้ว ปัจจุบันได้มีการสังเคราะห์สารช่วยในกระบวนการผลิตชนิดใหม่ขึ้นมามากมาย ตัวอย่างที่สำคัญของสารช่วยในกระบวนการผลิตสังเคราะห์เหล่านี้ ได้แก่ Ultraflow 500 ซึ่งจัดเป็นสารช่วยในกระบวนการผลิตจำพวกอนุพันธ์ของกรดไขมันที่มีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากได้มีการรายงานว่า Ultraflow 500 นอกจากจะสามารถช่วยลดความหนืดของยางธรรมชาติได้แล้ว ยังมีคุณสมบัติช่วยในการปรับปรุงสมบัติความทนทานต่อความร้อนของผลิตภัณฑ์อีกด้วย [9] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์หลักเพื่อนำ Ultraflow 500 ซึ่งจัดเป็นสารช่วยในกระบวนการผลิตสำหรับยางธรรมชาติมาทดลองใช้กับยางสังเคราะห์ EPDM โดยนำมาใช้ในรูปแบบของพลาสติไซเซอร์เปรียบเทียบกับน้ำมันอะโรมาติกและน้ำมันพาราฟินนิก โดยทำการศึกษาผลที่มีต่อความสามารถในกระบวนการผลิตและสมบัติเชิงกลต่างๆ ของยางทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน

วิธีการวิจัย

วัสดุ

งานวิจัยนี้ใช้ยางสังเคราะห์ EPDM (Keltan®514) ผลิตโดยบริษัท ดูปองค์ ดาว อีลาสโตเมอร์ จำกัด สารตัวเติมที่ใช้ คือ เขม่าดำเกรด N330 (มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 84 m^2/g) ซึ่งผลิตโดย บริษัท ไทยคาร์บอน โพรดั๊ก จำกัด สารช่วยในกระบวนการผลิตที่นำมาใช้ในการทดลองมี 3 ชนิด คือ น้ำมันอะโรมาติก น้ำมันพาราฟินนิก และ Ultraflow 500 ซึ่งน้ำมันอะโรมาติกและน้ำมันพาราฟินนิกได้รับจาก บริษัท ยูเนียน ลิงค์ จำกัด ส่วน Ultraflow 500 ได้รับจาก บริษัท เบ็นไมเยอร์ เคมีคอล (ที) จำกัด สารเคมีที่ใช้เป็นองค์ประกอบในการผสมเคมียาง ได้แก่ ซิงก์ออกไซด์ (ZnO) กรดสเตียริก (stearic acid) และกำมะถัน (S_8) ได้รับจาก บริษัท เคมมินคอร์ปอเรชั่น จำกัด ส่วนสารตัวเร่งปฏิกิริยาจำนวน 2 ชนิดที่นำมาใช้ คือ เตตระเมทิลไธยูแรมไดซัลไฟด์ (Perkasit®TMTD) และบิวทิล-2-เบนโซไธอะโซลซัลฟีนาไมด์ (Santocure®TBBS) ได้รับจากบริษัทรีไลแอนซ์ เทคโนเคม (Flexsys) จำกัด

การเตรียมและทดสอบสมบัติของยางคอมพาวด์

ตารางที่ 1 สูตรการผสมเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

องค์ประกอบ	ปริมาณ (phr*)
ยาง EPDM (Keltan®514)	100
ซิงก์ออกไซด์	3
กรดสเตียริก	1
เขม่าดำ (N330)	40
สารช่วยในกระบวนการผลิต	0, 2, 4, 6, 8
บิวทิลเบนโซไธอะโซลซัลฟีนาไมด์ (Santocure®TBBS)	1
เตตระเมทิลไธยูแรมไดซัลไฟด์ (Perkasit®TMTD)	0.2
กำมะถัน	1.2

หมายเหตุ: *phr: parts per hundred of rubber

ตารางที่ 1 แสดงสูตรการผสมเคมีที่ใช้ในงานวิจัย หลังจากการออกสูตรได้ดำเนินการผสมเคมียางโดยใช้เครื่องผสมระบบปิด (Brabender 350E) ตั้งอุณหภูมิเริ่มต้นของห้องผสมที่ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์ 40 รอบต่อนาที และใช้ fill factor เท่ากับ 0.7 โดยเริ่มจากการผสมยาง EPDM ในเครื่องผสม เมื่อเวลาผ่านไป 2 นาทีจึงทำการเติมซิงก์ออกไซด์และกรดสเตียริก หลังจากนั้นทำการเติมเขม่าดำในนาทีที่ 4 แล้วทำการเติมสารช่วยในกระบวนการผลิตในนาทีที่ 6 เมื่อเวลาผ่านไป 9 นาทีจึงใส่กำมะถันและสารตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นผสมต่ออีกเป็นระยะเวลา 3 นาที ก่อนที่จะนำยางคอมพาวด์ที่ได้ไปรีดให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง (two-roll mill) จากนั้นจึงแบ่งยางคอมพาวด์ออกเป็น 3 ส่วน โดยส่วนแรกนำไปวัดค่าความหนืดมูนนี่ตามมาตรฐาน ASTM D1646-87 ด้วยเครื่อง Mooney viscometer (visc Tech+) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ส่วนที่ 2 นำไปหาค่าระยะเวลาสกอร์ช (Scorch time, t_s2) ค่าระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสม (optimum cure time, t_c90) ค่าแรงบิดต่ำสุด (minimum torque, ML) และค่าแรงบิดสูงสุด (maximum torque, MH) ด้วยเครื่อง Moving Die Rheometer (MDR TechPRO MD+) ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และส่วนที่ 3 นำไปขึ้นรูปสำหรับทดสอบสมบัติต่างๆ ของยางคงรูปต่อไป

การทดสอบสมบัติของยางคงรูป

นำยางคอมพาวด์ที่ได้หลังการผสมไปทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ตามระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสม (t_c90) ของยางแต่ละสูตร จากนั้นจึงนำยางคงรูปที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติความแข็ง (hardness) ตามมาตรฐาน ASTM D2240 สมบัติความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ตามมาตรฐาน ASTM D412 (ดาย C) สมบัติความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength) ตามมาตรฐาน ASTM D624 สมบัติการเสียรูปหลังการกดอัด (compression set) ตามมาตรฐาน ASTM D395 (method B) โดยทำการทดสอบทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 22 ชั่วโมง สมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (ageing resistance) ตามมาตรฐาน ASTM D573 โดยนำชิ้นทดสอบไปทำการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 22 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบสมบัติความทนทานต่อแรงดึงเปรียบเทียบกับสมบัติของชิ้นทดสอบที่ไม่ได้รับการบ่มเร่ง และแสดงผลในรูปของสมบัติสัมพัทธ์ (แสดงดังสมการที่ 1)

$$\text{สมบัติสัมพัทธ์} = P_a/P_i \qquad \text{..... (1)}$$

เมื่อ P_a คือ สมบัติของยางคงรูป*หลัง*การบ่มเร่ง

P_i คือ สมบัติของยางคงรูป*ก่อน*การบ่มเร่ง

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

พฤติกรรมการผสม ความหนืดมูนนี่ และลักษณะการคงรูปของยาง

ตารางที่ 2 ผลของสารช่วยในกระบวนการผลิตต่อพลังงานที่ใช้ในการผสม ความหนืดมูนนี่ และลักษณะการคงรูปของยาง

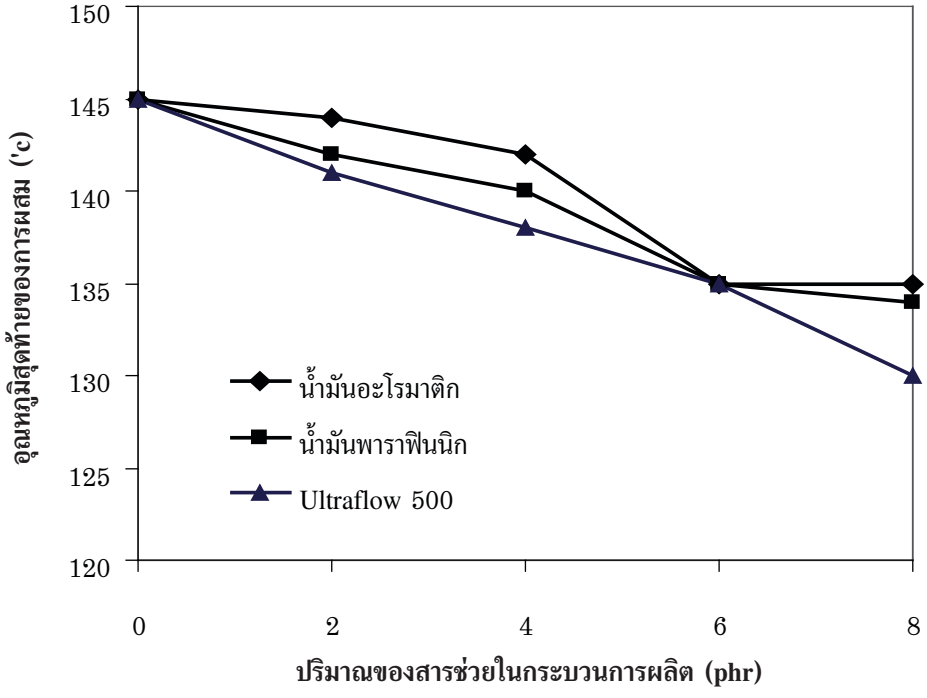
ชนิด	ปริมาณ (phr)	พลังงาน ($\times 10^5$ J)	ความหนืดมูนนี่* (MU)	ลักษณะการคงรูป		
				t_c90 (นาที)	t_s2 (นาที)	ผลต่างแรงบิด (dN.m)
น้ำมันอะโรมาติก	0	3.81	97.9	6.98	1.79	1.68
	2	3.68	90.4	6.48	1.78	1.62
	4	3.50	86.2	6.46	1.87	1.60
	6	3.35	80.8	6.62	2.05	1.54
	8	3.37	76.0	6.96	2.01	1.48
น้ำมันพาราฟินนิก	0	3.81	97.9	6.98	1.79	1.68
	2	3.61	89.2	6.92	1.86	1.68
	4	3.45	82.3	6.72	1.99	1.62
	6	3.34	75.7	7.09	2.18	1.54
	8	3.22	72.1	7.32	2.34	1.51
Ultraflow 500	0	3.81	97.9	6.98	1.79	1.68
	2	3.62	87.6	9.41	2.37	1.72
	4	3.46	82.9	9.75	2.50	1.60
	6	3.37	78.4	11.21	2.78	1.46
	8	3.17	72.4	12.31	2.94	1.37

หมายเหตุ: *(ML 1+4@ 100°C)

ตารางที่ 2 แสดงผลของสารช่วยในกระบวนการผลิตต่อพลังงานที่ใช้ในการผสม ความหนืดมูนนี่ และลักษณะการคงรูปของยาง จากการทดลองพบว่าสารช่วยในกระบวนการผลิตทั้ง 3 ชนิดส่งผลต่อพลังงานที่ใช้ในการผสมและความหนืดมูนนี่ของยางคอมพาวด์ในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือ พลังงานที่ใช้ในการผสมและความหนืดมูนนี่ของยางมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตามการเพิ่มปริมาณของสารช่วยในกระบวนการผลิต เมื่อพิจารณาที่ปริมาณสารช่วยในกระบวนการผลิตที่เท่ากัน พบว่าการเติมน้ำมันพาราฟินนิกส่งผลให้พลังงานในการผสมและความหนืดมูนนี่ของยางมีแนวโน้มลดลงมากกว่าการเติมน้ำมันอะโรมาติกเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันพาราฟินนิกมีลักษณะโครงสร้างที่เป็นสายโซ่ตรงของพันธะเดี่ยวแบบอะลิฟาติกจึงทำให้น้ำมันชนิดนี้นอกจากจะมีความหนืดที่ต่ำกว่าแล้ว ยังมีระดับความเป็นขั้วที่ต่ำกว่าน้ำมันอะโรมาติกอีกด้วย ดังนั้นน้ำมันพาราฟินนิกจึงสามารถผสมเข้าไปในยาง EPDM (ซึ่งจัดเป็นยางที่มีความเป็นขั้วต่ำมาก) ได้เป็นอย่างดี โดยโมเลกุลของน้ำมันพาราฟินนิกสามารถแทรกเข้าไปในโมเลกุลของยางได้ง่าย ส่งผลทำให้โมเลกุลของยางเกิดการเคลื่อนที่ได้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างน้ำมันมิเนอรัลทั้ง 2 ชนิด จึงพบว่าน้ำมันพาราฟินนิกสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติในกระบวนการผลิตได้ดีกว่าน้ำมันอะโรมาติก เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการปรับปรุงกระบวนการผลิตระหว่างน้ำมันมิเนอรัลและ Ultraflow 500 จะพบว่า Ultraflow 500 มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงกระบวนการผลิตสูงใกล้เคียงกับน้ำมันพาราฟินนิก ทั้งนี้แม้ว่า Ultraflow 500 จะอยู่ในสภาวะของแข็งที่อุณหภูมิห้อง แต่เมื่อได้รับอุณหภูมิสูงในระหว่างกระบวนการผสม Ultraflow 500 ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของกรดไขมันจะเกิดการหลอมเหลวกลายเป็นของเหลวที่สามารถละลายเข้าไปในเนื้อยางได้ ทำให้ความหนืดของยางและพลังงานที่ใช้ในการผสมลดต่ำลง

เมื่อพิจารณาผลของสารช่วยในกระบวนการผลิตทั้ง 3 ชนิดต่อลักษณะการคงรูปของยางคอมพาวด์ พบว่าการเพิ่มปริมาณน้ำมันอะโรมาติกและน้ำมันพาราฟินนิกส่งผลทำให้ระยะเวลาสกอร์ช (t_s2) และระยะเวลาที่เหมาะสมในการคงรูปของยางคอมพาวด์ (t_c90) มีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อย ที่เป็นเช่นนี้คาดว่าเป็นผลมาจากการลดลงของอุณหภูมิในระหว่างการผสมที่เกิดจากการเติมน้ำมันมิเนอรัล เพราะเป็นที่ทราบกันดีว่าการแตกตัวของสารตัวเร่งปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่อย่างมากกับประวัติการได้รับความร้อน (thermal history) ของยาง เนื่องจากในการทดลองนี้ได้ทำการผสมแบบ 1 ขั้นตอน กล่าวคือ หลังจากที่ทำการเติมสารตัวเติมและสารช่วยในกระบวนการผลิตเรียบร้อยแล้ว ก็จะทำการเติมสารเคมีในกลุ่มที่ทำให้ยางคงรูปตามลงไปแล้วผสมต่ออีก 3 นาทีก่อนที่จะนำยางคอมพาวด์ออกจากเครื่องผสมระบบปิด ซึ่งในระหว่างที่จะทำการเติมสารเคมีในกลุ่มที่ทำให้ยางคงรูปลงไปนั้น อุณหภูมิของยางคอมพาวด์ในขณะนั้นจะค่อนข้างสูงมากเพราะยางมีความหนืดค่อนข้างสูงส่งผลทำให้มีความร้อนที่เกิดจากการขัดสี (frictional heat) สูงตามไปด้วย สำหรับในกรณีที่มีการเติมสารช่วยในกระบวนการผลิตลงไป ความหนืดของยางจะลดต่ำลง ส่งผลทำให้อุณหภูมิของยางคอมพาวด์ขณะที่ทำการผสมมีค่าลดลงตามไปด้วย (รูปที่ 1) ดังนั้น สารตัวเร่งปฏิกิริยาที่เติมลงไปในตอนท้ายของการผสมจึงได้รับอุณหภูมิที่ต่ำลง ซึ่งจะส่งผลต่อเนื่องทำให้ยางคอมพาวด์มีระยะเวลาสกอร์ชและระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสมที่ยาวมากขึ้นเล็กน้อย อย่างไรก็ดี สำหรับในกรณีของการเติม Ultraflow 500 ลงไป พบว่า Ultraflow 500 ส่งผลกระทบต่อค่าระยะเวลาสกอร์ชและระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสมของยางคอมพาวด์อย่างชัดเจน กล่าวคือ ค่าระยะเวลาสกอร์ชและระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสมของยางคอมพาวด์มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของ Ultraflow 500 ผลการทดลองบ่งชี้อย่างชัดเจนว่า Ultraflow 500 มีฤทธิ์หน่วงปฏิกิริยาคงรูปของยาง ที่เป็นเช่นนี้อาจมีสาเหตุ

มาจากความจริงที่ว่า Ultraflow 500 เป็นสบู่ที่เกิดจากปฏิกิริยาของซิงก์ไอออนและกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ดังนั้น ในโมเลกุลของ Ultraflow 500 จึงมีพันธะคู่ที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีอยู่ในปริมาณสูง ซึ่งพันธะคู่ที่มีอยู่ใน Ultraflow 500 นี้สามารถเข้าไปแย่งจับกับสารเคมีในกลุ่มที่ทำให้ยางคงรูปจากโมเลกุลของยางได้ จึงส่งผลทำให้อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาคงรูปของยางลดลง นอกจากการหน่วงอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาคงรูปแล้ว Ultraflow 500 ยังส่งผลทำให้ยางคงรูปมีระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงลดลงด้วยเช่นกัน ดังจะเห็นได้จากการลดลงอย่างชัดเจนของค่าผลต่างของแรงบิด (MH-ML) ที่วัดได้จากเครื่อง MDR เพราะเป็นที่ทราบกันดีว่าค่าผลต่างของแรงบิดจะแปรผันโดยตรงกับระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงในยาง [8, 10, 11] โดยผลการทดลองในตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่า Ultraflow 500 ส่งผลทำให้ยางมีระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันอะโรมาติกและน้ำมันพาราฟินนิก



รูปที่ 1 อุณหภูมิของยางคอมพาวด์ในระหว่างทำการผสม

สมบัติเชิงกลของยางคงรูป

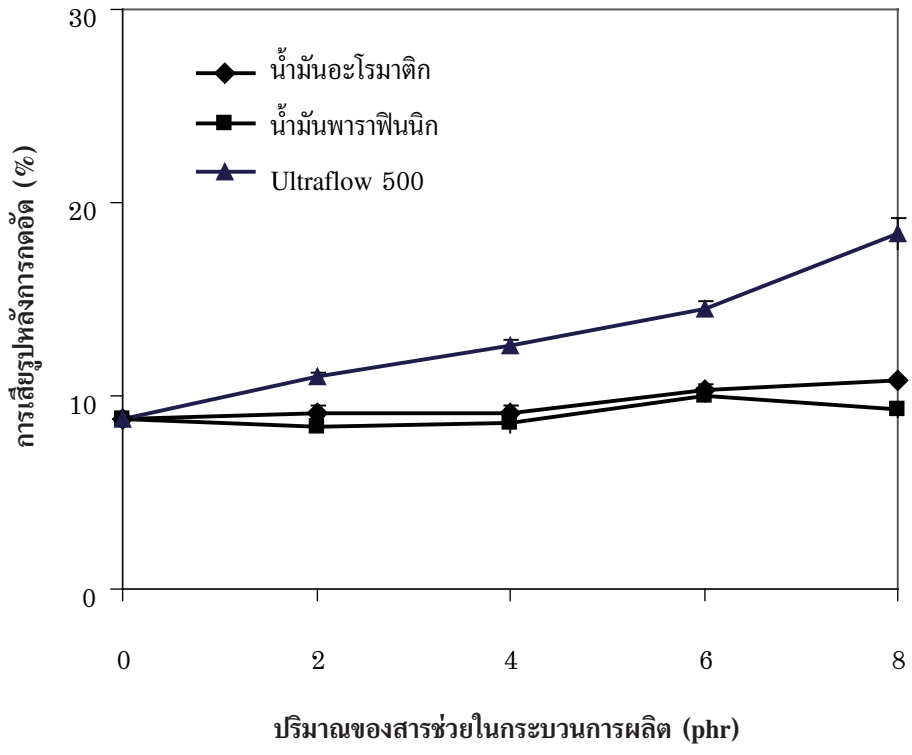
ตารางที่ 3 แสดงผลของสารช่วยในกระบวนการผลิตต่อความแข็ง ความทนทานต่อการฉีกขาด และสมบัติแรงดึงของยาง จากตารางพบว่าการเติมสารช่วยในกระบวนการผลิตทั้ง 3 ชนิดส่งผลทำให้ยางคงรูปที่ได้มีค่าความแข็งและมอดุลัสลดลง ซึ่งการลดลงของค่าความแข็งและมอดุลัสดังกล่าวเกิดจากผลของความเป็นพลาสติไซเซอร์ (plasticizing effect) ของสารช่วยในกระบวนการผลิตทั้ง 3 ชนิด เพราะสารช่วยในกระบวนการผลิตดังกล่าวสามารถแทรกเข้าไปในยางและทำให้โมเลกุลของยางเกิดการเคลื่อนที่ได้ง่ายมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้การลดลงของระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงก็อาจเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ความแข็งและมอดุลัสของยางคงรูปลดลงตามการเพิ่มปริมาณของสารช่วยในกระบวนการผลิต [3, 4, 12] ในส่วนของสมบัติความทนทานต่อการฉีกขาดพบว่า การเติมน้ำมันพาราฟินนิกและน้ำมันอะโรมาติกไม่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติความทนทานต่อการฉีกขาดของยางแต่อย่างใด (ยกเว้นในกรณีที่ทำการเติมน้ำมันอะโรมาติกลงไปในปริมาณค่อนข้างสูงที่พบว่าจะส่งผลทำให้ค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของยางสูงขึ้นเล็กน้อย) อย่างไรก็ดี สำหรับในกรณีของ Ultraflow 500 กลับพบว่าค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของยางมีแนวโน้มสูงขึ้นตามการเพิ่มปริมาณของ Ultraflow 500 ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าความทนทานต่อการฉีกขาดดังกล่าวคาดว่าน่าจะเป็นผลมาจากการลดลงของระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยง เพราะเป็นที่ทราบกันดีว่าค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของยางจะสูงขึ้นเมื่อยางมีระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่ค่อนข้างต่ำ [13]

แม้ว่าผลการทดลองในตารางที่ 3 จะแสดงให้เห็นว่าค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางคงรูปมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มปริมาณของสารช่วยในกระบวนการผลิต อย่างไรก็ดี จากการสังเกตพบว่าทั้งน้ำมันอะโรมาติกและ Ultraflow 500 ส่งผลกระทบต่อค่าความทนทานต่อแรงดึงต่ำกว่าน้ำมันพาราฟินนิก เพราะผลการทดลองบ่งชี้ว่าการเติมน้ำมันอะโรมาติกและ Ultraflow 500 ลงไปในปริมาณ 8 phr จะส่งผลทำให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางลดลงเพียงแค่ร้อยละ 10 เท่านั้น ในขณะที่การเติมน้ำมันพาราฟินนิกลงไปในปริมาณที่เท่ากันจะส่งผลทำให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางลดลงสูงถึงร้อยละ 25 ซึ่งการลดลงของค่าความทนทานต่อแรงดึงตามปริมาณของสารช่วยในกระบวนการผลิต (ซึ่งเห็นได้ชัดเจนในกรณีของน้ำมันพาราฟินนิก) นั้นคาดว่ามีสาเหตุหลักมาจากการที่น้ำมันพาราฟินนิกนั้นสามารถแทรกเข้าไปในเนื้อยางได้มากกว่า (ผลของการเป็นพลาสติไซเซอร์สูงกว่า) จึงทำให้โมเลกุลของยางอยู่ห่างกันมากขึ้น ทำให้การพันกันของโมเลกุลยาง (entanglement) ลดลง ค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางจึงลดลงด้วย

ตารางที่ 3 ผลของสารช่วยในกระบวนการผลิตต่อความแข็ง ความทนทานต่อการฉีกขาด และสมบัติแรงดึงของยาง

ชนิด	ปริมาณ (phr)	ความแข็ง (Shore A)	ความทนทานต่อการฉีกขาด (N/mm)	สมบัติแรงดึง	
				ความทนทานต่อแรงดึง (MPa)	100% มอดุลัส (MPa)
น้ำมันอะโรมาติก	0	71.3 ± 0.3	60.5 ± 1.3	19.7 ± 0.7	5.15 ± 0.11
	2	69.8 ± 0.4	59.0 ± 3.3	19.9 ± 1.0	4.73 ± 0.18
	4	70.0 ± 0.0	58.3 ± 1.0	19.8 ± 1.2	4.62 ± 0.13
	6	68.2 ± 0.3	61.4 ± 1.3	18.9 ± 1.7	4.19 ± 0.22
	8	67.6 ± 0.4	64.9 ± 2.6	18.3 ± 0.9	4.01 ± 0.17
น้ำมันพาราฟินนิก	0	71.3 ± 0.3	60.5 ± 1.3	19.7 ± 0.7	5.15 ± 0.11
	2	71.0 ± 0.5	60.5 ± 0.6	18.9 ± 0.7	5.14 ± 0.19
	4	70.2 ± 0.3	60.3 ± 3.1	18.9 ± 0.3	4.62 ± 0.07
	6	68.6 ± 0.4	59.5 ± 1.7	16.5 ± 0.3	4.30 ± 0.05
	8	67.5 ± 0.5	59.3 ± 1.9	14.9 ± 0.5	4.17 ± 0.06
Ultraflow 500	0	71.3 ± 0.3	60.5 ± 1.3	19.7 ± 0.7	5.15 ± 0.11
	2	71.0 ± 0.6	60.0 ± 1.6	18.3 ± 0.7	5.05 ± 0.20
	4	71.0 ± 0.4	64.0 ± 2.8	18.7 ± 0.1	5.01 ± 0.10
	6	68.7 ± 0.6	64.5 ± 3.1	18.1 ± 2.5	4.23 ± 0.06
	8	68.3 ± 0.3	65.2 ± 1.1	18.1 ± 0.5	3.79 ± 0.03

เมื่อพิจารณาสมบัติการเสียรูปหลังการกดอัดของยางที่อุณหภูมิห้อง (รูปที่ 2) พบว่าสารช่วยในกระบวนการผลิตชนิดน้ำมันอะโรมาติกและน้ำมันพาราฟินนิกไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติการเสียรูปหลังการกดอัดของยาง ในขณะที่การเพิ่มปริมาณ Ultraflow 500 ทำให้สมบัติการเสียรูปหลังการกดอัดของยางมีแนวโน้มที่ด้อยลงอย่างเห็นได้ชัด (Ultraflow 500 ส่งผลทำให้ยางมีค่าการเสียรูปหลังการกดอัดสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ) ซึ่งการด้อยลงของสมบัติการเสียรูปหลังการกดอัดที่อุณหภูมิห้องคาดว่าเกิดจากการลดลงของระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงของโมเลกุลยางเมื่อมีการเติม Ultraflow 500 ลงไปนั่นเอง [13]

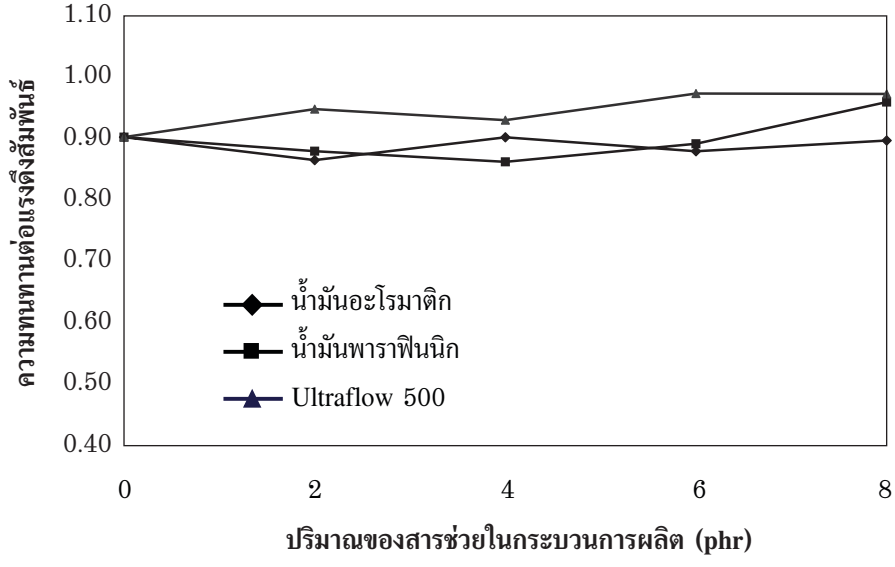


รูปที่ 2 ผลของสารช่วยในกระบวนการผลิตต่อสมบัติการเสียรูปหลังการกดอัดที่อุณหภูมิห้อง

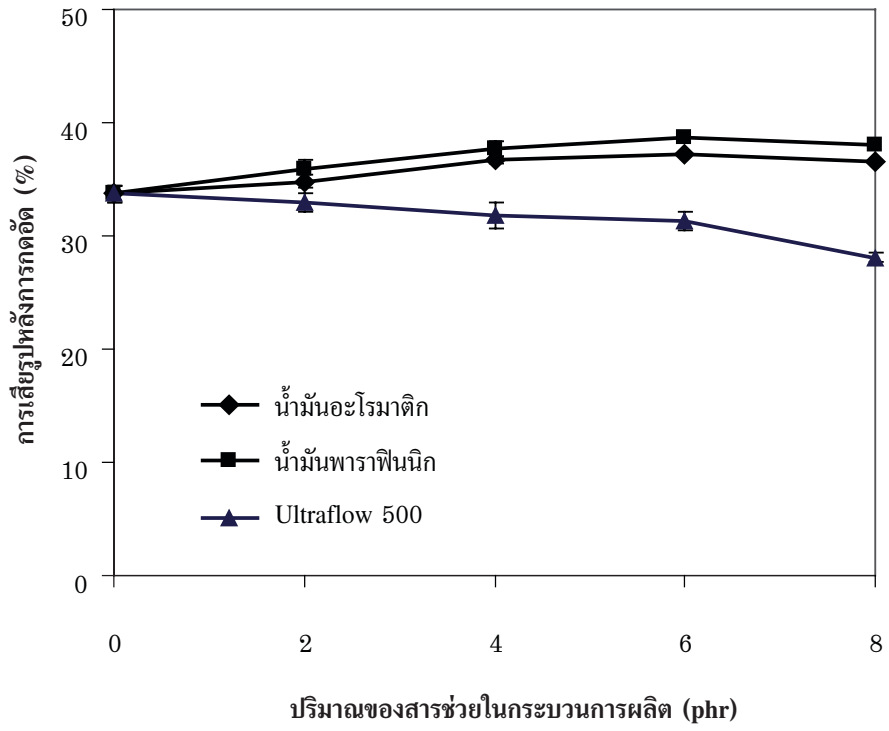
สมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ

รูปที่ 3 และ 4 แสดงผลของสารช่วยในกระบวนการผลิตต่อสมบัติความทนทานต่อความร้อนของยาง ซึ่งแสดงในรูปของสมบัติความทนทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์และสมบัติการเสียรูปหลังการกดอัดที่อุณหภูมิสูง ตามลำดับ จากผลการทดลองในรูปที่ 3 พบว่าความทนทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์ของยางทั้งหมดมีค่าต่ำกว่า 1 แสดงให้เห็นว่าการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 22 ชั่วโมง ส่งผลให้ความทนทานต่อแรงดึงของยางมีค่าต่ำลง อย่างไรก็ดี ในภาพรวมแล้วค่าความทนทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์ของยาง EPDM ก็ยังมีค่าค่อนข้างสูง (> 0.9) ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ายาง EPDM มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพได้ดี นอกจากนี้ยังพบว่าการปรับเพิ่มปริมาณของน้ำมันมิเนอรัล (ทั้งน้ำมันอะโรมาติกและน้ำมันพาราฟินนิก) ไม่ส่งผลต่อสมบัติความทนทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์ของยางอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่การเพิ่มปริมาณของ Ultraflow 500 กลับส่งผลให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์ของยางมีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างสารช่วยในกระบวนการผลิตทั้ง 3 ชนิดพบว่าที่ปริมาณการเติมเท่ากัน Ultraflow 500 ส่งผลทำให้ยางมีค่าความทนทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์สูงที่สุด ที่เป็นเช่นนี้คาดว่าน่าจะเกิดจากพันธะคู่ที่มีอยู่ใน Ultraflow 500 สามารถเข้าไปจับกับอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่น ทำให้อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา ด้วยเหตุนี้ จึงพบว่าค่าความทนทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์ของยางมีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณของ Ultraflow 500 เมื่อพิจารณาสมบัติการเสียรูปหลังการกดอัดของยางที่อุณหภูมิสูง (รูปที่ 4) พบว่าการเสียรูปหลังการกดอัดที่วัดได้มีค่า

สูงกว่าค่าที่วัดได้ ณ อุณหภูมิห้องค่อนข้างมาก ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากในระหว่างการทดสอบที่อุณหภูมิสูง ยางได้รับการบ่มเร่งด้วยความร้อนจนเกิดการเสื่อมสภาพส่งผลทำให้สมบัติความยืดหยุ่นของยางสูญเสียไป เมื่อพิจารณาผลของปริมาณสารช่วยในกระบวนการผลิตต่อสมบัติการเสียรูปหลังการกดอัดที่อุณหภูมิสูงของยาง พบว่าน้ำมันอะโรมาติกและน้ำมันพาราฟินนิกนั้นส่งผลทำให้สมบัติการเสียรูปหลังการกดอัดมีแนวโน้มด้อยลงเล็กน้อย (ยางมีการเสียรูปเพิ่มขึ้นเล็กน้อย) เมื่อปริมาณในการเติมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งการด้อยลงของสมบัติดังกล่าวคาดว่าน่าจะเกิดจากการระเหยไปของน้ำมัน ณ อุณหภูมิสูง ส่งผลทำให้ยางคงรูปสูญเสียสมบัติความยืดหยุ่นไป อย่างไรก็ดี เป็นที่น่าแปลกใจที่พบว่าการเพิ่มปริมาณของ Ultraflow 500 กลับส่งผลทำให้ยางมีสมบัติความทนทานต่อการเสียรูปหลังการกดอัดที่อุณหภูมิสูงดีขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ การเพิ่มปริมาณ Ultraflow 500 ส่งผลทำให้ยางที่ได้รับการบ่มเร่งด้วยความร้อนมีสมบัติความยืดหยุ่นสูงขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของสมบัติความยืดหยุ่นตามปริมาณของ Ultraflow 500 ดังกล่าวคาดว่าน่าจะเกิดจากการที่ Ultraflow 500 สามารถปรับปรุงสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนของยางนั่นเอง



รูปที่ 3 ผลของสารช่วยในกระบวนการผลิตต่อสมบัติความทนทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์



รูปที่ 4 ผลของสารช่วยในกระบวนการผลิตต่อสมบัติการเสียรูปหลังการกดอัดที่อุณหภูมิสูง

สรุปผลการทดลอง

การเติมสารช่วยในกระบวนการผลิตทั้ง 3 ชนิด คือ น้ำมันอะโรมาติก น้ำมันพาราฟินนิก และ Ultraflow 500 ในยาง EPDM ที่ได้รับการเสริมแรงด้วยเขม่าดำนั้น พบว่าสารช่วยในกระบวนการผลิตทั้ง 3 ชนิดดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการช่วยปรับปรุงกระบวนการผลิตได้ใกล้เคียงกัน กล่าวคือทั้ง 3 ชนิดส่งผลให้ทั้งค่าความหนืดและพลังงานที่ใช้ในการผสมมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตามปริมาณของสารช่วยในกระบวนการผลิตที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้ง่ายยิ่งขึ้น แต่เมื่อพิจารณาผลของสารช่วยในกระบวนการผลิตทั้ง 3 ชนิดต่อสมบัติเชิงกลต่างๆ ของยางพบว่า การเพิ่มปริมาณของสารช่วยในกระบวนการผลิตทั้ง 3 ชนิดส่งผลทำให้ยางมีความแข็ง มอดุลัส และความทนทานต่อแรงดึงด้อยลง ซึ่งการด้อยลงของค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางจะเห็นได้อย่างชัดเจนในกรณีของน้ำมันพาราฟินนิก นอกจากนี้ยังพบว่าสารช่วยในกระบวนการผลิตชนิด Ultraflow 500 ซึ่งนอกจากจะสามารถทำหน้าที่เป็นเพปไทเซอร์ในยางธรรมชาติแล้ว ยังสามารถทำหน้าที่เป็นพลาสติไซเซอร์ในยาง EPDM ได้อีกด้วย อย่างไรก็ตาม เนื่องจาก Ultraflow 500 มีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้างโมเลกุลทำให้มีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับสารเคมีในกลุ่มที่ทำให้ยางคงรูป ดังนั้น Ultraflow 500 จึงมีฤทธิ์ในการหน่วงปฏิกิริยาคงรูปของยาง ซึ่งส่งผลทำให้ยางคงรูปมีระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงต่ำลง แม้ว่า Ultraflow 500 จะส่งผลทางด้านลบต่อลักษณะการคงรูปของยางมากกว่าน้ำมันอะโรมาติกและน้ำมันพาราฟินนิก แต่ผลการทดลองก็ชี้ให้เห็นว่าการใช้ Ultraflow 500 เป็นสารช่วยในกระบวนการผลิตจะทำให้ยางคงรูปที่ได้มีสมบัติความทนทานต่อการฉีกขาดและความทนทานต่อความร้อนสูงกว่าการใช้น้ำมันอะโรมาติกและน้ำมันพาราฟินนิก

เอกสารอ้างอิง

1. Hofmann, W. 1989. Rubber Technology Handbook. New York. Hanser Publishers. p. 100.
2. Mitra, S., Ghanbari-Siahkalia, A., Kingshotta, P., Rehmeierb, H. K., Abildgaardc, H. and Almdalet, K. 2006. Chemical Degradation of Crosslinked Ethylene-Propylene-Diene Rubber in an Acidic Environment. Part I. Effect on Accelerated Sulphur Crosslinks. *Polymer Degradation and Stability* 91: 69-80.
3. พงษ์ธร แซ่อุย. 2548. สารเคมียาง. พิมพ์ครั้งที่ 1. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC). หน้า 99-101.
4. Ibarra, L., Posadas, P. and Esteban-Martinez, M. 2004. Influence of Some Additives on Rheological Properties, Viscosity, and Dynamic Mechanical Properties in NR Compounds. *Journal of Applied Polymer Science* 94: 332-344.
5. Menon, A. R. R., Pillai, C. K. S. and Nando, G. B. 1999. Cure Characteristics and Physicomechanical Properties of Natural Rubber Modified with Phosphorylated Cashew Nut Shell Liquid Polymer: A Comparison with Aromatic Oil. *Journal of Applied Polymer Science* 73: 813-818.
6. Baarle, B. V. 1997. Processing Aids. *Newsletter of the Rubber Foundation Information Center for Natural Rubber* 9: 9-10.
7. Dick, J. S. 2001. Rubber Technology Compounding Testing for Performance. Cincinnati. Hanser Gardner Publications. p. 132.
8. Ismail, H. and Anuar, H. 2000. Palm Oil Fatty Acid As an Activator in Carbon Black Filled Natural Rubber Compounds: Dynamic Properties, Curing Characteristics, Reversion and Fatigue Studies. *Polymer Testing* 19: 349-359.
9. Processing Additive for Polymers. 2007. Available from http://www.inforubber.com/product/dispersing/uflow500.asp. 8 February 2007.
10. Zhang, L., Li, T., Lu, Y., Tang, Y., Qiao, J. and Tian, M. 2006. The Morphology and Property of Ultra-Fine Full-Vulcanized Acrylonitrile Butadiene Rubber Particles/EPDM Blends. *Journal of Applied Polymer Science* 100: 3673-3679.
11. Park, S. J. and Seo, M. K. 2005. Influence of Surface Characteristics of Carbon Blacks on Cure and Mechanical Behaviors of Rubber Matrix Compoundings. *Journal of Colloid and Interface Science* 291: 229-235.
12. Menon, A. R. R., Aigbodion, A. I., Pillai, C. K. S. and Mathew, N. M. 2002. Processability Characteristics and Physico-Mechanical Properties of Natural Rubber Modified with Cashewnut Shell Liquid and Cashewnut Shell Liquid-Formaldehyde Resin. *European Polymer Journal* 38: 163-168.
13. Coran, A. Y. 2003. Chemistry of the Vulcanization and Protection of Elastomers: A Review of the Achievements. *Journal of Applied Polymer Science* 87: 24-30.

ได้รับบทความวันที่ 21 มกราคม 2551
ยอมรับตีพิมพ์วันที่ 1 เมษายน 2551