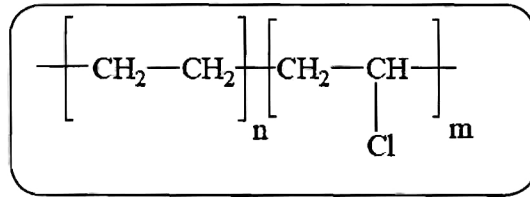


สมบัติของโพลีเมอร์ผสมระหว่างยางคลอรีน-โพลีเอทิลีนและยางธรรมชาติ

ดร. ชาศริต สิริสิงห์ และ ปญจพร วงศ์วิทยากุล

ยางคลอรีน-โพลีเอทิลีน (Chlorinated Polyethylene) หรือ CPE เป็นโพลีเมอร์สายโซ่ยาวชนิดอิ่มตัวที่เตรียมขึ้นจากการเติมอะตอมของคลอรีน (chlorine, Cl) ไปบนสายโซ่โพลีเอทิลีน (PE) ส่งผลให้โพลีเมอร์ที่ได้มีความเป็นขั้วสูงขึ้น ดังนั้น จากการที่ CPE มีความอึดตัวและความเป็นขั้วดังกล่าวจึงทำให้ CPE มีความทนต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อน ออกซิเจน โอโซน รวมถึงน้ำมันได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ อะตอมของคลอรีนที่มีอยู่ในโครงสร้างยังส่งผลทำให้ CPE ไม่ลามไฟ ด้วยเหตุนี้ CPE ที่ผ่านการวัลคาไนซ์จึงมักถูกนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ต้องการทั้งความยืดหยุ่นและความทนต่อความร้อนและน้ำมัน อาทิเช่น เบรลือกหุ้มสายโทรเลข ท่อยาง และซีลยาง ตลอดจนยางหุ้มเพลลาขับ เป็นต้น



รูปที่ 1 โครงสร้างยางคลอรีน-โพลีเอทิลีน

สำหรับ CPE ที่ผลิตโดยบริษัท Dupont Dow Elastomers Co., Ltd. มีชื่อทางการค้าว่า Tyrin™ สมบัติส่วนใหญ่ของ CPE ขึ้นอยู่กับปริมาณคลอรีนบนสายโซ่โพลีเมอร์ดังแสดงในตารางที่ 1

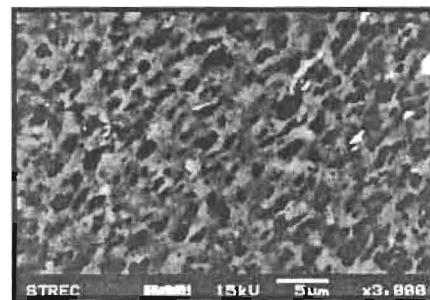
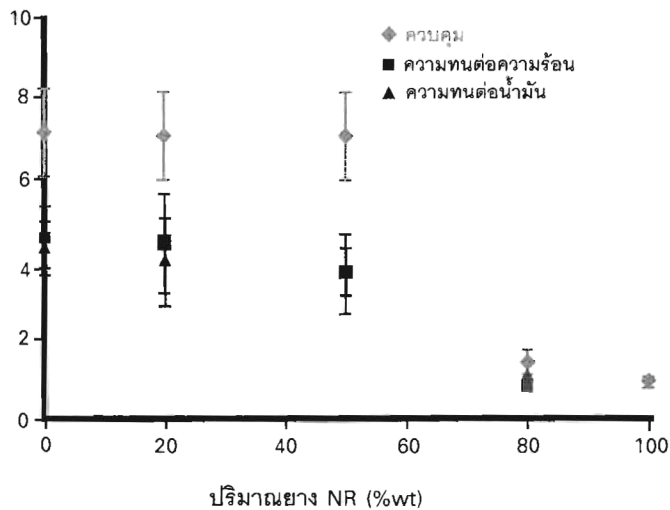
ตารางที่ 1 ผลของปริมาณคลอรีนต่อสมบัติของยาง Tyrin™ (วัลคาไนซ์ด้วยเพอร์ออกไซด์และโคโตะไดโซล) [1]

การเพิ่มปริมาณคลอรีน	การลดปริมาณคลอรีน
<ol style="list-style-type: none"> 1. ความทนต่อน้ำมันและสารเคมีสูงขึ้น 2. ความแข็งสูงขึ้น 3. ความทนต่อการตีไฟสูงขึ้น 4. ช่วยลดความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซและของเหลว 5. ความทนต่อการฉีกขาดสูงขึ้น 6. ช่วยเพิ่มความหนาแน่นของการเชื่อมโยงในการวัลคาไนซ์ด้วยระบบไทอะไดโซล 	<ol style="list-style-type: none"> 1. เพิ่มความสามารถในการรับพลาสติไซเซอร์ 2. ช่วยปรับปรุงสมบัติการหึงงอที่อุณหภูมิต่ำ 3. สมบัติการเสียรูปถาวรหลังกดตีขึ้น 4. สมบัติความทนต่อความร้อนสูงขึ้น 5. ช่วยเพิ่มความหนาแน่นของการเชื่อมโยงในการวัลคาไนซ์ด้วยระบบเพอร์ออกไซด์

เนื่องจาก CPE เป็นยางที่มีราคาสูงเมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ (NR) ดังนั้น จึงได้มีความพยายามที่จะนำยาง NR ไปผสมกับ CPE เพื่อลดต้นทุนในการผลิต โดยเบื้องต้นได้มีการรายงานผลของปริมาณยาง NR ต่อสมบัติเชิงกล ความทนต่อน้ำมัน และความทนต่อความร้อนของโพลีเมอร์ผสมระหว่าง CPE และ NR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเพอร์ออกไซด์ [2]

จากงานวิจัยพบว่าการเพิ่มสัดส่วนของยาง NR ให้สูงกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ทำให้อย่างผสมมีค่าความทนต่อแรงดึงลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2 นอกจากนี้ เมื่อนำยางผสมไปทดสอบสมบัติความทนต่อความร้อน (thermal ageing resistance) และความทนต่อน้ำมัน (oil resistance) พบว่าค่าความทนต่อแรงดึงของยางผสมลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มสัดส่วนของยาง NR ให้สูงกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ซึ่งผลการทดลองก็สอดคล้องกับข้อมูลทางสัณฐานวิทยาที่แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าโพลีเมอร์ผสมที่มีปริมาณยาง NR ไม่เกินร้อยละ 50 นี้ มี CPE เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (continuous phase or matrix) และยาง NR เป็นวัฏภาคที่กระจายตัว (dispersed phase) ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งส่งผลให้โพลีเมอร์ผสมที่เตรียมได้สามารถคงสมบัติความทนต่อน้ำมันและความร้อนได้ดี [2] อย่างไรก็ตาม โพลีเมอร์ผสมระหว่าง CPE และยาง NR ที่เตรียมได้ดังกล่าวไม่สามารถนำมาหลอมเหลวและขึ้นรูปใหม่ได้ เนื่องจากเพอร์ออกไซด์สร้างพันธะเชื่อมโยงได้ทั้งในโพลีเมอร์ที่อิมมัตวและไม่อิมมัตว นั่นคือการวัลคาไนซ์สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในวัฏภาคของ CPE และ NR ทำให้ไม่สามารถนำโพลีเมอร์ผสมดังกล่าวกลับมาขึ้นรูปและใช้งานใหม่ได้ (recycle) จึงเป็นข้อจำกัดหลักข้อหนึ่งของโพลีเมอร์ผสมที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเพอร์ออกไซด์

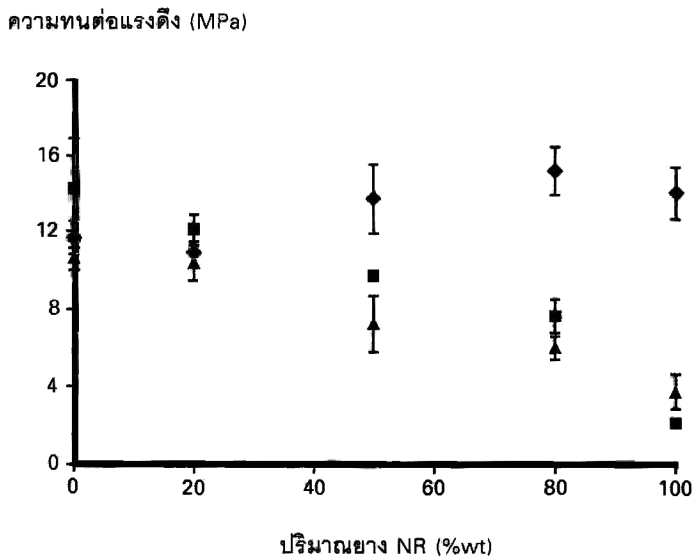
ความทนต่อแรงดึง (MPa)



รูปที่ 2 ความทนต่อแรงดึงของโพลีเมอร์ผสมระหว่าง CPE และยาง NR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเพอร์ออกไซด์ เมื่อใช้ยาง NR ปริมาณต่างๆ [2]

รูปที่ 3 สัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์ผสมระหว่าง CPE และยาง NR ที่มีปริมาณยาง NR ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก: วัฏภาคต่อเนื่องของ CPE (สีเทา) วัฏภาคของยาง NR (สีขาว) กระจายตัวอยู่ [2]

เพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าว จึงมีการวิจัยเพิ่มเติมเพื่อพัฒนา โพลีเมอร์ผสมโดยใช้กำมะถันเป็นสารที่ทำให้ยางวัลคาไนซ์แทนการใช้เพอร์ออกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากกำมะถันจะสร้างพันธะเชื่อมโยงเฉพาะในยางไม่อิ่มตัว ดังนั้นเฉพาะวัฏภาคของยาง NR เท่านั้นที่ถูกเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน ส่วนวัฏภาคของ CPE ซึ่งเป็นวัฏภาคต่อเนื่องจะไม่ถูกเชื่อมโยง ทำให้สามารถนำยางผสมนี้กลับมาขึ้นรูปและใช้งานใหม่ได้ โดยงานวิจัยดังกล่าวได้ศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนของโพลีเมอร์ผสมต่อสมบัติเชิงกล ความทนต่อความร้อนและความทนต่อน้ำมันของยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเติมยาง NR ลงไปในสัดส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะยังคงทำให้โพลีเมอร์ผสมมีสมบัติเชิงกล ความทนต่อความร้อนและความทนต่อน้ำมันใกล้เคียงกับ CPE ดังแสดงในรูปที่ 4 [3] โดยผลที่ได้สอดคล้องกับหลักฐานทางสัณฐานวิทยาที่พบว่าโพลีเมอร์ผสมดังกล่าวมี CPE เป็นวัฏภาคต่อเนื่องเมื่อปริมาณยาง NR มีค่าไม่เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งข้อมูลที่ได้แสดงให้เห็นว่าระบบที่ใช้เชื่อมโยงพันธะส่งผลอย่างชัดเจนต่อสมบัติของโพลีเมอร์ผสมโดยเฉพาะสมบัติความทนต่อน้ำมันและความร้อน



รูปที่ 4 ความทนต่อแรงดึงของโพลีเมอร์ผสมระหว่าง CPE และยาง NR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน เมื่อใช้ยาง NR ปริมาณต่างๆ [3]

ถึงแม้ว่าการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันจะทำให้สามารถนำโพลีเมอร์ผสมกลับมาขึ้นรูปและใช้งานใหม่ได้ แต่ผลงานวิจัยก็แสดงให้เห็นว่า หากต้องการให้ได้ยางผสมที่มีสมบัติความทนต่อความร้อนและน้ำมันอยู่ในเกณฑ์ที่ดี ผู้ประกอบการก็สามารถเติมยาง NR ลงไปได้เพียงร้อยละ 20 โดยน้ำหนักเท่านั้น ดังนั้นเพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิต จึงได้มีการศึกษาเพิ่มเติมโดยการนำยาง NR เกรด STR 20 มาใช้ทดแทนยาง NR เกรด STR 5L [4] ซึ่งโดยทั่วไปยาง NR เกรด STR 20 มีปริมาณสิ่งสกปรกและส่วนที่ไม่ใช่ยาง (non-rubber) เช่น โปรีติน และกรดไขมัน เป็นองค์ประกอบอยู่มาก ทำให้มีคุณภาพต่ำกว่ายาง NR เกรด STR 5L โดยสมบัติหลักที่ทดสอบ ได้แก่ พฤติกรรมการวัลคาไนซ์ (cure behavior) และสมบัติวิสโคอีลาสติก (viscoelastic properties) หรือที่รู้จักกันในชื่อของสมบัติหยุ่นหนืด โดยวัดสมบัติดังกล่าวจากเครื่อง Rubber Process Analyzer (RPA2000) และสูตรยางคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการเตรียมโพลีเมอร์ผสมได้แสดงไว้ในตารางที่ 2

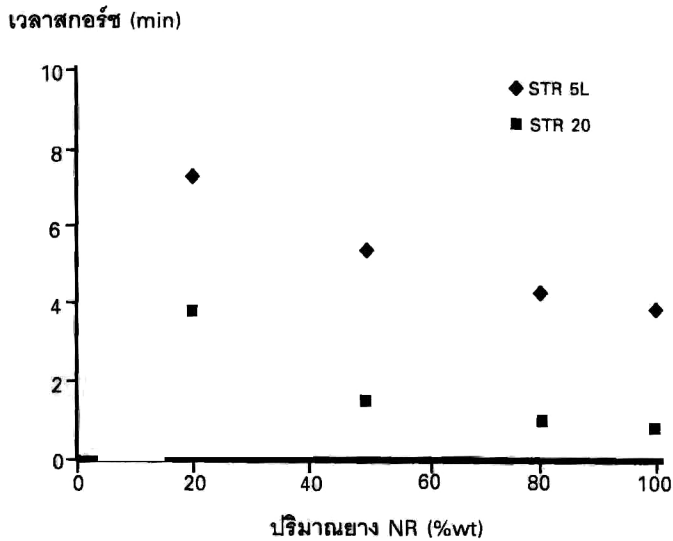
ตารางที่ 2 สูตรผสมเคมีของโพลีเมอร์ผสมระหว่าง CPE และยาง NR

ส่วนผสม	ปริมาณ (phr)
ยาง	100.0
ไอโซโพรพิลพิเนดพินิลอีเทนไดเออร์ (IPP)	4.0
กำมะถัน	2.0
บิวทิลดีทาร์เตอิลเพอร์ออกไซด์ฟีนีลเมท (TBBS)	1.0
แมกนีเซียออกไซด์	5.0
กรดสเตียริก	2.0
พริวัลคาไนเซชัน อินิเชียเตอร์ (PVI)	1.0

¹ สัดส่วนการผสม (CPE:NR) = 100/0, 80/20, 50/50, 20/80, 0/100

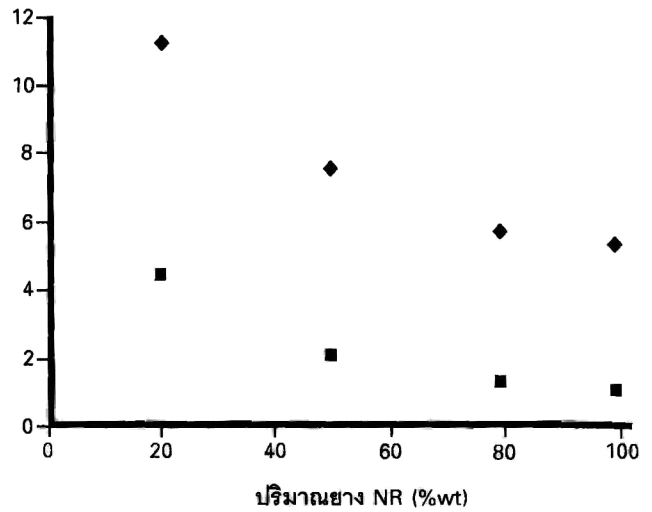
² ใช้เฉพาะกรณียาง NR เกรด STR 5L

พฤติกรรมการวัลคาไนซ์ของโพลีเมอร์คู่ผสมที่ใช้ยาง NR เกรด STR 20 แสดงไว้ในรูปที่ 5 และ 6 ซึ่งเป็นการแสดงผลของเกรดและปริมาณของยาง NR ต่อค่าเวลาสกอร์ช (scorch time; t_2) และเวลาการวัลไนซ์ที่เหมาะสม (optimum cure time; t_{90}) ของโพลีเมอร์คู่ผสม ตามลำดับ จากรูปจะเห็นว่าเมื่อใช้ยาง NR เกรด STR 20 ทำให้โพลีเมอร์คู่ผสมมีค่าเวลาสกอร์ชสั้นกว่าเมื่อใช้ยาง NR เกรด STR 5L เนื่องจากยางเกรด STR 20 มีปริมาณของส่วนที่ไม่ใช่ยางสูงซึ่งทำหน้าที่เสมือนตัวกระตุ้น (activator) เร่งให้ยาง NR เกิดการวัลคาไนซ์ได้เร็วขึ้น ดังนั้นเพื่อให้กระบวนการผลิตราบรื่นจึงต้องเติมสารหน่วง (pre-vulcanization inhibitor; PVI) ซึ่งเป็นตัวยับยั้งการวัลคาไนซ์ก่อนกำหนดลงในยางคอมพาวด์ของโพลีเมอร์คู่ผสมที่ใช้ยาง NR เกรด STR 20



รูปที่ 5 เวลาสกอร์ชของโพลีเมอร์คู่ผสมระหว่าง CPE และยาง NR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน [4]

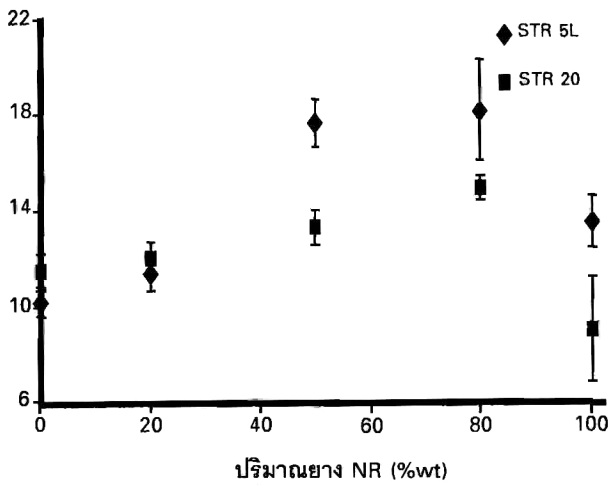
เวลาการสุกตัวไปร้อยละ 90 (min)



รูปที่ 6 เวลาการวัลคาไนซ์ที่เหมาะสมของโพลีเมอร์คู่ผสมระหว่าง CPE และยาง NR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน [4]

อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบค่าความทนต่อแรงดึงของโพลีเมอร์คู่ผสมที่ใช้ยาง NR ต่างชนิดกัน ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่าเกรดของยาง NR ไม่ส่งผลต่อค่าความทนต่อแรงดึงของโพลีเมอร์คู่ผสมที่มีปริมาณยาง NR ไม่เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (ซึ่งในสัดส่วนผสมดังกล่าวนี้ มียาง NR กระจายตัวใน CPE ที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง) แต่ในทางตรงกันข้าม เมื่อเพิ่มปริมาณยาง NR ให้สูงกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ค่าความทนต่อแรงดึงของโพลีเมอร์คู่ผสมที่ใช้ยาง NR เกรด STR 20 จะมีค่าต่ำกว่ายาง NR เกรด STR 5L เนื่องจากในยาง NR เกรด STR 20 มีปริมาณสิ่งสกปรกอยู่สูงนั่นเอง

ความทนต่อแรงดึง (MPa)



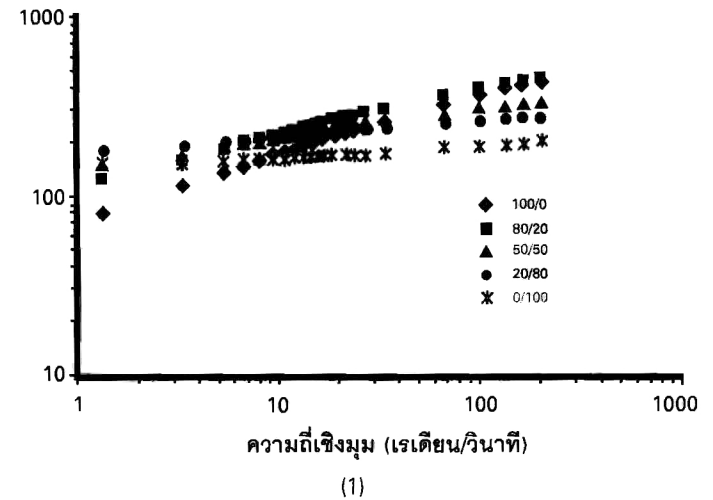
รูปที่ 7 ความทนต่อแรงดึงของโพลีเมอร์คู่ผสมระหว่าง CPE และยาง NR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน [4]

สมบัติวิสโคอิลาสติกเป็นสมบัติสำคัญที่บ่งชี้ถึงความสามารถในกระบวนการผลิตของโพลีเมอร์คู่ผสม จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสสะสม (G') กับความถี่เชิงมุม (ดังแสดงในรูปที่ 8) พบว่าการใช้ยาง NR ทั้งสองเกรดในโพลีเมอร์คู่ผสมมีสมบัติวิสโคอิลาสติกเป็นไปในแนวโน้มเดียวกัน โดยผลที่ได้แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลัก คือ กลุ่มที่ค่า G' ขึ้นกับความถี่เป็นอย่างมาก (โพลีเมอร์คู่ผสมที่มีปริมาณยาง NR ไม่เกินร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก) และกลุ่มที่ค่า G' ไม่ขึ้นกับความถี่เท่าใดนัก (โพลีเมอร์คู่ผสมที่มีปริมาณยาง NR มากกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก)

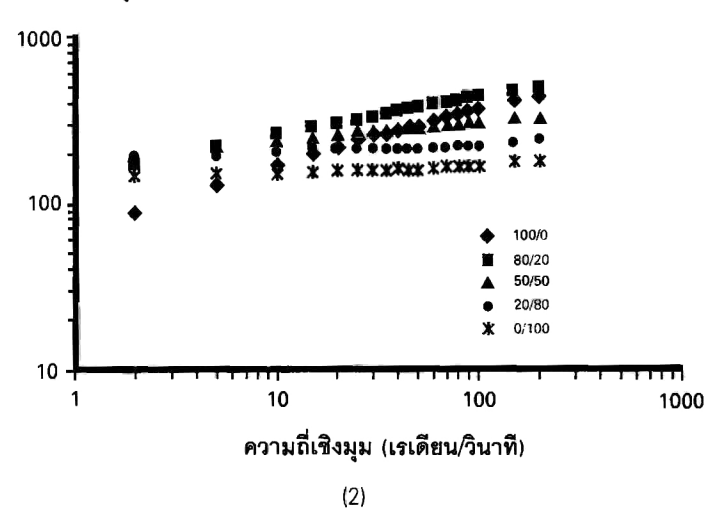
สำหรับโพลีเมอร์คู่ผสมกลุ่มแรกที่ค่า G' ขึ้นกับความถี่ค่อนข้างมากคือกลุ่มที่มี CPE เป็นองค์ประกอบหลัก สมบัติวิสโคอิลาสติกของโพลีเมอร์คู่ผสมในกลุ่มนี้จึงคล้ายกับ CPE โดยเมื่อได้รับอุณหภูมิสูง (เช่น ที่ 170°C) CPE จะเกิดการหลอมเหลวและไหลได้ สายโซ่โมเลกุลของ CPE จึงตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของความถี่ได้อย่างชัดเจน กล่าวคือ ที่ความถี่ต่ำสายโซ่โมเลกุลดังกล่าวมีเวลาที่จะเกิดการคลายตัว (relaxation) ส่งผลให้มีปริมาณการพันกันของสายโซ่โมเลกุล (molecular entanglement) ที่น้อย ค่า G' จึงต่ำ แต่เมื่อเพิ่มความถี่ให้สูงขึ้น สายโซ่โมเลกุลของ CPE มีเวลาไม่เพียงพอที่จะเกิดการคลายตัว ทำให้มีปริมาณการพันกันของสายโซ่โมเลกุลสูง ส่งผลให้มีค่า G' ที่สูงขึ้น

สำหรับโพลีเมอร์คู่ผสมกลุ่มที่ค่า G' ไม่ขึ้นกับความถี่คือกลุ่มที่มีปริมาณยาง NR เป็นองค์ประกอบหลักและเนื่องจากวิฤภาคยาง NR ถูกเชื่อมโยงด้วยพันธะกำมะถันซึ่งเป็นการจำกัดความสามารถในการไหลของโมเลกุล ดังนั้นโพลีเมอร์คู่ผสมในกลุ่มนี้จึงแสดงลักษณะความเป็นอิลาสติก (elastic response) สูง ค่า G' ของโพลีเมอร์คู่ผสมในกลุ่มนี้จึงไม่ขึ้นอยู่กับความถี่

อิลาสติกโมดูลัส (kPa)



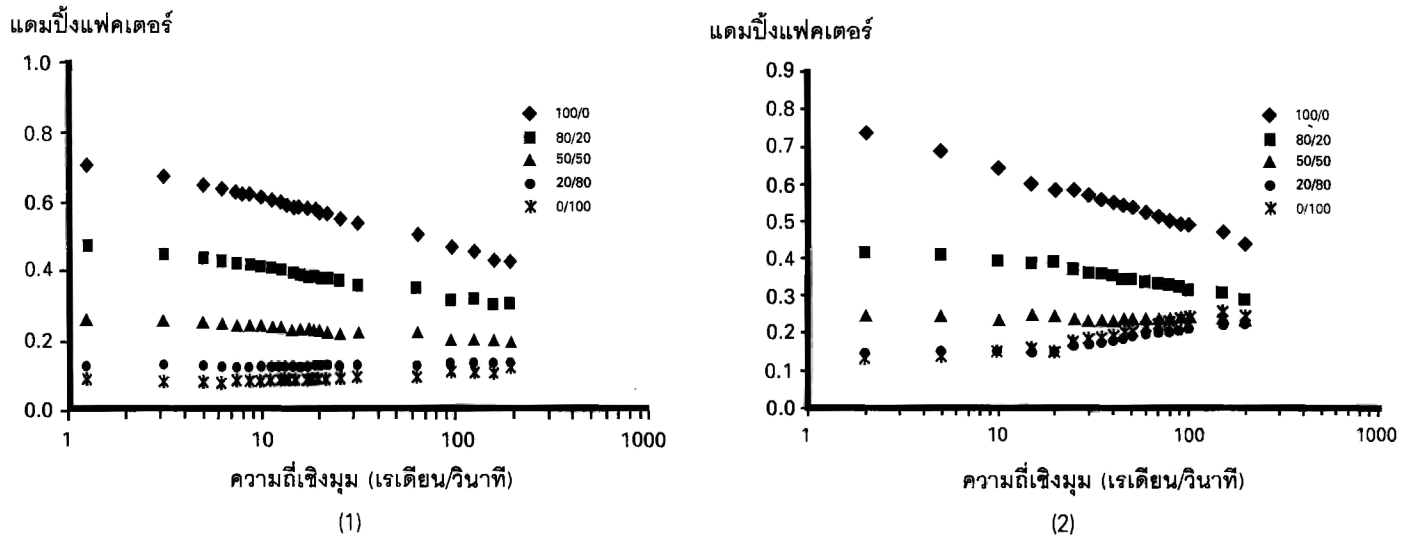
อิลาสติกโมดูลัส (kPa)



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอิลาสติกโมดูลัส (G') และความถี่เชิงมุมของโพลีเมอร์คู่ผสมที่ใช้ยาง NR ต่างเกรดกัน (1) STR 5L (2) STR 20 (อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ 170°C) [4]

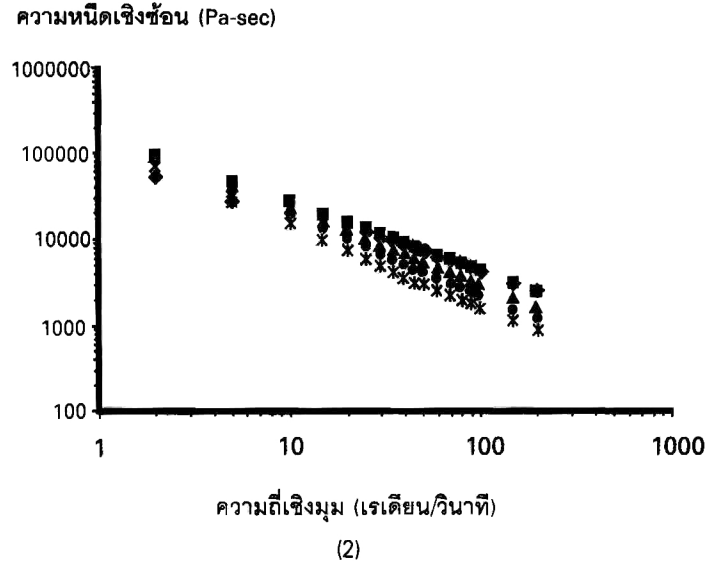
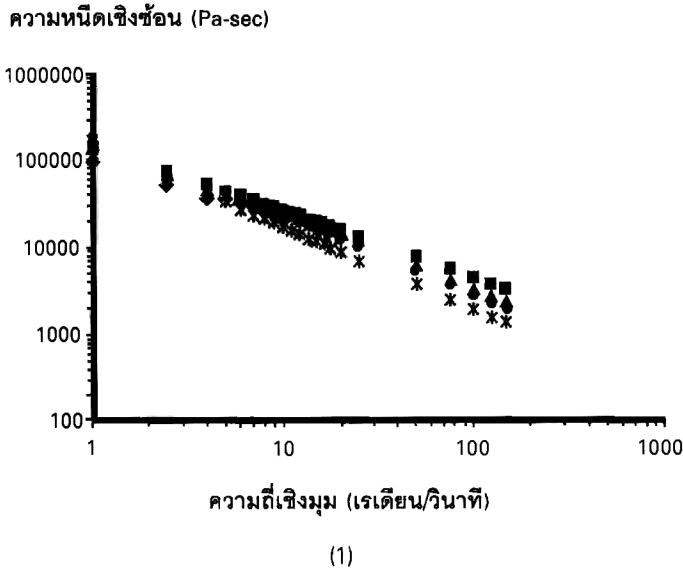
นอกจากนี้แล้วพฤติกรรมด้านวิสโคอีลาสติกของโพลีเมอร์คู่ผสมยังสามารถอธิบายได้ด้วยค่าแดมปีงแฟคเตอร์ (damping factor) หรือแทนเจนต์ (tan δ) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าโมดูลัสสูญเสีย (loss modulus; G'') ต่อค่าโมดูลัสสะสม (storage modulus; G') นั่นคืออัตราส่วนระหว่างความเป็นวิสคัลต่อความเป็นอีลาสติก โดยค่าแดมปีงแฟคเตอร์จะลดลงเมื่อความเป็นอีลาสติกเพิ่มขึ้น

จากงานวิจัยพบว่า แดมปีงแฟคเตอร์ของกลุ่มที่มี CPE เป็นองค์ประกอบหลักมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความถี่ แสดงถึงความเป็นอีลาสติกที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการพันกันของสายโซ่โมเลกุลของ CPE เมื่อความถี่สูงขึ้น ในทางตรงกันข้าม แดมปีงแฟคเตอร์ของกลุ่มที่มีวิฏภาคยาง NR เป็นองค์ประกอบหลักมีค่าคงที่ตลอดการเปลี่ยนแปลงความถี่ เนื่องจากความเป็นอีลาสติกจากการเกิดพันธะเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน นอกจากนี้ยังพบว่าค่าแดมปีงแฟคเตอร์มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มปริมาณยาง NR ในโพลีเมอร์คู่ผสม เนื่องจากมีปริมาณวิฏภาคของยาง NR ที่ผ่านการวัลคาไนซ์สูงขึ้น จึงมีความเป็นอีลาสติกเพิ่มขึ้น (dilution effect) ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแดมปีงแฟคเตอร์ และความถี่เชิงมุมของโพลีเมอร์คู่ผสมที่ใช้ยาง NR ต่างเกรดกับ (1) STR 5L (2) STR 20 (อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ 170°C) [4]

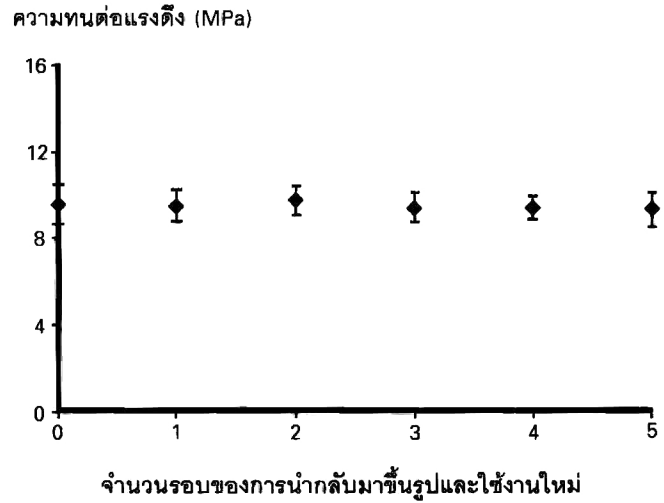
ในแง่ของความสามารถในกระบวนการผลิตพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดเชิงซ้อน (complex viscosity) "ละความถี่เชิงมุมดังแสดงในรูปที่ 10 พบว่าโพลีเมอร์คู่ผสมที่ใช้ยาง NR ทั้งสองเกรดแสดงพฤติกรรมแบบซูโดพลาสติก (pseudoplastic behavior) เป็นไปในแนวโน้มเดียวกัน กล่าวคือ ค่าความหนืดเชิงซ้อนลดลงเมื่อเพิ่มความถี่ นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความถี่ต่ำ ค่าความหนืดเชิงซ้อนของโพลีเมอร์คู่ผสมมีแนวโน้มลดลงตามการลดปริมาณของยาง NR ซึ่งเกิดจากการลดลงของปริมาณวิฏภาคที่มีความเป็นอีลาสติกสูงนั่นเอง ในทางตรงกันข้ามเมื่อพิจารณาที่ความถี่สูงกลับพบว่าโพลีเมอร์คู่ผสมที่มี CPE เป็นองค์ประกอบหลักมีความหนืดเชิงซ้อนสูงกว่าโพลีเมอร์คู่ผสมที่มียาง NR เป็นองค์ประกอบหลัก เนื่องจากสายโซ่ CPE ซึ่งไม่ได้เกิดพันธะเชื่อมโยงมีเวลาไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการคลายตัวของสายโซ่โมเลกุลที่ความถี่สูงได้ จากผลการทดลองส่วนนี้บ่งบอกอย่างชัดเจนว่าค่าของความหนืดเชิงซ้อนของโพลีเมอร์คู่ผสมระบบนี้ขึ้นกับความความเป็นอีลาสติกของโพลีเมอร์คู่ผสมอย่างมาก



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเชิงซ้อนและความถี่เชิงมุมของโพลีเมอร์คุณภาพที่ใช้ยาง NR ต่างเกรดกับ (1) STR 5L (2) STR 20 (อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ 170°C) [4]

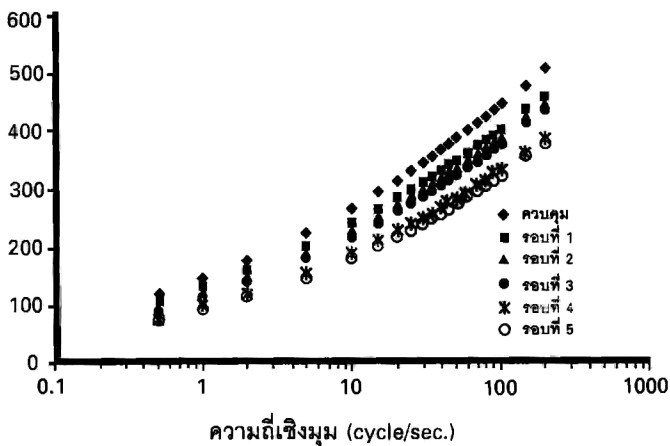
จากที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่าคาร์วัลคาไนซ์ด้วยระบบกัมมะถันจะทำให้โพลีเมอร์คุณสมบัติสามารถนำกลับมาขึ้นรูปและใช้งานใหม่ได้ จึงมีงานวิจัยที่ศึกษาถึงความสามารถในการนำกลับมาขึ้นรูปและใช้งานใหม่ได้ของโพลีเมอร์คุณสมบัติคาร์วัลคาไนซ์ด้วยระบบกัมมะถัน โดยศึกษาจำนวนรอบของการนำกลับมาขึ้นรูปและใช้งานใหม่ของโพลีเมอร์คุณสมบัติที่มีปริมาณยาง NR เกรด STR 5L ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก [5] จากผลการวิจัยดังกล่าวพบว่าค่าความทนต่อแรงดึงของโพลีเมอร์คุณสมบัติไม่เปลี่ยนแปลงตามการเพิ่มจำนวนรอบของการนำกลับมาขึ้นรูปและใช้งานใหม่ดังแสดงในรูปที่ 11 แสดงว่าโพลีเมอร์คุณสมบัติที่เตรียมได้มีความเสถียรต่อความร้อนสูง ซึ่งเป็นผลมาจาก CPE ที่เป็นองค์ประกอบหลักในโพลีเมอร์คุณสมบัติเป็นโพลีเมอร์ที่มีเมอิมตัวสูง จึงมีความสามารถในการทนต่อความร้อนได้ดี

จากการศึกษาพฤติกรรมการไหล (ดูรูปที่ 12) พบว่าค่า G' มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มจำนวนรอบของการนำกลับมาขึ้นรูปและใช้งานใหม่ ทั้งนี้เนื่องจากในระหว่างการนำกลับมาขึ้นรูปและใช้งานใหม่ โมเลกุลยางโดยเฉพาะในภูมิภาคของยาง NR จะเกิดการตัดขาดของสายโซ่ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากปริมาณของยาง NR ในโพลีเมอร์คุณสมบัติมีเพียงร้อยละ 20 จึงไม่ส่งผลเสียต่อสมบัติทนต่อแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 ความทนต่อแรงดึงของโพลีเมอร์คุณภาพที่มีปริมาณยาง NR เกรด STR 5L ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และจำนวนรอบของการนำกลับมาขึ้นรูปและใช้งานใหม่ [5]

อีลาสติกโมดูลัส (kPa)



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสลบ (G') และความถี่ของฟิล์มอีลาสโตเมอร์ที่มีปริมาณยาง NR ในระดับ STR 5L ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก เมื่อเพิ่มจำนวนรอบของการนำกลับมาขึ้นรูปและใช้งานใหม่

จากการศึกษาทั้งหมดที่กล่าวมาสรุปได้ว่า การเติมยาง NR ลงไปใน CPE เพื่อลดต้นทุนในการผลิตนั้นสามารถทำได้ในเชิงปฏิบัติ อย่างไรก็ตาม สมบัติของโพลีเมอร์ผสมที่ได้ก็ขึ้นอยู่กับระบบการวัลคาไนซ์และสัดส่วนของการผสม กรณีของการวัลคาไนซ์ด้วยระบบเพอร์ออกไซด์ แม้ว่าจะสามารถเติมยาง NR ลงไปใน CPE ได้สูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยไม่ส่งผลเสียอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติเชิงกล สมบัติความทนต่อความร้อนและความทนต่อน้ำมัน แต่การใช้ระบบการวัลคาไนซ์ด้วยเพอร์ออกไซด์ก็มีข้อเสียคือไม่สามารถนำโพลีเมอร์ผสมกลับมาขึ้นรูปและใช้ใหม่ได้อีก แต่สำหรับกรณีของการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันนั้น แม้ว่าจะสามารถเติมยาง NR ลงไปใน CPE ได้เพียงร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก แต่โพลีเมอร์ผสมที่เตรียมได้ก็สามารถนำกลับมาขึ้นรูปและใช้งานใหม่ได้สูงถึง 5 รอบ โดยไม่ส่งผลเสียอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติเชิงกล

เอกสารอ้างอิง

1. Dick J.S., "Rubber technology: Compounding and testing for performance" Hanser, Munich, 2001
2. Sirisinha C., Saeoui P., and Guaysomboon J., "Mechanical properties oil resistance and thermal ageing properties in chlorinated polyethylene/natural rubber blends" *J. Appl. Polym. Sci.* 84, 22 (2002)
3. Sirisinha C., Saeoui P., and Pattanawanidchai S., "Rheological properties oil and thermal resistance in sulfur-cured CPE/NR blends" *J. Appl. Polym. Sci.*, 93, 1129 (2004)
4. Wongwitthayakool P., "Rheological and mechanical properties of chlorinated polyethylene blended with low cost grade natural rubber." M. Sc. Thesis in Polymer Science and Technology Faculty of Graduate Studies, Mahidol University (2007)
5. Prasopnatra P., "Recycling of chlorinated polyethylene/natural rubber blends." M.Sc. Thesis in Polymer Science and Technology Faculty of Graduate Studies, Mahidol University (2007)

รศ.ดร. เอกสิทธิ์ สิริสิงห์
 การศึกษา: วิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (KJIT)
 Jangjeon College, Bangkok, Thailand
 สถานที่ทำงานปัจจุบัน: วิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 กรุงเทพมหานคร

ปัญจพร วงศ์วิทยากุล
 การศึกษา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (KJIT) สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต
 สถานที่ทำงานปัจจุบัน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 กรุงเทพมหานคร