

เอกสารผลงานที่เสนอให้ประเมินเพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่ง  
นักวิทยาศาสตร์ 6ว

เรื่องที่ 1

การศึกษาสารตัวเร่ง DPG และ MBTS ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและ  
สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติ

โดย

นายกาญจน์ สกุลแก้ว

นักวิทยาศาสตร์ 5

กลุ่มงานเทคโนโลยีผลิตภัณฑ์ 1

กองฟิสิกส์และวิศวกรรม

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม

เอกสารผลงานที่เสนอให้ประเมินเพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่ง  
นักวิทยาศาสตร์ 6ว

เรื่องที่ 1

การศึกษาสารตัวเร่ง DPG และ MBTS ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและ  
สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติ

เลขหมู่	๑๗ กพ
	๒๖ 65
เลขทะเบียน	11259
วันที่	9, ๑๓, 46/

โดย

นายกาญจน์ สุกุลแก้ว  
นักวิทยาศาสตร์ 5

ด้วยฉันทินทนาการ
จาก
กาญจน์ สุกุลแก้ว

กลุ่มงานเทคโนโลยีผลิตภัณฑ์ 1  
กองฟิสิกส์และวิศวกรรม  
กรมวิทยาศาสตร์บริการ  
กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม

## บทคัดย่อ

การศึกษาอัตราส่วน และปริมาณของสารตัวเร่งที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติโดยใช้สารตัวเร่ง  $N,N'$  - Diphenylguanidine (DPG) และ 2,2' - Dibenzothiazyl disulfide (MBTS) เป็นตัวแปรในสูตรของยางที่อัตราส่วนของ MBTS ต่อ DPG 0.5:0.5, 1.0:0.5, 1.5:0.5, 2.0:0.5, 2.5:0.5, 3.0:0.5, 0.5:1.0, 0.5:1.5, 0.5:2.0, 0.5:2.5 และ 0.5:3.0 ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนักตามลำดับ แล้วทำการบดผสมกับยางและสารเคมียางซึ่งกำหนดให้มีปริมาณคงที่ จากนั้นนำยางคอมปาวด์ส่วนหนึ่งไปทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง Oscillating Disk Rheometer (ODR) ที่อุณหภูมิ 150 °C สำหรับยางคอมปาวด์ส่วนที่เหลือนำไปขึ้นรูปด้วยเทคนิคการอัดแบบชนิดแรงอัด เพื่อเตรียมเป็นชิ้นทดสอบสำหรับทดสอบสมบัติเชิงกลของยางต่อไป

จากการทดลองเมื่อใช้ปริมาณของสารตัวเร่ง MBTS เพิ่มขึ้น ที่อัตราส่วนของ MBTS:DPG 2.5:0.5 ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก พบว่าให้ค่าความแข็ง ความต้านแรงดึง โมดูลัสที่ความยืดร้อยละ 300 และความต้านแรงฉีกขาดสูงที่สุด ส่วนสมบัติการวัลคาไนซ์ ที่อัตราส่วนของ MBTS:DPG 2.5:0.5 ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก ให้ระยะเวลาคงรูปสั้นที่สุดและอัตราการคงรูปสูงที่สุดเช่นกัน ในทางกลับกันเมื่อใช้ปริมาณของ DPG เพิ่มขึ้น ที่อัตราส่วนของ DPG:MBTS 2.0:0.5 ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก ให้ค่าความแข็ง ความต้านแรงดึง โมดูลัสที่ความยืดร้อยละ 300 และความต้านแรงฉีกขาดสูงที่สุดของกลุ่มที่มีการเพิ่มปริมาณของ DPG ส่วนค่าความยืดขณะขาดต่ำที่สุด สำหรับสมบัติการวัลคาไนซ์ ที่อัตราส่วนของ DPG:MBTS 3.0:0.5 ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก ให้ระยะเวลาเริ่มคงรูปสั้นที่สุดและระยะเวลาคงรูปนานที่สุด สำหรับค่าการยุบอยู่ตัวพบว่าที่อัตราส่วนของ MBTS:DPG 1.0:0.5 ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนักให้ค่าการยุบอยู่ตัวต่ำที่สุด

## สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อ		i
สารบัญ		ii
สารบัญตาราง		iii
สารบัญภาพ		iv
บทที่ 1	บทนำ	1
	1.1 ปัญหาและที่มาของการศึกษาทดลอง	1
	1.2 วัตถุประสงค์	1
	1.3 ขอบเขตของการศึกษา	1
	1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	1
	1.5 ระยะเวลาดำเนินการ	2
บทที่ 2	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
	2.1 ระบบการวัดคาบไชนซ์ของยาง	5
	2.2 สารตัวเร่ง	10
บทที่ 3	วัสดุ อุปกรณ์เครื่องมือ และวิธีดำเนินการ	14
	3.1 วัสดุและสารเคมี	14
	3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	15
	3.3 วิธีดำเนินการ	16
บทที่ 4	ผลการทดลอง	18
บทที่ 5	วิจารณ์ผลและสรุปผลการศึกษาทดลอง	23
	กิตติกรรมประกาศ	26
	บรรณานุกรม	27
ภาคผนวก ก	Rheometer curve ของยางคอมปาวด์สูตรที่ 1 ถึงสูตรที่ 11	28
ภาคผนวก ข	ชื่อย่อของยาง	39
ภาคผนวก ค	ชื่อย่อของสารตัวเร่ง	40

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สารเคมีชนิดต่างๆที่ใช้ผสมกับยางเพื่อทำผลิตภัณฑ์ยาง	3
2	สารประกอบที่สลายตัวให้กำมะถัน	7
3	ตารางแสดงผลการทดลองของสารตัวเร่ง MBTS และ DPG ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติ	18

## สารบัญภาพ

ภาพที่	คำบรรยายได้รูปภาพ	หน้า
1	การเชื่อมต่อกันของโมเลกุลของยางกับกำมะถันด้วยพันธะทางเคมีแบบต่างๆ	6
2	ผลของการเสริมประสิทธิภาพร่วมกันของสารตัวเร่งในกลุ่ม guanidines และ thiazoles ที่มีผลต่อค่าโมดูลัสของยาง	11
1-1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเร่ง(MBTS/DPG) กับค่าความแข็ง	19
1-2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเร่ง(MBTS/DPG)กับค่าความต้านแรงดึง	19
1-3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเร่ง(MBTS/DPG)กับค่าความยืดเมื่อขาด	20
1-4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเร่ง(MBTS/DPG) กับค่าโมดูลัสที่ความยืดร้อยละ 300	20
1-5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเร่ง(MBTS/DPG) กับค่าการยุบอยู่ตัว	21
1-6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเร่ง(MBTS/DPG) กับค่าความต้านทานแรงฉีกขาด	21
1-7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเร่ง(MBTS/DPG) กับระยะเวลาเริ่มคงรูป (scorch time) ระยะเวลาคงรูป (cure time) และ cure rate index	22
ก -1	Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 1 : ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 2.79 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 6.42 นาที	28
ก -2	Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 2 : ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 2.79 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 5.02 นาที	29
ก -3	Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 3 : ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 2.63 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 4.29 นาที	30
ก -4	Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 4 : ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 2.52 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 4.06 นาที	31
ก -5	Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 5 : ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 2.54 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 3.96 นาที	32
ก -6	Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 6 : ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 2.98 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 4.48 นาที	33
ก -7	Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 7 : ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 2.04 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 5.17 นาที	34
ก -8	Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 8 : ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 1.52 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 4.58 นาที	35
ก -9	Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 9 : ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 1.23 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 4.60 นาที	36

ภาพที่	คำบรรยายใต้รูปภาพ	หน้า
ก -10	Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 10 : ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 1.04 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 4.21 นาที	37
ก -11	Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 11 : ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 0.88 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 5.50 นาที	38

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ปัญหาและที่มาของการศึกษาทดลอง

ความต้องการใช้ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติในปัจจุบันมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากยางธรรมชาติมีคุณสมบัติพิเศษที่ยางสังเคราะห์ไม่มีคือ มีความยืดหยุ่นสูง ดูดซับและกระจายแรงที่มากระทำได้ดี ดังจะเห็นได้จากการนำยางธรรมชาติไปประยุกต์ใช้ในงานประเภทต่างๆ เช่น ใช้เป็นยางรองคอสะพานเพื่อรองรับน้ำหนักโครงสร้างส่วนบนและน้ำหนักบรรทุกของยานพาหนะที่แล่นผ่านบนสะพานไม่ให้ไปสร้างความเสียหายกับโครงสร้างส่วนล่างของสะพาน นอกจากนี้ยังช่วยลดการสั่นไหวเนื่องจากแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวได้อีกด้วย ตัวอย่างข้างต้นเป็นตัวอย่างหนึ่งในหลาย ๆ ตัวอย่างที่แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของยางธรรมชาติ ดังนั้นในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติให้มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานประเภทต่างๆนั้น การเลือกใช้ชนิดและอัตราส่วนผสมของสารเคมีที่เหมาะสมจึงเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อคุณสมบัติโดยรวมของผลิตภัณฑ์ยางที่ได้

ในการศึกษาครั้งนี้ต้องการแสดงให้เห็นว่าสารตัวเร่งที่นิยมใช้ในสูตรของยางธรรมชาติ ได้แก่ MBTS และ DPG นอกจากจะช่วยให้ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ของยางให้เร็วขึ้นแล้ว ยังส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติได้อีกด้วย

#### 1.2 วัตถุประสงค์

1.1.1 เพื่อเปรียบเทียบผลของสมบัติเชิงกลของยาง ได้แก่ ค่าความแข็ง ความต้านแรงดึง ความยืดเมื่อขาด โมดูลัสที่ความยืดร้อยละ 300 ความต้านทานแรงฉีกขาด และ ค่าการยุบอยู่ตัว ซึ่งได้จากการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนผสมระหว่างสารตัวเร่ง 2,2-Dibenzothiazyl disulfide (MBTS) และ N,N - Diphenylguanidine (DPG) โดยใช้กำมะถันเป็นสารวัลคาไนซ์

1.1.2 เพื่อศึกษาสมบัติวัลคาไนซ์ของยาง ซึ่งได้จากการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนผสมระหว่างสารตัวเร่งทั้งสองชนิดด้วยเครื่อง Oscillating Disk Rheometer (ODR)

#### 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.2.1 ศึกษา ทดลองบดผสมสารตัวเร่งทั้งสองชนิดในอัตราส่วนผสมต่างๆ กันกับยางและสารเคมียางรวมทั้งหมด 11 สูตร

1.2.2 ศึกษา ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางที่ได้จากการทดลองรวม ทั้งหมด 11 สูตร

1.2.3 วิเคราะห์และสรุปผลของการศึกษาทดลอง

#### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.4.1 นำผลจากการศึกษา ทดลองไปเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนผสมระหว่างสารตัวเร่งในการออกสูตรยางให้มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการนำไปใช้งานในด้านต่างๆ

1.4.2 เป็นแนวทางในการพัฒนาสูตรยางในเชิงพาณิชย์ต่อไป

1.4.3 ให้คำแนะนำแก่โรงงานผู้ผลิตสินค้ายางในการปรับเปลี่ยนสูตร เพื่อทำผลิตภัณฑ์ยางให้มีคุณภาพตรงตามความต้องการของลูกค้า



## 1.5 ระยะเวลาดำเนินการ

1 ตุลาคม 2544 ถึง 1 มีนาคม 2545 รวมระยะเวลา 6 เดือน

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ยางเป็นวัสดุที่มีความสำคัญและนิยมใช้กันแพร่หลาย เนื่องจากมีสมบัติเฉพาะตัวที่วัสดุอื่นไม่มี คือมีความยืดหยุ่นสูง รับ รักษาและกระจายแรงที่มากระทำได้ดี ทนต่อการฉีกขาดและพังอ เป็นฉนวน ไฟฟ้าและฉนวนความร้อน ดังจะเห็นได้จากการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ เช่น ยางรองฐานของ อาคาร ยางรองคอสสะพาน ยางล้อรถยนต์ ยางล้อเครื่องบิน สายพานส่งกำลัง สายพานลำเลียง ปะเก็น ยาง แหวนยาง ยางปูพื้น ถูมือยาง ฉนวนภายในกระบอกสำหรับเก็บเชื้อเพลิงของจรวด เป็นต้น

ยางที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน มีทั้งยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงกล ดีกว่ายางสังเคราะห์แต่มีข้อจำกัดคือ ไม่ทนน้ำมัน สารเคมี โอโซน ความร้อนและ แสงแดด จึงเป็นเหตุ ให้มีการนำยางสังเคราะห์มาใช้แทนยางธรรมชาติมากขึ้น ยางที่กล่าวมาแล้วข้างต้นยังไม่สามารถนำไปใช้งานได้ทันที เนื่องจากจะต้องนำมาผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน (vulcanization) หรือการทำให้ ยางคงรูปก่อน ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้ยางซึ่งผสมกับสารเคมีหรือที่เรียกว่ายางคอมพาวด์ (ดูตาราง ที่ 1 : สารเคมีชนิดต่างๆ ที่ใช้ผสมกับยางเพื่อทำผลิตภัณฑ์ยาง) เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี โดยสายโซ่โมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมโยง (crosslinking) ระหว่างกันขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความ เหนียว และยืดหยุ่น ไม่บวมพองในตัวทำละลายอินทรีย์ มีความคงทนไม่เปลี่ยนแปลงตามสภาวะของ อุณหภูมิ (ไม่เหนียวเยิ้มเมื่ออุณหภูมิสูงและไม่แข็งกระด้างเมื่ออุณหภูมิต่ำ) ทนต่อการเสื่อมสภาพ เนื่องจากอายุการใช้งาน เป็นต้น

---

ยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์จะมีความยืดหยุ่นมากขึ้นและมีความเป็นพลาสติกลดลง ความแตกต่างระหว่างการมี สมบัติความยืดหยุ่นกับการมีสมบัติความเป็นพลาสติกคือ สมบัติความยืดหยุ่นแสดงถึงความสามารถของยางในการ กลับคืนสู่รูปร่างเดิมหลังจากปล่อยแรงที่กระทำใหยางมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ส่วนสมบัติความเป็นพลาสติกเป็น สมบัติที่แสดงถึงความสามารถของยางในการรักษารูปร่างที่ได้เปลี่ยนแปลงไปตามแรงกระทำ

ตารางที่ 1 : สารเคมีชนิดต่างๆ ที่ใช้ผสมกับยางเพื่อทำผลิตภัณฑ์ยาง

สารเคมี	หน้าที่	ตัวอย่าง
สารวัลคาไนซ์ยาง (Vulcanizing Agents)	- ช่วยให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง	กำมะถัน (Sulfur) สารที่สลายตัวให้กำมะถัน (Sulfur Donors) -Dithiodimorpholine(DTDM) -Tetramethyl thiuram disulfide (TMTD) เปอร์ออกไซด์(Peroxide) - Dibenzoyl peroxide - Dicumyl peroxide ออกไซด์ของโลหะ (Metal oxide) - MgO, ZnO, PbO ไดออกซิม (Dioxime) - <i>p</i> -Benzoquinone dioxime เอมีน (Amine) - Hexamethylene diaminocarbamate
สารตัวเร่ง (Accelerators)	- ช่วยให้ยางวัลคาไนซ์ได้เร็วขึ้น	- Dibenzothiazyl disulfide(MBTS) - Diphenylguanidine(DPG)
สารกระตุ้นตัวเร่ง (Activators)	- ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของตัวเร่ง	- Stearic acid - Zinc oxide (ZnO) - Magnesium oxide (MgO) - Lead oxide (PbO)
สารตัวเติม (Fillers)	- เสริมความเหนียวและแข็งแรง - เพิ่มเนื้อผลิตภัณฑ์ - ลดต้นทุนการผลิต	- Carbon black - Silica - Calcium carbonate( $\text{CaCO}_3$ ) - White clay
สารช่วยการแปรรูป (Processing aids)	- ช่วยให้ยางแปรรูปได้ง่ายขึ้น มีความหนืดลดลง	- Paraffinic/Aromatic oils - Fatty acids - Factice
สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradants)	- ป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยา oxidation	สาร Antioxidants - Phenyl-naphthylamines - Substituted phenols
	- ป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซน	สาร Antiozonants - <i>p</i> -Phenylenediamines - Waxes

สารเคมี	หน้าที่	ตัวอย่าง
อื่นๆ	สารให้สี (Pigments)	- Titanium dioxide - Chromium oxide
	สารช่วยลดการติดไฟ (Flame retardants)	- Antimony trioxide - Zinc borate
	สารทำให้ยางฟู (Blowing agents)	- Sodium bicarbonate - Azodicarbonamide
	สารหน่วง (Retardants) - ช่วยชะลอเวลาการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันของยาง	- Benzoic acid - Phthalic acid

การวัลคาไนซ์ยางขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลัก 2 ประการคือ

2.1 ระบบการวัลคาไนซ์ของยาง (vulcanizing or curing systems)

2.2 สารตัวเร่ง (accelerator)

ระบบการวัลคาไนซ์ยางมีหลายวิธีด้วยกันดังนี้

1) การวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน(sulfur)

เป็นวิธีที่ใช้กันมาแต่ดั้งเดิมตั้งแต่ Goodyear ค้นพบในปี ค.ศ.1840 และยังคงเป็นวิธีที่ใช้มากที่สุดในปัจจุบันเพราะใช้ต้นทุนต่ำและทำให้ยางมีคุณสมบัติที่ดีได้ตามต้องการ ซึ่งใช้ได้กับยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ที่มีโครงสร้างทางเคมีแบบไม่อิ่มตัว (unsaturation) กำมะถันสำหรับใช้ในการวัลคาไนซ์ยาง (rubber grade sulfur) มีความบริสุทธิ์อย่างน้อยร้อยละ 99.5 และปราศจากการด เนื่องจากความเป็นกรดจะหน่วงให้อัตราการวัลคาไนซ์ของยางช้าลง

กำมะถันสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ตามความสามารถในการละลายเข้ากับยางได้ดังนี้

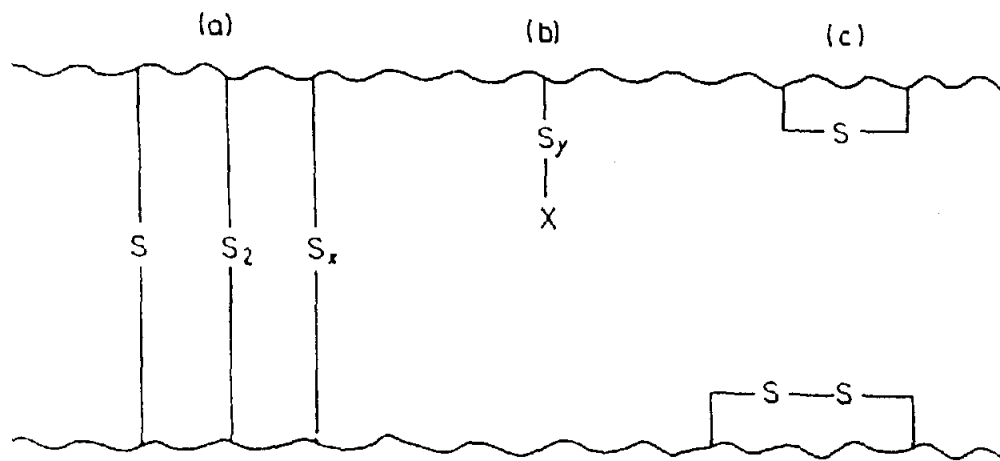
1.กำมะถันที่ละลายได้ (soluble sulfur)

กำมะถันชนิดนี้มีโครงสร้างเป็นผลึก และมีการจัดเรียงตัวของผลึกเป็นแบบรอมบิก (rhombohedral crystal form) ซึ่งมีอะตอมทั้ง 8 จัดเรียงตัวเป็นวงแหวน มีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 112 – 120 °C สามารถละลายและกระจายเข้ากับยางได้ดีเมื่ออุณหภูมิในการบดผสมเข้ากับยางสูงขึ้น แต่เมื่อยางเย็นตัวที่อุณหภูมิต่ำ ปริมาณของกำมะถันส่วนเกินที่ละลายเข้ากับยางที่อุณหภูมิสูง จะเกิดการตกผลึกและฝังตัวอยู่ในเนื้อยาง บางส่วนจะซึมผ่านชั้นมาบนผิวหน้าของยาง ทำให้ผิวหน้ายางมีคราบสีขาวกระจายอยู่ทั่วไป (sulfur blooming) ซึ่งจะทำให้ความสามารถในการยึดติดกัน (tack) ของผิวหน้ายางลดลงเมื่อนำผิวหน้ายางคอมปาวด์มาประกบหรือสัมผัสกัน

2.กำมะถันที่ไม่ละลาย(insoluble sulfur) หรือ polymeric sulfur เป็นกำมะถันที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน กล่าวคือโครงสร้างไม่มีความเป็นผลึก และมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ระหว่าง 100,000 ถึง 300,000 มีขีดจำกัดในการละลายเข้ากับยาง แต่กระจายตัวในยางได้ และมักจับตัวเป็นก้อนได้ง่ายเนื่องจากเกิดประจุไฟฟ้าสถิตย์ กำมะถันชนิดนี้ไม่ซึมผ่านชั้นมาบนผิวหน้าของยาง อุณหภูมิขณะวัลคาไนซ์จะทำให้

กำมะถันชนิดนี้ซึ่งกระจายตัวอยู่ในเนื้อของยางเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปเป็นกำมะถันที่ละลายได้และเข้าสู่กระบวนการวัลคาไนซ์ต่อไป กำมะถันที่ไม่ละลายนิยมใช้ในกรณีที่ต้องการให้ยางคอมปาวด์มีความเหนียวติดกันได้ดี เช่น ในการผลิตล้อยางและผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่ต้องประกบชั้นยางให้ซ้อนติดกัน อุณหภูมิในการบดผสมยางกับกำมะถันชนิดนี้ไม่ควรเกิน 120 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิสูงเกินระดับนี้จะทำให้กำมะถันเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างกลับไปเป็นกำมะถันที่ละลายได้ ซึ่งทำให้คุณสมบัติที่ต้องการของกำมะถันที่ไม่ละลายสูญเสียไป

การวัลคาไนซ์ยางด้วยกำมะถันเพียงอย่างเดียวจะทำให้อัตราเร็วของการวัลคาไนซ์ช้ามากและยางที่ได้มีสมบัติไม่ดีเท่าที่ควร ซึ่งในปัจจุบันการวัลคาไนซ์ด้วยวิธีนี้ต้องใช้สารตัวเร่งและสารกระตุ้นตัวเร่ง เช่น กรดสเตียริก(stearic acid) และซิงค์ออกไซด์(zinc oxide) ช่วยเร่งปฏิกิริยาด้วย สมบัติของผลิตภัณฑ์ยางที่ได้จากการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน ขึ้นอยู่กับจำนวนและชนิดของพันธะทางเคมีซึ่งทำให้โมเลกุลของยางมาเชื่อมต่อกัน(ภาพที่ 1) โดยชนิดของสารตัวเร่งและอัตราส่วนผสมระหว่างสารตัวเร่งกับกำมะถันจะเป็นตัวกำหนดชนิดของพันธะทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างการวัลคาไนซ์



Types of sulfur crosslink: (a) monosulfidic, disulfidic, and polysulfidic; (b) pendant sulfur; (c) intramolecular linkages. Types (b) and (c) are wasteful of sulfur.

ภาพที่ 1 การเชื่อมต่อกันของโมเลกุลของยางกับกำมะถันด้วยพันธะทางเคมีแบบต่างๆ

การวัลคาไนซ์ยางด้วยกำมะถันสามารถแบ่งออกเป็นระบบต่างๆ ตามสัดส่วนของตัวเร่งและกำมะถันได้ 3 ระบบดังนี้

#### 1.1) ระบบที่นิยมใช้ทั่วไปหรือระบบธรรมดา (Conventional Vulcanizing System, CV)

เป็นระบบซึ่งใช้ปริมาณกำมะถัน 2.0-3.5 ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก (phr) และสารตัวเร่ง 1.0 - 0.5 ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก พันธะทางเคมีที่เกิดขึ้นเป็นแบบ polysulfidic crosslinks ซึ่งจะต้องใช้กำมะถันในการเชื่อมโยงตั้งแต่ 1 จนถึง 20 อะตอม ยางที่ได้มีสมบัติทางกายภาพโดยทั่วไปดี เช่น คุณสมบัติการต้านแรงดึง การฉีกขาดและการล้าตัวแต่พันธะเคมีแบบนี้ไม่คงทนต่อการเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิสูง เพราะจะทำให้ยางสูญเสียสมบัติความเหนียวและแข็งแรงไป เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างพันธะเคมีในยางเกิดขึ้น

#### 1.2) ระบบประสิทธิภาพ (Efficient Vulcanizing System, EV)

เป็นระบบซึ่งใช้ปริมาณกำมะถันน้อยคือประมาณ 0.2 - 0.7 ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก ร่วมกับสารตัวเร่งซึ่งสลายตัวให้กำมะถัน 5.0 - 2.5 ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก พันธะการเชื่อมโยงทางเคมีที่ได้ส่วนใหญ่เป็นพันธะแบบ monosulfidic crosslinks ซึ่งใช้กำมะถัน 1-2 อะตอมในการเชื่อมโยง ทำให้ยางที่ได้มีเสถียรภาพและทนทานต่อการเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิสูงได้ดี แต่สมบัติการต้านแรงดึง การฉีกขาด การล้าตัวและการสึกหรอค่อนข้างด้อยกว่าการวัลคาไนซ์ด้วยระบบธรรมดา

#### 1.3) ระบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi - Efficient Vulcanizing System, Semi - EV)

เป็นระบบซึ่งใช้ปริมาณกำมะถันอยู่ระหว่างปริมาณกำมะถันที่ใช้ในสองระบบข้างต้นคือ ประมาณ 1-2 ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก ร่วมกับสารตัวเร่งประมาณ 2.5-2.0 ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก พันธะการเชื่อมโยงทางเคมีที่ได้ส่วนใหญ่เป็นพันธะแบบ polysulfidic crosslinks

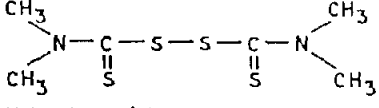
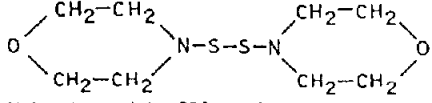
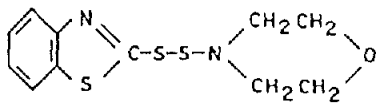
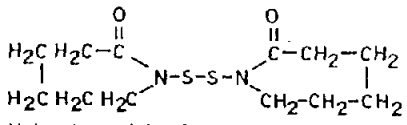
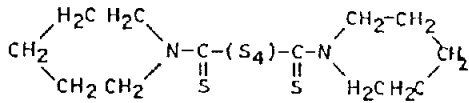
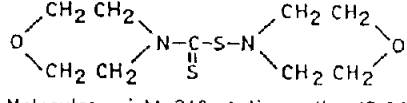
#### 2) การวัลคาไนซ์ด้วยสารประกอบที่สลายตัวให้กำมะถัน (sulfur donors)

นอกจากใช้กำมะถันในการวัลคาไนซ์ยางแล้ว สารประกอบที่สลายตัวให้กำมะถันก็สามารถนำมาใช้ในการวัลคาไนซ์ยางได้เช่นกัน (ตารางที่ 2)

---

\* Parts per 100 parts of rubber by weight

ตารางที่ 2 : สารประกอบซึ่งสลายตัวให้กำมะถัน

COMPOUND	STRUCTURE AND CONTENT OF ACTIVE SULFUR
Tetramethyl thiuram disulfide (TMTD)	 <p>Molecular weight = 240, Active sulfur = 13.3%</p>
Dithiodimorpholine (DTDM)	 <p>Molecular weight = 236, Active sulfur = 13.6%</p>
2-morpholino-dithiobenzothiazole (MBSS)	 <p>Molecular weight = 284, Active sulfur = 11.3%</p>
NN'-dithio bis-(hexahydro-2H-azepinone) or Caprolactam disulfide (CLD)	 <p>Molecular weight = 288, Active sulfur = 11.1%</p>
Dipentamethylene thiuramtetrasulfide (DPTT)	 <p>Molecular weight = 384, Active sulfur = 16.6%</p>
N-oxydiethylene dithiocarbamyl N'-oxydiethylene sulfenamide (OTOS)	 <p>Molecular weight = 248, Active sulfur = 12.9%</p>

ในการวัลคาไนซ์ยางด้วยสารประกอบที่สลายตัวให้กำมะถัน กำมะถันจะทำให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางอย่างมีประสิทธิภาพมาก ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการวัลคาไนซ์ด้วยระบบนี้มีความคงทนต่อการเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิสูงและทนต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี และยังช่วยลดการการซึมผ่านของกำมะถันขึ้นมาบนผิวหน้ายางอีกด้วย

สารประกอบที่สลายตัวให้กำมะถัน สามารถนำมาใช้แทนกำมะถันเพื่อลดสัดส่วนปริมาณของกำมะถันในสูตรของยางคอมปาวด์ที่ต้องนำไปวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิสูง นอกจากนั้นยังสามารถนำไปใช้ในระบบวัลคาไนซ์แบบ EV และแบบ Semi - EV ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นได้อีกด้วย

### 3) การวัลคาไนซ์ด้วยสารประกอบเปอร์ออกไซด์ (peroxides)

การวัลคาไนซ์ด้วยสารประกอบเปอร์ออกไซด์สามารถใช้ได้กับยางที่มีโครงสร้างทางเคมีแบบไม่อิ่มตัว เช่น ยางธรรมชาติ ยาง butadiene (BR) ยาง ethylene propylene diene methylene (EPDM) ยาง styrene-butadiene (SBR) และยางที่มีโครงสร้างทางเคมีแบบอิ่มตัว เช่น ยาง silicone ยาง urethane แต่มียางบางชนิด เช่น ยาง butyl (IIR) และยาง chloroprene (CR) ไม่สามารถวัลคาไนซ์ด้วยสารประกอบเปอร์ออกไซด์ได้ เนื่องจากข้อจำกัดของโครงสร้างพันธะเคมีของยางในการทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารประกอบเปอร์ออกไซด์ สารประกอบเปอร์ออกไซด์ไม่ควรใช้ร่วมกับสารเคมียางที่มีสมบัติเป็นกรด เช่น กรดไขมันซึ่งใช้เป็นสารช่วยในการแปรรูป acidic silica และเขม่าดำบางชนิดซึ่งใช้เป็นสารตัวเติม (filler) นอกจากนี้สารป้องกันยางเสื่อมสภาพบางชนิดก็ไม่ควรใช้ร่วมกับสารประกอบเปอร์ออกไซด์ เพราะสารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารประกอบเปอร์ออกไซด์ ทำให้สารประกอบเปอร์ออกไซด์ไม่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับพันธะเคมีของยาง สารประกอบเปอร์ออกไซด์ที่ใช้สำหรับวัลคาไนซ์ยางได้แก่ dibenzoyl peroxide, di-ter-butyl peroxide และ dicumyl peroxide (DICUP)

พันธะการเชื่อมโยงทางเคมีระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางที่ได้จากการวัลคาไนซ์ด้วยสารประกอบเปอร์ออกไซด์เป็นพันธะเคมีแบบคาร์บอน-คาร์บอน (C-C) ซึ่งมีเสถียรภาพและทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดีกว่าพันธะการเชื่อมโยงทางเคมีแบบคาร์บอน-ซัลเฟอร์ (C-S) ซึ่งได้จากการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน ดังนั้นผลิตภัณฑ์ยางที่ได้จากการวัลคาไนซ์ด้วยสารประกอบเปอร์ออกไซด์จึงทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดี แต่สมบัติการต้านแรงดึงและการฉีกขาดต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ยางที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน

### 4) การวัลคาไนซ์ด้วยโลหะออกไซด์ (metal oxide)

ยางที่สามารถวัลคาไนซ์ด้วยโลหะออกไซด์ได้แก่ ยาง polysulfide ยาง chlorosulfonated polyethylene และยาง CR สำหรับโลหะออกไซด์ที่ใช้ได้แก่ magnesium oxide, zinc oxide และ lead oxide ในการวัลคาไนซ์ยาง CR มักจะใช้ zinc oxide ร่วมกับ magnesium oxide โดยใช้สารตัวเร่งได้แก่ ethylene thiourea (ETU) หรือ 2-mercaptoimidazoline

### 5) การวัลคาไนซ์ด้วยไดออกซิม (dioximes)

สารประกอบไดออกซิมที่นิยมใช้ได้แก่ benzoquinone dioxime ซึ่งจะต้องใช้ร่วมกับ  $PbO_2$ ,  $MnO_2$  ซึ่งเป็นสาร oxidizing agent เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของไดออกซิม ยางที่สามารถวัลคาไนซ์ด้วย dioxime ได้แก่ ยาง NR ยาง SBR ยาง EPDM และยาง IIR โดยเฉพาะในยาง IIR อัตราการวัลคาไนซ์จะเร็วขึ้นตามองศาความไม่อิ่มตัวของโครงสร้างทางเคมีของยาง สารประกอบไดออกซิมสามารถใช้ร่วมกับกำมะถันได้เพื่อทำให้ยางมีสมบัติการต้านแรงดึงดีขึ้นและให้ความปลอดภัยในกระบวนการผลิตและแปรรูปมากขึ้น (scorch safety) แต่จะทำให้สมบัติการยุบรูปอยู่ตัว (compression set) และความทนอุณหภูมิสูงลดลง นอกจากนี้สารตัวเร่งเช่น MBTS (2,2-Dibenzothiazyl disulfide) ก็สามารถใช้ร่วมกับสารประกอบไดออกซิมได้เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดพันธะการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางดีขึ้น



## 6) การวัลคาไนซ์ด้วยสารประกอบเอมีน (amines)

นิยมใช้ในการวัลคาไนซ์อย่าง **acrylate (ACM)** และอย่าง **fluorocarbon (FPM)** การวัลคาไนซ์ด้วยเอมีนเพียงอย่างเดียวจะทำให้ผลิตภัณฑ์ยางที่ได้ไม่ทนต่ออุณหภูมิสูง จึงมักเติมกำมะถันหรือสารตัวเร่ง เช่น **MBTS** หรือ **Tetramethyl thiuram disulfide (TMTD)** ลงไปด้วยเพื่อช่วยให้ยางทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดีขึ้น สารประกอบเอมีนที่นิยมใช้ในการวัลคาไนซ์ยาง ได้แก่ **hexamethylene diaminocarbamate** และ **ethylene diaminocarbamate**

### 7) อื่นๆ

- การวัลคาไนซ์ด้วย **phenol formaldehyde resins**
- การวัลคาไนซ์ด้วยรังสี
- การวัลคาไนซ์ด้วย **diurethane (Novor Cures)**

## 2.2 สารตัวเร่ง

สารตัวเร่งเป็นสารซึ่งช่วยเร่งให้ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ของยางเร็วขึ้นกว่าเดิม ถ้าใช้กำมะถันเพียงอย่างเดียวจะต้องใช้เวลาในการวัลคาไนซ์นานถึง 5 ชั่วโมง แต่ถ้าใช้สารตัวเร่งร่วมด้วยจะใช้เวลาเพียง 10 - 30 นาทีเท่านั้น สารตัวเร่งนอกจากช่วยเร่งให้ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ของยางเร็วขึ้นแล้วสารตัวเร่งยังมีผลต่อการทำให้เกิดชนิดและจำนวนพันธะการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติการนำไปใช้งานของยางอีกด้วย

สารตัวเร่งที่ดีควรมีคุณสมบัติทั่วไปดังนี้

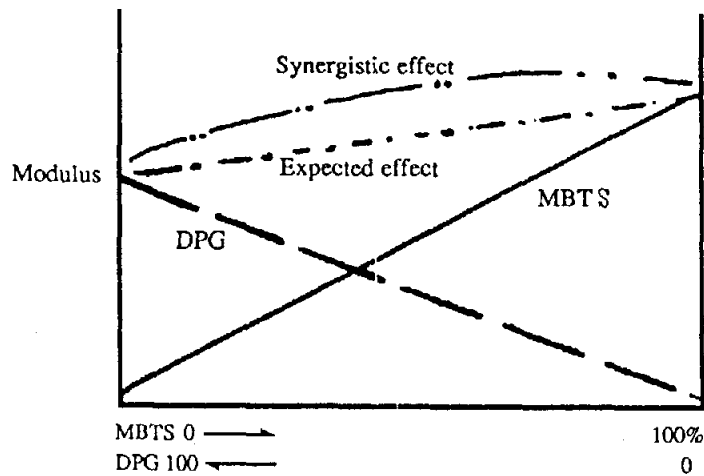
- 1) ช่วยให้ง่ายเกิดการวัลคาไนซ์เร็ว
- 2) ละลายและกระจายตัวในยางได้ดี
- 3) มี **delayed action** (ไม่ทำให้ง่ายเกิดการวัลคาไนซ์ก่อนกำหนดขณะบดผสมยางกับสารเคมีและขณะแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์)
- 4) เข้ากันได้ดีกับสารเคมีที่เติมใส่ลงไปนยาง
- 5) ให้ **plateau** หรือ **flat curve** เมื่อทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง **oscillating disk rheometer**
- 6) ใช้งานได้ดีในช่วงอุณหภูมิกว้าง
- 7) เก็บไว้ได้นานโดยไม่เสื่อมสภาพ
- 8) ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้

สารตัวเร่งที่สำคัญสามารถจัดออกเป็นหมวดหมู่ตามลักษณะโครงสร้างทางเคมีได้ดังนี้

- |                               |                 |
|-------------------------------|-----------------|
| 1. Guanidines                 | 2. Thiazoles    |
| 3. Thioureas                  | 4. Sulfenamides |
| 5. Aldehyde/Amine Condensates | 6. Thiurams     |
| 7. Dithiocarbamates           | 8. Xanthates    |

### 1. Guanidines

สารตัวเร่งในกลุ่มนี้ทำให้ยางวัลคาไนซ์ถึงจุดที่เหมาะสมก่อนข้างข้างจึงนิยมใช้เป็นสารตัวเร่งรอง (secondary accelerator or booster) ในยางส่วนใหญ่ที่ใช้กำมะถันเป็นสารวัลคาไนซ์ เช่น ยางธรรมชาติ ยาง SBR ยาง CR ยาง BR และยาง nitrile (NBR) โดยใช้ผสมร่วมกับสารตัวเร่งในกลุ่ม thiurams thiazoles sulfenamides และ dithiocarbamates โดยเฉพาะเมื่อใช้ร่วมกับสารตัวเร่งในกลุ่ม thiazoles จะทำให้เกิดผลของการเสริมประสิทธิภาพร่วมกัน (synergistic effect) ทำให้อัตราการวัลคาไนซ์ของยางเร็วขึ้นและมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น (ภาพที่ 2)



ภาพที่ 2 : ผลของการเสริมประสิทธิภาพร่วมกันของสารตัวเร่งในกลุ่ม guanidines และ thiazoles ที่มีผลต่อค่าโมดูลัสของยาง

โดยทั่วไปสารตัวเร่งในกลุ่มนี้เมื่อผสมกับสารตัวเร่งหลักแล้วจะทำให้ยางมีคุณสมบัติเชิงกลทั่วไปดี เช่น สมบัติการยืดตัว การฉีกขาด การล้าตัว เป็นต้น แต่ไม่คงทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากการบ่มเร่งและให้ค่าการยุบอยู่ตัวค่อนข้างสูง

### 2. Thiazoles

ให้อัตราการวัลคาไนซ์และระดับความปลอดภัยในการผลิต (ไม่ทำให้ยางวัลคาไนซ์ก่อนกำหนด) ปานกลางอยู่ระหว่างสารตัวเร่งในกลุ่ม guanidines และ thiurams นอกจากนี้จะใช้เป็นสารตัวเร่งหลัก ร่วมกับยางที่ใช้กำมะถันเป็นสารวัลคาไนซ์แล้ว ยังสามารถใช้เป็นสารตัวเร่งรองร่วมกับสารตัวเร่งในกลุ่ม dithiocarbamates, sulfenamides และ thiurams สารตัวเร่งในกลุ่มนี้ที่นิยมใช้ได้แก่ MBT (2-Mercaptobenzothiazole) และ MBTS โดย MBTS จะชะลอระยะเวลาในการเกิดวัลคาไนซ์ของยางนานกว่า MBT เล็กน้อย สมบัติของยางที่ได้จากการใช้สารตัวเร่งในกลุ่มนี้จะคงทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากการบ่มเร่งดี และทำให้ยางไม่เปลี่ยนสี (non - discoloring)

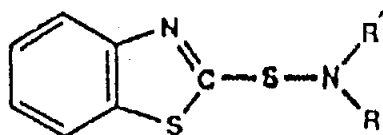
### 3. Thioureas

มีขอบเขตการใช้ค่อนข้างจำกัดสำหรับยางที่มีโครงสร้างทางเคมีไม่อ้อมตัว แต่สามารถใช้ได้ดีกับยาง CR สารตัวเร่งในกลุ่มนี้ ethylene thiourea เป็นสารตัวเร่งที่นิยมใช้มากที่สุด นอกจากนี้ใช้เป็นสารตัวเร่งแล้วยังสามารถใช้เป็นสารวัลคาไนซ์ยาง epichlorohydrin ได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามสาร

ตัวเร่งในกลุ่มนี้มีการใช้น้อย เนื่องจากเป็นสารก่อมะเร็ง

#### 4. Sulfenamides

sulfenamides เป็นสารอนุพันธ์ของ 2-mercaptobenzothiazole ซึ่งมีสูตรโครงสร้างทั่วไปดังนี้



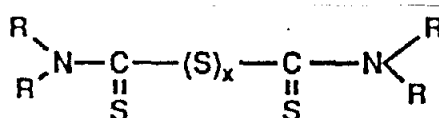
ประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาของ sulfenamides ขึ้นอยู่กับหมู่แทนที่ R และ R' เช่น N-dicyclohexylbenzothiazole-2-sulfenamide (DCBS) จะชะลอระยะเวลาในการเริ่มวัลคาไนซ์ของยางนานกว่า N-Cyclohexyl-2-benzothiazyl sulfenamide (CBS) เนื่องจากความเกะกะของหมู่ cyclohexyl ซึ่งเป็นหมู่แทนที่ใน DCBS ซึ่งมีขนาดใหญ่ sulfenamides จะให้ความปลอดภัยในกระบวนการผลิตสูงกว่าสารตัวเร่งในกลุ่ม thiazoles แต่ให้อัตราการวัลคาไนซ์ค่อนข้างเร็ว sulfenamides สามารถใช้เป็นตัวเร่งหลักร่วมกับสารตัวเร่งในกลุ่ม dithiocarbamates และ thiurams ซึ่งใช้เป็นสารตัวเร่งรองเพื่อเร่งอัตราการวัลคาไนซ์ให้เร็วขึ้นหรือในทางกลับกันอาจจะใช้ sulfenamides เป็นสารตัวเร่งรองร่วมกับสารตัวเร่งในกลุ่มที่กล่าวถึงข้างต้น ซึ่งใช้เป็นสารตัวเร่งหลักในกรณีที่ต้องการเร่งระยะเวลาในการเริ่มเกิดการวัลคาไนซ์ให้เร็วขึ้นและต้องการลดอัตราการวัลคาไนซ์ให้ช้าลง

#### 5. Aldehyde/Amine Condensates

มีขอบเขตการใช้ค่อนข้างจำกัดส่วนใหญ่ใช้เป็นสารตัวเร่งสำหรับการผลิตยาง ebonites

#### 6. Thiurams

สารตัวเร่งในกลุ่มนี้มีความไวต่อปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์สูงมาก (ultra-accelerator) และให้ระดับของความปลอดภัยในกระบวนการผลิตสูงกว่าสารตัวเร่งในกลุ่ม dithiocarbamates thiurams มีสูตรโครงสร้างทั่วไปดังนี้



โดยที่ X = 1, 2 หรือ 4 ถ้า X = 4 เช่น Dipentamethylene thiuram tetrasulfide (DPTT) สามารถใช้เป็นสารที่สลายตัวให้กำมะถันสำหรับยางที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน thiurams สามารถใช้ในแบบวัลคาไนซ์ แบบ CV, แบบ semi-EV และแบบ EV ได้ โดยใช้เพียงลำพังหรือใช้ร่วมกับสารตัวเร่งในกลุ่มอื่น เช่น thiazoles, sulfenamides, dithiocarbamates และ guanidines

## 7. Dithiocarbamates

dithiocarbamates มีความไวต่อปฏิกิริยาวัลคาไนซ์สูงกว่าสารตัวเร่งในกลุ่ม thiurams โดย dithiocarbamates ที่มี zinc, sodium และ ammonium – based alkyls เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างทางเคมี สามารถละลายน้ำได้ดีจึงนิยมใช้เป็นสารตัวเร่งในน้ำยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ สำหรับระยะเวลาในการทำให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์ของสารตัวเร่งในกลุ่ม dithiocarbamates สามารถจัดลำดับได้ดังนี้

zinc dibutyl dithiocarbamate (ZDBC) > zinc diethyl dithiocarbamate (ZDEC) > zinc dimethyl dithiocarbamate (ZDMC) > zinc dibenzyl dithiocarbamate (ZBEC)

สำหรับ dithiocarbamates ที่มี nickle เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างทางเคมีไม่นิยมใช้เป็นสารตัวเร่ง แต่นิยมใช้เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพสำหรับยาง CR ยาง chlorosulfonated polyethylene และ ยาง epichlorohydrin

## 8. Xanthates

จัดเป็นสารตัวเร่งที่เร็วที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเร่งที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้น นิยมใช้เป็นสารตัวเร่งในน้ำยางเพื่อผลิตยางโฟม นอกจากนี้ยังนิยมใช้เป็นสารตัวเร่งเพื่อให้เกิดการคงรูปที่อุณหภูมิห้องสำหรับกาวและกาวยาแนว (sealants)

สารตัวเร่งที่กล่าวถึงข้างต้นสามารถจัดลำดับอัตราการเร่งได้ดังนี้

Xanthates > Dithiocarbamates > Thiurams > Thiazoles > Sulfenamides > Guanidines

### บทที่ 3

## วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ และวิธีดำเนินการ

### 3.1 วัสดุและสารเคมี

#### 3.1.1 ยาง

- ยางธรรมชาติ (ยางแผ่นรมควันชั้นที่ 3) เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัทไทยบารุงเคมีเคิล จำกัด

#### 3.1.2 สารเคมี

##### 3.1.2.1 สารวัลคาไนซ์

- กำมะถัน เป็นสารเคมีของบริษัทโคซัน(ประเทศไทย) จำกัด

##### 3.1.2.2 สารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน

- MBTS (Oricel-DM) เป็นสารเคมีของบริษัทโคซัน(ประเทศไทย) จำกัด
- DPG (Soxinol DG) เป็นสารเคมีของบริษัทโคซัน(ประเทศไทย) จำกัด

##### 3.1.2.3 สารกระตุ้นสารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน

- Zinc oxide (ZnO) ) เป็นสารเคมีของบริษัทเกรดแมน(ประเทศไทย) จำกัด
- Stearic acid เป็นสารเคมีของบริษัทเกรดแมน(ประเทศไทย) จำกัด

##### 3.1.2.4 สารตัวเติม

- Calcium carbonate (CCP-401) เป็นสารเคมีของบริษัทปูนคุณภาพ จำกัด

##### 3.1.2.5 สารช่วยการแปรรูป

- Naphthenic oil เป็นสารเคมีของบริษัทลัทซ์เคมอินเตอร์เนชันแนล จำกัด

##### 3.1.2.6 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ

- Anox T (Alkylated phenol) เป็นสารเคมีของบริษัทโคซัน(ประเทศไทย) จำกัด

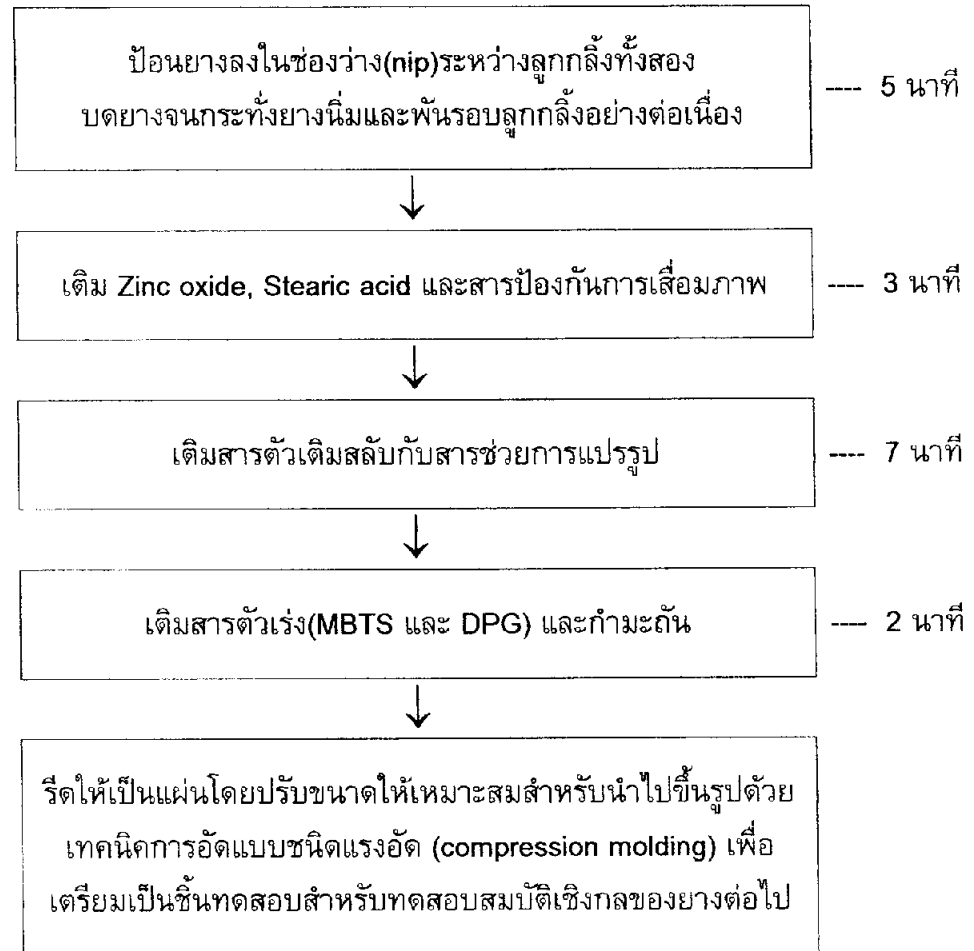
### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 3.2.1 เครื่องบดแบบสองลูกกลิ้ง(Two-roll mill) – Gumix GX 2002
- 3.2.2 เครื่อง Rheometer แบบ Rotor type – rheOTECH<sup>®</sup>
- 3.2.3 แม่พิมพ์(mold) สำหรับขึ้นรูปอย่างเป็นขั้นตอนทดสอบ
- 3.2.4 เครื่องอัดไฮดรอลิกพร้อมแผ่นให้ความร้อน
- 3.2.5 หัวตัด (Cutting die) พร้อมอุปกรณ์สำหรับเตรียมขั้นตอนทดสอบความต้านแรงดึง ความยืดเมื่อขาด และความต้านทานแรงฉีกขาด
- 3.2.6 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile – testing machine) – Instron 4460
- 3.2.7 อุปกรณ์สำหรับทดสอบการยุบอยู่ตัวของยาง
- 3.2.8 เครื่องวัดความแข็งแบบ Shore durometer hardness Type A - 2
- 3.2.9 ตู้อบแบบลมร้อน (Hot air oven) – Memmert
- 3.2.10 Dial gauge สำหรับวัดความหนาที่มีความละเอียดในการอ่านค่า 0.01 มม.– Mitutoyo ID - C Series No.543
- 3.2.11 เครื่องชั่งละเอียด 0.01 กรัม – Precica 4000C

### 3.3 วิธีดำเนินการ

แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

3.3.1 บดผสมยางกับสารเคมีแต่ละสูตรด้วยเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง ซึ่งมีขั้นตอนโดยสังเขป ดังนี้



ระยะเวลาในการบดผสม : 17 นาที

อุณหภูมิของลูกกลิ้ง(roll temperature) :  $60 \pm 5$  °C

3.3.2 นำยางคอมปาวด์ที่บดผสมได้แต่ละสูตร(ประมาณ 20 กรัม)ไปทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ ด้วยเครื่อง Rheometer ที่อุณหภูมิ 150 °C เพื่อหาระยะเวลาในการขึ้นรูปชิ้นทดสอบ

3.3.3 ขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกที่อุณหภูมิ 150 °C โดยใช้ระยะเวลาที่อ่านได้จาก Rheometer curve ที่  $t_{90}$  (เวลาที่ค่าทอร์คเพิ่มขึ้นร้อยละ 90 ก่อนถึงค่าทอร์คสูงสุด) เป็นระยะเวลาในการวัลคาไนซ์

3.3.4 นำชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูป(หลังจากตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 16 ชั่วโมงแต่ไม่เกิน 96 ชั่วโมง)ไปทดสอบสมบัติเชิงกลได้แก่

3.3.4.1 ความแข็ง (Durometer hardness, Shore A)

3.3.4.2 ความต้านแรงดึง (Tensile strength)

3.3.4.3 ความยืดเมื่อขาด (Elongation at break)

3.3.4.4 โมดูลัสที่ความยืดร้อยละ 300 (Modulus at 300% elongation)

3.3.4.6 การยุบอยู่ตัว (Compression set)

3.3.4.5 ความต้านทานแรงฉีกขาด (Tear strength)



## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

สูตรยาง	phr <sup>A</sup>
ยางแผ่นรมควันชั้นที่ 3	100
Zinc oxide	5
Stearic acid	3
Calcium carbonate	50
Naphthenic oil	2.5
Antioxidant (Anox T)	1
กำมะถัน	2

ตารางที่ 3 : ตารางแสดงผลการทดลองของสารตัวเร่ง MBTS และ DPG ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติ

ปริมาณของสารตัวเร่ง (phr)	คอมเปาเวต										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
MBTS <sup>B</sup>	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
DPG <sup>C</sup>	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0

Rheometer : 150 °C, 3° arc (ดู Rheometer curve ที่ภาคผนวก ก )

Scorch time(t <sub>2</sub> ), min	2.79	2.79	2.63	2.52	2.54	2.98	2.04	1.52	1.23	1.04	0.88
Cure time(t <sub>90</sub> ), min	6.42	5.02	4.29	4.06	3.96	4.48	5.17	4.58	4.60	4.21	5.50
Minimum torque, dN·m	2.37	1.65	1.00	1.36	1.15	1.51	1.00	1.36	2.01	1.65	2.37
Maximum torque, dN·m	62.82	69.28	72.22	75.95	79.18	84.84	69.49	72.79	79.25	72.94	78.75
Cure Rate Index <sup>D</sup>	27.5	44.8	60.2	64.9	70.4	66.7	32.0	32.7	35.3	31.5	21.7

#### Mechanical properties

Durometer hardness, Shore A	38	40	45	48	50	49	46	47	50	48	47
Tensile strength, MPa	21.7	22.4	22.9	23.4	23.5	20.5	23.9	24.7	25.5	23.3	22.5
Elongation at break, %	643	600	595	583	566	580	630	634	610	618	638
Modulus at 300 % elongation, MPa	3.7	4.5	4.6	4.8	5.7	5.3	4.3	4.5	4.7	4.3	4.0
Compression set <sup>E</sup> (Method B), %	21	13	30	22	24	19	28	27	25	24	23
Tear strength (Die C), N/mm	35.7	36.5	38.6	39.0	39.7	35.5	41.2	42.0	43.2	41.4	36.6

<sup>A</sup> Parts per 100 parts of rubber by weight

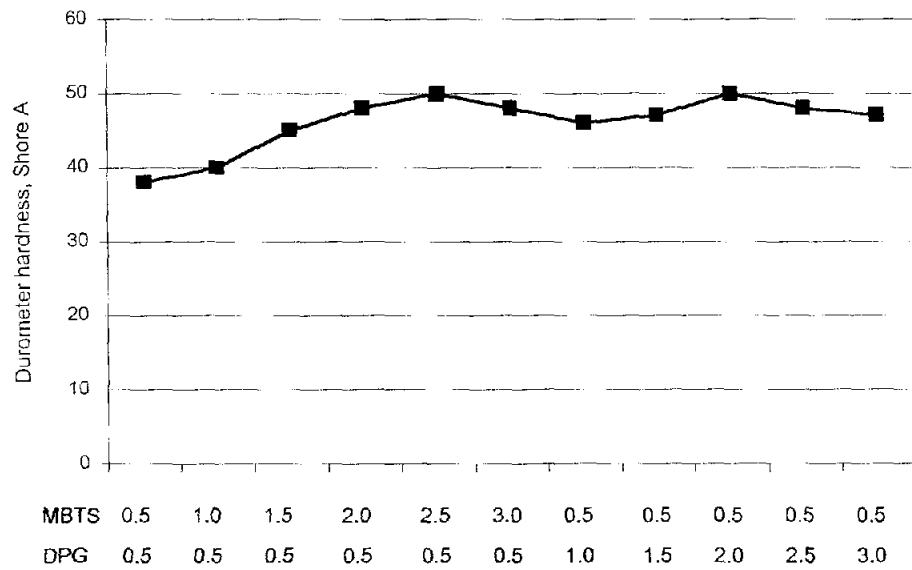
<sup>B</sup> 2,2-Dibenzothiazyl disulfide

<sup>C</sup> N,N -Diphenylguanidine

<sup>D</sup> Cure Rate Index = 100/(cure time – scorch time)

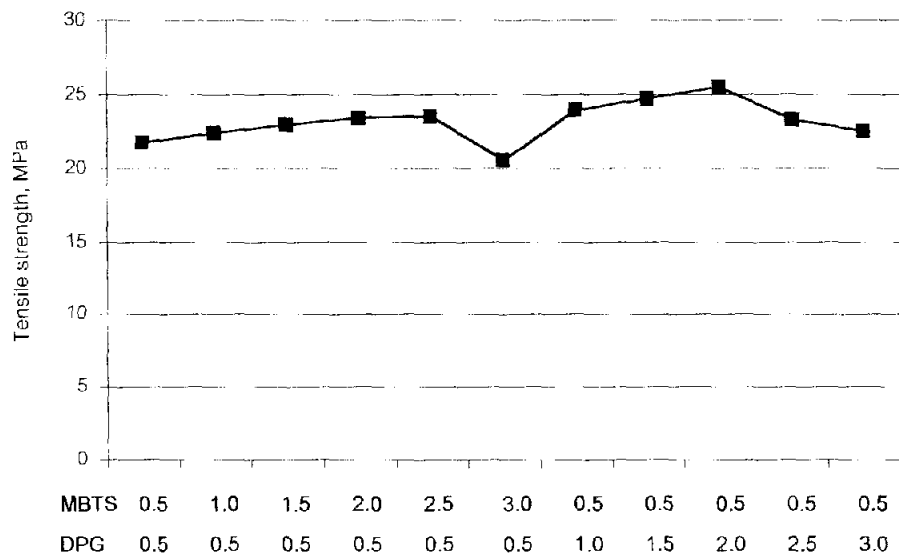
<sup>E</sup> At 70 °C for 22 hrs.

จากตารางแสดงผลการทดลองหน้าที 18 สามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมบัติเชิงกล และสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางกับอัตราส่วนของสารตัวเร่ง MBTS และ DPG ได้ดังนี้



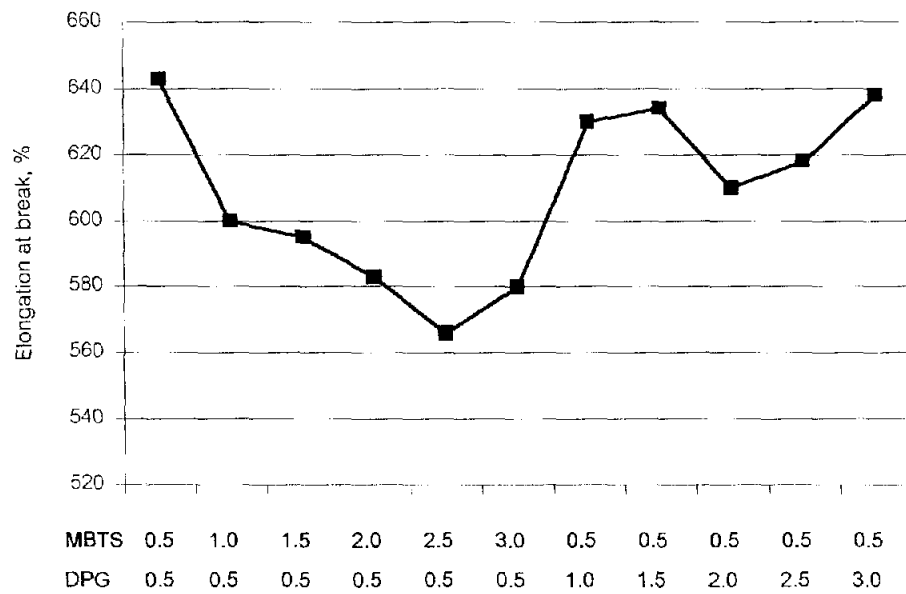
อัตราส่วนระหว่าง MBTS/DPG (ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก)

ภาพที่ 1-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเร่ง(MBTS/DPG) กับค่าความแข็ง



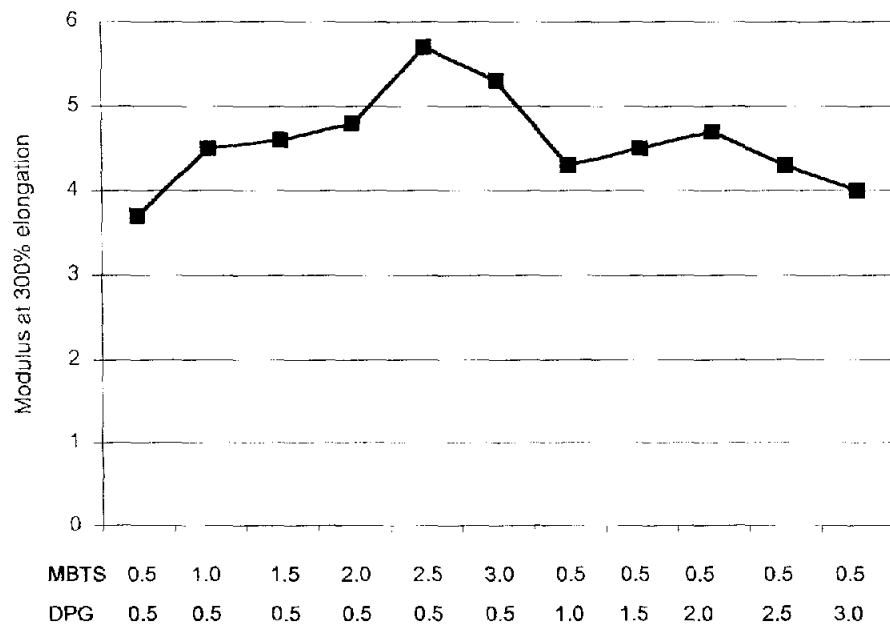
อัตราส่วนระหว่าง MBTS/DPG (ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก)

ภาพที่ 1-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเร่ง(MBTS/DPG)กับค่าความต้านแรงดึง



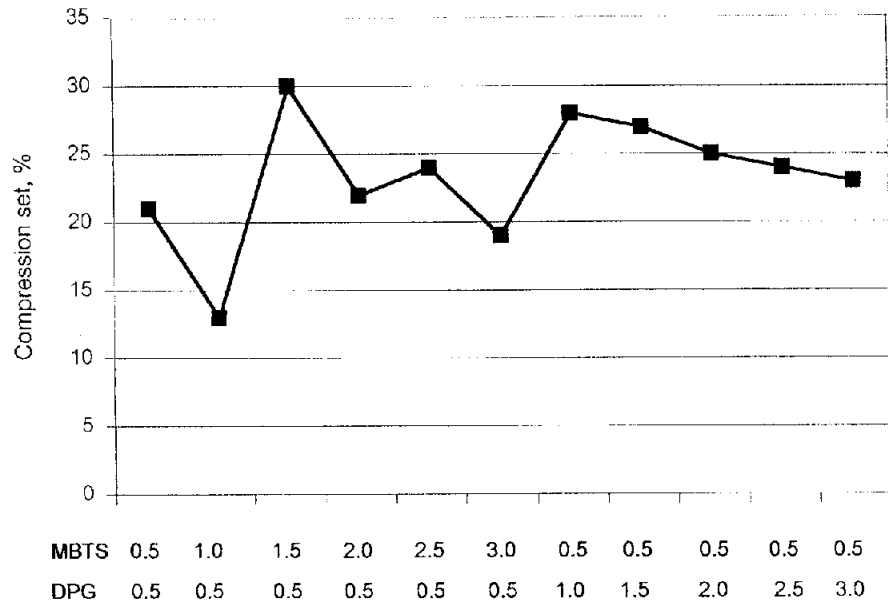
อัตราส่วนระหว่าง MBTS/DPG (ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก)

ภาพที่ 1-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเร่ง(MBTS/DPG)กับค่าความยืดเมื่อขาด



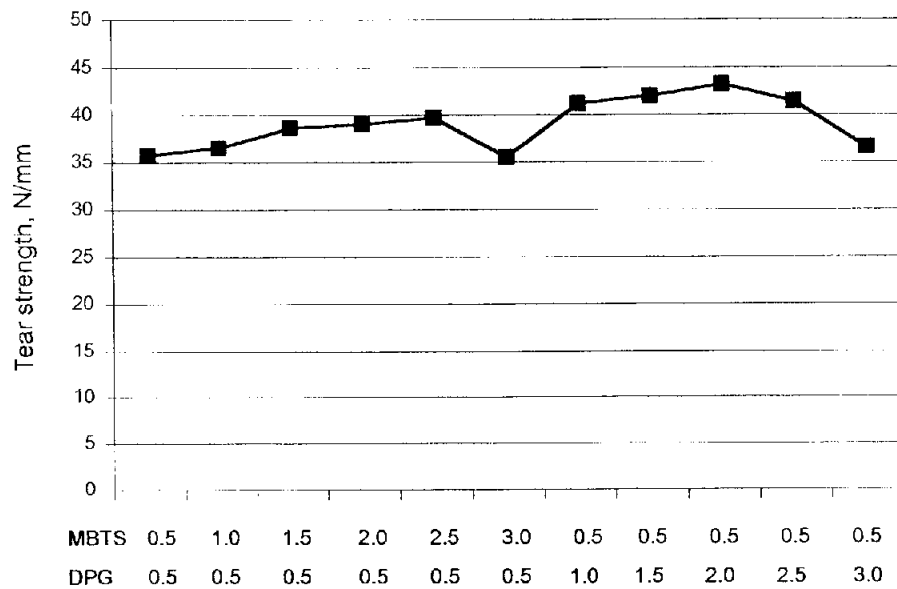
อัตราส่วนระหว่าง MBTS/DPG (ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก)

ภาพที่ 1-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเร่ง(MBTS/DPG) กับค่าโมดูลัสที่ความยืดร้อยละ 300



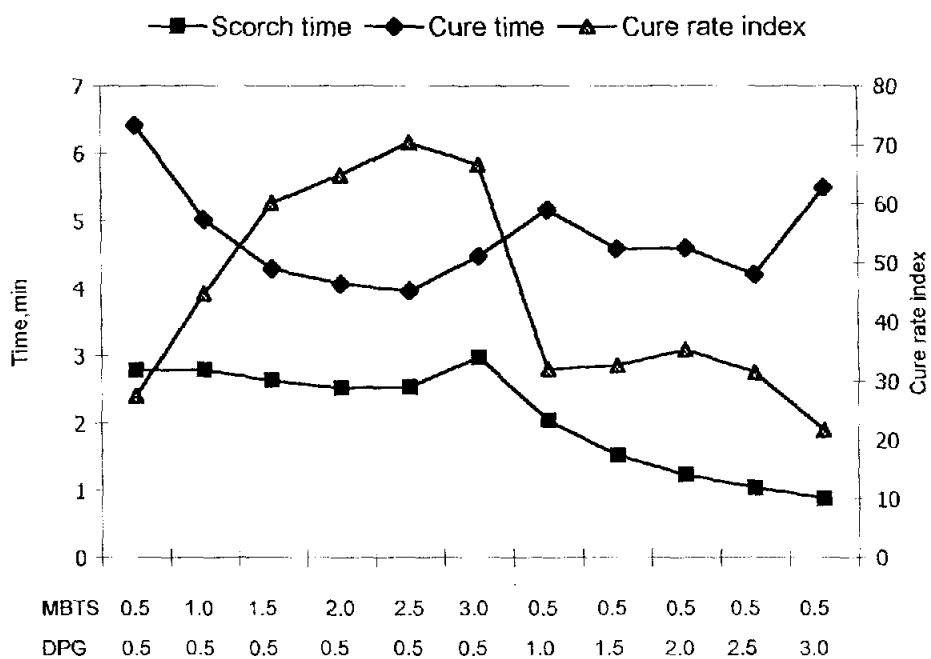
อัตราส่วนระหว่าง MBTS/DPG (ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก)

ภาพที่ 1-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเร่ง(MBTS/DPG) กับค่าการยุบอยู่ตัว



อัตราส่วนระหว่าง MBTS/DPG (ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก)

ภาพที่ 1-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเร่ง(MBTS/DPG)กับค่าความต้านทานแรงฉีกขาด



อัตราส่วนระหว่าง MBTS/DPG (ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก)

ภาพที่ 1-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเร่ง(MBTS/DPG) กับระยะเวลาเริ่ม  
 คงรูป (scorch time) ระยะเวลาคงรูป (cure time) และ cure rate index

## บทที่ 5

### วิจารณ์ผลและสรุปผลการศึกษาทดลอง

#### 4.1 สมบัติเชิงกลของยางกับอัตราส่วนของสารตัวเร่ง MBTS และ DPG

คอมเปาวด์ที่ 1 ใช้อัตราส่วนของสารตัวเร่ง MBTS และ DPG เท่ากันคือ 0.5 ส่วนต่อยางร้อยละโดยน้ำหนัก เพื่อใช้เป็นคอมเปาวด์อ้างอิงสำหรับศึกษาติดตามการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลและสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางได้เมื่อได้มีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของสารตัวเร่งทั้งสอง สำหรับคอมเปาวด์ที่ 2 – 6 กำหนดให้ปริมาณของ DPG คงที่แต่ปรับเพิ่มปริมาณของ MBTS ขึ้นครั้งละ 0.5 ส่วนต่อยางร้อยละโดยน้ำหนัก จนกระทั่งถึง 3.0 ส่วนต่อยางร้อยละโดยน้ำหนัก โดยกลับกันคอมเปาวด์ที่ 7–11 กำหนดให้ปริมาณของ MBTS คงที่ แต่เพิ่มปริมาณของ DPG ขึ้นครั้งละ 0.5 ส่วนต่อยางร้อยละโดยน้ำหนัก จนกระทั่งถึง 3.0 ส่วนต่อยางร้อยละโดยน้ำหนักเช่นเดียวกัน จากผลการทดลองรูปที่ 1 – 7 แสดงให้เห็นว่า การปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างสารตัวเร่งทั้ง 2 มีผลต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางอย่างมีนัยสำคัญ

##### 4.1.1 ความแข็ง

ความแข็งของยาง หมายถึงความต้านทานต่อการกดลงบนผิวหน้าของยางซึ่งวัดภายใต้สภาวะที่กำหนดตามมาตรฐานการทดสอบ ยางยิ่งแข็งมากย่อมมีความต้านทานต่อการกดมาก ความแข็งของยางมีความสัมพันธ์กับองศาของการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง (degree of crosslinking) ความแข็งของยางจะเพิ่มขึ้นตามองศาการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางที่สูงขึ้น ถ้าหากองศาของการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้ยางที่ได้มีสมบัติเป็นพลาสติกแข็ง (ไม่มีสมบัติเป็นยางหรือไม่สามารถยืดหยุ่นได้) เรียกว่า ยางแข็ง หรือ อีโบไนต์ (ebonite) (Hofmann, 1967) จากผลการทดลองของคอมเปาวด์ที่ 2 – 6 (เมื่อเพิ่มปริมาณของสารตัวเร่ง MBTS) พบว่าคอมเปาวด์ที่ 5 มีค่าความแข็งมากที่สุดในกลุ่ม จึงสันนิษฐานว่าคอมเปาวด์ที่ 5 ซึ่งใช้ปริมาณของ MBTS:DPG 2.5:0.5 ส่วนต่อยางร้อยละโดยน้ำหนักน่าจะเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม (optimum level) ซึ่งทำให้ยางที่ได้มีองศาของการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับคอมเปาวด์ที่ 2 3 4 และ 6 ตามลำดับ ส่วนคอมเปาวด์ที่ 7–11 (เมื่อเพิ่มปริมาณของ DPG) พบว่าคอมเปาวด์ที่ 9 ซึ่งใช้ปริมาณของ DPG:MBTS 2:0.5 ส่วนต่อยางร้อยละโดยน้ำหนักให้ค่าความแข็งมากที่สุดในกลุ่ม แสดงว่าคอมเปาวด์ที่ 9 เกิดองศาของการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับคอมเปาวด์ที่ 7 8 10 และ 11 ตามลำดับ

#### 4.1.2 ความต้านแรงดึง ความยืดเมื่อขาด โมดูลัสที่ความยืดร้อยละ 300 และความต้านทานแรงฉีกขาด

จากการผลการทดลองของคอมเปาวด์ที่ 2-6(เมื่อเพิ่มปริมาณของสารตัวเร่ง MBTS) พบว่าที่อัตราส่วนของ MBTS:DPG 2.5:0.5 ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก(คอมเปาวด์ที่ 5) ให้ค่าความต้านแรงดึง โมดูลัสที่ความยืดร้อยละ 300 และความต้านทานแรงฉีกขาดสูงที่สุด แต่มีค่าความยืดเมื่อขาดต่ำที่สุดในกลุ่ม สำหรับคอมเปาวด์ที่ 7 – 11 (เมื่อเพิ่มปริมาณของDPG) พบว่าคอมเปาวด์ที่ 9 ซึ่งใช้ปริมาณของ DPG:MBTS 2:0.5 ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก ให้ค่าความต้านแรงดึง โมดูลัสที่ความยืดร้อยละ 300 และความต้านทานแรงฉีกขาดสูงที่สุด แต่มีค่าความยืดเมื่อขาดต่ำที่สุดในกลุ่ม ซึ่งสามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกับข้อ 4.1.1

#### 4.1.3 การยุบอยู่ตัว

เนื่องจากการทดสอบการยุบอยู่ตัว เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาสมบัติการคืนตัวของยางหลังปล่อยจากแรงอัดที่ระยะยุบตัวคงที่ภายใต้อุณหภูมิสูง การที่ยางจะให้ค่าการยุบอยู่ตัวสูง(ยางคืนตัวไม่ดี)หรือต่ำ(ยางคืนตัวได้ดี) ขึ้นอยู่กับเสถียรภาพและลักษณะโครงสร้างของพันธะเคมีที่โมเลกุลของยางมาเชื่อมต่อกัน (Hofmann 1967) จากการทดลองโดยใช้คอมเปาวด์ที่ 1 เป็นคอมเปาวด์อ้างอิง (MBTS:DPG 0.5:0.5 ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก) พบว่าคอมเปาวด์ที่ 2 ซึ่งใช้อัตราส่วนของMBTS:DPG 1.0:0.5 ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก ให้ค่าการยุบอยู่ตัวต่ำที่สุด และคอมเปาวด์ที่ 3 ซึ่งใช้อัตราส่วนของ MBTS:DPG 1.5:0.5 ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก ให้ค่าการยุบอยู่ตัวสูงที่สุด

ดังนั้นจึงสันนิษฐานว่าคอมเปาวด์ที่ 2 ซึ่งใช้ปริมาณของ MBTS:DPG 1.0:0.5 ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก จะทำให้โมเลกุลของยางเกิดพันธะเชื่อมโยงที่มีเสถียรภาพ และทนต่อความร้อนได้ดีที่สุด

#### 4.2 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยาง

เมื่อพิจารณาจาก rheometer curveของคอมเปาวด์ที่ 2 – 6(เมื่อเพิ่มปริมาณของสารตัวเร่งMBTS) พบว่าระยะเวลาเริ่มคงรูป (scorch time) ของคอมเปาวด์ที่ 4 ซึ่งใช้ปริมาณของ MBTS:DPG 2.0:0.5 ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก ให้ระยะเวลาเริ่มคงรูปสั้นที่สุด สำหรับระยะเวลาคงรูป (cure time) คอมเปาวด์ที่ 5 ซึ่งใช้ปริมาณของ MBTS:DPG 2.5:0.5 ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก ให้ระยะเวลาคงรูปสั้นที่สุด ส่วนอัตราการคงรูปซึ่งพิจารณาจาก cure rate index พบว่าคอมเปาวด์ที่ 5 ให้อัตราการคงรูปจะเร็วที่สุดเช่นเดียวกัน

เมื่อเปรียบเทียบภายในกลุ่มของคอมเปาวด์ที่ 7 – 11(เมื่อเพิ่มปริมาณของDPG) พบว่าคอมเปาวด์ที่ 11 ซึ่งใช้ปริมาณของ DPG:MBTS 3.0:0.5 ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงที่สุดในกลุ่มให้ระยะเวลาเริ่มคงรูปสั้นที่สุด แต่กลับพบว่าให้ระยะเวลาคงรูปนานที่สุดในกลุ่ม ส่วนอัตราการคงรูป พบว่าคอมเปาวด์ที่ 9 ซึ่งใช้ปริมาณของ DPG:MBTS 2.0:0.5 ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก ให้อัตราการคงรูปเร็วที่สุดในกลุ่ม ดังนั้นผลจากการทดลองของคอมเปาวด์ที่ 1 – 11 จึงมีเหตุผลที่สันนิษฐานได้ว่า ระยะเวลาเริ่มคงรูปและระยะเวลาคงรูปจะสั้นลงหรือนานขึ้น อัตราการคงรูปจะเร็วขึ้นหรือช้าลงไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณและอัตราส่วนของสารตัวเร่งทั้งสองที่เพิ่มขึ้นในสูตรของยางเพียงอย่างเดียว แต่ทั้งนี้จะต้องขึ้นอยู่กับอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างสารตัวเร่งทั้งสองด้วย

จาก rheometer curve ที่ได้ สามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มปริมาณของ MBTS มีแนวโน้มทำให้ระยะเวลาคงรูปสั้น ส่วนการเพิ่มปริมาณของ DPG มีแนวโน้มทำให้ระยะเวลาคงรูปนาน ดังนั้น MBTS จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นสารตัวเร่งหลัก ส่วนสารตัวเร่ง DPG เหมาะสมที่จะใช้เป็นสารตัวเร่งรอง ดังนั้นอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการทำให้ยางคงรูปตามสูตรในการทดลองนี้คือ MBTS : DPG 2.5 : 0.5 (สูตรที่ 5)



## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ หัวหน้ากลุ่มงานเทคโนโลยีผลิตภัณฑ์ 1 คุณพยับ นามประเสริฐ หัวหน้างาน양 คุณดรุณี วิชาเรื่องวิทย์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่ามาช่วยตรวจสอบ แก้ไข รายงานฉบับนี้ให้มีภาษาที่น่าอ่านมากขึ้น ขอขอบคุณ คุณอนนท์ ป้อมประสิทธิ์ สำหรับความช่วยเหลือและแนะนำ ในการจัดทำกราฟผลการทดลอง ในบทที่ 3 ให้น่าชม และมีสาระมากยิ่งขึ้น และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านในการให้ความช่วยเหลือ ในส่วนของการทดลองให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

### บรรณานุกรม

1. American Society for Testing and Materials. Rubber Property – Compression Set. In **Annual Book of ASTM standard : Rubber**. Washington, DC. : ASTM 2001.p.37– 42.
2. American Society for Testing and Materials. Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomer– Tension. In **Annual Book of ASTM standard : Rubber**. Washington, DC. :ASTM 2001.p.43 – 55.
3. American Society for Testing and Materials. Tear strength of Conventional Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers. In **Annual Book of ASTM standard Rubber**. Washington, DC. :ASTM 2001.p.133 – 141.
4. American Society for Testing and Materials. Rubber Property – Vulcanization Using Oscillating Disk Cure Meter. In **Annual Book of ASTM standard : Rubber**. Washington, DC. :ASTM 2000. p.365– 375.
5. American Society for Testing and Materials. Rubber Property – Durometer Hardness.In **Annual Book of ASTM standard : Rubber**. Washington, DC. : ASTM 2001.p.382– 389.
6. American Society for Testing and Materials. Rubber–Material, Equipment and Procedures for Mixing Standard Compounds and Preparing Standard Vulcanized Sheets. In **Annual Book of ASTM standard : Rubber**. Washington, DC. : ASTM 2000 p.447– 452.
7. American Society for Testing and Materials. Rubber Compounding Materials – Vulcanization Accelerators. In **Annual Book of ASTM standard : Rubber**. Washington, DC. : ASTM 2001.p.742– 745.
8. G.A. Blokh. **Organic Accelerators in The Vulcaization of Rubber**. Jerusalem: S.Monson, 1968.
9. Hofmann Werner. **Vulcanization and Vulcanizing Agents**. London : Maclaren,1967.
10. R.P.Brown **Physical Testing of Rubbers**. London : Applied Science Publishers Ltd,1979.
11. A.D.Thorn, and R.A. Robinson. Compound Design. In Anil K. Bhowmick. **Rubber Products Manufacturing Technology**. New York : Marcel Dekker Inc.,1994.
12. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. ศัพท์บัญญัติผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมยาง. **ศ10**. หน้า 9 – 10, 40,45,50.

ภาคผนวก ก

# Rheometer Summary Report

## Rubber Technology Division

Thursday August 9, 2001

COMPOUND ID: R-34-A

DESCRIPTION: DSS/KARTPAN

CHART RANGE: 100 dNm

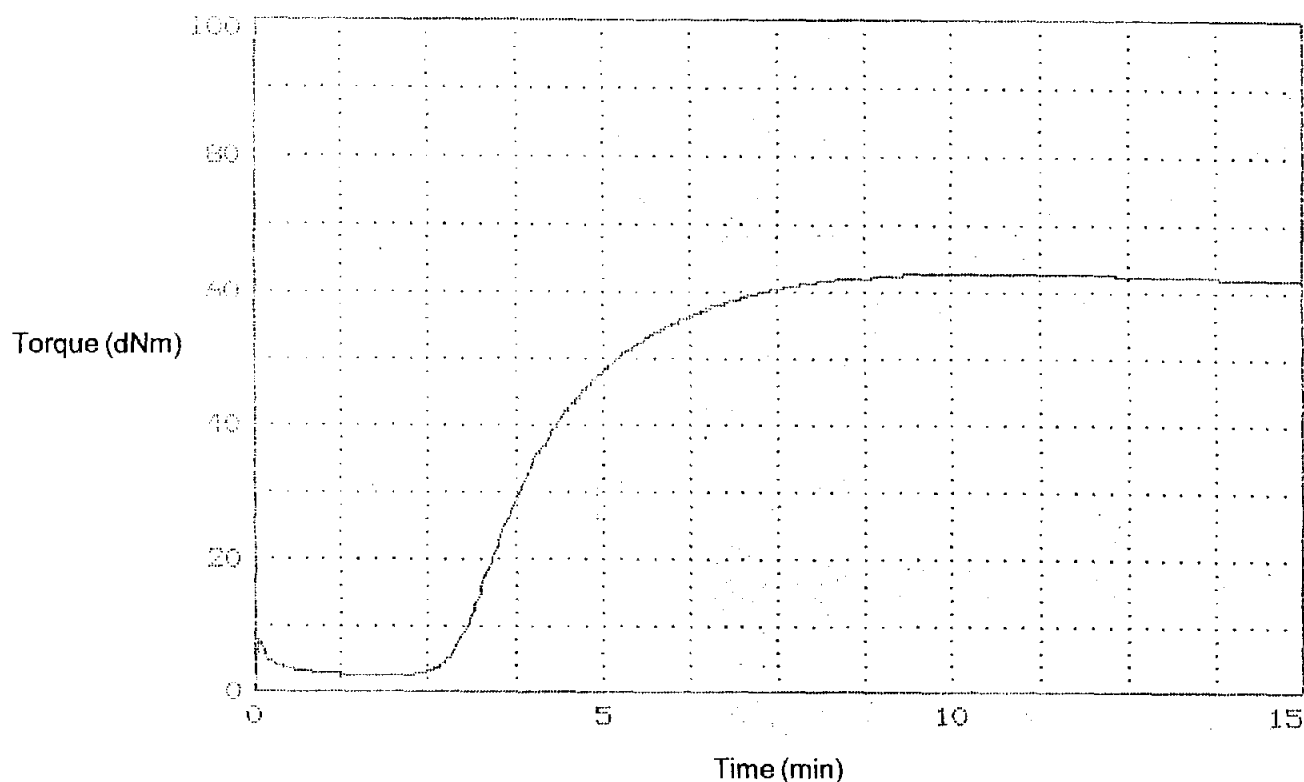
CHART SPEED: 15 min

DEGREE ARC: 3.00

DIE TYPE: MPC

TEMPERATURE: 150 °C

MIX DATE	TEST ID	MAX TORQ	MIN TORQ	ts1	ts2	tc10	tc50	tc90	P/F
08/09/01	VUL-1	62.82	2.37	2.65	2.79	3.00	3.96	6.42	P



ภาพที่ ก -1 Rheometer curve ของคอมปาวด์ที่ 1 : ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 2.79 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 6.42 นาที

# Rheometer Summary Report

## Rubber Technology Division

Thursday August 9, 2001

COMPOUND ID: R-34-A

DESCRIPTION: DSS/KARTPAN

CHART RANGE: 100 dNm

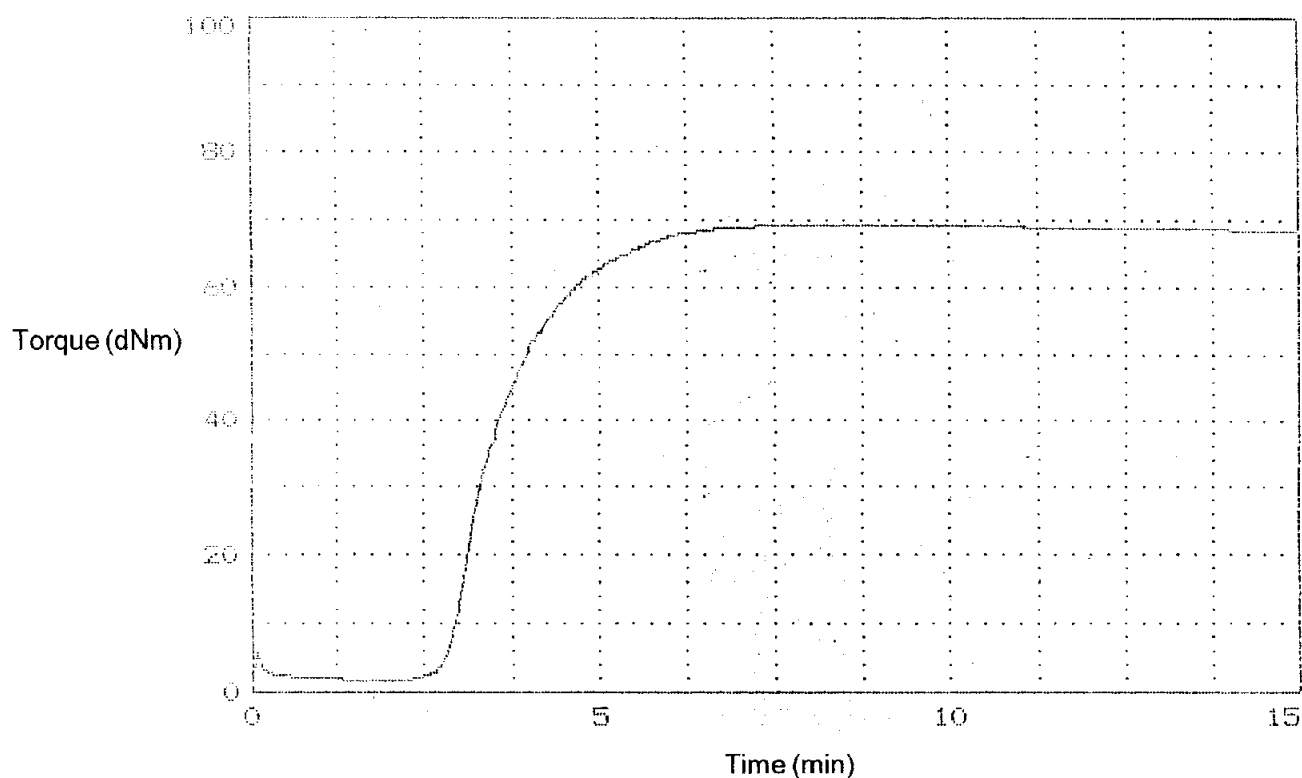
CHART SPEED: 15 min

DEGREE ARC: 3.00

DIE TYPE: MPC

TEMPERATURE: 150 °C

MIX DATE	TEST ID	MAX TORQ	MIN TORQ	ts1	ts2	tc10	tc50	tc90	P/F
08/09/01	VUL-2	69.28	1.65	2.69	2.79	2.94	3.46	5.02	P



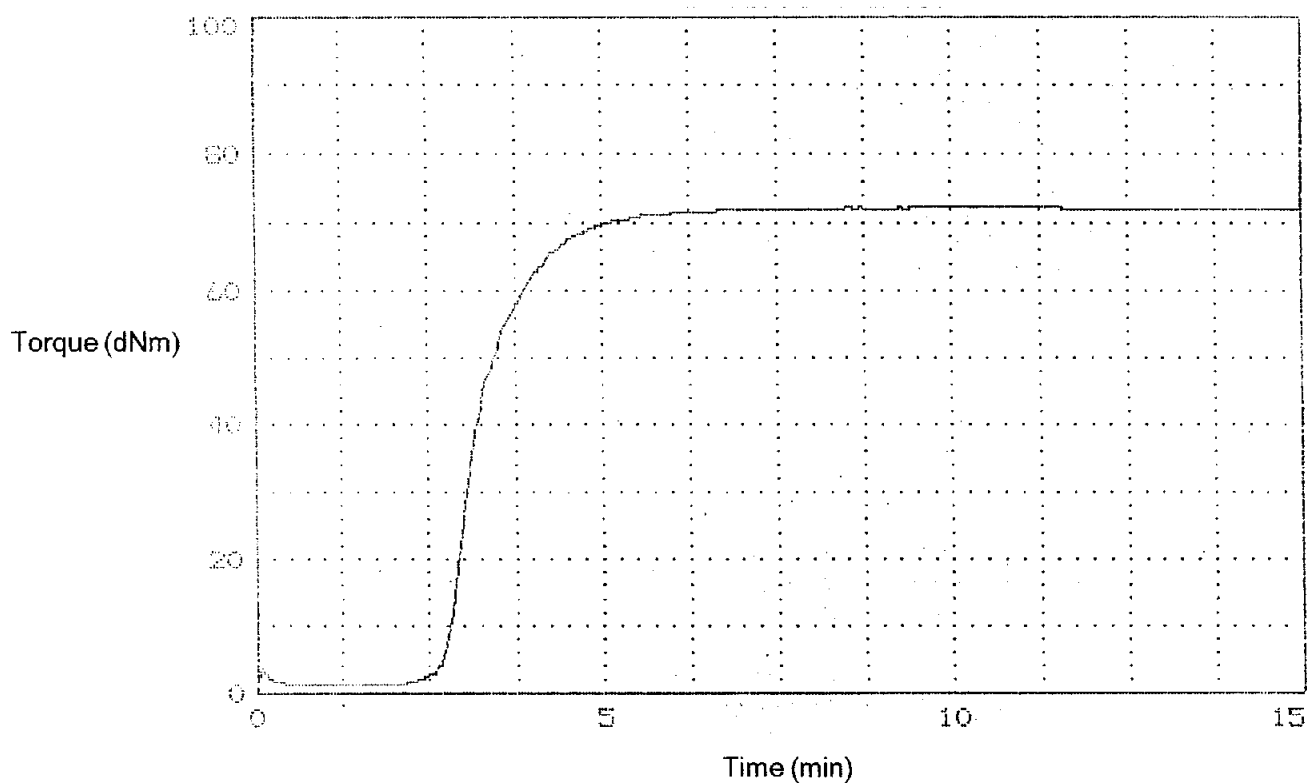
ภาพที่ ก -2 Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 2: ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 2.79 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 5.02 นาที

# Rheometer Summary Report

## Rubber Technology Division

Thursday August 9, 2001

COMPOUND ID: R-34-A		DESCRIPTION: DSS/KARTPAN							
CHART RANGE: 100 dNm		CHART SPEED: 15 min				DEGREE ARC: 3.00			
DIE TYPE: MPC		TEMPERATURE: 150 °C							
MIX DATE	TEST ID	MAX TORQ	MIN TORQ	ts1	ts2	tc10	tc50	tc90	P/F
08/09/01	VUL-3	72.22	1.00	2.48	2.63	2.79	3.15	4.29	P



ภาพที่ ก-3 Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 3 : ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 2.63 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 4.29 นาที

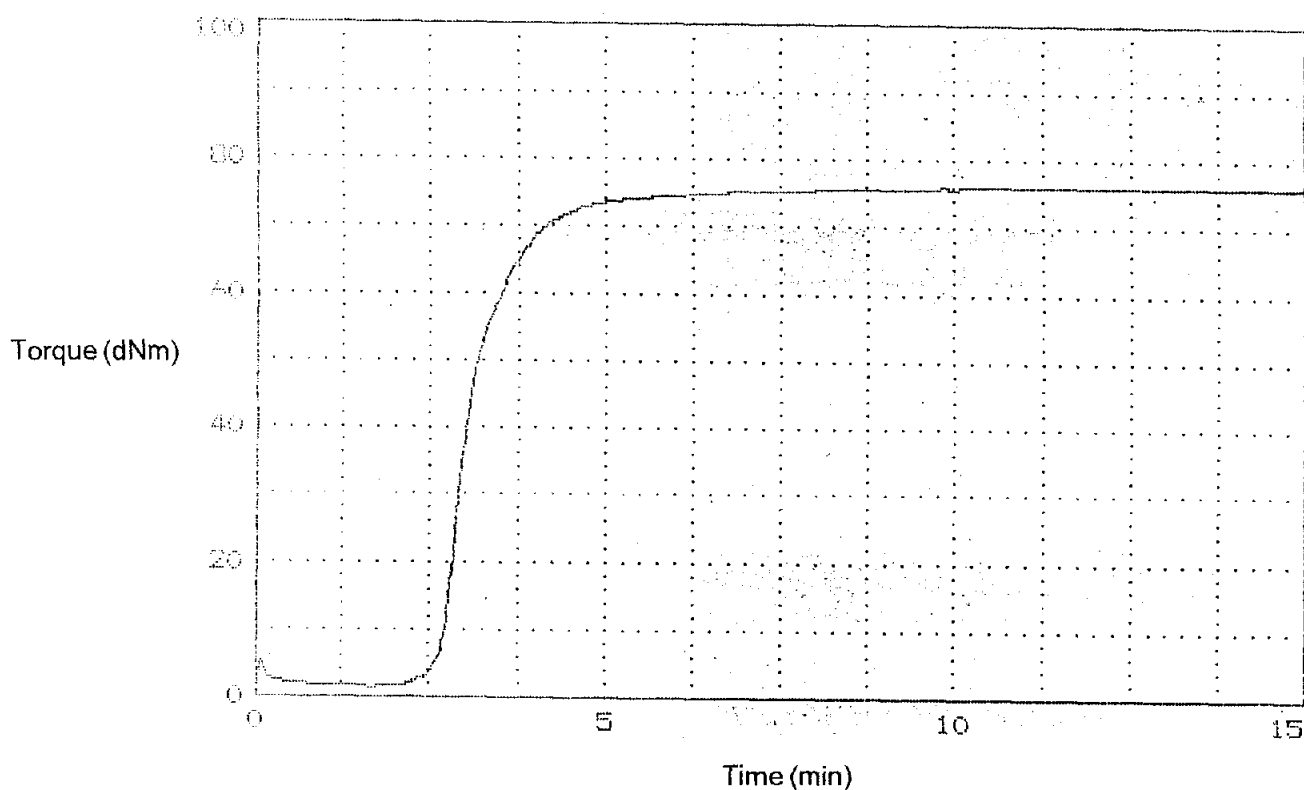
# Rheometer Summary Report

## Rubber Technology Division

Thursday August 9, 2001

COMPOUND ID: R-34-A	DESCRIPTION: DSS/KARTPAN	
CHART RANGE: 100 dNm	CHART SPEED: 15 min	DEGREE ARC: 3.00
DIE TYPE: MPC	TEMPERATURE: 150 °C	

MIX DATE	TEST ID	MAX TORQ	MIN TORQ	ts1	ts2	tc10	tc50	tc90	P/F
08/09/01	VUL-4	75.93	1.36	2.40	2.52	2.71	3.02	4.06	P



ภาพที่ ก-4 Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 4 :ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 2.52 นาที,ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 4.06 นาที

# Rheometer Summary Report

## Rubber Technology Division

Thursday August 9, 2001

COMPOUND ID: R-34-A

DESCRIPTION: DSS/KARTPAN

CHART RANGE: 100 dNm

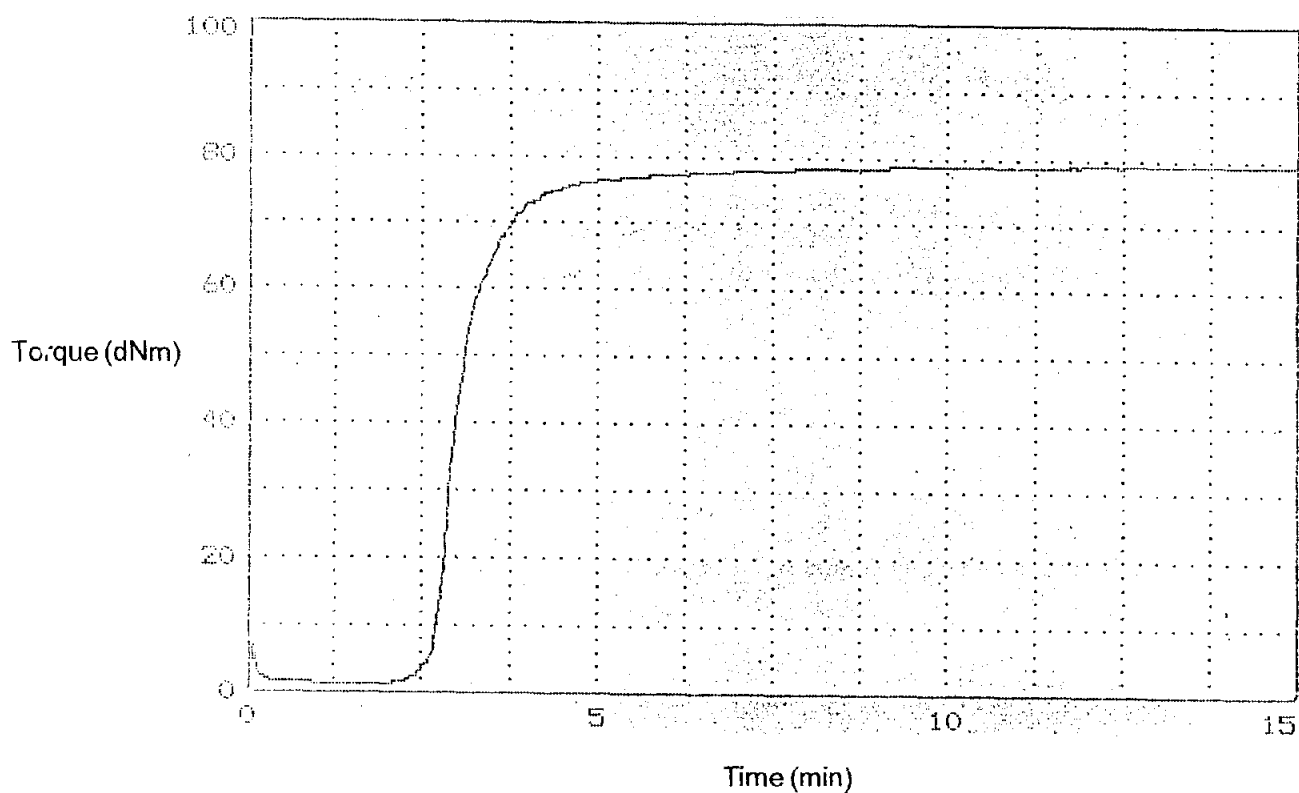
CHART SPEED: 15 min

DEGREE ARC: 3.00

DIE TYPE: MPC

TEMPERATURE: 150 °C

MIX DATE	TEST ID	MAX TORQ	MIN TORQ	ts1	ts2	tc10	tc50	tc90	P/F
08/09/01	VUL-5	79.18	1.15	2.40	2.54	2.71	3.00	3.96	P



ภาพที่ ก-5 Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 5: ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 2.54 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 3.96 นาที

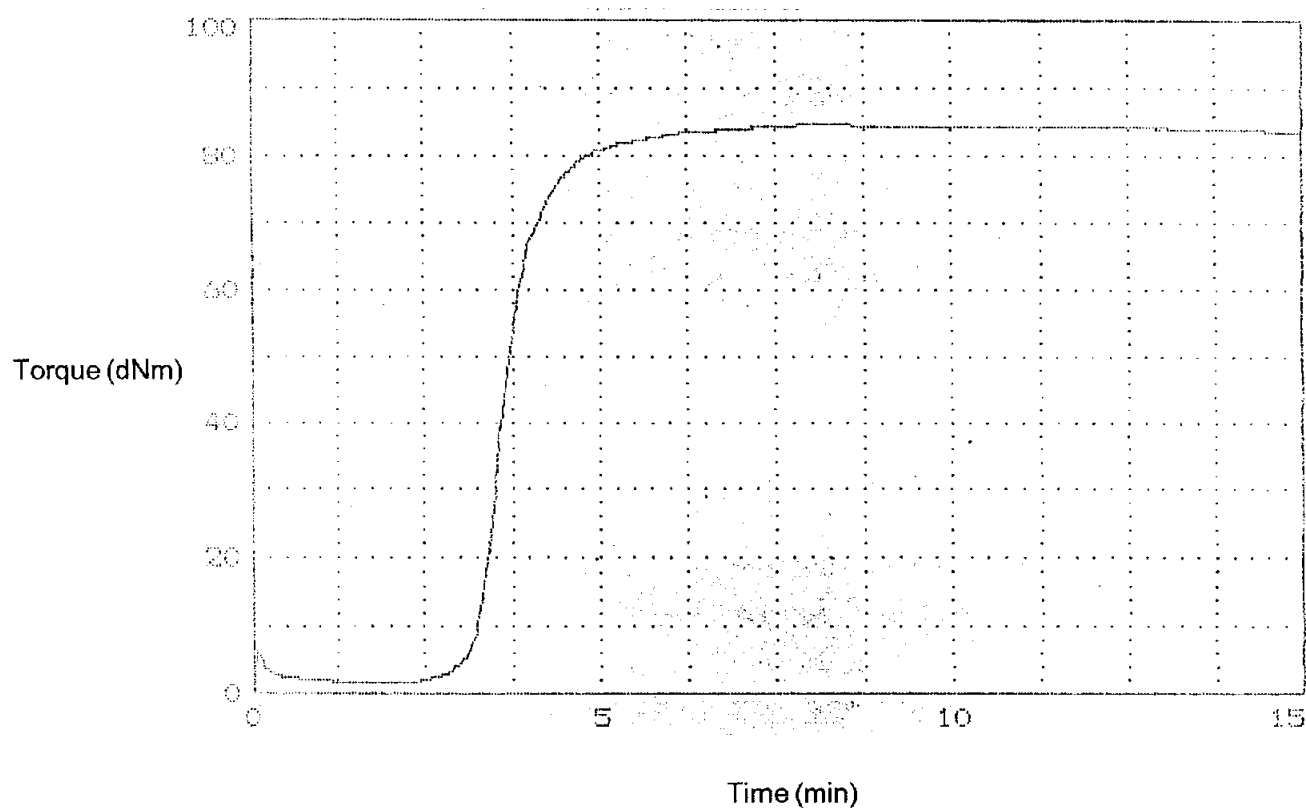
# Rheometer Summary Report

## Rubber Technology Division

Monday January 14, 2002

COMPOUND ID: R-34-A	DESCRIPTION: DSS/KARTPAN	
CHART RANGE: 100 dNm	CHART SPEED: 15 min	DEGREE ARC: 3.00
DIE TYPE: MPC	TEMPERATURE: 150 °C	

MIX DATE	TEST ID	MAX TORQ	MIN TORQ	ts1	ts2	tc10	tc50	tc90	P/F
01/14/02	VUL-6	84.84	1.51	2.79	2.98	3.27	3.63	4.48	P



ภาพที่ ก-6 Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 6: ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 2.98 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 4.48 นาที



# Rheometer Summary Report

## Rubber Technology Division

Monday September 9, 2001

COMPOUND ID: R-34-A

DESCRIPTION: DSS/KARTPAN

CHART RANGE: 100 dNm

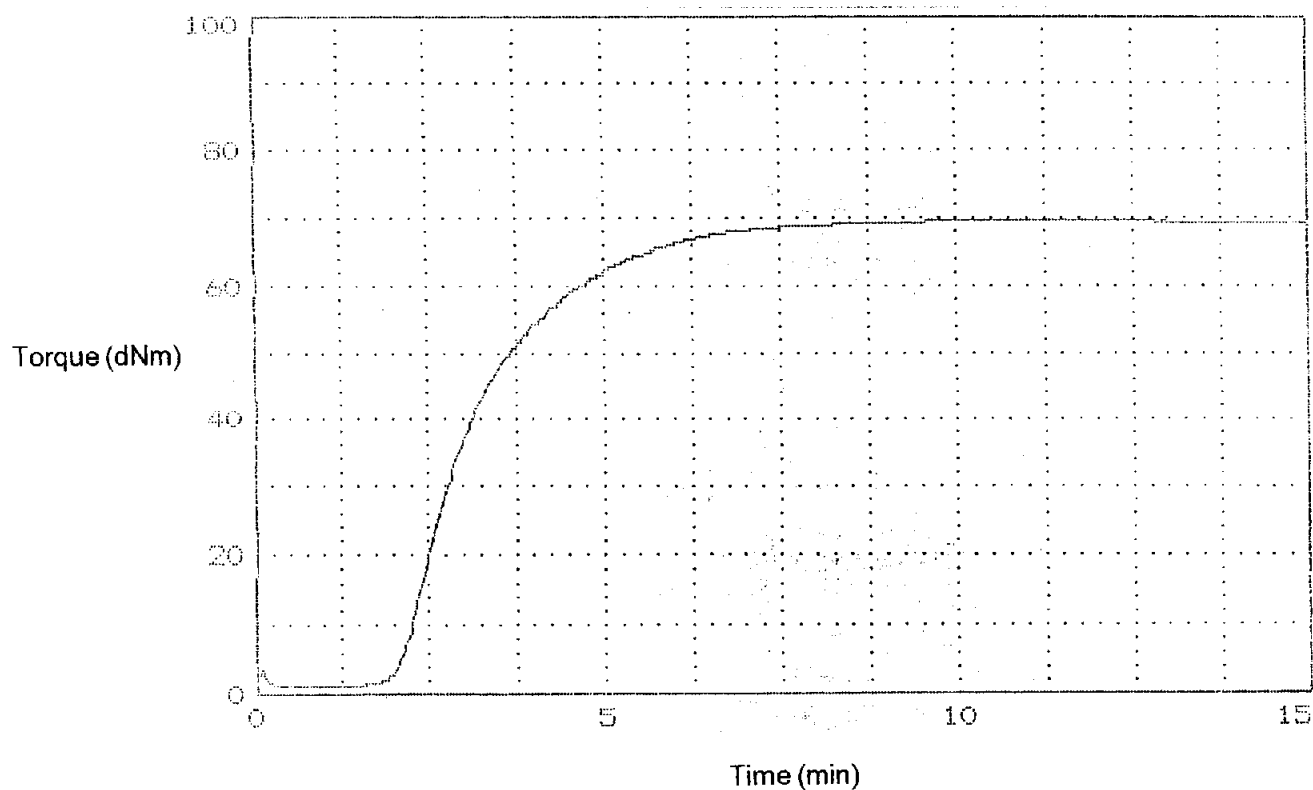
CHART SPEED: 15 min

DEGREE ARC: 3.00

DIE TYPE: MPC

TEMPERATURE: 150 °C

MIX DATE	TEST ID	MAX TORQ	MIN TORQ	ts1	ts2	tc10	tc50	tc90	P/F
09/09/01	VUL-7	69.49	1.00	1.90	2.04	2.21	2.96	5.17	P



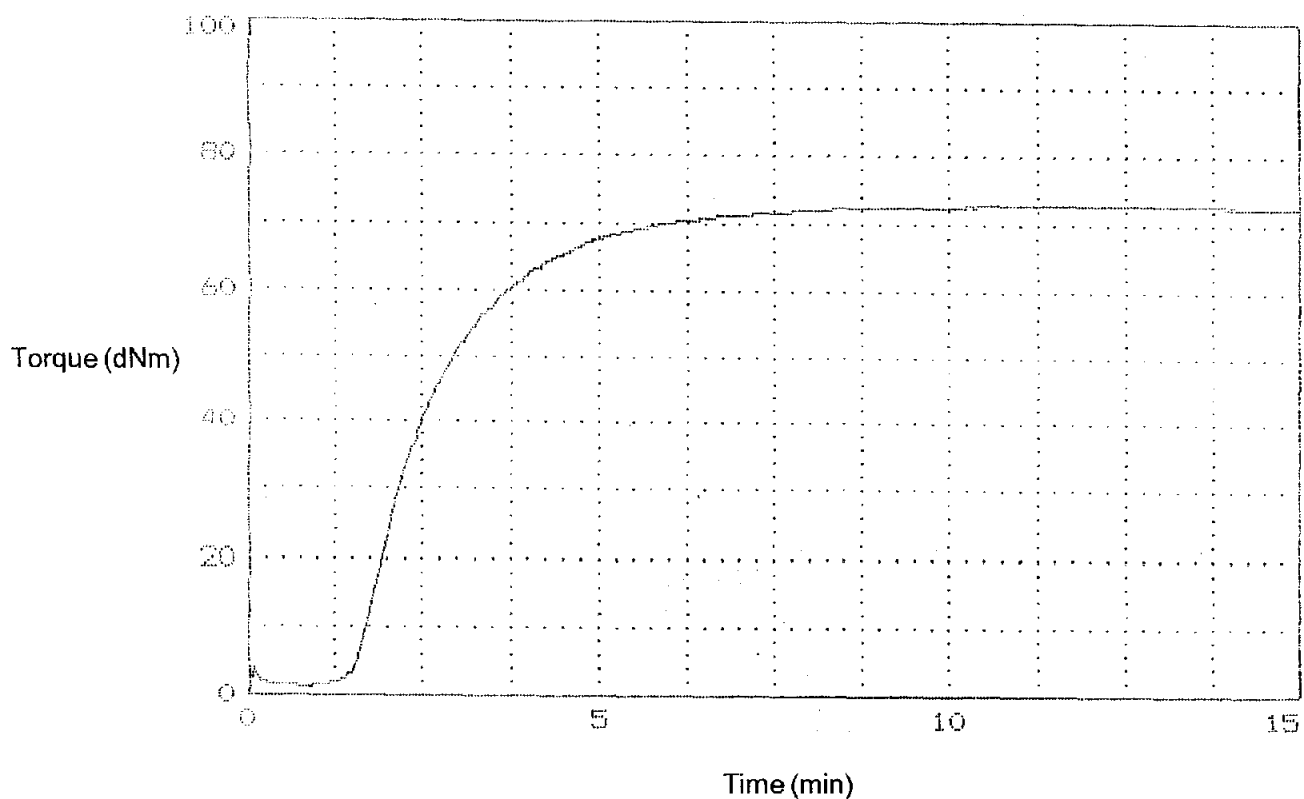
ภาพที่ ก-7 Rheometer curve ของคอมปาวด์ที่ 7 : ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 2.04 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 5.17 นาที

# Rheometer Summary Report

## Rubber Technology Division

Monday September 9, 2001

COMPOUND ID: R-34-A		DESCRIPTION: DSS/KARTPAN							
CHART RANGE: 100 dNm		CHART SPEED: 15 min				DEGREE ARC: 3.00			
DIE TYPE: MPC		TEMPERATURE: 150 °C							
MIXDATE	TEST ID	MAX TORQ	MIN TORQ	ts1	ts2	tc10	tc50	tc90	P/F
09/09/01	VUL-8	72.79	1.36	1.40	1.52	1.69	2.40	4.58	P



ภาพที่ ก-8 Rheometer curve ของคอมปาวด์ที่ 8: ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 1.52 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 4.58 นาที

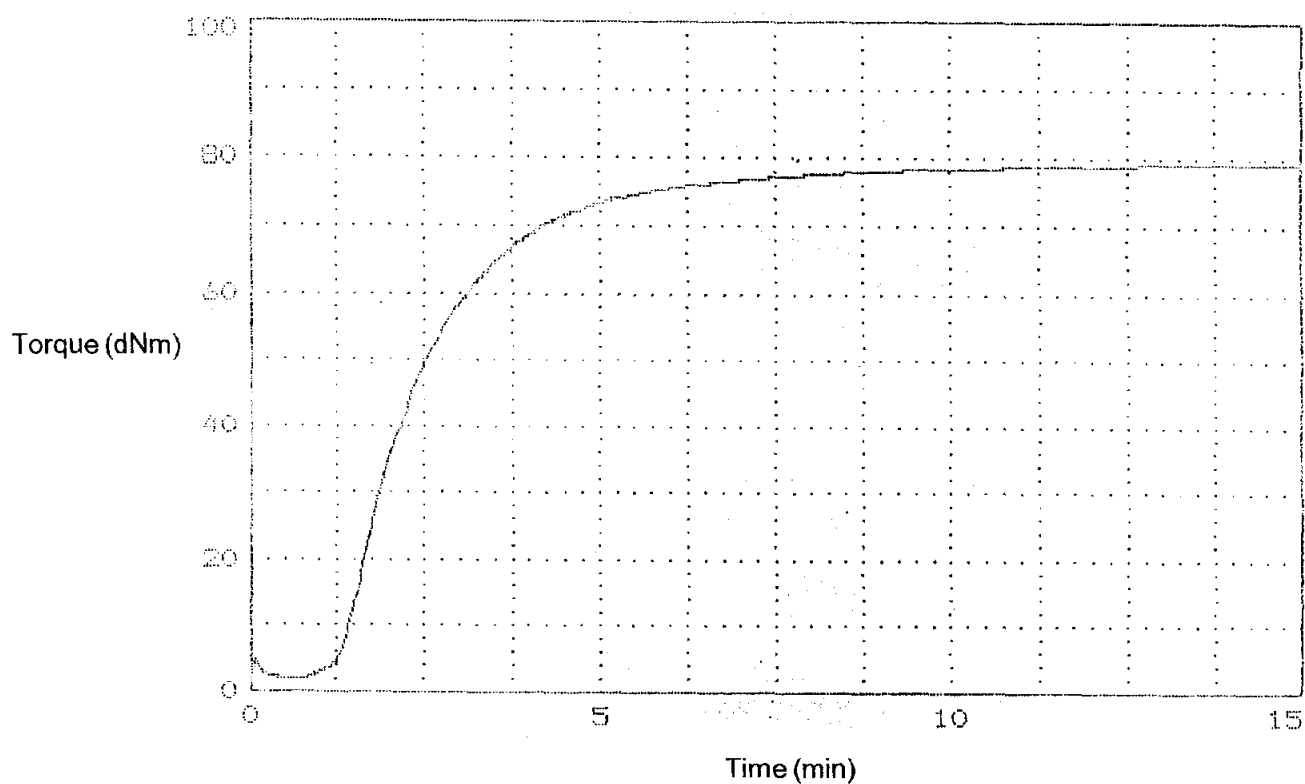
# Rheometer Summary Report

## Rubber Technology Division

Thursday November 15, 2001

COMPOUND ID: R-34-A	DESCRIPTION: DSS/KARTPAN	
CHART RANGE: 100 dNm	CHART SPEED: 15 min	DEGREE ARC: 3.00
DIE TYPE: MPC	TEMPERATURE: 150 °C	

MIX DATE	TEST ID	MAX TORQ	MIN TORQ	ts1	ts2	tc10	tc50	tc90	P/F
11/15/01	VUL-9	79.25	2.01	1.10	1.23	1.44	2.19	4.60	P



ภาพที่ ก-9 Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 9: ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 1.23 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 4.60 นาที

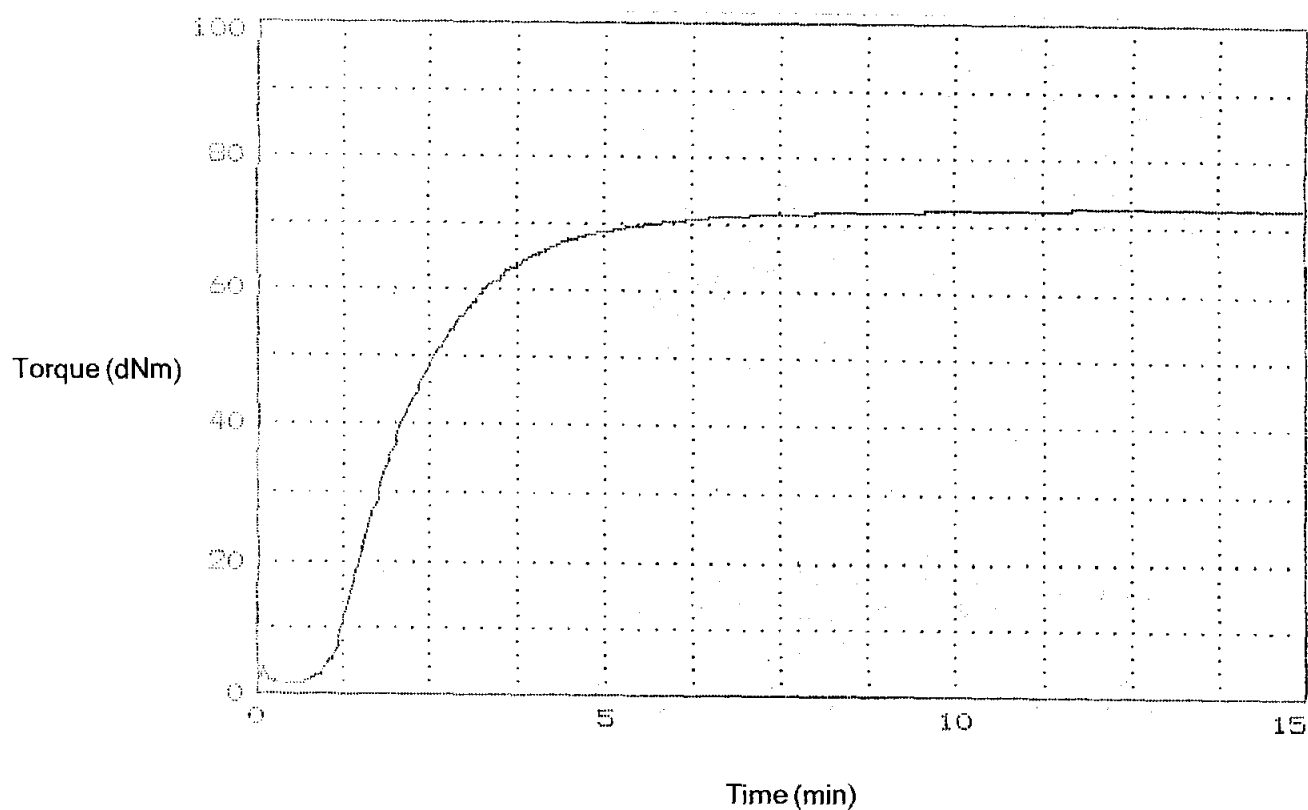
# Rheometer Summary Report

## Rubber Technology Division

Thursday November 15, 2001

COMPOUND ID: R-34-A	DESCRIPTION: DSS/KARTPAN	
CHART RANGE: 100 dNm	CHART SPEED: 15 min	DEGREE ARC: 3.00
DIE TYPE: MPC	TEMPERATURE: 150 °C	

MIX DATE	TEST ID	MAX TORQ	MIN TORQ	ts1	ts2	tc10	tc50	tc90	P/F
11/15/01	VUL-10	72.94	1.65	0.94	1.04	1.21	2.02	4.21	P



ภาพที่ ก -10 Rheometer curve ของคอมปาวด์ที่ 10: ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 1.04 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 4.21 นาที

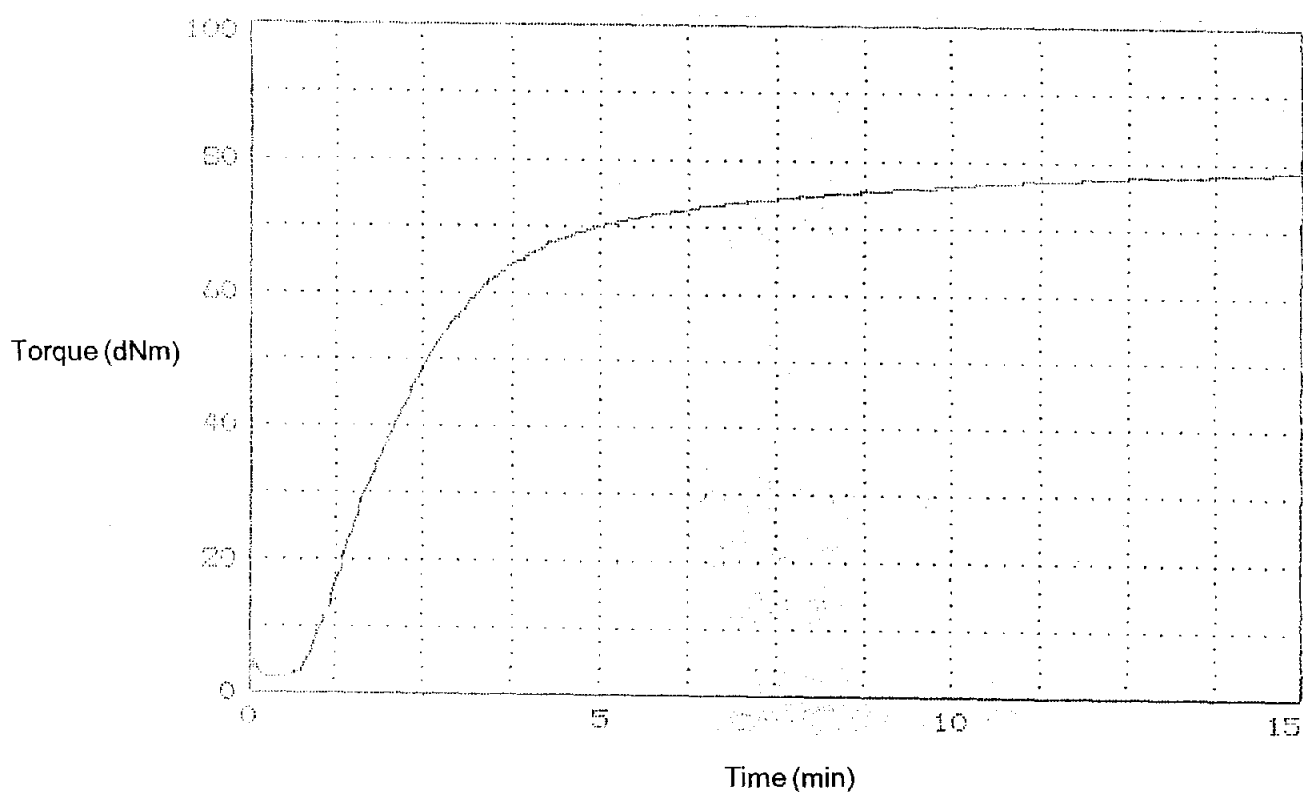
# Rheometer Summary Report

## Rubber Technology Division

Monday January 14, 2002

COMPOUND ID: R-34-A	DESCRIPTION: DSS/KARTPAN	
CHART RANGE: 100 dNm	CHART SPEED: 15 min	DEGREE ARC: 3.00
DIE TYPE: MPC	TEMPERATURE: 150 °C	

MIX DATE	TEST ID	MAX TORQ	MIN TORQ	ts1	ts2	tc10	tc50	tc90	P/F
01/14/02	VUL-11	78.75	2.37	0.77	0.88	1.04	2.13	5.50	P



ภาพที่ ก -11 Rheometer curve ของคอมเพาวด์ที่ 11 : ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 0.88 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 5.50 นาที

## ภาคผนวก ข

### ชื่อย่อของยาง

ชื่อย่อ	ยาง
<b>IR</b>	Polyisoprene rubber (synthetic)
<b>BR</b>	Polybutadiene rubber
<b>CR</b>	Polychloroprene rubber
<b>IIR</b>	Butyl rubber
<b>CIIR</b>	Chlorobutyl rubber
<b>BIIR</b>	Bromobutyl rubber
<b>NBR</b>	Nitrile rubber
<b>HNBR</b>	Hydrogenated nitrile rubber
<b>SBR</b>	Styrene-butadiene rubber
<b>EPM</b>	Ethylene propylene methylene rubber
<b>EPDM</b>	Ethylene propylene diene methylene rubber
<b>CM</b>	Chlorinated polyethylene rubber
<b>CSM</b>	Chlorosulfonated polyethylene rubber
<b>EVA</b>	Ethylene vinyl acetate copolymer rubber
<b>ACM</b>	Polyacrylate rubber
<b>FPM</b>	Fluorocarbon rubber
<b>MQ</b>	Silicone rubber
<b>VMQ</b>	Vinyl silicone rubber
<b>CO</b>	Epichlorohydrin homopolymer rubber
<b>ECO</b>	Epichlorohydrin copolymer rubber
<b>AFMU</b>	Nitrosofluororubber
<b>FZ and PZ</b>	Polyphosphazene rubber
<b>OT and EOT</b>	Polysulfide rubber
<b>GPO</b>	Propylene oxide rubber
<b>AU and EU</b>	Polyurethane rubber

## ภาคผนวก ค

### ชื่อย่อของสารตัวเร่ง

สารตัวเร่ง	ชื่อย่อ
<b>Guanidines</b>	
N,N -Diphenylguanidine	DPG
N,N-Diorthotolyl guandinine	DOTG
Orthotolyl biguandinine	OTBG
Triphenyl guandinine	TPG
<b>Thioureas</b>	
N,N -Dibutylthiourea	DBTU
1,3-Diethylthiourea	DETU
N,N -Diorthotolyl thiourea	DOTU
N,N-Diphenyl thiourea	DPTU
Ethylene thiourea	ETU
<b>Thiazoles</b>	
2-Mercaptobenzothiazole	MBT
Zinc-2-mercaptobezothiazole	ZMBT
2,2-Dibenzothiazyl disulfide	MBTS
2-(2,4-Dinitrophenyl) mercaptobenzothiazole	DMBT
4-Morpholinyl-2-benzothiazyl disulfide	MBSS
<b>Sulfenamides</b>	
2-(4-Morpholinylmercapto)benzothiazole	MOR(MBS/MOBS)
N-tert-Butyl-benzothiazyl sulfenamide	TBBS(NS)
N-Cyclohexyl-2-benzothiazyl sulfenamide	CBS
N,N-Diisopropyl-2-benzothiazyl sulfenamide	DIBS
N-Dimethyl benzothiazyl sulfenamide	DMBS
N-Diethyl benzothiazyl sulfenamide	DEBS
N,N-Dicyclohexyl-2-benzothiazyl sulfenamide	DCBS
<b>Aldehyde/amine condensates</b>	
Acetaldehyde/aniline	AA
Butyraldehyde/aniline	BA
Anhydroformaldehyde/aniline	MA

สารตัวเร่ง	ชื่อย่อ
Heptaldehyde/aniline	HA
Anhydroformaldehyde/ <i>p</i> -toluidine	MT
Hexamethylene tetramine	HEXA (HMT)
Dibutylamine	DBA
Cyclohexylethylamine	CEA
<b>Thiurams</b>	
Dimethyldiphenyl thiuram disulfide	MPTD (DDTS)
Dipentamethylene thiuram disulfide	DPTD (PTD)
Dipentamethylene thiuram tetrasulfide	DPTT
Dipentamethylene thiuram monosulfide	DPTM (PTM)
Tetrabutyl thiuram disulfide	TBUT(TBT/TBTS)
Tetraethyl thiuram disulfide	TETD (TET)
Tetramethyl thiuram monosulfide	TMTM
Tetramethyl thiuram disulfide	TMTD (TMT)
<b>Dithiocarbamates</b>	
Bismuth dimethyl dithiocarbamate	BMD(BDMC)
Copper dimethyl dithiocarbamate	CuDD(CuDMc)
Lead dimethyl dithiocarbamate	LDMC(PbDMC)
Piperidinium pentamethylene dithiocarbamate	PPD
Selenium diethyl dithiocarbamate	SEDC
Sodium dibutyl dithiocarbamate	SBUD
Sodium diethyl dithiocarbamate	SDED
Tellurium diethyl dithiocarbamate	TEDC
Zinc dibenzyl dithiocarbamate	ZBED(ZBEC/ZBD)
Zinc dibutyl dithiocarbamate	ZBUD(ZDBC)
Zinc diethyl dithiocarbamate	ZDC(ZDEC)
Zinc dimethyl dithiocarbamate	ZMD(ZDMC)
Zinc pentamethylene dithiocarbamate	ZPD
<b>Xanthates</b>	
Sodium isopropyl xanthate	SIX
Zinc dibutyl xanthate	ZBX
Zinc diisopropyl xanthate	ZIX