

# บทบาทสำคัญของโพลีเมอร์และสารตัวเติมของคอมพาวด์ดอกยาง

## ที่มีต่อประสิทธิภาพของยางล้อ

เรียบเรียงโดย ชญาภา นิมสุวรรณ

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และ ศูนย์วิจัยเทคโนโลยียาง

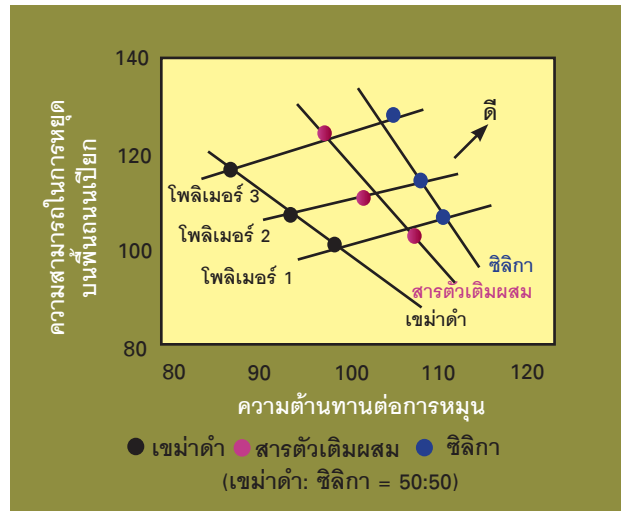
ยางล้อเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากของรถยนต์ มีหน้าที่รับน้ำหนัก ส่งแรงขับเคลื่อนทำให้รถวิ่งได้ ถ่ายเทแรงระหว่างการขับขี่ การหยุดรถ และการบังคับเลี้ยว ซึ่งการถ่ายเทแรงเหล่านี้ต้องทำในหลายสภาวะ ทั้งบนถนนเปียก ถนนแห้ง ถนนที่มีน้ำแข็งหรือหิมะ ยิ่งไปกว่านั้นยางล้อจำเป็นต้องสูญเสียพลังงานให้น้อยที่สุดเพื่อประหยัดน้ำมันและสามารถใช้งานได้อย่างยาวนานก่อนที่ดอกยางจะหมด ขณะที่ยางล้อหมุน ดอกยางจะสัมผัสกับผิวถนน ดังนั้นการเลือกคอมพาวด์ดอกยางที่เหมาะสมจะทำให้ยางล้อมีประสิทธิภาพที่ดี จากการห้ามจำหน่ายน้ำมันในช่วงทศวรรษที่ 70 ทำให้ความต้านทานต่อการหมุน (rolling resistance) ของล้อยางมีบทบาทสำคัญมากขึ้นในการประหยัดน้ำมัน การศึกษาในช่วงแรกจะเน้นไปที่การตัดแปรคอมพาวด์ดอกยางซึ่งมีผลอย่างมากต่อความต้านทานต่อการหมุน และได้มีการศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงที่ต้องประนีประนอมระหว่างความต้านทานต่อการหมุนและปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของยางล้อโดยการปรับเปลี่ยนชนิดของโพลีเมอร์ เขม่าดำ และน้ำมันที่ใช้ในช่วงต้นทศวรรษที่ 90 ได้มีการนำเอาซิลิกาซึ่งเป็นสารตัวเติมที่มีประสิทธิภาพใส่ลงไปในคอมพาวด์ดอกยางของยางล้อพบว่า ความต้านทานต่อการหมุนต่ำและความสามารถในการหยุดบนพื้นถนนเปียก (wet traction) ดีขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีการใช้ซิลิกาเพิ่มขึ้นอย่างมาก ในปี ค.ศ. 1998 ดอกยางล้อรถยนต์นั่งส่วนบุคคลในยุโรปร้อยละ 67 ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม ในปี ค.ศ. 2006 Rubber and Plastic News ได้รายงานว่าการใช้ฟิสิกส์พรีซิพิเตชันซิลิกา (precipitated silica) จะเติบโตขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 4.7 ต่อปีในช่วงอีก 10 ปีต่อมา ซึ่งส่วนใหญ่เป็นความต้องการจากอุตสาหกรรมยางล้อ ในการศึกษาก่อนหน้านี้ได้เน้นไปที่ความสัมพันธ์ของสมบัติเชิงกายภาพของคอมพาวด์ดอกยางที่มีต่อประสิทธิภาพยางล้อ ในศึกษานี้พบว่า ประสิทธิภาพจะสัมพันธ์โดยตรงกับปัจจัยต่างๆ ของคอมพาวด์ที่มีการปรับเปลี่ยนอย่างเป็นระบบ เช่น ชนิดของโพลีเมอร์และสารตัวเติม รวมทั้งซิลิกาชนิดใหม่ด้วย

### ปัจจัยที่มีผลต่อการทดลอง

ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของยางล้อ ได้แก่ ความสามารถในการหยุดบนพื้นถนนเปียก (wet traction) ความต้านทานต่อการสึกกร่อน (wear resistance) และความสามารถในการหยุดบนหิมะ (snow traction) ความต้านทานต่อการหมุนคำนวณจากค่าแทนเจนต์เดลต้าของคอมพาวด์ดอกยางที่ 30°C ปัจจัยที่สำคัญของคอมพาวด์ ได้แก่ ชนิดของโพลีเมอร์ (ในเทอมของค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature; T<sub>g</sub>)) ชนิดของสารตัวเติมและปริมาณที่ใช้ ในการศึกษาครั้งนี้จะศึกษาโพลีเมอร์ 3 ชนิด ได้แก่ โพลีเมอร์ชนิดที่ 1 ชนิดที่ 2 และชนิดที่ 3 (ซึ่งมี T<sub>g</sub> ต่ำ ปานกลาง และสูง ตามลำดับ) ซึ่งได้จากการผสมยางสไตรีนบิวทาไดอีน (styrene butadiene rubber; SBR) ที่มี T<sub>g</sub> สูง เข้ากับยางบิวทาไดอีนเกรดที่มีโครงสร้างเป็นซิส (cis-polybutadiene) สูง ชนิดของสารตัวเติมที่ศึกษา ได้แก่ เขม่าดำ ซิลิกา และสารตัวเติมผสมระหว่างเขม่าดำกับซิลิกา ส่วนการศึกษาปริมาณของสารตัวเติมจะใช้โพลีเมอร์ชนิดที่ 2 และระบบสารตัวเติมผสมระหว่างเขม่าดำกับซิลิกา และศึกษาโมดูลัสของคอมพาวด์ 3 ค่าในแต่ละปริมาณสารตัวเติมที่ใช้

### ผลการทดลอง

รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ที่ต้องประนีประนอมระหว่างความสามารถในการหยุดบนพื้นถนนเปียกกับความต้านทานต่อการหมุนที่มีต่อประสิทธิภาพของยางล้อเมื่อปรับเปลี่ยนปัจจัยต่างๆ ของคอมพาวด์ เมื่อปรับเปลี่ยนชนิดของโพลีเมอร์โดยใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติม ความสามารถในการหยุดบนพื้นถนนเปียกและความต้านทานต่อการหมุนจะแปรเปลี่ยนไปตามเส้นเขม่าดำ ในทางตรงกันข้ามเมื่อปรับเปลี่ยนชนิดของโพลีเมอร์โดยใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม เส้นกราฟที่แสดงประสิทธิภาพจะเปลี่ยนไปค่อนข้างมาก (เส้นซิลิกา) ในทำนองเดียวกันเมื่อปรับเปลี่ยนชนิดของสารตัวเติมโดยใช้โพลีเมอร์ชนิดที่ 1 ก็จะทำให้ความสามารถในการหยุดบนพื้นถนนเปียกกับความต้านทานต่อการหมุนจะเป็นไปตามเส้นโพลีเมอร์ 1 เมื่อใช้โพลีเมอร์ชนิดที่ 3 ที่มี T<sub>g</sub> สูง ประสิทธิภาพของยางล้อจะเป็นไปตามเส้นกราฟโพลีเมอร์ 3 โดยจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารตัวเติมที่ใช้ การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าคอมพาวด์ดอกยางเป็นปัจจัยที่สำคัญยิ่งต่อประสิทธิภาพของยางล้อ การเลือกโพลีเมอร์และสารตัวเติมที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญที่จะทำให้ยางล้อมีประสิทธิภาพที่ดี

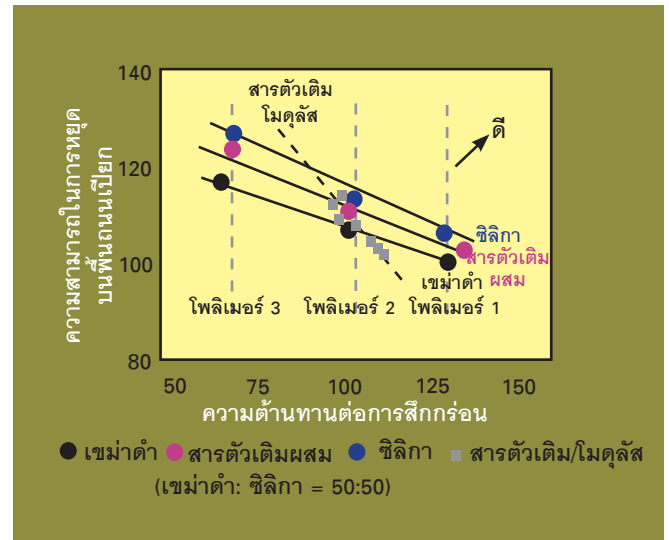
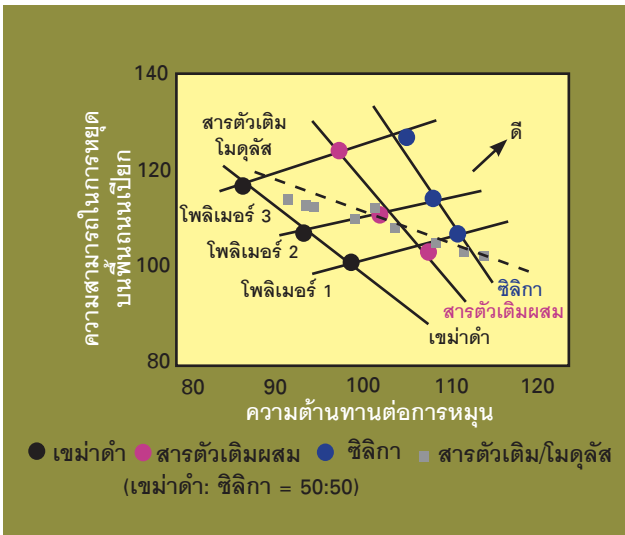


รูปที่ 1 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการหยุดบนพื้นถนนเปียกกับความต้านทานต่อการหมุนที่มีต่อประสิทธิภาพของยางล้อ (1)

ปัจจัยอื่นที่สำคัญของประสิทธิภาพคอมพาวด์ดอกยาง คือ ปริมาณของสารตัวเติมที่ใช้ในคอมพาวด์ โดยศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนปริมาณของสารตัวเติมโดยใช้โพลีเมอร์ชนิดที่ 2 และระบบสารตัวเติมผสม และศึกษาผลของโมดูลัสของคอมพาวด์ 3 ค่าในแต่ละปริมาณของสารตัวเติมที่ใช้ รูปที่ 2 แสดงประสิทธิภาพของคอมพาวด์ดอกยางเมื่อปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติมและโมดูลัส เป็นที่น่าสนใจว่าความชัน (slope) ของเส้นกราฟที่ต้องประนีประนอมระหว่างความสามารถในการหยุดบนพื้นถนนเปียกกับความต้านทานต่อการหมุนค่อนข้างจะต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของโพลีเมอร์และปริมาณสารตัวเติมที่ใช้ ตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการให้ความสามารถในการหยุดบนพื้นถนนเปียกเพิ่มขึ้นโดยที่สูญเสียความต้านทานต่อการหมุนน้อยที่สุดในระบบสารตัวเติมผสม ควรเลือกใช้โพลีเมอร์ที่มี  $T_g$  สูงขึ้นดีกว่าการใช้ปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามถ้าต้องการเพิ่มความต้านทานต่อการหมุนโดยที่สูญเสียความสามารถในการหยุดบนพื้นถนนเปียกน้อยที่สุด ควรจะต้องลดปริมาณสารตัวเติมที่ใช้ลงดีกว่าการเลือกใช้โพลีเมอร์ที่มี  $T_g$  ต่ำลง รูปที่ 2 แสดงประสิทธิภาพของยางล้อในเทอมของชนิดของโพลีเมอร์และสารตัวเติม ซึ่งการที่จะให้ได้ประสิทธิภาพตามที่ต้องการ จะต้องเลือกเส้นของคอมพาวด์ที่เหมาะสม

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการหยุดบนพื้นถนนเปียกกับความต้านทานต่อการสึกกร่อน (wear resistance) ซึ่งจะสำคัญมากสำหรับยางล้อทดแทน (replacement tyre) แผนภาพนี้แสดงว่าการประนีประนอมระหว่างความสามารถในการหยุดบนพื้นถนนเปียกกับความต้านทานต่อการหมุนเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรเมื่อปรับเปลี่ยนปัจจัยที่สำคัญแต่ละตัวที่มีผลต่อคอมพาวด์ เช่น โพลีเมอร์ที่มี  $T_g$  ต่างกัน ชนิดของสารตัวเติม และปริมาณของสารตัวเติมที่ใช้ในสูตรคอมพาวด์ดอกยาง ผลการทดลองแสดงว่าสารตัวเติมทุกชนิด (เซม่าดำ ซิลิกา สารตัวเติมผสม) จะให้ค่าความต้านทานต่อการสึกกร่อนของคอมพาวด์เท่ากัน อย่างไรก็ตามซิลิกาจะให้ค่าความสามารถในการหยุดบนพื้นถนนเปียกสูงกว่าเซม่าดำ ความชันของเส้นกราฟที่ต้องประนีประนอมระหว่างความสามารถในการหยุดบนพื้นถนนเปียกกับความต้านทานต่อการสึกกร่อนนั้นต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของโพลีเมอร์หรือปริมาณสารตัวเติมที่เปลี่ยนแปลงไป ถ้าต้องการให้ความสามารถในการหยุดบนพื้นถนนเปียกเพิ่มขึ้นโดยให้ความต้านทานต่อการสึกกร่อนลดลงน้อยที่สุด ควรจะเพิ่มปริมาณสารตัวเติมที่ใช้แทนที่จะเปลี่ยนไปเลือกใช้โพลีเมอร์ที่มี  $T_g$  สูงขึ้น เป็นที่น่าสังเกตว่าความชันของเส้นกราฟนี้กลับ (reverse) กับความชันของเส้นกราฟความสามารถในการหยุดบนพื้นถนนเปียกและความต้านทานต่อการหมุนในรูปที่ 2

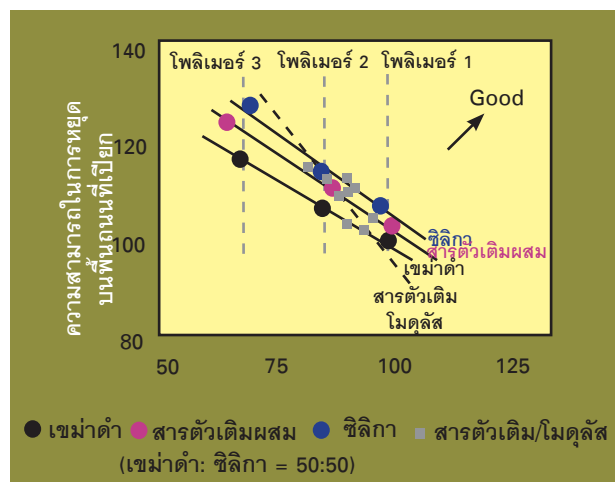




รูปที่ 2 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการหยุดบนพื้นถนนเปียกกับความต้านทานต่อการหมุนที่มีต่อประสิทธิภาพของยางล้อ (2)

รูปที่ 3 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการหยุดบนพื้นถนนเปียกกับความต้านทานต่อการสึกกร่อนที่มีต่อประสิทธิภาพของยางล้อ

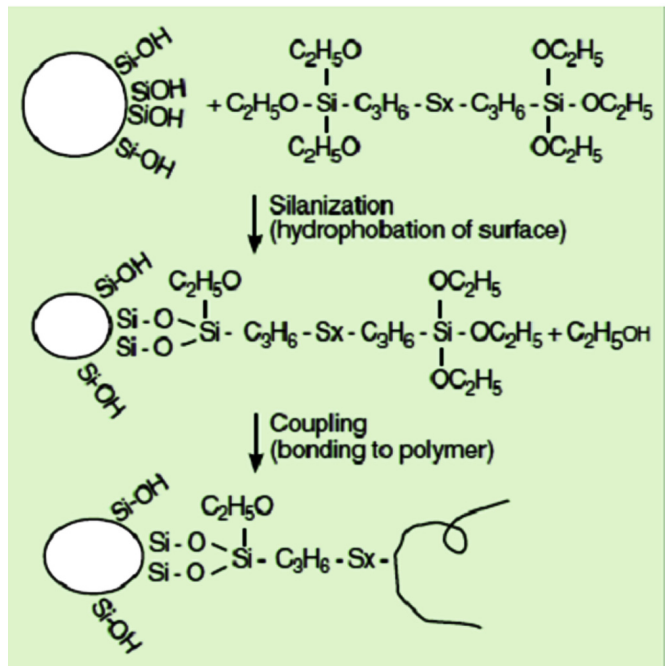
รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการหยุดบนพื้นถนนเปียกและความสามารถในการหยุดบนหิมะ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ของคอมพาวด์ เช่น ชนิดของโพลีเมอร์ ชนิดและปริมาณของสารตัวเติมที่ใช้ จากรูปจะเห็นว่าชนิดของโพลีเมอร์ (T<sub>0</sub>) มีผลอย่างมากต่อความสามารถในการหยุดบนหิมะ อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้การใช้ซีลิกาไม่ได้ทำให้ความสามารถในการหยุดบนหิมะดีกว่าการใช้เซม่าดำอย่างมีนัยสำคัญ ถึงแม้ว่าจะมีการนำซีลิกามาใช้ในยางล้อสำหรับฤดูหนาว (winter tyre) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปริมาณของซีลิกาที่ใช้มากกว่าเซม่าดำถึงร้อยละ 15 จะส่งผลให้โพลีเมอร์มีความหนาแน่นที่แตกต่างกันและอีกประการหนึ่งเป็นผลจากปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในซีลิกา



รูปที่ 4 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการหยุดบนพื้นถนนเปียกกับความสามารถในการหยุดบนหิมะที่มีต่อประสิทธิภาพของยางล้อ



จากการศึกษานี้พบว่า คอมพาวด์ดอกยางที่ใช้ซิลิกาจะให้ประสิทธิภาพของยางล้อดีกว่าการใช้เขม่าดำ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การที่ต้องประนีประนอมระหว่างความสามารถในการหยุดบนพื้นถนนเปียกกับความต้านทานต่อการหมุน นอกจากนี้ยังสามารถอธิบายได้ว่าการใช้ซิลิกาเพิ่มขึ้นส่งผลต่อการประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิงของรถยนต์ได้อย่างไร อย่างไรก็ตามการใช้ซิลิกาได้สร้างความท้าทายใหม่ในอุตสาหกรรมยางล้อจากปฏิกิริยาของสารคู่ควบ (coupling agent) เช่น Si69 (bis-(3-triethoxysilylpropyl)tetrasulfide) ดังแสดงในรูปที่ 5 ทั้งนี้เนื่องจากพื้นผิวของซิลิกามีความเป็นขั้วจากหมู่ไฮดรอกซิล (silanol groups) และไม่สามารถจะเข้ากับยางไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้วได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องดัดแปรพื้นผิวนุภาคของซิลิกาใหม่ให้ไม่มีขั้วด้วยการใช้สารคู่ควบ ไม่เช่นนั้นแล้วอนุภาคของซิลิกาที่สร้างพันธะไฮโดรเจนเชื่อมโยงระหว่างอนุภาคซิลิกา-ซิลิกาด้วยกันเองจะไม่สามารถกระจายตัวในยางไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้วได้ หน้าที่ของสารคู่ควบ ได้แก่ 1) การทำให้พื้นผิวของอนุภาคซิลิกาไม่ชอบน้ำ (hydrophobation) โดยการทำให้ปฏิกิริยาที่หมู่ไฮดรอกซิล 2) การสร้างพันธะเชื่อมโยงระหว่างอนุภาคของซิลิกาและสายโซ่โพลีเมอร์เพื่อให้เกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายที่แข็งแรงระหว่างที่ซิลิกาเกิดปฏิกิริยากับสารคู่ควบ (silanization reaction) จะเกิดการปลดปล่อยเอทานอลที่ระเหยได้ (volatile ethanol) ออกมา ซึ่งตามหลักการแล้วปฏิกิริยาคู่ควบ (coupling reaction) ระหว่างอนุภาคซิลิกากับโครงสร้างตาข่ายของยางควรจะต้องเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการขึ้นรูปยางล้อด้วยแม่พิมพ์ อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาคู่ควบบางปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นก่อนในขั้นตอนการผสมยางกับซิลิกา ซึ่งจะทำให้เกิดความยากในขั้นตอนการสร้างยาง (tyre building process)



รูปที่ 5 แผนภาพแสดงปฏิกิริยาระหว่างพื้นผิวนุภาคของซิลิกา สารคู่ควบ และสายโซ่โพลีเมอร์

จากปัญหาที่เกิดขึ้น ได้มีการนำสารคู่ควบชนิดพิเศษมาใช้เพื่อลดการปลดปล่อยเอทานอลที่ระเหยได้ ตัวอย่างสารคู่ควบชนิดพิเศษนี้ ได้แก่ NXT-Z ของ Momentive และ Si363 ของ Degussa สารเหล่านี้ทำให้เอทานอลมีน้ำหนักโมเลกุลที่สูงขึ้นและเกิดการระเหยได้น้อยลง จึงช่วยลดปัญหาการปลดปล่อยเอทานอลให้น้อยลงได้ สำหรับตัวอย่างพริซิปิเทตซิลิกา ได้แก่ Ciptane ของ PPG และ Coupsil ของ Degussa นอกจากนี้ยังอาจเลือกใช้สารตัวเติมผสมระหว่างซิลิกากับเขม่าดำ เช่น CRX2000 และ CRX4000 จาก Cabot ได้ สำหรับปัญหาเรื่องความยากในกระบวนการผลิตเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาคู่ควบก่อนเวลาอันควรสามารถทำให้ลดลงได้โดยการใช้สารคู่ควบ เช่น การแทนที่เททระซิลไฟต์ด้วยเมอร์แคปโตที่มีโครงสร้างแบบบล็อก หรือ NXT ของ Momentive หรือไดซิลไฟต์ หรือ Si266 ของ Degussa

**สรุป**

คอมพาวด์ดอกยางเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของยางล้อ ซึ่งการศึกษานี้ได้ปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ชนิดของโพลีเมอร์และสารตัวเติม ของคอมพาวด์ดอกยางเพื่อให้ประสิทธิภาพของยางล้อเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงร้อยละ 30-50 จากการศึกษพบว่าซิลิกาจะให้ประสิทธิภาพยางล้อที่ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งเส้นกราฟที่แสดงการประนีประนอมระหว่างความสามารถในการหยุดบนพื้นถนนเปียกกับความต้านทานต่อการหมุน อย่างไรก็ตามการใช้ซิลิกาในคอมพาวด์ทำให้ปัญหา เช่น การปลดปล่อยสารอินทรีย์ที่ระเหยได้และความยากในกระบวนการผลิต ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการใช้สารคู่ควบ