

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงของยางธรรมชาติและยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีน

หลังจากขึ้นรูปยางคอมปาวด์ของยางธรรมชาติและยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีนแล้ว นำตัวอย่างยางที่ได้ไปทำการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึง เพื่อเลือกสูตรยางที่ดีที่สุดไปใช้ในการทำยางผสมต่อไป ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาด แสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 – 4.2 จากผลการทดสอบพบว่า ยางธรรมชาติสูตร NR2 และสูตร NR5 ให้ค่าความทนต่อแรงดึงใกล้เคียงกัน คือ 24.00 MPa และ 24.13 MPa ตามลำดับ ยางธรรมชาติสูตร NR3 มีความทนต่อแรงดึงต่ำสุด และสูตร NR1 กับสูตร NR4 มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนค่าการยืด ณ จุดขาดของยางธรรมชาติทั้ง 5 สูตร มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณายางธรรมชาติแต่ละสูตร (ในตารางที่ 3.1) จะเห็นว่า สูตร NR3 วัลคาไนซ์ด้วยระบบอีวี ทำให้ยางที่ได้มีค่าความทนต่อแรงดึงต่ำกว่าสูตรอื่นๆ เพราะการวัลคาไนซ์ด้วยระบบนี้ ยางเกิดการเชื่อมโยงแบบมอโนซัลฟิดิกและได-ซัลฟิดิก ทำให้ยางมีความต้านทานต่อความร้อนและความต้านทานต่อการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดดีขึ้น แต่สมบัติด้านความทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการสึกหรอหรือด้อยลง ส่วนสูตร NR1 และ NR5 วัลคาไนซ์ด้วยระบบเซมิอีวี ยางที่ได้จึงมีค่าความทนต่อแรงดึงสูงกว่าสูตร NR3 สำหรับสูตร NR2 และ NR4 วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันปกติ ทำให้ยางที่ได้มีความทนแรงดึงสูง เพราะยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันปกติ เกิดการเชื่อมโยงแบบพอลิซัลฟิดิกที่จะทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดี แต่สมบัติความต้านทานต่อความร้อนและความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพจะด้อยลง (พรพรรณ, 2540)

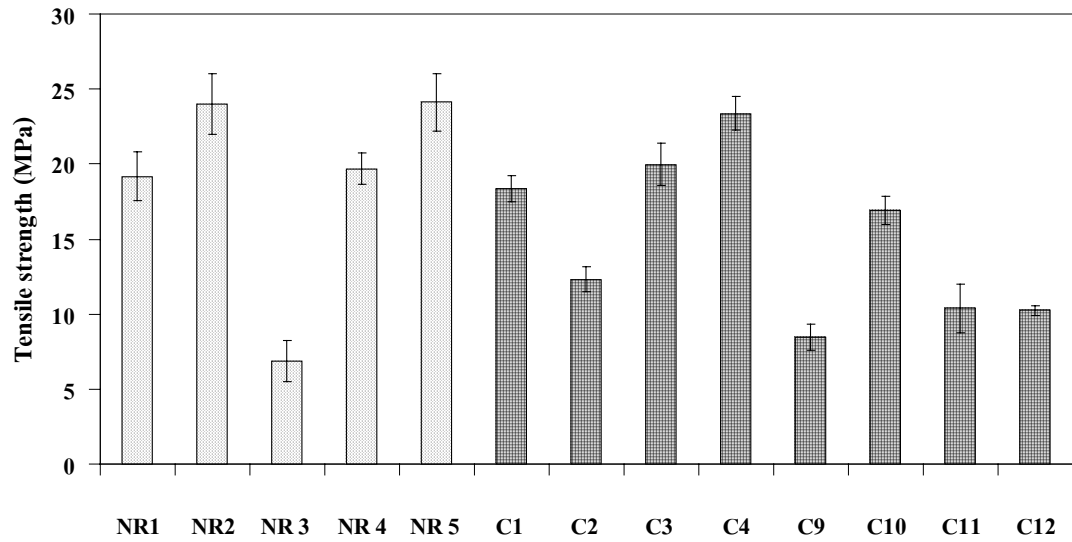
สำหรับสูตรยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีนนั้น สูตรที่ให้ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุด คือ สูตร C4 และสูตรนี้มีค่าการยืด ณ จุดขาดสูงสุดเช่นกัน ส่วนสูตร C1 และสูตร C3 ให้ค่าความทนต่อแรงดึงที่ใกล้เคียงกัน ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.1 – 4.2 แต่สูตร C5, C6, C7, C8, และ C13 ไม่สามารถนำยางคอมปาวด์สูตรดังกล่าวไปขึ้นรูปเป็นแผ่นยางได้ เนื่องจากในการหาเวลาการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง MDR ทั้ง 5 สูตรไม่เกิดการวัลคาไนซ์ ซึ่งสังเกตได้จากค่าทอร์คสูงสุดที่มีค่าต่ำกว่า 3.0 dNm และเมื่อนำไปทดลองขึ้นรูป ยางสูตรดังกล่าวไม่เกิดการวัลคาไนซ์ แต่ยางจะเหนียวติดเบ้า ไม่สามารถแกะออกจากเบ้าได้ เมื่อพิจารณาสูตรยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีนแต่ละสูตร (ในตารางที่ 3.2) จะเห็นว่า สูตร C4 วัลคาไนซ์ด้วยระบบอีวี เพราะใช้สารให้กำมะถันคือ Tetrone[®] A และ MBTS ในการวัลคาไนซ์ และใช้กรดสเตียริกเป็นสารตัวกระตุ้น ซึ่งจะทำให้

ยางสูตร C4 มีค่าความทนต่อแรงดึงสูง แต่ในสูตร C1 ที่ใช้ Tetrone® A ในการวัลคาไนซ์เพียงอย่างเดียวและไม่ใช้สารตัวกระตุ้น จะมีค่าความทนต่อแรงดึงต่ำกว่า เนื่องจากว่า MBTS จะทำให้การเชื่อมโยงมีประสิทธิภาพมากขึ้น และการใส่กรดสเตียริกลงไปปริมาณเล็กน้อยจะทำให้ยางมีค่ามอดูลัสสูงขึ้น (พรพรรณ, 2528) และการเติมสารตัวเติม (แคลเซียมคาร์บอเนต) ลงในยางคอมปาวด์ (สูตร C2 และ C3) จะทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงลดลง

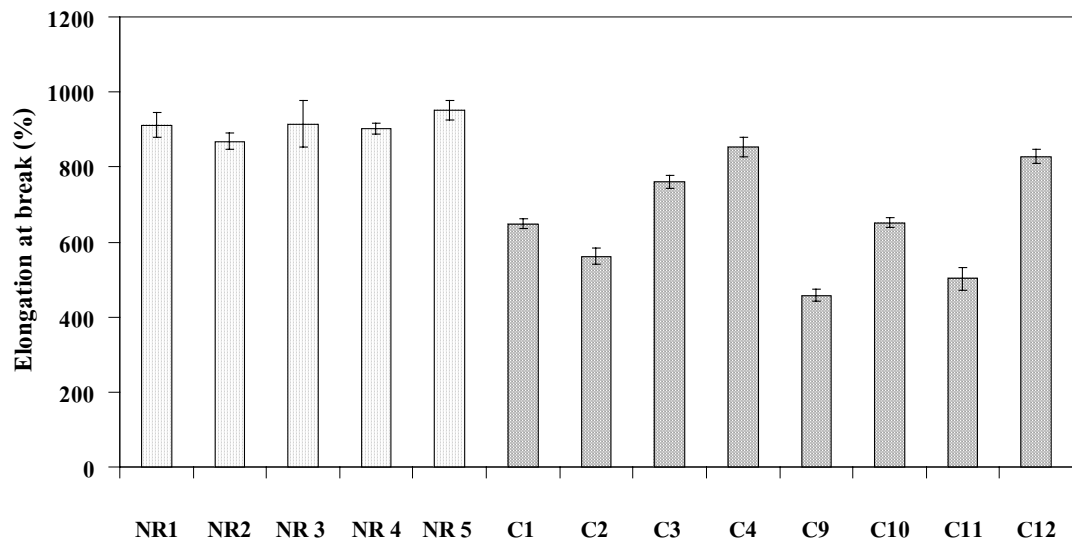
จากค่าความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาดที่ได้จากการทดสอบ จึงเลือกยางสูตร NR1, NR2, NR5, C1 และ C4 ไปใช้ในการเตรียมยางผสม และได้กำหนดสูตรยางผสมทั้งหมด 4 สูตร คือ สูตร B1, B2, B3 และ B4 ซึ่งรายละเอียดของแต่ละสูตรได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 4.1 ค่าความทนต่อแรงดึงของยางธรรมชาติและยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีน

สูตร	ความทนต่อแรงดึง (MPa)	การยืด ณ จุดขาด (%)
NR1	19.17 ± 1.63	912 ± 33
NR2	24.00 ± 2.04	868 ± 22
NR 3	6.90 ± 1.37	915 ± 62
NR 4	19.69 ± 1.04	902 ± 14
NR 5	24.13 ± 1.93	950 ± 26
C1	18.34 ± 0.86	649 ± 13
C2	12.32 ± 0.82	562 ± 22
C3	19.98 ± 1.42	761 ± 18
C4	23.38 ± 1.09	854 ± 26
C9	8.43 ± 0.86	457 ± 16
C10	16.90 ± 0.92	652 ± 13
C11	10.38 ± 1.64	502 ± 30
C12	10.25 ± 0.34	828 ± 19



รูปที่ 4.1 ค่าความทนต่อแรงดึงของยางธรรมชาติและยางคลอโรซัลไฟเนตเตตพอลิเอทิลีน



รูปที่ 4.2 ค่าการยืด ณ จุดขาดของยางธรรมชาติและยางคลอโรซัลไฟเนตเตตพอลิเอทิลีน

2. ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีน

2.1 ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงของยางผสม

ในการทดสอบความทนต่อแรงดึง จะได้ค่าความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาดของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีน ตั้งแต่อัตราส่วน 80/20 – 20/80 ดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยค่าที่ได้จากการคำนวณ ได้มาจากกฎการผสมอย่างง่าย (rule of mixture) ตามสมการที่ 1 (ref.)

$$P_{blend} = w_1 P_1 + w_2 P_2 \quad (1)$$

โดยที่ P_{blend} คือ สมบัติของยางผสม

w_1, w_2 คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของยางธรรมชาติและยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีน ตามลำดับ

P_1, P_2 คือ สมบัติของยางธรรมชาติและยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีน ตามลำดับ

และสามารถเปรียบเทียบผลที่ได้ดังรูปที่ 4.3 – 4.8

(ในการเรียกชื่อสูตร เช่น สูตร B1-20 หมายถึง ยางผสมสูตร B1 ที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติต่อยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีน เป็น 80/20 หรือสูตร B1-80 หมายถึง ยางผสมสูตร B1 ที่อัตราส่วน 20/80)

จากผลการทดลอง พบว่า ยางผสมสูตร B1 ที่มียางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีน 20% จะให้ค่าความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาดสูงสุด และมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ แต่เมื่อปริมาณยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีนเพิ่มขึ้น ค่าความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง โดยยางผสมที่มียางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีนน้อยกว่า 50% จะมีค่าความทนต่อแรงดึงน้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณไม่เกิน 10% (ดังรูปที่ 4.3)

ยางผสมสูตร B2, B3 และ B4 มีค่าความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาดน้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ (ดังรูปที่ 4.4 – 4.6) โดยที่ยางผสมสูตร B2 มีค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดเมื่อมียางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีน 70% เช่นเดียวกับยางผสมสูตร B3 และ B4 แต่ยางผสมสูตร B2 และ B3 มีค่าความทนต่อแรงดึงใกล้เคียงกันที่ทุกอัตราส่วน (ดังแสดงในรูปที่ 4.7) ส่วนค่าการยืด ณ จุดขาดของยางผสมทั้ง 3 สูตร มีค่าลดลง เมื่อปริมาณยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีนเพิ่มขึ้น และแต่ละสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน

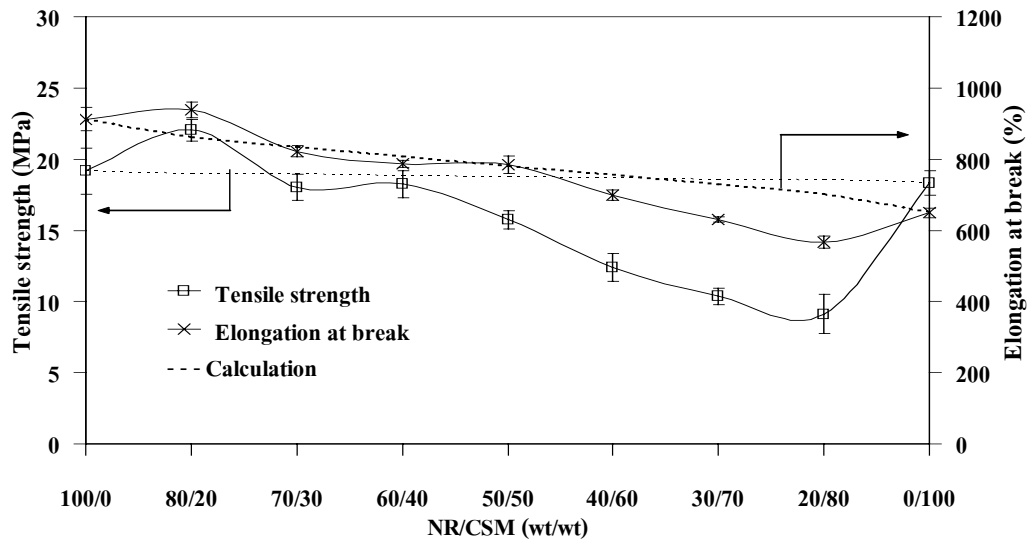
เมื่อเปรียบเทียบค่าความทนต่อแรงดึงของยางผสมทั้ง 4 สูตร (ดังรูปที่ 4.7) ยางผสมสูตร B1 ให้ค่าความทนต่อแรงดึงต่ำสุด ส่วนยางผสมสูตร B2, B3 และ B4 มีค่าที่ใกล้เคียงกัน และให้ค่าสูงกว่ายางผสมสูตร B1 และพบว่า เมื่อยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทรีนมากกว่า 50% ยางผสมสูตร B4 ให้ค่าความทนต่อแรงดึงสูงกว่าสูตรอื่นๆ ส่วนค่าการยืด ณ จุดขาด (ดังรูปที่ 4.8) มีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 4 สูตร และมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนเมื่อปริมาณยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทรีนเพิ่มขึ้น เนื่องจากยางผสมสูตร B1 ได้จากยางสูตร NR1 ผสมกับยางสูตร C1 ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นว่า สูตร NR1 วัลคาไนซ์ด้วยระบบเซมิอีวี ส่วนสูตร C1 วัลคาไนซ์ด้วยสารที่ให้กำมะถันเพียงตัวเดียว คือ Tetrone[®] A ทำให้ยางทั้งสองสูตรมีค่าความทนต่อแรงดึงต่ำกว่าสูตร NR2, NR5 และ C4 ส่วนสูตร B2 ได้จากยางสูตร NR1 ผสมกับยางสูตร C4 ซึ่งยางสูตรนี้วัลคาไนซ์ด้วย Tetrone[®] A และ MBTS เป็นการเสริมประสิทธิภาพในการวัลคาไนซ์ ทำให้ยางมีความทนต่อแรงดึงสูงขึ้น ยางผสมสูตร B3 ได้จากยางสูตร NR2 ผสมกับสูตร C4 ยางสูตร NR2 เป็นวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันปกติ ที่ให้ยางที่มีความทนต่อแรงดึงสูง และสูตร B4 ได้จากยางสูตร NR5 ผสมกับสูตร C4 ซึ่งสูตร NR5 วัลคาไนซ์ด้วยระบบเซมิอีวี โดยใช้ CBS เป็นสารตัวเร่ง (CBS เป็นสารตัวเร่งที่ทำให้ยางมีค่ามอดูลัสสูงขึ้น) ทำให้ยางมีค่าความทนต่อแรงดึงสูงขึ้น (พรพรรณ, 2528)

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงของยางผสม

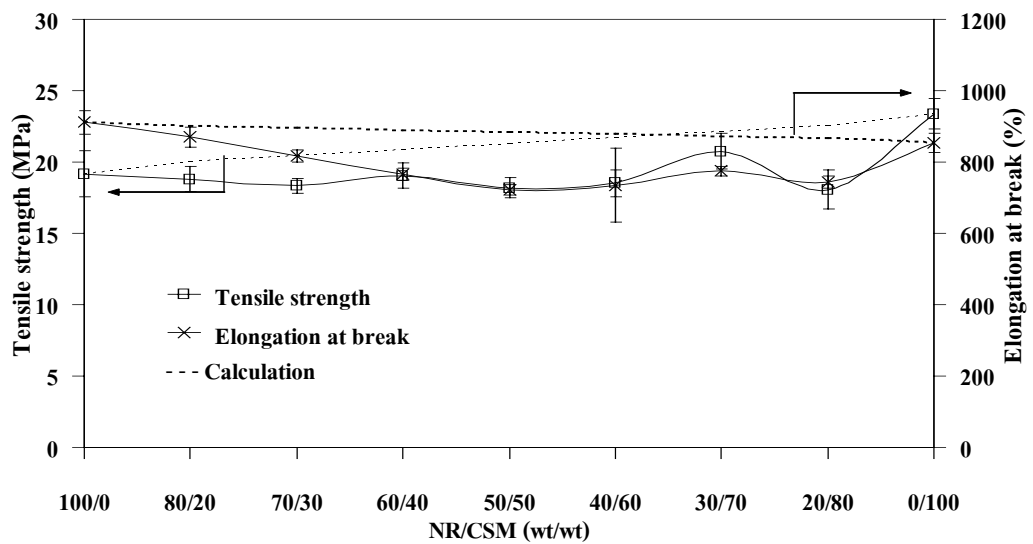
สูตร	ค่าความทนต่อแรงดึง (MPa)		ค่าการยืด ณ จุดขาด (%)	
	จำนวน	ผลที่ได้	จำนวน	ผลที่ได้
B1-0 (=NR1)	-	19.17 ± 1.63	-	912 ± 33
B1-20	19.00	22.03 ± 0.78	859	938 ± 22
B1-30	18.92	18.03 ± 0.92	833	822 ± 16
B1-40	18.84	18.24 ± 0.92	807	787 ± 9
B1-50	18.76	15.76 ± 0.64	781	784 ± 24
B1-60	18.67	12.38 ± 0.98	754	699 ± 14
B1-70	18.59	10.38 ± 0.58	728	631 ± 7
B1-80	18.51	9.11 ± 1.37	702	568 ± 17
B1-100 (=C1)	-	18.34 ± 0.86	-	649 ± 13
B2-0 (=NR1)	-	19.17 ± 1.63	-	912 ± 33
B2-20	20.01	18.80 ± 0.87	900	870 ± 28

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

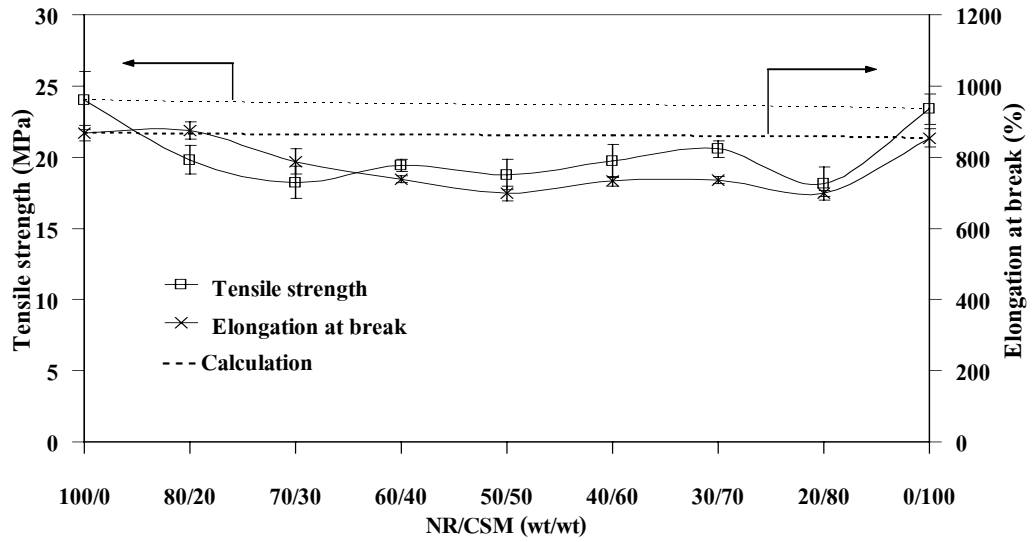
สูตร	ค่าความทนต่อแรงดึง (MPa)		ค่าการยืด ณ จุดขาด (%)	
	จำนวน	ผลที่ได้	จำนวน	ผลที่ได้
B2-30	20.43	18.33 ± 0.50	895	818 ± 18
B2-40	20.85	19.05 ± 0.90	889	766 ± 17
B2-50	21.28	18.20 ± 0.71	883	722 ± 15
B2-60	21.70	18.52 ± 0.94	877	735 ± 104
B2-70	22.12	20.75 ± 1.26	871	775 ± 14
B2-80	22.54	18.07 ± 1.38	866	745 ± 17
B2-100 (=C4)	-	23.38 ± 1.09	-	854 ± 26
B3-0 (=NR2)	-	24.00 ± 2.04	-	868 ± 22
B3-20	23.88	19.80 ± 1.01	865	875 ± 24
B3-30	23.81	18.22 ± 1.13	864	788 ± 35
B3-40	23.75	19.43 ± 0.45	862	738 ± 10
B3-50	23.69	18.77 ± 1.06	861	698 ± 20
B3-60	23.63	19.75 ± 1.15	860	732 ± 13
B3-70	23.57	20.57 ± 0.59	858	736 ± 10
B3-80	23.50	18.17 ± 1.16	857	698 ± 8
B3-100 (=C4)	-	23.38 ± 1.09	-	854 ± 26
B4-0 (=NR5)	-	24.13 ± 1.93	-	950 ± 26
B4-20	23.98	19.04 ± 0.45	931	947 ± 12
B4-30	23.91	19.01 ± 1.10	921	879 ± 25
B4-40	23.83	16.33 ± 0.52	912	780 ± 34
B4-50	23.76	21.98 ± 1.33	902	743 ± 21
B4-60	23.68	19.61 ± 1.56	892	693 ± 22
B4-70	23.61	22.11 ± 1.08	883	725 ± 24
B4-80	23.53	19.00 ± 2.01	873	714 ± 37
B4-100 (=C4)	-	23.38 ± 1.09	-	854 ± 26



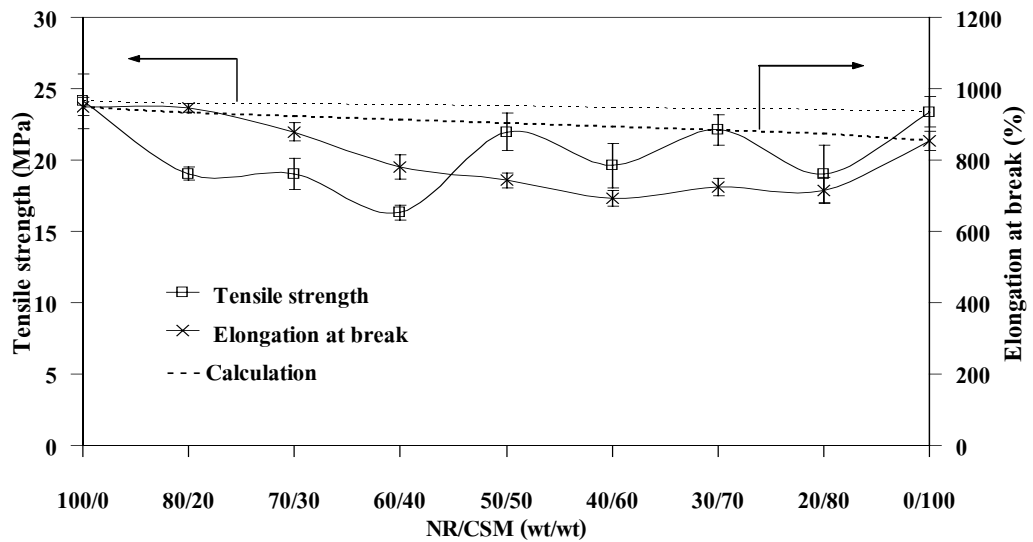
รูปที่ 4.3 ความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร B1



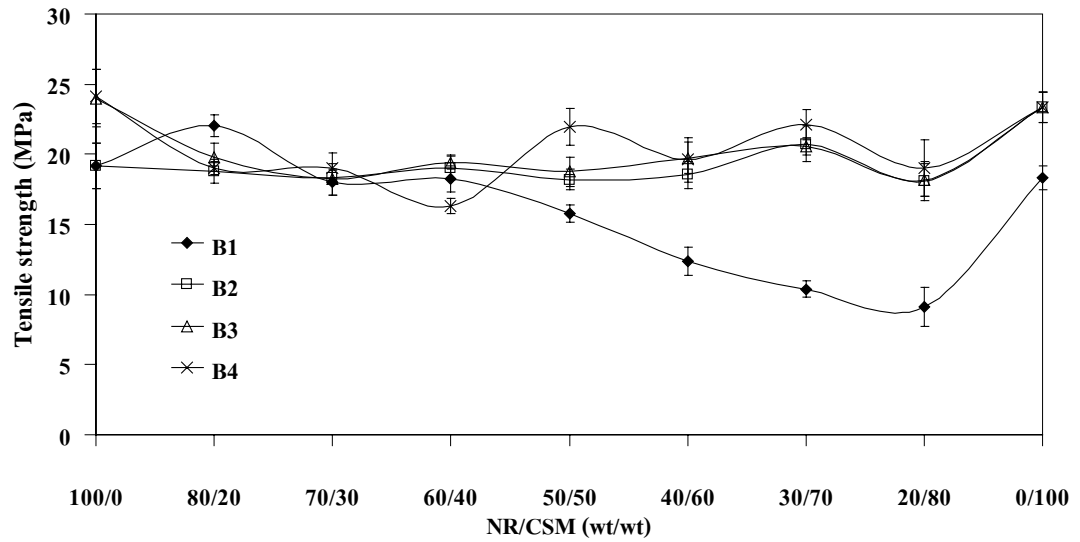
รูปที่ 4.4 ความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร B2



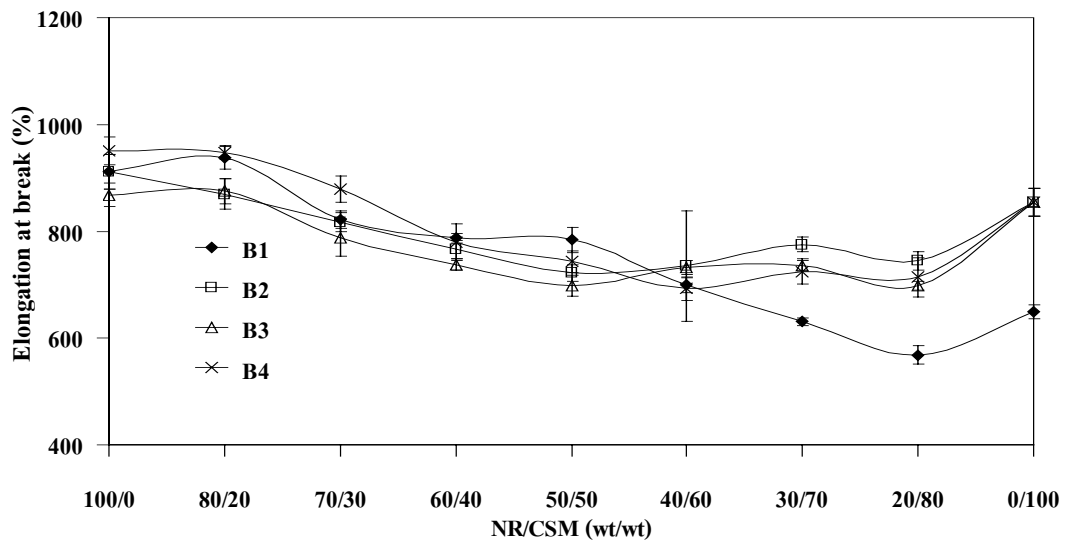
รูปที่ 4.5 ความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร B3



รูปที่ 4.6 ความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร B4



รูปที่ 4.7 ความทนต่อแรงดึงของยางผสมทั้ง 4 สูตร



รูปที่ 4.8 ค่าการยืด ณ จุดขาดของยางผสมทั้ง 4 สูตร

2.2 ผลการทดสอบการนิกษาค

ผลการทดสอบของยางผสมสูตรต่างๆ ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.3 โดยค่าที่ได้จากการคำนวณ มาจากกฎการผสมอย่างง่าย (rule of mixture) ตามสมการที่ 1

ยางผสมสูตร B1, B2 และ B3 มีความทนต่อการนิกษาคสูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ ที่อัตราส่วน 80/20 และ 70/30 (ดังรูปที่ 4.9 – 4.12) ส่วนยางผสมสูตร B4 ทุกอัตราส่วนมีความทนต่อการนิกษาคต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ แต่ที่อัตราส่วน 80/20 และ 70/30 ค่าที่ได้จากการทดสอบต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณน้อยกว่า 10% และจะเห็นว่า ที่อัตราส่วน 80/20 และ 70/30 ของยางผสมแต่ละสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน เช่น สูตร B1 ที่อัตราส่วน 80/20 มีค่าความทนต่อการนิกษาค 28.65 N/mm และที่อัตราส่วน 70/30 มีค่าเท่ากับ 27.29 N/mm และสูตร B4 ที่อัตราส่วน 80/20 มีค่าเท่ากับ 23.82 N/mm และที่อัตราส่วน 70/30 มีค่าเท่ากับ 24.41 N/mm เป็นต้น เมื่อปริมาณยางคลอโรซัลเฟตพอลิเอทรีนเพิ่มเป็น 40% ค่าความทนต่อการนิกษาคมีค่าลดลงอย่างชัดเจน เช่น สูตร B1 ที่อัตราส่วน 60/40 มีค่าความทนต่อการนิกษาค 23.69 N/mm ส่วนสูตร B4 ที่อัตราส่วน 60/40 มีค่าเท่ากับ 21.90 N/mm เป็นต้น และค่าความทนต่อการนิกษาคของยางผสมทุกสูตรมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณยางคลอโรซัลเฟตพอลิเอทรีนเพิ่มขึ้น (มากกว่า 30%) และจากการเปรียบเทียบผลที่ได้ของยางผสมสูตรต่างๆ (ดังรูปที่ 4.13) ยางผสมสูตร B2 มีความทนต่อการนิกษาคดีกว่าสูตรอื่นๆ ทุกอัตราส่วน

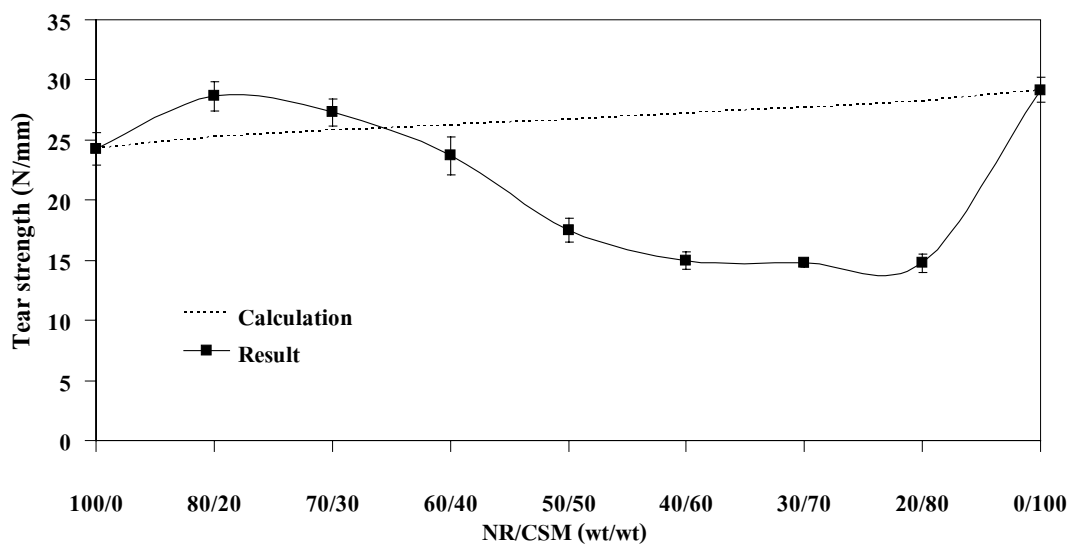
จากที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นว่า ที่อัตราส่วน 80/20 และ 70/30 สูตร B1, B2 และ B3 มีค่าความทนต่อการนิกษาคสูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ แสดงว่า การผสมยางธรรมชาติกับยางคลอโรซัลเฟตพอลิเอทรีน โดยมียางคลอโรซัลเฟตพอลิเอทรีนปริมาณเล็กน้อย (ไม่เกิน 30%) เป็นการเพิ่มความทนต่อการนิกษาคของยางธรรมชาติให้ดีขึ้น และที่อัตราส่วนดังกล่าว ยางผสมมีความเข้ากันได้ จึงทำให้ค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ (Ismail and Poh, 2000) ซึ่งเป็นผลมาจากปรากฏการณ์ที่เรียกว่า synergistic effect ที่จะเกิดขึ้นเมื่อยางผสมมีความเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวกัน (miscible) หรือสามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้บางส่วน (partially miscible) (Ismail and Leong, 2001) แต่สูตร B4 ไม่เกิด synergistic effect ทำให้ผลที่ได้มีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ แต่ยางผสมที่เตรียมได้ไม่เป็น miscible blend เพราะยางผสมที่ได้แยกเป็นสองเฟสอย่างชัดเจน (ดังจะเห็นได้จากผลการตรวจสอบด้วยเครื่อง SEM) และสูตรที่ให้สมบัติดีขึ้นจะเรียกว่า compatible blend

ตารางที่ 4.3 ความทนต่อการฉีกขาดของยางผสม

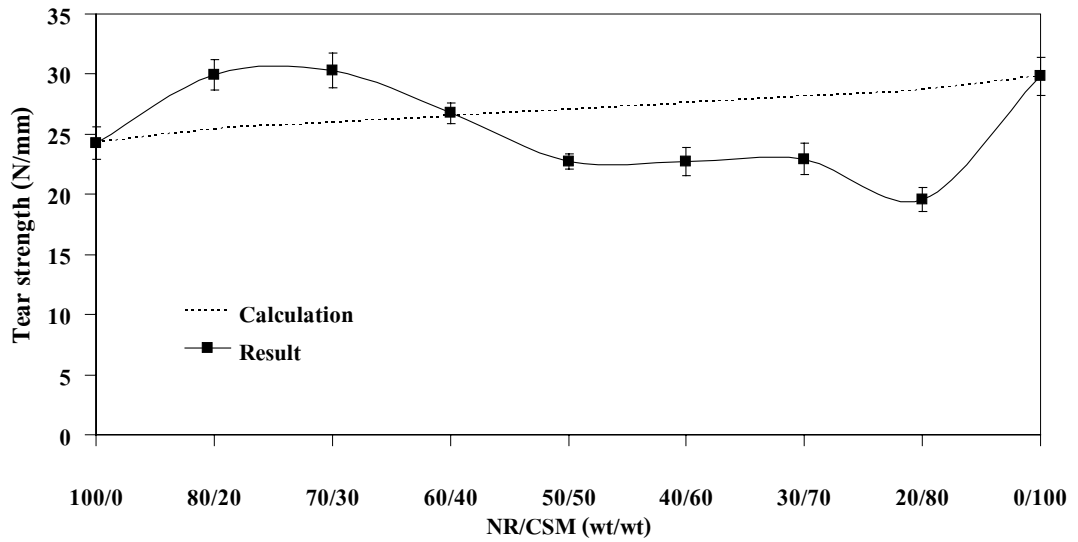
สูตร	คำนวณ (N/mm)	ค่าที่ได้จริง (N/mm)
B1-0	-	24.29 ± 1.34
B1-20	25.27	28.65 ± 1.25
B1-30	25.75	27.29 ± 1.17
B1-40	26.24	23.69 ± 1.61
B1-50	26.73	17.52 ± 0.98
B1-60	27.22	14.98 ± 0.73
B1-70	27.71	14.78 ± 0.39
B1-80	28.19	14.77 ± 0.77
B1-100	-	29.17 ± 1.02
B2-0	-	24.29 ± 1.34
B2-20	25.40	29.95 ± 1.25
B2-30	25.95	30.33 ± 1.43
B2-40	26.50	26.75 ± 0.86
B2-50	27.06	22.73 ± 0.62
B2-60	27.61	22.73 ± 1.18
B2-70	28.16	22.93 ± 1.30
B2-80	28.71	19.55 ± 0.98
B2-100	-	29.82 ± 1.58
B3-0	-	26.05 ± 0.51
B3-20	26.80	27.94 ± 1.73
B3-30	27.18	27.37 ± 1.00
B3-40	27.56	24.72 ± 1.66
B3-50	27.94	21.04 ± 0.83
B3-60	28.31	20.04 ± 1.06
B3-70	28.69	18.02 ± 0.49

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

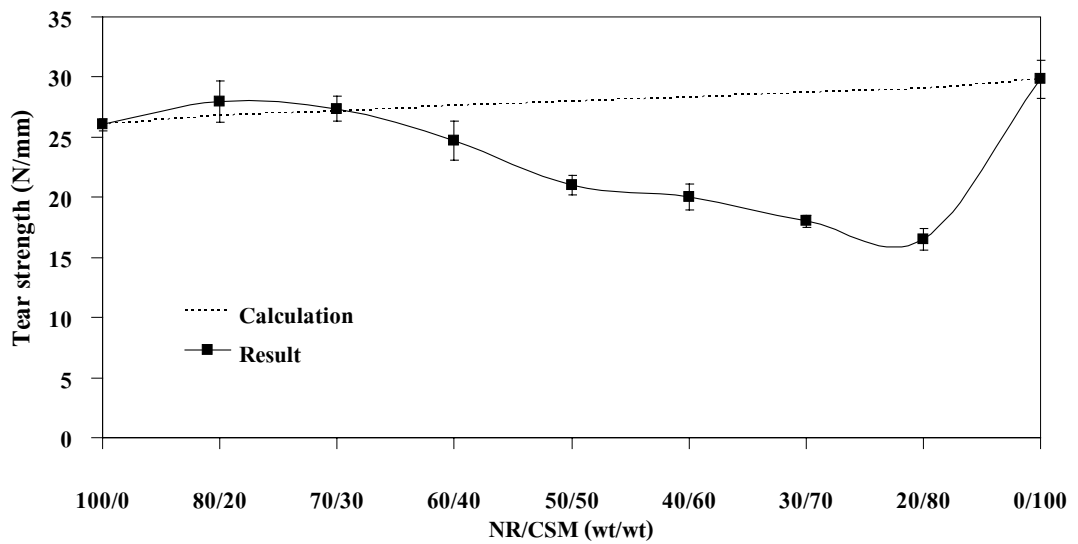
สูตร	คำนวณ (N/mm)	ค่าที่ได้จริง (N/mm)
B3-80	29.07	16.51 ± 0.86
B3-100	-	29.82 ± 1.58
B4-0	-	25.55 ± 0.92
B4-20	26.40	23.82 ± 1.30
B4-30	26.83	24.41 ± 0.51
B4-40	27.26	21.90 ± 1.22
B4-50	27.69	20.40 ± 1.09
B4-60	28.11	20.22 ± 0.95
B4-70	28.54	19.67 ± 0.64
B4-80	28.97	19.69 ± 0.90
B4-100	-	29.82 ± 1.58



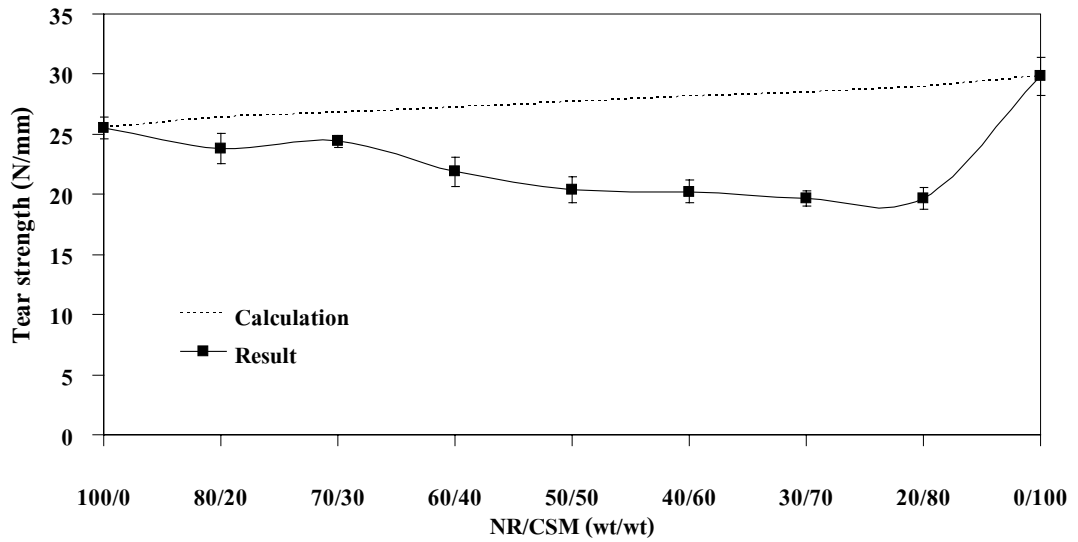
รูปที่ 4.9 ความทนต่อการฉีกขาดของยางผสมสูตร B1



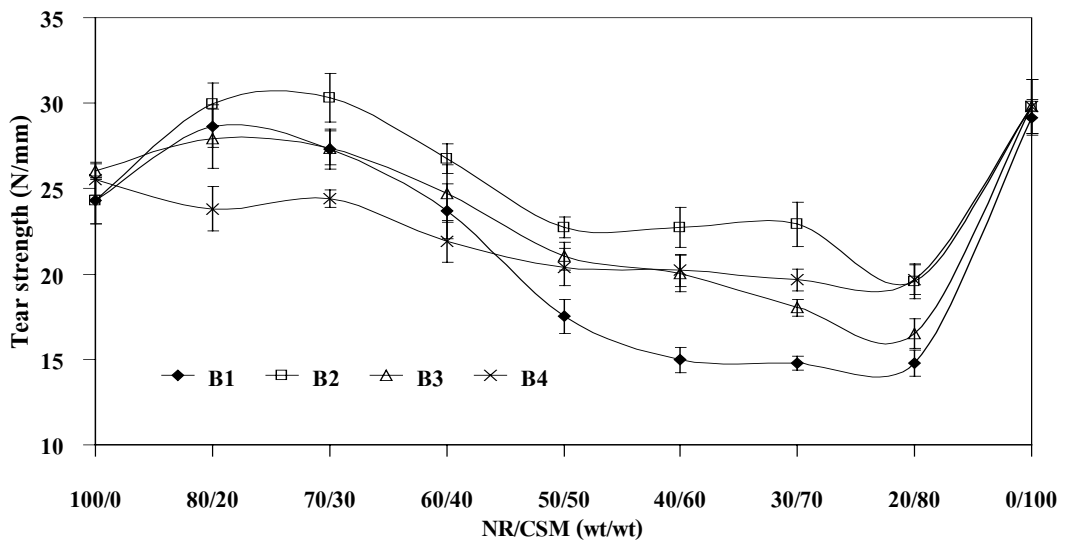
รูปที่ 4.10 ความทนต่อการฉีกขาดของยางผสมสูตร B2



รูปที่ 4.11 ความทนต่อการฉีกขาดของยางผสมสูตร B3



รูปที่ 4.12 ความทนต่อการฉีกขาดของยางผสมสูตร B4



รูปที่ 4.13 ความทนต่อการฉีกขาดของยางผสมทั้ง 4 สูตร

2.3 การทดสอบความต้านทานต่อการบ่มเร่งด้วยความร้อน

การทดสอบการบ่มเร่งด้วยความร้อน เป็นการหาค่าความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาดของยางผสมหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน แล้วนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าดังกล่าวของยางผสมที่ยังไม่ผ่านการบ่มเร่ง เพื่อหาค่าการเปลี่ยนแปลงความทนต่อแรงดึงของยางผสม ซึ่งจะช่วยให้ทราบถึงความต้านทานต่อการบ่มเร่งด้วยความร้อนของยางผสม กล่าวคือ ถ้าค่าการเปลี่ยนแปลงมีค่าน้อยกว่า แสดงว่า ยางผสมนั้นมีความต้านทานต่อการบ่มเร่งด้วยความร้อนสูงกว่า

ค่าความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาดของยางผสมหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน แสดงในตารางที่ 4.4 และค่าการเปลี่ยนแปลงของสมบัติดังกล่าวแสดงในตารางที่ 4.5

จากผลการทดลองพบว่า ยางผสมสูตร B1 มีค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดที่อัตราส่วน 80/20 แต่เมื่อปริมาณยางคลอโรซัลไฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนเพิ่มขึ้น ค่าดังกล่าวจะมีค่าลดลง (ดังรูปที่ 4.14) ส่วนยางผสมสูตร B2, B3 และ B4 มีค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดที่อัตราส่วน 30/70 แต่สูตร B2 ในอัตราส่วนที่มียางคลอโรซัลไฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนน้อยกว่า 70% มีค่าความทนต่อแรงดึงใกล้เคียงกัน (ดังรูปที่ 4.15) ส่วนสูตร B3 และ B4 จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางคลอโรซัลไฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนมากกว่า 30% แต่ไม่เกิน 80% (ดังรูปที่ 4.16 – 4.17) และจากรูปที่ 4.18 จะเห็นว่า ยางผสมสูตร B4 ให้ค่าความทนต่อแรงดึงหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนสูงกว่าสูตรอื่นๆ เกือบทุกอัตราส่วน (ยกเว้นที่อัตราส่วน 60/40 มีค่าน้อยกว่าสูตร B2 เล็กน้อย) ส่วนสูตร B1 มีค่าต่ำกว่าสูตรอื่นๆ เมื่อปริมาณยางคลอโรซัลไฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนมากกว่า 50% และที่อัตราที่มีปริมาณยางคลอโรซัลไฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนน้อยกว่า 50% ยางผสมสูตร B3 ให้ค่าความทนต่อแรงดึงต่ำสุด

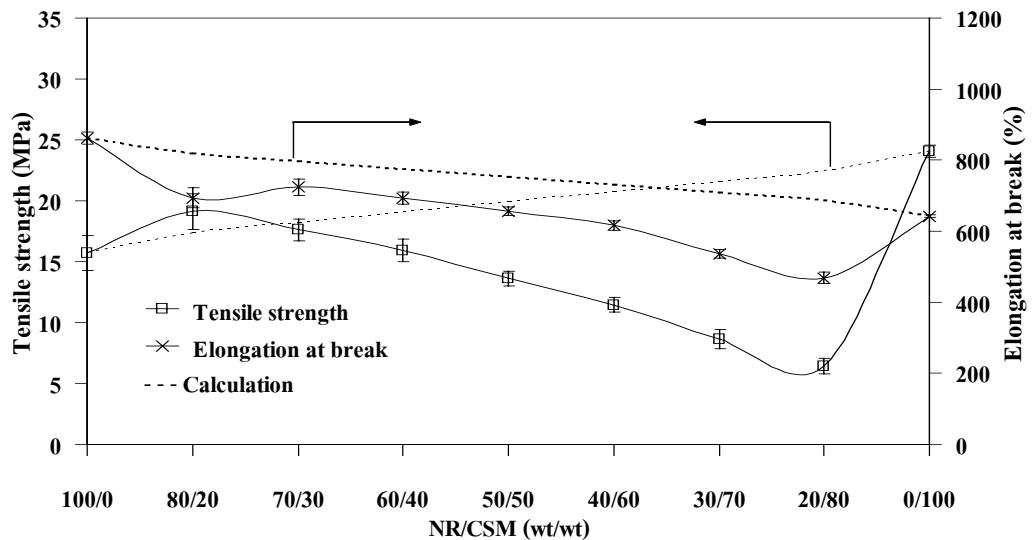
ส่วนค่าการยืด ณ จุดขาดของแต่ละสูตรมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณยางคลอโรซัลไฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนเพิ่มขึ้น ซึ่งในอัตราส่วนที่มีปริมาณยางคลอโรซัลไฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนน้อยกว่า 40% ยางผสมสูตร B4 มีค่าการยืด ณ จุดขาดดีกว่าสูตรอื่นๆ แต่เมื่อปริมาณยางคลอโรซัลไฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนมากกว่า 40% แต่ละสูตรจะมีค่าการยืด ณ จุดขาดใกล้เคียงกัน (รูปที่ 4.19)

ตารางที่ 4.4 ความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาดของยางผสม หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 7 วัน

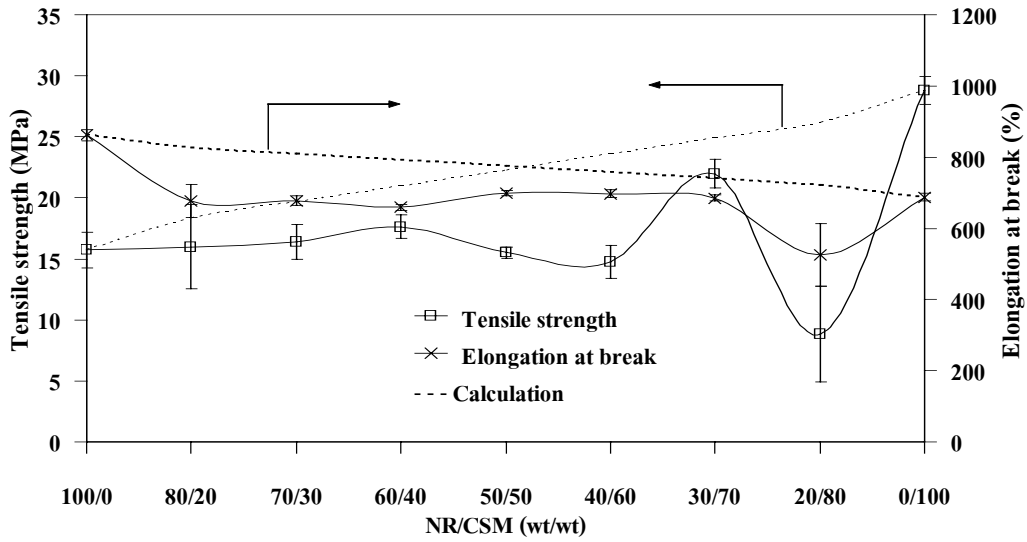
สูตร	ความทนต่อแรงดึง (MPa)		ค่าการยืด ณ จุดขาด (%)	
	จำนวน	ผลที่ได้	จำนวน	ผลที่ได้
B1-0	-	15.72 ± 1.45	-	862 ± 16
B1-20	17.39	19.11 ± 1.44	818	694 ± 28
B1-30	18.23	17.61 ± 0.88	796	724 ± 23
B1-40	19.06	15.95 ± 0.92	774	693 ± 18
B1-50	19.90	13.61 ± 0.59	752	656 ± 12
B1-60	20.74	11.45 ± 0.60	730	616 ± 13
B1-70	21.57	8.64 ± 0.78	708	536 ± 12
B1-80	22.41	6.44 ± 0.62	686	468 ± 16
B1-100	-	24.08 ± 0.50	-	642 ± 4
B2-0	-	15.72 ± 1.45	-	862 ± 16
B2-20	18.34	16.00 ± 3.45	827	677 ± 47
B2-30	19.65	16.39 ± 1.44	810	678 ± 14
B2-40	20.96	17.61 ± 0.96	792	659 ± 9
B2-50	22.27	15.51 ± 0.47	775	699 ± 7
B2-60	23.57	14.76 ± 1.34	757	697 ± 11
B2-70	24.88	21.99 ± 1.21	740	685 ± 8
B2-80	26.19	8.84 ± 3.91	722	526 ± 88
B2-100	-	28.81 ± 1.16	-	687 ± 11
B3-0	-	20.22 ± 1.33	-	820 ± 8
B3-20	21.94	17.63 ± 4.67	793	638 ± 70
B3-30	22.80	12.49 ± 2.14	780	524 ± 29
B3-40	23.66	13.93 ± 1.61	767	526 ± 21
B3-50	24.52	15.57 ± 1.77	754	638 ± 19
B3-60	25.37	15.73 ± 1.25	740	685 ± 11

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

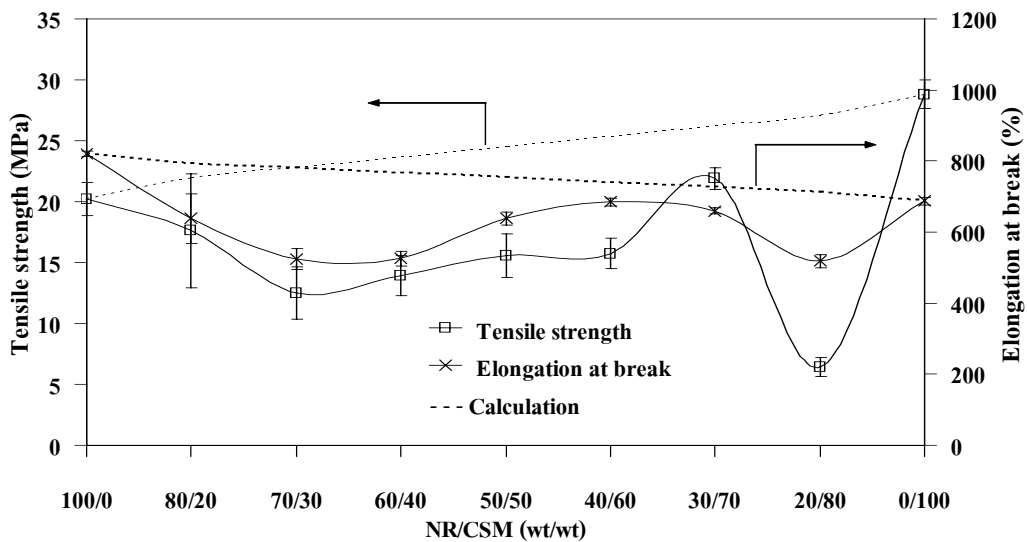
สูตร	ความทนต่อแรงดึง (MPa)		ค่าการยืด ณ จุดขาด (%)	
	คำนวณ	ผลที่ได้	คำนวณ	ผลที่ได้
B3-70	26.23	21.90 ± 0.91	727	660 ± 9
B3-80	27.09	6.43 ± 0.78	714	518 ± 18
B3-100	-	28.81 ± 1.16	-	687 ± 11
B4-0	-	23.30 ± 1.88	-	876 ± 23
B4-20	24.40	21.94 ± 1.06	838	833 ± 15
B4-30	24.95	18.03 ± 0.45	819	718 ± 9
B4-40	25.50	17.17 ± 0.93	800	637 ± 14
B4-50	26.06	18.90 ± 1.09	782	610 ± 3
B4-60	26.61	19.74 ± 1.23	763	608 ± 10
B4-70	27.16	22.56 ± 1.13	744	631 ± 15
B4-80	27.71	16.61 ± 3.26	725	581 ± 40
B4-100	-	28.81 ± 1.16	-	687 ± 11



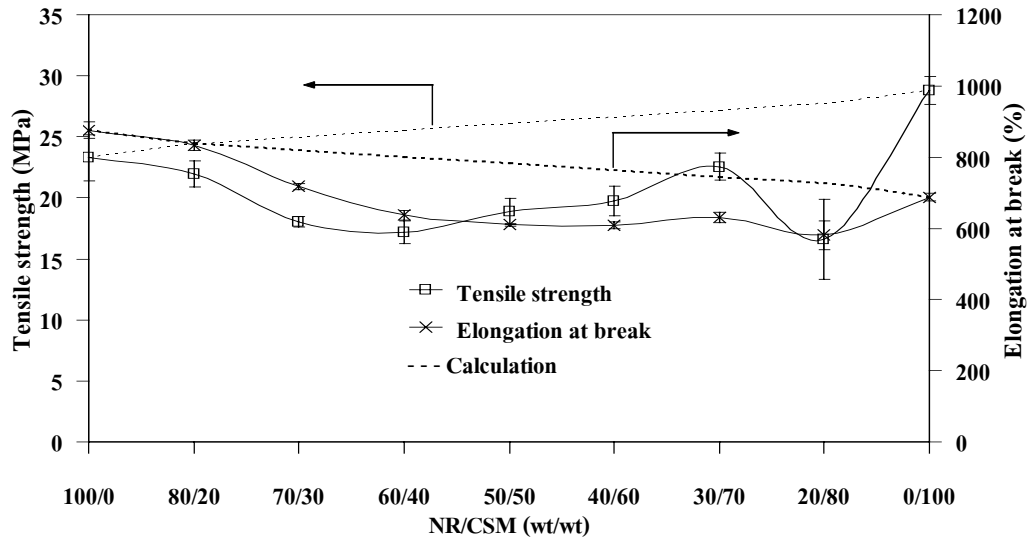
รูปที่ 4.14 ความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร B1 หลังการบ่มเร่ง ด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 7 วัน



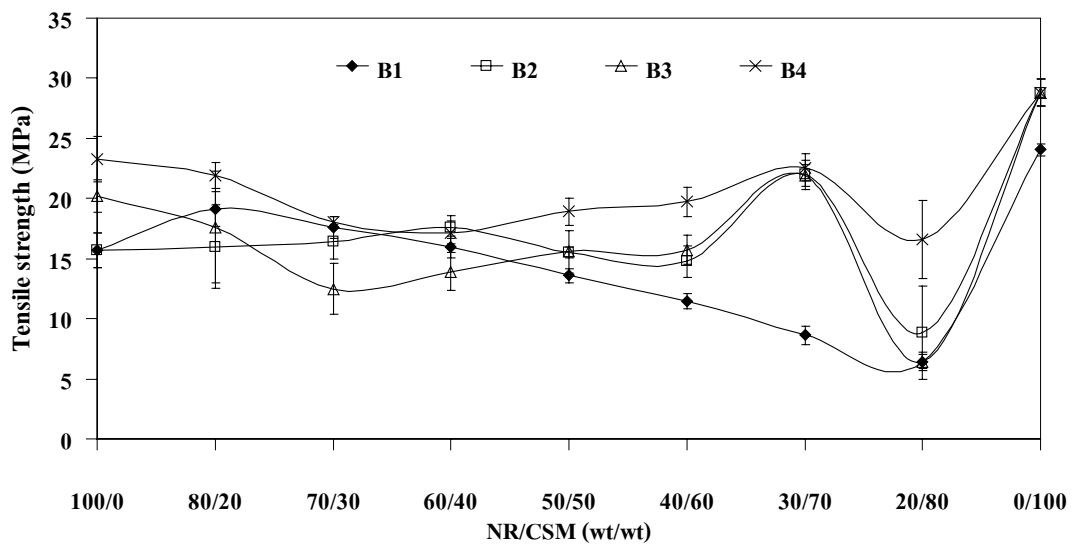
รูปที่ 4.15 ความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร B2 หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 7 วัน



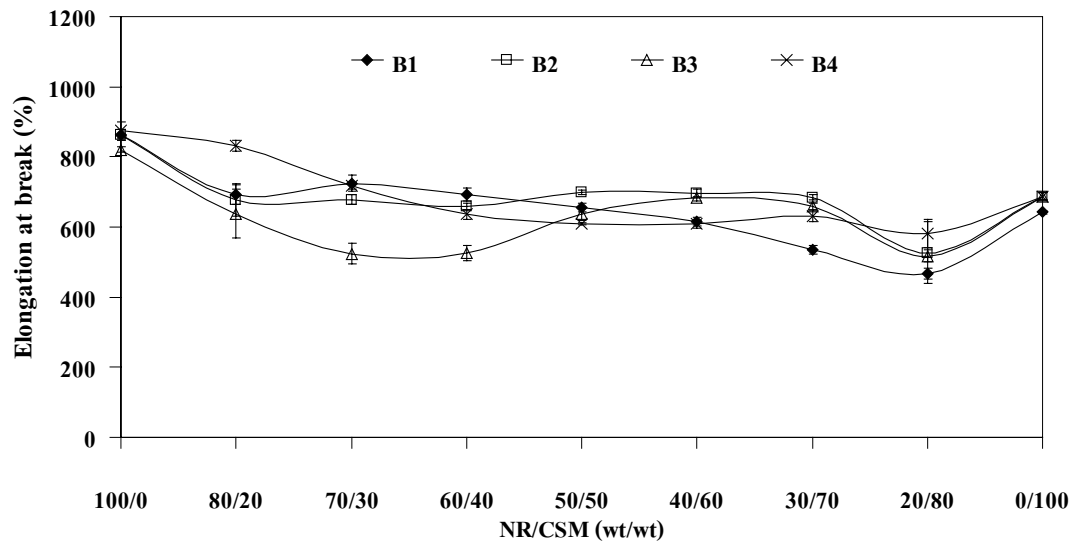
รูปที่ 4.16 ความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร B3 หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 7 วัน



รูปที่ 4.17 ความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร B4 หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 7 วัน



รูปที่ 4.18 ความทนต่อแรงดึงของยางผสมทั้ง 4 สูตร หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 7 วัน



รูปที่ 4.19 ค่าการยืด ณ จุดขาดของยางผสมทั้ง 4 สูตร หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 7 วัน

เมื่อนำค่าความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาดหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน เปรียบเทียบกับผลก่อนการบ่มเร่งด้วยความร้อน สามารถสรุปผลการเปรียบเทียบได้ดังแสดงในตารางที่ 4.5 หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทรีนมีค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นมากกว่า 20% เนื่องจากในขั้นตอนการบ่มเร่งด้วยความร้อนของยางชนิดต่าง ๆ นั้น จะเกิดปรากฏการณ์ 2 อย่างพร้อมกัน คือ เกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุล (chain scission) และเกิดการเชื่อมโยง (crosslinking) ขึ้นระหว่างสายโซ่โมเลกุล แต่ในยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทรีนจะเกิดการเชื่อมโยงมากกว่าการขาดของสายโซ่โมเลกุล (Nichols and Pett, 1994) ทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้ก่อนการบ่มเร่ง และยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทรีนมีลักษณะการวัลคาไนซ์แบบมาร์ชชิ่ง (marching) ซึ่งในขั้นตอนการขึ้นรูปยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทรีนใช้เวลาในการวัลคาไนซ์เพียง 18 นาที เพื่อให้สามารถนำผลการทดสอบสมบัติต่างๆ ของยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทรีนเปรียบเทียบกับสมบัติต่างๆ ของยางผสมแต่ละสูตรได้ เพราะยางผสมมีเวลาการวัลคาไนซ์ไม่เกิน 25 นาที (ทุกสูตรและทุกอัตราส่วน) โดยทั่วไปการวัลคาไนซ์ยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทรีนใช้เวลานานกว่านี้ เช่น สูตร C4 ใช้เวลาวัลคาไนซ์ 43 นาที ซึ่งในงานวิจัยได้ทดลองวัลคาไนซ์ยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทรีนที่เวลา 43 นาที เปรียบเทียบกับการวัลคาไนซ์ที่เวลา 18 นาที ปรากฏว่า ที่เวลา 43 นาที ให้ค่าความทนต่อแรงดึง 28.67 MPa ค่าการยืด ณ จุดขาด 826% แต่ที่เวลา 18 นาที มีค่าความทนต่อแรงดึง 23.38 MPa และค่าการยืด ณ จุดขาด 854% เป็นต้น ส่วนค่าการยืด ณ จุดขาดหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนของยางคลอ-

โรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทรีนมีค่าลดลงไม่เกิน 20% ส่วนยางธรรมชาติมีค่าความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาดลดลง เพราะยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้างโมเลกุล และเกิดการเชื่อมโยงแบบพอลิซัลไฟดิค (polysulfidic) ซึ่งสามารถถูกทำลายได้ง่ายที่อุณหภูมิสูงและมีออกซิเจน

ยางผสมมีการเปลี่ยนแปลงค่าความทนต่อแรงดึงหลังการบ่มเร่่งน้อยกว่ายางธรรมชาติ (ดังรูปที่ 4.20 – 4.23) โดยยางผสมสูตร B1 ที่มียางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทรีนน้อยกว่า 60% มีการเปลี่ยนแปลงหลังการบ่มเร่่งน้อยกว่า 15% โดยมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้ก่อนการบ่มเร่่ง สูตร B2, B3 และ B4 มีการเปลี่ยนแปลงหลังบ่มเร่่งน้อยกว่า 10% ที่อัตราส่วน 30/70 และที่อัตราส่วนนี้ค่าความทนต่อแรงดึงหลังการบ่มเร่่งมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้ก่อนการบ่มเร่่ง จากรูปที่ 4.24 จะเห็นว่า สูตร B4 มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดและในบางอัตราส่วนมีค่าความทนต่อแรงดึงสูงขึ้นหลังการบ่มเร่่ง เช่น ที่อัตราส่วน 80/20, 60/40, 40/60 และ 30/70 แต่สูตร B3 มีการเปลี่ยนแปลงค่าความทนต่อแรงดึงมากที่สุด แสดงว่า สูตร B3 มีความต้านทานต่อการบ่มเร่่งด้วยความร้อนน้อยกว่าสูตรอื่นๆ เนื่องจากสูตร B3 ได้จากยางสูตร NR2 ผสมกับสูตร C4 ซึ่งยางสูตร NR2 วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันปกติเกิดพันธะการเชื่อมโยงแบบพอลิซัลไฟดิคที่ไม่ทน ต่อ ความร้อน ทำให้พันธะเชื่อมโยงแตกออก จึงมีการเปลี่ยนแปลงหลังการบ่มเร่่งมาก ในขณะที่สูตร B4 ได้จากยางสูตร NR5 ผสมกับสูตร C4 ซึ่งยางสูตร NR5 วัลคาไนซ์ด้วยระบบเคมีวีวีที่เกิดพันธะการเชื่อมโยงแบบมอนอซัลไฟดิคและไดซัลไฟดิคมากกว่า จึงทนต่อความร้อนได้ดีกว่า (Rattanasom, 2005) แต่อย่างไรก็ตามความต้านทานต่อการบ่มเร่่งด้วยความร้อนยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของยางผสมอีกด้วย

ส่วนค่าการยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรต่างๆ (ดังรูปที่ 4.25) มีค่าลดลงหลังการบ่มเร่่งทุกสูตรและทุกอัตราส่วน และมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่ายางธรรมชาติ โดยที่อัตราส่วน 40/60 ยางผสมทุกสูตรมีการเปลี่ยนแปลงค่าการยืด ณ จุดขาดน้อยที่สุด และในอัตราส่วนที่มียางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทรีนมากกว่า 50% ยางผสมสูตรต่างๆมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าอัตราส่วนที่มียางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทรีนน้อยกว่า 50% (ยกเว้นที่อัตราส่วน 20/80 มีค่าการเปลี่ยนแปลงมากกว่า) แสดงว่า หลังการบ่มเร่่งยางผสมจะสูญเสียสมบัติทางด้านการยืดไป เพราะในระหว่างการบ่มเร่่งด้วยความร้อนจะเกิดปฏิกิริยา thermal oxidation ขึ้น ซึ่งผลของปฏิกิริยานี้จะทำให้เกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุลและความเป็นอีลาสติคของยางผสมลดลง ทำให้ยางผสมยืดได้น้อยลง (Sirisinha, 2004)

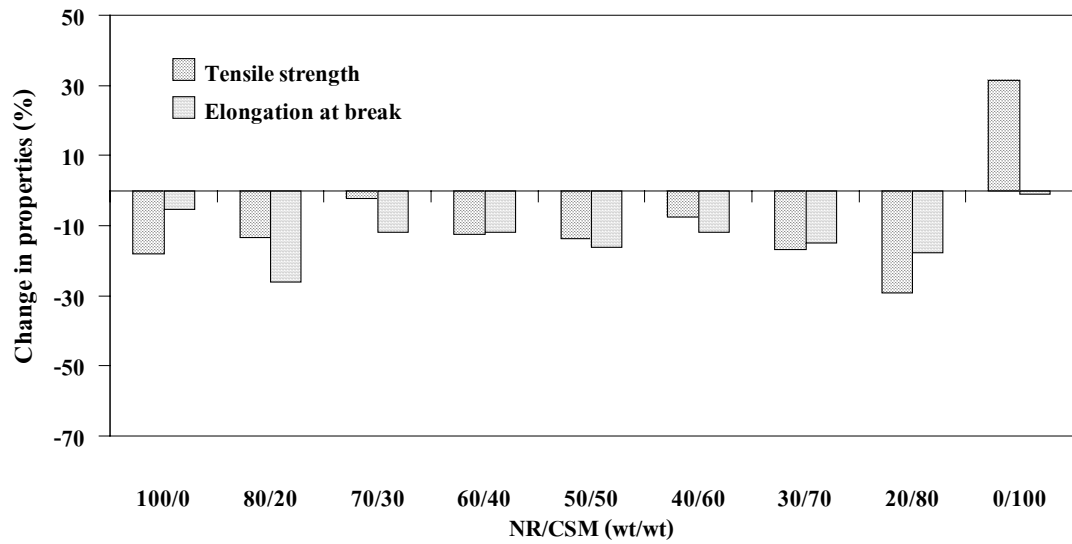
ตารางที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงค่าความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาดของยางผสม หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 7 วัน

สูตร	ความทนต่อแรงดึง			ค่าการยืด ณ จุดขาด		
	ก่อนการบ่มเร่ง (MPa)	หลังการบ่มเร่ง (MPa)	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง	ก่อนการบ่มเร่ง (%)	หลังการบ่มเร่ง (%)	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง
B1-0	19.17	15.72	-18.00	912	862	-5.48
B1-20	22.03	19.11	-13.25	938	694	-26.01
B1-30	18.03	17.61	-2.33	822	724	-11.92
B1-40	18.24	15.95	-12.55	787	693	-11.94
B1-50	15.76	13.61	-13.64	784	656	-16.33
B1-60	12.38	11.45	-7.51	699	616	-11.87
B1-70	10.38	8.64	-16.76	631	536	-15.06
B1-80	9.11	6.44	-29.31	568	468	-17.61
B1-100	18.34	24.08	31.30	649	642	-1.08
B2-0	19.17	15.72	-18.00	912	862	-5.48
B2-20	18.80	16.00	-14.89	870	677	-22.18
B2-30	18.33	16.39	-10.58	818	678	-17.11
B2-40	19.05	17.61	-7.56	766	659	-13.97
B2-50	18.20	15.51	-14.78	722	699	-3.19
B2-60	18.52	14.76	-20.30	735	697	-5.17
B2-70	20.75	21.99	5.98	775	685	-11.61
B2-80	18.07	8.84	-51.08	745	526	-29.40
B2-100	23.38	28.81	23.22	854	687	-19.56
B3-0	24.00	20.22	-15.75	868	820	-5.53
B3-20	19.80	17.63	-10.96	875	638	-27.09

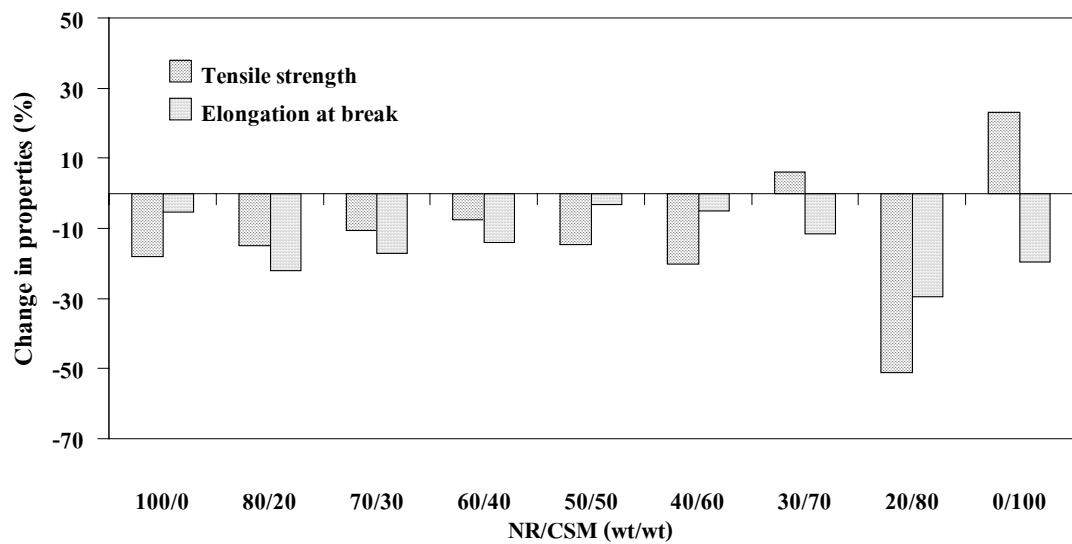
B3-30	18.22	12.49	-31.45	788	524	-33.50
B3-40	19.43	13.93	-28.31	738	526	-28.73

ตารางที่ 4.5 (ต่อ)

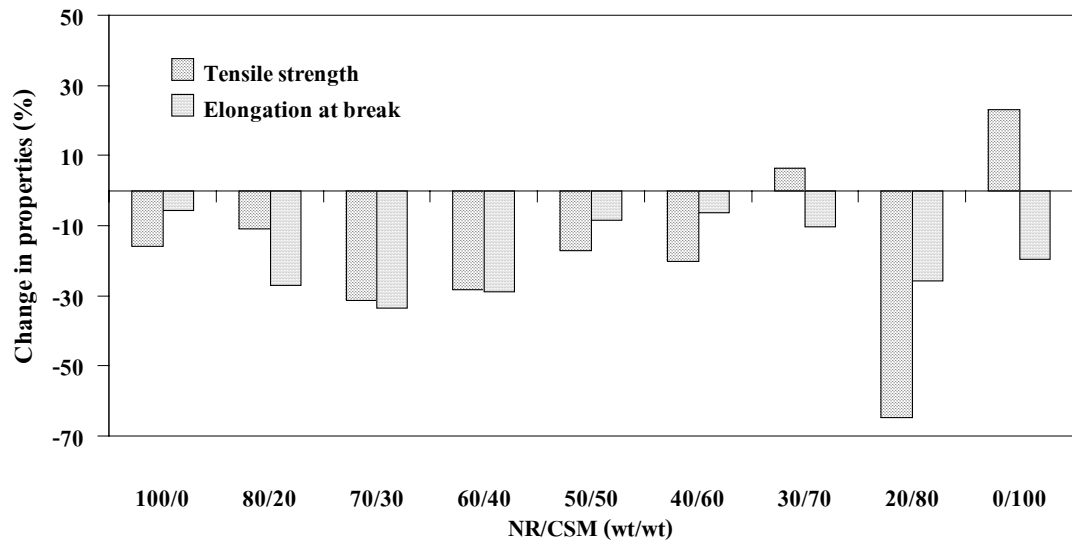
สูตร	ความทนต่อแรงดึง			ค่าการยึด ณ จุดขาด		
	ก่อนการ ปั๊มแรง (MPa)	หลังการ ปั๊มแรง (MPa)	เปอร์เซ็นต์การ เปลี่ยนแปลง	ก่อนการ ปั๊มแรง (%)	หลังการ ปั๊มแรง (%)	เปอร์เซ็นต์การ เปลี่ยนแปลง
B3-50	18.77	15.57	-17.05	698	638	-8.60
B3-60	19.75	15.73	-20.35	732	685	-6.42
B3-70	20.57	21.90	6.47	736	660	-10.33
B3-80	18.17	6.43	-64.61	698	518	-25.79
B3-100	23.38	28.81	23.22	854	687	-19.56
B4-0	24.13	23.30	-3.44	950	876	-7.79
B4-20	19.04	21.94	15.23	947	833	-12.04
B4-30	19.01	18.03	-5.16	879	718	-18.32
B4-40	16.33	17.17	5.14	780	637	-18.33
B4-50	21.98	18.90	-14.01	743	610	-17.90
B4-60	19.61	19.74	0.66	693	608	-12.27
B4-70	22.11	22.56	2.04	725	631	-12.97
B4-80	19.00	16.61	-12.58	714	581	-18.63
B4-100	23.38	28.81	23.22	854	687	-19.56



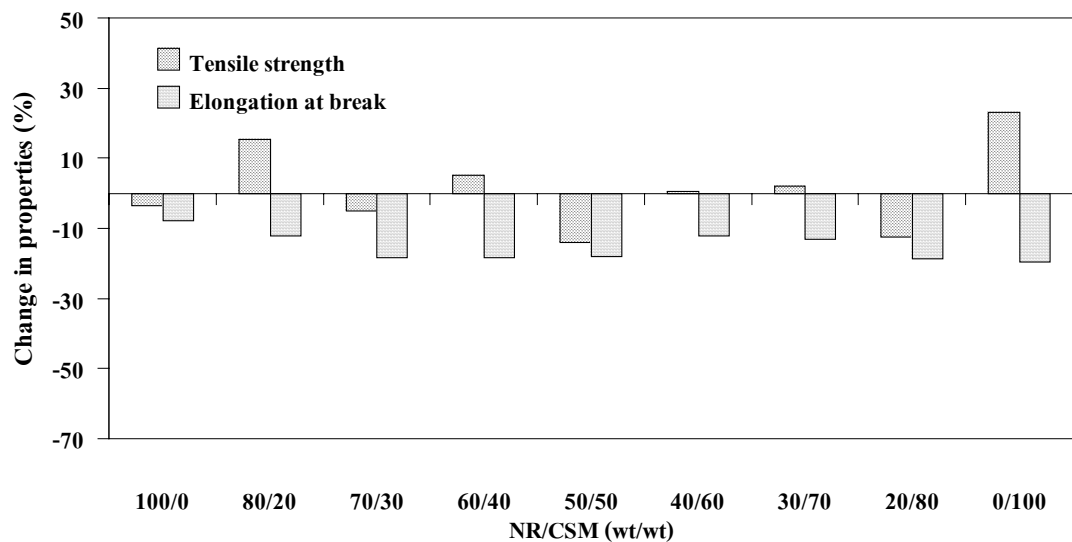
รูปที่ 4.20 การเปลี่ยนแปลงค่าความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร B1 หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 7 วัน



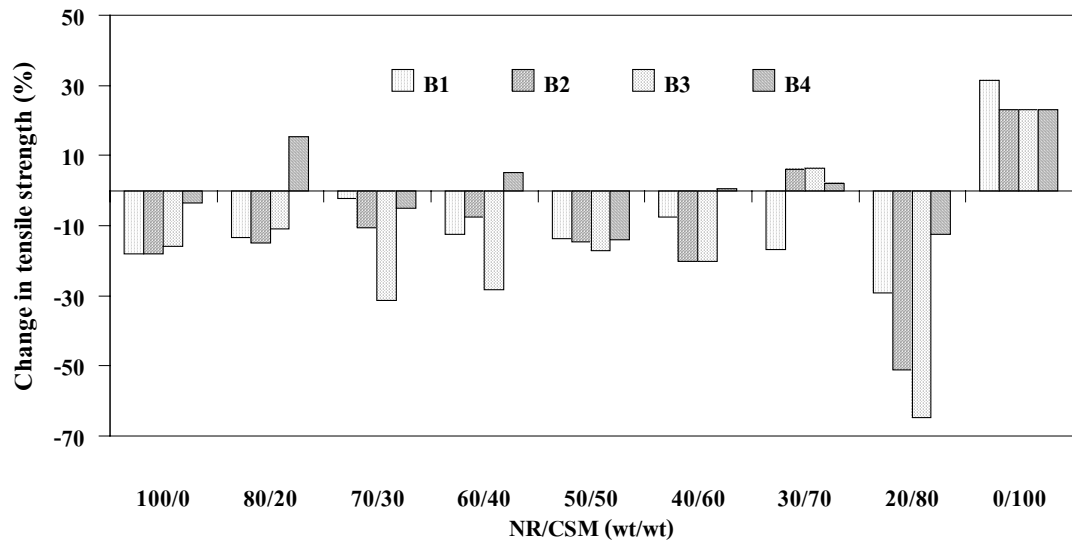
รูปที่ 4.21 การเปลี่ยนแปลงค่าความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร B2 หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 7 วัน



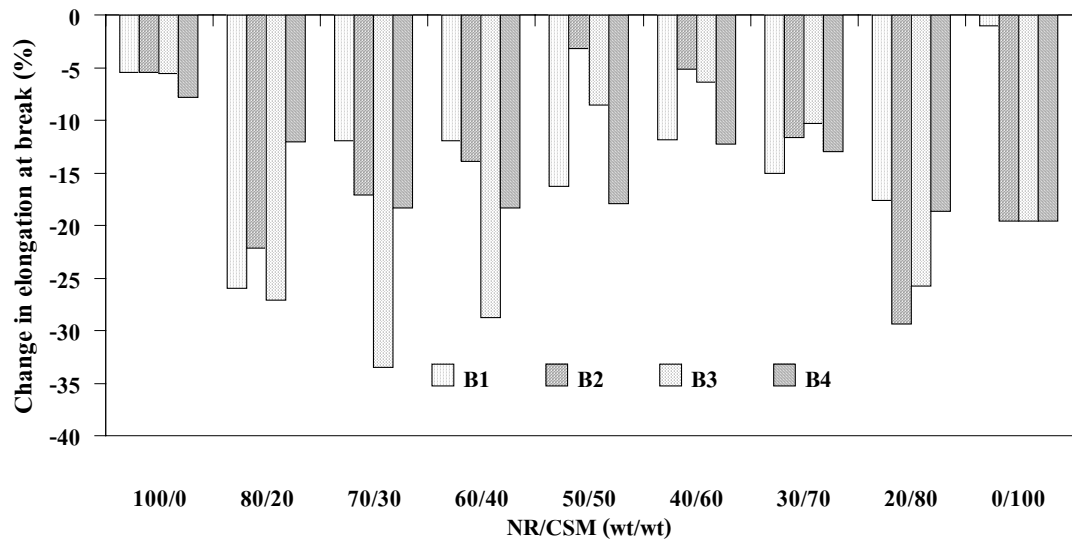
รูปที่ 4.22 การเปลี่ยนแปลงค่าความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร B3 หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 7 วัน



รูปที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลงค่าความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร B4 หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 7 วัน



รูปที่ 4.24 การเปลี่ยนแปลงค่าความทนต่อแรงดึงของยางผสมทั้ง 4 สูตร หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 7 วัน

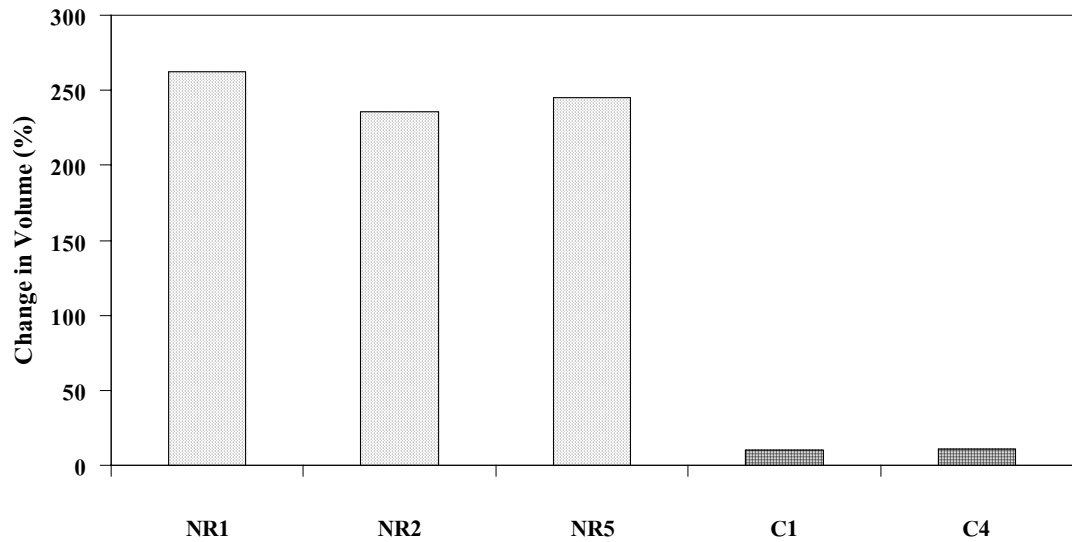


รูปที่ 4.25 การเปลี่ยนแปลงค่าการยืด ณ จุดขาดของยางผสมทั้ง 4 สูตร หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 7 วัน

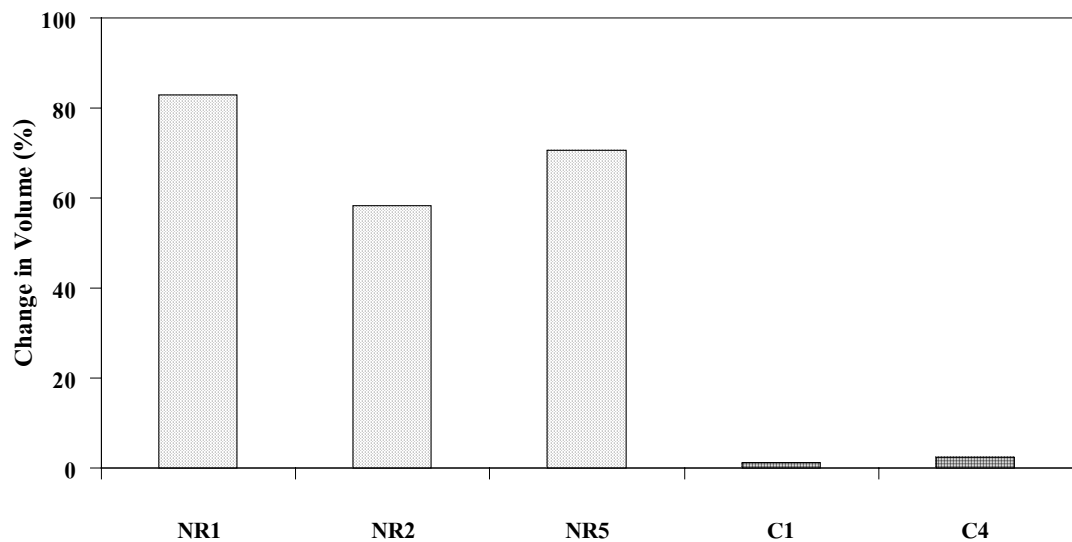
2.4 ผลการทดสอบการบวมตัว

การทดสอบการบวมตัวในน้ำมัน เป็นการทดสอบเพื่อหาความต้านทานต่อน้ำมันของยางผสม โดยนำยางผสมแช่ในน้ำมัน 2 ชนิด คือ น้ำมัน ASTM เบอร์ 1 และน้ำมัน IRM 903 แล้วหาค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรและน้ำหนักของชิ้นทดสอบ ถ้าหากชิ้นทดสอบมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสูง แสดงว่า ยางผสมนั้นไม่ทนต่อการบวมตัวในน้ำมัน ถ้าหากยางผสมต้องใช้งานที่ต้องสัมผัสกับน้ำมัน ก็จะทำให้ยางผสมเสื่อมสภาพ ไม่สามารถนำไปใช้งานได้อีก จากผลการทดลองพบว่า ยางธรรมชาติมีการบวมตัวในน้ำมันทั้งสองชนิดมากกว่ายางคลอโรซัลโฟเนต-เตตพอลิเอทิลีน แสดงว่า ยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีนทนต่อน้ำมันได้ดีกว่ายางธรรมชาติ และยางธรรมชาติกับยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีนสามารถทนต่อน้ำมัน IRM 903 ได้มากกว่าน้ำมัน ASTM เบอร์ 1 (รูปที่ 4.26 – 4.27 และรูปที่ 4.30 – 4.31) และยางธรรมชาติสูตร NR2 ทนต่อน้ำมันได้ดีกว่าสูตร NR1 และ NR5 ส่วนยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีนทั้งสองสูตรสามารถทนต่อน้ำมันได้ใกล้เคียงกัน (NR2 มีการเชื่อมโยงมากกว่าสูตรอื่น ทำให้บวมตัวได้น้อย เพราะเป็นระบบ CV)

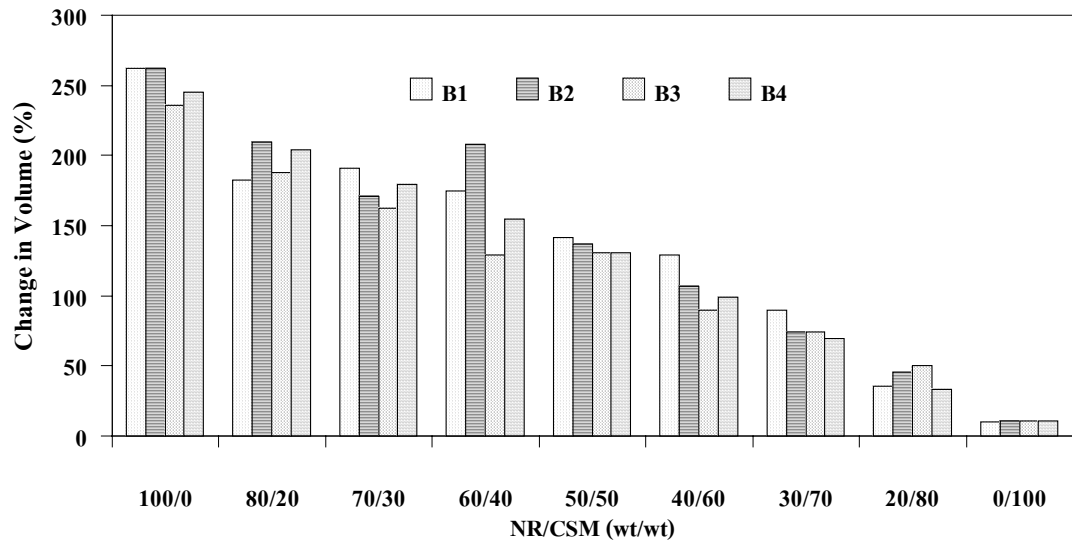
ยางผสมแต่ละสูตร มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรและน้ำหนักลดลง เมื่อปริมาณยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีนในยางผสมเพิ่มขึ้น แสดงว่า ยางผสมมีความทนต่อการบวมตัวในน้ำมันได้ดีกว่ายางธรรมชาติ และสามารถทนต่อการบวมตัวได้ดีขึ้น เมื่อปริมาณยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีนเพิ่มขึ้น ทั้งในน้ำมัน ASTM เบอร์ 1 และน้ำมัน IRM 903 (ดังรูปที่ 4.28 – 4.29 และรูปที่ 4.32 – 4.33) แต่ทนต่อน้ำมัน IRM 903 ได้ดีกว่าน้ำมัน ASTM เบอร์ 1 และพบว่า ยางผสมสูตร B3 ทนต่อการบวมตัวในน้ำมันได้ดีกว่ายางผสมสูตรอื่นๆ เนื่องจากยางผสมสูตร B3 เป็นยางผสมระหว่างยางธรรมชาติสูตร NR2 กับยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีนสูตร C4 ซึ่งสูตร NR2 และสูตร C4 มีความทนต่อการบวมตัวในน้ำมันได้ดี (เมื่อเปรียบเทียบกับสูตร NR1 และ NR5) ทำให้ยางผสมที่ได้จากทั้งสองสูตรทนต่อการบวมตัวในน้ำมันได้ดี ส่วนยางผสมสูตรอื่นๆ มีความทนต่อน้ำมันแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของยางผสมแต่ละสูตร แต่มีแนวโน้มทนน้ำมันได้ดีขึ้นเมื่อปริมาณยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีนเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับยางผสมสูตร B3



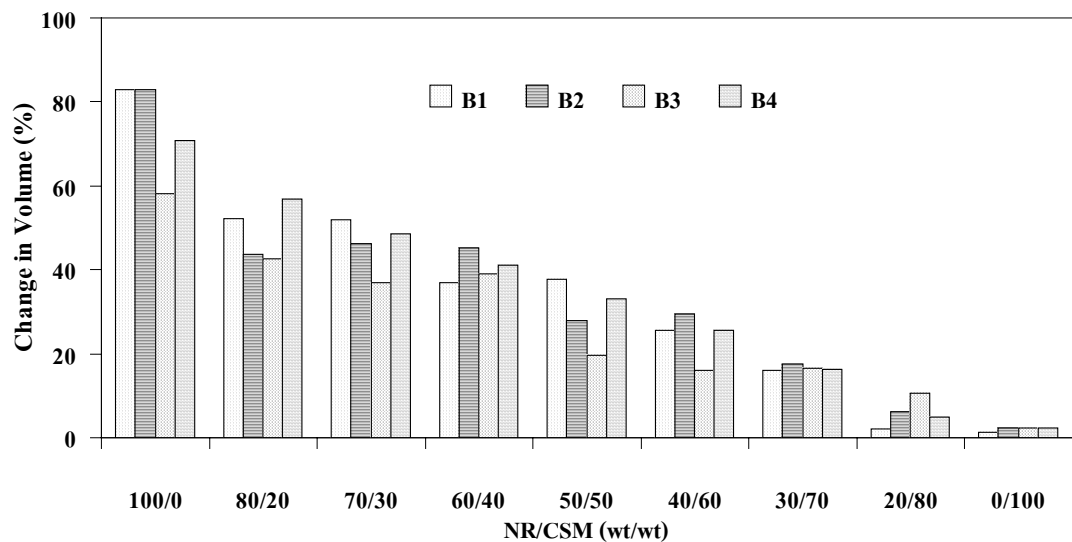
รูปที่ 4.26 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของยางธรรมชาติและยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทรีลีน เมื่อแช่ในน้ำมัน ASTM เบอร์ 1 เป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิห้อง (25°C)



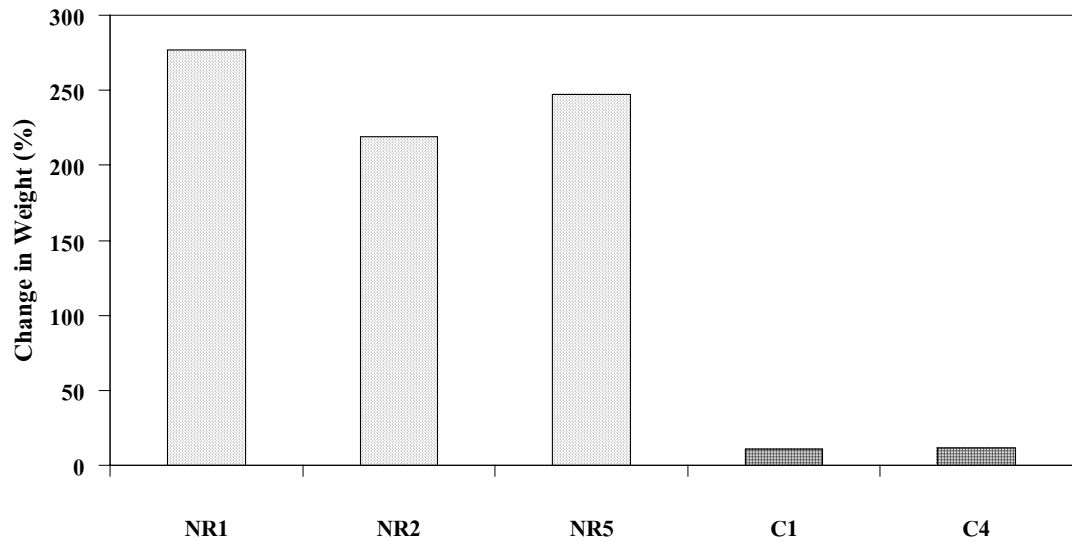
รูปที่ 4.27 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของยางธรรมชาติและยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทรีลีน เมื่อแช่ในน้ำมัน IRM 903 เป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิห้อง (25°C)



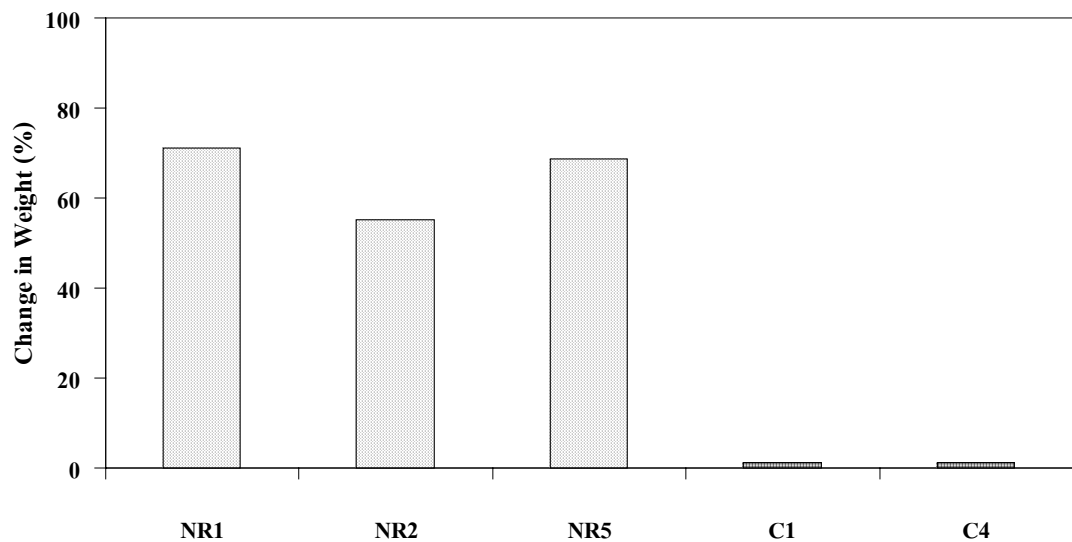
รูปที่ 4.28 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของยางผสมสูตรต่างๆ เมื่อแช่ในน้ำมัน ASTM เบอร์ 1 เป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิห้อง (25°C)



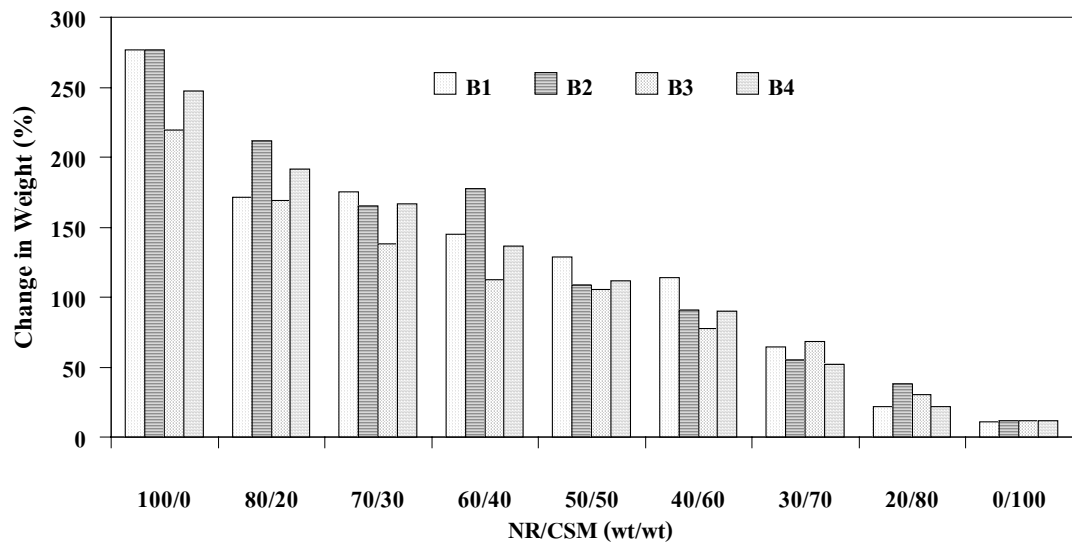
รูปที่ 4.29 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของยางผสมสูตรต่างๆ เมื่อแช่ในน้ำมัน IRM 903 เป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิห้อง (25°C)



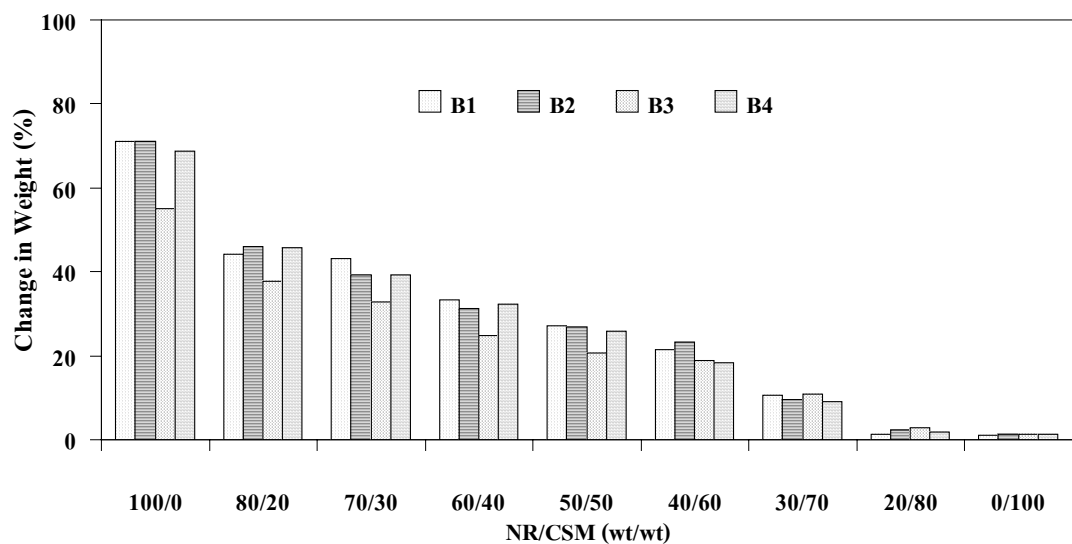
รูปที่ 4.30 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของยางธรรมชาติและยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทรีลีน เมื่อแช่ในน้ำมัน ASTM เบอร์ 1 เป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิห้อง (25°C)



รูปที่ 4.31 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของยางธรรมชาติและยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทรีลีน เมื่อแช่ในน้ำมัน IRM 903 เป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิห้อง (25°C)



รูปที่ 4.32 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของยางผสมสูตรต่างๆ เมื่อแช่ในน้ำมัน ASTM เบอร์ 1 เป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิห้อง (25°C)



รูปที่ 4.33 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของยางผสมสูตรต่างๆ เมื่อแช่ในน้ำมัน IRM 903 เป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิห้อง (25°C)

2.5 ผลการทดสอบความต้านทานต่อโอโซน

ในการทดสอบความต้านทานต่อโอโซน ทำการทดสอบโดยสังเกตการเปลี่ยนแปลงของชั้นทดสอบและรอยแตกที่เกิดขึ้นเป็นครั้งแรก หลังจากอบในตู้อบโอโซน (ซึ่งก่อนทำการอบชิ้นตัวอย่างต้องดึงยึดชิ้นตัวอย่างก่อน เพราะโอโซนจะทำปฏิกิริยากับยางที่ถูกดึงยึดได้ง่ายกว่ายางที่ไม่ถูกดึงยึด) รวมทั้งลักษณะและปริมาณของรอยแตกที่เกิดขึ้น ซึ่งสามารถสรุปเวลาที่เริ่มแตกและลักษณะการแตกของยางสูตรต่างๆ ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.6 โดยชิ้นตัวอย่างที่เริ่มแตกที่เวลาน้อยๆ แสดงว่า ชิ้นตัวอย่างนั้นมีความต้านทานต่อโอโซนต่ำ

ตารางที่ 4.6 เวลาที่เริ่มแตกของยางธรรมชาติ ยางคลอโรซัลไฟเนตเตตพอลิเอทรีน และยางผสมสูตรต่างๆ หลังจากอบในตู้อบโอโซน ที่อุณหภูมิ 40°C และความเข้มข้นโอโซน 50 pphm

สูตร	เวลาที่เริ่มแตก (ชั่วโมง)	ลักษณะของชิ้นตัวอย่างเมื่ออบในตู้อบโอโซน
NR1	8	2 ชั่วโมง เห็นเป็นรอยขีดข่วนๆ 8 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตก 24 ชั่วโมง สีเปลี่ยนเป็นสีขาวขึ้น 72 ชั่วโมง เป็นเส้น
NR2	4	2 ชั่วโมง เป็นรอยขีดข่วนๆ 8 ชั่วโมง รอยแตกเป็นเส้นยาวและขอบเริ่มแตก 48 ชั่วโมง เป็นเส้น 72 ชั่วโมง ขาด
NR5	8	4 ชั่วโมง เป็นรอยขีดข่วนๆ 16 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตก 24 ชั่วโมง รอยแตกเป็นเส้นและสีเปลี่ยน 96 ชั่วโมง เป็นเส้น
C1	-	ไม่เปลี่ยนแปลง
C4	-	ไม่เปลี่ยนแปลง
B1-0	8	2 ชั่วโมง เห็นเป็นรอยขีดข่วนๆ 8 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตก

		24 ชั่วโมง สี่เปลี่ยนเป็นสีขาวขึ้น 72 ชั่วโมง เป็นเส้น
--	--	---

ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

สูตร	เวลาที่เริ่มแตก (ชั่วโมง)	ลักษณะของชั้นตัวอย่างเมื่ออบในตู้อบไอโซน
B1-20	16	4 ชั่วโมง เริ่มเปลี่ยนเป็นสีขาว 24 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตก 96 ชั่วโมง เป็นเส้น
B1-30	16	4 ชั่วโมง เริ่มเปลี่ยนเป็นสีขาว 16 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตก 96 ชั่วโมง รอยแตกกระจายทั้งชั้น แต่มีขนาดเล็ก
B1-40	16	4 ชั่วโมง เริ่มเปลี่ยนเป็นสีขาว 24 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตก 96 ชั่วโมง รอยแตกกระจายทั้งชั้น แต่มีขนาดเล็ก
B1-50	48	4 ชั่วโมง เริ่มเปลี่ยนเป็นสีขาว 96 ชั่วโมง ขอบแตก
B1-60	-	ไม่แตก แต่สี่เปลี่ยนเป็นสีขาว
B1-70	-	ไม่แตก แต่สี่เปลี่ยนเล็กน้อย
B1-80	-	ไม่เปลี่ยนแปลง
B1-100	-	ไม่เปลี่ยนแปลง
B2-0	8	2 ชั่วโมง เห็นเป็นรอยขีดข่วนๆ 8 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตก 24 ชั่วโมง สี่เปลี่ยนเป็นสีขาวขึ้น 72 ชั่วโมง เป็นเส้น
B2-20	24	2 ชั่วโมง เริ่มเปลี่ยนเป็นสีขาว 24 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตกและรอยแตกมีขนาดเล็ก 96 ชั่วโมง รอยแตกมีขนาดเล็ก ปริมาณมาก แต่กระจายทั้งชั้น
B2-30	24	2 ชั่วโมง เริ่มเปลี่ยนเป็นสีขาว 24 ชั่วโมง รอยแตกมีขนาดเล็กมาก 72 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตก แต่มีขนาดเล็กมาก

		96 ชั่วโมง รอยแตกมีขนาดเล็ก ปริมาณมากและกระจาย ทั้งชั้น
--	--	--

ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

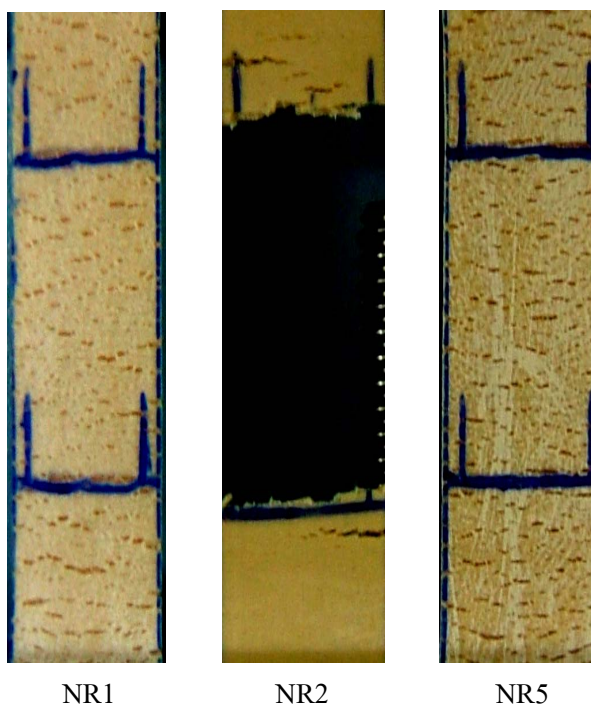
สูตร	เวลาที่เริ่มแตก (ชั่วโมง)	ลักษณะของชั้นตัวอย่างเมื่ออบในตู้อบไอโซน
B2-40	72	2 ชั่วโมง เริ่มเปลี่ยนเป็นสีขาว 72 ชั่วโมง แทบมองไม่เห็นรอยแตก 96 ชั่วโมง รอยแตกมีขนาดเล็ก ปริมาณมากและกระจาย ทั้งชั้น
B2-50	-	ไม่แตก แต่สีเปลี่ยนเป็นสีขาว
B2-60	-	ไม่แตก แต่สีเปลี่ยนเป็นสีขาว
B2-70	-	ไม่แตก แต่สีเปลี่ยนเป็นสีขาว
B2-80	-	ไม่เปลี่ยนแปลง
B2-100	-	ไม่เปลี่ยนแปลง
B3-0	4	2 ชั่วโมง เป็นรอยขีดข่วนๆ 8 ชั่วโมง รอยแตกเป็นเส้นยาวและขอบเริ่มแตก 48 ชั่วโมง เป็นเส้น 72 ชั่วโมง ขาด
B3-20	24	2 ชั่วโมง เป็นรอยขีดข่วนๆ และสีเปลี่ยนเป็นสีขาว 72 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตก 96 ชั่วโมง รอยแตกลึกมากขึ้น เห็นได้ชัดเจนแต่มีปริมาณ น้อย
B3-30	16	2 ชั่วโมง เริ่มเปลี่ยนเป็นสีขาว 16 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตก ขอบเริ่มแตก 96 ชั่วโมง เป็นเส้น
B3-40	-	ไม่แตก แต่สีเปลี่ยนเป็นสีขาว
B3-50	-	ไม่แตก แต่เปลี่ยนเป็นสีขาว
B3-60	-	ไม่แตก แต่เปลี่ยนเป็นสีขาว
B3-70	-	ไม่แตก แต่เปลี่ยนเป็นสีขาว
B3-80	-	ไม่เปลี่ยนแปลง
B3-100	-	ไม่เปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

สูตร	เวลาที่เริ่มแตก (ชั่วโมง)	ลักษณะของขึ้นตัวอย่างเมื่ออบในตู้อบไอโซน
B4-0	8	4 ชั่วโมง เป็นรอยขีดข่วนๆ 16 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตก 24 ชั่วโมง รอยแตกเป็นเส้นและสีเปลี่ยน 96 ชั่วโมง เป็นเส้น
B4-20	8	2 ชั่วโมง เริ่มเปลี่ยนเป็นสีขาว 16 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตก
B4-30	16	4 ชั่วโมง เริ่มเปลี่ยนเป็นสีขาว 24 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตก
B4-40	48	4 ชั่วโมง เริ่มเปลี่ยนเป็นสีขาว 48 ชั่วโมง รอยแตกมีขนาดแทบมองไม่เห็น
B4-50	-	ไม่แตก แต่สีเปลี่ยนเป็นสีขาว
B4-60	-	ไม่แตก แต่เปลี่ยนเป็นสีขาว
B4-70	-	ไม่แตก แต่เปลี่ยนเป็นสีขาว
B4-80	-	ไม่เปลี่ยนแปลง
B4-100	-	ไม่เปลี่ยนแปลง

จากผลการทดลอง พบว่า ยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อไอโซนต่ำกว่ายางคลอโรซัลไฟเนตเตตพอลิเอทิลีนอย่างชัดเจน เพราะยางธรรมชาติเริ่มแตกที่เวลาที่ค่อนข้างเร็ว และรอยแตกที่เกิดขึ้นมีปริมาณมากและเป็นรอยลึก ขึ้นตัวอย่างของยางธรรมชาติบางสูตรขาดออกจากกันเมื่อครบ 96 ชั่วโมง (ดังรูปที่ 4.34) ในขณะที่ยางคลอโรซัลไฟเนตเตตพอลิเอทิลีน ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นภายในเวลา 7 วัน (ทดลองเพิ่มเวลาในการอบขึ้นตัวอย่างเป็น 7 วัน เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของยางคลอโรซัลไฟเนตเตตพอลิเอทิลีนว่า มีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่ ถ้าต้องสัมผัสกับไอโซนนานขึ้น ซึ่งปรากฏว่า ยางคลอโรซัลไฟเนตเตตพอลิเอทิลีนไม่มีการเปลี่ยนแปลง) เนื่องจากยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้าง เมื่อต้องอยู่ในสภาวะที่มีไอโซน จะทำให้พันธะคู่แตกและสายโซ่โมเลกุลขาด ทำใหยางธรรมชาติเป็นยางที่ไม่ทนต่อไอโซน แต่ยางคลอโรซัลไฟเนตเตตพอลิเอทิลีนไม่มีพันธะคู่ในโครงสร้างโมเลกุล ทำให้ทนต่อไอโซนได้ดีกว่า (White and De, 2001)

และจากผลการทดสอบจะเห็นว่า ยางธรรมชาติสูตร NR2 มีความต้านทานต่อโอโซนได้ดีกว่า เนื่องจากสูตร NR2 วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันปกติ ซึ่งทำให้เกิดการเชื่อมโยงแบบพอลิ-ซัลฟิดิก (polysulfidic) มากกว่าการเชื่อมโยงแบบอื่นๆ การเชื่อมโยงแบบพอลิซัลฟิดิกนี้ พันธะการเชื่อมโยงสามารถขาดจากกันได้ง่าย เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีออกซิเจนหรือโอโซนหนาแน่น ทำให้ยางธรรมชาติสูตร NR2 เกิดรอยแตกเร็วกว่าและรอยแตกที่เกิดขึ้นรุนแรงกว่าสูตรอื่นๆ

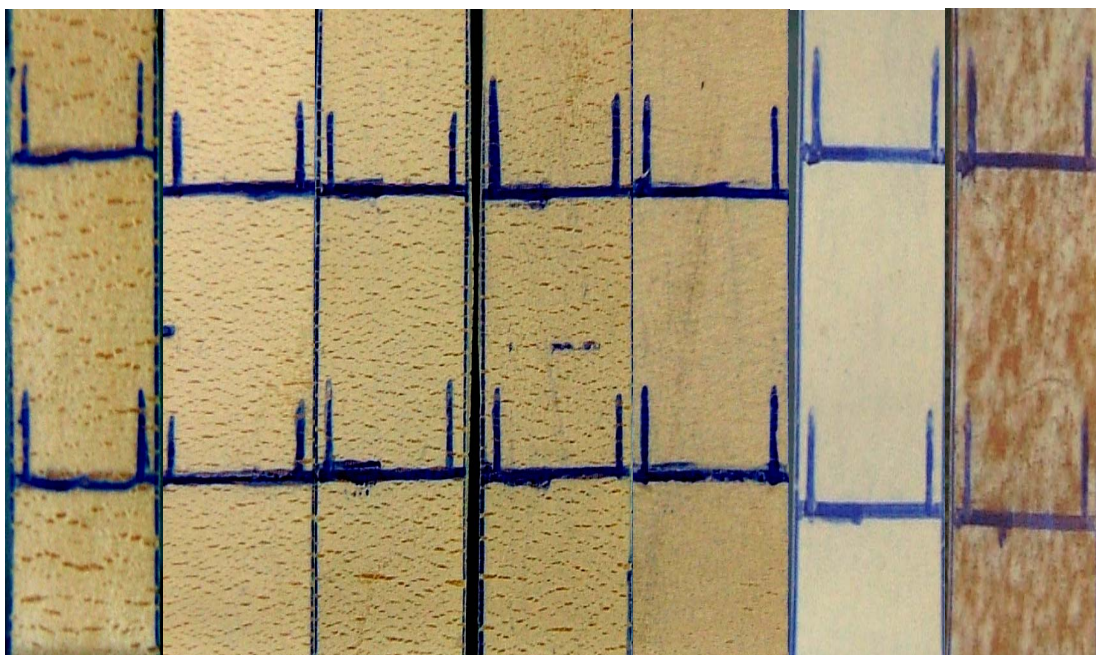


รูปที่ 4.34 ลักษณะรอยแตกที่เกิดขึ้นของยางธรรมชาติ (รอยขีดสีดำน้อยในแนวนอน) เมื่ออบในตู้อบโอโซนเป็นเวลา 96 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 40°C และความเข้มข้นของโอโซน 50 ppm ขึ้นทดสอบสูตร NR2 ขาดเป็น 2 ท่อน (รอยขีดสีดำเข้มในแนวนอนและแนวตั้งเป็นรอยขีดจากปากกา)

ส่วนยางผสมแต่ละสูตร จะเกิดรอยแตกครั้งแรกที่เวลาแตกต่างกันและความรุนแรงของรอยแตกที่เกิดขึ้นก็แตกต่างกันเช่นกัน ขึ้นอยู่กับสูตรและอัตราส่วนของยางผสม แต่มีแนวโน้มว่า เมื่อปริมาณยางคลอโรซัลไฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนในยางผสมเพิ่มขึ้น เวลาที่เริ่มเกิดรอยแตกจะนานขึ้น (ดังแสดงในตารางที่ 4.6) และความรุนแรงของรอยแตกลดน้อยลง (ดังรูปที่ 4.35 – 4.38) แสดงว่า ยางคลอโรซัลไฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนช่วยให้ยางผสมมีความต้านทานโอโซนได้ดีขึ้น (เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ) และความต้านทานต่อโอโซนของยางผสมจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ

ยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนที่เพิ่มขึ้น เพราะยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนมีความต้านทานต่อการเข้าทำปฏิกิริยาของโอโซนได้ดีมาก (Morton, 1987)

หลังจากทำทดสอบความต้านทานต่อโอโซนของยางผสมสูตร B1 พบว่า ที่อัตราส่วน 70/30 เกิดรอยแตกเร็วกว่าอัตราส่วนอื่นๆ และรอยแตกที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่และลึกมากกว่าที่อัตราส่วนอื่นๆ แต่ในอัตราส่วนที่มียางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนมากกว่า 50% ยางผสมไม่เกิดรอยแตก แต่สีของยางผสมเกือบทุกอัตราส่วนจะเปลี่ยนไปเป็นสีขาว ยกเว้นที่อัตราส่วน 20/80 สีไม่เปลี่ยน (ก่อนอบโอโซนยางผสมที่อัตราส่วนดังกล่าวมีสีน้ำตาลเข้ม) ซึ่งสามารถสรุปความต้านทานต่อโอโซนของสูตร B1 จากมากไปน้อยได้ดังนี้ $20/80 > 30/70 > 40/60 > 50/50 > 80/20 > 60/40 > 70/30$ (ดังแสดงในรูปที่ 4.35)

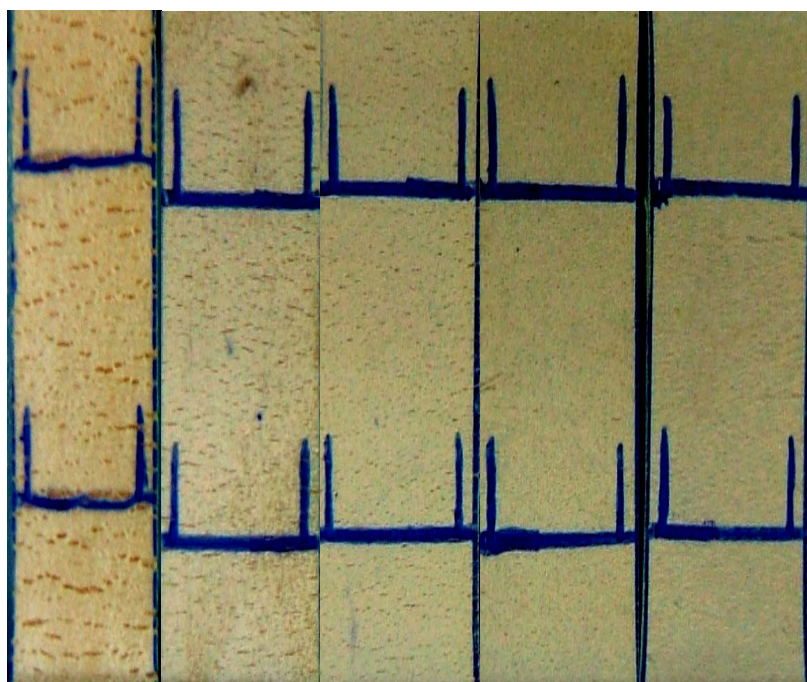


B1-0 B1-20 B1-30 B1-40 B1-50 B1-60 B1-70

รูปที่ 4.35 ลักษณะรอยแตกที่เกิดขึ้นของยางผสมสูตร B1 ที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่ออบในตู้อบโอโซนเป็นเวลา 96 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 40°C และความเข้มข้นของโอโซน 50 ppm (รอยขีดสีดำเข้มในแนวนอนและแนวตั้งเป็นรอยขีดจากปากกา)

ส่วนยางผสมสูตร B2 พบว่า ที่อัตราส่วน 80/20 เกิดรอยแตกเร็วกว่าอัตราส่วนอื่นๆ และรอยแตกที่เกิดขึ้นเห็นได้อย่างชัดเจนมากกว่าที่อัตราส่วนอื่นๆ ที่อัตราส่วน 70/30 รอยแตกมีขนาดเล็กมาก และอัตราส่วน 60/40 มีรอยแตกเล็กมากแทบมองไม่เห็น (ต้องใช้แว่นขยายในการดูรอยแตก) ในอัตราส่วนที่มียางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนมากกว่า 40% ยางผสมไม่เกิด

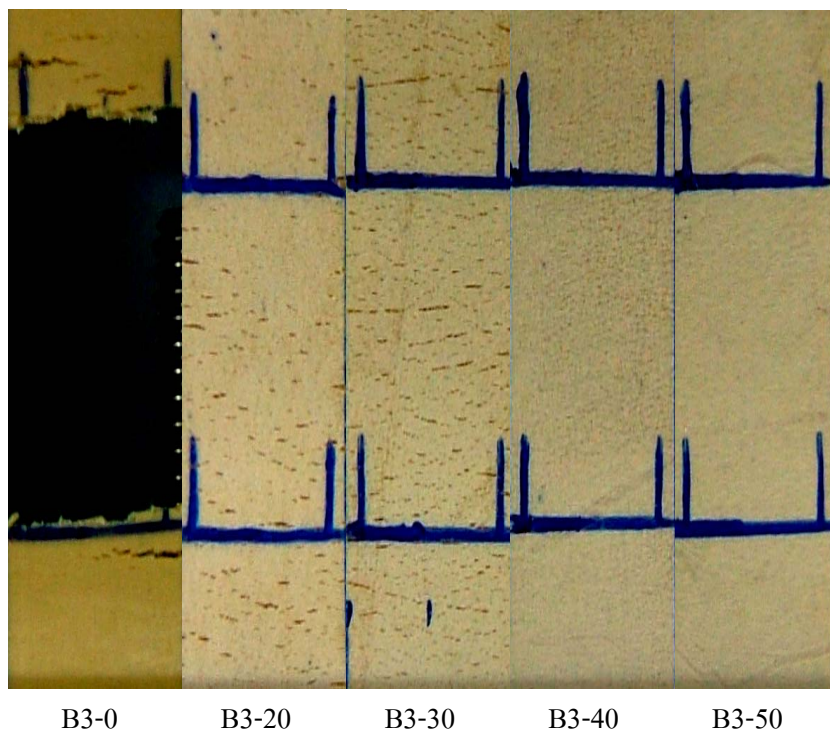
รอยแตก แต่สีของยางผสมเกือบทุกอัตราส่วนจะเปลี่ยนไปเป็นสีขาว ยกเว้นที่อัตราส่วน 20/80 สีไม่เปลี่ยนเช่นเดียวกับสูตร B1 (ก่อนอบไอโซนอัตราส่วนที่มียางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทรีลีนมากกว่า 60% มีสีน้ำตาลเข้ม และที่น้อยกว่า 60% มีสีน้ำตาล) ซึ่งสามารถสรุปความต้านทานต่อไอโซนของสูตร B2 จากมากไปน้อยได้ดังนี้ $20/80 > 30/70 > 40/60 > 50/50 > 60/40 > 70/30 > 80/20$ (ดังแสดงในรูปที่ 4.36)



B2-0 B2-20 B2-30 B2-40 B2-50

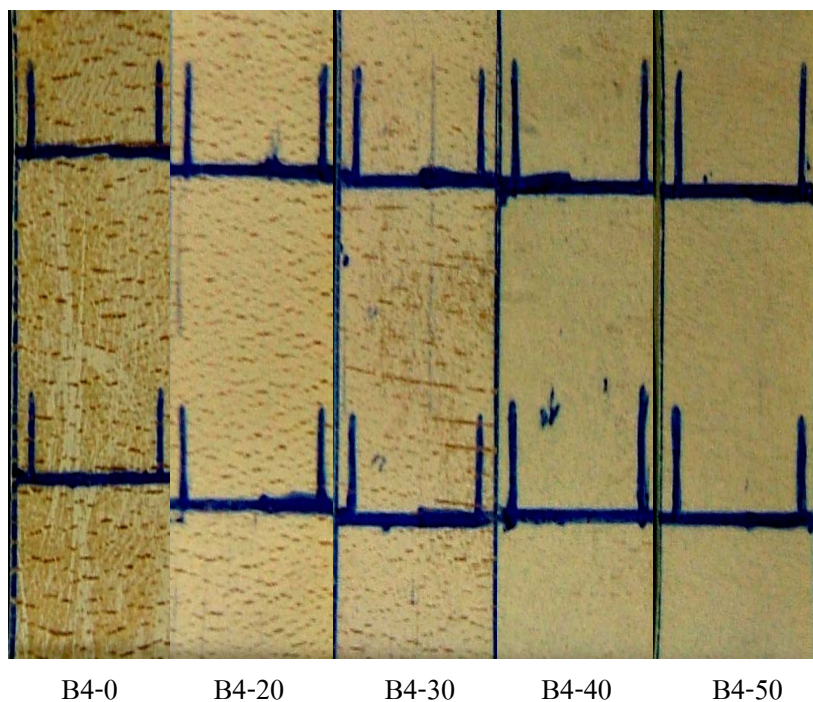
รูปที่ 4.36 ลักษณะรอยแตกที่เกิดขึ้นของยางผสมสูตร B2 ที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่ออบในตู้อบไอโซนเป็นเวลา 96 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 40°C และความเข้มข้นของไอโซน 50 ppm (รอยขีดสีดำเข้มในแนวนอนและแนวตั้งเป็นรอยขีดจากปากกา)

ยางผสมสูตร B3 หลังอบไอโซน พบว่า ที่อัตราส่วน 70/30 เกิดรอยแตกเร็วกว่าอัตราส่วนอื่นๆ และรอยแตกที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่และลึกมากกว่าที่อัตราส่วนอื่นๆ และอัตราส่วน 80/20 รอยแตกมีขนาดเล็กแต่เห็นได้ชัดเจน ในอัตราส่วนที่มียางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทรีลีนมากกว่า 30% ยางผสมไม่เกิดรอยแตก แต่สีของยางผสมเกือบทุกอัตราส่วนจะเปลี่ยนไปเป็นสีขาว ยกเว้นที่อัตราส่วน 20/80 สีไม่เปลี่ยนเช่นเดียวกับสูตร B1 และ B2 ซึ่งสามารถสรุปความต้านทานต่อไอโซนของสูตร B3 จากมากไปน้อยได้ดังนี้ $20/80 > 30/70 > 40/60 > 50/50 > 60/40 > 80/20 > 70/30$ (ดังแสดงในรูปที่ 4.37)



รูปที่ 4.37 ลักษณะรอยแตกที่เกิดขึ้นของยางผสมสูตร B3 ที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่ออบในตู้อบโอโซนเป็นเวลา 96 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 40°C และความเข้มข้นของโอโซน 50 ppm (รอยขีดสีดำเข้มในแนวนอนและแนวตั้งเป็นรอยขีดจากปากกา)

ส่วนยางผสมสูตร B4 พบว่า ที่อัตราส่วน 80/20 เกิดรอยแตกเร็วกว่าและมีปริมาณรอยแตกมากกว่าอัตราส่วนอื่นๆ แต่รอยแตกมีขนาดเล็กกว่าอัตราส่วน 70/30 และที่อัตราส่วน 60/40 มีรอยแตกเล็กมากแทบมองไม่เห็น (ต้องใช้แว่นขยายในการดูรอยแตก) ในอัตราส่วนที่มียางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทรีลีนมากกว่า 40% ยางผสมไม่เกิดรอยแตก แต่สีของยางผสมเกือบทุกอัตราส่วนจะเปลี่ยนไปเป็นสีขาว ยกเว้นที่อัตราส่วน 20/80 สีไม่เปลี่ยนเช่นเดียวกับสูตร B1, B2 และ B3 ซึ่งสามารถสรุปความต้านทานต่อโอโซนของสูตร B4 จากมากไปน้อยได้ดังนี้ $20/80 > 30/70 > 40/60 > 50/50 > 60/40 > 70/30 > 80/20$ (ดังแสดงในรูปที่ 4.38)



รูปที่ 4.38 ลักษณะรอยแตกที่เกิดขึ้นของยางผสมสูตร B4 ที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่ออบในตู้อบไอโซนเป็นเวลา 96 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 40°C และความเข้มข้นของไอโซน 50 ppm (รอยขีดสีดำเข้มในแนวนอนและแนวตั้งเป็นรอยขีดจากปากกา)

จากผลการทดสอบความต้านทานต่อไอโซน พบว่า ยางผสมมีความต้านทานต่อไอโซนดีกว่ายางธรรมชาติ โดยยางผสมสูตร B2 มีความต้านทานต่อไอโซนมากกว่ายางผสมสูตรอื่นๆทุกอัตราส่วน ซึ่งสังเกตได้จากเวลาที่เริ่มแตกและความรุนแรงของรอยแตกที่น้อยกว่ายางผสมสูตรอื่นๆ ส่วนยางผสมสูตร B1 ที่อัตราส่วน 60/40 มีความต้านทานต่อไอโซนต่ำกว่ายางผสมสูตรอื่นๆ และยางผสมสูตร B4 ที่อัตราส่วน 80/20 และ 70/30 มีความต้านทานต่อไอโซนต่ำกว่ายางผสมสูตรอื่นๆ และในชั้นตัวอย่างที่ไม่เกิดรอยแตก แต่เกิดการเปลี่ยนสีของชั้นตัวอย่าง โดยชั้นตัวอย่างเปลี่ยนจากสีน้ำตาลอ่อนเป็นสีขาวขุ่น

3. ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางผสม เมื่อมีการใช้สารที่ช่วยเพิ่มความเข้ากันได้

3.1 อิทธิพลของ Struktol® 60 NS

3.1.1 เมื่อเติม Struktol® 60 NS ปริมาณ 3 phr ในยางผสมสูตร B1 ทุกอัตราส่วน

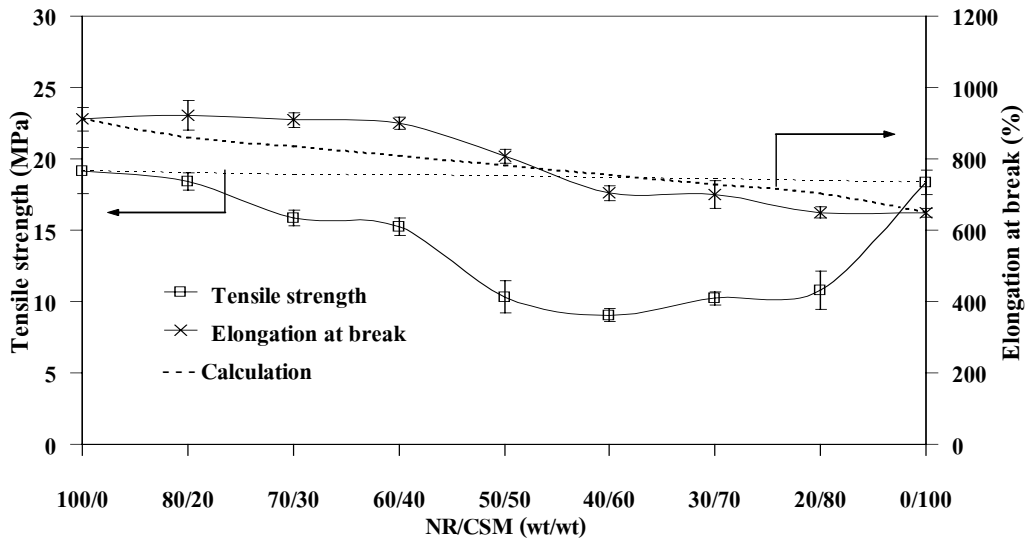
ยางผสมสูตร B1 เติม Struktol® 60 NS ปริมาณ 3 phr ได้ยางผสมสูตรที่ 5 เรียกว่ายางผสมสูตร B5 และกำหนดสัญลักษณ์แทนชื่อสูตรที่อัตราส่วนต่างๆ เช่น สูตร B5-20 หมายถึง

ยางผสมสูตร B5 ที่มีอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติต่อยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีน เป็น 80/20 ผลการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร B5 แสดงในตารางที่ 4.7 ซึ่งพบว่า ยางผสมสูตร B5 ในอัตราส่วนที่มียางธรรมชาติมากกว่ายางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีน ให้ค่าความทนต่อแรงดึงต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณไม่เกิน 20% แต่เมื่อปริมาณยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงมีค่าลดลง และที่อัตราส่วน 80/20 ให้ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุด ส่วนค่าการยืด ณ จุดขาดมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ เมื่อยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนมากกว่า 50% และมีค่าลดลงเมื่อปริมาณยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.39) เมื่อนำผลการทดสอบที่ได้เปรียบเทียบกับยางผสมสูตร B1 พบว่า ยางผสมสูตร B5 ให้ค่าความทนต่อแรงดึงต่ำกว่ายางผสมสูตร B1 เช่น ที่อัตราส่วน 80/20 สูตร B1 มีค่าความทนต่อแรงดึง 22.03 MPa แต่สูตร B5 มีค่าเท่ากับ 18.40 MPa เป็นต้น แต่ค่าการยืด ณ จุดขาดมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

ค่าความทนต่อการฉีกขาดของยางผสมสูตร B5 มีค่าลดลง เมื่อปริมาณยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.40) เช่นเดียวกับยางผสมสูตร B1 แต่ยางผสมสูตร B5 มีค่าความทนต่อการฉีกขาดต่ำกว่ายางผสมสูตร B1 ตัวอย่างเช่น ที่อัตราส่วน 80/20 สูตร B1 มีค่าความทนต่อการฉีกขาด 28.65 N/mm แต่สูตร B5 มีค่าเท่ากับ 24.08 N/mm เป็นต้น

ตารางที่ 4.7 ค่าความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร B5

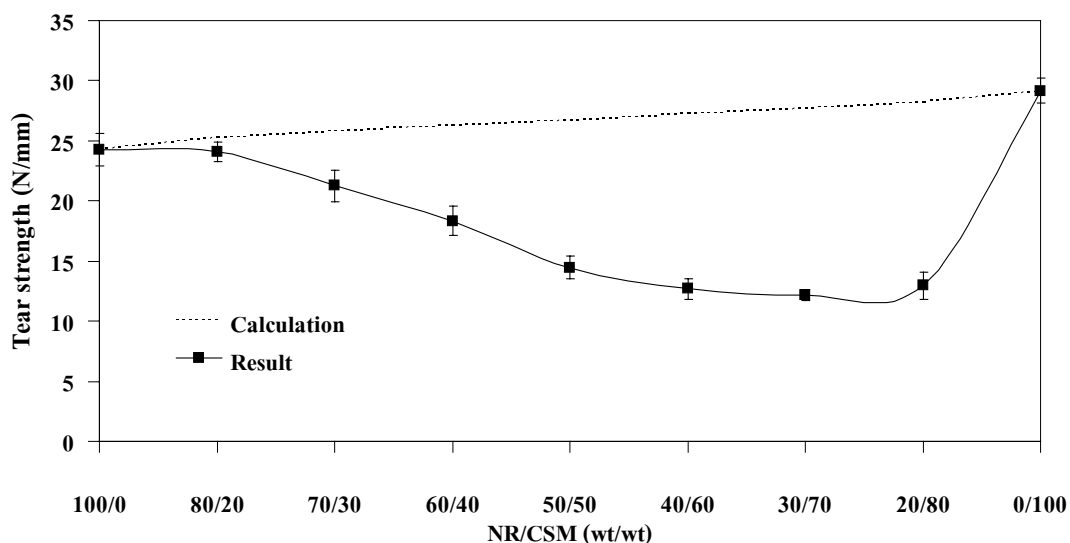
สูตร	ค่าความทนต่อแรงดึง (MPa)		ค่าการยืด ณ จุดขาด (%)	
	คำนวณ	ผลที่ได้	คำนวณ	ผลที่ได้
B5-0	-	19.17 ± 1.63	-	912 ± 33
B5-20	19.00	18.40 ± 0.62	859	922 ± 42
B5-30	18.92	15.86 ± 0.54	833	909 ± 21
B5-40	18.84	15.25 ± 0.60	807	899 ± 17
B5-50	18.76	10.33 ± 1.12	781	808 ± 20
B5-60	18.67	9.05 ± 0.47	754	704 ± 20
B5-70	18.59	10.23 ± 0.46	728	701 ± 39
B5-80	18.51	10.82 ± 1.34	702	649 ± 16
B5-100	-	18.34 ± 0.86	-	649 ± 13



รูปที่ 4.39 ความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร B5

ตารางที่ 4.8 ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดหรือความทนต่อการฉีกขาดของ B5

สูตร	คำนวณ (N/mm)	ค่าที่ได้จริง (N/mm)
B5-0	-	24.29 ± 1.34
B5-20	25.27	24.08 ± 0.79
B5-30	25.75	21.26 ± 1.30
B5-40	26.24	18.35 ± 1.23
B5-50	26.73	14.45 ± 0.95
B5-60	27.22	12.70 ± 0.84
B5-70	27.71	12.18 ± 0.42
B5-80	28.19	12.97 ± 1.13
B5-100	-	29.17 ± 1.02



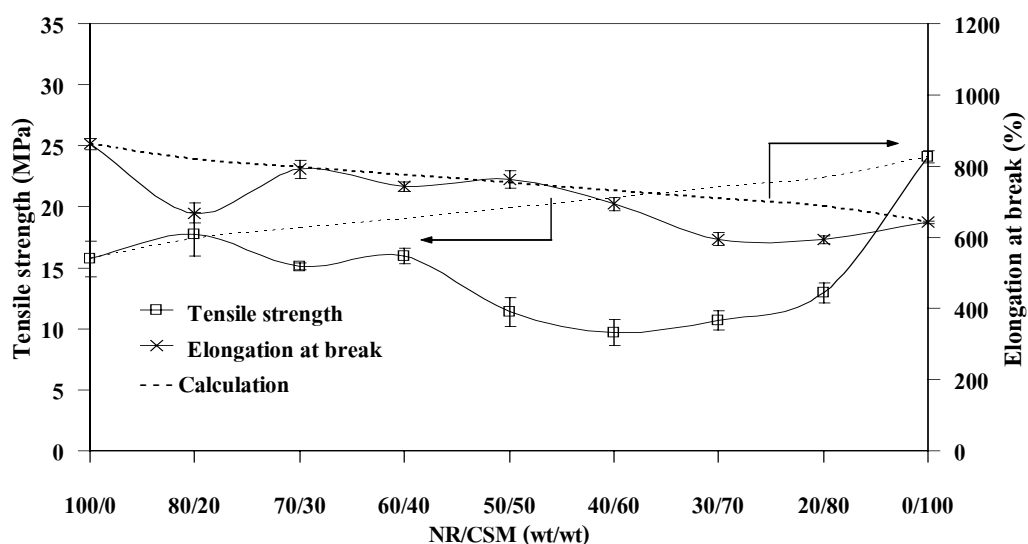
รูปที่ 4.40 ความทนต่อการฉีกขาดของยางผสมสูตร B5

เมื่อนำยางผสมสูตร B5 ไปทดสอบความต้านทานต่อการบ่มเร่งด้วยความร้อน (ตารางที่ 4.9 – 4.10) พบว่า ยางผสมสูตร B5 ที่อัตราส่วน 80/20 มีค่าความทนต่อแรงดึงหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนสูงกว่าที่อัตราส่วนอื่นๆ และเมื่อปริมาณยางคลอโรซัลไฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนมากกว่า 20% ค่าความทนต่อแรงดึงแนวโน้มนลดลง และในอัตราส่วนที่มียางคลอโรซัลไฟเนตเตต-พอลิเอทธิลีนมากกว่า 30% ค่าความทนต่อแรงดึงมีค่ามากกว่าค่าที่ได้ก่อนการบ่มเร่ง ค่าการเปลี่ยนแปลงความทนต่อแรงดึงของยางผสมสูตร B5 เกือบทุกอัตราส่วนไม่เกิน 10% (ยกเว้นที่อัตราส่วน 20/80 มีค่าเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 19%) (ดังรูปที่ 4.41 – 4.42) เมื่อเปรียบเทียบกับ B1 ยางผสมสูตร B5 มีความต้านทานต่อการบ่มเร่งด้วยความร้อนดีกว่าสูตร B1 (สูตร B1 มีค่าความทนต่อแรงดึงหลังการบ่มเร่งน้อยกว่าค่าที่ได้ก่อนการบ่มเร่งทุกอัตราส่วน ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.24)

ส่วนค่าการยืด ณ จุดขาดหลังการบ่มเร่งของยางผสมสูตร B5 มีค่าสูงสุดที่อัตราส่วน 70/30 แต่เมื่อปริมาณยางคลอโรซัลไฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนเพิ่มขึ้น ค่าดังกล่าวมีแนวโน้มลดลง และเกือบทุกอัตราส่วนมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 20% (ยกเว้นที่อัตราส่วน 80/20 มีการเปลี่ยนแปลงมากกว่า 27%) และค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าการยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร B1 แต่หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน ยางผสมสูตร B5 มีค่าการยืด ณ จุดขาดต่ำกว่าค่าที่ได้ก่อนการบ่มเร่งทุกอัตราส่วน (ดังรูปที่ 4.41 – 4.42) เมื่อเปรียบเทียบกับยางผสมสูตร B1 พบว่า ในอัตราส่วนที่มียางคลอโรซัลไฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนน้อยกว่า 50% สูตร B5 มีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าสูตร B1 แต่ถ้ามียางคลอโรซัลไฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนตั้งแต่ 50% ขึ้นไป สูตร B1 มีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าสูตร B5

ตารางที่ 4.9 ค่าความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร B5 หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 7 วัน

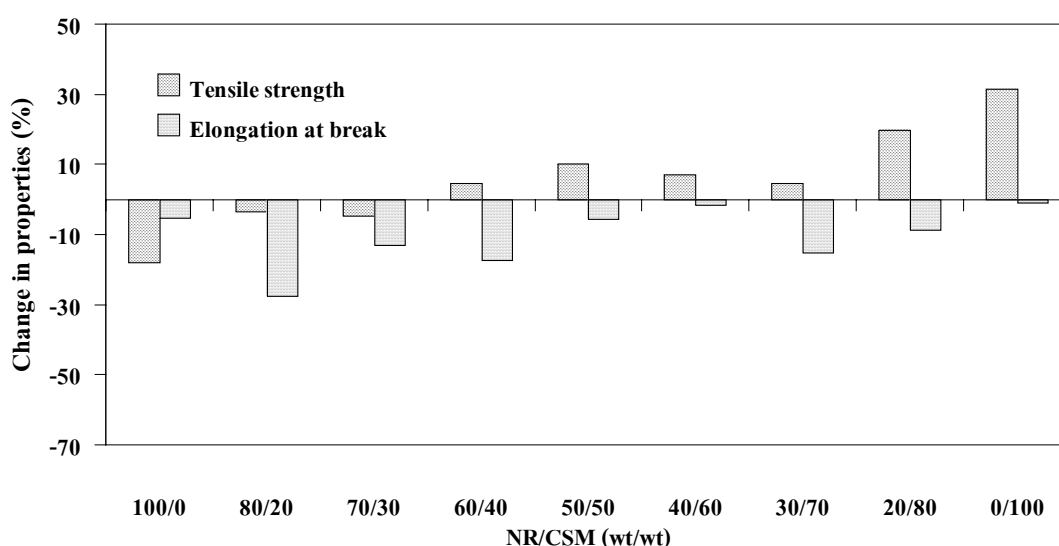
สูตร	ค่าความทนต่อแรงดึง (MPa)		ค่าการยืด ณ จุดขาด (%)	
	คำนวณ	ผลที่ได้	คำนวณ	ผลที่ได้
B5-0	-	15.72 ± 1.45	-	862 ± 16
B5-20	17.39	17.74 ± 1.77	818	668 ± 28
B5-30	18.23	15.12 ± 0.27	796	791 ± 26
B5-40	19.06	15.96 ± 0.63	774	742 ± 14
B5-50	19.90	11.38 ± 1.17	752	763 ± 24
B5-60	20.74	9.68 ± 1.06	730	693 ± 18
B5-70	21.57	10.68 ± 0.78	708	595 ± 19
B5-80	22.41	12.94 ± 0.80	686	593 ± 11
B5-100	-	24.08 ± 0.50	-	642 ± 4



รูปที่ 4.41 ความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร B5 หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 7 วัน

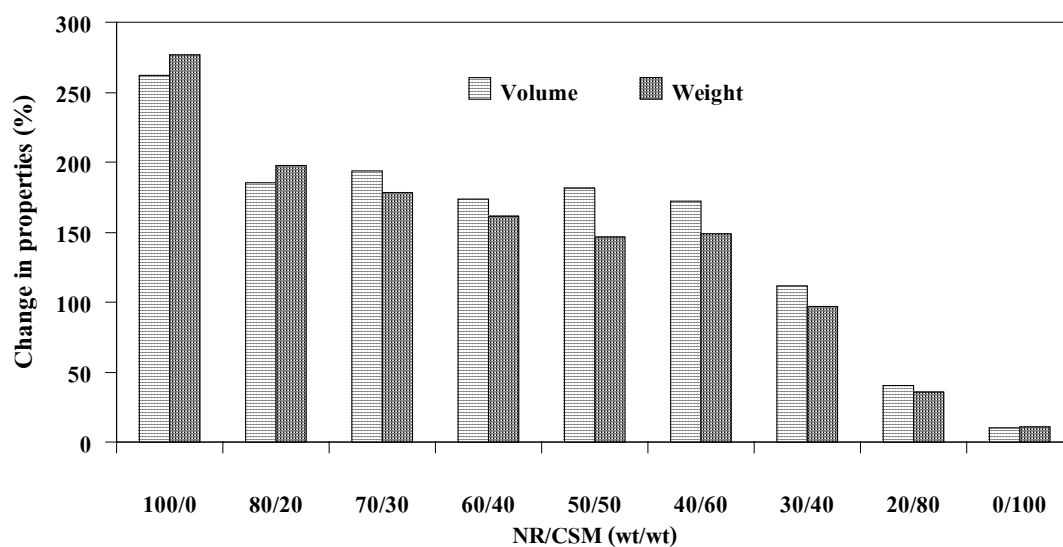
ตารางที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงของค่าความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร B5 หลังการบ่มแรงด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 7 วัน

สูตร	ความทนต่อแรงดึง (MPa)			ค่าการยืด ณ จุดขาด (%)		
	ก่อนการบ่มแรง	หลังการบ่มแรง	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง	ก่อนการบ่มแรง	หลังการบ่มแรง	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง
B5-0	19.17	15.72	-18.00	912	862	-5.48
B5-20	18.40	17.74	-3.59	922	668	-27.55
B5-30	15.86	15.12	-4.67	909	791	-12.98
B5-40	15.25	15.96	4.66	899	742	-17.46
B5-50	10.33	11.38	10.16	808	763	-5.57
B5-60	9.05	9.68	6.96	704	693	-1.56
B5-70	10.23	10.68	4.40	701	595	-15.12
B5-80	10.82	12.94	19.59	649	593	-8.63
B5-100	18.34	24.08	31.30	649	642	-1.08

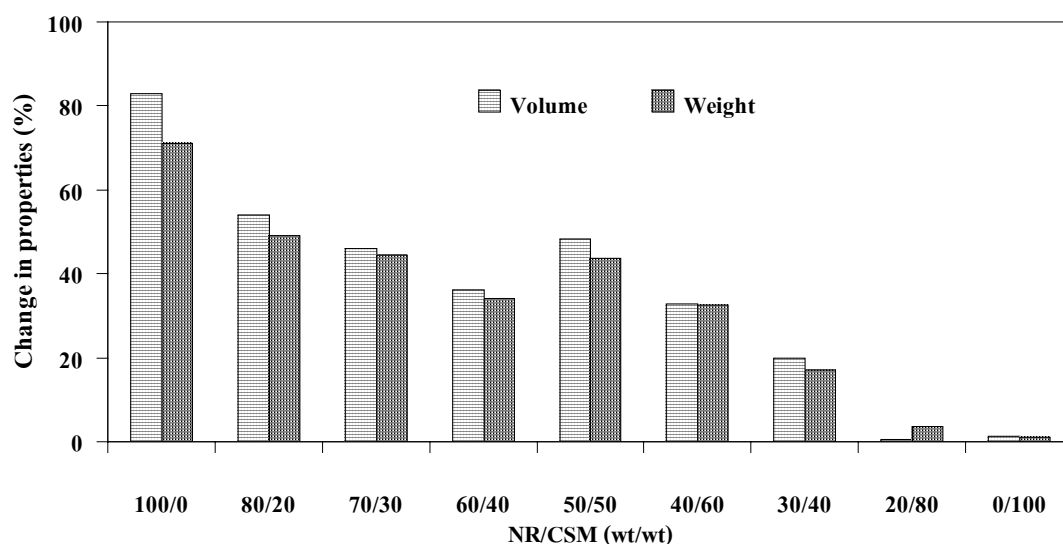


รูปที่ 4.42 การเปลี่ยนแปลงค่าความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร B5 หลังการบ่มแรงด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 7 วัน

ยางผสมสูตร B5 ทนต่อการบวมตัวในน้ำมันได้ต่ำกว่ายางผสมสูตร B1 เพราะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรและน้ำหนักมาก เมื่อแช่ในน้ำมันทั้งสองชนิด (ดังรูปที่ 4.43 – 4.44) แต่ยางผสมสูตร B5 มีแนวโน้มทนต่อการบวมตัวในน้ำมันได้ดีขึ้น เมื่อมียางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีนในยางผสมเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับยางผสมสูตร B1



รูปที่ 4.43 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรและน้ำหนักของยางผสมสูตร B5 เมื่อแช่ในน้ำมัน ASTM เบอร์ 1 เป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิห้อง (25°C)



รูปที่ 4.44 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรและน้ำหนักของยางผสมสูตร B5 เมื่อแช่ในน้ำมัน IRM 903 เป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิห้อง (25°C)

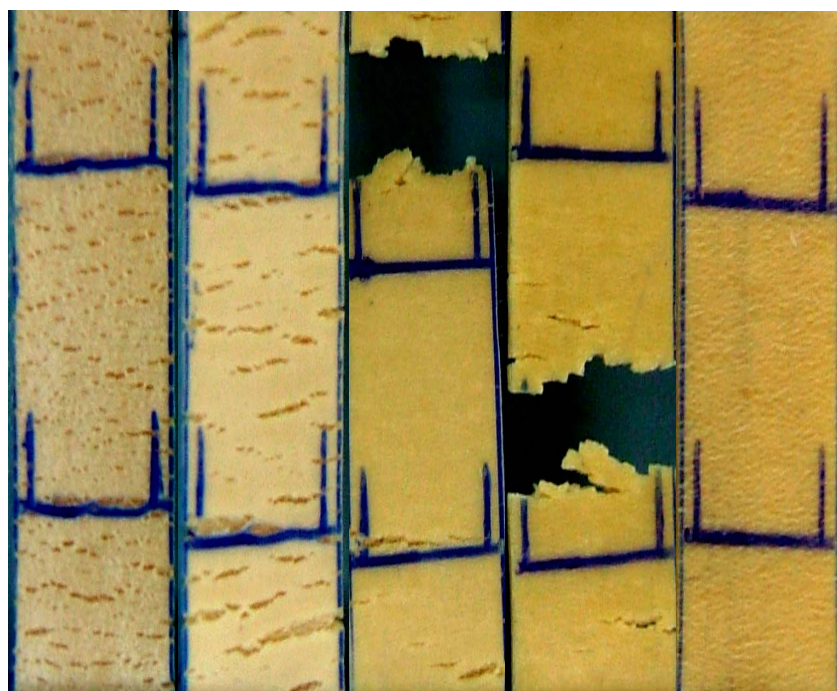
หลังจากอบโอโซน (ดังแสดงในตารางที่ 4.11) พบว่า ยางผสมสูตร B5 ที่อัตราส่วน 80/20, 70/30 และ 60/40 เริ่มแตกที่เวลาเท่ากัน แต่ที่อัตราส่วน 70/30 รอยแตกมีความรุนแรงมากกว่าที่อัตราส่วนอื่นๆ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นรอยแตกของอัตราส่วน 70/30 มีขนาดใหญ่และลึกมากขึ้น (มากกว่าอัตราส่วนอื่นๆ) และเมื่อครบ 96 ชั่วโมง ชิ้นตัวอย่างของอัตราส่วน 70/30 และ 60/40 ขาดเป็น 2 ส่วน ถ้ายางผสมมีปริมาณยางคลอโรซัลไฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนมากกว่า 40% ยางผสมไม่แตก และในอัตราส่วนที่มีปริมาณยางคลอโรซัลไฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนมากกว่า 60% ยางผสมไม่มีการเปลี่ยนแปลง (ที่อัตราส่วนอื่น ยางผสมจะเปลี่ยนเป็นสีขาว) ซึ่งสามารถสรุปความต้านทานต่อโอโซนของสูตร B5 จากมากไปน้อยได้ดังนี้ $20/80 > 30/70 > 40/60 > 50/50 > 80/20 > 60/40 > 70/30$ (ดังแสดงในรูปที่ 4.45) เมื่อเปรียบเทียบกับสูตร B1 จะเห็นว่า ยางผสมสูตร B5 มีความต้านทานต่อโอโซนต่ำกว่ายางผสมสูตร B1 และมีความรุนแรงของรอยแตกมากกว่ายางผสมสูตร B1 แสดงว่า การเติม Struktol® 60 NS 3.0 phr ไม่ช่วยให้ยางผสมมีความต้านทานต่อโอโซนดีขึ้น แต่ในการผสม Struktol® 60 NS ลงในยางผสม Struktol® 60 NS กระจายตัวในยางผสมได้ไม่ดี เมื่อนำไปขึ้นรูปแล้ว ผิวของแผ่นยางที่ได้ไม่เรียบ มีลักษณะคล้ายมีฟองอากาศอยู่บนผิวของแผ่นยาง จึงมีผลทำให้ยางผสมที่เติม Struktol® 60 NS 3.0 phr มีความต้านทานต่อโอโซนต่ำกว่าในกรณีที่เติม Struktol® 60 NS

ตารางที่ 4.11 เวลาที่เริ่มแรกของยางผสมสูตร B5 เมื่ออบในตู้อบ โอโซน ที่อุณหภูมิ 40°C และความเข้มข้นของโอโซน 50 pphm

สูตร	เวลาที่เริ่มแตก (ชั่วโมง)	ลักษณะของชิ้นตัวอย่างเมื่ออบในตู้อบโอโซน
B5-0	8	2 ชั่วโมง เห็นเป็นรอยขีดข่วนๆ 8 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตก 24 ชั่วโมง สีเปลี่ยนเป็นสีขาวขึ้น 72 ชั่วโมง เป็นเส้น
B5-20	16	2 ชั่วโมง เป็นรอยขีดข่วนๆ 16 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตก 48 ชั่วโมง เป็นเส้น
B5-30	16	2 ชั่วโมง เป็นรอยขีดข่วนๆ 16 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตก 96 ชั่วโมง ขาด

ตารางที่ 4.11 (ต่อ)

สูตร	เวลาที่เริ่มแตก (ชั่วโมง)	ลักษณะของชิ้นตัวอย่างเมื่ออบในตู้อบไอโซน
B5-40	16	2 ชั่วโมง เป็นรอยขีดข่วน 16 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตก 72 ชั่วโมง เป็นเส้น 96 ชั่วโมง ขาด
B5-50	-	ไม่แตก แต่เป็นรอยข่วน
B5-60	-	ไม่แตก แต่เป็นรอยข่วน
B5-70	-	ไม่แตกและสีไม่เปลี่ยน
B5-80	-	ไม่แตกและสีไม่เปลี่ยน
B5-100	-	ไม่เปลี่ยนแปลง



B5-0

B5-20

B5-30

B5-40

B5-50

รูปที่ 4.45 ลักษณะรอยแตกที่เกิดขึ้นของยางผสมสูตร B5 ที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่ออบในตู้อบไอโซนเป็นเวลา 96 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 40°C และความชื้นของไอโซน 50 ppm (รอยขีดสีดำเข้มในแนวนอนและแนวตั้งเป็นรอยขีดจากปากกา)

จากผลการทดสอบที่ได้กล่าวมา แสดงให้เห็นว่า การเติม Struktol® 60 NS 3.0 phr ลงในยางผสมสูตร B1 ทำให้ยางผสมมีสมบัติความทนต่อแรงดึง ความทนต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อโอโซนด้อยลง แต่ทนต่อแรงดึงหลังการบ่มแรงและทนต่อน้ำมันได้ดีขึ้น

3.1.2 เมื่อเติม Struktol® 60 NS ปริมาณ 1.0 และ 3.0 phr ลงในยางผสมทั้ง 4 สูตร ที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนเป็น 70/30

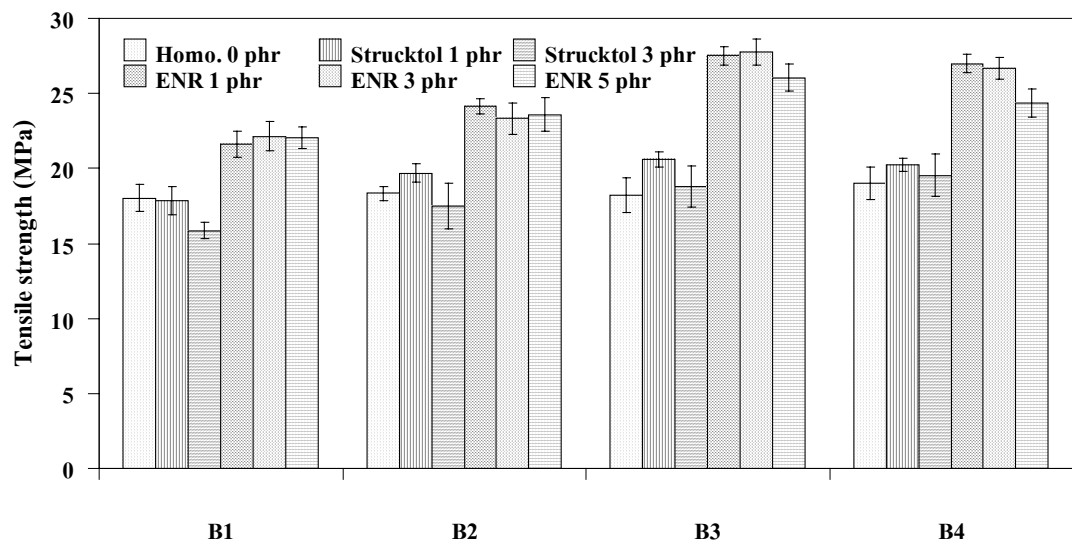
จากผลการทดลองตามหัวข้อ 3.1.1 ที่มีการเติม Struktol® 60 NS ลงในยางผสมสูตร B1 ในปริมาณ 3.0 phr ไม่ได้ช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อการตรวจสอบความเข้ากันได้ด้วยเครื่อง SEM) และไม่ช่วยให้สมบัติของยางผสมดีขึ้น จึงได้ทดลองเติม Struktol® 60 NS ปริมาณ 1.0 และ 3.0 phr ลงในยางผสมทั้ง 4 สูตร (B1 – B4) แล้วนำไปทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึง ซึ่งได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.12 พบว่า การเติม Struktol® 60 NS ในปริมาณ 1.0 phr ให้ค่าความทนต่อแรงดึงสูงกว่าในกรณีที่ใช้ Struktol® 60 NS 3.0 phr ส่วนค่าการยืดฉีก จุดขาดมีค่าที่ใกล้เคียงกัน (ดังแสดงในรูปที่ 4.46 – 4.47) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Mathew และคณะ (2003) ที่กล่าวว่า ในการใช้สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ในยางผสม เมื่อปริมาณสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้เพิ่มขึ้น จะทำให้สมบัติของยางผสมดีขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นของสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้มากกว่าจุดที่เรียกว่า critical micelle concentration (CMC) สมบัติของยางผสมจะคงที่หรือบางครั้งสมบัติจะแย่ลง โดย Mathew และคณะได้ใช้สไตรีน-อะคริโลไนไตรล์โคพอลิเมอร์ (SAN) เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ในยางผสมระหว่างยางไนไตรล์ (NBR) กับพอลิสไตรีน พบว่า เมื่อใช้ SAN 1 % โดยน้ำหนัก ทำให้สมบัติต่างๆของยางผสม เช่น ความเค้น ฉีกขาด ความหนาแน่น ความทนต่อการฉีกขาด และความทนต่อแรงกระแทกมีค่าสูงสุด แต่เมื่อเพิ่มปริมาณมากขึ้น สมบัติดังกล่าวจะมีค่าคงที่

ตารางที่ 4.12 ความทนต่อแรงดึงและการยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรต่างๆ ที่อัตราส่วน 70/30 เมื่อผสม Struktol® 60 NS ปริมาณ 1.0 และ 3.0 phr

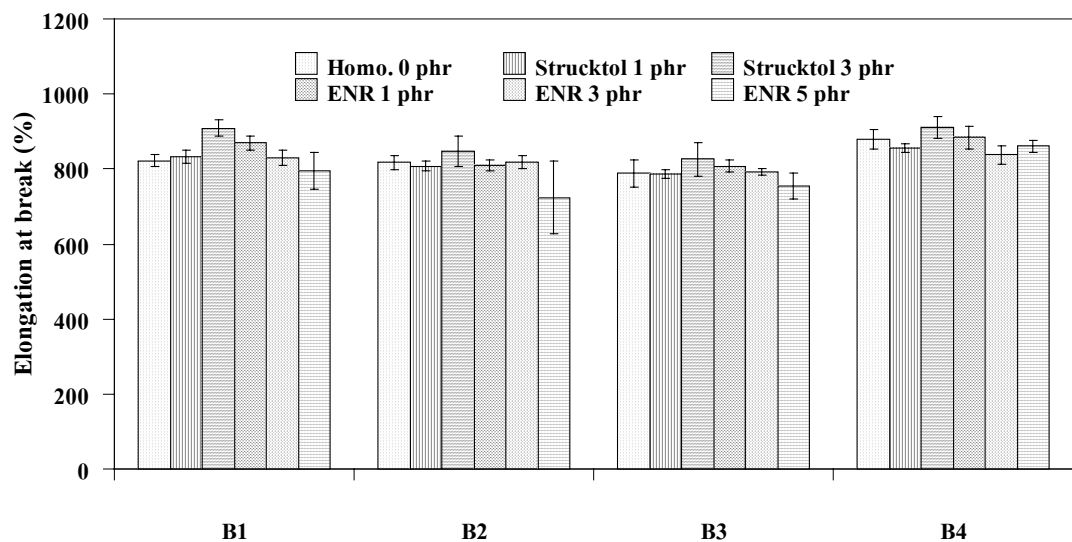
สูตร	ความทนต่อแรงดึง (MPa)		การยืด ณ จุดขาด (%)	
	คำนวณ	ผลที่ได้	คำนวณ	ผลที่ได้
B1-30	18.92	18.03 ± 0.92	833	822 ± 16
B1-30 (Struktol 1.0 phr)	18.92	17.84 ± 0.93	833	832 ± 18
B1-30 (Struktol 3.0 phr)	18.92	15.86 ± 0.54	833	909 ± 21
B2-30	20.43	18.33 ± 0.50	895	817 ± 18
B2-30 (Struktol 1.0 phr)	20.43	19.69 ± 0.64	895	808 ± 14
B2-30 (Struktol 3.0 phr)	20.43	17.50 ± 1.49	895	847 ± 41
B3-30	23.81	18.22 ± 1.13	864	788 ± 35
B3-30 (Struktol 1.0 phr)	23.81	20.59 ± 0.50	864	786 ± 12
B3-30 (Struktol 3.0 phr)	23.81	18.78 ± 1.36	864	826 ± 44
B4-30	23.91	19.01 ± 1.10	921	879 ± 25
B4-30 (Struktol 1.0 phr)	23.91	20.25 ± 0.42	921	855 ± 12
B4-30 (Struktol 3.0 phr)	23.91	19.54 ± 1.42	921	911 ± 30

ในการเรียกชื่อสูตร เช่น สูตร B1-30 (Struktol 1.0 phr) หมายถึง ยางผสมสูตร B1 ที่มีอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติต่อยางคลอโรซัลโฟเนตดพอลิเอทธิลีน เป็น 70/30 และมี Struktol® 60 NS 1.0 phr

ส่วนผลการทดสอบการบวมตัวในน้ำมันของยางผสมที่เติม Struktol® 60 NS ยางผสมมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรและน้ำหนักลดลง เมื่อเติม Struktol® 60 NS 1.0 phr และค่าการเปลี่ยนแปลงมีค่าน้อยกว่าในกรณีที่ใช้ Struktol® 60 NS 3.0 phr เล็กน้อย (แต่ยางแต่ละสูตรมีค่าการเปลี่ยนแปลงที่ใกล้เคียงกันทั้งที่เติม Struktol® 60 NS 1.0 และ 3.0 phr) ทั้งในน้ำมัน ASTM เบอร์ 1 และ IRM 903 แต่การเติม Struktol® 60 NS ไม่ได้ช่วยให้ยางผสมทนต่อน้ำมันได้ดีขึ้นมากนัก สืบเนื่องได้จากค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาตรและน้ำหนักที่มีค่าใกล้เคียงกันทั้งในกรณีที่ไม่เติมและไม่เติม Struktol® 60 NS และยางผสมที่เติม Struktol® 60 NS ทนต่อน้ำมัน IRM 903 ได้ดีกว่าน้ำมัน ASTM เบอร์ 1 โดยยางผสมสูตร B3 ทนต่อน้ำมันทั้งสองชนิดดีกว่ายางผสมสูตรอื่นๆ เช่นเดียวกับยางผสมที่ไม่เติม Struktol® 60 NS

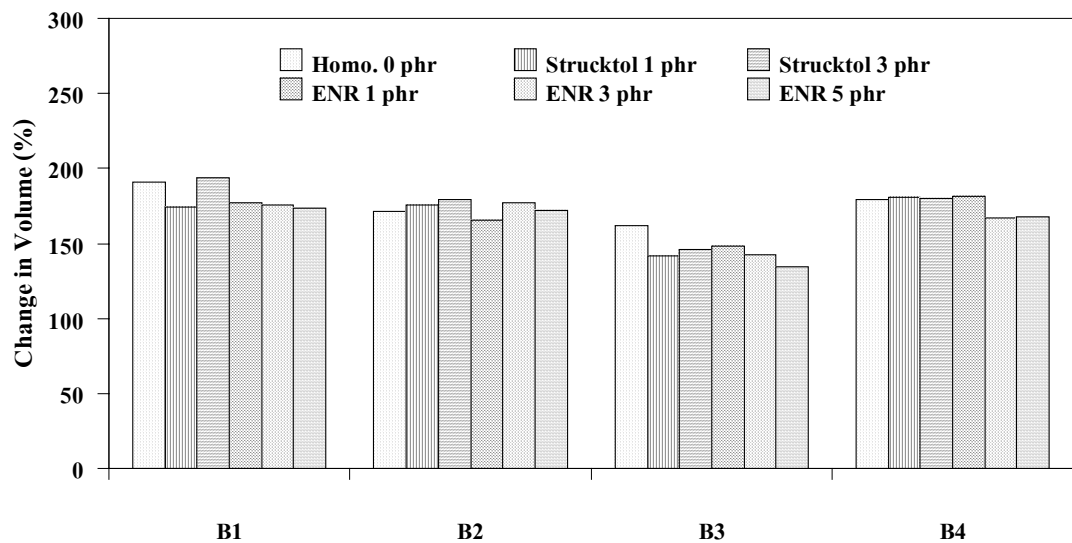


รูปที่ 4.46 ความทนต่อแรงดึงของยางผสมสูตรต่างๆ ที่อัตราส่วน 70/30 เมื่อเติม Struktol® 60 NS และ ENR ในปริมาณต่างๆ

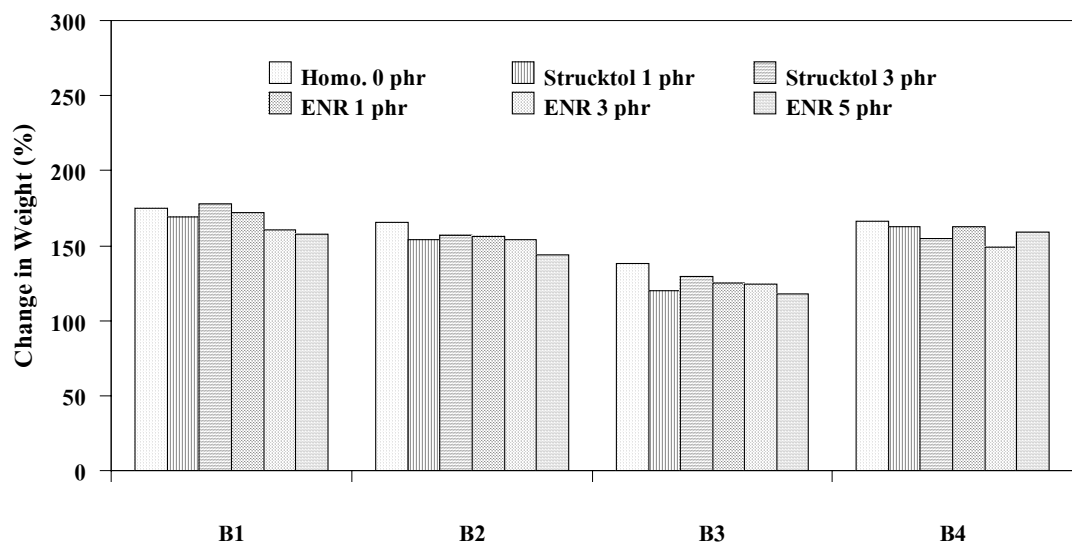


รูปที่ 4.47 ค่าการยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรต่างๆ ที่อัตราส่วน 70/30 เมื่อเติม Struktol® 60 NS และ ENR ในปริมาณต่างๆ

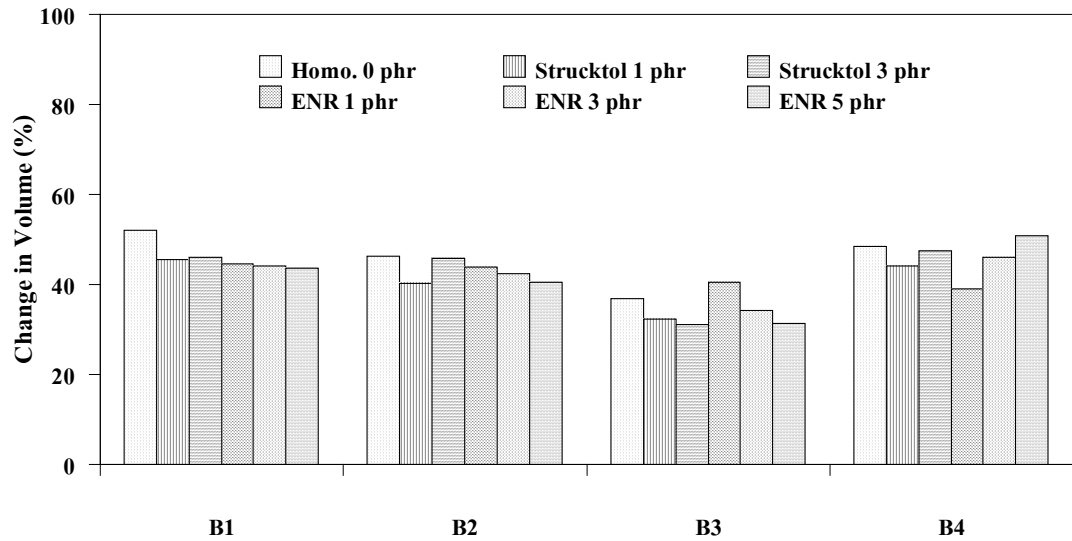
หมายเหตุ : Homo. 0 phr หมายถึง ยางผสมสูตรต่างๆ ที่อัตราส่วน 70/30 ที่ไม่เติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (ไม่เติม Struktol® 60 NS และยาง ENR)



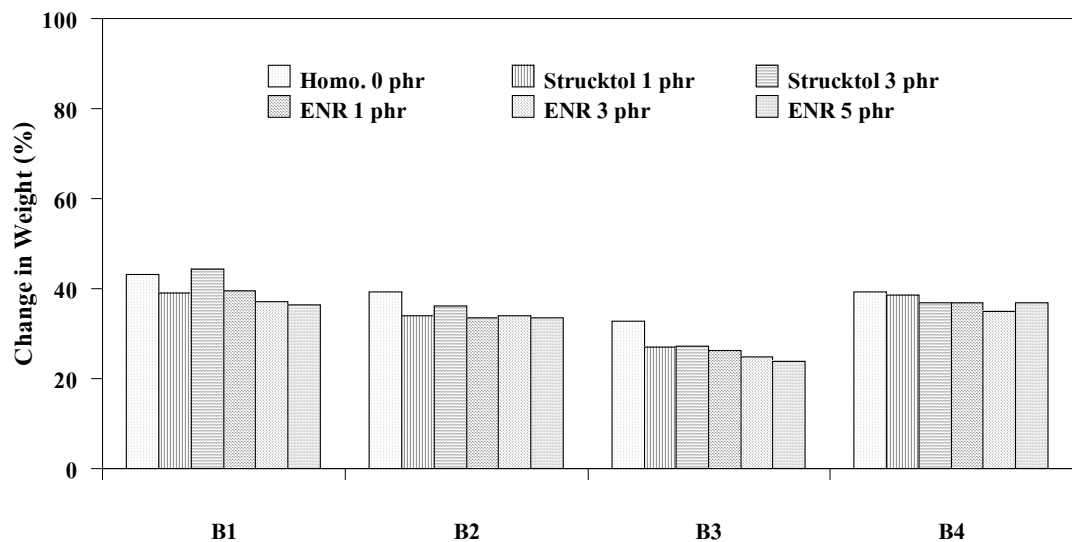
รูปที่ 4.48 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของยางผสมสูตรต่างๆ ที่อัตราส่วน 70/30 เมื่อเติม Struktol[®] 60 NS และ ENR ในปริมาณต่างๆ และแช่ในน้ำมัน ASTM เบอร์ 1 เป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิห้อง (25°C)



รูปที่ 4.49 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของยางผสมสูตรต่างๆ ที่อัตราส่วน 70/30 เมื่อเติม Struktol[®] 60 NS และ ENR ในปริมาณต่างๆ และแช่ในน้ำมัน ASTM เบอร์ 1 เป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิห้อง (25°C)



รูปที่ 4.50 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของยางผสมสูตรต่างๆ ที่อัตราส่วน 70/30 เมื่อเติม Struktol® 60 NS และ ENR ในปริมาณต่างๆ และแช่ในน้ำมัน IRM 903 เป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิห้อง (25°C)



รูปที่ 4.51 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของยางผสมสูตรต่างๆ ที่อัตราส่วน 70/30 เมื่อเติม Struktol® 60 NS และ ENR ในปริมาณต่างๆ และแช่ในน้ำมัน IRM 903 เป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิห้อง (25°C)

จากผลการทดสอบความต้านทานต่อโอโซนของยางผสมสูตร B5 พบว่า การเติม Struktol® 60 NS 3.0 phr ไม่ช่วยให้ยางผสมสูตร B5 มีความต้านทานต่อโอโซนดีขึ้น จึงได้ทดลองเติม Struktol® 60 NS 3.0 phr ลงในยางผสมสูตรอื่นๆ และทดลองเติม Struktol® 60 NS 1.0 phr ลงในยางผสมทุกสูตร ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.13 ซึ่งพบว่า เมื่อเวลา 96 ชั่วโมง ยางผสมทุกสูตรขาดเป็น 2 ส่วน (ดังรูปที่ 4.52) แต่เมื่อพิจารณาเวลาที่เริ่มแตกและความรุนแรงของรอยแตกก่อนขึ้นตัวอย่างขาด สูตร B3 เริ่มแตกก่อนและรอยแตกมีขนาดใหญ่เห็นได้ชัดเจนมากกว่าสูตรอื่นๆ ซึ่งสามารถสรุปความต้านทานต่อโอโซนของยางผสมสูตรต่างๆจากมากไปน้อยได้ดังนี้ $B4 > B1 > B2 > B3$ แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นว่า การเติม Struktol® 60 NS 3.0 phr ไม่ช่วยให้ยางผสมแต่ละสูตรทนต่อโอโซนได้ดีขึ้น

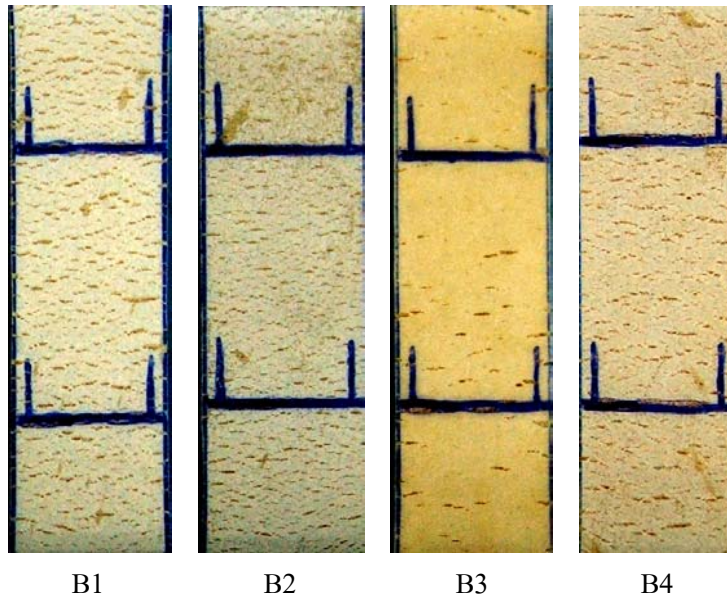
ส่วนในกรณีที่เติม Struktol® 60 NS 1.0 phr (ดังรูปที่ 4.53) พบว่า ยางผสมแต่ละสูตรมีรอยแตกที่มีขนาดเล็กและความรุนแรงน้อยกว่าในกรณีที่เติม Struktol® 60 NS 3.0 phr ดังนั้นการเติม Struktol® 60 NS 1.0 phr ทำให้ยางผสมทนต่อโอโซนได้ดีกว่ากรณีที่เติม Struktol® 60 NS 3.0 phr ซึ่งสามารถสรุปความต้านทานต่อโอโซนของยางผสมสูตรต่างๆที่เติม Struktol® 60 NS 1.0 phr จากมากไปน้อยได้ดังนี้ $B2 > B3 > B4 > B1$ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับยางผสมที่ไม่เติม Struktol® 60 NS นั้น จะเห็นว่า การเติม Struktol® 60 NS ไม่ได้ช่วยให้ยางผสมมีความต้านทานต่อโอโซนดีขึ้น

ตารางที่ 4.13 เวลาที่เริ่มแตกของยางผสมสูตรต่างๆ ที่อัตราส่วน 70/30 เมื่อเติม Struktol® 60 NS และอบในตู้อบโอโซนที่มีความเข้มข้นโอโซน 50 pphm ที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 96 ชั่วโมง

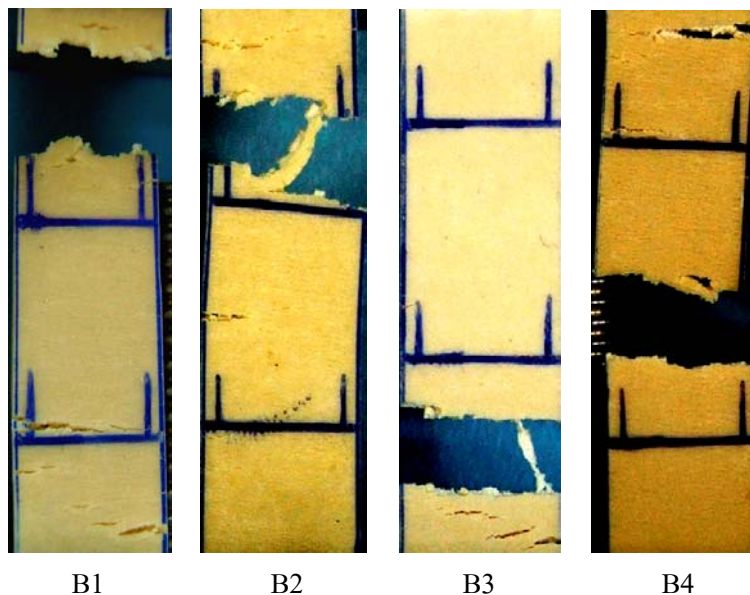
สูตร	เวลาที่เริ่มแตก (ชั่วโมง)	ลักษณะของชิ้นตัวอย่างเมื่ออบในตู้อบโอโซน
B1-30	16	4 ชั่วโมง เริ่มเปลี่ยนเป็นสีขาว 16 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตก 96 ชั่วโมง รอยแตกกระจายทั้งชิ้น แต่มีขนาดเล็ก
B1-30 (Strucktol 1.0 phr)	8	4 ชั่วโมง เปลี่ยนเป็นสีขาว 8 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตก 48 ชั่วโมง รอยแตกเป็นเส้นยาว 96 ชั่วโมง รอยแตกมีปริมาณมากและกระจายทั้งชิ้น
B1-30 (Strucktol 3.0 phr)	16	2 ชั่วโมง เป็นรอยขีดข่วน 16 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตก 48 ชั่วโมง รอยแตกเป็นเส้นยาว 96 ชั่วโมง ชิ้นตัวอย่างขาด
B2-30	24	2 ชั่วโมง เริ่มเปลี่ยนเป็นสีขาว 24 ชั่วโมง รอยแตกมีขนาดเล็กมาก 72 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตก แต่มีขนาดเล็กมาก 96 ชั่วโมง รอยแตกมีขนาดเล็ก ปริมาณมากและกระจายทั้งชิ้น
B2-30 (Strucktol 1.0 phr)	16	4 ชั่วโมง เปลี่ยนเป็นสีขาว 16 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตก 96 ชั่วโมง รอยแตกมีปริมาณมาก กระจายทั้งชิ้นตัวอย่าง
B2-30 (Sytrucktol 3.0 phr)	16	16 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตก 48 ชั่วโมง รอยแตกเป็นเส้นยาว 5 มิลลิเมตร 96 ชั่วโมง ชิ้นตัวอย่างขาด

ตารางที่ 4.13 (ต่อ)

สูตร	เวลาที่เริ่มแตก (ชั่วโมง)	ลักษณะของชิ้นตัวอย่างเมื่ออบในตู้อบไอโซน
B3-30	16	2 ชั่วโมง เริ่มเปลี่ยนเป็นสีขาว 16 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตก 96 ชั่วโมง รอยแตกเป็นเส้น
B3-30 (Strucktol 1.0 phr)	16	8 ชั่วโมง เปลี่ยนเป็นสีขาว 24 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตก 96 ชั่วโมง รอยแตกเป็นเส้นยาว
B3-30 (Strucktol 3.0 phr)	8	24 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตก 48 ชั่วโมง รอยแตกเป็นเส้น 96 ชั่วโมง ชิ้นตัวอย่างขาด
B4-30	16	4 ชั่วโมง เริ่มเปลี่ยนเป็นสีขาว 24 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตก 48 ชั่วโมง รอยแตกเป็นเส้นยาว
B4-30 (Strucktol 1.0 phr)	16	2 ชั่วโมง เริ่มเปลี่ยนเป็นสีขาว 24 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตก 96 ชั่วโมง รอยแตกเป็นเส้นยาว
B4-30 (Strucktol 3.0 phr)	24	8 ชั่วโมง เริ่มเปลี่ยนเป็นสีขาว 24 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตก 48 ชั่วโมง รอยแตกเป็นเส้นยาว 96 ชั่วโมง ชิ้นตัวอย่างขาด



รูปที่ 4.52 ลักษณะรอยแตกที่เกิดขึ้นของยางผสมสูตรต่างๆ ที่อัตราส่วน 70/30 เมื่อเติม Struktol[®] 60 NS 1 phr และอบในตู้อบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นเวลา 96 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 40°C และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 50 ppm (รอยขีดสีดำเข้มในแนวนอนและแนวตั้งเป็นรอยขีดจากปากกา)



รูปที่ 4.53 ลักษณะรอยแตกที่เกิดขึ้นของยางผสมสูตรต่างๆ ที่อัตราส่วน 70/30 เมื่อเติม Struktol[®] 60 NS 3 phr และอบในตู้อบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นเวลา 96 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 40°C และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 50 ppm (รอยขีดสีดำเข้มในแนวนอนและแนวตั้งเป็นรอยขีดจากปากกา)

จากผลการทดลองที่ได้กล่าวมา จะเห็นว่า การเติม Struktol® 60 NS 1.0 phr ทำให้ยางผสมมีสมบัติต่างๆ เช่น ความทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อโอโซนมีค่าสูงกว่าในกรณีที่ใช้ Struktol® 60 NS 3.0 phr เนื่องจาก Struktol® 60 NS 1.0 phr เป็นปริมาณที่พอดีที่จะเข้าไปอยู่ระหว่างเฟสยางธรรมชาติกับเฟสยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีน ทำให้ยางผสมมีแรงยึดระหว่างเฟสดีขึ้นและเฟสยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนมีขนาดเล็กลง ส่งผลให้ยางผสมเข้ากันได้มากขึ้นและยางผสมมีสมบัติต่างๆ เช่น ความทนต่อแรงดึง และความต้านทานต่อโอโซน มีค่าสูงขึ้น แต่เมื่อปริมาณ Struktol® 60 NS เพิ่มขึ้น อาจจะมีปริมาณ Struktol® 60 NS ที่ไม่สามารถเข้าไปอยู่ระหว่างเฟสได้รวมตัวกันเป็นไมเซลล์ (micelle) ซึ่งจะไปทำให้การยึดติดระหว่างเฟสแย่ง ส่งผลให้ความเข้ากันได้ของยางผสมลดลงและสมบัติดังกล่าวมีค่าลดลงหรือคงที่ (Asaletha et al., 1995)

สำหรับการทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอของยางผสมสูตร B4 ที่อัตราส่วน 70/30 เมื่อเติม Struktol® 60 NS พบว่า ยางผสมที่เติม Struktol® 60 NS 1.0 phr มีปริมาตรที่หายไปต่อ 1,000 รอบ 0.7024 ml และมีค่าดัชนีการสึกหรอ 17.98% ส่วนในกรณีที่เติม Struktol® 60 NS 3.0 phr มีปริมาตรที่หายไปต่อ 1,000 รอบ 0.6548 ml และมีค่าดัชนีการสึกหรอ 19.29% เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติม Struktol® 60 NS ซึ่งมีปริมาตรที่หายไปต่อ 1,000 รอบ 0.6700 ml และมีค่าดัชนีการสึกหรอ 18.85% จะเห็นว่า ผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่า การเติม Struktol® 60 NS ลงในยางผสม ไม่ช่วยให้ยางผสมมีความต้านทานต่อการสึกหรอดีขึ้น เนื่องจากสมบัติความทนต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการบวมแรง และความต้านทานต่อโอโซน มีผลต่อสมบัติความต้านทานต่อการสึก-หรอของยางผสม กล่าวคือ ถ้ายางผสมมีสมบัติความทนต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการบวมแรง และความต้านทานต่อโอโซนดี ยางผสมจะมีความต้านทานต่อการสึกหรอดีเช่นกัน (Mukhopadhyay and De, 1991)

ส่วนผลการทดสอบการผิรูปลถารแบบดึงของยางผสมสูตร B4 ที่อัตราส่วน 70/30 พบว่า ยางผสมมีการผิรูปลถารน้อยกว่ายางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีน แต่เมื่อเติม Struktol® 60 NS ทำให้ยางผสมมีการผิรูปลถารมากขึ้น แต่ยังไม่น้อยกว่ายางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีน กล่าวคือ ยางธรรมชาติมีการผิรูปลถาร 0.74% ยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนมีการผิรูปลถาร 5.76% ยางผสมที่ไม่เติม Struktol® 60 NS มีการผิรูปลถาร 1.49% แต่เมื่อเติม Struktol® 60 NS 1.0 phr มีการผิรูปลถาร 1.70% และเมื่อเติม Struktol® 60 NS 3.0 phr มีการผิรูปลถาร 1.68% แสดงว่า Struktol® 60 NS ไม่มีผลต่อการผิรูปลถารดึงของยางผสม และการที่ยางผสมมีอัตราส่วนของยางธรรมชาติมากกว่ายางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีน ทำให้ยางผสมมีการผิรูปลถารน้อยกว่ายางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีน เพราะยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนเป็นยางที่มีความต้านทานต่อการผิรูปลถารต่ำ

3.2 อิทธิพลของยางธรรมชาติฟ็อกซีไดซ์

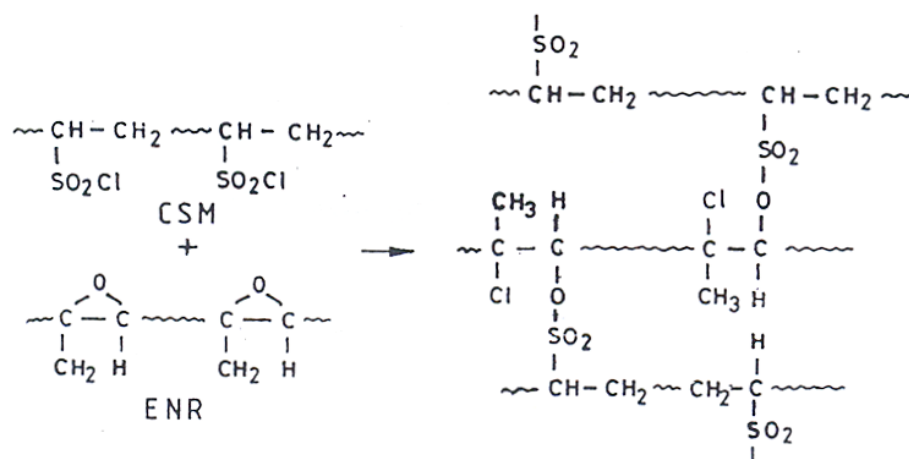
การเติมยาง ENR (Epoxidized natural rubber ชนิด Epoxyprene[®] 25) ลงในยางผสม เพื่อช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ของยางผสมให้ดีขึ้น เพราะจากงานวิจัยของ De และคณะ (1991) พบว่า ยาง ENR และยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีนสามารถผสมเข้ากันได้ดี ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ยาง ENR เป็นสารที่ช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ เช่นเดียวกัน Struktol[®] 60 NS (โดยกำหนดใช้สัญลักษณ์แทนการเรียกชื่อสูตร เช่น สูตร B1-30 (ENR 0 phr) หมายถึง ยางผสมสูตร B1 ที่มีอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติต่อยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีน เป็น 70/30 และมียาง ENR 0 phr)

3.2.1 ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึง

ยางผสมสูตรต่างๆ ที่มีการเติมยาง ENR มีค่าความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาด ดังแสดงในตารางที่ 4.14 พบว่า ยางผสมแต่ละสูตรมีความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเติมยาง ENR ลงในยางผสม โดยเฉพาะในยางผสมสูตร B3 และ B4 การเติมยาง ENR เพียง 1.0 phr ทำให้ยางผสมมีความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นถึง 51% และ 42% ตามลำดับ แต่เมื่อปริมาณของยาง ENR เพิ่มขึ้นมากกว่า 1.0 phr ความทนต่อแรงดึงของยางผสมไม่ได้เพิ่มขึ้น กล่าวคือ ค่าที่ได้มีค่าเกือบคงที่ และที่ปริมาณยาง ENR 5.0 phr ยางผสมบางสูตรมีค่าลดลง เช่นเดียวกับกรณีที่ใช้ Struktol[®] 60 NS (ดังแสดงในรูปที่ 4.46) ส่วนค่าการยืด ณ จุดขาดของยางผสมแต่ละสูตรมีค่าใกล้เคียงกันไม่ว่าจะเติมหรือไม่เติม ENR แต่มีแนวโน้มเหมือนกับค่าความทนต่อแรงดึง คือ เมื่อปริมาณยาง ENR เพิ่มขึ้นมากกว่า 1.0 phr ค่าการยืด ณ จุดขาด มีแนวโน้มที่จะมีค่าลดลงเล็กน้อย (ดังรูปที่ 4.47) แต่อย่างไรก็ตาม การเติมยาง ENR เป็นสารที่ช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ ให้ค่าความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาดสูงกว่าในกรณีที่ใช้ Struktol[®] 60 NS เป็นสารที่ช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ และยาง ENR ที่เติมลงในยางผสมในปริมาณเล็กน้อย สามารถเพิ่มค่าความทนต่อแรงดึงของยางผสมได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mathew และคณะดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.1.2

สาเหตุที่ทำให้ยางผสมมีค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น เมื่อเติมยาง ENR ในปริมาณน้อยๆ เนื่องจากยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีนจะเกิดปฏิกิริยากับยาง ENR โดยจะเกิดการเชื่อมโยงขึ้นระหว่างหมู่ $-SO_2Cl$ ของยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีนกับหมู่ฟ็อกซีไดซ์ของยาง ENR เป็นการเชื่อมโยงชนิดซัลโฟเนต จากงานวิจัยของ Antony และคณะ (2001) พบว่า เมื่อนำยางผสมระหว่างยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีนกับยาง ENR ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR พบว่า พิกการยืดของหมู่ SO_2 เกิดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง กล่าวคือ ก่อนเกิดการเชื่อมโยง พิกดังกล่าวจะปรากฏที่ตำแหน่ง 1160 และ 1375 cm^{-1} แต่เมื่อเกิดการเชื่อมโยงจะปรากฏที่ตำแหน่ง 1196

และ 1142 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งของพีคที่เกิดจากการสั่นของหมู่ SO_2 ในซัลโฟเนต ปฏิบัติการที่คาดว่าเกิดขึ้นระหว่างยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีนกับยาง ENR แสดงได้ดังรูปที่ 4.54 (Antony et al., 2001)



รูปที่ 4.54 ปฏิบัติการระหว่างยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีนกับยาง ENR

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ทำให้ยาง ENR และยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีนผสมเข้ากันได้ดี ความเข้ากันได้ของยางทั้งสองชนิดขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของยางผสม ปริมาณหมู่อีพอกไซด์ในยาง ENR และปริมาณคลอรีนในยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีน ซึ่งจากการทดลองที่ได้ทำการผสมยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีนกับยาง ENR ชนิด ENR 25 (Epoxyrene[®] 25) และชนิด ENR 50 (Epoxyrene[®] 50) ที่อัตราส่วนระหว่างยาง ENR กับยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีนเท่ากับ 70/30 แล้วนำไปทดสอบความทนต่อแรงดึง พบว่า ยางผสมที่ใช้ยาง ENR 25 ให้ความทนต่อแรงดึงดีกว่ายางผสมที่ใช้ ENR 50 ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ยาง ENR ชนิด ENR 25 (หรือ Epoxyrene[®] 25) เป็นสารที่ช่วยเพิ่มความเข้ากันได้

เนื่องจากยาง ENR จะเข้าไปอยู่ระหว่างเฟสทั้งสอง (เฟสของยางธรรมชาติและเฟสของยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีน) ทำให้แรงตึงผิวระหว่างเฟส (interfacial tension) มีค่าลดลง และทำให้แรงยึดติดระหว่างเฟส (interfacial strength) มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ยางผสมเข้ากันได้มากขึ้น เมื่อมีแรงกระทำในขณะดึงยึด แรงดังกล่าวจะถูกถ่ายเทจากเฟสของยางธรรมชาติไปยังเฟสของยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีนผ่านทางยาง ENR ทำให้ยางผสมทนต่อแรงดึงได้ดีขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของยาง ENR มากขึ้น จะทำให้มียาง ENR มากเกินไปที่จะสามารถเข้าไปอยู่ระหว่างเฟสได้ ทำให้ส่วนที่เกินเกิดการรวมกันเป็นเฟสใหม่ขึ้นมา ซึ่งเฟสใหม่นี้จะทำให้ผิวระหว่างเฟสของยางธรรมชาติกับเฟสของยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีนลื่นหรือเป็นจุดอ่อนในยาง-

ผสม มีผลให้ยางผสมมีความทนต่อแรงดึงลดลง (Kiatkamjornwong and Pairpisit, 2004) จากเหตุผลดังที่กล่าวมา นอกจากทำให้มีสมบัติความทนต่อแรงดึงดีขึ้นแล้ว ยังทำให้สมบัติอื่นๆ เช่น ความทนต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการบวมแรง ความต้านทานต่อการบวมแรงด้วยความร้อน มีสมบัติที่ดีขึ้นเช่นกัน

ตารางที่ 4.14 ความทนต่อแรงดึงและการยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรต่างๆ ที่อัตราส่วน 70/30 เมื่อเติมยาง ENR ในปริมาณต่างๆ

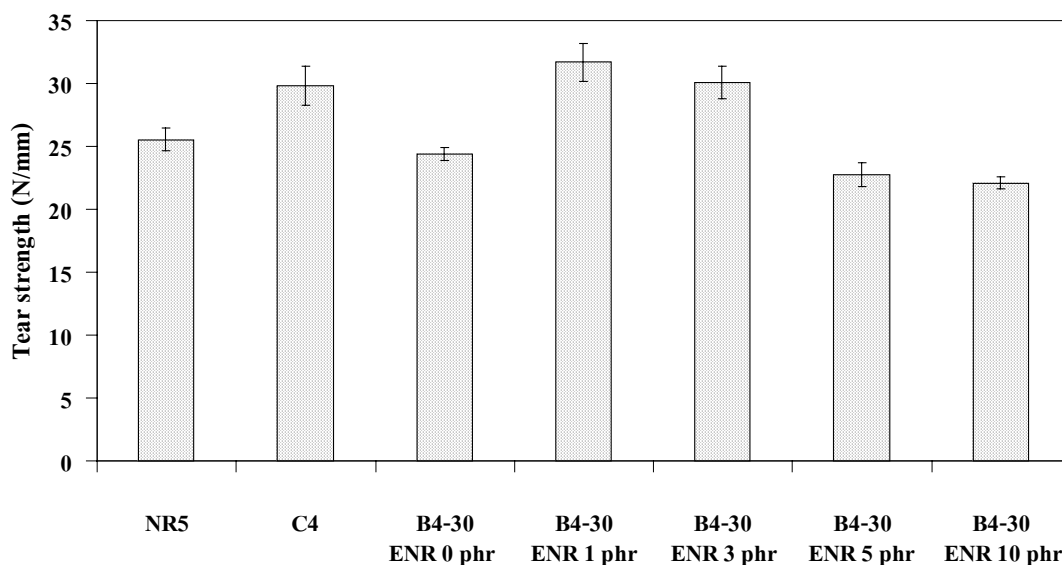
สูตร	ความทนต่อแรงดึง (MPa)		การยืด ณ จุดขาด (%)	
	คำนวณ	ผลที่ได้	คำนวณ	ผลที่ได้
B1-30	18.92	18.03 ± 0.92	833	822 ± 16
B1-30(ENR 1.0 phr)	19.15	21.64 ± 0.87	842	869 ± 20
B1-30(ENR 3.0 phr)	19.61	22.15 ± 0.97	860	830 ± 19
B1-30(ENR 5.0 phr)	20.07	22.04 ± 0.73	878	795 ± 49
B2-30	20.43	18.33 ± 0.50	895	817 ± 18
B2-30(ENR 1.0 phr)	20.66	24.15 ± 0.51	904	809 ± 15
B2-30(ENR 3.0 phr)	21.12	23.34 ± 1.04	922	819 ± 17
B2-30(ENR 5.0 phr)	21.58	23.59 ± 1.12	940	724 ± 96
B3-30	23.81	18.22 ± 1.13	864	788 ± 35
B3-30(ENR 1.0 phr)	24.04	27.52 ± 0.60	873	808 ± 17
B3-30(ENR 3.0 phr)	24.50	27.74 ± 0.88	891	792 ± 9
B3-30(ENR 5.0 phr)	24.96	26.05 ± 0.89	909	754 ± 35
B4-30	23.91	19.01 ± 1.10	921	879 ± 25
B4-30(ENR 1.0 phr)	24.14	27.00 ± 0.61	930	884 ± 31
B4-30(ENR 3.0 phr)	24.60	26.68 ± 0.71	948	838 ± 25
B4-30(ENR 5.0 phr)	25.06	24.33 ± 0.94	966	861 ± 16

3.2.2 ผลการทดสอบความทนต่อการฉีกขาด

การทดสอบความทนต่อการฉีกขาด ได้ทำการทดสอบยางผสมสูตร B4 เพียงสูตรเดียว เพราะจากผลการทดสอบสมบัติต่างๆ เช่น สมบัติความทนต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการบ่มเร่งด้วยความร้อน ความทนต่อการฉีกขาด และการบวมตัวในน้ำมันของยางผสมสูตร B4 ทั้งสูตรที่เติมและไม่เติม Struktol® 60 NS ยางผสมสูตร B4 ให้ผลการทดสอบสมบัติที่ค่อนข้างดีกว่าสูตรอื่นๆ จึงเลือกใช้ยางผสมสูตร B4 ในการทดสอบสมบัติความทนต่อการฉีกขาด เพื่อศึกษาอิทธิพลของยาง ENR ที่มีต่อสมบัติดังกล่าวของยางผสม จากผลการทดสอบ พบว่า การเติมยาง ENR 1.0 phr ทำให้ยางผสมมีความทนต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้นถึง 30% แต่เมื่อปริมาณยาง ENR เพิ่มขึ้น ค่าความทนต่อการฉีกขาดกลับมีค่าลดลง (ดังแสดงในตารางที่ 4.15 และรูปที่ 4.55) เนื่องจากยาง ENR ปริมาณ 1.0 phr เป็นปริมาณที่พอดีที่ยาง ENR สามารถเข้าไปอยู่ระหว่างเฟสของยางธรรมชาติกับเฟสของยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทรีนได้ ทำให้ยางผสมมีความทนต่อการฉีกขาดดีขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณมากขึ้น (ปริมาณมากกว่าจุด CMC) ยาง ENR ที่เหลือจะรวมตัวกันอยู่ในเฟสของยางธรรมชาติแทน ทำให้ยางผสมมีค่าความทนต่อการฉีกขาดต่ำลง (Mathew and Thomas, 2003)

ตารางที่ 4.15 ความทนต่อการฉีกขาดของยางผสมสูตรต่างๆ ที่อัตราส่วน 70/30 เมื่อเติม ENR ในปริมาณต่างๆ

สูตร	จำนวน	ค่าที่ได้จริง (N/mm)
NR5	-	25.55 ± 0.92
C4	-	29.82 ± 1.58
B4-30 (ENR 0 phr)	26.83	24.41 ± 0.51
B4-30 (ENR 1.0 phr)	27.08	31.69 ± 1.52
B4-30 (ENR 3.0 phr)	27.57	30.08 ± 1.28
B4-30 (ENR 5.0 phr)	28.07	22.77 ± 0.92
B4-30 (ENR 10.0 phr)	29.30	22.11 ± 0.49
B4 (NR/ENR/CSM = 65/5/30)	26.79	23.04 ± 0.79
B4 (NR/ENR/CSM = 60/10/30)	26.75	23.70 ± 0.66
B4 (NR/ENR/CSM = 50/20/30)	26.66	24.30 ± 1.30



รูปที่ 4.55 ความทนต่อการฉีกขาดของยางผสมสูตร B4 อัตราส่วน 70/30 เมื่อเติม ENR ในปริมาณต่างๆ

3.2.3 ผลการทดสอบการบ่มเร่งด้วยความร้อน

การทดสอบความต้านทานต่อการบ่มเร่งด้วยความร้อน ให้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.16 และ 4.17 พบว่า การเติมยาง ENR ลงในยางผสมแต่ละสูตร ทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงหลังการบ่มเร่งของยางผสมแต่ละสูตร มีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างชัดเจน (แต่ละสูตรมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่า 30%) เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ได้เติมยาง ENR โดยยางผสมสูตร B1, B2 และ B4 มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด เมื่อเติมยาง ENR ลงไป 1.0 phr ส่วนสูตร B3 มีค่าสูงสุด เมื่อเติมยาง ENR 3.0 phr (ดังรูปที่ 4.56) และเมื่อพิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความทนต่อแรงดึงหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนพบว่า ยาง ENR ช่วยทำให้ยางผสมแต่ละสูตรมีการเปลี่ยนแปลงน้อยลง (ไม่เกิน 5% ยกเว้นสูตร B1 มีการเปลี่ยนแปลงมากกว่า 5%) เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ได้เติมยาง ENR โดยในยางผสมสูตร B1 และ B4 มีค่าความทนต่อแรงดึงสูงขึ้น หลังการบ่มเร่ง (ดังรูปที่ 4.57)

ส่วนค่าการยืด ณ จุดขาดหลังการบ่มเร่ง จะมีค่าที่ใกล้เคียงกันทั้งในกรณีที่ไม่เติมยาง ENR และไม่เติมยาง ENR โดยยางผสมสูตร B1, B2 และ B4 มีค่าลดลงเล็กน้อย เมื่อปริมาณยาง ENR เพิ่มขึ้นแต่ยางผสมสูตร B3 ให้ค่าการยืด ณ จุดขาดหลังการบ่มเร่งสูงสุด เมื่อเติมยาง ENR 3.0 phr และสูตรนี้มีค่าต่ำกว่าสูตรอื่นๆ (ดังรูปที่ 4.58) ค่าการยืด ณ จุดขาดของแต่ละสูตรมีค่าลดลงหลังการบ่มเร่ง และการเติมยาง ENR ไม่ช่วยให้ค่าเปลี่ยนแปลงลดลงมากนัก เพราะในบางสูตร เช่น สูตร B1, B2 และ B4 เมื่อเติมยาง ENR 1.0 phr มีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าในกรณีที่ไม่เติมยาง ENR (ยกเว้นสูตร B3 ค่าการเปลี่ยนแปลงลดลง เมื่อเติมยาง ENR) แต่ในสูตร B1, B2 และ B3 ค่าการ

เปลี่ยนแปลงมีค่าลดลง เมื่อยาง ENR เพิ่มขึ้น และสูตร B3 มีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าสูตรอื่นๆ (ดังรูปที่ 4.59)

แต่อย่างไรก็ตาม การเติมยาง ENR ทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาดหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนมีค่าสูงขึ้น และทำให้ยางผสมมีแนวโน้มมีการเปลี่ยนแปลงหลังการบ่มเร่งลดลง (ในบางสูตรมีสมบัติดังกล่าวดีขึ้นหลังการบ่มเร่ง) แสดงว่า ยาง ENR ช่วยทำให้ยางผสมมีความต้านทานต่อการบ่มเร่งด้วยความร้อนได้ดีขึ้น เนื่องจากการเติมยาง ENR ลงในยางผสม ทำให้แรงตึงผิวระหว่างเฟส (interfacial tension) ของยางผสมลดลงและค่าการยึดติดระหว่างเฟส (interfacial adhesion) มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เฟสกระจายมีขนาดเล็กลง ยางผสมมีความเข้ากันได้มากขึ้น ทำให้มีความต้านทานต่อความร้อนดีขึ้น (Sirisinha, 2004) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sirqueira และ Soares (2003) ที่ทำยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน-มอนอเมอร์ (EPDM) ซึ่งพบว่า เมื่อเติม EPDM ลงในยางผสม จะทำให้ยางผสมเข้ากันได้มากขึ้น และเมื่อนำไปบ่มเร่งด้วยความร้อน ยางผสมที่มีความเข้ากันได้มีความต้านทานต่อการบ่มเร่งด้วยความร้อนดีกว่ายางผสมที่เข้ากันไม่ได้

ตารางที่ 4.16 ความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรต่างๆ ที่อัตราส่วน 70/30 เมื่อเติม ENR ในปริมาณต่างๆ หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 7 วัน

สูตร	ความทนต่อแรงดึง (MPa)		การยืด ณ จุดขาด (%)	
	จำนวน	ผลที่ได้	จำนวน	ผลที่ได้
B1-30 (ENR 0 phr)	18.23	17.61 ± 0.88	796	724 ± 23
B1-30 (ENR 1 phr)	18.48	24.09 ± 0.92	805	719 ± 15
B1-30 (ENR 3 phr)	18.97	23.07 ± 1.03	822	710 ± 15
B1-30 (ENR 5 phr)	19.46	23.51 ± 0.85	840	721 ± 12
B2-30 (ENR 0 phr)	19.65	16.39 ± 1.44	810	678 ± 14
B2-30 (ENR 1 phr)	19.89	23.73 ± 1.03	818	668 ± 13
B2-30 (ENR 3 phr)	20.39	22.76 ± 1.03	836	690 ± 8
B2-30 (ENR 5 phr)	20.88	22.90 ± 1.37	853	639 ± 14
B3-30 (ENR 0 phr)	22.80	12.49 ± 2.14	810	524 ± 29
B3-30 (ENR 1 phr)	23.04	26.14 ± 1.37	818	600 ± 16

ตารางที่ 4.16 (ต่อ)

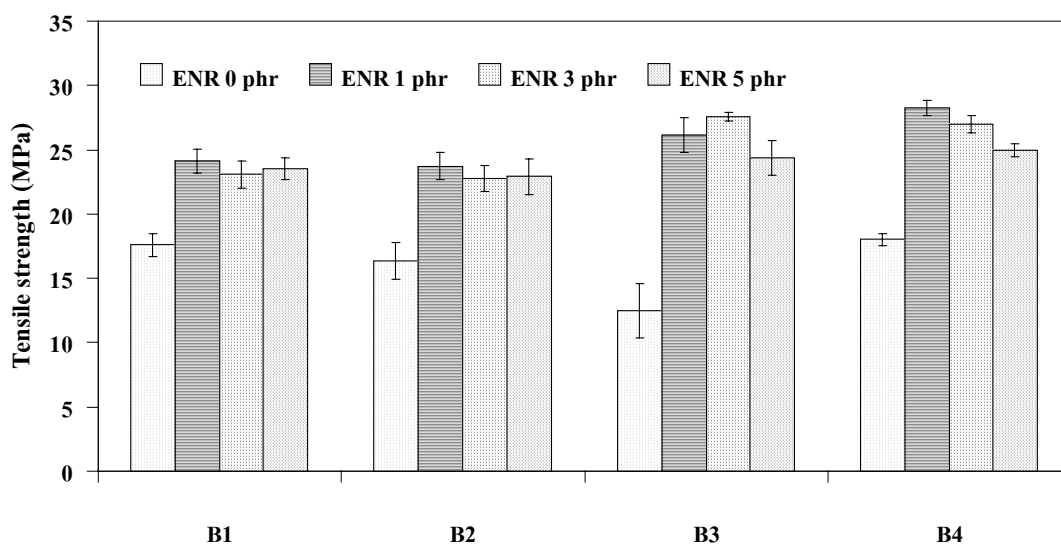
สูตร	ความทนต่อแรงดึง (MPa)		การยืด ณ จุดขาด (%)	
	คำนวณ	ผลที่ได้	คำนวณ	ผลที่ได้
B3-30 (ENR 3 phr)	23.54	27.60 ± 0.34	836	622 ± 10
B3-30 (ENR 5 phr)	24.03	24.36 ± 1.35	853	597 ± 13
B4-30 (ENR 0 phr)	24.95	18.03 ± 0.45	819	718 ± 9
B4-30 (ENR 1 phr)	25.20	28.26 ± 0.58	828	721 ± 21
B4-30 (ENR 3 phr)	25.69	27.00 ± 0.66	846	712 ± 9
B4-30 (ENR 5 phr)	26.19	24.99 ± 0.50	863	705 ± 5

ตารางที่ 4.17 การเปรียบเทียบค่าความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรต่างๆ ที่อัตราส่วน 70/30 เมื่อเติม ENR ในปริมาณต่างๆ หลังการบ่มแรงด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 7 วัน

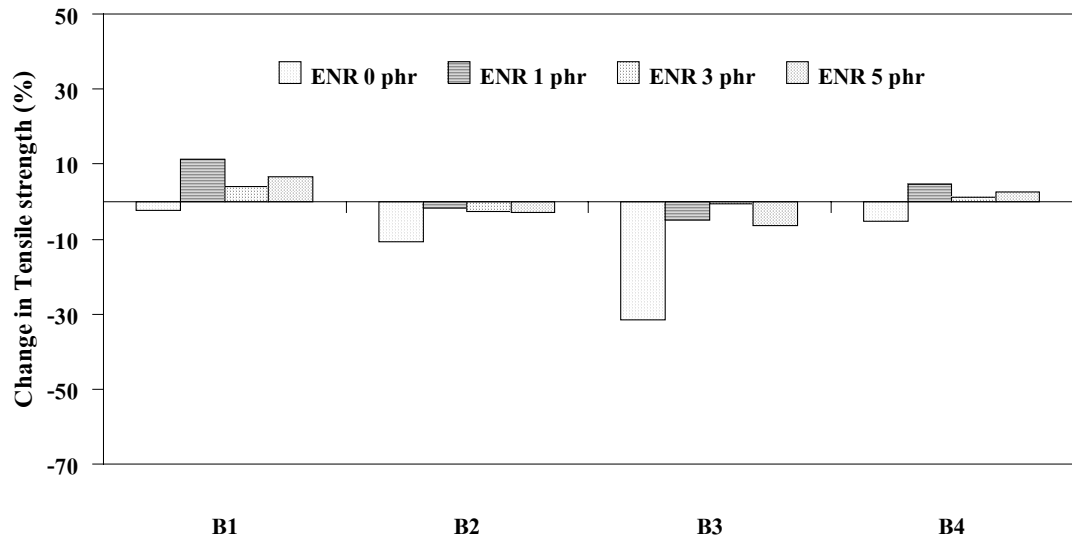
สูตร	ความทนต่อแรงดึง			การยืด ณ จุดขาด		
	ก่อนบ่มแรง (MPa)	หลังบ่มแรง (MPa)	%การเปลี่ยนแปลง	ก่อนบ่มแรง (%)	หลังบ่มแรง (%)	%การเปลี่ยนแปลง
B1-30 (ENR 0 phr)	18.03	17.61	-2.33	822	724	-11.92
B1-30 (ENR 1 phr)	21.64	24.09	11.32	869	719	-17.26
B1-30 (ENR 3 phr)	22.15	23.07	4.15	830	710	-14.46
B1-30 (ENR 5 phr)	22.04	23.51	6.67	795	721	-9.31
B2-30 (ENR 0 phr)	18.33	16.39	-10.58	818	678	-17.11
B2-30 (ENR 1 phr)	24.15	23.73	-1.74	809	668	-17.43
B2-30 (ENR 3 phr)	23.34	22.76	-2.49	819	690	-15.75
B2-30 (ENR 5 phr)	23.59	22.90	-2.92	724	639	-11.74
B3-30 (ENR 0 phr)	18.22	12.49	-31.45	788	524	-33.50
B3-30 (ENR 1 phr)	27.52	26.14	-5.01	808	600	-25.74
B3-30 (ENR 3 phr)	27.74	27.60	-0.50	792	622	-21.46
B3-30 (ENR 5 phr)	26.05	24.36	-6.49	754	597	-20.82

ตารางที่ 4.17 (ต่อ)

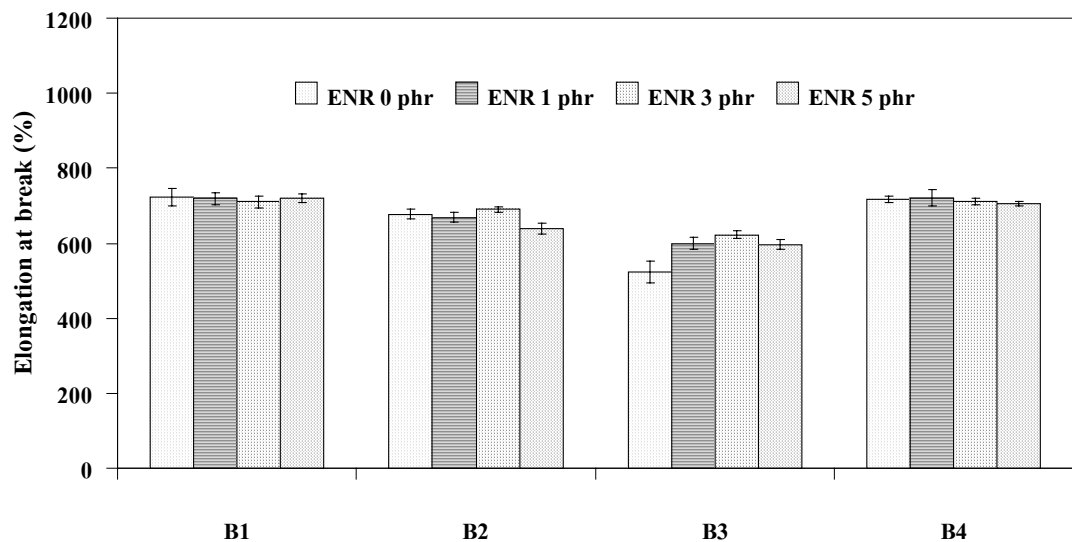
สูตร	ความทนต่อแรงดึง			การยืด ณ จุดขาด		
	ก่อนบ่ม แรง (MPa)	หลัง บ่มแรง (MPa)	%การ เปลี่ยนแปลง	ก่อนบ่ม แรง (%)	หลัง บ่มแรง (%)	%การ เปลี่ยนแปลง
B4-30 (ENR 0 phr)	19.01	18.03	-5.16	879	718	-18.32
B4-30 (ENR 1 phr)	27.00	28.26	4.67	884	721	-18.44
B4-30 (ENR 3 phr)	26.68	27.00	1.20	838	712	-15.04
B4-30 (ENR 5 phr)	24.33	24.99	2.71	861	705	-18.12



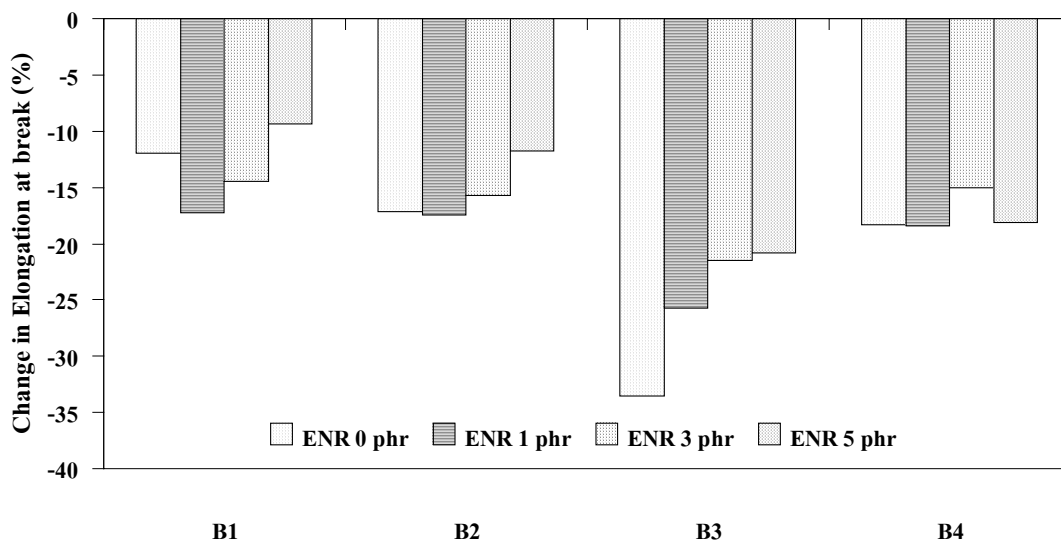
รูปที่ 4.56 ความทนต่อแรงดึงของยางผสมสูตรต่างๆ ที่อัตราส่วน 70/30 เมื่อเติม ENR ในปริมาณต่างๆ หลังการบ่มแรงด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 7 วัน



รูปที่ 4.57 การเปลี่ยนแปลงค่าความทนต่อแรงดึงของยางผสมสูตรต่างๆ ที่อัตราส่วน 70/30 เมื่อเติม ENR ในปริมาณต่างๆ หลังการบ่มแรงด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 7 วัน



รูปที่ 4.58 ค่าการยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรต่างๆ ที่อัตราส่วน 70/30 เมื่อเติม ENR ในปริมาณต่างๆ หลังการบ่มแรงด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 7 วัน



รูปที่ 4.59 การเปลี่ยนแปลงค่าการยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรต่างๆ ที่อัตราส่วน 70/30 เมื่อเติม ENR ในปริมาณต่างๆ หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 7 วัน

3.2.4 ผลการทดสอบการบวมตัวในน้ำมัน

จากผลการทดลอง (ดังแสดงในรูปที่ 4.48 – 4.51) พบว่า ยางผสมที่เติมยาง ENR มีความต้านทานต่อการบวมตัวดีกว่ายางผสมที่ไม่มีการเติมสารที่ช่วยเพิ่มความเข้ากันได้และยางผสมที่เติม Struktol® 60 NS เพราะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรและน้ำหนักน้อยกว่า ทั้งในน้ำมัน ASTM เบอร์ 1 และในน้ำมัน IRM 903 และความต้านทานต่อการบวมตัวในน้ำมันของยางผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณยาง ENR เพิ่มขึ้น เพราะยาง ENR มีความเป็นขั้วเช่นเดียวกับยางคลอโรซัลโฟเนตเตดพอลิเอทิลีน จึงทำให้ทนต่อน้ำมันได้ (เสาวนีย์, 2540) และยางผสมสูตร B3 มีความต้านทานต่อการบวมตัวดีกว่ายางผสมสูตรอื่นๆ เนื่องจากยางผสมสูตร B3 มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูง ซึ่งเมื่อพิจารณาจากสูตรของยางผสม จะพบว่า สูตร B3 มีการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันปกติ ซึ่งปริมาณกำมะถันที่ใช้มากกว่าสูตรอื่นๆ จึงมีการเชื่อมโยงเกิดขึ้นมาก ทำให้ยางผสมบวมตัวในน้ำมันได้น้อย

3.2.5 ผลการทดสอบความต้านทานต่อโอโซน

ส่วนยางผสมที่เติมยาง ENR มีความต้านทานต่อโอโซนได้ดีขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากเวลาที่เริ่มเกิดรอยแตกครั้งแรกและความรุนแรงของรอยแตกที่เกิดขึ้น กล่าวคือ เมื่อเติมยาง ENR ลงในยางผสมแต่ละสูตร ทำให้เวลาที่เริ่มเกิดรอยแตกนานขึ้นและรอยแตกมีปริมาณน้อยลง มีความลึก

ของรอยแตกน้อยลง (ยกเว้นสูตร B1 และ B4 มีเวลาที่เริ่มเกิดรอยแตกเท่ากับเวลาที่เริ่มเกิดรอยแตกของยางผสมที่ไม่เติมสารที่ช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ แต่มีความรุนแรงของรอยแตกน้อยกว่ายางผสมที่ไม่เติมสารที่ช่วยเพิ่มความเข้ากันได้) และพบว่า เมื่อปริมาณยาง ENR เพิ่มขึ้น ความต้านทานต่อโอโซนของยางผสมแต่ละสูตรลดลง (ยกเว้นสูตร B1 ที่เติมยาง ENR 3.0 phr ทนต่อโอโซนดีที่สุด) ซึ่งสังเกตได้จากเวลาที่เริ่มเกิดรอยแตกที่เร็วขึ้น (ดังแสดงในตารางที่ 4.18) และความรุนแรงของรอยแตกที่มากขึ้น (ดังรูปที่ 4.60 – 4.63) โดยสูตร B2, B3 และ B4 ที่เติมยาง ENR 1.0 phr ทนต่อโอโซนได้ดีที่สุด

เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับกรณีที่ใช้ Struktol® 60 NS พบว่า ยางผสมแต่ละสูตรที่เติมยาง ENR มีความต้านทานต่อโอโซนได้ดีกว่ายางผสมที่เติม Struktol® 60 NS ถึงแม้ว่า ในยางผสมบางสูตร (เช่น สูตร B1 และ B4) มีเวลาที่เริ่มเกิดรอยแตกเท่ากับเวลาที่เริ่มเกิดรอยแตกของยางผสมที่มีการเติม Struktol® 60 NS แต่ความรุนแรงของรอยแตกน้อยกว่ามาก เพราะในยางผสมที่มีการเติม Struktol® 60 NS มีรอยแตกมากกว่าและมีความลึกของรอยแตกมากกว่า แต่อย่างไรก็ตาม ความต้านทานต่อโอโซนของยางผสมที่มีการเติม Struktol® 60 NS และยาง ENR เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ จะมีความต้านทานต่อโอโซนมากหรือน้อยยังขึ้นอยู่กับสูตรของยางผสมด้วย

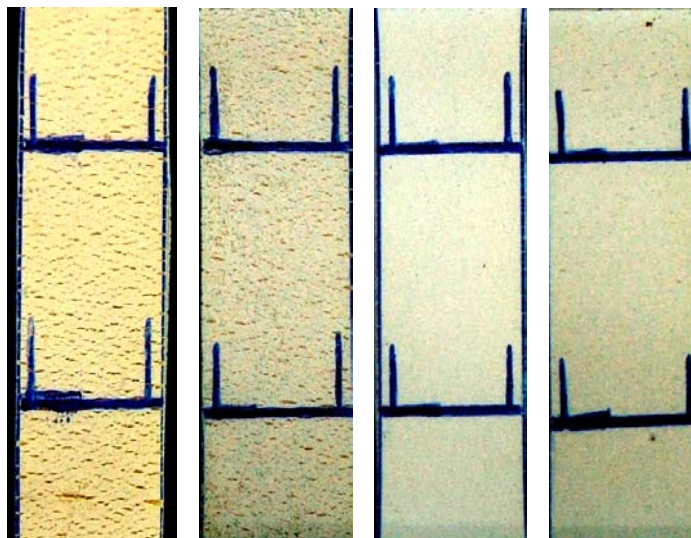
การเติมยาง ENR ลงในยางผสม ทำให้ยางผสมนั้นมีความต้านทานต่อโอโซนได้ดีขึ้น เนื่องจากยาง ENR จะไปทำให้เฟสยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีน (เฟสกระจาย) ที่กระจายอยู่ในเฟสยางธรรมชาติ มีขนาดเล็กลงและทำให้เฟสดังกล่าวกระจายตัวดีขึ้น เมื่อเฟสกระจายมีขนาดเล็กลงและกระจายตัวดีขึ้น จะไปขัดขวางการโตของรอยแตกที่เกิดขึ้นในเฟสยางธรรมชาติ ทำให้รอยแตกมีขนาดเล็กและทำให้ยางทนต่อโอโซนได้ดีขึ้น (Chang และคณะ, 1999) แต่ความต้านทานต่อโอโซนยังขึ้นอยู่กับปริมาณของยาง ENR ที่ใช้ด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 4.18 เวลาที่เริ่มแตกของยางผสมสูตรต่างๆ ที่อัตราส่วน 70/30 เมื่อเติม ENR และอบในตู้อบโอโซนที่มีความเข้มข้นโอโซน 50 ppbm ที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 96 ชั่วโมง

สูตร	เวลาที่เริ่มแตก (ชั่วโมง)	ลักษณะของชิ้นตัวอย่างเมื่ออบในตู้อบโอโซน
B1-30	16	4 ชั่วโมง เริ่มเปลี่ยนเป็นสีขาว 16 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตก 96 ชั่วโมง รอยแตกกระจายทั้งชิ้น แต่มีขนาดเล็ก
B1-30 (ENR 1.0 phr)	16	4 ชั่วโมง เปลี่ยนเป็นสีขาว 48 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตก 96 ชั่วโมง รอยแตกกระจายทั้งชิ้น
B1-30 (ENR 3.0 phr)	72	4 ชั่วโมง เปลี่ยนเป็นสีขาว 96 ชั่วโมง รอยแตกชัดขึ้น แต่มีขนาดเล็กและตื้น
B1-30 (ENR 5.0 phr)	48	4 ชั่วโมง เปลี่ยนเป็นสีขาว 96 ชั่วโมง รอยแตกชัดขึ้น แต่มีขนาดเล็กและตื้น
B2-30	24	2 ชั่วโมง เริ่มเปลี่ยนเป็นสีขาว 24 ชั่วโมง รอยแตกมีขนาดเล็กมาก 72 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตก แต่มีขนาดเล็กมาก 96 ชั่วโมง รอยแตกมีขนาดเล็ก ปริมาณมากและกระจายทั้งชิ้น
B2-30 (ENR 1.0 phr)	-	ไม่แตก แต่เปลี่ยนเป็นสีขาว
B2-30 (ENR 3.0 phr)	48	4 ชั่วโมง เปลี่ยนเป็นสีขาว 96 ชั่วโมง รอยแตกมีปริมาณน้อยและมีขนาดเล็ก
B2-30 (ENR 5.0 phr)	48	4 ชั่วโมง เปลี่ยนเป็นสีขาว 96 ชั่วโมง รอยแตกมีปริมาณน้อยและมีขนาดเล็ก
B3-30	16	2 ชั่วโมง เริ่มเปลี่ยนเป็นสีขาว 16 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตก 96 ชั่วโมง รอยแตกเป็นเส้น
B3-30 (ENR 1.0 phr)	-	ไม่แตก แต่เปลี่ยนเป็นสีขาว

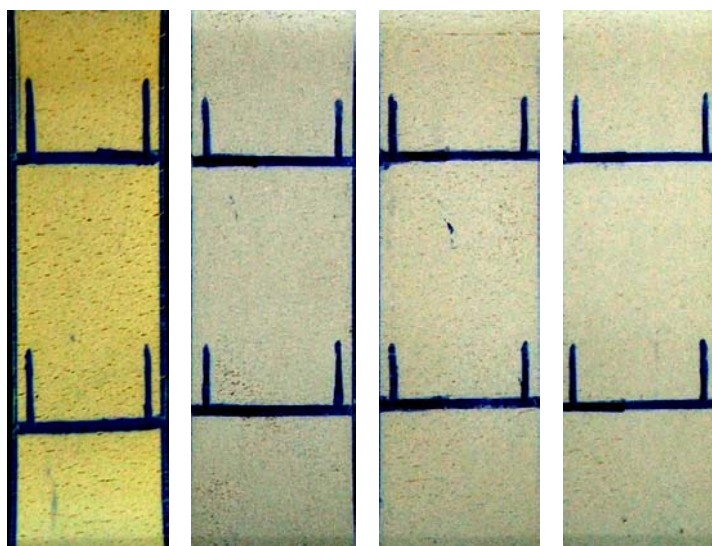
ตารางที่ 4.18 (ต่อ)

สูตร	เวลาที่เริ่มแตก (ชั่วโมง)	ลักษณะของชั้นตัวอย่างเมื่ออบในตู้อบไอโซน
B3-30 (ENR 3.0 phr)	96	8 ชั่วโมง เปลี่ยนเป็นสีขาว 96 ชั่วโมง รอยแตกมีขนาดเล็กมาก
B3-30 (ENR 5.0 phr)	48	4 ชั่วโมง เปลี่ยนเป็นสีขาว 72 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตก 96 ชั่วโมง รอยแตกมีขนาดเล็ก กระจายทั้งชั้นตัวอย่าง
B4-30	16	4 ชั่วโมง เริ่มเปลี่ยนเป็นสีขาว 24 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตก 48 ชั่วโมง รอยแตกเป็นเส้นยาว
B4-30 (ENR 1.0 phr)	-	ไม่แตก แต่เปลี่ยนเป็นสีขาว
B4-30 (ENR 3.0 phr)	-	ไม่แตก แต่เปลี่ยนเป็นสีขาว
B4-30 (ENR 5.0 phr)	16	4 ชั่วโมง เริ่มเปลี่ยนเป็นสีขาว 24 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตก



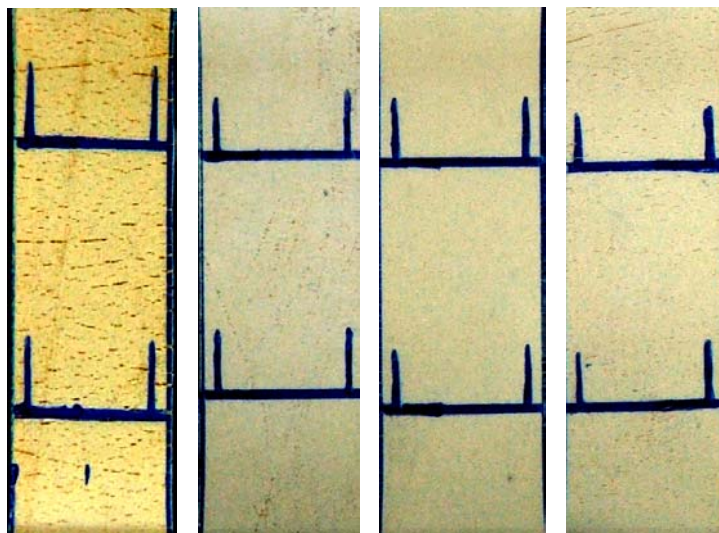
ENR 0 phr ENR 1.0 phr ENR 3.0 phr ENR 5.0 phr

รูปที่ 4.60 ลักษณะรอยแตกที่เกิดขึ้นของยางผสมสูตร B1 ที่อัตราส่วน 70/30 เมื่อเติม ENR และอบในตู้อบโอโซนเป็นเวลา 96 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 40°C และความเข้มข้นของโอโซน 50 ppm (รอยขีดสีดำเข้มในแนวนอนและแนวตั้งเป็นรอยขีดจากปากกา)



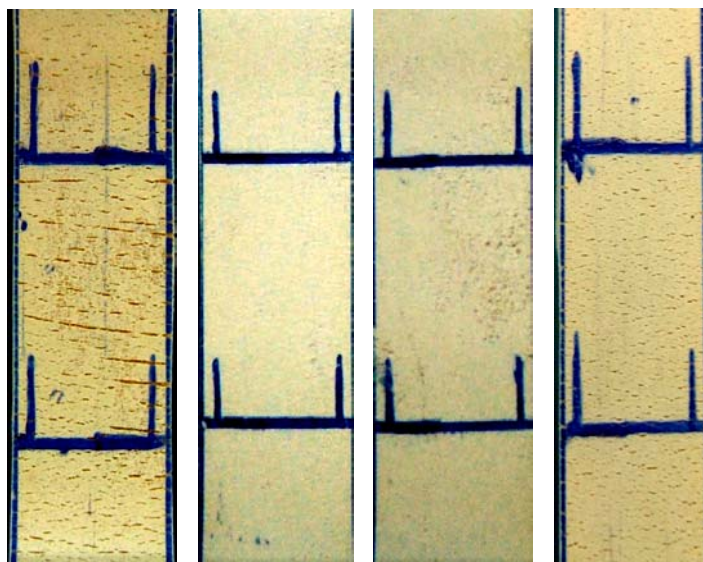
ENR 0 phr ENR 1.0 phr ENR 3.0 phr ENR 5.0 phr

รูปที่ 4.61 ลักษณะรอยแตกที่เกิดขึ้นของยางผสมสูตร B2 ที่อัตราส่วน 70/30 เมื่อเติม ENR และอบในตู้อบโอโซนเป็นเวลา 96 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 40°C และความเข้มข้นของโอโซน 50 ppm (รอยขีดสีดำเข้มในแนวนอนและแนวตั้งเป็นรอยขีดจากปากกา)



ENR 0 phr ENR 1.0 phr ENR 3.0 phr ENR 5.0 phr

รูปที่ 4.62 ลักษณะรอยแตกที่เกิดขึ้นของยางผสมสูตร B3 ที่อัตราส่วน 70/30 เมื่อเติม ENR และอบในตู้อบโอโซนเป็นเวลา 96 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 40°C และความเข้มข้นของโอโซน 50 ppm (รอยขีดสีดำเข้มในแนวนอนและแนวตั้งเป็นรอยขีดจากปากกา)



ENR 0 phr ENR 1.0 phr ENR 3.0 phr ENR 5.0 phr

รูปที่ 4.63 ลักษณะรอยแตกที่เกิดขึ้นของยางผสมสูตร B4 ที่อัตราส่วน 70/30 เมื่อเติม ENR และอบในตู้อบโอโซนเป็นเวลา 96 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 40°C และความเข้มข้นของโอโซน 50 ppm (รอยขีดสีดำเข้มในแนวนอนและแนวตั้งเป็นรอยขีดจากปากกา)

3.2.6 ผลการทดสอบการสึกหรอ

การทดสอบการสึกหรอเป็นวิธีการวัดความต้านทานต่อการสึกหรอของยาง โดย การหาปริมาณที่หายไปต่อ 1,000 รอบของยางตัวอย่าง และหาค่าดัชนีการสึกหรอของยาง ซึ่งค่า ดัชนีการสึกหรอเป็นค่าที่แสดงถึงสัดส่วนเปรียบระหว่างปริมาณที่หายไปของยางมาตรฐานกับ ปริมาณที่หายไปของยางตัวอย่าง ในการทดสอบการสึกหรอได้ทำการทดสอบยางผสมที่อัตราส่วน ระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีนเป็น 70/30 และเลือกยางผสมสูตร B4 ในการศึกษาผลของยาง ENR และ Struktol® 60 NS ที่มีต่อความต้านทานการสึกหรอของยาง ผสม ส่วนยางมาตรฐานมีค่าปริมาณที่หายไปเฉลี่ยต่อ 1,000 รอบ เท่ากับ 0.1263 กรัม ผลการ ทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 4.19 พบว่า ยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีนมีความต้านทานต่อ การสึกหรอดีกว่ายางธรรมชาติ สังเกตได้จากค่าดัชนีการสึกหรอที่มีค่าสูงและปริมาณที่หายไป เฉลี่ยต่อ 1,000 รอบมีค่าน้อย ส่วนยางผสมมีความต้านทานการสึกหรอดีกว่ายางธรรมชาติ (ค่า ดัชนีการสึกหรอมีค่าต่ำและปริมาณที่หายไปต่อ 1,000 รอบมีค่ามาก) เพราะยางผสมไม่เข้าเป็นเนื้อ เดียวกัน มีการแยกเป็นสองเฟส (ผลการตรวจสอบความเข้ากันได้จะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 3.5.8 เป็น ลำดับต่อไป) แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสจึงมีค่าต่ำ ทำให้เกิดการหลุดออกจากกันได้ง่าย (Findik et al., 2004) โดยยางผสมสูตร B1 มีความต้านทานต่อการสึกหรอดีที่สุด

เมื่อเติมยาง ENR ลงในยางผสมสูตร B4 ทำให้ค่าดัชนีการสึกหรอของยางผสม สูตร B4 มีค่าสูงขึ้นและปริมาณที่หายไปเฉลี่ยต่อ 1,000 รอบมีค่าลดลง แสดงว่า ยาง ENR ทำให้ ยางผสมมีความต้านทานต่อการสึกหรอดีขึ้น และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยาง ENR ในยางผสม เพิ่มขึ้น เนื่องจากยาง ENR ทำให้ยางผสมเข้ากันได้มากขึ้น ส่งผลให้มีค่าความทนต่อแรงดึง ความ ทนต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อการบ่มเร่งด้วยความร้อน และความต้านทานต่อโอโซนสูงขึ้น ทำให้ยางผสมมีความต้านทานต่อการสึกหรอด้วยเช่นเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ De และ Mukhopadhyay (1991) ซึ่งได้ทำการทดลองหาค่าความต้านทานต่อการสึกหรอของยางผสม ระหว่างยางธรรมชาติอีพ็อกไซค์กับยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีน และเมื่อเปรียบเทียบกับ กรณีที่เติม Struktol® 60 NS พบว่า ยางผสมที่เติมยาง ENR ด้านทานต่อการสึกหรอได้ดีกว่ายางผสม ที่เติม Struktol® 60 NS

จากผลการทดลอง จะเห็นว่า ยางผสมมีความต้านทานต่อการสึกหรอต่ำกว่ายาง ธรรมชาติ และเมื่อเติมยาง ENR ลงในยางผสม จะทำให้ยางผสมมีความต้านทานต่อการสึกหรอ ดีขึ้น

ตารางที่ 4.19 ค่าดัชนีการสึกหรอของยางธรรมชาติ ยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธีลีน ยางผสม
ที่อัตราส่วน 70/30 สูตรต่างๆ ทั้งที่เติมและไม่เติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้

สูตร	จำนวนรอบการ Running – in (รอบ)	จำนวนรอบการ ทดสอบจริง (รอบต่อครั้ง)	ปริมาตรที่หายไป ไปเฉลี่ยต่อ 1,000 รอบ (ml)	ดัชนีการ สึกหรอ (%)
NR1	2,000	500	0.3480	36.29
NR2	2,000	500	0.4434	28.48
NR5	750	250	0.5196	24.31
C1	2,000	500	0.1298	97.30
C4	2,000	500	0.1308	96.56
B1-30	2,000	500	0.4760	26.53
B2-30	750	250	0.6528	19.35
B3-30	750	250	0.7556	16.72
B4-30	750	250	0.6700	18.85
B4-30 (ENR 1.0 phr)	2,000	500	0.5016	25.18
B4-30 (ENR 3.0 phr)	2,000	500	0.4274	29.55
B4-30 (ENR 5.0 phr)	2,000	500	0.3798	33.25

3.5.7 ผลการทดสอบการผิครูปถาวรแบบดึง

การทดสอบการผิครูปถาวรเป็นการวัดการผิครูปถาวรของยางตัวอย่าง โดยในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบการผิครูปถาวรแบบดึง (Tension set) และทดสอบแบบส่วนยืดคงที่ (Constant deflection test) ซึ่งได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.20 พบว่า ยางธรรมชาติมีการผิครูปถาวรแบบดึงน้อยกว่ายางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธีลีน ส่วนยางผสมทั้งที่เติมและไม่เติมยาง ENR มีการผิครูปถาวรอยู่ระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธีลีน กล่าวคือ ยางผสมมีการผิครูปถาวรน้อยกว่ายางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธีลีนและยางผสมที่เติม Struktol® 60 NS แต่มากกว่ายางธรรมชาติ และการเติมยาง ENR ไม่มีผลมากนักต่อสมบัติการผิครูปของยางผสม เพราะค่าการผิครูปถาวรที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากยางผสมที่ทำการทดสอบ เป็นยางผสมที่อัตราส่วน 70/30 ซึ่งมีปริมาณยางธรรมชาติมากกว่ายางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธีลีน ยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธีลีนจึงมีผลต่อยางผสมน้อย ทำให้ยางผสมมีการผิครูปถาวรน้อยกว่า

เพราะยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทรีนเป็นยางที่มีความต้านทานต่อการผิกรูปแบบถาวรต่ำกว่ายางชนิดอื่นๆ (Mukhopadhyay and De, 1991)

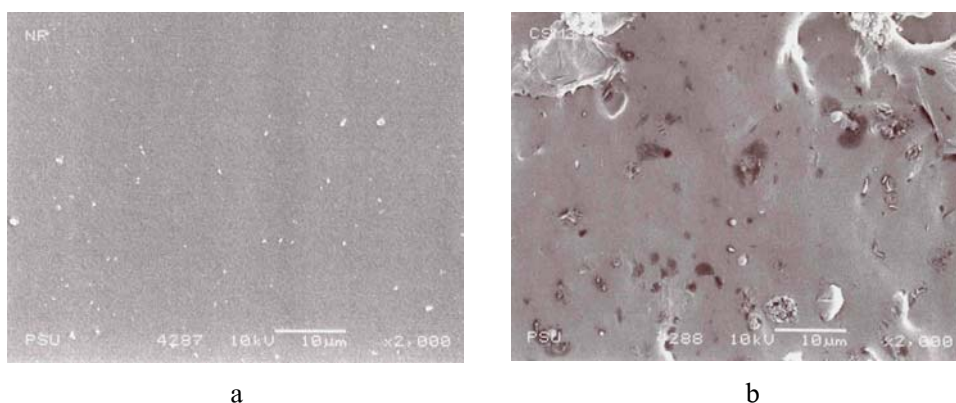
ตารางที่ 4.20 ค่าการคงตัวแบบดึงของยางธรรมชาติ ยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทรีน ยางผสมที่อัตราส่วน 70/30 สูตรต่างๆ ทั้งที่เติมและไม่เติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้

สูตร	การผิกรูปถาวรแบบดึง (%)
NR1	0.61 ± 0.39
NR2	0.85 ± 0.69
NR5	0.74 ± 0.47
C1	3.54 ± 0.68
C4	5.76 ± 0.95
B1-30	1.67 ± 0.54
B2-30	1.53 ± 0.43
B3-30	1.25 ± 0.31
B4-30	1.49 ± 0.28
B4-30 (ENR 1.0 phr)	1.49 ± 0.48
B4-30 (ENR 3.0 phr)	1.43 ± 0.50
B4-30 (ENR 5.0 phr)	1.92 ± 0.32

4. ผลการวิเคราะห์ความเข้ากันได้ด้วยเครื่อง SEM และ DMTA

4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM เป็นการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางตัวอย่าง ทั้งยางธรรมชาติ ยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีน และยางผสมแต่ละสูตร จากผลการตรวจสอบ พบว่า ยางธรรมชาติและยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนมีเพียงเฟสเดียว ดังแสดงในรูปที่ 4.64



รูปที่ 4.64 ลักษณะสัณฐานวิทยา (a) ยางธรรมชาติ และ (b) ยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีน เมื่อตรวจสอบด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า

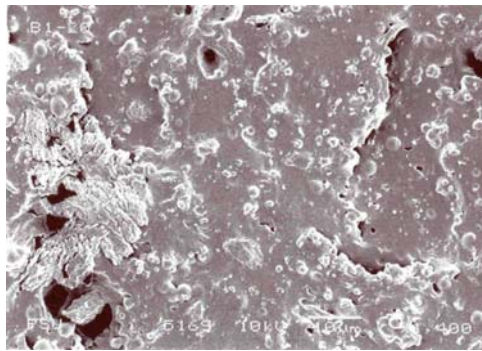
ส่วนยางผสมแต่ละสูตรนั้นจะเห็นการแยกเฟสอย่างชัดเจนในยางผสมตั้งแต่อัตราส่วน 80/20 – 50/50 โดยเฟสยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีน (เรียกว่า เฟสกระจาย) จะกระจายตัวอยู่ในเฟสต่อเนื่องที่เป็นเฟสยางธรรมชาติ เฟสยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนมีอนุภาคเป็นทรงกลมและทรงรี (ดังรูปที่ 4.65 – 4.68) แสดงให้เห็นว่า ยางผสมไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน เนื่องจากยางทั้งสองชนิดมีความเป็นขั้วแตกต่างกันมาก กล่าวคือ ยางธรรมชาติเป็นยางที่ไม่มีขั้ว ส่วนยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนเป็นยางที่มีขั้ว ทำให้แรงดึงดูดระหว่างทั้งสองเฟสมีค่าสูงและแรงยึดติดระหว่างเฟสมีค่าต่ำ (Morton, 1987) โดยในการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM จะทำการย้อมชิ้นตัวอย่างด้วยออกสเมียมเตตรอกไฮไดรด์ ซึ่งออกสเมียมเตตรอกไฮไดรด์จะไปทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ที่มีในเฟสยางธรรมชาติ เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM ทำให้มองเห็นลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นตัวอย่างที่เป็นยางผสมได้ชัดเจนขึ้น (บริเวณที่เป็นเฟสยางธรรมชาติจะมีสีเข้มกว่าบริเวณเฟสยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีน)

ยางผสมแต่ละสูตรมีขนาดอนุภาคยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.21 พบว่า ยางผสมที่มีปริมาณยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีน 20% – 50% มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.55 – 2.45 μm และในยางผสมแต่ละสูตร ปริมาณยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนไม่มีผลต่อขนาดอนุภาคมากนัก กล่าวคือ ขนาดอนุภาคของยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อปริมาณยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนมากกว่า 50% ไม่สามารถวัดขนาดอนุภาคยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนได้ และพบว่า ขนาดอนุภาคเล็กที่สุดและขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด มีค่าแตกต่างกันมาก และยางผสมสูตร B1 มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าสูตรอื่นๆ และสูตร B2 มีขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด

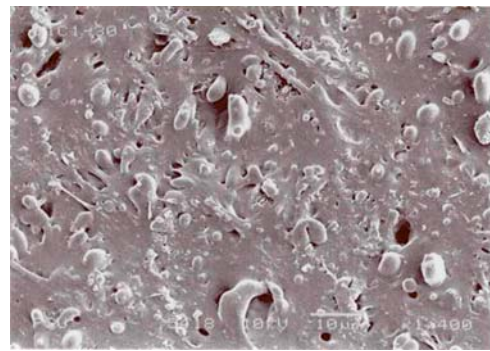
เมื่อเติม Struktol[®] 60 NS 3.0 phr ลงในยางผสม Struktol[®] 60 NS ไม่ช่วยให้ยางผสมสูตร B5 มีความเข้ากันได้มากขึ้น ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.68 ว่า ยางผสมยังคงแยกเป็นสองเฟสอย่างชัดเจน และขนาดอนุภาคของยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนยังคงมีขนาดที่ใกล้เคียงกับขนาดอนุภาคของยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนในยางผสมสูตร B1 ที่ไม่มีการเติม Struktol[®] 60 NS

ตารางที่ 4.21 ขนาดอนุภาคของยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนในยางผสมสูตรต่างๆ

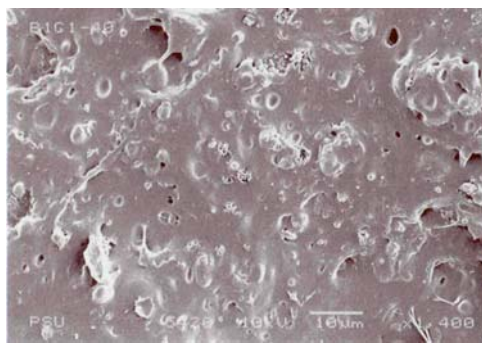
สูตร	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (μm)	ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (μm)	ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (μm)
B1-20	1.49 ± 0.54	0.72	3.34
B1-30	1.72 ± 0.86	0.61	5.75
B1-40	1.68 ± 0.73	0.62	4.58
B1-50	1.48 ± 0.57	0.71	3.49
B2-20	2.17 ± 0.78	0.89	4.85
B2-30	2.32 ± 1.04	0.41	5.30
B2-40	2.40 ± 0.86	0.77	5.63
B2-50	2.22 ± 0.80	0.65	4.74
B3-20	2.04 ± 0.83	0.70	4.92
B3-30	2.45 ± 1.02	0.90	5.43
B3-40	2.25 ± 0.79	0.81	5.67
B3-50	1.98 ± 0.85	0.70	4.57
B4-20	1.55 ± 0.69	0.56	4.85
B4-30	2.02 ± 1.07	0.52	5.17
B4-40	1.94 ± 1.09	0.52	6.45
B5-20	2.00 ± 0.78	0.80	4.81
B5-30	1.71 ± 0.74	0.68	4.55
B5-40	1.89 ± 0.74	0.69	4.25
B5-50	1.89 ± 0.67	0.75	3.79



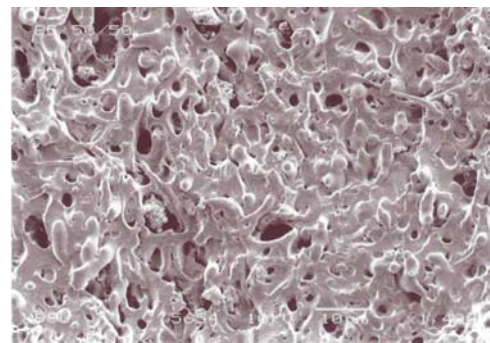
(a)



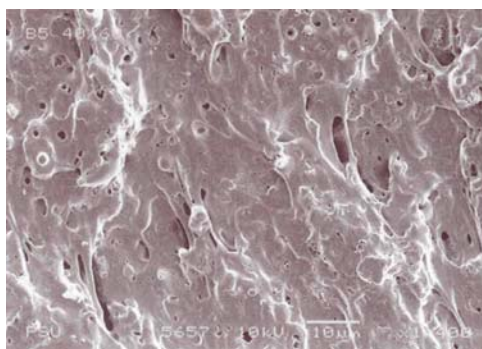
(b)



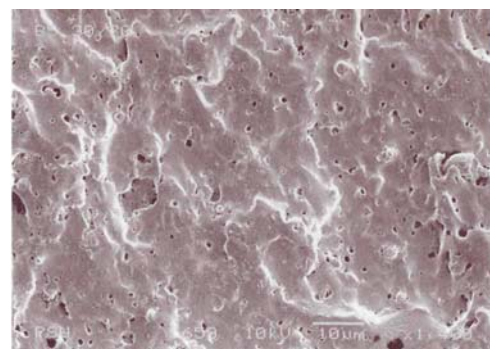
(c)



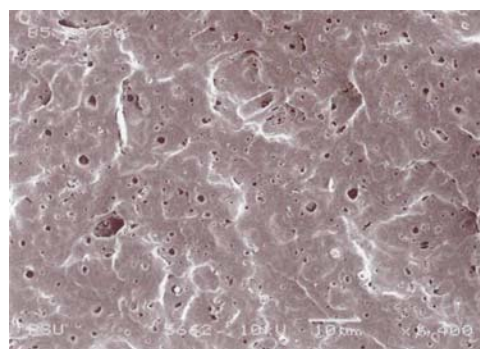
(d)



(e)



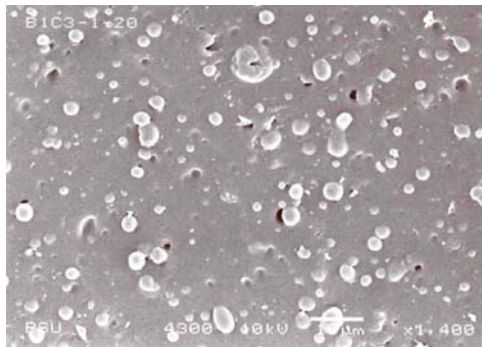
(f)



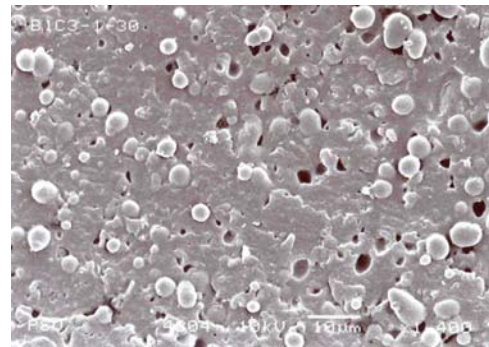
(g)

รูปที่ 4.65 รูป SEM ของยางผสมสูตร B1 ที่อัตราส่วนต่างๆ คือ (a) 80/20, (b) 70/30, (c) 60/40,

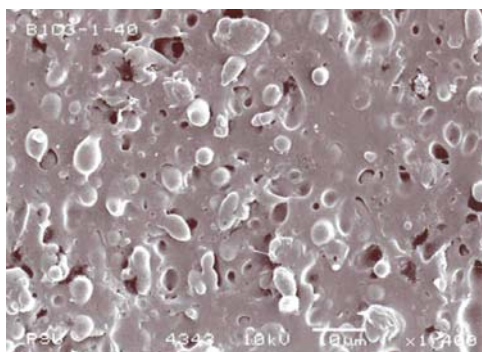
(d) 50/50, (e) 40/60, (f) 30/70 และ (g) 20/80 (กำลังขยาย 1,400 เท่า)



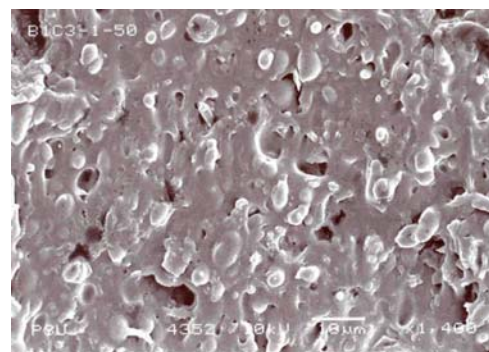
(a)



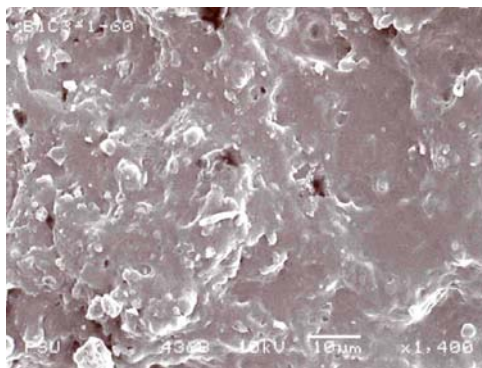
(b)



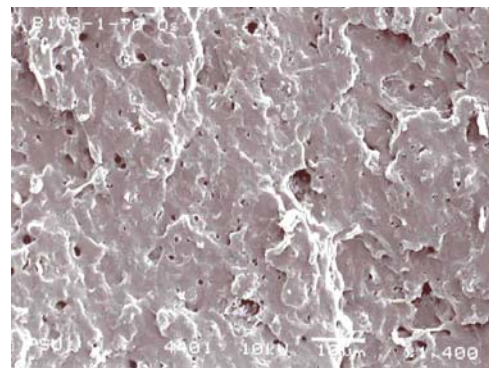
(c)



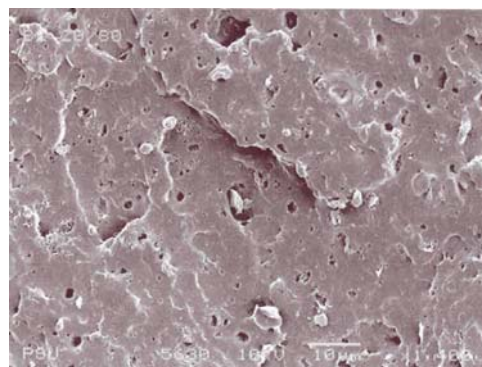
(d)



(e)



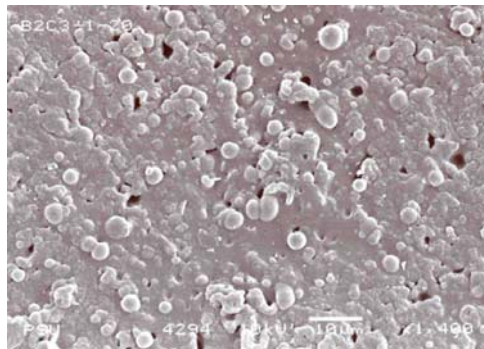
(f)



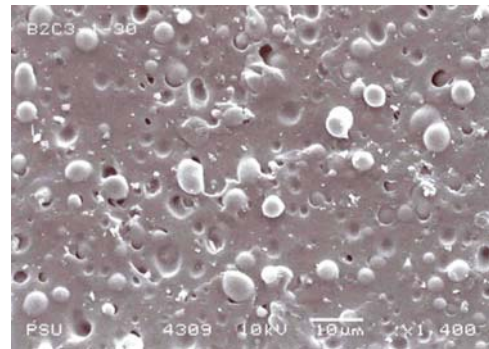
(g)

รูปที่ 4.66 รูป SEM ของยางผสมสูตร B2 ที่อัตราส่วนต่างๆ คือ (a) 80/20, (b) 70/30, (c) 60/40,

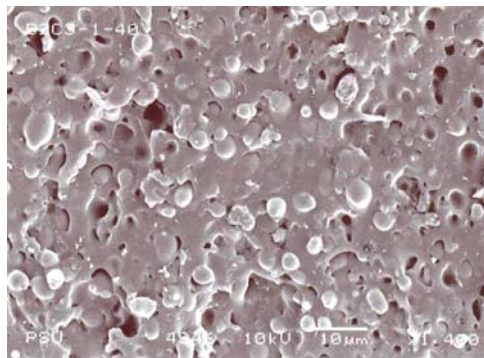
(d) 50/50, (e) 40/60, (f) 30/70 และ (g) 20/80 (กำลังขยาย 1,400 เท่า)



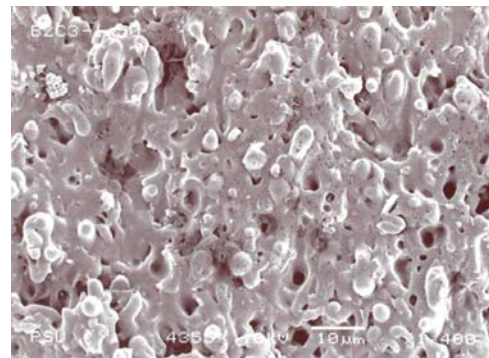
(a)



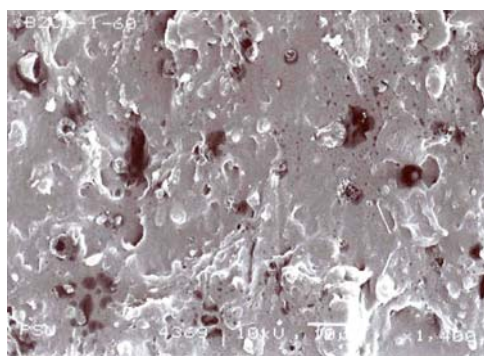
(b)



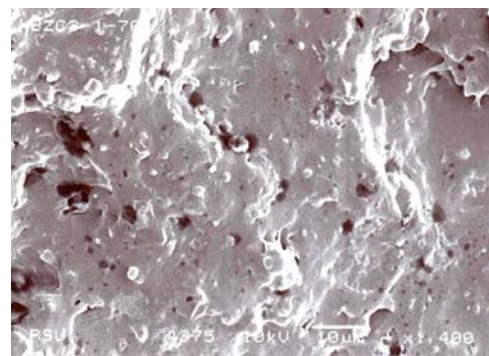
(c)



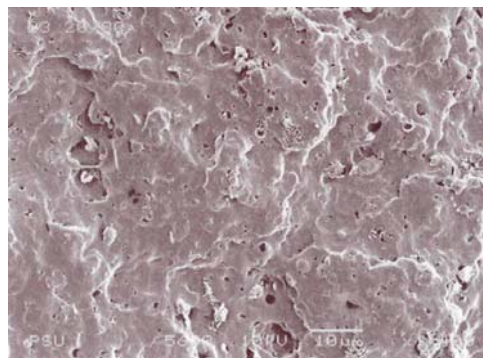
(d)



(e)



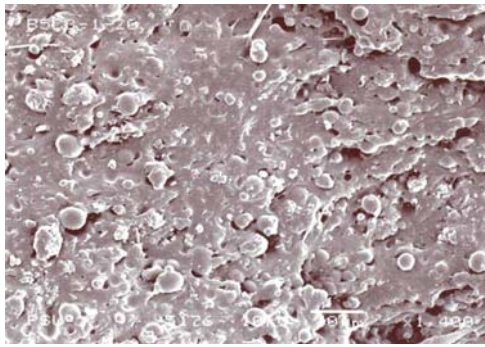
(f)



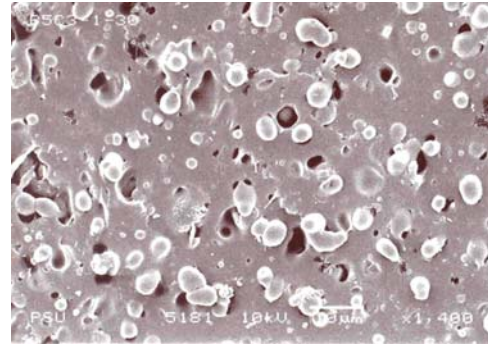
(g)

รูปที่ 4.67 รูป SEM ของยางผสมสูตร B3 ที่อัตราส่วนต่างๆ คือ (a) 80/20, (b) 70/30, (c) 60/40,

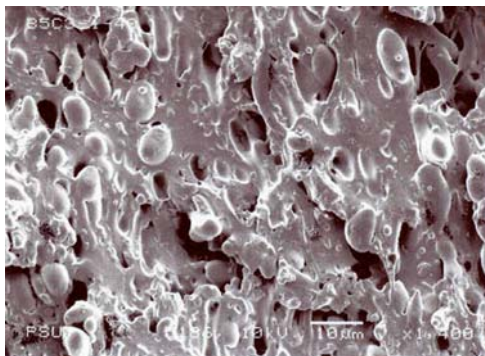
(d) 50/50, (e) 40/60, (f) 30/70 และ (g) 20/80 (กำลังขยาย 1,400 เท่า)



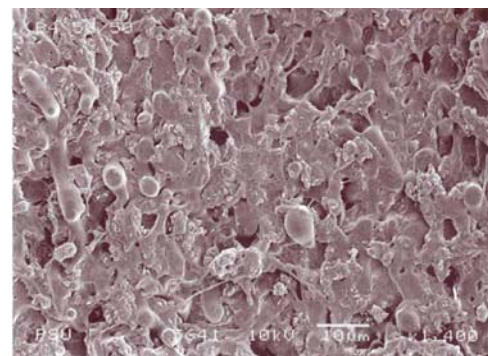
(a)



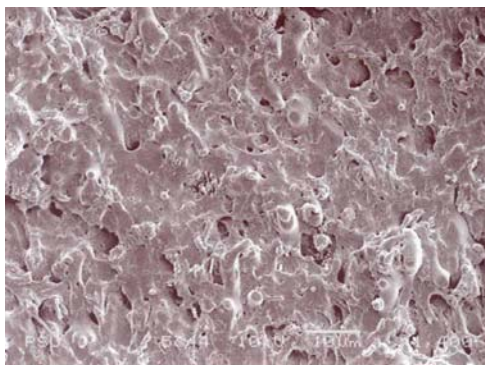
(b)



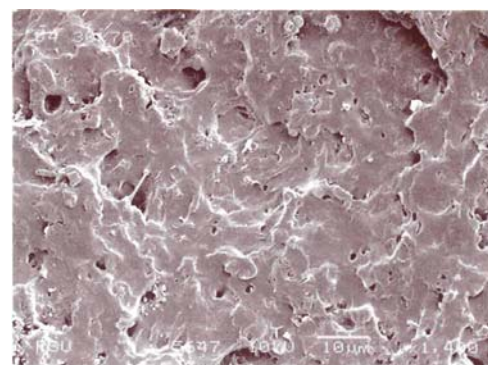
(c)



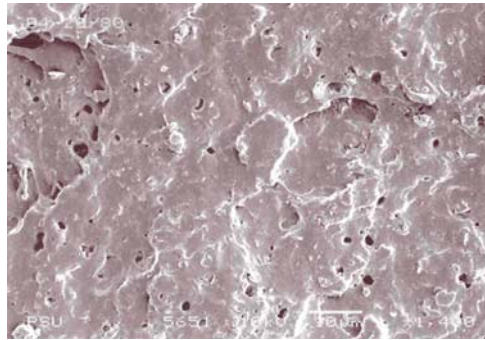
(d)



(e)



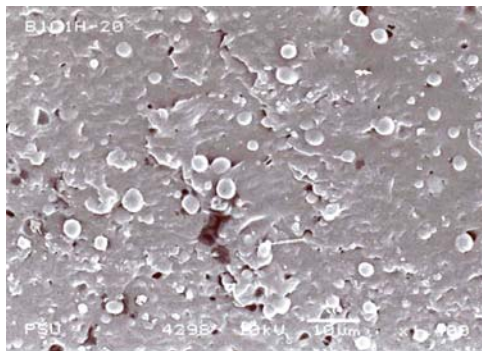
(f)



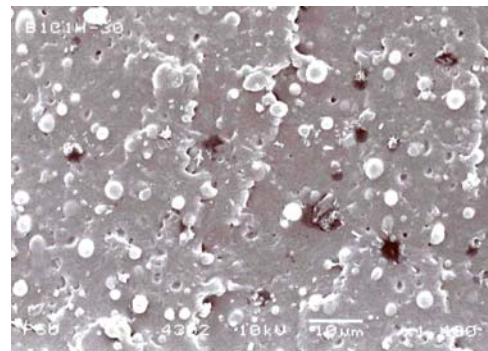
(g)

รูปที่ 4.68 รูป SEM ของยางผสมสูตร B4 ที่อัตราส่วนต่างๆ คือ (a) 80/20, (b) 70/30, (c) 60/40,

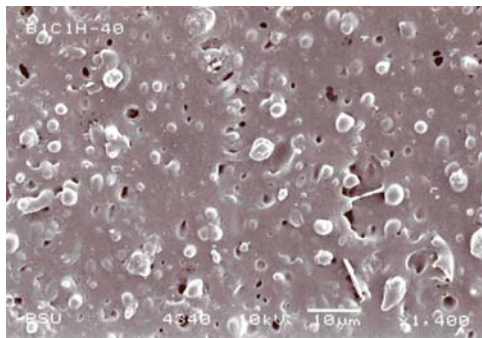
(d) 50/50, (e) 40/60, (f) 30/70 และ (g) 20/80 (กำลังขยาย 1,400 เท่า)



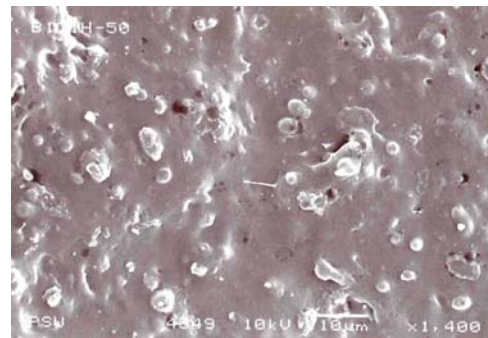
(a)



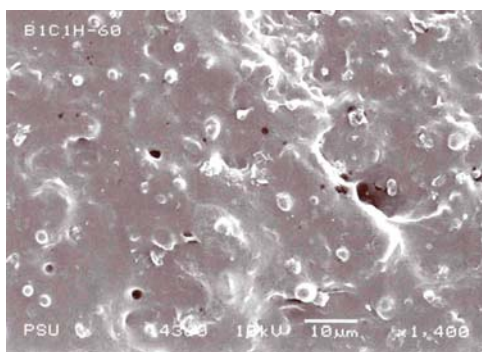
(b)



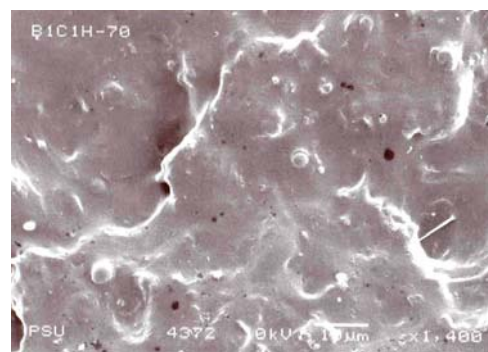
(c)



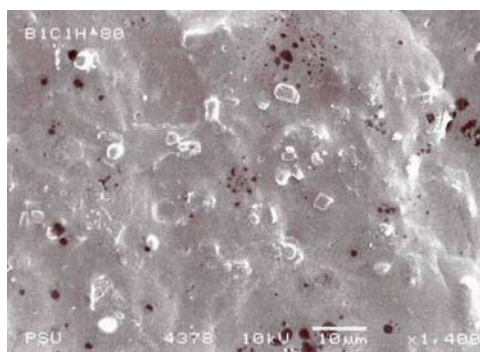
(d)



(e)



(f)



(g)

รูปที่ 4.69 รูป SEM ของยางผสมสูตร B5 ที่อัตราส่วนต่างๆ คือ (a) 80/20, (b) 70/30, (c) 60/40,

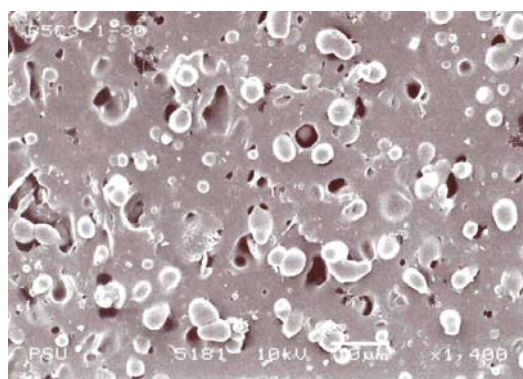
(d) 50/50, (e) 40/60, (f) 30/70 และ (g) 20/80 (กำลังขยาย 1,400 เท่า)

ในกรณีที่เติมยาง ENR ลงในยางผสมที่อัตราส่วน 70/30 พบว่า ยาง ENR ทำให้ขนาดอนุภาคยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีนมีขนาดเล็กลง (ดังรูปที่ 4.70) เช่น ในยางผสมสูตร B4 ที่ไม่เติมยาง ENR อนุภาคยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีนมีขนาดเฉลี่ย $2.02 \pm 1.07 \mu\text{m}$ เมื่อเติมยาง ENR 1.0 phr อนุภาคยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีนมีขนาดเฉลี่ย $0.75 \pm 0.33 \mu\text{m}$ แสดงว่า ยาง ENR ทำหน้าที่เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ ทำให้ยางผสมมีความเข้ากันได้มากขึ้น โดยยาง ENR จะเข้าไปอยู่ระหว่างทั้งสองเฟส ทำให้ค่าแรงดึงผิวระหว่างมีค่าลดลงและการยึดติดระหว่างเฟสดีขึ้น ทำให้การรวมกันของเฟสยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีนลดลงขนาดอนุภาคยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีนจึงมีขนาดเล็กลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chang และคณะ (1999) ที่ได้ทำการทดลองเติม TOR (trans – Polyoctylene Rubber) ลงในยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง EPDM ซึ่งพบว่า TOR สามารถลดขนาดของยาง EPDM ที่กระจายอยู่ในเฟสยางธรรมชาติได้

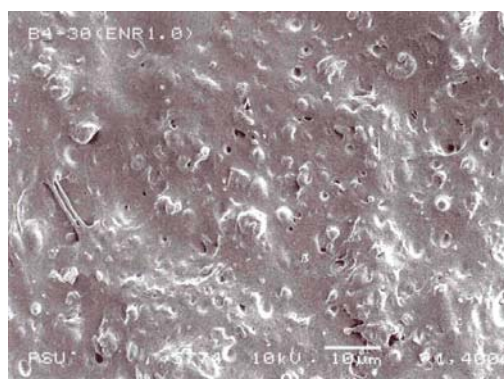
เมื่อเติมยาง ENR มากขึ้น ลงในยางผสมสูตร B4 อนุภาคยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีนจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเล็กน้อย โดยมีขนาดเฉลี่ย $1.03 \pm 0.32 \mu\text{m}$ แต่ยังมีขนาดเล็กกว่ากรณีที่เติมยาง ENR ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sirisinha และคณะ (2004) ที่ได้ทำการทดลองเติม EPDM – g – MA ลงในยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอริเนตเตตพอลิเอทิลีน (CPE) แล้วพบว่า EPDM – g – MA 1.0 phr ทำให้ขนาดอนุภาคของยางธรรมชาติที่กระจายอยู่ในเฟสยางคลอริเนตเตตพอลิเอทิลีนมีขนาดลดลงมากที่สุด แต่เมื่อปริมาณ EPDM – g – MA เพิ่มขึ้น อนุภาคของยางมีขนาดใหญ่ขึ้น และได้อธิบายไว้ว่า ปริมาณ EPDM – g – MA ที่ไม่สามารถเข้าไปอยู่ระหว่างทั้งสองเฟสได้ จะเกิดการรวมตัวเป็นไมเซลล์และ EPDM – g – MA ที่อยู่ระหว่างทั้งสอง

เฟสจะหลุดออกไปรวมกันเป็นไมเซลล์ อยู่ภายในเฟสของคลอริเนตเตดพอลิเอทธิลีนเช่นกัน ทำให้อนุภาคของยางธรรมชาติมีขนาดใหญ่ขึ้นและทำให้ความเข้ากันได้ของยางผสมลดลง

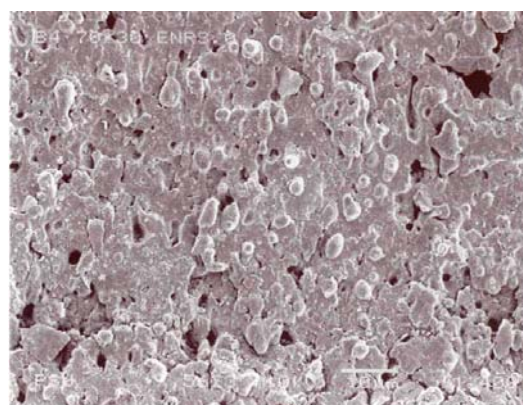
ปริมาณของยาง ENR ที่จะนำมาใช้ในยางผสมนี้ไม่ควรเกินจุดที่เรียกว่า critical micelle concentration (CMC) เนื่องจากที่ความเข้มข้นดังกล่าว ยาง ENR สามารถเข้าไปอยู่ระหว่างทั้งสองเฟสได้พอดี ทำให้อนุภาคยางคลอโรซัลโฟเนตเตดพอลิเอทธิลีนมีขนาดเล็กและยางผสมเข้ากันได้ดีขึ้น ถ้าปริมาณยาง ENR มากกว่าจุด CMC ขนาดอนุภาคยางคลอโรซัลโฟเนตเตดพอลิเอทธิลีนจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ความเข้ากันได้ของยางผสมก็จะน้อยลง (Aravind et al, 2004) จากผลการทดลองแสดงว่า การเติมยาง ENR 1.0 phr ทำให้ง่ายผสมเข้ากันได้มากกว่าการใช้ยาง ENR 3.0 phr



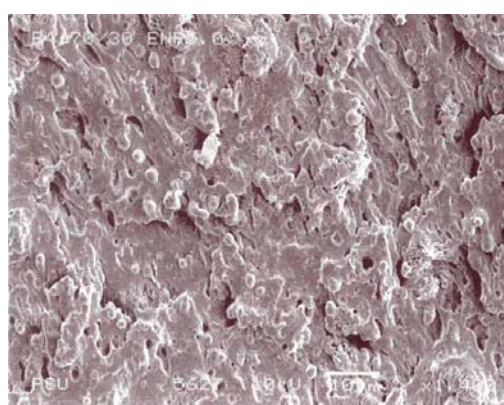
(a)



(b)



(c)

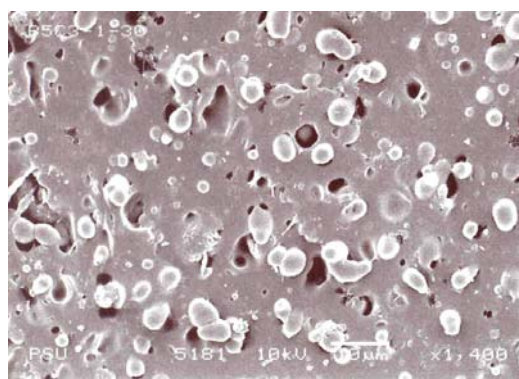


(e)

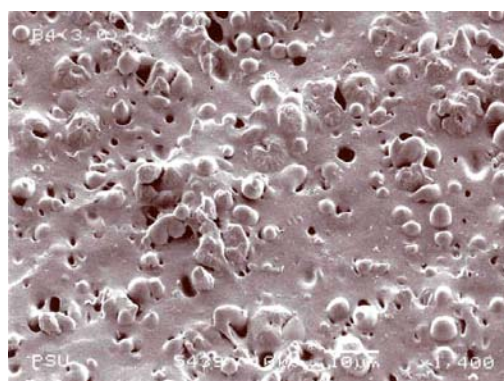
รูปที่ 4.70 รูป SEM ของยางผสมสูตร B4 ที่อัตราส่วน 70/30 เมื่อเติมยาง ENR ที่ปริมาณต่าง

ได้แก่ (a) 0 phr, (b) 1 phr, (c) 3 phr และ (d) 5 phr (กำลังขยาย 1,400 เท่า)

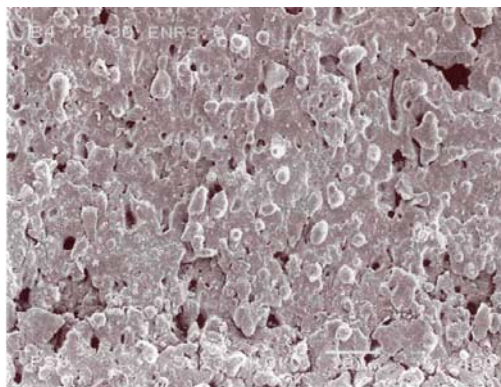
เมื่อเปรียบเทียบผลของยาง ENR และ Struktol[®] 60 NS ต่อความเข้ากันได้ของยางผสมสูตร B4 ที่อัตราส่วน 70/30 พบว่า ยางผสมที่เติมยาง ENR 1.0 phr มีขนาดอนุภาคยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนเล็กกว่ายางผสมที่ไม่ได้เติมยาง ENR และยางผสมที่เติม Struktol[®] 60 NS 3.0 phr แต่ยางผสมที่เติม Struktol[®] 60 NS 3.0 phr มีขนาดเล็กกว่ายางผสมที่ไม่ได้เติม Struktol[®] 60 NS (ดังรูปที่ 4.70) แสดงว่า ยาง ENR ช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ของยางผสมได้ดีกว่า Struktol[®] 60 NS



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 4.71 รูป SEM ของยางผสมสูตร B4 ที่อัตราส่วน 70/30 (a) ไม่เติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (ไม่เติม Struktol® 60 NS และยาง ENR), (b) เติม Struktol® 60 NS 3 phr และ (c) เติมยาง ENR 3 phr (กำลังขยาย 1,400 เท่า)

4.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DMTA

ในการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DMTA เป็นการวิเคราะห์ความเข้ากันได้ของยางผสมวิธีหนึ่ง โดยพิจารณาจากค่ามอดุลัสสะสม (storage modulus), มอดุลัสสูญเสีย (loss modulus) และค่าแทนเจนต์สูญเสีย (loss tangent) ที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากค่าต่างๆเหล่านี้ของยางแต่ละชนิด โดยอุณหภูมิที่มีค่าแทนเจนต์สูญเสียสูงสุดจะหมายถึงอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature : T_g) ของยางแต่ละชนิด (Mukhopadhyay and De, 1991) จากผลการทดลอง พบว่ากราฟแสดงค่า loss tangent ของยางธรรมชาติ ยาง ENR และยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีน แสดงค่า T_g เพียงค่าเดียว (ดังรูปที่ 4.72) แสดงให้เห็นว่า ยางทั้งสามชนิดมีเพียงเฟสเดียว แต่กราฟค่าแทนเจนต์สูญเสียของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์มีลักษณะกว้าง (broad) กว่ายางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีน ส่วนในยางผสมทั้งที่เติมและไม่เติมยาง ENR มีค่าแทนเจนต์สูญเสียสูงสุดเปลี่ยนแปลงไปจากตำแหน่งเดิม และมีค่า T_g 2 ค่า ที่มีค่าต่างไปจากค่า T_g ของยางแต่ละชนิด แสดงว่า ยางผสมมีการแยกเป็นสองเฟส โดยค่า T_g ของยางธรรมชาติมีค่าลดลง แต่ค่า T_g ของยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนมีค่าเพิ่มขึ้น (ดังแสดงในตารางที่ 4.22) แสดงว่า เฟสยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนเกิดการเชื่อมโยงมากขึ้น เนื่องจากยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนวัลคาไนซ์ด้วยสารให้กำมะถัน ซึ่งในยางผสมมีการเติมกำมะถันลงไป เพื่อใช้ในการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติ แต่กำมะถันที่เติมลงไปทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ทั้งสองเฟส ทำให้เฟสยางธรรมชาติเกิดการเชื่อมโยงน้อยลง เพราะมีปริมาณกำมะถันไม่เพียงพอต่อการวัลคาไนซ์เฟสยางธรรมชาติ ทำให้ค่า T_g ของเฟสยางธรรมชาติมีค่าลดลง ส่วนเฟสยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนเกิด

การเชื่อมโยงมากขึ้น เพราะสามารถวัดคาบในซึ่ได้ด้วยสารที่ให้กำมะถันและกำมะถัน ค่า T_g ของยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนจึงมีค่าเพิ่มขึ้น (ในกรณีที่เป็นยางผสม NR/ENR มีค่า T_g เพียงค่าเดียว แต่จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM มีการแยกเป็น 2 เฟส ส่วนในยางผสม ENR/CSM มีค่า T_g 2 ค่า และค่าที่ได้เข้าใกล้กันมากกว่าค่า T_g ของยางผสม NR/CSM แสดงยางผสม ENR/CSM เข้ากันได้มากกว่ายางผสม NR/CSM)

ส่วนค่าแทนเจนต์สูญเสียสูงสุดของเฟสยางธรรมชาติและเฟสยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนในยางผสมมีค่าลดลงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับค่าแทนเจนต์สูญเสียของยางแต่ละชนิด (ที่ไม่ใช่ยางผสม) เช่น ยางธรรมชาติมีค่าแทนเจนต์สูญเสียเท่ากับ 0.68 แต่ในยางผสมสูตร B4 ค่าแทนเจนต์สูญเสียของเฟสยางธรรมชาติเท่ากับ 0.40 ส่วนยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนมีค่าแทนเจนต์สูญเสียเท่ากับ 1.42 แต่ในยางผสมสูตร B4 มีค่าแทนเจนต์สูญเสียของเฟสยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนเท่ากับ 0.37 (ดังรูปที่ 4.73) แสดงว่า ค่ามอดูลัสสูญเสียของยางผสมมีค่าลดลงและยางมีความเป็นอีลาสติกมากขึ้น (ค่ามอดูลัสสะสมมีค่าเพิ่มขึ้น) เมื่อเปรียบเทียบกับยางแต่ละชนิด (Kumnuantip and Sombatsompop, 2003) โดยเฉพาะในเฟสยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีน ค่าแทนเจนต์สูญเสียมีค่าลดลงเป็นอย่างมาก ซึ่งแสดงว่า ยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนในยางผสมมีความเป็นอีลาสติกเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนเพียงชนิดเดียว (ค่าแทนเจนต์สูญเสียเป็นอัตราส่วนระหว่างค่ามอดูลัสสูญเสียกับค่ามอดูลัสสะสม)

เมื่อเติมยาง ENR ลงในยางผสม (NR/CSM) พบว่า ค่า T_g ของยางทั้งสองเฟสมีแนวโน้มเข้าใกล้กันมากขึ้น เมื่อปริมาณยาง ENR เพิ่มขึ้น (ทำการทดลองเพิ่มปริมาณยาง ENR ในยางผสมให้มากขึ้น และทดลองเตรียมยางผสมที่ใช้ปริมาณยาง ENR มากขึ้นจนกลายเป็นองค์ประกอบชนิดที่ 3 ในยางผสม เพื่อศึกษาผลของยาง ENR ต่อค่า T_g ของยางผสม) โดยค่า T_g ของยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนมีค่าลดลงอย่างชัดเจน (ดังแสดงในตารางที่ 4.22 และรูปที่ 4.73 – 4.75) เมื่อเปรียบเทียบกับยางผสมที่ไม่เติมยาง ENR แสดงว่า ยาง ENR ทำให้ยางผสมเข้ากันได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kaitkamjornwong และ Pairpisit (2004) ที่ได้ทำการทดลองเติม Ultrablend® 4000 ลงในยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง EPDM แล้วพบว่า Ultrablend® 4000 ทำให้ค่า T_g ของยางธรรมชาติและยาง EPDM มีค่าเข้าใกล้กันมากขึ้นและยางผสมมีความเข้ากันได้มากขึ้น

การเติมยาง ENR ลงในยางผสม ทำให้ค่าแทนเจนต์สูญเสียสูงสุดของยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนเพิ่มขึ้น แต่ค่าแทนเจนต์สูญเสียสูงสุดของยางธรรมชาติมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับยางผสมที่ไม่เติมยาง ENR แสดงว่า ยาง ENR ทำให้เฟสยางคลอโรซัลโฟเนตเตต-

พอลิเอทธิลีนมีค่ามอดุลัสสูงเพิ่มขึ้น แต่ค่ามอดุลัสสูงของเฟสยางธรรมชาติมีค่าลดลง ทำให้เฟสยางธรรมชาติมีความเป็นอีลาสติกเพิ่มขึ้น (ค่ามอดุลัสสะสมมีค่าเพิ่มขึ้น) แต่เฟสยางคลอโร-ซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนมีความเป็นอีลาสติกลดลง (ค่ามอดุลัสสะสมมีค่าลดลง) เมื่อเปรียบเทียบกับความเป็นอีลาสติกของทั้งสองเฟสในยางผสมที่ไม่เติมยาง ENR และจากรูปที่ 4.73 – 4.75 พบว่ากราฟแสดงค่าแทนเจนต์สูงเทียบเท่ากับอุณหภูมิของยางผสม (NR/CSM) ทั้งที่เติมและไม่เติมยาง ENR มีลักษณะกว้าง (broad)

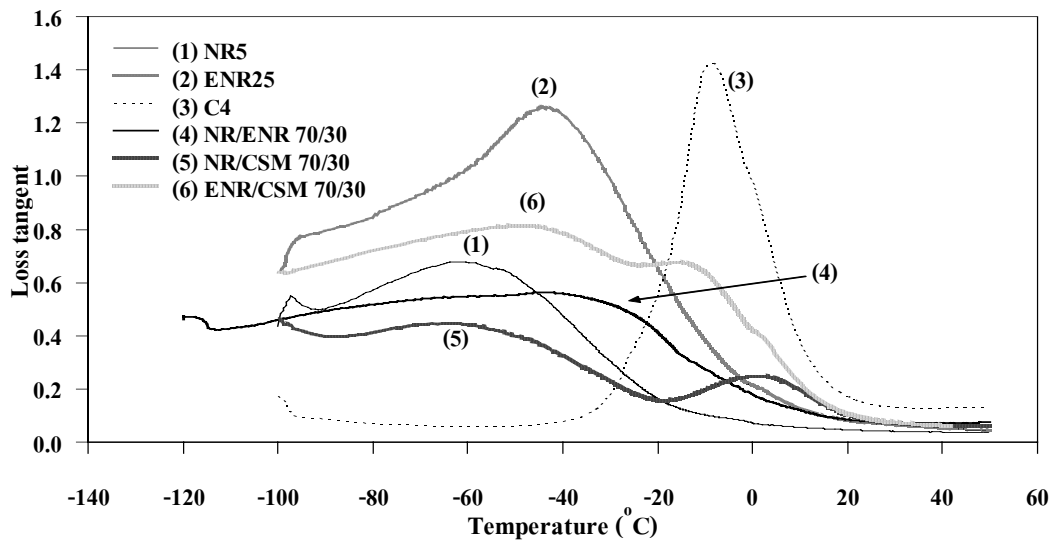
ตารางที่ 4.22 ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) ของยางผสมสูตร B2, B3 และ B4

สูตร	T_g ของยาง NR ($^{\circ}\text{C}$)	T_g ของยาง CSM ($^{\circ}\text{C}$)
NR5	-62.84	-
C4	-	-8.49
ENR	-44.31	-
B2-30	-80.06	0.22
B2-30 (ENR 5.0 phr)	-88.96	-7.60
B3-30	-79.54	2.84
B3-30 (ENR 5.0 phr)	-74.12	-4.07
B4-30	-65.38	1.87
B4-30 (ENR 5.0 phr)	-80.00	-9.15
B4-30 (ENR 10.0 phr)	-58.70	-0.60
NR/ENR/CSM (65/5/30)	-77.74	-7.53
NR/ENR/CSM (60/10/30)	-49.58	-7.17
NR/ENR/CSM (50/20/30)	-56.80	-11.02
NR/ENR/CSM (40/30/30)	-51.22	-11.33
NR/ENR (70/30)	-43.01	-
ENR/CSM (70/30)	-49.06	-15.65

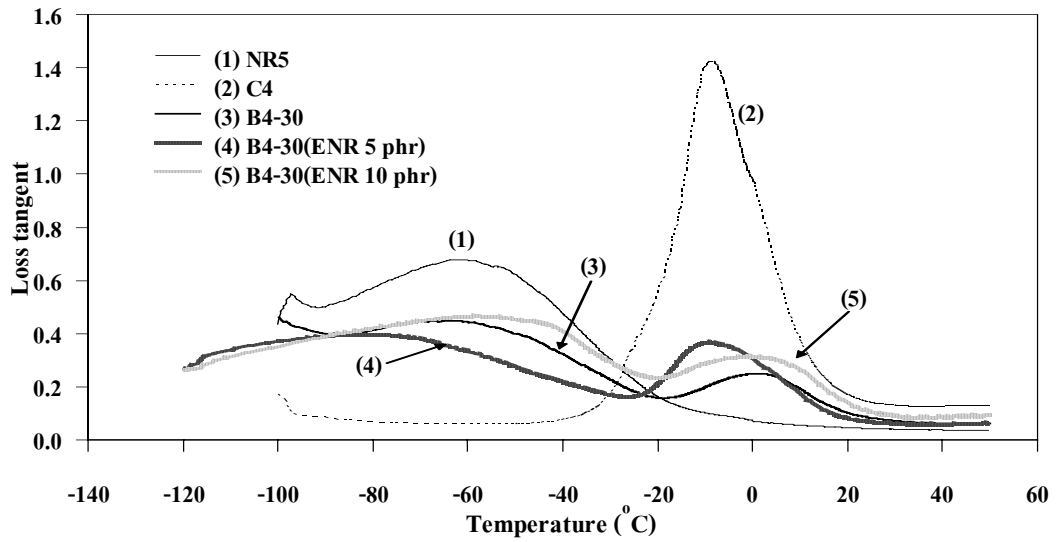
หมายเหตุ : เกรดยาง ENR ที่ใช้คือ Epoxiprene[®] 25 (ENR25)

ยางผสม NR/ENR/CSM เตรียมจากสูตร NR5, ENR25 สูตรที่ 1 และสูตร C4

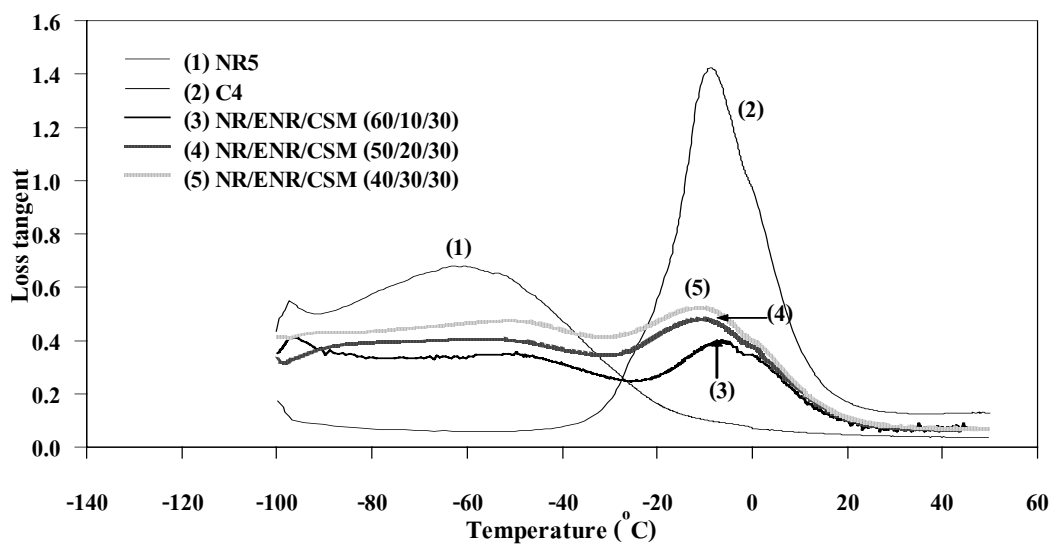
ยางผสม ENR/CSM เตรียมจากสูตร ENR25 สูตรที่ 1 และสูตร C4



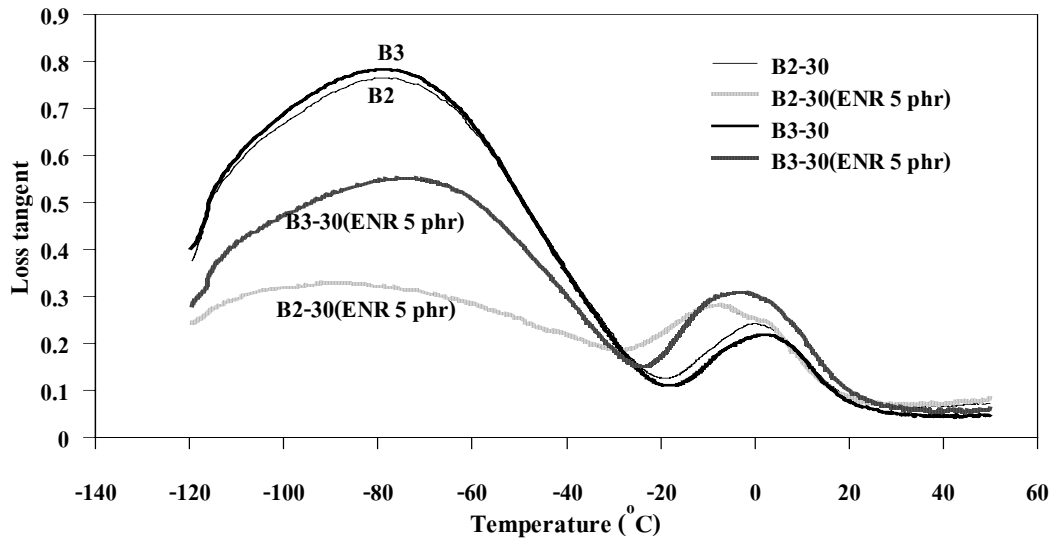
รูปที่ 4.72 กราฟ DMTA ของยางธรรมชาติ ยาง ENR ยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทรีน และยางผสม



รูปที่ 4.73 กราฟ DMTA ของยางผสมสูตร B4 ที่อัตราส่วน 70/30 แสดงผลของยาง ENR ต่อค่า Loss tangent และอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของยางผสมสูตร B4



รูปที่ 4.74 กราฟ DMTA ของยางผสม NR/ENR/CSM ที่อัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.75 กราฟ DMTA ของยางผสมสูตร B2 และ B3 ที่อัตราส่วน 70/30 แสดงผลของยาง ENR ต่อค่า Loss tangent และอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของยางผสมทั้งสองสูตร