

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ : ยางเบลนด์

4.1 สมบัติของยางคอมพาวนด์และยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA

4.1.1 อิทธิพลของปริมาณไตรเมทิลลอลโพรเพนไตรเมทาคริเลตต่อสมบัติยางคอมพาวนด์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA

เตรียมยางคอมพาวนด์จากยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสมเอทิลีนเอทิลีนไวนิลอะซิเตทโดยแปรปริมาณ TMPTMA ต่างๆ ดังนี้คือ 2.5, 5.0, 7.5, 10.0 และ 12.5 phr ตามหัวข้อที่ 3.3.1.1 เพื่อทดสอบสมบัติการแปรรูป สมบัติการวัลคาไนซ์ สมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่ง ได้ผลการทดลองดังนี้

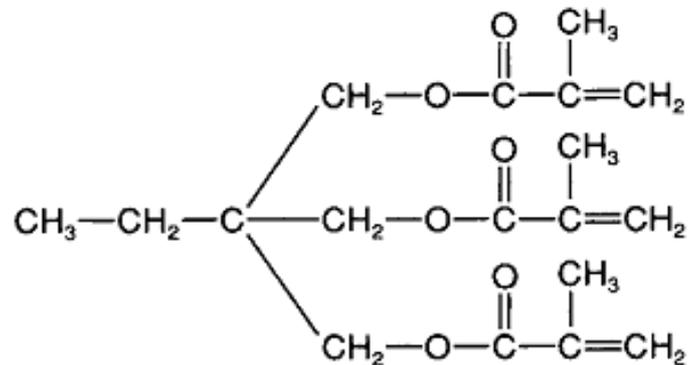
4.1.1.1 อิทธิพลของปริมาณ TMPTMA ต่อค่าความหนืดมูนี่ของยางคอมพาวนด์

ความหนืดมูนี่ของยางคอมพาวนด์ระหว่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับเอทิลีนไวนิลอะซิเตท (ENR-25/EVA) อัตราส่วน 50/50 % โดยน้ำหนัก โดยแปรปริมาณ TMPTMA ต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความหนืดมูนี่ของยางคอมพาวนด์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA โดยแปรปริมาณ TMPTMA

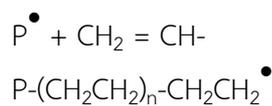
Quantities of TMPTMA (phr)	Mooney viscosity ML 1+4 (125 °C)
2.5	13
5.0	14
7.5	14
10.0	15
12.5	15

จากตารางที่ 4.1 พบว่า การใช้ TMPTMA ปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความหนืดมูนี่ของยางคอมพาวนด์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากโมเลกุลของ TMPTMA มีพันธะคู่ที่ว่องไว 3 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 4.1 สามารถเกิดปฏิกิริยาโฮโมพอลิเมอไรเซชัน (Homopolymerization) ทำให้โมเลกุลมีขนาดใหญ่มากขึ้นจึงขัดขวางการเคลื่อนไหวของโมเลกุลของยางคอมพาวนด์ ดังกลไกการเกิดปฏิกิริยาของโคเอเจนต์ที่เสนอโดย Dluzeski (2001) มี 2 แบบ คือ (1) การเกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอไรซ์ TMPTMA บนโมเลกุลยางธรรมชาติอีพอกไซด์และเอทิลีนไวนิลอะซิเตท และ (2) การเกิดปฏิกิริยาโฮโมพอลิเมอไรซ์ของ TMPTMA ด้วยกันเอง ดังรูปที่ 4.2

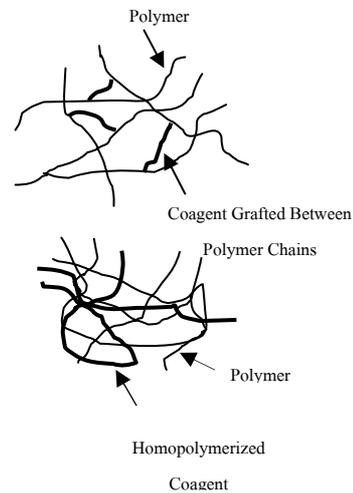
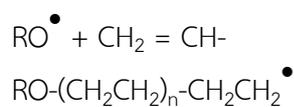


รูปที่ 4.1 โครงสร้างโมเลกุลของ TMPTMA (Datta *et al*, 1996)

การกราฟต์



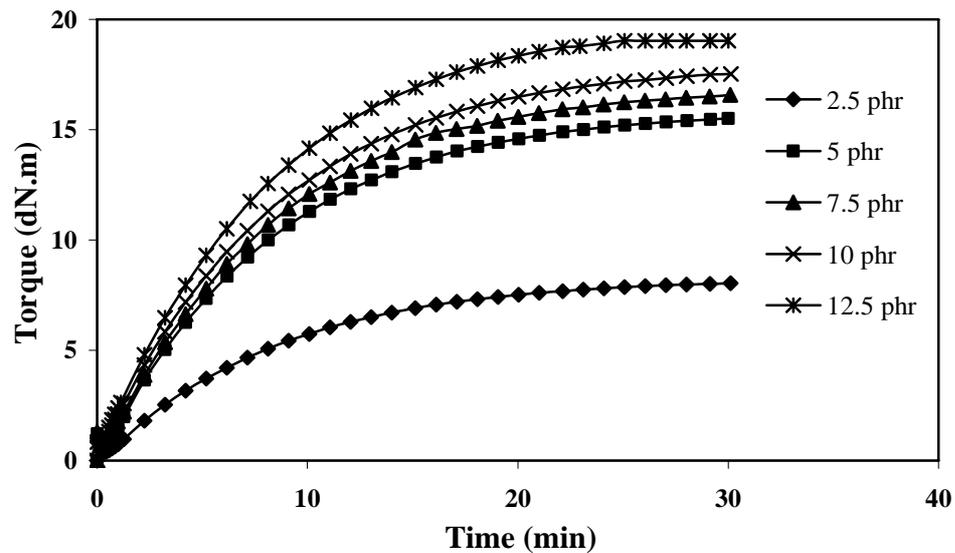
โฮโมพอลิเมอไรซ์



รูปที่ 4.2 กลไกที่เป็นไปได้ของโคเอเจนต์ในการวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ (Dluzneski, 2001)

4.1.1.2 อิทธิพลของปริมาณ TMPTMA ต่อลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวนด์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA

ทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวนด์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA ที่อุณหภูมิ 160°C โดยใช้ปริมาณ DCP 4.0 phr และแปรปริมาณ TMPTMA ดังนี้คือ 2.5, 5.0, 7.5, 10.0 และ 12.5 phr ได้ลักษณะการวัลคาไนซ์ ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาในการทดสอบการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวนด์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA โดยแปร TMPTMA ที่ปริมาณต่างๆ

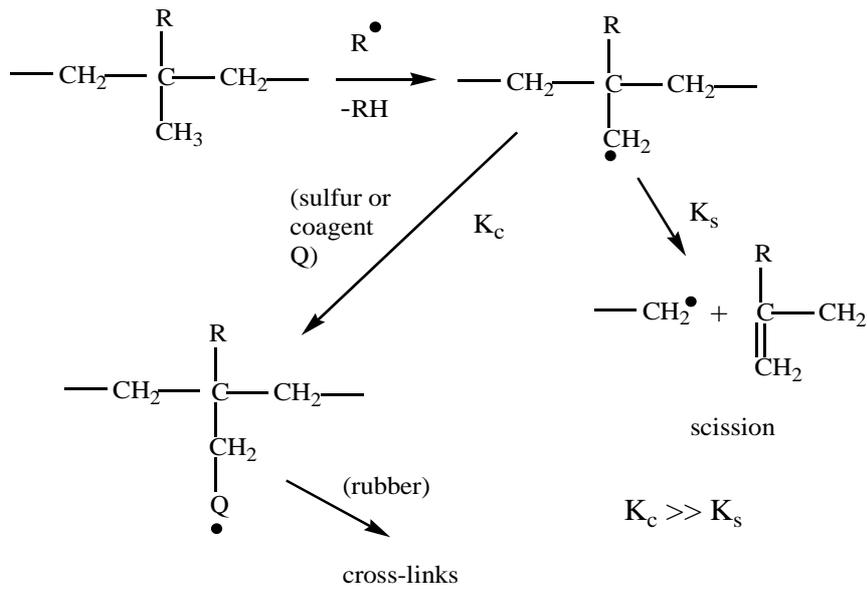
จากรูปที่ 4.3 สามารถนำมาหาค่าสมบัติการวัลคาไนซ์ ของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ อีพอกไซด์กับเอทิลีนไวนิลอะซิเตท (ENR-25/EVA) ที่แปรปริมาณ TMPTMA ต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวนด์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA โดยแปรปริมาณ TMPTMA

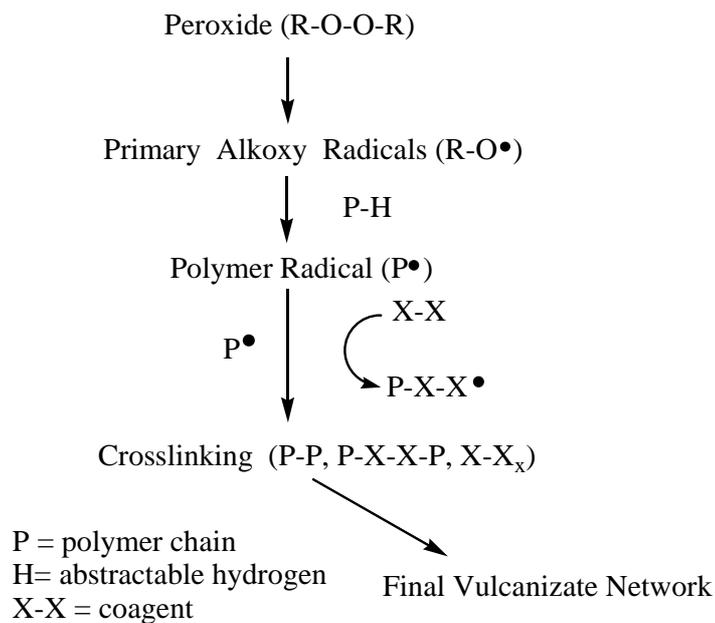
Quantities of TMPTMA (phr)	M_L (dN.m)	M_H (dN.m)	$M_H - M_L$ (dN.m)	Cure time t_{c90} (min)	Scorch time (min)	CRI (1/min)
2.5	0.39	8.03	7.64	18.07	1.74	6.15
5.0	0.65	15.51	14.86	17.11	1.05	6.26
7.5	0.62	16.57	15.95	16.11	0.90	6.62
10.0	0.68	17.53	16.85	16.12	0.72	6.54
12.5	0.86	19.03	18.17	12.05	0.71	8.85

จากตารางที่ 4.2 พิจารณา M_L และ M_H ซึ่งเป็นค่าทอร์กสูงสุดและต่ำสุด พบว่า ค่าทอร์กต่ำสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อ TMPTMA เพิ่มขึ้น แสดงว่ายางเบลนด์มีความหนืดเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับค่าความหนืดมูนนี่ที่เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณ TMPTMA และค่าทอร์กสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน เนื่องจากการใช้ TMPTMA ทำให้ปริมาณพันธะการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นได้ โดยที่ปฏิกิริยาการใช้ TMPTMA ร่วมกับการวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ทำให้เกิดปฏิกิริยาแบบรวมตัวหรือเติมเข้าไป (addition reaction) ดังนั้นการใช้โคเอเจนต์จึงทำให้ได้ปริมาณพันธะเชื่อมโยงสูงขึ้นโดยไปลดการขาดออกของโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ โดยที่ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงมากกว่าการเกิดปฏิกิริยาการขาดออกของโมเลกุล ($K_c \gg K_s$) (Mark *et al*, 1994) แสดงดังรูปที่ 4.4 จึงทำให้การเชื่อมโยงเกิดขึ้นได้มาก ส่งผลให้ผลต่างของค่าทอร์ก ($M_L - M_H$) อัตราการวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น เวลาในการวัลคาไนซ์และเวลาในการแปรรูปลดลง ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยา แสดงดัง

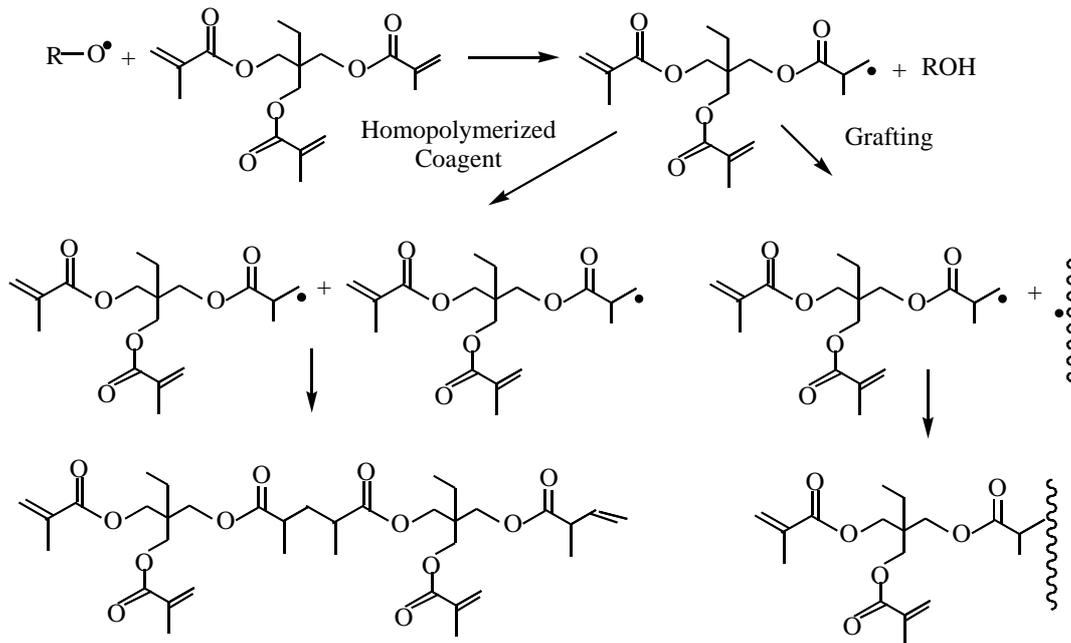
รูปที่ 4.5 และ 4.6 โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ในรูปที่ 4.5 ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ (1) DCP แตกตัวออกเป็นอนุมูลอิสระอัลคอกซี ขั้นตอนที่ (2) อนุมูลที่เกิดขึ้นเข้าดึงอะตอมของไฮโดรเจนเกิดการเคลื่อนย้ายอนุมูลอิสระมายังโซ่พอลิเมอร์ และขั้นตอนที่ (3) เกิดการรวมตัวกันของอนุมูลอิสระโดยอนุมูลอิสระของพอลิเมอร์ 2 โมเลกุลเกิดการรวมตัวกันเกิดพันธะโควาเลนต์เป็นพันธะเชื่อมโยง รูปที่ 4.6 อธิบายการทำงานของโคเอเจนต์ TMPTMA จะไปรับอนุมูลอิสระของอัลคอกซี จากนั้นเกิดเป็นอนุมูลอิสระขึ้นบนโมเลกุล TMPTMA แล้วอนุมูลอิสระ TMPTMA ที่เกิดขึ้นสามารถเกิดการกราฟต์บนโมเลกุลยางหรือทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของ TMPTMA อื่นๆ



รูปที่ 4.4 การใช้สารโคเอเจนต์ลดการขาดออกของโมเลกุลพอลิเมอร์ (Mark et al, 1994)



รูปที่ 4.5 ปฏิกิริยารีดอกซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ (Henning and Richard, 2005)



รูปที่ 4.6 การใช้โคเอเจนต์ TMPTMA ร่วมกับการวัลคาไนซ์ระบบเปอร์ออกไซด์ (Sartomer, 2009)

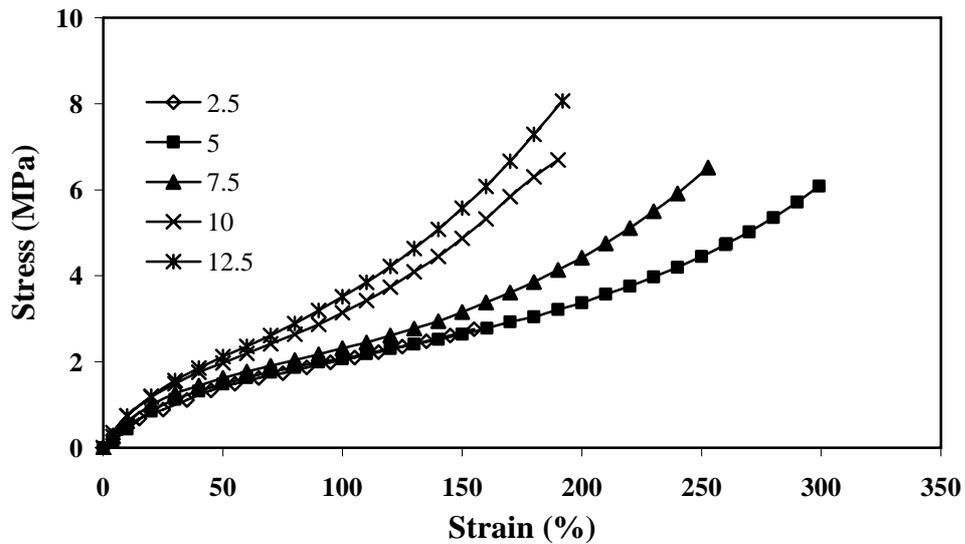
4.1.1.3 สมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA ที่แปรปริมาณ TMPTMA ต่างๆ

ทดสอบสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA โดยแปรปริมาณ TMPTMA ดังนี้คือ 2.5, 5.0, 7.5, 10.0 และ 12.5 phr ร่วมกับการใช้ DCP 4.0 phr ได้ผลดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 อิทธิพลของปริมาณ TMPTMA ต่อสมบัติเชิงกลยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA

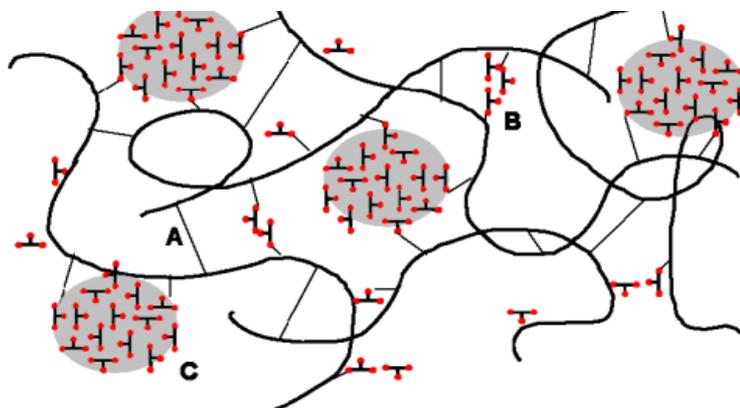
Quantities of TMPTMA (phr)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Hardness (shore A)	Tear strength (N/mm)	Tension set (%)	Area under stress-strain curve
2.5	2.82±0.07	154±1.00	57.0±0.29	10.98±0.57	1.00±0.89	261.41
5.0	6.09±0.09	299±16.70	61.0±0.00	15.31±0.22	2.00±1.30	852.17
7.5	6.53±0.48	252±25.11	63.5±0.00	25.04±0.44	5.50±0.27	752.67
10.0	6.69±0.75	190±13.23	66.0±0.29	28.61±0.34	5.00±0.45	617.07
12.5	8.08±0.28	192±24.58	68.5±0.29	30.55±0.63	6.50±0.27	709.58

ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA โดยแปรปริมาณ TMPTMA ต่างๆ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดแสดงดัง รูปที่ 4.7

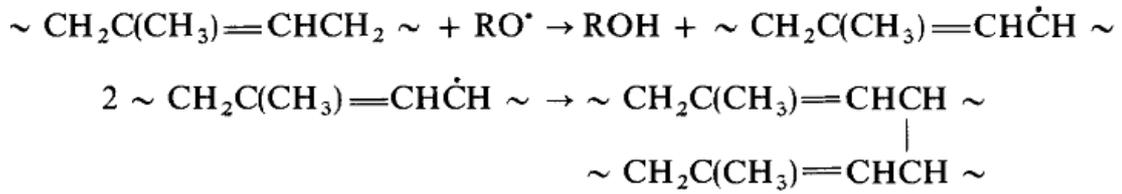
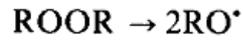


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA ที่แปร TMPTMA ที่ปริมาณต่างๆ

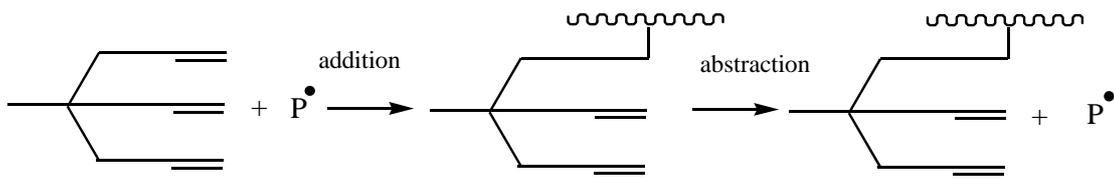
จากรูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA โดยแปรปริมาณ TMPTMA พบว่าโมดูลัสของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA เพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่ม TMPTMA สังเกตได้จากความชันของกราฟความเค้น-ความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งการใช้ TMPTMA ร่วมกับ DCP สามารถเกิดพันธะเชื่อมโยงกับโมเลกุลยางได้ดังรูปที่ 4.8 โดยโครงสร้างโมเลกุลแบบ A พอลิเมอร์ที่มีอนุมูลอิสระจากการดึงไฮโดรเจนของอนุมูลอิสระที่เกิดจากการแตกตัวของ DCP เกิดปฏิกิริยาการรวมตัว (Coupling reaction) เกิดเป็นพันธะคาร์บอน-คาร์บอน (C-C linkage) แสดงปฏิกิริยาดังรูปที่ 4.9 ส่วนโครงสร้างโมเลกุลแบบ B เกิดจากปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ไรซ์ระหว่าง TMPTMA บนโมเลกุลของพอลิเมอร์ แสดงปฏิกิริยาดังรูปที่ 4.10 และโครงสร้างแบบ C เกิดจากปฏิกิริยาไฮโมพอลิเมอร์ของ TMPTMA เกิดเป็นเทอร์โมเซต แสดงปฏิกิริยาดังรูปที่ 4.11 แล้วอนุมูลอิสระที่เกิดบนโมเลกุลของ TMPTMA สามารถกราฟต์บนโมเลกุลของพอลิเมอร์แล้วสามารถเกิดการเชื่อมโยงได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.8 (A) การเชื่อมโยงของพอลิเมอร์ที่มีอนุมูลอิสระในโมเลกุลพอลิเมอร์ (B) การเกิดการกราฟต์ของ TMPTMA บนโมเลกุลของพอลิเมอร์ (C) การเกิดไฮโมพอลิเมอร์ของ TMPTMA แล้วกราฟต์บนโมเลกุลของพอลิเมอร์ (Henning, 2009)



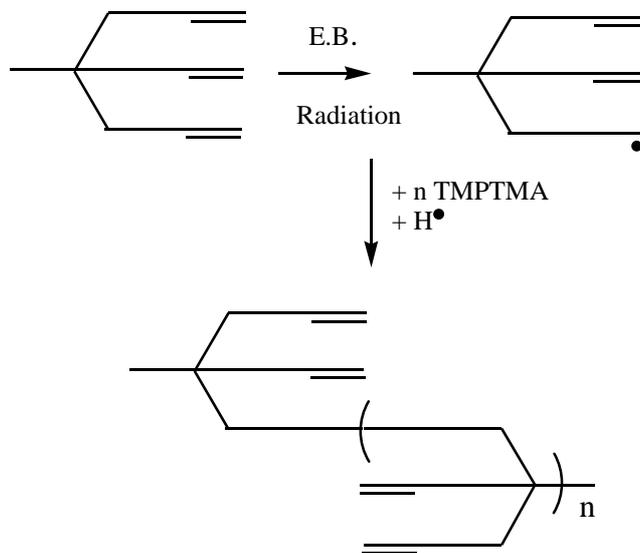
รูปที่ 4.9 ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของยางธรรมชาติด้วยเปอร์ออกไซด์ (Loan, 1967)



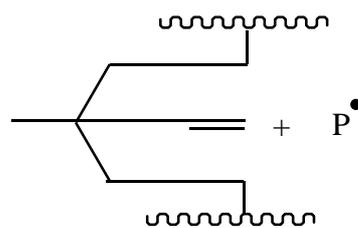
Grafting

รูปที่ 4.10 ปฏิกิริยาการกราฟต์ของ TMPTMA บนโมเลกุลของพอลิเมอร์ (Datta et al, 1996)

Polymerization



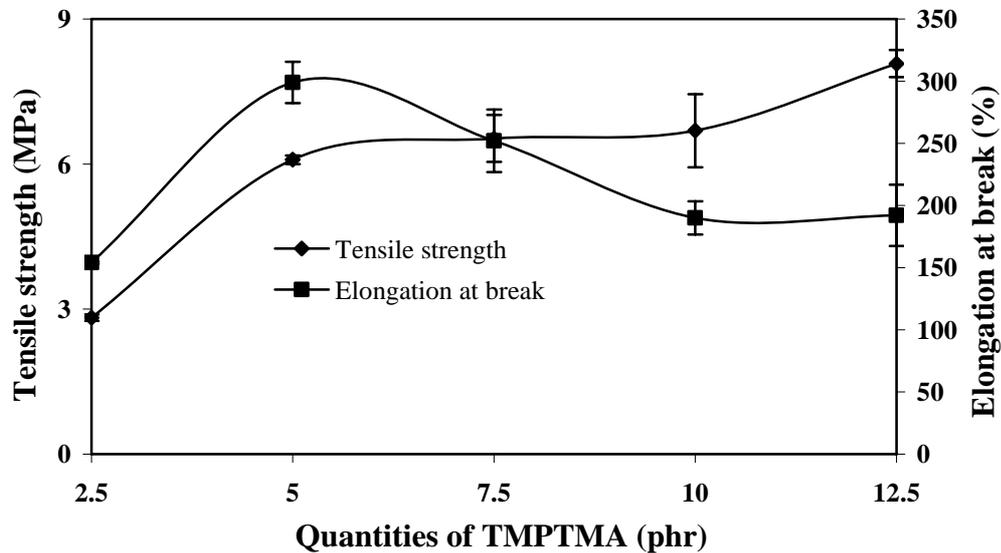
รูปที่ 4.11 ปฏิกิริยาไฮโมพอลิเมอร์ของ TMPTMA (Datta et al, 1996)



Crosslinking

รูปที่ 4.12 การเชื่อมโยงของพอลิเมอร์ด้วย TMPTMA (Datta et al, 1996)

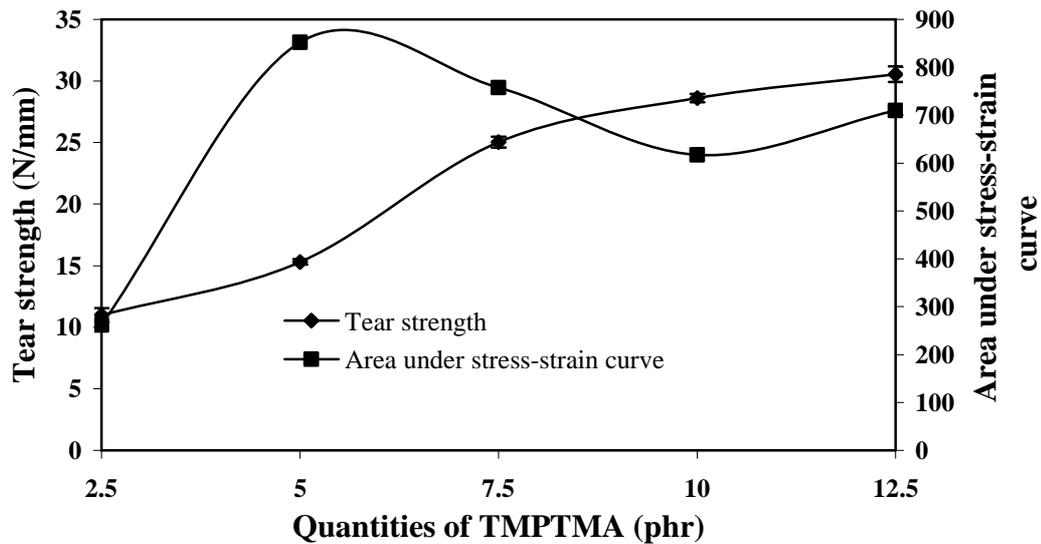
จากความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียดสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดได้ดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA ที่แปร TMPTMA ในปริมาณต่างๆ

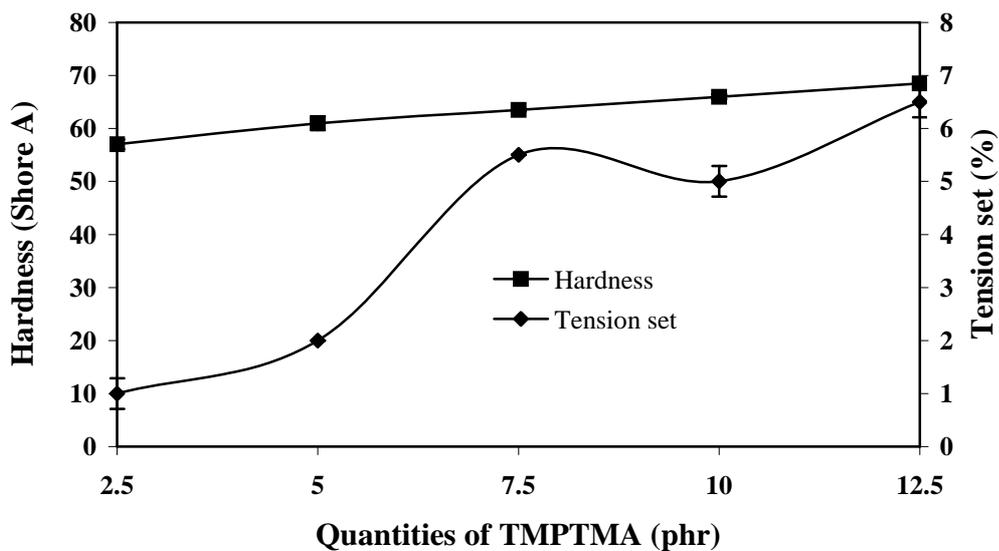
จากรูปที่ 4.13 พบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการเพิ่มปริมาณ TMPTMA เนื่องจากการใช้ coagent ทำให้ปริมาณพันธะเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น (Henning, 2009) ส่งผลให้ยางเบลนด์มีความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์พบว่า มีค่าสูงสุดที่ปริมาณ TMPTMA 5.0 phr เนื่องจากเป็นปริมาณที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงที่เหมาะสม หลังจากนั้นแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ TMPTMA ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดไฮโมพอลิเมอร์ไรซ์ของ TMPTMA ด้วยกันเอง เป็นเทอร์โมเซต แล้วกราฟต์บนโมเลกุลยาง (Henning, 2009) ดังรูปที่ 4.8 เกิดโครงสร้างแบบ C ซึ่งโครงสร้างนี้จะมีความแข็งแรงสูงทำให้ความสามารถในการยืดลดลง

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA ที่แปรปริมาณ TMPTMA ต่างๆ ได้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด พื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียด ค่าความแข็งแรง และการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึงดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.14-4.15



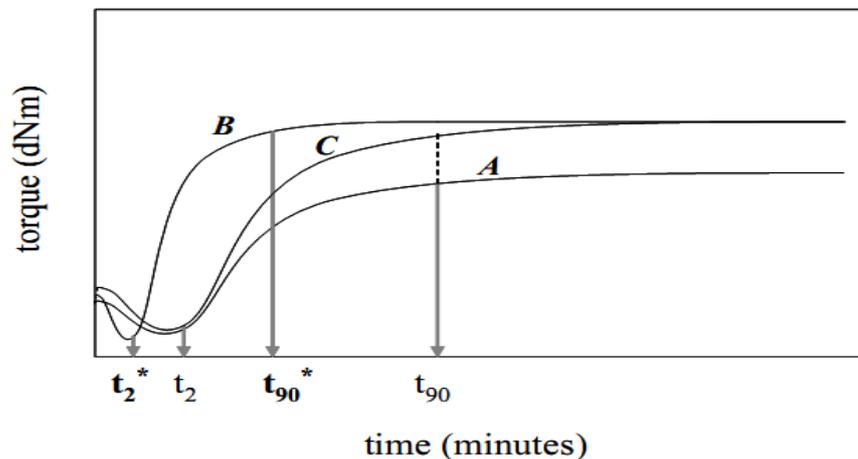
รูปที่ 4.14 ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดแบบมุมและพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียดของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA โดยแปรรุ TMPTMA ในปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 4.14 พบว่า ความต้านทานต่อการฉีกขาดมีแนวโน้มเช่นเดียวกับความต้านทานต่อแรงดึง คือ เมื่อเพิ่มปริมาณ TMPTMA ทำให้ความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการใช้ TMPTMA ร่วมในการวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ จะเพิ่มประสิทธิภาพในการวัลคาไนซ์ ทำให้ปริมาณพันธะเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น (Henning, 2009) เมื่อพิจารณาถึงพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียด ซึ่งแสดงถึงพลังงานในการทำให้ขึ้นตัวอย่างเสียหายหรือความเหนียว (Toughness) พบว่า การใช้ TMPTMA ที่ปริมาณ 7.5 phr มีพื้นที่ใต้กราฟสูงที่สุด เมื่อเพิ่มปริมาณ TMPTMA พื้นที่ใต้กราฟมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากการใช้ TMPTMA ที่ปริมาณนี้เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดในการใช้ TMPTMA ในการวัลคาไนซ์ร่วมกับเปอร์ออกไซด์

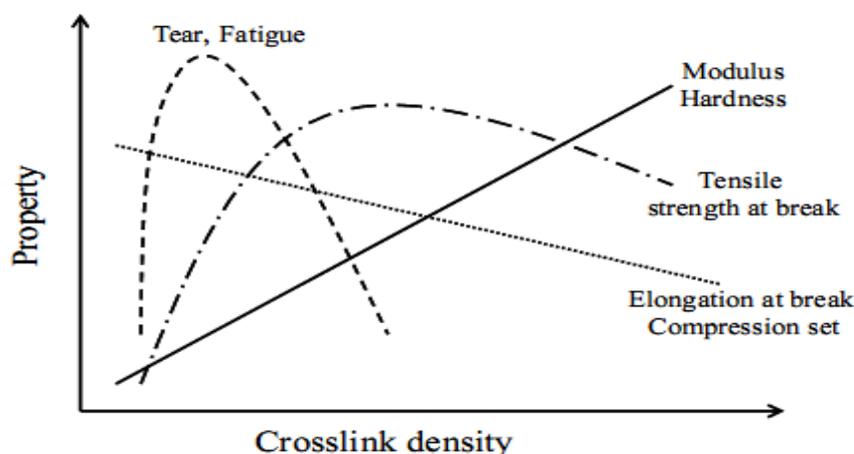


รูปที่ 4.15 ค่าความแข็งและค่าการผิดรูปถาวรจากการดึงของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA โดยแปรรุ TMPTMA ในปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 4.15 พบว่า ความแข็งของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดซึ่งสังเกตได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่มีค่าความชันหรือมอดูลัสสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ TMPTMA และให้ผลในทำนองเดียวกันกับผลต่างทอร์ก ($M_H - M_L$) ที่มีค่าสูงขึ้นดังตารางที่ 4.2 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Henning และ Richard (2005) ดังรูปที่ 4.16 เส้นโค้ง A ไม่ใช่โคเอเจนต์ ในการวัลคาไนซ์ ส่วน B และ C ใช้โคเอเจนต์ โดย B จะเป็นโคเอเจนต์ในกลุ่มที่ประกอบด้วย acrylate, methacrylate ester และ dimaleimides ส่วน C จะเป็นโคเอเจนต์ในกลุ่มที่ประกอบด้วย allylic compound และ low molecular weight vinyl polymer พบว่า การใช้โคเอเจนต์ร่วมในการ วัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ให้ค่าผลต่างค่าทอร์กสูงขึ้นเมื่อเทียบกับไม่ใช่โคเอเจนต์ ส่วนค่าการผิดรูปถาวรจากการดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่ม TMPTMA เนื่องจากการเพิ่ม TMPTMA ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงและความแข็งเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.17 รวมทั้งทำให้เกิดโครงสร้างเป็นโอโมพอลิเมอร์ ซึ่งมีสมบัติความเป็นยาง (Elastic properties) ลดลง



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาในการทดสอบการวัลคาไนซ์เมื่อใช้และไม่ใช้โคเอเจนต์ร่วมในการวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ (Henning and Richard, 2005)



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงกับสมบัติต่างๆ (Doi and Edwards, 2008)

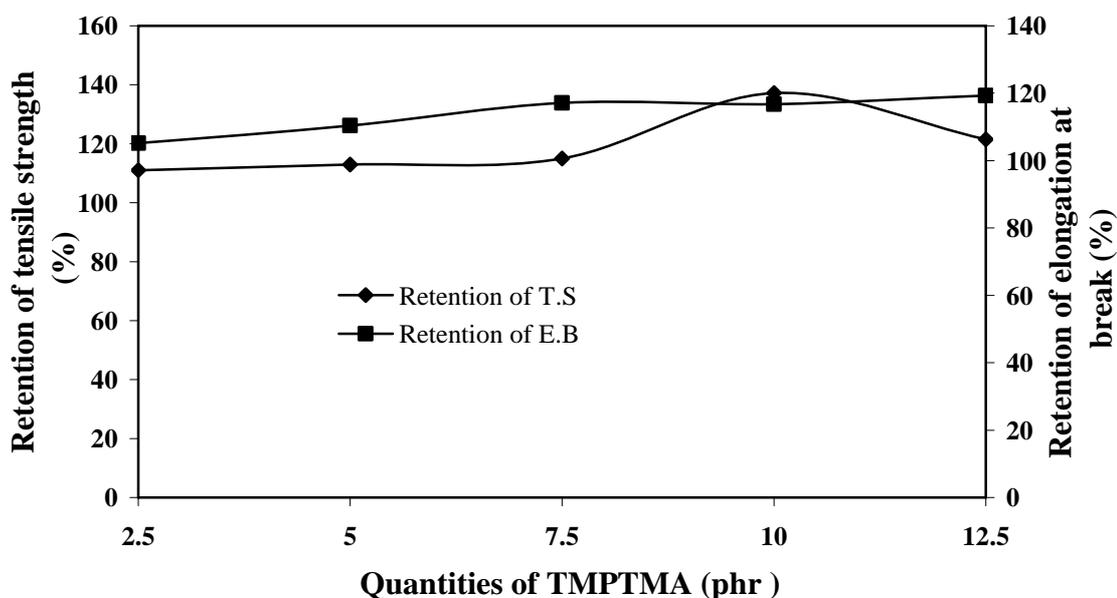
4.1.1.4 อิทธิพลของปริมาณ TMPTMA ต่อสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA

จากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณ TMPTMA ต่อสมบัติหลังการบ่มแรง โดยการนำยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA ไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 อิทธิพลของปริมาณ TMPTMA ต่อการบ่มแรงของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA

Quantities of TMPTMA (phr)	Retention of Tensile strength (%)	Retention of Elongation at break (%)
2.5	110.99	105.19
5.0	112.97	110.37
7.5	115.01	117.06
10.0	137.22	116.76
12.5	121.53	119.27

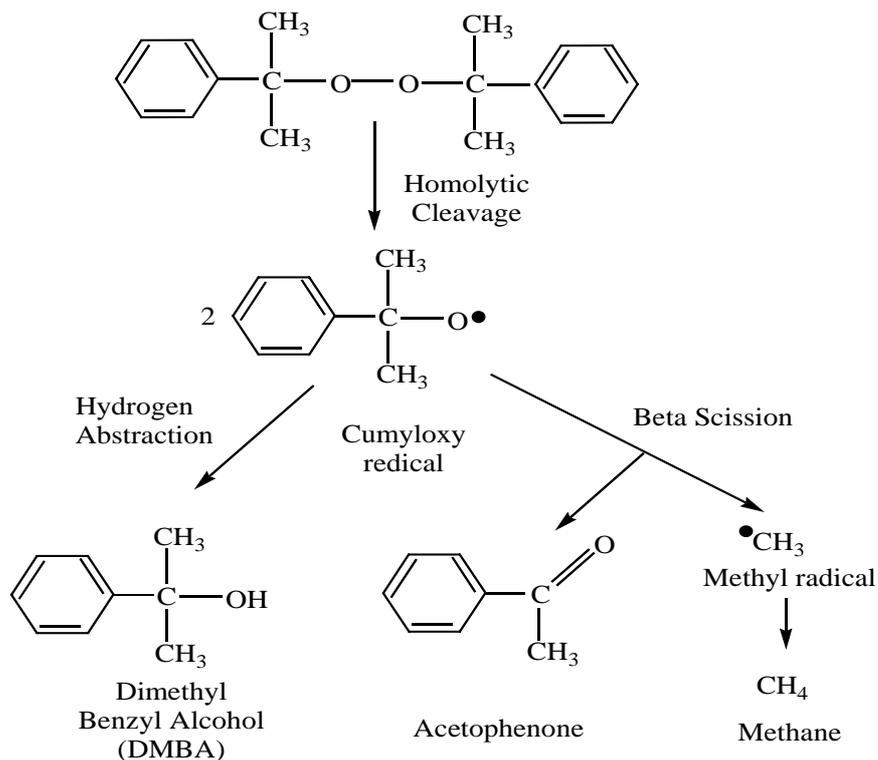
จากตารางที่ 4.4 สามารถนำข้อมูลค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดหลังการบ่มแรงมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ TMPTMA กับ ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่หลังบ่มแรงได้ดังรูปที่ 4.18



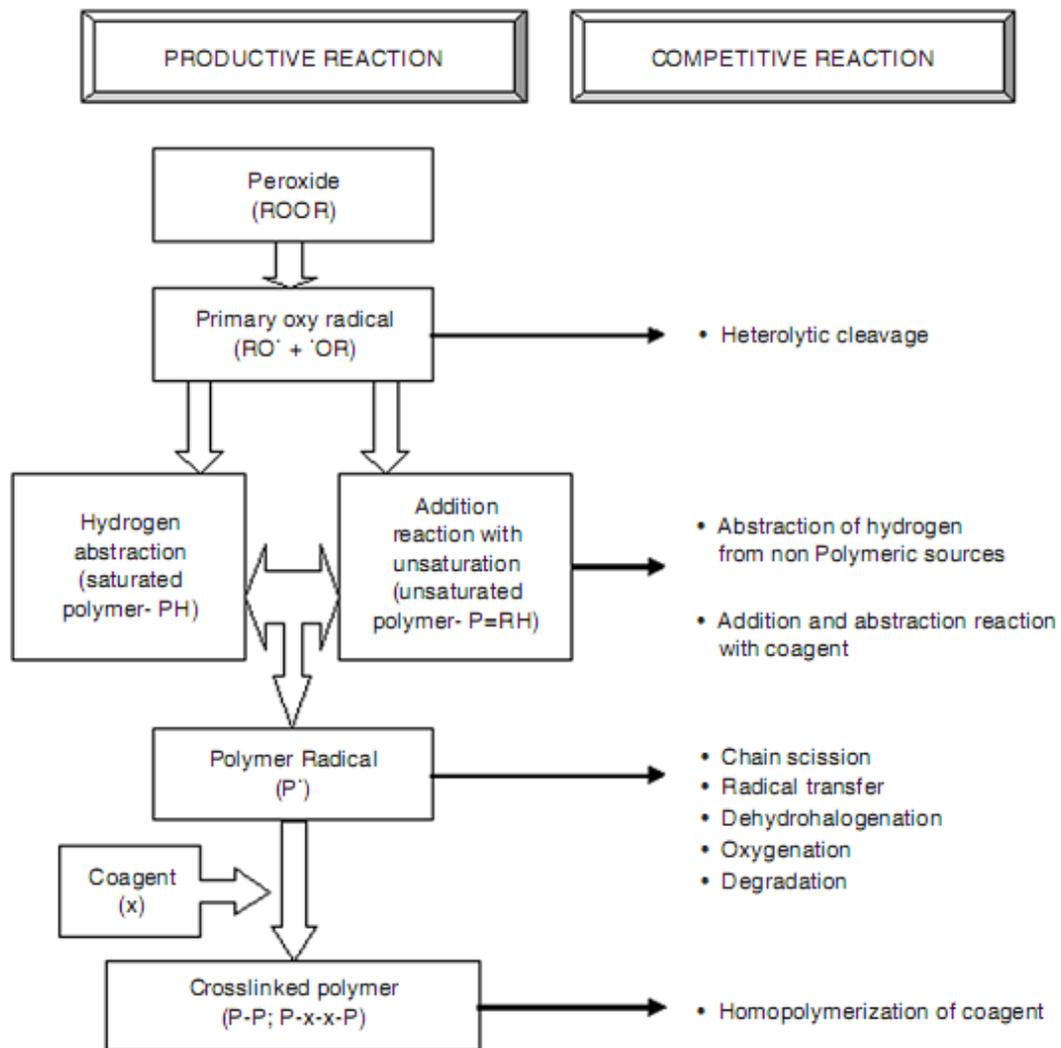
รูปที่ 4.18 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่หลังบ่มแรงของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA โดยแปร TMPTMA ในปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 4.18 พบว่า ความต้านทานต่อแรงดึงที่คงอยู่หลังบ่มแรงของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA โดยแปรปริมาณ TMPTMA มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ TMPTMA และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ

เปรียบเทียบกับค่าความต้านทานต่อแรงดึงก่อนบ่มแรง เนื่องจากการบ่มแรงที่อุณหภูมิสูงอาจจะเป็นการกำจัดผลิตภัณฑ์ คือ acetophenone ที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ระบบเปอร์ออกไซด์ ดังรูปที่ 4.19 การบ่มแรงเป็นการทำ post-curing ของผลิตภัณฑ์หลังจากการวัลคาไนซ์ ทำให้ไม่มีโมเลกุลสารเคมีเร่งการออกซิเดชันในโมเลกุลยาง (พงษ์ธร, 2548) ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงหลังบ่มแรงดีขึ้น ซึ่งทำให้สมบัติของยางไม่ลดลงเมื่อสัมผัสกับความร้อน และยังพบว่า การเพิ่มปริมาณ TMPTMA ทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงหลังบ่มแรงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าสมบัติของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA มีความต้านทานต่อการออกซิเดชันเมื่อใส่ TMPTMA ที่ปริมาณสูงขึ้น ส่วนค่าความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่หลังบ่มแรงของยางเบลนด์ ENR-25/EVA โดยแปรปริมาณ TMPTMA พบว่า มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับความต้านทานต่อแรงดึงกล่าวคือ เมื่อใช้ TMPTMA รวมในระบบวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ทำให้ค่าความสามารถในการยืดจนขาดหลังบ่มแรงมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่ายางเบลนด์มีความทนทานต่อการออกซิเดชันและเมื่อพิจารณาการใช้ TMPTMA ปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการยืดจนขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อาจเป็นผลมาจากการใช้ TMPTMA ในการวัลคาไนซ์ ส่งผลให้ลดการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการ เช่น การถ่ายโอนอนุมูลอิสระ การเสื่อมสลายของสายโซ่ (Babu *et al*, 2008) ดังแผนภาพในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.19 การสลายตัวของเปอร์ออกไซด์ (Dluzeski, 2001)



รูปที่ 4.20 ปฏิกริยารัศคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์และโคเอเจนต์ (Babu *et al*, 2008)

4.1.2 อิทธิพลของปริมาณไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ต่อสมบัติยางคอมพาวนด์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA

เตรียมยางคอมพาวนด์จากยางธรรมชาติอิพอกไซด์ผสมเอทิลีนเอทิลีนไวนิลอะซิเตท โดยแปรปริมาณ DCP ดังนี้คือ 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 และ 6.0 phr ร่วมกับการใช้ TMPTMA ปริมาณ 7.5 phr ตามหัวข้อที่ 3.3.1.2 เพื่อทดสอบสมบัติการแปรรูป สมบัติการวัลคาไนซ์ สมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่ง ได้ผลการทดลองดังนี้

4.1.2.1 อิทธิพลของปริมาณไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ต่อค่าความหนืดมูนี้ของยางคอมพาวนด์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA

ความหนืดมูนี้ของยางคอมพาวนด์ระหว่างยางธรรมชาติอิพอกไซด์กับเอทิลีนไวนิลอะซิเตท (ENR-25/EVA) ที่แปรปริมาณไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ ต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ความหนืดมูนนี่ของยางคอมพาวนด์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA โดยแปรปริมาณ DCP ต่างๆ

Quantities of DCP (phr)	Mooney viscosity ML 1+4 (125 °C)
1.0	12
2.0	12
3.0	13
4.0	14
5.0	15
6.0	20

จากตารางที่ 4.5 พบว่า ความหนืดมูนนี่ของยางคอมพาวนด์เพิ่มขึ้นตามปริมาณไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากการทดสอบที่อุณหภูมิ 125 °C สารวัลคาไนซ์คือ ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ สามารถเกิดการแตกตัวและทำให้เกิดการเชื่อมโยงของยางคอมพาวนด์ไปบางส่วน แต่ที่อุณหภูมิดังกล่าวนี้สารที่กล่าวมาข้างต้นไม่สามารถแตกตัวได้ 100% จึงไม่สามารถเกิดการเชื่อมโยงได้สมบูรณ์และเมื่อเพิ่มปริมาณสารที่กล่าวข้างต้นการแตกตัวจะเกิดมากขึ้น ดังตารางที่ 4.6 ส่งผลให้ค่าความหนืดมูนนี่เพิ่มสูงขึ้น

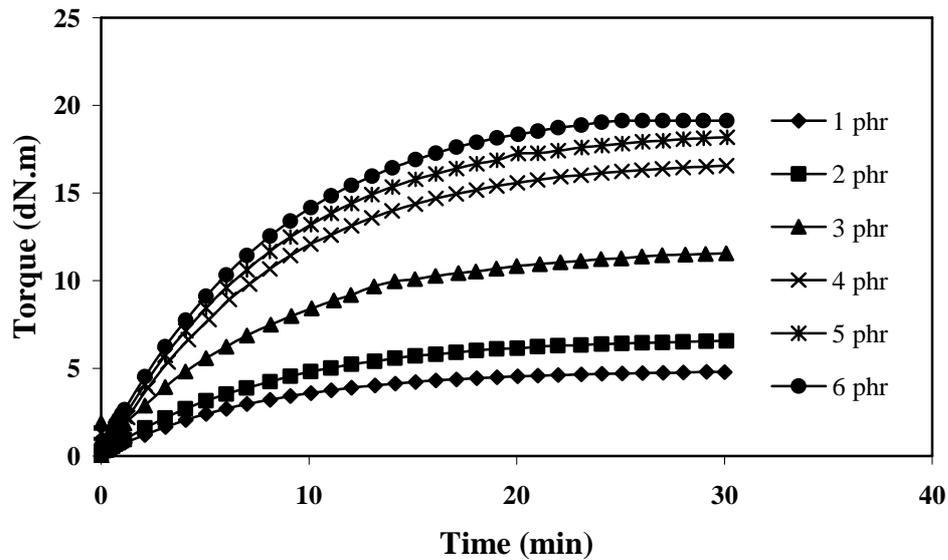
ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการคงรูปกับร้อยละของการสลายตัวของเปอร์ออกไซด์

เวลา (จำนวนเท่าของค่าครึ่งชีวิต)	*การสลายตัวของเปอร์ออกไซด์ (%)
1	50.0
2	75.0
3	87.5
4	93.8
5	96.9
6	98.4
7	99.2
8	99.6
9	99.8
10	99.9

* ที่อุณหภูมิ 150°C สลายตัว 10 นาที อุณหภูมิ 100°C สลายตัว 60 ชั่วโมง และที่ 25°C สลายตัว 2000 ปี (Dluzneski, 2001)

4.1.2.2 อิทธิพลของปริมาณไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ต่อลักษณะการวัลคาไนซ์ยางคอมพาวนด์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA

ทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวนด์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA ที่อุณหภูมิ 160°C โดยใช้ปริมาณ TMPTMA 7.5 phr และแปรปริมาณ DCP ดังนี้คือ 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 และ 6.0 phr ได้ลักษณะวัลคาไนซ์ ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาในการทดสอบการวัลคาไนซ์ของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA โดยแปรโดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาในการทดสอบการวัลคาไนซ์ของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA โดยแปรโดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ พบว่า กราฟมีลักษณะเป็นแบบ plateau curve โดยค่าทอร์กมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณโดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากการเพิ่มโดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ ทำให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระปริมาณมากขึ้น ทำให้พันธะเชื่อมโยงเกิดได้ตามไปด้วยเพิ่มขึ้น

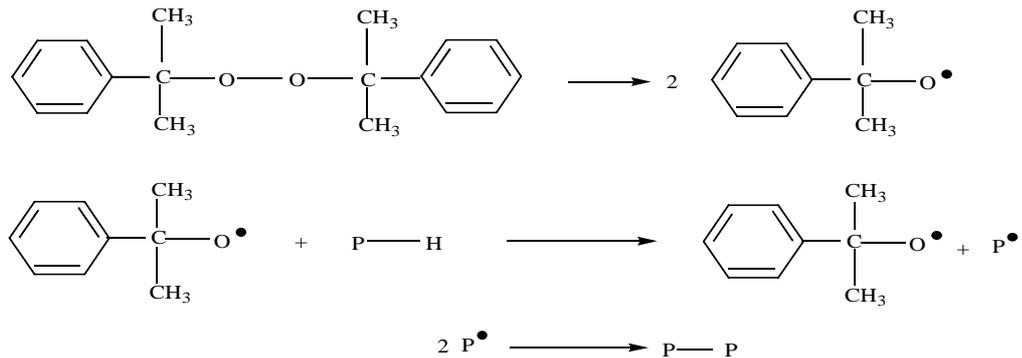
จากรูปที่ 4.21 สามารถหาค่าสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับเอทิลีนไวนิลอะเซเตท (ENR-25/EVA) ที่แปรปริมาณ DCP ต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวนด์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA โดยแปรปริมาณ โดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ ต่างๆ

Quantities of DCP (phr)	M_L (dN.m)	M_H (dN.m)	$M_H - M_L$ (dN.m)	Cure time t_{c90} (min)	Scorch	
					time (min)	CRI (1/min)
1.0	0.28	4.82	4.54	18.07	2.02	6.25
2.0	0.33	6.57	6.24	17.08	1.73	6.55
3.0	0.70	11.57	10.87	16.00	1.00	6.66
4.0	0.62	16.57	15.95	16.11	0.90	6.57
5.0	0.63	18.19	17.56	16.08	0.76	6.56
6.0	0.66	19.10	18.44	16.09	0.71	6.54

จากตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบผลต่างค่าทอร์ก ($M_H - M_L$) พบว่า มีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณโดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากปริมาณของอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจากการแตกตัวของโดคิวมิลเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์เกิดได้มากขึ้นตามไปด้วย ดังรูปที่ 4.22 กล่าวคือ การสลายตัวของเปอร์

ออกไซด์เมื่อได้รับการกระตุ้นจากความร้อน แล้วเกิดเป็นอนุมูลอิสระของอัลคอกซีและอนุมูลอิสระนี้เป็นตัวตั้งไฮโดรเจนอะตอมจากยางทำให้เกิดอนุมูลอิสระบนโมเลกุลยางหรือพอลิเมอร์และอนุมูลอิสระบนโมเลกุลยางรวมกันเกิดเป็นพันธะการเชื่อมโยง ซึ่งพันธะการเชื่อมโยงเป็นแบบคาร์บอน-คาร์บอน (C-C linkage) และหนึ่งโมเลกุลของเปอร์ออกไซด์จะทำให้เกิดหนึ่งพันธะการเชื่อมโยงในยาง นอกจากนี้พบว่า การเพิ่มปริมาณไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ ทำให้เวลาสกอก เวลาการวัลคาไนซ์มีค่าลดลง ส่วนอัตราการวัลคาไนซ์มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก



รูปที่ 4.22 การเชื่อมโยงทางเคมีของพอลิเมอร์จากการวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ (พงษ์ธร, 2548)

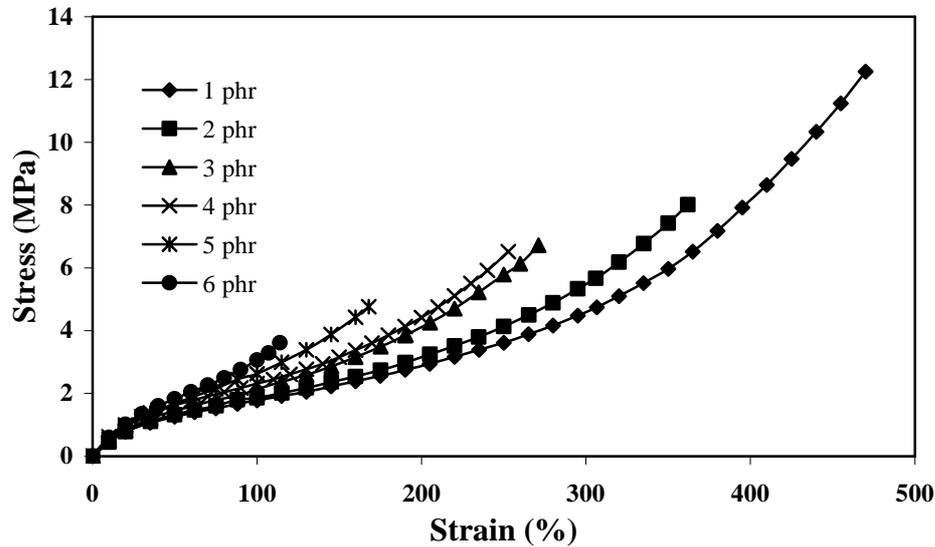
4.1.2.3 สมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA ที่แปรปริมาณไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ต่างๆ

ทดสอบสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA ที่แปรปริมาณไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ดังนี้คือ 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 และ 6.0 phr โดยใช้ปริมาณ TMPTMA 7.5 phr ได้ผลดังตาราง 4.8

ตารางที่ 4.8 อิทธิพลของปริมาณไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ต่อสมบัติเชิงกลยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA

Quantities of DCP (phr)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Hardness (shore A)	Tear strength (N/mm)	Tension set (%)	Area under stress-strain curve
1.0	12.26±0.90	470±23.63	55.0±1.52	30.66±1.29	3.5±0.29	2028.84
2.0	8.02±0.48	362±9.17	57.0±0.45	28.30±1.45	5.0±0.58	1196.62
3.0	6.73±0.70	271±16.09	61.5±0.91	21.14±1.69	5.0±0.76	812.43
4.0	6.53±0.48	252±25.11	63.5±0.27	25.04±0.44	5.5±0.00	757.20
5.0	4.75±0.32	168±7.57	64.0±0.82	16.85±1.52	7.5±0.29	415.62
6.0	3.61±0.37	114±8.08	67.5±0.50	13.07±1.40	7.5±0.29	224.80

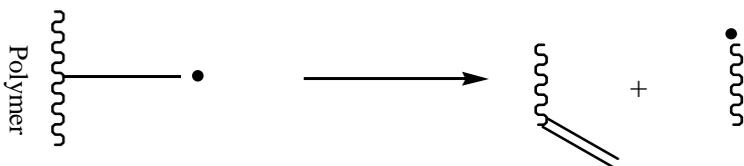
ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA ที่แปรโดคิวมิลเปอร์ ออกไซด์ในปริมาณต่างๆ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดแสดงดังรูปที่ 4.23



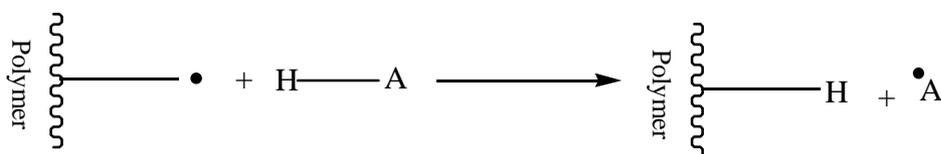
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA ที่แปรโดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ในปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 4.23 พบว่า การใช้โดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้ยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีความแข็งแรงและความสามารถในการยืดลดลง เป็นผลมาจากเกิดปฏิกิริยาที่เกิดการแข่งขันกันในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ เช่น การตัดสายโซ่หลักของโมเลกุลพอลิเมอร์ การเคลื่อนย้ายอนุมูลอิสระ (Dluzneski, 2001) แสดงดังรูปที่ 4.24 ปฏิกิริยาดังกล่าวจะส่งผลให้สายโซ่หลักของพอลิเมอร์สั้นลง

Scission of Polymer backbone

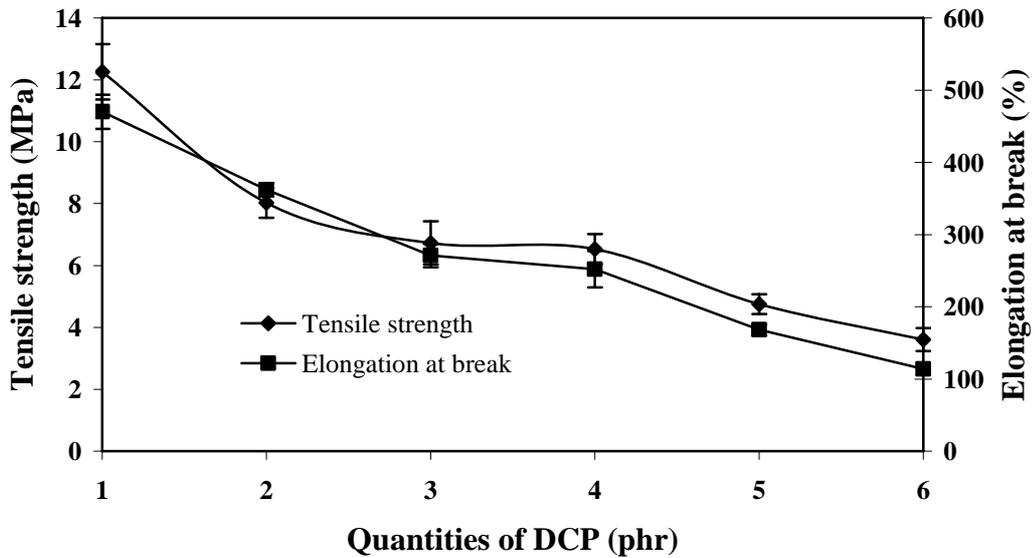


Radical Transfer



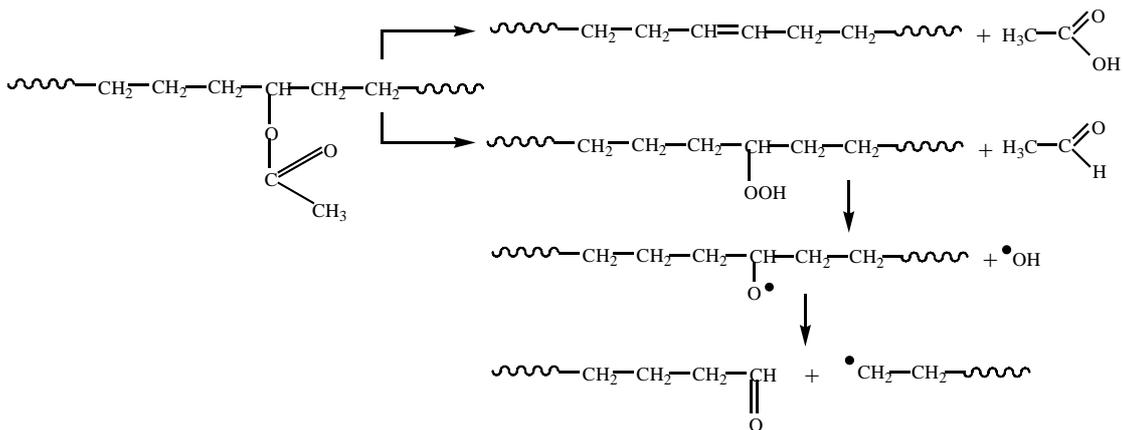
รูปที่ 4.24 การตัดสายโซ่หลักของโมเลกุลพอลิเมอร์และการเคลื่อนย้ายอนุมูลอิสระระหว่างการวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ (Dluzneski, 2001)

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดในรูปที่ 4.23 สามารถคำนวณหาความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดได้ดังตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.25



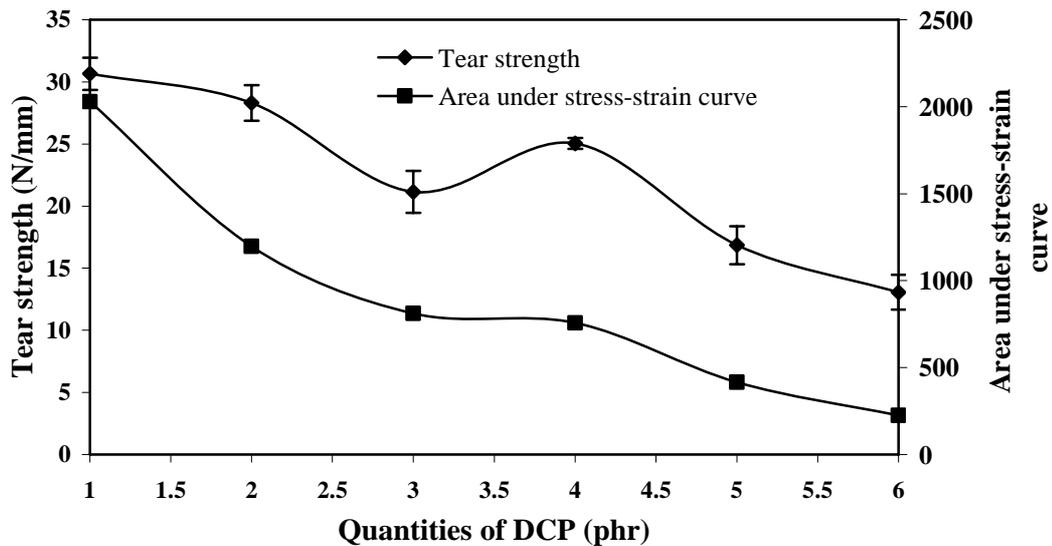
รูปที่ 4.25 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA ที่แปรโดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ในปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 4.25 พบว่า เมื่อปริมาณโดคิวมิลเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดลดลง ซึ่งอธิบายได้เช่นเดียวกับรูปที่ 4.23 กล่าวคือ เกิดปฏิกิริยาการแข่งขันกันระหว่างการวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ เช่น การตัดสายโซ่หลักของโมเลกุลพอลิเมอร์ การเคลื่อนย้ายอนุมูลอิสระ เป็นต้น โดยการตัดสายโซ่จะเกิดทั้งในยาง ENR-25 และ EVA ซึ่งการตัดสายโซ่ของโมเลกุล EVA อาจเกิดจากปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 4.26 ส่งผลให้ลดผลึกของยาง ENR-25 และ EVA ระหว่างการดึงทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงลดลง



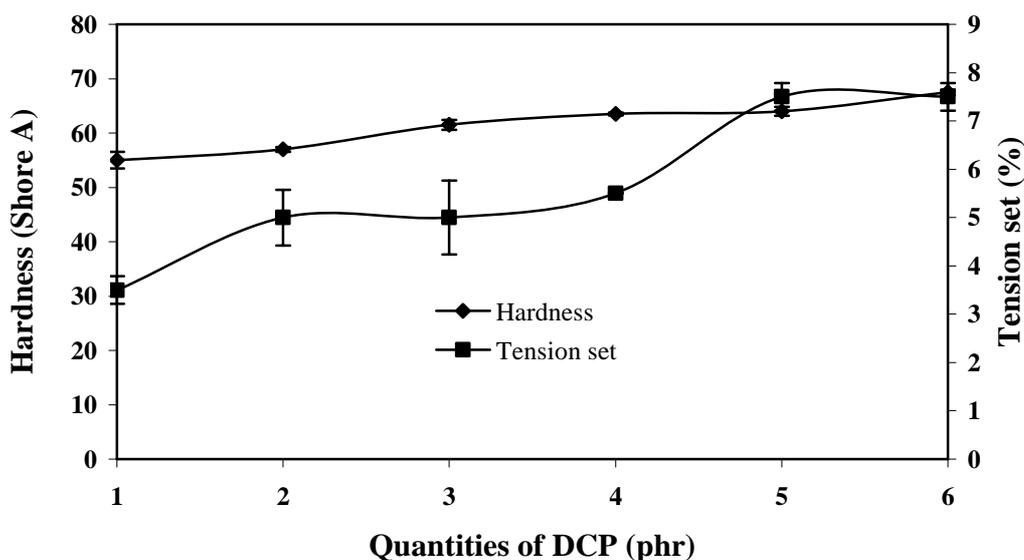
รูปที่ 4.26 ปฏิกิริยาการตัดสายโซ่ของโมเลกุล EVA ระหว่างการวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ (Stelescu, 2011)

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA ได้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด พื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียด ค่าความแข็งและค่าการบิดรูปถาวรเนื่องจากการดึง ดังตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.27-4.28



รูปที่ 4.27 ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดแบบมุมและพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียดของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA โดยแปรโดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ในปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 4.27 พบว่า ความต้านทานต่อการฉีกขาดแบบมุมของยางเบลนด์ลดลงเมื่อปริมาณ โดคิวมิลเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น โดยให้ผลการทดลองในทำนองเช่นเดียวกับความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดซึ่งสามารถอธิบายด้วยเหตุผลเช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาถึงพื้นที่ใต้กราฟซึ่งแสดงถึงพลังงานในการทำให้ชิ้นตัวอย่างเสียหายหรือความเหนียว (Toughness) พบว่า พื้นที่ใต้กราฟมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณโดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ซึ่งสามารถอธิบายด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับกราฟความเค้น-ความเครียด กล่าวคือ การใช้โดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้ยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีความแข็งแรงและความสามารถในการยืดลดลง เป็นผลมาจากเกิดปฏิกิริยาที่เกิดการแข่งขันกันในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ เช่น การตัดสายโซ่หลักของโมเลกุลพอลิเมอร์ การเคลื่อนย้ายอนุมูลอิสระ ปฏิกิริยาดังกล่าวจะส่งผลให้สายโซ่หลักของพอลิเมอร์สั้นลง



รูปที่ 4.28 ความแข็งและค่าการผิดรูปถาวรจากการดึงของยางเบลนด์ ENR-25/EVA โดยแปรโดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ในปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 4.28 พบว่า ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์เนื่องการเพิ่มไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ทำให้ความแข็งตึงเพิ่มขึ้นซึ่งสังเกตได้จากความชันของกราฟในรูปที่ 4.23 หรือค่ามอดูลัสที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน เนื่องจากการเพิ่มปริมาณไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ ทำให้ยางหรือพอลิเมอร์มีความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงเพิ่มมากขึ้นทำให้ยางวัลคาไนซ์มีความยืดหยุ่นลดลง ส่งผลให้ความสามารถในการคืนรูปได้น้อยลงเมื่อคลายแรงที่กระทำต่อยางวัลคาไนซ์

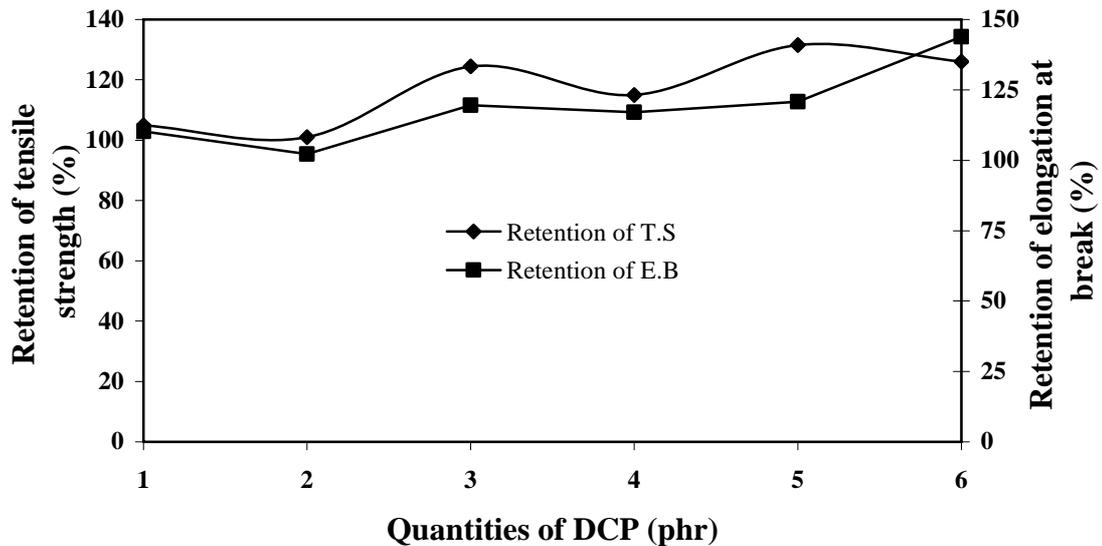
4.1.2.4 อิทธิพลของปริมาณไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ต่อสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA

จากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ต่อสมบัติหลังการบ่มแรงของยาง วัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA โดยการนำยางวัลคาไนซ์ไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 สมบัติที่คงอยู่หลังบ่มแรงของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA โดยแปรปริมาณไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์

Quantities of DCP (phr)	Retention of Tensile strength (%)	Retention of Elongation at break (%)
1.0	104.89	110.21
2.0	101.00	102.21
3.0	124.52	119.56
4.0	115.01	117.06
5.0	131.58	120.83
6.0	126.04	143.86

จากตารางที่ 4.9 สามารถนำข้อมูลค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดหลังการบ่มแรงมาเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่หลังบ่มแรงของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA โดยแปรโดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ในปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 4.29 พบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่หลังบ่มแรงของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหรือมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติหลังบ่มแรงมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณโดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการบ่มแรงเนื่องจากการอบที่อุณหภูมิสูงเป็นการกำจัดผลผลิตกัณฑ์ (acetophenone) ที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ระบบวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ดังรูปที่ 4.19 ทำให้ไม่มีสารที่เร่งการเกิดออกซิเดชันในโมเลกุลยางรวมทั้งอาจเกิดจากอิทธิพลของการใช้โดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ ปริมาณมากเกินไป เมื่อมีการบ่มแรงโดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ที่เหลือสามารถแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระแล้วเกิดการวัลคาไนซ์ต่อเนื่องส่งผลให้ยางวัลคาไนซ์มีสมบัติดังกล่าวดีขึ้นและมีการเปลี่ยนแปลงหลังบ่มแรงมากขึ้นตามไปด้วย

4.1.3 อิทธิพลของอัตราส่วน ENR-25/EVA ต่อสมบัติของยางคอมพาวนด์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA

เตรียมยางคอมพาวนด์จากยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสมเอทิลีนไวนิลอะซิเตท ตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.3.1.3 โดยแปรอัตราส่วนยางเบลนด์ระหว่าง ENR-25/EVA ดังนี้ คือ 0/100, 25/75, 50/50, 75/25 และ 100/0 % โดยน้ำหนัก จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติการแปรรูป สมบัติการวัลคาไนซ์ สมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรง ได้ผลการทดลองดังนี้

4.1.3.1 อิทธิพลของอัตราส่วน ENR-25/EVA ต่อค่าความหนืดมูนีของยางคอมพาวนด์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA

ค่าความหนืดมูนีของยางคอมพาวนด์ระหว่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับเอทิลีนไวนิลอะซิเตท (ENR-25/EVA) ที่แปรอัตราส่วนยางเบลนด์ ENR-25/EVA ต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.10

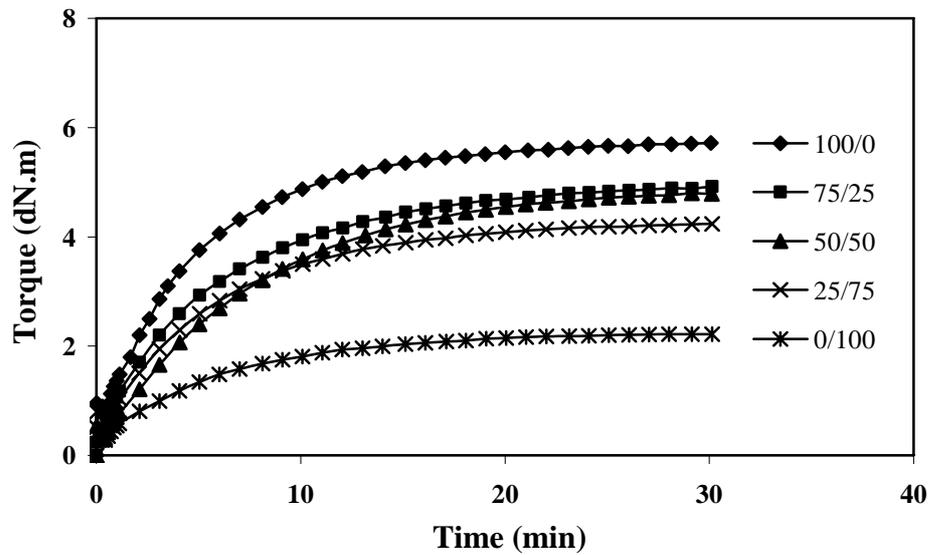
ตารางที่ 4.10 ความหนืดมูนนี่ของยางคอมพาวนด์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ที่ปริมาณต่างๆ

ENR-25/EVA ratio	Mooney viscosity (ML 1+4, 125 °C)
100/0	26
75/25	14
50/50	11
25/75	12
0/100	11

จากตารางที่ 4.10 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเอทิลีนไวนิลอะซิเตท ทำให้ค่าความหนืดมูนนี่ของยางคอมพาวนด์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA มีค่าลดลง เนื่องจากเอทิลีนไวนิลอะซิเตทมีโครงสร้างของพอลิเอทิลีนที่มีลักษณะเป็นเทอร์โมพลาสติกมีน้ำหนักโมเลกุล 58,300 g/mol (Arsac *et al*, 1999) เป็นเอทิลีนไวนิลอะซิเตท เกรดที่มีปริมาณ เปอร์เซนต์ไวนิลอะซิเตท เท่ากับ 28% ซึ่งมีจุดอ่อนตัวที่ 49°C และมี T_m 2 ค่า คือ $T_{m1} = 45.5$ °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิหลอมของไวนิลอะซิเตท ส่วน $T_{m2} = 73.5$ °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิหลอมของเอทิลีน ทำให้เอทิลีนไวนิลอะซิเตทมีค่าความหนืดมูนนี่ต่ำกว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า เมื่อผสมลงไปยางธรรมชาติอีพอกไซด์ ทำให้ความหนืดมูนนี่ของยางคอมพาวนด์มีค่าลดลง

4.1.3.2 อิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ ENR-25/EVA ต่อลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวนด์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA

ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนยางเบลนด์ต่อลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวนด์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA ที่อัตราส่วนต่างๆดังนี้คือ 100/0, 75/25, 50/50, 25/75, 0/100 % โดยน้ำหนัก โดยใช้ DCP = 1.0 phr ร่วมกับ TMPTMA = 7.5 phr ได้ลักษณะการวัลคาไนซ์ดังรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาในการทดสอบการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวนด์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA ที่อัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 4.30 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาในการทดสอบการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวนด์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA ที่อัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ พบว่า ลักษณะกราฟที่ได้เป็นแบบ plateau curve โดยค่าทอร์กมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของยาง ENR-25 ในยางเบลนด์เพิ่มขึ้น สามารถหาค่าสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับเอทิลีนไวนิลอะซิเตท (ENR-25/EVA) ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ ได้ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวนด์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA ที่อัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ

ENR/EVA ratio	M_L (dN.m)	M_H (dN.m)	$M_H - M_L$ (dN.m)	Cure	Scorch	CRI (1/min)
				time t_{c90} (min)	time (min)	
100/0	0.71	5.72	5.13	13.19	1.60	8.62
75/25	0.40	4.92	4.52	15.57	1.58	7.15
50/50	0.28	4.82	4.54	18.08	2.02	6.22
25/75	0.33	4.24	3.91	15.10	1.78	7.50
0/100	0.28	2.23	1.95	16.10	4.63	8.30

จากการทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ยางคอมพาวนด์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเอทิลีนไวนิลอะซิเตทในยางเบลนด์มากขึ้น ทำให้ค่าทอร์กต่ำสุด (M_L) ค่าทอร์กสูงสุด (M_H) และผลต่างของค่าทอร์ก ($M_H - M_L$) มีแนวโน้มลดลง แสดงว่ายาง ENR-25 สามารถเกิดการเชื่อมโยงได้มากกว่า EVA เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาสูงกว่า นอกจากนี้โมเลกุลของเอทิลีนไวนิลอะซิเตทมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีปริมาณไวนิลอะซิเตท 28%

โดยโมล ทำให้เกิดปริมาณพันธะเชื่อมโยงได้น้อยกว่า เมื่อพิจารณาเวลาสกอชและเวลาวัลคาไนซ์ พบว่า การเพิ่มปริมาณเอทิลีนไวนิลอะซิเตท ทำให้สมบัติดังกล่าวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ เกิดได้ช้าลง ส่วนอัตราการวัลคาไนซ์ พบว่า ยาง ENR-25 มีอัตราการวัลคาไนซ์เท่ากับ 8.62 ในขณะที่เอทิลีนไวนิล อะซิเตทมีค่าเท่ากับ 8.30 แสดงให้เห็นว่ายางธรรมชาติออกไซด์เกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่า ส่วนในกรณียางเบลนด์ พบว่า มีอัตราการวัลคาไนซ์ต่ำกว่าการใช้พอลิเมอร์หรือยางเดี่ยวๆ เป็นผลมาจากจากอนุมูลอิสระที่เกิดจากการแตกตัวของเปอร์ออกไซด์ไปดึงไฮโดรเจนอะตอม (Hydrogen abstraction) จากโครงสร้างโมเลกุล ENR-25 ได้เร็วกว่า EVA โดยพลังงานที่ใช้ในการดึงไฮโดรเจนที่ตำแหน่งอัลไลลิก (Allylic position) บนโครงสร้างของ ENR-25 มีค่าเท่ากับ 88 (kcal/mol) ส่วนพลังงานที่ใช้ในการดึงไฮโดรเจนที่ตำแหน่งคาร์บอนตติยภูมิ (Tertiary Carbon) บนโครงสร้างของ EVA มีค่าเท่ากับ 91 (kcal/mol) (Dluzneski, 2001)

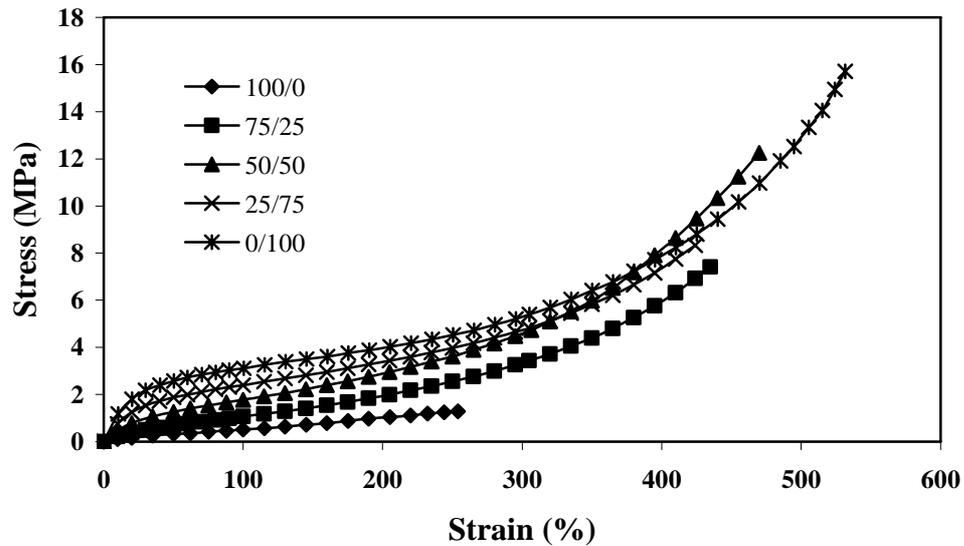
4.1.3.3 สมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ ENR-25/EVA ต่างๆ

ทดสอบสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ ENR-25/EVA ดังนี้คือ 100/0, 75/25, 50/50, 25/75 และ 0/100 % โดยน้ำหนัก ได้ผลดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 อิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ ENR-25/EVA ต่อสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์

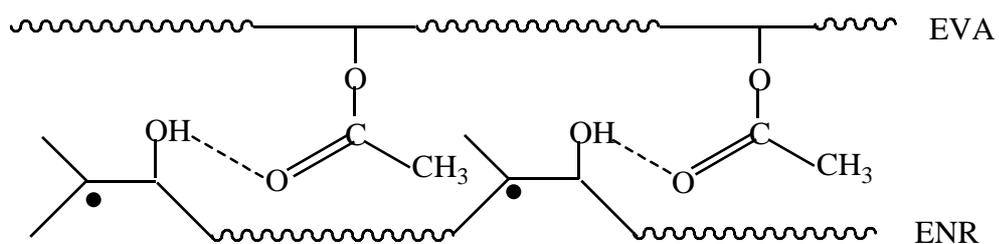
ENR-25/EVA ratio	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Hardness (shore A)	Tear strength (N/mm)	Tension set (%)	Area under stress-strain curve
100/0	1.26±0.19	254±5.20	37.0±0.84	9.75±0.58	2.5±0.29	172.75
75/25	7.50±0.48	435±14.57	43.0±0.84	20.90±0.88	3.5±0.50	1150.26
50/50	12.26±0.90	470±26.64	55.0±1.52	30.66±1.29	3.5±0.29	2028.84
25/75	8.35±0.41	424±21.20	62.0±1.14	35.78±0.69	10.5±0.50	1634.42
0/100	15.47±1.17	532±2.52	66.0±2.07	44.78±0.31	18.0±0.29	2095.54

ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนด์ ENR-25/EVA โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ ENR-25/EVA ดังนี้คือ 100/0, 75/25, 50/50, 25/75 และ 0/100 % โดยน้ำหนัก ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดแสดงดังรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางเบลนด์ ENR-25/EVA โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์

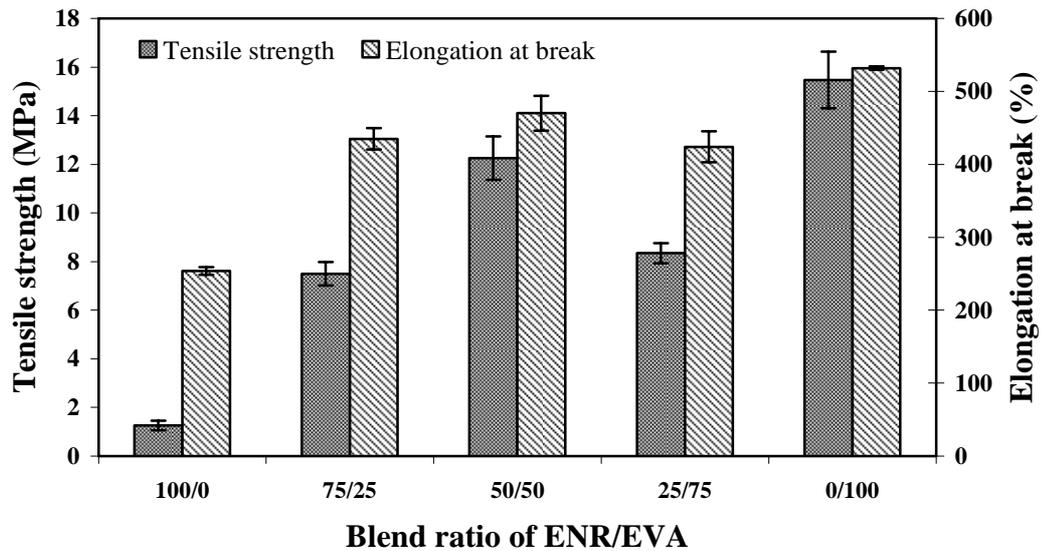
จากรูปที่ 4.31 เมื่อพิจารณาความเค้นหรือมอดูลัสที่ระยะยืดไม่เกิน 300 % พบว่า ค่ามอดูลัสของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณเอทิลีนไวนิลอะซิเตท เนื่องจากเอทิลีนไวนิลอะซิเตทมีส่วนของพอลิเอทิลีนซึ่งสามารถเกิดผลึกได้เมื่อยืดตัวอย่างทดสอบ ซึ่งจะเห็นว่าความชันของกราฟแต่ละอัตราส่วนการเบลนด์มีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาที่ระยะยืดมากกว่า 300 % พบว่า ที่อัตราส่วนการเบลนด์เท่ากับ 50/50 และ 75/25 % โดยน้ำหนัก กราฟมีความชันเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดแรงกระทำระหว่างหมู่ฟังก์ชันฮิพอกไซด์กับไวนิลอะซิเตทดังรูปที่ 4.32 จึงทำให้ยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์มีความเค้นเพิ่มสูงขึ้น



Hydrogen bonding of ENR/EVA blend

รูปที่ 4.32 การเกิดพันธะไฮโดรเจนที่เป็นไปได้ของพอลิเมอร์เบลนด์จากการเบลนด์ ENR/EVA (วิสุทธิ์ , 2552)

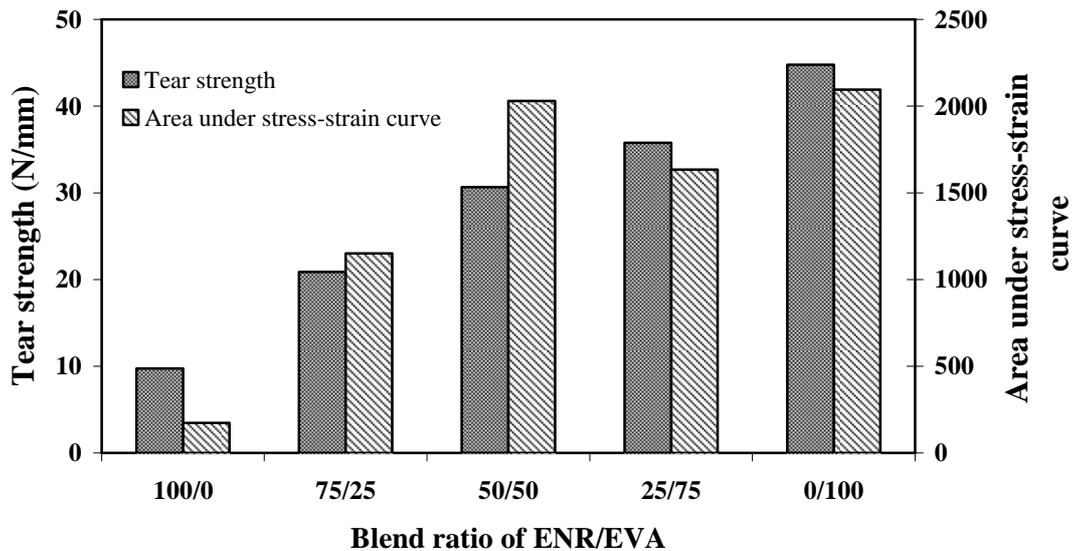
จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดได้ดังตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ ENR-25/EVA ที่อัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ

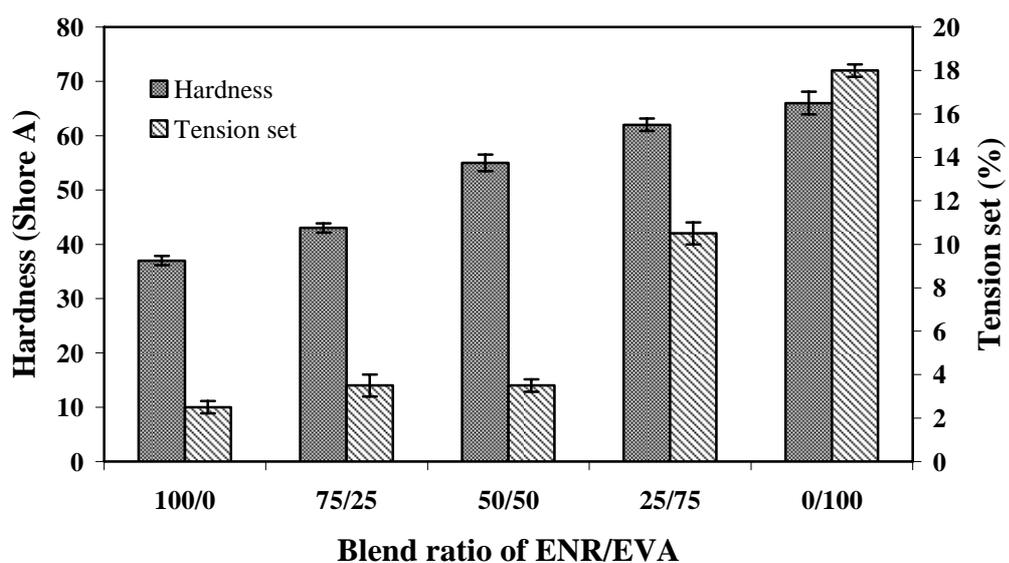
จากรูปที่ 4.33 พบว่า ยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างธรรมชาติอิพอกไซด์กับเอทิลีนไวนิลอะซิเตท มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเอทิลีนไวนิลอะซิเตท เนื่องจากเอทิลีนไวนิลอะซิเตทมีส่วนของพอลิเอทิลีนซึ่งสามารถเกิดการตกผลึกได้ (Henderson, 1993) ทำให้มีความแข็งแรงมากกว่ายางธรรมชาติอิพอกไซด์ และเนื่องจากเอทิลีนไวนิลอะซิเตทมีส่วนของเอทิลีน ซึ่งขณะถูกกระทำด้วยแรงดึงทำให้เกิดการตกผลึกขึ้นในระหว่างการดึง ทำให้ยืดออกได้มาก ส่วนโมเลกุลของยางธรรมชาติอิพอกไซด์เกิดการเชื่อมโยงของพันธะแบบคาร์บอน-คาร์บอน (C-C linkages) การเกิดพันธะเชื่อมโยงแบบดังกล่าวในปริมาณสูง ทำให้ยางธรรมชาติอิพอกไซด์สูญเสียสมบัติด้านความยืดหยุ่น ส่งผลให้มีลักษณะแข็งเปราะจึงทำให้มีสมบัติด้านการยืดที่ต่ำ ในกรณีอัตราส่วนการเบลนด์ 25/75 % โดยน้ำหนัก มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดลดลงอาจเป็นผลมาจากที่อัตราส่วนดังกล่าวนี้ยางธรรมชาติอิพอกไซด์และเอทิลีนไวนิลอะซิเตทมีความเข้ากันได้้น้อยลงหรือเกิดแรงกระทำระหว่างหมู่ฟังก์ชันลดลง

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ได้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด พื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียด ค่าความแข็งและค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึง ดังรูปที่ 4.34-4.35



รูปที่ 4.34 ความต้านทานต่อการฉีกขาดและพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียดของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA ที่อัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 4.34 พบว่า ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณของเอทิลีนไวนิลอะซิเตทและเมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับเอทิลีนไวนิลอะซิเตท พบว่า เอทิลีนไวนิลอะซิเตทมีความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงกว่าซึ่งสอดคล้องกับความต้านทานต่อแรงดึง เมื่อพิจารณาถึงพื้นที่ใต้กราฟซึ่งแสดงถึงพลังงานในการทำให้ชิ้นตัวอย่างเสียหายหรือความเหนียว (Toughness) พบว่า พื้นที่ใต้กราฟมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเอทิลีนไวนิลอะซิเตทซึ่งสอดคล้องกับความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาด กล่าวคือ สมบัติดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเอทิลีนไวนิลอะซิเตท เนื่องจากเอทิลีนไวนิลอะซิเตทมีส่วนของพอลิเอทิลีนซึ่งสามารถเกิดการตกลึกได้ ทำให้มีความแข็งแรงมากกว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์



รูปที่ 4.35 ความแข็งของและค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึงยางเบลนด์ ENR-25/EVA ที่อัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 4.35 พบว่า ค่าความแข็งของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามอัตราส่วนของเอทิลีนไวนิลอะซิเตท เนื่องจากเอทิลีนไวนิลอะซิเตทเป็นเทอร์โมพลาสติกซึ่งมีความแข็ง 85 Shore A (Henderson, 1993) ซึ่งสอดคล้องกับค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึงที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสมบัติด้านความยืดหยุ่นของเอทิลีนไวนิลอะซิเตทมีค่าน้อยกว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์ จึงขึ้นรูปได้น้อย ดังนั้นเมื่อปริมาณของเอทิลีนไวนิลอะซิเตทเพิ่มขึ้นจึงทำให้ค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึงของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA เพิ่มขึ้น

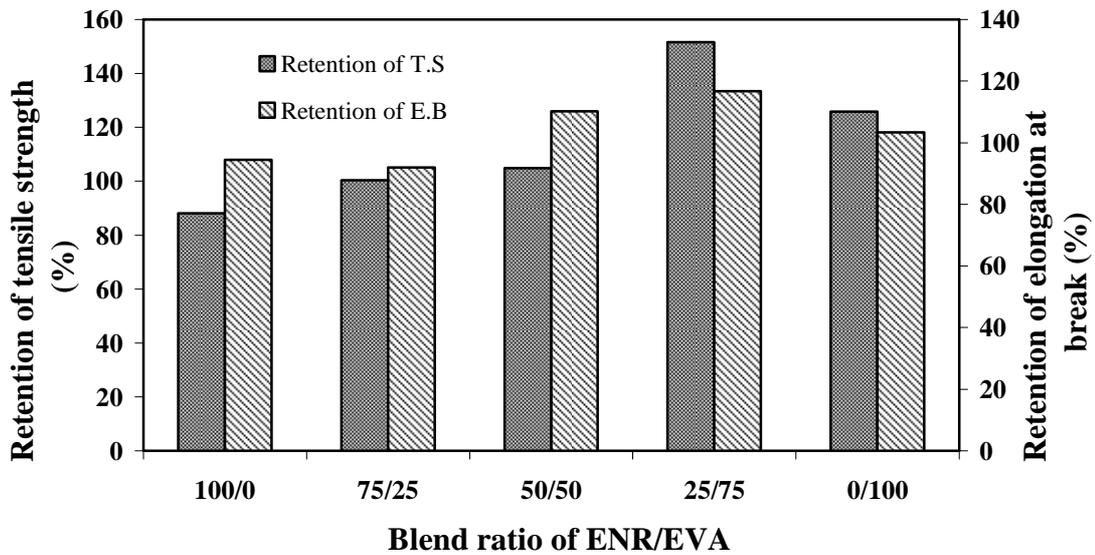
4.1.3.4 สมบัติที่คงอยู่หลังการบ่มเร่งของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA โดยแปรอัตราส่วนยางเบลนด์ต่างๆ

จากการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนยางเบลนด์ ENR-25/EVA ต่อสมบัติหลังการบ่มเร่ง โดยการนำยางเบลนด์ที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้วไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 สมบัติที่คงอยู่หลังบ่มเร่งของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์

ENR-25/EVA ratio	Retention of Tensile strength (%)	Retention of Elongation at break (%)
100/0	88.10	94.49
75/25	100.40	91.95
50/50	104.89	110.21
25/75	151.62	116.75
0/100	125.86	103.38

จากตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่หลังบ่มเร่งของยางเบลนด์ ENR-25/EVA โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์มาเขียนกราฟได้ ดังรูปที่ 4.36



รูปที่ 4.36 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่หลังบ่มแรงของยางเบลนด์ ENR-25/EVA โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 4.36 เป็นค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดหลังบ่มแรงของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA เมื่อพิจารณากรณีที่ใช้ ENR-25 100% โดยน้ำหนัก พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดประมาณ 12 และ 5.5 % ตามลำดับ ซึ่งสมบัติหลังการบ่มแรงมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับก่อนบ่มแรง ในขณะที่อัตราส่วนการเบลนด์อื่นๆ สมบัติหลังบ่มแรงมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงในกรณีที่ใช้อย่างธรรมชาติอีพอกไซด์เดี่ยวๆจะมีค่ามากกว่ากรณีใช้เอทิลีนไวนิลอะซิเตท 100% โดยน้ำหนัก เนื่องจากจากโครงสร้างของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ยังมีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้างทำให้ทนต่อการออกซิเดชันได้น้อยกว่าเอทิลีนไวนิลอะซิเตท ซึ่งโครงสร้างสายโซ่หลักของโมเลกุลมีความอิมตัว เมื่อเพิ่มปริมาณเอทิลีนไวนิลอะซิเตทในยางเบลนด์เป็น 25 และ 50 % โดยน้ำหนัก พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดเกิดขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเอทิลีนไวนิลอะซิเตทเป็น 75 และ 100 % โดยน้ำหนัก จะเห็นผลของการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนแสดงให้เห็นว่าเอทิลีนไวนิลอะซิเตทมีความต้านทานต่อการออกซิเดชันดีกว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์จึงทำให้ทนต่อความร้อนได้ดีกว่า

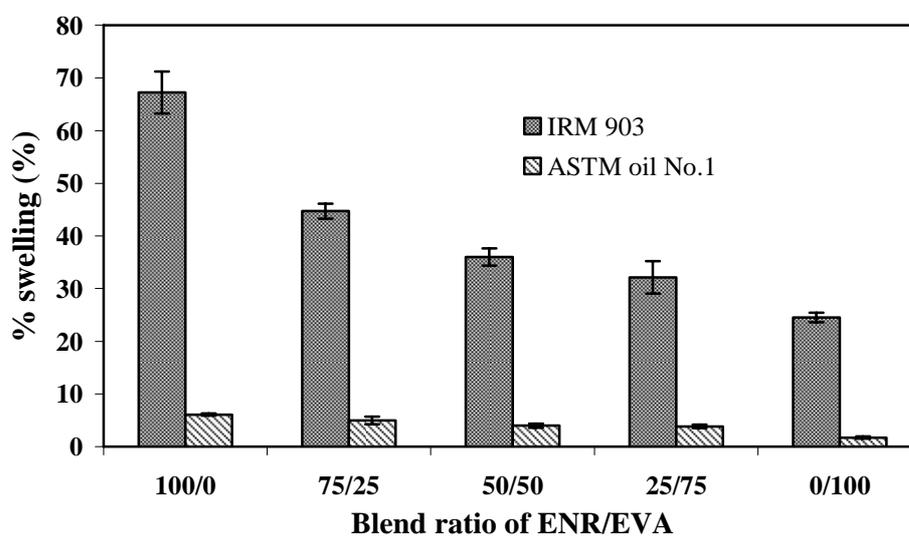
4.1.3.5 สมบัติด้านการทนต่อน้ำมันของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA โดยแปรอัตราส่วนต่างๆ

การทดสอบสมบัติการทนต่อน้ำมันของยางวัลคาไนซ์จากยางเบลนด์ ENR-25/EVA ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ โดยใช้ น้ำมัน 2 ชนิด คือ ASTM oil No.1 และ IRM 903 ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 การบวมพองในน้ำมันของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA ที่แปรอัตราส่วนต่างๆ

ENR-25/EVA ratio	Swelling (%)	
	ASTM oil No. 1	IRM 903
100/0	6.08 ± 0.21	67.23 ± 4.00
75/25	4.96 ± 0.72	44.69 ± 1.46
50/50	3.97 ± 0.42	36.00 ± 1.66
25/75	3.84 ± 0.33	32.12 ± 3.09
0/100	1.72 ± 0.23	24.50 ± 0.92

จากตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบการบวมพองในน้ำมันของยางวัลคาไนซ์จากยางเบลนด์ ENR-25/EVA ที่แปรอัตราส่วนต่างๆได้ดังรูปที่ 4.37



รูปที่ 4.37 การบวมพองในน้ำมันของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA ที่แปรอัตราส่วนยางเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 4.37 พบว่า การบวมพองของยางวัลคาไนซ์จากยางเบลนด์ ENR-25/EVA มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มปริมาณของเอทิลีนไวนิลอะซิเตท เนื่องจากเอทิลีนไวนิลอะซิเตทมีหมู่ไวนิลอะซิเตทเป็นองค์ประกอบซึ่งมีความเป็นขั้วส่งผลให้เอทิลีนไวนิลอะซิเตทมีความต้านทานต่อตัวทำละลายเพิ่มขึ้น โดย ENR-25 และ EVA มีค่า Solubility Parameter เท่ากับ 8.5 และ 8.6 (cal/cm³)^{1/2} ตามลำดับ นอกจากนี้จากโครงสร้างที่เป็นผลึกของเอทิลีนไวนิลอะซิเตทเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความต้านทานต่อตัวทำละลาย กล่าวคือ โครงสร้างของเอทิลีนไวนิลอะซิเตทมีส่วนที่เป็นผลึกซึ่งสามารถขัดขวางการแทรกผ่านของตัวทำละลายในเนื้อพอลิเมอร์หรือยางวัลคาไนซ์ทำให้มีความคงตัวมากขึ้น ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณเอทิลีนไวนิลอะซิเตท ทำให้ยางเบลนด์ ENR-25/EVA ทนน้ำมันเพิ่มขึ้น (วิสุทธิ์, 2552) และเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนเดียวกันพบว่า ยางเบลนด์มีความทนทานต่อน้ำมัน ASTM oil No.1 ได้มากกว่าน้ำมัน IRM 903 เนื่องจากน้ำมัน IRM 903 มีค่า aniline point ที่ 70°C ซึ่งต่ำกว่าน้ำมัน ASTM oil No.1 ซึ่งมีค่า aniline point ที่ 124°C แสดงว่ามีความเป็นขั้วมากกว่า ทำให้สามารถแทรกเข้าไปในยางเบลนด์ได้ดีกว่าลดตรงกระทำที่เกิดขึ้นระหว่าง

โมเลกุลของยางธรรมชาติอีพอกไซด์หรือเอทิลีนไวนิลอะซิเตท จึงทำให้ยางวัลคาไนซ์เกิดการบวมพองในน้ำมัน IRM 903 สูงกว่าน้ำมัน ASTM oil No.1

4.1.4 อิทธิพลของชนิดยางธรรมชาติต่อสมบัติของยางคอมพาวนด์จากการเบลนด์ NR/EVA และ ENR/EVA

เตรียมยางคอมพาวนด์จากยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสมเอทิลีนเอทิลีนไวนิลอะซิเตท ตามวิธีการทดลองในหัวข้อ 3.3.1.4 โดยแปรชนิดยางเบลนด์ คือ NR/EVA, ENR-25/EVA และ ENR-50/EVA เพื่อทดสอบสมบัติการแปรรูป สมบัติการวัลคาไนซ์ สมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่ง ได้ผลการทดลองดังนี้

4.1.4.1 อิทธิพลของชนิดยางธรรมชาติต่อค่าความหนืดมูนนี่ยางคอมพาวนด์จากการเบลนด์ NR/EVA และ ENR/EVA

ค่าความหนืดมูนนี่ของยางคอมพาวนด์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/EVA, ENR-25/EVA และ ENR-50/EVA ที่อัตราส่วน 50/50 % โดยน้ำหนัก แสดงดังตารางที่ 4.15

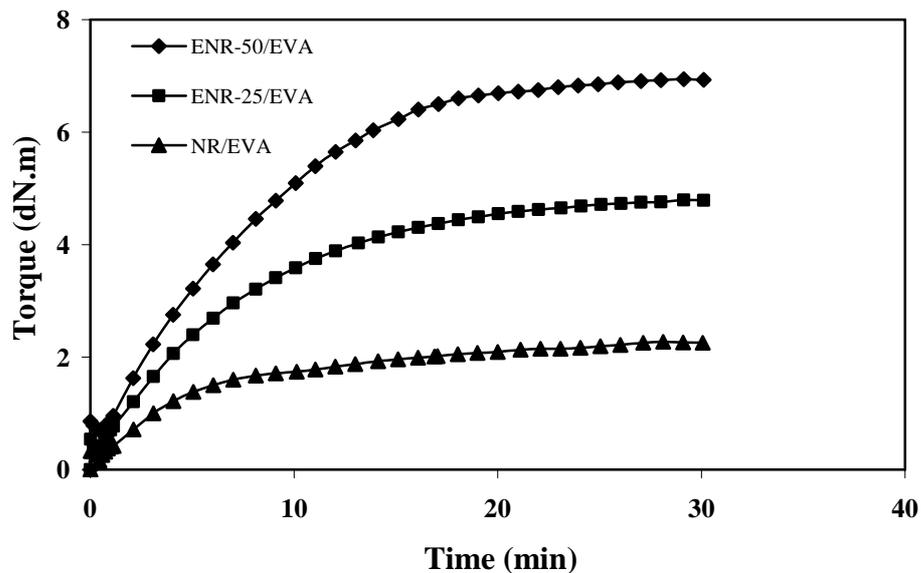
ตารางที่ 4.15 ความหนืดมูนนี่ของยางคอมพาวนด์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA โดยแปรชนิดยาง

Types of Rubber	Mooney viscosity (ML 1+4, 125 °C)
NR/EVA	10
ENR-25/EVA	11
ENR-50/EVA	15

จากตารางที่ 4.15 เป็นค่าความหนืดมูนนี่ของยางคอมพาวนด์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับเอทิลีนไวนิลอะซิเตท (ENR/EVA) เปรียบเทียบกับยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับเอทิลีนไวนิลอะซิเตท (NR/EVA) พบว่า ยางเบลนด์ที่ใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีความหนืดมูนนี่สูงกว่าการเบลนด์ที่ใช้ยางธรรมชาติ เนื่องจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีวงแหวนอีพอกไซด์ ทำให้ความหนืดมูนนี่เพิ่มสูงขึ้นเพราะวงแหวนอีพอกไซด์มีความเป็นขั้ว ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของยางทำให้ต้านทานการเคลื่อนที่หรือการไหลจึงมีความหนืดสูง นอกจากนี้ยังเป็นผลมาจากวงแหวนออกซิเจนในโมเลกุลยาง ENR เกิดการแตกออกเกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซี (Hydroxy groups) ทำให้ยางมีความเป็นขั้วและสามารถเกิดอันตรกิริยากับหมู่คาร์บอนิลในส่วนของไวนิลอะซิเตทในโครงสร้างโมเลกุลเอทิลีนไวนิลอะซิเตทซึ่งเป็นพลาสติกที่มีความเป็นขั้วได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.32 จะเห็นว่าบริเวณผิวประจัญของ ENR กับ EVA สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจน เพราะพอลิเมอร์ทั้งสองมีหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ (วิสุทธิ์, 2552) ส่วนการเบลนด์ระหว่าง NR/EVA จะไม่เกิดแรงกระทำระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด

4.1.4.2 อิทธิพลชนิดของยางต่อลักษณะการวัลคาไนซ์ของคอมพาวนด์จากการเบลนด์ยาง NR/EVA และ ENR/EVA

ศึกษาอิทธิพลของชนิดยางเบลนด์ต่อลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ NR/EVA และ ENR/EVA ที่แปรชนิดยาง คือ NR/EVA, ENR-25/EVA และ ENR-50/EVA โดยใช้อัตราส่วนการเบลนด์ 50/50 % โดยน้ำหนัก ได้ลักษณะการวัลคาไนซ์ดังรูปที่ 4.38



รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาในการทดสอบการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวนด์จากการเบลนด์ NR/EVA และ ENR/EVA ที่แปรชนิดยาง

จากรูปที่ 4.38 พบว่า ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ทั้ง 3 ชนิด เป็นแบบ plateau curve โดยค่าทอร์กสูงสุด (M_H) ของยางเบลนด์ ENR-50/EVA มีค่าสูงสุด รองลงมาคือ ENR-25/EVA และ NR/EVA ตามลำดับ สามารถหาค่าสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติหรือธรรมชาติอ็อกไซด์กับเอทิลีนไวนิลอะซิเตทที่แปรชนิดยางเบลนด์ ได้ดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวนด์จากการเบลนด์ NR/EVA และ ENR/EVA ที่แปรชนิดยาง

Types of Rubber	M_L (dN.m)	M_H (dN.m)	M_H-M_L (dN.m)	Cure time t_{c90} (min)	Scorch time (min)	CRI (1/min)
NR/EVA	0.16	2.28	2.12	19.00	3.50	6.45
ENR-25/EVA	0.28	4.82	4.54	18.08	2.02	6.22
ENR-50/EVA	0.70	6.92	6.22	15.13	2.19	7.72

จากตารางที่ 4.16 เมื่อพิจารณาค่าทอร์กต่ำสุด (M_L) ค่าทอร์กสูงสุด (M_H) และผลต่างของค่าทอร์ก (M_H-M_L) ของยางคอมพาวนด์ พบว่า ยางเบลนด์ทั้ง ENR-25/EVA และ ENR-50/EVA จะให้ผลต่างของค่าทอร์กสูงกว่า NR/EVA เนื่องจากในยางธรรมชาติอ็อกไซด์มีแรงกระทำทางเคมี ซึ่งเกิดแรงดึงดูภายใน

โมเลกุลของยางธรรมชาติอีพอกไซด์จากวงแหวนอีพอกไซด์ส่งผลให้ผลต่างของค่าทอร์กสูงกว่ายางธรรมชาติ นอกจากนี้ยังเป็นผลมาการเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่อีพอกไซด์กับ EVA ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นในรูปที่ 4.32 ส่วนเวลาสก๊อช และเวลาการวัลคาไนซ์ พบว่า มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มหมู่อีพอกไซด์ เนื่องจากหมู่อีพอกไซด์ในโครงสร้างส่งผลให้อัตราการวัลคาไนซ์เกิดเร็วขึ้น

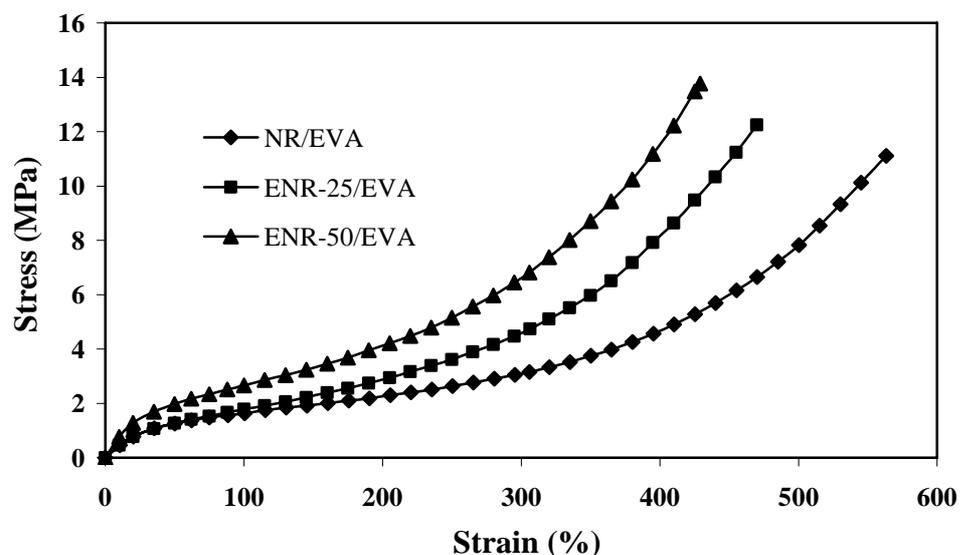
4.1.4.3 สมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA โดยแปรชนิดยาง

ทดสอบสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/EVA และ ENR/EVA ที่แปรชนิดยางเบลนด์ คือ NR/EVA, ENR-25/EVA และ ENR-50/EVA ได้ผลดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 อิทธิพลของชนิดยางต่อสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/EVA และ ENR/EVA

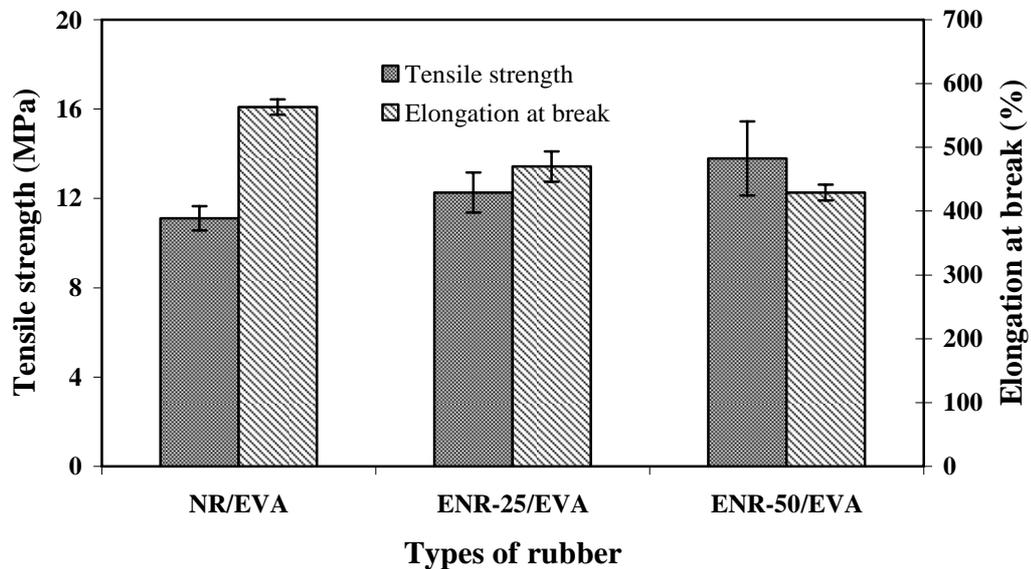
Types of Rubber	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Hardness (shore A)	Tear strength (N/mm)	Tension set (%)	Area under stress-strain curve
NR/EVA	11.11±0.54	563±11.85	53.0±1.30	29.21±0.54	2.5±0.29	2153.30
ENR-25/EVA	12.26±0.90	470±23.64	55.0±1.52	30.66±1.29	3.5±0.29	2028.84
ENR-50/EVA	13.79±1.66	429±12.49	57.0±0.84	31.20±1.25	3.5±0.14	2284.78

ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยางวัลคาไนซ์ โดยแปรที่แปรชนิดยางเบลนด์ คือ NR/EVA, ENR-25/EVA และ ENR-50/EVA ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดแสดงดังรูปที่ 4.39

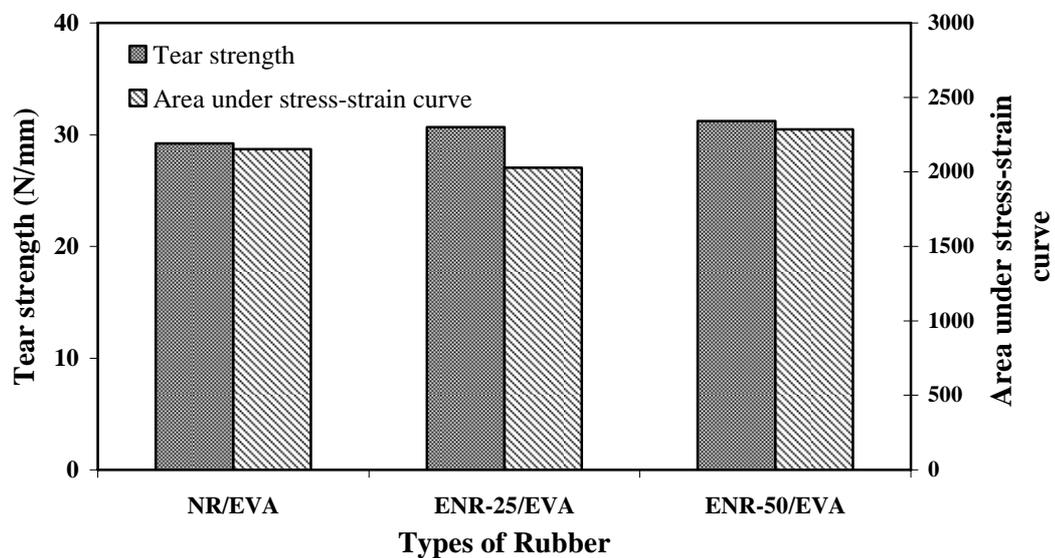


รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/EVA และ ENR/EVA โดยแปรชนิดยางเบลนด์

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาด ได้ดังตารางที่ 4.17 และรูปที่ 4.40 และความต้านทานต่อการฉีกขาดพื้นที่ได้กราฟความเค้น-ความเครียด ค่าความแข็ง และค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึง ดังรูปที่ 4.41-4.42



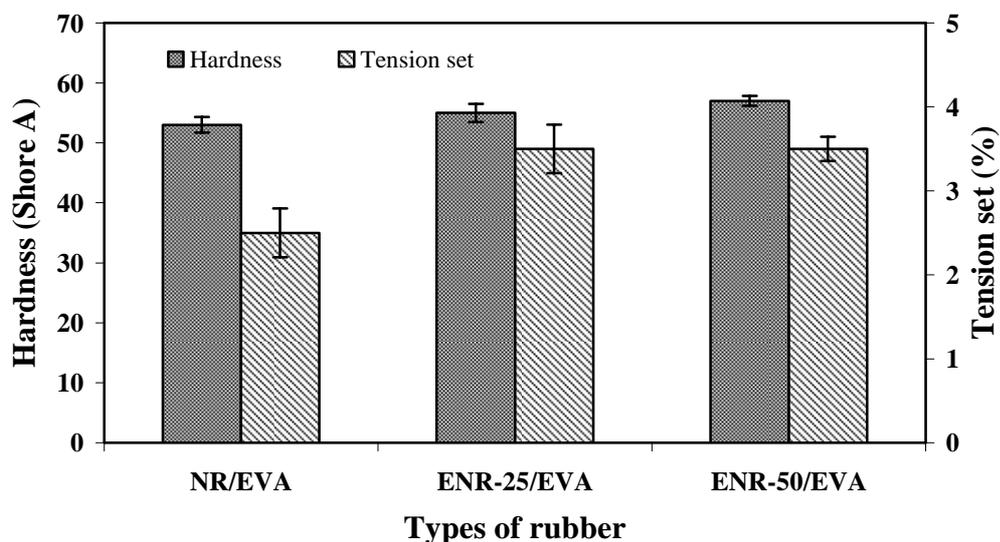
รูปที่ 4.40 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/EVA และ ENR/EVA โดยแปรชนิดยางเบลนด์



รูปที่ 4.41 ความต้านทานต่อการฉีกขาดและพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียดของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/EVA และ ENR/EVA โดยแปรชนิดยางเบลนด์

จากรูปที่ 4.39 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/EVA และ ENR/EVA พบว่า ความชันของกราฟและค่ามอดูลัสจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู่ฮิพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในยางเบลนด์ เนื่องจากในยางธรรมชาติฮิพอกไซด์มีแรงกระทำทางเคมี ซึ่งเกิดแรงดึงดูดภายในโมเลกุลของยางธรรมชาติฮิพอกไซด์จากวงแหวนฮิพอกไซด์ นอกจากนี้ยังเป็นผลมากรเกิดอันตรกิริยา

ระหว่างหม้ออีพอกไซด์กับ EVA ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นในรูปที่ 4.32 ส่วนรูปที่ 4.40-4.41 พบว่า ยางเบลนด์ ENR-25/EVA และ ENR-50/EVA มีความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงกว่า NR/EVA เนื่องจากมีวงแหวนอีพอกไซด์บนโมเลกุลยางธรรมชาติอีพอกไซด์ส่งผลให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล จึงทำให้ค่าความแข็งแรงสูงกว่ากรณีที่ใช้ยางธรรมชาติในการเบลนด์ ส่วนค่าความสามารถในการยืดจนขาดพบว่า ยางเบลนด์ NR/EVA มีค่าสูงกว่ายางเบลนด์ ENR-25/EVA และ ENR-50/EVA เนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่าง ENR กับ EVA ดังที่กล่าวมาแล้วซึ่งส่งผลให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ความสามารถในการยืดลดลง เมื่อพิจารณาระหว่าง ENR-25/EVA และ ENR-50/EVA พบว่า ENR-50/EVA มีความสามารถในการยืดจนขาดต่ำกว่ายางเบลนด์ ENR-25/EVA เนื่องจาก ENR-50 มีวงแหวนอีพอกไซด์ที่สูงกว่าซึ่งเป็นส่วนที่ลดสมบัติด้านความยืดหยุ่นของยางทำให้มีความสามารถในการยืดจนขาดต่ำกว่า เมื่อพิจารณาถึงพื้นที่ใต้กราฟซึ่งแสดงถึงพลังงานในการทำให้ชิ้นตัวอย่างเสียหายหรือความเหนียว (Toughness) พบว่า พื้นที่ใต้กราฟมีแนวโน้มเช่นเดียวกับความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดสามารถอธิบายด้วยเหตุผลเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.42 ความแข็งและค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึงของยางเบลนด์ NR/EVA และ ENR/EVA ที่แปรชนิดยางเบลนด์

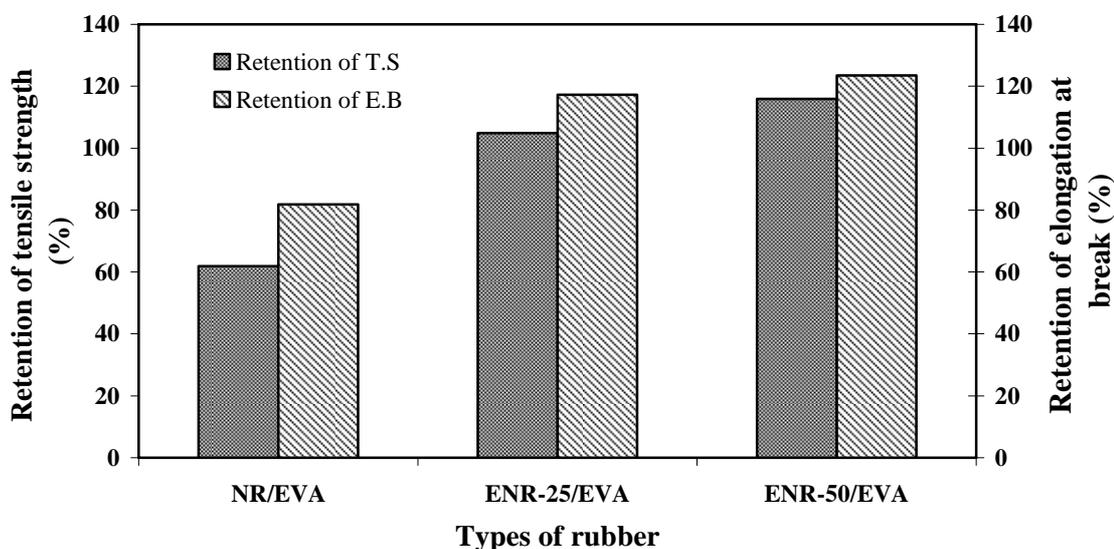
จากรูปที่ 4.42 พบว่า ความแข็งของยางเบลนด์ ENR-50/EVA มีค่าสูงสุด รองลงมาคือ ENR-25/EVA และ NR/EVA ตามลำดับ เนื่องจากมีวงแหวนอีพอกไซด์บนโมเลกุลยางธรรมชาติ อีพอกไซด์ส่งผลให้เกิดแรงกระทำทางเคมีระหว่างโมเลกุล จึงทำให้ค่าความแข็งสูงกว่ายางธรรมชาติ นอกจากนี้ยังมีอิทธิพลจากค่า T_g ของยางทั้ง 3 ชนิดที่ใช้ในการเบลนด์ โดย NR, ENR-25 และ ENR-50 มีค่า T_g เท่ากับ -72 , -47 และ -25°C ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึงพบว่ายางเบลนด์ NR/EVA มีสมบัติด้านการคืนรูปที่ดีกว่าเนื่องจากยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่น (elasticity) มากกว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์ โดยยางธรรมชาติมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและมีโครงสร้างโมเลกุลที่สม่ำเสมอทำให้สามารถกลับคืนรูปได้เหมือนเดิม ซึ่งไม่มีการขัดขวางด้วยหมู่ที่เกาะหรืออันตรกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในโมเลกุลยางธรรมชาติอีพอกไซด์

4.1.4.4 สมบัติที่คงอยู่หลังการบ่มเร่งของยางเบลนด์ NR/EVA และ ENR/EVA โดยแปรชนิดยาง จากการศึกษาค่าคงอยู่ของชนิดยางเบลนด์ NR/EVA, ENR-25/EVA และ ENR-50/EVA ต่อสมบัติ หลังการบ่มเร่ง โดยการนำยางเบลนด์ที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้วไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 สมบัติที่คงอยู่หลังบ่มเร่งของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/EVA และ ENR-25/EVA โดยแปรชนิดยางเบลนด์

Types of Rubber	Retention of Tensile strength (%)	Retention of Elongation at break (%)
NR/EVA	61.84	81.88
ENR-25/EVA	104.89	117.23
ENR-50/EVA	115.88	123.54

จากตารางที่ 4.18 เปรียบเทียบความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่ หลังบ่มเร่งของยางเบลนด์ NR/EVA ENR/EVA โดยแปรชนิดยางเบลนด์มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 4.43



รูปที่ 4.43 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่หลังบ่มเร่งของ ยางเบลนด์ NR/EVA และ ENR/EVA โดยแปรชนิดยางเบลนด์

จากรูปที่ 4.43 พบว่า ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่หลังบ่มเร่ง ของยางเบลนด์ NR/EVA มีสมบัติต่ำกว่าเมื่อเทียบกับก่อนบ่มเร่ง เนื่องจากยางธรรมชาติมีพันธะคู่ใน โครงสร้างโมเลกุลมากกว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์ จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่ายกว่ายางธรรมชาติอี พอกไซด์ ส่งผลทำให้สมบัติทั้งสองประการข้างต้นหลังการบ่มเร่งของยางเบลนด์ NR/EVA มีค่าต่ำกว่า ENR- 25/EVA และ ENR-50/EVA นอกจากนี้ยังพบว่า ยางเบลนด์ ENR-25/EVA และ ENR-50/EVA มีสมบัติหลัง การบ่มเร่งสูงกว่าก่อนการบ่มเร่ง โดยการใช้ ENR-50 ในการเบลนด์ทำให้สมบัติหลังบ่มเร่งมีค่าสูงกว่า ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากหมู่ฟังก์ชันของ ENR-50 และ EVA เกิดแรงกระทำทางเคมีเพิ่มขึ้นระหว่างการบ่มเร่ง

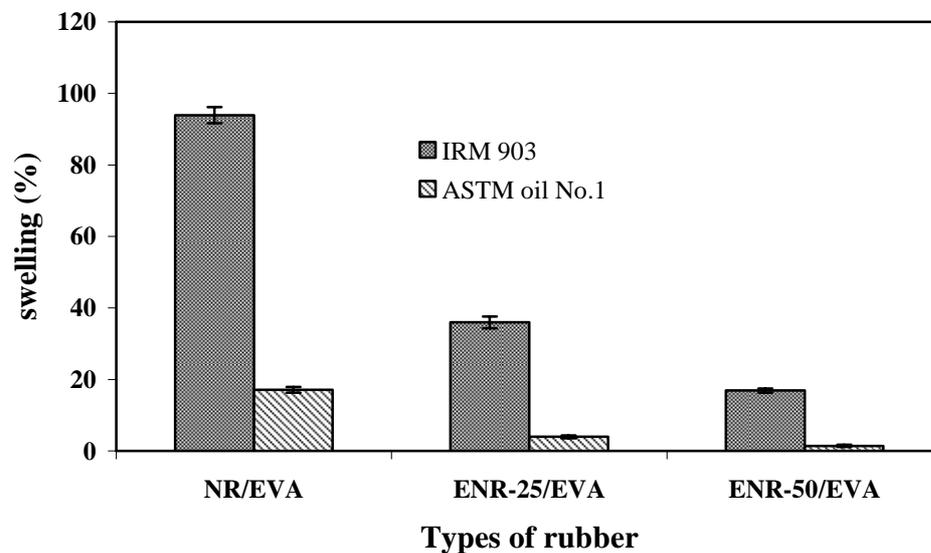
4.1.4.5 สมบัติด้านการทนต่อน้ำมันของยางเบลนด์ NR/EVA และ ENR/EVA โดยแปรชนิดยางเบลนด์

การทดสอบสมบัติการทนต่อน้ำมันของยางวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ NR/EVA และ ENR/EVA ที่แปรชนิดยาง โดยใช้ น้ำมัน 2 ชนิด คือ ASTM oil No.1 และ IRM 903 ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 การบวมพองในน้ำมันของยางเบลนด์ NR/EVA และ ENR/EVA โดยแปรชนิดยางเบลนด์

Types of Rubber	Swelling (%)	
	ASTM oil No. 1	IRM 903
NR/EVA	17.14±0.82	93.91±2.27
ENR-25/EVA	3.97±0.42	36.00±1.66
ENR-50/EVA	1.46±0.29	16.92±0.59

จากตารางที่ 4.18 เปรียบเทียบการบวมพองในน้ำมันของยางเบลนด์ที่แปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ ได้ดังรูปที่ 4.44



รูปที่ 4.44 การบวมพองในน้ำมันของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/EVA และ ENR/EVA ที่แปรชนิดยางเบลนด์

จากรูปที่ 4.44 พบว่า ยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/EVA ทนต่อการบวมพองในน้ำมันได้ต่ำกว่ายางเบลนด์ ENR-25/EVA และ ENR-50/EVA เนื่องจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีส่วนของวงแหวนอีพอกไซด์ซึ่งมีสภาพขั้วจึงทนต่อน้ำมันที่ไม่มีขั้วได้ดี โดย NR, ENR-25 และ ENR-50 มีค่า Solubility Parameter เท่ากับ 8.2, 8.5 และ 8.9 (cal/cm³)^{1/2} ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง การเบลนด์ ENR-25/EVA และ ENR-50/EVA พบว่า ยางธรรมชาติที่มีระดับอีพอกไซด์สูงจะทำให้มีความเป็นขั้วสูงกว่า จึงทำให้ยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-50/EVA ทนต่อน้ำมันได้ดีกว่า ENR-25/EVA เมื่อเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันสอง

ชนิด พบว่า ยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ยาง 3 ชนิด มีความทนทานต่อน้ำมัน ASTM oil No.1 ได้ดีกว่า น้ำมัน IRM 903 เนื่องจากน้ำมัน IRM 903 มีค่า aniline point ที่อุณหภูมิ 70°C ซึ่งต่ำกว่า น้ำมัน ASTM oil No.1 ซึ่งมีค่า aniline point ที่ 124°C จึงทำให้ความสามารถในการละลาย (Solubility) ในยางวัลคาไนซ์ได้มากกว่าลดแรงกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลยางหรือพอลิเมอร์

4.2 สมบัติของยางคอมพาวนด์และยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM

4.2.1 อิทธิพลของปริมาณไตรเมทิลลอลโพรเพนไตรเมทาคริเลตต่อสมบัติยางคอมพาวนด์จากการเบลนด์ ENR-25/CSM

เตรียมยางคอมพาวนด์จากยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสมยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนโดยแปรปริมาณ TMPTMA ต่างๆ ดังนี้คือ 5.0, 7.5, 10.0 และ 12.5 phr ตามหัวข้อที่ 3.3.1.1 เพื่อทดสอบสมบัติการแปรรูป สมบัติการวัลคาไนซ์ สมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรง ได้ผลการทดลองดังนี้

4.2.1.1 อิทธิพลของปริมาณ TMPTMA ต่อค่าความหนืดมูนนี่ของยางคอมพาวนด์

ทดสอบความหนืดมูนนี่ของยางคอมพาวนด์ระหว่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน (ENR-25/CSM) อัตราส่วน 50/50 % โดยน้ำหนัก โดยแปรปริมาณ TMPTMA ต่างๆ ได้ผลดังตารางที่ 4.20

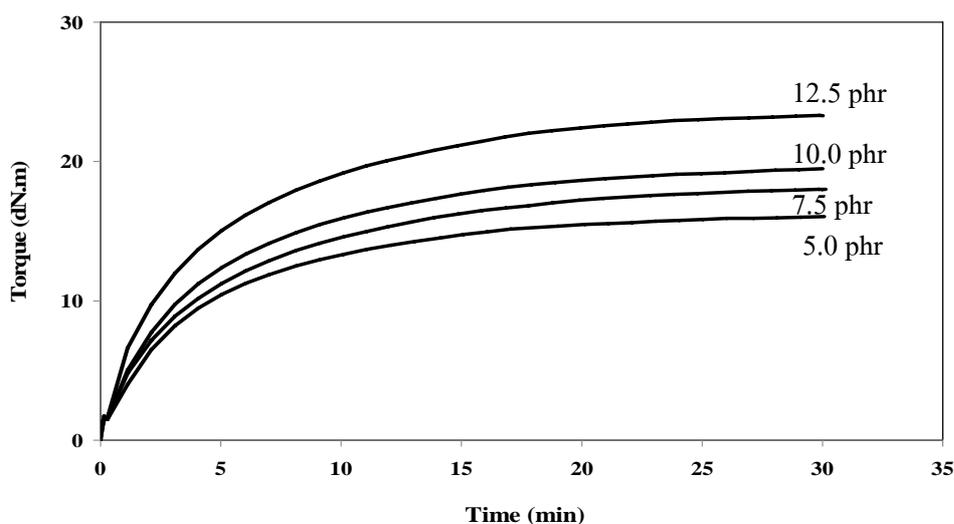
ตารางที่ 4.20 ความหนืดมูนนี่ของยางเบลนด์ ENR-25/CSM โดยแปรปริมาณ TMPTMA ที่ 5.0, 7.5, 10.0 และ 12.5 phr

Quantity of TMPTMA (phr)	Mooney viscosity ML 1+4 (125 °C)
5.0	11
7.5	12
10.0	14
12.5	17

จากตารางที่ 4.20 พบว่า ความหนืดมูนนี่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ TMPTMA เนื่องจากโมเลกุลของ TMPTMA มีพันธะคู่ที่ว่องไวสามารถเกิดปฏิกิริยาโฮโมพอลิเมอร์ไรเซชัน (homopolymerization) ทำให้โมเลกุลมีขนาดใหญ่มากขึ้นจึงขัดขวางการเคลื่อนไหวของโมเลกุลของยางเบลนด์ ดังกลไกการเกิดปฏิกิริยาของโคเอเจนต์ที่เสนอโดย Dluzeski (2001) มี 2 แบบ คือ การเกิดกราฟต์ TMPTMA บนโมเลกุลยาง และการเกิดปฏิกิริยาโฮโมพอลิเมอร์ไรเซชันของ TMPTMA ด้วยกันเอง ดังรูปที่ 4.2

4.2.1.2 อิทธิพลของปริมาณ TMPTMA ต่อลักษณะการวัลคาไนซ์

ทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ ENR-25/CSM ที่อุณหภูมิ 160°C โดยใช้ปริมาณ DCP 4 phr และแปรปริมาณ TMPTMA ต่างๆ คือ 5.0, 7.5, 10.0 และ 12.5 phr ได้ลักษณะการวัลคาไนซ์ดังรูปที่ 4.45



รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาในการทดสอบการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ ENR-25/CSM โดยใช้ DCP 4 phr และแปร TMPTMA ที่ปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 4.45 สามารถนำมาหาค่าสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติอิพอกไซด์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน (ENR-25/CSM) ที่แปรปริมาณ TMPTMA ต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.21 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ ENR-25/CSM โดยแปรปริมาณ TMPTMA ที่ 5.0, 7.5, 10.0 และ 12.5 phr

Quantities of TMPTMA (phr)	M_L (dN.m)	M_H (dN.m)	$M_H - M_L$ (dN.m)	Cure time t_{c90} (min)	Scorch	
					time (min)	CRI (1/min)
5.0	1.50	16.05	14.55	15.08	0.55	6.88
7.5	1.50	18.00	16.50	14.85	0.56	7.00
10.0	1.50	19.42	17.92	13.90	0.43	7.42
12.5	1.60	23.30	21.70	13.86	0.43	7.45

จากตารางที่ 4.21 พิจารณา M_L และ M_H ซึ่งเป็นค่าแรงบิดต่ำสุดและแรงบิดสูงสุด ตามลำดับ พบว่าแรงบิดต่ำสุดมีค่าไม่แตกต่างกันและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อ TMPTMA 12.5 phr แสดงว่ายางเบลนด์มีความหนืดเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนืดมูนิที่เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของปริมาณ TMPTMA และค่าแรงบิดสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน สามารถอธิบายได้ว่า TMPTMA เพิ่มพันธะการเชื่อมโยงได้คือปฏิกิริยาการใช้ TMPTMA ร่วมกับการวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์เกิดปฏิกิริยาแบบรวมหรือเติมเข้าไป (addition reaction) มากกว่าปฏิกิริยาการดึงไฮโดรเจน (hydrogen abstraction) การใช้โคเจนต์จึงทำให้ได้ปริมาณพันธะเชื่อมโยงสูงขึ้น โดยไปลดการขาดออกของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ โดยการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงเกิดได้มากกว่าการขาดของสายโซ่พอลิเมอร์ ดังที่ได้อธิบายในหัวข้อ 4.1.1.2 ซึ่งให้ผลการวิจัยในทำนองเดียวกันกับยางคอมพาวด์จากการเบลนด์ ENR-25/EVA

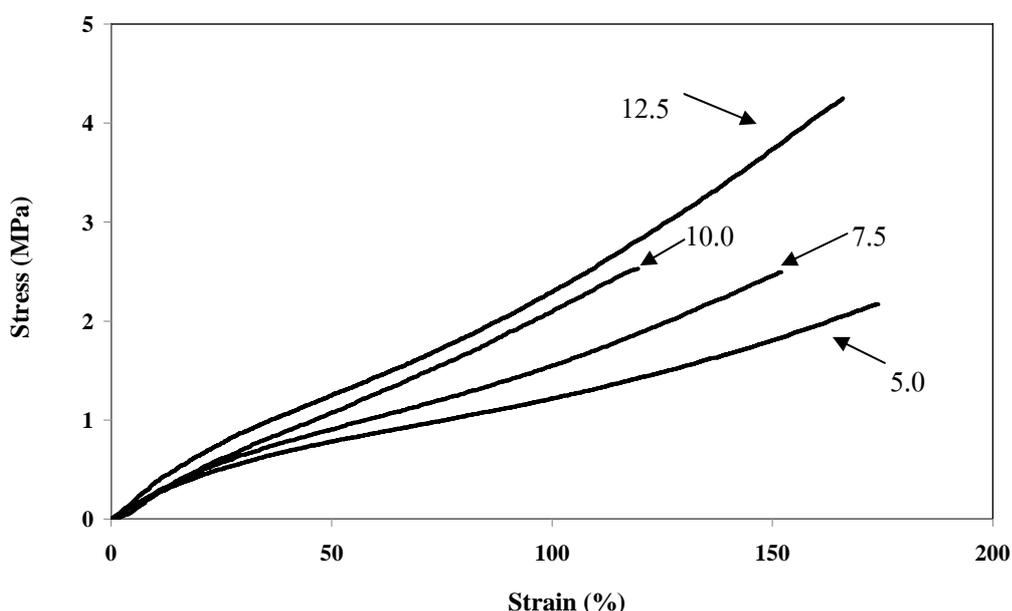
4.2.1.3 สมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ ENR-25/CSM โดยแปรปริมาณ TMPTMA ต่างๆ

ทดสอบสมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ ENR-25/CSM โดยแปรปริมาณ TMPTMA ต่างๆดังนี้คือ 5.0, 7.5, 10.0 และ 12.5 phr ใช้ DCP 4 phr ได้ผลดังตารางที่ 4.22

ตารางที่ 4.22 อิทธิพลของปริมาณ TMPTMA ต่อสมบัติเชิงกล

Quantities of TMPTMA (phr)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tear strength (N/mm)	Hardness (shore A)	Tension set (%)	Area under stress-strain curve
5.0	2.2 ± 0.1	174.0 ± 15.9	12.0 ± 0.2	41.0 ± 0.1	7.5	196
7.5	2.5 ± 0.1	152.0 ± 13.6	12.9 ± 0.2	45.0 ± 0.3	7.5	191
10.0	2.5 ± 0.1	119.5 ± 17.5	13.2 ± 0.3	49.0 ± 0.8	7.5	152
12.5	4.3 ± 0.2	166.0 ± 11.1	17.6 ± 0.2	53.0 ± 0.5	7.5	336

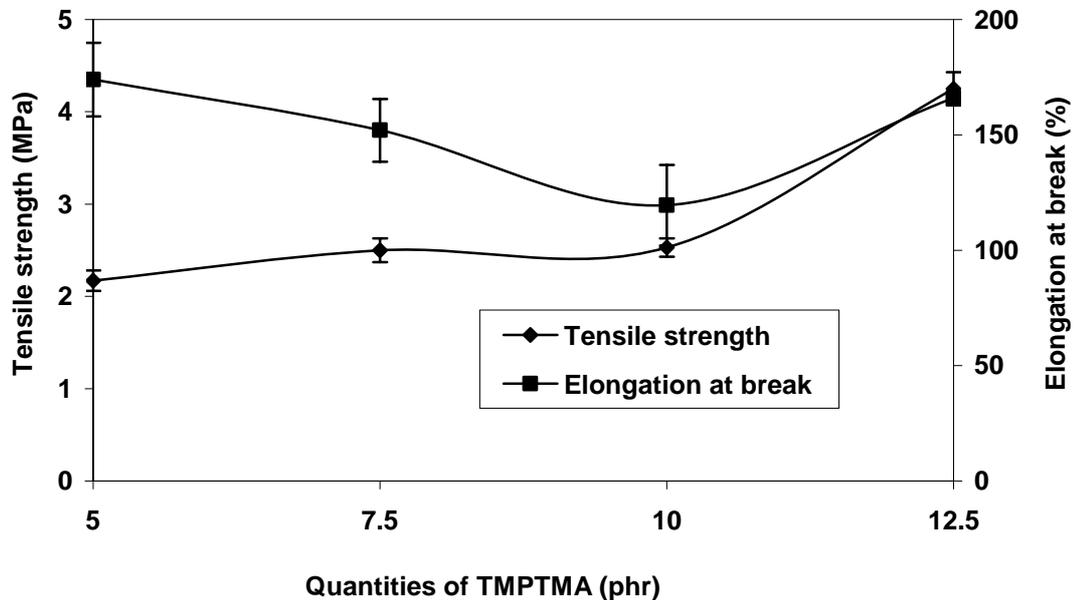
ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนด์ ENR-25/CSM โดยแปรปริมาณ TMPTMA คือ 5.0, 7.5, 10.0 และ 12.5 phr โดยใช้ DCP 4 phr ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด แสดงดังรูปที่ 4.46



รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางเบลนด์ ENR-25/CSM โดยใช้ DCP 4 phr แปร TMPTMA ที่ปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางเบลนด์ ENR-25/CSM ที่แปร TMPTMA ในปริมาณต่างๆ พบว่าโมดูลัสของยางเบลนด์ ENR-25/CSM เพิ่มขึ้น คือความแข็งตึง (stiffness) เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของปริมาณ TMPTMA ซึ่งการใช้ TMPTMA ร่วมกับ DCP สามารถเกิดพันธะการเชื่อมโยงกับโมเลกุลยางได้ ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งให้ผลการวิจัยในทำนองเดียวกับยางคอมพาวนด์จากคาร์บอนแบลนด์ ENR-25/EVA

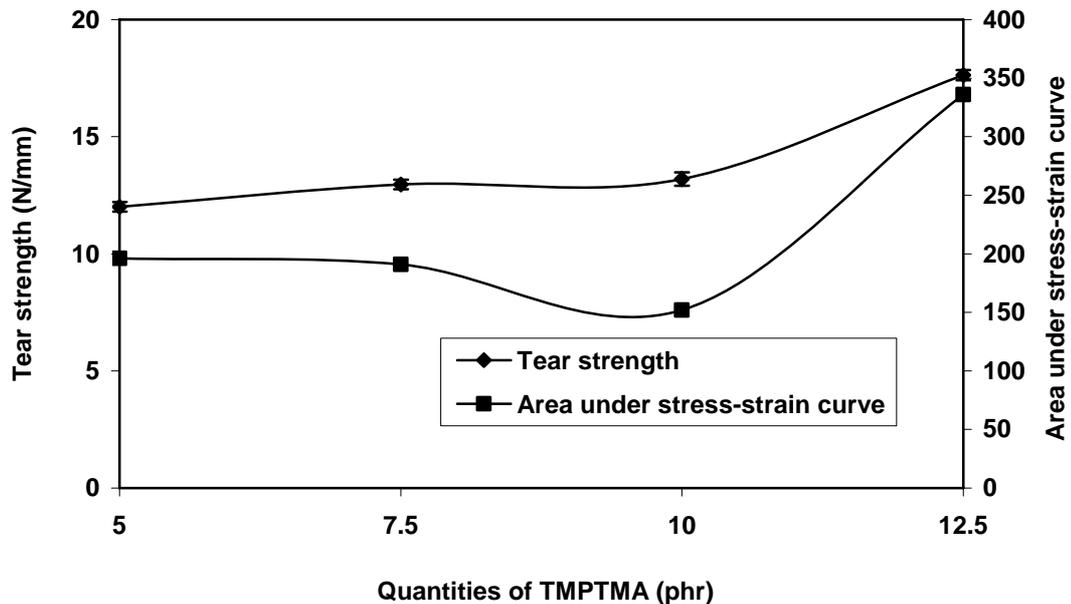
จากความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดได้ดังรูปที่ 4.47



รูปที่ 4.47 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ ENR-25/CSM โดยใช้ DCP 4 phr แปร TMPTMA ที่ปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 4.47 พบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงของยางเบลนด์ ENR-25/CSM มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของ TMPTMA โดยที่ปริมาณมากกว่า 10.0 phr ทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการใช้โคเอเจนต์ TMPTMA ที่ปริมาณสูงขึ้นทำให้เกิดการเชื่อมโยงแบบรูปที่ 4.8 C มากคือเกิดไฮโมพอลิเมอร์ของ TMPTMA เป็นเทอร์โมเซต ทำให้ยางเบลนด์มีความแข็งแรงขึ้น ส่วนค่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ ENR-25/CSM มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ TMPTMA สอดคล้องกับค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิดไฮโมพอลิเมอร์ของ TMPTMA เป็นเทอร์โมเซต แล้วกราฟต์บนโมเลกุลยางทำให้ความสามารถในการยืดลดลง ส่วนที่ปริมาณ TMPTMA มากกว่า 10.0 phr อาจเกิดจากอีกกรณีคือ การใช้ TMPTMA ทำให้ความยาวของพันธะการเชื่อมโยง (chain length) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ยืดได้มาก (Sartomer, 2009)

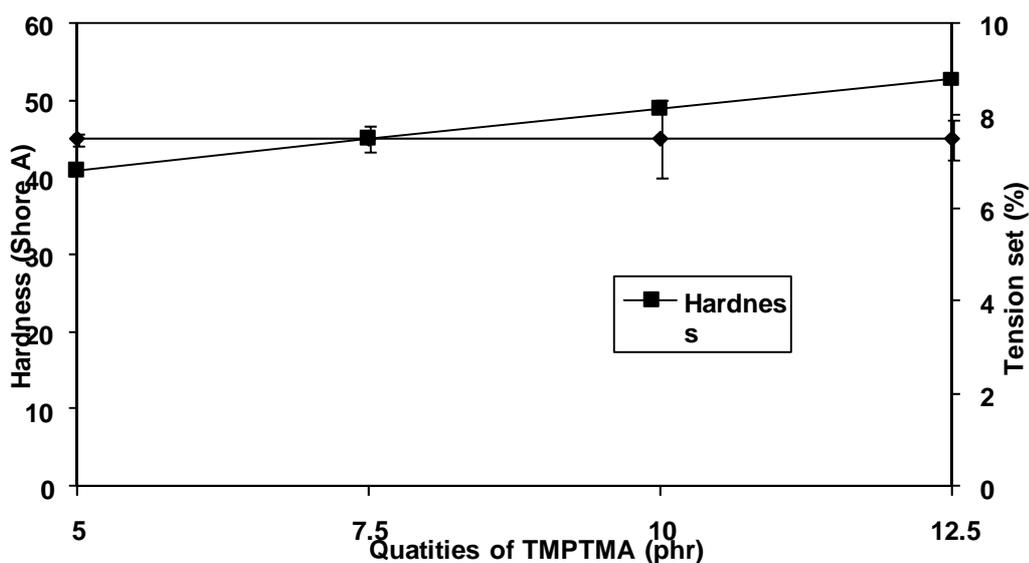
จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ ENR-25/CSM ที่แปรปริมาณ TMPTMA ต่างๆ ได้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด พื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียด ค่าความแข็ง และค่าการผิดรูปถาวร เนื่องจากการดัดรูปที่ 4.48 – 4.49



รูปที่ 4.48 ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดแบบมุมและพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียดของยางเบลนด์ ENR-25/CSM โดยใช้ DCP 4 phr แปร TMPTMA ที่ปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 4.48 พบว่า ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดแบบมุมมีแนวโน้มเช่นเดียวกับความต้านทานต่อแรงดึง กล่าวคือ เมื่อเพิ่มปริมาณ TMPTMA ทำให้ความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มของปริมาณ TMPTMA นี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของสารวัลคาไนซ์ (ไดคิวมิลเปอร์ ออกไซด์) ทำให้ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นดังที่กล่าวไว้แล้วในรูปที่ 4.6 ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดแบบมุมเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาถึงพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียด ซึ่งแสดงถึงพลังงานในการทำให้ชิ้นตัวอย่างเสียหายหรือความเหนียว (Toughness) พบว่า การเพิ่มปริมาณ TMPTMA ในช่วง 5 ถึง 12.5 phr ทำให้พื้นที่ใต้กราฟมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยการใช้ TMPTMA ปริมาณ 12.5 phr มีพื้นที่ใต้กราฟสูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลยางสามารถเกิดพันธะเชื่อมโยงได้มากขึ้นสอดคล้องกับค่าผลต่างของค่าทอร์ก (MH-ML) ความต้านทานต่อแรงดึง ความแข็ง และความต้านทานต่อการฉีกขาด

จากรูปที่ 4.49 พบว่า ความแข็งของยางเบลนด์ ENR-25/CSM มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันกับความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาด ซึ่งสามารถดูได้จากกราฟความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดที่มีค่าโมดูลัสสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ TMPTMA แสดงว่าการใช้ TMPTMA ทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงของยางเบลนด์มากขึ้น และค่าความแข็งสอดคล้องกับผลต่างทอร์ก (MH-ML) ที่มีค่าสูงขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังพบว่า ยางเบลนด์ ENR-25/CSM ในทุกปริมาณการใช้ TMPTMA มีการผิดรูปน้อย สามารถอธิบายได้ว่าโมเลกุลของยางเบลนด์มีสมบัติความยืดหยุ่น (elasticity) สูง ส่งผลให้ยางเบลนด์สามารถคืนรูปได้เมื่อปล่อยแรงกระทำ และปริมาณการใช้ TMPTMA ไม่มีผลต่อการผิดรูปของยางเบลนด์



รูปที่ 4.49 ความแข็งและค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึงของยางเบลนด์ ENR-25/CSM โดยใช้ DCP 4 phr แปร TMPTMA ที่ปริมาณต่างๆ

4.2.1.4 อิทธิพลของปริมาณ TMPTMA ต่อสมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่ง

ทดสอบสมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่งโดยการนำยางเบลนด์ ENR-25/CSM ที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้ว ไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง แล้วทดสอบสมบัติเชิงกล ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.23

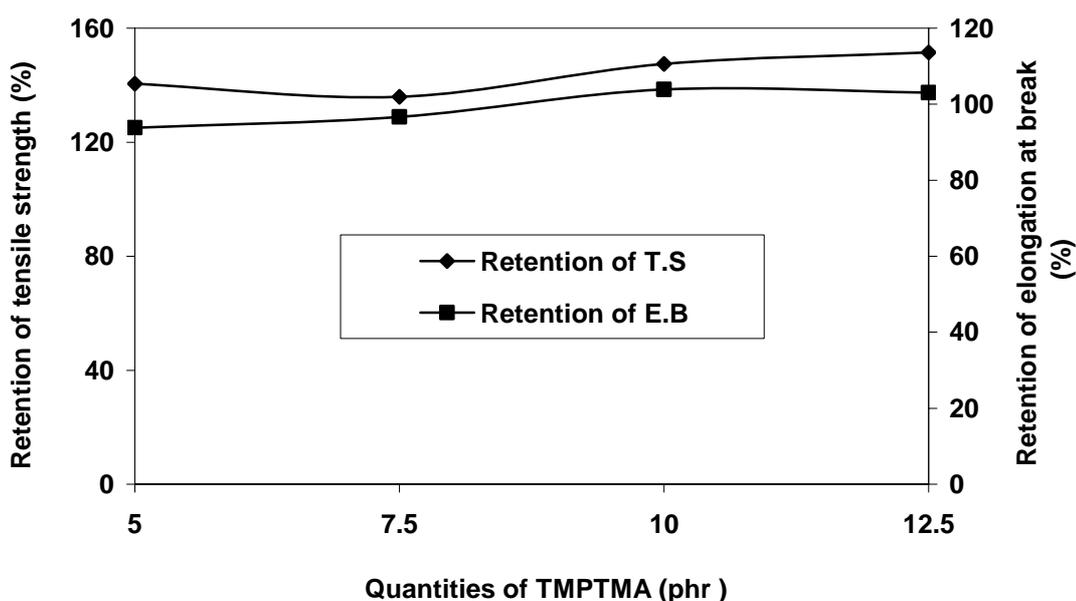
ตารางที่ 4.23 อิทธิพลของปริมาณ TMPTMA ต่อการบ่มเร่ง

Quantities of TMPTMA (phr)	Retention of tensile strength (%)	Retention of elongation at break (%)
5.0	140.0	93.8
7.5	136.0	96.7
10.0	147.4	103.9
12.5	151.5	103.0

จากตารางที่ 4.23 สามารถนำข้อมูลค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดหลังการบ่มเร่งมาพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ 4.50

จากรูปที่ 4.50 พบว่า ความต้านทานต่อแรงดึงที่คงอยู่หลังบ่มเร่งของยางเบลนด์ ENR-25/CSM ไม่แตกต่างกันมากในทุกปริมาณการใช้ TMPTMA แต่มีค่าเพิ่มเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานแรงดึงก่อนการบ่มเร่ง เนื่องจากการอบที่อุณหภูมิสูงในขั้นตอนการบ่มเร่งอาจเป็นการกำจัดผลิตภัณฑ์ คือ acetophenone ที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ระบบเปอร์ออกไซด์ ดังรูปที่ 4.19 ทำให้ไม่มีสารที่เร่งการเกิดออกซิเดชันในโมเลกุลยาง (พงษ์ธร, 2548) ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงที่คงอยู่หลังบ่มเร่งดีขึ้น ซึ่งการที่มีค่าที่สูงขึ้นนี้ทำให้สมบัติของยางไม่ลดลงเมื่อเจอความร้อน และเมื่อพิจารณาปริมาณของ TMPTMA พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ TMPTMA ที่มากขึ้น บ่งชี้ให้เห็นว่าสมบัติของยางเบลนด์ ENR-

25/CSM มีความทนทานต่อการออกซิเดชันได้ดีเมื่อใส่ TMPTMA ที่ปริมาณสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าความสามารถในการยึดจุนขาดที่คงอยู่หลังการบ่มแรงของยางเบลนด์มีแนวโน้มเช่นเดียวกับความต้านทานต่อแรงดึงคือ เมื่อใช้ TMPTMA รวมในระบบการวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ปริมาณมากขึ้นจะทำให้ค่าความสามารถในการยึดจุนขาดหลังการบ่มแรง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการยึดจุนขาดก่อนกับหลังบ่มแรง พบว่าไม่แตกต่างกัน แสดงว่ายางเบลนด์มีความทนทานต่อการออกซิเดชัน



รูปที่ 4.50 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่คงอยู่และค่าความสามารถในการยึดจุนขาดหลังบ่มแรงของยางเบลนด์ ENR-25/CSM โดยใช้ DCP 4 phr แปร TMPTMA ที่ปริมาณต่างๆ

จากการศึกษาปริมาณ TMPTMA ต่อสมบัติยางเบลนด์ ENR-25/CSM พบว่าสมบัติเชิงกลก่อนและหลังการบ่มแรงที่ใช้ปริมาณ TMPTMA 12.5 phr ให้ผลดีที่สุด จึงเลือกสูตรการเบลนด์ยาง ENR-25/CSM ที่ใช้ปริมาณ TMPTMA 12.5 phr ศึกษาในหัวข้อถัดไป

4.2.2 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารวัลคาไนซ์ไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ต่อสมบัติยางเบลนด์ ENR-25/CSM

เตรียมคอมพาวนด์ระหว่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน (ENR-25/CSM) ใช้ TMPTMA 12.5 phr โดยแปรปริมาณ DCP ที่ 2, 3, 4, 5 และ 6 phr ตามหัวข้อ 3.3.1.2 เพื่อทดสอบสมบัติการแปรรูป สมบัติการวัลคาไนซ์ สมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรง ได้ผลการทดลองดังนี้

4.2.2.1 อิทธิพลของปริมาณ DCP ต่อค่าความหนืดมูนนี้ของยางคอมพาวนด์

สมบัติด้านการแปรรูปของยางคอมพาวด์ของยางเบลนด์ ENR-25/CSM ใช้ TMPTMA 12.5 phr โดยแปรปริมาณ DCP ที่ 2, 3, 4, 5 และ 6 phr แสดงดังตารางที่ 4.24

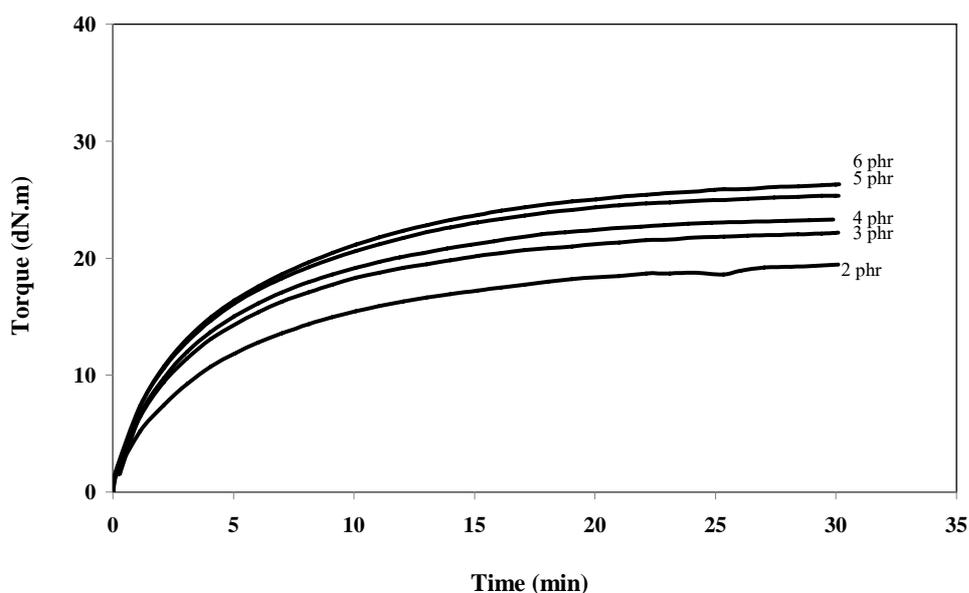
ตารางที่ 4.24 ความหนืดของยางเบลนด์ ENR-25/CSM โดยแปรปริมาณ DCP ต่างๆ

Quantity of DCP (phr)	Mooney viscosity ML 1+4 (125 °C)
2	11
3	14
4	17
5	19
6	26

จากตารางที่ 4.24 พบว่า ค่าความหนืดของยางเบลนด์ ENR-25/CSM มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ DCP เนื่องจากการทดสอบที่อุณหภูมิ 125 °C DCP เกิดการแตกตัว และทำให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลของยางเบลนด์บางส่วน แต่อุณหภูมินี้ DCP ไม่สามารถแตกตัวได้ 100% ดังตารางที่ 4.6 และเวลาที่ใช้ทดสอบเพียงแค่ 4 นาทีจึงไม่สามารถเกิดการเชื่อมโยงได้สมบูรณ์ และเมื่อเพิ่มปริมาณ DCP การแตกตัวเกิดมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนืดเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณ DCP อธิบายได้ว่าการใช้ DCP เพิ่มขึ้นจะแตกตัวได้มากกว่าส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงได้มากขึ้น

4.2.2.2 อิทธิพลของปริมาณ DCP ต่อลักษณะการวัลคาไนซ์

ทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของ ENR-25/CSM ที่อุณหภูมิ 160°C ใช้ TMPTMA 12.5 phr โดยแปรปริมาณ DCP ที่ 2, 3, 4, 5 และ 6 phr ได้ลักษณะการวัลคาไนซ์ดังรูปที่ 4.51



รูปที่ 4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาในการทดสอบการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ ENR-25/CSM โดยแปร DCP ในปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 4.51 สามารถนำมาหาค่าสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติอิพอกไซด์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน (ENR-25/CSM) ที่แปรปริมาณ DCP ต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.25

ตารางที่ 4.25 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ ENR-25/CSM โดยแปร DCP ที่ปริมาณต่างๆ

Quantities of DCP (phr)	M _L (dN.m)	M _H (dN.m)	M _H -M _L (dN.m)	Cure time t _{c90} (min)	Scorch time (min)	CRI (1/min)
2	1.60	19.45	17.85	17.08	0.43	6.01
3	1.63	22.17	20.54	14.00	0.42	7.36
4	1.60	23.30	20.70	13.86	0.43	7.45
5	1.99	25.34	23.35	13.04	0.41	7.91
6	1.90	26.32	24.42	13.03	0.40	7.91

จากตารางที่ 4.25 เปรียบเทียบผลต่างค่าทอร์ค พบว่ามีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณ DCP เนื่องจากการวัลคาไนซ์เกิดได้มากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอนุมูลอิสระ ดังรูปที่ 4.22 คือการสลายตัวของเปอร์ออกไซด์เมื่อได้รับการกระตุ้นจากพลังงานภายนอก เช่น ความร้อน แสงแดด หรือแสงอัลตราไวโอเล็ต ได้อนุมูลอิสระของอัลคอกซี และอนุมูลอิสระนี้เป็นตัวไปตั้งไฮโดรเจนอะตอมจากยาง ทำให้เกิดอนุมูลอิสระบนโมเลกุลยาง และอนุมูลอิสระบนโมเลกุลยางรวมกันเกิดเป็นพันธะการเชื่อมโยง ซึ่งพันธะการเชื่อมโยงจะเกิดเป็นแบบพันธะคาร์บอนคาร์บอนและหนึ่งโมเลกุลของเปอร์ออกไซด์จะทำให้เกิดหนึ่งพันธะการเชื่อมโยงในยาง เมื่อเปรียบเทียบเวลาที่ทำให้ยางสุกและเวลาการวัลคาไนซ์มีแนวโน้มลดลง แต่อัตราการวัลคาไนซ์มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากมี DCP มากขึ้นทำให้เกิดอนุมูลอิสระมาก ส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงได้เร็วขึ้น

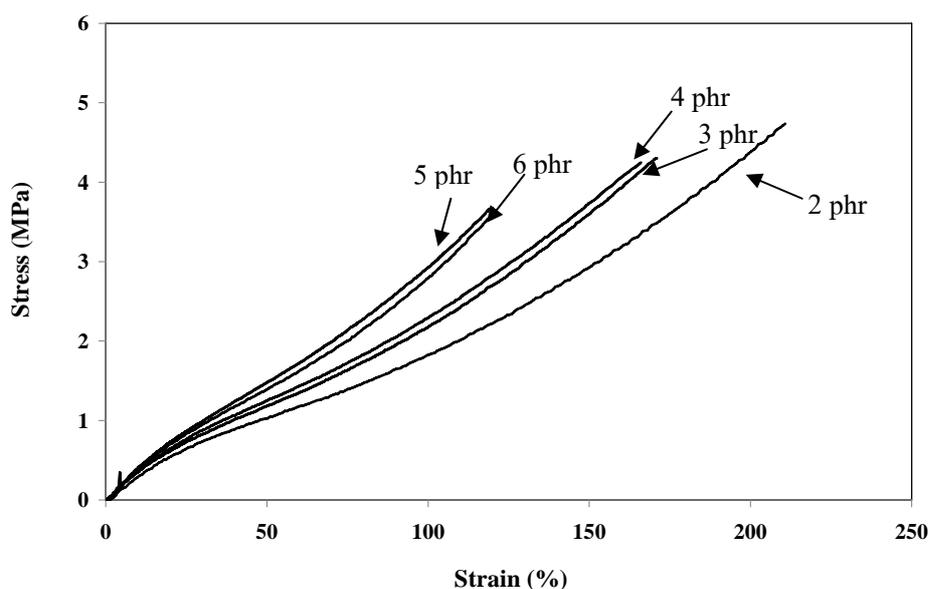
4.2.2.3 สมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ ENR-25/CSM โดยแปรปริมาณ DCP ต่างๆ

ทดสอบสมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ ENR-25/CSM โดยแปรปริมาณ DCP ดังนี้คือ 2, 3, 4, 5 และ 6 phr ได้ผลดังตารางที่ 4.26

ตารางที่ 4.26 อิทธิพลของปริมาณ DCP ต่อสมบัติเชิงกล

Quantities of DCP (phr)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tear strength (N/mm)	Hardness (shore A)	Tension set (%)	Area under stress-strain curve
2	4.8 ± 0.4	210.8 ± 14.1	18.1 ± 0.6	51.0 ± 0.0	6.0	447
3	4.3 ± 0.2	171.0 ± 12.9	18.1 ± 0.9	52.0 ± 0.6	6.0	342
4	4.3 ± 0.2	166.0 ± 11.06	17.6 ± 0.2	53.0 ± 0.5	7.0	336
5	3.7 ± 0.3	120.0 ± 19.0	15.0 ± 0.4	56.0 ± 0.5	7.0	215
6	3.6 ± 0.3	119.2 ± 12.5	12.3 ± 0.7	57.0 ± 0.5	7.0	202

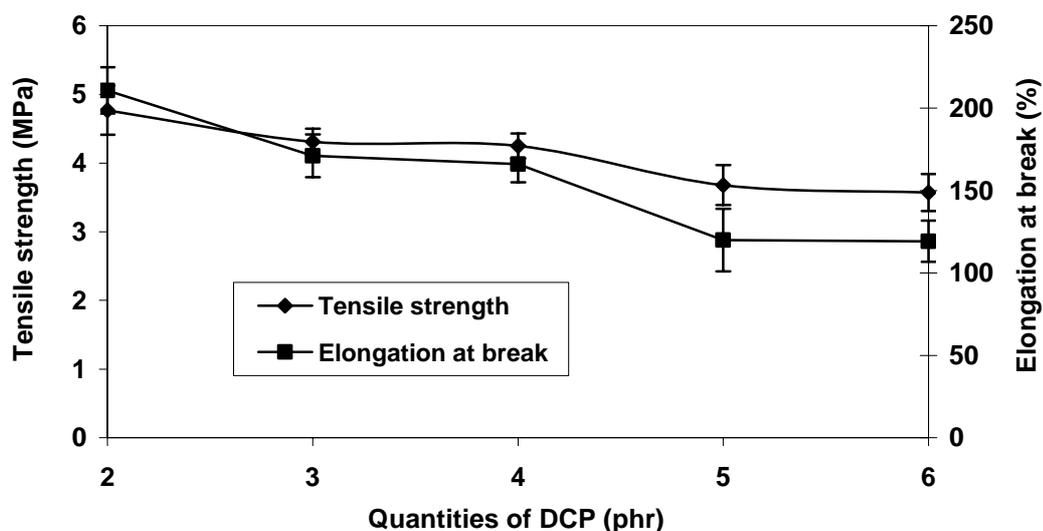
ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนด์ ENR-25/CSM โดยแปรปริมาณ DCP ดังนี้คือ 2, 3, 4, 5 และ 6 phr ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด แสดงดังรูปที่ 4.52



รูปที่ 4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางเบลนด์ ENR-25/CSM ที่แปร DCP ในปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 4.52 พบว่า การใช้ไดคิมิวเปอร์ออกไซด์ (DCP) ในการวัลคาไนซ์ยางเบลนด์ระหว่าง ENR-25/CSM ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด คือการใช้ปริมาณ DCP ที่เพิ่มขึ้น ยางคงรูปที่ได้จะมีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดต่ำลง ส่วนค่าโมดูลัสของยางนั้นจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ความแข็งตึง (stiffness) เนื่องมาจากปริมาณของ DCP ที่มากขึ้นจะทำให้ยางแข็งเปราะและสูญเสียสมบัติความยืดหยุ่น โดยพันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นเป็นการเชื่อมโยงระหว่าง C-C ซึ่งพันธะดังกล่าวเป็นพันธะที่มีพลังงานสูง (346 kJ mole^{-1}) และแข็งแรง ซึ่งมีความยาวของพันธะต่ำ (0.154 nm) ส่งผลให้ยางเบลนด์มีความยืดหยุ่นได้น้อยลง การรับแรงและการกระจายแรงที่มากกระทำจึงเกิดได้ลดลง ส่วนค่าความเค้นของยางเบลนด์ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ DCP เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดการแข่งขันระหว่างการวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ เช่น การตัดสายโซ่หลักของโมเลกุลพอลิเมอร์ การเคลื่อนย้ายอนุมูลอิสระ (Dluzneski, 2001) นอกจากนี้ปฏิกิริยาดังกล่าวที่เกิดขึ้นอาจส่งผลให้ลดการตกผลึกของยางระหว่างตั้ง จึงทำให้ความเค้นลดลง

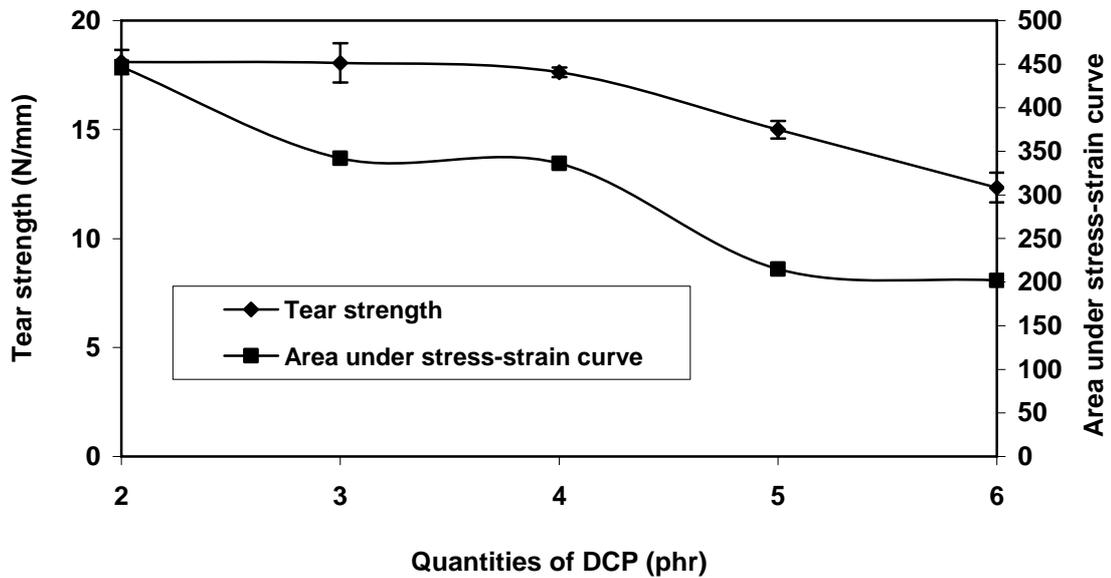
จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดสามารถคำนวณหาความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดได้ดังรูปที่ 4.53



รูปที่ 4.53 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ ENR-25/CSM ที่แปร DCP ในปริมาณต่างๆ

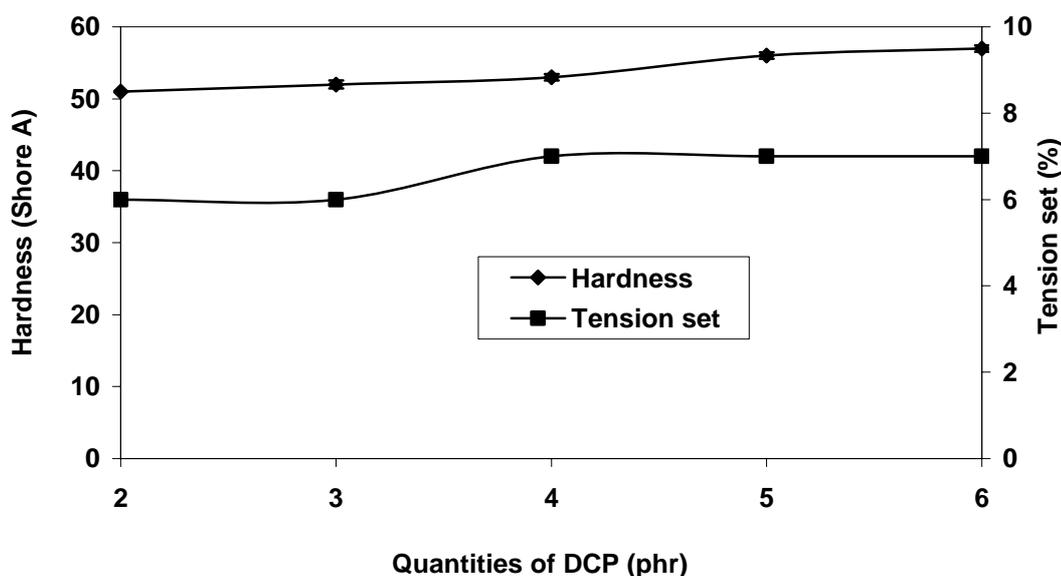
จากรูปที่ 4.53 พบว่า การเพิ่มปริมาณ DCP ทำให้ยางเบลนด์มีค่าความต้านทานแรงดึงลดลง ซึ่งสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกันกับค่าความเค้น รูปที่ 4.19 คือเกิดปฏิกิริยาการแข่งขัน เช่นปฏิกิริยาการตัดสายโซ่โมเลกุลกับปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของ DCP ระหว่างการวัลคาไนซ์ และปฏิกิริยาแข่งขันดังกล่าวส่งผลให้การตกผลึกของยางระหว่างดึง จึงทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ ENR-25/CSM มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มปริมาณ DCP ซึ่งสอดคล้องกับค่าความต้านทานต่อแรงดึง คือเมื่อใช้ DCP มากกว่า 2 phr ทำให้เกิดปฏิกิริยาแข่งขันกันระหว่างปฏิกิริยาการตัดสายโซ่กับปฏิกิริยาการเชื่อมโยงด้วย DCP ทำให้ยางเบลนด์มีความสามารถในการยืดน้อย

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ระหว่าง ENR-25/CSM ได้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด พื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียด ค่าความแข็ง และค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึงดังรูปที่ 4.54 – 4.55



รูปที่ 4.54 ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดแบบมุมและพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียดของยางเบลนด์ ENR-25/CSM ที่แปร DCP ในปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 4.54 พบว่า ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดแบบมุมของยางเบลนด์ ENR-25/CSM เมื่อเพิ่มปริมาณของสารวัลคาไนซ์ DCP ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับสมบัติด้านความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดคือมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาแข่งขัน เช่น การตัดสายโซ่โมเลกุลในโมเลกุลยาง ทำให้การเชื่อมโยงในยางลดลง ส่งผลให้ความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลง เมื่อพิจารณาถึงพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียดซึ่งแสดงถึงพลังงานในการทำขึ้นตัวอย่างเสียหายหรือความเหนียว (Toughness) พบว่า พื้นที่ใต้กราฟมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณไดคิมิลเปอร์ออกไซด์ซึ่งสามารถอธิบายด้วยเหตุผลเช่นเดียวกันกับกราฟความเค้น-ความเครียด กล่าวคือ การใช้ไดคิมิลเปอร์ออกไซด์ปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้ยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีความแข็งแรงและความสามารถในการยืดลดลง เป็นผลมาจากเกิดปฏิกิริยาที่เกิดการแข่งขันกันในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ เช่น การตัดสายโซ่หลักของโมเลกุลพอลิเมอร์ การเคลื่อนย้ายอนุมูลอิสระ ปฏิกิริยาดังกล่าวจะส่งผลให้สายโซ่หลักของพอลิเมอร์สั้นลง ซึ่งให้การผลการวิจัยในทำนองเดียวกับยางคอมพาวนด์จากการเบลนด์ ENR/EVA



รูปที่ 4.55 ความแข็งและค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึงของยางเบลนด์ ENR-25/CSM ที่แปร DCP ในปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 4.55 พบว่า ปริมาณของสารวัลคาไนซ์ DCP ทำให้ความแข็งของยางเบลนด์ ENR-25/CSM เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่ม DCP ทำให้ความแข็งดึงเพิ่มขึ้นได้จากค่าโมดูลัสจากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดรูปที่ 5.9 ที่เพิ่มขึ้น จากรูปดังกล่าวยังพบว่า การผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึงของยางเบลนด์ ENR-25/CSM มีค่าไม่แตกต่างกัน เนื่องจากโมเลกุลของยางเบลนด์มีสมบัติความยืดหยุ่น (elasticity) สูง ส่งผลให้ยางเบลนด์สามารถคืนรูปได้เมื่อปล่อยแรงกระทำ ดังนั้นปริมาณการใช้ DCP ไม่มีผลต่อการผิดรูปของยางเบลนด์

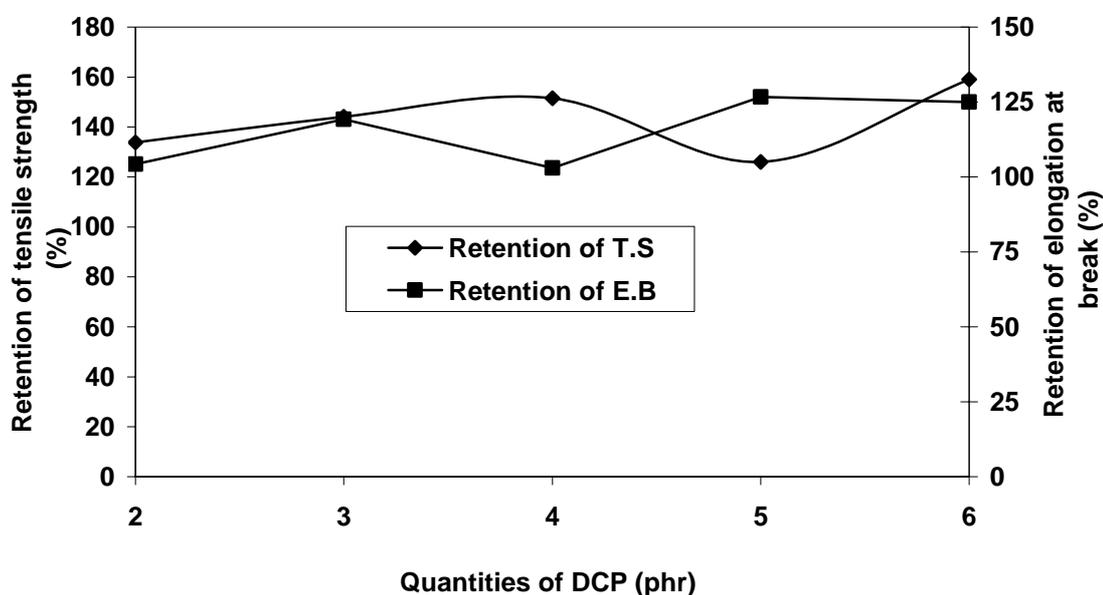
4.2.2.4 สมบัติหลังการบ่มแรงของยางเบลนด์ ENR-25/CSM โดยแปรปริมาณ DCP ต่างๆ

ทดสอบสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงโดยการนำยางเบลนด์ ENR-25/CSM ที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้วไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง แล้วทดสอบสมบัติเชิงกล ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.27

ตารางที่ 4.27 อิทธิพลของปริมาณสารวัลคาไนซ์ DCP ต่อการบ่มแรง

Quantities of DCP (phr)	Retention of tensile strength (%)	Retention of elongation at break (%)
2	133.8	104.3
3	144.1	119.3
4	151.5	103.0
5	153.0	126.7
6	159.1	125.0

จากตารางที่ 4.27 สามารถนำข้อมูลค่าความต้านทานต่อแรงดึงหลังการบ่มแรง และและค่าความสามารถในการยึดจนขาดที่คงอยู่หลังบ่มแรงมาพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ 4.56



รูปที่ 4.56 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยึดจนขาดที่คงอยู่หลังบ่มแรงของยางเบลนด์ ENR-25/CSM ที่แปร DCP ในปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 4.56 พบว่า ความต้านทานต่อแรงดึงที่คงอยู่หลังบ่มแรงของยางเบลนด์ ENR-25/CSM มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อใช้ DCP มากขึ้น และมีค่าเพิ่มเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานแรงดึงก่อนการบ่มแรง เนื่องจากการอบที่อุณหภูมิสูงเป็นการกำจัดผลิตภัณฑ์ (acetophenone) ที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ระบบการวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ ดังรูปที่ 4.19 ทำให้ไม่มีสารที่เร่งการเกิดออกซิเดชันในโมเลกุลยาง และอาจเนื่องจาก DCP ปริมาณที่มากเกินไป ทำให้มี DCP หลงเหลือ เมื่อมีการบ่มแรง DCP ที่เหลือสามารถแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระแล้วเกิดการวัลคาไนซ์ได้อีกส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงที่คงอยู่หลังบ่มแรงดีขึ้น ซึ่งการที่มีค่าที่สูงขึ้นนี้ทำให้สมบัติของยางไม่ลดลงเมื่อเจอความร้อน จากรูปที่ 5.13 พบว่า ความสามารถในการยึดจนขาดที่คงอยู่หลังการบ่มแรงของยางเบลนด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับความต้านทานต่อแรงดึงที่คงอยู่หลังการบ่มแรง คือเมื่อใช้ DCP ปริมาณที่มากขึ้น อาจทำให้มี DCP หลงเหลือ เมื่อมีการบ่มแรง DCP ที่เหลือสามารถแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระแล้วเกิดการวัลคาไนซ์ได้อีก

จากการศึกษาปริมาณ DCP ต่อสมบัติยางเบลนด์ ENR-25/CSM พบว่าสมบัติเชิงกลที่ใช้ปริมาณ DCP 2 phr ให้ผลดีที่สุด และสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ DCP จึงเลือกสูตรการเบลนด์ยาง ENR-25/CSM ที่ใช้ปริมาณ DCP 2 phr

4.2.3 ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนยางต่อสมบัติยางเบลนด์ ENR-25/CSM

เตรียมยางคอมพาวด์ระหว่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน ตามวิธีการทดลองในหัวข้อ 3.3.1.3 โดยแปรอัตราส่วนยางเบลนด์ ENR-25/CSM ดังนี้คือ 100/0, 75/25, 50/50, 25/75 และ 0/100 เพื่อศึกษาสมบัติการแปรรูป สมบัติการวัลคาไนซ์ สมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรง ได้ผลการทดลองดังนี้

4.2.3.1 อิทธิพลของอัตราส่วนยางเบลนด์ ENR/CSM ต่อค่าความหนืดมูนนี่ของยางคอมพาวนด์ สมบัติด้านการแปรรูปหรือค่าความหนืดมูนนี่ของยางคอมพาวนด์ของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน (ENR-25/CSM) แสดงดังตารางที่ 4.28

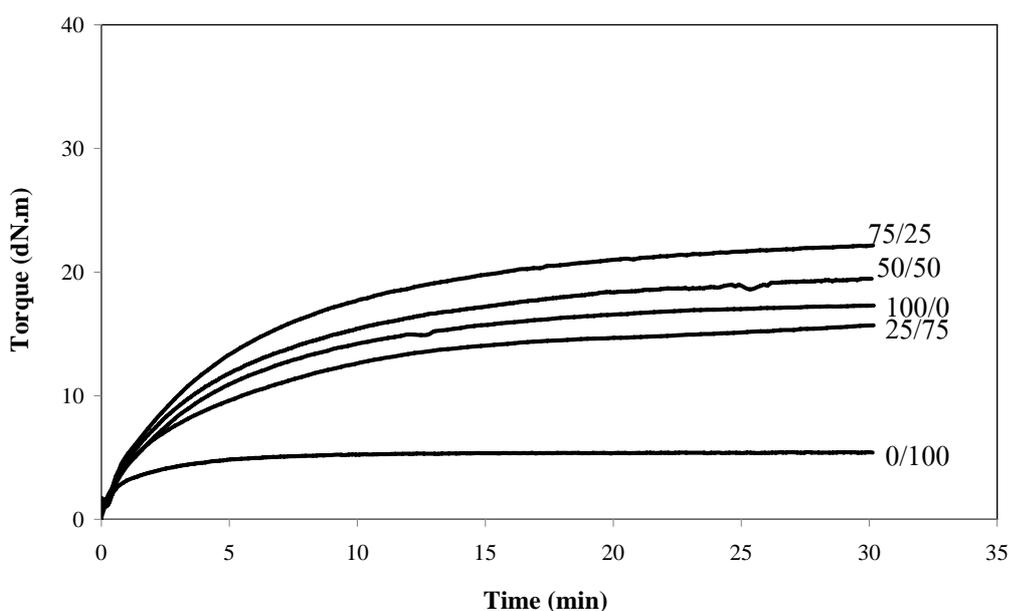
ตารางที่ 4.28 ความหนืดมูนนี่ ของยางเบลนด์ระหว่างยางเบลนด์ ENR-25/CSM โดยแปรอัตราส่วนต่างๆ

ENR-25/CSM	Mooney viscosity ML 1+4 (125 °C)
100/0	31
75/25	28
50/50	11
25/75	10
0/100	40

จากตารางที่ 4.28 พบว่า ค่าความหนืดของยางเบลนด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติอีพอกไซด์ เนื่องจากยางอีพอกไซด์มีวงอีพอกไซด์อยู่ในโครงสร้างทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมากกว่าเมื่อมียางอีพอกไซด์สูงกว่า ทำให้ค่าความหนืดสูง

4.2.3.2 อิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ยาง ENR-25/CSM ต่อลักษณะการวัลคาไนซ์

ทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของ ENR-25/CSM ที่อุณหภูมิ 160°C โดยแปรอัตราส่วนยางเบลนด์ ดังนี้คือ 100/0, 75/25, 50/50, 25/75 และ 0/100 ได้ลักษณะการวัลคาไนซ์ดังรูปที่ 4.57



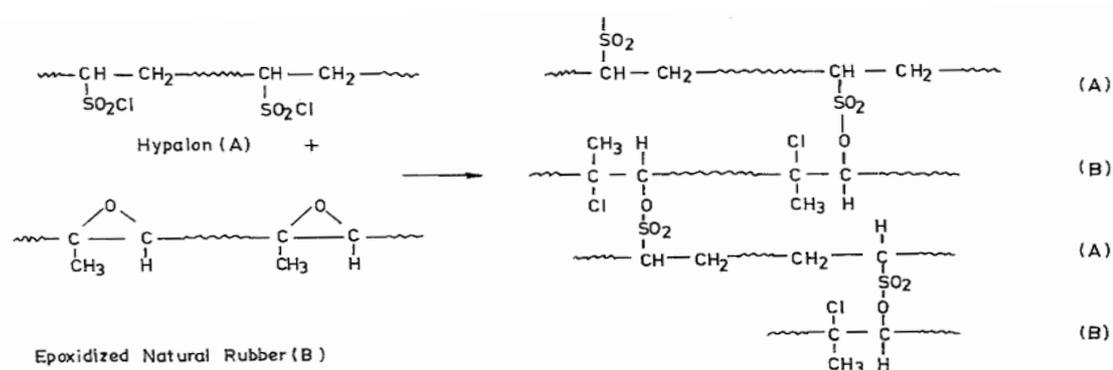
รูปที่ 4.57 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาในการทดสอบการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ ENR-25/CSM โดยแปรอัตราส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 4.57 สามารถนำมาหาค่าสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติอิพอกไซด์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน (ENR-25/CSM) ที่แปรอัตราส่วนยางเบลนด์ต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.29

ตารางที่ 4.29 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ ENR-25/CSM โดยแปรอัตราส่วนต่างๆ

ENR-25/CSM ratio	M_L (dN.m)	M_H (dN.m)	M_H-M_L (dN.m)	Cure time t_{c90} (min)	Scorch	
					time (min)	CRI (1/min)
100/0	2.78	17.84	15.06	18.21	0.82	5.75
75/25	1.77	23.42	21.65	22.84	0.53	4.48
50/50	1.60	19.46	17.86	16.80	0.43	6.11
25/75	1.19	16.79	15.60	15.98	0.43	6.43
0/100	1.28	5.42	4.14	6.45	0.50	16.8

จากการทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ ENR-25/CSM ลักษณะกราฟของยางเบลนด์มีค่าทอร์กสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเวลาผ่านไป นั่นคือยางวัลคาไนซ์จะมีแข็งแรงเพิ่มขึ้น และ เมื่อพิจารณาค่าผลต่างของทอร์กพบว่ายางเบลนด์ ENR-25/CSM ที่อัตราส่วนการเบลนด์ 75/25 มีค่าสูงสุด รองลงมาคืออัตราส่วน 50/50, 100/0, 25/75 และ 0/100 และพบว่าที่อัตราส่วนยาง ENR-25/CSM ที่ 50/50 และ 25/75 มีค่าทอร์กสูง ซึ่งนอกเหนือจากเกิดการวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์แล้ว ยางธรรมชาติอิพอกไซด์และยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนสามารถเกิดการวัลคาไนซ์ด้วยตนเองได้ดังรูปที่ 4.58 เนื่องจากการเกิดการวัลคาไนซ์ด้วยตัวเองของยางธรรมชาติอิพอกไซด์และยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนสามารถเกิดได้อุณหภูมิประมาณ 150°C (Mukhopadhyay and DE, 1990)



รูปที่ 4.58 ปฏิกิริยาการเกิด Self-vulcanization ENR และ CSM (Mukhopadhyay and DE, 1990)

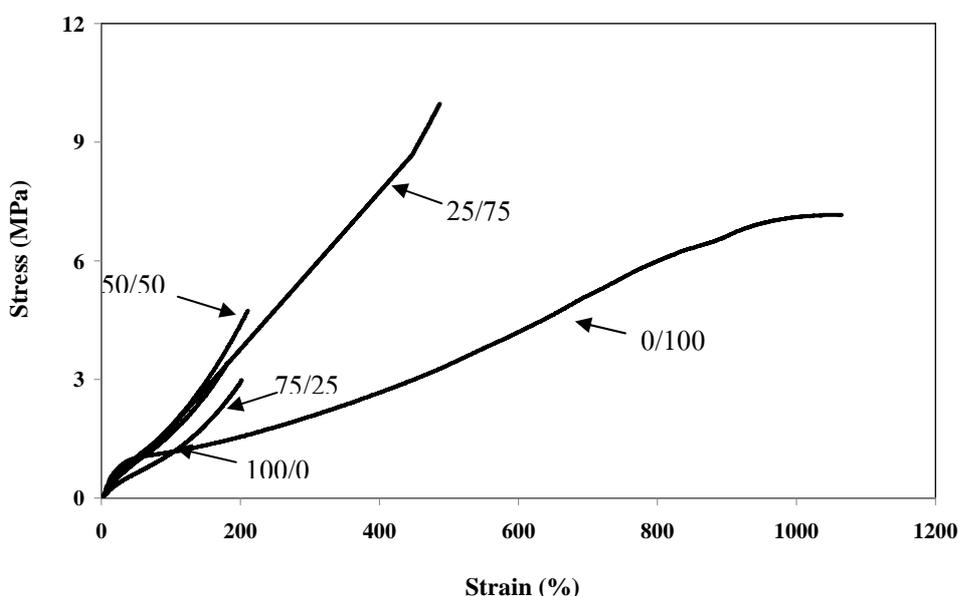
4.2.3.3 สมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ ENR-25/CSM โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ ENR-25/CSM ต่างๆ

ทดสอบสมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ ENR-25/CSM โดยแปรอัตราส่วนยางเบลนด์ ENR-25/CSM ต่างๆ คือ 100/0, 75/25, 50/50, 75/25 และ 0/100 ได้ผลดังตารางที่ 4.30

ตารางที่ 4.30 อิทธิพลของอัตราส่วนยางเบลนด์ต่อสมบัติเชิงกล ที่แปรอัตราส่วนยางเบลนด์ ENR-25/CSM ต่างๆ

ENR-25/ CSM ratio	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tear strength (N/mm)	Hardness (shore A)	Tension set (%)	Area under stress-strain curve
100/0	2.9 ± 0.2	202.0 ± 5.7	19.3 ± 0.4	43.0 ± 0.5	1.5	258
75/25	3.4 ± 0.0	182.0 ± 8.5	11.2 ± 0.5	50.0 ± 0.5	5.0	289
50/50	4.8 ± 0.4	210.8 ± 14.1	18.2 ± 0.6	51.0 ± 0.0	6.0	447
25/75	10.0 ± 0.5	487.0 ± 48.8	27.6 ± 0.4	52.0 ± 0.6	7.0	2279
0/100	7.2 ± 0.4	1065.0 ± 78.2	30.4 ± 0.9	53.0 ± 0.5	13.5	4126

ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนด์ ENR-25/CSM โดยแปรอัตราส่วนยางเบลนด์ ENR-25/CSM ต่างๆ คือ 100/0, 75/25, 50/50, 75/25 และ 0/100 ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด แสดงดังรูปที่ 4.59

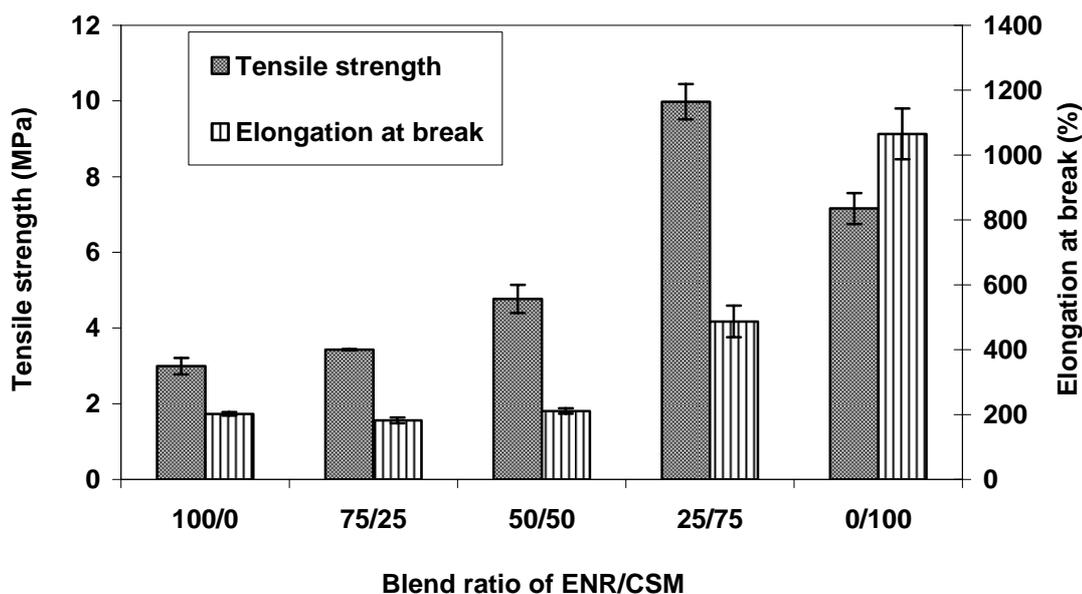


รูปที่ 4.59 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางเบลนด์ ENR-25/CSM ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 4.59 พบว่า ความแข็งแรงของยางเบลนด์ ENR-25/CSM มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน จนถึงอัตราส่วนการเบลนด์ที่ 25/75 ให้ความแข็งแรงสูงสุด เนื่องจากยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนและยางธรรมชาติอีพอกไซด์สามารถเกิดการวัลคาไนซ์ด้วยตัวเองได้

ตั้งที่กล่าวข้างต้นในรูปที่ 4.58 และอาจเนื่องจากการใช้เปอร์ออกไซด์วัลคาไนซชันอาจทำให้เกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติอีพอกไซด์ทำให้ความแข็งแรงของยางเบลนด์ลดลง

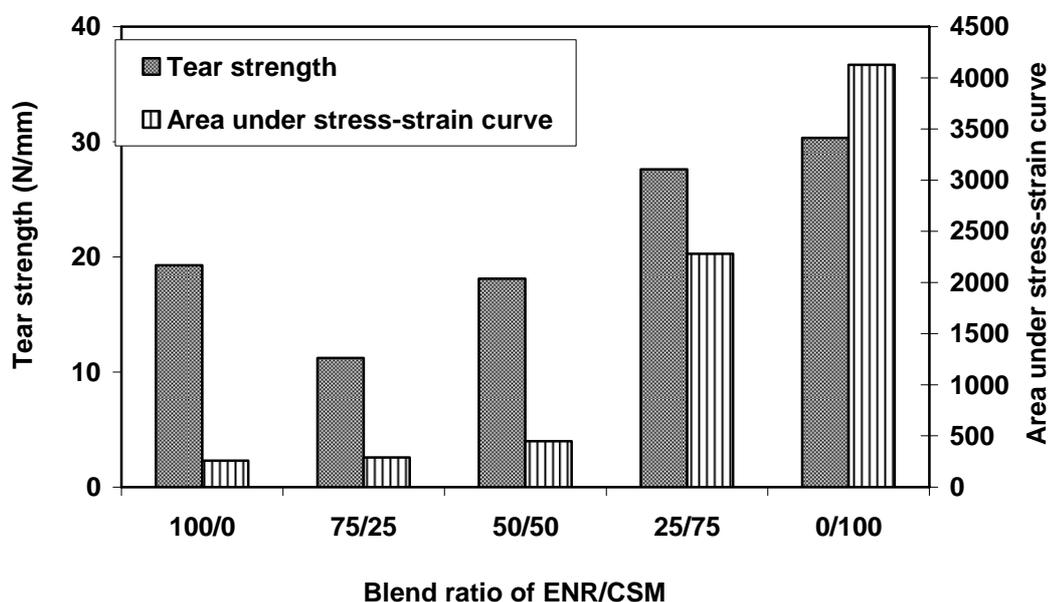
จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดได้ดังรูปที่ 4.60



รูปที่ 4.60 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ ENR-25/CSM ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ

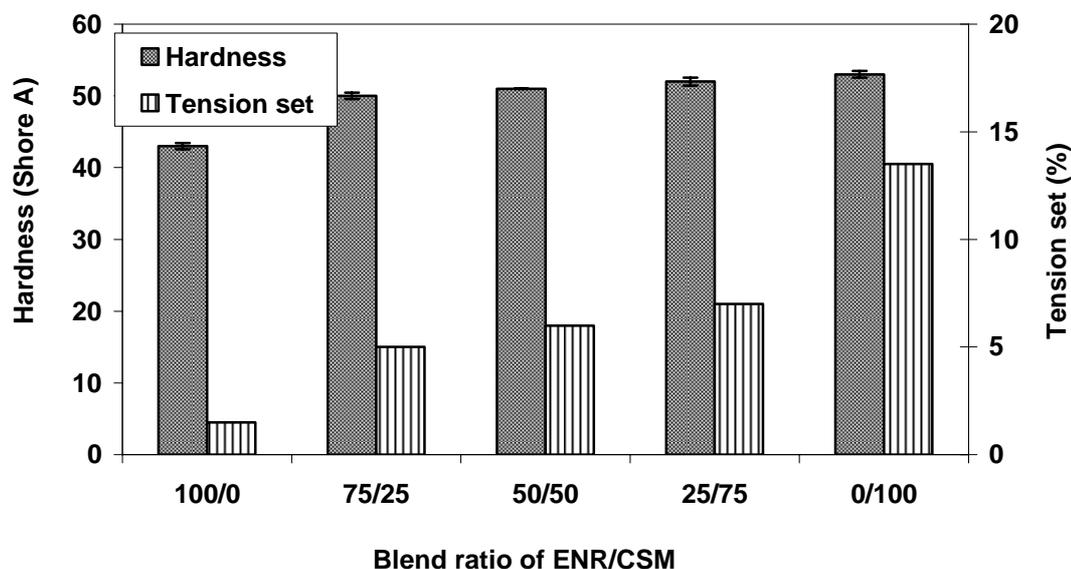
จากรูปที่ 4.60 พบว่า ความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนด์ระหว่าง ENR-25/CSM ที่อัตราส่วน 25/75 มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงที่สุด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเกิดการวัลคาไนซชันได้ด้วยตนเองของยางธรรมชาติอีพอกไซด์และยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน ดังที่กล่าวไว้แล้วในรูปที่ 4.46 และเมื่อเปรียบเทียบยางธรรมชาติอีพอกไซด์และยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนจะเห็นว่ายางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนมีความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์ เนื่องจากการวัลคาไนซชันด้วย DCP ทำให้เกิดการขาดสายโซ่บนพันธะคู่ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ จึงทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติอีพอกไซด์ จากรูปดังกล่าวยังพบว่า ค่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามการเพิ่มปริมาณของยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนในยางเบลนด์ และที่อัตราส่วน 25/75 มีความสามารถในการยืดจนขาดสูงที่สุด เนื่องจากเกิดการวัลคาไนซชันด้วยตัวเองของยางเบลนด์ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลมีมากจึงต้องใช้ระยะยืดที่สูงที่จะทำให้เกิดการขาดได้ และอาจเกิดจากเมื่อเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติอีพอกไซด์ทำให้ความสามารถในการยืดจนขาดลดลง เนื่องจากบนโมเลกุลของยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีพันธะคู่อยู่ เมื่อวัลคาไนซชันด้วยเปอร์ออกไซด์ อาจเกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุลของยางทำให้ความสามารถในการยืดจนขาดลดลง

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ ENR-25/CSM ที่แปรอัตราส่วนยางเบลนด์ต่างๆ ได้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด พื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียด ค่าความแข็งแรง ค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึง ดังแสดงในรูปที่ 4.61 – 4.62



รูปที่ 4.61 ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดแบบมุมและพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียดของยางเบลนด์ ENR-25/CSM ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 4.61 ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางเบลนด์ ENR-25/CSM มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามการเพิ่มปริมาณของยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติพอกไซต์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน พบว่า ยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนมีความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงกว่า ซึ่งสอดคล้องกับความต้านทานต่อแรงดึง เมื่อพิจารณาถึงพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียดซึ่งแสดงถึงพลังงานในการทำให้ชิ้นตัวอย่างเสียหายหรือความเหนียว (Toughness) พบว่า พื้นที่ใต้กราฟมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนซึ่งสอดคล้องกับความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาด กล่าวคือ สมบัติดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนเนื่องจากยางชนิดนี้สามารถเกิดการตกผลึกได้เนื่องจากมีพอลิเอทิลีนในโครงสร้าง ทำให้มีความแข็งแรงมากกว่ายางธรรมชาติพอกไซต์ โดยพื้นที่ใต้กราฟเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อใช้ยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนมากกว่า 75 % โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.62 ความแข็งและค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึงของยางเบลนด์ ENR-25/CSM ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 4.62 พบว่า ค่าความแข็งของยางเบลนด์ ENR-25/CSM ที่อัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามอัตราส่วนของยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน แต่ค่าความแข็งของยางเบลนด์ ENR-25/CSM ที่อัตราส่วน 75/25, 50/50, 25/75 และ 0/100 มีค่าไม่แตกต่างกันมาก จากรูปที่ 4.62 ยังพบว่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึง (tension set) ของยางเบลนด์ ENR-25/CSM มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามอัตราส่วนของยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน เนื่องจากยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนมีโครงสร้างที่เป็นเอทิลีนมีสมบัติคล้ายพลาสติกมากกว่า ส่งผลให้สมบัติด้านความยืดหยุ่นน้อยกว่ายางธรรมชาติอิพอกไซด์ ดังนั้นเมื่อปริมาณของยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนจึงทำให้ค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึงของยางเบลนด์ ENR-25/CSM เพิ่มขึ้น

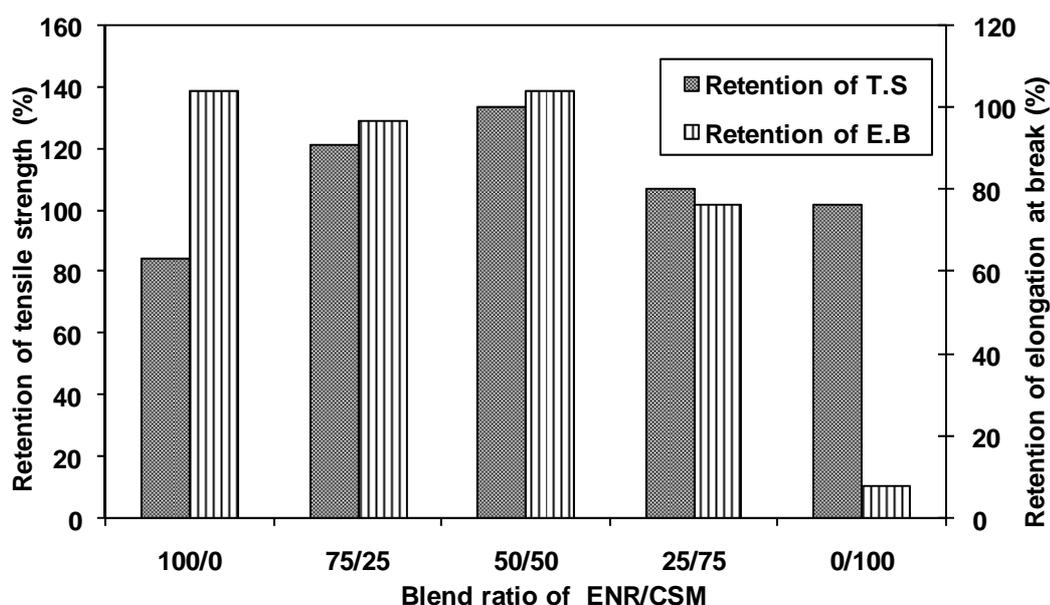
4.2.3.4 สมบัติหลังการบ่มแรงของยางเบลนด์ ENR-25/CSM โดยแปรอัตราส่วนยางเบลนด์ต่างๆ

ทดสอบสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงโดยการนำยางเบลนด์ ENR-25/CSM ที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้วไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง แล้วทดสอบสมบัติเชิงกล ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.31

ตารางที่ 4.31 อิทธิพลของอัตราส่วนต่างๆ ของยางเบลนด์ต่อการบ่มเร่ง

Blend ratio of ENR-25/CSM	Retention of tensile strength (%)	Retention of elongation at break (%)
100/0	84.7	104.0
75/25	121.7	96.7
50/50	133.8	104.3
25/75	107.4	76.6
0/100	101.7	8.0

จากตารางที่ 4.31 สามารถนำข้อมูลค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่หลังบ่มเร่งมาพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ 4.63



รูปที่ 4.63 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่หลังบ่มเร่งของยางเบลนด์ ENR-25/CSM ที่แปรอัตราส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 4.63 พบว่า สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงที่คงอยู่หลังการบ่มเร่งของยางเบลนด์ ENR-25/CSM ที่มีปริมาณของยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนเพิ่มขึ้นจะทำให้ยางเบลนด์ทนต่อการออกซิเดชันได้ดีกว่าว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์ เนื่องจากยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนมีความอิมตัวมากกว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์จึงทำให้ยางเบลนด์ทนความร้อนได้ดีกว่า และยางเบลนด์ระหว่าง ENR-25/CSM ทั้งอัตราส่วน 75/25, 50/50 และ 25/75 มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่คงอยู่หลังบ่มเร่งดีกว่าการใช้ยางธรรมชาติอีพอกซ์และยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน อาจเนื่องจากเกิดการเชื่อมโยงด้วยตัวเองของยางทั้งสองชนิดเกิดพันธะที่แข็งแรงทำให้ทนต่อการออกซิเดชันได้ดี จากรูปที่ 4.63 พบว่า ความสามารถในการยืด

จนขาดที่คงอยู่หลังบ่มแรงของยางเบลนด์ ENR-25/CSM ที่เพิ่มปริมาณของยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน จะทำให้ยางเบลนด์มีความสามารถในการยึดจนขาดที่คงอยู่หลังการบ่มแรงน้อยลง

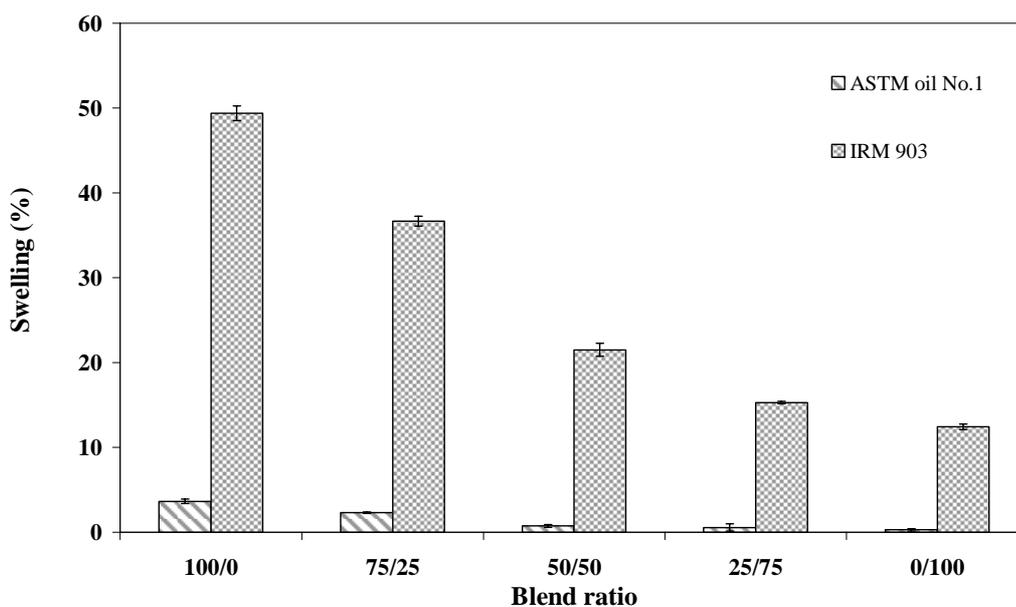
4.2.3.5 สมบัติด้านการทนต่อน้ำมันของยางเบลนด์ ENR-25/CSM โดยแปรอัตราส่วนต่างๆ

การทดสอบสมบัติการทนต่อน้ำมันของยางเบลนด์ ENR-25/CSM ที่แปรอัตราส่วนต่างๆ ได้ผลการวิจัยดังตารางที่ 4.32

ตารางที่ 4.32 การบวมพองในน้ำมันของยางเบลนด์ ENR-25/CSM ที่แปรอัตราส่วนต่างๆ

ENR-25/CSM ratio	Swelling (%)	
	ASTM oil No. 1	IRM 903
100/0	3.63±0.27	49.40±0.86
75/25	2.31±0.09	36.67±0.58
50/50	0.74±0.17	21.50±0.78
25/75	0.54±0.43	15.28±0.13
0/100	0.27±0.16	12.43±0.35

จากตารางที่ 4.32 สามารถแสดงกราฟเปรียบเทียบการบวมของยางเบลนด์ที่แปรอัตราส่วนต่างๆได้ ดังรูปที่ 4.64



รูปที่ 4.64 การบวมพองในน้ำมันของยางเบลนด์ ENR-25/CSM ที่แปรอัตราส่วนยางเบลนด์ ENR-25/CSM ต่างๆ

จากรูปที่ 4.64 พบว่า การบวมพองของยางเบลนด์ ENR-25/CSM มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มปริมาณของยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน เนื่องจากคลอรีนในโมเลกุลยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงกว่าอะตอมออกซิเจนในโครงสร้างยางธรรมชาติอีพอกไซด์จึงมีความเป็นขั้วสูงกว่า ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนทำให้ยางเบลนด์ ENR-25/CSM ทนน้ำมันเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนเดียวกัน พบว่ายางเบลนด์มีความทนทานต่อน้ำมัน ASTM oil No.1 ได้มากกว่า น้ำมัน IRM 903 เนื่องจากน้ำมัน IRM 903 มีค่า aniline point ต่ำกว่าน้ำมัน ASTM oil No.1 ทำให้แทรกเข้าไปในยางเบลนด์ได้ดีกว่า จึงทำให้มีการบวมพองสูงกว่าน้ำมัน ASTM oil No.1

4.2.4 ศึกษาอิทธิพลของชนิดยางเบลนด์ต่อสมบัติยางเบลนด์

เตรียมยางคอมพาวด์ระหว่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน ตามวิธีการทดลองในหัวข้อ 3.3.1.4 โดยแปรชนิดยางเบลนด์ คือ NR/CSM, ENR-25/CSM และ ENR-50/CSM เพื่อศึกษาสมบัติการแปรรูป สมบัติการวัลคาไนซ์ สมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่ง ได้ผลการทดลองดังนี้

4.2.4.1 อิทธิพลของชนิดยางเบลนด์ต่อค่าความเหนียวนี้ของยางคอมพาวด์

สมบัติด้านการแปรรูปหรือค่าความเหนียวนี้ของยางคอมพาวด์ของยางเบลนด์ระหว่าง NR/CSM, ENR-25/CSM และ ENR-50/CSM ที่อัตราส่วน 50/50 แสดงดังตารางที่ 4.33

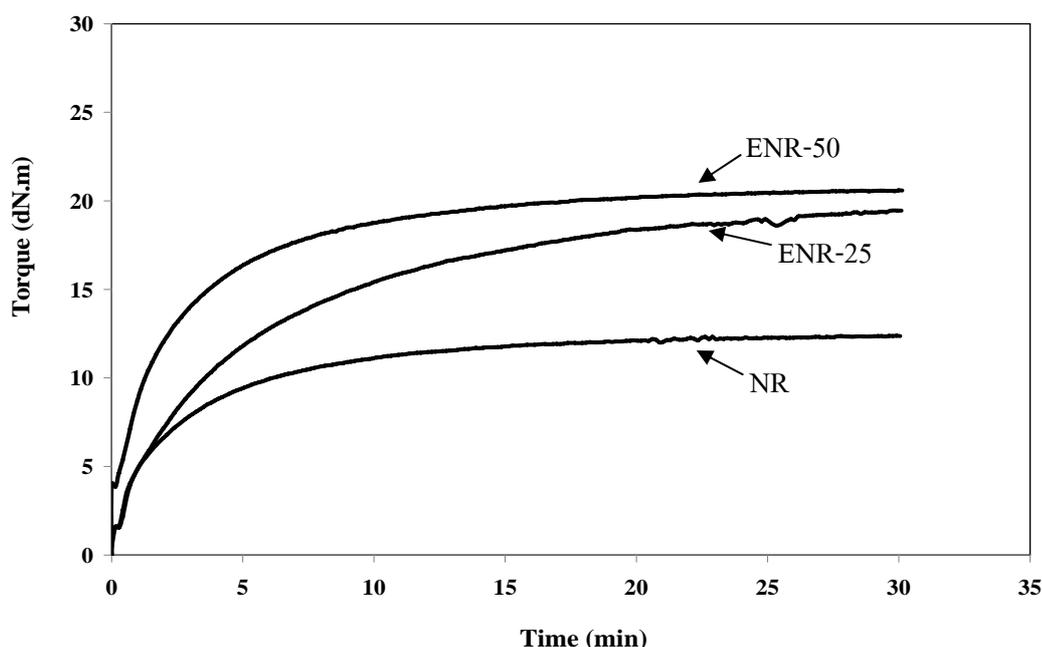
ตารางที่ 4.33 ความเหนียวนี้ของยางเบลนด์ โดยแปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ

Types of rubber blend	Mooney viscosity ML 1+4 (125 °C)
NR/CSM	9
ENR-25/CSM	11
ENR-50/CSM	21

จากตารางที่ 4.33 พบว่า ค่าความเหนียวนี้ของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนเปรียบเทียบกับยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน พบว่ายางเบลนด์ที่ใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีความเหนียวนี้สูงกว่ายางเบลนด์ที่ใช้ยางธรรมชาติ เนื่องจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีวงแหวนอีพอกไซด์ ทำให้ค่าเหนียวนี้เพิ่มสูงขึ้น เพราะวงแหวนอีพอกไซด์มีอะตอมออกซิเจนซึ่งมีความเป็นขั้ว ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลยางทำให้เคลื่อนที่ได้ยากจึงมีความเหนียวสูง

4.2.4.2 อิทธิพลของชนิดยางเบลนด์ต่อลักษณะการวัลคาไนซ์

ทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของ ENR-25/CSM ที่อุณหภูมิ 160°C โดยแปรชนิดยางเบลนด์ ดังนี้ คือ NR/CSM, ENR-25/CSM และ ENR-50/CSM ได้ลักษณะการวัลคาไนซ์ดังรูปที่ 4.65



รูปที่ 4.65 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาในการทดสอบการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ ENR-25/CSM โดยแปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 4.65 สามารถนำมาหาค่าสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน (ENR-25/CSM) ที่แปรชนิดยางต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.34

ตารางที่ 4.34 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ ENR-25/CSM โดยแปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ

Types of rubber blend	M_L (dN.m)	M_H (dN.m)	M_H-M_L (dN.m)	Cure time t_{c90} (min)	Scorch	
					time (min)	CRI (1/min)
NR	1.55	12.36	10.81	10.80	0.43	9.64
ENR-25	1.60	19.46	17.86	16.80	0.43	6.11
ENR-50	4.65	20.60	15.95	10.99	0.47	9.50

เมื่อพิจารณาค่าความแตกต่างของค่าทอร์กสูงสุด-ต่ำสุดของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน พบว่า ยางเบลนด์ทั้ง ENR-25/CSM และ ENR-50/CSM จะให้ค่าความแตกต่างของค่าทอร์กสูงสุด-ต่ำสุดสูงกว่า NR/CSM เนื่องจากในยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีแรงกระทำทางเคมี ซึ่งเกิดแรงดึงดูดภายในโมเลกุลของยางธรรมชาติอีพอกไซด์จากวงแหวนอีพอกไซด์ จึงส่งผลให้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีค่าความต่างของค่าทอร์กสูงสุด-ต่ำสุดสูงกว่ายางธรรมชาติ และอาจเนื่องจากยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์สามารถเกิดการวัลคาไนซ์ด้วยตัวเองทำให้เกิดการเชื่อมโยงในโมเลกุลได้มากกว่ายางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนที่ไม่สามารถเกิดการเชื่อมโยงได้ด้วยตัวเอง

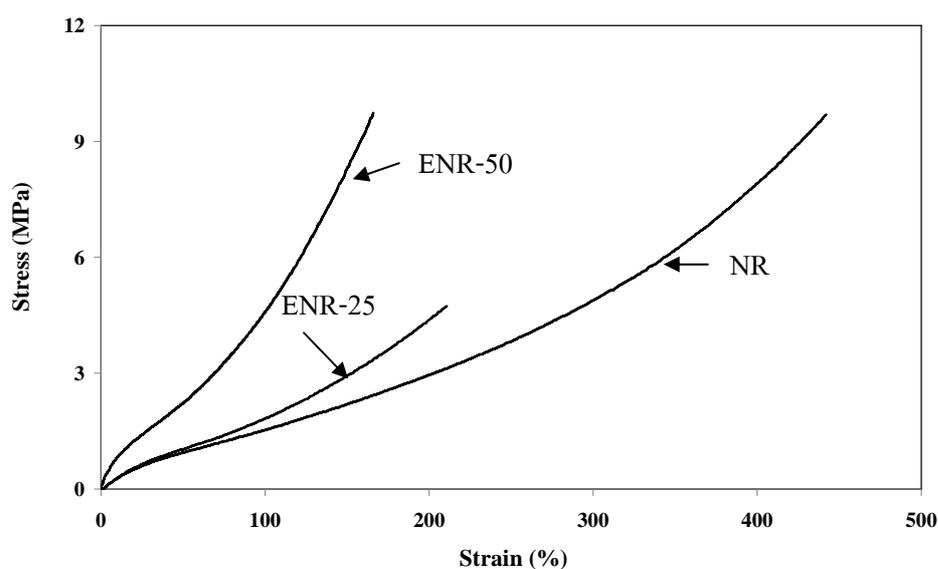
4.2.4.3 สมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ โดยแปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ

ทดสอบสมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ ENR-25/CSM โดยแปรชนิดยางเบลนด์ NR/CSM, ENR-25/CSM และ ENR-50/CSM ได้ผลการวิจัยดังตารางที่ 4.35

ตารางที่ 4.35 อิทธิพลของอัตราส่วนยางเบลนด์ต่อสมบัติเชิงกล

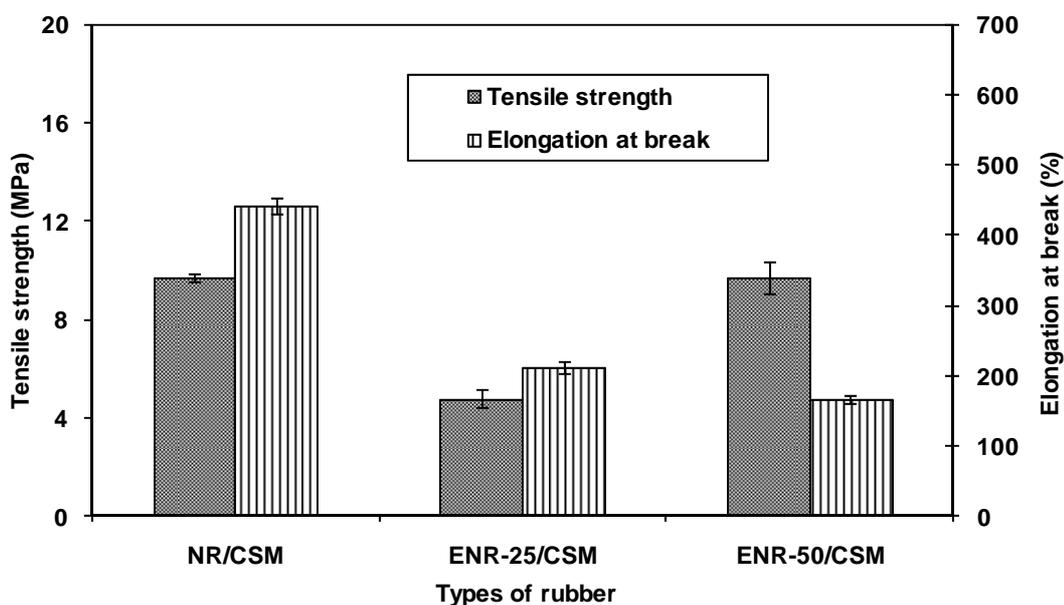
Types of rubber blend	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tear strength (N/mm)	Hardness (shore A)	Tension set (%)	Area under stress-strain curve
NR/CSM	9.7 ± 0.2	442.0 ± 10.4	29.8 ± 0.6	47.0 ± 0.6	5.0	1691
ENR-25/CSM	4.8 ± 0.4	210.8 ± 14.1	18.1 ± 0.6	51.0 ± 0.0	6.0	447
ENR-50/CSM	9.7 ± 0.7	166.0 ± 6.3	19.27 ± 1.8	52.0 ± 0.5	6.0	692

ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนด์โดยแปรชนิดยางเบลนด์ NR/CSM, ENR-25/CSM และ ENR-50/CSM ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด แสดงดังรูปที่ 4.66



รูปที่ 4.66 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางเบลนด์ที่แปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ

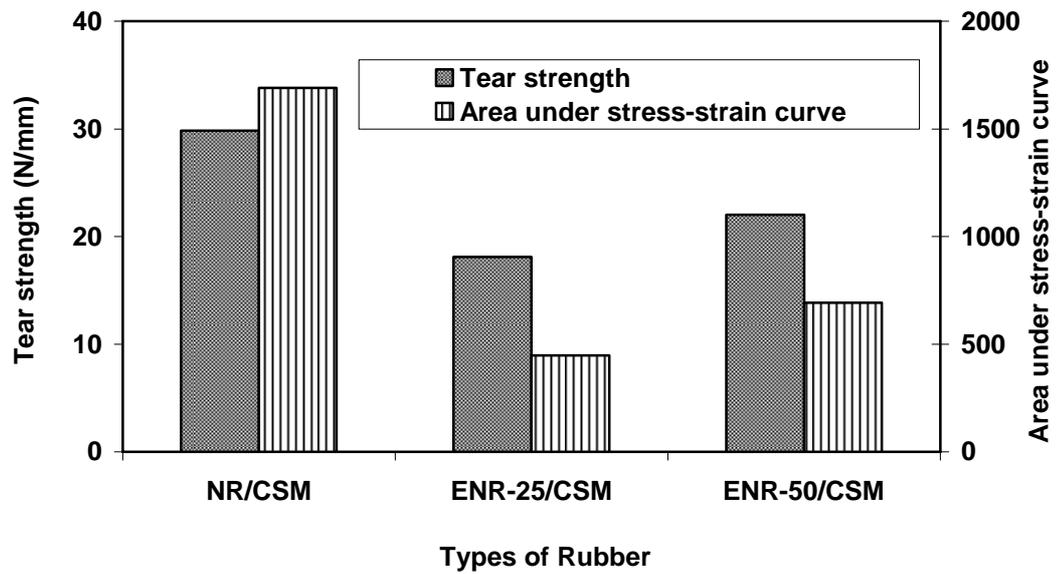
จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดสามารถคำนวณหาความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดได้ดังรูปที่ 4.67



รูปที่ 4.67 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ที่แปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ

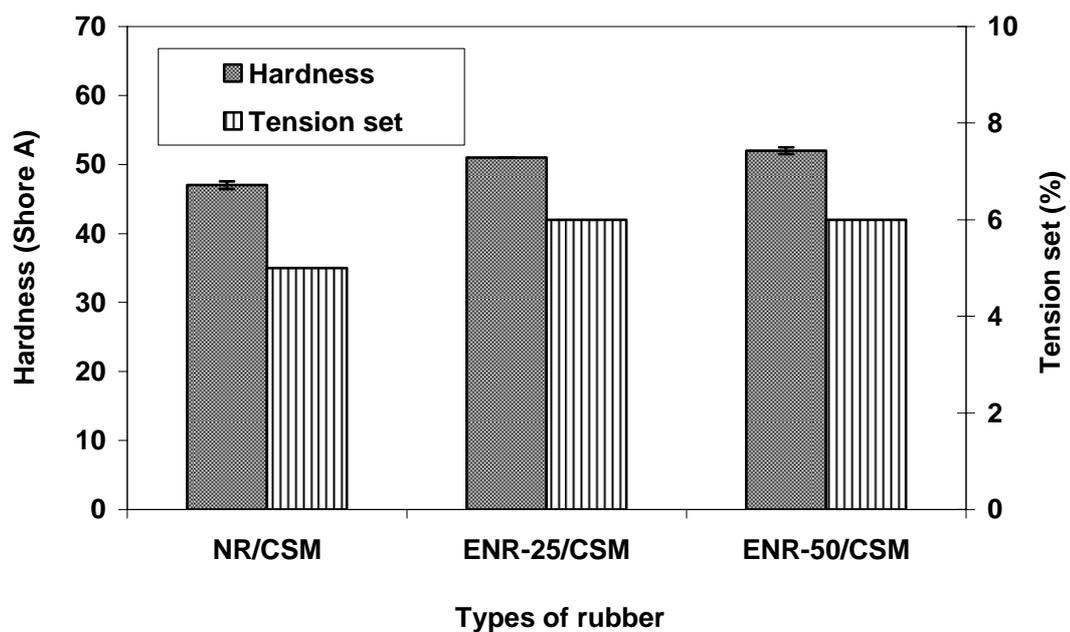
จากรูปที่ 4.67 พบว่า ยางเบลนด์ NR/CSM มีความสามารถในการดึงสูงกว่ายางเบลนด์ ENR-25/CSM เนื่องจากการวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ในเฟสของยางธรรมชาติอาจทำให้มีความแข็งแรงมากกว่า การเกิดการเชื่อมโยงในยางธรรมชาติฟอกไซต์กับยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน จึงทำให้ยางเบลนด์ NR/CSM แสดงสมบัติด้านความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่า ENR-25/CSM ส่วนในยางเบลนด์ ENR-50/CSM มีความสามารถในการดึงที่ดี เนื่องจากยาง ENR-50 มีขั้วสูงกว่า ENR-25 ทำให้เบลนด์เข้ากับยาง CSM ได้ดีกว่าและสามารถเกิดการวัลคาไนซ์ได้ด้วยตัวเองสูงกว่า ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงสูงด้วย จากรูปที่ 4.67 พบว่า ความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ NR/CSM มากกว่ายางเบลนด์ ENR-25 และ ENR-50 เนื่องจากการวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ในเฟสของยางธรรมชาติอาจทำให้มีความแข็งแรงมากกว่า การเกิดการเชื่อมโยงในยางธรรมชาติฟอกไซต์กับยางคลอโรซัลโฟเนต พอลิเอทิลีน จึงทำให้ยางเบลนด์ NR/CSM แสดงสมบัติด้านความสามารถในการยืดสูงกว่า ENR/CSM เนื่องจากมีความแข็งแรงของพันธะเชื่อมโยงสูง จึงต้องใช้ระยะยืดที่สูงที่จะทำให้เกิดการขาดได้ ส่วนในยางเบลนด์ ENR-50/CSM มีความสามารถในการยืดต่ำกว่ายางเบลนด์ ENR-25/CSM เนื่องจากยาง ENR-50 มีวงอ็อกไซดที่สูงกว่า ซึ่งเป็นส่วนที่ลดสมบัติด้านความยืดหยุ่นของยางทำให้มีความสามารถในการยืดจนขาดต่ำ

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ที่แปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ ได้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด พื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียด ค่าความแข็ง ค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึง ดังแสดงในรูปที่ 4.68 – 4.69



รูปที่ 4.68 ความต้านทานต่อการฉีกขาดแบบมุมและพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียดของยางเบลนด์ที่แปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 4.68 พบว่า ความต้านทานต่อการฉีกขาดแบบมุมของยางเบลนด์ NR/CSM มากกว่ายางเบลนด์ ENR-25/CSM และ ENR-50/CSM ซึ่งสามารถอธิบายเช่นเดียวกันกับความต้านทานต่อแรงดึง เมื่อพิจารณาถึงพื้นที่ใต้กราฟซึ่งแสดงถึงพลังงานในการทำให้ขึ้นตัวอย่างเสียหายหรือความเหนียว (Toughness) พบว่า พื้นที่ใต้กราฟมีแนวโน้มเช่นเดียวกับความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดสามารถอธิบายด้วยเหตุผลเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.69 ความแข็งและค่าการผิดรูปถาวรเนื่องจากการดึงของยางเบลนด์ที่แปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 4.69 พบว่า ความแข็งของยางเบลนด์ ENR-50/CSM มีค่าสูงสุด รองลงมาคือยางเบลนด์ ENR-25/CSM และยางเบลนด์ NR/CSM มีค่าความแข็งต่ำที่สุด เนื่องจากการมีวงอีพอกไซด์บนโมเลกุลยางธรรมชาติอีพอกไซด์ส่งผลให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล จึงทำให้ค่าความแข็งสูงกว่ายางเบลนด์ ENR/CSM จากรูปที่ 4.69 เมื่อพิจารณายางเบลนด์ NR/CSM กับยางเบลนด์ ENR-25/CSM และ ENR-50/CSM พบว่า ยางที่เบลนด์ด้วยยางธรรมชาตินั้นมีสมบัติด้านการคืนรูปที่ดีกว่า เนื่องจากยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่น (elasticity) มากกว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์ และการจัดเรียงตัวของยางธรรมชาติทำให้สามารถกลับคืนรูปได้เหมือนเดิม ซึ่งไม่มีการรบกวนด้วยหมู่เกาะในโครงสร้างเหมือนยางธรรมชาติอีพอกไซด์ ทำให้ยางเบลนด์ ENR-25/CSM และ ENR-50/CSM มีการผิดรูปสูงกว่ายางเบลนด์ NR/CSM

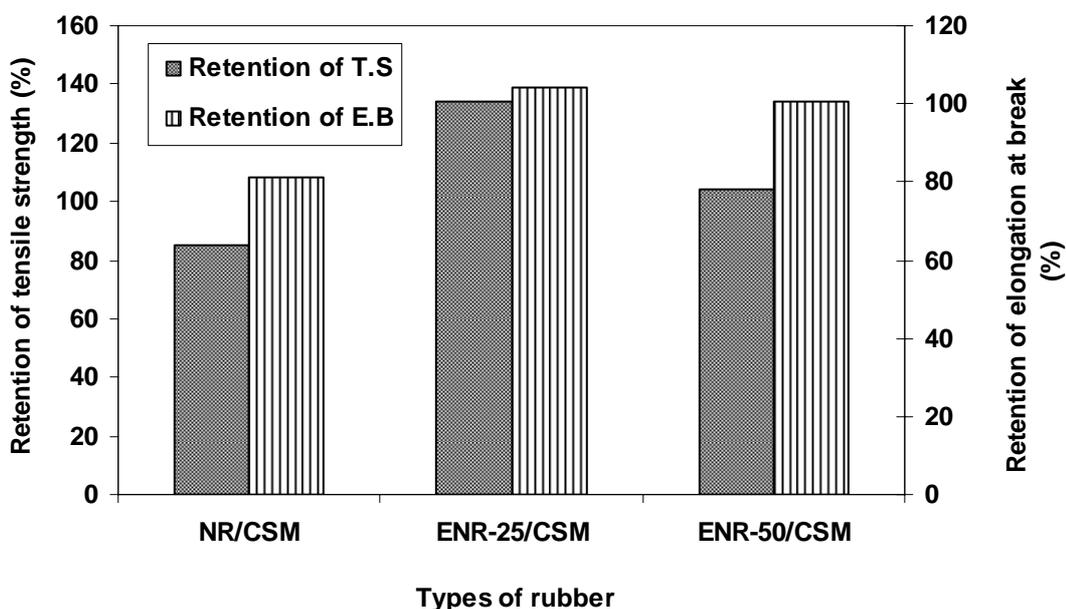
4.2.4.4 สมบัติหลังการบ่มเร่งของยางเบลนด์ โดยแปรชนิดยางต่างๆ

ทดสอบสมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่งโดยการนำยางเบลนด์ NR/CSM, ENR-25/CSM, ENR-50/CSM ที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้วไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง แล้วทดสอบสมบัติเชิงกล ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.36

ตารางที่ 4.36 อิทธิพลของชนิดยางเบลนด์ต่อสมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่ง

Type of rubber blends	Retention of tensile strength (%)	Retention of elongation at break (%)
NR/CSM	84.8	81.0
ENR-25/CSM	133.9	104.3
ENR-50/CSM	104.3	100.6

จากตารางที่ 4.36 สามารถนำข้อมูลค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่าความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่หลังการบ่มเร่งมาพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ 4.70



รูปที่ 4.70 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาดที่คงอยู่หลังบ่มแรงของยางเบลนด์ที่แปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 4.70 พบว่า ความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาดหลังการบ่มแรงของยางเบลนด์ระหว่าง NR/CSM มีสมบัติต่ำกว่าเมื่อเทียบกับก่อนบ่มแรง เนื่องจากยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้างโมเลกุลมากจึงทำให้เกิดการออกซิเดชันได้ง่าย ส่วนกรณีที่ใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีโอกาสที่ เกิดออกซิเดชันน้อยกว่า จึงทำให้สมบัติหลังการบ่มแรงของยางเบลนด์ ENR/CSM สูงกว่า NR/CSM

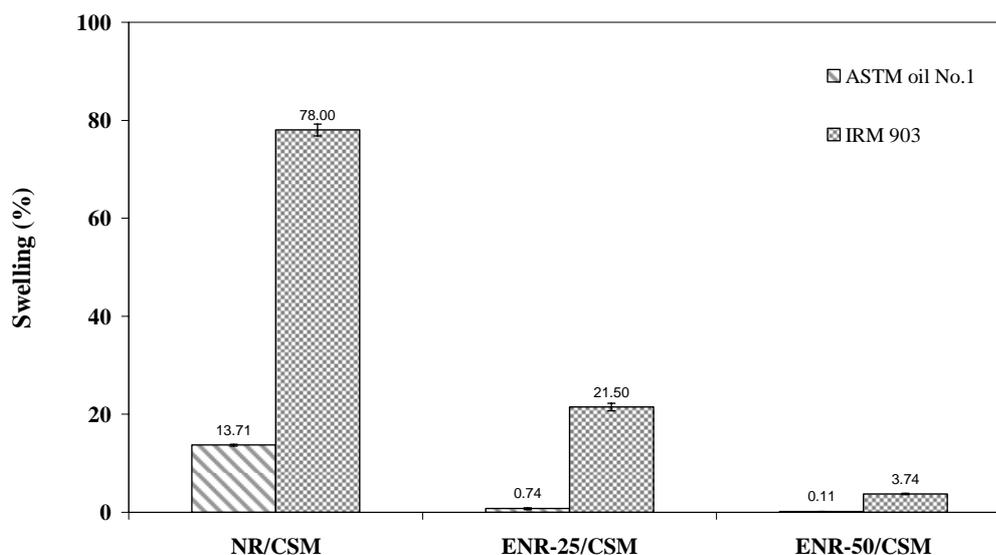
4.2.4.5 สมบัติด้านการทนต่อน้ำมันของยางเบลนด์ โดยแปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ

การทดสอบสมบัติการทนต่อน้ำมันของยางเบลนด์ที่แปรชนิดยางเบลนด์ NR/CSM, ENR-25/CSM และ ENR-50/CSM ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.37

ตารางที่ 4.37 การบวมพองในน้ำมันของยางเบลนด์ที่แปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ

Types of rubber blend	Swelling (%)	
	ASTM oil No. 1	IRM 903
NR/CSM	13.71±0.18	78.00±1.21
ENR-25/CSM	0.74±0.16	21.50±0.78
ENR-50/CSM	0.11±0.06	3.74±0.15

จากตารางที่ 4.37 สามารถแสดงกราฟเปรียบเทียบการบวมของยางเบลนด์ที่แปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆได้ดังรูปที่ 4.71



รูปที่ 4.71 การบวมพองในน้ำมันของยางเบลนด์ที่แปรชนิดยางเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 4.71 พบว่า ยางเบลนด์ ENR-25/CSM และ ENR-50/CSM ทนน้ำมันได้ดีกว่ายางเบลนด์ NR/CSM เนื่องจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีการเติมออกซิเจนเข้าไปในโมเลกุลของยางธรรมชาติตรงพันธะคู่ เกิดเป็นวงแหวนอีพอกไซด์ ดังนั้นยางธรรมชาติอีพอกไซด์จึงมีความเป็นขั้ว จึงทนต่อน้ำมันที่ไม่มีขั้วได้ดีขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบยางเบลนด์ ENR-25/CSM กับ ENR-50/CSM พบว่ายางที่มีระดับอีพอกไซด์สูงกว่า ทำให้อย่างมีขั้วมากกว่าจึงทำให้ยางเบลนด์ ENR-50/CSM ทนน้ำมันได้ดีกว่ายางเบลนด์ ENR-25/CSM เมื่อเปรียบเทียบที่ยางเบลนด์ชนิดเดียวกัน พบว่า ยางเบลนด์มีความทนทานต่อน้ำมัน ASTM oil No.1 ได้มากกว่าน้ำมัน IRM 903 เนื่องจาก IRM 903 มีค่า aniline point ต่ำกว่า ASTM oil No.1 จึงทำให้สามารถแทรกเข้าไปในสายโซ่โมเลกุลยางได้มากกว่า เมื่อเปรียบเทียบยางเบลนด์ ENR-50/CSM กับยาง CSM (ASTM oil No.1=0.27, IRM 903=12.43) พบว่ายางเบลนด์ ENR-50/CSM ทนน้ำมันได้มากกว่ายาง CSM