

บทที่ 3

ผลการทดลองและวิจารณ์

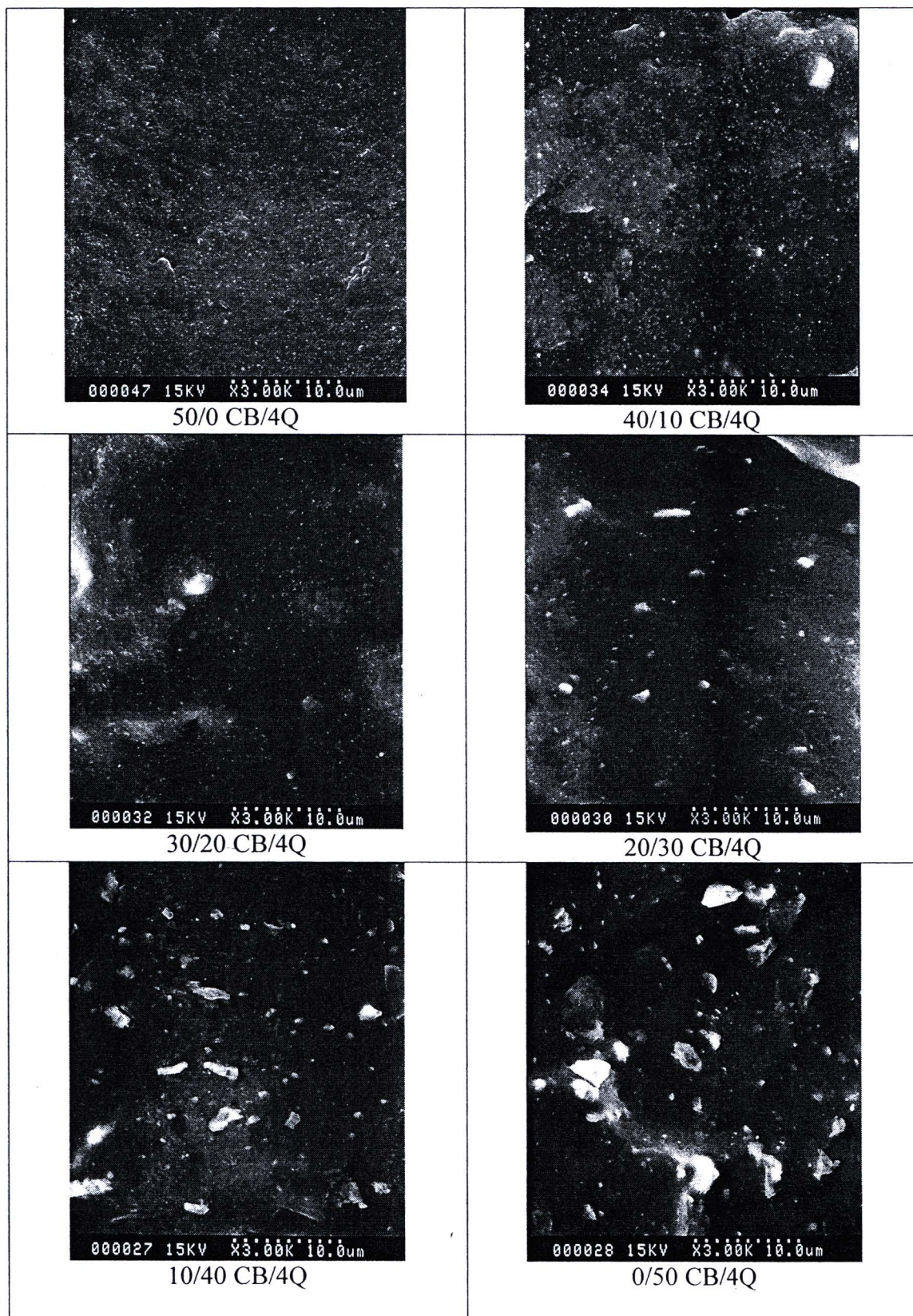
3.1 สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่ใช้เขม่าดำร่วมกับสารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรงหรือ กึ่งเสริมแรงในสัดส่วนต่างๆ

การทดลองในส่วนนี้ได้ทำการแปรปริมาณสัดส่วนของสารตัวเติม 2 ชนิดที่ใช้ร่วมกันในยางธรรมชาติ ซึ่งได้แก่ เขม่าดำ (CB) เกรด N330 และสารตัวเติมชนิดที่สอง (2^{nd} fillers) ซึ่งมีทั้งชนิดไม่เสริมแรงและกึ่งเสริมแรง ซึ่งได้แก่แคลเซียมคาร์บอเนต (4Q และ HF) เคลย์ (soft clay (SC) และ hard clay (HC)) และทัลคัม (talcum; TC) โดยในการทดลองส่วนนี้ใช้ปริมาณรวมของสารตัวเติมผสมเท่ากันทุกสูตรคือ 50 phr

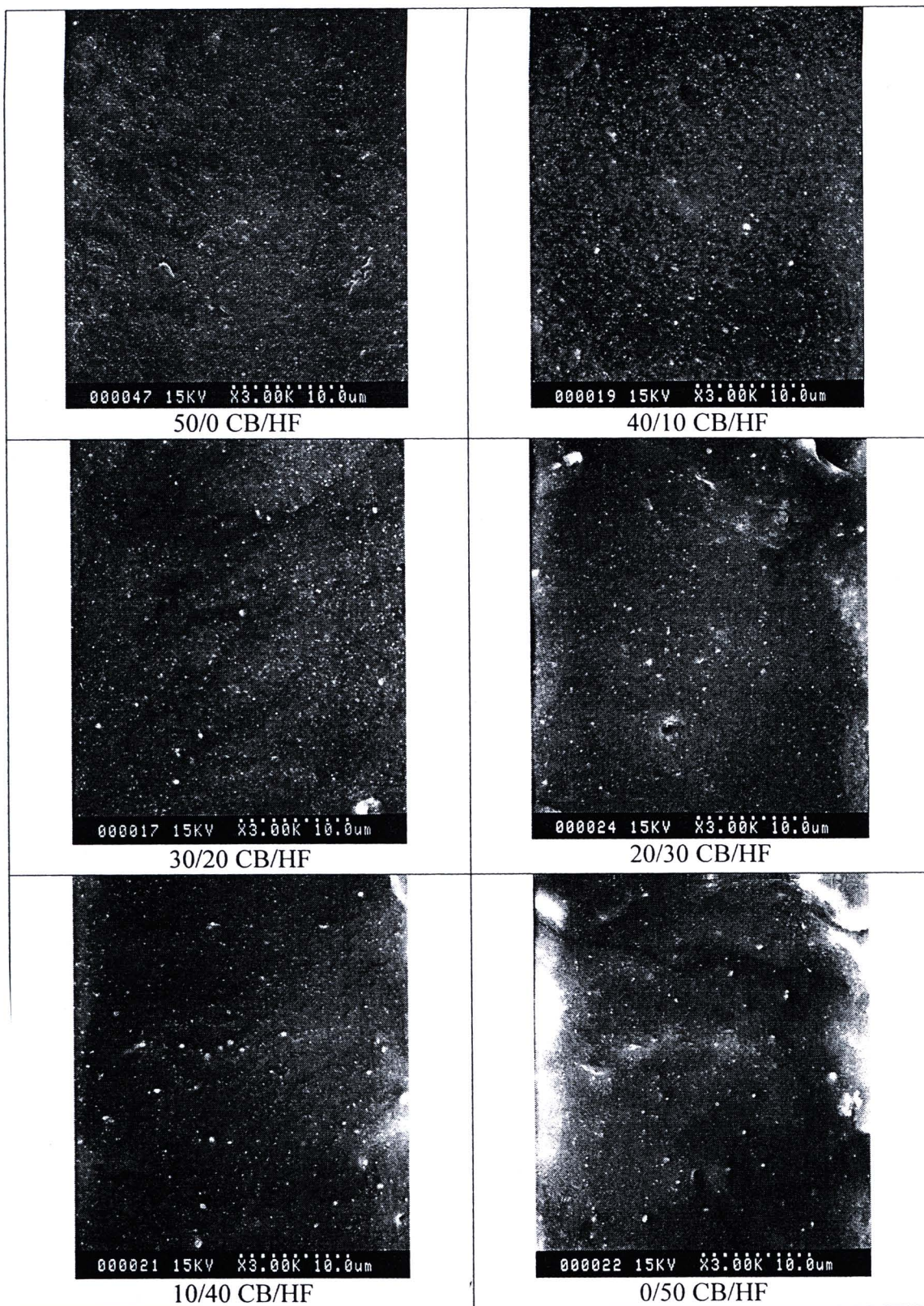
รูปที่ 1-5 แสดงภาพถ่าย SEM ของยางธรรมชาติเมื่อใช้สารตัวเติมผสมระหว่างเขม่าดำและ 2^{nd} filler ต่างๆ ได้แก่ 4Q, HF, SC, HC และ TC ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า 4Q ในรูปที่ 1 มีขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุดและอยู่เป็นกลุ่ม ส่วน HF มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า 4Q มาก แต่มักจะเกาะกลุ่มกันโดยเฉพาะเมื่อปริมาณของ 2^{nd} filler ในสารตัวเติมผสมมากขึ้น สำหรับ SC, HC และ TC นั้นมีลักษณะเป็นแผ่นและมีแนวโน้มที่จะเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน และจะเห็นได้ว่า HC มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า SC และ TC รวมทั้งมีความยาวอนุภาคโดยเฉลี่ยต่ำกว่า TC

สำหรับผลของสมบัติเชิงกลต่างๆ ได้แสดงไว้ในหน้าถัดไป โดยแกน x แสดงการแปรปริมาณของ 2^{nd} filler ที่มีอยู่ในสารตัวเติมผสมตั้งแต่ 0-50 phr ดังนั้นสูตรยางที่มี 2^{nd} filler ในปริมาณ 20 phr จะมีเขม่าดำผสมอยู่ 30 phr เป็นต้น

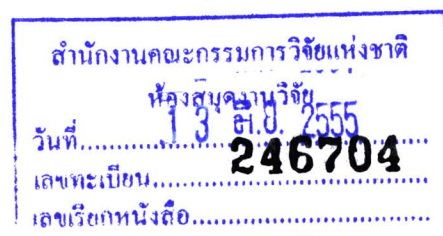
ผลการทดลองในรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าความหนืดมูนี (Mooney viscosity) ของยางธรรมชาติมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของ 2^{nd} filler เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ น่าจะเป็นผลมาจากการที่ 2^{nd} filler ชนิดต่างๆ มีอันตรกิริยา (interaction) กับยางต่ำกว่าเขม่าดำ นอกจากนี้จะเห็นได้ว่ายางที่เติม 4Q และ HF เป็น 2^{nd} filler ให้ค่าความหนืดมูนีใกล้เคียงกัน แสดงว่าความสามารถในการไหลของคอมพาวด์ทั้งสองชนิดไม่แตกต่างกันมากนัก และยางที่ใช้ SC, HC และ TC ก็มีค่าความหนืดมูนีใกล้เคียงกัน และสูงกว่าของยางที่เติม 4Q และ HF เล็กน้อย เมื่อเติม 2^{nd} filler ไม่เกิน 40 phr แต่ความหนืดมูนีของยางที่เติม TC 50 phr มีค่าใกล้เคียงกับยางที่เติม 4Q และ HF เท่ากับ 50 phr

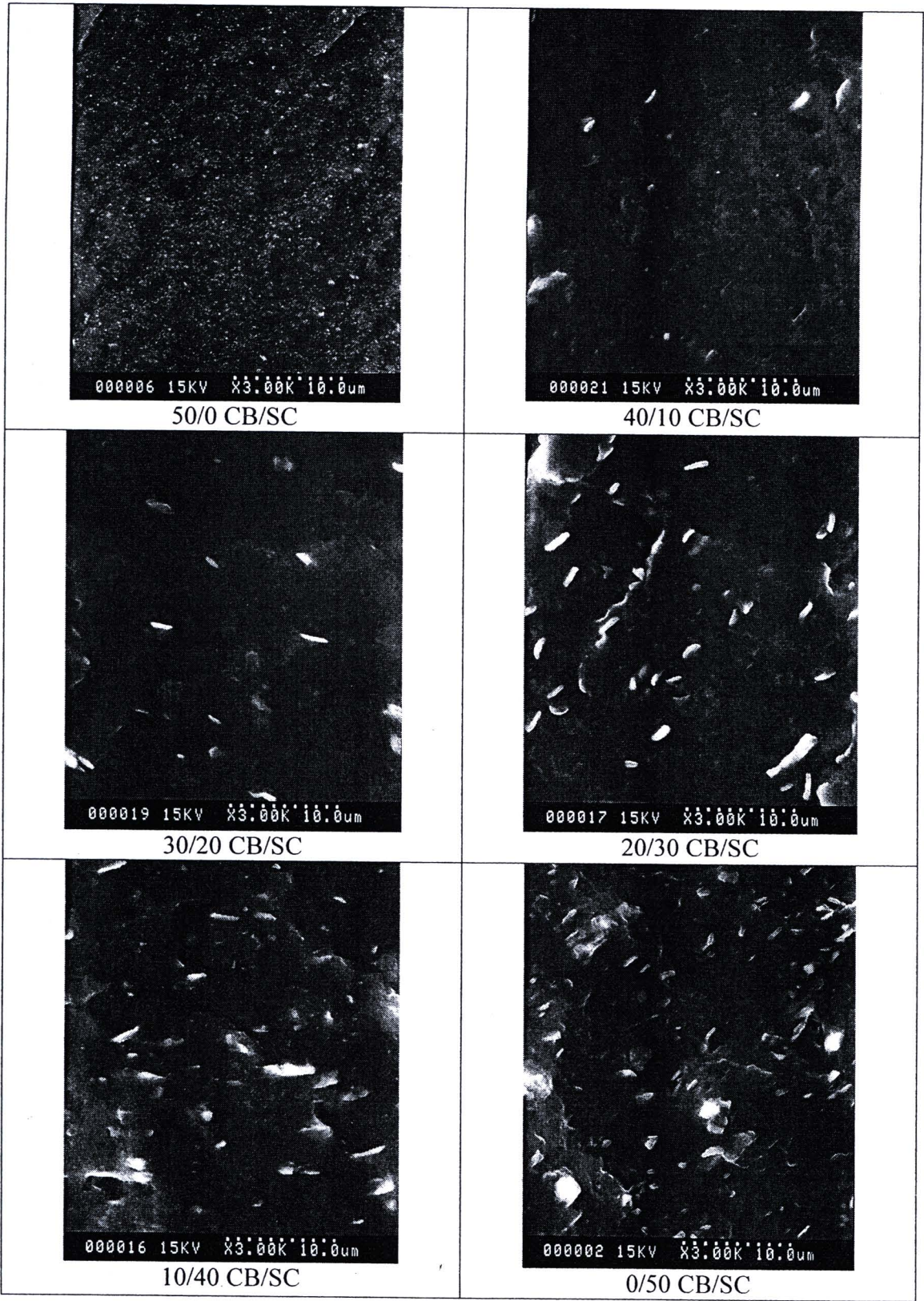


รูปที่ 1 ภาพถ่าย SEM ของยางธรรมชาติที่เติม CB/4Q ที่สัดส่วนต่าง ๆ

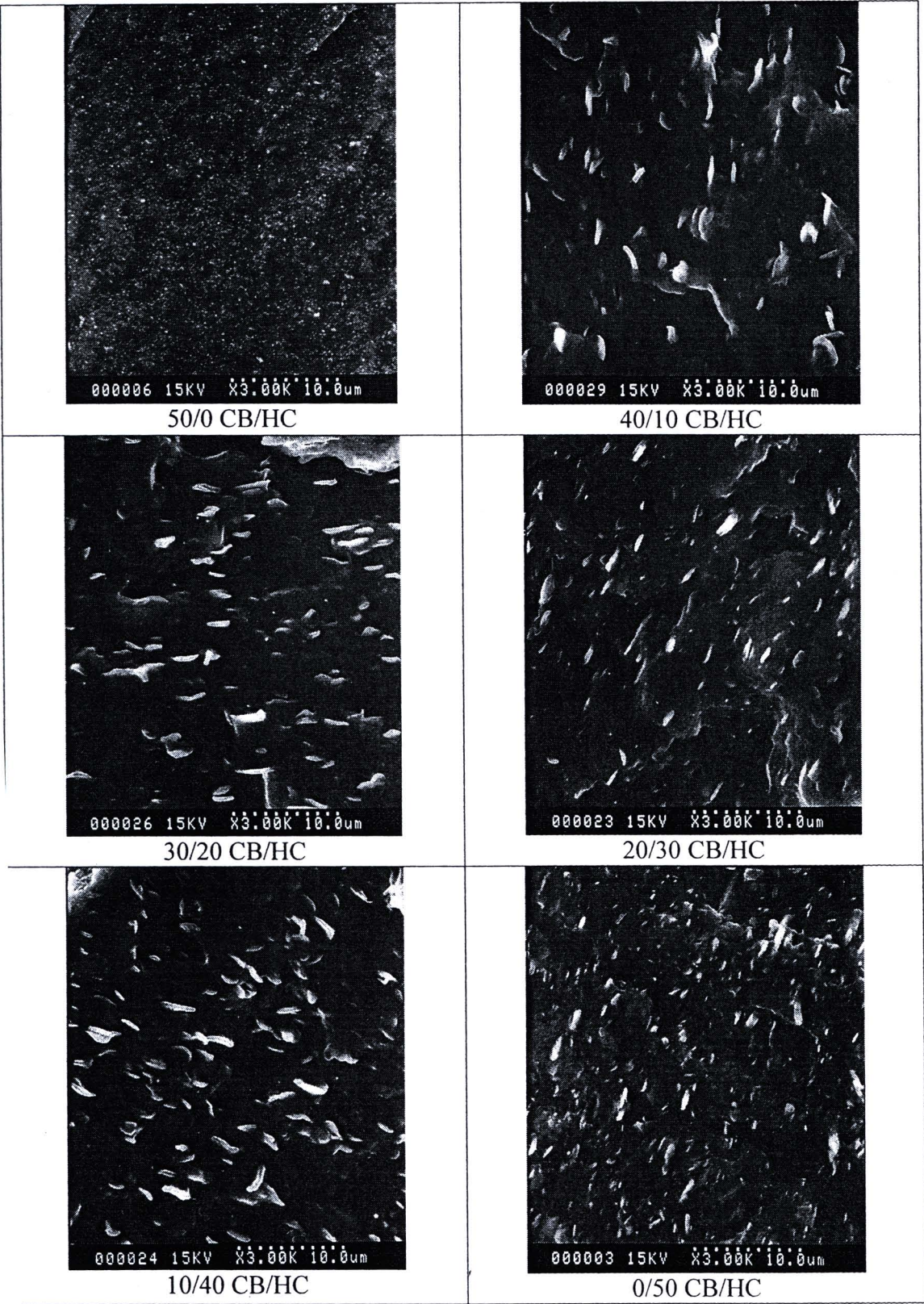


รูปที่ 2 ภาพถ่าย SEM ของยางธรรมชาติที่เติม CB/HF ที่สัดส่วนต่าง ๆ

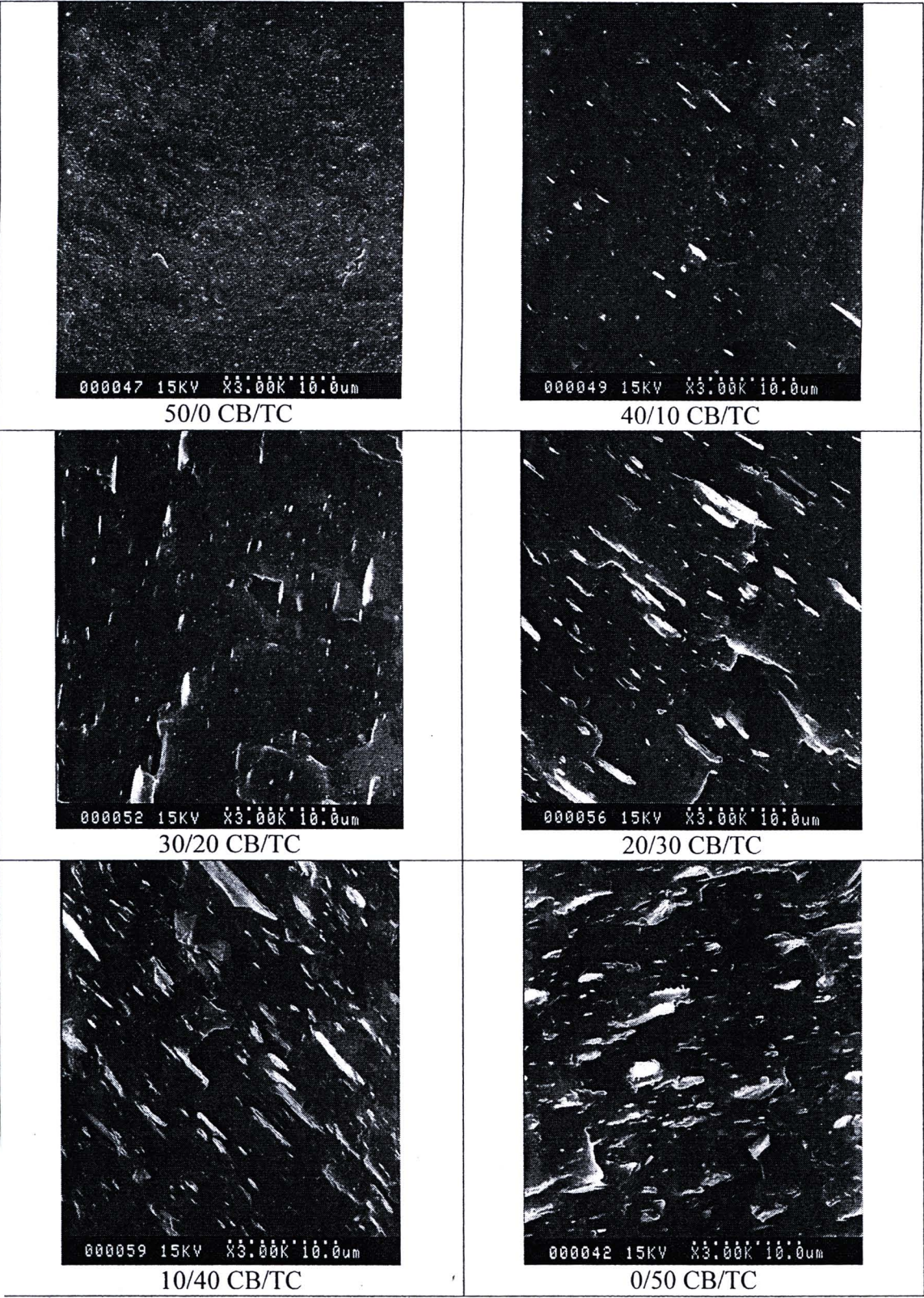




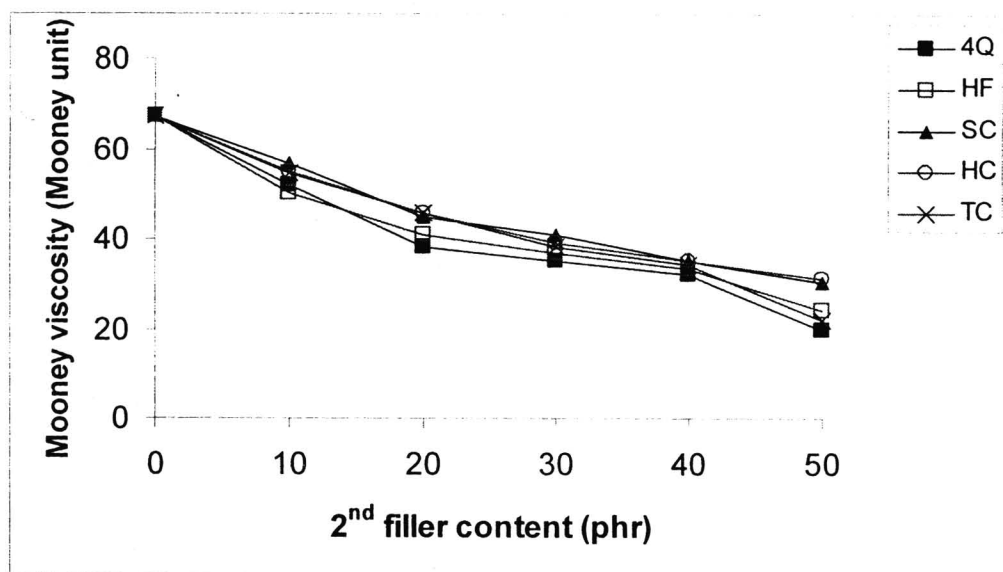
รูปที่ 3 ภาพถ่าย SEM ของยางธรรมชาติที่เติม CB/SC ที่สัดส่วนต่าง ๆ



รูปที่ 4 ภาพถ่าย SEM ของยางธรรมชาติที่เติม CB/HC ที่สัดส่วนต่าง ๆ

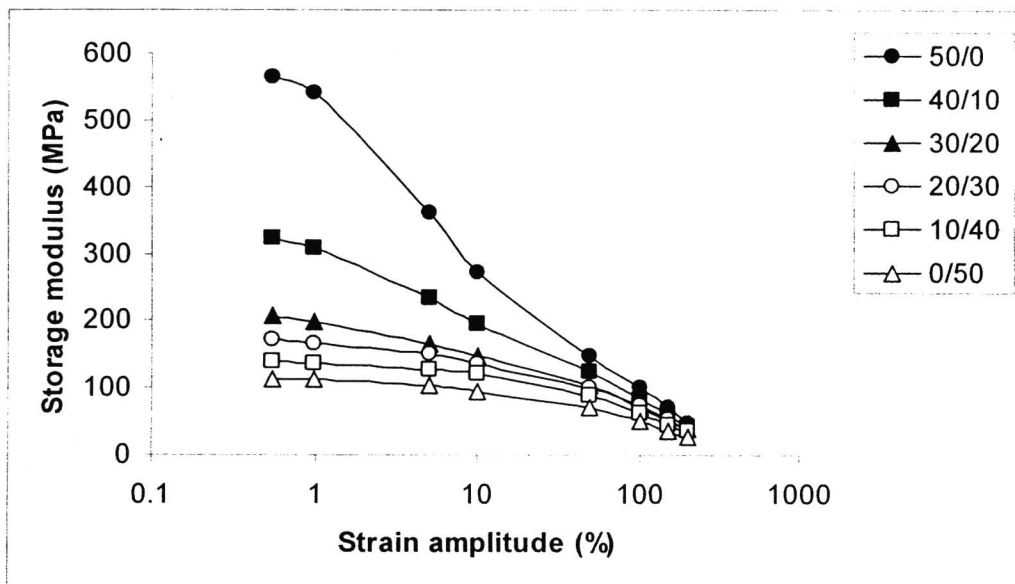


รูปที่ 5 ภาพถ่าย SEM ของยางธรรมชาติที่เติม CB/TC ที่สัดส่วนต่าง ๆ

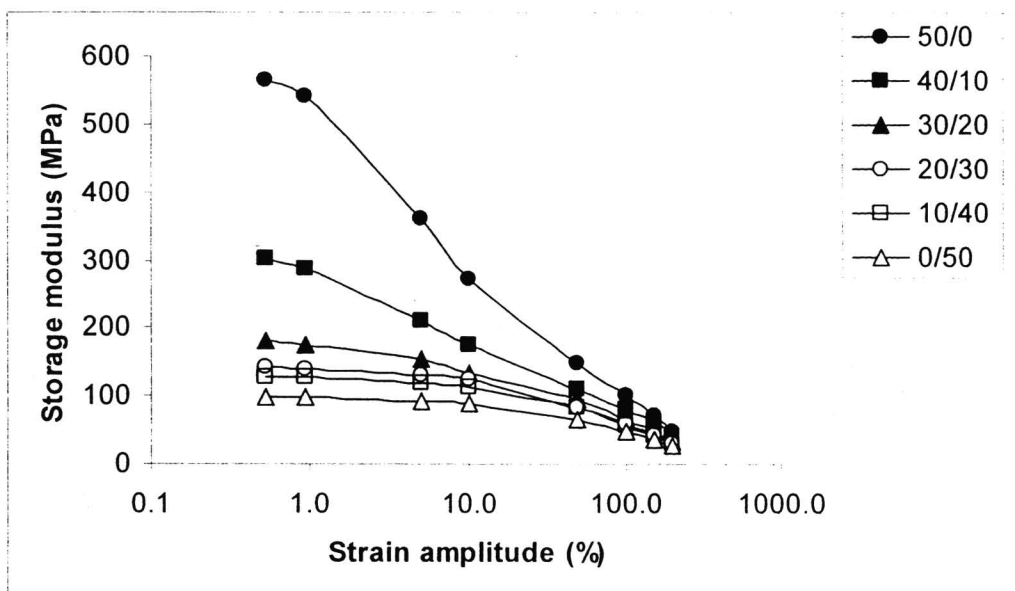


รูปที่ 6 ความหนืดมูนนี่ของยางธรรมชาติเมื่อแปรสัดส่วนของสารตัวเติมผสมระหว่าง
เขม่าดำและ 2nd filler

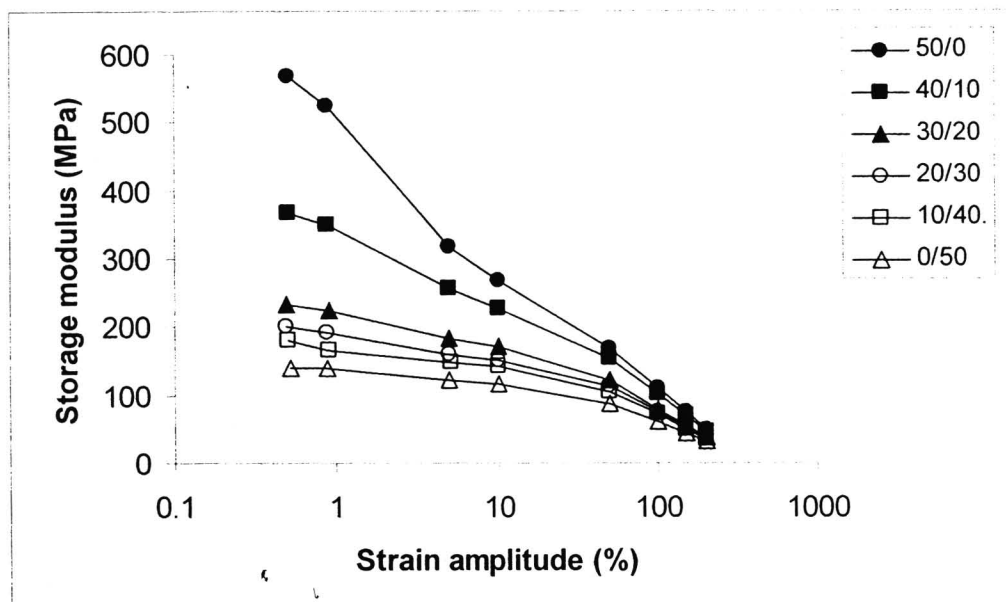
รูปที่ 7-11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง storage modulus และ strain amplitude ของยางธรรมชาติเมื่อใช้เขม่าดำร่วมกับ 4Q, HF, SC, HC และ TC ตามลำดับ ซึ่งพบว่ายางที่มีปริมาณเขม่าดำสูงมีค่า storage modulus ที่ขึ้นอยู่กับการ strain amplitude มากที่สุด โดยสามารถอธิบายได้ว่าเขม่าดำอันตรกิริยาต่อกัน (filler-filler interaction) สูง และอันตรกิริยาระหว่างเขม่าดำถูกทำลายได้มากขึ้นเมื่อ strain สูงขึ้น หรือเรียกว่า Payne effect [18-19] และพบว่า storage modulus ที่ strain ใดๆ มีค่าลดลงเมื่อปริมาณของ 2nd filler เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า storage modulus ที่ strain ต่ำๆ ของยางธรรมชาติที่เติม HC เพียงอย่างเดียวมีค่าสูงกว่ายางที่เติม SC เพียงอย่างเดียว ส่วน storage modulus ที่ strain ต่ำๆ ของยางธรรมชาติที่เติม 4Q, HF และ TC เพียงอย่างเดียวมีค่าใกล้เคียงกัน



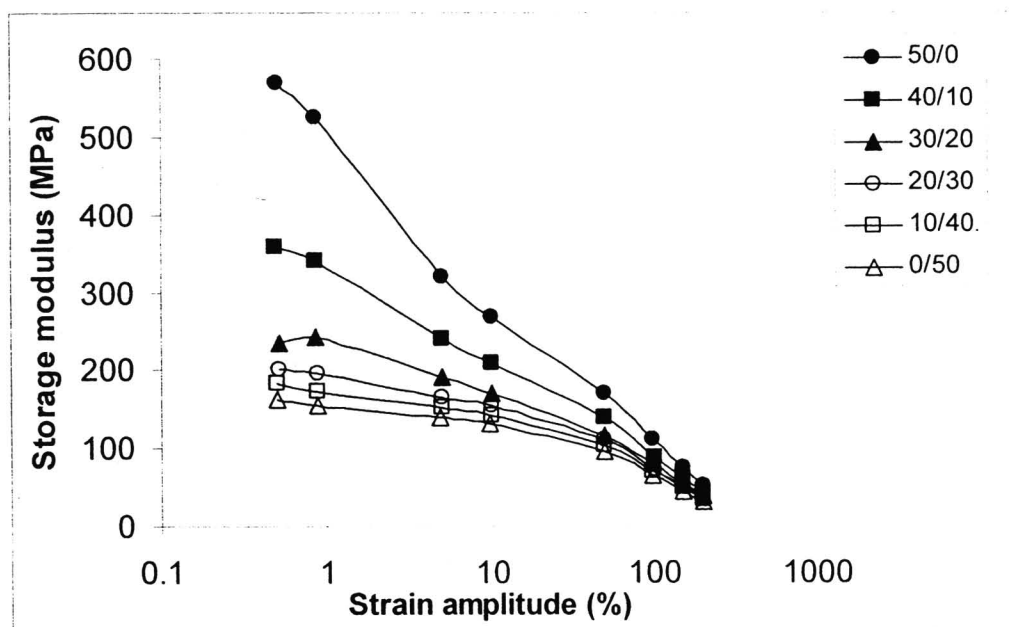
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง storage modulus และ strain amplitude ของยางธรรมชาติ
เมื่อแปรปริมาณสัดส่วนสารตัวเติมผสม CB/4Q



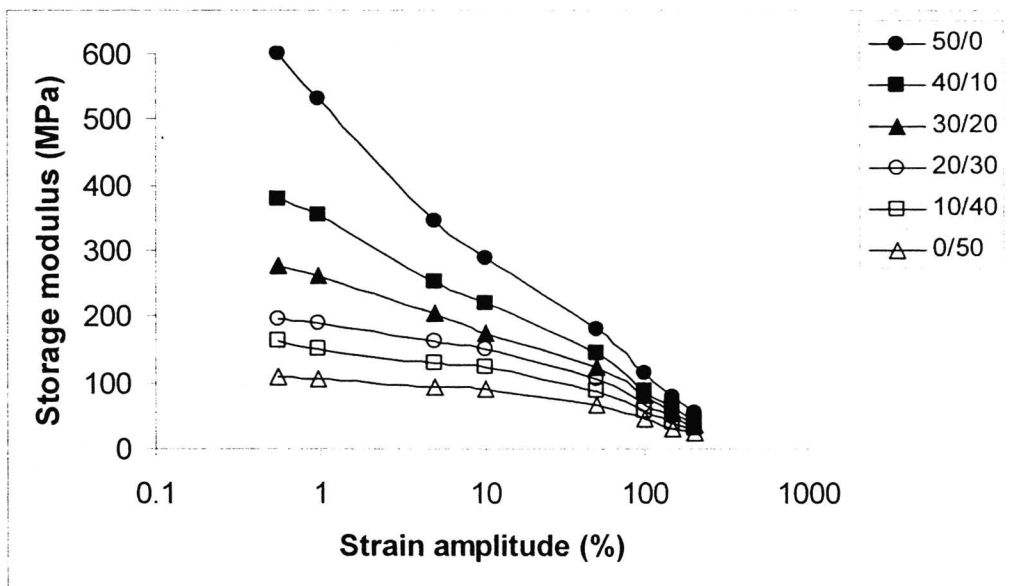
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง storage modulus และ strain amplitude ของยางธรรมชาติ
เมื่อแปรปริมาณสัดส่วนสารตัวเติมผสม CB/HF



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง storage modulus และ strain amplitude ของยางธรรมชาติ
เมื่อแปรปริมาณสัดส่วนสารตัวเติมผสม CB/SC

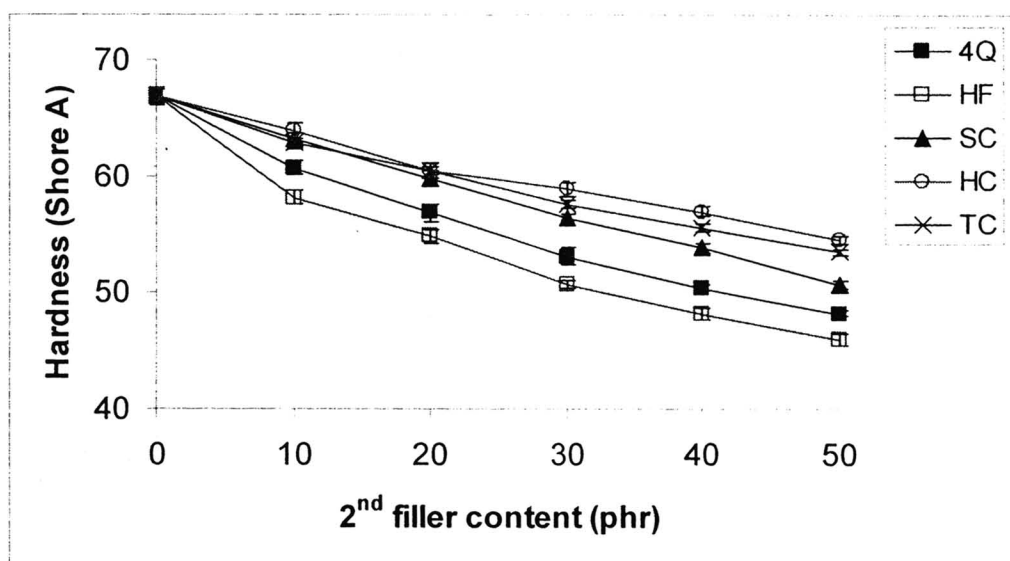


รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่าง storage modulus (G) และ strain amplitude ของยางธรรมชาติ
เมื่อแปรปริมาณสัดส่วนสารตัวเติมผสม CB/HC

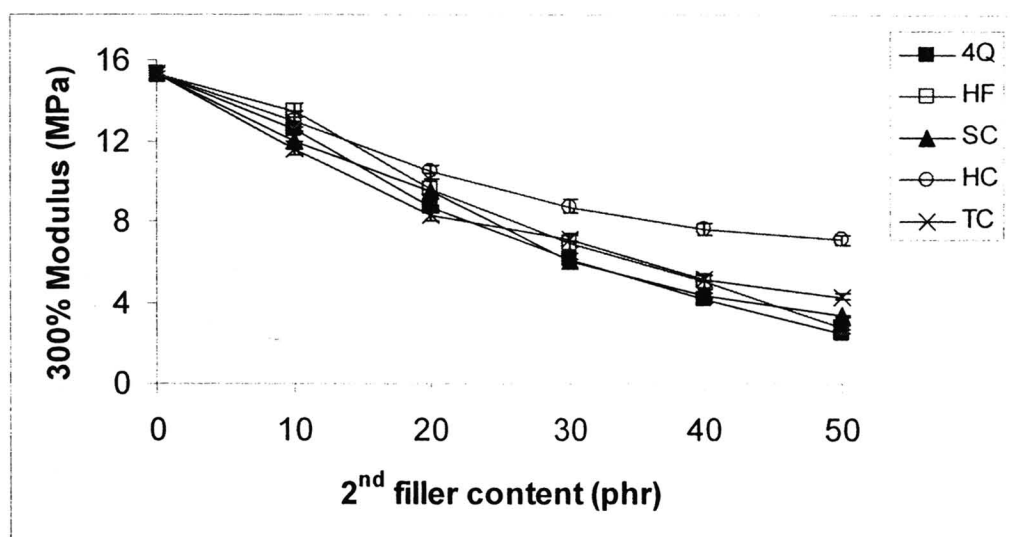


รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่าง storage modulus (G) และ strain amplitude ของยางธรรมชาติ เมื่อแปรปริมาณสัดส่วนสารตัวเติมผสม CB/TC

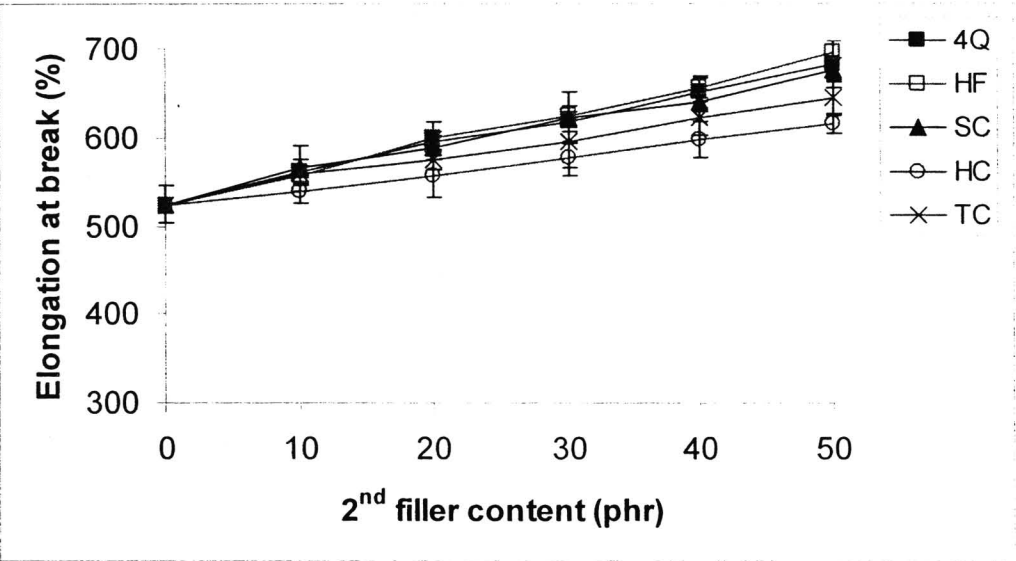
รูปที่ 12 และ 13 แสดงให้เห็นว่า ความแข็งของยางซึ่งแสดงด้วยค่า Hardness และ 300% โมดูลัส (modulus) มีค่าลดลงเมื่อปริมาณของ 2nd filler ในสารตัวเติมผสมเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ระยะยืด ณ จุดขาด (elongation at break) ที่แสดงในรูปที่ 14 มีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณของ 2nd filler ในสารตัวเติมผสมเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า 300% โมดูลัสของยางที่เติม CB/HC สูงกว่ายางที่ใช้เซมาดำร่วมกับ 2nd filler อื่นๆ ในขณะที่ 300% โมดูลัส ของยางที่ใช้เซมาดำร่วมกับ 2nd filler อื่นๆ มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก สำหรับค่า 300% โมดูลัส หลังจากการบ่มแรงที่แสดงในรูปที่ 15 ก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกับก่อนบ่มแรง (ageing) และค่า โมดูลัสหลังจากบ่มแรง ของยางทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากผลของ post curing ที่ทำให้ยางมีปริมาณการ เชื่อมโยง (crosslink density) ของโมเลกุลสูงขึ้น และทำให้ยางยืดได้น้อยลงหลังจากบ่มแรง ดังแสดงในรูปที่



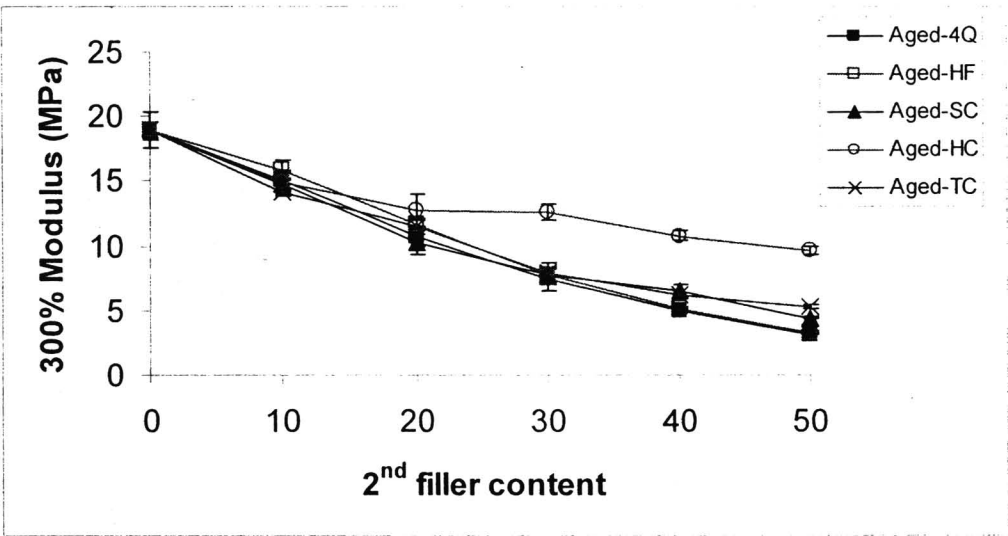
รูปที่ 12 ความแข็งของยางธรรมชาติเมื่อแปรสัดส่วนของสารตัวเติมผสมระหว่างเขม่าดำและ 2nd fillers



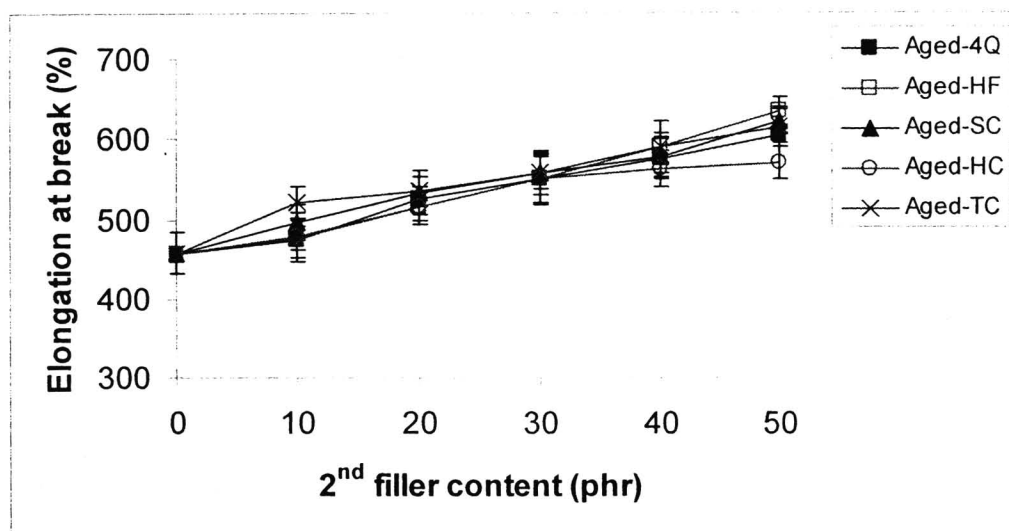
รูปที่ 13 300% โมดูลัสของยางธรรมชาติเมื่อแปรสัดส่วนของสารตัวเติมผสมระหว่างเขม่าดำ และ 2nd fillers ก่อนการบ่มเร่ง



รูปที่ 14 ค่าระยะยืด ณ จุดขาดของยางธรรมชาติเมื่อแปรสัดส่วนของสารตัวเติมผสมระหว่าง เขม่าดำและ 2nd fillers ก่อนการบ่มเร่ง



รูปที่ 15 300% โมดูลัสของยางธรรมชาติเมื่อแปรสัดส่วนของสารตัวเติมผสมระหว่าง เขม่าดำและ 2nd fillers หลังการบ่มเร่ง

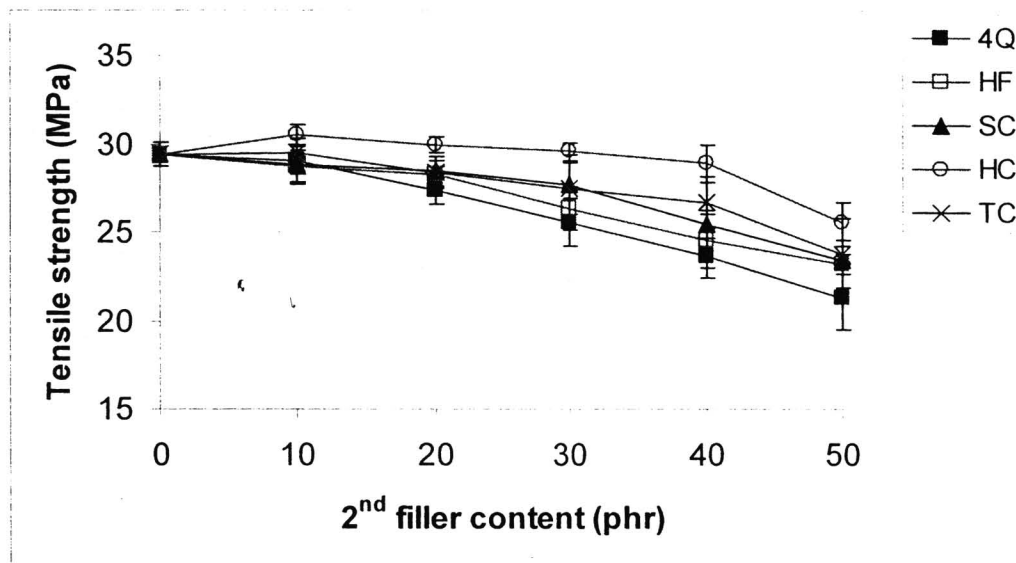


รูปที่ 16 ระยะยืด ณ จุดขาด ของยางธรรมชาติเมื่อแปรสัดส่วนของสารตัวเติมผสมระหว่าง
เขม่าดำและ 2nd fillers หลังการบ่มแรง

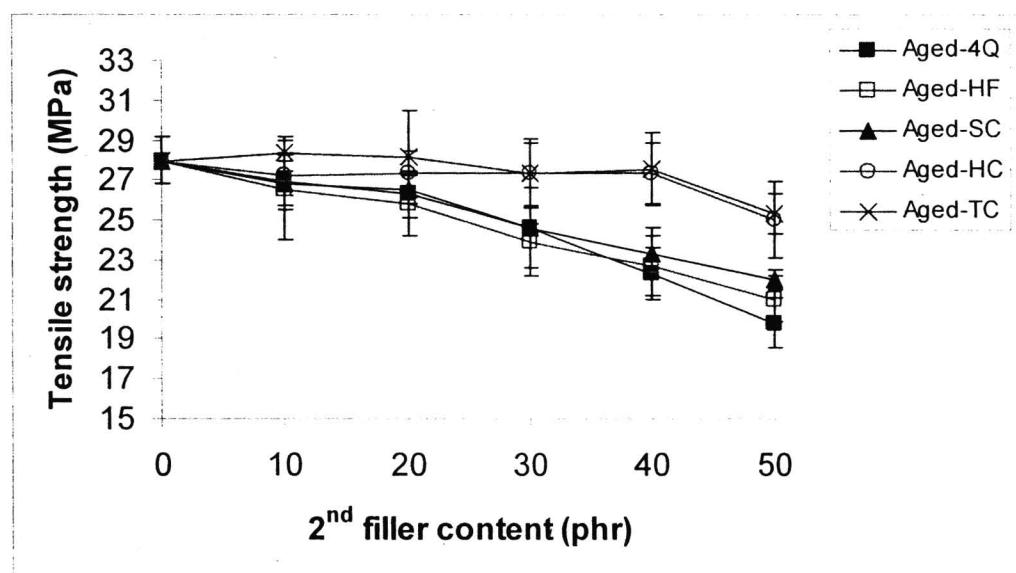
รูปที่ 17 แสดงให้เห็นว่าค่าแรงดึงที่จุดขาด มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของ 2nd filler ในสารตัวเติมผสมเพิ่มขึ้น และผลที่น่าสนใจคือค่าแรงดึงที่จุดขาดของยางที่เติม CB/HF มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก หากปริมาณของ HC ในสารตัวเติมผสมไม่เกิน 40 phr ส่วนค่าแรงดึงที่จุดขาดของยางที่เติม CB/4Q นั้นมีค่าลดลงมากกว่าการเติม 2nd filler ชนิดอื่นๆ เมื่อใช้ 4Q ในสารตัวเติมผสมมากกว่า 10 phr ซึ่งน่าจะเป็นเพราะ 4Q ไม่เกิดอันตรกิริยากับยาง และมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 2nd filler ชนิดอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 1(f) สำหรับค่าแรงดึงที่จุดขาดหลังการบ่มแรง ที่แสดงในรูปที่ 18 ส่วนใหญ่มีค่าลดลง ยกเว้นของยางที่เติม TC ในสูตรมากกว่า 20 phr ที่มีค่าแรงดึงที่จุดขาดก่อนและหลังแรงดึงที่จุดขาดใกล้เคียงกันทั้งนี้อาจจะเนื่องมาจากการเกิด post curing นั้นทำให้ ยางที่เติม TC เกิดการเชื่อมโยงได้มากขึ้นแต่ ปริมาณการเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นนั้นไม่เกินจุด optimum ดังนั้นจึงไม่ทำให้แรงดึงที่จุดขาดลดลง

รูปที่ 19 แสดงค่าความทนต่อการฉีกขาด (tear strength) ซึ่งลดลงอย่างชัดเจนเมื่อปริมาณของ 2nd filler ในสารตัวเติมผสมเพิ่มขึ้น และยางที่เติม CB/HF ให้ค่าความทนต่อการฉีกขาดสูงกว่ายางที่เติม 2nd filler ชนิดอื่นๆ ในขณะที่พบว่ายางที่เติม CB/TC ให้ค่าความทนต่อการฉีกขาดต่ำที่สุด ส่วนยางที่เติม CB/SC, CB/HF และ CB/4Q ให้ค่าความทนต่อการฉีกขาดไม่ต่างกันมากนัก ทั้งนี้อาจกล่าวได้ว่าทั้งขนาดและรูปร่างของสารตัวเติมมีผลต่อค่าความทนต่อการฉีกขาด โดยสารตัวเติมที่มีรูปร่างของอนุภาคกลมและขนาดเล็ก เช่น HF จะให้ค่าความทนต่อการฉีกขาดที่สูงกว่าสารตัวเติมที่มีรูปร่างของอนุภาคกลมและขนาดใหญ่ (เช่น 4Q) หรือมีลักษณะของอนุภาคเป็นแผ่น (เช่น SC, HC และ TC) ส่วนการที่ยางสูตรที่ใช้ CB/HF ให้ค่าความทนต่อการฉีกขาดสูงกว่ายางที่เติม CB/TC ทั้ง ๆ ที่ HC และ TC มีลักษณะของอนุภาคเป็นแผ่นทั้งคู่นั้น อาจจะเนื่องมาจากการที่ HC แฉกตัวได้ดีกว่า TC จึงทำให้กระจายตัวในยางได้ดีกว่า TC ดังแสดง

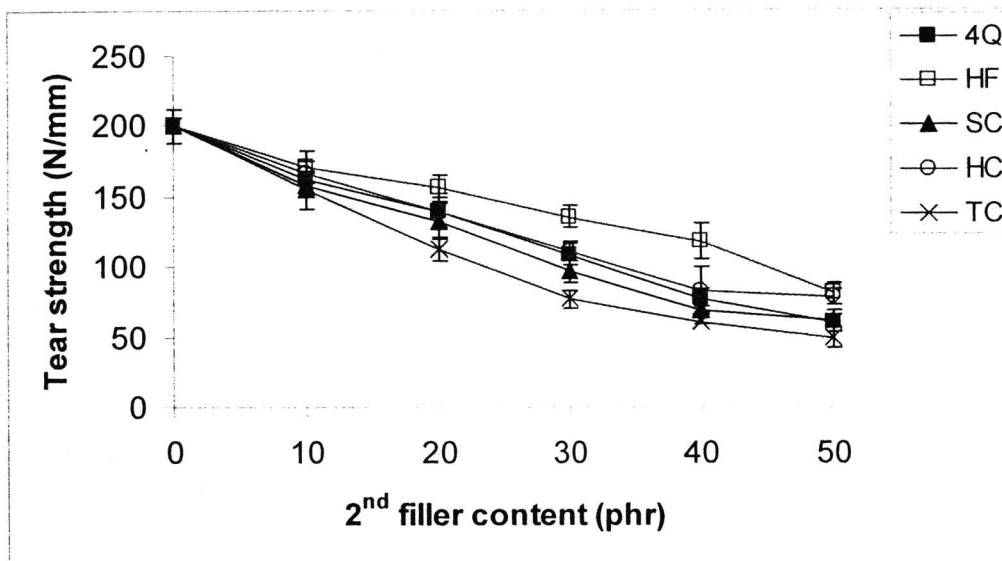
ในภาพถ่าย รูปที่ 4 และ 5 จึงส่งผลให้เกิดอันตรกิริยากับยางได้ดีกว่า TC รูปที่ 20 แสดงให้เห็นว่าค่าการสูญเสียจากการขัดสีมีค่ามากขึ้นเมื่อปริมาณของ 2nd filler ในสารตัวเติมผสมเพิ่มขึ้น เพราะ 2nd filler เหล่านี้เสริมแรงให้แก่ยางได้น้อยกว่าเขม่าดำ และเมื่อเปรียบเทียบผลของการใช้เขม่าดำร่วมกับ 2nd filler ชนิดต่างๆ พบว่า ค่าการสูญเสียจากการขัดสีของยางที่เติม 4Q~HF > TC~SC > HC โดยทั่วไปยางที่มีความแข็งต่ำจะมีการสูญเสียจากการขัดสีสูง [20-21] และผลการทดลองในรูปที่ 12 ก็แสดงให้เห็นว่ายางที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต (4Q และ HF) มีความแข็งต่ำกว่ายางที่เติมทัลคัมและเคลย์



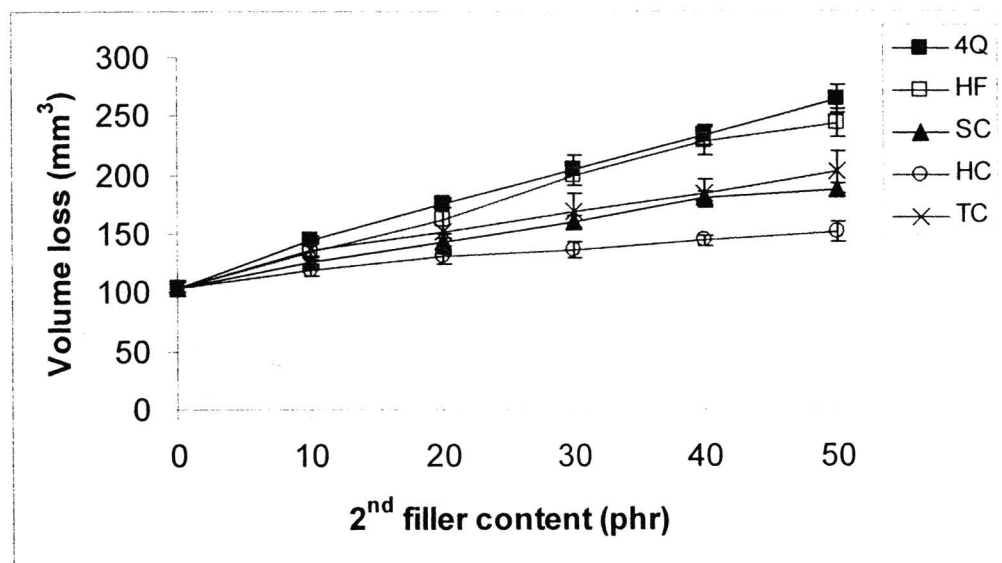
รูปที่ 17 แรงดึงที่จุดขาดของยางธรรมชาติเมื่อแปรสัดส่วนของสารตัวเติมผสมระหว่างเขม่าดำและ 2nd fillers ก่อนการบ่มเร่ง



รูปที่ 18 แรงดึงที่จุดขาดของยางธรรมชาติเมื่อแปรสัดส่วนของสารตัวเติมผสมระหว่างเขม่าดำและ 2nd fillers หลังการบ่มเร่ง



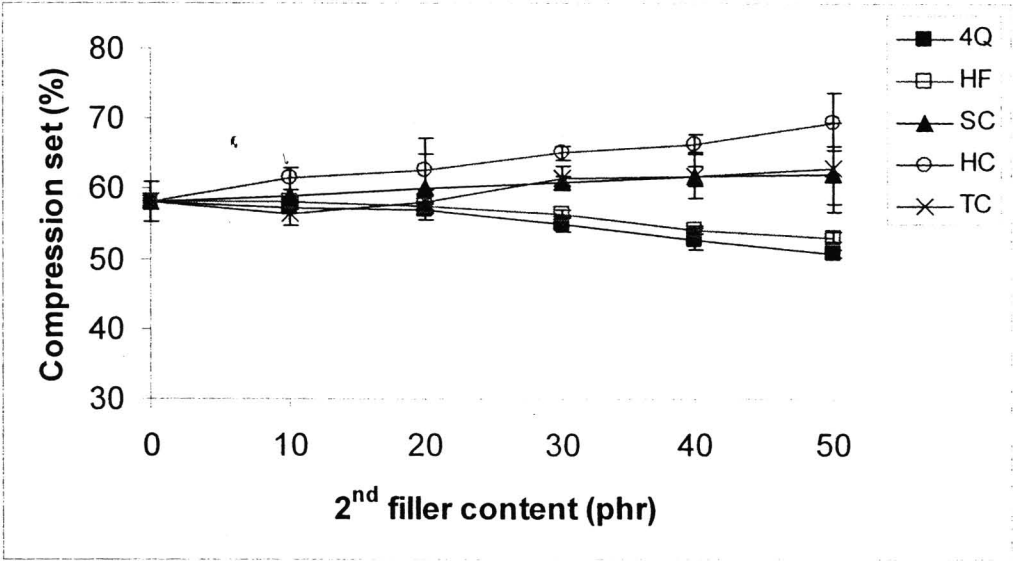
รูปที่ 19 ความทนต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติเมื่อแปรสัดส่วนของสารตัวเติมผสมระหว่างเขม่าดำและ 2nd fillers



รูปที่ 20 ความทนต่อการหดตัวของยางธรรมชาติเมื่อแปรสัดส่วนของสารตัวเติมผสมระหว่างเขม่าดำและ 2nd fillers

สำหรับค่าการเสียรูปจากแรงกด (compression set) ของยางธรรมชาติ ที่แสดงในรูปที่ 21 มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ SC, HC และ TC ในสารตัวเติมผสมเพิ่มขึ้น โดยยางที่เติม HC มีค่าการเสียรูปจากแรงกดสูงที่สุด ในทางกลับกันการเพิ่มปริมาณ 4Q และ HF ในสารตัวเติมผสม ทำให้การเสียรูปจากแรงกดลดลง ทั้งนี้การเสียรูปจากแรงกด ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายชนิด เช่น ปริมาณการเชื่อมโยงของโมเลกุล อันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมและยาง รวมทั้งอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมและสารตัวเติม ในกรณีนี้

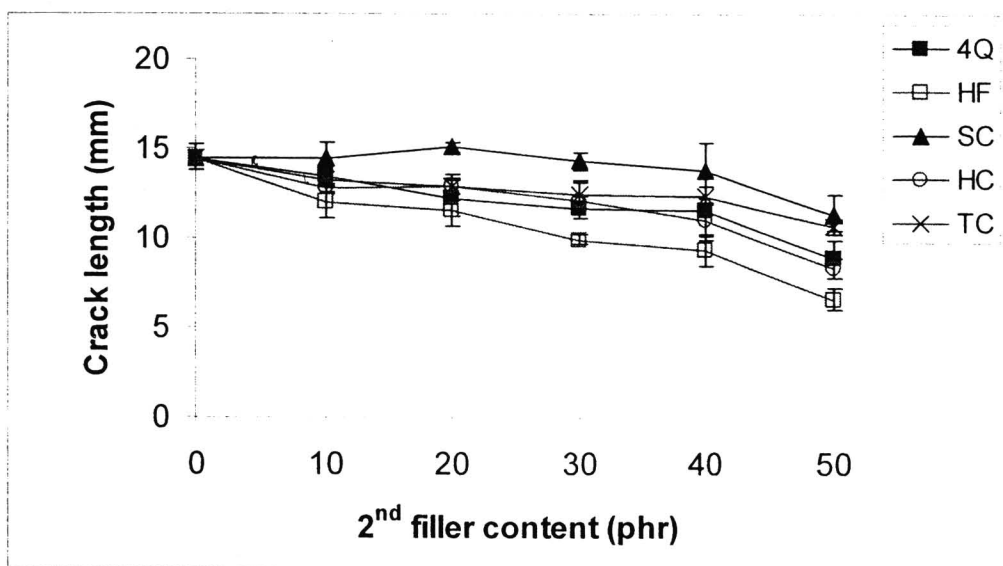
เปรียบเทียบค่าการเสียรูปจากแรงกดที่สัดส่วนของสารตัวเติมเท่ากันใดๆ จะพบว่ายางที่ใช้เขม่าดำร่วมกับเคลย์และทัลคัม มีค่าการเสียรูปจากแรงกดสูงกว่ากรณีที่ใช้แคลเซียมคาร์บอเนต ทั้งนี้อาจจะเนื่องมาจากการที่ยางที่เติมเคลย์และทัลคัม มีปริมาณการเชื่อมโยงของโมเลกุลที่ต่ำกว่ายางที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต เพราะทั้งเคลย์และทัลคัมมีหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างทำให้สามารถดูดซับสารตัวเร่งได้ ซึ่งส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันด้อยกว่ายางที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต นอกจากนี้แคลเซียมคาร์บอเนตมีฤทธิ์เป็นด่างซึ่งสามารถช่วยเร่ง ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ได้ด้วย และอีกสาเหตุหนึ่งอาจเนื่องมาจากการที่โครงสร้างของเคลย์ที่ซ้อนเป็นชั้น ๆ ถูกทำลายเมื่อได้รับแรงกด



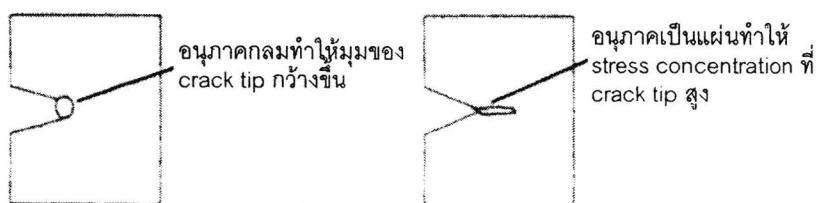
รูปที่ 21 การเสียรูปจากแรงกดของยางธรรมชาติเมื่อแปรสัดส่วนของสารตัวเติมผสมระหว่างเขม่าดำและ 2nd fillers

ส่วนรูปที่ 22 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้สารตัวเติมที่มีปริมาณของ 2nd filler ในสารตัวเติมผสมเพิ่มขึ้นขนาดของรอยแตกของยางเล็กลง (เมื่อยางถูกพับงอจำนวน 20k รอบ) ทั้งนี้เพราะ 2nd filler เหล่านี้เสริมแรงให้แกยางได้น้อยกว่าเขม่าดำ ทำใหยางมีความแข็งแรงลดลง และสามารถเกิดการพับงอได้ง่ายเมื่อได้รับแรง ดังนั้น stress concentration ที่ crack tip ของยางที่มีปริมาณของ 2nd filler ในสารตัวเติมผสมเพิ่มขึ้น จึงต่ำกว่าและส่งผลให้เกิดการขยายขนาดของรอยแตกต่ำกว่ายางที่มีปริมาณสัดส่วนของเขม่าดำสูง [20, 22] แต่เมื่อเปรียบเทียบผลของการเติม 2nd filler ในสารตัวเติมผสมที่มีปริมาณสัดส่วนใด ๆ และมี 2nd filler ไม่เกิน 40 phr พบว่าขนาดของรอยแตกของยางที่เติม CB/SC > CB/TC ~ CB/HC ~ CB/4Q > CB/HF ทั้งๆ ที่ยางที่เติม CB/SC มีโมดูลัสต่ำกว่ายางที่เติม TC และ HC และเมื่อทำการทดลองซ้ำผลการทดลองยังคงแสดงแนวโน้มเช่นเดิม ดังนั้นการที่ยางที่เติม SC มีความทนทานต่อการพับงอ (flex cracking resistance) ต่ำ

กว่ายางที่เติม TC และ HC จึงน่าจะเป็นผลมาจากการที่ SC มีขนาดใหญ่กว่า จึงทำให้เปรียบเสมือนเป็น ตาหนีในยางและเป็นจุดกำเนิดของการเกิดรอยแตกได้ง่ายกว่ายางที่เติม TC และ HC เมื่อเปรียบเทียบที่การใช้ในปริมาณเท่ากัน ส่วนยางที่เติม CB/HF มีความทนทานต่อการบ่งอสูงที่สุด ถึงแม้ว่า HF จะมีกระจายตัวไม่ค่อยดีแต่ก็เป็นยางที่มีค่าความแข็งต่ำกว่ายางที่เติม 2nd filler ชนิดอื่นๆ จึงน่าจะส่งผลให้ stress concentration ที่ crack tip ต่ำกว่ายางที่มีสารตัวเติมอื่นๆ นอกจากนี้เป็นที่ทราบกันดีว่าสารตัวเติมที่มีรูปร่างเป็นแผ่น ทำให้มี stress concentration ที่ crack tip สูงกว่าในกรณีที่มีสารตัวเติมรูปร่างกลม ดังแสดงในรูปที่ 23



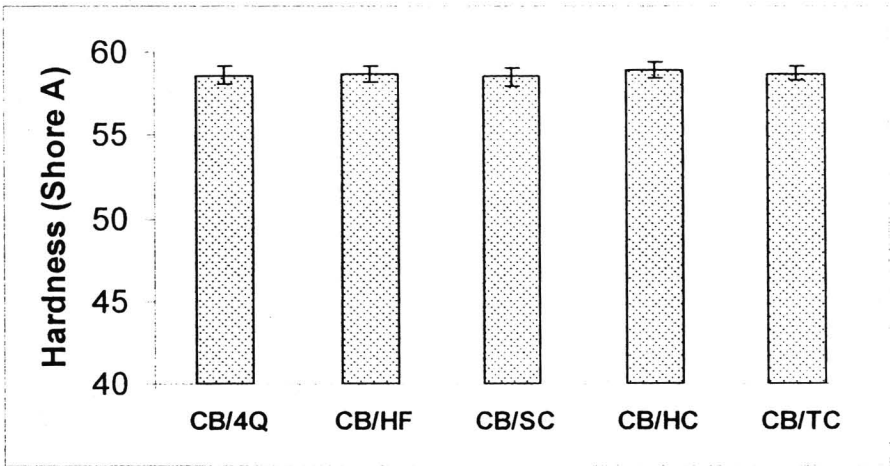
รูปที่ 22 ขนาดของรอยแตก (เมื่อถูกบ่งอจำนวน 20k รอบ) ของยางธรรมชาติเมื่อแปร สัดส่วนของสารตัวเติมผสมระหว่างเขม่าดำและ 2nd fillers



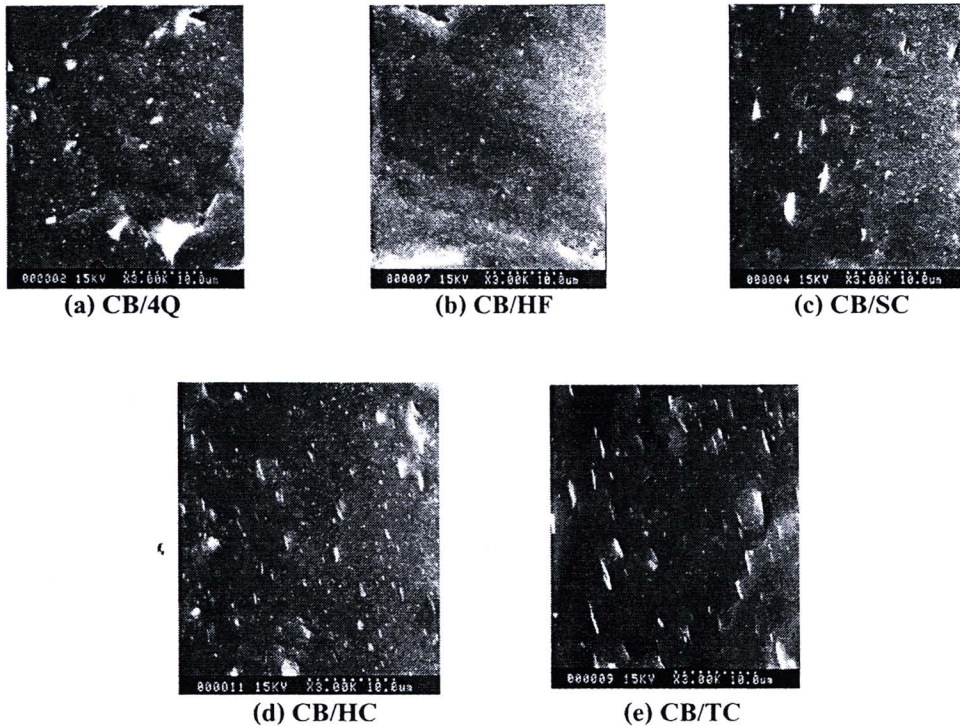
รูปที่ 23 ผลของลักษณะรูปร่างของสารตัวเติมต่อ stress concentration ที่ crack tip

3.2 สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่ใช้เขม่าดำร่วมกับสารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรงหรือกึ่งเสริมแรงชนิดต่างๆ ที่มีความแข็งใกล้เคียงกัน

โดยทั่วไปการออกสูตรใหม่เพื่อลดต้นทุนในโรงงาน สามารถเริ่มต้นด้วยการคำนวณปรับปริมาณสารตัวเติมโดยคงค่าความแข็งของยางไว้ จากนั้นจึงค่อยผสมยางคอมพาวด์เพื่อเตรียมยางวัลคาไนซ์และทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆ ดังนั้นในการทดลองนี้จึงต้องการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่ใช้เขม่าดำร่วมกับสารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรงหรือกึ่งเสริมแรงต่างๆ ที่มีความแข็งใกล้เคียงกัน คือ ประมาณ 60 (Shore A) ซึ่งความแข็งในช่วงนี้ เป็นสเปคความแข็งของผลิตภัณฑ์ยางหลายชนิด เช่น หน้ายางของยางล้อ (tire tread) และท่อยาง (hose) เป็นต้น โดยในการทดลองได้ใช้ปริมาณเขม่าดำเท่ากันทุกสูตรคือ 30 phr และเติมสารตัวเติมอื่นๆ ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต (4Q และ HF) ซอฟท์เคลย์ (SC) และ ฮาร์ดเคลย์ (HC) และทัลคัม (TC) ในปริมาณที่แตกต่างกัน (ดังสูตรที่แสดงในตารางที่ 2.4) เพื่อปรับให้ได้ยางที่มีความแข็งเท่ากันตามต้องการดังแสดงในรูปที่ 24 ซึ่งจะเห็นได้ว่าแต่ละสูตรจะมีปริมาณรวมของสารตัวเติมผสมแตกต่างกัน โดยสูตรที่ใช้ CB/HF มีปริมาณรวมของสารตัวเติมผสมมากที่สุด ภาพถ่าย SEM ที่แสดงในรูปที่ 25 แสดงให้เห็นว่าแม้ HF มีขนาดเล็กกว่า 4Q มาก แต่ HF มักเกาะกลุ่มกันจึงแตกตัวไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นจึงทำให้ต้องใช้ ในปริมาณมากขึ้น เพื่อให้ได้ความแข็งใกล้เคียงกันสูตรอื่นๆ

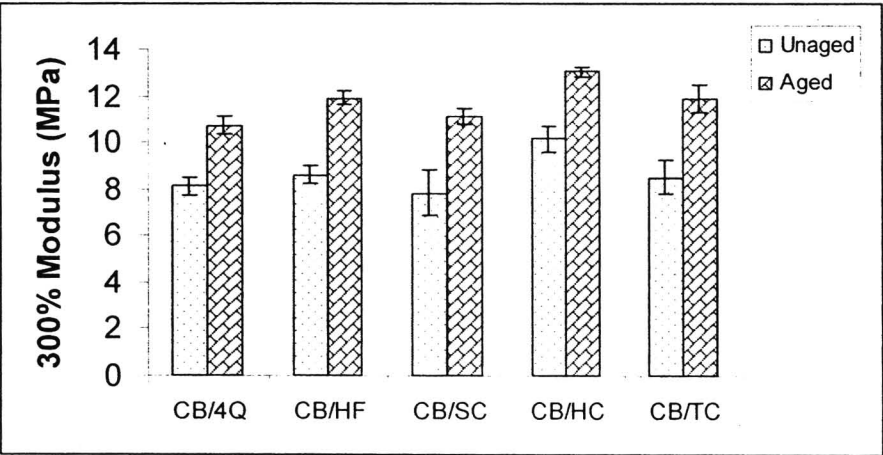


รูปที่ 24 ความแข็งของยางธรรมชาติที่ใช้เขม่าดำร่วมกับ 2nd filler ชนิดต่างๆ

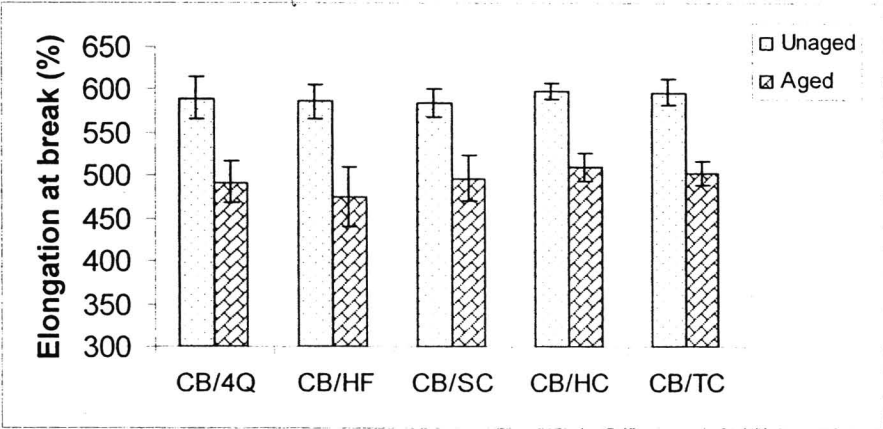


รูปที่ 25 ภาพถ่าย SEM ของ fractured surface ของยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่ใช้
เมมอดำร่วมกับสารตัวเติมชนิดอื่นๆ และเปรียบเทียบที่ความแข็งเท่ากัน

รูปที่ 26 แสดงให้เห็นว่า ถึงแม้ยางแต่ละสูตรจะมีค่าความแข็งใกล้เคียงกันแต่ 300% โมดูลัสก่อนการบ่มแรงของยางสูตรต่างๆ แตกต่างกัน โดยโมดูลัสของยางที่เติม CB/HC > CB/TC ~ CB/HF > CB/SC ~ CB/4Q ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า CB/HC เสริมแรงได้สูงที่สุด ส่วน CB/SC และ CB/4Q เสริมแรงได้น้อยที่สุด อย่างไรก็ตามยางทุกสูตรมีค่าระยะยืดที่จุดขาดก็ไม่แตกต่างกันมากนักดังแสดงในรูปที่ 27 และเมื่อนำยางไปบ่มแรง พบว่าโมดูลัสของยางทุกสูตรมีค่าเพิ่มขึ้น โดยแนวโน้มของโมดูลัสยังคงเป็นเช่นเดิมคือโมดูลัสของยางที่เติม CB/HC > CB/TC ~ CB/HF > CB/SC ~ CB/4Q ส่วนค่าระยะยืดที่จุดขาดยางแต่ละสูตรก็ยังคงใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วงของ error bar เดียวกัน



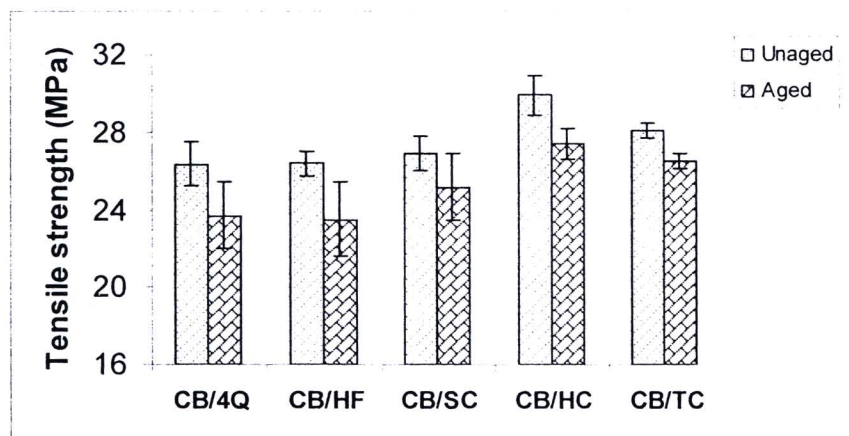
รูปที่ 26 300% โมดูลัสของยางธรรมชาติที่ใช้เขม่าดำร่วมกับ 2nd filler ชนิดต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบที่ความแข็งใกล้เคียงกัน ก่อนและหลังการบ่มเร่ง



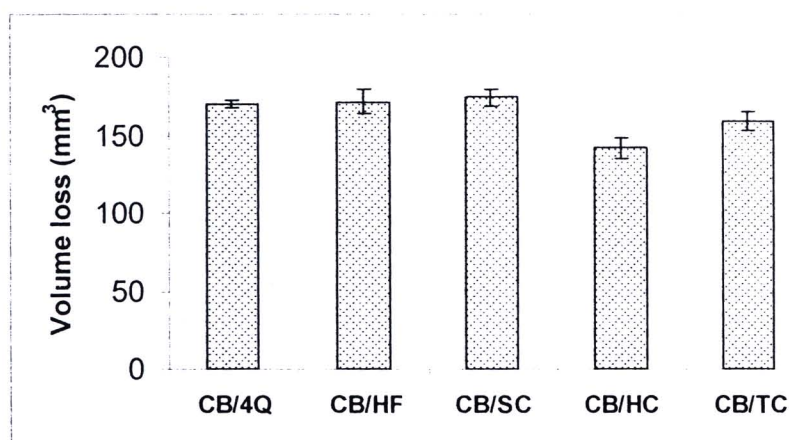
รูปที่ 27 ระยะยืดที่จุดขาดของยางธรรมชาติที่ใช้เขม่าดำร่วมกับ 2nd filler ชนิดต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบที่ความแข็งใกล้เคียงกัน ก่อนและหลังการบ่มเร่ง

รูปที่ 28 เปรียบเทียบค่าแรงดึงที่จุดขาดของยางสูตรต่างๆ เมื่อมีความแข็งใกล้เคียงกัน ซึ่งพบว่ายางที่เติม CB/HC มีค่าแรงดึงที่จุดขาดสูงที่สุดทั้งก่อนและหลังบ่มเร่ง โดยค่าแรงดึงที่จุดขาดก่อนบ่มเร่งของยางที่เติม CB/HC > CB/TC > CB/SC ~ CB/HF ~ CB/4Q และค่าแรงดึงที่จุดขาดหลังบ่มเร่งของยางที่เติม CB/HC > CB/TC > CB/SC > CB/HF ~ CB/4Q ซึ่งชี้ให้เห็นว่ายางที่เติมสารตัวเติมประเภทเคลย์และทลค์ัมสามารถทนความร้อนได้ดีกว่าการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต นอกจากนี้ผลการทดลองในรูปที่ 29 แสดงให้เห็นว่าค่าความทนต่อการขัดสีของยางที่เติม CB/HC > CB/TC > CB/SC ~ CB/HF ~ CB/4Q การที่ยางที่เติม CB/HC มีค่าความทนต่อการขัดสีสูงที่สุดหรือมีการสูญเสียจากการขัดสีต่ำที่สุดอาจจะเป็นผล

มาจากการที่ยางที่เติม CB/HC มีการแตกตัวของสารตัวเติมดี ดังแสดงในภาพถ่าย SEM ในรูปที่ 25 และมีอันตรกริยากับยางได้ดี โดยเห็นได้จากการที่ยางที่เติม CB/HC มีค่าโมดูลัสสูงที่สุด



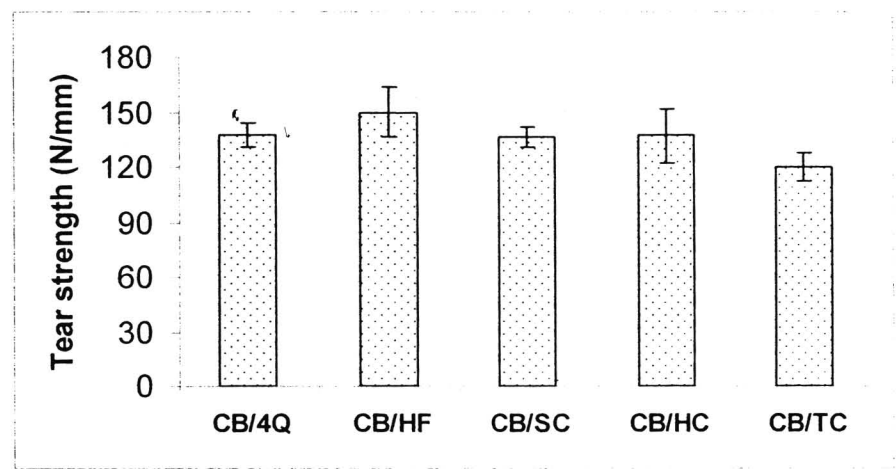
รูปที่ 28 แรงดึงที่จุดขาดของยางธรรมชาติที่ใช้เขม่าดำร่วมกับ 2nd filler ชนิดต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบที่ความแข็งใกล้เคียงกัน ก่อนและหลังการบ่มเร่ง



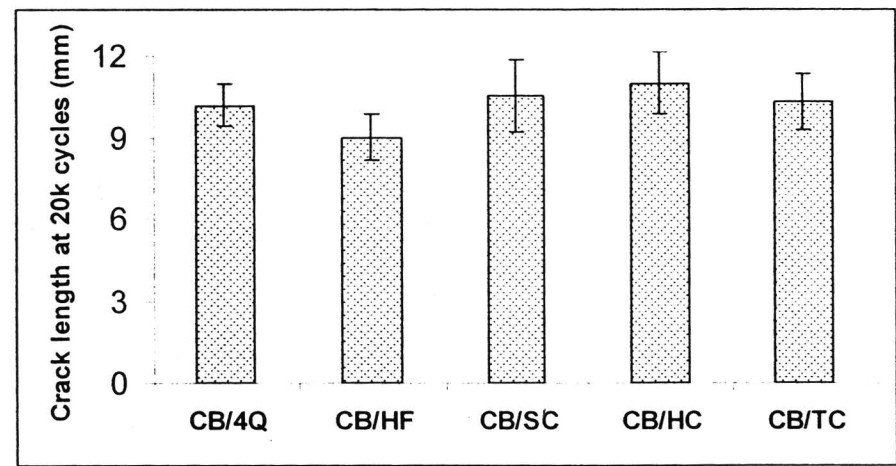
รูปที่ 29 ปริมาณการสูญเสียจากการขัดสีของยางธรรมชาติที่ใช้เขม่าดำร่วมกับ 2nd filler ชนิดต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบที่ความแข็งใกล้เคียงกัน

สำหรับ รูปที่ 30 แสดงให้เห็นว่าค่าความทนต่อการฉีกขาดของยางที่เติม CB/HF > CB/4Q ~ CB/SC ~ CB/HC > CB/TC การที่ยางที่เติม CB/HF มีค่าความทนต่อการฉีกขาดสูงกว่ายางที่เติม CB/4Q เพราะ HF เสริมแรงได้ดีกว่า 4Q ที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ อีกทั้งสูตรที่ใช้ CB/HF มีปริมาณรวมของสารตัวเติมมากกว่า นอกจากนี้การที่ HF มีรูปร่างกลมและมีปริมาณมากกว่าเคลย์และทัลคัมนั้น จะทำให้สามารถกีดขวางการฉีกขาดได้ดีกว่า ส่วนการที่ยางที่เติม CB/HC มีค่าความทนต่อการฉีกขาดสูงกว่ายางที่เติม CB/TC อาจเป็นเพราะ HC มีอันตรกริยากับยางมากกว่า TC ดังจะเห็นได้จากค่าโมดูลัสที่สูงกว่า ส่วนรูปที่ 31 แสดง

ขนาดของรอยแตกของยางที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆ เมื่อผ่านการรับแรงแบบพั้งอจำนวน 20,000 รอบ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบที่ความแข็งเท่ากันนี้ ความทนต่อการพั้งอของยางที่เติม CB/HF > CB/4Q ~ CB/SC ~ CB/TC > CB/HC ในที่นี้ยางที่เติม CB/HF มีค่าความทนต่อการพั้งอสูงกว่ายางที่เติม CB/4Q และ CB/SC ทั้งๆ ที่ยางที่เติม CB/4Q และ CB/SC มีโมดูลัสต่ำกว่า ทั้งนี้เพราะ 4Q มีขนาดอนุภาคใหญ่ทำให้เป็นเกิดเป็นตำหนิในยาง ส่วน SC มีรูปร่างเป็นแผ่นจึงทำให้มี stress concentration ที่ crack tip สูง ดังแสดงในรูปที่ 23 ส่วนยางที่เติม CB/HC มีโมดูลัสสูงที่สุดอีกทั้ง HC มีลักษณะของอนุภาคเป็นแผ่นจึงมีค่าความทนต่อการพั้งอต่ำที่สุด ผลการทดลองบ่งชี้ว่ายางที่มีโมดูลัสต่ำจะมีความทนต่อการพั้งอสูง และยางที่เติมสารตัวเติมที่มีรูปร่างกลมและขนาดเล็กจะกีดขวางการขยายของรอยแตกได้ดีกว่ายางที่เติมสารตัวเติมที่มีขนาดใหญ่หรือมีรูปร่างเป็นแผ่น

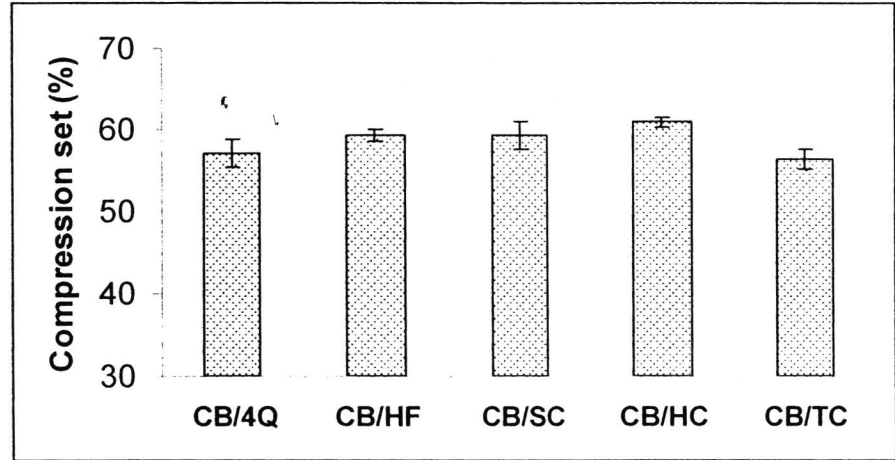


รูปที่ 30 ความทนต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติที่ใช้ผสมมาดำร่วมกับ 2nd filler ชนิดต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบที่ความแข็งใกล้เคียงกัน

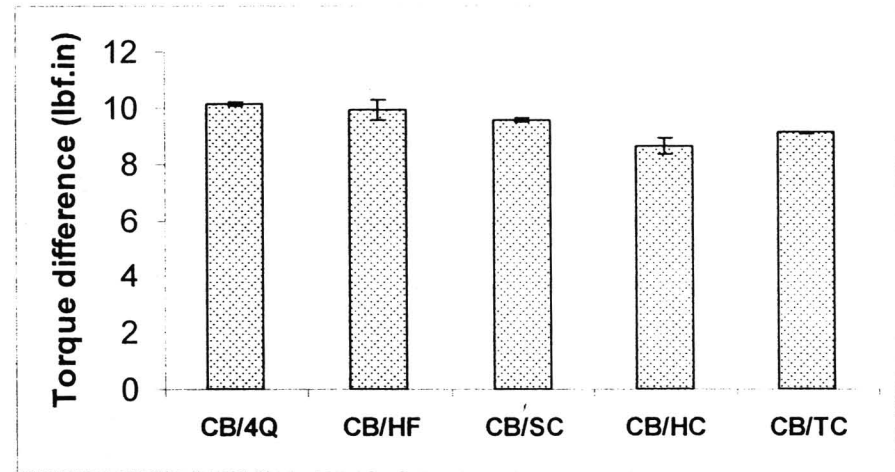


รูปที่ 31 การขยายขนาดของรอยแตกของยางธรรมชาติที่ใช้ผสมมาดำร่วมกับ 2nd filler ชนิดต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบที่ความแข็งใกล้เคียงกัน

สำหรับค่าการเสียรูปจากแรงกด (compression set) ที่แสดงในรูปที่ 32 พบว่ามีแนวโน้มดังนี้คือ $CB/HC > CB/SC \sim CB/HF \sim CB/4Q > CB/TC$ ซึ่งการที่ยางที่เติม CB/HC มีค่าการเสียรูปจากแรงกดสูงที่สุด อาจเกิดจากการที่ยางที่เติม CB/HC มีปริมาณการเชื่อมโยงของโมเลกุลที่ต่ำกว่ายางสูตรอื่นๆ ดังจะเห็นได้จากการที่ค่าความแตกต่างของแรงบิด (torque difference) ที่แสดงในรูปที่ 33 ของยางที่เติม CB/HC มีค่าต่ำที่สุด ส่วนการที่ยางที่เติม CB/TC มีค่าการเสียรูปจากแรงกดค่อนข้างต่ำกว่ายางสูตรอื่นๆ อาจจะเนื่องมาจากยางที่เติม CB/TC มีปริมาณสารตัวเติมรวมต่ำกว่ายางที่เติม CB/SC, CB/HF และ CB/4Q จึงทำให้มีความเป็น elasticity ที่สูงกว่า และเมื่อเปรียบเทียบกับยางที่เติม CB/HC พบว่ายางที่เติม CB/TC มีค่าความแตกต่างของแรงบิดสูงกว่าซึ่งบ่งชี้ว่ามีปริมาณการเชื่อมโยงของโมเลกุลสูงกว่า จึงทำให้ยางที่เติม CB/TC มีค่าการเสียรูปจากแรงกดต่ำกว่าที่ยางที่เติม CB/HC



รูปที่ 32 การเสียรูปจากแรงกดของยางธรรมชาติที่ใช้เมาดำร่วมกับ 2nd filler ชนิดต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบที่ความแข็งใกล้เคียงกัน



รูปที่ 33 ความแตกต่างของแรงบิดยางธรรมชาติที่ใช้เมาดำร่วมกับ 2nd filler ชนิดต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบที่ความแข็งใกล้เคียงกัน