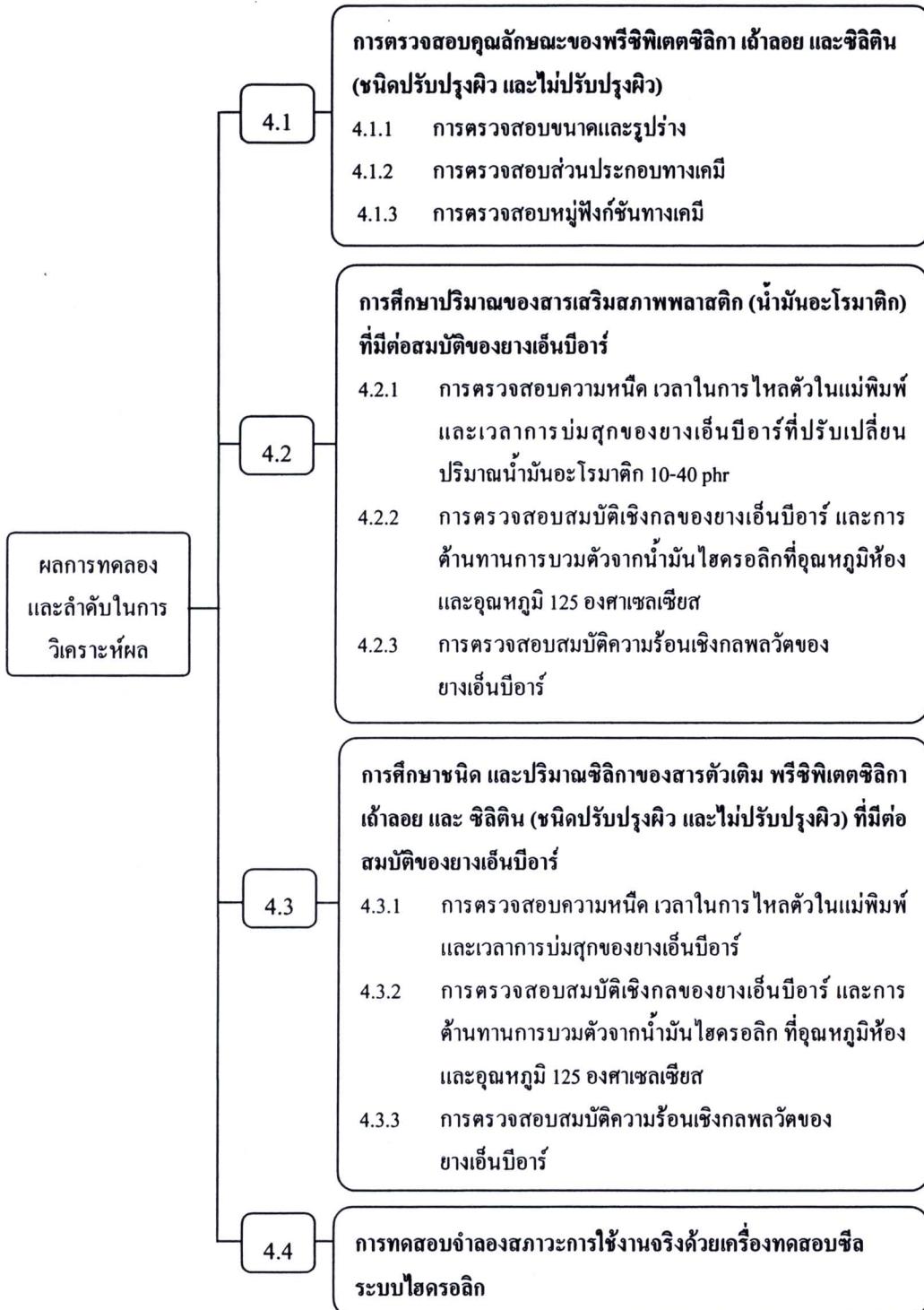


บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ผลการทดลองทั้งหมดในภาพรวม และลำดับในการวิเคราะห์ผลการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลำดับผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

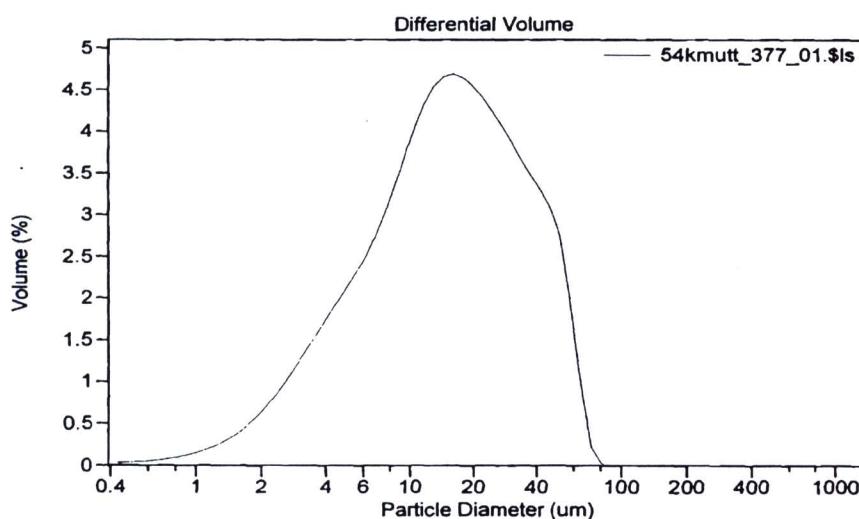
4.1 การตรวจสอบคุณลักษณะของพรีซิพิเตตซิลิกา ฝ้าลอย และซิลิติน (ชนิดปรับปรุงผิวและไม่ปรับปรุงผิว)

4.1.1 การตรวจสอบขนาด และรูปร่าง

งานในส่วนนี้ เป็นการศึกษาลักษณะด้านขนาด และรูปร่างของสารตัวเติมพรีซิพิเตตซิลิกา ฝ้าลอย และซิลิติน ดังแสดงในรูปที่ 4.2-4.4

4.1.1.1 ขนาด และรูปร่างของพรีซิพิเตตซิลิกา

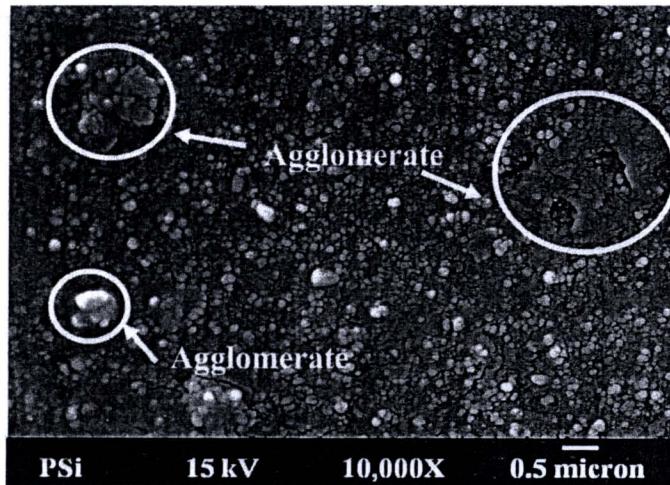
การตรวจสอบขนาดของพรีซิพิเตตซิลิกาด้วยเครื่อง LS Particle size analyzer และตรวจสอบรูปร่าง การกระจายตัวของพรีซิพิเตตซิลิกาในยางเอ็นบีอาร์ ด้วยเทคนิค SEM ดังแสดงรูปที่ 4.2-4.3



รูปที่ 4.2 การตรวจสอบขนาดอนุภาคของพรีซิพิเตตซิลิกาด้วยเครื่อง LS Particle size analyzer

รูปที่ 4.2 แสดงขนาดอนุภาคของพรีซิพิเตตซิลิกา พบว่า อนุภาคของพรีซิพิเตตซิลิกาส่วนใหญ่มีขนาด 15.19 ไมโครเมตร ซึ่งจากการตรวจสอบรูปร่างพรีซิพิเตตซิลิกาด้วยเทคนิค SEM กำลังขยาย 10,000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่า พรีซิพิเตตซิลิกามีลักษณะรูปร่างค่อนข้างกลม มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในยางเอ็นบีอาร์ นอกจากนี้ พบว่า อนุภาคของพรีซิพิเตตซิลิกามีการเกาะกลุ่มกันเป็น

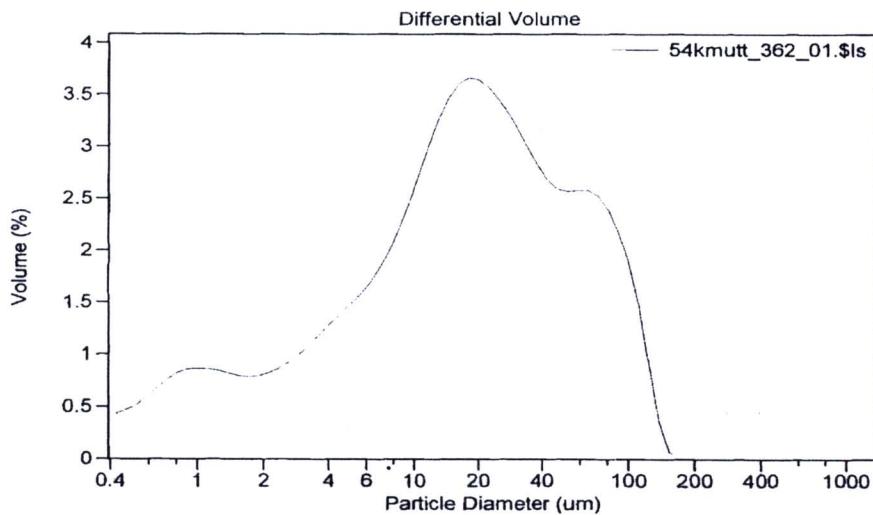
อนุภาคขนาดใหญ่ (Agglomerate) ที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคซิลิกา (Filler-filler interaction) ด้วยกันเอง



รูปที่ 4.3 ลักษณะรูปร่างอนุภาคพรีซิพิเตดซิลิกาด้วยเทคนิค SEM (กำลังขยาย 10,000 เท่า)

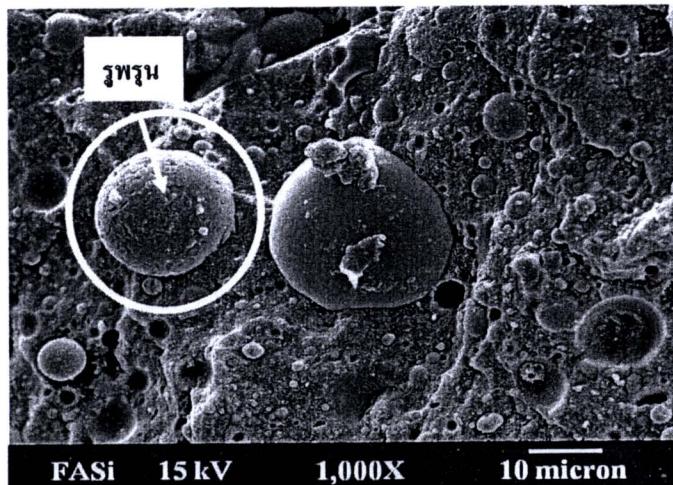
4.1.1.2 ขนาดและรูปร่างของเถ้าลอย

การตรวจสอบขนาดของเถ้าลอยด้วยเครื่อง LS Particle size analyzer และตรวจสอบรูปร่างการกระจายตัวของเถ้าลอยในยางเอ็นบีอาร์ ด้วยเทคนิค SEM ดังแสดงรูปที่ 4.4-4.5



รูปที่ 4.4 การตรวจสอบขนาดอนุภาคของเถ้าลอยด้วยเครื่อง LS Particle size analyzer

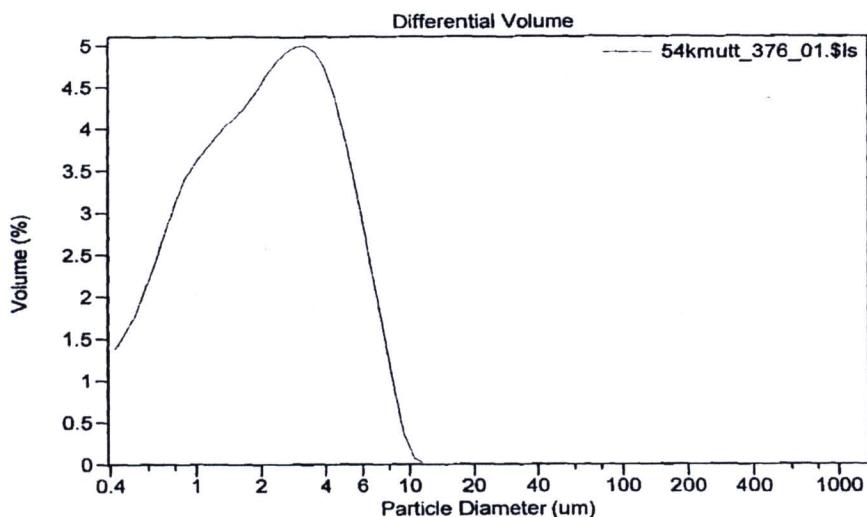
จากรูปที่ 4.4 แสดงขนาดอนุภาคของถ้ำลอย พบว่า อนุภาคของถ้ำลอยส่วนใหญ่มีขนาด 17.79 ไมโครเมตร สำหรับการตรวจสอบลักษณะรูปร่างถ้ำลอยจากแม่เมาะด้วยเทคนิค SEM กำลังขยาย 1,000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่า ถ้ำลอยมีลักษณะรูปร่างค่อนข้างกลม และที่ผิวอนุภาคขนาดใหญ่ของถ้ำลอยมีความเป็นรูพรุน



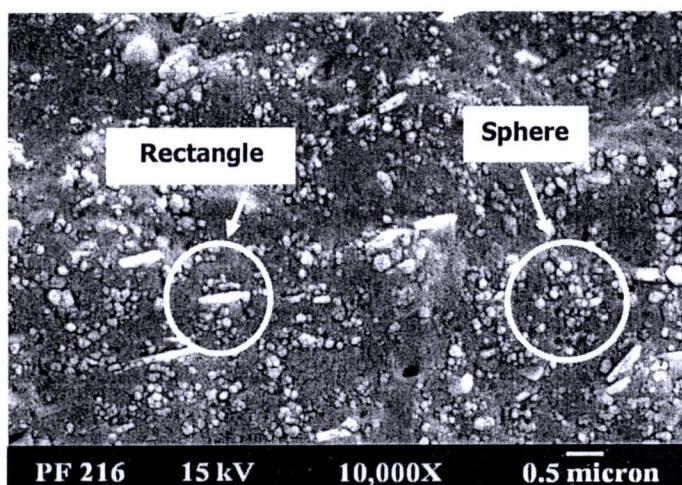
รูปที่ 4.5 ลักษณะรูปร่างอนุภาคถ้ำลอยด้วยเทคนิค SEM (กำลังขยาย 1,000 เท่า)

4.1.1.3 ขนาดและรูปร่างของซิลิดิน

การตรวจสอบขนาดของซิลิดินด้วยเครื่อง LS Particle size analyzer และตรวจสอบรูปร่างการกระจายตัวของซิลิดินในยางเอ็นบีอาร์ ด้วยเทคนิค SEM ดังแสดงรูปที่ 4.6-4.7



รูปที่ 4.6 การตรวจสอบขนาดอนุภาคของซิลิตินด้วยเครื่อง LS Particle size analyzer



รูปที่ 4.7 ลักษณะรูปร่างอนุภาคซิลิตินด้วยเทคนิค SEM (กำลังขยาย 10,000 เท่า)

รูปที่ 4.6 แสดงขนาดอนุภาคของซิลิติน พบว่า อนุภาคของซิลิตินส่วนใหญ่มีขนาด 2.16 ไมโครเมตร ส่วนลักษณะรูปร่างอนุภาคซิลิตินที่มาจากแร่ Quartz และแร่ Kaolinite จากบริษัท เป็นไมเยอร์ เคมี คอล (ที) จำกัด ประเทศไทย ตรวจสอบด้วยเทคนิค SEM กำลังขยาย 10,000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่า ซิลิตินมีลักษณะรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าและค่อนข้างกลมคล้ายกับอนุภาคของพริชปีเตด ซิลิกา

4.1.2 การตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีของพรีซิพิตเตตซิลิกา ซิลิติน และเถ้าลอย

การตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีของสารตัวเติมกลุ่มซิลิกาด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence Spectrometer; XRF พบว่า พรีซิพิตเตตซิลิกามีส่วนประกอบของซิลิคอนไดออกไซด์หรือซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก ปริมาณ 98.77 เปอร์เซ็นต์ สำหรับซิลิติน และเถ้าลอยมีส่วนประกอบของซิลิคอนไดออกไซด์เป็นส่วนประกอบหลักเช่นเดียวกัน และมีส่วนประกอบของกลุ่มโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ โดยซิลิตินมีส่วนประกอบของซิลิกาปริมาณ 72.6-73.5 เปอร์เซ็นต์ และมีอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ปริมาณ 12.9-15.2 เปอร์เซ็นต์ และเถ้าลอยมีส่วนประกอบของซิลิกาที่ปริมาณสัดส่วน 30.1 เปอร์เซ็นต์ และมีส่วนประกอบของกลุ่มโลหะออกไซด์ ได้แก่ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) 18.4 เปอร์เซ็นต์ เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) 18.4 เปอร์เซ็นต์ และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) 21.4 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงตารางที่ 4.1

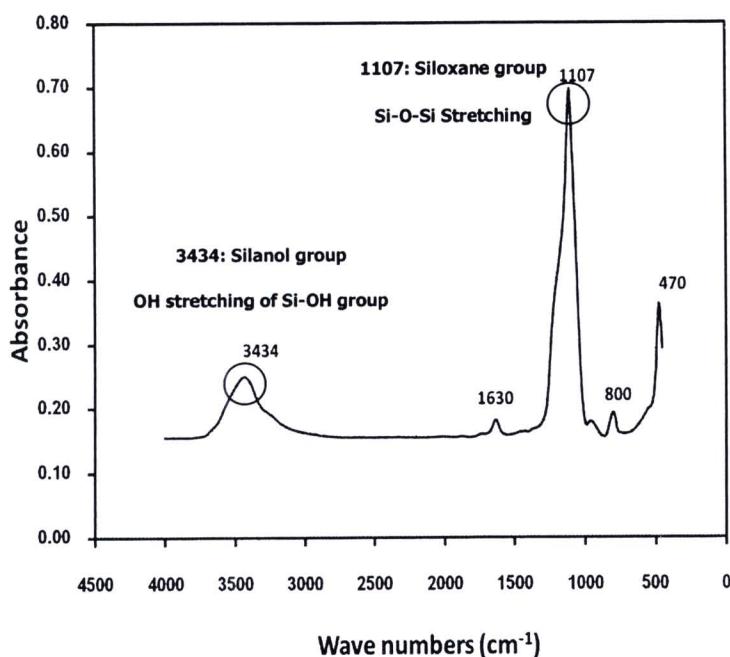
ตารางที่ 4.1 ส่วนประกอบทางเคมีของสารตัวเติมกลุ่มซิลิกา

ส่วนประกอบ	ปริมาณส่วนประกอบ (%)			
	พรีซิพิตเตตซิลิกา	ซิลิติน (ปรับปรุงผิว)	ซิลิติน (ไม่ปรับปรุงผิว)	เถ้าลอย
ซิลิคอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide; SiO_2)	98.77	72.60	73.50	30.10
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide; Al_2O_3)	-	12.90	15.20	18.40
เหล็กออกไซด์ (Iron oxide; Fe_2O_3)	-	0.81	0.93	18.40
แคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide; CaO)	-	0.16	0.12	21.40
แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide; MgO)	-	0.11	0.08	2.04
โพแทสเซียมออกไซด์ (Potassium oxide; K_2O)	-	0.46	0.35	2.75
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide; SO_2)	-	0.99	0.02	1.85
สารประกอบอื่นๆ	1.23	11.97	9.80	5.06

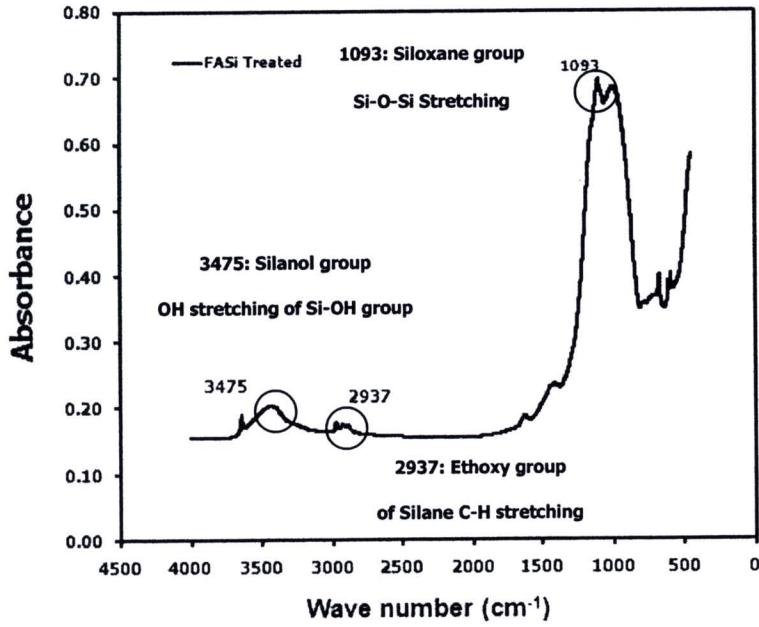
4.1.3 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของ พรีซิพิตเตดซิลิกา etailoy และซิลิติน (ชนิดปรับปรุงผิว และไม่ปรับปรุงผิว)

การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของพรีซิพิตเตดซิลิกา โดยใช้เทคนิค FTIR ดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่า ตำแหน่งสเปกตรัมการยืดของพันธะ Si-O-Si ที่เลขคลื่น $1000-1100\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล และตำแหน่งสเปกตรัม $3400-3500\text{ cm}^{-1}$ ที่มีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล [13]

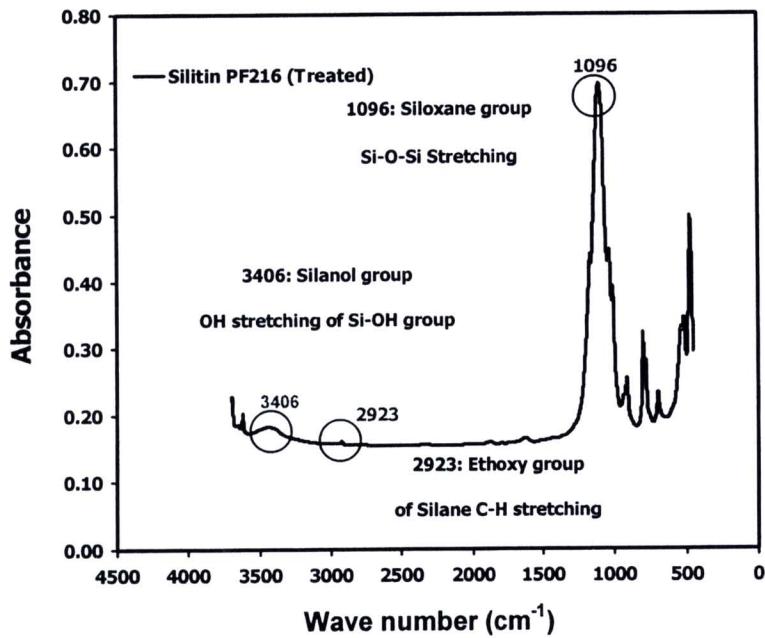
ส่วน รูปที่ 4.9-4.11 แสดงสเปกตรัมของetailoyที่ปรับปรุงผิว และซิลิติน (ชนิดปรับปรุงผิวและไม่ปรับปรุงผิว) โดยใช้เทคนิค FTIR พบว่า etailoyและซิลิติน (ชนิดปรับปรุงผิวและไม่ปรับปรุงผิว) มีตำแหน่งสเปกตรัมการยืดของพันธะ Si-O-Si ที่เลขคลื่น $1000-1100\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล และตำแหน่งสเปกตรัม $3400-3500\text{ cm}^{-1}$ ที่มีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล นอกจากนี้ พบว่า ตำแหน่งสเปกตรัมการยืดของพันธะ C-H ที่เลขคลื่น $2800 - 3000\text{ cm}^{-1}$ จากหมู่เอทอกซีของสารคู่ควบไฮดรอกซิล ซึ่งมาจากการดูดซับของสารคู่ควบไฮดรอกซิลที่ผิวซิลิกาของetailoyที่ปรับปรุงผิว แต่ไม่พบในซิลิตินชนิดไม่ปรับปรุงผิว ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Marrone และคณะ [49]



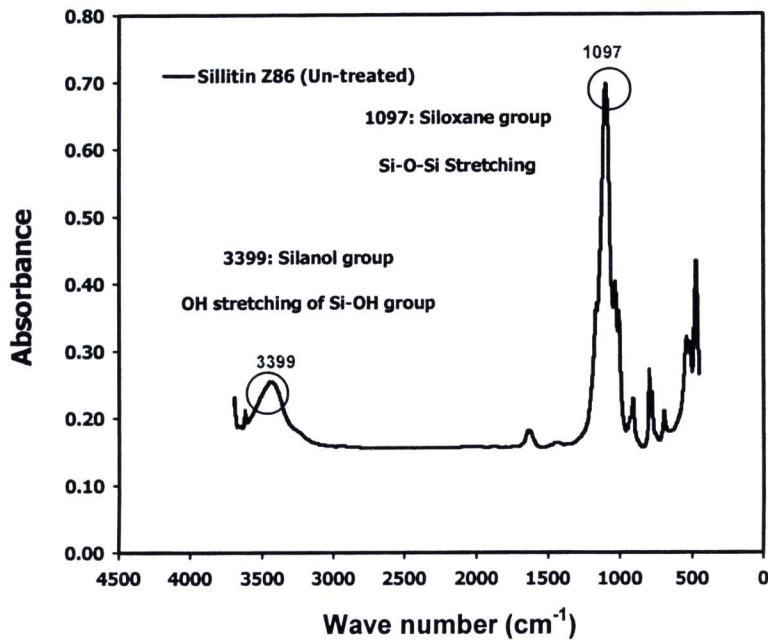
รูปที่ 4.8 สเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของพรีซิพิตเตดซิลิกา [13]



รูปที่ 4.9 สเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของแก้วลอยชนิดที่ปรับปรุงผิว



รูปที่ 4.10 สเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของซิลิตินชนิดที่ปรับปรุงผิว

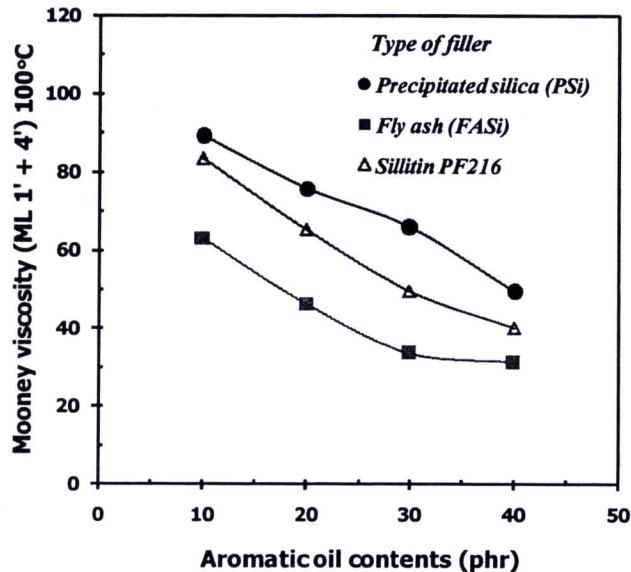


รูปที่ 4.11 สเปกตรัมของหมูฟังกัซันทางเคมีของซิลิตินชนิดที่ไม่ปรับปรุงผิว

4.2 การศึกษาปริมาณของสารเสริมสภาพพลาสติก (น้ำมันอะโรมาติก) ที่มีต่อสมบัติของยางเอ็นบีอาร์

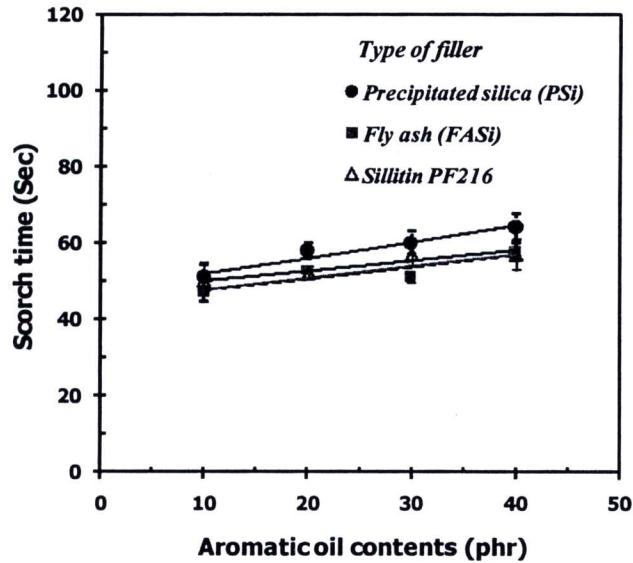
งานในส่วนนี้ ศึกษาปริมาณของสารเสริมสภาพพลาสติก (น้ำมันอะโรมาติก) ที่เติมในยางเอ็นบีอาร์ ดังนี้ 10 20 30 และ 40 phr โดยมีผงเขม่าดำเป็นสารเติมแต่งหลัก ที่ปริมาณ 50 phr และมีการเติมสารตัวเติมกลุ่มซิลิกา ดังนี้ สารตัวเติมฟริชิตเตตซิลิกา; PSi เถ้าลอย; FASi และซิลิตินชนิดปรับปรุงผิว; เกรด PF216 ที่ปริมาณซิลิกาในสารตัวเติม 50 phr ที่มีผลต่อสมบัติการไหลและการบ่มสุก สมบัติเชิงกลด้านความแข็ง สมบัติการกลับคืนตัวเมื่อได้รับแรงกดอัด การต้านทานต่อการขีดสี สมบัติความร้อนเชิงกลพลวัต และการบวมตัวในน้ำมันของยางเอ็นบีอาร์ที่อุณหภูมิห้อง (25-30 องศาเซลเซียส) และอุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส

4.2.1 การตรวจสอบความหนืด เวลาในการไหลตัวในแม่พิมพ์ และเวลาการบ่มสุกของยางเอ็นบีอาร์ที่มีปริมาณน้ำมันอะโรมาติก

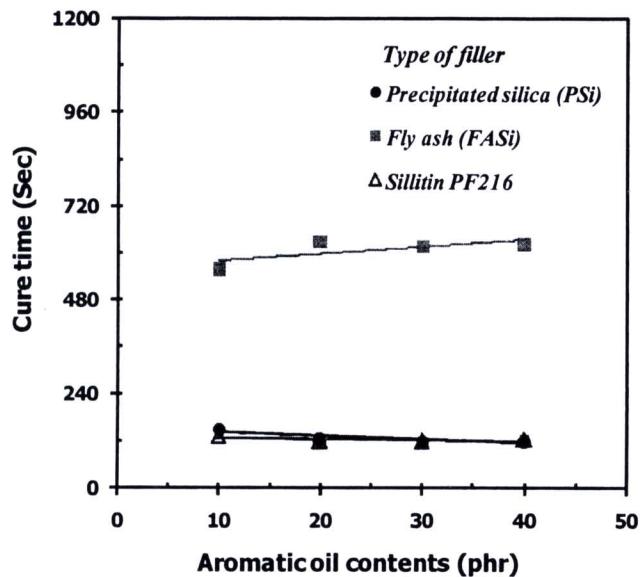


รูปที่ 4.12 อิทธิพลของปริมาณน้ำมันอะโรมาติกที่มีต่อความหนืดของยางเอ็นบีอาร์ที่มีสารตัวเติมพรีซิพิเตตซิลิกา เถ้าลอย และซิลิตินชนิดปรับปรุงผิว

รูปที่ 4.12 แสดงอิทธิพลของปริมาณน้ำมันอะโรมาติก 10-40 phr ที่มีต่อความหนืดของยางเอ็นบีอาร์ที่มีสารตัวเติมพรีซิพิเตตซิลิกา เถ้าลอย และซิลิตินชนิดปรับปรุงผิว พบว่า เมื่อปริมาณน้ำมันอะโรมาติกเพิ่มขึ้นความหนืดของยางเอ็นบีอาร์ลดลง เนื่องจาก น้ำมันอะโรมาติกลดแรงเสียดทานระหว่างโมเลกุลของสายโซ่ของสายโซ่ของยางเกิดการเลื่อนไถลได้ทำให้ยางเอ็นบีอาร์มีความหนืดลดลง [50] นอกจากนี้ พบว่า ยางเอ็นบีอาร์ที่เติมสารตัวเติมพรีซิพิเตตซิลิกามีความหนืดมากกว่าการเติมซิลิตินและเถ้าลอย เนื่องจาก พรีซิพิเตตซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นที่ผิวของอนุภาคมากทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกับอนุภาคของพรีซิพิเตตซิลิกาเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน ความหนืดของยางจึงมากกว่าซิลิติน ส่วนอนุภาคเถ้าลอยมีลักษณะค่อนข้างกลมไหลตัวในยางได้ง่ายทำให้ยางมีความหนืดต่ำ [1]



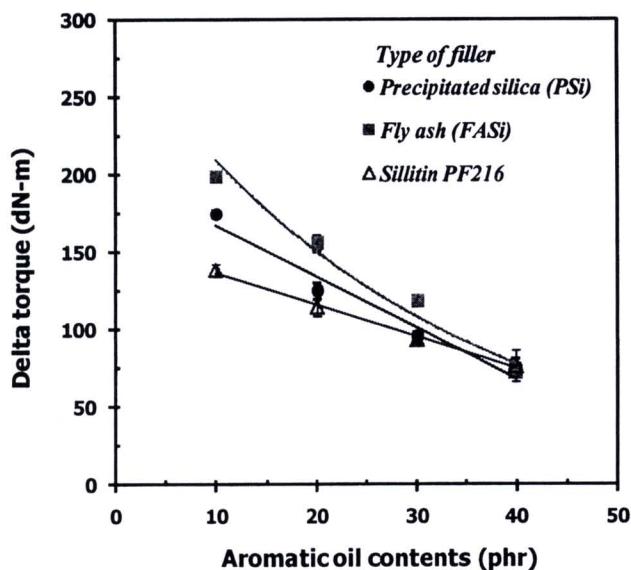
รูปที่ 4.13 อิทธิพลของปริมาณน้ำมันอะโรมาติกที่มีต่อเวลาการไหลตัวในแม่พิมพ์ของยางเอ็นบีอาร์ที่มีสารตัวเติมพรีซิพิเตตซิลิกา เถ้าลอย และซิลิตินชนิดปรับปรุงผิว



รูปที่ 4.14 อิทธิพลของปริมาณน้ำมันอะโรมาติกที่มีต่อเวลาบ่มสุกของยางเอ็นบีอาร์ที่มีสารตัวเติมพรีซิพิเตตซิลิกา เถ้าลอย และซิลิตินชนิดปรับปรุงผิว

ส่วนรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 แสดงเวลาการไหลตัวในแม่พิมพ์ และเวลาการบ่มสุกของยางเอ็นบีอาร์ที่เติมน้ำมันอะโรมาติกที่ปริมาณ 10-40 phr และมีสารตัวเติมพรีซิพิเตตซิลิกา เถ้าลอย และซิลิตินชนิดปรับปรุงผิว พบว่า การเติมปริมาณน้ำมันอะโรมาติกลงในยางเอ็นบีอาร์เพิ่มขึ้น ไม่ส่งผลต่อเวลาการ

ไหลตัวในแม่พิมพ์ และเวลาการบ่มสุกของยางเอ็นบีอาร์ สำหรับเวลาในการบ่มสุกของยางเอ็นบีอาร์ที่เติมเถ้าลอยมากกว่าการเติมพรีซิพิเตตซิลิกาและซิลิตินชนิดปรับปรุงผิว ทั้งนี้เนื่องจาก เถ้าลอยมีส่วนประกอบของโลหะออกไซด์ ที่สามารถเกิดการหน่วงปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของสายโซ่กับส่วนที่มีขั้ว (-CN groups) ของยางเอ็นบีอาร์จึงส่งผลทำให้เวลาการบ่มสุกยางเพิ่มขึ้น [1, 2, 13]



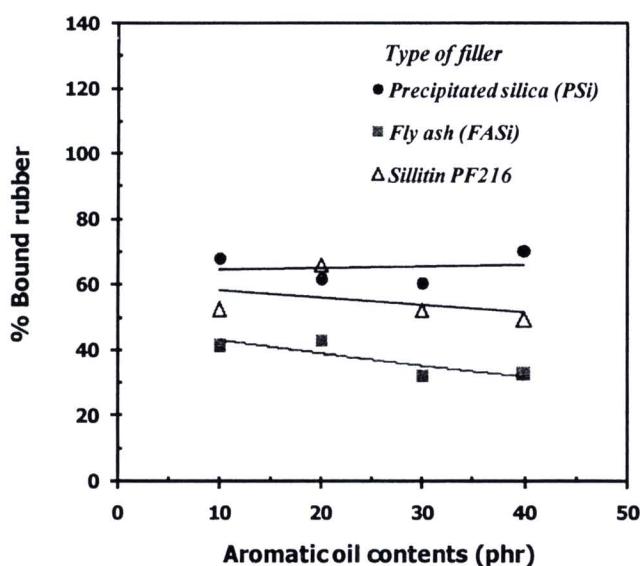
รูปที่ 4.15 อิทธิพลของปริมาณน้ำมันอะโรมาติกที่มีต่อค่าผลต่างแรงบิดของยางเอ็นบีอาร์ที่มีสารตัวเติมพรีซิพิเตตซิลิกา เถ้าลอย และซิลิตินชนิดปรับปรุงผิว

จากรูปที่ 4.15 พบว่า เมื่อปริมาณน้ำมันอะโรมาติกในยางเอ็นบีอาร์เพิ่มขึ้น ค่าผลต่างแรงบิดของยางเอ็นบีอาร์ที่มีสารตัวเติมพรีซิพิเตตซิลิกา เถ้าลอย และซิลิตินชนิดปรับปรุงผิวมีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก น้ำมันอะโรมาติกเป็นสารเสริมสภาพพลาสติกที่ทำให้ยางเอ็นบีอาร์มีความนุ่ม จึงส่งผลให้ค่าผลต่างแรงบิดของยางเอ็นบีอาร์ลดลง [50] สังเกตได้จากค่าแรงบิดสูงสุด (MH) และ ค่าแรงบิดต่ำสุด (ML) ดังแสดงในตารางที่ 4.2 นอกจากนี้ พบว่า ค่าผลต่างแรงบิดของยางเอ็นบีอาร์ที่เติมเถ้าลอยมากกว่ายางเอ็นบีอาร์ที่เติมพรีซิพิเตตซิลิกา เนื่องจาก การเติมสารตัวเติมเถ้าลอยที่มีลักษณะกลมไหลตัวในยางได้ง่าย [1] ทำให้มีค่าแรงบิดต่ำสุดของยางเอ็นบีอาร์น้อยกว่าการเติมพรีซิพิเตตซิลิกา ส่วนค่าแรงบิดสูงสุดของยางเอ็นบีอาร์ที่เติมเถ้าลอยมากกว่าพรีซิพิเตตซิลิกา ทั้งนี้เนื่องจากในสารตัวเติมเถ้าลอยมีปริมาณซิลิกาน้อยกว่าสารตัวเติมพรีซิพิเตตซิลิกาจึงต้องเติมสารตัวเติมเถ้าลอยที่มีความแข็งแรง (Rigidity) ในปริมาณที่มากกว่าสารตัวเติมพรีซิพิเตตซิลิกาเพื่อให้ได้ปริมาณซิลิกาที่เท่ากัน

ตารางที่ 4.2 อิทธิพลของปริมาณน้ำมันอะโรมาติกที่มีต่อค่าแรงบิดสูงสุดและต่ำสุดของยางเอ็นบีอาร์ที่มีสารตัวเติมพรีซิพิเตดซิลิกา เถ้าลอย และซิลิตินชนิดปรับปรุงผิว

ปริมาณน้ำมันอะโรมาติก (phr)	แรงบิดสูงสุด (dM-N)		แรงบิดต่ำสุด (dM-N)	
	พรีซิพิเตดซิลิกา	เถ้าลอย	พรีซิพิเตดซิลิกา	เถ้าลอย
10	207.13±1.18	218.15±2.35	32.76±0.27	18.96±0.21
20	157.62±0.20	172.15±0.31	32.81±1.22	16.69±0.34
30	118.27±0.31	128.67±2.51	23.20±0.24	10.71±0.71
40	91.97±0.69	80.36±5.57	15.60±0.37	7.91±0.14

จากผลการตรวจสอบค่าผลต่างแรงบิดของยางเอ็นบีอาร์ที่เติมสารตัวเติมเถ้าลอยมากกว่า การเติมพรีซิพิเตดซิลิกา ดังนั้นจึงทำการตรวจสอบการเสริมแรงของยางเอ็นบีอาร์กับสารตัวเติม โดยทำการหาปริมาณยางบาวด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 พบว่า การเติมน้ำมันอะโรมาติกไม่ส่งผลต่อปริมาณยางบาวด์ อย่างมีนัยสำคัญ และพบว่าปริมาณยางบาวด์ของยางที่เติมพรีซิพิเตดซิลิกามีค่ามากที่สุด และสารตัวเติมซิลิตินและเถ้าลอยปริมาณยางบาวด์ลดลงตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจาก สารตัวเติมพรีซิพิเตดซิลิกามีอนุภาคขนาดเล็ก ทำให้มีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (Si-OH group) บนพื้นผิวมาก [1, 13, 37] สามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่างยางกับสารคู่ควบไฮดรอกซิลที่หมู่เอทอกซี (Ethoxy group) ได้ดี และภายในโครงสร้างของสารคู่ควบไฮดรอกซิลมีหมู่ซัลไฟด์ (Sulfide group) ที่สามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลยางขณะผสมได้ทำให้เสริมแรงได้ดีกว่า [51]



รูปที่ 4.16 อิทธิพลของปริมาณน้ำมันอะโรมาติกที่มีต่อปริมาณยางบาวด์ของยางเอ็นบีอาร์ที่มีสารตัวเติมพรีซิพิเตดซิลิกา เถ้าลอย และซิลิตินชนิดปรับปรุงผิว

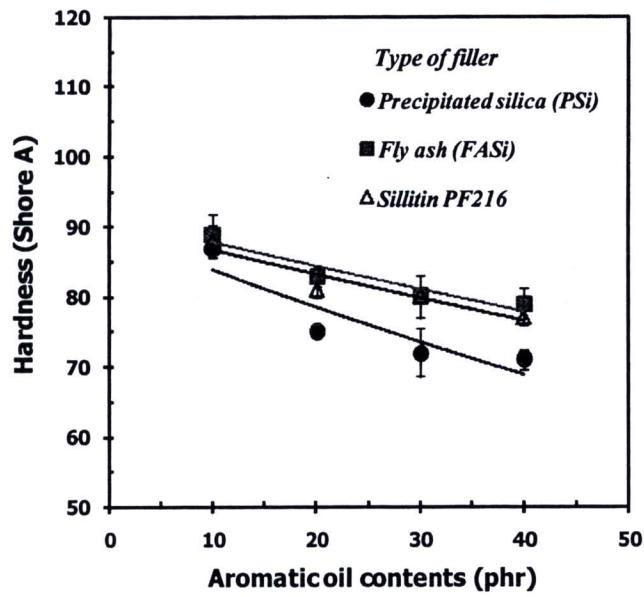
4.2.2 การตรวจสอบสมบัติเชิงกลของยางเอ็นบีอาร์ และการต้านทานการบวมตัวใน น้ำมันไฮดรอลิก ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส

การศึกษาสมบัติเชิงกลด้านการกลับคืนตัวของยางเอ็นบีอาร์ที่มีสารตัวเติมพรีซิพิเตดซิลิกา เถ้าลอย และซิลิโคนชนิดที่ปรับปรุงผิว ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่า การบวมตัวถาวรเมื่อได้รับแรงกดอัดของยางเอ็นบีอาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณน้ำมันอะโรมาติกเพิ่มขึ้น แสดงถึงการกลับคืนตัวของยางเอ็นบีอาร์ลดลง เนื่องจากน้ำมันอะโรมาติกทำลายแรงดึงดูดระหว่างซั้ว และแยกส่วนที่มีซั้วของยาง (-CN groups) ให้อยู่ห่างกัน นอกจากนี้ สามารถเพิ่มพื้นที่ว่างหรือปริมาตรอิสระระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง [52] ส่งผลให้ยางเอ็นบีอาร์มีสมบัติความเป็นอีลาสติกลดลง

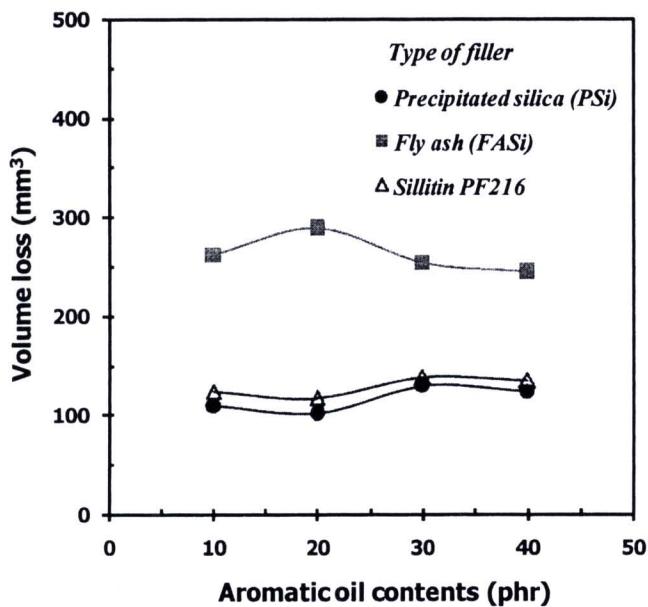
ตารางที่ 4.3 อิทธิพลของปริมาณน้ำมันอะโรมาติกที่มีต่อการบวมตัวถาวรเมื่อได้รับแรงกดอัดของยางเอ็นบีอาร์ที่มีสารตัวเติมพรีซิพิเตดซิลิกา เถ้าลอย และซิลิโคนชนิดปรับปรุงผิว

ปริมาณน้ำมันอะโรมาติก (phr)	การบวมตัวถาวรเมื่อได้แรงกดอัด (%)		
	พรีซิพิเตดซิลิกา	เถ้าลอย	ซิลิโคน (ปรับปรุงผิว)
10	24	34	22
20	50	38	37
30	59	46	45
40	71	47	45

ส่วนค่าความแข็งที่ผิวของยางเอ็นบีอาร์ที่มีสารตัวเติมพรีซิพิเตดซิลิกา เถ้าลอย และซิลิโคนชนิดปรับปรุงผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.17 พบว่า เมื่อปริมาณน้ำมันอะโรมาติกเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความแข็งของยางมีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก น้ำมันอะโรมาติกเป็นสารเสริมสภาพพลาสติกที่ทำให้ยางเอ็นบีอาร์มีความนิ่ม จึงส่งผลให้ความแข็งที่ผิวโดยรวมของยางเอ็นบีอาร์ลดลง [50] นอกจากนี้พบว่ายางเอ็นบีอาร์ที่เติมพรีซิพิเตดซิลิกามีความแข็งที่ผิวน้อยกว่าที่มีสารตัวเติมซิลิโคนชนิดปรับปรุงผิว และเถ้าลอย ทั้งนี้เนื่องจาก สารตัวเติมมีปริมาณซิลิกาต่างกัน โดยเถ้าลอยมีปริมาณของซิลิกาน้อยกว่าสารตัวเติมพรีซิพิเตดซิลิกาและซิลิโคนชนิดปรับปรุงผิว ดังนั้นในงานนี้จึงต้องเติมสารตัวเติมเถ้าลอยในปริมาณที่มากกว่าสารตัวเติมอื่นเพื่อให้ได้ปริมาณซิลิกาที่เท่ากัน และสารตัวเติมเถ้าลอยมีความแข็งแกร่ง (Rigidity) ส่งผลทำให้ค่าความแข็งที่ผิวของยางเอ็นบีอาร์ที่เติมสารตัวเติมเถ้าลอยมากกว่าการเติมสารตัวเติมพรีซิพิเตดซิลิกา [13]



รูปที่ 4.17 อิทธิพลของปริมาณน้ำมันอะโรมาติกที่มีต่อความแข็งที่ผิวของยางเอ็นบีอาร์ที่มีสารตัวเติมพรีซิพิเตตซิลิกา เถ้าลอย และซิลิตินชนิดปรับปรุงผิว



รูปที่ 4.18 อิทธิพลของปริมาณน้ำมันอะโรมาติกที่มีต่อความต้านทานต่อการขัดสีของยางเอ็นบีอาร์ที่มีสารตัวเติมพรีซิพิเตตซิลิกา ซิลิกาในเถ้าลอย และซิลิกาในซิลิตินชนิดปรับปรุงผิว

และรูปที่ 4.18 แสดงอิทธิพลของปริมาณน้ำมันอะโรมาติก 10-40 phr ที่มีต่อการสูญเสียปริมาตรของยางเอ็นบีอาร์ที่มีสารตัวเติมพรีซีพีเตคซิลิกา เถ้าลอย และซิลิโคนชนิดปรับปรุงผิว พบว่า ปริมาณของน้ำมันอะโรมาติกที่เพิ่มขึ้น ไม่ส่งผลต่อปริมาตรการสูญเสียเนื้อวัสดุของยางเอ็นบีอาร์อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจาก น้ำมันอะโรมาติกเป็นสารช่วยในการหล่อลื่นจึงลดแรงเสียดทานในการขัดสีได้นอกจากนี้ พบว่า ปริมาตรการสูญเสียเนื้อวัสดุของยางที่เติมสารตัวเติมพรีซีพีเตคซิลิกา มีค่าน้อยกว่าการเติมสารตัวเติมชนิดอื่น เนื่องจาก พรีซีพีเตคซิลิกามีหมู่ไซเลนอลบนพื้นที่ผิวของอนุภาค ทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติม (Rubber –filler interaction) ได้ดี ส่งผลทำให้ยางเอ็นบีอาร์มีความต้านทานต่อการขัดสีได้ดี [37]

งานวิจัยนี้เน้นการนำไปใช้งานผลิตภัณฑ์ซีลยางในกระบอกระบบไฮดรอลิก ที่ต้องสัมผัสกับน้ำมันไฮดรอลิกจึงทำการทดสอบการทนต่อน้ำมันไฮดรอลิกของยางเอ็นบีอาร์ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 โดยศึกษาที่สภาวะอุณหภูมิห้อง (25-30 องศาเซลเซียส) และที่สภาวะอุณหภูมิใช้งานสูงสุด 125 องศาเซลเซียส เนื่องจากการใช้งานของซีลยางในกระบอกไฮดรอลิกมีการเสียดสีของน้ำมันไฮดรอลิก ทำให้มีความร้อนสะสมเกิดขึ้นในการนำไปใช้งาน

ตารางที่ 4.4 อิทธิพลของปริมาณน้ำมันอะโรมาติกของยางเอ็นบีอาร์ที่มีต่อสัดส่วนการบวมตัวในน้ำมันไฮดรอลิกที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส โดยมีสารตัวเติมพรีซีพีเตคซิลิกา เถ้าลอย และซิลิโคนชนิดปรับปรุงผิว

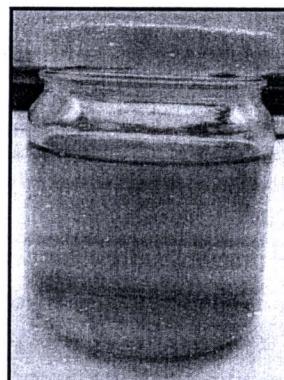
ปริมาณน้ำมันอะโรมาติก (phr)	สัดส่วนการบวมตัวในน้ำมันไฮดรอลิก ที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส (%)		
	พรีซีพีเตคซิลิกา	เถ้าลอย	ซิลิโคน (ปรับปรุงผิว)
10	1.5	0.8	1.3
20	-4.6	-2.4	-3.6
30	-6.7	-3.9	-5.8
40	-8.1	-5.2	-7.4

จากตารางที่ 4.4 แสดงอิทธิพลของปริมาณน้ำมันอะโรมาติก 10-40 phr ต่อสัดส่วนการบวมตัวในน้ำมันไฮดรอลิกที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส ของยางเอ็นบีอาร์ โดยมีสารตัวเติมพรีซีพีเตคซิลิกา เถ้าลอย และซิลิโคนชนิดปรับปรุงผิว ผลการทดลองพบว่า ยางเอ็นบีอาร์ที่มีปริมาณน้ำมันอะโรมาติก 10 phr มีการบวมตัวของยางที่น้อยมาก เนื่องจาก ยางเอ็นบีอาร์มีสมบัติที่สามารถต้านทานต่อการแทรกตัวต่อน้ำมันได้ดี นอกจากนี้ สังเกตว่ายางเอ็นบีอาร์ที่เติมเถ้าลอยมีสัดส่วนการบวมน้อยกว่า

การเติมสารตัวเติมอื่น เนื่องจาก ในสูตรที่มีการเติมเถ้าลอยมีสัดส่วนของปริมาณที่น้อยกว่า การบวมตัวจึงลดลง และเมื่อเติมน้ำมันอะโรมาติกปริมาณตั้งแต่ 20-40 phr พบว่า ยางเอ็นบีอาร์มี น้ำหนักหลังการทดสอบในน้ำมันไฮดรอลิกลดลง โดยพบว่า น้ำมันมีสีที่เปลี่ยนไปจากเดิม ดังแสดง ในรูปที่ 4.19 a แสดงสีของน้ำมันไฮดรอลิกก่อนทำการทดสอบการบวมตัวในน้ำมันที่อุณหภูมิการ ทดสอบ 125 องศาเซลเซียส และรูปที่ 4.19 b แสดงสีของน้ำมันไฮดรอลิกหลังทำการทดสอบการ บวมตัวในน้ำมันที่อุณหภูมิการทดสอบ 125 องศาเซลเซียส โดยสีของน้ำมันไฮดรอลิก หลังทำการ ทดสอบการบวมตัวมีสีที่เข้มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก การเติมน้ำมันอะโรมาติกในยางเอ็นบีอาร์ในปริมาณที่ มากเกินไป (20-40 phr) ส่งผลให้น้ำมันอะโรมาติกมีการซึมออกมาจากเนื้อยาง [3] อีกทั้งทำการ ทดสอบที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส ทำให้น้ำมันอะโรมาติกสามารถซึมผ่านจากเนื้อยางได้เพิ่มขึ้น ส่วนการทดสอบการทนต่อน้ำมันไฮดรอลิกที่สภาวะอุณหภูมิห้อง ไม่พบการบวมในน้ำมันของยาง เอ็นบีอาร์ เนื่องจาก โครงสร้างของยางเอ็นบีอาร์สามารถต้านทานต่อการแทรกตัวของน้ำมันได้ดี



(a)



(b)

รูปที่ 4.19 ลักษณะสีของน้ำมันไฮดรอลิกที่ใช้ในการทดสอบการบวมตัวในน้ำมันของยางเอ็นบีอาร์
(a) น้ำมันก่อนทดสอบ (b) น้ำมันหลังทดสอบ แซ่ยางที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส

4.2.3 การตรวจสอบสมบัติความร้อนเชิงกลพลวัตของยางเอ็นบีอาร์

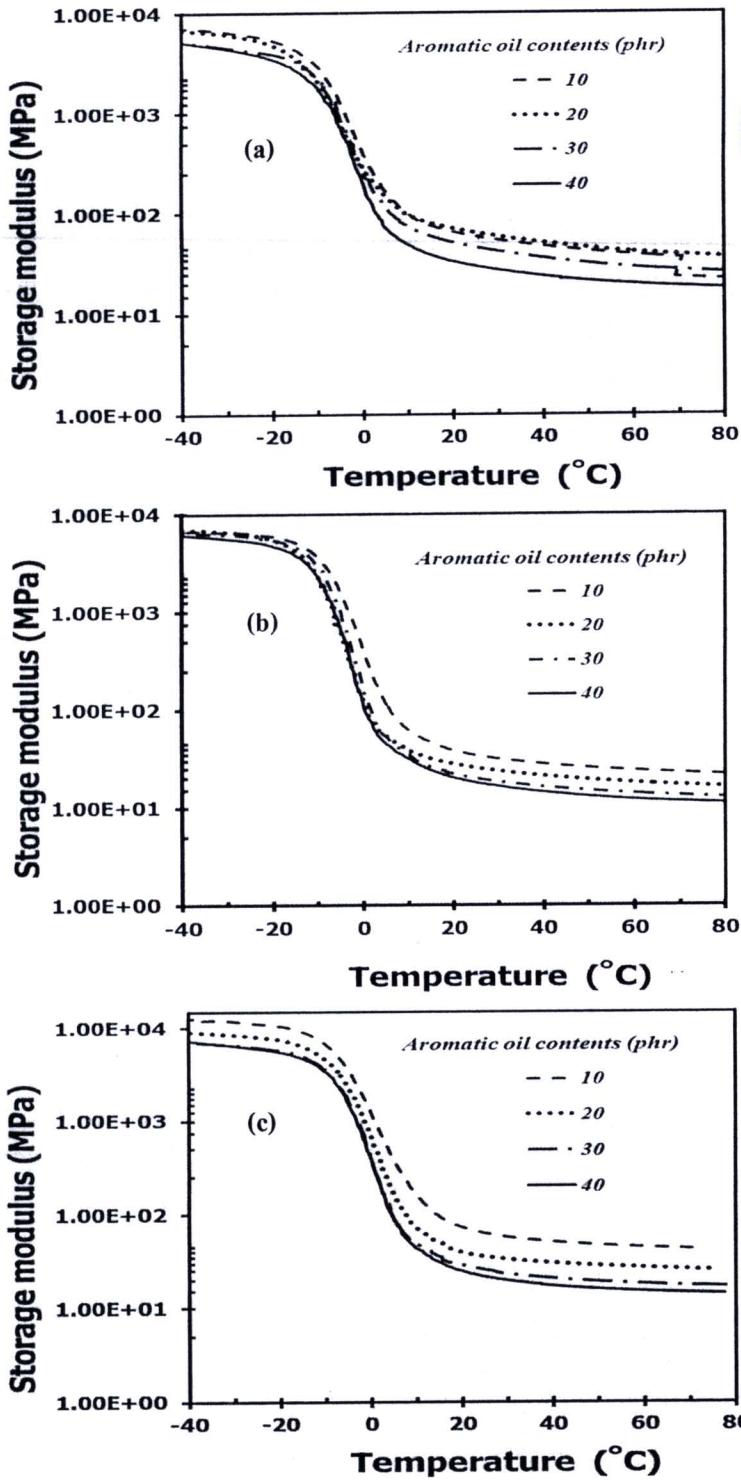
การตรวจสอบสมบัติความร้อนเชิงกลพลวัตของยางเอ็นบีอาร์ เพื่อศึกษาสมบัติขณะการใช้งานจริงใน กระบอกไฮดรอลิก โดยที่ชิ้นงานมีการทดสอบได้รับแรงกดอัดในลักษณะเป็นรอบ และมีความร้อน เกิดขึ้นจากการใช้งาน ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงทำการทดสอบสมบัติความร้อนเชิงกลพลวัต ศึกษาอิทธิพล ของอุณหภูมิต่อโมดูลัสการสะสม Tan δ และอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของยางเอ็นบีอาร์ ที่ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำมันอะโรมาติก 10-40 phr ดังแสดงในรูปที่ 4.20-4.21

จากรูปที่ 4.20 และรูปที่ 4.21 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อโมดูลัสการสะสม และ Tan δ ของยางเอ็นบีอาร์ที่มีน้ำมันอะโรมาติก 10-40 phr ในสารตัวเติมพีซีพีเตตซีลิกา ซิลิโคนชนิดปรับปรุงผิว และถั่วลอซ ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า ปริมาณน้ำมันอะโรมาติกที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ยางเอ็นบีอาร์มีค่าโมดูลัสการสะสมลดลง และมีค่า Tan δ เพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำมันอะโรมาติกทำลายแรงดึงดูดระหว่างขั้ว และแยกส่วนที่มีขั้วของยาง (-CN groups) ให้อยู่ห่างกัน นอกจากนี้ สามารถเพิ่มพื้นที่ว่างหรือปริมาตรอิสระระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง [52] ส่งผลให้ยางมีสมบัติความเป็นออสติกลดลง และเป็นความสูญเสียเมื่อเสียรูป นอกจากนี้ไม่พบความแตกต่างของยางเอ็นบีอาร์ที่มีสารตัวเติมชนิดต่างๆ

ตารางที่ 4.5 อิทธิพลของปริมาณน้ำมันอะโรมาติก 10-40 phr ที่มีต่ออุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของยางเอ็นบีอาร์โดยมีสารตัวเติมพีซีพีเตตซีลิกา ถั่วลอซ และซิลิโคนชนิดปรับปรุงผิว

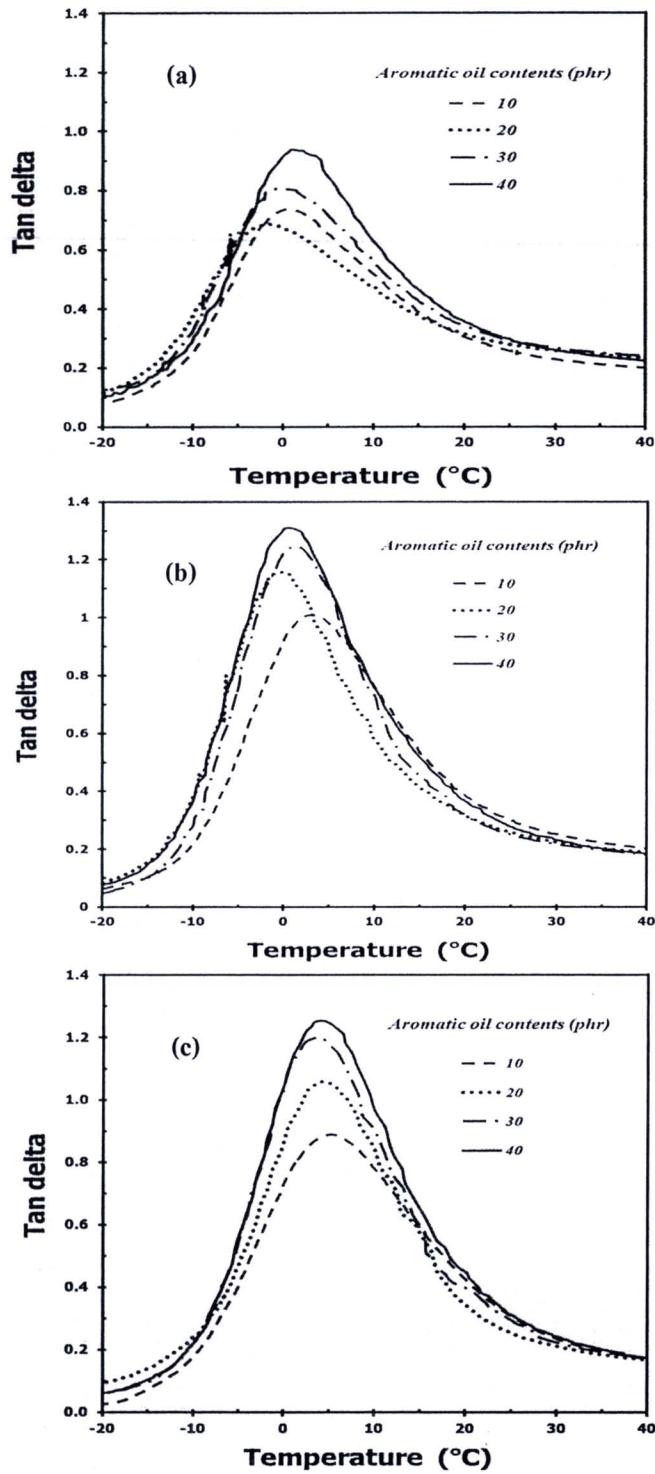
ชนิดของสารตัวเติม	ปริมาณน้ำมันอะโรมาติก (phr)	อุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว; T _g (°C)
พีซีพีเตตซีลิกา	10	0.7
	20	-1.5
	30	-0.1
	40	1.1
ถั่วลอซ	10	-0.1
	20	5.2
	30	4.1
	40	3.9
ซิลิโคนชนิดปรับปรุงผิว	10	0.4
	20	3.2
	30	-0.3
	40	1.3

จากตารางที่ 4.5 แสดงอิทธิพลของปริมาณน้ำมันอะโรมาติก 10-40 phr ที่มีต่ออุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของยางเอ็นบีอาร์โดยมีสารตัวเติมพีซีพีเตตซีลิกา ถั่วลอซ และซิลิโคนชนิดปรับปรุงผิว พบว่า เมื่อปริมาณน้ำมันอะโรมาติกเพิ่มขึ้น ไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) อย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.20 โมดูลัสการสะสมของยางเอ็นพียอร์ที่ปริมาณน้ำมันอะโรมาติก 10-40 phr ในสารตัวเติม

(a) ปริมาณพอลิเมอร์สูง (b) ปริมาณพอลิเมอร์ปานกลาง (c) ปริมาณพอลิเมอร์ต่ำ



รูปที่ 4.21 Tan δ ของยางเอ็นपीอาร์ที่ปริมาณน้ำมันอะโรมาติก 10-40 phr ในสารตัวเติม
 (a) ฟริชพิเตตซิติกา (b) ซิลิโคนชนิดที่ปรับปรุงผิว (c) ฝ้าลอย

สำหรับบทสรุปของผลการศึกษาปริมาณของสารเสริมสภาพพลาสติก (น้ำมันอะโรมาติก) ที่เติมในยางเอ็นปีอาร์ส่งผลต่อสมบัติ มีดังนี้

- ความเหนียวของยางเอ็นปีอาร์ลดลงแต่ไม่ส่งผลต่อเวลาการไหลตัวในแม่พิมพ์ และเวลาในการบ่มสุกยาง
- สมบัติความแข็งที่ผิว และการกลับคืนตัวของยางเอ็นปีอาร์ลดลง
- ยางเอ็นปีอาร์ไม่มีการบวมตัวที่อุณหภูมิห้อง และเมื่อทำการทดสอบการบวมตัวที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียสที่ปริมาณน้ำมันอะโรมาติก 10 phr พบว่า ยางเอ็นปีอาร์มีการบวมตัวน้อยมาก
- มี Tan δ เพิ่มขึ้น และโมดูลัสสะสมของยางเอ็นปีอาร์มีแนวโน้มลดลง แสดงถึงยางเอ็นปีอาร์มีสมบัติความเป็นอีลาสติกลดลง

นอกจากนี้ การเติมปริมาณของสารเสริมสภาพพลาสติก (น้ำมันอะโรมาติก) ในยางเอ็นปีอาร์ส่งผลต่อกระบวนการผสมยาง ดังแสดงในตารางที่ 4.6 ดังนี้

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบอิทธิพลของน้ำมันอะโรมาติกที่มีต่อกระบวนการผสมยางเอ็นปีอาร์ที่มีสารตัวเติมพริซพิเตคซิลิกา ซิลิโคน และถั่วลอถอย

ปริมาณน้ำมันอะโรมาติก (phr)	กระบวนการผสมยางเอ็นปีอาร์กับสารตัวเติม (พริซพิเตคซิลิกา ซิลิโคน และถั่วลอถอย)
5	สารตัวเติมฟุ้งกระจายผสมเข้ากับยางเอ็นปีอาร์ได้ยากมาก/ทำการผสมยาก
10	สารตัวเติมผสมเข้ากับยางเอ็นปีอาร์ได้ดี/ทำการผสมได้ง่าย
20	ยางหลุดออกจากลูกกึ่งเครื่องผสม เนื่องจากลูกกึ่งมีความลื่นจากน้ำมัน ทำให้สารตัวเติมผสมเข้ากับยางได้ยาก/ทำการผสมได้ยากขึ้น
30	
40	

สำหรับตารางที่ 4.6 แสดงผลของปริมาณเสริมสภาพพลาสติก (น้ำมันอะโรมาติก) ที่ส่งผลต่อกระบวนการผสม พบว่า น้ำมันอะโรมาติกที่ใช้ในการผสมยางเอ็นปีอาร์ที่ปริมาณ 5 phr สารตัวเติมกระจายเข้าไปในยางได้ยากและเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันอะโรมาติกที่ 10 phr สารตัวเติมสามารถผสมเข้ากับยางเอ็นปีอาร์ได้ดี และปริมาณน้ำมันอะโรมาติกที่ปริมาณ 20-40 phr สังเกตว่ายางเอ็นปีอาร์ไม่เกาะลูกกึ่ง เนื่องจาก ผิวของลูกกึ่งเกิดฟิล์มจากน้ำมันอะโรมาติกทำให้ยางและสารตัวเติมหลุดออกจากลูกกึ่งส่งผลให้ยางกับสารตัวเติมผสมเข้ากันได้ยาก

ดังนั้น ปริมาณน้ำมันอะโรมาติกที่เติมในยางเอ็นปีอาร์ที่เหมาะสม 10 phr โดยใช้ในการทำการทดลอง ที่ปรับเปลี่ยนชนิดและปริมาณสารตัวเติมต่อไป

4.3 การศึกษาชนิดและปริมาณซิลิกาของสารตัวเติมพีซีพีเตตซิลิกา ถั่วลอถอยและ ซิลิติน (ชนิดปรับปรุงผิวและไม่ปรับปรุงผิว) ที่มีต่อสมบัติของยางเอ็นปีอาร์

งานในส่วนนี้ เป็นการศึกษาชนิดและปริมาณซิลิกาของสารตัวเติมกลุ่มซิลิกา ดังนี้ พีซีพีเตตซิลิกา ถั่วลอถอย ซิลิตินชนิดปรับปรุงผิว และซิลิตินชนิดไม่ปรับปรุงผิว ที่มีต่อสมบัติของยางผสมยางเอ็นปีอาร์ โดยมีผงเขม่าดำปริมาณ 50 phr เป็นสารเติมแต่งหลัก โดยปรับเปลี่ยนปริมาณซิลิกาที่สัดส่วน 0-50 phr และเติมสารเสริมสภาพพลาสติก (น้ำมันอะโรมาติก) ที่ปริมาณ 10 phr

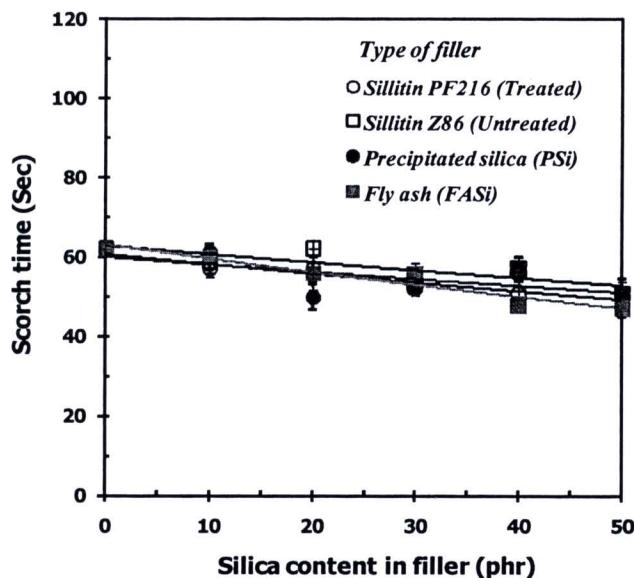
4.3.1 การตรวจสอบความหนืด เวลาในการไหลตัวในแม่พิมพ์ และเวลาการบ่มสุกของ ยางเอ็นปีอาร์

ตารางที่ 4.7 อิทธิพลของปริมาณซิลิกาในสารตัวเติมพีซีพีเตตซิลิกา ถั่วลอถอย และซิลิติน (ชนิดปรับปรุงผิวและไม่ปรับปรุงผิว) ที่มีต่อความหนืดมูนิของยางเอ็นปีอาร์

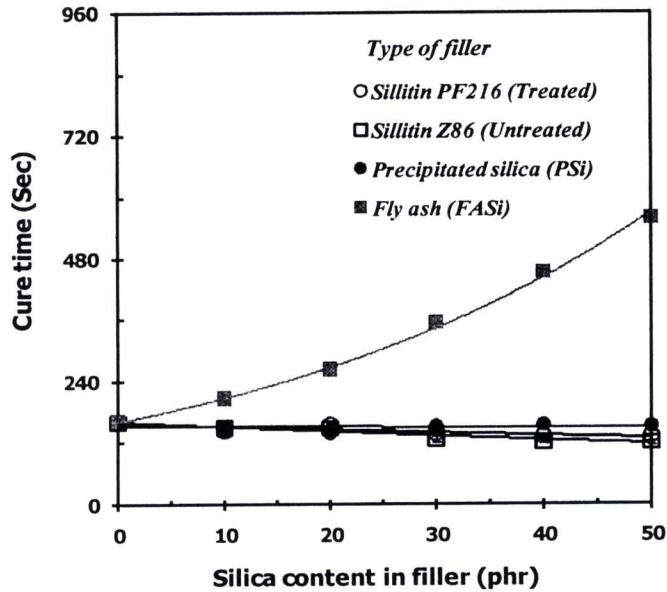
ปริมาณซิลิกา (phr)	ความหนืดมูนิ (ML 1'+ 4') 100 องศาเซลเซียส			
	พีซีพีเตตซิลิกา	ถั่วลอถอย	ซิลิติน (ปรับปรุงผิว)	ซิลิติน (ไม่ปรับปรุงผิว)
0	51.6	51.6	51.6	51.6
10	54.4	58.0	45.7	54.7
20	59.7	62.5	52.6	58.2
30	68.9	69.3	62.1	71.5
40	85.3	72.8	67.8	73.0
50	89.1	76.3	69.6	83.1

ตารางที่ 4.7 แสดงอิทธิพลของปริมาณซิลิกาในสารตัวเติมพีซีพีเตตซิลิกา ถั่วลอถอย และซิลิติน (ชนิดปรับปรุงผิว และไม่ปรับปรุงผิว) ที่มีต่อความหนืดของยางเอ็นปีอาร์ พบว่า เมื่อปริมาณซิลิกาของสารตัวเติมเพิ่มขึ้นความหนืดของยางเอ็นปีอาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจาก ปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่างยางกับสารตัวเติมเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ทำให้ปริมาณการเติมสารตัว

เติมเพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิของสารตัวเติมขัดขวางการไหลตัวของยางเอ็นบีอาร์ [37] เมื่อทำการเปรียบเทียบความหนืดของยางเอ็นบีอาร์ที่มีสารตัวเติมพรีซิพิเตตซิลิกา และถั่วลันเตา พบว่า ความหนืดของยางเอ็นบีอาร์ที่เติมพรีซิพิเตตซิลิกามีความหนืดมากกว่าการเติมถั่วลันเตา เนื่องจาก พรีซิพิเตตซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นที่ผิวของอนุภาคมากกว่าถั่วลันเตา ทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกับอนุภาคเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนขัดขวางการไหลของยางส่งผลให้มีความหนืดมากกว่า นอกจากนี้ รูปร่างของถั่วลันเตามีลักษณะกลมสามารถไหลตัวในยางได้ดีส่งผลทำให้ความหนืดของยางต่ำ [1] สำหรับอิทธิพลของปริมาณซิลิกาในสารตัวเติมพรีซิพิเตตซิลิกา ถั่วลันเตาและซิลิติน (ชนิดปรับปรุงผิวและไม่ปรับปรุงผิว) ที่มีต่อเวลาการไหลตัวในแม่พิมพ์ และเวลาบ่มสุกของยางเอ็นบีอาร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.22 และรูปที่ 4.23 พบว่า ปริมาณซิลิกาในสารตัวเติมไม่ส่งผลต่อเวลาในการไหลตัวในแม่พิมพ์ของยางเอ็นบีอาร์ สำหรับเวลาในการบ่มสุกของยางเอ็นบีอาร์ที่เติมสารตัวเติมพรีซิพิเตตซิลิกา ถั่วลันเตาและซิลิติน (ชนิดปรับปรุงผิวและไม่ปรับปรุงผิว) ใกล้เคียงกัน โดยมีเวลาในการบ่มสุกอยู่ในช่วง 2-3 นาที นอกจากนี้ ปริมาณซิลิกาในสารตัวเติมไม่ส่งผลต่อเวลาในการบ่มสุกของยางเอ็นบีอาร์อย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นการเติมถั่วลันเตา โดยปริมาณซิลิกาในยางเอ็นบีอาร์เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้เวลาการบ่มสุกเพิ่มขึ้น เนื่องจากถั่วลันเตามีส่วนประกอบของโลหะออกไซด์ที่สามารถเกิดการหน่วงปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของสายโซ่กับส่วนที่มีขั้ว (-CN groups) ของยางเอ็นบีอาร์จึงส่งผลทำให้เวลาการบ่มสุกยางเพิ่มขึ้น [1, 2, 13]



รูปที่ 4.22 อิทธิพลของปริมาณซิลิกาในสารตัวเติมพรีซิพิเตตซิลิกา ถั่วลันเตา และซิลิติน (ชนิดปรับปรุงผิวและไม่ปรับปรุงผิว) ที่มีต่อเวลาการไหลตัวในแม่พิมพ์ของยางเอ็นบีอาร์



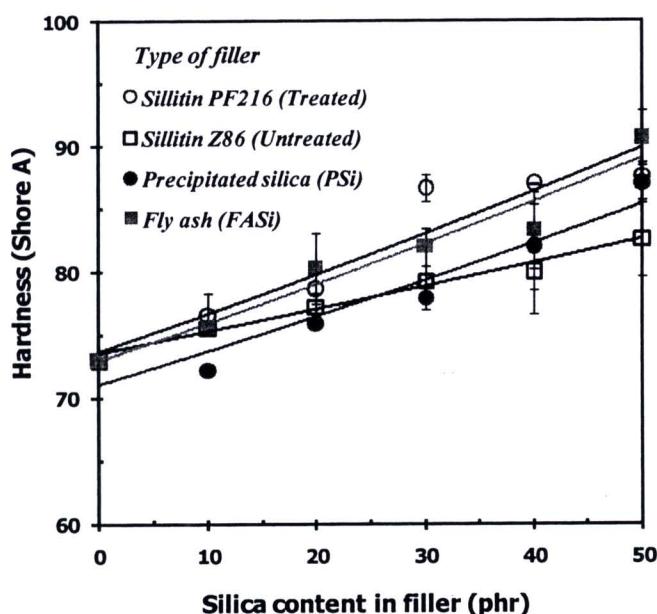
รูปที่ 4.23 อิทธิพลของปริมาณซิลิกาในสารตัวเติมพรีซิพิเตตซิลิกา เถ้าลอย และซิลิติน (ชนิดปรับปรุงผิวและไม่ปรับปรุงผิว) ที่มีต่อเวลาบ่มสุกของยางเอ็นบีอาร์

4.3.2 การตรวจสอบสมบัติเชิงกล การต้านทานการบวมตัวของยางเอ็นบีอาร์ในน้ำมันไฮดรอลิกที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส

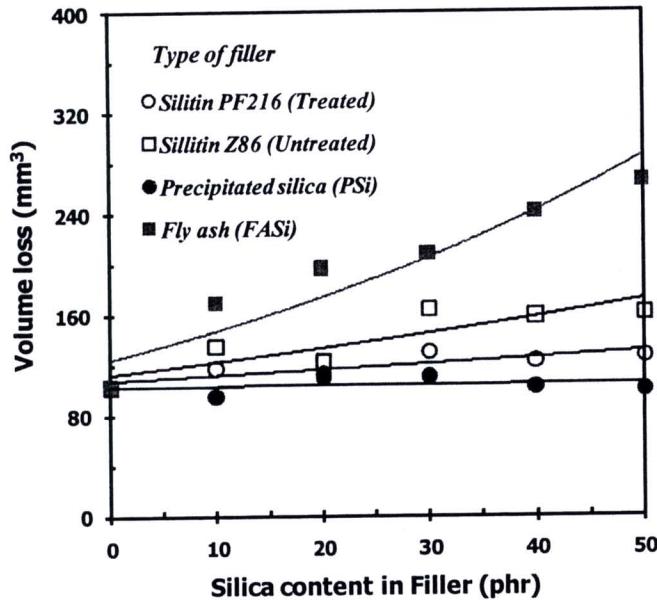
ตารางที่ 4.8 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมกลุ่มซิลิกา พรีซิพิเตตซิลิกา เถ้าลอย และซิลิติน (ชนิดปรับปรุงผิวและไม่ปรับปรุงผิว) ที่มีต่อการบวมตัวถาวรเมื่อได้รับแรงกดอัดของยางเอ็นบีอาร์

ปริมาณซิลิกา (phr)	การบวมตัวถาวรเมื่อได้แรงกดอัด (%)			
	พรีซิพิเตตซิลิกา	เถ้าลอย	ซิลิติน (ปรับปรุงผิว)	ซิลิติน (ไม่ปรับปรุงผิว)
0	17	17	17	17
10	26	17	25	29
20	25	24	20	24
30	26	29	26	31
40	27	29	24	33
50	24	34	22	34

ตารางที่ 4.8 แสดงอิทธิพลของปริมาณซิลิกาของสารตัวเติมพรีซิพิเตตซิลิกา ฝ้าลอย และซิลิติน (ชนิดปรับปรุงผิวและไม่ปรับปรุงผิว) ที่มีต่อการยุบตัวถาวรเมื่อได้รับแรงกดอัดของยางเอ็นบีอาร์ พบว่าการยุบตัวถาวรเมื่อได้รับแรงกดอัดของยางเอ็นบีอาร์อยู่ในช่วง 17-34% นอกจากนี้ พบว่า การเติมพรีซิพิเตตซิลิกาในยางเอ็นบีอาร์ ทำให้การกลับคืนตัวเมื่อได้รับแรงกดอัดดีกว่าการเติมฝ้าลอย เนื่องจากพรีซิพิเตตซิลิกามีอนุภาคขนาดเล็ก [1, 13, 37, 51] สามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่างยางกับสารตัวเติมได้ดียิ่งขึ้นทำให้มีความเป็นอีลาสติกมากขึ้น สำหรับซิลิตินชนิดปรับปรุงผิวให้ค่าการกลับคืนตัวใกล้เคียงกับ พรีซิพิเตตซิลิกา ทั้งที่มีอนุภาคขนาดใหญ่กว่า เนื่องจาก อนุภาคขนาดเล็กของพรีซิพิเตตซิลิกาทำให้สายโซ่โมเลกุลยางเอ็นบีอาร์สูญเสียพลังงานเลื่อนไถล (Slip) เมื่อได้รับแรงกดอัด ส่งผลทำให้ยางมีสมบัติการกลับคืนตัวที่ไม่ดี [53] ส่วนความแข็งที่ผิวของยางเอ็นบีอาร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.24 พบว่า ค่าความแข็งของยางเอ็นบีอาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาจากสารตัวเติมกลุ่มซิลิกาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติมอนุภาคสารตัวเติมกลุ่มซิลิกามีความแข็งแกร่ง (Rigidity) ส่งผลทำให้ความแข็งของยางโดยรวมเพิ่มขึ้น [13]



รูปที่ 4.24 อิทธิพลของปริมาณซิลิกาในสารตัวเติมพรีซิพิเตตซิลิกา ฝ้าลอย และซิลิติน (ชนิดปรับปรุงผิวและไม่ปรับปรุงผิว) ที่มีต่อความแข็งที่ผิวของยางเอ็นบีอาร์



รูปที่ 4.25 อิทธิพลของปริมาณซิลิกาในสารตัวเติมพรีซิพิตเตดซิลิกา แก้วลอย และซิลิติน (ชนิดปรับปรุงผิวและไม่ปรับปรุงผิว) ที่มีต่อความต้านทานต่อการขัดสีของยางเอ็นบีอาร์

สำหรับการปริมาตรการสูญเสียเนื้อวัสดุของยางเอ็นบีอาร์ จากการทดสอบความต้านทานต่อการขัดสี ดังแสดงในรูปที่ 4.25 พบว่า ปริมาตรการสูญเสียเนื้อวัสดุของยางเอ็นบีอาร์ที่ไม่เติมสารตัวเติมน้อยกว่าการใช้สารตัวเติม เนื่องจาก อนุภาคสารตัวเติมแก้วลอยและซิลิติน เมื่อหลุดออกสามารถขัดสี ทำให้ยางเอ็นบีอาร์สูญเสียเนื้อวัสดุเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคของซิลิกามีความแข็งมากกว่ายางทำให้ทนต่อการขัดสีลดลง โดยคาดว่า ปริมาณซิลิกาในสารตัวเติมพรีซิพิตเตดซิลิกาที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ความต้านทานต่อการขัดสีเพิ่มขึ้น เนื่องจากพรีซิพิตเตดซิลิกามีอนุภาคขนาดเล็กเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางได้ดี แต่จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณพรีซิพิตเตดซิลิกาที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อความต้านทานต่อการขัดสีอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจาก การเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่างอนุภาคของสารตัวเติม (Filler –filler interaction) เพราะบนพื้นผิวของซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) เป็นจำนวนมาก เมื่อซิลิกามาอยู่รวมกันสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนผ่านหมู่ไฮดรอกซิล ทำให้อนุภาคของพรีซิพิตเตดซิลิกาเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน [51] นอกจากนี้ พบว่า การเติมแก้วลอยในยางเอ็นบีอาร์มีการสูญเสียเนื้อวัสดุมากกว่าการเติมซิลิติน และพรีซิพิตเตดซิลิกา เนื่องจาก แก้วลอยมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ ทำให้ปริมาตรการสูญเสียเนื้อวัสดุเพิ่มขึ้นซึ่งแสดงถึงความต้านทานต่อการขัดสีลดลง [51] ส่วนอิทธิพลของปริมาณซิลิกาในสารตัวเติมพรีซิพิตเตดซิลิกา แก้วลอย และซิลิติน (ชนิดปรับปรุงผิวและไม่ปรับปรุงผิว) ที่มีต่อสัดส่วนการบวมตัวในน้ำมันไฮดรอลิกของยางเอ็นบีอาร์ที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 4.9 พบว่า ยางเอ็นบีอาร์มีสัดส่วนการบวมตัวที่น้อยกว่า 3 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทำการทดสอบ

การทนต่อน้ำมันไฮดรอลิกที่สภาวะอุณหภูมิห้องไม่พบการบวมในน้ำมันของยางเอ็นบีอาร์ เนื่องจากโครงสร้างของยางเอ็นบีอาร์สามารถต้านทานต่อการแทรกตัวของน้ำมันได้ดี

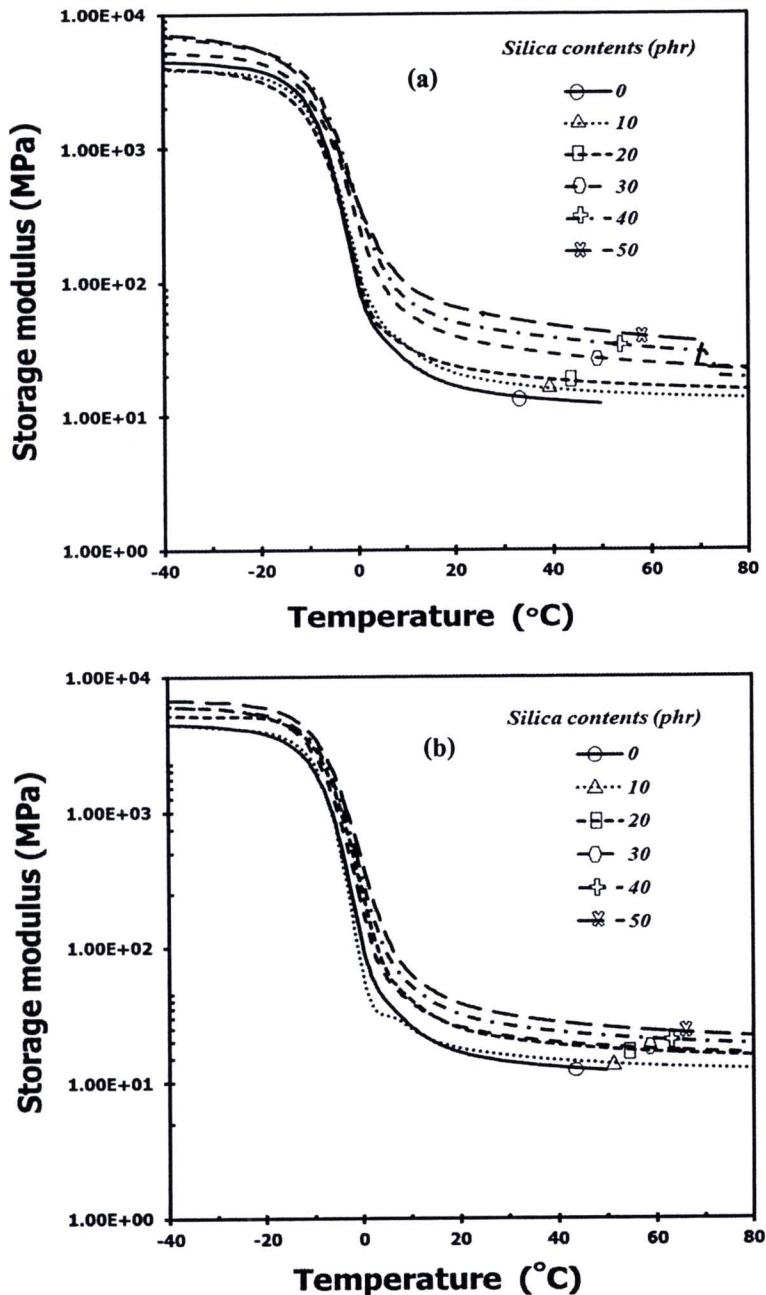
ตารางที่ 4.9 อิทธิพลของปริมาณซิลิกาในสารตัวเติมพรีซิพิตเตดซิลิกา ฝ้าลอย และซิลิติน (ชนิดปรับปรุงผิวและไม่ปรับปรุงผิว) ที่มีต่อสัดส่วนการบวมตัวในน้ำมันไฮดรอลิกของยางเอ็นบีอาร์ที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส

ปริมาณซิลิกาในสารตัวเติม (phr)	สัดส่วนการบวมตัวในน้ำมันไฮดรอลิก ที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส (%)			
	พรีซิพิตเตดซิลิกา	ซิลิติน (ปรับปรุงผิว)	ซิลิติน (ไม่ปรับปรุงผิว)	ฝ้าลอย
0	1.0	1.0	1.0	1.0
10	1.5	0.7	1.2	1.4
20	2.2	1.3	0.9	1.2
30	1.8	1.0	1.3	1.3
40	1.7	1.6	0.9	0.8
50	1.5	1.3	0.9	0.8

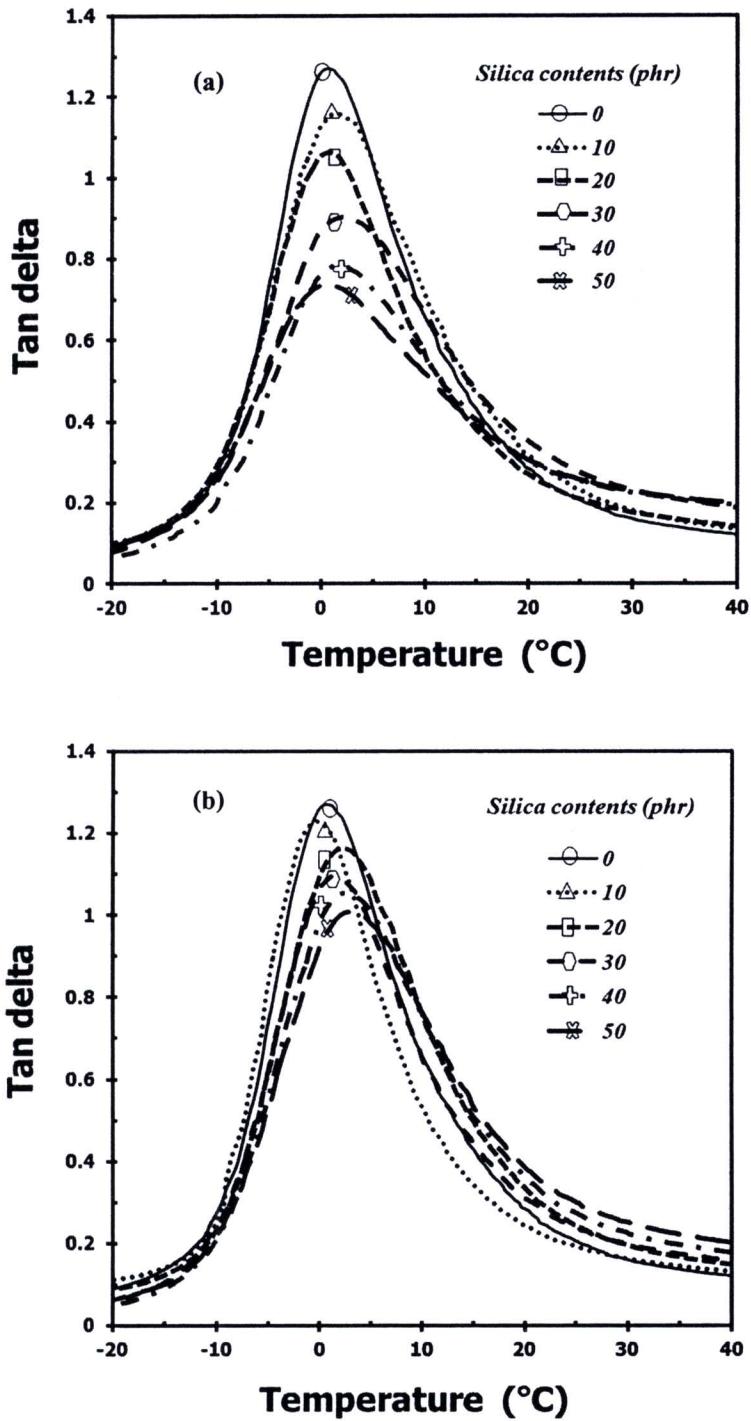
4.3.3 การตรวจสอบสมบัติความร้อนเชิงกลพลวัตของยางเอ็นบีอาร์

จากผลการทดลองที่กล่าวข้างต้น พบว่า ยางเอ็นบีอาร์ที่เติมซิลิตินชนิดปรับปรุงผิวให้สมบัติโดยรวมที่ใกล้เคียงกับพรีซิพิตเตดซิลิกา จึงทำการทดสอบสมบัติความร้อนเชิงกลพลวัตที่แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อโมดูลัสการสะสม และ $\tan \delta$ ของยางเอ็นบีอาร์ที่มีปริมาณซิลิกา 0-50 phr ในสารตัวเติม พรีซิพิตเตดซิลิกาดังแสดงในรูปที่ 4.26 a และ 4.27 a และซิลิตินชนิดปรับปรุงผิวดังแสดงในรูปที่ 4.26 b และ 4.27 b ผลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิการใช้งาน 30 องศาเซลเซียส ปริมาณซิลิกาในสารตัวเติมพรีซิพิตเตดซิลิกาและซิลิตินชนิดปรับปรุงผิวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าโมดูลัสการสะสมของยางเอ็นบีอาร์เพิ่มขึ้น และค่า $\tan \delta$ ของยางเอ็นบีอาร์ลดลง เนื่องจาก ปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นสามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่างยางกับสารตัวเติม (Rubber-filler interaction) มากขึ้น ทำให้สมบัติความเป็นอีลาสติกของยางเอ็นบีอาร์เพิ่มขึ้น [36, 37] สำหรับตารางที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบโมดูลัสการสะสมที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของยางเอ็นบีอาร์ที่มีสารตัวเติมพรีซิพิตเตดซิลิกาและซิลิตินชนิดปรับปรุงผิว 0-50 phr พบว่า ค่า T_g ไม่มี

การเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของซิลิกาในสารตัวเติมพรีซีพิตเตดซิลิกา และซิลิตินปรับปรุงผิวในยาง เอ็นบีอาร์ที่บ่งบอกถึงการเสริมแรง (Reinforcement) ในยางที่เติมสารตัวเติมพรีซีพิตเตดซิลิกาและซิลิติน ไม่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.26 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อโมดูลัสการสะสมของยางเอ็นบีอาร์ที่มีปริมาณซิลิกา 0-50 phr ในสารตัวเติม (a) พรีซีพิตเตดซิลิกา (b) ซิลิตินชนิดปรับปรุงผิว



รูปที่ 4.27 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อ Tan δ ของยางเอนปีอาร์ที่มีปริมาณซิลิกา 0-50 phr ในสารตัวเติม (a) พรีซีพิตเตดซิลิกา (b) ซิลิโคนชนิดปรับปรุงผิว

ตารางที่ 4.10 อิทธิพลของปริมาณสารตัวเติมพรีซีพีเตตซิกา และซิลิโคนชนิดปรับปรุงผิวในยาง เอ็นบีอาร์ที่มีต่อ โมดูลัสการสะสมที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว

ชนิดของสารตัวเติม	ปริมาณซิกา (phr)	อุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว; T_g ($^{\circ}\text{C}$)	โมดูลัสการสะสม; E' อุณหภูมิ 30 $^{\circ}\text{C}$ (MPa)
ไม่มีสารตัวเติมซิกา	0	0.1	14.22
พรีซีพีเตตซิกา	10	1.6	17.50
	20	0.7	20.27
	30	2.2	32.60
	40	1.6	42.65
	50	1.4	54.18
ซิลิโคนชนิดปรับปรุงผิว	10	0.3	15.86
	20	2.3	21.09
	30	1.7	21.83
	40	2.7	26.40
	50	3.2	31.58

สำหรับการศึกษาชนิดและปริมาณซิกาของสารตัวเติม พรีซีพีเตตซิกา ถ้ำลอย และ ซิลิโคน (ชนิดปรับปรุงผิว และไม่ปรับปรุงผิว) ที่มีต่อสมบัติของยางเอ็นบีอาร์สามารถสรุปผลได้ดังนี้

- พรีซีพีเตตซิกาให้ความหนืดสูงสุด และการเติมถ้ำลอยทำให้เวลาการบ่มสุกยางมากกว่าการเติมสารตัวเติมชนิดอื่น
- ส่วนสมบัติเชิงกลโดยรวมของพรีซีพีเตตซิกาสูงกว่าสารตัวเติมชนิดอื่น ยกเว้น สมบัติการกลับคืนตัวเมื่อได้รับแรงกดอัด โดยที่การเติมซิลิโคนชนิดปรับปรุงผิวให้ค่าที่ใกล้เคียงกับพรีซีพีเตตซิกา
- สมบัติความร้อนเชิงกลพลวัตของวัสดุประกอบยางเอ็นบีอาร์ที่เติมพรีซีพีเตตซิกามีค่า Storage modulus สูงกว่าซิลิโคนชนิดปรับปรุงผิว สำหรับค่า $\tan \delta$ ของวัสดุประกอบยางเอ็นบีอาร์ที่เติม พรีซีพีเตตซิกามีค่าต่ำกว่าซิลิโคนชนิดปรับปรุงผิว
- ค่า T_g ของวัสดุประกอบยางเอ็นบีอาร์ให้ผลที่ไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบข้อดี/ข้อเสียของกระบวนการผสมยางเอ็นบีอาร์ที่มีการปรับเปลี่ยนชนิดของสารตัวเติมพีซีพีเตตซิลิกา ซิลิโคน และถั่วลอถอย

ขั้นตอนการผลิต		ข้อดี/ข้อเสียของขั้นตอนการผสมยางเอ็นบีอาร์ที่มีสารตัวเติม		
		พีซีพีเตตซิลิกา	ซิลิโคน	ถั่วลอถอย
การเตรียมวัตถุดิบ		ต้องการปรับปรุงผิวก่อนนำไปใช้งาน		
กระบวนการผสม		พีซีพีเตตซิลิกาฟุ้งกระจายผสมให้เข้าในเนื้อยางยาก ต้องใช้ทั้งเวลาและพลังงานในการบดผสมสูง	สามารถผสมเข้าเนื้อยางได้ง่าย จึงนับว่าเป็นการช่วยทางด้านการประหยัดพลังงาน	
ลักษณะเครื่องมือ/อุปกรณ์/สถานที่หลังการผลิต		ทำความสะอาดค่อนข้างยากเนื่องจาก ฟุ้งกระจายรอบๆเครื่องผสม	ทำความสะอาดง่าย ประหยัดเวลาในการทำงาน	
กระบวนการขึ้นรูป	การไหลตัวของยาง	ไหลตัวยาก ซึ่งต้องใช้แรงอัดขึ้นรูปสูง	ไหลตัวได้ง่าย ซึ่งช่วยลดพลังงานแรงอัดจากเครื่องจักรได้เป็นอย่างดี	
	เวลาในการขึ้นรูป	เวลาในการบ่มสุกยางสั้น		เวลาในการบ่มสุกยางนาน
ลักษณะชิ้นงาน		ผิวเรียบมัน		ผิวหยาบ

ตารางที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบข้อดี/ข้อเสียของกระบวนการผสมยางเอ็นบีอาร์ที่มีการปรับเปลี่ยนชนิดของสารตัวเติมพีซีพีเตตซิลิกา ซิลิโคน และถั่วลอถอย พบว่า พีซีพีเตตซิลิกาฟุ้งกระจายผสมให้เข้าในเนื้อยางยาก ต้องใช้ทั้งเวลาและพลังงานในการบดผสมสูง อีกทั้งต้องใช้เวลาในการทำ ความสะอาด สำหรับการไหลตัวในแม่พิมพ์ของยางเอ็นบีอาร์ พีซีพีเตตซิลิกาทำให้เวลาการไหลตัวของยางเอ็นบีอาร์นาน แต่มีเวลาในการขึ้นรูปสั้นเมื่อเทียบกับสารตัวเติมอื่น ลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากการเติมพีซีพีเตตซิลิกา และซิลิโคนมีลักษณะผิวเรียบมัน สำหรับการเติมถั่วลอถอยชิ้นงานที่ได้มีลักษณะหยาบ

4.4 การทดสอบจำลองสภาวะการใช้งานจริงด้วยเครื่องทดสอบซีลในงานระบบไฮดรอลิก

4.4.1 การวิเคราะห์เชิงกายภาพ และเชิงกล

สูตรยางซีลที่นำมาทดสอบการใช้งานจริงด้วยเครื่องทดสอบซีล 2 ชนิด คือ ยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมพีซีพีเตตซีลิกาที่ปริมาณ 50 phr (NBR/PSi-50) และยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมซิลิโคนชนิดปรับปรุงผิว ที่ปริมาณ 50 phr (NBR/PF216-50) โดยที่มีปริมาณเขม่าดำ 50 phr และน้ำมันอะโรมาติก 10 phr ทั้งนี้เนื่องจาก เป็นสูตรยางที่มีสมบัติการกลับคืนตัวและสมบัติความร้อนเชิงกลพลวัตที่ดี จึงเลือกนำมาขึ้นรูปเป็นยางซีลกันรั่ว U-CUP ทดสอบเปรียบเทียบกับยางซีลกันรั่วเอ็นบีอาร์ชนิด U-CUP เกรดการค้าชื่อ NOK Corteco จากประเทศญี่ปุ่น ซึ่งสภาวะในการทดสอบแบบต่อเนื่องในเครื่องทดสอบซีลระบบไฮดรอลิกระบบปิด ดังนี้ ระยะทางทดสอบ 20 กิโลเมตร ความเร็วเคลื่อนที่ของลูกสูบไป-กลับ 0.125 เมตรต่อวินาที และมีแรงจากภายนอก (ลูกค้อนน้ำหนัก) 65 กิโลกรัม

สำหรับตารางที่ 4.11 แสดงผลทดสอบสมบัติทางกายภาพ (น้ำหนัก ลักษณะผิว สีผลิตภัณฑ์ และขนาดของยางซีล) สมบัติเชิงกล (ความแข็ง) อุณหภูมิการใช้งาน และความดันจากการใช้งาน ของยางซีลกันรั่ว U-CUP ทางการค้าเปรียบเทียบกับยางซีลกันรั่ว U-CUP ที่ได้จากงานวิจัย ก่อน / หลังการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบซีลในระบบไฮดรอลิก เป็นระยะทาง 20 กิโลเมตร พบว่า หลังทดสอบแบบต่อเนื่องในเครื่องทดสอบซีลระบบไฮดรอลิกไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาด น้ำหนัก และความแข็งของยางซีลทั้ง 3 ชนิด ส่วนรูปที่ 4.28 a และ 4.28 b แสดงอุณหภูมิและความดันที่เปลี่ยนแปลงในการทดสอบซีลด้วยเครื่องทดสอบซีลระบบไฮดรอลิกของยางซีลกันรั่ว U-CUP ที่มีสารตัวเติมพีซีพีเตตซีลิกาและซิลิโคน ที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และมีแรงจากภายนอก 65 กิโลกรัม เมื่อทดสอบด้วยเครื่องทดสอบซีลเป็นระยะทาง 1.8 กิโลเมตร (4 ชั่วโมง) พบว่า อุณหภูมิภายในระบบเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากอุณหภูมิห้อง (27-28 องศาเซลเซียส) ถึงประมาณ 62-66 องศาเซลเซียส เนื่องจากน้ำมันถูกอัดตัวทำให้เกิดความร้อนในระบบส่งผลทำให้อุณหภูมิในระบบสูงขึ้น และเมื่อระยะทางการทดสอบเพิ่มขึ้น พบว่า อุณหภูมิในระบบไม่เปลี่ยนแปลงอยู่ช่วงระหว่าง 62-68 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.12 การทดสอบยางซีลกันรั่ว U-CUP ทางการค้าเปรียบเทียบกับยางซีลกันรั่ว U-CUP จากงานวิจัย ก่อน / หลังการทดสอบในเครื่องทดสอบซีลระบบไฮดรอลิก ที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และมีแรงจากภายนอก 65 กิโลกรัม

สถานะ	ผลิตภัณฑ์ซีล U-CUP	น้ำหนัก (กรัม)		ความแข็ง (Shore A)		ลักษณะผิว		สีผลิตภัณฑ์		ขนาดของผลิตภัณฑ์ยางซีล (มิลลิเมตร)					
		ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อนทดสอบ*		หลังทดสอบ*			
การทดสอบ										D _o	D _i	t	D _o	D _i	t
ทดสอบแบบต่อเนื่อง ในเครื่องทดสอบซีล	เกรดการค้า	4.45	4.46	82	82	ค่าเงา	ค่าเงา	ปกติ	ปกติ	45.69	34.68	6.55	45.65	34.49	6.28
	NBR/PSi-50	4.07	4.05	86	86	ค่าเงา	ค่าเงา	ปกติ	ปกติ	45.95	34.15	5.86	45.53	34.61	5.65
	NBR/PF216-50	4.32	4.34	83	83	ค่าด้าน	ค่าด้าน	ปกติ	ปกติ	45.59	34.73	5.79	45.53	34.77	5.78

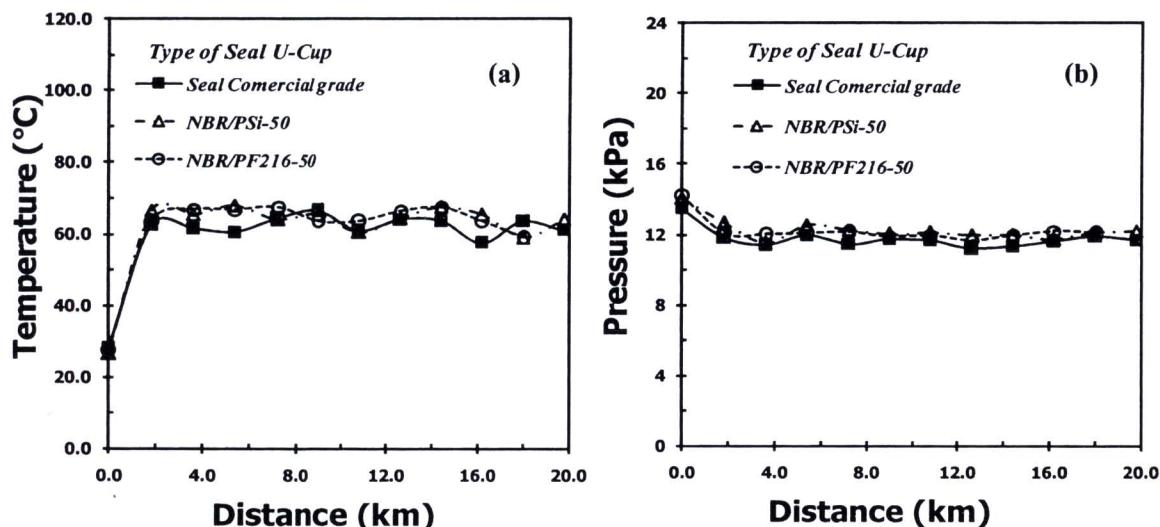
เมื่อ NBR/PSi-50 : ยางเอ็นบีอาร์ที่มีสารตัวเติมพริชพีเตดซีลิกที่ 50 phr

NBR/PF216-50 : ยางเอ็นบีอาร์ที่มีสารตัวเติมซิลิกาในซิลิโคนชนิดปรับปรุงผิวที่ 50 phr

* โดยที่ D_o : ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของผลิตภัณฑ์ซีลกันรั่ว U-CUP

D_i : ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของผลิตภัณฑ์ซีลกันรั่ว U-CUP

t : ความหนาของผลิตภัณฑ์ของซีลกันรั่ว U-CUP



รูปที่ 4.28 ชนิดของซีล U-CUP ที่ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบซีลในระบบไฮดรอลิกที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร รับแรงจากภายนอก 65 กิโลกรัม (a) อุณหภูมิในระบบ (b) ความดันในระบบ

นอกจากนี้ พบว่า ความดันในระบบลดลงเมื่อระยะการทดสอบผ่านไป 1.8 กิโลเมตร มีค่าประมาณ 11.00-13.00 กิโลปาสกาล ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ น้ำมันไฮดรอลิกร้อนขึ้นทำให้ความหนืดของน้ำมันลดลงส่งผลให้ความดันภายในระบบลดลง และเมื่อระยะทางการทดสอบเพิ่มขึ้น ความดันในระบบไม่เปลี่ยนแปลง

ดังนั้น จากผลการทดลองดังกล่าวผลิตภัณฑ์ยางซีลกันรั่ว U-CUP ที่ได้จากการวิจัย (สูตรที่เติมพรีซีพิตเตตซิลิกาและซิลิติน) มีสมบัติทางกายภาพและเชิงกลโดยรวม เทียบเท่าสามารถใช้แทนผลิตภัณฑ์ยางซีลกันรั่ว U-CUP ทางการค้าได้

4.4.2 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาเชิงเศรษฐศาสตร์ของสารประกอบยางซีลที่ได้จากการวิจัยที่เหมาะสม คือ ยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมพรีซีพิตเตตซิลิกาที่ปริมาณ 50 phr (NBR/PSi-50) และยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมซิลิตินชนิดปรับปรุงผิวที่ปริมาณ 50 phr (NBR/PF216-50) โดยที่มีปริมาณเขม่าดำ 50 phr และน้ำมันอะโรมาติก 10 phr ดังแสดงในตารางที่ 4.12-4.13

ตารางที่ 4.13 การคำนวณราคาของผลิตภัณฑ์ยางซีลกันรั่ว U-CUP จากการวิจัย

สารเคมี	ปริมาณ (phr)	ราคา/กก (บาท).	ราคาตามปริมาณที่ใช้ในสูตรยาง (บาท)
1. ยางเอ็นบีอาร์ เกรด KYRNAC 3345F (ราคาขายวันที่ 18 พฤศจิกายน 2553)	100 ส่วน	106.00	10.60
2. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO)	5.00	125.00	0.70
3. กรดสเตียริก (Stearic acid)	1.50	65.00	0.10
4. ผงเขม่าดำ (N 550)	50.00	90.00	4.50
5. เททระเมทิลไทูรัม ไดซัลไฟด์ (Tetramethylthiuram disulfide, TMTD)	2.50	210.00	0.60
6. ไดเบนโซไทโซไทล ไดซัลไฟด์ (Dibenzothiazyl diulfide, MBTS)	0.70	320.00	0.30
7. กำมะถัน	2.00	40.00	0.08
8. น้ำมันอะโรมาติก (Aromatic oil) เกรด E101	10.0	125.00	1.25
รวมราคาสารเคมีที่ใช้ในสูตรยาง (บาท)			18.12
ราคาสารตัวเติม			
พรีซีพีเตตซิลิกา		ซิลิโคนชนิดปรับปรุงผิว เกรด AKTISIL PF 216	
ราคาปกติพรีซีพีเตตซิลิกา : 1 กิโลกรัม ราคา 35 บาท ราคาตามปริมาณการใช้ในสูตรยาง : 50 กรัม ราคา 1.75 บาท		ราคาปกติ : 1 กิโลกรัม ราคา 72 บาท ราคาตามปริมาณการใช้ในสูตรยาง : 50 กรัม ราคา 3.60 บาท	
ราคาปกติสารคู่ควบไซเลน (Couplink 89) : 1 กิโลกรัม ราคา 45 บาท ราคาตามปริมาณการใช้ในสูตรยาง : 2 กรัม ราคา 1.10 บาท			
ราคาปกติเอทานอล 95%เกรด การค้า : 20 ลิตร ราคา 1,200 บาท ราคาตามปริมาณการใช้ในสูตรยาง : 48 ลบ.ซม. ราคา 28.80 บาท			
รวมราคาสารเคมีที่มีสารตัวเติมพรีซีพีเตตซิลิกา เท่ากับ 66.50 บาทต่อสูตรยาง และเท่ากับ 665 บาทต่อ 1 กิโลกรัม		รวมราคาสารเคมีที่มีสารตัวเติมซิลิโคน เท่ากับ 38.50 บาทต่อสูตรยาง และเท่ากับ 385 บาทต่อ 1 กิโลกรัม	

การศึกษาเชิงเศรษฐศาสตร์ของสารประกอบยางซีล ดังแสดงในตารางที่ 4.13 พบว่า ยางซีลกันรั่ว U-CUP ยางเอ็นปีอาร์ผสมสารตัวเติมพรีซิพิเตตซิลิกาที่ปริมาณ 50 phr (NBR/PSi-50) ราคาประมาณ 665 บาทต่อ 1 กิโลกรัม และยางเอ็นปีอาร์ผสมสารตัวเติมซิลิโคนชนิดปรับปรุงผิว ที่ปริมาณ 50 phr (NBR/PF216-50) ราคาประมาณ 385 บาทต่อ 1 กิโลกรัม โดยมีปริมาณเคมีค่า 50 phr และน้ำมันอะโรมาติก 10 phr สามารถนำไปผลิตขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางซีลกันรั่ว U-CUP ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก 45 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 35 มิลลิเมตร ความหนา 5 มิลลิเมตร ได้ประมาณ 200 ชิ้น ถ้าคิดราคาของผลิตภัณฑ์ยางซีลกันรั่ว U-CUP จากการวิจัยดังแสดงในตารางที่ 4.14 สูตร NBR/PSi-50 มีราคาต้นทุนเท่ากับ 3.30 บาทต่อชิ้น และสูตร NBR/PF216-50 มีราคาต้นทุนเท่ากับ 2.20 บาทต่อชิ้น (ไม่รวมค่าแรงงานและค่าเครื่องจักร) สำหรับราคาผลิตภัณฑ์ยางซีลกันรั่วเอ็นปีอาร์ U-CUP ทางการค้าที่นำเข้าจากต่างประเทศมีราคาขายเท่ากับ 45 บาทต่อชิ้น (รวมค่าแรงงานและค่าเครื่องจักร) คิดเฉพาะวัตถุดิบของผลิตภัณฑ์ซีลเกรดการค้ามีราคา 32 บาทต่อชิ้น ดังนั้น เห็นได้ว่าราคาของผลิตภัณฑ์ยางซีลกันรั่วที่ได้จากงานวิจัยมีราคาต่ำกว่า 88 เปอร์เซ็นต์ (ในสารตัวเติมพรีซิพิเตตซิลิกา) และต่ำกว่า 91 เปอร์เซ็นต์ (ในสารตัวเติมซิลิโคนชนิดปรับปรุงผิว) เมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ยางซีลกันรั่วทางการค้าที่นำเข้าจากต่างประเทศ

ตารางที่ 4.14 การเปรียบเทียบราคาของผลิตภัณฑ์ยางซีลกันรั่ว U-CUP จากการวิจัยกับผลิตภัณฑ์ยางซีลกันรั่ว U-CUP ทางการค้า

ประเภทของยางซีล	ราคา (บาท)
ต้นทุนวัตถุดิบยางซีลกันรั่ว U-CUP ที่ได้จากการวิจัยต่อชิ้นผลิตภัณฑ์* (ไม่รวมค่าแรง / เครื่องจักร)	
• NBR/PSi-50	3.30
• NBR/PF216-50	2.20
ยางซีลกันรั่ว U-CUP ทางการค้าที่นำเข้าจากต่างประเทศต่อชิ้นงาน (ข้อมูลจากผู้จำหน่าย บริษัท โพลีซีล แทร็ค จำกัด ไม่รวมค่าแรง / เครื่องจักร)	32
ผลิตภัณฑ์ยางซีลกันรั่ว U-CUP จากการวิจัย สูตร NBR/PSi-50 มีราคาถูกกว่าประมาณ 88 เปอร์เซ็นต์ และสูตร NBR/PF216-50 มีราคาถูกกว่าประมาณ 91 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ยางซีลกันรั่ว U-CUP ทางการค้า	

*(สารประกอบยาง 1 กิโลกรัมราคา 2000 บาท สามารถผลิตยางซีล U-CUP ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอกxใน xหนา เท่ากับ 45 x 35 x 5 มิลลิเมตร ได้ประมาณ 200 ชิ้น)