

ตารางที่ 4.40 ความหนืดมูนนี้ ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางสูตรทดลองที่อุณหภูมิทดสอบ 160°C และ %Heat Reversion

สมบัติ	อ้างอิง	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5	สูตร 6
MV(ML1+4)	36	38	41	47	35	42	39
ML	6.6	9.1	8.3	8.8	7.0	10.2	7.4
MH	39.0	46.1	38.1	45.2	38.4	45.8	42.2
TS1	1:53	2:11	2:11	1:53	2:19	1:53	2:02
T90	5:04	6:40	4:38	4:47	5:47	5:30	4:55
%Heat Reversion	7.18	0	0.52	0.22	0	0.22	1.42

ตารางที่ 4.41 สมบัติของยางวัลคาไนซ์ เมื่อแปรปริมาณการเบลนด้วยธรรมชาติกับ BR และ SBR

สมบัติ	อ้างอิง	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5	สูตร 6
Hardness(shore A)	62	61	63	62	62.5	62	63
100%Modulus (MPa)	1.87	1.69	1.93	2.08	2.04	1.94	1.64
200%Modulus(MPa)	3.7	3.49	3.81	4.16	4.16	3.87	3.48
300%Modulus(MPa)	6.16	6.28	6.14	6.74	6.78	6.97	6
Tensile strength(MPa)	26.54	22.95	22.67	23.01	22.1	24.7	22.28
%E.B.	650	650	650	650	600	600	600
Tear strength(MPa)	88.13	79.21	85.68	95.37	84.49	82.77	87.52
Yerzley Resillien,%	72.17	72.01	75.32	68.17	69.12	73.24	70.21
Dunlop Tripsometer,%	47.75	47.75	50.31	47.75	45.74	47.75	50.31
Abrasion Resistance Index	47.96	47.62	53.34	43.24	42.6	45.77	45.84
Heat build-up (°C)	18	23	20	22	20	23	21
Compression set	0.208	0.297	0.21	0.257	0.243	0.279	0.218
tan δ at 10Hz	0.135	0.138	0.139	0.144	0.142	0.150	0.141
After aging at 72 °C for 72 hrs.							
100%Modulus	2.85	2.71	3.09	3.21	3.41	2.85	2.8
200%Modulus	5.42	5.41	6.17	6.45	6.56	5.84	5.73
300%Modulus	10.75	11.09	11.03	11.43	12.75	11.63	11.25
Tensile Strength	13.89	14.26	15.23	14.15	15.04	14.25	14.96
%E.B.	350	350	350	350	325	325	325

เมื่อทำการเบลนค์ยางพอลิวิทาไดอินในปริมาณ 10 phr ดังสูตรที่ 1 และลดปริมาณไซเลนลง นั้น พบว่าเมื่อเทียบกับสูตรอ้างอิง ยางคอมเปานด์มีความหนืดสูงขึ้น เวลาในการวัลคาไนซ์ช้าลง โดยที่ไม่เกิดการ reversion แสดงให้เห็นถึงสมบัติของยาง BR ที่ cure ช้ากว่ายางธรรมชาติ และทนการเกิด Heat reversion ที่ดีกว่า สำหรับยางวัลคาไนซ์สูตรที่ 1 ความแข็งแรงลดลง 1 หน่วย และสมบัติด้านความต้านทานต่อแรงดึงและลักษณะลดลงเล็กน้อย ส่วนการกระเด็นตัวและความต้านทานต่อการสึกหรอไม่เปลี่ยนแปลง ความร้อนสะสม compression set และ เพิ่มขึ้น เนื่องจากยางBR เป็นยางที่เกิดความร้อนสะสมได้มากกว่า ส่วนสมบัติหลังการบ่มเร่งก่อนข้างจะดีกว่าสูตรอ้างอิง เมื่อเพิ่มปริมาณยางBR ให้มากขึ้นเป็น 20 phr ดังสูตรที่ 2 พบว่ายางคอมเปานด์มีความหนืดมากขึ้น เวลาในการวัลคาไนซ์สั้นลง และHeat reversion เมื่อเทียบกับสูตรที่ 1 จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ยังน้อยกว่าสูตรอ้างอิง ยางที่วัลคาไนซ์แล้วจะแข็งขึ้นเล็กน้อยสัมพันธ์กับค่ามอดูลัส แต่ความต้านทานต่อการยืดจนขาดต่ำกว่ายางสูตรอ้างอิง การกระเด็นตัวและความต้านทานต่อการสึกหรอดีกว่าสูตรอ้างอิง โดยที่ค่าความร้อนสะสมเพิ่มขึ้นเพียง 2 องศา สูตรที่ 2 นี้จึงน่าจะพอยอมรับได้ แต่ความแข็งที่เพิ่มขึ้นอาจมีผลต่อการจับที่ไม่นุ่มสบาย เมื่อทดลองใช้ยาง SBR เบลนค์ในปริมาณ 10 และ 20 phr ดังสูตรที่ 3 และ 4 พบว่าเมื่อเทียบกับสูตรอ้างอิงการใช้ยาง SBR 10 phr ให้ความหนืดมากขึ้นที่สูงขึ้น เวลา cure สั้นลง และลด Heat reversion ลงได้เช่นกัน โดยที่ความแข็งของยางวัลคาไนซ์ไม่เปลี่ยนแปลง ความต้านทานต่อแรงดึงลดลงเล็กน้อย แต่ความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด การกระเด็นตัวไม่เปลี่ยนแปลง แต่ความต้านทานต่อการสึกหรอลดลง และความร้อนสะสมเพิ่มขึ้น ส่วนสมบัติการบ่มเร่งก่อนข้างดี ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณยาง SBR เป็น 20 phr ดังสูตรที่ 4 สมบัติทางกายภาพส่วนใหญ่จึงลดลง โดยสามารถลดความร้อนสะสมลงมาได้แต่ยังคงสูงกว่ายางอ้างอิง การเบลนค์ยาง SBR เข้าไปเรื่อยๆจึงไม่ทำให้สมบัติทางกายภาพดีขึ้น เนื่องจากยาง SBR โดยตัวมันเองมีสมบัติทางกลที่ดีกว่ายางธรรมชาติอยู่แล้ว อย่างไรก็ตามเมื่อลองทดลองเบลนค์ทั้งยางBRและยาง SBR พร้อมกันทั้งสองดังสูตรที่ 5 และ 6 พบว่าสมบัติทางกลก็ยังไม่ดีขึ้น

การทดลองต่อมาจึงทดลองเปลี่ยนชนิดของสารตัวเร่งและแปรปริมาณของไซเลนเพื่อปรับปรุงสมบัติทางกล สูตรที่ใช้แสดงดังตารางที่ 4.42 สมบัติของยางดังตารางที่ 4.43 และ 4.44

ตารางที่ 4.42 สูตรยางที่ใช้เมื่อแปรชนิดของสารตัวเร่ง และแปรปริมาณของ Silane

Ingredients	อ้างอิง	สูตร 7	สูตร 8	สูตร 9	สูตร 10
RSS 1	100	100	80	80	80
St acid	2	2	20	20	20
ZnO	3	3	5	5	5
Silica	45	45	45	45	45
Silane	3.6	3.6	2	3	4
PEG	3	3	3	3	3
Sulphur	2	2	2	2	2
Oil	3	3	3	3	3
515P	2	2	2	2	2
MBTS	1.5				
TBBS		1.5	1.5	1.5	1.5
TiO ₂	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75

ตารางที่ 4.43 ความหนืดมูนนี้ ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางสูตรทดลองที่อุณหภูมิทดสอบ 160°C และ %Heat Reversion

สมบัติ	อ้างอิง	สูตร 7	สูตร 8	สูตร 9	สูตร 10
MV(ML1+4)	36	35	40	38	41
ML	6.6	7.4	8.3	7.0	6.3
MH	39.0	42.2	38.1	38.4	43.1
TS1	1:53	2:02	2:11	2:19	3:11
T90	5:04	4:55	4:38	5:47	6:40
%Heat Reversion	7.18	1.42	0.52	0	0.46

ตารางที่ 4.44 สมบัติของยางวัลคาไนซ์ เมื่อแปรชนิดของสารตัวเร่ง แปรปริมาณของ Silane

สมบัติ	อ้างอิง	สูตร 7	สูตร 8	สูตร 9	สูตร 10
Hardness(shore A)	62	61	63.5	63	63
100%Modulus(MPa)	1.87	1.72	1.75	2.15	2.22
200%Modulus(MPa)	3.7	4.31	3.59	4.41	5.35
300%Modulus(MPa)	6.16	7.56	6.05	7.54	8.78
Tensile strength(MPa)	26.54	26.34	25.43	25.49	25.25
%E.B.	650	650	650	650	600
Tear strength(MPa)	88.13	99.5	89.7	94	89.22
Yerzley Resillien,%	72.17	71.91	74.87	75.02	75.3
Dunlop Tripsometer,%	47.75	47.75	50.31	50.31	50.31
Abrasion Resistance Index	47.96	48.12	59.76	59.51	60.12
Heat build-up (°C)	18	17	23	22	22
Compression set	0.208	0.232	0.254	0.237	0.224
tanδ at 10Hz	0.135	0.119	0.122	0.128	0.132
After aging at 72 °C for 72 hrs.					
100%Modulus	2.85	2.69	2.91	3.24	3.35
200%Modulus	5.42	6.36	6.27	6.76	7.21
300%Modulus	10.75	11.13	11.12	11.64	12.18
Tensile Strength	13.89	13.45	15.38	14.95	14.75
%E.B.	350	350	350	350	325

สูตรที่ 7 เมื่อใช้ยางธรรมชาติและเปลี่ยนเฉพาะชนิดของสารตัวเร่งเป็น TBBS ซึ่งเป็นสารตัวเร่งกลุ่มซัลฟีนามิด พบว่ายางคอมปานด์ cure เร็วขึ้น และ Heat Reversion ลดลงประมาณ 5 % ความแข็งของยางวัลคาไนซ์ลดลง 1 หน่วย ความต้านทานต่อแรงดึง การกระด้างตัว ความต้านทานต่อการสึกหรอ สมบัติหลังการบ่มเร่ง ไม่เปลี่ยนแปลง แต่ความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้นชัดเจน โดยที่ความร้อนสะสม และ tanδ ลดลง แสดงว่าสารตัวเร่ง TBBS สามารถช่วยปรับปรุงสูตรให้ดีขึ้นได้เล็กน้อย เมื่อกลับไปใช้ยางBR มาเบลนด์เพื่อช่วยสมบัติด้านความต้านทานต่อการสึกหรอ โดยเปลี่ยนมาใช้สารตัวเร่ง TBBS และแปรปริมาณของไซเลนดังสูตรที่ 8-10 นั้นพบว่าการเพิ่มปริมาณไซเลนมีผลทำให้การวัลคาไนซ์ช้าลง และไม่มีผลมากนักต่อ Heat reversion ยางวัลคาไนซ์มีค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ความต้านทานต่อการดึงจนขาด การกระด้างตัว ความต้านทานต่อการสึกหรอ เปลี่ยนแปลงน้อยมาก

โดยค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าสูงสุดที่ปริมาณไซเลน 3 phr ความร้อนสะสม และค่า $\tan\delta$ เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับสูตรอ้างอิงความต้านทานต่อการสึกหรอของยางสูตรที่ 8-10 มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ความต้านทานต่อการสึกหรอเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนประมาณ 12 หน่วย การกระเดื่องตัวเพิ่มขึ้น โดยที่ความร้อนสะสมเพิ่มขึ้น แต่ $\tan\delta$ และ Heat reversion ลดลง โดยภาพรวมแล้วสามารถนำสูตรที่ 9 ไปทดลองผลิตทดสอบใช้งานจริงได้ต่อไป

4.2.2 การทดลองจริงครั้งที่ 1

การทดลองจริงทำโดยการผสมยางกับสารเคมีด้วยเครื่องผสมระดับอุตสาหกรรม และอัดเป่ายางล้อรถขนาดจริง สูตรที่ใช้ดังตารางที่ 4.45 และสมบัติทางกายภาพดังตารางที่ 4.46

ตารางที่ 4.45 สูตรที่ใช้ในการทดลองจริงที่โรงงานครั้งที่ 1

Ingredients	อ้างอิง	สูตรทดลอง
RSS 1	100	80
St acid	2	20
ZnO	3	5
Silica	45	45
Silane	3.6	3
PEG	3	3
Sulphur	2	2
Oil	3	3
515P	2	2
MBTS	1.5	-
TBBS	-	1.5
TiO ₂	5.75	5.75

ตารางที่ 4.46 สมบัติทางกายภาพของยางอ้างอิงเทียบกับสูตรยางทดลอง

Properties	อ้างอิง	สูตรทดลอง
100 % Modulus (MPa)	1.2	1.79
200 % Modulus (MPa)	2.29	3.32
300 % Modulus (MPa)	3.96	5.31
T.S (MPa)	28.12	24.91
E.B. (%)	766.67	712.50
Hardness (IRHD)	63	68
Flex Cracking (มม)	2.02	2.09
Abrasion index (%)	45.99	51.59
Dunlop Tripsometer (%)	55	53.47
Heat Build Up ($^{\circ}\text{C}$)	12	22
Compression set	0.045	0.117
tandelta @ 0 Hz	0.10487	0.10796
tandelta @ 10 Hz	0.12859	0.12135
tandelta @ 50 Hz	0.17578	0.15638
loss compliance	3.68E-06	8.23E-07

ในการทดลองจับจริงใช้คนจับจำนวน 4 คน ทดสอบจับ เป็นเวลาอย่างน้อย 15 นาที ในแต่ละชุดการทดลอง หลังทดลองจับทำการประเมินได้คะแนนการประเมินในแต่ละหัวข้อดังตารางที่ 4.47 ยางกลางที่ใช้เช่นเดียวกับการทดลองยางคำครั้งที่ 1

ตารางที่ 4.47 ผลการทดลองใช้จริงที่โรงงานครั้งที่ 1 ของยางขาวสูตรโรงงาน เปรียบเทียบกับสูตรทดลอง

ลำดับ	หัวข้อการทดลอง	การให้คะแนน	ผลการทดสอบ		
			ใหม่2ชั้น	ใหม่3ชั้น	เก่า2ชั้น
1.	ความนุ่มนวลในการจับจี	นุ่มนวลมากคะแนนมาก			
	1.1 ขณะไม่ปั่นทุกของ		13	14	13
	1.2 ขณะปั่นทุกของ		13	18	17
2.	การเกาะถนน/พื้น	เกาะถนนได้ดีคะแนนมาก	15	16	17
3	การเบรคหยุด	เบรคได้ดีคะแนนมาก			
	3.1 ขณะไม่บรรทุกของ		15	16	17
	3.2 ขณะบรรทุกของ		17	17	15
4	การจับจีขึ้นลงถูกระนาด	ขึ้นลงได้นุ่มนวลคะแนนมาก	14	14	16
5	ความเร็วในการจับจี	จับได้ดีคะแนนมาก			
	5.1 ความเร็วต่ำไม่บรรทุกของ		16	17	17
	5.2 ความเร็วต่ำบรรทุกของ		16	19	17
	5.3 ความเร็วปานกลางบรรทุกของ		14	15	15
	5.4 ความเร็วปานกลางไม่บรรทุกของ		16	19	16
	5.5 ความเร็วสูงไม่บรรทุกของ		12	14	14
	5.6 ความเร็วสูงบรรทุกของ		13	17	17
6	การบังคับเลี้ยว	บังคับเลี้ยวได้ดีคะแนนมาก	16	16	17
รวมทั้งหมด			190	212	208

จากตารางที่ 4.46 จะเห็นได้ว่า modulus ของยางสูตรทดลองสูงกว่าสูตรของโรงงาน ทั้ง 100% 200% 300% modulus ในขณะที่ค่า tensile strength ลดลง 3.21 MPa ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการใช้ปริมาณสารตัวเร่งที่สูงเกินไป ทำให้เกิดการ crosslink มาก modulus ของยางจึงเพิ่มสูงขึ้น และ จากการที่ค่า tensile strength ลดลงนั้น อาจเนื่องมาจาก การเบลนด์ยาง BR ลงไปในยางธรรมชาติ ซึ่งทำให้ค่าความแข็งแรงของยางลดลง ในส่วนของค่า heat build up พบว่าเพิ่มสูงขึ้นมาก เนื่องจากผลของยาง BR นั้นเอง ส่วนการสึกหรอของยางทดลองพบว่าการสึกหรอสูงกว่าสูตรยางเดิมของโรงงาน ส่วนค่า $\tan \delta$ พบว่า ที่ความถี่ 50 Hz ยางสูตรทดลองจะมีค่าต่ำกว่าสูตรโรงงาน ในขณะที่ความถี่ 0 Hz และ 10 Hz มีค่าไม่แตกต่างจากสูตรโรงงาน แสดงให้เห็นว่าที่ความถี่สูงการสูญเสียพลังงานของสูตรยางทดลองจะน้อยกว่าสูตรโรงงาน ซึ่งเป็นผลจากการเบลนด์ยาง BR เข้าไปในนั่นเอง

จากผลการทดสอบการใช้งานจริงที่โรงงานพบว่า ยางสูตรเดิมของโรงงานได้คะแนนสูงสุดคือ 212 คะแนน รองลงมาคือสูตรใหม่ 3 ชั้น และสูตรใหม่ 2 ชั้นได้คะแนนน้อยที่สุด (190 คะแนน) เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรยาง 2 ชั้นระหว่างสูตรยางเก่า และสูตรยางใหม่ พบว่า ความนุ่มนวล การจับจีบด้วยความเร็วสูงในขณะบรรทุกของ มีค่าแตกต่างของคะแนนสูงถึง 5 คะแนน ซึ่งอาจเป็นผลมาจาก ยางสูตรทดลองมีโมดูลัสที่สูง ทำให้มีลักษณะแข็ง โดยเฉพาะในเวลาที่ได้รับแรง (มีการบรรทุกของ) ทำให้ความนุ่มนวลและความเร็วในการจับจีบแยกว่ายางสูตรเก่า

4.2.3 การทดลองจริงครั้งที่ 2

การทดลองนี้ได้พัฒนาและใช้สูตรยางที่มียางบาทาได้อื่นน้อยลงดังแสดงในตารางที่

4.48 สมบัติของยางดังตารางที่ 4.49-4.50

ตารางที่ 4.48 สูตรยางขาวที่ใช้ในการทดลองจริงครั้งที่ 2

สารเคมี	ยางโรงงาน	ยางขาว
RSS 3	100	90
BR	-	10
Silica	45	45
Silane	3.6	3.6
PEG	3	3
Oils	3	3
Zn stearate	-	6
Stearic acid	2	-
Zinc Oxide	3	3
Sulphur	3	2
515P	2	2
TBBS	-	1.5
MBTS	1.5	-
TMTD	-	0.1
TiO ₂	5.75	5.75

ตารางที่ 4.49 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมปอนด์

Properties	ยางโรงงาน	ยางทดลอง
ML	1.41	0.78
MH	14.08	14.03
TS1	1.07	1.4
T90	3.05	5.56
% Reversion	13.64	3.71

ตารางที่ 4.50 สมบัติต่าง ๆ ของยางสูตรขาวจากโรงงานเปรียบเทียบกับสูตรทดลอง

Properties	ยางโรงงาน	ยางทดลอง
100 % Modulus (MPa)	3.03	3
200 % Modulus (MPa)	5.73	7
300 % Modulus (MPa)	8.89	11
T.S (MPa)	22.62	21
E.B. (%)	650	550
Tear resistance (N/mm)	101.8	67
Hardness (Shore A)	65.5	66
Heat build-up (C)	26	17.5
Yeszley resilience (%)	51.6	51
Crack Growth at 25,000รอบ (มม)	23	24
Flex resistance (รอบ)	15000	21000
Abrasion index (%)	50.93	42
tandelta @ 0 Hz	0.10487	0.0842
tandelta @ 10 Hz	0.12859	0.09683
tandelta @ 50 Hz	0.17578	0.15748
loss compliance	3.68459E-06	1.15696E-07
After aging 70 C 7 days		
100 % Modulus (%)	1.79	11
200 % Modulus (%)	3.04	6
300 % Modulus (%)	4.91	3
T.S after aging (%)	5.56	8
E.B. after aging (%)	10	15
Tear resistance after aging (%)	15	13

การอัดยางล้อทั้งที่มียางกลางและไม่มียางกลาง แล้วทำการทดลองใช้จริง ในการทดลองขับจริง ในครั้งนี้ใช้คนขับจำนวน 12 คน วันเดียวกับการทดลองยางดำ ทดสอบขับ เป็นเวลาอย่างน้อย 15 นาที ในแต่ละชุดการทดลอง หลังทดลองขับทำการประเมินได้คะแนนการประเมินในแต่ละหัวข้อดังตารางที่

ตารางที่ 4.51 ผลการทดสอบการใช้งานจริงของสูตรยางขาวสูตรโรงงานเทียบกับสูตรทดลอง

ลำดับ	หัวข้อการทดลอง		ผลการทดสอบ				
			ใหม่2ชั้น	ใหม่3ชั้น	เก่า3ชั้น	เก่า2ชั้น	บริษัทอื่น
1.	รถวิ่งตัวเปล่า ความเร็วปกติ						
	1.1	ความนุ่มนวลในการขับขี่	53	53	55	50	46
	1.2	การเกาะถนน/พื้น	55	55	56	51	53
	1.3	การเบรคหยุด	51	53	57	52	50
	1.4	การขับเคลื่อนลูกกระพิก	46	47	53	48	45
	1.5	การบังคับเลี้ยว	53	52	54	53	54
	รวมข้อ1		258	260	275	254	248
2.	รถวิ่งตัวเปล่า ความเร็วสูง						
	2.1	ความนุ่มนวลในการขับขี่	52	52	55	48	47
	2.2	การเกาะถนน/พื้น	51	54	55	52	50
	2.3	การเบรคหยุด	55	55	56	56	50
	2.4	การขับเคลื่อนลูกกระพิก	48	47	51	49	48
	2.5	การบังคับเลี้ยว	51	50	54	50	46
	รวมข้อ2		257	258	271	255	241
3	รถยกโมเดล ความเร็วปกติ						
	3.1	ความนุ่มนวลในการขับขี่	58	56	60	52	55
	3.2	การเกาะถนน/พื้น	55	57	57	55	53
	3.3	การเบรคหยุด	53	56	55	52	52
	3.4	การขับเคลื่อนลูกกระพิก	50	49	52	52	50
	3.5	การบังคับเลี้ยว	54	55	53	52	52
	รวมข้อ3		270	273	277	263	262
4	รถยกโมเดล ความเร็วสูง						
	4.1	ความนุ่มนวลในการขับขี่	57	54	57	51	52
	4.2	การเกาะถนน/พื้น	55	52	53	54	51
	4.3	การเบรคหยุด	53	53	54	53	48
	4.4	การขับเคลื่อนลูกกระพิก	50	47	51	49	49
	4.5	การบังคับเลี้ยว	54	53	55	52	50
	รวมข้อ4		269	259	270	259	250
รวมทั้งหมด (เต็ม 1200)			1054	1050	1093	1031	1001

จากการทดลองใช้ยางรถโฟล์คลิฟท์ขาว โดยเปรียบเทียบกับสูตรเดิมของโรงงาน กับสูตรใหม่ ที่เบลนด์ยาง BR ลงไป และเปลี่ยนระบบการวัลคาไนซ์เป็นแบบ semi EV พบว่า เมื่อเปรียบเทียบ คะแนนเต็มทั้ง 1200 คะแนน ยางสูตรเก่า 3 ชั้น ได้คะแนนมากที่สุด (1093 คะแนน) แต่เมื่อเปรียบเทียบ ยาง 2 ชั้น จะเห็นได้ว่า ยางสูตรใหม่จะได้คะแนนสูงกว่ายางสูตรเดิม 23 คะแนน ทั้งนี้เนื่องจากการ เบลนด์ยาง BR เข้าไปในสูตรยางทำให้สูตรยางจะมีการกระเด็นตัวดีขึ้น ทำให้เกิดความนุ่มสบายในการ ขับขี่มากกว่ายางสูตรเดิม และเมื่อเปรียบเทียบกับยางบริษัทอื่น พบว่าทั้งยางสูตรเก่าและยางสูตรใหม่ได้ ระดับคะแนนสูงกว่ามาก

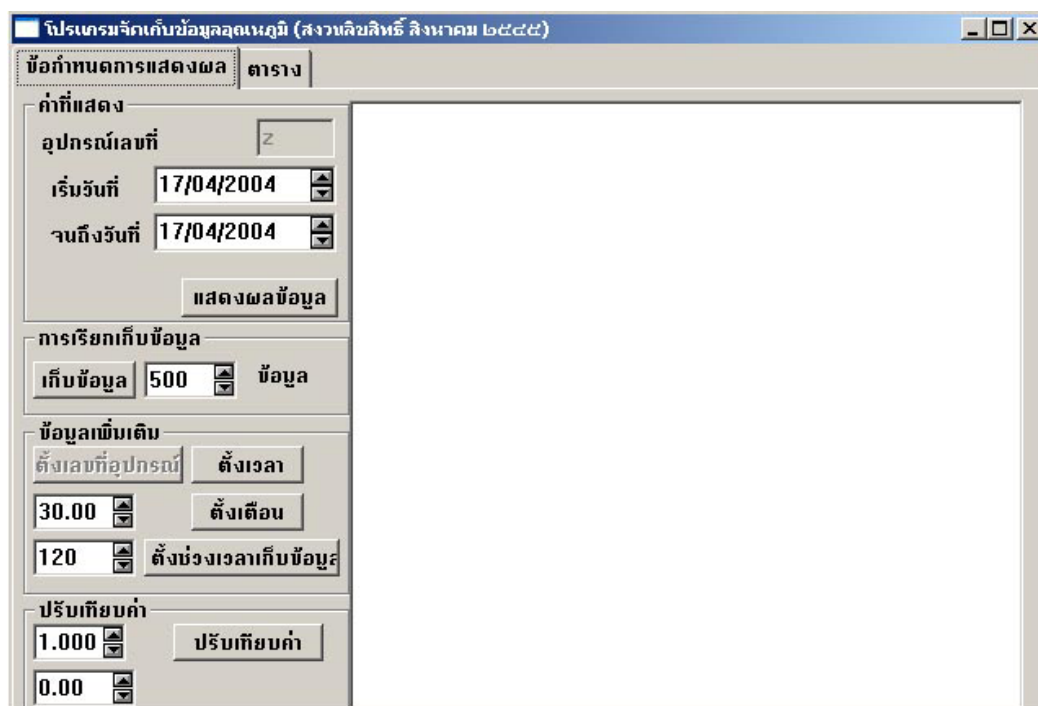
4.3 การวัดระดับการวัดคาในซ์

ขั้นตอนแรกในการพัฒนาส่วนของเครื่องมือที่ใช้ในการบันทึกผล และแสดงผลของอุณหภูมิและเวลา ทางผู้วิจัยได้เลือกใช้แผงควบคุมขนาดเล็กแบบสำเร็จรูปที่สามารถโปรแกรมได้เป็นต้นแบบ ส่วนในการวัดอุณหภูมิใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค ซึ่งมีราคาถูกและสามารถวัดอุณหภูมิได้ดีในช่วง 50

-180 องศาเซลเซียส เหมาะสำหรับการใช้งาน ลักษณะของแผงควบคุมสำเร็จรูปเป็นไปตามรูปที่ 4.1 ซึ่งอุปกรณ์ชิ้นนี้สามารถบันทึกเวลาและค่าที่วัดได้รวมทั้งสิ้น 4000 ตำแหน่ง และสามารถส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์ได้โดยผ่าน serial port โปรแกรมที่จะใช้ในคอมพิวเตอร์ได้แสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 แผงควบคุมสำเร็จรูป



รูปที่ 4.2 โปรแกรมเชื่อมต่อระหว่างแผงควบคุมกับคอมพิวเตอร์

ในการวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิลนั้นมีความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ในหลายทาง ยกตัวอย่าง เช่น

- ความผิดพลาดเนื่องจากสัญญาณรบกวนที่ส่วนขยาย, ส่วนแปลงสัญญาณ analog to digital
- ความผิดพลาดเนื่องจาก linearity ของส่วนขยาย, ส่วนแปลงสัญญาณ analog to digital
- ความผิดพลาดของการวัดอุณหภูมิที่ขั้วต่อเทอร์โมคัปเปิล เนื่องจากการวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิลนั้นเป็นการวัดค่าความแตกต่างระหว่างขั้วต่อ กับตำแหน่งหัวเทอร์คัปเปิลที่วัด
- ความผิดพลาดเนื่องจากค่าความต่างศักย์อ้างอิงที่ผิดพลาด การแปลงสัญญาณจาก analog เป็น digital นั้นจำเป็นต้องมีค่าความต่างศักย์อ้างอิง ถ้าอุปกรณ์ที่ให้กำเนิดค่าอ้างอิงนี้ ให้ค่าที่ผิดพลาดเมื่ออุณหภูมิบรรยากาศเปลี่ยนแปลง การแปลงสัญญาณก็จะผิดพลาดได้
- ความผิดพลาดเนื่องจากเซนเซอร์ ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณภาพของเซนเซอร์

ความผิดเนื่องจากสัญญาณรบกวนนั้นแก้ไขได้ยาก แต่ความผิดพลาดเรื่องอื่น ๆ ที่เหลือสามารถปรับปรุงแก้ไขด้วยการเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีคุณภาพ ซึ่งก็จะเกี่ยวเนื่องไปถึงราคา, ความทนทาน, ความกินพลังงานของอุปกรณ์ และความจำเป็นในการใช้งาน ในการวิจัยนี้ ทางผู้วิจัยได้เลือกคุณภาพระดับกลางที่เหมาะสมกับอุณหภูมิ 50-180 องศาเซลเซียส โดยมีความผิดพลาดประมาณ 1 องศาเซลเซียส และด้วยความผิดพลาดทั้งหมดดังกล่าวทำให้มีความจำเป็นต้องมีการ Calibration ก่อนที่จะมีการใช้งานครั้งแรกเสมอ ซึ่งสามารถทำได้ด้วยทาง Software และ Hardware แต่ในการวิจัยนี้จะทำการ Calibration ด้วย Software เท่านั้น

ในการทำ Software Calibration นั้นจะให้หลักการของ Linear Approximation ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของกฎที่ว่าความสัมพันธ์ของค่าจริงกับค่าที่อ่านได้นั้นเป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรง ดังนั้นในการทำ Calibration เราจึงต้องการค่าที่วัดในการ Calibration สองค่าด้วยกัน เช่น ให้ "a" เป็นค่าจริง (ค่าที่ต้องแสดงผล) และ "r" เป็นค่าที่อ่านได้ด้วยเซนเซอร์ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงกับค่าที่อ่านได้จึงเป็นตามสมการเส้นตรงดังนี้ $b + r * m = a$ จะเห็นได้ว่าจะต้องใช้จุดอ้างอิงสองจุดเพื่อหาความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ นั่นคือ $(1_r, 1_a)$ และ $(2_r, 2_a)$ เมื่อทำการวัดค่าทั้งสองจุดดังกล่าวแล้ว "m" จะมีค่าเท่ากับ $(1_r - 2_r) / (1_a - 2_a)$ และ "b" เท่ากับ $1_r * m - 1_a$

ขั้นตอนการ Calibration เป็นดังนี้

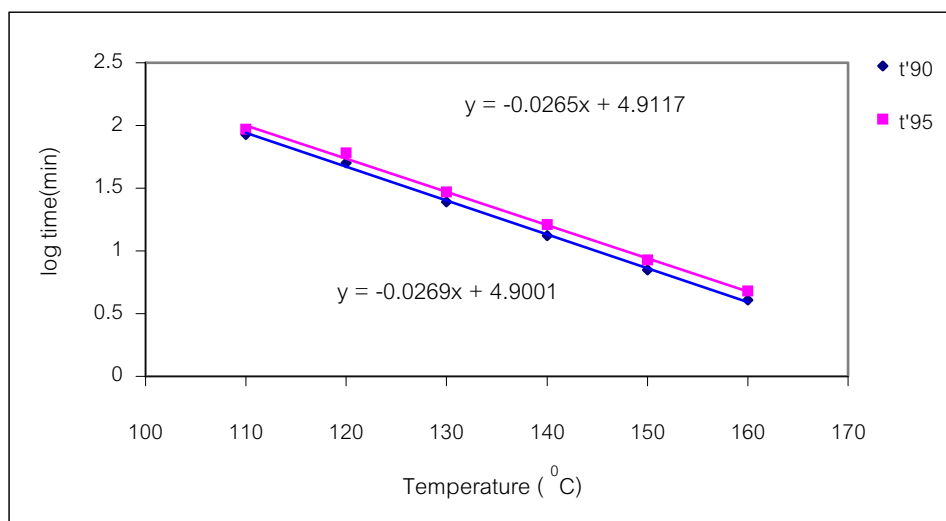
- (1) ตั้งค่า "m" เป็น 1 และ "b" เป็น 0
- (2) วัดค่าจุดอ้างอิงแรกจะได้ $(1_r, 1_a)$
- (3) จากนั้นจึงวัดค่าจากจุดอ้างอิงที่สองซึ่งจะได้ $(2_r, 2_a)$
- (4) ค่า "m" และ "b" ที่เหมาะสมจะสามารถคำนวณได้จากสมการข้างต้น

4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการวัลคาไนซ์ โดยเปรียบเทียบจากเครื่อง ODR 2000

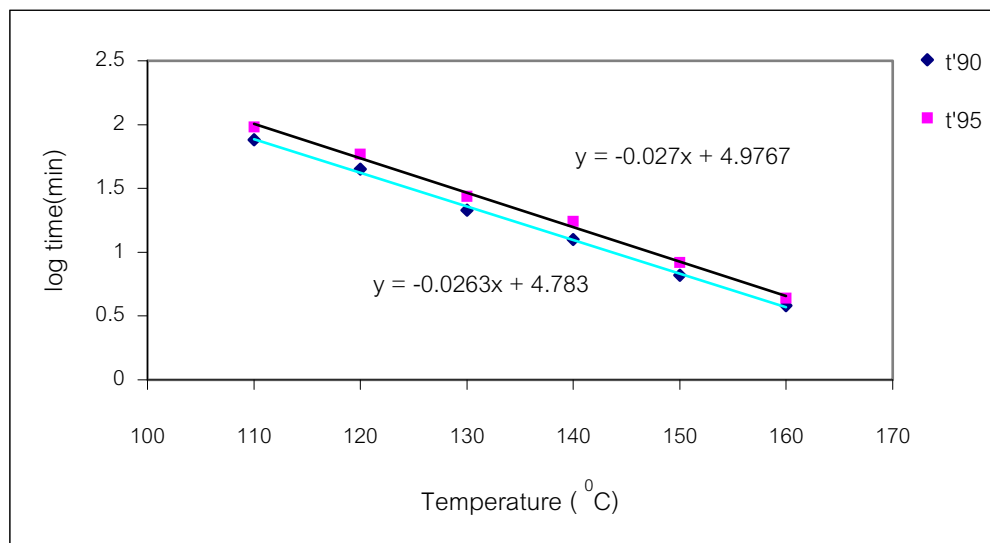
เตรียมชิ้นทดสอบจากยางคอมปอนด์ตามตารางที่ 3.1 นำมาทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง ODR 2000 โดยแปรอุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 110, 120, 130, 140, 150 และ 160 °C จากนั้นนำเวลาของการวัลคาไนซ์มา เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการวัลคาไนซ์ ได้ผลการทดลองดัง ตารางที่ 4.52 และรูปที่ 4.3, 4.4

ตารางที่ 4.52 ค่า cure time ที่ t'90 และ t'95 ของยางสูตรที่ 1 และ 2 (ดังตารางที่ 1) ที่อุณหภูมิการ วัลคาไนซ์ต่างๆ

Vulcanizing Temperature (°C)	Cure Time (min)			
	ยางสูตรที่ 1		ยางสูตรที่ 2	
	t'90	t'95	t'90	t'95
110	84.97	94.45	75.39	94.42
120	50.25	60.99	44.83	58.48
130	24.63	29.60	21.55	27.41
140	13.20	16.19	12.67	17.40
150	7.10	8.50	6.61	8.34
160	4.04	4.79	3.69	4.42



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ที่ 90't และ 95't โดยใช้เครื่อง 2000ODR ของยางสูตรที่ 1



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ที่ 90°t และ 95°t โดยใช้เครื่อง 2000ODR ของยางสูตรที่ 2

จะเห็นได้ว่าจากรูปที่ 4.3 และ 4.4 เวลาในการวัลคาไนซ์ของยางแต่ละอุณหภูมิมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงตามสมการ $\log t = AT + B$ จากความสัมพันธ์ที่ได้นี้ เราสามารถที่จะหาค่าสัมประสิทธิ์ในการวัลคาไนซ์ (Coefficient of Vulcanization, C) ได้ตามสมการดังนี้⁽⁶⁸⁾

$$C = 10^{-10A}$$

โดยค่า C คือ จำนวนเท่าของเวลาเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป $C^0 10$

นั่นคือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น $C^0 10$ เวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์จะลดลง C เท่า เป็นต้น

ตารางที่ 4.53 ค่า C ที่ได้จากการคำนวณ

สูตรยาง		ค่า C
1	t'90	1.86
	t'95	1.84
2	t'90	1.83
	t'95	1.86

จากรูปที่ 4.3 , 4.4 และตารางที่ 4.52 และ 4.53 เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการวัลคาไนซ์ กฎที่ใช้ในการปฏิบัติทั่วไปเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น $C^0 10$ เวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์จะลดลงประมาณ 2 เท่า ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่าค่าไม่เท่ากับ 2 แต่จะมีค่าใกล้เคียงกับ 2

ซึ่งจากตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิในการวัดค่าไนซ์เพิ่มขึ้น 10°C เวลาที่ใช้ในการวัดค่าไนซ์จะลดลงประมาณ 1.8 เท่า โดยขงสูตรที่ 1 และสูตรที่ 2 จะมีค่า C ใกล้เคียงกัน

4.3.2 การพัฒนาเครื่องมือวัดระดับการวัดค่าไนซ์ และผลของการวัดระดับการวัดค่าไนซ์กับสูตรวางแผนด้วยเป้าหมาย โดยใช้เครื่องวัดระดับการวัดค่าไนซ์

4.3.2.1 การ Calibrate เครื่องวัดระดับการวัดค่าไนซ์ เพื่อให้สามารถวัดค่าได้ตามความเป็นจริงเราจึงต้องทำการ Calibrate เครื่องวัด หลักการการ Calibrate เครื่องวัดระดับการวัดค่าไนซ์ จะเป็นไปตามสมการเส้นตรง $a = m \cdot r + b$ โดยแกน x คือค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากเครื่องวัดระดับการวัดค่าไนซ์ (r) แกน y คือค่าอุณหภูมิจริง (a) จากเครื่องมือวัดที่มีเชื่อถือได้ เช่น เทอร์โมมิเตอร์ เป็นต้น โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการตั้งค่าเครื่องวัดระดับการวัดค่าไนซ์กับคอมพิวเตอร์ โดยตั้งค่าให้ Slope = 1 และตั้งค่า offset = 0 (จะเห็นได้ว่า slope คือค่า m และ offset คือ ค่า b)
2. ทำการวัดอุณหภูมิจุดแรกของน้ำร้อน (อย่างน้อย 50°C ขึ้นไป) โดยให้ A คือ ค่าอุณหภูมิจริง , R คือ ค่าอุณหภูมิที่วัดได้ จะได้เป็น (A_1, R_1)
3. ทำการวัดอุณหภูมิจุดที่ 2 โดยค่าอุณหภูมิจริงห่างจากจุดแรกประมาณ 20°C จะได้เป็น (A_2, R_2)
4. ค่า m และ b สามารถคำนวณได้โดย $m = (A_2 - A_1) / (R_2 - R_1)$, $b = A_1 - m \cdot R_1$ หรือสามารถหาค่า m และ b ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่วัดจากเครื่องได้กับค่าจริงที่วัดได้จากเทอร์โมคอปเปิล
5. นำค่า m และ b มาเซ็ทในเครื่องวัดระดับการวัดค่าไนซ์ โดยแทนค่า Slope = m และค่า offset = b ที่คำนวณได้

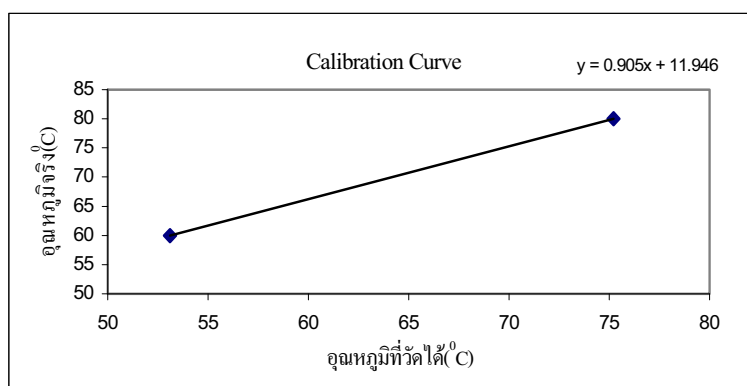
ในการวิจัยทั้งหมดจะเตรียมขึ้นทดสอบจากยางคอมเปานด์ตามตารางที่ 3.2 และข้างขึ้นในที่ส่งมาจากทางบริษัท สยามไฟโอเนียร์ จำกัด นำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการวัดค่าไนซ์ตามวิธีการทดลองข้อที่ 3.3.4.3 และทำการ Calibrate เครื่องวัดระดับการวัดค่าไนซ์ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้ว แล้วนำยางคอมเปานด์ทั้ง 2 ชิ้น มาทำทดลองโดยการอัดเบ้าด้วยเป้าหมาย โดยการจัดเรียงยางคอมเปานด์ทั้งสองชิ้นจะจำลองการจัดเรียงที่เกิดขึ้นจริงในการผลิตยางล้อต้น ในขณะเดียวกันใช้เครื่องวัดระดับการวัดค่าไนซ์ บันทึกผลตามที่จะได้เสนอผลการทดลองต่อไป

4.3.2.2 ผลการอัดเบ้าครั้งที่ 1

สำหรับการทดลองครั้งที่ 1 ซึ่งเป็นการทดลองขึ้นเบื่องต้นนั้น มีสิ่งที่ต้องทำการศึกษาหลายเรื่องด้วยกัน เช่น ชนิดและความเหมาะสมของเซนเซอร์ที่เลือกใช้, วิธีในการฝังเซนเซอร์, การใช้งานของตัวมิเตอร์ในขั้นเบื่องต้น, ขั้นตอนและปริมาณในการอัดเบ้าที่มีขนาดใหญ่ เป็นต้น โดยทั้งหมด

ทั้งสิ้นนี้ จำเป็นต้องทำการศึกษาควบคู่กันไปเนื่องด้วยระยะเวลาที่มีจำกัด รวมไปถึงปริมาณยางชั้นใน หรือชั้นผ้าใบ ที่ส่งมาจากทางบริษัทที่มีจำนวนจำกัด และระยะเวลาในการเก็บที่สั้นอีกด้วย โดยในครั้งแรกนี้จะมีการบันทึกข้อมูลเพียงตำแหน่งเดียวคือวัดที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของเบ้า อีกทั้งมิเตอร์รุ่นแรกที่ใช้ยังไม่สามารถคำนวณค่า state of cure ได้ เป็นเพียงแค่การวัดอุณหภูมิ และบันทึกไว้เท่านั้น

สำหรับขั้นเบื้องต้นเมื่อทำการเตรียมชิ้นยางคอมเพานด์สำหรับอัดเบ้าก็พบว่าการที่จะฝังเซนเซอร์ในขั้นตอนของการขึ้นรูปนั้นเป็นไปได้ยากมาก เนื่องจากปริมาณยางที่ใกล้เคียงขนาดของเบ้าทำให้ร้อยสายออกมาจากรูที่เจาะเบ้าไว้ได้ยาก อีกทั้งตำแหน่งที่ฝังนั้นไม่สามารถกำหนดได้แม่นยำตามที่เหมาะสม การเลื่อนตำแหน่งไปเพียง 2-3 เซนติเมตรอาจหมายถึงระยะเวลาที่แตกต่างในการอัดเบ้าถึงกว่าครึ่งชั่วโมงเลยทีเดียว ดังนั้น ทางคณะวิจัยจึงตัดสินใจใช้เซนเซอร์ที่มีลักษณะที่เป็นแท่งยาว และจะมีการใส่เข้าไปหลังจากมีการอัดเบ้าแล้วในขั้นแรก ดังนั้นขั้นตอนแรกที่ต้องทำคือการ Calibrate เครื่องมือกับเซนเซอร์ที่ต้องการใช้ ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.5 ซึ่งจะให้ค่า slope (m) และ offset (b) ที่ต้องการ



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่วัดได้(°C) กับอุณหภูมิจริง(°C)

ผลการทดลองได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.55 ซึ่งจะเห็นว่ามีกรวัดข้อมูลเริ่มต้นที่เวลาการอัดเบ้าผ่านไปแล้วถึง 90 นาที นั้นเกิดเนื่องจากในขั้นต้นไม่สามารถใส่เซนเซอร์เข้าไปในตำแหน่งที่ต้องการได้ เนื่องจากความดันที่สูงในการอัดเบ้า จะดันให้เซนเซอร์ไหลออกมาจากตำแหน่งอยู่ตลอดเวลา จึงต้องมีการทำอุปกรณ์สำหรับจับยึดแบบชั่วคราวขึ้น ทำให้เสียเวลาในขั้นเริ่มต้นไป อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนั้นยังอยู่ในระดับที่ค่อนข้างต่ำเนื่องจากยางมีความเป็นฉนวน ผลที่ตามมาอีกอย่างหนึ่งในการใช้วิธีการจับยึดแบบชั่วคราวนี้คือ ตำแหน่งที่วัดได้นั้นอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางที่ต้องการประมาณ 3 ซม. ซึ่งอุณหภูมิที่วัดได้จากมิเตอร์ จะถูกอ่านเข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อนำมาประมวลผลตามตารางที่ 4.55 ในการวัดทั้งหมดจะมีการบันทึกข้อมูลเก็บไว้ในมิเตอร์ทุก ๆ ระยะเวลา 3 นาที ในรูปที่

4.6 แสดงถึงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของยางที่ตำแหน่งดังกล่าวกับเวลา จะเห็นได้ชัดว่า ในขณะที่เวลาผ่านไปเกือบ 5 ชั่วโมงนั้น ที่ตำแหน่งดังกล่าวยังห่างจากอุณหภูมิที่ผิวเข้าเป็นอย่างมาก นั่นคือประมาณ 200 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาต่อไปว่าเมื่อยางผ่านความร้อนในลักษณะเช่นนี้ จะมีระดับการวัลคาไนซ์ เป็นอย่างไร ข้อมูลด้านอุณหภูมิและเวลาจะถูกนำมาประมวลตามวิธีที่จะกล่าวต่อไป

การคำนวณระดับการวัลคาไนซ์ของยาง

สำหรับคำนวณระดับการวัลคาไนซ์ เป็นการคำนวณจากข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่วัดโดยตรงจากตัวเซนเซอร์ กับเวลาที่อ่านจากแผงควบคุม โดยความเข้มของการ วัลคาไนซ์ (I) คือ

$$I = C \frac{T(t) - T_r}{10} \quad (1)$$

T(t) คือค่าอุณหภูมิของยางที่อ่านจากเซนเซอร์ ณ เวลา t Tr คือค่าอุณหภูมิอ้างอิงที่ใช้ในการหาค่า cure time จากเครื่อง ODR และ C คือค่าจำนวนเท่าของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10 องศาเซลเซียส จะสังเกตเห็นว่าความเข้มของการ วัลคาไนซ์ (I) จะเท่ากับ 1 เมื่ออุณหภูมิของยางเท่ากับอุณหภูมิอ้างอิงจาก ODR

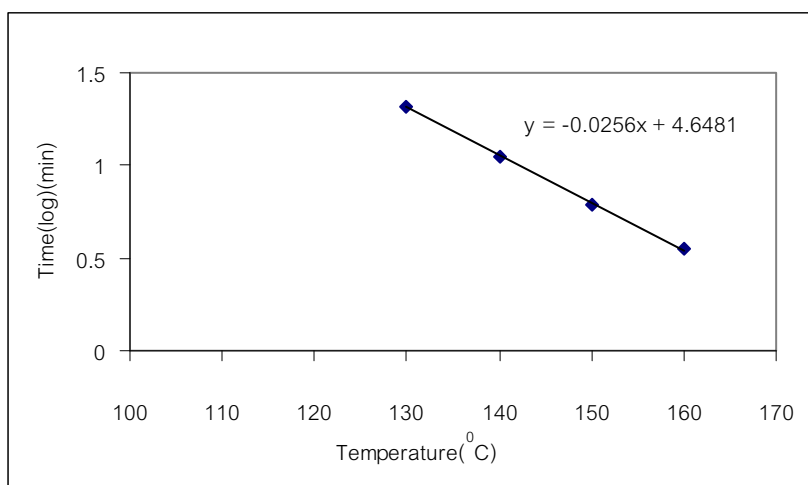
ดังนั้นผลจากการ วัลคาไนซ์ (E) นั่นคือพื้นที่ใต้กราฟระหว่าง I และ เวลา (t) หรือ

$$E = \int_0^t I dt \quad (2)$$

ระดับการ วัลคาไนซ์ (% cure) สามารถหาได้จากการเทียบกับค่ามาตรฐานจาก ODR ($E_r = t_{cure}$) ในขณะที่ t_r คือ cure time ที่ได้จาก ODR ที่อุณหภูมิอ้างอิง Tr หรือ $\% \text{ cure} = (E/E_r) \times 100$

ตารางที่ 4.54 เวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ ของสูตรยาง ดังตารางที่ 2 ที่อุณหภูมิการวัลคาไนซ์ต่างๆ ที่ได้จากการทดลองครั้งที่ 1

Temp.(°C)	130	140	150	160
Time(min)	20.96	11.23	6.19	3.57



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ($^{\circ}\text{C}$) กับเวลา(min)ที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ ของสูตรยางจากตารางที่ 3.2 จากการทดลองครั้งที่ 1

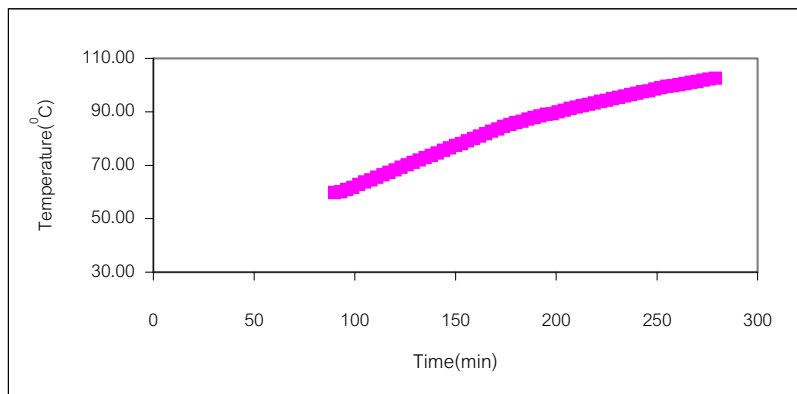
จากตารางที่ 4.54 และรูปที่ 4.6 สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การวัลคาไนซ์ C ได้ตามวิธีที่ได้กล่าวมาแล้วซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.81 ซึ่งสามารถนำมาคำนวณระดับการวัลคาไนซ์ (% cure) ได้ตามสมการที่ 1-2 ซึ่งตัวอย่างในการคำนวณแสดงไว้ในภาคผนวก ผลการคำนวณได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.55 และรูปที่ 4.8

ตารางที่ 4.55 เวลา, อุณหภูมิและเปอร์เซ็นต์การวัลคาไนซ์ที่คำนวณได้จากการทดลองในครั้งที่ 1 โดยทำการวัลคเมื่อเวลาอัดเข้าผ่านไประหว่าง 90 นาที

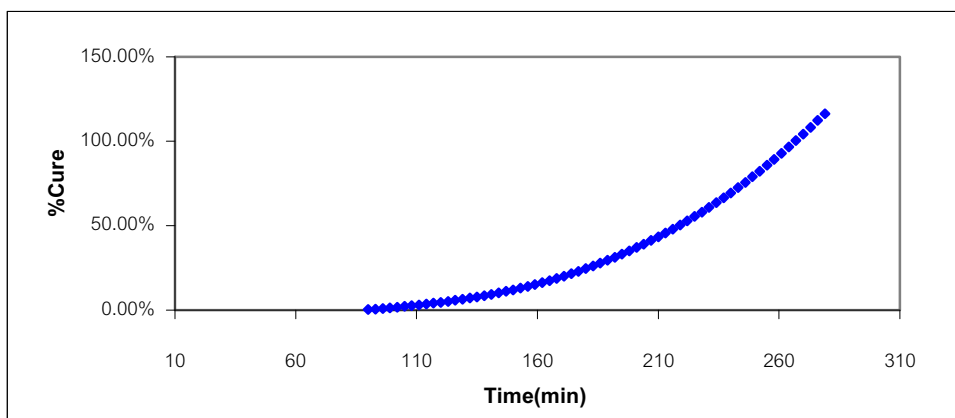
(min)Time	($^{\circ}\text{C}$)Temp	Interval	Value-C	Vulc-Del	Vulc-T	Cure %
90	59.74	3	02-E1.55	02-E4.64	02-E4.64	%0.33
93	60.12	3	02-E1.58	02-E4.75	02-E9.39	%0.66
96	60.85	3	02-E1.65	02-E4.96	01-E1.43	%1.01
99	61.74	3	02-E1.74	02-E5.23	01-E1.96	%1.38
102	62.76	3	02-E1.85	02-E5.55	01-E2.51	%1.77
105	63.73	3	02-E1.96	02-E5.88	01-E3.10	%2.19
108	64.52	3	02-E2.05	02-E6.16	01-E3.72	%2.62
111	65.49	3	02-E2.18	02-E6.53	01-E4.37	%3.08
114	66.39	3	02-E2.30	02-E6.89	01-E5.06	%3.57
117	67.34	3	02-E2.43	02-E7.29	01-E5.79	%4.08

120	68.25	3	02-E2.56	02-E7.69	01-E6.56	%4.62
123	69.21	3	02-E2.71	02-E8.14	01-E7.37	%5.19
126	70.17	3	02-E2.87	02-E8.62	01-E8.23	%5.80
129	71.02	3	02-E3.02	02-E9.06	01-E9.14	%6.44
132	71.96	3	02-E3.19	02-E9.58	00+E1.01	%7.12
135	72.88	3	02-E3.37	01-E1.01	00+E1.11	%7.83
138	73.68	3	02-E3.54	01-E1.06	00+E1.22	%8.58
141	74.62	3	02-E3.74	01-E1.12	00+E1.33	%9.37
144	75.54	3	02-E3.95	01-E1.19	00+E1.45	%10.20
(min)Time	(C ⁰)Temp	Interval	Value-C	Vulc-Del	Vulc-T	Cure %
147	76.51	3	02-E4.18	01-E1.26	00+E1.57	%11.09
150	77.41	3	02-E4.42	01-E1.32	00+E1.71	%12.02
153	78.15	3	02-E4.61	01-E1.38	00+E1.84	%13.00
156	79.11	3	02-E4.88	01-E1.46	00+E1.99	%14.03
159	80.01	3	02-E5.15	01-E1.55	00+E2.15	%15.12
162	80.87	3	02-E5.42	01-E1.63	00+E2.31	%16.26
165	81.79	3	02-E5.73	01-E1.72	00+E2.48	%17.47
168	82.69	3	02-E6.04	01-E1.81	00+E2.66	%18.75
171	83.52	3	02-E6.34	01-E1.90	00+E2.85	%20.09
174	84.51	3	02-E6.73	01-E2.02	00+E3.05	%21.51
177	85.26	3	02-E7.03	01-E2.11	00+E3.26	%23.00
180	85.92	3	02-E7.31	01-E2.19	00+E3.48	%24.55
183	86.44	3	02-E7.54	01-E2.26	00+E3.71	%26.14
186	87.21	3	02-E7.90	01-E2.37	00+E3.95	%27.81
189	87.85	3	02-E8.20	01-E2.46	00+E4.19	%29.54
192	88.45	3	02-E8.50	01-E2.55	00+E4.45	%31.34
195	89.06	3	02-E8.81	01-E2.64	00+E4.71	%33.20
198	89.29	3	02-E8.93	01-E2.68	00+E4.98	%35.09
201	90.00	3	02-E9.32	01-E2.80	00+E5.26	%37.06
204	90.57	3	02-E9.64	01-E2.89	00+E5.55	%39.10
207	91.23	3	01-E1.00	01-E3.01	00+E5.85	%41.22

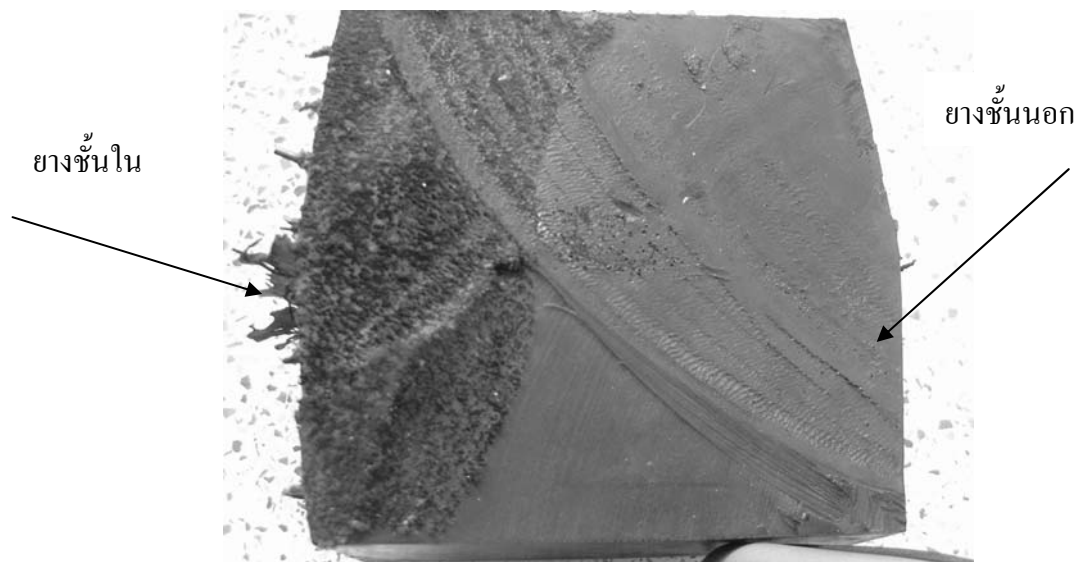
210	91.76	3	01-E1.03	01-E3.10	00+E6.16	%43.41
213	92.33	3	01-E1.07	01-E3.21	00+E6.48	%45.67
216	92.82	3	01-E1.10	01-E3.30	00+E6.81	%48.00
219	93.27	3	01-E1.13	01-E3.39	00+E7.15	%50.39
222	93.88	3	01-E1.17	01-E3.52	00+E7.50	%52.87
225	94.35	3	01-E1.21	01-E3.62	00+E7.86	%55.42
228	94.88	3	01-E1.24	01-E3.73	00+E8.24	%58.05
231	95.39	3	01-E1.28	01-E3.85	00+E8.62	%60.76
234	95.93	3	01-E1.32	01-E3.97	00+E9.02	%63.56
237	96.38	3	01-E1.36	01-E4.08	00+E9.43	%66.44
240	96.93	3	01-E1.41	01-E4.22	00+E9.85	%69.41
243	97.50	3	01-E1.45	01-E4.36	01+E1.03	%72.48
246	97.87	3	01-E1.49	01-E4.46	01+E1.07	%75.62
249	98.52	3	01-E1.54	01-E4.63	01+E1.12	%78.89
252	99.04	3	01-E1.59	01-E4.78	01+E1.17	%82.26
255	99.50	3	01-E1.64	01-E4.91	01+E1.22	%85.72
258	99.71	3	01-E1.66	01-E4.97	01+E1.27	%89.22
261	100.11	3	01-E1.70	01-E5.09	01+E1.32	%92.81
264	100.59	3	01-E1.75	01-E5.24	01+E1.37	%96.51
(min)Time	(C ⁰)Temp	Interval	Value-C	Vulc-Del	Vulc-T	Cure %
267	101.09	3	01-E1.80	01-E5.40	01+E1.42	%100.31
270	101.38	3	01-E1.83	01-E5.49	01+E1.48	%104.18
273	101.89	3	01-E1.89	01-E5.66	01+E1.53	%108.17
276	102.20	3	01-E1.92	01-E5.77	01+E1.59	%112.23
279	102.56	3	01-E1.96	01-E5.89	01+E1.65	%116.38



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์(min) กับอุณหภูมิ($^{\circ}\text{C}$) ของยางที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของเบ้า ที่ได้จากการทดลองในครั้งที่ 1



รูปที่ 4.8 เปอร์เซนต์การวัลคาไนซ์ของยางคอมเพานด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยเก็บข้อมูลจากเครื่องวัดระดับการวัลคาไนซ์ จากการทดลองในครั้งที่ 1



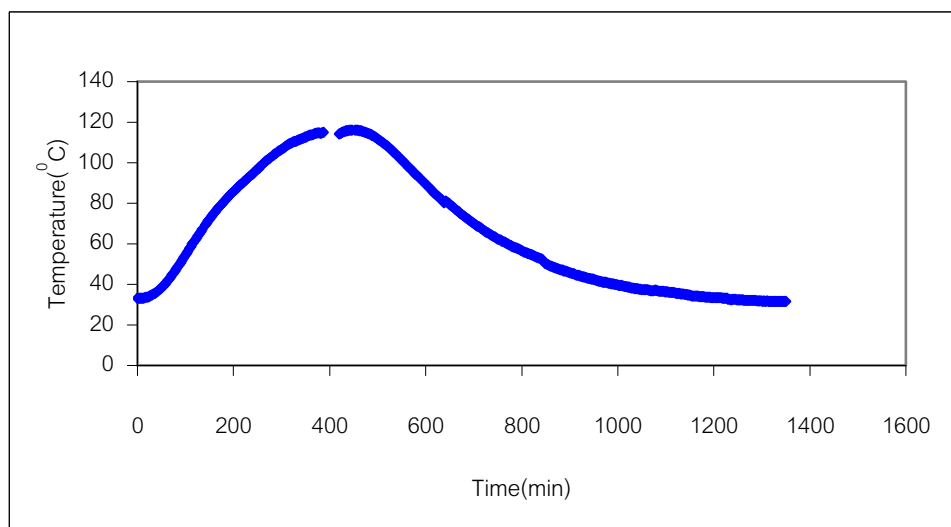
รูปที่ 4.9 ลักษณะของยางวัลคาไนซ์ที่ได้จากการทดลองครั้งที่ 1

จากรูปที่ 4.8 นั้นจะพบว่าเมื่อสิ้นสุดการบันทึกระดับการวัลคาไนซ์นั้นมีค่ากว่า 116% แต่เมื่อสังเกตจากรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าตรงกึ่งกลางของยางจะมีลักษณะเป็นฟองอากาศ ซึ่งไม่น่าจะมีเกิดขึ้นถ้าระดับการวัลคาไนซ์สูงถึงขนาดนั้นแล้ว คาดว่าน่าจะเป็นมาจากสองสาเหตุคือ การที่มีการที่พยายามใส่เซนเซอร์เข้าออกหลาย ๆ ครั้ง รวมถึงตลอดช่วงเวลาการอัดที่ต้องคอยใส่เข้าไปใหม่เนื่องจากการจับยึดเซนเซอร์แบบชั่วคราวนั้นไม่ค่อยดีนัก ซึ่งอาจเป็นการอัดอากาศเข้าไปเพิ่มเติมในระบบในขณะที่ยางกำลังขึ้นรูปก็เป็นได้ และอีกเหตุผลคือเนื่องจากบริเวณที่วัดนั้นอยู่บริเวณขอบด้านนอกของส่วนที่เกิดฟองอากาศ ซึ่งค่าระดับการวัลคาไนซ์ที่คำนวณมานั้นไม่ได้เป็นส่วนของที่เกิดฟองอากาศแต่อย่างใด อย่างไรก็ตามในการทดลองครั้งนี้ทำให้ได้ขั้นตอนในการใส่เซนเซอร์ที่เหมาะสม รวมไปถึงได้เรียนรู้เทคนิคที่จะใช้ในการทดลองขั้นต่อ ๆ ไป รวมไปถึงทั้งแนวทางในการปรับปรุงเบ้าให้มีการจับยึดของเซนเซอร์ที่ดีขึ้นได้ ซึ่งทางคณะวิจัยได้ใช้การติดต่อที่มีการกลึงเกลียวสำหรับยึดเซนเซอร์ที่ด้านนอกของเบ้า ซึ่งนอกจากจะป้องกันการไหลของเซนเซอร์ระหว่างการทดลองแล้วยังสามารถกำหนดระยะที่ปลายเซนเซอร์จะวัดภายในเนื้อยางได้อย่างแม่นยำอีกด้วย นอกจากนั้นแล้วข้อมูลจากชิ้นยางที่อัดได้ยังนำมาใช้ในการเตรียมปริมาณยางในครั้งต่อไปได้ดียิ่งขึ้นเพื่อลดการไหลของยางทำให้สามารถใส่เซนเซอร์เข้าไปวัดได้รวดเร็วขึ้นอีกด้วย

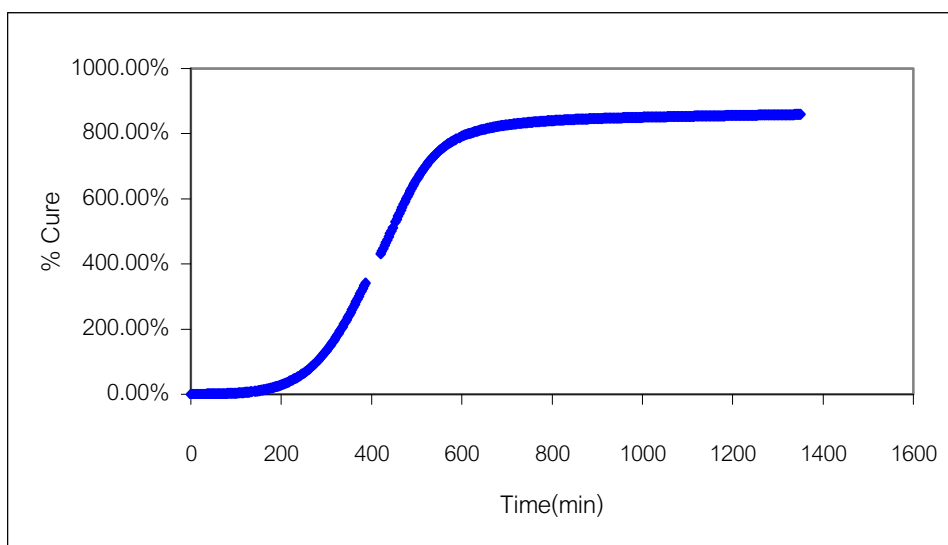
4.3.2.3 ผลการทดลองครั้งที่ 2

ทำการแก้ไขตำแหน่งของเทอร์โมคอปเปิลจากการทดลองครั้งที่ 1 ให้อยู่ที่จุดศูนย์กลางของเบ้าโดยใช้การยึดด้วยทอกลึงเกลียว โดยใช้ค่า C คือ 1.81 เพราะเป็นยาสสูตรเดียวกัน และใช้ค่า Calibrate เดียวกันกับการทดลองครั้งแรก แต่ในการทดลองครั้งที่สองนี้จะมีการบันทึกอุณหภูมิภายหลังแกะเบ้าแล้วอีกด้วย เพื่อที่จะคำนวณการวัดคาไนซ์ที่เกิดจากความร้อนที่หลงเหลือ (post cure) จากรูปที่ 4.10 บริเวณที่เส้นกราฟขาดไปนั้นคือช่วงเวลาที่แกะยางออกจากเบ้า ก่อนที่จะใส่เซนเซอร์เข้าไปยังตำแหน่งเดิม จะเห็นว่าในขณะที่ใช้เวลา 400 นาที่ในการเพิ่มอุณหภูมิจาก 30 เป็นประมาณ 120 องศาเซลเซียส กลับต้องใช้เวลากว่า 1000 นาที่ เพื่อที่จะทำให้อุณหภูมิกลับมาสู่อุณหภูมิห้องดั้งเดิม ดังนั้นจึงสามารถคาดการณ์ได้ว่าสำหรับระดับการวัดคาไนซ์ที่เกิดขึ้นหลังจากถอดออกจากเบ้านั้นต้องมีสัดส่วนที่สูงพอสมควร ซึ่งจากการคำนวณ และได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าอัตราส่วนการวัดคาไนซ์ที่เกิดขึ้นภายหลังจากการถอดออกจากเบ้านั้นมีมากกว่ากึ่งหนึ่ง ถ้าสังเกตจากทั้งสองรูปดังกล่าวจะพบว่าเวลาที่ใช้ในการอัดเบ้านั้นยาวมากเป็นพิเศษทั้งนี้เพื่อความมั่นใจว่าวิธีในการทดลองนั้นเหมาะสมเพียงพอที่จะทำให้เกิดขึ้นงานที่มีความสมบูรณ์ได้ โดยไม่มีผลจากการที่มีการใส่เซนเซอร์เข้าไปในระหว่างการอัดเบ้า หรืออีกนัยหนึ่งคือการที่มีการลดความดันระหว่างช่วงแรกของการอัดเบ้าเพื่อที่จะใส่เซนเซอร์นั้นไม่ทำให้เกิดการกักขังของอากาศ ซึ่งทำให้เกิดฟองเช่นเดียวกันกับการทดลองครั้งแรก เมื่อผ่าชิ้นงานออกดูตามรูปที่ 4.12 จะพบว่าไม่มีฟองอากาศเกิดขึ้น แนวของเทอร์โมคัปเปิล แสดงให้เห็นว่าโดยวิธีการใช้ทอยึด ทำให้สามารถกำหนดตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำ

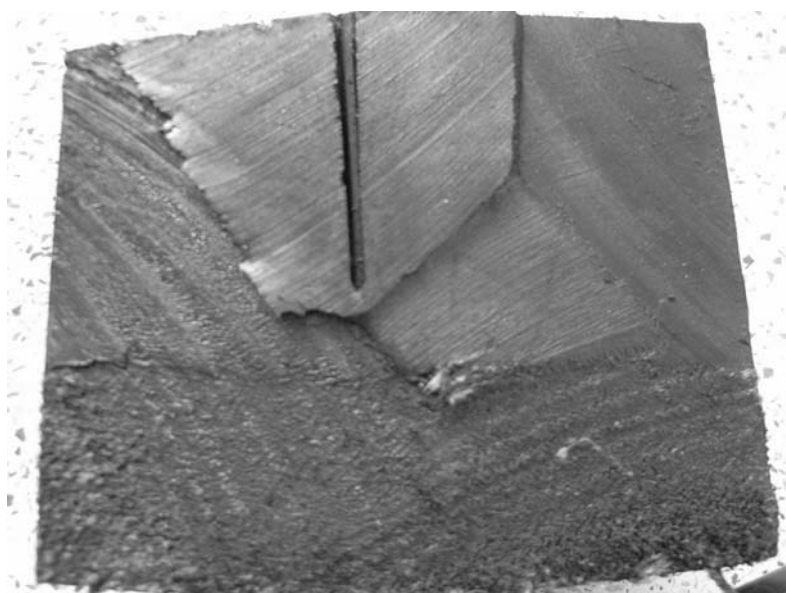
ในการอัดเบ้านานเช่นนี้นั้น ทำให้ระดับการวัดคาไนซ์ตามทฤษฎีที่คำนวณได้ ในขณะที่เอายางออกจากเบ้านั้น เปอร์เซ็นต์การวัดคาไนซ์ที่คำนวณได้จะประมาณเกือบ 400% และเมื่อปล่อยให้ยางเกิดการวัดคาไนซ์ต่อไปเรื่อยๆ เปอร์เซ็นต์การวัดคาไนซ์ที่คำนวณได้จะประมาณ 800% มีความหมายในทางทฤษฎีแต่เพียงว่า ยางในตำแหน่งดังกล่าวมีการวัดคาไนซ์ เทียบเท่าที่อุณหภูมิอ้างอิงเป็นระยะเวลา 4 เท่า และ 8 เท่า ของ cure time ตามลำดับเท่านั้น ไม่ได้บ่งบอกถึงการรีเวอร์ชันได้ แต่ในการทดลองนี้ได้ใช้สูตรยางที่มีความทนทานต่อการรีเวอร์ชัน ดังนั้นจึงไม่ปัญหาในการทดลอง



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์(min) กับอุณหภูมิ($^{\circ}\text{C}$) ของยางที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลาง ของเบ้าที่จากการทดลองในครั้งที่ 2



รูปที่ 4.11 เปอร์เซนต์การวัลคาไนซ์ของยางคอมเพานด์ที่ได้จากการคำนวณ โดยเก็บข้อมูลจากเครื่องวัดระดับการวัลคาไนซ์จากการทดลองในครั้งที่ 2



รูปที่ 4.12 ลักษณะของยางวัลคาไนซ์ที่ได้จากการทดลองในครั้งที่ 2

จากการทดลองทั้งสองครั้งนี้ ทำให้ได้ทราบถึงกรรมวิธีที่เหมาะสมในการทดลอง และยังเพิ่มความมั่นใจในเซนเซอร์ที่เลือกไว้ว่าจะสามารถประยุกต์ใช้ในการวิจัยนี้ได้เหมาะสม ขั้นตอนต่อไปนั้นจึงเป็นการโปรแกรมการคำนวณระดับวัลคาไนซ์เข้าไปในแผงวงจร รวมไปถึงการออกแบบระบบการใช้งานของเครื่อง, แบบของกล่องบรรจุแผงวงจร เป็นต้น

ในขณะที่ในแบบเสนอร่างโครงการจะเป็นการเสนอเครื่องที่มี 8 ช่องสัญญาณในขั้นตอนต่อไป ทางคณะผู้วิจัยมีความเห็นว่า ด้วยแบบที่ออกแบบมาแล้วนั้น จะเป็นการสะดวก และประหยัดต้นทุนมากกว่าในการที่จะใช้เครื่องวัดแบบ 1 ช่องสัญญาณหลาย ๆ ตัว เนื่องจากโดยขนาดของเซนเซอร์นั้นจะจำกัดตำแหน่งที่วัดได้ประมาณ 3 ตำแหน่ง และการ Calibrate แยกตัวนั้นจะให้ผลที่แม่นยำไม่มีการรบกวนกันระหว่างช่องสัญญาณ อีกทั้งขนาดและการขนย้ายจะเป็นไปโดยง่ายและสะดวกกว่า 8 ช่องสัญญาณที่จะต้องมีความใหญ่กว่า

4.3.2.4 ผลการทดลองครั้งที่ 3

ในการทดลองครั้งที่ 3 นี้เครื่องวัดระดับการวัลคาไนซ์แบบพกพานั้นถูกปรับปรุงเพื่อที่จะสามารถคำนวณระดับการวัลคาไนซ์ ซึ่งมีรายละเอียดตามที่แสดงไว้ในภาคผนวก ลักษณะของเครื่องวัดระดับการวัลคาไนซ์แสดงดังรูปที่ 4.13 การใช้งานเครื่องมือวัดระดับการวัลคาไนซ์ สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. ปุ่มซ้ายมือด้านล่าง ทำหน้าที่เปลี่ยน mode คือ

- เวลา
- วันที่
- อุณหภูมิ
- % cure
- แบตเตอรี่

2. ปุ่มขวามือด้านล่างจะเป็นปุ่มที่ใช้เซต % cure ให้เท่ากับ 0 เมื่อเราจะเริ่มทดสอบ

3. ปุ่มขวามือด้านบน จะเป็นปุ่มที่ใช้เริ่มต้นนับ % cure หลังจากทำการเซต 0 แล้ว

4. สามารถต่อกับคอมพิวเตอร์ได้ เพื่อทำการเซตข้อมูลต่างๆ หรือเซตช่วงเวลาที่ต้องการเก็บข้อมูลและทำการ Calibrate เครื่องมือวัดระดับการวัลคาไนซ์

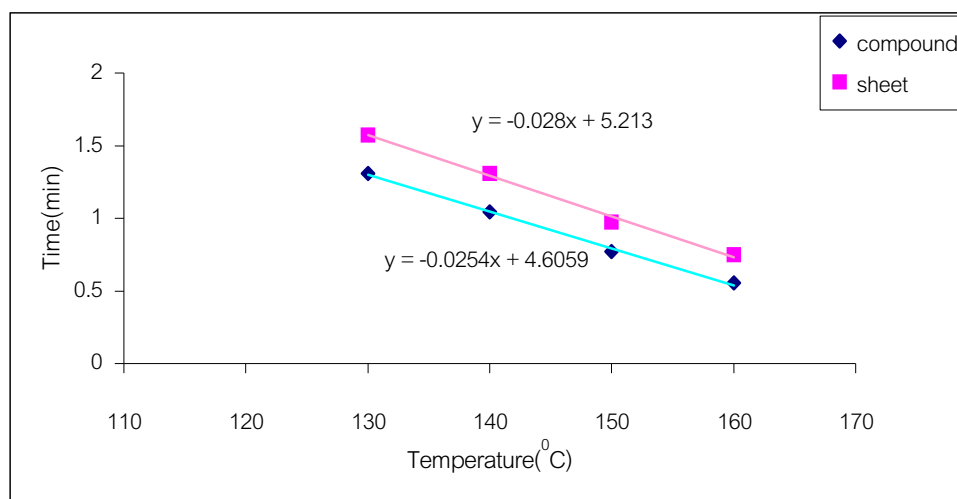
ในครั้งนี้จะทำการวัดระดับการวัลคาไนซ์โดยใช้เครื่องวัดระดับการวัลคาไนซ์ 3 ตำแหน่ง คือ ที่จุดศูนย์กลางของเบ้า ที่ตำแหน่งของยางชั้นในในส่วนล่าง และที่ตำแหน่งกึ่งกลางส่วนบนของเบ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และทำการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การวัลคาไนซ์ที่ได้จากเครื่องวัดระดับการวัลคาไนซ์กับเปอร์เซ็นต์การวัลคาไนซ์ที่ได้จากการคำนวณโดยเก็บข้อมูลจากเครื่องวัดระดับการวัลคาไนซ์ ทั้งนี้เพื่อศึกษาขึ้นเบื้องต้นเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนของยางภายในเบ้า รวมทั้งศึกษาความแตกต่างระหว่างยางชั้นนอกกับยางชั้นภายในอีกด้วย

ในขั้นต้นจากรูปที่ 4.14 เป็นการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การวัลคาไนซ์ C ของยางชั้นนอกหรือยางคอมเพานด์ ยางชั้นใน หรือยางชั้นผ้าใบ และค่าที่ได้จากการคำนวณ คือ ยางคอมเพานด์ (1.81) และยางชั้นผ้าใบ (1.91) และค่า C ที่ได้จะนำไปใช้ในการคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์การวัลคาไนซ์เพื่อเปรียบเทียบ รวมทั้งใช้เป็นตัวแปรในการตั้งเครื่องวัดระดับการวัลคาไนซ์ จะเห็นได้ว่าเวลาในการวัลคาไนซ์ของยางชั้นนอกกับยางชั้นในแตกต่างกัน โดยยางชั้นในจะใช้เวลาในการวัลคาไนซ์ที่มากกว่ายางชั้นนอก เพราะยางชั้นในเป็นยางที่ผสมกับเศษผ้าใบเพื่อเพิ่มความแข็งแรงทำให้ปริมาณยางและสารเคมีน้อยลงเป็นผลให้เวลาการวัลคาไนซ์ยาวกว่า และเป็นผลทำให้ค่า C ที่คำนวณได้นั้นมีความแตกต่างกันด้วย

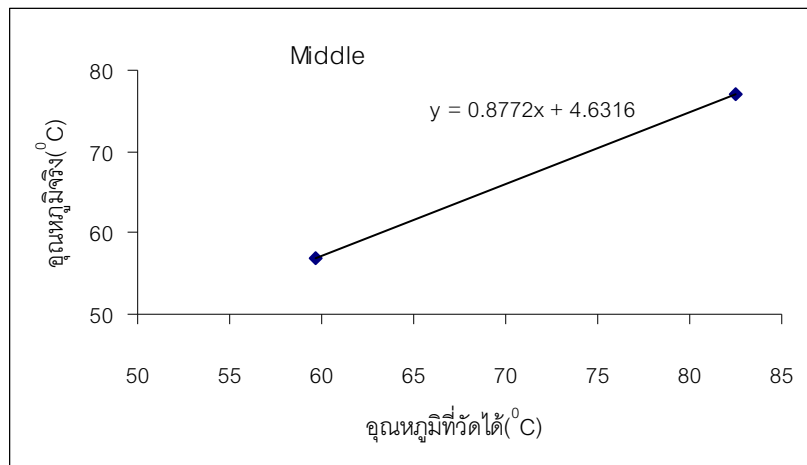
เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.15 และ 4.16 ซึ่งเป็นการ Calibrate เครื่องวัดระดับการวัลคาไนซ์ จะเห็นได้ว่า เครื่องวัดระดับการวัลคาไนซ์ในแต่ละตำแหน่งนั้นมีค่าการ Calibrate ที่ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับค่าความผิดพลาดจากการอ่านอุณหภูมิของเทอร์โมคอปเปิลจากเครื่องวัดระดับการวัลคาไนซ์ในแต่ละตำแหน่ง เพื่อที่จะทำให้เครื่องวัดระดับการวัลคาไนซ์ทั้ง 3 ตำแหน่ง ให้ค่าที่ถูกต้อง



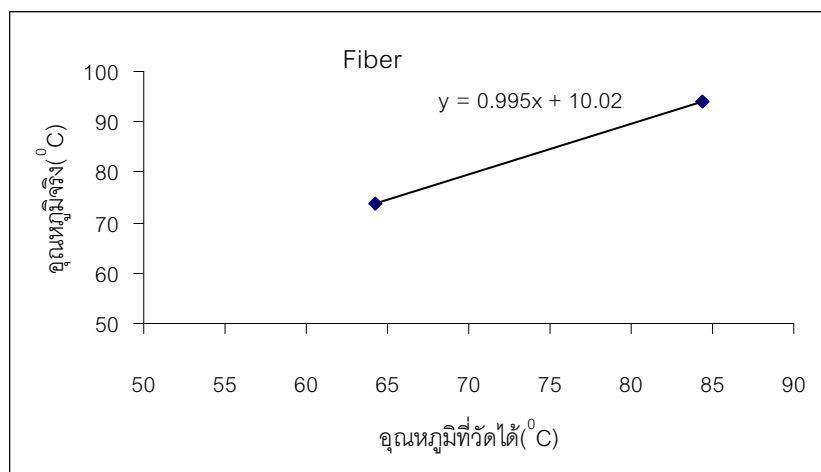
รูปที่ 4.13 ลักษณะของเครื่อง Cure meter



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ($^{\circ}\text{C}$)กับเวลาที่ใช้ในการวัดคาบไชน์(min)ของยางคอมปอนด์ และยางชั้นไน ที่ได้จากการทดลองครั้งที่ 3



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่วัดได้(°C) กับอุณหภูมิจริง(°C) ของเครื่องวัดระดับการวัดคาไนซ์ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของเบ้า

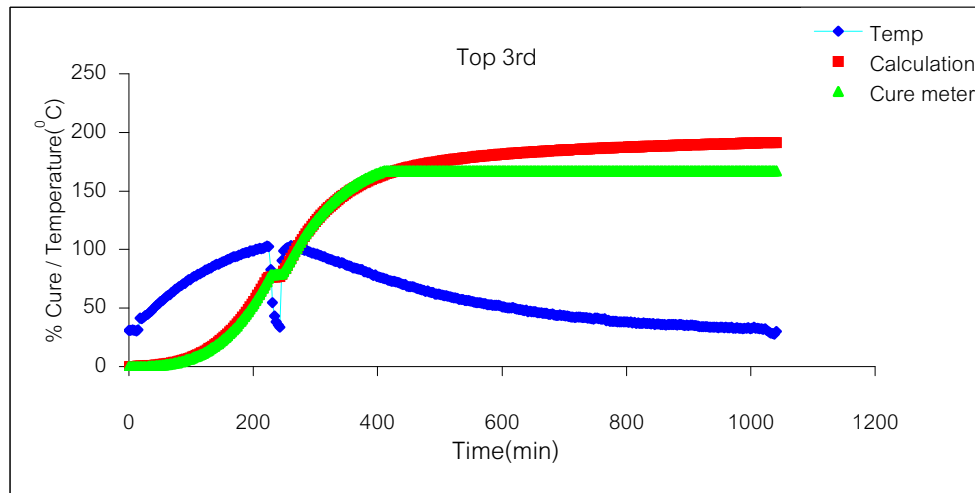


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่วัดได้(°C) กับอุณหภูมิจริง(°C) ของเครื่องวัดระดับการวัดคาไนซ์ที่ตำแหน่งตำแหน่งของยางชั้นในในส่วนล่าง

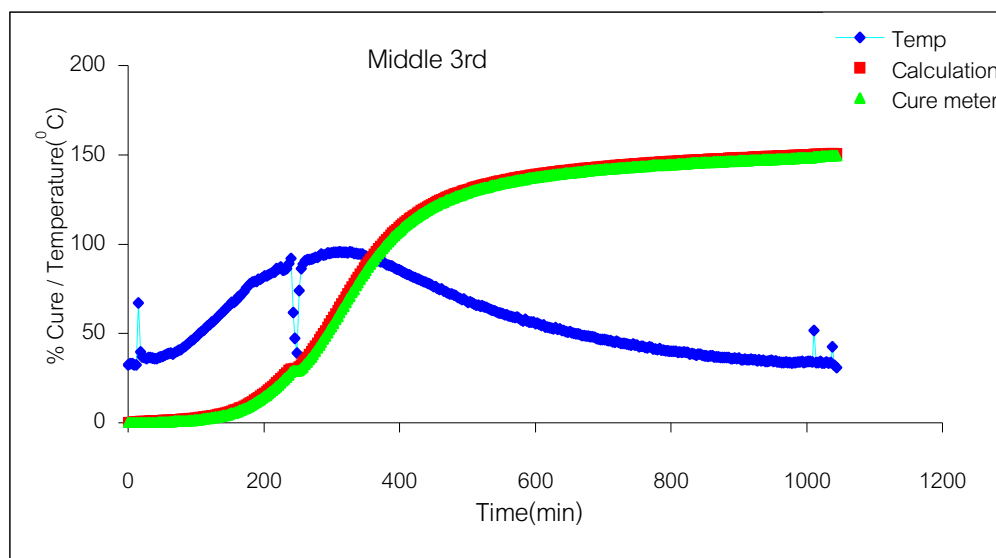
จากรูปที่ 4.17, 4.18 และ 4.19 จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์การวัดคาไนซ์ที่วัดได้จากเครื่องวัดระดับการวัดคาไนซ์และจากการคำนวณนั้น จะมีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นในรูปที่ 18 ที่เครื่องวัดระดับการวัดคาไนซ์จะทำการวัดเปอร์เซ็นต์การวัดคาไนซ์ซ้ำๆกัน หลังจากวัดไปจนถึงค่าหนึ่ง ซึ่งจริงๆแล้ว ยางจะทำการวัดคาไนซ์ต่อไปอีก ดังค่าที่ได้จากการคำนวณ ทั้งนี้เกิดจากการที่โปรแกรมในเครื่องวัดระดับการวัดคาไนซ์ทำงานบกพร่อง ทำให้ไม่ทำการอินทิเกรตค่าถัดไป

เมื่อเปรียบเทียบระดับอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปพบว่า อุณหภูมิส่วนบนและส่วนล่างเปลี่ยนไปอย่างใกล้เคียงกันซึ่งแสดงว่า แผ่นความร้อนด้านบนและล่างให้ความร้อนได้สม่ำเสมอ นอกจากนั้นยังแสดงถึงว่าทั้งสองประเภทมีค่าการนำความร้อนไม่แตกต่างกันมากนัก และสุดท้ายคือความร้อนมีการถ่ายเทจากแผ่นความร้อนสู่ยางในแนวดิ่งเท่านั้น ไม่มีความแตกต่างกันในแนวนอน ดังนั้นในการอัดเบ้าสำหรับการวิจัยครั้งนี้จุดที่สำคัญที่สุดที่มีการวัดคาบในซ์ได้ช้าที่สุดคือบริเวณกึ่งกลางของเบ้า และบริเวณที่เป็นยางชั้นผ้าใบเนื่องจากการวัดคาบในซ์ได้ช้ากว่ายางคอมปานด์

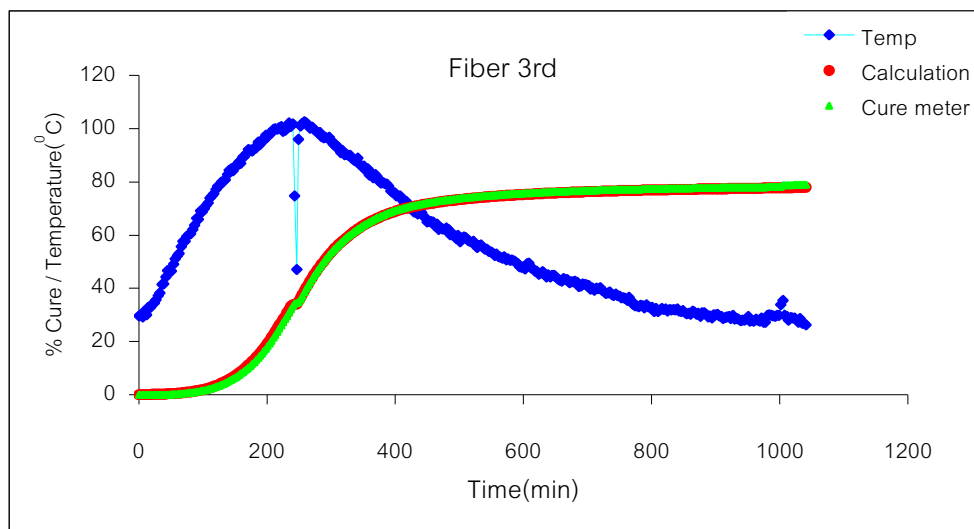
และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.20 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การวัดคาบในซ์ของทั้ง 3 ตำแหน่ง ที่วัดได้จากเครื่องวัดระดับที่คำนวณได้ พบว่าขณะที่เอายางออกจากเบ้า นั้น ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของส่วนบนของยางจะมีเปอร์เซ็นต์การวัดคาบในซ์สูงที่สุด รองลงมาเป็นตำแหน่งจุดศูนย์กลางของยาง และตำแหน่งยางชั้นในจะมีเปอร์เซ็นต์การวัดคาบในซ์ต่ำที่สุด เพราะตำแหน่งกึ่งกลางของส่วนบนของยางจะได้รับความร้อนก่อน ทำให้เกิดการวัดคาบในซ์ก่อนตำแหน่งจุดศูนย์กลางของยาง ส่วนตำแหน่งยางชั้นใน มีเวลาที่ใช้ในการวัดคาบในซ์ยาวกว่าตำแหน่งอื่นๆ จึงเกิดการวัดคาบในซ์ช้ากว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การวัดคาบในซ์ที่ได้จึงมีค่าต่ำ แต่เมื่อสังเกตจากรูปที่ 22 จะเห็นได้ว่าเกิดฟองอากาศที่บริเวณจุดศูนย์กลางของยาง แต่ไม่เกิดฟองอากาศในบริเวณยางชั้นผ้าใบเลย แสดงว่ายางคอมปานด์นั้นมีค่า Blow Point ที่สูงกว่ายางชั้นผ้าใบ โดยขณะที่เอายางออกจากเบ้า นั้น ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของยางจะมีเปอร์เซ็นต์การวัดคาบในซ์ประมาณ 30% แสดงว่า Blow point ซึ่งปกติช่วง Blow point ของคอมปานด์ล้อยางนี้ มีค่าสูงกว่า 30% Cure อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.20 และ 4.21 ร่วมกันแล้ว ถึงแม้ว่าระดับการวัดคาบในซ์ของยางชั้นในนั้นไม่ถึงระดับ 100% เมื่อสิ้นสุดการทดลองแล้วก็ตาม ก็ไม่แสดงให้เห็นถึงอาการที่ยางไม่วัดคาบในซ์เลย ซึ่งเมื่อนำยางไปทดสอบด้วยเครื่อง ODR พบว่ายางมีลักษณะที่ scorch แล้ว ดังนั้น เป็นไปได้ว่าค่า cure time ที่หาได้ในขั้นตอนอาจมีค่าไม่ถูกต้องจึงต้องระวังในการวิจารณ์ผลในครั้งที่ 4-5 เนื่องจากใช้ยางลอปเดียวกัน



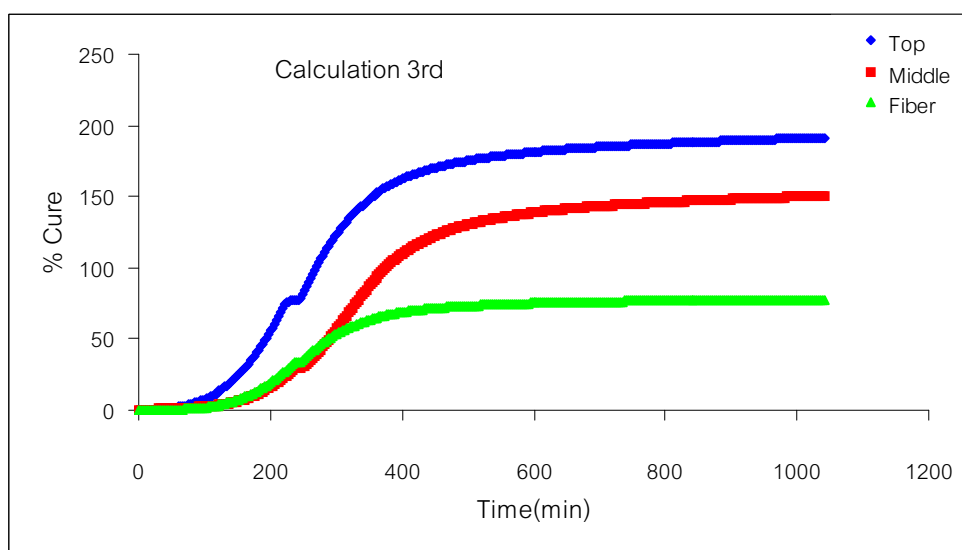
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการวัดระดับการวัลคาไนซ์(min) อุณหภูมิของยาง($^{\circ}$ C)และเปอร์เซ็นต์การวัลคาไนซ์ที่ได้จากการคำนวณ กับเปอร์เซ็นต์การวัลคาไนซ์ที่ได้จากเครื่องวัดระดับการวัลคาไนซ์ ที่ตำแหน่งกึ่งกลางส่วนบนของเบ้า จากการทดลองครั้งที่ 3



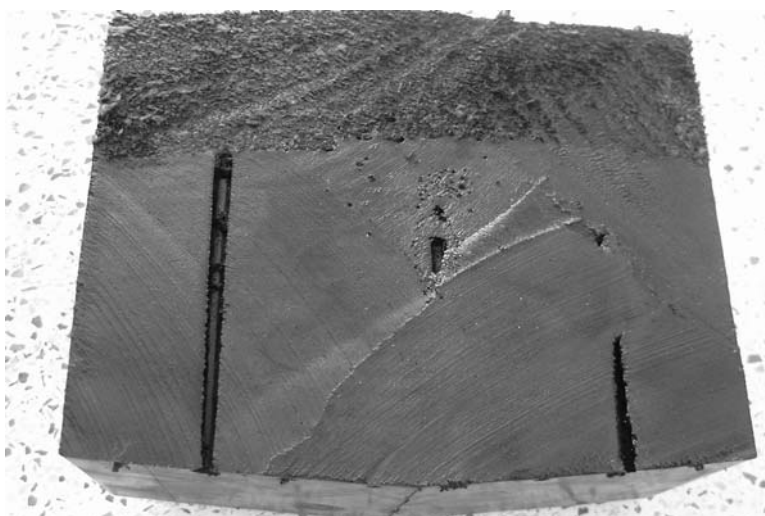
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการวัดระดับการวัลคาไนซ์(min) อุณหภูมิของยาง($^{\circ}$ C)และเปอร์เซ็นต์การวัลคาไนซ์ที่ได้จากการคำนวณ กับเปอร์เซ็นต์การวัลคาไนซ์ที่ได้จากเครื่องวัดระดับการวัลคาไนซ์ ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของเบ้า จากการทดลองครั้งที่ 3



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการวัดระดับการวัลคาไนซ์ (min) อุณหภูมิของยาง($^{\circ}\text{C}$) และเปอร์เซ็นต์การวัลคาไนซ์ที่ได้จากการคำนวณ กับเปอร์เซ็นต์การวัลคาไนซ์ที่ได้จากเครื่องวัดระดับการวัลคาไนซ์ที่ตำแหน่งของยางชั้นใน(ผ้าใบ) จากการทดลองครั้งที่ 3



รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การวัลคาไนซ์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้ข้อมูลจากเครื่องวัดระดับการวัลคาไนซ์ ทั้ง 3 ตำแหน่ง จากการทดลองครั้งที่ 3



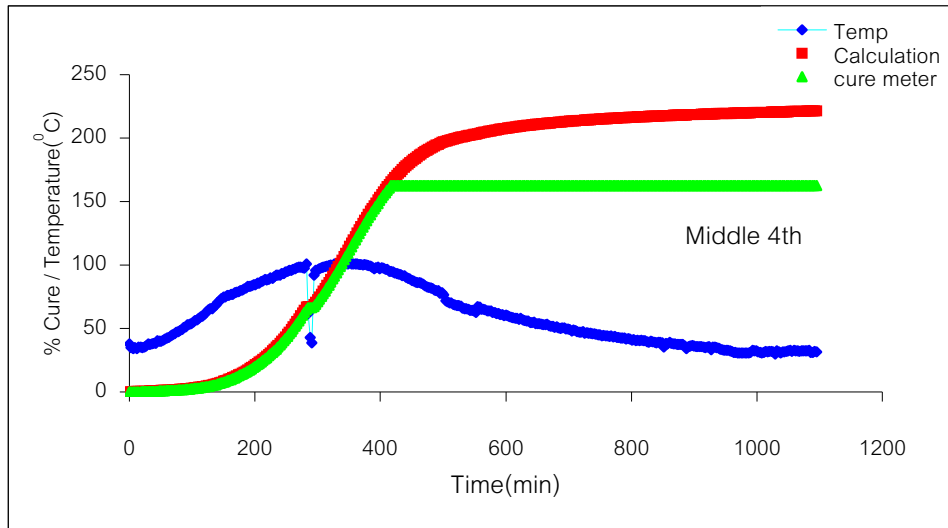
รูปที่ 4.21 ลักษณะของยางวัลคาไนซ์ที่ได้จากการทดลองครั้งที่ 3

การเกิดลักษณะฟองอากาศตามรูปที่ 4.21 นั้น เมื่อใช้รูปที่ 4.20 มาพิจารณาด้วยจึงพบว่า ไม่ใช่เป็นการที่วัลคาไนซ์ไม่สมบูรณ์แต่อย่างใด ซึ่งที่สุดแล้ว ณ ตำแหน่งนั้นมีระดับการวัลคาไนซ์สูงถึงกว่า 150% ดังนั้นปรากฏการณ์ที่เห็นนั้นเป็นปรากฏการณ์ของสิ่งที่เรียกขานกันว่า Blow Point นั่นคือ ถ้าหากมีการลดความดัน หรือแกะยากออกจากเบ้าก่อนที่ระดับการวัลคาไนซ์เลขจุดนั้นไปแล้ว ยางยังไม่อยู่ในระดับที่แข็งแรงเพียงพอที่จะรักษาสภาพได้เมื่อมีการขยายตัวของก๊าซเนื่องมาจากความชื้น หรือสารเคมีต่าง ๆ เพราะมีการลดความดัน จึงทำให้ยางเป็นโพรงอากาศและรักษาสภาพโพรงอากาศนั้นไว้จนการทั้งมีการวัลคาไนซ์ที่สมบูรณ์

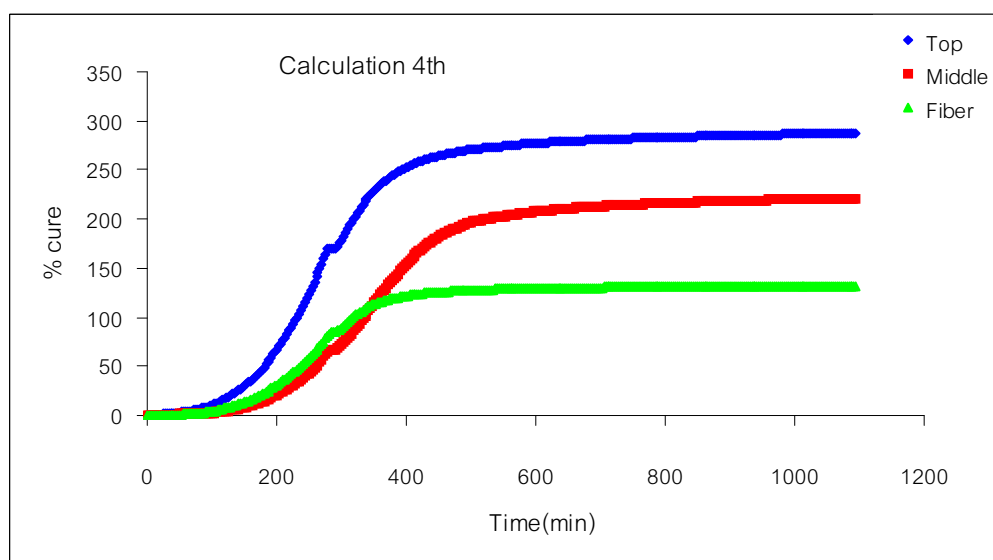
4.3.2.5 ผลการทดลองครั้งที่ 4

การทดลองในครั้งนี้ 4 จะทดลองเช่นเดียวกันกับการทดลองครั้งที่ 3 เพื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การวัลคาไนซ์ที่ได้จากการคำนวณกับเปอร์เซ็นต์การวัลคาไนซ์ที่วัดได้จากเครื่องวัดระดับการวัลคาไนซ์กับการทดลอง ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.22 ถึง 4.24 ผลการทดลองโดยทั่วไปเป็นไปในทางเดียวกันกับครั้งที่ 3 เครื่องวัดระดับมีปัญหาหยุดการคำนวณเมื่อถึงค่าหนึ่ง ในการทดลองครั้งนี้ได้ยี่กระยะเวลาการอัดเบ้าออกจนกระทั่งตำแหน่งกึ่งกลางมีระดับการวัลคาไนซ์เป็น 70% ดังจะเห็นได้จากจุดที่มีความไม่ต่อเนื่องของเส้นกราฟในรูปที่ 4.23

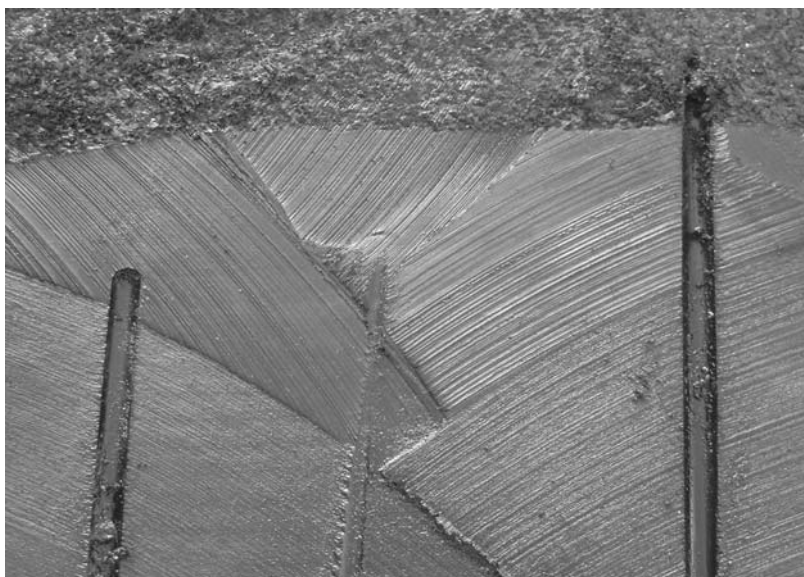
ในการทดลองนี้ ระดับการวัลคาไนซ์ของทุกตำแหน่งที่ระยะสุดท้ายมีค่ามากกว่า 100% จากรูปที่ 4.24 จะเห็นว่าไม่มีฟองอากาศใด ๆ ทั้งสิ้น แสดงให้เห็นว่า Blow Point นั้นมีค่าต่ำกว่า 70% ดังนั้นระยะต่อไปจึงเห็นสมควรให้ทำการทดลองที่ ระดับการวัลคาไนซ์ 50%



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการวัดระดับการวัลคาไนซ์ (min) อุณหภูมิของยาง($^{\circ}\text{C}$) และเปอร์เซ็นต์การวัลคาไนซ์ที่ได้จากการคำนวณ กับเปอร์เซ็นต์การวัลคาไนซ์ที่ได้จากเครื่องวัดระดับการวัลคาไนซ์ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของเบ้า จากการทดลองครั้งที่ 4



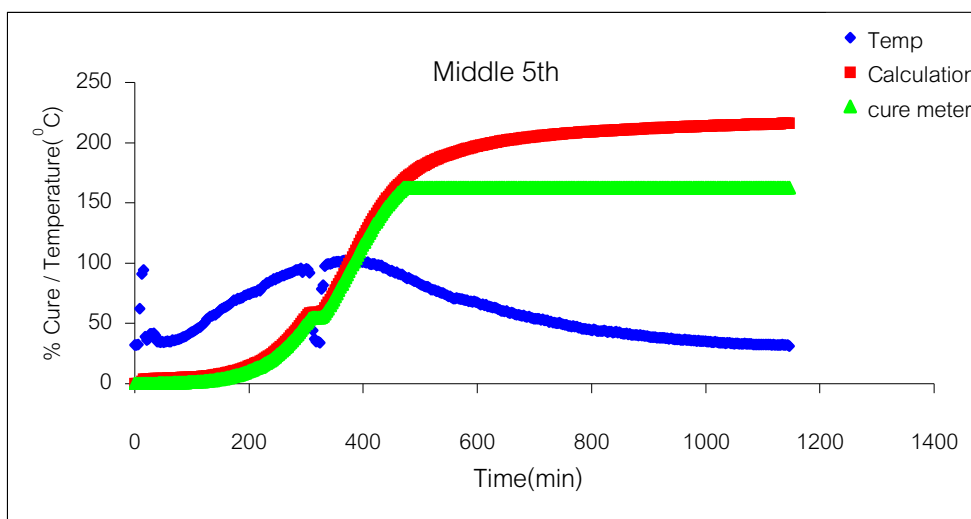
รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การวัลคาไนซ์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ข้อมูลจากเครื่องวัดระดับการวัลคาไนซ์ ทั้ง 3 ตำแหน่ง จากการทดลองครั้งที่ 4



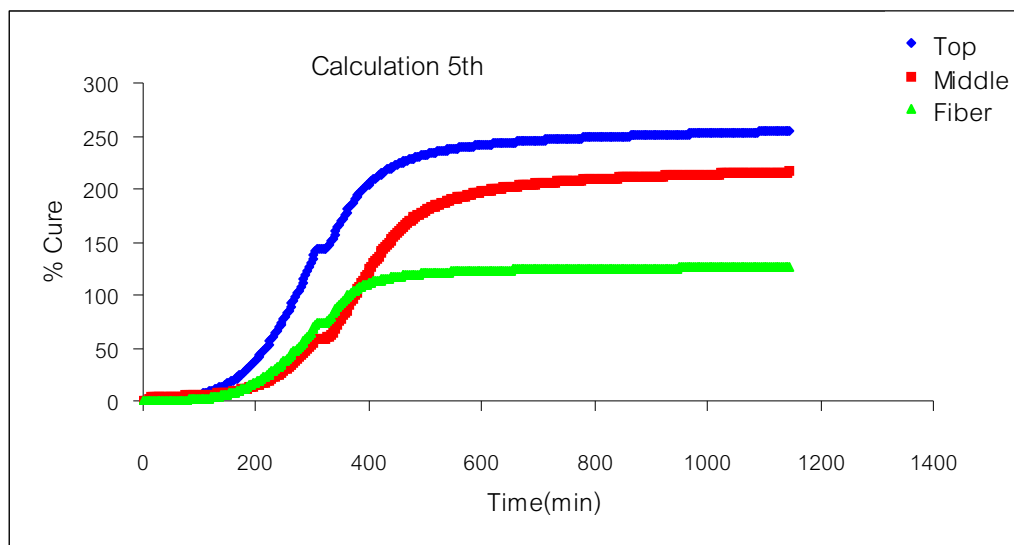
รูปที่ 4.24 ลักษณะของยางวัลคาไนซ์ที่ได้จากการทดลองครั้งที่ 4

4.3.2.6 ผลการทดลองครั้งที่ 5

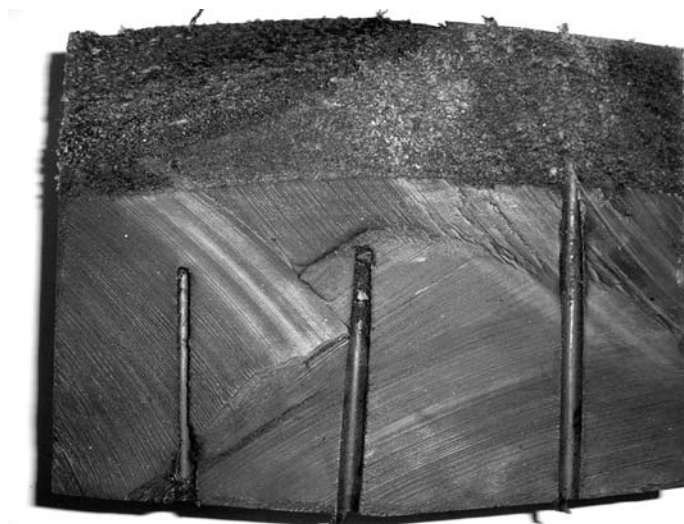
ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองที่ 3 และ 4 เพื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การวัลคาไนซ์ที่ได้จากการคำนวณกับเปอร์เซ็นต์การวัลคาไนซ์ที่วัดได้จากเครื่องวัดระดับการวัลคาไนซ์ ดังแสดงผลในรูปที่ 4.25-4.27



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการวัดระดับการวัลคาไนซ์ (min) อุณหภูมิของยาง(°C) และเปอร์เซ็นต์การวัลคาไนซ์ที่ได้จากการคำนวณ กับเปอร์เซ็นต์การวัลคาไนซ์ที่ได้จากเครื่องวัดระดับการวัลคาไนซ์ ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของเบ้า จากการทดลองครั้งที่ 5



รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การวัลคาไนซ์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้ข้อมูลจากเครื่องวัดระดับการวัลคาไนซ์ ทั้ง 3 ตำแหน่ง จากการทดลองครั้งที่ 5

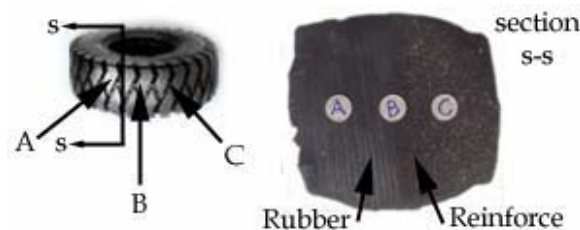


รูปที่ 4.27 ลักษณะของยางวัลคาไนซ์จากการทดลองครั้งที่ 5

จะเห็นได้ว่าผลการทดลองจะออกมาในลักษณะเดียวกันกับผลการทดลองครั้งที่ 3 และ 4 โดยรวมแล้วพบว่าการวัดเปอร์เซ็นต์การวัลคาไนซ์โดยวัดจากเครื่องวัดระดับการวัลคาไนซ์และจากการคำนวณ ให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน แสดงว่าเครื่องวัดระดับการวัลคาไนซ์สามารถวัดระดับการวัลคาไนซ์ได้ถูกต้อง แต่ต้องแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นกับเครื่องวัดระดับการวัลคาไนซ์ดังกล่าวมาแล้ว คือการหยุดคำนวณเมื่อถึงจุดหนึ่งซึ่งน่าจะเป็นสาเหตุจากหน่วยความจำที่มีจำนวนจำกัด ซึ่งสามารถแก้ไขได้ไม่ยากนักโดยทาง software นอกเหนือจากนั้นรายละเอียดเกี่ยวกับความสะดวกในการใช้งานบางอย่างเช่น ระบบพลังงานสำรองเมื่อมีปัญหาระหว่างการทดลองเพื่อที่จะไม่ต้องทำการติดตั้งตัวแปร และนาฬิกาใหม่ทุกครั้ง เป็นต้น ก็จะทำให้เครื่องวัดระดับการวัลคาไนซ์มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น และเมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การวัลคาไนซ์ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของยาง ขณะที่เอียงออกจากเบ้า นั้น จะมีเปอร์เซ็นต์การวัลคาไนซ์ประมาณ 50% ได้ยางวัลคาไนซ์มีลักษณะผิวเรียบ ไม่เกิดฟองอากาศ ซึ่งหมายความว่า 50% Cure จะเกินช่วงของการเกิด Blow point ของยางที่ทำการทดลอง จะเห็นได้ว่าช่วง Blow Point ของยางที่ทำการทดลองจะอยู่ในช่วง 30 – 50% Cure

4.3.2.7 การถ่ายเทความร้อนและการวัลคาไนซ์ของยางล้อต้นในสายการผลิตจริง

หลังจากมีการแก้ไขปรับปรุงเครื่องวัดระดับการวัลคาไนซ์เกี่ยวกับระบบหน่วยความจำ และระบบพลังงานสำรองเรียบร้อยแล้วจึงมีการทดลองใช้จริงในสายงานผลิต โดยทำการเจาะเบ้ายางล้อต้น 3 ตำแหน่งด้วยกัน เพื่อที่จะวัดอุณหภูมิและระดับการวัลคาไนซ์ที่ 3 ตำแหน่ง กล่าวคือ บริเวณกึ่งกลางของยางชั้นนอก (A), บริเวณกึ่งกลางของยางชั้นใน (C) และบริเวณรอยต่อระหว่างยางชั้นนอกกับยางชั้นใน (B) ซึ่งจะอยู่ประมาณกึ่งกลางของล้อยางพอดี เนื่องจากเบ้ามีความหนาทำให้ต้องมีการสั่งขนาดความยาวของเซนเซอร์ที่เหมาะสม แทนที่จะใช้การปรับระยะโดยความยาวของท่อยึดดังเช่นในการทดลองที่ผ่านมา ในการทดลองจะทำไปในลักษณะเดียวกัน และพบว่าเทคนิคที่ใช้ในการทดลองระดับปฏิบัติการสามารถประยุกต์ใช้ได้ดีในโรงงาน อย่างไรก็ตามเบ้าที่ใช้มีระบบการให้ความร้อนด้วยน้ำมันร้อนไหลผ่านตัวเบ้าทำให้การวัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างแหล่งความร้อนบนและล่างนั้นเป็นไปได้ยาก ในการทดลองนี้ตำแหน่งที่วัดจะอยู่ใกล้กับแหล่งความร้อนด้านล่างมากกว่าด้านบน หรืออยู่เยื้องเส้นศูนย์กลางลงมาประมาณ 2 นิ้ว ซึ่งอาจจะเทียบเท่าเวลาในการอัดเบ้าที่ต่างกันถึง 40 นาทีเลยทีเดียว อย่างไรก็ตามในการประยุกต์กับเบ้าจริง ๆ นั้นจะต้องมีปัญหาดังกล่าวอยู่เสมอ เนื่องจากเบ้ามีขนาดใหญ่ และมีการออกแบบที่หลากหลายไม่ซ้ำกัน ถึงเช่นนั้นก็ดีในการทดลองนี้ ผลการทดลองยังสามารถให้ภาพโดยรวมของทิศทางการไหลของความร้อน และลักษณะการวัลคาไนซ์โดยทั่วไปของชิ้นงาน และสามารถระบุถึงบริเวณที่น่าจะเป็นจุดที่ควรให้ความสนใจมากที่สุดได้ ตำแหน่งในการวัดอุณหภูมินั้นแสดงในรูปที่ 4.28



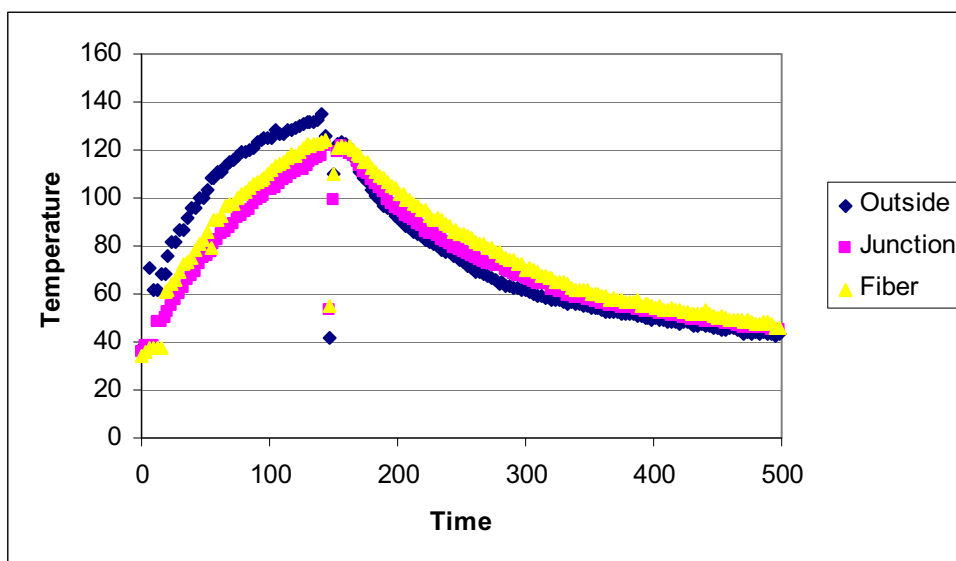
รูปที่ 4.28 ตำแหน่งที่ฝังหัวเซนเซอร์และส่วนประกอบยางล้อคัน

ในสายการผลิตนี้ตั้งอุณหภูมิของเบ้าที่ 150°C และเวลาในการอัดเบ้า 140 นาที ผลการทดลองของค่าระดับการวัลคาไนซ์ของทั้ง 3 ตำแหน่งนั้นแสดงในรูปที่ 4.29 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าบริเวณกึ่งกลางของยางชั้นนอกนั้นร้อนเร็วที่สุด ในขณะที่บริเวณกึ่งกลางของล้อซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างยางชั้นนอก และยางชั้นในนั้นร้อนช้าที่สุด ลักษณะที่แตกต่างกันของอุณหภูมิที่สังเกตเห็นได้นั้น แสดงให้เห็นว่าถึงแม้ว่าจะอยู่ที่ระดับเดียวกันจากการให้ความร้อนด้านบนและล่าง ความร้อนที่เข้าสู่เบ้านี้มีมากกว่าในแนวตั้ง นั่นคือมีในแนวนอนด้วยโดยด้านนอกมีความร้อนส่งผ่านมากกว่าด้านในของยาง

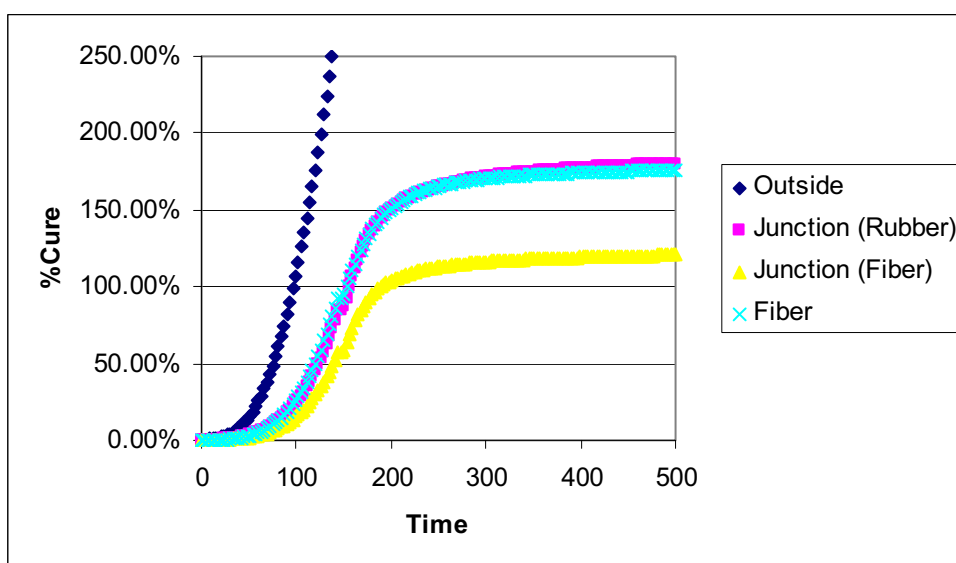
ตารางที่ 4.56 ค่าคงที่ที่ใช้ในการคำนวณระดับการวัลคาไนซ์ของยางคอมเพานด์

ชนิดของยาง	T'90 @ 160°C	C
ยางชั้นนอก (Rubber)	4.5	1.8
ยางชั้นใน (Reinforce)	4.83	1.91

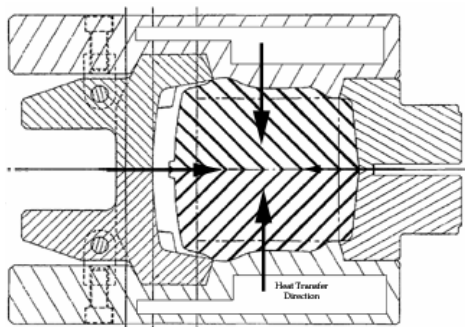
สมบัติของยางคอมเพานด์ที่ใช้ในการทดลองนี้แสดงในตารางที่ 5.56 เนื่องจากที่ตำแหน่งศูนย์กลางของล้อหรือบริเวณที่เป็นรอยต่อนั้นเป็นจุดที่ร้อนช้าที่สุดจึงเป็นจุดที่ควรจะให้เวลาสนใจมากที่สุด และเนื่องจากมียางทั้งสองประเภทอยู่ใกล้กัน จึงได้มีการคำนวณเพิ่มเติมโดยอาศัยข้อมูลจากอุณหภูมิที่วัดได้เพื่อมาหาระดับการวัลคาไนซ์ ในความเป็นจริงนั้นสามารถที่จะกำหนดค่าเริ่มต้นในเครื่องวัดให้เป็นข้อมูลของยางที่มี cure time ที่สูงกว่าเลยก็ได้ ซึ่งในที่นี้เป็นยางชั้นผ้าใบ จากรูปที่ 4.30 นั้นจะเห็นว่าถึงแม้ว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางของยางชั้นนอกจะร้อนเร็วกว่าบริเวณรอยต่อ เมื่อดูระดับการวัลคาไนซ์ของยางคอมเพานด์แล้วพบว่าไม่แตกต่างกันมากนัก แต่หากว่าเมื่อพิจารณาถึงบริเวณรอยต่อโดยคิดถึงยางที่เป็นชั้นผ้าใบที่ใช้เวลานานกว่าในการวัลคาไนซ์นั้น พบว่าระดับการวัลคาไนซ์ต่ำกว่ามาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าบริเวณนี้เป็นจุดสำคัญ ซึ่งจากการศึกษาของทางบริษัท จากสินค้าส่งคืนนั้นมีความเป็นไปได้สูงที่จะพบชิ้นงานที่มีฟองอากาศในบริเวณใกล้รอยต่อ และมักจะอยู่ในชั้นยางชั้นในหรือชั้นผ้าใบนั่นเอง รูปที่ 4.31 แสดงให้เห็นถึงทิศทางในการถ่ายเทความร้อนในเบ้ายางล้อคัน



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่วัดจากตำแหน่งต่าง ๆ ในยางล้อตัน



รูปที่ 4.30 ระดับการวัลคาไนซ์ของยางล้อตันที่ตำแหน่งต่าง ๆ



รูปที่ 4.31 การถ่ายเทความร้อนในเบ้าอัดยางล้อต้น

4.3.3 การศึกษาเพื่อหาจุดเกิดฟองอากาศ (Blow Point) ในสายการผลิตยางล้อต้น

จุดเกิดฟองอากาศเป็นจุดที่ต่ำกว่าระดับการวัลคาไนซ์ต่ำกว่าจุดนี้ เมื่อนำยางออกจากเบ้าจะทำให้เกิดฟองอากาศ ซึ่งวิธีการวัดเพื่อหาจุดดังกล่าวนี้ต้องใช้การคำนวณอย่างที่ใช้ในการวิจัยนี้เท่านั้น ในการบ่งบอกถึงระดับการวัลคาไนซ์ของยางในขณะนั้น สาเหตุของการเกิดฟองอากาศนั้นเนื่องมาจากการลดลงของความดันเนื่องจากการนำยางออกจากเบ้า ยางที่มีระดับการวัลคาไนซ์ต่ำมีความนิ่มในขณะที่ยางขึ้น หรือแก๊สต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในเนื้อยางขยายตัวทำให้เกิดฟองอากาศได้ (Hill 1971) ดังนั้นจุดเกิดฟองอากาศจึงขึ้นกับปัจจัยหลายอย่างด้วยกัน เช่น สูตรยาง, อุณหภูมิที่ใช้ในการอัดเบ้า และขนาดรูปร่างของยาง เป็นต้น ดังนั้นการเกิดฟองอากาศนั้นไม่ใช่เครื่องหมายแสดงให้เห็นถึงการวัลคาไนซ์ไม่สมบูรณ์ของยางเสมอไป สำหรับยางหนาที่มีการวัลคาไนซ์ภายหลังการออกจากเบ้ามาก ยางส่วนที่เกิดฟองอากาศแล้วนั้นอาจเกิดการวัลคาไนซ์จนสมบูรณ์ได้เช่นกัน Freeman ⁽⁹⁾ แสดงให้เห็นว่าสำหรับยางล้อรถยนต์ซึ่งมีจุดเกิดฟองอากาศที่ระดับ 23-28 %cure ถึงแม้ว่านำยางออกจากเบ้าที่ระดับนี้การวัลคาไนซ์ต่อเนื่องของยางทำให้ท้ายที่สุดแล้วยางมีการวัลคาไนซ์ที่สมบูรณ์ แม้ว่าในบางตัวอย่างจะเกิดฟองอากาศเนื่องจากการนำออกจากเบ้าก่อนจุดเกิดฟองอากาศนั่นเอง เนื่องจากการแก้ไขเบื้องต้นของการเกิดฟองอากาศคือการเพิ่มเวลาอัดเบ้า และในบางครั้งการเกิดฟองอากาศรวมกันกับลักษณะการวัลคาไนซ์ไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดความเข้าใจผิดขึ้นได้

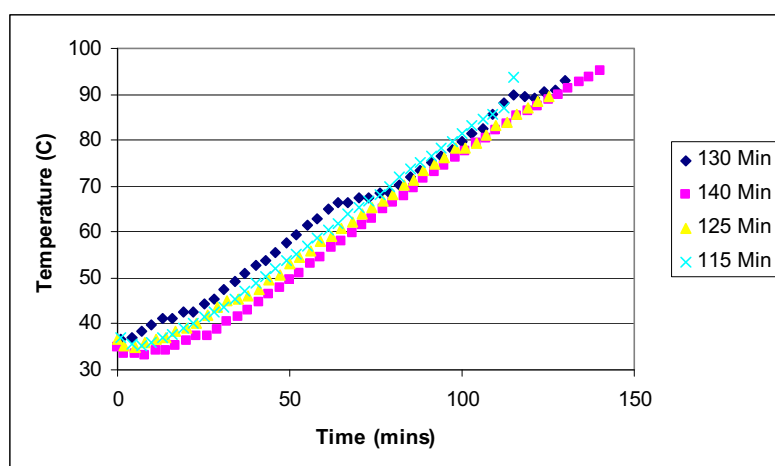
ในขั้นตอนการวิจัยขั้นนี้เพื่อศึกษาถึงจุดเกิดฟองอากาศของยางล้อต้น จากการทดลองขั้นที่ผ่านมาจะพบว่าบริเวณที่สนใจจะเป็นบริเวณรอยต่อระหว่างยางชั้นนอกกับยางชั้นใน (B) เนื่องจากยางชั้นในที่มีการวัลคาไนซ์ที่ช้ากว่า และระยะทางจากแหล่งความร้อนที่ใกล้ที่สุดของจุดดังกล่าว ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงเลือกจุดนี้เป็นจุดที่ใช้ในการกำหนดระดับการวัลคาไนซ์ที่บ่งบอกถึงจุดเกิดฟองอากาศ นอกจากนี้ยังได้มีการเจาะเบ้าใหม่โดยเลื่อยเจาะขึ้นในแนวตั้ง และเอียงทำมุมเพื่อให้ปลายหัวเซนเซอร์เข้าไปในตำแหน่งศูนย์กลางในแนวตั้งพอดี แก้ไขปัญหาการถ่ายเทความร้อนที่ไม่สมดุลกันในการทดลองที่ผ่านมาอีกด้วย และเนื่องจากในการทดลองที่ผ่านมาได้ทราบแล้วว่ายางล้อต้นมีการวัลคาไนซ์ภายหลังการ

นำออกจากเบ้าเป็นสัดส่วนที่สูง ดังนั้นในการทดลองนี้จึงละเว้นการวัดการวัดคาในชั้นภายหลังการนำยางออกจากเบ้า

ตารางที่ 4.57 ค่าคงที่ที่ใช้ในการคำนวณระดับการวัดคาไนซ์ของยางชั้นใน

T' 90 @ 160°C	C
5.0	1.8

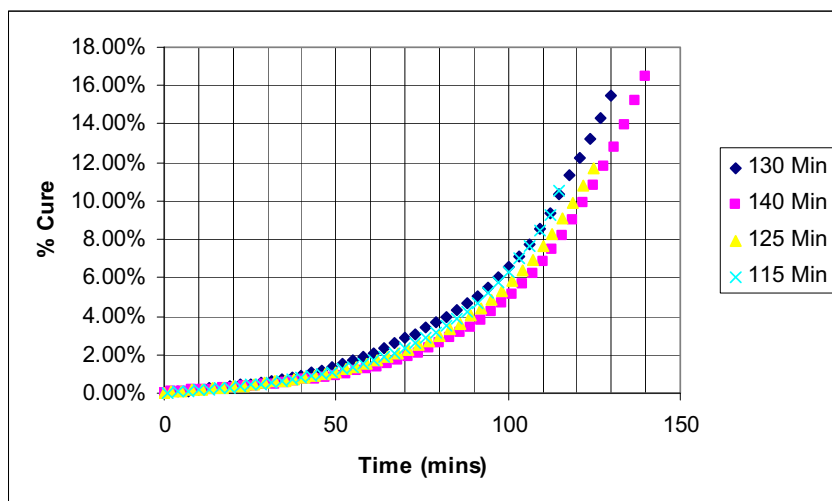
ในการทดลองนี้ใช้อุณหภูมิในการอัดเบ้า 150°C แปรเวลาในการอัดเบ้า 115, 125, 130 และ 140 นาที ค่าคงที่ที่ใช้ในการคำนวณระดับการวัดคาไนซ์ของยางชั้นในแสดงในตารางที่ 4.57 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของยางล้อต้นแสดงในรูปที่ 4.32 จะเห็นว่าอุณหภูมิภายในที่จุดดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกันมาก ความแตกต่างของอุณหภูมิที่เห็นเกิดจากความร้อนของเบ้าที่ร้อนทั่วถึงมากขึ้นเนื่องจากการอัดเบ้าที่ต่อเนื่องกัน ซึ่งในการทดลองนี้ลำดับการทดลองคือ 140, 125, 115 และ 130 นาที เรียงตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าอุณหภูมิภายในสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อมีการใช้งานเบ้าหลายครั้งขึ้น



รูปที่ 4.32 อุณหภูมิภายใน ณ จุดกึ่งกลางของยางล้อต้น อัดเบ้าที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน

ระดับการวัดคาไนซ์ของยางชั้นใน ณ จุดดังกล่าวแสดงในรูปที่ 4.33 จะเห็นได้ว่าระดับการวัดคาไนซ์แตกต่างกันเล็กน้อยเนื่องจากอุณหภูมิที่แตกต่างกันดังที่ได้กล่าวมาแล้ว อย่างไรก็ตาม ณ เวลาที่นำยางออกจากเบ้า นั้น ระดับการวัดคาไนซ์ของยางชั้นในคือ 10.5%, 11.7%, 15.5% และ 16.5% สำหรับระยะเวลาในการอัดเบ้า 115, 125, 130 และ 140 นาทีตามลำดับ เมื่อนำชิ้นงานมาผ่าเพื่อศึกษาจะพบว่าที่ระยะเวลา 115 และ 125 นาทีนั้น เกิดฟองอากาศอย่างชัดเจนทั้งบริเวณยางชั้นนอกและยางชั้นใน

ในขณะที่ที่ระยะเวลาอัด 130 และ 140 นาทีนั้นมีเกิดฟองอากาศที่ข้างชั้นนอก อย่างไรก็ตามยางชั้นในยังมีสภาพการเกิดฟองอากาศเล็กน้อยแต่ไม่ชัดเจนมากนัก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาในการอัดนั้นยังไม่เพียงพอที่จะทำให้เลยจุดการเกิดฟองอากาศของยางชั้นในได้ หรืออีกนัยหนึ่งจุดการเกิดฟองอากาศของยางชั้นในมีค่าสูงกว่า 16.5% เล็กน้อย และนี่อาจเป็นผลทำให้ผลิตภัณฑ์มีสมบัติไม่คงที่



รูปที่ 4.33 ระดับการวัลคาไนซ์ของยาง ณ ตำแหน่งกึ่งกลางที่ระยะเวลาอัดเบ้าต่าง ๆ กัน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผล

การพัฒนาสูตรยางชั้นนอกให้มีสมบัติทนทานต่อการถดถอยของสมบัติเนื่องจากความร้อน และมีความร้อนสะสมต่ำ มีความทนทานต่อการสึกหรอและทนทานต่อการฉีกขาดที่ดี พบว่าสามารถทำได้โดยใช้ระบบวัลคาไนซ์แบบเคมีอีวี การใช้สารตัวเติมซิลิกาผสมเขม่าดำ การใช้กรดสเตียริก หรือซิงค์สเตียเรท ในปริมาณสูงกว่าปกติเล็กน้อย อย่างไรก็ตามการใช้ระบบวัลคาไนซ์แบบเคมีอีวี และใช้สารตัวเร่ง TMTD ทำให้มีคุณสมบัติของยางสูงและมีผลต่อการจับจีที่ไม่นุ่มนวล และต้นทุนการผลิตสูงขึ้น เนื่องจากการใช้ปริมาณสารตัวเร่งที่มีราคาสูงในปริมาณมากกว่าระบบปกติ การพัฒนาใช้ยางรีเคลมผสมจึงช่วยลดต้นทุนในการผลิตลงได้ และสามารถใช้อย่างรีเคลมได้ถึง 30 phr โดยที่เมื่อนำไปทดลองผลิตจริงและใช้งานจริง ล้อยางทดลองให้สมบัติการใช้งานที่ไม่ค่อยไปกว่ายางล้อมาตรฐานทั่วไป สำหรับสูตรยางสีขาวทำการปรับปรุงให้ยางมีความทนทานต่อการสึกหรอโดยการผสมด้วยยางพอลิบูทาไดอินในปริมาณ 10 phr

การปรับปรุงยางล้อต้นให้ใช้งานในการจับจีที่นุ่มนวลทำได้โดยการเพิ่มชั้นยางนิ่มเป็นชั้นยางกลางระหว่างดอกยางกับยางชั้นในที่เป็นยางแข็งผสมเส้นใย สูตรยางกลางมีความแข็ง 45 shore A มีความร้อนสะสมต่ำ และการขึ้นรูปผลิตเป็นยางล้อต้นต้องออกแบบความหนาความกว้างให้เหมาะสมเพื่อไม่ให้เกิดการยุบตัวมากเกินไปเมื่อรับน้ำหนัก สำหรับยางชั้นในที่เป็นยางแข็งผสมเส้นใยพบว่ามีสมบัติเหมาะสมในการใช้งาน สูตรดอกยางที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ทั้งยางดำและยางขาว ให้ผลการจับจีที่ใกล้เคียงกับสูตรยางอ้างอิงและยางล้อจากบริษัทอื่น

การพัฒนาเครื่องมือวัดระดับการวัลคาไนซ์แบบพกพาพบว่าที่สามารถนำไปใช้ควบคุมการผลิตผลิตภัณฑ์ยางหนาได้อย่างเหมาะสม โดยระดับการวัลคาไนซ์ที่คำนวณจะตั้งอยู่ในหลักการของพลังงานที่ใช้ในการวัลคาไนซ์เมื่อเทียบกับการวัดด้วยเครื่อง ODR เครื่องมือดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนในเบ้าอัดยางล้อต้น เพื่อหาจุดการเกิดฟองการอากาศสำหรับยางล้อต้นในสายการผลิตจริง ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการทำให้เกิดการแยกชั้นระหว่างยางชั้นในกับยางชั้นนอก จากการวิจัยพบว่าเวลาที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนของยางจนมีอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ระหว่างตำแหน่งกึ่งกลางกับตำแหน่งหนึ่งในสาม นั้นแตกต่างกันถึง 57 นาที และในขณะนำยางออกจากเบ้า นั้น อุณหภูมิที่แตกต่างกัน ๓ องศาเซลเซียส ค่าสูงถึง 15 องศาเซลเซียส ความแตกต่างดังกล่าวส่งผลให้ระดับการวัลคาไนซ์ของยางทั้งสองตำแหน่งต่างกันถึง 3 เท่า การออกสูตรยางในแต่ละชั้นให้มีลักษณะการวัลคาไนซ์ที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญเช่นกัน

5.2 ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะ

การนำความรู้ และผลจากการวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการไปขยายผลสู่ระดับอุตสาหกรรมมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการยกระดับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ยางของประเทศไทย และจากการวิจัยนี้พบว่าทั้งในวงการอุตสาหกรรม และวงการศึกษายังมีความสับสนระหว่างการเกิดฟองอากาศและระดับการวัลคาไนซ์กันอยู่อีกมาก การใช้เครื่องมือที่ได้พัฒนาขึ้นทั้งในระบบอุตสาหกรรม และในการศึกษาจะทำให้เข้าใจถึงระดับการวัลคาไนซ์ที่แตกต่างกันเนื่องจากการถ่ายเทความร้อน และความแตกต่างระหว่างการเกิดฟองอากาศกับการวัลคาไนซ์ไม่สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

1. Subramaniam, A. 1980. Molecular Weight and Molecular Weight Distribution of Natural Rubber. *RRIM Technology Bulletin*. 4 : 6.
2. Hofmann W. 1989. Rubber Technology Handbook. Oxford Univ. Press, New York.
3. Morrison, N.J. and Porter, M. 1983. Temperature Effects on The Stability of Intermediates and Crosslinks in Sulfur Vulcanization, Rubber Chem. Technol., 63-85.
4. Datta R.N. and Ivany, M.S. 1995. A Chemical for Reversion Resistance Compounding, Rubber World, 212, 24.
5. Kooi J.V. 1997. Zinc Soap for Improved Vulcanizates, Rubber World, 216, 21.
6. Ismail H. 2000. Effect of Palm Oil Fatty Acid Additive (POFA) on Curing Characteristics and Vulcanizate Properties of Silica Filled Natural Rubber Compounds, J. Elastomers and Plastics. 32, 33-45.
7. Hill D. A. 1971. Heat Transfer & Vulcanization of Rubber, Elsevier Publishing, Amsterdam.
8. Conant F. S., Svetlink J. F., and Juve A. E. 1958. Equivalent Cures in Specimens Of Various Shapes, 137, 856.
9. Freeman H. A. 1962. Determining the Blow Point in Tire Compounds, Rubber Age, 68, 779.
10. Claxton W. E., and Liska J. W. 1964. Calculation of cure in Rubber Under Variable Time-Temperature Conditions, Rubber Age, 95, 237.
11. Kramer Ole and Ferry John D. 1978. Science and Technology of Rubber, Eirich, Frederick F. (Editor), Academic Press, London, p. 181.
12. Payne R.R. and Scott J.R. 1960. Engineering Design with Rubber, McLaren, London, p. 19.
13. Gent A.N. 1978. Science and Technology of Rubber, Eirich, Frederick F. (Editor), Academic Press, London, p. 182.
14. Reed T. F. 1989. Elastomerics, November, p. 23.
15. Reed T. F. op cit., p.23.
16. Lessig E.T. 1937. Industrial and Engineering Chemistry, Reinhold Publishing Corporation, Ohio, p. 586.
17. Lessig E.T., op. cit., p. 586.

18. Reed T. F., op. cit., p. 26.
19. Reed T. F., op. cit., p. 26.
20. Reed T. F., op. cit., p. 24.
21. Reed T. F., op. cit., p. 25-26.
22. Southern E. 1979. Elastomers: Criteria for Engineering Design, Hepburn C. and Reynolds R.J.W. (Editor), Applied Science Publishers, London, p. 305.
23. Reed T. F., op. cit., p. 28.
24. Reed T. F., op. cit., p. 25.
25. Reed T. F., op. cit., p. 27.
26. Bristow G.M. 1986. Reversion Resistance of accelerated sulphur systems, NR technology, 17, 7.
27. Wallace I.R. 1987. Compounding natural rubber for low rolling resistance in industrial solid tyre applications. NR Technology, Vol. 18, Part 3, 61-66)
28. Baker C.S.L. and Wallace I.R. 1986. Natural Rubber Truck Tyre Compounds for Improved Wear Performance. J. Nat. Rubb. Res., 1, 270.
29. Graf H.J and Sayej E. 2000. Reversion Resistance of Engine Mounts. Rubber World, 221, 55
30. Poh B.T. and Kasmuri, M.B. 1999. Effect of Stearic Acid Concentration on the Reversion Behavior of Epoxidized Natural Rubber. J. Appli. Polym. Sci. 73(7), 1165-1169.
31. Poh B.T. and Kasmuri, M.B. 1999. Effect of Stearic Acid Concentration on the Reversion Behavior of Epoxidized Natural Rubber. J. Appli. Polym. Sci. 73(7), 1165-1169.
32. Byron H.T. 1998. High Temperature Curing and High Heat Resistance Compounding, Rubber World, 218, 19.
33. Dutta R.N. and Helt W.F. 1997. Optimizing Tire Compound Reversion Resistance Without Sacrificing Performance Characteristics, Rubber World, 216, 24.
34. พรพรรณ นิธิอุทัย, รศ., " สารเคมีสำหรับยาง", คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, วิทยาเขตปัตตานี, 2528, p.207-208. ,
35. Rios S. , Chicurel R. and Del Castillo L. F. 2001. *Potential of particle and fibre reinforcement of tyre tread elastomers*, Materials & Design, Vol.22, Issue 5, August 2001, Pages 369-374.
36. Medalia A.I. and Laube S.G. 1978. Rubber Chemistry and Technology. 51, 89.
37. Wang M.-J and Patterson T.A. 1998. Rubber and Plastic News. 12, Feb. 9.

38. Dick J.S. 2001. Rubber Technology – Compounding and Testing for Performance. Carl Hanser Verlag, Munich, 316-320.
39. Southern, E.,1979. "Elastomers: Criteria for Engineering Design", C. Hepburn and R.J.W. Reynolds (Editor), Applied Science Publishers, London, p.302.
40. Hanafi Ismail, Z. Ahmad and Z. A. Mohd Ishak *Comparison of cetyltrimethylammonium maleate and sulphenamide as an accelerator in carbon black filled natural rubber compounds*, Polymer Testing, Volume 20, Issue 6, 2001, Pages 607-614 ,
41. Hanafi Ismail and B. T. 2000. *Cure and tear properties of ENR 25/SMR L and ENR 50/SMR L blends*, European Polymer Journal, Volume 36, Issue 11, November 2000, Pages 2403-2408.
42. Younan A.F., Ismail M.N. and Khalaf A.I. 1995. Thermal stability of natural rubber-polyester short fiber composites, Polymer Degradation and Stability, 48, 103-109
43. Okel T.A. and Waddell W.H. 1994. Rubber Chem. Technol., 67, 217.
44. Branhart R.R. 1988. "Rubber Compounding" in Encyclopedia of Chemical Technology, Third Edition, Vol. 20, M. Grayson Editor, John Wiley & Sons, New York, 365.
45. Waddell W.H. and Evans L.R. 1996. Rubber Chem. Technol., 69, 377.
46. Bhakuni R.S., Mowdood S.K., Waddell W.H., Rai I.S. and Knight D.L. 1989. "Tires" in Encyclopedia of Polymer Science and Engineering, Second Edition, Vol. 16, Kroschwitz J.I. Editor, John Wiley & Sons, New York, 844.
47. US Pat. No. 2002/0129883
48. US Pat. No. 6,142,203
49. US Pat. No. 6,089,292
50. US Pat. No. 5,579,818
51. US Pat. No. 5,429,165
52. US Pat. No. 5,053,095
53. US Pat. No. 4,966,212
54. US Pat. No. 4,877,071
55. US Pat. No. 4,217,944
56. US Pat. No. 4,440,208
57. US Pat. No. 3,986,802

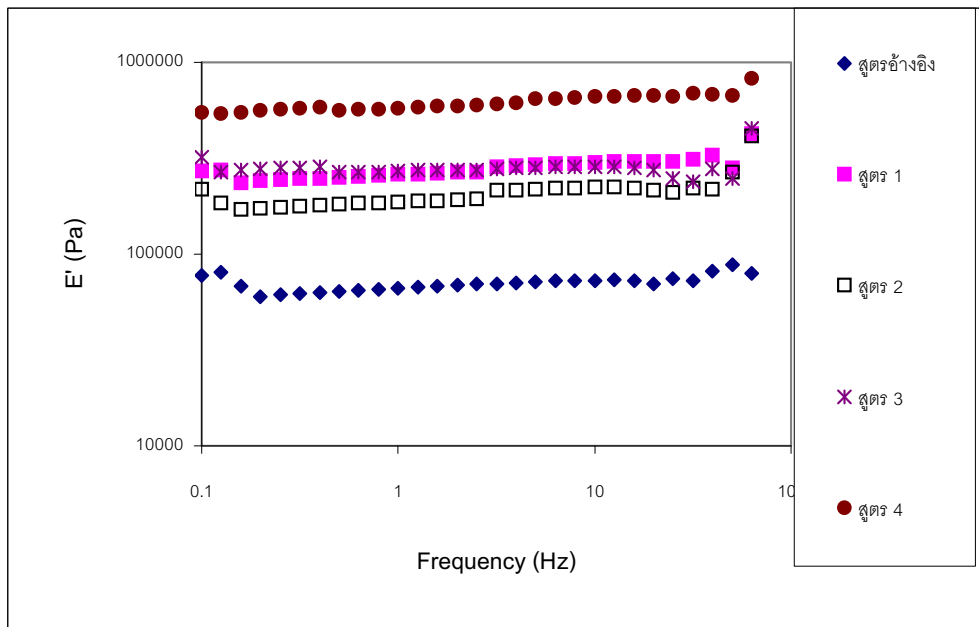
58. US Pat. No. 3,205,928
59. GB2 012 686 A
60. EP 0 960 748 A
61. RU2197388
62. JP2001329118
63. JP4193602
64. JP9003244
65. JP58214402
66. JP58211901
67. Sheppard, J. R. and Wiegand, W. B. 1928. Evaluation of Variable-Temperature Cures, Ind. Eng. Chem., 20, 953.
68. Greory, I.H., Muhr, A.H. and Imizan, A.B. 1999. Prediction of State of Cure throughout Rubber Compound, J. Rubb. Reserch, 2 (1).
69. Hess W.M. and Klamp W.K. 1982. The Effects of Carbon Black and Other Compounding Variables on Tire Rolling Resistance and Traction, Paper given at symposium on Tire Rolling Resistance at the 122nd Meeting of Rubber Division, American Chemical Society at Chicago, Illinois, October 5-7, 1982.

ภาคผนวก

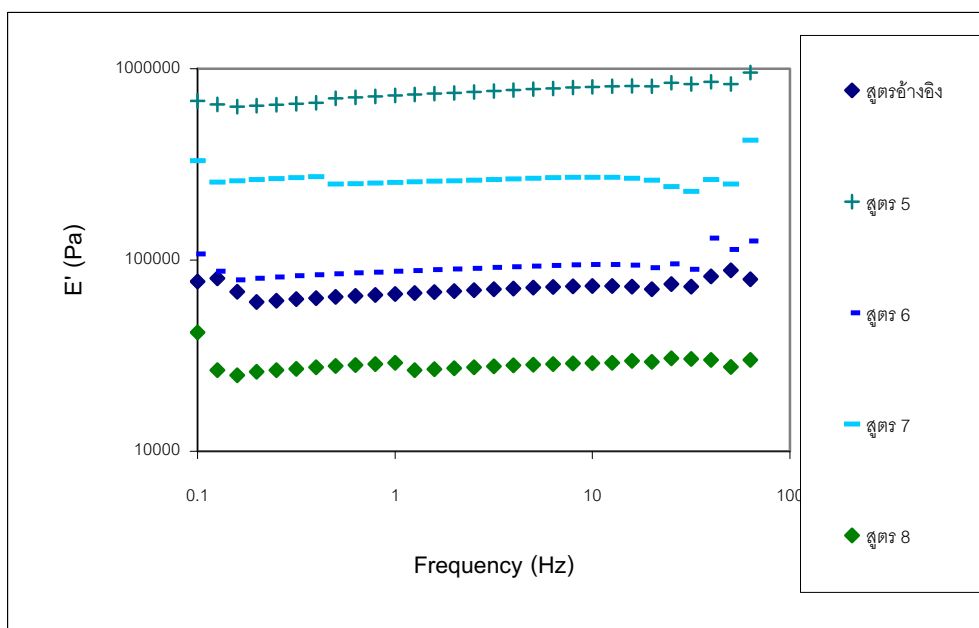
ภาคผนวก (ก)

1. ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ DMTA ของยางนอกสีดำสูตรต่าง ๆ

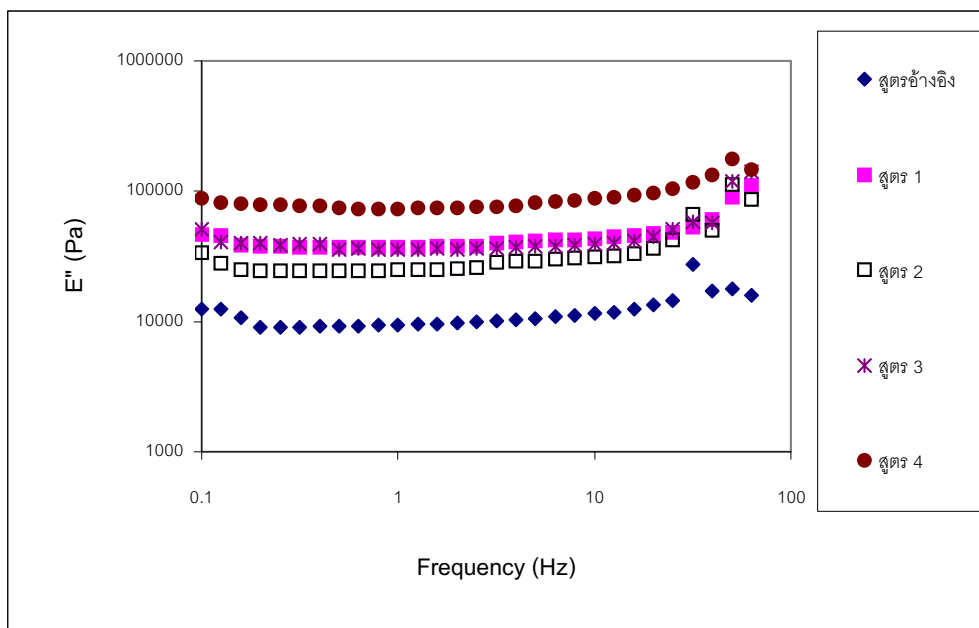
1.1 การออกสูตรก่อนการทดลองจริงครั้งที่ 1



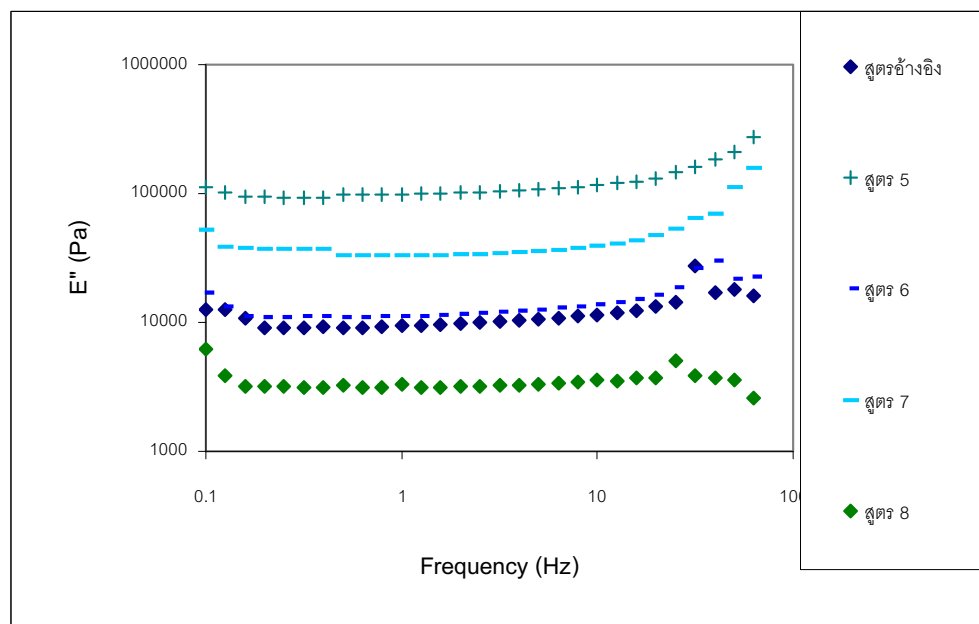
รูปที่ 1 storage modulus ของยางสูตรที่ 1, 2, 3 และ สูตร 4



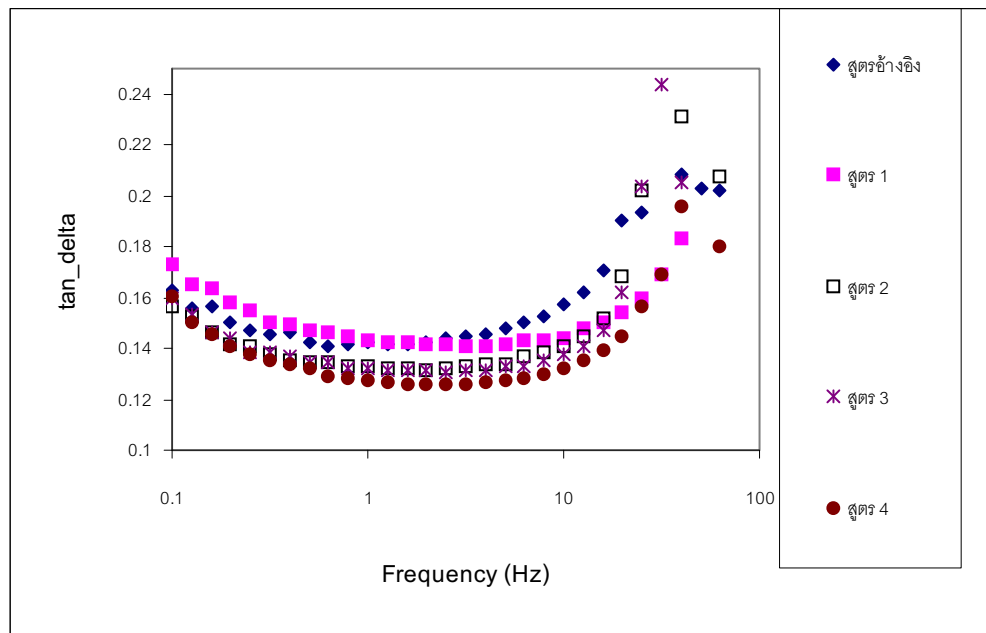
รูปที่ 2 storage modulus ของยางสูตรที่ 5, 6, 7 และ สูตร 8



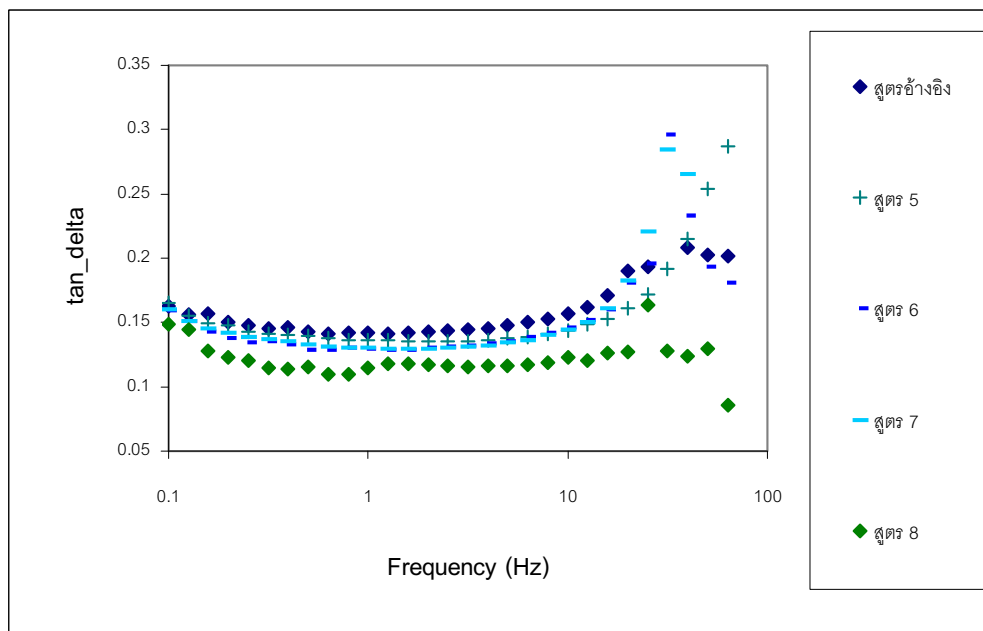
รูปที่ 3 loss modulus ของยางสูตรที่ 1, 2, 3 และ สูตร 4



รูปที่ 4 loss modulus ของยางสูตรที่ 5, 6, 7 และ สูตร 8

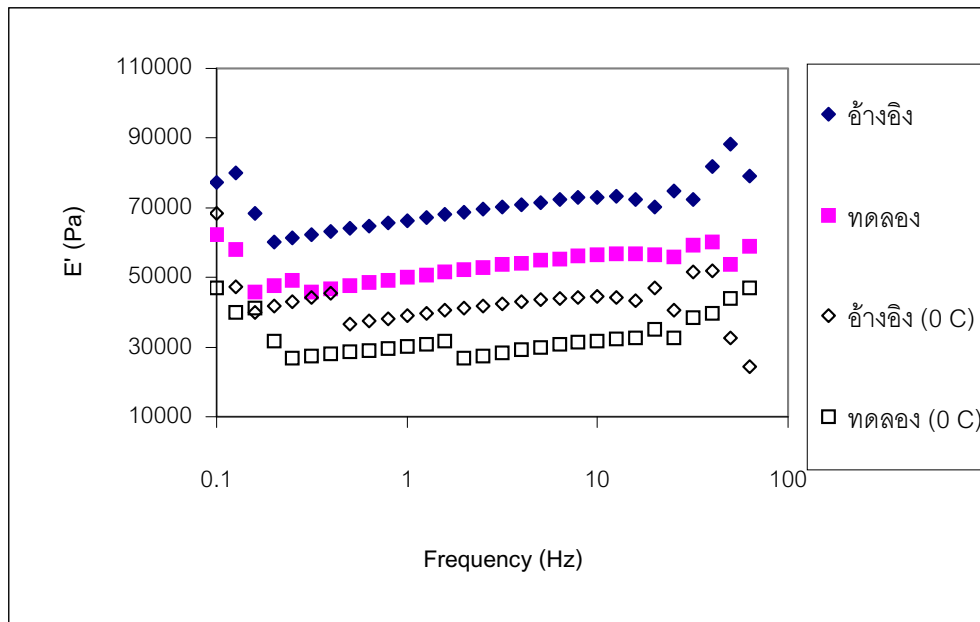


รูปที่ 5 ค่า $\tan \delta$ ของบางสูตรที่ 1, 2, 3 และ สูตร 4

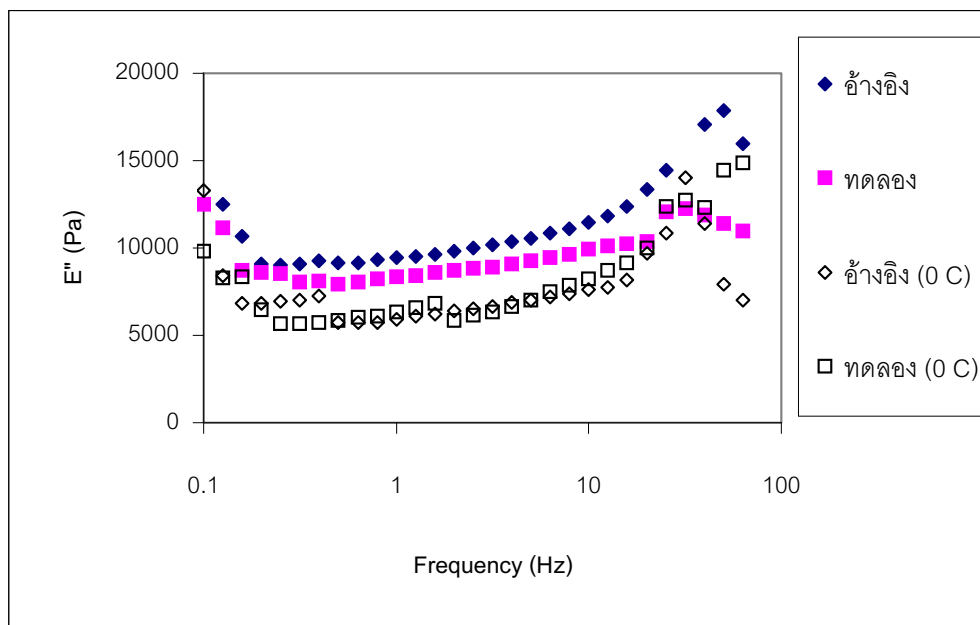


รูปที่ 6 ค่า $\tan \delta$ ของบางสูตรที่ 5, 6, 7 และ สูตร 8

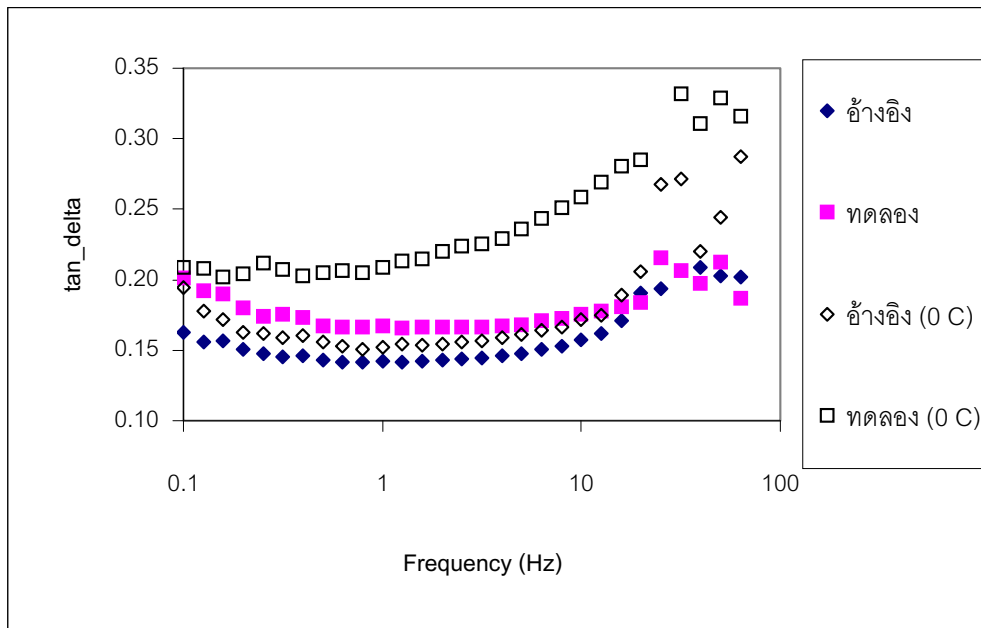
1.2 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ DMTA ของยางนอกสีดำ ทดสอบจริงที่โรงงานครั้งที่ 1



รูปที่ 7 storage modulus ของยางสูตรทดลองเทียบกับสูตรโรงงานที่ทำการทดลองจริงที่โรงงานครั้งที่ 1

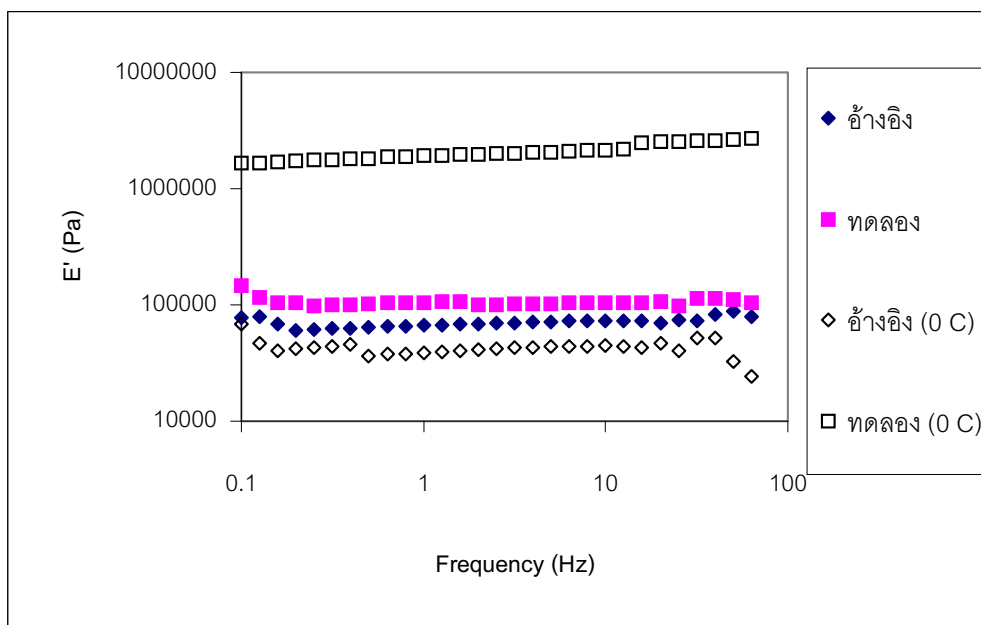


รูปที่ 8 loss modulus ของยางสูตรทดลองเทียบกับสูตรโรงงานที่ทำการทดลองจริงครั้งที่ 1

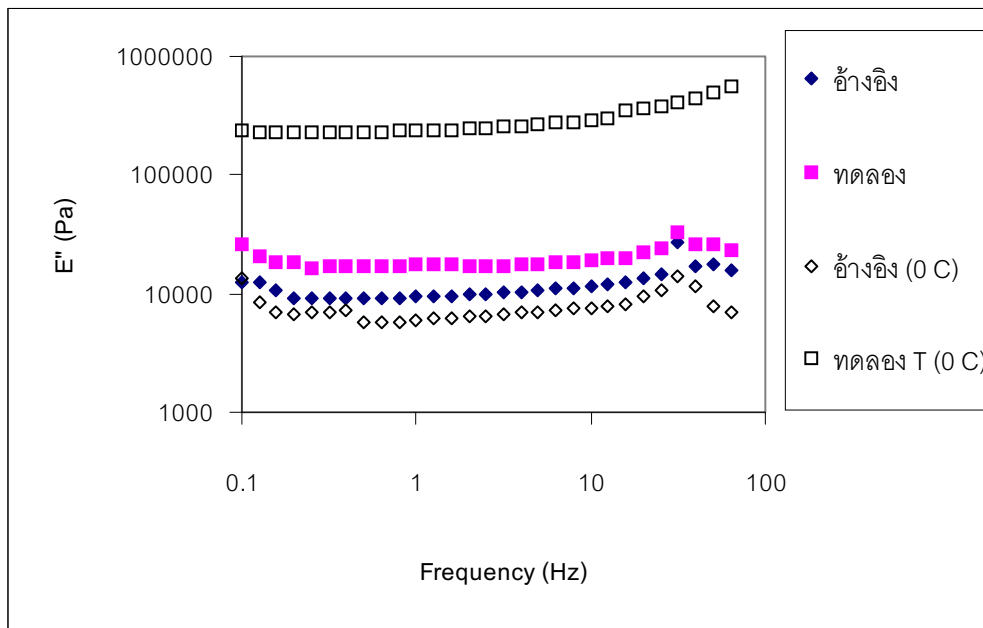


รูปที่ 9 $\tan \delta$ ของยางสูตรทดลองเทียบกับสูตร โรงงานที่ทำการทดลองจริงครั้งที่ 1

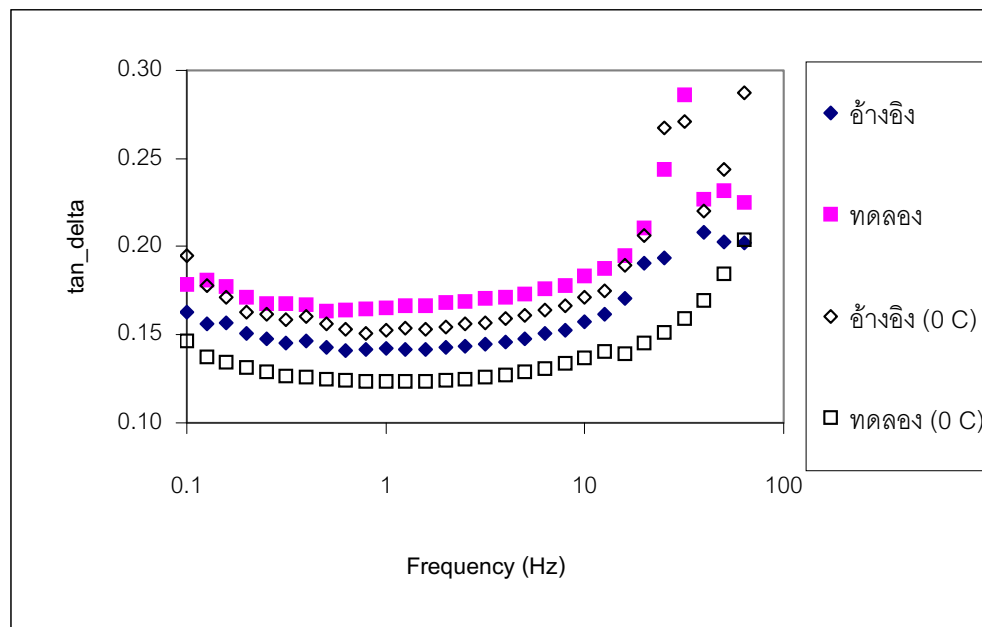
1.3 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ DMTA ของยางนอกสีดำ ทดสอบจริงที่โรงงานครั้งที่ 2



รูปที่ 10 storage modulus ของยางสูตรทดลองเทียบกับสูตร โรงงานที่ทำการทดลองจริงที่โรงงานครั้งที่ 2

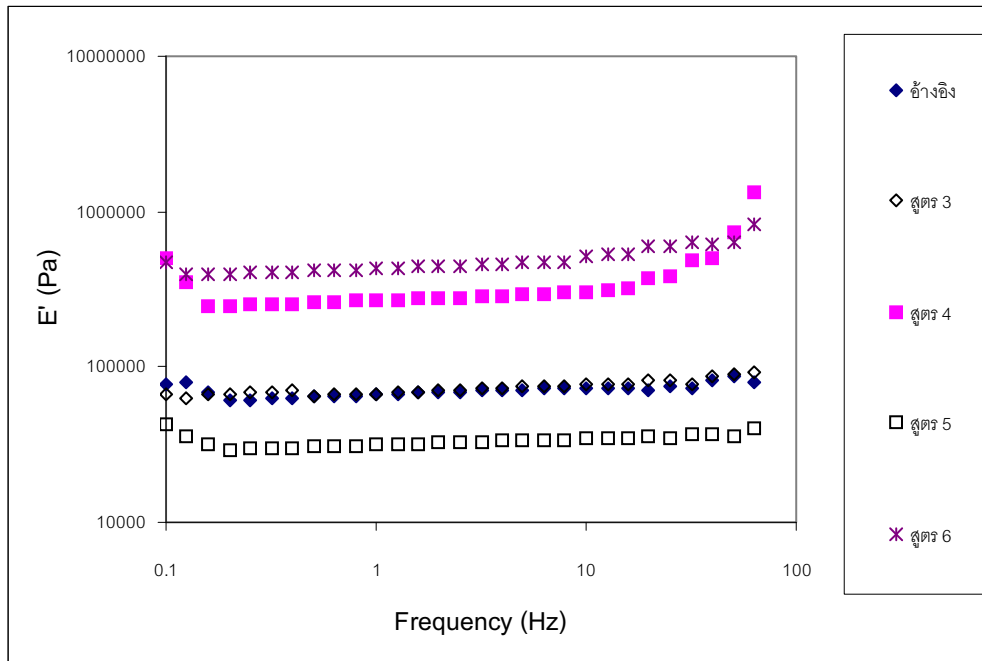


รูปที่ 11 loss modulus ของยางสูตรทดลองเทียบกับสูตรโรงงานที่ทำการทดลองจริงที่โรงงานครั้งที่ 2

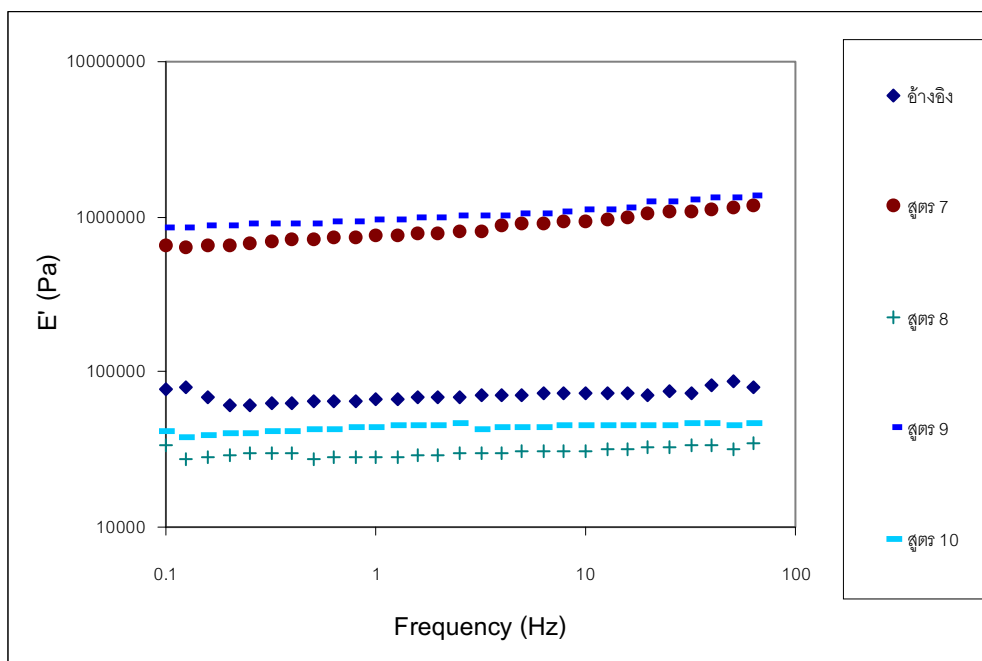


รูปที่ 12 $\tan \delta$ ของยางสูตรทดลองเทียบกับสูตรโรงงานที่ทำการทดลองจริงครั้งที่ 2

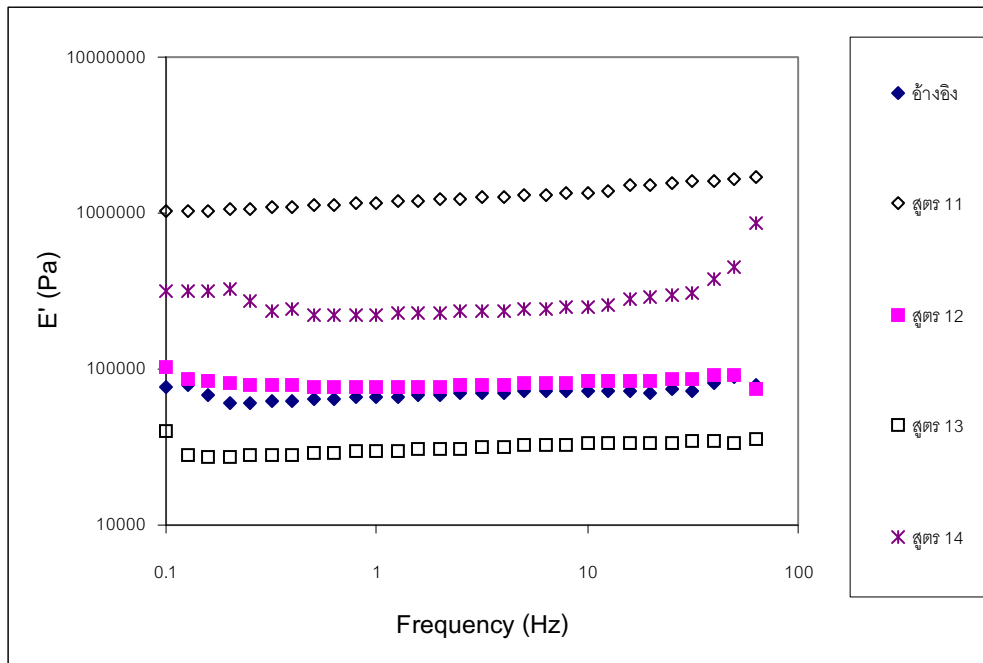
1.4 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ DMTA ของยางนอกสีดำ เพื่อปรับปรุงสมบัติหลังจากทดสอบจริงที่โรงงานครั้งที่ 2



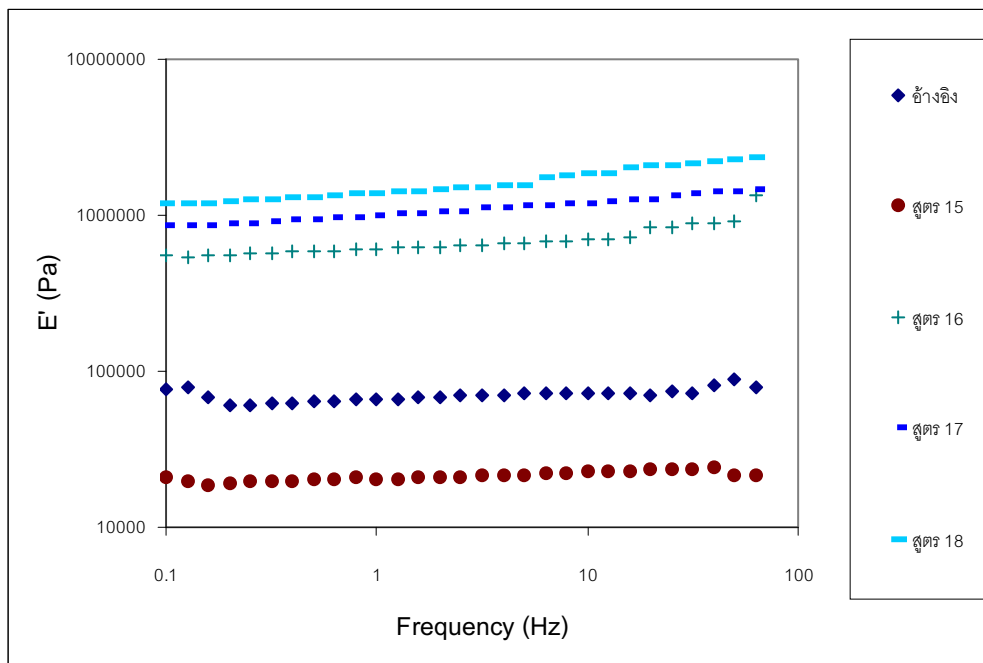
รูปที่ 13 ค่า storage modulus ของยางสูตร 3 ถึง สูตร 6 เปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง



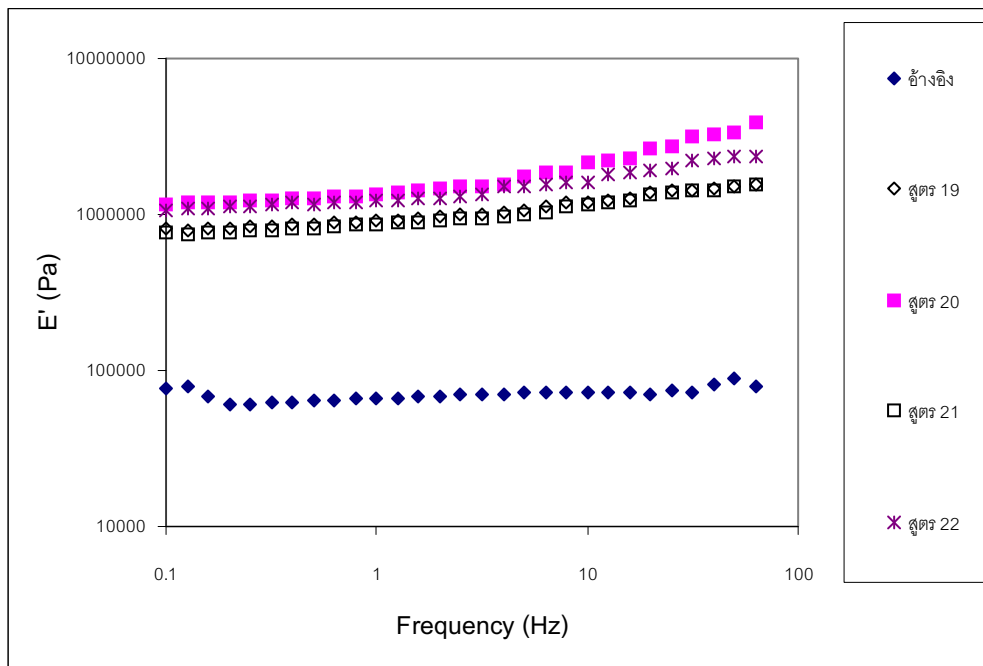
รูปที่ 14 ค่า storage modulus ของยางสูตร 7 ถึง สูตร 10 เปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง



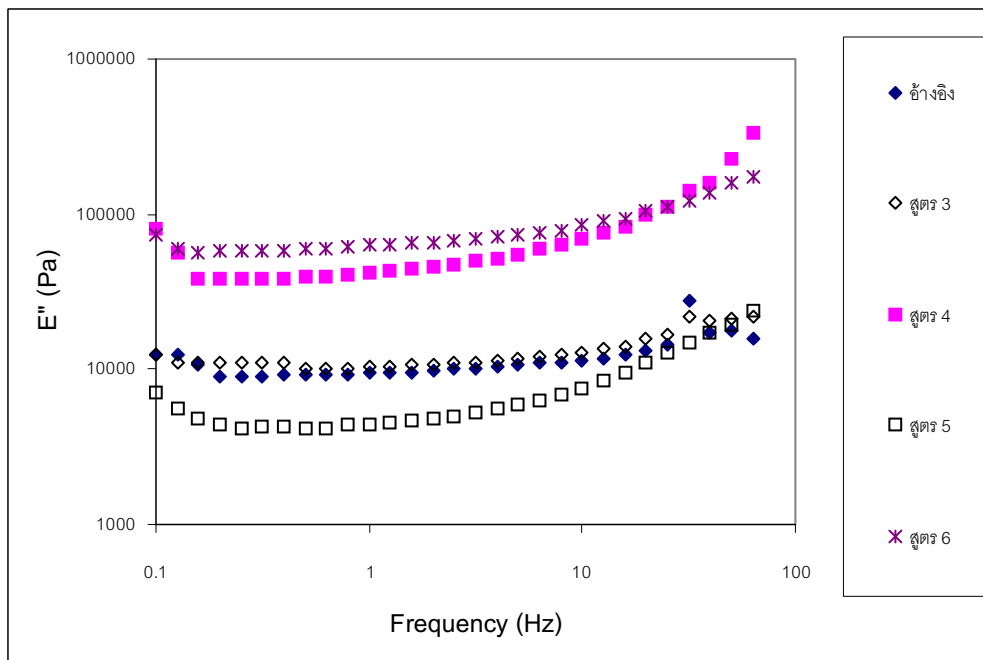
รูปที่ 15 ค่า storage modulus ของยางสูตร 11 ถึง สูตร 14 เปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง



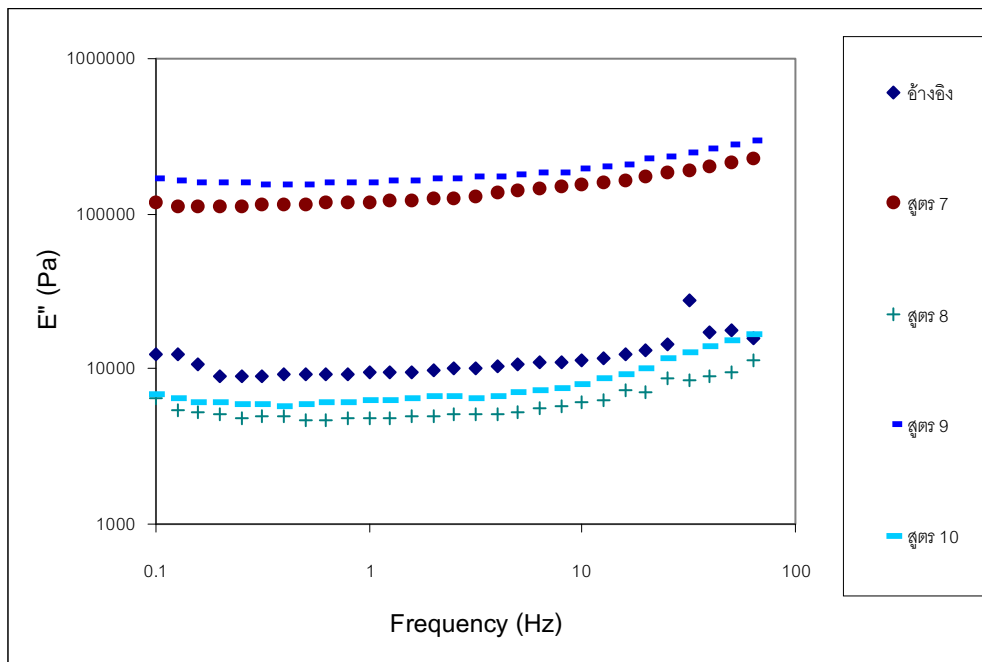
รูปที่ 16 ค่า storage modulus ของยางสูตร 15 ถึง สูตร 18 เปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง



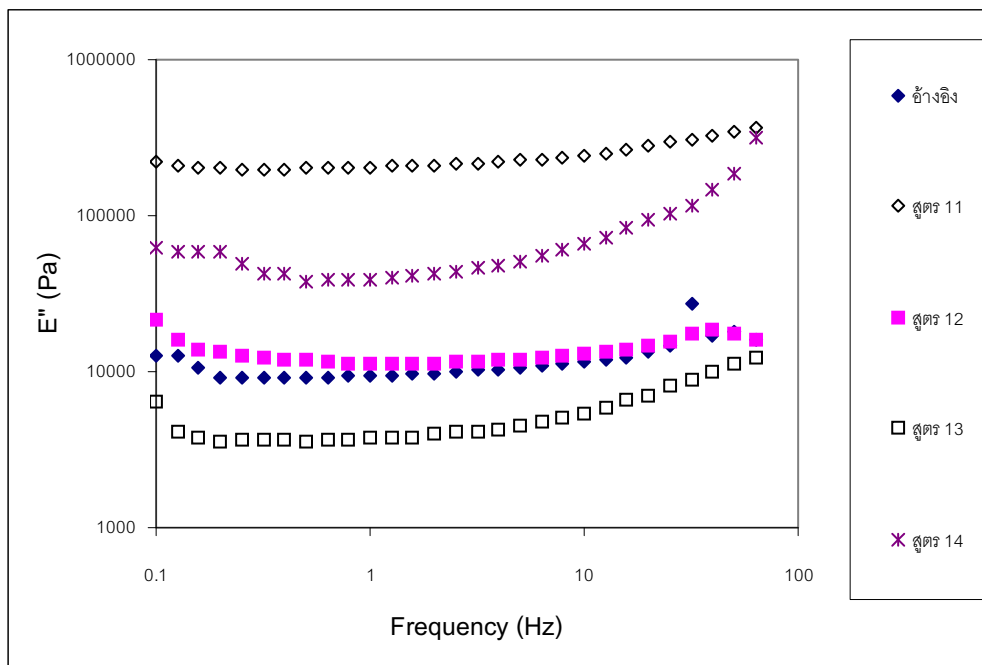
รูปที่ 17 ค่า storage modulus ของยางสูตร 19 ถึง สูตร 22 เปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง



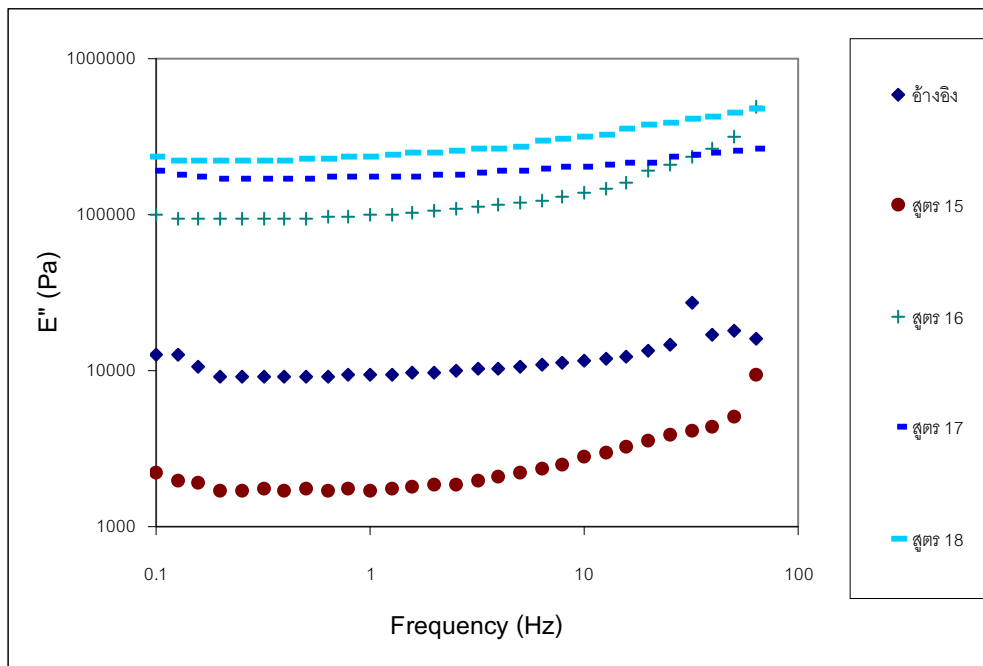
รูปที่ 18 ค่า loss modulus ของยางสูตร 3 ถึง สูตร 6 เปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง



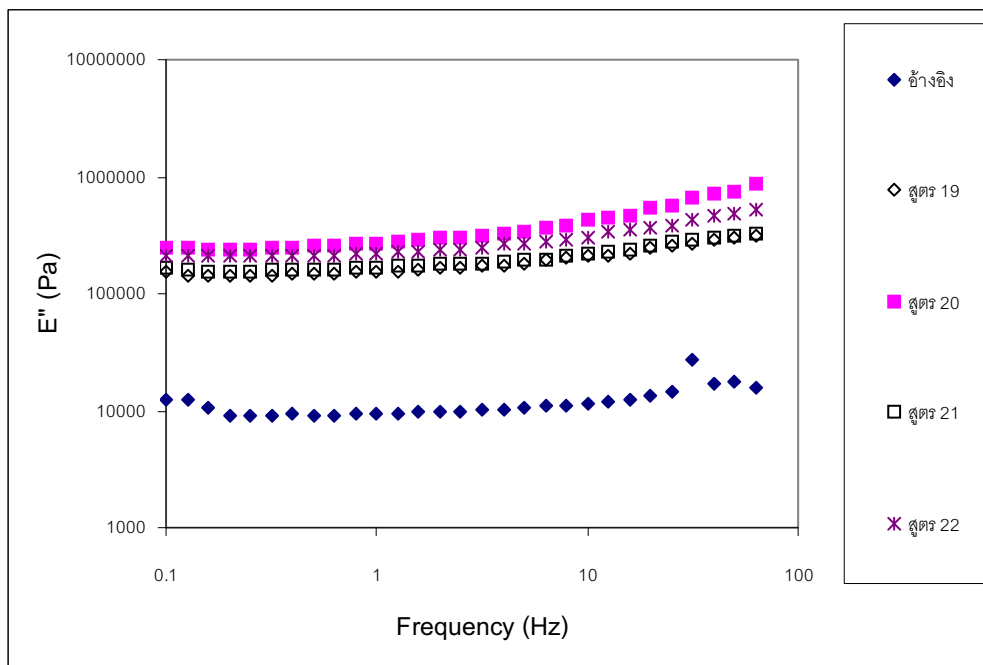
รูปที่ 19 ค่า loss modulus ของยางสูตร 7 ถึง สูตร 10 เปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง



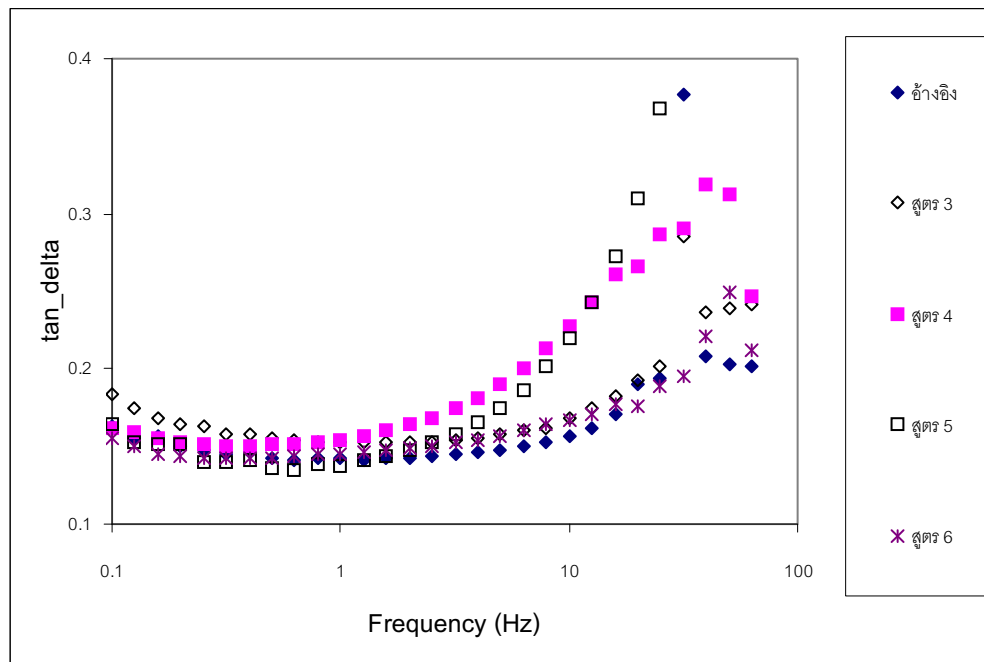
รูปที่ 20 ค่า loss modulus ของยางสูตร 11 ถึง สูตร 14 เปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง



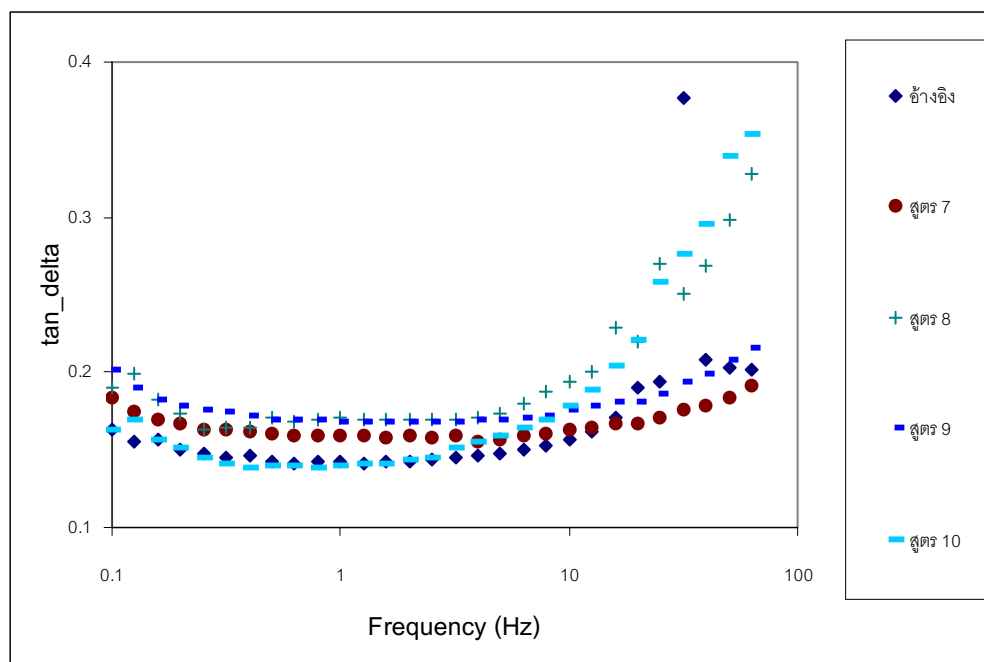
รูปที่ 21 ค่า loss modulus ของยางสูตร 15 ถึง สูตร 18 เปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง



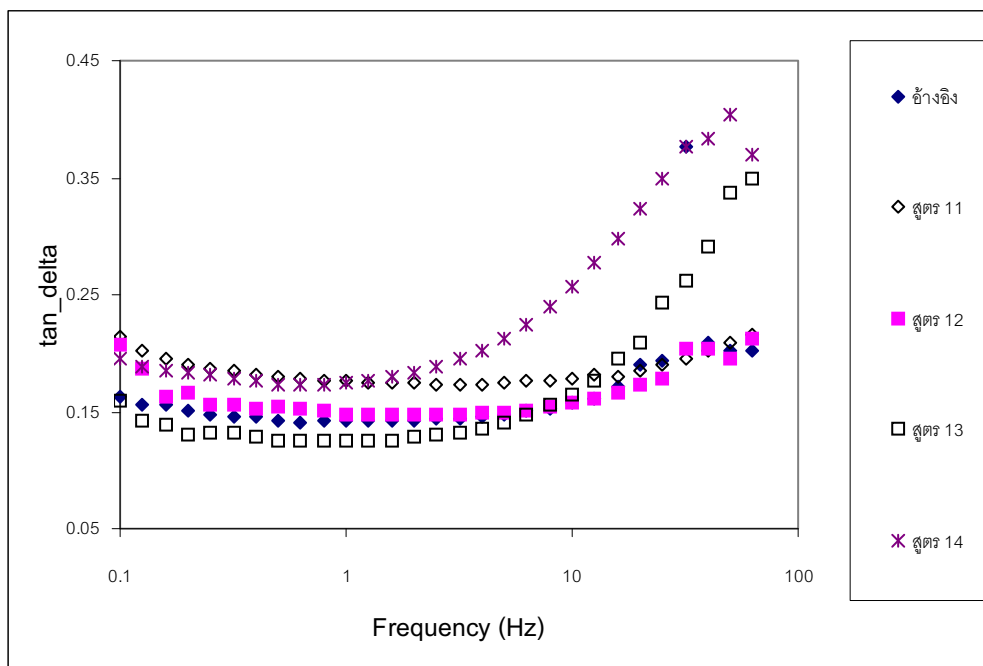
รูปที่ 22 ค่า loss modulus ของยางสูตร 19 ถึง สูตร 22 เปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง



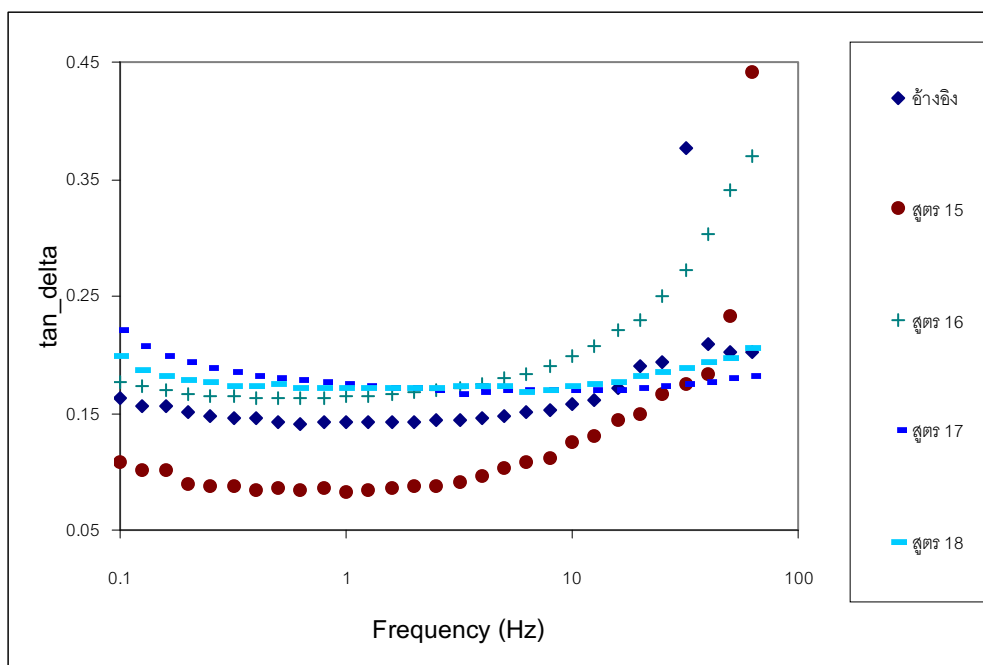
รูปที่ 23 ค่า $\tan \delta$ ของบางสูตร 3 ถึง สูตร 6 เปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง



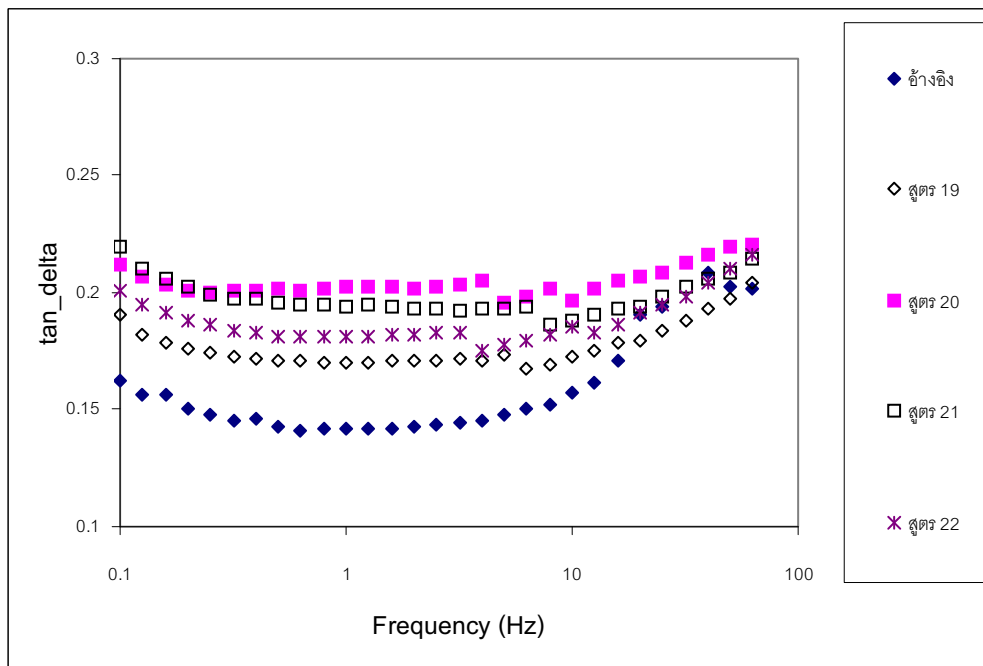
รูปที่ 24 ค่า $\tan \delta$ ของบางสูตร 7 ถึง สูตร 10 เปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง



รูปที่ 25 ค่า $\tan \delta$ ของบางสูตร 11 ถึง สูตร 14 เปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง

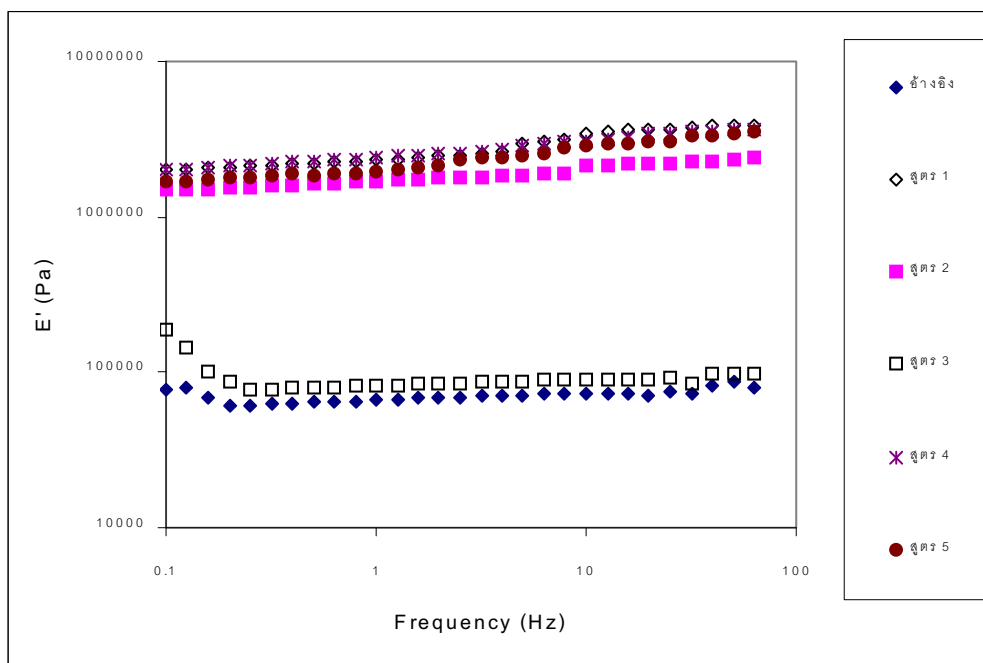


รูปที่ 26 ค่า $\tan \delta$ ของบางสูตร 15 ถึง สูตร 18 เปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง

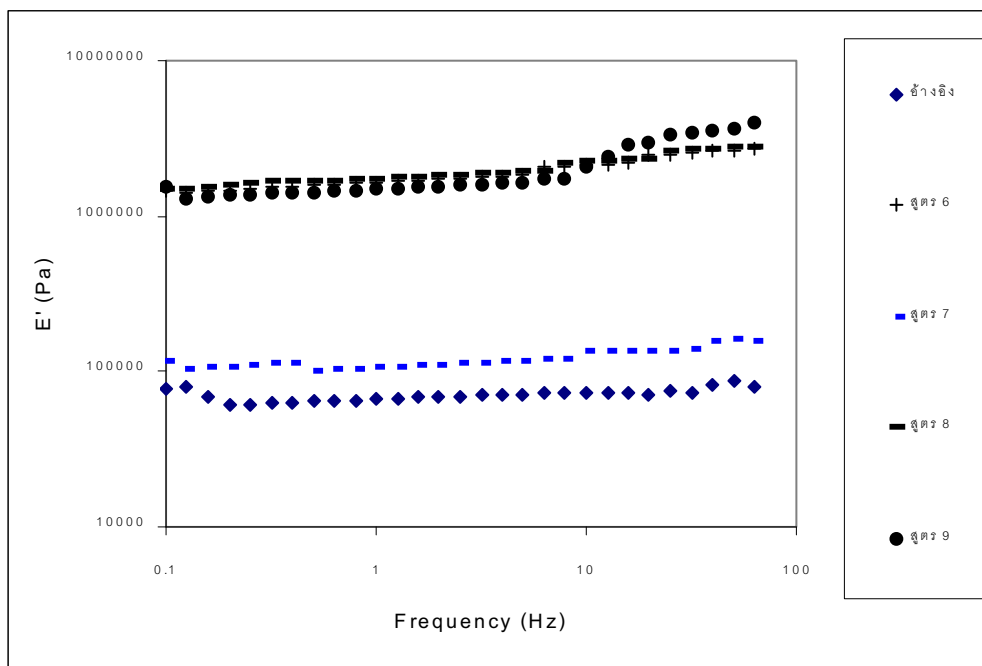


รูปที่ 27 ค่า $\tan \delta$ ของยางสูตร 19 ถึง สูตร 22 เปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง

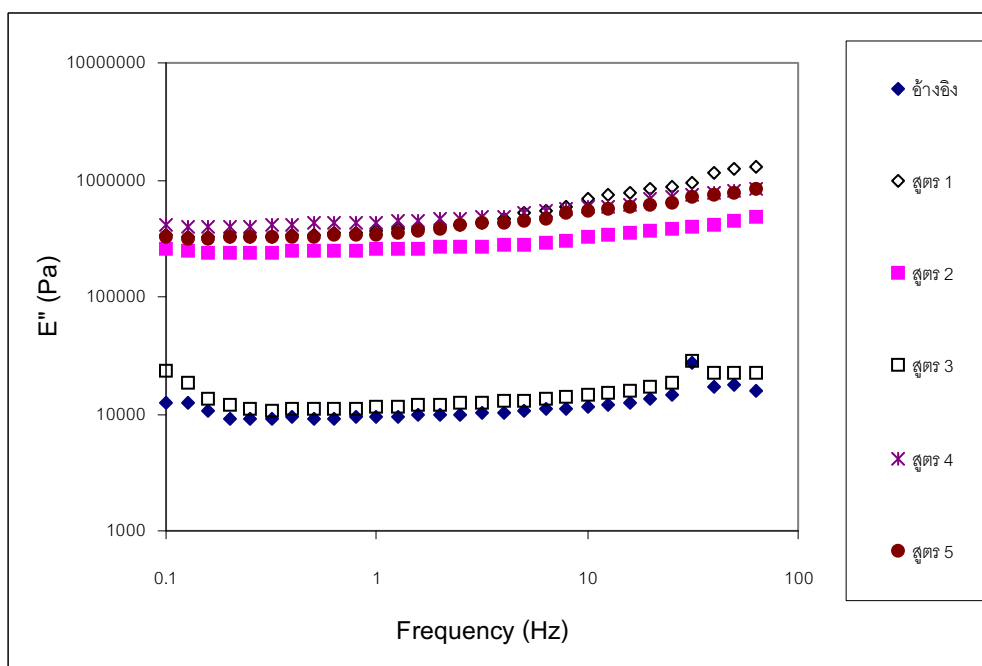
1.5 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ DMTA ของยางที่ทำการผสมและทดสอบสมบัติที่โรงงาน เพื่อศึกษาสูตรที่ช่วยในการลดต้นทุนโดยใช้ยาง reclaim และ CaCO_3 เป็นสารตัวเติม



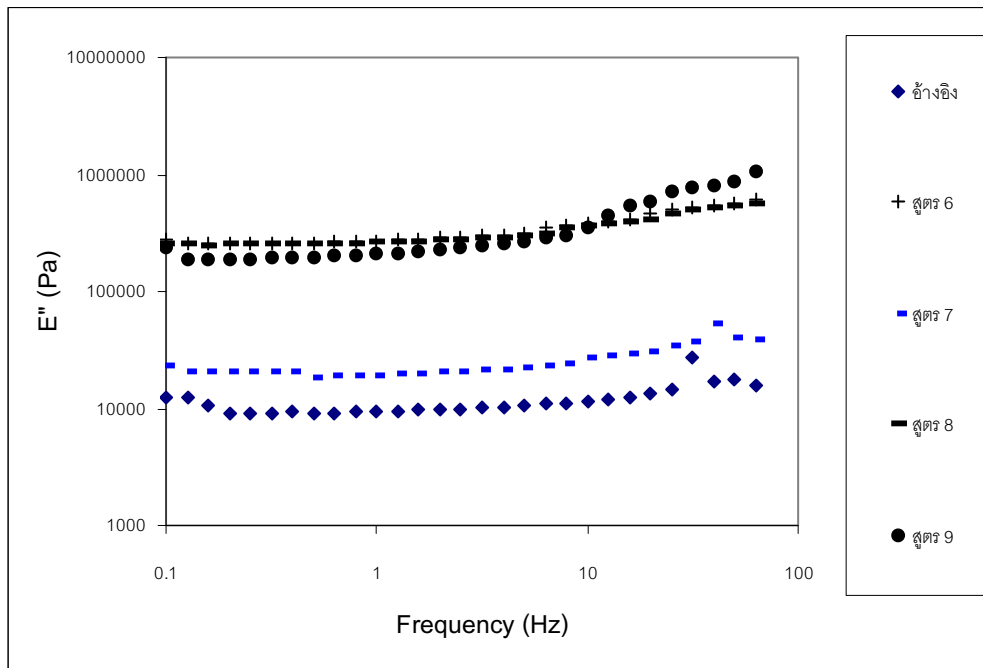
รูปที่ 28 ค่า storage modulus ของยางสูตร 1 ถึง สูตร 5 เปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง



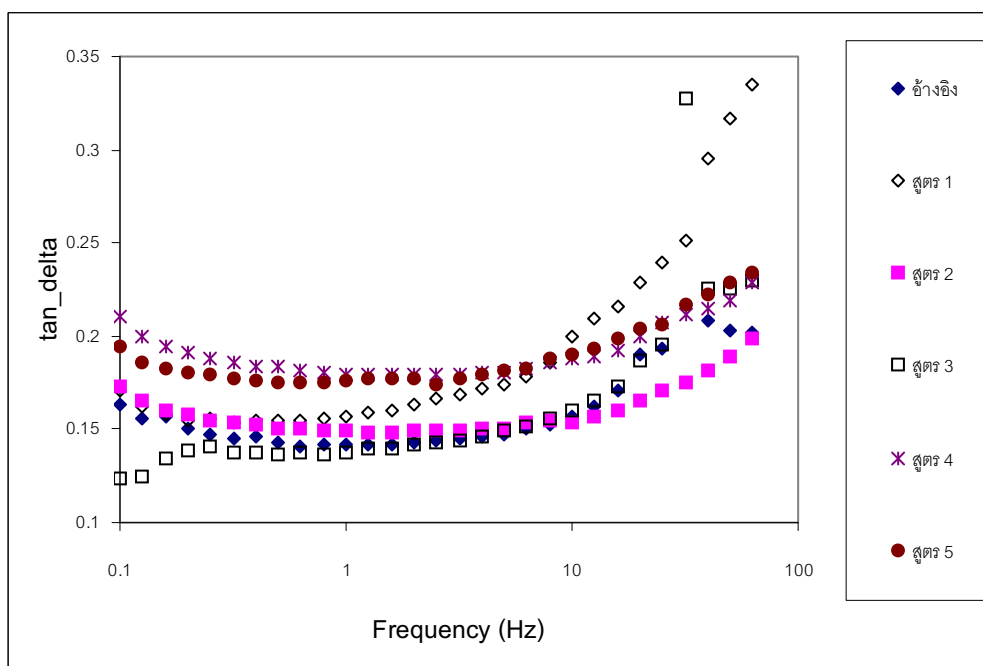
รูปที่ 29 ค่า storage modulus ของยางสูตร 6 ถึง สูตร 9 เปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง



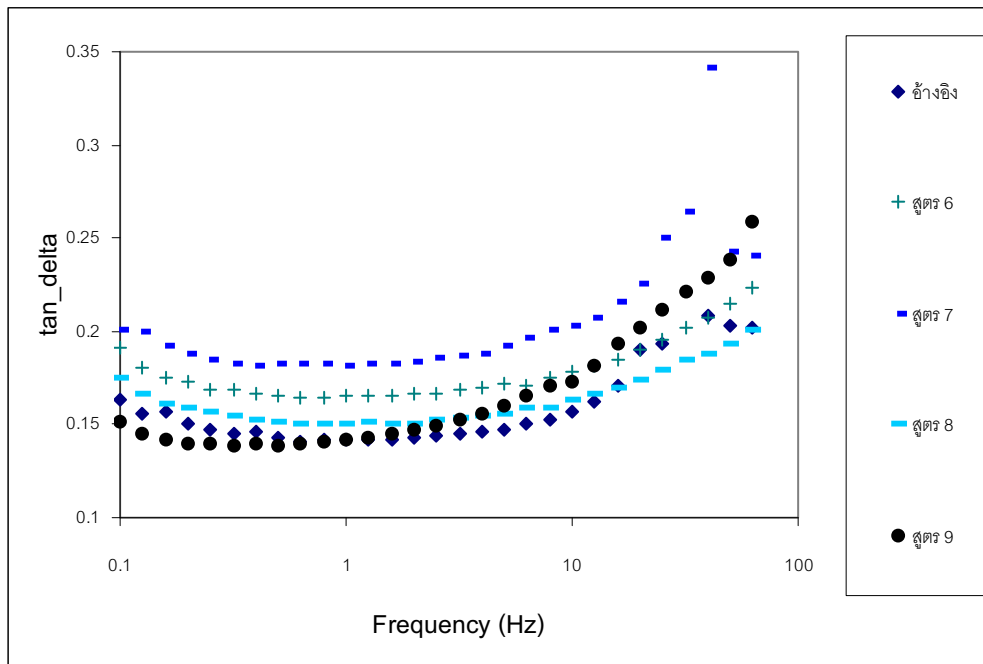
รูปที่ 30 ค่า loss modulus ของยางสูตร 1 ถึง สูตร 5 เปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง



รูปที่ 31 ค่า loss modulus ของยางสูตร 6 ถึง สูตร 9 เปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง



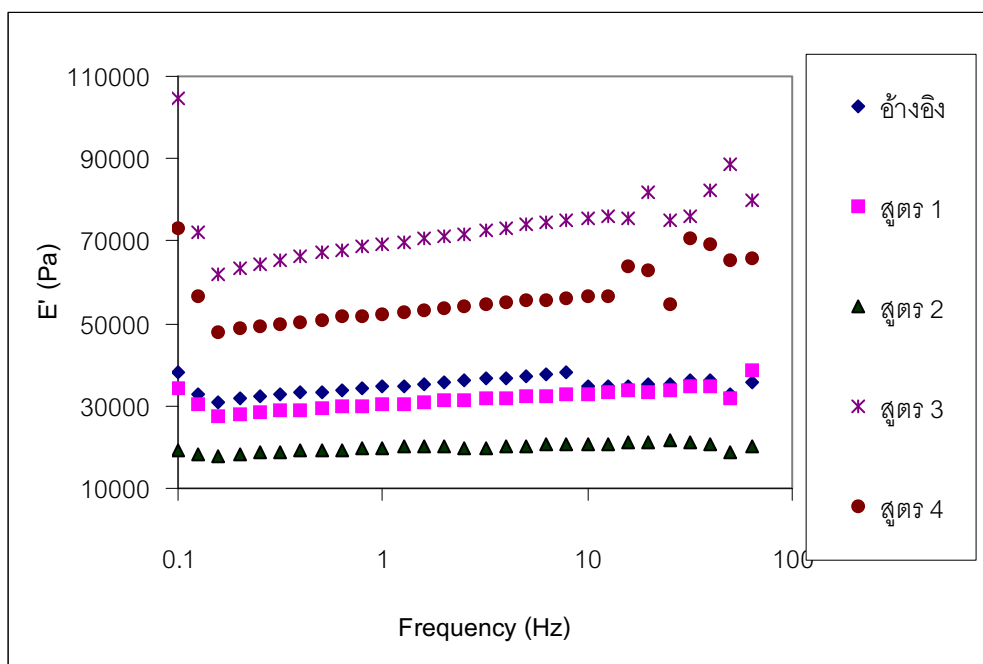
รูปที่ 32 ค่า $\tan \delta$ ของยางสูตร 1 ถึง สูตร 5 เปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง



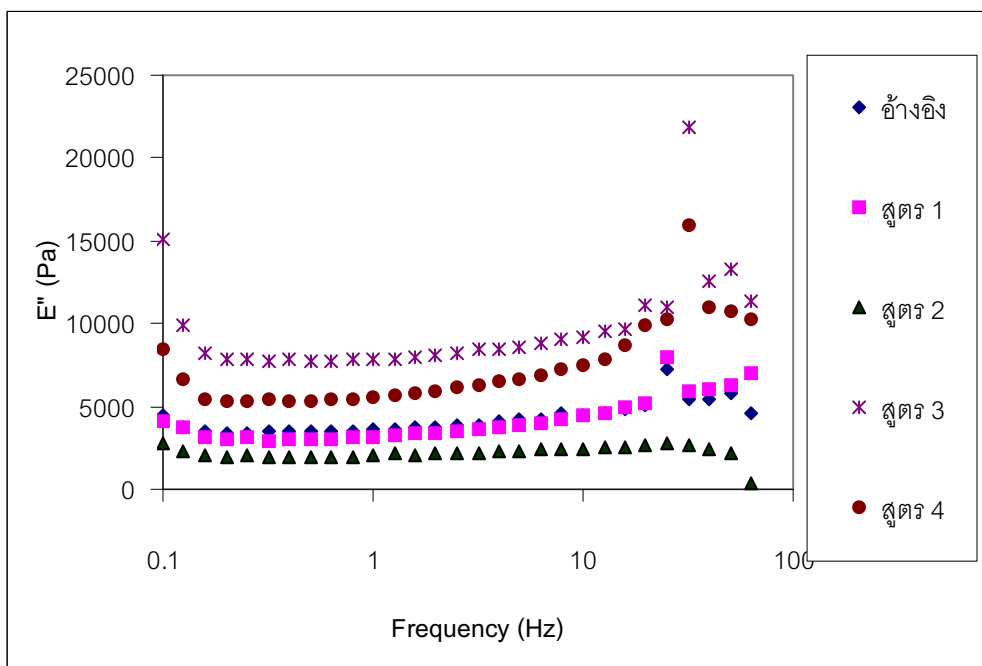
รูปที่ 33 ค่า $\tan \delta$ ของยางสูตร 6 ถึง สูตร 9 เปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง

2. ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ DMTA ของยางนอกสี่ขาวสูตรต่าง ๆ

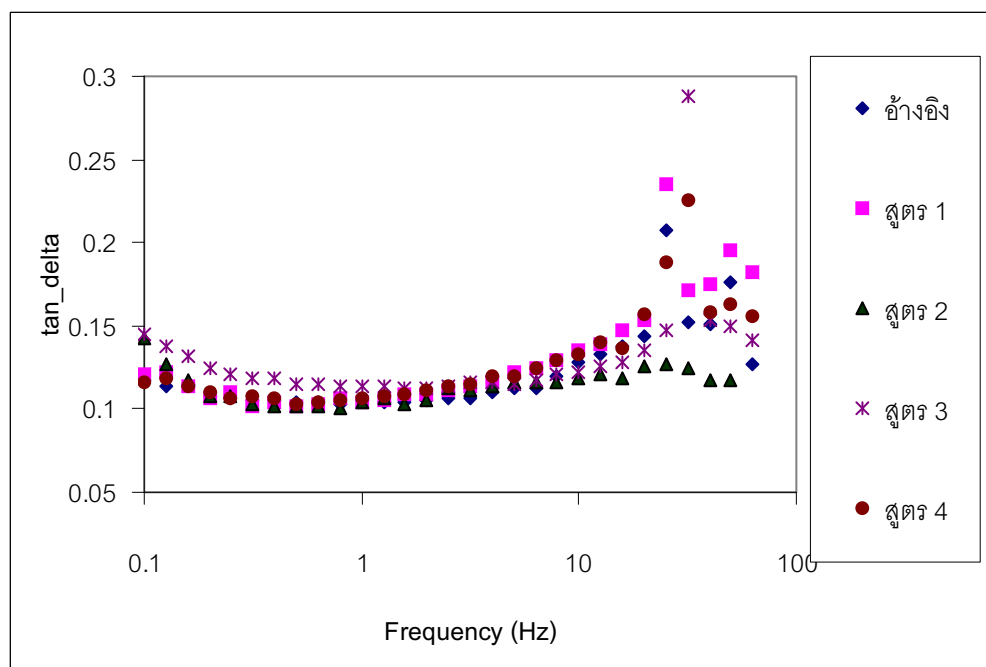
2.1 การออกสูตรก่อนการทดลองจริงครั้งที่ 1



รูปที่ 34 ค่า storage modulus ของยางสูตร 1 ถึง สูตร 4 เปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง

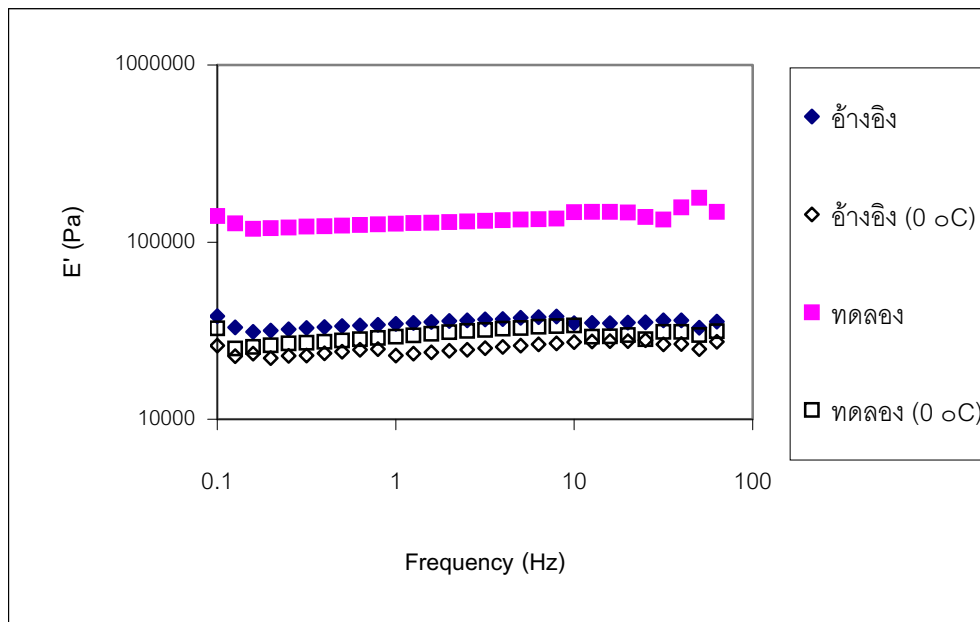


รูปที่ 35 ค่า loss modulus ของยางสูตร 1 ถึง สูตร 4 เปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง

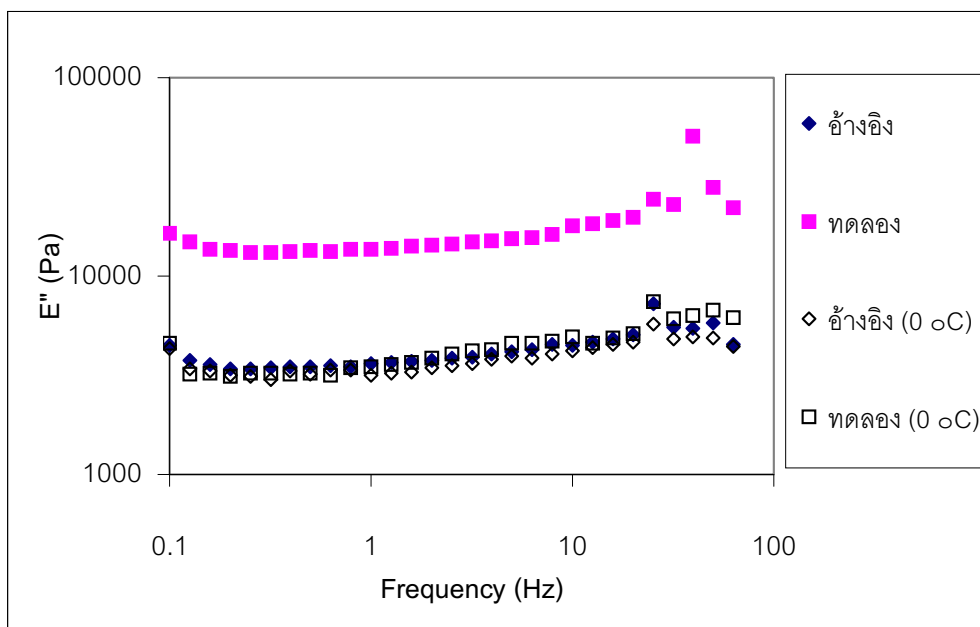


รูปที่ 36 ค่า $\tan \delta$ ของยางสูตร 1 ถึง สูตร 4 เปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง

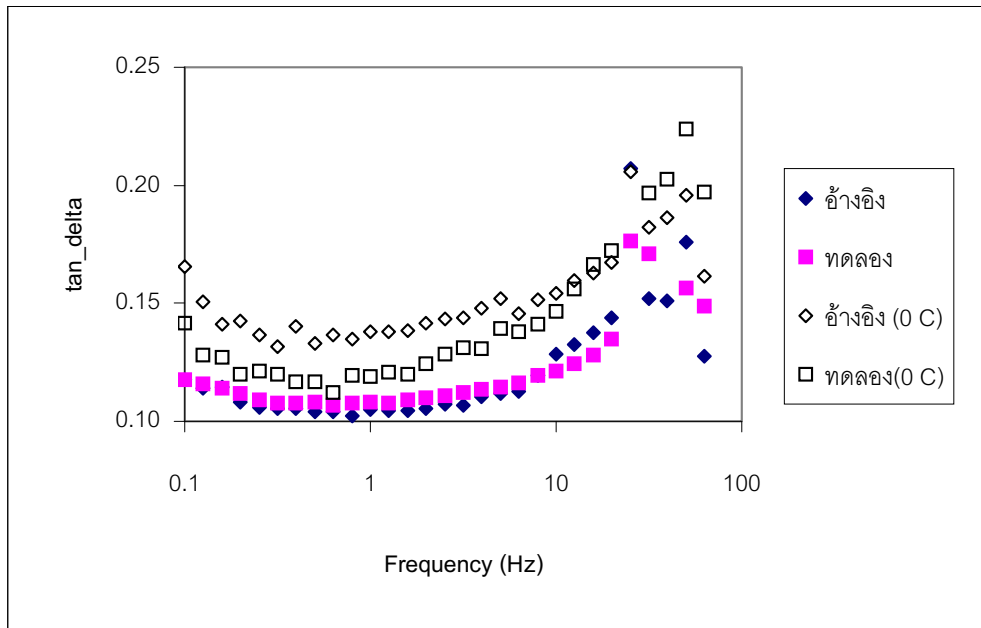
2.2 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ DMTA ของยางสีขาว ที่ทำการทดลองจริงครั้งที่ 1



รูปที่ 37 ค่า storage modulus ของสูตรยางทดลองเปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง

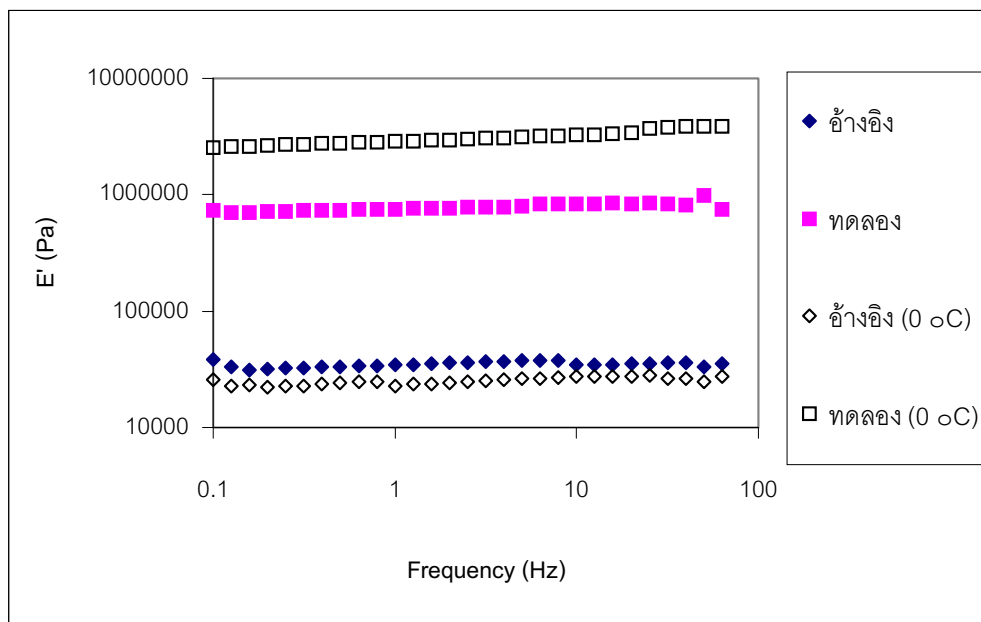


รูปที่ 35 ค่า loss modulus ของสูตรยางทดลองเปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง

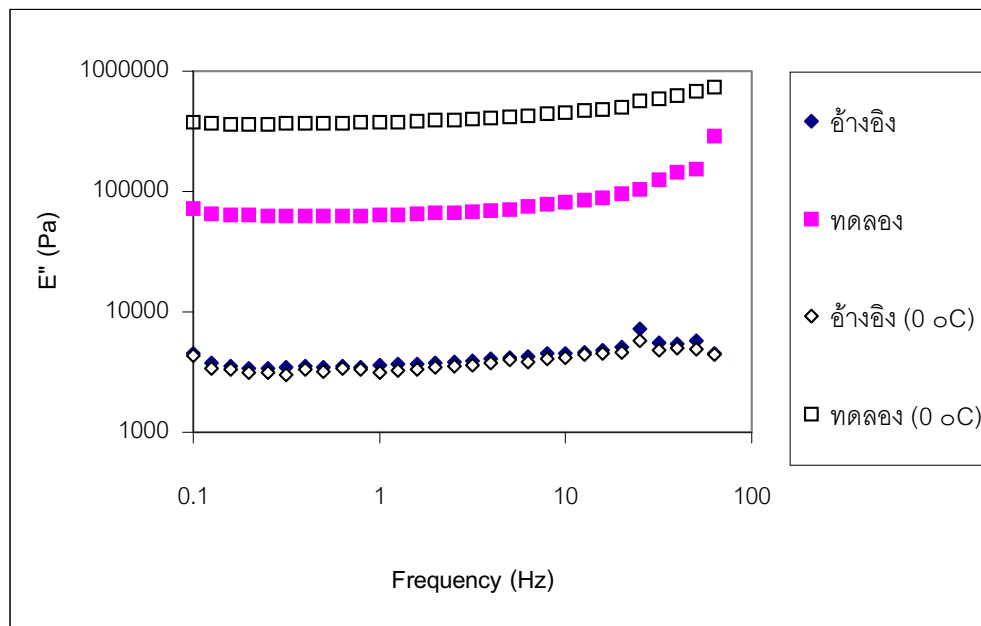


รูปที่ 36 ค่า $\tan \delta$ ของสูตรยางทดลองเปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง

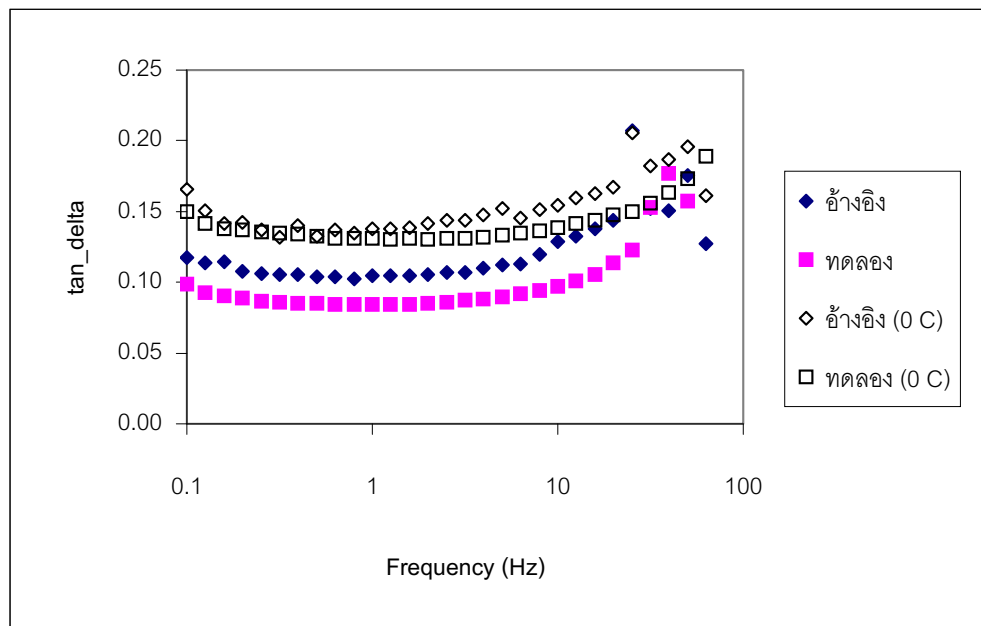
2.3 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ DMTA ของยางสูตรขาว ที่ทำการทดลองจริงครั้งที่ 2



รูปที่ 37 ค่า storage modulus ของสูตรยางทดลองเปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง

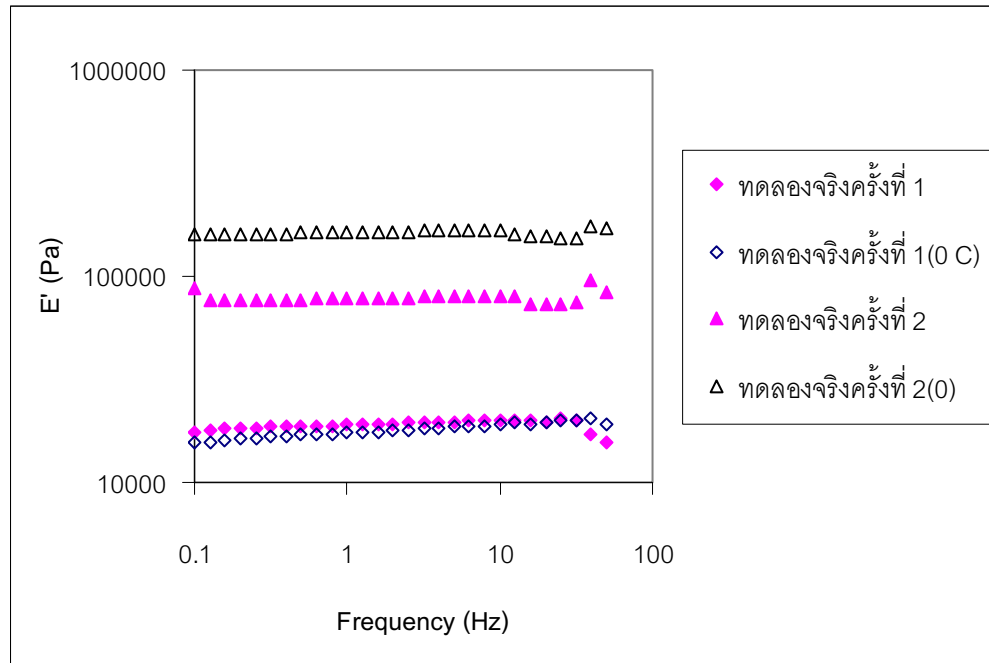


รูปที่ 38 ค่า loss modulus ของสูตรยางทดลองเปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง

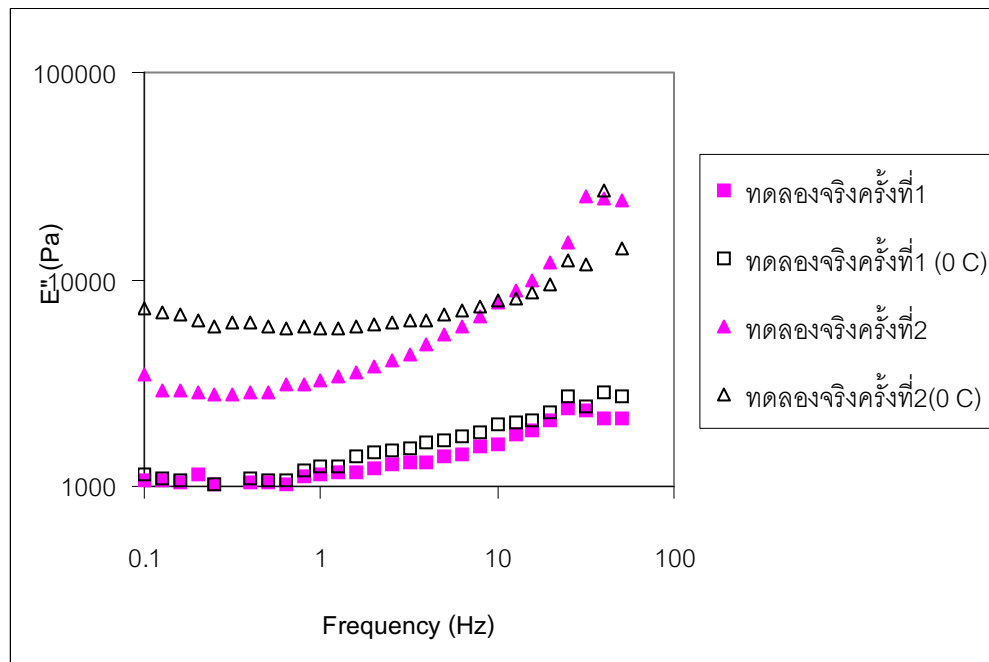


รูปที่ 39 ค่า $\tan \delta$ ของสูตรยางทดลองเปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง

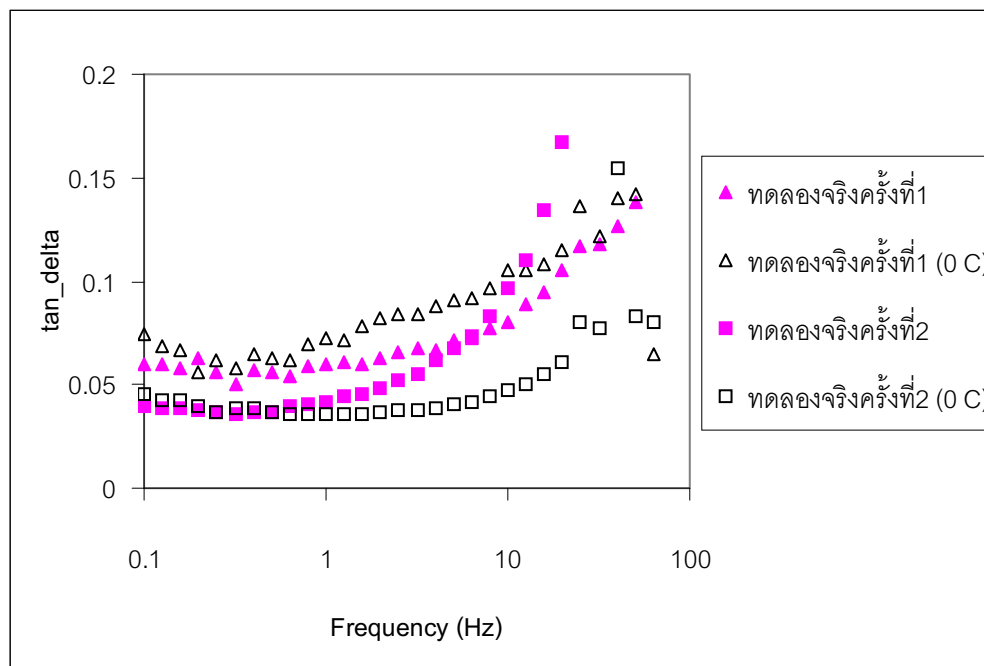
3. ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ DMTA ของยางกลางสูตรต่าง ๆ



รูปที่ 40 ค่า storage modulus ของสูตรยางทดลองเปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง



รูปที่ 41 ค่า loss modulus ของสูตรยางทดลองเปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง

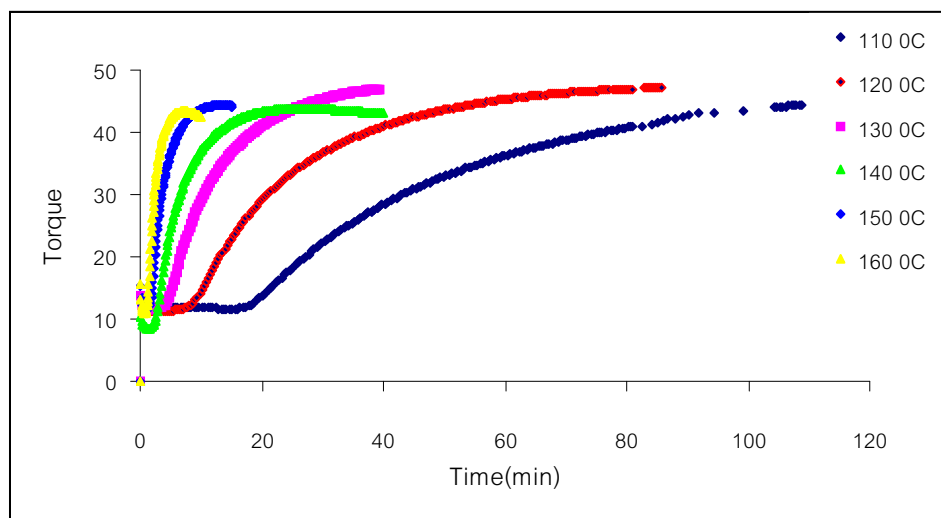


รูปที่ 42 ค่า $\tan \delta$ ของสูตรยางทดลองเปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง

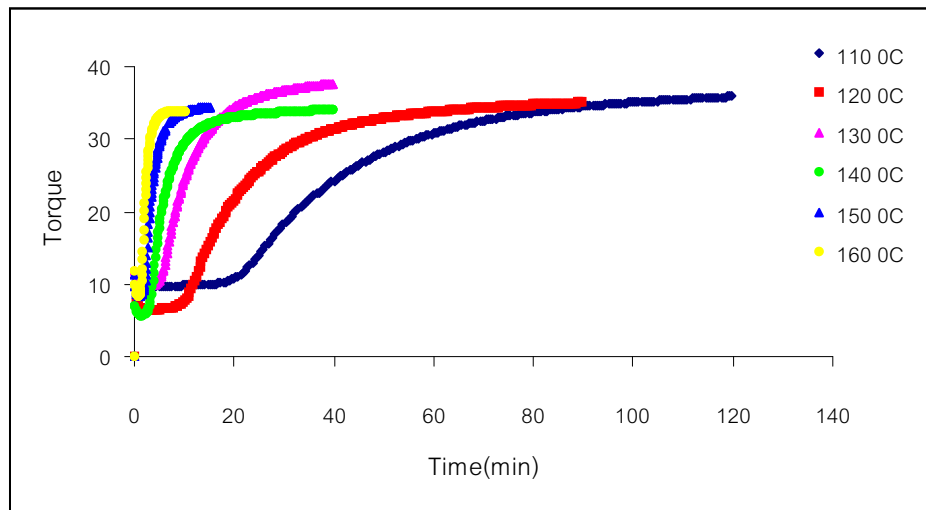
ภาคผนวก ข

1 ลักษณะค่าทอร์กที่ได้จาก เครื่อง ODR 2000

1.1 ลักษณะค่าทอร์ก ที่ทำการทดลองตามตารางที่ 3.1

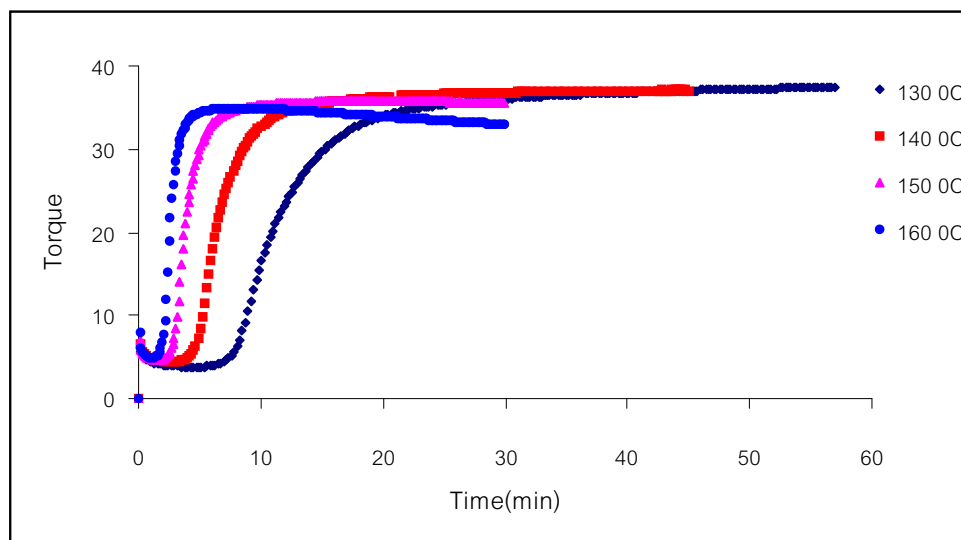


รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์ก กับ เวลาในการวัดค่าไนซ์ของยางสูตรที่ 1 ตามตารางที่ 3.1

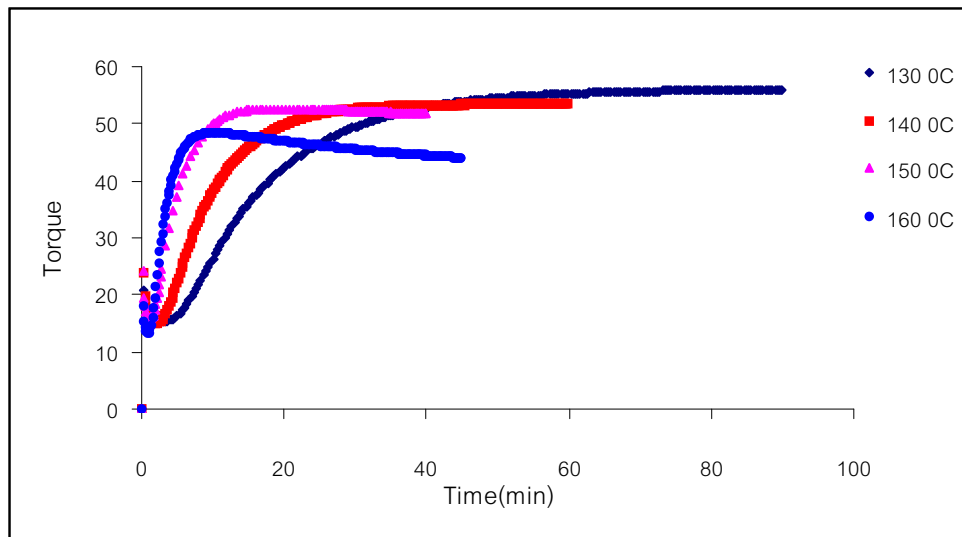


รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์ก กับเวลาในการวัลคาไนซ์ของสูตรที่ 2 ตามตารางที่ 3.1

2 ลักษณะค่าทอร์กที่ได้จากการทดลองตามตารางที่ 3.2



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาในการวัลคาไนซ์ของสูตรยางชั้นนอก ตามตารางที่ 3.2



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาในการวัดคาโนซ์ของยางชั้นใน(ผ้าใบ) ตามตารางที่ 4.5

2 ตัวอย่างการ Calibrate เครื่องวัดระดับการวัดคาโนซ์

2.1 ตั้งค่าเครื่องวัดระดับการวัดคาโนซ์กับคอมพิวเตอร์ โดยตั้งค่าให้ Slope = 1 และตั้งค่า offset = 0

2.2 ทำการวัดอุณหภูมิน้ำร้อนครั้งแรกที่อุณหภูมิ 60 °C เทอร์โมคอปเปิลอ่านค่าได้ 53.1 °C โดยที่

A1 = 60 และ R1 = 53.1

2.3 ทำการวัดอุณหภูมิครั้งที่ 2 (จะต้องห่างจากจุดแรกที่วัดประมาณ 20 °C) ที่อุณหภูมิ 80 °C ค่าที่อ่านได้คือ 75.2 °C โดยที่ A2 = 80 และ R2 = 75.2

2.4 ทำการคำนวณหาค่า m และ b

$$m = (A2 - A1) / (R2 - R1) = (80 - 60) / (75.2 - 53.1) = 0.905$$

$$b = A1 - m * R1 = 60 - (0.905 * 53.1) = 11.945$$

2.5 นำค่า m และ b มาเซ็ทในเครื่องวัดระดับการวัดคาโนซ์กับคอมพิวเตอร์ โดยแทนค่า Slope = 0.905 และ offset = 11.945

3 ตัวอย่างการคำนวณระดับการวัลคาไนซ์

ตารางที่ 1 ตัวอย่าง เวลา, อุณหภูมิและเปอร์เซ็นต์การวัลคาไนซ์ที่คำนวณได้

Time(min)	Temp	Interval	Tave	n	C-value	Δ -Vulc.	T-vulc.	%cure
0	29.58	3	29.755	-10.0245	0.0026116	0.0078347	0.0078347	0.02
3	29.93	3	29.63	-10.037	0.0025923	0.0077768	0.0156115	0.04
6	29.33	3	30.405	-9.9595	0.0027143	0.0081428	0.0237543	0.06
9	31.48	3	30.795	-9.9205	0.0027778	0.0083334	0.0320876	0.09
12	30.11	3	31.48	-9.852	0.002893	0.008679	0.0407667	0.11
15	32.85	3	32.82	-9.718	0.0031324	0.0093973	0.0501639	0.13
18	32.79	3	33.415	-9.6585	0.003245	0.0097349	0.0598989	0.16
21	34.04	3	34.225	-9.5775	0.0034047	0.0102142	0.0701131	0.19
24	34.41	3	35.025	-9.4975	0.0035702	0.0107107	0.0808238	0.22
27	35.64	3	36.475	-9.3525	0.003891	0.011673	0.0924968	0.25
30	37.31	3	37.825	-9.2175	0.0042155	0.0126465	0.1051433	0.28
33	38.34	3	39.89	-9.011	0.004765	0.0142949	0.1194381	0.32
36	41.44	3	41.54	-8.846	0.005255	0.0157651	0.1352032	0.36
39	41.64	3	42.985	-8.7015	0.0057255	0.0171764	0.1523796	0.41
42	44.33	3	45.475	-8.4525	0.006637	0.019911	0.1722906	0.46
45	46.62	3	46.63	-8.337	0.0071078	0.0213233	0.1936139	0.52
48	46.64	3	46.54	-8.346	0.0070699	0.0212098	0.2148237	0.57
51	46.44	3	47.755	-8.2245	0.0075984	0.0227952	0.2376189	0.63
54	49.07	3	50.09	-7.991	0.0087275	0.0261825	0.2638014	0.7

จากผลการทดลองดังตารางที่ 1 สามารถคำนวณระดับการวัลคาไนซ์ได้โดยใช้สมการดังนี้

$$\frac{\int c \left(\frac{T - \theta}{10} \right) dt}{\tau}$$

1. $t \text{ Interval} = t_1 - t_0, t_2 - t_1, t_3 - t_2, \dots$.ในการทดลองจะเท่ากับ 3 ตลอดเพราะได้ทำการเก็บข้อมูลทุกๆ 3 นาที

$$2. n = [T_{ave} - T_{ref}] / 10$$

โดยที่ T_{ave} คือ ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิของเนื้อเยื่อที่แปรไปตามเวลา

T_{ref} คือ อุณหภูมิที่จะทำการอบยาง ในที่นี้คือ 130°C

ตัวอย่างเช่น ในคอลัมน์ที่ 1 จากตารางที่ 6.1

$$T_{ave} = (29.58 + 29.93) / 2 = 29.755$$

$$T_{ref} = 130$$

ดังนั้น $n = (29.755 - 130) / 10 = -10.0245$

3. $C - \text{value} = C^n$ ซึ่งในการทดลองค่า C จะเท่ากับ 1.81 และค่า n ได้มาจากการคำนวณข้างต้น

ดังนั้น $C - \text{value} = 1.81^{-10.0245} = 0.0026116$

$$4. \Delta - \text{vulcanization} = (C - \text{value}) \times (t \text{ Interval})$$

ตัวอย่างเช่น $\Delta - \text{vulcanization} = 0.0026116 \times 3 = 0.0078347$

$$5. T - \text{vulcanization} = \int \Delta - \text{vulcanization} \quad (\Delta - \text{vulc}_1, \Delta - \text{vulc}_{1+2}, \Delta - \text{vulc}_{2+3}, \dots)$$

ตัวอย่างเช่น $\Delta - \text{vulc}_1 = 0.0078347$

$$\Delta - \text{vulc}_{1+2} = 0.0078347 + 0.0077768 = 0.0156115$$

$$6. \% \text{ Cure} = [T - \text{vulc.} / \tau (T=130^\circ\text{C})] \times 100$$

โดยที่ τ คือ เวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์เมื่ออุณหภูมิตั้งที่ 130°C คือ 20.4 นาที

ตัวอย่างเช่น $\% \text{ Cure} = (0.0078347 / 20.4) \times 100$

$$= 0.02 \%$$

การเผยแพร่ผลงาน

เผยแพร่ผลงานในรูปแบบของการนำเสนอแบบบรรยายในงานประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติครั้งที่ 30 ระหว่างวันที่ 19-21 ตุลาคม 2547 “เครื่องมือวัดระดับการวัดคาโนซ์ : หลักการ, การพัฒนา และการประยุกต์ใช้”

เผยแพร่ผลงานในรูปแบบการออกบูธในงานตลาดนัดนวัตกรรมระหว่างวันที่ 19-23 ตุลาคม 2547 “เครื่องมือวัดระดับการวัดคาโนซ์ของยางขนาดพกพา”

เผยแพร่ผลงานในรูปแบบของการนำเสนอแบบบรรยายในงานประชุมวิชาการสัปดาห์วิศวกรรมแห่งชาติครั้งที่ 2 ระหว่างวันที่ 28-31 ตุลาคม 2547 “การถ่ายเทความร้อนและการวัดคาโนซ์ในการผลิตยางรถฟอร์คลิฟ”

เครื่องมือวัดระดับการวัลคาไนซ์ : หลักการ, การพัฒนา และการประยุกต์ใช้

State of Cure Measuring Device : Principle, Development and Implementation

ณัฐพงศ์ นิธิอุทัย¹, กิตติพันธ์ เตชะกิตติโรจน์², ชลดา เลวิส³, จิตทิพัทร ศรีนวล¹

Nattapong Nithi-Uthai¹, Kittiphan Techakittiroj², Chonlada Lewis³, Thitipat Srinual¹

¹Department of Rubber Technology and Polymer, Faculty of Science and Technology, Prince of Songkla University Pattani Campus, Thailand,

²Computer Engineering Department, School of Engineering, Assumption University, Thailand,

³Polymer Science Department, Faculty of Science, Prince of Songkla University Had Yai Campus, Thailand,

E-mail address: Nattapong@cwru.edu

บทคัดย่อ: เครื่องวัดระดับการวัลคาไนซ์ได้ถูกพัฒนา และประยุกต์ใช้ในงานอัดเบ้ายางหนาโดยอาศัยหลักการของระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกัมมันต์โดยอาศัยความร้อน เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถวัดอุณหภูมิ และคำนวณระดับการวัลคาไนซ์ได้อย่างแม่นยำ ระดับการวัลคาไนซ์ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ยางควรที่จะต้องมีการวัดและตรวจสอบอยู่เป็นประจำ ทำให้เครื่องมือที่ถูกพัฒนาขึ้นจะเป็นประโยชน์อย่างมากในอุตสาหกรรมยางในการควบคุมคุณภาพ และการวิจัยและพัฒนา เช่น การหาค่า blow point ของผลิตภัณฑ์ การออกแบบให้มีขนาดเล็ก พกพาสะดวก และมีเทอร์โมคัปเปิลเป็นแบบโมดูล ทำให้สามารถที่จะนำไปใช้ได้สะดวก และยืดหยุ่นกับงานหลากหลายประเภท

Abstract: State of cure measuring device was developed using a programmable data logger as a platform. Principle of state of cure calculation is based on chemical kinetic of sulfur-rubber reaction. State of cure is one of the most important controlling points of rubber product and needed to be closely watched. The measuring unit was design to be portable and modular. It was found that the measurement and calculation were accurate comparing with calculation using Excel. The meter can be implemented easily on production line to quality control or using in research and development such as finding blow point.

Methodology: Vulcanisation is a chemical reaction of sulfur and rubber molecule. Like all others reaction, it is temperature dependent. In compression molding of thick rubber products (thicker than 5 centimeters), rubber, inherently thermal insulation, shows temperature profile which temperature vary from surface to middle of sample. As a result, level of vulcanisation (state of cure) varies greatly between surface and middle of sample. [1-5] A programmable data logger was programmed to calculate state of cure from temperature taking out from rubber sample based on eq. 1 and 2.[5]

$$I = C \frac{T(t) - T_r}{10} \quad (1) \quad E = \int_0^t I dt \quad (2)$$

where I is an intensity of cure, T(t) is a temperature at time t, T_r is a reference temperature, C is a temperature dependence of vulcanisation and E is a measure of total time cured. State of cure then can be calculated from (E/E_r)x100 which E_r is a

reference cure time. Measurement from Oscillating Disk Rheometer (ODR) is used for reference temperature and reference cure time. Temperature dependence of vulcanisation was taking from relationship between cure temperature and cure time using ODR.

Type K thermocouple were used in this experiments. The meters were calibrated using hot water. The meters were used to measure temperature of rubber sample from various points. Formulation of the rubber compound is shown in Table 1. Temperature histories were then used to calculate state of cure using Excel to compare with calculated value from meters. Lastly, finished meters were used to determine blow point of rubber sample. By varying time in compression molding, measuring state of cure to the point of releasing pressure sample will expose to different level of vulcanisation. Samples were then split to check for sign of porosity. Blow point was taking from the state of cure under which samples showed sign of porosity [1]

Table 1. Formulation of the rubber compound

Ingredient	Part per hundred rubber (phr)
RSS#3	100
Stearic acid	4
ZnO	6
Carbon black N-330	40
Silica	10
Silane 69	0.2
Paraphinic oil	5
Sulphur	1.4
6PPD	1
TMQ	1
CBS	1.7
DEG	0.60

Results, Discussion and Conclusion: It was found that relationship between optimum cure time and cure temperature is a linear relationship. Temperature dependence of vulcanisation of rubber compounds were between 1.8-1.9. Developed state of cure measuring device is a compact portable unit (Figure 1) which able to show clock, time of cure, temperature and state of cure at real time. Thermocouple port was designed for different kind of thermocouples to be plugged in as a module for usage flexibility in various products or applications. The unit has one serial port for connecting with computer to calibrate, set up and download data for further analysis.



Figure 1 State of Cure Measuring Device

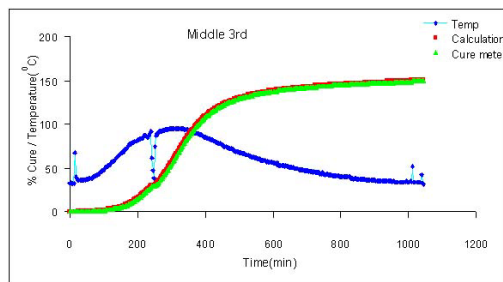


Figure 2 Typical result from experiments.

Typical result of experiments is shown in figure 2. Temperature was taken from middle of 20 centimeters thick rubber sample. Fast drop in temperature is the point at which samples was taken out of the mold. Thermocouple was then inserted back in to measure post-cure. It is shown that meter can calculate accurately the state of cure. From the experiment, it was found that majority of cure occurred after releasing from mold while rubber sample was cooled down by itself (post-cure).

More experiments were run for different state of cures at which samples to be taken out of the mold to find blow point. Blow point was found to be in between 30-50% cure for this rubber sample. Figure 3 shows sample with porosity and figure 4 shows sample without porosity. These were taken out of the mold at 30% and 50% cure respectively. More experiments can be done to find exact blow point however this is enough to illustrate an application of new developed device.



Figure 3 Sample with porosity

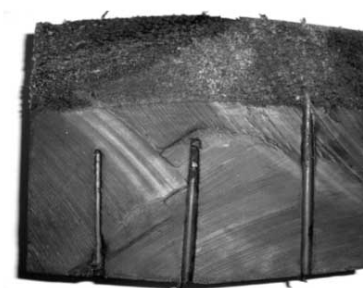


Figure 4 Sample without porosity

In conclusion, this portable state of cure measuring device can be used to obtain one of the most valuable data, state of cure, out of production line with ease. It can be used to monitor the process or quality control in manufacturing thick rubber product such as solid rubber tires. Modular design of the unit is greatly improve flexibility in different kind of manufacturing or applications.

Acknowledgement: Financial support by Thailand Research Fund (TRF) is gratefully acknowledged.

References:

- [1].Freeman, H. A., Rubber Age, **1962**, 68, 779.
- [2].Sheppard, J. R. and Wiegand, W. B., Ind. Eng. Chem., **1928**, 20, 953.
- [3].Claxton W. E., and Liska J. W., Rubber Age, **1964**, 95, 237.
- [4].Hill, D. A., Heat Transfer & Vulcanisation of Rubber, **1971**, Elsevier Publishing, Amsterdam.
- [5].Gregory, I. H., Muhr, A. H., and Imizan, A. B., J. Rubb. Research, **1999**, 2, 1.

Keyword: State of cure, Optimum cure, Vulcanisation of rubber, Blow point, Porosity, Compression molding.

แบบตอบรับการส่งผลงานเข้าร่วมแสดงในงาน

นิทรรศการ “ตลาดนัดนวัตกรรม”

ณ อิมแพ็ค เมืองทองธานี 19-23 ตุลาคม 2547

ชื่องานวิจัย/ชิ้นงาน (ไทย) : เครื่องวัดระดับการวัลคาไนซ์ของยางขนาดพกพา

ชื่องานวิจัย/ชิ้นงาน (อังกฤษ) : Portable Cure Meter for Rubber*

สถาบันเจ้าของงานวิจัย/ชิ้นงาน : มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี/มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ/

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่/สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

ชื่อนักวิจัย : ผศ. ดร.กิตติพันธ์ เตชะกิตติโรจน์¹, ดร.ณัฐพงศ์ นิธิอุทัย², ดร. ชลดา เลวิส³, จิตทิภัทร สีนวล²

¹ มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ, ² มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, ³ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

งบประมาณวิจัย : 200,000 บาท

ลักษณะเด่น/ความสำคัญ : การวัลคาไนซ์ยังเป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่จะขึ้นกับอุณหภูมิและเวลา ยางที่หนามีการถ่ายเทความร้อนช้าทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิภายในเนื้อยางนำมาซึ่งความแตกต่างของระดับการวัลคาไนซ์ ความแตกต่างนี้มีผลเป็นอย่างมากต่อคุณสมบัติของยางที่ได้จึงจำเป็นต้องมีการวัดหรือควบคุม ในปัจจุบันการวัดดังกล่าวทำได้โดยการวัดอุณหภูมิตามจุดต่าง ๆ แล้วนำข้อมูลมาวิเคราะห์ ซึ่งมีความยุ่งยากในการจดบันทึกข้อมูลเป็นจำนวนมาก การคำนวณวิเคราะห์ข้อมูลที่ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญ เป็นต้น นวัตกรรมชิ้นนี้เป็นการแก้ปัญหาดังกล่าวโดยเครื่องวัดระดับการวัลคาไนซ์แบบพกพาเป็นเครื่องบันทึกอุณหภูมิขนาดเล็กที่มีการคำนวณระดับการวัลคาไนซ์ของยางที่ซับซ้อนอยู่ในตัว สามารถพกพาไปใช้ในสายงานผลิตเพื่อวิเคราะห์กระบวนการผลิต โดยจะให้ข้อมูลด้านอุณหภูมิ และระดับการวัลคาไนซ์ในขณะปัจจุบันโดยพนักงานที่ไม่จำเป็นต้องมีพื้นฐานความรู้ที่สูงในขณะเดียวกันจะเก็บบันทึกข้อมูลไว้เพื่อนำไปวิเคราะห์อย่างต่อเนื่องผ่านการส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลได้โดยบุคลากรที่มีพื้นฐานทางคอมพิวเตอร์เบื้องต้นเท่านั้น จึงนับว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีประโยชน์เป็นอย่างยิ่งต่อแผนกควบคุมการผลิต, แผนกวิจัยและพัฒนาของอุตสาหกรรมยาง ในขณะเดียวกันเป็นเครื่องมือที่สามารถใช้อย่างสะดวกในการวิจัยพัฒนาเกี่ยวกับยางทั่วไปอีกด้วย

กลุ่มเป้าหมาย/ตลาดผู้ใช้ประโยชน์ : อุตสาหกรรมยางแห่งทั่วไป/สถาบันการศึกษาและสถาบันวิจัยที่มีการวิจัยเกี่ยวกับยาง

Website ของงานวิจัย/สถาบัน : www.nrfoam.org, <http://talent.in.th>

ขนาด/น้ำหนักของชิ้นงาน : 7x7x5 ซม.³ 250 กรัม

พื้นที่ที่ใช้แสดงชิ้นงาน : เล็กที่สุด

อุปกรณ์ประกอบบูรณนิทรรศการ : โต๊ะ 2 ตัว และ เก้าอี้ 3-4 ตัว เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับแสดงผล

ชื่อผู้ประสานงาน :

1. ผศ.ดร. กิตติพันธ์ เตชะกิตติโรจน์ มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ रामคำแหง 24 กทม. โทรศัพท์ 0-1406-1612
โทรสาร 0-2719-1500 eMail : ketch@talent.in.th
2. ดร. ณัฐพงศ์ นิธิอุทัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี โทรศัพท์ 0-1543-3177 โทรสาร 0-7334-8510 eMail : nattapong@cwru.edu

รูปภาพชิ้นงาน



รูปที่ 1 เครื่องวัดระดับการวัดคาโนซัยขนาดพกพา และหน้าจอการควบคุมเครื่องผ่านทางคอมพิวเตอร์

การถ่ายเทความร้อนและการวัลคาไนซ์ในการผลิตยางรถฟอร์คลิฟ

Heat Transfer and Vulcanisation in Fork Lift Tires Production

ดร. ณัฐพงศ์ นิธิอุทัย¹, ผศ. ดร. กิตติพันธ์ เตชะกิตติโรจน์², ดร. ชลดา เลวิส³, จุติภัทร ศรีนวล¹

Dr.Nattapong Nithi-Uthai¹, Assoc. Prof. Dr. Kittiphan Techakittiroj², Dr. Chonlada Lewis³ and Thitipat Srinual¹

¹ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปัตตานี, ²ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ, ³สาขาวิชา วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่

โทรศัพท์ 0-7331-2213 โทรสาร 0-7333-5130

E-mail address: nnattapo@bunga.psu.ac.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีความนิยมใช้ยางรถฟอร์คลิฟที่เป็นล้อตันมากขึ้น เนื่องจากความทนทานและการซ่อมบำรุงต่ำ ในการผลิตยางล้อตันขนาดใหญ่จะใช้กระบวนการอัดเบ้าในการขึ้นรูป ในขณะที่เบ้านั้นจะมีการส่งผ่านความร้อนให้แก่ยางเพื่อทำการวัลคาไนซ์ การถ่ายเทความร้อนภายในยางซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวนความร้อนจะเป็นไปอย่างช้า ๆ จากเบ้าเข้าสู่ยางภายใน ในขณะที่การวัลคาไนซ์ของยางเป็นปฏิกิริยาทางเคมีซึ่งเกี่ยวพันอย่างมากกับอุณหภูมิ เช่น อุณหภูมิต่างกัน 10 องศาเซลเซียส จะทำให้เวลาในการวัลคาไนซ์ต่างกันประมาณ 2 เท่า การวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงการถ่ายเทความร้อนภายในยาง ในสายการผลิตล้อตันสำหรับรถฟอร์คลิฟ และผลของการถ่ายเทความร้อนต่อระดับการวัลคาไนซ์ของยางล้อตัน เทอโมคัปเปิลจะถูกฝังตามตำแหน่งต่าง ๆ ของยางในขณะที่ขึ้นรูป หลังจากนั้นข้อมูลเกี่ยวกับอุณหภูมิ จะถูกนำไปคำนวณเพื่อเปรียบเทียบระดับการวัลคาไนซ์ของยางที่ตำแหน่งต่าง ๆ จากการวิจัยพบว่าเวลาที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนของยางจนมีอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ระหว่างตำแหน่งกึ่งกลางกับตำแหน่งหนึ่งในสาม นั้นแตกต่างกันถึง 57 นาที และในขณะที่นำยางออกจากเบ้า นั้น อุณหภูมิที่แตกต่างกัน ๕ สองตำแหน่งดังกล่าวมีค่าสูงถึง 15 องศาเซลเซียส ความแตกต่างดังกล่าวส่งผลให้ระดับการวัลคาไนซ์ของยางทั้งสองตำแหน่งต่างกันถึง 3 เท่า

Abstract

Now solid tire for forklift has reach high popularity from industrial users because of its durability and low maintenance. Compression molding is a main process in production of solid tire. Heated mold transfer heat through rubber for vulcanisation. Heat transfer in rubber which inherently an insulator will be slow from a mold into central part of rubber. Vulcanisation of rubber, a chemical reaction, is highly temperature dependent i.e. for every 10 Celsius, approximately twice the differences in vulcanisation time. Studies of heat transfer and vulcanisation of solid rubber tire for forklift were carried out from production line. Thermocouples were places at several positions in the solid tire while compressed in the mold.

Temperature data were calculated to give exact vulcanisation levels for each position to be compared. It was found that for the middle of the tire and one-third from the front of the tire, it took 57 minutes different in time to reach the same temperature of 120 Celsius. At the point of mold opening temperature differences between these two points were 15 Celsius. As a result, vulcanisation levels of these two points were 3 times different.

1. บทนำ

ในการวัลคาไนซ์ขึ้นยางที่มีความหนามากนั้นเป็นปัญหาที่มีมานานมากแล้ว อย่างเป็นตัวนำความร้อนที่เร็วทำให้อุณหภูมิภายในของขึ้นยางหนาแปรไปตามเวลาอย่างช้า ๆ ในขณะที่ระดับการวัลคาไนซ์ภายในยังไม่สูงนักบริเวณผิวของขึ้นงานอาจจะวัลคาไนซ์เกินไปแล้วก็เป็นได้ เวลาในการวัลคาไนซ์ที่ได้จากเครื่อง Oscillatory Disc Rheometer (ODR) ไม่สามารถนำมาใช้ในการออกแบบระบบการผลิตที่มีประสิทธิภาพได้ดีเท่าที่ควร การแก้ปัญหาสามารถทำได้หลาย ๆ ทางร่วมกันตั้งแต่การออกแบบสูตรยางที่เหมาะสมที่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการวัลคาไนซ์เกินไม่มาก, การออกแบบคอมปาวด์ที่มีอัตราการวัลคาไนซ์แตกต่างกันระหว่างภายในและภายนอก เป็นต้น นอกจากนี้แล้ว การศึกษาการถ่ายเทความร้อนในทางทฤษฎีก็มีความสำคัญ ที่จะช่วยคาดคะเนการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในของขึ้นยาง รวมไปถึงเป็นเครื่องมือในการออกแบบผลิตภัณฑ์ต่อไปในอนาคต

ในวิจัยส่วนนี้จะประยุกต์ใช้เครื่องมือที่ใช้ในการวัดระดับการวัลคาไนซ์ขนาดพกพาที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยคณะวิจัย (สินวล 2547) โดยตัวเครื่องมือจะประกอบด้วยส่วนใหญ่ ๆ สองส่วนคือ เซนเซอร์ และแผงควบคุม ส่วนที่เป็นเซนเซอร์นั้นจะถูกฝังไปยังตำแหน่งต่าง ๆ ของขึ้นตัวอย่างเพื่อที่จะวัดอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งนั้น ๆ เพื่อส่งข้อมูลไปยังส่วนแผงควบคุมเพื่อคำนวณระดับการวัลคาไนซ์ต่อไป Freeman (Freeman 1962) ได้ทำการศึกษาในลักษณะเดียวกันนี้เพื่อหาความสัมพันธ์ของ blow point ในยางคอมปาวด์ กับระดับการวัลคาไนซ์ แต่ระดับการวัลคาไนซ์ จะถูกคำนวณภายหลัง โดยใช้ข้อมูลที่เก็บจากเทอร์โมคัปเปิลที่ฝังไว้ในตำแหน่งต่าง ๆ

การคำนวณระดับการวัลคาไนซ์ นั้นได้มีการศึกษากันมานานแล้ว ในปี 1928 Sheppard และ Wiegand (Sheppard and Wiegand 1928) ได้เสนอวิธีการคำนวณโดยใช้หลักการที่ว่าปฏิกิริยาในการวัลคาไนซ์ เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าทุก ๆ ครั้งที่อุณหภูมิ เพิ่มขึ้น 15F งานในลักษณะเดียวกันได้ถูกนำเสนอโดย Claxton และ Liska โดยที่มีการวัดค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่ละเอียดมากขึ้นโดยใช้เครื่อง CEPAR (Claxton and Liska 1965) และมีการเน้นถึงความสำคัญของการเย็นตัวของขึ้นยางที่ยังมีการวัลคาไนซ์ อย่างต่อเนื่อง Conant et al (Conant, Svetnik et al. 1958) ได้ออกแบบ monograph ที่ใช้เครื่องมือที่ช่วยในการคำนวณเวลาในการวัลคาไนซ์สำหรับขึ้นยางรูปร่าง และขนาดต่าง ๆ กัน Hills ได้รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน และการวัลคาไนซ์ ของยางไว้ในหนังสือที่ตีพิมพ์เล่มหนึ่งในปี 1971 (Hill 1971) และเมื่อไม่นานมานี้ Gregory et al

(Gregory, Muhr et al. 1999) ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนในยางด้วยวิธีไฟโนลิเมนต์ ในขณะที่เดียวกันก็ได้มีการคำนวณระดับการ วัดคาโนซ์ ตามหลักการเดียวกันกับนักวิจัยท่านอื่น ๆ

การพัฒนาเครื่องวัดระดับการวัดคาโนซ์ แบบพกพาที่นอกจากจะสะดวก และเป็นประโยชน์ในการตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณการถ่ายเทความร้อนในทางทฤษฎีแล้ว ยังสามารถประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมได้โดยสะดวก รวดเร็ว โดยไม่ต้องการทักษะของผู้ใช้เครื่องมือที่สูงมากนัก ก็จะสามารถให้ข้อมูลที่สำคัญในการผลิตชิ้นงานได้ เช่น อุณหภูมิ และที่สำคัญคือระดับการวัดคาโนซ์ ของชิ้นงานในตำแหน่งต่าง ๆ

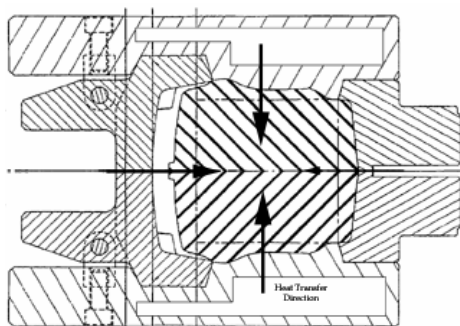
เครื่องมือวัดนี้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตล้อต้นสำหรับรถฟอร์คลิฟเพื่อศึกษาถึงการถ่ายเทความร้อน และผลของการถ่ายเทความร้อนต่อระดับการวัดคาโนซ์ของยางล้อต้น

2. เนื้อความ

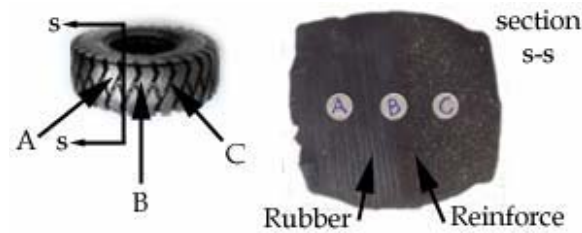
เครื่องวัดระดับการวัดคาโนซ์แบบพกพาได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตยางล้อต้นสำหรับรถฟอร์คลิฟ โดยรูปที่ 1 แสดงลักษณะเครื่องมือ และเซนเซอร์ ที่ใช้ในการวิจัย เนื่องจากการให้ความร้อนของเบ้าอัดยางล้อต้นอยู่ในแนวตั้งระหว่างฝาดบนและฝาดล่าง ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงวัดอุณหภูมิของชิ้นงาน ณ ตำแหน่งกึ่งกลางในแนวแกนของล้อยาง ในขณะที่เดียวกันถึงแม้ว่าทิศทางการถ่ายเทความร้อนหลักจะอยู่ในแนวตั้ง เบ้าเหล็กซึ่งหุ้มยางไว้นั้นจะสามารถนำความร้อน และก่อให้เกิดทางถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมีซึ่งเป็นทิศทางรอง (รูปที่ 2) คณะวิจัยจึงได้กำหนดตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิไว้ 3 ตำแหน่งที่ระยะตามแนวรัศมีแตกต่างกันในขณะที่ระยะในแนวตั้งเดียวกันตามรูปที่ 3



รูปที่ 1 เครื่องวัดระดับการวัดคาโนซ์แบบพกพา

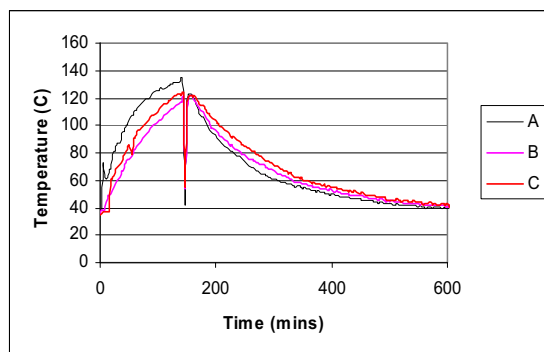


รูปที่ 2 ลักษณะของเบ้าอัดยางล้อต้น

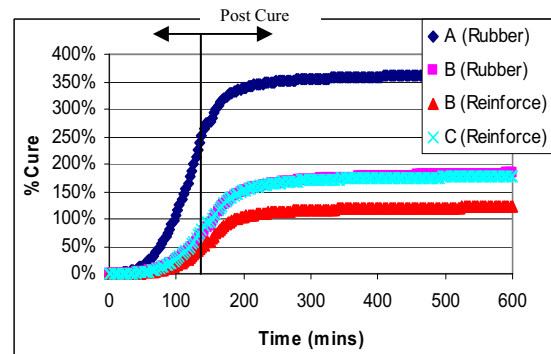


รูปที่ 3 ตำแหน่งที่ฝังหัวเซนเซอร์และส่วนประกอบของยางล้อต้น

รูปที่ 4 แสดงผลการจากการวัดอุณหภูมิ ณ สามตำแหน่งดังกล่าว อุณหภูมิของเบ้าเป็น 140°C และเวลาในการอัดเบ้าคือ 140 นาที ซึ่งหลังจากนำยางออกจากเบ้าแล้วจะมีการใส่เซนเซอร์กลับเข้าไปเพื่อบันทึกอุณหภูมิของยางที่เย็นตัวลง จากรูปพบว่า ในขณะที่ ณ บริเวณต่าง ๆ ทั้งสามตำแหน่งที่วัด อุณหภูมิไม่ขึ้นถึงค่าที่ตั้งไว้สำหรับเบ้าเลย ณ จุดที่นำยางออกจากเบ้า ซึ่งจะสังเกตจากอุณหภูมิที่ตกลง นอกจากนี้จะเห็นว่ายางใช้เวลาถึงกว่า 450 นาทีในการเย็นตัวลงสู่อุณหภูมิห้อง ซึ่งมากกว่าเวลาในการให้ความร้อนถึงกว่าสามเท่าตัว ตำแหน่ง A ร้อนเร็วที่สุดและเย็นตัวลงเร็วที่สุด ในขณะที่ตำแหน่ง B และ C นั้นใกล้เคียงกัน โดยตำแหน่ง B ร้อนช้าที่สุดและอุณหภูมิขึ้นถึงเพียง 120°C เท่านั้นเมื่อนำยางออกจากเบ้า ในขณะที่ตำแหน่ง A และ C นั้นร้อนถึงอุณหภูมิ 120°C ก่อนหน้านั้นเป็นเวลา 57 นาที และ 15 นาทีตามลำดับ และในขณะที่ถอดออกจากเบ้าอุณหภูมิขึ้นสูงถึง 135°C และ 125°C ตามลำดับ



รูปที่ 4 อุณหภูมิของยาง ณ ตำแหน่ง A, B และ C



รูปที่ 5 ระดับการวัลคาไนซ์ของยาง ณ ตำแหน่ง A, B และ C

เครื่องมือวัดระดับการวัลคาไนซ์จะได้ข้อมูลด้านอุณหภูมิและนำไปประมวลผลตามรายละเอียดในภาคผนวกเพื่อจะได้มาซึ่งระดับการวัลคาไนซ์ที่มีค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ รายงานระดับการวัลคาไนซ์ของยาง ณ จุดต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 5 เนื่องจากการผลิตยางล้อต้นรุ่นดังกล่าวจะประกอบด้วยยางสองส่วนคือส่วนหน้าดอกยางและส่วนยางรับแรงดันในซึ่งรอยต่อระหว่างยางทั้งสองชนิดจะอยู่บริเวณตำแหน่ง B แสดงในรูปที่ 3 ยางทั้งสองประเภทมีคุณสมบัติด้านการวัลคาไนซ์ที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 1

ค่าคงที่	ส่วนหน้าดอกยาง (Rubber)	ส่วนยางด้านใน (Reinforce)
T_r	160°C	160°C
tcure	4.5 mins	4.85 mins
C	1.80	1.91

ตารางที่ 1 ค่าคงที่ที่ใช้ในการคำนวณ

ระดับการวัลคาไนซ์ ณ ตำแหน่ง B สำหรับยางส่วนหน้าดอกยาง (B Rubber) นั้นเป็นการคำนวณภายหลัง โดยอาศัยข้อมูลจากรูปที่ 4 และตารางที่ 1 นอกจากนั้นเป็นการคำนวณภายในเครื่องวัด จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ยาง ณ ตำแหน่ง A นั้นได้รับการวัลคาไนซ์เต็มที่คือ สูงกว่า 250 เปอร์เซนต์ ขณะที่นำออกจากเบ้าในขณะที่ ณ ตำแหน่ง B Rubber และ C Reinforce นั้นประมาณ 80% และ B Reinforce นั้น 48% เท่านั้น ซึ่งแตกต่างกันถึง ห้าเท่า และในขณะที่ยางเย็นตัวลงอย่างช้า ๆ นั้น ระดับการวัลคาไนซ์ยังคงเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ (Post Cure) จนมี ค่าประมาณ 360%, 175% และ 120% สำหรับตำแหน่ง A, B Rubber/C Reinforce และ B Reinforce ตามลำดับ จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าระดับการวัลคาไนซ์ขึ้นอยู่กับการถ่ายเทความร้อน และคุณสมบัติทางด้านการวัลคาไนซ์ ของยาง และผลของความแตกต่างดังกล่าวทำให้ระดับการวัลคาไนซ์สุดท้ายของยางล้อต้นที่ได้แตกต่างกันถึง 3 เท่าระหว่างตำแหน่งกึ่งกลางกับตำแหน่งหนึ่งในสามจากหน้ายาง

3. บทสรุป

จากการวิจัยพบว่าเวลาที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนของยางจนมีอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ระหว่าง ตำแหน่งกึ่งกลางกับตำแหน่งหนึ่งในสามจากหน้ายางนั้นแตกต่างกันถึง 57 นาที และในขณะที่นำยางออกจากเบ้า นั้น อุณหภูมิที่ต่างกัน ณ สองตำแหน่งดังกล่าวมีค่าสูงถึง 15 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ระดับการวัลคาไนซ์ แตกต่างกันกว่าห้าเท่าตัว ความร้อนสะสมภายในยางในขณะที่เย็นตัวลงของยางทำให้มีการวัลคาไนซ์อย่างต่อเนื่องภายหลังจากการถอดออกจากเบ้า (Post Cure) ซึ่งส่งผลให้ระดับการวัลคาไนซ์ของยางนั้นมีค่าสูงกว่า 100% ทุกตำแหน่ง และความแตกต่างดังกล่าวส่งผลให้ระดับการวัลคาไนซ์ของยางทั้งสองตำแหน่งต่างกันถึง 3 เท่า

4. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) (Grant number: RDG4650057) สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัย

5. เอกสารอ้างอิง

1. จิตภัทร สีนวล (2547). การวัดระดับการวัลคาไนซ์ของยางหนา. ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ปัตตานี, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. ปรินญาตรี.
2. Claxton, W. E. and J. W. Liska (1965). "Calculation of State of Cure in Rubber Under Variable Time-Temperature Conditions." Rubber Age 95(May): 237.
3. Conant, F. S., J. F. Svetnik, et al. (1958). "Equivalent Cures in Specimens Of Various Shapes." Rubber World 137(March): 856.
4. Freeman, H. A. (1962). "Determining the Blow Point in Tire Compounds." Rubber Age(February): 779.
5. Gregory, I. H., A. H. Muhr, et al. (1999). "Prediction of State of Cure throughout Rubber Components." Journal of Rubber Research 2(1): 1.
6. Hill, D. A. (1971). Heat Transfer & Vulcanisation of Rubber. Amsterdam, Elsevier.
7. Sheppard, J. R. and W. B. Wiegand (1928). "Evaluation of Variable-Temperature Cures." Industrial and Engineering Chemistry 20(September): 953.

6. ภาคผนวก

การคำนวณระดับการวัลคาไนซ์ของยาง

สำหรับคำนวณระดับการวัลคาไนซ์ เป็นการคำนวณจากข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่วัดโดยตรงจากตัวเซนเซอร์ กับเวลาที่อ่านจากแผงควบคุม โดยความเข้มของการวัลคาไนซ์ (I) คือ

$$I = C \frac{T(t) - T_r}{10} \quad (1)$$

T(t) คือค่าอุณหภูมิของยางที่อ่านจากเซนเซอร์ ณ เวลา t T_r คือค่าอุณหภูมิอ้างอิงที่ใช้ในการหาค่าเวลาการวัลคาไนซ์จากเครื่อง Oscillatory Disc Rheometer (ODR) และ C คือค่าจำนวนเท่าของปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10 องศาเซลเซียส จะสังเกตเห็นว่าความเข้มของการ วัลคาไนซ์ (I) จะเท่ากับ 1 เมื่ออุณหภูมิของยางเท่ากับอุณหภูมิอ้างอิงจาก ODR

ดังนั้นผลจากการวัลคาไนซ์ (E) นั่นคือพื้นที่ใต้กราฟระหว่าง I และ เวลา (t) หรือ

$$E = \int_0^t I dt \quad (2)$$

ระดับการวัลคาไนซ์ (% cure) สามารถหาได้จากการเทียบกับค่ามาตรฐานจาก ODR (E_r = tcure) ในขณะที่ tcure คือเวลาในการวัลคาไนซ์ ที่ได้จาก ODR ที่อุณหภูมิอ้างอิง T_r หรือ % cure = (E/E_r)×100