

ผลของขนาดอนุภาคและปริมาณสารตัวเติมต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล
ของยางธรรมชาติที่ผ่านการวัลคาไนซ์



นางสาวโอบเอื้อ อิ่มวิทยา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-346-662-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF PARTICLE SIZE AND QUANTITY OF FILLERS ON PHYSICAL AND
MECHANICAL PROPERTIES OF VULCANIZED NATURAL RUBBER



MISS AOPEAU IMVITTAYA

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Applied Polymer Science and Textile Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-346-662-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของขนาดอนุภาคและปริมาณสารตัวเติมต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่ผ่านการวัลคาไนซ์

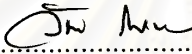
โดย นางสาวโอบเอื้อ อิมวิทยา

ภาควิชา วัสดุศาสตร์

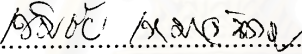
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร

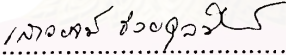
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม คร.นุชนาฏ ฌ ระนอง

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท



..... คณะบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย โพธิ์พิจิตร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เข็มชัย เหมะจันทร์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ดร.นุชนาฏ ฌ ระนอง)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ สันติสุข)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.อุษา แสงวัฒนาโรจน์)

นางสาวโอบเอื้อ อิมวิทยา : ผลของขนาดอนุภาคและปริมาณสารตัวเติมต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่ผ่านการวัลคาไนซ์. (EFFECTS OF PARTICLE SIZE AND QUANTITY OF FILLERS ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF VULCANIZED NATURAL RUBBER) อ.ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตรร์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.นุชนาฏ ฌ ระนอง, 132 หน้า. ISBN 974-346-662-2.

งานวิจัยนี้ได้นำเขม่าดำ (N330, N550 และ N660) และแคลเซียมคาร์บอเนต มาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ STR 5L เพื่อศึกษาผลของขนาดอนุภาคและปริมาณสารตัวเติมเหล่านี้ต่อสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของยางรองแท่นเครื่องจักร จากการทดลองพบว่าการใช้เขม่าดำ N330 ซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กที่สุด จะให้สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ดีที่สุด ด้วยเหตุนี้จึงได้นำแคลเซียมคาร์บอเนตมาใช้ร่วมกับเขม่าดำ N330 เพื่อลดต้นทุนการผลิต จากผลการศึกษาทั้งสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกล พบว่า การใช้เขม่าดำ N330 ร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนต ในอัตราส่วน 45/15 โดยน้ำหนัก จะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติเหมาะสำหรับการทำยางรองแท่นเครื่องจักรมากที่สุด

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วัสดุศาสตร์

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ

ปีการศึกษา 2543

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4172556723 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEY WORD : CARBON BLACK / CALCIUM CARBONATE / NATURAL RUBBER / MECHANICAL PROPERTY / PHYSICAL PROPERTY

AOPEAU IMVITTAYA : EFFECTS OF PARTICLE SIZE AND QUANTITY OF FILLERS ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF VULCANIZED NATURAL RUBBER .
 THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SOAWAROJ CHUAYJULJIT, THESIS CO-ADVISOR :
 NUCHNAT NA-RANONG, Ph.D. 132 pp. ISBN 974-346-662-2.

In this research, effects of particle size and quantity of carbon black (N330, N550 and N660) and calcium carbonate fillers on physical and mechanical properties of the natural rubber STR 5L used as engine mounts were studied. It was found that the optimum properties of the products can be achieved by using carbon black N330 which has the finest particle size. For this reason, calcium carbonate was incorporated with carbon black N330 in order to reduce the production cost. By considering both physical and mechanical properties, it can be concluded that the most appropriate ratio between carbon black N330 and calcium carbonate in making engine mounts is 45 / 15 by weight.

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department of Materials Science

Field of study Applied Polymer Science and Textile Technology

Academic year 2000

Student's signature

Advisor's signature

Co-advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือทุกด้านเพื่อให้งานวิจัยนี้สำเร็จด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ดร.นุชนาฏ ณ ระนอง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่ได้แนะนำแนวทางในการวิเคราะห์ และแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้ และความช่วยเหลือต่างๆ มากมาย

ขอขอบพระคุณ อาจารย์วราภรณ์ ขจรณ์ไชยกุล ที่ได้ให้โอกาส และการคำแนะนำในการทำวิจัยเรื่องนี้

ขอขอบพระคุณ สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ และสารเคมีต่างๆ และขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้คำแนะนำ และช่วยเหลือในด้านต่างๆ อย่างดียิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย และภาควิชาวัสดุศาสตร์ ที่ช่วยเหลือด้านเงินทุนในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และศูนย์วิจัยโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือทดสอบ และให้ข้อมูลเทคนิคต่างๆ และขอขอบพระคุณ บริษัทไทยคาร์บอนแบล็คจำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์คาร์บอนแบล็คเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ Dr. Meng – Jiao Wang ที่ให้ความอนุเคราะห์เอกสารทางวิชาการ ตลอดจนคำแนะนำที่เป็นประโยชน์สำหรับงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณทุกท่านหากมิได้เอื้อนาม ในการช่วยเหลือด้านต่างๆ งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลง

ท้ายสุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ที่แนะนำสั่งสอน และเป็นกำลังใจในการทำวิจัยตลอดมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. ทฤษฎีและวารสารปริทรรศน์.....	3
2.1 ยางธรรมชาติ.....	3
2.2 เขม่าดำ.....	5
2.2.1 การแบ่งชนิดของเขม่าดำ.....	5
2.2.2 สมบัติของเขม่าดำ.....	6
2.3 แคลเซียมคาร์บอเนต.....	14
2.4 สมบัติพลวัตเชิงกล.....	19
3. การทดลอง.....	25
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	25
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	26
3.3 การทดสอบสมบัติของยางธรรมชาติ และการบดผสมยางกับสารเคมี.....	27
3.4 การทดสอบการแปรรูป และการวัลคาไนซ์.....	31
3.5 การทดสอบสมบัติของยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์.....	32
4. ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	36
4.1 สมบัติของยางธรรมชาติ.....	36
4.2 สมบัติของยางที่ผสมสารตัวเติมชนิดเดียว.....	36
4.2.1 ความหนืดมูนิ.....	36
4.2.2 เวลาที่ยางเริ่มวัลคาไนซ์ และเวลาวัลคาไนซ์.....	38
4.2.3 ความแข็ง.....	41
4.2.4 ความทนแรงดึง ระยะยืดเมื่อขาด และมอดุลัส.....	44
4.2.5 ความทนการฉีกขาด.....	54

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.6 ความต้านทานการสึกหรอ.....	57
4.2.7 ความต้านทานการหักงอ.....	58
4.2.8 ความต้านทานการล้าตัว.....	60
4.2.9 การกระดอน.....	61
4.2.10 การคืบตัว.....	63
4.3 สมบัติของยางที่ผสมสารตัวเติมสองชนิด.....	64
4.3.1 ความหนืดมูนิ.....	65
4.3.2 เวลาที่ยางเริ่มวัลคาไนซ์ และเวลาวัลคาไนซ์.....	66
4.3.3 ความแข็ง.....	68
4.3.4 ความทนแรงดึง ระยะยืดเมื่อขาด และมอดุลัส.....	70
4.3.5 ความทนการฉีกขาด.....	77
4.3.6 ความต้านทานการสึกหรอ.....	79
4.3.7 ความต้านทานการหักงอ.....	80
4.3.8 ความต้านทานการล้าตัว.....	82
4.3.9 การกระดอน.....	83
4.3.10 การคืบตัว.....	84
4.4 สมบัติพลวัตเชิงกล.....	85
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	95
รายการอ้างอิง.....	97
ภาคผนวก.....	101
ภาคผนวก ก การทดสอบยางแท่ง.....	102
ภาคผนวก ข การคำนวณปริมาณยางและสารเคมีสำหรับเครื่องบดผสมระบบปิด.....	106
ภาคผนวก ค ผลการทดลองสมบัติพลวัตเชิงกล.....	108
ประวัติผู้เขียน.....	117

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 สมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติ.....	5
2.2 การแบ่งชนิดของเขม่าดำ.....	7
2.3 ค่าการดูดซึม ไอ โอดีน, ไน โตรเจน, CTAB, DBP และ 24M4 DBP ของเขม่าดำ.....	10
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของยางกับขนาดอนุภาคและ โครงสร้างของเขม่าดำ.....	11
2.5 สมบัติของแคลเซียมคาร์บอเนต.....	16
2.6 องค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า.....	17
3.1 สูตรที่ไม่ใส่สารตัวเติม และสูตรที่ใส่เขม่าดำชนิดต่างๆ.....	27
3.2 สูตรที่ใส่แคลเซียมคาร์บอเนต.....	28
3.3 สูตรที่ใส่ทั้งเขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนต.....	28
3.4 การทดสอบความต้านทานการสึกหรอด้วยเครื่อง Akron.....	33
4.1 สมบัติของยางแท่ง STR 5L	36
4.2 ความหนืดมูนิของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ.....	37
4.3 ความหนืดมูนิของยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนต.....	37
4.4 เวลาที่ยางผสมเขม่าดำเริ่มวัลคาไนซ์.....	38
4.5 เวลาที่ยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเริ่มวัลคาไนซ์.....	38
4.6 เวลาวัลคาไนซ์ของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ.....	40
4.7 เวลาวัลคาไนซ์ของยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนต.....	40
4.8 ความแข็งของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ ก่อนอบ.....	41
4.9 ความแข็งของยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนตก่อนอบ.....	41
4.10 ความแข็งของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ หลังอบ.....	42
4.11 ความแข็งของยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนตหลังอบ.....	43
4.12 ความทนแรงดึงของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ ก่อนอบ.....	44
4.13 ความทนแรงดึงของยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนตก่อนอบ.....	44
4.14 ความทนแรงดึงของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ หลังอบ.....	45
4.15 ความทนแรงดึงของยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนตหลังอบ.....	46
4.16 ระยะยืดเมื่อขาดของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ ก่อนอบ.....	47
4.17 ระยะยืดเมื่อขาดของยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนตก่อนอบ.....	47
4.18 ระยะยืดเมื่อขาดของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ หลังอบ.....	48

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
4.19	ระยะยืดเมื่อขาดของยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนตหลังอบ.....49
4.20	มอดุลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ ก่อนอบ.....50
4.21	มอดุลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนตก่อนอบ.....50
4.22	มอดุลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ หลังอบ.....52
4.23	มอดุลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนตหลังอบ.....52
4.24	ความทนการฉีกขาดของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ ก่อนอบ.....54
4.25	ความทนการฉีกขาดของยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนตก่อนอบ.....54
4.26	ความทนการฉีกขาดของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ หลังอบ.....55
4.27	ความทนการฉีกขาดของยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนตหลังอบ.....56
4.28	ความต้านทานการสึกหรอของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ.....57
4.29	ความต้านทานการสึกหรอของยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนต.....57
4.30	ความต้านทานการหักงอของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ.....59
4.31	ความต้านทานการหักงอของยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนต.....59
4.32	ความต้านทานการล้าตัวของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ.....60
4.33	ความต้านทานล้าตัวของยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนต.....60
4.34	การกระดอนของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ.....61
4.35	การกระดอนของยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนต.....62
4.36	การคืนตัวของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ.....63
4.37	การคืนตัวของยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนต.....63
4.38	ความเหนียวของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต.....65
4.39	เวลาที่ยางผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนตเริ่มวัลคาไนซ์.....66
4.40	เวลาวัลคาไนซ์ของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต.....67
4.41	ความแข็งของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนตก่อนอบ.....68
4.42	ความแข็งของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนตหลังอบ.....69
4.43	ความทนแรงดึงของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนตก่อนอบ.....70
4.44	ความทนแรงดึงของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนตหลังอบ.....71
4.45	ระยะยืดเมื่อขาดของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนตก่อนอบ.....72
4.46	ระยะยืดเมื่อขาดของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนตหลังอบ.....73

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
4.47	มอดูลัสที่ระยะยึด 100% และ 300% ของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และ แคลเซียมคาร์บอเนตก่อนอบ.....74
4.48	มอดูลัสที่ระยะยึด 100% และ 300% ของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และ แคลเซียมคาร์บอเนตหลังอบ.....76
4.49	ความทนการฉีกขาดของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนตก่อนอบ...77
4.50	ความทนการฉีกขาดของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนตหลังอบ....78
4.51	ความต้านทานการสึกกร่อนของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต.....79
4.52	ความต้านทานการหักงอของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต.....81
4.53	ความต้านทานการฉีกตัวของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต.....82
4.54	การกระดอนของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต.....83
4.55	การคืนตัวของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต.....84
4.56	ค่า $\tan \delta$ max และมอดูลัสที่ระยะยึด 100% และ 300% ของยางผสมสารตัวเติมชนิด และปริมาณต่างๆ.....91
ข.1	ตัวอย่างการคำนวณปริมาณยางและสารเคมีสำหรับเครื่องบดผสมระบบปิด.....106

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 โครงสร้างเขม่าดำแสดงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน.....	9
2.2 ลักษณะทางเคมีของพื้นผิวเขม่าดำ.....	12
2.3 หลักการวัดพื้นที่ผิวด้วย "t method" ซึ่งสัมพันธ์กับความเป็นรูพรุนของอนุภาคเขม่าดำ....	13
2.4 การกระจายขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนต.....	17
2.5 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบด.....	18
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดึงกับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ ในยางธรรมชาติ...18	
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ความเครียด และเวลา ของวัสดุวิสโคอีลาสติก.....	19
3.1 ขั้นตอนการบดผสมยางกับสารเคมี การทดสอบสมบัติของยางผสม การขึ้นรูปและการทดสอบสมบัติของยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์.....	30
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดมูนีกับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ.....	37
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเริ่มวัลคาไนซ์กับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ.....	39
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาวัลคาไนซ์กับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ.....	40
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ ก่อนอบ.....	42
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ หลังอบ.....	43
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดึงกับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ ก่อนอบ.....	45
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดึงกับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ หลังอบ.....	46
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะยืดเมื่อขาดกับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ ก่อนอบ.....	48
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะยืดเมื่อขาดกับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ หลังอบ.....	49
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสที่ระยะยืด 100% กับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ ก่อนอบ.....	51
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสที่ระยะยืด 300% กับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ ก่อนอบ.....	51
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสที่ระยะยืด 100% กับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ หลังอบ.....	53
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสที่ระยะยืด 300% กับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ หลังอบ.....	53
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนการฉีกขาดกับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ ก่อนอบ.....	55
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนการฉีกขาดกับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ หลังอบ.....	56
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการสึกหรอกับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ.....	58

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการหักงอกับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ.....	59
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการล้าตัวกับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ.....	61
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างการกระดอนกับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ.....	62
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างการคืนตัวกับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ.....	64
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดมูนีกับปริมาณเขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนต.....	65
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเริ่มวัดคาไนซ์กับปริมาณเขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนต.....	66
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาวัดคาไนซ์กับปริมาณเขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนต.....	68
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับปริมาณเขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนตก่อนอบ.....	69
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับปริมาณเขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนตหลังอบ.....	70
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดึงกับปริมาณเขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนต ก่อนอบ.....	71
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดึงกับปริมาณเขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนต หลังอบ.....	72
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะยืดเมื่อขาดกับปริมาณเขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนต ก่อนอบ.....	73
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะยืดเมื่อขาดกับปริมาณเขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนต หลังอบ.....	74
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสที่ระยะยืด 100% กับปริมาณเขม่าดำและ แคลเซียมคาร์บอเนตก่อนอบ.....	75
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสที่ระยะยืด 300% กับปริมาณเขม่าดำและ แคลเซียมคาร์บอเนตก่อนอบ.....	75
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสที่ระยะยืด 100% กับปริมาณเขม่าดำและ แคลเซียมคาร์บอเนตหลังอบ.....	76
4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสที่ระยะยืด 300% กับปริมาณเขม่าดำและ แคลเซียมคาร์บอเนตหลังอบ.....	77
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนการฉีกขาดกับปริมาณเขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนต ก่อนอบ.....	78
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนการฉีกขาดกับปริมาณเขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนต หลังอบ.....	79

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการลี้กหรือกับปริมาณเขม่าดำและ แคลเซียมคาร์บอเนต.....	80
4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการหักงอกับปริมาณเขม่าดำและ แคลเซียมคาร์บอเนต.....	81
4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการล้าตัวกับปริมาณเขม่าดำและ แคลเซียมคาร์บอเนต.....	82
4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างการกระดอนกับปริมาณเขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนต.....	83
4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างการคืนตัวกับปริมาณเขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนต.....	84
4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\tan \delta$ กับอุณหภูมิของยางผสมเขม่าดำ N330 ปริมาณต่างๆ.....	86
4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E' กับอุณหภูมิของยางผสมเขม่าดำ N330 ปริมาณต่างๆ.....	86
4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\tan \delta$ กับอุณหภูมิของยางผสมเขม่าดำ N550 ปริมาณต่างๆ.....	87
4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E' กับอุณหภูมิของยางผสมเขม่าดำ N550 ปริมาณต่างๆ.....	87
4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\tan \delta$ กับอุณหภูมิของยางผสมเขม่าดำ N660 ปริมาณต่างๆ.....	88
4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E' กับอุณหภูมิของยางผสมเขม่าดำ N660 ปริมาณต่างๆ.....	88
4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\tan \delta$ กับอุณหภูมิของยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนต ปริมาณต่างๆ.....	89
4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E' กับอุณหภูมิของยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนต ปริมาณต่างๆ.....	89
4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\tan \delta$ กับอุณหภูมิของยางผสมเขม่าดำ N330 และ แคลเซียมคาร์บอเนตปริมาณต่างๆ.....	90
4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E' กับอุณหภูมิของยางผสมเขม่าดำ N330 และ แคลเซียมคาร์บอเนตปริมาณต่างๆ.....	90
4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\tan \delta$ max กับปริมาณสารตัวเติม.....	92
4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\tan \delta$ max กับมอดุลัสที่ระยะยืด 100%.....	93
4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\tan \delta$ max กับมอดุลัสที่ระยะยืด 300%.....	93
ค.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\tan \delta$ และ E' กับอุณหภูมิของยางที่ไม่ใส่สารตัวเติม.....	108
ค.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\tan \delta$ และ E' กับอุณหภูมิของยางที่ใส่เขม่าดำ N330 30 phr.....	108
ค.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\tan \delta$ และ E' กับอุณหภูมิของยางที่ใส่เขม่าดำ N330 45 phr.....	109
ค.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\tan \delta$ และ E' กับอุณหภูมิของยางที่ใส่เขม่าดำ N330 60 phr.....	109

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
ค.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\tan \delta$ และ E' กับอุณหภูมิของยางที่ใส่เขม่าดำ N550 30 phr.....	110
ค.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\tan \delta$ และ E' กับอุณหภูมิของยางที่ใส่เขม่าดำ N550 45 phr.....	110
ค.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\tan \delta$ และ E' กับอุณหภูมิของยางที่ใส่เขม่าดำ N550 60 phr.....	111
ค.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\tan \delta$ และ E' กับอุณหภูมิของยางที่ใส่เขม่าดำ N660 30 phr.....	111
ค.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\tan \delta$ และ E' กับอุณหภูมิของยางที่ใส่เขม่าดำ N660 45 phr.....	112
ค.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\tan \delta$ และ E' กับอุณหภูมิของยางที่ใส่เขม่าดำ N660 60 phr.....	112
ค.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\tan \delta$ และ E' กับอุณหภูมิของยางที่ใส่ CaCO_3 , 15 phr.....	113
ค.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\tan \delta$ และ E' กับอุณหภูมิของยางที่ใส่ CaCO_3 , 30 phr.....	113
ค.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\tan \delta$ และ E' กับอุณหภูมิของยางที่ใส่ CaCO_3 , 45 phr.....	114
ค.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\tan \delta$ และ E' กับอุณหภูมิของยางที่ใส่ CaCO_3 , 60 phr.....	114
ค.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\tan \delta$ และ E' กับอุณหภูมิของยางที่ใส่เขม่าดำ/ CaCO_3 , 30/15 phr.....	115
ค.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\tan \delta$ และ E' กับอุณหภูมิของยางที่ใส่เขม่าดำ/ CaCO_3 , 45/15 phr.....	115
ค.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\tan \delta$ และ E' กับอุณหภูมิของยางที่ใส่เขม่าดำ/ CaCO_3 , 30/30 phr.....	116

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยเป็นผู้ผลิตยางธรรมชาติรายใหญ่ที่สุดของโลก โดยมีศักยภาพการผลิตปีละประมาณ 1.8 ล้านตัน ซึ่งผลผลิตส่วนใหญ่ส่งออกไปจำหน่ายยังต่างประเทศ และมีมูลค่าการส่งออกมากกว่าปีละ 6 หมื่นล้านบาท ซึ่งถ้ารวมกับมูลค่ายางที่ใช้ภายในประเทศแล้วเป็นรายได้ปีละนับแสนล้านบาทสิ่งเหล่านี้เป็นการเร่งเร้า และกระตุ้นให้ทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้องทั้งภาครัฐ ภาคเอกชน และเกษตรกรชาวสวนยางร่วมมือร่วมใจกันพัฒนากิจการยางของประเทศในทุกๆด้านให้เจริญก้าวหน้าอย่างต่อเนื่อง

ประเทศไทยมีการทำผลิตภัณฑ์ยางชนิดต่างๆจากยางธรรมชาติมาตั้งแต่สมัยสงครามโลก ซึ่งผลิตภัณฑ์ยางสำเร็จรูปที่ใช้ยางพาราในประเทศเป็นวัตถุดิบ ได้แก่ ยางรถชนิดต่างๆ ยางล้อเครื่องบิน ยางรัดของ ท่อยาง ผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้ในบ้าน เช่น เบาะ ที่นอน ฟองน้ำ รองเท้า ยาง และลูกโป่ง เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ รัฐบาลจึงพยายามอย่างยิ่งในการส่งเสริม และสนับสนุนให้มีการใช้ยางธรรมชาติในประเทศให้มากขึ้น เพื่อเพิ่มรายได้ของการส่งออกในรูปแบบผลิตภัณฑ์ยางสำเร็จรูป ตลอดจนเป็นการสร้างงานให้กับประเทศ โดยเน้นการพัฒนาอุตสาหกรรมขนาดย่อม นอกจากนี้ปัจจุบันได้มีการนำยางธรรมชาติมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อใช้ในงานด้านวิศวกรรมมากขึ้น เช่น ยางรองเครื่องจักร ยางรองคอสพาน วงแหวนหรือปะเก็นยาง เป็นต้น แต่เนื่องจากสภาวะวิกฤตทางเศรษฐกิจในปัจจุบัน ทำให้การประกอบธุรกิจอุตสาหกรรมต่างๆ รวมทั้งอุตสาหกรรมยางได้รับผลกระทบเป็นอย่างมาก ดังนั้นเพื่อควบคุมคุณภาพ และต้นทุนการผลิตในสภาวะตลาดปัจจุบัน จึงได้ทำการศึกษาผลของการใช้สารตัวเติมประเภทเสริมแรง (reinforcing filler) เช่น เขม่าดำ (carbon black) หลากหลายเกรดมาใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ยาง โดยเฉพาะสมบัติพลวัตเชิงกล (dynamic mechanical properties) รวมทั้งการใช้สารตัวเติมที่ไม่เสริมแรง (inert filler) ที่มีราคาถูก เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต เพื่อช่วยลดต้นทุนการผลิต

เขม่าดำที่ใช้เสริมแรงยางธรรมชาติ มีด้วยกันหลายเกรดตามขนาดอนุภาค และกรรมวิธีการผลิต ซึ่งทั้งขนาดอนุภาคและปริมาณเขม่าดำ จะมีผลต่อสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลเป็นอย่างมาก ดังนั้น การเลือกเกรดของเขม่าดำ และปริมาณที่เหมาะสม จะช่วยพัฒนาคุณภาพผลิตภัณฑ์ยางให้เหมาะสมกับการใช้งานด้านวิศวกรรม

การใช้แคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าเขม่าดำ จะไม่ช่วยด้านการเสริมแรง แต่จะมีผลลดต้นทุนการผลิต ซึ่งถ้าใช้ปริมาณมาก จะทำให้สมบัติเชิงกลต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ยางลดลง ทั้งในด้านความต้านทานการสึกหรอ (abrasion resistance) ความทนแรงดึง (tensile strength)

และความทนทานการฉีกขาด (tear strength) เป็นต้น ขณะที่ผลกระทบบ้างเล็กน้อยต่อสมบัติพลวัตเชิงกล

จากที่กล่าวมาแล้ว จะเห็นว่าสารตัวเติมทั้งประเภทเสริมแรง และประเภทลดต้นทุน มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมยางเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะงานด้านวิศวกรรม ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาทั้งขนาดอนุภาค และปริมาณเขม่าดำที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติพลวัตเชิงกลของยางธรรมชาติที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้ว เพื่อนำไปใช้ทำยางรองเครื่องจักร ซึ่งต้องรองรับการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร และศึกษาปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ช้างต้น เปรียบเทียบกับยางสูตรที่ไม่ได้ใส่สารตัวเติมใดๆ นอกจากนี้ ยังศึกษาปริมาณของเขม่าดำ และแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของยาง ซึ่งถ้าผลการวิจัยเป็นที่น่าพอใจ และสามารถออกสู่อุตสาหกรรมได้ จะเป็นการพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางให้แข่งขันในตลาดโลกได้



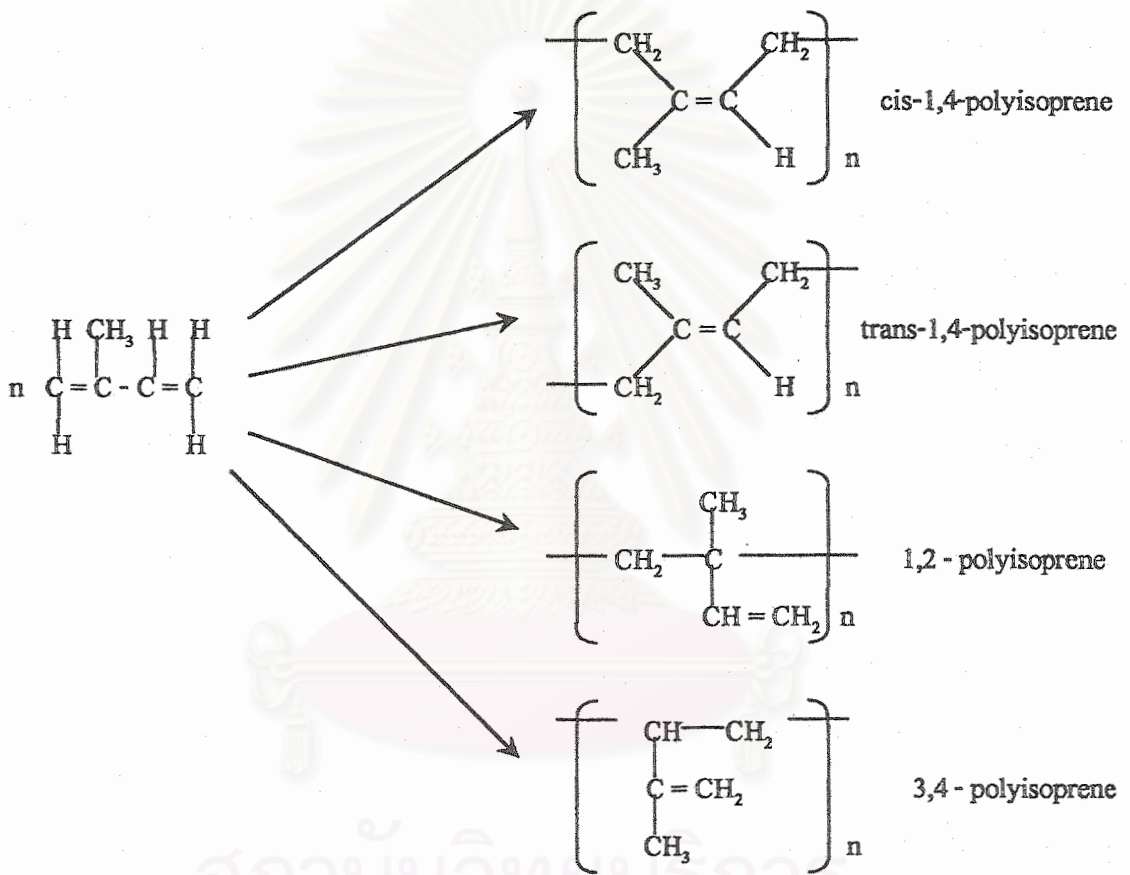
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎี และวารสารปริทรรศน์

2.1 ยางธรรมชาติ^(3,5)

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีว่า โพลีไอโซพรีน (Polyisoprene) มีสูตรเคมี คือ $(C_5H_8)_n$ โดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 15,000 และโพลีไอโซพรีนสามารถเกิดเป็นไอโซเมอร์ (Isomers) ได้ดังนี้ คือ



ยางฮีเวีย (Heavea rubber) มีโครงสร้างเป็น cis-1,4-polyisoprene ส่วนยางกัตตาเปอร์ชา (Gutta-percha) หรือยางบาลาด้า (Balata) มีโครงสร้างเป็น trans-1,4-polyisoprene โดยทั่วไป trans-form จะตกผลึกได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิห้อง ส่วน cis-form เมื่อมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลจะทำให้เกิดการตกผลึกบางส่วน ดังนั้น cis-form จะมีสมบัติเป็นยาง ส่วน trans-form จะแข็งที่อุณหภูมิห้อง จึงไม่มีสมบัติเป็นยาง ดังนั้น trans-form จะไม่ค่อยมีความสำคัญทางการค้ามากนัก มีการใช้งานน้อย เช่น ทำฉนวนหุ้มสายเคเบิลใต้น้ำ ใช้หุ้มลูกกอล์ฟ และทำกาวพิเศษบางชนิด ทั้งนี้เนื่องจากน้ำยางพวกนี้แข็งตัวเร็วมากในอากาศนั่นเอง

จากการศึกษาด้วย X - ray และ IR พบว่ายางธรรมชาติประกอบด้วย cis-1,4-polyisoprene ประมาณ 97% ดังนั้นชื่อทางเคมีที่แท้จริงของยางธรรมชาติ คือ cis-1,4-polyisoprene ยางธรรมชาติ มีน้ำหนักโมเลกุลโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.85×10^6 และจำนวนโมเลกุลโดยเฉลี่ยประมาณ 1×10^6

เนื้อยางแห้ง (ในน้ำยางมีเนื้อยางแห้ง 20 - 45% โดยน้ำหนัก) ประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอน (rubber hydrocarbon) อยู่ประมาณ 92% อีกประมาณ 8% เป็นสารอื่นที่ไม่ใช่ยาง (non - rubber constituents) ปนอยู่ ได้แก่ โปรตีน กลูโคไซด์ (glucosides) ไขมัน (lipids) กลีเซอรอล และเอนไซม์

การที่โมเลกุลของยางมีความไม่อิ่มตัว มีพันธะคู่ ทำให้ไฮโดรเจนตรงใกล้พันธะคู่ (α - methylene hydrogen) มีความว่องไวต่อปฏิกิริยา และเป็นจุดทำให้เกิดการเชื่อมโยง (crosslink) กับสารประกอบกำมะถัน หรือสารเปอร์ออกไซด์ได้ และการที่หมู่เมทิล (methyl group) ส่งอิเล็กตรอนไปยังพันธะคู่ จะไปกระตุ้นให้พันธะคู่แสดงประสิทธิภาพแรงยิ่งขึ้น ก็จะยิ่งทำให้หมู่อัลฟาเมทิลีน (α - methylene group) ว่องไวต่อปฏิกิริยามากขึ้น ดังนั้นยางธรรมชาติจึงทำปฏิกิริยาเชื่อมโยงกับสารประกอบกำมะถัน หรือสารเปอร์ออกไซด์ได้ไว แต่ก็มีข้อเสีย คือ จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจน และโอโซน โดยมีโลหะ (เช่น Mn, Fe, Cu, และ Co เป็นต้น) ความร้อน แสง และความเครียดที่มีในเนื้อยาง เช่น การหักงอ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้ยางเสื่อมสภาพเร็วยิ่งขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงต้องใส่สารกันตัวออกซิไดซ์ (antioxidant) และสารกันตัวโอโซน (antiozonant) ผสมเข้าไปในยางเพื่อยืดอายุการใช้งาน และการเก็บรักษา

สมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติ อาจเปลี่ยนแปลงไปได้บ้างเล็กน้อยจากการที่มีสารที่ไม่ใช่ยางปะปนอยู่ และจากระดับการเกิดผลึก (degree of crystallinity) สมบัติที่สำคัญของยางธรรมชาติ คือ ยางธรรมชาติมีสมบัติการกระดอน (resilience) สูงกว่ายางสังเคราะห์อื่นๆ และจะตกผลึกเมื่อดึง จึงทำให้ยางมีความทนแรงดึง (tensile strength) สูง โดยตัวของมันเอง การใช้สารตัวเติมเสริมแรง (reinforcing filler) เช่น เขม่าดำ (carbon black) จะปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางให้ดีขึ้น ส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว (nonpolar) ดังนั้นยางธรรมชาติจะละลายได้ในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว ได้แก่ อะลิฟาติก และอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (aliphatic and aromatic hydrocarbon) คลอรีเนตไฮโดรคาร์บอน (chlorinated hydrocarbon) อีเทอร์ (ethers) คาร์บอนไดซัลไฟด์ (carbon disulfide) เป็นต้น ส่วนตัวไม่ทำละลายของยางธรรมชาติ ได้แก่ คีโตน (lower ketone) แอลกอฮอล์ (alcohol) และเอสเทอร์ (lower ester) เป็นต้น แต่เมื่อยางผ่านการวัลคาไนซ์แล้ว จะบวมพองในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว ยางธรรมชาติมีความทนน้ำ กรดเจือจาง ค่าง และเกลือได้ดี แต่ออกซิเจน โอโซน แสงแดด และแสงอัลตราไวโอเล็ต จะทำให้ยางธรรมชาติเกิดรอยแตกหักได้ ซึ่งปริมาณโอโซน 100 ppm สามารถทำลายยางได้ภายใน 2 นาที และถ้าจุ่มยางในกรดไนตริก กรดซัลฟูริก กรดโครมิก ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรือโซเดียมไฮโปคลอไรต์ ยางจะถูกทำลายอย่างรวดเร็ว และความทนน้ำมันของยางธรรมชาติมีค่าต่ำมาก นอกจากนี้

ยางธรรมชาติมีจุดอ่อนตัว (softening point) ประมาณ 120°C ความถ่วงจำเพาะ 0.915 - 0.930 สมบัติทางกายภาพบางอย่างของยางธรรมชาติ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติ⁽³⁾

Density	0.92
Refractive index (20°C)	1.52
Coefficient of cubical expansion	$0.00062 / ^{\circ}\text{C}$
Cohesive energy density	$63.7 \text{ cal} / \text{cm}^3$
Heat of combustion	$10,700 \text{ cal} / \text{g}$
Thermal conductivity	$0.00032 \text{ cal} / \text{sec} / \text{cm}^2 / ^{\circ}\text{C}$
Dielectric constant	2.37
Power factor (1,000 cycles)	0.15 - 0.2
Volume resistivity	$10^{15} \text{ ohms} / \text{cm}^3$
Dielectric strength	1,000 volts / mil

2.2 เขม่าดำ

2.2.1 การแบ่งชนิดของเขม่าดำ⁽⁶⁻¹⁰⁾

เขม่าดำเป็นสารตัวเติมเสริมแรง (reinforcing filler) ที่นิยมมากที่สุดในปัจจุบัน มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 10 - 400 nm เขม่าดำที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมยาง ได้แก่ channel black และ furnace black แต่เนื่องจากประสิทธิภาพในการผลิต channel black ต่ำกว่า furnace black มาก ทำให้ furnace black เข้ามาแทนที่ channel black มากขึ้น นอกจากนี้ ยังมีเขม่าดำชนิดอื่น เช่น lamp black, thermal black และ acetylene black แต่จะใช้งานเฉพาะเท่านั้นจึงไม่ได้กล่าวรายละเอียดในที่นี้

การแบ่งประเภทเขม่าดำสำหรับยาง มีอยู่หลายระบบตามลักษณะเด่น เช่น

- ความต้านทานการสึกหรอ แบ่งเป็น high abrasion furnace (HAF), intermediate super abrasion furnace (ISAF) และ super abrasion furnace (SAF) เป็นต้น
- การเสริมแรง แบ่งเป็น semi-reinforcing furnace (SRF) และ high modulus furnace เป็นต้น

- กระบวนการผลิต แบ่งเป็น fast extrusion furnace (FEF) เป็นต้น
- การใช้ประโยชน์ แบ่งเป็น general - purpose furnace (GPF) และ all purpose furnace (APF) เป็นต้น
- ขนาดอนุภาค แบ่งเป็น fine furnace (FF) และ large particle size furnace (LPF) เป็นต้น
- สมบัติการนำไฟฟ้า แบ่งเป็น conductive furnace (CF) และ super conductive furnace (SCF) เป็นต้น

นอกจากนี้ยังมีการแบ่งเป็นเกรดย่อย (subgrades) ตามลักษณะอื่นที่แตกต่างกัน ได้แก่ ระดับโครงสร้าง (structure levels) แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น HAF ยังแบ่งออกเป็น high structure subgrade (HAF-HS) และ low structure subgrade (HAF-LS) เป็นต้น

จะเห็นได้ว่าการแบ่งเกรดข้างต้นไม่ค่อยสะดวก ต่อมาจึงมีการแบ่งเกรดเขม่าดำตามระบบ ASTM D1765 ซึ่งจะใช้อักษร 1 ตัว และตัวเลข 3 ตัว

ตัวอักษรแสดงอัตราการบ่ม หรือการวัลคาไนซ์ โดยที่ N และ S ใช้แทนแบบปกติ (normal cure rate) และแบบช้า (slow cure rate) ตามลำดับ

เลขตัวแรกบอกให้ทราบถึงพื้นที่ผิวของเขม่าดำ ซึ่งวัดได้ด้วยการดูดซึมไอโอดีน (iodine adsorption) หลายฝ่ายพยายามจะสร้างความสัมพันธ์ระหว่างระบบนี้กับระบบเรียกชื่อตามลักษณะเด่น เช่น 1 = SAF, 2 = ISAF, 3 = HAF เป็นต้น

เลขสองตัวที่เหลือจะถูกกำหนดตามลักษณะต่างๆ ในกรณีของเขม่าดำที่มีระดับโครงสร้างตามมาตรฐานทั่วไป เลขตัวที่สองจะซ้ำกับเลขตัวแรก และตัวสุดท้ายเป็นศูนย์ เช่น SAF = N110 และ ISAF = N220 เป็นต้น

ตารางที่ 2.2 แสดงการแบ่งชนิดของเขม่าดำตาม ASTM D1765, ชื่อสามัญ, ขนาดอนุภาค และพื้นที่ผิว

2.2.2 สมบัติของเขม่าดำ ⁽⁸⁾

การยึดเกาะ (interaction) ระหว่างสารตัวเดิมกับยาง ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น extensity, intensity และ geometrical factors

Extensity factor หมายถึง ปริมาณพื้นที่ผิวทั้งหมดของสารตัวเดิมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรของยางผสม

Intensity factor หมายถึง ความสามารถเฉพาะของพื้นผิว (solid surface) สารตัวเดิมต่อตารางเซนติเมตรของพื้นผิวสัมผัส ซึ่งสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของพื้นผิวสารตัวเดิม และยางจะเป็นตัวกำหนด

Geometrical factor สามารถแบ่งออกเป็น

- โครงสร้าง (structure) ของสารตัวเติม ซึ่งจะกำหนดโดยปริมาตรช่องว่างที่พบในการจัดเรียงตัวของอนุภาคสารตัวเติม
- ความเป็นรูพรุน (porosity) ของสารตัวเติม โดยปกติแล้วจะเป็นปัจจัยสำคัญรองลงมา

สรุปได้ว่าปัจจัยที่สำคัญของเขม่าดำในการเสริมแรงแก่ยาง คือ ขนาดอนุภาค หรือพื้นที่ผิว, ลักษณะทางกายภาพของพื้นผิว, สมบัติทางเคมีของพื้นผิว, โครงสร้าง และความเป็นรูพรุนของอนุภาค

ตารางที่ 2.2 การแบ่งชนิดของเขม่าดำ⁽⁹⁾

ASTM D1765 designation	Unsystematic common name	Abbreviation	Particle size (nm)	Surface area (m ² / g)
N110	Super abrasion furnace	SAF	11 - 19	125 - 155
N220	Intermediate abrasion furnace	ISAF	20 - 25	110 - 140
N293	Conductive furnace	CF	20 - 25	110 - 140
N294	Super conductive furnace	SCF	20 - 25	110 - 140
N330	High abrasion furnace	HAF	26 - 30	70-90
N326	High abrasion furnace, low structure	HAF - LS	26 - 30	75-105
N347	High abrasion furnace, high structure	HAF - HS	26 - 30	80-100
S300	Easy processing channel	EPC	26 - 30	95-115
N440	Fine furnace	FF	31 - 39	43-69
N550	Fine extrusion furnace	FEF	40 - 48	36-52
N660	General - purpose furnace	GPF	49 - 60	26-42
N762	Semi - reinforcing furnace	SRF	61 - 100	17-33
N990	Medium thermal	MT	201 - 500	6-9

2.2.2.1 ขนาดอนุภาค และพื้นที่ผิว ^(6,8-9,11)

อนุภาคของเขม่าดำจะอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม (clusters) ซึ่งเรียกกลุ่มของอนุภาคเขม่าดำนี้ว่า aggregates ขนาดของ aggregates เหล่านี้มีผลต่อการเสริมแรงของยาง ซึ่งขนาดของ aggregates จะถูกกำหนดด้วยขนาดอนุภาคของเขม่าดำที่อยู่ข้างใน ขนาดอนุภาคเขม่าดำจะสัมพันธ์กับพื้นที่ผิว กล่าวคือ ถ้าขนาดอนุภาคยิ่งเล็ก พื้นที่ผิวจะมาก ถ้าขนาดอนุภาคใหญ่ พื้นที่ผิวจะน้อยลง

โดยทั่วไปแล้วเขม่าดำที่มีขนาดเล็กกว่าจะทำให้ความแข็ง, ความทนแรงดึง, ความต้านทานการฉีกขาด และความต้านทานการสึกหรอของยางเพิ่มขึ้น แต่จะผสมเข้ากับยางยากขึ้นด้วย

การวัดขนาดอนุภาคโดยตรงทำได้ด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน โดยวัดขนาดของแต่ละอนุภาค แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย ซึ่งวิธีนี้จะได้ค่าที่ถูกต้อง แต่เสียเวลามาก

วิธีอื่นที่ใช้วัดขนาดอนุภาคเขม่าดำ ได้แก่ การวัดแสงสะท้อนด้วย Nigrometer ซึ่งขนาดอนุภาคยิ่งเล็กพื้นที่ผิวก็มากก็ยิ่งดูดซับแสงไว้ได้มาก ทำให้แสงสะท้อนออกมาน้อย นอกจากนี้ ยังมีวิธีวัดพื้นที่ผิวโดยการวัดการดูดซึมแก๊สไนโตรเจน ที่เรียกว่า BET Method, วิธีการวัดการดูดซึมไอโอดีน และวิธีการวัดการดูดซึม large cetyl trimethyl ammonium bromide molecule (CTAB) วิธีการวัดการดูดซึมของสารเหล่านี้ อยู่บนพื้นฐานที่ว่าขนาดอนุภาคเล็ก พื้นที่ผิวจะมาก ทำให้ดูดซึมสารต่างๆที่ผิวได้มาก

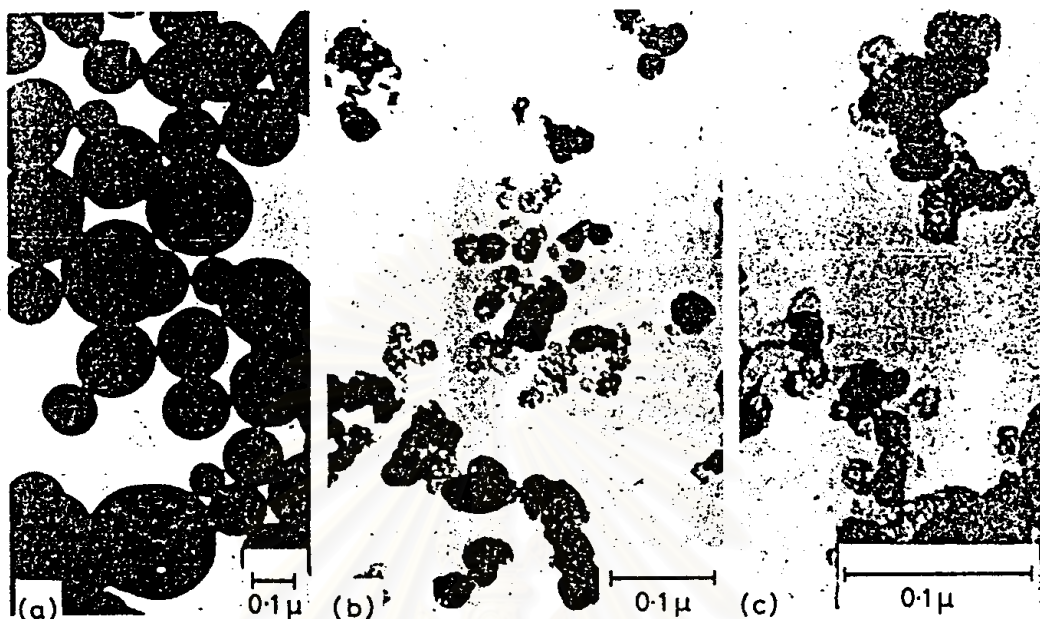
ตารางที่ 2.2 แสดงขนาดอนุภาคของเขม่าดำเกรดต่างๆ ส่วนค่าการดูดซึมไอโอดีน, ค่าการดูดซึมไนโตรเจน และค่าการดูดซึม CTAB ของเขม่าดำ แสดงไว้ในตารางที่ 2.3 ส่วนตารางที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของยางกับขนาดอนุภาค และโครงสร้างของเขม่าดำ

2.2.2.2 โครงสร้าง ^(6,8-9,11)

โครงสร้างของเขม่าดำ หมายถึงการเชื่อมกันระหว่างอนุภาคของเขม่าดำ ทำให้มีลักษณะเป็นสายโซ่ยาว, กลุ่มคล้ายผลองุ่น (grape-like clusters) และ aggregates ที่พันกันแบบสามมิติ (tangled three-dimensional aggregates) ถ้าเขม่าดำมีการเชื่อมต่อกันเป็นจำนวนมาก แสดงว่ามีโครงสร้างสูง ในทางกลับกันถ้าเชื่อมต่อกันน้อย ก็แสดงว่าโครงสร้างต่ำ จะเห็นได้ว่ารูปร่าง และขนาดของ aggregates เป็นตัวกำหนดโครงสร้างของเขม่าดำ

การรวมตัวกัน (aggregation) ที่กล่าวมานี้ เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิต วิธีการผลิตจึงมีผลโดยตรงต่อโครงสร้างของเขม่าดำ กล่าวคือ thermal black จะมีโครงสร้างต่ำ หรือไม่มีส่วน channel black จะมีทั้งโครงสร้างต่ำ และสูง ซึ่งขึ้นกับการออกแบบกระบวนการผลิต และการเลือกใช้วัตถุดิบ เช่น ถ้าใช้วัตถุดิบที่มีความเป็นอะโรมาติกสูง ก็จะได้โครงสร้างสูง และถ้าใช้สาร

เดิมแต่งที่ไปปรับปรุงความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาไอออนในเซชันในเปลวไฟ ก็จะได้เขม่าดำที่มีโครงสร้างต่ำ เป็นต้น



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเขม่าดำชนิดต่างๆแสดงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน⁽⁸⁾

(a) thermal black (b) channel black (c) furnace black

เขม่าดำที่มีโครงสร้างสูง รูปร่างของ aggregates จะไม่สม่ำเสมอ ดังนั้น ความสามารถในการจัดเรียงตัวจะไม่ดี ทำให้เกิดช่องว่างระหว่าง aggregates มาก โดยทั่วไปการวัดโครงสร้างของเขม่าดำทำได้โดยการวิเคราะห์จากปริมาตรทั้งหมดของช่องว่างระหว่าง aggregates ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของเขม่าดำ การทดสอบทำได้โดยการวัดปริมาตรของของเหลว dibutyl phthalate (DBP) ที่ถูกเติมเต็มช่องว่าง ต่อมาได้มีการปรับปรุงวิธีทดสอบนี้ โดยเพิ่มแรงอัด ซึ่งจะทำให้ aggregates ที่รวมตัวกันอย่างหลวมๆ แยกออกจากกันได้ และทำให้โครงสร้างเข้ามาชิดกันมากขึ้น ช่องว่างจึงลดน้อยลง วิธีนี้จะให้ผลสัมพันธ์กับปรากฏการณ์ที่เกิดในยาง โดยเฉพาะผลของการหดตัวหลังการ extrusion (extrusion shrinkage) วิธีนี้เรียกว่า 24M4 หรือ crushed DBPA test

ผลของโครงสร้างเขม่าดำส่วนใหญ่จะมีผลต่อการแปรรูปยาง เขม่าดำที่มีโครงสร้างสูงจะกระจายตัวในยางได้ดี ทำให้ยางที่ผ่านการ extrusion ได้มีผิวเรียบ ความหนืดของยางสูงขึ้น

ค่าการดูดซึม DBP และ 24M4 DBP ของเขม่าดำเกรดต่าง แสดงดังตารางที่ 2.3 ส่วนตารางที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของยางกับขนาดอนุภาค และโครงสร้างของเขม่าดำ

ตารางที่ 2.3 ค่าการดูดซึมไอโอดีน, ค่าการดูดซึมไนโตรเจน, ค่าการดูดซึม CTAB, ค่าการดูดซึม DBP และ 24M4 DBP ของเขม่าดำเกรดต่างๆตาม ASTM D1765⁽⁸⁻¹⁰⁾

Grade	Iodine	Nitrogen	CTAB	DBP	24 M4 DBP
	Adsorption (g / kg) D1510	Adsorption (m ² / g) D3037	Adsorption (m ² / kg) D3765	Absorption (cm ³ / 100 g) D2414	Absorption (cm ³ / 100 g) D3493
N110	145	140	124	113	100
N121	121	132	121	132	112
N220	121	118	111	115	100
N231	121	121	116	91	77
N234	118	125	122	122	100
N285	104	106	106	129	99
N326	84	82	83	72	71
N330	82	82	83	102	88
N347	90	90	89	124	101
N351	66	76	77	120	97
N358	88	87	69	148	110
N375	91	100	99	115	98
N539	42	42	44	110	85
N550	43	43	43	120	88
N650	37	38	39	123	88
N660	35	35	35	91	75
N683	35	37	39	133	98
N762	27	28	29	65	57
N765	31	32	32	115	86
N774	31	31	31	76	72

ตารางที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของยางกับขนาดอนุภาคและโครงสร้างของเขม่าดำ^(6,8)

สมบัติ	ขนาดอนุภาคลด	โครงสร้างเพิ่ม
<u>Processing properties</u>		
Loading capacity	ลดลง	ลดลง
Mixing time	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น
Dispersability	ลดลง	เพิ่มขึ้น
Mooney viscosity	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น
Scorch	ลดลง	ลดลง
Extrusion shrinkage	ลดลง	ลดลง
Extrusion smoothness	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น
Extrusion rate	ลดลง	เปลี่ยนเล็กน้อย
<u>Vulcanizate properties</u>		
Rate of cure	ลดลง	เปลี่ยนเล็กน้อย
Hardness	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น
Tensile strength	เพิ่มขึ้น	ลดลง
Modulus	เพิ่มขึ้นสูงสุดแล้วลดลง	เพิ่มขึ้น
Elongation	ลดลงต่ำสุดแล้วเพิ่มขึ้น	ลดลง
Tear resistance	เพิ่มขึ้น	เปลี่ยนเล็กน้อย
Abrasion resistance	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น
Flex resistance	เพิ่มขึ้น	ลดลง
Resilience	ลดลง	เปลี่ยนเล็กน้อย
Heat build - up	เพิ่มขึ้น	เพิ่มเล็กน้อย
Compression set	เปลี่ยนเล็กน้อย	เปลี่ยนเล็กน้อย

2.2.2.3 ลักษณะทางกายภาพของพื้นผิว^(6,8)

อะตอมของคาร์บอนในเขม่าดำจะจัดเรียงตัวเป็นชั้น สำหรับเขม่าดำที่มีสมบัติในการเสริมแรงต่ำ เช่น thermal black ชั้นเหล่านี้จะเรียงตัวเป็นระเบียบ โดยส่วนใหญ่จะเรียงขนานกันไปบนพื้นผิว และมีขนาดใหญ่พอสมควร พร้อมกับมีจุดบกพร่องน้อยมาก ในทางกลับกันเขม่าดำที่มี

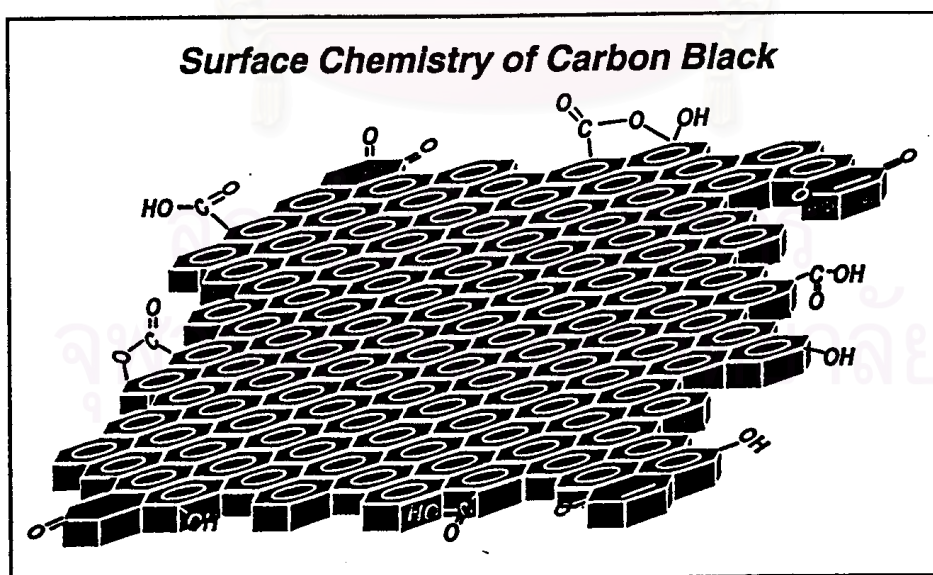
สมบัติในการเสริมแรงสูง จะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนไม่เป็นระเบียบมากกว่า ชั้นของอะตอมคาร์บอนมีขนาดเล็กกว่า และมีจุดบกพร่องมากกว่า

ลักษณะอะตอมคาร์บอนที่พื้นผิวอนุภาคจะมีผลต่อการเสริมแรงได้ อะตอมคาร์บอนสามารถรวมตัวกัน ทำให้การจัดเรียงตัวที่ผิวเป็นระเบียบ ทำให้เกาะติดกับยางไม่ดี การเสริมแรงก็จะต่ำ แต่ถ้าอะตอมคาร์บอนมีไฮโดรเจนมาเกาะ จะช่วยให้เขม่าดำนั้นเสริมแรงมากขึ้น และจะมากยิ่งขึ้นถ้าเกิดอนุมูลอิสระอยู่บนผิวเขม่าดำ ซึ่งอนุมูลอิสระนี้จะสร้างพันธะกับยางได้ เมื่อโมเลกุลของยางแตกออกเป็นอนุมูลอิสระขณะบดผสม

2.2.2.4 สมบัติทางเคมีของพื้นผิว ^(6, 8-9, 11-12)

เขม่าดำประกอบด้วยคาร์บอนประมาณร้อยละ 90-99 ส่วนที่เหลือประกอบด้วยไฮโดรเจนและออกซิเจน ไฮโดรเจนได้มาจากไฮโดรคาร์บอนตั้งต้น และจะกระจายอยู่ตลอดทั่วทั้งอนุภาคเขม่าดำ ส่วนออกซิเจนจะเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของอนุภาคเขม่าดำ ในกระบวนการเผาไหม้ออกซิเจนเหล่านี้จะปรากฏในรูปของหมู่ฟีนอลิก, คีโตนิก, คาร์บอกซิลิก และแลคโตน

นอกจากนี้ เขม่าดำยังอาจประกอบด้วยกำมะถันจำนวนเล็กน้อย ซึ่งขึ้นอยู่กับสมบัติของไฮโดรคาร์บอนที่ใช้ในกระบวนการผลิต กำมะถันเหล่านี้ส่วนใหญ่จะรวมตัวกันทางเคมี และแสดงลักษณะเฉื่อยต่อปฏิกิริยา และไม่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงในโมเลกุลของยาง



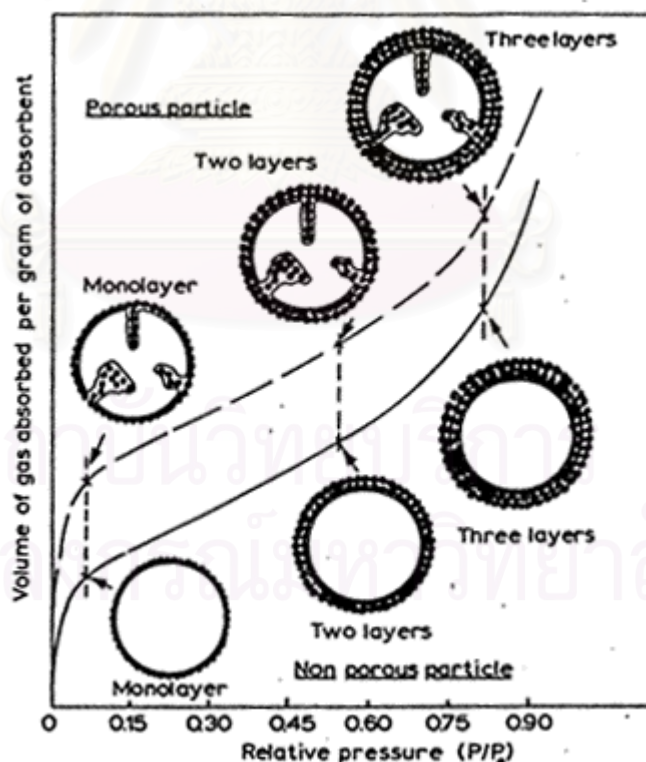
รูปที่ 2.2 ลักษณะทางเคมีของพื้นผิวเขม่าดำ ⁽¹²⁾

2.2.2.5 ความเป็นรูพรุนของอนุภาค ^(6,8)

ผิวของเขม่าดำไม่เรียบ เนื่องจากการเตรียมเขม่าดำนั้นทำได้โดยกระบวนการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง การออกซิเดชันจะทำให้เกิดรูพรุนขึ้นในอนุภาคเขม่าดำได้ การมีรูพรุนมาก หรือน้อย เป็นสาเหตุทำให้เกิดการวัดคาไนซ์เร็ว หรือช้าได้ เพราะสารตัวเร่งจะถูกดูดเข้าไปในรูพรุนนี้ ทำให้การวัดคาไนซ์ช้าลงได้

วิธีการวัดความเป็นรูพรุนสามารถทำได้โดยการเทียบกับพื้นที่ผิว ที่สันนิษฐานว่าอนุภาคเขม่าดำเป็นทรงกลม แล้วคำนวณหาพื้นที่ผิวทรงกลมได้จากเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค ที่วัดจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน นอกจากนี้ยังวัดความเป็นรูพรุนได้จากการดูดซึมน้ำในโตรเจนซึ่งสามารถวัดได้ทั้งพื้นที่ผิวภายนอก รวมทั้งรู และรอยแตกภายในอนุภาค

เขม่าดำที่มีรูพรุนมากจะมีจำนวนอนุภาคมากกว่าเขม่าดำที่มีรูพรุนน้อย ถ้าใส่เขม่าดำทั้งสองชนิดน้ำหนักเท่าๆกันลงไปในยาง เขม่าดำที่มีรูพรุนมากกว่าจะทำให้ยางมีความหนืดสูงกว่า การนำไฟฟ้าดีกว่า เนื่องจากจำนวนอนุภาคมากกว่านั่นเอง



รูปที่ 2.3 หลักการวัดพื้นที่ผิวด้วย "t method" ซึ่งสัมพันธ์กับความเป็นรูพรุนของอนุภาคเขม่าดำ ⁽⁸⁾

2.3 แคลเซียมคาร์บอเนต (6, 13-14)

แคลเซียมคาร์บอเนตรู้จักกันในหลายๆชื่อ เช่น marble, limestone, calcite, chalk, aragonite, dolomite ($\text{CaCO}_3 / \text{MgCO}_3$), coral, shell และ whiting แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมที่ใช้อย่างกว้างขวางอย่างหนึ่ง เนื่องจากความขาว, ความต้านทานการสึกหรอต่ำ, ขนาดอนุภาคหลากหลาย และราคาถูก

Limestone และ dolomite เป็น primary carbonaceous rocks ได้จากธรรมชาติ limestone ประกอบด้วยแร่ calcite ซึ่งเป็นอัญรูปที่มีเสถียรภาพของแคลเซียมคาร์บอเนต ส่วน aragonite เป็น metastable polymorph ซึ่งสามารถเปลี่ยนอัญรูปเป็น calcite โดยการให้ความร้อนด้วยอากาศแห้งที่อุณหภูมิ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยมีน้ำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนอัญรูปนี้ ผลึกของ calcite เป็น hexagonal ส่วนผลึกของ aragonite เป็น orthorhombic

ความขาวของแคลเซียมคาร์บอเนตขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาอย่างมาก เนื่องจากแต่ละแหล่งมีสิ่งเจือปน เช่น กราไฟต์ (graphite), ไพไรต์ (pyrite) และพวกซิลิเกต (silicate) ในปริมาณต่างๆกัน ซึ่งสำคัญมาก เพราะสิ่งเหล่านี้อาจทำให้เกิดผลเสียต่อเครื่องจักรได้ โดยเฉพาะปริมาณซิลิกาเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงอย่างยิ่งสำหรับผู้ผลิต และผู้ใช้

กระบวนการผลิตแคลเซียมคาร์บอเนต สามารถแบ่งกว้างๆได้ 2 แบบ คือ กระบวนการทางกายภาพ และกระบวนการทางเคมี

กระบวนการทางกายภาพ คือการบดแคลเซียมคาร์บอเนตที่อยู่ในรูปต่างๆในธรรมชาติ ให้มีขนาดอนุภาคเล็กลง เรียกผลิตภัณฑ์ที่ได้ว่า แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบด (ground calcium carbonate) กระบวนการนี้แบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ

1. กระบวนการบดแบบแห้ง (dry grinding process)

ขั้นตอนต่างๆ ประกอบด้วย การบดหยาบ (crushing), การบดละเอียด (pulverizing) และการแยกขนาดอนุภาคด้วยอากาศ (air classification)

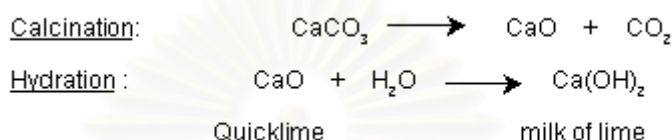
2. กระบวนการบดแบบเปียก (wet grinding process)

วิธีนี้จะต่างจากกระบวนการบดแบบแห้ง คือ มีการชำระล้างสิ่งเจือปนที่มีลักษณะหยาบๆก่อน เช่น โคลน แล้วน้ำจะเป็นตัวพา และแยกแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีขนาดอนุภาคต่างๆกัน แล้วทิ้งไว้ให้เกิดการนอนก้นในถังแยกขนาดอนุภาคที่เตรียมไว้ เรียกขั้นตอนนี้ว่า centrifuging technique หลังจากนั้นทำให้แห้ง และบดให้ละเอียดต่อไป

กระบวนการทางเคมี เป็นอีกกระบวนการที่ใช้ในการผลิตแคลเซียมคาร์บอเนต โดยนำสารประกอบแคลเซียมที่มีอยู่ในธรรมชาติ หรือ limestone มาทำปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีความบริสุทธิ์มากขึ้น มีลักษณะผลึก ขนาดอนุภาค และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคต่างๆกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับภาวะในการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิเริ่มต้น, อุณหภูมิระหว่างการทำ

ปฏิกิริยา, อัตราการบ่ม, pH และความเข้มข้นของสารที่ทำให้ปฏิกิริยา เป็นต้น และเรียกผลิตภัณฑ์ที่ได้ว่า แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (precipitated calcium carbonate) ซึ่งในทางการค้าส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป aragonite ซึ่งอัญรูปต่างๆสามารถควบคุมได้โดยการเปลี่ยนแปลงภาวะการผลิต

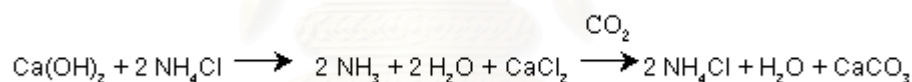
กระบวนการทางเคมีที่ใช้อยู่ทั่วไป ประกอบด้วยขั้นตอนการเผา (Calcination) และ การทำปฏิกิริยากับน้ำ (Hydration) ตามลำดับ ซึ่งแสดงได้ดังนี้



ขั้นตอนต่อไปจะแตกต่างกันตามแต่ละวิธี ดังนี้

1. กระบวนการโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate process)

กระบวนการนี้ เป็นกระบวนการต่อเนื่องจากการเตรียมโซดาแอช หรือ โซเดียมคาร์บอเนต โดยนำแอมโมเนียมคลอไรด์ ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเตรียมโซดาแอช มาทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ หรือ milk of lime แสดงปฏิกิริยาได้ดังนี้



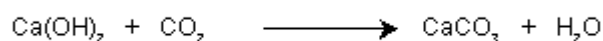
2. กระบวนการโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide process)

นำแคลเซียมไฮดรอกไซด์ มาทำปฏิกิริยากับโซเดียมคาร์บอเนต จะได้แคลเซียมคาร์บอเนต และโซเดียมไฮดรอกไซด์ออกมา แสดงปฏิกิริยาได้ดังนี้



3. กระบวนการรีคาร์บอเนชัน (Recarbonation process)

นำแคลเซียมไฮดรอกไซด์ มาทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ได้จากการเผาแคลเซียมคาร์บอเนตในขั้นตอนแรก แสดงปฏิกิริยาได้ดังนี้



หลังจากได้แคลเซียมคาร์บอเนตออกมา ก็จะถูกกรอง และทำให้แห้งต่อไป เมื่อลองเปรียบเทียบแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนกับแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบดละเอียด (finely ground calcium carbonate) พบว่าชนิดตกตะกอนมีความบริสุทธิ์สูงกว่า คือ จะมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่ร้อยละ 99 ขณะที่ชนิดบดละเอียด จะมีแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่ประมาณร้อยละ 94 หรือสูงกว่า แต่ชนิดตกตะกอนมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า และใช้พลังงานในการผลิตสูงกว่า ทำให้มีราคาสูงกว่า

สมบัติของแคลเซียมคาร์บอเนต องค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า การกระจายขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนต และภาพถ่ายแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงดังตารางที่ 2.5 , ตารางที่ 2.6 , รูปที่ 2.4 และรูปที่ 2.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.5 สมบัติของแคลเซียมคาร์บอเนต⁽¹⁴⁾

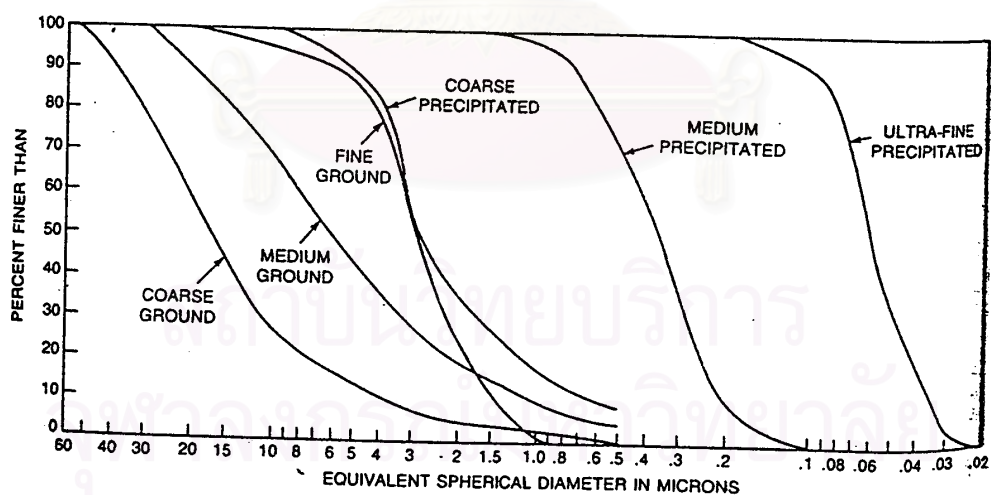
Properties	Ground		Ultra - Fine Precipitated
	Fine	Coarse	
Average particle size (microns, esd ^a)	3 - 14	17	0.07
Specific gravity (g / cm ³)	2.71	2.71	2.55 - 2.65
Surface area, BET N2 (m ² / g)	0.9 - 2.2	-	11 - 26
Oil absorption, ASTM D-281	5 - 21	5 - 6	28 - 58
Mohs hardness	2.5 - 3.0	3	2.5 - 3.0
Thermal conductivity x 10 ³ (cal / g•s•°C)	5.6	-	5.6
Specific heat (cal / g •°C)	0.205	-	0.21
Coefficient of thermal expansion (lin unit / unit °C x 10 ⁻⁶)	10	9 - 12	10

^a esd = equivalent spherical diameter

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต (%) ทางการค้า⁽¹⁴⁾

Chemical	Ground		Dolomite ^a	Precipitated
	Fine	Coarse		
CaCO ₃	97.40	96.50	58.20	99.00
MgCO ₃	1.50	2.30	41.16	0.20
SiO ₂	0.60	0.90	0.34	0.10
Al ₂ O ₃	0.18	0.18	0.19	0.20
Fe ₂ O ₃	0.08	0.08	0.28	0.02
CaSO ₄	-	0.02	-	-

^a MnO, Pb, As, F, Cl - trace < 0.01



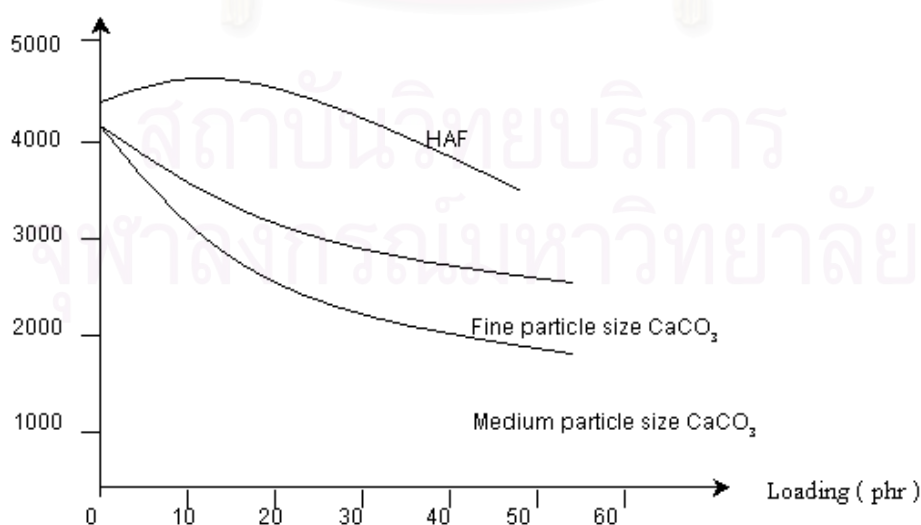
รูปที่ 2.4 การกระจายขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนต⁽¹⁴⁾



รูปที่ 2.5 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบด⁽¹⁴⁾

นอกจากนี้ยังมีการใช้สารที่ไม่ละลายน้ำ ได้แก่ พวบน้ำมัน และกรดไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น กรดสเตียริก หรือ metallic stearate ไปเคลือบผิวของแคลเซียมคาร์บอเนต เพื่อช่วยปรับปรุงการกระจายตัว ลดการเกิด agglomeration โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเกรดที่มีขนาดอนุภาคเล็กมาก ทำให้ผสมในยางได้ง่าย ไม่เกิดการจับเป็นก้อน ทำให้การ extrusion และ calendering ได้ผิวเรียบ ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีราคาปานกลาง การกระดอนดี ปริมาณกรดสเตียริกที่ใช้ประมาณ 0.8 - 3 % เคลือบที่อุณหภูมิ 100 °C เรียกแคลเซียมคาร์บอเนตที่ผ่านกรรมวิธีนี้ว่า " แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดเคลือบผิว (surface - treated calcium carbonate) " และยังมีการใช้สารอื่นๆ ในการเคลือบผิวด้วย เช่น ทิทาเนต (titanate) เซอร์โคอะลูมินาต (zirconium aluminate) และสารช่วยเปียก (wetting agent) อื่นๆ

Tensile strength (lb / in²)

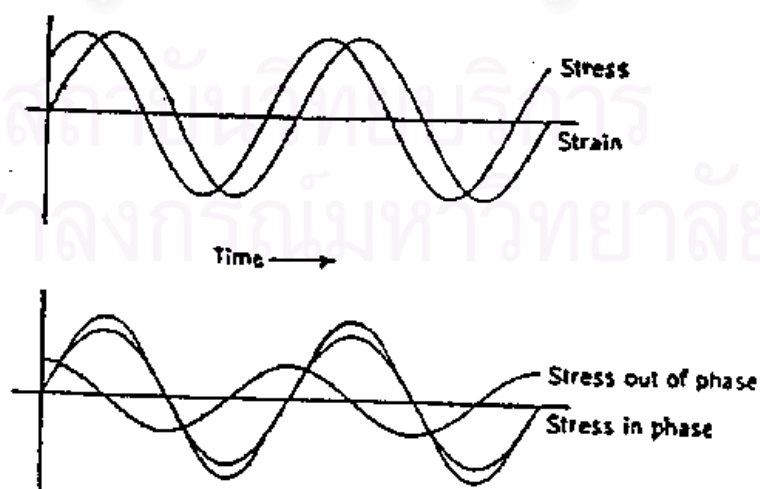


รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดึงกับปริมาณของสารตัวเติมชนิดต่างๆ ในยางธรรมชาติ⁽⁶⁾

การใส่แคลเซียมคาร์บอเนตในยางธรรมชาติทำให้ความทนแรงดึงไม่ดี เมื่อเทียบกับเขม่าดำ จากรูป 2.6 จะเห็นได้ว่าความทนแรงดึงตกลงทันที แต่แคลเซียมคาร์บอเนตที่มีขนาดอนุภาคเล็กจะให้ความทนแรงดึงของยางสูงกว่าที่มีขนาดอนุภาคปานกลาง และเนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตมีราคาถูก ส่วนใหญ่จึงใช้เพื่อลดต้นทุนการผลิต โดยไม่คำนึงถึงการเสริมประสิทธิภาพให้กับยางเท่าใดนัก

2.4 สมบัติพลวัตเชิงกล (Dynamic mechanical property) ^(4, 12, 15 - 16)

สมบัติพลวัตเชิงกลเป็นสมบัติของวัสดุซึ่งเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายใต้แรงกระทำที่มีลักษณะเป็นคาบ (periodic forces) เมื่อให้ความเค้นที่แปรตามเวลาแบบฟังก์ชันไซน์ (sinusoidal stress) กับของแข็งที่มีพฤติกรรมยืดหยุ่นแบบสมบูรณ์ (perfectly elastic solid) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือความเครียด (strain) ร่วมเฟส (in phase) กับความเค้น ส่วนวัสดุที่มีลักษณะของเหลวหนืดแบบสมบูรณ์ (completely viscous material) จะตอบสนองโดยการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไม่ร่วมเฟส (out of phase) กับความเค้น หรือตามหลังความเค้นอยู่ 90° นั่นเอง ในกรณีของวัสดุพอลิเมอร์ จะแสดงพฤติกรรมทั้งลักษณะที่คล้ายของแข็งยืดหยุ่น และของเหลวหนืด หรือพฤติกรรมวิสโคอีลาสติก (viscoelastic behavior) เมื่อวัสดุพอลิเมอร์ได้รับความเค้นเป็นจังหวะแปรตามเวลาแบบฟังก์ชันไซน์ (sinusoidally oscillating stress) จะไม่เกิดความเครียดร่วมเฟส หรือไม่ร่วมเฟส 90° กับความเค้น แต่ความเครียดจะเกิดในลักษณะตามหลังความเค้นด้วยมุมน้อยกว่า 90° ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 ขนาดของมุมที่เปลี่ยนแปลงไป (loss angle) ขึ้นอยู่กับปริมาณการเคลื่อนไหวกายใน (internal motion) ที่เกิดขึ้นเมื่อได้รับความเค้นในช่วงความถี่หนึ่ง



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ความเครียด และเวลา ของวัสดุวิสโคอีลาสติก ⁽⁴⁾

ในการศึกษาการตอบสนองของวัสดุต่อแรงสั่นสะเทือน (vibrational force) ความเค้นที่ทำให้กับวัสดุวิสโคอีลาสติก จะส่งผลให้เกิดการตอบสนองแบบพลวัตเชิงเส้น หรือไม่เป็นเชิงเส้น (linear or nonlinear dynamic response) ถ้าขนาดของความเค้นต่ำเพียงพอ, ความเครียดแปรตามเวลาแบบฟังก์ชันไซน์ และขนาดของความเครียดเป็นสัดส่วนกับความเค้นที่อุณหภูมิ และความถี่ที่ให้ วัสดุจะแสดงพฤติกรรมแบบเชิงเส้น อย่างไรก็ตามถ้าขนาดของความเค้นสูงเพียงพอ ความเครียดแปรตามความถี่ แต่ไม่เป็นแบบฟังก์ชันไซน์ (nonsinusoidal) กล่าวคือความเครียดไม่ได้เป็นสัดส่วนกับความเค้น วัสดุสามารถเกิดคลื่นก้องที่สูง (high harmonics) ซึ่งจะแสดงพฤติกรรมวิสโคอีลาสติกแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear viscoelastic behavior)

สำหรับพฤติกรรมวิสโคอีลาสติกแบบเชิงเส้น ความเค้น (σ) และความเครียด (ϵ) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\sigma = \sigma_0 \sin \omega t$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \sin (\omega t - \delta)$$

โดยที่ σ_0 = ความเค้นสูงสุด (maximum stress)

ϵ_0 = ความเครียดสูงสุด (maximum strain)

ω = ความถี่เชิงมุม (angular frequency)

δ = มุมเฟส (phase angle)

สำหรับวัสดุวิสโคอีลาสติก ไม่สามารถที่จะนิยามมอดุลัส ด้วยอัตราส่วนของความเค้นกับความเครียด เนื่องจากอัตราส่วนนี้เปลี่ยนแปลงระหว่าง ∞ และ $-\infty$ ซึ่งขึ้นอยู่กับเวลาการวัด และไม่สามารถนิยามมอดุลัสด้วยอัตราส่วนของความเค้นสูงสุดกับความเครียดสูงสุดได้ เพราะไม่ได้ให้ข้อมูลเกี่ยวกับความแตกต่างเฟส โดยทั่วไปมอดุลัสเชิงซ้อน (complex modulus, E^*) ได้กำหนดขึ้นเพื่ออธิบายสมบัติพลวัตเชิงกลของพอลิเมอร์ เนื่องจากสามารถบอกทั้งมอดุลัส และความแตกต่างเฟส

$$E^* = E' + iE''$$

$$|E^*| = [(E')^2 + (E'')^2]^{1/2}$$

E' คือ อัตราส่วนของความเค้นกับความเครียดที่ร่วมเฟสกัน ส่วน E'' คือ อัตราส่วนของความเค้นกับความเครียดที่ไม่ร่วมเฟสกัน ความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงดังนี้

$$E' = \frac{\sigma_0 \cos \delta}{\epsilon_0}$$

$$E'' = \frac{\sigma_0 \sin \delta}{\epsilon_0}$$

อีกนัยหนึ่ง E' คือ ส่วนที่อยู่ในเฟสเดียวกับมอดุลัสเชิงซ้อน (in phase (real) component of complex modulus) หรือเรียกว่า "อีลาสติคมอดุลัส (elastic modulus)" และเนื่องจากส่วนที่มีความยืดหยุ่น (elastic component) แสดงถึงพลังงานที่สะสมไว้ จึงสามารถเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่า "มอดุลัสสะสม (storage modulus)" ซึ่งบ่งบอกถึงพลังงานสะสม และคืนกลับในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบเป็นรอบ (cyclic deformation)

ส่วน E'' คือ ส่วนที่ไม่ร่วมเฟสกับมอดุลัสเชิงซ้อน (out phase (imaginary) component of complex modulus) หรือเรียกว่า "วิสกัสมอดุลัส (viscous modulus)" และเนื่องจากส่วนที่มีความหนืด (viscous component) แสดงถึงพลังงานที่สูญเสียไปในรูปความร้อน จึงสามารถเรียกได้อีกอย่างว่า "มอดุลัสสูญเสีย (loss modulus)" ซึ่งวัดจากพลังงานที่สูญเสียไปในรูปความร้อน

นอกจากนี้ อัตราส่วนของมอดุลัสสูญเสียกับมอดุลัสสะสม เป็นสิ่งสำคัญมากที่จะบ่งบอกถึงสมบัติพลวัตเชิงกลของวัสดุพอลิเมอร์ ในรูปข้อมูลเกี่ยวกับความแตกต่างเฟสระหว่างมอดุลัสทั้งสอง และเรียกความสัมพันธ์ที่กล่าวถึงนี้ว่า "ปัจจัยในการสูญเสีย (loss factor)" ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$\tan \delta = E'' / E'$$

$\tan \delta$ สามารถเรียกอีกอย่างว่า "ความต้านทานภายใน (internal friction)" หรือ "damping" ซึ่งก็คือ อัตราส่วนของพลังงานที่สูญเสียกับพลังงานที่สะสมไว้สูงสุดต่อหนึ่งรอบ

พลังงาน หรือความร้อนที่สูญเสียต่อรอบของการกดขี่ เรียกว่า "hysteresis (H)" สามารถแสดงได้ดังนี้

$$H = \pi F S \sin \delta$$

โดยที่ F = ขนาดของรอบความเค้นทั้งหมด (amplitude of total stress cycle)

S = ขนาดของรอบความเครียดทั้งหมด (amplitude of total strain cycle)

ปัจจัยกำหนดสมบัติพลวัต ซึ่งสัมพันธ์กับความร้อนสะสม (heat build - up) จะขึ้นอยู่กับสถานะการใช้งานของวัสดุ ในสถานะที่ประกอบด้วยขนาดความเครียดที่แน่นชัด ขนาดความเค้นจะกำหนดด้วย $S \times E'$ และพลังงานที่สูญเสียต่อรอบต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} H &= \pi S E' S \sin \delta \\ &= \pi S^2 E'' \end{aligned}$$

ภายใต้ขนาดความเค้นที่แน่นชัด ขนาดความเครียดจะกำหนดด้วย F / E^* และพลังงานที่สูญเสียต่อรอบต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร สามารถแสดงอีกนัยหนึ่ง คือ

$$\begin{aligned} H &= \pi F(F / E^*) \sin \delta \\ &= \pi F^2 D'' \\ &\approx \frac{\pi F^2 \tan \delta}{E'} \end{aligned}$$

โดยที่ loss compliance (D'') = $E'' / (E^*)^2$

จะเห็นได้ว่าพลังงานที่สูญเสียต่อรอบ (H) แปรผันตรงกับมอดุลัสสูญเสีย และแปรผกผันกับมอดุลัสสะสม ดังนั้นถ้ายังมีมอดุลัสสูญเสียสูง ก็จะสามารถดูดกลืนพลังงานกลได้ดี ในขณะที่เดียวกันก็จะเกิดการสูญเสียพลังงานในรูปความร้อนได้มากขึ้น ในทางกลับกันพบว่ายางที่มีมอดุลัสสะสมสูง ซึ่งแข็งแรงมาก ก็จะสะสมพลังงานได้มากในแต่ละรอบของการกระทำ

2.5 ผลของสารตัวเติมต่อสมบัติของยางวัลคาไนซ์

2.5.1 ผลของปริมาณเขม่าดำ

เมื่อใส่เขม่าดำลงไปอย่างมากขึ้น จะทำให้ความหนาแน่น และความแข็งเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความทนแรงดึงจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดๆหนึ่งความทนแรงดึงจะลดลง ส่วนมอดุลัสก็จะเพิ่มขึ้น แต่ความสัมพันธ์ไม่ได้เป็นแบบเชิงเส้น^(11, 17) ในทางกลับกันระยะยืดเมื่อขาดและการกระดอนกลับลดลงเมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้น เมื่อผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน พบว่าความแข็งจะสูงขึ้น แต่ความทนแรงดึงลดลง ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหลัก⁽¹⁸⁾ ในปี 1993 Thavamani และ Bhowmick ทำการทดลองเกี่ยวกับความต้านทานการสึกหรอของยางธรรมชาติ และยางสไตรีนบิวทีไดอีน (SBR) พบว่าเมื่อผ่านการขัดสี จะสังเกตเห็นสันนูน (ridges) บริเวณพื้นผิว ซึ่งช่องว่างระหว่างสันนูน (ridge spacing) ลดลงเมื่อใส่เขม่าดำเป็นปริมาณมากขึ้น แต่จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิทดสอบ และน้ำหนักที่หายไปของยางระหว่างการขัดสีจะเพิ่มขึ้นเมื่อช่องว่างระหว่างสันนูนเพิ่มขึ้น โดยมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น สรุปได้ว่า ความต้านทานการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นเมื่อใส่เขม่าดำมากขึ้น⁽¹⁹⁾

Datta และคณะ พบว่าเมื่อปริมาณเขม่าดำมากขึ้น อุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (Glass Transition, T_g) ไม่เปลี่ยนแปลง แต่ $\tan \delta$ ที่ T_g ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่

โมเลกุลหลัก และอนุภาคเขม่าดำ⁽²⁰⁾ สอดคล้องกับ Wang ที่กล่าวว่าอุณหภูมิที่ $\tan \delta$ max ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น⁽¹²⁾

จากการทดลองของ Sombatsompop พบว่าเมื่อใส่เขม่าดำ Tg จะเลื่อนไปที่อุณหภูมิสูงขึ้นเล็กน้อย โดยจะสูงสุดที่ปริมาณเขม่าดำ 40 phr เนื่องจากเกิดการเชื่อมโยง ซึ่งจะไปจำกัดการเคลื่อนไหวยของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ และเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเขม่าดำกับยางเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ปริมาณของเขม่าดำที่ส่งผลสูงสุดต่อสมบัติพลวัตเชิงกล คือ 60 phr แล้วจะตกลง เนื่องจากการรวมตัวของ aggregates ของเขม่าดำเมื่อปริมาณเขม่าดำสูงเกินจุดๆหนึ่ง โมดูลัสสะสม (E') เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำจนถึง 60 phr แล้วสมบัติจะตกลง ค่า $\tan \delta$ จะแสดงค่าสูงสุดบริเวณ transition region ซึ่งค่า $\tan \delta$ max นี้จะลดลงเมื่อใส่เขม่าดำมากขึ้นจนถึง 60 phr แต่ค่า $\tan \delta$ max ที่ 80 phr กลับเพิ่มขึ้นสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับ Tg⁽²¹⁾

อาจกล่าวได้ว่า $\tan \delta$ เป็นปัจจัยที่บ่งบอกถึงพลังงานหรือความร้อนที่สูญเสียต่อรอบของการกดยืด (hysteresis) กล่าวคือปริมาณสารตัวเติมน้อย การรวมตัวเป็น agglomerate เกิดขึ้นน้อย ส่งผลให้ hysteresis ต่ำลง ในขณะที่สารตัวเติมมากแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง aggregates เพิ่มขึ้น และมีการสร้าง secondary network ซึ่งจะทำให้วงไวดต่อการรวมตัวเป็น agglomerate ส่งผลให้ hysteresis สูง⁽²²⁾

2.5.2 ผลของขนาดอนุภาคของเขม่าดำ

ขนาดอนุภาคของเขม่าดำจะสัมพันธ์กับพื้นที่ผิว ดังกล่าวไว้ในตอนต้น พื้นที่ผิวมากจะทำให้ความทนแรงดึง โมดูลัส ความต้านทานการฉีกขาด และความแข็งเพิ่มขึ้น ส่วนการกระดอนลดลง^(11, 13)

พื้นที่ผิวของเขม่าดำเพิ่มขึ้น ขณะที่ปริมาณคงที่ พบว่าจะทำให้แนวโน้มการรวมตัว (agglomerate) ของ aggregates เพิ่มขึ้น และเป็นที่ทราบกันดีว่า hysteresis ซึ่งวิเคราะห์จาก $\tan \delta$ มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพื้นที่ผิวของสารตัวเติมเพิ่มขึ้น⁽¹²⁾ นอกจากนี้ Trexler และ Lee มีความเห็นว่าสามารถพัฒนาอย่างให้มีโมดูลัสสะสมตามที่ต้องการพร้อมกับมีความว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทำได้โดยการใช้สารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคเล็ก⁽²³⁾

2.5.3 ผลของการกระจายตัวของเขม่าดำ

การกระจายตัวของเขม่าดำขึ้นกับขนาดและจำนวน agglomerates และระยะทางระหว่าง aggregates⁽⁴⁾ การกระจายตัวที่ดีจะช่วยปรับปรุงสมบัติด้านต่างๆของยาง ในปี 1997 Ghosh และ

คณะ ได้ศึกษาการดัดแปรเขม่าดำด้วยผลิตภัณฑ์จากพืช ซึ่งเป็นสารจำพวก long aliphatic chain substituted phenol พบว่าช่วยให้การบดผสมเขม่าดำกับยางธรรมชาติทำได้ง่าย และกระจายตัวดี นอกจากนี้ยังปรับปรุงความทนแรงดึง ความต้านทานการหักงอ และความต้านทานการสึกหรอ ส่วนสมบัติด้านอื่นมีผลกระทบเพียงเล็กน้อย⁽²⁴⁾ การเพิ่มเวลาการบดผสมก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะช่วยปรับปรุงการกระจายตัวของเขม่าดำ ซึ่งทำให้การกระดอนและ hysteresis ต่ำลงในยางธรรมชาติ ยางสไตรีนบิวตะไดอิน และยางคลอโรพรีน⁽⁴⁾

การเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวของเขม่าดำ และการยึดเกาะระหว่างเขม่าดำกับยาง มีหลายวิธี ได้แก่

- การปรับสภาวะการบดผสม เช่น เวลาการบดผสม และเครื่องบดผสม เป็นต้น⁽²⁵⁾
- การปรับกระบวนการผลิตเขม่าดำ โดยออกแบบเครื่องและปัจจัยต่างๆให้เหมาะสม⁽¹²⁾
- การทำ surface treatment ได้แก่ heat treatment⁽⁴⁾, plasma treatment⁽¹²⁾ และการใช้สารประกอบซิลิโคน⁽¹²⁾ เป็นต้น

- การใช้สารช่วยผสม (plasticizer) เช่น น้ำมันพาราฟินิกและอะโรมาติก เป็นต้น⁽³⁾

การกระจายตัวและสัณฐานวิทยาของเขม่าดำสามารถศึกษาด้วยเครื่องมือต่างๆ⁽²⁷⁻²⁸⁾ ได้แก่

- Optical microscope : ใช้ศึกษาการกระจายตัวของ agglomerates
- X - ray diffraction : ใช้ศึกษาการกระจายตัวเช่นกัน แต่สามารถประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะใช้ร่วมกับ SEM/EDX
- Transmission electron microscope (TEM) : ใช้ศึกษา microstructure และสัณฐานวิทยาของเขม่าดำ
- Scanning electron microscope / Scanning transmission electron microscope (SEM/STEM) : ใช้ศึกษา microstructure และสัณฐานวิทยาของเขม่าดำเช่นกัน
- Atomic force microscope (AFM) : จะแสดงให้เห็นภาพด้วยกลไกที่แตกต่างกัน ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์วัสดุเชิงประกอบที่ใส่เขม่าดำ

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 ยางธรรมชาติ STR 5L ผลิตโดย Rayong Bangkok Rubber Co., Ltd.
- 3.1.2 เขม่าดำ (Carbon Black) เกรด N330, N550 และ N660 ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมเสริมแรง ผลิตโดย Thai Carbon Black Co., Ltd.
- 3.1.3 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) ชนิด light precipitated ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมไม่เสริมแรง ผลิตโดย FK Co., Ltd.
- 3.1.4 น้ำมันพาราฟินิก (Paraffinic oil) ทำหน้าที่เป็นสารช่วยในการแปรรูป (plasticizer) ผลิตโดย Gurny Mooning petrochemical Co., Ltd.
- 3.1.5 ซิงก์ออกไซด์ (Zinc oxide) ชนิด white seal ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นวัลคาไนซ์ (activator) ผลิตโดย Univertures public Co., Ltd.
- 3.1.6 กรดสเตียริก (Stearic acid) ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นวัลคาไนซ์ (activator) ผลิตโดย Imperial Co., Ltd.
- 3.1.7 TMQ (2,2,4-trimethyl-1,2-dihydroquinoline) ทำหน้าที่เป็นสารป้องกันยางเสื่อมสภาพ ผลิตโดย Flexsys Co., Ltd.
- 3.1.8 6PPD (N-(1,3-dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylene-diamine) ทำหน้าที่เป็นสารป้องกันยางเสื่อมสภาพ ผลิตโดย Flexsys Co., Ltd.
- 3.1.9 CBS (N-cyclohexyl-2-benzothiazyl sulphenamide) ทำหน้าที่เป็นสารเร่งวัลคาไนซ์ (accelerator) ผลิตโดย Flexsys Co., Ltd.
- 3.1.10 TMTD (Tetramethythyuram disulphide) ทำหน้าที่เป็นสารเร่งวัลคาไนซ์ (accelerator) ผลิตโดย Flexsys Co., Ltd.
- 3.1.11 กำมะถัน (Sulphur) ทำหน้าที่เป็นสารวัลคาไนซ์ (vulcanizing agent) ผลิตโดย Loxley Public Co., Ltd.

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 เครื่องบดผสมแบบปิด Kneader : Type KD.3 ความจุ 3,500 ลูกบาศก์เซนติเมตร ของ Kneader Machinery Co., Ltd.
- 3.2.2 เครื่องบดผสมแบบเปิด ชนิดสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางลูกกลิ้ง 8 x 20 นิ้ว Model R11-3FF ของ Kodaira Seisakusho Co., Ltd.
- 3.2.3 เครื่องวัลคาไนซ์ด้วยการอัด (Vulcanizing Press) ขนาดแท่นอัด 50 x 50 เซนติเมตร แรงอัด 150 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ของโรงงานชัยเจริญการช่าง
- 3.2.4 เครื่องทดสอบหาความหนืดของยาง (Mooney viscometer) Model 123103 ของ Tech Pro, Inc.
- 3.2.5 เครื่องทดสอบหาเวลาและลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางผสม (Rheometer ชนิด moving die type) Model MDR 2000 ของ Monsanto Co., Ltd.
- 3.2.6 เครื่องตัดตัวอย่างยางแบบใช้กำลังลม (Compressed air sample cutter) Model SDAP-100-N ของ Dumbbell Co., Ltd.
- 3.2.7 เครื่องทดสอบความทนแรงดึง (Tensile Tester) Model 1101 ของ Instron Calibration Laboratory Co., Ltd.
- 3.2.8 เครื่องทดสอบความทนการฉีกขาด Model LS500 ของ Lloyd Instruments Co.
- 3.2.9 เครื่องทดสอบความต้านทานการสึกหรอ (Akron Abrasion Tester) Model APH-40 ของ Hampden Northampton Co., Ltd.
- 3.2.10 เครื่องทดสอบการหักงอ (De Mattia flexing tester) ของ Wallace test equipment Co., Ltd.
- 3.2.11 เครื่องทดสอบความล้าตัว (Fatigue tester) ของ Wallace test equipment Co., Ltd.
- 3.2.12 เครื่องทดสอบการกระดอน (Rebound Resilience Tripsometer) ของ Wallace test equipment Co., Ltd.
- 3.2.13 เครื่องทดสอบการคั่นตัว (Compression Set Tester MILANO / ITALIA) ของ Newton Co., Ltd.
- 3.2.14 เครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness tester) Model 917 Maximum Hardness Indicator ของ Shore Instrument and Mfg.Co.
- 3.2.15 ตู้อบ (Rubber aging oven)
- 3.2.16 เครื่องทดสอบสมบัติพลวัตเชิงกล (Dynamic Mechanical Analyzer) : DMA 7e ของ Perkin Elmer Co., Ltd.

3.3 การทดสอบสมบัติของยางธรรมชาติ และการบดผสมยางกับสารเคมี

3.3.1 ทดสอบสมบัติของยางธรรมชาติ

ทดสอบสมบัติของ STR 5L ที่เป็นวัตถุดิบ ได้แก่ ปริมาณผงหรือสิ่งสกปรก ปริมาณเถ้า ปริมาณสิ่งระเหย ปริมาณไนโตรเจน ค่าดัชนีความอ่อนตัว สี และความหนืด

3.3.2 สูตรสารประกอบที่ใช้ในการวิจัย

แบ่งได้เป็น 4 กลุ่ม

1. สูตรที่ไม่ใส่สารตัวเติม จำนวน 1 สูตร (สูตรที่ 1)
2. สูตรที่ใส่ขี้นกต่างชนิดต่างๆ จำนวน 9 สูตร (สูตรที่ 2 - 10)
3. สูตรที่ใส่แคลเซียมคาร์บอเนต จำนวน 4 สูตร (สูตรที่ 11 - 14)
4. สูตรที่ใส่ทั้งขี้นกดำ และแคลเซียมคาร์บอเนต จำนวน 3 สูตร (สูตรที่ 15 - 17)

ตารางที่ 3.1 สูตรที่ไม่ใส่สารตัวเติม และสูตรที่ใส่ขี้นกต่างชนิดต่างๆ ได้แก่ สูตรที่ 1 - 10 ดังนี้

ส่วนประกอบ	ปริมาณที่ใช้ในสูตรต่างๆ (phr)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
STR 5L	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
N330	-	30	45	60	-	-	-	-	-	-
N550	-	-	-	-	30	45	60	-	-	-
N660	-	-	-	-	-	-	-	30	45	60
Paraffinic oil	-	6.7	10	13.3	6.7	10	13.3	6.7	10	13.3
ZnO	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Stearic acid	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
TMQ	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
6PPD	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
CBS	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
TMTD	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Sulphur	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

หมายเหตุ N330, N550 และ N660 มีขนาดอนุภาค 26 - 30, 40 - 48 และ 49 - 60 nm ตามลำดับ

ตารางที่ 3.2 สูตรที่ใช้แคลเซียมคาร์บอเนต ได้แก่ สูตรที่ 11 - 14 ดังนี้

ส่วนประกอบ	ปริมาณที่ใช้ในสูตรต่างๆ (phr)			
	11	12	13	14
STR 5L	100	100	100	100
CaCO ₃	15	30	45	60
Paraffinic oil	3.3	6.7	10	13.3
ZnO	10	10	10	10
Stearic acid	2	2	2	2
TMQ	2	2	2	2
6PPD	2	2	2	2
CBS	1.2	1.2	1.2	1.2
TMTD	0.2	0.2	0.2	0.2
Sulphur	1.5	1.5	1.5	1.5

หมายเหตุ light precipitated CaCO₃ มีขนาดอนุภาค 0.69 microns หรือ 690 nm

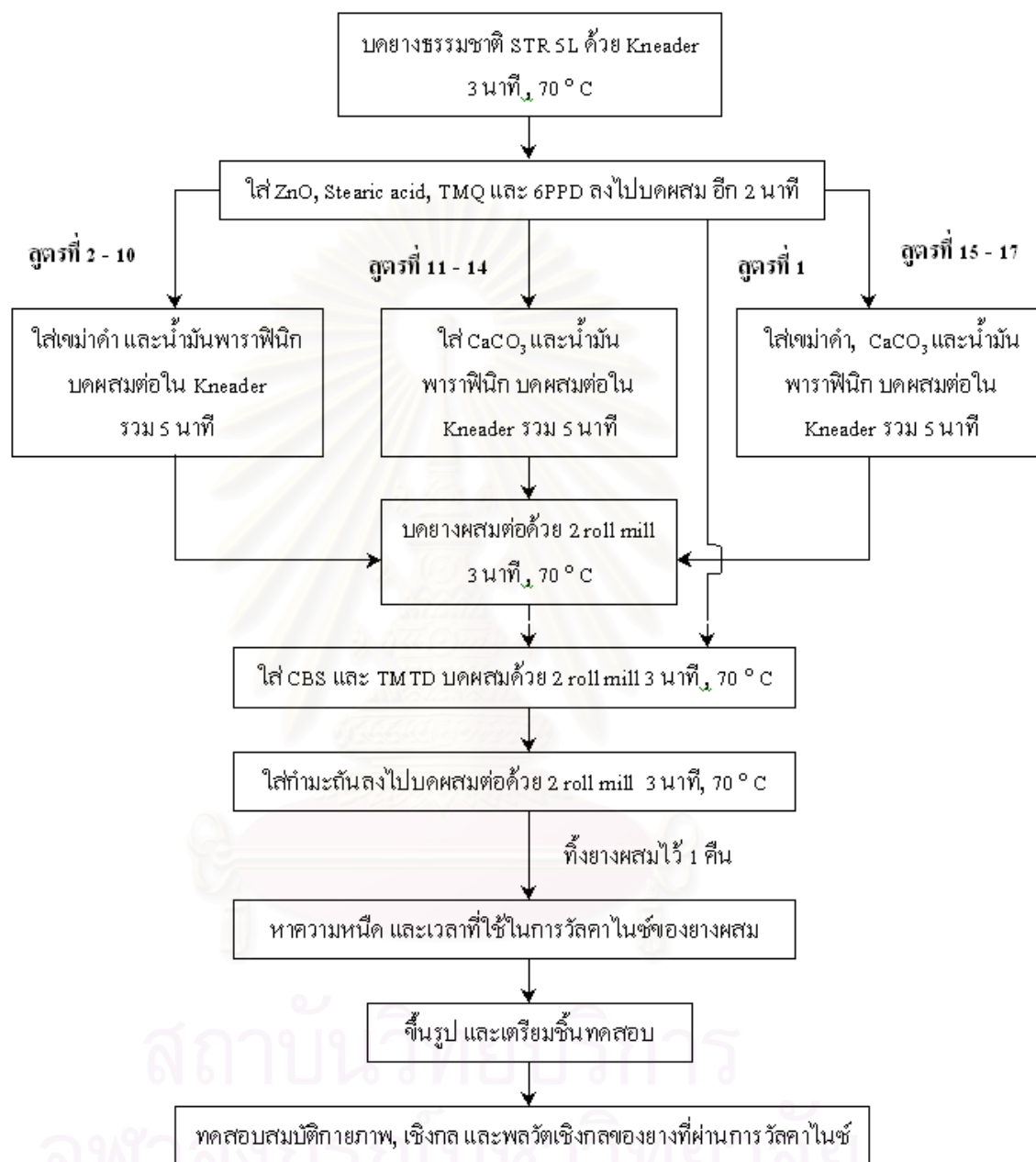
ตารางที่ 3.3 สูตรที่ใช้ทั้งเขม่าดำ และแคลเซียมคาร์บอเนต ได้แก่ สูตรที่ 15 - 17 ดังนี้

ส่วนประกอบ	ปริมาณที่ใช้ในสูตรต่างๆ (phr)		
	15	16	17
STR 5L	100	100	100
N330	30	45	30
CaCO ₃	15	15	30
Paraffinic oil	10	13.3	13.3
ZnO	10	10	10
Stearic acid	2	2	2
TMQ	2	2	2
6PPD	2	2	2
CBS	1.2	1.2	1.2
TMTD	0.2	0.2	0.2
Sulphur	1.5	1.5	1.5

3.3.3 ขั้นตอนการบดผสมยางกับสารเคมี

1. คำนวณปริมาตรรวมของยางและสารเคมีให้อยู่ประมาณ 60 - 90% ของความจุของเครื่องบดผสมแบบปิด ที่เรียกว่า Kneader ซึ่งสามารถจุได้ประมาณ 3,500 ลบ.ซม. เนื่องจากถ้าใช้ปริมาณยางที่บดผสมกับสารเคมีน้อยเกินไปจะทำให้บดผสมยางกับสารเคมีเข้ากันได้ไม่ทั่วถึง ในทางกลับกันถ้ามีปริมาณมากเกินไป นอกจากจะทำให้บดผสมยางกับสารเคมีเข้ากันได้ไม่ทั่วถึงแล้ว ยังทำให้ใช้พลังงานมากเกินไปในการบดผสม และสิ้นเปลืองวัตถุดิบในงานวิจัยอีกด้วย (วิธีการคำนวณน้ำหนักของวัตถุดิบดูได้ในภาคผนวก)
2. เตรียมยางและสารเคมีตามน้ำหนักที่ใช้ในแต่ละสูตร
3. บดยางธรรมชาติ STR 5L ให้นิ่มด้วยเครื่อง Kneader ใช้อุณหภูมิประมาณ 70 °C เวลา 3 นาที
4. ใส่ซิงออกไซด์, กรดสเตียริก, TMQ และ 6PPD ลงไปบดผสมกับยางอีก 2 นาที
5. สูตรที่ 2 - 10 ใส่เขม่าดำครึ่งหนึ่งลงไปบดผสมกับยาง หลังจากนั้นใส่อีกครึ่งหนึ่งลงไปบดผสมต่อ ใช้เวลารวมประมาณ 5 นาที
 สูตรที่ 11 - 14 ทำตามข้างต้น แต่จะเปลี่ยนสารตัวเติมจากเขม่าดำเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต
 สูตรที่ 15 - 17 ใส่เขม่าดำส่วนหนึ่งลงไปบดผสมกับยาง ต่อมาใส่เขม่าดำส่วนที่เหลือ พร้อมกับน้ำมันพาราฟินิกส่วนหนึ่งลงไปบดผสมต่อ หลังจากนั้นใส่แคลเซียมคาร์บอเนต และน้ำมันพาราฟินิกส่วนที่เหลือลงไปบดผสมต่อ ใช้เวลารวมในการบดผสมทั้งหมดประมาณ 5 นาที
 สูตรที่ 1 ไม่มีสารตัวเติม และน้ำมันพาราฟินิก ให้ข้ามขั้นตอนนี้ไป
6. สูตรที่ 2 - 17 บดผสมยางกับสารตัวเติมต่อด้วยเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง ให้ช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง (nip gap) อยู่ประมาณ 2 - 3 มิลลิเมตร ใช้อุณหภูมิประมาณ 70 °C เวลา 3 นาที โดยตัดและม้วนยางสลับไปมา เพื่อให้สารตัวเติมกระจายในยางอย่างสม่ำเสมอ
 สูตรที่ 1 ไม่มีสารตัวเติม และน้ำมันพาราฟินิก ให้ข้ามขั้นตอนนี้ไป
7. นำยางผสมสารเคมีมาบดผสมต่อกับ CBS และ TMTD ด้วยเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง ให้ช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งอยู่ประมาณ 2 มิลลิเมตร นอกจากนี้บางช่วงของการบดผสมควรลดช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งให้อยู่ประมาณ 1 มิลลิเมตร เพื่อบดให้สารเคมีแตกตัว ใช้เวลาบดผสมทั้งสิ้นประมาณ 3 นาที
8. ค่อยๆ ใส้กัมมะถันลงไปบดผสมกับยาง ให้ช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งอยู่ประมาณ 2 มิลลิเมตร ใช้เวลาประมาณ 3 นาที
9. นำยางผสมออกจากเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง วัดอุณหภูมิของยาง และลูกกลิ้ง แล้วชั่งน้ำหนักยางที่บดผสมได้ เพื่อหาน้ำหนักที่หายไประหว่างการบดผสม โดยค่าที่เหมาะสมไม่ควรเกิน 2 % และในการบดผสมแต่ละครั้งต้องควบคุมอุณหภูมิให้ใกล้เคียงกัน

10. ทิ้งยางผสมไว้ 1 คืน แล้วนำบางส่วนมาหาความหนืด และเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ หลังจากนั้นจึงนำไปขึ้นรูปโดยการใช้แม่แบบ แล้วนำไปทดสอบสมบัติของยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์ต่อไป



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการบดผสมยางกับสารเคมี การทดสอบสมบัติของยางผสม การขึ้นรูป และทดสอบสมบัติของยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์

3.4 การทดสอบการแปรรูป และการวัลคาไนซ์

3.4.1 ความหนืดของมูนนี่ (Mooney viscosity)

ใช้วิธีทดสอบมาตรฐาน ISO 289-1 : 1994 (E) ด้วยเครื่อง Mooney viscometer โดยเตรียมชิ้นทดสอบวงกลม 2 ชิ้น เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 เซนติเมตร หนาประมาณ 5 มิลลิเมตร น้ำหนักประมาณ 20 กรัม ชิ้นทดสอบชิ้นหนึ่งจะถูกเจาะรูตรงกลาง เพื่อใส่ด้านล่างของโรเตอร์ อีกชิ้นจะนำมาประกบด้านบนของโรเตอร์ ใช้เวลาอุ่นเครื่อง 1 นาที แล้วทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 5 นาที โดยโรเตอร์จะหมุนวัดความหนืดเป็นเวลา 4 นาที

3.4.2 เวลาที่ย่างเริ่มวัลคาไนซ์ และเวลาวัลคาไนซ์ (Scorch time and cure time)

ใช้วิธีทดสอบมาตรฐาน ISO 3417 : 1991 (E) ด้วยเครื่อง Monsanto Oscillating Disk Rheometer โดยเตรียมชิ้นทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส แต่ละด้านยาว 1.5 เซนติเมตร หนา 5 มิลลิเมตร ทดสอบที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 30 นาที

3.4.3 การขึ้นรูป และเตรียมชิ้นทดสอบ

3.4.3.1 เตรียมชิ้นทดสอบจากยางผสม ตามลักษณะแม่พิมพ์ ดังนี้

- สี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง 14 เซนติเมตร ยาว 16 เซนติเมตร หนา 4 มิลลิเมตร จำนวน 12 ชิ้น สำหรับทดสอบความทนแรงดึง ความทนการฉีกขาด ความล้าตัว และสมบัติพลวัตเชิงกล

- สี่เหลี่ยมจัตุรัส แต่ละด้านยาว 15 เซนติเมตร หนา 6 มิลลิเมตร จำนวน 1 ชิ้น สำหรับทดสอบการกระดอน

- สี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง 2.5 เซนติเมตร ยาว 14 เซนติเมตร หนา 8 มิลลิเมตร จำนวน 3 ชิ้น สำหรับทดสอบการหักงอ

- ทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร หนา 2 เซนติเมตร จำนวน 6 ชิ้น สำหรับทดสอบการคืนตัว

- ทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร หนา 3 เซนติเมตร จำนวน 2 ชิ้น สำหรับทดสอบการสึกหรอด้วยเครื่อง Akron

3.4.3.2 ใช้เวลาและอุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ตามผลที่ได้จากเครื่อง Rheometer โดยชิ้นทดสอบที่หนาไม่เกิน 1 เซนติเมตร จะใช้ t_{c95} เป็นเวลาในการวัลคาไนซ์ ส่วนชิ้นทดสอบที่หนาเกิน 1 เซนติเมตร จะใช้เวลาวัลคาไนซ์เป็น 2 เท่าของ t_{c95}

3.4.3.3 ตัดชิ้นทดสอบความทนแรงดึง ความทนการฉีกขาด ความล้าตัว การกระดอน และสมบัติ พลวัตเชิงกล ด้วยเครื่องตัดตัวอย่างกำลังลม (Compress air sample cutter)

3.5 การทดสอบสมบัติของยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์

3.5.1 ความทนแรงดึง (Tensile strength)

ใช้วิธีทดสอบมาตรฐาน ISO 37 : 1994 (E) โดยใช้เครื่อง Instron ที่มี load cell ขนาด 500 นิวตัน ความเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที มี extensometer เป็นตัวจับระยะการยืดของชิ้นทดสอบ ชิ้นทดสอบจะถูกตัดเป็นรูปคัมเบลล์ (dumbbell) ตามแนวการรีดยางออกมาเป็นแผ่น ชิ้นทดสอบมีความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร

3.5.2 ความทนการฉีกขาด (Tear strength)

ใช้วิธีทดสอบมาตรฐาน ISO 34-1 : 1994 (E) โดยใช้เครื่อง Lloyd ที่มี load cell 500 นิวตัน ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวจับ (grip) 500 มิลลิเมตรต่อนาที ตัดชิ้นทดสอบเป็นแบบ angle (ASTM DIE C) โดยตัดขวางแนวเครื่อง ชิ้นทดสอบมีความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร

3.5.3 ความต้านทานการสึกหรอ (Abrasion resistance)

ใช้วิธีทดสอบมาตรฐาน BS 903 : Part A9 : 1998 Method B โดยใช้เครื่อง Akron ชิ้นทดสอบ 2 ชิ้น มีลักษณะเป็นวงล้อ เส้นผ่านศูนย์กลางวงนอก 6.3 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางวงใน 1.3 เซนติเมตร หนา 1.3 เซนติเมตร โดยชิ้นทดสอบที่วัดค่าความหนาแน่นแล้วจะถูกขัดสีกับวงล้อหินจำนวน 500 รอบ แล้วชั่งน้ำหนักที่หายไป คำนวณหาปริมาตรที่หายไป แล้วทำ Running - In 1 ครั้ง และ Test Run 5 ครั้ง ตามตารางที่ 3.4 หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักที่หายไป แล้วคำนวณหาปริมาตรที่หายไปต่อ 1,000 รอบ คำนวณหาค่าเฉลี่ยของชิ้นทดสอบ 2 ชิ้น

ตารางที่ 3.4 การทดสอบความต้านทานการสึกหรอด้วยเครื่อง Akron

Approximate Running - In and Test Runs		
Volume loss in 500 Revolution Trial Run (ml)	Revolutions (Additional to Trial Run)	
	Running - In	Test Run
Above 0.05, not above 0.10	4,000	1,000
Above 0.10, not above 0.20	2,000	500
Above 0.20, not above 0.40	750	250
Above 0.40	500	125

3.5.4 ความต้านทานการหักงอ (Flex cracking resistance)

ใช้วิธีทดสอบมาตรฐาน ISO 132 : 1999 (E) โดยใช้เครื่อง De Mattia flexing tester ซึ้นทดสอบ 3 ซึ้น มีขนาดกว้าง 2.5 เซนติเมตร ยาว 14.8 เซนติเมตร หนา 6.5 มิลลิเมตร บริเวณกลาง ซึ้นทดสอบจะเป็นร่องขนานกับความกว้าง ยึดปลาย 2 ด้านของซึ้นทดสอบในแนวดิ่ง เดินเครื่อง ด้วยเร็ว 300 รอบต่อนาที ซึ้นทดสอบจะถูกยึดตรงและพับงอสลับกัน ให้สังเกตรอยแตกที่เกิดขึ้น บริเวณร่องตรงกลางซึ้นทดสอบ โดยหยุดเครื่องดูเป็นระยะๆ รอยแตกจะแบ่งเป็นเกรดต่างๆ 6 เกรด ทดสอบจนถึงเกรด 6 แล้วอ่านค่ารอบที่ได้ หรือถ้าถึง 10,000 รอบ แล้วยังไม่แตกถึงเกรด 6 ก็ให้ หยุด แล้วอ่านค่าเกรดที่ได้ หรือหาค่าเฉลี่ยของจำนวนรอบ ลักษณะของเกรดต่างๆ แสดงได้ดังนี้

เกรด 1 : รอยแตกเหมือนรอยเข็ม และมองเห็นด้วยตาเปล่า จำนวนไม่เกิน 10 รอย

เกรด 2 : มี 2 กรณี คือ 1. มีรอยแตกแบบเกรด 1 เพิ่มขึ้น 10 รอย

2. จำนวนรอยแตกไม่เพิ่มขึ้น แต่รอยแตกขยายไม่เกิน 0.5 มิลลิเมตร

เกรด 3 : รอยแตกมีความยาวระหว่าง 0.5 - 1.0 มิลลิเมตร (มองเห็นรอยแตกที่ใหญ่ที่สุด)

เกรด 4 : รอยแตกมีความยาวระหว่าง 1 - 1.5 มิลลิเมตร (มองเห็นรอยแตกที่ใหญ่ที่สุด)

เกรด 5 : รอยแตกที่ยาวที่สุดอยู่ระหว่าง 1.5 - 3 มิลลิเมตร

เกรด 6 : รอยแตกที่ยาวที่สุดมากกว่า 3 มิลลิเมตร

3.5.5 ความต้านทานการล้าตัว (Fatigue resistance)

ใช้วิธีทดสอบมาตรฐาน ISO 4666/1-1982 (E) โดยใช้เครื่อง Fatigue tester ขึ้นทดสอบ 5 ชั้น มีลักษณะเป็นวง เส้นผ่านศูนย์กลางวงนอก 5.3 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางวงใน 4.3 เซนติเมตร หนา 2 มิลลิเมตร ขึ้นทดสอบจะถูกยึดหดด้วยความถี่เครื่อง 50 Hz เมื่อขึ้นทดสอบขาด อ่านค่าจำนวนรอบที่ได้ แล้วหาค่าเฉลี่ย

3.5.6 การกระดอน (Resilience)

ใช้วิธีทดสอบมาตรฐาน BS 903 : Part A8 : 1990 โดยใช้เครื่อง Wallace Dunlop Tripsometer ขึ้นทดสอบมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 เซนติเมตร หนา 4 มิลลิเมตร อุณหภูมิขึ้นทดสอบก่อนทดสอบเป็นเวลา 5 นาที ตั้งจานเหวี่ยงที่ 45 °C ปล่อยให้จานลงตีขึ้นทดสอบซ้ำ 6 ครั้ง เพื่ออุ่นขึ้นทดสอบ แล้วจึงเริ่มทำการทดสอบจริง เครื่องคอมพิวเตอร์จะคำนวณค่าออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ของการกระดอน บันทึกค่าที่ได้ซ้ำกัน 3 ครั้ง ทำการทดลองดังข้างต้นกับขึ้นทดสอบอีก 2 ชั้น แล้วหาค่าเฉลี่ย

3.5.7 การคืนตัว (Compression set)

ใช้วิธีทดสอบมาตรฐาน ASTM D 395-98 โดยใช้เครื่อง Compression Set Tester MILANO/ITALIA ขึ้นทดสอบ 6 ชั้น มีลักษณะทรงกระบอกตัน เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.9 เซนติเมตร หนาประมาณ 1.3 เซนติเมตร นำขึ้นทดสอบมากดให้ความหนาลดลงประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ โดยเหลือความหนาประมาณ 9.5 มิลลิเมตร แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง แล้ววัดความหนาที่ลดลง นำมาคำนวณเปอร์เซ็นต์การคืนตัว ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{การคืนตัว} = \left[\frac{\text{ความหนาของชิ้นงานก่อนทดสอบ} - \text{ความหนาของชิ้นงานหลังทดสอบ}}{\text{ความหนาของชิ้นงานก่อนทดสอบ} - \text{ความหนาของชิ้นทดสอบเมื่อเริ่มกด (9.5 มม.)}} \right] \times 100$$

3.5.8 ความแข็ง (Hardness)

ใช้วิธีทดสอบมาตรฐาน ASTM D 2240-97 โดยใช้เครื่อง Model 917 Maximum Hardness Indicator ใช้ขึ้นทดสอบความทนแรงดึง หรือความต้านทานการนิกขาด 3 ชั้นซ้อนกัน ซึ่งมีความหนาประมาณ 6 มิลลิเมตร ในการทดสอบความแข็ง ใช้ shore A และตุ้มน้ำหนัก 1 กิโลกรัมในการ

ทดสอบ ก่อนทดสอบต้องตรวจสอบการอ่านค่าความแข็งกับยางมาตรฐานที่ใช้ shore A ก่อน โดยทดสอบกับยางมาตรฐานเป็นเวลา 1 วินาที แล้วจึงทดสอบกับชิ้นทดสอบเป็นเวลา 15 วินาที

3.5.9 การบ่มเร่งด้วยความร้อน (Heat ageing)

ใช้วิธีทดสอบมาตรฐาน ASTM D 573-99 ด้วยเครื่อง Ueshima โดยอบชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง เมื่อนำออกจากตู้อบทิ้งไว้อย่างน้อยครึ่งชั่วโมงที่อุณหภูมิห้องนำไปตัดชิ้นทดสอบสมบัติต่างๆ แล้วทิ้งไว้อีกอย่างน้อย 16 ชั่วโมง จึงนำไปทดสอบความแข็งแรงดึง และความต้านทานการฉีกขาด

3.5.10 สมบัติพลวัตเชิงกล (Dynamic mechanical properties)

ทดสอบด้วยเครื่อง Perkin Elmer DMA7e โดยใช้ tension mode ใช้ความถี่ (frequency) 1 Hz ช่วงอุณหภูมิ (temperature range) -110 ถึง 50 °C อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (heating rate) 5 °C/min ชิ้นทดสอบยาวประมาณ 15 มิลลิเมตร กว้างประมาณ 2 มิลลิเมตร หนาประมาณ 1 มิลลิเมตร

บทที่ 4

ผลการทดลอง และอภิปรายผล

4.1 สมบัติของยางแท่ง STR 5L

ผลการทดสอบสมบัติตามมาตรฐานของยางแท่ง STR 5L ที่ได้จากบริษัท ระบุของบางกอก-รับเบอร์ จำกัด แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สมบัติของยางแท่ง STR 5L

สมบัติ	ผลการทดสอบ	ขีดจำกัดของยาง STR 5L
ปริมาณสิ่งสกปรก (% wt)	0.011	0.04 max
ปริมาณเถ้า (% wt)	0.16	0.40 max
ปริมาณสิ่งระเหย (% wt)	0.29	0.80 max
ปริมาณไนโตรเจน (% wt)	0.31	0.60 max
ค่าดัชนีความอ่อนตัวเริ่มแรก (Po)	36.5	35.0 min
ค่าดัชนีความอ่อนตัวของยาง (PRI)	90.4	60.0 min
ลี (Lovibond Scale)	2.8	6.0 max
ความหนืด [Mooney Viscosity (ML 1+4) 100°C]	64.3	-

4.2 สมบัติของยางที่ผสมสารตัวเติมชนิดเดียว

4.2.1 ความหนืดมูนี (Mooney viscosity)

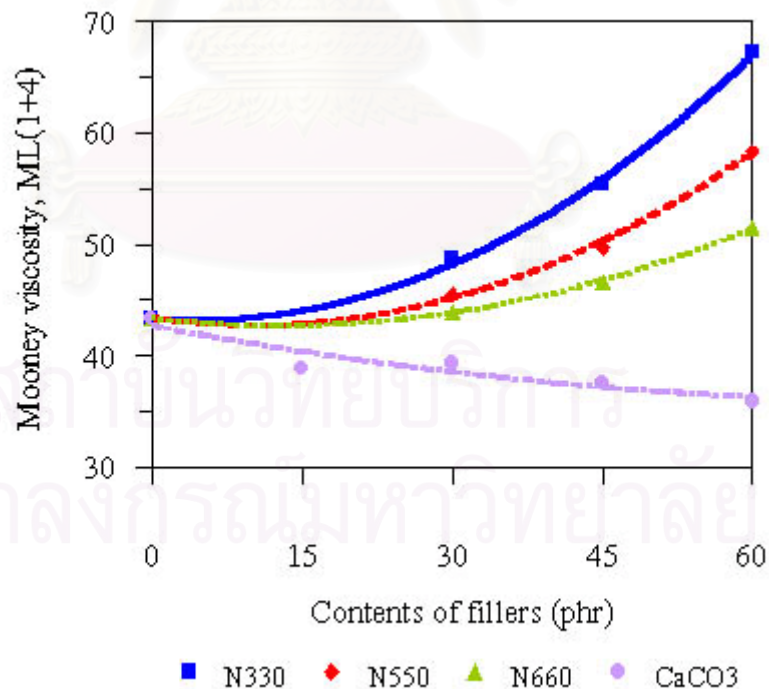
ผลของความหนืดมูนีของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ และแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 – 4.3 และรูปที่ 4.1 โดยที่ N330, N550 และ N660 มีขนาดอนุภาค 26 - 30, 40 - 48 และ 49 - 60 nm ตามลำดับ ส่วน light precipitated CaCO₃ มีขนาดอนุภาค 0.69 microns หรือ 690 nm

ตารางที่ 4.2 ความหนืดมูนนี่ของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ

ปริมาณเขม่าดำ (phr)	ความหนืดมูนนี่ [Mooney viscosity, ML(1+4) 100°C]		
	N330	N550	N660
30	48.64	45.47	43.86
45	55.40	49.69	46.59
60	67.25	58.31	51.36

ตารางที่ 4.3 ความหนืดมูนนี่ของยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนต

ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (phr)	ความหนืดมูนนี่ [Mooney viscosity, ML(1+4) 100°C]
0	43.27
15	38.83
30	39.33
45	37.53
60	35.92



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดมูนนี่กับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ

จากตารางที่ 4.2 - 4.3 และรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าเขม่าดำมีผลทำให้ความหนืดของยางเพิ่มขึ้น ซึ่งขึ้นกับปริมาณและขนาดอนุภาค กล่าวคือ เมื่อปริมาณเขม่าดำมากขึ้น ความหนืดจะยิ่งสูงขึ้น และเมื่อใช้ในปริมาณเท่ากัน ขนาดอนุภาคยิ่งเล็กจะทำให้ความหนืดของยางเพิ่มขึ้น ส่วนแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าเขม่าดำมาก กลับมีผลทำให้ความหนืดของยางต่ำลง และเมื่อใส่ปริมาณมากขึ้นความหนืดจะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

4.2.2 เวลาที่ย่างเริ่มวัลคาไนซ์ (Scorch time) และเวลาวัลคาไนซ์ (95% Cure time)

4.2.2.1 เวลาที่ย่างเริ่มวัลคาไนซ์

4.2.2.2

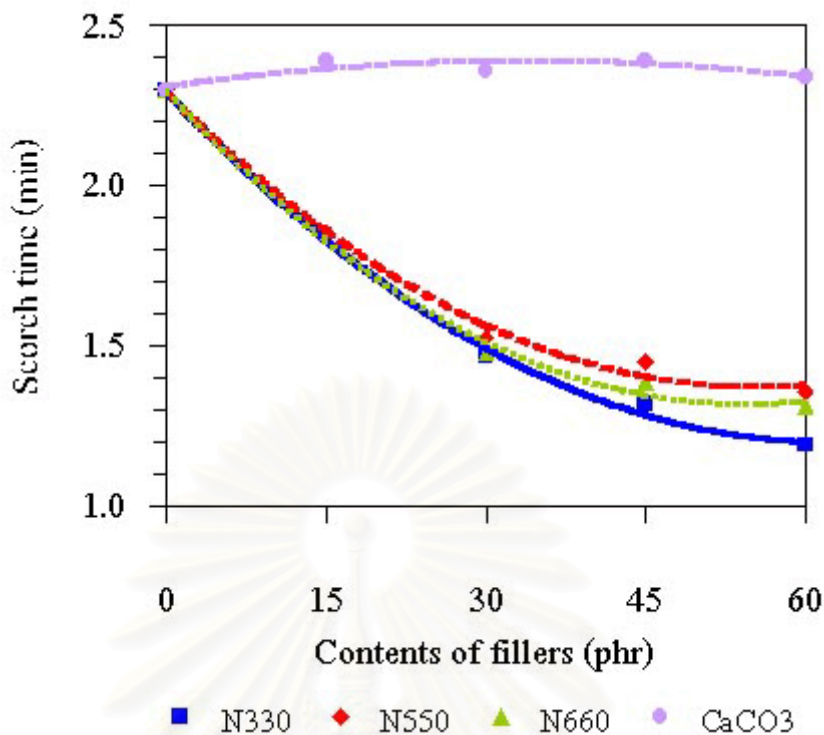
ผลของเวลาเริ่มวัลคาไนซ์ของยางที่ใส่เขม่าดำชนิดต่างๆ และแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณต่างๆกัน แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 - 4.5 และรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.4 เวลาที่ย่างผสมเขม่าดำเริ่มวัลคาไนซ์

ปริมาณเขม่าดำ (phr)	เวลาที่ย่างเริ่มวัลคาไนซ์ (นาที)		
	N330	N550	N660
30	1.47	1.53	1.48
45	1.32	1.45	1.39
60	1.19	1.36	1.31

ตารางที่ 4.5 เวลาที่ย่างผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเริ่มวัลคาไนซ์

ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (phr)	เวลาที่ย่างเริ่มวัลคาไนซ์ (นาที)
0	2.30
15	2.39
30	2.36
45	2.39
60	2.34



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเริ่มวัลคาไนซ์กับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ

จากตารางที่ 4.4 - 4.5 และรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าเวลาที่ยางเริ่มวัลคาไนซ์ มีค่าลดลงเมื่อใส่เขม่าดำปริมาณมากขึ้น ส่วนแคลเซียมคาร์บอเนตมีผลทำให้ค่าทั้งสองเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากเขม่าดำมีขนาดอนุภาคเล็ก พื้นที่ผิวมาก เมื่อบดผสมกับยางในระบบปิดด้วยเครื่อง kneader จึงทำให้เกิดความร้อนสูง ซึ่งความร้อนที่เพิ่มมากขึ้นนี้จะเป็นตัวเร่งให้สารเคมีทำปฏิกิริยากับยางเร็วขึ้น สำหรับแคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า พื้นที่ผิวน้อยกว่า เมื่อบดผสมจึงไม่เกิดความร้อนสูงขึ้นเท่าเขม่าดำ ทำให้เวลาเริ่มวัลคาไนซ์ ไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงไปเท่าใดนัก

4.2.2.2 เวลาวัลคาไนซ์

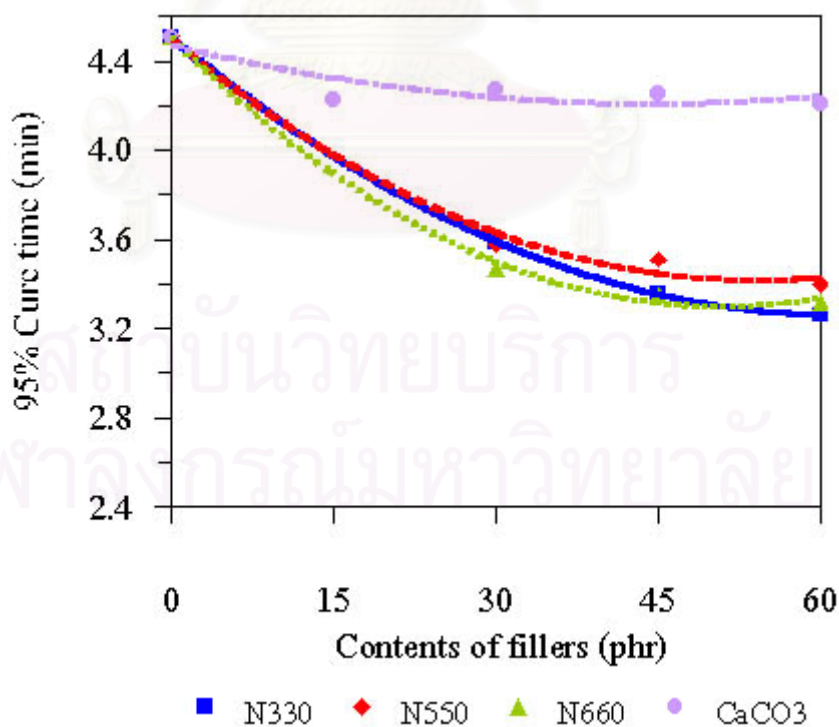
ผลของเวลาวัลคาไนซ์ของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ และแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณต่างๆกัน แสดงไว้ในตารางที่ 4.6 - 4.7 และรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.6 เวลาวัลคาไนซ์ของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ

ปริมาณเขม่าดำ (phr)	เวลาวัลคาไนซ์ (นาท)		
	N330	N550	N660
30	3.59	3.58	3.47
45	3.36	3.51	3.35
60	3.26	3.40	3.32

ตารางที่ 4.7 เวลาวัลคาไนซ์ของยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนต

ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (phr)	เวลาวัลคาไนซ์ (นาท)
0	4.51
15	4.23
30	4.27
45	4.25
60	4.21



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาวัลคาไนซ์กับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ

จากตารางที่ 4.6 - 4.7 และรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าเวลาวัลคาไนซ์ มีค่าลดลงมากเมื่อใส่เขม่าดำปริมาณมากขึ้น ส่วนแคลเซียมคาร์บอเนตมีผลทำให้ค่าลดลงเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากขนาดอนุภาคของสารตัวเติม ซึ่งสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับเวลาเริ่มวัลคาไนซ์

4.2.3 ความแข็ง (Hardness)

ความแข็งของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ และแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณต่างๆกัน ก่อนผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน แสดงไว้ในตารางที่ 4.8 - 4.9 และรูปที่ 4.4

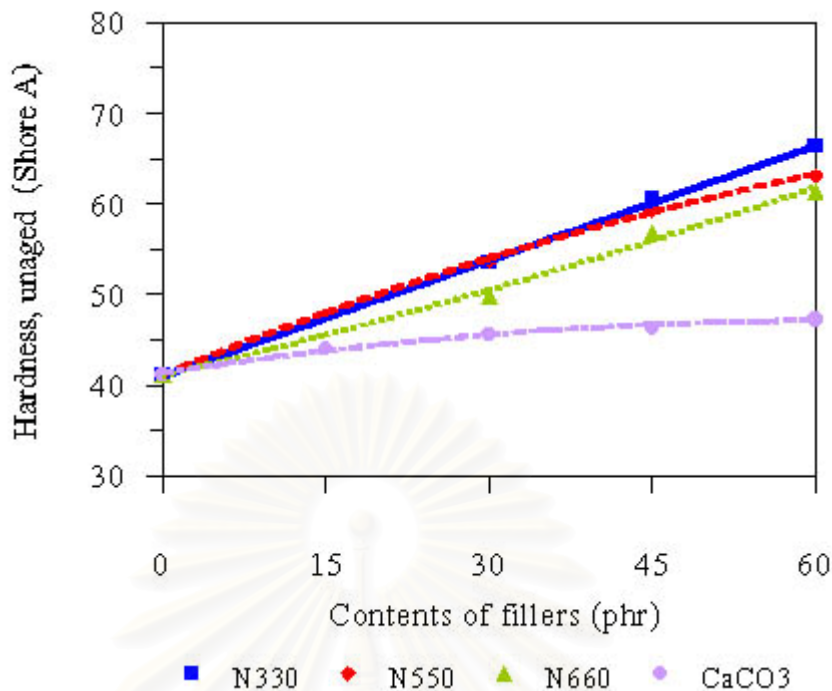
ตารางที่ 4.8 ความแข็งของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ ก่อนอบ

ปริมาณเขม่าดำ (phr)	ความแข็ง (Shore A)		
	N330	N550	N660
30	53.5 (0.96)*	53.7 (0.30)	49.7 (0.35)
45	60.6 (0.26)	59.3 (0.98)	56.8 (0.45)
60	66.3 (0.55)	63.1 (1.26)	61.4 (0.36)

หมายเหตุ * คือ CV (%) หมายถึงค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน (Coefficient of Variation)

ตารางที่ 4.9 ความแข็งของยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนต ก่อนอบ

ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (phr)	ความแข็ง (Shore A)
0	41.1 (1.24)
15	44.0 (0.23)
30	45.5 (0.57)
45	46.3 (0.68)
60	47.2 (0.53)



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ ก่อนอบ

จากตารางที่ 4.8 - 4.9 และรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าเมื่อใส่เขม่าดำมากขึ้น ความแข็งจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยที่ขนาดอนุภาคยิ่งเล็ก ความแข็งก็จะยิ่งเพิ่มมากขึ้น ส่วนแคลเซียมคาร์บอเนตนั้นทำให้ความแข็งของยางเพิ่มขึ้น แต่มีผลน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเขม่าดำ ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหลัก (backbone structure) ของยาง กล่าวคือสารตัวเติมจะเกิดแรงยึดเกาะกับสายโซ่โมเลกุลของยาง โดยที่ขนาดอนุภาคเล็ก พื้นที่ผิวมาก จะสามารถเกิดการยึดเกาะได้ดีกว่า ทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางมีความยืดหยุ่นลดลง ความแข็งจะมากขึ้น

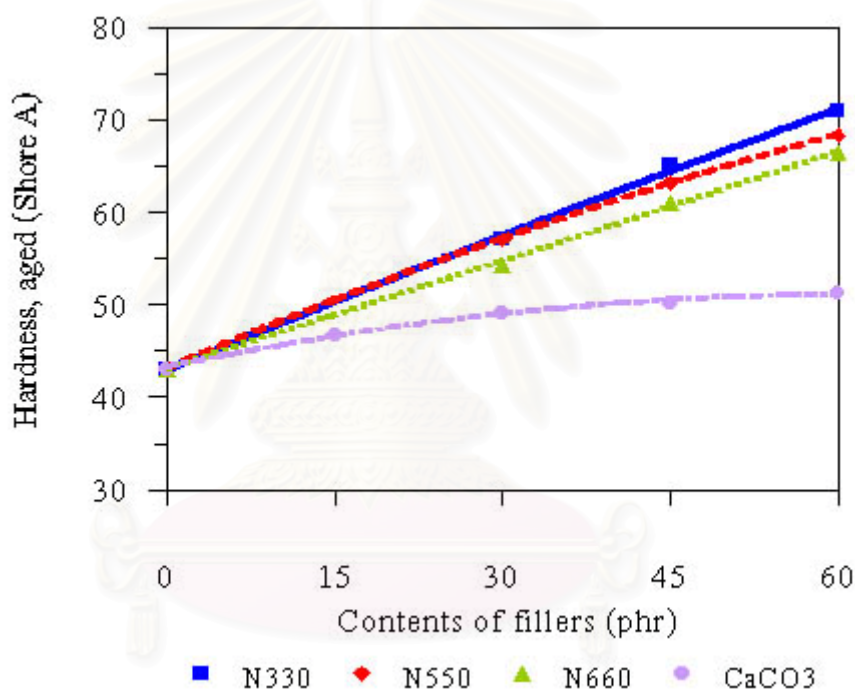
ความแข็งของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ และแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณต่างๆกัน หลังผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน แสดงไว้ในตารางที่ 4.10 - 4.11 และรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.10 ความแข็งของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ หลังอบ

ปริมาณเขม่าดำ (phr)	ความแข็ง (Shore A, ageing)		
	N330	N550	N660
30	57.1 (0.76)	57.0 (1.12)	54.3 (0.69)
45	65.1 (0.84)	63.2 (0.47)	61.0 (0.55)
60	71.0 (0.61)	68.3 (0.72)	66.3 (0.38)

ตารางที่ 4.11 ความแข็งของยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนต หลังอบ

ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (phr)	ความแข็ง (Shore A, ageing)
0	43.1 (1.65)
15	46.7 (0.85)
30	49.0 (1.86)
45	50.2 (0.82)
60	51.2 (1.15)



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ หลังอบ

จากตารางที่ 4.10 - 4.11 และรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าเมื่อผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน ความแข็งของยางจะเพิ่มขึ้นทั้งที่ใส่และไม่ใส่สารตัวเติม โดยมีแนวโน้มเหมือนก่อนอบ กล่าวคือ ความแข็งจะแปรตามปริมาณ และแปรผกผันกับขนาดอนุภาคของสารตัวเติม แต่ทั้งนี้เขม่าดำจะมีอิทธิพลต่อความแข็งมากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต

4.2.4 ความทนแรงดึง ระยะยืดเมื่อขาด และมอดูลัส

4.2.4.1 ความทนแรงดึง (Tensile strength)

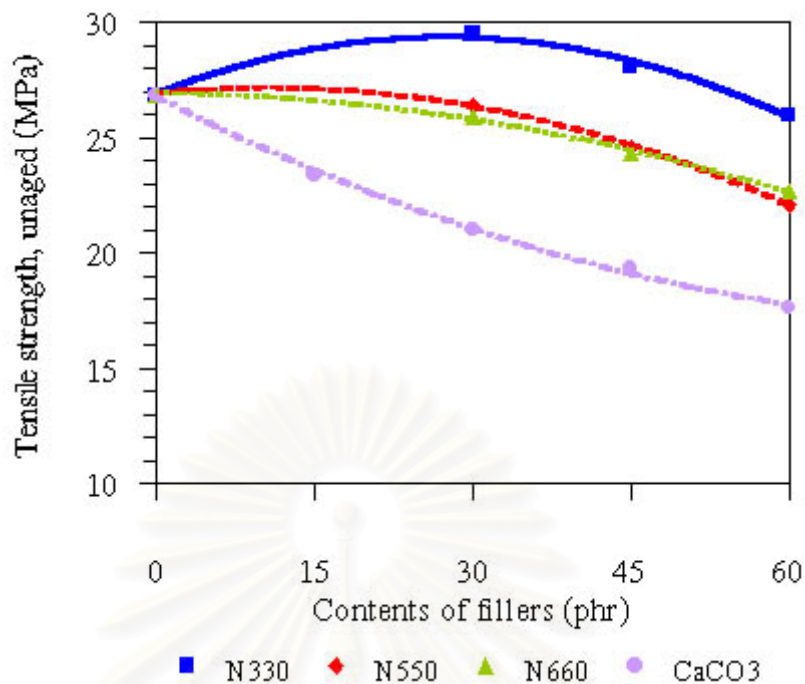
ความทนแรงดึงของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ และแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณต่างๆ กัน ก่อนผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน แสดงไว้ในตารางที่ 4.12 - 4.13 และรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.12 ความทนแรงดึงของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ ก่อนอบ

ปริมาณเขม่าดำ (phr)	ความทนแรงดึง (MPa)		
	N330	N550	N660
30	29.59 (3.95)	26.43 (3.78)	25.88 (4.10)
45	28.07 (4.28)	24.60 (3.78)	24.33 (3.21)
60	26.03 (3.39)	22.10 (4.94)	22.67 (3.62)

ตารางที่ 4.13 ความทนแรงดึงของยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนต ก่อนอบ

ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (phr)	ความทนแรงดึง (MPa)
0	26.90 (8.41)
15	23.41 (8.93)
30	21.01 (8.61)
45	19.34 (7.29)
60	17.65 (5.84)



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดึงกับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ ก่อนอบ

จากตารางที่ 4.12 - 4.13 และรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าเขม่าดำที่มีขนาดอนุภาคยิ่งเล็กลง พื้นที่ผิวยิ่งมาก เกิดแรงยึดเกาะกับสายโซ่โมเลกุลของยางดียิ่งขึ้น มีผลทำให้ความทนแรงดึงสูงขึ้น และปริมาณเขม่าดำแต่ละชนิดที่ทำให้ค่าความทนแรงดึงของยางสูงสุด จะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการบดผสม ส่วนแคลเซียมคาร์บอเนตเมื่อใส่มากขึ้น กลับทำให้ความทนแรงดึงต่ำลง เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาดอนุภาคใหญ่ พื้นที่ผิวน้อย และขาดแรงยึดเกาะกับยาง

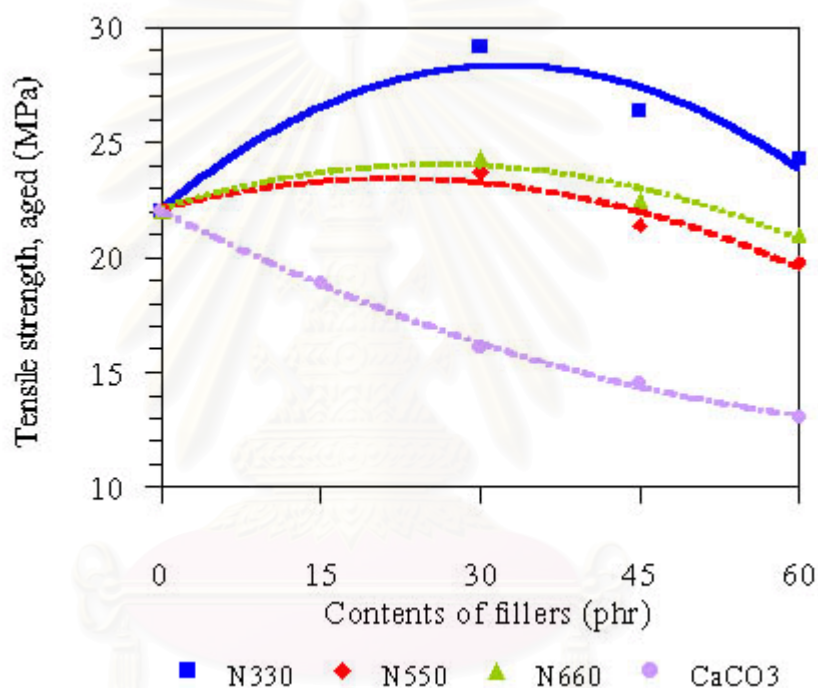
ความทนแรงดึงของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ และแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณต่างๆ กัน หลังผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน แสดงไว้ในตารางที่ 4.14 - 4.15 และรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.14 ความทนแรงดึงของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ หลังอบ

ปริมาณเขม่าดำ (phr)	ความทนแรงดึง (MPa, ageing)		
	N330	N550	N660
30	29.13 (4.39)	23.68 (5.45)	24.33 (6.66)
45	26.37 (5.61)	21.37 (5.19)	22.51 (4.44)
60	24.27 (5.23)	19.77 (5.36)	20.96 (4.44)

ตารางที่ 4.15 ความทนแรงดึงของยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนต หลังอบ

ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (phr)	ความทนแรงดึง (MPa, ageing)
0	22.03 (8.47)
15	18.89 (6.50)
30	16.07 (14.96)
45	14.52 (13.93)
60	13.05 (10.48)



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดึงกับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ หลังอบ

จากตารางที่ 4.14 - 4.15 และรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าเมื่อผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน ยางที่ไม่ได้ใส่เคมีดำมีความทนแรงดึงลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเทียบกับก่อนผ่านการอบในตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.6 เนื่องจากความร้อนเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในยางธรรมชาติซึ่งมีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา ทำให้ยางเสื่อมสภาพเร็วขึ้น ในขณะที่ยางผสมเคมีดำมีความทนแรงดึงต่ำลงเพียงเล็กน้อย ที่เป็นเช่นนี้เพราะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของเคมีดำกับสายโซ่โมเลกุลของยาง และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเคมีดำกับเคมีดำ กรณีใส่แคลเซียมคาร์บอเนต พบว่าความทนแรงดึงลดลง เมื่อใส่มากขึ้น ก็ยิ่งลดลงมากขึ้น

4.2.4.2 ระยะเวลายืดเมื่อขาด (Elongation at break)

ระยะเวลายืดเมื่อขาดของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ และแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณต่างๆ กัน ก่อนผ่านการอบแรงด้วยความร้อน แสดงไว้ในตารางที่ 4.16 - 4.17 และรูปที่ 4.8

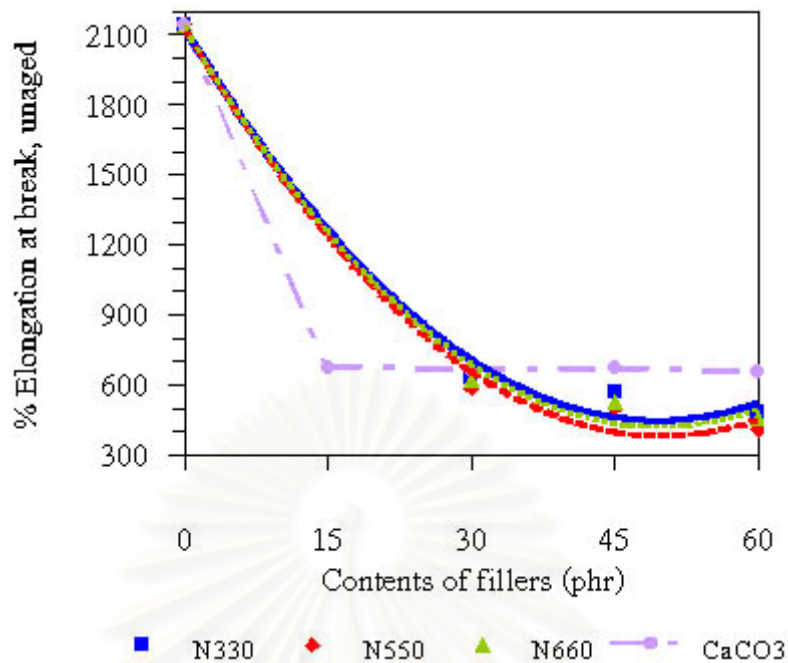
ตารางที่ 4.16 ระยะเวลายืดเมื่อขาดของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ ก่อนอบ

ปริมาณเขม่าดำ (phr)	ระยะเวลายืดเมื่อขาด (%)		
	N330	N550	N660
30	633.0 (3.93)	583.3 (3.39)	619.5 (4.12)
45	565.1 (4.37)	498.7 (3.41)	526.1 (4.01)
60	486.2 (6.21)	408.3 (6.49)	456.3 (4.67)

ตารางที่ 4.17 ระยะเวลายืดเมื่อขาดของยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนต ก่อนอบ

ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (phr)	ระยะเวลายืดเมื่อขาด (%)
0	2144.6 (1.76)
15	676.0 (4.41)
30	665.4 (4.48)
45	669.6 (3.75)
60	653.2 (5.22)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะยืดเมื่อขาดกับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆก่อนอบ

จากตารางที่ 4.16 - 4.17 และรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าอย่างธรรมชาติที่ไม่ใส่สารตัวเติมมีระยะยืดเมื่อขาดสูงกว่าอย่างที่ใส่สารตัวเติม และเมื่อใส่เขม่าดำมากขึ้น ระยะยืดเมื่อขาดลดลง แต่ไม่ขึ้นกับขนาดอนุภาคโดยตรง ทั้งนี้เนื่องจากเขม่าดำเกิดแรงยึดเกาะกับยางทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น มีความยืดหยุ่นลดลง ทำให้ความสามารถในการยืดตัวต่ำลง ส่วนแคลเซียมคาร์บอเนตเมื่อใส่ลงไปจะทำให้ระยะยืดเมื่อขาดต่ำลงจนถึงระดับหนึ่ง และเมื่อใส่มากขึ้นระยะยืดเมื่อขาดแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลง

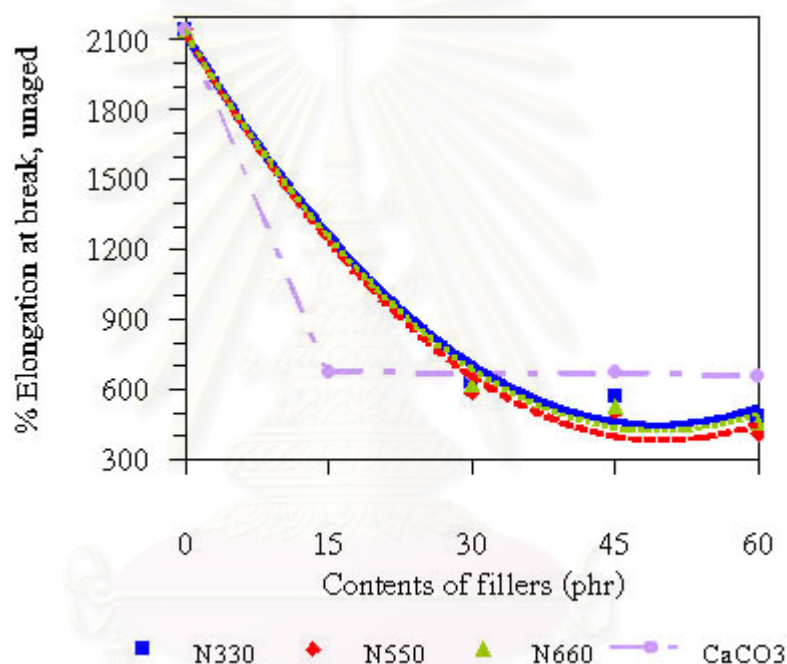
ระยะยืดเมื่อขาดของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ และแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณต่างๆ กัน หลังผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน แสดงไว้ในตารางที่ 4.18 - 4.19 และรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.18 ระยะยืดเมื่อขาดของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ หลังอบ

ปริมาณเขม่าดำ (phr)	ระยะยืดเมื่อขาด (% , ageing)		
	N330	N550	N660
30	530.6 (4.00)	512.7 (5.03)	525.1 (7.12)
45	488.1 (5.12)	426.1 (6.03)	461.4 (5.01)
60	420.9 (4.56)	353.1 (6.51)	370.0 (4.92)

ตารางที่ 4.19 ระยะยืดเมื่อขาดของยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนต หลังอบ

ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (phr)	ระยะยืดเมื่อขาด (% , ageing)
0	594.6 (4.35)
15	574.5 (2.84)
30	548.2 (4.95)
45	553.1 (4.72)
60	553.5 (5.46)



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะยืดเมื่อขาดกับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆหลังอบ

จากตารางที่ 4.18 - 4.19 และรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าเมื่อผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน ยางธรรมชาติที่ไม่ใส่สารตัวเติมจะมีระยะยืดเมื่อขาดลดลงมาก เมื่อเทียบกับก่อนผ่านการอบในตารางที่ 4.17 และรูปที่ 4.8 ทั้งนี้อธิบายได้เช่นเดียวกับกรณีความทนแรงดึง กล่าวคือ พันธะคู่ในยางเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้อย่างรวดเร็ว โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งทำให้ยางเสื่อมสภาพเร็วขึ้น ขณะที่ระยะยืดเมื่อขาดของยางที่ใส่สารตัวเติมก็ลดลงแต่ความแตกต่างระหว่างก่อนอบและหลังอบไม่มากเท่าที่ยางที่ไม่ใส่สารตัวเติม ส่วนแนวโน้มโดยทั่วไปมีลักษณะคล้ายก่อนอบ ทั้งนี้เพราะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคสารตัวเติม และยางธรรมชาติ

4.2.4.3 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% (Modulus at 100% and 300% elongation)

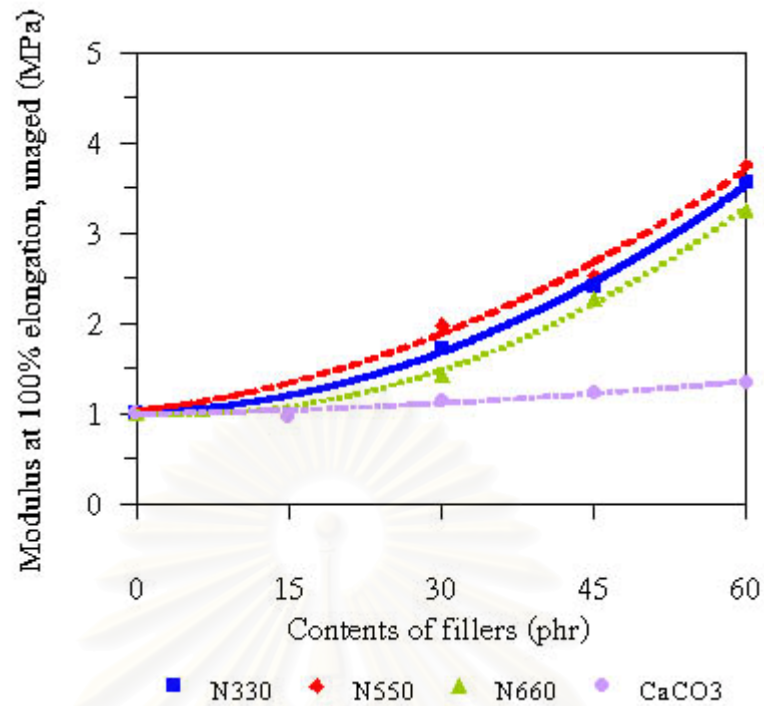
มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ และแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณต่างๆกัน ก่อนผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน แสดงไว้ในตารางที่ 4.20 - 4.21 และรูปที่ 4.10 - 4.11

ตารางที่ 4.20 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ ก่อนอบ

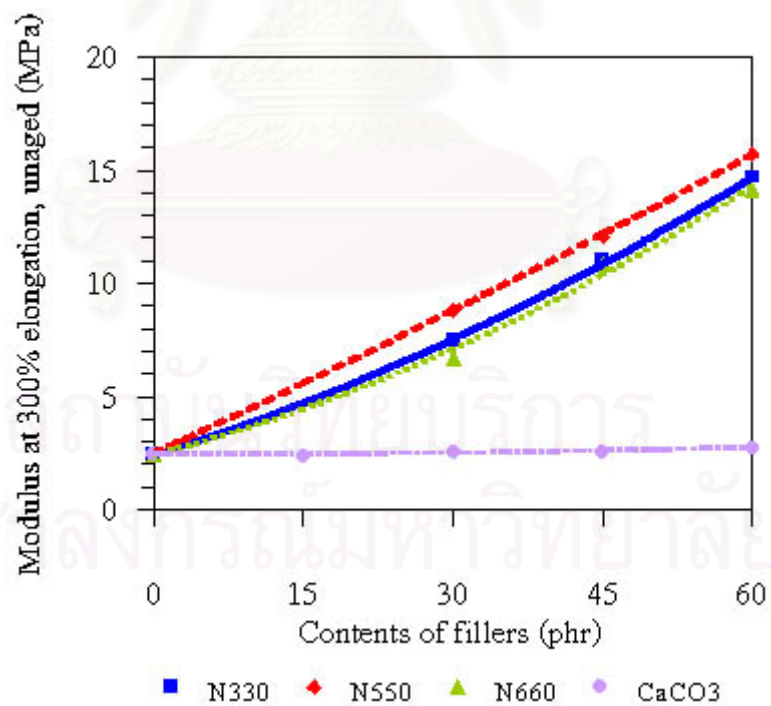
ปริมาณเขม่าดำ (phr)	มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% (MPa)					
	100%			300%		
	N330	N550	N660	N330	N550	N660
30	1.73 (8.09)	1.98 (16.16)	1.42 (9.86)	7.47 (8.22)	8.84 (8.02)	6.69 (8.40)
45	2.42 (13.22)	2.53 (15.02)	2.28 (15.35)	11.01 (8.65)	12.06 (5.89)	10.83 (6.79)
60	3.57 (11.76)	3.75 (10.93)	3.25 (12.31)	14.69 (6.81)	15.68 (6.49)	14.08 (4.55)

ตารางที่ 4.21 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนต ก่อนอบ

ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (phr)	มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% (MPa)	
	100%	300%
0	1.01 (8.75)	2.45 (6.00)
15	0.97 (8.25)	2.37 (6.59)
30	1.15 (7.83)	2.56 (6.53)
45	1.22 (6.56)	2.57 (5.61)
60	1.34 (11.94)	2.73 (13.65)



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสที่ระยะยืด 100% กับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ ก่อนอบ



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสที่ระยะยืด 300% กับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ ก่อนอบ

จากตารางที่ 4.20 - 4.21 และรูปที่ 4.10 - 4.11 จะเห็นได้ว่าเมื่อใส่เขม่าดำจะทำให้มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% มีค่าสูงขึ้นตามลำดับ เนื่องจากเขม่าดำเกิดแรงยึดเกาะกับยางทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น มีความยืดหยุ่นลดลง การดึงให้ยืดออกต้องใช้แรงมากขึ้น ส่งผลให้มอดูลัสมีค่าสูงขึ้น แต่มอดูลัสไม่ขึ้นกับขนาดอนุภาคโดยตรง ในทางกลับกันเมื่อใส่แคลเซียมคาร์บอเนตลงไปมากขึ้น กลับพบว่ามอดูลัสของยางไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงเท่าใดนัก ทั้งนี้เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าเขม่าดำ พื้นที่ผิวน้อยกว่า ทำให้เกิดการยึดเกาะกับยางได้ไม่ดีเท่าเขม่าดำ

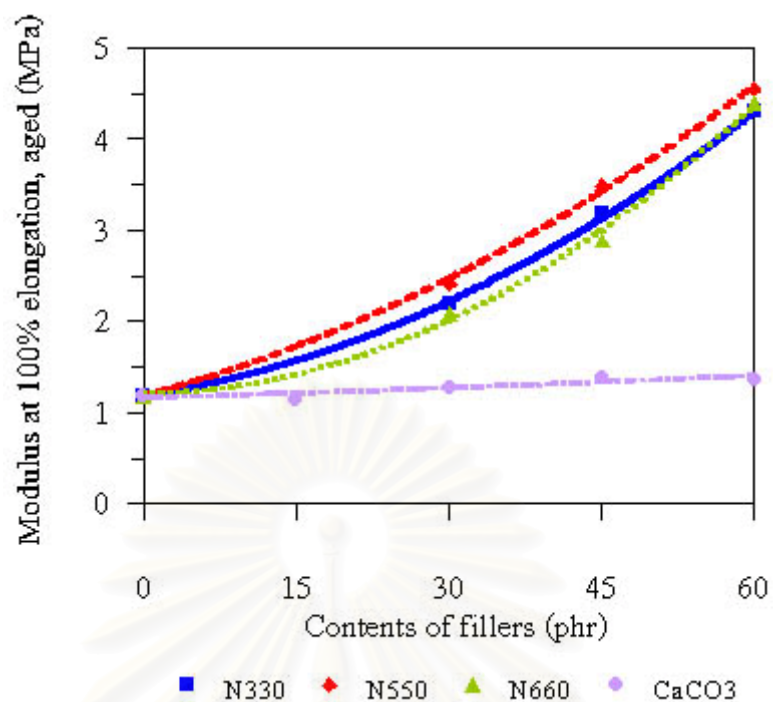
มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ และแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณต่างๆกัน หลังผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน แสดงไว้ในตารางที่ 4.22 - 4.23 และรูปที่ 4.12 - 4.13

ตารางที่ 4.22 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ หลังอบ

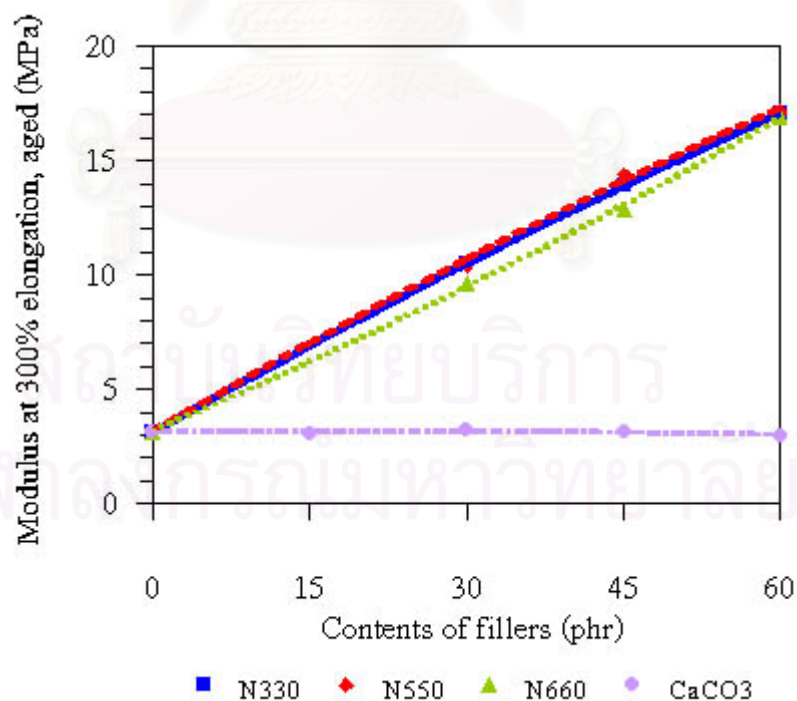
ปริมาณเขม่าดำ (phr)	มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% (MPa, ageing)					
	100%			300%		
	N330	N550	N660	N330	N550	N660
30	2.20 (11.36)	2.41 (11.62)	2.08 (15.87)	10.49 (8.11)	10.43 (6.42)	9.57 (10.38)
45	3.18 (10.38)	3.49 (15.19)	2.89 (15.57)	13.94 (4.73)	14.38 (6.40)	12.85 (7.00)
60	4.30 (16.51)	4.55 (13.85)	4.40 (12.95)	17.08 (4.68)	17.16 (3.85)	16.92 (5.85)

ตารางที่ 4.23 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนต หลังอบ

ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (phr)	มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% (MPa, ageing)	
	100%	300%
0	1.19 (4.36)	3.13 (5.49)
15	1.13 (6.19)	3.04 (4.17)
30	1.28 (9.38)	3.19 (7.89)
45	1.38 (6.52)	3.11 (5.02)
60	1.37 (7.30)	2.96 (5.46)



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสที่ระยะยืด 100% กับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ หลังอบ



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสที่ระยะยืด 300% กับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ หลังอบ

จากตารางที่ 4.22 - 4.23 และรูปที่ 4.12 - 4.13 จะเห็นว่าหลังผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% จะเพิ่มขึ้นตามลำดับ แนวโน้มทั่วไปมีลักษณะเหมือนก่อนอบ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความร้อนเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในยาง ทำให้ความยืดหยุ่นในโมเลกุลของยางลดลง ความเค้นที่ทำให้ยางยืดออกเป็นระยะเท่าเดิมมีค่ามากขึ้น ทำให้มอดูลัสสูงขึ้น

4.2.5 ความทนการฉีกขาด (Tear strength)

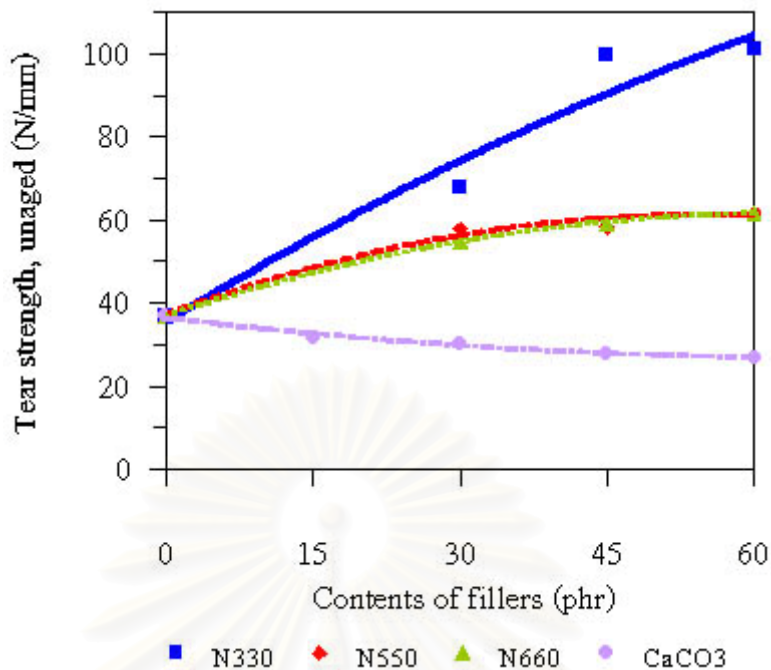
ความทนการฉีกขาดของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ และแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณต่างๆกัน ก่อนผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน แสดงไว้ในตารางที่ 4.24 - 4.25 และรูปที่ 4.14

ตารางที่ 4.24 ความทนการฉีกขาดของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ ก่อนอบ

ปริมาณเขม่าดำ (phr)	ความทนการฉีกขาด (N/mm)		
	N330	N550	N660
30	67.63 (11.09)	57.69 (9.10)	54.96 (7.59)
45	99.50 (12.82)	58.23 (7.56)	58.99 (8.58)
60	101.21 (11.41)	61.70 (10.05)	61.61 (10.87)

ตารางที่ 4.25 ความทนการฉีกขาดของยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนต ก่อนอบ

ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (phr)	ความทนการฉีกขาด (N/mm)
0	36.70 (2.92)
15	31.59 (3.83)
30	30.34 (3.92)
45	27.90 (3.84)
60	26.73 (3.52)



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนการฉีกขาดกับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ ก่อนอบ

จากตารางที่ 4.24 - 4.25 และรูปที่ 4.14 จะเห็นว่าเขม่าดำที่มีขนาดอนุภาคยิ่งเล็ก มีผลทำให้ความทนการฉีกขาดสูงขึ้น และแปรตามปริมาณที่ใส่ ขณะที่แคลเซียมคาร์บอเนตมากขึ้นส่งผลให้ความทนการฉีกขาดต่ำลง

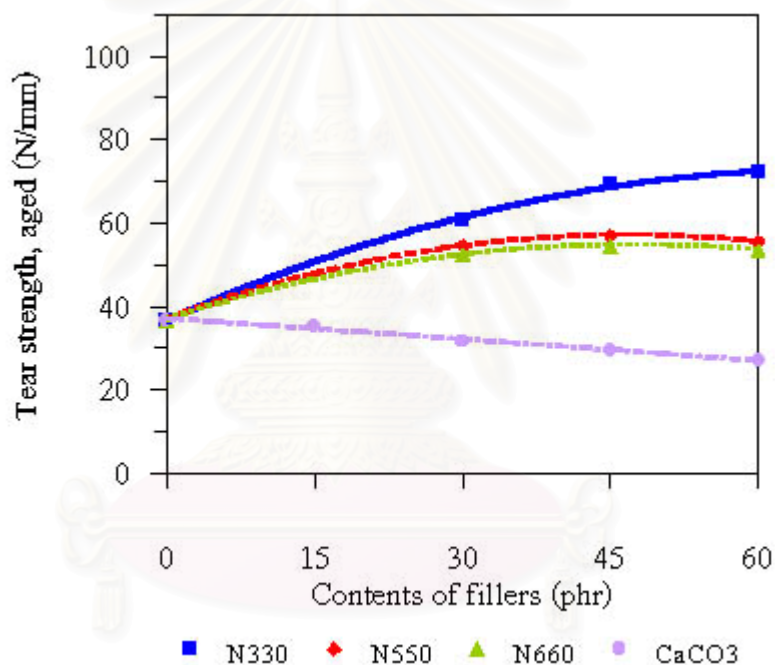
ความทนการฉีกขาดของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ และแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณต่างๆกัน หลังผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน แสดงไว้ในตารางที่ 4.26 - 4.27 และรูปที่ 4.15

ตารางที่ 4.26 ความทนการฉีกขาดของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ หลังอบ

ปริมาณเขม่าดำ (phr)	ความทนการฉีกขาด (N/mm, ageing)		
	N330	N550	N660
30	60.84 (5.60)	54.48 (4.72)	52.54 (6.66)
45	69.54 (13.40)	56.84 (6.86)	54.33 (6.11)
60	72.13 (13.84)	55.45 (4.74)	53.58 (13.71)

ตารางที่ 4.27 ความทนการฉีกขาดของยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนต หลังอบ

ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (phr)	ความทนการฉีกขาด (N/mm, ageing)
0	36.77 (7.32)
15	35.04 (4.88)
30	31.60 (2.44)
45	29.49 (4.20)
60	26.87 (2.98)



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนการฉีกขาดกับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ หลังอบ

จากตารางที่ 4.26 - 4.27 และรูปที่ 4.15 จะเห็นว่าเมื่อผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน ยางผสมเขม่าดำมีความทนการฉีกขาดลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเทียบกับก่อนผ่านการอบในตารางที่ 4.24 - 4.25 และรูปที่ 4.14 ในขณะที่ยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนตไม่ค่อยเกิดการเปลี่ยนแปลง ส่วนแนวโน้มโดยทั่วไปเหมือนก่อนอบ

4.2.6 ความต้านทานการสึกหรอ (Akron abrasion resistance)

ความต้านทานการสึกหรอของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ และแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณต่างๆกัน แสดงไว้ในตารางที่ 4.28 - 4.29 และรูปที่ 4.16

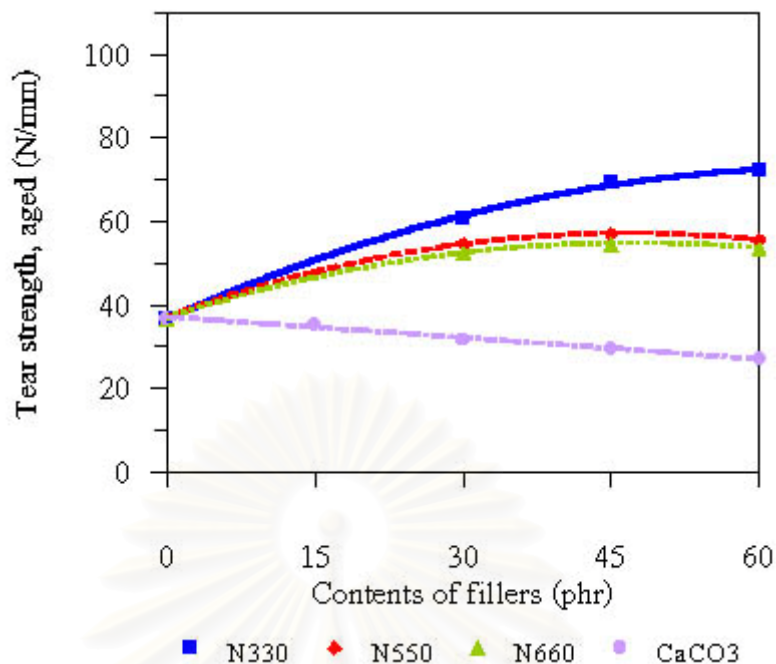
ตารางที่ 4.28 ความต้านทานการสึกหรอของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ

ปริมาณเขม่าดำ (phr)	ความต้านทานการสึกหรอ (Vol. loss, cm ³ /1000)		
	N330	N550	N660
30	0.44 (1.15)	0.44 (3.45)	0.48 (0.00)
45	0.29 (5.26)	0.31 (0.00)	0.38 (2.63)
60	0.15 (13.33)	0.23 (6.67)	0.32 (1.59)

ตารางที่ 4.29 ความต้านทานการสึกหรอของยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนต

ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (phr)	ความต้านทานการสึกหรอ (Vol. loss, cm ³ /1000)
0	2.36 (1.69)
15	2.24 (0.00)
30	2.28 (1.75)
45	2.08 (3.85)
60	2.16 (3.70)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการสึกหรอกับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ

จากตารางที่ 4.28 - 4.29 และรูปที่ 4.16 จะเห็นว่าความต้านทานการสึกหรอจะขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาค และปริมาณสารตัวเติม กล่าวคือ เมื่อใส่เขม่าดำมากขึ้น ความต้านทานการสึกหรอจะยิ่งเพิ่มขึ้น หรือปริมาตรของยางที่หายไปเมื่อถูกขัดสีลดลง และเขม่าดำที่มีขนาดอนุภาคเล็กลง จะมีความต้านทานการสึกหรอสูงขึ้น ทั้งนี้สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับกรณีความทนแรงดึง กล่าวคือ เนื่องมาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเขม่าดำ และสายโซ่โมเลกุลของยาง ส่วนแคลเซียมคาร์บอเนตแทบไม่มีผลต่อความต้านทานการสึกหรอ

4.2.7 ความต้านทานการหักงอ (Flex cracking resistance)

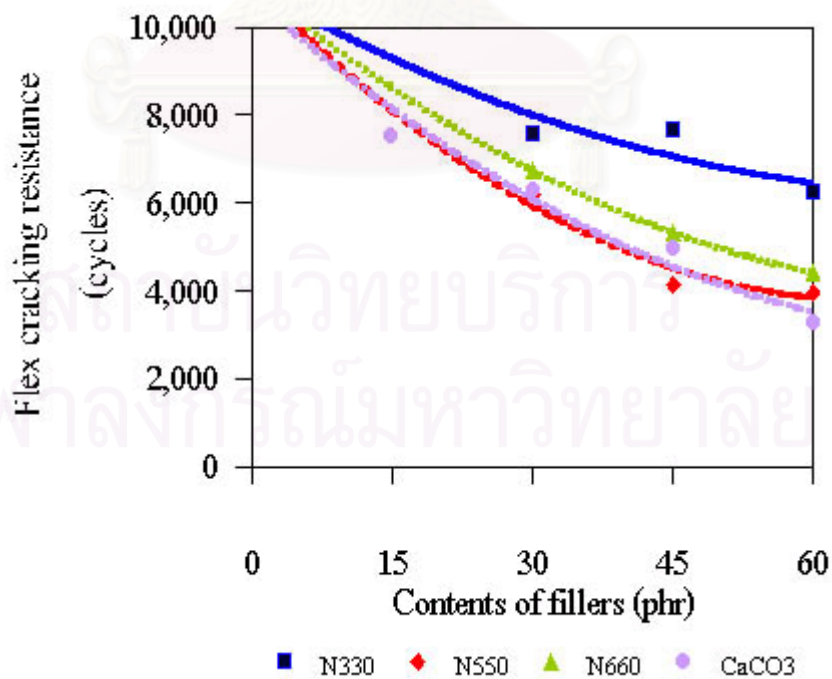
ความต้านทานการหักงอของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆและแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณต่างๆกัน แสดงไว้ในตารางที่ 4.30 - 4.31 และรูปที่ 4.17

ตารางที่ 4.30 ความต้านทานการหักงอของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ

ปริมาณเขม่าดำ (phr)	ความต้านทานการหักงอ (Cycles)		
	N330	N550	N660
30	7580 (16.76)	6199 (1.78)	6732 (19.17)
45	7630 (7.22)	4162 (4.25)	5310 (10.95)
60	6245 (14.27)	3966 (3.45)	4398 (15.03)

ตารางที่ 4.31 ความต้านทานการหักงอของยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนต

ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (phr)	ความต้านทานการหักงอ (Cycles)
0	> 10,000
15	7513 (19.15)
30	6258 (18.68)
45	4941 (5.15)
60	3281 (11.11)



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการหักงอกับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ

จากตารางที่ 4.30 - 4.31 และรูปที่ 4.17 จะเห็นว่าเมื่อใส่สารตัวเติมลงไปอย่างธรรมชาติ จะทำให้ความต้านทานการหักงอลดลงตามปริมาณที่ใส่ แคลเซียมคาร์บอเนตจะทำให้ความต้านทานการหักงอของยางต่ำกว่าเขม่าดำ

4.2.8 ความต้านทานการล้าตัว (Fatigue resistance)

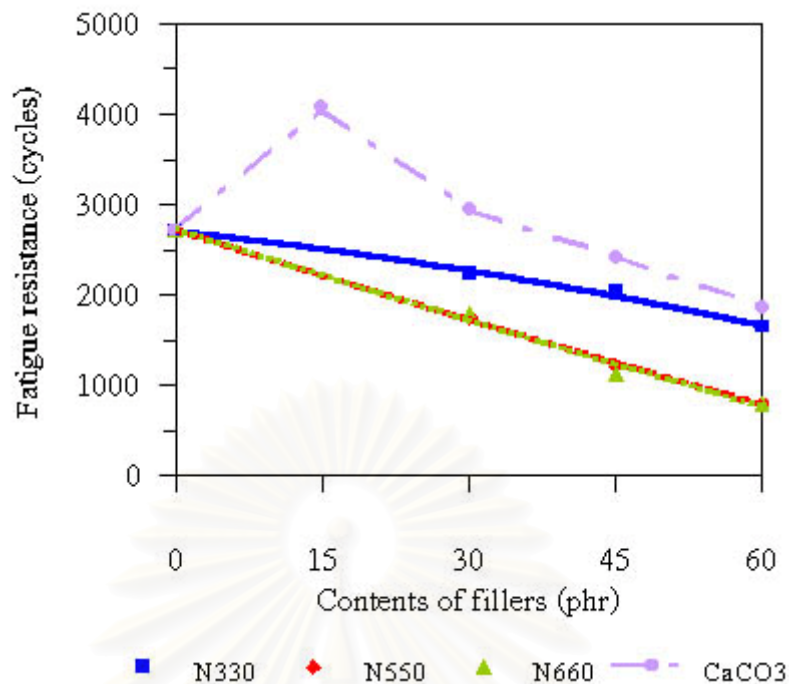
ความต้านทานการล้าตัวของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ และแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณต่างๆกัน แสดงไว้ในตารางที่ 4.32 - 4.33 และรูปที่ 4.18

ตารางที่ 4.32 ความต้านทานการล้าตัวของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆกัน

ปริมาณเขม่าดำ (phr)	ความต้านทานการล้าตัว (Cycles)		
	N330	N550	N660
30	2236 (13.23)	1750 (8.87)	1783 (15.54)
45	2027 (14.77)	1200 (8.58)	1131 (10.94)
60	1645 (9.94)	796 (12.73)	791 (9.88)

ตารางที่ 4.33 ความต้านทานการล้าตัวของยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนต

ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (phr)	ความต้านทานการล้าตัว (Cycles)
0	2709 (13.95)
15	4066 (35.00)
30	2935 (24.73)
45	2420 (24.14)
60	1862 (32.59)



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการล้าตัวกับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ

จากตารางที่ 4.32 - 4.33 และรูปที่ 4.18 จะเห็นว่าเมื่อใส่เขม่าดำมากขึ้น ความต้านทานการล้าตัวของยางจะต่ำลง (จำนวนรอบของการทดสอบจนยางขาดมีค่าน้อยลง) ส่วนยางที่ใส่แคลเซียมคาร์บอเนต จะมีความต้านทานต่อการล้าตัวสูงสุดที่ 15 phr และเมื่อใส่มากขึ้นพบว่าความต้านทานการล้าตัวจะต่ำลง

4.2.9 การกระดอน (Resilience)

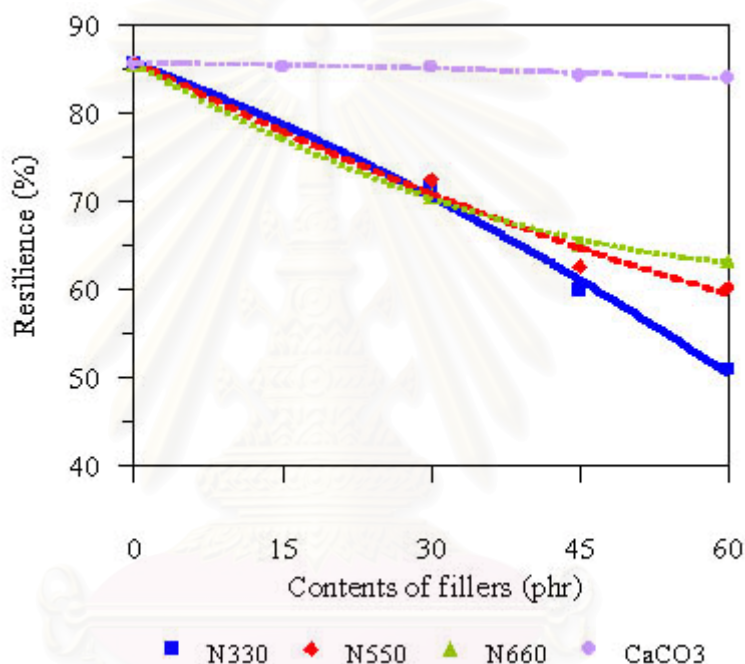
การกระดอนของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ และแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณต่างๆกัน แสดงไว้ในตารางที่ 4.34 - 4.35 และรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.34 การกระดอนของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ

ปริมาณเขม่าดำ (phr)	การกระดอน (%)		
	N330	N550	N660
30	71.60 (1.19)	72.49 (0.75)	70.68 (2.38)
45	59.97 (0.21)	62.61 (4.76)	65.23 (1.71)
60	51.03 (2.60)	60.31 (2.36)	63.24 (1.64)

ตารางที่ 4.35 การกระดอนของยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนต

ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (phr)	การกระดอน (%)
0	85.65 (1.10)
15	85.30 (0.97)
30	85.31 (1.34)
45	84.22 (0.71)
60	83.94 (0.45)



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างการกระดอนกับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ

จากตารางที่ 4.34 - 4.35 และรูปที่ 4.19 จะเห็นว่าเมื่อใส่เขม่าดำปริมาณมากขึ้น ทำให้การกระดอนของยางลดลง โดยขนาดอนุภาคยิ่งเล็ก การกระดอนจะยิ่งลดลง ทั้งนี้เพราะเขม่าดำที่มีขนาดอนุภาคยิ่งเล็ก พื้นที่ผิวยิ่งมากขึ้น จะเกิดแรงยึดเกาะกับสายโซ่โมเลกุลของยางได้ดี ทำให้ความยืดหยุ่นในยางลดลง ส่งผลให้การกระดอนลดลง และปริมาณเขม่าดำที่มากขึ้น ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเขม่าดำและยางมากขึ้น ดังนั้นการสูญเสียพลังงานที่พื้นที่ผิวสัมผัสจะมากขึ้น ความสามารถในการส่งพลังงานที่กระทำต่อยางกลับคืน ซึ่งก็คือการกระดอน จะลดลง ส่วนยางที่ใส่แคลเซียมคาร์บอเนต พบว่าการกระดอนแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า พื้นที่ผิวน้อยกว่า และไม่เกิดแรงยึดเกาะกับยางเหมือนเขม่าดำ

4.2.10 การคืบตัว (Compression set)

สมบัติการคืบตัวของยาง คือ สมบัติในการคงสภาพความเป็นอีลาสติกของยางภายใต้ความเค้นอัด อุณหภูมิ 100 °C เวลา 22 ชั่วโมง โดยเครื่อง Compression set Method B แล้วหาเปอร์เซ็นต์การคืบตัวของชิ้นทดสอบ ถ้าเปอร์เซ็นต์การคืบตัวต่ำแสดงว่ายางมีการคืบตัวดี และถ้าเปอร์เซ็นต์การคืบตัวสูงแสดงว่าการคืบตัวไม่ดี

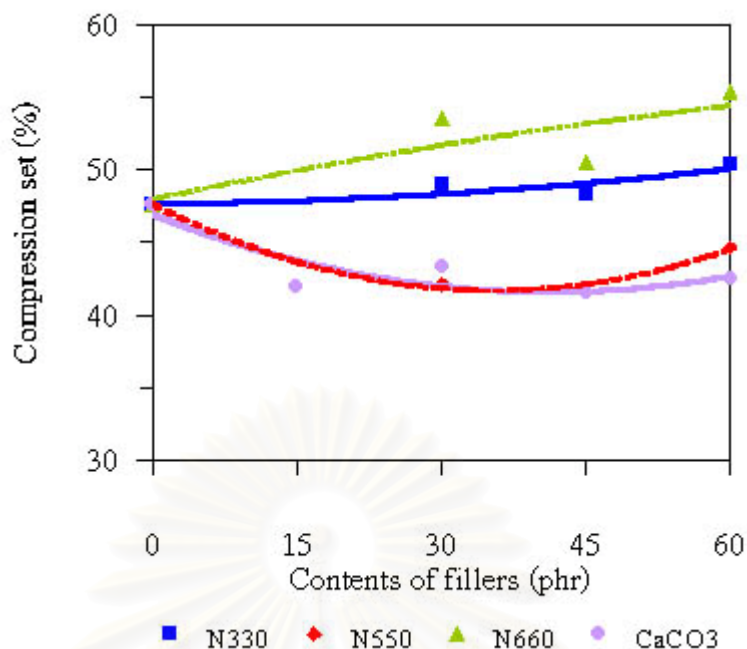
การคืบตัวของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ และแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณต่างๆกัน แสดงไว้ในตารางที่ 4.36 - 4.37 และรูปที่ 4.20

ตารางที่ 4.36 การคืบตัวของยางผสมเขม่าดำชนิดต่างๆ

ปริมาณเขม่าดำ (phr)	การคืบตัว (%)		
	N330	N550	N660
30	48.93 (6.01)	42.09 (4.99)	53.53 (4.64)
45	48.27 (4.82)	41.61 (2.81)	50.54 (5.01)
60	50.38 (4.16)	44.63 (1.57)	55.28 (2.46)

ตารางที่ 4.37 การคืบตัวของยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนต

ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (phr)	การคืบตัว (%)
0	47.57 (6.31)
15	41.99 (9.28)
30	43.39 (6.33)
45	41.51 (7.14)
60	42.50 (4.42)



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างการคืนตัวกับปริมาณสารตัวเติมชนิดต่างๆ

จากตารางที่ 4.36 - 4.37 และรูปที่ 4.20 จะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์การคืนตัวของยางผสมเขม่าดำ N330 และ N660 มีค่าสูงขึ้นตามปริมาณเขม่าดำที่ใส่ แสดงว่ายางเกิดการยุบตัวมาก การคืนตัวไม่ดีขึ้นขณะที่ยางผสมเขม่าดำ N660 มีเปอร์เซ็นต์การคืนตัวต่ำลง แต่เมื่อใส่มากเกินไป 45 phr เปอร์เซ็นต์การคืนตัวกลับสูงขึ้น เกิดการยุบตัวมากขึ้น ส่วนแคลเซียมคาร์บอเนตส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การคืนตัวของยางเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ดังนั้นปริมาณสารตัวเติมแต่ละชนิดที่ใส่ลงไปยาง ควรพิจารณาให้เหมาะสมกับการใช้งานของผลิตภัณฑ์

4.3 สมบัติของยางที่ผสมสารตัวเติมสองชนิด

จากสมบัติของยางที่ผสมสารตัวเติมชนิดเดียว เมื่อพิจารณาพบว่าเขม่าดำ N330 ส่งผลโดยรวมต่อสมบัติต่างๆดีกว่าเขม่าดำชนิดอื่นที่ใช้ในการทดลอง อาทิเช่น ความทนแรงดึง ความต้านทานการฉีกขาด และความต้านทานการสึกหรอ เป็นต้น ดังนั้นจึงนำมาผสมร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนต เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของสารตัวเติมทั้งสองต่อสมบัติต่างๆดังต่อไปนี้

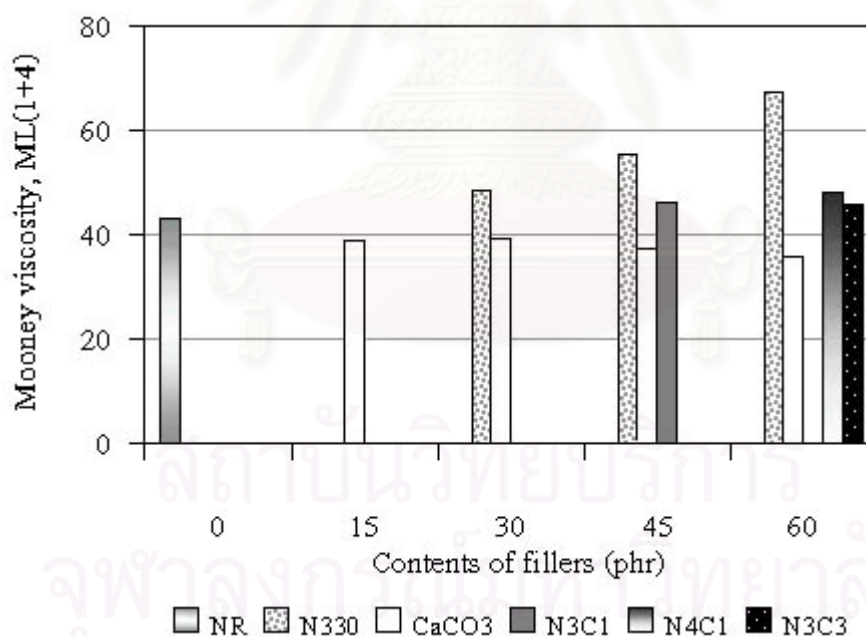
4.3.1 ความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity)

ตารางที่ 4.38 และรูปที่ 4.21 แสดงค่าความหนืดมูนนี่ของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณต่างๆ กัน

ตารางที่ 4.38 ความหนืดมูนนี่ของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต

ปริมาณ เขม่าดำ / CaCO ₃ (phr)	ความหนืดมูนนี่ [Mooney viscosity, ML(1+4) 100°C]
30 / 15	46.31
45 / 15	48.33
30 / 30	45.88

หมายเหตุ เครื่องบดผสมที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถบดผสมยางกับสารตัวเติมอย่างมีประสิทธิภาพได้ไม่เกิน 60 phr



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดมูนนี่กับปริมาณเขม่าดำ และแคลเซียมคาร์บอเนต

(N3C1, N4C1 และ N3C3 คือ ปริมาณเขม่าดำต่อแคลเซียมคาร์บอเนตเท่ากับ 30:15, 45:15 และ 30:30 ตามลำดับ)

จากตารางที่ 4.38 และรูปที่ 4.21 จะเห็นว่าได้เลือกใช้เขม่าดำ N330 เพราะจากการทดสอบสมบัติเชิงกล เช่น ความทนแรงดึง ความทนการฉีกขาด และความต้านทานการสึกหรอ เป็นต้น จะให้ค่าสูงกว่าเขม่าดำชนิดอื่น และจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อใส่ทั้งเขม่าดำร่วมกับแคลเซียม

คาร์บอนเนต จะทำให้ความหนืดมูนนี้ต่ำกว่าเมื่อใส่เขม่าดำเพียงอย่างเดียว แต่สูงกว่าเมื่อใส่แคลเซียมคาร์บอนเนตเพียงอย่างเดียว และเมื่อใส่เขม่าดำร่วมกับแคลเซียมคาร์บอนเนตในปริมาณเท่ากัน เขม่าดำจะมีผลต่อความหนืดมูนนี้ของยางมากกว่าแคลเซียมคาร์บอนเนต

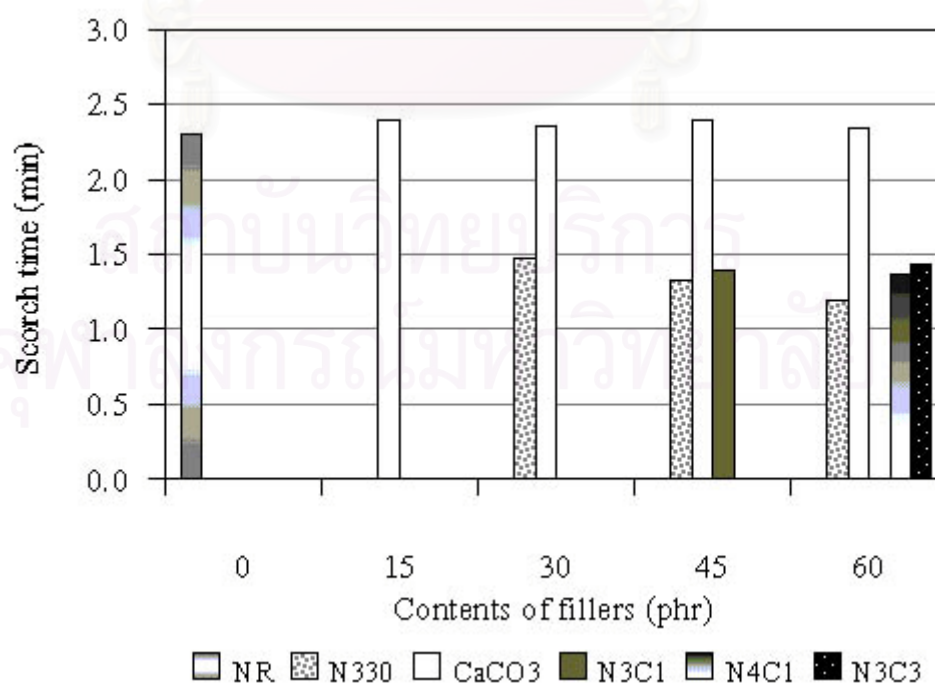
4.3.2 เวลาที่ย่างเริ่มวัลคาไนซ์ (Scorch time) และเวลาวัลคาไนซ์ (95% Cure time)

4.3.2.1 เวลาที่ย่างเริ่มวัลคาไนซ์

ผลของเวลาเริ่มวัลคาไนซ์ของยางผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอนเนตในปริมาณต่าง ๆ กัน แสดงไว้ในตารางที่ 4.39 และรูปที่ 4.22

ตารางที่ 4.39 เวลาที่ย่างผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอนเนตเริ่มวัลคาไนซ์

ปริมาณ เขม่าดำ / CaCO ₃ (phr)	เวลาที่ย่างเริ่มวัลคาไนซ์ (นาที)
30 / 15	1.39
45 / 15	1.36
30 / 30	1.43



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเริ่มวัลคาไนซ์กับปริมาณเขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอนเนต

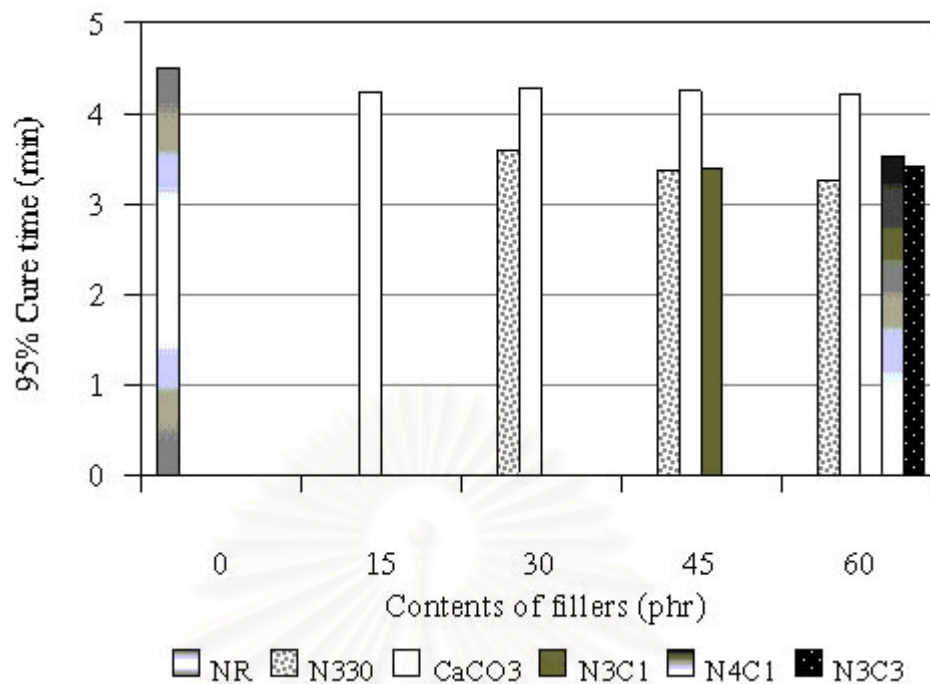
จากตารางที่ 4.39 และรูปที่ 4.22 แสดงให้เห็นว่ายางผสมเขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณแคลเซียมเท่ากัน เมื่อใส่เขม่าดำมากขึ้น (N3C1 และ N4C1) เวลาเริ่มวัลคาไนซ์ลดลงน้อยมาก ในทางกลับกันที่ปริมาณเขม่าดำเท่ากัน เมื่อใส่แคลเซียมคาร์บอเนตมากขึ้น (N3C1 และ N3C3) เวลาเริ่มวัลคาไนซ์มีค่าเพิ่มขึ้นไม่มากนัก และเมื่อเปรียบเทียบกับยางผสมเขม่าดำอย่างเดียว ในปริมาณเท่ากับปริมาณรวมของสารตัวเติมทั้งสอง พบว่าเวลาเริ่มวัลคาไนซ์ของยางผสมสารตัวเติมสองชนิดเข้าด้วยกันมีค่าสูงกว่าของยางผสมเขม่าดำเพียงอย่างเดียว ทำให้ทราบว่าในปริมาณที่เท่ากันของสารตัวเติมทั้งสองชนิด แคลเซียมคาร์บอเนตจะช่วยเพิ่มเวลาเริ่มวัลคาไนซ์ของยาง ทำให้เริ่มเกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลของยางระหว่างการขึ้นรูปโดยใช้เวลานานขึ้น ทำให้ยางไหลในแม่แบบได้นานขึ้นก่อนที่จะเกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลของยาง ซึ่งส่งผลดีต่อการขึ้นรูปโดยใช้แม่แบบที่สลับซับซ้อน แต่ทั้งนี้เวลาเริ่มวัลคาไนซ์จะขึ้นอยู่กับเขม่าดำมากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต

4.3.2.2 เวลาวัลคาไนซ์

ผลของเวลาวัลคาไนซ์ของยางผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณต่างๆกัน แสดงไว้ในตารางที่ 4.40 และรูปที่ 4.23

ตารางที่ 4.40 เวลาวัลคาไนซ์ของยางผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต

ปริมาณ เขม่าดำ / CaCO ₃ (phr)	เวลาวัลคาไนซ์ (นาที)
30 / 15	3.39
45 / 15	3.53
30 / 30	3.42



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาวัลคาไนซ์กับปริมาณเขม่าดำ และแคลเซียมคาร์บอเนต

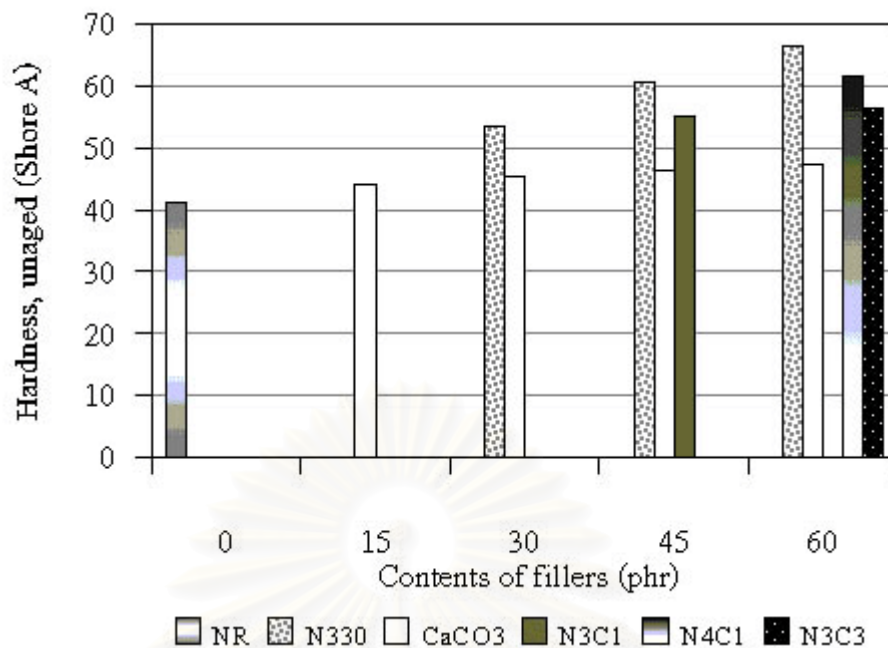
จากตารางที่ 4.40 และรูปที่ 4.23 แสดงให้เห็นว่ายางผสมเขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนต เวลาวัลคาไนซ์จะขึ้นอยู่กับเขม่าดำมากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต กล่าวคือ เมื่อใส่แคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มเข้าไป เวลาวัลคาไนซ์จะเปลี่ยนแปลงไปไม่มากจากยางผสมเขม่าดำเพียงอย่างเดียว

4.3.3 ความแข็ง (Hardness)

ความแข็งของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณต่าง ๆ กัน ก่อนผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน แสดงไว้ในตารางที่ 4.41 และรูปที่ 4.24

ตารางที่ 4.41 ความแข็งของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต ก่อนอบ

ปริมาณ เขม่าดำ / CaCO ₃ (phr)	ความแข็ง (Shore A)
30 / 15	55.0 (1.44)
45 / 15	61.6 (0.66)
30 / 30	56.5 (0.39)



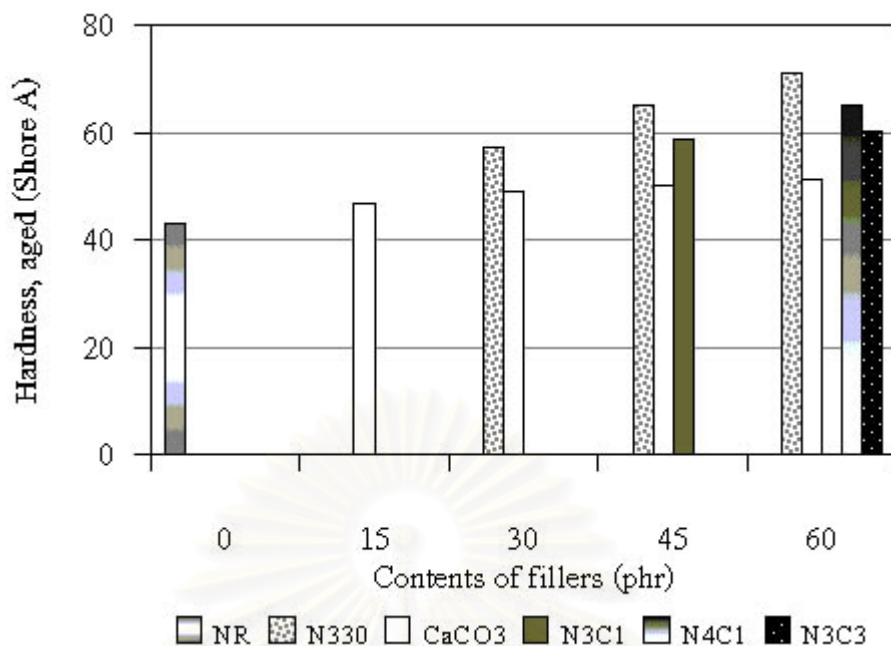
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับปริมาณเขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนต ก่อนอบ

จากตารางที่ 4.41 และรูปที่ 4.24 แสดงให้เห็นว่ากรรมวิธีใส่ทั้งเขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนต ที่ปริมาณเขม่าดำเท่ากัน เมื่อใส่แคลเซียมคาร์บอเนตมากขึ้น (N3C1 และ N3C3) แคลเซียมคาร์บอเนตจะทำให้ยางแข็งขึ้นเพียงเล็กน้อย ในทางกลับกันถ้าใส่แคลเซียมคาร์บอเนตเท่ากัน แต่ใส่เขม่าดำมากขึ้น (N3C1 และ N4C1) พบว่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าเขม่าดำมีอิทธิพลต่อความแข็งมากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต

ความแข็งของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต หลังผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน แสดงไว้ในตารางที่ 4.42 และรูปที่ 4.25

ตารางที่ 4.42 ความแข็งของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต หลังอบ

ปริมาณ เขม่าดำ / CaCO ₃ (phr)	ความแข็ง (Shore A, ageing)
30 / 15	58.7 (0.48)
45 / 15	65.1 (0.67)
30 / 30	60.1 (0.73)



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับปริมาณเขม่าดำ และแคลเซียมคาร์บอเนต หลังอบ

จากตารางที่ 4.42 และรูปที่ 4.25 จะเห็นว่าเมื่อผ่านการอบด้วยความร้อน ความแข็งจะเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนอบ แต่แนวโน้มยังคงเดิม กล่าวคือ เขม่าดำมีอิทธิพลอย่างมากต่อความแข็งของยาง ในขณะที่แคลเซียมคาร์บอเนตมีผลต่อความแข็งเพียงเล็กน้อย

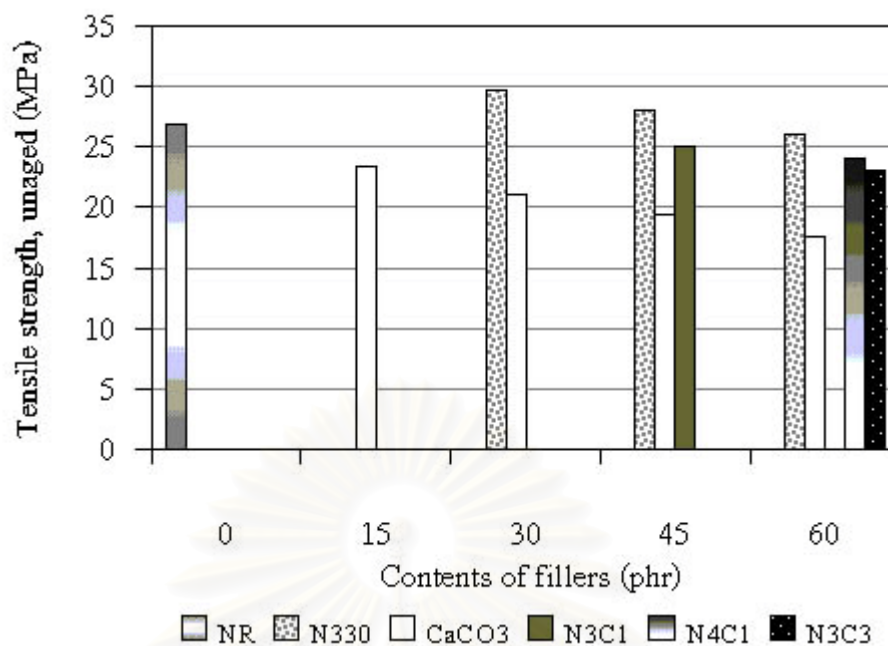
4.3.4 ความทนแรงดึง ระยะยืดเมื่อขาด และมอดูลัส

4.3.4.1 ความทนแรงดึง (Tensile strength)

ความทนแรงดึงของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณต่างๆ ก่อนผ่านการอบด้วยความร้อน แสดงไว้ในตารางที่ 4.43 และรูปที่ 4.26

ตารางที่ 4.43 ความทนแรงดึงของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต ก่อนอบ

ปริมาณ เขม่าดำ / CaCO ₃ (phr)	ความทนแรงดึง (MPa)
30 / 15	25.04 (7.15)
45 / 15	24.00 (2.54)
30 / 30	23.06 (2.56)



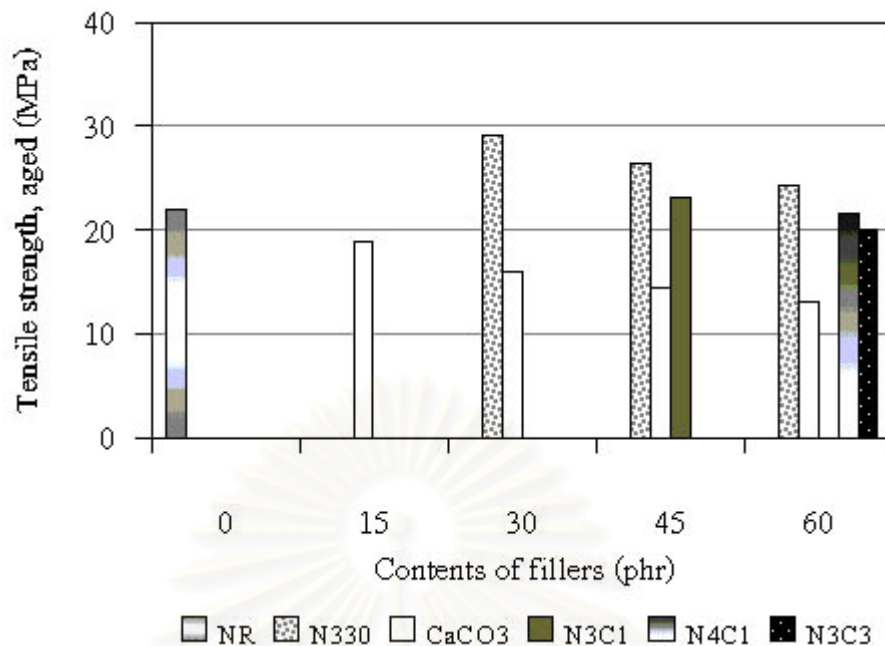
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดึงกับปริมาณเขม่าดำ และแคลเซียมคาร์บอเนตก่อนอบ

จากตารางที่ 4.43 และรูปที่ 4.26 จะเห็นว่าความทนแรงดึงของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนตจะได้รับอิทธิพลจากปริมาณสารตัวเติมทั้งสอง เมื่อพิจารณาขงที่ผสมเขม่าดำ 30 phr ร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนต 15 phr พบว่าความทนแรงดึงจะมีค่าอยู่ระหว่างขงที่ใส่เขม่าดำ 30 phr และขงที่ใส่แคลเซียมคาร์บอเนต 15 phr ส่วนขงที่ผสมสารตัวเติมทั้งสองในปริมาณอื่นๆ ก็ให้ผลสอดคล้องกัน ดังนั้นการใส่สารตัวเติมทั้งสองร่วมกันจะต้องคำนึงถึงปริมาณที่เหมาะสมกับความทนแรงดึงที่ต้องการสำหรับการใช้งานในด้านต่างๆ

ความทนแรงดึงของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณต่างๆ กัน หลังผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน แสดงไว้ในตารางที่ 4.44 และรูปที่ 4.27

ตารางที่ 4.44 ความทนแรงดึงของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต หลังอบ

ปริมาณ เขม่าดำ / CaCO ₃ (phr)	ความทนแรงดึง (MPa, ageing)
30 / 15	23.11 (8.91)
45 / 15	21.68 (3.83)
30 / 30	20.04 (7.78)



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดึงกับปริมาณเขม่าดำ และแคลเซียมคาร์บอเนต หลังอบ

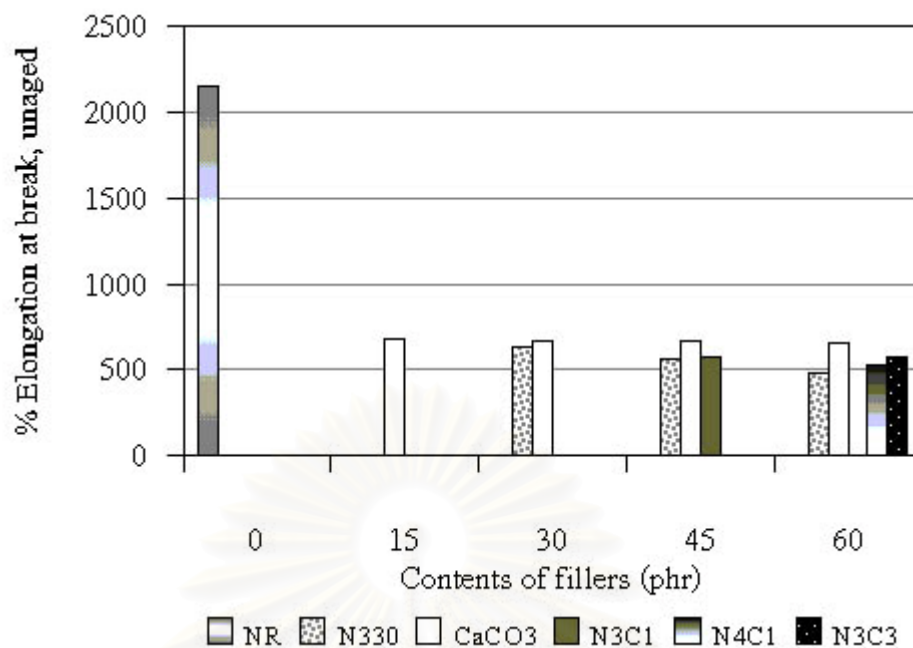
จากตารางที่ 4.44 และรูปที่ 4.27 จะเห็นว่าหลังผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน ความทนแรงดึงของยางผสมเขม่าดำลดลงไม่มากนัก ขณะที่ยางผสมแคลเซียมคาร์บอเนตลดลงอย่างมาก ซึ่งส่งต่อการความทนแรงดึงของยางที่ผสมสารตัวเติมทั้งสองชนิด โดยจะขึ้นอยู่กับปริมาณสารตัวเติมแต่ละชนิดที่ได้

4.3.4.2 ระยะยืดเมื่อขาด (Elongation at break)

ระยะยืดเมื่อขาดของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ และแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณต่าง ๆ กัน ก่อนผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน แสดงไว้ในตารางที่ 4.45 และรูปที่ 4.28

ตารางที่ 4.45 ระยะยืดเมื่อขาดของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต ก่อนอบ

ปริมาณ เขม่าดำ / CaCO ₃ (phr)	ระยะยืดเมื่อขาด (%)
30 / 15	571.5 (5.67)
45 / 15	525.5 (4.15)
30 / 30	569.2 (3.30)



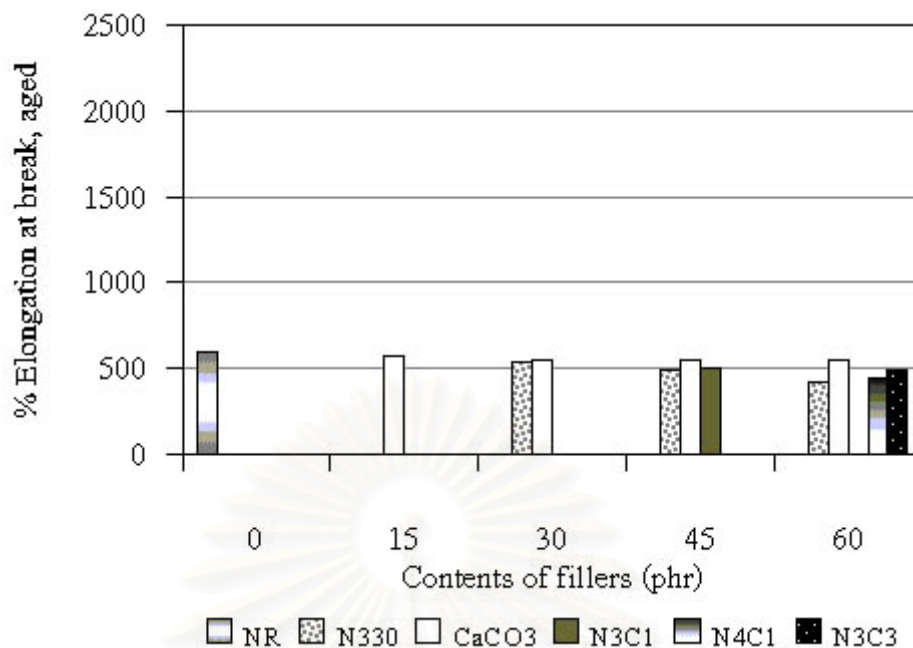
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะยืดเมื่อขาดกับปริมาณเขม่าดำ และแคลเซียมคาร์บอเนต ก่อนอบ

จากตารางที่ 4.45 และรูปที่ 4.28 จะเห็นได้ว่าระยะยืดเมื่อขาดของยางที่ผสมสารตัวเติมทั้งสองชนิดจะขึ้นอยู่กับปริมาณสารตัวเติมแต่ละชนิดที่ใส่ โดยเขม่าดำจะมีอิทธิพลต่อการลดลงของระยะยืดเมื่อขาดมากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตเมื่อใส่ในปริมาณเท่ากัน

ระยะยืดเมื่อขาดของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ และแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณต่าง ๆ กัน หลังผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน แสดงไว้ในตารางที่ 4.46 และรูปที่ 4.29

ตารางที่ 4.46 ระยะยืดเมื่อขาดของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต หลังอบ

ปริมาณ เขม่าดำ / CaCO ₃ (phr)	ระยะยืดเมื่อขาด (% , ageing)
30 / 15	497.8 (6.23)
45 / 15	448.5 (4.82)
30 / 30	492.9 (6.37)



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะยืดเมื่อขาดกับปริมาณเขม่าดำ และแคลเซียมคาร์บอเนต หลังอบ

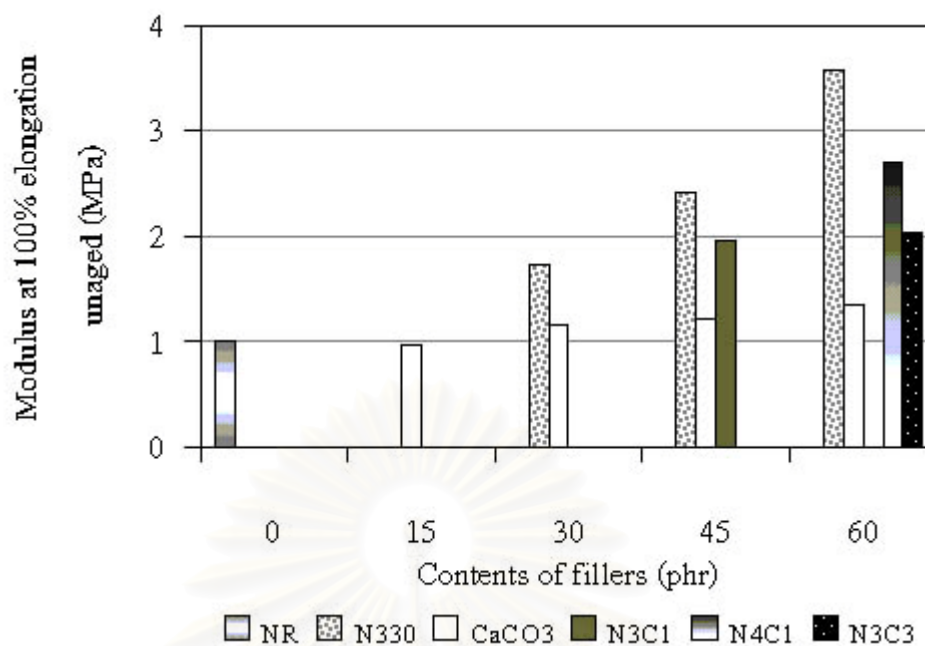
จากตารางที่ 4.46 และรูปที่ 4.29 จะเห็นได้ว่าหลังผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน ขางที่ผสมสารตัวเติมทั้งสองชนิดจะมีระยะยืดเมื่อขาดลดลงเมื่อเทียบกับก่อนอบ ส่วนแนวโน้มโดยทั่วไปมีลักษณะคล้ายก่อนอบ กล่าวคือ ระยะยืดเมื่อขาดของยางที่ผสมสารตัวเติมทั้งสองชนิดจะขึ้นอยู่กับปริมาณสารตัวเติมแต่ละชนิดที่ใส่

4.3.4.3 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% (Modulus at 100% and 300% elongation)

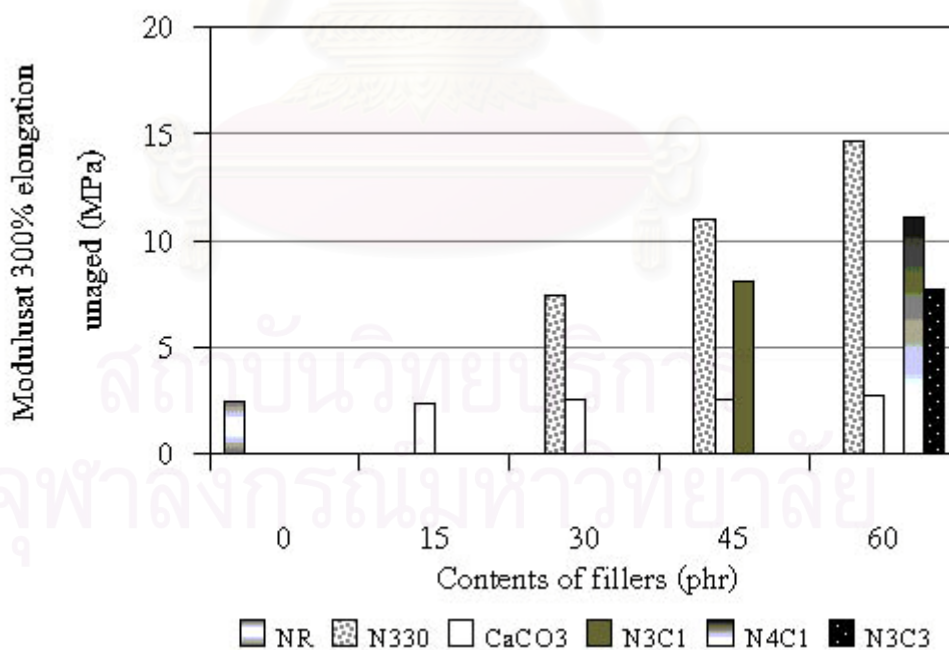
มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ และแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณต่างๆกัน ก่อนผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน แสดงไว้ในตารางที่ 4.47 และรูปที่ 4.30 - 4.31

ตารางที่ 4.47 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต ก่อนอบ

ปริมาณ เขม่าดำ / CaCO ₃ (phr)	มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% (MPa)	
	100%	300%
30 / 15	1.95 (9.23)	8.13 (7.76)
45 / 15	2.70 (11.48)	11.09 (7.09)
30 / 30	2.04 (9.31)	7.68 (7.33)



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสที่ระยะยืด 100% กับปริมาณเขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนต ก่อนอบ



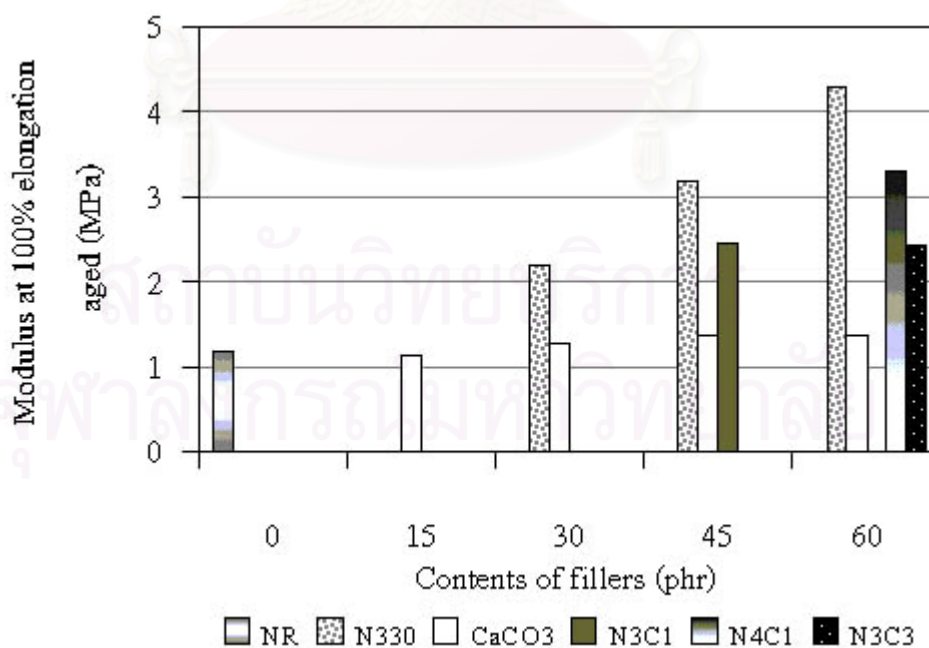
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสที่ระยะยืด 300% กับปริมาณเขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนต ก่อนอบ

จากตารางที่ 4.47 และรูปที่ 4.30 - 4.31 จะเห็นว่าเขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใส่ร่วมกัน จะช่วยเพิ่มค่ามอดูลัสให้กับยาง ทั้งที่ระยะยืด 100% และ 300% โดยเขม่าดำจะมีอิทธิพลต่อค่ามอดูลัสมากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต การใส่แคลเซียมคาร์บอเนตลงไปในยางที่ผสมเขม่าดำจะช่วยปรับค่ามอดูลัสตามต้องการ แต่ทั้งนี้ควรพิจารณาความทนแรงดึงร่วมด้วย

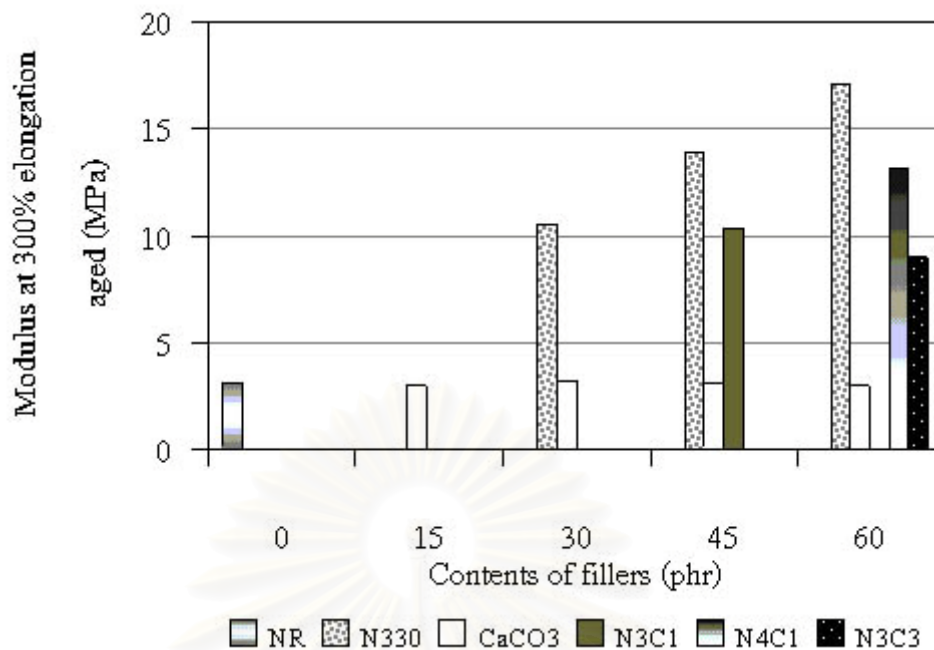
มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต หลังผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน แสดงไว้ในตารางที่ 4.48 และรูปที่ 4.32 - 4.33

ตารางที่ 4.48 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต หลังอบ

ปริมาณ เขม่าดำ / CaCO ₃ (phr)	มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% (MPa, ageing)	
	100%	300%
30 / 15	2.45 (11.02)	10.36 (7.59)
45 / 15	3.30 (11.82)	13.18 (5.01)
30 / 30	2.43 (11.52)	9.04 (7.15)



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสที่ระยะยืด 100% กับปริมาณเขม่าดำ และแคลเซียมคาร์บอเนต หลังอบ



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสที่ระยะยืด 300% กับปริมาณเขม่าดำ และแคลเซียมคาร์บอเนต หลังอบ

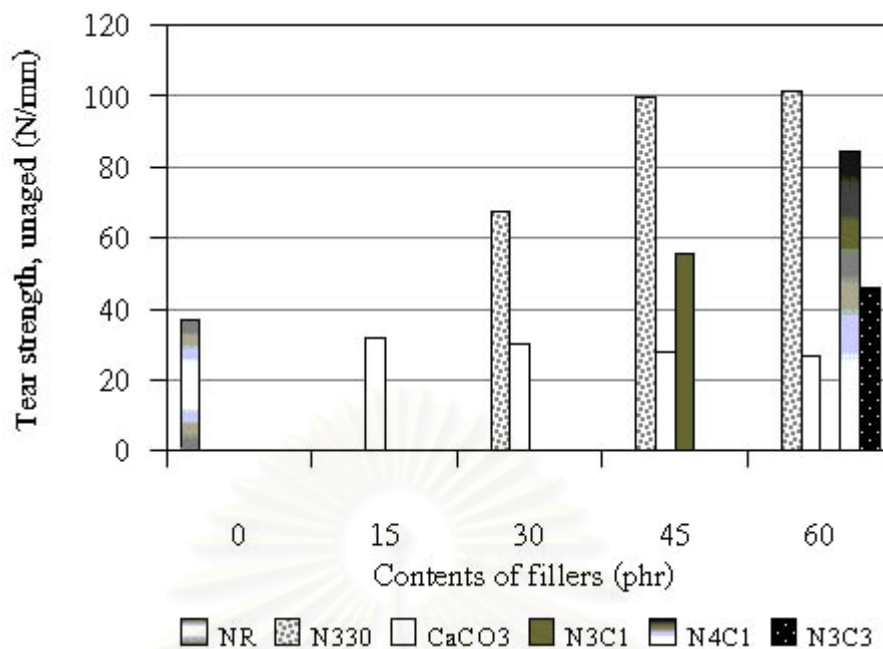
จากตารางที่ 4.48 และรูปที่ 4.32 - 4.33 จะเห็นว่าค่ามอดูลัสของยางที่ผสมสารตัวเติมทั้งสองชนิดหลังผ่านการอบเร่งด้วยความร้อนมีค่าสูงกว่าก่อนอบ การเพิ่มของมอดูลัสจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณสารตัวเติมแต่ละชนิดที่ใส่ลงไป

4.3.5 ความทนการฉีกขาด (Tear strength)

ความทนการฉีกขาดของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณต่างๆกัน ก่อนผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน แสดงไว้ในตารางที่ 4.49 และรูปที่ 4.34

ตารางที่ 4.49 ความทนการฉีกขาดของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนตก่อนอบ

ปริมาณ เขม่าดำ / CaCO ₃ (phr)	ความทนการฉีกขาด (N/mm)
30 / 15	55.69 (6.20)
45 / 15	84.46 (10.00)
30 / 30	46.10 (5.47)



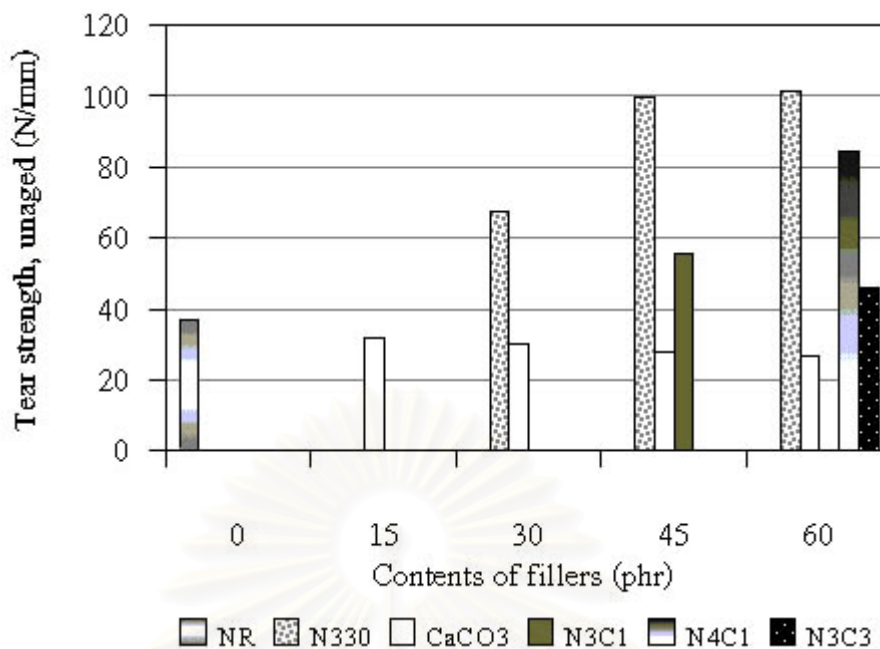
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนการฉีกขาดกับปริมาณเขม่าดำ และแคลเซียมคาร์บอเนตก่อนอบ

จากตารางที่ 4.49 และรูปที่ 4.34 จะเห็นว่าความทนการฉีกขาดของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนตจะได้รับอิทธิพลจากปริมาณสารตัวเติมทั้งสอง โดยแคลเซียมคาร์บอเนตจะทำให้ความทนการฉีกขาดลดลงอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นการใส่สารตัวเติมทั้งสองร่วมกัน ควรพิจารณาอัตราส่วนของปริมาณสารตัวเติมว่าส่งผลให้ความทนการฉีกขาดเป็นไปตามต้องการหรือไม่

ความทนการฉีกขาดของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณต่าง ๆ กัน หลังผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน แสดงไว้ในตารางที่ 4.50 และรูปที่ 4.35

ตารางที่ 4.50 ความทนการฉีกขาดของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนตหลังอบ

ปริมาณ เขม่าดำ / CaCO ₃ (phr)	ความทนการฉีกขาด (N/mm, ageing)
30 / 15	50.18 (5.70)
45 / 15	51.72 (10.67)
30 / 30	42.57 (5.92)



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนการฉีกขาดกับปริมาณเขม่าดำ และแคลเซียมคาร์บอเนต หลังอบ

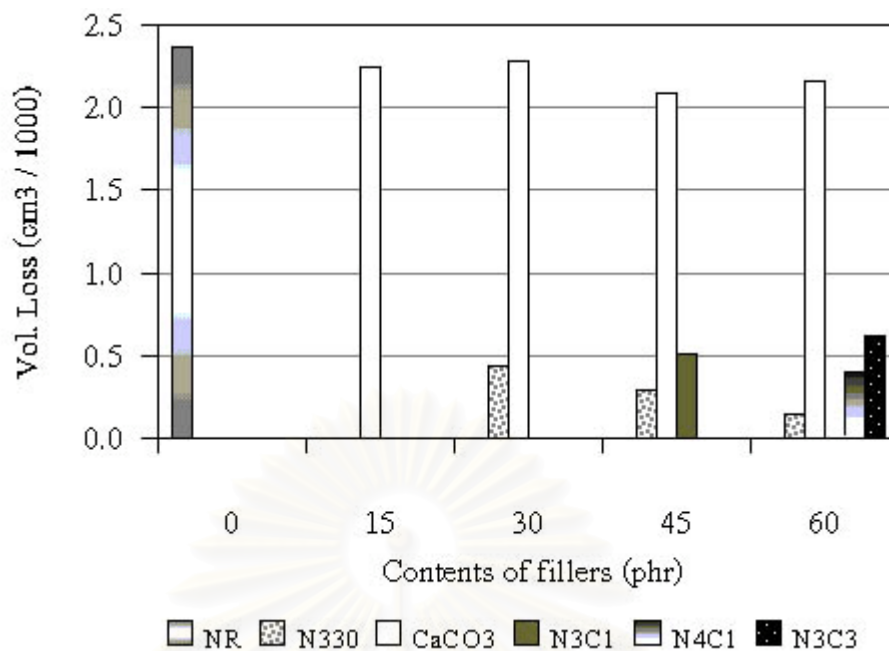
จากตารางที่ 4.50 และรูปที่ 4.35 จะเห็นว่าหลังผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน ความทนการฉีกขาดของยางที่ผสมสารตัวเติมทั้งสองชนิด จะขึ้นอยู่กับปริมาณสารตัวเติมแต่ละชนิดที่ใส่ โดยถ้าใส่เขม่าดำมากขึ้น หลังอบความทนการฉีกขาดจะต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด ขณะที่ถ้าใส่แคลเซียมคาร์บอเนตมากขึ้น หลังอบความทนการฉีกขาดจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

4.3.6 ความต้านทานการสึกหรอ (Akron abrasion resistance)

ความต้านทานการสึกหรอของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณต่าง ๆ กัน แสดงไว้ในตารางที่ 4.51 และรูปที่ 4.36

ตารางที่ 4.51 ความต้านทานการสึกหรอของยางผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต

ปริมาณ เขม่าดำ / CaCO ₃ (phr)	ความต้านทานการสึกหรอ (Vol. Loss, cm ³ /1000)
30 / 15	0.51 (4.67)
45 / 15	0.40 (3.80)
30 / 30	0.62 (18.70)



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการสึกหรอกับปริมาณเขม่าดำ และแคลเซียมคาร์บอเนต

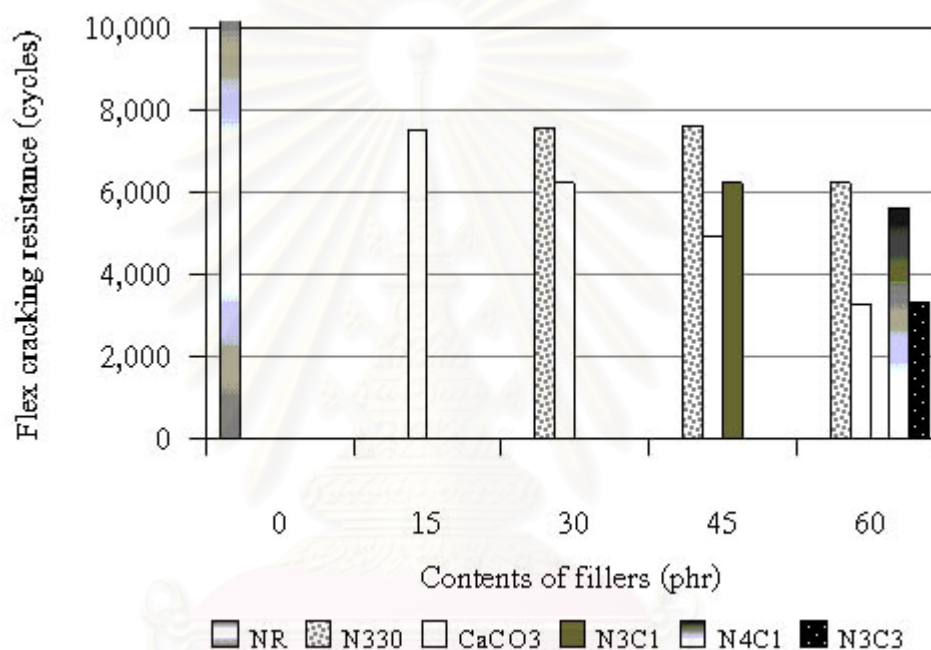
จากตารางที่ 4.51 และรูปที่ 4.36 จะเห็นว่าความต้านทานการสึกหรอของยางผสมสารตัวเติมทั้งสองชนิดจะได้รับอิทธิพลจากเขม่าดำมากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต เขม่าดำจะช่วยเพิ่มความต้านทานการสึกหรออย่างเห็นได้ชัด ขณะที่แคลเซียมคาร์บอเนตที่ใส่เพิ่มเข้าไปจะทำให้ความต้านทานการสึกหรอลดลง ดังนั้นการใส่สารตัวเติมทั้งสองร่วมกัน ควรพิจารณาอัตราส่วนของปริมาณสารตัวเติมว่าส่งผลให้ความต้านทานการสึกหรอเป็นไปตามต้องการหรือไม่

4.3.7 ความต้านทานการหักงอ (Flex cracking resistance)

ความต้านทานการหักงอของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณต่าง ๆ กัน แสดงไว้ในตารางที่ 4.52 และรูปที่ 4.37

ตารางที่ 4.52 ความต้านทานการหักงอของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต

ปริมาณ เขม่าดำ / CaCO ₃ (phr)	ความต้านทานการหักงอ (Cycles)
30 / 15	6244 (9.88)
45 / 15	5636 (9.41)
30 / 30	3347 (7.18)



รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการหักงอกับปริมาณเขม่าดำ และแคลเซียมคาร์บอเนต

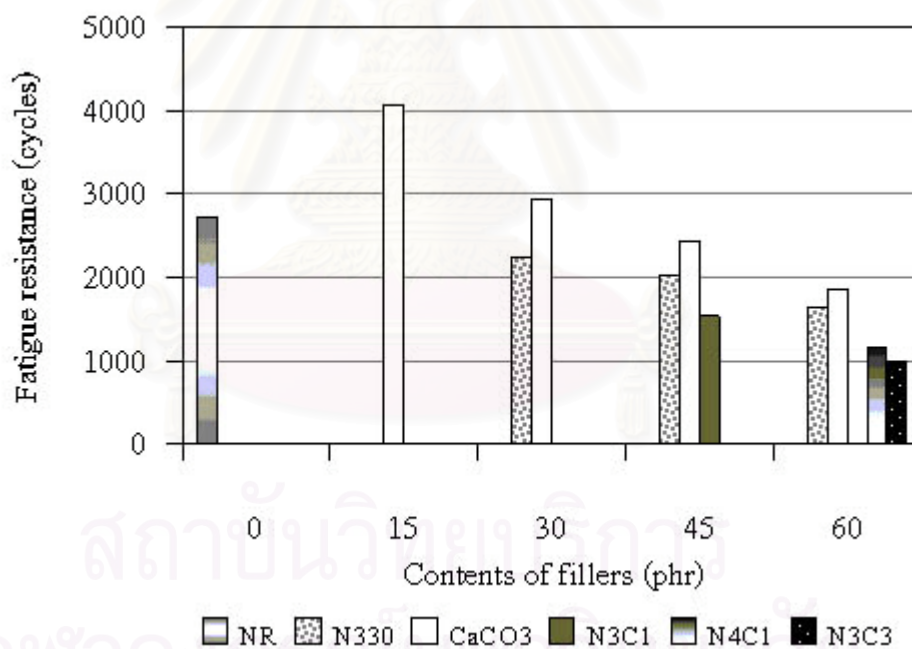
จากตารางที่ 4.52 และรูปที่ 4.37 จะเห็นว่าความต้านทานการหักงอของยางผสมสารตัวเติมทั้งสองชนิดจะขึ้นกับปริมาณรวมของสารตัวเติม ถ้าปริมาณรวมมาก ความต้านทานการหักงอจะลดลง สำหรับยางที่ใส่สารตัวเติมเป็นปริมาณรวมเท่ากัน ถ้าปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตมากกว่าเขม่าดำ จะทำให้ความต้านทานการหักงอลดลงมากกว่ายางที่ใส่เขม่าดำเป็นปริมาณมากกว่า ดังเช่น กรณี N4C1 และ N3C3

4.3.8 ความต้านทานการล้าตัว (Fatigue resistance)

ความต้านทานการล้าตัวของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณต่างๆกัน แสดงไว้ในตารางที่ 4.53 และรูปที่ 4.38

ตารางที่ 4.53 ความต้านทานการล้าตัวของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต

ปริมาณ เขม่าดำ / CaCO ₃ (phr)	ความต้านทานการล้าตัว (Cycles)
30 / 15	1545 (7.94)
45 / 15	1167 (9.89)
30 / 30	1001 (29.70)



รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการล้าตัวกับปริมาณเขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนต

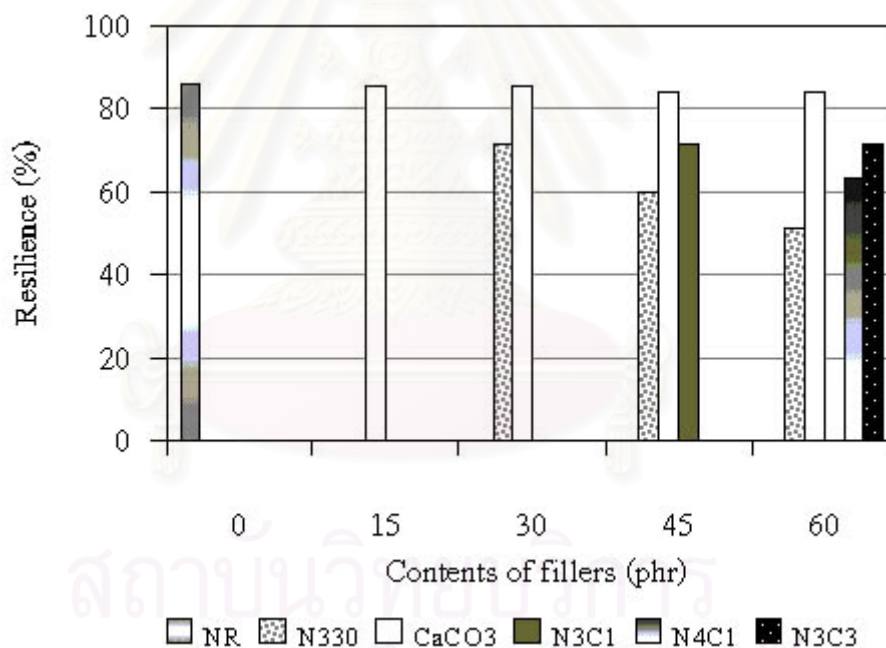
จากตารางที่ 4.53 และรูปที่ 4.38 จะเห็นว่าความต้านทานการล้าตัวของยางผสมสารตัวเติมทั้งสองชนิดจะลดลงเมื่อปริมาณรวมของสารตัวเติมมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบปริมาณรวมของสารตัวเติมที่เท่ากับปริมาณเขม่าดำ หรือแคลเซียมคาร์บอเนต ใดๆอย่างหนึ่ง พบว่ายางที่ผสมสารตัวเติมทั้งสองชนิดจะมีความต้านทานการล้าตัวต่ำกว่ายางที่ผสมสารตัวเติมชนิดใดชนิดหนึ่ง

4.3.9 การกระดอน (Resilience)

การกระดอนของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณต่าง ๆ กัน แสดงไว้ในตารางที่ 4.54 และรูปที่ 4.39

ตารางที่ 4.54 การกระดอนของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต

ปริมาณ เขม่าดำ / CaCO ₃ (phr)	การกระดอน (%)
30 / 15	71.18 (1.12)
45 / 15	63.34 (0.92)
30 / 30	71.42 (0.33)



รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างการกระดอนกับปริมาณเขม่าดำ และแคลเซียมคาร์บอเนต

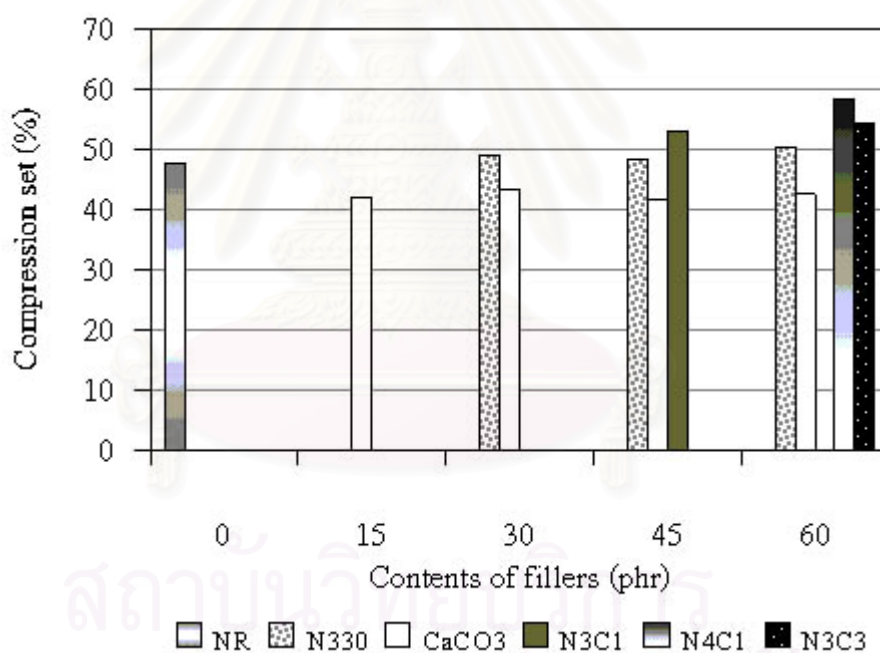
จากตารางที่ 4.54 และรูปที่ 4.39 จะเห็นว่าการกระดอนของยางผสมสารตัวเติมทั้งสองชนิด ขึ้นอยู่กับปริมาณเขม่าดำมากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต เมื่อพิจารณา N3C1 และ N3C3 ซึ่งใส่เขม่าดำ ปริมาณเท่ากัน คือ 30 phr แต่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตต่างกัน โดย N3C3 ใส่ 30 phr และ N3C1 ใส่ 15 phr พบว่าการกระดอนของสูตรทั้งสองใกล้เคียงกัน ขณะที่ N4C1 ซึ่งมีปริมาณเขม่าดำ และ แคลเซียมคาร์บอเนตเท่ากับ 45 และ 15 phr ตามลำดับ พบว่าการกระดอนต่ำกว่าสูตรทั้งสอง

4.3.10 การคืบตัว (Compression set)

การคืบตัวของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณต่าง ๆ กัน แสดงไว้ในตารางที่ 4.55 และรูปที่ 4.40

ตารางที่ 4.55 การคืบตัวของยางที่ผสมทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต

ปริมาณ เขม่าดำ / CaCO ₃ (phr)	การคืบตัว (%)
30 / 15	52.83 (3.50)
45 / 15	58.35 (3.01)
30 / 30	54.14 (3.23)



รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างการคืบตัวของยางกับอัตราส่วนของปริมาณเขม่าดำ และแคลเซียมคาร์บอเนต

จากตารางที่ 4.55 และรูปที่ 4.40 จะเห็นว่าการใส่เขม่าดำร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตจะทำให้เปอร์เซ็นต์การคืบตัวมีค่าสูงกว่าการใส่สารตัวเติมชนิดใดชนิดหนึ่งเพียงอย่างเดียวในปริมาณเท่ากัน โดยเขม่าดำมีอิทธิพลต่อเปอร์เซ็นต์การคืบตัวของยางผสมสารตัวเติมทั้งสองชนิดมากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต

4.4 สมบัติพลวัตเชิงกล (Dynamic mechanical properties)

สมบัติพลวัตเชิงกลที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง DMA ได้แก่ ค่ามอดุลัสสะสม (storage modulus หรือ E') และ $\tan \delta$ ช่วงอุณหภูมิ -110 ถึง 50 °C ใช้ความถี่ 1 Hz และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 °C / min

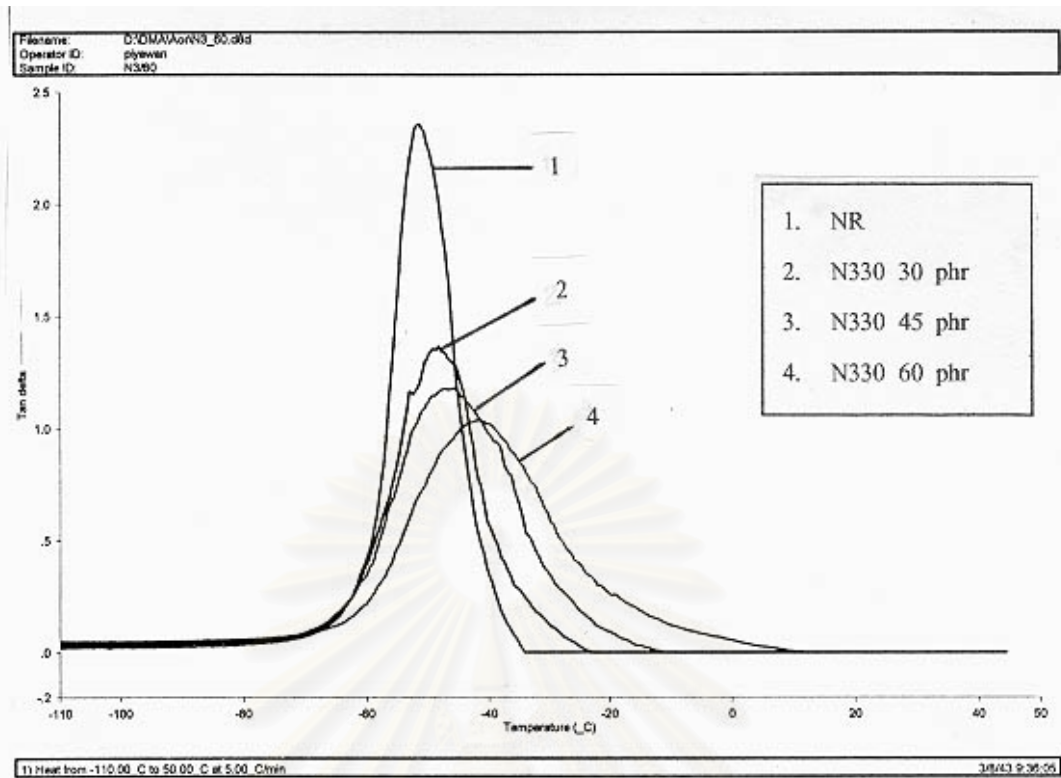
สมบัติพลวัตเชิงกลของยางผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆในปริมาณที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.41 - 4.50 ในหน้าถัดไป

จากรูปที่ 4.41 - 4.50 พบว่าการใส่สารตัวเติมลงไปในช่วงส่งผลให้ค่า $\tan \delta$ max ลดลง ส่วนจะลดลงมากน้อยเพียงใดนั้นขนาดอนุภาคมีผลเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยขนาดอนุภาคเล็กกลงจะเห็นการลดลงของค่า $\tan \delta$ max ชัดเจนขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากขนาดอนุภาคเล็กกลง พื้นที่ผิวจะมากขึ้น ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของยางกับเขม่าดำมากขึ้น ความยืดหยุ่นของสายโซ่โมเลกุลของยางลดลง การถ่ายเทพลังงานที่ย่างได้รับไปในรูปพลังงานกลได้น้อยลง

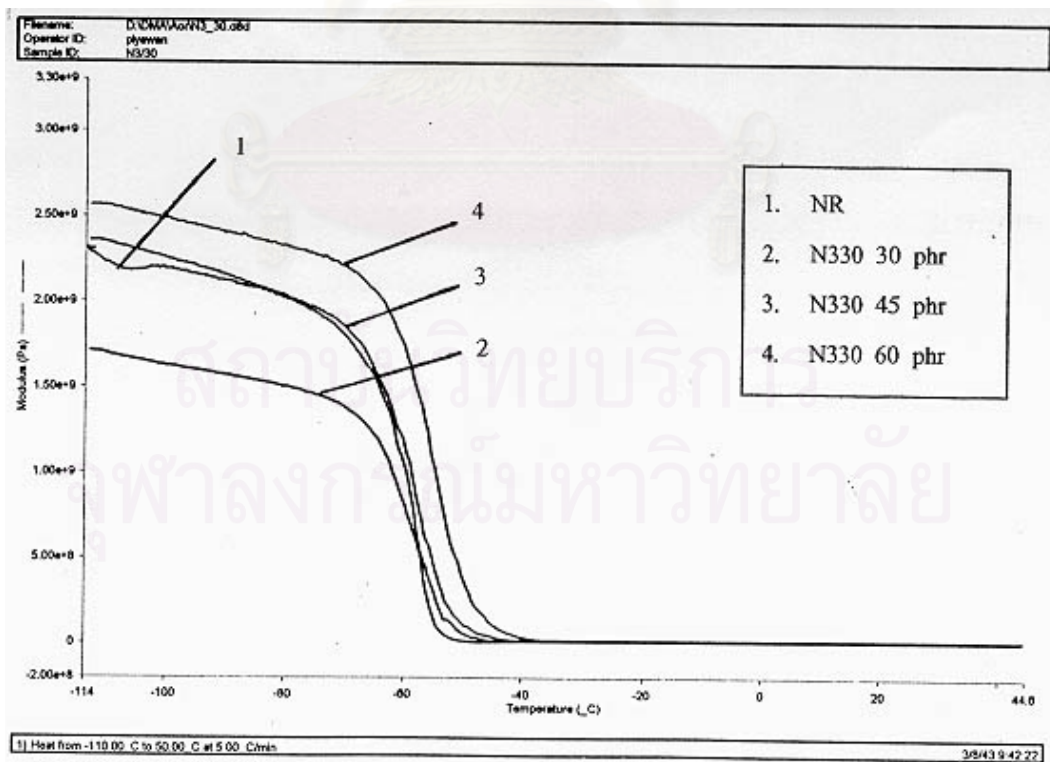
เขม่าดำที่มีขนาดอนุภาคยิ่งเล็ก (N330) เมื่อใส่ในปริมาณไม่มากนักพบว่าที่บริเวณ glassy region ค่า E' จะลดลงจากที่ไม่ใส่สารตัวเติม เมื่อใส่มากขึ้นค่า E' จะเพิ่มจากเดิมจนมีค่าใกล้เคียงและสูงกว่าพวกที่ไม่ใส่สารตัวเติม เมื่อขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น ค่า E' จะสูงขึ้น และสูงยิ่งขึ้นเมื่อใส่ปริมาณมากขึ้น ส่วนแคลเซียมคาร์บอเนตส่งผลให้ค่า E' สูงขึ้นเมื่อใส่ปริมาณมากขึ้น แต่ความแตกต่างจะไม่ชัดเจนเท่าเขม่าดำ ส่วนอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) เปลี่ยนแปลงน้อยมาก

เมื่อใส่ทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่าค่า $\tan \delta$ max ได้รับอิทธิพลจากเขม่าดำมากกว่า ส่วนปริมาณแคลเซียมที่ใส่แทบจะไม่มีผลกระทบต่อค่า $\tan \delta$ max สำหรับค่า E' นั้นที่บริเวณ glassy region จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อใส่สารตัวเติมมากขึ้น ปริมาณเขม่าดำจะส่งผลให้ค่า E' สูงขึ้นมากกว่าปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เท่ากัน ส่วนค่า T_g มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก

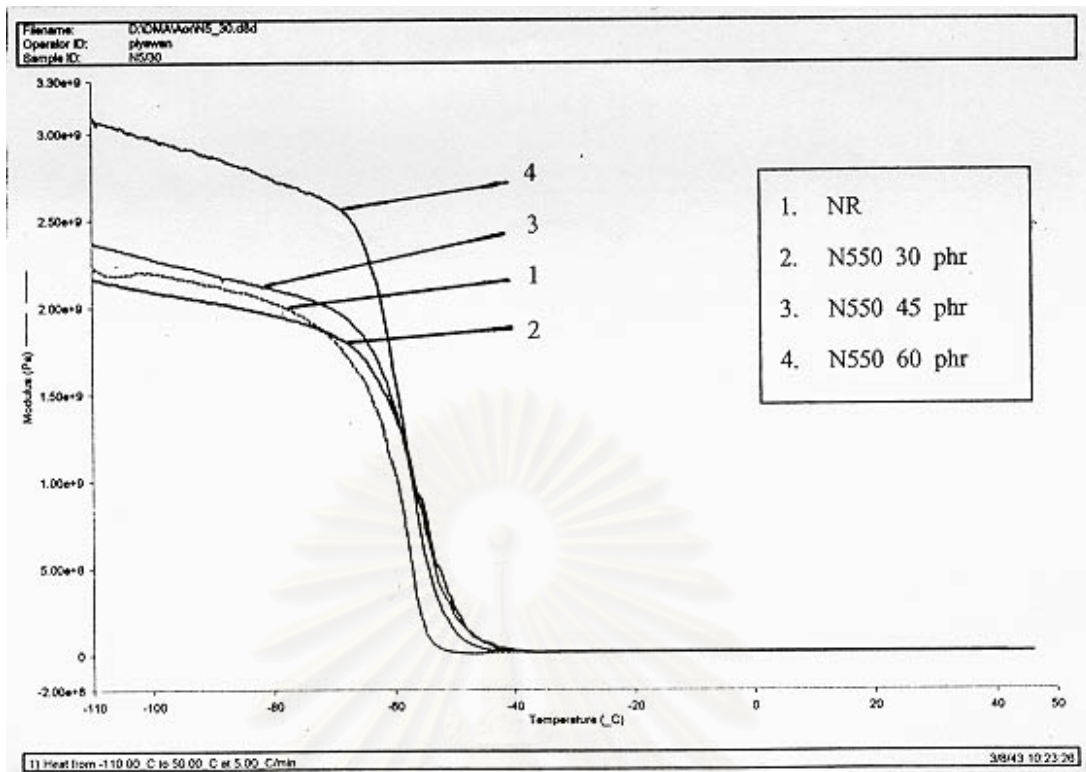
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



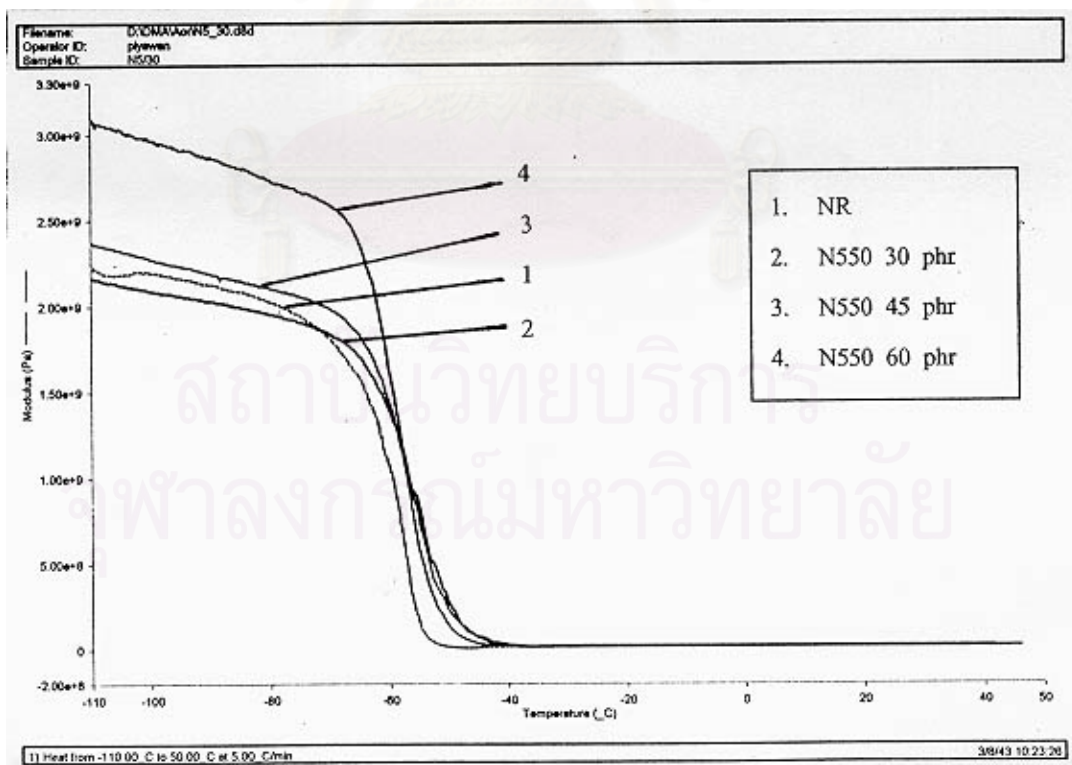
รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tan δ กับอุณหภูมิของยางผสมเขม่าดำ N330 ปริมาณต่างๆ



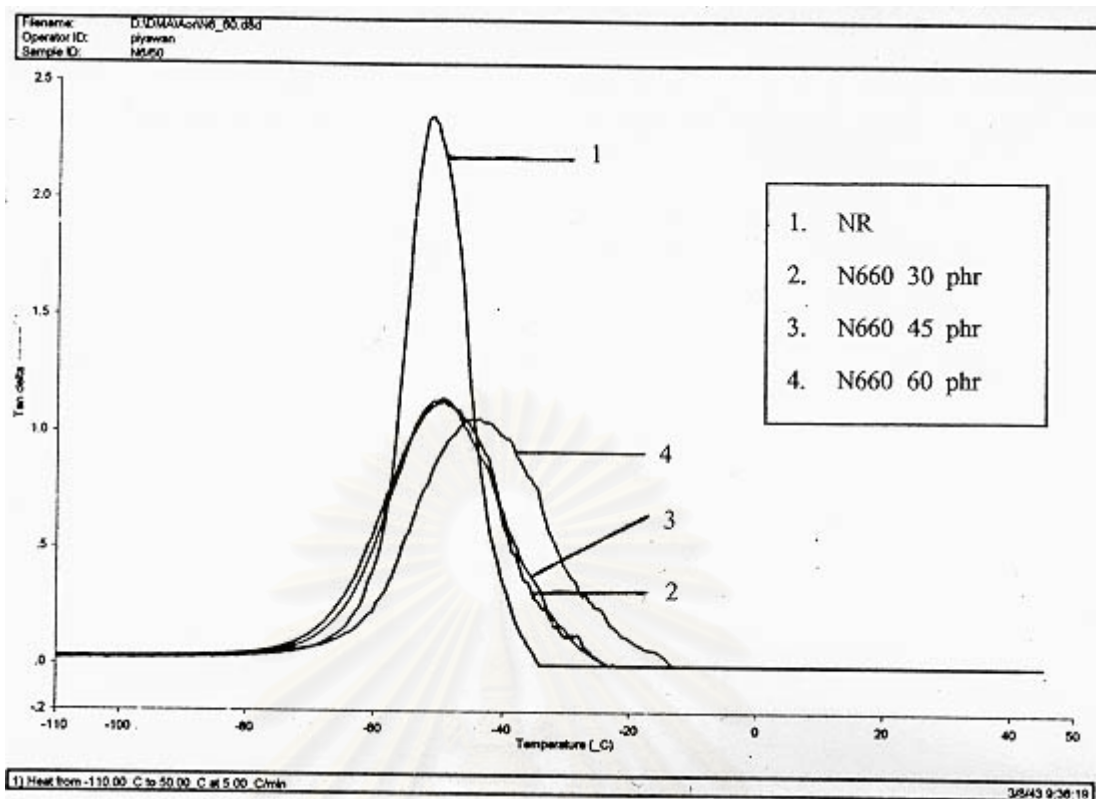
รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E' กับอุณหภูมิของยางผสมเขม่าดำ N330 ปริมาณต่างๆ



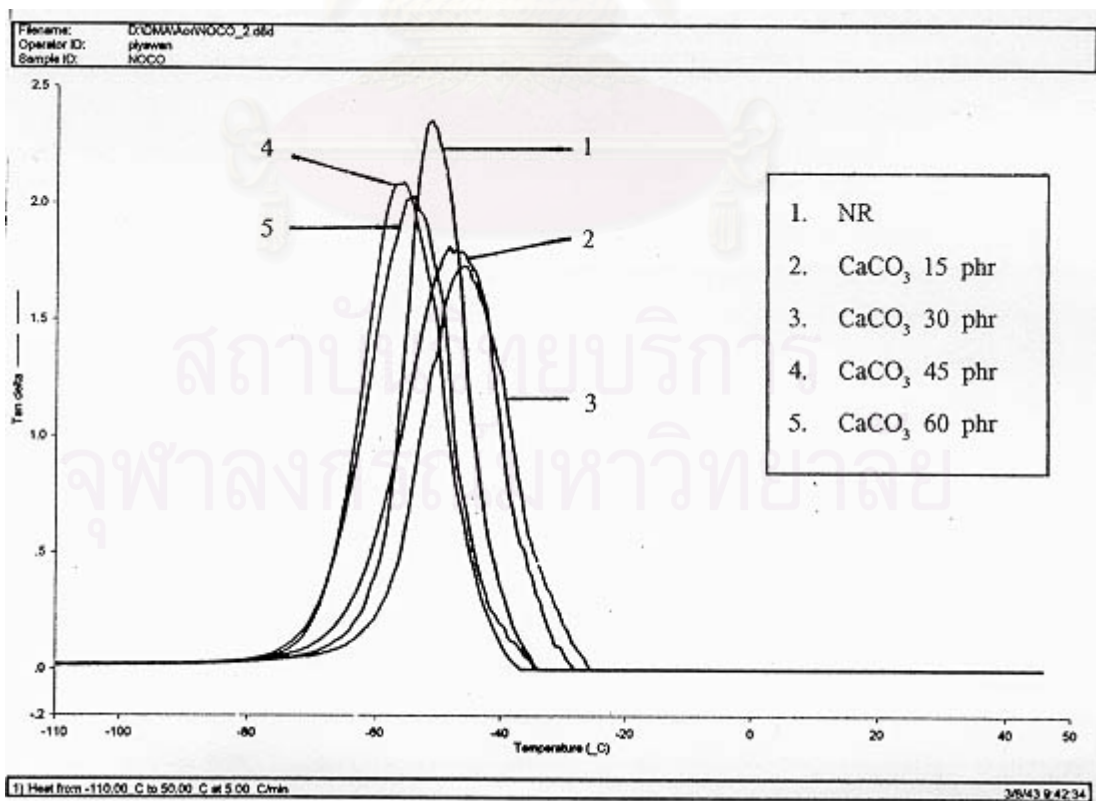
รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\tan \delta$ กับอุณหภูมิของยางผสมเขม่าดำ N550 ปริมาณต่างๆ



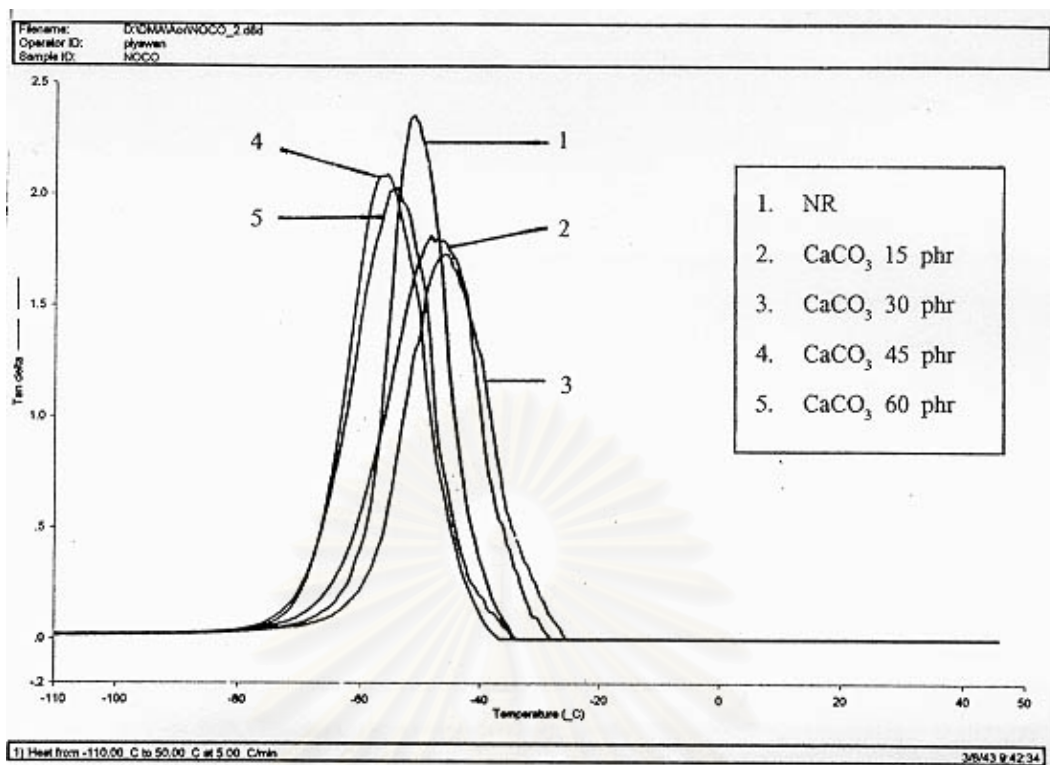
รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E' กับอุณหภูมิของยางผสมเขม่าดำ N550 ปริมาณต่างๆ



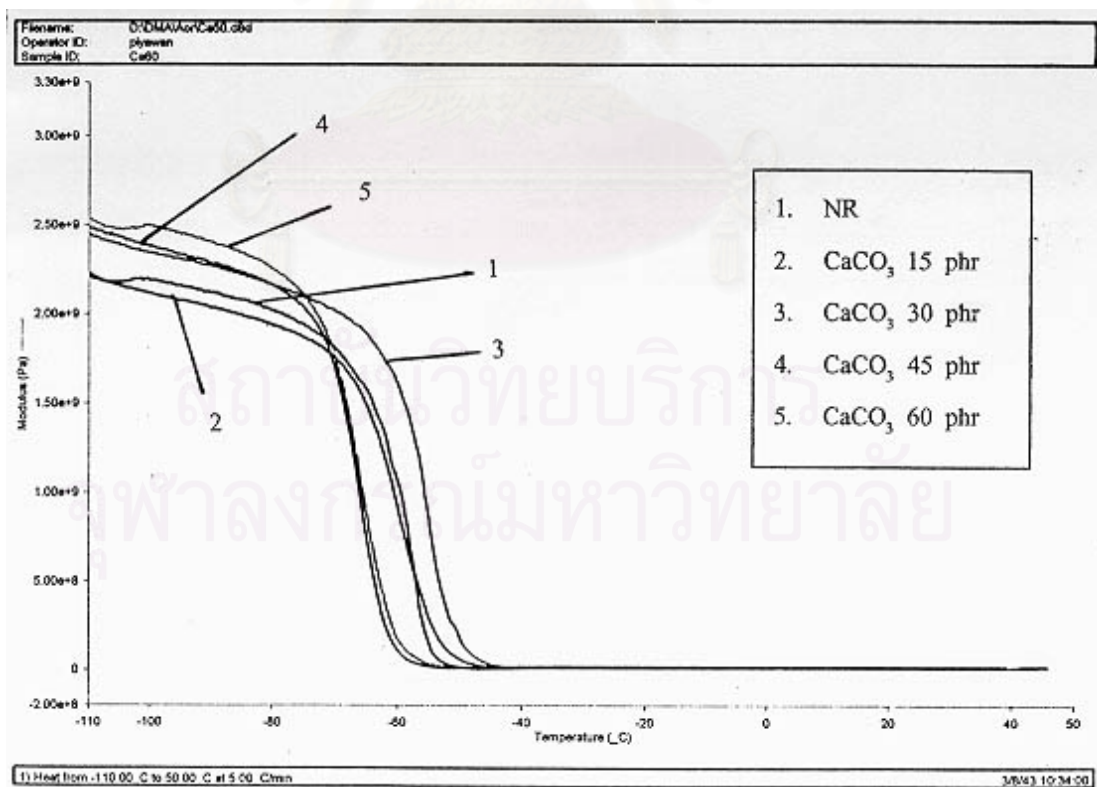
รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tan δ กับอุณหภูมิของยางผสม N660 ปริมาณต่างๆ



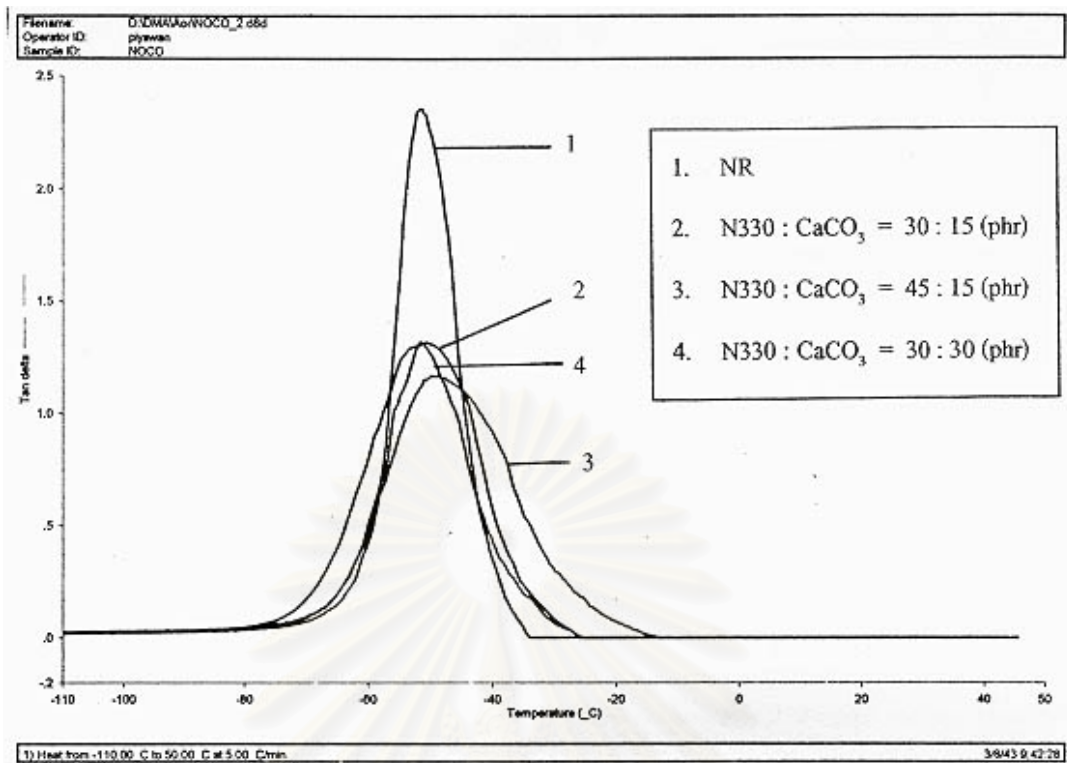
รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E' กับอุณหภูมิของยางผสม N660 ปริมาณต่างๆ



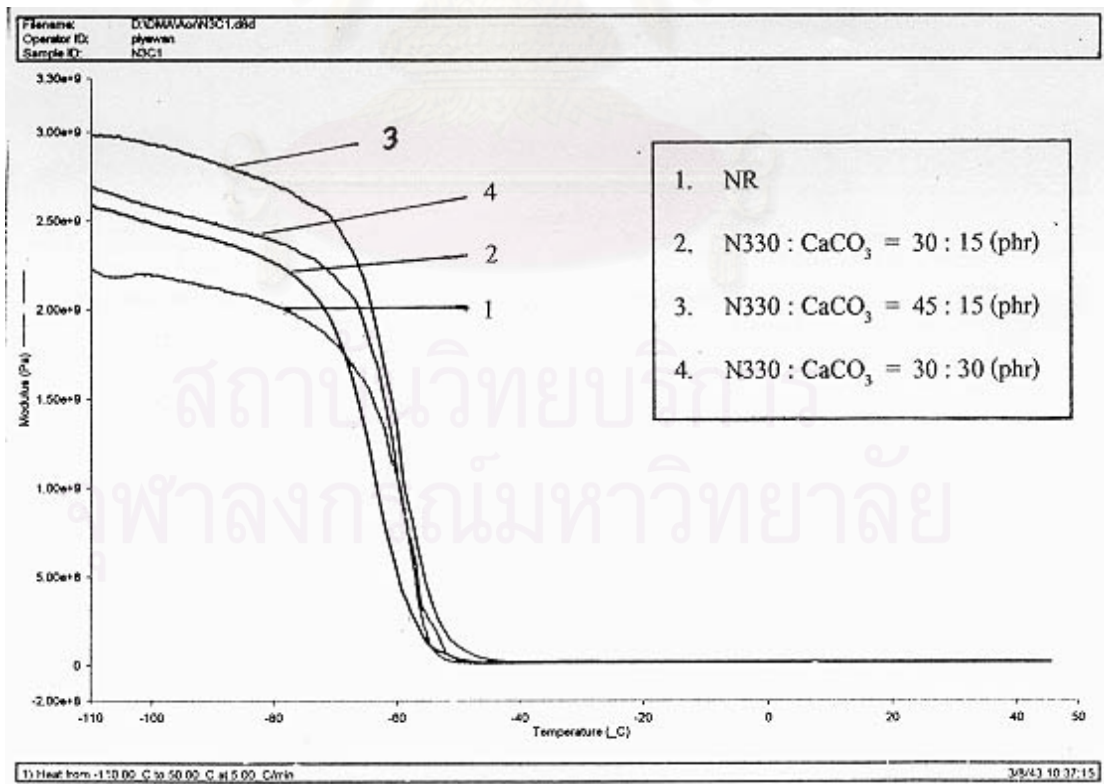
รูปที่ 4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tan δ กับอุณหภูมิของยางผสมเขม่าดำ CaCO₃ ปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E' กับอุณหภูมิของยางผสมเขม่าดำ CaCO₃ ปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tan δ กับอุณหภูมิของยางผสมเขม่าดำ N330 และ CaCO₃ ปริมาณต่างๆ

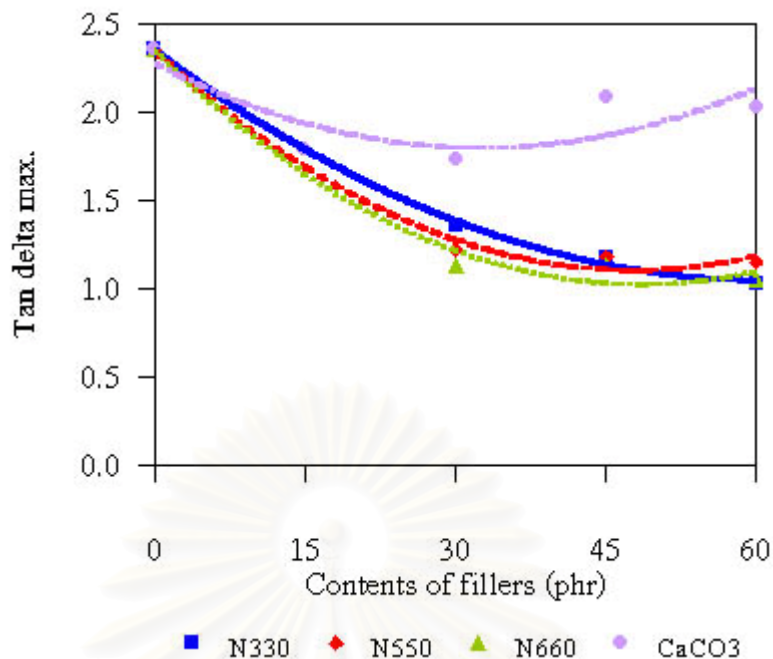


รูปที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E' กับอุณหภูมิของยางผสมเขม่าดำ N330 และ CaCO₃ ปริมาณต่างๆ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\text{Tan } \delta_{\text{max}}$ กับปริมาณสารตัวเติม แสดงดังตารางที่ 4.56 และรูปที่ 4.51

ตารางที่ 4.56 ค่า $\text{Tan } \delta_{\text{max}}$ และมอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของยางผสมสารตัวเติมชนิดและปริมาณต่างๆ

ปริมาณสารตัวเติม (phr)	$\text{Tan } \delta_{\text{max}}$	Modulus at 100% elongation (MPa)	Modulus at 300% elongation (MPa)
0	2.356	1.01	2.45
30 (N330)	1.358	1.73	7.47
45 (N330)	1.174	2.42	11.01
60 (N330)	1.033	3.57	14.69
30 (N550)	1.219	1.98	8.84
45 (N550)	1.178	2.53	12.06
60 (N550)	1.150	3.75	15.68
30 (N660)	1.130	1.42	6.69
45 (N660)	1.134	2.28	10.83
60 (N660)	1.051	3.25	14.08
15 (CaCO_3)	1.791	0.97	2.37
30 (CaCO_3)	1.733	1.15	2.56
45 (CaCO_3)	2.084	1.22	2.57
60 (CaCO_3)	2.028	1.34	2.73

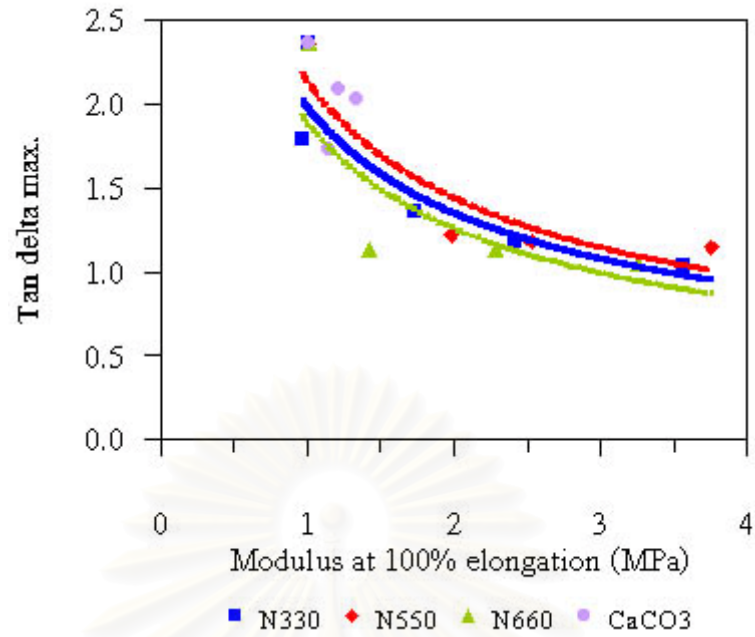


รูปที่ 4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\tan \delta_{max}$ กับปริมาณสารตัวเติม

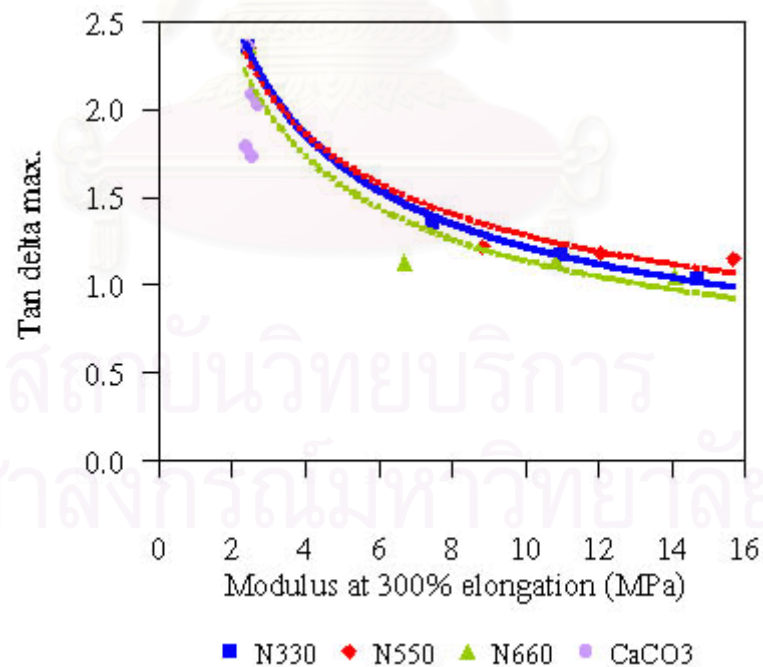
จากตารางที่ 4.56 และรูปที่ 4.51 จะเห็นว่าเมื่อใส่เขม่าดำ ค่า $\tan \delta_{max}$ ลดลง เนื่องจากเกิดแรงยึดเกาะระหว่างเขม่าดำกับสายโซ่โมเลกุลของยางมากขึ้น ทำให้การเลื่อน (slippage) ของสายโซ่โมเลกุลของยางน้อยลง พลังงานสูญเสียลงไปด้วย ค่า $\tan \delta_{max}$ จึงต่ำลง แต่จากการทดลองนี้เมื่อใส่เขม่าดำที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน และปริมาณมากขึ้น จะเห็นความแตกต่างไม่ชัดเจนนัก อาจเนื่องมาจากการกระจายตัวของ aggregates การเกิด agglomerates และปัจจัยต่างๆในการบดผสม

ส่วนแคลเซียมคาร์บอเนตนั้น มีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยใหญ่กว่าเขม่าดำ พื้นที่ผิวน้อยกว่า และไม่เกิดแรงยึดเกาะกับยางเหมือนเขม่าดำ ทำให้การเลื่อนของสายโซ่โมเลกุลเกิดได้ง่ายกว่า พลังงานที่สูญเสียมากขึ้น ค่า $\tan \delta_{max}$ จึงสูงขึ้น

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\tan \delta_{max}$ กับมอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% แสดงดังตารางที่ 4.56 และรูปที่ 4.52 - 4.53



รูปที่ 4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\text{Tan } \delta_{\text{max}}$ กับมอดุลัสที่ระยะยืด 100%



รูปที่ 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\text{Tan } \delta_{\text{max}}$ กับมอดุลัสที่ระยะยืด 300%

จากตารางที่ 4.56 และรูปที่ 4.52 - 4.53 จะเห็นว่าเมื่อทดสอบด้วยแรงคงที่ (static force) ยางที่ใส่เข็ม่าค่ามากขึ้น ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% เพิ่มขึ้น ค่า $\text{Tan } \delta_{\text{max}}$ ที่ได้จากการทดสอบด้วยแรงที่เป็นคาบ (periodic force) จะลดลง และจากการทดลองนี้ พบว่าเข็ม่าค่าที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน ให้ผลไม่ต่างกันเท่าใดนัก ส่วนแคลเซียมคาร์บอเนต ไม่สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสกับค่า $\text{Tan } \delta_{\text{max}}$ ได้ชัดเจนเหมือนเข็ม่าค่า



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

จากการศึกษา พบว่าเมื่อใส่เขม่าดำที่มีขนาดอนุภาคเล็กลง เป็นปริมาณมากขึ้น จะส่งผลให้ความหนืดสูงขึ้น เวลาเริ่มและใช้ในการวัลคาไนซ์สั้นลง ทำให้ประหยัดเวลา และพลังงานในการขึ้นรูป ส่วนสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็ง ความทนการฉีกขาด ความทนแรงดึง และความต้านทานการสึกหรอมีค่าสูงขึ้น การกระดอนต่ำลง ในทางกลับกัน เมื่อใส่เขม่าดำที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นในปริมาณมากขึ้น ความต้านทานการล้าตัวจะลดลง ส่วนแนวโน้มการคืนตัวต่ำลง ยุบตัวมาก แต่ไม่ขึ้นกับขนาดอนุภาคโดยตรง เป็นที่น่าสังเกตว่าขนาดอนุภาค และปริมาณของเขม่าดำที่ส่งผลดีที่สุดต่อสมบัติแต่ละอย่างจะแตกต่างกัน และจากผลทดลองเห็นได้ว่าเขม่าดำที่มีขนาดอนุภาคเล็กที่สุดในการทดลองนี้ คือ N330 จะส่งผลดีที่สุดต่อสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลส่วนใหญ่ของผลิตภัณฑ์ยาง

ด้านปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อสมบัติด้านการแปรรูป ความต้านทานการสึกหรอ การกระดอน และการคืนตัว เมื่อใส่เพิ่มความแข็งจะสูงขึ้นแต่น้อยกว่าเขม่าดำ ความทนแรงดึง และความทนการฉีกขาดต่ำลง

เมื่อศึกษาสมบัติพลวัตเชิงกล พบว่าขนาดอนุภาคและปริมาณสารตัวเติมทั้งสองชนิดส่งผลต่ออุณหภูมิกลาสทรานซิชันเพียงเล็กน้อย เมื่อใส่เขม่าดำมากขึ้น $\tan \delta_{max}$ ต่ำลง ขณะที่ E' บริเวณ glassy region สูงขึ้น ส่วนแคลเซียมคาร์บอเนตส่งผลให้ $\tan \delta_{max}$ ต่ำลงไม่มากเท่าเขม่าดำ และ E' สูงขึ้นไม่มากนัก และเมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกลทั่วไปกับสมบัติพลวัตเชิงกล พบว่าเมื่อใส่เขม่าดำปริมาณมากขึ้น ทำให้ค่ามอดุลัสสูงขึ้น ค่า $\tan \delta_{max}$ ลดลง จากความสัมพันธ์นี้อาจเป็นแนวทางในการใช้สมบัติเชิงกลทั่วไป บอกแนวโน้มของสมบัติพลวัตเชิงกลได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์กับผู้ผลิตรายย่อย เนื่องจากข้อจำกัดในด้านเครื่องมือทดสอบสมบัติพลวัตเชิงกล

เมื่อใส่ทั้งเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่าสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลต่างๆ จะขึ้นอยู่กับปริมาณสารตัวเติมแต่ละชนิด โดยเขม่าดำจะมีอิทธิพลต่อค่าต่างๆ มากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต ดังนั้นการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตร่วมกับเขม่าดำไม่ได้ช่วยเสริมสมบัติด้านต่างๆมากนัก จึงมักใส่เพื่อลดต้นทุนการผลิต ทั้งนี้ต้องพิจารณาสมบัติแต่ละอย่างของยางว่ายอมรับได้หรือไม่

จากผลการทดลองทั้งหมด สรุปได้ว่าการใช้เขม่าดำ N330 ร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วน 45/15 (โดยคิดเป็น phr) จะให้สมบัติทั่วไปเหมาะสมสำหรับยางรองแท่นเครื่องจักรมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบจากการทดลองทั้งหมด 3 อัตราส่วน ได้แก่ 30/15, 45/15 และ 30/30 (เขม่าดำ N330/แคลเซียมคาร์บอเนต) ซึ่งคิดเป็น phr

ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้ศึกษาเฉพาะเขม่าดำ N330, N550, N660 และแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน การศึกษาต่อไปควรใช้เขม่าดำ และแคลเซียมคาร์บอเนต ที่มีขนาดอนุภาคต่างๆ และสารตัวเติมชนิดอื่นๆเพิ่มเติม และอาจศึกษาอย่างผสมระหว่างยางธรรมชาติ และยางชนิดอื่นๆ
2. ควรศึกษาการกระจายตัวของสารตัวเติมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน จะทำให้สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดีขึ้น และเป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการบดผสม
3. เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องงบประมาณ และเวลาในการทดสอบ ทำให้การทดสอบด้วย DMA ต้องจำกัดปริมาณชิ้นงาน ถ้าสามารถทดสอบชิ้นงานได้เพิ่มขึ้น อาจทำให้ได้ข้อสรุปที่ชัดเจนขึ้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. สถาบันวิจัยยาง. สถิติยางประเทศไทย ปีที่ 27 ฉบับที่ 3 และ 4. สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการ เกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2541.
2. วราภรณ์ ขจรไชยกูล. การลดต้นทุนและการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ยาง. วารสารยางพารา ปีที่ 18 ฉบับ 2 (พ.ค.- ส.ค.) : 111 - 130.
3. เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร. เทคโนโลยีของยาง. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
4. Maingam, B. A Study of Structures - Properties of Rubber Vulcanizates by Dynamic Mechanical Analyzer. Master's Thesis, Polymer Science, Graduate School, Mahidol University, 1994.
5. บุญธรรม นิธิอุทัย, พรพรรณ นิธิอุทัย และปรีชา ป็องภัย. สารเคมีสำหรับยางและเทคนิคการออกสูตรยาง. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, 2520.
6. พรพรรณ นิธิอุทัย. สารเคมีสำหรับยาง. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, 2528.
7. Evans, C.W. Practical Rubber Compounding and Processing. London and New Jersey : Applied Science Publishers Ltd., 1981.
8. Blow, C.M., and Hepburn, C. Rubber Technology and Manufacture. 2nd ed. The Plastic and Rubber Institute, 1982.
9. Bhowmick, A.K., Hall, M.M., and Benarey, H.A. Rubber Products Manufacturing Technology. New York : Marcel Dekker, Inc., 1994.
10. The American National Standard. ASTM D1765 Standard Classification System for Carbon Blacks Used in Rubber Products. Annual Book of ASTM Standard 09.01 (1998) : 324 - 327.

11. Studebaker, M.L. Carbon Black Properties. In G. Kraus (ed.), Reinforcement of Elastomers, pp.323 - 331. New York : Interscience, 1965.
12. Wang, M.- J. Effect of Polymer - Filler and Filler - Filler Interactions on Dynamic Properties of Filled Vulcanizates. Rubber Chemistry and Technology 71(3) (1998) : 520 - 589.
13. Morton, M. Introduction to Rubber Technology. 2nd ed. New York : Reinhold Publishing Corporation, 1993.
14. Sekutowski, D. Calcium Carbonate. In J. Edenbaum (ed.), Plastics Additives and Modifiers Handbook, pp.503 - 512. New York : Van Nostrand Reinhold, 1992
15. วุฒิสักดิ์ ศิริทองถาวร, อติชัย รุ่งวิชาณวัฒน์ และวิมล อินททอง. สมบัติพลวัตเชิงกลและการสะสมความร้อนของระบบยางผสม. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, 2540.
16. Haines, P.J. Thermal Methods of Analysis : Principles, Applications and Problems. Glasgow : Backie Academic & Professional, 1995.
17. Ghosh, P., and Chakrabarti, A. Conducting carbon black filled EPDM vulcanizates : assessment of dependence of physical and mechanical properties and conducting character on variation of filler loading. European Polymer Journal 36(5) (2000) : 1043 - 1054.
18. Hamza, S.S. Effect of aging and carbon black on the mechanical properties of EPDM rubber. Polymer Testing 17(2) (1998) : 131 - 137.
19. Thavamani, P., and Bhowmick, A.K. Wear of natural rubber and styrene - butadiene rubber vulcanizates at elevated - temperatures. Plastics Rubber and Composites Processing and Applications 20(4) (1993) : 239 - 247.
20. Datta, S., et al. Dynamic mechanical and infra - red spectroscopic studies on interaction between carbon black and ionic thermoplastic elastomer based on maleated EPDM rubber. Polymer 37(15) (1996) : 3431 - 3435.

21. Sombatsompop, N. Dynamic Mechanical Properties of Ground Flexible Polyurethane Foam Particles and Carbon - Black - Filled Rubber Vulcanizates. Polymer - Plastics Technology and Engineering 37(1) (1998) : 1 - 18.
22. Tan, E.- W., and Wang, M.- J. A New Approach for Studying the Effect of Fillers on Dynamic Properties. In Abdul Aziz bin S.A. Kadir (ed.), Natural Rubber : Current Developments in Product Manufacture and Applications, pp.363 - 385. Kuala Lumpur : Rubber Research Institute of Malaysia, 1993.
23. Trexler, H.E., and Lee, M.C.H. Effect of Types of Carbon Black and Cure Conditions on Dynamic Mechanical Properties of Elastomers. Research Publication GMR - 4908, pp.1 - 27. Los Angeles : The American Chemical Society, 1985.
24. Ghosh, A.K., et al. Effect of modified carbon black on the properties of natural rubber vulcanizate. Journal of Applied Polymer Science 66(4) (1997) : 683 - 693.
25. Katbab, A.A., Nazockdast, H., and Bazgir, S. Carbon black - reinforced dynamically cured EPDM / PP thermoplastic elastomers. I. Morphology, rheology, and dynamic mechanical properties. Journal of Applied Polymer Science 75(9) (2000) : 1127 - 1137.
26. Coran, A.Y., and Donnet J.B. The dispersion of carbon - black in rubber.1. Rapid method for assessing quality of dispersion. Rubber Chemistry and Technology 65(5) (1992) : 973 - 997.
27. Hess, W.M., Herd, C.R., and Sebok, E.B. Microscopy of carbon - black. Kautschuk Gummi Kunststoffe 47(5) (1994) : 328 - &.
28. Donnet, J.- B. Black and White Fillers and Tire Compound. Rubber Chemistry and Technology 71(3) (1998) : 323 - 341.
29. สถาบันวิจัยยาง. การทดสอบมาตรฐานยางแท่ง เอส.ที.อาร์. สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการ เกษตร, 2539.

30. ทิววรรณ วิทยา. สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติผสมยางพอลิบิวทาไดอินเดิมซิลิกา. ปรินญา
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, 2542.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การทดสอบยางแท่ง⁽²⁹⁾

การทดสอบปริมาณสิ่งสกปรก (Determination of Dirt Content)

ปริมาณสิ่งสกปรก หมายถึง ปริมาณสารที่ได้จากการกรองด้วยตัวกรอง ที่มีแผ่นตะแกรงกรอง ขนาดรูตะแกรง 325 เมช (mesh) หรือ 44 ไมครอน (micron) ซึ่งสารที่ได้จากการกรองนั้น ประกอบด้วยสารที่ไม่ใช่เนื้อยาง (non rubber) และรวมทั้งสารแปลกปลอมอื่นๆ ได้แก่ เปลือกไม้ ดิน ใบไม้ ปริมาณและชนิดของสิ่งสกปรก มีความสำคัญต่อกระบวนการนำยางไปใช้แปรรูปทำผลิตภัณฑ์ยาง ถ้าหากยางมีปริมาณสิ่งสกปรกสูงจะมีผลกระทบต่อกระบวนการแปรรูปและคุณภาพของผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องควบคุมการผลิตยางให้ปราศจากหรือมีปริมาณผบน้อยที่สุด เช่น ทำการกรองน้ำยางให้สะอาดก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการผลิตยาง

ปริมาณสิ่งสกปรกในชั้นยางทดสอบคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ดังนี้

$$\% \text{ สิ่งสกปรก} = \frac{\text{น้ำหนักสิ่งสกปรก}}{\text{น้ำหนักชั้นยางทดสอบ}} \times 100$$

$$\text{หรือ} = \frac{B - A}{W} \times 100$$

เมื่อ A = น้ำหนักตัวกรองเปล่า (กรัม)

B = น้ำหนักตัวกรองพร้อมสิ่งสกปรก (กรัม)

W = น้ำหนักชั้นยางทดสอบ (กรัม)

การทดสอบปริมาณเถ้า (Determination of Ash Content)

ปกติเถ้า (Ash) ของยางธรรมชาติ จะประกอบด้วยสารพวกคาร์บอเนต และฟอสเฟต ของโปแตสเซียม แมกนีเซียม แคลเซียม โซเดียม และแร่ธาตุอื่นๆ นอกจากนี้ปริมาณเถ้าอาจเป็นพวกซิลิกาหรือซิลิเกต ที่มีอยู่ในยางเองหรืออาจปะปนมาจากข้างนอก ซึ่งขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของยาง ปริมาณของเถ้าจึงเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณของแร่ธาตุที่มีอยู่ในยางดิบ

การทดสอบหาปริมาณเถ้าก็เพื่อต้องการทราบปริมาณของสารพวกเกลืออนินทรีย์ (Inorganic salt) ในยาง ถ้าหากปริมาณของเกลืออนินทรีย์ เช่น สารอลัม (Alum) สูงจะเป็นสาเหตุทำให้ความชื้นถูกดูดซึมเข้าไปในยางได้มาก เมื่อความชื้นสูงก็จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดปัญหาในการ

ผลิตผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป อเนกการทราบปริมาณเก่าในยางจะช่วยบ่งชี้ว่ามีการใส่สารตัวเติม (filler) ลงไปช่วยเพิ่มน้ำหนักยางหรือไม่

ปริมาณเก่าในชั้นยางทดสอบคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ดังนี้

$$\% \text{เก่า} = \frac{\text{น้ำหนักเก่า}}{\text{น้ำหนักชั้นยางทดสอบ}} \times 100$$

$$\text{หรือ} = \frac{B - A}{W} \times 100$$

เมื่อ A = น้ำหนัก Crucible (กรัม)

B = น้ำหนัก Crucible พร้อมเก่า (กรัม)

W = น้ำหนักชั้นยางทดสอบ (กรัม)

การทดสอบปริมาณสิ่งระเหย (Determination of Volatile matter)

สิ่งระเหยในยางส่วนใหญ่ เป็นความชื้นในยาง การผลิตยางแท่งต้องผ่านกระบวนการผลิตหลายขั้นตอน เช่น การอบยางให้แห้ง ตลอดจนการบรรจุหีบห่อ ทำให้ปริมาณสิ่งระเหยในยางแท่งน้อยกว่าปริมาณสิ่งระเหยในยางดิบต่างๆไป ปริมาณสิ่งระเหยที่สูงจะทำให้ยางแท่งนั้นเกิดราได้ง่าย มีกลิ่นเหม็น ทำให้เกิดปัญหาต่อผู้นายางไปใช้ และยังทำให้เกิดปัญหาระหว่างกระบวนการผลิต เช่น การบดผสมยางภายใน (Banbury or Internal Mixer) ปริมาณสิ่งระเหยที่สูงจะทำให้ยางลื่นบดผสมกับสารเคมีอื่นได้ยาก นอกจากนี้การอบยางไม่แห้งยังเป็นการเอาเปรียบผู้ใช้อย่างเพราะเท่ากับขายน้ำรวมไปกับยาง

ปริมาณสิ่งระเหยในชั้นยางทดสอบคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ดังนี้

$$\% \text{สิ่งระเหย} = \frac{B - A}{A} \times 100$$

เมื่อ A = น้ำหนักตัวอย่างยางก่อนอบ (กรัม)

B = น้ำหนักตัวอย่างยางหลังอบ (กรัม)

การทดสอบปริมาณไนโตรเจน (Determination of Nitrogen Content)

ปกติไนโตรเจนในยางดิบจะอยู่ในรูปของโปรตีน ดังนั้นปริมาณไนโตรเจนจึงเป็นตัวบ่งชี้ปริมาณของสาร โปรตีน การวิเคราะห์ก็เพื่อให้ทราบว่าในยางดิบนั้นๆจะมีโปรตีนอยู่ปริมาณมาก

น้อยเพียงใด และถึงแม้ว่าไนโตรเจนจะมีปริมาณแตกต่างกันไปตามชนิดของโปรตีนก็ตาม โดยทั่วไปอนุโลมให้ โปรตีน = 6.25 x ปริมาณของไนโตรเจน แต่ปริมาณไนโตรเจนที่คำนวณได้โดยสูตรนี้ก็ไม่ได้เป็นตัวเลขเจาะจงแน่นอนของปริมาณโปรตีนเสมอไป อนึ่งน้ำยางที่แยกเอาเนื้อยางออกเหลือแต่หางน้ำยาง จะมีปริมาณไนโตรเจนสูง

การวิเคราะห์หาไนโตรเจนจากยาง จะใช้วิธี Semi - micro kjeldahl โดยทำให้ยางย่อยสลายด้วยการเผากับสารเร่งปฏิกิริยาและกรดกำมะถันเข้มข้น เพื่อเปลี่ยนสารประกอบไนโตรเจนไปเป็นแอมโมเนียมไฮโดรเจนซัลเฟต (ammonium hydrogen sulphate) แล้วเปลี่ยนสารนั้นให้อยู่ในรูปของต่าง นำไปกลั่นจะได้ก๊าซแอมโมเนีย ใช้กรดบอริกจับก๊าซแอมโมเนียที่กลั่นออกมาได้ แล้วนำสารละลายที่ได้ไปไตเตรทกับสารละลายมาตรฐานกรดกำมะถัน ก็สามารถคำนวณหาปริมาณไนโตรเจนได้

การกำหนดชนิดจำกัดไนโตรเจนในยางแท่งมีจุดมุ่งหมายเพื่อป้องกันไม่ให้ผู้ผลิตนำหางน้ำยาง (Skim - latex) มาผลิตยางแท่ง ในหางน้ำยางมีปริมาณไนโตรเจนสูง ซึ่งไนโตรเจนนี้จะอยู่ในรูปของโปรตีนและรวมทั้งสารที่ไม่ใช่เนื้อยาง (non rubber) หากปริมาณโปรตีนและสารที่ไม่ใช่เนื้อยางสูง จะมีผลทำให้เกิดความยุ่งยากเกี่ยวกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ คือ ทำให้เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เร็วขึ้น (fast cure) และผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงแก่ยาง สิ่งสำคัญที่สุด คือ เมื่อนำหางน้ำยางไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติทางพลวัต (Dynamic properties) เช่น สมบัติการกระดอน ไม่ดี เป็นต้น

การทดสอบค่าดัชนีความอ่อนตัว (Determination of Plasticity Retention Index - PRI)

ค่าดัชนีความอ่อนตัวของยาง คือ ค่าความต้านทานของยางคิบัติต่อการแตกหักของโมเลกุลที่อุณหภูมิสูงหรือต่อการออกซิเดชัน การทดสอบประกอบด้วยการหา Plasticity ของยางก่อนอบ (P_0) และหลังอบที่อุณหภูมิ $140 \pm 0.2^\circ\text{C}$ นาน 30 นาที (P_{30})

ดัชนีความอ่อนตัวของยาง ถ้าได้ค่าสูง แสดงว่ายางมีความต้านทานต่อการแตกหักของโมเลกุลสูง

นำค่ามัธยฐาน (Median) จากสามค่าของขึ้นทดสอบที่ไม่อบและอบ มาคำนวณหาค่าดัชนีความอ่อนตัวของยาง ดังนี้

$$PRI = (P_{30} / P_0) \times 100$$

เมื่อ PRI = ค่าดัชนีความอ่อนตัวของยาง (Plasticity Retention Index)

P_0 = ค่ามัธยฐานของค่า Plasticity ของยางที่ไม่อบ

P_{30} = ค่ามัธยฐานของค่า Plasticity ของยางที่อบแล้ว

การทดสอบสี (Determination of Colour)

สีของตัวอย่างยางแท่ง เป็นสมบัติที่สำคัญสมบัติหนึ่งของยางแท่งชั้น STR 5L เมื่อเปรียบเทียบสีของตัวอย่างยางแท่งกับสีมาตรฐาน Lovibond Comparator Discs "Rubber Latex Colours Amber Units" แล้วจะต้องไม่เกินขีดจำกัดที่กำหนดไว้ การที่ต้องกำหนดสีของยางแท่งไว้ ก็เพื่อประโยชน์ในการนำยางชนิดนั้นไปทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความใส หรือมีสีอื่นต่างๆ

การทดสอบความหนืดมูนนี่ (Determination of Mooney Viscosity - V_R)

ความหนืดเป็นสมบัติที่ระบุคุณภาพด้านการนำยางไปใช้ ค่าของความหนืดสัมพันธ์โดยตรงกับน้ำหนักโมเลกุลของยาง ยางที่มีความหนืดสูง หมายความว่า ยางนั้นมีน้ำหนักโมเลกุลมาก ยางที่มีความหนืดสูงจะแข็งมาก เมื่อนำไปใช้ ต้องใช้เวลานานในการบดให้ยางนิ่ม หรือให้ยางมีความหนืดลดลง ทั้งนี้เพราะโมเลกุลยางถูกตัดตอนให้สั้นลงขณะที่บดยาง เมื่อยางนิ่มตามต้องการแล้วจึงจะสามารถผสมสารเคมีต่างๆได้

$$\text{ความหนืดมูนนี่ (} V_R \text{)} = x \text{ ML (1+4) } 100 \text{ } ^\circ\text{C}$$

เมื่อ x = ค่าความหนืดที่อ่านได้จากเครื่อง Mooney Viscometer

M = Mooney

L = โรเตอร์ใหญ่ (ในกรณีที่ยางแข็งมากใช้โรเตอร์เล็ก S)

1 = เวลาที่ใช้ในการอุ่นยาง (นาที)

4 = เวลาที่โรเตอร์หมุนวัดความหนืด (นาที)

$100 \text{ } ^\circ\text{C}$ = อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การคำนวณปริมาณยางและสารเคมีสำหรับเครื่องบดผสมระบบปิด⁽³⁰⁾

การบดผสมยางด้วยเครื่องบดผสมระบบปิด จะต้องคำนวณปริมาณยางและสารเคมีที่จะใช้ให้เหมาะสม ไม่มากหรือน้อยเกินไป เนื่องจากเครื่องจะทำงานไม่ได้ประสิทธิภาพสูงสุด และสิ้นเปลืองพลังงาน

ปริมาณรวมของยางและสารเคมีที่เหมาะสมในการบดผสมสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Q = F \times V_c \times S$$

เมื่อ Q = ปริมาณรวมของยางและสารเคมี (กรัม)

F = Fill Factor (%) โดยทั่วไปจะใช้ประมาณ 60 - 90 % ของความจุห้องบดผสม

V_c = ปริมาตรห้องบดผสม ซึ่งเท่ากับ 3,500 ลูกบาศก์เซนติเมตร

S = ความถ่วงจำเพาะรวมของยางและสารเคมี

ปริมาณของแต่ละองค์ประกอบสามารถคำนวณได้จาก

ปริมาณของแต่ละองค์ประกอบ (กรัม) = M.F. x phr ของแต่ละองค์ประกอบ

เมื่อ M.F. = Multiplying factor ซึ่งมีค่าเท่ากับ Q / phr

phr = น้ำหนักต่อยาง 100 ส่วน (part per hundred rubber)

ตารางที่ ข.1 ตัวอย่างการคำนวณปริมาณยางและสารเคมีสำหรับเครื่องบดผสมระบบปิด

องค์ประกอบ	phr	ถ.พ.	ปริมาตร (g/cm ³)	น้ำหนัก (g)
STR 5L	100	0.92	108.69	1,400
Carbon black	45	1.80	25	630
Paraffinic oil	10	0.89	11.24	140
ZnO	10	5.57	1.79	140
Stearic Acid	2	0.85	2.35	28
TMQ	2	1.09	1.83	28
6PPD	2	1.09	1.83	28
CBS	1.2	1.30	0.92	16.8
TMTD	0.2	2.0	0.1	2.8
Sulphur	1.5	2.1	0.71	21
รวม	173.9		154.46	2,434.6

$$\begin{aligned} \text{ความถี่จำเพาะรวมของยางและสารเคมี (S)} &= \text{phr} / \text{ปริมาณรวมของยางและสารเคมี} \\ &= 173.9 / 154.46 = 1.13 \end{aligned}$$

ถ้า $F = 0.6$ และ $V_c = 3,500$ จะได้

$$\text{ปริมาณของรวมของยางและสารเคมี (Q)} = 0.6 \times 3,500 \times 1.13 = 2,373 \text{ กรัม}$$

$$\text{Multiplying factor (M.F.)} = 2,373 / 173.9 = 13.65 \approx 14$$

นำค่า M.F. ที่ได้มาคูณ phr ของแต่ละองค์ประกอบ ก็จะได้น้ำหนักเป็นกรัม ยกตัวอย่างเช่น

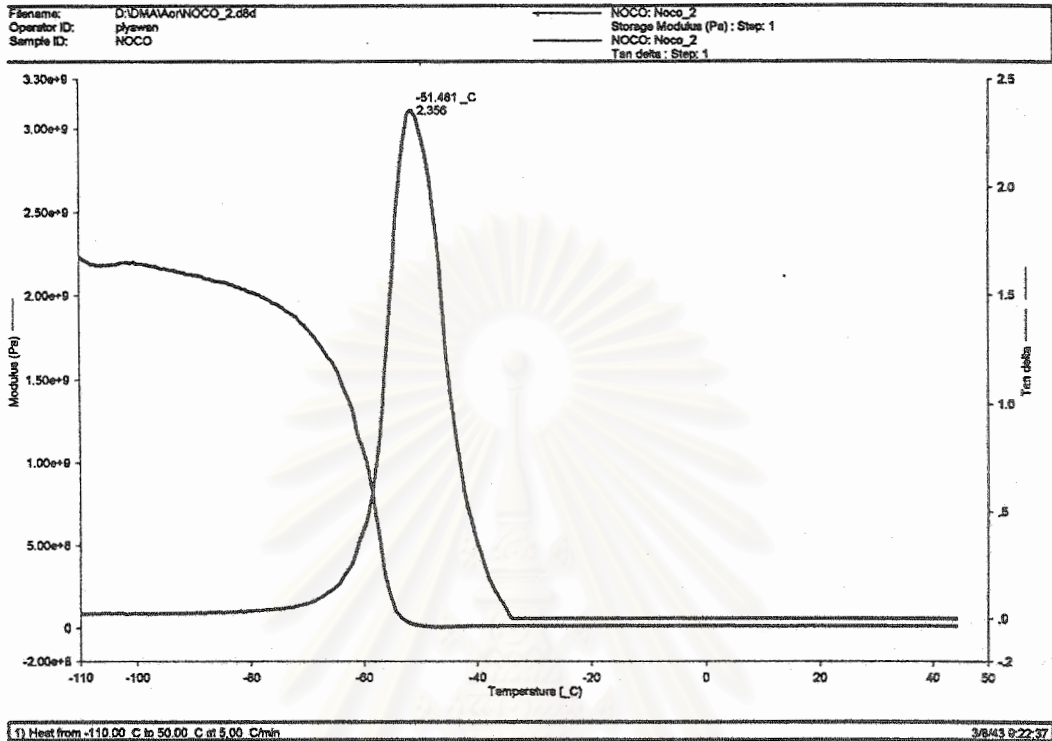
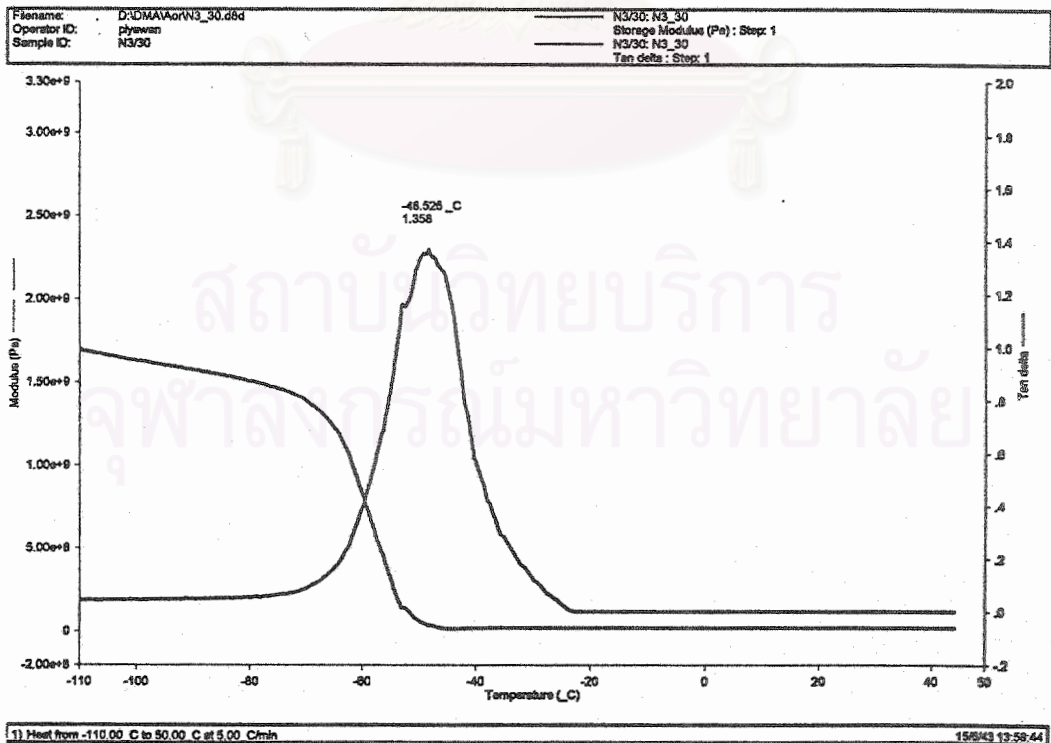
ปริมาณยาง 100 phr เท่ากับน้ำหนัก $100 \times 14 = 1,400$ กรัม เป็นต้น

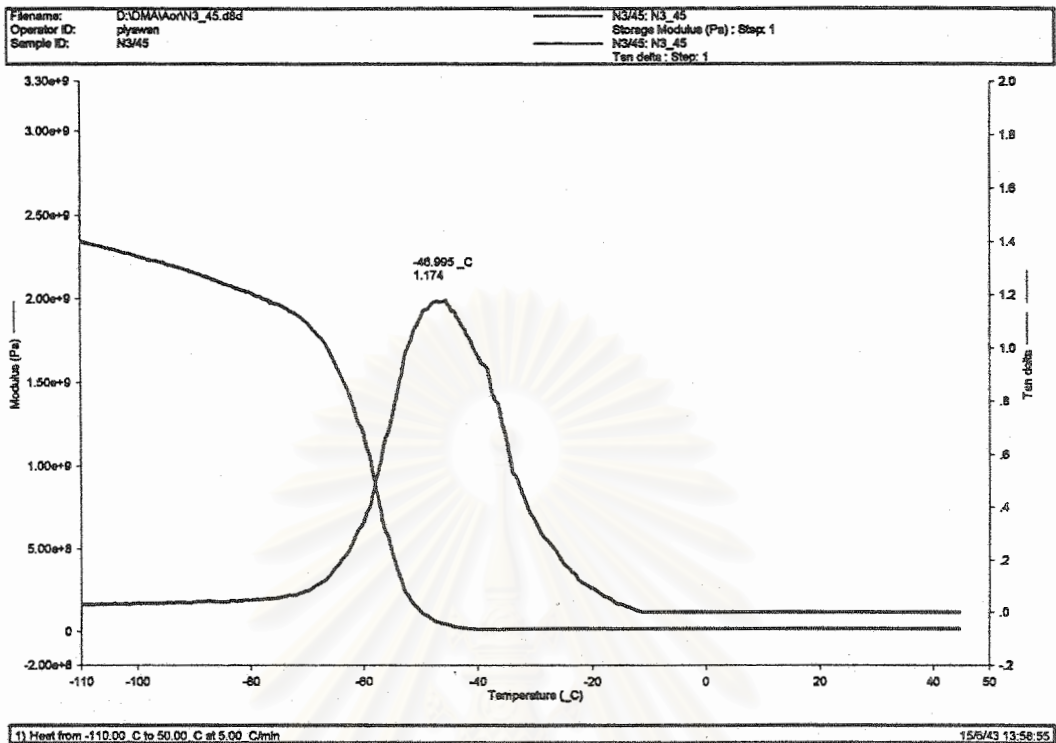


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

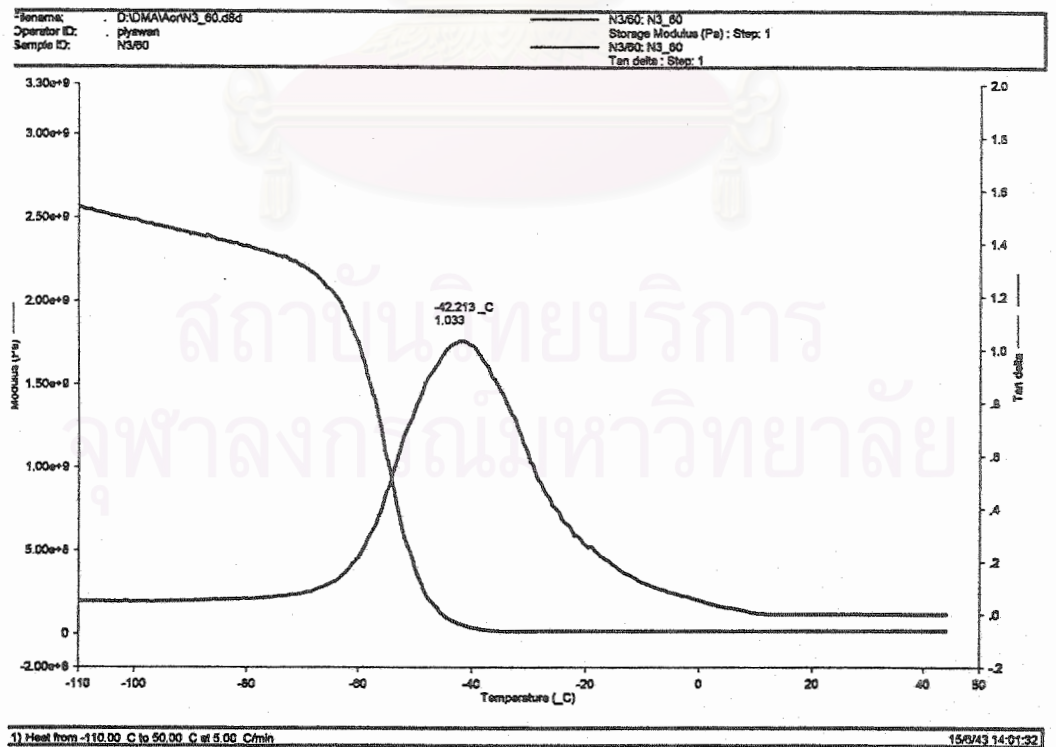
ภาคผนวก ค

ผลการทดลองสมบัติพลวัตเชิงกล

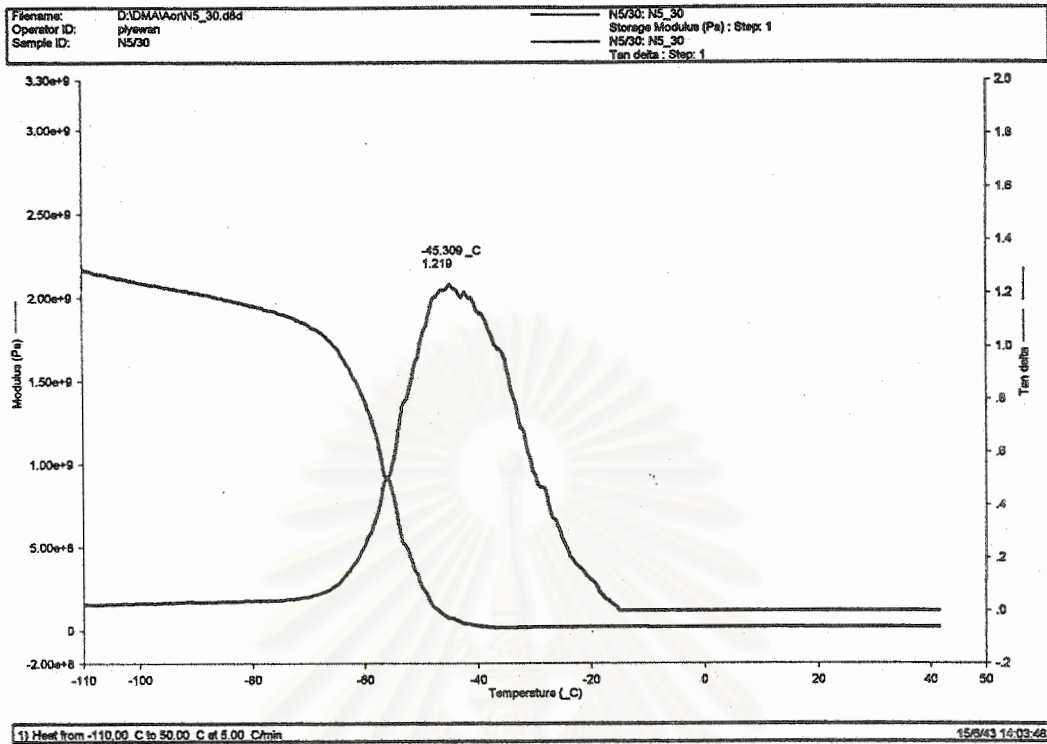
รูปที่ ค.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Tan δ และ E' กับอุณหภูมิของยางที่ไม่ใส่สารตัวเติมรูปที่ ค.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Tan δ และ E' กับอุณหภูมิของยางที่ใส่เขม่าดำ N330 30 phr



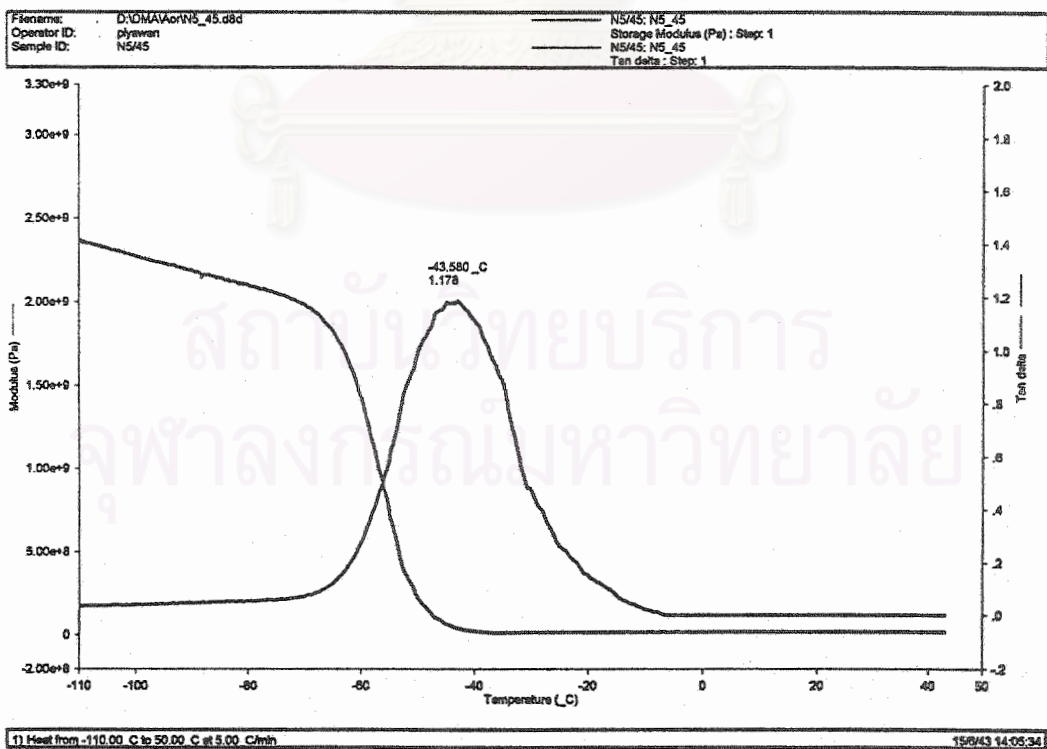
รูปที่ ค.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Tan δ และ E' กับอุณหภูมิของยางที่ใส่เขม่าดำ N330 45 phr



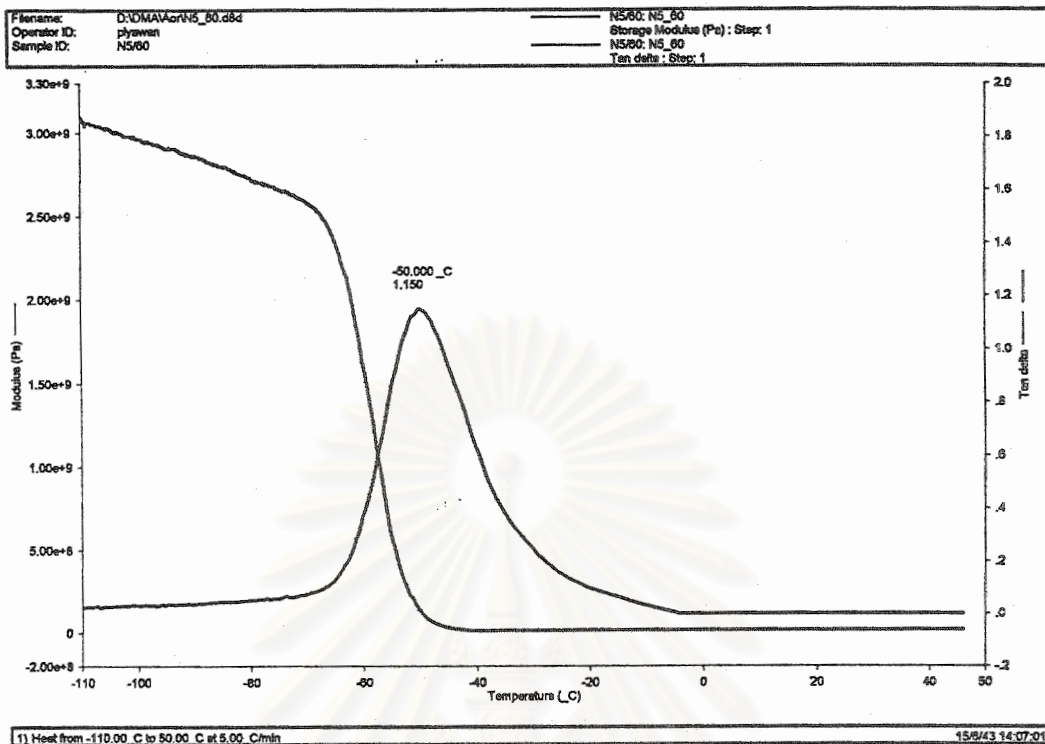
รูปที่ ค.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Tan δ และ E' กับอุณหภูมิของยางที่ใส่เขม่าดำ N330 60 phr



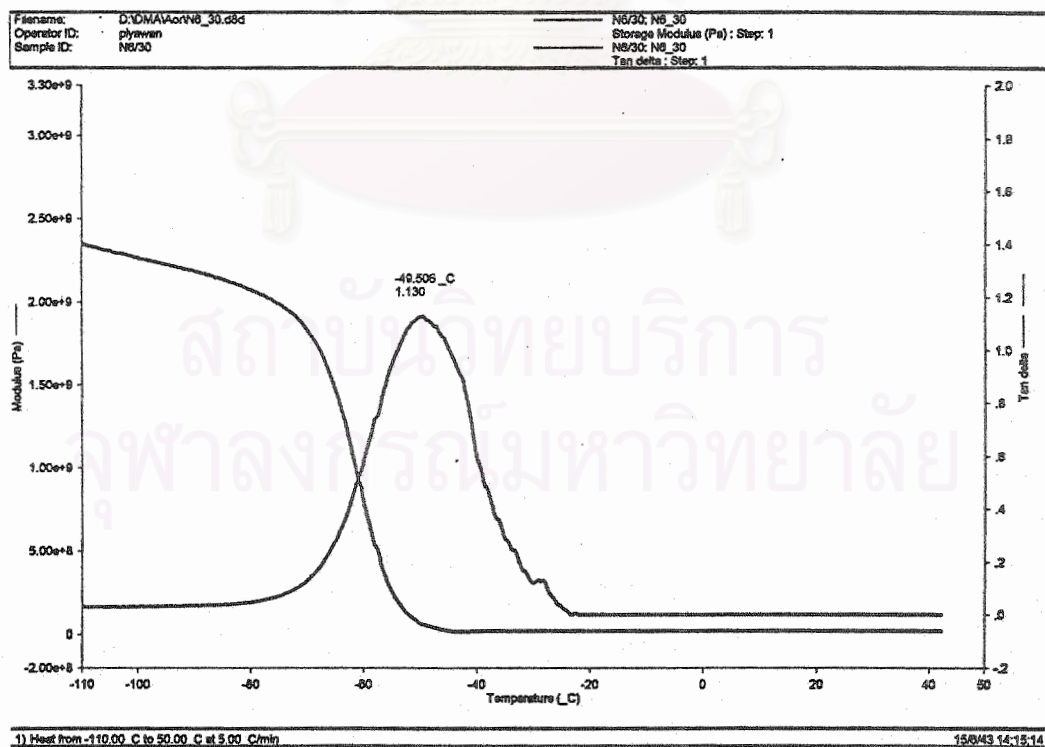
รูปที่ ๕.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Tan δ และ E' กับอุณหภูมิของยางที่ใส่เขม่าดำ N550 30 phr



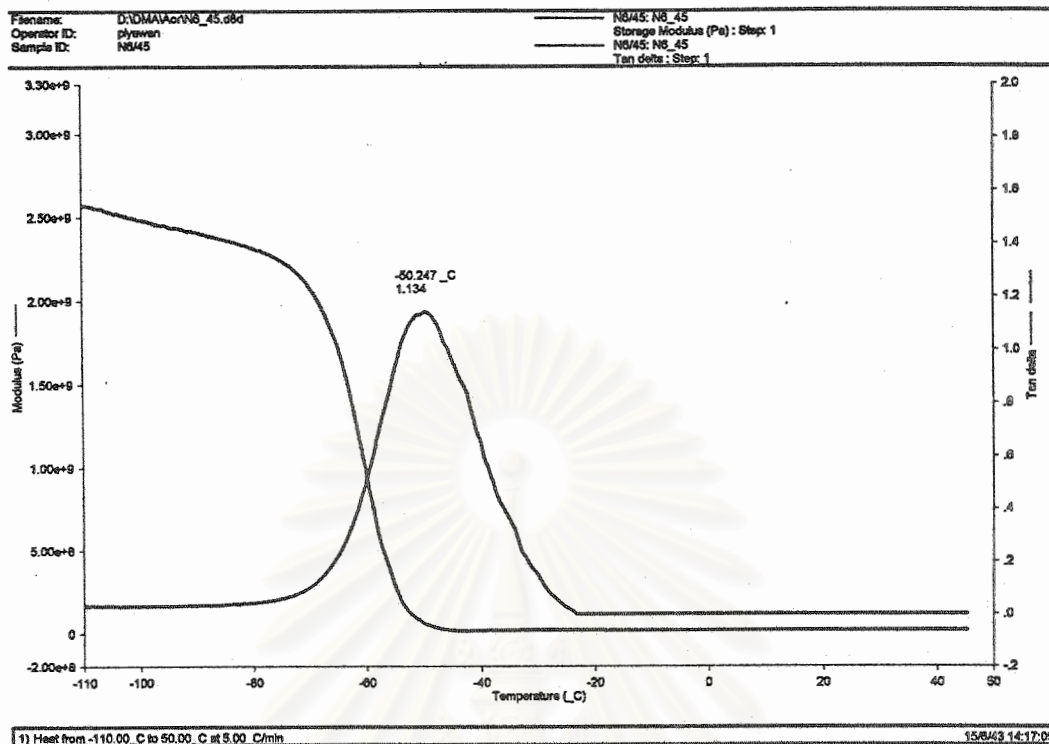
รูปที่ ๕.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Tan δ และ E' กับอุณหภูมิของยางที่ใส่เขม่าดำ N550 45 phr



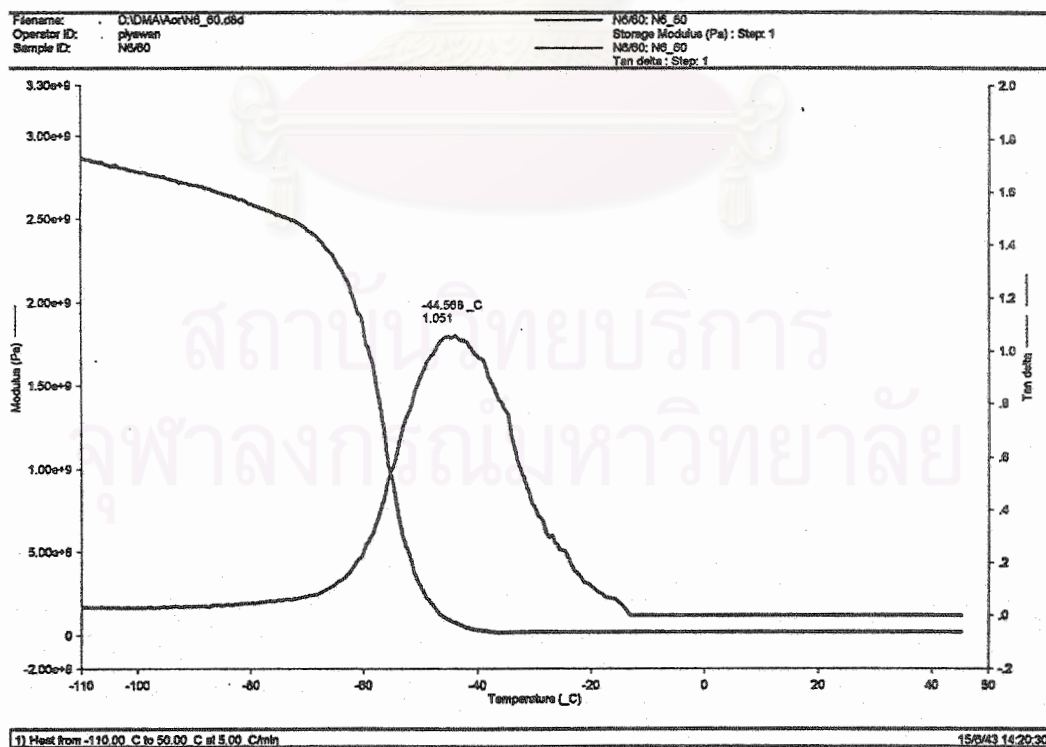
รูปที่ ค.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Tan δ และ E' กับอุณหภูมิของยางที่ใส่เขม่าดำ N550 60 phr



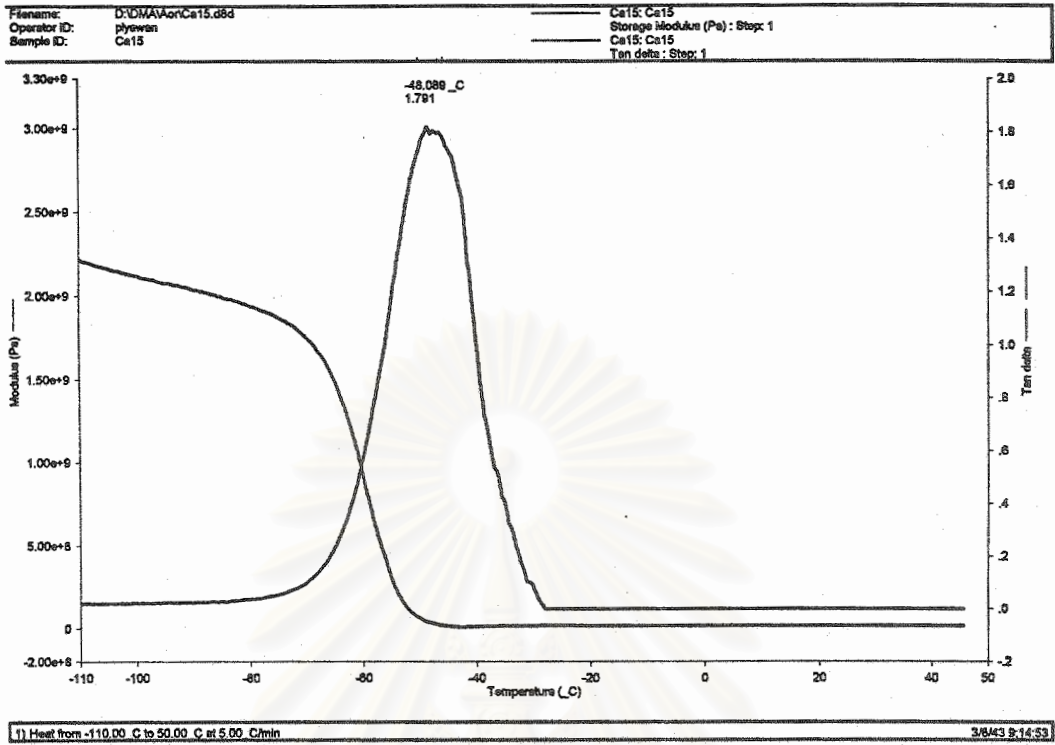
รูปที่ ค.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Tan δ และ E' กับอุณหภูมิของยางที่ใส่เขม่าดำ N660 30 phr



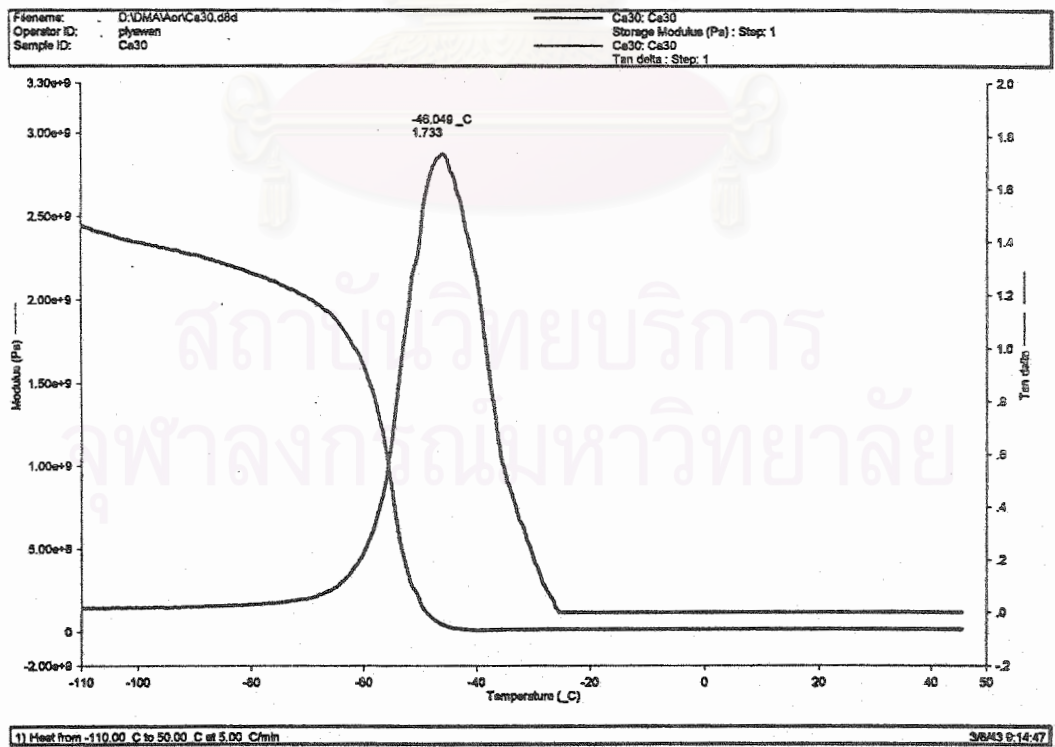
รูปที่ ค.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Tan δ และ E' กับอุณหภูมิของยางที่ใส่เขม่าดำ N660 45 phr



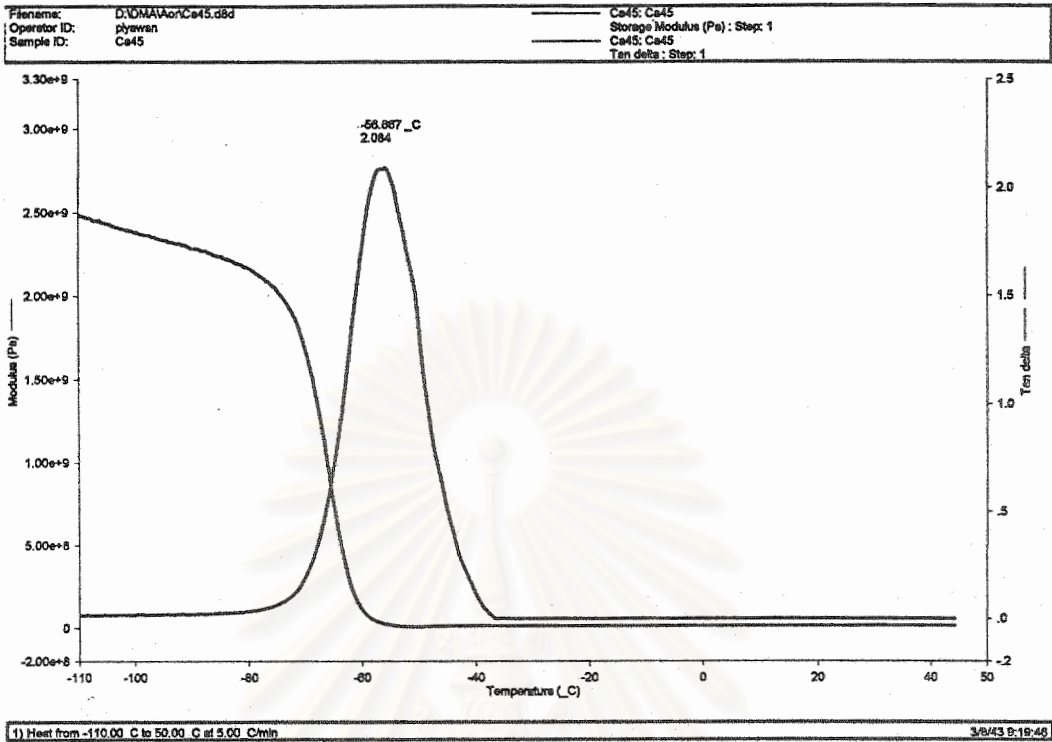
รูปที่ ค.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Tan δ และ E' กับอุณหภูมิของยางที่ใส่เขม่าดำ N660 60 phr



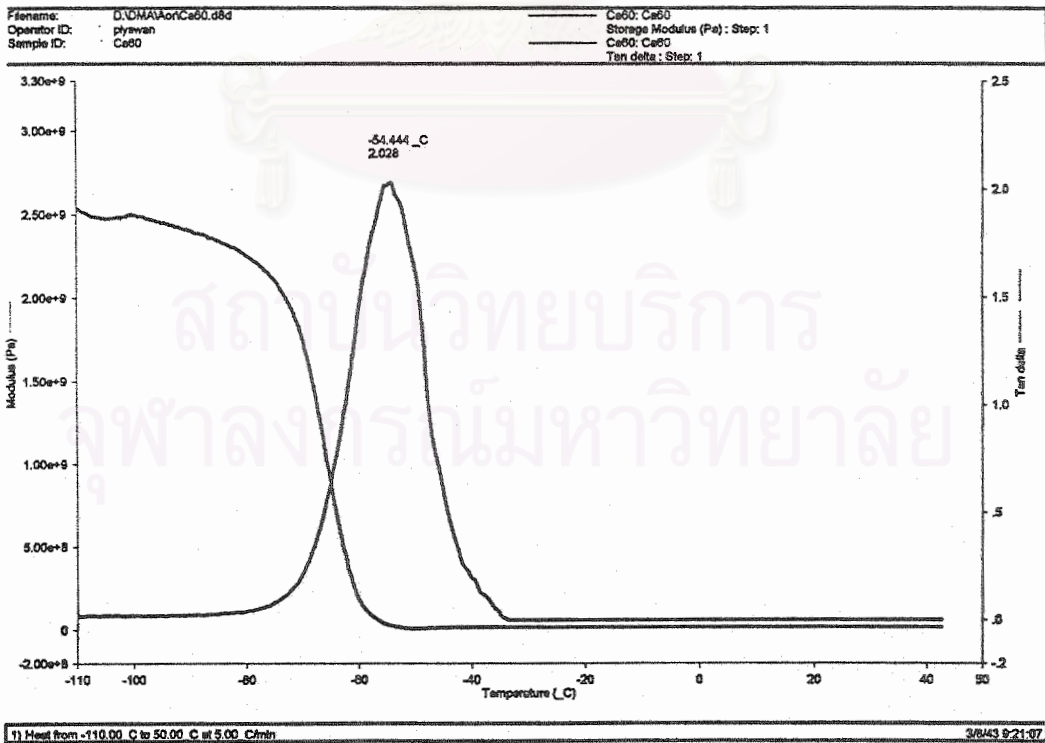
รูปที่ ค.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Tan δ และ E' กับอุณหภูมิของยางที่ใส่ CaCO₃ 15 phr



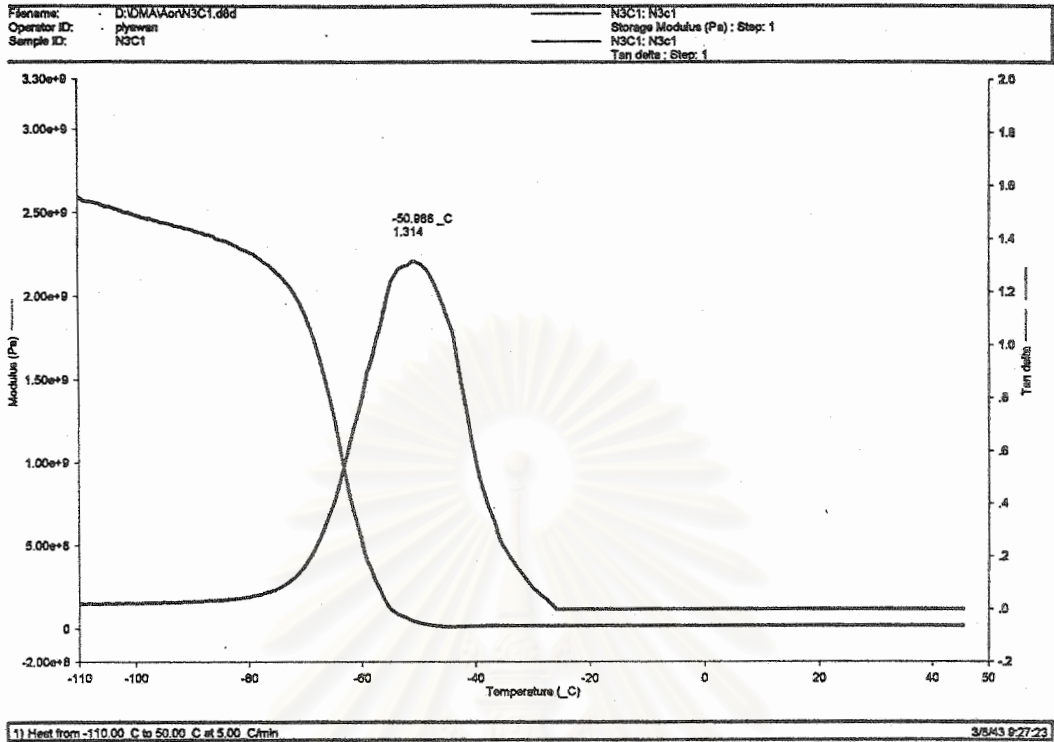
รูปที่ ค.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Tan δ และ E' กับอุณหภูมิของยางที่ใส่ CaCO₃ 30 phr



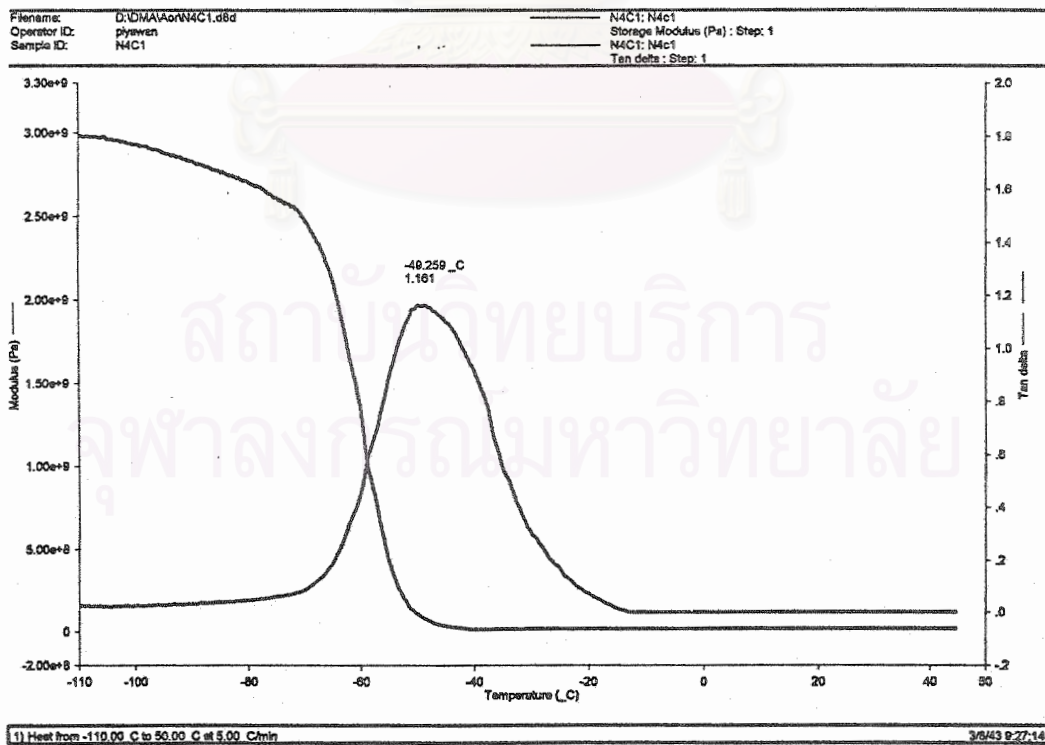
รูปที่ ค.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Tan δ และ E' กับอุณหภูมิของยางที่ใส่ CaCO₃ 45 phr



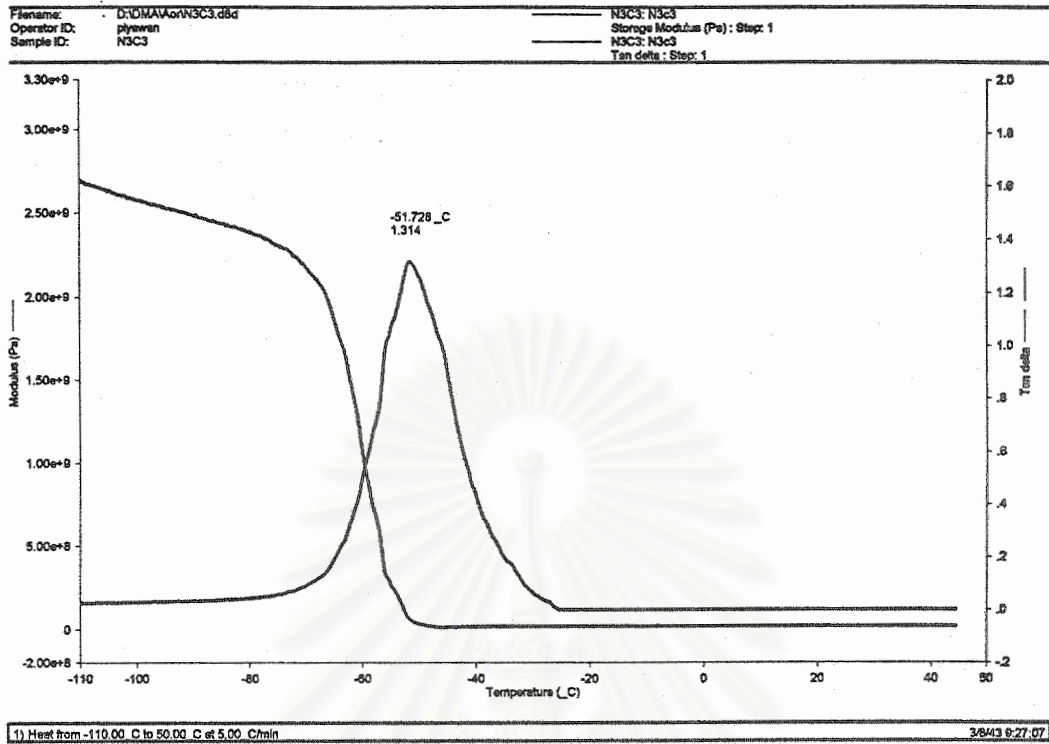
รูปที่ ค.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Tan δ และ E' กับอุณหภูมิของยางที่ใส่ CaCO₃ 60 phr



รูปที่ ค.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง Tan δ และ E' กับอุณหภูมิของยางที่ใส่เขม่าดำ/CaCO₃ 30/15 phr



รูปที่ ค.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง Tan δ และ E' กับอุณหภูมิของยางที่ใส่เขม่าดำ/CaCO₃ 45/15 phr



รูปที่ ค.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง Tan δ และ E' กับอุณหภูมิของยางที่ใส่เขม่าดำ/CaCO₃ 30/30 phr

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวโอบเอื้อ อัมวิทยา เกิดเมื่อวันที่ 12 มิถุนายน พ.ศ.2518 ที่กรุงเทพมหานคร
สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ และสิ่งทอ ภาควิชา
วัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540

เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
ประยุกต์ และเทคโนโลยีสิ่งทอ ในเดือนมิถุนายน ปีการศึกษา 2541 และสำเร็จการศึกษาในเดือน
ตุลาคม ปีการศึกษา 2543



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย