

การศึกษาอิทธิพลของขนาดและปริมาณเขม่าดำที่มีผลต่อสมบัติการคงรูปและสมบัติเชิงกลของยาง HNBR

Effect of Carbon Black on the Cure Characteristic and Mechanical Properties of HNBR

ณัฐพร มโนอิม และ เนตรชนก พันธุ

อ.ดร. สมเจตน์ พัชรพันธ์

ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โทร. 0-2942-8555 ต่อ 2121 โทรสาร 0-25493422 E-mail: fengsjpc@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณเขม่าดำที่มีต่อสมบัติการไหล สมบัติการคงรูปและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานยาง HNBR เมื่อผสมเขม่าดำชนิด N330 N550 และ N660 ในปริมาณ 60 และ 70 phr ตามลำดับ โดยสมบัติการไหลและการคงรูปที่ได้ศึกษา ได้แก่ ความหนืดมูนีและระยะเวลาในการคงรูปของยางที่ 90 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่สมบัติเชิงกลที่ได้ศึกษา ได้แก่ สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อการขีดสี ค่าความแข็ง รวมทั้งความต้านทานต่อการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด ซึ่งได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของชิ้นงานยางทั้งก่อนและหลังผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนและน้ำมันร้อน จากผลการทดลองพบว่า ค่าความหนืดมูนีเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณการผสมเขม่าดำ ในขณะที่เวลาเริ่มคงรูปและเวลาคงรูปของยางที่ 90 เปอร์เซ็นต์มีแนวโน้มลดลง และเมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลของชิ้นงานพบว่า เมื่อผสมเขม่าดำในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานยางมีความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดและความต้านทานต่อการขีดสีมีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตามการผสมเขม่าดำที่มีอนุภาคขนาดเล็กในปริมาณที่สูงเกินไป ทำให้ประสิทธิภาพการบดผสมลดลง ซึ่งส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานมีแนวโน้มคงที่หรือลดลง และนอกจากนี้ พบว่า เขม่าดำชนิด N550 ซึ่งมีโครงสร้างสูง เมื่อผสมเข้ากับยาง HNBR ทำให้ชิ้นงานยางมีค่ามอดูลัสเพิ่มสูงขึ้น และผลจากการนำชิ้นงานยางไปผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนและการบ่มเร่งด้วยน้ำมันร้อน พบว่า ชิ้นงานยาง HNBR มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการบ่มเร่ง เนื่องจากยาง HNBR มีสมบัติการทนต่อความร้อนที่สูง และชิ้นงานยางเกิดพันธะเชื่อมขวางต่อเนื่อง (Post curing) จากการวิจัยนี้ พบว่า เขม่าดำชนิด N550 ที่ปริมาณการผสม 60 phr มีความเหมาะสมต่อการนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์แหวนกันซึมน้ำมันที่ผลิตจากยาง HNBR

คำสำคัญ: ยาง HNBR, เขม่าดำ, การบ่มเร่งด้วยความร้อน, การบ่มเร่งด้วยน้ำมันร้อน

Abstract

The objective of this study was to investigate the effects of type and content of carbon black on the rheological and mechanical behaviors of HNBR. The HNBR was compounded with different types of carbon black (N330, N550, and N660) ranging from 60 and 70 phr. The HNBR compounds were characterized with respect to Mooney viscosity and 90% cure time (t_{90}), while the mechanical properties of HNBR vulcanizates were investigated according to the tensile, tear, abrasion, hardness, and compression set, respectively. In addition, the heat and hot oil resistances were also tested. It can be seen that the Mooney viscosity of HNBR compounds increased, while scorch and cure time tended to decrease with increasing carbon black content. In the case of N660, the tensile strength of HNBR vulcanizates also increased, whereas tear and abrasion resistance tended to decrease with increasing carbon black content. However, in the case of N330, it was found that the higher the carbon black loading, the lower the mixing efficiency and thus the lower mechanical strength of cured rubber. An increase of modulus of HNBR was found when using the high structure grade of N550. In addition, it can be seen that the mechanical strength of HNBR was higher than that of un-aged HNBR. This was attributed to the high temperature resistance of HNBR and post curing effect occurred during the aging test. From the results obtained in this work, it can be concluded that the N550 grade and 60 phr of carbon black was suitable for HNBR when using as the Oil-Ring applications.

Keywords: HNBR, Carbon black, Thermal aging, Thermal-oil aging

1. บทนำ

ยางไฮโดรเจนคอะครีโลไนไตรล์บิวตาไดอิน (HNBR) เป็นยางสังเคราะห์ชนิดหนึ่งที่มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน รังสีที่มีพลังงานสูง และโอโซนที่สูงมาก เนื่องจากมีหมู่ไซยาไนด์ (-CN) อยู่ในโครงสร้างของโมเลกุล ทำให้ยางชนิดนี้มีข้อเด่นในด้านการทนต่อน้ำมันได้ดี ในขณะที่ยังคงมีข้อเสียในเรื่องของราคาที่สูงมาก จึง

ต้องการแนวทางในการลดต้นทุนของการผลิตด้วยวิธีการผสมสารตัวเติมลงไปเป็นอย่างดี โดยที่ไม่ทำให้สมบัติเชิงกลของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไปมากนัก สารตัวเติมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยาง คือ เชม่าดำ ซึ่งมีราคาถูก รวมทั้งสามารถปรับปรุงสมบัติการคงรูปและสมบัติเชิงกลของยางให้ดีขึ้น (2543) ได้ศึกษาศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคและปริมาณสารตัวเติมเหล่านี้ต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานยาง พบว่า ชิ้นงานยางที่ผสมเชม่าดำที่มีอนุภาคขนาดเล็ก ทำให้สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางดีขึ้น Demirhan *et al* (2007) ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของยางสไตรีนบิวตาไดอิน (SBR1502) โดยใช้เชม่าดำชนิด N220 N326 N330 N347 N550 และ N660 เป็นสารตัวเติม พบว่าเมื่อปริมาณเชม่าดำเพิ่มขึ้น ความต้านทานแรงดึง มอดูลัสที่ 300% และระยะยืดเพิ่มสูงขึ้นจนถึงค่าสูงสุด หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณเชม่าดำต่อไปอีก พบว่า ค่าดังกล่าวมีแนวโน้มลดลง Rattanasom and Prasertsri (2009) พบว่า เมื่อผสมเชม่าดำลงไปทำให้เวลาในการคงรูปของยางลดลงกว่าการผสมแคลเซียมคาร์บอเนต และเชม่าดำประเภท N330 ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและต้านทานการฉีกขาดได้มากที่สุด อย่างไรก็ตามเชม่าดำที่ใช้ในการผสมเข้ากับยางนั้นมีหลากหลายชนิด ขึ้นอยู่กับ โครงสร้างและขนาดของอนุภาค รวมทั้งกรรมวิธีในการผลิต ซึ่งส่งผลต่อสมบัติการคงรูปและสมบัติเชิงกล ทำให้ได้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ยางที่ผสมกับเชม่าดำที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาอิทธิพลของอนุภาคและปริมาณของเชม่าดำที่มีต่อสมบัติการคงรูปและสมบัติเชิงกลของยาง HNBR เพื่อนำไปพัฒนากระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางต่อไป

2. อุปกรณ์และวิธีการ

ในงานวิจัยนี้ใช้ยาง HNBR Zetpol 2030L ที่มีปริมาณพันธะคู่ประมาณ 9 เปอร์เซ็นต์ บริษัท ZEON CORP. เชม่าดำชนิด N330 N550 และ N660 บริษัท ไทยคาร์บอนแบล็ค จำกัด มหาชน ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) โดยมีโคคิวบิลเพอร์ออกไซด์ 40% (DCP 40G) เป็นสารคงรูประบบเพอร์ออกไซด์ Trimethylolpropane Trimethylacrylate50 (TMPTMA50G) เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยา และน้ำมันไดออกทิลพทาเลท (DOP) เป็นสารช่วยในกระบวนการผลิต โดยมีสัดส่วนการผสมดังแสดงในตารางที่ 1 นำยางคอมพาวด์ไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 170°C จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆ ได้แก่ สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM D573 สมบัติความต้านทานการฉีกขาด ตามมาตรฐาน ASTM D624 สมบัติความต้านทานต่อการขัดสี ตามมาตรฐาน ASTM D395-99 สมบัติความต้านทานต่อการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด ตามมาตรฐาน ASTM D395-99 และนอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานยางภายหลังการบ่มด้วยความร้อน ตามมาตรฐาน ASTM D573 และการบ่มด้วยความร้อนตามมาตรฐาน ASTM D471-98 จากนั้นนำผลการทดสอบไปเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการบ่มด้วยความร้อน

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของยางคอมพาวด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

Ingredients	Contents(phr*)					
	Mix 1	Mix 2	Mix 3	Mix 4	Mix 5	Mix 6
HNBR	100	100	100	100	100	100
ZnO	5	5	5	5	5	5
N330	60	70	-	-	-	-
N550	-	-	60	70	-	-
N660	-	-	-	-	60	70
DOP	8	8	8	8	8	8
DCP40G	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
TMPTMA50G	12	12	12	12	12	12

*phr = part per hundred of rubber by weight

3. ผลการดำเนินโครงการและวิจารณ์

3.1. สมบัติของยางคอมพาวด์ที่ผสมเชม่าดำ

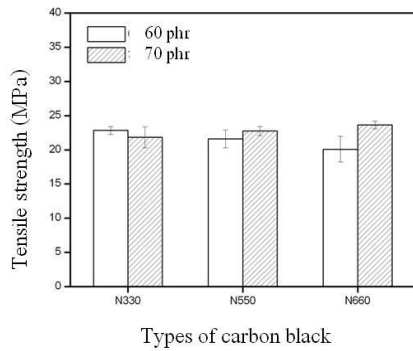
เมื่อพิจารณาค่าความหนืดมูนนี้ของยางผสมเชม่าดำ พบว่า เมื่อปริมาณเชม่าดำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนืดมูนนี้เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่เวลาเริ่มคงรูปและเวลาในการคงรูปลดลง ดังผลการทดลองในตารางที่ 2 ตารางที่ 2 อิทธิพลของชนิดและปริมาณเชม่าดำที่มีต่อสมบัติการคงรูปของยาง HNBR

Characteristic properties	60 phr			70 phr		
	N330	N550	N660	N330	N550	N660
Mooney viscosity	56.23	84.21	78.77	90.63	101.06	89.98
Cure time (min)	6.43	6.34	6.31	6.23	6.19	6.37
Scorch time (min)	0.68	0.63	0.58	0.58	0.55	0.59

3.2. อิทธิพลของชนิดและปริมาณเชม่าดำที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยาง HNBR

เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานแรงดึงของยางคอมพาวด์ที่ผสมเชม่าดำชนิด N550 และชนิด N660 ดังรูปที่ 1 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเชม่าดำ ส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเชม่าดำมีอนุภาคขนาดเล็ก จึงเกิดอันตรกิริยากับสายโซ่โมเลกุลยางสูง (Chain flexibility) ลดลง (Chuayujit, 2002) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาของคอมพาวด์ที่ผสมกับเชม่าดำชนิด N330 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเชม่าดำ ชิ้นงานมีความแข็งแรงลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องมาจากเชม่าดำชนิด N330 มีอนุภาคขนาดเล็ก บดผสมเข้ากับเนื้อยางได้ ประสิทธิภาพในการเสริมแรงจึงลดลง และเมื่อพิจารณาค่าความต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานยางที่ผสมกับเชม่าดำแต่ละชนิด ที่ปริมาณการผสม 60 และ 70 phr พบว่าการบดผสมที่ปริมาณ 60 phr ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานยางที่ผสมเชม่าดำชนิด N330 N550 และ N660 มีแนวโน้มลดลงตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากเชม่าดำที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงลดลง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณการผสม เป็น 70 phr ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเชม่าดำชนิด N330 N550 และ N660

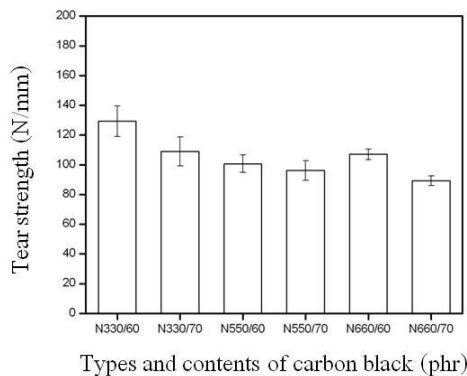
มีแนวโน้มที่ดีขึ้น เมื่ออนุภาคของเขม่าดำมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งมีสาเหตุมาจากการบดผสมเขม่าดำที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ สามารถเข้ากับเนื้อยางได้ง่ายและมีแตกตัวและการกระจายตัวที่ดีกว่าการบดผสมเขม่าดำที่มีอนุภาคขนาดเล็ก



รูปที่ 1 ความต้านทานแรงดึงของยาง HNBR ผสมเขม่าดำแต่ละชนิดในปริมาณที่ต่างกัน

3.3. อิทธิพลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานการฉีกขาดของยาง HNBR

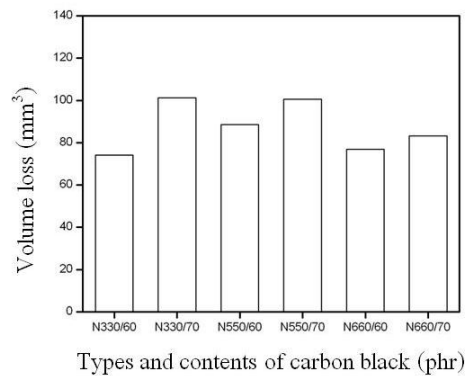
เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณเขม่าดำที่บดผสมในปริมาณ 60 และ 70 phr ดังรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่า ค่าความต้านทานการฉีกขาดมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้น เนื่องจากการบดผสมเขม่าดำที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลยางเคลื่อนตัวได้ยากขึ้นดังที่ได้กล่าวไปแล้ว โดยในขณะทดสอบ แรงถูกถ่ายโอนไปยังสายโซ่โมเลกุลยางลดน้อยลง ประกอบกับเกิดการสะสมพลังงานไว้ที่บริเวณร่องบากของชิ้นงานทดสอบส่งผลให้ชิ้นงานทดสอบฉีกขาดได้ง่าย เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของเขม่าดำแต่ละชนิด พบว่า เขม่าดำชนิด N330 มีความสามารถในการต้านทานต่อการฉีกขาดสูงที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเขม่าดำชนิด N550 และ N660



รูปที่ 2 ความต้านทานการฉีกขาดของยาง HNBR ผสมเขม่าดำแต่ละชนิดในปริมาณที่ต่างกัน

3.4. อิทธิพลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานการขัดสีของยาง HNBR

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณเขม่าดำที่ส่งผลต่อความต้านทานต่อการขัดสี ดังรูปที่ 3 พบว่า ค่าความต้านทานต่อการขัดสีลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำจาก 60 เป็น 70 phr ซึ่งมีสาเหตุมาจากการบดผสมเขม่าดำในปริมาณที่สูงขึ้น ประสิทธิภาพการบดผสมลดลง และพบว่าเขม่าดำชนิด N330 ที่ปริมาณการบดผสม 60 phr มีการทนต่อการขัดสีที่ดีที่สุด เนื่องเขม่าดำชนิด N330 มีอนุภาคขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้นเป็น 70 phr แสดงให้เห็นว่าอนุภาคเขม่าดำชนิด N330 มีอัตราการสึกหรอที่เพิ่มสูงมากที่สุด ซึ่งมีสาเหตุจากการบดผสมยากกับเขม่าดำชนิด N330 ที่ 70 phr มีประสิทธิภาพการบดผสมที่ลดลง ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 3.2 และเมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อการขัดสีของเขม่าดำทั้ง 3 ชนิด พบว่า การบดผสมเขม่าดำชนิด N550 มีความต้านทานต่อการขัดสีต่ำที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากเขม่าดำชนิด N550 มีโครงสร้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับเขม่าดำชนิด N330 และ N660 ซึ่งเขม่าดำที่มีโครงสร้างสูงนั้นสามารถยุบตัวได้มากกว่า (พงษ์ธร, 2550) ทำให้ที่บริเวณผิวสัมผัสกับเครื่องทดสอบ มีความเสียดทาน (Friction) เกิดขึ้นสูง ดังนั้นจึงมีการสูญเสียเนื้อยางในปริมาณมากกว่ายางที่บดผสมกับเขม่าดำที่มีโครงสร้างต่ำ

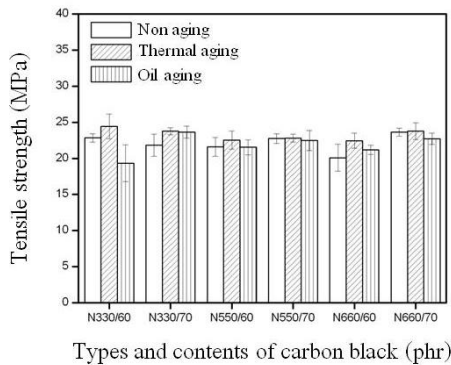


รูปที่ 3 การต้านทานการขัดสีของยาง HNBR ผสมเขม่าดำแต่ละชนิดในปริมาณที่ต่างกัน

3.5. อิทธิพลของปริมาณและขนาดอนุภาคของเขม่าดำที่มีต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ของยาง HNBR ที่ผ่านการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนและน้ำมันร้อน

เมื่อนำชิ้นงานยางมาผ่านการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนและผ่านการบ่มเร่งสภาวะด้วยน้ำมันร้อนไปทดสอบความต้านทานแรงดึงแล้วนำไปเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการบ่มเร่ง พบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการบ่มเร่งมีความต้านทานแรงดึงสูงกว่าชิ้นงานยางที่ไม่ผ่านการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อน ดังรูปที่ 4 เนื่องจากชิ้นงานยางที่ผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนเกิดการเชื่อมขวางต่อเนื่องหลังจากการคงรูป (Post curing) แต่เมื่อพิจารณาในกรณีการบ่มเร่งด้วยความร้อนและการบ่มเร่งด้วยน้ำมัน

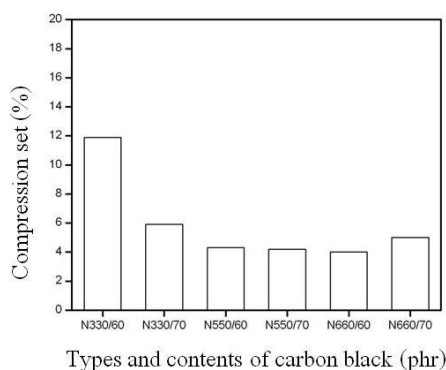
ร้อน พบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานที่บ่มเร่งด้วยน้ำมันร้อนมีแนวโน้มต่ำกว่าชิ้นงานที่ผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเสื่อมสภาพของชิ้นงานยาง เนื่องจากการบ่มเร่งสภาวะด้วยน้ำมันร้อน



รูปที่ 4 ค่าความต้านทานแรงดึงของยาง HNBR ผสมเขม่าดำแต่ละชนิดในปริมาณที่ต่างๆกัน

3.6. อิทธิพลของปริมาณและขนาดอนุภาคของเขม่าดำที่มีต่อความต้านทานการยุบตัว

จากรูปที่ 5 เมื่อพิจารณาที่เขม่าดำชนิด N550 และ N660 พบว่า มีค่าความต้านทานการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดสูงและมีค่าไม่ต่างกันมากนัก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก มีปริมาณความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางสูงเมื่อนำไปทดสอบความต้านทานการกดอัด ปริมาณพันธะเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นหลังจากการทดสอบจึงไม่แตกต่างกันมาก ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การคืนรูปหลังการกดอัดสูง เมื่อพิจารณาที่เขม่าดำชนิด N330 พบว่า การเพิ่มปริมาณจาก 60 phr เป็น 70 phr มีค่ายุบตัวจากแรงอัดลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งผู้วิจัยคาดว่าเป็นผลมาจากความแตกต่างของความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางมีค่าน้อยกว่าที่ 70 phr



รูปที่ 5 ความต้านทานการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของยาง HNBR ผสมเขม่าดำแต่ละชนิดในปริมาณที่ต่างๆกัน

4. สรุปผล

อิทธิพลของชนิดและปริมาณเขม่าดำที่ส่งผลต่อสมบัติการคงรูปและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานยาง HNBR ทั้งก่อนและหลังบ่มเร่งด้วย

ความร้อน ซึ่งผลที่ได้จากการวิจัยพบว่า ปริมาณเขม่าดำที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความเหนียวเพิ่มขึ้น เวลาเริ่มคงรูปและเวลาคงรูปลดลง จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกล แสดงให้เห็นว่า เมื่อผสมเขม่าดำในปริมาณที่สูงขึ้น ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ในขณะที่ความสามารถในการยืดตัว และความต้านทานการฉีกขาดมีแนวโน้มลดลง ความต้านทานต่อการขีดสี และเมื่อนำชิ้นงานยาง HNBR ไปผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนและน้ำมันร้อน พบว่าชิ้นงานยาง HNBR มีความแข็งแรงสูงขึ้น เนื่องจากเกิด post curing ซึ่งจากผลการวิจัยสรุปได้ว่าชนิดและปริมาณเขม่าดำที่มีความเหมาะสมต่อการนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ยาง HNBR คือ เขม่าดำชนิด N550 ในปริมาณ 60 phr

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และคุณวัลลภ หาญณรงค์ชัย จากบริษัท ไฮควอลซิล จำกัด สำหรับทุนการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งขอขอบคุณสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ สำหรับความอนุเคราะห์ด้านเครื่องมือทดสอบยางคอมพาวด์และยางคงรูป

เอกสารอ้างอิง

พงษ์ธร แซ่อู๋. 2550. สารเคมียาง. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ(สวทช.), ปทุมธานี.

โอบเอื้อ อิมวิทยา. 2543. ผลของขนาดอนุภาคและปริมาณสารตัวเติมต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่ผ่านการวัลคาไนซ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Chuayjuljit, S., A. Imvittaya, N. Na-Ranong and P. Potiyaraj. 2002. Effect of particle size and amount of carbon black and calcium carbonate on curing characteristics and dynamic mechanical properties of natural rubber. **Journal of Metals, Materials and Minerals**.12(1): 51-57.

Demirhan, E., F. Kandemirli and M. Kandemirli. 2007. The effects of furnace carbon blacks on the mechanical and the rheological properties of SBR1502 styrene butadiene rubber. **Materials and Design**. 28: 1326–1329.

Rattanasom, N. and S. Prasertsri. 2009. Relationship among mechanical properties, heat ageing resistance, cut growth behavior and morphology in natural rubber: partial replacement of clay with various types of carbon black at similar hardness level. **Polymer Testing**. 28(2009): 270-276.