

เอกสารผลงานที่เสนอให้ประเมินเพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่ง  
นักวิทยาศาสตร์ 6ว

เรื่องที่ 2

การศึกษาสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตและฮาร์ดเคลย์ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล  
และสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติ

โดย

นายกาญจน์ สกุลแก้ว

นักวิทยาศาสตร์ 5

และผู้ร่วมดำเนินการ

นายอนุรักษ์ ศรีสมศักดิ์

นายช่างเครื่องกล 5

กลุ่มงานเทคโนโลยีผลิตภัณฑ์ 1

กองฟิสิกส์และวิศวกรรม

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม

เอกสารผลงานที่เสนอให้ประเมินเพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่ง  
นักวิทยาศาสตร์ 6ว

เรื่องที่ 2

การศึกษาศาสตร์ตัวเต็มแคลเซียมคาร์บอเนตและฮาร์ดเคลย์ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล  
และสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติ

เลขหมู่	๑๗ กพ
	๑๖ ๖๖
เลขทะเบียน	11260
วันที่	9, 12, 2561

โดย

นายกางพันธ์ สกุลแก้ว

นักวิทยาศาสตร์ 5

และผู้ร่วมดำเนินการ

นายอนุรักษ์ ศรีสมศักดิ์

นายช่างเครื่องกล 5

ด้วยอำนาจ
จาก
นางพงษ์ สกุลแก้ว

กลุ่มงานเทคโนโลยีผลิตภัณฑ์ 1

กองฟิสิกส์และวิศวกรรม

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม

## บทคัดย่อ

ในการศึกษาสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตและฮาร์ดเคลย์ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ชุดการทดลอง ดังนี้ การทดลองชุดที่ 1 เพิ่มปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตเพียงอย่างเดียว การทดลองชุดที่ 2 เพิ่มปริมาณของฮาร์ดเคลย์เพียงอย่างเดียวในสูตรของยางเช่นเดียวกันกับการทดลองในชุดที่ 1 โดยเพิ่มปริมาณขึ้นครั้งละ 50 ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก โดยเริ่มจาก 50 100 150 และ 200 ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนักตามลำดับ ส่วนการทดลองชุดที่ 3 ได้นำสารตัวเติมทั้งสองชนิดมาผสมกันที่อัตราส่วนต่างๆ กันดังนี้ แคลเซียมคาร์บอเนตต่อฮาร์ดเคลย์ 200:0 150:50 50:150 และ 0:200 ตามลำดับ

ผลการทดลองโดยรวม จากการทดลองชุดที่ 1 ชุดที่ 2 และชุดที่ 3 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของสารตัวเติม ค่าความแข็ง และค่าโมดูลัสที่ความยืดร้อยละ 100 มีแนวโน้มสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเพิ่มปริมาณและอัตราส่วนของฮาร์ดเคลย์ในการทดลองชุดที่ 2 และชุดที่ 3 แนวโน้มของสมบัติเชิงกลดังกล่าวข้างต้นจะสูงขึ้น และสูงกว่าการเพิ่มปริมาณและอัตราส่วนของแคลเซียมคาร์บอเนตในการทดลองชุดที่ 1 และชุดที่ 3 ในทางกลับกันสมบัติด้านความแข็งแรง(strength) ได้แก่ ความต้านแรงดึง ความยืดเมื่อขาด และความต้านทานแรงฉีกขาด มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณและอัตราส่วนของฮาร์ดเคลย์ที่เพิ่มขึ้น ส่วนการยุบอยู่ตัว มีแนวโน้มสูงขึ้น สำหรับสมบัติการวัลคาไนซ์ พบว่าการเพิ่มปริมาณและอัตราส่วนของฮาร์ดเคลย์ในการทดลองชุดที่ 2 และชุดที่ 3 มีแนวโน้มให้ระยะเวลาในการเริ่มคงรูป(scorch time) สั้น แต่ระยะเวลาคงรูป(cure time) นานกว่าการเพิ่มปริมาณและอัตราส่วนของแคลเซียมคาร์บอเนตในการทดลองชุดที่ 1 และชุดที่ 3 สำหรับอัตราการวัลคาไนซ์(cure rate) การเพิ่มปริมาณและอัตราส่วนของแคลเซียมคาร์บอเนตในการทดลองชุดที่ 1 และชุดที่ 3 ให้อัตราการวัลคาไนซ์สูงกว่าการเพิ่มปริมาณและอัตราส่วนของฮาร์ดเคลย์ในการทดลองชุดที่ 2 และชุดที่ 3

## 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	1
บทที่ 2      ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	2
สารตัวเติมสำหรับยาง	2
2.1 ชนิดของสารตัวเติม	2
2.2 สมบัติของสารตัวเติม	8
บทที่ 3      วัสดุ อุปกรณ์เครื่องมือและวิธีดำเนินการ	12
3.1 วัสดุและสารเคมี	12
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	13
3.3 วิธีดำเนินการ	14
บทที่ 4      ผลการทดลอง	16
บทที่ 5      วิเคราะห์ผลและสรุปผลการศึกษาทดลอง	29
กิตติกรรมประกาศ	32
บรรณานุกรม	33
ภาคผนวก ก      Rheometer curve ของยางคอมปาวด์สูตรที่ 1-1 ถึง 3 -5	34

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ตัวอย่างและสมบัติบางประการของเขม่าดำ	4
2	ตารางแสดงผลการทดลองของสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตและฮาร์ดเคลย์ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติ	16

## สารบัญภาพ

ภาพที่	คำบรรยายใต้รูปภาพ	หน้า
1	เตาเผาสำหรับการผลิตเซมาต์ชนิดเฟอร์โรน	3
2	หมู่ฟังก์ชันแนลที่พื้นผิวของอนุภาคเซมาต์	9
3	โครงสร้างของอนุภาคเซมาต์ ซึ่งยึดเกาะกันเป็นกลุ่ม (ซ้าย) และ ภาพของอนุภาคเซมาต์ ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (ขวา) ขีด — เท่ากับ 10 นาโนเมตร	10
4	รูปร่างของอนุภาคสารตัวเติมอนินทรีย์	10
1-1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม ( $\text{CaCO}_3$ / Hard clay) กับค่าความแข็ง	17
1-2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม ( $\text{CaCO}_3$ / Hard clay) กับค่าความ ต้านแรงดึง	17
1-3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม ( $\text{CaCO}_3$ / Hard clay) กับค่าโมดูลัส ที่ความยืดร้อยละ 100	18
1-4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม ( $\text{CaCO}_3$ / Hard clay) กับค่าความ ยึดเมื่อขาด	18
1-5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม ( $\text{CaCO}_3$ / Hard clay) กับค่าการ ยุบอยู่ตัว	19
1-6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม ( $\text{CaCO}_3$ / Hard clay) กับค่าความ ต้านทานแรงฉีกขาด	19
1-7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม ( $\text{CaCO}_3$ / Hard clay) กับระยะ เวลาเริ่มคงรูป ระยะเวลาคงรูป และ cure rate index	20
2-1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม ( $\text{CaCO}_3$ / Hard clay) กับค่าความแข็ง	21
2-2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม ( $\text{CaCO}_3$ / Hard clay) กับค่าความ ต้านแรงดึง	21
2-3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม ( $\text{CaCO}_3$ / Hard clay) กับค่าโมดูลัส ที่ความยืดร้อยละ 100	22
2-4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม ( $\text{CaCO}_3$ / Hard clay) กับค่าความ ยึดเมื่อขาด	22
2-5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม ( $\text{CaCO}_3$ / Hard clay) กับค่าการ ยุบอยู่ตัว	23
2-6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม ( $\text{CaCO}_3$ / Hard clay) กับค่าความ ต้านทานแรงฉีกขาด	23
2-7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม ( $\text{CaCO}_3$ / Hard clay) กับระยะ เวลาเริ่มคงรูป ระยะเวลาคงรูป และ cure rate index	24
3-1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม ( $\text{CaCO}_3$ / Hard clay) กับค่าความแข็ง	25
3-2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม ( $\text{CaCO}_3$ / Hard clay) กับค่าความ ต้านแรงดึง	25

ภาพที่	คำบรรยายได้รูปภาพ	หน้า
3-3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม ( $\text{CaCO}_3$ / Hard clay) กับค่าโมดูลัสที่ความยืดร้อยละ 100	26
3-4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม ( $\text{CaCO}_3$ / Hard clay) กับค่าความยืดเมื่อขาด	26
3-5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม ( $\text{CaCO}_3$ / Hard clay) กับค่าการยุบอยู่ตัว	27
3-6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม ( $\text{CaCO}_3$ / Hard clay) กับค่าความต้านทานแรงเฉือนขาด	27
3-7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม ( $\text{CaCO}_3$ / Hard clay) กับระยะเวลาเริ่มคงรูป ระยะเวลาคงรูป และ cure rate index	28
ก -1	Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 1-1 : ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 3.29 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 5.73 นาที	34
ก -2	Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 1-2 : ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 2.50 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 5.11 นาที	35
ก -3	Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 1-3 : ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 1.86 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 4.25 นาที	36
ก -4	Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 1-4 : ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 1.71 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 3.71 นาที	37
ก -5	Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 2-1 : ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 3.23 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 3.35 นาที	38
ก -6	Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 2-2 : ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 4.50 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 8.85 นาที	39
ก -7	Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 2-3 : ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 3.17 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 8.11 นาที	40
ก -8	Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 2-4 : ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 0.56 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 9.42 นาที	41
ก -9	Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 3 -1 : ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 1.71 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 3.71 นาที	42
ก -10	Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 3-2: ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 2.07 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 4.47 นาที	43
ก -11	Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 3 -3 : ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 2.40 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 5.65 นาที	44
ก -12	Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 3 -4 : ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 0.67 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 6.70 นาที	45
ก -13	Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 3 -5 : ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 0.56 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 9.42 นาที	46

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ปัญหาและที่มาของการศึกษาทดลอง

ในปัจจุบันตลาดของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติมีการเติบโตสูงมากพอสมควร ถึงแม้ว่าจะไม่มากเท่ากับตลาดของผลิตภัณฑ์ประเภทอื่นๆ แต่ตลาดของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติมีการเติบโตอย่างต่อเนื่องและยั่งยืน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศที่กำลังพัฒนาซึ่งมีความต้องการใช้ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติค่อนข้างสูง ปัจจัยหนึ่งที่มีส่วนส่งเสริมให้ตลาดของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติเติบโตอย่างต่อเนื่อง นอกจากในเรื่องของคุณสมบัติพิเศษเหนือกว่ายางสังเคราะห์แล้ว ในเรื่องของราคาก็ถือว่าเป็นแรงจูงใจอย่างหนึ่งที่ทำให้ผู้บริโภคมาใช้ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นในการศึกษาค้นคว้าจึงได้ศึกษาผลของการใช้สารตัวเติมสำหรับยางธรรมชาติที่มีราคาประหยัด ง่ายต่อการจัดหาและสามารถผลิตได้ภายในประเทศ ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนตและฮาร์ดเคลย์ ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการวัลคาไนซ์ของยาง เพื่อใช้แนวทางเลือกเบื้องต้นอีกแนวทางหนึ่งในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติให้มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ และมีราคาประหยัด ซึ่งจะส่งผลโดยรวมต่อการเติบโตของตลาดผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติอีกทางหนึ่งด้วย

#### 1.2 วัตถุประสงค์

1.1.1 เพื่อเปรียบเทียบผลของสมบัติเชิงกลของยาง ได้แก่ ค่าความแข็ง ความต้านแรงดึง ความยืดเมื่อขาด โมดูลัสที่ความยืดร้อยละ 100 ความต้านทานแรงฉีกขาด และค่าการยุบอยู่ตัว ซึ่งได้จากการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนผสมของสารตัวเติม ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนตและฮาร์ดเคลย์

1.1.2 เพื่อศึกษาสมบัติวัลคาไนซ์ของยาง ซึ่งได้จากการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนผสมระหว่างสารตัวเติมทั้งสองชนิดด้วยเครื่อง Oscillating Disk Rheometer (ODR)

#### 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.2.1 ศึกษา ทดลองบดผสมสารตัวเติมทั้งสองชนิดในอัตราส่วนผสมต่างๆ กันกับยางและสารเคมียางรวมทั้งหมด 13 สูตร

1.2.2 ศึกษา ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางที่ได้จากการทดลองรวมทั้งหมด 13 สูตร

1.2.3 วิจัยและสรุปผลของการศึกษาทดลอง

#### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.4.1 นำผลจากการศึกษา ทดลองไปเป็นข้อมูลเบื้องต้น ในการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนผสมระหว่างสารตัวเติมในการออกสูตรยางให้มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการนำไปใช้งานในด้านต่างๆ

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

#### สารตัวเติมสำหรับยาง

การใช้สารตัวเติม (filler) กับยางนั้นนอกจากกล่าวได้ว่าเริ่มต้นขึ้นมาพร้อม ๆ กับการที่มนุษย์รู้จักนำยางมาใช้ประโยชน์เลยทีเดียว จนเผ่าพื้นเมืองบริเวณพื้นที่แถบลุ่มแม่น้ำอเมซอนในสมัยที่ถูกครอบครองโดยชาวสเปนรู้จักใช้ผงสีดำ (black powder) ใส่ลงไปในน้ำยางเพื่อรักษาสภาพของน้ำยางให้ทนต่อแสงแดดได้ดีขึ้น ต่อมาภายหลังจากที่ Thomas Hancock ได้ประดิษฐ์เครื่องบดผสมยางหรือเครื่อง “pickle” การใช้สารตัวเติมกับยางก็นิยมใช้กันแพร่หลายมากขึ้น สารตัวเติมที่นิยมใช้ในสมัยนั้นได้แก่ หินปูนขาว (limestone) แบริต์ ดินขาว เป็นต้น ด้วยเหตุผลเพียงเพื่อว่าทำให้น้ำยางมีเนื้อมากขึ้น ลดต้นทุนในการผลิตลงและช่วยให้น้ำยางที่ได้หลังจากการวัลคาไนซ์แล้วไม่หดตัว สำหรับสารให้สีที่ใช้ก็มีเพียง zinc oxide ซึ่งให้สีขาว และแลมป์แบล็ค (lampblack) (เตรียมได้จากการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิงปิโตรเลียมหรือน้ำมันที่ได้จากการกลั่นผ่านหินในที่มีอากาศจำกัด ผลที่เกิดจากการเผาไหม้จะผ่านไปยังห้องเพื่อเก็บเขม่าสีดำที่เกิดขึ้น) ซึ่งให้สีดำ โดยเฉพาะแลมป์แบล็คได้มีรายงานการศึกษาผลของการใช้ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของยาง กล่าวคือทำให้น้ำยางมีสมบัติแข็งตึงมากขึ้น ต่อมาในปี ค.ศ. 1904 S.C.Mote ได้รายงานการค้นพบผลของการเสริมแรงของเขม่าดำที่มีต่อสมบัติเชิงกลของยาง ซึ่งให้ความต้านแรงดึงสูงถึง 294 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูงมาก แต่ก็เป็นที่น่าเสียดายเพราะในสมัยนั้นยังไม่มีความต้องการใช้น้ำยางที่มีการเสริมแรงอย่างจริงจัง จึงทำให้การค้นพบของเขาหยุดชะงักไป อย่างไรก็ตามนับเป็นจุดเริ่มต้นสำคัญต่อการศึกษา ค้นพบสารตัวเติมชนิดอื่น ๆ ในเวลาต่อมาและมีการนำไปใช้กับยางอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

การใช้สารตัวเติมผสมกับยาง นอกจากเป็นการใช้เพื่อเพิ่มปริมาณของเนื้อยางให้มากขึ้นแล้วยังช่วยปรับสมบัติเชิงกลของยางให้ดียิ่งขึ้น เพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้า ลดการพองตัวในน้ำมันและยืดอายุการใช้งานของยางให้นานขึ้นอีกด้วย

#### 2.1 ชนิดของสารตัวเติม

สารตัวเติมแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดตามสมบัติและวัตถุประสงค์ในการนำมาใช้ผสมกับยางดังนี้

1) สารตัวเติมชนิดเสริมแรง (reinforcing fillers) ได้แก่ เขม่าดำ และ ซิลิกา สารตัวเติมชนิดนี้เมื่อใช้ผสมกับยางแล้วจะช่วยปรับสมบัติด้านต่าง ๆ ของยางให้ดียิ่งขึ้น เช่น ความต้านแรงดึง ความต้านทานแรงฉีกขาด ความต้านทานการสึกหรอ และการนำไฟฟ้าดีขึ้น เป็นต้น

2) สารตัวเติมชนิดกึ่งเสริมแรง (semi-reinforcing fillers) ได้แก่ สารประกอบพวกซิลิเกต เช่น อลูมิเนียมซิลิเกต และแมกนีเซียมซิลิเกต เป็นต้น

3) สารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง (non-reinforcing fillers หรือ diluent) ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต และเคลย์ (clay) ซึ่งคุณภาพต่าง ๆ เป็นต้น สารตัวเติมชนิดนี้มีราคาค่อนข้างถูก เพียงกิโลกรัมละ 2-5 บาท จึงนิยมใช้ในปริมาณมากเพื่อเพิ่มเนื้อยางให้มากขึ้น

### 2.1.1 เขม่าดำ

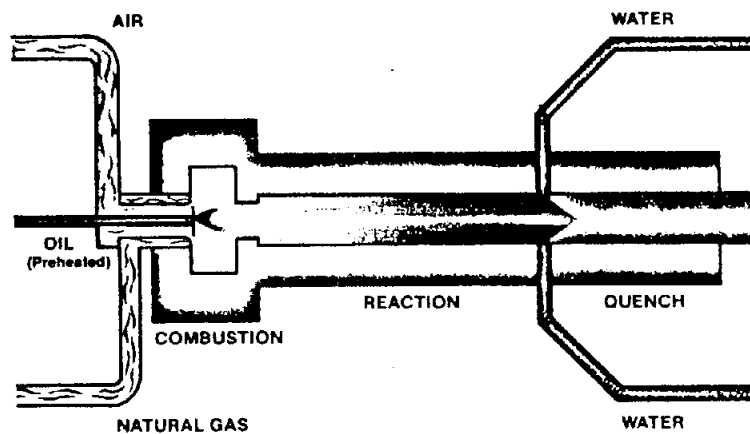
เขม่าดำ เป็นสารซึ่งมีลักษณะเป็นผงสีดำประกอบด้วยธาตุคาร์บอนประมาณร้อยละ 90-99 ส่วนที่เหลือเป็นกำมะถัน ออกซิเจนและไฮโดรเจน ได้จากการเผาไหม้ของสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่สมบูรณ์ในประเทศสหรัฐอเมริกาประมาณร้อยละ 64 ของเขม่าดำที่ผลิตได้ทั้งหมด ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตล้อยาง ร้อยละ 10 ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตยางขึ้นส่วนรถยนต์ เช่น สายพาน ปะเก็นยาง ท่อยางชนิดต่างๆ ภายในห้องเครื่อง ร้อยละ 20 ใช้ในผลิตภัณฑ์ยางชนิดต่างๆ เช่น ยางรองฐานของอาคาร ท่อลม ยาง ข้อต่อชนิดต่างๆ เป็นต้น ส่วนที่เหลือประมาณร้อยละ 6 ใช้ในอุตสาหกรรมหมึกพิมพ์ กระดาษ และพลาสติก เขม่าดำสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดตามกระบวนการผลิตดังนี้

#### 1) แชนเนลแบล็ก (channel black)

เขม่าดำชนิดนี้เตรียมได้จากการเผาก๊าซธรรมชาติซึ่งประกอบด้วย ก๊าซมีเทน และ อีเทน เป็นส่วนใหญ่ โดยเผาให้เกิดเปลวไฟสีเหลืองไปตกกระทบบนผิวหน้าของแผ่นเหล็ก (channel iron) ภายในเตาเผาจนเกิดผงถ่านซึ่งสามารถกวาดออกมาได้ ปริมาณและสมบัติของแชนเนลแบล็กขึ้นอยู่กับส่วนประกอบและความดันของก๊าซธรรมชาติ รูปร่างและระยะห่างของเปลวไฟ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับปริมาณของอากาศที่ใช้ด้วย อนุภาคของแชนเนลแบล็กมีขนาดประมาณ 10 ถึง 30 นาโนเมตร ขนาดของอนุภาคยิ่งเล็กลง ความดำก็ยิ่งเพิ่มขึ้น ในการผลิตเขม่าดำชนิดนี้จะต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง ทำให้มีราคาแพง จึงมีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมยางน้อยมาก

#### 2) เฟอร์เนชแบล็ก (furnace black)

สามารถเตรียมได้จากการเผาก๊าซธรรมชาติหรือน้ำมัน (น้ำมันที่ได้จากส่วนล่างของหอกลั่น) ที่พ่นออกมาเป็นฝอยละเอียดเพื่อผสมกับอากาศที่หิวจัดในเตาเผา(ภาพที่ 1) โดยควบคุมปริมาณของอากาศที่ผ่านเข้าไป ทำให้สามารถเตรียมเขม่าดำที่มีขนาดของอนุภาคต่างๆกันได้ เขม่าดำชนิดนี้มีการใช้มากที่สุด ในอุตสาหกรรมยาง



ภาพที่ 1 เตาเผาสำหรับการผลิตเขม่าดำชนิดเฟอร์เนช

### 3) เทอร์มอลแบล็ก (Thermal black)

เทอร์มอลแบล็กเตรียมได้จากการทำให้ก๊าซธรรมชาติหรือก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่สลายตัวด้วยความร้อนในสภาวะไร้อากาศ เขม่าดำชนิดนี้มีขนาดของอนุภาคใหญ่ที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเขม่าดำทั้งสองชนิดที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

การจำแนกชนิดของเขม่าดำในอดีต จะจำแนกตามประสิทธิภาพของเขม่าดำเมื่อใช้ร่วมกับยาง เช่น CF(Conductive Furnace) HAF(High Abrasive Furnace) ซึ่งชื่อเหล่านี้บางครั้งก็คลุมเครือ และสมบัติของเขม่าดำก็ไม่ได้เป็นไปตามข้อกำหนดที่ให้ไว้ ดังนั้นสมาคมทดสอบวัสดุของประเทศสหรัฐอเมริกา (American Society for Testing Materials หรือ ASTM) ได้เสนอวิธีการจำแนกชนิดของเขม่าดำขึ้นใหม่ โดยใช้สัญลักษณ์เป็นตัวอักษร 4 ตัว อักษรตัวแรกจะบอกถึงผลของเขม่าดำชนิดนั้นที่มีต่ออัตราการวัลคาไนซ์ของยาง โดยอักษร **N** แทน อัตราการวัลคาไนซ์ปกติ (Normal) และอักษร **S** แทนอัตราการวัลคาไนซ์ช้า (Slow) ส่วนอักษรตัวที่สองเป็นตัวเลขตั้งแต่ 0 – 9 ซึ่งบ่งชี้พื้นที่ผิวหน้าของอนุภาคเขม่าดำ เลข 0 หมายถึงเขม่าดำชนิดนั้นมีพื้นที่ผิวหน้ามากกว่า 150 ตารางเมตรต่อน้ำหนักหนึ่งกรัม เลข 9 หมายถึงเขม่าดำชนิดนั้นมีพื้นที่ผิวหน้าระหว่าง 0 – 10 ตารางเมตรต่อน้ำหนักหนึ่งกรัม สำหรับตัวอักษรตัวที่สามและสี่เป็นตัวเลขตั้งแต่ 0 – 9 เช่นเดียวกัน (ตารางที่ 1) แต่เป็นตัวเลขที่ตั้งขึ้นมาลอยๆ (arbitrarily assigned digits)

ตารางที่ 1 ตัวอย่างและสมบัติบางประการของเขม่าดำ

Abbreviation	Unsystematic common name	Particle size (nm)	Surface area (m <sup>2</sup> /g)	ASTM D1765 designation <sup>a</sup>
SAF	Superabrasion furnace	11-19	125-155	N110
ISAF	Intermediate abrasion furnace	20-25	110-140	N220
CF	Conductive furnace	20-25	110-140	N293
SCF	Superconductive furnace	20-25	110-140	N294
HAF	High abrasion furnace	26-30	70-90	N330
HAF-LS	High abrasion furnace, low structure	26-30	75-105	N326
HAF-HS	High abrasion furnace, high structure	26-30	80-100	N347
EPC	Easy processing channel	26-30	95-115	S300
FF	Fine furnace	31-39	43-69	N440
FEF	Fine extrusion furnace	40-48	36-52	N550
GPF	General-purpose furnace	49-60	26-42	N650
SRF	Semireinforcing furnace	61-100	17-33	N762
MT	Medium thermal	201-500	6-9	N990

<sup>a</sup> N, normal curing, neutral, or basic blacks; first digit, particle size indication; second and third digits, arbitrary designations.

### 2.1.2 ซิลิกา

ซิลิกา จัดเป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรงอีกชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กันมากสำหรับผลิตภัณฑ์ยางที่ไม่ต้องการให้มีสีดำ เช่น ยางพื้นรองเท้าผ้าใบ ยางพื้นรองเท้าฟองน้ำ เป็นต้น ซิลิกาสามารถแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังนี้

#### 1) ซิลิกาบด (ground mineral silica)

ได้จากการบดซิลิคอนไดออกไซด์ (silicon dioxide) แล้วนำไปผ่านตะแกรงร่อนขนาด 200 mesh แบ่งเป็นชั้นคุณภาพต่างๆ ตามความละเอียดของอนุภาค ซิลิกาชนิดนี้มีราคาถูกและไม่ไวต่อปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ของยาง สามารถใช้เป็นสารตัวเติมสำหรับผลิตภัณฑ์ยางทนอุณหภูมิสูงได้ดี

#### 2) Kieselguhr หรือ diatomaceous earth

ได้จากซากของสัตว์ทะเล เช่น หอยชนิดต่างๆ ซึ่งทับถมกันมานานหลายล้านปี ซากเหล่านี้ประกอบด้วยซิลิกาที่มีน้ำปนอยู่ถึงร้อยละ 60 ดังนั้นในการแยกเอาซิลิกาออกจากซากสัตว์เหล่านี้จะต้องนำมาผ่านกระบวนการให้ความร้อน เพื่อแยกเอาน้ำออก และผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายจะมีซิลิกาอยู่ในช่วงร้อยละ 80 – 90 ซิลิกาชนิดนี้สามารถใช้เป็นสารตัวเติมสำหรับผลิตภัณฑ์ยางทนอุณหภูมิสูงได้เช่นเดียวกัน

#### 3) ซิลิกาจากการตกตะกอน (precipitated silica)

ซิลิกาชนิดนี้มีน้ำปนอยู่ประมาณร้อยละ 10–14 และมีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 10–40 นาโนเมตร นิยมใช้ผสมกับยางเพื่อช่วยให้ยางมีสมบัติเชิงกลดีขึ้นและช่วยให้ยางมีสีอันสวยงามมากขึ้น เมื่อเติมใส่สารให้สีลงไป เมื่อใช้ร่วมกับเซมาดำจะช่วยเพิ่มแรงยึดเกาะระหว่างยางกับผ้าใบและทนทานต่อแรงฉีกขาดได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามซิลิกาชนิดนี้จะหน่วงปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ของยางให้ช้าลงทำให้จะต้องเพิ่มปริมาณของสารตัวเร่งในสูตรของยางมากขึ้น หรือจะต้องเติมสารพวกไกลคอลหรือเอมีนลงไปด้วยเพื่อช่วยเร่งให้ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เร็วขึ้น

#### 4) ซิลิกาจากการเผาไหม้ (fume silica or pyrogenic silica)

ซิลิกาชนิดนี้มีน้ำปนอยู่ประมาณร้อยละ 2 ซึ่งเตรียมได้จากการเผาไหม้สารประกอบซิลิกาที่ระเหยได้ ซิลิกาที่ได้มีอนุภาคละเอียดมาก นิยมใช้เป็นสารตัวเติมสำหรับยางซิลิโคนเพื่อช่วยเสริมแรงให้ยางมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น

### 2.1.3 สารประกอบซิลิเกต

ได้แก่ อลูมิเนียมซิลิเกต แมกนีเซียมซิลิเกต สารตัวเติมชนิดนี้ไม่ไวต่อปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ นิยมใช้เป็นสารตัวเติมสำหรับผลิตภัณฑ์ยางทนความร้อน เช่น ปะเก็นยางสำหรับหม้อหนึ่งไอน้ำ (autoclave) เป็นต้น

### 2.1.4 แคลเซียมคาร์บอเนต

แคลเซียมคาร์บอเนต หรือ **whiting** จัดเป็นสารตัวเติมที่นิยมใช้มากที่สุดทั้งในอุตสาหกรรมยาง สี และพลาสติก เนื่องจากมีราคาค่อนข้างถูกและช่วยให้ผลิตภัณฑ์ยางที่ได้มีสมบัติดี

แคลเซียมคาร์บอเนตสามารถแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆได้ดังนี้

#### 1) หินปูนขาวบด (ground limestone)

แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดนี้ได้จากการบดหินปูนขาวที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ แล้วนำไปผ่านตะแกรงร่อนขนาด 100 mesh นิยมใช้ในกรณีที่ต้องการเพิ่มความแข็งแรงของยางและเพิ่มเนื้อยางให้มากขึ้น

#### 2) ซอล์กบด (ground chalk)

ได้จากการบดตะกอนของซากพืช หรือซากสัตว์เล็กๆที่ทับถมกันหลายล้านปี มีขนาดของอนุภาคเล็กกว่า 30 นาโนเมตร เมื่อเติมใส่ลงไปนยางจะทำให้มีค่าความแข็งแรงปานกลางและถ้าใส่ในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้ยางกระดองตัวได้ดี แต่ให้ค่าความต้านแรงดึงและความต้านแรงฉีกขาดลดลงสามารถใช้ได้ดีกับยางที่ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ด้วยเทคนิคการอัดผ่านหัวดาย (**extrusion**) ทำให้ยางที่ได้มีผิวเนียนเรียบ สวยงามยิ่งขึ้น

#### 3) แคลเซียมคาร์บอเนตจากการตกตะกอน (precipitated calcium carbonate)

เป็นผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้จากการผลิตเคมีภัณฑ์จากกรรมวิธีแอมโมเนีย (**ammonia process**) โดยการควบคุมสภาวะการตกตะกอนจะได้แคลเซียมคาร์บอเนตที่มีอนุภาคขนาดต่างๆกัน ที่มีขนาดตั้งแต่ 2 ไมโครเมตร ถึง 50 นาโนเมตร แคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการตกตะกอนนี้จัดอยู่ในกลุ่มของสารตัวเติมชนิดกึ่งเสริมแรง ช่วยให้ยางมีสมบัติด้านต่างๆ ดีกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการบดโดยตรง

#### 4) แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดเคลือบผิว (surface-coated calcium carbonate)

ได้จากการเคลือบผิวแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดที่ได้จากธรรมชาติ และชนิดที่ได้จากการตกตะกอนดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ด้วยกรดสเตียริก หรือแคลเซียมสเตียเรต แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดเคลือบผิว สามารถกระจายตัวในเนื้อยางได้ดี ไม่เกาะกันเป็นก้อน และมีสมบัติกาไหล (**rheology**) ดีช่วยให้การบดผสมเข้ากับยางได้ง่าย แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดนี้จัดเป็นสารตัวเติมชนิดกึ่งเสริมแรง ช่วยให้ยางมี สมบัติความต้านแรงดึง ความต้านแรงฉีกขาด และการกระดองตัวดี เมื่อใช้กับผลิตภัณฑ์ยางที่มีสี พบว่าช่วยทำให้มีสีสดใสยิ่งขึ้น

### 2.1.5 เคลย์

เคลย์ หรือ ไชนาเคลย์ (**china clay**) มีโครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยอลูมิเนียมซิลิเกตที่มีน้ำปนอยู่ มีชื่อทางแร่ธาตุว่า เคาลินไนต์ (**kaolinite**) สำหรับสาเหตุที่เรียกชื่อว่า ไชนาเคลย์ ก็เพราะต้นกำเนิดการใช้มาจากชาวจีน ซึ่งได้นำไชนาเคลย์มาใช้ในการทำพอร์ซเลนสีขาว (**white porcelain**) นั่นเอง

เคลย์สามารถแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆได้ดังนี้

#### 1) ซอฟท์เคลย์ (soft clay)

มีขนาดของอนุภาคใหญ่กว่า 2 ไมโครเมตร มีราคาถูก ให้ค่าความต้านแรงดึง ความแข็งแรงสูงกว่า แคลเซียมคาร์บอเนต ไม่นิยมใช้กับผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องการให้มีสีสดใส

## 2) ฮาร์ดเคลย์ (hard clay)

เคลย์ชนิดนี้ จะมีความขาวและมีราคาค่อนข้างแพงกว่าซอฟท์เคลย์ อนุภาคมีขนาดเล็กกว่า 2 ไมโครเมตร ให้ค่าความต้านแรงดึง ความต้านทานแรงฉีกขาด ความคงทนต่อการขัดสี ดีกว่าซอฟท์เคลย์ นิยมใช้เป็นสารตัวเติม สำหรับยางพื้นรองเท้า ยางปูพื้น ท่อยาง เป็นต้น แต่ถ้าใช้ในปริมาณมาก จะหน่วงปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ของยางให้ช้าลง

## 3) แคลไซน์ด์เคลย์ (calcined clay)

ได้จากการเผาฮาร์ดเคลย์ ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000 °C สารตัวเติมชนิดนี้ มีสมบัติเทียบเท่ากับ สารตัวเติมชนิดกึ่งเสริมแรง มีสีขาวสดใส ให้ค่าความแข็ง ความต้านแรงดึง และสมบัติทางไฟฟ้าดีกว่า ฮาร์ดเคลย์ นิยมใช้กับผลิตภัณฑ์ยางที่มีสี หรือยางที่ต้องการให้มีสมบัติทางไฟฟ้า เป็นต้น

## 4) ทรีทเท็ดเคลย์ (treated clay)

เคลย์ชนิดนี้นิยมใช้กับผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องการให้มีคุณภาพสูง สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

4.1 เคลย์ชนิดเคลือบผิวด้วยเอมีน (amine-coated)

4.2 เคลย์ชนิดเคลือบผิวด้วยไซเลน (silane-coated)

4.3 เคลย์ชนิดเคลือบผิวด้วยโพลีบิวตะไดอิน (polybutadiene-coated)

## 2.1.6 สารตัวเติมอื่น ๆ

### – ผงไมกา (mica powder)

มีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ (laminar) ช่วยให้ยางทนความร้อน และลดการซึมผ่านของก๊าซได้ดี

### – ผงสเลท (slate powder)

โครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยซิลิกา และซิลิเกต นิยมใช้กับยางปะเก็นทนอุณหภูมิสูง

### – ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide)

นอกจากใช้เป็นสารกระตุ้นตัวเร่งสำหรับปฏิกิริยาวัลคาไนซ์แล้ว ยังจัดเป็นสารตัวเติมกึ่งเสริมแรงอีกด้วย

### – แบเรียมซัลเฟต (barium sulfate)

มีทั้งชนิดบด และชนิดตกตะกอน จัดเป็นสารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง ชนิดตกตะกอนนิยมใช้เป็น สารตัวเติมสำหรับผลิตภัณฑ์ยางที่ทนกรดได้ นอกจากนี้แบเรียมซัลเฟตยังมีสมบัติที่บดแสงต่อรังสีเอ็กซ์

### – ทัลก์ (talc)

ทัลก์ มีโครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วย แมกนีเซียมซิลิเกตที่มีน้ำปนอยู่ด้วย มีสูตรโครงสร้างดังนี้  $3\text{MgO} \cdot \text{SiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 2-15 ไมโครเมตร โดยปกติ ทัลก์มีโครงสร้างเป็นเส้นใย (fibrous structure) แต่อาจมีโครงสร้างเป็นแผ่นบางๆปนอยู่บ้าง นิยมใช้โรยที่ผิวหน้าของยางเพื่อ ช่วยลดการเหนียวติดกัน

## 2.2 สมบัติของสารตัวเติม

สมบัติของสารตัวเติมที่มีผลต่ออย่าง ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

### 1) เอกซ์เทนซิตี แฟกเตอร์ (extensity factor)

คือ พื้นที่ผิวหน้าทั้งหมดของสารตัวเติม ซึ่งสัมพันธ์กับยาง ในยางคอมปาวด์ซึ่งมีปริมาตรหนึ่ง ลูกบาศก์เซนติเมตร

พื้นที่ผิวหน้าของสารตัวเติม จะมีความสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาคของสารตัวเติมนั้น สมมุติว่า ถ้าอนุภาคของสารตัวเติม มีขนาดเท่ากัน และเป็นทรงกลมทั้งหมด พื้นที่ผิวหน้า ( $A_s$ ) ต่อน้ำหนักหนึ่งกรัมของสารตัวเติม จะมีค่าดังสมการต่อไปนี้

$$A_s = \frac{\pi d^2}{\frac{1}{6} \pi d^3 \rho} = \frac{6}{d\rho}$$

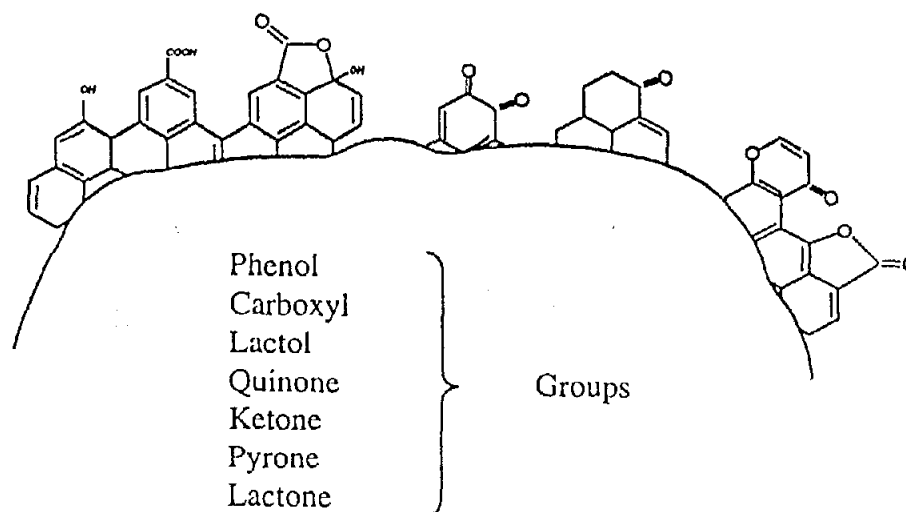
โดย  $d$  คือเส้นผ่านศูนย์กลาง และ  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของสารตัวเติม ถ้าให้หน่วยของพื้นที่ผิวหน้าเท่ากับ ตารางเมตรต่อกรัม ( $m^2/g$ ) และเส้นผ่านศูนย์กลาง มีหน่วยเป็น นาโนเมตร (nm) สมการข้างต้นจะได้เป็น

$$A_s = \frac{6000}{d\rho}$$

ถ้าสารตัวเติมมีความหนาแน่น 2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเท่ากับ 30 นาโนเมตร จะมีพื้นที่ผิวหน้าเท่ากับ 100 ตารางเมตรต่อกรัม ดังนั้นจากสมการจึงสรุปได้ว่าถ้าขนาดของอนุภาคยิ่งเล็กลง พื้นที่ผิวสัมผัสหรือเกิดพันธะยึดกับโมเลกุลของยางย่อมมีมากขึ้น ซึ่งจะช่วยให้เสริมแรงของยาง ให้มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น

### 2) อินเทนซิตี แฟกเตอร์ (intensity factor)

คือ ประสิทธิภาพของพื้นผิวของอนุภาคสารตัวเติม ในการเกิดพันธะยึดกับโมเลกุลของยาง ต่อพื้นที่ซึ่งเชื่อมโยงกันระหว่างพื้นผิวของอนุภาคสารตัวเติมนั้นกับยาง 1 ตารางเซนติเมตร ซึ่งปัจจัยข้อนี้เกิดจากสมบัติทางเคมีของผิวของสารตัวเติม เช่น พื้นผิวของเขม่าดำมีหมู่ฟังก์ชันแนล (functional group) หลายหมู่ เช่น หมู่ฟีนอลิก คาร์บอกซิลิก ไฮดรอกซิล ควิโนน เป็นต้น กระจายอยู่ทั่วพื้นผิวของอนุภาค (ภาพที่ 2)



ภาพที่ 2 หมู่ฟังก์ชันแนลที่พื้นผิวของอนุภาคเขม่าดำ

ซึ่งสารต่าง ๆ เหล่านี้ที่ปนอยู่ที่ผิวจะเป็นตัวบ่งชี้ความเป็นกรด-ด่างของเขม่าดำ เช่น เขม่าดำชนิดแซลเนล ซึ่งมีออกซิเจนจับตัวอยู่ในรูปของหมู่ฟังก์ชันแนลสูงจะทำให้พื้นผิวมีสมบัติเป็นกรด ส่วนเขม่าดำเฟอร์เนซ ซึ่งมีออกซิเจนจับตัวอยู่น้อย ทำให้พื้นผิวมีสมบัติเป็นกลางหรือด่าง ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะมีผลต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ของยาง สำหรับซิลิกาซึ่งที่พื้นผิวมีหมู่ไฮดรอกซิลกระจายอยู่ทั่วไปทำให้มีสมบัติเป็นกรด จะดูดซับและหน่วงประสิทธิภาพของสารตัวเร่ง ส่งผลให้ยางเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ช้าลงทำให้ต้องใส่สารตัวเร่งมากขึ้น หรือใส่สารที่มีสมบัติเป็นด่างลงไปด้วย เช่น ไดเอทิลีนไกลคอล โพลีเอทิลีนไกลคอล หรือไตรเอทาโนลามีน เป็นต้น

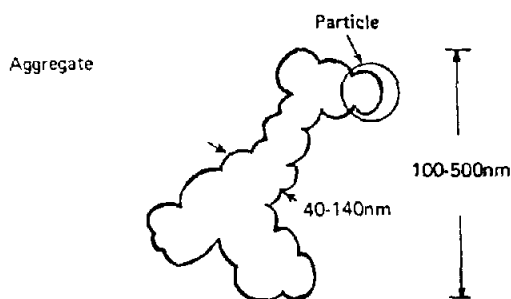
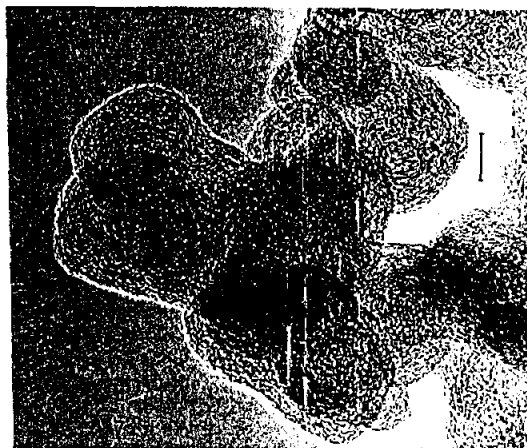
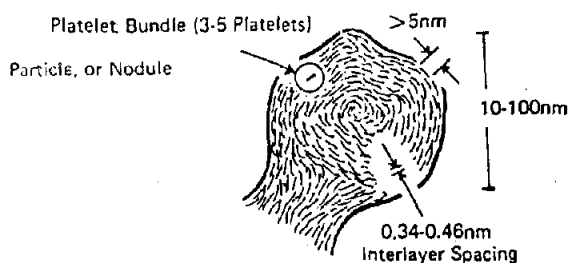
### 3) จีโอเมทริกัล แฟกเตอร์ (geometrical factor)

ปัจจัยข้อนี้ ได้แก่ โครงสร้าง(structure) และความเป็นรูพรุน (porosity) ของสารตัวเติม

#### 3.1) โครงสร้าง

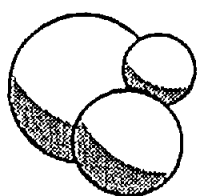
อนุภาคของสารตัวเติม มีรูปร่างแตกต่างกันไม่แน่นอน ซึ่งรูปร่างเหล่านี้จะมีผลต่อการจัดเรียงตัวของอนุภาค เช่น เขม่าดำประกอบด้วยอนุภาคเล็กๆ มีรูปร่างกลมไม่สม่ำเสมอเกาะยึดกันเป็นกลุ่ม (ภาพที่ 3) ซึ่งขนาด รูปร่าง จำนวนช่องว่าง(void) ระหว่างอนุภาค จะเป็นตัวตัดสินลักษณะของโครงสร้างเขม่าดำ ถ้าอนุภาคของเขม่าดำเกาะกลุ่มกันอย่างหนาแน่นถึง 200 อนุภาค เรียกว่า โครงสร้างสูง (high structure) ถ้ามีอนุภาคเกาะกลุ่มกันโดยเฉลี่ย ประมาณ 30 อนุภาค จะเรียกว่า โครงสร้างต่ำ (low structure)



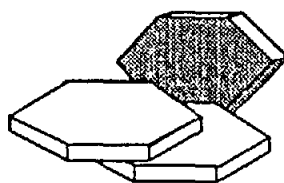


ภาพที่ 3 โครงสร้างของอนุภาคเขม่าดำ ซึ่งยึดเกาะกันเป็นกลุ่ม (ซ้าย) และ ภาพของอนุภาคเขม่าดำ ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (ขวา) ขีด — เท่ากับ 10 นาโนเมตร

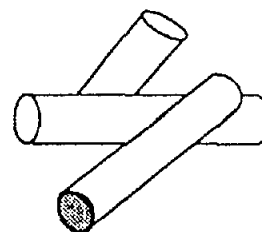
ซึ่งโครงสร้างเหล่านี้จะมีผลต่อกระบวนการผลิต สมบัติเชิงกล และสมบัติการนำไฟฟ้าของยาง สำหรับ สารตัวเติมอินทรีย์ (โครงสร้างไม่มีลักษณะของการเกาะกลุ่มกัน) มีรูปร่างของอนุภาคแตกต่างกัน เช่น แคลเซียมคาร์บอเนตบดมีรูปร่างของอนุภาคเป็นทรงกลม เคลย์ไมกา มีรูปร่างของอนุภาคเป็นแผ่น บางๆ เป็นต้น (ภาพที่ 4) ซึ่งรูปร่างของอนุภาคเหล่านี้ จะมีผลต่อสมบัติความหนืดและค่าโมดูลัสของยาง



Spherical  
(Ball shaped)



Laminar  
(Plate shaped)



Cylindrical  
(Rod shaped)

ภาพที่ 4 รูปร่างของอนุภาคสารตัวเติมอินทรีย์

### 3.2) ความเป็นรูปพรุน

ความเป็นรูปพรุนของอนุภาคของสารตัวเติม นับว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกข้อหนึ่งที่มีผลต่อสมบัติของยางหลายด้าน ซิลิกาโดยทั่วไป จะมีอนุภาคที่มีความพรุนมากกว่าเขม่าดำ ดังนั้นซิลิกาจะทำให้ยางมีความหนืดมากกว่าเขม่าดำ เมื่อใช้ในปริมาณที่เท่ากัน สำหรับเขม่าดำ การมีรูปพรุนมากหรือน้อยอาจเป็นสาเหตุทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ เร็วขึ้นหรือช้าลงได้ ถ้าสารตัวเร่งถูกดูดซับเข้าไปในรูปพรุน การเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ก็จะช้าลง เขม่าดำที่มีความพรุนมาก จะมีสมบัติการนำไฟฟ้าดีกว่าเขม่าดำที่มีความพรุนน้อย

### บทที่ 3

## วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือและวิธีดำเนินการ

### 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
- Hard clay เป็นสารเคมีของห้างหุ้นส่วนจำกัด ยงวิเชียร

##### 3.1.2.5 สารช่วยการแปรรูป

- Naphthenic oil เป็นสารเคมีของบริษัทลัคซ์เคมีอินเตอร์เนชันแนล จำกัด

##### 3.1.2.6 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ

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

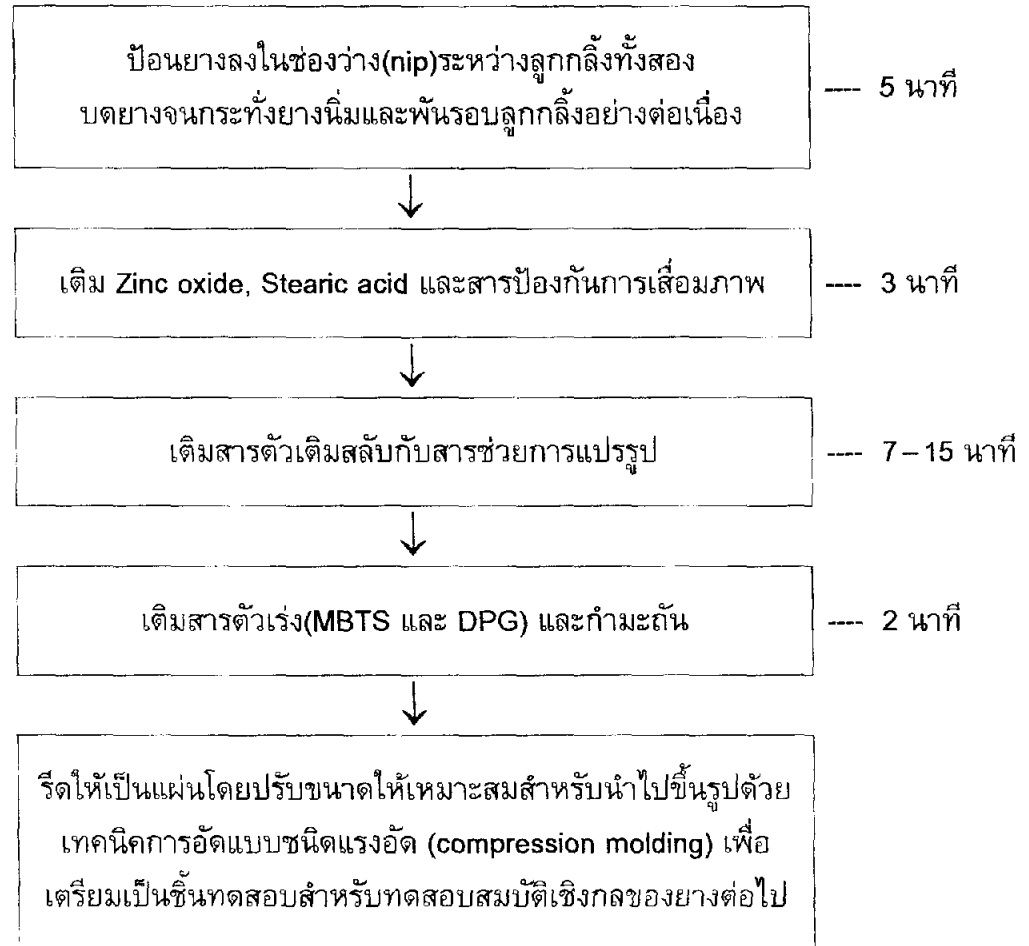
### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 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) สำหรับขึ้นรูปยางเป็นชิ้นทดสอบ
- 3.2.4 เครื่องอัดไฮดรอลิกพร้อมแผ่นให้ความร้อน
- 3.2.5 หัวตัด (Cutting die) พร้อมอุปกรณ์สำหรับเตรียมชิ้นทดสอบความต้านแรงดึง ความยืด  
เมื่อขาด 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– 25 นาที (ขึ้นอยู่กับปริมาณของสารตัวเติม)

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

3.3.2 นำยางคอมปาวด์ที่บดผสมได้แต่ละสูตร(ประมาณ 20 กรัม)ไปทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง 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 100 (Modulus at 100 % 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
MBTS	1
DPG	0.5
Zinc oxide	5
Stearic acid	3
Naphthenic oil	2.5
Antioxidant (Anox T)	1
กำมะถัน	2

ตารางที่ 2 : ตารางแสดงผลการทดลองของสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตและฮาร์ดเคลย์ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติ

ปริมาณของสารตัวเติม (phr)	การทดลองชุดที่ 1				การทดลองชุดที่ 2				การทดลองชุดที่ 3				
	คอมเปาเวต์				คอมเปาเวต์				คอมเปาเวต์				
	1-1	1-2	1-3	1-4	2-1	2-2	2-3	2-4	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5
CaCO <sub>3</sub>	50	100	150	200	0	0	0	0	200	150	100	50	0
Hard clay	0	0	0	0	50	100	150	200	0	50	100	150	200

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

Scorch time(t <sub>2</sub> ), min	3.29	2.50	1.86	1.71	3.23	4.50	3.17	0.56	1.71	2.07	2.40	0.67	0.56
Cure time(t <sub>90</sub> ), min	5.73	5.11	4.25	3.71	6.35	8.85	8.11	9.42	3.71	4.47	5.65	6.70	9.42
Minimum torque, dN.m	1.43	2.53	2.53	1.29	1.22	1.58	2.90	7.32	1.29	1.08	1.65	3.37	7.32
Maximum torque, dN.m	61.18	94.93	88.08	103.99	60.46	49.56	57.41	27.11	103.99	85.63	73.87	34.57	27.11
Cure Rate Index <sup>B</sup>	41.0	38.3	41.8	50.0	32.1	23.0	20.2	11.3	50.0	41.7	30.8	16.6	11.3

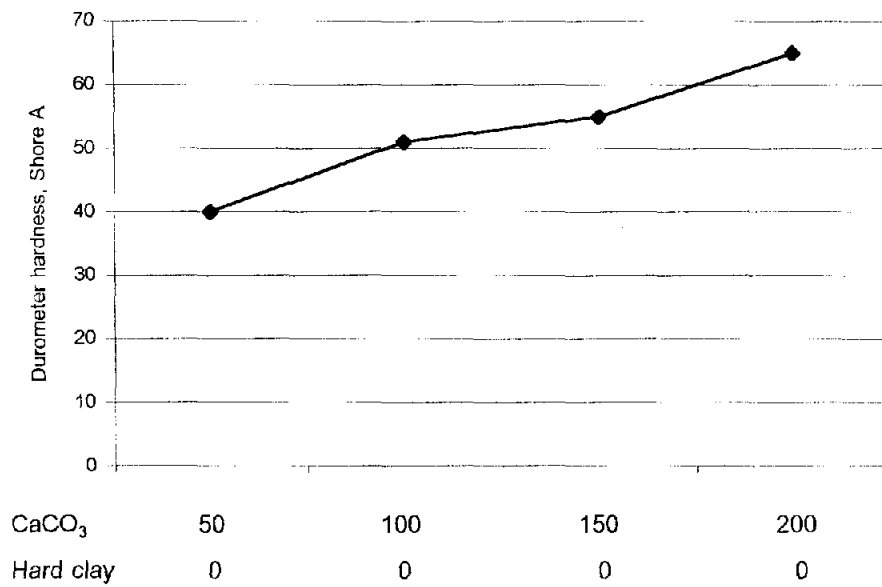
#### Mechanical properties

Durometer hardness, Shore A	40	51	55	65	48	56	63	71	65	65	65	67	71
Tensile strength, MPa	22.4	13.2	10.8	9.0	23.3	11.1	9.4	7.4	9.0	9.5	7.2	9.6	7.4
Modulus at 100 % elongation, MPa	1.4	2.1	2.4	2.9	2.5	3.5	3.8	4.1	2.9	3.0	3.1	3.0	4.1
Elongation at break, %	600	494	457	422	552	299	263	254	422	384	300	296	254
Compression set <sup>C</sup> (Method B), %	13	18	20	27	38	42	46	65	27	31	47	55	65
Tear strength (Die C), N/mm	36.5	33.9	30.1	28.6	35.8	32.6	29.9	26.7	28.6	24.6	26.1	23.0	26.7

<sup>A</sup> Parts per 100 parts of rubber by weight    <sup>B</sup> Cure Rate Index = 100/(cure time - scorch time)    <sup>C</sup> At 70 °C for 22 hrs.

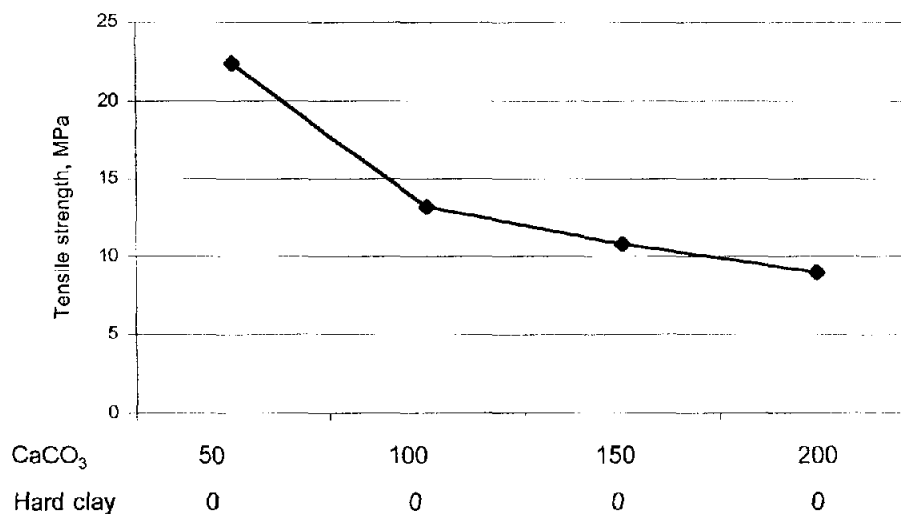
จากตารางแสดงผลการทดลองของแต่ละชุดการทดลองหน้าที่ 16 สามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมบัติเชิงกล และสมบัติการวัดค่าโมดูลัสของยางกับอัตราส่วนของสารตัวเติมทั้งสองชนิดได้ดังนี้

### การทดลองชุดที่ 1



อัตราส่วนระหว่าง CaCO<sub>3</sub>/ Hard clay (ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก)

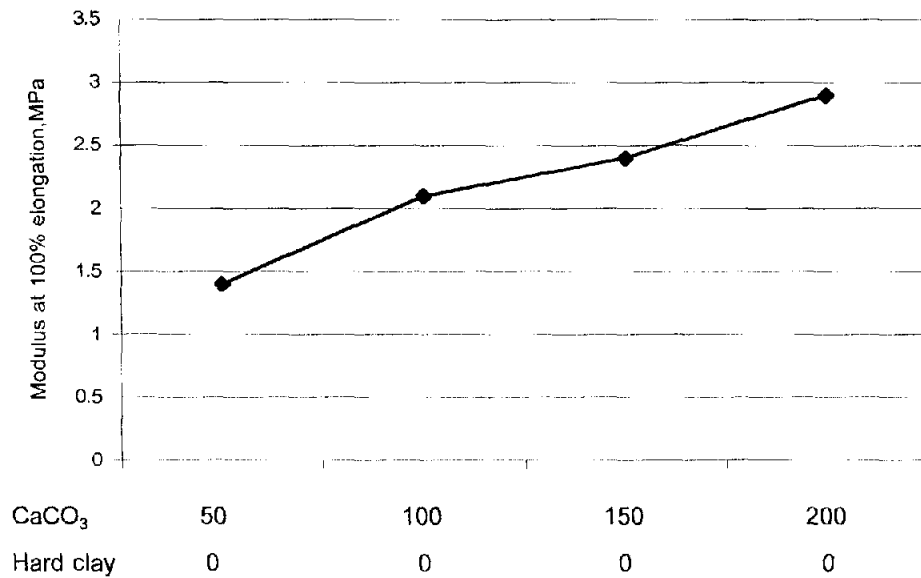
ภาพที่ 1-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม (CaCO<sub>3</sub>/ Hard clay) กับค่าความแข็ง



อัตราส่วนระหว่าง CaCO<sub>3</sub>/ Hard clay (ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก)

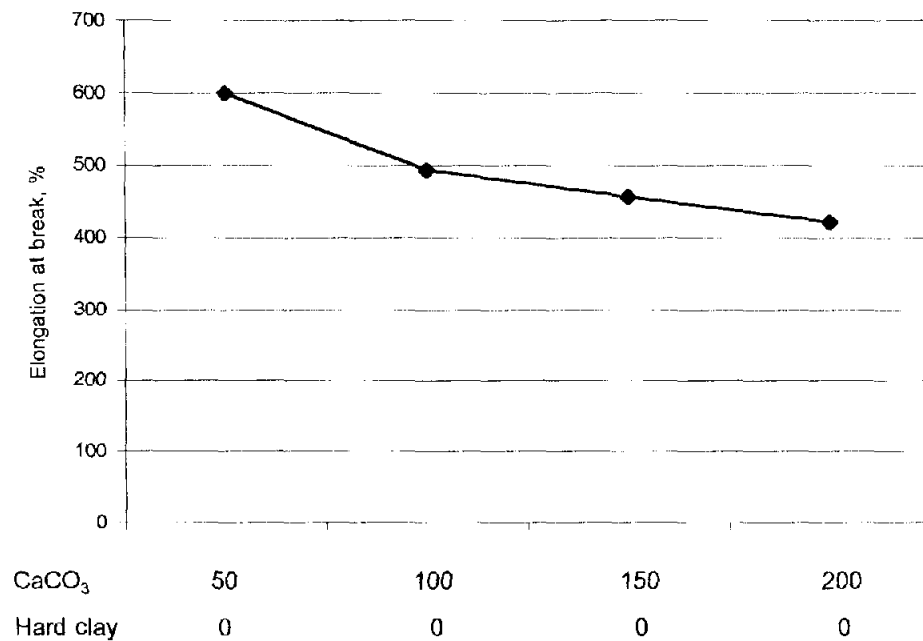
ภาพที่ 1-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม (CaCO<sub>3</sub>/ Hard clay) กับค่าความต้านแรงดึง





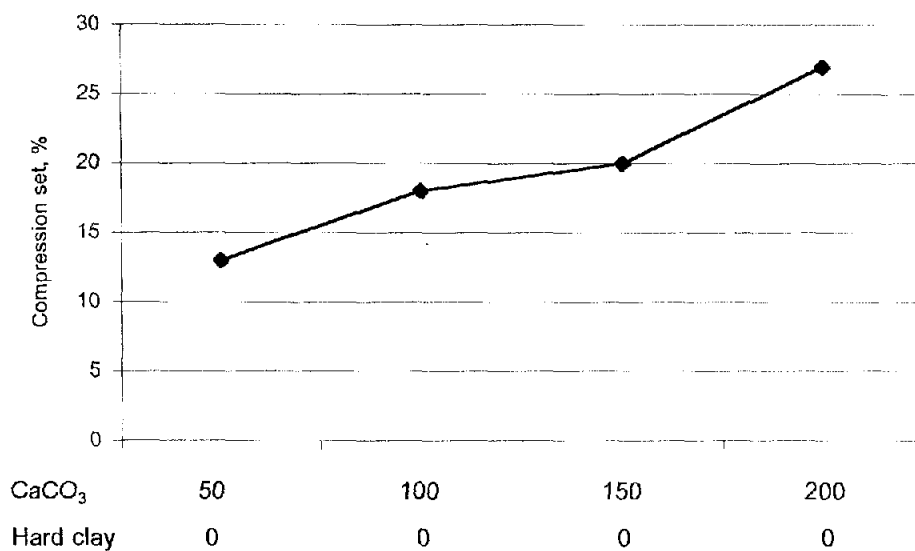
อัตราส่วนระหว่าง CaCO<sub>3</sub>/ Hard clay (ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก)

ภาพที่ 1-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม (CaCO<sub>3</sub>/ Hard clay) กับค่าโมดูลัสที่ความยืดร้อยละ 100



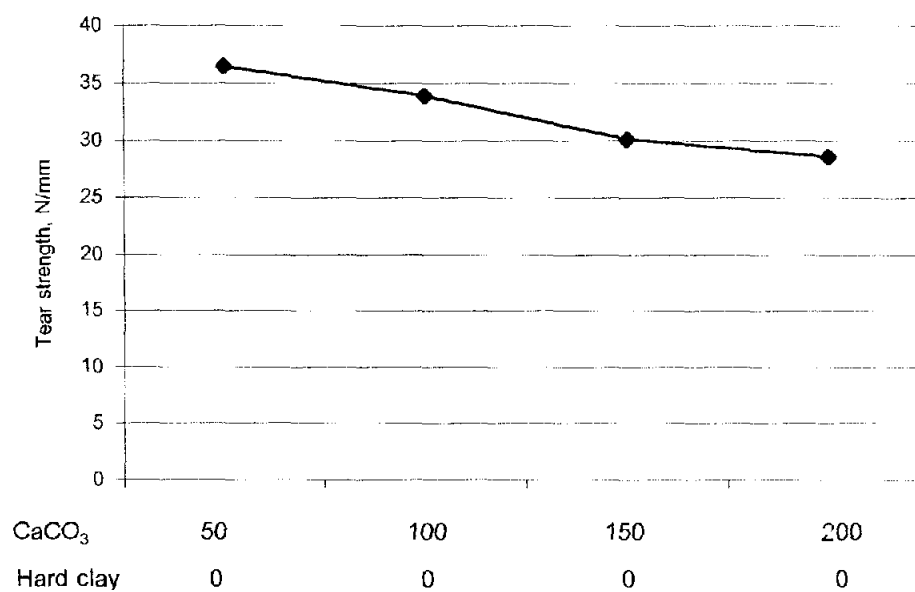
อัตราส่วนระหว่าง CaCO<sub>3</sub>/ Hard clay (ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก)

ภาพที่ 1-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม (CaCO<sub>3</sub>/ Hard clay) กับค่าความยืดเมื่อขาด



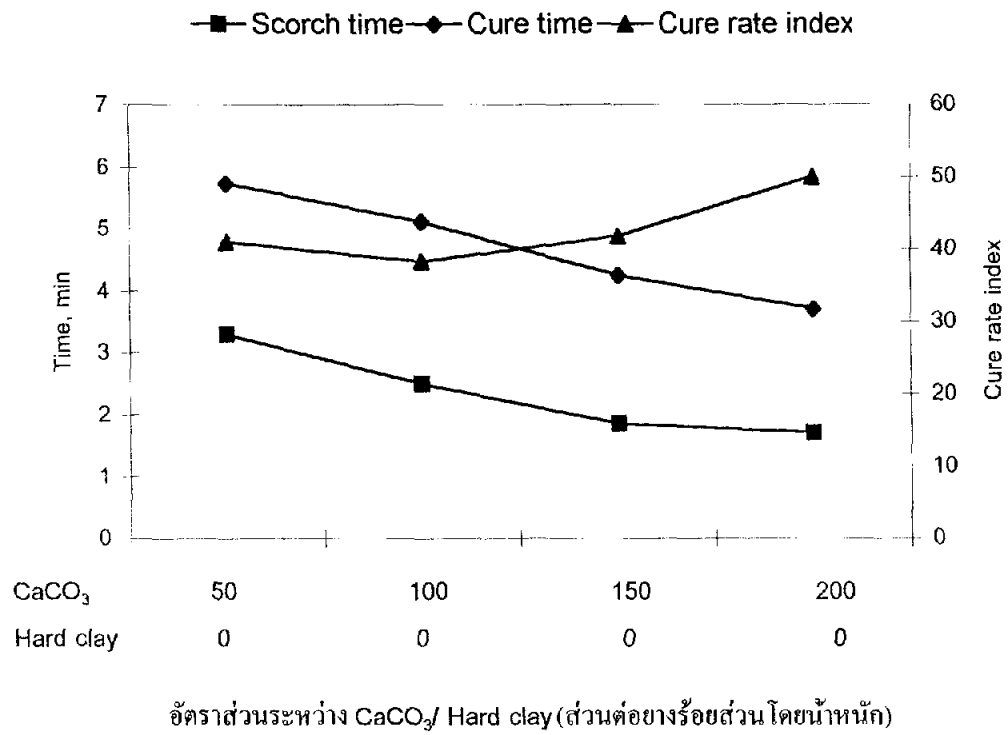
อัตราส่วนระหว่าง CaCO<sub>3</sub>/ Hard clay (ส่วนต่อขยาร้อยส่วนโดยน้ำหนัก)

ภาพที่ 1-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม (CaCO<sub>3</sub>/ Hard clay) กับค่าการยุบยู่ตัว



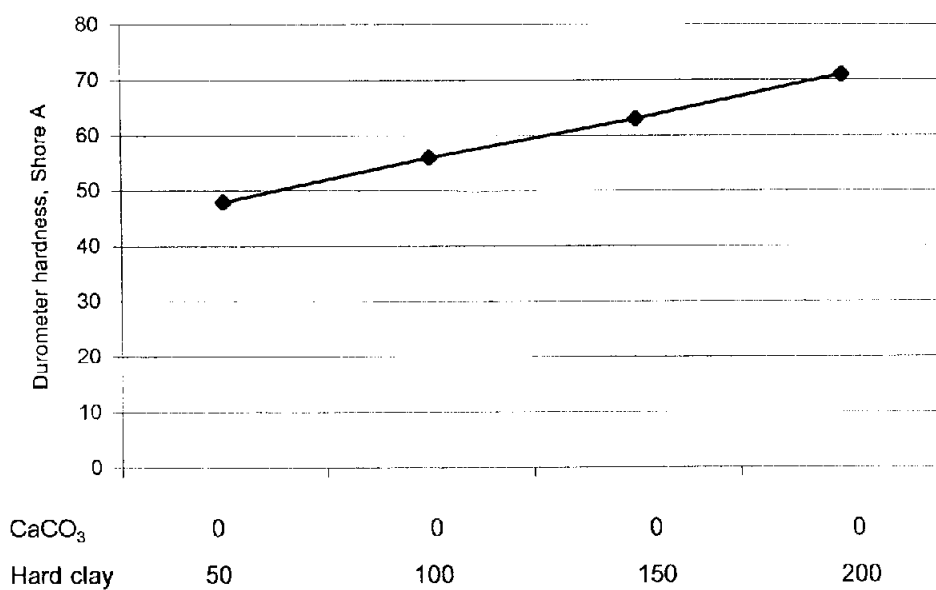
อัตราส่วนระหว่าง CaCO<sub>3</sub>/ Hard clay (ส่วนต่อขยาร้อยส่วนโดยน้ำหนัก)

ภาพที่ 1-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม (CaCO<sub>3</sub>/ Hard clay) กับค่าความต้านทานแรงฉีกขาด



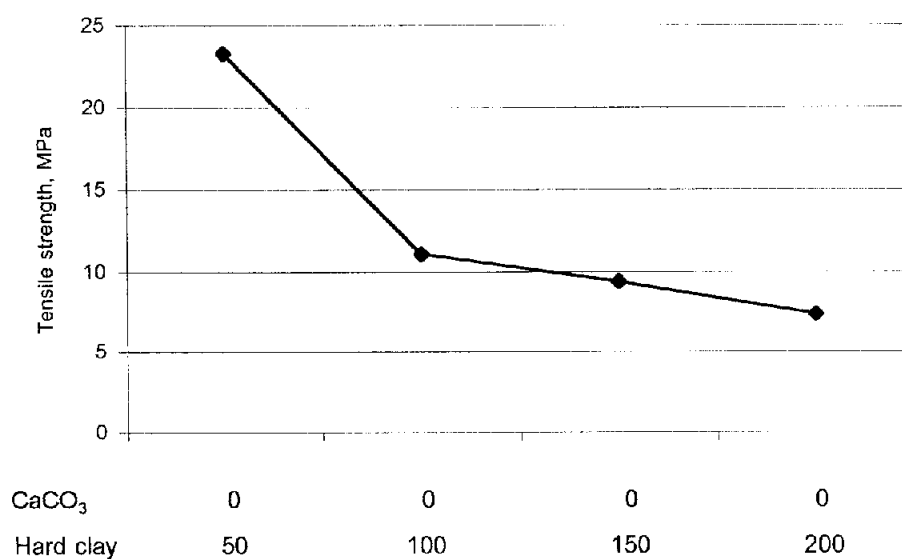
ภาพที่ 1-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม (CaCO<sub>3</sub>/Hard clay) กับระยะเวลาเริ่มคงรูป ระยะเวลาคงรูป และ cure rate index

## การทดลองชุดที่ 2



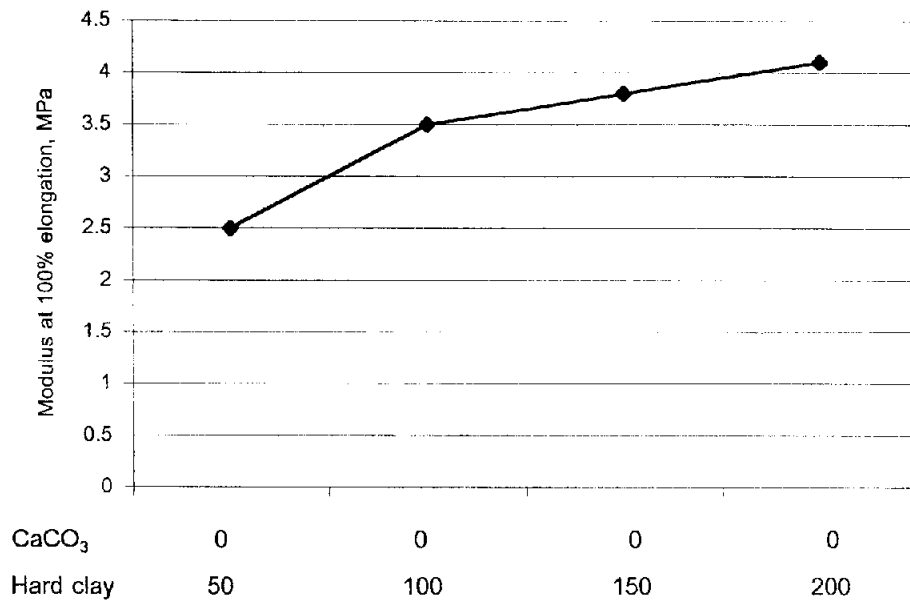
อัตราส่วนระหว่าง CaCO<sub>3</sub>/ Hard clay (ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก)

ภาพที่ 2-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม (CaCO<sub>3</sub>/ Hard clay) กับค่าความแข็ง



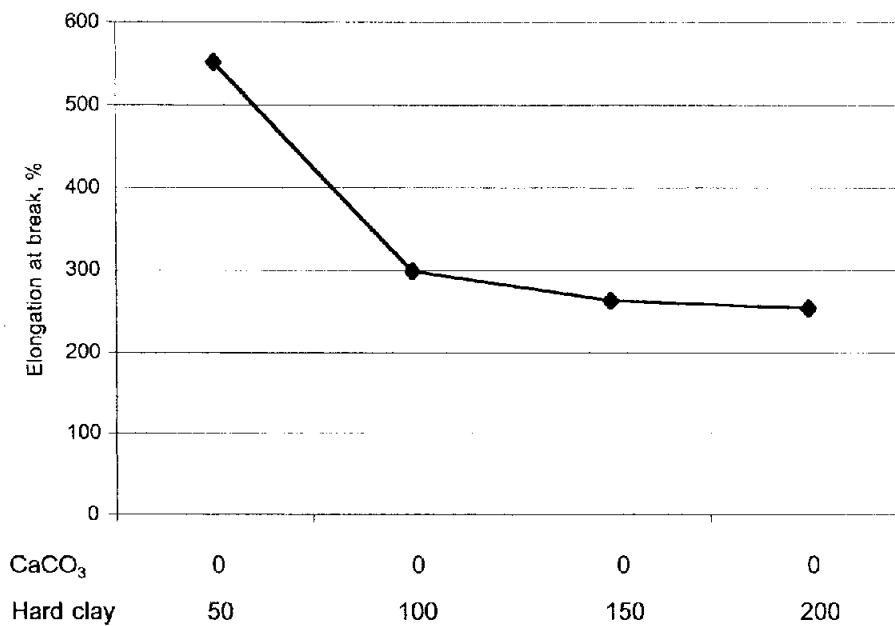
อัตราส่วนระหว่าง CaCO<sub>3</sub>/ Hard clay (ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก)

ภาพที่ 2-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม (CaCO<sub>3</sub>/ Hard clay) กับค่าความต้านแรงดึง



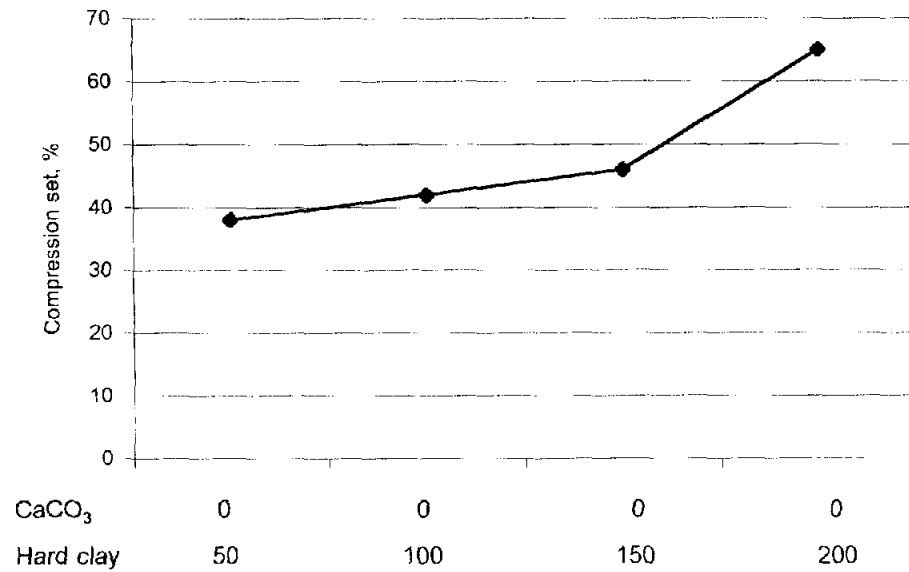
อัตราส่วนระหว่าง CaCO<sub>3</sub>/ Hard clay (ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก)

ภาพที่ 2-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม (CaCO<sub>3</sub>/Hard clay) กับค่าโมดูลัสที่ความยืดร้อยละ 100



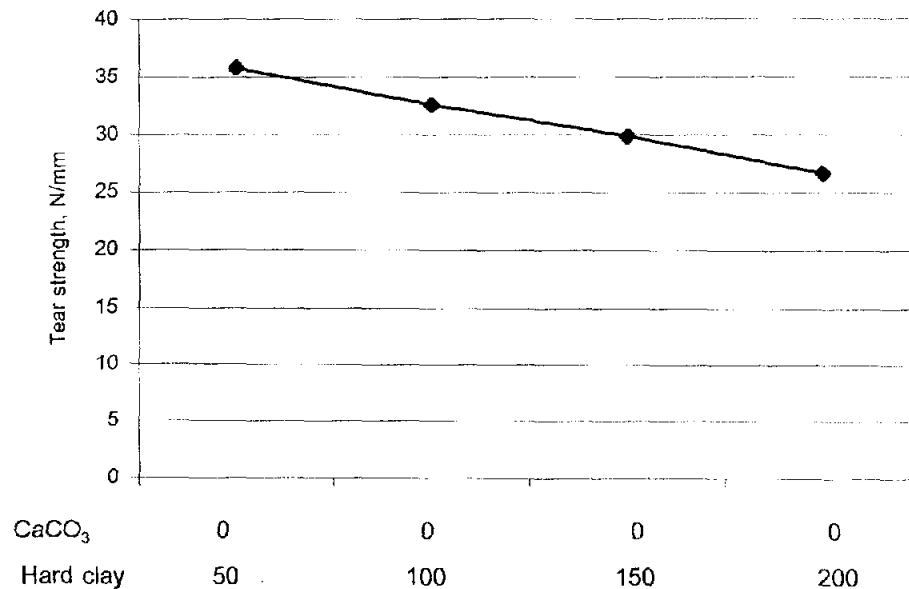
อัตราส่วนระหว่าง CaCO<sub>3</sub>/ Hard clay (ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก)

ภาพที่ 2-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม (CaCO<sub>3</sub>/Hard clay) กับค่าความยืดเมื่อขาด



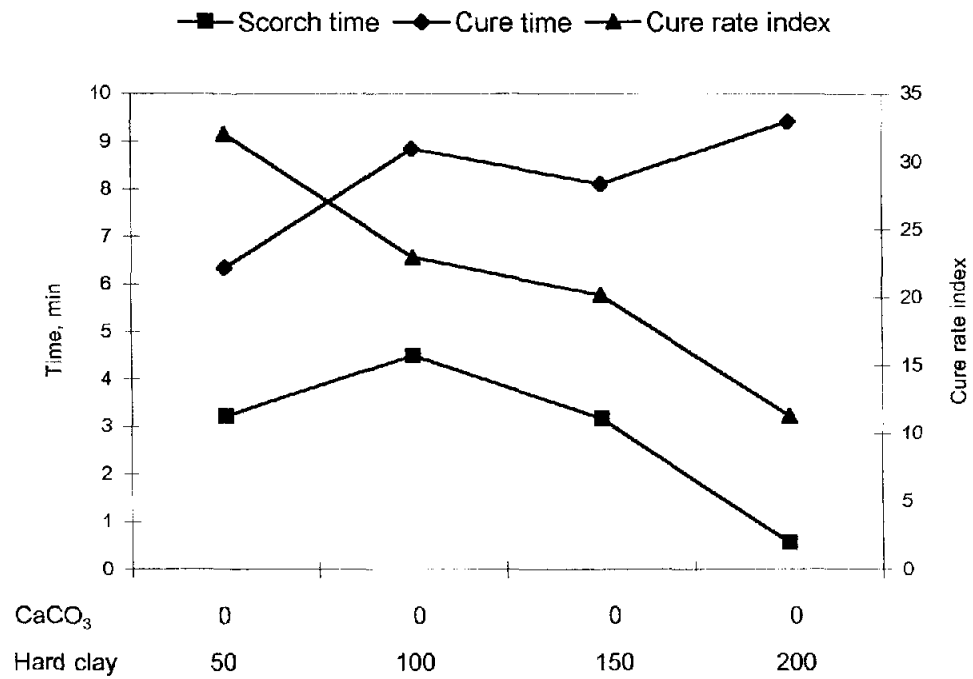
อัตราส่วนระหว่าง CaCO<sub>3</sub>/ Hard clay (ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก)

ภาพที่ 2-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม (CaCO<sub>3</sub>/Hard clay) กับค่าการยุบยู่ตัว



อัตราส่วนระหว่าง CaCO<sub>3</sub>/ Hard clay (ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก)

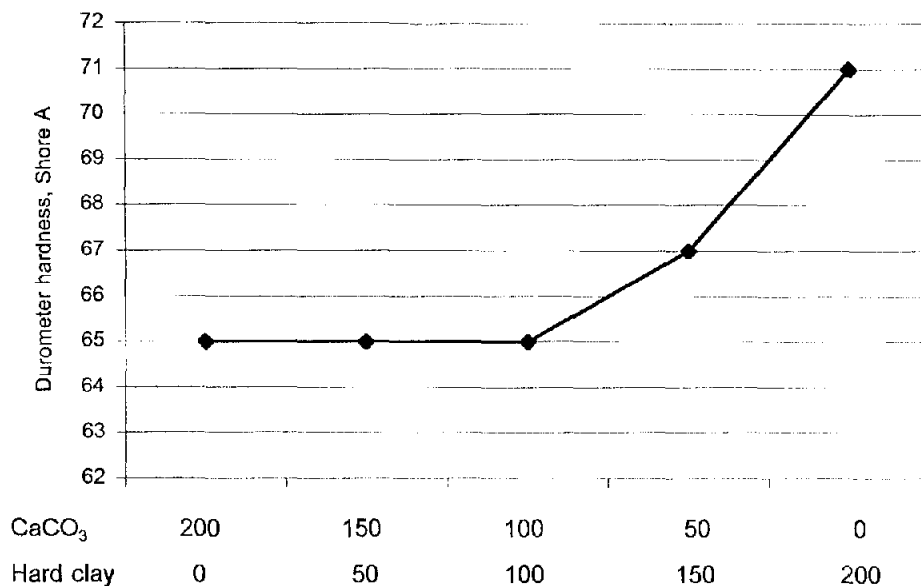
ภาพที่ 2-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม (CaCO<sub>3</sub>/Hard clay) กับค่าความต้านทานแรงฉีกขาด



อัตราส่วนระหว่าง CaCO<sub>3</sub>/ Hard clay (ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก)

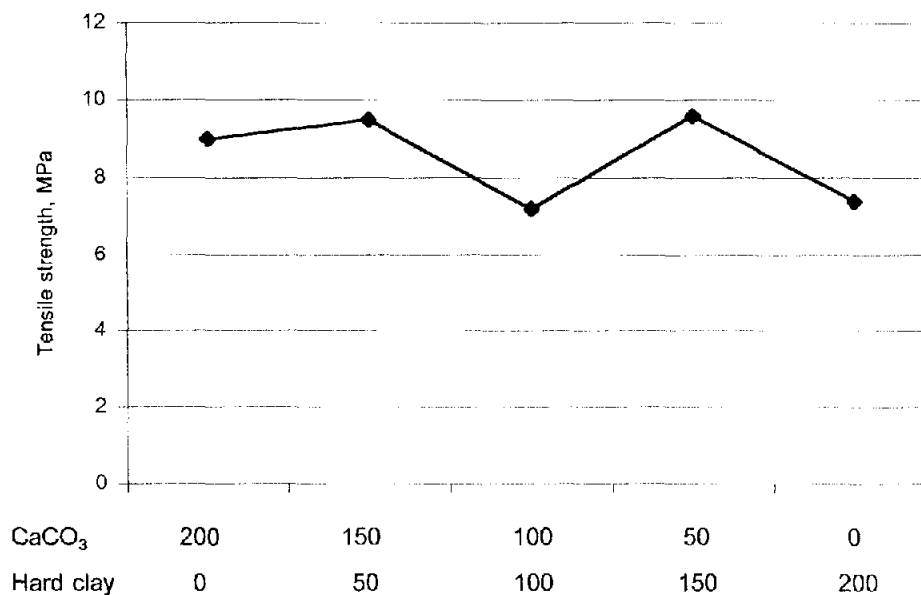
ภาพที่ 2-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม (CaCO<sub>3</sub>/ Hard clay) กับระยะเวลาเริ่มคงรูป ระยะเวลาคงรูป และ cure rate index

การทดลองชุดที่ 3



อัตราส่วนระหว่าง CaCO<sub>3</sub>/ Hard clay (ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก)

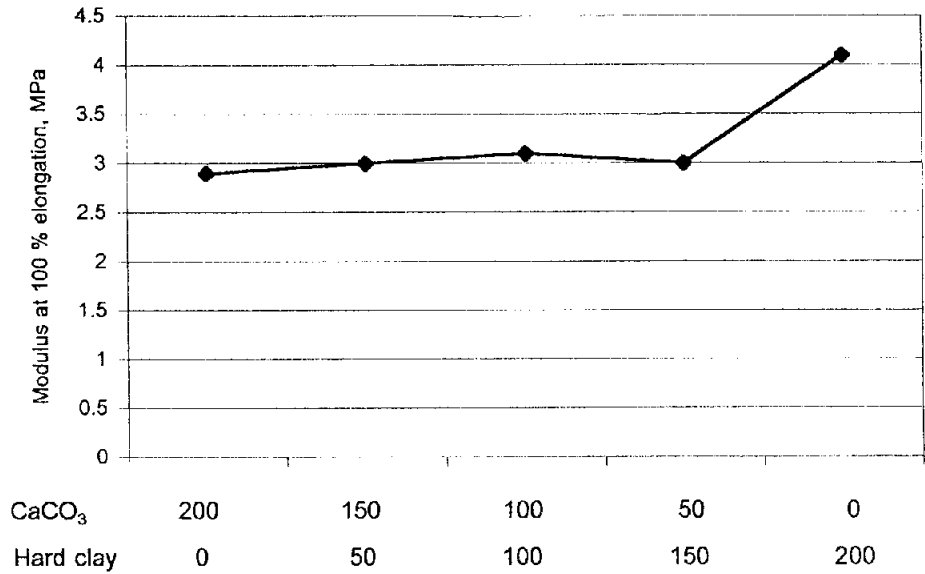
ภาพที่ 3-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม (CaCO<sub>3</sub>/Hard clay) กับค่าความแข็ง



อัตราส่วนระหว่าง CaCO<sub>3</sub>/ Hard clay (ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก)

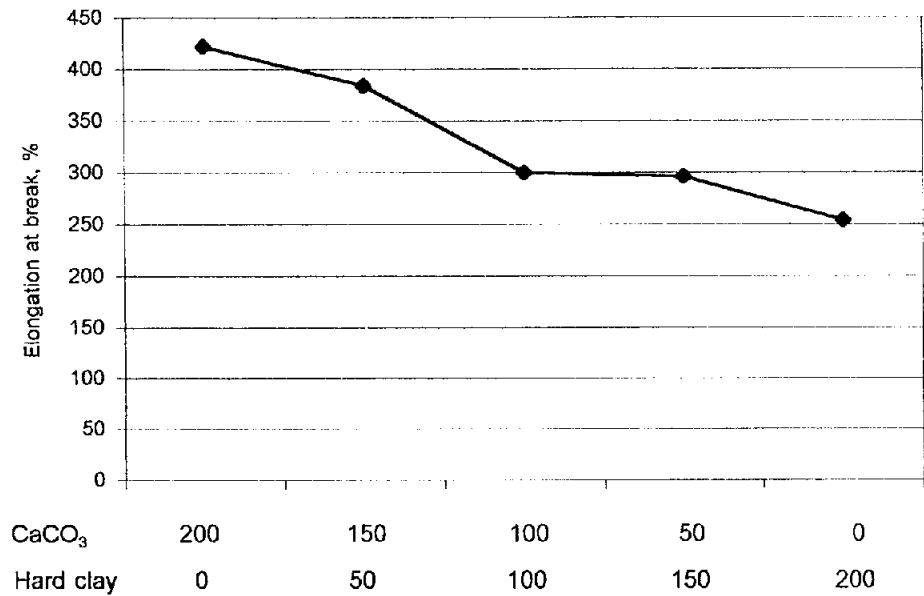
ภาพที่ 3-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม (CaCO<sub>3</sub>/Hard clay) กับค่าความต้านแรงดึง





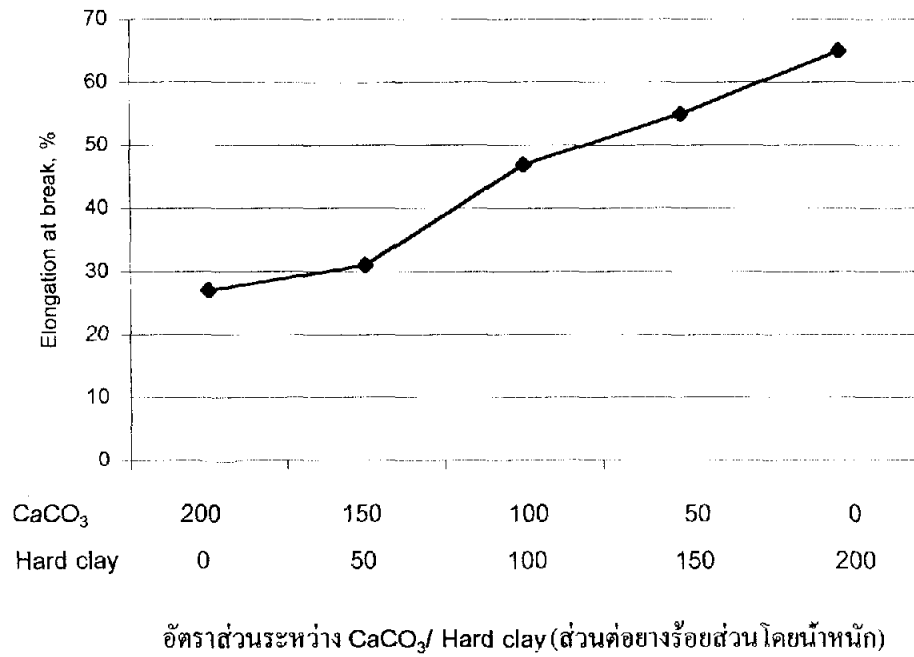
อัตราส่วนระหว่าง CaCO<sub>3</sub>/ Hard clay (ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก)

ภาพที่ 3-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม (CaCO<sub>3</sub>/Hard clay) กับค่าโมดูลัสที่ความยืดร้อยละ 100

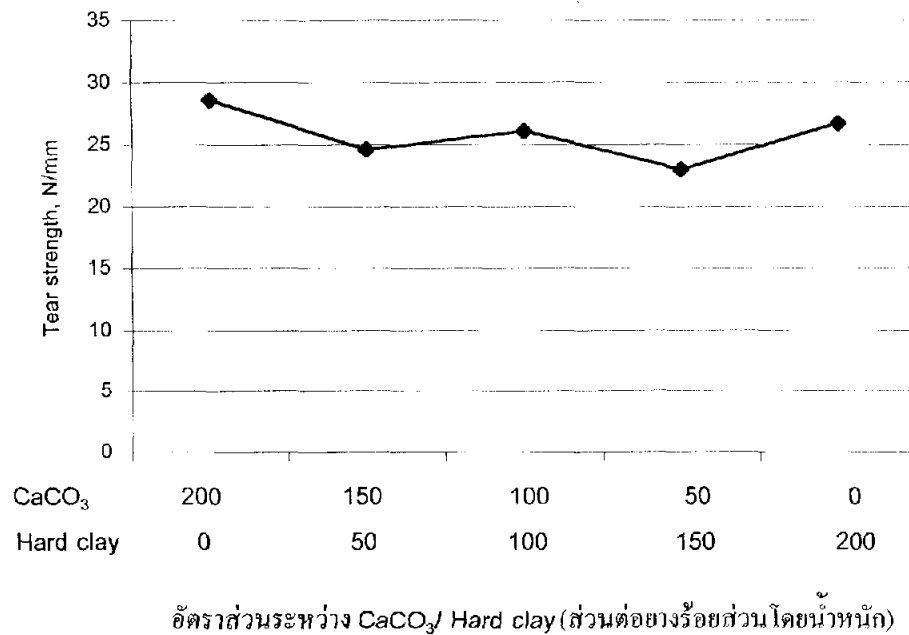


อัตราส่วนระหว่าง CaCO<sub>3</sub>/ Hard clay (ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก)

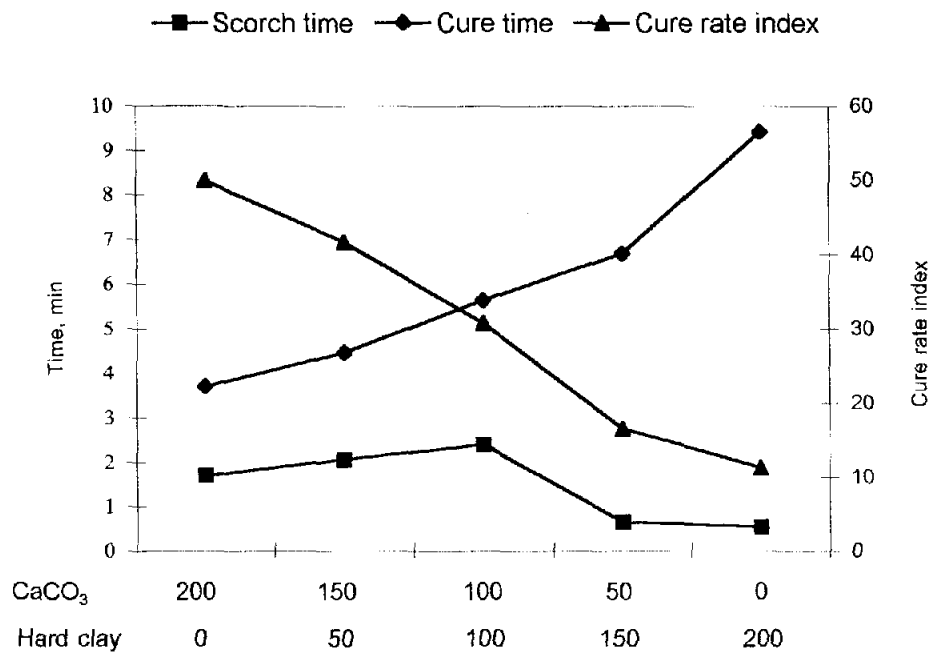
ภาพที่ 3-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม (CaCO<sub>3</sub>/Hard clay) กับค่าความยืดเมื่อขาด



ภาพที่ 3-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม (CaCO<sub>3</sub>/ Hard clay) กับค่าการยุบยู่ตัว



ภาพที่ 3-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม (CaCO<sub>3</sub>/ Hard clay) กับค่าความต้านทานแรงฉีกขาด



อัตราส่วนระหว่าง CaCO<sub>3</sub>/ Hard clay (ส่วนต่อขยงร้อยละโดยน้ำหนัก)

ภาพที่ 3-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวเติม (CaCO<sub>3</sub>/Hard clay) กับระยะเวลาเริ่มคงรูป ระยะเวลาคงรูป และ cure rate index

## บทที่ 5

### วิจารณ์ผลและสรุปผลการศึกษาทดลอง

จากผลการทดลอง การปรับเปลี่ยนปริมาณของสารตัวเติม แคลเซียมคาร์บอเนต และฮาร์ดเคลย์ในยางคอมปาวด์สูตรต่างๆ พบว่า สมบัติเชิงกล และสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางได้เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณและอัตราส่วนของสารตัวเติมทั้งสองชนิดดังนี้

#### 4.1 สมบัติเชิงกล

##### 4.1.1 ความแข็ง

ค่าความแข็งมีความสัมพันธ์กับสมบัติความเป็นอีลาสติกของยาง ถ้ายางมีค่าความแข็งมากยางก็จะมีความเป็นอีลาสติกต่ำ (ยืดหยุ่นได้น้อย) กว่ายางที่มีค่าความแข็งต่ำๆ จากการทดลองและเปรียบเทียบผลของการใช้สารตัวเติมทั้งสองชนิดในปริมาณ และอัตราส่วนที่เท่ากัน (การทดลองชุดที่ 1 และชุดที่ 2) พบว่า ฮาร์ดเคลย์ ให้ค่าความแข็งของยาง สูงกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต และเมื่อนำสารตัวเติมทั้งสองชนิดมาผสมกันที่อัตราส่วนต่างๆ กัน (การทดลองชุดที่ 3) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของฮาร์ดเคลย์ ความแข็งของยางจะเพิ่มขึ้น สูงกว่าการเพิ่มปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วนที่เท่ากัน ดังนั้นการเพิ่มปริมาณของสารตัวเติมในสูตรของยาง ให้ผลที่มีประสิทธิภาพเป็นอย่างมากต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งของยาง ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากว่า ปริมาณของสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้นในสูตรของยางจะเจือจางปริมาณของเนื้อยาง (มีความเป็นอีลาสติกสูง) ให้น้อยลง จึงทำให้ยางมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น ส่วนในกรณีที่ฮาร์ดเคลย์ ให้ค่าความแข็งสูงกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตน่าจะมีผลมาจาก ขนาด และรูปร่างของอนุภาคสารตัวเติมทั้งสองชนิดที่มีความแตกต่างกัน ซึ่งปัจจัยข้อนี้มีส่วนสำคัญต่อการจัดเรียงตัวของอนุภาคของสารตัวเติมในเนื้อของยางและจะส่งผลต่อค่าความแข็งของยาง (Wolf 1959)

##### 4.1.2 ความต้านแรงดึง ความยืดเมื่อขาด โมดูลัสที่ความยืดร้อยละ 100 และความต้านทานแรงฉีกขาด

เมื่อเพิ่มปริมาณของสารตัวเติมทั้งสองชนิดในแต่ละชุดการทดลองพบว่า ค่าความต้านแรงดึง ความยืดเมื่อขาด และความต้านทานแรงฉีกขาดต่ำลง จึงอาจสันนิษฐานได้ว่าเมื่อปริมาณ (อนุภาค) ของสารตัวเติมเพิ่มขึ้น แนวโน้มในการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคของสารตัวเติมย่อมสูงขึ้น ทำให้โอกาสในการเกิดพันธะยึดเกาะกัน ระหว่างอนุภาคของสารตัวเติมด้วยกันเองย่อมมีมากกว่าการยึดเกาะกับสายโซ่โมเลกุลของยางหรือส่วนที่เป็น rubber matrix (ถ้าอนุภาคของสารตัวเติมเกิดพันธะกับสายโซ่โมเลกุลของยางได้ดี (อนุภาคของสารตัวเติมกระจายตัวในยางได้ดี) เมื่อมีแรงมากกระทำ (แรงดึง) เพื่อให้ยางมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง อนุภาคของสารตัวเติมเหล่านั้นสามารถเคลื่อนตัวไปพร้อมๆ กับสายโซ่โมเลกุลของยางในขณะเดียวกันก็ช่วยเสริมแรงของยางด้วย โดยกลับกัน ถ้าอนุภาคของสารตัวเติมเกิดพันธะกับสายโซ่โมเลกุลของยางได้ไม่ดี (อนุภาคของสารตัวเติมกระจายตัวในยางได้ไม่ดี) เมื่อมีแรงมากกระทำ เพื่อให้ยางมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง อนุภาคของสารตัวเติมเหล่านั้นก็ไม่สามารถเคลื่อนตัวไปพร้อมๆ กับสายโซ่โมเลกุลของยาง จะส่งผลให้เกิดความเค้นที่สายโซ่โมเลกุลของยาง และทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางขาดออกจากกันได้) ส่วนในกรณีที่การเพิ่มปริมาณของฮาร์ดเคลย์มีผลทำให้

ค่าความต้านแรงดึง ความยืดเมื่อขาดและความต้านทานแรงฉีกขาดต่ำลงมากกว่าการเพิ่มปริมาณของ แคลเซียมคาร์บอเนต สามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกับข้อ 4.1.1

อย่างไรก็ตามมีสิ่งที่น่าสนใจคือ เมื่อเพิ่มปริมาณของสารตัวเติมค่าโมดูลัส(มีความสัมพันธ์กับความแข็งดึง (stiffness) ของยาง) มีค่าสูงขึ้นตามปริมาณของสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้นซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากเมื่อปริมาณ (อนุภาค) ของสารตัวเติมเพิ่มขึ้น อนุภาคของสารตัวเติมเหล่านั้นจะเกิดการรวมตัวและเกาะกันเป็นกลุ่มมีขนาดใหญ่มากขึ้น ซึ่งจะส่งผลทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางถูกจำกัดพื้นที่ในการเคลื่อนตัวมากขึ้น ดังนั้นเมื่อมีแรงกระทำเพื่อให้ยางมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ย่อมจะต้องใช้แรงในการกระทำเพื่อให้ยางมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากขึ้นกว่าเดิม (ยางมีความแข็งดึงมากขึ้น)

#### 4.1.3 การยุบอยู่ตัว

การทดสอบการยุบอยู่ตัว เป็นการทดสอบความทนต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรของยางภายใต้ความเค้นอัด ค่าที่ได้มีหน่วยเป็นร้อยละของระยะยุบตัวที่ซึ่งขึ้นทดสอบไม่สามารถคืนตัวสู่ความหนาเดิมได้ โดยค่าการยุบอยู่ตัวจะมีความสัมพันธ์กับความเป็นอีลาสติคของยาง ถ้ายางมีค่าการยุบอยู่ตัวต่ำๆ แสดงถึง ความเป็นอีลาสติคสูง จากการทดลองเมื่อเพิ่มปริมาณของสารตัวเติม พบว่าค่าการยุบอยู่ตัวมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณของสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น (การเพิ่มปริมาณฮาร์ดเคลย์ให้ค่าการยุบอยู่ตัวสูงกว่าการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต) ซึ่งสามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกับข้อ 4.1.1

#### 4.2 สมบัติการวัลคาไนซ์

ผลของสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ของยาง นับเป็นปัจจัยสำคัญอีกข้อหนึ่งที่มีผลต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางให้มีคุณสมบัติเหมาะสมตรงตามความต้องการได้ นอกเหนือจากสมบัติเชิงกลกล เนื่องจากสารตัวเติมมีสมบัติทางเคมีที่แตกต่างกัน ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะมีผลต่ออัตราการวัลคาไนซ์ (cure rate) ระยะเวลาเริ่มคงรูป (scorch time) และระยะเวลาคงรูป(cure time) ของยาง ถ้าสารตัวเติมมีสมบัติเป็นต่างก็มีแนวโน้มที่จะช่วยเสริมประสิทธิภาพของสารตัวเร่ง ในการช่วยให้ยางเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ได้ดียิ่งขึ้น ตรงกันข้ามถ้ามีสมบัติเป็นกรดก็จะไปหน่วงประสิทธิภาพของสารตัวเร่งได้ (Wolf 1959)

จากการทดลองเมื่อเพิ่มปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนต(การทดลองชุดที่ 1) พบว่าระยะเวลาเริ่มคงรูป และระยะเวลาคงรูปมีแนวโน้มสั้นลง ในขณะที่อัตราการวัลคาไนซ์มีแนวโน้มเร็วขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณของฮาร์ดเคลย์(การทดลองชุดที่ 2) พบว่าระยะเวลาเริ่มคงรูปแนวโน้มสั้นลงเช่นเดียวกัน และสั้นกว่าระยะเวลาเริ่มคงรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต สำหรับระยะเวลาคงรูปมีแนวโน้มนานขึ้นตามปริมาณของฮาร์ดเคลย์ที่เพิ่มขึ้น ส่วนอัตราการวัลคาไนซ์มีแนวโน้มช้าลง จึงมีเหตุผลที่สันนิษฐานได้ว่า การใช้ปริมาณฮาร์ดเคลย์เพิ่มขึ้น น่าจะมีผลต่อประสิทธิภาพของสารตัวเร่ง (MBTS และ DPG) ในสูตรของยางที่ใช้ในการทดลองนี้มากกว่าการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วนที่เท่ากัน เมื่อนำสารตัวเติมทั้งสองชนิดมาผสมกันที่อัตราส่วนต่างๆกัน(การทดลองชุดที่ 3) พบว่าสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางจะแปรเปลี่ยนไปตามปริมาณของสารตัวเติมทั้งสองชนิดว่าชนิดใดมีมากกว่ากัน เมื่อเปรียบเทียบกับคอมเปาวด์ที่ 3-2 (แคลเซียมคาร์บอเนต 150 ส่วนต่อยางร้อยละโดยน้ำหนักกับคอมเปาวด์ที่ 3-4 (แคลเซียมคาร์บอเนต 50 ส่วนต่อยางร้อยละโดยน้ำหนัก) กับคอมเปาวด์ที่ 3-4 (แคลเซียมคาร์บอเนต 50

ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนักกับฮาร์ดเคลย์ 150 ส่วนต่ออย่างร้อยละโดยน้ำหนัก)คอมเปาวด์ที่ 3-2 มีแนวโน้มของสมบัติการวัลคาไนซ์ของแคลเซียมคาร์บอเนตค่อนข้างโดดเด่นกว่าฮาร์ดเคลย์ ส่วนคอมเปาวด์ที่ 3-4 ก็มีแนวโน้มของสมบัติการวัลคาไนซ์ของฮาร์ดเคลย์ค่อนข้างโดดเด่นกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต คือมีระยะเวลาเริ่มคงรูปสั้น แต่มีระยะเวลาคงรูปนาน และอัตราการวัลคาไนซ์ช้ากว่าคอมเปาวด์ที่ 3-2

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ หัวหน้ากลุ่มงานเทคโนโลยีผลิตภัณฑ์ 1 คุณพวยับ นามประเสริฐ หัวหน้างานยาง คุณดรุณี วัชรารื่องวิทย์ 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. R.P. Brown **Physical Testing of Rubbers**. London : Applied Science Publishers Ltd, 1979.
8. R.F. Wolf. Nonblack compounding ingredients. In M. Morton. **Rubber Technology**. New York : Reinhold Publishing Corporation, 1959.
9. A.D.Thorn, and R.A. Robinson. Compound Design. In Anil K. Bhowmick **Rubber Products Manufacturing Technology**. New York : Marcel Dekker Inc., 1994.
10. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. ศัพท์บัญญัติผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมยาง. **๙10**. หน้า 9 – 10, 40,45,50.



ภาคผนวก ก

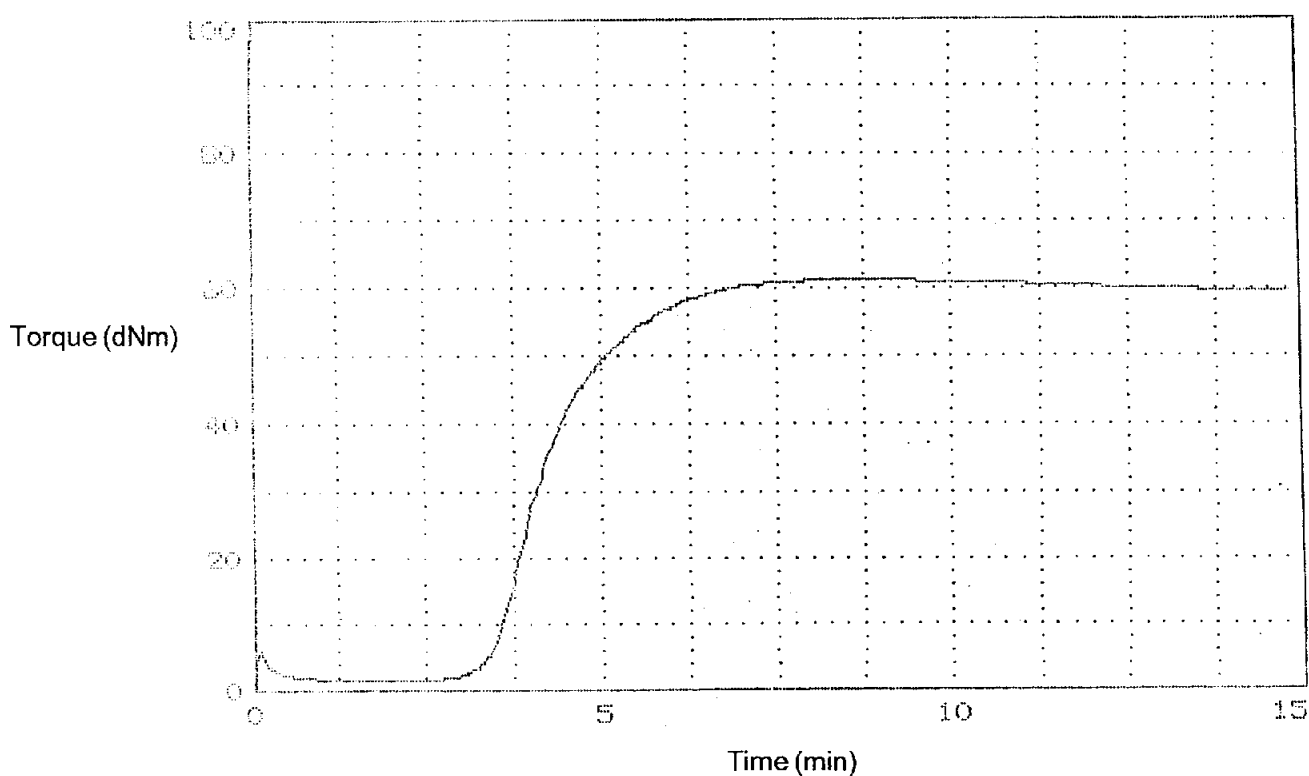
# Rheometer Summary Report

## Rubber Technology Division

Wednesday February 20, 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
02/20/02	FILL 1-1	61.18	1.43	3.10	3.29	3.54	4.13	5.73	P



ภาพที่ ก -1 Rheometer curve ของคอมปาวด์ที่ 1-1 : ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 3.29 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 5.73 นาที

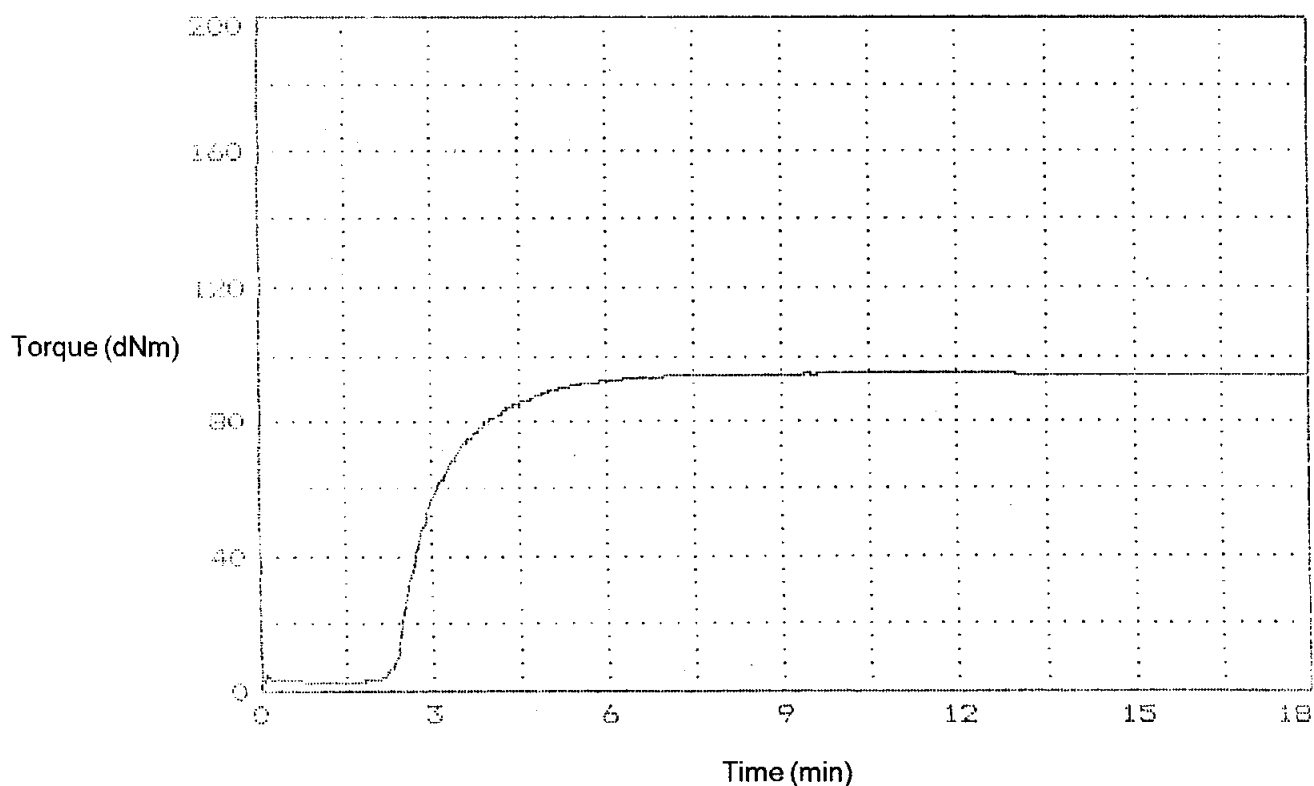
# Rheometer Summary Report

## Rubber Technology Division

Wednesday February 26, 2002

COMPOUND ID: R-34-A	DESCRIPTION: DSS/KARTPAN	
CHART RANGE: 200 dNm	CHART SPEED: 20 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
02/26/02	FILL1-2	94.93	2.53	2.39	2.50	2.69	3.19	5.11	P



ภาพที่ ก -2 Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 1-2 : ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 2.50 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 5.11 นาที

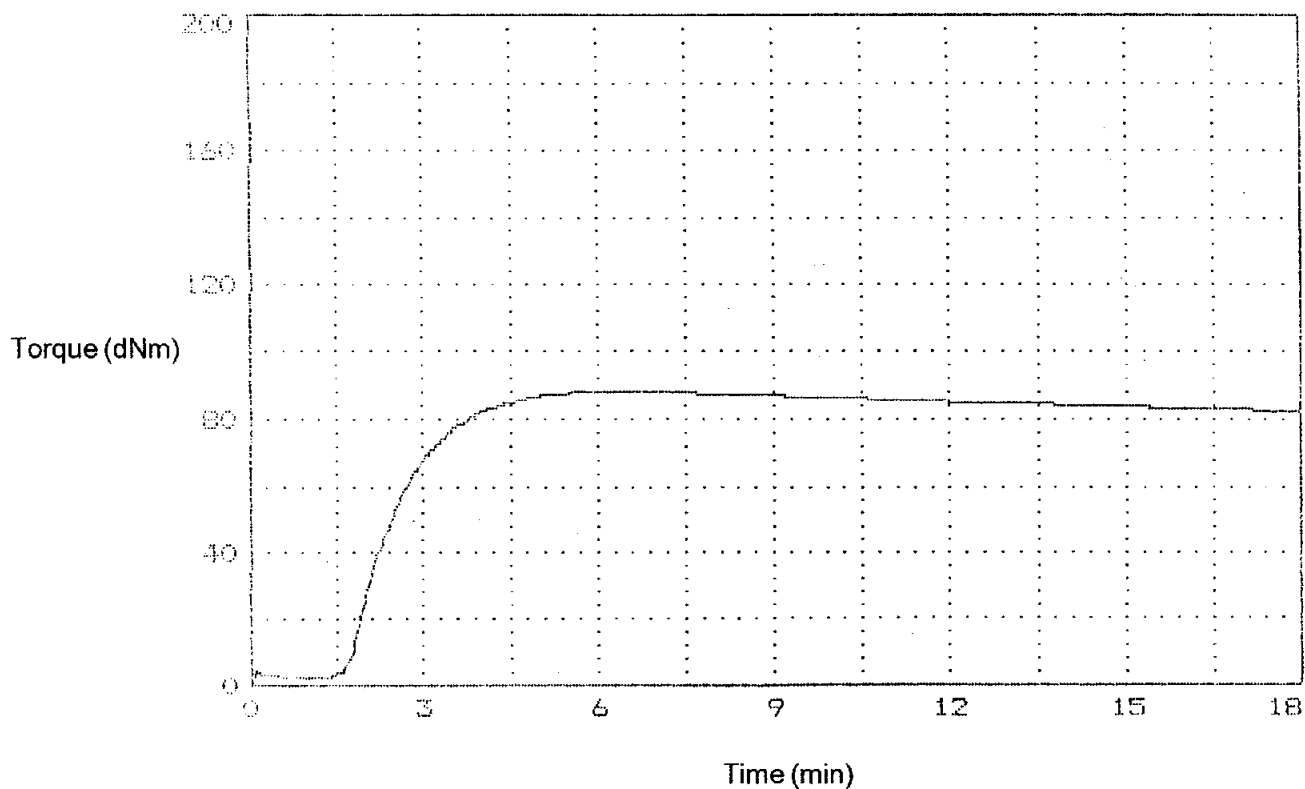
# Rheometer Summary Report

## Rubber Technology Division

Wednesday February 26, 2002

COMPOUND ID: R-34-A	DESCRIPTION: DSS/KARTPAN	
CHART RANGE: 200 dNm	CHART SPEED: 20 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
02/26/02	FILL1-3	88.08	2.53	1.78	1.86	2.03	2.64	4.25	P



ภาพที่ ก -3 Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 1-3 : ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 1.86 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 4.25 นาที

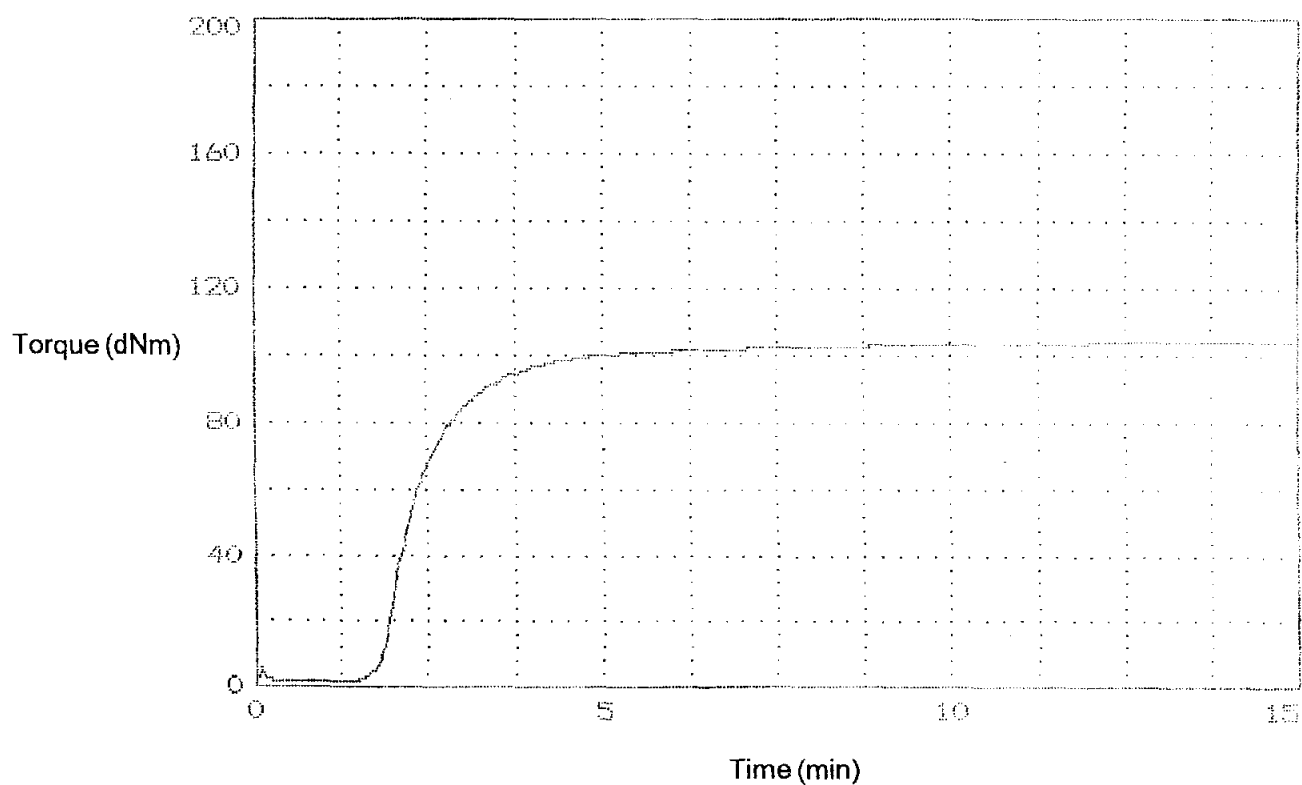
# Rheometer Summary Report

## Rubber Technology Division

Wednesday February 15, 2002

COMPOUND ID: R-34-A	DESCRIPTION: DSS/KARTPAN	
CHART RANGE: 100 dNm	CHART SPEED: 20 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
02/15/02	FILL1-4	103.99	1.29	1.60	1.71	1.88	2.27	3.71	P



ภาพที่ ก -4 Rheometer curve ของคอมปาวด์ที่ 1-4: ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 1.71 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 3.71 นาที

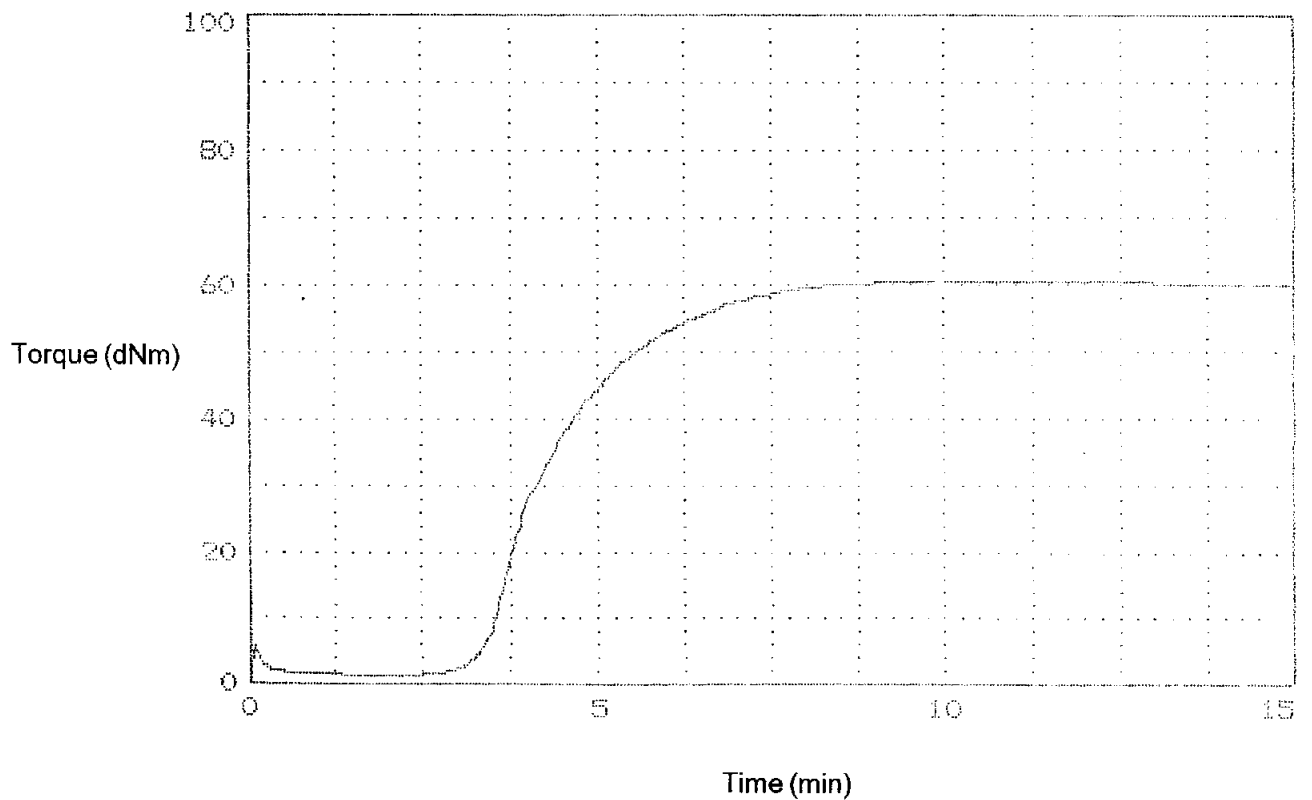
# Rheometer Summary Report

## Rubber Technology Division

Wednesday February 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
02/14/02	FILL2-1	60.46	1.22	3.04	3.23	3.46	4.19	6.35	P



ภาพที่ ก -5 Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 2-1 : ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 3.23 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 6.35 นาที

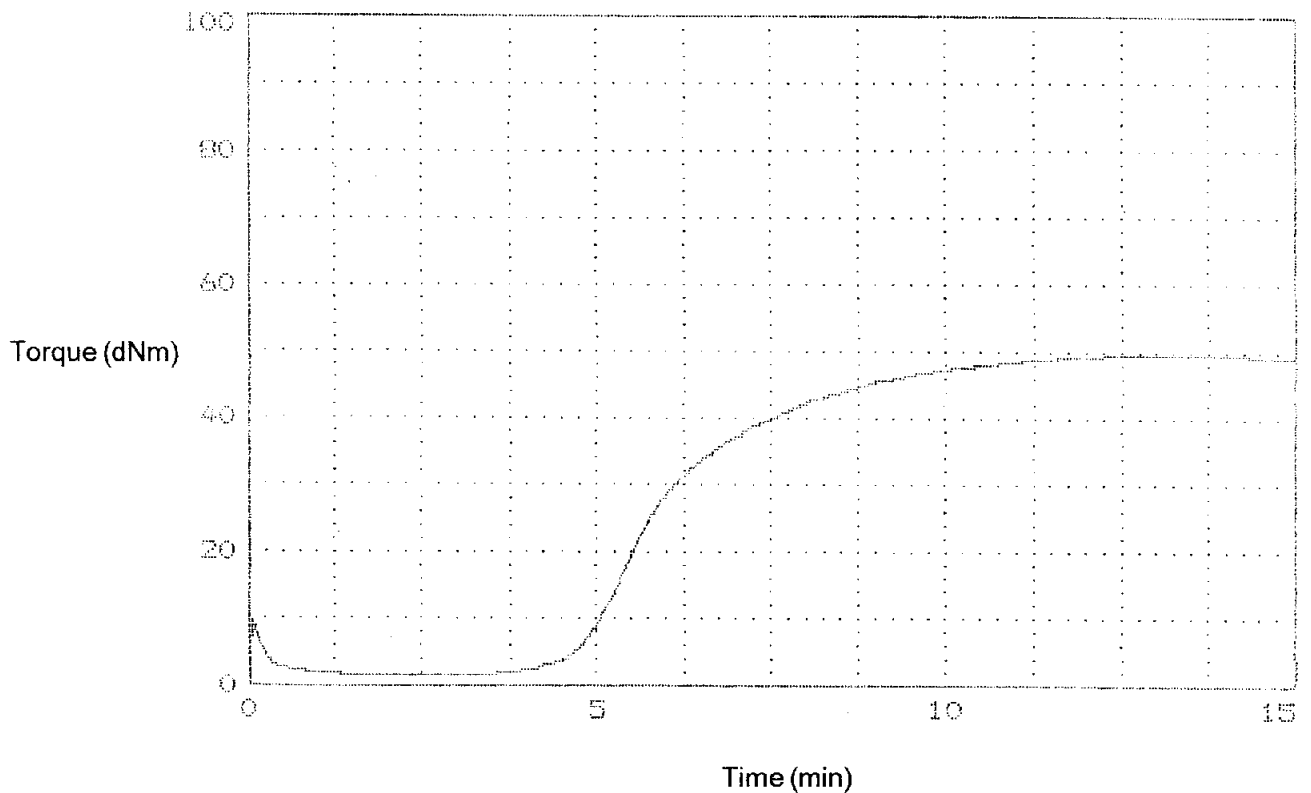
# Rheometer Summary Report

## Rubber Technology Division

Wednesday February 20, 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
02/20/02	FILL2-2	49.56	1.58	4.19	4.50	4.88	5.83	8.85	P



ภาพที่ ก -6 Rheometer curve ของคอมเปาเวดท์ที่ 2-2 : ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 4.50 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 8.85 นาที

# Rheometer Summary Report

## Rubber Technology Division

Wednesday February 20, 2002

COMPOUND ID: R-34-A

DESCRIPTION: DSS/KARTPAN

CHART RANGE: 200 dNm

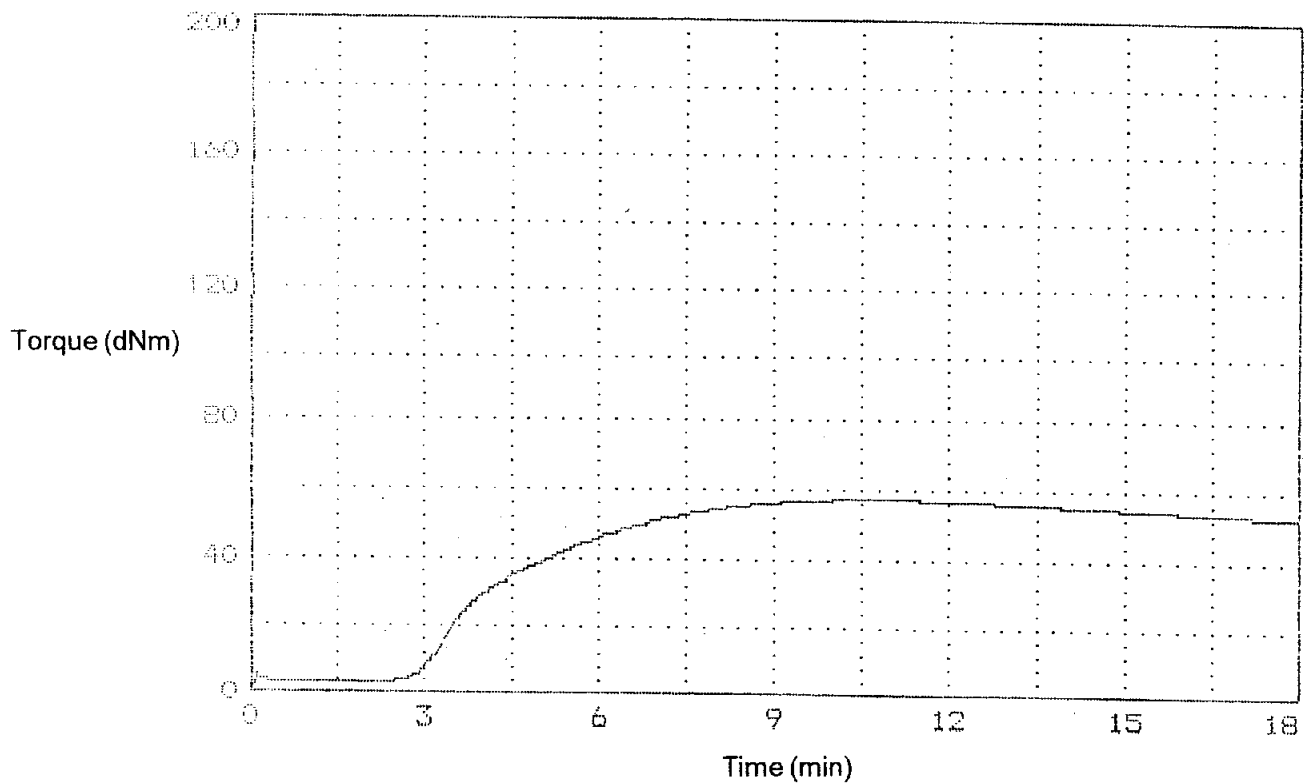
CHART SPEED: 20 min

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
02/20/02	FILL2-3	57.41	2.90	2.97	3.17	3.44	4.61	8.11	P



ภาพที่ ก -7 Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 2-3: ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 3.17 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 8.11 นาที

# Rheometer Summary Report

## Rubber Technology Division

Wednesday February 20, 2002

COMPOUND ID: R-34-A

DESCRIPTION: DSS/KARTPAN

CHART RANGE: 100 dNm

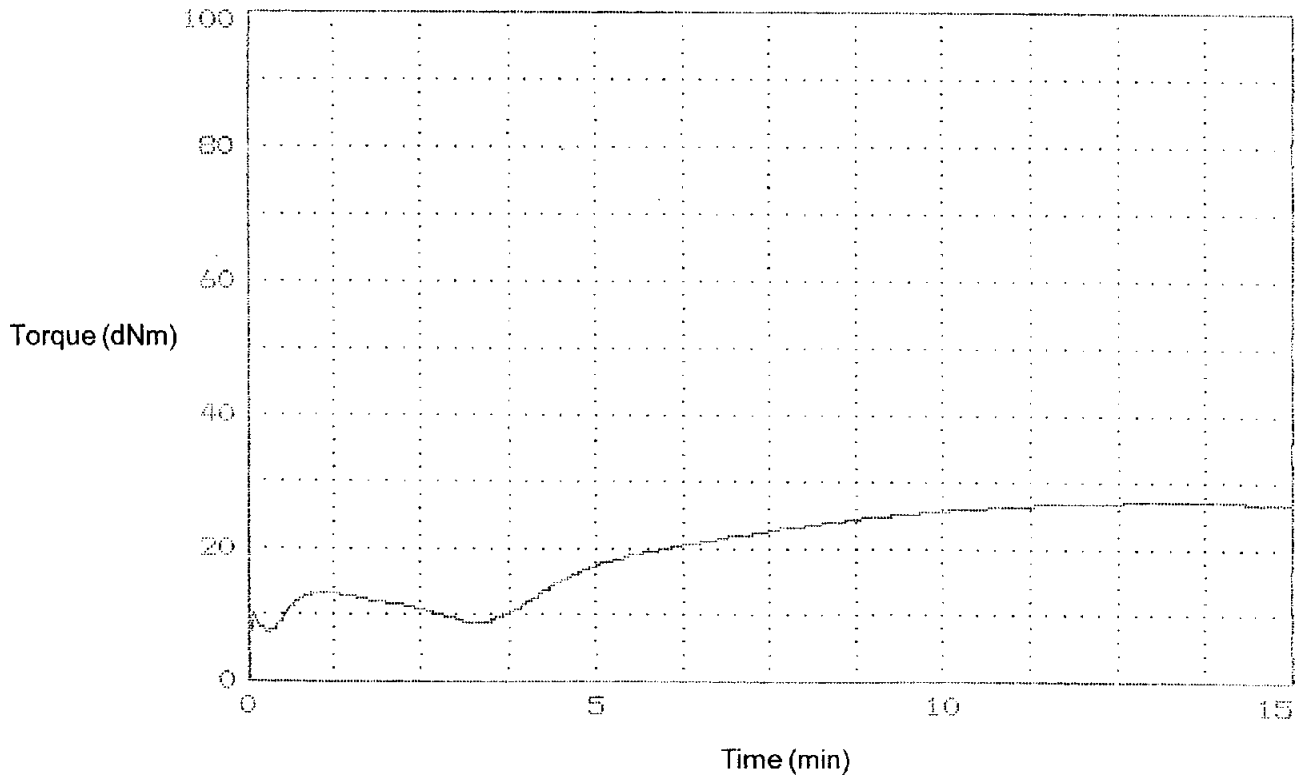
CHART SPEED: 15 min

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
02/20/02	FILL2-4	27.11	7.32	0.50	0.56	3.63	5.02	9.42	P



ภาพที่ ก -8 Rheometer curve ของคอมเปาต์ที่ 2-4 : ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 0.56 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 9.42 นาที



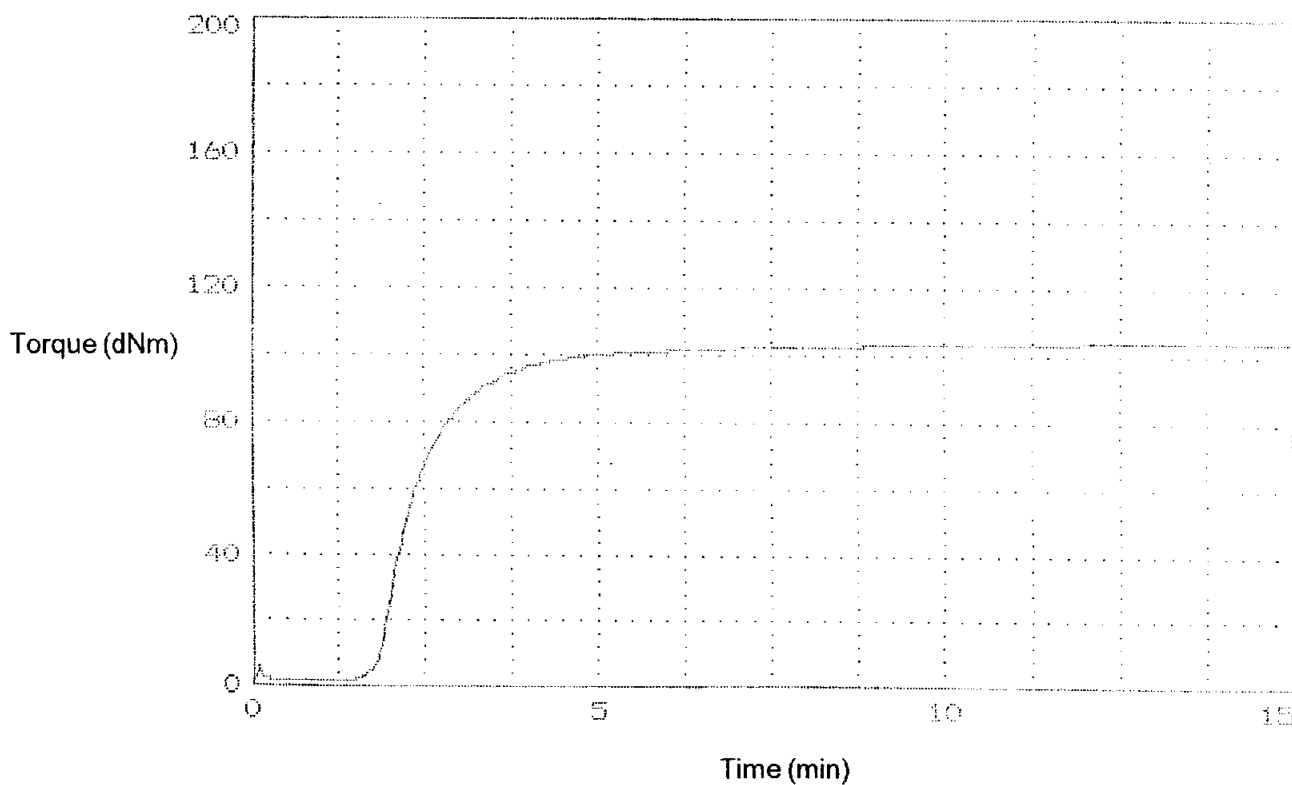
# Rheometer Summary Report

## Rubber Technology Division

Wednesday February 15, 2002

COMPOUND ID: R-34-A	DESCRIPTION: DSS/KARTPAN	
CHART RANGE: 100 dNm	CHART SPEED: 20 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
02/15/02	FILL3-1	103.99	1.29	1.60	1.71	1.88	2.27	3.71	P



ภาพที่ ก -9 Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 3-1 : ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 1.71 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 3.71 นาที

# Rheometer Summary Report

## Rubber Technology Division

Wednesday February 10, 2002

COMPOUND ID: R-34-A

DESCRIPTION: DSS/KARTPAN

CHART RANGE: 100 dNm

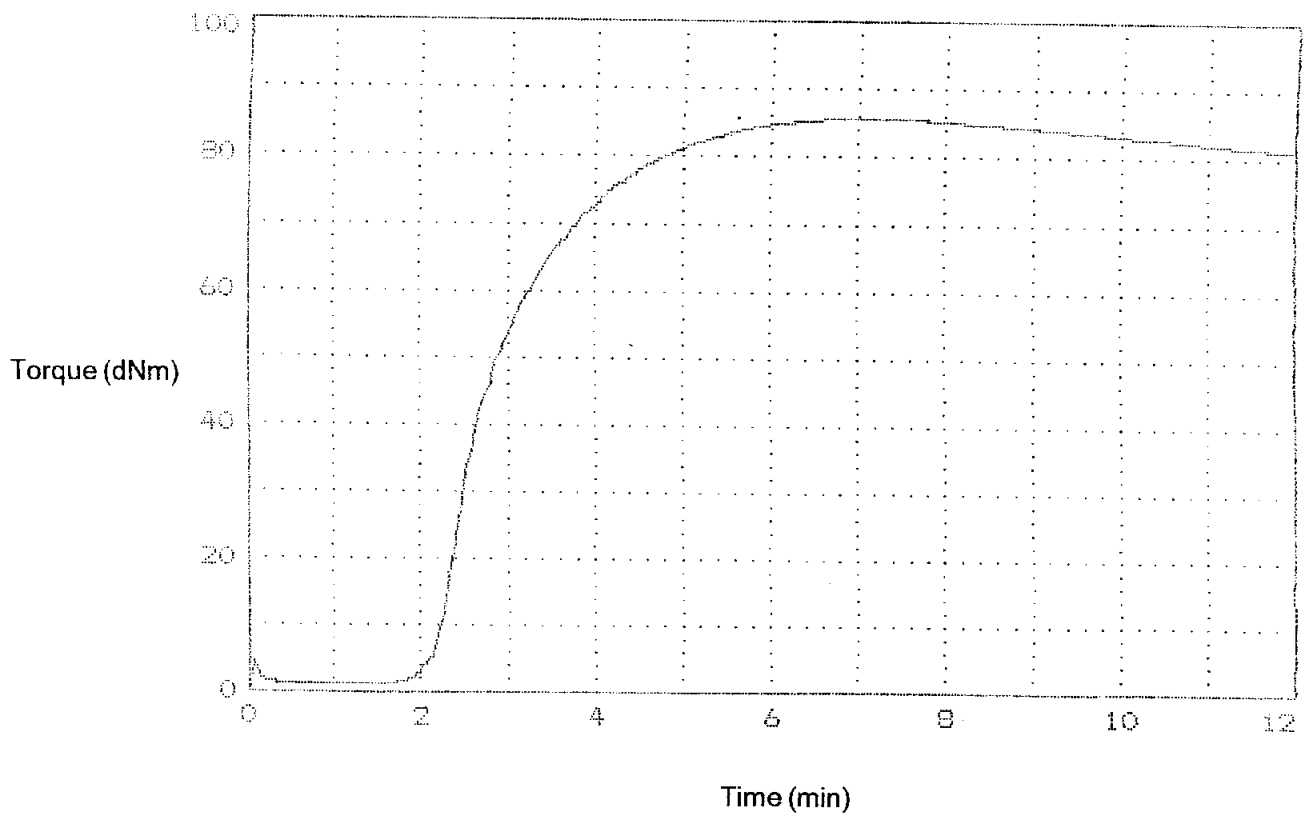
CHART SPEED: 12 min

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
02/10/02	FILL3-2	85.63	1.08	1.95	2.07	2.25	2.72	4.47	P



ภาพที่ ก -10 Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 3-2 : ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 2.07 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 4.47 นาที

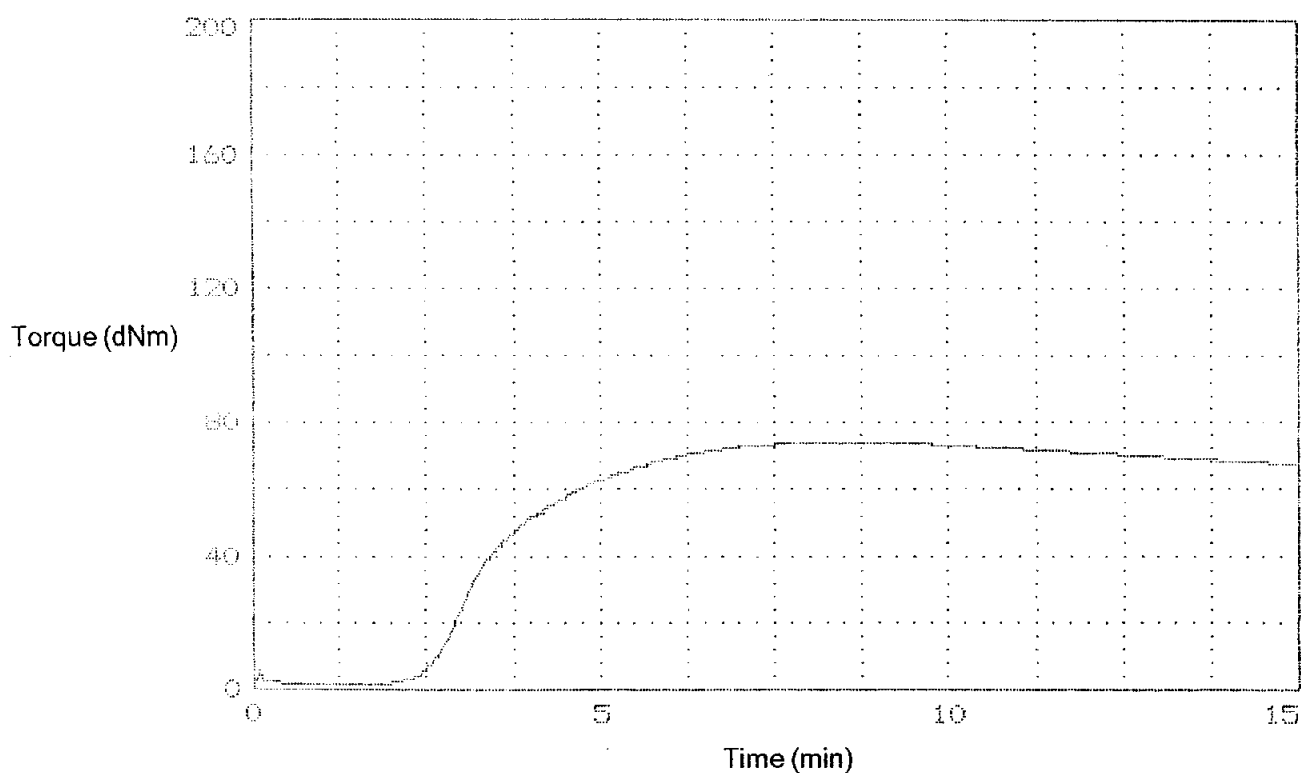
# Rheometer Summary Report

## Rubber Technology Division

Wednesday February 15, 2002

COMPOUND ID: R-34-A	DESCRIPTION: DSS/KARTPAN	
CHART RANGE: 200 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
02/15/02	FILL3-3	73.87	1.65	2.23	2.40	2.67	3.38	5.65	P



ภาพที่ ก -11 Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 3-3 : ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 2.40 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 5.65 นาที

# Rheometer Summary Report

## Rubber Technology Division

Wednesday February 10, 2002

COMPOUND ID: R-34-A

DESCRIPTION: DSS/KARTPAN

CHART RANGE: 100 dNm

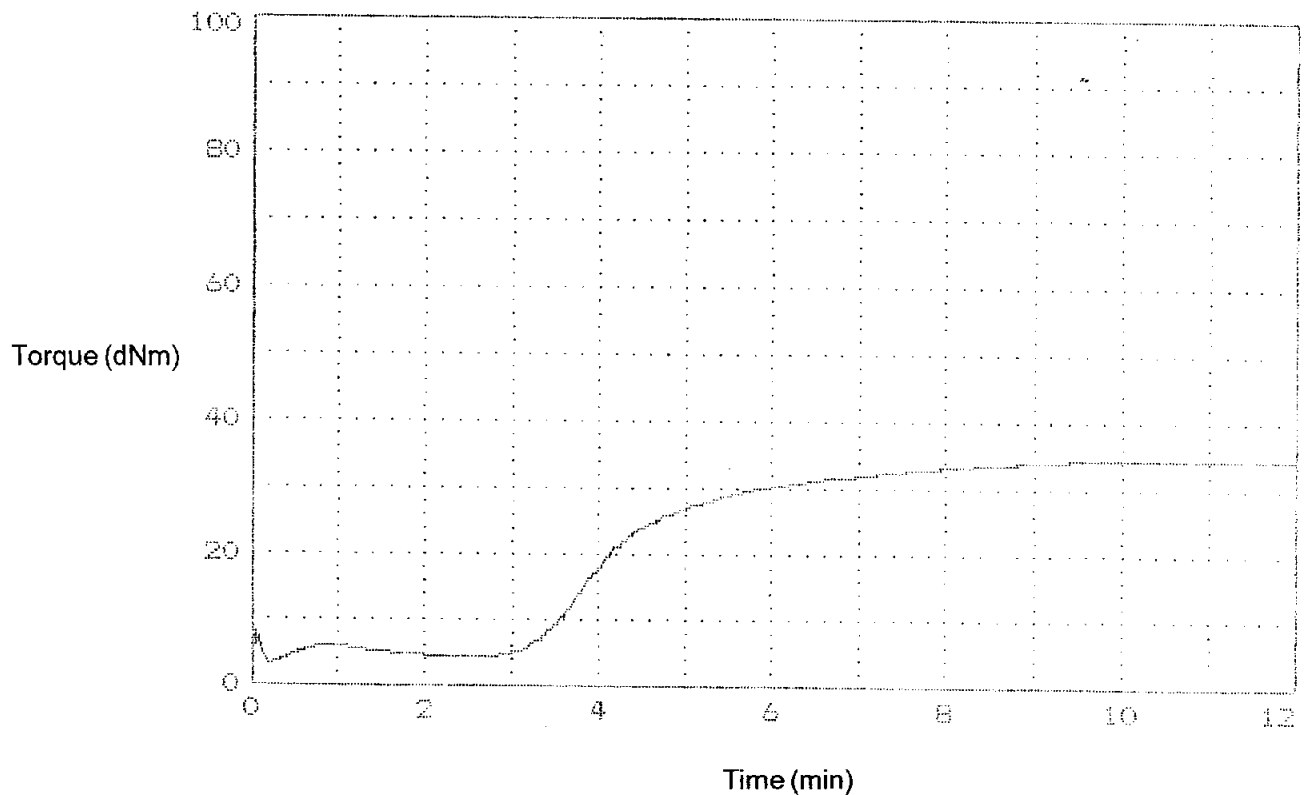
CHART SPEED: 12 min

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
02/10/02	FILL3-4	34.57	3.37	0.50	0.67	3.32	4.10	6.70	P



ภาพที่ ก -12 Rheometer curve ของคอมเปาวด์ที่ 3-4 : ระยะเวลาเริ่มคงรูป ( $t_2$ ) 0.67 นาที, ระยะเวลาคงรูป ( $t_{90}$ ) 6.70 นาที

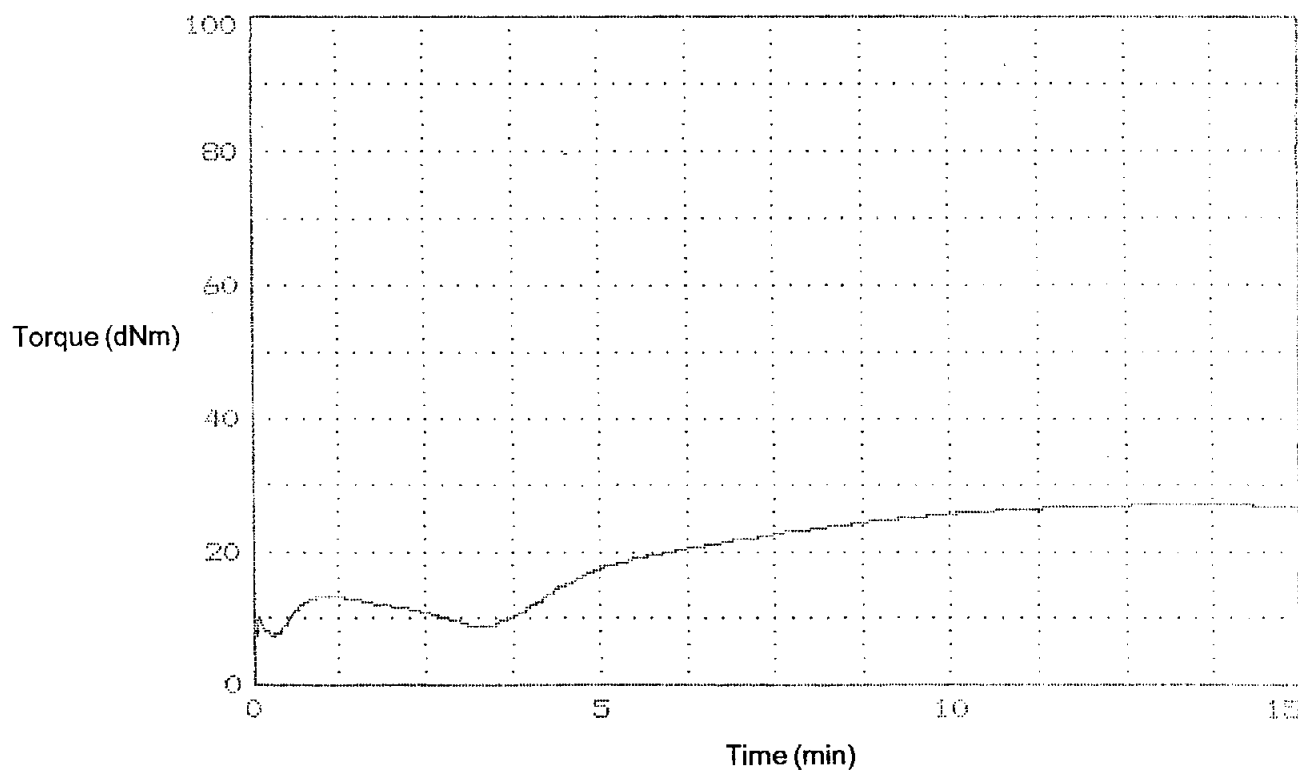
# Rheometer Summary Report

## Rubber Technology Division

Wednesday February 20, 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
02/20/02	FILL3-5	27.11	7.32	0.50	0.56	3.63	5.02	9.42	P



ภาพที่ ก -13 Rheometer curve ของคอมเปาต์ที่ 3-5 : ระยะเวลาดำเนินการ ( $t_2$ ) 0.56 นาที, ระยะเวลาดำเนินการ ( $t_{90}$ ) 9.42 นาที