



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาหาแนวทางการลดปริมาณซิงค์ออกไซด์ในสูตรยางธรรมชาติ

โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อาชีวัน แกสมาน และคณะ

ธันวาคม 2547

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาหาแนวทางการลดปริมาณซิงค์ออกไซด์ในสูตรยางธรรมชาติ

คณะผู้วิจัย	สังกัด
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อาชีชัน แกสมาน	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
นายเอกชัย อินทสุวรรณโณ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร. เจริญ นาคะสรรค์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชุดโครงการ วิจัยแห่งชาติยางพารา (SPR)

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานฉบับนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	i
Abstract	ii
หน้าสรุปโครงการ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	2
ทางเลือกและแนวทางการแก้ปัญหา	2
แนวทางการดำเนินงานวิจัย	3
บทสรุปของผู้บริหาร	4
2. วิธีการทดลอง	7
2.1 การเตรียมยางผสมสารเคมี	7
2.2 การทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์	10
2.3 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ	11
3. ผลการทดลองและวิจารณ์	
3.1 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์	16
3.2 อิทธิพลของชนิดสารตัวเร่งต่อการทำหน้าที่ของซิงค์ออกไซด์ โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์	27
3.3 อิทธิพลของสารตัวเติมเมื่อแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์	38
3.4 อิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์เมื่อแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์	51
4. สรุปผลการทดลอง	65
5. เอกสารอ้างอิง	67
ภาคผนวก	69

การศึกษาหาแนวทางการลดปริมาณซิงค์ออกไซด์ในสูตรยางธรรมชาติ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาแนวทางการลดปริมาณการใช้ซิงค์ออกไซด์ในสูตรยางที่ใช้ยางธรรมชาติ เนื่องจากสารเคมีดังกล่าวมีรายงานว่าส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กในน้ำ โดยสนใจศึกษาอิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อสูตรยางผสมสารเคมีที่มีตัวแปรต่างๆ คือ ชนิดของสารตัวเร่ง (ZDEC, TMTD, MBT, MBTS และ CBS) ชนิดของสารตัวเติม (เขม่าดำ ซิลิกา เคลย์ และแคลเซียมคาร์บอเนต) ระบบการวัลคาไนซ์ (ระบบปกติ เชมิ-อีวี และอีวี) ในการวิจัยได้นำยางผสมสารเคมีไปทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ หลังจากนั้นนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบ และทดสอบสมบัติทางกายภาพ จากการทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ พบว่า การเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ในสูตรยางที่ใช้สารตัวเร่ง สารตัวเติม และระบบการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ ทำให้ปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์เกิดได้เร็วขึ้น รวมทั้งเกิดระดับการเชื่อมโยงในยางได้มากขึ้น ปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับสมบัติด้านการวัลคาไนซ์อยู่ในช่วง 2 ถึง 3 phr จากการทดสอบสมบัติทางกายภาพ พบว่า การเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ ทำให้ค่า 300 % โมดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง ความแข็ง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความกระด้างตัวเพิ่มมากขึ้น ส่วนสมบัติด้านระยะยืดสูงสุด ความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นในยางมีค่าลดลง ปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่ทำให้ได้สมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 2 ถึง 3 phr ส่วนสมบัติด้านความต้านทานต่อการสึกหรอของยาง ควรใช้ซิงค์ออกไซด์ไม่น้อยกว่า 3 phr

Reduction of zinc oxide content in natural rubber compounding formulation

Abstract

Reduction of zinc oxide content in natural rubber compound was investigated in this work. There was a report on toxicity of soluble zinc compounds on aquatic organism. The main interest was the efficiency of zinc oxide on curing and vulcanizates properties of the various types of the rubber compounds. Various types of additives such as accelerators (i.e., ZDEC, TMTD, MBT, MBTS and CBS); and filler (i.e., carbon black, silica, clay and calcium carbonate) were studied. Furthermore, different curing systems (i.e., conventional, semi-EV and EV) were performed. Cure characteristics of the natural rubber compounds was performed using ODR2000. Specimen was later prepared by compression molding and mechanical properties were also tested. It was found that rate of vulcanization reaction and state of cure increased with increasing zinc oxide content. The optimum level of zinc oxide used for an optimum curing properties was found at 2-3 phr. Furthermore, modulus (at 300 % elongation), tensile strength, hardness, tear strength and resilience also increased with increasing zinc oxide content. However, elongation at break and heat build-up decreased. Therefore, zinc oxide at 2-3 phr in the NR formulation gave optimum mechanical properties. For the best abrasion resistance the level of zinc oxide was approximately 3 phr.

หน้าสรุปโครงการ

1. **ชื่อโครงการ** การศึกษาหาแนวทางการลดปริมาณซิงค์ออกไซด์ในสูตรยางธรรมชาติ
คำสำคัญ ซิงค์ออกไซด์ ยางธรรมชาติ สมบัติการวัลคาไนซ์ สมบัติทางกายภาพ
Research title Reduction of zinc oxide content in natural rubber compounding formulation
keywords Zinc oxide, Natural Rubber, Cure characteristics, Physical properties
2. **ชื่อหัวหน้าโครงการ** หน่วยงานสังกัด ที่อยู่ หมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ E-mail
ชื่อ-สกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์อ้อชีชัน แกสมาน
หน่วยงาน ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ที่อยู่ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี
โทรศัพท์/โทรสาร 0-7331-3930-50 ต่อ 1866 / 0-7333-1099
E-mail kazizon@bunga.pn.psu.ac.th
3. **นักศึกษาหรือนักวิจัย** หน่วยงานสังกัด ที่อยู่ หมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ E-mail
ชื่อ-สกุล นายเอกชัย อินทสุวรรณโน
หน่วยงาน ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ที่อยู่ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี
โทรศัพท์/โทรสาร 0-7331-3930-50 ต่อ 1866 / 0-7333-1099
E-mail S4445051@mor-or.pn.psu.ac.th
4. **หน่วยงาน** ชื่อและสถานที่ติดต่อของผู้บังคับบัญชาของหน่วยงานของหัวหน้าโครงการ
ชื่อ – สกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมปอง ทองพ่อง
หน่วยงาน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ที่อยู่ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี
โทรศัพท์/โทรสาร 0-7331-3930-50 ต่อ 1800 / 0-7333-1099
E-mail tsompong@bunga.pn.psu.ac.th
5. ได้เสนอโครงการนี้ หรือโครงการที่มีส่วนเหมือนกับเรื่องนี้บางส่วนเพื่อขอทุนต่อแหล่งอื่นที่ใดบ้าง
☐ ไม่เสนอต่อแหล่งทุนอื่น
6. งบประมาณทั้งโครงการ ...105,000.....บาท
7. ระยะเวลาดำเนินงาน 6 เดือน

8. ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศ สร้างรายได้ในรูปแบบต่างๆ ทั้งในการส่งออก ในรูปของยางดิบ หรือการใช้เป็นวัตถุดิบสำคัญในอุตสาหกรรมยางภายในประเทศเพื่อทำเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทต่างๆ เช่น ยางรถยนต์ รองเท้า ถุงมือยาง เป็นต้น โดยที่การใช้ยางธรรมชาติในประเทศเป็นการใช้งานทางตรง กล่าวคือ เป็นการนำยางธรรมชาติผสมกับสารเคมีชนิดต่างๆ แล้วขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ หรืออาจจะมีการผสมกับยางสังเคราะห์เพื่อเสริมคุณสมบัติบางประการที่ไม่มีในยางธรรมชาติ เช่น ผสมกับยาง EPDM เพื่อเพิ่มความสามารถในการทนต่อสภาวะการใช้งานที่อุณหภูมิสูงขึ้นและความต้านทานต่อโอโซน หรือผสมกับยางไนไตรล์ เพื่อปรับปรุงสมบัติการทนต่อตัวทำละลาย เป็นต้น จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าการออกสูตรยางเป็นขั้นตอนที่สำคัญประการหนึ่งในการกำหนดสมบัติด้านต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ยาง กล่าวคือ ทั้งสมบัติด้านการแปรรูป และสมบัติยางวัลคาไนซ์ ซึ่งคัลคูล์ไฮดรอกไซด์เป็นสารเคมีที่สำคัญอย่างยิ่งต่อปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ยางในระบบที่ใช้กำมะถันและสารตัวเร่ง โดยทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้น ทำให้ปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์เกิดได้เร็วขึ้น และได้สมบัติทางกายภาพของยางที่ดีขึ้น แต่ได้มีรายงานเกี่ยวกับการใช้ซิงค์ออกไซด์ในสูตรยางว่า ซิงค์ออกไซด์ที่ปนเปื้อนหรือถูกชะล้างออกสู่แหล่งน้ำ (Heideman and Noordermeer, 2002) ทั้งในขั้นตอนการแปรรูปยาง การใช้งานผลิตภัณฑ์ การกำจัด และการรีไซเคิล ส่งผลกระทบต่อจุลินทรีย์ที่อยู่ในน้ำ (aquatic organisms) ทำให้คุณภาพของน้ำแย่ลง แนวทางที่จะลดปัญหาดังกล่าวคือ การลดปริมาณการใช้ซิงค์ออกไซด์ในสูตรยางลง หาสารเคมีชนิดอื่นๆทดแทนการใช้ซิงค์ออกไซด์ เพื่อเป็นการหาแนวทางที่จะแก้ไขปัญหาที่ส่งผลกระทบต่ออุตสาหกรรมยางโดยรวม ได้มีการศึกษาโดย Heideman, et al, 2003 เกี่ยวกับการใช้ Zinc loaded clay (Zn-Clay) เป็นสารกระตุ้นในระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน เพื่อเป็นแนวทางใหม่ในการลดการใช้ซิงค์ออกไซด์ในสูตรยาง พบว่า การใช้ Zn-Clay สามารถใช้แทนที่ซิงค์ออกไซด์ปกติ (Conventional ZnO) จึงมีความจำเป็นต้องศึกษาวิจัยถึงอิทธิพลของสารเคมีชนิดนี้ต่อสมบัติด้านต่างๆของยาง ดังนั้นงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อสมบัติต่างๆของยางวัลคาไนซ์ เช่น ลักษณะการวัลคาไนซ์ สมบัติทางกายภาพ สมบัติด้านการใช้งาน เป็นต้น โดยศึกษาครอบคลุมถึงชนิดของสารตัวเร่ง ชนิดของสารตัวเติม และระบบการวัลคาไนซ์ ซึ่งจะได้ข้อมูลพื้นฐานการใช้ซิงค์ออกไซด์ในสูตรยาง เพื่อเป็นแนวทางในการออกสูตรหรือพัฒนาสูตรรองรับปัญหาที่จะเกิดขึ้นต่ออุตสาหกรรมยาง

9. วัตถุประสงค์

- เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อสมบัติของยางวัลคาไนซ์
- เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณซิงค์ออกไซด์กับสารเคมีอื่นๆในสูตรยางคือ สารตัวเร่ง สารตัวเติม ระบบการวัลคาไนซ์

10. ทางเลือกและแนวทางการแก้ปัญหา

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยถึงอิทธิพลของซิงค์ออกไซด์ต่อสมบัติต่างๆของยางคอมปาวด์ เช่น ลักษณะการวัลคาไนซ์ สมบัติทางกายภาพ เป็นต้น รวมทั้งศึกษาความสัมพันธ์ของการใช้ซิงค์ออกไซด์กับสารเคมีชนิดอื่นๆในสูตรยางคือ สารตัวเร่ง สารตัวเติม และระบบการวัลคาไนซ์ เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาที่มีต่อผลิตภัณฑ์ยางจากผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากการใช้ซิงค์ออกไซด์ การวิจัยจะเน้นการศึกษาในสูตรยางคอมปาวด์ที่ใช้ยางธรรมชาติเป็นหลัก แปรปริมาณของซิงค์ออกไซด์ ตั้งแต่ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0 และ 5 phr จากนั้นนำยางคอมปาวด์ที่ได้มาทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ สมบัติทางกายภาพ นอกจากนี้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการใช้ซิงค์ออกไซด์กับสารเติมแต่ง (additives) ชนิดอื่นๆ คือ สารตัวเร่ง สารตัวเติม และระบบการวัลคาไนซ์ เพื่อให้ได้แนวทางการออกสูตรที่ใช้ซิงค์ออกไซด์ครอบคลุมสูตรยางคอมปาวด์ที่สามารถประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์หลายประเภท รวมทั้งเป็นแนวทางในการออกสูตรยางคอมปาวด์ที่สามารถลดปริมาณซิงค์ออกไซด์ลง โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติด้านต่างๆของยาง ในการวิจัยจะผสมยางคอมปาวด์โดยแปรปัจจัยต่างๆดังนี้คือ แปรชนิดของสารตัวเร่งคือ ไดโรโคคาร์บามัท ไทยูเรม ไทอะโซล และซัลฟิनाไมด์ ชนิดของสารตัวเติมคือ เชม่าดำ ซิลิกา เกลย์ และแคลเซียมคาร์บอเนต ระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันคือ ระบบปกติ (Conventional system) ระบบเซมิอีวี (Semi-EV system) และระบบอีวี (EV system) จากนั้นทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ และสมบัติทางกายภาพ

11. ผลที่คาดว่าจะได้รับ (Output)

- ได้แนวทางการใช้หรือลดปริมาณการใช้ซิงค์ออกไซด์ในสูตรยางคอมปาวด์
- ทราบความสัมพันธ์ของการใช้ซิงค์ออกไซด์กับสารตัวเร่ง สารตัวเติม และระบบการวัลคาไนซ์ และข้อมูลพื้นฐานทางด้านลักษณะการวัลคาไนซ์ และสมบัติทางกายภาพ

12. แนวทางการดำเนินงานวิจัย

สมมุติฐานการวิจัย	วิธีการวิจัย
• แนวทางการพัฒนาสูตร ยางที่ใช้ซิงค์ออกไซด์ ปริมาณน้อยลง	• ศึกษาอิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อสมบัติของยางวัลคาไนซ์ (ลักษณะการวัลคาไนซ์ สมบัติทางกายภาพ)
	• ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างซิงค์ออกไซด์กับชนิดของสารตัวเร่งต่อสมบัติของยางวัลคาไนซ์ (ทดสอบสมบัติเช่นเดียวกับข้อ 1)
	• ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างซิงค์ออกไซด์กับชนิดของสารตัวเติมต่อสมบัติของยางวัลคาไนซ์ (ทดสอบสมบัติเช่นเดียวกับข้อ 1)
	• ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างซิงค์ออกไซด์กับระบบการวัลคาไนซ์ต่อสมบัติของยางวัลคาไนซ์ (ทดสอบสมบัติเช่นเดียวกับข้อ 1)

บทสรุปของผู้บริหาร (Executive Summary)

ในระบบการวัดคาบในซังยาง มีองค์ประกอบที่สำคัญต่างๆ นอกเหนือจากยาง เช่น สารตัวเร่ง สารกระตุ้น สารตัวเติม สารป้องกันการเสื่อม เป็นต้น ซึ่งสารเคมีแต่ละชนิดเหล่านี้ทำหน้าที่สำคัญในการกำหนดสมบัติของยาง ทั้งในด้านการผสม การแปรรูป การวัดคาบในซัง และสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ยาง สารเคมีชนิดซิงค์ออกไซด์ เป็นสารเคมีที่ทำหน้าที่กระตุ้นการทำงานของสารตัวเร่งในปฏิกิริยาการวัดคาบในซังด้วยกำมะถัน โดยเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับสารตัวเร่งและกรดไขมัน แต่จากรายงานพบว่า สารเคมีชนิดนี้ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กในแหล่งน้ำ เมื่อมีการปลดปล่อยสารเคมีชนิดนี้จากผลิตภัณฑ์ลงสู่แหล่งน้ำ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ เพื่อให้ครอบคลุมขอบเขตการใช้งานของสูตรยาง โดยเลือกศึกษาในยางธรรมชาติ เนื่องจากเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่สำคัญของประเทศไทย ขึ้นต้นศึกษาอิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อลักษณะการวัดคาบในซังและสมบัติทางกายภาพศึกษาอิทธิพลของซิงค์ออกไซด์ในสารตัวเร่งชนิดต่างๆ โดยเลือกมาศึกษา 5 ชนิด ตั้งแต่สารตัวเร่งที่ทำให้การวัดคาบในซังเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และใช้มาในอุตสาหกรรมน้ำยาง จนกระทั่งสารตัวเร่งที่เป็นชนิด delayed action ซึ่งใช้กันมากในอุตสาหกรรมยานยนต์ หรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสมบัติเชิงกล ศึกษาอิทธิพลของซิงค์ออกไซด์ต่อสูตรยางที่ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ คือ เขม่าดำ ซิลิกา เคลย์ และแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งเป็นสารตัวเติมที่ใช้งานในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการใส่สารตัวเติมเพื่อลดต้นทุน มีราคาถูก จนกระทั่งผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสมบัติเชิงกลสูง และเลือกศึกษาในปริมาณที่ใช้ในการออกสูตรยาง นอกจากนี้ยังศึกษาอิทธิพลของซิงค์ออกไซด์ที่มีผลต่อระบบการวัดคาบในซังด้วยกำมะถันแบบต่างๆ คือ ระบบปกติ เชมิ-อีวี และอีวี เพื่อให้ครอบคลุมสมบัติที่ต้องการ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติด้านความทนทานต่อความร้อน เป็นต้น

จากผลการวิจัยพบว่า การเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ในสูตรยางที่ใช้ยางธรรมชาติ ทำให้ลักษณะการวัดคาบในซังเกิดได้เร็วขึ้น รวมทั้งทำให้สมบัติทางกายภาพ เช่น 300 % โมดูลัส ความทนทานต่อแรงดึง ระยะยืดสูงสุด ความทนทานต่อการฉีกขาด เป็นต้น ดีขึ้น โดยปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่เหมาะสมคือ 3 phr ซึ่งจะเห็นว่า ไม่จำเป็นต้องใช้ปริมาณสูงถึง 5 phr ส่วนการแปรชนิดของสารตัวเร่ง พบว่า การเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ในสารตัวเร่งชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการวิจัย ทำให้ลักษณะการวัดคาบในซังเกิดได้เร็วขึ้นเช่นเดียวกัน แต่สมบัติทางกายภาพที่ดีที่สุดของการใช้สารตัวเร่งแต่ละชนิด พบว่า ต้องใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณที่แตกต่างกัน นั่นคือ สารตัวเร่งแต่ละชนิดไม่จำเป็นต้องออกสูตรยางที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์เท่ากัน โดยปริมาณที่เหมาะสมของซิงค์ออกไซด์อยู่ในช่วง 2 ถึง 3 phr เมื่อศึกษาอิทธิพลของซิงค์

ออกไซด์ในสูตรยางที่ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ พบว่า สูตรยางที่ใช้สารตัวเติมทั้ง 4 ชนิด การใช้ซิงค์ออกไซด์ส่งผลกระทบต่อลักษณะการวัลคาไนซ์ กล่าวคือ ทำให้การวัลคาไนซ์เกิดได้เร็วขึ้น เมื่อพิจารณาสมบัติทางกายภาพ คือ โมดูลัส ความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด พบว่า สูตรยางที่ใช้สารตัวเติมเขม่าดำ การใช้ซิงค์ออกไซด์จะมีอิทธิพลเป็นอย่างมาก ส่วนสูตรยางที่ใช้สารตัวเติมเคลย์ และแคลเซียมคาร์บอเนตจะส่งผลกระทบน้อย ส่วนการศึกษาอิทธิพลของซิงค์ออกไซด์ต่อสูตรยางที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์ที่แตกต่างกัน พบว่า สูตรยางที่ใช้ระบบเคมี-อีวี การใช้ซิงค์ออกไซด์จะมีอิทธิพลน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพ พบว่า กรณีสมบัติความทนทานต่อแรงดึง และความแข็งแรง ซิงค์ออกไซด์จะส่งผลกระทบต่อระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ มากที่สุด ส่วนความทนทานต่อการฉีกขาด พบว่าซิงค์ออกไซด์จะส่งผลต่อระบบเคมี-อีวี ได้มากกว่า

2. วิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมยางผสมสารเคมี

2.1.1 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อสมบัติของยางธรรมชาติผสมสารเคมี

นำยางธรรมชาติชนิดยางแผ่นผึ่งแห้ง (Air dry sheet, ADS) ผลิตโดยบริษัท Pan Star Co., Ltd. ผสมกับสารวัลคาไนซ์และสารเคมีชนิดต่างๆ ดังตารางที่ 1 โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ ดังนี้คือ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 7.5 และ 10 phr และใช้ลำดับและระยะเวลาการผสมสารเคมีชนิดต่างๆ ดังตารางที่ 2 จากนั้นนำยางผสมสารเคมีที่เตรียมได้เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 1 สูตรยางผสมสารเคมี (ASTM D3184)

สารเคมี	ปริมาณ, phr
ยางธรรมชาติ (ADS)	100
ZnO White seal	แปรปริมาณ*
Stearic acid	2
CBS	0.8
Sulphur	3

* ผลิตโดยบริษัท China National Chemical construction ประเทศจีน

* แปรปริมาณ 0, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 7.5 และ 10 phr

ตารางที่ 2 ลำดับขั้นตอนและระยะเวลาการผสมยางกับสารเคมี

เวลาผสมรวม (นาที)	เวลาผสม (นาที)	ขั้นตอนการผสม
1	1	ใส่ยางเบลนด์ลงไปในลูกกลิ้ง โดยไม่ให้เกิดการพันลูกกลิ้ง
5	4	ขยายระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง ใส่ยางให้พันลูกกลิ้ง จนได้ผิวเรียบ
7	2	ผสม Stearic acid
11	4	ผสม Zinc oxide + TBBS + Sulphur
13	2	ตัด 3/4 จากด้านข้าง
15	2	ตัดยางออก ปรับลูกกลิ้งให้แคบลง ผ่านยางในลูกกลิ้ง 6 ครั้ง โดยการม้วน
18	3	ตัดยางออก ขยายระยะห่างของลูกกลิ้ง ผ่านยางในลูกกลิ้ง 4 ครั้ง โดยการพับ

2.1.2 ศึกษาอิทธิพลของชนิดของสารตัวเร่งต่อสมบัติของยางธรรมชาติผสมสารเคมีที่แปรปริมาณซิงค์ออกไซด์

นำยางธรรมชาติผสมกับสารเคมีชนิดต่างๆดังตารางที่ 3 โดยแปรชนิดของสารตัวเร่งดังนี้คือ ZDC, TMTD, MBT, MBTS, และ CBS โดยใช้ปริมาณ 1.0 phr และแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่ใช้คือ 0, 1, 2, 3, 4, และ 5 phr โดยใช้ขั้นตอนการผสมดังตารางที่ 2

ตารางที่ 3 สูตรยางคอมปาวด์ที่ใช้สารตัวเร่งชนิดต่างๆ โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์

สารเคมี	ปริมาณ, phr
ยางธรรมชาติ (ADS)	100
ZnO White seal	แปรปริมาณ**
Stearic acid	2
Accelerator (แปรชนิด) ***	1.0
Sulphur	3

** แปรปริมาณ 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 phr

*** แปรชนิดสารตัวเร่งคือ ZDEC, TMTD, MBT, MBTS และ CBS

2.1.3 ศึกษาอิทธิพลของชนิดสารตัวเติมต่อสมบัติของยางธรรมชาติผสมสารเคมีที่แปรปริมาณซิงค์ออกไซด์

นำยางธรรมชาติผสมกับสารเคมีชนิดต่างๆดังตารางที่ 4 โดยแปรชนิดของสารตัวเติมดังนี้คือ เหมาดำ (เป็นชนิด ISAF ผลิตโดยบริษัท ไทยคาร์บอนเบสส์ จำกัด), ซิลิกา (เป็นชนิดตกตะกอน เกรด VN3 Ultrasil), ไชนาเคลย์ (เป็นชนิดละเอียด จัดจำหน่ายโดยบริษัท เพชรไทยเคมีภัณฑ์ จำกัด), แคลเซียมคาร์บอเนต, (เป็นชนิดบด จัดจำหน่ายโดยบริษัท เพชรไทยเคมีภัณฑ์ จำกัด) โดยที่ สารตัวเติมเขาดำและซิลิกา ใช้ปริมาณ 40 phr ในขณะที่เคลย์และแคลเซียมคาร์บอเนต ใช้ปริมาณ 100 phr ขั้นตอนการผสมดำเนินการทดลองดังตารางที่ 5

ตารางที่ 4 สูตรยางคอมเพาต์ที่ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ โดยแปรปริมาณซึ่งค่อออกไซด์

สารเคมี	ปริมาณ, phr			
	C1	C2	C3	C4
ยางธรรมชาติ (ADS)	100			
ZnO White seal	แปรปริมาณ****			
Stearic acid	2			
CBS	0.8			
Carbon black (N-330)	40			
Silica (VN3)		40		
China clay			100	
CaCO ₃				100
Sulphur	3			

**** แปรปริมาณ 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 phr

ตารางที่ 5 ขั้นตอนการผสมยางและสารเคมีชนิดต่างๆ โดยแปรชนิดของสารตัวเติมที่ใช้

เวลาผสมรวม (นาที)	เวลาผสม (นาที)	ขั้นตอนการผสม
1	1	ปรับลูกกลิ้งให้แคบ ผ่านยางเข้าไป โดยไม่เกิดการพันลูกกลิ้ง
3	2	ขยายระยะห่างของลูกกลิ้ง ให้ยางพัน ตัด 3/4 จากด้านข้าง
5	2	ขยายระยะห่างของลูกกลิ้ง ผสม Zinc oxide ตัด 3/4 จากด้านข้าง
19 (25)	14 (20)	ผสมเขม่าดำหรือซิลิกา (เคลย์หรือแคลเซียมคาร์บอเนต) ขยายลูกกลิ้ง ใส่ Stearic acid ตัด 3/4 จากด้านข้าง ใส่สารตัวเติมที่เหลือ
21 (27)	2	ใส่สารตัวเร่ง CBS ตัด 3/4 จากด้านข้าง
24 (30)	3	ใส่ Sulphur ตัด 3/4 จากด้านข้าง
26 (32)	2	ตัดยางออก ปรับระยะห่างของลูกกลิ้ง ผ่านยางในลูกกลิ้ง 6 ครั้ง โดยการม้วน
29 (35)	3	ขยายระยะห่างของลูกกลิ้ง ผ่านยางในลูกกลิ้ง 4 ครั้ง โดยการพับ

() ตัวเลขในวงเล็บ คือ เวลาผสมที่ใช้ กรณีสารตัวเติมเคลย์หรือแคลเซียมคาร์บอเนต ปริมาณ 100 phr

2.1.4 ศึกษาอิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อสมบัติของยางธรรมชาติผสมสารเคมีที่แปรปริมาณซิงค์ออกไซด์

นำยางธรรมชาติผสมกับสารเคมีชนิดต่างๆ ดังตารางที่ 6 โดยแปรระบบการวัลคาไนซ์ดังนี้คือ ระบบปกติ (Conventional system) ระบบเซมิ-อีวี (Semi-EV system) และระบบอีวี (EV system) โดยใช้ขั้นตอนการผสมดังตารางที่ 2

ตารางที่ 6 สูตรยางคอมปาวด์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แตกต่างกัน โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์

สารเคมี	ปริมาณ, phr		
	Conventional	Semi-EV	EV
ยางธรรมชาติ (ADS)	100		
ZnO White seal	แปรปริมาณ*****		
Stearic acid	2.0		
CBS	0.8	1.6	3.2
Sulphur	3	1.5	0.7

***** แปรปริมาณ 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 phr

2.2 การทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์

นำยางผสมสารเคมีที่เตรียมได้โดยการแปรปัจจัยต่างๆ มาทดสอบหาสมบัติการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 160°C ด้วยเครื่อง ODR2000 (ผลิตโดยบริษัท Monsanto Co., Ltd.) ดังรูปที่ 1 โดยรายงานค่า Scorch time, Cure time, Cure rate index, Minimum torque และ Maximum torque



รูปที่ 1 ลักษณะทั่วไปของเครื่องทดสอบการดึงของยาง ODR 2000

2.3 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

2.3.1 การเตรียมชิ้นทดสอบ

นำยางที่ผสมสารเคมีชนิดต่างๆ และตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง มาเตรียมเป็นชิ้นทดสอบต่างๆ โดยใช้เครื่องอัดเบ้าแบบ Compression molding ที่อุณหภูมิ 160°C ความดันในการอัดยางเท่ากับ 500 psi และใช้ระยะเวลาการอบที่ทดสอบได้จากเครื่อง ODR2000

2.3.2 การทดสอบความทนทานต่อแรงดึง

นำชิ้นทดสอบที่เตรียมได้จากการอัดเบ้า ตัดเป็นเป็นรูปดัมเบลล์ (Dumb-bell) ตามมาตรฐาน ASTM D412 นำไปทดสอบความทนทานต่อแรงดึงด้วยเครื่อง Tensometer (ผลิตโดยบริษัท Hounsfield Co., Ltd.) ดังรูปที่ 2 ด้วยอัตราการดึง 500 mm/min. รายงานข้อมูลในรูปของ 300 % Modulus, Tensile strength, และ % Elongation at break



รูปที่ 2 ลักษณะทั่วไปของเครื่อง Tensometer (ผลิตโดยบริษัท Hounsfield Co., Ltd.)

2.3.3 การทดสอบความทนทานต่อการฉีกขาด

นำชิ้นทดสอบที่เตรียมได้จากการอัดเบ้า ตัดเป็นเป็นชิ้นทดสอบแบบ Die C ตามมาตรฐาน ASTM D624 นำไปทดสอบความทนทานต่อแรงดึงด้วยเครื่อง Tensometer (ผลิตโดยบริษัท Hounsfield Co., Ltd.) ด้วยอัตราการดึง 500 mm/min. รายงานข้อมูลในรูปของ Tear strength, N/mm

2.3.4 การทดสอบความแข็ง

นำชิ้นทดสอบที่เตรียมได้จากการอัดเบ้า มาวัดความแข็งด้วยเครื่องวัดแบบ Shore Durometer แบบ Shore A (ผลิตโดยบริษัท Brevell AFTRI ประเทศอังกฤษ) ดังรูปที่ 3 ตามมาตรฐาน ASTM D2240 รายงานข้อมูลในรูปของ Shore A



รูปที่ 3 ลักษณะทั่วไปของเครื่องวัดความแข็งแบบ Shore A

2.3.5 การทดสอบความกระด้างตัว

นำชิ้นทดสอบที่เตรียมได้จากการอัดเบ้า มาวัดค่าความกระด้างตัวด้วยเครื่อง Dunlop tripsometer (ผลิตโดยบริษัท H.W. Wallace & Co., Ltd. ประเทศอังกฤษ) ดังรูปที่ 4 ตามมาตรฐาน B.S. 903 : Part A8 รายงานข้อมูลในรูปของ % Resilience



รูปที่ 4 ลักษณะทั่วไปของเครื่องวัดความกระด้างตัวของยางแบบ Dunlop tripsometer

2.3.6 การทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอ

นำชิ้นทดสอบที่เตรียมได้จากการอัดเป่า มาหาค่าความทนทานต่อการสึกหรอด้วยเครื่อง Akron abrasion (ผลิตโดยบริษัท H.W. Wallace & Co., Ltd. ประเทศอังกฤษ) ดังรูปที่ 5 ตามมาตรฐาน B.S. 903 : Part A รายงานข้อมูลในรูปของ Abrasion index โดยใช้สูตรมาตรฐานดังนี้คือ

สูตรมาตรฐานสำหรับทดสอบด้วยเครื่อง Akron

ยางและสารเคมี	ปริมาณ, phr
ยางธรรมชาติ (RSS 3)	100
ZnO	5
Stearic acid	3
TMQ	1
TBBS	1
HAF (N-330)	50
Sulphur	3



รูปที่ 5 ลักษณะทั่วไปของเครื่องทดสอบความทนทานต่อการสึกหรอแบบ Akron

2.3.7 ความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นในยาง

นำชิ้นทดสอบที่เตรียมได้จากการอัดเบ้า มาหาค่าความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นในยางด้วยเครื่อง Goodrich flexometer (ผลิตโดยบริษัท Ferry Machine Company, Ohio, สหรัฐอเมริกา) ดังรูปที่ 6 ตามมาตรฐาน ASTM D623 รายงานข้อมูลในรูปของอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นหลังจากทดสอบเป็นระยะเวลา 25 นาที



รูปที่ 6 ลักษณะทั่วไปของเครื่องวัดความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นในยางแบบ Goodrich Flexometer

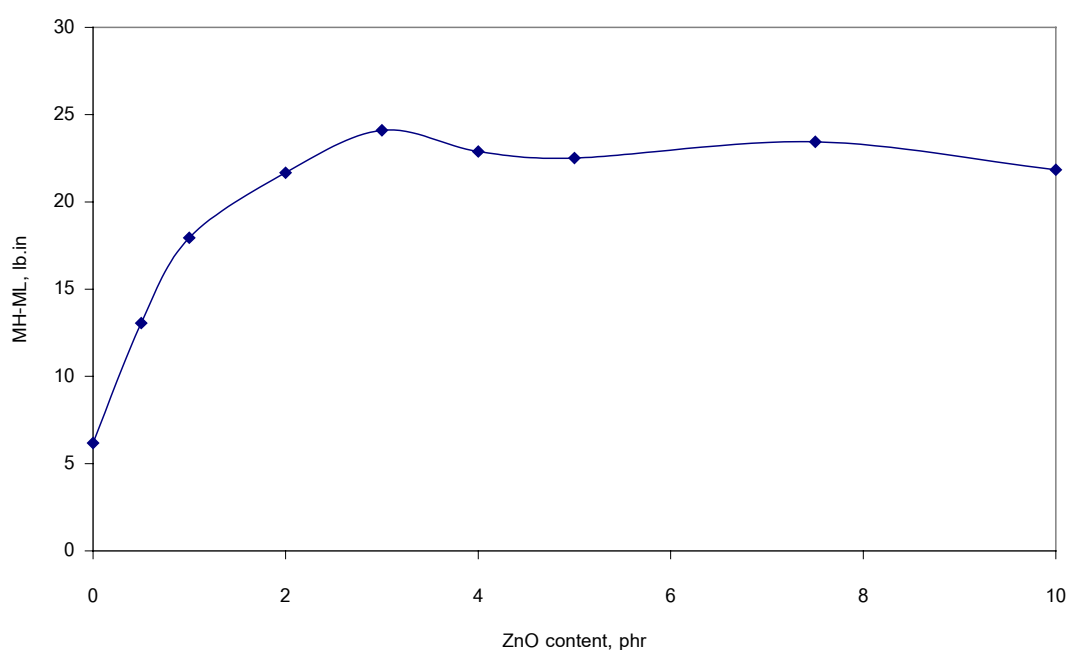
3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์

3.1.1 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อลักษณะการวัลคาไนซ์

จากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อลักษณะการวัลคาไนซ์ได้ผลการวิจัยดังรูปที่ 7 ถึง 11

3.1.1.1 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อผลต่างของค่าแรงบิดสูงสุดและต่ำสุด



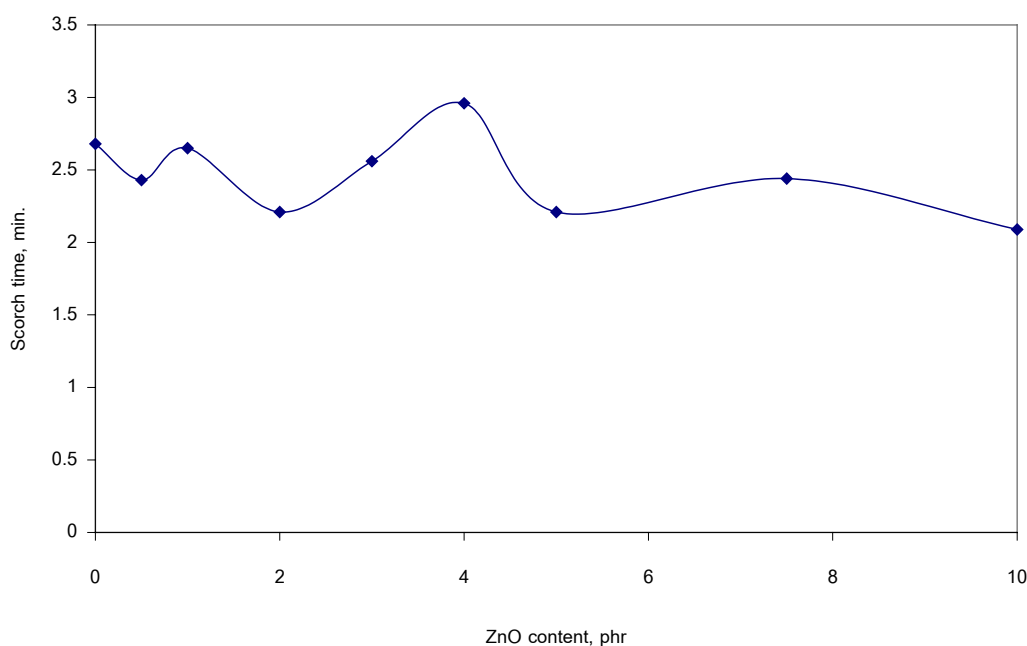
รูปที่ 7 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อผลต่างของค่าแรงบิดสูงสุดและต่ำสุด

จากรูปที่ 7 พบว่า การเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ ตั้งแต่ 0 ถึง 3 phr ทำให้ผลต่างของแรงบิดสูงสุดและต่ำสุดเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากซิงค์ออกไซด์สามารถกระตุ้นการทำงานของสารตัวเร่ง โดยเกิดปฏิกิริยากับกรดไขมัน (ในงานวิจัยนี้ใช้ กรดสเตียริก) เกิดเป็นเกลือของกรดไขมัน ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเสริมประสิทธิภาพผิว (Surfactants) (Akiba and Hashim, 1997) เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับสารตัวเร่ง ในที่นี้คือ CBS ได้ดี กล่าวคือ ทำให้ละลายได้ไวย่างได้มากกว่าการใช้สารตัวเร่งเพียงลำพัง (Feldshtein, *et al*, 1959) ในระหว่างการวัลคาไนซ์ที่มีสารตัวเร่งและโลหะออกไซด์ (โดยเฉพาะซิงค์ออกไซด์) จะเกิดโครงสร้างที่เป็น disulfides หรือ polysulfides โดยสารประกอบเหล่านี้จะเกิดการสลายตัวปลดปล่อยกำมะถันที่ว่องไว (active sulfur) ส่งผลให้เกิดการวัลคาไนซ์ได้มากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณมากกว่า 3 phr พบว่า ผลต่างของแรงบิดสูงสุดและต่ำสุดมีแนวโน้มคงที่ แสดงให้เห็นว่า การใช้ซิงค์

ออกไซด์ปริมาณสูงเกินความจำเป็น ไม่ทำให้ระดับของการวัลคาไนซ์หรือปริมาณพันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นในยางเพิ่มมากขึ้น

3.1.1.2 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อค่าเวลาสกอช

จากรูปที่ 8 เป็นการศึกษาอิทธิพลของซิงค์ออกไซด์ต่อเวลาสกอช พบว่า เมื่อปริมาณซิงค์ออกไซด์เพิ่มมากขึ้น ไม่ทำให้เวลาสกอชเปลี่ยนแปลงมากนัก แต่มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่า ปริมาณซิงค์ออกไซด์ไม่มีผลต่อการเริ่มต้นปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ (Onset of vulcanization หรือ induction period) มากนัก ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงที่สารตัวเร่ง ซิงค์ออกไซด์ และกรดสเตียริก เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีผลต่ออัตราการวัลคาไนซ์ ซึ่งจะเห็นว่า การใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณสูงขึ้น ทำให้สารประกอบเชิงซ้อนดังกล่าวข้างต้นเกิดได้เร็วขึ้น

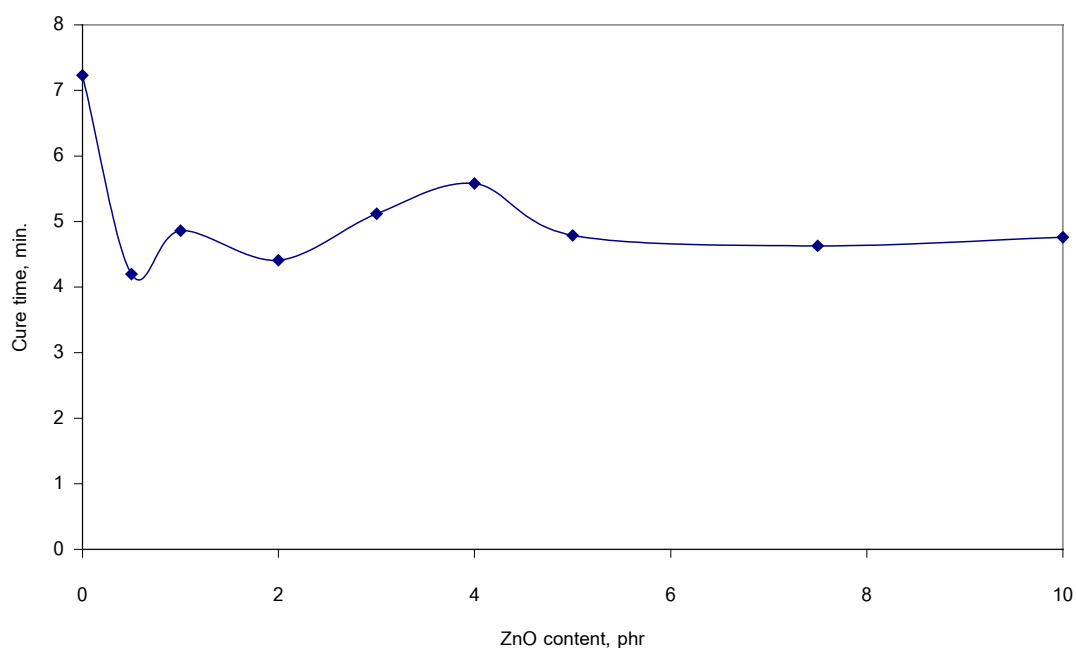


รูปที่ 8 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อเวลาสกอช

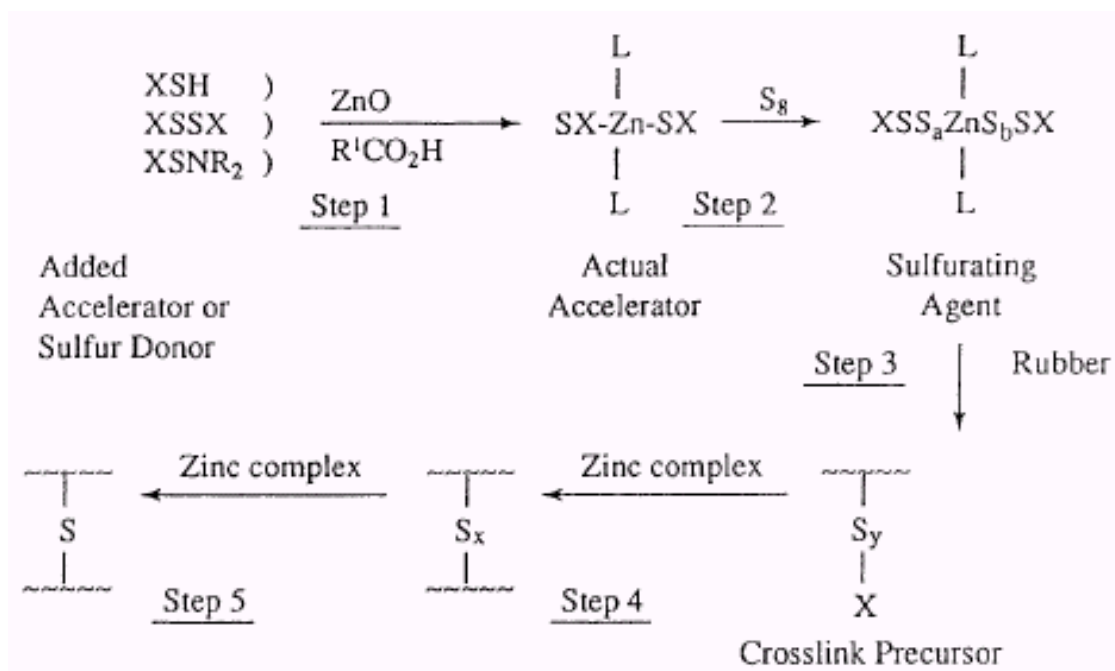
3.1.1.3 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อค่าเวลาสุก

จากรูปที่ 9 เป็นการศึกษาอิทธิพลของซิงค์ออกไซด์ต่อเวลาสุก พบว่า เมื่อปริมาณซิงค์ออกไซด์เพิ่มมากขึ้น ทำให้เวลาสุกลดลง โดยเฉพาะการใช้ปริมาณซิงค์ออกไซด์ เพิ่มจาก 0 เป็น 0.5 phr ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเมื่อมีการใช้ปริมาณซิงค์ออกไซด์ ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารตัวเร่งและกรดสเตียริก ทำให้เร่งอัตราการวัลคาไนซ์ได้เร็วขึ้น ซึ่งซิงค์ออกไซด์จะทำหน้าที่ร่วมกับกรดไขมันและสารกระตุ้นชนิดเอมีน ดังรูปที่ 10 (Akiba and Hashim, 1997) โดยสารประกอบเชิงซ้อน ทำหน้าที่กระตุ้นให้

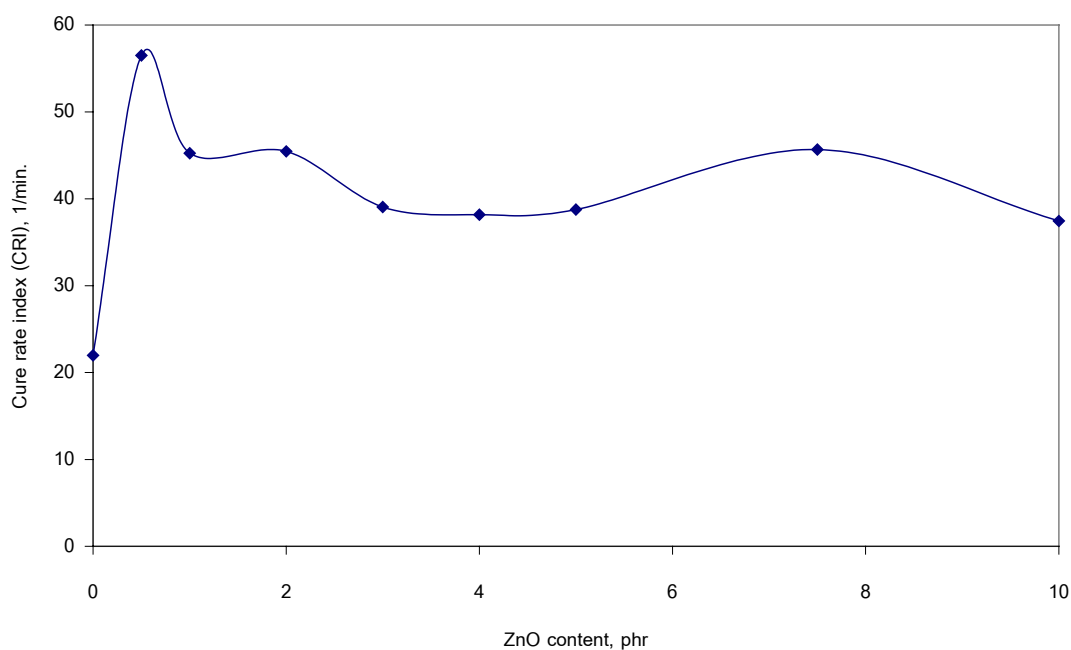
เกิดการเปิดวงแหวนของกำมะถัน (Sulfur rings) เกิดเป็นไอออนของพอลิซัลไฟด์ (Polysulfide ion) (ดูขั้นตอนที่ 2 ในรูปที่ 10) ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น กล่าวคือ มีอัตราการวัลคาไนซ์สูง นอกจากนี้ซิงค์ออกไซด์หรือสารกระตุ้น จะทำให้ความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของซิงค์-สารตัวเร่ง-เมอร์แคปไทด์ที่ละลายได้ (Soluble zinc-accelerator-mercaptide complex) เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยา sulfuration ของยาง (ขั้นตอนที่ 3 ในรูปที่ 10) และการเกิดปฏิกิริยา desulfuration ของพันธะเชื่อมโยงแบบพอลิซัลไฟด์ (Polysulfide crosslink) เกิดเป็นพันธะเชื่อมโยงแบบได- และโมโนซัลไฟด์ (Di- and monosulfide crosslink) (ขั้นตอนที่ 4 และ 5 ในรูปที่ 10) ส่งผลให้ประสิทธิภาพการเชื่อมโยงเพิ่มมากขึ้น กล่าวคือ เกิดปริมาณพันธะเชื่อมโยงได้สูงขึ้น โดยที่ปริมาณการใช้ ตั้งแต่ 0.5 ถึง 3.0 phr จะทำให้เวลาสุกมีแนวโน้มคงที่ แสดงให้เห็นว่า การใช้ซิงค์ออกไซด์จะมีการกระตุ้นปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์อย่างชัดเจนที่ปริมาณการใช้ต่ำคือ 0.5 phr ส่วนการใช้ปริมาณสูงขึ้น จะส่งผลต่อสมบัติทางด้านกายภาพของยางวัลคาไนซ์ กล่าวคือ ทำให้สมบัติทางกายภาพดีขึ้น



รูปที่ 9 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อเวลาสุก



รูปที่ 10 หน้าที่ของซิงค์ออกไซด์ กรดไขมัน และสารกระตุ้น ในระบบการวัลคาไนซ์ที่ใช้สารตัวเร่ง โดยที่ X คือ ส่วนหนึ่งของสารตัวเร่ง (accelerator residue); L คือ ลิแกนด์ (basic nitrogen หรือ zinc carboxylate) (Akiba and Hashim, 1997)



รูปที่ 11 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่ออัตราการวัลคาไนซ์

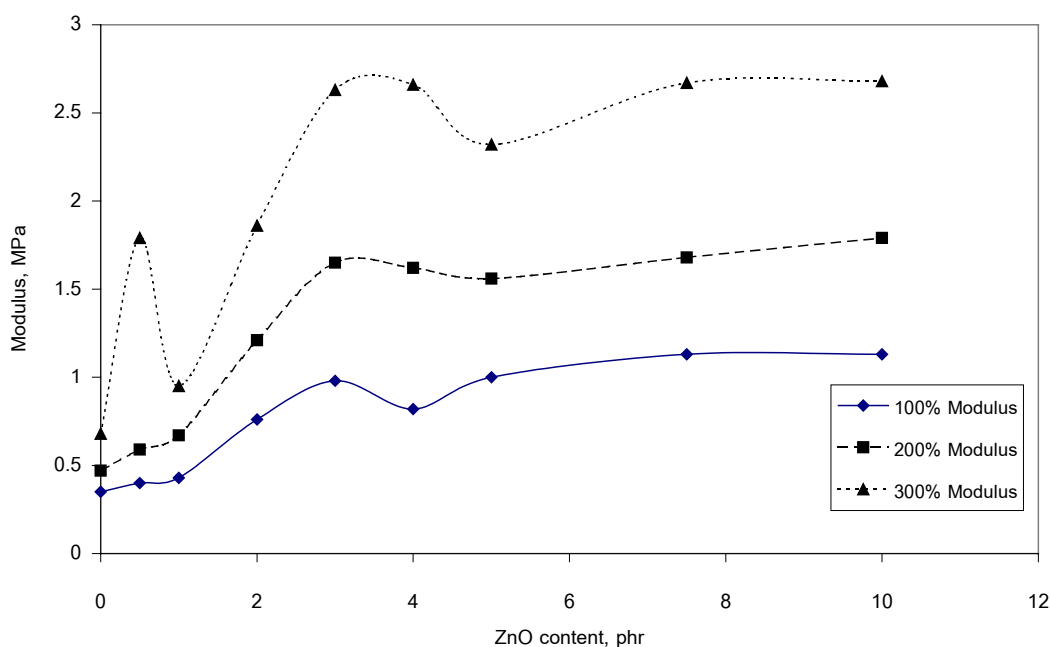
3.1.1.4 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่ออัตราการวัลคาไนซ์

จากรูปที่ 11 เป็นการศึกษาอิทธิพลของซิงค์ออกไซด์ต่ออัตราการวัลคาไนซ์ พบว่า เมื่อปริมาณซิงค์ออกไซด์เพิ่มมากขึ้น ทำให้อัตราการวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น กล่าวคือ ซิงค์ออกไซด์ทำให้อัตราการวัลคาไนซ์ (Enthalpy of vulcanization) มีค่าลดลง (Kok, 1995) โดยเฉพาะการเพิ่มปริมาณระหว่าง 0 ถึง 0.5 phr ทั้งนี้มีเหตุผลในทำนองเดียวกันกับคำอธิบายในหัวข้อ 3.1.1.3 แต่เมื่อเพิ่มปริมาณมากกว่า 0.5 ถึง 10 phr จะทำให้อัตราการวัลคาไนซ์ค่อนข้างคงที่หรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับเวลาสุกของยางผสมสารเคมี โดยปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการเกิดพันธะเชื่อมโยงเพิ่มมากขึ้น หรือมีปริมาณพันธะเชื่อมโยงสูงขึ้นนั่นเอง ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 7 โดยมีผลต่างของค่าแรงบิดสูงสุดและต่ำสุดเพิ่มมากขึ้น

3.1.2 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อสมบัติของยางวัลคาไนซ์

จากการทดสอบสมบัติของยางวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 10 phr ได้ผลการวิจัยดังรูปที่ 12 ถึง 19

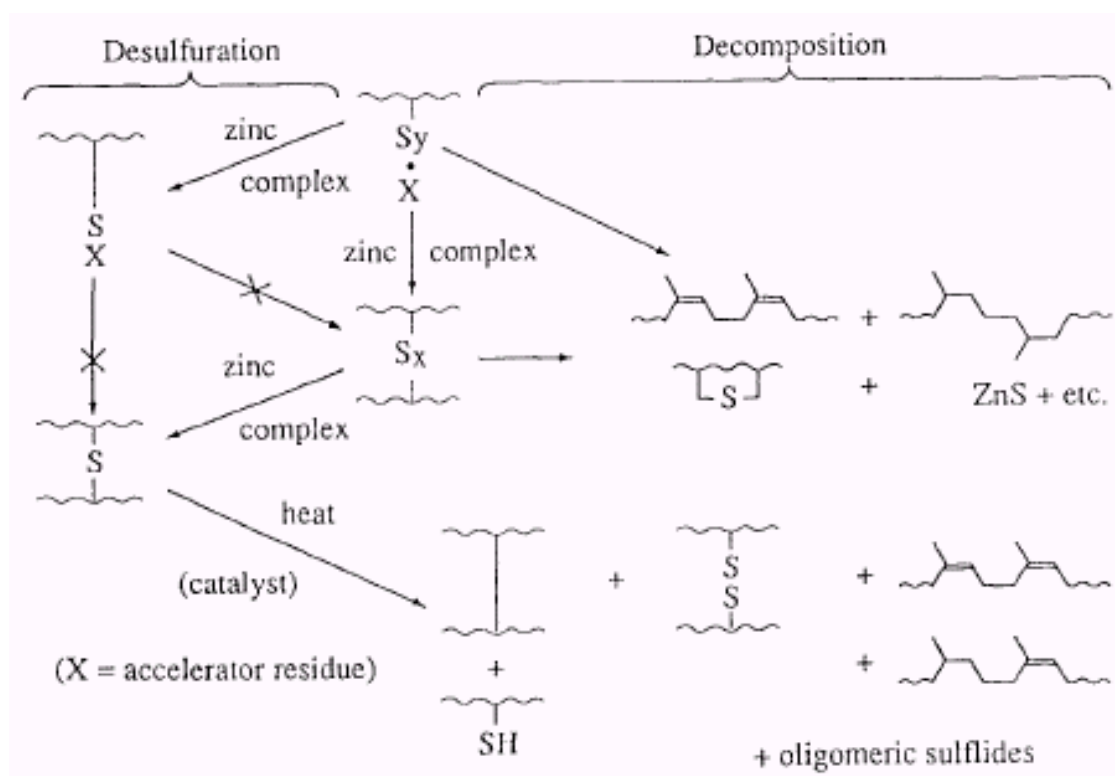
3.1.2.1 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อความทนทานต่อการยืด



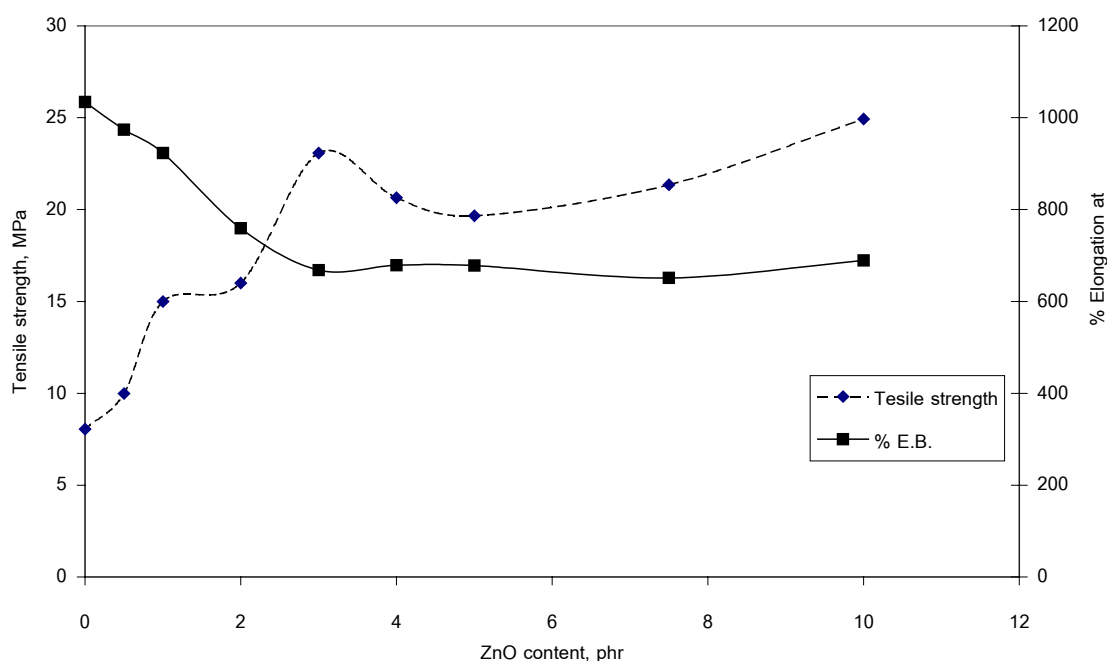
รูปที่ 12 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อค่า 100 %, 200% และ 300% โมดูลัส

จากรูปที่ 12 พบว่า การเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ในสูตรยางคอมปาวด์ที่ใช้ยางธรรมชาติ ทำให้ค่าโมดูลัสเพิ่มสูงขึ้น โดยการเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 3 phr ทำให้ค่าโมดูลัสเพิ่มสูงขึ้นอย่าง

ชัดเจน แต่เมื่อใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณมากกว่า 3 phr พบว่า ค่าโมดูลัสเพิ่มสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยจนเกือบจะคงที่ แสดงให้เห็นว่า การใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณ 0 ถึง 3 phr จะทำให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงได้เร็วและมีประสิทธิภาพการเชื่อมโยง ส่วนเมื่อปริมาณซิงค์ออกไซด์มากกว่า 3 phr จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของพันธะเชื่อมโยงในลักษณะของชนิดพันธะเชื่อมโยง โดยเกิดผ่านปฏิกิริยา desulfuration และ decomposition ทั้งในส่วน of pendant groups และ crosslink โดยสารที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาดังกล่าวคือ สารประกอบเชิงซ้อนของซิงค์ (Zinc complex) ดังรูปที่ 13 (Akiba and Hashim, 1997)



รูปที่ 13 ปฏิกิริยา desulfuration และ decomposition ของหมู่ที่ห้อยอยู่กับโครงสร้างหลัก (pendant groups) และพันธะเชื่อมโยงในยางพอลิไอโซพรีน (Akiba and Hashim, 1997)

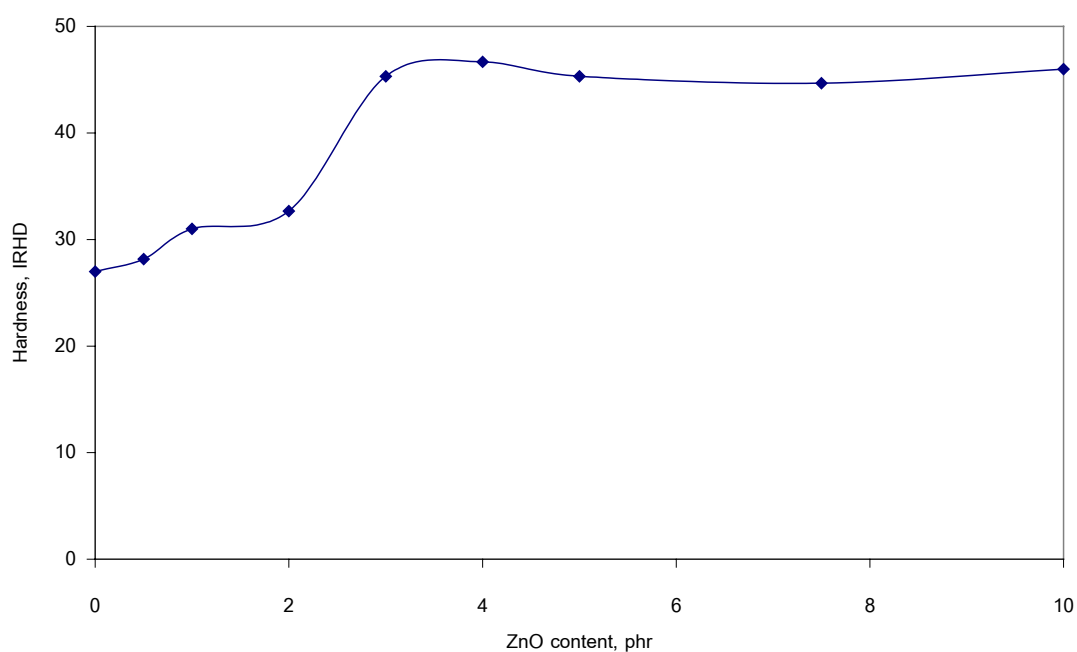


รูปที่ 14 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อค่าความทนทานต่อแรงดึง และระยะยืดสูงสุด

ส่วนรูปที่ 14 เป็นสมบัติด้านความทนทานต่อแรงดึงและระยะยืดสูงสุด พบว่า ปริมาณการใช้ซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 3 phr จะให้ความทนทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเช่นเดียวกับค่าโมดูลัส โดยที่การใช้ปริมาณ 3 phr จะให้ค่าสูงสุด เมื่อปริมาณมากกว่า 3 phr จะทำให้สมบัติดังกล่าวลดลงเล็กน้อย ซึ่งสามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกันกับค่าโมดูลัส ส่วนระยะยืดสูงสุด พบว่า เมื่อปริมาณที่ใช้ตั้งแต่ 0 ถึง 3 phr ทำให้ระยะยืดสูงสุดลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน หลังจากนั้นระยะยืดสูงสุดมีแนวโน้มคงที่ จากผลการวิจัยในรูปที่ 5 และ 6 ปรากฏว่า สมบัติด้านโมดูลัสและความทนทานต่อแรงดึงสอดคล้องกับผลต่างของแรงบิดสูงสุดและต่ำสุด กล่าวคือ การใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณ 3 phr ทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงในยางธรรมชาติที่สมบูรณ์ (Optimum cure)

3.1.2.2 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อค่าความแข็ง

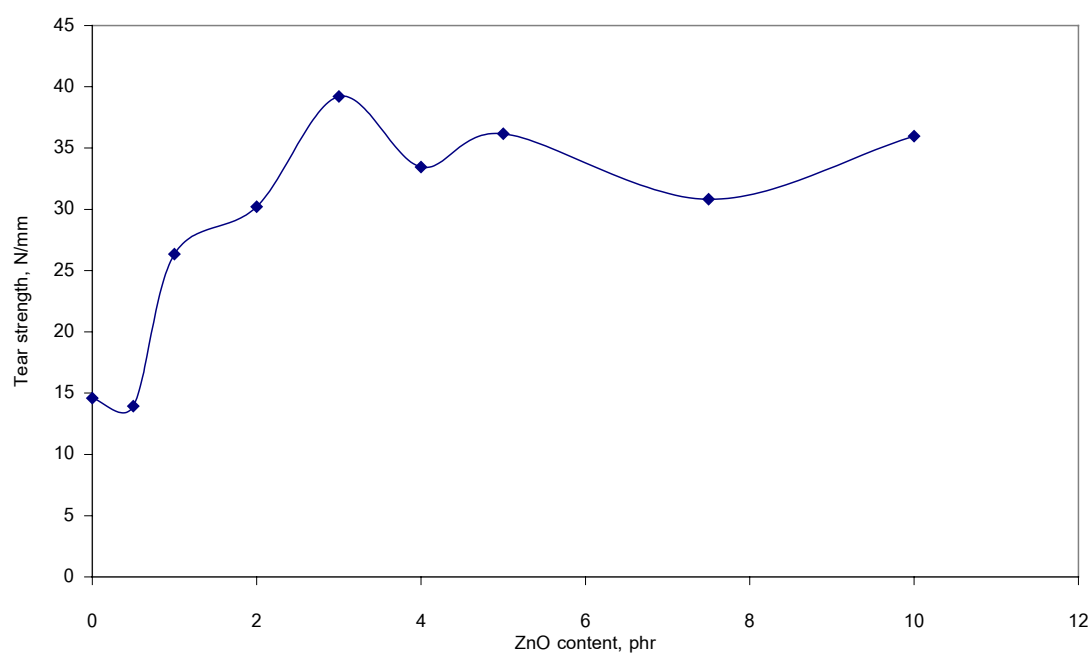
จากการทดสอบความแข็งของยางวัลคาไนซ์ ได้ผลการวิจัยดังรูปที่ 15 พบว่า ให้ผลในทำนองเดียวกันกับค่าโมดูลัสและความทนทานต่อแรงดึง กล่าวคือ ความแข็งจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อปริมาณซิงค์ออกไซด์เพิ่มจาก 0 เป็น 3 phr แต่เมื่อปริมาณเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 3 ถึง 10 phr ค่าความแข็งที่ได้มีแนวโน้มคงที่



รูปที่ 15 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อค่าความทนทานต่อความแข็ง

3.1.2.3 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด

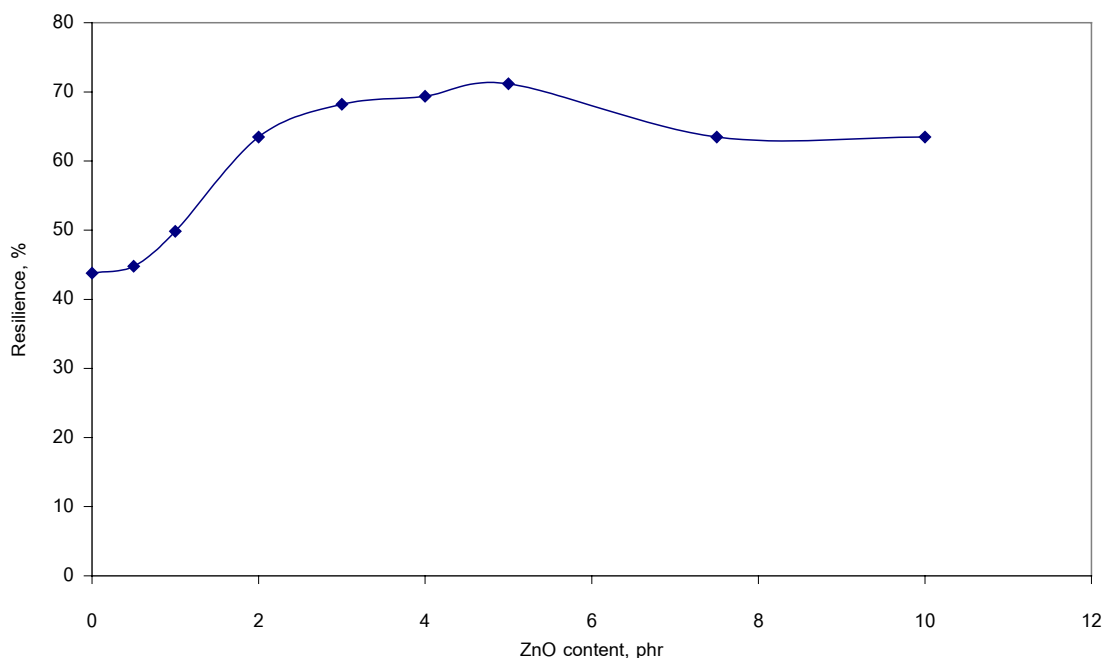
จากการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาด ได้ผลการวิจัยดังรูปที่ 16 พบว่า ให้ผลในทำนองเดียวกันกับค่าโมดูลัสและความทนทานต่อแรงดึง



รูปที่ 16 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อค่าความทนทานต่อการฉีกขาด

3.1.2.4 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อค่าการกระเดื่องตัว

จากการทดสอบความกระเดื่องตัวของยางวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง Dunlop tripsometer ได้ผลการวิจัย ดังรูปที่ 17 พบว่า การใช้ซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0 ถึง 2 phr จะทำให้ความกระเดื่องตัวของยางเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากยางธรรมชาติเกิดการเชื่อมโยง ทำให้ได้โครงสร้างที่มีความยืดหยุ่น และมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณ 5 phr จึงจะให้กระเดื่องตัวสูงสุด แต่เมื่อใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณมากกว่า 5 phr จะทำให้ความกระเดื่องตัวมีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก ปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่ใช้มากเกินไป ส่งผลให้ความเป็นยางหรืออีลาสโตเมอร์ของยางวัลคาไนซ์ลดลง ซึ่งซิงค์ออกไซด์อาจทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมชนิดหนึ่ง



รูปที่ 17 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อค่าการกระเดื่องตัว

3.1.2.4 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อค่าความทนทานต่อการสึกหรอ

จากตารางที่ 7 เป็นผลการทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอของยางวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ พบว่า การใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณ 0 ถึง 2 phr ทำให้ผิวของยางเหนียวระหว่างการทดสอบ จึงไม่สามารถหาสมบัติดังกล่าวได้ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณตั้งแต่ 3 ถึง 10 phr ได้ดัชนีการสึกหรอระหว่าง 12 ถึง 15 ซึ่งมีค่าค่อนข้างต่ำ กล่าวได้ว่า การใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณต่ำ ทำให้ปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ในยางหนา (ขึ้นทดสอบการสึกหรอหนาประมาณ 12 มิลลิเมตร) เกิดได้ไม่สมบูรณ์หรือเกิดปริมาณพันธะเชื่อมโยงต่ำ ดังที่กล่าวมาข้างต้น (โดยเฉพาะภายในชั้นทดสอบ) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณต่ำ การนำความร้อนในยางเกิดได้ช้า ส่งผลให้อุณหภูมิแต่ละตำแหน่งของยาง โดยเฉพาะตรง

กลางชิ้นงานต่ำกว่าผิวข้างนอก ทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ได้น้อยกว่า ส่วนยางที่ใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณสูงขึ้น สามารถนำความร้อนได้ดีขึ้น (พรพรรณ, 2528) จึงทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ที่สมบูรณ์ ได้ปริมาณพันธะเชื่อมโยงสูงขึ้น ขึ้นทดสอบไม่เหนียวติดหินขัด นอกจากนี้เมื่อพิจารณาสีของยางวัลคาไนซ์ จากรูปที่ 18 พบว่า ยางวัลคาไนซ์ที่ใช้ซิงค์ออกไซด์น้อยกว่า 3 phr จะมีสีค่อนข้างเข้ม โดยที่การเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ ทำให้สีของยางอ่อนลง จะเห็นว่า การใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณต่ำ จะส่งผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องการสีอ่อน แต่ในงานวิจัยสูตรยางที่ใช้ไม่ผสมสารป้องกันการเสื่อม (Antioxidant) ดังนั้นการแก้ไขปัญหามอาจใช้สารเคมีข้างต้นเพื่อป้องกันการเสื่อมของยางหรือการเปลี่ยนแปลงสีของยางในกรณีที่ใช้สูตรยางที่ลดปริมาณซิงค์ออกไซด์ลง



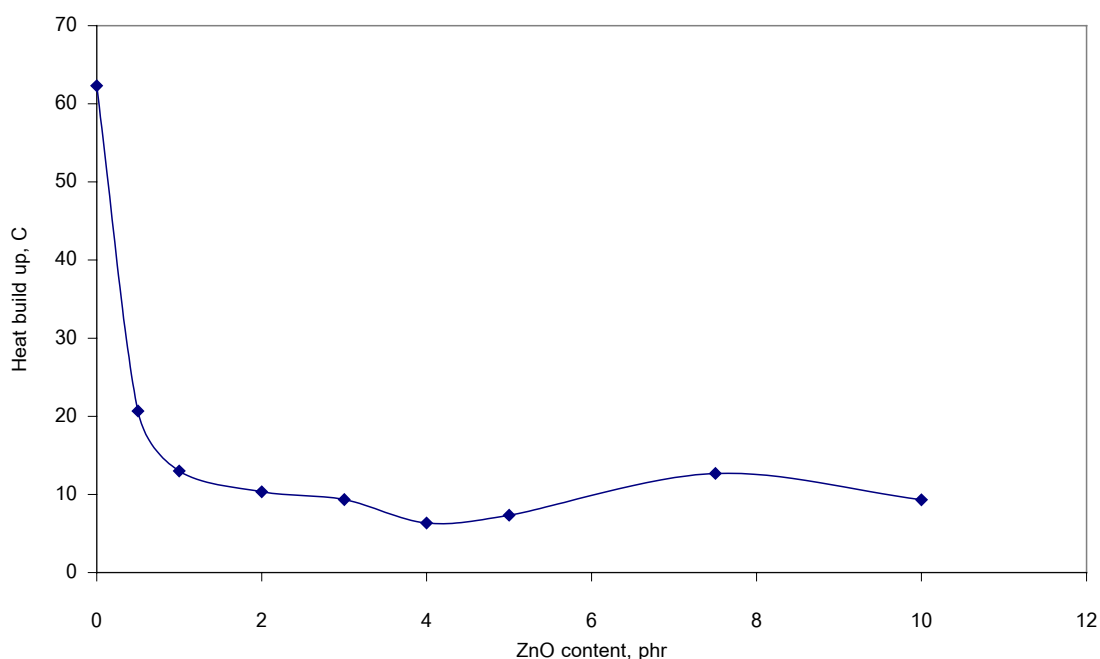
รูปที่ 18 ลักษณะของสียางวัลคาไนซ์ เมื่อแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์

ตารางที่ 7 สมบัติความทนทานต่อการสึกหรอของยางวัลคาไนซ์ที่ใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณต่างๆ

ปริมาณซิงค์ออกไซด์, phr	ลักษณะของยาง / ดัชนีการสึกหรอ
0	ชั้นทดสอบเหนียว คัดหินขัด
1	ชั้นทดสอบเหนียว คัดหินขัด
2	ชั้นทดสอบเหนียว คัดหินขัด
3	15.09
4	13.41
5	13.64
7.5	12.37
10	12.77

3.1.2.5 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อค่าความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นในยาง

จากรูปที่ 19 เป็นความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นในยางวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ พบว่าเมื่อปริมาณซิงค์ออกไซด์เพิ่มมากขึ้น จะทำให้ความร้อนสะสมลดลงอย่างมาก โดยเฉพาะการใช้ปริมาณตั้งแต่ 0 ถึง 1.0 phr ทั้งนี้เนื่องมาจากโมเลกุลโมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมโยง ทำให้มีความยืดหยุ่นหรือมีความเป็นอีลาสติกเพิ่มมากขึ้น (Krejsa, M.R., 1993) ส่งผลให้โครงสร้างของยางวัลคาไนซ์ไม่สะสมพลังงานไว้ในโมเลกุล เกิดความร้อนสะสมภายในยางได้น้อย แต่ความร้อนสะสมมีแนวโน้มคงที่เมื่อใช้ปริมาณมากกว่า 2 ถึง 5 phr แต่เมื่อใช้ปริมาณมากกว่า 5 phr จะเห็นว่าความร้อนสะสมเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องมาจากซิงค์ออกไซด์ปริมาณมากเกินไปไม่ได้ส่งผลต่อปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ แต่จะทำหน้าที่ทำนองเดียวกันกับสารตัวเติม กล่าวคือ ทำให้ความยืดหยุ่นของยางลดลง เกิดความร้อนสะสมในยางได้มากขึ้น



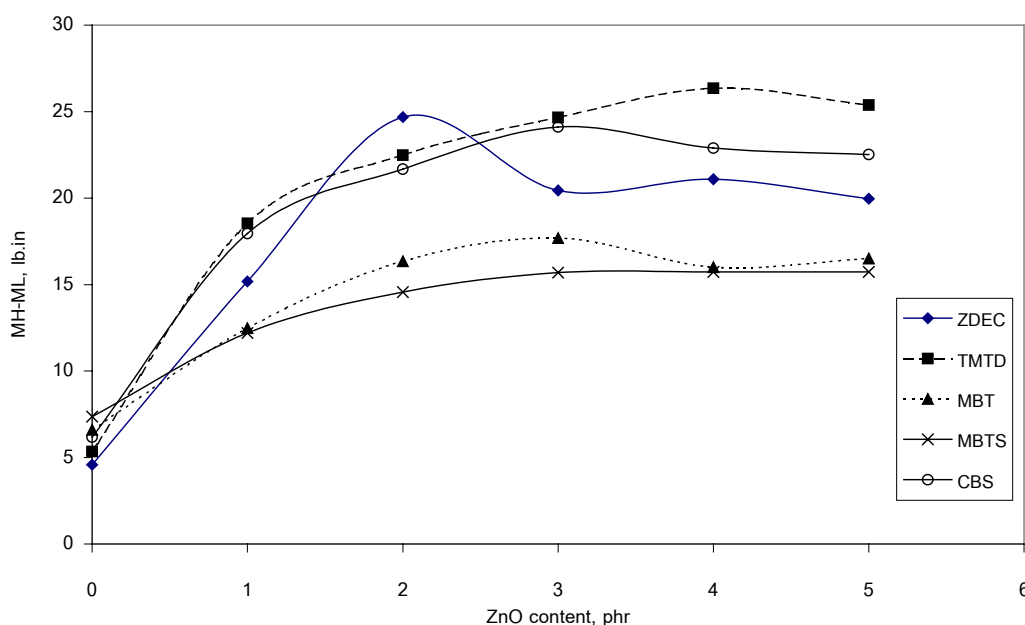
รูปที่ 19 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อค่าความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นในยาง

3.2 อิทธิพลของชนิดสารตัวเร่งต่อการทำหน้าที่ของซิงค์ออกไซด์ โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์

3.2.1 อิทธิพลของชนิดสารตัวเร่งต่อการทำหน้าที่ของซิงค์ออกไซด์ในการกระตุ้นปฏิกิริยาการการวัลคาไนซ์

3.2.1.1 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อผลต่างของแรงบิดสูงสุดและต่ำสุด

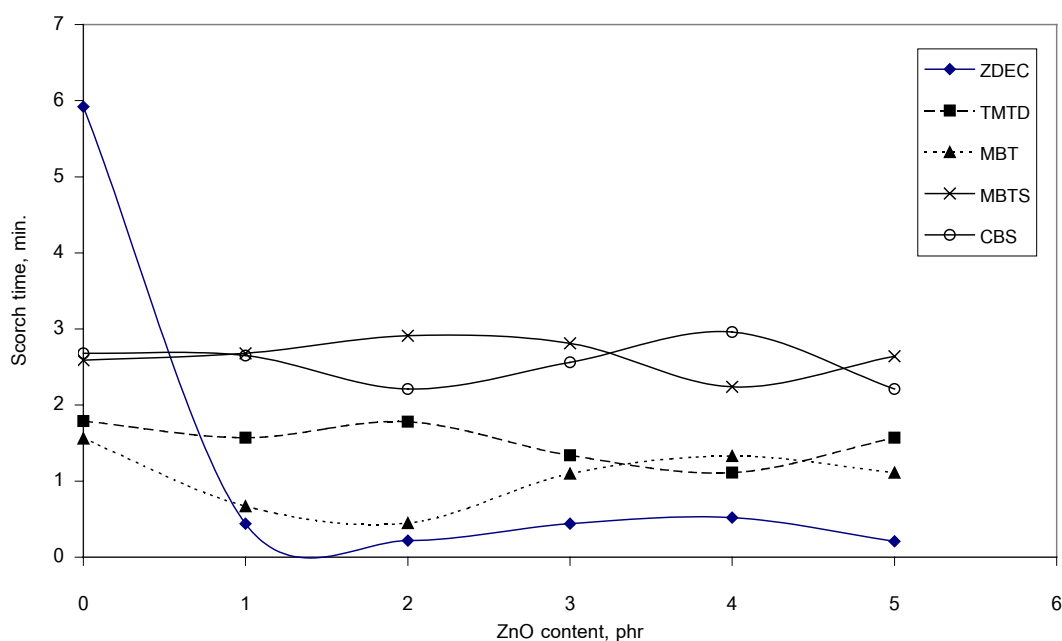
จากรูปที่ 20 พบว่า สารตัวเร่งทุกชนิดที่ใช้ในการวิจัย เมื่อใช้ปริมาณซิงค์ออกไซด์เพิ่มมากขึ้น ทำให้ผลต่างของแรงบิดสูงสุดและต่ำสุดเพิ่มมากขึ้น กล่าวคือ มีระดับการวัลคาไนซ์เพิ่มมากขึ้นนั่นเอง แต่สารตัวเร่งชนิดต่างๆจะเหมาะสมกับปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน โดยที่สารตัวเร่งไทอะโซล (MBT และ MBTS) และสารตัวเร่งซัลฟิโนไมด์ (CBS) ควรจะใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณ 3 phr จึงจะให้ระดับการวัลคาไนซ์ที่เหมาะสม สารตัวเร่งไดไทโอคาร์บาเมท ควรใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณ 2 phr ในขณะที่สารตัวเร่งไทูแรม ใช้ซิงค์ออกไซด์ 4 phr ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสารตัวเร่งแต่ละกลุ่มต้องการใช้ซิงค์ออกไซด์เพื่อเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนคือ active sulfuring agent ที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ อาจเนื่องมาจากความสามารถในการละลายหรือความเข้ากันได้ของสารตัวเร่งชนิดต่างๆ ในยางธรรมชาติ เพื่อให้เกิดการวัลคาไนซ์ที่มีประสิทธิภาพ และเกิดพันธะเชื่อมโยงปริมาณสูง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารตัวเร่งแต่ละชนิด พบว่า สารตัวเร่ง MBT และ MBTS ทำให้ยางธรรมชาติเกิดการวัลคาไนซ์ ได้ปริมาณพันธะเชื่อมโยงต่ำกว่าสารตัวเร่ง CBS, TMTD และ ZDEC



รูปที่ 20 อิทธิพลของชนิดของสารตัวเร่งต่อผลต่างของแรงบิดสูงสุดและต่ำสุด โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 5 phr

3.2.1.2 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อค่าเวลาสกอล

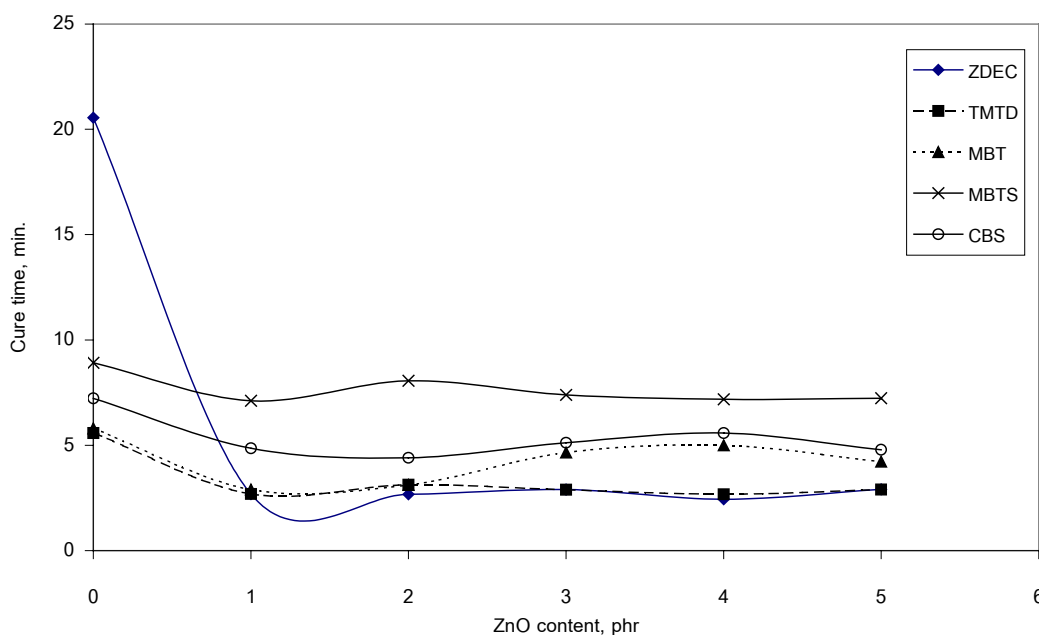
จากรูปที่ 21 เป็นการศึกษาอิทธิพลของชนิดสารตัวเร่งต่อเวลาสกอล โดยใช้สารตัวเร่งดังนี้คือ ZDEC, TMTD, MBT, MBTS และ CBS ปริมาณ 1.0 phr พบว่า กรณีสารตัวเร่ง ZDEC การใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณตั้งแต่ 0 ถึง 1 phr ทำให้เวลาสกอลลดลงอย่างมาก แต่เมื่อเพิ่มปริมาณปริมาณซิงค์ออกไซด์เพิ่มมากกว่า 1 phr จะทำให้เวลาสกอลเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย โดยที่การใช้สารตัวเร่งแต่ละชนิดจะให้อัตราการลดลงของเวลาสกอลแตกต่างกัน เมื่อปริมาณซิงค์ออกไซด์เพิ่มมากขึ้น กล่าวคือ สารตัวเร่ง ZDEC จะทำให้เวลาสกอลลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า สารตัวเร่งดังกล่าวเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ว่องไวกับซิงค์ออกไซด์และกรดไขมันได้อย่างรวดเร็วหรือตอบสนองต่อการใช้ซิงค์ออกไซด์สูง นั่นคือ การใช้ซิงค์ออกไซด์มีผลอย่างมากต่อการเกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ ในขณะที่สารตัวเร่ง TMTD, MBT, MBTS และ CBS จะทำให้เวลาสกอลลดลงได้ช้ากว่า แสดงว่าสารตัวเร่งดังกล่าวเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับซิงค์ออกไซด์และกรดไขมันได้ช้ากว่านั่นเอง



รูปที่ 21 อิทธิพลของชนิดของสารตัวเร่งต่อเวลาสุก โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 5 phr

3.2.1.2 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อค่าเวลาสุก

จากรูปที่ 22 เป็นการศึกษาอิทธิพลของซิงค์ออกไซด์ต่อเวลาสุก พบว่า กรณีสารตัวเร่ง ZDEC การใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณ 0 ถึง 1 phr จะทำให้เวลาสุกลดลงอย่างชัดเจน สอดคล้องกับเวลาสุกของยางผสมสารเคมีในรูปที่ 21 ส่วนการใช้สารตัวเร่ง TMTD, MBT และ CBS นั้น เวลาสุกจะลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ระหว่าง 0 ถึง 2 phr ในขณะที่สารตัวเร่ง MBTS เวลาสุกของยางผสมสารเคมีเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เมื่อใช้ซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 1 ถึง 5 phr เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ซิงค์ออกไซด์ พบว่าเวลาสุกของยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเร่ง ZDEC มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ MBTS, CBS, MBT และ TMTD แสดงว่า สูตรยางที่ใช้สารตัวเร่ง ZDEC หรือกลุ่มไดไทโอคาร์บาเมท มีความจำเป็นต้องใช้ซิงค์ออกไซด์ในการเกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ ในขณะที่สารตัวเร่งกลุ่มไทูเรม ไทอะโซล และซัลฟิनाไมด์ มีความจำเป็นน้อยกว่า เมื่อใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณระหว่าง 2 ถึง 5 phr ในสารตัวเร่งทั้ง 5 ชนิด พบว่า เวลาสุกของยางผสมสารเคมีเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

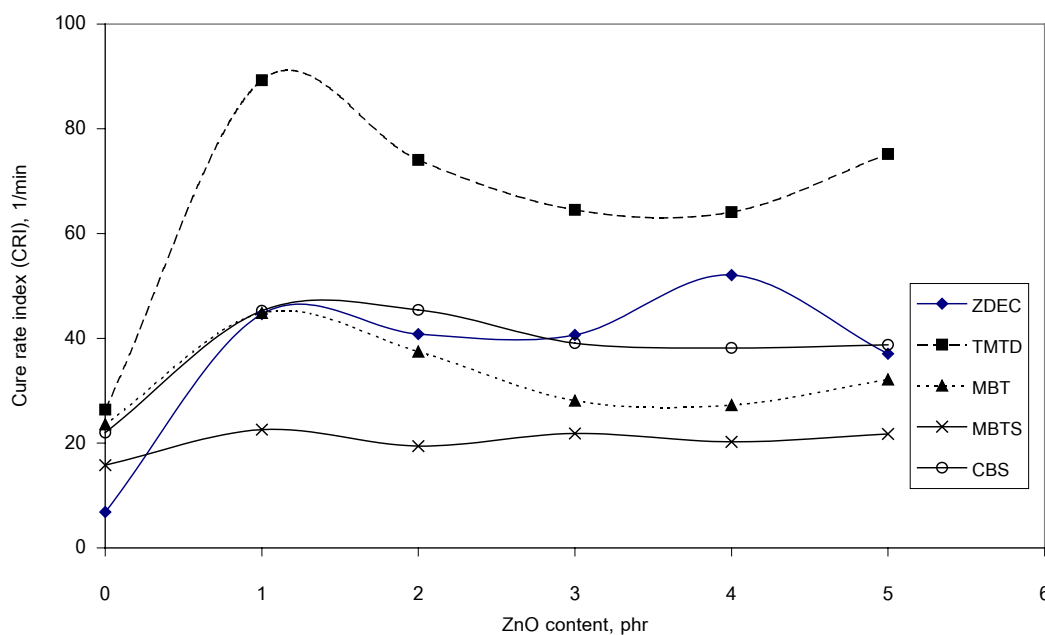


รูปที่ 22 อิทธิพลของชนิดของสารตัวเร่งต่อเวลาสุก โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 5

phr

3.2.1.3 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่ออัตราการวัลคาไนซ์

จากรูปที่ 23 เป็นการศึกษาอิทธิพลของซิงค์ออกไซด์ต่ออัตราการวัลคาไนซ์ พบว่า การใช้สารตัวเร่ง ZDEC, TMTD, MBT และ CBS ทำให้อัตราการวัลคาไนซ์เพิ่มสูงขึ้น กล่าวคือ ซิงค์ออกไซด์ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารตัวเร่งและกรดไขมัน ส่งผลให้สารตัวเร่งสามารถละลายได้มากขึ้น รวมทั้งทำให้วงแหวนกำมะถันสามารถเปิดออกได้ง่าย โดยที่สารตัวเร่ง TMTD จะเห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนที่สุด โดยเฉพาะการใช้ปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 1 phr ส่วนสารตัวเร่ง MBTS พบว่าอัตราการวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นค่อนข้างน้อย นอกจากนี้ยังพบว่า การใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณมากกว่า 2 phr ในยางผสมสารเคมีที่ใช้สารตัวเร่ง TMTD และ MBT ทำให้อัตราการการวัลคาไนซ์ลดลงเล็กน้อย ในขณะที่สารตัวเร่ง ZDEC และ CBS มีอัตราการวัลคาไนซ์เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย



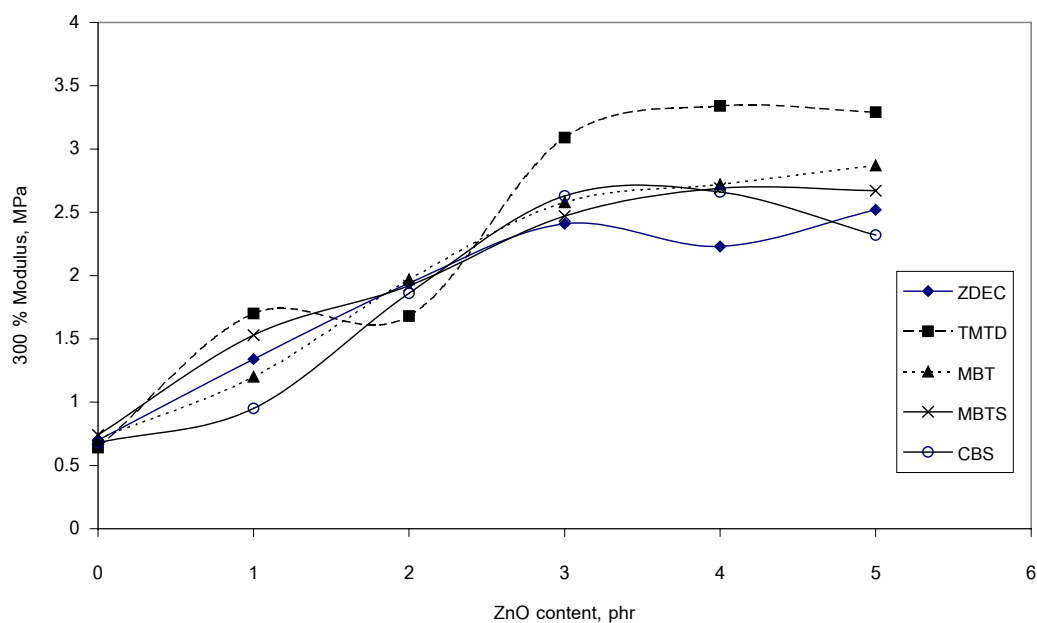
รูปที่ 23 อิทธิพลของชนิดของสารตัวเร่งต่ออัตราการวัลคาไนซ์ โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ ตั้งแต่ 0 ถึง 5 phr

3.2.2 อิทธิพลของชนิดสารตัวเร่งต่อสมบัติของยางวัลคาไนซ์ที่ใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณต่างๆ

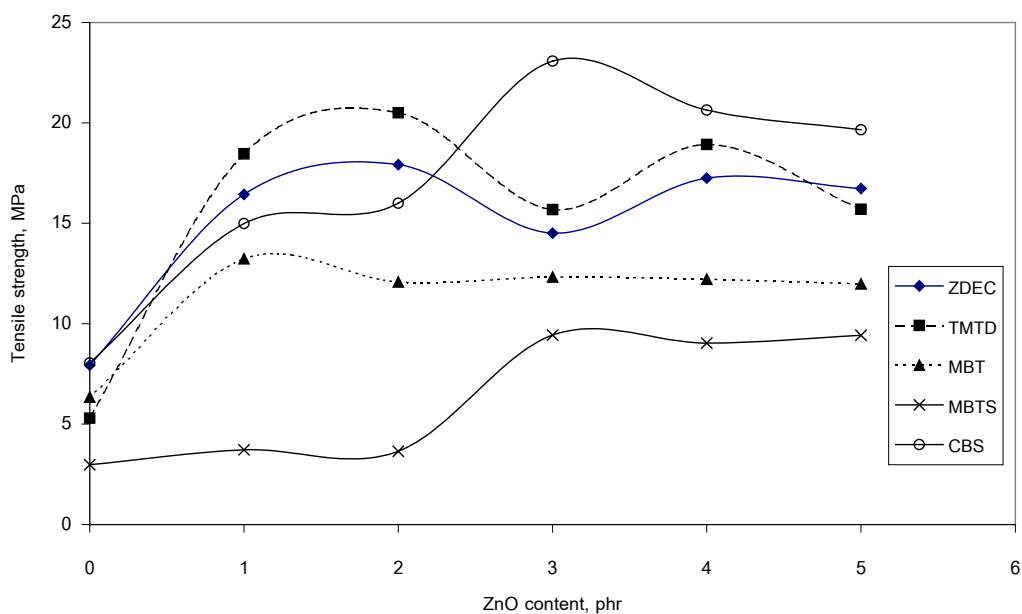
จากการทดสอบสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดของสารตัวเดิม โดยใช้ซิงค์ออกไซด์ระหว่าง 0 ถึง 5 phr ได้ผลการวิจัยดังรูปที่ 24 ถึง 28

3.2.2.1 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อความทนทานต่อการยืด

จากรูปที่ 24 เป็นค่า 300 % โมดูลัสของยางวัลคาไนซ์ที่ใช้สารตัวเร่งชนิดต่างๆ พบว่า การใช้สารตัวเร่งทั้ง 5 ชนิดคือ ZDEC, TMTD, MBT, MBTS และ CBS เมื่อเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 5 phr ทำให้ค่า 300 % โมดูลัสเพิ่มสูงขึ้น เมื่อพิจารณาอัตราการเพิ่มขึ้นของสมบัติดังกล่าว พบว่า การใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณตั้งแต่ 0 ถึง 3 phr ทำให้ค่า 300 % โมดูลัสเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน และเริ่มคงที่หรือเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อใช้ปริมาณมากกว่า 3 phr ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากประสิทธิภาพของซิงค์ออกไซด์ในการทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์และเกิดพันธะเชื่อมโยงที่แข็งแรง เมื่อใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณที่เหมาะสมคือ 3 phr



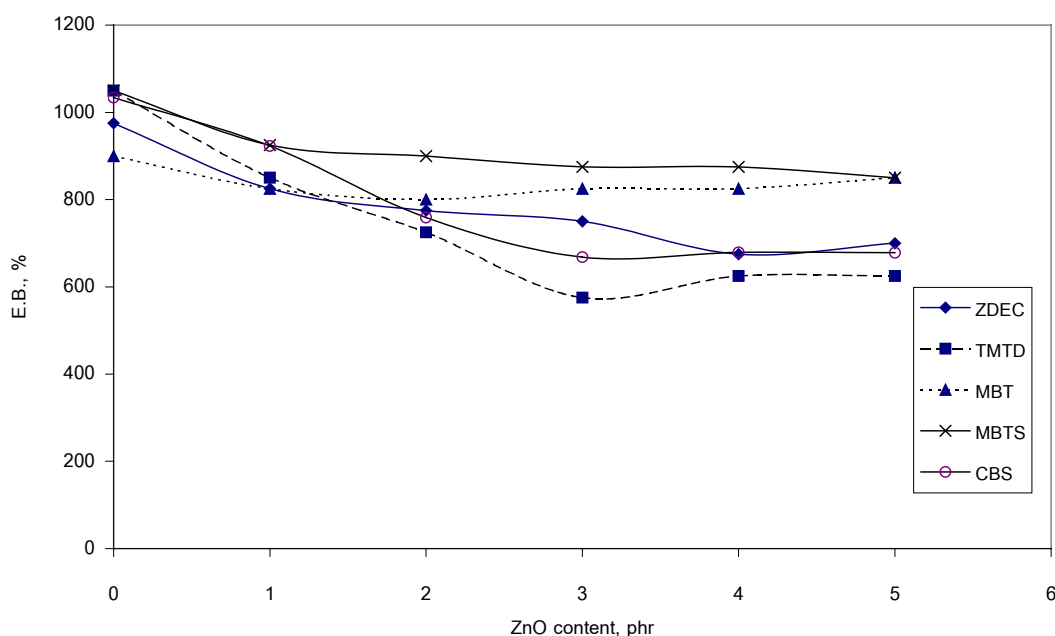
รูปที่ 24 อิทธิพลของชนิดของสารตัวเร่งต่อค่า 300% โมดูลัส โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 5 phr



รูปที่ 25 อิทธิพลของชนิดของสารตัวเร่งต่อค่าความทนทานต่อแรงดึง โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 5 phr

จากรูปที่ 25 การเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ในยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่ใช้สารตัวเร่งชนิดต่างๆ พบว่า ทำให้ความทนทานต่อแรงดึงเพิ่มสูงขึ้น โดยที่สารตัวเร่งแต่ละชนิด จะมีประสิทธิภาพในการวัล-

ค่าในซ์ที่ระดับซิงค์ออกไซด์แตกต่างกัน กล่าวคือ สารตัวเร่ง CBS และ MBTS ให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์ 3 phr ส่วน ZDEC และ TMTD ให้ความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์เท่ากับ 2 phr ในขณะที่ MBT จะให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุด ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์เท่ากับ 1 phr เมื่อเปรียบเทียบสมบัติดังกล่าวของสารตัวเร่งทั้ง 5 ชนิด ที่สมบัติสูงสุด พบว่า สารตัวเร่ง CBS ให้ความทนทานต่อแรงดึงสูงสุด รองลงมาคือ TMTD, ZDEC, MBT และ MBTS ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสารตัวเร่ง CBS เกิดการแตกตัวด้วยความร้อน เป็นเมอร์เคปโตเบนโซไทอะโซล (Mercaptobenzothiazole, MBT) และเอมีนทุติยภูมิ (secondary amine) ซึ่งส่วนของเอมีนทุติยภูมิจะทำหน้าที่กระตุ้นหรือเร่งให้ปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์เกิดได้เร็วขึ้นและมีปริมาณพันธะเชื่อมโยงสูง (Alliger, G. and Sjothun, I.J., 1978)

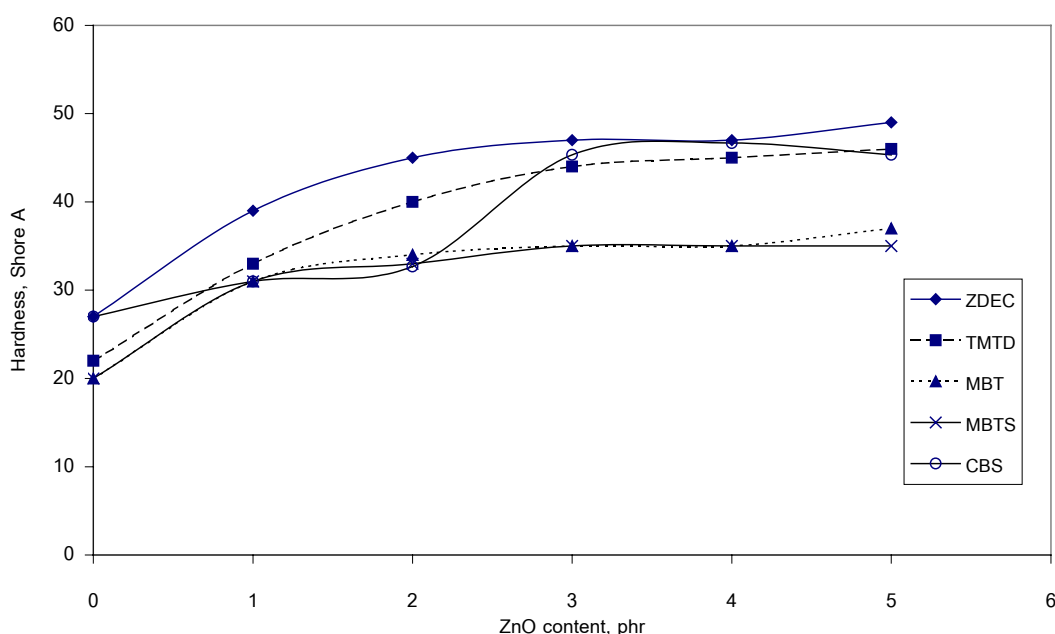


รูปที่ 26 อิทธิพลของชนิดของสารตัวเร่งต่อค่าระยะยืดสูงสุด โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 5 phr

จากรูปที่ 26 เมื่อใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณตั้งแต่ 0 ถึง 3 phr พบว่า การเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ในสูตรยางคอมปาวด์ที่ใช้ยางธรรมชาติและมีสารตัวเร่งชนิดต่างๆ ทำให้ค่าระยะยืดสูงสุดลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากการเกิดพันธะเชื่อมโยง ทำให้โมเลกุลมีความแข็งตึง (Stiffness) มากขึ้น ความสามารถในการยืดของยางธรรมชาติลดลง โดยที่สารตัวเร่ง ZDEC, TMTD และ CBS ลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อใช้ปริมาณซิงค์ออกไซด์มากกว่านั้นสมบัติดังกล่าวลดลงเล็กน้อย ส่วนสารตัวเร่ง MBT และ MBTS เมื่อใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณมากขึ้น ทำให้ระยะยืดสูงสุดลดลงเล็กน้อย

3.2.2.2 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อค่าความแข็ง

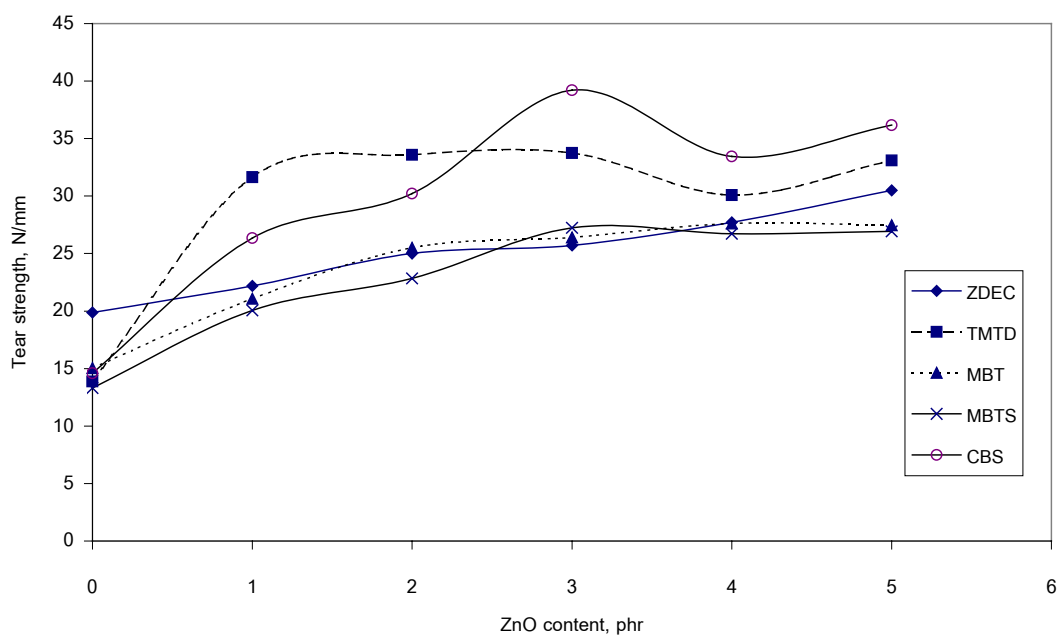
จากรูปที่ 27 เป็นสมบัตินด้านความแข็งของยางวัลคาไนซ์ พบว่า การเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ ทำให้ความแข็งของยางธรรมชาติเพิ่มสูงขึ้น แต่จะมีแนวโน้มคงที่เมื่อใช้ปริมาณมากกว่า 3 phr เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารตัวเร่งชนิดต่างๆ พบว่า สารตัวเร่ง ZDEC, TMTD และ CBS มีค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกัน และมีค่าสูงกว่าการใช้สารตัวเร่ง MBT และ MBTS ซึ่งมีค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกันเช่นเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณพันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นในยางแตกต่างกัน โดยสารตัวเร่งกลุ่มแรกคือ ZDEC, TMTD และ CBS มีปริมาณพันธะเชื่อมโยงสูงกว่าสารตัวเร่งกลุ่ม MBT และ MBTS สอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อ 3.2.1.1



รูปที่ 27 อิทธิพลของชนิดของสารตัวเร่งต่อค่าความแข็ง โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 5 phr

3.2.2.3 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด

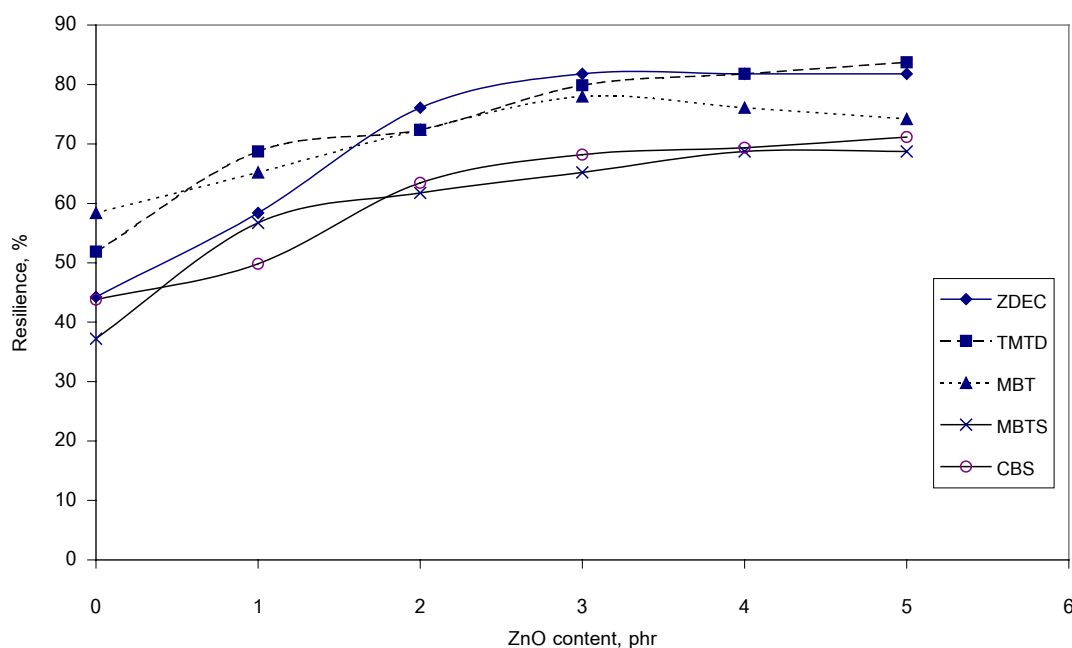
จากรูปที่ 28 เป็นสมบัตินด้านความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางวัลคาไนซ์ พบว่า การเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ ทำให้ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางเพิ่มสูงขึ้น แต่จะมีแนวโน้มคงที่ เมื่อใช้ปริมาณมากกว่า 3 phr เช่นเดียวกับสมบัตินด้านความแข็ง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารตัวเร่งชนิดต่างๆ พบว่า สารตัวเร่ง CBS จะให้ความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงสุด รองลงมาคือ TMTD ส่วน ZDEC, MBT และ MBTS ให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดที่ใกล้เคียงกัน และมีค่าต่ำกว่าสารตัวเร่งข้างต้น



รูปที่ 28 อิทธิพลของชนิดของสารตัวเร่งต่อค่าความทนทานต่อการฉีกขาด โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 5 phr

3.2.2.4 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อค่าการกระเดื่องตัว

จากรูปที่ 29 เป็นสมบัติด้านความกระเดื่องตัวของยางวัลคาไนซ์ พบว่า การเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 3 phr ทำให้ความกระเดื่องตัวของยางเพิ่มสูงขึ้น แต่จะมีแนวโน้มคงที่ เมื่อใช้ปริมาณมากกว่า 3 phr เช่นเดียวกับสมบัติด้านความแข็งแรงและความต้านทานต่อการฉีกขาด นั่นคือ การใช้ปริมาณซิงค์ออกไซด์ 3 phr ทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงได้ยางวัลคาไนซ์ที่มีความยืดหยุ่นสูง เมื่อเปรียบเทียบเทียบระหว่างสารตัวเร่งชนิดต่างๆ พบว่า สารตัวเร่ง ZDEC, TMTD และ MBT ให้ความกระเดื่องตัวสูงและมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนสารตัวเร่ง MBTS และ MBTS ให้ค่าความกระเดื่องตัวต่ำกว่าและใกล้เคียงกัน โดยมีเหตุผลในทำนองเดียวกันกับสมบัติด้านความแข็งแรงและความทนทานต่อการฉีกขาด



รูปที่ 29 อิทธิพลของชนิดของสารตัวเร่งต่อค่าการกระเดื่องตัว โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 5 phr

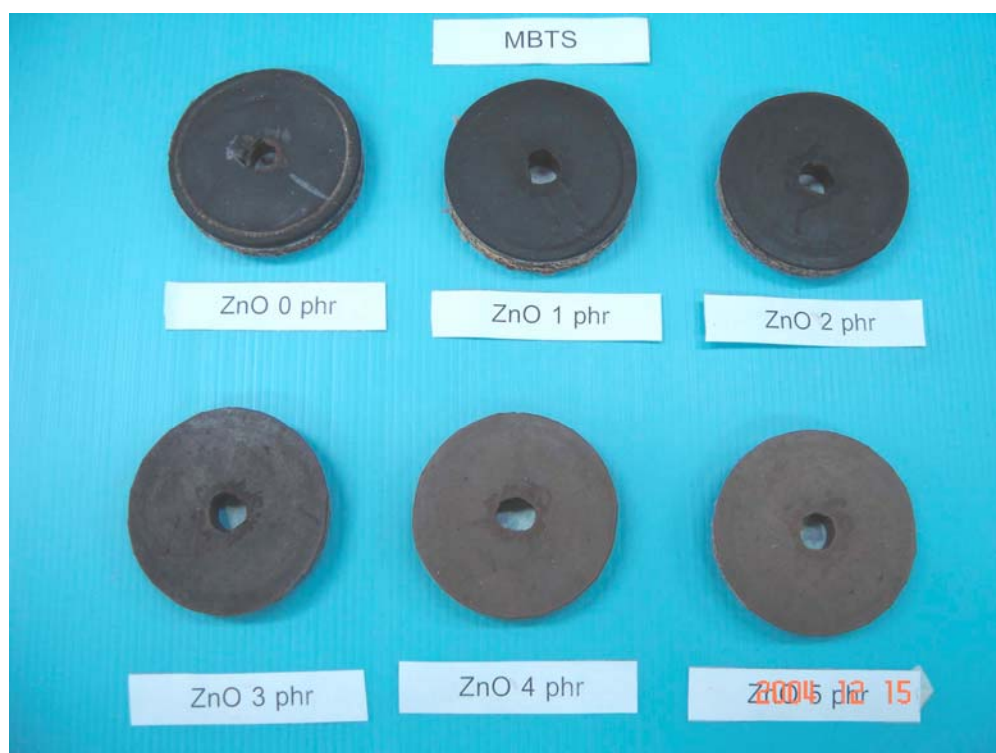
3.2.2.5 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อค่าความทนทานต่อการสึกหรอ

จากตารางที่ 8 เป็นการใส่สารตัวเร่งทั้ง 5 ชนิด ในสูตรยางธรรมชาติ พบว่าการใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณตั้งแต่ 0 ถึง 2 phr เมื่อนำไปทดสอบความทนทานต่อการสึกหรอ ชิ้นทดสอบมีลักษณะเหนียว ซึ่งเกิดจากการวัลคาไนซ์เกิดขึ้นภายในชิ้นทดสอบไม่สมบูรณ์ ทั้งนี้เนื่องมาจากการนำความร้อนภายในชิ้นทดสอบในขณะที่วัลคาไนซ์ จากอิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ แต่เมื่อปริมาณซิงค์ออกไซด์มากกว่า 2 phr พบว่า ยางวัลคาไนซ์ที่ใช้สารตัวเร่ง TMTD, MBTS และ CBS ให้สมบัติดังกล่าวดีที่สุดและใกล้เคียงกัน รองลงมาคือ MBT และ ZDEC ตามลำดับ

จากรูปที่ 30 เป็นลักษณะของยางวัลคาไนซ์ที่ใช้สารตัวเร่ง MBTS พบว่า ยางวัลคาไนซ์ที่ใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณน้อยกว่า 3 phr มีลักษณะสีเข้ม โดยการใช้สารตัวเร่งชนิดอื่นๆคือ ZDEC, TMTD, MBT และ CBS ให้ผลการทดลองที่สอดคล้องกับ MBTS แต่สูตรยางที่ใช้ในการทดลองไม่ผสมสารป้องกันกันเสื่อม ดังนั้นการลดปริมาณซิงค์ออกไซด์ โดยใช้ในปริมาณต่ำ มีความจำเป็นต้องใช้สารป้องกันการเสื่อมที่มีคุณภาพ

ตารางที่ 8 สมบัติความทนทานต่อการสึกหรอของยางวัลคาไนซ์ที่ใช้สารตัวเร่งชนิดต่างๆ

ปริมาณซิงค์ ออกไซด์, phr	สารตัวเร่ง				
	ZDEC	TMTD	MBT	MBTS	CBS
0	ชั้นทดสอบมีลักษณะเหนียว เศษยางที่เกิดจากการขีดไม่หลุดออกจากผิวยาง				
1	ชั้นทดสอบมีลักษณะเหนียว เศษยางที่เกิดจากการขีดไม่หลุดออกจากผิวยาง				
2	ชั้นทดสอบมีลักษณะเหนียว เศษยางที่เกิดจากการขีดไม่หลุดออกจากผิวยาง				
3	10.55	27.16	17.36	28.56	27.93
4	9.40	25.07	16.40	21.36	27.06
5	8.32	21.80	14.36	22.67	27.29

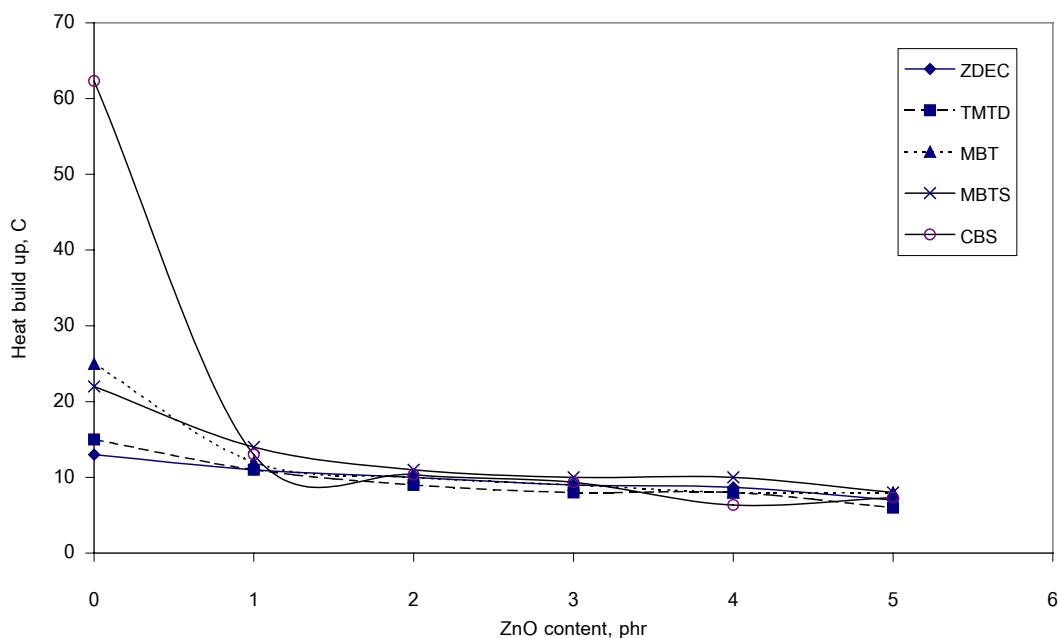


รูปที่ 30 ลักษณะของสียางวัลคาไนซ์ที่ใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณต่างๆ เมื่อใช้สารตัวเร่ง MBTS

3.2.2.6 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อค่าความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นในยาง

จากรูปที่ 31 เป็นความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นในยางวัลคาไนซ์ที่ใช้สารตัวเร่งชนิดต่างๆ พบว่า การเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์จาก 0 เป็น 1 phr ทำให้ความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นในยางลดลง โดยเฉพาะสารตัวเร่ง CBS จะเห็นการเปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจน แต่เมื่อใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณตั้งแต่ 2 ถึง 5 phr ความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มคงที่ ทั้งนี้เนื่องมาจากโมเลกุลของยางเกิดพันธะเชื่อมโยง ทำให้โมเลกุลมีความยืดหยุ่นมากขึ้น ความร้อนที่เกิดขึ้นมีการสะสมอยู่ในยางน้อย เมื่อพิจารณาสารตัวเร่งแต่

ละชนิด พบว่า ความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นในยางที่มีพันธะเชื่อมโยงที่ปริมาณเหมาะสมหรือเกิดการเชื่อมโยงได้อย่างสมบูรณ์ (Optimum cure) มีค่าความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นใกล้เคียงกัน



รูปที่ 31 อิทธิพลของชนิดของสารตัวเร่งต่อค่าความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นในยาง โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 5 phr

3.3 อิทธิพลของสารตัวเติมเมื่อแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์

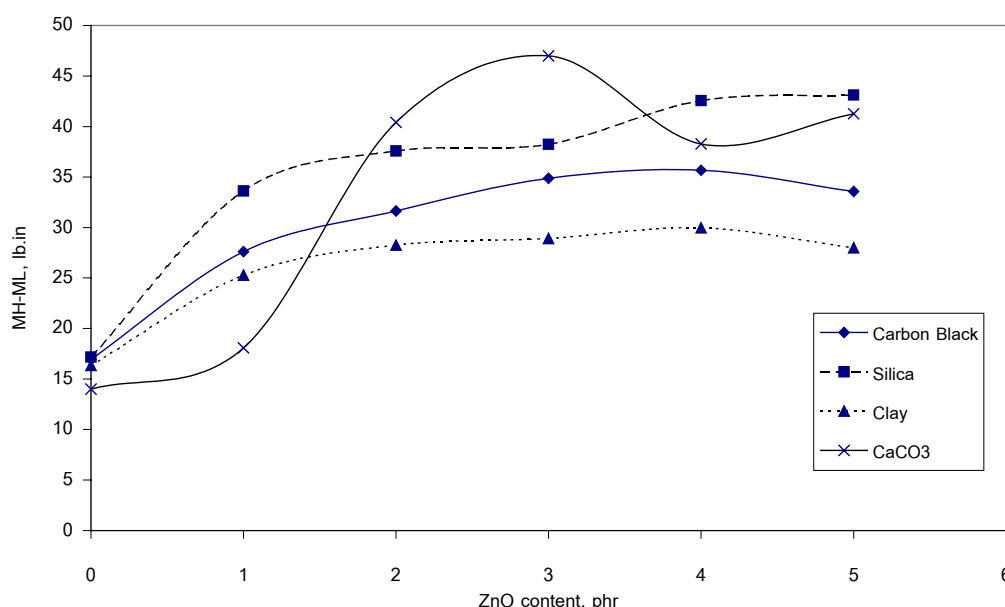
3.3.1 อิทธิพลของสารตัวเติมต่อลักษณะการวัลคาไนซ์เมื่อใช้ปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่างๆ

จากการทดสอบสมบัติของยางวัลคาไนซ์ที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกันคือ เขม่าดำ ซิลิกา เคลย์ และแคลเซียมคาร์บอเนต โดยใช้ปริมาณที่แตกต่างกัน โดยใช้หลักเกณฑ์ปริมาณการใช้สารตัวเติมที่ทางอุตสาหกรรมนิยมใช้คือ เขม่าดำและซิลิกาใช้ปริมาณ 40 phr ส่วนเคลย์และแคลเซียมคาร์บอเนตใช้ปริมาณ 100 phr ได้ผลการวิจัยดังรูปที่ 32 ถึง 35

3.3.1.1 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อค่าผลต่างของแรงบิดสูงสุดและต่ำสุด

จากรูปที่ 32 การใช้สารตัวเติมทุกชนิดที่ใช้ในการวิจัยคือ เขม่าดำ ซิลิกา เคลย์ และแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่า เมื่อใช้ปริมาณซิงค์ออกไซด์เพิ่มมากขึ้น ทำให้ผลต่างของแรงบิดสูงสุดและต่ำสุดเพิ่มมากขึ้น กล่าวคือ มีระดับการวัลคาไนซ์เพิ่มมากขึ้นนั่นเอง เมื่อเปรียบเทียบในระหว่างสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพคือ เขม่าดำ และซิลิกาที่ปริมาณเท่ากันคือ 40 phr พบว่า ซิลิกาจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของผลต่างของแรงบิดสูงสุดและต่ำสุดมากกว่า และมีระดับของผลต่างของแรงบิดสูงสุดและต่ำสุดมากกว่าด้วย

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเคลย์และแคลเซียมคาร์บอเนต เมื่อใช้ปริมาณ 100 phr พบว่า สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตให้อัตราการเพิ่มขึ้นของผลต่างของแรงบิดสูงสุดและต่ำสุดมากกว่าเคลย์ รวมทั้งมีค่าผลต่างที่มากกว่าด้วย นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณ 3 phr ในยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด จะให้ผลต่างของแรงบิดสูงสุดและต่ำสุดถึงจุดสมดุลหรือจุด optimum cure เมื่อใช้ปริมาณมากกว่า 3 phr จะให้ค่าผลต่างของแรงบิดทั้งสองมีแนวโน้มคงที่ ส่วนสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต จะทำให้ผลต่างของแรงบิดสูงสุดและต่ำสุดมีค่าลดลง

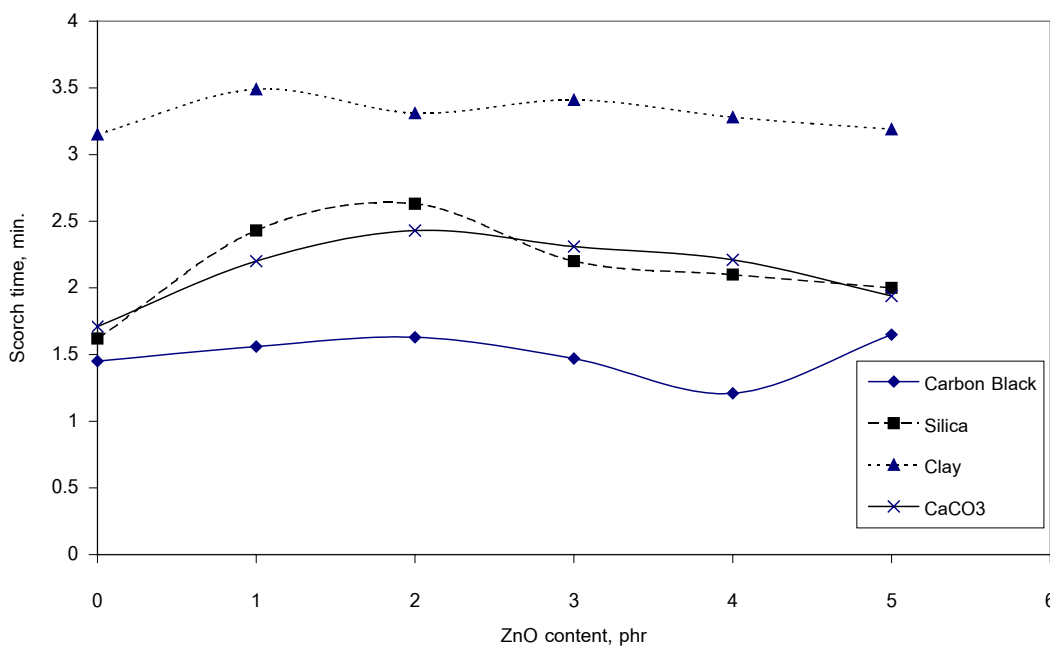


รูปที่ 32 อิทธิพลของชนิดของสารตัวเติมต่อเวลาสกอช โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 5.0 phr

3.3.1.2 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อค่าเวลาสกอช

จากรูปที่ 33 เป็นการศึกษาอิทธิพลของซิงค์ออกไซด์ต่อเวลาสกอชของยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติม 4 ชนิด พบว่า กรณีสารตัวเติมเขม่าดำและเคลย์ เมื่อปริมาณซิงค์ออกไซด์เพิ่มมากขึ้น เวลาสกอชมีแนวโน้มคงที่ ในขณะที่สารตัวเติมซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนต เมื่อปริมาณซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 2 phr เวลาสกอชเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณซิงค์ออกไซด์มากกว่า 2 phr จะทำให้เวลาสกอชลดลงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบสารตัวเติมแต่ละชนิด พบว่า สารตัวเติมเขม่าดำมีเวลาสกอชต่ำที่สุด อาจเนื่องมาจากในขั้นตอนการผสมเกิดความร้อนสูง ส่งผลให้ยางเริ่มต้นเกิดการวัลคาไนซ์ได้เร็วขึ้น ส่วนสารตัวเติมซิลิกามีเวลาสกอชยาวกว่า ถึงแม้ว่าจะเกิดความร้อนขึ้นในการผสมสูง แต่อนุภาคของสารตัวเติมชนิดนี้มีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (Silanol groups) ทำให้เกิดการดูดซับสารตัวเร่ง ทำให้การเริ่มต้นการวัลคาไนซ์เกิดได้ช้าลง และเมื่อเปรียบเทียบสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตกับเคลย์ พบว่า เคลย์มีเวลาสกอชยาว

กว่าแคลเซียมคาร์บอเนต ทั้งนี้เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตมีความเป็นด่าง ส่งผลให้เกิดการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ได้เร็วกว่า ในขณะที่สารตัวเติมเคลย์มีส่วนประกอบเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ซึ่งอาจทำให้เกิดการดูดซับสารตัวเร่งในทำนองเดียวกันกับสารตัวเติมซิลิกา

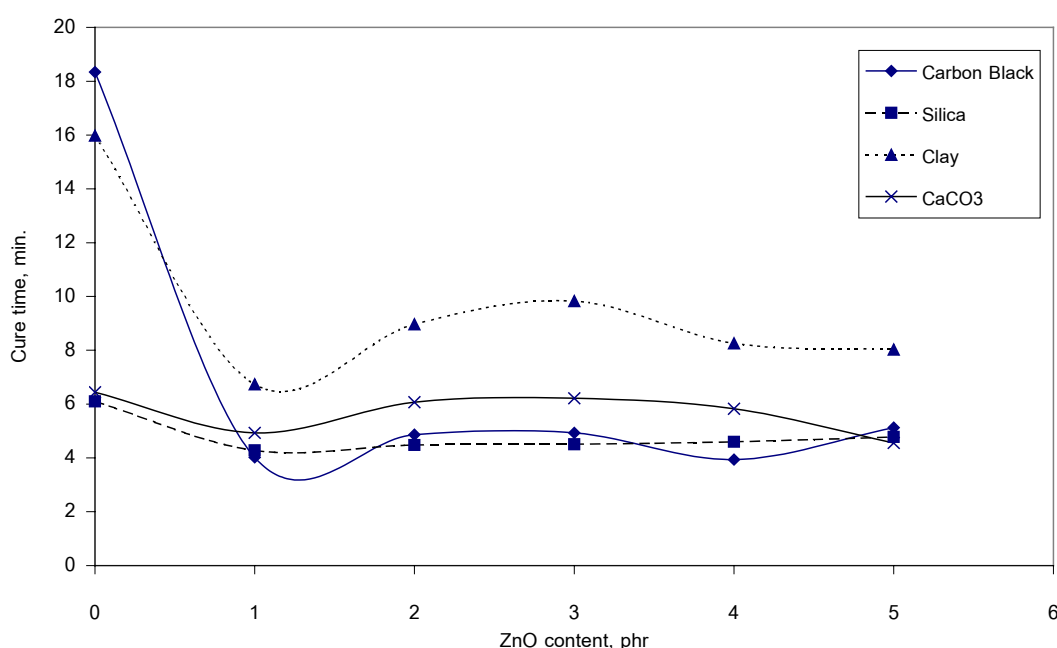


รูปที่ 33 อิทธิพลของชนิดของสารตัวเติมต่อเวลาสกอร์ช โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0.5 ถึง 5.0 phr

3.3.1.3 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อค่าเวลาสกอร์ช

จากรูปที่ 34 เป็นการศึกษาอิทธิพลของซิงค์ออกไซด์ต่อเวลาสกอร์ชของยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติม 4 ชนิด พบว่า เมื่อปริมาณซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 1 phr ทำให้เวลาสกอร์ชลดลงอย่างรวดเร็ว นั่นคือ ซิงค์ออกไซด์มีอิทธิพลอย่างมากต่อปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชนิดของสารตัวเติม พบว่า สารตัวเติมซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนต ทั้งกรณีที่ไม่มีและมีซิงค์ออกไซด์ จะทำให้เวลาสกอร์ชลดลงเพียงเล็กน้อย โดยเมื่อเพิ่มปริมาณมากกว่า 1 phr ค่าเวลาสกอร์ชเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีความเป็นด่าง รวมทั้งมีไอออนเป็น แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ซึ่งอาจส่งผลกระตุ้นปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ ในทำนองเดียวกันกับการทำหน้าที่ของซิงค์ออกไซด์ในการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับกรดไขมันและสารตัวเร่ง ส่วนสารตัวเติมซิลิกานั้นมีการผสมไดเอทิลีนไกลคอล (Diethylene glycol, DEG) ลงไป 6 เปอร์เซ็นต์ของสารตัวเติมชนิดนี้ ซึ่งสารเคมีชนิดนี้มีความเป็นด่าง ส่งผลให้ปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์เกิดได้เร็วขึ้น สารตัวเติมอีก 2 ชนิดคือ เขม่าดำและเคลย์ พบว่า ซิงค์ออกไซด์จะมีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ค่อนข้างมาก โดยเฉพาะการเพิ่ม

ปริมาณจาก 0 เป็น 1 phr และมีแนวโน้มคงที่หรือเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เมื่อใช้ปริมาณตั้งแต่ 1 ถึง 5 phr กรณีสารตัวเติมเคลย์นั้น ถึงแม้ว่าองค์ประกอบจะมี SiO_2 เป็นส่วนประกอบและมีโลหะออกไซด์อื่นๆปนอยู่ด้วย แต่ในสูตรยางไม่มีการใช้ไดเอทิลีนไกลคอล ทำให้สารตัวเติมชนิดนี้สามารถดูดซับสารตัวเร่ง ทำให้การวัลคาไนซ์เกิดได้ช้าลง ในขณะที่สารตัวเติมเขม่าดำนั้น ซิงค์ออกไซด์มีความจำเป็นต้องใช้เพื่อเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับสารตัวเร่งและกรดสเตียริก เพื่อทำหน้าที่กระตุ้นและเร่งปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติ โดยที่สารตัวเติมเขม่าดำไม่มีองค์ประกอบที่เป็นโลหะออกไซด์หรืออะมีนในปริมาณต่ำ

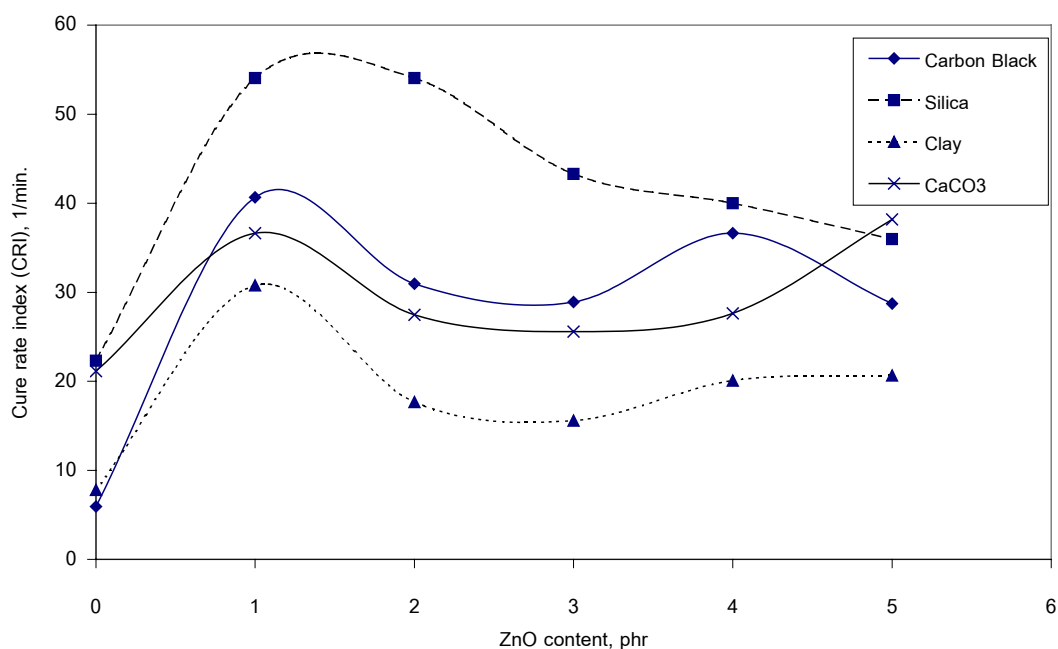


รูปที่ 34 อิทธิพลของชนิดของสารตัวเติมต่อเวลาสุก โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 5 phr

3.3.1.4 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่ออัตราการวัลคาไนซ์

จากรูปที่ 35 เป็นการศึกษาอิทธิพลของซิงค์ออกไซด์ต่ออัตราการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติ ผสมสารตัวเติม 4 ชนิด พบว่า เมื่อปริมาณซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0 ถึง 1 phr ทำให้อัตราการวัลคาไนซ์เพิ่มสูงขึ้น โดยที่สารตัวเติมเขม่าดำและซิลิกา มีอัตราการเพิ่มขึ้นของปฏิกิริยาที่ใกล้เคียงกัน และสูงกว่าสารตัวเติมเคลย์และแคลเซียมคาร์บอเนต แต่เมื่อปริมาณซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 1 ถึง 5 phr พบว่า อัตราการวัลคาไนซ์มีแนวโน้มลดลง โดยเฉพาะสารตัวเติมซิลิกาจะลดลงต่อเนื่องอย่างเห็นได้ชัด

ส่วนเขม่าดำ เคลย์ และแคลเซียมคาร์บอเนต จะลดลงในช่วงปริมาณ 1 ถึง 2 phr หลังจากนั้นแนวโน้มคงที่



รูปที่ 35 อิทธิพลของชนิดของสารตัวเติมต่ออัตราการวัลคาไนซ์ โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 5 phr

3.3.2 อิทธิพลของสารตัวเติมต่อลักษณะการวัลคาไนซ์เมื่อใช้ปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่างๆต่อสมบัติของยางวัลคาไนซ์

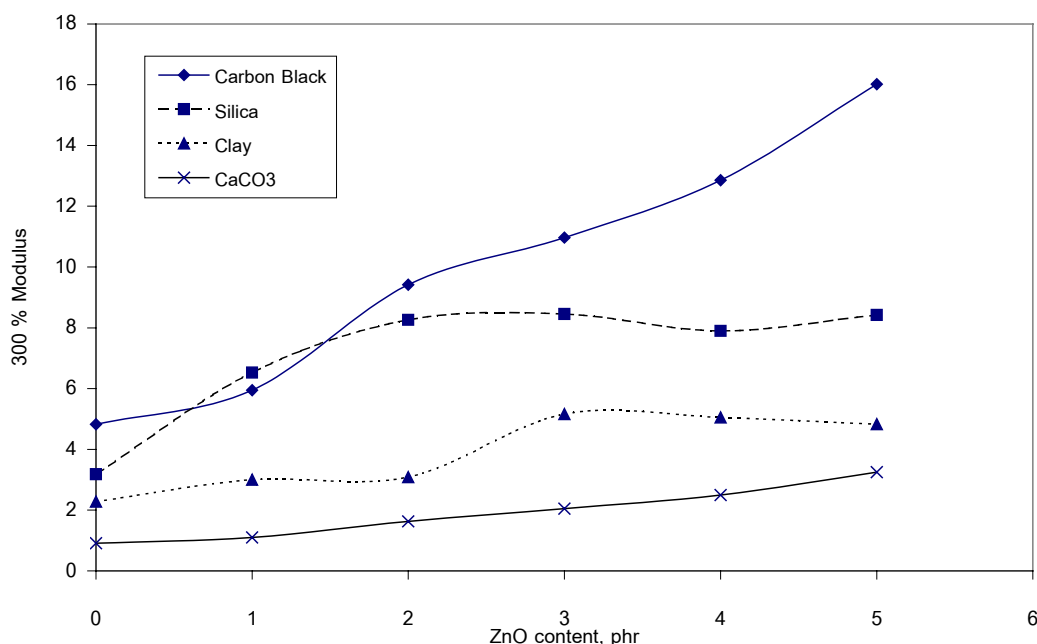
จากการทดสอบสมบัติทางกายภาพของยางวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดของสารตัวเติมคือ เขม่าดำ ซิลิกา เคลย์ และแคลเซียมคาร์บอเนต โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ระหว่าง 0 ถึง 5 phr ได้ผลการวิจัยดังรูปที่ 36 ถึง 42

3.3.2.1 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อความทนทานต่อการยืด

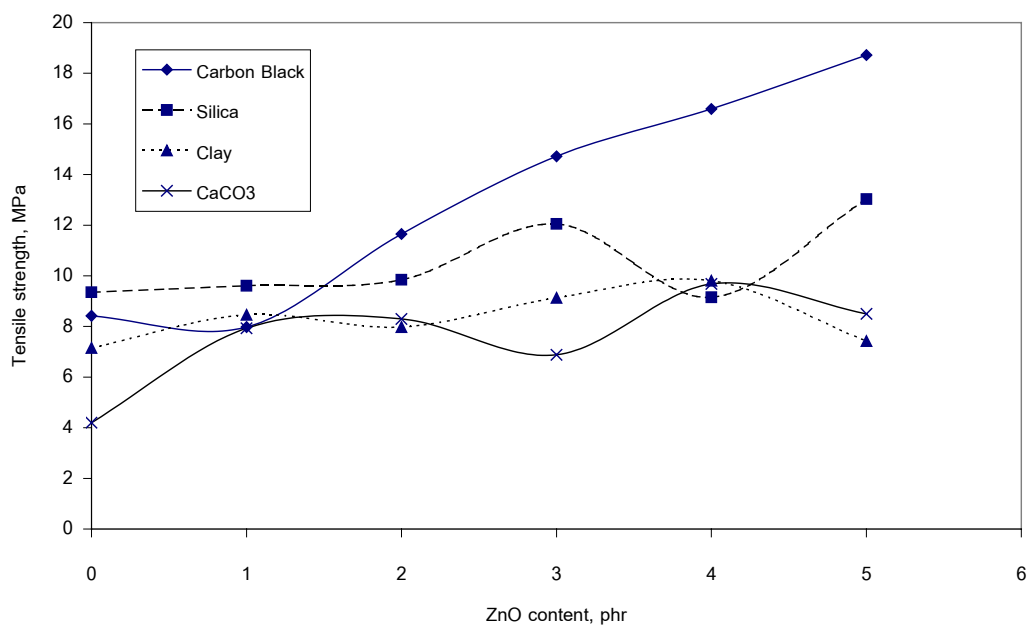
จากรูปที่ 36 เป็นค่า 300 % โมดูลัสของยางวัลคาไนซ์ พบว่า การเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ในยางวัลคาไนซ์ที่ใช้สารตัวเติมทั้ง 4 ชนิด ทำให้ค่า 300 % โมดูลัสเพิ่มขึ้น โดยที่สารตัวเติมซิลิกาและเคลย์จะให้ค่าเริ่มคงที่ เมื่อใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณ 2 และ 3 phr ตามลำดับ ส่วนการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตจะให้ค่า 300 % โมดูลัสเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ในขณะที่การใช้สารตัวเติมเขม่าดำ จะให้ค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนและมีอัตราการเพิ่มขึ้นของสมบัติดังกล่าวสูงที่สุด นั้นแสดงให้เห็นว่า สารตัวเติมเขม่าดำมีความจำเป็นต้องใช้ซิงค์ออกไซด์มากที่สุด รองลงมาคือ ซิลิกา เคลย์ และแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ

จากรูปที่ 37 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ ทำให้ความทนทานต่อแรงดึงเพิ่มสูงขึ้น แต่สารตัวเติมแต่ละชนิดตอบสนองต่อปริมาณซิงค์ออกไซด์แตกต่างกัน กล่าวคือ การใช้สารตัวเติมเขม่าดำ เมื่อปริมาณซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 5 phr ทำให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ซิลิกา เคลย์ และแคลเซียมคาร์บอเนต จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แสดงว่า สูตรยางที่มีสารตัวเติม 3 ชนิดข้างต้น การใช้ซิงค์ออกไซด์มีอิทธิพลต่อสมบัติของยางน้อยกว่ากรณีการใช้สารตัวเติมเขม่าดำ

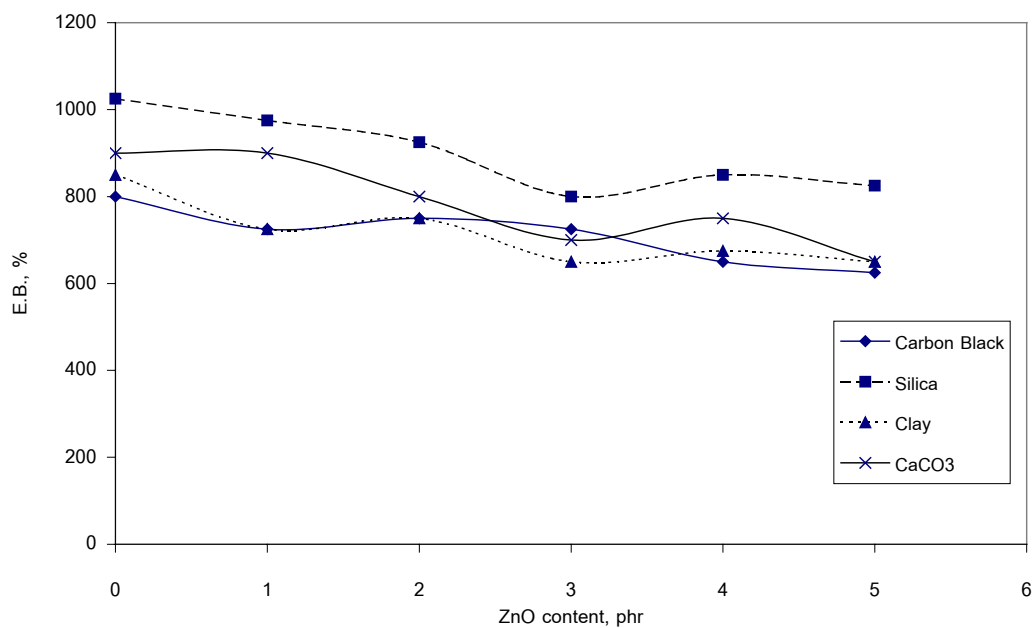
จากรูปที่ 38 พบว่า การเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ ทำให้ระยะยืดสูงสุดของยางวัลคาไนซ์มีแนวโน้มลดลง ในอัตราที่ลดลงที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากซิงค์ออกไซด์ ทำให้ยางธรรมชาติเกิดพันธะเชื่อมโยงได้มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่ใช้ซิงค์ออกไซด์ ส่งผลให้ความสามารถในการยืดลดน้อยลง



รูปที่ 36 อิทธิพลของชนิดของสารตัวเติมต่อค่า 300% โมดูลัส โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 5 phr



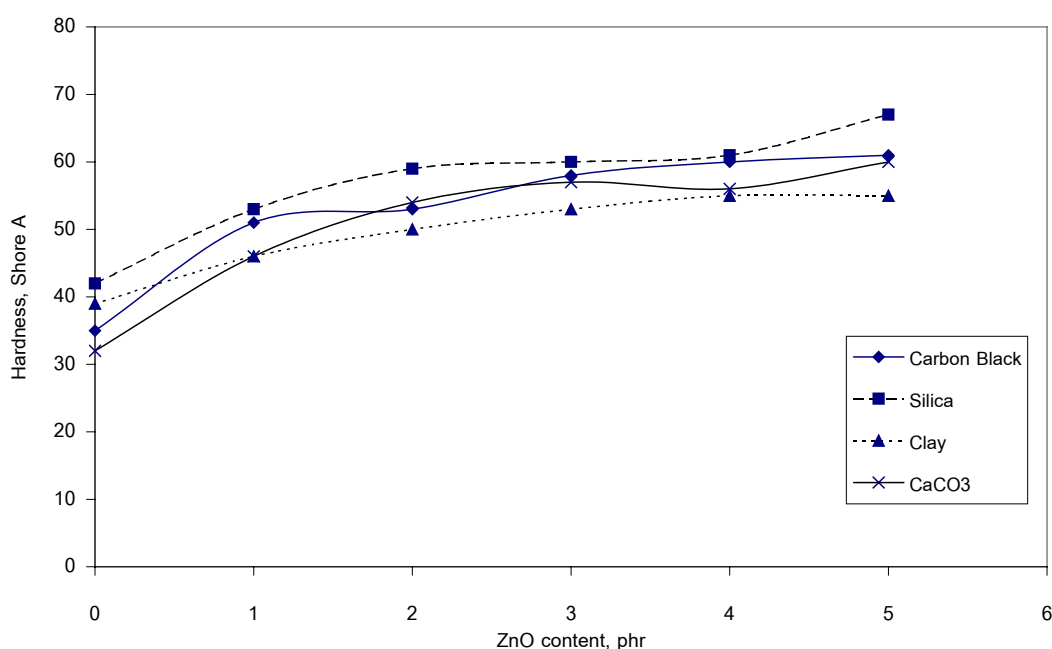
รูปที่ 37 อิทธิพลของชนิดของสารตัวเติมต่อค่าความทนทานต่อแรงดึง โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 5 phr



รูปที่ 38 อิทธิพลของชนิดของสารตัวเติมต่อค่าระยะยืดสูงสุด โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 5 phr

3.3.2.2 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อค่าความแข็ง

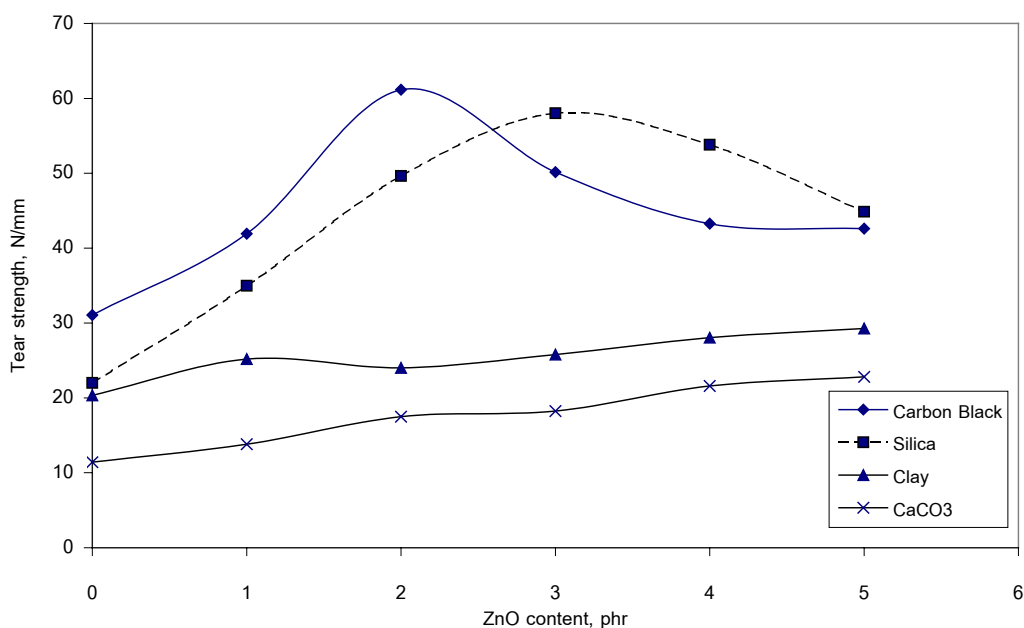
จากรูปที่ 39 พบว่า การเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ในยางวัลคาไนซ์ที่ใช้สารตัวเติมทั้ง 4 ชนิด ทำให้ความแข็งของยางเพิ่มสูงขึ้น โดยเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูง เมื่อใช้ปริมาณ 0 ถึง 2 phr แต่เมื่อใช้ปริมาณมากกว่าหรือเท่ากับ 3 phr ค่าความแข็งมีแนวโน้มคงที่ แสดงให้เห็นว่า พันธะเชื่อมโยงเริ่มเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์เมื่อใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณ 3 phr เมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพคือ เหม่ดำ และซิลิกา ปริมาณ 40 phr พบว่า ซิลิกามีค่าความแข็งสูงกว่าเหม่ดำ ส่วนกรณีสารตัวเติมชนิดไม่เสริมประสิทธิภาพคือ เคลย์ และแคลเซียมคาร์บอเนต ปริมาณ 100 phr พบว่า แคลเซียมคาร์บอเนตให้ค่าความแข็งสูงกว่า



รูปที่ 39 อิทธิพลของชนิดของสารตัวเติมต่อค่าความแข็ง โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 5 phr

3.3.2.3 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด

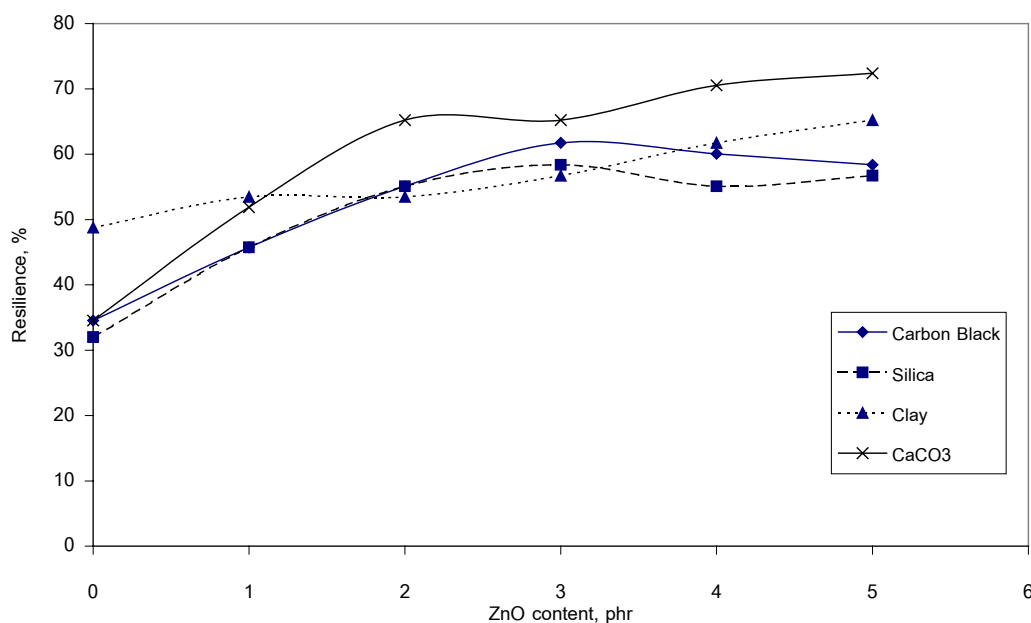
จากรูปที่ 40 เป็นอิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ในยางวัลคาไนซ์ที่ใช้สารตัวเติมทั้ง 4 ชนิด พบว่า กรณีการใช้สารตัวเติมเหม่ดำ และซิลิกา ปริมาณ 40 phr การเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ ทำให้ความทนทานต่อการฉีกขาดของยางวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยที่สารตัวเติมเหม่ดำ มีความทนทานต่อการฉีกขาดสูงสุดเมื่อใช้ซิงค์ออกไซด์เท่ากับ 2 phr ในขณะที่ซิลิกามีค่าสูงสุดเมื่อใช้ปริมาณ 3 phr ส่วนการใช้สารตัวเติมเคลย์และแคลเซียมคาร์บอเนต ปริมาณ 100 phr ทำให้ความทนทานต่อการฉีกขาดเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย



รูปที่ 40 อิทธิพลของชนิดของสารตัวเติมต่อค่าความทนทานต่อการฉีกขาด โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 5 phr

3.3.2.4 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อค่าการกระเดื่องตัว

รูปที่ 41 เป็นค่าความกระเดื่องตัวของยางวัลคาไนซ์ พบว่า เมื่อปริมาณซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้น ทำให้ความกระเดื่องตัวของยางเพิ่มสูงขึ้น โดยเพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่อใช้ซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 3 phr แต่เมื่อใช้มากกว่าหรือเท่ากับ 3 phr ค่าความกระเดื่องตัวของยางวัลคาไนซ์มีแนวโน้มคงที่หรือเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่า การใช้ซิงค์ออกไซด์ในยางธรรมชาติ ทำให้ยางวัลคาไนซ์มีความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างซิลิกาและเขม่าดำ ปริมาณ 40 phr ซึ่งเป็นสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพ พบว่า เขม่าดำให้ค่าความกระเดื่องตัวสูงกว่า ส่วนสารตัวเติมชนิดไม่เสริมประสิทธิภาพคือ เกลย์ และแคลเซียมคาร์บอเนต ปริมาณ 100 phr พบว่า แคลเซียมคาร์บอเนตให้ค่าความกระเดื่องตัวสูงกว่า



รูปที่ 41 อิทธิพลของชนิดของสารตัวเติมต่อค่าการกระเดื่องตัว โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 5 phr

3.3.2.5 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อค่าความทนทานต่อการสึกหรอ

จากตารางที่ 9 พบว่า กรณีสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพคือ เขม่าดำ และซิลิกา ปริมาณ 40 phr เมื่อเปรียบเทียบกรณีที่ใช้และไม่ใช้ซิงค์ออกไซด์ จะเห็นว่า กรณีที่ไม่ใช้ซิงค์ออกไซด์ ไม่สามารถทดสอบได้ เนื่องจากชั้นทดสอบมีลักษณะเหนียวติดบริเวณผิวที่ขัด เมื่อใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณเพิ่มมากขึ้น ทำให้ความทนทานต่อการสึกหรอเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยที่สารตัวเติมซิลิกาให้ค่าความทนทานต่อการสึกหรอสูงกว่า ส่วนสารตัวเติมที่ไม่เสริมประสิทธิภาพคือ เคลย์ และแคลเซียมคาร์บอเนต ใช้ในปริมาณ 100 phr พบว่า ความทนทานต่อการสึกหรอไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

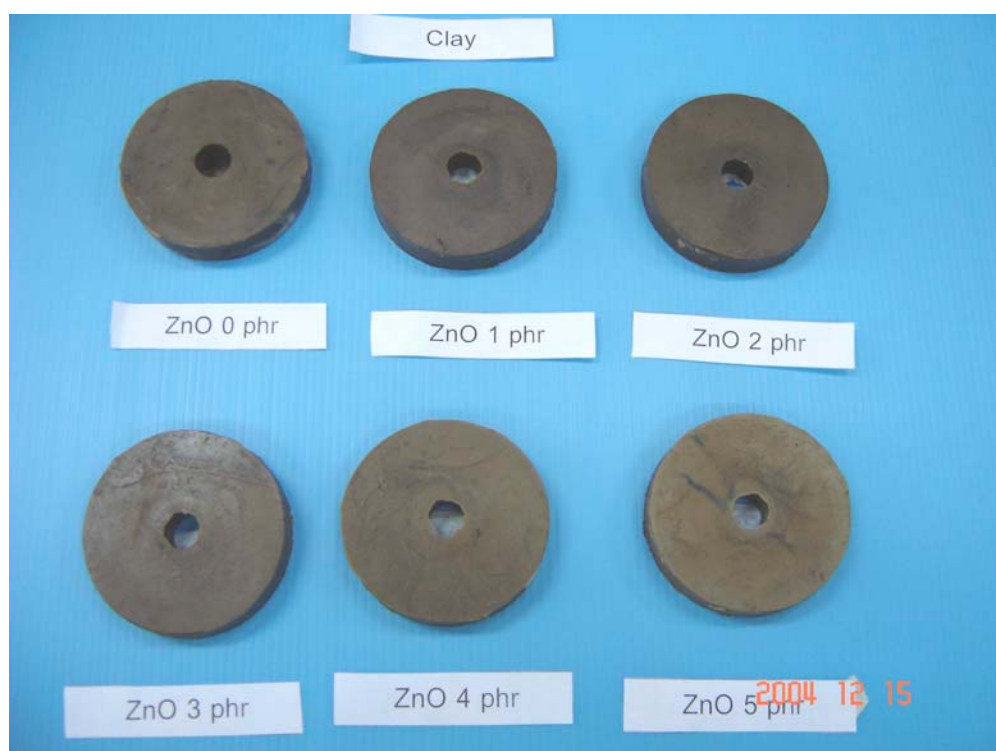
ตารางที่ 9 สมบัติความทนทานต่อการสึกหรอของยางวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ

ปริมาณซิงค์ออกไซด์, phr	สารตัวเติม			
	เขม่าดำ	ซิลิกา	เคลย์	แคลเซียมคาร์บอเนต
0	ขึ้นทดสอบเหนียว	ขึ้นทดสอบเหนียว	ขึ้นทดสอบเหนียว	ขึ้นทดสอบเหนียว
1	52.66	ขึ้นทดสอบเหนียว	20.36	13.51
2	55.93	77.88	16.46	10.75
3	55.33	74.77	18.05	9.48
4	56.23	76.72	15.06	9.53
5	67.70	84.66	14.57	10.84

จากรูปที่ 42 เป็นลักษณะของยางวัลคาไนซ์ที่ใช้สารตัวเติมซิลิกา ปริมาณ 40 phr โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ และในสูตรยางไม่ใช้สารป้องกันการเสื่อม พบว่า ในกรณีที่ใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณน้อยกว่า 3 phr จะให้สีของยางวัลคาไนซ์ค่อนข้างเข้ม ส่วนสูตรยางที่ไม่ผสมซิงค์ออกไซด์และใช้ปริมาณ 1 phr พบว่า ได้ยางวัลคาไนซ์ที่มีลักษณะเหนียว ไม่หลุดออกจากผิวยางหลังจากถูกขัด การที่สีของยางวัลคาไนซ์มีลักษณะเข้ม เนื่องมาจากเกิดปฏิกิริยาการออกซิเดชันของยาง จากการที่สูตรยางไม่ได้ใช้สารเคมีชนิดแอนติออกซิแดนท์ผสมลงไป ส่วนการใช้ปริมาณซิงค์ออกไซด์สูงขึ้น ทำให้ได้ยางวัลคาไนซ์ที่มีสีขาวกว่า เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์ที่มีค่าดัชนีหักเหแตกต่างจากดัชนีหักเหของยางสูง ทำให้ยางมีสีขาว



รูปที่ 42 ลักษณะของสียางวัลคาไนซ์ที่ใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณต่างๆ เมื่อใช้สารตัวเติมซิลิกา



รูปที่ 43 ลักษณะของสียางวัลคาไนซ์ที่ใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณต่างๆ เมื่อใช้สารตัวเติมเคลย์

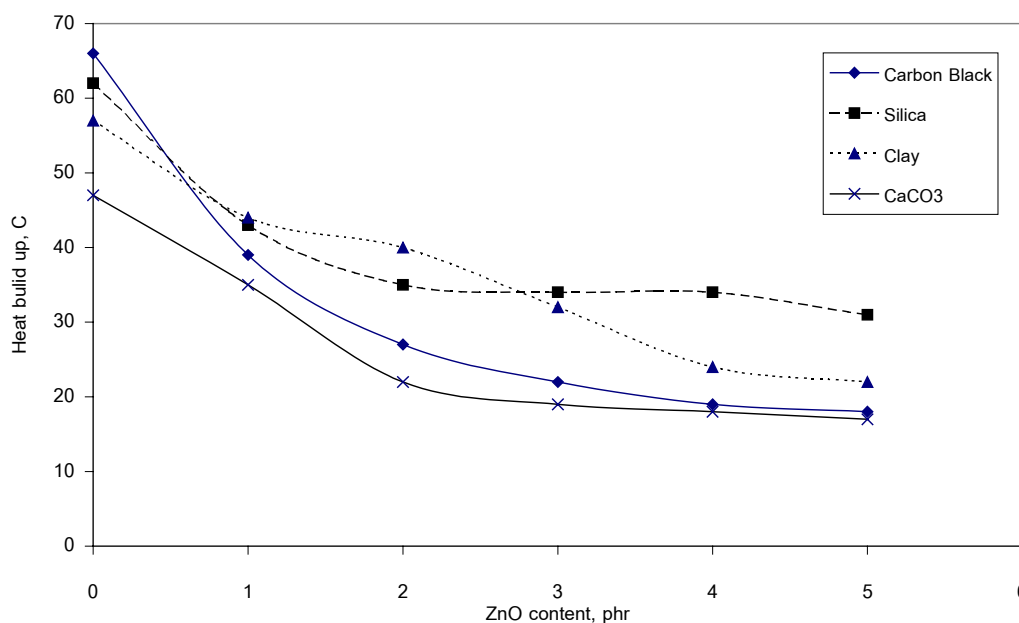


รูปที่ 44 ลักษณะของสียางวัลคาไนซ์ที่ใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณต่างๆ เมื่อใช้สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต

รูปที่ 43 และ 44 เป็นลักษณะของยางที่ใช้สารตัวเติมแคลซ์และแคลเซียมคาร์บอเนต ปริมาณ 100 phr ตามลำดับ พบว่า การใช้ซิงค์ออกไซด์น้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 phr ทำให้ยางวัลคาไนซ์มีสีค่อนข้างคล้ำ

3.3.2.6 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อค่าความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นในยาง

จากรูปที่ 45 เป็นค่าความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นในยางวัลคาไนซ์ พบว่า การเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ทำให้ความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นในยางลดลง โดยเฉพาะการใช้ปริมาณตั้งแต่ 0 ถึง 2 phr นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณมากกว่าหรือเท่ากับ 3 phr ทำให้ยางวัลคาไนซ์ที่ใช้สารตัวเติมเขม่าดำ ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต มีแนวโน้มของค่าความร้อนสะสมคงที่ เมื่อใช้ปริมาณมากกว่าหรือเท่ากับ 3 phr ส่วนการใช้สารตัวเติมแคลซ์จะมีความร้อนสะสมคงที่ เมื่อใช้ปริมาณมากกว่า 4 phr เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารตัวเติมชนิดเสริมประสิทธิภาพคือ เขม่าดำ และซิลิกา พบว่า เขม่าดำมีค่าความร้อนสะสมต่ำกว่าซิลิกา ส่วนสารตัวเติมชนิดไม่เสริมประสิทธิภาพนั้น พบว่า แคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าต่ำกว่าแคลซ์



รูปที่ 45 อิทธิพลของชนิดของสารตัวเติมต่อค่าความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นในยาง โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 5 phr

3.4 อิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์เมื่อแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์

3.4.1 อิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อลักษณะการวัลคาไนซ์เมื่อแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์

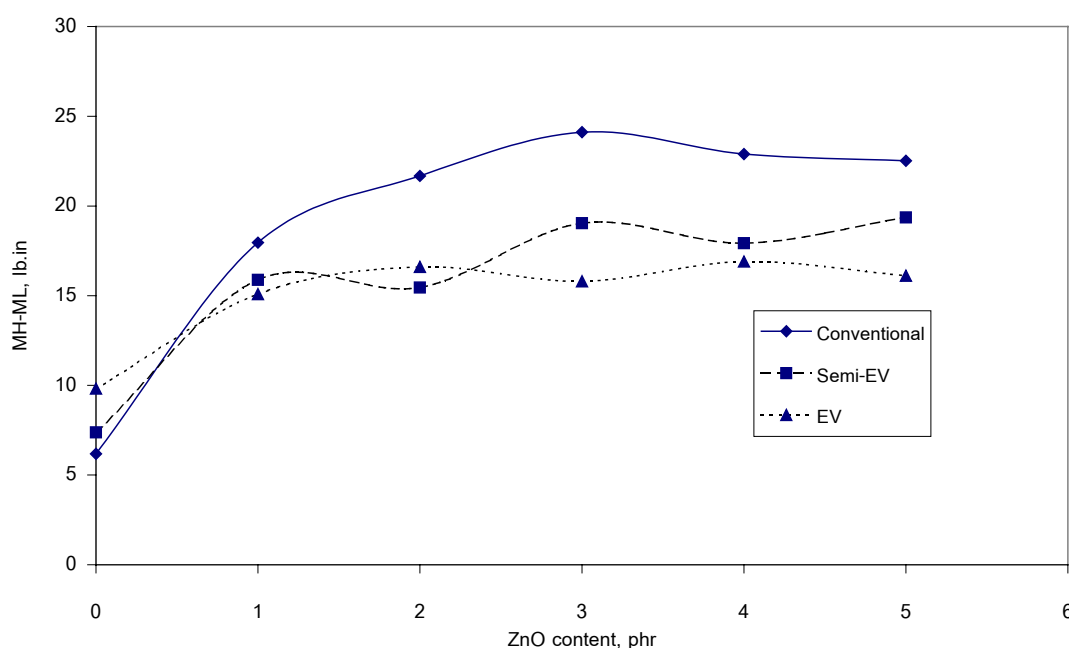
จากการศึกษาอิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อสมบัติของยางวัลคาไนซ์ โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 5 phr ได้ผลการวิจัยดังต่อไปนี้

3.4.1.1 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อค่าผลต่างของแรงบิดสูงสุดและต่ำสุด

จากรูปที่ 46 เป็นค่าผลต่างของแรงบิดสูงสุดและต่ำสุดของการวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์ที่แตกต่างกัน พบว่า ทุกระบบการวัลคาไนซ์ที่ศึกษา เมื่อปริมาณซิงค์ออกไซด์เพิ่มมากขึ้น ทำให้ผลต่างของแรงบิดสูงสุดและต่ำสุดเพิ่มมากขึ้น โดยที่ระบบปกติ (Conventional system) จะให้ผลต่างของค่าแรงบิดดังกล่าวเพิ่มขึ้นมากที่สุด รองลงมาคือเคมี-อีวี (Semi efficiency vulcanization) และ อีวี (Efficiency vulcanization) ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ การใช้ซิงค์ออกไซด์ในสูตรยางมีความจำเป็นต้องใช้เป็นอย่างมาก โดยต้องใช้ปริมาณซิงค์ออกไซด์อย่างน้อย 3 phr จึงจะทำให้ระดับการวัลคาไนซ์ถึงจุดที่เหมาะสม เช่นเดียวกับระบบเคมี-อีวี ส่วนระบบอีวีมีความจำเป็นต้องใช้เช่นเดียวกัน แต่ปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่ต้องใช้ในสูตรประมาณ 1 phr ทั้งนี้เนื่องมาจากซิงค์ออกไซด์จะเกิดปฏิกิริยากับกรดสเตียริกและสารตัวเร่ง เป็นสารประกอบเชิงซ้อน ทำให้สารตัวเร่งเกิดการละลายได้ในยางได้มากขึ้นรวมทั้งทำให้วงแหวนกำมะถันแตกออกได้ง่าย ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาได้

พันธะเชื่อมโยงสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกรณีที่ใช้หรือไม่ใช้ซิงค์ออกไซด์ พบว่า การไม่ใช้ซิงค์ออกไซด์ จะเกิดปฏิกิริยาได้ช้ากว่า รวมทั้งประสิทธิภาพการเชื่อมโยงหรือปริมาณพันธะเชื่อมโยงเกิดขึ้นในยางได้น้อยกว่ากรณีที่มีซิงค์ออกไซด์

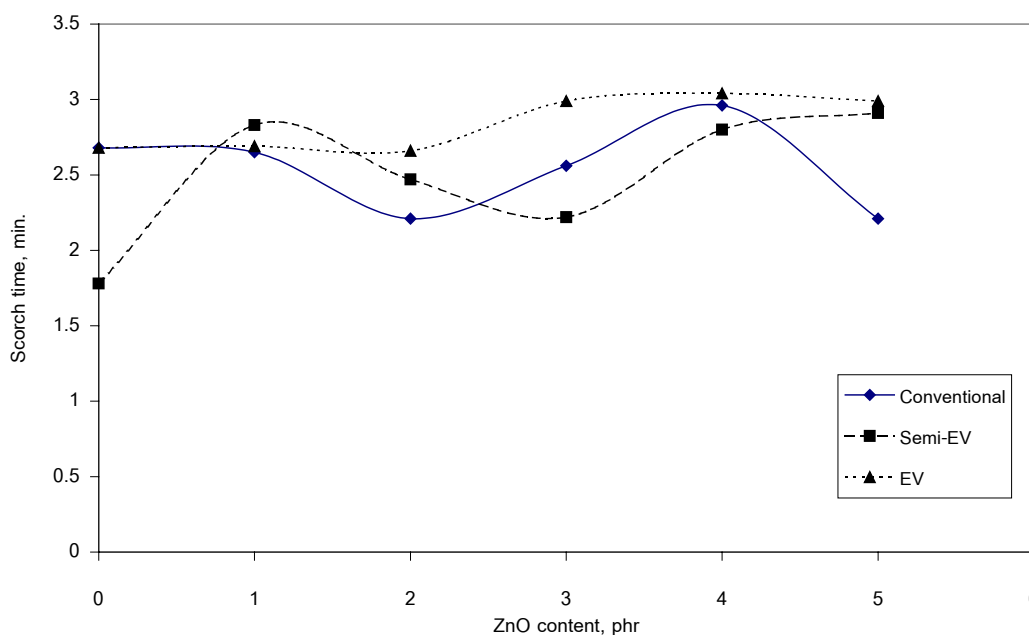
เมื่อเปรียบเทียบค่าผลต่างของแรงบิดสูงสุดและต่ำสุด พบว่า ระบบการวัลคาไนซ์ปกติ ทำให้มีค่าผลต่างของแรงบิดมากที่สุด รองลงมาคือ เซมิ-อีวี และอีวี แสดงให้เห็นว่า ระบบการวัลคาไนซ์ปกติจะเกิดปริมาณพันธะเชื่อมโยงได้มากกว่า โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้ซิงค์ออกไซด์



รูปที่ 46 อิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อค่าผลต่างของแรงบิดสูงสุดและต่ำสุด โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 5 phr

3.4.1.2 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อค่าเวลาสกอซ

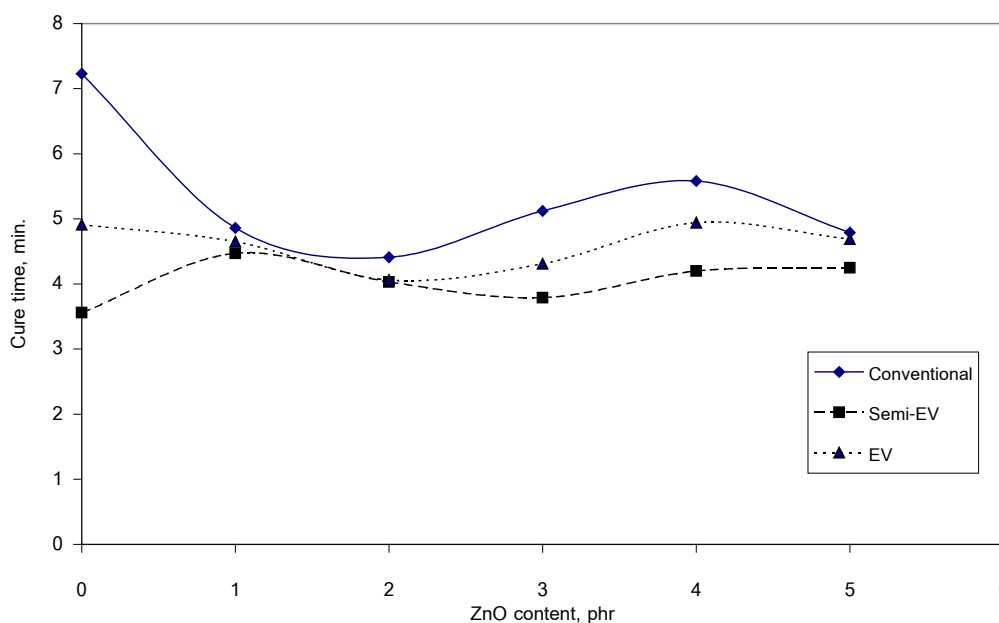
จากรูปที่ 47 เป็นการศึกษาอิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อเวลาสกอซ โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ พบว่า เมื่อปริมาณซิงค์ออกไซด์เพิ่มมากขึ้น เวลาสกอซของยางผสมสารเคมีมีความแปรปรวนไม่เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน



รูปที่ 47 อิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อเวลาสกอช โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 5 phr

3.4.1.3 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อค่าเวลาสุก

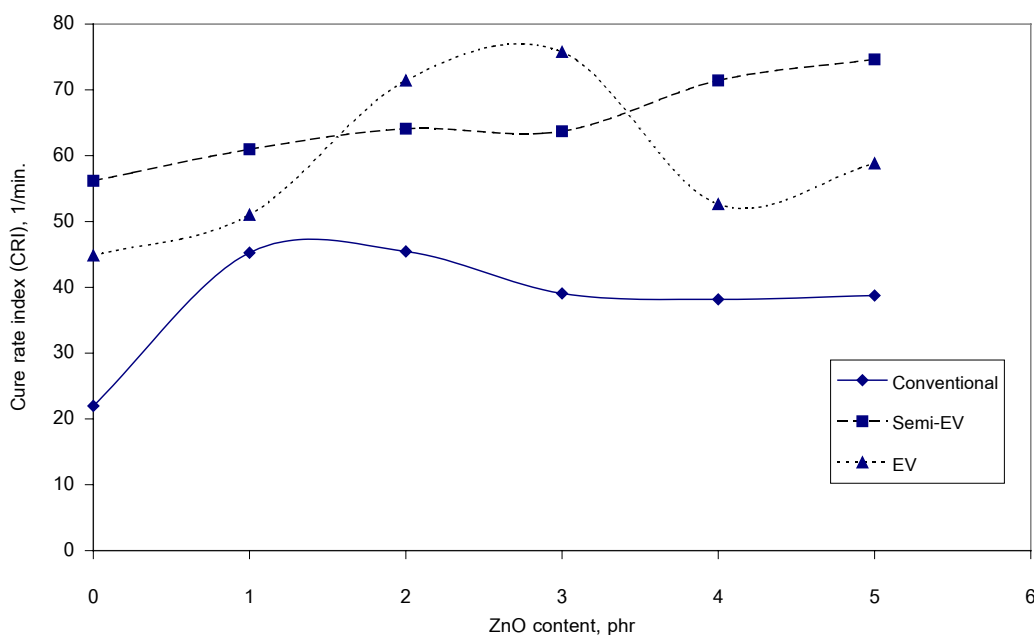
จากรูปที่ 48 เป็นการศึกษาอิทธิพลของซิงค์ออกไซด์ต่อเวลาสุกของยาง เมื่อใช้ระบบการวัลคาไนซ์ที่แตกต่างกัน พบว่า ในระบบการวัลคาไนซ์ปกติ เมื่อเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์จาก 0 ถึง 2 phr ทำให้เวลาสุกลดลงอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องมาจากเหตุผลที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ กล่าวคือ การใช้ซิงค์ออกไซด์เกิดสารประกอบเชิงซ้อน ทำให้สารตัวเร่งทำหน้าที่ได้ดีขึ้น รวมทั้งวงแหวนกำมะถันสามารถแตกตัวออก เพื่อเกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ได้เร็วขึ้น แต่เมื่อใช้ปริมาณมากกว่า 2 phr ทำให้เวลาสุกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนระบบการวัลคาไนซ์แบบเคมี-อีวี และอีวินั้น พบว่า การเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ไม่ทำให้เวลาสุกของยางเปลี่ยนแปลงมากนัก จะเห็นว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ จำเป็นต้องใช้ซิงค์ออกไซด์ในสูตรยางเพื่อเร่งปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ของยาง ส่วนระบบการวัลคาไนซ์อีก 2 ระบบ การใช้ซิงค์ออกไซด์ส่งผลต่อการทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ของสารตัวเร่งน้อยกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากระบบการวัลคาไนซ์ที่มีการใช้สารตัวเร่งปริมาณที่สูง ไม่จำเป็นต้องใช้ซิงค์ออกไซด์ไปกระตุ้นการทำหน้าที่ของสารตัวเร่งมากนัก



รูปที่ 48 อิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อเวลาสุก โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 5 phr

3.4.1.4 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่ออัตราการวัลคาไนซ์

จากรูปที่ 49 เป็นการศึกษาอิทธิพลของซิงค์ออกไซด์ต่ออัตราการวัลคาไนซ์ของยางผสมสารเคมีที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์ที่ต่างกัน พบว่า ในระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ เมื่อปริมาณซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0 ถึง 1 phr ค่าอัตราการวัลคาไนซ์เพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อปริมาณซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 2 ถึง 5 phr ทำให้อัตราการวัลคาไนซ์มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ส่วนระบบเซมิ-อีวีนั้น เมื่อเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ ทำให้อัตราการวัลคาไนซ์เพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยอย่างต่อเนื่อง แต่ระบบอีวี พบว่า การใช้ซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0 ถึง 3 phr ทำให้อัตราการวัลคาไนซ์เพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อปริมาณมากกว่า 3 phr ค่าอัตราการวัลคาไนซ์มีค่าลดลง จะเห็นว่า สูตรยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเร่งปริมาณสูง (เซมิ-อีวี และอีวี) มีอัตราการวัลคาไนซ์สูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ ทั้งนี้เนื่องมาจาก ระบบการวัลคาไนซ์แบบเซมิ-อีวี และอีวี มีการใช้สารตัวเร่งปริมาณสูงกว่า ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้มากกว่า เกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่า แต่เมื่อพิจารณาควบคู่กับผลต่างของค่าแรงบิดสูงสุดและต่ำสุด พบว่า ปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์เกิดได้เร็ว แต่ได้พันธะเชื่อมโยงในปริมาณที่ต่ำกว่า



รูปที่ 49 อิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อค่าอัตราการวัลคาไนซ์ โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0.0 ถึง 5.0 phr

3.4.2 อิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อลักษณะการวัลคาไนซ์เมื่อแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อสมบัติของยางวัลคาไนซ์

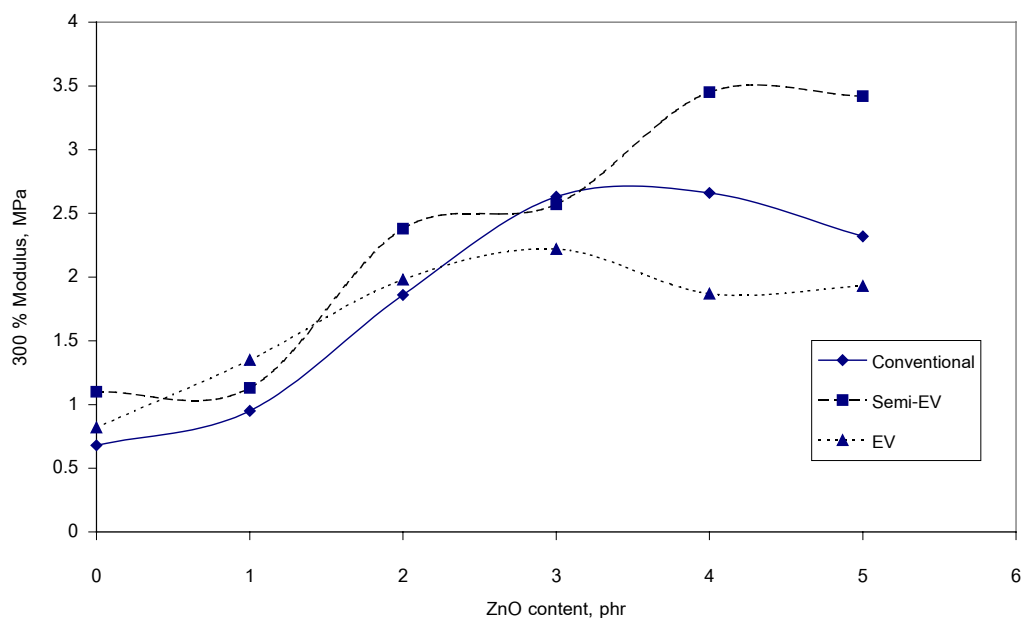
จากการทดลองแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ โดยใช้ระบบการวัลคาไนซ์ที่แตกต่างกัน ได้ผลการวิจัยดังต่อไปนี้

3.4.2.1 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อความทนทานต่อการยืด

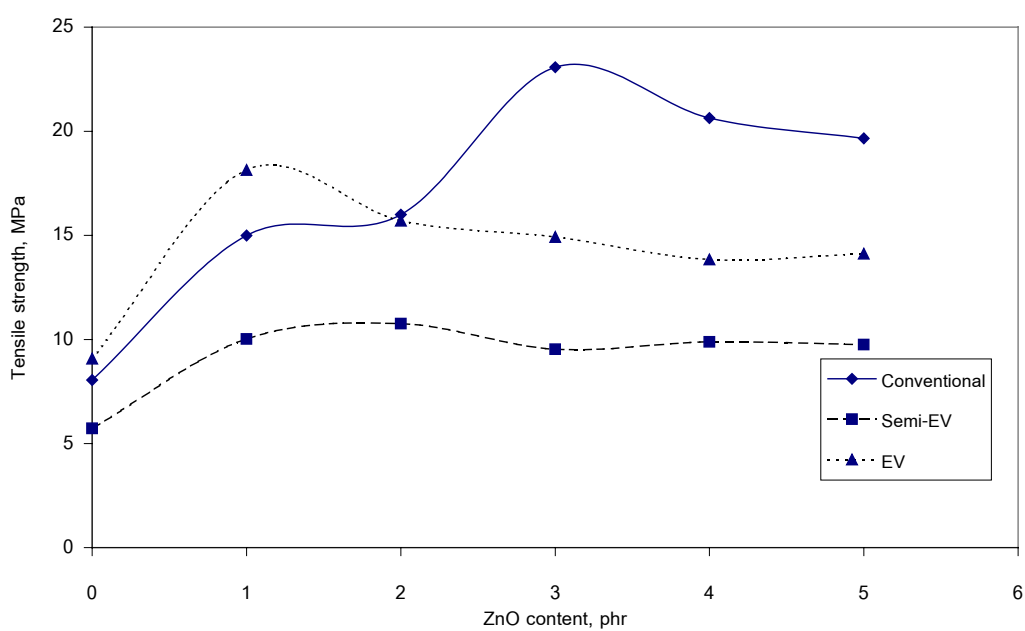
จากรูปที่ 50 เป็นค่า 300 % โมดูลัสของยางธรรมชาติที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แตกต่างกัน พบว่าเมื่อปริมาณซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้นในยางวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์ 3 แบบ ทำให้ค่า 300 % โมดูลัสเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ พบว่า ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติและอีวี ให้ค่า 300 % โมดูลัส ที่ค่อนข้างคงที่ เมื่อปริมาณซิงค์ออกไซด์มากกว่าหรือเท่ากับ 3 phr ส่วนระบบเคมี-อีวี นั้นจะให้ค่าสูงสุด เมื่อใช้ปริมาณ 4 phr เมื่อพิจารณาจากค่าสูงสุดพบว่า ระบบเคมี-อีวี ให้ค่าสูงสุด รองลงมาคือ ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ และระบบอีวี ตามลำดับ

จากรูปที่ 51 เป็นสมบัติความทนทานต่อแรงดึง พบว่า ยางวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติจะให้ค่าสูงสุด เมื่อใช้ซิงค์ออกไซด์ 3 phr แต่เมื่อใช้ปริมาณมากกว่านั้น จะมีแนวโน้มลดลง รองลงมาคือ ระบบอีวี ซึ่งให้ค่าสูงสุดเมื่อใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณ 1 phr ส่วนระบบเคมี-อีวี จะให้ความทนทานต่อแรงดึงต่ำที่สุด กล่าวได้ว่า ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ จะเกิดปริมาณพันธะเชื่อมโยงได้มากกว่าระบบอีวี และเคมี-อีวี ตามลำดับ รวมทั้งการใช้ซิงค์ออกไซด์ในระบบการวัลคาไนซ์ดังกล่าวข้าง

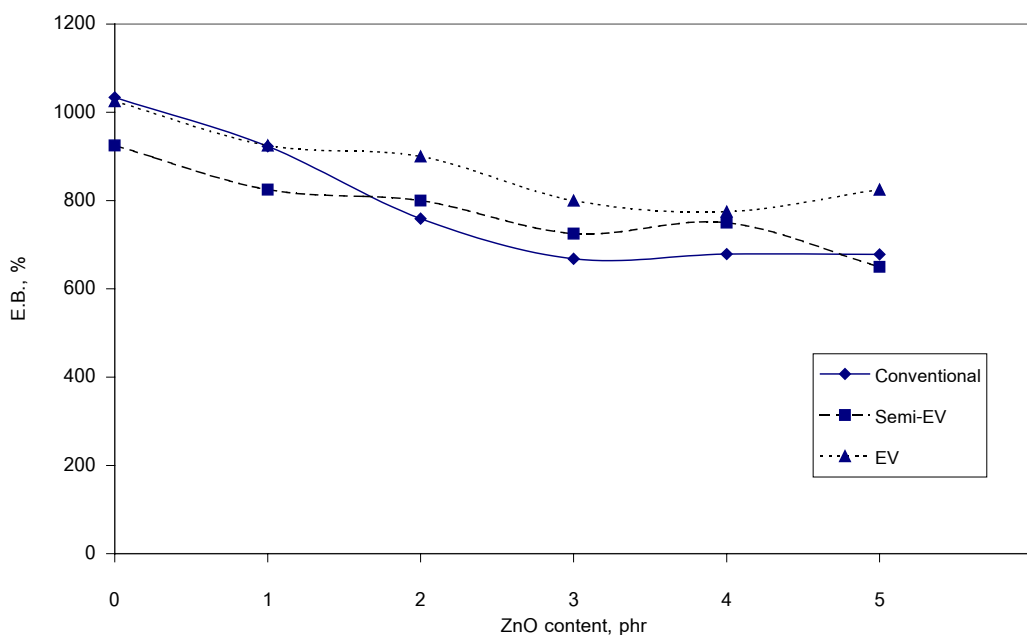
ต้นมีความจำเป็นค่อนข้างมาก ทั้งนี้เนื่องจากความทนทานต่อแรงดึงกรณีที่ใช้ซิงค์ออกไซด์ มีค่าสูงกว่ากรณีที่ไม่ใช้ซิงค์ออกไซด์ค่อนข้างมาก



รูปที่ 50 อิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อค่า 300% โมดูลัส โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0.5 ถึง 5.0 phr



รูปที่ 51 อิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อค่าความทนทานต่อแรงดึง โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 5 phr



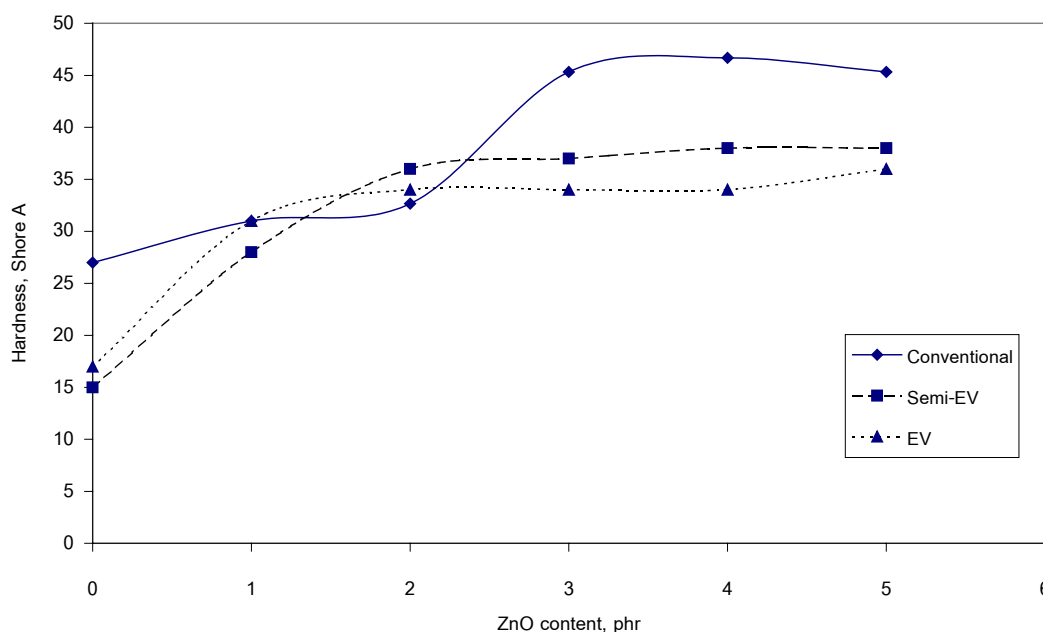
รูปที่ 52 อิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อค่าระยะยืดสูงสุด โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 5 phr

จากรูปที่ 52 พบว่า การเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ในสูตรยางคอมปาวด์ที่ใช้ยางธรรมชาติโดยใช้ระบบการวัลคาไนซ์ต่างๆ 3 ระบบ ทำให้ค่าระยะยืดสูงสุดมีแนวโน้มลดลง โดยที่การใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณตั้งแต่ 0 ถึง 3 phr สมบัติดังกล่าวจะลดลงอย่างชัดเจน และมีแนวโน้มคงที่เมื่อใช้มากกว่าหรือเท่ากับ 3 phr เมื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ พบว่า ระบบการวัลคาไนซ์แบบอีวี จะให้ค่าระยะยืดที่จุดขาดสูงที่สุด รองลงมาคือเคมี-อีวี และระบบปกติ ตามลำดับ

3.4.2.2 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อค่าความแข็ง

จากรูปที่ 53 พบว่า การเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ในสูตรยางคอมปาวด์ที่ใช้ยางธรรมชาติโดยแปรระบบการวัลคาไนซ์ ทำให้ค่าความแข็งของยางวัลคาไนซ์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยที่ระบบเคมี-อีวี และอีวี ให้ความแข็งของยางเพิ่มขึ้นมากในช่วงปริมาณซิงค์ออกไซด์ 0 ถึง 2 phr และเมื่อใช้ปริมาณมากกว่าหรือเท่ากับ 2 phr พบว่า ความแข็งมีแนวโน้มคงที่ ในขณะที่ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ พบว่า การใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณตั้งแต่ 0 ถึง 3 phr ทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่เมื่อใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณมากกว่าหรือเท่ากับ 3 phr ให้ค่าความแข็งที่มีแนวโน้มคงที่ เมื่อเปรียบเทียบความแข็งของระบบการวัลคาไนซ์ทั้ง 3 ระบบ พบว่า ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติให้ความแข็งของยางสูงที่สุด รองลงมาคือ ระบบเคมี-อีวี และอีวี ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติซึ่งใช้กำมะถัน

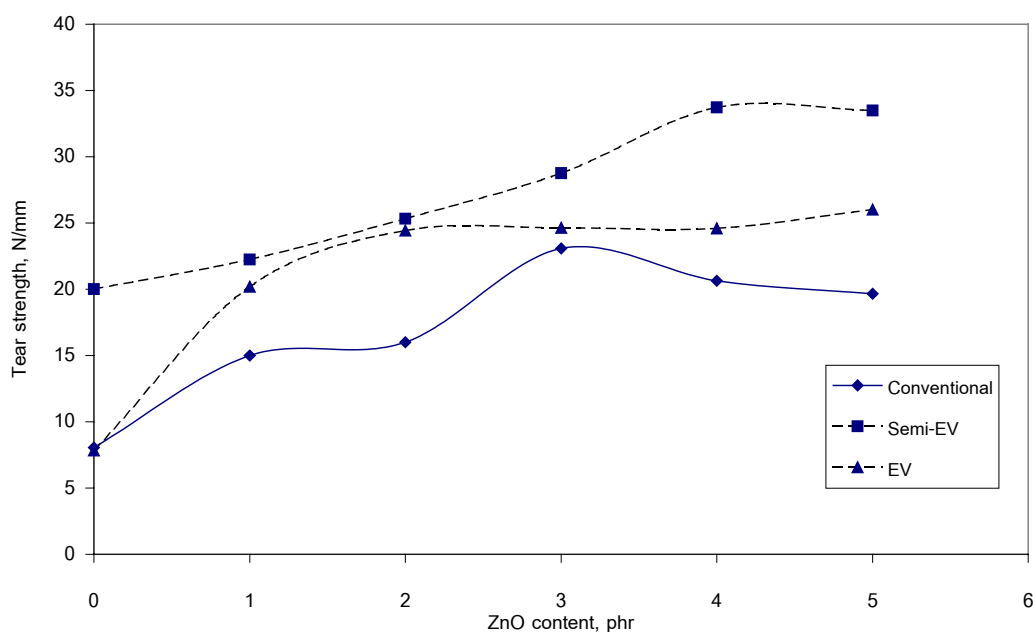
ปริมาณสูงกว่า สามารถเกิดพันธะเชื่อมโยงได้มากที่สุด รวมทั้งซิงค์ออกไซด์มีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ด้วยระบบดังกล่าวมากกว่าระบบอีก 2 ระบบ ดังกล่าวข้างต้น



รูปที่ 53 อิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อค่าความทนทานต่อการฉีกขาด โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 5 phr

3.4.2.3 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด

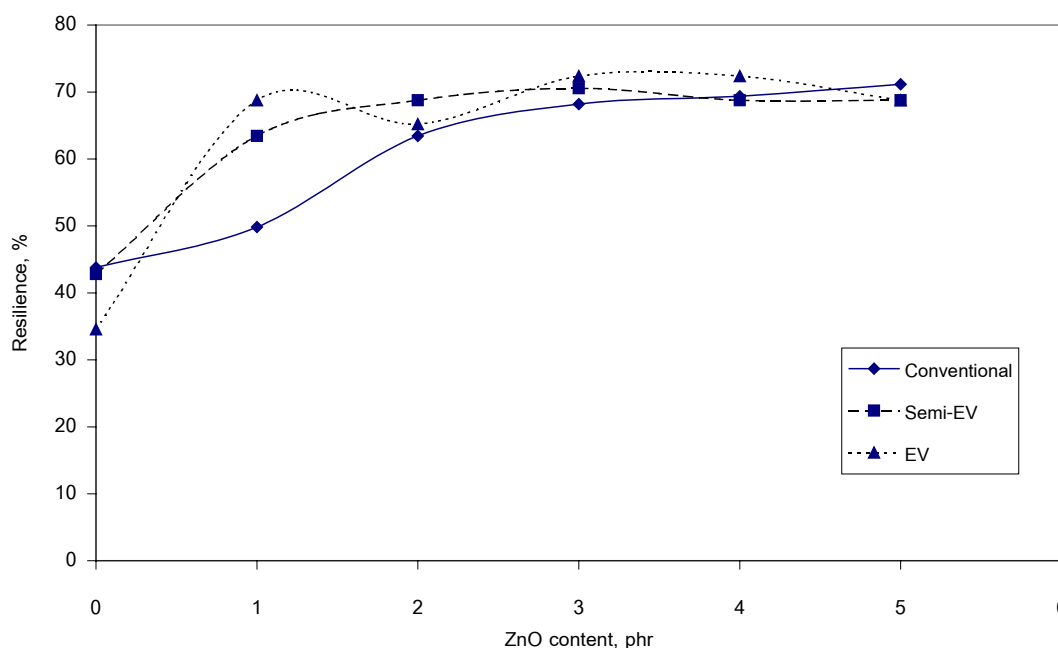
จากรูปที่ 54 เป็นความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ พบว่า การเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ ทำให้ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบสมบัติดังกล่าวของระบบต่างๆ พบว่า ระบบการวัลคาไนซ์แบบเคมี-อีวี ให้สมบัติดังกล่าวสูงที่สุด รองลงมาคือ ระบบอีวี และระบบปกติ ตามลำดับ โดยที่ระบบอีวี และเคมี-อีวี ให้ค่าสูงสุดเมื่อใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณ 2 และ 4 phr ตามลำดับ ในขณะที่ระบบการวัลคาไนซ์ปกติ ให้สมบัติดังกล่าวสูงที่สุดเมื่อใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณ 3 phr



รูปที่ 54 อิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อค่าความทนทานต่อการฉีกขาด โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 5 phr

3.4.2.4 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อค่าการกระเดื่องตัว

จากรูปที่ 55 เป็นความกระเดื่องตัวของยางวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ พบว่าการเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ในระบบการวัลคาไนซ์ทั้ง 3 ระบบ ทำให้ความกระเดื่องตัวของยางเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบสมบัติดังกล่าวของระบบต่างๆ พบว่า ระบบการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ ให้สมบัติดังกล่าวใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาอัตราการเพิ่มขึ้นของสมบัติดังกล่าว พบว่า ระบบเคมี-อีวี และอีวี ให้สมบัติดังกล่าวเพิ่มขึ้นสูงที่สุดเมื่อใช้ปริมาณระหว่าง 0 ถึง 1 phr และเมื่อใช้ปริมาณมากกว่าหรือเท่ากับ 1 phr สมบัติข้างต้นมีแนวโน้มคงที่ ในขณะที่ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ พบว่า ความกระเดื่องตัวของยางมีแนวโน้มคงที่ เมื่อใช้ปริมาณมากกว่าหรือเท่ากับ 2 phr กล่าวได้ว่า ซิงค์ออกไซด์ที่ใช้ในสูตรยาง ทำให้โมเลกุลของยางเกิดการวัลคาไนซ์ ส่งผลให้ได้ยางวัลคาไนซ์ที่มีความยืดหยุ่นมากขึ้น ทำใหยางวัลคาไนซ์มีความกระเดื่องตัวเพิ่มสูงขึ้นด้วย



รูปที่ 55 อิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อค่าการกระเดื่องตัว โดยแปรปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 5 phr

3.4.2.5 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อค่าความทนทานต่อการสึกหรอ

จากตารางที่ 10 เป็นความทนทานต่อการสึกหรอของยางวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์ที่แตกต่างกัน พบว่า กรณีการวัลคาไนซ์ด้วยระบบแบบปกติ และเคมี-อีวี การใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณตั้งแต่ 0 ถึง 2 phr ได้ขึ้นทดสอบที่มีลักษณะเหนียวติดกับหินขัด ทำให้ผลการทดลองที่ได้ผิดพลาด ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณดังกล่าว ทำให้เกิดระดับการวัลคาไนซ์ในยางธรรมชาติต่ำ รวมทั้งการนำความร้อนภายในยางเกิดได้ช้าด้วย ทำให้ระดับการวัลคาไนซ์ที่ผิวภายในแตกต่างจากผิวภายนอกของขึ้นทดสอบค่อนข้างมาก ส่วนในกรณีขึ้นทดสอบหรือผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะบางจะไม่ปรากฏเหตุการณ์ดังกล่าว ส่วนยางวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบอีวีไม่เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว อาจเนื่องมาจากปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์เกิดได้สมบูรณ์มากกว่า ดพราะใช้สารตัวเร่งปริมาณสูง โดยที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์มีอิทธิพลต่อสมบัติด้านความทนทานต่อการสึกหรอไม่ชัดเจน และเมื่อเปรียบเทียบการใช้ซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 3 ถึง 5 phr ในยางวัลคาไนซ์ด้วยระบบต่างๆ พบว่า ยางวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบอีวี มีความทนทานต่อการสึกหรอมากที่สุด รองลงมาคือ ระบบปกติ ส่วนระบบเคมี-อีวี มีค่าต่ำที่สุด

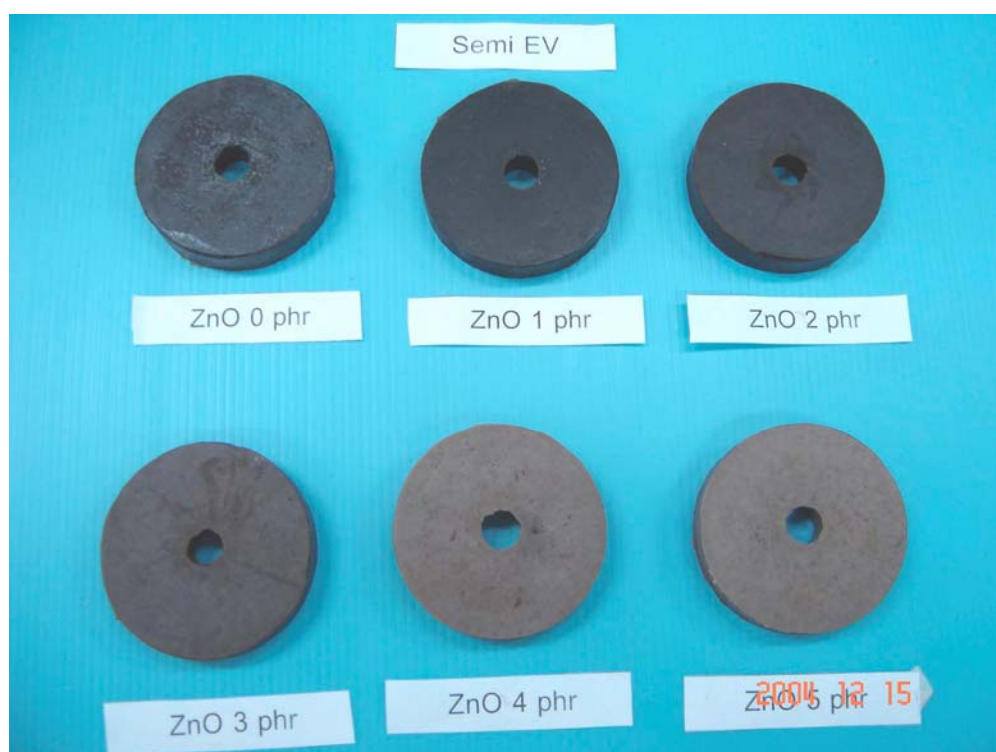
ตารางที่ 10 สมบัติความทนทานต่อการสึกหรอของยางวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ

ปริมาณซิงค์ ออกไซด์, phr	ดัชนีการสึกหรอ (Abrasion index)		
	ปกติ	เคมี-อีวี	อีวี
0	ขึ้นทดสอบเหนียว	ขึ้นทดสอบเหนียว	22.21
1	ขึ้นทดสอบเหนียว	ขึ้นทดสอบเหนียว	23.80
2	ขึ้นทดสอบเหนียว	ขึ้นทดสอบเหนียว	28.49
3	27.51	18.21	27.76
4	27.06	17.10	23.90
5	27.29	16.40	23.29

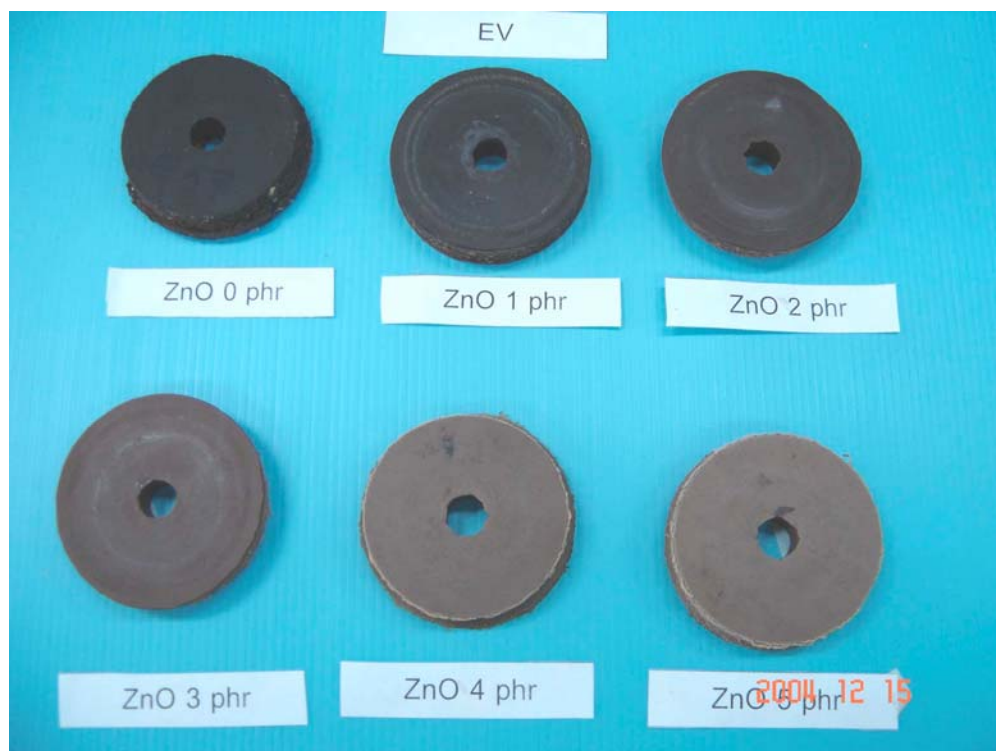
จากรูปที่ 56 เป็นลักษณะของยางวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ พบว่า การใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณน้อยกว่า 3 phr จะให้ยางวัลคาไนซ์ที่มีสีค่อนข้างเข้ม ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสูตรยางไม่ใช้สารป้องกันการเสื่อม ประกอบกับระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ เป็นระบบที่ไม่เสถียรต่อความร้อนในขณะทำการวัลคาไนซ์ เนื่องจากพันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นแบบ Polysulfidic crosslink ซึ่งเป็นที่ไม่เสถียรต่อความร้อน เกิดการเปลี่ยนแปลงได้ง่าย เมื่อพิจารณาระบบการวัลคาไนซ์แบบเคมี-อีวี พบว่า เมื่อใช้ซิงค์ออกไซด์ ปริมาณน้อยกว่า 3 phr ยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีลักษณะเหนียวในทำนองเดียวกัน แต่เมื่อพิจารณาสีของยางวัลคาไนซ์ จากรูปที่ 57 จะเห็นว่า ยางวัลคาไนซ์มีสีอ่อนกว่าการใช้ระบบวัลคาไนซ์แบบปกติ ทั้งนี้เนื่องมาจากระบบการวัลคาไนซ์แบบเคมี-อีวีให้ยางวัลคาไนซ์ที่มีความเสถียรต่อความร้อนมากกว่า โดยพันธะเชื่อมโยงส่วนใหญ่เป็น Disulfidic และ Monosulfidic crosslink และเมื่อพิจารณาในรูปที่ 58 ซึ่งเป็นลักษณะของยางวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบอีวี พบว่า จะให้สีของยางวัลคาไนซ์อ่อนที่สุด นั้นแสดงให้เห็นว่า เป็นระบบที่มีความเสถียรต่อความร้อน เกิดพันธะเชื่อมโยงส่วนใหญ่เป็น Monosulfidic crosslink นอกจากนี้อาจเนื่องมาจากเหตุผลทางด้านระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ที่ใช้ระยะเวลาสั้นกว่า



รูปที่ 56 ลักษณะของสียางวัลคาไนซ์ที่ใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณต่างๆ เมื่อใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ



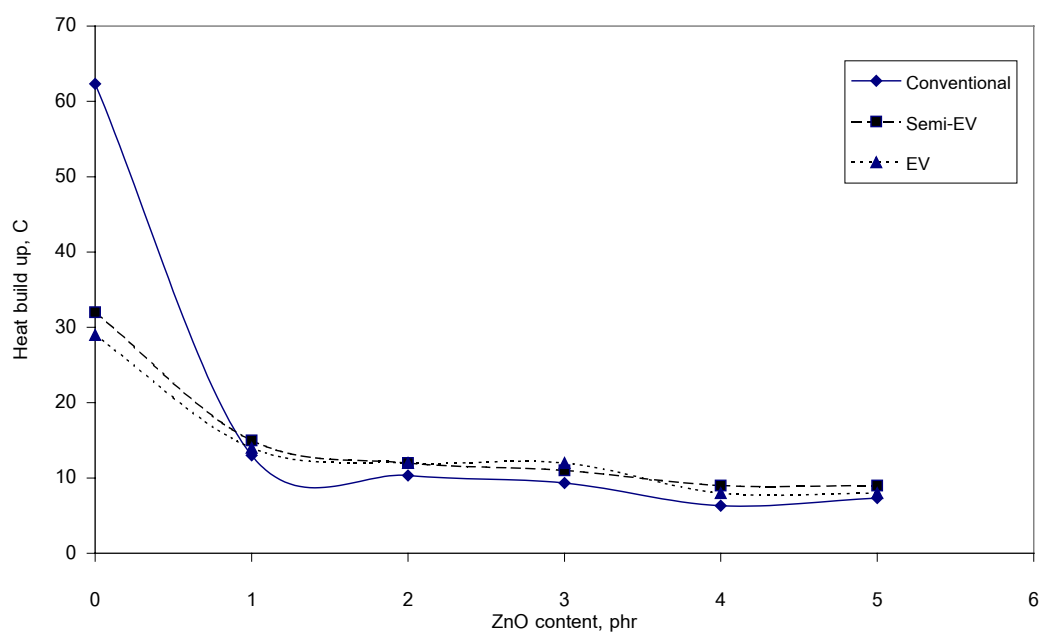
รูปที่ 57 ลักษณะของสียางวัลคาไนซ์ที่ใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณต่างๆ เมื่อใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบเคมี-อีวี



รูปที่ 58 ลักษณะของสียางวัลคาไนซ์ที่ใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณต่างๆ เมื่อใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบอีวี

3.4.2.6 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อค่าความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นในยาง

จากรูปที่ 59 เป็นความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นในยางวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ พบว่า การเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 1 phr ทำให้ความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นในยางลดลงอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อใช้ปริมาณมากกว่าหรือเท่ากับ 1 phr ค่าความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มคงที่ ทั้งนี้ เนื่องจาก โมเลกุลยางเกิดพันธะเชื่อมโยง ส่งผลให้ได้โครงสร้างโมเลกุลที่มีความยืดหยุ่น ไม่เกิดการสะสมพลังงานที่ได้รับจากแรงกระทำไว้ในโมเลกุล จึงเกิดความร้อนสะสมในยางต่ำลง



รูปที่ 59 อิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อค่าความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นในยาง โดยแปรปริมาณ
ซิงค์ออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 5 phr

4. สรุปผลการทดลอง

4.1 อิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์เพิ่มมากขึ้น

4.1.1 ลักษณะการวัดคาไนซ์

เมื่อปริมาณซิงค์ออกไซด์เพิ่มมากขึ้น ทำให้เวลาสกอช เวลาสุก มีค่าลดลง ในขณะที่อัตราการวัดคาไนซ์เพิ่มขึ้นในช่วงต้น หลังจากนั้นก็มีค่าคงที่ โดยผลต่างของแรงบิดสูงสุด-ต่ำสุดหรือระดับการวัดคาไนซ์มีค่าเพิ่มมากขึ้น ปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 3 ถึง 4 phr

4.1.2 สมบัติทางกายภาพ

การเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ ทำให้ค่า 300 % โมดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง ความแข็งแรง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความกระด้างตัว เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ระยะยืดสูงสุด ความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นในยางมีค่าลดลง ส่วนความทนทานต่อการสึกหรอ สามารถทดสอบหาค่าได้เมื่อใช้ซิงค์ออกไซด์มากกว่าหรือเท่ากับ 3 phr

4.2 อิทธิพลของชนิดสารตัวเร่ง

4.2.1 ลักษณะการวัดคาไนซ์

การใช้ซิงค์ออกไซด์ในสูตรยางที่ใช้สารตัวเร่งชนิดต่างๆ พบว่า การเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ทำให้ระดับการวัดคาไนซ์เกิดได้มากขึ้น ทำให้เวลาสกอช เวลาสุกลดลง ในขณะที่อัตราการวัดคาไนซ์เพิ่มสูงขึ้น โดยปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่เหมาะสมคือ 3 phr

4.2.2 สมบัติทางกายภาพ

การเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ในสูตรยางที่ใช้สารตัวเร่งชนิดต่างๆ ทำให้ค่า 300 % โมดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง ความแข็งแรง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความกระด้างตัว เพิ่มสูงขึ้น โดยที่ความทนทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาด การใช้สารตัวเร่ง CBS ให้ค่าสูงกว่าสารตัวเร่งชนิดอื่นๆ ส่วนความแข็งแรงและความกระด้างตัว สารตัวเร่ง ZDEC ให้สมบัติดังกล่าวสูงกว่าสารตัวเร่งชนิดอื่นๆ ในขณะที่ระยะยืดสูงสุด ความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นในยางมีค่าลดลง ส่วนความทนทานต่อการสึกหรอ สามารถทดสอบหาค่าได้เมื่อใช้ซิงค์ออกไซด์มากกว่าหรือเท่ากับ 3 phr

4.3 อิทธิพลของชนิดสารตัวเติม

4.3.1 ลักษณะการวัดคาไนซ์

การใช้ซิงค์ออกไซด์ในสูตรยางที่ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ พบว่า การเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ทำให้ระดับการวัดคาไนซ์เกิดได้มากขึ้น ทำให้เวลาสุกลดลง ในขณะที่อัตราการวัดคาไนซ์เพิ่มสูงขึ้น ส่วนเวลาสกอชไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก โดยปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับสารตัวเติมชนิดต่างๆ คือ 3 phr

4.3.2 สมบัติทางกายภาพ

การเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ในสูตรยางที่ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ ทำให้ค่า 300 % โมดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง ความแข็ง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความกระด้างตัว เพิ่มสูงขึ้น โดยการใช้สารตัวเติมเขม่าดำ เมื่อเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ ทำให้สมบัติด้านโมดูลัส และความทนทานต่อการฉีกขาดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่สารตัวเติมซิลิกา เคลย์ และแคลเซียมคาร์บอเนต สมบัติทั้งสองประการข้างต้น เพิ่มขึ้นเล็กน้อย หลังจากนั้นก็มีแนวโน้มลดลงหรือคงที่ ในขณะที่ระยะยืดสูงสุด ความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นในยางมีค่าลดลง ส่วนความทนทานต่อการสึกหรอ การใช้สารตัวเติมเขม่าดำและซิลิกา การเพิ่มซิงค์ออกไซด์ ทำให้ความทนทานต่อการสึกหรอเพิ่มขึ้น แต่สารตัวเติมเคลย์และแคลเซียมคาร์บอเนตมีแนวโน้มคงที่ ปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่เหมาะสมกับสารตัวเติมทั้ง 4 ชนิด อยู่ในช่วง 2 ถึง 3 phr

4.4 อิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์

4.4.1 ลักษณะการวัลคาไนซ์

การเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ในระบบการวัลคาไนซ์แบบต่างๆคือ ระบบปกติ เชมิ-อีวี และอีวี ทำให้ปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์เกิดได้เร็วขึ้น และทำให้ระดับการวัลคาไนซ์เกิดได้มากขึ้น โดยปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 2 ถึง 3 phr

4.4.2 สมบัติทางกายภาพ

การเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ ทำให้ค่า 300 % โมดูลัส ความทนทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความแข็ง ความกระด้างตัว เพิ่มสูงขึ้น โดยที่ระยะยืดสูงสุด ความร้อนสะสมที่เกิดขึ้น มีค่าลดลง โดยซิงค์ออกไซด์ปริมาณที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 2 ถึง 3 phr เช่นเดียวกัน

5. เอกสารอ้างอิง

- พรพรรณ นิธิอุทัย, (2528), สารเคมีสำหรับยาง, ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มอ. ปัตตานี, น. 110.
- Akiba, M. and Hashim, A.S., (1997), Vulcanization and crosslinking in elastomers, *Prog. Polym. Sci.*, 22, 475-521.
- Alliger, G., and Sjothun, (1978), *Vulcanization of Elastomer*, Robert E. Krieger Publishing, New York, 173-178.
- Beniska, J. and Dogadkin, B., (1959). The influence of vulcanization process. I. The influence of zinc oxide on the rate of combination of sulfur with rubber, *Rubber Chem. Technol.*, 32, 774-779.
- Beniska, J. and Dogadkin, B., (1959). The influence of activators on the vulcanization process. II. The influence of zinc oxide on the structure of vulcanizates, *Rubber Chem. Technol.*, 32, 780-784.
- Coran, A.Y., (1995), Vulcanization : conventional and dynamic, *Rubb. Chem. Technol.*, 68, 351-375.
- Dick, J.S., (2001), *Rubber Technology : Compounding and Testing for Performance*, Hanser Publishers, Munich, 382-383.
- Dogadkin, B., and Beniska, I., (1958). The action of vulcanization activators, *Rubber Chem. Technol.*, 31, 329-342.
- Feldstein, M., Orlovsky, P., and Dogadkin, B., (1959). Metal oxides as vulcanization activators for sodium butadiene rubber, *Rubber Chem. Technol.*, 32, 164-173.
- Feldstein, M., Orlovsky, P., and Dogadkin, B., (1958). The role of metal oxides as activators of vulcanization, *Rubber Chem. Technol.*, 31, 526-538.
- Galle-Gutbrecht, R., Hensel, M., Menting, K.H., Mergenhagen, T., and Umland, H., (2002), Zinc-free rubber processing additives matching the properties of traditional zinc soaps, *International Rubber Conference (IRC 2002)*, Prague, Czech Republic, July 1-4, 2002.
- Hamed, G.R. and Hua, K.C., (2004), Effect of ZnO particle size on the curing of carboxylated NBR and carboxylated SBR, *Rubber Chem. Technol.*, 77, 214-226.
- Haslam, G.S., (1933). The effect of particle size of zinc oxide on the physical properties of rubber, *Rubber Chem. Technol.*, 6, 288-298.
- Heideman, G. and Noordermeer, J.W.M., (2003), Reduction of zinc oxide levels in rubber compounds, *International Rubber Conference (IRC 2002)*, Prague, Czech Republic, July 1-4, 2002.

- Heideman, G., Noordermeer, J.W.M., and Datta, R.N., (2003), A novel approach zinc oxide levels in Rubber compounds, International Rubber Conference (IRC 2003), Nurnberg, Germany, June 30 - July 3, 2003.
- Heideman, G., Noordermeer, J.W.M., and Datta, R.N., (2004), Zinc loaded clay as activator in sulfur vulcanization : a new route for zinc oxide reduction in rubber compounds, Rubber Chem. Technol., 77, 336-355.
- Hofmann, W., (1989), Rubber technology handbook, Hanser Publishers, New York, 233-250
- Jones, H.C., and Depew, H.A., (1932). Reaction during vulcanization I- Influence of zinc and lead on rate of cure of stocks accelerated with tetramethylthiuram monosulfide, Rubber Chem. Technol., 5, 39-50.
- Kok, C.M., (1986), A thermal analysis study of the effect of zinc oxide on the sulphur vulcanization of rubbers, Eur. Polym. J., 22 (12), 1015-1016.
- Kok, C.M., (1987), The effects of compounding variables on the reversion process in the sulphur vulcanization of natural rubber, Eur. Polym. J., 23 (8), 611-615.
- Krejsa, M.R., (1993), A review of sulfur crosslinking fundamentals for accelerated and unaccelerated vulcanization, Rubb. Chem. Technol., 66, 376-410.
- Reuvekamp, L.A.E.M., Debnath, S.C., Ten Brinke, J.W., Van Swaaij, P.J. and Noordermeer, J.W.M., (2003), Effect of zinc oxide on the reaction of TESPT silane coupling agent with silica and rubber, Rubber Chem. Technol., 76, 34-49.
- Robert, A.D., (1988), Natural Rubber Science and Technology, Oxford University Press, Oxford, 555-561.
- Scheele, W., Toussaint, H.E., and Stange, P., (1958). Vulcanization of elastomers. 14. Role of the oxide in vulcanization with compounds of the thiuram series. I, Rubber Chem. Technol., 31, 539-547.

ภาคผนวก 1 : ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์	กิจกรรมที่วางไว้	กิจกรรมที่ดำเนินการ	ผลที่ได้รับจากโครงการ
1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อสมบัติของยางวัลคาไนซ์	- วางแผนการทดลอง โดยกำหนดชนิดของยาง และสารเคมีที่ใช้ - เตรียมยางผสมสารเคมี - ศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์ - เตรียมชิ้นทดสอบ	- จัดหายาง และสารเคมีที่จำเป็นสำหรับงานวิจัย - ผสมยางและสารเคมีชนิดต่างๆ ตามสูตรโดยแปรปัจจัยต่างๆ คือ ปริมาณซิงค์ออกไซด์ ชนิดของสารตัวเติม ชนิดของสารตัวเร่ง และระบบการวัลคาไนซ์ - ทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง Oscillating disc rheometer รุ่น ODR 2000 - เตรียมชิ้นทดสอบสมบัติเชิงกล คือ ความทนทานต่อแรงดึง ความกระด้างตัว ความทนทานต่อการสึกหรอ ความร้อนสะสม เป็นต้น ด้วยเครื่องอัดเบ้า	- ได้สูตรยางผสมสารเคมี ที่ใช้ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่สัมพันธ์กับการใช้ซิงค์ออกไซด์ - ทราบถึงอิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางผสมสารเคมีที่แปรชนิดของสารตัวเร่ง สารตัวเติม และระบบการวัลคาไนซ์

2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณ ซิงค์ออกไซด์กับสารเคมีอื่นๆใน สูตรยางคือ สารตัวเร่ง สารตัวเติม ระบบการวัลคาไนซ์	ศึกษาสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์	ทดสอบสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์ คือ 300 % โมดูลัส ความทนทานต่อแรงดึง ระยะยืดสูงสุด ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความแข็งแรงการกระเดื่องตัว ความทนทานต่อการสึกหรอ ความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นตามมาตรฐาน ASTM หรือ B.S.	- ทราบถึงอิทธิพลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดของสารตัวเร่ง สารตัวเติม และระบบการวัลคาไนซ์ - ได้แนวทางการใช้หรือลดปริมาณการใช้ซิงค์ออกไซด์ในสูตรยางคอมเพาด์ - ทราบความสัมพันธ์ของการใช้ซิงค์ออกไซด์กับสารตัวเร่ง สารตัวเติม และระบบการวัลคาไนซ์ และข้อมูลพื้นฐานทางด้านลักษณะการวัลคาไนซ์ และสมบัติทางกายภาพ
---	--	---	---