

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผสมยางธรรมชาติกับยางพอลิบิวทาไดอินและเติมซิลิกาเป็นสารเสริมแรง โดยศึกษาถึงผลของอัตราส่วนของยางธรรมชาติกับยางพอลิบิวทาไดอิน ปริมาณของซิลิกาต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางผสม (Blend) ซึ่งสมบัติที่ทดสอบมีทั้งสมบัติของยางก่อนการคงรูป (unvulcanized compounds) ได้แก่ ความหนืด (mooney viscosity) อัตราเริ่มการคงรูป (mooney scorch) เวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (t_{s2}) เวลาที่ใช้ในการคงรูป (t_{c90}) และสมบัติของยางหลังการคงรูป (vulcanized compounds) ได้แก่ ความต้านทานแรงดึง (tensile strength) ความยืดเมื่อขาด (% elongation at break) โมดูลัส (modulus) ความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear strength) ความต้านทานการสึกหรอ (abrasion resistance) การยุบตัว (compression set) การกระดอน (resilience) ความแข็ง (hardness) สมบัติเชิงกล (dynamic mechanical thermal analysis) และศึกษาลักษณะโครงสร้างวิทยา (morphology) ของยางผสมเติมซิลิกาด้วยภาพถ่ายจากเครื่อง scanning electron microscopy (SEM)

ผลการทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน ดังนี้คือ

ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติทางกายภาพของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิบิวทาไดอินในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน สำหรับสูตรการทดลองที่ 1 – 7

จากการทดสอบสูตรการทดลองที่ 1-7 พบว่า อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิบิวทาไดอิน (NR : BR) ที่ 80 : 20 และ 60 : 40 ให้สมบัติการทดสอบ เช่น ความต้านทานแรงดึง ความยืดเมื่อขาด โมดูลัส ความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง และสมบัติการกระดอนที่ดี จึงทำให้เลือกอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิบิวทาไดอิน (NR : BR) ที่ 80 : 20 , 60 : 40 และเพิ่มที่อัตราส่วน 70 : 30 เป็นสูตรยางผสมที่เติมซิลิกาปริมาณ 0, 30, 40, 50 phr โดยกำหนดให้ที่อัตราส่วนยางธรรมชาติ 100 phr และ ยางพอลิบิวทาไดอิน 100 phr เติมซิลิกาปริมาณ 0, 30, 40, 50 phr เป็นสูตรควบคุม

ตารางที่ 4.2 แสดงข้อมูลการทดลองสมบัติทางกายภาพของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิบิวทาไดอินเติมซิลิกาในปริมาณต่าง ๆ กัน สำหรับสูตรการทดลองที่ 8 - 27

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลการทดลองสมบัติทางกายภาพของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิวิทาไดอิน

สูตร	1	2	3	4	5	6	7
NR : BR	100 : 0	80 : 20	60 : 40	50 : 50	40 : 60	20 : 80	0 : 100
สมบัติยางก่อนการคงรูป							
Mooney Viscosity, ML(1+4)	33.49	32.85	33.59	32.63	33.06	33.85	34.82
Mooney Scorch, ($t_{35} - t_5$)	3.51	4.29	2.50	4.13	3.71	-	-
t_{s2} (min)	4.78	5.71	6.75	7.87	8.16	10.75	14.72
t_{c90} (min)	10.31	11.81	12.96	13.33	14.15	17.26	22.80
สมบัติยางหลังการคงรูป							
Tensile Stress, (MPa)							
ก่อนอบ (25 °C)	10.75 (2.07)	8.90 (1.31)	3.50 (0.66)	3.29 (0.72)	2.62 (0.32)	1.36 (0.21)	1.21 (0.09)
หลังอบ (100 °C)	2.44 (0.24)	2.23 (0.29)	1.74 (0.22)	1.87 (0.19)	1.68 (0.12)	1.52 (0.11)	1.02 (0.07)
Elongation at break, (%)							
ก่อนอบ (25 °C)	457.7 (48.7)	432.7 (63.7)	360.7 (55.4)	370.2 (59.9)	334.5 (18.7)	172.2 (32.9)	98.9 (13.3)
หลังอบ (100 °C)	163.2 (4.9)	172.8 (17.9)	151.0 (24.3)	175.4 (17.2)	15.5 (23.2)	121.1 (13.6)	61.7 (6.5)
Modulus at 100 %, (MPa)							
ก่อนอบ (25 °C)	1.23 (0.07)	1.16 (0.04)	1.09 (0.82)	1.04 (0.08)	1.03 (0.08)	0.98 (0.05)	0.61 (0.08)
หลังอบ (100 °C)	1.51 (0.09)	1.38 (0.02)	1.26 (0.06)	1.21 (0.05)	1.24 (0.11)	1.34 (0.08)	-

* ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD.)

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลการทดลองสมบัติทางกายภาพของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิบิวทาไดอิน (ต่อ)

สูตร	1	2	3	4	5	6	7
Modulus at 300 %, (MPa)							
ก่อนอบ (25 °C)	3.98 (0.45)	4.19 (2.24)	2.68 (0.24)	1.94 (0.97)	1.89 (0.95)	-	-
หลังอบ (100°C)	-	-	-	-	-	-	-
Modulus at 400 %, (MPa)							
ก่อนอบ (25 °C)	7.39 (1.23)	5.46 (0.25)	-	-	-	-	-
หลังอบ (100°C)	-	-	-	-	-	-	-
Tear Strength, (N/mm)							
ก่อนอบ (25 °C)	43.97 (4.6)	34.53 (0.62)	28.24 (2.13)	24.27 (1.56)	19.67 (1.17)	11.37 (0.95)	4.95 (0.92)
หลังอบ (100°C)	11.93 (1.08)	11.25 (0.67)	17.43 (1.96)	9.91 (0.57)	9.11 (1.19)	6.78 (0.56)	3.93 (0.34)
Resilience, (%)	76.5 (1.6)	75.9 (1.0)	73.4 (0.9)	71.6 (1.3)	69.7 (0.6)	71.8 (0.3)	72.2 (0.5)
Hardness, (shore A)							
ก่อนอบ (25 °C)	47.10 (0.73)	46.45 (1.03)	45.90 (0.84)	45.12 (1.10)	45.59 (0.68)	45.98 (1.03)	49.73 (1.08)
หลังอบ (100 °C)	50.00 (0.86)	47.90 (1.18)	47.40 (0.98)	46.70 (0.99)	46.20 (0.98)	48.20 (1.01)	51.50 (1.26)

* ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD.)

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลการทดลองสมบัติทางกายภาพของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิบิวทาไดอินเต็มซีลิกา

สูตร	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
NR : BR ,(phr)	100 : 0	100 : 0	100 : 0	100 : 0	80 : 20	80 : 20	80 : 20	80 : 20	70 : 30	70 : 30
ซีลิกา ,(phr)	0	30	40	50	0	30	40	50	0	30
สมบัติยางก่อนการคงรูป										
Mooney Viscosity, ML(1+4)	37.79	54.66	64.72	74.28	36.86	58.97	69.78	82.52	27.67	56.10
Mooney Scorch, ($t_{35} - t_5$)	5.42	2.25	2.46	3.17	5.50	2.42	2.00	2.29	5.83	1.71
t_{S_2} ,(min)	4.18	2.28	1.49	0.45	4.07	2.33	1.59	0.25	4.58	2.28
t_{C90} ,(min)	9.29	4.46	4.27	3.24	9.16	5.02	4.23	4.01	11.19	4.37
สมบัติยางหลังการคงรูป										
Tensile Stress, (MPa)										
ก่อนอบ (25 °C)	14.90	30.03	28.95	27.26	9.34	26.20	23.81	22.57	7.39	20.51
(SD.)	(2.53)	(0.97)	(1.03)	(0.89)	(2.03)	(1.27)	(1.14)	(0.89)	(0.69)	(0.93)
หลังอบ (100°C)	3.59	27.81	26.05	26.86	3.51	17.82	21.05	18.35	3.16	15.12
(SD.)	(0.38)	(2.21)	(1.24)	(1.30)	(0.21)	(2.91)	(1.72)	(2.24)	(0.17)	(1.62)
Elongation at break, (%)										
ก่อนอบ (25 °C)	1461.3	675.1	717.5	687.8	559.3	672.90	684.7	681.7	556.3	700.6
(SD.)	(51.1)	(54.5)	(35.13)	(44.66)	(28.9)	(39.8)	(32.6)	(56.3)	(30.4)	(38.1)
หลังอบ (100°C)	247.7	576.6	545.8	657.6	244.6	476.2	620.7	561.1	239.3	549.3
(SD.)	(34.9)	(24.5)	(15.5)	(33.3)	(27.2)	(21.6)	(12.4)	(36.6)	(26.4)	(30.3)

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลการทดลองสมบัติทางกายภาพของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิบิวทาไดอินเตมิซลิกา (ต่อ)

สูตร	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Modulus at 100 %, (MPa)										
ก่อนอบ (25 °C)	2.03	2.59	2.63	2.81	2.05	2.54	2.72	2.69	1.96	2.36
(SD.)	(0.07)	(0.08)	(0.07)	(0.12)	(0.14)	(0.13)	(0.08)	(0.13)	(0.08)	(0.06)
หลังอบ (100°C)	2.20	3.05	2.83	3.05	2.25	2.97	2.74	2.88	2.16	2.56
(SD.)	(0.09)	(0.11)	(0.41)	(0.07)	(0.13)	(0.14)	(0.07)	(0.11)	(0.08)	(0.06)
Modulus at 300 %, (MPa)										
ก่อนอบ (25 °C)	3.11	4.89	5.23	6.32	3.22	4.98	5.16	5.39	2.82	4.25
(SD.)	(0.14)	(0.26)	(0.33)	(0.72)	(0.20)	(0.35)	(0.25)	(0.51)	(0.94)	(0.19)
หลังอบ (100°C)	-	7.27	7.08	7.52	-	7.06	5.72	6.81	-	5.28
(SD.)	-	(0.34)	(1.70)	(0.41)	-	(0.51)	(0.39)	(0.67)	-	(0.25)
Modulus at 600 %, (MPa)										
ก่อนอบ (25 °C)	12.25	20.12	20.57	21.26	6.55	20.22	17.86	17.87	-	13.77
(SD.)	(2.20)	(1.91)	(2.00)	(2.65)	(0.96)	(2.62)	(1.39)	(2.47)		(1.78)
หลังอบ (100°C)	-	-	-	21.26	-	-	-	-	-	-
(SD.)	-	-	-	(1.55)	-	-	-	-	-	-
Tear Strength, (N/mm)										
ก่อนอบ (25 °C)	31.12	74.25	82.54	83.20	27.07	44.29	57.41	67.10	25.63	36.20
(SD.)	(1.72)	(5.01)	(7.05)	(8.90)	(1.05)	(5.97)	(5.29)	(8.20)	(1.17)	(1.46)

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลการทดลองสมบัติทางกายภาพของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิบิวทาไดอินเติมซิลิกา (ต่อ)

สูตร	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
หลังอบ (100°C	27.56	55.97	63.61	91.69	24.37	42.19	35.89	46.88	19.53	35.89
(SD.)	(3.83)	(5.49)	(3.16)	(4.52)	(3.16)	(2.56)	(1.97)	(2.72)	(3.12)	(1.97)
Abrasion loss,										
(cm ³ /kilocycles)	1.328	0.638	0.520	0.502	1.904	0.550	0.520	0.510	1.48	0.51
(SD.)	(0.001)	(0.001)	(0.005)	(0.001)	(0.002)	(0.015)	(0.005)	(0.001)	(0.005)	(0)
Flex cracking resistance,										
(kilocycle)	9.19	3.93	3.93	4.96	10.00	5.83	5.01	5.58	10.00	3.26
(SD.)	(0.2)	(0.38)	(0.18)	(0.30)	(0)	(0.66)	(0.21)	(0.23)	(0)	(0.17)
Compression set, (%)	17.49	38.80	44.36	49.96	14.29	32.47	40.75	47.60	15.13	30.86
(SD.)	(0.29)	(0.69)	(0.36)	(0.85)	(0.70)	(1.42)	(1.65)	(1.16)	(0.28)	(0.08)
Resilience, (%)	83.20	66.57	58.17	53.87	83.20	67.80	55.20	48.40	80.73	67.10
(SD.)	(0.99)	(1.51)	(0.97)	(0.79)	(0.14)	(0.42)	(0.41)	(0.61)	(1.05)	(0.14)
Hardness, shore A										
ก่อนอบ (25 °C)	39.05	55.14	59.55	63.25	39.97	53.71	59.87	62.90	39.79	55.51
(SD.)	(0.28)	(0.44)	(1.00)	(0.59)	(0.57)	(0.60)	(0.75)	(0.73)	(0.76)	(0.93)
หลังอบ (100 °C)	43.90	57.30	65.81	67.51	45.29	59.15	65.45	69.05	45.97	59.33
(SD.)	(0.57)	(0.23)	(0.82)	(0.79)	(0.67)	(0.50)	(0.57)	(0.79)	(0.47)	(0.72)

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลการทดลองสมบัติทางกายภาพของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิบิวทาไดอินเต็มซิลิกา (ต่อ)

สูตร	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
NR : BR ₉₀ (phr)	70 : 30	70 : 30	60 : 40	60 : 40	60 : 40	60 : 40	0 : 100	0 : 100	0 : 100	0 : 100
ซิลิกา (phr)	40	50	0	30	40	50	0	30	40	50
สมบัติยางก่อนการคงรูป										
Mooney Viscosity	64.03	93.53	28.24	48.29	67.28	96.95	34.55	68.15	96.76	154.86
Mooney Scorch, (t ₃₅ - t ₅)	2.50	2.04	6.45	2.25	2.16	1.75	-	2.84	2.67	1.75
t ₅₂ (min)	1.18	0.11	4.51	2.47	0.30	0.08	6.13	3.13	0.04	0.03
t ₃₀₀ (min)	4.47	3.26	11.01	5.34	4.42	3.57	15.08	7.14	5.51	4.42
สมบัติยางหลังการคงรูป										
Tensile Stress, (MPa)										
ก่อนอบ (25 °C)	22.05	22.61	6.47	17.22	19.45	19.32	2.67	6.32	10.36	12.59
(SD.)	(1.05)	(0.84)	(1.55)	(1.52)	(1.50)	(1.23)	(0.17)	(0.65)	(0.54)	(0.91)
หลังอบ (100°C)	18.06	19.62	3.27	12.05	15.32	17.83	2.31	4.93	8.07	12.11
(SD.)	(1.49)	(1.63)	(0.37)	(1.34)	(1.16)	(0.82)	(0.20)	(0.29)	(0.54)	(0.93)
Elongation at break, (%)										
ก่อนอบ (25 °C)	691.6	759.5	586.6	708.6	741.6	824.1	198.3	455.2	619.7	661.8
(SD.)	(38.7)	(41.9)	(67.7)	(54.2)	(54.8)	(74.9)	(33.4)	(57.9)	(14.1)	(40.5)
หลังอบ (100°C)	639.0	640.0	251.8	456.2	478.2	648.6	104.2	339.9	450.5	555.8
(SD.)	(23.2)	(36.3)	(27.3)	(18.2)	(10.2)	(24.4)	(21.3)	(20.8)	(26.8)	(23.5)

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลการทดลองสมบัติทางกายภาพของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิบิวทาไดอินเดิมซิลิกา (ต่อ)

สูตร	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Modulus at 100 %, (MPa)										
ก่อนอบ (25 °C)	2.63	2.44	1.94	2.35	2.48	2.46	2.15	2.50	3.36	3.85
(SD.)	(0.08)	(0.09)	(0.06)	(0.10)	(0.09)	(0.09)	(0.09)	(0.18)	(0.09)	(0.13)
หลังอบ (100°C)	2.62	2.87	2.20	3.05	3.43	2.97	1.74	2.62	3.53	3.79
(SD.)	(0.05)	(0.14)	(0.09)	(0.16)	(0.11)	(0.10)	(0.58)	(0.17)	(0.19)	(0.18)
Modulus at 300 %, (MPa)										
ก่อนอบ (25 °C)	5.02	4.93	2.78	4.06	4.26	3.93	-	4.07	5.27	6.07
(SD.)	(0.33)	(0.35)	(0.17)	(0.29)	(0.35)	(0.36)	-	(0.385)	(0.15)	(0.19)
หลังอบ (100°C)	5.16	6.29	-	6.08	7.23	6.11	-	4.54	5.82	6.84
(SD.)	(0.26)	(0.56)	-	(0.69)	(0.33)	(0.41)	-	(0.34)	(0.31)	(0.41)
Modulus at 600 %, (MPa)										
ก่อนอบ (25 °C)	16.28	14.37	-	11.72	12.12	10.47	-	-	9.83	10.95
(SD.)	(1.91)	(1.47)	-	-	(2.38)	(2.23)	-	-	(0.31)	(0.32)
หลังอบ (100°C)	15.93	17.74	-	-	-	15.77	-	-	-	-
(SD.)	(1.32)	(1.95)	-	-	-	(1.41)	-	-	-	-
Tear Strength, (N/mm)										
ก่อนอบ (25 °C)	52.24	66.80	23.65	31.96	34.47	51.31	10.79	28.15	35.14	41.07
(SD.)	(4.86)	(3.60)	(1.61)	(1.64)	(1.73)	(3.53)	(2.40)	(1.93)	(1.87)	(1.32)

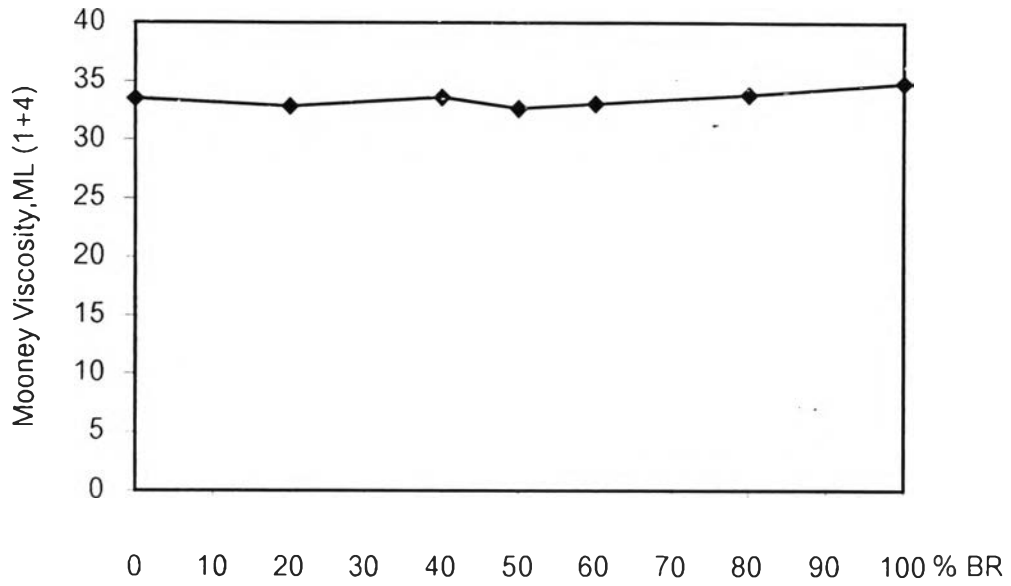
ตารางที่ 4.2 ข้อมูลการทดลองสมบัติทางกายภาพของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิบิวทาไดอินเต็มซิติกา (ต่อ)

สูตร	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
หลังอบ (100°C)	8.92	50.70	18.24	32.91	35.86	40.00	4.54	27.05	36.25	44.25
(SD.)	(1.68)	(5.08)	(1.94)	(1.17)	(1.92)	(2.92)	(1.01)	(2.25)	(1.96)	(1.76)
Abrasion loss,										
(cm ³ /kilocycles)	0.44	0.43	2.66	0.57	0.49	0.51	มาก	0.11	0.13	0.08
(SD.)	(0.005)	(0)	(0.105)	(0.027)	(0.005)	(0)	-	(0)	(0.005)	(0.003)
Flex cracking resistance,										
(kilocycle)	8.89	8.07	10.00	4.70	5.29	5.06	-	-	-	0.30
(SD.)	(0.30)	(0.14)	(0)	(0.10)	(0.19)	(0.08)	-	-	-	(0.01)
Compression set, (%)	44.86	50.73	17.05	36.40	40.48	52.56	14.85	20.71	25.30	41.34
(SD.)	(0.31)	(0.81)	(1.33)	(0.73)	(1.38)	(0.27)	(0.50)	(1.15)	(1.08)	(1.11)
Resilience, (%)	57.03	53.07	81.20	64.17	54.47	48.23	80.60	65.90	59.60	55.10
(SD.)	(1.01)	(0.97)	(0.16)	(0.24)	(0.49)	(0.12)	(0.47)	(0.99)	(0.85)	(0.36)
Hardness, shore A										
ก่อนอบ (25 °C)	62.33	66.90	41.36	56.66	62.24	64.79	45.67	58.11	71.41	68.71
(SD.)	(0.67)	(0.64)	(0.48)	(0.46)	(0.36)	(0.36)	(0.61)	(0.34)	(0.47)	(0.42)
หลังอบ (100 °C)	63.94	70.59	43.00	60.64	67.64	68.51	48.72	60.09	69.78	74.25
(SD.)	(0.72)	(0.84)	(0.28)	(0.54)	(0.34)	(0.34)	(0.35)	(0.58)	(0.94)	(0.72)

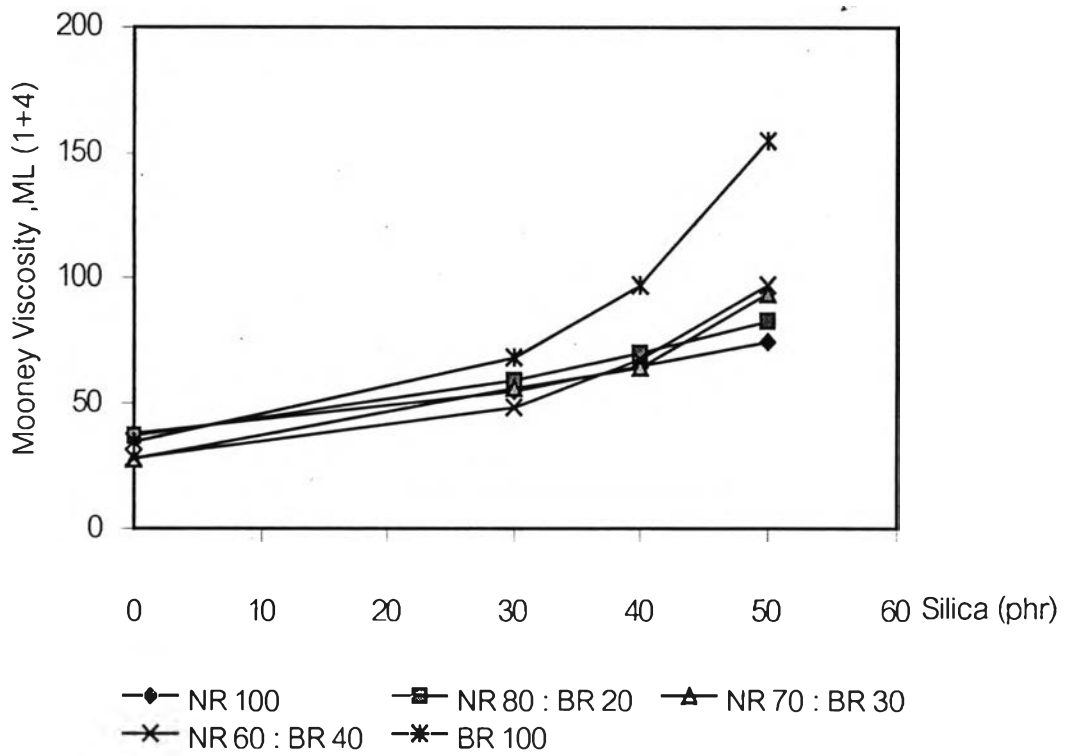
4.1 ความหนืดของยางผสม (Mooney Viscosity)

สำหรับยางผสมที่ไม่เติมซิลิกา ความหนืดของยางผสมที่ได้จากเครื่อง mooney viscometer นี้ที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิไอโซพรีน (NR : BR) คือ 100 : 0, 80 : 20, 60 : 40, 50 : 50, 40 : 60, 20 : 80, 0 : 100 phr ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.1 จากรูปที่ 4.1 พบว่าความหนืดของยางผสมมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากว่าในขั้นตอนการบดผสมมีการบดผสมยางธรรมชาติ (ความหนืด 90.64) ก่อนเป็นเวลาประมาณ 8 นาที เพื่อปรับค่าความหนืดให้เท่ากับยางพอลิไอโซพรีน (ความหนืด 41.8) ทำให้ยางทั้งสองชนิดเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดี และความหนืดของยางผสมทุกอัตราส่วน ซึ่งความหนืดในอยู่ช่วง 32-35 มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับความหนืดของยางพอลิไอโซพรีนเนื่องจากในขั้นตอนการบดผสมยางด้วยเครื่องบดผสมระบบเปิด (two roll mill) หรือเครื่องบดผสมระบบปิด (Kneader) แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะตัดสายโมเลกุลยางและเกิดเรดิคัล (radical) ที่ปลายโมเลกุลของยางที่ขาดออกทำให้น้ำหนักโมเลกุลของยางลดลงและทำให้ความหนืดของยางผสมลดลงและมีความหนืดต่ำกว่าความหนืดของยางธรรมชาติและยางพอลิไอโซพรีน

สำหรับความหนืดของยางผสมเติมซิลิกา ที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิไอโซพรีน (NR : BR) เป็น 100 : 0, 80 : 20, 70 : 30, 0 : 100 phr และปริมาณซิลิกา 0, 30, 40, 50 phr ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.2 จากรูปที่ 4.2 พบว่าเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ยางผสมมีค่าความหนืดสูงขึ้น สำหรับทุกอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อยางพอลิไอโซพรีน M.P. Wagner [31] ได้อธิบายไว้ว่า เนื่องจากซิลิกาซึ่งเป็นของแข็งมีขนาดอนุภาคเล็กอยู่ในช่วง 20 – 50 นาโนเมตร เมื่อนำมาบดผสมในยางมีผลทำให้ยางก่อนการคงรูปมีค่าความหนืดสูงขึ้นเมื่อเทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่นที่มีขนาดอนุภาคเท่ากัน แม้ว่าในสูตรที่เติมซิลิกามีการเติม PEG (polyethylene glycol) ซึ่งเป็นสารที่ช่วยทำให้ยางมีความนิ่มลง หรือเรียกว่าเป็นสารลดความหนืดของยางแล้วก็ตาม



รูปที่ 4.1 ความหนืดของยางผสม

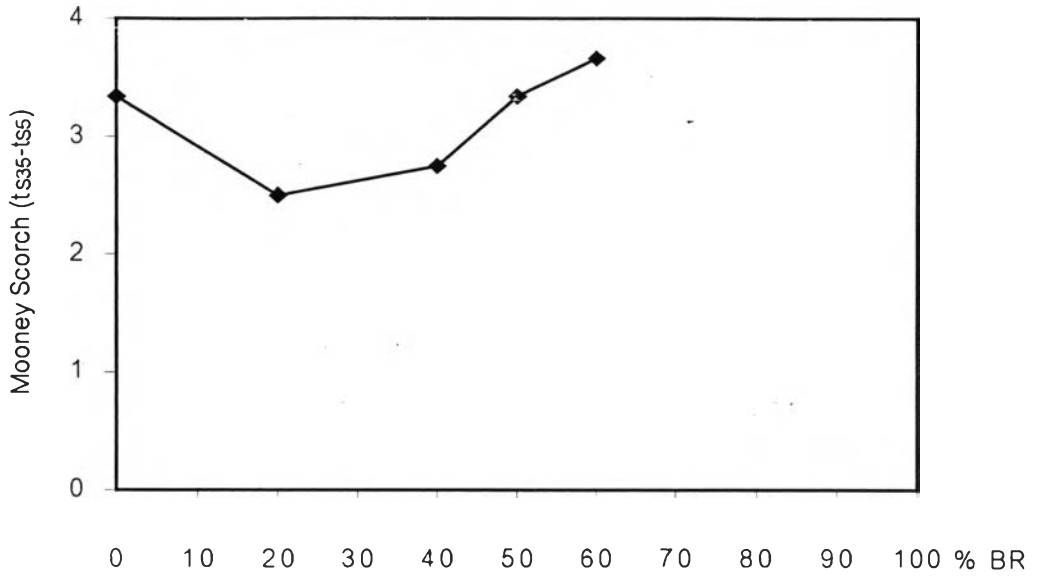


รูปที่ 4.2 ความหนืดของยางผสมเติมซิลิกา

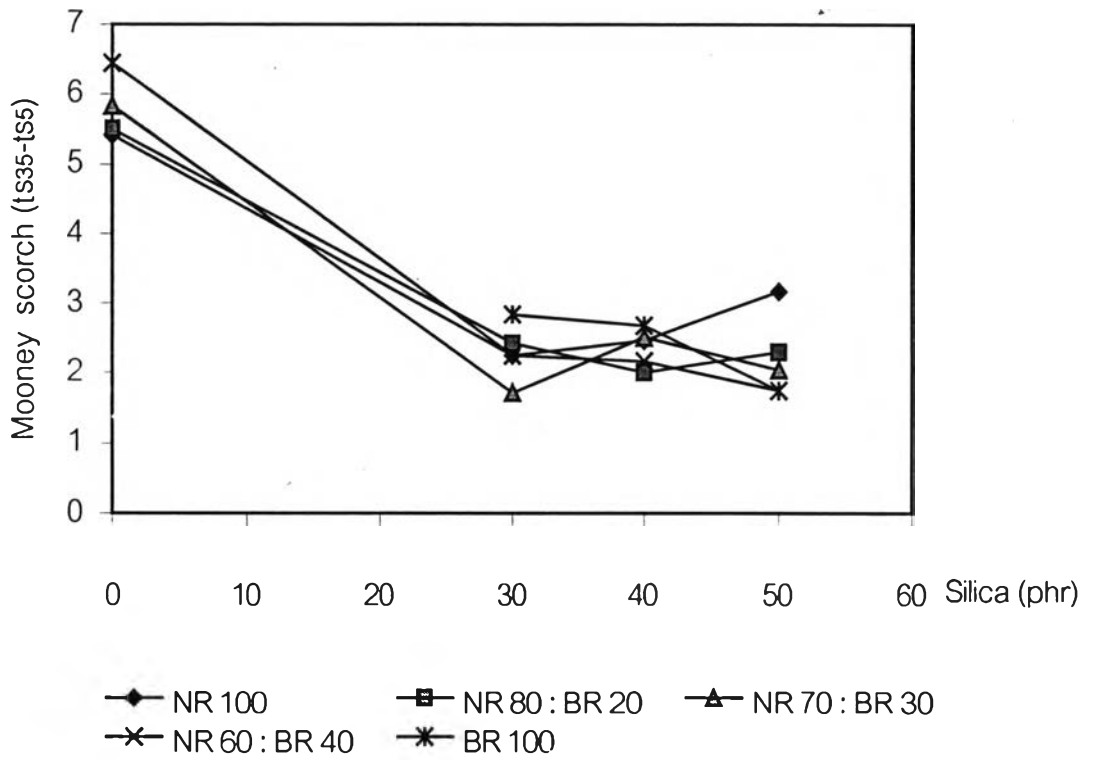
4.2 อัตราเริ่มการคงรูป (Mooney Scorch) ของยางผสม

อัตราเริ่มการคงรูปของยางผสมที่ไม่เติมซิลิกาที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิบิวทาไดอิน (NR : BR) คือ 100 : 0, 80 : 20, 60 : 40, 50 : 50, 40 : 60, 20 : 80, 0 : 100 phr ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จากรูปที่ 4.3 พบว่าอัตราเริ่มการคงรูปมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากว่า อัตราเริ่มการคงรูป คือ อัตราเริ่มการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเซชันซึ่งขึ้นกับระบบสารวัลคาไนซ์เป็นส่วนใหญ่ ในการทดลองได้มีการกำหนดให้ใช้ระบบสารวัลคาไนซ์ (CBS, Sulphur) ในปริมาณเท่ากันทั้งหมดทุกสูตรการทดลอง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของยางแต่ละชนิดจึงไม่มีผลต่ออัตราเริ่มการคงรูปมากนัก

สำหรับอัตราเริ่มการคงรูปของยางผสมเติมซิลิกาที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิบิวทาไดอิน (NR : BR) เป็น 100 : 0, 80 : 20, 70 : 30, 0 : 100 phr และปริมาณซิลิกา 0, 30, 40, 50 phr ดังแสดงในตารางที่ 4.2 จากรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่อเติมซิลิกาในยางผสมมีผลทำให้อัตราเริ่มการคงรูปของยางผสมมีค่าลดลงหรือเรียกว่า อัตราเริ่มการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเซชันเกิดได้เร็วขึ้นกว่าสูตรที่ไม่เติมซิลิกาเป็นเท่าตัว ที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องจากว่าบริเวณที่ผิวของซิลิกาเป็นสารอินทรีย์ (-Si-OH) ซึ่งมีฤทธิ์เป็นกรด และผิวของซิลิกามีพันธะไฮโดรเจน ดังนั้นทำให้เกิดการดูดซับสารตัวเร่งพวก Zinc Oxide และ Stearic acid ไว้ที่ผิวของซิลิกาทำให้ปริมาณของสารตัวเร่งที่ทำปฏิกิริยามีจำนวนลดลงทำให้อัตราเริ่มการคงรูปช้าลง แต่ในการทดลองมีการเติม PEG (polyethylene glycol) ซึ่งนอกจากเป็นสารที่ช่วยให้ยางนิ่มลงทำให้ความเหนียวของยางผสมลดลงแล้ว ยังเป็นสารประเภทตัวลดประสิทธิภาพในการดูดซับสารตัวเร่งไว้ที่ผิวของซิลิกา คือ glycol activity ของ PEG จะทำให้เกิดโครงสร้างบริเวณผิวของซิลิกาแทนที่ปฏิกิริยาการดูดซับของ Zinc Oxide กับซิลิกา จึงทำให้อัตราเริ่มการคงรูปของยางผสมที่เติมซิลิกา (เติม PEG) เร็วกว่าสูตรที่ไม่เติมซิลิกา (ไม่เติม PEG) [4,31]



รูปที่ 4.3 อัตราเริ่มการคงรูปของยางผสม

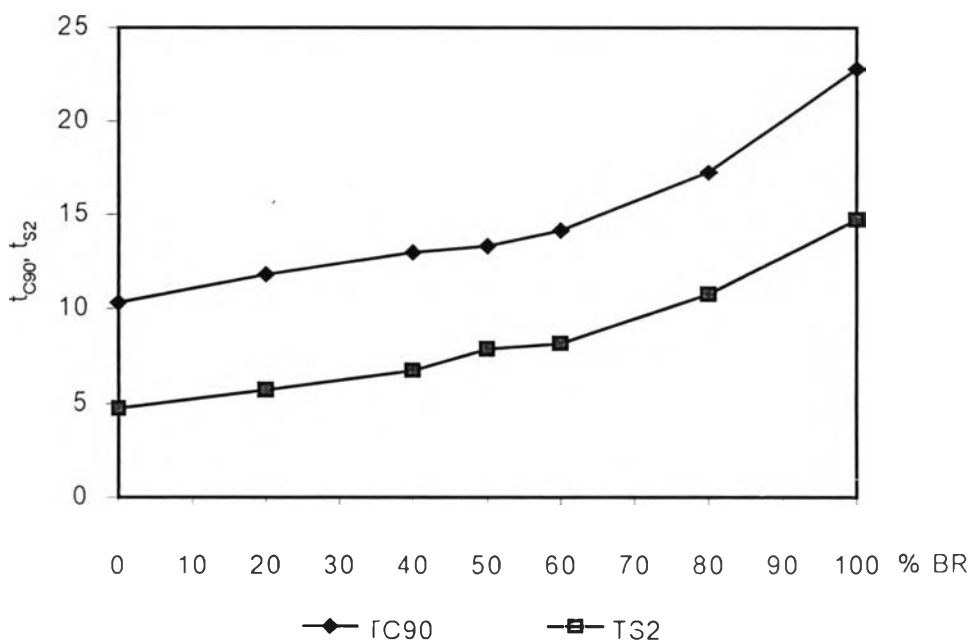


รูปที่ 4.4 อัตราเริ่มการคงรูปของยางผสมเติมซิลิกา

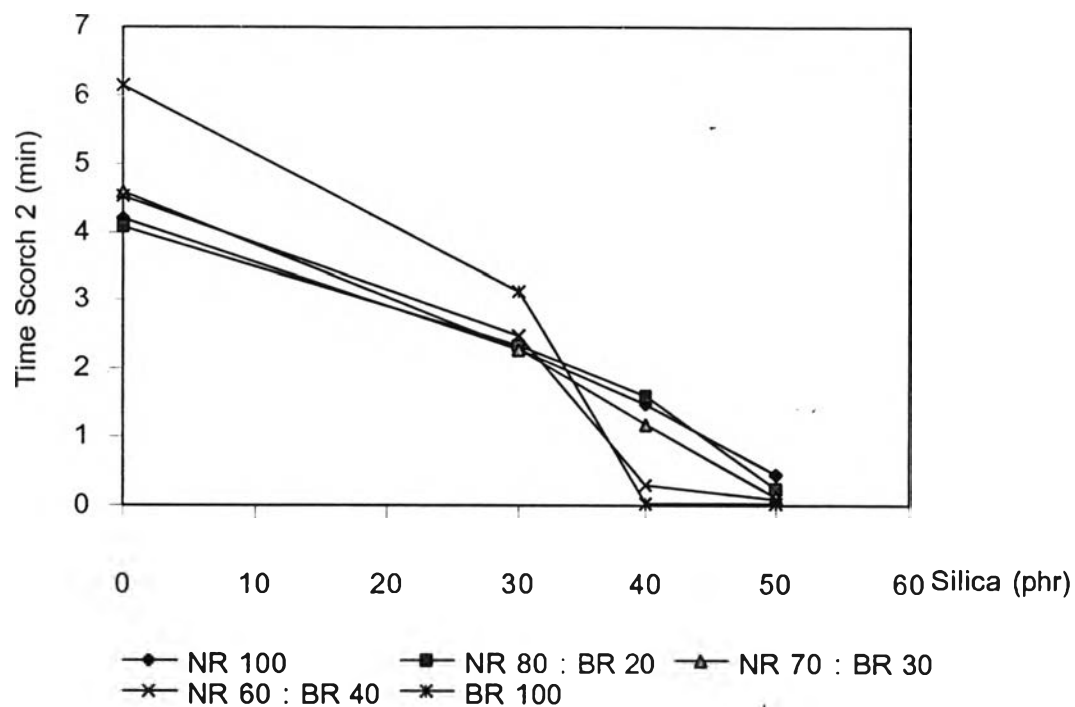
4.3 เวลาที่ย่างเริ่มเกิดการคงรูปและเวลาที่ใช้ในการคงรูป

สำหรับยางผสมไม่เติมซิลิกา ที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิบิวทาไดอิน (NR : BR) คือ 100 : 0, 80 : 20, 60 : 40, 50 : 50, 40 : 60, 20 : 80, 0 : 100 phr ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จากรูปที่ 4.5 พบว่าเวลาที่ย่างเริ่มเกิดการคงรูป (t_{s2}) และเวลาที่ใช้ในการคงรูป (t_{c90}) มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณยางพอลิบิวทาไดอินเพิ่มมากขึ้นทั้งนี้ก็เนื่องจากยางธรรมชาติมีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลแบบไม่อ้อมตัวมีพันธะคู่ที่วงไวต่อปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันกับสารระบบวัลคาไนซ์ได้มากกว่าพันธะคู่ของยางพอลิบิวทาไดอิน ทำให้สามารถทำปฏิกิริยากับกำมะถันในกระบวนการวัลคาไนซ์ได้เร็วกว่ายางพอลิบิวทาไดอิน

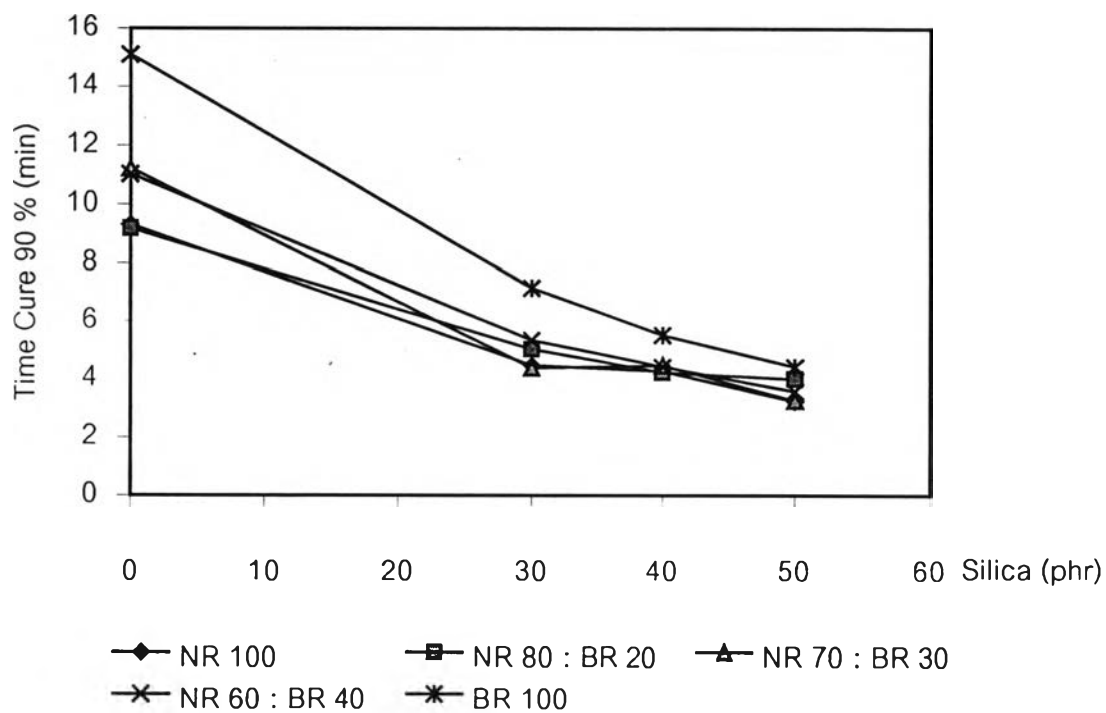
สำหรับยางผสมที่เติมซิลิกา ดังแสดงในตารางที่ 4.2 จากรูปที่ 4.6 และ 4.7 พบว่า เวลาที่ย่างเริ่มเกิดการคงรูป (t_{s2}) และเวลาที่ใช้ในการคงรูป (t_{c90}) มีค่าลดลงสำหรับทุกอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวทาไดอิน หรือเรียกว่าใช้เวลาในการคงรูปลดลงเมื่อเทียบกับสูตรที่ไม่เติมซิลิกา ทั้งนี้เนื่องจากผลของ PEG ที่เติมลงไปยางผสมที่เติมซิลิกา เพราะนอกจาก PEG จะมีผลต่อความหนืดและอัตราเริ่มการคงรูปของยางผสมแล้ว ยังมีผลต่อปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันด้วย เพราะ PEG เป็นสารที่ช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันเร็วขึ้น และผลจกขนาดอนุภาคของซิลิกาที่มีขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวมาก ดังนั้นในขณะที่บดผสมยางในเครื่องบดผสมระบบปิด (Kneader) จะเกิดความร้อนขึ้นสูง ซึ่งความร้อนจะเร่งให้สารเคมีทำปฏิกิริยากับยางทำให้สูตรที่เติมซิลิกาใช้เวลาที่ย่างเริ่มเกิดการคงรูปและเวลาที่ใช้ในการคงรูปน้อยกว่าสูตรที่ไม่เติมซิลิกา



รูปที่ 4.5 เวลาที่ย่างเริ่มเกิดการคงรูป (t_{s2}) และเวลาในการคงรูป (t_{c90})



รูปที่ 4.6 เวลาที่ย่างเริ่มเกิดการคงรูป (t_{s2}) ของยางผสมเติมซิลิกา



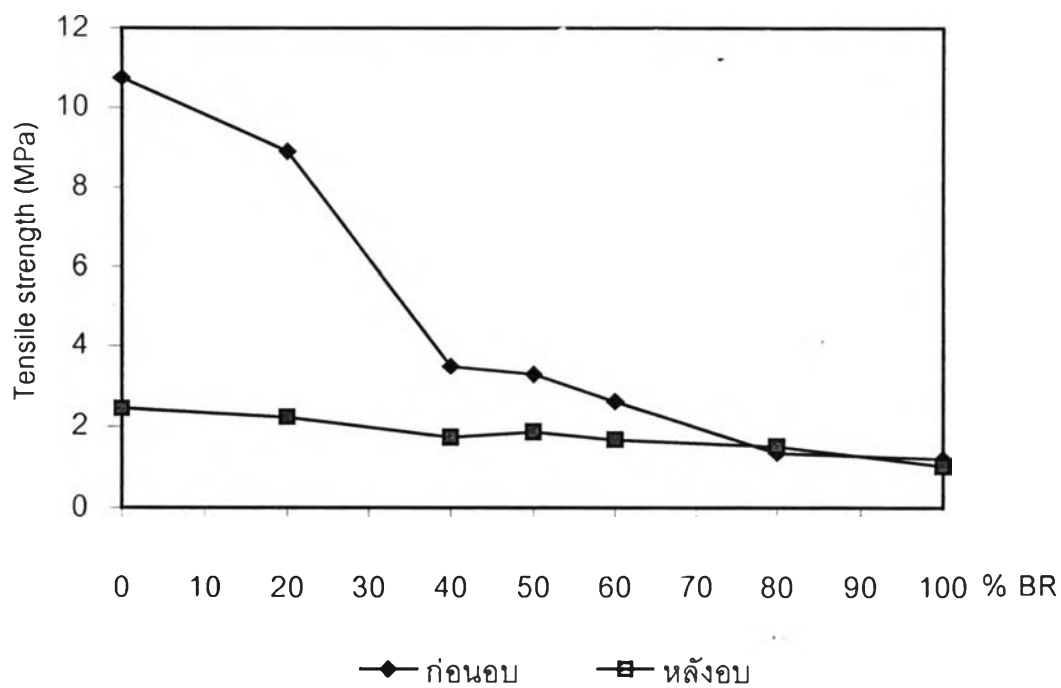
รูปที่ 4.7 เวลาที่ใช้ในการคงรูป (t_{90}) ของยางผสมเติมซิลิกา

4.4 ความต้านทานแรงดึง

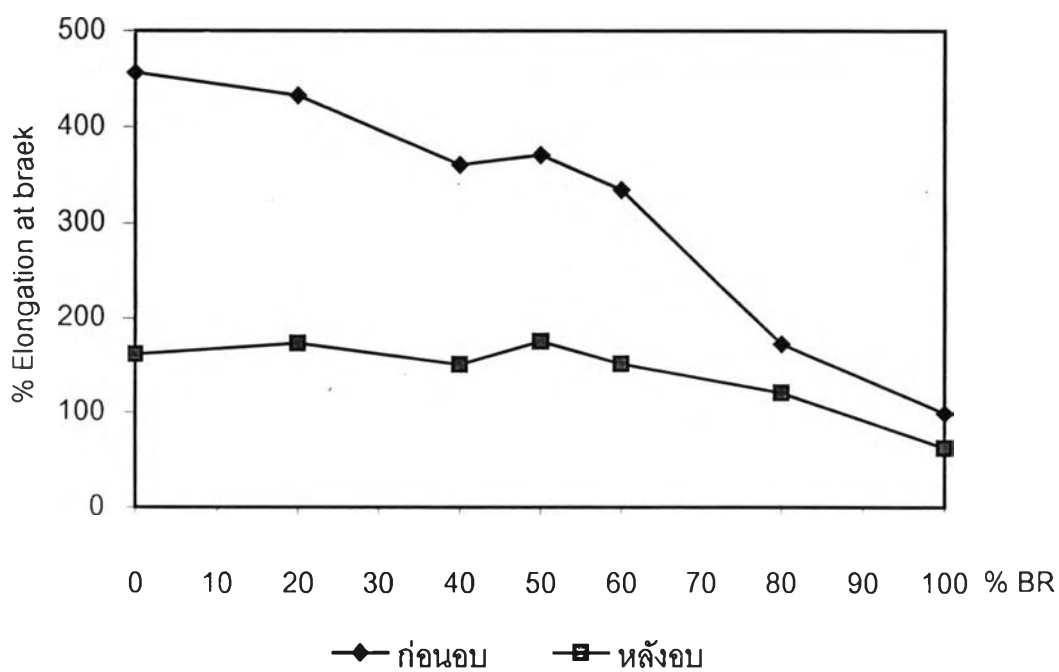
4.4.1 ความต้านทานแรงดึง ความยืดเมื่อขาดของยางผสม

สำหรับยางผสมไม่เติมซิลิกา ความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และความยืดเมื่อขาด (elongation at break) ของยางผสมที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิบิวทาไดอิน (NR : BR) เป็น 100 : 0, 80 : 20, 60 : 40, 50 : 50, 40 : 60, 20 : 80, 0 : 100 phr ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าเมื่อปริมาณยางพอลิบิวทาไดอินเพิ่มขึ้น ความต้านทานแรงดึงและความยืดเมื่อขาดมีค่าลดลงทั้งก่อนอบและหลังอบ ทั้งนี้เนื่องจากว่าโมเลกุลยางธรรมชาติซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบ Crystalline คือเรียงตัวเป็นระเบียบเมื่อถูกยืดให้ยาว จะสามารถทนต่อแรงดึงได้ดีกว่ายางพอลิบิวทาไดอิน และค่าที่ได้หลังจากอบ 100 องศาเซลเซียส เวลา 22 ชั่วโมง มีค่าลดต่ำลงมากเนื่องจากว่าลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของทั้งยางธรรมชาติและยางพอลิบิวทาไดอินเป็นแบบไม่อิมิตัวคือมีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา ดังนั้นจึงเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับแก๊สออกซิเจนโดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ยางเสื่อมสภาพเร็วขึ้น แต่ยางธรรมชาติมีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันมากกว่ายางพอลิบิวทาไดอินจึงทำให้ความต้านทานแรงดึงและความยืดเมื่อขาดของยางธรรมชาติลดลงมากเมื่อเทียบกับค่าก่อนอบ

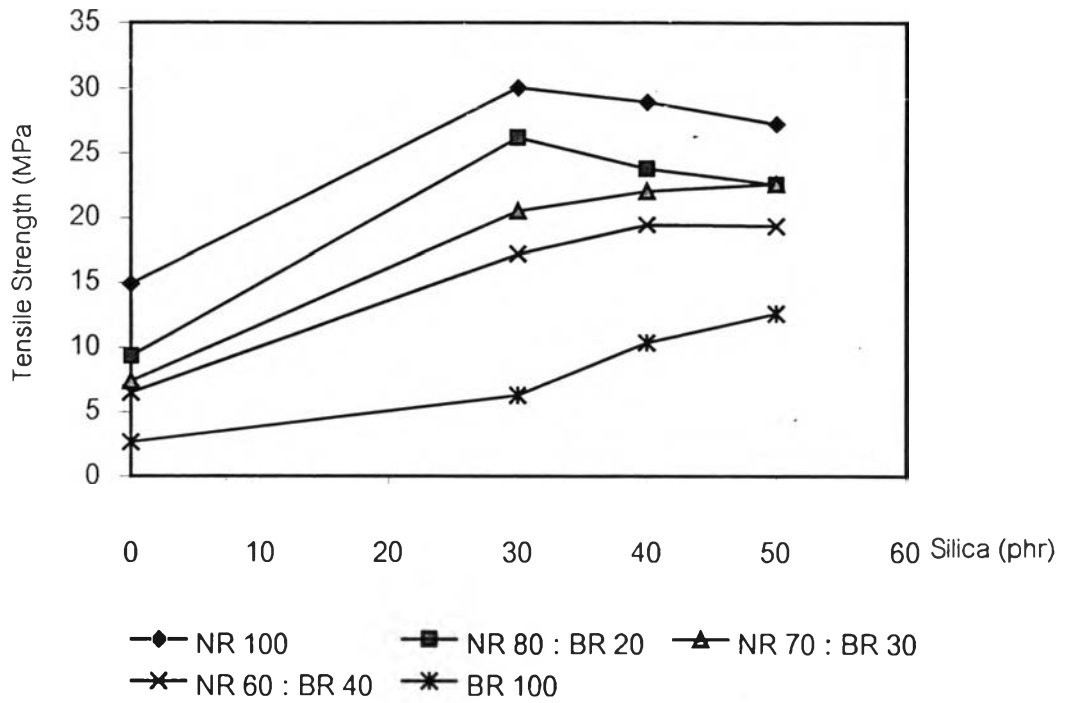
สำหรับยางผสมเติมซิลิกาที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยาง พอลิบิวทาไดอิน (NR :BR) เป็น 100 : 0, 80 : 20, 70 : 30, 0 : 100 phr และปริมาณซิลิกา 0, 30, 40, 50 phr ความต้านทานแรงดึง และความยืดเมื่อขาดของยางผสมดังแสดงในตารางที่ 4.2 จากรูปที่ 4.10 และ 4.11 พบว่ายางผสมที่เติมซิลิกามีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับยางผสมที่ไม่เติมซิลิกาที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะในยางผสมที่เติมซิลิกามีแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งระหว่างซิลิกากับสายโมเลกุลของยางทำให้ความต้านทานแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้น จากกราฟเห็นได้ว่าความต้านทานแรงดึงของยางผสมที่ไม่เติมซิลิกาหลังอบมีค่าต่ำกว่าก่อนอบ เนื่องจากผลของพันธะคู่ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ส่วนความต้านทานแรงดึงของยางผสมที่เติมซิลิกาก่อนอบมีค่าใกล้เคียงกับหลังอบ M.P. Wagner [31] ได้อธิบายว่าซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่สามารถทนต่อความร้อน (heat resistant) ได้เนื่องจากว่าทำให้ยางสามารถดูดซับออกซิเจน (oxygen absorption) ได้น้อยลงทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลงน้อยกว่าสูตรที่ไม่เติมซิลิกา



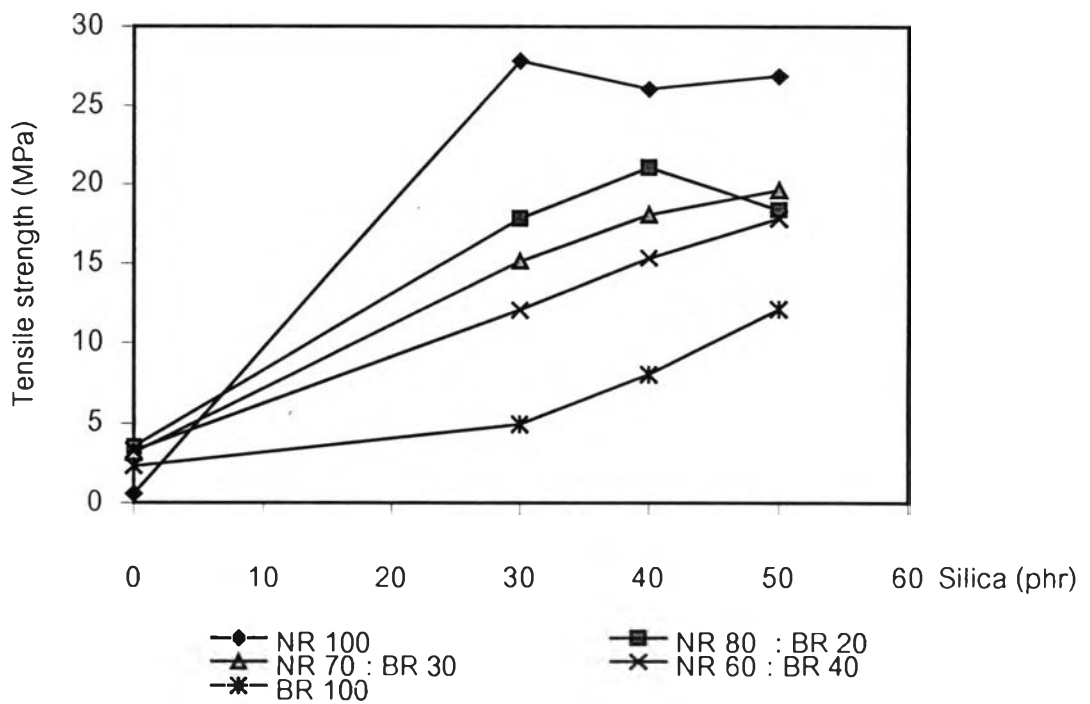
รูปที่ 4.8 ความต้านทานแรงดึงของยางผสม



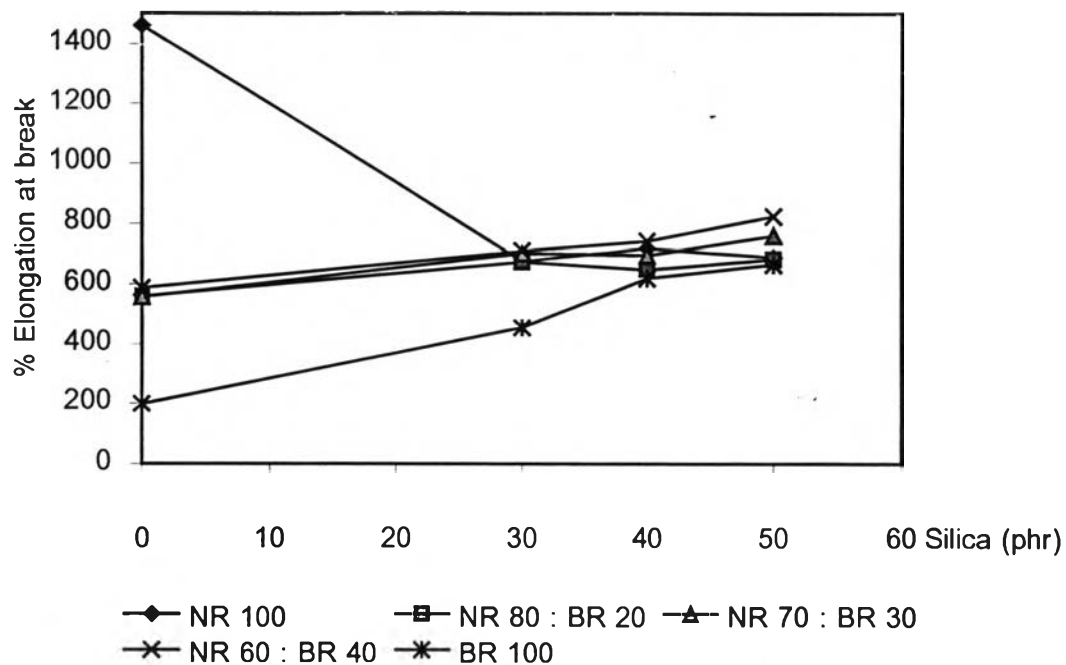
รูปที่ 4.9 ความยืดเมื่อขาดของยางผสม



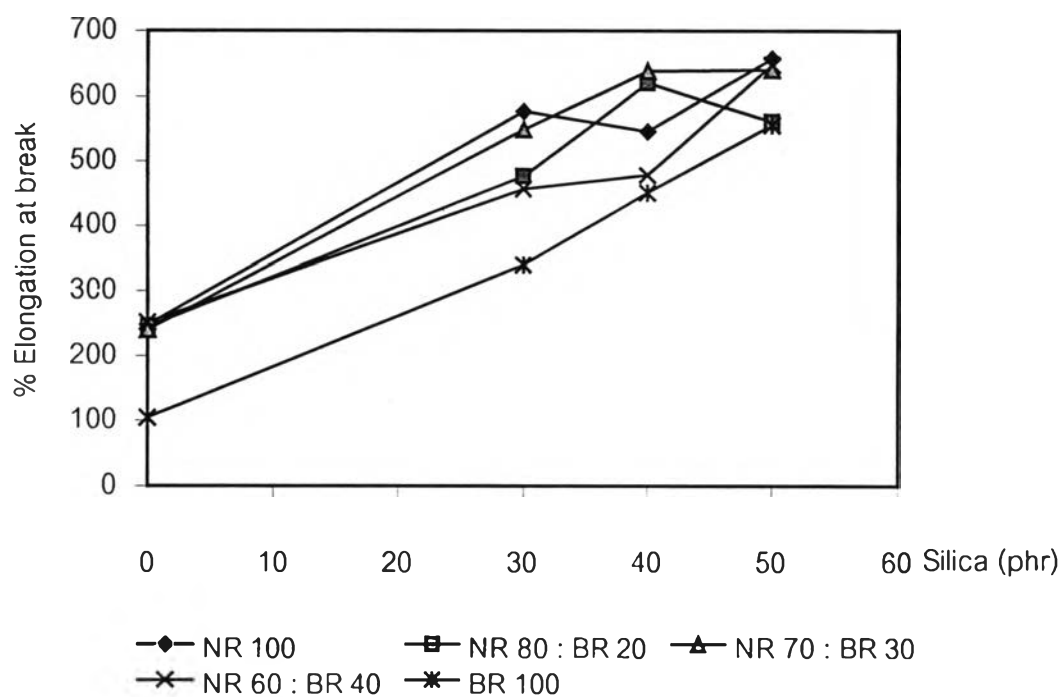
รูปที่ 4.10 ค่าความต้านทานแรงดึงของยางผสมเติมซิลิกา ก่อนอบ



รูปที่ 4.11 ค่าความต้านทานแรงดึงของยางผสมเติมซิลิกา หลังอบ



รูปที่ 4.12 ความยืดเมือขนาดของยางผสมเต็มชิลิกาที่ก่อนอบ



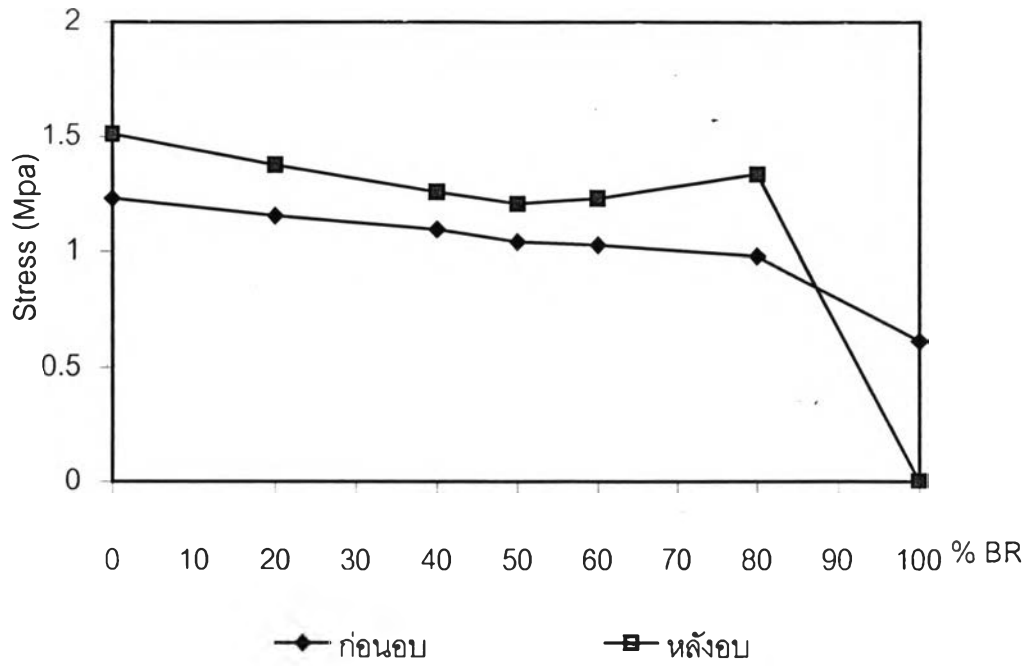
รูปที่ 4.13 ความยืดเมือขนาดของยางผสมเต็มชิลิกาหลังอบ

4.4.2 ไมดูล์สของยางผสม

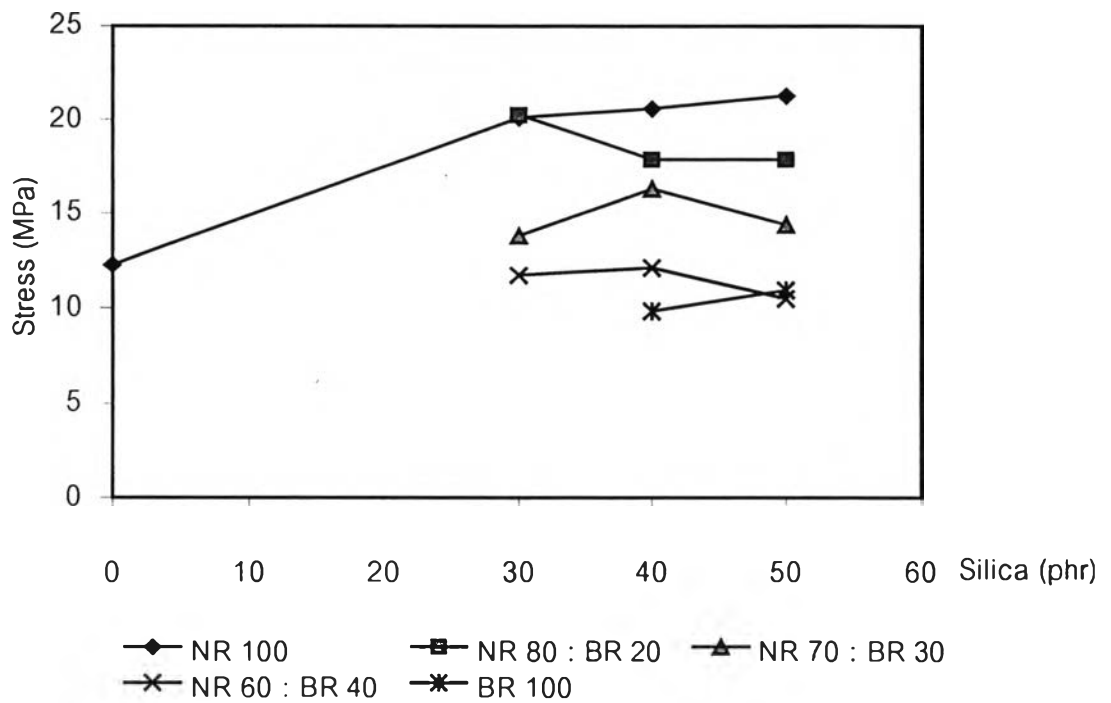
สำหรับยางผสมไม่เติมซิลิกา ค่าไมดูล์สของยางผสมที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิบิวทาไดอิน (NR : BR) คือ 100 : 0, 80 : 20, 60 : 40, 50 : 50, 40 : 60, 20 : 80, 0 : 100 phr ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่ายางผสมธรรมชาติสามารถให้ค่าไมดูล์สสูงสุดถึง 400 % ไมดูล์ส จากรูปที่ 4.14 พบว่าปริมาณยางพอลิบิวทาไดอินเพิ่มขึ้นค่าไมดูล์สมีค่าลดลงและค่าไมดูล์สหลังอบจะมีค่าต่ำกว่าก่อนอบ ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับ ความต้านทานแรงดึง และความยืดเมื่อขาด ทั้งนี้เนื่องจากความเป็น Crystalline ของยางธรรมชาติ ดังที่กล่าวมาแล้ว

สำหรับยางผสมที่เติมซิลิกาค่าไมดูล์สของยางผสมที่อัตราส่วนยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวทาไดอิน (NR : BR) 100 : 0, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 0 : 100 phr และปริมาณซิลิกา 0, 30, 40, 50 phr ดังแสดงในตารางที่ 4.2 จากรูปที่ 4.15 ซึ่งพบว่าค่าไมดูล์สที่ 600 % ของยางผสมที่เติมซิลิกามีค่าไมดูล์สสูงกว่ายางผสมที่ไม่เติมซิลิกา และในกรณียางผสมที่ไม่เติมซิลิกหรือเติมในปริมาณต่ำ 30 phr พบว่าค่าไมดูล์ส ก่อนอบมีค่ามากกว่าไมดูล์สหลังอบ ส่วนยางผสมที่ผสมซิลิกาในปริมาณที่สูง เช่น ปริมาณซิลิกา 40, 50 phr ที่อัตราส่วนยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวทาไดอินเป็น 70 : 30 และ 60 : 40 พบว่า ค่าไมดูล์สหลังอบมีค่ามากกว่าไมดูล์สก่อนอบ

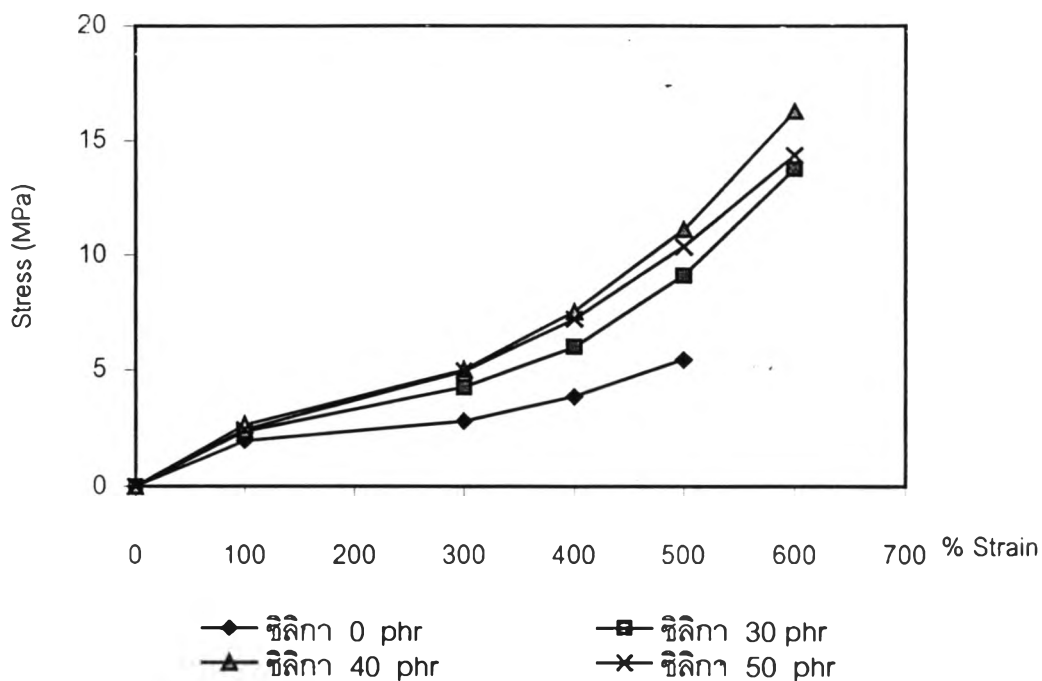
จากรูปที่ 4.16 และ 4.17 ซึ่งเป็นกราฟเปรียบเทียบค่าความเค้นและความเครียดที่ไมดูล์สค่าต่าง ๆ ของยางผสม (NR : BR) 70 : 30 เติมซิลิกาในปริมาณ 0, 30, 40, 50 phr ซึ่งพบว่าเมื่อเติมซิลิกาในยางผสมมีผลทำให้ความเค้นและความเครียดของยางผสมมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งก่อนอบและหลังอบ และการเติมซิลิกาในปริมาณที่สูงทำให้ยางผสมมีความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มมากขึ้น M.P. Wager [31] ได้อธิบายไว้ว่าเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างซิลิกากับโมเลกุลของยางทำให้ยางที่เติมซิลิกาค่าไมดูล์สจะสูงขึ้น เช่นเดียวกับค่าความต้านทานแรงดึงและความยืดเมื่อขาด



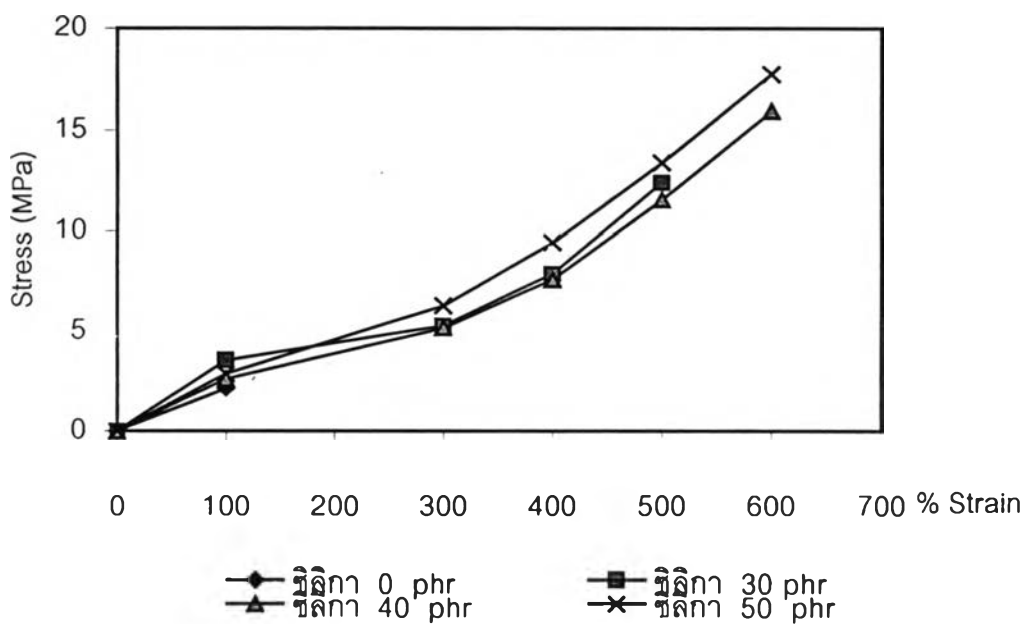
รูปที่ 4.14 ค่าโมดูลัสที่ 100 % ของยางผสม



รูปที่ 4.15 ค่าโมดูลัสที่ 600 % ของยางผสมเติมซิลิกา ก่อนอบ



รูปที่ 4.16 ความเค้นและความเครียดที่ค่าโมดูลัสต่างๆ ของยางผสม (NR:BR) 70 : 30 เดิม ซิลิกา ก่อนอบ



รูปที่ 4.17 ความเค้นและความเครียดที่ค่าโมดูลัสต่างๆ ของยางผสม (NR:BR) 70 : 30 เดิมซิลิกา หลังอบ

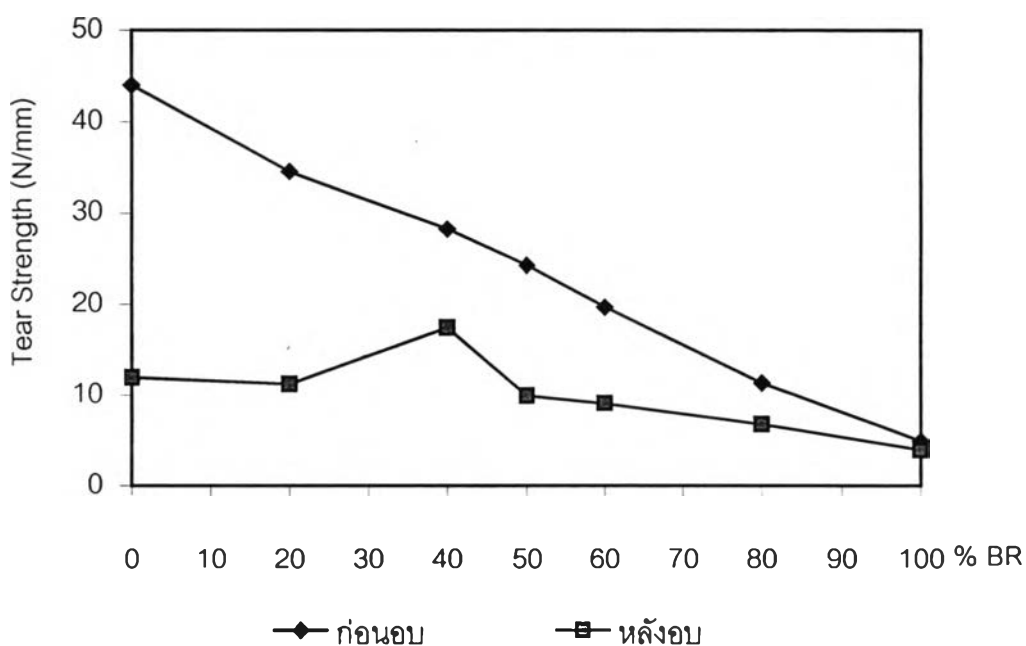
4.5 ความต้านทานต่อการฉีกขาด

ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางผสมที่ไม่เติมซิลิกา ที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิบิวทาไดอิน (NR : BR) คือ 100 : 0, 80 : 20, 60 : 40, 50 : 50, 40 : 60, 20 : 80, 0 : 100 phr ดังแสดงในตารางที่ 4.2 จากรูปที่ 4.18 ความต้านทานต่อการฉีกขาดมีแนวโน้มเช่นเดียวกับความต้านทานแรงดึง คือ เมื่อปริมาณยางพอลิบิวทาไดอินเพิ่มขึ้น ความต้านทานต่อการฉีกขาดจะลดลง ดังนี้

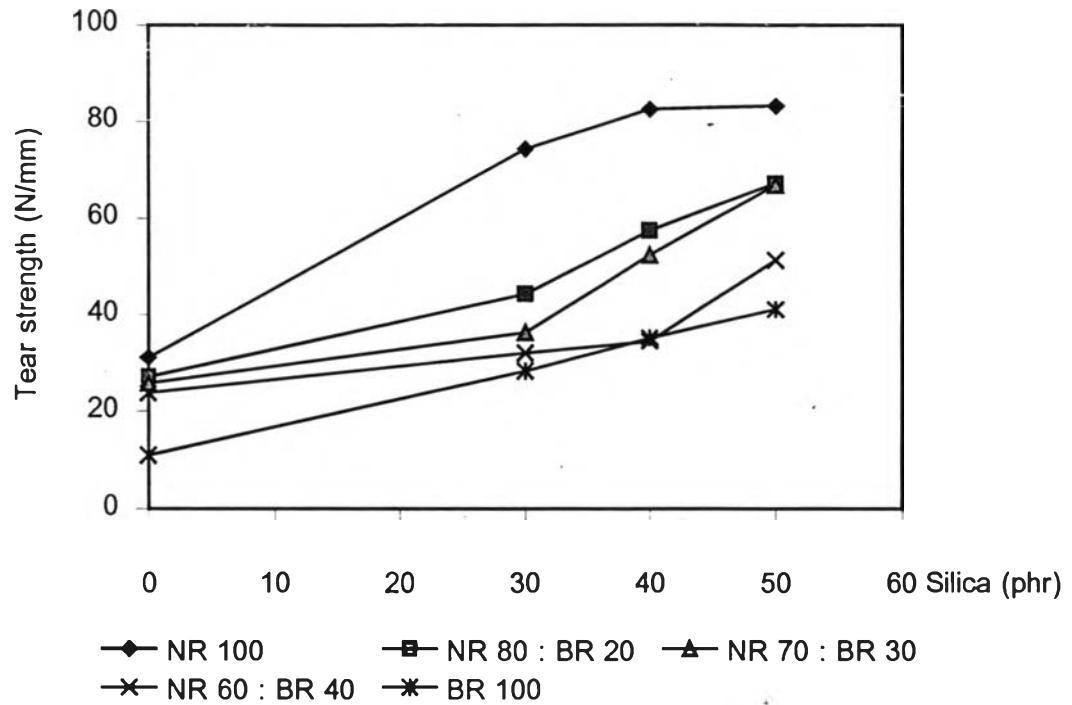
$$100 : 0 > 80 : 20 > 60 : 40 > 50 : 50 > 40 : 60 > 20 : 80 > 0 : 100$$

และค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดหลังอบที่ 100 องศาเซลเซียส 22 ชั่วโมงพบว่ามีค่าต่ำกว่าก่อนอบ

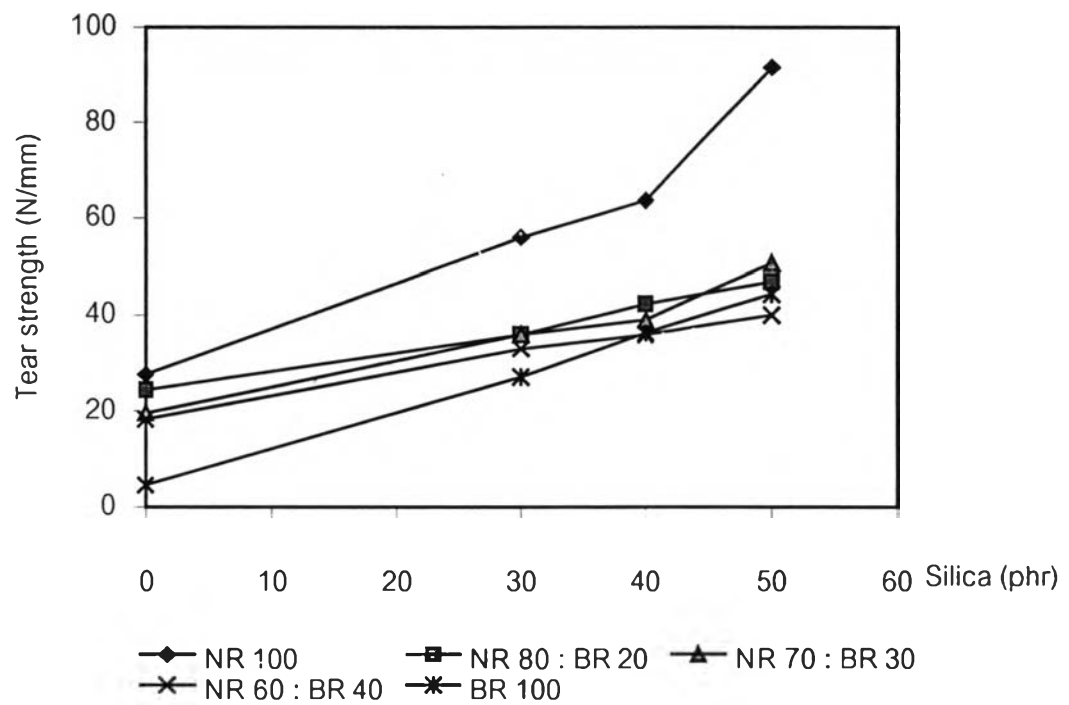
สำหรับยางผสมที่เติมซิลิกาที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิบิวทาไดอิน (NR :BR) เป็น 100 : 0, 80 : 20, 70 : 30, 0 : 100 phr และปริมาณซิลิกา 0, 30, 40, 50 phr ดังแสดงในตารางที่ 4.3 จากรูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 พบว่าเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้น [27] ทั้งก่อนอบและหลังอบแต่ค่าที่ได้จากทดสอบหลังอบมีค่าต่ำกว่าก่อนอบ ทั้งนี้เนื่องจากผลของแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงระหว่างซิลิกากับสายโมเลกุลยางดังที่กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 4.18 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางผสม



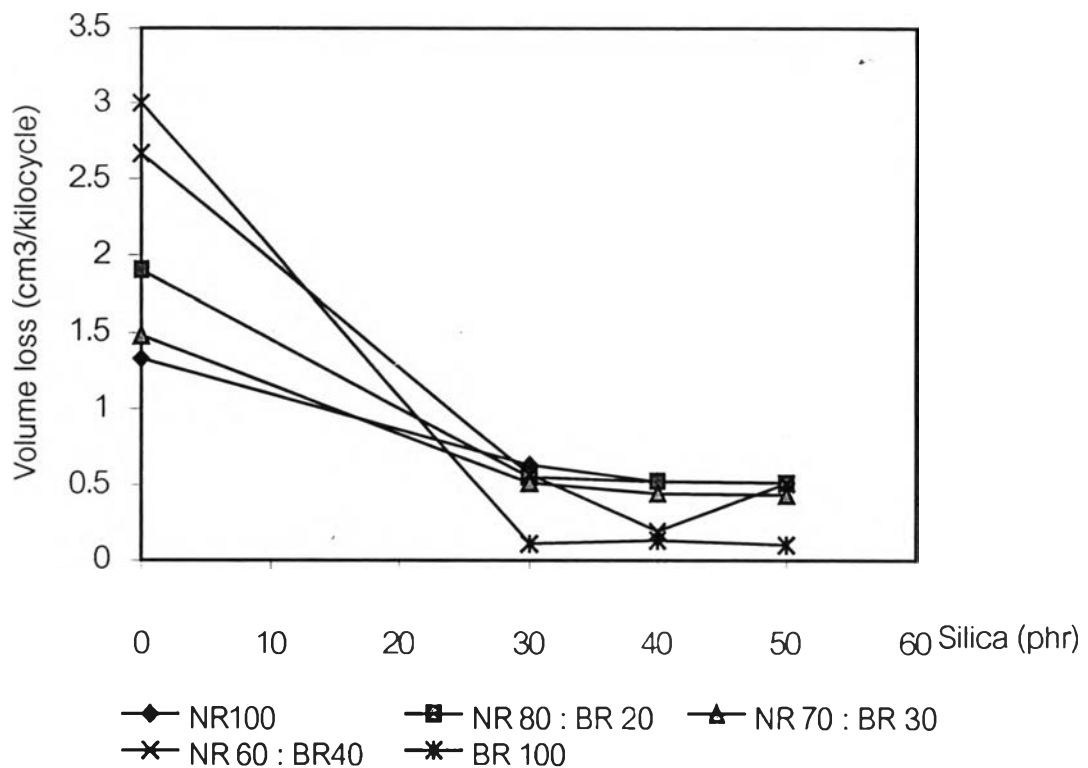
รูปที่ 4.19 ความต้านทานต่อการฉีกขาดเต็มซิลิกา ก่อนอบ



รูปที่ 4.20 ความต้านทานต่อการฉีกขาดเต็มซิลิกา หลังอบ

4.6 ความต้านทานต่อการสึกหรอ (Abrasion Resistance)

ปริมาตรที่หายไปของยางผสมเติมซิลิกาที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิบิวทาไดอิน (NR : BR) คือ 100 : 0, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 0 : 100 phr และปริมาณซิลิกา 0, 30, 40, 50 phr ดังแสดงในตารางที่ 4.2 จากรูปที่ 4.21 พบว่า ซิลิกามีผลทำให้ยางผสมมีความต้านทานต่อการสึกหรอเพิ่มขึ้น หรือ ปริมาตรของยางที่หายไปลดลงซึ่งสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับค่าความต้านทานแรงดึง และความต้านทานต่อการฉีกขาด คือ เมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงระหว่างซิลิกากับสายโมเลกุลของยางเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ปริมาตรที่หายไปของยางผสมที่เติมซิลิกาตกลงเมื่อเทียบกับยางผสมที่ไม่เติมซิลิกา และเมื่อปริมาณยางพอลิบิวทาไดอินเพิ่มขึ้น ความต้านทานต่อการสึกหรอเพิ่มขึ้น ซึ่งจากรูปเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวทาไดอิน (NR : BR) 70 : 30 และปริมาณซิลิกา 40 มีปริมาตรที่หายไปของยางผสมต่ำใกล้เคียงกับยางพอลิบิวทาไดอินเติมซิลิกา

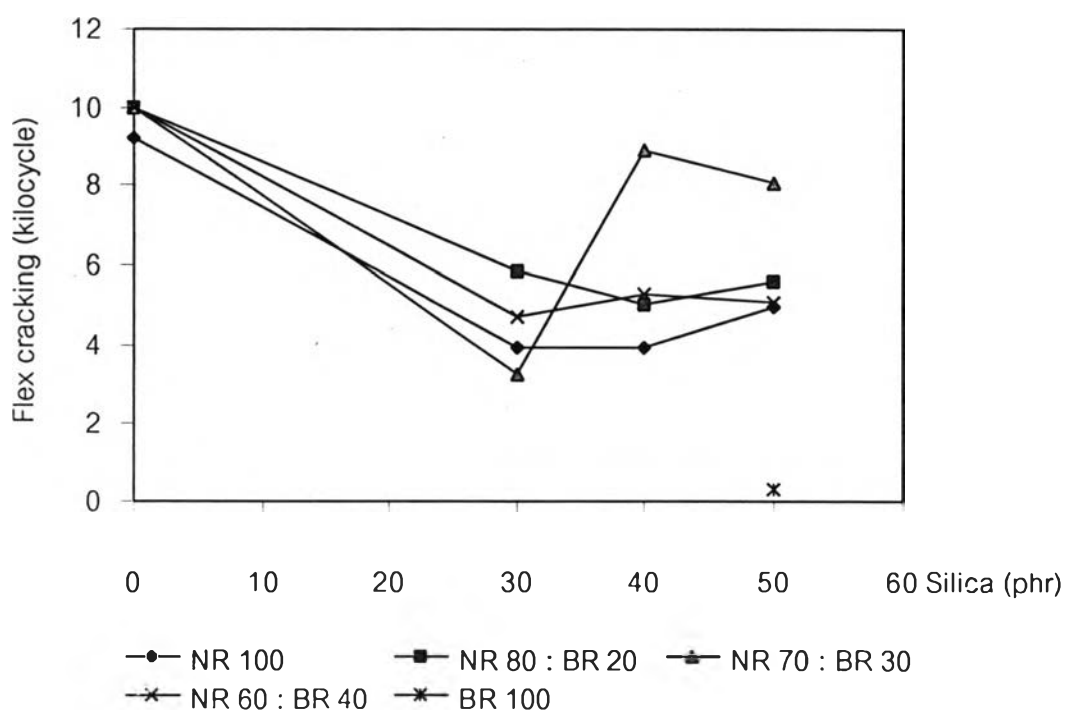


รูปที่ 4.21 ปริมาตรที่หายไปของยางผสมเติมซิลิกา

4.7 ความต้านทานการหักงอ (Flex cracking resistance)

ความต้านทานต่อการหักงอ คือ ความล้าตัวของยางเมื่อยางถูกแรงกระทำซ้ำ ๆ กัน จะทำให้สมบัติของยางเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ซึ่งจากการทดสอบด้วยเครื่อง De Mattia เป็นการทดสอบการหักงอของยางเพื่อให้เกิดรอยแตก หรือรอยแยกตรงรอยบากของชั้นยางทดสอบ โดยจะรายงานผลเป็นจำนวนรอบที่ทำให้ยางเกิดรอยแตกถึงขั้นที่ 6 คือมีรอยแตกที่ยาวที่สุดมากกว่า 3 มิลลิเมตร

ความต้านทานการหักงอของยางผสม ที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิบิวทาไดอิน (NR : BR) คือ 100 : 0, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 0 : 100 phr และปริมาณซิลิกา 0, 30, 40, 50 phr ดังแสดงในตารางที่ 4.2 จากรูปที่ 4.22 พบว่ายางผสมที่ไม่เติมซิลิกาสามารถต้านทานต่อการหักงอได้ดีกว่ายางผสมที่เติมซิลิกา เช่น จากสูตรอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวทาไดอิน (NR : BR) 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40 ซึ่งสามารถต้านทานต่อการหักงอได้ดีมากคือ เมื่อทดสอบเป็นจำนวน 10,000 รอบ แล้วยางขึ้นทดสอบยังไม่เกิดรอยแตกแบบรอยเข็มที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากว่ายางผสมที่ไม่เติมซิลิกามีแต่โมเลกุลยางกับยางเท่านั้นซึ่งมีสมบัติในการยืดหยุ่นต่อการหักงอได้ดีกว่ายางผสมที่เติมซิลิกาซึ่งมีความยืดหยุ่นของสายโมเลกุลยางต่ำกว่าจึงเกิดรอยแตกที่บริเวณผิวของยางได้ง่ายกว่า

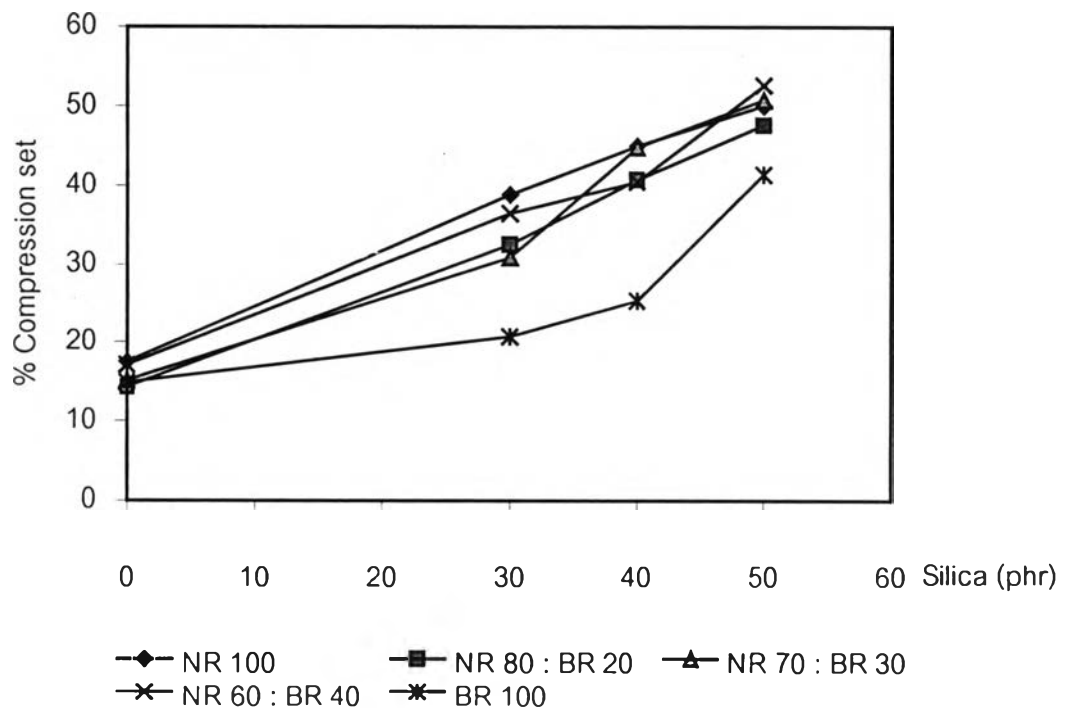


รูปที่ 4.22 ความต้านทานการหักงอของยางผสมเติมซิลิกา

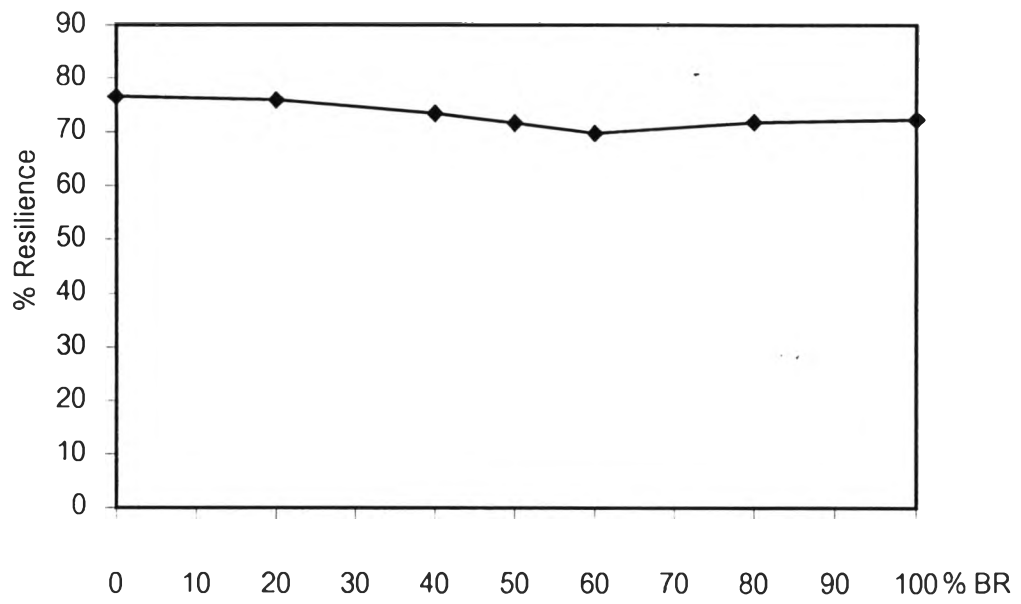
4.8 การยุบตัวและการกระดอน

สมบัติการคืนตัวของยางผสม คือ สมบัติในการคงสภาพความเป็นอีลาสติคของยางภายใต้ความเค้นอัด (compression set) อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 22 ชั่วโมง ซึ่งเป็นการหาเปอร์เซ็นต์การยุบตัวของชิ้นทดสอบ ค่าการยุบตัวต่ำแสดงว่ามีการคืนตัวดี ค่าการยุบตัวมากแสดงว่ามีการคืนตัวไม่ดี การยุบตัวของยางผสมที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิบิวทาไดอิน (NR : BR) คือ 100 : 0, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 0 : 100 phr และปริมาณซิลิกา 0, 30, 40, 50 phr ดังแสดงในตารางที่ 4.2 จากรูปที่ 4.23 พบว่ายางผสมที่เติมซิลิกามีสมบัติการคืนตัวต่ำกว่ายางผสมที่ไม่เติมซิลิกาและปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้นในยางผสมทำให้สมบัติการคืนตัวลดลงเนื่องซิลิกาที่เพิ่มขึ้นทำให้ลดความเป็นอีลาสติคในยางผสมด้วยจึงทำให้สมบัติการคืนตัวลดลง

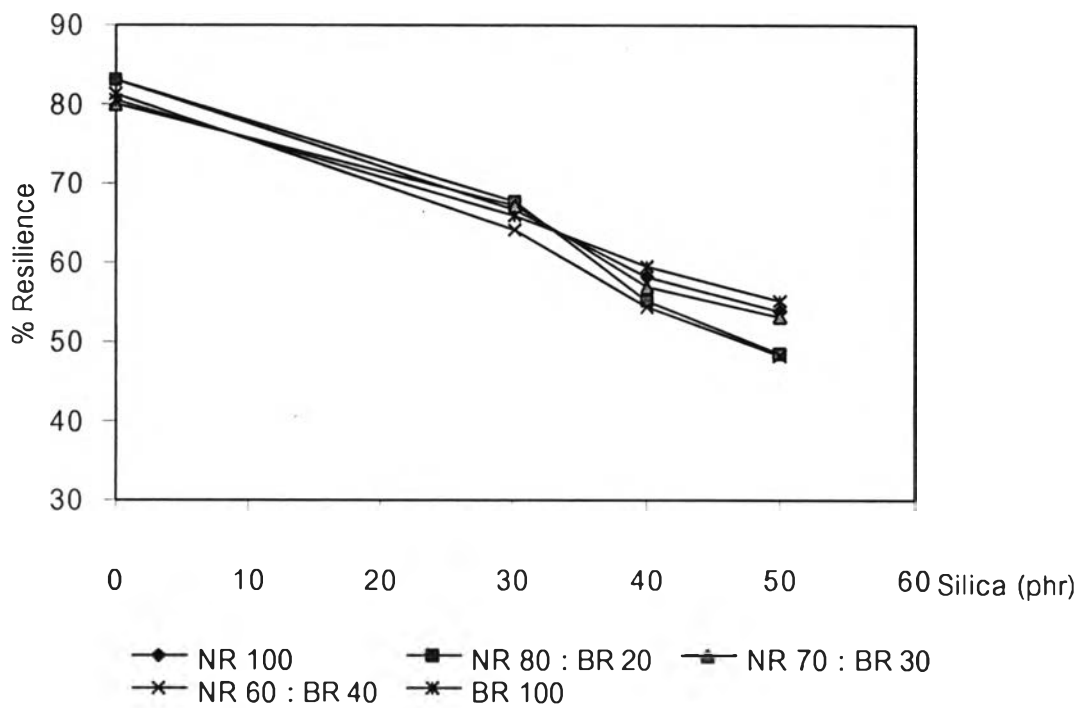
สมบัติการกระดอนของยางผสมไม่เติมซิลิกา ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จากรูปที่ 4.24 ค่าการกระดอนมีค่าใกล้เคียงกัน คือ อยู่ในช่วง 72 - 77 % แต่สำหรับยางผสมที่เติมซิลิกานั้น ดังแสดงในตารางที่ 4.2 จากรูปที่ 4.25 พบว่า ยางผสมที่เติมซิลิกามีเปอร์เซ็นต์การกระดอนกลับต่ำกว่ายางผสมที่ไม่เติมซิลิกา และเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นค่าการกระดอนของยางผสมมีค่าลดลงเนื่องจากซิลิกาเป็นสารเสริมแรงลดความยืดหยุ่นของโมเลกุลยาง



รูปที่ 4.23 เปอร์เซ็นต์การยุบตัวของยางผสมเติมซิลิกา



รูปที่ 4.24 เปอร์เซ็นต์การกระดอนกลับของยางผสม

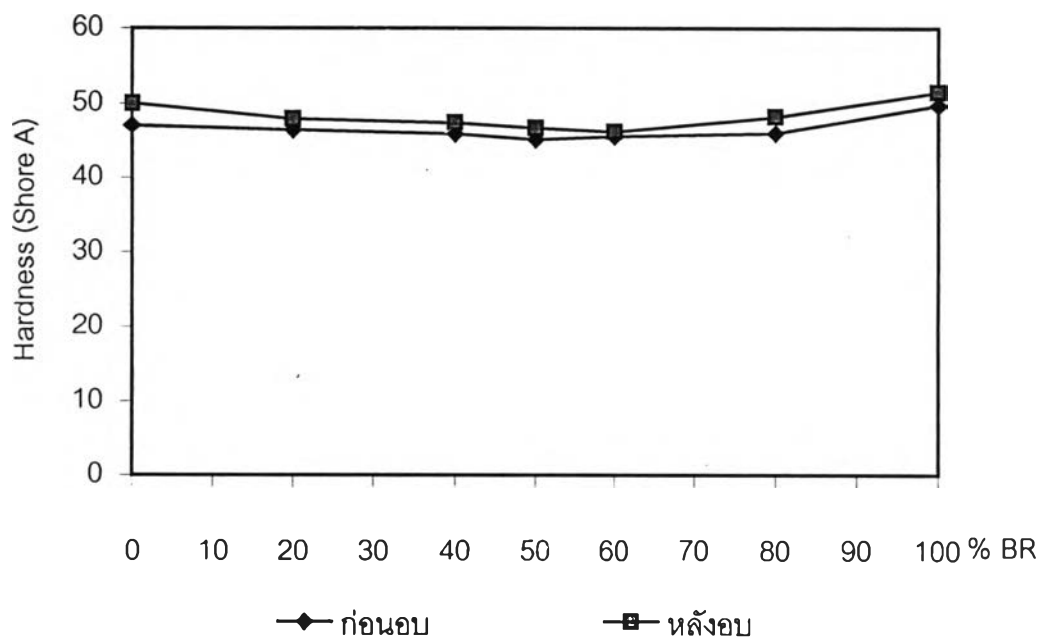


รูปที่ 4.25 เปอร์เซ็นต์การกระดอนกลับของยางผสมเติมซิลิกา

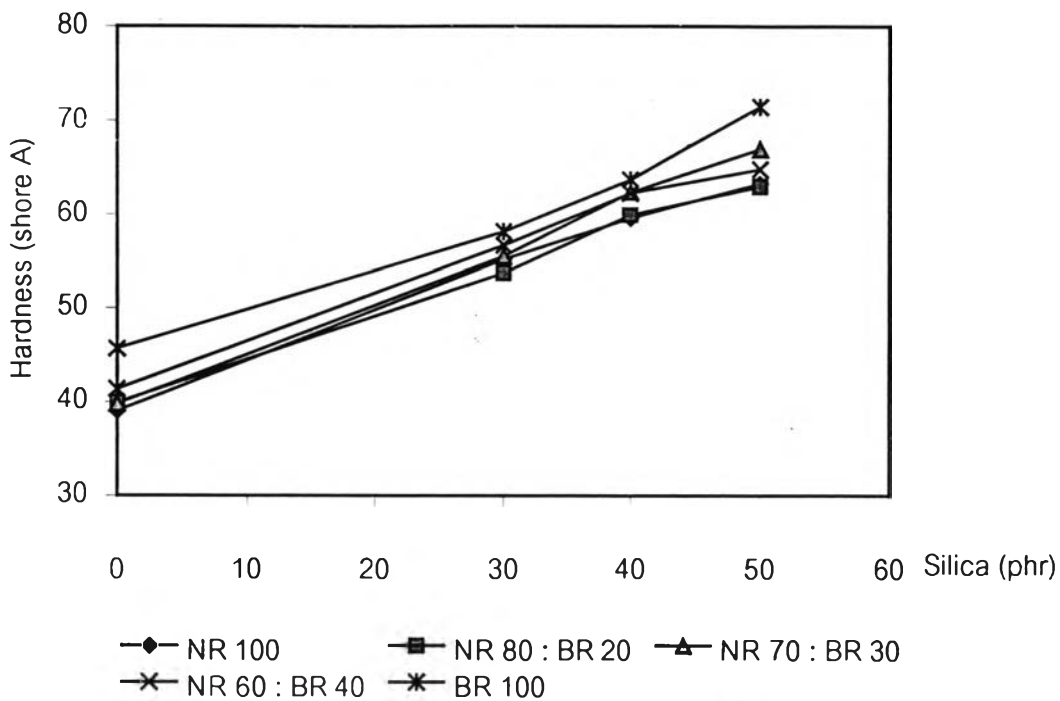
4.9 ความแข็ง

ความแข็งของยางผสมที่ไม่เติมซิลิกา ที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิบิวทาไดอิน (NR : BR) คือ 100 : 0, 80 : 20, 60 : 40, 50 : 50, 40 : 60, 20 : 80, 0 : 100 phr ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จากรูปที่ 4.26 พบว่าความแข็งมีค่าใกล้เคียงกันสำหรับทุกอัตราส่วนของยางธรรมชาติกับยางพอลิบิวทาไดอิน แต่หลังจากการนำขึ้นทดสอบไปอบบ่มเร่งด้วยความร้อน 100 องศาเซลเซียส เวลา 22 ชั่วโมงแล้ว พบว่า ค่าความแข็งของยางผสมมีค่าเพิ่มขึ้นจากก่อนอบเล็กน้อย

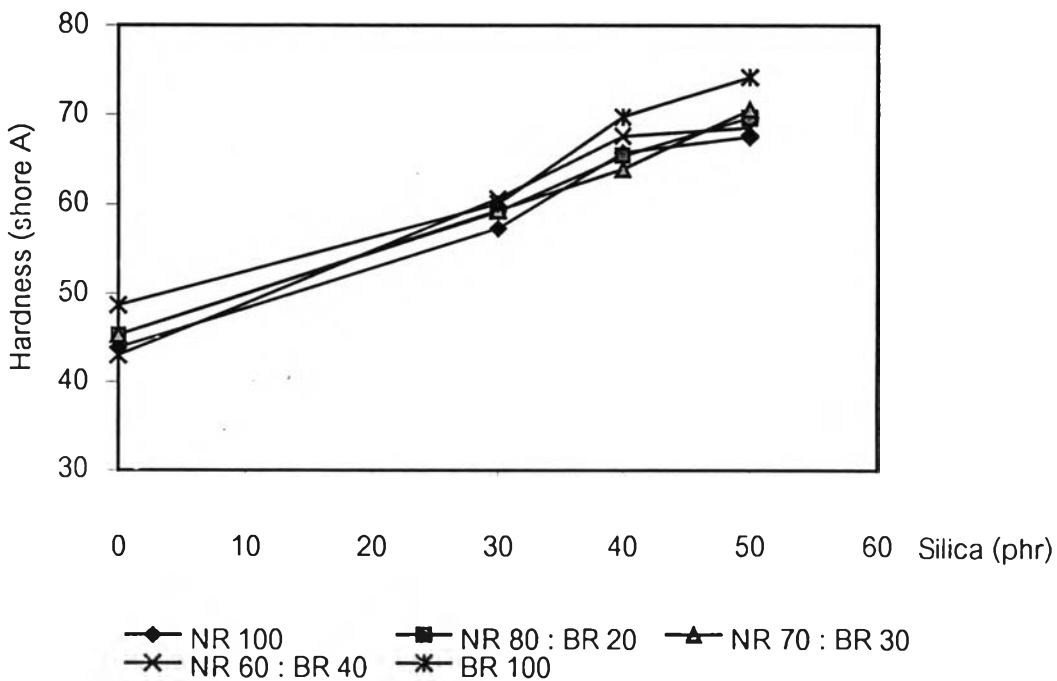
สำหรับความแข็งของยางผสมที่เติมซิลิกา ที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิบิวทาไดอิน (NR : BR) คือ 100 : 0, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 0 : 100 phr และปริมาณซิลิกา 0, 30, 40, 50 phr ดังแสดงในตารางที่ 4.2 จากรูปที่ 4.27 และ 4.28 พบว่า เมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งก่อนอบและหลังอบ ในอัตราส่วนยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวทาไดอินเดียวกันและหลังอบมีค่าความแข็งมากกว่าก่อนอบ และที่ปริมาณซิลิกาเดียวกันค่าความแข็งจะมีค่าใกล้เคียงกันทุกอัตราส่วนของยาง ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ค่าความแข็งขึ้นกับปริมาณซิลิกามากกว่าอัตราส่วนของยางธรรมชาติกับยางพอลิบิวทาไดอิน



รูปที่ 4.26 ความแข็งของยางผสม



รูปที่ 4.27 ความแข็งของยางผสมเติมซิลิกาที่อ่อนอบ



รูปที่ 4.28 ความแข็งของยางผสมเติมซิลิกาที่หลังอบ

4.10 ผลของปริมาณซิลิกาในยางผสมต่อค่าสโตเรจโมดูลัส โมดูลัสสูญเสีย และอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g)

การศึกษาสมบัติของยางธรรมชาติผสมยางพอลิบิวทาไดอินเต็มซิลิกาด้วยการทดสอบด้วยวิธี DMTA สามารถบอกสมบัติของยางผสมได้แก่ ค่าสโตเรจโมดูลัส โมดูลัสสูญเสีย และอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน โดยการทดสอบสมบัติของยางธรรมชาติ ยางพอลิบิวทาไดอิน ยางผสมที่อัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวทาไดอิน (NR : BR) เป็น 70 : 30 และปริมาณซิลิกา 0, 30, 40, 50 phr

ค่าสโตเรจโมดูลัส (storage modulus) หรือ G' เป็นค่าที่แสดงถึง พลังงานสะสมในวัสดุที่ยืดหยุ่น (stored elastic energy in material) จากรูปที่ 4.29 จะเห็นได้ว่าค่าสโตเรจโมดูลัสมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิ -125 ถึง -60 องศาเซลเซียส จัดให้อยู่ในช่วงของการเปลี่ยนแปลงจาก glassy region (-125 ถึง -80) เป็น transition region (-80 ถึง -60) เนื่องจากว่า ค่า $G'' > G'$ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และมีแรงกระทำต่อยางแบบซ้ำ ๆ กัน (dynamic mechanical) ทำให้สายโมเลกุลของยางเกิดการเคลื่อนที่ได้ง่ายกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนที่อุณหภูมิตั้งแต่ -60 ถึง -25 เป็นช่วง rubber plateau ค่าสโตเรจโมดูลัสไม่มีการเปลี่ยนแปลงสำหรับทุก ๆ สูตรของยางผสม ค่าสโตเรจโมดูลัสของยางธรรมชาติจะสูงกว่ายางธรรมชาติผสมยางพอลิบิวทาไดอินและสูงกว่ายางพอลิบิวทาไดอินมาก ส่วนยางผสมที่เต็มซิลิกามีค่าสโตเรจโมดูลัสต่ำกว่ายางผสมที่ไม่เต็มซิลิกาเพราะซิลิกาทำให้สายโมเลกุลของยางเคลื่อนที่ได้ยาก

ค่าโมดูลัสสูญเสีย หรือ G'' คือ พลังงานที่สูญหายไปในรูปแบบของความร้อน จากรูปที่ 4.30 จะเห็นได้ว่าค่าโมดูลัสสูญเสีย มีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่าสโตเรจโมดูลัส

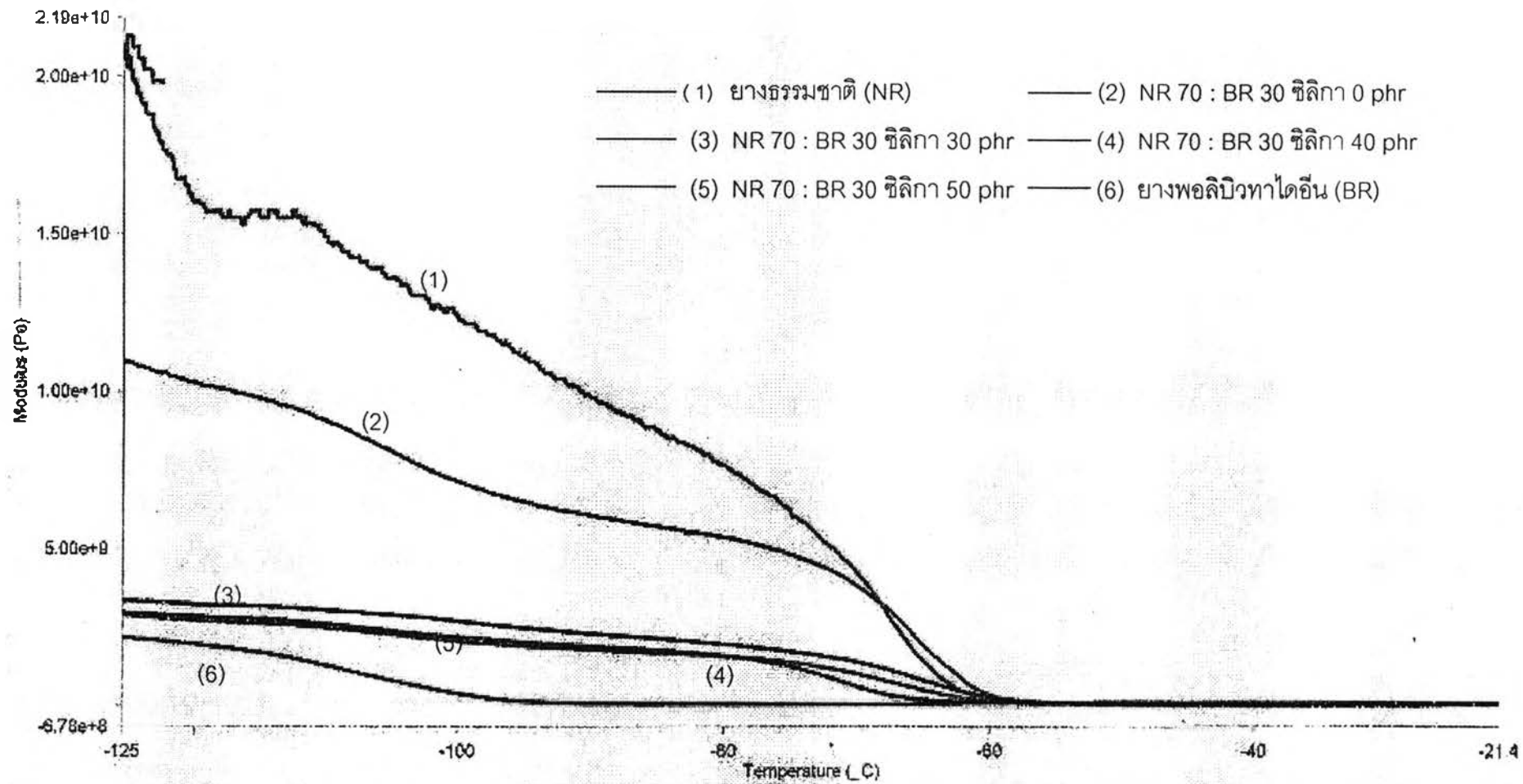
อุณหภูมิกลาสทรานซิชันเป็นค่าที่บอกถึงการเปลี่ยนแปลงสถานะของยางผสมจาก glassy region เป็น rubbery region ซึ่งสามารถหาได้จากรูปที่ 4.31 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณซิลิกาที่เติมในยางผสมต่างกัน ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของยางผสมต่างกัน แสดงดังตารางที่ 4.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ยางผสมมีค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันอยู่ในช่วงระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิบิวทาไดอิน และเมื่อเต็มซิลิกาในยางผสมค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เมื่อเทียบกับยางผสมที่ไม่เต็มซิลิกา ซึ่งสอดคล้องกับ Sudarsan Maiti [37] อธิบายไว้ว่าปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้นทำให้ $\tan \delta$ ลดลงและ ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ไม่เปลี่ยนแปลง

ผลของปริมาณซิลิกากับค่า dynamic mechanical properties พิจารณาได้จาก ค่า $\tan \delta$ คือ อัตราส่วนระหว่างค่าสโตเรจโมดูลัสกับค่าโมดูลัสสูญเสีย (G'/G'') รูป 4.31 ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่า $\tan \delta$ เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ ซึ่งค่า $\tan \delta$ เพิ่มขึ้นและลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง transition region อุณหภูมิ -70 ถึง -40 องศาเซลเซียส ยางผสมเต็มซิลิกามีผลต่อ

ค่า $\tan \delta$ อย่างเห็นได้ชัดเพราะซิลิกามีผลทำให้ ค่า $\tan \delta$ ของยางผสมที่เติมซิลิกามีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จาก ยางผสมที่ไม่เติมซิลิกา Bunpot maingam [15] ได้อธิบายไว้ว่า เมื่อปริมาณสารตัวเติมในยางเพิ่มขึ้นทำให้ bulk rubber ระหว่างผิวซิลิกากับโมเลกุลของยางลดลง ดังนั้นค่า $\tan \delta$ จึงมีค่าลดลง

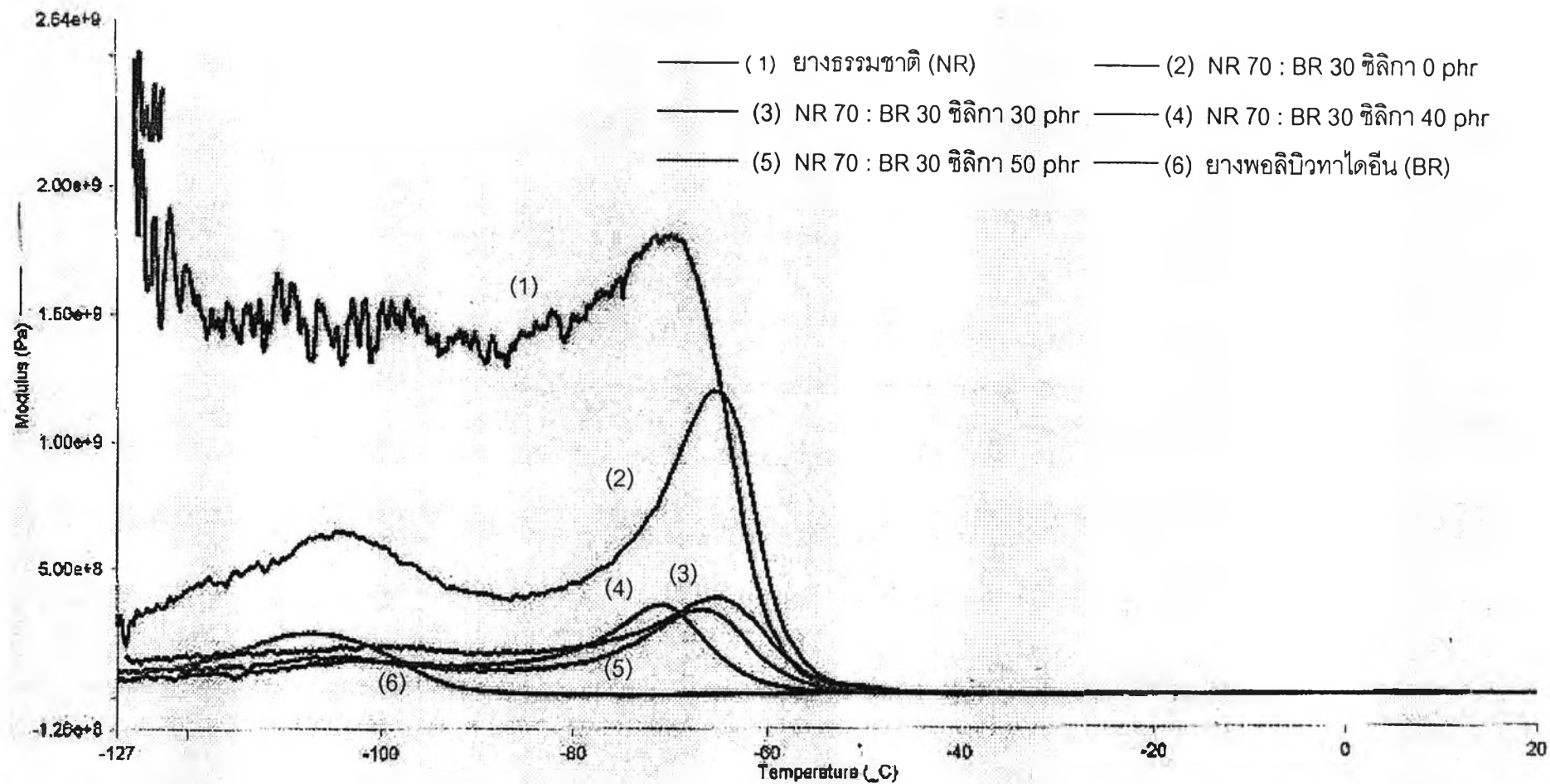
ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน และค่า $\tan \delta$ ของยางธรรมชาติ ยางพอลิบิวทาไดอิน และยางผสมเติมซิลิกา

ยาง	อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (องศาเซลเซียส)	$\tan \delta$
ยางธรรมชาติ	-56.75	2.326
ยางพอลิบิวทาไดอิน	-92.17	0.810
ยางธรรมชาติ ต่อยางพอลิบิวทาไดอิน (70 : 30)		
ปริมาณซิลิกา 0 phr	-57.49	1.989
ปริมาณซิลิกา 30 phr	-58.28	1.239
ปริมาณซิลิกา 40 phr	-62.52	1.036
ปริมาณซิลิกา 50 phr	-56.67	1.003



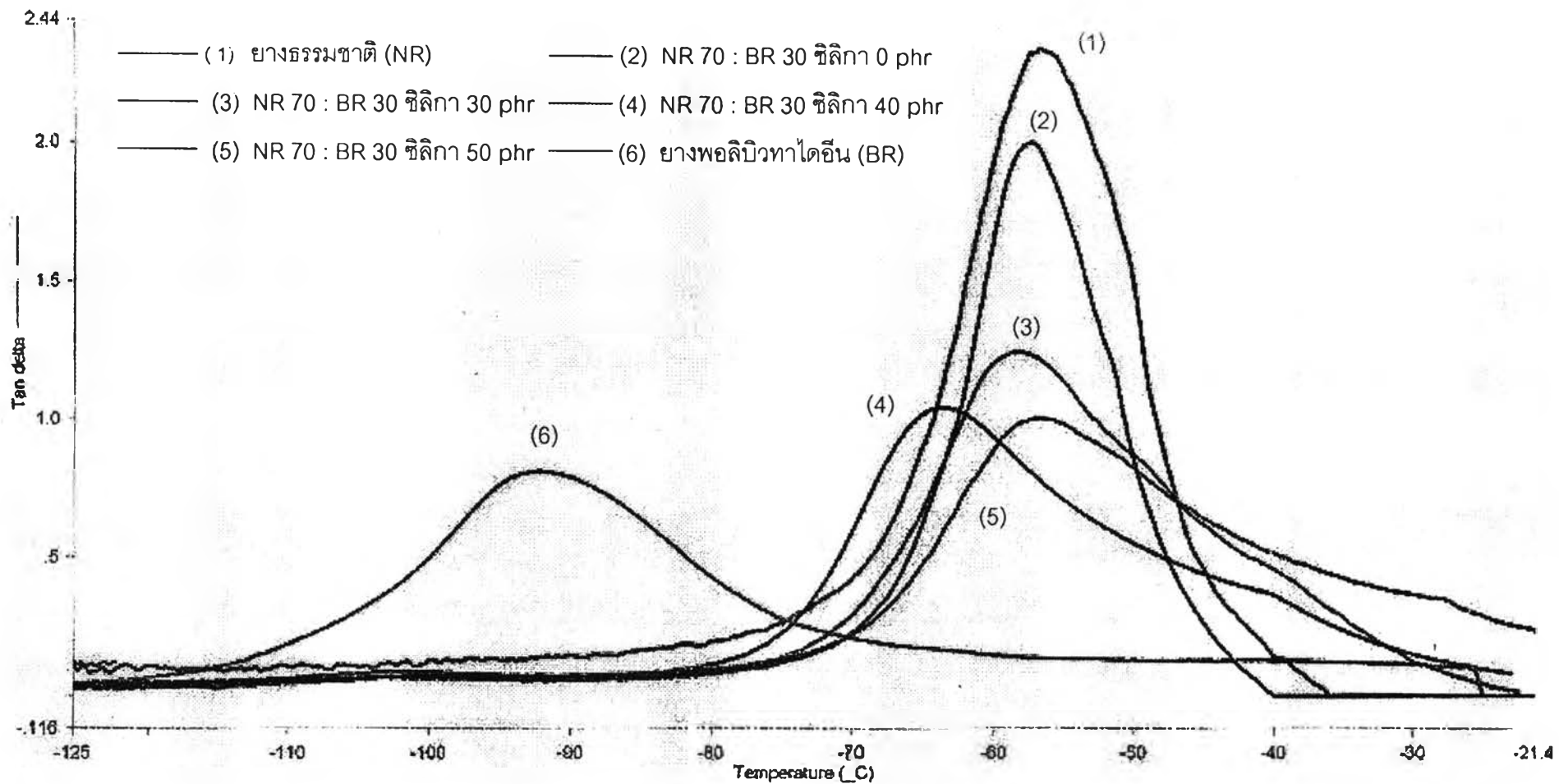
1) Heat from -130.00 °C to -19.00 °C at 5.00 °C/min 23/2/43 13:48:00

รูปที่ 4.29 ค่าสโตเรจโมดูลัสของยางธรรมชาติ ยางพอลิบิวทาไดอิน และยางผสมเติมซิลิกา



1) File: from -130.00 °C to 50.00 °C at 5.00 °C/min 23/2/43 13:50:56

รูปที่ 4.30 ค่าโมดูลัสสูญเสียของยางธรรมชาติ ยางพอลิบิวทาไดอิน และยางผสมเติมซิลิกา

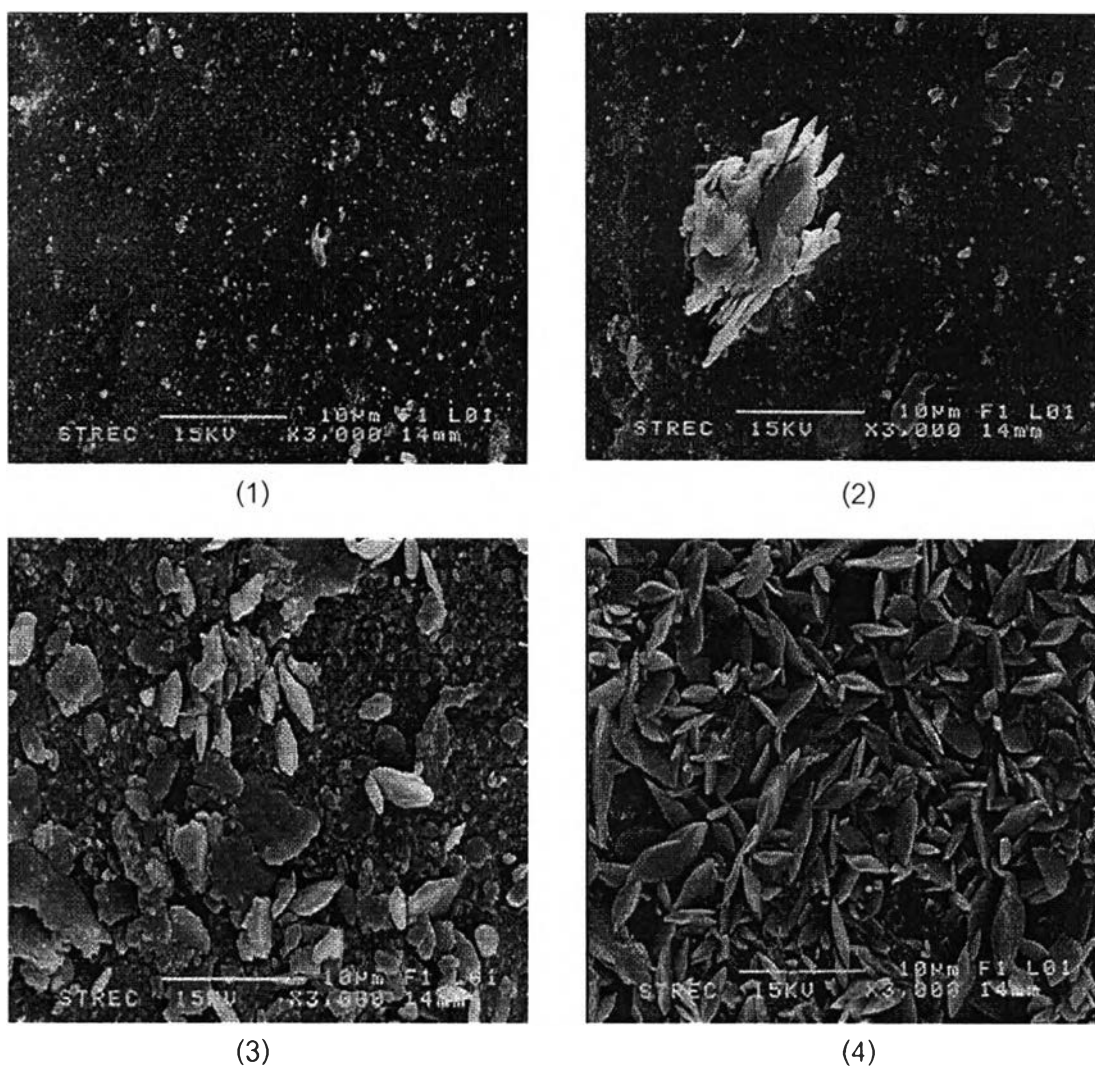


11 Heat from -130.00 to 50.00 C at 5.00 C/min 23/2/43 13:48:36

รูปที่ 4.31 ค่า Tan δ ของยางธรรมชาติ ยางพอลิบิวทาไดอิน และยางผสมเติมซิลิกา

4.11 สัณฐานวิทยาของยางผสมเติมซิลิกา

สัณฐานวิทยา (Morphology) ของยางผสมเติมซิลิกา ศึกษาโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาสัณฐานวิทยาของยางผสมที่มีปริมาณอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อยางพอลิเบิวทาไดอิน (NR : BR) เป็น 70 : 30 และปริมาณซิลิกา 0, 30, 40, 50 phr ซึ่งได้จากแนวการฉีกขาดตรงภาคตัดขวางของชิ้นทดสอบความต้านทานการฉีกขาด จากรูปที่ 4.32 แสดงลักษณะการกระจายตัวของซิลิกาปริมาณต่าง ๆ ในยางผสมกำลังขยาย 3000 เท่า จากรูปจะเห็นว่ายางผสมเติมซิลิกา 30 phr ซิลิกาเกาะกลุ่มกัน ส่วนยางผสมที่เติมซิลิกาในปริมาณ 40 และ 50 phr พบว่าการกระจายตัวของซิลิกาในยางผสมดีขึ้น คือกระจายอยู่ทั่วไปในเนื้อยางผสม



รูปที่ 4.32 ลักษณะการกระจายตัวของซิลิกาปริมาณต่าง ๆ ในยางผสมกำลังขยาย 3000 เท่า

(1) ซิลิกา 0 phr (2) ซิลิกา 30 phr (3) ซิลิกา 40 phr (4) ซิลิกา 50 phr

4.12 การเปรียบเทียบสมบัติของยางผสม

4.12.1 เปรียบเทียบผลสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติ ยางพอลิวิทาไดอิน และยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิวิทาไดอิน

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบผลสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติ ยางพอลิวิทาไดอิน และยางผสม

สมบัติ	ยางธรรมชาติ (NR)	ยางผสม NR : BR 80:20 – 60 : 40	ยางพอลิวิทาไดอิน (BR)
ความต้านทานแรงดึง (MPa)			
ก่อนอบ	14.90	9.34 - 7.39	2.67
หลังอบ	3.59	3.51 - 3.16	2.31
ความยืดเมื่อขาด (%)			
ก่อนอบ	1461.3	559.3 - 556.3	198.3
หลังอบ	247.7	244.6 - 239.3	104.2
ความต้านทานต่อการฉีกขาด (MPa)			
ก่อนอบ	31.12	27.07 - 25.63	10.79
หลังอบ	27.56	24.37 - 19.53	4.57
ความต้านทานต่อการสึกหรอ (cm ³ /kc)	1.328	1.90 - 1.48	มาก
การยุบตัว (%)	17.49	14.3 - 15.3	14.85
การกระดอน (%)	83.10	83.20 – 80.33	80.60

จากตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่ายางธรรมชาติมีสมบัติ ด้านความต้านทานแรงดึง ความยืดเมื่อขาด ความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง และสมบัติด้านความต้านทานต่อการสึกหรอของยางธรรมชาติจะดีกว่ายางพอลิวิทาไดอิน ส่วนยางพอลิวิทาไดอิน มีสมบัติด้านความทนต่อสภาพการอบบ่มแรงที่อุณหภูมิสูง 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ชั่วโมง แล้วยังให้สมบัติความต้านทานแรงดึง ความยืดเมื่อขาด ความต้านทานต่อการฉีกขาด หลังอบมีค่าใกล้เคียงกับสภาพก่อนอบมากกว่ายางธรรมชาติ นอกจากนี้สมบัติด้านการคืนตัวดีกว่ายางธรรมชาติ ส่วนสมบัติด้านการกระดอนของยางทั้งสองชนิดจะมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นเพื่อเป็นการปรับปรุงสมบัติของยางให้ได้ครบตามต้องการจึงมีการผสมยางธรรมชาติกับยางพอลิวิทาไดอิน ซึ่งผลแสดงดังตารางที่ 4.4

4.12.2 เปรียบเทียบผลสมบัติทางกายภาพของยางผสมเติมซิลิกา

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบผลสมบัติทางกายภาพของยางผสมเติมซิลิกา

สมบัติ	ยาง NR 70 : BR 30 ปริมาณซิลิกา (phr)			
	0	30	40	50
ความต้านทานแรงดึง (MPa)				
ก่อนอบ	7.39	20.51	22.05	22.61
หลังอบ	3.16	15.12	18.06	19.62
ความยืดเมื่อขาด (%)				
ก่อนอบ	556.3	700.6	694.6	759.5
หลังอบ	239.3	549.3	639.0	640.0
ความต้านทานต่อการฉีกขาด (MPa)				
ก่อนอบ	25.63	36.20	52.24	66.80
หลังอบ	19.53	35.89	38.92	50.70
ความต้านทานต่อการสึกหรอ (cm ³ /kc)	1.48	0.51	0.44	0.43
ความต้านทานต่อการหักงอ (kilocycle)	10.0	3.26	8.89	8.07
การยุบตัว (%)	15.13	30.86	44.86	50.73
การกระดอน (%)	80.73	67.10	57.03	53.07

จากตารางที่ 4.5 ซึ่งเปรียบเทียบผลสมบัติทางกายภาพของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิบิวทาไดอิน อัตราส่วน 70 : 30 และเติมซิลิกาในปริมาณต่าง ๆ จะเห็นว่าเมื่อเติมซิลิกาในปริมาณที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของยางผสม เช่น ความต้านทานแรงดึง ความยืดเมื่อขาด ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อการสึกหรอเพิ่มขึ้น ส่วนความต้านทานต่อการหักงอ การยุบตัว และการกระดอนลดลง

4.12.3 การเปรียบเทียบสมบัติของยางผสมที่เติมซิลิกากับมาตรฐานผลิตภัณฑ์พื้นรองเท้า

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบสมบัติของยางผสมที่เติมซิลิกากับมาตรฐานผลิตภัณฑ์พื้นรองเท้า

สมบัติ	NR 70 : BR 30		มอก.749-2531		ISO 6907-1994(E)	
	ปริมาณซิลิกา (phr)		ชั้นคุณภาพ		Grade	
	40	50	1	2	1	2
ความหนาแน่น (g/ cm ³)	1.10	1.13	ไม่เกิน1.35	ไม่เกิน1.45	ไม่เกิน1.35	ไม่เกิน1.45
ความแข็ง (IRHD)	78	80	มากกว่า 85	มากกว่า 90	มากกว่า 88	มากกว่า 93
ความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)	22.1	22.6	มากกว่า 7.5	มากกว่า 6.5	มากกว่า 7.5	มากกว่า 6.5
ความยืดเมื่อขาด (%)	694.6	759.5	มากกว่า 175	มากกว่า 150	มากกว่า 200	มากกว่า 200
ความยืดเมื่อขาดหลังอบ (%)	639.0	640.0	มากกว่า 145	มากกว่า 145	มากกว่า 145	มากกว่า 120
ความต้านทานต่อการหักงอ (kilocycle)	8.90 ^{*1}	8.1 ^{*2}	มากกว่า 100 ^{*3}	มากกว่า 100 ^{*4}	-	-
ความต้านทานต่อการสึกหรอ (cm ³ /kc)	0.44	0.43	ไม่เกิน 2	ไม่เกิน 2	-	-

*¹, *² ความต้านทานต่อการหักงอในงานวิจัยทดสอบตามมาตรฐาน ISO 132

*³, *⁴ ความต้านทานต่อการหักงอมาตรฐาน มอก.ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 6907

จากตารางที่ 4.6 เมื่อเปรียบเทียบงานวิจัยที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติต่อยางพอลิ บิวทาไดอิน (NR : BR) เป็น 70 : 30 ปริมาณซิลิกา 40 และ 50 phr กับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมยางพื้นรองเท้า (Standard for rubber sole) ตาม มอก. 749-2531 [10] และ International standard ISO 6907-1994 rubber footwear [24] พบว่าผลิตภัณฑ์ยางที่เตรียมได้ มีสมบัติ ความหนาแน่น ความต้านทานต่อแรงดึง ความยืดเมื่อขาดทั้งก่อนอบและหลังอบ ผ่านตามมาตรฐาน ยกเว้น ความแข็งซึ่งในการทดลองทดสอบโดยใช้ Shore durometer (Shore A) แล้วนำมาเทียบกราฟ IRHD ทำให้ค่าที่ไม่ถูกต้องมากนัก และความต้านทานต่อการหักงอในงานวิจัยทดสอบตามมาตรฐาน ISO 132 แต่มาตรฐานของมอก. จะทดสอบตาม ISO 6907 จึงทำให้ค่าที่ได้จากการทดสอบแตกต่างกันเปรียบเทียบกันไม่ได้