

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 ผลการศึกษาสมบัติของยางธรรมชาติดิบ

จากการทดสอบความหนืดมูนีของยางธรรมชาติดิบเกรดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 100 °C โดยใช้จานโลหะขนาดใหญ่ อุณหภูมิเป็นเวลา 1 นาที แล้วอ่านค่าความหนืดมูนีที่ 4 นาที หลังจากเดินเครื่องทดสอบ ดังรายละเอียดในหัวข้อ 3.3.1.1 ได้ผลดังแสดงในตาราง 4.1

การทดสอบค่าพลาสติกซิตีและการคงพลาสติกซิตี โดยวัดค่าพลาสติกซิตีของยางก่อนอบ (Po) และ หลังการอบแล้ว 30 นาทีที่ 140 °C (P30) ดังรายละเอียดในหัวข้อ 3.3.1.2 ได้ผลดังแสดงในตาราง 4.1

ตาราง 4.1 ค่าความหนืดมูนี ค่าพลาสติกซิตีและการคงพลาสติกซิตีของยางธรรมชาติดิบ

เกรดยาง	ML 1+4, 100 °C	Po	P30	PRI (%)
STR 5L	75	47	36	76.6
ADS	83	50	42	84.0
Skim	49	29	4	13.8
STR 5CV 60	61	32	25	78.1
STR 20CV 60	56	34	19	55.9
RSS N0.3	76	47	41	87.2
Pale Crepe	93	57	46	80.7
STR 20	78	35	16	45.7

จากตาราง 4.1 จะเห็นว่ายางธรรมชาติแต่ละเกรดมีความหนืดและค่าพลาสติกซิตีแตกต่างกันอย่างชัดเจน บ่งบอกถึงความระมัดระวังในการเลือกใช้อย่างเหมาะสมกับการแปรรูป และการควบคุมการแปรรูปให้ได้สมบัติที่ต้องการ โดยที่ยางเครพเป็นยางที่มีค่าความ

หน้ดมุนนี้ และค่าพลาสติกซีดีสูงสุดในการทดสอบครั้งนี้ นั่นคือ ในการบดขางก่อนผสมสารเคมีต้อง
ใช้พลังงานการบดมากกว่าขางเกรดอื่น ๆ สำหรับค่า PRI จะเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความยากง่ายต่อการ
ถูกออกซิไดซ์

หนีดมุนนี้ และค่าพลาสติกซีดีสูงสุดในการทดสอบครั้งนี้ นั่นคือ ในการบดขางก่อนผสมสารเคมีต้องใช้พลังงานการบดมากกว่าขางเกรดอื่น ๆ นั่นคือ ในการบดขางก่อนผสมสารเคมีต้องใช้พลังงานการบดมากกว่าขางเกรดอื่น ๆ สำหรับค่า PRI จะเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความยากง่ายต่อการถูกออกซิไดซ์จะเห็นว่าขางแผ่นรมควันจะเป็นขางที่มีค่า PRI สูงสุด จึงเป็นขางที่ทนต่อการถูกออกซิไดซ์ดีกว่าขางเกรดอื่น ๆ เนื่องจากสารฟีนอลิกที่มาจากกรรมควันในขางแผ่นรมควันช่วยป้องกันการถูกออกซิไดซ์ สำหรับขางสกิม พบว่า มีค่า PRI ที่ต่ำสุด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากขางสกิมเป็นผลพลอยได้จากหางน้ำขาง ซึ่งมีอนุภาคขางขนาดเล็ก มีส่วนที่ไม่ใช่ขางสูงที่ถูกปั่นแยกออกมา มีปริมาณไฮโดรคาร์บอนที่น้อยกว่าขางเกรดอื่น และมีปริมาณโลหะหนักมาก เช่น ทองแดงและแมกนีเซียม จึงส่งผลให้ความทนทานต่อการถูกออกซิไดซ์ของขางสกิมด้อยกว่าขางเกรดอื่น ๆ (Bristow, 1990)

4.2 ผลการศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์และพลังงานกระตุ้นการวัลคาไนซ์ของขางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบกัมมะถันปกติ เซมิอีวี และอีวี

การศึกษายจนผลศาสตร์ของปฏิบัติการวัลคาไนเซชันของขางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ โดยมีระบบวัลคาไนซ์แบบกัมมะถันปกติ เซมิอีวี และอีวี สูตรขางที่ใช้ศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์และพลังงานกระตุ้น คือ สูตรที่ 3.1 หน้า 81 ซึ่งไม่มีเขม่าดำเป็นสารตัวเติม หาลักษณะการวัลคาไนซ์ของขางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ ด้วยเครื่อง MDR 2000 ที่อุณหภูมิ 150, 160, 170 และ 180 °C เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของระบบการวัลคาไนซ์ต่อการเกิดปฏิบัติการวัลคาไนเซชันของขางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ ได้แสดงลักษณะการวัลคาไนซ์ของขางธรรมชาติดังตาราง 4.2 ถึง 4.13 และภาพประกอบ 4.1 ถึง 4.16

ตาราง 4.2 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ วัลคาไนซ์ด้วยระบบกัมมะถันปกติ ที่อุณหภูมิ 150 °C

ระบบและสมบัติวัลคาไนซ์ เกรดยาง	CV			
	M _L (dN.m)	M _H (dN.m)	TS 2 (min)	TC 90 (min)
STR 20	0.27	6.61	4.04	6.57
STR 5L	0.41	6.68	6.34	10.01
ADS	0.30	6.07	6.36	9.55
Skim	0.28	8.39	2.45	7.52
STR 5CV 60	0.30	6.29	8.17	11.54
STR 20CV 60	0.24	6.21	6.33	9.48
RSS No. 3	0.42	6.69	3.27	6.19
Crepe	0.32	5.96	7.55	11.30

ตาราง 4.3 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ วัลคาไนซ์ด้วยระบบเซมิอีวี ที่อุณหภูมิ 150 °C

ระบบและสมบัติวัลคาไนซ์ เกรดยาง	Semi-EV			
	M _L (dN.m)	M _H (dN.m)	TS 2 (min)	TC 90 (min)
STR 20	0.23	6.07	5.12	7.12
STR 5L	0.33	6.52	7.55	11.28
ADS	0.30	5.91	6.30	8.67
Skim	0.27	7.46	2.58	6.14
STR 5CV 60	0.30	6.17	7.51	12.39
STR 20CV 60	0.20	5.97	9.18	11.00
RSS No. 3	0.29	6.41	4.29	7.22
Crepe	0.34	6.01	8.20	11.06

ตาราง 4.4 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ วัลคาไนซ์ด้วยระบบอีวี ที่อุณหภูมิ 150 °C

ระบบและสมบัติวัลคาไนซ์ เกรดยาง	EV			
	M _L (dN.m)	M _H (dN.m)	TS 2 (min)	TC 90 (min)
STR 20	0.17	5.13	9.11	16.02
STR 5L	0.33	5.83	13.11	22.13
ADS	0.22	4.94	8.43	14.32
Skim	0.18	5.36	3.37	16.19
STR 5CV 60	0.23	5.31	11.44	19.28
STR 20CV 60	0.18	5.22	10.59	18.03
RSS No. 3	0.28	5.67	8.57	16.60
Crepe	0.31	5.42	10.55	18.35

ตาราง 4.5 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ วัลคาไนซ์ด้วยระบบกัมมะถันปกติ ที่อุณหภูมิ 160 °C

ระบบและสมบัติวัลคาไนซ์ เกรดยาง	CV			
	M _L (dN.m)	M _H (dN.m)	TS 2 (min)	TC 90 (min)
STR 20	0.24	6.21	2.16	6.09
STR 5L	0.37	6.34	3.36	5.26
ADS	0.27	5.81	3.41	5.32
Skim	0.23	7.79	1.36	4.08
STR 5CV 60	0.27	5.84	4.33	6.27
STR 20CV 60	0.23	5.95	3.08	5.18
RSS No. 3	0.38	6.39	1.66	3.34
Crepe	0.29	5.68	4.16	6.09

ตาราง 4.6 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ วัลคาไนซ์ด้วยระบบเซมิอีวี ที่อุณหภูมิ 160 °C

ระบบและสมบัติวัลคาไนซ์ เกรดยาง	Semi-EV			
	M _L (dN.m)	M _H (dN.m)	TS 2 (min)	TC 90 (min)
STR 20	0.20	5.72	3.01	4.07
STR 5L	0.30	6.16	4.31	6.12
ADS	0.27	5.61	3.48	5.02
Skim	0.22	6.80	1.43	3.08
STR 5CV 60	0.27	5.75	4.40	6.07
STR 20CV 60	0.17	5.66	4.00	5.44
RSS No. 3	0.26	6.03	2.30	3.60
Crepe	0.30	5.67	4.38	6.15

ตาราง 4.7 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ วัลคาไนซ์ด้วยระบบอีวี ที่อุณหภูมิ 160 °C

ระบบและสมบัติวัลคาไนซ์ เกรดยาง	EV			
	M _L (dN.m)	M _H (dN.m)	TS 2 (min)	TC 90 (min)
STR 20	0.16	4.91	5.36	9.02
STR 5L	0.30	5.61	7.37	12.27
ADS	0.19	4.70	5.16	8.16
Skim	0.16	4.73	2.12	7.21
STR 5CV 60	0.20	5.14	6.51	11.15
STR 20CV 60	0.17	4.90	6.31	9.38
RSS No. 3	0.26	5.22	5.13	8.36
Crepe	0.28	4.97	6.32	10.34

ตาราง 4.8 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ วัลคาไนซ์ด้วยระบบกัมมะถันปกติ ที่อุณหภูมิ 170 °C

ระบบและสมบัติวัลคาไนซ์ เกรดยาง	CV			
	M _L (dN.m)	M _H (dN.m)	TS 2 (min)	TC 90 (min)
STR 20	0.23	5.88	1.21	2.07
STR 5L	0.35	6.00	2.01	3.04
ADS	0.25	5.49	2.06	3.06
Skim	0.22	7.11	1.02	2.17
STR 5CV 60	0.25	5.37	2.30	3.32
STR 20CV 60	0.20	5.73	1.45	2.52
RSS No. 3	0.36	6.06	1.13	2.07
Crepe	0.26	5.34	2.26	3.27

ตาราง 4.9 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ วัลคาไนซ์ด้วยระบบเซมิอีวี ที่อุณหภูมิ 170 °C

ระบบและสมบัติวัลคาไนซ์ เกรดยาง	Semi-EV			
	M _L (dN.m)	M _H (dN.m)	TS 2 (min)	TC 90 (min)
STR 20	0.17	5.36	1.45	2.28
STR 5L	0.27	5.88	2.37	3.31
ADS	0.24	5.31	2.19	3.00
Skim	0.19	6.22	1.07	1.50
STR 5CV 60	0.23	5.29	2.48	3.41
STR 20CV 60	0.16	5.38	2.22	3.19
RSS No. 3	0.23	5.76	1.33	2.11
Crepe	0.27	5.42	2.48	3.39

ตาราง 4.10 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ วัลคาไนซ์ด้วยระบบอีวี ที่อุณหภูมิ 170 °C

ระบบและสมบัติวัลคาไนซ์ เกรดยาง	EV			
	M _L (dN.m)	M _H (dN.m)	TS 2 (min)	TC 90 (min)
STR 20	0.14	4.83	3.27	5.34
STR 5L	0.25	5.60	4.34	8.11
ADS	0.18	4.65	3.24	5.21
Skim	0.13	4.19	1.26	3.20
STR 5CV 60	0.17	4.81	4.14	6.33
STR 20CV 60	0.15	4.97	4.00	5.53
RSS No. 3	0.23	5.12	3.12	5.14
Crepe	0.24	4.91	4.00	6.37

ตาราง 4.11 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ วัลคาไนซ์ด้วยระบบกัมมะถันปกติ ที่อุณหภูมิ 180 °C

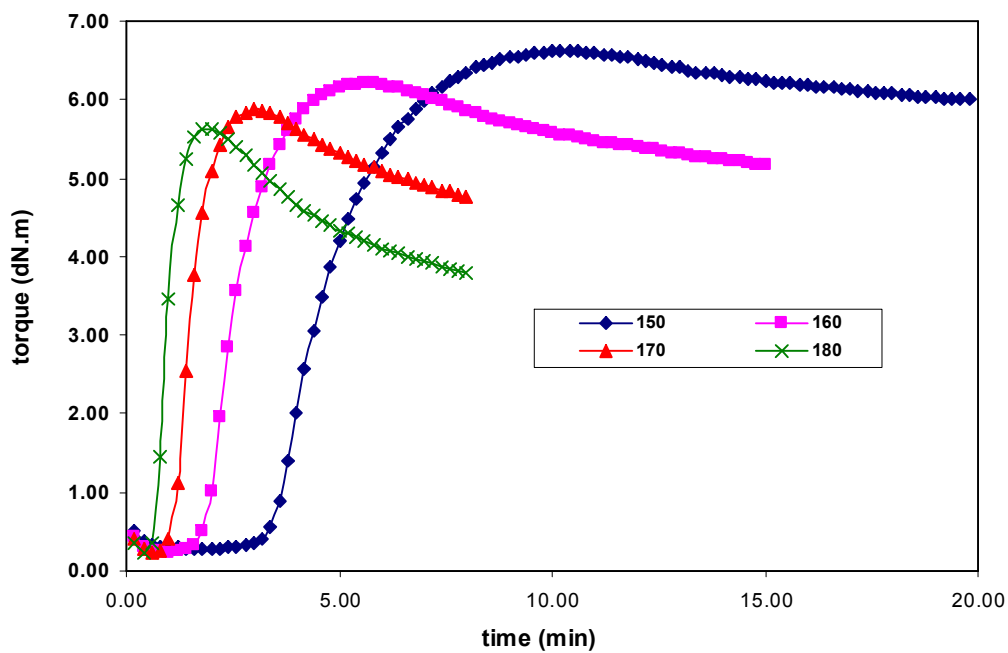
ระบบและสมบัติวัลคาไนซ์ เกรดยาง	CV			
	M _L (dN.m)	M _H (dN.m)	TS 2 (min)	TC 90 (min)
STR 20	0.14	4.55	0.62	1.19
STR 5L	0.24	5.19	1.12	1.46
ADS	0.16	4.42	1.12	1.46
Skim	0.10	3.83	0.45	1.22
STR 5CV 60	0.16	4.57	1.27	2.00
STR 20CV 60	0.18	5.26	1.00	1.40
RSS No. 3	0.19	5.07	0.61	1.21
Crepe	0.23	4.53	1.25	1.59

ตาราง 4.12 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ วัลคาไนซ์ด้วยระบบเคมีอีวี ที่อุณหภูมิ 180 °C

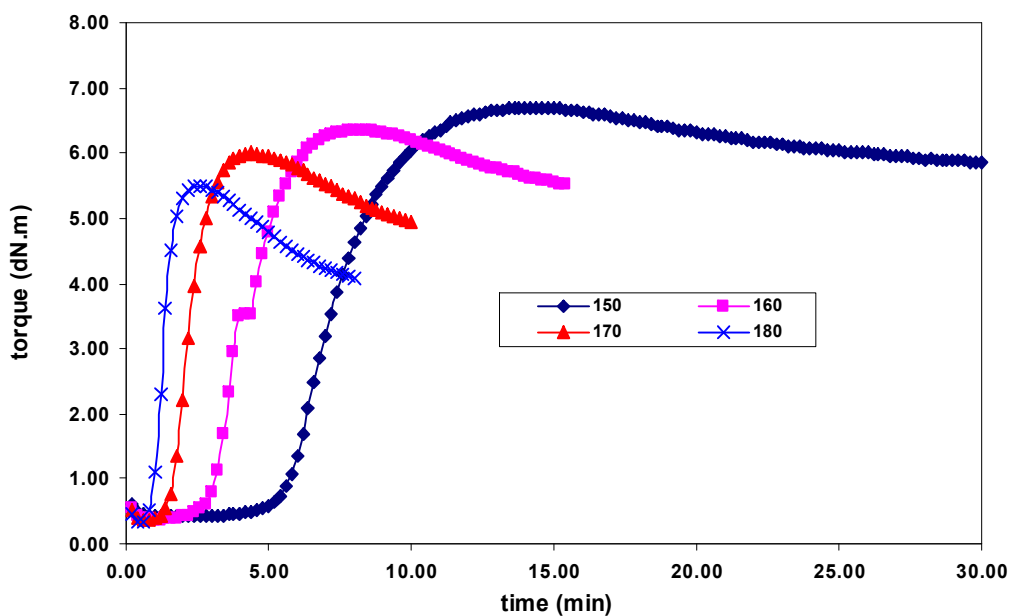
ระบบและสมบัติวัลคาไนซ์ เกรดยาง	Semi-EV			
	M _L (dN.m)	M _H (dN.m)	TS 2 (min)	TC 90 (min)
STR 20	0.17	4.96	1.08	1.36
STR 5L	0.24	5.42	1.33	2.01
ADS	0.23	5.00	1.28	1.51
Skim	0.20	5.82	0.47	1.13
STR 5CV 60	0.22	4.89	1.43	2.10
STR 20CV 60	0.15	5.01	1.25	1.58
RSS No. 3	0.22	5.43	1.01	1.24
Crepe	0.24	5.06	1.40	2.12

ตาราง 4.13 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ วัลคาไนซ์ด้วยระบบอีวี ที่อุณหภูมิ 180 °C

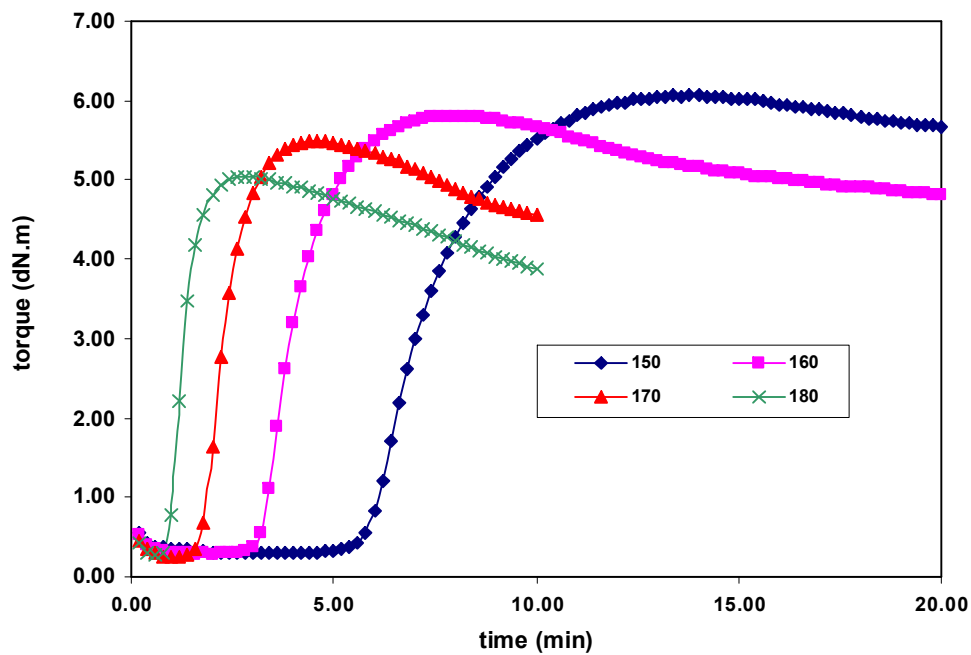
ระบบและสมบัติวัลคาไนซ์ เกรดยาง	EV			
	M _L (dN.m)	M _H (dN.m)	TS 2 (min)	TC 90 (min)
STR 20	0.14	4.55	2.16	3.23
STR 5L	0.24	5.19	2.54	4.20
ADS	0.16	4.42	2.10	3.17
Skim	0.10	3.83	1.03	2.11
STR 5CV 60	0.16	4.57	2.42	4.09
STR 20CV 60	0.11	4.74	2.32	4.10
RSS No. 3	0.19	5.07	2.03	3.46
Crepe	0.23	4.53	2.34	3.45



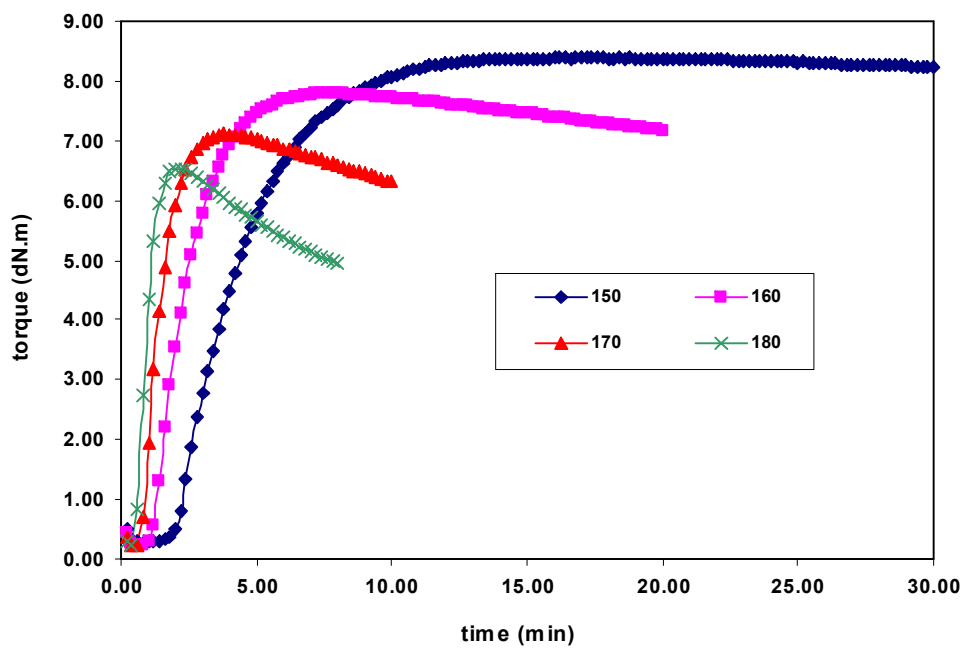
ภาพประกอบ 4.1 ลักษณะการวัดคาบไวนซ์ของยางธรรมชาติเกรด STR 20 ที่วัดคาบไวนซ์ด้วยระบบ
กำมะถันปกติ (CV) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



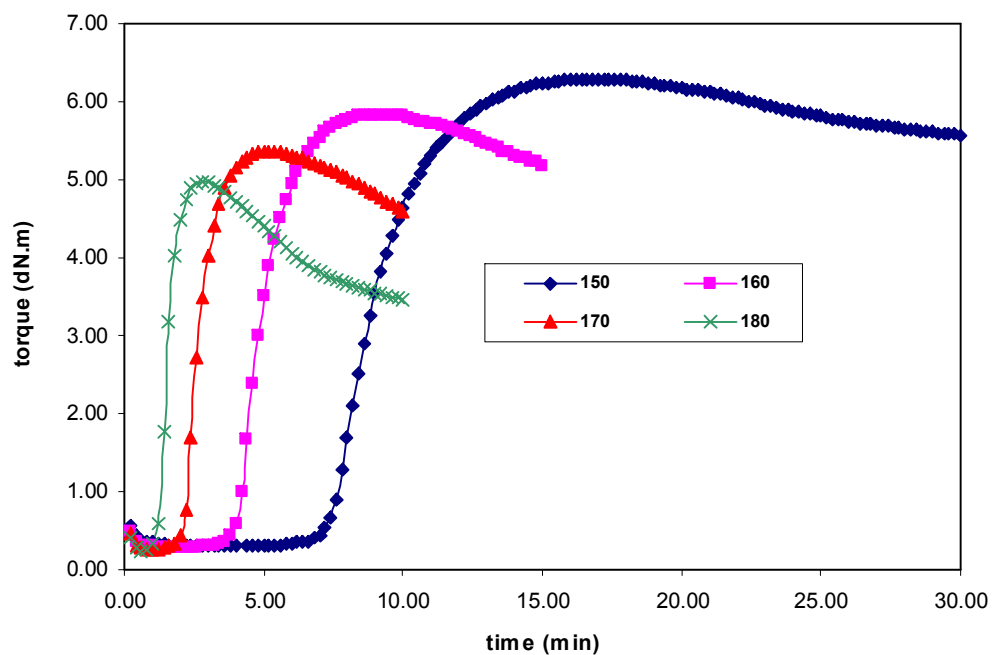
ภาพประกอบ 4.2 ลักษณะการวัดคาบไวนซ์ของยางธรรมชาติเกรด STR 5L ที่วัดคาบไวนซ์ด้วยระบบ
กำมะถันปกติ (CV) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



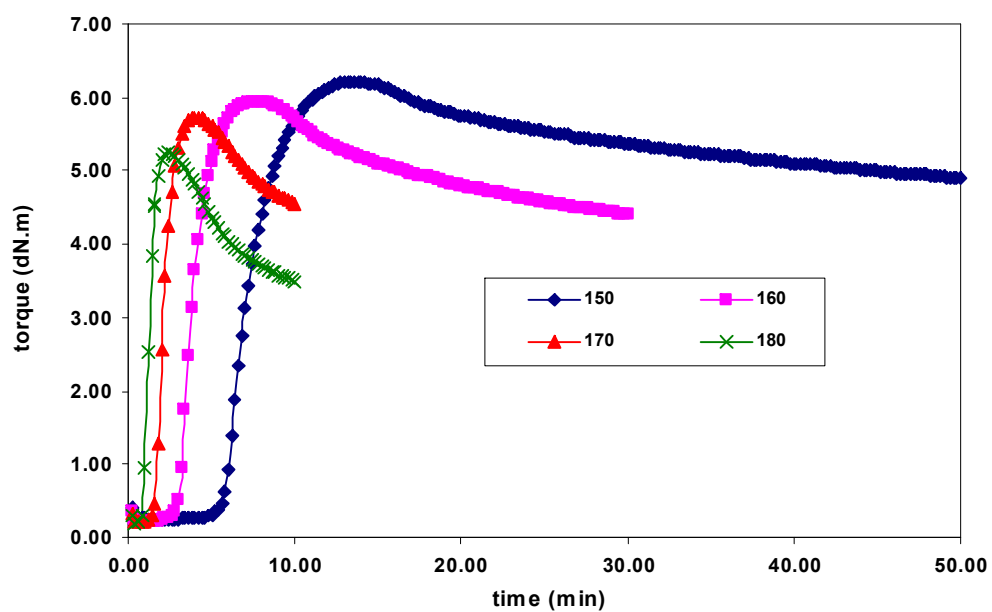
ภาพประกอบ 4.3 ลักษณะการวัดคาไนซ์ของยางธรรมชาติเกรด ADS ที่วัดคาไนซ์ด้วยระบบกัมมันตภาพ (CV) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



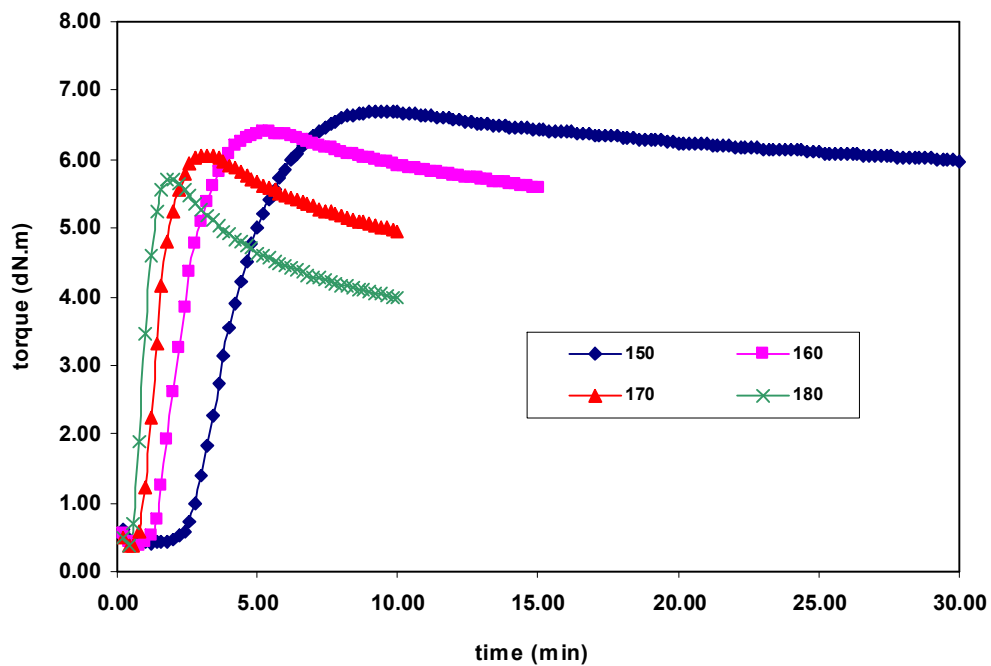
ภาพประกอบ 4.4 ลักษณะการวัดคาไนซ์ของยางสทิมที่วัดคาไนซ์ด้วยระบบกัมมันตภาพ (CV) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



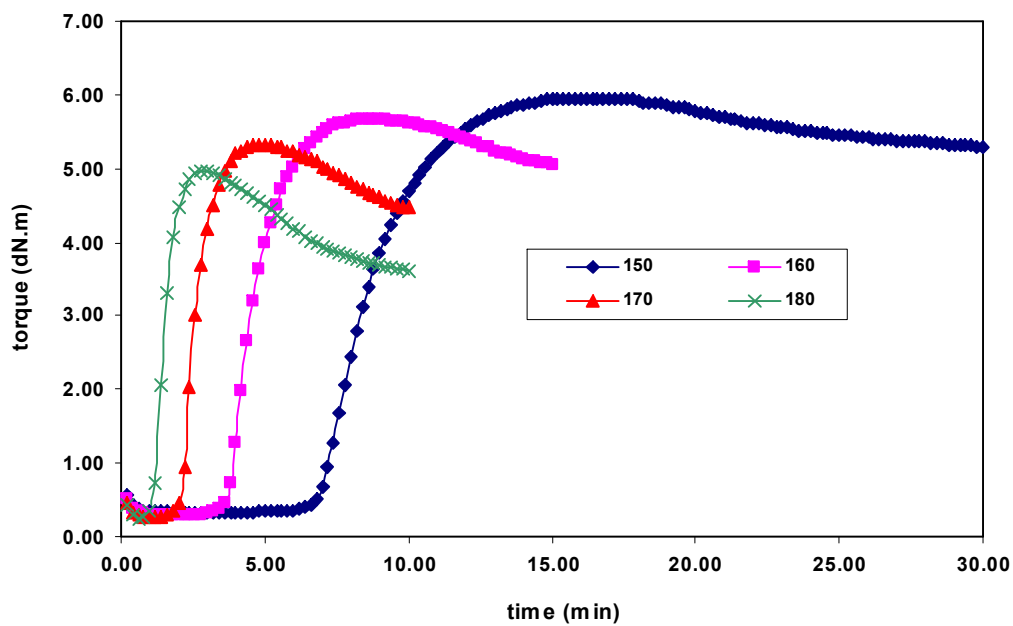
ภาพประกอบ 4.5 ลักษณะการวัดคาบไวนซ์ของยางธรรมชาติเกรด STR 5LCV 60 ที่วัดคาบไวนซ์ด้วยระบบกัมมันตภาพ (CV) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



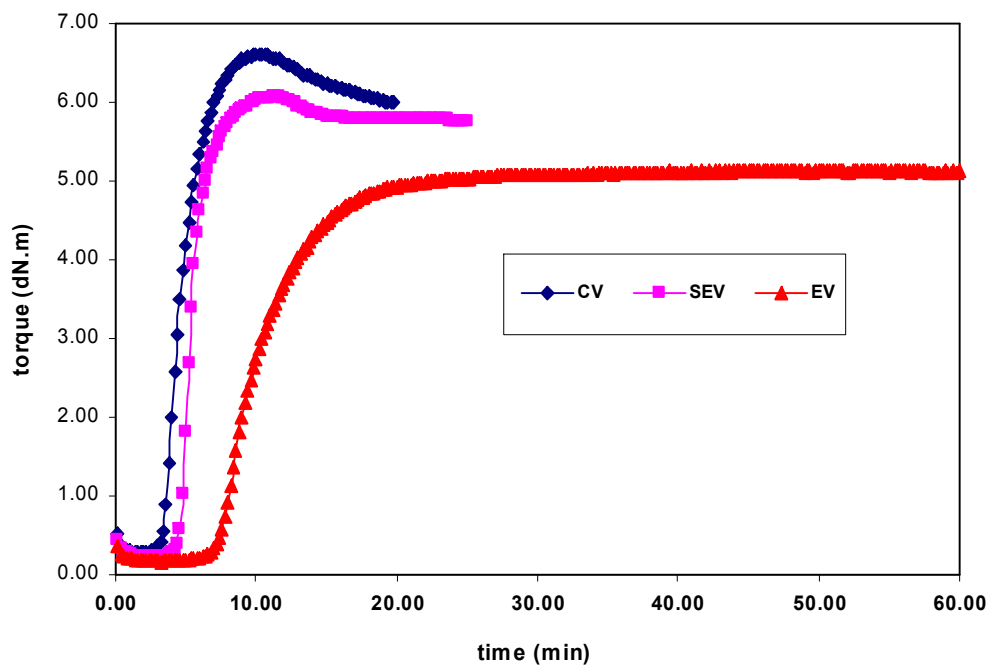
ภาพประกอบ 4.6 ลักษณะการวัดคาบไวนซ์ของยางธรรมชาติเกรด STR 20CV 60 ที่วัดคาบไวนซ์ด้วยระบบกัมมันตภาพ (CV) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



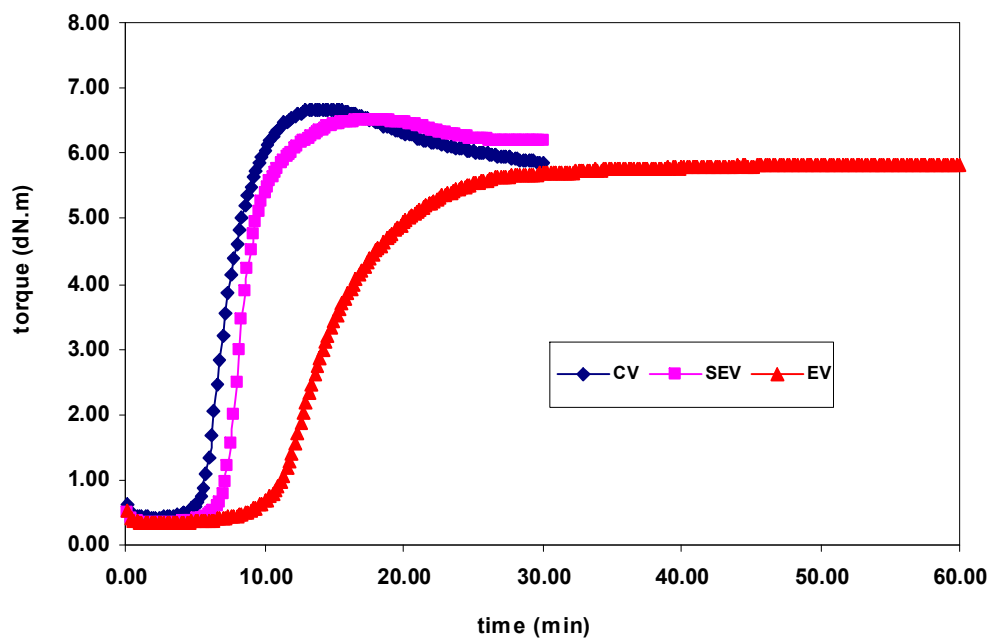
ภาพประกอบ 4.7 ลักษณะการวัดคาบไชนซ์ของยางแผ่นรมควันชั้น 3 ที่วัดคาบไชนซ์ด้วยระบบก่ามะถันปกติ (CV) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



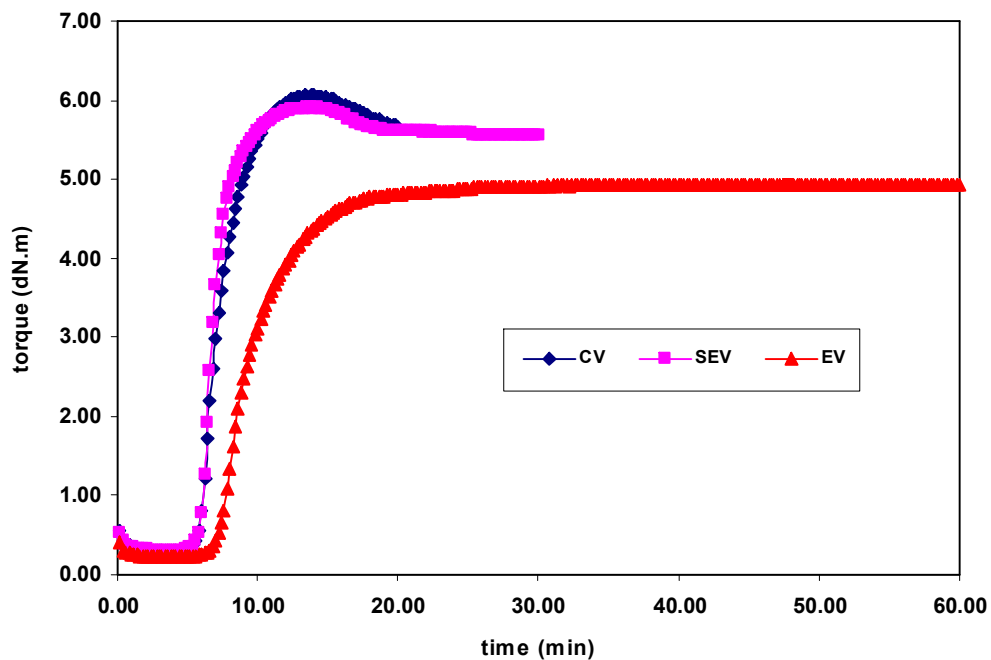
ภาพประกอบ 4.8 ลักษณะการวัดคาบไชนซ์ของยางเครพขาวที่วัดคาบไชนซ์ด้วยระบบก่ามะถันปกติ (CV) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



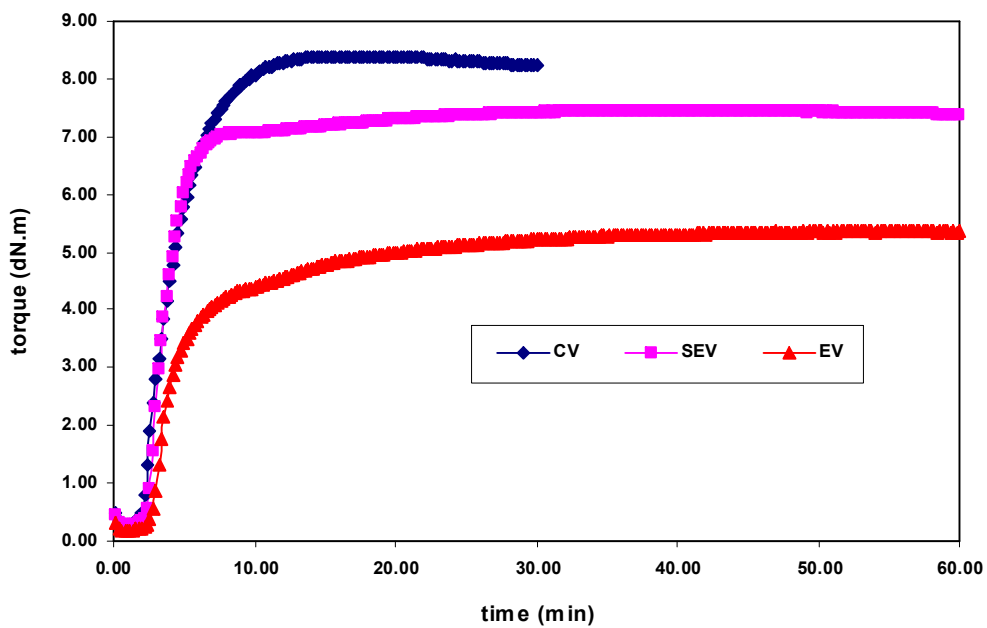
ภาพประกอบ 4.9 ลักษณะการวัดคาบไชน์ของยางธรรมชาติเกรด STR20 วัดคาบไชน์ด้วยระบบ กำมะถันปกติ (CV) เซมิอีวี (SEV) และอีวี (EV) ที่อุณหภูมิ 150 °C



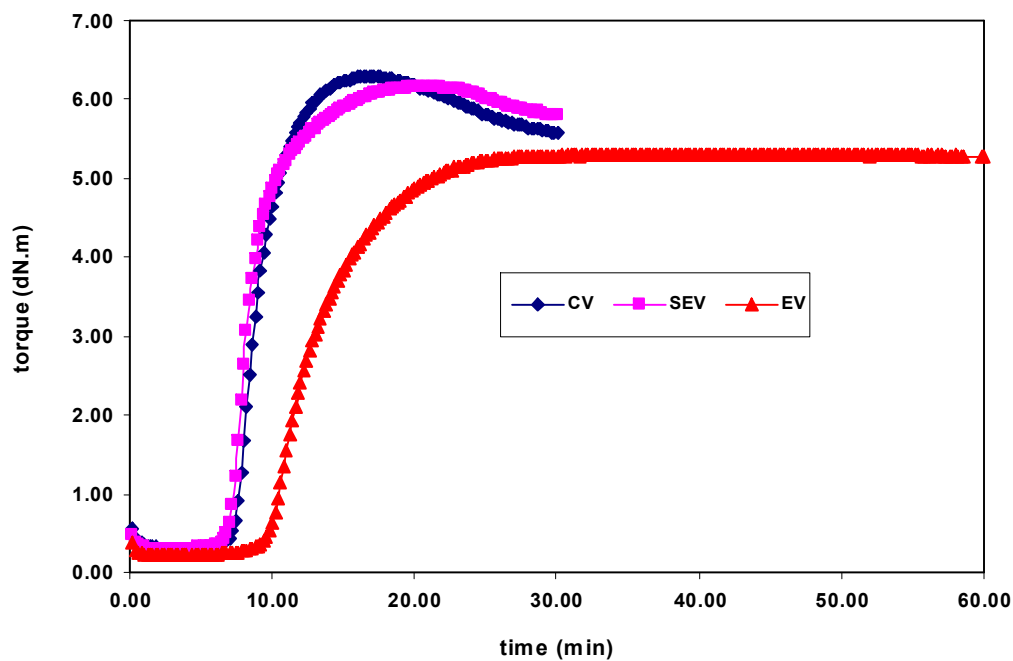
ภาพประกอบ 4.10 ลักษณะการวัดคาบไชน์ของยางธรรมชาติเกรด STR 5L ที่วัดคาบไชน์ด้วยระบบ กำมะถันปกติ (CV) เซมิอีวี (SEV) และอีวี (EV) ที่อุณหภูมิ 150 °C



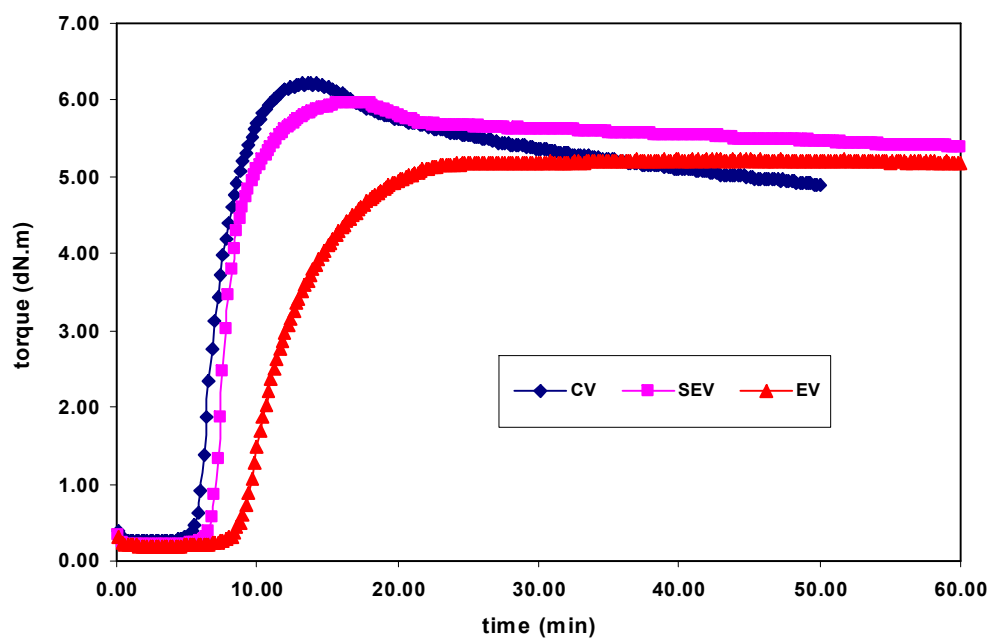
ภาพประกอบ 4.11 ลักษณะการวัดคาบไนซ์ของยางธรรมชาติเกรด ADS ที่วัดคาบไนซ์ด้วยระบบ
กัมมะถันปกติ (CV) เซมิอีวี (SEV) และอีวี (EV) ที่อุณหภูมิ 150 °C



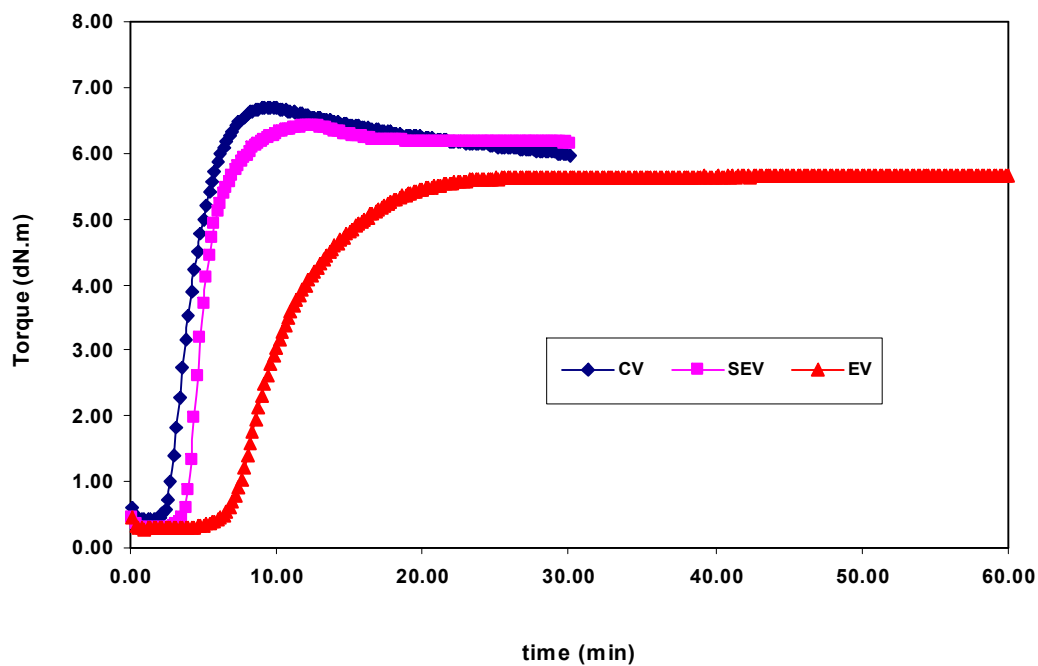
ภาพประกอบ 4.12 ลักษณะการวัดคาบไนซ์ของยางสทิมที่วัดคาบไนซ์ด้วยระบบกัมมะถันปกติ (CV)
เซมิอีวี (SEV) และอีวี (EV) ที่อุณหภูมิ 150 °C



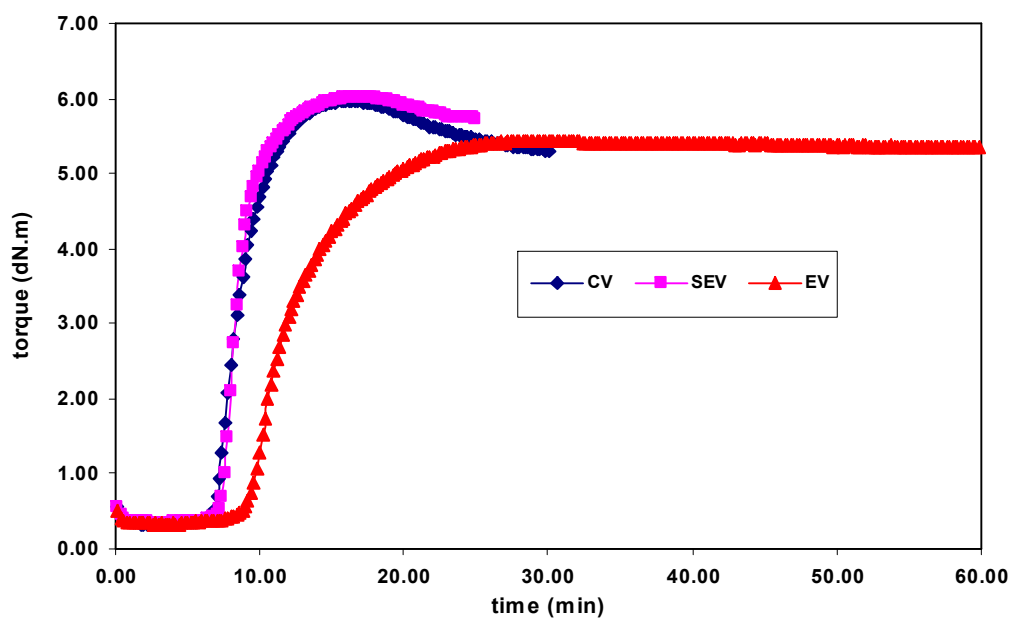
ภาพประกอบ 4.13 ลักษณะการวัดคาบไชน์ของยางธรรมชาติเกรด STR 5CV60 ที่วัดคาบไชน์ด้วยระบบก้ำะถันปกติ (CV) เซมิอีวี (SEV) และอีวี (EV) ที่อุณหภูมิ 150 °C



ภาพประกอบ 4.14 ลักษณะการวัดคาบไชน์ของยางธรรมชาติเกรด STR 20CV60 ที่วัดคาบไชน์ด้วยระบบก้ำะถันปกติ (CV) เซมิอีวี (SEV) และอีวี (EV) ที่อุณหภูมิ 150 °C



ภาพประกอบ 4.15 ลักษณะการวัดคาบไชนซ์ของยางแผ่นรมควันชั้น 3 ที่วัดคาบไชนซ์ด้วยระบบกำมะถันปกติ (CV) เซมิอีวี (SEV) และอีวี (EV) ที่อุณหภูมิ 150 °C



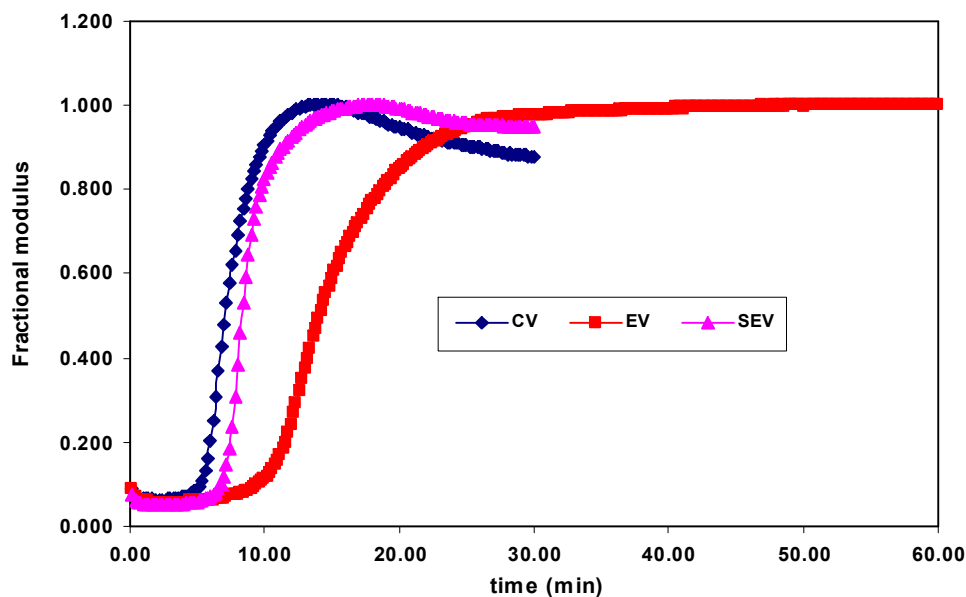
ภาพประกอบ 4.16 ลักษณะการวัดคาบไชนซ์ของยางเครพที่วัดคาบไชนซ์ด้วยระบบกำมะถันปกติ (CV) เซมิอีวี (SEV) และอีวี (EV) ที่อุณหภูมิ 150 °C

จากตาราง 4.2 ถึง 4.13 พบว่า ยางสกิมจะมีค่า scorch time สั้นกว่ายางธรรมชาติเกรดอื่น ๆ ในทุกระบบการวัลคาไนซ์ อาจเนื่องจากยางสกิมมีจำนวนไฮโดรคาร์บอนต่ำกว่ายางธรรมชาติเกรดอื่น ๆ คือ ประมาณ 80 % เมื่อเปรียบเทียบกับยางเกรดอื่น ๆ เช่น ยางแผ่นรมควัน ยาง SMR L และ SMR 20 ที่มีจำนวนไฮโดรคาร์บอนประมาณ 93 - 94 % (Bristow, 1990) รวมทั้งยางสกิมมีปริมาณกรดไขมันและโปรตีนสูงทำให้ค่าแรงบิดสูงสุด (M_H) ของยางสกิมสูงกว่ายางเกรดอื่น ๆ สำหรับเวลาในการวัลคาไนซ์ (TC 90) พบว่ายางแผ่นรมควันให้เวลาการวัลคาไนซ์ที่เร็วสุดใกล้เคียงกับยางสกิม โดยที่บางระบบการวัลคาไนซ์ยางสกิมวัลคาไนซ์เร็วที่สุด และบางระบบยางแผ่นรมควันเร็วที่สุด

จากภาพประกอบ 4.1 ถึง 4.16 พบว่า ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติเป็นแบบ reversion cure ทุก ๆ อุณหภูมิการวัลคาไนซ์ และจะเห็นได้ชัดเจนขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ช่วงเวลาก่อนการวัลคาไนซ์หรือ scorch time และ cure time ของยางจะลดลง และค่าทอร์ก (torque) ต่ำลง เมื่ออุณหภูมิการวัลคาไนซ์เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิเป็นตัวแปรที่สำคัญในการเร่งปฏิกิริยาให้เกิดได้เร็วขึ้น ที่อุณหภูมิสูงปฏิกิริยาสามารถเกิดการวัลคาไนซ์ได้เร็วขึ้น เวลาที่ใช้เกิดพันธะเชื่อมโยงสั้นทำให้ปริมาณของการเกิดพันธะเชื่อมโยง (crosslink) เกิดขึ้นน้อย ค่าแรงบิด (torque) จึงต่ำกว่า ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของยางเช่นกัน ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบอีวีแสดงลักษณะการทนต่อการ reversion ดีที่สุด เนื่องจากระบบนี้ใช้กำมะถันน้อยและสารตัวเร่งมาก ซึ่งทำให้การใช้กำมะถันเชื่อมโยงแต่ละพันธะมีประสิทธิภาพมาก แต่ละพันธะเชื่อมโยงจะมีกำมะถันอยู่เพียงหนึ่งหรือสองอะตอมเท่านั้นยางจึงมีความต้านทานต่อการ reversion ดี สำหรับยางธรรมชาติเกรดอื่น ๆ จะมีลักษณะการวัลคาไนซ์เป็นไปในแนวโน้มเดียวกันกับยาง STR 5L

จากกราฟแสดงลักษณะการวัลคาไนซ์สามารถนำมาคำนวณหาสัดส่วนโมดูลัสที่เพิ่มขึ้น (Fractional modulus, K) ได้ตามสมการ 2.6 หน้า 34 แสดงผลที่ได้ดังภาพประกอบ 4.17 ถึง 4.19

ผลของระบบการวัลคาไนซ์

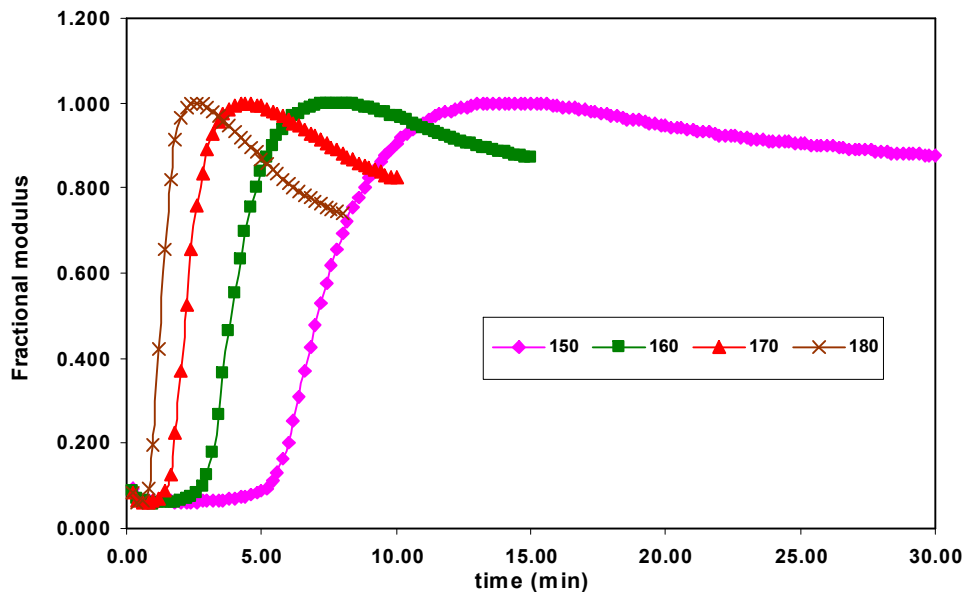


ภาพประกอบ 4.17 Fractional modulus (K) ของยางธรรมชาติเกรด STR 5L วัลคาไนซ์ด้วยระบบ กำมะถันปกติ(CV) เซมิอีวี(SEV) และอีวี(EV) ที่อุณหภูมิ 150 °C

จากภาพประกอบ 4.17 พบว่า ระบบการวัลคาไนซ์แบบอีวีจะมีการเพิ่มขึ้นของค่า K ซ้ำที่สุด เนื่องจากสารตัวเร่ง N-tert-butyl-2-benzothiazyl sulphenamide (TBBS) เป็นสารตัวเร่งประเภทซัลฟิโนไมด์ ซึ่งชะลอเวลาการเกิดวัลคาไนซ์ก่อนกำหนด

จากภาพประกอบ 2.13 แสดงให้เห็นว่า TBBS ก่อนที่จะเข้าทำปฏิกิริยาต้องแตกตัวเป็น MBT ก่อน จากนั้น MBT จะเข้าทำปฏิกิริยากับ TBBS เกิดเป็น active accelerator complex จากนั้น active accelerator complex จะทำปฏิกิริยากับกำมะถันได้เป็น sulfurating agent ซึ่งจะชะลอการเกิดการวัลคาไนซ์ก่อนกำหนดออกไประยะหนึ่งระบบการวัลคาไนซ์แบบอีวีซึ่งใช้สารตัวเร่งในปริมาณที่มากกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบอื่น ๆ จึงมีการเพิ่มขึ้นของค่า K ซ้ำที่สุด และแสดงลักษณะการทนต่อการ reversion ดีที่สุด เนื่องจากการมี active accelerator complex มาก และมีการใช้กำมะถันที่มีปริมาณน้อยอย่างมีประสิทธิภาพเกิดเป็น sulfurating agent ที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับโมเลกุลยางและเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลยางต่อไป

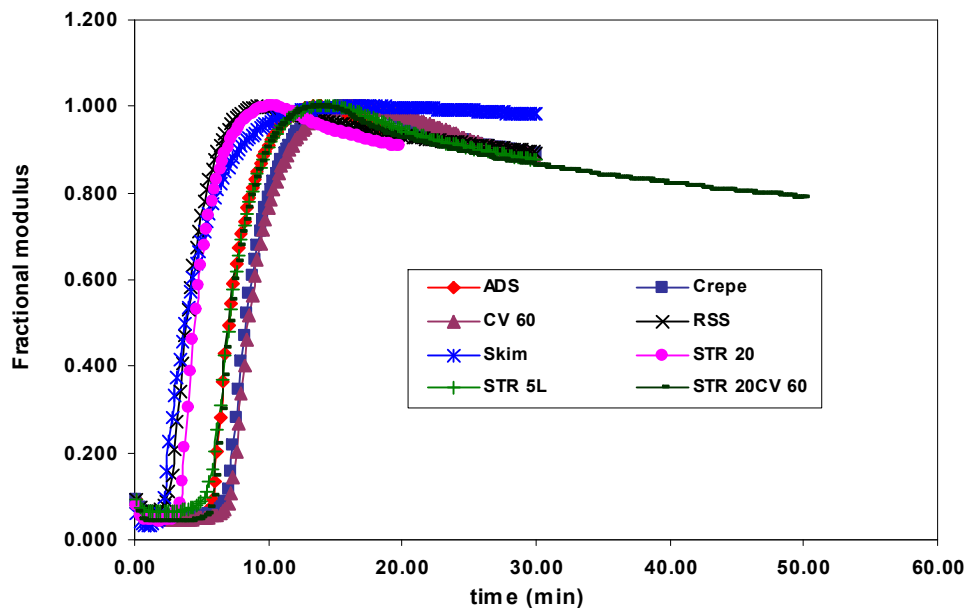
ผลของอุณหภูมิ



ภาพประกอบ 4.18 Fractional modulus (K) ของยางธรรมชาติเกรด STR 5L วัลคาไนซ์ด้วยระบบ กำมะถันปกติ (CV) ที่อุณหภูมิ 150 160 170 และ 180 °C

จากภาพประกอบ 4.18 พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การเพิ่มของค่า K ก็เพิ่มได้เร็วขึ้น ซึ่งเมื่ออุณหภูมิการวัลคาไนซ์สูงขึ้น ค่า K ของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ จะมีค่าลดลง แสดงว่า ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติจะเกิดการ reversion เร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิการวัลคาไนซ์สูงขึ้น

ผลของเกรดยางธรรมชาติ



ภาพประกอบ 4.19 Fractional modulus (K) ของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ วัดค่าในชั่วโมงระบบ
กำมะถันปกติ (CV) ที่อุณหภูมิ 150 °C

จากภาพประกอบ 4.19 พบว่า ยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ มีค่า K ที่เพิ่มขึ้นในอัตราที่ใกล้เคียงกัน ยกเว้นยางสกิน ยางแผ่นรมควัน และยาง STR 20 จะมีค่า K ที่เพิ่มขึ้นเร็วกว่ายางธรรมชาติเกรดอื่น จะเห็นว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้น การเพิ่มของค่า K จะยิ่งเพิ่มได้เร็วขึ้น ซึ่งแนวโน้มความเร็วในการเพิ่มของค่า K เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะมีแนวโน้มเหมือนกันยางธรรมชาติทุกเกรด ซึ่งเมื่ออุณหภูมิการวัดค่าในชั่วโมงสูงขึ้นค่า K ของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ จะมีค่าลดลง เมื่อเวลาการวัดค่าในชั่วโมงเพิ่มมากขึ้น

ช่วงเวลาก่อนการวัดค่าในชั่วโมงค่าคงที่ของอัตราการวัดค่าในชั่วโมง ซึ่งคำนวณได้ตามสมการ 2.9 หน้า 34 ดังรายละเอียดในหัวข้อ 3.3.2 แสดงดังตาราง 4.14

ตาราง 4.14 ช่วงเวลาก่อนยางวัลคาไนซ์ (induction period) และค่าคงที่อัตราการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติ (curing rate constant) เกรดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 150 - 180 °C

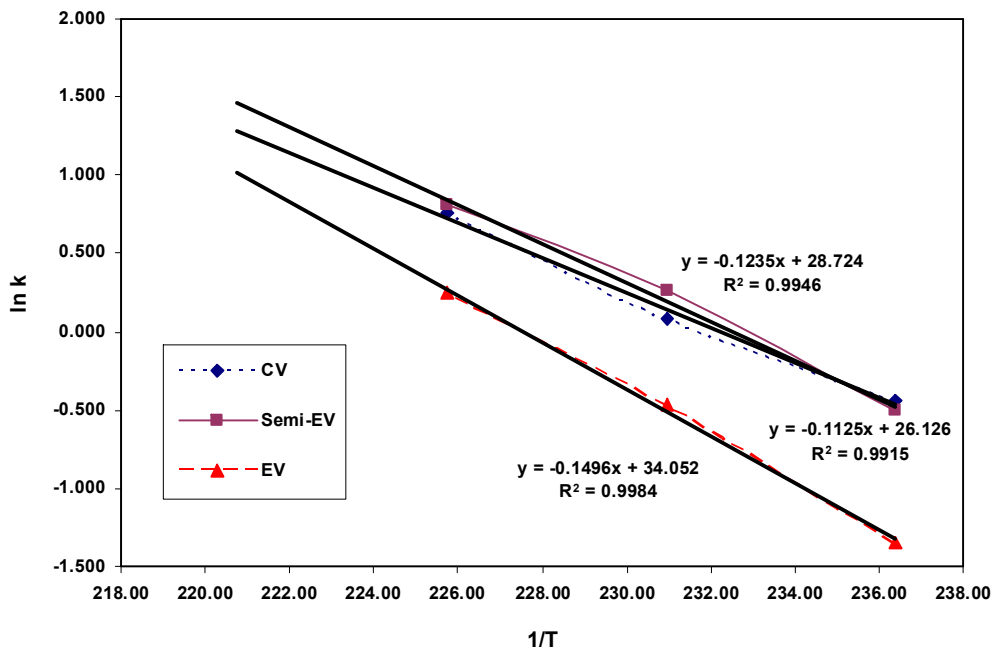
		150 °C			160 °C		
		CV	Semi-EV	EV	CV	Semi-EV	EV
STR 20	t_0 (min)	4.04	5.12	9.11	2.16	3.01	5.36
	$k \times 10^4$	8,090	10,598	3,380	13,750	21,949	6,290
STR 5L	t_0 (min)	6.34	7.55	13.11	3.36	4.31	7.37
	$k \times 10^4$	6,440	6,070	2,610	10,820	12,950	4,560
ADS	t_0 (min)	6.36	6.30	8.43	3.41	3.48	5.16
	$k \times 10^4$	6,530	9,020	3,890	11,560	15,080	7,680
Skim	t_0 (min)	2.45	2.58	3.37	1.36	1.43	2.12
	$k \times 10^4$	4,350	6,550	1,820	8,150	12,750	4,500
STR 5CV 60	t_0 (min)	8.17	7.51	11.44	4.33	4.40	6.51
	$k \times 10^4$	6,470	4,680	2,910	10,720	13,160	5,030
STR 20CV 60	t_0 (min)	6.33	9.18	10.59	3.08	4.00	6.31
	$k \times 10^4$	5,616	8,656	3,176	14,267	17,120	6,233
RSS N0.3	t_0 (min)	3.27	4.29	8.57	1.66	2.30	5.13
	$k \times 10^4$	7,690	7,690	2,860	12,570	15,930	6,920
Crepe	t_0 (min)	7.55	8.20	10.55	4.16	4.38	6.32
	$k \times 10^4$	4,680	7,812	2,950	11,250	11,250	7,000

ตาราง 4.14 (ต่อ)

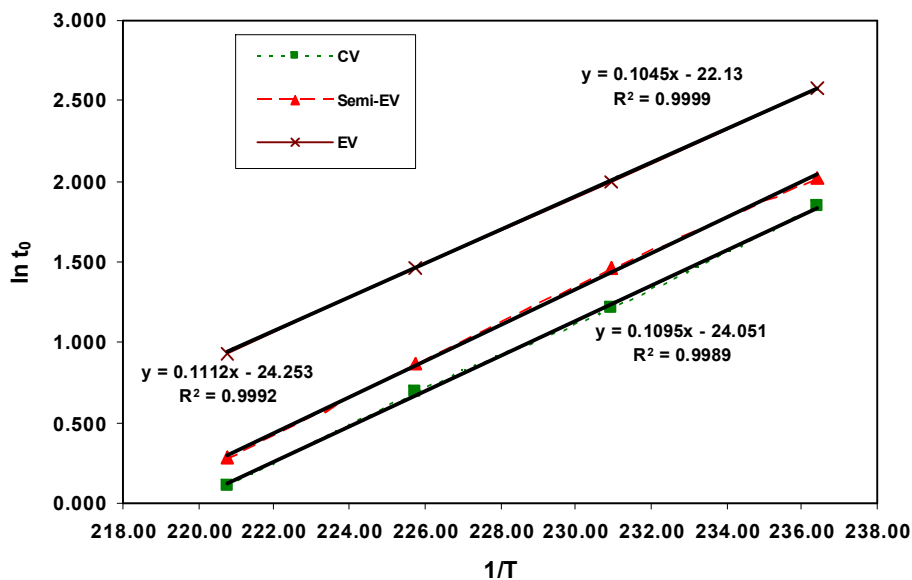
		170 °C			180 °C		
		CV	Semi-EV	EV	CV	Semi-EV	EV
STR 20	t_0 (min)	1.21	1.47	3.27	0.62	1.08	2.16
	$k \times 10^4$	23,460	27,792	10,410	30,980	67,033	18,650
STR 5L	t_0 (min)	2.01	2.37	4.34	1.12	1.33	2.54
	$k \times 10^4$	21,430	22,650	6,240	31,390	33,570	12,880
ADS	t_0 (min)	2.06	2.19	3.24	1.12	1.28	2.10
	$k \times 10^4$	21,200	28,930	11,110	34,450	52,060	20,710
Skim	t_0 (min)	1.02	1.07	1.26	0.45	0.47	1.03
	$k \times 10^4$	18,660	37,430	11,720	21,910	33,720	21,890
STR 5CV 60	t_0 (min)	2.30	2.48	4.14	1.27	1.43	2.42
	$k \times 10^4$	20,540	20,330	10,080	31,820	35,940	12,800
STR 20CV 60	t_0 (min)	1.45	2.22	4.00	1.00	1.25	2.32
	$k \times 10^4$	18,726	21,563	11,665	63,016	61,668	18,657
RSS N0.3	t_0 (min)	1.13	1.33	3.12	0.61	1.01	2.03
	$k \times 10^4$	21,380	29,910	11,500	27,680	56,770	13,950
Crepe	t_0 (min)	2.26	2.48	4.0	1.25	1.40	2.34
	$k \times 10^4$	18,520	22,355	9,550	32,520	33,958	16,400

จากตาราง 4.14 พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าคงที่อัตราการวัลคาไนซ์ของยาง (k) จะเพิ่มขึ้นด้วย ในขณะที่ค่า k เพิ่มขึ้น ช่วงเวลาก่อนยางวัลคาไนซ์ของยางก็ลดต่ำลง เมื่อพิจารณา ค่าคงที่อัตราการวัลคาไนซ์ของยาง (k) พบว่า ค่า k ของระบบวัลคาไนซ์แบบเคมีอีวีมีแนวโน้มสูงกว่าระบบกำมะถันปกติและระบบอีวี ตามลำดับ แสดงว่าระบบวัลคาไนซ์แบบอีวีมีอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ช้าที่สุด สำหรับค่า t_0 ระบบวัลคาไนซ์แบบอีวีแตกต่างจากระบบกำมะถันปกติ และเคมีอีวีอย่างเห็นได้ชัด คือ ค่า t_0 ของระบบอีวียาวที่สุดรองลงมาก็คือระบบเคมีอีวีและระบบกำมะถันปกติ เนื่องจากระบบอีวีใช้ปริมาณสารตัวเร่ง TBBS ซึ่งเป็นสารตัวเร่งประเภท delayed action มากที่สุดนั่นเอง

การคำนวณหาค่าพลังงานการกระตุ้นในการวัดคาบในซิงของยาง (Activation energy) หรือค่า E_1 และ E_2 สามารถหาได้จากความชันของกราฟระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ และ $\ln t_0$ กับ $1/T$ ดังภาพประกอบ 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log k$ กับส่วนกลับของอุณหภูมิของสารตัวอย่าง STR 5L



ภาพประกอบ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log t_0$ กับส่วนกลับของอุณหภูมิของวัสดุตัวอย่าง STR 5L

จากความชันที่ได้จากภาพประกอบ 4.20 และ 4.21 สามารถนำมาคำนวณหา E_1 และ E_2 ตามสมการ 2.7 และ 2.8 หน้า 34 ค่าที่ได้แสดงในตาราง 4.15

ตาราง 4.15 พลังงานกระตุ้นการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ

เกรดยาง ระบบวัลคาไนซ์	E_1 (kcal/mol)			R^2		
	CV	Semi-EV	EV	CV	Semi-EV	EV
STR 20	41.42	50.97	52.20	0.9987	0.9999	0.9965
STR 5L	53.19	58.39	70.73	0.9915	0.9946	0.9984
ADS	50.73	48.79	53.52	0.9934	0.9954	0.9897
Skim	51.63	54.61	76.36	0.9907	0.9879	0.9938
STR 5CV 60	49.22	44.44	54.29	0.9980	0.9895	0.9965
STR 20CV 60	53.85	55.27	68.04	0.9949	0.9969	0.9964
RSS No. 3	45.30	47.94	55.51	0.9988	0.9987	0.9987
Crepe	47.00	46.15	52.20	0.9899	0.9897	0.9978

ตาราง 4.15 (ต่อ)

กรดยาง ระบบวัลคาไนซ์	E ₂ (kcal/mol)			R ²		
	CV	Semi-EV	EV	CV	Semi-EV	EV
STR 20	48.89	53.43	63.79	0.9888	0.9904	0.9945
STR 5L	49.41	51.77	52.58	0.9989	0.9992	0.9999
ADS	49.41	51.77	52.58	0.9956	0.9987	0.9977
Skim	37.02	48.56	48.80	0.9874	0.9995	0.9918
STR 5CV 60	46.34	50.26	56.31	0.9990	0.9987	0.9889
STR 20CV 60	43.17	59.62	65.25	0.9987	0.9009	0.9987
RSS No. 3	43.17	59.62	65.25	0.9887	0.9867	0.9689
Crepe	43.69	49.13	51.92	0.9975	0.9999	0.9897

จากตาราง 4.15 จากการคำนวณค่าคงที่อัตราการวัลคาไนซ์และพลังงานการกระตุ้นให้เกิดการ วัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ โดยสมมติว่าปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง พบว่า ค่าพลังงานการกระตุ้นให้เกิดการวัลคาไนซ์ (E₂) ของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบอีวีจะมีค่าสูงสุด โดยมีค่าอยู่ในช่วง 52.20 ถึง 76.36 กิโลแคลอรีต่อโมล ส่วนระบบกำมะถันปกติและระบบเคมีอีวีมีระดับของค่าพลังงานการกระตุ้นใกล้เคียงกันและต่ำกว่าระบบอีวี

วรพงษ์ (2540) ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชันของยางธรรมชาติที่มี trans-1,4-polyisoprene (TPI) ผสมอยู่ในอัตราส่วน 30, 50 และ 70 % (w/w) ด้วยเทคนิค DSC ในช่วงอุณหภูมิ 50 – 250 °C โดยเปลี่ยนแปลงอัตราการให้ความร้อนเป็น 5, 10, 15 และ 20 °C /min พบว่า ระบบอีวี จะมีค่าพลังงานการกระตุ้นสูงสุด ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 83.93 ถึง 92.19 กิโลแคลอรีต่อโมล ส่วนระบบเคมีอีวีและกำมะถันปกติ มีระดับของค่าพลังงานการกระตุ้นใกล้เคียงกันและต่ำกว่าระบบอีวี ระบบเคมีอีวี มีค่าพลังงานการกระตุ้นอยู่ในช่วง 78.70 ถึง 84.19 กิโลแคลอรีต่อโมล และระบบกำมะถันปกติ มีค่าพลังงานการกระตุ้นอยู่ในช่วง 66.93 ถึง 84.33 กิโลแคลอรีต่อโมล จะเห็นว่าค่าพลังงานการกระตุ้นที่คำนวณได้ในการวิจัยนี้ จะมีค่าที่ต่ำกว่างานของ วรพงษ์ (2540)

สำหรับค่า E_2 ซึ่งเป็นค่าพลังงานกระตุ้นในช่วงเริ่มแรก จะเห็นว่าแนวโน้มค่า E_2 ในระบบกำมะถันปกติต่ำกว่าระบบเคมีอีวีและอีวีตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากระบบกำมะถันปกติจะใช้ปริมาณกำมะถันมากที่สุด และใช้ TBBS น้อยที่สุดจึงเกิดการชะลอการวัลคาไนซ์น้อยที่สุด ทำให้ค่า scorch time สั้น ค่า E_2 จึงต่ำ

4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ

ในการเลือกเกรดยางธรรมชาติเพื่อไปใช้งานให้เหมาะสมกับการแปรรูปและผลิตภัณฑ์ เช่นในการวิจัยนี้ต้องการผลิตยางรองคอสะพานที่มีสมบัติตามมาตรฐานกำหนดนั้น จำเป็นต้องรู้ทั้งจลนพลศาสตร์การวัลคาไนซ์และสมบัติทางฟิสิกส์ของยางแต่ละเกรด จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ พบว่าระบบกำมะถันปกติ ใช้พลังงานการกระตุ้นการวัลคาไนซ์ที่ต่ำกว่าระบบอื่น จึงเลือกระบบระบบกำมะถันปกติ มาศึกษาสมบัติของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ ที่มีเขม่าดำเป็นสารตัวเติม เพื่อช่วยในการวิเคราะห์เลือกชนิดของยางไปผลิตยางรองคอสะพานหรือผลิตภัณฑ์อื่นต่อไป

4.3.1 ลักษณะการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 150 °C

นำยางคอมปาวด์ที่เตรียมตามสูตรดังตาราง 3.2 หน้า 82 ซึ่งเป็นยางคอมปาวด์ที่ผสมเขม่าดำ 30 phr ไปทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง MDR 2000 ที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 30 นาที ได้ผลการทดลองตามตาราง 4.16

จากตาราง 4.16 พบว่าลักษณะการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 150 °C ของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ จะมีค่าที่แตกต่างกันไม่มากนัก ยกเว้นยางสกิม ที่มีค่า scorch time (TS 2) และค่าแรงบิดสูงสุด (M_H) ต่างจากยางธรรมชาติเกรดอื่น ๆ เนื่องมาจากปริมาณไนโตรเจนในยางสกิมที่สูงกว่ายางธรรมชาติเกรดอื่น ๆ ทำให้ยางสกิมสกอซเร็ว และมีความแข็งมากกว่ายางธรรมชาติเกรดอื่น ๆ ทำให้ค่า M_H สูง

ตาราง 4.16 ลักษณะการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 150 °C ของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ

สมบัติ เกรดยาง	TS2 (min)	TC 90 (min)	M _H (dN.m)	M _L (dN.m)	M _H - M _L (dN.m)
STR 20	3.26	6.04	6.68	0.27	6.41
STR 20CV 60	3.57	6.43	6.71	0.24	6.47
RSS No. 3	3.33	6.35	6.60	0.34	6.26
STR 5L	4.38	7.56	7.29	0.28	7.01
STR 5CV 60	3.57	6.43	6.71	0.24	6.47
ADS	4.06	6.54	6.83	0.32	6.51
Skim	2.26	6.37	11.41	0.56	10.85
Crepe	4.36	7.56	6.47	0.25	6.22

4.3.2 สมบัติความทนต่อแรงดึง

หลังจากขึ้นรูปยางคอมปาวด์เตรียมขึ้นตัวอย่างสำหรับทดสอบความทนต่อแรงดึงก่อนและหลังบ่มเร่ง โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 412 ทดสอบด้วยเครื่อง tensometer ที่อัตราการดึง 500 mm/min และทดสอบการบ่มเร่งตามมาตรฐาน ASTM D 573 โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง ในตู้บ่มเร่งแบบ gear oven ตามรายละเอียดในหัวข้อ 3.3.3.3.1 และ 3.3.3.3.3 ได้ผลดังตาราง 4.17 และ 4.18 และภาพประกอบ 4.22 ถึง 4.24

จากตาราง 4.17 และ 4.18 และภาพประกอบ 4.22 ถึง 4.24 พบว่าค่า tensile strength, 300% modulus และ elongation at break ก่อนบ่มเร่งของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ จะมีค่าใกล้เคียงกัน แตกต่างกันเล็กน้อย โดยที่ยางสกิมมีค่า tensile strength และ 300% modulus ก่อนบ่มเร่งสูงสุด แสดงให้เห็นว่ายางสกิมมีปริมาณ crosslink ที่สูง ซึ่งสัมพันธ์กับค่า modulus ที่สูง แต่ค่า elongation at break ก่อนบ่มเร่งของยางครอปจะมีค่าสูงสุด ในขณะที่ค่า elongation at break ก่อนบ่มเร่งของยางสกิมจะมีค่าต่ำสุด อาจเนื่องมาจากยางสกิมมีความแข็งสูงสุด ทำให้ยางขาดความยืดหยุ่น ขาดง่ายเมื่อยืด จึงทำให้ค่า elongation at break ต่ำลง

หลังบ่มเร่งยางธรรมชาติบางเกรด คือ ยาง STR 20, STR 20CV 60, STR 5CV 60 และ ADS จะมีค่า tensile strength สูงกว่าก่อนบ่มเร่ง อาจเนื่องจากเมื่อสารเคมีบางตัวอาจจะทำปฏิกิริยาได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จึงทำให้ค่าสูงขึ้น tensile strength กว่าก่อนบ่มเร่ง โดย

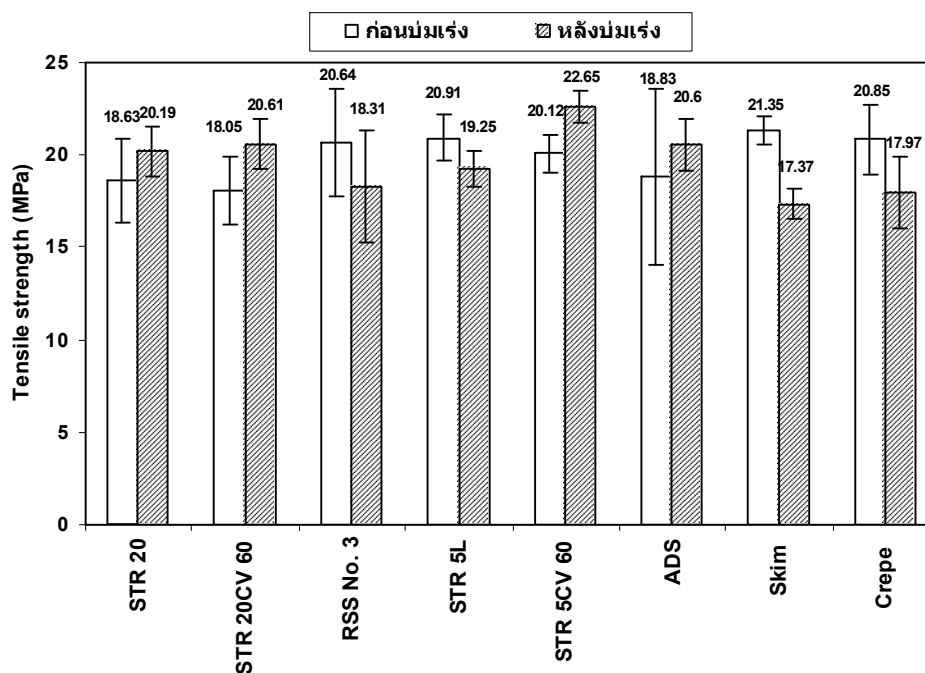
ที่ค่า tensile strength และค่า elongation at break หลังบ่มเร่งยาง STR 5CV 60 มีค่าสูงสุด ค่า 300% modulus หลังบ่มเร่งของยางธรรมชาติทุกเกรดจะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อยางได้รับความร้อนสายโซ่โมเลกุลยางจะขาด หรือพันธะเชื่อมโยงแบบ polysulfidic สลาย เกิดเป็นพันธะใหม่ที่ใช้กำมะถันต่อพันธะน้อยลง ทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้ยางสกิมจะมีค่า 300% modulus หลังบ่มเร่งสูงสุด และเป็นที่น่าสังเกตคือเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่า tensile strength ของยางสกิมหลังการบ่มเร่งมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด บ่งบอกถึงข้อด้อยด้านการทนต่อการถูกออกซิไดซ์ เช่นเดียวกับยางดิบ

ตาราง 4.17 ความทนต่อแรงดึงก่อนบ่มเร่งของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ

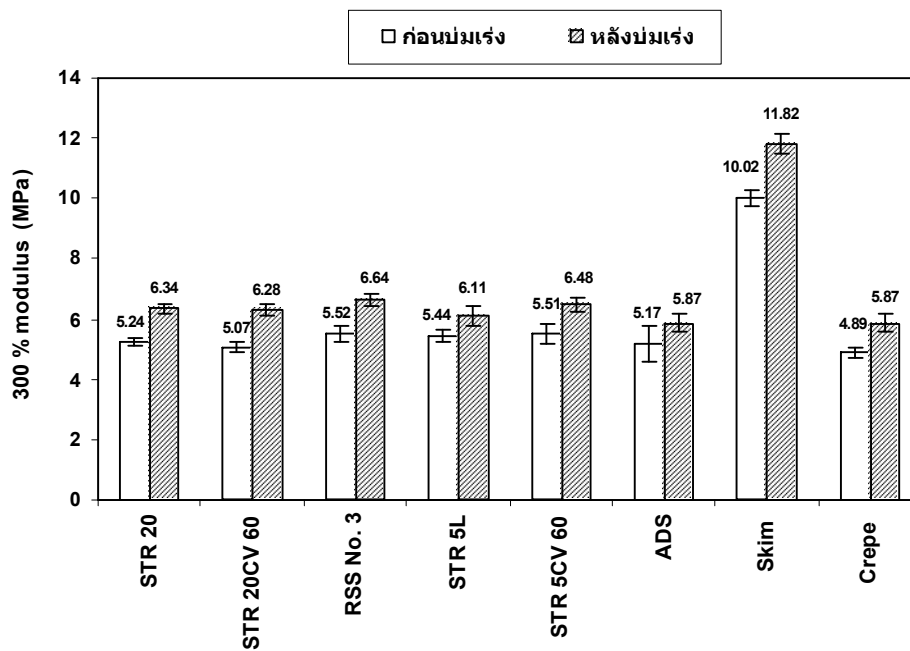
สมบัติ เกรดยาง	Tensile Strength (MPa)	300%modulus (MPa)	Elongation at break (%)
STR 20	18.63 ± 2.24	5.24 ± 0.16	635 ± 50.68
STR 20CV 60	18.05 ± 1.87	5.07 ± 0.17	637 ± 30.75
RSS No. 3	20.64 ± 2.94	5.52 ± 0.25	663 ± 63.38
STR 5L	20.91 ± 1.24	5.44 ± 0.22	680 ± 17.24
STR 5CV 60	20.12 ± 1.02	5.51 ± 0.34	659 ± 1.44
ADS	18.83 ± 4.75	5.17 ± 0.62	656 ± 14.68
Skim	21.35 ± 0.74	10.02 ± 0.25	553 ± 8.82
Crepe	20.85 ± 1.93	4.89 ± 0.15	705 ± 33.92

ตาราง 4.18 ความทนต่อแรงดึงหลังบ่มแรงของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ

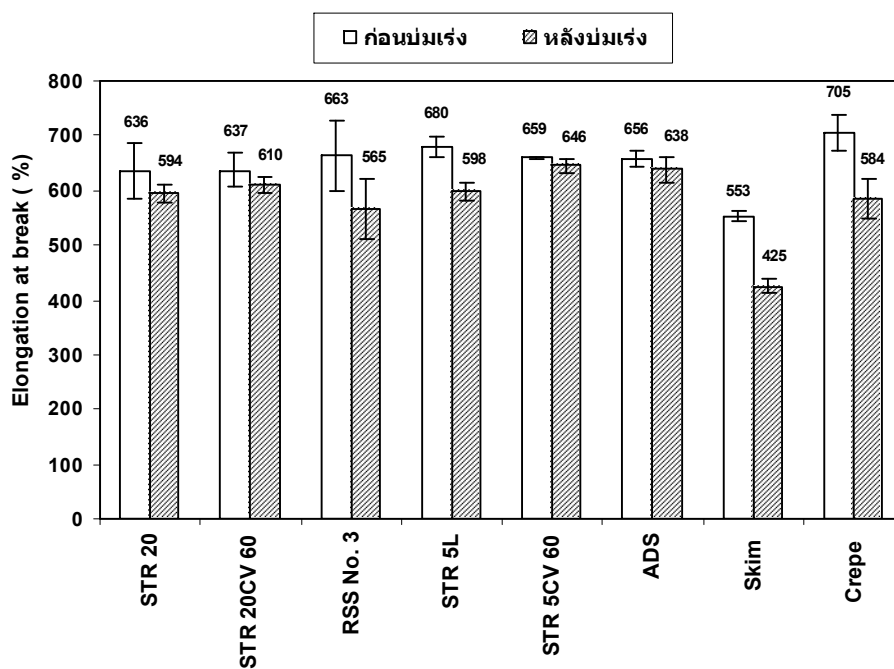
เกรดยาง สมบัติ	Tensile Strength (MPa)		300% modulus (MPa)		Elongation at break (%)	
	หลังบ่มแรง	% การเปลี่ยนแปลง	หลังบ่มแรง	% การเปลี่ยนแปลง	หลังบ่มแรง	% การเปลี่ยนแปลง
STR 20	20.19±1.33	8.38	6.34±0.15	21.06	594 ±16.82	-6.59
STR 20CV 60	20.61±1.39	14.16	6.28±0.19	23.81	610 ±14.81	-4.23
RSS No. 3	18.31±3.03	-11.27	6.64±0.20	20.20	565 ±54.11	-14.79
STR 5L	19.25±0.97	-7.94	6.11±0.33	12.47	597 ±16.57	-12.12
STR 5CV 60	22.65±0.87	12.58	6.48±0.21	17.56	646 ±13.62	-2.08
ADS	20.60±1.41	9.39	5.87±0.27	13.63	638 ±23.11	-2.74
Skim	17.37±0.79	-18.62	11.82±.34	17.97	425 ±12.99	-23.11
Crepe	17.97±1.97	-13.84	5.87±0.27	20.00	584 ±36.32	-17.15



ภาพประกอบ 4.22 กราฟแสดงค่า tensile strength ก่อนบ่มแรงและหลังบ่มแรงของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ



ภาพประกอบ 4.23 กราฟแสดงค่า 300% modulus ก่อนบ่มแรงและหลังบ่มแรงของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ



ภาพประกอบ 4.24 กราฟแสดงค่า elongation at break ก่อนบ่มแรงและหลังบ่มแรงของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ

4.3.3 สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาด

หลังจากขึ้นรูปยางคอมปาวด์เตรียมขึ้นตัวอย่างสำหรับทดสอบด้านทานต่อการฉีกขาด ก่อนและหลังบ่มแรง โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 624 ทดสอบด้วยเครื่อง tensometer ที่อัตราการดึง 500 mm/min และทดสอบการบ่มแรงตามมาตรฐาน ASTM D 573 โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง ในตู้บ่มแรงแบบ gear oven ตามรายละเอียดในหัวข้อ 3.3.3.3.2 และ 3.3.3.3.3 ได้ผลดังตาราง 4.19 และ 4.20 และภาพประกอบ 4.25

จากตาราง 4.19 และ 4.20 และภาพประกอบ 4.25 พบว่าค่า tear strength ก่อนบ่มแรงของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ จะมีค่าใกล้เคียงกัน แตกต่างกันเล็กน้อย ยกเว้นยางสกินที่มีค่า tear strength สูงสุด อันเนื่องมาจากปริมาณไนโตรเจนที่สูงนั่นเอง

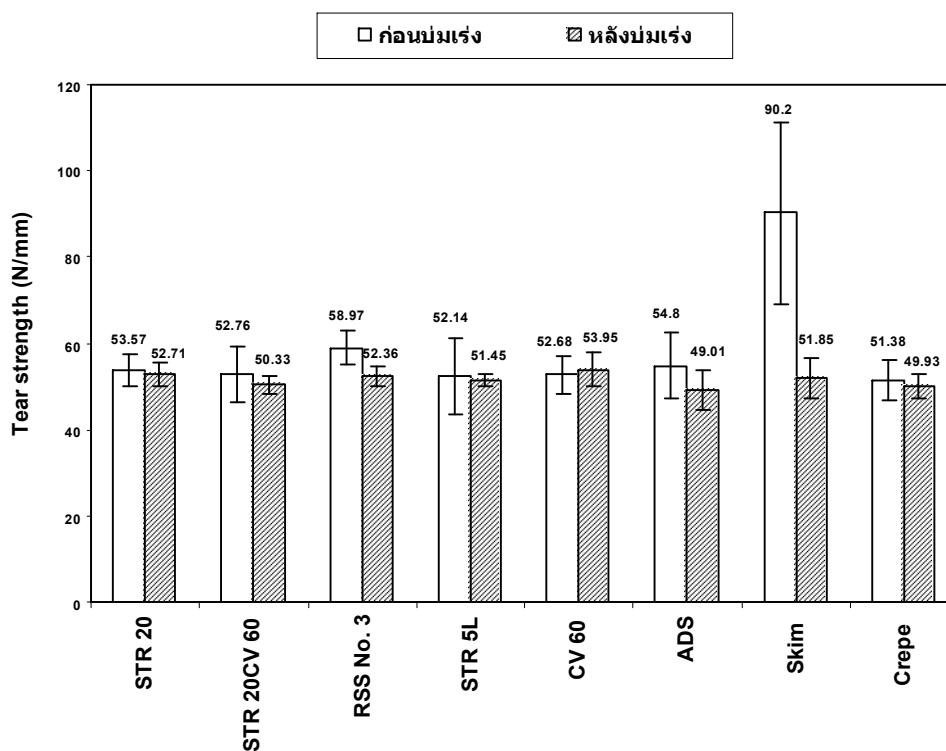
ค่า tear strength หลังบ่มแรงของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ จะมีค่าใกล้เคียงกัน แตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งมีค่าน้อยกว่าก่อนบ่มแรงโดยที่ยางสกินจะมี % การเปลี่ยนแปลงค่า tear strength สูงสุด (การลดลงของค่า tear strength มากที่สุด) และยาง STR 5CV 60 มีค่า tear strength สูงสุด

ตาราง 4.19 ความต้านทานต่อการฉีกขาดก่อนบ่มแรงของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ

สมบัติ \ เกรดยาง	Tear Strength (N/mm)
STR 20	53.57 ± 3.66
STR 20CV 60	52.76 ± 6.64
RSS No. 3	58.97 ± 3.92
STR 5L	52.14 ± 8.79
STR 5CV 60	52.68 ± 4.45
ADS	54.80 ± 7.60
Skim	90.20 ± 21.01
Crepe	51.38 ± 4.79

ตาราง 4.20 ความต้านทานต่อการฉีกขาดหลังบ่มเร่งของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ

เกรดยาง สมบัติ	Tear Strength (N/mm)	% การเปลี่ยนแปลง
STR 20	52.71 ± 2.75	-1.60
STR 20CV 60	50.33 ± 2.03	-4.61
RSS No. 3	52.36 ± 2.53	-11.20
STR 5L	51.45 ± 1.54	-1.32
STR 5CV 60	53.95 ± 3.83	2.42
ADS	49.01 ± 4.75	-10.57
Skim	51.85 ± 4.59	-42.51
Crepe	49.93 ± 2.67	-2.81



ภาพประกอบ 4.25 กราฟแสดงค่า Tear Strength ก่อนบ่มเร่งและหลังบ่มเร่งของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ

4.3.4 สมบัติด้านความแข็ง

หลังจากขึ้นรูปยางคอมปาวด์เตรียมขึ้นตัวอย่างสำหรับทดสอบความแข็ง โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2240 ทดสอบด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบ shore A ใช้ขึ้นทดสอบที่มีความหนาอย่างน้อย 6 มิลลิเมตร ให้หัวกดกดค้างไว้ 30 วินาที แล้วจึงอ่านค่าความแข็งที่ได้ ตามรายละเอียดในหัวข้อ 3.3.3.3.4 ได้ผลดังตาราง 4.21

จากตาราง 4.21 พบว่ายางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ มีค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งเห็นว่าเกรดของยางธรรมชาติจะไม่ส่งผลต่อค่าความแข็ง เนื่องจากเตรียมมาจากสูตรเดียวกัน ยกเว้นค่าความแข็งของยางสกินที่มีค่าสูงสุด เนื่องจากปริมาณไนโตรเจนที่มีในยางสกินสูงกว่าปริมาณไนโตรเจนที่สูงกว่ายางธรรมชาติเกรดอื่น ๆ

ตาราง 4.21 ความแข็งของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ

เกรดยาง สมบัติ	ความแข็ง (Shore A)
STR 20	51 ± 0.58
STR 20CV 60	53 ± 0.58
RSS No. 3	51 ± 0.58
STR 5L	52 ± 1.24
STR 5CV 60	54 ± 1.15
ADS	55 ± 1.00
Skim	63 ± 0.58
Crepe	54 ± 0.58

4.3.5 สมบัติ compression set

หลังจากขึ้นรูปยางคอมปาวด์เตรียมขึ้นตัวอย่างสำหรับทดสอบ compression set โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 395 อัคให้ผิดรูป 25 % ของความหนา อบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาแล้วนำยางออกจากแผ่นอัดทันที ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที บนพื้นที่ไม่นำความร้อน แล้วจึงวัดความหนา ตามรายละเอียดในหัวข้อ 3.3.3.3.5 ได้ผลดังตาราง 4.22

จากตาราง 4.22 พบว่ายางสกิมมีการคืนตัวที่ไม่ดี (มีค่า compression set สูงสุด) ยางที่คืนตัวดีที่สุด คือ ยาง STR 20CV 60 (ค่า compression set ต่ำสุด) อาจเนื่องมาจากยางสกิมเมื่อได้รับความร้อนพันธะเชื่อมโยง (crosslink) โคนทำลายมาก ทำให้การคืนตัวลดลง หรือเกิดการผิดรูปมากกว่ายางธรรมชาติเกรดอื่น ๆ

ตาราง 4.22 compression set ของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ

เกรดยาง สมบัติ	compression set (%)
STR 20	51.36 ± 7.32
STR 20CV 60	38.33 ± 6.85
RSS No. 3	38.50 ± 0.80
STR 5L	41.85 ± 1.03
STR 5CV 60	41.42 ± 2.02
ADS	40.54 ± 0.35
Skim	63.14 ± 2.67
Crepe	43.53 ± 1.27

4.3.6 สมบัติการกระดอนตัวในแนวตั้ง

หลังจากขึ้นรูปยางคอมปาวด์เตรียมขึ้นตัวอย่างสำหรับทดสอบการกระดอนตัวในแนวตั้งโดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2632 ปล่อยให้ตัวกระแทกกระทบแผ่นยาง 6 ครั้ง ติดต่อกัน บันทึกการกระดอนตัวเฉพาะครั้งที่ 4, 5 และ 6 เป็นผลการทดลอง ตามรายละเอียดในหัวข้อ 3.3.3.3.6 ได้ผลดังตาราง 4.23

จากตาราง 4.23 จะเห็นว่าความกระดอนตัวของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ มีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้น ยางสกิมจะมีความกระดอนตัวน้อยที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจากความแข็งของยางสกิมที่มีความแข็งสูงสุด การกระดอนจึงน้อยกว่ายางธรรมชาติเกรดอื่น ๆ

ตาราง 4.23 ความกระดอนตัวของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ

เกรดยาง สมบัติ	resilience(%)
STR 20	56 ± 1.15
STR 20CV 60	56 ± 2.00
RSS No. 3	55 ± 2.08
STR 5L	55 ± 1.15
STR 5CV 60	53 ± 2.89
ADS	54 ± 1.00
Skim	34 ± 2.00
Crepe	54 ± 1.53

4.3.7 สมบัติความต้านทานต่อการหักงอ

หลังจากขึ้นรูปยางคอมปาวด์เตรียมขึ้นตัวอย่างสำหรับความต้านทานต่อการหักงอตามมาตรฐาน ASTM D 430 ปรับระยะห่างระหว่างที่จับเท่ากับ 65 มิลลิเมตรในขณะที่ตรวจหารอยแตกด้วยแว่นขยาย บันทึกจำนวนรอบเมื่อพบรอยแตกที่เห็นได้เป็นครั้งแรก เดินเครื่องทดสอบและบันทึกระดับของรอยแตกต่อไปจนถึงระดับที่ต้องการ ตามรายละเอียดในหัวข้อ 3.3.3.3.7 ได้ผลดังตาราง 4.24

จากตาราง 4.24 พบว่าในยางสกินสามารถตรวจพบรอยแตกแรกก่อนยางธรรมชาติเกรดอื่นที่ 12,000 รอบเท่านั้น ในขณะที่ยางธรรมชาติเกรดอื่น ๆ พบรอยแตกเริ่มแรกที่ 19,000 รอบ คือ ยาง STR 5CV 60, ADS และ STR 20 จึงเกิดรอยแตก ยางธรรมชาติเกรดอื่น ๆ พบรอยแตกที่ 22,000 รอบ แต่จะเห็นว่ายางสกินเมื่อเกิดรอยแตก รอยแตกนั้นจะขยายตัวเร็ว ต่างจากยางแผ่นรมควัน และยางเครพ เมื่อเกิดรอยแตก รอยแตกนั้นจะขยายตัวช้ากว่า

ตาราง 4.24 ระดับความรุนแรงของรอยแตกของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ

จำนวนรอบ	ระดับการเกิดรอยแตกของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ							
	STR 5L	STR 5CV 60	ADS	RSS No.3	STR 20	STR 20 CV 60	Crepe	Skim
3,000	0	0	0	0	0	0	0	0
6,000	0	0	0	0	0	0	0	0
9,000	0	0	0	0	0	0	0	0
12,000	0	0	0	0	0	0	0	1
15,000	0	0	0	0	0	0	0	1
18,000	0	0	0	0	0	0	0	1
19,000	0	1	1	0	1	0	0	2
21,000	0	1	1	1	1	0	0	2
22,000	1	2	2	1	1	1	1	2
24,000	1	2	2	1	1	1	1	2
25,000	2	2	2	1	2	1	1	3
27,000	2	2	2	1	2	1	1	3
30,000	2	2	2	1	2	1	1	3

4.3.8 สมบัติการเติบโตของรอยแตก

ทดสอบการเติบโตของรอยแตกตามมาตรฐาน ASTM D 813 นำชิ้นทดสอบมาเจาะรูตรงกลางยาว 2 มิลลิเมตร โดยเจาะให้ทะลุโดยเจาะเพียงครั้งเดียว ตรวจวัดรอยแตกปรับระยะห่างระหว่างที่จับเท่ากับ 65 มิลลิเมตร บันทึกจำนวนรอบเมื่อรอยแตกขยายตัวจาก 2 เป็น 4 มิลลิเมตร และจาก 4 เป็น 8 มิลลิเมตร ตามรายละเอียดในหัวข้อ 3.3.3.3.8 ได้ผลดังตาราง 4.25

จากตาราง 4.25 พบว่า ยางสกินจะมีการขยายตัวของรอยแตกเร็วที่สุดพิจารณาจากจำนวนรอบที่เกิดรอยแตก รองลงมาคือ ยางเครพ, STR 20CV60, STR 5CV60, STR 20, ยางแผ่นรมควัน และ STR 5L ตามลำดับ ยาง STR 5L จะมีการขยายตัวของรอยแตกช้าที่สุด

ตาราง 4.25 การขยายตัวของรอยแตกของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ

การขยายตัวของรอยแตก เกรดยาง	STR 5L	STR 5CV60	ADS	RSS No.3	STR 20	STR 20CV60	Crepe	Skim
2 - 4 mm	12,000	9,000	12,000	12,000	12,000	9,000	8,000	3,000
4 - 8 mm	66,000	48,000	48,000	48,000	38,000	38,000	38,000	20,000

4.3.9 สมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอ

ทดสอบการสึกหรอของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ ด้วยเครื่อง akron machine โดยนำตัวอย่างยางที่ได้จากการอัดเบ้าใส่ไปในเครื่องทดสอบหมุนให้ครบ 500 รอบแล้วนำตัวอย่างไปชั่งแล้วคำนวณหาปริมาตรยางที่หายไป จากปริมาตรที่หายไปนี้นำยางดังกล่าวไปเดิน running-in โดยมีจำนวนรอบเท่ากับที่แสดงในตาราง หลังจาก running-in แล้วนำยางไปชั่งแล้วนำไป test run เป็นจำนวน 5 ครั้ง ตามรายละเอียดในหัวข้อ 3.3.3.3.9 ได้ผลดังตาราง 4.26

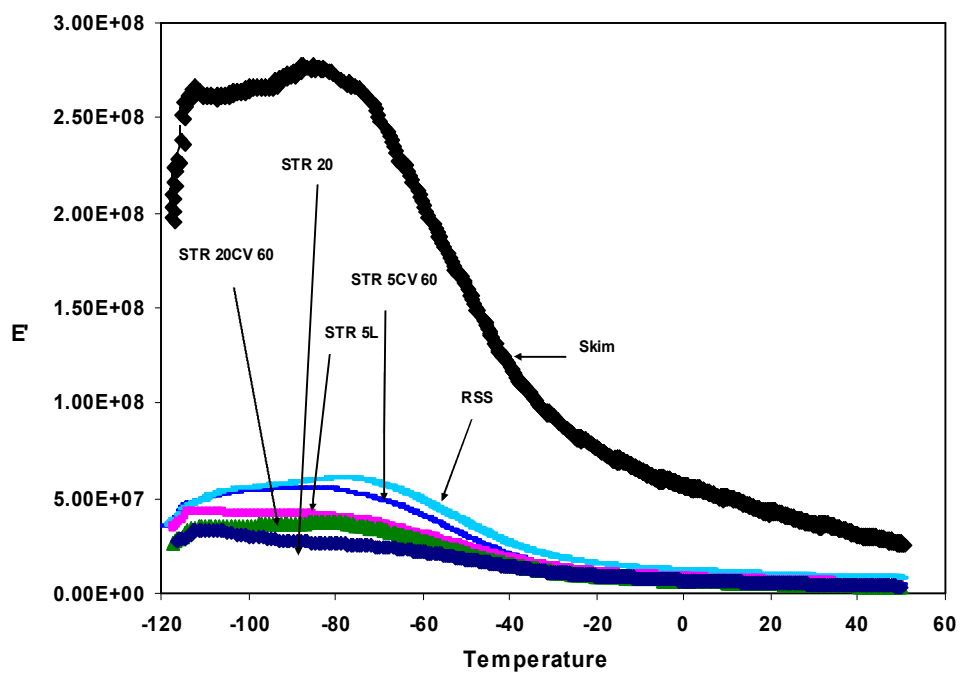
ค่าดัชนีการสึกหรอ (A.I.) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความทนต่อการขัดถูของยางยางที่มีค่า A.I. แสดงว่ายางชนิดนั้นมีความทนต่อการขัดถูดี ดังนั้นจากตาราง 4.26 พบว่ายางสกีมีค่า A.I. ต่ำสุด ยางแผ่นรมควันเป็นยางที่มีค่า A.I. สูงสุด จึงเป็นยางที่ทนต่อการขัดถูดี เป็นเหตุผลหนึ่งในกระบวนการผลิตยางรถจักรยานใช้ยางแผ่นรมควันเป็นวัตถุดิบ

ตาราง 4.26 ดัชนีความสึกหรอของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ

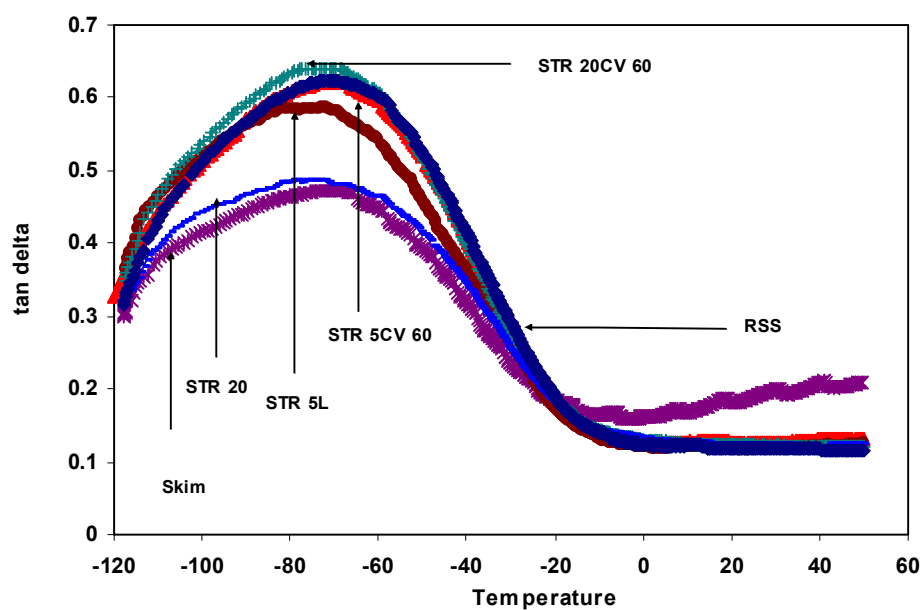
สมบัติ \ เกรดยาง	A.I.
STR 20	44.16
STR 20CV 60	41.55
RSS No. 3	79.43
STR 5L	61.91
STR 5CV60	59.86
ADS	70.96
Skim	31.42
Crepe	38.86

4.3.10 สมบัติทางพลวัต

ทดสอบสมบัติทางพลวัตของยางทั้ง 8 เกรดด้วยเครื่อง DMTA ตามรายละเอียดในหัวข้อ 3.3.3.3.11 ได้ผลดังตาราง 4.27 และภาพประกอบ 4.26 และ 4.27



ภาพประกอบ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสสะสม (E' , Pa) กับอุณหภูมิต่าง ๆ ที่ความถี่ 3.5 Hz



ภาพประกอบ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\tan \delta$ กับอุณหภูมิต่าง ๆ ที่ความถี่ 3.5 Hz

จากภาพประกอบ 4.26 และ 4.27 พบว่า ยางสกิมมีค่ามอดูลัสสะสมมากที่สุดสำหรับค่า $\text{Tan } \delta$ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสสูญเสียต่อมอดูลัสสะสม พบว่ายางเครพมีค่า $\text{Tan } \delta$ สูงสุด และยางสกิมมีค่า $\text{Tan } \delta$ ต่ำสุดบ่งบอกถึงความหนาแน่นของปริมาณพันธะเชื่อมโยงที่ทำให้โมเลกุลเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น จากตาราง 4.27 พบว่า T_g ของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ มีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก

ตาราง 4.27 อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ($^{\circ}\text{C}$) และ $\text{Tan } \delta$ ของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ

เกรดยาง สมบัติ	T_g ($^{\circ}\text{C}$)	$\text{Tan } \delta$
STR 20	-73.21	0.4869
STR 20CV 60	-75.93	0.6410
RSS No. 3	-72.21	0.6243
STR 5L	-72.12	0.5864
STR 5CV 60	-68.80	0.6221
ADS	-70.18	0.5289
Skim	-72.01	0.4729
Crepe	-65.17	0.7015

ในการวิจัยนี้ยางรองคอสะพานเป็นผลิตภัณฑ์ตัวอย่างที่เลือกผลิต จากผลการทดลองที่ได้ยางแผ่นรมควันชั้น 3 ที่มีคุณภาพดี มีค่าพลังงานกระตุ้นค่อนข้างต่ำและมีสมบัติทางฟิสิกส์ดี และยางสกิมที่มีสมบัติเด่นในด้านการทนต่อแรงดึง ทนต่อการฉีกขาด ราคาถูก แต่มีข้อด้อยเรื่องการทนต่อการถูกออกซิไดซ์มาใช้ จึงเลือกยางทั้งสองชนิดเป็นยางผสมเพื่อลดต้นทุน โดยจะต้องมีการทดลองหาสูตรและระบบวัลคาไนซ์ที่เหมาะสมเพื่อแก้ปัญหาข้อด้อยของยางสกิมเพื่อให้ได้ยางรองคอสะพานที่มีสมบัติตามมาตรฐาน ในหัวข้อต่อไป

4.4 ผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนเบลนด์ (blend) ของยางธรรมชาติที่มีราคาสูงและต่ำ ปริมาณกำมะถัน และสารตัวเร่งที่มีผลต่อลักษณะการวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงฟิสิกส์ของยางโดยใช้หลักสถิติที่เรียกว่า Response Surface Methodology (RSM) ในการออกสูตรยาง

การทดลองนี้ได้ใช้หลักสถิติที่เรียกว่า Response Surface Methodology (RSM) ในการออกสูตรยางเพื่ออธิบายผลของตัวแปรอิสระ 3 ตัว คือ อัตราส่วนยางแผ่นรมควันต่อยางสกีม ปริมาณกำมะถัน และปริมาณสารตัวเร่ง TBBS แต่ละตัวแปรจะแปรค่า 5 ระดับ ต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของยางและทำนายสูตรยางที่จะใช้เพื่อผลิตยางรองคอสพานให้ได้สมบัติตามที่ต้องการ จากตาราง 3.8 และ 3.9 หน้า 93 และ 93 ตามลำดับ ตามรายละเอียดในหัวข้อ 3.3.4 ได้ผลดังตาราง 4.28 และ 4.29

ตาราง 4.28 ลักษณะการวัดคาบไวนซ์ของยางทั้ง 20 สูตรที่อุณหภูมิการวัดคาบไวนซ์ 150 °C

สูตรที่	TS2 (min)	TC 90 (min)	M _H (dN.m)	M _L (dN.m)	M _H - M _L (dN.m)
1	2.01	4.26	9.18	0.35	8.83
2	2.16	4.11	5.69	0.23	5.46
3	1.44	4.33	13.48	0.31	13.17
4	1.51	4.09	12.34	0.29	12.05
5	1.56	9.26	9.81	0.25	9.56
6	1.52	4.31	11.11	0.30	10.81
7	1.31	4.23	16.26	0.27	15.99
8	1.38	3.35	16.04	0.30	15.74
9	1.40	8.04	12.81	0.33	12.48
10	1.50	3.37	12.36	0.33	12.03
11	2.23	5.21	7.26	0.26	7.00
12	1.36	3.22	15.36	0.32	15.04
13	2.28	6.26	8.80	0.45	8.35
14	1.43	6.28	14.82	0.37	14.45
15	1.46	4.17	12.68	0.35	12.33
16	1.51	3.28	12.04	0.41	11.63
17	1.47	3.49	12.65	0.39	12.26
18	1.45	4.39	12.85	0.42	12.43
19	1.47	3.22	12.07	0.35	11.72
20	1.49	3.27	12.21	0.37	11.84
\bar{X}	1.48	3.64	12.42	0.38	12.04
S.D.	0.02	0.51	0.35	0.03	0.34

ตาราง 4.29 สมบัติทางฟิสิกส์ของยางทั้ง 20 สูตร

สูตร	Tensile Strength (MPa)		Elongation at break (%)		Hardness (Shore A)		% Set
	ก่อนบ่มเร่ง	หลังบ่มเร่ง	ก่อนบ่มเร่ง	หลังบ่มเร่ง	ก่อนบ่มเร่ง	หลังบ่มเร่ง	
1	23.88	23.47	520	440	60	64	35
2	28.14	27.09	600	503	57	58	29
3	23.18	16.08	390	222	69	72	46
4	25.06	22.21	503	388	66	68	36
5	19.83	17.95	366	309	66	67	19
6	25.56	22.30	453	386	63	65	27
7	14.72	11.17	212	137	76	78	34
8	17.64	10.17	263	147	71	74	32
9	16.17	13.02	276	181	73	77	28
10	26.21	20.02	464	330	64	68	32
11	22.90	24.46	564	533	55	56	23
12	17.87	11.06	275	141	71	74	34
13	26.58	25.17	541	430	59	64	43
14	14.03	8.90	217	129	71	72	28
15	19.32	12.91	359	217	65	69	32
16	24.60	19.59	447	307	65	69	32
17	22.61	18.26	407	286	65	68	31
18	22.62	16.70	398	259	64	67	30
19	24.34	20.64	430	332	64	68	33
20	23.98	17.66	440	276	63	68	33
\bar{X}	22.91	17.63	414	280	64	68	32
S.D.	1.96	2.70	33	39	0.59	0.59	0.93

** ค่าเฉลี่ย (\bar{X}) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน(S.D.) เป็นค่าสำหรับข้อมูลในกลุ่มค่ากลาง คือ สูตรที่

15 ถึง 20

ตาราง 4.31 ผลรวมกับค่าจริงที่ใช้ในสมการ

T	A	B	C	A ²	B ²	C ²	AB	AC	BC	
1(2.01)	-1(2.01)	-1(2.01)	-1(2.01)	1(2.01)	1(2.01)	1(2.01)	1(2.01)	1(2.01)	1(2.01)	
1(2.16)	1(2.16)	-1(2.16)	-1(2.16)	1(2.16)	1(2.16)	1(2.16)	-1(2.16)	-1(2.16)	1(2.16)	
1(1.44)	-1(1.44)	1(1.44)	-1(1.44)	1(1.44)	1(1.44)	1(1.44)	-1(1.44)	1(1.44)	-1(1.44)	
1(1.51)	1(1.51)	1(1.51)	-1(1.51)	1(1.51)	1(1.51)	1(1.51)	1(1.51)	-1(1.51)	-1(1.51)	
1(1.56)	-1(1.56)	-1(1.56)	1(1.56)	1(1.56)	1(1.56)	1(1.56)	1(1.56)	-1(1.56)	-1(1.56)	
1(1.52)	1(1.52)	-1(1.52)	1(1.52)	1(1.52)	1(1.52)	1(1.52)	-1(1.52)	1(1.52)	-1(1.52)	
1(1.31)	-1(1.31)	1(1.31)	1(1.31)	1(1.31)	1(1.31)	1(1.31)	-1(1.31)	-1(1.31)	1(1.31)	
1(1.38)	1(1.38)	1(1.38)	1(1.38)	1(1.38)	1(1.38)	1(1.38)	1(1.38)	1(1.38)	1(1.38)	
1(1.40)	-1.682(1.40)	0(1.40)	0(1.40)	3(1.40)	0(1.40)	0(1.40)	0(1.40)	0(1.40)	0(1.40)	
1(1.50)	1.682(1.50)	0(1.50)	0(1.50)	3(1.50)	0(1.50)	0(1.50)	0(1.50)	0(1.50)	0(1.50)	
1(2.23)	0(2.23)	-1.682(2.23)	0(2.23)	0(2.23)	3(2.23)	0(2.23)	0(2.23)	0(2.23)	0(2.23)	
1(1.36)	0(1.36)	1.682(1.36)	0(1.36)	0(1.36)	3(1.36)	0(1.36)	0(1.36)	0(1.36)	0(1.36)	
1(2.28)	0(2.28)	0(2.28)	-1.682(2.28)	0(2.28)	0(2.28)	3(2.28)	0(2.28)	0(2.28)	0(2.28)	
1(1.43)	0(1.43)	0(1.43)	1.682(1.43)	0(1.43)	0(1.43)	3(1.43)	0(1.43)	0(1.43)	0(1.43)	
1(1.46)	0(1.46)	0(1.46)	0(1.46)	0(1.46)	0(1.46)	0(1.46)	0(1.46)	0(1.46)	0(1.46)	
1(1.51)	0(1.51)	0(1.51)	0(1.51)	0(1.51)	0(1.51)	0(1.51)	0(1.51)	0(1.51)	0(1.51)	
1(1.47)	0(1.47)	0(1.47)	0(1.47)	0(1.47)	0(1.47)	0(1.47)	0(1.47)	0(1.47)	0(1.47)	
1(1.45)	0(1.45)	0(1.45)	0(1.45)	0(1.45)	0(1.45)	0(1.45)	0(1.45)	0(1.45)	0(1.45)	
1(1.47)	0(1.47)	0(1.47)	0(1.47)	0(1.47)	0(1.47)	0(1.47)	0(1.47)	0(1.47)	0(1.47)	
1(1.49)	0(1.49)	0(1.49)	0(1.49)	0(1.49)	0(1.49)	0(1.49)	0(1.49)	0(1.49)	0(1.49)	
\bar{X}	31.94	0.42	-3.07	-2.78	21.09	23.05	23.39	0.03	-0.19	0.83

หมายเหตุ เมื่อ A คือ รหัสของตัวแปรอัตราส่วนยางแผ่นรมควันต่ออย่างสгим

B คือ รหัสของตัวแปรปริมาณกำมะถัน

C คือ รหัสของตัวแปรปริมาณสารตัวเร่ง TBBS

แทนค่าต่าง ๆ ที่คำนวณได้ในตาราง 4.31 ลงในสมการ 2.43 – 2.49 หน้า 54 -55

สำหรับการทดลองที่มี 3 ตัวแปร

$$b_0 = 0.1663402267(T) - 0.05679210581(A^2+B^2+C^2) \quad (2.43)$$

$$b_i = 0.0732233047(i) - 0.05679210581(A^2+B^2+C^2) \quad (2.44)$$

$$b_{ii} = 0.062500(ii) + 0.00689003779(A^2+B^2+C^2) - 0.05679210581(T) \quad (2.45)$$

$$b_{ij} = 0.125000(ij) \quad (2.46)$$

ดังนั้นจะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่าง scorch time กับอัตราส่วนยางแผ่นรมควันต่อยางสกิม ปริมาณกำมะถัน และปริมาณสารตัวเร่ง TBBS คือ

$$TS2 = 1.478 + 0.031(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM}) - 0.225(S) - 0.204(TBBS) - 0.03(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})^2 + 0.092(S)^2 + 0.113(TBBS)^2 + 0.004(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})(S) - 0.024(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})(TBBS) + 0.104(S)(TBBS)$$

สำหรับสมการความสัมพันธ์ของสมบัติต่าง ๆ สามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกัน ค่า $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{12}, b_{13}$ และ b_{23} ของสมการความสัมพันธ์ของสมบัติต่าง ๆ แสดงดังตาราง 4.32 และ 4.33

ตาราง 4.32 สัมประสิทธิ์ของตัวแปรของสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติการวัดคาโนซ์ กับอัตราส่วนยางแผ่นรมควันต่อยางสกิม ปริมาณกำมะถัน และปริมาณสารตัวเร่ง TBBS

	TS 2 (min)	TC 90(min)	M_L (dN.m)	M_H (dN.m)	$M_L - M_H$ (dN.m)
b_0	1.478	3.660	0.383	12.418	12.035
b_1	0.031	-1.031	-0.004	-0.315	-0.311
b_2	-0.225	-0.680	0.010	2.633	2.622
b_3	-0.204	0.322	-0.014	1.659	1.673
b_{11}	-0.030	0.571	-0.030	0.033	0.063
b_{22}	0.092	0.044	-0.044	-0.418	-0.374
b_{33}	0.113	0.771	-0.001	-0.241	-0.240
b_{12}	0.004	0.498	0.010	0.104	0.094
b_{13}	-0.024	-0.680	0.028	0.714	0.686
b_{23}	0.104	-0.755	0.000	0.054	0.054
S.E.(b_i)	0.005	0.138	0.008	0.095	0.092
S.E.(b_{ii})	0.005	0.134	0.008	0.092	0.089
S.E.(b_{ij})	0.007	0.181	0.011	0.124	0.120
S.D.	0.02	0.51	0.03	0.35	0.34

ตาราง 4.33 สัมประสิทธิ์ของตัวแปรของสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางฟิสิกส์กับ อัตราส่วนยางแผ่นรมควันต่อยางสกิน ปริมาณกำมะถัน และปริมาณสารตัวเร่ง TBBS

	Tensile Strength (MPa)		Elongation at break (%)		Hardness (Shore A)		% Set
	ก่อนบ่มเร่ง	หลังบ่มเร่ง	ก่อนบ่มเร่ง	หลังบ่มเร่ง	ก่อนบ่มเร่ง	หลังบ่มเร่ง	
b_0	22.850	17.567	412.828	278.800	64.304	68.156	31.951
b_1	2.320	1.821	47.399	41.436	-2.134	-2.329	-0.160
b_2	-1.850	-3.933	-77.364	-102.643	4.607	5.040	4.138
b_3	-3.194	-4.000	-92.488	-79.211	3.235	2.506	-4.202
b_{11}	-0.234	-0.024	-10.146	-3.160	1.572	1.383	-0.434
b_{22}	-0.519	0.415	7.590	25.637	-0.373	-1.092	-0.954
b_{33}	-0.547	0.158	-6.864	5.373	0.334	-0.032	1.343
b_{12}	-0.649	-0.355	-0.327	4.579	-0.250	0.000	-1.713
b_{13}	0.314	-0.800	-6.890	-17.751	-0.250	0.417	2.843
b_{23}	-1.156	-0.830	-14.728	-9.849	0.000	0.083	0.295
S.E.(b_i)	0.531	0.732	8.878	10.705	0.160	0.160	0.252
S.E.(b_{ij})	0.515	0.710	8.616	10.389	0.155	0.155	0.245
S.E.(b_{ij})	0.694	0.956	11.597	13.983	0.209	0.209	0.329
S.D.	1.96	2.70	32.76	39.50	0.59	0.59	0.93

จากตาราง 4.32 และ 4.33 พบว่าการใช้เทคนิค RSM ในการหาสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติต่าง ๆ กับอัตราส่วนยางแผ่นรมควันต่อยางสกิน ปริมาณกำมะถัน และปริมาณสารตัวเร่ง TBBS นั้น สามารถกระทำได้โดยใช้จำนวนการทดลองที่น้อยลงแต่ได้สมการที่มีความเชื่อถือได้อย่างมีความเชื่อมั่นทางสถิติ ซึ่งพิจารณาจากค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่า standard error (S.E.) ที่มีค่าต่ำ แต่จะมีสัมประสิทธิ์บางตัวที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่า S.E. ค่อนข้างสูง โดยเฉพาะค่าความต้านทานต่อการยืดที่ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (tensometer) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะความละเอียดของการวัดยังไม่ละเอียดเท่าที่ควร

นอกจากนี้จากค่าสัมประสิทธิ์ของสมการที่คำนวณได้นั้น พบว่าสำหรับแต่ละสมบัติที่ทำการศึกษานั้นจะมีผลกระทบจากปริมาณของอัตราส่วนยางแผ่นรมควันต่ออย่างสกิม ปริมาณกำมะถัน และปริมาณสารตัวเร่ง TBBS แตกต่างกันไป ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดสำหรับแต่ละสมบัติภายหลัง

จากการทดลอง สามารถสรุปสมการแสดงความสัมพันธ์ของสมบัติต่าง ๆ กับอัตราส่วนยางแผ่นรมควันต่ออย่างสกิม ปริมาณกำมะถัน และปริมาณสารตัวเร่ง TBBS ได้ดังนี้

สมบัติการวัลคาไนซ์

1. Minimum torque, M_L (dN.m)

$$M_L = 0.383 - 0.004(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM}) + 0.01(S) - 0.014(\text{TBBS}) - 0.03(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})^2 - 0.044(S)^2 - 0.001(\text{TBBS})^2 + 0.01(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})(S) + 0.028(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})(\text{TBBS}) \dots \dots \dots (4.1)$$

2. Maximum torque, M_H (dN.m)

$$M_H = 12.418 - 0.315(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM}) + 2.633(S) + 1.659(\text{TBBS}) + 0.033(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})^2 - 0.418(S)^2 - 0.241(\text{TBBS})^2 + 0.104(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})(S) + 0.714(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})(\text{TBBS}) + 0.054(S)(\text{TBBS}) \dots \dots \dots (4.2)$$

3. ค่าแรงบิดที่เพิ่มขึ้น, $M_H - M_L$ (dN.m)

$$M_H - M_L = 12.035 - 0.311(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM}) + 2.622(S) + 1.673(\text{TBBS}) + 0.063(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})^2 - 0.374(S)^2 - 0.24(\text{TBBS})^2 + 0.094(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})(S) + 0.686(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})(\text{TBBS}) + 0.054(S)(\text{TBBS}) \dots \dots \dots (4.3)$$

4. Scorch time, TS2 (min)

$$TS2 = 1.478 + 0.031(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM}) - 0.225(S) - 0.204(\text{TBBS}) - 0.03(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})^2 + 0.092(S)^2 + 0.113(\text{TBBS})^2 + 0.004(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})(S) - 0.024(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})(\text{TBBS}) + 0.104(S)(\text{TBBS}) \dots \dots \dots (4.4)$$

5. Cure time, TC90 (min)

$$TC90 = 3.66 - 1.031(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM}) - 0.68(S) + 0.322(\text{TBBS}) + 0.571(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})^2 + 0.044(S)^2 + 0.771(\text{TBBS})^2 + 0.498(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})(S) - 0.68(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})(\text{TBBS}) - 0.755(S)(\text{TBBS}) \dots \dots \dots (4.5)$$

สมบัติทางฟิสิกส์ก่อนบ่มเร่ง

1. Tensile strength, T.S. (MPa)

$$\text{T.S.} = 22.85 + 2.32(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM}) - 1.85(\text{S}) - 3.194(\text{TBBS}) - 0.234(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})^2 - 0.519(\text{S})^2 - 0.547(\text{TBBS})^2 - 0.649(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})(\text{S}) + 0.314(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})(\text{TBBS}) - 1.156(\text{S})(\text{TBBS}) \dots (4.6)$$

2. Elongation at break, E.B. (%)

$$\text{E.B.} = 412.828 + 47.399(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM}) - 77.364(\text{S}) - 92.488(\text{TBBS}) - 0.146(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})^2 + 7.59(\text{S})^2 - 6.864(\text{TBBS})^2 - 0.327(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})(\text{S}) - 6.89(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})(\text{TBBS}) - 14.728(\text{S})(\text{TBBS}) \dots (4.7)$$

3. Hardness (shore A)

$$\text{Hardness} = 64.304 - 2.134(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM}) + 4.607(\text{S}) + 3.235(\text{TBBS}) + 1.572(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})^2 - 0.373(\text{S})^2 + 0.334(\text{TBBS})^2 - 0.250(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})(\text{S}) - 0.250(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})(\text{TBBS}) \dots (4.8)$$

สมบัติทางฟิสิกส์หลังบ่มเร่ง

1. Tensile strength, T.S. (MPa)

$$\text{T.S.} = 17.567 + 1.821(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM}) - 3.933(\text{S}) - 4.0(\text{TBBS}) - 0.024(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})^2 + 0.415(\text{S})^2 + 0.158(\text{TBBS})^2 - 0.355(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})(\text{S}) - 0.8(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})(\text{TBBS}) - 0.83(\text{S})(\text{TBBS}) \dots (4.9)$$

2. Elongation at break, E.B. (%)

$$\text{E.B.} = 278.8 + 41.436(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM}) - 102.643(\text{S}) - 79.211(\text{TBBS}) - 3.160(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})^2 + 25.637(\text{S})^2 + 5.373(\text{TBBS})^2 + 4.579(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})(\text{S}) - 17.751(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})(\text{TBBS}) - 9.849(\text{S})(\text{TBBS}) \dots (4.10)$$

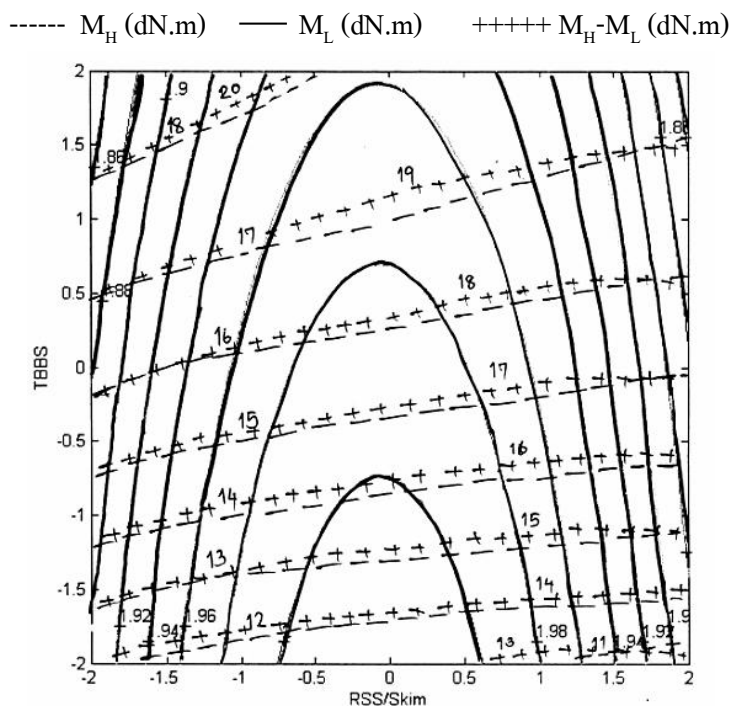
3. Hardness (shore A)

$$\text{Hardness} = 68.156 - 2.329(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM}) + 5.040(\text{S}) + 2.506(\text{TBBS}) + 1.383(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})^2 - 1.092(\text{S})^2 - 0.032(\text{TBBS})^2 + 0.417(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})(\text{TBBS}) + 0.083(\text{S})(\text{TBBS}) \dots (4.11)$$

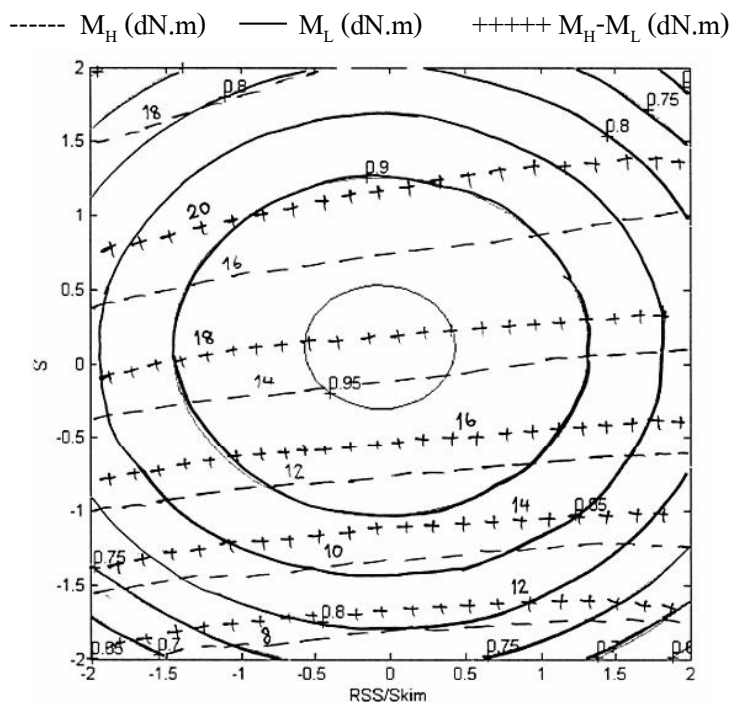
4. Compression set (%)

$$\text{Compression set} = 31.951 - 0.16(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM}) + 4.138(\text{S}) - 4.202(\text{TBBS}) - 0.434(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})^2 - 0.954(\text{S})^2 + 1.343(\text{TBBS})^2 - 1.713(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})(\text{S}) + 2.843(\text{อัตราส่วนยางRSS/SKIM})(\text{TBBS}) + 0.295(\text{S})(\text{TBBS}) \dots \dots \dots (4.12)$$

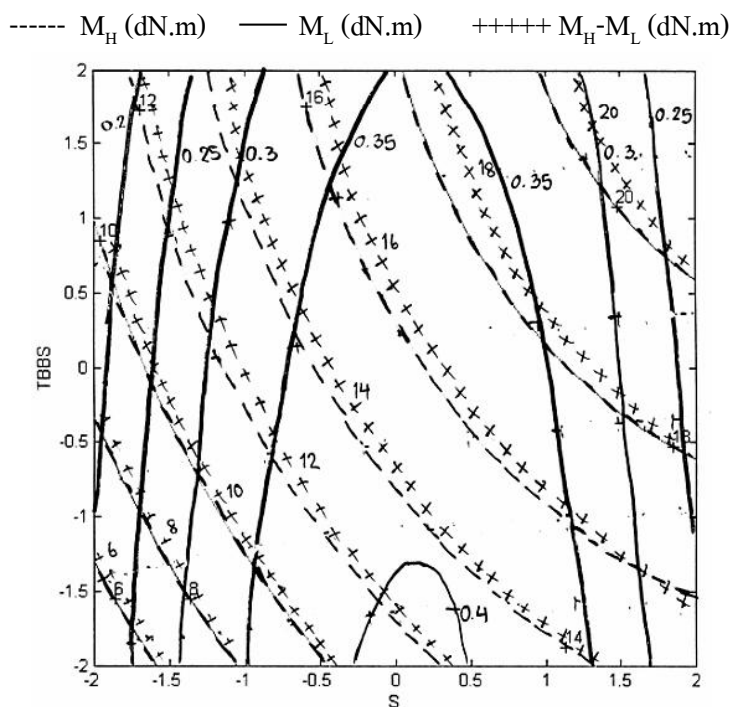
เมื่อแทนค่าด้วยรหัสของอัตราส่วนยางแผ่นรมควันต่อยางสกิม ปริมาณกำมะถัน และปริมาณสารตัวเร่ง TBBS ลงในสมการต่าง ๆ แล้วนำค่าของสมบัติที่ได้เหล่านั้นไปสร้างกราฟคอนทัวร์ ซึ่งจากการทดลองมีตัวแปร 3 ตัวแปรทำให้กราฟคอนทัวร์ที่ได้มีลักษณะเป็น 3 มิติ ซึ่งยากต่อความเข้าใจ ดังนั้นในการทดลองนี้จึงสร้างกราฟคอนทัวร์เป็น 2 มิติธรรมดา โดยการแปรปริมาณตัวแปร 2 ตัวแปรพร้อมกัน แล้วกำหนดให้ตัวแปรที่เหลือมีปริมาณคงที่ที่ค่ากลาง (รหัส 0) ส่วนระดับสูงสุดและต่ำสุดดูรายละเอียดได้ที่ภาคผนวก ค. หน้า 197 ซึ่งในการทดลองได้อาศัยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ คือ โปรแกรม MATLAB 6.1 ในการสร้างกราฟคอนทัวร์ ได้กราฟคอนทัวร์ของสมบัติ M_H , M_L และ $M_H - M_L$ ดังภาพประกอบ 4.28 ถึง 4.30



ภาพประกอบ 4.28 อิทธิพลของอัตราส่วนยาง RSS/SKIM และสารตัวเร่ง TBBS ต่อค่าแรงบิดเมื่อกำมะถัน เท่ากับ 1.50 (รหัส 0)



ภาพประกอบ 4.29 อิทธิพลของกำมะถันและอัตราส่วนยาง RSS/SKIM ต่อค่าแรงบิดเมื่อสารตัวเร่ง TBBS เท่ากับ 2.88 (รหัส 0)



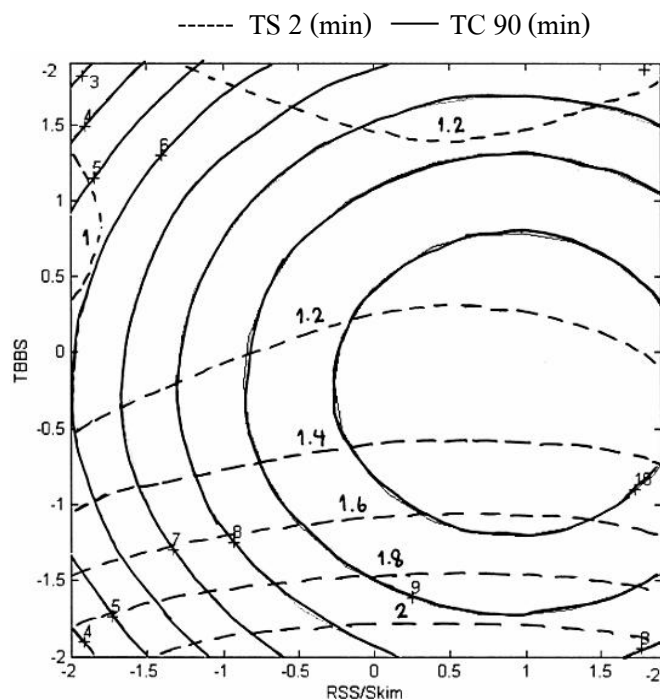
ภาพประกอบ 4.30 อิทธิพลของกำมะถันและสารตัวเร่ง TBBS ต่อค่าแรงบิดเมื่ออัตราส่วนยาง RSS/SKIM เท่ากับ 2.12 (รหัส 0)

จากภาพประกอบ 4.28 ถึง 4.30 และสมการที่ 4.1 พบว่าสารตัวเร่ง TBBS มีอิทธิพลต่อค่าแรงบิดต่ำสุด (M_L) มากที่สุด รองลงมาคือ กำมะถัน และอัตราส่วนยาง RSS/SKIM ตามลำดับ โดยที่สารตัวเร่ง TBBS มีอิทธิพลมากกว่ากำมะถัน และอัตราส่วนยาง RSS/SKIM ประมาณ 1.4 และ 3.5 เท่า ตามลำดับ ขณะที่กำมะถันจะมีอิทธิพลมากกว่าอัตราส่วนยาง RSS/SKIM ประมาณ 2.5 เท่า จากภาพประกอบ 4.28 เมื่อปริมาณกำมะถันและ TBBS เพิ่มขึ้น โดยให้อัตราส่วนของยางแผ่นรมควันต่อยางสกิมมีค่าคงที่ ค่าแรงบิดต่ำสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณกำมะถันและ TBBS ทำให้ยางเริ่มเกิดการวัลคาไนซ์เกิดพันธะเชื่อมโยงมากขึ้น ยางจึงมีความแข็งจะมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าแรงบิดต่ำสุดจึงมีค่าเพิ่มขึ้น และที่ค่ากลาง (อัตราส่วนยาง RSS/SKIM เท่ากับ 2.12 ปริมาณกำมะถัน เท่ากับ 1.50 phr และปริมาณสารตัวเร่ง TBBS เท่ากับ 2.88 phr) ค่าแรงบิดต่ำสุดมีค่าประมาณ 0.38 dN.m

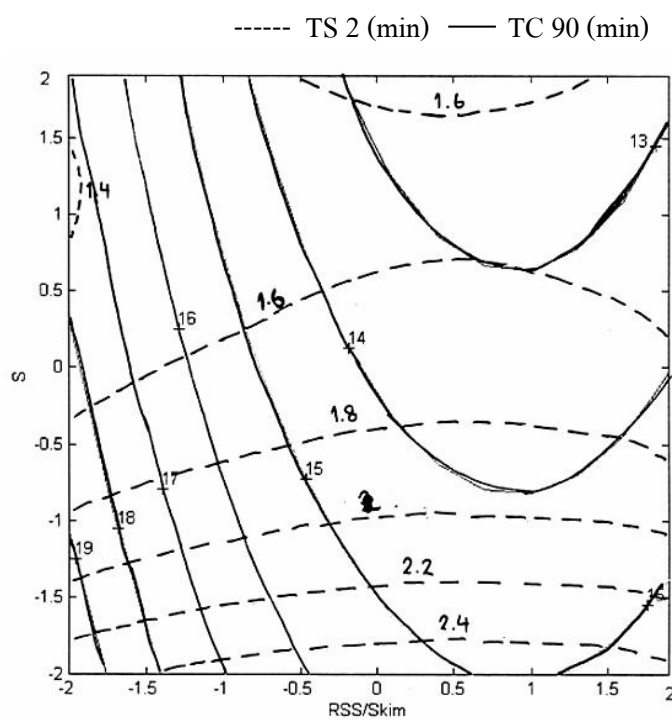
จากภาพประกอบ 4.28 ถึง 4.30 และสมการที่ 4.2 พบว่ากำมะถันมีอิทธิพลต่อค่าแรงบิดสูงสุด (M_H) มากที่สุด รองลงมาคือสารตัวเร่ง TBBS และอัตราส่วนยาง RSS/SKIM ตามลำดับ โดยที่กำมะถันมีอิทธิพลมากกว่าสารตัวเร่ง TBBS และอัตราส่วนยาง RSS/SKIM ประมาณ 1.6 และ 2 เท่า ตามลำดับ ขณะที่สารตัวเร่ง TBBS จะมีอิทธิพลมากกว่าอัตราส่วนยาง RSS/SKIM ประมาณ 5 เท่า จากภาพประกอบ 4.29 จะเห็นว่าค่าแรงบิดสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของยางแผ่นรมควันต่อยางสกิมลดลง โดยให้กำมะถันมีค่าคงที่ เนื่องมาจากเมื่ออัตราส่วนของยางแผ่นรมควันต่อยางสกิมลดลง หรือปริมาณของยางสกิมมากขึ้น ทำให้ค่าความแข็งจะมีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่าแรงบิดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น และที่ค่ากลางค่าแรงบิดสูงสุดมีค่าประมาณ 12.42 dN.m

จากภาพประกอบ 4.28 ถึง 4.30 และสมการที่ 4.3 พบว่ากำมะถันมีอิทธิพลต่อค่าแรงบิดที่เพิ่มขึ้น ($M_H - M_L$) มากที่สุด รองลงมาคือสารตัวเร่ง TBBS และอัตราส่วนยาง RSS/SKIM ตามลำดับ โดยที่กำมะถันมีอิทธิพลมากกว่าสารตัวเร่ง TBBS และอัตราส่วนยาง RSS/SKIM ประมาณ 1.6 และ 8 เท่า ตามลำดับ ขณะที่สารตัวเร่ง TBBS จะมีอิทธิพลมากกว่าอัตราส่วนยาง RSS/SKIM ประมาณ 5 เท่า และที่ค่ากลางค่าแรงบิดที่เพิ่มขึ้นมีค่าประมาณ 12.04 dN.m

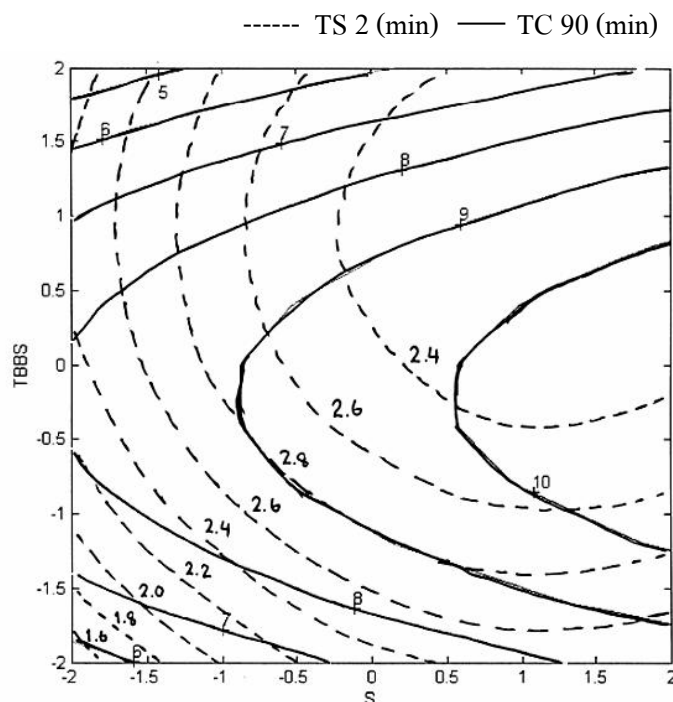
อิทธิพลของอัตราส่วนยางแผ่นรมควันต่อยางสกิม ปริมาณกำมะถัน และปริมาณสารตัวเร่ง TBBS ต่อค่า scorch time, cure time แสดงดังสมการที่ 4.4 และ 4.5 และภาพประกอบ 4.31 ถึง 4.33



ภาพประกอบ 4.31 อิทธิพลของอัตราส่วนยาง RSS/SKIM และ สารตัวเร่ง TBBS ต่อค่า scorch time และค่า cure time เมื่อกำมะถัน เท่ากับ 1.50 (รหัส 0)



ภาพประกอบ 4.32 อิทธิพลของกำมะถันและอัตราส่วนยาง RSS/SKIM ต่อค่า scorch time และค่า cure time เมื่อสารตัวเร่ง TBBS เท่ากับ 2.88 (รหัส 0)

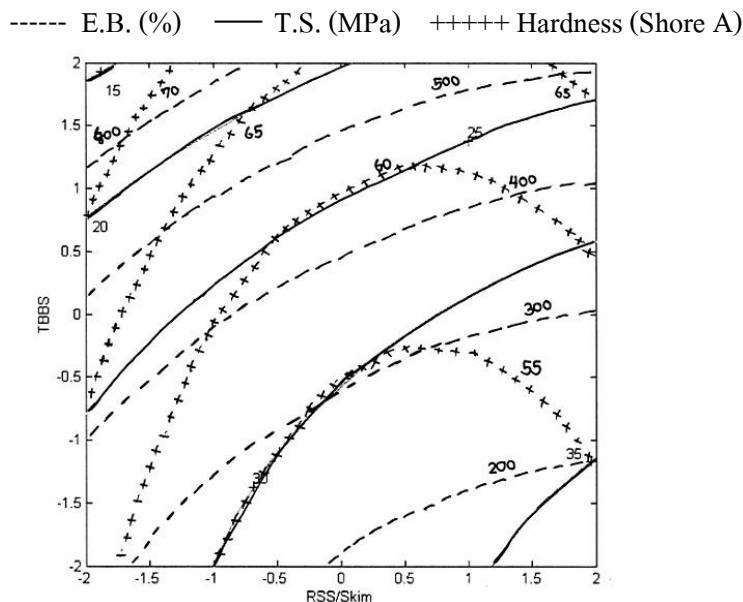


ภาพประกอบ 4.33 อิทธิพลของกำมะถันและสารตัวเร่ง TBBS ต่อค่า scorch time และค่า cure time เมื่ออัตราส่วนยาง RSS/SKIM เท่ากับ 2.12 (รหัส 0)

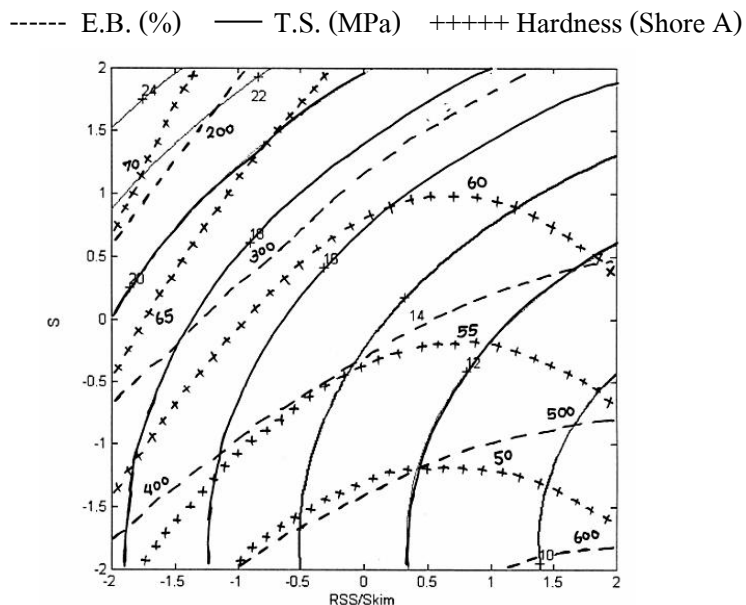
จากภาพประกอบ 4.31 ถึง 4.33 และสมการที่ 4.4 พบว่ากำมะถันมีอิทธิพลต่อค่า scorch time มากที่สุด รองลงมาคือสารตัวเร่ง TBBS และอัตราส่วนยาง RSS/SKIM ตามลำดับ โดยที่กำมะถันมีอิทธิพลมากกว่าสารตัวเร่ง TBBS และอัตราส่วนยาง RSS/SKIM ประมาณ 1 และ 7 เท่าตามลำดับ ขณะที่สารตัวเร่ง TBBS จะมีอิทธิพลมากกว่าอัตราส่วนยาง RSS/SKIM ประมาณ 6 เท่า จากภาพประกอบ 4.31 และ 4.33 เมื่อเพิ่มปริมาณ TBBS จะทำให้ scorch time ยาวขึ้น เนื่องจาก TBBS เป็นสารตัวเร่งในกลุ่มซัลฟิनाไมด์ โดยเมื่อได้รับความร้อนจะแตกตัวออกให้ MBT และเบสออกมา ซึ่งช่วงเวลาในการแตกตัวนี้จะทำให้ยางมี scorch time ยาวขึ้น และที่ค่ากลาง scorch time มีค่าประมาณ 1.49 นาที

จากภาพประกอบ 4.31 ถึง 4.33 และสมการที่ 4.5 พบว่าอัตราส่วนยาง RSS/SKIM มีอิทธิพลต่อค่า cure time มากที่สุด รองลงมาคือกำมะถันและสารตัวเร่ง TBBS ตามลำดับ โดยที่อัตราส่วนยาง RSS/SKIM มีอิทธิพลมากกว่ากำมะถันและสารตัวเร่ง TBBS ประมาณ 1.5 และ 3 เท่าตามลำดับ ขณะที่กำมะถันจะมีอิทธิพลมากกว่าสารตัวเร่ง TBBS ประมาณ 2 เท่า จากภาพประกอบ 4.31 พบว่า cure time จะมีค่าสั้นลงเมื่อปริมาณกำมะถันเพิ่มขึ้น และที่ค่ากลาง cure time มีค่าประมาณ 3.27 นาที

อิทธิพลของอัตราส่วนยางแผ่นรมควันต่ออย่างสกิน ปริมาณกำมะถัน และปริมาณสารตัวเร่ง TBBS ต่อค่า elongation at break, tensile strength และค่า hardness ก่อนบ่มเร่ง แสดงดังสมการที่ 4.6 และ 4.8 และภาพประกอบ 4.34 ถึง 4.36

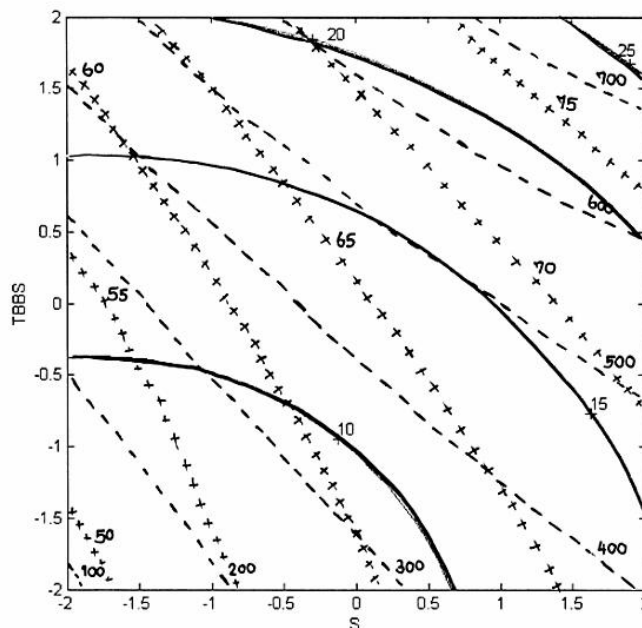


ภาพประกอบ 4.34 อิทธิพลของอัตราส่วนยาง RSS/SKIM และสารตัวเร่ง TBBS ต่อค่า elongation at break, tensile strength และค่า hardness เมื่อกำมะถัน เท่ากับ 1.50 (รหัส 0)



ภาพประกอบ 4.35 อิทธิพลของกำมะถันและอัตราส่วนยาง RSS/SKIM ต่อค่า elongation at break, tensile strength และค่า hardness เมื่อสารตัวเร่ง TBBS เท่ากับ 2.88 (รหัส 0)

----- E.B. (%) — T.S. (MPa) ++++++ Hardness (Shore A)



ภาพประกอบ 4.36 อิทธิพลของกำมะถันและสารตัวเร่ง TBBS ต่อค่า elongation at break, tensile strength และค่า hardness เมื่ออัตราส่วนยาง RSS/SKIM เท่ากับ 2.12 (รหัส 0)

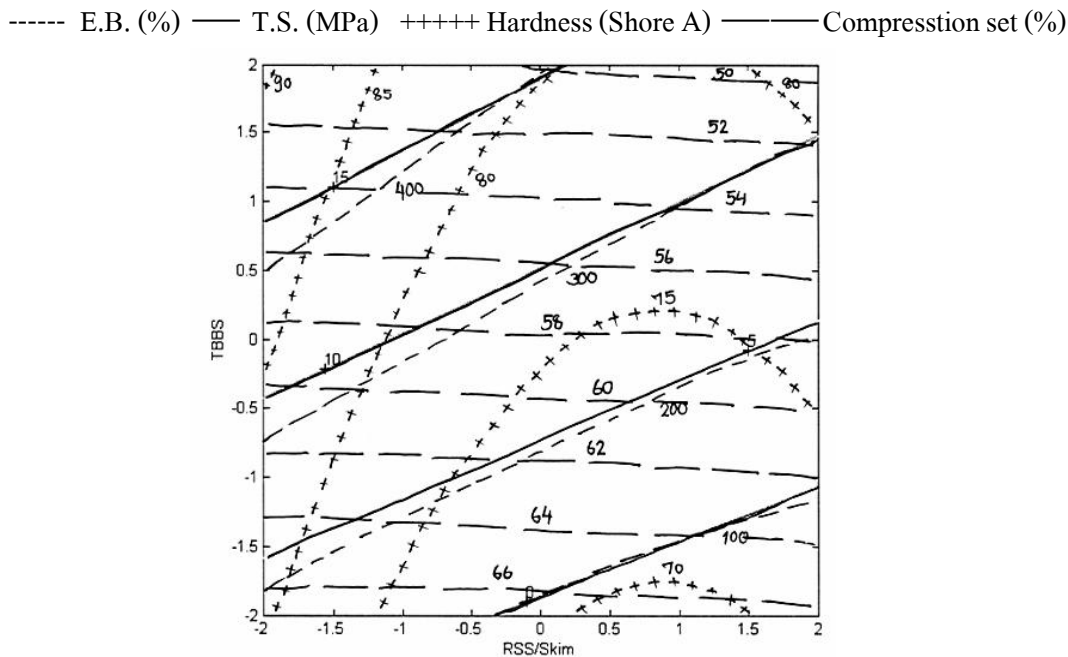
จากภาพประกอบ 4.34 ถึง 4.36 และสมการที่ 4.6 พบว่าสารตัวเร่ง TBBS มีอิทธิพลต่อค่า tensile strength มากที่สุด รองลงมาคืออัตราส่วนยาง RSS/SKIM และกำมะถันตามลำดับ โดยที่สารตัวเร่ง TBBS มีอิทธิพลมากกว่าอัตราส่วนยาง RSS/SKIM และกำมะถันประมาณ 1.4 และ 1.7 เท่า ตามลำดับ ขณะที่อัตราส่วนยาง RSS/SKIM จะมีอิทธิพลมากกว่ากำมะถันประมาณ 1.2 เท่า จากภาพประกอบ 4.34 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ TBBS โดยที่ปริมาณกำมะถันคงที่ ทำให้ค่า tensile strength มีค่าสูงขึ้น อาจเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณ TBBS ทำให้เกิดปริมาณพันธะเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางเพิ่มขึ้น ค่า tensile strength จะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถัน (จากภาพประกอบ 4.36) จนถึงที่ปริมาณกำมะถันประมาณเท่ากับ 1 ค่า tensile strength จะลดลง อาจเนื่องจากเมื่อกำมะถันปริมาณมากขึ้นที่มีความแข็งมากขึ้นทำให้ยางเปราะขาดง่าย จึงทำให้ค่า tensile strength ลดลง และที่ค่ากลางค่า tensile strength ก่อนบ่มเร่งมีค่าประมาณ 22.91 MPa

จากภาพประกอบ 4.34 ถึง 4.36 และสมการที่ 4.7 พบว่าสารตัวเร่ง TBBS มีอิทธิพลต่อค่า elongation at break มากที่สุด รองลงมาคือ กำมะถันและอัตราส่วนยาง RSS/SKIM ตามลำดับ โดยที่สารตัวเร่ง TBBS มีอิทธิพลมากกว่า กำมะถันและอัตราส่วนยาง RSS/SKIM ประมาณ 1.2 และ 2 เท่า ตามลำดับ ขณะที่กำมะถันจะมีอิทธิพลมากกว่าอัตราส่วนยาง RSS/SKIM

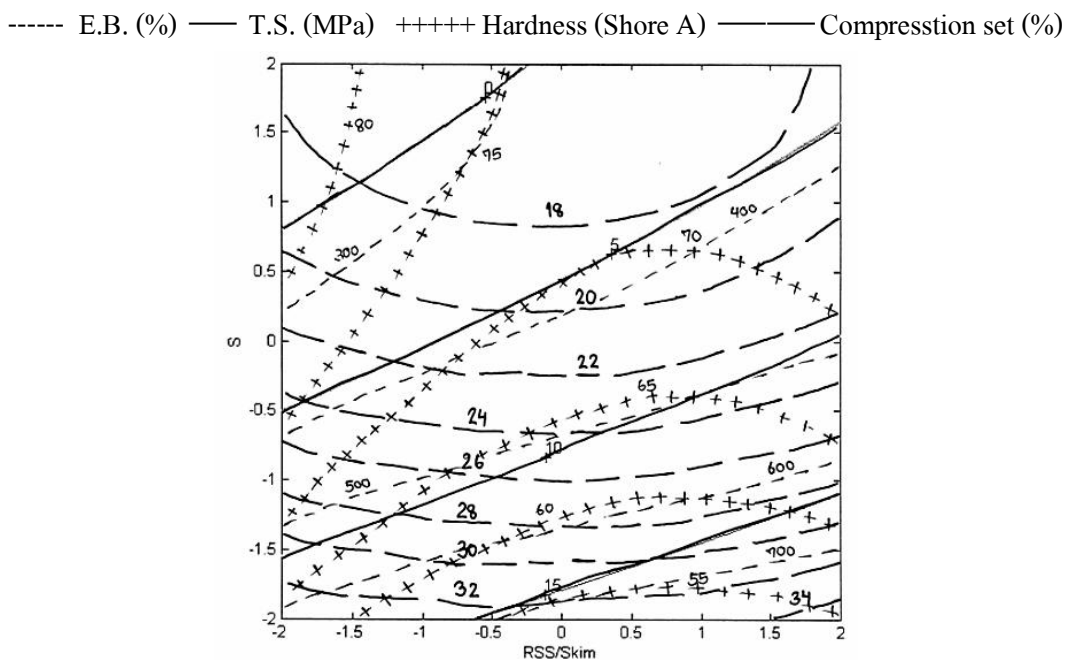
ประมาณ 1.6 เท่า จากภาพประกอบ 4.36 พบว่าค่า elongation at break จะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของยางแผ่นรมควันต่อยางสกีมลดลง โดยให้กำมะถันมีค่าคงที่ เนื่องจากยางสกีมจะมีปริมาณไนโตรเจนสูงกว่ายางทั่วไปทำให้ค่าความแข็งสูงกว่ายางแผ่นรมควัน ดังนั้นในสูตรยางคอมปาวด์ที่ใช้ปริมาณยางสกีมในสัดส่วนที่มากกว่ายางแผ่นรมควัน ค่า elongation at break จึงมีค่าต่ำกว่าสูตรยางคอมปาวด์ที่ใช้ปริมาณยางแผ่นรมควันในสัดส่วนที่มากกว่ายางสกีม และยางจะมีค่า elongation at break ต่ำลงเมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถันและ TBBS เนื่องจากการเพิ่มปริมาณกำมะถันและสารตัวเร่งทำให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น ปริมาณพันธะเชื่อมโยงก็เกิดเพิ่มขึ้น ทำให้ยางขาดความยืดหยุ่น ขาดง่ายเมื่อยืด จึงทำให้ค่า elongation at break ต่ำลง และที่ค่ากลางค่า elongation at break ก่อนบ่มเร่งมีค่าประมาณ 414 %

จากภาพประกอบ 4.34 ถึง 4.36 และสมการที่ 4.8 พบว่ากำมะถันมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งมากที่สุด รองลงมาคือสารตัวเร่ง TBBS และอัตราส่วนของ RSS/SKIM ตามลำดับ โดยที่กำมะถันมีอิทธิพลมากกว่าสารตัวเร่ง TBBS และอัตราส่วนของ RSS/SKIM ประมาณ 1.4 และ 2 เท่า ตามลำดับ ขณะที่สารตัวเร่ง TBBS จะมีอิทธิพลมากกว่าอัตราส่วนของ RSS/SKIM ประมาณ 1.5 เท่า จากภาพประกอบ 4.35 พบว่าค่าความแข็งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของยางแผ่นรมควันต่อยางสกีมเพิ่มขึ้น โดยให้ TBBS มีค่าคงที่ เนื่องจากยางสกีมจะมีปริมาณไนโตรเจนสูงกว่ายางทั่วไปทำให้ค่าความแข็งสูงกว่ายางแผ่นรมควัน และจากภาพประกอบ 4.36 การเพิ่มปริมาณกำมะถันและ TBBS จะทำให้ค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณกำมะถันและสารตัวเร่งทำให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น ปริมาณพันธะเชื่อมโยงก็เกิดเพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่าความแข็งของยางมีค่าเพิ่มขึ้น และที่ค่ากลางค่าความแข็งก่อนบ่มเร่งมีค่าประมาณ 64 shore A

อิทธิพลของอัตราส่วนของยางแผ่นรมควันต่อยางสกีม ปริมาณกำมะถัน และปริมาณสารตัวเร่ง TBBS ต่อค่า elongation at break, tensile strength, compression set และค่า hardness หลังบ่มเร่ง แสดงดังสมการที่ 4.9 และ 4.12 และภาพประกอบ 4.37 ถึง 4.39

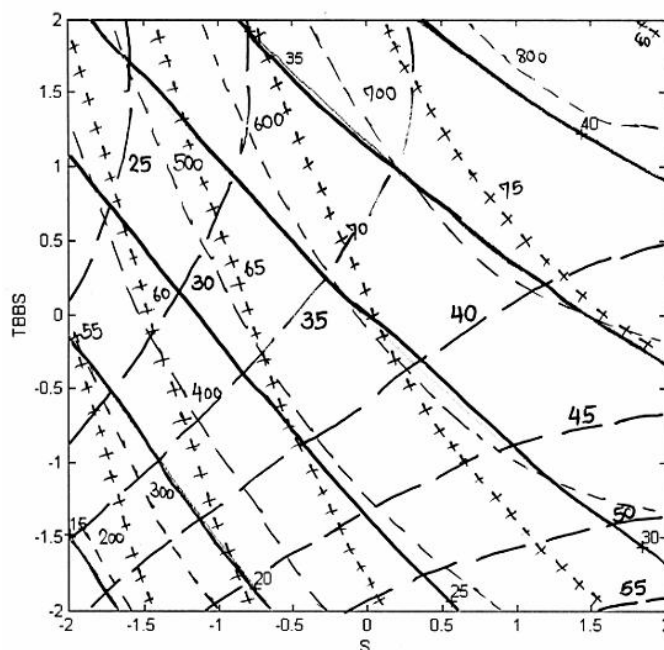


ภาพประกอบ 4.37 อิทธิพลของอัตราส่วนยาง RSS/SKIM และสารตัวเร่ง TBBS ต่อค่า elongation at break, tensile strength, compression set และค่า hardness เมื่อกำมะถันเท่ากับ 1.50 (รหัส 0)



ภาพประกอบ 4.38 อิทธิพลของอัตราส่วนยาง RSS/SKIM และกำมะถันต่อค่า elongation at break, tensile strength, compression set และค่า hardness เมื่อสารตัวเร่ง TBBS เท่ากับ 2.88 (รหัส 0)

----- E.B. (%) — T.S. (MPa) +++++ Hardness (Shore A) ——— Compression set (%)



ภาพประกอบ 4.39 อิทธิพลของกำมะถันและสารตัวเร่ง TBBS ต่อค่า elongation at break, tensile strength, compression set และค่า hardness เมื่ออัตราส่วนของ RSS/SKIM เท่ากับ 2.12 (รหัส 0)

จากภาพประกอบ 4.37 ถึง 4.39 และสมการที่ 4.9 พบว่าสารตัวเร่ง TBBS มีอิทธิพลต่อค่า tensile strength มากที่สุด รองลงมาคือ กำมะถันและอัตราส่วนของ RSS/SKIM ตามลำดับ โดยที่สารตัวเร่ง TBBS มีอิทธิพลมากกว่ากำมะถันและอัตราส่วนของ RSS/SKIM ประมาณ 1 และ 2.2 เท่า ตามลำดับ ขณะที่กำมะถันจะมีอิทธิพลมากกว่าอัตราส่วนของ RSS/SKIM ประมาณ 2.2 เท่า ค่า tensile strength หลังบ่มเร่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของยางแผ่นรมควันต่อยางสกิมเพิ่มขึ้น (จากภาพประกอบ 4.37) อาจเนื่องมาจากยางแผ่นรมควันเป็นยางที่มีค่า PRI สูงสุด (จากตาราง 4.1) จึงเป็นยางที่ทนต่อการถูกออกซิไดซ์ดีกว่ายางสกิม เนื่องจากสารฟีนอลิกในยางแผ่นรมควันช่วยป้องกันการถูกออกซิไดซ์ จากภาพประกอบ 4.39 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ TBBS โดยที่อัตราส่วนของ RSS/SKIM มีค่าคงที่ ค่า tensile strength หลังบ่มเร่งจะมีค่าลดลง เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ TBBS ทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงมากขึ้น และอาจเกิดพันธะได้มากขึ้น เมื่อได้รับความร้อนซึ่งจะทำให้ tensile strength ตกลง เนื่องจากเกินจุดสูงสุดของค่า tensile strength จึงทำให้ค่า tensile strength จะมีค่าลดลง และที่ค่ากลางค่า tensile strength หลังบ่มเร่งมีค่าประมาณ 17.63 MPa

จากภาพประกอบ 4.37 ถึง 4.39 และสมการที่ 4.10 พบว่ากำมะถัน มีอิทธิพลต่อค่า elongation at break มากที่สุด รองลงมาคือ สารตัวเร่ง TBBS และอัตราส่วนยาง RSS/SKIM ตามลำดับ โดยที่กำมะถัน มีอิทธิพลมากกว่าสารตัวเร่ง TBBS และอัตราส่วนยาง RSS/SKIM ประมาณ 1.3 และ 2.5 เท่า ตามลำดับ ขณะที่สารตัวเร่ง TBBS จะมีอิทธิพลมากกว่าอัตราส่วนยาง RSS/SKIM ประมาณ 2 เท่า เมื่อให้ปริมาณกำมะถันคงที่ (ภาพประกอบ 4.37) การเพิ่มปริมาณ TBBS และอัตราส่วนยาง RSS/SKIM จะมีแนวโน้มของค่า elongation at break หลังบ่มเร่งที่ลดลง เมื่อให้ปริมาณ TBBS คงที่ (ภาพประกอบ 4.38) การเพิ่มปริมาณกำมะถัน จะมีแนวโน้มของค่า elongation at break หลังบ่มเร่งที่ลดลงเช่นเดียวกันกับการเพิ่มปริมาณ TBBS และอัตราส่วนยาง RSS/SKIM เมื่อให้ปริมาณกำมะถันคงที่ และที่ค่ากลางค่า elongation at break หลังบ่มเร่งมีค่าประมาณ 280%

จากภาพประกอบ 4.37 ถึง 4.39 และสมการที่ 4.11 พบว่ากำมะถันมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งมากที่สุด รองลงมาคือ สารตัวเร่ง TBBS และอัตราส่วนยาง RSS/SKIM ตามลำดับ โดยที่กำมะถัน มีอิทธิพลมากกว่าสารตัวเร่ง TBBS และอัตราส่วนยาง RSS/SKIM ประมาณ 2 และ 2.2 เท่า ตามลำดับ ขณะที่สารตัวเร่ง TBBS จะมีอิทธิพลมากกว่าอัตราส่วนยาง RSS/SKIM ประมาณ 1 เท่า จากภาพประกอบ 4.38 จะเห็นว่าเมื่ออัตราส่วนของยางแผ่นรมควันต่อยางสกิมลดลงโดยให้ TBBS มีค่าคงที่ จะทำให้ค่าความแข็งจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากยางสกิมจะมีปริมาณในโตรเจนสูงกว่ายางเกรดอื่น ๆ ดังนั้นในสูตรยางคอมปาวด์ที่ใช้ยางสกิมในอัตราส่วนที่มากกว่ายางแผ่นรมควัน ค่าความแข็งจะสูงกว่าสูตรยางคอมปาวด์ที่ใช้ยางสกิมในอัตราส่วนที่น้อยกว่ายางแผ่นรมควัน และจะเห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถันและ TBBS โดยให้อัตราส่วนยาง RSS/SKIM มีค่าคงที่ (ภาพประกอบ 4.39) ค่าความแข็งจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถันและ TBBS ทำให้มีปริมาณพันธะเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น และที่ค่ากลางค่าความแข็งหลังบ่มเร่งมีค่าประมาณ 68 Shore A

จากภาพประกอบ 4.37 ถึง 4.39 และสมการที่ 4.12 พบว่าสารตัวเร่ง TBBS มีอิทธิพลต่อค่า compression set มากที่สุด รองลงมาคือ กำมะถันและอัตราส่วนยาง RSS/SKIM ตามลำดับ โดยที่สารตัวเร่ง TBBS มีอิทธิพลมากกว่า กำมะถันและอัตราส่วนยาง RSS/SKIM ประมาณ 1 และ 26 เท่า ตามลำดับ ขณะที่กำมะถันจะมีอิทธิพลมากกว่าอัตราส่วนยาง RSS/SKIM ประมาณ 26 เท่า จากภาพประกอบ 4.38 เมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถัน โดยให้ TBBS มีปริมาณคงที่ ทำให้ค่า compression set มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณกำมะถันทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงแบบ polysulfidic มาก เมื่อได้รับความร้อนก็จะแตกตัวได้ง่ายการคืนตัวลดลง หรือการผิครูปมากขึ้น ค่า compression set จึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากภาพประกอบ 4.39 เมื่อเพิ่มปริมาณ TBBS โดยให้อัตราส่วนยาง RSS/SKIM มีปริมาณคงที่ ทำให้ค่า compression set มีค่าลดลง เนื่องจากการเพิ่ม

ปริมาณสารตัวเร่งเป็นการเพิ่มปริมาณพันธะเชื่อมโยงให้มากขึ้น การผิครูปจึงน้อยลง และที่ค่ากลาง ค่า compression set หลังบ่มเร่งมีค่าประมาณ 32%

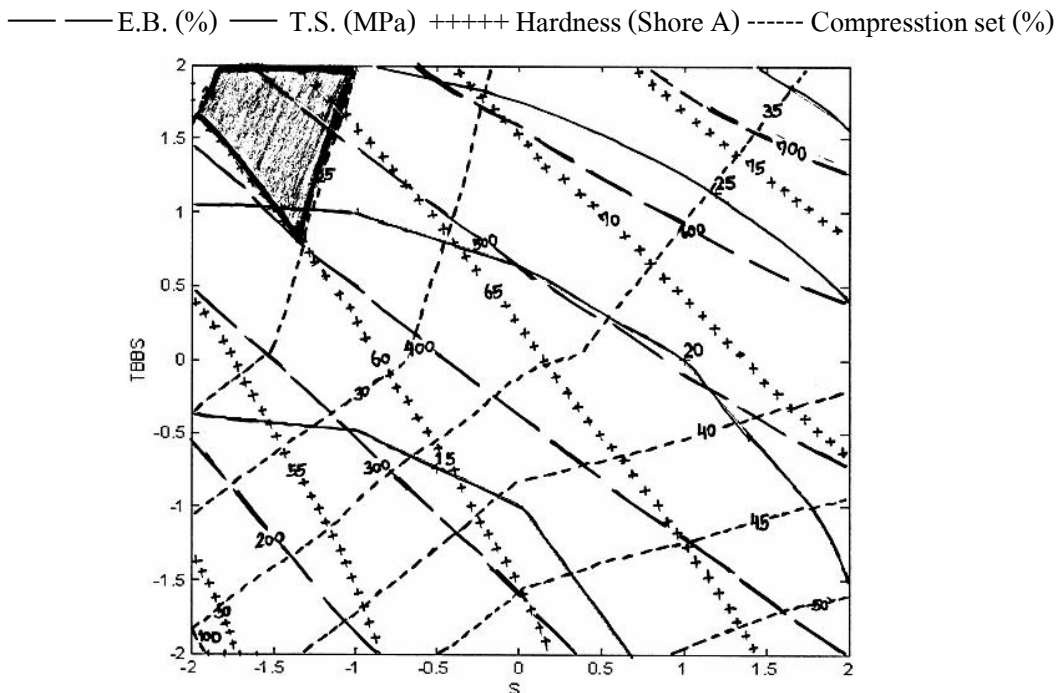
สมบัติการทนต่อโอโซน

ทดสอบความต้านทานต่อโอโซนของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ ด้วยเครื่อง ozone aging tester ตามรายละเอียดในหัวข้อ 3.3.3.3.10 ได้ผลแสดงในภาคผนวก ข ดังภาพประกอบ ข.1 ถึง ข.5 หน้า 189 - 191

จากภาพประกอบ ข.1 ถึง ข.5 จะเห็นว่ายางทั้ง 20 ตรวจไม่พบรอยแตก อาจเนื่องจากในสูตรที่ใช้ในการทดลองมีการใช้ปริมาณ paraffin wax ซึ่งเป็นสารแอนตี้โอโซนเนนซ์ ในปริมาณที่มากพอจึงป้องกันยางไม่ให้เกิดรอยแตกได้

จากกราฟคอนทัวร์ของสมบัติต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองนี้ อิทธิพลของอัตราส่วนยางแผ่นรมควันต่อยางสกิม ปริมาณกำมะถัน และปริมาณสารตัวเร่ง TBBS สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการออกสูตรยางคอมปาวด์ให้มีคุณสมบัติที่ต้องการได้ ซึ่งสามารถทำได้โดยนำกราฟคอนทัวร์ของสมบัติต่าง ๆ ที่ต้องการมาเขียนลงในกราฟรูปเดียวกัน เช่น สมบัติ elongation at break, tensile strength, compression set และ hardnesss เป็นต้น แล้วแรเงาส่วนที่สนใจซึ่งเป็นส่วนที่มีสมบัติตามที่ต้องการ หากสมการถูกต้องจะมีสมบัติตรงตามสมบัติที่ต้องการ

ตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการออกสูตรยางรองคอสะพานให้มีสมบัติตามมาตรฐาน มอก. 951-2533 ดังนี้ คือ elongation at break ก่อนบ่มเร่ง มีค่าไม่น้อยกว่า 400 %, tensile strength ก่อนบ่มเร่ง มีค่าไม่น้อยกว่า 17 MPa, hardnesss มีค่า 60 ± 5 shore A และ compression set มีค่าไม่มากกว่า 25 % โดยมีอัตราส่วนยาง RSS/SKIM เท่ากับ 2.12 (สัดส่วน 68/32) ดังนั้นจะต้องเขียนกราฟคอนทัวร์ระหว่างปริมาณกำมะถัน และปริมาณสารตัวเร่ง TBBS โดยมีอัตราส่วนยาง RSS/SKIM เท่ากับ 2.12 (สัดส่วน 68/32) และมีสมบัติทั้งสี่อยู่ในกราฟเดียวกัน จะได้บริเวณที่แรเงาซึ่งเป็นบริเวณที่มีสมบัติตามที่ต้องการ ดังภาพประกอบ 4.40



ภาพประกอบ 4.40 อิทธิพลของกำมะถันและสารตัวเร่ง TBBS ต่อค่า elongation at break, tensile strength, compression set และค่า hardness เมื่ออัตราส่วนยาง RSS/SKIM เท่ากับ 68/32

จากภาพประกอบ 4.40 สามารถเลือกจุดใด ๆ ในบริเวณที่แรเงาไปออกสูตร เพื่อให้ได้สมบัติตรงตามที่ต้องการได้ เช่น เลือกจุดที่ปริมาณสารตัวเร่ง TBBS เท่ากับ 5 phr ปริมาณกำมะถัน เท่ากับ 0.5 phr เมื่ออัตราส่วนยาง RSS/SKIM เท่ากับ 2.12 (สัดส่วน 68/32) หรือเลือกจุดที่ปริมาณสารตัวเร่ง TBBS เท่ากับ 4.77 phr ปริมาณกำมะถัน เท่ากับ 0.67 phr เมื่ออัตราส่วนยาง RSS/SKIM เท่ากับ 2.12 (สัดส่วน 68/32) เป็นต้น

การทดสอบความแม่นยำของสมการความสัมพันธ์ที่ได้

เลือกสูตรยางรองคอสะพานตามสมการให้ค่าสมบัติที่ยางรองคอสะพานผ่านมาตรฐานมา 2 สูตร ดังตาราง 4.34 ทำการผสมยางกับสารเคมี นำไปทดสอบหาลักษณะการวัลคาไนซ์ และอัดเข้าขึ้นทดสอบเพื่อทดสอบสมบัติทางฟิสิกส์ได้ดังตาราง 4.35

ตาราง 4.34 สูตรยางที่ได้จากกราฟคอนทอร์เพื่อทดสอบความแม่นยำของกราฟคอนทอร์

สารเคมี	ปริมาณที่ใช้ (phr)	
	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2
อัตราส่วนยาง RSS No.3/Skim	68/32	68/32
กำมะถัน	0.5	0.67
TBBS	5.0	4.77
เขม่าดำ	40	40
ซิงค์ออกไซด์	4	4
กรดสเตียริก	1	1
6 PPD	1	1
Wax	3	3
Spindle oil	3	3

ตาราง 4.35 สมบัติทางฟิสิกส์ของยางสูตรที่ 1 และ สูตรที่ 2 เปรียบเทียบกับสมบัติที่ได้จากการคำนวณจากสมการที่หาได้

สมบัติ		สูตรที่ 1		สูตรที่ 2	
		จากการคำนวณ	จากการทดลอง	จากการคำนวณ	จากการทดลอง
ก่อนบ่มเร่ง	Tensile Strength (MPa)	23.39	22.10 ± 0.84	22.26	21.72 ± 0.72
	Elongation at break (%)	431	483 ± 12.02	425	418 ± 16.30
	ความแข็ง (Shore A)	62	58 ± 0.58	62	61 ± 0.00
หลังบ่มเร่ง	Tensile Strength (MPa)	21.42	21.74 ± 1.04	22.81	21.07 ± 0.59
	Elongation at break (%)	434	453 ± 15.79	393	391 ± 8.73
	Compression set (%)	18	23.34 ± 1.21	19	26.20 ± 0.10
	ความแข็ง (Shore A)	61	60 ± 0.58	62	63 ± 1.00

จากตาราง 4.35 พบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าที่แตกต่างจากค่าที่ได้จากการทดลองเพียงเล็กน้อย แสดงว่าสมการและกราฟคอนทอร์ที่ได้จากการทดลองสามารถนำมาใช้ได้จริง

และสมบัติทางฟิสิกส์ที่ทดสอบได้มีค่าอยู่ในช่วงที่ต้องการ คือ elongation at break ก่อนบ่มแรง มีค่าไม่น้อยกว่า 400 %, tensile strength ก่อนบ่มแรง มีค่าไม่น้อยกว่า 17 MPa, hardness มีค่า 60 ± 5 shore A และ compression set มีค่าไม่มากกว่า 25 % ยกเว้นสูตรที่ 2 ที่มีค่า compression set สูงกว่าที่ต้องการเพียงเล็กน้อย

4.5 การศึกษาการพัฒนาสูตรยางรองคอสะพาน

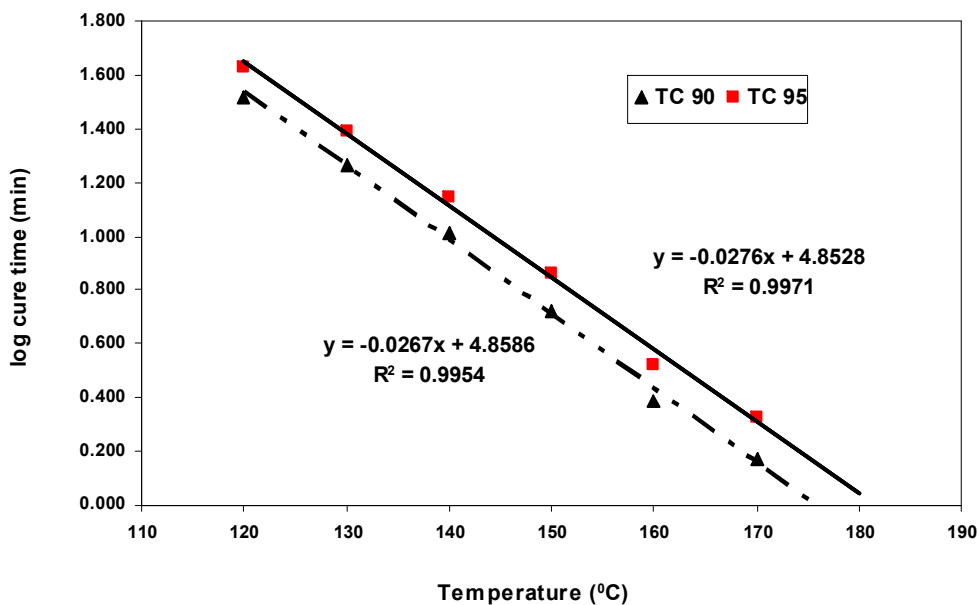
ทำการเลือกสูตรยางที่ให้สมบัติยางรองคอสะพานตามมาตรฐาน มอก. 951-2533 นั่นคือสูตรที่ 1 ในตารางที่ 4.34 มาศึกษาการผลิตยางรองคอสะพาน ซึ่งยางรองคอสะพานที่เลือกในงานวิจัยนี้เป็นยางติดเหล็กบนและล่างโดยไม่มีแผ่นเหล็กเสริมแรง ขึ้นยางขนาดกว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 2x4x2 นิ้ว เป็นขึ้นยางที่ค่อนข้างหนาและเบาใหญ่และหนา คือมีขนาด 22x26x10 ซม. ทำให้เมื่อวัลคาไนซ์ยาง เวลาที่ใช้จะไม่ใช้เวลาที่หาได้จากเครื่องทดสอบการหาเวลาการวัลคาไนซ์ (MDR) เวลาจะต้องมากขึ้นตามความหนาของยาง ซึ่งยางมีสมบัติการนำความร้อนที่ไม่ดี การจะหาเวลาวัลคาไนซ์ยางหนานั้นจำเป็นที่จะต้องรู้อุณหภูมิในเนื้อยางตรงกลางเบา ตามเวลาที่เพิ่มขึ้นเพื่อที่จะสามารถคำนวณหาระดับการวัลคาไนซ์ของยางตรงกลางได้ ซึ่งจะได้ขึ้นงานที่วัลคาไนซ์ทั้งก้อน และไม่เกิดปัญหาทรุนในชิ้นงาน การวัดอุณหภูมิตรงกลางชิ้นงานในระหว่างการอัดเบาทำได้โดยการเจาะเบาเป็นรูเพื่อใส่เทอร์โมคัปเปิล ที่สามารถวัดอุณหภูมิได้โดยตรง ดังรายงานวิจัยของชลดาและคณะ (2547) แต่ในการทดลองนี้ไม่ต้องการเจาะรู ทำลายเบาจึงใช้วิธีการคำนวณหาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตรงกลางเบาของตัวอย่างเป็นแบบสี่เหลี่ยม ตามสมการ 3.17 หน้า 97 เพื่อตรวจสอบว่าสมการนี้สามารถนำไปใช้ได้งานจริงหรือไม่ หากให้ผลเป็นที่น่าพอใจ จะช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการหาเวลาการวัลคาไนซ์ยางได้

4.5.1 การคำนวณระดับการวัลคาไนซ์ของยาง

เตรียมชิ้นทดสอบจากยางคอมปาวด์ที่เตรียมตามสูตรที่ 1 ดังตาราง 4.34 นำมาทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง MDR 2000 โดยแปรอุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 120 – 180 °C จากนั้นนำเวลาของการวัลคาไนซ์มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการวัลคาไนซ์เพื่อหาค่า C (temperature coefficient of vulcanization) ตามรายละเอียดในหัวข้อ 3.3.5.1 ได้ผลการทดลองดังตาราง 4.36 และภาพประกอบ 4.41

ตาราง 4.36 ค่า cure time (TC 90 และ TC 95) ของยางที่อุณหภูมิการวัลคาไนซ์ต่างๆ

อุณหภูมิการวัลคาไนซ์ (°C)	TC 90	TC 95
120	46.02	52.18
130	33.17	42.29
140	18.41	24.48
150	10.29	14.09
160	5.29	7.35
170	2.42	3.33
180	1.49	2.14



ภาพประกอบ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์

จากสมการเส้นตรงของยางแต่ละสูตรจะได้ความชัน A และนำมาแทนค่าใน $C = 10^{-10A}$ จะได้ผลการทดลองตามตาราง 4.37 โดยค่า C คือ จำนวนเท่าของเวลาเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป 10 °C

ตาราง 4.37 ค่า C ที่ได้จากการคำนวณ

	ค่า C
TC 90	1.89
TC 95	1.85

จากภาพประกอบ 4.41 และตาราง 4.37 เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการวัดคาบไบนซ์ จากทฤษฎีเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10°C เวลาที่ใช้ในการวัดคาบไบนซ์จะลดลง 2 เท่า ซึ่งจากการทดลองจะไม่เท่ากับ 2 แต่จะมีค่าใกล้เคียงกับ 2 จากการทดลองจะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิในการวัดคาบไบนซ์เพิ่มขึ้น 10°C เวลาที่ใช้ในการวัดคาบไบนซ์จะลดลงประมาณ 1.8-1.9 เท่า

คำนวณหาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตรงกลางเบ้า ของยางรองคอกสะพานที่มีความกว้าง x ความยาว x ความหนา เท่ากับ $2 \times 4 \times 2$ นิ้ว โดยมีค่า D (thermal diffusivity) เท่ากับ $0.009 \text{ in}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ อุณหภูมิเริ่มต้น เท่ากับ 30°C (86°F) และอัดยงที่ 150°C (302°F)

เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ 2.25 หน้า 39 จะได้สมการที่ใช้ในการคำนวณอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตรงกลางเบ้าที่เวลาต่าง ๆ ตามสมการ 3.17 หน้า 97 คือ

$$T(^{\circ}\text{F}) = 302 - 446e^{-0.05t}$$

T คือ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตรงกลางเบ้า

t คือ เวลาใด ๆ

เหตุผลที่เลือกสมการ 2.25 ชี้นำงานแบบสี่เหลี่ยมแทนที่จะเป็นสมการที่ใช้ชี้นำงานแบบ slab ในสมการ 2.23 นั้น เนื่องจากชี้นำงานในการวิจัยในที่นี่มีขนาด เท่ากับ $2 \times 4 \times 2$ นิ้ว อัตราส่วนของความยาวต่อความกว้างมีค่าไม่มาก แต่ถ้าเป็นชี้นำงานแบบ slab อัตราส่วนของความยาวต่อความกว้างจะต้องมีค่ามาก

ตาราง 4.38 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตรงกลางเบ้าที่เวลาการวัลคาไนซ์ต่าง ๆ

T (min)	T (°C)	T (min)	T (°C)	T (min)	T (°C)
11	7.04	31	97.41	51	130.65
12	14.02	32	99.97	52	131.60
13	20.65	33	102.41	53	132.49
14	26.96	34	104.74	54	133.35
15	32.96	35	106.94	55	134.16
16	38.67	36	109.04	56	134.93
17	44.10	37	111.04	57	135.67
18	49.26	38	112.94	58	136.37
19	54.17	39	114.75	59	137.03
20	58.85	40	116.47	60	137.66
21	63.29	41	118.10	61	138.27
22	67.52	42	119.66	62	138.84
23	71.54	43	121.14	63	139.38
24	75.37	44	122.55	64	139.90
25	79.01	45	123.88	65	140.39
26	82.47	46	125.16	66	140.86
27	85.77	47	126.37	67	141.31
28	88.90	48	127.52	68	141.73
29	91.88	49	128.62	69	142.13
30	94.71	50	129.66	70	142.52

นำอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตรงกลางเบ้าที่คำนวณได้ตามตาราง 4.38 ไปคำนวณหาระดับการวัลคาไนซ์ ดังรายละเอียดในหัวข้อ 2.6.3 หน้า 41

ตาราง 4.39 เวลา อุณหภูมิและเปอร์เซ็นต์การวัลคาไนซ์ที่คำนวณได้

Time(min)	Temp(^o C)	Interval	Tave	n	C-Value	Δ -Vulc	T-Vulc	% Cure
11	7.04	1	10.53067	-13.9469	1.39E-04	1.39E-04	3.59E-04	0.35%
12	14.02	1	17.33266	-13.2667	2.15E-04	2.15E-04	5.74E-04	0.56%
13	20.65	1	23.80293	-12.6197	3.24E-04	3.24E-04	8.99E-04	0.87%
14	26.96	1	29.95763	-12.0042	4.80E-04	4.80E-04	1.38E-03	1.34%
15	32.96	1	35.81217	-11.4188	6.97E-04	6.97E-04	2.08E-03	2.02%
16	38.67	1	41.38117	-10.8619	9.93E-04	9.93E-04	3.07E-03	2.98%
17	44.10	1	46.67858	-10.3321	1.39E-03	1.39E-03	4.46E-03	4.33%
18	49.26	1	51.71762	-9.82824	1.92E-03	1.92E-03	6.38E-03	6.20%
19	54.17	1	56.51091	-9.34891	2.60E-03	2.60E-03	8.98E-03	8.73%
20	58.85	1	61.07043	-8.89296	3.48E-03	3.48E-03	1.25E-02	12.11%
21	63.29	1	65.40757	-8.45924	4.59E-03	4.59E-03	1.70E-02	16.56%
22	67.52	1	69.53319	-8.04668	5.96E-03	5.96E-03	2.30E-02	22.36%
23	71.54	1	73.45761	-7.65424	7.65E-03	7.65E-03	3.07E-02	29.80%
24	75.37	1	77.19062	-7.28094	9.71E-03	9.71E-03	4.04E-02	39.23%
25	79.01	1	80.74158	-6.92584	1.22E-02	1.22E-02	5.25E-02	51.06%
26	82.47	1	84.11935	-6.58806	1.51E-02	1.51E-02	6.76E-02	65.72%
27	85.77	1	87.33239	-6.26676	1.85E-02	1.85E-02	8.61E-02	83.71%
28	88.90	1	90.38872	-5.96113	2.25E-02	2.25E-02	1.09E-01	105.57%
29	91.88	1	93.296	-5.6704	2.71E-02	2.71E-02	1.36E-01	131.87%
30	94.71	1	96.06149	-5.39385	3.23E-02	3.23E-02	1.68E-01	163.23%
31	97.41	1	98.6921	-5.13079	3.82E-02	3.82E-02	2.06E-01	200.31%
32	99.97	1	101.1944	-4.88056	4.47E-02	4.47E-02	2.51E-01	243.79%
33	102.41	1	103.5747	-4.64253	5.21E-02	5.21E-02	3.03E-01	294.38%
34	104.74	1	105.8389	-4.41611	6.01E-02	6.01E-02	3.63E-01	352.82%
35	106.94	1	107.9926	-4.20074	6.90E-02	6.90E-02	4.32E-01	419.84%
36	109.04	1	110.0414	-3.99586	7.86E-02	7.86E-02	5.11E-01	496.21%
37	111.04	1	111.9902	-3.80098	8.90E-02	8.90E-02	6.00E-01	582.66%
38	112.94	1	113.8439	-3.61561	1.00E-01	1.00E-01	7.00E-01	679.93%
39	114.75	1	115.6073	-3.43927	1.12E-01	1.12E-01	8.12E-01	788.76%
40	116.47	1	117.2846	-3.27154	1.25E-01	1.25E-01	9.36E-01	909.86%

ตาราง 4.39 (ต่อ)

Time(min)	Temp(^o C)	Interval	Tave	n	C-Value	Δ -Vulc	T-Vulc	% Cure
41	118.10	1	118.8802	-3.11198	1.38E-01	1.38E-01	1.07E+00	1043.90%
42	119.66	1	120.3979	-2.96021	1.52E-01	1.52E-01	1.23E+00	1191.54%
43	121.14	1	121.8416	-2.81584	1.67E-01	1.67E-01	1.39E+00	1353.39%
44	122.55	1	123.2149	-2.67851	1.82E-01	1.82E-01	1.57E+00	1530.03%
45	123.88	1	124.5213	-2.54787	1.98E-01	1.98E-01	1.77E+00	1721.98%
46	125.16	1	125.7639	-2.42361	2.14E-01	2.14E-01	1.99E+00	1929.73%
47	126.37	1	126.9459	-2.30541	2.30E-01	2.30E-01	2.22E+00	2153.72%
48	127.52	1	128.0702	-2.19298	2.48E-01	2.48E-01	2.46E+00	2394.33%
49	128.62	1	129.1398	-2.08602	2.65E-01	2.65E-01	2.73E+00	2651.89%
50	129.66	1	130.1571	-1.98429	2.83E-01	2.83E-01	3.01E+00	2926.68%
51	130.65	1	131.1249	-1.88751	3.01E-01	3.01E-01	3.31E+00	3218.94%
52	131.60	1	132.0454	-1.79546	3.19E-01	3.19E-01	3.63E+00	3528.83%
53	132.49	1	132.9211	-1.70789	3.37E-01	3.37E-01	3.97E+00	3856.48%
54	133.35	1	133.754	-1.6246	3.56E-01	3.56E-01	4.32E+00	4201.98%
55	134.16	1	134.5464	-1.54536	3.74E-01	3.74E-01	4.70E+00	4565.35%
56	134.93	1	135.3	-1.47	3.92E-01	3.92E-01	5.09E+00	4946.58%
57	135.67	1	136.017	-1.3983	4.11E-01	4.11E-01	5.50E+00	5345.61%
58	136.37	1	136.6989	-1.33011	4.29E-01	4.29E-01	5.93E+00	5762.35%
59	137.03	1	137.3476	-1.26524	4.47E-01	4.47E-01	6.38E+00	6196.66%
60	137.66	1	137.9647	-1.20353	4.65E-01	4.65E-01	6.84E+00	6648.36%
61	138.27	1	138.5517	-1.14483	4.82E-01	4.82E-01	7.32E+00	7117.26%
62	138.84	1	139.11	-1.089	5.00E-01	5.00E-01	7.82E+00	7603.13%
63	139.38	1	139.6411	-1.03589	5.17E-01	5.17E-01	8.34E+00	8105.70%
64	139.90	1	140.1463	-0.98537	5.34E-01	5.34E-01	8.87E+00	8624.70%
65	140.39	1	140.6269	-0.93731	5.51E-01	5.51E-01	9.43E+00	9159.83%
66	140.86	1	141.084	-0.8916	5.67E-01	5.67E-01	9.99E+00	9710.75%
67	141.31	1	141.5189	-0.84811	5.83E-01	5.83E-01	1.06E+01	10277.14%
68	141.73	1	141.9325	-0.80675	5.98E-01	5.98E-01	1.12E+01	10858.64%
69	142.13	1	142.3259	-0.76741	6.14E-01	6.14E-01	1.18E+01	11454.89%
70	142.52	1	142.7002	-0.72998	6.28E-01	6.28E-01	1.24E+01	12065.51%

จากตาราง 4.39 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิภายในยางจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการอัดเบ้ามากขึ้น และเปอร์เซ็นต์การวัลคาไนซ์ที่คำนวณได้จะแปรผันตามเวลาในการอัดเบ้า ถ้าใช้เวลาในการอัดเบ้ามาก เปอร์เซ็นต์การวัลคาไนซ์ก็จะมากขึ้นไปด้วย และพบว่าจะต้องใช้เวลาในการวัลคาไนซ์ประมาณ 28 นาที ยางตรงกลางจึงจะวัลคาไนซ์ได้ระดับ 100% cure

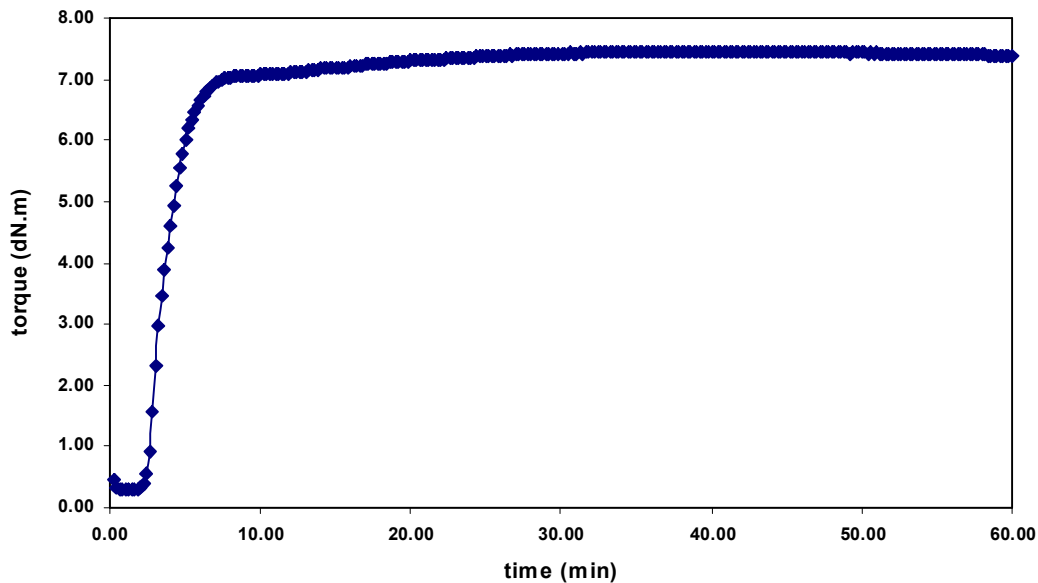
อย่างไรก็ตามจากรายงานการวิจัยของชลดาและคณะ (2547) ระดับการวัลคาไนซ์ในยางตรงกลางเพียง 30-50 % ก็เกินจุด blow point ทำให้ไม่เกิดรูพรุนตรงกลางชิ้นงาน และหลังจากเอาเบ้าออกจากเครื่องอัด ยางตรงกลางก็ยังคงวัลคาไนซ์ต่อไป เนื่องจากต้องใช้เวลาทำให้อุณหภูมิลดลงมาถึงอุณหภูมิห้องได้

เพื่อพิจารณาว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอัดยางรองคอสะพาน ยางจะเกิดการ reversion มากหรือไม่ จึงทำการหา % reversion ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้ผลการทดลองดังแสดงในตาราง 4.40

ตาราง 4.40 % reversion ของยางรองคอสะพานที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิการวัลคาไนซ์ (°C)	Torque สูงสุด	Torque final ที่เวลา 60 นาที	% reversion
120	6.97	6.96	0.14
130	7.88	7.86	0.25
140	8.68	8.65	0.34
150	7.41	7.34	0.94
160	7.81	7.22	7.55
170	7.20	5.45	24.31
180	6.17	4.04	34.52

จากตาราง 4.40 และภาพประกอบ 4.42 แสดงให้เห็นว่าสูตรยางที่ใช้มีสมบัติความต้านทานการเกิด reversion ที่ดี ดังนั้นการวัลคาไนซ์ยางรองคอสะพานที่เวลา 50 นาที จะไม่ทำให้สมบัติทางฟิสิกส์ของยางลดต่ำลงมากนัก



ภาพประกอบ 4.42 ลักษณะการวัดคาบไชน์ของยางรองคอสะพานที่อุณหภูมิ 150 °C

4.5.2 ผลศึกษาการขึ้นรูปยางรองคอสะพาน

จากการคำนวณหาเวลาการวัดคาบไชน์ ได้เวลาการวัดคาบไชน์ที่เหมาะสมประมาณ 28 นาที การทดลองจึงเตรียมยางรองคอสะพานที่อัดเข้าที่เวลาต่าง ๆ เพื่อทดสอบลักษณะและปริมาณความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงของยางที่อยู่ตรงกลางและส่วนผิวชั้นนอก เพื่อวิเคราะห์ความสอดคล้องกับการหาระดับการวัดคาบไชน์โดยวิธีการคำนวณ นำยางคอมปาวด์ที่เตรียมได้มาอัดเข้าด้วยเครื่องอัดเข้าแบบไฮดรอลิกโดยใช้อุณหภูมิ 150 °C โดยแปรเวลาในการอัดที่ 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที ตามรายละเอียดในหัวข้อ 3.3.5.2 ได้ยางรองคอสะพานที่มีลักษณะดังภาพประกอบ 4.43 ถึง 4.47



ภาพประกอบ 4.43 ลักษณะผิวภายในของยางรองคอสะพานที่ใช้เวลาในการอัด 20 นาที



ภาพประกอบ 4.44 ลักษณะผิวภายในของยางรองคอสะพานที่ใช้เวลาในการอัด 30 นาที



ภาพประกอบ 4.45 ลักษณะผิวภายในของยางรองคอสะพานที่ใช้เวลาในการอัด 40 นาที



ภาพประกอบ 4.46 ลักษณะผิวภายในของยางรองคอสะพานที่ใช้เวลาในการอัด 50 นาที



ภาพประกอบ 4.47 ลักษณะผิวภายในของยางรองคอสะพานที่ใช้เวลาในการอัด 60 นาที

จากภาพประกอบ 4.43 ถึง 4.47 พบว่า ที่เวลาการวัลคาไนซ์ต่ำ คือ 20, 30 และ 40 นาที การวัลคาไนซ์ยังเกิดไม่สมบูรณ์ เนื่องจากผิวภายในมีรูพรุน แต่ที่เวลา 50 นาที ยางจะวัลคาไนซ์ได้อย่างสมบูรณ์ ลักษณะผิวภายนอกและภายในสมบูรณ์ ลักษณะผิวภายนอกไม่โป่งพอง ผิวภายในไม่เป็นฟองอากาศและเรียบ

จากการคำนวณตามตาราง 4.39 จะเห็นว่าจะต้องใช้เวลาในการวัลคาไนซ์ประมาณ 28 นาที ยางตรงกลางจึงจะวัลคาไนซ์ได้ระดับ 100% cure แต่จากการผลทดลองจริงที่เวลา 30 นาที เมื่อผ่าทางด้านในออกมาดูยางวัลคาไนซ์ไม่สมบูรณ์ สังเกตได้จากมีรูพรุน แสดงว่าค่าที่ใช้จากการคำนวณตามสมการ 3.17 มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้วัดจริง อาจเนื่องจากผิวทั้งหมดของตัวอย่างมีค่าความจุความร้อน (heating capacity) ไม่เท่ากัน และอีกปัจจัยหนึ่ง คือ ความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างวางยางลงในเบ้า (mould) (Hill, 1971)

4.5.3 ผลศึกษาหาความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง (crosslink density)

ยางรองคอสสะพานที่เวลาการอัดต่าง ๆ นำมาหาความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงของยางที่อยู่ตรงกลางและส่วนผิวชั้นนอก เพื่อวิเคราะห์ความสอดคล้องกับการหาค่าการวัลคาไนซ์โดยวิธีการคำนวณ และวิเคราะห์ปริมาณความแตกต่างของความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงของยางที่อยู่ตรงกลางและส่วนผิวชั้นนอก ซึ่งการทดลองทำได้โดยตัดชิ้นตัวอย่างยางรองคอสสะพานด้านในและด้านนอกที่เวลาอัดต่าง ๆ มาแช่ในตัวทำละลายโทลูอีนในขวดแบบปิดเป็นเวลา 7 วัน ตามรายละเอียดในหัวข้อ 3.3.5.2.3 ได้ผลการทดลองดังตาราง 4.41 และ 4.42

ตาราง 4.41 ความหนาแน่นของชิ้นตัวอย่างยางรองคอสสะพานภายนอกและภายในที่เวลาต่าง ๆ

เวลาการวัลคาไนซ์ (นาที)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	
	ชั้นยางด้านใน	ชั้นยางด้านนอก
20	1.056	1.101
30	1.068	1.067
40	1.070	1.161
50	1.027	1.103
60	1.071	1.103

จากตาราง 4.41 พบว่า ความหนาแน่นของชั้นยางด้านในและด้านนอก ที่เวลาการวัลคาไนซ์ต่าง ๆ จะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

ตาราง 4.42 ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง (crosslink density) และน้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่ที่อยู่ระหว่างพันธะเชื่อมโยงของยางรองคอสสะพานภายนอกและภายในที่เวลาต่าง ๆ

เวลาการวัลคาไนซ์ (นาที)	ชั้นยางด้านใน		ชั้นยางด้านนอก	
	$V \times 10^4$ (mole/g)	$M_c \times 10^{-3}$	$V \times 10^4$ (mole/g)	$M_c \times 10^{-3}$
20	1.86	2.688	4.26	1.174
30	2.11	2.368	5.71	0.875
40	2.33	2.148	6.05	0.826

ตาราง 4.42 (ต่อ)

เวลาการวัลคาไนซ์ (นาทีก)	ชั้นยางด้านใน		ชั้นยางด้านนอก	
	$V \times 10^4$ (mole/g)	$M_c \times 10^{-3}$	$V \times 10^4$ (mole/g)	$M_c \times 10^{-3}$
50	5.77	0.867	7.93	0.631
60	6.78	0.737	13.81	0.362

จากตาราง 4.42 พบว่า ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงของผิวยางทั้งจากภายนอกและภายในเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยที่ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงของผิวภายนอกจะมีค่ามากกว่าผิวภายใน เนื่องจากผิวด้านนอกจะได้รับความร้อนโดยตรง ยางรองคอสปะพานที่เวลาอัดน้อย เช่น ที่เวลา 20, 30 และ 40 นาที มีค่า crosslink density ต่ำ แสดงว่ายังเกิดการวัลคาไนซ์ไม่สมบูรณ์ เมื่อสังเกตภายนอกจะเห็นว่ายางโป่งตรงกลาง ผ่าดูผิวภายในจะเห็นว่ามิฟองอากาศ ที่เวลาอัด 50 นาที พบว่า ค่าความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง ของยางด้านในสูงขึ้นกว่าอัดที่เวลา 40 นาที อย่างชัดเจน นั่นคือจาก 2.33 เป็น 5.77 ค่าที่ได้สอดคล้องกับยางชั้นนอกที่เวลาอัดประมาณ 30 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่ยางควรจะวัลคาไนซ์ได้อย่างสมบูรณ์แล้ว แสดงว่าที่เวลาอัด 50 นาที ยางด้านในและด้านนอกเกิดการวัลคาไนซ์อย่างสมบูรณ์ แต่การอัดยางที่เวลา 60 นาที อาจจะนานเกินไป ซึ่งจะเห็นว่าความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงของยางภายในที่เวลา 50 นาที มีค่าแตกต่างกันไม่มากนักกับยางภายในที่เวลา 60 นาที

Marykutty (2003) หาความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงของยางธรรมชาติ (ISNR-5) ที่มีค่า ML 1+4, 100 °C เท่ากับ 85 ใช้กำมะถันเป็นสารวัลคาไนซ์ สารตัวเร่งใช้ MBS ร่วมกับ DTB และ MBS ร่วมกับ DPG พบว่า ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง ($V \times 10^4$) มีค่าอยู่ในช่วง 0.25 – 0.36 mole/g ซึ่งมีค่าน้อยกว่าในการวิจัยนี้ เนื่องจากในงานของ Marykutty ใช้ปริมาณของสารตัวเร่ง MBS ร่วมกับ DTB และ MBS ร่วมกับ DPG มีค่าอยู่ในช่วง 1.26 – 2.8 phr ซึ่งในน้อยกว่าในงานวิจัยนี้ที่ใช้สารตัวเร่ง 5 phr ทำให้ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงน้อยกว่า

การวัลคาไนซ์ยางหนาจำเป็นต้องเพิ่มเวลาจากเวลาการวัลคาไนซ์ที่ได้จากเครื่อง MDR ซึ่งในสูตรยางรองคอสปะพานในการทดลองนี้ใช้เวลาการวัลคาไนซ์ ประมาณ 10 นาที เนื่องจากยางมีสมบัติการนำความร้อนที่ไม่ดี วิธีที่ทำให้ทราบเวลาการวัลคาไนซ์อย่างคร่าว ๆ คือจากการคำนวณหาระดับการวัลคาไนซ์ ทำให้ทราบได้ว่ายางวัลคาไนซ์ได้สมบูรณ์ที่เวลาประมาณเท่าใด ซึ่งในการทดลองนี้เวลาประมาณ 28 นาที แต่จากการคำนวณค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตรงกลางจะมีค่าสูงกว่าการทดลองจริง ดังนั้นในทางปฏิบัติจริงเวลาที่ใช้ในการอัดเข้าชิ้นตัวอย่างต้องเพิ่ม

เวลาในการอัดให้มากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ ทำให้ประหยัดเวลาและลดต้นทุนในการผลิต นั่นคือ ไม่สูญเสียวัสดุดิบและเวลาในการหาเวลาวัลคาไนซ์ที่เหมาะสมในการอัด โดยการแปรเวลาในการอัด

4.5.4 การทดสอบยางรองคอสะพานภายใต้แรงกด

ทำการทดสอบโดยใช้ยางรองคอสะพานที่มีความกว้าง x ความยาว x ความหนา เท่ากับ 2x4x2 นิ้ว จำนวน 3 ตัวอย่าง โดยให้มีระยะกดสูงสุด 21 มิลลิเมตร และจำกัดไม่ให้แรงกดสูงสุดเกิน 50 kN ตามรายละเอียดในหัวข้อ 3.3.8.2.4 ได้ผลการทดลองแสดงในตาราง 4.43 และกราฟของแรง – ระยะกด ดังภาพประกอบ 4.48

จากตาราง 4.43 พบว่า ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของยางรองคอสะพาน 3 ชิ้น ที่ระยะกดต่าง ๆ มีค่าที่ไม่แตกต่างกันนัก และร้อยละของความแปรปรวนตลอดช่วงระยะกดที่ทดสอบ มีค่าสูงสุดไม่เกิน 15 % จัดว่ามีความแปรปรวนไม่สูง (วิไลพรและคณะ, 2541)

เมื่อเปรียบเทียบจากงานของวิไลพรและคณะ (2541) พบว่า ยางรองคอสะพานที่มีขนาด เท่ากับ 4x4 นิ้ว ความแข็ง 60 Shore A ไม่มีเหล็กเสริมแรง ถูกทดสอบภายใต้แรงกด โดยมีระยะกด 6 มิลลิเมตร จะมีค่าแรงกด ประมาณ 10 kN แต่ในการทดลองนี้ที่ระยะกด 6 มิลลิเมตร จะมีค่าแรงกด ประมาณ 4 kN เท่านั้น เนื่องจากขนาดของพื้นที่รับแรงแตกต่างกัน ยางรองคอสะพานในงานวิจัยนี้จะมีพื้นที่รับแรงน้อยกว่า ทำให้ที่ระยะกดเท่ากัน แต่รับแรงกดได้น้อยกว่า

คำนวณหาค่า compressive modulus (E_c) จากสมการ 2.53 หน้า 58 คือ

$$E_c = E_0(1 + 2kS^2)$$

shape factor (S) = load area / force free area

$$S = \frac{BL}{2t(B+L)}$$

ในงานวิจัยนี้ ยางรองคอสะพานมีขนาดเท่ากับ 2x4x2 นิ้ว คำนวณหาค่า shape factor ได้ดังนี้

$$S = \frac{2 \times 4}{2 \times 2(2 + 4)}$$

$$S = 0.33$$

$$k = 0.64 \text{ (สำหรับยางที่มีค่าความแข็ง 55 IRHD)}$$

$$E_0 = 3.25 \text{ (สำหรับยางที่มีค่าความแข็ง 55 IRHD)}$$

แทนค่าต่าง ๆ ที่ได้ลงในสมการ เพื่อหาค่า compressive modulus (E_c)

$$\text{จะได้ว่า } E_c = 3.25(1 + 2 \times 0.64(0.33)^2)$$

$$E_c = 3.70$$

สำหรับงานของวิไลพรและคณะ (2541) ยางรองคอสะพานมีขนาดเท่ากับ 4x4x2 นิ้ว คำนวณหาค่า shape factor ได้ดังนี้

$$S = \frac{4 \times 4}{2 \times 2(4 + 4)}$$

$$S = 0.5$$

$$k = 0.57 \text{ (สำหรับยางที่มีค่าความแข็ง 60 IRHD)}$$

$$E_0 = 4.45 \text{ (สำหรับยางที่มีค่าความแข็ง 60 IRHD)}$$

แทนค่าต่าง ๆ ที่ได้ลงในสมการ เพื่อหาค่า compressive modulus (E_c)

$$\text{จะได้ว่า } E_c = 4.45(1 + 2 \times 0.57(0.5)^2)$$

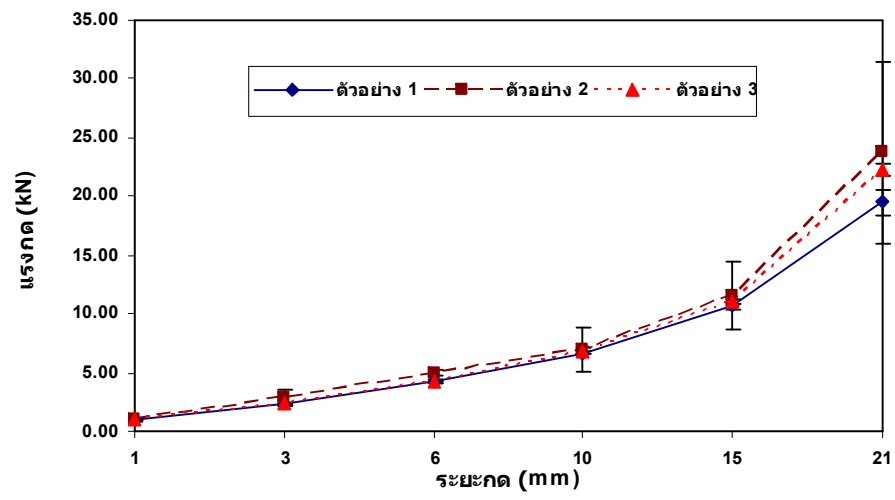
$$E_c = 5.71$$

เมื่อเปรียบเทียบค่า compressive modulus จะเห็นว่าจากงานของวิไลพรและคณะ (2541) มีค่ามากกว่าในงานวิจัยนี้

ตาราง 4.43 ค่าแรงกดที่ระยะกดต่าง ๆ ของยางรองคอสะพานที่มีขนาด เท่ากับ 2x4x2 นิ้ว

ระยะกด (mm)	แรงกด (kN)			
	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ตัวอย่าง 3	% C_v
1	0.98 ± 0.04	0.94 ± 0.01	0.98 ± 0.04	3.03
3	2.32 ± 0.05	2.88 ± 0.61	2.34 ± 0.11	9.40
6	4.17 ± 0.03	5.01 ± 0.33	4.21 ± 0.16	3.64
10	6.67 ± 0.10	6.91 ± 1.88	6.87 ± 0.31	11.09
15	10.63 ± 0.28	11.52 ± 2.87	11.09 ± 0.15	9.63
21	19.48 ± 1.07	23.70 ± 7.70	22.25 ± 0.44	13.32

หมายเหตุ % C_v ร้อยละของความแปรปรวน; $C_v = \frac{S.D.}{X} \times 100$



ภาพประกอบ 4.48 ความสัมพันธ์ของแรงกดที่แปรระยะกดของยางรองคอสะพานที่มีขนาด เท่ากับ 2x4x2 นิ้ว