

การใช้สารตัวเติม เช่น เชมม่าดำ (เมื่ออนุภาคขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร) ผสมเข้าไปในยางล้อเพื่อปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงและความต้านทานต่อการสึกกร่อนนั้น มีมานานแล้ว แต่วันนี้ทางบริษัท Lanxess ได้นำเสนอสารเติมแต่งชนิดใหม่สำหรับอุตสาหกรรมยางล้อที่มีชื่อว่า “นาโนพรีน (Nanoprene)” ซึ่งจะช่วยลดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงให้ต่ำลง (เนื่องจากช่วยลดความต้านทานการหมุน (rolling resistance) ให้ต่ำลง) โดยที่ยังคงมีความสามารถในการยึดเกาะถนนที่ดีทั้งบนถนนแห้งและถนนเปียก

## สามเหลี่ยมมหัศจรรย์ของสมบัติยางล้อ

ตามการประเมินของผู้เชี่ยวชาญพบว่า ความต้านทานการหมุนของยางล้อเป็นปัจจัยที่ทำให้สิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงถึงหนึ่งในห้าสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคล และจะสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงมากขึ้นในกรณีของรถบรรทุก ยิ่งไปกว่านั้น ค่าความต้านทานต่อการสึกกร่อนไม่เพียงแต่จะส่งผลต่ออายุการใช้งานของยางล้อเท่านั้น แต่ยังก่อให้เกิดข้อถกเถียงกันในเรื่องของการเกิดฝุ่น (ละออง) อีกด้วย

สมบัติ 3 ประการใน “สามเหลี่ยมมหัศจรรย์” ของยางล้อกำลังมีความสำคัญเพิ่มมากขึ้น อันได้แก่ ความต้านทานการหมุน (rolling resistance) การยึดเกาะถนนบนพื้นเปียก (wet grip) และความต้านทานต่อการสึกกร่อน (abrasion) ซึ่งปัจจุบันสมบัติทั้ง 3 ประการนี้เป็นปัจจัยสำคัญในการตัดสินใจเลือกซื้อยางล้อ (นอกเหนือไปจากเรื่องของราคา) ของผู้บริโภค

โดยทั่วไปการเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดเกาะถนนบนพื้นเปียกจะทำให้ความต้านทานการหมุนสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้มีการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นและมีการสึกกร่อนเพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้เหตุผลหนึ่งที่ทำให้สมบัติทั้งสองมีความขัดแย้งกัน นั่นคือ การยึดเกาะถนนบนพื้นเปียกและความต้านทานการหมุน ต่างก็ขึ้นกับอัตราส่วนของโมดูลัสสูญเสีย (loss modulus) ต่อโมดูลัสสะสม (storage modulus) หรือค่าแทนเดลต้า (tan delta) นั่นเอง กล่าวคือ ค่าแทนเดลต้าที่เพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 0-20°C จะทำให้การยึดเกาะถนนบนพื้นเปียกเพิ่มขึ้น แต่เมื่อค่าแทนเดลต้าลดลงในช่วงอุณหภูมิ 50-70°C ก็จะทำให้ความต้านทานการหมุนลดลงด้วย

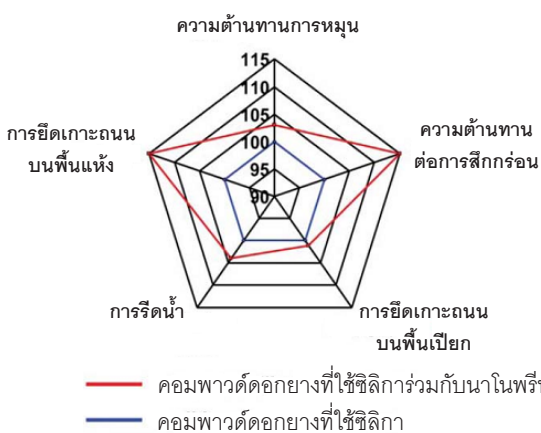
การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวของค่าแทนเดลต้าจะเลื่อนไปตามช่วงอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป แต่ไม่ส่งผลต่อลักษณะรูปร่างของกราฟ อย่างไรก็ตามถ้ามีการเปลี่ยนแปลงสูตรผสมเคมีของยางผสมก็อาจจะทำให้การยึดเกาะถนนบนพื้นเปียกได้ดีขึ้น แต่ความต้านทานการหมุนลดต่ำลง (หรือกลับกัน)

## เทคโนโลยีซิลิกาช่วยปรับปรุงสมบัติการยึดเกาะบนพื้นเปียกให้ดีขึ้น

ในช่วงทศวรรษ 1990-1999 มีการวิจัยเพื่อหาแนวทางแก้ไขปัญหามาตรับทั้งสองที่มีความขัดแย้งกัน ซึ่งก็ได้มีการนำเทคโนโลยีซิลิกาเข้ามาใช้ในการแก้ปัญหา ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางล้อที่ใช้เชมม่าดำกับยางล้อที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมพบว่ายางล้อที่ใช้ซิลิกาจะให้อัตราส่วนระหว่างโมดูลัสสูญเสียต่อโมดูลัสสะสมที่ดีกว่า ทำให้รถไม่เกิดการลื่นไถลเปลี่ยนทิศทางเมื่อวิ่งบนพื้นเปียก จึงทำให้เทคโนโลยี ABS (Anti-lock Braking System) นิยมใช้ยางล้อที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม ในขณะที่ยางล้อที่ใช้เชมม่าดำจะยึดเกาะถนนบนพื้นเปียกได้ไม่ดี ทำให้รถเกิดการลื่นไถลเปลี่ยนทิศทางได้ อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับการใช้เชมม่าดำแล้ว ยางล้อที่ใช้ซิลิกาจะมีความต้านทานต่อการสึกกร่อนต่ำกว่า

ในยุโรปตะวันตก ถึงแม้ว่ายางล้อที่ใช้ซิลิกาจะมีราคาสูงกว่ายางล้อที่ใช้เชมม่าดำ แต่ผู้บริโภคก็นิยมใช้ ทำให้ปัจจุบันผู้ผลิตยางล้อในยุโรปได้ผลิตแต่ดอกยางล้อที่ใช้ซิลิกา ทั้งนี้แม้กระทั่งตลาดยางล้อทดแทน (replacement tyre market) ก็ยังนิยมใช้ยางล้อที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมมากกว่าเชมม่าดำด้วยเช่นกัน

เป็นที่น่าสังเกตว่าเทคโนโลยีซิลิกาที่ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องนั้นได้รับการพัฒนาในส่วนของเทคโนโลยีการผลิตมากกว่าการพัฒนาในเรื่องของวัสดุที่ใช้ กล่าวคือในปัจจุบันก็ยังมีการใช้สารออร์แกนไฮซิลเลนที่มีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ในการช่วยให้ซิลิกาเกิดการกระจายตัวและใช้เป็นสารคู่ควบช่วยยึดระหว่างซิลิกากับเนื้อยางอยู่ ซึ่งเทคโนโลยีดังกล่าวได้มีการใช้มาตั้งแต่ทศวรรษที่ 1970s (หรือเป็นเวลาเกือบ 40 ปีแล้ว) ดังนั้นการพัฒนาในช่วง 2-3 ปีที่ผ่านมาจึงเน้นไปที่การพัฒนาสารเคมีพื้นฐานที่มีการใช้กันอยู่ ซึ่งตลาดก็ยังไม่มีความเกี่ยวข้องกับวัสดุใหม่ออกมาในช่วงนี้

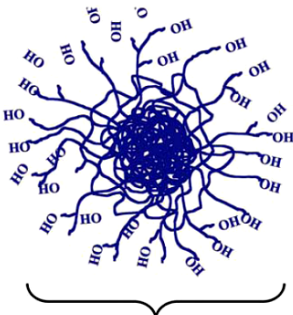


## รูปที่ 1 ผลของการใช้นาโนพรีนที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของคอมพาวด์ดอกยาง

## นาโนพรีน: นวัตกรรมสารเติมแต่งชนิดใหม่

นาโนพรีนประกอบด้วยอนุภาคทรงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 50 นาโนเมตร และมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่แคบมาก ผลิตจากโมโนเมอร์ชนิดพิเศษและเทคนิคการโพลีเมอไรซ์ (อิมัลชัน) ที่เหมาะสม ทำให้แกนกลางของอนุภาคนาโนพรีนเกิดการเชื่อมโยงสูงและมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) อยู่ที่บริเวณพื้นผิว (ดังแสดงในรูปที่ 2)

การที่แกนกลางของอนุภาคเกิดการเชื่อมโยงที่สูงนั้นทำให้อนุภาคยังสามารถคงรูปร่างอยู่ได้แม้ว่าจะถูกแรงเฉือนสูงระหว่างการผสม พื้นผิวที่มีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่นั้นสามารถจะเกิดปฏิกิริยาไดโพล-ไดโพลและพันธะไฮโดรเจนกับองค์ประกอบอื่นที่มีขั้วในยางคอมพาวด์และเกิดปฏิกิริยาเคมีกับสารตัวควบไซเลนได้ (เหมือนกับซิลิกา) ยิ่งไปกว่านั้นยังสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของอนุภาคนาโนพรีนกับหมู่ซิลานอลของซิลิกาได้อีกด้วย



เส้นผ่านศูนย์กลาง 40-65 นาโนเมตร

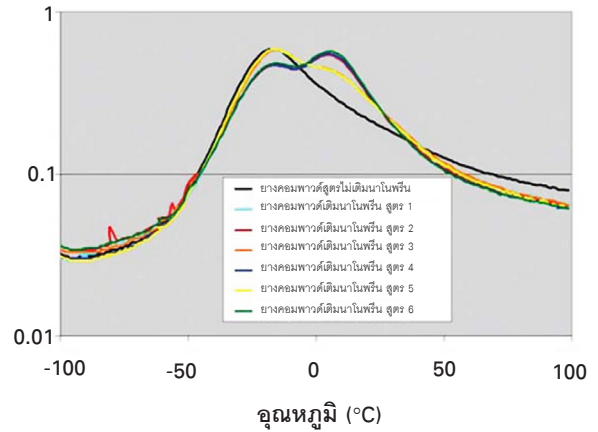
### รูปที่ 2 อนุภาคของนาโนพรีน

### ประสิทธิภาพของนาโนพรีนที่มีต่อสมบัติของยาง

การเติมนาโนพรีนเกรดที่มีอุณหภูมิคล้ายแก้ว (glass temperature;  $T_g$ ) เท่ากับ  $15^\circ\text{C}$  ลงไป 10-20 phr ทำให้ยางวัลคาไนซ์เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือ ยางวัลคาไนซ์ดังกล่าวจะเกิดค่าดัมป์สูงสุดในช่วงอุณหภูมิ  $0-20^\circ\text{C}$  ซึ่งจะไม่เกิดปรากฏการณ์นี้ในยางที่เติมแต่ซิลิกาเพียงอย่างเดียว จากผลของค่าดัมป์สูงสุดที่ได้นี้จะเป็นตัวบ่งชี้ที่สำคัญว่ายางล้อนี้มีสมบัติการยึดเกาะถนนบนพื้นเปียกที่ดีขึ้น นอกจากนี้ยางที่เติมนาโนพรีนยังมีค่าแทนเดลต้าในช่วงอุณหภูมิ  $50-70^\circ\text{C}$  ต่ำกว่ายางที่ผสมซิลิกา ซึ่งก็เป็นตัวบ่งชี้ที่สำคัญว่ายางที่เติมนาโนพรีนมีความต้านทานการหมุนลดลงด้วย (รูปที่ 3)

อย่างไรก็ตามเป็นเรื่องที่น่าประหลาดใจว่า ความสูงของค่าดัมป์สูงสุดในยางสูตรที่มีการเติมนาโนพรีนจะขึ้นอยู่กับลำดับการเติมนาโนพรีนและไซเลน (แม้ว่าจะมีสูตรผสมเคมีเหมือนกัน) ดังนั้นเพื่อให้ได้ค่าดัมป์สูงสุดมีค่าสูง วิธีที่ดีที่สุดคือการเติมนาโนพรีนเข้าไปในช่วงปลายของกระบวนการผสมก่อนการเติมไซเลน โดยมีสิ่งสำคัญที่ต้องพึงระลึกถึง คือ จำนวนขั้นตอนการผสมจะต้องไม่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เทคโนโลยีซิลิกา

### ค่าแทนเดลต้า



รูปที่ 3 ผลของนาโนพรีนที่มีต่อค่าแทนเดลต้า (ดัมป์) ของคอมพาวด์ดอกยาง

### การเติมนาโนพรีนลงไปเป็นสูตรผสมเคมีจะช่วยให้สมบัติดีขึ้น

ถึงแม้ว่าสมบัติของยางผสมจะขึ้นอยู่กับลำดับการเติมนาโนพรีนและไซเลน แต่ก็ได้หมายความว่า การพัฒนาสูตรผสมให้มีสมบัติที่ดีขึ้นจะมีความยุ่งยาก ตรงกันข้ามกลับไม่มีความจำเป็นที่จะต้องตัดแปรยางผสมดังกล่าวเพื่อให้สามารถนำไปใช้ร่วมกับสารเติมแต่งและสูตรผสมเคมียางที่มีอยู่เดิมได้

นาโนพรีนจัดเป็นสารประเภท “สารเติมแต่ง” ที่ช่วยปรับปรุงสมบัติของยางได้โดยที่การใช้งานไม่มีความซับซ้อนหรือมีค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นในการปรับสูตรที่มีอยู่ให้ดีขึ้น เหตุผลอย่างหนึ่งก็คือ นาโนพรีนเป็นอนุภาคที่มีการวัลคาไนซ์มาแล้ว (pre-crosslinking) และมีโครงสร้างที่ “อัดแน่น” ทำให้สารเคมีที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ เช่น สารตัวเร่งปฏิกิริยา กำมะถัน น้ำมัน และสารต้านออกซิเดชันไม่สามารถดูดซับลงไปบนเนื้อของนาโนพรีนได้ จึงทำให้การเติมนาโนพรีนลงไปโดยไม่ผลกระทบบต่อสมบัติของยางวัลคาไนซ์

นอกจากนี้กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ใช้นาโนพรีนนี้นสามารถทำได้ง่ายขึ้น กล่าวคือ นาโนพรีนจะรวมเป็นเนื้อเดียวกับเนื้อของยางได้อย่างรวดเร็วตั้งแต่ช่วงแรกของการผสม อย่างไรก็ตามผลข้างเคียงที่จะเกิดขึ้น ได้แก่ แรงดึงดูดของซิลิกาที่มีความว่องไวสูงต่อโลหะจะลดลง ซึ่งถือเป็นปัญหาในปัจจุบันที่เกิดขึ้นเกี่ยวกับ “การยึดติดแน่น (sticky)” ของยางที่ผสมกับซิลิกา



## ความสำคัญของอนุหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว

จากการที่อนุหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ของนาโนพรีนจะมีผลต่อรูปแบบอนุหภูมิของค่าแทนเดลต้า ปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนานาโนพรีนเกรดต่างๆ ที่มีอนุหภูมิ การเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งสามารถรองรับต่อความต้องการที่แตกต่างกันเมื่อนำไปใช้กับยางล้อแต่ละประเภท (ยางล้อรถยนต์นั่งส่วนบุคคลและรถจักรยานยนต์สำหรับฤดูร้อนและฤดูหนาว) และส่วนประกอบต่างๆ ของยางล้อ (ดอกยาง ร่องเล็กบนดอกยาง แก้มยาง และโครงยาง)

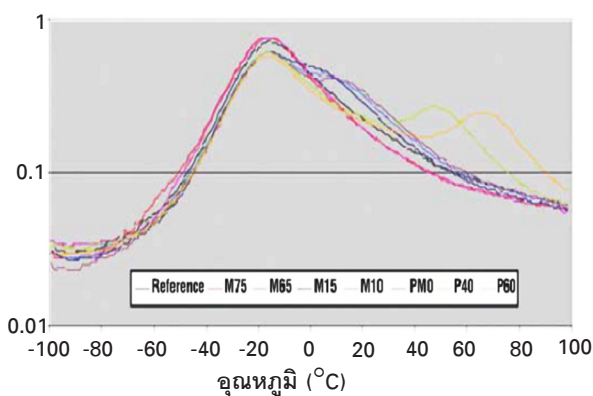
ตารางที่ 1 นาโนพรีนเกรดต่างๆ ที่มีจำหน่ายในปัจจุบัน

เกรด	ชนิดของยาง	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	d <sub>50</sub> (nm)	O <sub>spec.</sub> (m <sup>2</sup> /g)	T <sub>g</sub> (°C)	ปริมาณ OH (mg KOH/g)
B P60OH VP	SBR	1.06	47.4	126	60.0	20.5
B P40OH VP	SBR	1.04	40.3	146	37.5	20.5
B PM0OH VP	SBR	1.02	50.0	125	-2.5	25.1
B M10OH VP	SBR	1.02	50.0	125	-9.0	27.3
B M15OH VP	SBR	1.00	45.5	132	-14.5	25.2
B M75OH VP	BR	0.94	50.9	127	-77.0	32.8

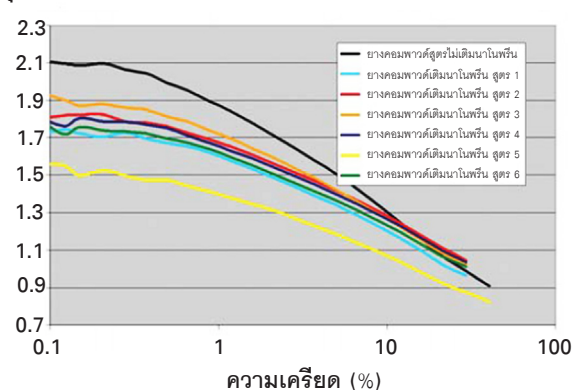
จากตารางที่ 1 แสดงนาโนพรีนเกรดต่างๆ ที่มีอนุหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ต่างๆ กัน ยกตัวอย่างเช่น เกรด B P40OH VP เป็นเกรดที่มีอนุหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) เท่ากับ +40°C ในขณะที่ B M15OH VP เป็นเกรดที่มีอนุหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) เท่ากับ -15°C โดยที่ M และ P แสดงถึงอนุหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ที่เป็นลบและบวกตามลำดับ OH คือ หมู่ไฮดรอกซิล และ B คือ รูปแบบการหีบห่อ (อัดเป็นก้อน) ซึ่งเป็นรูปแบบการหีบห่อที่มีการใช้กันมากในบริษัทผู้ผลิตยางล้อ

สำหรับเกรด B M75OH VP เป็นนาโนพรีนที่มีอนุหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) เท่ากับ -75°C ซึ่งเหมาะที่จะใช้สำหรับสูตรดอกยาง ร่องเล็กบนดอกยาง แก้มยาง และโครงยางล้อที่ใช้ในฤดูหนาว

ค่าแทนเดลต้า



โมดูลัสสะสม (MPa)



รูปที่ 4 ผลของอนุหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของนาโนพรีน

รูปที่ 5 ผลของนาโนพรีนที่มีต่อ Payne effect

จากการทดสอบยางล้อต้นแบบในห้องปฏิบัติการพบว่า การยืดเกาะถนนบนพื้นแห้งดีขึ้นร้อยละ 10-15 ความแข็งเกร็ง (rigidity) ของผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างแบบบล็อกดีขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าได้มีการปรับปรุงสมบัติบริเวณมุมให้ดีขึ้น

ความต้านทานต่อการสึกกร่อนของดอกยางที่เติมนาโนพรีนจะดีกว่าดอกยางที่ใช้ซิลิกาถึงร้อยละ 10-15 เหตุผลอาจจะเป็นเพราะว่า ยางคอมพาวด์สูตรที่เติมนาโนพรีนจะช่วยให้ซิลิกามีการกระจายตัวดีขึ้น ซึ่งจะลดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “Payne effect”<sup>1</sup> ลงได้

การใช้นาโนพรีนช่วยปรับปรุงสมบัติทั้งสามในสามเหลี่ยมมหัศจรรย์ให้ดีขึ้นทุกสมบัติโดยไม่มีสมบัติใดที่แยงเลย ไม่ว่าจะเป็นความต้านทานการหมุนที่ลดลง (ทำให้ประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิง) การยืดเกาะถนนบนพื้นเปียกและความต้านทานต่อการสึกกร่อนที่ดีขึ้น ทำให้สามารถตอบสนองต่อความต้องการของบริษัทผู้ผลิตยางล้อได้เป็นอย่างดี

ปัจจุบันนาโนพรีนได้ถูกนำไปทดสอบการใช้งานจากบริษัทผู้ผลิตยางล้อชั้นนำของโลก และได้มีการวางจำหน่ายยางล้อที่มีการใช้นาโนพรีนเรียบร้อยแล้ว นั่นหมายความว่า นาโนเทคโนโลยีได้เป็นหนทางหนึ่งที่จะช่วยปรับปรุงเทคโนโลยียางให้ดีขึ้นได้



รูปที่ 6 ยางล้อที่มีการใช้นาโนพรีนในสูตรคอมพาวด์ดอกยางที่นำมาแสดงในงาน K ปี ค.ศ. 2007

### เอกสารอ้างอิง

1. Rubber Journal Asia, April 2009

<sup>1</sup>Payne effect เป็นปรากฏการณ์ที่ยางมีค่าโมดูลัสสูงที่ระดับความเครียดต่ำ ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติม (เช่น เชมาค้ากับแชมาค้า หรือซิลิกากับซิลิกา) เป็นปัจจัยสำคัญ เพราะที่ระดับความเครียดต่ำๆ สารตัวเติมส่วนใหญ่ยังคงอยู่ใกล้กันและเกาะกลุ่มกันเป็นโครงข่ายตาข่าย (network) แต่เมื่อเพิ่มระดับความเครียดให้สูงขึ้น โครงข่ายตาข่ายของสารตัวเติมนี้ก็จะถูกทำลาย ทำให้ยางมีค่าโมดูลัสลดลง