

ทำไมยาง S-SBR จึงเหมาะที่จะใช้ผลิต “Green tyre”

จากกระแสความตระหนักถึงการอนุรักษ์ด้านอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมของโลกที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้หลายๆ ประเทศมีการบังคับใช้ข้อกำหนดในการควบคุมมลภาวะด้านสิ่งแวดล้อมที่เข้มงวดมากขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งข้อกำหนดที่ต้องปฏิบัติตามข้อกำหนด EU Tyre Labelling Regulation 1222/2009 โดยต้องติดฉลากแสดงสมบัติสำคัญ 3 ประการของยางล้อ ได้แก่

- 1) ความต้านทานการหมุน (rolling resistance) ซึ่งบอกถึงความสามารถในการประหยัดเชื้อเพลิง (A ดีที่สุด จนถึง G แย่ที่สุด)
- 2) ดัชนีการยึดเกาะถนนเปียก (wet grip index) ซึ่งบอกถึงความปลอดภัยในการขับขี่บนพื้นผิวถนนเปียก (A ดีที่สุด จนถึง G แย่ที่สุด)
- 3) ระดับความดังของเสียงที่เกิดจากล้อสัมผัสกับพื้นถนน (noise) ซึ่งบอกถึงความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (ลดมลพิษทางเสียง)



การบังคับให้แสดงฉลากดังกล่าวส่งผลให้ผู้ผลิตรายล้อมรถยนต์ยี่ห้อชั้นนำของต่างประเทศมุ่งเน้นพัฒนายางล้อที่มีค่าความต้านทานการหมุนต่ำและมีสมบัติการยึดเกาะถนนเปียกที่ดี โดยพัฒนาและผลิตจำหน่ายภายใต้ชื่อ “Green tyre” ซึ่งปัจจุบันส่วนใหญ่นิยมใช้ยาง S-SBR (solution-polymerised styrene butadiene rubber) แทนยาง E-SBR (emulsion-polymerised styrene butadiene rubber) ทำไมจึงเป็นเช่นนั้น?

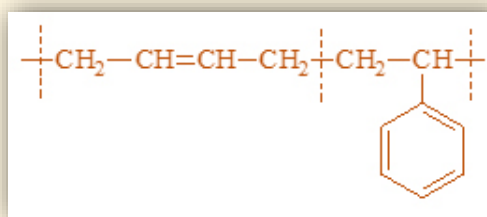
ยางสไตรีนบิวทาไดอีน (styrene butadiene rubber; SBR)



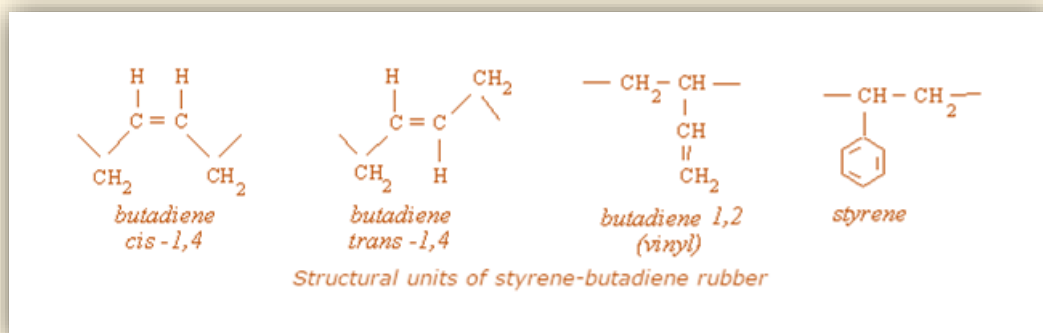
ยางสไตรีนบิวทาไดอีน (styrene butadiene rubber; SBR) เป็นยางสังเคราะห์ที่มีการใช้งานแพร่หลายมากที่สุดในปัจจุบันเพราะเป็นยางที่มีราคาถูก มีคุณภาพสม่ำเสมอและแปรรูปได้ง่าย แม้ว่ายางชนิดนี้จะมีสมบัติเชิงกลที่ไม่สูงมากนักเนื่องจากไม่สามารถเกิดผลึกได้เมื่อได้รับความเครียด (strain-induced crystallisation) แต่เมื่อได้รับการเสริมแรงด้วยสารตัวเติมเสริมแรงที่เหมาะสมแล้ว ยางที่ได้จะมีสมบัติเชิงกลที่ดีสามารถนำไปใช้งานในทางวิศวกรรมได้อย่างหลากหลาย อย่างไรก็ตาม เนื่องจากยาง SBR มีหมู่สไตรีนอยู่ในโครงสร้างโมเลกุล ทำให้ยางชนิดนี้มีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature; Tg) ที่สูงกว่ายางธรรมชาติ (natural rubber; NR) และยางบิวทาไดอีน (butadiene rubber; BR) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือยาง SBR มีความยืดหยุ่นต่ำกว่ายาง NR และ BR นอกจากนี้ ยาง SBR ยังจัดเป็นยางที่ไม่มีขี้ผึ้ง จึงไม่ทนน้ำมันหรือตัวทำละลายที่ไม่มีขี้ผึ้งเป็นยางที่เสื่อมสภาพได้ง่ายเนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลยังคงมีพันธะคู่อยู่ในปริมาณค่อนข้างมาก จึงต้องใช้สารป้องกันการเสื่อมสภาพเพื่อยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากยาง SBR ซึ่งมีหลากหลายประเภท เช่น สายพานลำเลียงพื้นรองเท้า รวมถึงดอกยางล้อรถยนต์โดยสาร ส่วนใหญ่ยาง SBR จะถูกนำไปใช้ผสมกับยางชนิดอื่นๆ ได้แก่ NR และ/หรือ BR เพื่อปรับปรุงให้ดอกยางล้อให้มีสมบัติบางประการที่ดีขึ้น [1]

ยาง SBR เป็นยางสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้นโดยการนำสไตรีนมาโพลิเมอไรซ์ร่วมกับบิวทาไดอีนโดยมีโครงสร้างทางเคมี ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยทั่วไปสัดส่วนของสไตรีนต่อบิวทาไดอีนจะอยู่ในช่วง 15-40% ยาง SBR แบ่งตามกระบวนการผลิต ได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. ยาง “E-SBR” คือ ยาง SBR ที่ผลิตด้วยกระบวนการโพลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน (emulsion polymerisation) ซึ่งควบคุมการเกิดปฏิกิริยาได้ยาก ทำให้ยาง E-SBR มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่ กว้างและมีโครงสร้างโมเลกุลเป็นแบบกิ่งก้านสาขาค่อนข้างสูง อีกทั้งหมู่สไตรีนในโมเลกุลจะกระจายอยู่ อย่างไม่เป็นระเบียบ ส่วนหมู่บิวทาไดอีนที่มีอยู่ในโครงสร้างโมเลกุลนั้นส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของ trans-configuration โดยมีส่วนที่เป็น cis-configuration และไวนิล (1,2-vinyl) ผสมอยู่ด้วยเพียงเล็กน้อย (ดูรูปที่ 2) ยางชนิดนี้มีใช้กันค่อนข้างมากในอุตสาหกรรม



รูปที่ 1 สูตรโครงสร้างเคมีของยางสไตรีนบิวทาไดอีน



รูปที่ 2 โครงสร้าง cis-, trans-, vinyl 1,2- ของบิวทาไดอีน [2]

2. ยาง “S-SBR” คือ ยาง SBR ที่ผลิตด้วยกระบวนการโพลิเมอไรเซชันแบบสารละลาย (solution polymerisation) ซึ่งสามารถควบคุมการเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่าแบบอิมัลชัน ทำให้ยาง S-SBR มีการกระจายตัว ของน้ำหนักโมเลกุลที่แคบ (สามารถควบคุมน้ำหนักโมเลกุลได้ดี) และมีกิ่งก้านสาขาต่ำกว่า หมู่สไตรีนในโมเลกุล อาจกระจายอยู่อย่างอิสระหรืออยู่แบบบล็อกโคโพลิเมอร์ก็ได้ นอกจากนั้นหมู่บิวทาไดอีนที่มีอยู่ในยาง S-SBR ยังสามารถเกิดการจัดเรียงตัวแบบไวนิลได้ในสัดส่วนที่สูงกว่าหรือสามารถควบคุมให้มีการจัดเรียงตัว แบบ cis-configuration ในปริมาณที่สูงกว่าหมู่บิวทาไดอีนที่มีอยู่ในยาง E-SBR ก็ได้ ส่งผลให้สามารถผลิต ยาง S-SBR ให้มีโครงสร้างที่สามารถให้สมบัติตามที่ต้องการได้มากขึ้น เช่น มีความต้านทานการหมุนต่ำลง ในการนำไปผลิตยางล้อ หรือมีความสามารถในการยึดเกาะถนนเปียกสูงขึ้น เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้ อุตสาหกรรมยางล้อมีแนวโน้มที่จะใช้ยาง S-SBR ในปริมาณที่สูงขึ้นเรื่อยๆ

ตารางที่ 1 สมบัติพื้นฐานของยาง S-SBR และ E-SBR ที่ผลิตโดยบริษัท Lanxess จำกัด [3]

สมบัติ	S-SBR	E-SBR
ปริมาณสไตรีน (%)	15-40	23-40
ปริมาณไวนิล (%)	7-55	15-20
การกระจายตัวของสไตรีน	บล็อกหรืออิสระ	อิสระ
ปริมาณกรดไขมันสูงสุด (%)	0.5	6
น้ำหนักโมเลกุล	สามารถควบคุมได้	-
การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล	แคบ	กว้าง
กิ่งก้านสาขา	เล็กน้อย	มาก

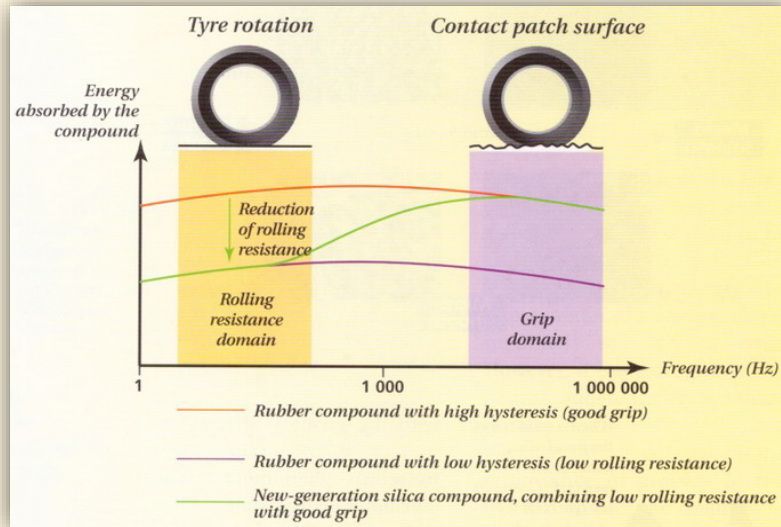
ความต้านทานการหมุนของยางล้อและความสามารถในการยึดเกาะถนนเปียก

เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปในอุตสาหกรรมยางล้อว่าค่า $\tan \delta$ ที่อุณหภูมิ 60°C และ 0°C สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ความต้านทานการหมุนและความสามารถในการยึดเกาะถนนเปียกของยางล้อได้ ทั้งนี้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\tan \delta$ และสมบัติดังกล่าวพิจารณาได้จากสมบัติไดอิเล็กทริกของยางเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเชิงพลวัต กล่าวคือ ในขณะที่ยางล้อหมุน ความถี่ในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางอยู่ในช่วง 10-100 Hz และอุณหภูมิของดอกยางอยู่ในช่วงประมาณ 60-70°C ดังนั้น ความต้านทานการหมุนของยางล้อจึงสามารถทำนายได้จากการวัดอัตราส่วนระหว่างโมดูลัสสูญเสีย



(loss modulus) และโมดูลัสยืดหยุ่น (storage modulus) ณ ความถี่และอุณหภูมิในช่วงดังกล่าวได้โดยตรง [4] แต่ในกรณีของความสามารถในการยึดเกาะถนนเปียกนั้น เมื่อแตะเบรก ยางล้อจะสั่นไถลอย่างรวดเร็วไปบนพื้นผิวถนนที่หยาบ ทำให้ยางเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ความถี่สูงมากดังแสดงในรูปที่ 3 (บางครั้งอาจสูงถึง 100,000 Hz ที่อุณหภูมิ 40°C [5]) แต่การศึกษาสมบัติของยางที่ความถี่สูงมากๆ นั้นทำได้ยากเนื่องจากมีขีดจำกัดของเครื่องมือทดสอบ ดังนั้นจึงมีการประยุกต์ใช้สมการของ Williams-Landel-Ferry (WLF) เพื่อให้สามารถทำนายสมบัติของยางที่ความถี่สูงมากได้จากการวัดสมบัติของยางที่ความถี่ต่ำ (เช่น 10 Hz) แต่วัดที่อุณหภูมิต่ำลงแทน (อาศัยหลัก time-temperature superposition) และเมื่อพิจารณาการเบรกในสภาพถนนที่แตกต่างกันจะพบว่า ยางที่อยู่บนพื้นถนนเปียกจะมีความถี่สูงกว่ายางที่อยู่บนพื้นถนนแห้ง ด้วยเหตุนี้เมื่อประยุกต์ใช้สมการ WLF ก็จะพบว่าประสิทธิภาพการยึดเกาะบนถนนเปียกสัมพันธ์โดยตรงกับค่า $\tan \delta$ ที่อุณหภูมิต่ำกว่าคือประมาณ 0°C ในขณะที่ประสิทธิภาพในการยึดเกาะบนถนนแห้งจะสัมพันธ์โดยตรงกับค่า $\tan \delta$ ที่อุณหภูมิสูงกว่าคืออาจจะอยู่ในช่วงประมาณ 20-25°C จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจึงเป็นที่เข้าใจกันโดยทั่วไปว่ายางที่มีค่า $\tan \delta$ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0°C สูง ก็จะสามารถต้านทานการหมุนเปียกได้ดี ส่วนยางที่มีค่า $\tan \delta$ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 60°C สูง ก็จะสามารถต้านทานการหมุนที่แห้งตามไปด้วย ซึ่งจะทำให้สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงในการขับเคลื่อน ดังนั้น หากต้องการให้ยางล้อมีความสามารถในการยึดเกาะถนนเปียกสูงในขณะที่มีความต้านทานการหมุนต่ำ จึงจำเป็นต้องออกสูตรดอกยางล้อให้ได้ยางที่มีค่า $\tan \delta$ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0°C สูง ในขณะที่มีค่า $\tan \delta$ ที่อุณหภูมิ 60°C ต่ำ





รูปที่ 3 การดูดกลืนพลังงานของยางที่มีความถี่ต่างๆ [6-7]

S-SBR ดีกว่า E-SBR อย่างไรในยางล้อ

ชาคริต สิริสิงห์ และคณะ [8] ได้ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของดอกยางล้อรถยนต์โดยสารที่ผลิตจากยาง S-SBR และ E-SBR (ตารางที่ 2) ที่มีการแปรสารตัวเติม 2 ระบบ ได้แก่ 1) เขม่าดำ (N234) 2) ซิลิกา (Tokusil 255) ที่ใช้ร่วมกับสารคู่ควบไซเลน (TESPT) ดำเนินการผสมยางกับสารเคมีโดยใช้วิธีการผสมแบบ 3 ขั้นตอน ได้แก่

ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมยางมาสเตอร์แบตช์ (masterbatch)

ขั้นตอนที่ 2 การบ่มยางมาสเตอร์แบตช์ที่อุณหภูมิสูงอีกครั้งเพื่อให้สารคู่ควบไซเลนสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลบนพื้นผิวของซิลิกาได้ดียิ่งขึ้น

ขั้นตอนที่ 3 การผสมยางมาสเตอร์แบตช์กับสารวัลคาไนซ์

ตารางที่ 2 ข้อมูลพื้นฐานของยาง S-SBR และ E-SBR เกรดที่ใช้ในการศึกษา

	S-SBR (6450SL)	E-SBR (1723)
ปริมาณสไตรีน (%)	34.6	23.4
ปริมาณไวนิล (%)	40.1	-
ปริมาณน้ำมัน TDAE (phr)	37.5	37.5
ความหนืดมูนนี่ ML1+4@100°C (MU)	53.2	49.1

จากการศึกษาสมบัติการวัลคาไนซ์ของยาง S-SBR และ E-SBR พบว่า ยาง S-SBR สามารถวัลคาไนซ์ได้เร็วกว่ายาง E-SBR (ดูตารางที่ 3) ทั้งนี้คาดว่าน่าจะเกิดจากยาง S-SBR มีสัดส่วนของไวนิลในบิวทาไดอีนที่สูงกว่ายาง E-SBR ซึ่งการจัดเรียงตัวแบบไวนิลนี้จะทำให้ยางมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีสูงกว่าการจัดเรียงตัวแบบ cis- หรือ trans- นอกจากนี้ยางที่ได้รับการเสริมแรงด้วยเขม่าดำมีระยะเวลาวัลคาไนซ์ต่ำกว่ายางที่ได้รับการเสริมแรงด้วยซิลิกา ทั้งนี้เนื่องจากบนพื้นผิวของซิลิกามีหมู่ไซลานอลที่สามารถดูดซับสารกระตุ้นปฏิกิริยาหรือสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นต่างได้ การเติมซิลิกาลงไปจึงส่งผลทำให้ยางคอมพาวด์มีระยะเวลาวัลคาไนซ์ที่สูงขึ้น

ตารางที่ 3 สมบัติต่างๆ ของยาง S-SBR และยาง E-SBR

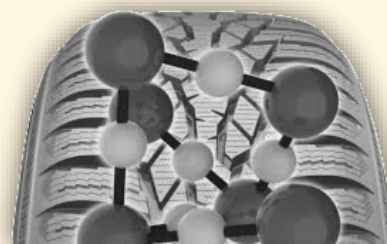
สมบัติ	S-SBR		E-SBR	
	เขม่าดำ	ซิลิกา	เขม่าดำ	ซิลิกา
ระยะเวลาวัลคาไนซ์ (min)	10.0	18.7	11.9	26.0
ความแข็ง (Shore A)	61.5	66.1	61.5	62.4
100% โมดูลัส (MPa)	1.80	3.06	1.81	2.20
ความทนต่อแรงดึง (MPa)	18.1	19.0	19.1	19.3
ความยืด ผน จุดขาด (%)	562	405	563	499
ความต้านทานต่อการขาด - ปริมาตรสูญเสียน (mm ³)	19.7	24.8	28.1	85.0
ความร้อนสะสม (°C)	21.5	10.0	24.0	13.5

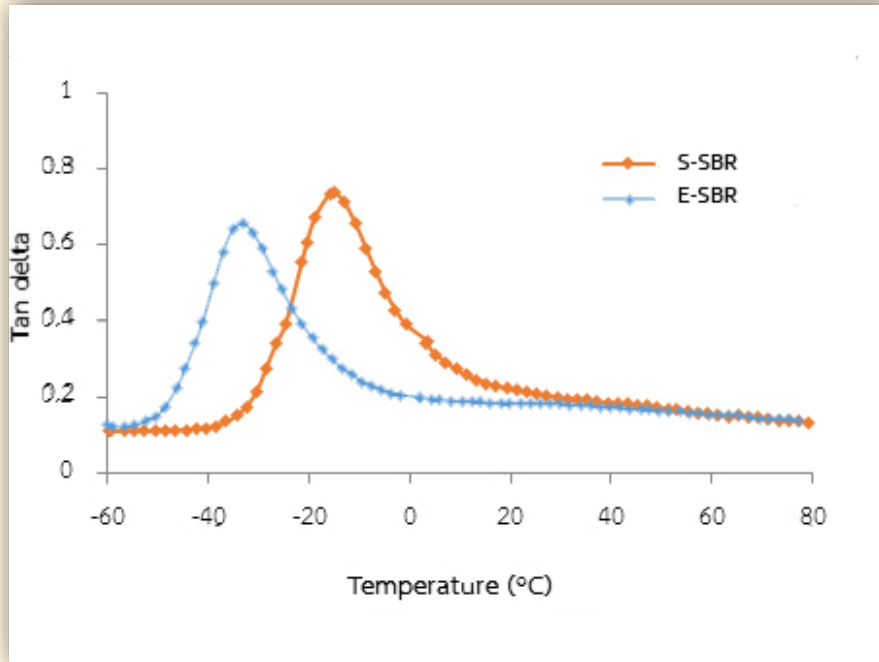
งานวิจัยนี้ยังแสดงให้เห็นว่ายาง S-SBR และ E-SBR ที่เสริมแรงด้วยเขม่าดำมีค่าความแข็ง โมดูลัส และความทนต่อแรงดึง ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อเสริมแรงด้วยซิลิกาพบว่ายาง S-SBR มีความแข็งและโมดูลัสสูงกว่ายาง E-SBR ค่อนข้างมาก (ยกเว้นค่าความทนต่อแรงดึงที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ) ทั้งนี้เนื่องจากยาง S-SBR มีหมู่ไวนิล (ที่เกิดจากการจัดเรียงตัวของบิวทาไดอีน) ในสัดส่วนที่สูงกว่ายาง E-SBR ดังนั้นระหว่างที่บ่มยางมาสเตอร์แบตช์ในขั้นตอนของการผสมที่อุณหภูมิสูง หมู่ไวนิลในโมเลกุลของยาง S-SBR ซึ่งมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีสูงกว่าการจัดเรียงตัวแบบอื่นๆ [9] จึงสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับสารคู่ควบไซเลนได้ดี ส่งผลทำให้ยาง S-SBR มีอันตรกิริยากับซิลิกาสูงกว่ายาง E-SBR ซึ่งมีหมู่ไวนิลในสัดส่วนที่ต่ำกว่า นอกจากนี้การเติมสารคู่ควบไซเลนที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ (Si-69) ลงไปในระบบด้วย จะทำให้ยาง S-SBR มีระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่สูงกว่าอีกด้วย

ยาง S-SBR มีความต้านทานต่อการขาดสูงกว่ายาง E-SBR (ปริมาตรสูญเสียนน้อยกว่า) ซึ่งจะเห็นได้เด่นชัดมากขึ้นในกรณีที่เสริมแรงด้วยซิลิกา ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากยาง S-SBR มีอันตรกิริยากับสารตัวเติมสูงกว่ายาง E-SBR ค่อนข้างมาก โดยเฉพาะในกรณีที่เสริมแรงด้วยซิลิกา ประกอบกับยาง S-SBR มีความแข็งและความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงกว่ายาง E-SBR เล็กน้อยอีกด้วย จึงทำให้ยาง S-SBR มีความต้านทานต่อการขาดสูงกว่ายาง E-SBR

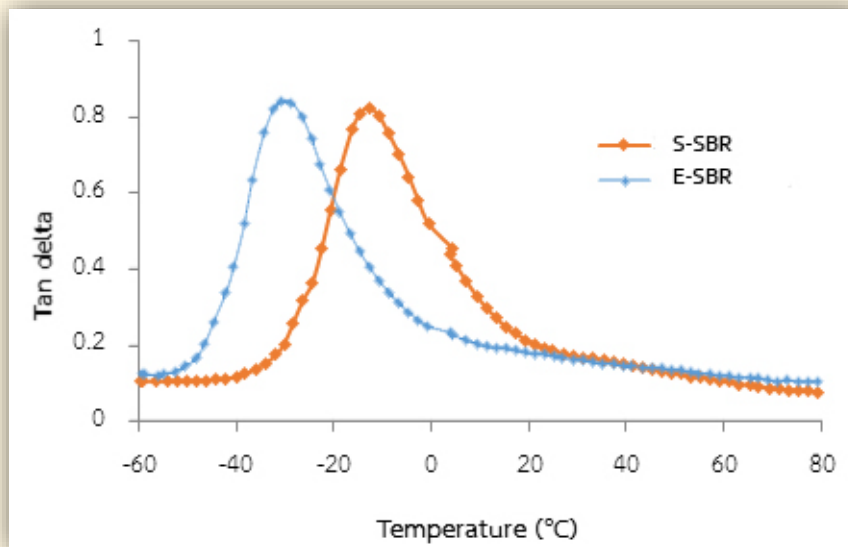
สำหรับค่าความร้อนสะสมพบว่า ยาง S-SBR ให้ค่าความร้อนสะสมต่ำกว่ายาง E-SBR เล็กน้อย ที่เป็นเช่นนี้คาดว่าน่าจะเป็นผลจากที่ยาง S-SBR มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่สูงกว่า และมีอันตรกิริยากับสารตัวเติม (โดยเฉพาะกับซิลิกา) สูงกว่ายาง E-SBR โมเลกุลยางจึงเกิดการลื่นไถลบนพื้นผิวของสารตัวเติมในระหว่างการทดสอบได้น้อยกว่า ส่งผลให้ยาง S-SBR มีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเชิงพลวัตต่ำกว่ายาง E-SBR

นอกจากสมบัติทางกายภาพทั่วไปแล้ว งานวิจัยนี้ยังได้เน้นศึกษาสมบัติเชิงพลวัตของยาง SBR ในช่วง -60°C ถึง 80°C ด้วยเครื่อง Dynamic Mechanical Analyser (DMA) ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4-5 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่า $\tan \delta$ ของยางวัลคาไนซ์ที่เสริมแรงด้วยเขม่าดำ และซิลิกา ตามลำดับ จากรูปจะเห็นว่ายาง S-SBR มีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วสูงกว่ายาง E-SBR ค่อนข้างมาก (เส้นกราฟขยับไปทางด้านขวามือ) ทั้งนี้เพราะยาง S-SBR มีปริมาณสไตรีนและไวนิลสูงกว่ายาง E-SBR นั่นเอง และเนื่องจากยาง S-SBR มีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่สูง จึงส่งผลให้มีค่า $\tan \delta$ ที่อุณหภูมิ 0°C สูงขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน (เพราะที่อุณหภูมิ 0°C ค่า $\tan \delta$ ยังคงอยู่ในช่วงบ่าของพีก) ด้วยเหตุนี้ ยาง S-SBR จึงมีประสิทธิภาพในการเกาะถนนเปียกที่สูงกว่ายาง E-SBR ค่อนข้างมาก อย่างไรก็ตาม แม้ว่ายาง S-SBR จะมีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่สูง แต่กลับพบว่ายาง S-SBR ให้ค่า $\tan \delta$ ที่อุณหภูมิ 60°C ใกล้เคียงกับยาง E-SBR ในกรณีที่เสริมแรงด้วยเขม่าดำหรือต่ำกว่าในกรณีที่เสริมแรงด้วยซิลิกา ผลการทดลองแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่ายาง S-SBR นอกจากจะมีประสิทธิภาพในการยึดเกาะถนนเปียกได้ดีกว่ายาง E-SBR แล้ว ยังมีความต้านทานการหมุนที่ใกล้เคียงหรือต่ำกว่ายาง E-SBR อีกด้วย (ขึ้นอยู่กับระบบของการเสริมแรง) ซึ่งจะช่วยให้ยางล้อประหยัดพลังงานได้มากขึ้น





รูปที่ 4 ค่า $\tan \delta$ ที่อุณหภูมิต่างๆ ของยางวัลคาไนซ์ S-SBR และ E-SBR ที่เสริมแรงด้วยเขม่าดำ



รูปที่ 5 ค่า $\tan \delta$ ที่อุณหภูมิต่างๆ ของยางวัลคาไนซ์ S-SBR และ E-SBR ที่เสริมแรงด้วยซิลิกา

เมื่อเปรียบเทียบผลของชนิดสารตัวเติม (ตารางที่ 4) จะพบว่าการเสริมแรงด้วยซิลิกาจะส่งผลทำให้ยางมีค่า $\tan \delta$ ที่อุณหภูมิ 0°C สูงกว่าการเสริมแรงด้วยเขม่าดำ และที่น่าสนใจก็คือการเสริมแรงด้วยซิลิกายังส่งผลทำให้ยางมีค่า $\tan \delta$ ที่อุณหภูมิ 60°C ต่ำที่สุดอีกด้วย ผลการทดสอบบ่งชี้อย่างชัดเจนว่าการเสริมแรงด้วยซิลิกานอกจากจะทำให้ดอกยางล้อยมีประสิทธิภาพในการยึดเกาะถนนเปียกสูงขึ้นแล้ว ยังส่งผลทำให้ดอกยางล้อยังมีความต้านทานการหมุนลดลงด้วย (มีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานสูงขึ้น) ที่เป็นเช่นนี้เพราะการเสริมแรงด้วยซิลิการ่วมกับสารคู่ควบไซเลนจะทำให้อุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของยางสูงกว่าการเสริมแรงด้วยเขม่าดำเล็กน้อย (เส้นกราฟขยับไปทางขวามือ) ซึ่งอาจเกิดจากซิลิกามีอันตรกิริยากับยางสูงกว่าเขม่าดำและยางที่เสริมแรงด้วยซิลิกายังมีระดับความหนาแน่นของ

การเชื่อมโยงที่สูงกว่ายางที่เสริมแรงด้วยเขม่าดำด้วย (คาดว่าเป็นผลจากการเติมสารควบไซเลนที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ) การขยับของเส้นกราฟดังกล่าวจึงส่งผลทำให้ค่า $\tan \delta$ ที่อุณหภูมิ 0°C ขยับสูงขึ้นตามไปด้วย ยางที่เสริมแรงด้วยซิลิกา จึงมีประสิทธิภาพในการยึดเกาะถนนเปียกสูงกว่ายางที่เสริมแรงด้วยเขม่าดำ

ตารางที่ 4 ค่า $\tan \delta$ ที่อุณหภูมิ 0°C และ 60°C ของยางวัลคาไนซ์ S-SBR และ E-SBR

ยาง	$\tan \delta$			
	เขม่าดำ		ซิลิกา	
	0°C	60°C	0°C	60°C
S-SBR	0.381	0.158	0.511	0.109
E-SBR	0.206	0.160	0.242	0.117

สรุป

ยาง S-SBR เป็นยางที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการผลิตดอกยางล้อรถยนต์โดยสารมากกว่ายาง E-SBR เพราะยาง S-SBR เกิดการวัลคาไนซ์ได้เร็ว มีอันตรกิริยากับสารตัวเติมสูง โดยเฉพาะกับซิลิกา ทำให้ดอกยางล้อมีการสูญเสียพลังงานขณะขับที่ต่ำกว่า (มีค่า $\tan \delta$ ที่ 60°C ต่ำ) อีกทั้งยังมีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่สูงกว่า จึงส่งผลทำให้ยาง S-SBR มีความสามารถในการยึดเกาะถนนเปียกได้ดีกว่า นอกจากนี้ ยาง S-SBR ยังมีความต้านทานต่อการขีดถูที่สูงกว่ายาง E-SBR รวมถึงมีความร้อนสะสมต่ำกว่ายาง E-SBR ด้วย โดยเฉพาะเมื่อได้รับการเสริมแรงด้วยซิลิกา

เอกสารอ้างอิง

1. พงษ์ธร แซ่ฮุย, สารเคมียาง, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค), 2548.
2. https://www.tut.fi/ms/muo/vert/5_rubber_chemistry/SR_styrene_butadiene_rubbers.htm, Cited: 11/11/2015.
3. <http://techcenter.lanxess.com/pbr/emea/en/products/description/10/index.jsp?docId=7167394&pid=10>, Cited: 15/05/2013.
4. H.G. Lee, H.S. Kim, S.T. Cho, I.T. Jung and C.T. Cho. Characterization of Solution Styrene Butadiene Rubber (SBR) Through the Evaluation of Static and Dynamic Mechanical Properties and Fatigue in Silica-Filled Compound. Asian J. Chem. 25(9), 5251, 2013.
5. H. Takino, R. Nakayama, Y. Yamada, Viscoelastic Properties of Elastomers and Tire Wet Skid Resistance, Rubber Chem. Technol. 70(3), 584, 1997.
6. Michelin. The Tyre Digest, 2002.
7. H.D. Brandt, W. Nentwig, N. Rooney, R.T. LaFlair, U.U. Wolf, J. Duffy, J.E. Puskas, G. Kaszas, M. Drewitt and S. Glander. Rubber, 5. Solution Rubbers, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH, Weinheim, 2011.
8. ชาคกริต สิริสิงห์ และคณะ, การศึกษาเพื่อพัฒนาสูตรดอกยางล้อรถยนต์โดยสารที่เกาะถนนเปียกได้ดีและสูญเสียพลังงานต่ำ, รายงานการวิจัย เสนอต่อสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.), กรกฎาคม 2558.
9. K. Inagaki, M. Hayashi and A. Imai, Development of the Solution SBRs for High-Performance Tires. R&D Report, Sumitomo Kagaku, 200

ดร.พงษ์ธร แซ่ฮุย และ ชญาภา นิมสุวรรณ
 เครือข่ายพัฒนาอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางและไม้ยางพารา
 กระทรวงอุตสาหกรรม
 วันที่ 25 พฤศจิกายน 2558