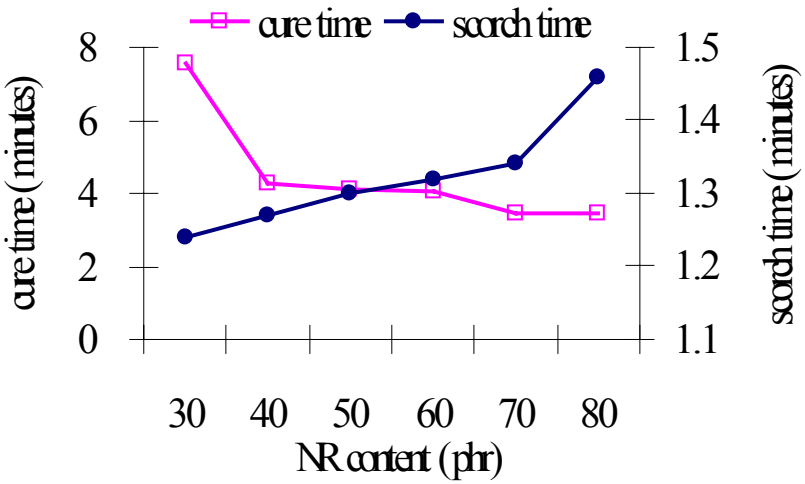
บทที่ 3

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

3.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติการเชื่อมขวางและการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล เมื่อแปรผันปริมาณเนื้อสารหลัก

3.1.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติการเชื่อมขวาง (การหาค่า cure time และ scorch time) เมื่อแปรผันปริมาณเนื้อสารหลัก

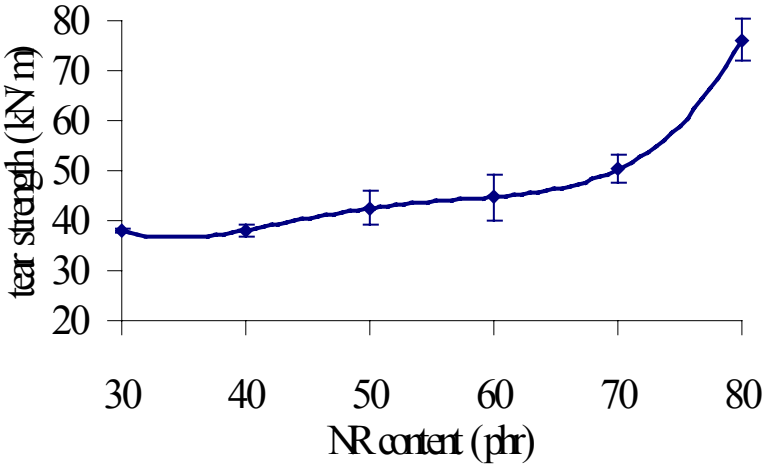
เนื่องจาก cure time หมายถึง เวลาที่โมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมขวางกัน (crosslink) และ scorch time คือ เวลาที่โมเลกุลของยางเริ่มเกิดการเชื่อมขวางกัน ซึ่งโมเลกุลของยางสามารถเคลื่อนไหวได้หรือไหลได้ก่อนที่จะถึง scorch time นี้ ดังนั้น ในทางอุตสาหกรรมจึงต้องการให้ยางคอมพาวด์มีระยะ scorch time ที่ยาวขึ้น เพื่อป้องกันการเกิดยางตาย คือ ยางไหลไม่เต็มแม่แบบสำหรับกระบวนการฉีดขึ้นรูป (injection molding) หรือกระบวนการอัดขึ้นรูป (compression molding) โดยการที่มีระยะ scorch time ที่ยาวขึ้น ต้องไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางหรือความหนาแน่นของการเชื่อมขวางแต่อย่างใด



ภาพประกอบที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า cure time และค่า scorch time กับปริมาณยางธรรมชาติ

การแปรผันปริมาณยางธรรมชาติ จะส่งผลต่อค่าความหนืด (viscosity) ของของผสม กล่าวคือ ที่สภาวะของการผสมที่ shear stress ต่ำๆ ค่าความหนืดของของผสมจะเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนของยางเพิ่มขึ้น และค่าความหนืดของของผสมจะเพิ่มขึ้นเมื่อมี degree of crosslink เพิ่มขึ้นด้วย จึงผลให้เวลาที่ยางสุกลดลง แต่เวลาที่ยางสุกก่อนกำหนด (scorch time) มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มความปลอดภัยในกระบวนการผลิตของของผสมนี้ได้

3.1.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติความทนทานต่อแรงฉีกขาด (tear strength) เมื่อแปรผันปริมาณเนื้อสารหลัก



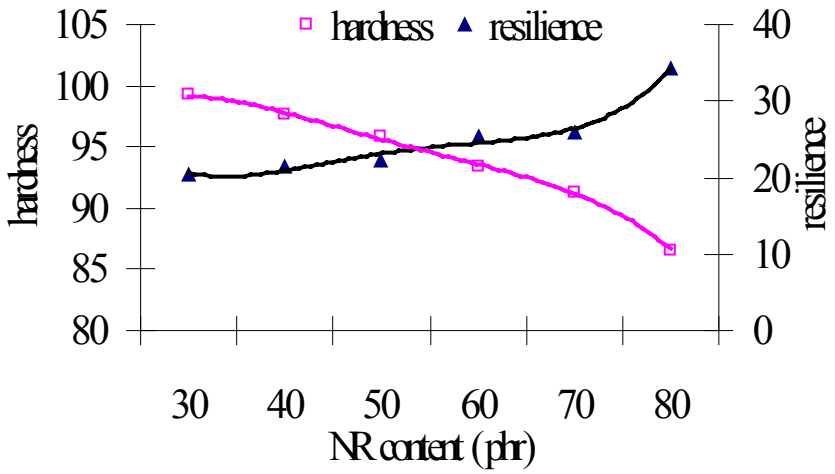
ภาพประกอบที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติความทนทานต่อแรงฉีกขาดกับปริมาณยางธรรมชาติ

คุณสมบัติความทนทานต่อแรงฉีกขาด หมายถึง การต้านทานต่อรอยขยายของรอยแตกหรือรอยตัดเมื่อมีการดึงหรือยืดรอยตัดนั้น จากภาพประกอบที่ 18 พบว่า คุณสมบัติความทนทานต่อแรงฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น เนื่องจาก แรงดึงเกี่ยวข้องกับพลังงานซึ่งประกอบด้วยพลังงานที่ใช้ยืดยางกับพลังงานที่ใช้ทำให้ยางฉีกและขาด ซึ่งพลังงานการฉีกขาด คือ พลังงานที่ใช้ในการเปิดผิวหน้าใหม่ ขนาดของพลังงานเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการฉีกขาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลลดลง ทำให้พลังงานภายในเพิ่มขึ้น ส่งผลให้พลังงานฉีกขาดเพิ่มขึ้น

3.1.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติความกระเด้งตัว (resilience test) เมื่อแปรผันปริมาณเนื้อสารหลัก

คุณสมบัติความกระเด้งตัวหรือความสามารถคืนกลับสู่รูปร่างเดิม (resilience property) เป็นอัตราส่วนของพลังงานที่ใช้เพื่อการคืนกลับสู่รูปร่างเดิมต่อพลังงานที่ใช้เพื่อการทำให้

เปลี่ยนรูปหรือทำให้เสียรูป จากภาพประกอบที่ 19 พบว่า คุณสมบัติความกระเด้งตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น เนื่องจาก ยางวัลคาไนซ์เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติความกระเด้งตัวสูง สามารถเก็บพลังงานกลโดยการผิดรูปได้มาก แล้วปล่อยพลังงานกลับออกมาได้เกือบทั้งหมดในทันที เพื่อกลับสู่ขนาดและรูปร่างเดิม (ปรีชา และคณะ, 2542)



ภาพประกอบที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลกับปริมาณยางธรรมชาติ

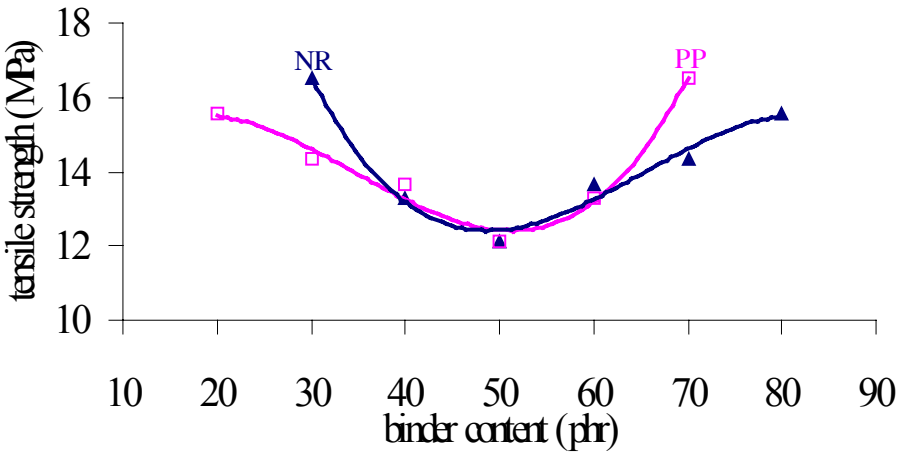
3.1.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านความแข็ง (hardness test) เมื่อแปรผันปริมาณเนื้อสารหลัก

การวัดความแข็งเป็นการวัดความต้านทานการยุบตัวของวัสดุนั้นๆที่ทำการทดสอบ ความแข็งของวัสดุจึงเป็นสมบัติพื้นฐานที่สำคัญเพื่อที่จะจัดเกรดของวัสดุนั้นได้ จากการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลกับการแปรผันปริมาณยางธรรมชาติ แสดงดังภาพประกอบที่ 19 พบว่า คุณสมบัติด้านความแข็งมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น เนื่องจาก ยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่อ่อนนิ่ม การเพิ่มปริมาณยางมากขึ้น จึงเป็นการเพิ่มความอ่อนนิ่ม ทำให้ค่าความแข็งลดลง

3.1.5 ผลการทดสอบคุณสมบัติความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) เมื่อแปรผันปริมาณเนื้อสารหลัก

เมื่อมีการให้ stress ที่เกิดจากการดึง (tensile stress) หรือจากการกดอัด (compressive stress) ซึ่ง stress ที่เกิดขึ้นนี้จะถูกถ่ายโอนจากเฟสของ thermoplastic matrix ที่มีความแข็งแรงกว่าไปยังบริเวณที่มีความอ่อนแอกว่าแต่มีความยืดหยุ่นมากกว่า ส่งผลให้เกิด strain ในอนุภาคยางในทิศทางที่ได้รับ tensile stress แต่จะเกิด strain ในอนุภาคยางในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางที่ให้ compressive stress

จากผลการทดสอบคุณสมบัติความทนทานต่อแรงดึง แสดงดังภาพประกอบที่ 20 พบว่า การแปรผันปริมาณพอลิโพรพิลีนและยางธรรมชาติ มีแนวโน้มของค่าความทนทานต่อแรงดึงเป็นไปในทำนองเดียวกัน เนื่องจากผลของการมี interfacial adhesion ระหว่างกันในแต่ละเฟสของของผสม ซึ่งผลนี้จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนการผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับยางธรรมชาตินั่นเอง ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับรายงานของ Inoue (1994) ที่ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง degree of crosslink กับความทนทานต่อแรงดึงของของผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับ unsaturated elastomer พบว่า จะได้กราฟที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับผลการทดลองนี้ กล่าวคือ ค่าความทนทานต่อแรงดึงจะเพิ่มขึ้นในตอนเริ่มต้น และจะมีแนวโน้มลดลง แล้วจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่งที่ปริมาณ degree of crosslink ที่เหมาะสม โดยสามารถอธิบายการลดลงของค่าความทนทานต่อแรงดึง คือ ค่าที่ลดลงเนื่องจากการมี excess degree of crosslink เป็นสาเหตุให้เกิด strong cohesive strength ที่มากเกินไป ค่าความทนทานต่อแรงดึงจึงลดลง และจะมีค่าความทนทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น เมื่อมี degree of crosslink อยู่ในระดับที่เหมาะสม



ภาพประกอบที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติความทนทานต่อแรงดึงกับปริมาณยางธรรมชาติและพอลิโพรพิลีน

3.1.6 ผลการคำนวณความสามารถในการรับพลังงานได้ (toughness) เมื่อแปรผันปริมาณเนื้อสารหลัก

ตารางที่ 12 ค่า toughness กับการแปรผันปริมาณเนื้อสารหลัก (binder)

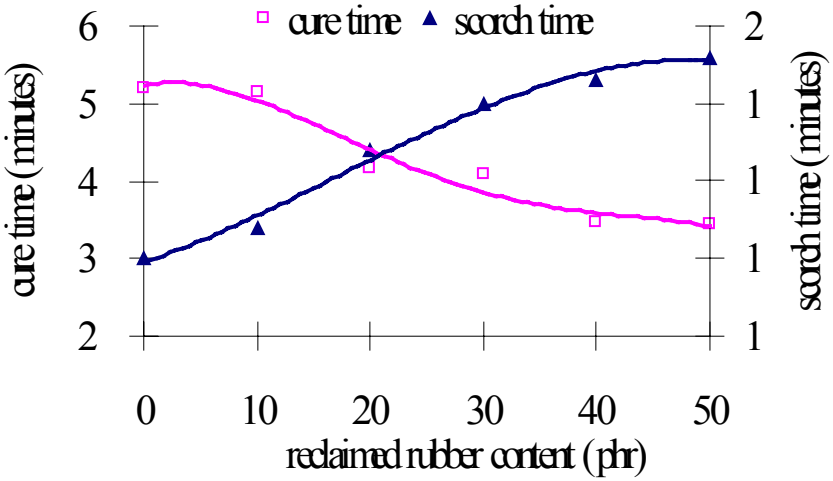
NR (phr)	PP (phr)	toughness ($N.mm/mm^3$)
30	70	184.32
40	60	169.72
50	50	222.92
60	40	513.85
70	30	834.72
80	20	1196.46
100	0	2658.76

จากผลการคำนวณค่า toughness พบว่า เมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ต้องใช้พลังงานปริมาณมากขึ้นเพื่อที่จะทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการแตกหักได้ เนื่องจากยางมีการเชื่อมขวางเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติ จึงสามารถรับพลังงานไว้ได้มากขึ้น ซึ่งที่การเติมยางธรรมชาติปริมาณ 100 phr จะให้ค่า toughness สูงสุด แต่มีข้อเสียคือของผสมมีความเหนียวติดกันมาก ส่งผลให้มีกระบวนการผสมที่ยุ่งยาก จึงไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน

เนื่องจากในการทดลองนี้จะใช้คุณสมบัติเชิงกลด้านความทนทานต่อแรงดึงร่วมกับพิจารณาความสามารถในการรับพลังงานได้ เป็นดัชนีบ่งชี้ความเหมาะสมของสูตรเป็นหลัก ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่สัดส่วนการผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิโพรพิลีน 30/70 จะให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงที่สุด แต่มีค่าความสามารถในการรับพลังงานได้น้อยที่สุด ถือว่าเป็นสูตรที่ไม่เหมาะสม จึงเลือกใช้สูตรที่มีสัดส่วนการผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิโพรพิลีน 80/20 ที่ให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงมีค่าใกล้เคียงกับสูตรข้างต้นและมีค่าความสามารถในการรับพลังงานได้ที่มีค่าสูง เป็นสัดส่วนที่คงที่เพื่อแปรผันปริมาณสารตัวต่อไป

3.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติการเชื่อมขวางและการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล เมื่อแปรผันปริมาณยางรีเคลม

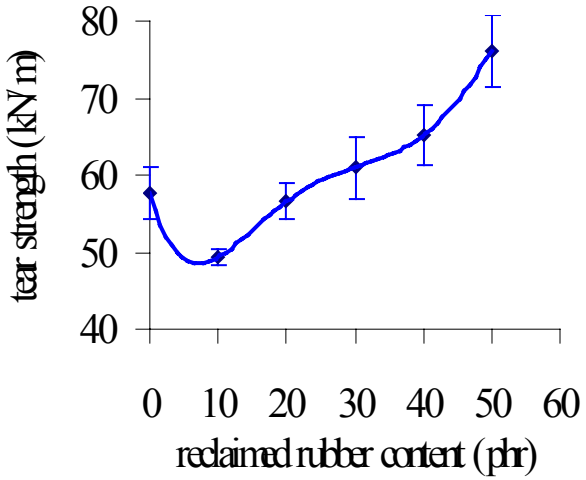
3.2.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติการเชื่อมขวาง (การหาค่า cure time และ scorch time) เมื่อแปรผันปริมาณยางรีเคลม



ภาพประกอบที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า cure time และค่า scorch time กับปริมาณยางรีเคลม

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติการเชื่อมขวางดังภาพประกอบที่ 21 พบว่า เมื่อปริมาณของยางรีเคลมเพิ่มขึ้น เวลาที่ยางสุกมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากมี active cross-linking sites เกิดขึ้นในยางรีเคลม ส่งผลทำให้ มีความต่อเนื่องที่โมเลกุลของยางจะเกิดการเชื่อมขวางกัน เป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติขณะวัลคาไนซ์ได้ การเชื่อมขวางกันของโมเลกุลของยางจึงเกิดได้เร็วขึ้น เวลาที่ยางสุกจึงมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ De et al. (1999) แต่เวลาที่ยางสุกก่อนกำหนดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น กล่าวคือ การมีปริมาณยางรีเคลมเพิ่มขึ้นสามารถยืดระยะเวลาที่ทำให้ยางเริ่มเกิดปฏิกิริยาคงรูปได้

3.2.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติความทนทานต่อแรงฉีกขาด (tear strength) เมื่อแปรผันปริมาณยางรีเคลม

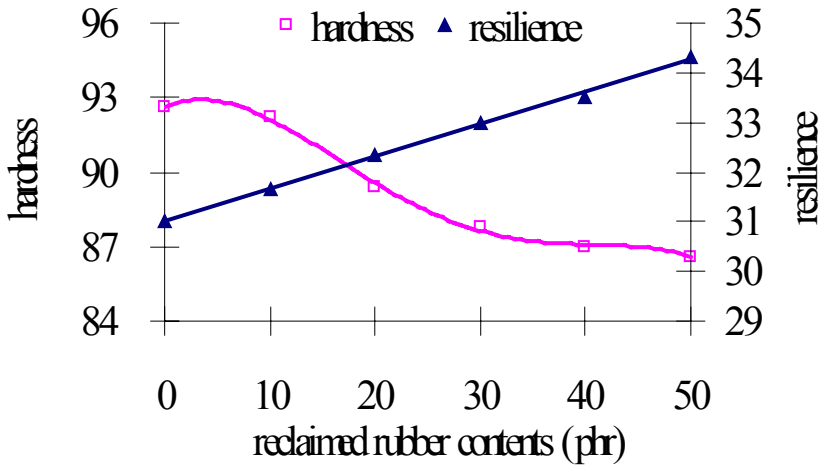


ภาพประกอบที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนทานต่อแรงฉีกขาดกับปริมาณยางรีเคลม

จากผลการทดสอบคุณสมบัติความทนทานต่อแรงฉีกขาด แสดงดังภาพประกอบที่ 22 พบว่า การเติมยางรีเคลมจะส่งผลทำให้คุณสมบัติความทนทานต่อแรงฉีกขาดด้อยลงเมื่อเปรียบเทียบการไม่เติมยางรีเคลมกับการเติมยางรีเคลมที่ 10 phr แต่การเติมยางรีเคลมที่ 10-50 phr พบว่าของผสมมีค่าความทนทานต่อแรงฉีกขาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการที่มี active cross-linking sites ในยางรีเคลม ส่งผลให้มีความต่อเนื่องที่จะเกิดการเชื่อมขวางกันเป็นโครงร่างตาข่ายในกระบวนการวัลคาไนซ์ ปริมาณยางรีเคลมที่เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของโมเลกุลของยางเพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลให้ค่าความทนทานต่อแรงฉีกขาดเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Kuriakose and De (1985) ที่พบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณการ crosslink ในเฟสยาง ทำให้คุณสมบัติความทนทานต่อแรงฉีกขาดถูกปรับปรุงขึ้น

3.2.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติความกระเด้งตัว (resilience test) เมื่อแปรผันปริมาณยางรีเคลม

ความกระเด้งตัว เป็นอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ออกมาต่อพลังงานที่ให้กับชิ้นทดสอบ ผลจากการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณของยางรีเคลมเพิ่มขึ้น จะมีค่าความกระเด้งตัวเพิ่มขึ้น แสดงดังภาพประกอบที่ 23 เนื่องจากปริมาณยางรีเคลมมาสเตอร์แบชท์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ของผสมมีบริเวณที่เป็น soft phase เพิ่มขึ้น ทำให้ของผสมมีความสามารถในการรับพลังงานได้สูงขึ้นเมื่อได้รับแรงกระแทกจากภายนอกก็จะปล่อยพลังงานออกมามากขึ้นด้วย



ภาพประกอบที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลกับปริมาณยางรีเคลม

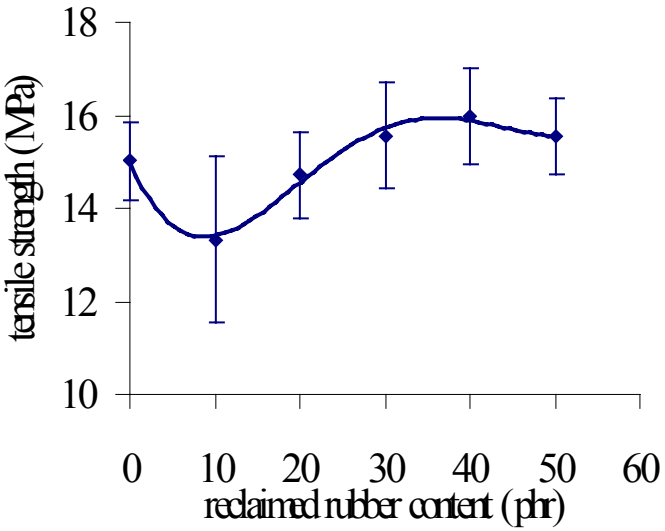
3.2.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านความแข็ง (hardness test) เมื่อแปรผันปริมาณยางรีเคลม

เมื่อปริมาณของยางรีเคลมเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งของของผสมมีแนวโน้มลดลง ยางรีเคลมและยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่อ่อนนุ่ม (soft materials) การเติม master batch ของยางรีเคลมเป็นการเพิ่ม total elastomeric content ค่าความแข็งของของผสมจึงมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Phadke and De (1986) แสดงผลการทดลองดังภาพประกอบที่ 23

3.2.5 ผลการทดสอบคุณสมบัติความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) เมื่อแปรผันปริมาณยางรีเคลม

จากผลการทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ 24 พบว่า การเติมยางรีเคลมจะส่งผลทำให้คุณสมบัติความทนทานต่อแรงดึงด้อยลง เมื่อเปรียบเทียบการไม่เติมยางรีเคลมกับการเติมยางรีเคลมที่ 10 phr แต่การเติมยางรีเคลมที่ 10-40 phr พบว่า มีค่าความทนทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น เนื่องจากการที่มี active cross-linking sites ในยางรีเคลม ส่งผลให้มีความต่อเนื่องที่จะเกิดการเชื่อมขวางกันเป็นโครงร่างตาข่ายในกระบวนการวัลคาไนซ์ ซึ่งปริมาณยางรีเคลมที่เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของโมเลกุลของยางเพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น โดยสอดคล้องกับรายงานของ Kuriakose and De (1985) ที่พบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณการ crosslink ในเฟสยาง ทำให้คุณสมบัติความทนทานต่อแรงดึงถูกปรับปรุงขึ้น และสำหรับค่าความทนทานต่อแรงดึงที่ลดลงเมื่อเติมยางรีเคลมปริมาณ 50 phr สามารถอธิบายได้ว่า ค่าความทนทานต่อแรงดึง จะขึ้นอยู่กับปริมาณความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของโมเลกุลของยาง ซึ่งการ

เติมยางรีเคลม 50 phr มี excess degree of crosslink เป็นสาเหตุให้เกิด strong cohesive strength ที่มากเกินไป ค่าความทนทานต่อแรงดึงจึงลดลง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Inoue (1994)



ภาพประกอบที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติความทนทานต่อแรงดึงกับปริมาณยางรีเคลม

3.2.6 ผลการคำนวณความสามารถในการรับพลังงานได้ (toughness) เมื่อแปรผันปริมาณยางรีเคลม

จากรายงานการวิจัยของ Inoue (1994) พบว่า พื้นที่ใต้กราฟระหว่าง stress กับ strain ซึ่งมีค่าเท่ากับ toughness ที่เพิ่มขึ้นทำให้ energy absorbed โดยชิ้นทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย (ตารางที่ 13) เนื่องจากการที่มี interfacial adhesion เพิ่มขึ้นและมี interaction ระหว่าง stress concentration zones ในเฟสของพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้น ซึ่งการที่มี interfacial adhesion เพิ่มขึ้นจะลดการเกิดช่องว่างหรือจุดตำหนิในเฟสของพอลิโพรพิลีนได้

ตารางที่ 13 ค่า toughness กับการแปรผันปริมาณยางรีเคลม

Reclaimed rubber (phr)	toughness ($N.mm/mm^3$)
0	647.63
10	621.32
20	976.48
30	1102.36

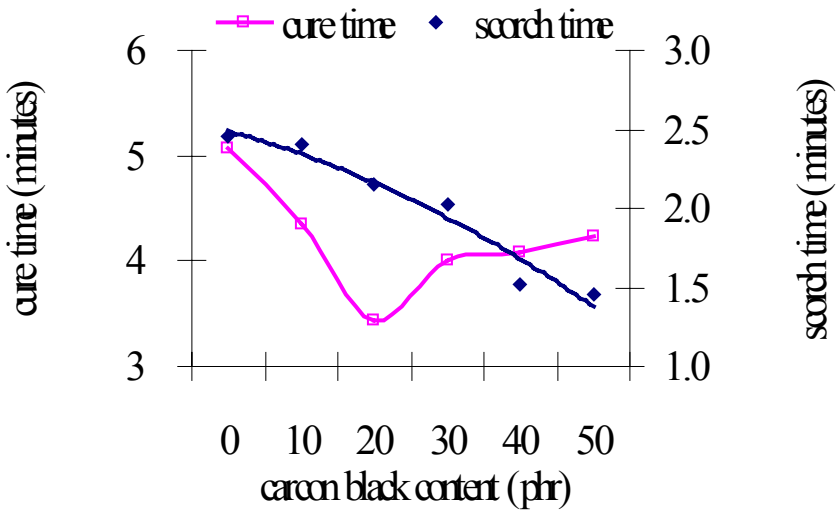
40	1224.93
50	1196.46

เนื่องจากในการทดลองนี้จะใช้คุณสมบัติเชิงกลด้านความทนทานต่อแรงดึงร่วมกับพิจารณาความสามารถในการรับพลังงานได้ เป็นดัชนีบ่งชี้ความเหมาะสมของสูตรเป็นหลัก ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่การเติมยางรีเคลม 40 phr จะให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงที่สุด และมีค่าความสามารถในการรับพลังงานได้สูงที่สุด จึงเลือกใช้ปริมาณนี้ให้เป็นสัดส่วนที่คงที่เพื่อแปรผันปริมาณสารตัวต่อไป

3.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติการเชื่อมขวางและการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลเมื่อแปรผันปริมาณเขม่าดำ

3.3.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติการเชื่อมขวาง (การหาค่า cure time และ scorch time) เมื่อแปรผันปริมาณเขม่าดำ

การนำเขม่าดำมาผสมกับยางจำเป็นต้องบดยางให้นิ่มก่อน การที่ยางนิ่ม หมายถึงยางจะมีความหนืด (viscosity) ลดลง และมีลักษณะที่อ่อนนิ่ม (plasticity) เพิ่มขึ้น การเติมเขม่าดำจะทำให้ยางมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น ดังนั้น การเติมเขม่าดำในยางที่ปริมาณต่างๆกัน จะมีผลต่อค่าความหนืดของยางได้ ส่งผลให้ค่า cure time มีค่าแปรผันไปตามปริมาณการเติมเขม่าดำ และผลของการใช้เขม่าดำในยางทำให้ลดเวลา scorch time ลงได้ ไม่ว่าจะใช้สารตัวเร่งชนิดใดก็ตาม (พรพรรณ, 2528) แสดงผลการทดลองดังภาพประกอบที่ 25

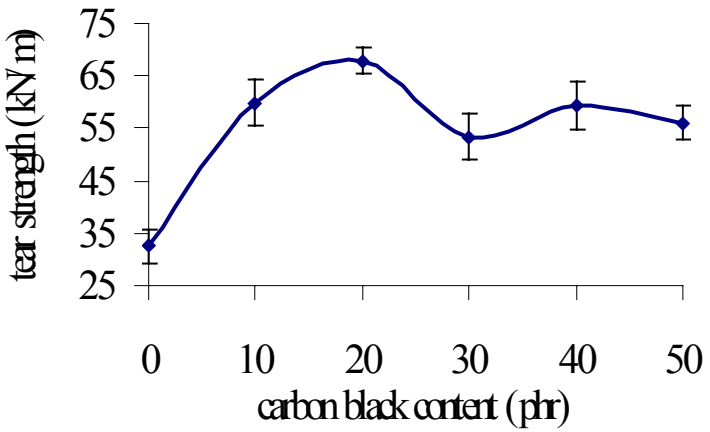


ภาพประกอบที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า cure time และค่า scorch time กับปริมาณเขม่าดำ

3.3.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติความทนทานต่อแรงฉีกขาด (tear strength) เมื่อแปร

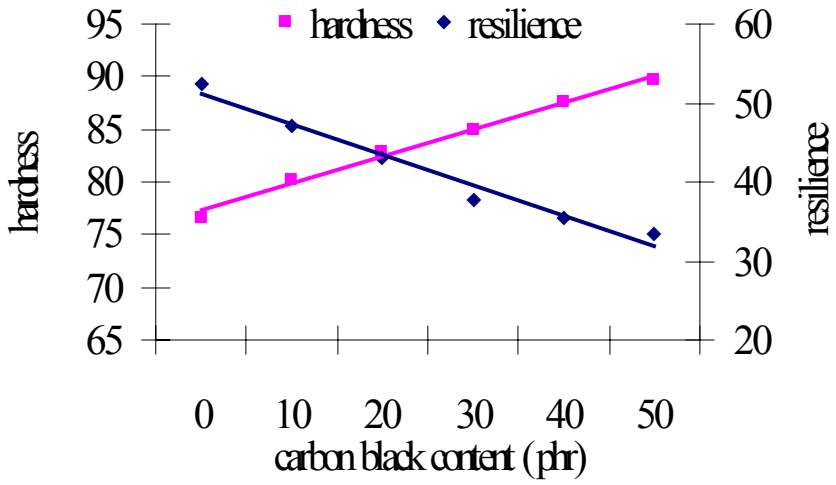
ผันปริมาณเขม่าดำ

การเติมเขม่าดำจะมีผลต่อความทนทานต่อแรงฉีกขาด คือ เขม่าดำจะทำให้ความทนทานต่อแรงฉีกขาดสูงขึ้นจนถึงจุดจุดหนึ่ง และเมื่อเติมเขม่าดำปริมาณเพิ่มขึ้นอีก ค่าความทนทานต่อแรงฉีกขาดจะมีค่าลดลง (พรพรรณ, 2528) แสดงผลดังภาพประกอบที่ 26



ภาพประกอบที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติความทนทานต่อแรงฉีกขาดกับปริมาณเขม่าดำ

3.3.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติความกระเด้งตัว (resilience test) เมื่อแปรผันปริมาณเขม่าดำ



ภาพประกอบที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลกับปริมาณเขม่าดำ

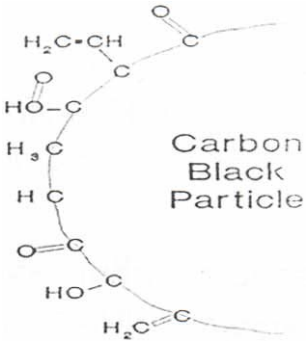
การเติมสารตัวเติม เช่น เขม่าดำลงไปในของผสม พบว่า ทำให้ค่าการกระเด้งตัวของยางลดลง ยิ่งปริมาณสารตัวเติมมากขึ้นเท่าใด ความกระเด้งตัวจะยิ่งลดลงเท่านั้น (พรพรรณ, 2528) แสดงผลดังภาพประกอบที่ 27

3.3.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านความแข็ง (hardness test) เมื่อแปรผันปริมาณเขม่าดำ

จากผลการทดลอง แสดงดังภาพประกอบที่ 27 การเติมเขม่าดำลงไปในของผสม พบว่า ความแข็งของของผสมจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเขม่าดำที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเขม่าดำมีองค์ประกอบของคาร์บอนสูงถึงร้อยละ 90-99 เมื่อเติมลงไปในของผสม จะส่งผลให้ของผสมมีความแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณเขม่าดำที่เพิ่มขึ้น

3.3.5 ผลการทดสอบคุณสมบัติความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) และผลการคำนวณความสามารถในการรับพลังงานได้ (toughness) เมื่อแปรผันปริมาณเขม่าดำ

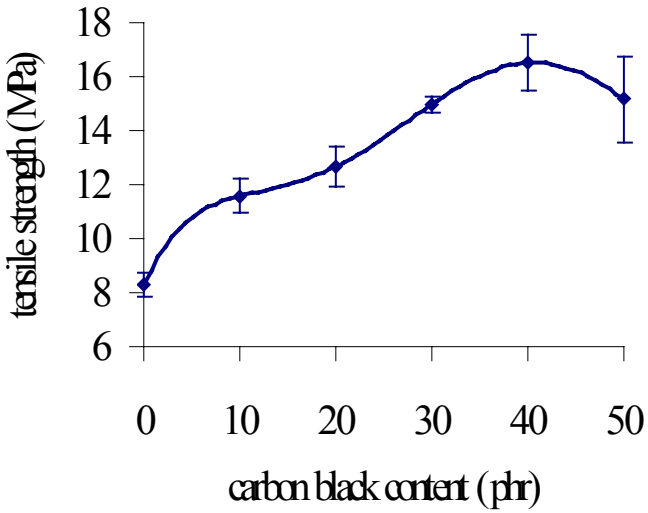
เนื่องจากเขม่าดำมีองค์ประกอบของคาร์บอนประมาณร้อยละ 90-99 และมีองค์ประกอบที่เหลือเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจนที่เกาะกันด้วยพันธะโควาเลนท์ โดยที่ไฮโดรเจนจะกระจายอยู่ตลอดทั้งอนุภาคของเขม่าดำ ส่วนออกซิเจนจะอยู่ที่ผิวของเขม่าดำ ซึ่งออกซิเจนที่ผิวจะจับตัวในรูปของหมู่ฟีนอลิก คีโตนิก คาร์บอกซิลิก และแลคโตน (ภาพประกอบที่ 28) เขม่าดำมีการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมในลักษณะเป็นชั้นๆ เขม่าดำที่มีสมบัติเป็นสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพสูงจะมีการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมไม่เป็นระเบียบ ซึ่งลักษณะของคาร์บอนอะตอมที่ผิวของเขม่าดำจะมีผลต่อการเสริมประสิทธิภาพได้ เช่น หากคาร์บอนอะตอมมีไฮโดรเจนมาเกาะจะช่วยให้เขม่าดำนั้นเสริมประสิทธิภาพมากขึ้น และหากเกิดอนุมูลอิสระอยู่บนผิวของเขม่าดำ โดยที่อนุมูลอิสระเหล่านี้จะสร้างพันธะกับยางได้เมื่อโมเลกุลของยางแตกออกเป็นอนุมูลอิสระขณะทำการผสม ทำให้เขม่าดำนั้นเสริมประสิทธิภาพมากขึ้น



ภาพประกอบที่ 28 ลักษณะพื้นผิวของเขม่าดำ

ที่มา: พงษ์ธร, 2548

เนื่องจากเขม่าดำเป็นสารตัวเติมแบบเสริมประสิทธิภาพ อนุภาคของเขม่าดำจึงสามารถแทรกเข้าไปในโมเลกุลของของผสม แล้วช่วยให้ของผสมมีความทนทานต่อแรงดึงสูงขึ้น แสดงผลการทดลองดังภาพประกอบที่ 29



ภาพประกอบที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติความทนทานต่อแรงดึงกับปริมาณเขม่าดำ

และจากการที่ของผสมมีความทนทานต่อแรงดึงที่สูงขึ้น ตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณเขม่าดำ ส่งผลให้ค่าความสามารถในการรับพลังงานได้ (toughness) ที่คำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟของ stress-strain จึงมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย แสดงผลการคำนวณดังตารางที่ 14

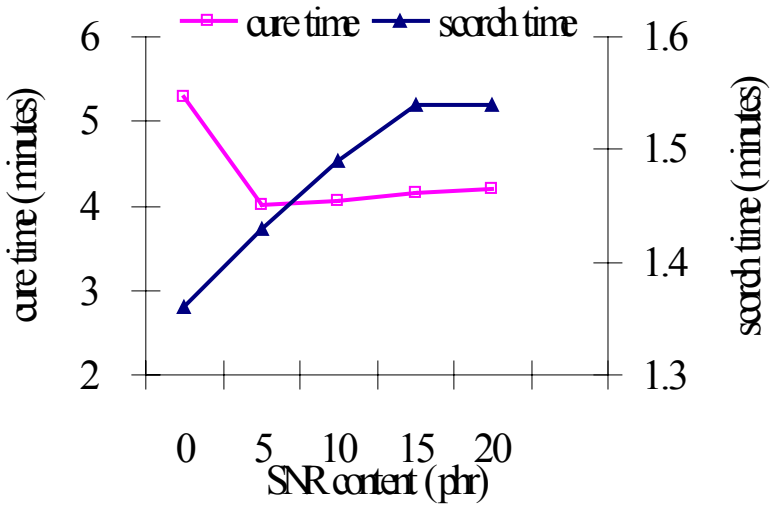
ตารางที่ 14 ค่า toughness กับการแปรผันปริมาณเขม่าดำ

CB (phr)	toughness ($N.mm/mm^3$)
0	822.54
10	1333.36
20	1640.74
30	1295.56
40	1609.76
50	1100.47

เนื่องจากในการทดลองนี้จะใช้คุณสมบัติเชิงกลด้านความทนทานต่อแรงดึงร่วมกับพิจารณาความสามารถในการรับพลังงานได้ เป็นดัชนีบ่งชี้ความเหมาะสมของสูตรเป็นหลัก ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่การเติมเขม่าดำปริมาณ 40 phr จะให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงที่สุด และมีค่าความสามารถในการรับพลังงานได้สูง จึงเลือกใช้ปริมาณนี้ให้เป็นสัดส่วนที่คงที่เพื่อแปรผันปริมาณสารตัวต่อไป

3.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติการเชื่อมขวางและการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลเมื่อแปรผันปริมาณ SNR

3.4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติการเชื่อมขวาง(การหาค่า cure time และ scorch time) เมื่อแปรผันปริมาณ SNR

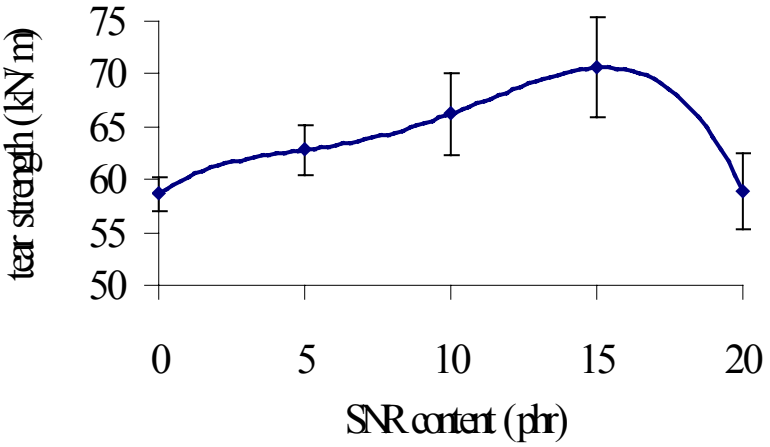


ภาพประกอบที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า cure time และค่า scorch time กับปริมาณ SNR

จากผลการทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ 30 พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่าง cure time กับปริมาณ SNR มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ SNR เพิ่มขึ้น เนื่องจากการที่มีพอลิสไตรีนปริมาณเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการจำกัดการเคลื่อนไหวได้ของสายโซ่โมเลกุล จึงเหนี่ยวนำให้เกิดการเชื่อมขวางของยางได้เร็วขึ้น แต่เวลาของ scorch time มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ชี้ให้เห็นว่าการเติม SNR ลงไปในของผสมจะช่วยเพิ่มความปลอดภัยในกระบวนการผลิตของของผสมนี้ได้

3.4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติความทนทานต่อแรงฉีกขาด (tear strength) เมื่อแปรผันปริมาณ SNR

SNR แสดงพฤติกรรมความเป็นอิลาสติกแบบไม่เป็นเส้นตรง ดังภาพประกอบที่ 31 พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงฉีกขาดกับปริมาณของ SNR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วง 0-15 phr แต่จะมีค่าความทนทานต่อแรงฉีกขาดลดลง เมื่อเติม SNR ปริมาณ 20 phr ซึ่งพบว่า การที่มีพอลิสไตรีนปริมาณมากขึ้น ทำให้สูญเสียคุณสมบัติความเป็นอิลาสติกได้ ค่าความทนทานต่อแรงฉีกขาดจึงมีค่าลดลง

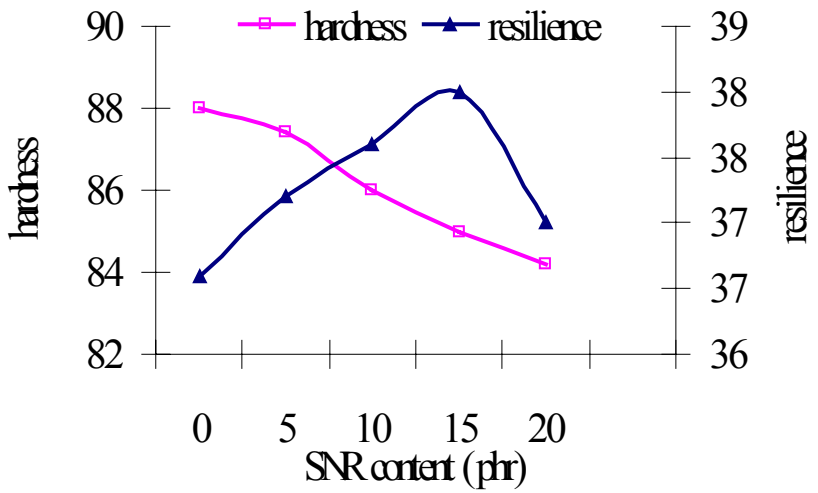


ภาพประกอบที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติความทนทานต่อแรงฉีกขาดกับปริมาณ SNR

3.4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านความแข็ง (hardness test) และผลการทดสอบคุณสมบัติความกระเด้งตัว (resilience test) เมื่อแปรผันปริมาณ SNR

จากผลการทดลอง แสดงดังภาพประกอบที่ 32 พบว่า คุณสมบัติด้านความแข็งลดลงเมื่อเติม SNR ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก SNR ทำหน้าที่เป็นสารที่ทำให้ของผสมเข้ากันได้ดี

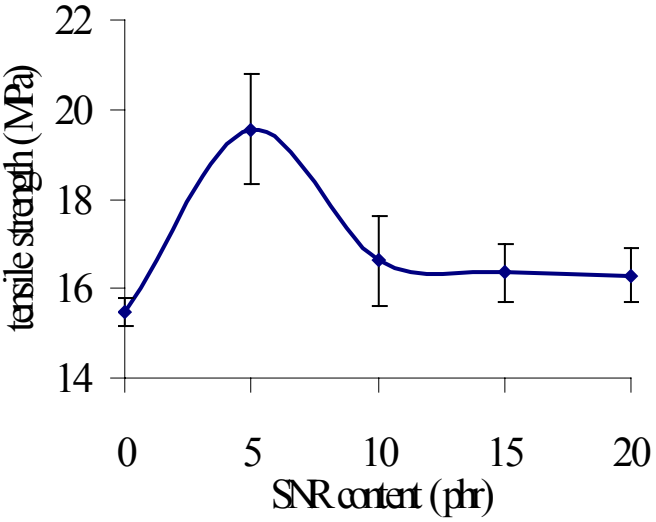
ขึ้น จึงทำให้มี interfacial adhesion ระหว่างเฟสยางกับ thermoplastic matrix สูงขึ้น ส่งผลทำให้มีองค์ประกอบที่มีความเป็นอิลาสโตเมอร์สูงขึ้น ค่าความแข็งของของผสมจึงลดลงด้วย



ภาพประกอบที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลกับปริมาณ SNR

และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการแปรผันปริมาณ SNR กับคุณสมบัติด้านความกระเด้งตัว พบว่า มีแนวโน้มเป็นไปในทำนองเดียวกันกับค่าความทนทานต่อแรงฉีกขาด กล่าวคือ ค่าความกระเด้งตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วง 0-15 phr แต่จะมีค่าลดลง เมื่อเติม SNR ปริมาณ 20 phr ซึ่งพบว่า การที่มีพอลิสไตรีนปริมาณมากขึ้น ส่งผลทำให้สูญเสียคุณสมบัติความเป็นอิลาสติกได้ ค่าความกระเด้งตัวจึงมีค่าลดลง

3.4.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) เมื่อแปรผันปริมาณ SNR



ภาพประกอบที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติความทนทานต่อแรงดึงกับปริมาณ SNR

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงดึงกับปริมาณของ SNR พบว่า การเติม SNR 5 phr จะให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุด ดังภาพประกอบที่ 33 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hashim and Ong (2002)

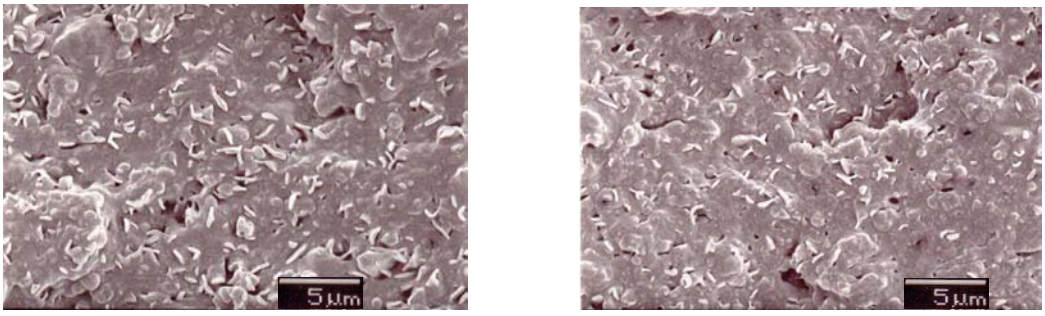
3.4.5 ผลการคำนวณความสามารถในการรับพลังงานได้ (toughness) เมื่อแปรผันปริมาณ SNR

จากผลการทดลอง แสดงดังตารางที่ 15 พบว่า ค่า toughness เพิ่มขึ้นเมื่อเติมปริมาณ SNR เพิ่มขึ้น เนื่องจาก SNR ทำหน้าที่เป็นสารที่ทำให้ของผสมเข้ากันได้ดีขึ้น จึงทำให้มี interfacial adhesion ระหว่างเฟสยางกับ thermoplastic matrix สูงขึ้น ทำให้มีองค์ประกอบที่มีความเป็นอิลาสโตเมอร์สูงขึ้น ความสามารถในการรับพลังงานได้ของของผสมจึงเพิ่มขึ้นด้วย

ตารางที่ 15 ค่า toughness กับการแปรผันปริมาณ SNR

SNR (phr)	toughness ($N.mm/mm^3$)
0	981.70
5	1582.65
10	1610.71
15	1851.16
20	1817.79

3.4.6 การทดสอบคุณสมบัติทางสัณฐานวิทยา (morphology test) เมื่อแปรผันปริมาณ SNR



(a) (b)

ภาพประกอบที่ 34 ผิวหน้าที่แตกหักที่เติม (a) SNR 0 phr และ (b) SNR 5 phr จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 3000 เท่า

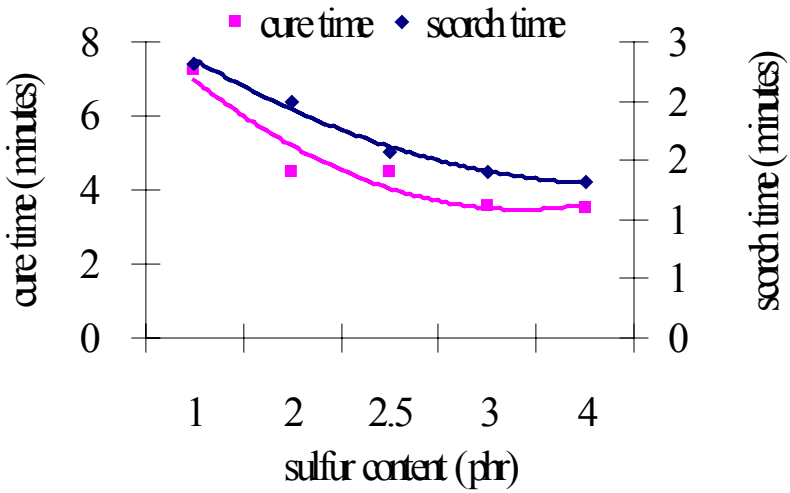
จากภาพประกอบที่ 34 (a) และ (b) แสดงผิวหน้าที่แตกหักเมื่อเติม SNR 0 และ 5 phr จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 3000 เท่า ตามลำดับ พบว่า ที่การเติม SNR 5 phr ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (morphology) มีความเป็นเนื้อเดียวกันที่ต่อเนื่องมากกว่า โดยมีเฟสของยางธรรมชาติที่มีลักษณะละเอียดกว่า แสดงให้เห็นว่า SNR ที่เติมลงไปในของผสม ทำให้ของผสมมีความเข้ากันได้ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hashim and Ong (2002)

เนื่องจากในการทดลองนี้จะใช้คุณสมบัติเชิงกลด้านความทนทานต่อแรงดึงร่วมกับพิจารณาความสามารถในการรับพลังงานได้ เป็นดัชนีบ่งชี้ความเหมาะสมของสูตรเป็นหลัก ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่การเติม SNR ปริมาณ 5 phr จะให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงที่สุด และมีค่าความ

สามารถในการรับพลังงานได้สูง จึงเลือกใช้ปริมาณนี้ให้เป็นสัดส่วนที่คงที่เพื่อแปรผันปริมาณสารตัวต่อไป

3.5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติการเชื่อมขวางและการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล เมื่อแปรผันปริมาณกำมะถัน

3.5.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติการเชื่อมขวาง (การหาค่า cure time และ scorch time) เมื่อแปรผันปริมาณกำมะถัน แสดงดังภาพประกอบที่ 35

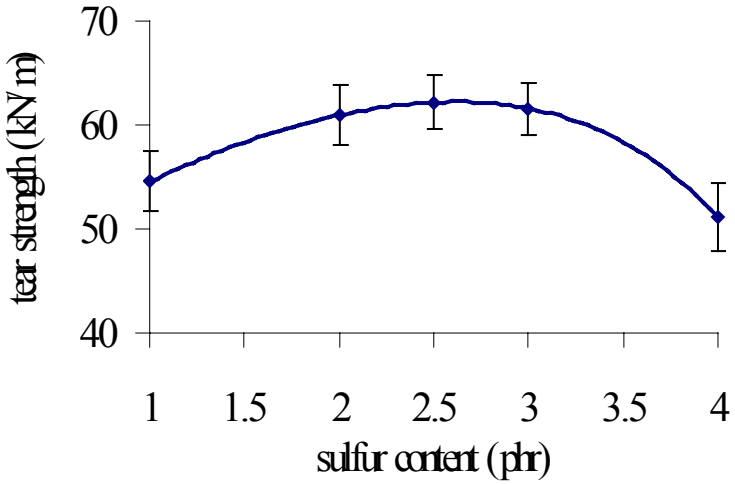


ภาพประกอบที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า cure time และค่า scorch time กับปริมาณกำมะถัน

กำมะถันมีคุณสมบัติเป็นสารวัลคาไนซ์ มีผลทำให้โมเลกุลของยางมาเชื่อมต่อกัน การเติมกำมะถันในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีการเชื่อมขวางกันของโมเลกุลของยางเพิ่มขึ้น เวลาการสุกและเวลาการไหลได้ของยางจึงมีค่าลดลง

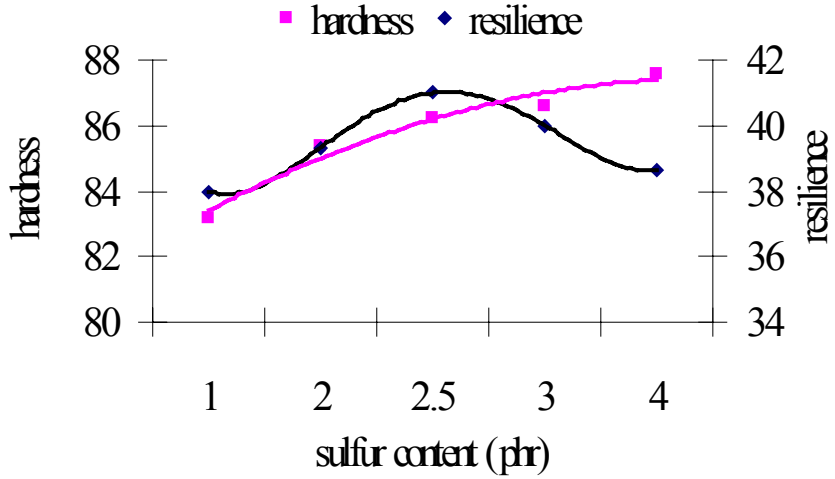
3.5.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติความทนทานต่อแรงฉีกขาด (tear strength) เมื่อแปรผันปริมาณกำมะถัน

การที่มีการเชื่อมขวางเกิดขึ้นในเฟสของยาง จะส่งผลให้ของผสมมีคุณสมบัติความทนทานต่อแรงฉีกขาดเปลี่ยนแปลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติเหล่านี้จะแปรผันตามความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง แสดงดังภาพประกอบที่ 36



ภาพประกอบที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติความทนทานต่อแรงฉีกขาดกับปริมาณกำมะถัน

3.5.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านความแข็ง (hardness test) และผลการทดสอบคุณสมบัติความกระเด้งตัว (resilience test) เมื่อแปรผันปริมาณกำมะถัน แสดงดังภาพประกอบที่ 37



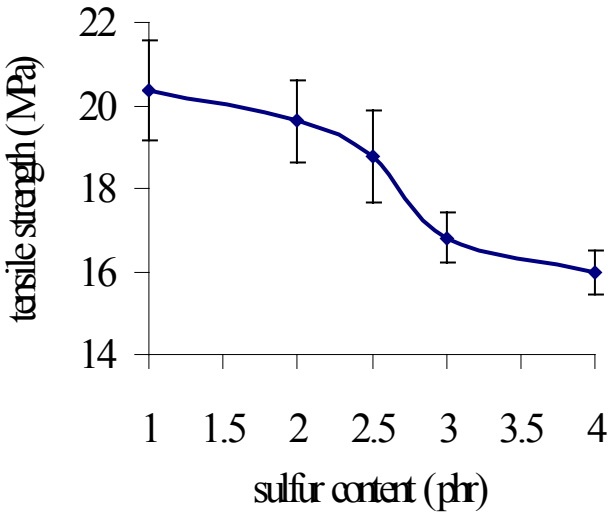
ภาพประกอบที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลกับปริมาณกำมะถัน

คุณสมบัติด้านความแข็งของของผสม จะมีค่าขึ้นตามลำดับของการวัลคาไนซ์ โดยที่ ค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ตามการเพิ่มขึ้นของพันธะการเชื่อมขวาง (ปรีชา, 2529)

และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการแปรผันปริมาณกำมะถันกับคุณสมบัติด้านความกระเด้งตัว พบว่า มีแนวโน้มเป็นไปในทำนองเดียวกันกับค่าความทนทานต่อแรงฉีกขาด กล่าวคือ คุณสมบัติด้านความกระเด้งตัวของของผสมมีการแปรผันตามความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง

3.5.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) เมื่อแปรผันปริมาณกำมะถัน

การเติมสารวัลคาไนซ์ ทำให้เกิดการเชื่อมขวางในเฟสยาง และเกิดผลในการปรับปรุงคุณสมบัติความทนทานต่อแรงดึงได้หากมีปริมาณการเชื่อมขวางที่เหมาะสม ซึ่งผลการทดสอบคุณสมบัติความทนทานต่อแรงดึง พบว่า การเติมปริมาณกำมะถันที่เหมาะสม คือ เติมที่ปริมาณ 1 phr เนื่องจากจะให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงที่สุด ทั้งนี้เป็นเพราะว่า ที่การเติมกำมะถันปริมาณ 1 phr ทำให้ระบบนี้มีการวัลคาไนซ์เป็นแบบระบบ efficient curative system (EV system) ซึ่งระบบนี้จะมีพันธะการเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นเป็นแบบ monosulfide bonds จึงมีความสามารถในการรับ stress ได้สูง



ภาพประกอบที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติความทนทานต่อแรงดึงกับปริมาณกำมะถัน

3.5.5 ผลการคำนวณความสามารถในการรับพลังงานได้ (toughness) เมื่อแปรผันปริมาณกำมะถัน

เนื่องจากการเติมกำมะถันในปริมาณเพิ่มขึ้น เป็นการเพิ่มปริมาณการเชื่อมขวางได้เพิ่มขึ้น ทำให้ของผสมมีองค์ประกอบที่มีความยืดหยุ่นลดลง ความสามารถในการรับพลังงานได้จึงลดลง แสดงผลการคำนวณดังตารางที่ 16

ตารางที่ 16 ค่า toughness กับการแปรผันปริมาณกำมะถัน

Sulfur (phr)	toughness ($N.mm/mm^3$)
1	2826.10
2	2294.75
2.5	2235.21
3	1178.59
4	1030.49

3.5.6 ผลการทดสอบคุณสมบัติความทนทานต่อการหักงอ (flex cracking resistance) เมื่อแปรผันปริมาณกำมะถัน

การเติมกำมะถันปริมาณ 1 phr ให้ค่าความทนทานต่อการหักงอได้สูงที่สุด คือ สามารถทดสอบได้ 1500 รอบ ก่อนที่จะเกิดรอยแตกที่ผิวหน้าของชิ้นทดสอบ ซึ่งมีผลการทดลองความทนทานต่อการหักงอเมื่อแปรผันปริมาณกำมะถันแสดงดังตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ค่าความทนทานต่อการหักงอกับการแปรผันปริมาณกำมะถัน

Sulfur (phr)	ความทนทานต่อการหักงอ (จำนวนรอบ)	ลักษณะรอยแตกที่ผิวหน้าของชิ้นทดสอบ	ประเมินผลตามASTM D 430-95 (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ง)
1	1500	แตกเป็นจุดเล็กๆคล้ายเข็มแทง	Grade 1
2	187	รอยแตกขยายเป็นวงกว้าง	Grade 2
2.5	507	มีรอยแตกตลอดทั้งผิวหน้า	Grade 3
3	20	เกิดการแตกหักแบบเฉือน	Grade 10
4	150	เกิดการแตกหักออกเป็น 2 ส่วน	Grade 10

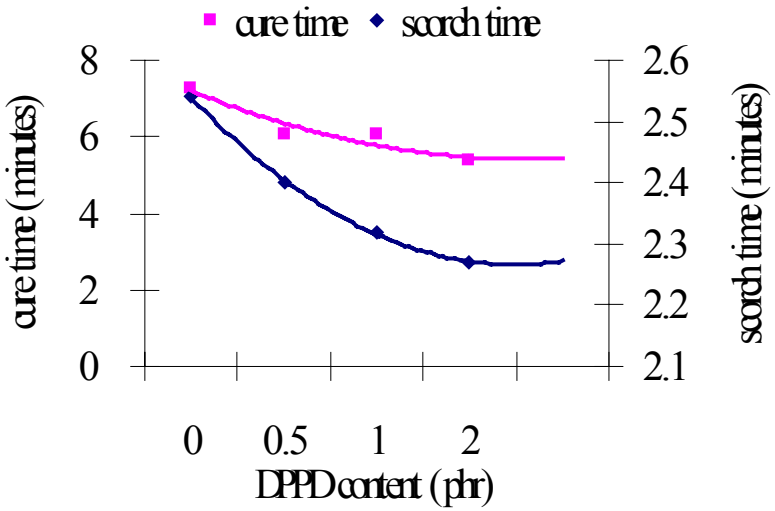
เนื่องจากในการทดลองนี้จะใช้คุณสมบัติเชิงกลด้านความทนทานต่อแรงดึงร่วมกับพิจารณาความสามารถในการรับพลังงานได้ เป็นดัชนีบ่งชี้ความเหมาะสมของสูตรเป็นหลัก ซึ่ง

จะเห็นได้ว่าที่การเติมกำมะถันปริมาณ 1 phr จะให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงที่สุด และมีค่าความสามารถในการรับพลังงานได้สูงที่สุด จึงเลือกใช้ปริมาณนี้ให้เป็นสัดส่วนที่คงที่เพื่อแปรผันปริมาณสารตัวต่อไป

3.6 การวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติการเชื่อมขวางและการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล เมื่อแปรผันปริมาณ DPPD

3.6.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติการเชื่อมขวาง (การหาค่า cure time และ scorch time) เมื่อแปรผันปริมาณ DPPD แสดงดังภาพประกอบที่ 39

เนื่องจากสารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นด่าง เมื่อเติมลงไปผสมในยางจะทำให้ยางมีค่าความเป็น กรด-ด่าง สูงขึ้น ซึ่งส่วนใหญ่จะส่งผลให้ยางมีอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางสูงขึ้นด้วย ดังนั้นการเติม DPPD ที่มีฤทธิ์เป็นด่าง จึงทำให้ผลการทดสอบค่าเวลาการสุกของยางและเวลาที่ยางสามารถไหลได้ก่อนที่จะเริ่มเกิดการเชื่อมขวางจึงลดลง

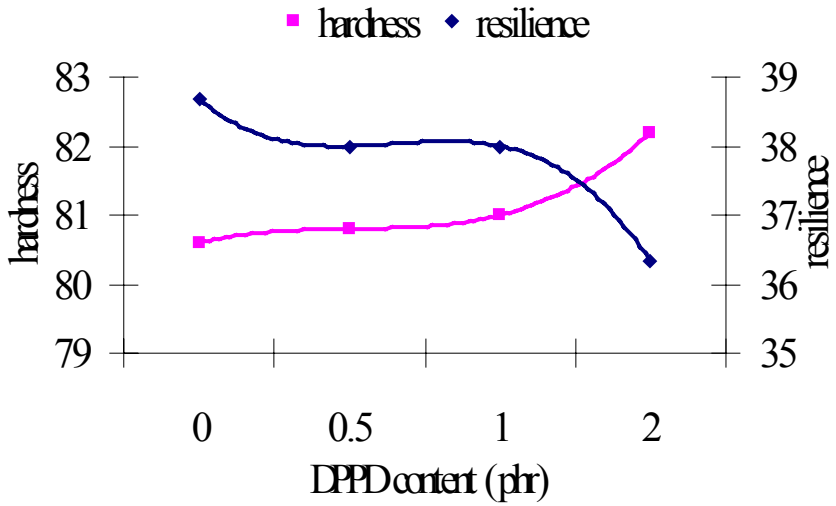


ภาพประกอบที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า cure time และค่า scorch time กับปริมาณ DPPD

3.6.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติความกระเด้งตัว (resilience test) และผลการทดสอบคุณสมบัติด้านความแข็ง (hardness test) เมื่อแปรผันปริมาณ DPPD

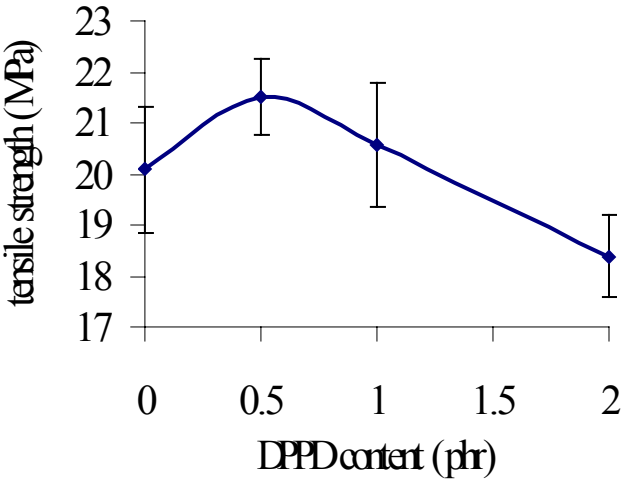
การเติม DPPD ที่มีฤทธิ์เป็นด่าง จะส่งผลให้ยางมีอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางสูงขึ้น จึงมีโอกาสสูงที่โมเลกุลจะเชื่อมขวางกันเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ ซึ่งจะส่งผลให้มีความหนาแน่นของการเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเติมสารที่มีฤทธิ์เป็นด่างเพิ่มขึ้น คุณสมบัติ

ด้านความกระเด้งตัวของของผสมจึงมีค่าลดลงเมื่อเติม DPPD ปริมาณเพิ่มขึ้น แต่คุณสมบัติด้านความแข็งของของผสมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติม DPPD ปริมาณเพิ่มขึ้น แสดงผลการทดลองดังภาพประกอบที่ 40



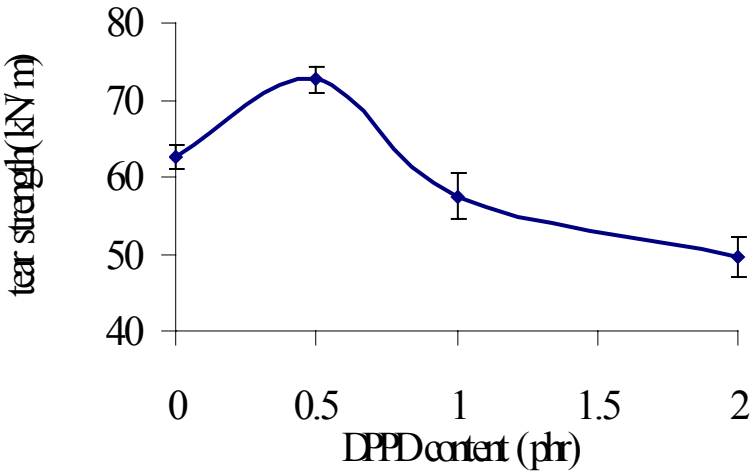
ภาพประกอบที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า hardness และ resilience กับปริมาณ DPPD

3.6.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) และผลการทดสอบคุณสมบัติความทนทานต่อแรงฉีกขาด (tear strength) เมื่อแปรผันปริมาณ DPPD



ภาพประกอบที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติความทนทานต่อแรงดึงกับปริมาณ DPPD

คุณสมบัติความทนทานต่อแรงดึง (ภาพประกอบที่ 41) และคุณสมบัติความทนทานต่อแรงฉีกขาด (ภาพประกอบที่ 42) มีแนวโน้มเป็นไปในทำนองเดียวกัน กล่าวคือ ของผสมจะมีค่าความทนทานต่อแรงดึงและค่าความทนทานต่อแรงฉีกขาดสูงที่สุดเมื่อเติม DPPD ที่ปริมาณ 0.5 phr ทั้งนี้เนื่องจากการเติม DPPD ในปริมาณที่ไม่เหมาะสม ทำให้มีโอกาสที่จะเกิด การบลูม (การซึมหรือการตกผลึกของสารเคมีที่เติมเข้าไปซึมออกมาที่ผิวหน้าของชิ้นงาน) ได้สูง ซึ่งการบลูมของสารนี้จะทำให้เกิดปัญหาที่ทำให้ยางต่อยางไม่เชื่อมขวางกัน เนื่องจากมีรอยแนวของ DPPD ที่ตกผลึกมากั้นไว้ ส่งผลให้บริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณที่อ่อนแอ จึงเกิดการแตกหักหรือฉีกขาดเมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกได้ง่าย ค่าความทนทานต่อแรงดึงและความทนทานต่อแรงฉีกขาดจึงลดลงที่การเติม DPPD สูงกว่า 0.5 phr



ภาพประกอบที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติความทนทานต่อแรงฉีกขาดกับปริมาณ DPPD

3.6.4 ผลการคำนวณความสามารถในการรับพลังงานได้ (toughness) เมื่อแปรผันปริมาณ DPPD

ตารางที่ 18 ค่า toughness กับการแปรผันปริมาณ DPPD

DPPD (phr)	toughness ($N.mm/mm^3$)
0	3263.02

0.5	3062.85
1	2826.10
2	2781.06

จากผลการทดลอง แสดงดังตารางที่ 18 พบว่า ความสามารถในการรับพลังงานได้ของของผสมมีค่าลดลงเมื่อเติม DPPD ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิดบริเวณที่อ่อนแอที่มีสาเหตุมาจากการตกผลึกของ DPPD ออกมากั้นการเชื่อมขวางของโมเลกุลของยาง จึงทำให้ความต่อเนื่องกันของเฟสของของผสมลดลง ส่งผลให้ความสามารถในการรับพลังงานได้มีค่าลดลงด้วย

3.6.5 การทดสอบการเสื่อมสภาพของยางในสภาวะอากาศและโอโซน

3.6.5.1 การทดสอบด้วยสภาวะอากาศ (weathering test)

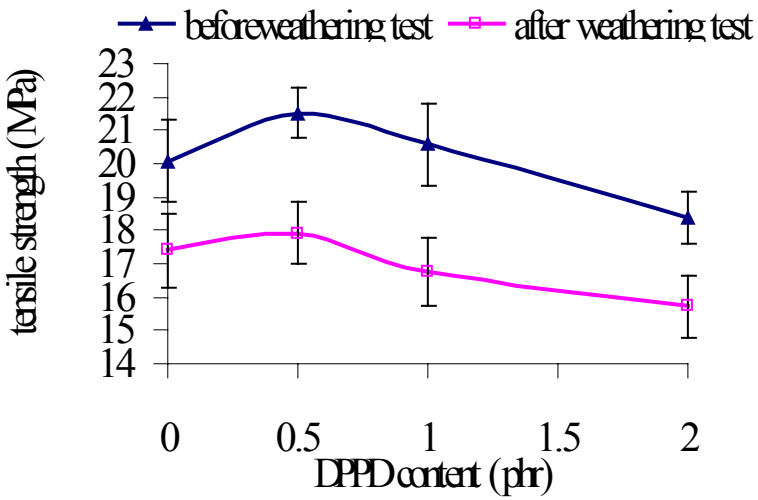
การทดสอบการสัมผัสสภาวะอากาศ (weathering test) เป็นการจำลองสถานการณ์การสัมผัสปัจจัยต่างๆที่ทำให้ของผสมเกิดการเสื่อมสภาพได้ ซึ่งปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้แก่ ความชื้น อากาศ และรังสีอัลตราไวโอเลต ผลการเปรียบเทียบความทนทานต่อแรงดึงก่อนและหลังการทดสอบการเสื่อมด้วยสภาวะอากาศแสดงดังตารางที่ 19

ตารางที่ 19 ผลการเปรียบเทียบความทนทานต่อแรงดึงก่อนและหลังทดสอบการเสื่อมด้วยสภาวะอากาศ

formula	DPPD (phr)	tensile strength (MPa)		% decrease	% weathering resistance
		before weathering test	after weathering test		
30	0	20.09	17.39	13.44	86.56
31	0.5	21.51	17.92	16.69	83.31
32	1	20.57	16.76	18.52	81.48
33	2	18.39	15.73	14.46	85.54

เนื่องจากออกซิเจนและโอโซนเป็นตัวการสำคัญในการเสื่อมสภาพของยาง โดยที่ความร้อน แสง และความเครียดในยางเป็นตัวเร่งให้ยางเสื่อมสภาพเร็วขึ้น สารเคมีที่ช่วยป้องกันไม่ให้ยางเสื่อมสภาพเรียกว่า “แอนตี้ออกซิแดนท์” สารประกอบกลุ่มที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการป้องกันยางจากสภาวะอากาศและโอโซน ทั้งภายใต้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบสถิตและแบบ

พลวัต ได้แก่ สารประกอบที่เป็นอนุพันธ์ของฟีนิลลีนไดเอมีน (p-phenylenediamine) สารประกอบเหล่านี้จะช่วยเพิ่มค่าพลังงานวิกฤติหรือค่าพลังงานต่ำสุด (critical energy) ทำให้รอยแตกเกิดได้ยากขึ้น และสารประกอบชนิดนี้ยังช่วยลดอัตราเร็วในการขยายตัวของรอยแตกทั้งในสภาวะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบสถิตและแบบพลวัต จากการทดลองแปรผันปริมาณ DPPD ซึ่งเป็นสารแอนตี้ออกซิแดนท์ในกลุ่มของฟีนิลลีนไดเอมีน พบว่า DPPD ทำหน้าที่ในการป้องกันการเสื่อมสภาพของยางได้ดี เนื่องจาก ชิ้นทดสอบที่ผ่านการสัมผัสกับสภาวะอากาศมีความทนทานต่อสภาวะอากาศได้สูงกว่า 80% ทุกการทดลอง แสดงดังภาพประกอบที่ 43



ภาพประกอบที่ 43 กราฟเปรียบเทียบค่าความทนทานต่อแรงดึงก่อนและหลังจากการทดสอบการเสื่อมสภาพด้วยสภาวะอากาศเมื่อแปรผันปริมาณ DPPD

3.6.5.2 การทดสอบด้วยสภาวะโอโซน (ozone test)

จากการทดสอบความทนทานต่อโอโซน โดยนำชิ้นทดสอบมายืดไว้ที่ 20% ในบรรยากาศเป็นเวลา 48 hrs แล้วนำชิ้นทดสอบเดิมวางไว้ในสภาวะการทดสอบที่มีความเข้มข้นของโอโซน 25 pphm ควบคุมอุณหภูมิที่ 40˚C ทดสอบเป็นเวลา 72 hrs จากนั้น วิเคราะห์ความทนทานต่อโอโซนของชิ้นทดสอบ จากลักษณะและขนาดของรอยแตกของผิวยางด้วยแว่นขยาย พบว่า การเติม DPPD ลงในของผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิโพรพิลีนจะมีความทนทานต่อโอโซนได้ดี แสดงผลตามตารางที่ 20

ตารางที่ 20 ความทนทานต่อโอโซนกับการแปรผันปริมาณ DPPD

formula	DPPD (phr)	ลักษณะรอยแตกที่ผิวหน้าของชิ้นทดสอบ
30	0	มีรอยแตกบริเวณขอบของชิ้นทดสอบ 3 ตำแหน่ง
31	0.5	ไม่มีรอยแตกบริเวณผิวหน้าของชิ้นทดสอบ
32	1	มีรอยแตกคล้ายเข็มแทงบริเวณผิวหน้าชิ้นทดสอบ 4 ตำแหน่ง
33	2	ไม่มีรอยแตกบริเวณผิวหน้าของชิ้นทดสอบ

เนื่องจากเมื่อนำยางที่ยืดทิ้งไว้ในบรรยากาศแล้วตั้งทิ้งไว้ระยะหนึ่ง พบว่า จะเกิดรอยแตกที่เนื้อยางในแนวตั้งฉากกับทิศทางที่ดึงยางไว้ การเกิดรอยแตกนี้เกิดจากการที่โอโซนทำปฏิกิริยากับยาง ทำให้ยางเกิดสารโอโซไนด์ที่ยืดไม่ได้ ทำให้เกิดรอยแตกที่ผิวขึ้น ทำให้เกิดผิวยางใหม่ที่สามารถทำปฏิกิริยากับโอโซนต่อไปได้อีก การป้องกันเพื่อให้ยางทำปฏิกิริยากับโอโซนน้อยลง สามารถทำได้โดยการเติมสารเคมีที่เรียกว่า “แอนตี้โอโซแนนท์” เช่น สารเคมีชนิด p-phenylenediamine ซึ่งเป็นแอนตี้โอโซแนนท์ที่ดี และการใช้สารขี้ผึ้งปิโตรเลียม (petroleum wax) เป็นสารป้องกันโอโซนได้ดี โดยขี้ผึ้งจะซึมออกมาที่ผิวของยางและเกิดเป็นแผ่นฟิล์มบางเคลือบอยู่ที่บริเวณพื้นผิวของยาง จึงป้องกันไม่ให้โอโซนทำปฏิกิริยากับยางได้ ทำให้ยางมีความทนทานต่อโอโซน การใช้ขี้ผึ้งร่วมกับแอนตี้ออกซิแดนท์และแอนตี้โอโซแนนท์มักเป็นที่นิยม โดยจะออกฤทธิ์เสริมซึ่งกันและกัน ซึ่งขี้ผึ้งจะเป็นสารที่ทำให้แอนตี้ออกซิแดนท์หรือแอนตี้โอโซแนนท์เคลื่อนไหวไปกับขี้ผึ้งด้วย ทำให้สามารถป้องกันโอโซนและออกซิเดชันได้ดีขึ้น

เนื่องจากในการทดลองนี้จะใช้คุณสมบัติเชิงกลด้านความทนทานต่อแรงดึงร่วมกับพิจารณาความสามารถในการรับพลังงานได้ เป็นดัชนีบ่งชี้ความเหมาะสมของสูตรเป็นหลัก ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่การเติม DPPD ปริมาณ 0.5 phr จะให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงที่สุด และมีค่าความสามารถในการรับพลังงานได้สูง จึงเลือกใช้ปริมาณนี้เป็นสัดส่วนที่เหมาะสม