

บทที่ 3

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในการทดลองเบื้องต้นได้ทำการศึกษาสมบัติของยางผสมสูตรต่างๆที่ไม่มีเซมาดำ ในอัตราส่วนผสมตั้งแต่ 80/20 – 20/80 (NR/CSM) แล้วเลือกอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมใช้ศึกษาสมบัติของยางผสมที่มีเซมาดำ โดยการศึกษาจะมุ่งเน้นยางผสมที่มียางธรรมชาติเป็นส่วนผสมมากกว่า50% เพราะต้องการใช้ยางธรรมชาติให้มากที่สุดเท่าที่จะทำให้สมบัติยังคงดีอยู่ และสนใจอัตราส่วนผสม70/30 เป็นกรณีพิเศษ เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่น่าจะเหมาะสมต่อการนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ เพราะจากการทบทวนเอกสารเกี่ยวกับยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ พบว่าต้องใช้ยางสังเคราะห์ เช่น EPDM ตั้งแต่ 30% ขึ้นไป จึงจะช่วยปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติได้ดี ในบทนี้แบ่งผลการทดลองออกเป็น 5 ตอน โดยตอนแรกเป็นสมบัติเชิงกลและความต้านทานต่อน้ำมันของยางผสมที่ไม่มีเซมาดำที่มีอัตราส่วนผสมตั้งแต่ 80/20 – 20/80 ตอนที่สองจะเป็นสมบัติเชิงกลของยางผสมที่มีเซมาดำและมียางCSMปริมาณ 20 – 40% ตอนที่สามจะเป็นผลการทดลองความต้านทานต่อโอโซนของยางผสมทั้งที่มีและไม่มีเซมาดำ ส่วนสองตอนสุดท้ายจะกล่าวถึงสัณฐานวิทยา(morphology) และอุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน (glass transition temperature, T_g) ของยางผสม ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเทคนิคSEMและDMTA ตามลำดับ

3.1 สมบัติเชิงกลของยางผสมที่ไม่มีเซมาดำ

3.1.1 สมบัติการทนต่อแรงดึง (Stress properties)

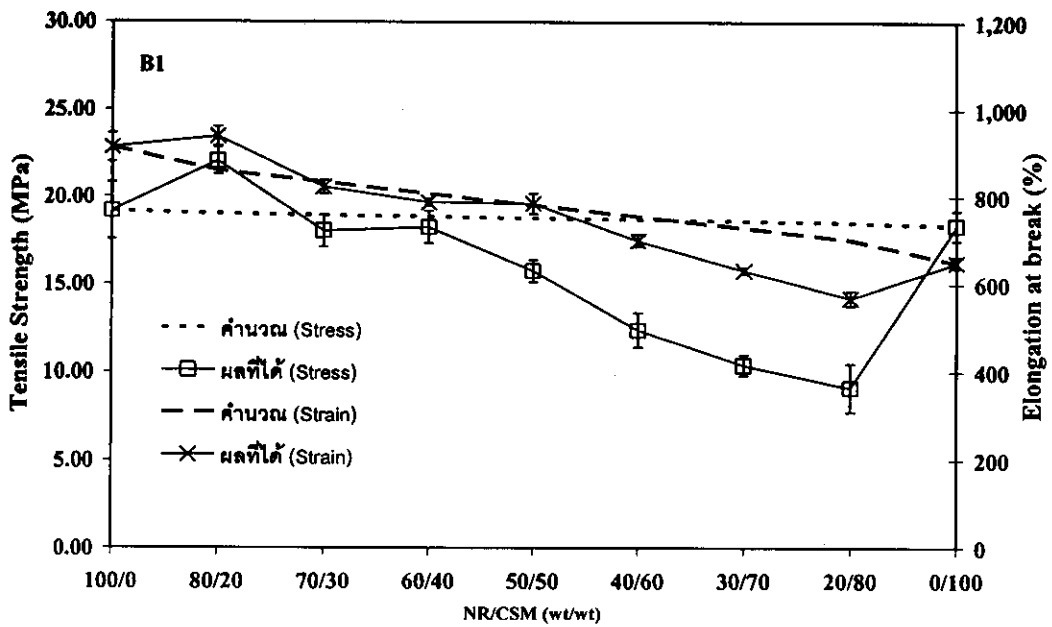
รูปที่ 3.1 – 3.4 แสดงความเค้นและความเครียด ณ จุดขาด ของยางผสมสูตร B1 – B4 ตามลำดับ ในรูปแสดงค่าที่ได้จากการคำนวณ (เส้นประทั้งสองเส้น) โดยการคำนวณนี้ใช้กฎของการผสมแบบง่าย (rule of mixture) ดังนี้

$$P_{Blend} = w_1P_1 + w_2P_2$$

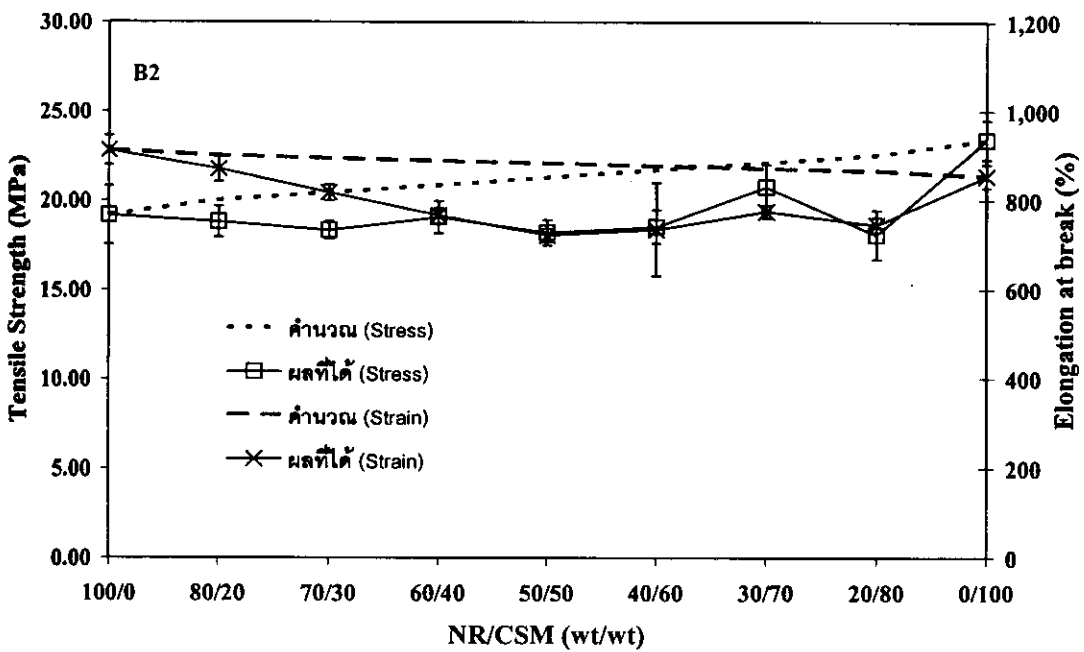
เมื่อ P_{Blend} คือสมบัติของยางผสม P_1 และ P_2 คือสมบัติของยางNRและยางCSMตามลำดับ w_1 และ w_2 คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของยางNRและยางCSMตามลำดับ โดยทั่วไปถ้าสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่มีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้ นี้ จะจัดเป็นพอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้ดี ในทางทฤษฎี การเตรียมพอลิเมอร์ผสมต้องการสมบัติที่เท่ากับหรือสูงกว่าที่คำนวณได้ และเรียกพอลิเมอร์ผสมชนิดนี้ว่า compatible blends

ยางผสมสูตรB1ที่มียางCSMอยู่ในช่วง 20% แสดงสมบัติการทนต่อแรงดึงดีมาก โดยมีค่าสูงกว่าค่าที่คำนวณได้ทั้งค่าความเค้นและความเครียด ณ จุดขาด (รูปที่ 3.1) ส่วนยางผสมที่มียางCSMอยู่ในช่วง 30% และ 40% มีค่าต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้เล็กน้อย (< 10%) แต่ยางผสมในอัตราส่วนที่มียางCSMมากขึ้น สมบัติจะด้อยลงตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของยางCSM

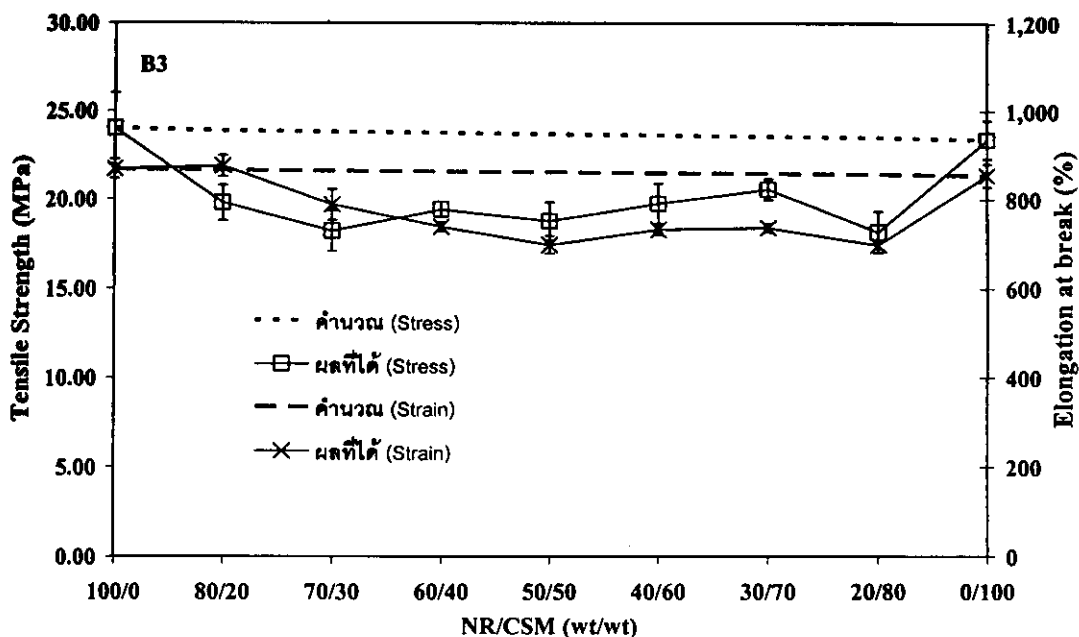
ค่าความเค้นและความเครียด ณ จุดขาด ของยางผสมสูตร B2 - B4 มีค่าต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้ (รูปที่ 3.2 – 3.4) ยางผสมสูตรB2ที่มียางCSMอยู่ในช่วง 20% และ 30% มีค่าความเค้น ณ จุดขาด ต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้เล็กน้อย($\leq 10\%$) ยางผสมที่มียางCSMมากขึ้นจะแสดงสมบัติด้อยลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของยางCSM ลักษณะเช่นเดียวกันนี้พบในค่าความเครียด ณ จุดขาด ของยางผสมทั้งสามสูตรนี้ด้วย ยางผสมที่มียางธรรมชาติมาก ๆ จะให้ค่าที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้เล็กน้อย ($\leq 10\%$) พฤติกรรมเช่นนี้น่าจะเป็นเพราะลักษณะที่เรียกว่า strain-induced crystallization ของยางธรรมชาติ จึงทำใหยางผสมที่มียางธรรมชาติมากมีค่าสมบัติการทนต่อแรงดึงสูงกว่ายางผสมที่มียางธรรมชาติน้อย



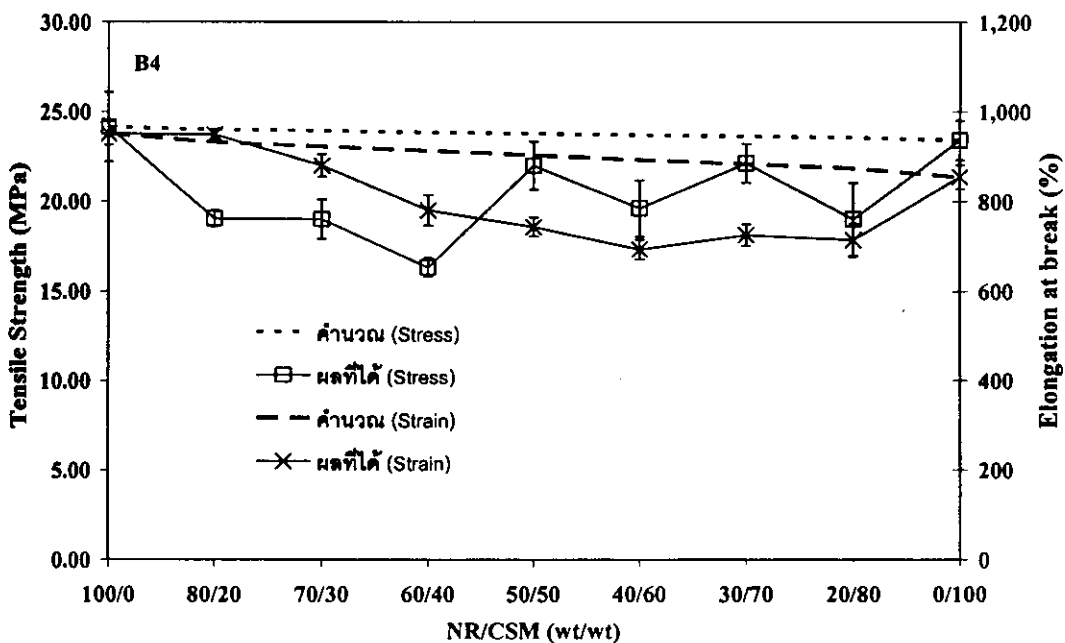
รูปที่ 3.1 ความเค้นและความเครียด ณ จุดขาด ของยางผสมที่อัตราส่วนผสมต่างๆของสูตร B1 ที่ไม่มีเขม่าดำ



รูปที่ 3.2 ความเค้นและความเครียด ณ จุดขาด ของยางผสมที่อัตราส่วนผสมต่างๆของสูตร B2 ที่ไม่มีเขม่าดำ



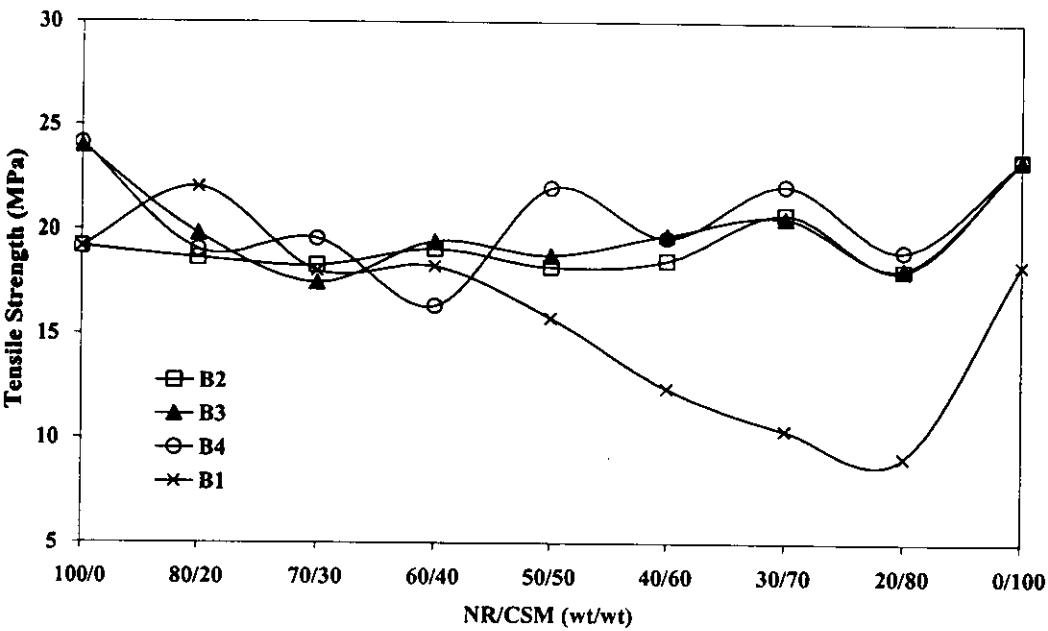
รูปที่ 3.3 ความเค้นและความเครียด ณ จุดขาด ของยางผสมที่อัตราส่วนผสมต่างๆของสูตร B3 ที่ไม่มีเซมาต้า



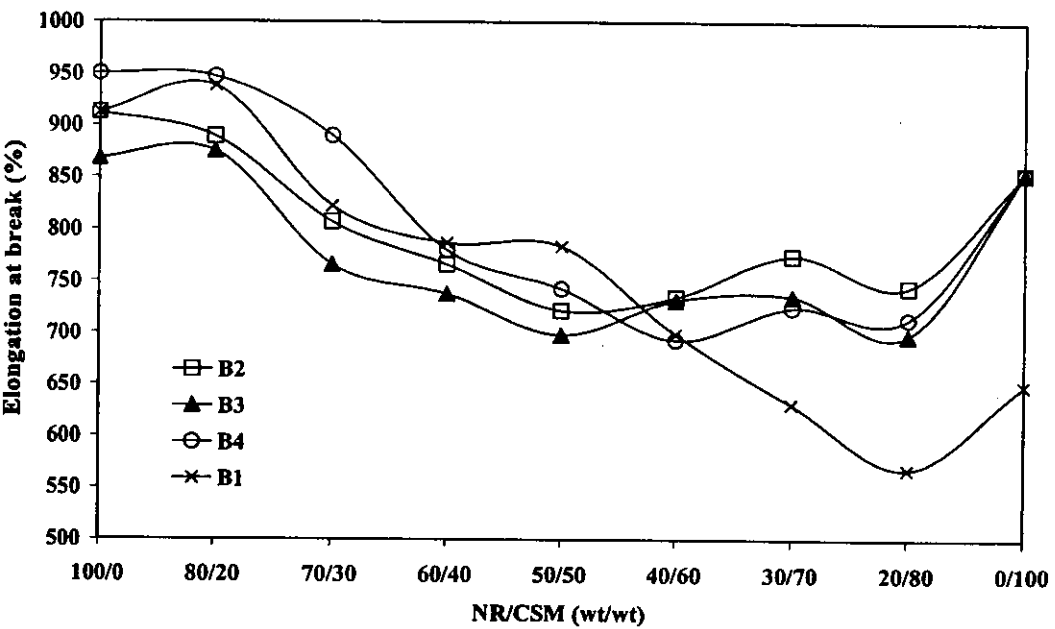
รูปที่ 3.4 ความเค้นและความเครียด ณ จุดขาด ของยางผสมที่อัตราส่วนผสมต่างๆของสูตร B4 ที่ไม่มีเซมาต้า

รูปที่ 3.5 และ 3.6 แสดงการเปรียบเทียบความเค้นและความเครียด ณ จุดขาด ของยางผสมทั้งสี่สูตร ในขณะที่ความเครียด ณ จุดขาด ของสูตรต่างๆที่มียางCSMอยู่ในช่วง20%และ30% สามารถเรียงตามลำดับได้ดังนี้ B4>B1>B2>B3

และยางผสมที่มี40%CSM สูตรB1และB4ให้ค่าใกล้เคียงกัน แต่ความเค้น ณ จุดขาดไม่สามารถจัดลำดับได้ เพราะที่อัตราส่วนต่างกันจะแสดงค่าสูงสุดจากสูตรที่ต่างกัน ดังนี้ ยางผสมที่มี20%CSM : B1>B3>B4>B2 ยางผสมที่มี30%CSM : B4>B2,B1>B3 ยางผสมที่มี40%CSM : B3,B2>B1>B4 อย่างไรก็ตาม การเตรียมยางผสมคู่นี้สามารถทำให้สมบัติของยางผสมใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้ โดยไม่ต้องเติมสารช่วยผสม (compatibilizer) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการเลือกใช้สูตรคอมพิวเตอร์ที่เหมาะสมต่อการวัลคาไนซ์อย่างทั้งสองชนิด



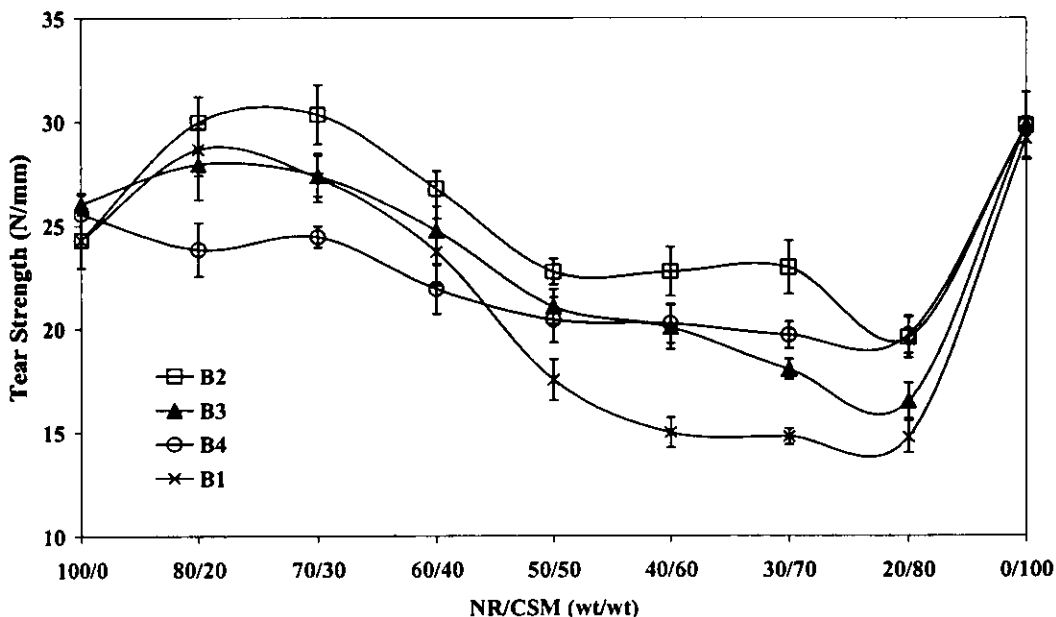
รูปที่ 3.5 ความเค้น ณ จุดขาด ของยางผสมที่อัตราส่วนผสมต่างๆที่ไม่มีเขม่าดำ



รูปที่ 3.6 ความเครียด ณ จุดขาด ของยางผสมที่อัตราส่วนผสมต่างๆที่ไม่มีเขม่าดำ

3.1.2 สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance)

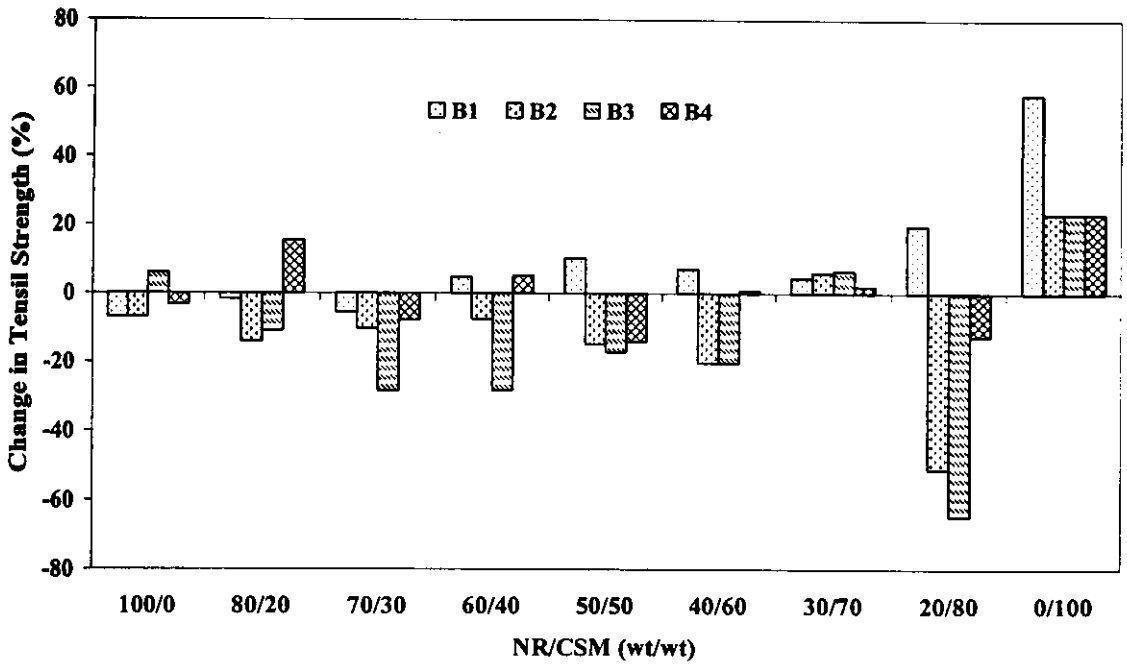
ค่าความแข็งแรงต่อการฉีกขาดของยางผสมสูตรต่างๆแสดงในรูปที่ 3.7 สังเกตได้อย่างชัดเจนว่ายางผสมสูตรB2 ให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงที่สุด ส่วนสูตรB4แสดงค่าต่ำสุดเมื่อพิจารณาในช่วงอัตราส่วนยางCSMปริมาณ 20% - 40% นอกจากนี้ยางผสมที่อัตราส่วนนี้ของทุกสูตร (ยกเว้น B4) แสดงค่าที่ได้จากการทดลองมากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ ดังนั้น สามารถกล่าวได้ว่ายางผสม NR/CSM ที่เตรียมได้จากโครงการวิจัยนี้ มีลักษณะเป็น compatible blend ในช่วงอัตราส่วนยางCSMปริมาณ 20% - 40% เนื่องจากให้สมบัติสูงกว่าหรือเท่ากับค่าที่คำนวณได้



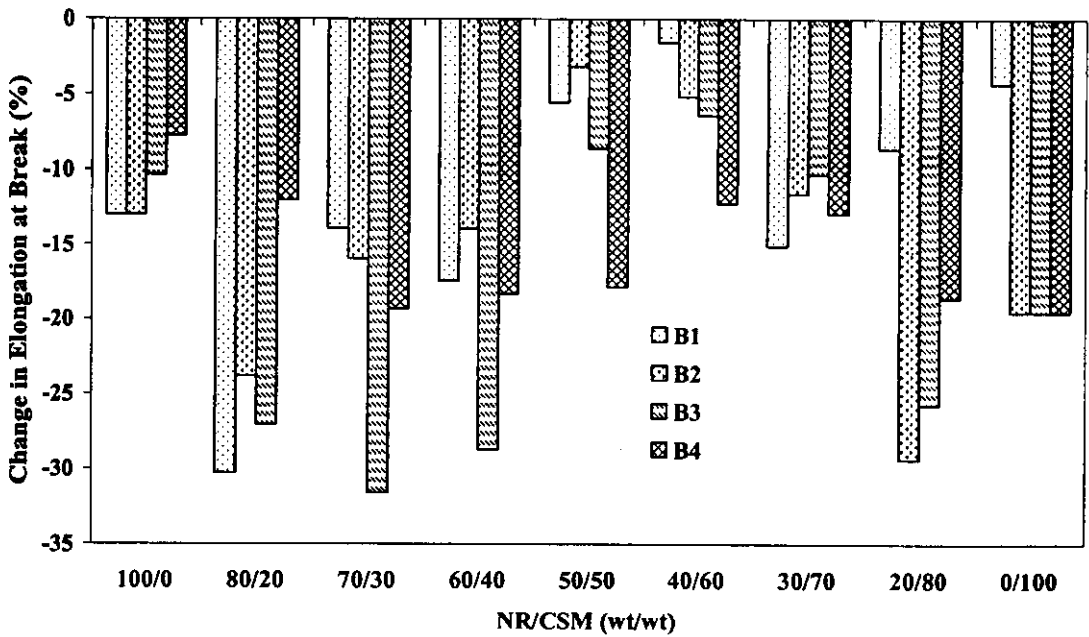
รูปที่ 3.7 ความต้านทานการฉีกขาดของยางผสมสูตรต่างๆที่อัตราส่วนผสมต่างๆและไม่มีเขม่าดำ

3.1.3 สมบัติการบ่มเร่งทางความร้อน (Thermal ageing properties)

การเปลี่ยนแปลงความเค้นและความเครียด ณ จุดขาด หลังการบ่มเร่งทางความร้อนของยางผสมสูตรต่างๆ แสดงในรูปที่ 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ ยางธรรมชาติมีแนวโน้มเกิดการตัดขาดของโมเลกุล ทำให้มีความแข็งแรงลดลง ยกเว้นสูตร NR2ซึ่งเป็นส่วนผสมของB3ที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นหลังการบ่มเร่ง ส่วนยางCSMทุกสูตรจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น คาดว่ามีการวัลคาไนซ์ระหว่างการบ่มเร่ง เพราะการวัลคาไนซ์ของยางCSMมีลักษณะแบบ marching ยางCSM (0/100) ชุดนี้ถูกวัลคาไนซ์ด้วยเวลาเพียง 18 นาที เนื่องจากต้องการเปรียบเทียบกับยางผสมซึ่งมีค่า t_{90} ไม่เกิน 18 นาที สำหรับยางผสมทุกสูตรและทุกอัตราส่วน ในขณะที่โดยทั่วไปนิยมวัลคาไนซ์ยางCSMที่เวลานานกว่านี้ เช่น 30 นาที หรือใช้อุณหภูมิสูงกว่านี้ เช่น 160°C อย่างไรก็ตาม โครงการวิจัยนี้ได้ทำการทดลองวัลคาไนซ์ยางCSMที่เวลา 30 นาที และนำไปทดสอบสมบัติการดึงยึด พบว่าให้ค่าความเค้นและความเครียด ณ จุดขาด ใกล้เคียงกับชิ้นทดสอบที่วัลคาไนซ์ด้วยเวลา 18 นาที การเปลี่ยนแปลงความเครียด ณ จุดขาด ของยางผสมมีค่าติดลบในทุกสูตรและทุกอัตราส่วน แสดงว่ามีค่าลดลงหลังการบ่มเร่ง ความเค้น ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลงเช่นกัน สูตรB3เป็นสูตรที่ด้อยที่สุด และสูตรB4น่าจะเป็นสูตรที่ดีที่สุด สังเกตได้ว่าการเปลี่ยนแปลงความเค้น ณ จุดขาด ของยางผสมในช่วง 20 - 40% ของ CSM มีค่าต่ำกว่า20%



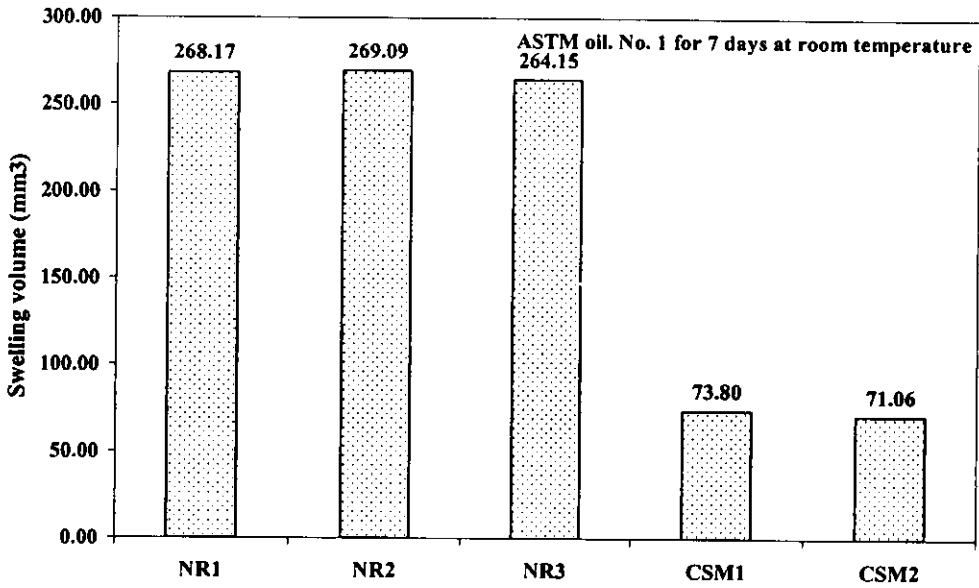
รูปที่ 3.8 การเปลี่ยนแปลงความเค้น ณ จุดขาด ของยางผสมสูตรต่างๆที่อัตราส่วนผสมต่างๆและไม่มีเขม่าดำ หลังการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 7 วัน



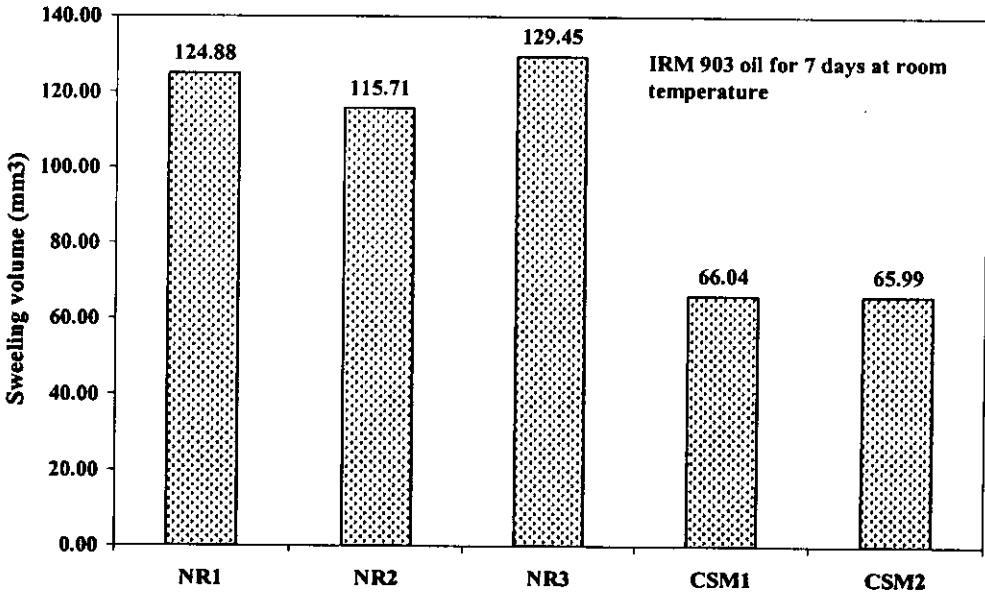
รูปที่ 3.9 การเปลี่ยนแปลงความเครียด ณ จุดขาด ของยางผสมสูตรต่างๆที่อัตราส่วนผสมต่างๆและไม่มีเขม่าดำ หลังการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 7 วัน

3.1.4 การบวมในน้ำมัน

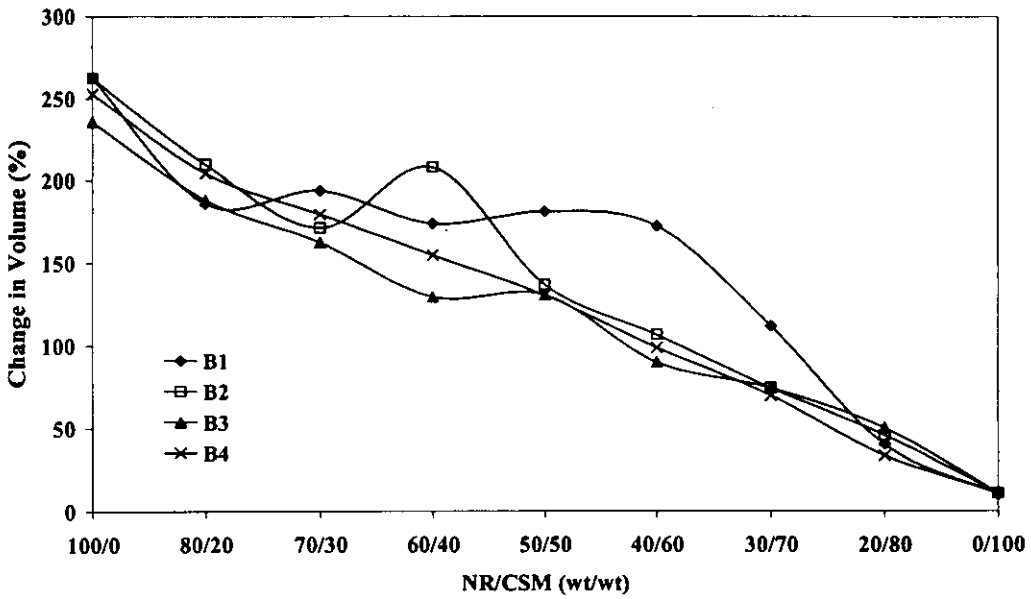
ปริมาณของยางธรรมชาติและยางCSMหลังการแช่น้ำมันแสดงในรูปที่ 3.10 และ 3.11 ยางCSMมีการบวมน้อยกว่ายางธรรมชาติมาก ปริมาณการบวมตัวของยางCSMมีค่าใกล้เคียงกันในน้ำมันทั้งสองชนิด ส่วนยางธรรมชาติจะบวมในน้ำมันASTMเบอร์1มากกว่าในน้ำมันIRM903 และยางแต่ละสูตรมีค่าการบวมที่ใกล้เคียงกัน



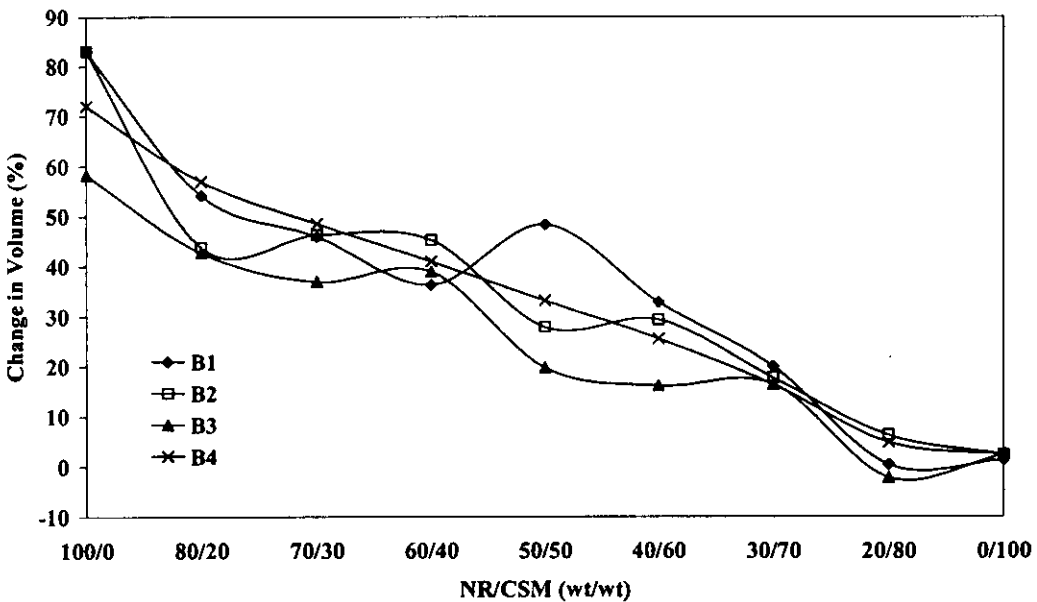
รูปที่ 3.10 ปริมาณของยางสูตรต่างๆที่ไม่มีเขม่าดำ หลังการแช่น้ำมันASTMเบอร์1 ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน



รูปที่ 3.11 ปริมาณของยางสูตรต่างๆที่ไม่มีเขม่าดำ หลังการแช่น้ำมันIRM903 ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน



รูปที่ 3.12 ปริมาณที่เพิ่มขึ้นของยางผสมสูตรต่างๆที่ไม่มีเซมาต้า หลังการแช่น้ำมันASTMเบอร์1 ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน



รูปที่ 3.13 ปริมาณของยางผสมสูตรต่างๆที่ไม่มีเซมาต้า หลังการแช่น้ำมันIRM903 ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน

ปริมาณที่เพิ่มขึ้นหลังการแช่น้ำมันของยางสูตรต่างๆแสดงในรูปที่ 3.12 และ 3.13 การผสมยางCSMทำให้ยางธรรมชาติมีการบวมในน้ำมันน้อยลง และความต้านทานการบวมในน้ำมันของยางผสมเพิ่มขึ้นตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของยางCSM ยางผสมบวมในน้ำมัน ASTMเบอร์1มากกว่าในน้ำมันIRM903 เป็นไปตามยางธรรมชาติและยางCSM ความต้านทานต่อน้ำมันของยางผสมทุกสูตรมีแนวโน้มต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้ ถึงแม้ว่าสูตรต่างๆของยางธรรมชาติและยางCSMจะแสดง

การรวมตัวที่ใกล้เคียงกันในแต่ละสูตรดังแสดงในรูปที่ 3.10 และ 3.11 แต่ยางผสมแต่ละสูตรแสดงควมต้านทานต่างกันและขึ้นอยู่กับอัตราส่วนด้วย

3.2 สมบัติเชิงกลของยางผสมที่มีเขม่าดำ

3.2.1 สมบัติการทนต่อแรงดึง (Tensile properties)

ความสามารถในการทนต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของNRและยางCSM รายงานผลเป็นค่าความเค้นและความเครียดในตารางที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ และเปรียบเทียบเป็นกราฟแท่งในรูปที่ 3.14 และ 3.15

ตารางที่ 3.1 ความเค้นและความเครียด ณ จุดขาด ของยางธรรมชาติที่มีเขม่าดำปริมาณต่างๆ

สูตร	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
NR1(0)	21.5±1.4	957±46
NR1(10)	21.7±1.3	844±19
NR1(20)	22.4±1.7	777±33
NR1(30)	23.1±1.0	757±17
NR1(40)	23.8±0.4	720±13
NR2(0)	22.5±1.5	977±23
NR2(10)	22.0±1.3	851±19
NR2(20)	22.1±1.8	762±27
NR2(30)	21.4±1.3	742±11
NR2(40)	21.5±1.6	693±13
NR3(0)	24.8±2.2	981±18
NR3(10)	24.1±0.5	844±25
NR3(20)	22.7±3.5	808±21
NR3(30)	23.6±1.2	729±19
NR3(40)	24.6±0.9	780±15

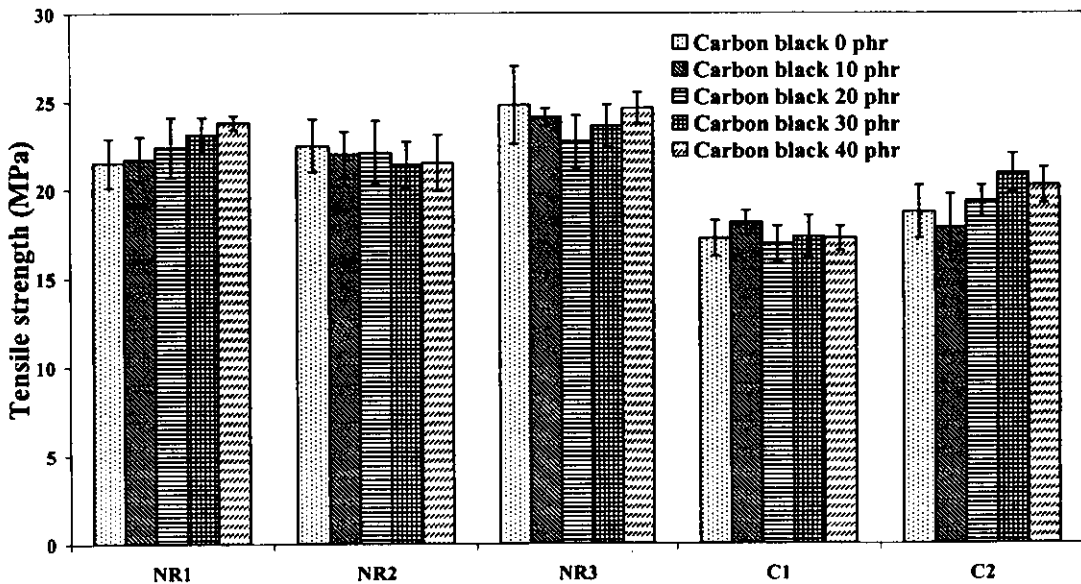
(การเรียกชื่อสูตร : NR1(0) = สูตร NR1 มีปริมาณเขม่าดำ 0 phr)

ตารางที่ 3.2 ความเค้นและความเครียด ณ จุดขาด ของยางCSMทุกสูตรที่มีเขม่าดำปริมาณต่างๆ

สูตร	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
C1(0)	17.2±1.0	767±24
C1(10)	18.1±0.7	573±10
C1(20)	16.9±1.0	449±17
C1(30)	17.3±1.2	486±11
C1(40)	17.2±0.7	419±11

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

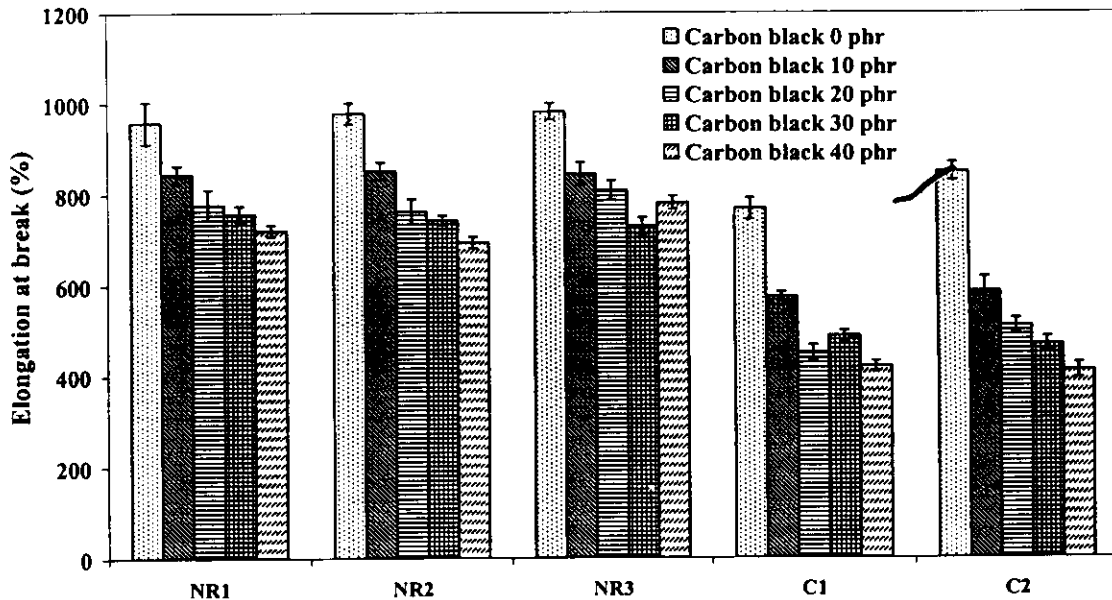
สูตร	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
C2(0)	18.7±1.5	849±20
C2(10)	17.8±1.9	584±32
C2(20)	19.3±0.9	508±16
C2(30)	20.9±1.1	467±16
C2(40)	20.2±1.0	409±16



รูปที่ 3.14 ความเค้น ณ จุดขาด ของยางธรรมชาติ (สูตร NR1, NR2 และ NR3) และยางCSM (สูตร C1 และ C2) ที่มีการเติมเขม่าดำในปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 3.14 จะเห็นได้ว่ายางธรรมชาติทุกสูตรมีความเค้น ณ จุดขาด สูงกว่า 20 MPa และสูตร NR3 จะให้ค่าสูงที่สุด ส่วนยางCSMทั้งสองสูตรมีค่าความเค้น ณ จุดขาด ต่ำกว่ายางธรรมชาติ และสูตรC2 ให้ค่าสูงกว่าสูตรC1 ผลของการเติมเขม่าดำในยางแต่ละสูตรมีความแตกต่างกัน แต่แสดงการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เช่น สำหรับสูตรNR1 เขม่าดำทำให้ยางมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้าม สูตรNR2มีความแข็งแรงลดลงเล็กน้อยเมื่อมีการเติมเขม่าดำ แต่สูตรNR3 ไม่มีทิศทางการเปลี่ยนแปลงที่แน่นอน การเติมเขม่าดำในสูตรC1ไม่ค่อยมีผลมากนัก ในขณะที่สูตรC2แสดงการเพิ่มขึ้นของความเค้น ณ จุดขาด เมื่อเติมเขม่าดำ เป็นที่น่าสังเกตว่ายางCSMที่มีการเติมเขม่าดำนี้ คือยางผสมนั่นเอง เนื่องมาจากยางที่มากับเขม่าดำมาสเตอร์แบทช์ จะมียางธรรมชาติและยางเอสบิโอาร์ปนอยู่กับยางCSMเพิ่มขึ้นตามปริมาณเขม่าดำ คือ 7%, 16%, 22% และ 28% จากเขม่าดำ 10 – 40 phr ตามลำดับ หากพิจารณาในภาพรวมจะเห็นว่า การเติมเขม่าดำมีผลเพียงเล็กน้อยต่อความเค้น ณ จุดขาด สำหรับยางทั้งสองชนิด และดูเหมือนว่ายางที่มาจากเขม่าดำไม่ได้ทำให้สมบัติของยางCSMด้อยลงไป นอกจากนี้ กล่าวได้ว่าสูตรNR3และสูตรC2ให้ค่าสูงกว่าสูตรอื่นในยางชนิดเดียวกัน ยางธรรมชาติมีการทนต่อแรงดึงมากกว่ายางCSM เพราะยางธรรมชาติจะเกิดผลึกเมื่อได้รับแรงดึง ซึ่งเป็นผลทำให้โมเลกุลของยางธรรมชาติมีความแข็งแรงมากขึ้น ในขณะที่ยางCSMไม่เกิดผลึกจึงทำให้มีความสามารถในการต้านทานต่อแรงดึงต่ำกว่า รูปที่ 3.15

แสดงความเครียด ณ จุดขาด ของยางธรรมชาติและยางCSM ยางธรรมชาติทั้งสามสูตรมีระยะยืดที่ขาดใกล้เคียงกันและมีค่ามากกว่าค่าของยางCSM สูตรC2ให้ค่าสูงกว่าสูตรC1 การเติมเขม่าดำทำให้ระยะยืดนี้ลดลงในทุกๆสูตร และยางCSMแสดงการเปลี่ยนแปลงมากกว่ายางธรรมชาติ อนึ่งผลของเขม่าดำที่มีต่อสมบัติเชิงกลนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของเขม่าดำที่ใช้ โครงการวิจัยนี้เลือกใช้เขม่าดำมาสเตอร์แบทช์ที่ขายทางการค้า ดังนั้น ผลการทดลองจึงสรุปได้เฉพาะสูตรเขม่าดำนี้เท่านั้น



รูปที่ 3.15 ความเครียด ณ จุดขาดของยางธรรมชาติ (สูตร NR1, NR2 และ NR3) และยางCSM (สูตร C1 และ C2) ที่มีการเติมเขม่าดำในปริมาณต่างๆ

จากข้อมูลของยางบริสุทธิ์ (virgin rubber) ที่กล่าวมานี้จะเห็นว่าสูตรต่างๆของยางธรรมชาติไม่แตกต่างกันมากนัก เช่นเดียวกับกับยางCSM เนื่องจากสมบัติของยางผสม (rubber blend) ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความเข้ากันได้ของยางทั้งสองชนิด และการกระจายของสารเคมี ดังนั้น สูตรของยางคอมปาวด์น่าจะมีอิทธิพลต่อสมบัติของยางผสมด้วย การเตรียมยางผสมชุดนี้จึงมีการแปรเปลี่ยนสูตรของยางทั้งสองชนิดด้วย เพื่อหาสูตรที่เหมาะสมต่อการพัฒนาของผสมชุดนี้ต่อไป ตารางที่ 3.3 แสดงค่าความเค้นและความเครียด ณ จุดขาด ของยางผสมสูตร B1 – B4 ทั้งที่มีและไม่มีเขม่าดำ สูตรยางผสมและการเรียกชื่อสูตรยางผสมอธิบายในบทที่ 2 ในที่นี้จะอธิบายอีกครั้ง ตัวเลขในวงเล็บหมายถึงปริมาณของเขม่าดำ และตัวเลขชุดสุดท้ายหมายถึงปริมาณโดยน้ำหนักของยางCSM

อิทธิพลของเขม่าดำที่มีต่อความเค้นและความเครียด ณ จุดขาด ของยางผสมสูตร B1 – B4 แสดงในรูปที่ 3.16 - 3.23 ตามลำดับ อิทธิพลของเขม่าดำที่มีต่อความเครียด ณ จุดขาด เป็นไปในทิศทางเดียวกันของทุกสูตร คือทำให้ค่าลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของเขม่าดำและยางCSM เขม่าดำทำให้ความเค้น ณ จุดขาดของยางผสมสูตรB1และB2 มีค่าลดลง (รูปที่ 3.16 และ 3.18) ส่วนสูตรB3และB4มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อมีเขม่าดำ 30 phr และเห็นได้ชัดเจนมากในสูตรB4 (รูปที่ 3.22) ในรูปนี้จะเห็นว่าเมื่อเติมเขม่าดำ 30 phr ยางผสมแข็งแรงกว่ายางผสมที่ไม่มีเขม่าดำ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณขึ้นความแข็งแรงกลับลดลง อาจกล่าวได้ว่าการเติมเขม่าดำในปริมาณที่เหมาะสม(30 phr)ช่วยให้ยางผสม(สูตรB4)มีลักษณะเข้ากันได้ดีขึ้น ดังนั้นสูตรB4นี้เป็นสูตรยางผสมที่ดีกว่าสูตรอื่นๆ

ตารางที่ 3.3

ความเค้นและความเครียด ณ จุดขาด ของยางผสมที่มีเขม่าดำปริมาณต่างๆ

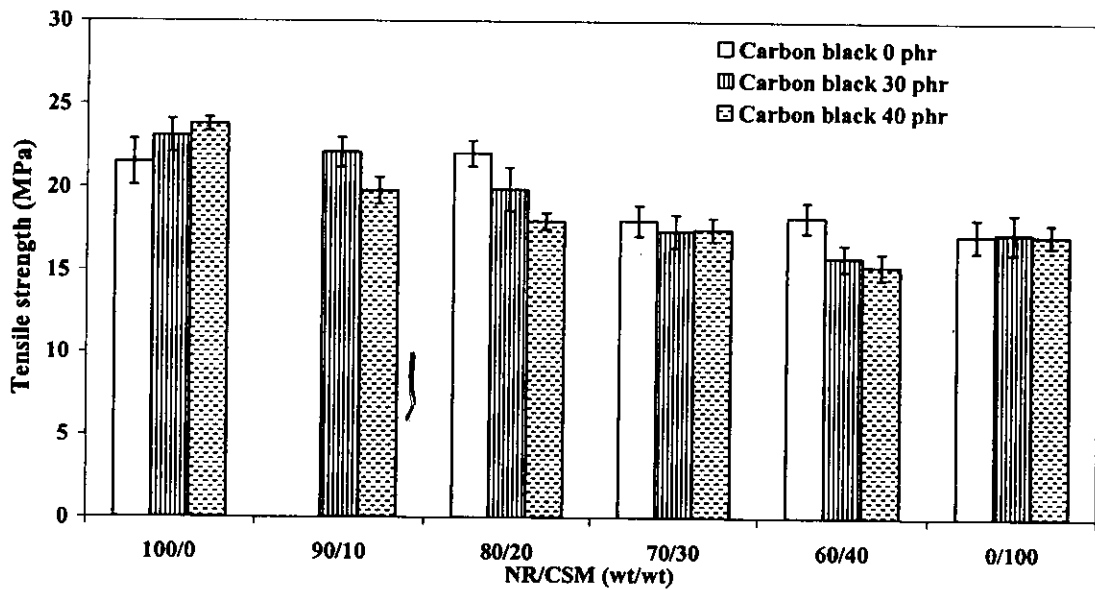
สูตร	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
B1(30)10	22.1±0.9	643±21
B1(40)10	19.8±0.8	616±15
B1(0)20	20.0±0.8	938±22
B1(30)20	19.9±1.3	505±11
B1(40)20	18.0±0.5	485±12
B1(0)30	18.0±0.9	822±16
B1(30)30	17.4±1.0	431±24
B1(40)30	17.5±0.7	425±17
B1(0)40	18.2±0.9	787±9
B1(30)40	15.8±0.8	380±19
B1(40)40	15.3±0.8	366±15
B2(30)10	23.2±0.7	699±16
B2(40)10	20.5±1.1	600±14
B2(0)20	18.8±0.9	870±28
B2(30)20	20.1±0.9	571±20
B2(40)20	18.7±0.7	493±13
B2(0)30	18.3±0.5	818±18
B2(30)30	18.0±1.1	425±17
B2(40)30	17.3±0.5	411±12
B2(0)40	19.1±0.9	766±17
B2(30)40	18.6±0.8	452±10
B2(40)40	15.3±1.6	360±22
B3(30)10	22.7±0.6	699±12
B3(40)10	22.7±0.6	497±10
B3(0)20	19.8±1.0	875±24
B3(30)20	21.3±1.0	563±13
B3(40)20	19.9±1.2	595±15
B3(0)30	18.2±1.1	788±35
B3(30)30	19.4±0.7	477±9
B3(40)30	17.6±0.6	387±15
B3(0)40	19.4±0.5	738±10
B3(30)40	17.5±1.4	433±19
B3(40)40	16.9±1.0	362±24

(การเรียกชื่อสูตร : B2(30)40 = สูตร B2 มีปริมาณเขม่าดำ 30 phr และ CSM 40 phr)

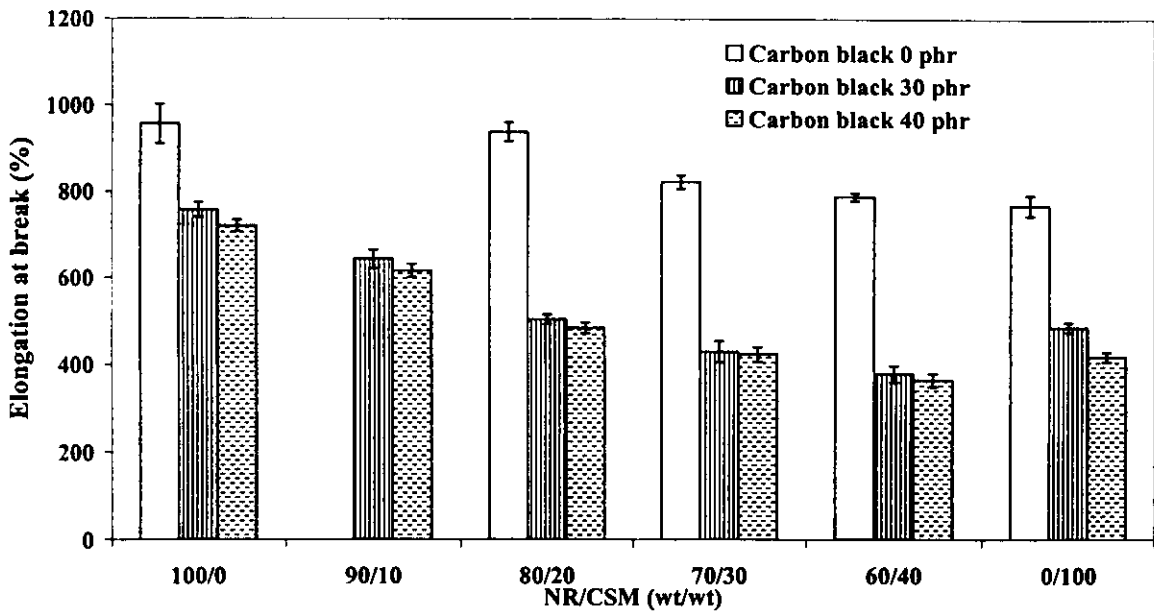
ตารางที่ 3.3 (ต่อ)

สูตร	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
B4(30)10	25.3±1.4	712±20
B4(40)10	23.7±1.1	663±22
B4(0)20	19.0±0.5	947±12
B4(30)20	22.8±0.6	641±14
B4(40)20	20.6±0.9	567±17
B4(0)30	19.0±1.1	879±25
B4(30)30	22.2±1.2	540±20
B4(40)30	18.2±0.3	464±6
B4(0)40	16.3±0.5	780±34
B4(30)40	21.2±0.6	483±9
B4(40)40	16.9±0.9	372±19

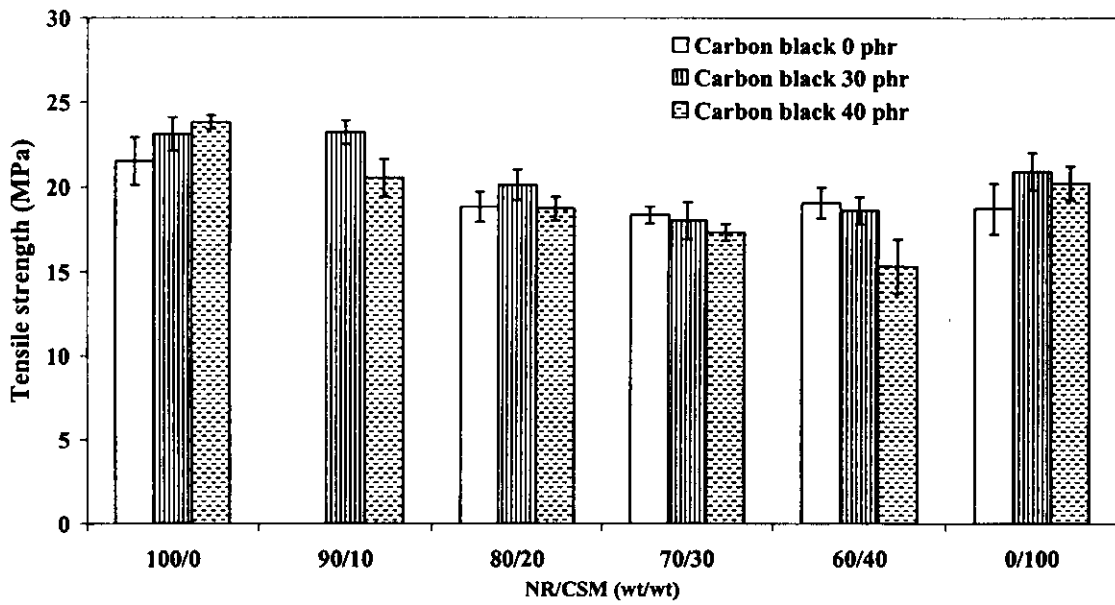
(การเรียกชื่อสูตร : B2(30)40 = สูตร B2 มีปริมาณเขม่าดำ 30 phr และ CSM 40 phr)



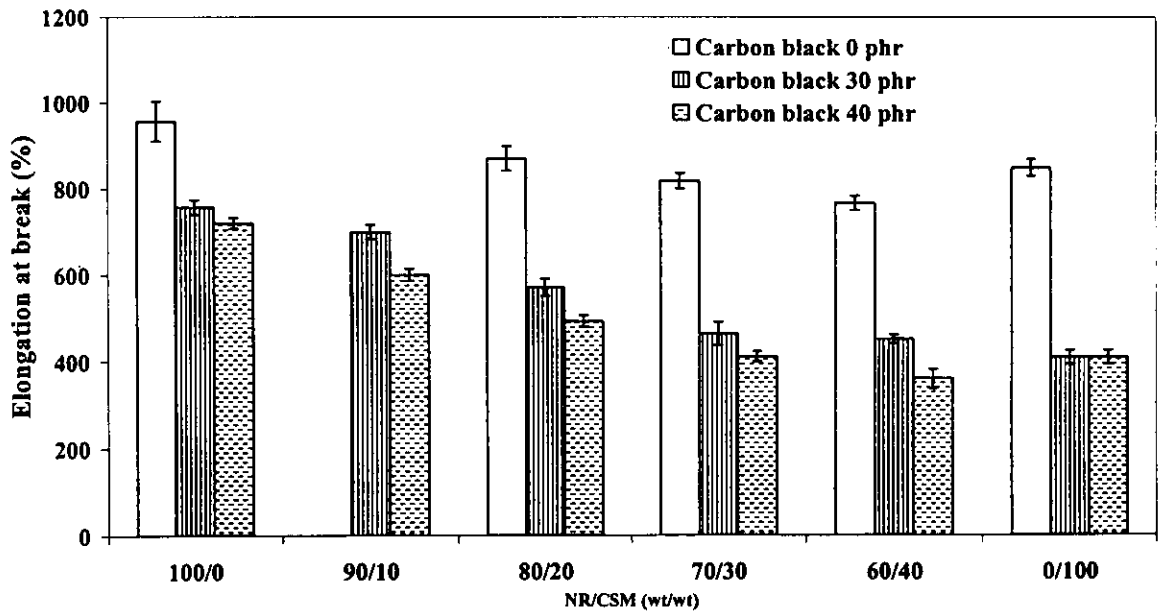
รูปที่ 3.16 อิทธิพลของเขม่าดำที่มีต่อความเค้น ณ จุดขาดของยางผสมสูตร B1



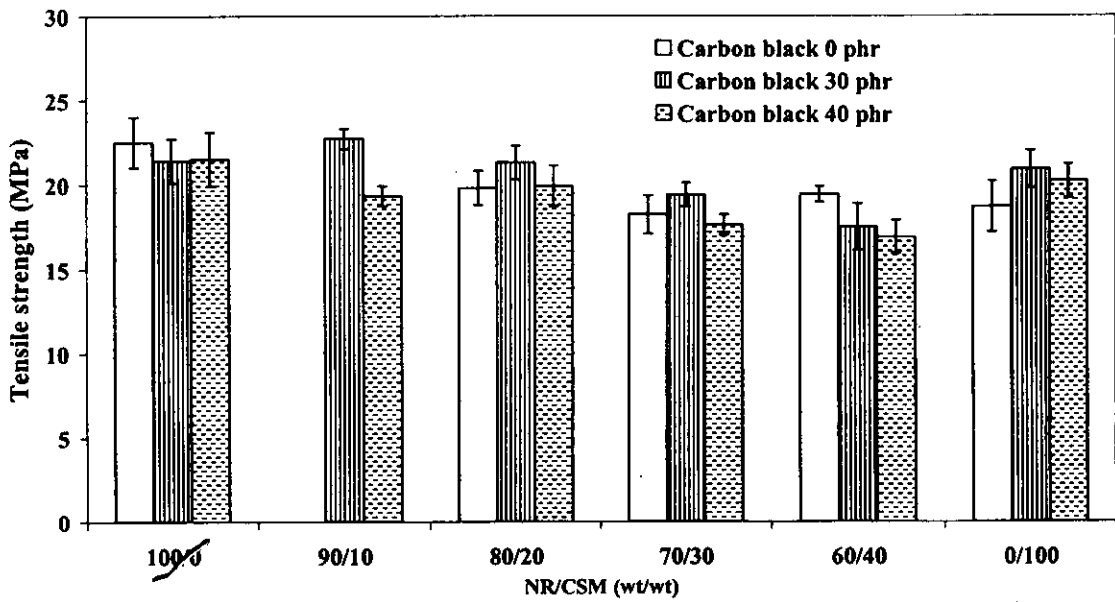
รูปที่ 3.17 อิทธิพลของเขม่าดำที่มีต่อความเครียด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร B1



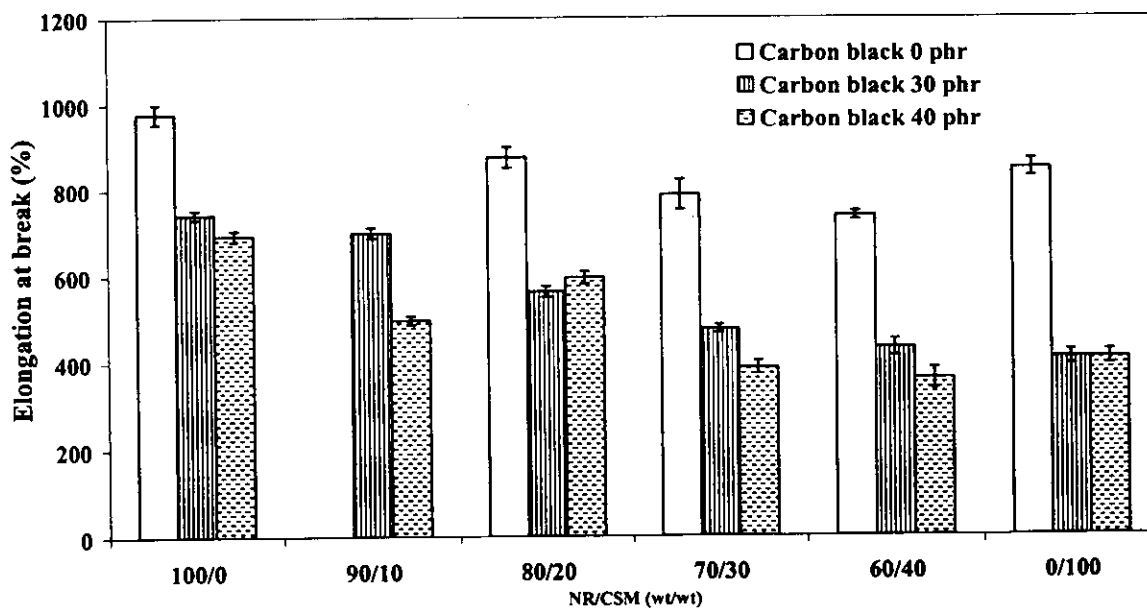
รูปที่ 3.18 อิทธิพลของเขม่าดำที่มีต่อความเค้น ณ จุดขาดของยางผสมสูตร B2



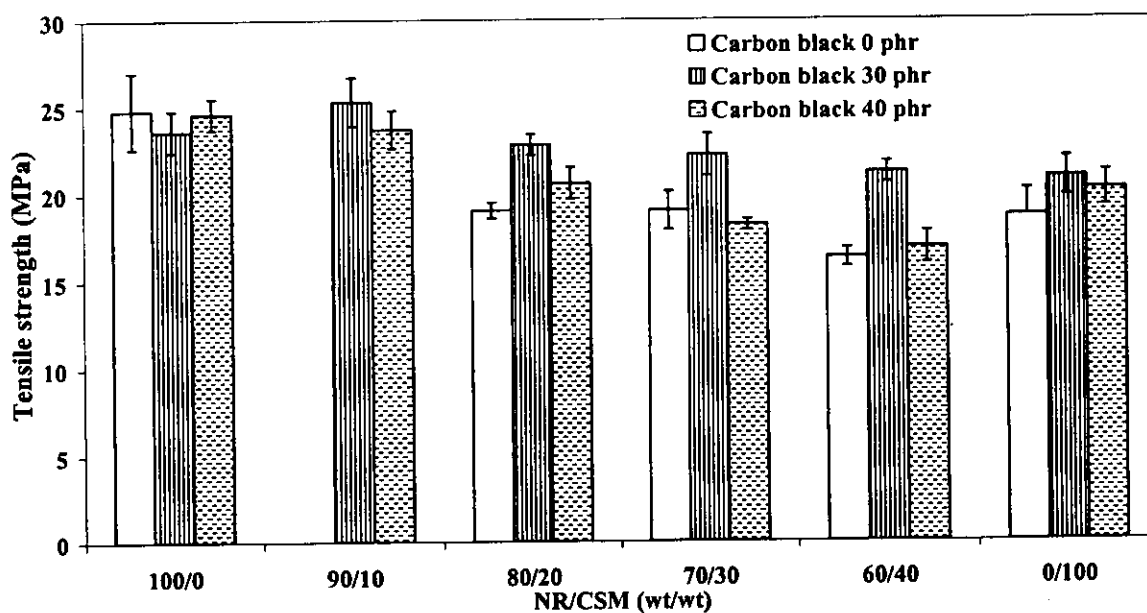
รูปที่ 3.19 อิทธิพลของเขม่าดำที่มีต่อความเครียด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร B2



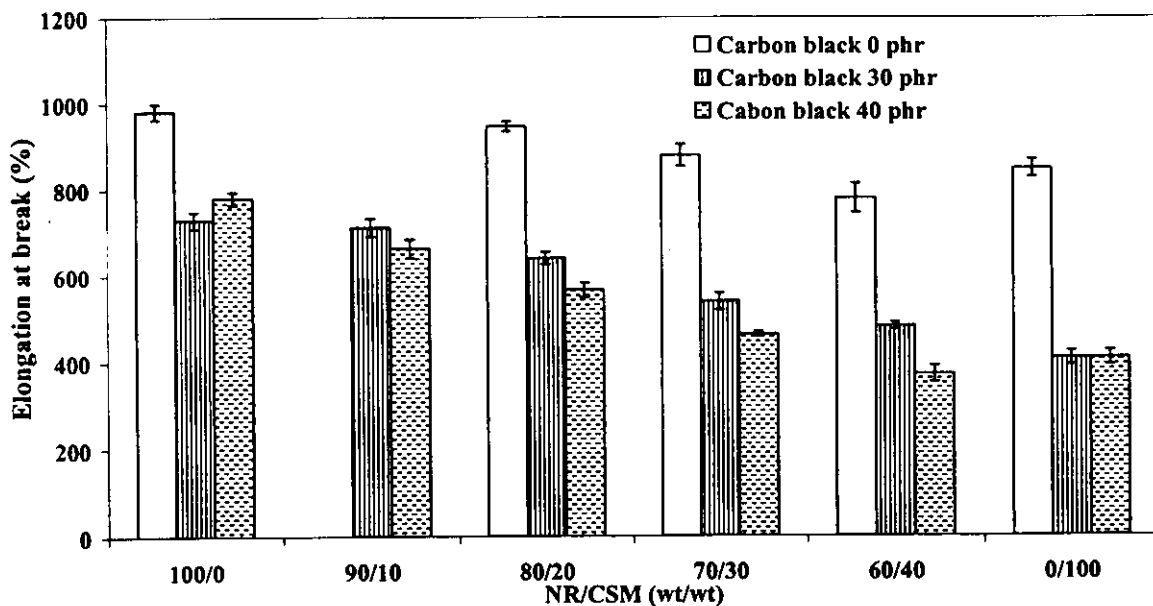
รูปที่ 3.20 อิทธิพลของเขม่าดำที่มีต่อความเค้น ณ จุดขาดของยางผสมสูตร B3



รูปที่ 3.21 อิทธิพลของเขม่าดำที่มีต่อความเครียด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร B3

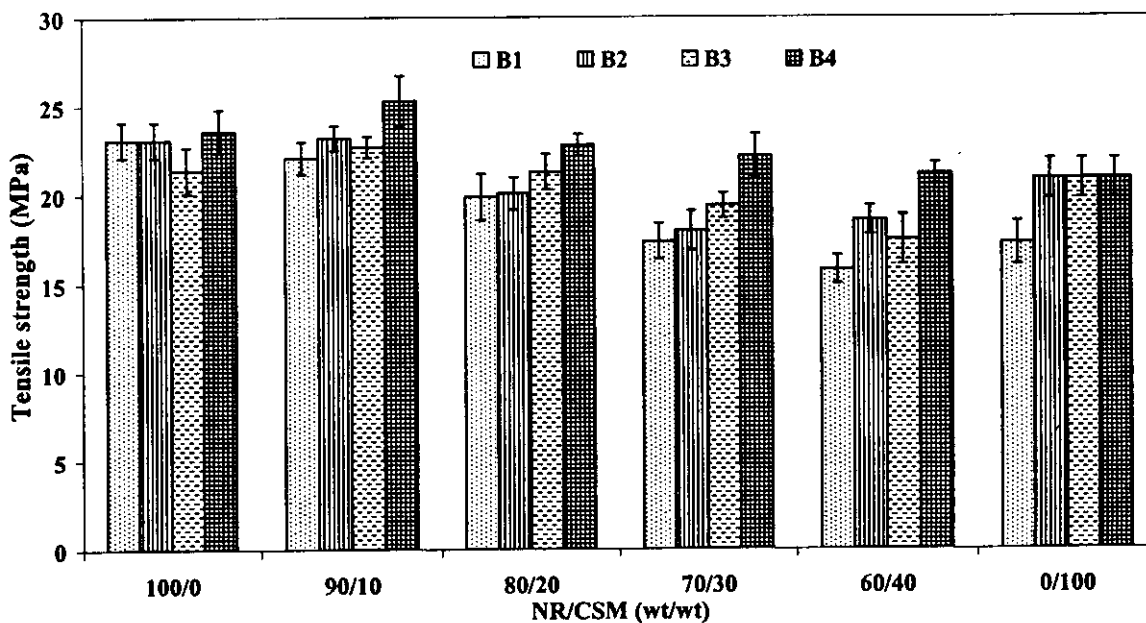


รูปที่ 3.22 อิทธิพลของเขม่าดำที่มีต่อความเค้น ณ จุดขาดของยางผสมสูตร B4

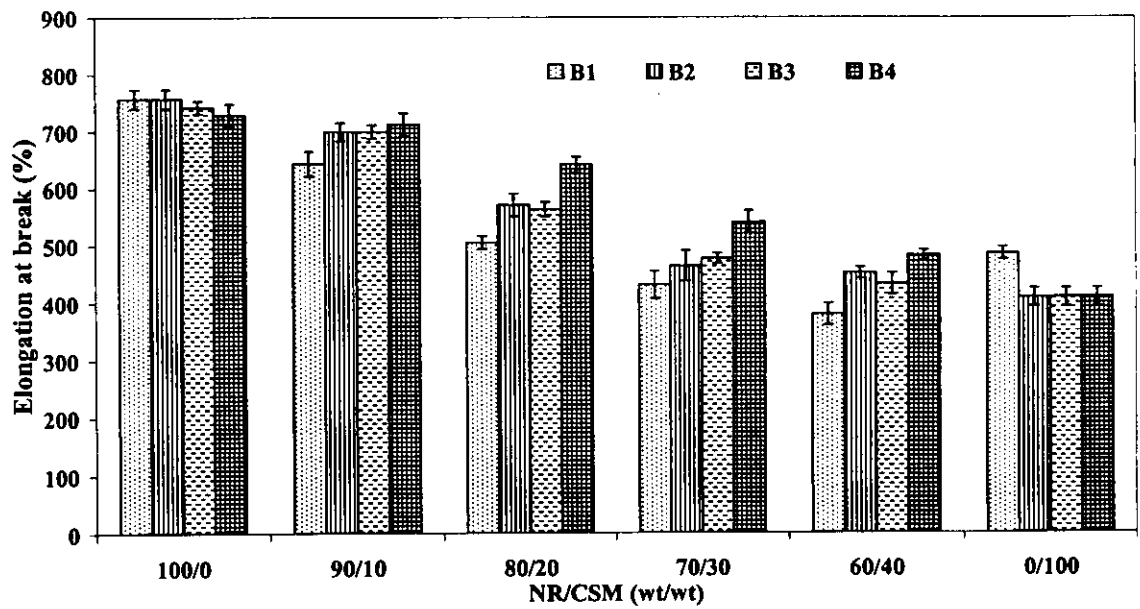


รูปที่ 3.23 อิทธิพลของเขม่าดำที่มีต่อความเครียด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร B4

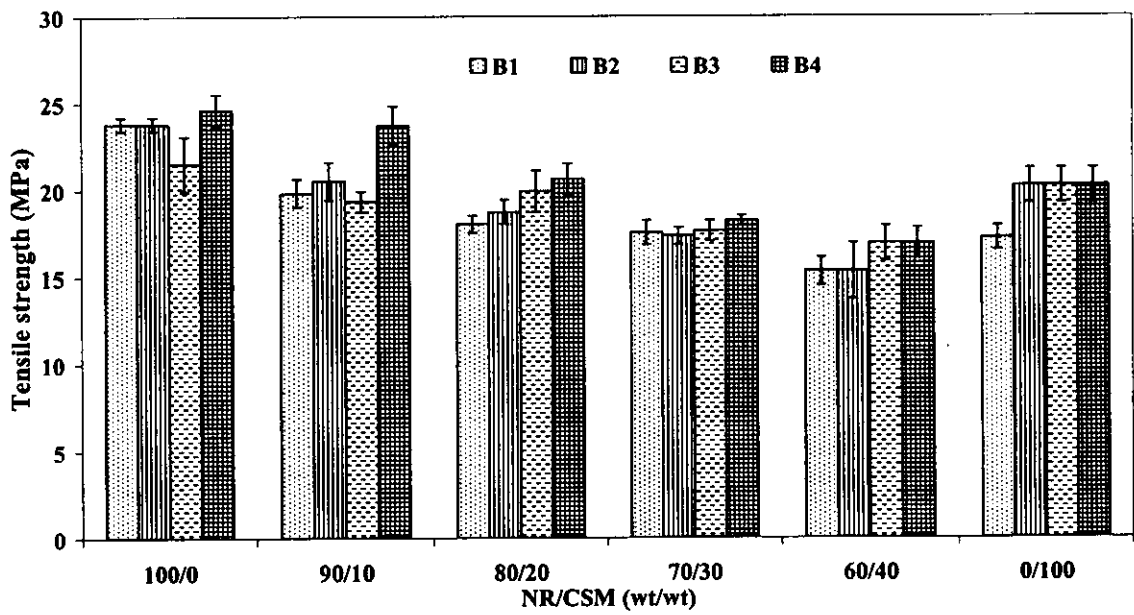
พิจารณาเปรียบเทียบสมบัติการทนต่อแรงดึงของยางผสมสูตรต่างๆเมื่อมีปริมาณเขม่าดำเท่ากัน พบว่าสูตร B4 เป็นสูตรที่ดีที่สุด โดยให้ค่าความเค้นและความเครียด ณ จุดขาด สูงกว่ายางผสมสูตรอื่น ดังแสดงในรูปที่ 3.24 - 3.27 เป็นที่น่าสังเกตว่าเมื่อปริมาณของเขม่าดำเพิ่มขึ้นการทนต่อแรงดึงของยางผสมลดลง



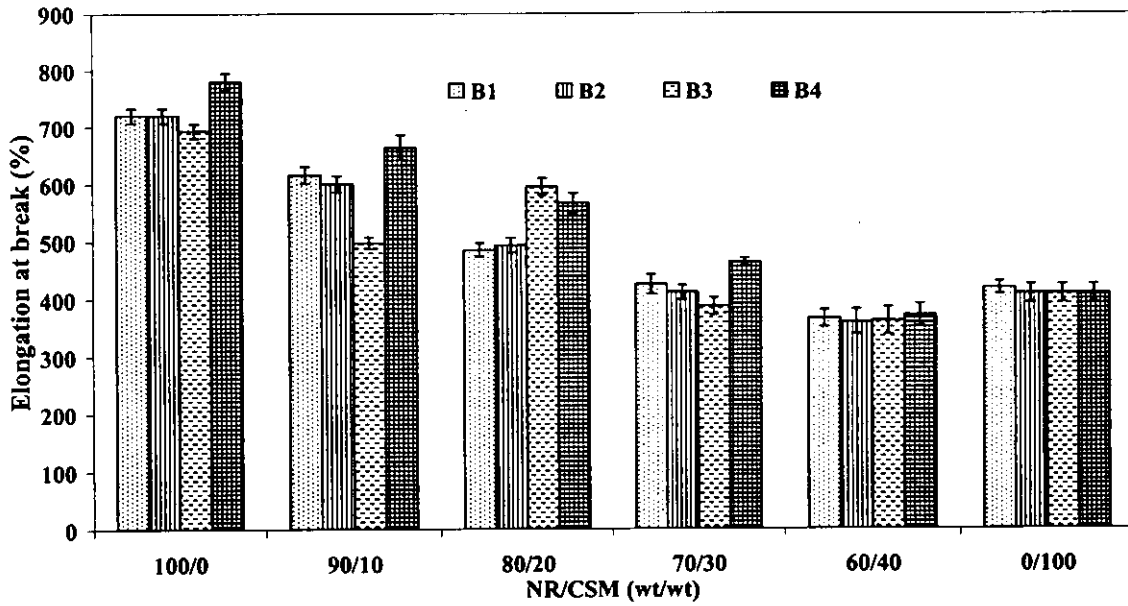
รูปที่ 3.24 ความเค้น ณ จุดขาดของยางผสมที่มีเขม่าดำ 30 phr



รูปที่ 3.25 ความเครียด ณ จุดขาดของยางผสมที่มีเซมาดำ 30 phr



รูปที่ 3.26 ความต้าน ณ จุดขาดของยางผสมที่มีเซมาดำ 40 phr



รูปที่ 3.27 ความเครียด ณ จุดขาดของยางผสมที่มีเขม่าดำ 40 phr

3.2.2 สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance)

ความต้านทานต่อการฉีกขาดรายงานผลเป็นค่าความแข็งแรงต่อความหนา (tear strength) ตารางที่ 3.4 และ 3.5 แสดงค่าความแข็งแรงต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติและยางCSMที่มีการเติมเขม่าดำในปริมาณต่างๆ และรูปที่ 3.28 เป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบความแข็งแรงต่อการฉีกขาดของยางทั้งสองชนิดนี้

ตารางที่ 3.4 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติสูตรต่างๆที่มีเขม่าดำปริมาณต่างๆ

สูตร	Tear strength (N/mm)
NR1(0)	29.7±0.87
NR1(10)	40.6±1.63
NR1(20)	43.0±2.04
NR1(30)	49.1±2.44
NR1(40)	50.5±1.85
NR2(0)	31.9±0.44
NR2(10)	37.3±2.32
NR2(20)	44.9±2.18
NR2(30)	44.1±2.5
NR2(40)	47.8±3.2
NR3(0)	31.7±0.94

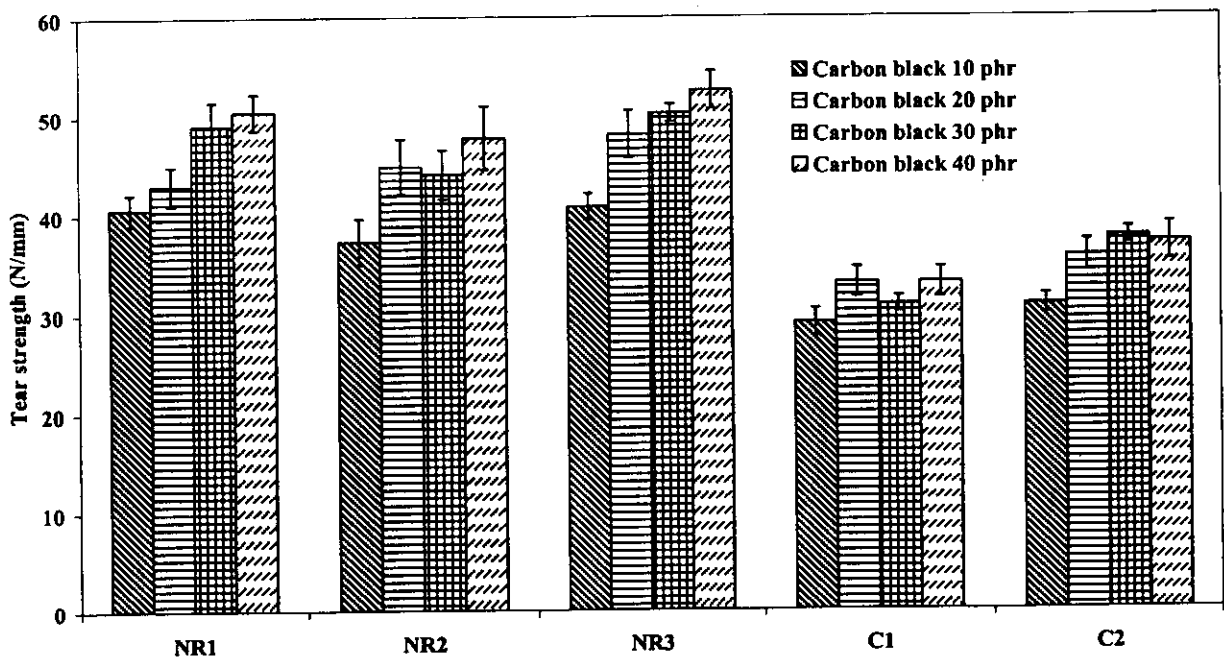
(การเรียกชื่อสูตร : NR1(0) = สูตร NR1 มีปริมาณเขม่าดำ 0 phr)

ตารางที่ 3.4 (ต่อ)

สูตร	Tear strength (N/mm)
NR3(20)	48.2±2.46
NR3(30)	50.3±0.9
NR3(40)	52.6±1.91

ตารางที่ 3.5 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางCSMสูตรต่างๆที่มีเขม่าดำปริมาณต่างๆ

สูตร	Tear strength (N/mm)
C1(0)	20.5±1.5
C1(10)	29.1±1.4
C1(20)	33.1±1.5
C1(30)	30.9±0.8
C1(40)	33.1±1.5
C2(0)	25.1±1.5
C2(10)	30.9±1.0
C2(20)	35.7±1.6
C2(30)	37.7±0.8
C2(40)	37.1±1.9



รูปที่ 3.28 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติ (สูตรNR1, NR2 และ NR3) และยางCSM (สูตร C1 และ C2) ที่มีเขม่าดำในปริมาณต่างๆ

เมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้น ทำให้ยางธรรมชาติและยางCSMมีความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้น โดยที่ยางธรรมชาติสูตรNR3ให้ความต้านทานต่อการฉีกขาดดีที่สุด และยางธรรมชาติจะมีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมากกว่ายางCSM เนื่องจากยางธรรมชาติจะมีความเหนียวมากกว่าทำให้ฉีกขาดได้ยากกว่า ตารางที่3.6 แสดงค่าความแข็งแรงต่อการฉีกขาดของยางผสมที่มีเขม่าดำ รูปที่ 3.29 และ 3.30 เป็นกราฟเปรียบเทียบความแข็งแรงต่อการฉีกขาดของยางผสมที่มีเขม่าดำ 30 และ 40 phr ตามลำดับ

ตารางที่ 3.6 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางผสมสูตรต่างๆที่มีเขม่าดำปริมาณต่างๆ

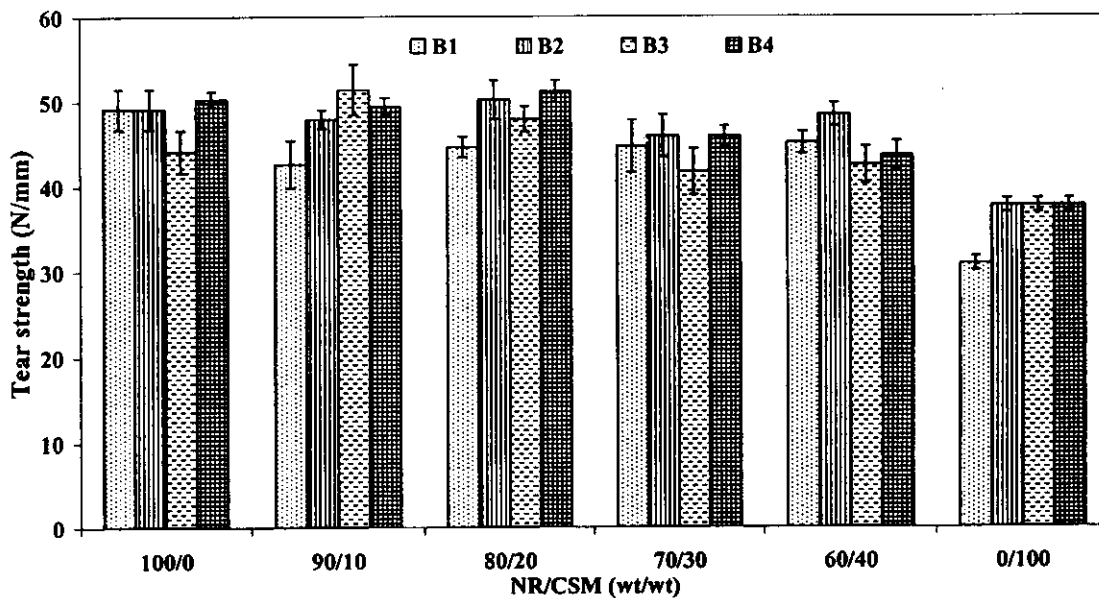
สูตร	Tear strength (N/mm)
B1(30)10	42.6±2.8
B1(40)10	43.3±1.8
B1(0)20	28.7±1.3
B1(30)20	44.6±1.2
B1(40)20	45.8±2.6
B1(0)30	27.3±1.2
B1(30)30	44.7±3.1
B1(40)30	39.2±3.1
B1(0)40	23.7±1.6
B1(30)40	45.1±1.3
B1(40)40	43.7±2.2
B2(30)10	47.9±1.1
B2(40)10	50.0±2.7
B2(0)20	30.0±1.3
B2(30)20	50.2±2.3
B2(40)20	47.2±2.2
B2(0)30	30.3±1.4
B2(30)30	45.9±2.5
B2(40)30	46.3±3.0
B2(0)40	26.8±0.9
B2(30)40	48.4±1.4
B2(40)40	45.6±1.9
B3(30)10	51.4±3.0
B3(40)10	51.0±3.4
B3(0)20	27.9±1.7
B3(30)20	47.9±1.5
B3(40)20	42.9±2.7

(การเรียกชื่อสูตร : B2(30)40 = สูตร B2 มีปริมาณเขม่าดำ 30 phr และ CSM 40 phr)

ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

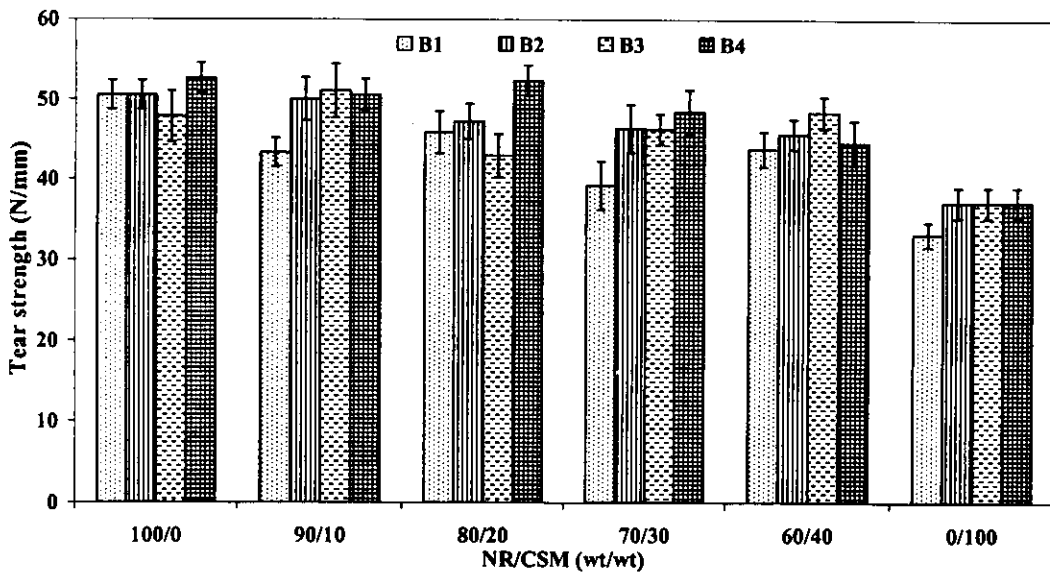
สูตร	Tear strength (N/mm)
B3(0)30	27.4±1.0
B3(30)30	41.7±2.7
B3(40)30	46.2±1.9
B3(0)40	24.7±1.7
B3(30)40	42.5±2.2
B3(40)40	48.3±2
B4(30)10	49.4±1.09
B4(40)10	50.5±1.64
B4(0)20	23.8±1.3
B4(30)20	51.2±1.34
B4(40)20	52.3±1.96
B4(0)30	24.4±0.5
B4(30)30	45.9±1.2
B4(40)30	48.4±2.8
B4(0)40	21.9±1.2
B4(30)40	43.6±1.7
B4(40)40	44.5±2.8

(การเรียกชื่อสูตร : B2(30)40 = สูตร B2 มีปริมาณเซมาต้า 30 phr และ CSM 40 phr)



รูปที่ 3.29

ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางผสมสูตรต่างๆที่มีการเติมเซมาต้า 30 phr



รูปที่ 3.30 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางผสมสูตรต่างๆที่มีการเติมเขม่าดำ 40 phr

การเติมเขม่าดำลงในยางผสม ทำให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางผสมมีค่าสูงขึ้นอย่างมาก แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของเขม่าดำมากขึ้น (เช่น เพิ่มปริมาณเขม่าดำจาก 30 phr เป็น 40 phr) ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดกลับเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แสดงว่าปริมาณเขม่าดำ 30 phr เหมาะสมต่อการเพิ่มความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางผสมมากกว่าปริมาณ 40 phr พฤติกรรมเช่นนี้เหมือนกับที่พบในความเค้น ณ จุดขาด ของยางผสม

ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วนของยางCSMที่เพิ่มขึ้น ทั้งในยางผสมที่เติมและไม่เติมเขม่าดำ อาจเนื่องมาจากลักษณะการเข้ากันได้ (compatibility) ของยางCSMและยางธรรมชาติลดลงเมื่อปริมาณของยางCSMในยางผสมเพิ่มขึ้น จึงทำให้สมบัติดังกล่าวแยลง

3.2.3 สมบัติการบ่มเร่งทางความร้อน (Thermal ageing properties)

การเปลี่ยนแปลงความเค้นและความเครียด ณ จุดขาด หลังการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 2 วัน ของยางธรรมชาติและยางCSMแสดงในตารางที่ 3.7 - 3.8 และ รูปที่ 3.31 - 3.32

ตารางที่ 3.7 การเปลี่ยนแปลงสมบัติการทนต่อแรงดึงหลังบ่มเร่งของยางธรรมชาติสูตรที่มีเขม่าดำ

สูตร	Change in property (%)	
	Tensile strength	Elongation at break
NR1(0)	-76.00	-50.67
NR1(10)	-50.23	-32.11
NR1(20)	-53.17	-41.03
NR1(30)	-58.92	-43.82
NR1(40)	-58.45	-45.33

ตารางที่ 3.7 (ต่อ)

สูตร	Change in property (%)	
	Tensile strength	Elongation at break
NR2(0)	-44.44	-31.27
NR2(10)	-71.36	-52.29
NR2(20)	-68.52	-46.72
NR2(30)	-62.62	-56.87
NR2(40)	-70.69	-62.92
NR3(0)	-14.52	-20.18
NR3(10)	-22.4	-24.29
NR3(20)	-22.47	-27.35
NR3(30)	-19.07	-21.81
NR3(40)	-31.21	-26.41

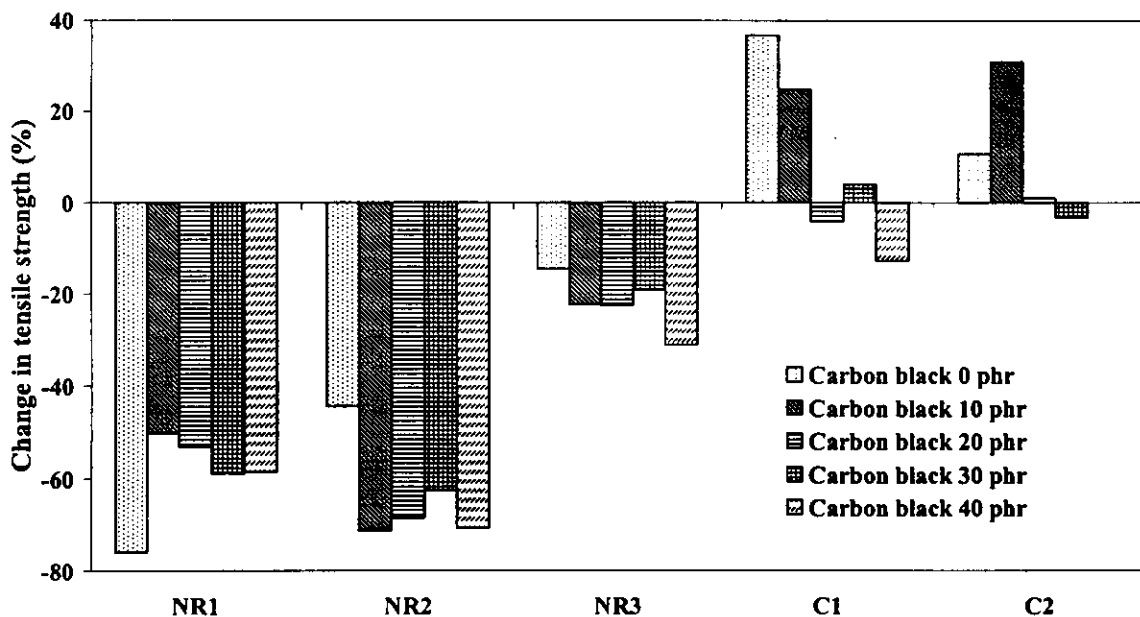
(การเรียกชื่อสูตร : NR1(0) = สูตร NR1 มีปริมาณเขม่าดำ 0 phr)

ตารางที่ 3.8 การเปลี่ยนแปลงสมบัติการทนต่อแรงดึงหลังปมเร่งของยางCSMที่มีเขม่าดำ

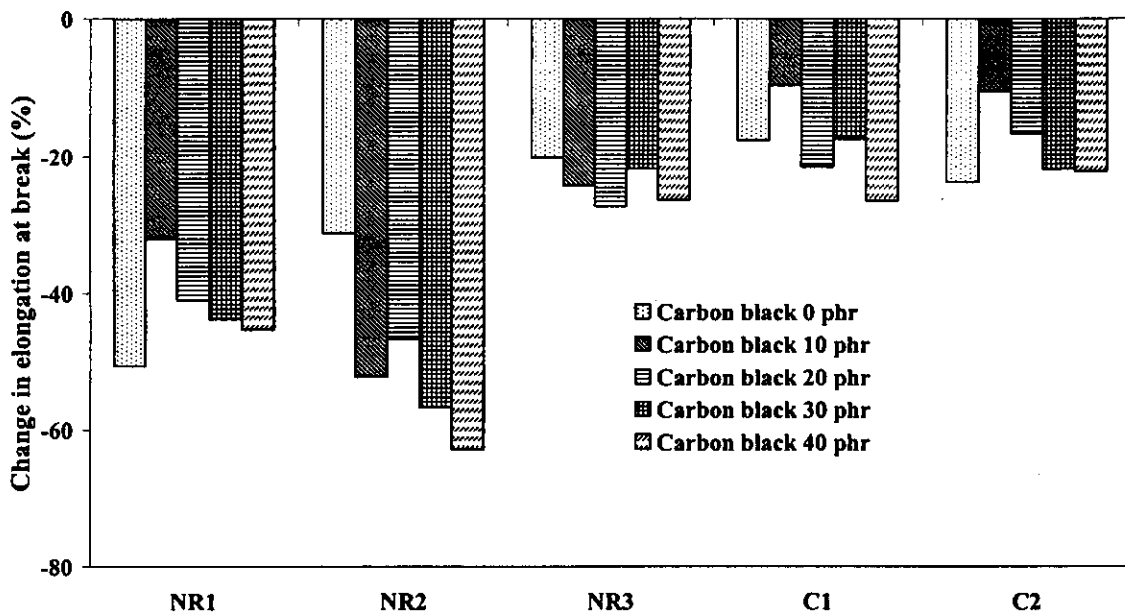
สูตร	Change in property (%)	
	Tensile strength	Elongation at break
C1(0)	36.68	-17.71
C1(10)	24.86	-9.77
C1(20)	-4.14	-21.6
C1(30)	4.04	-17.49
C1(40)	-12.79	-26.49
C2(0)	10.69	-23.79
C2(10)	30.89	-10.61
C2(20)	1.04	-16.73
C2(30)	-3.34	-21.84
C2(40)	0	-22.25

ยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อการปมเร่งที่ไม่ดี เนื่องจากมีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา การเติมเขม่าดำในยางทำให้ยางมีความต้านทานต่อการปมเร่งลดลง และมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณเขม่าดำที่เพิ่มขึ้น สูตรที่มีความต้านทานต่อการปมเร่งมากที่สุดคือสูตรNR3 ส่วนยางCSMมีความต้านทานต่อการปมเร่งที่ดีกว่ายางธรรมชาติ เนื่องจากในสายโซ่โมเลกุลไม่มีพันธะคู่ มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงในเชิงบวก ซึ่งเกิดจากการวัลคาไนซ์ของยางที่สมบูรณ์ขึ้นเมื่อได้รับความร้อน และเขม่าดำที่เพิ่มขึ้นทำให้ยางมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ลดลง โดยสูตรC2มีความต้านทานต่อการปมเร่งดีกว่าสูตรC1 การทดสอบการปมเร่งชุดนี้จะใช้อุณหภูมิสูงกว่าการปมเร่งยางที่ไม่มีเขม่าดำ สังเกตได้ว่าเมื่อใช้สภาวะปมเร่งที่รุนแรงขึ้น ยางธรรมชาติที่ไม่มีเขม่าดำจะมีการเปลี่ยนแปลงมากขึ้น คือมีสายโซ่โมเลกุลถูกตัดขาดมากขึ้น ทำให้ความเค้น

ณ จุดขาด ลดลง ส่วนยางCSMที่ไม่มีเขม่าดำกลับมีการเปลี่ยนแปลงลดลง การเปลี่ยนแปลงความเค้นและความเครียด ณ จุดขาด หลังการป้อนแรงที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 2 วัน ของยางผสมแสดงในตารางที่ 3.9 และ รูปที่ 3.33 – 3.38



รูปที่ 3.31 การเปลี่ยนแปลงความเค้น ณ จุดขาด ของยางธรรมชาติ (สูตรNR1, NR2 และ NR3) และยาง CSM (สูตรC1 และ C2) ที่ผสมเขม่าดำในปริมาณต่างๆ หลังป้อนแรงด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 2 วัน



รูปที่ 3.32 การเปลี่ยนแปลงความเครียด ณ จุดขาด ของยางธรรมชาติ (สูตร NR1, NR2 และ NR3) และยางCSM (สูตรC1 และ C2) ที่ผสมเขม่าดำในปริมาณต่างๆ หลังการป้อนแรงด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 2 วัน

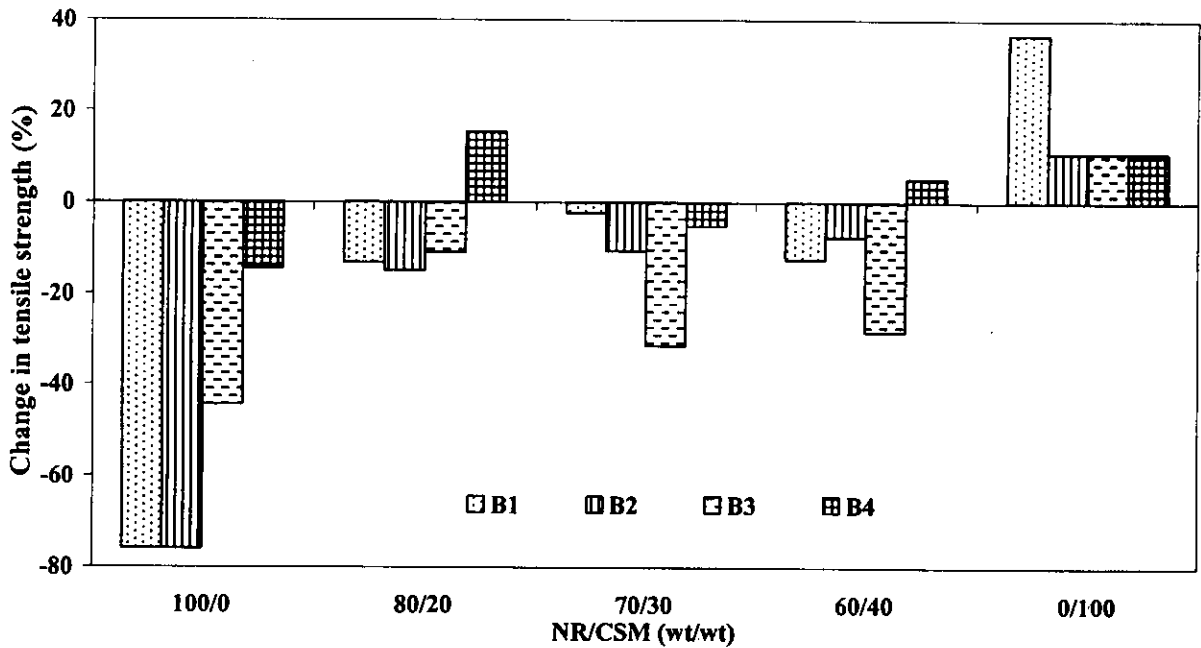
ตารางที่ 3.9 การเปลี่ยนแปลงสมบัติการทนต่อแรงดึงหลังปมเร่งของยางผสมสูตรต่างๆที่มีเขม่าดำ

สูตร	Change in property (%)	
	Tensile strength	Elongation at break
B1(30)10	-62.90	-42.74
B1(40)10	-52.02	-37.50
B1(0)20	-13.25	-26.01
B1(30)20	-58.29	-44.36
B1(40)20	-46.67	-33.81
B1(0)30	-2.33	-11.92
B1(30)30	-23.56	-32.71
B1(40)30	-32.57	-39.76
B1(0)40	-12.55	-11.94
B1(30)40	-44.94	-28.95
B1(40)40	-32.57	-31.42
B2(30)10	-44.83	-42.63
B2(40)10	-50.24	-44.17
B2(0)20	-14.89	-22.18
B2(30)20	-38.81	-43.61
B2(40)20	-43.85	-42.60
B2(0)30	-10.58	-17.11
B2(30)30	-37.22	-48.28
B2(40)30	-32.95	-47.69
B2(0)40	-7.56	-13.97
B2(30)40	-34.95	-48.67
B2(40)40	-20.92	-45.28
B3(30)10	-52.42	-50.93
B3(40)10	-59.07	-45.27
B3(0)20	-10.96	-27.09
B3(30)20	-52.42	-53.29
B3(40)20	-48.74	-68.40
B3(0)30	-31.45	-33.50
B3(30)30	-49.71	-52.20
B3(40)30	-48.30	-51.94
B3(0)40	-28.31	-28.73
B3(30)40	-38.85	-47.11
B3(40)40	-54.44	-37.85

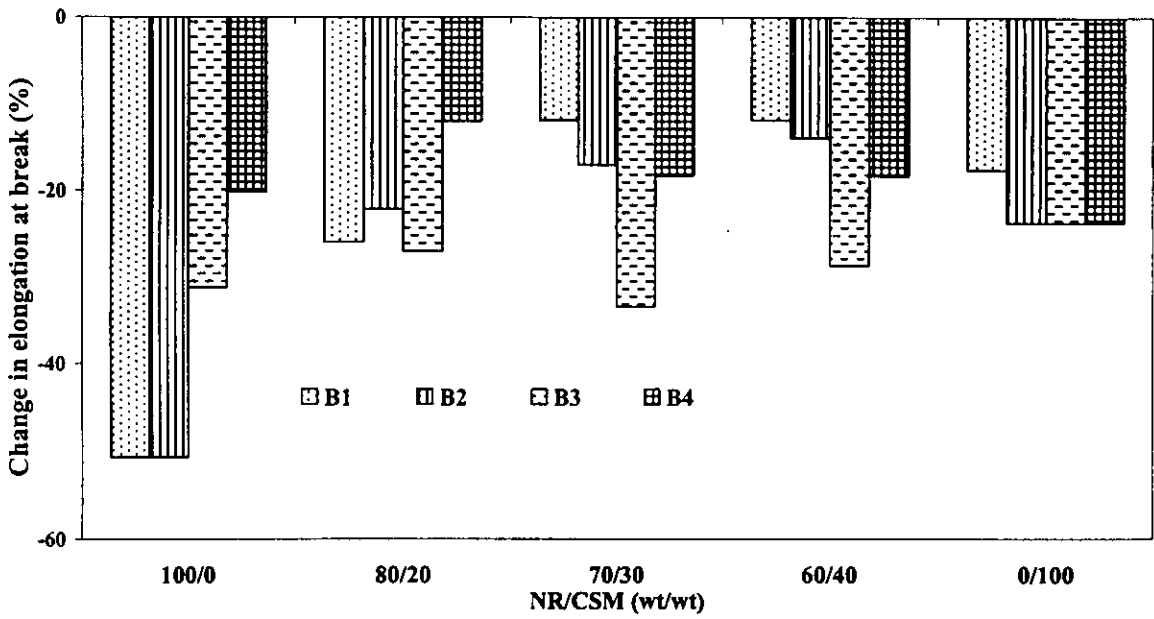
ตารางที่ 3.9 (ต่อ)

B4(30)10	-38.76	-32.03
B4(40)10	-40.03	-21.51
B4(0)20	15.23	-12.04
B4(30)20	-28.92	-30.42
B4(40)20	-25.23	-32.02
B4(0)30	-5.16	-18.32
B4(30)30	-34.04	-35.37
B4(40)30	-24.18	-37.93
B4(0)40	5.14	-18.33
B4(30)40	-43.4	-38.92
B4(40)40	-19.02	-29.03

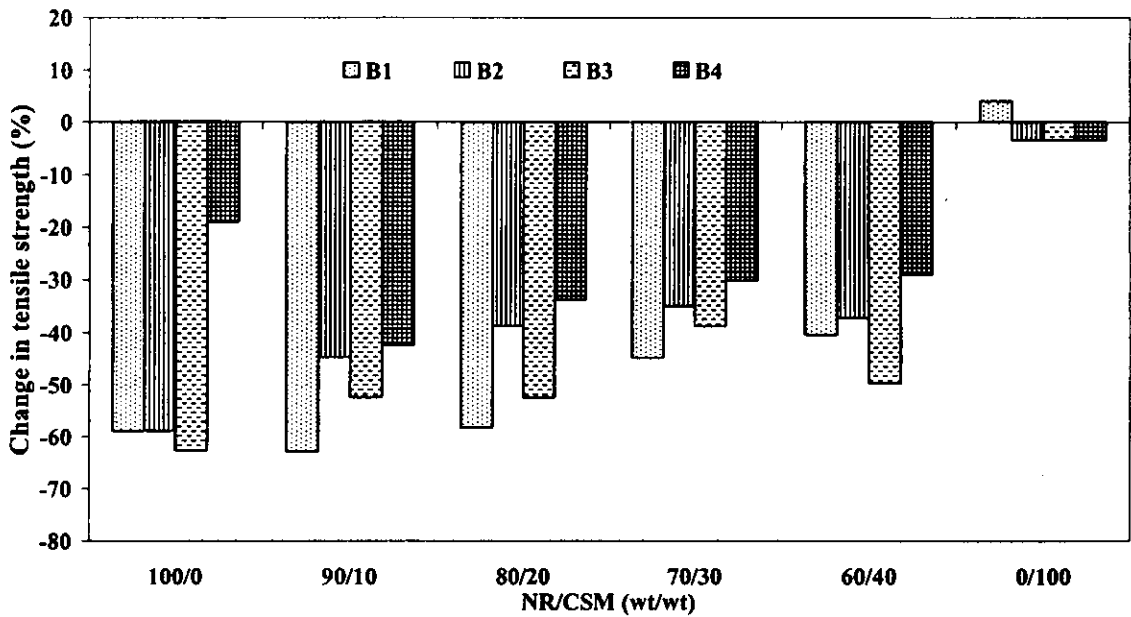
(การเรียกชื่อสูตร : B2(30)40 = สูตร B2 มีปริมาณเขม่าดำ 30 phr และ CSM 40 phr)



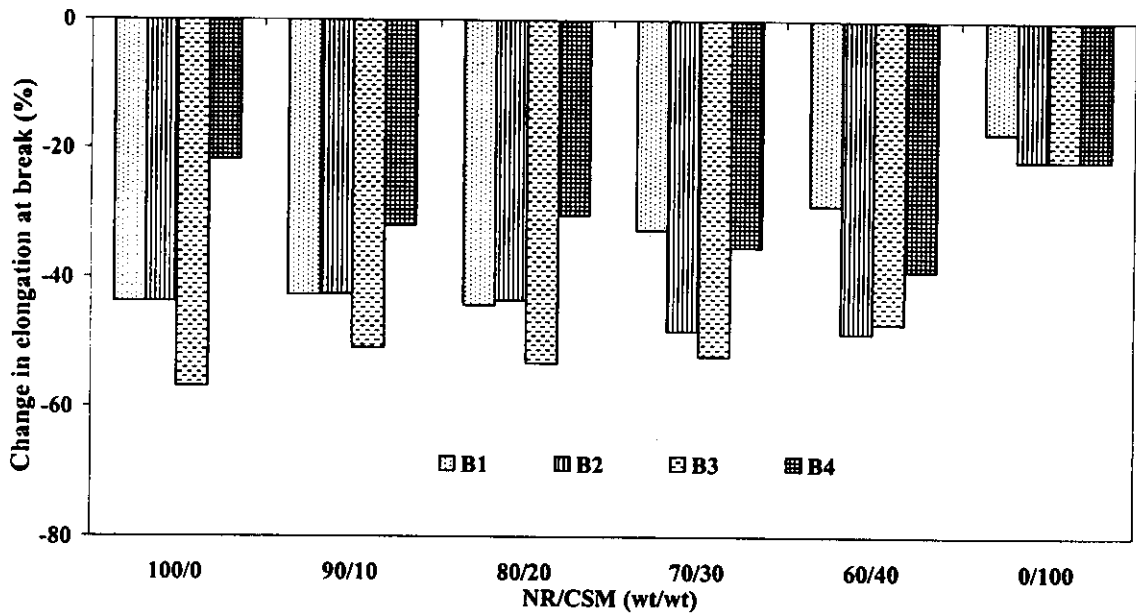
รูปที่ 3.33 การเปลี่ยนแปลงความเค้น ณ จุดขาด ของยางผสมสูตรต่างๆที่ไม่มีเขม่าดำหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 2 วัน



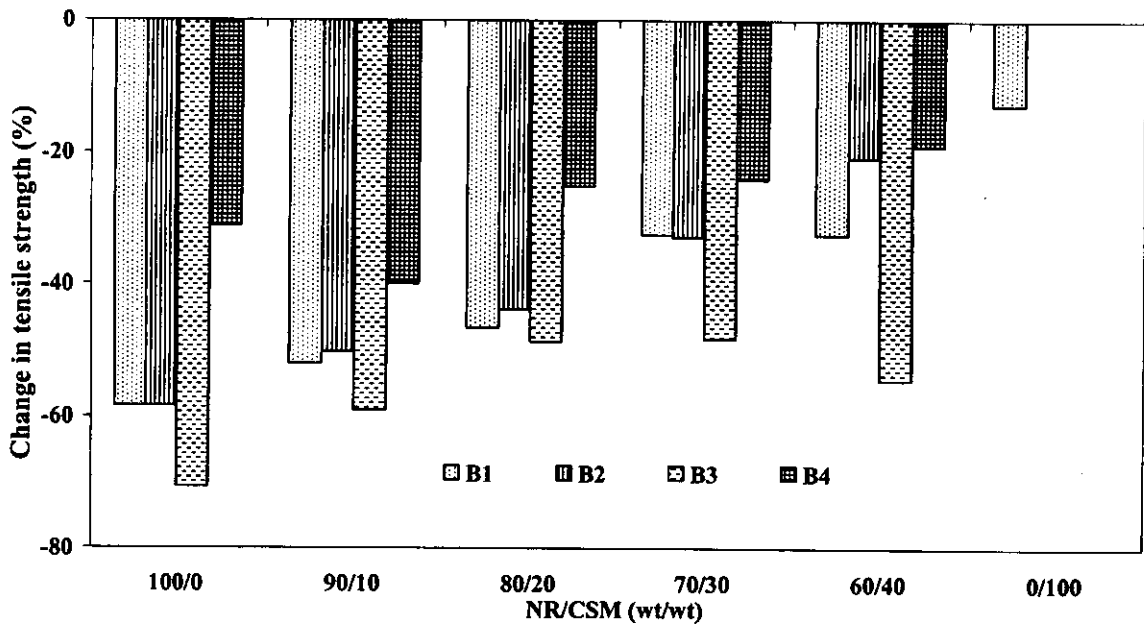
รูปที่ 3.34 การเปลี่ยนแปลงความเครียด ณ จุดขาด ของยางผสมสูตรต่างๆที่ไม่มีเซมาต้าหลังการป่นแรงด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 2 วัน



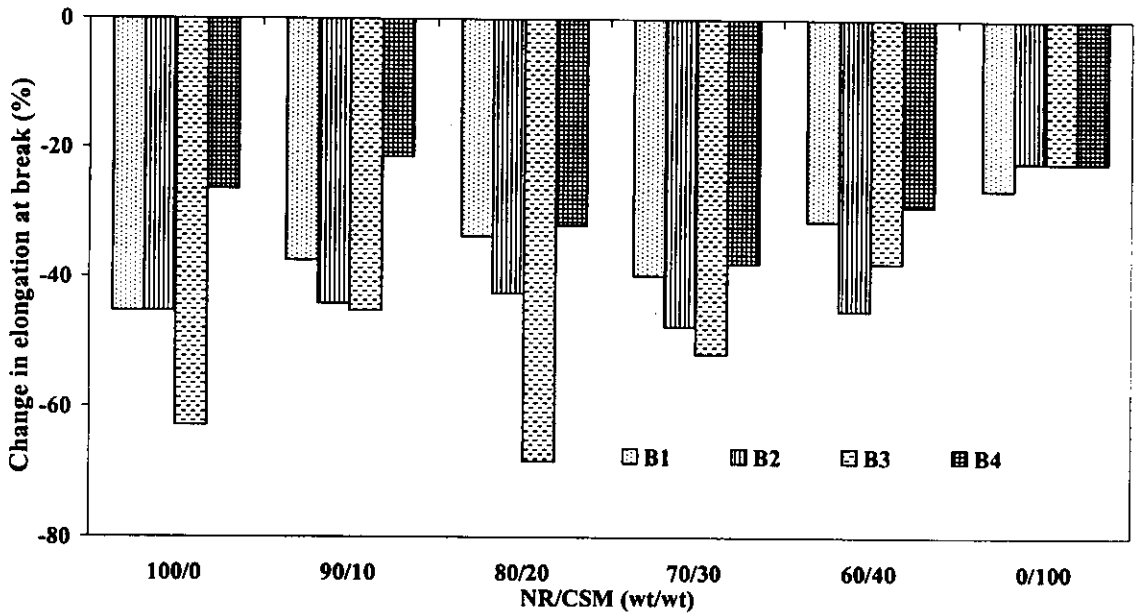
รูปที่ 3.35 การเปลี่ยนแปลงความเค้น ณ จุดขาด ของยางผสมสูตรต่างๆที่มีเซมาต้า 30 phr หลังการป่นแรงด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 2 วัน



รูปที่ 3.36 การเปลี่ยนแปลงความเครียด ณ จุดขาด ของยางผสมสูตรต่างๆที่มีเขม่าดำ 30 phr หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 2 วัน



รูปที่ 3.37 การเปลี่ยนแปลงความเค้น ณ จุดขาด ของยางผสมสูตรต่างๆที่มีเขม่าดำ 40 phr หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 2 วัน



รูปที่ 3.38 การเปลี่ยนแปลงความเครียด ณ จุดขาด ของยางผสมสูตรต่างๆที่มีเขม่าดำ 40 phr หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 2 วัน

การเติมเขม่าดำลงในยางผสม ทำให้ความเค้น ณ จุดขาด หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนของยางผสมลดลงอย่างมาก ยางผสมที่ไม่มีเขม่าดำจะมีการเปลี่ยนแปลง(การลดลง)หลังการบ่มเร่งน้อยกว่า 20% (รูปที่ 3.33) ยกเว้นสูตรB3ที่มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด แต่เมื่อมีเขม่าดำค่านี้อลดลงถึง 40% (รูปที่ 3.35) การเพิ่มปริมาณของเขม่าดำทำให้ยางผสมมีความต้านทานต่อการบ่มเร่งลดลง ในที่นี้ปริมาณเขม่าดำที่เหมาะสมคือ 30 phr เมื่ออัตราส่วนของยางCSMเพิ่มขึ้นจะทำให้ยางผสมที่มีเขม่าดำมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ลดลง ยกเว้นสูตรB3 แสดงว่า ยางผสมมีความต้านทานต่อการบ่มเร่งด้วยความร้อนดีขึ้นเช่นเดียวกับในกรณีที่ไม่มีการเติมเขม่าดำ อิทธิพลของยางCSMที่มีต่อการเพิ่มขึ้นของความต้านทานการบ่มเร่งของยางผสมที่มีเขม่าดำ เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับยางผสมที่ไม่มีเขม่าดำ และเป็นไปตามที่คาดหวังไว้ว่ายางCSMช่วยเพิ่มความคงทนต่อการบ่มเร่ง สูตรB4แสดงความต้านทานต่อการบ่มเร่งดีที่สุด

3.2.4 ความแข็ง

เนื่องจากการเติมเขม่าดำในปริมาณพอสมควร ดังนั้นจึงมีการตรวจสอบความแข็งของยางผสมสูตรต่างๆ ความแข็งของยางธรรมชาติ ยางCSM และยางผสมแสดงในตารางที่ 3.10 – 3.11

ตารางที่ 3.10 ความแข็งของยางธรรมชาติในสูตรต่างๆที่มีเขม่าดำ

สูตร	Hardness (Shore A)
NR1(0)	36.0
NR1(10)	37.5
NR1(20)	40.0

ตารางที่ 3.10 (ต่อ)

สูตร	Hardness (Shore A)
NR1(30)	40.5
NR1(40)	43.5
NR2(0)	39.0
NR2(10)	40.0
NR2(20)	44.0
NR2(30)	44.0
NR2(40)	44.5
NR3(0)	39.7
NR3(10)	42.0
NR3(20)	43.8
NR3(30)	46.0
NR3(40)	48.0

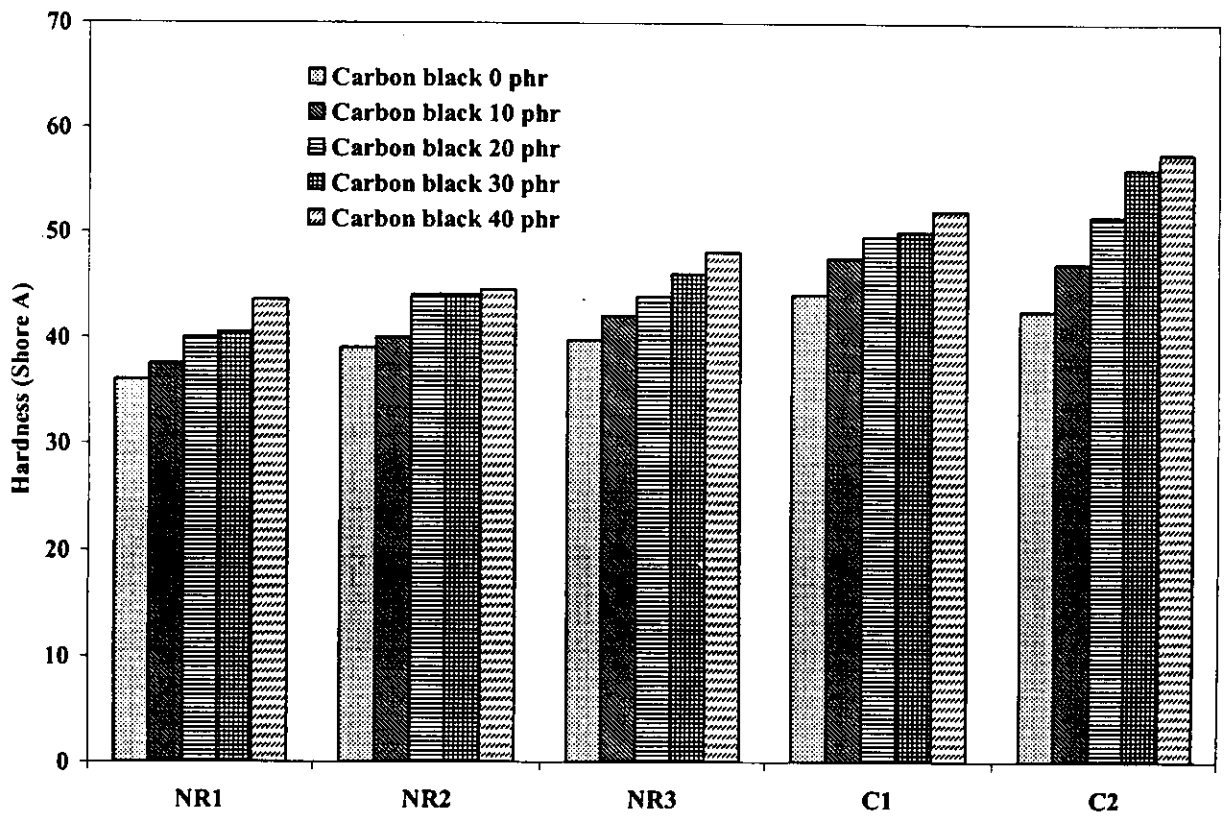
(การเรียกชื่อสูตร : NR1(0) = สูตร NR1 มีปริมาณเซมาค่า 0 phr)

ตารางที่ 3.11 ความแข็งของยางCSMในสูตรต่างๆที่มีเซมาค่า

สูตร	Hardness (Shore A)
C1(0)	44.0
C1(10)	47.5
C1(20)	49.5
C1(30)	50.0
C1(40)	52.0
C2(0)	42.5
C2(10)	47.0
C2(20)	51.5
C2(30)	56.0
C2(40)	57.5

เซมาค่ามีอิทธิพลทำให้ยางธรรมชาติและยางCSMมีความแข็งเพิ่มขึ้น
ยางCSMจะมีค่าความแข็งมากกว่ายางธรรมชาติในปริมาณเซมาค่าทุกอัตราส่วน
(รูปที่ 3.39)

ซึ่งจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณเซมาค่า
ยางแต่ละสูตรให้ความแข็งใกล้เคียงกัน



รูปที่ 3.39 ความแข็ง (shore A) ของยางธรรมชาติ(สูตรNR1, NR2, NR3) และยางCSM (สูตรC1 และ C2) ที่ผสมเขม่าดำในปริมาณต่างๆ

ตารางที่ 3.12 ความแข็งของยางผสมในสูตรต่างๆที่มีเขม่าดำ

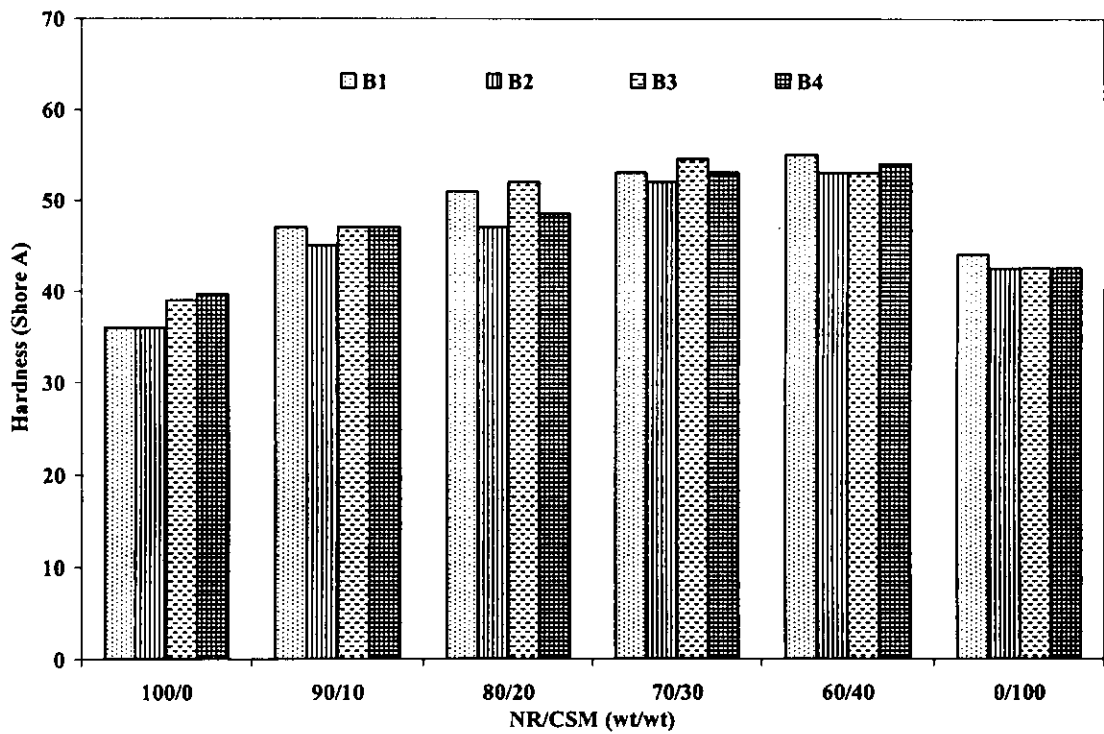
สูตร	Hardness (Shore A)
B1(30)10	47.0
B1(40)10	48.5
B1(30)20	51.0
B1(40)20	52.5
B1(30)30	53.0
B1(40)30	54.0
B1(30)40	55.0
B1(40)40	56.0

ตารางที่ 3.12 (ต่อ)

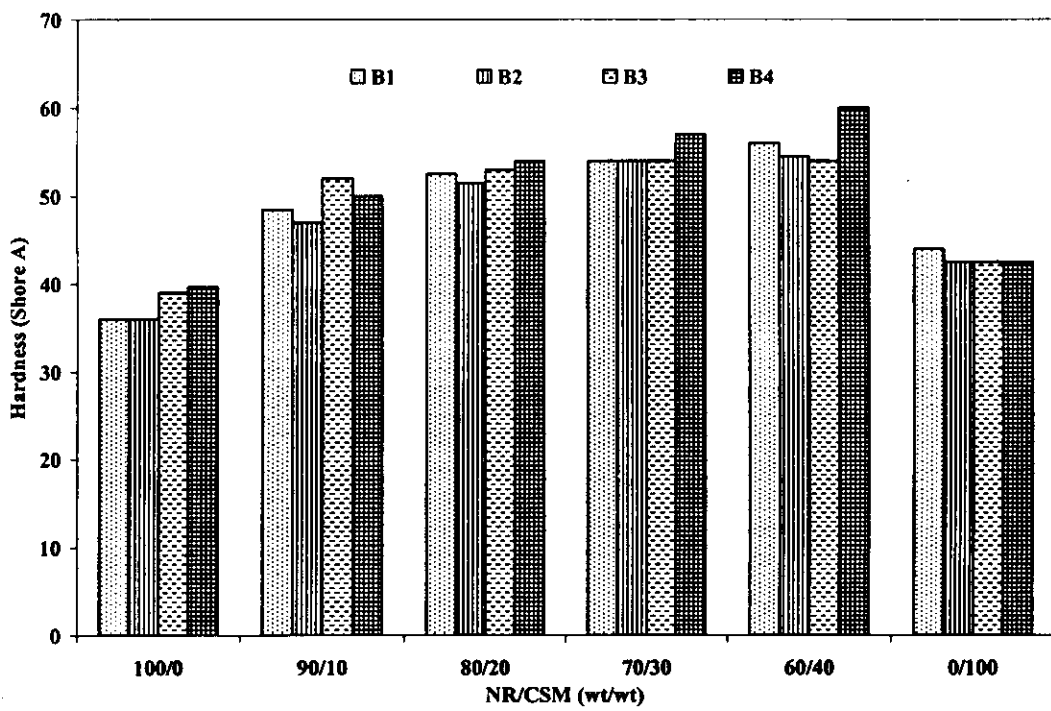
สูตร	Hardness (Shore A)
B2(30)10	45.0
B2(40)10	47.0
B2(30)20	47.0
B2(40)20	51.5
B2(30)30	52.0
B2(40)30	54.0
B2(30)40	53.0
B2(40)40	54.5
B3(30)10	47.0
B3(40)10	52.0
B3(30)20	52.0
B3(40)20	53.0
B3(30)30	54.5
B3(40)30	54.0
B3(30)40	53.0
B3(40)40	54.0
B4(30)10	47.0
B4(40)10	50.0
B4(30)20	48.5
B4(40)20	54.0
B4(30)30	53.0
B4(40)30	57.0
B4(30)40	54.0
B4(40)40	60.0

(การเรียกชื่อสูตร : B2(30)40 = สูตร B2 มีปริมาณเซมาต้า 30 phr และ CSM 40 phr)

ยางผสมที่มีอัตราส่วนยางCSMเพิ่มขึ้นจะทำให้ยางมีความแข็งเพิ่มมากขึ้น ปริมาณเซมาต้าเพิ่มขึ้นทำให้ยางผสมแข็งขึ้นเล็กน้อย อย่างไรก็ตามความแข็งของยางผสมอยู่ในช่วงใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 3.40 และ 3.41 นอกจากนี้ยังไม่มีความแตกต่างระหว่างสูตรอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 3.40 ความแข็ง (shore A) ของยางผสมสูตรต่างๆที่ผสมเขม่าดำในปริมาณ 30 phr



รูปที่ 3.41 ความแข็ง (shore A) ของยางผสมสูตรต่างๆที่ผสมเขม่าดำในปริมาณ 40 phr

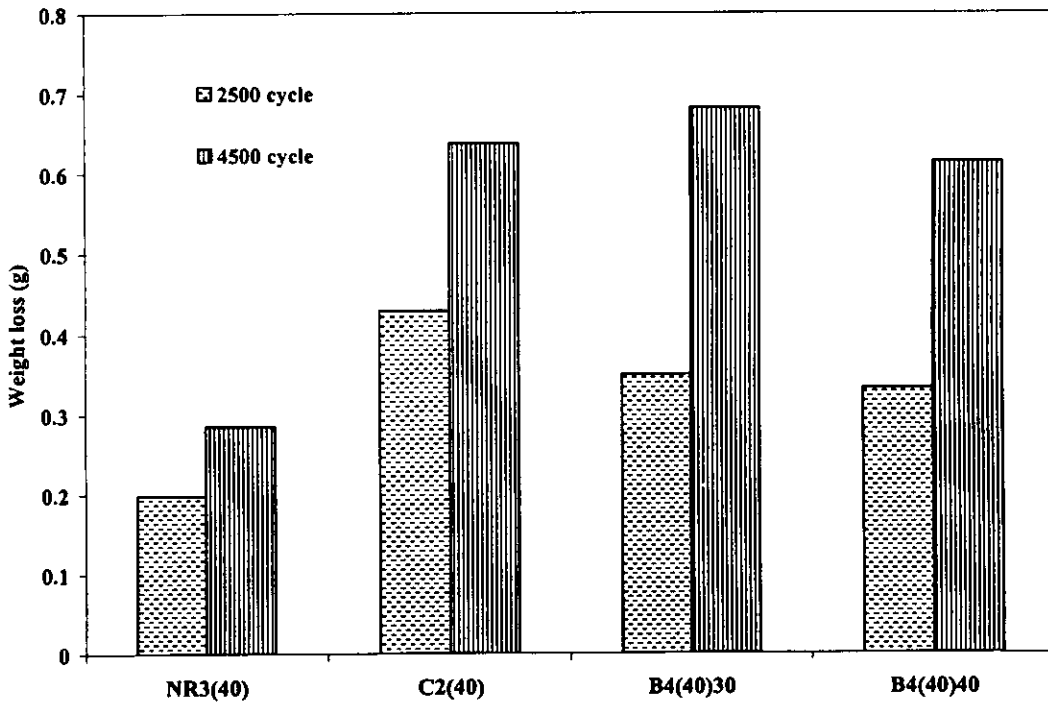
3.2.5 ความต้านทานต่อการสึกหรอ

ความต้านทานต่อการสึกหรอของยางธรรมชาติสูตรNR3(40) ยางCSMสูตรC2(40) และยางผสมสูตรB4(40)30 และ B4(40)40 แสดงในตารางที่ 3.13 และรูปที่ 3.42

ตารางที่ 3.13 ความต้านทานต่อการสึกหรอของยางในสูตรต่างๆ

สูตร	น้ำหนักที่หายไป (g)	
	2500 รอบ	4500 รอบ
NR3(40)	0.1982	0.2854
C2(40)	0.4289	0.6373
B4(40)30	0.3496	0.6818
B4(40)40	0.3324	0.6141

(การเรียกชื่อสูตร : B2(30)40 = สูตร B2 มีปริมาณเขม่าดำ 30 phr และ CSM 40 phr)



รูปที่ 3.42 ความต้านทานต่อการสึกหรอของยางธรรมชาติ ยางCSM และยางผสม

น้ำหนักที่หายไปหลังการขัดถูเป็นตัวชี้วัดความต้านทานต่อการสึกหรอ ถ้าน้ำหนักหายไปมากขึ้นแสดงว่าความต้านทานต่อการสึกหรอลดลง ยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อการสึกหรอดีกว่ายางCSMและยางผสม ปริมาณCSMเพิ่มขึ้นทำให้ความต้านทานการสึกหรอลดลงเล็กน้อย เนื่องจากยางCSMมีความต้านทานต่อการสึกหรอต่ำกว่ายางธรรมชาติ ดังนั้นยางผสมจึงมีความต้านทานต่ำลงด้วย

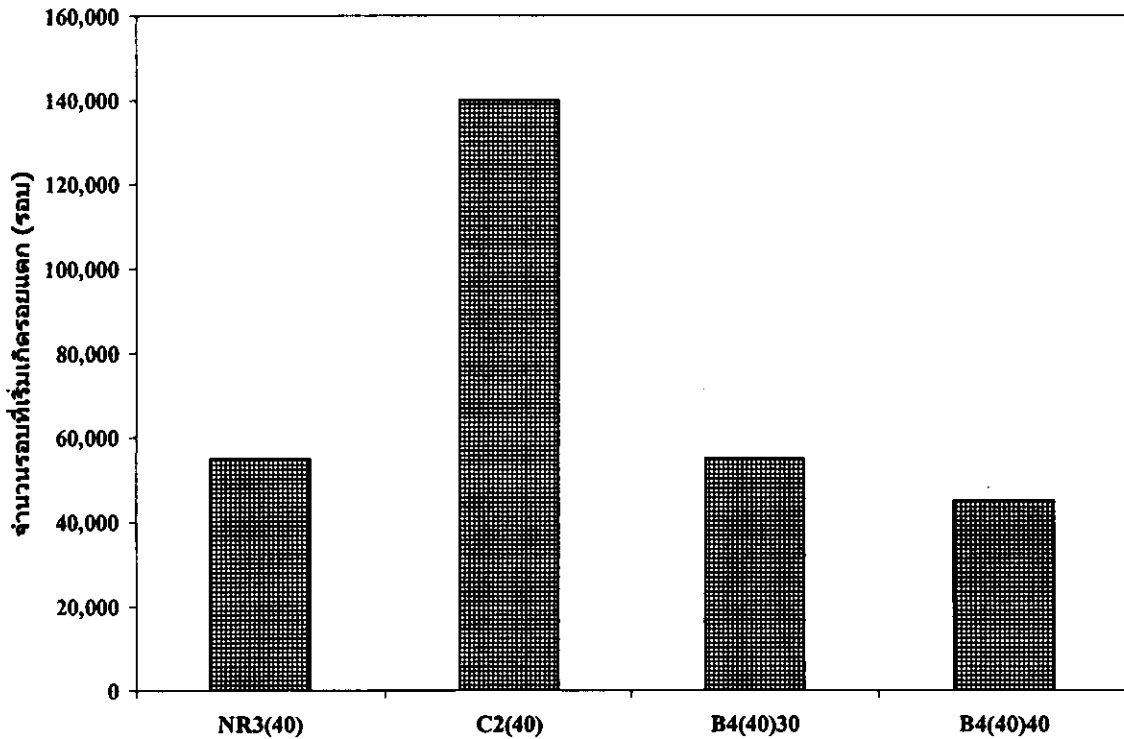
3.2.6 ความต้านทานต่อการหักงอ

ความต้านทานต่อการหักงอของยางธรรมชาติสูตรNR3(40) ยางCSMสูตรC2(40) และยางผสมสูตรB4(40)30 และ B4(40)40 แสดงในตารางที่ 3.14 และรูปที่ 3.43

ตารางที่ 3.14 ความต้านทานต่อการหักงอของยางจากสูตรต่างๆ

สูตร	จำนวนรอบที่เริ่มเกิดรอยแตก (รอบ)
NR3(40)	55,000
C2(40)	140,000
B4(40)30	55,000
B4(40)40	45,000

(การเรียกชื่อสูตร : B2(30)40 = สูตร B2 มีปริมาณแซมม่าค่า 30 phr และ CSM 40 phr)



รูปที่ 3.43 ความต้านทานต่อการหักงอของยางธรรมชาติ ยางCSM และยางผสม

ยางที่มีจำนวนรอบที่ทำให้เกิดรอยแตกสูงจะมีความต้านทานต่อการหักงอสูง จากรูปที่ 3.43 พบว่ายางCSMใช้จำนวนรอบของการหักงอที่สูงมากที่สุด นั่นคือยางCSMมีความต้านทานต่อการหักงอดีกว่ายางธรรมชาติและยางผสม ถึงแม้ว่าจะนำยางCSMซึ่งมีความต้านทานต่อการหักงอสูงมากผสมกับยางธรรมชาติในปริมาณ 30 - 40% แต่ยางผสมจะมีความต้านทานต่อการหักงอต่ำลงและต่ำมากกว่ายางธรรมชาติ นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณCSMกลับทำให้ความต้านทานนี้ลดลง แสดงว่ายางผสมคูนี่ที่มีปริมาณแซมม่าค่า 40 phr ไม่เหมาะต่องานที่ต้องความต้านทานต่อการหักงอสูง อาจกล่าวได้ว่า

ยางผสมคู่นี้มีลักษณะเป็น uncompatible blend เมื่อพิจารณาตามสมบัติความต้านทานต่อการหักงอ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากไม่ได้ทำการทดลองสูตรที่มีปริมาณเขม่าดำน้อยหรือไม่มี ทำให้กล่าวสรุปโดยภาพรวมไม่ได้

3.3 ความต้านทานต่อโอโซนของยางผสม

3.3.1 ยางผสมที่ไม่มีเขม่าดำ

นำยางธรรมชาติ CSM และยางผสม ที่ไม่มีเขม่าดำ ทดสอบสมบัติความต้านทานต่อโอโซนโดยการบันทึกจำนวน ชั่วโมงที่เริ่มเกิดรอยแตก และสังเกตลักษณะรอยแตกที่ปรากฏตามระยะเวลาที่ผ่านมา ระยะเวลาในการตรวจสอบรอยแตก เป็นไปตามกำหนดเวลาดังนี้ 2, 4, 8, 16, 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง ตรวจสอบด้วยแว่นขยาย ผลการทดลองแสดงใน ตารางที่ 3.15

ตารางที่ 3.15 ความต้านทานต่อโอโซนของยางสูตรต่างๆที่ไม่มีเขม่าดำ

สูตร	เวลาที่เริ่มแตก	ลักษณะการเปลี่ยนแปลง
NR1(0)	8 ชม.	เป็นรอยขีดขาว ๆ 8 ชั่วโมง ขอบเริ่มแตก 24 ชั่วโมง สีเปลี่ยนเป็นสีเทาขึ้น 72 ชั่วโมงเป็นเส้น
NR2 (0)	4ชม.	2 ชั่วโมงเป็นรอยขีดขาว ๆ 8 ชั่วโมง รอยแตกเป็นเส้นยาวและขอบเริ่มแตก 48 ชั่วโมง เป็นเส้น 72 ชั่วโมง ขาด
NR3(0)	8 ชม.	4 ชั่วโมงเป็นรอยขีดขาว ๆ 16 ชั่วโมงขอบเริ่มแตก 24 ชั่วโมงรอยแตกเป็นเส้นและ สีเปลี่ยน 96 ชั่วโมงเป็นเส้น
C1(0)	-	ไม่ปรากฏรอยแตกและไม่เปลี่ยนสี
C2(0)	-	ไม่ปรากฏรอยแตกและไม่เปลี่ยนสี
B1(0)30	16 ชม.	4 ชั่วโมงเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเทา 16 ชั่วโมงขอบเริ่มแตก
B1(0)40	16 ชม.	4 ชั่วโมงเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเทา 24 ชั่วโมงขอบเริ่มแตก
B2(0)30	24 ชม.	2 ชั่วโมงเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเทา 72 ชั่วโมงขอบเริ่มแตก
B2(0)40	72 ชม.	2 ชั่วโมงเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเทา 72 ชั่วโมงแทบมองไม่เห็นรอยแตก
B3(0)30	16 ชม.	2 ชั่วโมงเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเทา 16 ชั่วโมงขอบเริ่มแตก 72 ชั่วโมงขอบเริ่มแตก 96 ชั่วโมงเป็นเส้น
B3(0)40	-	ไม่แตก แต่สีเปลี่ยนเป็นสีเทา
B4(0)30	16 ชม.	4 ชั่วโมงเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเทา 24 ชั่วโมงขอบเริ่มแตก
B4(0)40	48 ชม.	4 ชั่วโมงเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเทา

(การเรียกชื่อสูตร : B2(30)40 = สูตร B2 มีปริมาณเขม่าดำ 30 phr และ CSM 40 phr)

จากตารางที่3.1 จะเห็นว่า ยางธรรมชาติทนต่อโอโซนได้น้อยกว่าCSMอย่างมาก ในขณะที่ยางธรรมชาติเริ่มแตก ในระยะเวลา 4 – 8 ชั่วโมง แต่ไม่เห็นรอยแตกในCSMหลังการอบด้วยโอโซนเป็นเวลา 96 ชั่วโมง ความสามารถในการทน ต่อโอโซนของยางธรรมชาติดีขึ้นเมื่อผสมกับCSM ดังจะเห็นได้จากผลการทดสอบของยางผสมทั้ง 4 สูตร และยางผสมจะ เริ่มเกิดรอยแตกช้าลงเมื่อปริมาณของCSMในยางผสมเพิ่มขึ้น

3.3.2 ยางผสมที่มีเซมาดำ

นำยางธรรมชาติ CSM และยางผสม ที่มีการเติมเซมาดำปริมาณ 30 และ 40 phr ทดสอบความต้านทานต่อโอโซน แบ่งการทดลองเป็น 2 วิธี คือ การสังเกตรอยแตกและการหาค่าการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านแรงดึงหลังการอบด้วยโอโซน

ตารางที่ 3.16 ความต้านทานต่อโอโซนของยางสูตรต่างๆที่มีเซมาดำ

สูตร	เวลาที่เริ่มแตก	ลักษณะการเปลี่ยนแปลง
NR1(30)	2 ชม.	รอยแตกเป็นเส้นกระจายทั่วทั้งชิ้นทดสอบ 96 ชั่วโมงความยาวรอยแตกมากกว่า 5 มม.
NR1(40)	2 ชม.	รอยแตกเป็นเส้นกระจายทั่วทั้งชิ้นทดสอบ 96 ชั่วโมงความยาวรอยแตกมากกว่า 5 มม. รอยแตกน้อยกว่า NR1(30)
NR2(30)	2 ชม.	รอยแตกเป็นเส้นกระจายทั่วทั้งชิ้นทดสอบ 48 ชั่วโมงชิ้นทดสอบขาดจากกัน
NR2(40)	2 ชม.	รอยแตกเป็นเส้นกระจายทั่วทั้งชิ้นทดสอบ 48 ชั่วโมงชิ้นทดสอบขาดจากกัน
NR3(30)	2 ชม.	รอยแตกเป็นเส้นกระจายทั่วทั้งชิ้นทดสอบ 96 ชั่วโมงความยาวรอยแตกมากกว่า 5 มม. รอยแตกใกล้เคียงกับสูตร NR1(30)
NR3(40)	2 ชม.	รอยแตกเป็นเส้นกระจายทั่วทั้งชิ้นทดสอบ 96 ชั่วโมงความยาวรอยแตกมากกว่า 5 มม. รอยแตกน้อยกว่า NR3(30) และใกล้เคียงกับสูตร NR1(40)
C1(30)	-	สีชิ้นทดสอบซีดลง ไม่ปรากฏรอยแตกเมื่อทดสอบครบ 96 ชั่วโมง
C1(40)	-	สีชิ้นทดสอบซีดลง ไม่ปรากฏรอยแตกเมื่อทดสอบครบ 96 ชั่วโมง
C2(30)	-	สีชิ้นทดสอบซีดลง ไม่ปรากฏรอยแตกเมื่อทดสอบครบ 96 ชั่วโมง
C2(40)	-	สีชิ้นทดสอบซีดลง ไม่ปรากฏรอยแตกเมื่อทดสอบครบ 96 ชั่วโมง
B1(30)30	-	สีชิ้นทดสอบซีดลง ไม่ปรากฏรอยแตกเมื่อทดสอบครบ 96 ชั่วโมง
B1(30)40	-	สีชิ้นทดสอบซีดลง ไม่ปรากฏรอยแตกเมื่อทดสอบครบ 96 ชั่วโมง
B1(40)30	-	สีชิ้นทดสอบซีดลง ไม่ปรากฏรอยแตกเมื่อทดสอบครบ 96 ชั่วโมง
B1(40)40	-	สีชิ้นทดสอบซีดลง ไม่ปรากฏรอยแตกเมื่อทดสอบครบ 96 ชั่วโมง
B2(30)30	-	สีชิ้นทดสอบซีดลง ไม่ปรากฏรอยแตกเมื่อทดสอบครบ 96 ชั่วโมง
B2(30)40	-	สีชิ้นทดสอบซีดลง ไม่ปรากฏรอยแตกเมื่อทดสอบครบ 96 ชั่วโมง
B2(40)30	-	สีชิ้นทดสอบซีดลง ไม่ปรากฏรอยแตกเมื่อทดสอบครบ 96 ชั่วโมง
B2(40)40	-	สีชิ้นทดสอบซีดลง ไม่ปรากฏรอยแตกเมื่อทดสอบครบ 96 ชั่วโมง
B3(30)30	-	สีชิ้นทดสอบซีดลง ไม่ปรากฏรอยแตกเมื่อทดสอบครบ 96 ชั่วโมง
B3(30)40	-	สีชิ้นทดสอบซีดลง ไม่ปรากฏรอยแตกเมื่อทดสอบครบ 96 ชั่วโมง
B3(40)30	-	สีชิ้นทดสอบซีดลง ไม่ปรากฏรอยแตกเมื่อทดสอบครบ 96 ชั่วโมง
B3(40)40	-	สีชิ้นทดสอบซีดลง ไม่ปรากฏรอยแตกเมื่อทดสอบครบ 96 ชั่วโมง
B4(30)30	-	สีชิ้นทดสอบซีดลง ไม่ปรากฏรอยแตกเมื่อทดสอบครบ 96 ชั่วโมง
B4(30)40	-	สีชิ้นทดสอบซีดลง ไม่ปรากฏรอยแตกเมื่อทดสอบครบ 96 ชั่วโมง
B4(40)30	-	สีชิ้นทดสอบซีดลง ไม่ปรากฏรอยแตกเมื่อทดสอบครบ 96 ชั่วโมง
B4(40)40	-	สีชิ้นทดสอบซีดลง ไม่ปรากฏรอยแตกเมื่อทดสอบครบ 96 ชั่วโมง

(การเรียกชื่อสูตร : B2(30)40 = สูตร B2 มีปริมาณเซมาดำ 30 phr และ CSM 40 phr)

จากตารางที่ 3.16 พบว่ายางธรรมชาติเริ่มเกิดรอยแตกเร็วและมีรอยแตกมาก เพราะโครงสร้างของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่มากจึงทำให้ไม่ทนต่อโอโซน ดังนั้นจึงเกิดรอยแตกมากที่สุด ในขณะที่CSMเป็นยางที่มีโครงสร้างอิมิตัวไม่มีพันธะคู่ ทำให้มีสมบัติเด่นด้านความทนทานต่อโอโซน เมื่อนำยางธรรมชาติมาผสมกับยางCSM ทำใหยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อโอโซนมากขึ้น และการเติมเขม่าดำลงในสูตรยางธรรมชาติ ทำใหยางธรรมชาติทนต่อโอโซนได้น้อยลง เพราะใช้เวลาที่เริ่มเกิดรอยแตกเวลาน้อยลง แต่ยางผสมที่มีเขม่าดำจะทนต่อโอโซนได้ดีขึ้น เพราะไม่เกิดรอยแตกขึ้นเลย ความเค้นและความเครียด ณ จุดขาด ก่อนและหลังการอบโอโซน และปริมาณการเปลี่ยนแปลงของสมบัติต้านแรงดึงแสดงในตารางที่ 3.17 และรูปที่ 3.44 – 3.55 การพิจารณาความต้านทานต่อโอโซนในส่วนนี้จะเปรียบเทียบปริมาณการเปลี่ยนแปลงความเค้นและความเครียด ณ จุดขาด ในทำนองเดียวกันกับสมบัติหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงน้อยลง แสดงว่ามีความต้านทานสูงขึ้น ทั้งนี้ยังไม่คำนึงถึงทิศทางการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกันกับสมบัติการบ่มเร่ง เพราะไม่ได้ศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาภายในยาง

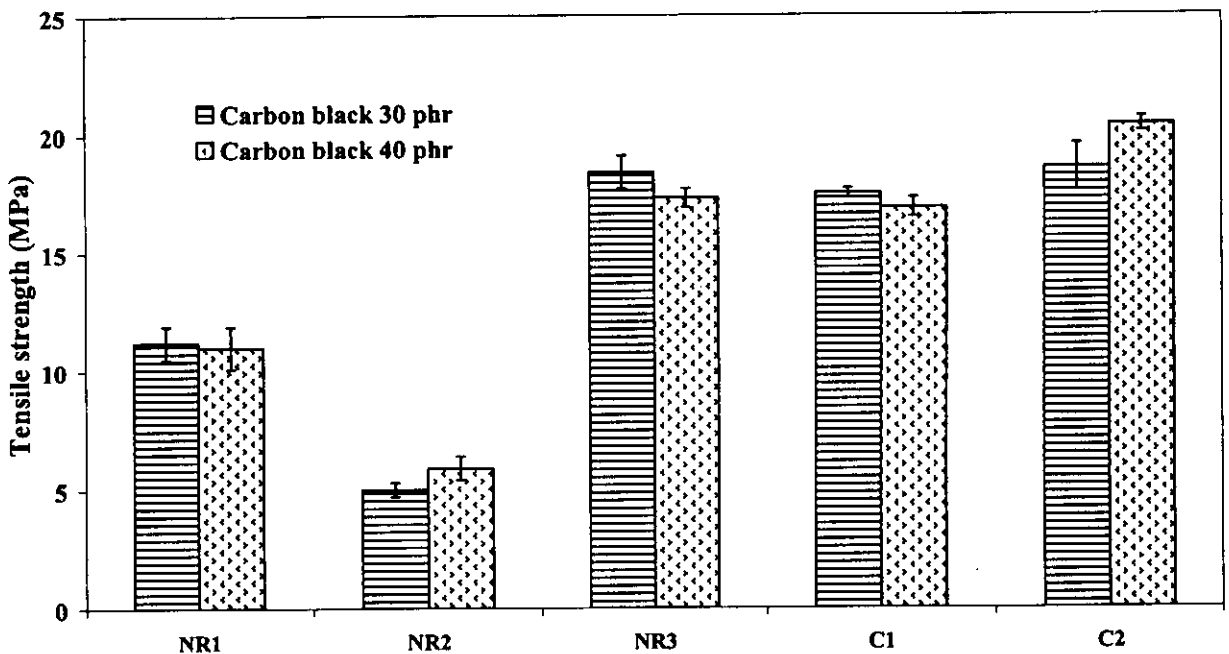
ตารางที่ 3.17 สมบัติต้านแรงดึงก่อนอบและหลังอบโอโซนและการเปลี่ยนแปลงของยางที่มีการเติมเขม่าดำ

สูตร	ก่อนอบ		หลังอบ		การเปลี่ยนแปลง	
	Stress (MPa)	Strain (%)	Stress (MPa)	Strain (%)	Stress (%)	Strain (%)
NR1(30)	23.1±1.0	757±17	11.2±0.4	537±13	-51.52	-29.06
NR1(40)	23.8±0.4	720±13	11.0±0.9	500±35	-53.78	-30.56
NR2(30)	21.4±1.3	742±11	5.0±0.3	406±7	-76.64	-32.61
NR2(40)	21.5±1.6	693±13	5.9±0.5	380±15	-72.56	-45.17
NR3(30)	23.6±1.2	729±19	18.4±0.7	631±22	-22.03	-13.44
NR3(40)	24.6±0.9	780±15	17.3±0.4	629±20	-29.67	-19.35
C1(30)	17.3±1.2	486±11	17.5±0.2	447±27	1.16	-8.02
C1(40)	17.2±0.7	419±11	16.9±0.4	415±6	-1.74	-0.95
C2(30)	20.9±1.1	467±16	18.6±1.0	449±24	-11	-3.85
C2(40)	20.2±1.0	409±16	20.4±0.3	423±9	0.99	3.42
B1(30)30	17.4±1.0	431±24	12.3±1.0	374±16	-29.31	-13.22
B1(40)30	17.5±0.7	425±17	12.8±0.4	336±6	-26.85	-23.29
B1(30)40	15.8±0.8	380±19	12.4±0.4	344±6	-21.52	-9.47
B1(40)40	15.0±0.8	366±15	9.4±0.5	248±15	-38.52	-32.24
B2(30)30	18.0±1.1	425±17	12.9±0.6	371±1	-28	-12.7
B2(40)30	17.3±0.5	411±12	12.6±0.2	316±6	-27.16	-23.11
B2(30)40	18.6±0.8	452±10	12.8±0.5	325±3	-29.57	-28.09
B2(40)40	15.3±1.6	360±22	12.4±0.3	268±20	-18.95	-25.56
B3(30)30	19.4±0.7	477±9	12.6±0.8	359±16	-35.05	-24.74
B3(40)30	17.6±0.6	387±15	12.0±0.1	311±3	-31.82	-19.64

ตารางที่ 3.17 (ต่อ)

B3(30)40	17.5±1.4	433±19	12.2±0.6	316±2	-30.29	-27.02
B3(40)40	16.9±1.0	362±24	12.1±0.5	273±3	-28.4	-24.59
B4(30)30	22.2±1.2	540±20	14.8±0.9	425±9	-33.33	-21.29
B4(40)30	18.2±0.3	464±6	15.0±0.6	449±8	-17.58	-3.23
B4(30)40	21.2±0.6	483±9	16.2±1.4	415±21	-23.58	-14.08
B4(40)40	16.9±0.9	432±19	14.2±0.3	423±5	-15.98	-2.08

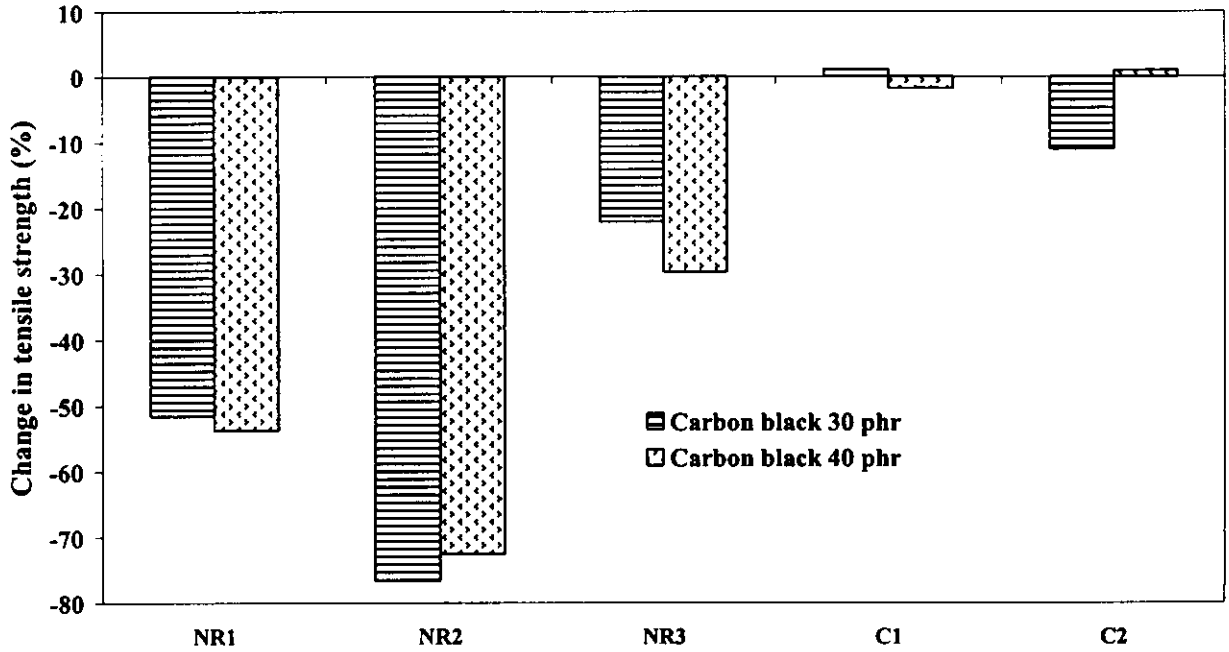
(การเรียกชื่อสูตร : B2(30)40 = สูตร B2 มีปริมาณเขม่าดำ 30 phr และ CSM 40 phr)



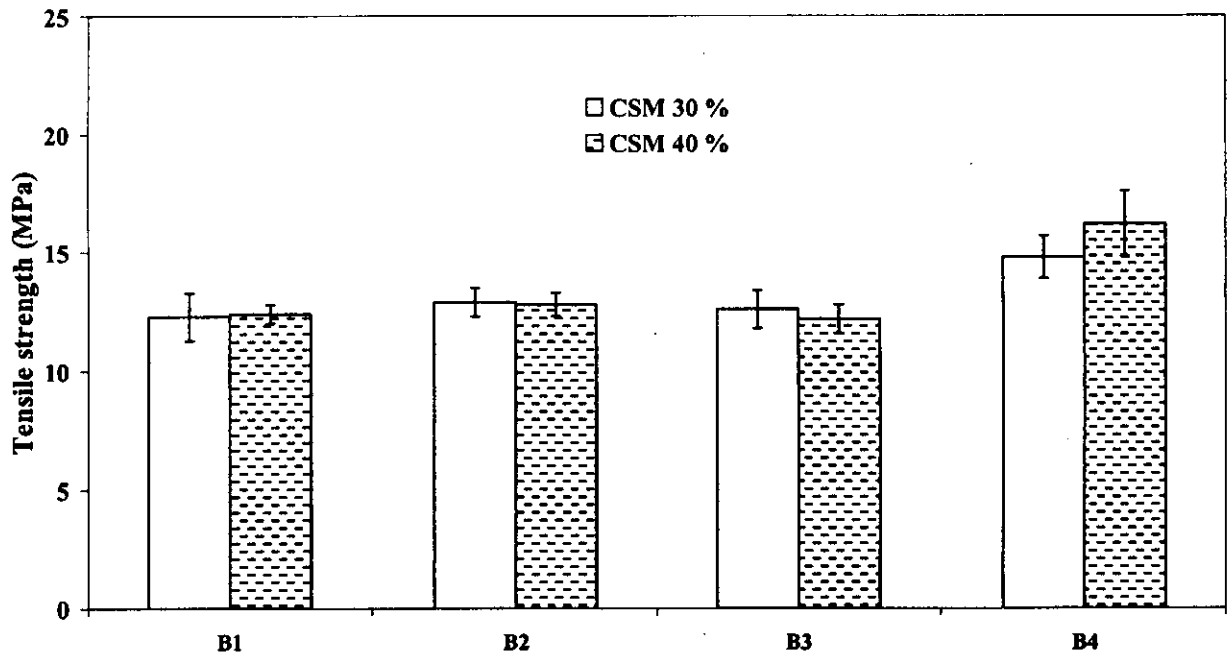
รูปที่ 3.44 ความเค้น ณ จุดขาด หลังอบโอโซนของยางธรรมชาติ (สูตร NR1, NR2 และ NR3) และยาง CSM (สูตร C1 และ C2) ที่ผสมเขม่าดำในปริมาณ 30 และ 40 phr

ยางCSMมีความต้านทานต่อโอโซนมากกว่ายางธรรมชาติซึ่งเป็นสมบัติที่เด่นของยางCSM สังกัดได้จากปริมาณการเปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่ 3.45 เนื่องจากยางCSMมีโครงสร้างที่อึดตัว ไม่มีพันธะคู่ที่ไวต่อปฏิกิริยาเหมือนยางธรรมชาติที่เป็นผลทำให้มีความต้านทานต่อโอโซนน้อย ยางธรรมชาติสูตรNR3จะมีความต้านต่อโอโซนมากที่สุด ปริมาณเขม่าดำจะให้ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกัน ส่วนยางCSMสูตรC2ที่ผสมเขม่าดำในปริมาณ 40 phr จะมีความต้านทานต่อโอโซนมากที่สุด และสูตรที่มีความต้านทานต่อโอโซนน้อยที่สุดคือสูตรC2 เนื่องจากในสูตรนี้มีค่าการทนต่อแรงดึงก่อนอบโอโซนที่สูงมากจึงทำให้มีค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงมาก

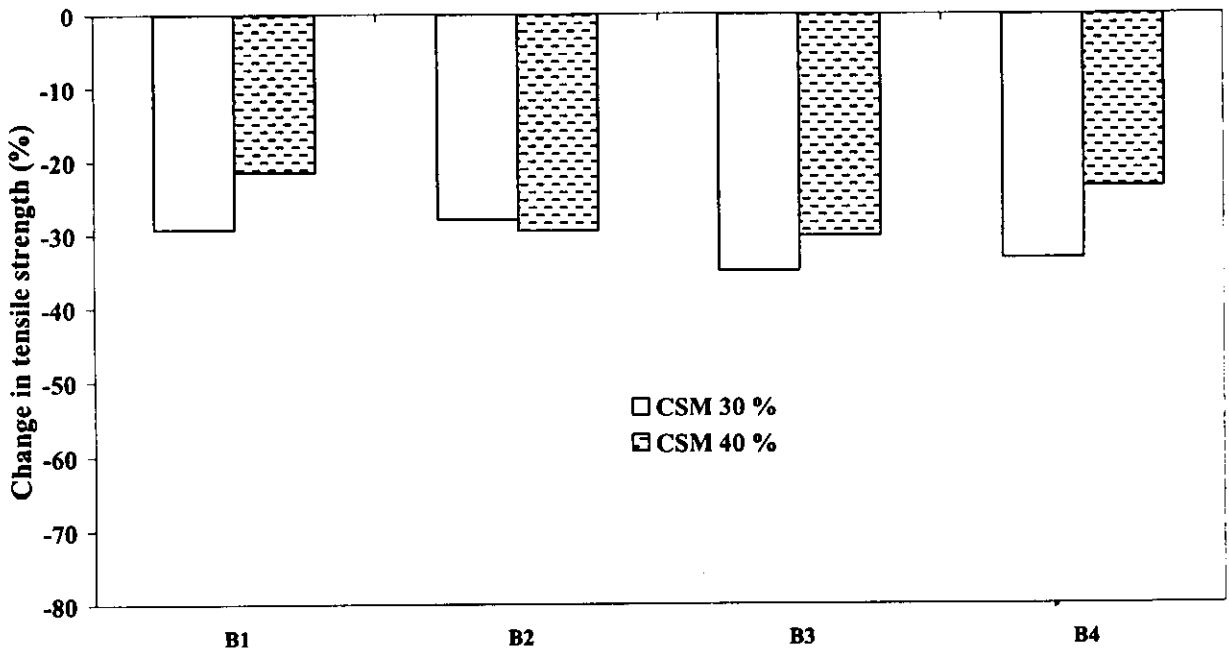
ยางผสมสูตรB4จะให้ค่าความเค้น ณ จุดขาด ก่อนและหลังอบโอโซนมากที่สุด สูตรยางผสมแต่ละสูตรมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ใกล้เคียงกัน และสูตรB4มีค่าการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าสูตรอื่นๆ เมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำ เพอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความเค้น ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลง นั่นคือ มีความต้านทานต่อโอโซนดีขึ้น



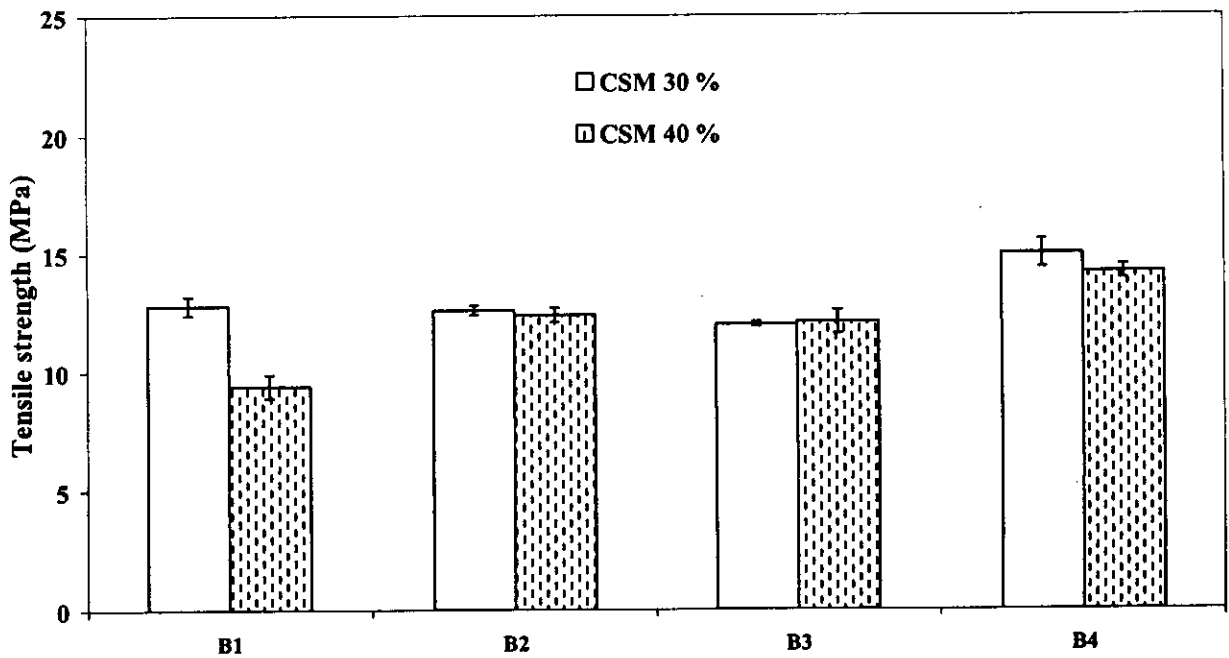
รูปที่ 3.45 การเปลี่ยนแปลงความเค้น ณ จุดขาด หลังอบโอโซนของยางธรรมชาติ (NR1, NR2 และ NR3) และCSM (C1 และ C2) ที่มีเขม่าดำปริมาณ 30 และ 40 phr



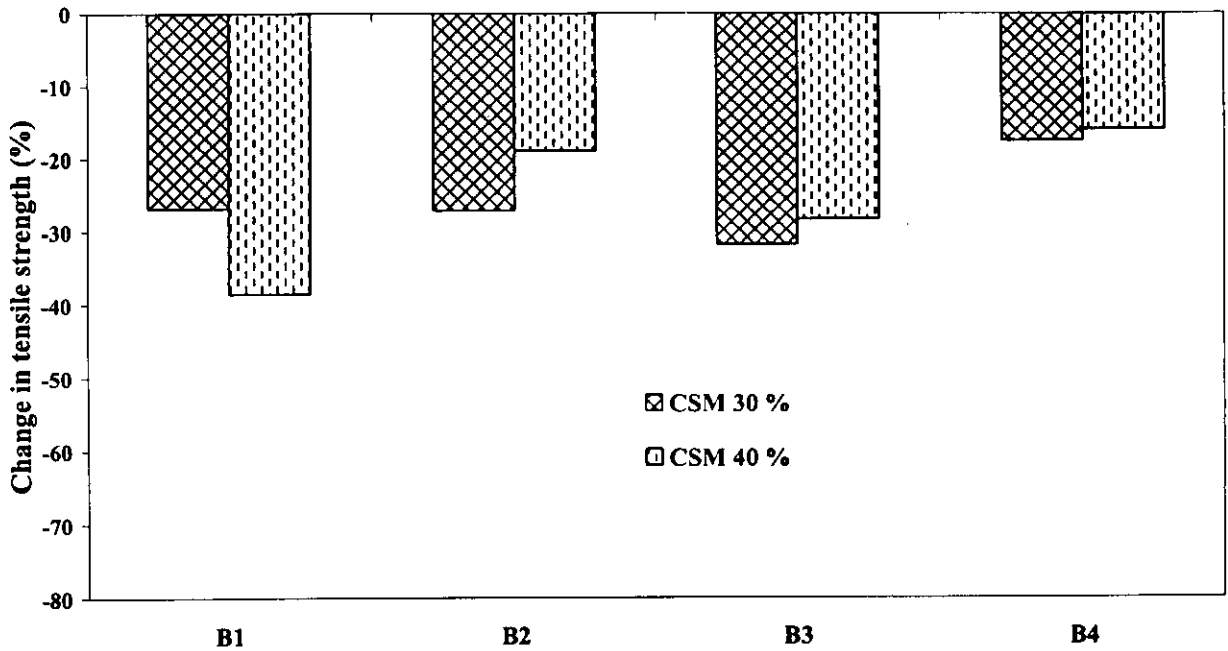
รูปที่ 3.46 ความเค้น ณ จุดขาด หลังอบโอโซนของยางผสมสูตรB1, B2, B3 และ B4 ที่มีเขม่าดำปริมาณ 30 phr



รูปที่ 3.47 การเปลี่ยนแปลงความเค้น ณ จุดขาด หลังอบโอโซนของยางผสมสูตร B1, B2, B3 และ B4 ที่มีเขม่าดำปริมาณ 30 phr

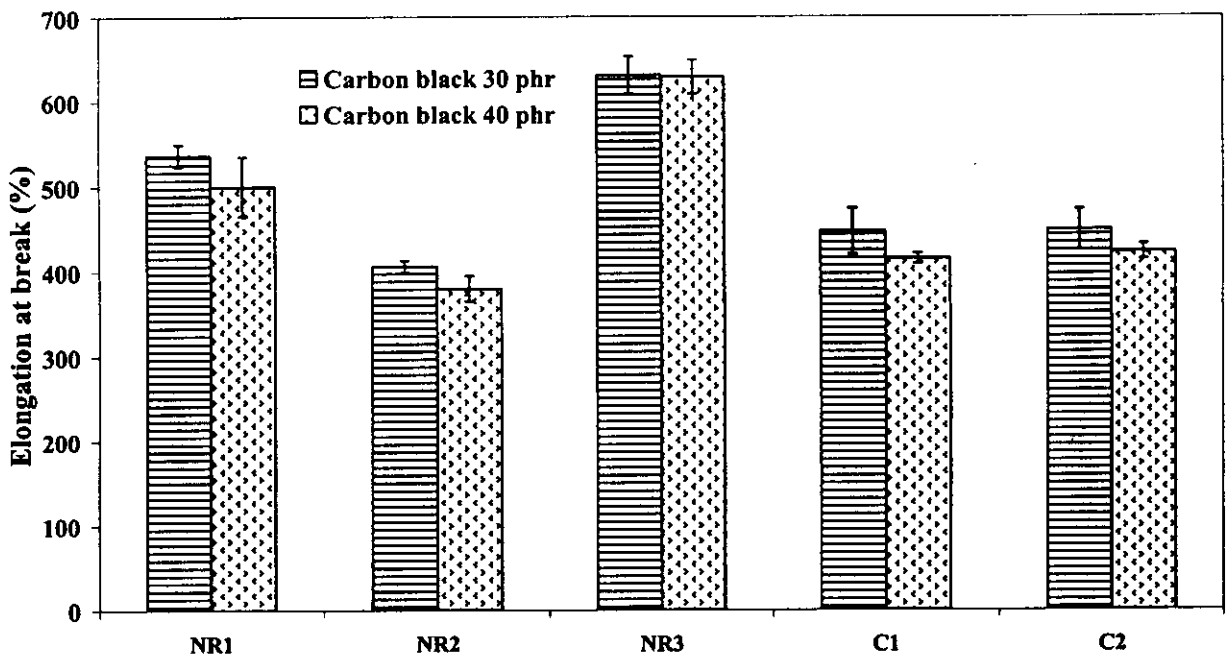


รูปที่ 3.48 ความเค้น ณ จุดขาด หลังอบโอโซนของยางผสมสูตร B1, B2, B3 และ B4 ที่มีเขม่าดำปริมาณ 40 phr

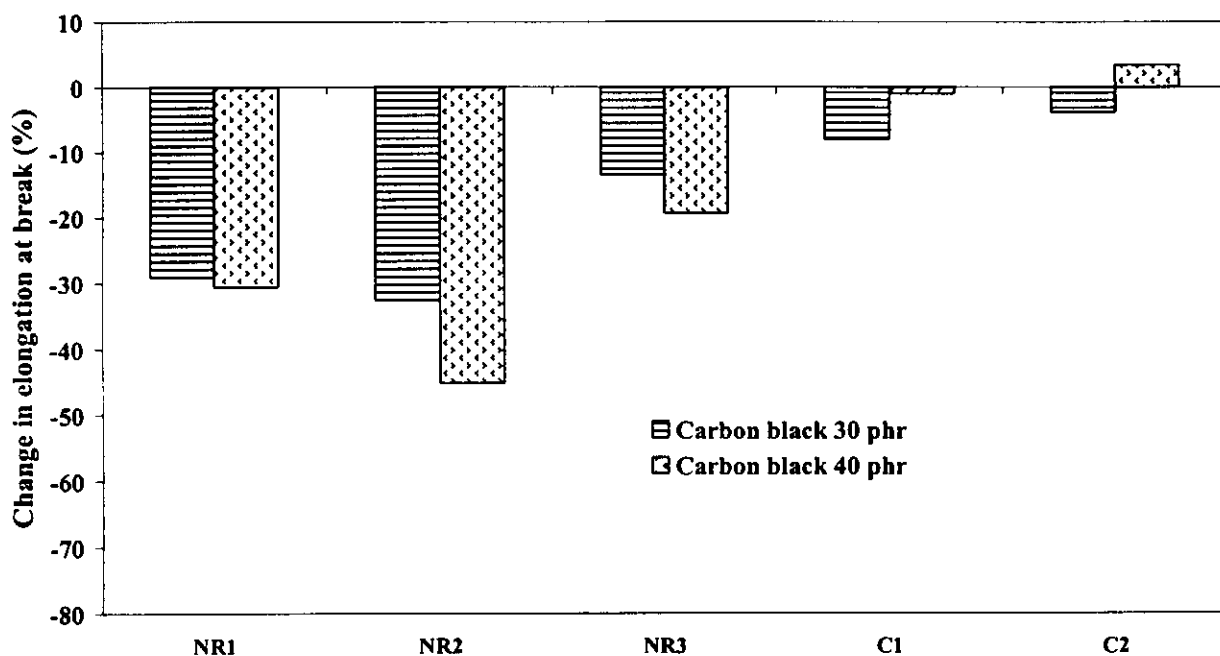


รูปที่ 3.49 การเปลี่ยนแปลงความเค้น ณ จุดขาด หลังอบโอโซนของยางผสมสูตร B1, B2, B3 และ B4 ที่มีเขม่าดำปริมาณ 40 phr

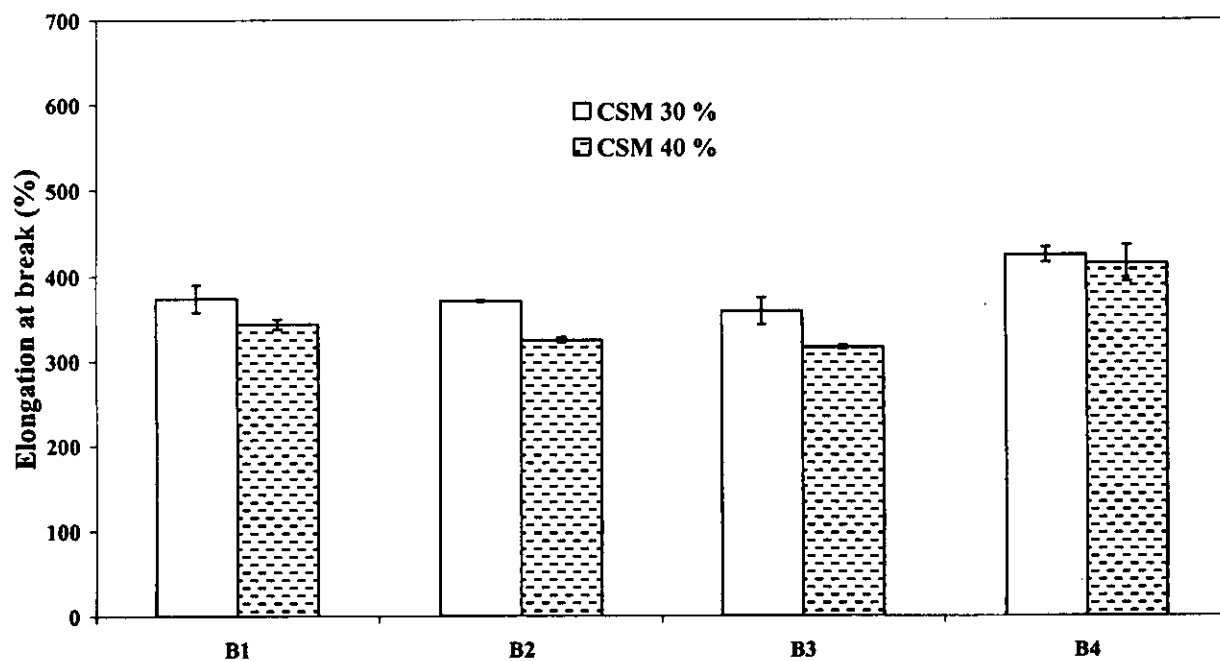
รูปที่ 3.50 - 3.55 แสดงความเคียว ณ จุดขาด และเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงหลังอบด้วยโอโซนของยางธรรมชาติ ยางCSM และยางผสมสูตรต่างๆ ผลการทดลองมีทิศทางเช่นเดียวกับค่าความเค้น ณ จุดขาด ดังที่กล่าวมา



รูปที่ 3.50 ความเคียว ณ จุดขาด หลังอบโอโซนของยางธรรมชาติ (NR1, NR2 และ NR3) และCSM (C1 และ C2) ที่มีเขม่าดำปริมาณ 30 และ 40 phr



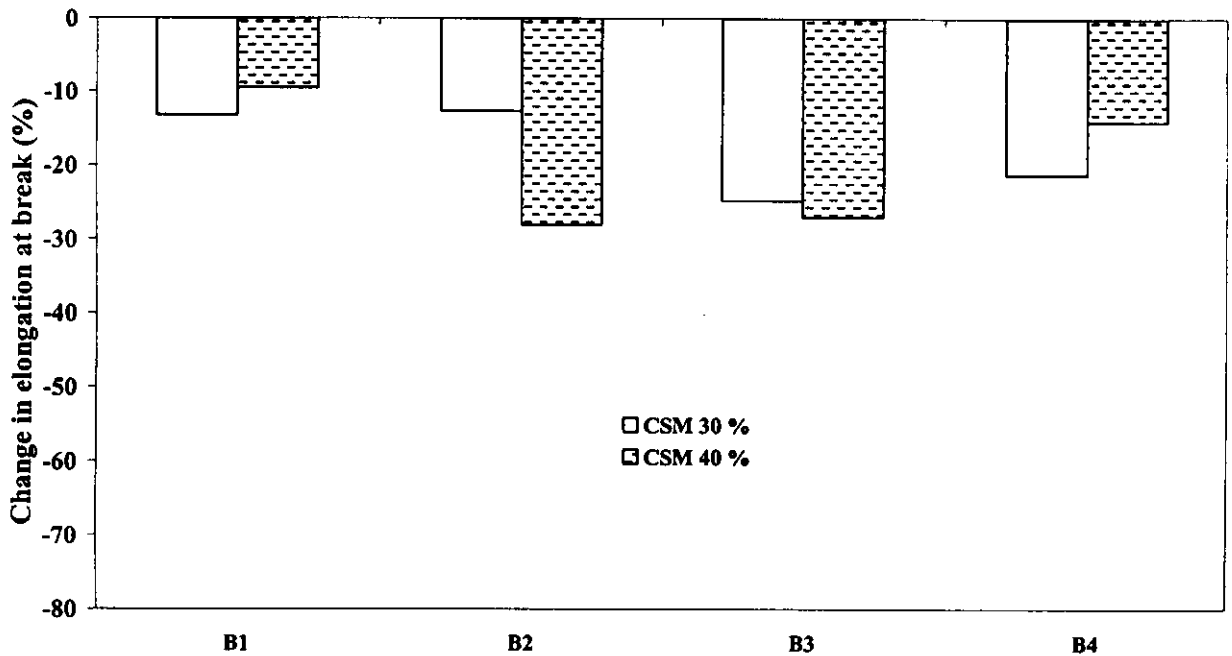
รูปที่ 3.51 การเปลี่ยนแปลงความเครียด ณ จุดขาด หลังอบโอโซนของยางธรรมชาติ (สูตร NR1, NR2 และ NR3) และยาง CSM (สูตร C1 และ C2) ที่ผสมเขม่าดำในปริมาณ 30 และ 40 phr



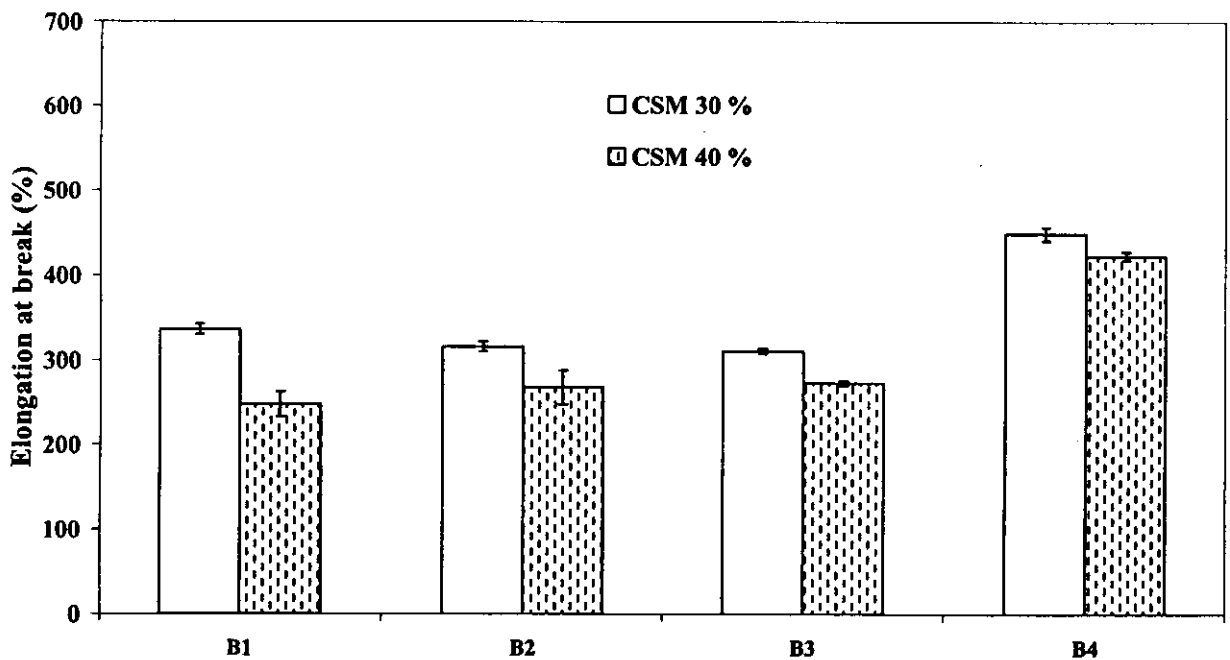
รูปที่ 3.52 ความเครียด ณ จุดขาด หลังอบโอโซนของยางผสมสูตร B1, B2, B3 และ B4 ที่มีเขม่าดำปริมาณ 30 phr

ยาง CSM มีความต้านทานต่อโอโซนในด้านความสามารถในการยืดจนขาดมากกว่ายางธรรมชาติ โดยยางธรรมชาติในสูตร NR3 มีความต้านทานต่อโอโซนมากที่สุด ยางธรรมชาติสูตรที่ผสมเขม่าดำในปริมาณ 30 phr มีความ

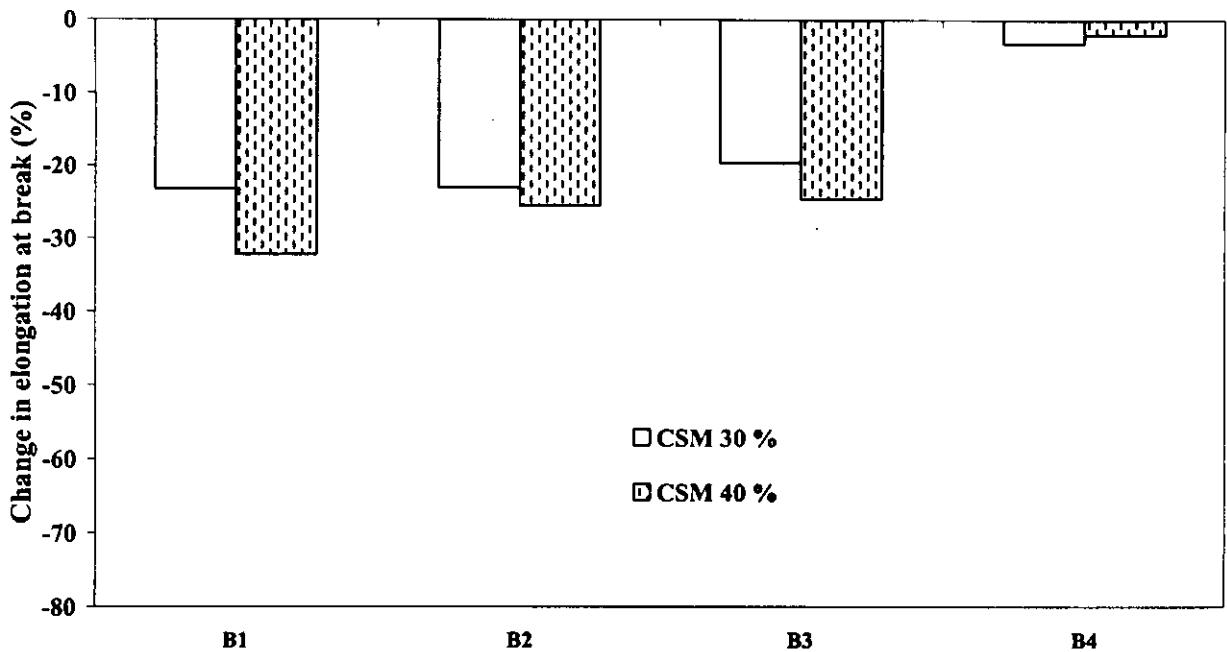
ต้านทานต่อโอโซนมากกว่าที่ปริมาณ 40 phr ส่วนยางCSMมีความต้านทานต่อโอโซนที่ใกล้เคียงกัน และยางCSMที่ผสม
 เขม่าดำในปริมาณ 40 phr จะมีความต้านทานต่อโอโซนที่มากกว่าที่ปริมาณ 30 phr



รูปที่ 3.53 การเปลี่ยนแปลงความความเครียด ณ จุดขาด หลังอบโอโซนของยางผสมสูตรB1, B2, B3 และ B4 ที่ผสมเขม่าดำในปริมาณ 30 phr



รูปที่ 3.54 ความเครียด ณ จุดขาด หลังอบโอโซนของยางผสมสูตร B1, B2, B3 และ B4 ที่มีเขม่าดำ ปริมาณ 40 phr

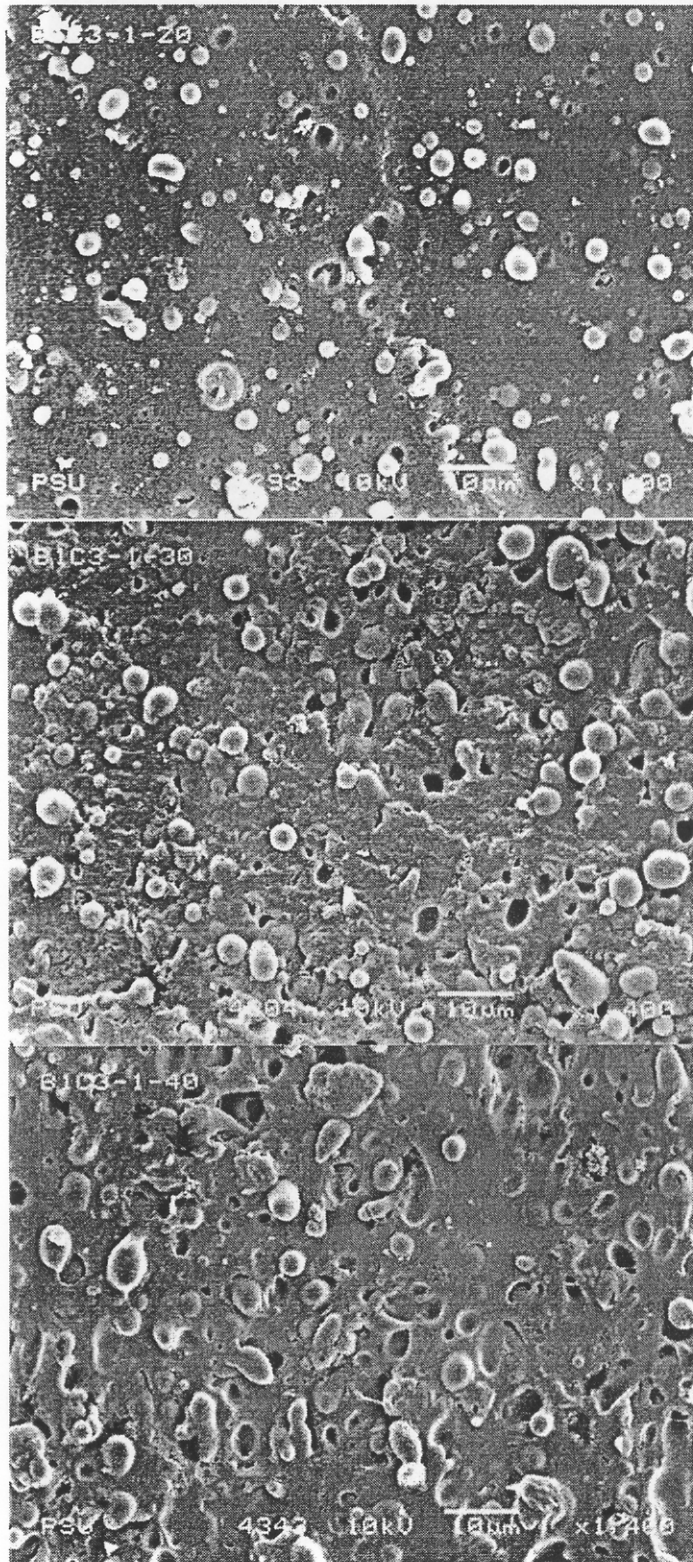


รูปที่ 3.55 การเปลี่ยนแปลงของความเครียด ณ จุดขาด หลังอบโอโซนของยางผสมสูตรB1, B2, B3 และ B4 ที่มีเซมาดำปริมาณ 40 phr

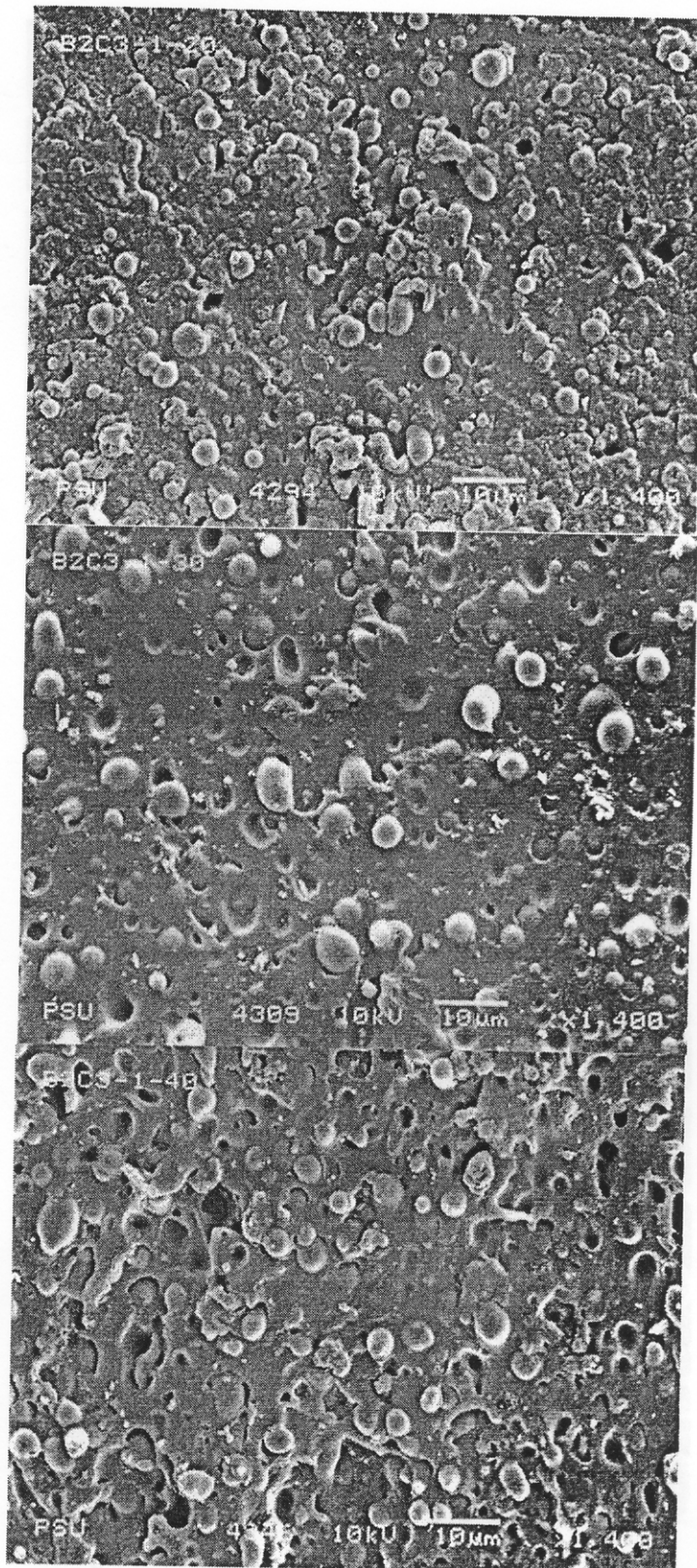
สูตรB4มีความสามารถในการยึดจนขาดหลังอบโอโซนมากที่สุดและมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด ยางผสมสูตรB4มีความต้านทานต่อโอโซนมากที่สุด ส่วนยางผสมสูตรอื่นๆมีความต้านทานต่อโอโซนใกล้เคียงกัน

3.4 ลักษณะวิทยาของยางผสม

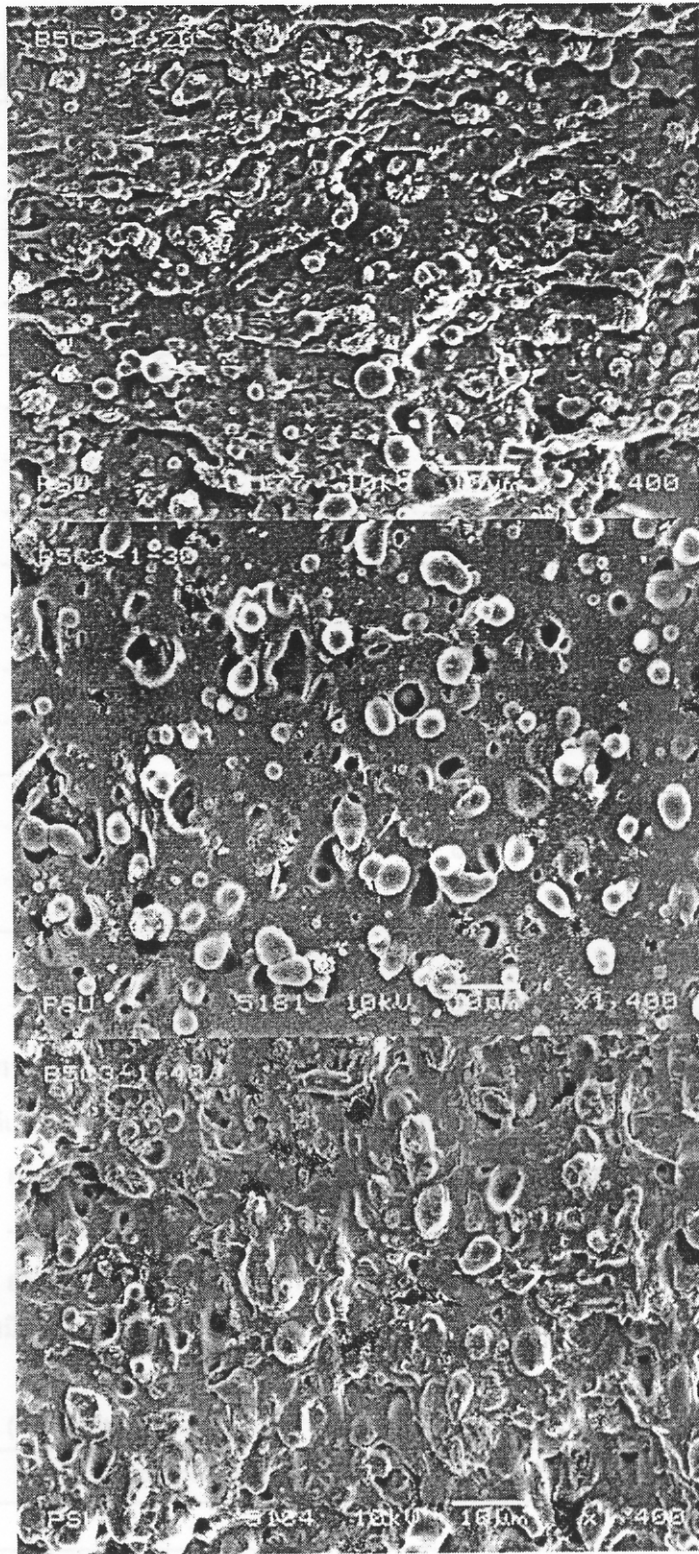
ลักษณะวิทยา (morphology) ของยางผสมถูกตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ขึ้นตัวอย่างถูกย้อมสีด้วยออสเมียมเตตระออกไซด์เพื่อให้เห็นความแตกต่างระหว่างยางธรรมชาติและยางCSMได้ชัดเจนยิ่งขึ้น รูปที่ 3.56 – 3.58 เป็นภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของยางผสมสูตรB2 – B4 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนผสม 80/20, 70/30 และ 60/40 (NR/CSM) ตามลำดับ จะเห็นอนุภาคของยางCSMที่มีรูปร่างส่วนใหญ่เป็นทรงกลม มีบางส่วนเป็นทรงรียาว ขนาดของอนุภาคมีหลากหลายตั้งแต่ต่ำกว่า 1 μm ไปจนถึง 6 μm ตารางที่ 3.18 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคยางCSMของยางผสมสูตรต่างๆ พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคยางCSMอยู่ในช่วง 2 μm ขนาดอนุภาคยางCSMมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณยางCSMเพิ่มมากขึ้น ค่าเฉลี่ยที่ต่ำลงเมื่อปริมาณยางCSMเพิ่มมากขึ้นอาจเกิดจากความผิดพลาดในการวัด อย่างไรก็ตาม ขนาดของอนุภาคยางCSMมีค่าใกล้เคียงกันทุกสูตร และทุกอัตราส่วนที่ทำการตรวจสอบ โดยทั่วไปอนุภาคของ dispersed phase มักจะมีขนาดโตขึ้นเมื่อมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น แต่สำหรับยางผสมคู่นี้ อนุภาคของ dispersed phase หรืออนุภาคของยางCSMมีแนวโน้มคงที่ (ประมาณ 2 μm) ถึงแม้ว่าจะมียางCSMเพิ่มขึ้นก็ตาม ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางนี้ค่อนข้างโต (> 1 μm) ส่วนยางผสมที่มียางธรรมชาติน้อยลงจะเห็นอนุภาคยาง dispersed phase ได้ไม่ชัดเจน แต่เนื่องจากโครงการวิจัยนี้สนใจเฉพาะยางผสมที่มียางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบหลัก จึงไม่ได้ให้ความสำคัญแก่อัตราส่วนที่มียางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบรอง



รูปที่ 3.56 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของยางผสมสูตรB2 แสดงอนุภาคของเม็ดยางCSM ที่กระจายอยู่ทั่วไป (ยางผสม : 20, 30 และ 40 %CSM เรียงจากบนลงล่าง)



รูปที่ 3.57 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของยางผสมสูตรB3 แสดงอนุภาคของเม็ดยาง CSM ที่กระจายอยู่ทั่วไป (ยางผสม : 20, 30 และ 40 %CSM เรียงจากบนลงล่าง)



รูปที่ 3.58 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของยางผสมสูตรB4 แสดงอนุภาคของเม็ดยาง CSMที่กระจายอยู่ทั่วไป (ยางผสม : 20, 30 และ 40 %CSM เรียงจากบนลงล่าง)

ตารางที่ 3.18 เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคยางCSMในยางผสม

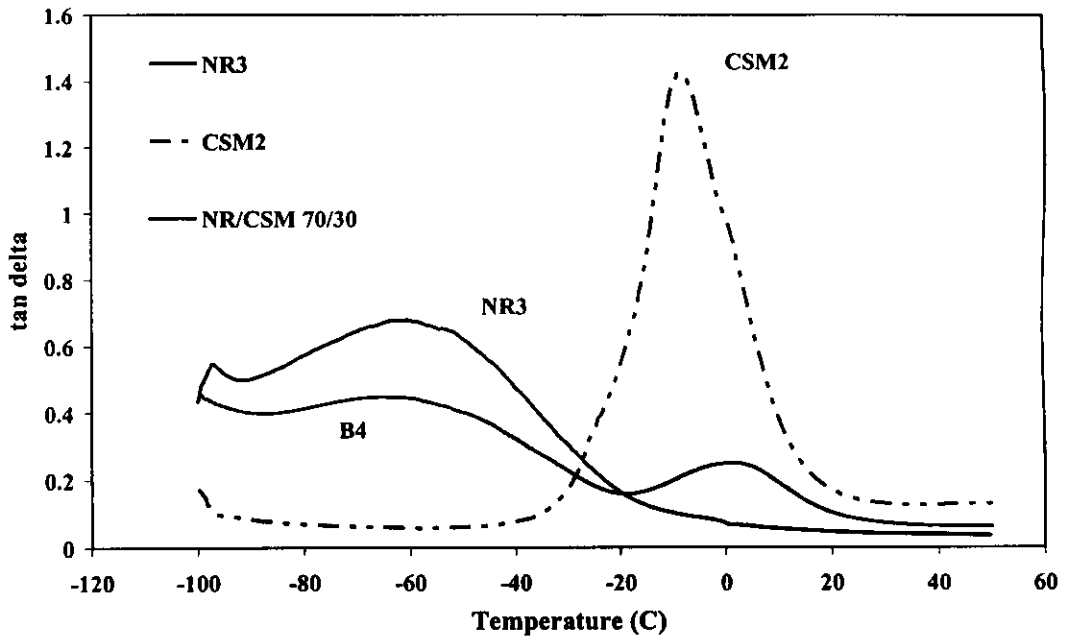
Rubber	Average Diameter (μm)	Minimum Diameter (μm)	Maximum diameter (μm)
B1: 20%CSM	2.00 ± 0.78	0.80	4.81
30%CSM	1.71 ± 0.74	0.68	4.55
40%CSM	1.89 ± 0.74	0.69	4.25
50%CSM	1.89 ± 0.67	0.75	3.79
B2: 20%CSM	2.17 ± 0.78	0.89	4.85
30%CSM	2.32 ± 1.04	0.41	5.30
40%CSM	2.40 ± 0.86	0.77	5.63
50%CSM	2.22 ± 0.80	0.65	4.74
B3: 20%CSM	2.04 ± 0.83	0.70	4.92
30%CSM	2.45 ± 1.02	0.90	5.43
40%CSM	2.25 ± 0.79	0.81	5.67
50%CSM	1.98 ± 0.85	0.70	4.57
B4: 20%CSM	1.55 ± 0.69	0.56	4.85
30%CSM	2.02 ± 1.07	0.52	5.17
40%CSM	1.94 ± 1.09	0.52	6.45

3.5 อุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของยางผสม

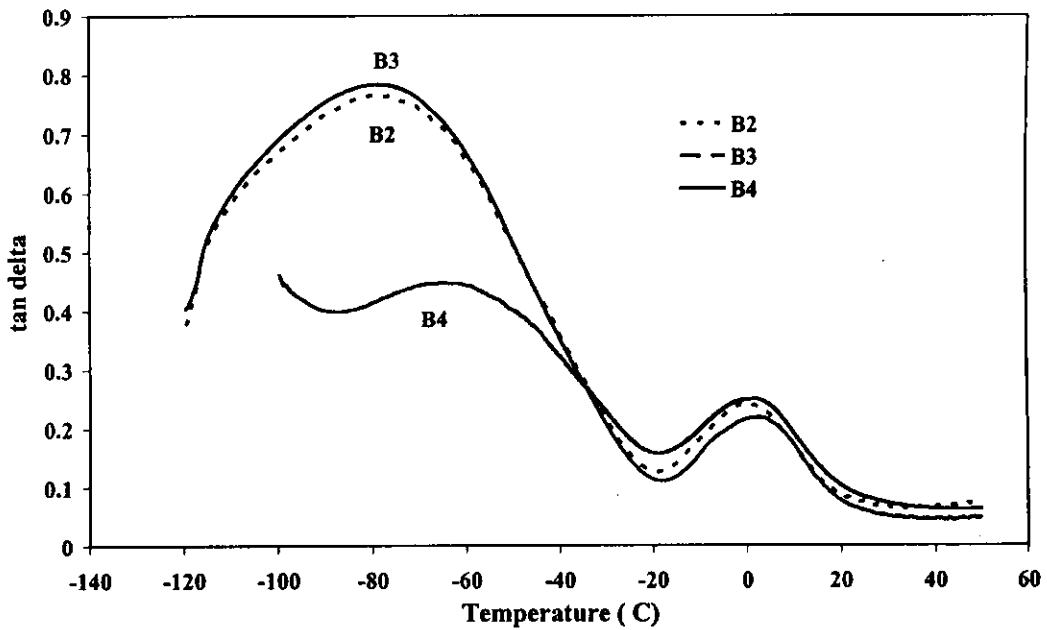
ค่า T_g ของพอลิเมอไรนที่นี้หมายถึง ค่า α transition temperature ที่ได้จากเทคนิค DMTA ตารางที่ 3.19 แสดงค่า T_g ของยางธรรมชาติ ยางCSM และยางผสม (30% CSM) รูปที่ 3.59 – 3.60 แสดง Dynamic mechanical spectra ที่บันทึกได้ในช่วงอุณหภูมิ -120°C ถึง 50°C การที่ T_g ที่ตำแหน่งของยางธรรมชาติในยางผสมสูตรB2และB3 มีค่าต่ำกว่ายางธรรมชาติบริสุทธิ์นั้น อาจเป็นเพราะพิกที่ตำแหน่งนี้กว้างมาก (ดูรูปที่ 3.59) ส่วน T_g ของCSMในยางผสมมีค่าสูงขึ้น อาจเนื่องมาจากยางCSMมีการวัลคาไนซ์มากขึ้น

ตารางที่ 3.19 ค่า T_g (α transition)ของยางธรรมชาติ ยางCSM และยางผสม

Rubber	Blend Composition	T_g of NR ($^{\circ}\text{C}$)	T_g of CSM ($^{\circ}\text{C}$)
NR3	-	-62.8	-
CSM2	-	-	-8.5
B2: NR/CSM	70/30	-80.1	0.2
B3: NR/CSM	70/30	-79.5	2.83
B4: NR/CSM	70/30	-63.0	1.9



รูปที่ 3.59 Dynamic mechanical spectra ของยางธรรมชาติ ยางCSM และยางผสมสูตรB4 (30% CSM) แสดง T_g ของยางธรรมชาติ (-62.8°C) และ T_g ของCSM (-8.5°C)



รูปที่ 3.60 Dynamic mechanical spectra ของยางผสมสูตรB2, B3 และ B4 (30% CSM) แสดง T_g ของตำแหน่ง (ของยางธรรมชาติและยางCSM)