

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

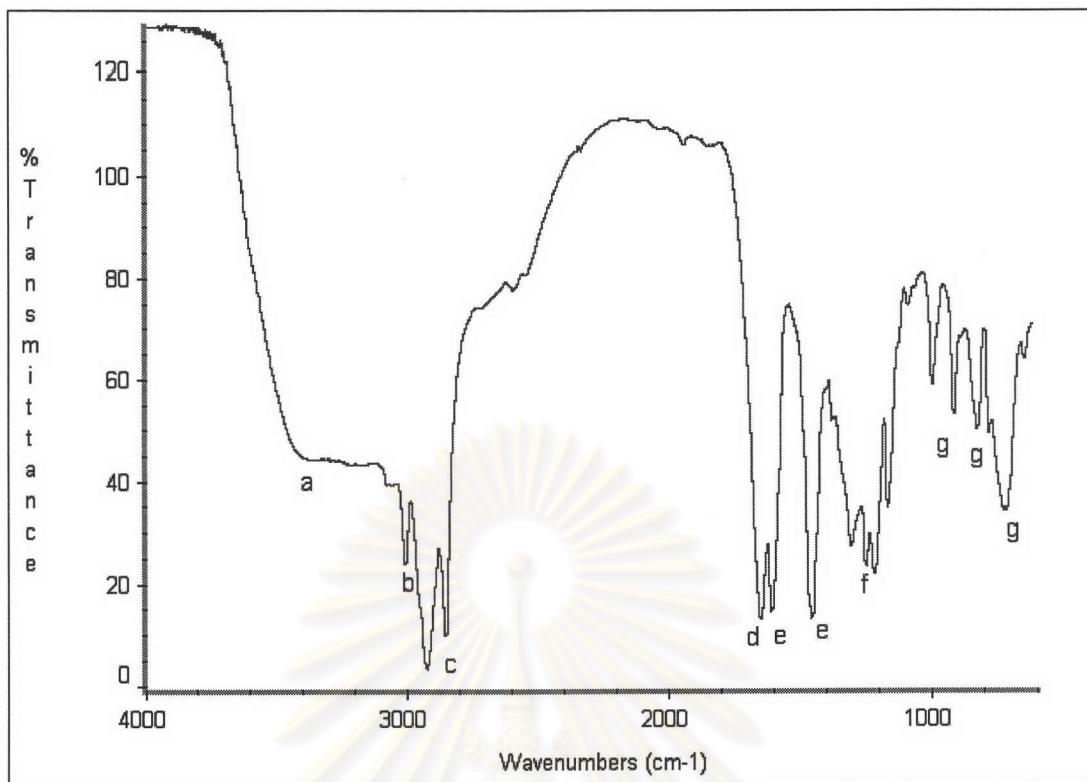
4.1 การสังเคราะห์คาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน

4.1.1 การสกัดน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (CNSL)

น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่สกัดได้เป็นของเหลวหนืดสีดำคล้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 สามารถละลายได้ในเฮกเซน โทลูอีน และอะซิโตน ผลของการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR แสดงไว้ในรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (CNSL)



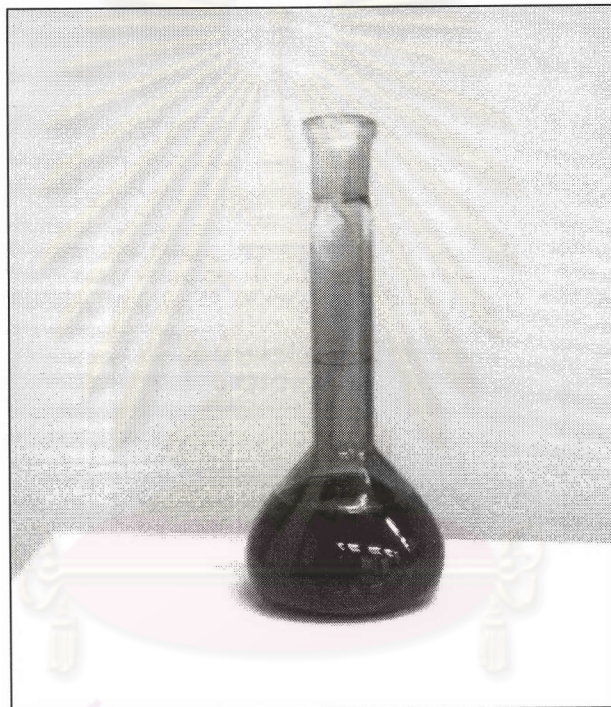
รูปที่ 4.2 FT-IR สเปกตรัมของ CNSL

ตารางที่ 4.1 หมู่ฟังก์ชัน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของ CNSL

ตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชัน (cm^{-1})	ลักษณะเฉพาะที่เกิด (assignment)
a : 3600 – 3200	O-H stretching ของคาร์บอกซิลิก
b : 3040 – 3012	C-H stretching ของเบนซีน
c : 2940 – 2902	C-H asymmetric stretching ของหมู่เมทิล
c : 2820 – 2800	C-H symmetric stretching ของหมู่เมทิล
d : 1670 – 1640	C=O asymmetric stretching ของคาร์บอกซิลิก
e : 1615 – 1601	C=C stretching ของเบนซีน
e : 1500 – 1427	C=C stretching ของเบนซีน
f : 1309 – 1200	C-O stretching ของคาร์บอกซิลิก
g : 1100 - 900	C-H in plane deformation 1,2,3-tri-substituted ของเบนซีน
g : 875 - 800	C-H out of plane deformation 1,2,3-tri-substituted ของเบนซีน
g : 770 - 750	C-H out of plane deformation mono-substituted ของเบนซีน

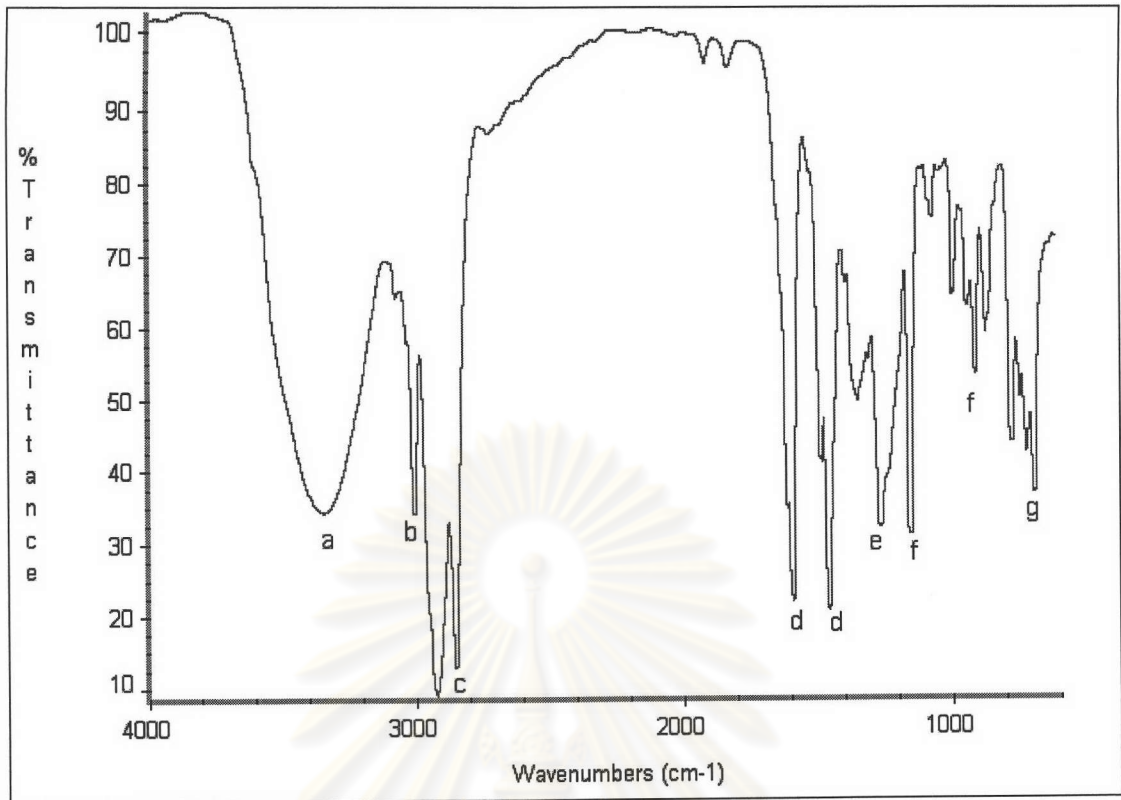
4.1.2 การเตรียมคาร์ดานอลจาก CNSL

คาร์ดานอลที่เตรียมได้เป็นของเหลวสีน้ำตาลแดงเข้ม ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งสามารถละลายได้ในเฮกเซน โทลูอีน และอะซิโตน เช่นเดียวกับ CNSL ภายหลังจากนำ CNSL ไปผ่านกระบวนการดีคาร์บอซิเลชันแล้ว พิกของหมู่คาร์บอซิลิกทั้ง 2 ตำแหน่ง ได้หายไป และมีตำแหน่งของไฮโดรเจนบริเวณวงแหวนเบนซีนเข้ามาแทนที่^{23 - 25} ผลการวิเคราะห์คาร์ดานอลที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค FT-IR แสดงไว้ในรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.3 คาร์ดานอล

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

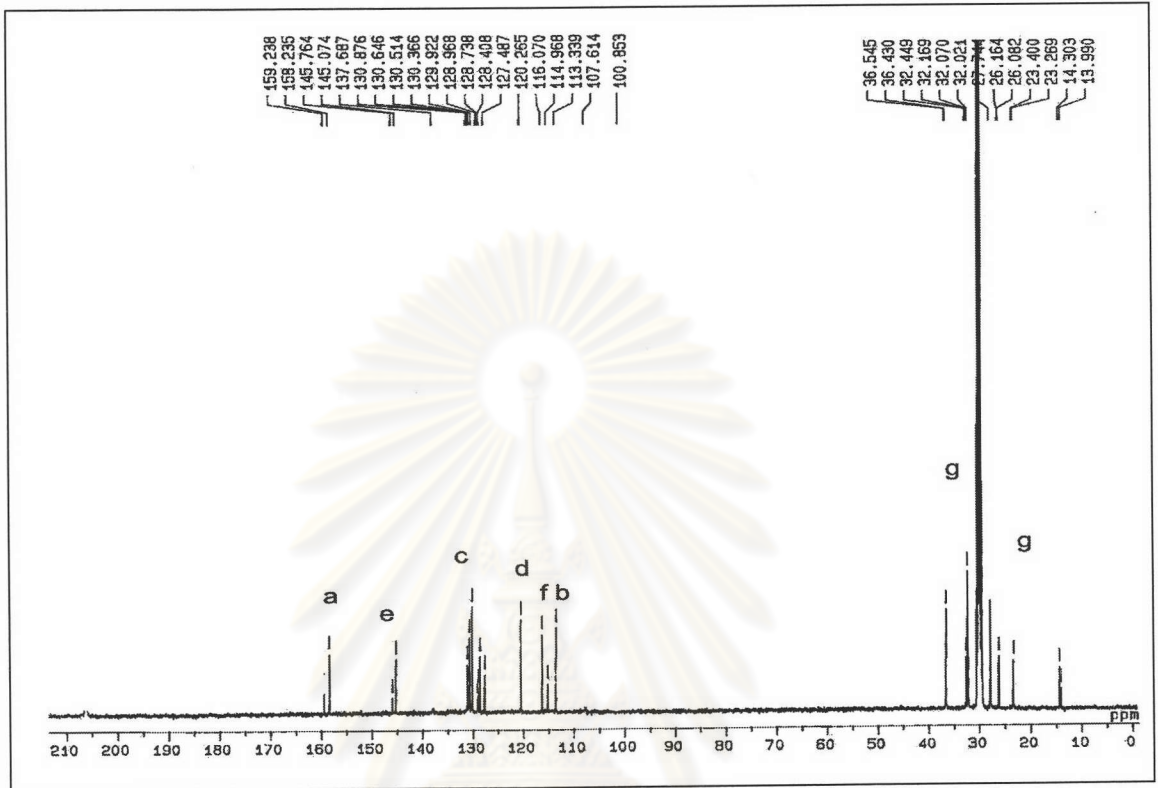


รูปที่ 4.4 FT-IR สเปกตรัมของคาร์ดินอล

ตารางที่ 4.2 หมู่ฟังก์ชัน ณ ตำแหน่งต่างๆ ของคาร์ดินอล

ตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชัน (cm^{-1})	ลักษณะเฉพาะที่เกิด (assignment)
a : 3600 – 3200	O-H stretching ของฟีนอล
b : 3040 – 3012	C-H stretching ของเบนซีน
c : 2940 – 2902	C-H asymmetric stretching ของหมู่เมทิล
c : 2820 – 2800	C-H symmetric stretching ของหมู่เมทิล
d : 1615 – 1601	C=C stretching ของเบนซีน
d : 1500 – 1427	C=C stretching ของเบนซีน
e : 1309 – 1200	C-O asymmetric stretching ของฟีนอล
f : 1100 - 900	C-H in plane deformation 1,2,3-tri-substituted ของเบนซีน
f : 875 - 800	C-H out of plane deformation 1,2,3-tri-substituted ของเบนซีน
g : 770 - 750	C-H out of plane deformation mono-substituted ของเบนซีน

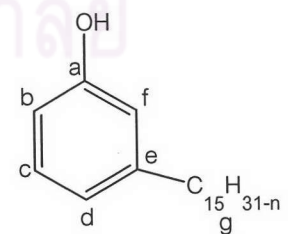
เมื่อนำสารที่เตรียมได้ไปหาลักษณะเฉพาะด้วยเทคนิค NMR เพื่อยืนยันว่าเป็นคาร์ดานอล ซึ่งผลที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.3^{23,25}



รูปที่ 4.5 ^{13}C NMR สเปกตรัมของคาร์ดานอลใน CDCl_3

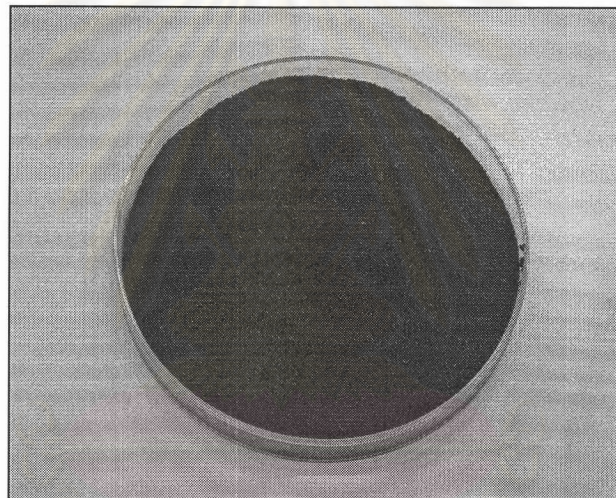
ตารางที่ 4.3 คาร์บอน ณ ตำแหน่งต่างๆ ของ คาร์ดานอล

ตำแหน่ง (PPM)	ลักษณะของโครงสร้าง
160	a
146 - 130	e
129	c
121	d
115	f
112	b
10 - 40	g



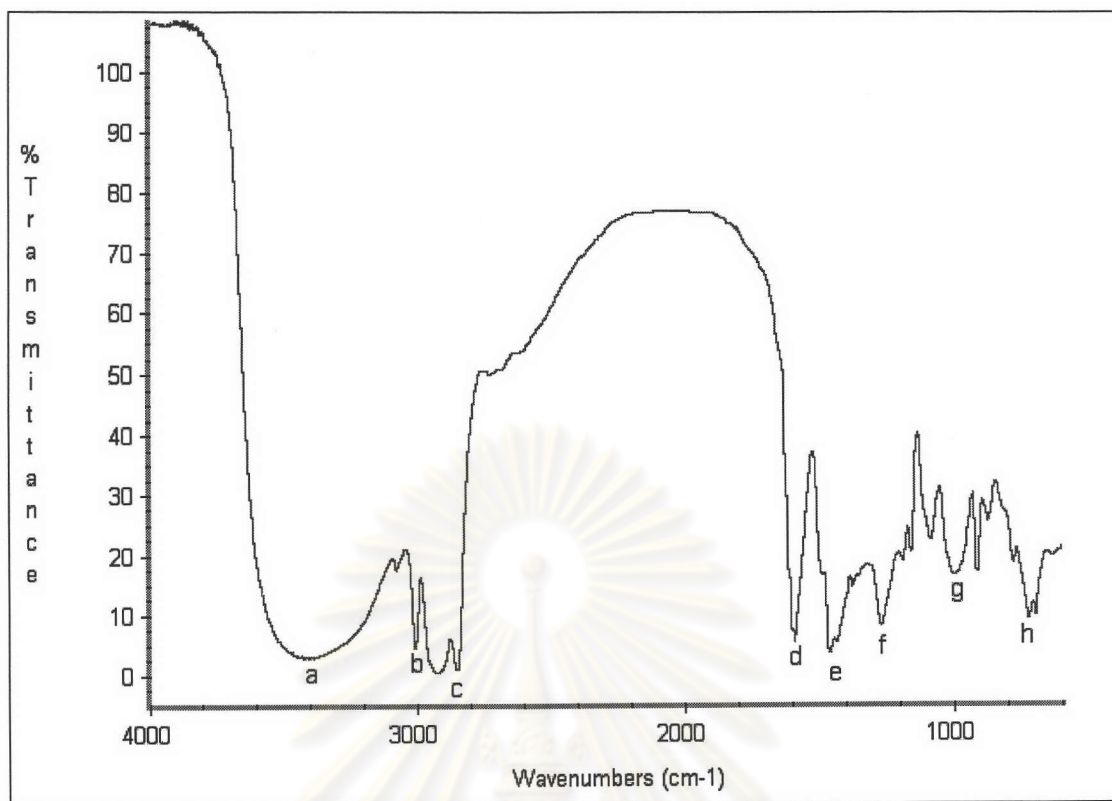
4.1.3 การสังเคราะห์คาร์ดานอล-พอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซล

คาร์ดานอล-พอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซลที่เตรียมได้เป็นของแข็งสีน้ำตาลแดงเข้ม รูปที่ 4.6 แสดงเรซินที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดแบบบอลมิลล์แล้ว และเมื่อนำเรซินที่ได้ไปหาขนาดอนุภาคด้วยเทคนิค Particle Size Analyzer พบว่า เรซินมีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย 58.90 ไมโครเมตร เรซินที่ได้สามารถละลายในเมทานอล และโทลูอีน แต่ไม่ละลายในน้ำ ผลการวิเคราะห์เรซินด้วยเทคนิค FT-IR แสดงไว้ในรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.4 ซึ่งพิกที่ได้คล้ายกับพิกของฟีนอลิกเรซินชนิดรีโซล²⁶⁻²⁸ ต่างกันตรงตำแหน่งการสั่นของหมู่เมทิลในคาร์ดานอลพอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซลนั้นชัดเจน และมีความเข้มข้นมากกว่า เนื่องจากโครงสร้างของคาร์ดานอลมี สายโซ่ของคาร์บอนต่อกันอยู่ถึง 15 อะตอม



รูปที่ 4.6 คาร์ดานอล-พอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซลที่ผ่านการบดด้วยบอลมิลล์แล้ว

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.7 FT-IR สเปกตรัมของคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซล

ตารางที่ 4.4 หมู่ฟังก์ชัน ณ ตำแหน่งต่างๆ ของ คาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซล

ตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชัน (cm ⁻¹)	ลักษณะเฉพาะที่เกิด (assignment)
a : 3600 – 3200	O-H stretching ของฟีนอลิกและหมู่เมทิลแอลกอฮอล์
b : 3035 – 3012	C-H stretching ของเบนซีน
c : 2980 – 2912	C-H asymmetric stretching ของหมู่เมทิล
d : 1650 – 1611	C=C stretching ของเบนซีน
e : 1480 – 1407	C-H deformation ของอะลิฟาติกคาร์บอน
f : 1309 – 1212	C-O in plane stretching ของฟีนอลิก
g : 1010 - 900	C-O stretching ของหมู่เมทิลแอลกอฮอล์ ตำแหน่งนี้ในเรซินชนิดโนโวแลกปรากฏน้อยมาก
h : 875 - 800	C-H out of plane deformation 1,2,3-tri-substituted ของเบนซีน

ตารางที่ 4.5 แสดงเปอร์เซ็นต์ผลได้ของคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซลเมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของฟอร์มัลดีไฮด์/คาร์ดานอล ([F]/[C]) ต่าง ๆ กัน ซึ่งถูกควบคุมให้มีค่า pH เท่ากับ 8 ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซินที่ใช้อัตราส่วนโดยโมล [F]/[C] ต่าง ๆ กัน

[F]/[C]	นน. รวมของสารตั้งต้น (กรัม)	นน. รวมหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา (กรัม)	นน. รวมหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา 48 ชม. (กรัม)	นน.รวมหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา 72 ชม. (กรัม)	(% yield)
1.6	30.133	23.774	20.312	20.264	67.25
1.8	30.401	24.609	21.396	21.317	70.12
2.0	30.604	26.412	21.832	22.613	73.82
2.2	30.901	23.216	21.812	21.730	70.32

ตารางที่ 4.6 แสดงผลของการนำคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซลที่ได้ไปทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

ตารางที่ 4.6 สมบัติทางความร้อนของคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซล

[F]/[C]	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว (°C)	มวลที่สูญเสียไป (% mass loss)
1.6	433.7	74.2
1.8	425.6	78.7
2.0	461.2	79.6
2.2	431.8	91.4

จากตารางที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซินที่มากที่สุด คือ เมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของ [F]/[C] เท่ากับ 2.0 และจากตารางที่ 4.6 เรซินที่อัตราส่วนโดยโมลของ [F]/[C] เท่ากับ 2.0 มีค่าการทนความร้อนมากที่สุด ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกอัตราส่วนโดยโมลของ [F]/[C] เท่ากับ 2.0 เพื่อใช้หาค่า pH ที่เหมาะสมในการเตรียมคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซลต่อไป

ตารางที่ 4.7 แสดงเปอร์เซ็นต์ผลได้ของคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซลเมื่อใช้ pH ของปฏิกิริยาต่างๆ กัน ซึ่งมีอัตราส่วนโดยโมลของ $[F]/[C]$ เท่ากับ 2.0 ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.7 เปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซินที่ใช้ pH ของปฏิกิริยาต่าง ๆ กัน

pH	นน. รวมของสารตั้งต้น (กรัม)	นน.รวมหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา (กรัม)	นน.รวมหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา 48 ชม. (กรัม)	นน.รวมหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา 72 ชม. (กรัม)	(%yield)
7.6	30.622	26.306	20.864	20.299	66.29
7.8	30.604	22.823	21.983	21.952	71.73
8.0	30.633	26.412	23.832	22.613	73.82
8.2	30.600	25.694	23.776	23.390	73.17
8.4	30.693	25.298	23.756	22.486	73.26

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการนำคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซลที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

ตารางที่ 4.8 สมบัติทางความร้อนของเรซิน

pH	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว ($^{\circ}C$)	มวลที่สูญเสียไป (% mass loss)
7.6	425.4	78.6
7.8	438.5	95.4
8.0	450.6	75.8
8.2	439.2	94.9
8.4	446.4	76.0

จากตารางที่ 4.7 พบว่าเรซินที่เตรียมโดยใช้ pH ของปฏิกิริยาเท่ากับ 8.0 ให้เปอร์เซ็นต์ผลได้มากที่สุด และจากตารางที่ 4.8 เรซินที่เตรียมโดย pH เท่ากับ 8.0 มีค่าการทนความร้อนมากที่สุด ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกค่า pH เท่ากับ 8.0 เพื่อใช้หาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเตรียมคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซลต่อไป

ตารางที่ 4.9 แสดงเปอร์เซ็นต์ผลได้ของคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซลที่เตรียมได้เมื่อใช้อุณหภูมิต่าง ๆ กัน ซึ่งอัตราส่วนโดยโมลของ [F]/[C] เท่ากับ 2.0 และมีค่า pH เท่ากับ 8 เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.9 เปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซินที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ	นน. รวมของสารตั้งต้น (กรัม)	นน. รวมหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา (กรัม)	นน. รวมหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา 48 ชม. (กรัม)	นน. รวมหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา 72 ชม. (กรัม)	(%yield)
70	30.622	24.128	22.468	21.948	71.58
80	30.633	26.412	23.832	22.613	73.82
90	30.592	25.239	24.126	23.057	75.37
100	30.627	23.776	22.563	22.410	73.17

ตารางที่ 4.10 แสดงผลการนำคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซลที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

ตารางที่ 4.10 สมบัติทางความร้อนของเรซิน

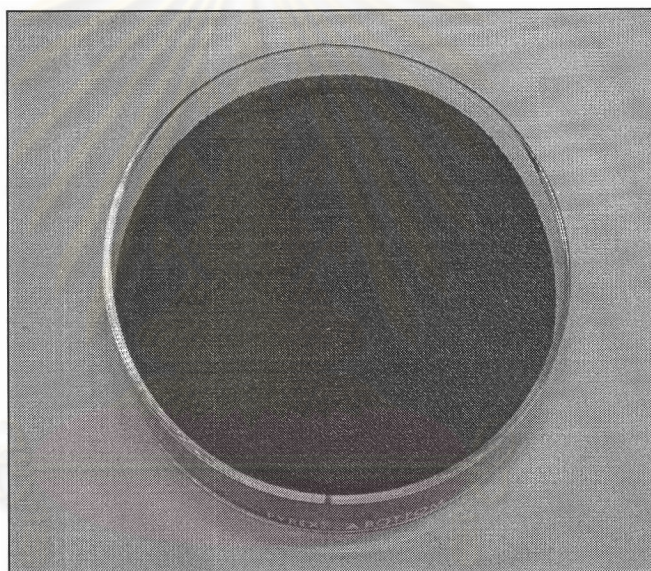
อุณหภูมิ	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว (°C)	มวลที่สูญเสียไป (% mass loss)
70	441.3	68.7
80	455.9	92.0
90	456.2	91.3
100	446.4	74.7

จากตารางที่ 4.9 พบว่าเรซินที่เตรียมได้จากการใช้อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ให้เปอร์เซ็นต์ผลได้มากที่สุด และจากตารางที่ 4.10 เรซินที่ได้จากการใช้อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส มีค่าการทนความร้อนมากที่สุด

ดังนั้น ในการสังเคราะห์คาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซลเพื่อนำไปใช้ผสมกับยางธรรมชาติได้ใช้ภาวะของปฏิกิริยา ดังนี้ คือ อัตราส่วนโดยโมลของฟอร์มัลดีไฮด์/คาร์ดานอล เท่ากับ 2.0 ค่า pH เท่ากับ 8.0 และอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

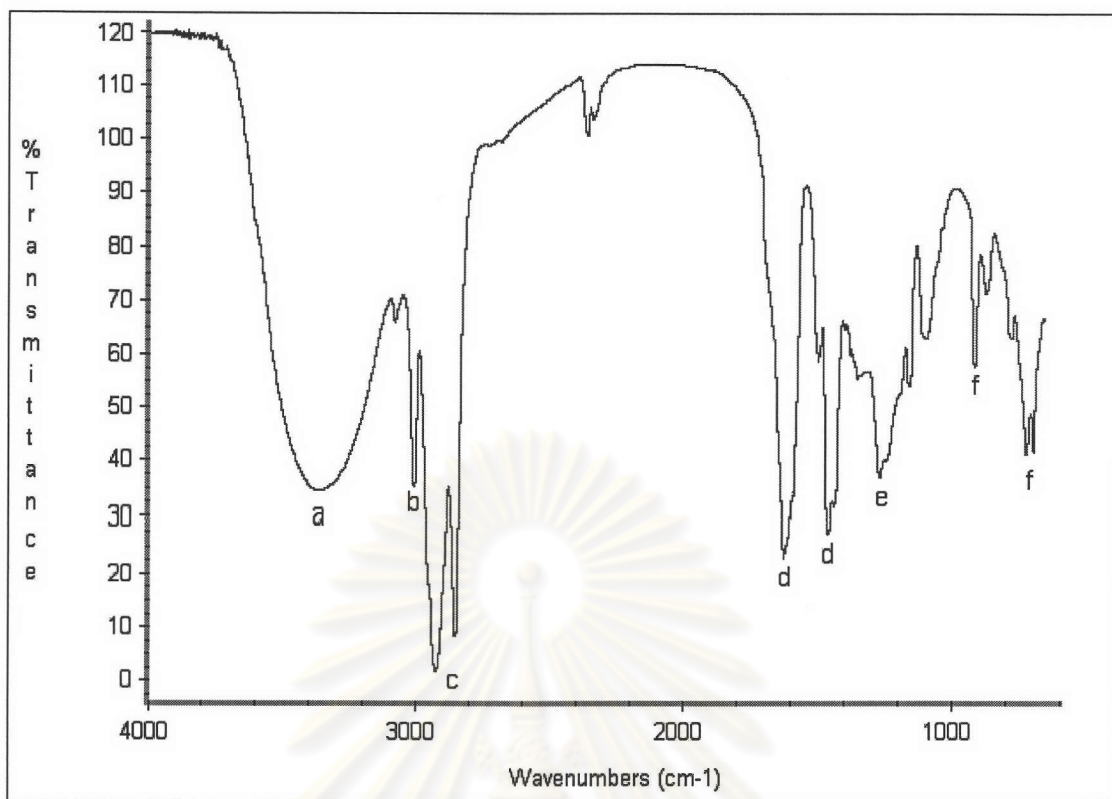
4.1.4 การสังเคราะห์คาร์ดานอล-พอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลก

คาร์ดานอล-พอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลกที่เตรียมได้ เป็นของแข็งสีน้ำตาลแดงเข้ม รูปที่ 4.8 แสดงเรซินที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดแบบบอลมิลล์แล้ว และเมื่อนำเรซินที่ได้ไปหาขนาดอนุภาคโดยใช้เทคนิค Particle Size Analyzer พบว่า เรซินมีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย 57.14 ไมโครเมตร เรซินชนิดนี้สามารถละลายในเมทานอล และโทลูอีน แต่ไม่ละลายในน้ำ ผลการวิเคราะห์เรซินโดยใช้เทคนิค FT-IR แสดงไว้ในรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.11 ซึ่งพิกที่ได้มีลักษณะคล้ายกับพิกของพีนอลิกเรซินชนิดโนโวแลก^{26 - 28} แต่ต่างกันตรงตำแหน่งการสั่นของหมู่เมทิลที่อยู่บนคาร์ดานอล-พอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลกนั้น ชัดเจนและมีความเข้มมากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของคาร์ดานอลมีสายโซ่ของคาร์บอนต่อกันอยู่ถึง 15 อะตอม



รูปที่ 4.8 คาร์ดานอล-พอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลกที่ผ่านการบดด้วยบอลมิลล์แล้ว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.9 FT-IR สเปกตรัมของคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลก

ตารางที่ 4.11 หมู่ฟังก์ชัน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของ คาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลก

ตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชัน (cm^{-1})	ลักษณะเฉพาะที่เกิด (assignment)
a : 3600 – 3200	O-H stretching ของฟีนอล
b : 3025 – 3012	C-H stretching ของเบนซีน
c : 2950 – 2910	C-H asymmetric stretching ของหมู่เมทิล
c : 2840 – 2820	C-H symmetric stretching ของหมู่เมทิล
d : 1640 – 1615	C=C stretching ของเบนซีน
d : 1580 – 1508	C=C stretching ของเบนซีน
e : 1309 – 1240	C-O asymmetric stretching ของฟีนอล
f : 1180 - 1090	C-H in plane deformation 1,2,3-tri-substituted ของเบนซีน
f : 875 - 800	C-H out of plane deformation 1,2,3-tri-substituted ของเบนซีน

ตารางที่ 4.12 แสดงเปอร์เซ็นต์ผลได้ของคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลก เมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของฟอร์มัลดีไฮด์/คาร์ดานอล ([F]/[C]) ต่าง ๆ กัน ซึ่งถูกควบคุมให้มีค่า pH เท่ากับ 2.2 ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.12 เปอร์เซนต์ผลได้ของเรซินที่ใช้อัตราส่วนโดยโมล ([F]/[C]) ต่าง ๆ กัน

[F]/[C]	นน. รวมของสารตั้งต้น (กรัม)	นน. รวมหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา (กรัม)	นน.รวมหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา 48 ชม. (กรัม)	นน.รวมหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา 72 ชม. (กรัม)	(% yield)
0.6	11.639	10.176	8.421	8.037	69.05
0.7	13.346	12.449	10.674	10.091	75.61
0.8	14.976	12.923	12.126	11.934	79.68
0.9	16.737	14.126	13.769	12.523	74.82

ตารางที่ 4.13 แสดงผลของการนำคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลกที่ได้ไปทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

ตารางที่ 4.13 สมบัติทางความร้อนของเรซิน

[F]/[C]	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว (°C)	มวลที่สูญเสียไป (% mass loss)
0.6	431.6	76.4
0.7	442.3	78.7
0.8	451.2	71.2
0.9	446.8	92.6

จากตารางที่ 4.12 เปอร์เซนต์ผลได้ของเรซินที่มากที่สุด คือ เมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของ [F]/[C] เท่ากับ 0.8 และจากตารางที่ 4.13 พบว่าเรซินที่อัตราส่วนโดยโมลของ [F]/[C] เท่ากับ 0.8 มีค่าการทนความร้อนมากที่สุด ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกอัตราส่วนโดยโมลของ [F]/[C] เท่ากับ 0.8 เพื่อใช้หาค่า pH ที่เหมาะสมในการเตรียมคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลกต่อไป

ตารางที่ 4.14 แสดงเปอร์เซ็นต์ผลได้ของคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลกเมื่อใช้ pH ของปฏิกิริยาต่างๆ กัน ซึ่งมีอัตราส่วนโดยโมลของ [F]/[C] เท่ากับ 0.8 ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.14 เปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซินที่ใช้ pH ของปฏิกิริยาต่าง ๆ กัน

pH	นน.รวมของสารตั้งต้น (กรัม)	นน.รวมหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา (กรัม)	นน.รวมหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา 48 ชม. (กรัม)	นน.รวมหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา 72 ชม. (กรัม)	(% yield)
1.8	15.049	13.164	11.964	11.323	75.24
2.0	15.093	13.082	12.103	11.505	76.23
2.2	14.976	12.923	12.126	11.934	79.68
2.4	15.087	12.694	11.119	10.570	70.06

ตารางที่ 4.15 แสดงผลการนำคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลกที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

ตารางที่ 4.15 สมบัติทางความร้อนของเรซิน

pH	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว (°C)	มวลที่สูญเสียไป (% mass loss)
1.8	439.2	76.1
2.0	446.3	92.3
2.2	456.7	79.8
2.4	449.5	93.1

จากตารางที่ 4.14 พบว่าเรซินที่เตรียมได้จากการใช้ pH ของปฏิกิริยาเท่ากับ 2.2 ให้เปอร์เซ็นต์ผลได้มากที่สุด และจากตารางที่ 4.15 พบว่าเรซินที่ใช้ pH เท่ากับ 2.2 มีค่าการทนความร้อนมากที่สุด ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกค่า pH เท่ากับ 2.2 เพื่อใช้หาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเตรียมคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลกต่อไป

ตารางที่ 4.16 แสดงเปอร์เซ็นต์ผลได้ของคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลกที่เตรียมได้เมื่อใช้อุณหภูมิต่างๆ กัน ซึ่งมีอัตราส่วนโดยโมลของ [F]/[C] เท่ากับ 0.8 และมีค่า pH เท่ากับ 2.2 เป็นเวลา 7 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.16 เปอร์เซนต์ผลได้ของเรซินที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ	นน. รวมของสารตั้งต้น (กรัม)	นน. รวมหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา (กรัม)	นน. รวมหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา 48 ชม. (กรัม)	นน. รวมหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา 72 ชม. (กรัม)	(%yield)
80	15.057	13.026	11.146	10.310	68.47
90	15.063	13.178	11.298	10.963	72.78
100	14.976	12.923	12.126	11.934	79.68
110	15.064	13.205	12.146	11.191	74.29

ตารางที่ 4.17 แสดงผลการนำคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลกที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

ตารางที่ 4.17 สมบัติทางความร้อนของเรซิน

อุณหภูมิ	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว (°C)	มวลที่สูญเสียไป (% mass loss)
80	443.7	91.3
90	439.1	92.0
100	452.6	68.7
110	438.4	78.7

จากตารางที่ 4.16 พบว่าเรซินที่เตรียมได้จากการใช้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ให้เปอร์เซ็นต์ผลได้มากที่สุด และจากตารางที่ 4.17 พบว่าเรซินที่ได้จากการใช้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส มีค่าการทนความร้อนมากที่สุด

ดังนั้น ในการสังเคราะห์คาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลกเพื่อนำไปผสมกับยางธรรมชาติได้ใช้ภาวะของปฏิกิริยา ดังนี้ คือ อัตราส่วนโดยโมลของฟอร์มัลดีไฮด์/คาร์ดานอล เท่ากับ 0.8 ค่า pH เท่ากับ 2.2 และอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 ชั่วโมง

4.2 การผสมเรซินกับยางธรรมชาติและสารเคมีอื่น ๆ

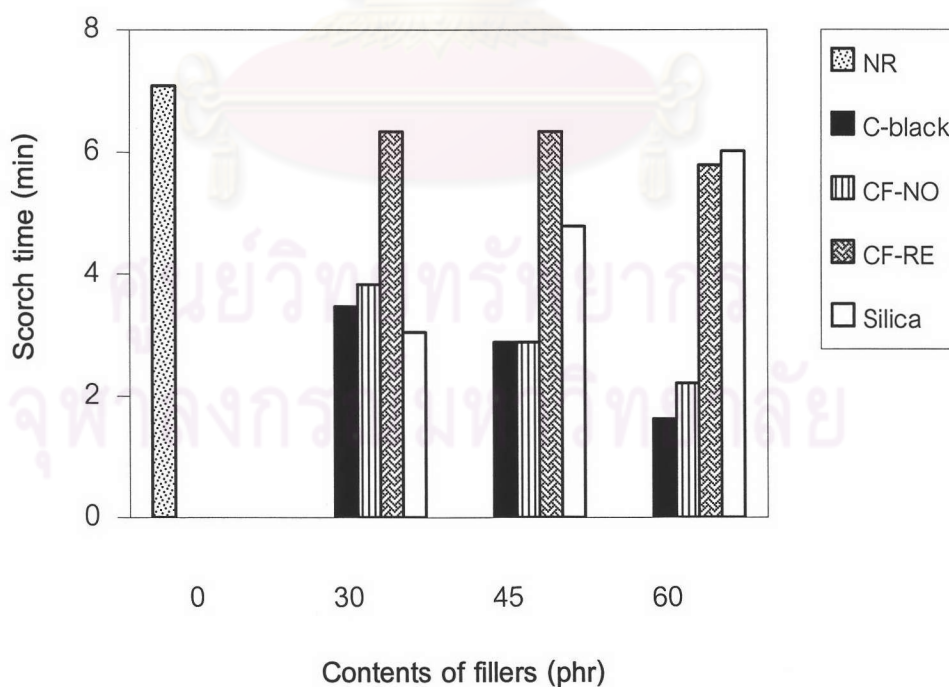
4.2.1 เวลาที่ยางเริ่มวัลคาไนซ์ (Scorch time) และเวลาการวัลคาไนซ์ (95% Cure time)

เวลาที่ยางผสมวัลคาไนซ์ (Scorch time)

ยางธรรมชาติที่ไม่ได้ผสมสารตัวเติมเสริมแรง มีเวลาที่ยางเริ่มวัลคาไนซ์ 7.08 นาที ส่วนเวลาที่ยางเริ่มวัลคาไนซ์ของยางที่ผสมสารตัวเติมเสริมแรงชนิดต่างๆ ในปริมาณต่างๆกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.18 และรูปที่ 4.10

ตารางที่ 4.18 เวลาที่ยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงเริ่มวัลคาไนซ์

ปริมาณ สารตัวเติม (phr)	เวลาที่ยางเริ่มวัลคาไนซ์ (นาที)			
	C-black	CF-NO	CF-RE	Silica
30	3.46	3.83	6.33	3.04
45	2.88	2.88	6.33	4.79
60	1.62	2.21	5.79	6.01



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเริ่มวัลคาไนซ์กับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง

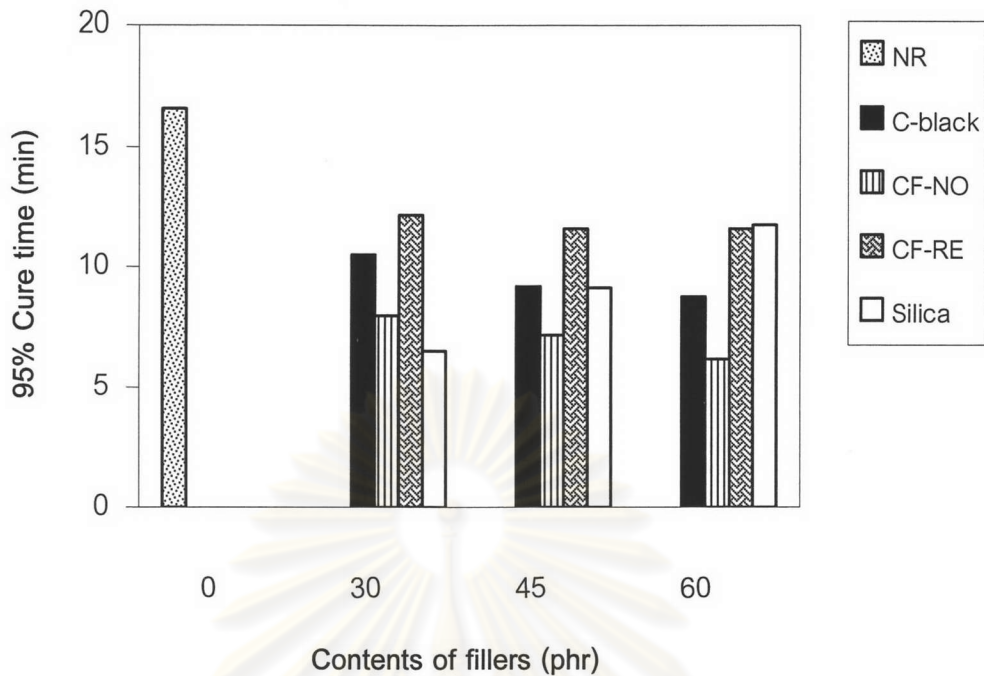
ตารางที่ 4.18 และรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าเวลาที่ยางเริ่มวัลคาไนซ์มีค่าลดลง เมื่อใส่สารตัวเติมเสริมแรงปริมาณมากขึ้น ยกเว้นซิลิกา ทั้งนี้เนื่องจากคาร์บอนแบล็กมีขนาดอนุภาคเล็กมาก (คาร์บอนแบล็ก N330 มีขนาดอนุภาค 26 – 30 นาโนเมตร) จึงมีพื้นที่ผิวมาก เมื่อบดผสมกับยางในเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้งที่มีอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ได้ส่งผลให้เกิดความร้อนสะสมขึ้นภายในยาง ซึ่งความร้อนที่เพิ่มมากขึ้นทำให้สารเคมีทำปฏิกิริยากับยางได้เร็วขึ้น ส่วนยางผสมโนโวแลกเรซินมีเวลาที่ยางเริ่มวัลคาไนซ์ใกล้เคียงกับยางผสมคาร์บอนแบล็ก และยางผสมรีไซเคิลเรซินมีเวลาที่ยางเริ่มวัลคาไนซ์ไปในทำนองเดียวกัน แต่ใช้เวลาในการเริ่มวัลคาไนซ์ช้ากว่า ซึ่งเป็นผลดีในกรณีที่ไม่ต้องการให้ยางเริ่มการวัลคาไนซ์เร็วเกินไป สำหรับการที่ยางผสมรีไซเคิลและโนโวแลก มีพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ต่างกัน เนื่องจากเรซินทั้งสอง มีลักษณะการเชื่อมขวางต่างกัน โดยการเชื่อมขวางโนโวแลกต้องใส่ HMTA เข้าไป จึงทำให้การเชื่อมขวางมีอะตอมของไนโตรเจนอยู่ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ในขณะที่รีไซเคิลไม่มีเพราะสามารถเกิดการเชื่อมขวางได้เอง ซึ่งมีผลให้โนโวแลกเรซินช่วยเร่งยางให้เริ่มวัลคาไนซ์ได้เร็วขึ้น ส่วนซิลิกาถึงแม้จะมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าคาร์บอนอล-ฟอรัลดีไฮด์เรซินทั้งสองชนิด คือ มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 1.9 – 8.8 ไมครอน แต่ซิลิกาสามารถจับตัวกันเองเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นตามโครงสร้างที่มีขั้วของซิลิกา ทำให้การวัลคาไนซ์ยางเกิดได้ยากเมื่อใส่ในปริมาณมาก จึงทำให้เวลาที่ยางเริ่มวัลคาไนซ์เพิ่มมากขึ้น

เวลาการวัลคาไนซ์ (95% Cure time)

ยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติมเสริมแรงมีเวลาการวัลคาไนซ์ 16.58 นาที ส่วนเวลาการวัลคาไนซ์ ของยางที่ผสมสารตัวเติมเสริมแรงชนิดต่างๆ ในปริมาณต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.19 และรูปที่ 4.11

ตารางที่ 4.19 เวลาที่ยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงเกิดการวัลคาไนซ์

ปริมาณ สารตัวเติม (phr)	เวลาวัลคาไนซ์ (นาที)			
	C-black	CF-NO	CF-RE	Silica
30	10.50	7.96	12.17	6.50
45	9.19	7.17	11.58	9.11
60	8.76	6.17	11.58	11.75



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาวัลคาไนซ์กับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง

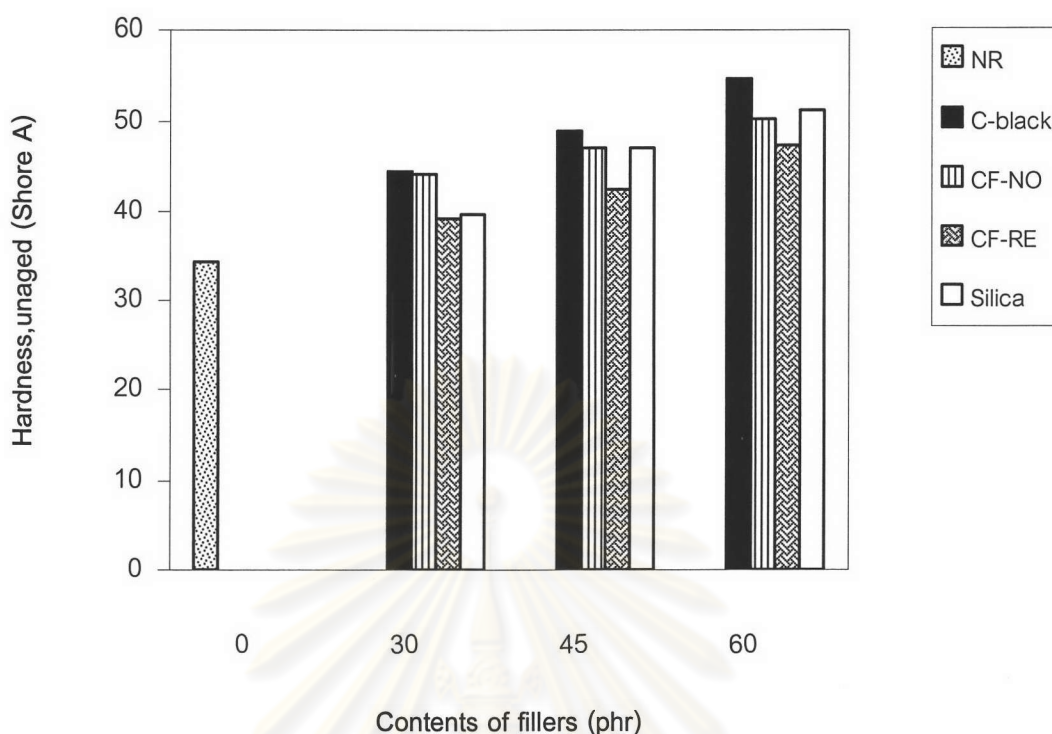
จากตารางที่ 4.19 และรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าเวลาการวัลคาไนซ์มีค่าลดลงเมื่อใส่สารตัวเติมเสริมแรงปริมาณมากขึ้น ยกเว้นซิลิกา ก็เนื่องด้วยสาเหตุเดียวกับผลของยางเริ่มวัลคาไนซ์ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

4.2.2 ความแข็ง (Hardness)

ความแข็งของยางที่ไม่ได้ผสมสารตัวเติมเสริมแรง ก่อนอบเร่งด้วยความร้อนมีค่า 34.3 (Shore A) ส่วนความแข็งของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงชนิดต่างๆ ในปริมาณต่างๆ กันก่อนผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน แสดงไว้ในตารางที่ 4.20 และรูปที่ 4.12

ตารางที่ 4.20 ความแข็งของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงก่อนอบเร่งด้วยความร้อน

ปริมาณ สารตัวเติม (phr)	ความแข็ง (Shore A)			
	C-black	CF-NO	CF-RE	Silica
30	44.5	44.2	39.2	39.7
45	49.0	47.1	42.5	47.1
60	54.7	50.3	47.4	51.3



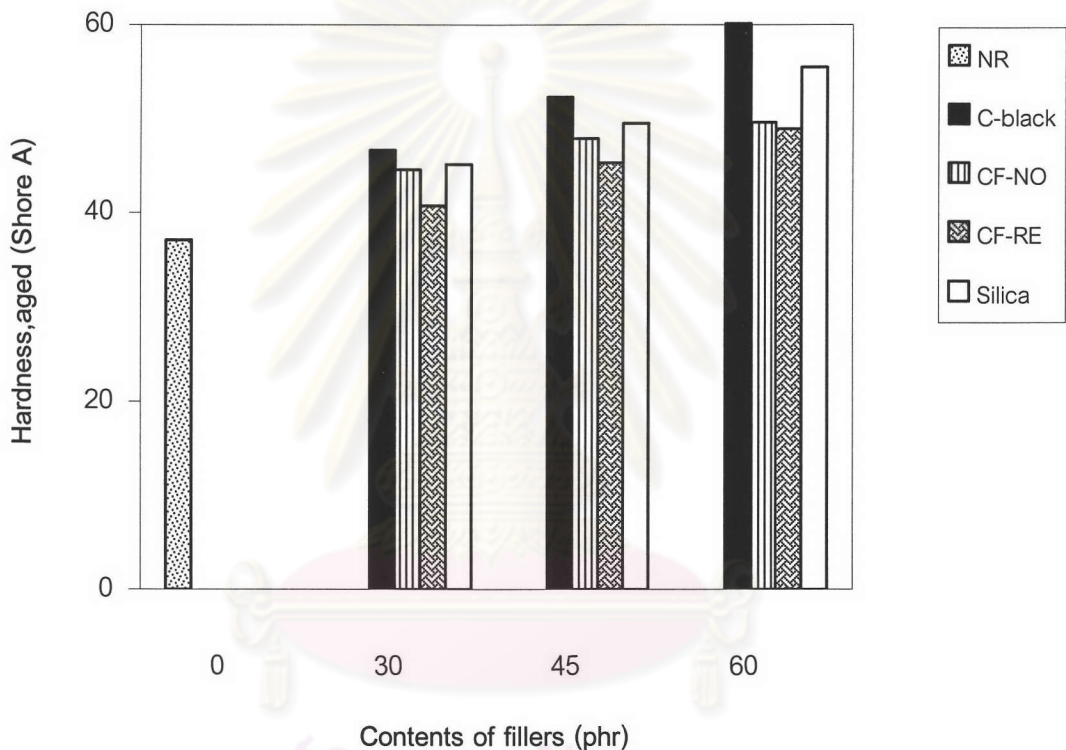
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับปริมาณสารตัวเติมก่อนอบเร่งด้วยความร้อน

จากตารางที่ 4.20 และรูปที่ 4.12 พบว่าเมื่อใส่สารตัวเติมเสริมแรงปริมาณเพิ่มมากขึ้น ความแข็งของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะการใส่คาร์บอนแบล็ก ทั้งนี้เพราะคาร์บอนแบล็กสามารถยึดเกาะกับสายโซ่โมเลกุลของยางด้วยอนุภาคที่เล็ก และพื้นที่ผิวที่มากได้ดีกว่าสารตัวเติมเสริมแรงชนิดอื่น ทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางมีความยืดหยุ่นลดลง และความแข็งมากขึ้น ส่วนซิลิกาซึ่งมีอนุภาคที่แข็ง จึงเพิ่มความแข็งของชิ้นงานเมื่อใส่เพิ่มมากขึ้น สำหรับคาร์บอนอลฟอร้มัลดีไฮด์เรซินทั้งสองชนิด ซึ่งมีแสดงสมบัติของเทอร์โมเซตพลาสติกจึงทำให้ความแข็งของยางผสมเรซินเพิ่มขึ้นและโนโวแลกเรซินมีผลทำให้ความแข็งของชิ้นงานเพิ่มขึ้นมากกว่ารีไซเคิลเรซิน ทั้งนี้เพราะโนโวแลกเรซินมีพันธะเมทิลีนและพันธะเบนซิลเอมีน ซึ่งมีความแข็งแรงกว่าพันธะอีเทอร์ในรีไซเคิลเรซิน ดังนั้นโนโวแลกจึงมีโครงสร้างร่างแหที่แข็งแรงมากกว่ารีไซเคิล

ความแข็งของยางที่ไม่ได้ผสมสารตัวเติมเสริมแรง หลังอบเร่งด้วยความร้อนมีค่า 37.1 (Shore A) ส่วนความแข็งของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงชนิดต่างๆ ในปริมาณต่างๆ กันหลังจากผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน แสดงไว้ในตารางที่ 4.21 และรูปที่ 4.13

ตารางที่ 4.21 ความแข็งของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงหลังอบเร่งด้วยความร้อน

ปริมาณ สารตัวเติม (phr)	ความแข็ง (Shore A)			
	C-black	CF-NO	CF-RE	Silica
30	46.6	44.5	40.7	45.1
45	52.3	47.9	45.3	49.5
60	60.1	49.6	48.9	55.5



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับปริมาณสารเสริมแรงหลังอบเร่งด้วยความร้อน

จากตารางที่ 4.21 และรูปที่ 4.13 พบว่าเมื่อผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน ชิ้นงานยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงมีความแข็งเพิ่มขึ้น เนื่องจากยางได้ถูกออกซิไดซ์เมื่อได้รับความร้อน ทำให้หมู่อะมิโนในโปรตีนที่มีอยู่ในยางธรรมชาติ เกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางกับสายโซ่โมเลกุลของยางได้อีก ยางจึงมีความแข็งมากขึ้น และมีแนวโน้มการเพิ่มไปในทำนองเดียวกับก่อนอบ

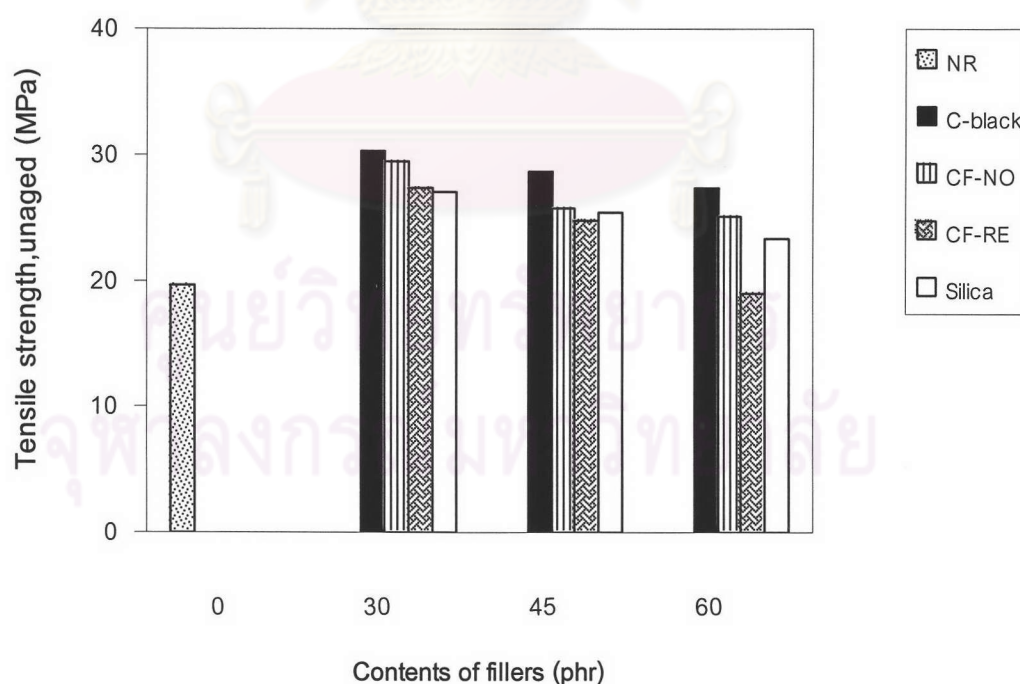
4.2.3 ความทนแรงดึง ระยะยึดที่จุดขาด และมอดุลัส

ความทนแรงดึง (Tensile strength)

ความทนแรงดึงของยางที่ไม่ผสมสารตัวเติมเสริมแรงก่อนอบเร่งด้วยความร้อนมีค่า 19.63 MPa ส่วนความทนแรงดึงของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงชนิดต่างๆ ในปริมาณต่างๆ กัน ก่อนผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน แสดงไว้ในตารางที่ 4.22 และรูปที่ 4.14

ตารางที่ 4.22 ความทนแรงดึงของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงก่อนอบเร่งด้วยความร้อน

ปริมาณ สารตัวเติม (phr)	ความทนแรงดึง (MPa)			
	C-black	CF-NO	CF-RE	Silica
30	30.34	29.48	27.33	27.09
45	28.65	25.82	24.82	25.35
60	27.42	25.10	18.95	23.25



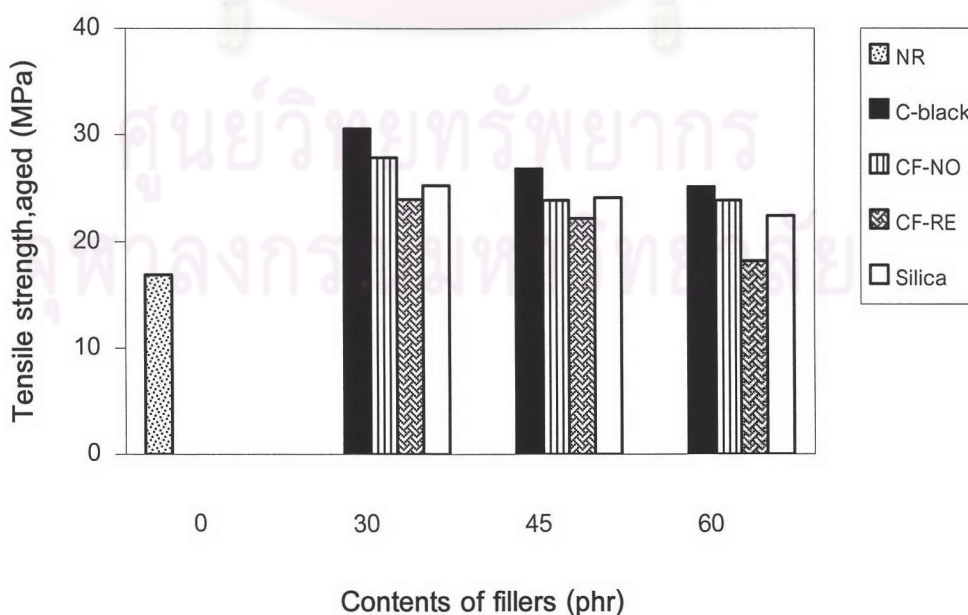
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดึงกับปริมาณสารเสริมแรงก่อนอบเร่งด้วยความร้อน

ตารางที่ 4.22 และรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่ายางผสมสารตัวเติมเสริมแรงต่างๆ มีความทนแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเมื่อไม่ได้สารตัวเติมเสริมแรง โดยคาร์บอนแบล็กมีความทนแรงดึงมากที่สุด เนื่องจากมีขนาดอนุภาคที่เล็ก พื้นที่ผิวมาก จึงเกิดแรงยึดเกาะกับสายโซ่โมเลกุลของยางได้ดีกว่าสารตัวเติมชนิดอื่น ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว และการใส่สารตัวเติมเสริมแรงซึ่งมีลักษณะเป็นผงละเอียดในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้ยางแข็ง และเหนียวติดกันได้ยาก จึงทำให้ความทนแรงดึงของชิ้นงานกลับลดลงเมื่อใส่สารตัวเติมเสริมแรงเพิ่มขึ้น และโนโวแลกเรซินมีผลทำให้ความทนแรงดึงของชิ้นงานเพิ่มขึ้นมากกว่าวิโซลเรซิน ทั้งนี้เพราะมีโครงสร้างร่างแหที่แข็งแรงกว่า

ความทนแรงดึงของยางที่ไม่ผสมสารตัวเติมเสริมแรงหลังอบเร่งด้วยความร้อนมีค่า 16.88 MPa ส่วนความทนแรงดึงของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงชนิดต่าง ๆ ในปริมาณต่าง ๆ กัน หลังอบเร่งด้วยความร้อน แสดงไว้ในตารางที่ 4.23 และรูปที่ 4.15

ตารางที่ 4.23 ความทนแรงดึงของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงหลังอบเร่งด้วยความร้อน

ปริมาณ สารตัวเติม (phr)	ความทนแรงดึง (MPa)			
	C-black	CF-NO	CF-RE	Silica
30	30.58	27.84	23.95	25.23
45	26.84	23.85	22.18	24.11
60	25.14	23.86	18.21	22.44



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดึงกับปริมาณสารเสริมแรงหลังอบด้วยความร้อน

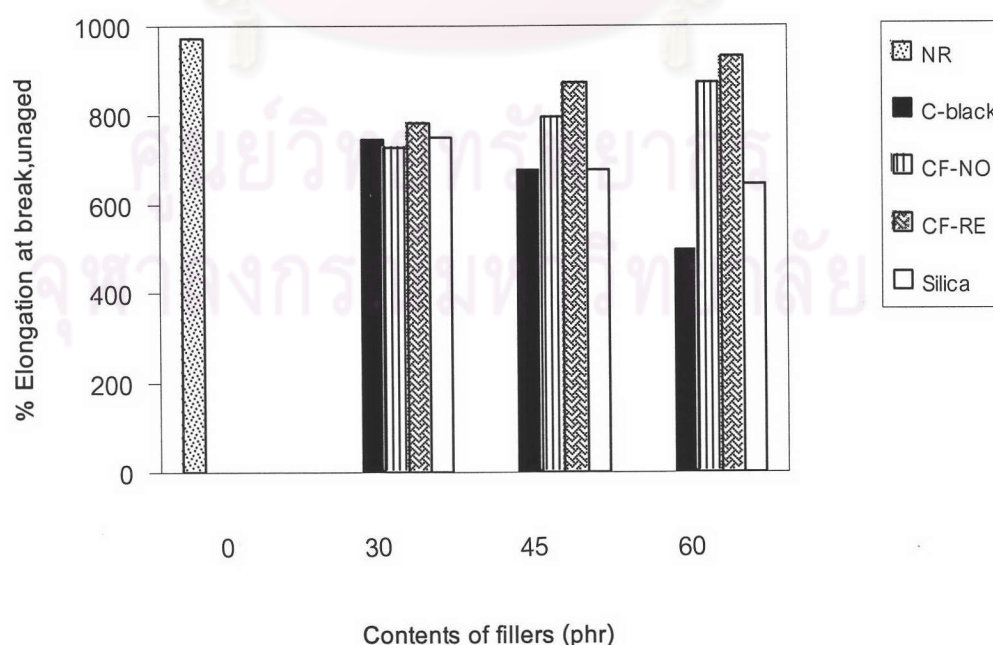
ตารางที่ 4.23 และรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าเมื่อผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน ความทนแรงดึงของชิ้นงานผสมสารเสริมแรงชนิดต่างๆ มีค่าลดลงทั้งนี้เนื่องจากหมู่อะมิโนของโปรตีนในยางธรรมชาติเมื่อได้รับความร้อนสามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางกับยางธรรมชาติได้อีก ดังนั้นยางจึงมีความแข็งเพิ่มมากขึ้น ประกอบกับได้รับอิทธิพลจากสารตัวเติมเสริมแรงดังที่ได้กล่าวไปในเหตุผลข้างต้น ยางจึงมีความเปราะมากขึ้น ทำให้ความทนแรงดึงของยางมีค่าลดลง โดยมีแนวโน้มการลดลงไปในทำนองเดียวกับก่อนอบ

ระยะยืดที่จุดขาด (Elongation at break)

ระยะยืดที่จุดขาดของยางที่ไม่ผสมสารตัวเติมเสริมแรงก่อนอบเร่งด้วยความร้อน มีค่า 971.5% ส่วนระยะยืดที่จุดขาดของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงชนิดต่าง ๆ ในปริมาณต่าง ๆ กัน ก่อนอบเร่งด้วยความร้อน แสดงไว้ในตารางที่ 4.24 และรูปที่ 4.16

ตารางที่ 4.24 ระยะยืดที่จุดขาดของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงก่อนอบเร่งด้วยความร้อน

ปริมาณ สารตัวเติม (phr)	ระยะยืดที่จุดขาด (%)			
	C-black	CF-NO	CF-RE	Silica
30	744.4	725.2	782.4	750.1
45	674.0	792.4	871.0	676.5
60	496.2	873.0	931.0	644.4



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะยืดที่จุดขาดกับปริมาณสารเสริมแรงก่อนอบด้วยความร้อน

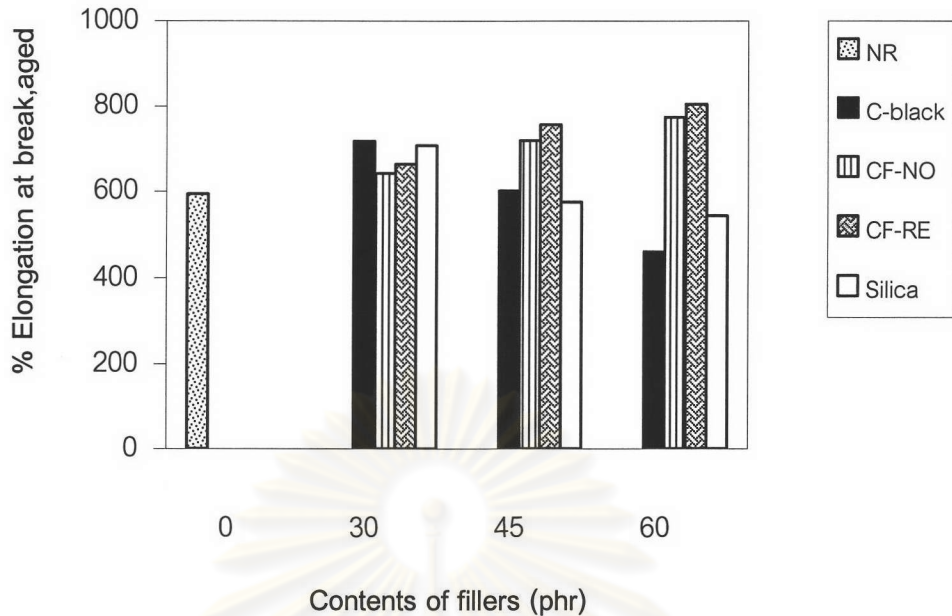
ตารางที่ 4.24 และรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานยางที่ผสมสารตัวเติมเสริมแรงชนิดต่างๆ มีระยะยืดที่จุดขาดต่ำกว่าเมื่อไม่ได้ใส่สารตัวเติมเสริมแรง โดยคาร์บอนแบล็กและซิลิกา มีระยะยืดที่จุดขาดลดลงเมื่อใส่ในปริมาณมากขึ้น เนื่องจากสารตัวเติมเสริมแรงทั้งสอง เกิดแรงยึดเกาะกับยางทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางเคลื่อนที่ได้ยากขึ้นมีความยืดหยุ่นลดลง ส่งผลให้มียางมีความสามารถในการยืดตัวต่ำลง ส่วนคาร์บอนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์เรซินทั้งสองชนิด มีระยะยืดที่จุดขาดสูงขึ้นเมื่อปริมาณเรซินเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะ สายโซ่คาร์บอนของเรซินที่พันอยู่กับสายโซ่โมเลกุลของยางสามารถยึดตัวได้มากกว่าคาร์บอนแบล็กและซิลิกา จึงทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางเคลื่อนตามไปด้วยได้

ระยะยืดที่จุดขาดของยางที่ไม่ได้ผสมสารตัวเติมเสริมแรงหลังอบเร่งด้วยความร้อน มีค่า 594.7% ส่วนระยะยืดที่จุดขาดของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงชนิดต่าง ๆ ในปริมาณต่าง ๆ กัน หลังอบเร่งด้วยความร้อน แสดงไว้ในตารางที่ 4.25 และรูปที่ 4.17

ตารางที่ 4.25 ระยะยืดที่จุดขาดของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงหลังอบเร่งด้วยความร้อน

ปริมาณสาร ตัวเติม (phr)	ระยะยืดที่จุดขาด (%)			
	C-black	CF-NO	CF-RE	Silica
30	718.9	643.0	664.2	708.1
45	601.8	719.0	757.0	576.7
60	460.9	775.0	805.0	544.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะยืดที่จุดขาดกับปริมาณสารเสริมแรงหลังอบด้วยความร้อน

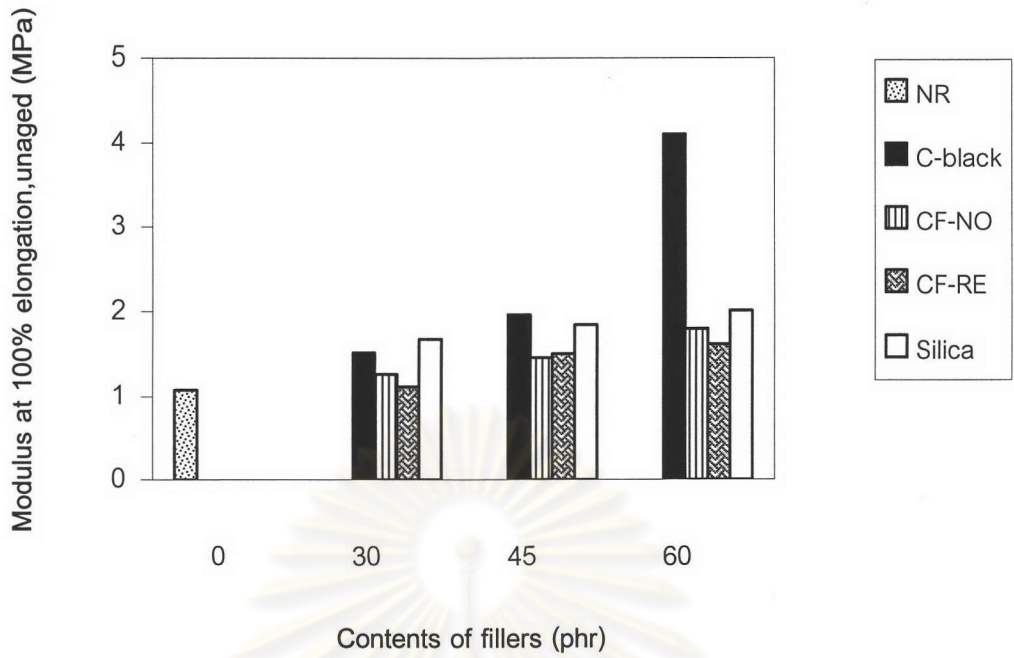
ตารางที่ 4.25 และรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าระยะยืดที่จุดขาดของชิ้นงานยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงต่าง ๆ เมื่อผ่านการอบเร่งด้วยความร้อนมีค่าลดลง เนื่องจากความร้อน เร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในยางธรรมชาติซึ่งมีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา ยางจึงเสื่อมสภาพเร็วขึ้น โดยมีแนวโน้มการลดลงไปในทำนองเดียวกับก่อนอบ

มอดูลัสที่ระยะยืด 100 และ 300% (Modulus at 100 , 300% elongation)

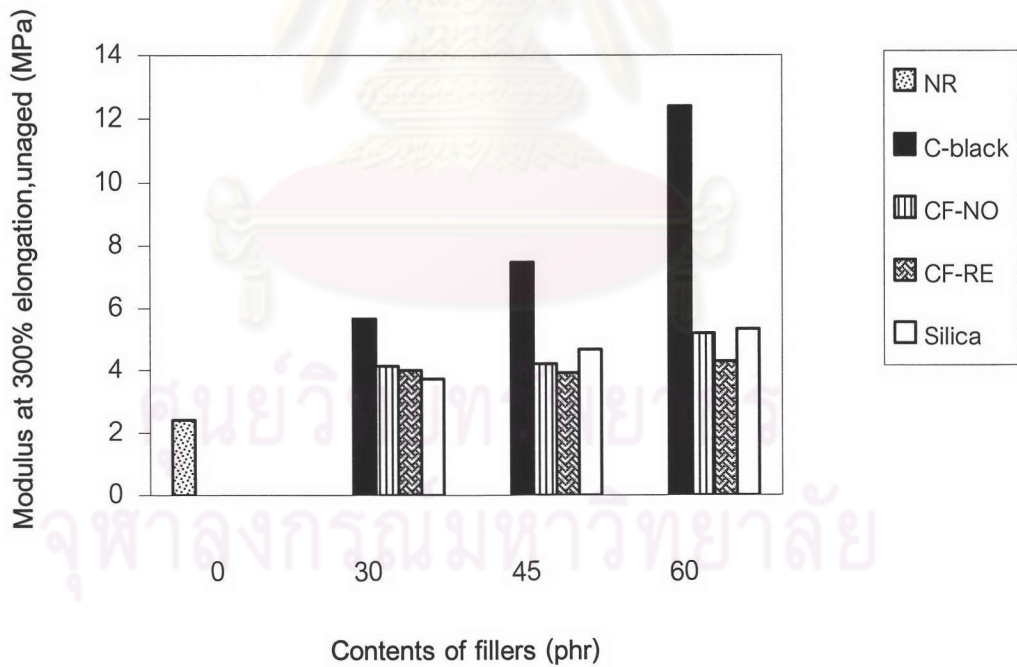
มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของยางที่ไม่ได้ผสมสารตัวเติมเสริมแรงก่อนอบเร่งด้วยความร้อนมีค่า 1.079 MPa และ 2.412 MPa ตามลำดับ ส่วนมอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงชนิดต่างๆ ในปริมาณต่างๆ กัน ก่อนอบเร่งด้วยความร้อน แสดงไว้ในตารางที่ 4.26 และรูปที่ 4.18-4.19

ตารางที่ 4.26 มอดูลัสที่ระยะยืด 100 , 300% ของยางผสมสารเสริมแรงก่อนอบด้วยความร้อน

ปริมาณสารตัวเติม (phr)	มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% (MPa)							
	100%				300%			
	C-black	CF-NO	CF-RE	Silica	C-black	CF-NO	CF-RE	Silica
30	1.523	1.267	1.116	1.679	5.665	4.141	4.011	3.738
45	1.961	1.462	1.505	1.840	7.484	4.216	3.926	4.686
60	4.106	1.749	1.621	2.001	12.390	5.213	4.302	5.338



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสที่ระยะยืด 100% กับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรงก่อนอบแรงด้วยความร้อน



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสที่ระยะยืด 300% กับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรงก่อนอบแรงด้วยความร้อน

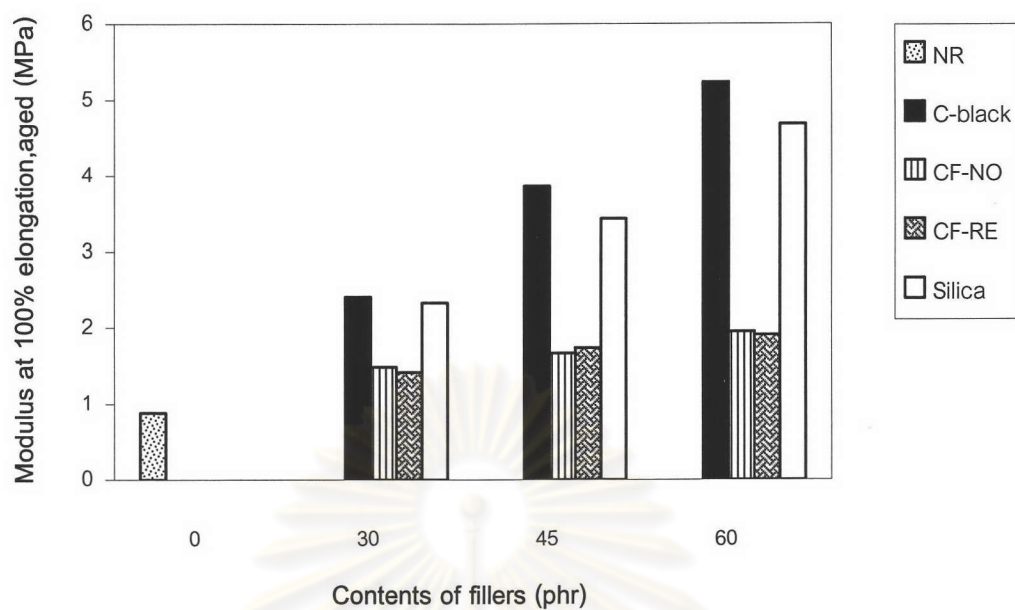
ตารางที่ 4.26 และรูปที่ 4.18–4.19 แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงต่าง ๆ มีค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% สูงกว่าเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้ใส่สารตัวเติมเสริมแรง โดยสารตัวเติมเสริมแรงชนิดต่างๆ ทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น มีความยืดหยุ่นลดลง การดึงชิ้นงานให้ยืดออกต้องใช้แรงมาก ส่งผลให้มอดูลัสมีค่าสูงขึ้นมาก

มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของยางที่ไม่ได้ผสมสารตัวเติมเสริมแรงหลังอบเร่งด้วยความร้อน มีค่า 0.88 และ 1.98 MPa ตามลำดับ ส่วนมอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงชนิดต่าง ๆ ในปริมาณต่าง ๆ กัน หลังอบเร่งด้วยความร้อน แสดงไว้ในตารางที่ 4.27 และรูปที่ 4.20–4.21

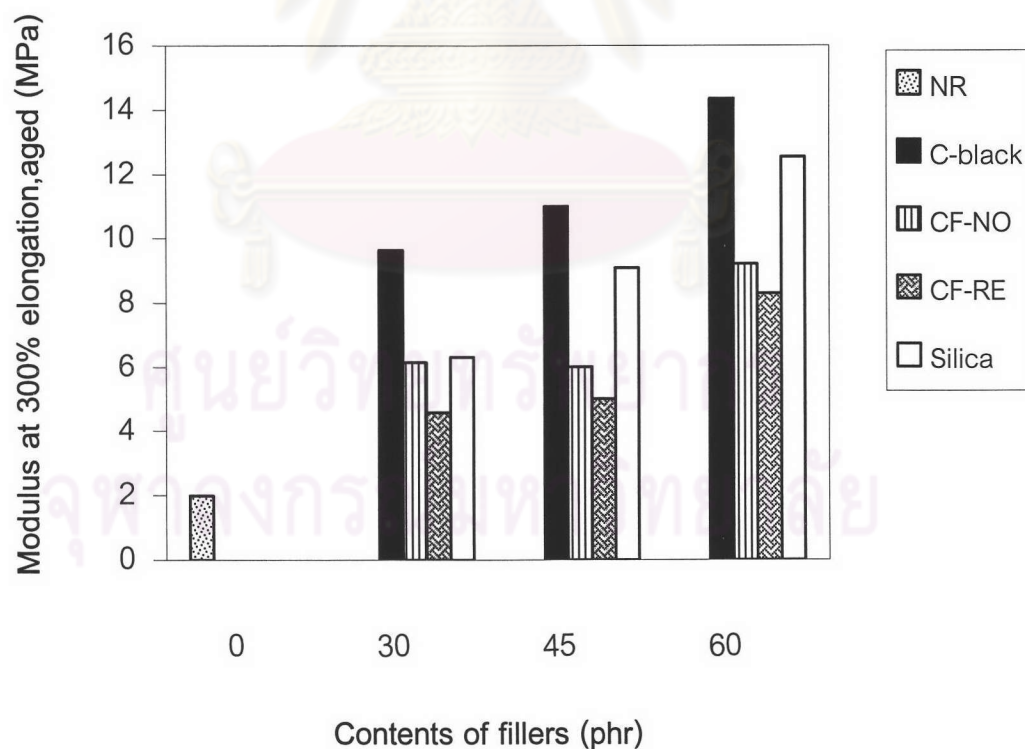
ตารางที่ 4.27 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรง หลังอบเร่งด้วยความร้อน

ปริมาณ สารตัวเติม (phr)	มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% (MPa)							
	100%				300%			
	C-black	CF-NO	CF-RE	Silica	C-black	CF-NO	CF-RE	Silica
30	2.410	1.485	1.412	2.335	9.628	4.531	4.080	6.308
45	3.859	1.666	1.738	3.428	11.01	5.336	4.405	9.091
60	5.236	1.949	1.906	4.686	14.36	7.592	6.086	12.540

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสที่ระยะยืด 100% กับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง หลังอบแรงด้วยความร้อน



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสที่ระยะยืด 300% กับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง หลังอบแรงด้วยความร้อน

ตารางที่ 4.27 และรูปที่ 4.20– 4.21 แสดงให้เห็นว่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของชิ้นงานยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงต่างๆ เมื่อผ่านการอบเร่งด้วยความร้อนมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากความร้อนเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในยางธรรมชาติ เมื่อโปรตีนในยางธรรมชาติได้รับความร้อน หมู่อะมิโนสามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางกับสายโซ่โมเลกุลของยางได้อีกยางจึงมีความแข็งเพิ่มขึ้นทำให้การยืดดึงต้องใช้แรงมากขึ้น ดังนั้นจึงมีค่ามอดูลัสเพิ่มมากขึ้น โดยมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นไปในการทำงานเดียวกับก่อนอบ

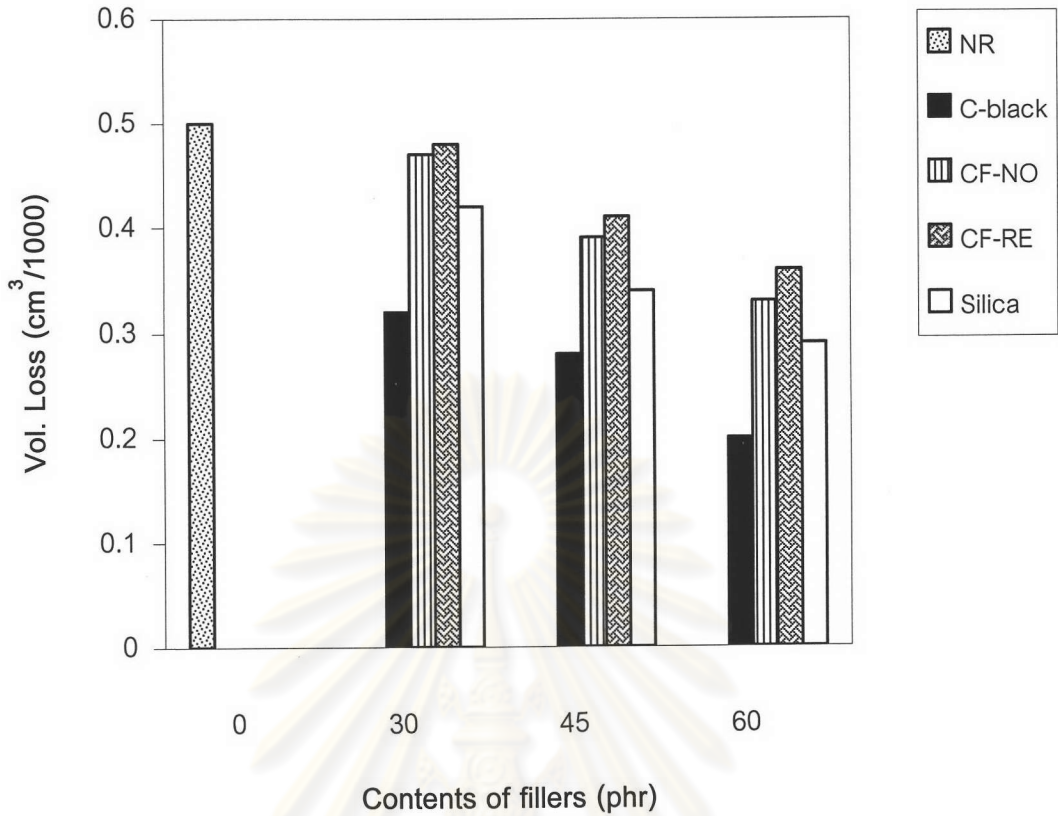
4.2.4 ความต้านทานการสึกหรอ (Akron abrasion resistance)

ความต้านทานการสึกหรอของยางที่ไม่ได้ผสมและผสมสารตัวเติมเสริมแรงชนิดต่างๆ ในปริมาณต่างๆ กัน แสดงไว้ในตารางที่ 4.28 และรูปที่ 4.22

ตารางที่ 4.28 ความต้านทานการสึกหรอของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรง

ปริมาณสาร ตัวเติม (phr)	ความต้านทานการสึกหรอ (Vol. loss, cm ³ /1000)				
	STR XL	C-black	CF-NO	CF-RE	Silica
0	0.50	-	-	-	-
30	-	0.32	0.47	0.48	0.42
45	-	0.28	0.39	0.41	0.34
60	-	0.20	0.33	0.36	0.29

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการสึกหรอกับปริมาณสารตัวเติม

ตารางที่ 4.22 และรูปที่ 4.22 แสดงให้เห็นว่าความต้านทานการสึกหรอขึ้นกับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง กล่าวคือ เมื่อใส่สารตัวเติมเสริมแรงมากขึ้น ความต้านทานการสึกหรอยิ่งเพิ่มขึ้นหรือปริมาตรของยางที่หายไปเมื่อถูกขัดสีลดลง สำหรับคาร์บอนแบล็กและซิลิกา มีความต้านทานการสึกหรอมากกว่าเรซินทั้งสองชนิด เนื่องจากทั้งคาร์บอนแบล็กและซิลิกา มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคกับสายโซ่โมเลกุลของยาง ส่วนเรซินทั้งสองชนิด มีสายโซ่คาร์บอนที่เกิดการพันเกี่ยวกับสายโซ่โมเลกุลของยางและมีส่วนที่เป็น เทอร์โมเซตของเรซินอยู่ ดังนั้น เมื่อมีการขัดสีทั้งสายโซ่โมเลกุลของยางและของเรซินเกิดการสึกหรอไปด้วยกัน แต่เนื่องด้วยเรซินยังมีส่วนที่เป็นเทอร์โมเซตทำให้มีการสึกหรอน้อยกว่ายางที่ไม่ใส่สารตัวเติมเสริมแรงด้วย

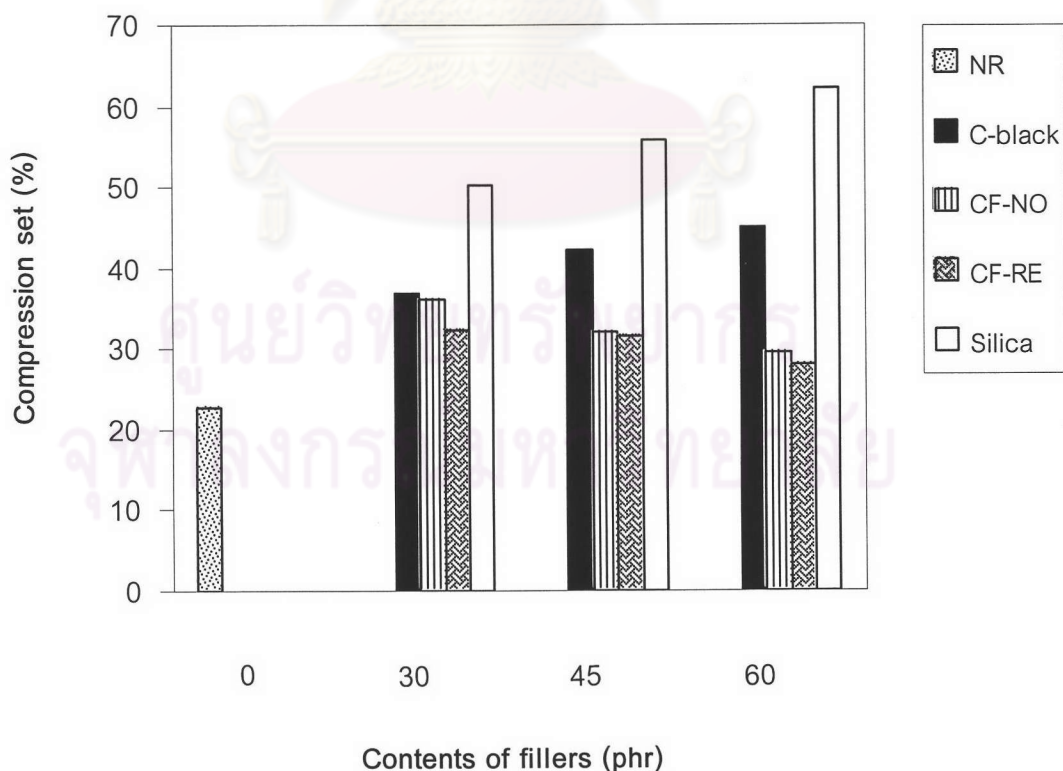
4.2.5 การคืบตัว (Compression set)

สมบัติการคืบตัวของยาง คือ สมบัติในการคงสภาพความเป็นอีลาสติคของยางภายใต้ความเค้นอัด ณ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ชั่วโมง ถ้าค่า compression set ต่ำ แสดงว่ายางสามารถคืบตัวได้ดี และถ้าค่า compression set สูง แสดงว่ายางมีการคืบตัวไม่ดี

การคืบตัวของยางที่ไม่ได้ผสมและผสมสารตัวเติมเสริมแรงชนิดต่างๆ ในปริมาณต่างๆ กัน แสดงไว้ในตารางที่ 4.29 และรูปที่ 4.23

ตารางที่ 4.29 การคืบตัวของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงชนิดต่าง ๆ

ปริมาณสาร ตัวเติม (phr)	Compression set (%)				
	STR XL	C-black	CF-NO	CF-RE	Silica
0	22.82	-	-	-	-
30	-	36.79	36.13	32.45	50.32
45	-	42.11	31.97	31.48	55.87
60	-	44.95	29.62	28.16	62.13

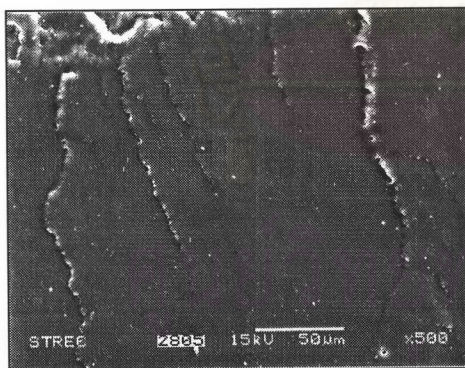


รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างการคืบตัวกับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง

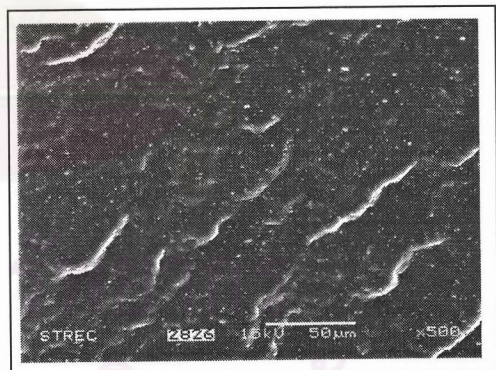
จากตารางที่ 4.29 และรูปที่ 4.23 แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานยางผสมคาร์บอนแบล็กและซิลิกา มีค่า compression set สูงขึ้นตามปริมาณที่ใส่ แสดงว่า ยางมีการยุบตัวมากและการคืนตัวไม่ดี เนื่องจาก มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคกับสายโซ่โมเลกุลของยาง จึงขัดขวางการคืนตัวของยาง ขณะที่ยางผสมเรซินทั้งสองชนิดมีค่า compression set ต่ำลง เมื่อปริมาณเรซินเพิ่มขึ้น แสดงว่า ยางเกิดยุบตัวน้อยและมีการคืนตัวดีขึ้น ซึ่งให้ผลตรงข้ามกับคาร์บอนแบล็กและซิลิกา ทั้งนี้เพราะ โมเลกุลของเรซินมีเพียงการพันกันกับสายโซ่โมเลกุลของยาง จึงทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางยังมีความยืดหยุ่นได้มากกว่าแต่ก็ยังมีค่า compression set ที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ไม่ได้ผสมสารตัวเติมเสริมแรง

4.2.6 การกระจายตัวของสารตัวเติมเสริมแรงในยางธรรมชาติ

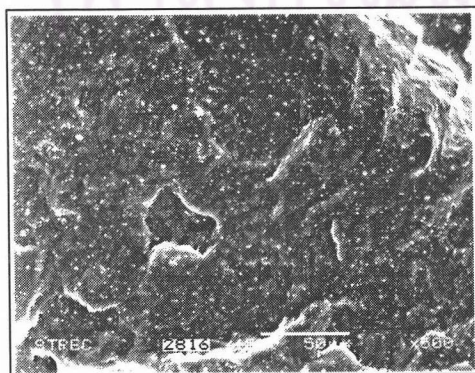
รูปที่ 4.24 แสดงการกระจายตัวของสารตัวเติมเสริมแรง ในยางธรรมชาติ ซึ่งผ่านการตรวจสอบด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscopy) โดยใช้กำลังขยาย 500 เท่า สำหรับชิ้นงานยางผสมกับคาร์บอนออลฟอรมัลดีไฮด์เรซินทั้งสองชนิดและซิลิกา ซึ่งเป็นกำลังขยายที่เพียงพอเนื่องจากขนาดอนุภาคของเรซินและซิลิกามีขนาดในระดับไมครอน สำหรับชิ้นงานยางผสมคาร์บอนแบล็กนั้นต้องใช้กำลังขยายสูงถึง 3500 เท่า เนื่องจากคาร์บอนแบล็กมีขนาดเล็กมาก



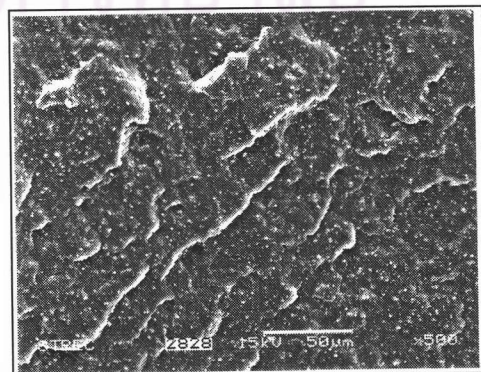
(ก)



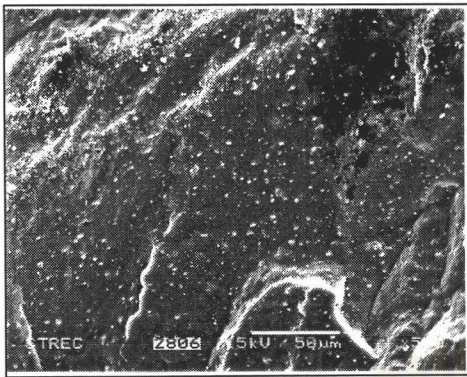
(ข)



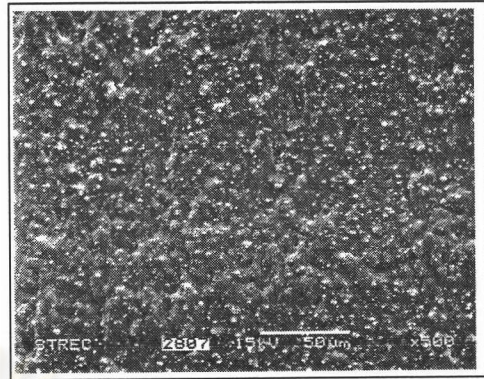
(ค)



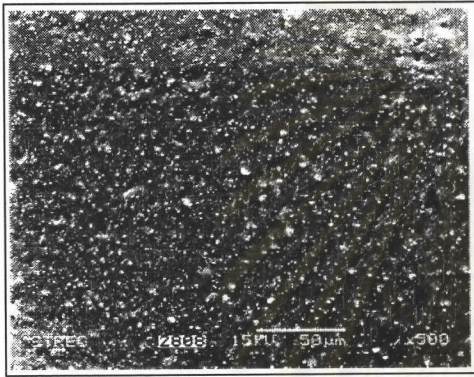
(ง)



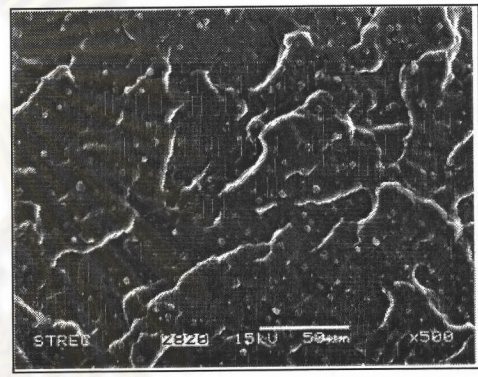
(a)



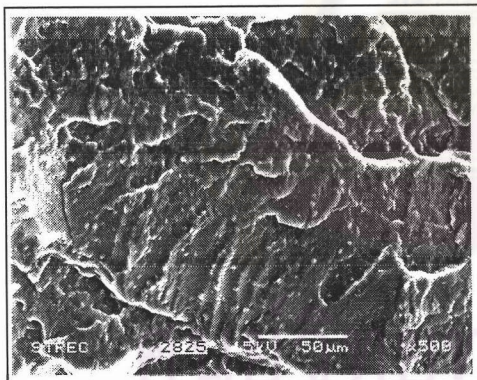
(b)



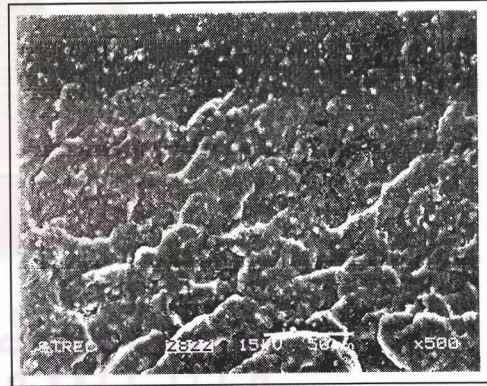
(c)



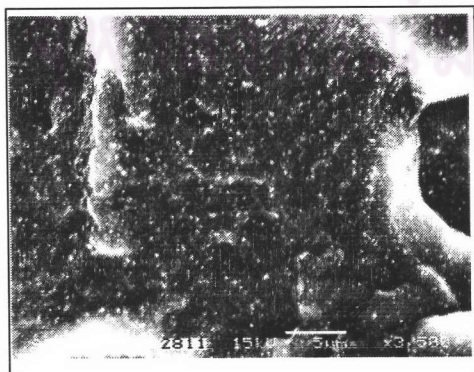
(d)



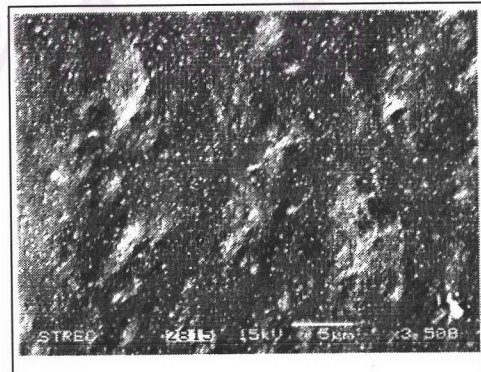
(e)



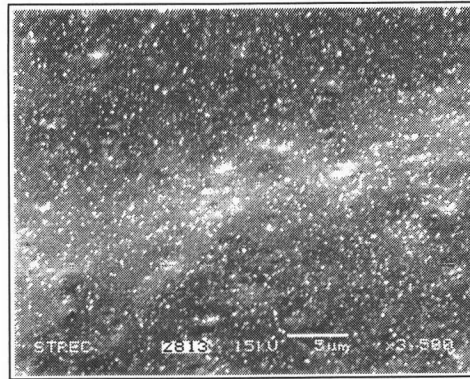
(f)



(g)



(h)



(จ)

รูปที่ 4.24 (ก) ยางธรรมชาติ (ข) CF-NO 30 phr (ค) CF-NO 45 phr (ง) CF-NO 60 phr
 (จ) CF-RE 30 phr (ฉ) CF-RE 45 phr (ช) CF-Re 60 phr (ฌ) Silica 30 phr
 (ฉ) Silica 45 phr (ญ) Silica 60 phr (ฎ) C-black 30 phr (ฏ) C-black 45 phr
 (ฐ) C-black 60 phr

จากรูปที่ 4.24 (ข) - (ฌ) แสดงให้เห็นว่าคาร์บอนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินทั้ง 2 ชนิด มีการกระจายตัวที่ดีเมื่อนำไปบดผสมกับยางธรรมชาติ ซึ่งการกระจายตัวที่ดีนี้ ส่งผลและยืนยันได้ว่าเรซินทั้งสองชนิด มีสมบัติที่ดีหลายประการดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ส่วนรูปที่ 4.24 (ญ) - (ฐ) แสดงให้เห็นว่าซิลิกาและคาร์บอนแบล็ก มีการกระจายตัวในยางได้ดีเช่นเดียวกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย