



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การผลิตยางธรรมชาติที่ทนทานต่อการเผาไหม้และ
การเสื่อมสลายด้วยความร้อน

โดย ดร.อดิศักดิ์ รุ่งวิชานีวัฒน์ และคณะ

มิถุนายน 2559

สัญญาเลขที่ RDG5150064

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การผลิตยางธรรมชาติที่ทนทานต่อการเผาไหม้และการเสื่อมสลายด้วยความร้อน

คณะผู้วิจัย

สังกัด

ดร.อดิศักดิ์ รุ่งวิชานีวัฒน์

ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์

น.ส. เกศรา มณีใส

ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์

ชุดโครงการ

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

แบบสรุปย่อรายงานสำหรับผู้บริหาร (Executive Summary)

ชื่อโครงการ การผลิตยางธรรมชาติที่ทนทานต่อการเผาไหม้และการเสื่อมสลาย
ด้วยความร้อน

Preparation of Natural Rubber with Flame and Heat resistance

ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด และที่อยู่

ชื่อ-สกุล ผศ.ดร.อดิศักดิ์ รุ่งวิชานีวัฒน์

ที่อยู่ ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ต.รูสะมิแล อ.เมือง จ.ปัตตานี
94000

โทรศัพท์ (073) 312-213 โทรสาร (073) 331-099

E-mail: adisai.r@psu.ac.th

นักศึกษา/ผู้ร่วมวิจัย น.ส.เกศรา มณีใส

งบประมาณทั้งโครงการ 350,000 บาท

ระยะเวลาการดำเนินการ 18 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 กันยายน 2551 ถึงวันที่ 28 กุมภาพันธ์ 2553

ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญ

ยางธรรมชาติมีจุดเด่นในเรื่องของสมบัติทางกลที่ดี มีความแข็งแรงเหนียว แต่ยางธรรมชาติมีจุดด้อยในเรื่องความไม่ทนทานต่อการเผาไหม้และมีความทนทานต่อการเสื่อมสลายด้วยความร้อนที่ค่อนข้างต่ำ ทำให้มีขีดจำกัดของการใช้งาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการปรับปรุงโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ โดยการควบคุมหรือเพิ่มหมู่ที่สามารถป้องกันการเผาไหม้ เช่น สารในกลุ่มของฟอสฟอรัสเข้าไปเกาะติดในสายโซ่โมเลกุล พร้อมทั้งการควบคุมปริมาณพันธะคู่ในสายโซ่โมเลกุลโดยวิธีการทำไฮโดรจิเนชัน ซึ่งจะเป็นการลดปริมาณพันธะที่ไม่อิ่มตัวในสายโซ่โมเลกุลหลักของยางธรรมชาติ จะได้ยางธรรมชาติเกรดใหม่ที่มีความทนทานต่อการเผาไหม้และการเสื่อมสลายด้วยความร้อน ซึ่งมีการศึกษาสมบัติด้านพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ สมบัติทางกลของยางวัลคาไนซ์ ความทนทานต่อการเสื่อมสลายด้วยความร้อน และความทนทานต่อการเผาไหม้

วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อผลิตยางธรรมชาติเกรดใหม่ที่มีความทนทานต่อการเผาไหม้และการเสื่อมสลายด้วยความร้อน

2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการวัดคาบไซน์ สมบัติด้านการแปรรูป สมบัติทางกลของยางธรรมชาติเกรดใหม่

ผลการดำเนินงาน

1. เตรียมยางธรรมชาติที่มีความทนทานต่อการเผาไหม้

1.1) ทำการปรับโครงสร้างโมเลกุลของน้ำยางธรรมชาติให้เป็นน้ำยางธรรมชาติอพอกไซค์ที่มีปริมาณอพอกไซค์ 2 ระดับ คือที่ 25% โมลและ 50% โมล จากนั้นใส่สารในกลุ่มไดบิวทิลฟอสเฟตลงในน้ำยางธรรมชาติอพอกไซค์ เพื่อที่จะทำปฏิกิริยากับวงแหวนอพอกไซค์ที่เกาะติดในสายโซ่โมเลกุลของยาง

1.2) วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี และปริมาณฟอสเฟตที่มีอยู่ในโครงสร้างของยางธรรมชาติที่ถูกดัดแปลงด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี

2. เตรียมยางธรรมชาติที่มีความทนทานต่อการเสื่อมสลายด้วยความร้อน

2.1) ทำไฮโดรจิเนชันในโมเลกุลยางธรรมชาติในสถานะน้ำยาง 2 ระดับ คือ 15% โมลและ 40% โมล

2.2) วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี และปริมาณพันธะคู่ที่มีอยู่จริงในโครงสร้างของยางธรรมชาติที่ได้ด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี

3. เตรียมยางธรรมชาติที่มีความทนทานต่อการเผาไหม้และการเสื่อมสลายด้วยความร้อน

3.1) ผสมยางธรรมชาติที่ถูกปรับโครงสร้างโมเลกุลด้วยฟอสเฟตและยางที่ถูกทำไฮโดรจิเนชันในสัดส่วนต่างๆ ได้แก่ 100/0, 80/20, 60/40, 50/50, 40/60, 20/80 และ 0/100 ผสมด้วยเครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง และศึกษาพฤติกรรมการวัดคาบไซน์ 3 ระบบ คือ แบบก้ามมะถันปกติ แบบอีวี และแบบเปอร์ออกไซค์

3.2) ศึกษาพฤติกรรมการวัดคาบไซน์ สมบัติด้านการแปรรูป สมบัติทางกล ความทนทานต่อการเสื่อมสลายด้วยความร้อน และความทนทานต่อการเผาไหม้

ผลการวิจัย

ยางธรรมชาติที่ดัดแปลงโมเลกุลด้วยไดบิวทิลฟอสเฟต (DSNR) ได้จากการทำปฏิกิริยาผ่านยางธรรมชาติอพอกไซค์ที่มีหมู่อพอกไซค์ 25% โมล และ 50% โมลในสถานะน้ำยาง ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี พบว่า DSNR ที่ได้มีการเกาะติดของหมู่ไดออกซาฟอสโฟเลนเท่ากับ 6% โมล (DSNR25) และ 24% โมล (DSNR50) ตามลำดับ การเตรียม HNR โดยใช้ไดอิมิดที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างไฮดราซีนโมโนไฮเดรตกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซค์ในสถานะน้ำยาง โดยใช้สัดส่วนโมลของพันธะคู่ : ไฮดราซีนโมโนไฮเดรต : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซค์ = 1:1:1 และ 1:4:5 พบว่าได้ HNR ที่มีเปอร์เซ็นต์ไฮโดรจิเนชันประมาณ 15% โมล (HNR15) และ 40% โมล (HNR40) ตามลำดับ จากนั้นเตรียมยางเบลนด์ DSNR/HNR และวัดคาบไซน์ด้วยก้ามมะถัน ศึกษาอัตราส่วนการเบลนด์ที่ 100/0, 80/20, 60/40, 50/50, 40/60, 20/80 และ 0/100 พบว่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ DSNR25/HNR15 ที่สัดส่วน 40/60 มีค่าสูงที่สุด ส่วนยางเบลนด์ DSNR25/HNR40 มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มอัตราส่วนยาง HNR40 เนื่องจากการเตรียมยาง HNR ให้มีเปอร์เซ็นต์ไฮโดรจิเนชันเพิ่มขึ้นจะทำให้

ให้น้ำหนักโมเลกุลของยาง HNR ลดลง จึงทำให้ความแข็งแรงของยางลดลงด้วย การเบลนด์ยาง DSNR50 กับยาง HNR15 หรือ HNR40 พบว่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของ HNR ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากยาง DSNR50 มีความเปราะมาก และมีความแข็งแรงที่น้อย ดังนั้นเมื่อยิ่งเพิ่มอัตราส่วนของยาง HNR ทำให้ยางเบลนด์มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ DSNR/HNR ภายหลังจากบ่มเร่งด้วยความร้อน พบว่ามีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของ HNR ในขณะที่อุณหภูมิการสลายตัวของยางเบลนด์ DSNR/HNR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอัตราส่วนของ HNR ส่วนอัตราการเผาไหม้ของยางเบลนด์ DSNR/HNR มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของ DSNR เนื่องจากในโครงสร้างโมเลกุลยางมีสารประกอบฟอสฟอรัสเป็นส่วนประกอบซึ่งสารดังกล่าวเหมาะที่จะใช้กับยางที่มีออกซิเจนอยู่ หน้าที่ของสารประกอบฟอสฟอรัสจะเป็นตัวคายน้ำออกมาในขณะการลุกไหม้ของยางที่มีออกซิเจนทำให้ผิวยางเกรียมเป็นฉนวนความร้อนทำให้ยางสลายตัวช้าลงไป นอกจากนี้ยังได้ศึกษาระบบการวัลคาไนซ์ของยาง เบลนด์ DSNR/HNR พบว่าการวัลคาไนซ์ด้วยระบบบิวิจะให้ยางเบลนด์ที่มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด ส่วนระบบการวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์จะให้สมบัติเชิงความร้อนและอัตราการเผาไหม้ที่ดีที่สุด

สรุปผลการวิจัย

1. สามารถเตรียมยางธรรมชาติที่ดัดแปลงโมเลกุลด้วยไดบิวทิลฟอสเฟตที่มีการเกาะติดของหมู่ไดออกซาฟอสโฟเลนเท่ากับ 6% โมล (DSNR25) และ 24% โมล (DSNR50) ตามลำดับ
2. สามารถเตรียมยางธรรมชาติไฮโดรจิเนตในสภาวะน้ำยาง ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยไม่ใช้สารตัวเร่ง มีเปอร์เซ็นต์ไฮโดรจิเนชันเท่ากับ 14.53 % โมล และ 39.15 % โมล
3. ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ DSNR25/HNR15 ที่สัดส่วนการเบลนด์ 40/60 สูงที่สุด ยางเบลนด์ DSNR25/HNR40 มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มอัตราส่วนยาง HNR40 ส่วนยางเบลนด์ DSNR50/HNR15 และ DSNR50/HNR40 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอัตราส่วนยาง HNR
4. เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ DSNR/HNR ภายหลังจากบ่มเร่งด้วยความร้อน พบว่ามีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของ HNR
5. อุณหภูมิการสลายตัวของยางเบลนด์ DSNR25/HNR15, DSNR50/HNR15, DSNR25/HNR40 และ DSNR50/HNR40 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอัตราส่วนยาง HNR
6. อัตราการเผาไหม้ของยางเบลนด์ DSNR25/HNR15, DSNR50/HNR15, DSNR25/HNR40 และ DSNR50/HNR40 มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มอัตราส่วนยาง DSNR

7. ศึกษากระบวนการวัดคาบไชนซ์ของยางเบลนด์ DSNR/HNR พบว่าการวัดคาบไชนซ์ด้วยระบบอีวีจะให้ยางเบลนด์ที่มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด ส่วนกระบวนการวัดคาบไชนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์จะให้สมบัติเชิงความร้อนและอัตราการเผาไหม้ที่ดีที่สุด

ข้อเสนอแนะ

1. จากการเตรียมยางทั้งสองชนิดคือยาง DSNR และยาง HNR จะมีการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงขึ้นอย่างมากโดยเฉพาะยาง DSNR ดังนั้นจึงต้องศึกษาเทคนิคการควบคุมโครงสร้างของยาง DSNR และยาง HNR ให้มีหมู่ข้างเคียงให้น้อยที่สุด

2. ศึกษาสารเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างยางทั้งสองชนิด เนื่องจากยางทั้งสองชนิดมีความเป็นขั้วที่แตกต่างกันมาก

3. ศึกษาวิธีการเตรียมยางเบลนด์ด้วยวิธีอื่น เช่น เนื่องจากสารเคมีส่วนใหญ่มีขั้วจะเข้ากับเฟสยางที่ขั้วมากกว่า เพื่อให้สารเคมีกระจายตัวดีควรผสมสารเคมีกับยางที่ไม่มีขั้วก่อน แล้วจึงผสมกับยางที่มีขั้วทีหลัง เป็นต้น

บทคัดย่อ

การเตรียมยางธรรมชาติที่ทนทานต่อการเผาไหม้และการเสื่อมสลายด้วยความร้อนได้จากการเบลนดยางธรรมชาติที่ดัดแปลงโมเลกุลด้วยไดบิวทิลฟอสเฟต (DSNR) กับยางธรรมชาติไฮโดรจิเนต (HNR) โดย DSNR ได้จากการทำปฏิกิริยาผ่านยางธรรมชาติฟอกไซค์ที่มีหมู่ฟอกไซค์ 25% โมล และ 50% โมลในสถานะน้ำยาง ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี พบว่า DSNR ที่ได้มีการเกาะติดของหมู่ไดออกซาฟอสโฟเลนเท่ากับ 6% โมล (DSNR25) และ 24% โมล (DSNR50) ตามลำดับ การเตรียม HNR โดยใช้ไดโอดีโมด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างไฮดราซีนโมโนไฮเดรตกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสถานะน้ำยาง โดยใช้สัดส่วนโมลของพันธะคู่ : ไฮดราซีนโมโนไฮเดรต : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ = 1:1:1 และ 1:4:5 พบว่าได้ HNR ที่มีเปอร์เซ็นต์ไฮโดรจิเนชันประมาณ 15% โมล (HNR15) และ 40% โมล (HNR40) ตามลำดับ จากนั้นเตรียมยางเบลนด์ DSNR/HNR และวัดคาบในซ์ด้วยกัมมะดัน ศึกษาอัตราส่วนการเบลนด์ที่ 100/0, 80/20, 60/40, 50/50, 40/60, 20/80 และ 0/100 พบว่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ DSNR25/HNR15 ที่สัดส่วน 40/60 มีค่าสูงที่สุด ส่วนยางเบลนด์ DSNR25/HNR40 มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มอัตราส่วนยาง HNR การเบลนด์ยาง DSNR50 กับยาง HNR15 หรือ HNR40 พบว่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของ HNR ที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ DSNR/HNR ภายหลังจากบ่มเร่งด้วยความร้อน พบว่ามีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของ HNR ในขณะที่อุณหภูมิการสลายตัวของยางเบลนด์ DSNR/HNR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอัตราส่วนของ HNR ส่วนอัตราการใช้ของยางเบลนด์ DSNR/HNR มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของ DSNR นอกจากนี้ยังได้ศึกษาระบบการวัดคาบในซ์ของยางเบลนด์ DSNR/HNR พบว่าการวัดคาบในซ์ด้วยระบบอีวีจะให้ยางเบลนด์ที่มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด ส่วนระบบการวัดคาบในซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์จะให้สมบัติเชิงความร้อนและอัตราการใช้ที่ต่ำที่สุด

ABSTRACT

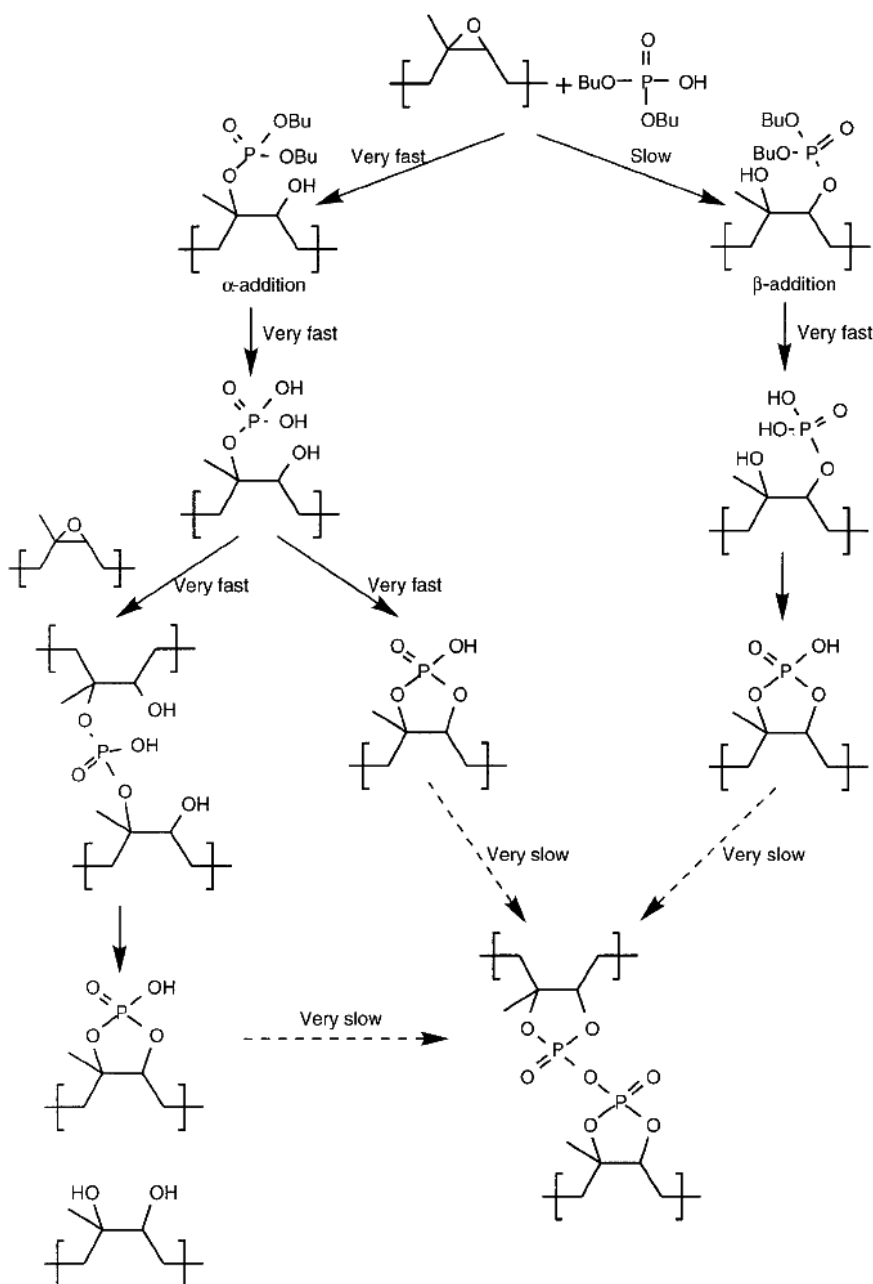
Preparation of natural rubber vulcanizates with flame and heat resistance was conducted by blending dibutyl phosphate supported natural rubber (DSNR) with hydrogenated natural rubber (HNR). DSNRs with 6 mol% (DSNR25) and 24 mol% (DSNR50) of dioxaphospholane groups, which were characterized by ^1H -NMR spectroscopy, were prepared in latex state through reaction of 25 and 50 mol% epoxidized natural rubbers with dibutyl phosphate, respectively. HNRs were also prepared in latex state using diimide generated *in-situ* from oxidation reaction of hydrazine monohydrate and hydrogen peroxide. By using molar ratio of $\text{C}=\text{C} : \text{N}_2\text{H}_4 : \text{H}_2\text{O}_2$ equal to 1:1:1 and 1:4:5, the resulting HNR of 15 and 40% hydrogenation (HNR15 and HNR40) were obtained respectively. Conventional sulfur vulcanized DSNR/HNR blends with various blend ratios at 100/0, 80/20, 60/40, 50/50, 40/60, 20/80 and 0/100 were prepared. It was found that 40/60 DSNR25/HNR15 blend showed the highest tensile strength and elongation at break. While the DSNR25/HNR40 blends showed the decreasing trend of tensile strength and elongation at break at higher proportion of HNR. Increasing trends of tensile strength and elongation at break of DSNR50 blends with HNR15 or HNR40 were also found in the blends with higher proportion of HNR. The percent change of tensile strength and elongation at break of DSNR/HNR after heat aging were decreased with higher proportion of HNR. Thermal property of DSNR/HNR blends increased with increasing proportion of HNR. Burning rate of DSNR/HNR blends was reduced with increasing proportion of DSNR. Influence of the vulcanization system of DSNR/HNR blends was also investigated. The best mechanical properties of DSNR/HNR blends were found in the efficiently vulcanized (EV) system. However, the best thermal properties and burning rate of the DSNR/HNR blends were found in the peroxide system.

บทที่ 1 บทนำ

ประเทศไทยสามารถผลิตยางธรรมชาติและส่งออกมากเป็นอันดับหนึ่งของโลกตั้งแต่ปี พ.ศ. 2534 แต่ผลผลิตที่ส่งออกส่วนใหญ่อยู่ในรูปของยางดิบ ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ส่งไปยังประเทศอุตสาหกรรมต่างๆ ทำให้สร้างรายได้ให้กับประเทศไม่มากเท่าที่ควร ดังนั้นงานวิจัยและพัฒนาจึงควรจะเน้นไปในแนวทางที่ก่อให้เกิดการเพิ่มมูลค่าของยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) และเพิ่มปริมาณการใช้ยางธรรมชาติภายในประเทศ และนอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มพูนศักยภาพการนำทรัพยากรภายในประเทศและทรัพยากรบุคคลใช้ประโยชน์ให้มากยิ่งขึ้น

ยางธรรมชาติเป็นยางที่ได้มาจากต้นยางพาราสายพันธุ์ฮีเวียบราซิลเลียนซิส (*Hevea Brasiliensis*) ในโมเลกุลยางธรรมชาติประกอบด้วยหน่วยไอโซพรีน (C_5H_8) มาต่อกันเป็นสายโซ่ยาว โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 50,000 – 3,000,000 และประมาณร้อยละ 60 ของโมเลกุลเหล่านี้มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 1,300,000 (ชัยวัฒน์, 2526) โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติมีลักษณะเป็น *cis*-isomer มากกว่า 99.99% และมี *trans*-isomer ปริมาณน้อยมาก ดังนั้นจึงมักเรียกกยางธรรมชาติว่า *cis*-1,4-polyisoprene ยางธรรมชาติมีสมบัติเด่นที่สำคัญคือ ความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด (Nghia *et al.*, 2008) และมีความแข็งแรงเหนียว ซึ่งมีการใช้งานในอุตสาหกรรม ที่พักอาศัย และอาคารสำนักงานต่างๆ แต่ถึงอย่างไรยางธรรมชาติก็มีข้อเสียที่สำคัญคือง่ายต่อการไหม้ไฟ (Derouet *et al.*, 2001) และเสื่อมสลายได้ด้วยความร้อน เนื่องจากยางธรรมชาติมีโครงสร้างที่ไม่อึดตัวในสายโซ่หลัก ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน จึงมีการปรับปรุงโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติให้มีความทนทานต่อการเผาไหม้ โดยทำเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นแรกเป็นการปรับโครงสร้างของโมเลกุลยางธรรมชาติให้เป็นยาง Epoxidized Natural Rubber (ENR) ก่อนขั้นที่สองใส่สารเคมีในกลุ่มของสารประกอบฟอสเฟตเข้าไปในโครงสร้างโมเลกุลของยาง โดยผ่านทางวงแหวนอีพอกไซด์ของยางอีพอกไซด์ ผลที่ได้คือสายโซ่โมเลกุลยางที่มีองค์ประกอบของฟอสเฟต จะสามารถลดการเผาไหม้ได้ในระดับหนึ่ง (บุญญานิช, 2546; สิทธิพร, 2550; Brosse *et al.*, 2000; Derouet *et al.*, 2001 และ 2003) ซึ่งเป็นที่รู้กันดีแล้วว่าพอลิเมอร์ที่มีองค์ประกอบของฟอสฟอรัสมีสมบัติในการหน่วงการติดไฟ และดีกว่าการใช้พวกฮาโลเจน เพราะไม่มีความเป็นพิษและไม่มีการระเหยที่มีฤทธิ์กัดกร่อน เช่น กรดไฮโดรคลอริก เป็นต้น (Derouet *et al.*, 2001) หน้าที่ของสารประกอบฟอสฟอรัสในการป้องกันไฟมี 2 อย่างคือ เกิดส่วนที่ติดไฟมีปริมาณน้อย และพอลิเมอร์จะถูกป้องกันจากความร้อนในการเผาไหม้จากชั้นที่ไหม้เกรียมที่เกิดขึ้นที่ผิวของพอลิเมอร์และจะดับด้วยน้ำที่คายออกมา (Grassie and Scott, 1985) ถึงแม้ว่าจะมีการปรับปรุงโมเลกุลยางให้มีฟอสเฟตแต่ในสายโซ่หลักยังคงมีพันธะคู่อยู่ ซึ่งอาจจะเป็นจุดอ่อนทำให้เกิดการเสื่อมสลายได้ง่าย กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไดบีทิลฟอสเฟตกับยางธรรมชาติอีพอกไซด์ การเข้าทำปฏิกิริยาแบบแทนที่ในตำแหน่งอัลฟาแอลกอฮอล์อย่างรวดเร็วเกิดเป็น β -hydroxyphosphate ซึ่งสามารถ

เกิดปฏิกิริยาได้ด้วยตัวเองเป็นหมู่ 2-Hydroxy-2-oxo-1,3,2-dioxaphospholane หรือทำปฏิกิริยากับหมู่ฟอสโฟไรต์ที่อยู่ใกล้เคียงด้วยการเกิดพันธะเกิดเป็น dialkylphosphate-type ภายหลังจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่เกิดเป็น 2-Hydroxy-2-oxo-1,3,2-dioxaphospholane และ α , β -diol ส่วน β -hydroxyphosphate ที่เกิดจากการเข้าทำปฏิกิริยาแบบแทนที่ในตำแหน่งเบต้า โดยจะเกิดการไฮโดรไลต์กับไดเอซิคอย่างรวดเร็ว และเกิดเป็น 2-Hydroxy-2-oxo-1,3,2-dioxaphospholane อย่างช้าๆ การเกิดพันธะ pyrophosphate เป็นผลมาจากปฏิกิริยาการควบแน่นระหว่างหมู่ 2-Hydroxy-2-oxo-1,3,2-dioxaphospholane 2 ตัวที่อยู่ใกล้เคียงกัน (Derouet *et al.*, 2003) ดังปฏิกิริยาที่แสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไดนิวทิลฟอสเฟตกับน้ำยาธรรมชาติฟอสโฟไรต์ (Derouet *et al.*, 2003)

การปรับปรุงโครงสร้างของยางธรรมชาติที่ทำให้ลดปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุล โดยการทำไฮโดรจิเนชัน (Hydrogenation) ซึ่งจะทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติด้านความต้านทานต่อการเสื่อมสลายด้วยความร้อนและออกซิเจน (Mahittikul *et al.*, 2005) ที่ดีขึ้น ยางธรรมชาติไฮโดรจิเนตมีโครงสร้างแบบสลับของเอทิลีนกับโพรพิลีน (Brydson *et al.*, 1988) พอลิเมอร์ที่มีพันธะคู่ในสายโซ่โมเลกุลที่มีการทำไฮโดรจิเนชัน เช่น poly(acrylonitrile-co-butadiene, NBR) (Xie *et al.*, 2003; Zhou *et al.*, 2004), poly(butadiene), poly(chloroprene) และ poly(styrene-co-butadiene, SBR) (Xie *et al.*, 2002; Sarkar *et al.*, 1999) นอกจากนี้ยังรวมไปถึงการผลิตที่ใช้และไม่ใช้สารตัวเร่ง สารตัวเร่งที่ใช้จะเป็นพวกโลหะซึ่งจะมีคุณภาพและเลือกไฮโดรจิเนตตรงพันธะคาร์บอน-คาร์บอนที่ไม่อิ่มตัวในพอลิเมอร์ได้ดี (Singha *et al.*, 1997) ส่วนการไฮโดรจิเนตที่ไม่ใช้สารตัวเร่ง โดยจะใช้ p-toluenesulfonyl hydrazide (TSH) ซึ่งจะช่วยให้สายโซ่เกิดการแตกและรวมกับ hydrazide จึงทำให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลงได้ ในด้านการทำไฮโดรจิเนชันยางธรรมดานั้นมีรายงานผลการวิจัยมากพอสมควร เช่นการทำไฮโดรจิเนชันยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกไซด์ โดยใช้ diimide เป็นตัวเร่งซึ่ง diimide เกิดจากการเสื่อมสลายด้วยความร้อนของ p-toluenesulfonyl hydrazide ใน o-xylene ที่อุณหภูมิ 135°C (Samran *et al.*, 2005; Mahittikul *et al.*, 2005) การทำไฮโดรจิเนชันในน้ำยางธรรมชาติโดยใช้ Osmium และ Iridium catalyst พร้อมทั้งศึกษาผลด้านจลนศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยา (Mahittikul *et al.*, 2005, 2006 และ 2008) และมีการวิจัยการพัฒนาสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้การทำไฮโดรจิเนชันในน้ำยางธรรมชาติโดยใช้ Hydrazine/hydrogen peroxide และใช้ cupric acetate เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยา (Mahittikul *et al.*, 2005) ผลผลิตที่ได้จากการทำไฮโดรจิเนชันยางธรรมชาติคือ ethylene-propylene copolymer ซึ่งมีโครงสร้างที่อิ่มตัวมากขึ้น (Mahittikul *et al.*, 2008) ดังนั้นถ้าสามารถควบคุมระดับของการทำไฮโดรจิเนชันก็สามารถควบคุมปริมาณของพันธะคู่ที่อยู่ในโมเลกุลยางซึ่งจะส่งผลต่อเนื่องไปยังสมบัติด้านความทนทานต่อการเสื่อมสลายด้วยความร้อน

ด้วยเทคโนโลยีที่สามารถเตรียมยางธรรมชาติที่มีการควบคุมการใส่องค์ประกอบของฟอสเฟตเข้าไปเกาะติดในสายโซ่โมเลกุล ทำให้ได้ยางธรรมชาติที่มีความทนทานต่อการเผาไหม้ นำมารวมกับเทคโนโลยีการทำไฮโดรจิเนชันยางธรรมชาติที่ควบคุมปริมาณพันธะคู่ในสายโซ่โมเลกุล ทำให้ได้ยางธรรมชาติที่มีความทนทานต่อการเสื่อมสลายด้วยความร้อน นำยางที่ได้มาผสมในเครื่องบดยางสองลูกกลิ้งในสถานะของแข็ง ซึ่งจะได้ยางธรรมชาติที่มีสมบัติทั้งด้านทนต่อการเผาไหม้และด้านทนต่อการเสื่อมสลายด้วยความร้อน อย่างไรก็ตาม ในยางธรรมชาติเกรดใหม่นี้จำเป็นต้องทราบถึงพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ พฤติกรรมการแปรรูป และสมบัติทางกลของยางวัลคาไนซ์เพื่อที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมมากขึ้น

บทที่ 2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 ยางและสารเคมี

2.1.1 น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูง (High Ammonia Concentrated Latex, HA)

น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูงมีปริมาณเนื้อยาง 60% ถูกรักษาสภาพด้วยแอมโมเนียปริมาณ 0.7% ใช้สำหรับการเตรียมยางธรรมชาติอพอกไซค์และยางธรรมชาติไฮโดรจิเนต ผลิตโดยบริษัท ยะลาตาเท็กซ์ จำกัด ประเทศไทย

2.1.2 เทอร์ริก เอ็น 30 (Terric N30)

เทอร์ริก เอ็น 30 เป็นสารลดแรงตึงผิวประเภทนอนไอออนิก (non-ionic surfactant) ใช้สำหรับการเตรียมยางธรรมชาติอพอกไซค์ จัดอยู่ในกลุ่ม alkylphenol ethoxylate มีลักษณะเป็นไขสีขาวข้น ค่า pH ประมาณ 6-8 ค่า Hydrogen Value เท่ากับ 33 mg KOH/g ผลิตโดยบริษัท Huntsman ประเทศออสเตรเลีย

2.1.3 กรดฟอร์มิก (Formic acid)

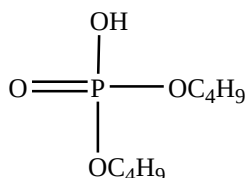
กรดฟอร์มิกใช้สำหรับเตรียมยางธรรมชาติอพอกไซค์ มีความเข้มข้น 85% สูตรทางเคมี HCOOH น้ำหนักโมเลกุล 46.03 กรัม/โมล ผลิตโดยบริษัท Quality Reagent Chemical Product ประเทศนิวซีแลนด์

2.1.4 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ใช้สำหรับเตรียมยางธรรมชาติอพอกไซค์ และสารเคมีที่ให้ไฮโดรเจนแก่ยางธรรมชาติไฮโดรจิเนชัน มีความเข้มข้น 35% สูตรทางเคมี H_2O_2 น้ำหนักโมเลกุล 34.01 กรัม/โมล ผลิตโดยบริษัท Quality Reagent Chemical Product ประเทศนิวซีแลนด์

2.1.5 ไดบิวทิลฟอสเฟต (Dibutyl phosphate, DBP)

ไดบิวทิลฟอสเฟตเป็นสารเคมีใช้สำหรับดัดแปลงโมเลกุลยางธรรมชาติอพอกไซค์ เพื่อที่จะทำให้สารในกลุ่มของฟอสฟอรัสเข้าทำปฏิกิริยากับวงแหวนอพอกไซค์ที่เกาะติดในสายโซ่โมเลกุลยาง มีความเข้มข้น 97% น้ำหนักโมเลกุล 210.21 กรัม/โมล มีความหนาแน่น $1.058 \pm 3 \text{ g/cm}^3$ ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศเยอรมัน มีสูตรโครงสร้างโมเลกุลแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของไดบิวทิลฟอสเฟต

2.1.6 เมทานอล (Methanol)

เมทานอลใช้สำหรับจับตัวน้ำหลังจากทำปฏิกิริยากับไดบิวทิลฟอสเฟต มีสูตรทางเคมี CH_3OH น้ำหนักโมเลกุล 32.04 กรัม/โมล ช่วงจุดเดือดอยู่ระหว่าง 64-65 °C ผลิตโดยบริษัท J.T.Baker ประเทศสหรัฐอเมริกา

2.1.7 คลอโรฟอร์ม (Chloroform)

คลอโรฟอร์มใช้เป็นตัวทำละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์เพื่อหาปริมาณหมู่อีพอกไซด์ มีความเข้มข้น 99.8% สูตรทางเคมี CHCl_3 น้ำหนักโมเลกุล 119.38 กรัม/โมล มีจุดเดือดเท่ากับ 61.2 °C ผลิตโดยบริษัท Lab-scan ประเทศไทย

2.1.8 ไฮดราซีน โมโนไฮเดรต (Hydrazine monohydrate)

ไฮดราซีน โมโนไฮเดรตเป็นสารเคมีที่ใช้ควบคู่กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อทำให้เกิดไดอิมิด์ในการทำปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน มีความเข้มข้น 98% สูตรทางเคมี $\text{NH}_2\text{NH}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ น้ำหนักโมเลกุล 50.061 กรัม/โมล มีความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 20 °C เท่ากับ $1.030 \pm 0.005 \text{ g/cm}^3$ ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศเยอรมัน

2.1.9 คิวปริอะซิเตต (Cupric acetate)

คิวปริอะซิเตตใช้เป็นสารตัวเร่งให้ไฮดราซีน โมโนไฮเดรตกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เกิดเป็นไดอิมิด์เร็วขึ้น มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเขียวมรกต มีสูตรทางเคมี $\text{C}_4\text{H}_6\text{CuO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ น้ำหนักโมเลกุล 199.65 กรัม/โมล ผลิตโดยบริษัท Fluka ประเทศเยอรมัน

2.1.10 อัลตราเบลนด์ (Ultra Blend 6000, UB6000)

อัลตราเบลนด์เป็นสารช่วยให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenizing agent) ในการผสมของยางธรรมชาติ คัดแปลงโมเลกุลด้วยไดบิวทิลฟอสเฟตกับยางธรรมชาติไฮโดรจิเนต ซึ่งการใส่ที่ดีที่สุดคือการใส่ในช่วงแรกของการเบลนด์ โดยใส่ได้ 2-5 phr ผลิตโดยบริษัท Performance Additives Co., Ltd. ประเทศมาเลเซีย มีสมบัติดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติของ Ultrablend 6000 (Ultrablend 6000 data sheet; Performance Additives Co., Ltd. 2004)

Properties	Typical
Appearance	Yellow pastilles
Specific Gravity	0.97
Ash Content (% Max)	2
Softening point (°C)	100
Storage stability	At least 2 years under normal condition

2.1.11 กรดสเตียริก (Stearic acid)

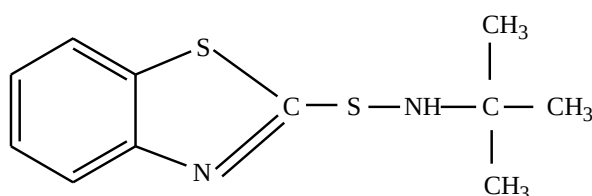
กรดสเตียริกเป็นสารกระตุ้นในการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน มีลักษณะคล้ายขี้ผึ้งที่เป็นของแข็ง สีขาว มีสูตรทางเคมี $C_{18}H_{36}O_2$ น้ำหนักโมเลกุล 284.47 กรัม/โมล ความหนาแน่น 0.85 g/cm^3 มีจุดหลอมเหลว $69-70^\circ\text{C}$ ผลิตโดยบริษัท Imperial Chemical จำกัด ประเทศไทย

2.1.12 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO)

ซิงค์ออกไซด์เป็นสารกระตุ้นในการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน มีลักษณะเป็นผงสีขาว น้ำหนักโมเลกุล 81.4084 กรัม/โมล ความถ่วงจำเพาะ 5.57 ผลิตโดยบริษัท Global Chemical ประเทศไทย

2.1.13 เอ็น-เทอเทียวรี-2-เบนโซไทอาร์ซิล ซัลฟีนามิด์ (N-tert-butyl-2-benzothiazyl sulphenamide, TBBS)

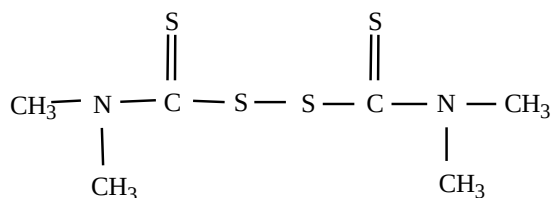
เอ็น-เทอเทียวรี-2-เบนโซไทอาร์ซิล ซัลฟีนามิด์เป็นสารตัวเร่งหลักในการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน ให้ระยะเวลาที่สามารถแปรรูปได้ (Scorch time) ยาว มีลักษณะเป็นแท่งเล็กๆ สีเหลืองนวล น้ำหนักโมเลกุล 238.37 กรัม/โมล มีจุดหลอมเหลว 105°C ความถ่วงจำเพาะ 1.28 ผลิตโดยบริษัท Bayer ประเทศเยอรมัน มีสูตรโครงสร้างโมเลกุลแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของเอ็น-เทอเทียวรี-2-เบนโซไทอาร์ซิล ซัลฟีนามิด์

2.1.14 เตตระเมทิลไทูรัมไดซัลไฟด์ (Tetramethylthiuram disulfide, TMTD)

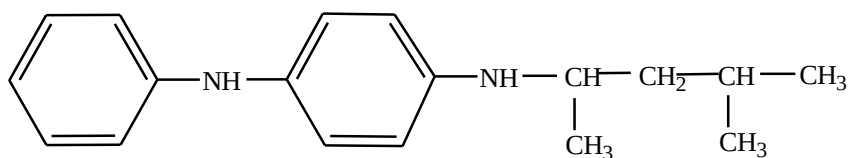
เตตระเมทิลไทูเรมไดซัลไฟด์เป็นสารตัวเร่งรองเพื่อไปกระตุ้นการทำงานของสารตัวเร่งหลัก ทำให้ยางมีอัตราในการเกิดปฏิกิริยาของรูปและมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้นในขณะที่ระยะเวลาการสกอรัช (Scorch time) ยังคงยาวอยู่ มีลักษณะเป็นเกล็ดของแข็งสีขาว ความถ่วงจำเพาะ 1.42 ผลิตโดยบริษัท Flexys ประเทศเบลเยียม มีสูตร โครงสร้างโมเลกุลแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของเตตระเมทิลไทูเรมไดซัลไฟด์

2.1.15 เอ็น-1,3-ไดเมทิลบิวทิล-เอ็น-ฟีนิลพาราฟีนิลลีนไดเอมีน (N-1,3-dimethylbutyl-N'-phenyl-p-phenylenediamine, 6PPD)

เอ็น-1,3-ไดเมทิลบิวทิล-เอ็น-ฟีนิลพาราฟีนิลลีนไดเอมีนเป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพชนิดตกสี ซึ่งมีประสิทธิภาพการปกป้องจากการออกซิเดชันและโอโซนได้ดี มีลักษณะเป็นเม็ดสีดำ มีความถ่วงจำเพาะ 0.99 ผลิตโดยบริษัท Flexys ประเทศเบลเยียม มีสูตร โครงสร้างโมเลกุลแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุลของเอ็น-1,3-ไดเมทิลบิวทิล-เอ็น-ฟีนิลพาราฟีนิลลีนไดเอมีน

2.1.16 เขม่าดำ (Carbon black)

เขม่าดำที่ใช้ชนิด HAF N330 (High Abrasion Furnace, N330) ใช้เป็นสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพในยางเบลด ผลิตโดยบริษัท Thai Carbon Black Public Co., Ltd. ประเทศไทย มีสมบัติดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติของเขม่าดำเกรด N330 (N330 data sheet; Thai Carbon Black Co., Ltd. 2006)

Properties	Values
Iodine Absorption, g/kg	82 ± 5
CTAB surface area, m ² /g	83 ± 6

pH value	6 - 9
Heating loss @125°C, %max	1.0
Ash content, %max	0.45
Sieve residue, %max	0.1 – 0.001
Sulphur content, %max	1.1
Toluene discoloration, %min	90
Pour content, kg/m ³	340
Fine content, %max	15

2.1.17 น้ำมันพาราฟินิก (Paraffinic oil)

ใช้เป็นสารช่วยในการแปรรูปยาง มีลักษณะใสไม่มีสี มีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นโมเลกุลที่อิ่มตัวซึ่งประกอบด้วยสารคาร์บอนและไฮโดรเจน และมีออกซิเจนกับไนโตรเจนเจือปนอยู่เล็กน้อย ผลิตโดยบริษัท คาลเท็กซ์ จำกัด ประเทศไทย มีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติของน้ำมันพาราฟินิก (Paraffinic oil data sheet; Caltex Co., Ltd. 2009)

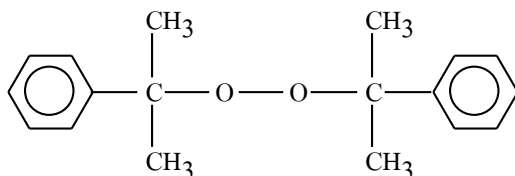
Properties	Test method	Value
Density@30°C	ASTM-D1298	0.858
Flash Point (COC) (°C)	ASTM-D92	224
Kinematic Viscosity@100°C (cSt)	ASTM-D445	
@40°C		
@100°C		30.5
Viscosity Index		4.903
Carbon Type Analysis Ca%	ASTM-D2270	105
Cn%	ASTM-D2140	4.1
Cp%	ASTM-D2140	27.6
	ASTM-D2140	68.2

2.1.18 ซัลเฟอร์ (sulphur)

กำมะถันเป็นสารที่ก่อให้เกิดการเชื่อมโยง (Cosslinking agent) ในโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ กำมะถันที่มีลักษณะเป็นผงสีเหลืองประกอบด้วยซัลเฟอร์ 8 อะตอม (S₈) ในหนึ่งโมเลกุล มีจุดหลอมเหลว 115.21 °C มีความถ่วงจำเพาะ 2.07 ผลิตโดยบริษัท Ajax Chemical ประเทศเนเธอร์แลนด์

2.1.19 ไดคิวมิล เปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, CDP)

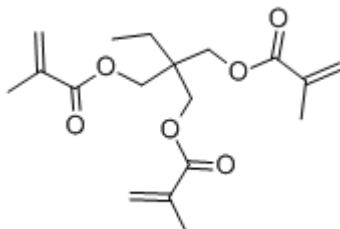
ไดคิวมิล เปอร์ออกไซด์เป็นอะโรมาติกเปอร์ออกไซด์ซึ่งใช้เป็นสารวัลคาไนซ์ มีลักษณะเป็นเม็ดสีขาวขุ่น มีจุดหลอมเหลว 39-41 °C มีน้ำหนักโมเลกุล 270.37 กรัม/โมล ความถ่วงจำเพาะ 1.02 ผลิตโดยบริษัท Wuzhou International Co., Ltd. ประเทศจีน มีสูตรโครงสร้างโมเลกุลแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลของไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์

2.1.20 ไตรเมทิลลอลโพรเพนไตรเมทาคริเลท (Trimethylol propane trimethacrylate, TMPTMA)

เป็นสาร โคเอเจนต์ (Coagent) ในปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ มีลักษณะเป็นของเหลวสีเหลืองใส มีสูตรโมเลกุล คือ $C_{18}H_{26}O_6$ น้ำหนักโมเลกุล 338.41 g/mol ความหนาแน่น 1.06 g/cm³ ผลิตโดยบริษัท Degussa Co., Ltd ประเทศจีน มีสูตร โครงสร้างโมเลกุลดังนี้



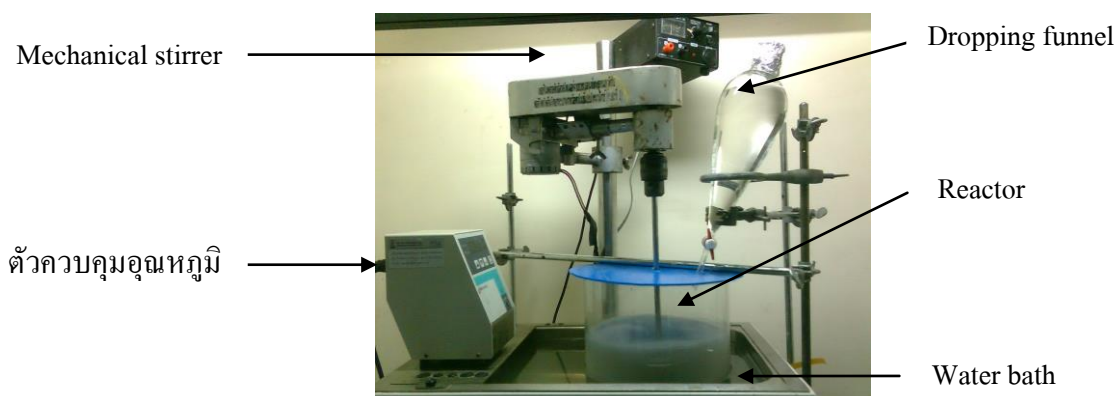
รูปที่ 2.6 โครงสร้างโมเลกุลของไตรเมทิลลอลโพรเพนไตรเมทาคริเลท

2.2 อุปกรณ์

2.2.1 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้เตรียมยางธรรมชาติที่ทนทานต่อการเผาไหม้

ชุดอุปกรณ์ที่ใช้เตรียมยางธรรมชาติอีพอกไซด์และเตรียมยางธรรมชาติดัดแปลงโมเลกุลด้วยไดบิวทิลฟอสเฟต ประกอบด้วยอ่างใส่น้ำสำหรับควบคุมอุณหภูมิ (water bath) ภาชนะแก้วซึ่งใช้เป็นปฏิกรณ์มีความจุประมาณ 10 ลิตร พร้อมประกอบกับส่วนของมอเตอร์กวน ใบพัดและมีชุดหยดสารเคมี (Dropping funnel) ควบคุมอุณหภูมิของปฏิกิริยาโดยเครื่อง immersion circulator มีใบพัดสำหรับกวนของผสมโดยใช้ชุด mechanical stirrer สำหรับการเตรียมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ ควบคุมให้อุณหภูมิเท่ากับ 50°C ความเร็วของใบพัดกวนประมาณ 150 รอบต่อนาที ส่วนการเตรียมยางธรรมชาติดัดแปลงโมเลกุลด้วยไดบิวทิล

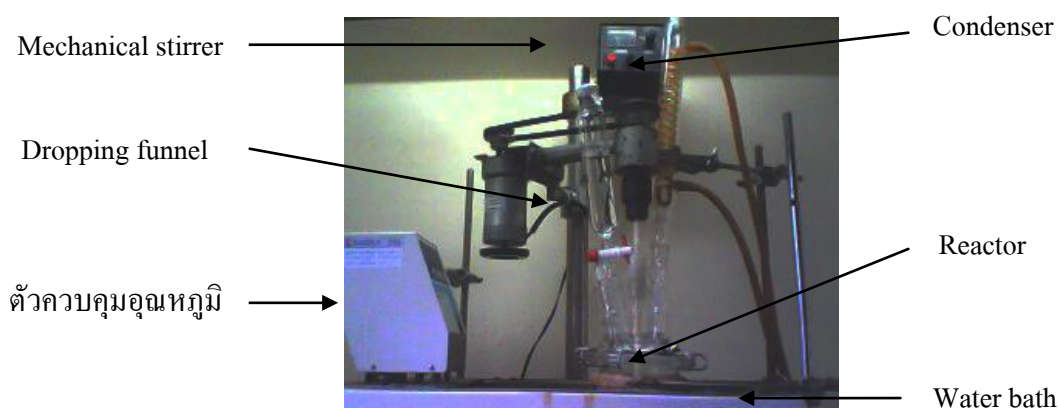
ฟอสเฟต ควบคุมให้อุณหภูมิเท่ากับ 30°C ความเร็วของใบพัดกวนประมาณ 250 รอบต่อนาที ลักษณะเครื่องแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติที่ทนทานต่อการเผาไหม้

2.2.2 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้เตรียมยางธรรมชาติไฮโดรจีเนชัน

ชุดอุปกรณ์ที่ใช้เตรียมยางธรรมชาติไฮโดรจีเนชัน ประกอบด้วยอ่างใส่น้ำสำหรับควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) ภาชนะแก้วซึ่งใช้เป็นปฏิกรณ์มีความจุประมาณ 2 ลิตร พร้อมประกอบกับส่วนของมอเตอร์ กวน ใบพัด ชุดกลั่น และชุดหยดสารเคมี (Dropping funnel) ควบคุมอุณหภูมิของปฏิกิริยาโดยเครื่อง immersion circulator ที่อุณหภูมิ 55°C มีใบพัดสำหรับกวนของผสมโดยใช้ชุด mechanical stirrer ความเร็วของใบพัดกวนประมาณ 150 รอบต่อนาที ลักษณะเครื่องแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติไฮโดรจีเนชัน

2.2.3 เครื่องทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ (Oscillating Disk Rheometer, ODR)

เป็นเครื่อง Oscillating Disk Rheometer รุ่น 2000 ผลิตโดยบริษัท Monsanto ประเทศสหรัฐอเมริกา เพื่อใช้หาเวลาการสกอรัชของยาง (Scorch time) และเวลาสุกของยาง (Cure time) โรเตอร์เป็นแบบ

Biconical disk มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3993 นิ้ว ซึ่งหมุนกลับไป-มาด้วยมุม 1 องศา ที่ความถี่ 100 รอบต่อ นาที เครื่องมือลักษณะแสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 เครื่องทดสอบลักษณะการวัดคาไนซ์ (Oscillating Disk Rheometer, ODR)

2.2.4 เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FTIR)

เป็นเครื่องรุ่น Omnic ESP Magna-IR 560 Spectrometer, Nicolet ผลิตโดยบริษัท Nicolet Instrument Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์โดยอาศัยรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า ในช่วงรังสีอินฟราเรดความยาวคลื่นตั้งแต่ 0.8-200 ไมครอน ซึ่งมีเลขคลื่นอยู่ในช่วง $4000-50\text{ cm}^{-1}$ ลักษณะเครื่องแสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

2.2.5 เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรมิเตอร์ชนิดโปรตอน ($^1\text{H-NMR}$)

เป็นเครื่องรุ่น Unity Inova 500 MHz ผลิตโดยบริษัท Varian ประเทศเยอรมนี เครื่องมีอประกอบด้วยแม่เหล็กตัวนำยิ่งยวดโซเลนอยด์ (Superconducting Solenoid) เป็นตัวผลิตสนามแม่เหล็กขนาด 11.74 เทสลาและ Console ซึ่งเป็นตัวผลิตรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่คลื่นวิทยุส่งไปยังสารตัวอย่างที่บรรจุอยู่ในหลอดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ซึ่งวางอยู่ใน Probe เพื่อให้สารเกิดเรโซแนนซ์ โดยที่ Probe จะมีตัวตรวจวัดสัญญาณติดอยู่ หลังจากนั้นสัญญาณคลื่นวิทยุที่เกิดขึ้นถูกส่งไปยัง console อีกครั้งหนึ่งเพื่อประมวลสัญญาณที่ปล่อยออกมาและส่งสัญญาณไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผล

2.2.6 เครื่องผสมยางสองลูกกลิ้ง (Two Roll Mill)

ใช้บดผสมยางคอมปาวด์ประกอบด้วยลูกกลิ้งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว ความยาว 13 นิ้ว ลูกกลิ้งหน้าหมุนด้วยความเร็ว 21.4 รอบ/นาที ลูกกลิ้งหลังหมุนด้วยความเร็ว 25.7 รอบ/นาที อัตราความเร็วของลูกกลิ้งหน้าต่อลูกกลิ้งหลัง (Friction ratio) เท่ากับ 1/1.21 ผลิตโดยห้างหุ้นส่วนจำกัดชัยเจริญการช่าง กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย ลักษณะเครื่องแสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 เครื่องผสมยางสองลูกกลิ้ง (Two roll mill)

2.2.7 เครื่องอัดเบ้า (Compression molding machine)

เป็นเครื่องสำหรับอัดขึ้นททดสอบยางโดยใช้ระบบไฮดรอลิก ให้ความร้อนด้วยระบบไฟฟ้า มีแผ่นอัดจำนวน 2 ชั้นแต่ละชั้นมีขนาด 20 x 20 นิ้ว สามารถปรับอุณหภูมิได้สูงสุดถึง $399 \pm 5^\circ\text{C}$ ความดันที่สามารถใช้อัดได้สูงสุด คือ 6000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ผลิตโดยห้างหุ้นส่วนจำกัด ชัยเจริญการช่าง กรุงเทพมหานคร ลักษณะเครื่องแสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 เครื่องอัดเป่า (Compression molding)

2.2.8 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile testing machine)

ยี่ห้อ Hounsfield รุ่น H 10KS ผลิตโดยบริษัท Hounsfield Test Equipment ประเทศอังกฤษ ใช้วัดแรงกดหรือแรงดึง สามารถรับแรงได้สูงสุด 10 KN มี Load cell ทำหน้าที่แปลงสัญญาณจากค่าแรงที่วัดได้ผ่านวงจรอิเล็กทรอนิกส์เป็นค่าแรงดึงหรือแรงกดในหน่วยนิวตัน สามารถตั้งความเร็วในการเคลื่อนที่ 0.01 ถึง 1000 มิลลิเมตรต่อนาที ลักษณะเครื่องแสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง

2.2.9 เครื่องทดสอบการสลายตัวด้วยความร้อน (Thermal gravimetric analyzer, TGA)

ใช้เป็นเครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อนด้วยเทคนิค Thermal gravimetric analysis, TGA รุ่น STA 6000 โดยให้ค่าอุณหภูมิการสลายตัวและเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักการสลายตัวของชิ้นตัวอย่าง สามารถทดสอบตัวอย่างได้ตั้งแต่อุณหภูมิ 20-1000°C ผลิตโดยบริษัท Perkin Elmer ประเทศสหรัฐอเมริกา ลักษณะเครื่องแสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 เครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermal gravimetric analyzer)

2.2.10 ตู้อบบ่มเร่งด้วยอากาศร้อน (Hot air aging oven)

ตู้อบบ่มเร่งด้วยอากาศร้อนนี้เป็นแบบช่อง (cell type) ซึ่งมีช่องสำหรับใส่ตัวอย่าง 3 ช่อง แต่ละช่องจะสามารถใส่ชิ้นตัวอย่างได้ 8 ชิ้น สามารถควบคุมอุณหภูมิได้แม่นยำ $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ปรับระดับอุณหภูมิได้ตั้งแต่ $40 - 200^{\circ}\text{C}$ และควบคุมปริมาณของอากาศที่ไหลเข้าออกในแต่ละเซลล์ได้ตั้งแต่ $0.1 - 1.0 \text{ l/min}$ ผลิตโดยบริษัท Elastocon ประเทศสวีเดน ลักษณะเครื่องแสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ตู้อบบ่มเร่งด้วยอากาศร้อนแบบช่อง (Cell typed ageing oven)

1.2.11 เครื่องทดสอบการเผาไหม้

เครื่องทดสอบการเผาไหม้เป็นเครื่องมือที่ผลิตขึ้นตามมาตรฐาน ISO 3582 ผลิตโดยเจ้าหน้าที่ฝ่ายเทคนิค อาคารเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ แสดงดังรูปที่ 2.16 เครื่องทดสอบการเผาไหม้ประกอบด้วย ห้องทดสอบ (test chamber) ตะเกียง (burner wing top) ตะแกรง (gauze) และตัวยึดตะแกรง (support gauze holder)



รูปที่ 2.16 เครื่องทดสอบการเผาไหม้ (A) ห้องทดสอบ และ (B) ส่วนที่เป็นตะเกียงและตะแกรง

2.2.12 เครื่องชั่งไฟฟ้า (Electronic balance)

มีการใช้ 2 แบบ คือ ER-120 A มีทศนิยม 4 ตำแหน่ง น้ำหนักสูงสุด 120 กรัม ผลิตโดยบริษัท A&D ประเทศญี่ปุ่น และเครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง น้ำหนักสูงสุด 5000 กรัม ผลิตโดยบริษัท Shinko Denshi ประเทศญี่ปุ่น

2.3 วิธีการทดลอง

2.3.1 การเตรียมยางธรรมชาติที่ทนทานต่อการเผาไหม้

2.3.1.1 การเตรียมยางธรรมชาติฟอกโซลด์

เตรียมยางธรรมชาติฟอกโซลด์โดยใช้สารเคมีที่แสดงในตารางที่ 2.4 โดยเจือจางน้ำยางข้น(High Ammonia Concentrated Latex, HA) ให้มีเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content, DRC) เท่ากับ 20% แล้วเติมสบู่ 40% Terric N30 เพื่อให้อนุภาคน้ำยางเสถียร ให้ความร้อนอุณหภูมิ 50 °C กวนเป็นเวลา 30 นาที ความเร็วการกวน 160 รอบ/นาที หลังจากนั้นเติมกรดฟอร์มิกอย่างช้าๆ และตามด้วยการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นลำดับสุดท้าย ภายใต้อการกวนตลอดเวลา แล้วปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินไป โดยหนึ่งชั่วโมงแรก เก็บตัวอย่างทุก 15 นาที หลังจากนั้นเก็บทุก 1 hr จนครบ 8 hr นำน้ำยางที่ได้มาปรับค่า pH ให้เป็นกลางด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 20% ใช้กระดาษลิตมัสในการทดสอบความเป็นกลาง ตั้งทิ้งไว้ 1 คืน จากนั้นนำตัวอย่างมาจับตัวด้วยเมทานอล ริดเป็นแผ่นบาง ล้างน้ำให้สะอาดและนำไปอบแห้ง แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณหมู่ฟอกโซลด์ด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกโรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy)

ตารางที่ 2.4 สารเคมีที่ใช้เตรียมยางธรรมชาติอ็อกโซไนด์ปริมาณ 1 ลิตร

สารเคมี	ปริมาณ	ปริมาณที่ใช้จริง (g)
Latex (Mol. Repeating unit of 60% NR)	1.70	193
85% Formic acid (M)	0.99	54
35% Hydrogen peroxide (M)	3.71	360
40% w/w Terric N30 (g/L)	-	65

2.3.1.2 การเตรียมยางธรรมชาติดัดแปลงด้วยไดบิวทิลฟอสเฟต (Dibutyl phosphate Supported Natural Rubber, DSNR)

หลังจากเตรียมน้ำยางธรรมชาติอ็อกโซไนด์ที่มีปริมาณอ็อกโซไนด์เท่ากับ 25% โมลและ 50% โมล ที่ปรับค่า pH ให้เป็นกลางแล้วจากหัวข้อที่ 2.3.1.1 เจือจางน้ำยางธรรมชาติอ็อกโซไนด์ให้มีเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งเท่ากับ 10% ใส่ลงในปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร ที่ต่อกับคอนเดนเซอร์และเครื่องกวน ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ 30 °C ความเร็วการกวน 250 รอบ/นาที แล้วหยดไดบิวทิลฟอสเฟต (Dibutyl phosphate, DBP) อย่างช้าๆ ด้วยอัตราคงที่ 9 ml/hr สัดส่วนโดยโมลที่ใช้คือ [DBP] : [epoxidized units] = 1:1 ทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 4 hr จากนั้นจับตัวด้วยเมทานอล และอบให้แห้งในตู้อบ 40 °C จนน้ำหนักคงที่ แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณหมู่ฟอสเฟต ด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกิริโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี

2.3.2 การเตรียมยางธรรมชาติที่มีความทนทานต่อการเสื่อมสลายด้วยความร้อน

2.3.2.1 การเตรียมยางธรรมชาติไฮโดรจิเนชัน (Hydrogenation of Natural Rubber, HNR) ใช้สารตัวเร่ง

เตรียมยางธรรมชาติไฮโดรจิเนชันโดยใช้สารเคมีที่แสดงในตารางที่ 2.5 โดยเจือจางน้ำยางข้น (High Ammonia Concentrated Latex, HA) ให้มีเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content, DRC) เท่ากับ 14% ใส่ลงในปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร ที่ต่อกับคอนเดนเซอร์และเครื่องกวน ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ 55 °C ความเร็วการกวน 160 รอบ/นาที กวนเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นเติมสารตัวเร่ง Cupric acetate 8 μmol และ 80% Hydrazine monohydrate กวนต่อเป็นเวลา 30 นาที แล้วหยด 30% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อย่างช้าๆ ด้วยอัตราคงที่ 59 ml/hr ปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินไป โดยเก็บตัวอย่างทุกๆ 30 นาทีจนครบ 7 hr แล้วนำตัวอย่างมาจับตัวด้วยเมทานอล ริดเป็นแผ่นบาง ล้างน้ำให้สะอาดและนำไปอบแห้งจนน้ำหนักคงที่ แล้วนำไปวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ไฮโดรจิเนชันด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกิริโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี

ตารางที่ 2.5 สารเคมีที่ใช้เตรียมยางธรรมชาติไฮโดรจิเนชันใช้สารตัวเร่งปริมาตร 1 ลิตร ที่สัดส่วนโมลของ $C=C : N_2H_4 : H_2O_2 = 1:4:5$

สารเคมี	ปริมาณ	ปริมาณที่ใช้จริง (g)
Latex (Mol. Repeating unit of 60% NR)	0.1	68
80% Hydrazine monohydrate	0.4	96
30% Hydrogen peroxide	0.5	340

2.3.2.2 การเตรียมยางธรรมชาติไฮโดรจิเนชัน (Hydrogenation of Natural Rubber, HNR) ไม่ใช้สารตัวเร่ง

เตรียมยางธรรมชาติไฮโดรจิเนชันโดยใช้สารเคมีที่แสดงในตารางที่ 2.6 โดยเจือจางน้ำยางข้น (High Ammonia Concentrated Latex, HA) ให้มีเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content, DRC) เท่ากับ 20% ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร โดยใช้เครื่อง magnetic stirrer ในการกวนน้ำยาง เติมสบู่ SDS ปริมาณ 2 phr ต่อน้ำหนักยางแห้ง จากนั้นปิดบีกเกอร์ด้วย wrap กวนน้ำยางต่อไปเป็นเวลา 24 hr จากนั้นเทน้ำยางที่ได้ลงในปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร ที่ต่อกับคอนเดนเซอร์และเครื่องกวน ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ 55 °C ความเร็วการกวน 160 รอบ/นาที แล้วหยด 98% Hydrazine monohydrate แบบต่อเนื่อง (dropwride) กวนต่อเป็นเวลา 30 นาที แล้วหยด 30% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยอัตราคงที่ 3.37 ml/hr ภายใต้การกวนตลอดเวลา เมื่อหยดเสร็จจึงปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินไปเป็นเวลา 24 hr จับตัวด้วยเมทานอล ริดเป็นแผ่นบาง ล้างน้ำให้สะอาด และนำไปอบแห้งจนน้ำหนักคงที่ แล้วนำไปวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ไฮโดรจิเนชันด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี

ตารางที่ 2.6 สารเคมีที่ใช้เตรียมยางธรรมชาติไฮโดรจิเนชันไม่ใช้สารตัวเร่งปริมาตร 1 ลิตร

สารเคมี	ปริมาณ		ปริมาณที่ใช้จริง (g)	
	1:1:1	1:4:5	1:1:1	1:4:5
Latex (Mol. Repeating unit of 60% NR)	0.3	0.3	133	133
80% Hydrazine monohydrate	0.3	1.2	47	188
30% Hydrogen peroxide	0.3	1.5	133	665

2.3.3 การศึกษาอิทธิพลการเบลนด้อยางธรรมชาติทนทานต่อการเผาไหม้กับยางธรรมชาติทนต่อการเสื่อมสลายด้วยความร้อน (DSNR/HNR)

2.3.3.1 ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนยางต่อสมบัติยางเบลด (DSNR/HNR)

เตรียมคอมปาวด์ยางธรรมชาติที่ดัดแปลงโมเลกุลด้วยไดบิวทิลฟอสเฟตกับยางธรรมชาติไฮโดรจิเนชัน โดยบดผสมด้วยเครื่องผสมยางสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิห้อง แปรอัตราส่วนยางเบลด DSNR/HNR คือ 100/0, 80/20, 60/40, 50/50, 40/60, 20/80 และ 0/100 ใช้สารเคมีดังแสดงในตารางที่ 2.7 และใช้ลำดับขั้นตอนการผสมดังตารางที่ 2.8 จากนั้นนำยางคอมปาวด์ที่ได้ไปทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง Oscillating Disk Rheometer ที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำยางคอมปาวด์ที่ได้ไปทำการทดสอบตามหัวข้อที่ 2.3.5-2.3.8

ตารางที่ 2.7 สูตรยางคอมปาวด์ DSNR/HNR โดยแปรอัตราส่วนยาง

Ingredients	Quantities (phr)						
	1	2	3	4	5	6	7
NR	100	-	-	-	-	-	-
DSNR25, DSNR50	100	80	60	50	40	20	0
HNR15, HNR20, HNR40	0	20	40	50	60	80	100
Stearic acid	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
ZnO	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
TBBS	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
TMTD	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
6PPD	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
N330	30	30	30	30	30	30	30
Paraffinic oil	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
sulphur	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Ultra blend 6000	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0

หมายเหตุ :

1. NR แทนตัวอย่างยางธรรมชาติ
2. ENR25 และ ENR50 แทนตัวอย่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีหมู่ปริมาณหมู่อีพอกไซด์ 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โมล ตามลำดับ
3. DSNR25 และ DSNR50 แทนตัวอย่างยางธรรมชาติที่ดัดแปลงโมเลกุลด้วยไดบิวทิลฟอสเฟตที่ได้จากการทำปฏิกิริยากับยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โมล ตามลำดับ

4. HNR20 แทนตัวอย่างยางธรรมชาติที่มีเปอร์เซ็นต์ไฮโดรจิเนชันในโมเลกุล 20 เปอร์เซนต์โมล แบบใช้สารตัวเร่ง
5. HNR15 และ HNR40 แทนตัวอย่างยางธรรมชาติที่มีเปอร์เซ็นต์ไฮโดรจิเนชันในโมเลกุล 15 และ 40 เปอร์เซนต์โมล แบบไม่ใช้สารตัวเร่ง

ตารางที่ 2.8 ระยะเวลาในการผสมคอมปาวด์ DSNR/HNR โดยแปรอัตราส่วนยาง

Ingredients	Adding time (min)	Time (min)
DSNR25, DSNR50	0	5
HNR15, HNR20, HNR40	5	5
Ultra blend 6000	10	2
ZnO	12	2
TBBS	14	2
TMTD	16	2
Stearic acid	18	2
6PPD	20	2
N330 และ Paraffinic oil	22	15
Sulphur	37	2
ม้วนยาง	39	10 ครั้ง

จากนั้นนำยางคอมปาวด์ที่ได้ไปขึ้นรูปด้วยการอัดเป่า ที่อุณหภูมิ 160°C ทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด สมบัติหลังการบ่มเร่ง และทดสอบการเผาไหม้

2.3.3.2 ศึกษาอิทธิพลของระบบวัลคาไนซ์ต่อสมบัติของยางเบลนด์ (DSNR/HNR)

เมื่อได้สัดส่วนที่เหมาะสมจากการศึกษาในหัวข้อที่ 2.3.3.1 จึงนำมาแปรระบบการวัลคาไนซ์โดยเลือกใช้ระบบการวัลคาไนซ์ 3 ระบบ คือ 1) ระบบกำมะถันปกติ 2) ระบบอีวี และ 3) ระบบเปอร์ออกไซด์ ซึ่งสารเคมีที่ใช้แสดงดังตารางที่ 2.9 สำหรับลำดับขั้นตอนการผสม แสดงดังตารางที่ 2.8 แต่ในส่วนระบบเปอร์ออกไซด์ให้ใส่สารเคมี TMPTMA และ DCP เป็นลำดับสุดท้าย โดยศึกษาอิทธิพลของระบบวัลคาไนซ์ต่อสมบัติยางเบลนด์ DSNR/HNR จากนั้นนำยางคอมปาวด์ที่ได้ไปทำการทดสอบตามหัวข้อที่ 2.3.5-2.3.8

ตารางที่ 2.9 สูตรยางคอมปาวด์ DSNR/HNR โดยแปรรูปการวัลคาไนซ์

Ingredients	Quantities (phr)		
	Conventional	EV	Peroxide
DSNR25, DSNR50	40	40	40
HNR15, HNR20, HNR40	60	60	60
Stearic acid	2.0	2.0	-
ZnO	5.0	5.0	-
TBBS	0.7	2.4	-
TMTD	0.5	1.0	-
6PPD	1.0	1.0	1.0
N330	30	30	30
Paraffinic oil	5.0	5.0	5.0
sulphur	2.5	0.3	-
Ultra blend 6000	5.0	5.0	5.0
DCP	-	-	2.0
TMPTMA	-	-	4.0

จากนั้นนำยางคอมปาวด์ที่ได้ไปขึ้นรูปด้วยการอัดเบ้า ที่อุณหภูมิ 160°C ทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด สมบัติหลังการบ่มเร่ง และทดสอบการเผาไหม้

2.3.4 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติที่ถูกดัดแปลง

2.3.4.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)

นำพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 40 °C จนพอลิเมอร์มีน้ำหนักคงที่ แล้วนำพอลิเมอร์มาประมาณ 1 g ตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ไปแช่ในตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม (CHCl_3) ประมาณ 10 ml จนกว่าตัวอย่างจะละลายหมด จากนั้นนำสารละลายพอลิเมอร์ที่ได้ไปทาบนผิวของแผ่นโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 50 °C จนตัวทำละลายระเหยหมด จึงนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR ในช่วงเลขคลื่น 400-4000 cm^{-1} นำสเปกตรัมอินฟราเรดที่ได้คำนวณหาโมลเปอร์เซ็นต์อีพอกไซด์ โดยเปรียบเทียบการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่ตำแหน่งเลขคลื่น 870 cm^{-1} และ 835 cm^{-1} ไปคำนวณหาค่า Absorbance ratio (Ar) เพื่อเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน (Loadman and Tidd, 1988)

2.3.4.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy)

นำพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 40 °C จนพอลิเมอร์มีน้ำหนักคงที่ จากนั้นนำไปละลายในคลอโรฟอร์ม- d_3 (CDCl₃) แล้ววิเคราะห์ด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณหมู่เอพอกไซด์ตามสมการที่ 2.1 (Yoksan *et al.*, 2008) วิเคราะห์หาปริมาณฟอสเฟตที่มีอยู่ในโครงสร้างของยางธรรมชาติที่ถูกดัดแปลงด้วยไดบิวทิลฟอสเฟตตามสมการที่ 2.2 และวิเคราะห์หาปริมาณพันธะเดี่ยวที่มีอยู่ในโครงสร้างของยางธรรมชาติไฮโดรจิเนชันตามสมการที่ 2.3 (Phinyocheep *et al.*, 2006)

$$\text{Mole \%epoxide} = \frac{A_{2.70}}{A_{2.70} + A_{5.10}} \times 100 \quad (2.1)$$

เมื่อ $A_{2.70}$ = พื้นที่ใต้พีคที่ตำแหน่ง chemical shift ที่ 2.70 ppm (proton attached to oxirane ring)
 $A_{5.10}$ = พื้นที่ใต้พีคที่ตำแหน่ง chemical shift ที่ 5.10 ppm (proton adjacent to double bond)

$$\text{Mole \%dioxaphospholane} = \frac{A_{4.05}}{A_{5.10} + A_{4.05}} \times 100 \quad (2.2)$$

เมื่อ $A_{4.05}$ = พื้นที่ใต้พีคที่ตำแหน่ง chemical shift ที่ 4.05 ppm (2-hydroxy-2-oxo-1,3,2-dioxaphospholane unit)
 $A_{5.10}$ = พื้นที่ใต้พีคที่ตำแหน่ง chemical shift ที่ 5.10 ppm (proton adjacent to double bond)

$$\% \text{Hydrogenation} = \frac{A_{0.84}}{A_{0.84} + 3A_{5.10}} \times 100 \quad (2.3)$$

เมื่อ $A_{0.84}$ = พื้นที่ใต้พีคที่ตำแหน่ง chemical shift ช่วง 0.84 ppm (methyl proton of the hydrogenated)
 $A_{5.10}$ = พื้นที่ใต้พีคที่ตำแหน่ง chemical shift ที่ 5.10 ppm (proton adjacent to double bond)

2.3.5 การทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง Oscillating Disk Rheometer (ODR)

นำพอลิเมอร์ที่เตรียมได้ใส่ลงบนจาน ปิดห้องยางทันที จานจะเริ่มบิดไป-มาทำมุม 1 องศา เมื่อห้องยางปิด โดยมีสภาวะที่ใช้ในการทดสอบ คือ อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 30 นาที ข้อมูลที่ได้จะบอกระยะเวลาที่สามารถแปรรูปได้ (Scorch time, t_{s1}), แรงบิดต่ำสุด (Minimum torque, M_L), แรงบิดสูงสุด (Maximum torque, M_H), เวลายางสุก (Cure time, t_{c90}) และดัชนีอัตราการวัลคาไนซ์ (Cure rate index, CRI) โดยที่

t_{s1} คือ เวลาเป็นนาทีจากจุดเริ่มต้นที่ทำให้แรงบิดสูงขึ้น 1 lbf.in (หรือ 1 dN.m) จากค่าแรงบิดต่ำสุด

t_{c90} คือ เวลาเป็นนาทีที่ค่าแรงบิดเพิ่มขึ้น 90% ของค่าแรงบิดที่เพิ่มขึ้น ($M_H - M_L$)

$$t_{c90} = M_L + \frac{90}{100} (M_H - M_L) \quad (2.4)$$

$$CRI = 100 / (\text{Cure time} - \text{Scorch time}) \quad (2.5)$$

2.3.6 การทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์

2.3.6.1 ทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength)

การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D412 (2000) โดยใช้ชิ้นทดสอบเป็นรูปดัมเบลล์ (dumb-bell) ขนาดความยาว 115 มิลลิเมตร กว้าง 6 ± 0.4 มิลลิเมตรหนา 3 มิลลิเมตร ระยะที่ใช้วัด (gauge length) มีระยะห่าง 20 มิลลิเมตร วัดความหนา 3 จุด โดยใช้ค่ากลาง แล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่อง Tensile testing machine ที่อัตราการดึง 500 ± 50 มิลลิเมตร/นาที รายงานผลเป็น N/mm^2 หรือ MPa ใช้สูตรคำนวณดังนี้

$$\text{Tensile strength} = F/A \quad (2.6)$$

เมื่อ $F =$ แรงที่ใช้ในการดึงจนชิ้นทดสอบขาด (นิวตัน)
 $A =$ พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ (mm^2)

2.3.6.2 การทดสอบความสามารถในการยืดจนขาด (Elongation at break)

การทดสอบจะทำการทดสอบเหมือนการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงตามหัวข้อ 2.3.6.1 ค่าที่ได้จะวัดโดยการอ่านระยะที่ชิ้นทดสอบสามารถยืดตัวได้จนขาด รายงานผลเป็นเปอร์เซ็นต์ความสามารถในการยืดตัว คำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\text{Elongation at break (\%)} = 100 \times (L - L_0) / L_0 \quad (2.7)$$

เมื่อ $L =$ ระยะห่างระหว่างเส้นที่ขีดบนชิ้นทดสอบเมื่อยืดจนขาด (cm)
 $L_0 =$ ระยะห่างระหว่างเส้นเริ่มต้นก่อนทำการทดสอบ (cm)

2.3.6.3 ทดสอบสมบัติการบ่มเร่ง

ทำการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการบ่มเร่งตามมาตรฐาน ASTM D 573 โดยใช้ชิ้นตัวอย่างแบบเดียวกับที่ใช้ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงในหัวข้อที่ 2.3.6.1 ทำการบ่มเร่งด้วยตู้อบความร้อนแบบช่อง (Cell typed ageing oven) ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 hr โดยใช้อัตราการไหลของอากาศในห้องทดสอบเท่ากับ 0.4 l/min หลังจากการบ่มเร่งให้พักชิ้นตัวอย่างไว้เป็นเวลา 1 วัน ก่อนที่จะนำไปทดสอบ

สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืด แล้วคำนวณเปอร์เซ็นต์ของสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปจากสมการดังนี้

$$\text{Change in Property (\%)} = \frac{A-O}{O} \times 100 \quad (2.8)$$

เมื่อ A = สมบัติหลังบ่มเร่ง

O = สมบัติก่อนบ่มเร่ง

2.3.7 การศึกษาสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค (Thermo Gravimetric Analysis, TGA)

การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนโดยใช้เครื่อง Thermal gravimetric analyzer, TGA รุ่น STA 6000 โดยการนำชิ้นตัวอย่างที่มีน้ำหนักอยู่ในช่วง 7 ถึง 12 มิลลิกรัม โดยทดสอบในสภาวะภายใต้ก๊าซไนโตรเจน เพื่อศึกษาการสลายตัวของตัวอย่างที่เป็นผลมาจากความร้อน (thermal degradation) เท่านั้น ซึ่งสภาวะการทดสอบ คืออัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 10 ml/min ทดสอบที่อุณหภูมิในช่วง 30-800 °C ใช้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 10 °C/min รายงานผลเป็นค่าอุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition temperature) และเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักการสลายตัวของชิ้นตัวอย่าง (Derivative weight)

2.3.8 การทดสอบสมบัติทนไฟ

2.3.8.1 อัตราการเผาไหม้ (Burning rate)

การทดสอบอัตราการเผาไหม้ตามมาตรฐาน ISO 3582 ชิ้นทดสอบมีขนาดกว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร และหนา 13 มิลลิเมตร ก่อนการทดสอบต้องวางชิ้นตัวอย่างที่อุณหภูมิ 27 °C ในเดสซิเคเตอร์เป็นเวลา 24 hr ชิ้นตัวอย่างต้องมีการมาร์คที่ตำแหน่งความยาว 125 มิลลิเมตร จากขอบของตัวอย่าง จากนั้นตั้งชิ้นตัวอย่างบนตะแกรงในแนวขนานกับพื้นดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.17 ให้ส่วนขอบบนของชิ้นตัวอย่างวางตรงกับเปลวไฟ จากนั้นเผาชิ้นตัวอย่างในส่วนขอบบน โดยเผาเป็นเวลา 60 วินาที ให้เกิดการเผาไหม้บนชิ้นตัวอย่างจากด้านซ้ายจนกระทั่งไฟดับลง บันทึกเวลาในการเผาไหม้จากจุดเริ่มไหม้ถึงตำแหน่งที่มาร์คไว้หรือจนไฟดับลง อัตราการเผาไหม้สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

1) ถ้าเปลวไฟไหม้ผ่านตำแหน่งที่มาร์คไว้

$$\text{Burning rate} = \frac{125}{t_b} \quad (2.9)$$

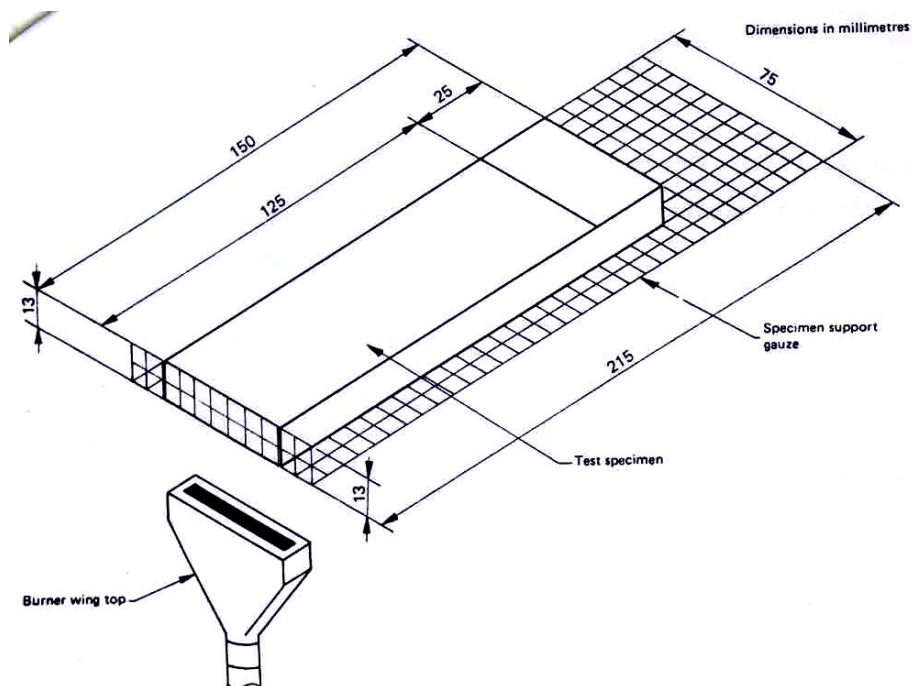
เมื่อ t_b คือ เวลาที่เปลวไฟเคลื่อนที่ถึงตำแหน่งที่มาร์คไว้ (วินาที)

2) ถ้าการเผาไหม้ที่เปลวไฟดับก่อนถึงตำแหน่งที่มาร์คไว้

$$\text{Burning rate} = \frac{L_e}{t_e} \quad (2.10)$$

เมื่อ L_e คือ ระยะทางที่การเปลวไฟดับลง (มิลลิเมตร)

t_e คือ เวลาที่เปลวไฟดับลง (วินาที)



รูปที่ 2.17 ลักษณะของเครื่องในการทดสอบการเผาไหม้ตามมาตรฐาน ISO 3582

บทที่ 3 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

3.1 การเตรียมยางธรรมชาติที่มีความทนทานต่อการเผาไหม้

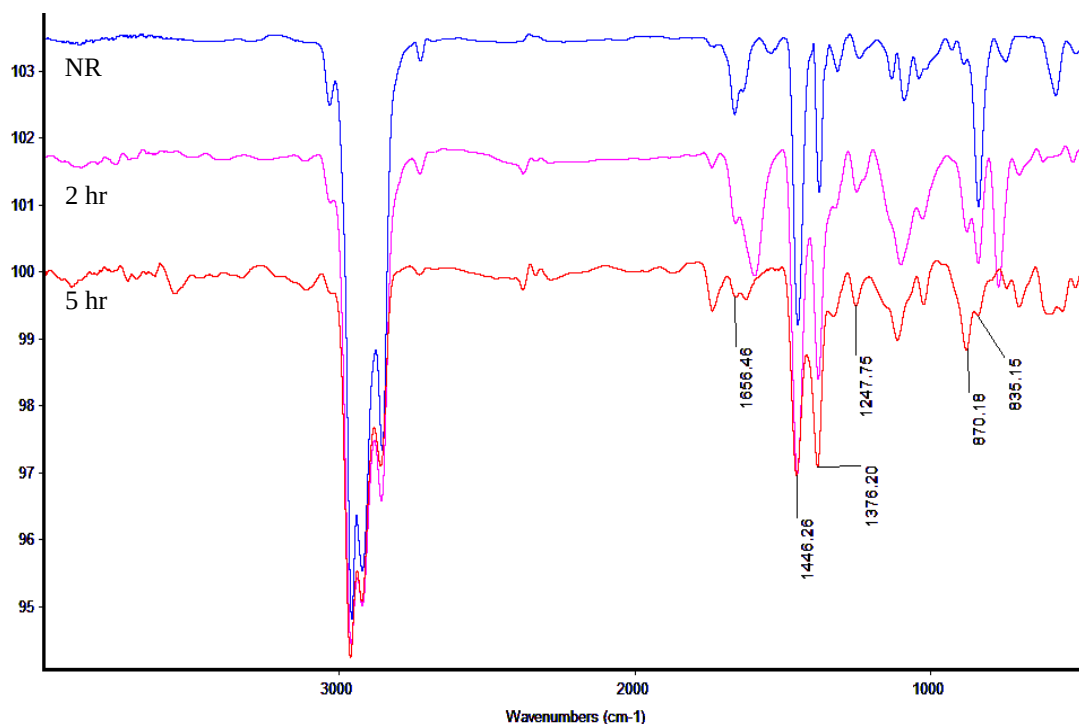
3.1.1 การเตรียมยางธรรมชาติอียพอกไซด์

3.1.1.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR)

จากการทดลองเตรียมยางธรรมชาติอียพอกไซด์ในหัวข้อ 2.3.1.1 โดยปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาอียพอกซิเดชัน แล้วจับตัวน้ำยางเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างของยางธรรมชาติอียพอกไซด์ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ได้สเปกตรัมดังรูปที่ 3.1 พบพีคที่แสดงลักษณะเฉพาะของหมู่เอพอกไซด์ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 870 และ 1240 cm^{-1} และพีคอื่นๆ ดังที่แสดงในตารางที่ 3.1 จากอัตราส่วนของพีค (Absorbance ratio) ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 870/835 cm^{-1} (ตำแหน่งเลขคลื่น 835 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการเกิด Out-of-plane bending ของพันธะ C-H ที่เกาะกับ C=C ของโมเลกุลยางธรรมชาติ) สามารถนำไปหาปริมาณของหมู่เอพอกไซด์ โดยการคำนวณจากค่า Absorbance ratio (Ar) ดังสมการที่ 3.1 (Loadman and Tidd, 1988) ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.2

$$\text{Absorbance ratio, Ar} = \frac{\log A / B}{\log A / B + \log C / D} \quad (3.1)$$

โดยที่ A/B และ C/D เป็นความสูงของพีคการดูดกลืนที่ตำแหน่งเลขคลื่น 870 cm^{-1} และ 835 cm^{-1} ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 สเปกตรัมอินฟราเรดของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่เวลาการทำปฏิกิริยา 2 และ 5 hr เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ

ตารางที่ 3.1 ตำแหน่งเลขคลื่นของพีคสเปกตรัมอินฟราเรดหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติอีพอกไซด์

หมู่ฟังก์ชัน	เลขคลื่น (cm ⁻¹)
-CH ₃	2956, 1377
-CH ₂	2925, 1440
C=C	1660
-C=CH-	835
	870, 1240

เมื่อเปรียบเทียบสเปกตรัมอินฟราเรดของยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติอีพอกไซด์ พบว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์มีพีคที่เพิ่มขึ้นมาที่ตำแหน่งการดูดกลืนที่เลขคลื่น 870 cm⁻¹ และเมื่อเปรียบเทียบสเปกตรัมอินฟราเรดของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่เวลาการทำปฏิกิริยาต่างกันคือ 2 และ 5 hr พบว่าพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 870 cm⁻¹ มีความสูงของพีคเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 3.1) แสดงให้เห็นว่ามีการเกาะติดของวงแหวนออกซีเรนในโมเลกุลของยางธรรมชาติ ผลของปริมาณหมู่อีพอกไซด์จากการวิเคราะห์ด้วย FT-IR แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ผลของเวลาการทำปฏิกิริยาอีพอกไซด์ขึ้นต่อ Absorbance ratio และปริมาณหมู่อีพอกไซด์

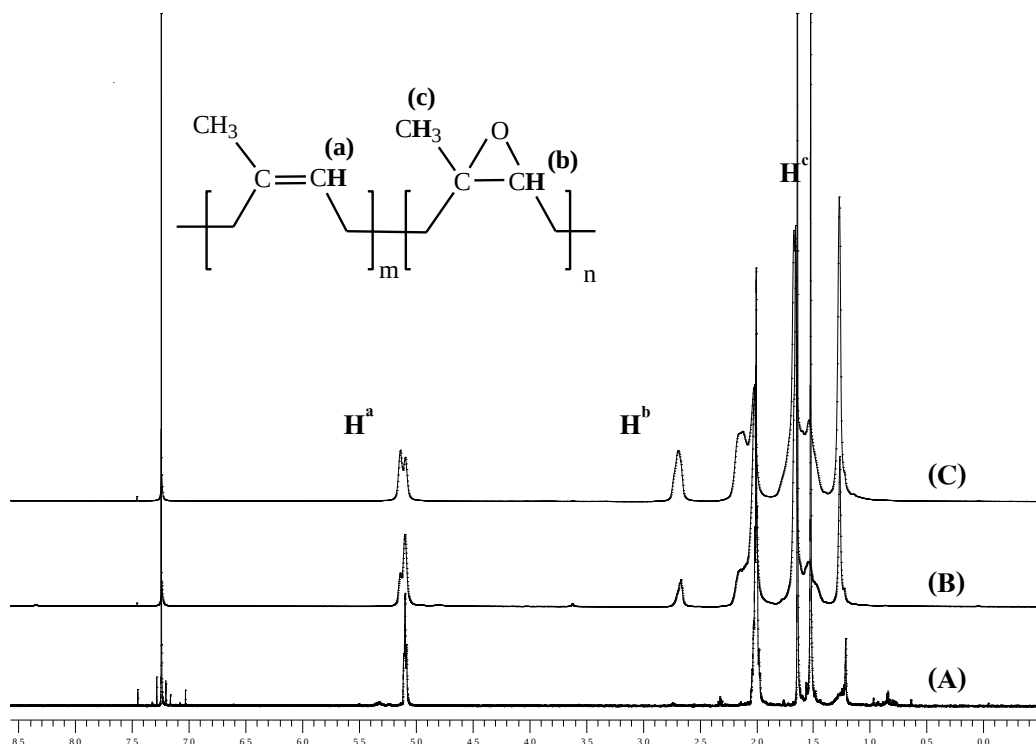
เวลา (ชม.)	Absorbance ratio	Mole % epoxide
2	0.41	21.45
5	0.65	53.82

4.1.1.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy)

จากการเตรียมยางธรรมชาติอีพอกไซด์แล้วมาวิเคราะห์หาปริมาณหมู่อีพอกไซด์ด้วยเครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี โดยละลายตัวอย่างในดิทเทอริยมคลอโรฟอร์ม วัดตำแหน่งสัญญาณของโปรตอนปรากฏตำแหน่ง Chemical shift (δ) ดังรูปที่ 3.2 พบว่าเกิดการเรโซแนนซ์ที่ตำแหน่ง Chemical shift ที่ 2.7 ppm (Proton attached to oxirane ring), 1.2 ppm (Methyl proton of the oxirane ring) และ 5.10 ppm (Proton adjacent to double bond) จากพื้นที่ใต้พีคสามารถคำนวณหาปริมาณหมู่อีพอกไซด์ได้ดังสมการที่ 3.2 ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.3

$$\text{Mole \%epoxide} = \frac{A_{2.70}}{A_{2.70} + A_{5.10}} \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ $A_{2.70}$ = พื้นที่ใต้พีคที่ตำแหน่ง Chemical shift ที่ 2.70 ppm (Proton attached to oxirane ring)
 $A_{5.10}$ = พื้นที่ใต้พีคที่ตำแหน่ง Chemical shift ที่ 5.10 ppm (Proton adjacent to double bond)



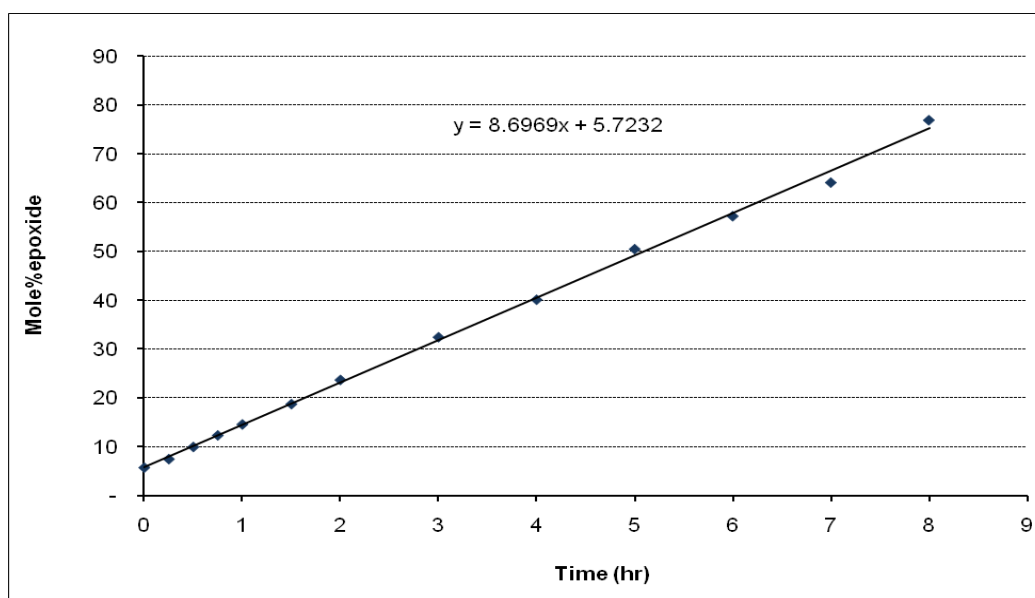
รูปที่ 3.2 สเปกตร้าจาก $^1\text{H-NMR}$ ของ (A) ยางธรรมชาติ (B) ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่เวลาการทำปฏิกิริยา 2 hr และ (C) ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่เวลาการทำปฏิกิริยา 5 hr

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปีของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (รูปที่ 3.2) พบว่าที่ตำแหน่ง Chemical shift (δ) ที่ 2.7 ppm (Proton attached to oxirane ring) ของการเวลาทำปฏิกิริยาที่ 5 hr พิกจะสูงกว่าที่เวลา 2 hr นอกจากนี้ยังพบพีคที่ตำแหน่ง Chemical shift ที่ 1.2 ppm เป็นตำแหน่งโปรตอนที่ถูกเมทิลที่วงแหวนออกซิเรน ซึ่งมีความสูงของพีคสูงขึ้นตามเวลาของการทำปฏิกิริยา แสดงให้เห็นว่ามีการติดของวงแหวนออกซิเรนในโมเลกุลยางธรรมชาติเพิ่มมากขึ้นตามเวลาที่ทำปฏิกิริยา (Yokson *et al.*, 2008) ซึ่งจะสอดคล้องกับผลที่แสดงดังตารางที่ 3.3 และรูปที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ปริมาณหมู่อีพอกไซด์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่แปรตามเวลาต่างๆ

เวลาการทำปฏิกิริยา (hr)	พื้นที่ใต้พีคที่ตำแหน่ง δ ที่ 2.70 ppm	พื้นที่ใต้พีคที่ตำแหน่ง δ ที่ 5.10 ppm	Mole %epoxide
0.00*	0.06	1.00	5.66
0.25	0.08	1.00	7.41
0.50	0.11	1.00	9.91
0.75	0.14	1.00	12.28
1.00	0.17	1.00	14.53
2.00	0.31	1.00	23.66
3.00	0.48	1.00	32.43
4.00	0.67	1.00	40.12
5.00	1.02	1.00	50.50
6.00	1.34	1.00	57.26
7.00	1.79	1.00	64.16
8.00	3.34	1.00	76.96

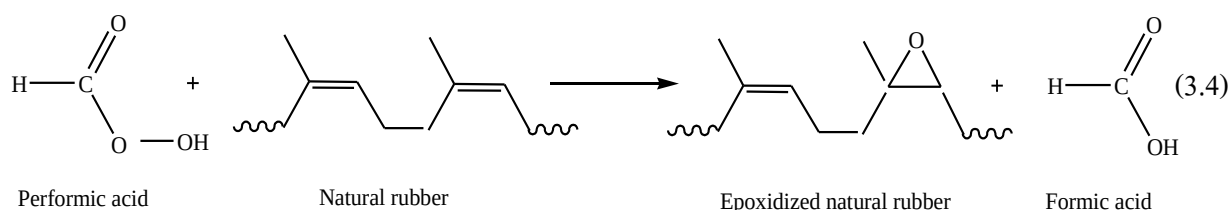
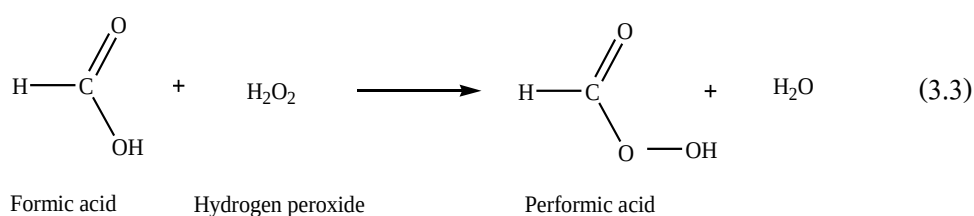
* เมื่อหยดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หมดแล้วจึงเก็บตัวอย่าง ถือว่าเป็นเวลาที่ 0 hr



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณหมู่อีพอกไซด์กับเวลา

จากการทดลองพบว่าเวลาที่ 0 hr มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์เกิดขึ้นเท่ากับ 5.66 เปอร์เซ็นต์โมล เนื่องจากการเก็บตัวอย่างจะทำเมื่อหยดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หมดแล้ว แต่ปฏิกิริยาจะเกิดตั้งแต่เริ่มหยดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

จากตารางที่ 3.3 และรูปที่ 3.3 เมื่อเวลาการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มขึ้นปริมาณหมู่เอพอกไซด์ในโมเลกุลยางธรรมชาติสูงขึ้น โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันดังแสดงในสมการที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ ซึ่งในตอนเริ่มต้นปฏิกิริยาจะเกิดกรดเปอร์ฟอร์มิกจากปฏิกิริยาของกรดฟอร์มิกกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และผลพลอยได้คือ น้ำ จากนั้นกรดเปอร์ฟอร์มิกที่เกิดขึ้นจะเกิดปฏิกิริยากับตำแหน่งพันธะคู่ของ *cis*-1,4-polyisoprene เกิดวงแหวนเอพอกไซด์ตลอดแนวโมเลกุล และได้กรดฟอร์มิกเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยา และกรดฟอร์มิกที่ได้นี้สามารถเกิดปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เติมมากเกินไป ทำให้เกิดวัฏจักรใหม่ของปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องจนกว่าปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการทำปฏิกิริยาจะหมด ดังนั้นเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้นปริมาณหมู่เอพอกไซด์จึงเพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลยางธรรมชาติมีโอกาสดเกิดปฏิกิริยากับกรดเปอร์ฟอร์มิกแล้วกลายเป็นโมเลกุลยางที่มีหมู่เอพอกไซด์ในโครงสร้างมากขึ้น



รูปที่ 3.4 ปฏิกิริยาออกซิเดชันในยางธรรมชาติโดยใช้กรดเปอร์ฟอร์มิกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Gelling *et al.*, 1991)

3.1.2 การเตรียมยางธรรมชาติที่ดัดแปลงด้วยไดบิวทิลฟอสเฟต

หลังจากที่ได้น้ำยางธรรมชาติอพอไซด์ 25 และ 50 เปอร์เซนต์โมลอพอไซด์ที่ปรับค่า pH ให้เป็นกลางแล้ว เจือจางด้วยน้ำให้ได้ 10% DRC แล้วลดอุณหภูมิโดยควบคุมให้อยู่ที่ 30°C ความเร็วการกวน 250 รอบ/นาทิจ แล้วหยดไดบิวทิลฟอสเฟต (Dibutylphosphate, DBP) อย่างช้าๆ ด้วยอัตราคงที่ 9 ml/hr สัดส่วนโดยโมลที่ใช้คือ [DBP] : [epoxidized units] = 1:1 ทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 4 hr ผลที่ได้คือ

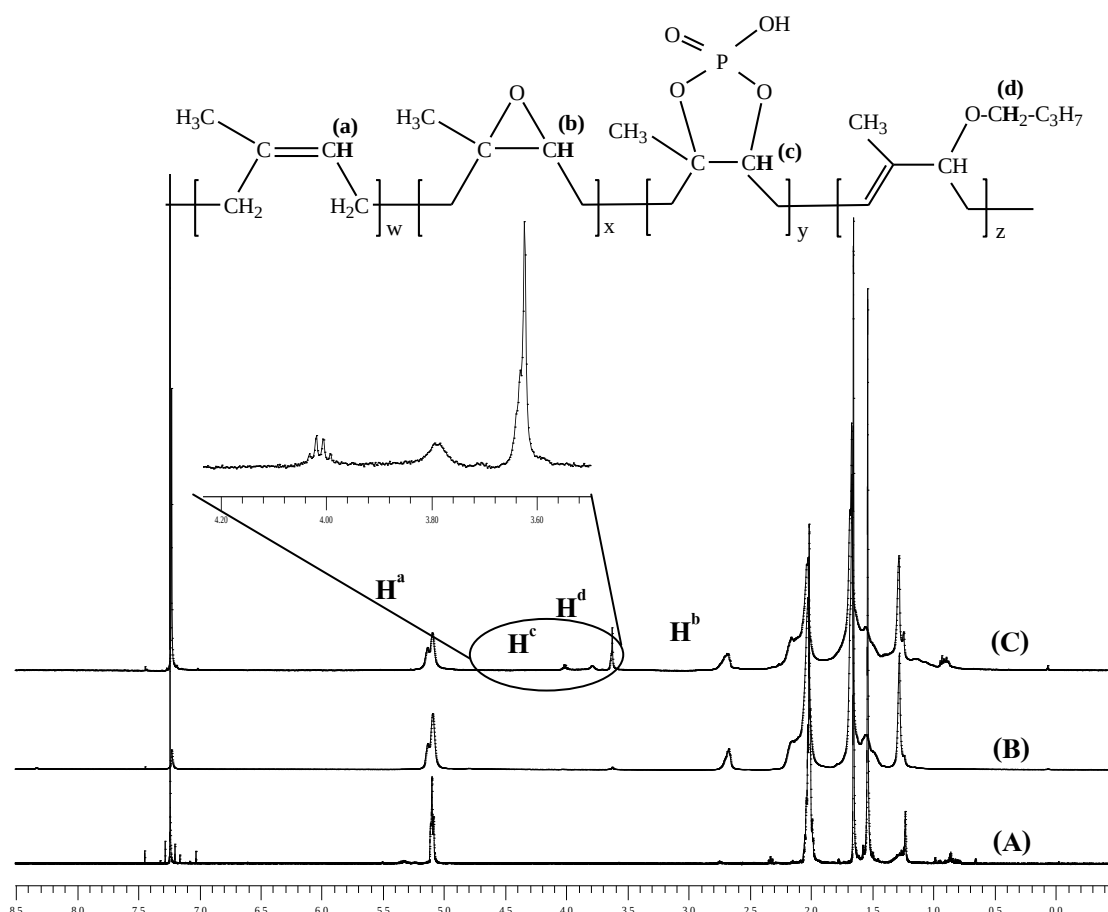
- A. ถ้าเตรียมยางธรรมชาติที่ดัดแปลงด้วยไดบิวทิลฟอสเฟตจากน้ำยางธรรมชาติอพอไซด์ที่มีปริมาณอพอไซด์ 25 เปอร์เซนต์โมล จะได้น้ำยางที่เป็นเนื้อเดียวกัน
- B. ถ้าเตรียมยางธรรมชาติที่ดัดแปลงด้วยไดบิวทิลฟอสเฟตจากน้ำยางธรรมชาติอพอไซด์ที่มีปริมาณอพอไซด์ 50 เปอร์เซนต์โมล จะได้เป็นน้ำยางที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ เมื่อกรองจะแยกออกได้อย่างชัดเจน

จากนั้นจับตัวด้วยเมทานอล ล้างด้วยน้ำให้สะอาด จากนั้นนำไปอบให้แห้งในตู้อบอุณหภูมิ 40°C จนน้ำหนักคงที่ แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณหมู่ฟอสเฟต ด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี โดยละลายในดีวเทอเรียมคลอโรฟอร์ม วัดตำแหน่งสัญญาณของโปรตอน ปรากฏตำแหน่ง Chemical shift (δ) ดังรูปที่ 3.5 และ 3.6 ซึ่งพบว่าเกิดการเรโซแนนซ์ที่ตำแหน่ง Chemical shift ที่ 4.05 ppm (2-Hydroxy-2-oxo-1,3,2-dioxaphospholane unit) และ 2.70 ppm (Proton attached to oxirane ring) จากพื้นที่ใต้พีคสามารถคำนวณหาโมลเปอร์เซ็นต์ของหมู่ไดออกซาฟอสโฟเลนที่เกิดขึ้นบนโมเลกุลของยางอีพอกไซด์ได้ดังสมการที่ 3.5 ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.4

$$\text{Mole \%dioxaphospholane} = \frac{A_{4.05}}{A_{4.05} + A_{2.70}} \times 100 \quad (3.5)$$

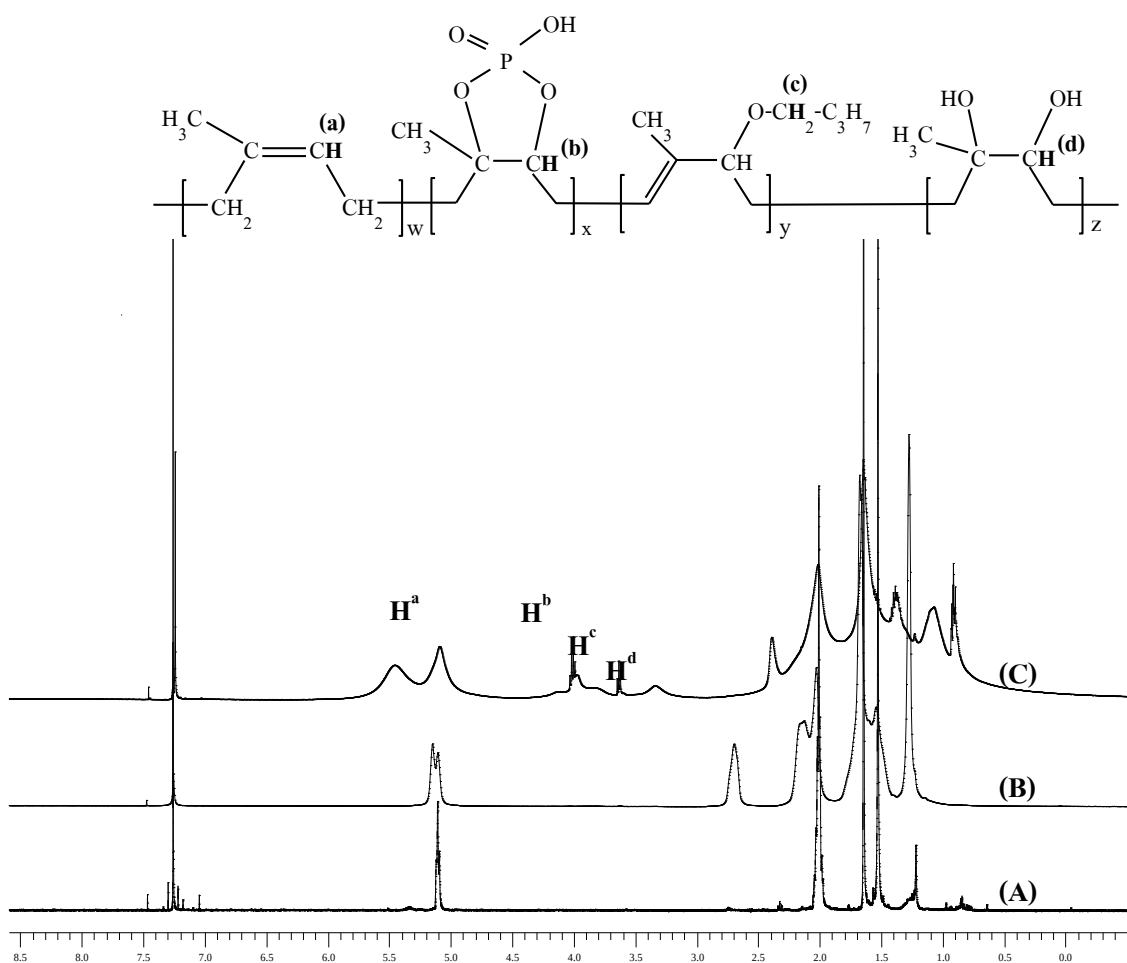
เมื่อ $A_{4.05}$ = พื้นที่ใต้พีคที่ตำแหน่ง Chemical shift ที่ 4.05 ppm (2-Hydroxy-2-oxo-1,3,2-dioxaphospholane unit)

$A_{2.70}$ = พื้นที่ใต้พีคที่ตำแหน่ง Chemical shift ที่ 2.70 ppm (Proton attached to oxirane ring)



รูปที่ 3.5 ตำแหน่ง Chemical shift (δ) ของโปรตอน (A) ยางธรรมชาติ (B) ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีปริมาณอีพอกไซด์ 25 เปอร์เซ็นต์โมล และ (C) ยางธรรมชาติที่ดัดแปลงด้วยไดบิวทิลฟอสเฟตจากน้ำยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีปริมาณอีพอกไซด์ 25 เปอร์เซ็นต์โมล

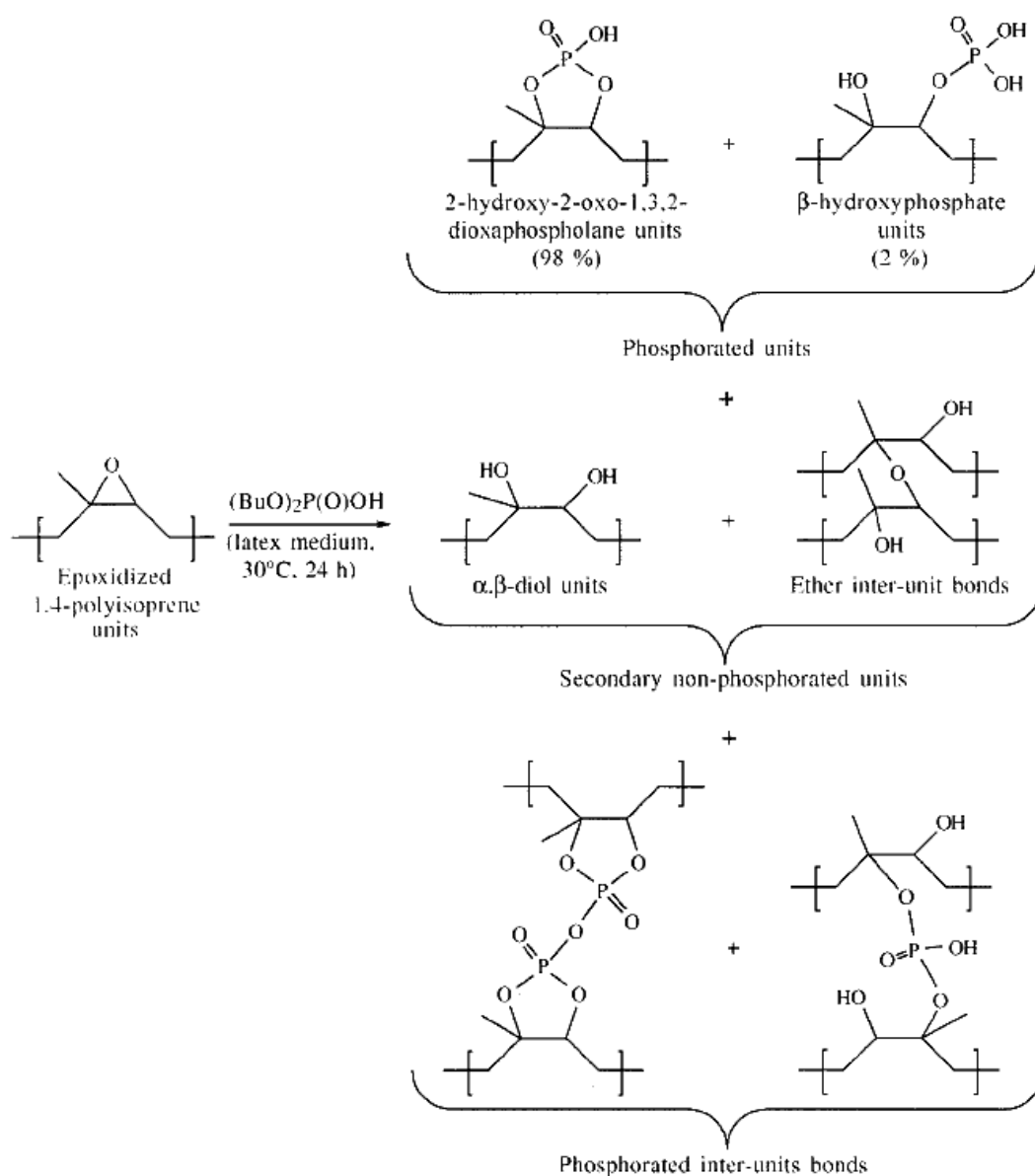
เมื่อหยดไดบิวทิลฟอสเฟตลงไปในยางธรรมชาติอียพอกไซด์ หมู่ฟอสเฟตในไดบิวทิลฟอสเฟตเข้าทำปฏิกิริยาที่ตรงตำแหน่งวงแหวนออกซีเรนในยางธรรมชาติอียพอกไซด์เกิดเป็น 2-Hydroxy-2-oxo-1,3,2-dioxaphospholane เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.5 เป็นการวิเคราะห์ยางธรรมชาติดัดแปลงโมเลกุลด้วยไดบิวทิลฟอสเฟตจากน้ำยางธรรมชาติอียพอกไซด์ที่มีปริมาณอียพอกไซด์ 25 เปอร์เซ็นต์โมล พบว่าจะปรากฏสัญญาณที่ตำแหน่ง Chemical shift ที่ 5.10, 2.70 และ 4.05 ppm ซึ่งเป็นตำแหน่งของโปรตอนที่พันธะคู่ในยางธรรมชาติ โปรตอนที่วงแหวนออกซีเรนและโปรตอนที่มีหมู่ไดออกซาฟอสโฟเลน ตามลำดับ นอกจากนี้การเข้าทำปฏิกิริยาของไดบิวทิลฟอสเฟตยังเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงอื่นๆ คือ หมู่อีเทอร์ (Ether group) ซึ่งอยู่ที่ตำแหน่ง 3.65 ppm



รูปที่ 3.6 ตำแหน่ง Chemical shift (δ) ของโปรตอน (A) ยางธรรมชาติ (B) ยางธรรมชาติอียพอกไซด์ที่มีปริมาณอียพอกไซด์ 50 เปอร์เซ็นต์โมล และ (C) ยางธรรมชาติที่ดัดแปลงด้วยไดบิวทิลฟอสเฟตจากน้ำยางธรรมชาติอียพอกไซด์ที่มีปริมาณอียพอกไซด์ 50 เปอร์เซ็นต์โมล

ในทำนองเดียวกันจากรูปที่ 3.6 เป็นการวิเคราะห์ยางธรรมชาติดัดแปลงโมเลกุลด้วยไดบิวทิลฟอสเฟตจากน้ำยางธรรมชาติอียพอกไซด์ที่มีปริมาณอียพอกไซด์ 50 เปอร์เซ็นต์โมล พบว่าจะปรากฏสัญญาณ

ที่ตำแหน่ง Chemical shift ที่ 5.10 และ 4.05 ppm เป็นตำแหน่งของโปรตอนที่พันธะคู่ในยางธรรมชาติ และโปรตอนที่มีหมู่ไฮดรอกซีฟอสเฟต ตามลำดับ แต่ไม่ปรากฏสัญญาณที่ตำแหน่ง Chemical shift ที่ 2.70 ppm เนื่องจากวงแหวนออกซีเรนมีการเปิดวงจนหมดจึงไม่ปรากฏสัญญาณที่ตำแหน่งนี้ และปฏิกิริยาข้างเคียงนอกจากจะเกิดสัญญาณที่ตำแหน่ง Chemical shift ที่ 3.65 ppm แล้วยังมีสัญญาณที่ตำแหน่ง Chemical shift ที่ 3.30 ppm ซึ่งเป็นโปรตอนที่มีหมู่ไฮดรอกซีฟอสเฟต นอกจากนี้การทำปฏิกิริยาในสถานะน้ำยังมีความเสี่ยงทำให้เกิดหมู่ข้างเคียงอื่นได้ด้วยเช่นกัน แต่ปฏิกิริยาจะเกิดช้าและเกิดในปริมาณที่น้อย แสดงดังรูปที่ 3.7 (Derouet *et al.*, 2003)



รูปที่ 3.7 ปฏิกิริยาข้างเคียงของไดบิวทิลฟอสเฟตกับยางธรรมชาติอีพอกไซด์ในสถานะน้ำ (Derouet *et al.*, 2003)

ตารางที่ 3.4 จำนวนโมลเปอร์เซ็นต์ของหมู่ไดออกซาฟอสโฟเลน โมลเปอร์เซ็นต์ของหมู่อีพอกไซด์และ โมลเปอร์เซ็นต์ของการแตกวงแหวนออกซิเรนของยางธรรมชาติดัดแปลงด้วยไดบิวทิลฟอสเฟต

Sample	พื้นที่ใต้พีคที่	พื้นที่ใต้พีคที่	พื้นที่ใต้พีคที่	Mole%			
	ตำแหน่ง δ ที่ 5.10 ppm	ตำแหน่ง δ ที่ 2.70 ppm	ตำแหน่ง δ ที่ 4.05 ppm	Epoxide	Dioxaphos pholane	Diol unit (3.3ppm)	Ether (3.6ppm)
ENR25	1.00	0.35	-	25.93	-	-	1.35
DSNR25	1.00	0.21	0.07	17.36	6.25	-	4.80
ENR50	1.00	1.04	-	50.98	-	-	-
DSNR50	1.00	-	0.32	-	24.76	17.34	7.9

จากตารางที่ 3.4 เมื่อหยดไดบิวทิลฟอสเฟตลงไปในน้ำยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีปริมาณอีพอกไซด์ 25 เปอร์เซ็นต์โมล พบว่าในการเข้าทำปฏิกิริยาของหมู่ฟอสฟอรัสกับวงแหวนออกซิเรนทำให้เกิดหมู่ไดออกซาฟอสโฟเลนเพียง 6.25 เปอร์เซ็นต์โมล และยังเหลือวงแหวนออกซิเรนในโมเลกุลยางธรรมชาติอีพอกไซด์อีก 17.36 เปอร์เซ็นต์โมล ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากหมู่ฟอสฟอรัสจากไดบิวทิลฟอสเฟตเข้าทำปฏิกิริยากับวงแหวนออกซิเรนได้น้อย แต่เมื่อหยดไดบิวทิลฟอสเฟตลงไปในน้ำยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีปริมาณอีพอกไซด์ 50 เปอร์เซ็นต์โมล พบว่าปริมาณของอีพอกไซด์ไม่มีเหลือในยางเพราะวงแหวนออกซิเรนมีการแตกออกหมด (รูปที่ 3.6) และเกิดหมู่ไดออกซาฟอสโฟเลน 24.76 เปอร์เซ็นต์โมล เนื่องจากการที่ใช้ไดบิวทิลฟอสเฟตที่มีปริมาณมากขึ้นทำให้โอกาสการเข้าทำปฏิกิริยาที่หมู่ออกซิเรนเกิดขึ้นได้มากกว่าการใช้ไดบิวทิลฟอสเฟตที่มีปริมาณน้อยกว่า สอดคล้องกับการศึกษาของบุญญานิช (2546) ได้เตรียมยางธรรมชาติ อีพอกไซด์ 20 เปอร์เซ็นต์โมลอีพอกไซด์ จากนั้นจึงนำไปเตรียมเป็นยางธรรมชาติที่ดัดแปลงโมเลกุลด้วยไดบิวทิลฟอสเฟต โดยใช้สัดส่วนโมลของ [DBP]/[epoxide unit] = 1 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 4 hr ที่อุณหภูมิ 30 °C ปรากฏว่ามีการติดของหมู่ไดออกซาฟอสโฟเลนในโมเลกุลของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โมล

กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไดบิวทิลฟอสเฟตกับยางธรรมชาติอีพอกไซด์ การเข้าทำปฏิกิริยาแบบแทนที่ในตำแหน่งอัลฟาถูกไฮโดรไลซ์อย่างรวดเร็วเกิดเป็น β -hydroxyphosphate ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ด้วยตัวเองเป็นหมู่ 2-Hydroxy-2-oxo-1,3,2-dioxaphospholane หรือทำปฏิกิริยากับหมู่อีพอกไซด์ที่อยู่ใกล้เคียงด้วยการเกิดพันธะเกิดเป็น Dialkylphosphate-type ภายหลังจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่เกิดเป็น 2-Hydroxy-2-oxo-1,3,2-dioxaphospholane และ α , β -diol ส่วน β -hydroxyphosphate ที่เกิดจากการเข้าทำปฏิกิริยาแบบแทนที่ในตำแหน่งเบต้า โดยจะเกิดการไฮโดรไลซ์กับไดเอซิลอย่างรวดเร็ว และเกิดเป็น 2-Hydroxy-2-oxo-1,3,2-dioxaphospholane อย่างช้าๆ การเกิดพันธะ pyrophosphate เป็นผลมาจากปฏิกิริยาการควบแน่นระหว่างหมู่ 2-Hydroxy-2-oxo-1,3,2-dioxaphospholane 2 ตัวที่อยู่ใกล้เคียงกัน (Derouet *et al.*, 2003)

2.3 เตรียมยางธรรมชาติที่มีความทนทานต่อการเสื่อมสลายด้วยความร้อน

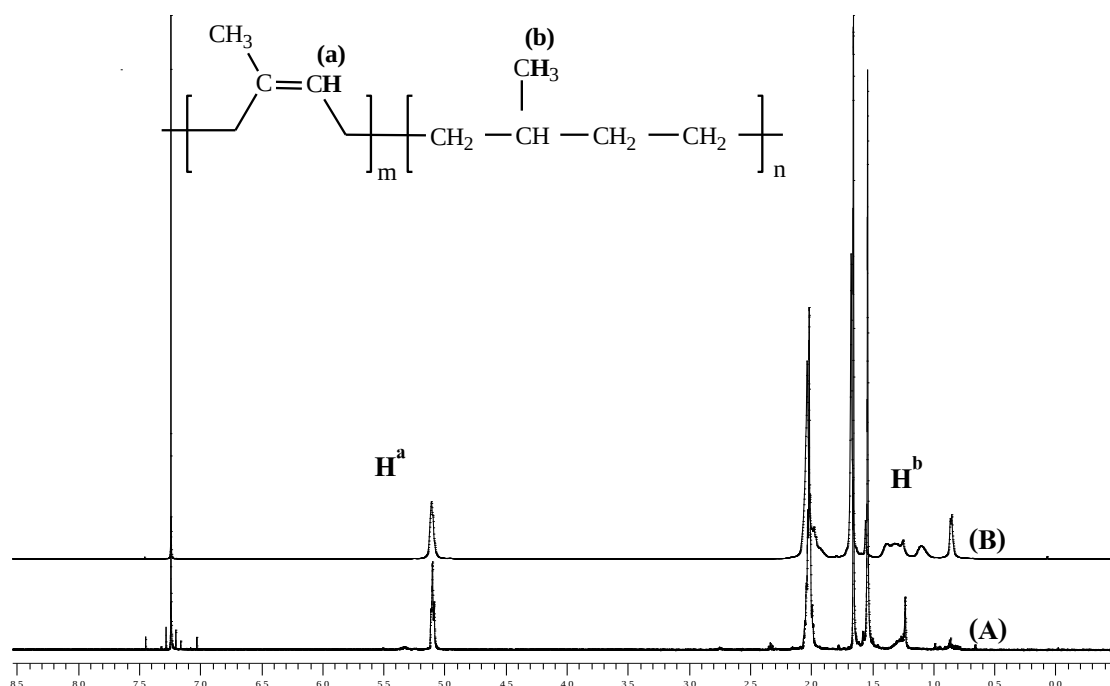
3.2.1 เตรียมยางธรรมชาติไฮโดรจิเนตใช้สารตัวเร่ง

3.2.1.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy, NMR)

จากการเตรียมยางธรรมชาติไฮโดรจิเนตอยู่ในรูปแบบของน้ำยางในหัวข้อที่ 2.3.2.1 แล้วจึงนำมาวิเคราะห์หาปริมาณไฮโดรจิเนชันที่มีในยางไฮโดรจิเนตด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปีโดยละลายตัวอย่างในดิคลอโรเมทิลฟอร์ม วัดตำแหน่งสัญญาณของโปรตอน ปรากฏตำแหน่ง Chemical shift (δ) ดังรูปที่ 3.8 พบว่าเกิดการเรโซแนนซ์ที่ตำแหน่ง Chemical shift ที่ 5.10 ppm (Proton adjacent to double bond) และตำแหน่ง Chemical shift ช่วง 0.84 ppm (Methyl proton of the hydrogenated) จากพื้นที่ใต้พีคสามารถคำนวณหาปริมาณไฮโดรจิเนชันได้ดังสมการที่ 3.6 (Phinyocheep *et al.*, 2006) ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.5

$$\text{Hydrogenation (\%)} = \frac{A_{0.84}}{A_{0.84} + 3A_{5.10}} \times 100 \quad (3.6)$$

เมื่อ $A_{0.84}$ = พื้นที่ใต้พีคที่ตำแหน่ง Chemical shift ช่วง 0.84 ppm (Methyl proton of the hydrogenated)
 $A_{5.10}$ = พื้นที่ใต้พีคที่ตำแหน่ง Chemical shift ที่ 5.10 ppm (Proton adjacent to double bond)

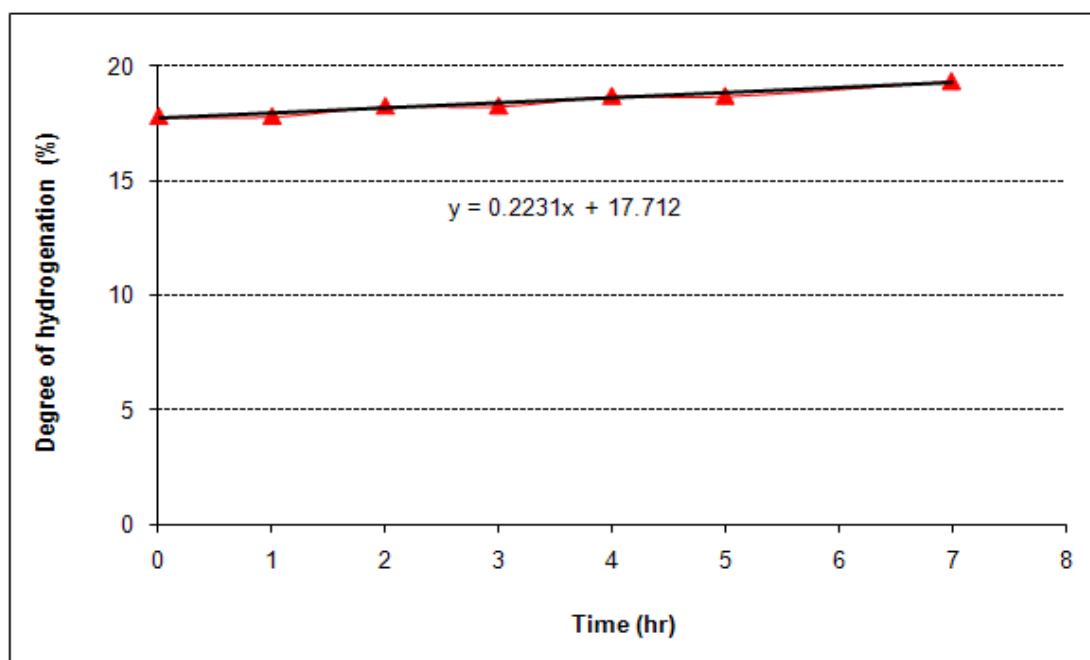


รูปที่ 3.8 สเปกตรัมจาก $^1\text{H-NMR}$ ของ (A) ยางธรรมชาติ และ (B) ยางธรรมชาติไฮโดรจิเนชัน

ตารางที่ 3.5 เปอร์เซ็นต์ไฮโดรจิเนชันของยางธรรมชาติไฮโดรจิเนตที่แปรตามเวลาต่างๆ

เวลาการทำปฏิกิริยา (hr)	พื้นที่ใต้พีคที่ตำแหน่ง δ ที่ 0.84 ppm	พื้นที่ใต้พีคที่ตำแหน่ง δ ที่ 5.10 ppm	Degree of Hydrogenation (%)
0.00*	0.65	1.00	17.81
1.00	0.65	1.00	17.81
2.00	0.67	1.00	18.26
3.00	0.67	1.00	18.26
4.00	0.69	1.00	18.70
5.00	0.69	1.00	18.70
7.00	0.72	1.00	19.35

* เมื่อหยดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หมดแล้วจึงเก็บตัวอย่าง ถือว่าเป็นเวลาที่ 0 hr



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ไฮโดรจิเนชันกับเวลา

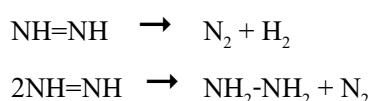
จากรูปที่ 3.9 พบว่าเมื่อเวลาการทำปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันเพิ่มขึ้น ปริมาณเปอร์เซ็นต์ไฮโดรจิเนชันในโมเลกุลยางธรรมชาติสูงขึ้น แต่จะสูงขึ้นไม่มากจึงทำการเพิ่มสัดส่วนโมล $\text{N}_2\text{H}_4 : \text{H}_2\text{O}_2$ เป็น 2 และ 3 เท่า

แล้วปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 5 hr แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี ผลที่ได้จากการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ไฮโดรจิเนชันแสดงดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 เปอร์เซ็นต์ไฮโดรจิเนชันเมื่อแปรจำนวนโมลของ carbon-carbon double bond (C=C) hydrazine monohydrate (N₂H₄) และ hydrogen peroxide (H₂O₂) ของยางไฮโดรจิเนตที่เวลาการทำปฏิกิริยา 5 hr

Sample	C=C	N ₂ H ₄	H ₂ O ₂	Degree of hydrogenation (%)
HNR-1	1	4	5	18.70
HNR-2	1	8	10	17.81
HNR-3	1	12	15	17.36

จากตารางที่ 3.6 พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนโมลของ N₂H₄ : H₂O₂ แล้ว แต่เปอร์เซ็นต์การเกิดไฮโดรจิเนชันมีค่าที่ใกล้เคียงกันประมาณ 20% เนื่องจากสารตัวเร่งที่เติมลงไปจะเกิดเป็นคอปเปอร์ไอออน ซึ่งคอปเปอร์ไอออนเมื่ออยู่ในระบบสามารถอยู่ได้ 3 แหล่งคือ อยู่ในน้ำที่เป็นตัวกลาง อยู่บนพื้นผิวอนุภาคของยาง และอยู่ในอนุภาคของยาง คอปเปอร์ไอออนที่อยู่ในส่วนของน้ำก่อให้เกิดปฏิกิริยาการเสื่อมของไดอิมิด์ดังสมการดังนี้



ส่วนคอปเปอร์ไอออนที่เติมลงในระบบแล้วสามารถกระจายไปทั่วบนพื้นผิวอนุภาคของยาง โดยจะเกิดการเชื่อมโยงกับไฮดราซีนเกิดเป็นอิเล็กตรอนอิสระ (Electron pairs) บนโมเลกุลของไฮโดรเจน เมื่อใส่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะเกิดการออกซิเดชันกับไฮดราซีนได้ผลิตภัณฑ์เป็นไดอิมิด์และน้ำ ในขณะที่คอปเปอร์ถูกกระตุ้นให้กลับมาอยู่ในรูปแบบเดิม ส่วนไดอิมิด์เกิดการไฮโดรจิเนชันกับพันธะคู่ในยางทำให้พันธะคู่ในยางลดลง และคอปเปอร์ไอออนที่เข้าไปอยู่ในอนุภาคยาง ซึ่งเป็นส่วนน้อยมากๆ (Sarkar *et al.*, 1999) ดังนั้นการที่จะเพิ่มเปอร์เซ็นต์ไฮโดรจิเนชันของยางธรรมชาติไฮโดรจิเนตขึ้นจะต้องควบคุมให้คอปเปอร์ไอออนอยู่บนพื้นผิวของอนุภาคยาง อีกอย่างหนึ่งคือในการทดลองนี้ได้หยดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในอัตราการหยดที่เร็ว (59 ml/hr) ทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงมาก เปอร์เซ็นต์ไฮโดรจิเนชันจึงไม่เพิ่มขึ้นถึงแม้ว่าจะเพิ่มสัดส่วนโมลให้มากขึ้นก็ตาม และยางที่ได้หลังจากที่อบให้แห้งมีลักษณะเป็นยางสีคล้ำ เมื่อตั้งทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 2 สัปดาห์ พบว่ายางมีลักษณะเหนียวเหนอะ เกิดจากการเกิด Auto-oxidation ของยางเนื่องจากคอปเปอร์ไอออน แสดงดังรูปที่ 3.10

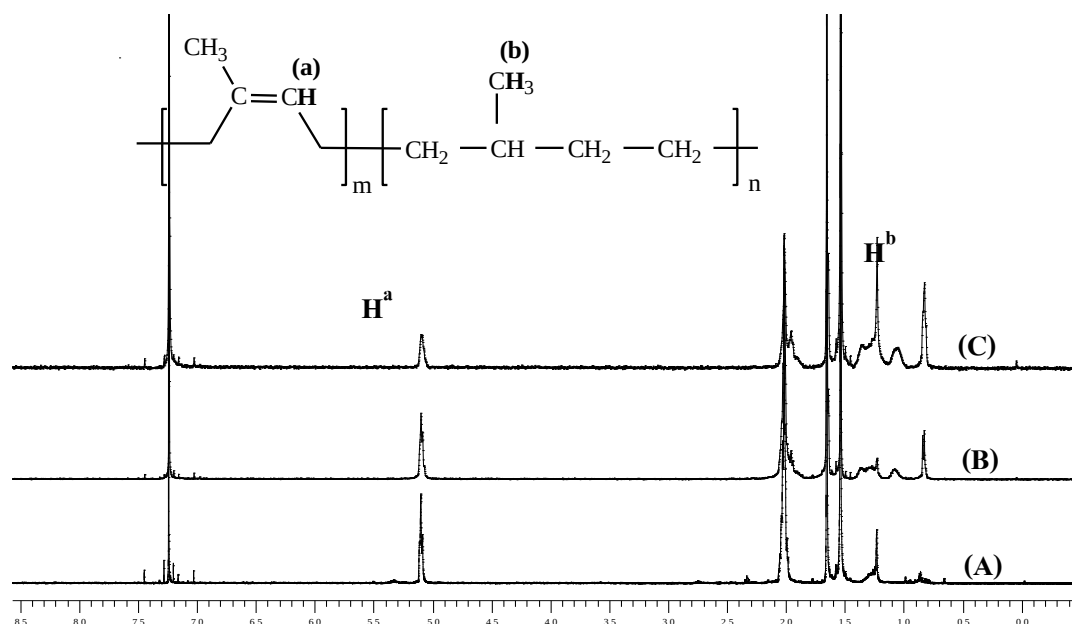


รูปที่ 3.10 ลักษณะทางธรรมชาติไฮโดรจินเนตที่ใช้สารตัวเร่ง

3.2.2 เตรียมยางธรรมชาติไฮโดรจินเนตไม่ใช้สารตัวเร่ง

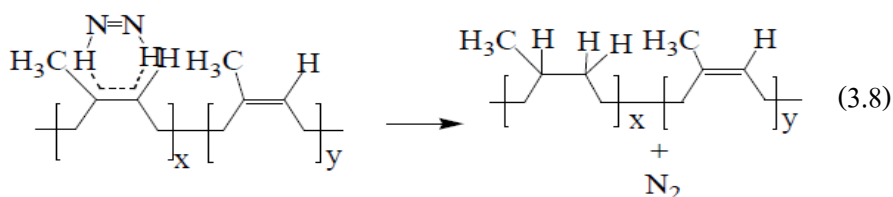
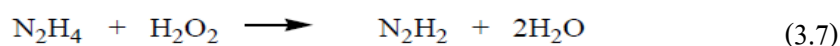
3.2.2.1 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy, NMR)

เนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮโดรจินเนชันจะทำให้ได้ 2 วิธีคือ แบบใช้สารตัวเร่งและแบบไม่ใช้สารตัวเร่ง ดังนั้นจึงเปลี่ยนมาเป็นแบบไม่ใช้สารตัวเร่ง โดยเตรียมยางธรรมชาติไฮโดรจินเนตอยู่ในรูปแบบของน้ำยางในหัวข้อที่ 2.3.2.2 แล้วจึงนำมาวิเคราะห์หาพันธะเดี่ยวที่มีในยางไฮโดรจินเนตด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปีโดยละลายตัวอย่างในดิทเทอริยมคลอโรฟอร์ม วัดตำแหน่งสัญญาณของโปรตอนดังรูปที่ 3.11 พบว่าเกิดการเรโซแนนซ์ที่ตำแหน่ง Chemical shift ที่ 5.10 ppm (Proton adjacent to double bond) และตำแหน่ง Chemical shift ช่วง 0.84 ppm (Methyl proton of the hydrogenated) และสามารถคำนวณหาปริมาณไฮโดรจินเนชันได้ดังสมการที่ 3.6 (Phinyocheep *et al.*, 2006)



รูปที่ 3.11 สเปกตรัมจาก ^1H -NMR ของ (A) ยางธรรมชาติ, (B) ยางธรรมชาติไฮโดรจินเนชันที่มีสัดส่วนโมลของ $\text{C}=\text{C} : \text{N}_2\text{H}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 = 1:1:1$ และ (C) ยางธรรมชาติไฮโดรจินเนชันที่มีสัดส่วนโมลของ $\text{C}=\text{C} : \text{N}_2\text{H}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 = 1:4:5$

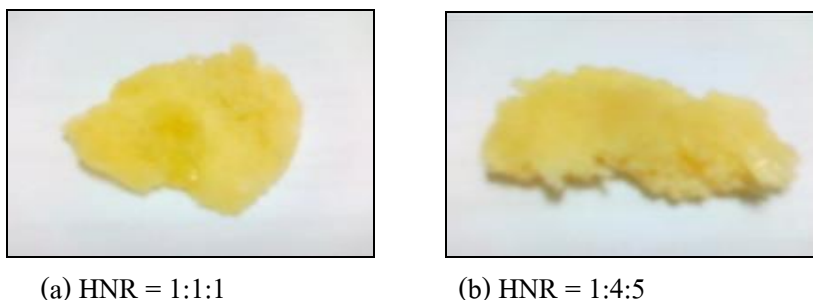
จากรูปที่ 3.11 พบว่าเมื่อใช้วิธีการเตรียมน้ำยางไฮโดรจิเนชันแบบไม่ใช้สารตัวเร่ง เกิดการออกซิเดชันของไฮดราซีนโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำให้เกิดโมเลกุลของไดอิมิด (N_2H_2) ซึ่งแสดงไว้ในสมการที่ 3.7 และไดอิมิดที่ได้จะให้โมเลกุลไฮโดรเจนแก่พันธะที่ไม่อิ่มตัวในโมเลกุลยางธรรมชาติ ดังสมการที่ 3.8 และจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้มีผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซไนโตรเจน (Phinyocheep *et al.*, 2006) และจากรูปที่ 3.11 สามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์ไฮโดรจิเนชันได้ดังตารางที่ 3.7



ตารางที่ 3.7 เปอร์เซนต์ไฮโดรจิเนชันเมื่อแปรจำนวน โมลของ carbon-carbon double bond ($C=C$) hydrazine monohydrate (N_2H_4) และ hydrogen peroxide (H_2O_2) ของยางไฮโดรจิเนตที่เวลาการทำปฏิกิริยา 24 hr

Sample	C=C	N_2H_4	H_2O_2	Degree of hydrogenation (%)
HNR-4	1	1	1	14.53
HNR-5	1	4	5	39.15

พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวน โมลเปอร์เซนต์ไฮโดรจิเนชันก็เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากเมื่อเพิ่มจำนวนโมลของไฮดราซีนโมโนไฮเดรตและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำให้เกิดไดอิมิดเพิ่มขึ้นซึ่งมีโอกาสดำเนินการปฏิกิริยากับโมเลกุลยางธรรมชาติได้มากขึ้น เนื่องจากไม่มีสารตัวเร่งมาเป็นผลทำให้เกิดการเสื่อมของไดอิมิด และการหยุดสารเคมีในอัตราที่ช้าลง (HNR = 1:1:1, อัตราการหยุด 3.4 ml/hr และ HNR = 1:4:5, อัตราการหยุด 4.4 ml/hr) ทำให้ไดอิมิดเข้าทำปฏิกิริยาที่ผิวอนุภาคยางธรรมชาติได้ดีกว่าการใช้อัตราที่เร็ว นอกจากนี้เวลาการทำปฏิกิริยา (24 hr) ก็มีส่วนทำให้เปอร์เซนต์ไฮโดรจิเนชันเพิ่มขึ้น โดยโมเลกุลของไดอิมิดจะทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ที่ผิวของอนุภาคของลาเท็กซ์เพิ่มขึ้น (Phinyocheep *et al.*, 2006) และลักษณะของยางที่ได้หลังจากการอบให้แห้งมีลักษณะเป็นยางสีเหลืองอ่อน สามารถตั้งวางไว้ได้นานถึง 1 เดือนได้โดยไม่เกิดการเหนียวเหนอะ ดังรูปที่ 3.12



(a) HNR = 1:1:1

(b) HNR = 1:4:5

รูปที่ 3.12 ลักษณะทางธรรมชาติไฮโดรจิเนตที่ไม่ใช้สารตัวเร่ง (a) HNR = 1:1:1 และ (b) HNR = 1:4:5

3.3 ศึกษาอิทธิพลการเบลนด้อย่างธรรมชาติทนทานต่อการเผาไหม้กับยางธรรมชาติทนต่อการเสื่อมสลายด้วยความร้อน (DSNR/HNR)

ในการทดลองนี้เป็นการเบลนด้อย่างระหว่างยางธรรมชาติดัดแปลงโมเลกุลด้วยไดบิวทิลฟอสเฟต (DSNR) กับยางธรรมชาติไฮโดรจิเนต (HNR) ซึ่งยางธรรมชาติไฮโดรจิเนตมีการเตรียมที่แตกต่างกัน 2 แบบ คือ แบบใช้สารตัวเร่งและแบบไม่ใช้สารตัวเร่ง ดังนั้นผลการทดสอบยางเบลนดจึงแบ่งเป็น 2 ส่วน ซึ่งสูตรการเบลนดและวิธีการทดสอบสมบัติต่างๆ จะทำเหมือนกันในทั้ง 2 ส่วนนี้

หมายเหตุ :

1. DSNR25 และ DSNR50 แทนตัวอย่างยางธรรมชาติที่ดัดแปลงโมเลกุลด้วยไดบิวทิลฟอสเฟตที่ได้จากการทำปฏิกิริยากับยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โมลตามลำดับ
2. HNR20 แทนตัวอย่างยางธรรมชาติที่มีเปอร์เซ็นต์ไฮโดรจิเนชันในโมเลกุล 20 เปอร์เซ็นต์โมล แบบใช้สารตัวเร่ง
3. HNR15 และ HNR40 แทนตัวอย่างยางธรรมชาติที่มีเปอร์เซ็นต์ไฮโดรจิเนชันในโมเลกุล 15 และ 40 เปอร์เซ็นต์โมล แบบไม่ใช้สารตัวเร่ง

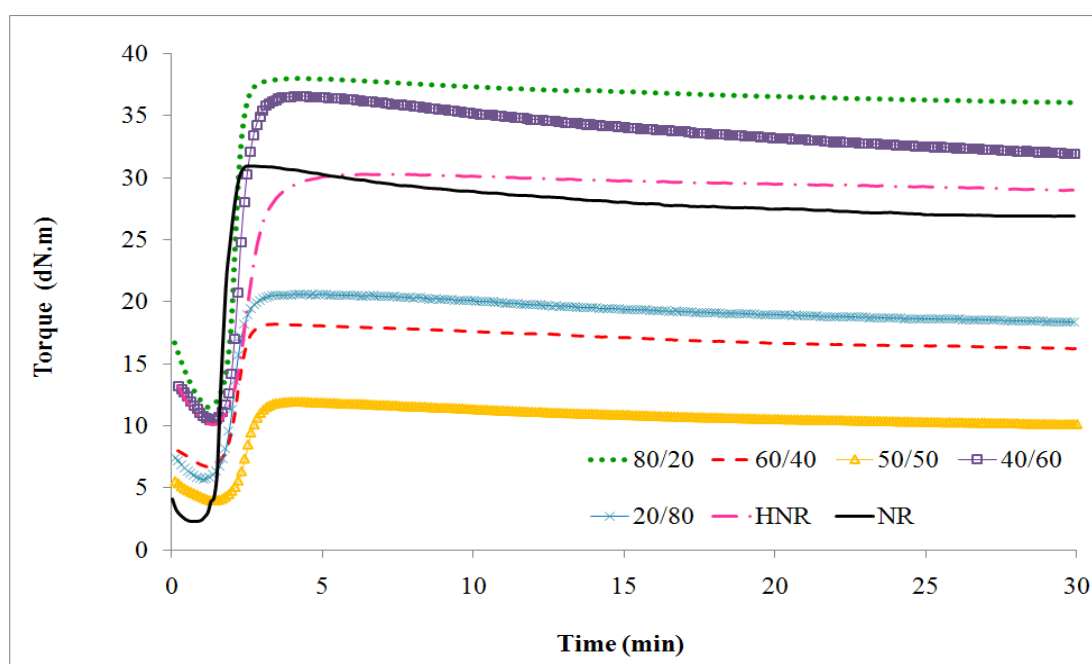
ส่วนที่ 1 ศึกษาอิทธิพลการเบลนด้อย่าง DSNR กับยาง HNR แบบใช้สารตัวเร่ง

3.3.1 ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนยางต่อสมบัติยางเบลนด์ (DSNR/HNR)

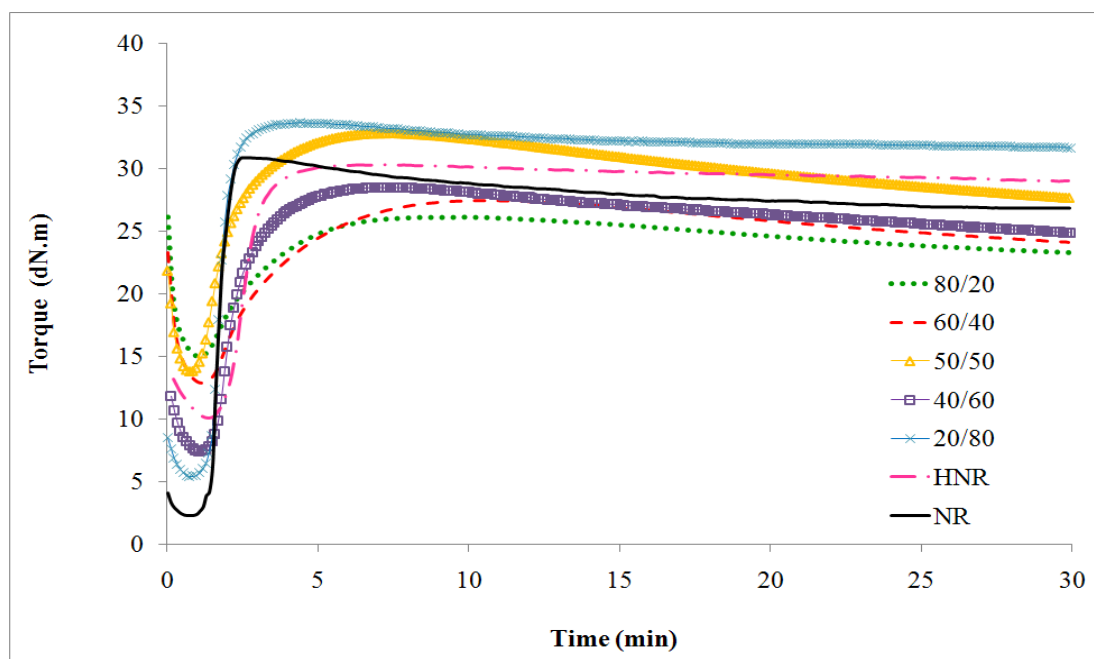
ทำการบดผสมยางธรรมชาติดัดแปลงโมเลกุลด้วยไดบิวทิลฟอสเฟตกับยางธรรมชาติไฮโดรจิเนตตามสูตรยางคอมปาวด์แสดงดังตารางที่ 2.8 ด้วยเครื่องผสมยางสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิห้อง แล้วเปรียบเทียบอัตราส่วนยางเบลนด์ DSNR/HNR คือ 100/0, 80/20, 60/40, 50/50, 40/60, 20/80 และ 0/100 สภาวะการทดสอบตามหัวข้อที่ 2.3.5 แต่ในการบดผสมยาง DSNR ที่อัตราส่วน 100/0 ไม่สามารถทำให้เป็นแผ่นได้เมื่อผ่านเครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง จึงไม่มีผลการทดลองที่อัตราส่วนนี้

3.3.1.1 อัตราส่วนการเบลนด์ต่อลักษณะการวัลคาไนซ์

ผสมยางธรรมชาติที่ดัดแปลงด้วยไดบิวทิลฟอสเฟตจากน้ำยางธรรมชาติอพอกไซค์ที่มีปริมาณอพอกไซค์ 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โมล กับยางธรรมชาติไฮโดรจิเนตที่มีปริมาณไฮโดรจิเนชัน 20 เปอร์เซ็นต์โมล ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ได้ผลดังรูปที่ 3.13 และ 3.14



รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดกับเวลาของยางธรรมชาติเปรียบเทียบกับยางเบลนด์ระหว่าง DSNR25/HNR20 แปรอัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 160 °C



รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดกับเวลาของยางธรรมชาติเปรียบเทียบกับยางเบลนด์ระหว่าง DSNR50/HNR20 แปรอัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 160 °C

จากรูปที่ 3.13 และ 3.14 พบว่า ลักษณะเฉพาะของการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติที่ 160 °C มีลักษณะเป็นรีเวอร์ชัน (reversion) มากกว่ายางเบลนด์ DSNR/HNR และจากผลการทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ในรูปที่ 3.13 และ 3.14 สามารถสรุปค่าแสดงลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติ ยางเบลนด์ DSNR25/HNR20 และยางเบลนด์ DSNR50/HNR20 ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 ลักษณะการวัดคาบในของยางธรรมชาติ ยางเบลนด์ DSNR25/HNR20 และยางเบลนด์ DSNR50/HNR20 ทดสอบที่อุณหภูมิ 160 °C

Sample	M _H (dN.m)	M _L (dN.m)	M _H -M _L (dN.m)	t ₉₀ (min)	t ₁ (min)	CRI (min ⁻¹)
NR	30.90	2.30	28.60	2.05	1.19	116.28
HNR20	30.30	10.10	20.20	3.18	1.44	57.47
DSNR25/HNR20						
80/20	38.03	11.51	26.52	2.40	1.62	128.21
60/40	18.20	6.70	11.50	2.28	1.40	113.64
50/50	12.00	3.90	8.10	2.51	1.59	108.70
40/60	36.60	10.40	26.20	2.41	1.41	100.00
20/80	20.60	5.70	14.90	2.27	1.30	103.09
DSNR50/HNR20						
80/20	26.17	15.09	11.08	5.00	1.50	28.57
60/40	27.45	12.92	14.53	6.33	1.62	21.23
50/50	32.85	13.83	19.02	3.00	1.10	52.60
40/60	28.50	7.40	21.10	3.43	1.27	46.30
20/80	33.70	5.50	28.20	2.09	1.10	101.01

จากตารางที่ 3.8 พบว่ายางธรรมชาติมีค่าความแตกต่างของแรงบิดสูงกว่ายางเบลนด์ แสดงว่ายางธรรมชาติมีปริมาณการเชื่อมโยงสูงกว่า เนื่องจากค่าความแตกต่างของแรงบิดเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณการเชื่อมโยงของโมเลกุลยาง เมื่อพิจารณาระยะเวลาในการวัดคาบในของยางธรรมชาติจะสั้นกว่ายางเบลนด์ เนื่องจากพันธะที่ไม่อิ่มตัวในสายโซ่หลักของโมเลกุลของยางธรรมชาติเกิดการเชื่อมโยงกันในปริมาณที่มาก ส่งผลให้ระยะเวลาการวัดคาบในสั้น

เมื่อพิจารณาเบลนด์ DSNR25/HNR20 ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าการลดปริมาณของยาง DSNR25 ทำให้ค่าความแตกต่างของแรงบิดลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากพันธะที่ไม่อิ่มตัวในโมเลกุลยาง DSNR25 ซึ่งเป็นจุดที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงลดลง สอดคล้องกับผลของดัชนีอัตราการวัดคาบใน แต่ค่าความแตกต่างของแรงบิดจะเพิ่มขึ้นอีกที่อัตราส่วน 40/60 ส่วนระยะเวลาการวัดคาบในของยางเบลนด์ DSNR25/HNR20 ในทุกอัตราส่วนมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน

เมื่อพิจารณาเบลนด์ DSNR50/HNR20 พบว่าค่าความแตกต่างของแรงบิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณยาง HNR20 เนื่องจากด้วยตัวยาง DSNR50 มีความแข็งแรงและมีหมู่เกาะที่ใหญ่มาก เมื่อเพิ่มปริมาณยาง HNR20 ซึ่งมีความเป็นยางอยู่สูงกว่าจึงเป็นการเพิ่มปริมาณการเชื่อมโยงด้วย ซึ่งจะสอดคล้องกับ

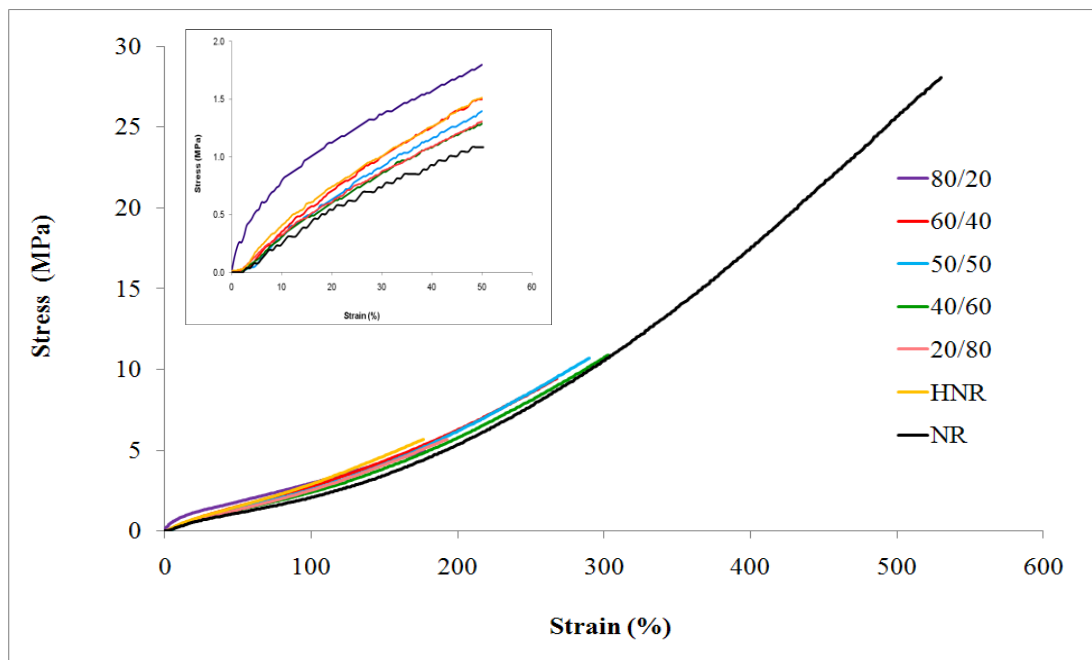
ผลของดัชนีอัตราการวัลคาไนซ์ ส่วนระยะเวลาการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ DSNR50/HNR20 มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มอัตราส่วนของยาง HNR20 เนื่องจากยาง HNR20 มีส่วนที่เป็นพันธะที่ไม่อิ่มตัวสูงกว่ายาง DSNR50 เมื่ออัตราส่วนของยาง HNR20 เพิ่มขึ้นปริมาณการเชื่อมโยงจึงเพิ่มขึ้นส่งผลให้วัลคาไนซ์เร็วขึ้น

3.3.1.2 อัตราส่วนการเบลนด์ต่อสมบัติเชิงกล

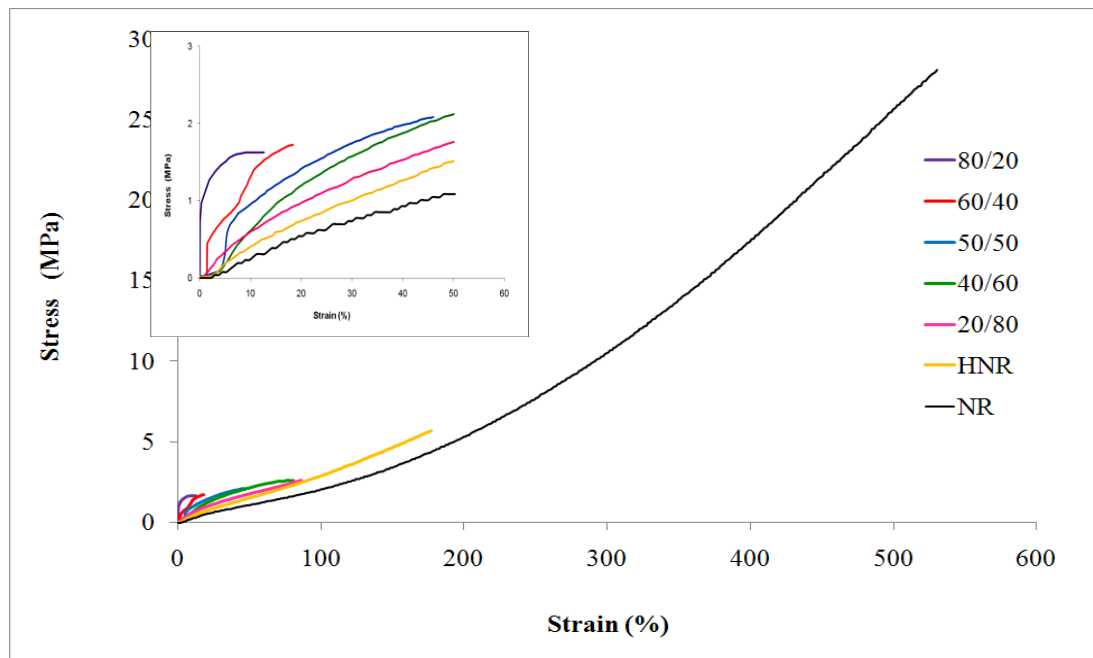
นำยางคอมปาวด์ที่เตรียมได้จากหัวข้อ 2.3.3.1 มาอัดเบ้าขึ้นทดสอบด้วยเครื่องอัดเบ้าไฮดรอลิกที่อุณหภูมิ 160 °C ตามระยะเวลาการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์แต่ละสูตร ตั้งแผ่นยางที่ได้ไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 24 hr ซึ่งการทดสอบจะทดสอบทั้งก่อนการบ่มแรงและหลังการบ่มแรง โดยบ่มแรงด้วยอากาศร้อนอุณหภูมิ 100 °C เป็นระยะเวลา 22 hr แล้วทำการทดสอบสมบัติเชิงกลตามหัวข้อที่ 2.3.6

3.3.1.2.1 สมบัติเชิงกลก่อนการบ่มแรง

ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติ ยางเบลนด์ DSNR25/HNR20 และยางเบลนด์ DSNR50/HNR20 โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ คือ 80/20, 60/40, 50/50, 40/60, 20/80 และ 0/100 ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด แสดงดังรูปที่ 3.15 และ 3.16



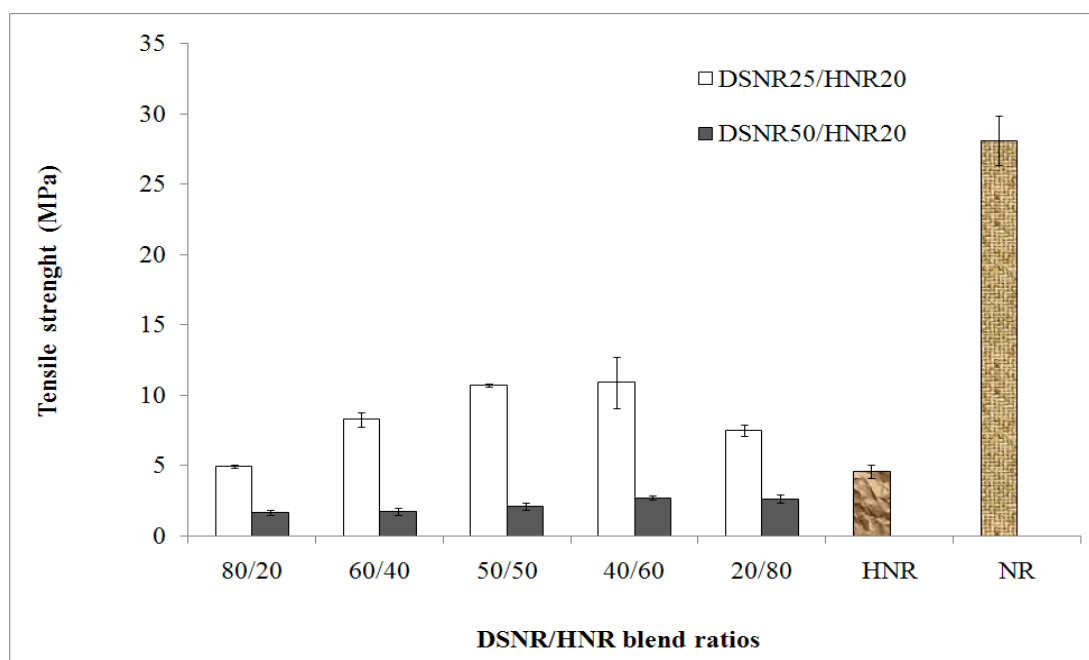
รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางธรรมชาติ และยางเบลด DSNR25/HNR20 แปรอัตราส่วนการเบลดต่างๆ



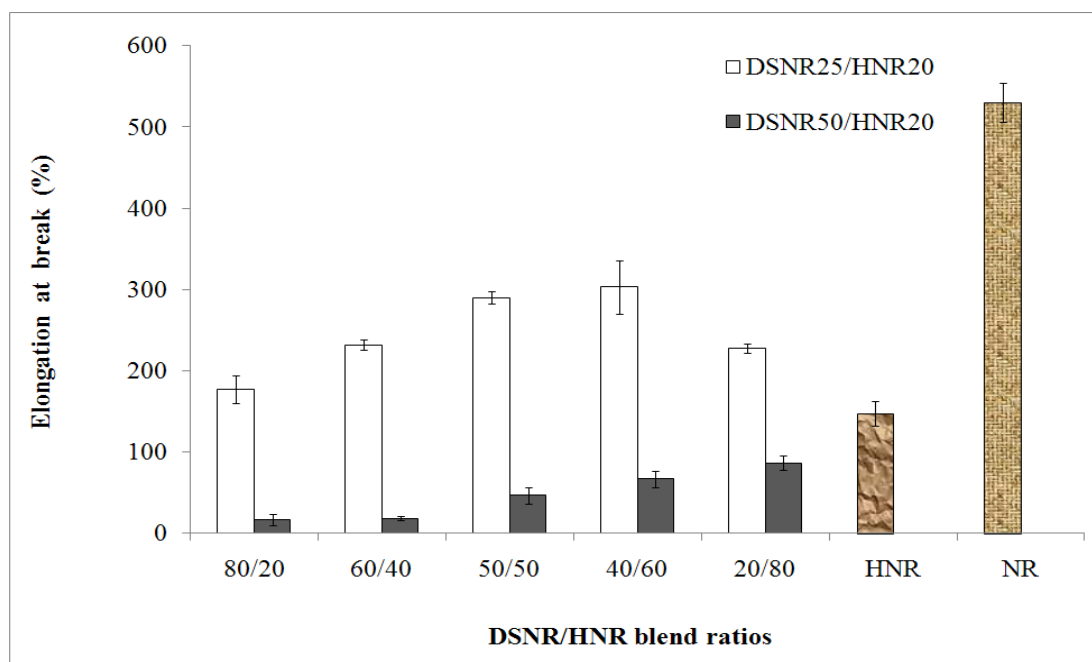
รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางธรรมชาติ และยางเบลด DSNR50/HNR20 แปรอัตราส่วนการเบลดต่างๆ

จากรูปที่ 3.15 และ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางธรรมชาติกับยางเบลนด์ DSNR25/HNR20 และ DSNR50/HNR20 ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ พบว่าค่ามอดูลัสที่ระยะยืดน้อยๆ ของยางเบลนด์ DSNR25/HNR20 และ DSNR50/HNR20 สูงกว่ายางธรรมชาติ เนื่องจากในโมเลกุลของ DSNR มีหมู่เกาะขนาดใหญ่ (Bulky groups) ทำให้การเคลื่อนไหวของโมเลกุลยากกว่า ในทำนองเดียวกันกับยาง HNR ที่มีพันธะเดี่ยวในโมเลกุล ซึ่งทำให้โมเลกุลมีการเคลื่อนไหวยากทำให้ค่ามอดูลัสสูงกว่าในยางธรรมชาติ สอดคล้องกับการรายงานของ Ikeda (2008) เมื่อเปรียบเทียบค่ามอดูลัสที่ระยะยืดน้อยๆ ของยางเบลนด์ DSNR25/HNR20 และยางเบลนด์ DSNR50/HNR20 ที่แปรอัตราส่วนต่างๆ พบว่าค่ามอดูลัสลดลงตามการเพิ่มอัตราส่วนของยาง HNR20 เนื่องจากในโมเลกุลของยาง HNR20 ยังมีส่วนที่เป็นพันธะอิมตัวอยู่ประมาณ 80% ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณของยาง HNR20 ขึ้นทำให้เพิ่มความเป็นยางมากขึ้น ค่ามอดูลัสจึงลดลง และเมื่อทำการยืดออกไปจนขาดพบว่ายางเบลนด์ DSNR25/HNR20 และยางเบลนด์ DSNR50/HNR20 มีค่า strain ที่สูงตามการเพิ่มปริมาณของยาง HNR

จากความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด สามารถคำนวณหาความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดได้ดังรูปที่ 3.17 และ 3.18



รูปที่ 3.17 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติ และยางเบลนด์ DSNR/HNR ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ

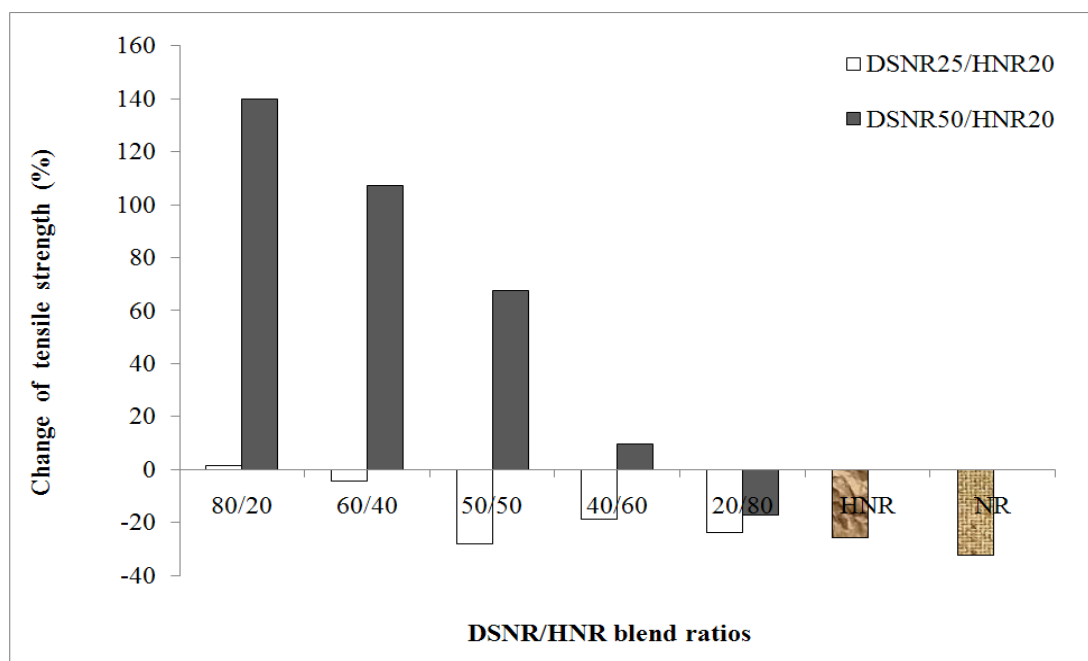


รูปที่ 3.18 ค่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางธรรมชาติ และยางเบลนด์ DSNR/HNR ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ

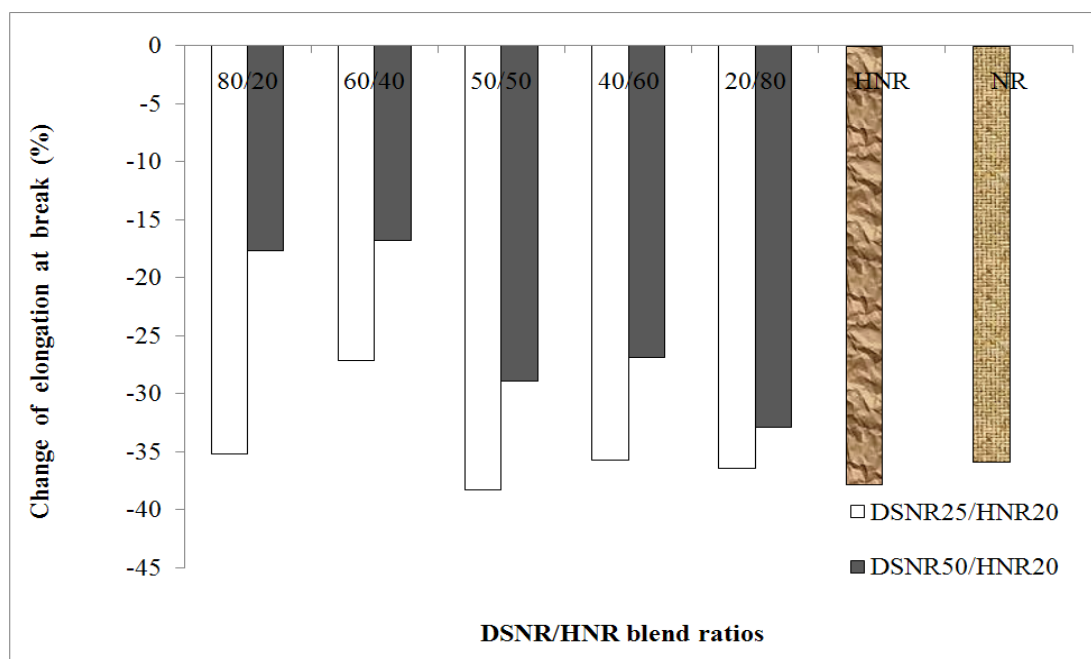
จากรูปที่ 3.17 และ 3.18 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางธรรมชาติสูงกว่ายางเบลนด์ DSNR/HNR เนื่องจากโครงสร้างของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบจึงเกิดการตกลึกได้เมื่อทำการยืด เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ DSNR/HNR พบว่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ DSNR25/HNR20 ที่อัตราส่วน 40/60 สูงที่สุด อาจจะเนื่องจากความเข้ากันได้ของยางทั้ง 2 ชนิด ส่วนค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ DSNR50/HNR20 มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของยาง HNR20 เนื่องจากยาง DSNR50 มีความแข็งแรง เมื่อเพิ่มส่วนที่เป็นยาง HNR20 ซึ่งมีความเป็นยางอยู่มากกว่าและยังมีส่วนที่เป็นพันธะไม่อิ่มตัวเหลืออยู่ในปริมาณที่สูง ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณของยาง HNR20 ขึ้นทำให้เพิ่มความแข็งแรงมากขึ้น

3.3.1.2.2 สมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่ง

ทดสอบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยึดของยางธรรมชาติ และยางเบลนด์ DSNR/HNR โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ คือ 80/20, 60/40, 50/50, 40/60, 20/80 และ 0/100 ได้ผลแสดงดังรูปที่ 3.19 และ 3.20



รูปที่ 3.19 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานต่อแรงดึงหลังการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 100°C 22 hr ของยางธรรมชาติและยางเบลนด์ DSNR/HNR ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์

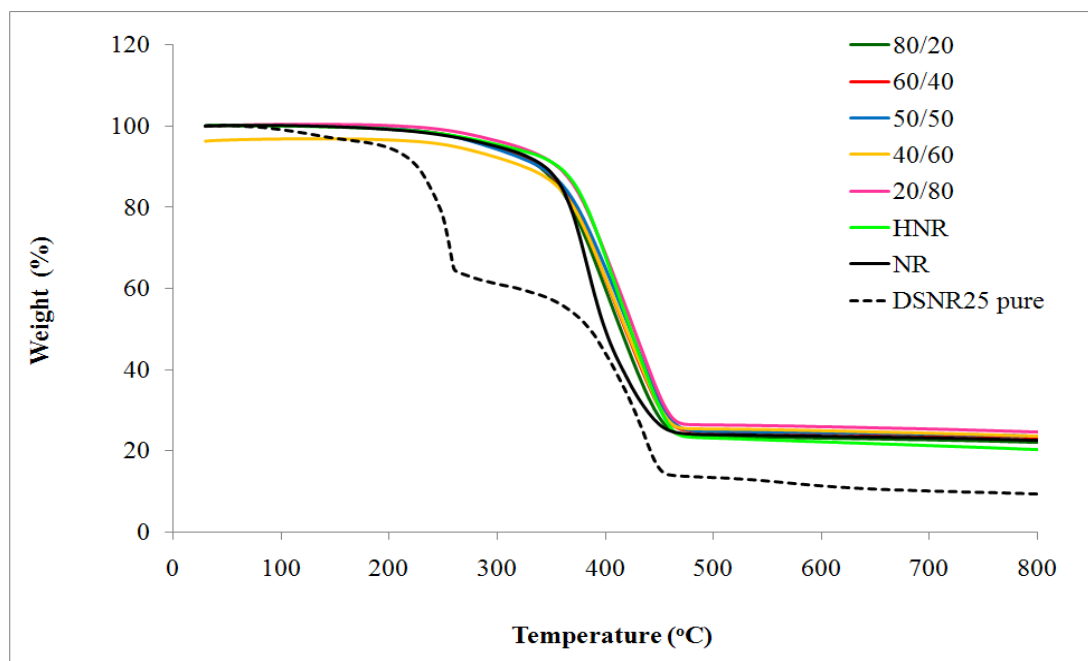


รูปที่ 3.20 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการยืดจนขาดหลังจากการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 100°C 22 hr ของยางธรรมชาติและยางเบลนด์ DSNR/HNR ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์

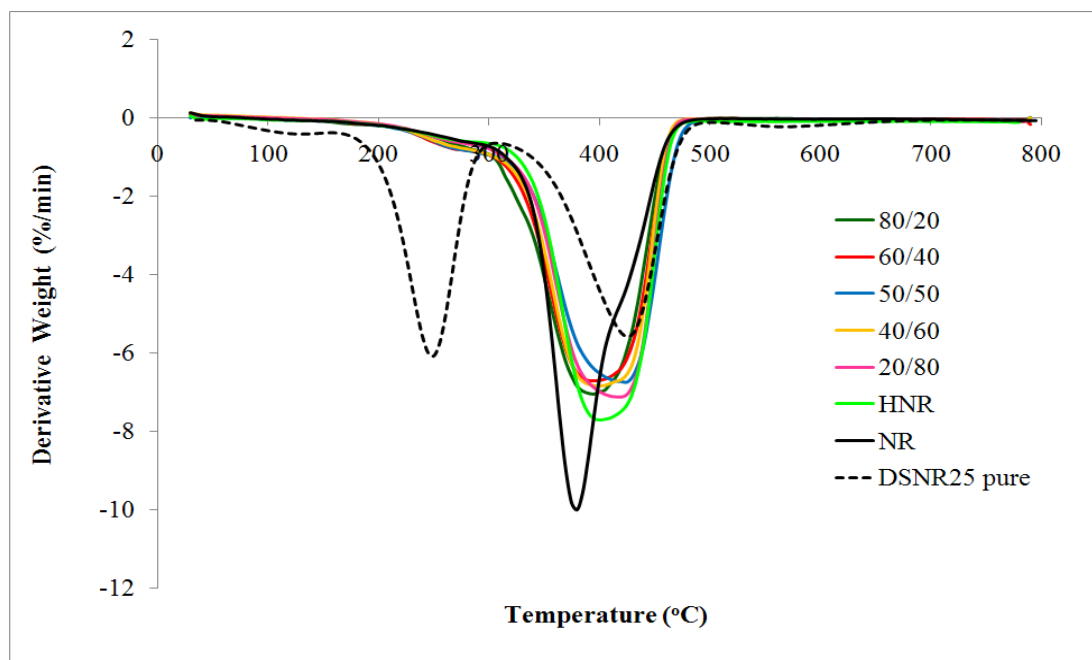
จากรูปที่ 3.19 พบว่ายางธรรมชาติมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานต่อแรงดึงมากกว่ายางเบลนด์ DSNR/HNR เนื่องจากความไม่อึดตัวในโมเลกุลของยางธรรมชาติ เมื่อเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนด์ DSNR25/HNR20 พบว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงขึ้นตามการเพิ่มอัตราส่วนของยาง HNR20 เนื่องจากในโมเลกุลของ HNR20 ยังมีส่วนที่ไม่อึดตัวในโมเลกุลเหลืออยู่มาก เมื่อทำการบ่มแรงที่อุณหภูมิสูงจึงเกิดการแตกของสายโซ่ความแข็งแรงของยางเบลนด์จึงลดลง ส่วนยางเบลนด์ DSNR50/HNR20 มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานต่อแรงดึงในทางด้านบวก และเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนด์ DSNR50/HNR20 ค่อยๆลดลงตามการเพิ่มอัตราส่วนยาง HNR20 เนื่องจากในโมเลกุลของ HNR20 ยังมีส่วนที่ไม่อึดตัวในโมเลกุลเหลืออยู่มาก เมื่อทำการบ่มแรงที่อุณหภูมิสูงจึงเกิดการแตกของสายโซ่ความแข็งแรงของยางเบลนด์จึงลดลงเมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ DSNR/HNR (รูปที่ 3.20) พบว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ DSNR25/HNR20 และยางเบลนด์ DSNR50/HNR20 มีแนวโน้มที่มากขึ้นตามการเพิ่มปริมาณยาง HNR20 เนื่องมาจากในโมเลกุลของยาง HNR20 ยังมีส่วนที่ไม่อึดตัวเหลืออยู่จึงทำให้เกิดการเสื่อมได้ด้วยความร้อน

3.3.1.3 อัตราส่วนการเบลนด์ต่อสมบัติเชิงความร้อน

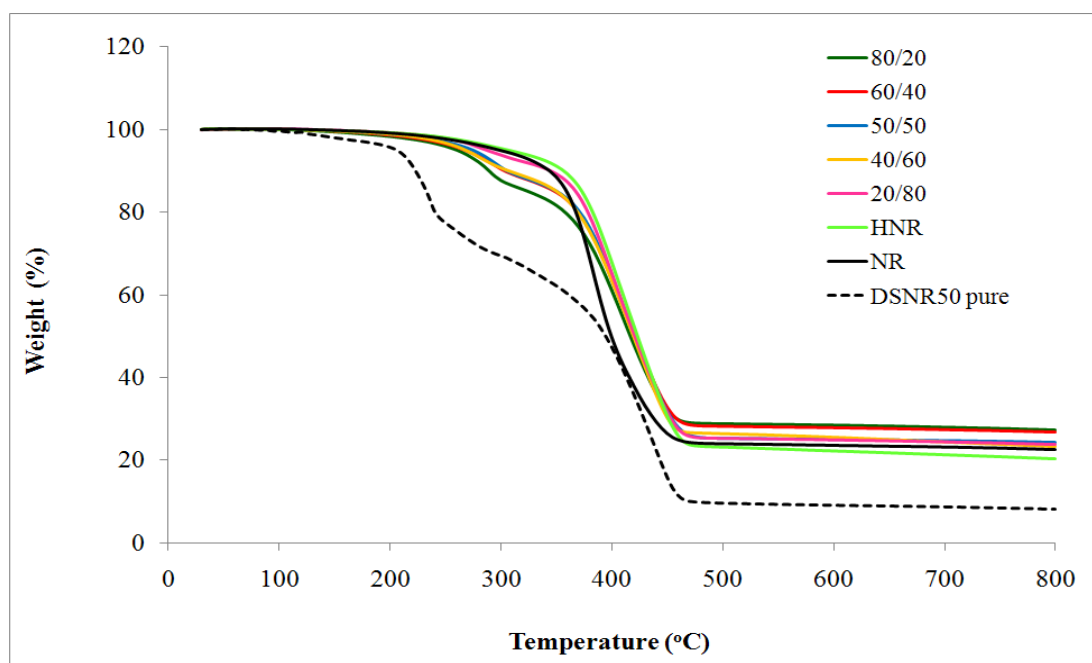
ทดสอบสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค TGA รุ่น STA 6000 ขึ้นตัวอย่างที่มีน้ำหนักอยู่ในช่วง 7 ถึง 12 มิลลิกรัม โดยทดสอบในสภาวะไนโตรเจน อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 20 ml/min ทดสอบที่อุณหภูมิในช่วง 30-800 °C อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 10 °C /min ได้ผลดังรูปที่ 3.21 - 3.24



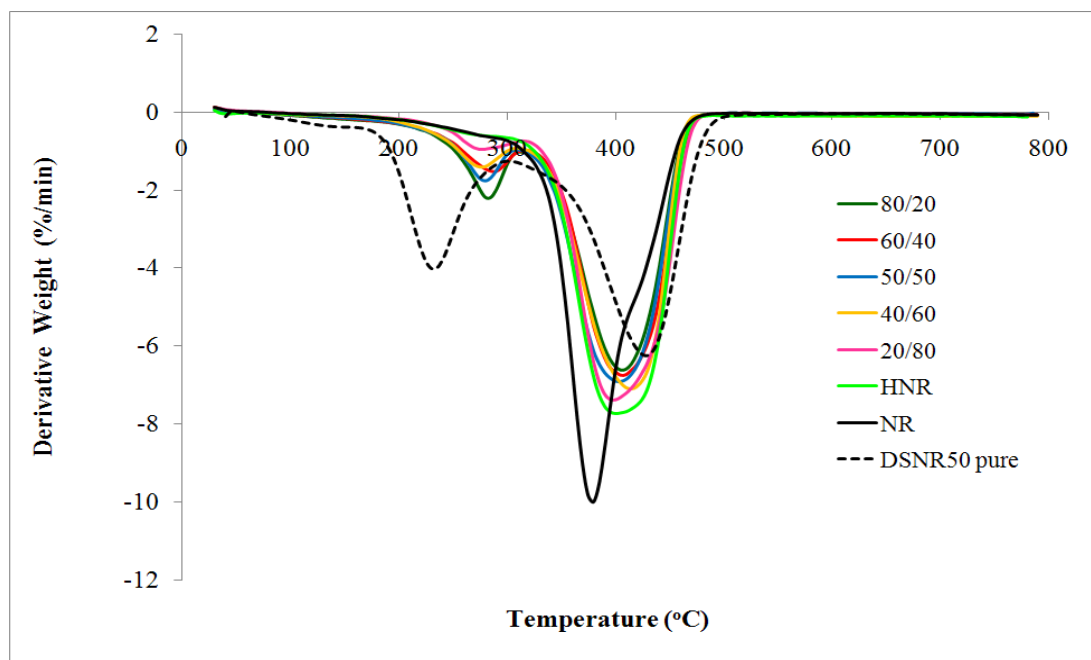
รูปที่ 3.21 เทอร์โมแกรม TGA ของยางเบลนด์ DSNR25/HNR20 ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์



รูปที่ 3.22 เทอร์โมแกรม DTG ของยางเบลนด์ DSNR25/HNR20 ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์



รูปที่ 3.23 เทอร์โมแกรม TGA ของยางเบลนด์ DSNR50/HNR20 ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์



รูปที่ 3.24 เทอร์โมแกรม DTG ของยางเบลนด์ DSNR50/HNR20 ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์

ตารางที่ 3.9 อุณหภูมิการสลายตัวของยางธรรมชาติ ยางเบลนด์ DSNR25/HNR20 และยางเบลนด์ DSNR50/HNR20 ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ

Sample	Decomposition temperature, Td (°C)	
	1st step	2nd step
NR	-	379.08
DSNR25 pure	240.30	418.76
DSNR50 pure	223.52	420.76
HNR20	-	410.45
DSNR25/HNR20		
80/20	-	399.58
60/40	-	403.78
50/50	-	413.72
40/60	-	410.99
20/80	-	425.90
DSNR50/HNR20		
80/20	279.43	404.57
60/40	283.71	404.47
50/50	284.60	410.37
40/60	274.85	413.66
20/80	278.15	400.40

จากรูปที่ 3.21 – 3.24 และตารางที่ 3.9 จะเห็นได้ว่ายางดิบ DSNR25 และ DSNR50 มีอุณหภูมิการสลายตัวเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรกเป็นอุณหภูมิการสลายตัวของหมู่ฟอสเฟต และในช่วงที่สองเป็นอุณหภูมิการสลายตัวของยางธรรมชาติ และจะสังเกตได้ว่าอุณหภูมิการสลายตัวในช่วงที่สองของยางดิบ DSNR25 และ DSNR50 สูงกว่าในยางธรรมชาติ ทั้งนี้เนื่องมาจากยางธรรมชาติที่ผ่านการดัดแปลงโมเลกุลจะมีพันธะคู่ที่ลดลง ทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของยางธรรมชาติที่ผ่านการดัดแปลงโมเลกุลเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณายางเบลนด์ DSNR25/HNR20 ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่ามีอุณหภูมิการสลายตัวเพียงช่วงเดียว ทั้งนี้เนื่องมาจากยาง DSNR25 มีส่วนประกอบที่เป็นหมู่ฟอสเฟตอยู่น้อย เมื่อทำการเบลนด์กับยาง HNR20 จึงไม่มีการปรากฏการสลายตัวของหมู่ฟอสเฟต และยางเบลนด์ DSNR50/HNR20 มีอุณหภูมิการสลายตัวเป็น 2 ช่วง นั่นคือ ช่วงแรกเป็นการสลายตัวของหมู่ฟอสเฟต ซึ่งมีอยู่มากในโมเลกุลของยาง DSNR50 และอุณหภูมิการสลายตัวในช่วงที่สองเป็นอุณหภูมิการสลายตัวของทั้งยาง HNR20 และยาง DSNR ที่สูญเสียหมู่ฟอสเฟตไปแล้ว และพบว่าอุณหภูมิการสลายตัวของยางเบลนด์ DSNR25/HNR20 และ

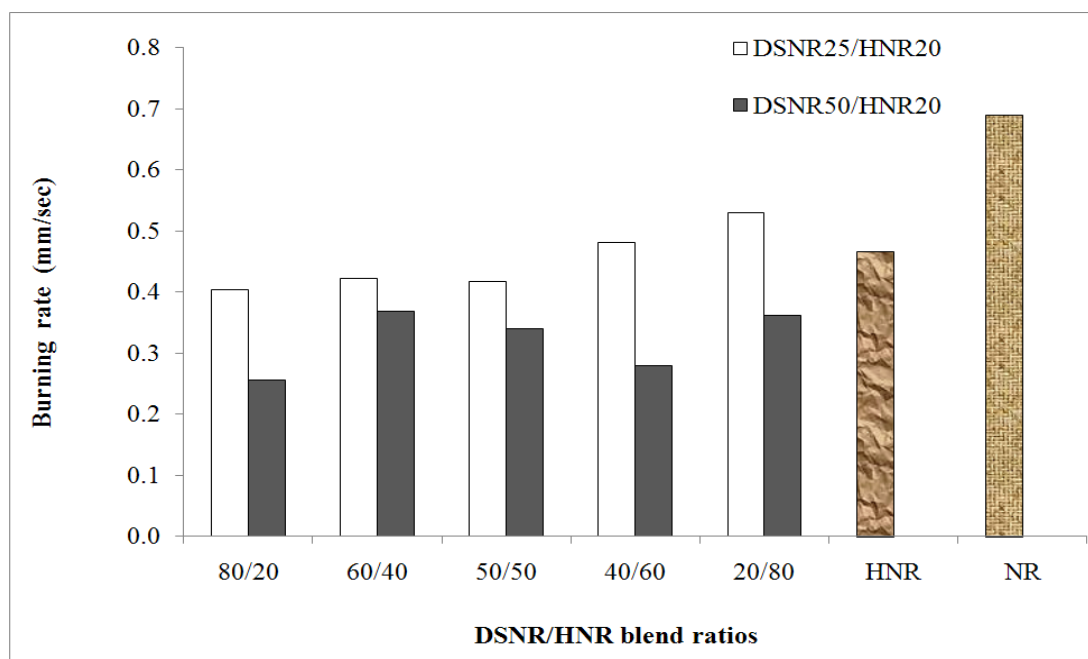
ยางเบลนด์ DSNR50/HNR20 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอัตราส่วนของยาง HNR20 เนื่องจากการลดพันธะคู่ในโมเลกุลยางธรรมชาติทำให้ยางเบลนด์มีความทนทานต่อความร้อนมากขึ้น

3.3.1.4 อัตราส่วนการเบลนด์ต่อสมบัติทนไฟ

ทำการทดสอบการทนไฟตามมาตรฐาน ISO 3582 รายงานผลเป็นอัตราการเผาไหม้ (Burning rate) ในหน่วยมิลลิเมตรต่อวินาทีได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.10 และรูปที่ 3.25

ตารางที่ 3.10 อัตราการเผาไหม้ของยางธรรมชาติ ยางเบลนด์ DSNR25/HNR20 และ DSNR50/HNR20 แปรอัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ

Sample	Burning rate (mm/sec)
NR	0.69
HNR20	0.47
DSNR25/HNR20	
80/20	0.40
60/40	0.42
50/50	0.42
40/60	0.48
20/80	0.53
DSNR50/HNR20	
80/20	0.26
60/40	0.37
50/50	0.34
40/60	0.28
20/80	0.36



รูปที่ 3.25 อัตราการเผาไหม้ของยางธรรมชาติ ยางเบลนด์ DSNR25/HNR20 และยางเบลนด์ DSNR50/HNR20 แปรอัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ

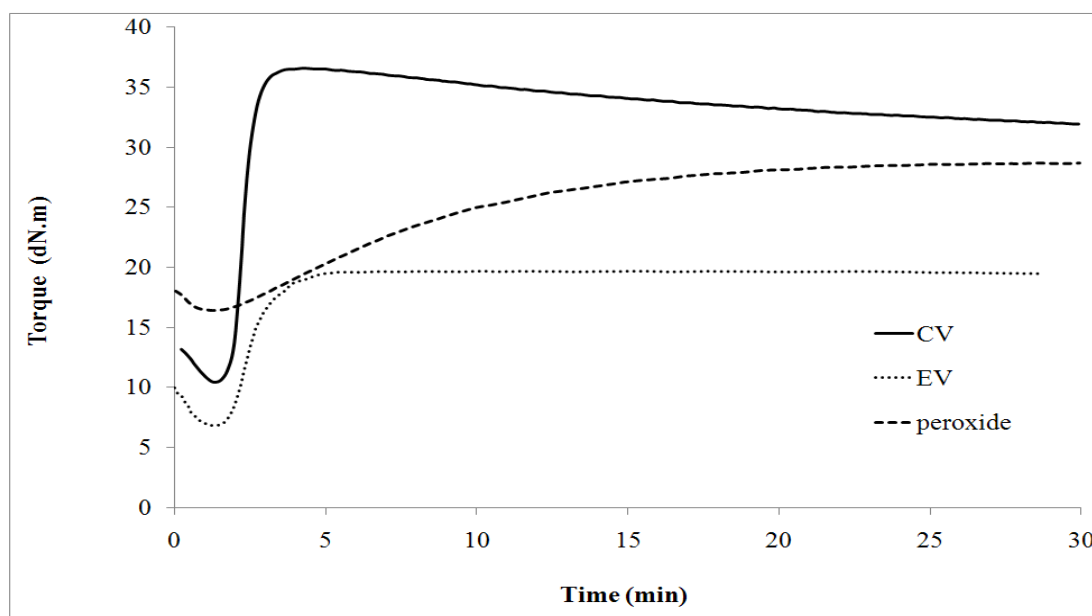
จากตารางที่ 3.10 และรูปที่ 3.25 พบว่าอัตราการเผาไหม้ของยางเบลนด์ DSNR25/HNR20 และ DSNR50/HNR20 ทุกอัตราส่วนมีค่าต่ำกว่ายางธรรมชาติ เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์พวกไฮโดรคาร์บอนหรือสารอินทรีย์ ซึ่งจะติดไฟได้ง่ายกว่า จึงทำให้ยางธรรมชาติมีอัตราการเผาไหม้สูง เมื่อพิจารณาจากเบลนด์ DSNR/HNR ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณยาง DSNR จะทำให้อัตราการเผาไหม้ลดลง เนื่องจากในโครงสร้างโมเลกุลของยางมีสารประกอบฟอสฟอรัสเป็นส่วนประกอบ ซึ่งสารดังกล่าวเหมาะที่จะใช้กับยางที่มีออกซิเจนอยู่ หน้าที่ของสารประกอบฟอสฟอรัสจะเป็นตัวคายน้ำออกมาในขณะการลุกไหม้ของยางที่มีออกซิเจนทำให้ผิวยางเกรียมเป็นฉนวนความร้อนทำให้ยางสลายตัวช้าลง และในขณะเดียวกันจะเกิดกรดฟอสฟอริกกลุ่มผิวของยางนั้นไว้ (พรพรรณ, 2528) ทำให้ยางเบลนด์ที่มีอัตราส่วนของยาง DSNR สูงขึ้นมีอัตราการเผาไหม้ลดลง นอกจากนี้ยังเห็นได้ว่ายางเบลนด์ DSNR50/HNR20 มีอัตราการเผาไหม้ที่ต่ำกว่ายางเบลนด์ DSNR25/HNR20 เนื่องจากในโมเลกุลของยาง DSNR50 มีเปอร์เซ็นต์ของสารประกอบฟอสฟอรัสที่สูงกว่ายาง DSNR25 จึงทำให้มีอัตราการเผาไหม้ที่ลดลง

3.3.2 ศึกษาอิทธิพลของระบบวัลคาไนซ์ต่อสมบัติของยางเบลนด์ (DSNR/HNR)

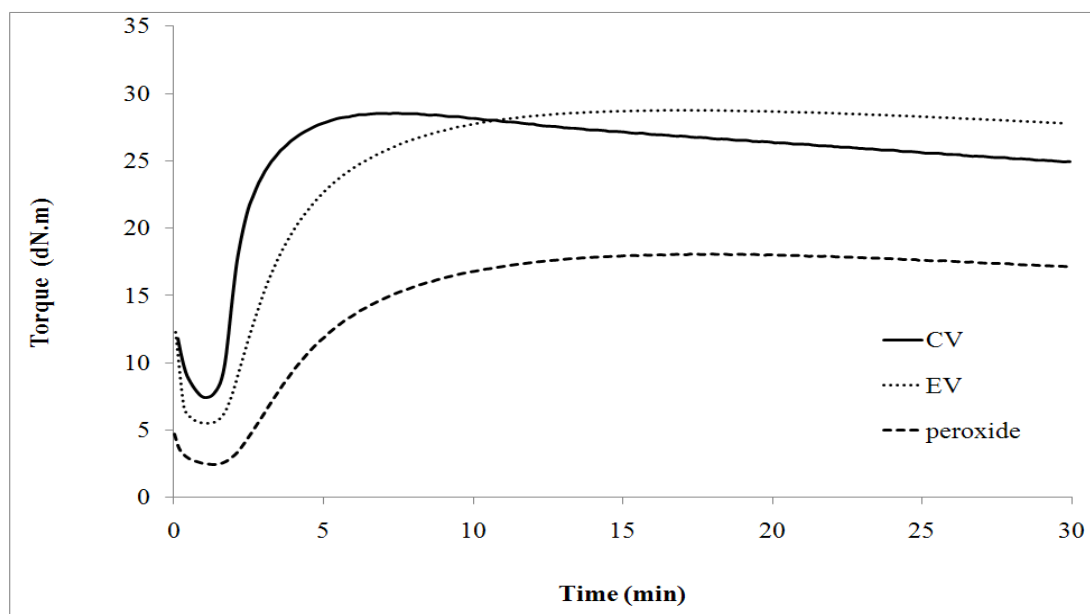
จากการทดสอบแปรอัตราส่วนตามผลที่ได้จากข้อที่ 3.3.1 พบว่าอัตราส่วนการเบลนด์ยาง DSNR/HNR = 40/60 มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด จึงได้เลือกสัดส่วนนี้มาแปรระบบการวัลคาไนซ์โดยเลือกใช้ระบบการวัลคาไนซ์ 3 ระบบ คือ 1) ระบบกำมะถันปกติ 2) ระบบอีวี และ 3) ระบบเปอร์ออกไซด์ ซึ่งสารเคมีที่ใช้ดังตารางที่ 2.10 จากนั้นนำยางคอมปาวด์ที่ได้ไปทำการทดสอบตามหัวข้อที่ 2.3.5-2.3.8

3.3.2.1 ผลของระบบวัลคาไนซ์ต่อลักษณะการวัลคาไนซ์

ผสมยางธรรมชาติที่ดัดแปลงด้วยไดบิวทิลฟอสเฟตจากน้ำยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีปริมาณอีพอกไซด์ 25 และ 50 เปอร์เซนต์โมล กับยางธรรมชาติไฮโดรจิเนตที่มีปริมาณไฮโดรจิเนชัน 20 เปอร์เซนต์โมล ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ แล้วนำไปทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ได้ผลดังรูปที่ 3.26 และ 3.27



รูปที่ 3.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดกับเวลาของยางเบลนด์ระหว่าง DSNR25/HNR20 = 40/60 แปรระบบการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 160 °C



รูปที่ 3.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดกับเวลาของยางเบลนด์ระหว่าง DSNR50/HNR20 = 40/60 แปรรูประบบการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 160 °C

จากรูปที่ 3.26 และ 3.27 พบว่าลักษณะการวัลคาไนซ์ระบบกัมมะถันปกติเป็นแบบรีเวอร์ชัน ส่วนลักษณะการวัลคาไนซ์ระบบอีวีและระบบเปอร์ออกไซด์เป็นแบบ plateau และจากรูปที่ 3.26 และ 3.27 สามารถนำมาหาค่าสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ระหว่างยางเบลนด์ DSNR25/HNR20 และ DSNR50/HNR20 ที่แปรรูปการวัลคาไนซ์ดังตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.11 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ DSNR25/HNR20 และ DSNR50/HNR20 แปรรูปการวัลคาไนซ์

Sample	M_H (dN.m)	M_L (dN.m)	$M_H - M_L$ (dN.m)	t_{c90} (min)	t_{s1} (min)	CRI (min^{-1})
DSNR25/HNR20 = 40/60						
CV	36.60	10.40	26.20	2.41	1.41	100.00
EV	19.70	6.80	12.90	4.27	2.02	44.44
peroxide	28.70	16.50	12.20	11.10	2.33	11.40
DSNR50/HNR20 = 40/60						
CV	28.50	7.40	21.10	3.43	1.27	46.30
EV	28.76	5.55	23.21	7.72	1.75	16.75
peroxide	18.07	2.47	15.60	9.38	2.19	13.91

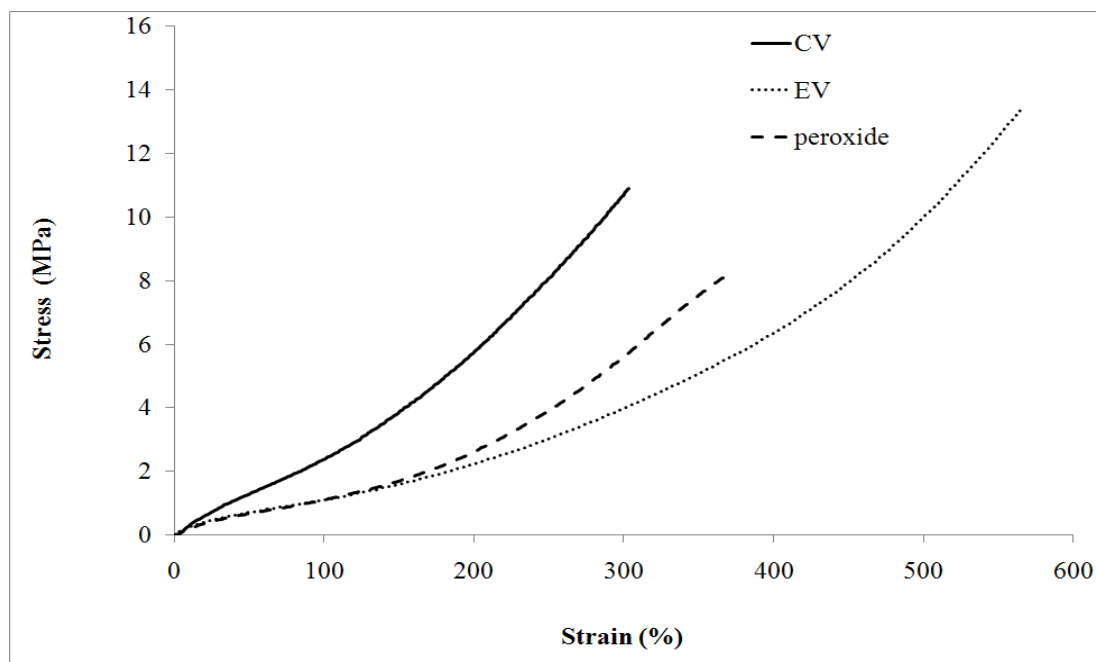
จากตารางที่ 3.11 เมื่อพิจารณาค่าความต่างของแรงบิดพบว่ายางเบลนด์ DSNR25/HNR20 ที่ระดับ 40/60 วัดคาไนซ์ด้วยระบบกัมมันตภาพรังสีมีค่าความต่างของแรงบิดสูงที่สุด รองลงมาคือการวัดคาไนซ์ด้วยระบบอีวีและระบบเปอร์ออกไซด์ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากยางเบลนด์ DSNR25/HNR20 มีส่วนที่ไม่อิ่มตัวในโมเลกุลของยาง HNR20 ซึ่งจะเกิดการเชื่อมโยงด้วยกัมมันตภาพรังสีได้มาก ส่วนยางเบลนด์ DSNR50/HNR20 ที่ระดับ 40/60 วัดคาไนซ์ด้วยระบบกัมมันตภาพรังสีและระบบอีวีมีค่าความต่างของแรงบิดอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน แต่มีค่าสูงกว่าระบบเปอร์ออกไซด์ ส่วนระบบเปอร์ออกไซด์ถึงแม้ว่าจะเหมาะสมกับยางที่มีปริมาณพันธะคู่ต่ำ แต่จะเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง (Side reactions) ควบคู่กับการเกิดพันธะเชื่อมโยงด้วย ทำให้ระดับการเกิดพันธะเชื่อมโยงลดลง (พรพรรณ, 2528) เมื่อพิจารณาระยะเวลาการวัดคาไนซ์พบว่ายางเบลนด์ DSNR25/HNR20 และยางเบลนด์ DSNR50/HNR20 ที่ระดับ 40/60 ที่วัดคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์จะมีระยะเวลาการวัดคาไนซ์นานกว่าการวัดคาไนซ์ด้วยระบบอีวีและระบบกัมมันตภาพรังสี ตามลำดับ เนื่องจากระบบเปอร์ออกไซด์ ต้องเกิดการสลายตัวของเปอร์ออกไซด์ถึง 97% จึงจะถึงระยะเวลาการวัดคาไนซ์ (Baker, 1988)

3.3.2.2 ระบบวัดคาไนซ์ต่อสมบัติเชิงกล

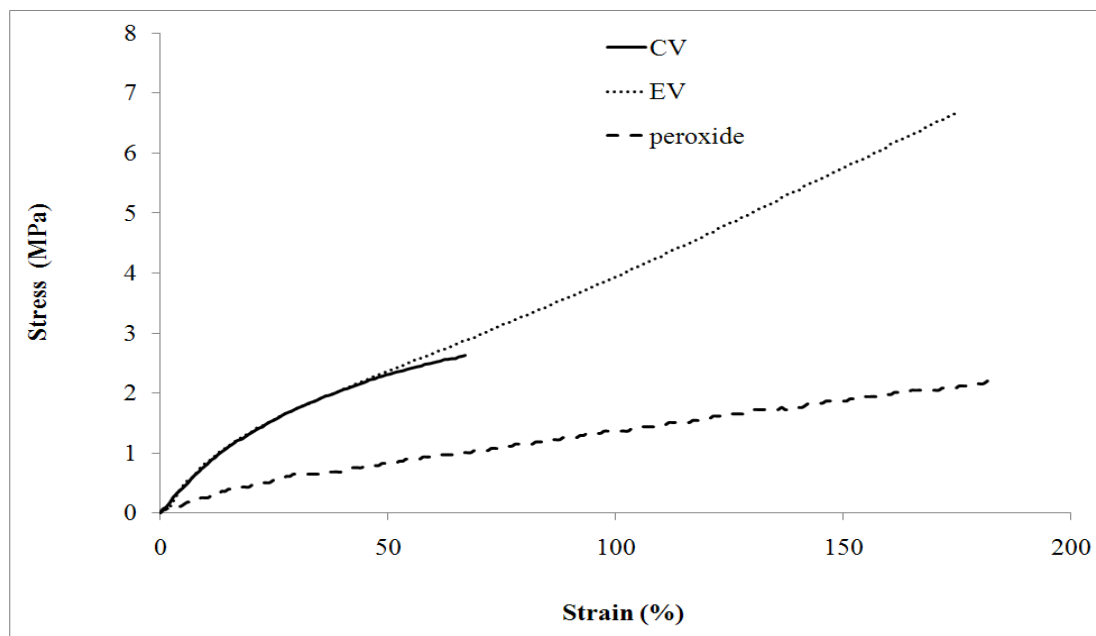
นำยางคอมปาวด์ที่เตรียมได้จากหัวข้อ 2.3.3.2 มาอัดเข้าขึ้นทดสอบด้วยเครื่องอัดเข้าไฮดรอลิกที่อุณหภูมิ 160 °C ตามระยะเวลาการวัดคาไนซ์ของยางคอมปาวด์แต่ละสูตร ตั้งแผ่นยางที่ได้ไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 24 hr ซึ่งการทดสอบจะทดสอบทั้งก่อนการบ่มและหลังการบ่ม โดยบ่มด้วยอากาศร้อนอุณหภูมิ 100 °C เป็นระยะเวลา 22 hr แล้วทำการทดสอบสมบัติเชิงกลตามหัวข้อที่ 2.3.6

3.3.2.2.1 สมบัติเชิงกลก่อนการบ่ม

ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนด์ DSNR25/HNR20 = 40/60 และยางเบลนด์ DSNR50/HNR20 = 40/60 โดยแปรรูป 3 ระบบ คือ ระบบกัมมันตภาพรังสี ระบบอีวี และระบบเปอร์ออกไซด์ ได้รับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด แสดงดังรูปที่ 3.28 และ 3.29

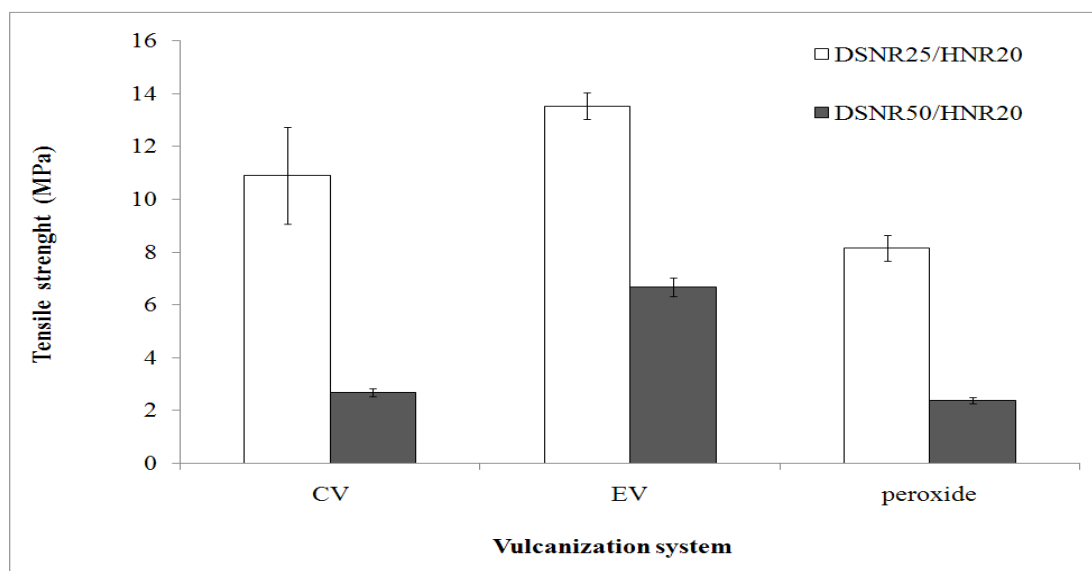


รูปที่ 3.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางเบลนด์ DSNR25/HNR20 = 40/60 แปรรูประบบการวัลคาไนซ์

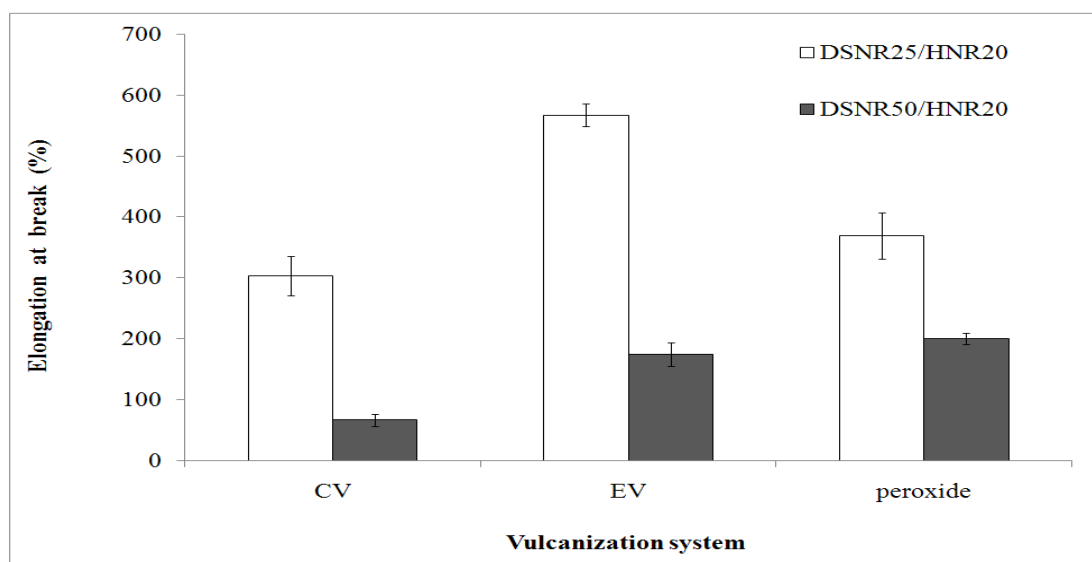


รูปที่ 3.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางเบลนด์ DSNR50/HNR20 = 40/60 แปรรูประบบการวัลคาไนซ์

จากรูปที่ 3.28 และ 3.29 พบว่าค่ามอดุลัสที่ระยะยืดน้อยๆ ของยางเบลนด์ DSNR25/HNR20 ต่ำกว่ายางเบลนด์ DSNR50/HNR20 เนื่องจากยางเบลนด์ DSNR25/HNR20 มีหมู่เกาะขนาดใหญ่ (Bulky groups) ต่ำกว่า และจากความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด สามารถคำนวณหาความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดได้ดังรูปที่ 3.30 และ 3.31



รูปที่ 3.30 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนด์ DSNR/HNR แปรระบบการวัลคาไนซ์



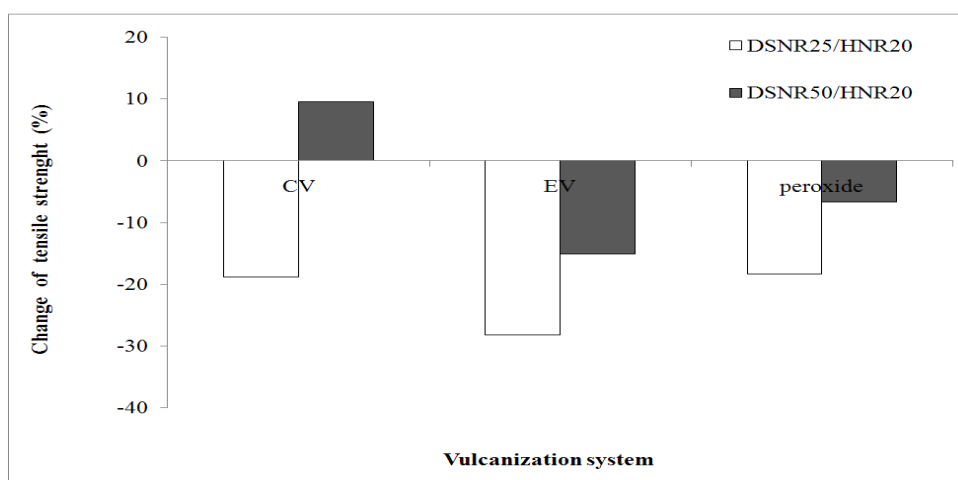
รูปที่ 3.31 ค่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ DSNR/HNR แปรระบบการวัลคาไนซ์

จากรูปที่ 3.30 และ 3.31 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ DSNR25/HNR20 ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบอีวีสูงกว่าการวัลคาไนซ์ด้วยระบบอื่นๆ เนื่องมาจากใน

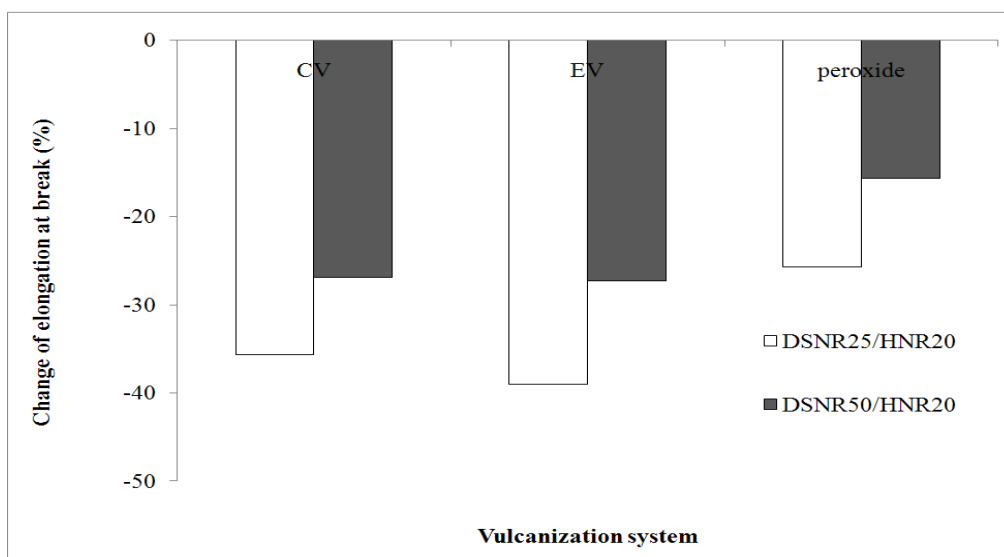
โมเลกุลของยางที่ผ่านการตัดแปลงโมเลกุลจะมีปริมาณพันธะคู่ที่น้อยลง เมื่อวัลคาไนซ์ด้วยระบบที่มีกำมะถันจะเกิดพันธะการเชื่อมโยงตรงพันธะคู่ เมื่อวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันปกติจะมีกำมะถันเหลือในระบบมาก ซึ่งกำมะถันที่เหลือนี้อาจจะไปขัดขวางการเกิดพันธะการเชื่อมโยงได้ ทำให้ความแข็งแรงของยางต่ำลง แต่เมื่อวัลคาไนซ์ด้วยระบบอีวีที่มีกำมะถันน้อย กำมะถันจะเกิดการเชื่อมโยงได้หมด ยางจึงมีความแข็งแรงสูงากว่านั่นเอง แต่เมื่อวัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์จะมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ต่ำ เนื่องจากการวัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์จะมีพันธะการเชื่อมโยงแบบคาร์บอน-คาร์บอน ซึ่งเป็นพันธะที่มีความแข็งแรงและมีความยาวของพันธะสั้น ทำให้โมเลกุลของยางยับตัวได้ยาก ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงต่ำ เมื่อพิจารณาจากเบลนด์ DSNR50/HNR20 พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบอีวีสูงกว่าการวัลคาไนซ์ด้วยระบบอื่นๆ ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น ส่วนค่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ DSNR50/HNR20 พบว่าการวัลคาไนซ์ด้วยระบบอีวีและระบบเปอร์ออกไซด์ให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน

3.3.2.2.2 สมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่ง

ทดสอบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดของยางเบลนด์ DSNR/HNR ที่แปรระบบการวัลคาไนซ์ 3 ระบบ ได้ผลแสดงดังรูปที่ 3.32 และ 3.33



รูปที่ 3.32 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานต่อแรงดึงหลังจากการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 100°C 22 hr ของยางเบลนด์ DSNR/HNR ที่แปรระบบการวัลคาไนซ์

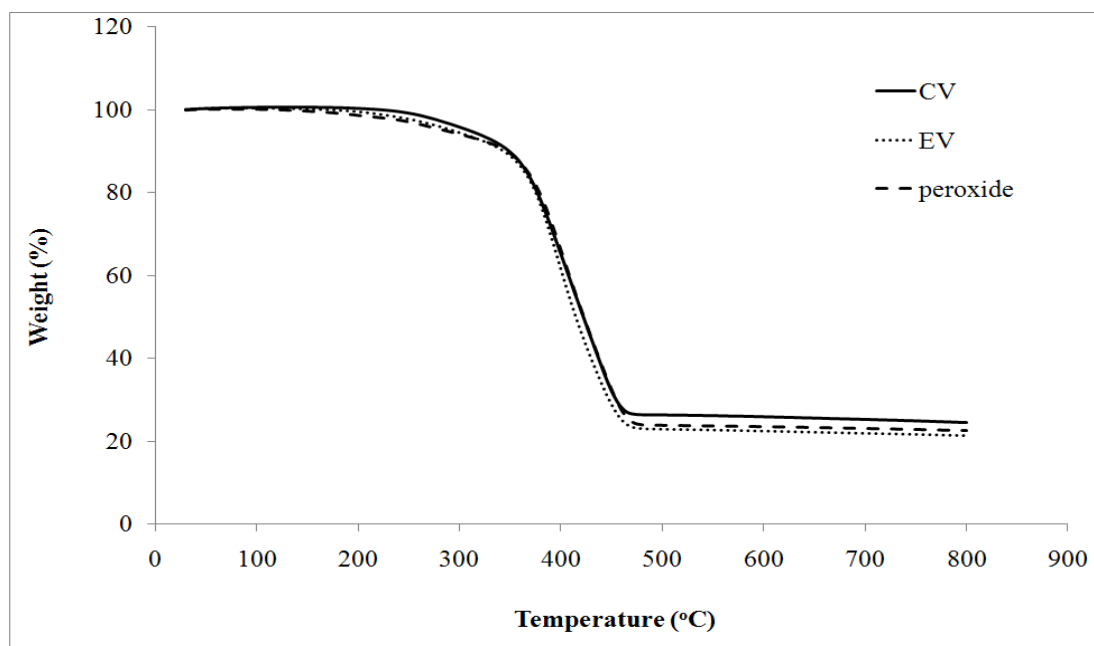


รูปที่ 3.33 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการยืดจนขาดหลังจากการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 100°C 22 hr ของยางเบลนด์ DSNR/HNR ที่แปรระบบการวัลคาไนซ์

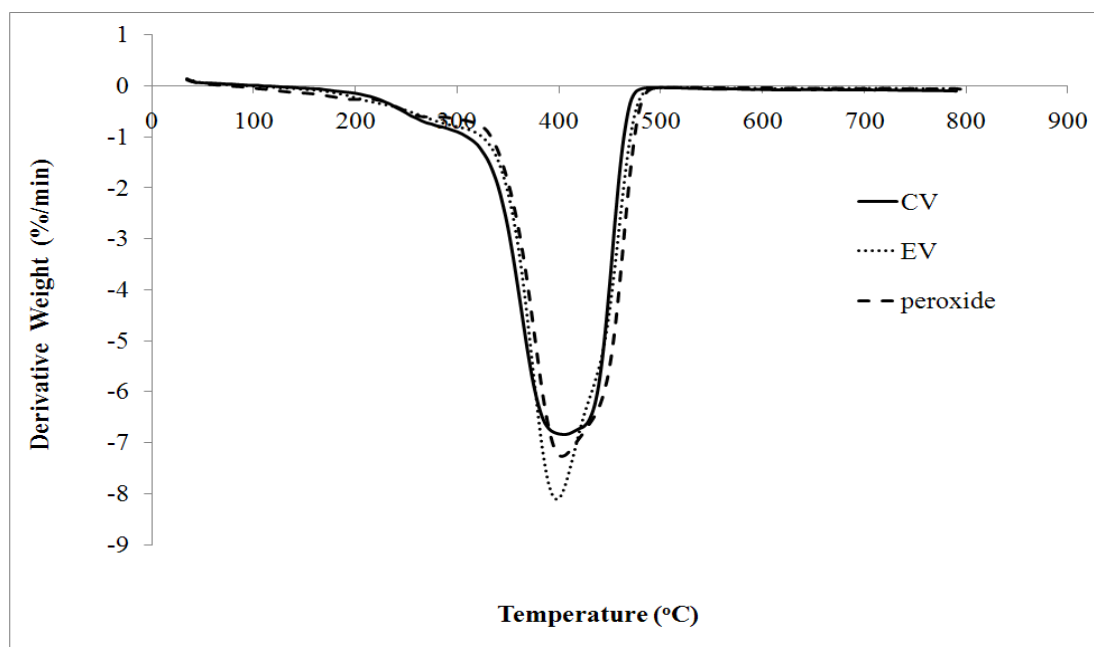
จากรูปที่ 3.32 และ 3.33 พบว่าเปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานต่อแรงดึงและเปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ DSNR25/HNR20 และ DSNR50/HNR20 ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงต่ำกว่าระบบอีวีและระบบกำมะถันปกติ เนื่องจากยางที่คงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์เกิดการเชื่อมโยงผ่านพันธะคาร์บอน-คาร์บอน ที่มีความแข็งแรงของพันธะสูงกว่ายางที่คงรูปด้วยกำมะถันที่เกิดการเชื่อมโยงผ่านพันธะคาร์บอน-ซัลเฟอร์ หรือซัลเฟอร์-ซัลเฟอร์ จึงทำให้ทนทานต่อการบ่มแรง

3.3.2.3 ระบบการวัลคาไนซ์ต่อสมบัติเชิงความร้อน

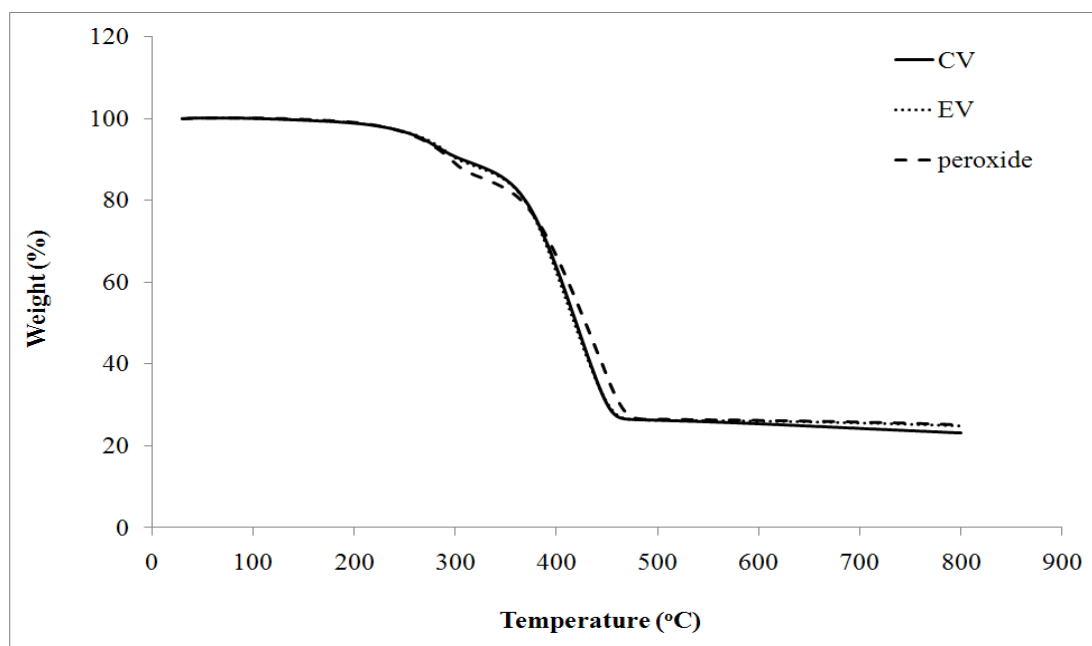
ทดสอบสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค TGA รุ่น STA 6000 ขึ้นตัวอย่างที่มีน้ำหนักอยู่ในช่วง 7 ถึง 12 มิลลิกรัม โดยทดสอบในสถานะไนโตรเจนอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 20 ml/min ทดสอบที่อุณหภูมิในช่วง $30-800^{\circ}\text{C}$ อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ แล้วทำการทดสอบสมบัติเชิงกลตามหัวข้อที่ 2.3.7 ได้ผลดังรูปที่ 3.34 - 3.37



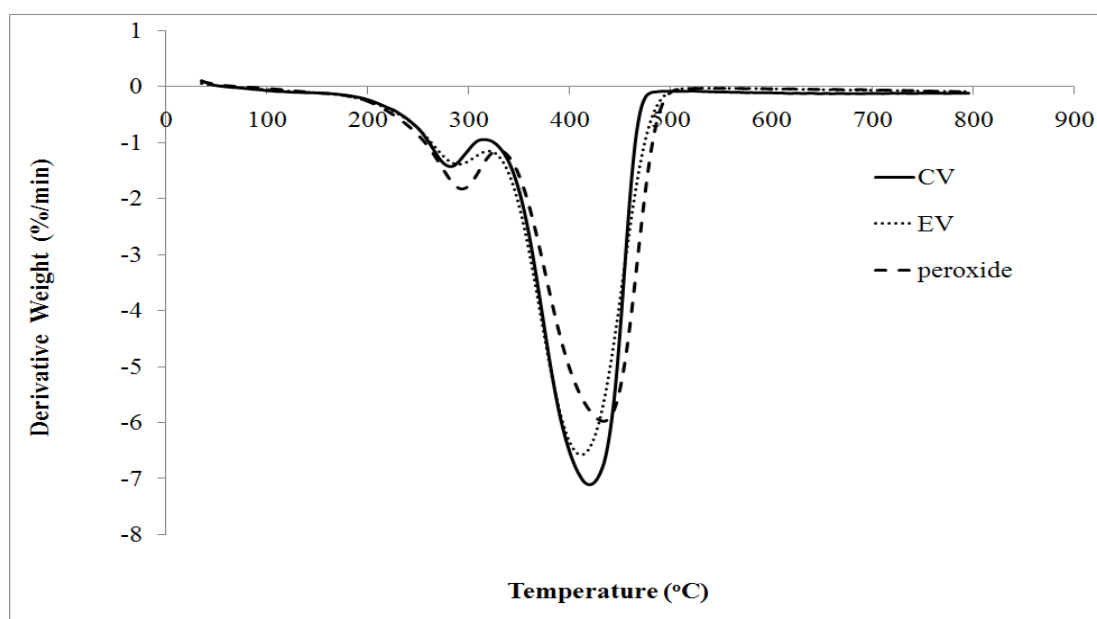
รูปที่ 3.34 เทอร์โมแกรม TGA ของยางเบลนด์ DSNR25/HNR20 = 40/60 ที่แปรระบบการวัลคาไนซ์



รูปที่ 3.35 เทอร์โมแกรม DTG ของยางเบลนด์ DSNR25/HNR20 = 40/60 ที่แปรระบบการวัลคาไนซ์



รูปที่ 3.36 เทอร์โมแกรม TGA ของยางเบลนด์ DSNR50/HNR20 = 40/60 ที่แปรระบบการวัลคาไนซ์



รูปที่ 3.37 เทอร์โมแกรม DTG ของยางเบลนด์ DSNR50/HNR20 = 40/60 ที่แปรระบบการวัลคาไนซ์

ตารางที่ 3.12 อุณหภูมิการสลายตัวของยางเบลนด์ DSNR25/HNR20 = 40/60 และ DSNR50/HNR20 = 40/60 แปรระบบการวัลคาไนซ์

Sample	Decomposition temperature, Td (°C)	
	1 st step	2 nd step
DSNR25/HNR20 = 40/60		

CV	-	410.99
EV	-	392.69
peroxide	-	399.30
DSNR50/HNR20 = 40/60		
CV	274.85	413.66
EV	280.87	404.95
peroxide	284.43	427.07

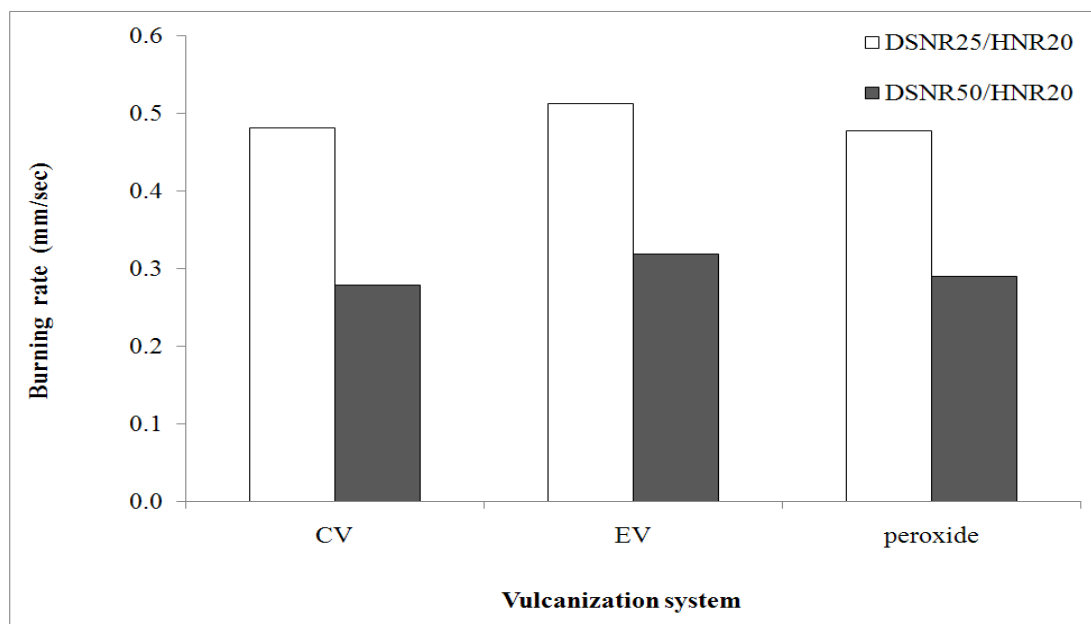
จากรูปที่ 3.34-3.37 และตารางที่ 3.12 พบว่ายางเบลนด์ DSNR25/HNR20 = 40/60 ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันปกติจะมีอุณหภูมิการสลายตัวที่สูงกว่าการวัลคาไนซ์ด้วยระบบอื่นๆ เมื่อพิจารณาจากเบลนด์ DSNR50/HNR20 = 40/60 พบว่าการวัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์มีอุณหภูมิการสลายตัวที่สูงกว่าระบบอื่นๆ เนื่องจากระบบเปอร์ออกไซด์มีพันธะเชื่อมโยงเป็นแบบคาร์บอน-คาร์บอน ซึ่งเสถียรต่อความร้อนดีกว่าระบบที่ใช้กำมะถัน และสังเกตได้ว่ายางเบลนด์ DSNR50/HNR20 มีอุณหภูมิการสลายตัวที่สูงกว่ายางเบลนด์ DSNR25/HNR20 เนื่องจากใน โมเลกุลของยาง DSNR50 มีปริมาณพันธะคู่ต่ำกว่ายาง DSNR25 ส่งผลให้มีอุณหภูมิการสลายตัวที่สูง

3.3.2.4 อัตราส่วนการเบลนด์ต่อสมบัติทนไฟ

ทำการทดสอบการทนไฟตามมาตรฐาน ISO 3582 รายงานผลเป็นอัตราการเผาไหม้ (burning rate) ในหน่วยมิลลิเมตรต่อวินาทีได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.13 และรูปที่ 3.38

ตารางที่ 3.13 อัตราการเผาไหม้ของยางเบลนด์ DSNR25/HNR20 = 40/60 และยางเบลนด์ DSNR50/HNR20 = 40/60 แปรรูประบบการวัลคาไนซ์

Sample	Burning rate (mm/sec)
DSNR25/HNR20 = 40/60	
CV	0.48
EV	0.51
peroxide	0.48
DSNR50/HNR20 = 40/60	
CV	0.28
EV	0.32
peroxide	0.29



รูปที่ 3.38 อัตราการเผาไหม้ของยางเบลนด์ DSNR25/HNR20 = 40/60 และยางเบลนด์ DSNR50/HNR20 = 40/60 แปรรูประบบการวัลคาไนซ์

จากตารางที่ 3.13 และรูปที่ 3.38 พบว่ายางเบลนด์ DSNR25/HNR20 และยางเบลนด์ DSNR50/HNR20 ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันปกติ ระบบอีวีและระบบเปอร์ออกไซด์มีอัตราการเผาไหม้ที่ใกล้เคียงกัน

ส่วนที่ 2 ศึกษาอิทธิพลการเบลนด์ยาง DSNR กับยาง HNR แบบไม่ใช้สารตัวเร่ง

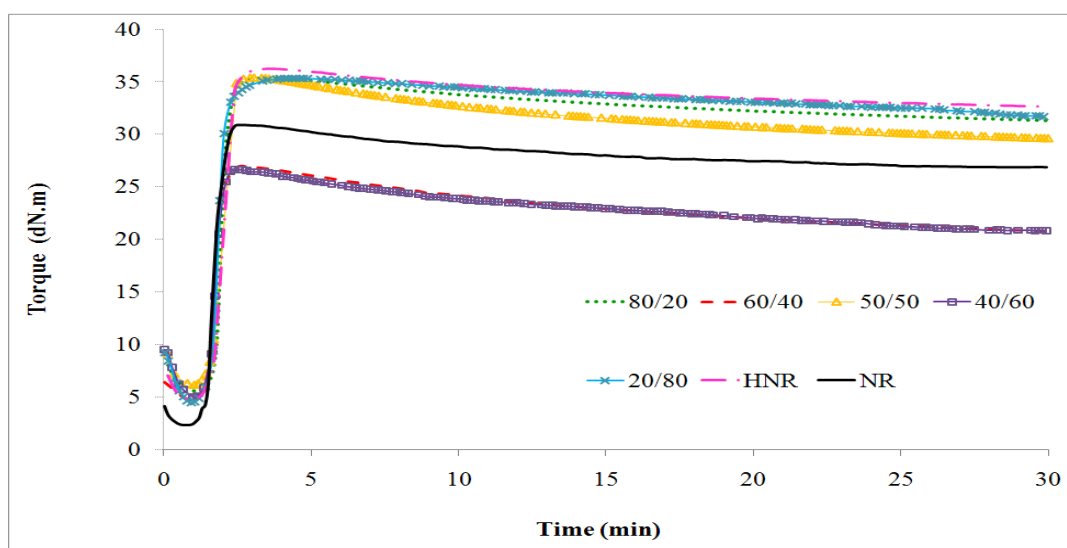
3.3.3 ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนยางต่อสมบัติยางเบลนด์ (DSNR/HNR)

ทำการบดผสมยางธรรมชาติดัดแปลงโมเลกุลด้วยไดบิวทิลฟอสเฟตกับยางธรรมชาติไฮโดรจิเนตตามสูตรยางคอมปาวด์แสดงดังตารางที่ 2.8 ด้วยเครื่องผสมยางสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิห้อง แล้วเปรียบเทียบอัตราส่วนยางเบลนด์ DSNR/HNR คือ 100/0, 80/20, 60/40, 50/50, 40/60, 20/80 และ 0/100 ศึกษาการทดสอบตามหัวข้อที่ 2.3.5 แต่ในการบดผสมยางเบลนด์ DSNR/HNR = 100/0 ไม่สามารถทำให้เป็นแผ่นได้เมื่อผ่านเครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง จึงไม่มีผลการทดลองที่อัตราส่วนนี้

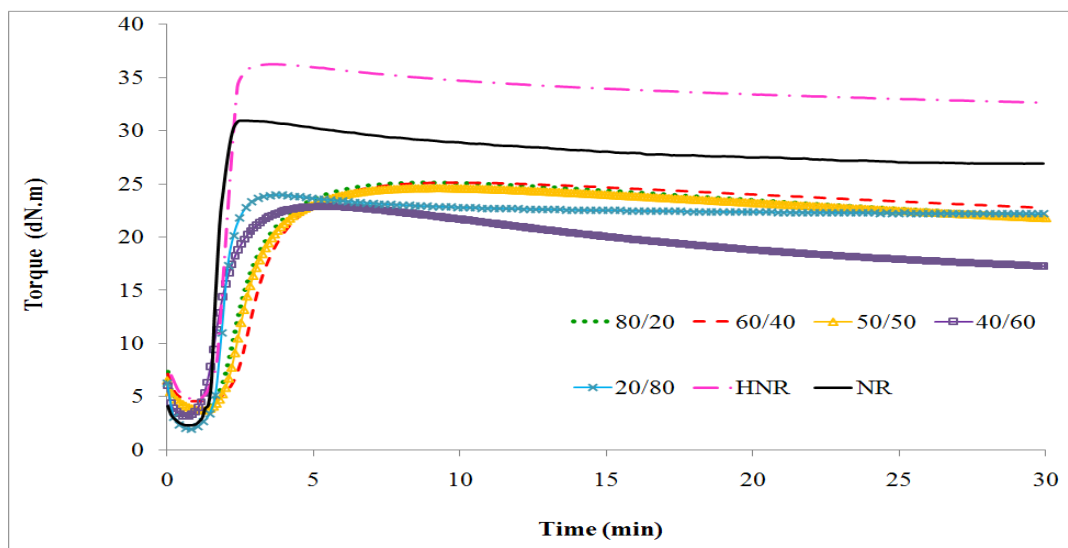
3.3.3.1 อัตราส่วนการเบลนด์ต่อลักษณะการวัลคาไนซ์

DSNR25/HNR15 และ DSNR50/HNR15

ผสมยางธรรมชาติที่ดัดแปลงด้วยไดบิวทิลฟอสเฟตจากน้ำยางธรรมชาติอิพอกไซค์ที่มีปริมาณอิพอกไซค์ 25 และ 50 เปอร์เซนต์โมล กับยางธรรมชาติไฮโดรจิเนตที่มีปริมาณไฮโดรจิเนชัน 15 เปอร์เซนต์โมล ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 3.39 และ 3.40



รูปที่ 3.39 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดกับเวลาของยางเบลนด์ระหว่าง DSNR25/HNR15 แปรอัตราส่วนการเบลนด์ ที่อุณหภูมิ 160 °C



รูปที่ 3.40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดกับเวลาของยางเบลนด์ระหว่าง DSNR50/HNR15 แปรอัตราส่วนการเบลนด์ ที่อุณหภูมิ 160 °C

จากรูปที่ 3.39 และ 3.40 สามารถนำมาหาค่าสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ระหว่างยางเบลนด์ DSNR25/HNR15 และ DSNR50/HNR15 ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ ดังตารางที่ 3.14

ตารางที่ 3.14 ลักษณะการวัดคาบไวนซ์ของยางธรรมชาติ ยางเบลนด์ DSNR25/HNR15 และยางเบลนด์ DSNR50/HNR15 ทดสอบที่อุณหภูมิ 160 °C

Sample	M _H (dN.m)	M _L (dN.m)	M _H -M _L (dN.m)	t ₉₀ (min)	t ₁ (min)	CRI (min ⁻¹)
NR	30.90	2.30	28.60	2.05	1.19	116.28
HNR15	36.25	4.78	31.47	2.33	1.43	111.11
DSNR25/HNR15						
80/20	35.40	5.55	29.85	2.27	1.62	153.85
60/40	27.02	4.71	22.31	2.06	1.34	138.89
50/50	35.38	6.12	29.26	2.31	1.42	112.36
40/60	26.65	5.00	21.65	2.06	1.40	151.52
20/80	35.33	4.46	30.87	2.21	1.30	109.89
DSNR50/HNR15						
80/20	25.14	3.75	21.39	4.60	1.66	34.01
60/40	25.14	4.54	20.60	5.15	2.05	32.26
50/50	24.64	3.70	20.94	4.62	1.79	35.34
40/60	22.87	3.14	19.73	2.97	1.12	54.05
20/80	23.95	1.94	22.01	2.50	1.41	91.74

จากตารางที่ 3.14 พบว่ายางธรรมชาติมีระยะเวลาในการวัดคาบไวนซ์สั้นกว่ายางเบลนด์ เนื่องจากพันธะที่ไม่อิ่มตัวในสายโซ่หลักของโมเลกุลของยางธรรมชาติเกิดการเชื่อมโยงกันในปริมาณที่มากส่งผลให้ระยะเวลาการวัดคาบไวนซ์สั้น

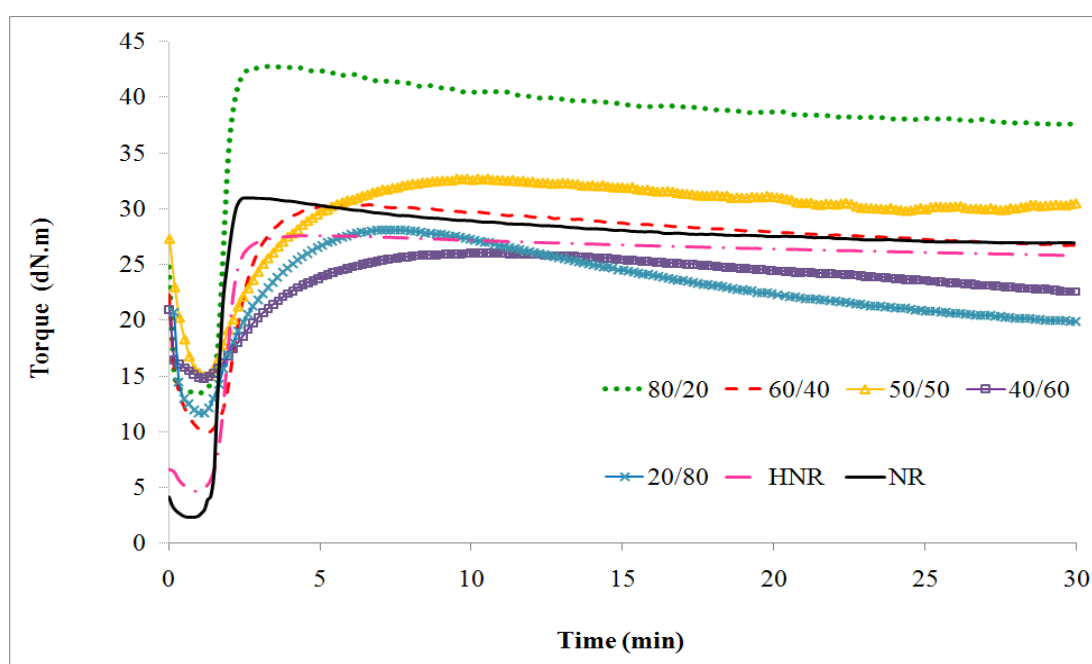
เมื่อพิจารณายางเบลนด์ DSNR25/HNR15 ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าค่าความแตกต่างของแรงบิดไม่เป็นแนวโน้ม ทั้งนี้อาจจะเนื่องมาจากอิทธิพลของความไม่เข้ากันของเฟสของทั้งสองชนิด ระยะเวลาการวัดคาบไวนซ์ของยางเบลนด์ DSNR25/HNR15 มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน และดัชนีอัตราการวัดคาบไวนซ์มีแนวโน้มลดลงเมื่อลดปริมาณของยาง DSNR25 เนื่องจากพันธะที่ไม่อิ่มตัวในโมเลกุลของยาง DSNR25 ซึ่งเป็นจุดที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงลดลง

เมื่อพิจารณายางเบลนด์ DSNR50/HNR15 ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าค่าความแตกต่างของแรงบิดมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ระยะเวลาในการวัดคาบไวนซ์ของยางเบลนด์ DSNR50/HNR15 มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มอัตราส่วนของยาง HNR15 เนื่องจากยาง HNR15 มีส่วนที่เป็นพันธะที่ไม่อิ่มตัวสูงซึ่งเป็นส่วนที่เกิดการเชื่อมโยงได้ด้วยกำมะถัน เมื่ออัตราส่วนของยาง HNR15 เพิ่มขึ้นปริมาณการเชื่อมโยงจึงเพิ่มขึ้นส่งผลให้วัดคาบไวนซ์เร็วขึ้น และดัชนีอัตราการวัดคาบไวนซ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณยาง HNR15 เนื่องจาก

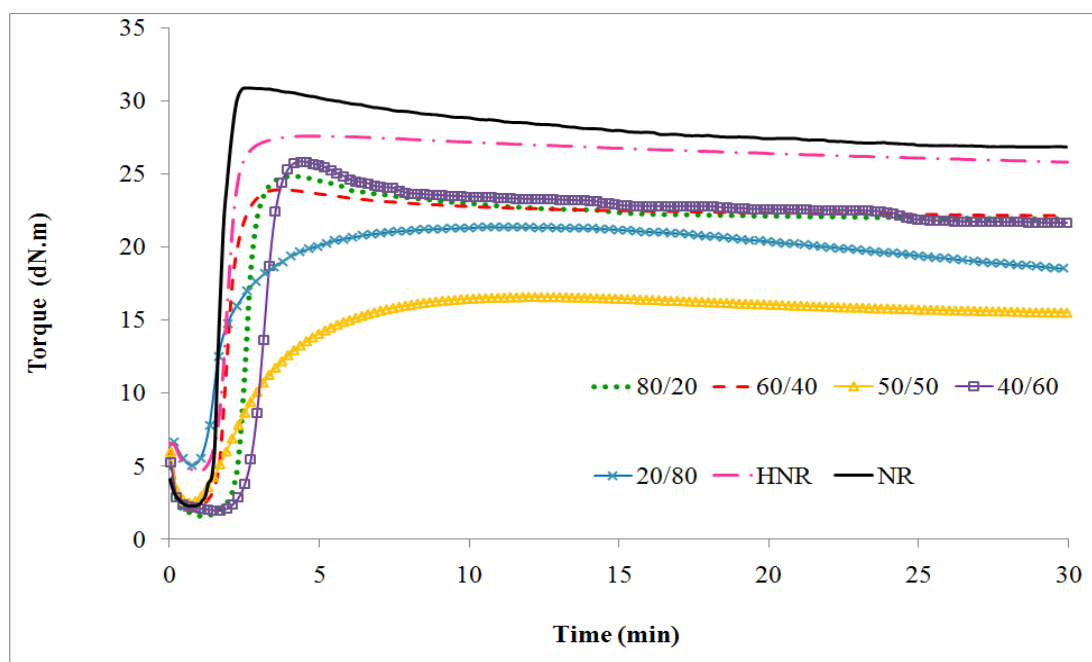
ด้วยตัวยาง DSNR50 มีความแข็งแรงเปราะ เมื่อเพิ่มปริมาณยาง HNR15 ซึ่งมีความเป็นยางสูงกว่าทำให้อัตรา
การวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น

DSNR25/HNR40 และ DSNR50/HNR40

ผสมยางธรรมชาติที่ตัดแปลงด้วยไดบิวทิลฟอสเฟตจากน้ำยางธรรมชาติอพอกไซค์ที่มีปริมาณ
อพอกไซค์ 25 และ 50 เปอร์เซนต์โมล กับยางธรรมชาติไฮโดรจิเนตที่มีปริมาณไฮโดรจิเนชัน 40 เปอร์เซนต์
โมล ที่แปรอัตราส่วนการเบลนค์ แล้วนำไปทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ได้ผลดังรูปที่ 3.41 และ 3.42



รูปที่ 3.41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดกับเวลาของยางเบลนค์ระหว่าง DSNR25/HNR40 แปรอัตราส่วน
การเบลนค์ ที่อุณหภูมิ 160 °C



รูปที่ 3.42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดกับเวลาของยางเบลนด์ระหว่าง DSNR50/HNR40 แปรอัตราส่วนการเบลนด์ ที่อุณหภูมิ 160 °C

จากผลการทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ในรูปที่ 3.41 และ 3.42 สามารถสรุปค่าแสดงลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ DSNR25/HNR40 และ DSNR50/HNR40 ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ดังตารางที่ 3.15

ตารางที่ 3.15 ลักษณะการวัดคาบไชนซ์ของยางธรรมชาติ ยางเบลนด์ DSNR25/HNR40 และยางเบลนด์ DSNR50/HNR40 ทดสอบที่อุณหภูมิ 160 °C

Sample	M _H (dN.m)	M _L (dN.m)	M _H -M _L (dN.m)	t ₉₀ (min)	t ₁ (min)	CRI (min ⁻¹)
NR	30.90	2.30	28.60	2.05	1.19	116.28
HNR40	27.62	4.63	22.99	2.23	1.22	98.87
DSNR25/HNR40						
80/20	42.82	13.36	29.46	2.13	1.22	119.25
60/40	30.40	9.98	20.42	3.34	1.39	52.35
50/50	32.70	15.02	17.68	4.12	1.33	21.54
40/60	26.02	14.79	11.23	4.15	1.40	21.84
20/80	28.12	11.65	16.47	4.58	1.25	28.95
DSNR50/HNR40						
80/20	24.85	1.60	23.25	3.01	2.04	103.09
60/40	23.95	1.94	22.01	2.50	1.41	91.74
50/50	16.61	2.52	14.09	6.22	1.25	20.12
40/60	25.86	1.99	23.87	3.61	2.41	83.33
20/80	21.40	5.08	16.32	4.37	1.15	31.06

จากตารางที่ 3.15 พบว่ายางธรรมชาติมีระยะเวลาในการวัดคาบไชนซ์จะสั้นกว่ายางเบลนด์ เนื่องจากพันธะที่ไม่อิ่มตัวในสายโซ่หลักของโมเลกุลของยางธรรมชาติเกิดการเชื่อมโยงกันในปริมาณที่มากส่งผลให้ระยะเวลาการวัดคาบไชนซ์สั้น

เมื่อพิจารณายางเบลนด์ DSNR25/HNR40 และยางเบลนด์ DSNR50/HNR40 พบว่าค่าความแตกต่างของแรงบิดมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มปริมาณของยาง HNR40 เนื่องจากยางธรรมชาติที่ดัดแปลงโมเลกุลแล้วจะส่งผลให้ความเป็นยางและความเป็นระเบียบของสายโซ่ลดลง ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงจึงลดลงด้วย สอดคล้องกับดัชนีอัตราการวัดคาบไชนซ์ ระยะเวลาการวัดคาบไชนซ์ของยางเบลนด์ DSNR25/HNR40 และยางเบลนด์ DSNR50/HNR40 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอัตราส่วนของยาง HNR40 เนื่องจากในโครงสร้างโมเลกุลของยางเบลนด์มีพันธะคู่ที่ลดลงทำให้ต้องใช้เวลาในการวัดคาบไชนซ์ที่นานขึ้น

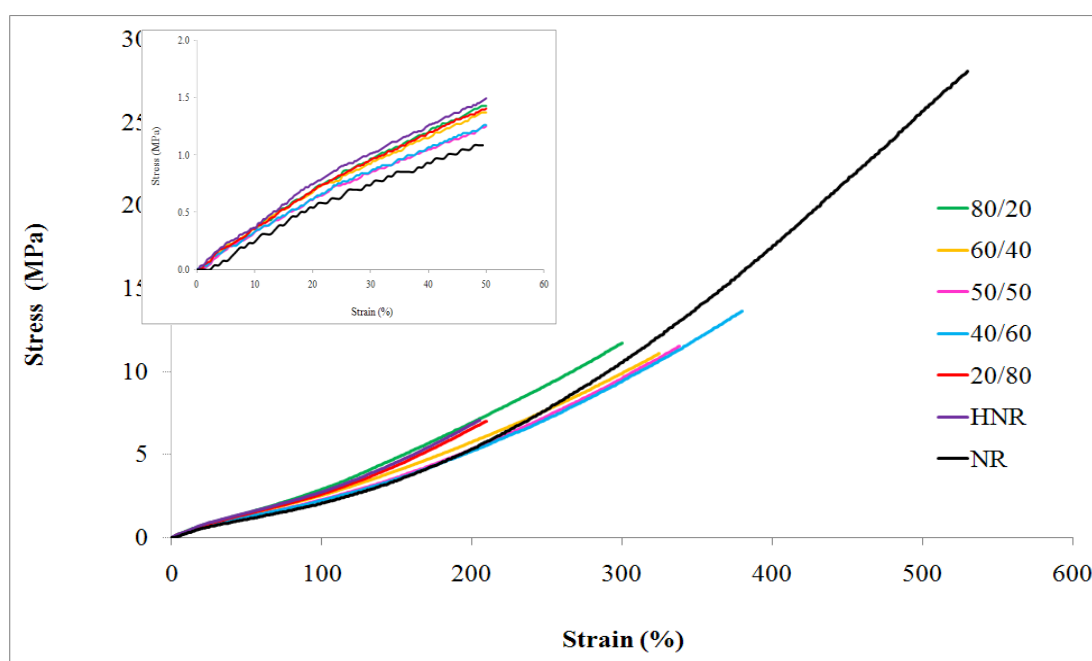
3.3.3.2 อัตราส่วนการเบลนด์ต่อสมบัติเชิงกล

นำยางคอมปาวด์ที่เตรียมได้จากหัวข้อ 2.3.3.1 มาอัดเข้าขึ้นทดสอบด้วยเครื่องอัดเข้าไฮดรอลิกที่อุณหภูมิ 160 °C ตามระยะเวลาการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์แต่ละสูตร ตั้งแผ่นยางที่ได้ไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 24 hr ซึ่งการทดสอบจะทดสอบทั้งก่อนการบ่มแรงและหลังการบ่มแรง โดยบ่มแรงด้วยอากาศร้อนอุณหภูมิ 100 °C เป็นระยะเวลา 22 hr แล้วทำการทดสอบสมบัติเชิงกลตามหัวข้อที่ 2.3.6

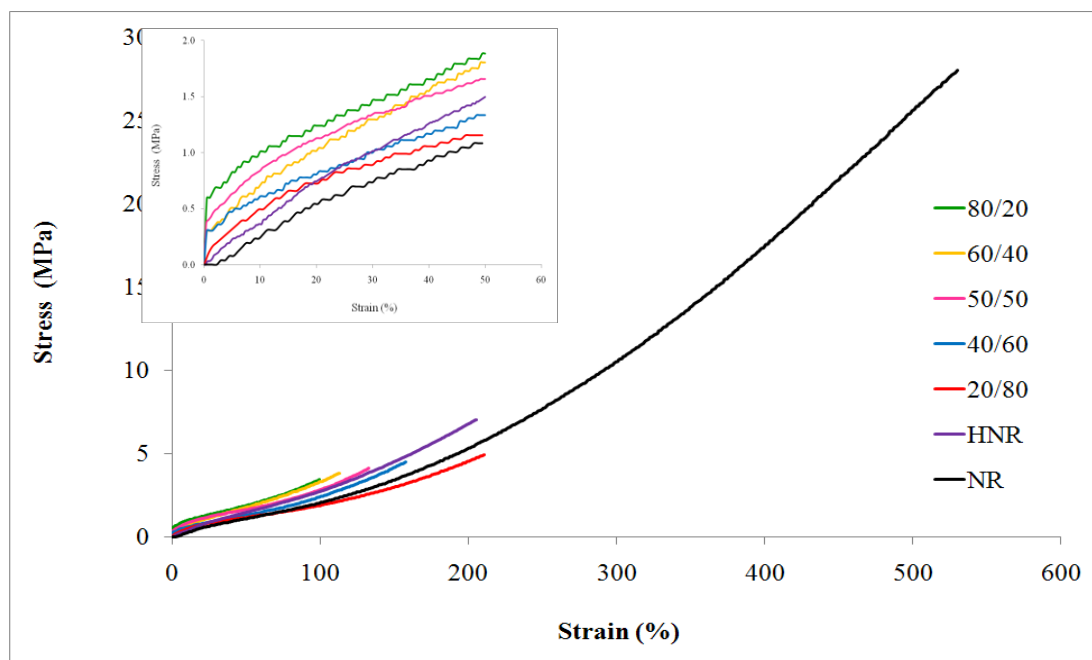
3.3.3.2.1 สมบัติเชิงกลก่อนการบ่มแรง

DSNR25/HNR15 และ DSNR50/HNR15

ผสมยางธรรมชาติที่ตัดแปลงด้วยไดบิวทิลฟอสเฟตจากน้ำยางธรรมชาติอพอกไซค์ที่มีปริมาณอพอกไซค์ 25 และ 50 เปอร์เซนต์โมล กับยางธรรมชาติไฮโดรจีเนตที่มีปริมาณไฮโดรจีเนชัน 15 เปอร์เซนต์โมล ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ แล้วทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงได้ผลดังรูปที่ 3.43 และ 3.44



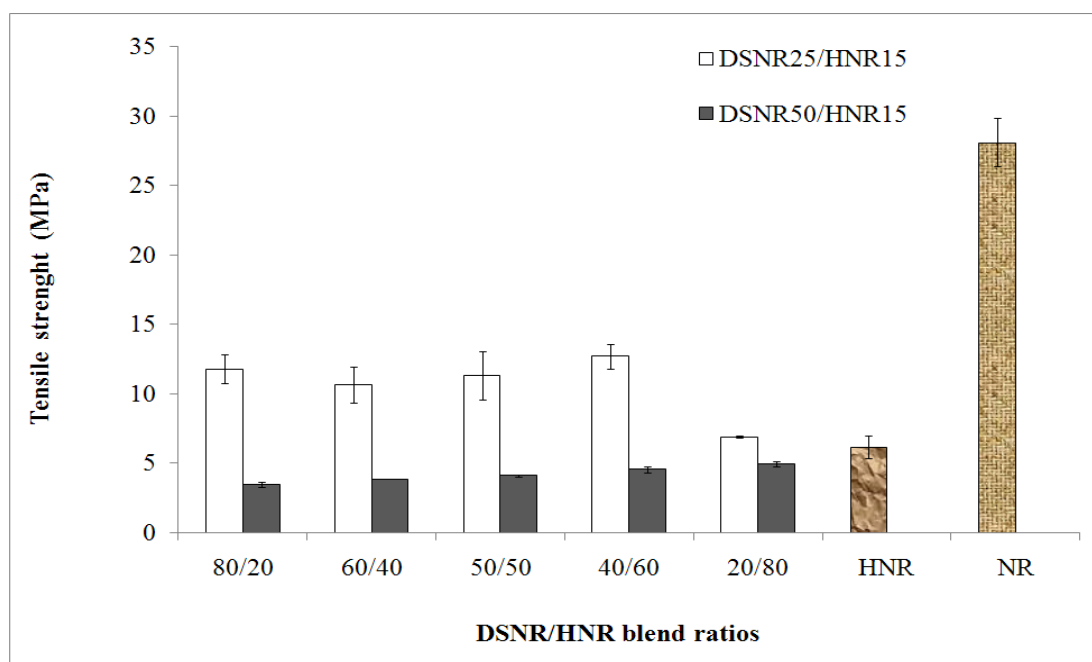
รูปที่ 3.43 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางเบลนด์ DSNR25/HNR15 แปรอัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ



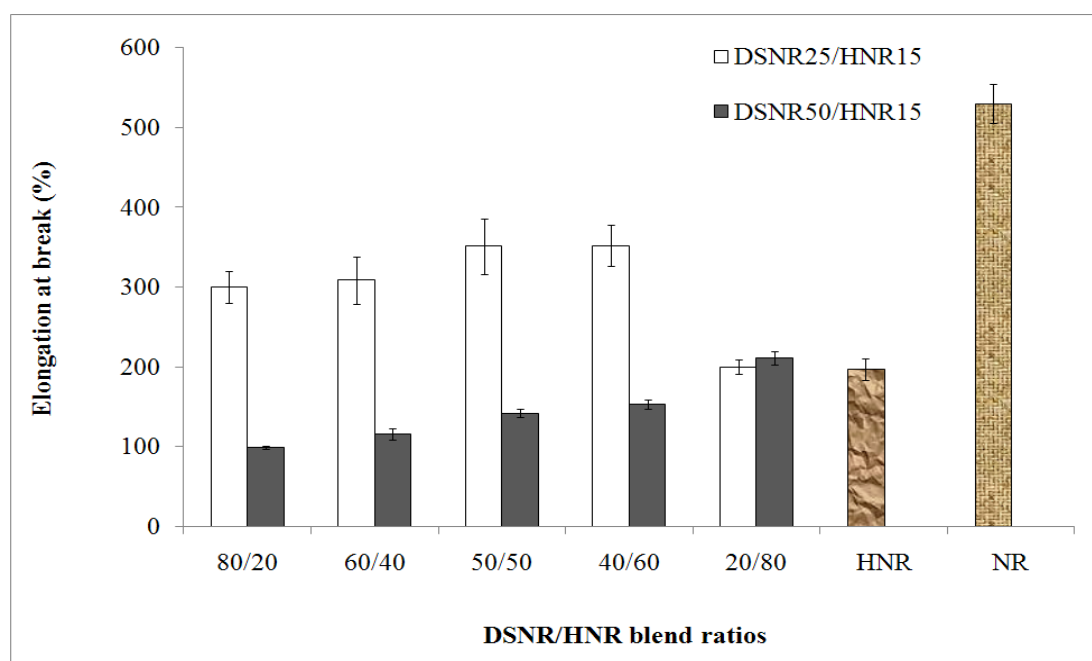
รูปที่ 3.44 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางเบลนด์ DSNR50/HNR15 แปรอัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 3.43 และ 3.44 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางธรรมชาติกับยางเบลนด์ ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ พบว่าค่ามอดูลัสที่ระยะยืดน้อยๆ ของยางเบลนด์ DSNR25/HNR15 และ DSNR50/HNR15 สูงกว่ายางธรรมชาติ เนื่องจากยางธรรมชาติที่ผ่านการตัดแปลงโมเลกุลมีหมู่เกาะขนาดใหญ่ (Bulky groups) สูงขึ้น ทำให้มีความแข็งเพิ่มขึ้น ค่ามอดูลัสที่ระยะยืดน้อยๆ ของยางเบลนด์ DSNR25/HNR15 ที่แปรอัตราส่วนต่างๆ พบว่าค่ามอดูลัสไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งตรงกันข้ามกับค่ามอดูลัสที่ระยะยืดน้อยๆ ของยางเบลนด์ DSNR50/HNR15 ที่เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของยาง DSNR50 เนื่องจากด้วยตัวของ DSNR50 มีความแข็งเปราะมาก ทำให้ค่ามอดูลัสมีค่าที่สูงเมื่อเพิ่มปริมาณของยาง DSNR50 มากขึ้น

จากความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด สามารถคำนวณหาความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดได้ดังรูปที่ 3.45 และ 3.4.6



รูปที่ 3.45 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนด์ DSNR/HNR ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ



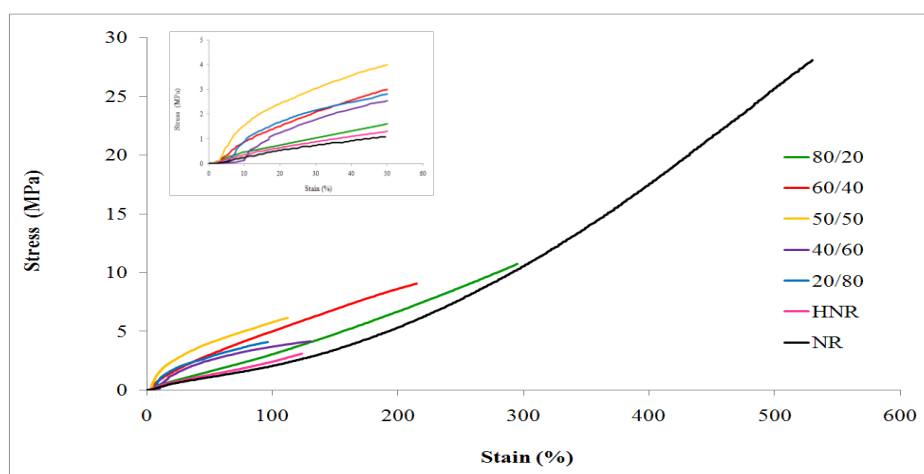
รูปที่ 3.46 ค่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ DSNR/HNR ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 3.45 และ 3.46 พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางธรรมชาติสูงกว่ายางเบลนด์ DSNR/HNR เนื่องจากโครงสร้างของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบจึง

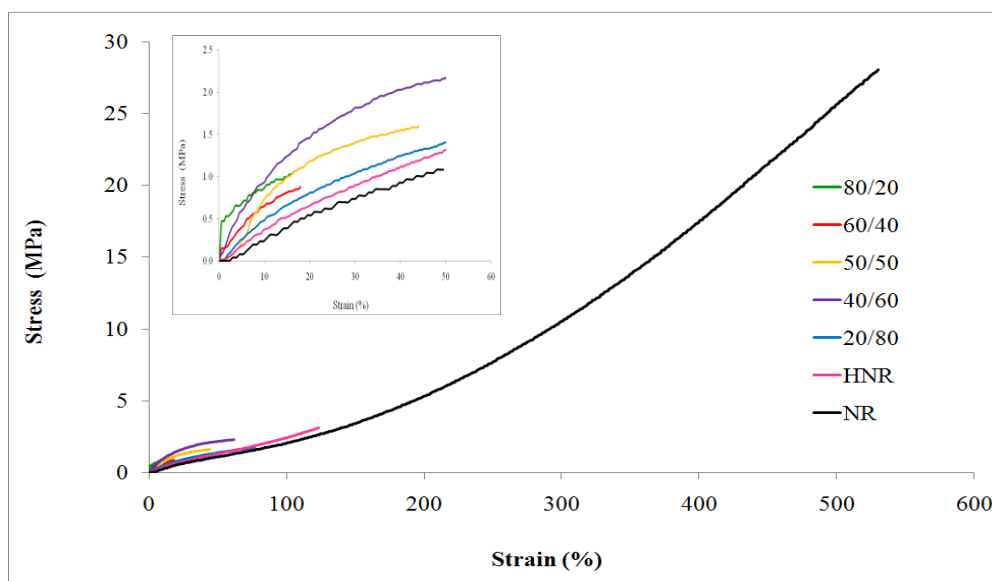
เกิดการแตกหักได้เมื่อทำการยืด ทำให้ยางธรรมชาติมีความแข็งแรง เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ DSNR/HNR พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ DSNR25/HNR15 ที่อัตราส่วน 40/60 สูงที่สุด ส่วนค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ DSNR50/HNR15 มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของยาง HNR15 เนื่องจากยาง DSNR50 มีความแข็งเปราะ เมื่อเพิ่มส่วนที่เป็นยาง HNR15 ซึ่งมีความเป็นยางอยู่มากกว่าและยังมีส่วนที่เป็นพันธะไม่อิ่มตัวเหลืออยู่ในปริมาณที่สูง ทำให้ยางเบลนด์มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของยาง HNR15 และสังเกตได้ว่าที่อัตราส่วนเดียวกันยางเบลนด์ DSNR25/HNR15 มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาดสูงกว่ายางเบลนด์ DSNR50/HNR15 เนื่องจากยาง DSNR25 ยังคงมีระดับของความเปราะต่ำ ทำให้ยังเข้ากันได้กับยาง HNR15 แต่ในยาง DSNR50 มีความเปราะสูงทำให้ไม่เข้ากันได้กับยาง HNR15

DSNR25/HNR40 และ DSNR50/HNR40

ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนด์ DSNR25/HNR40 และ DSNR50/HNR40 โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ คือ 80/20, 60/40, 50/50, 40/60, 20/80 และ 0/100 ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด แสดงดังรูปที่ 3.47 และ 3.48

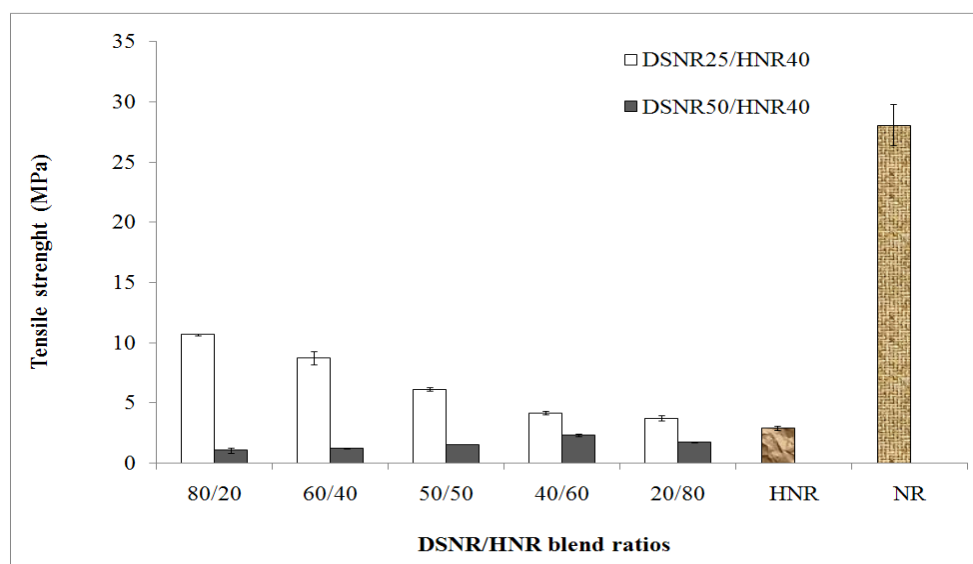


รูปที่ 3.47 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางเบลนด์ DSNR25/HNR40 แปรอัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ

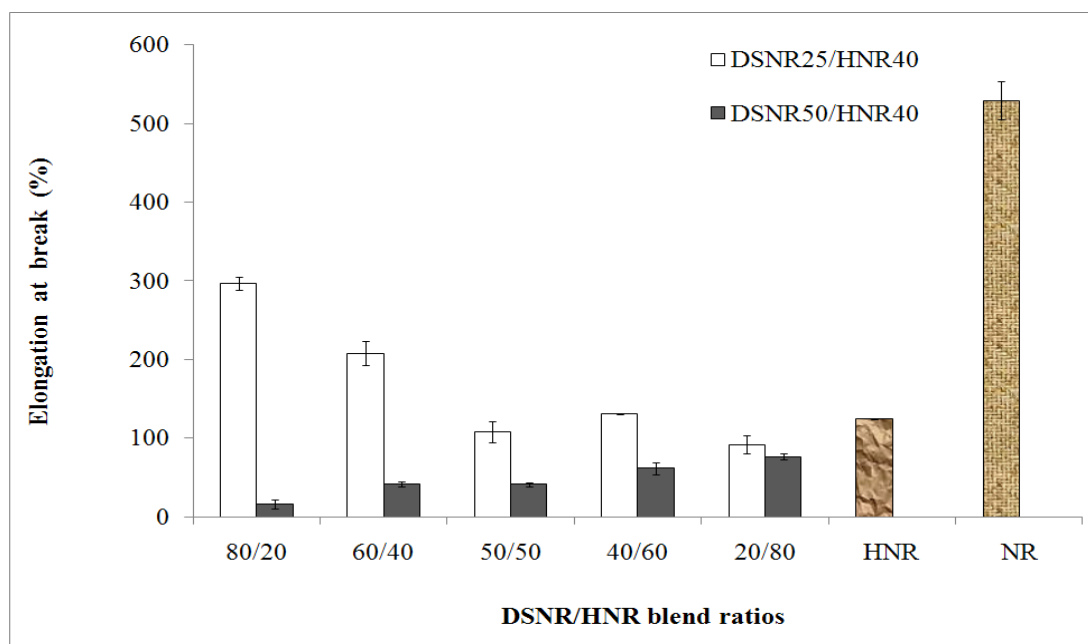


รูปที่ 3.48 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางเบลด DSNR50/HNR40 แปรอัตราส่วนการเบลดต่างๆ

จากความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด สามารถคำนวณหาความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดได้ดังรูปที่ 3.49 และ 3.50



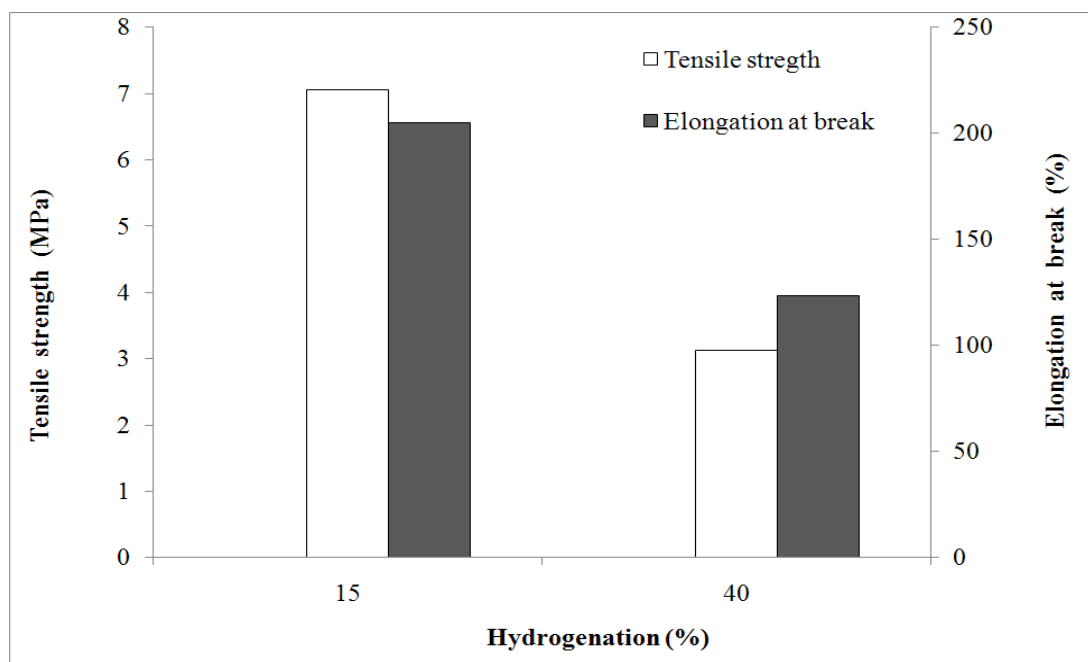
รูปที่ 3.49 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลด DSNR/HNR ที่แปรอัตราส่วนการเบลดต่างๆ



รูปที่ 3.50 ค่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ DSNR/HNR ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ

จากรูปที่ 3.49 และ 3.50 พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางธรรมชาติสูงกว่ายางเบลนด์ DSNR/HNR เนื่องจากโครงสร้างของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบจึงเกิดการตกผลึกได้เมื่อทำการยืด ทำให้ยางธรรมชาติมีความแข็งแรง ส่วนค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ DSNR25/HNR40 แนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นอัตราส่วนยาง HNR40 เนื่องจากการเตรียมยาง HNR ให้มีเปอร์เซ็นต์ไฮโดรเจนชั้นเพิ่มขึ้นจะทำให้น้ำหนักโมเลกุลของยาง HNR ลดลง (Inoue and Nishio, 2007) จึงทำให้ความแข็งแรงของยางลดลงด้วย ซึ่งยางเบลนด์ DSNR50/HNR40 มีผลที่ตรงกันข้ามคือ ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาดเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอัตราส่วนยาง HNR40 เนื่องจากยาง DSNR50 มีความเปราะมาก และมีความแข็งแรงที่น้อย ดังนั้นเมื่อยิ่งเพิ่มอัตราส่วนของยาง HNR40 ทำให้ยางเบลนด์มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น

เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์ไฮโดรเจนชั้นของยางธรรมชาติไฮโดรเจนที่แตกต่างกัน ได้ผลดังรูปที่



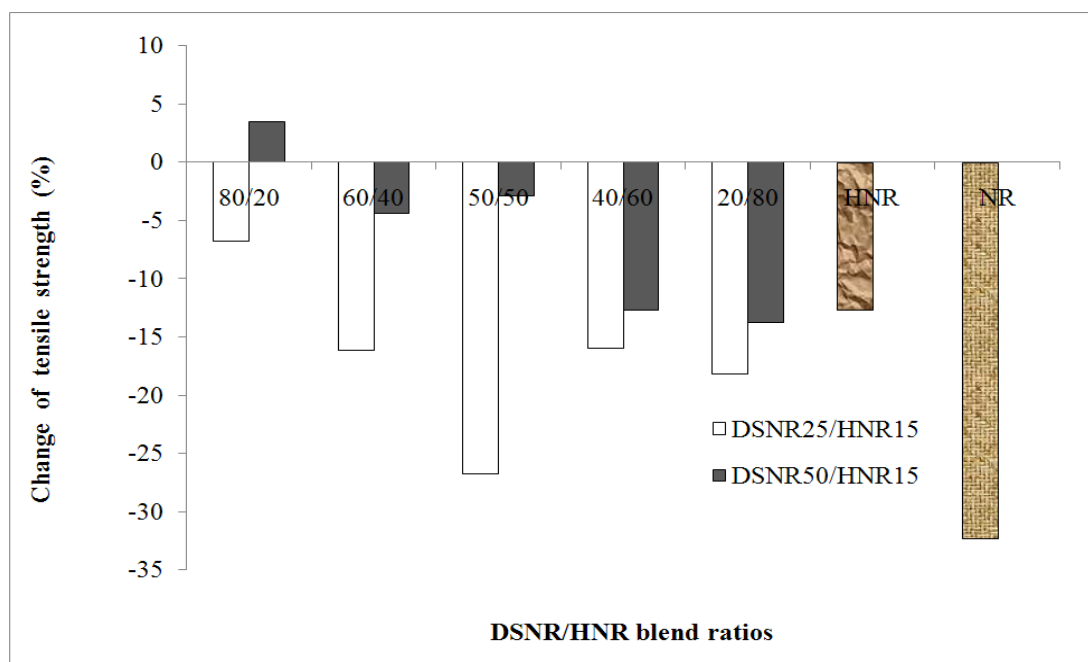
รูปที่ 3.51 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของยาง HNR วัลคาไนซ์ที่เปอร์เซ็นต์ไฮโดรเจนชั้นต่างๆ

จากรูปที่ 3.51 เป็นค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาดของยาง HNR เมื่อแปรเปอร์เซ็นต์ไฮโดรเจนชั้น พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาดมีค่าลดต่ำลงตามการเพิ่มเปอร์เซ็นต์ไฮโดรเจนชั้น เนื่องจากการเตรียมยาง HNR ให้มีเปอร์เซ็นต์ไฮโดรเจนชั้นเพิ่มขึ้นจะทำให้น้ำหนักโมเลกุลของยาง HNR ลดลง (Inoue and Nishio, 2007) จึงทำให้ความแข็งแรงของยางลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Ikeda (2008)

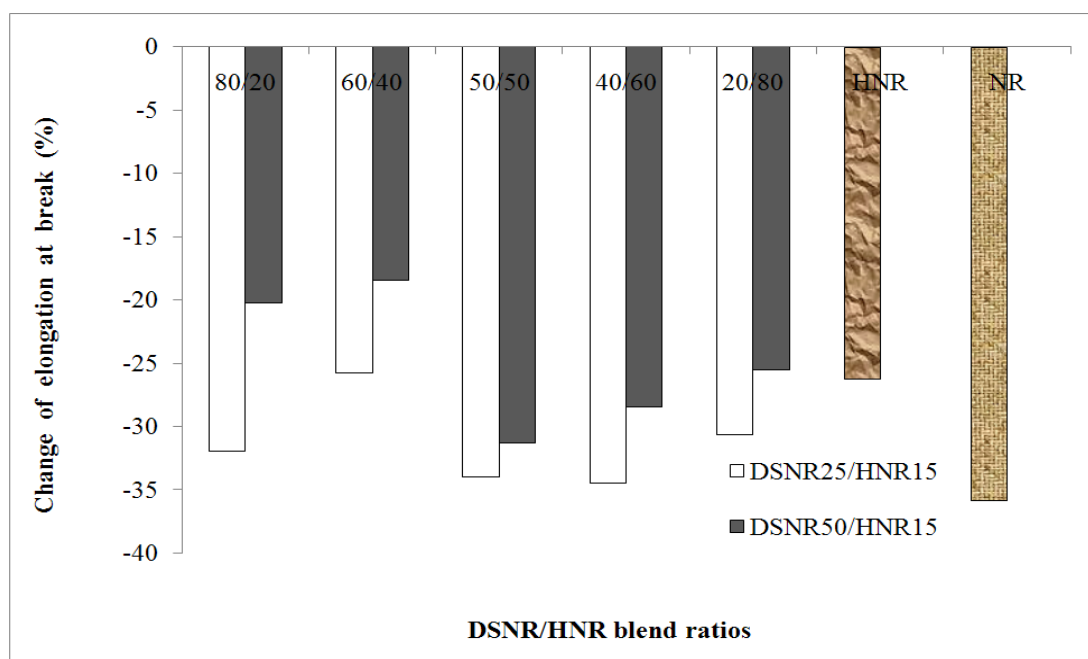
3.3.3.2.2 สมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่ง

DSNR25/HNR15 และ DSNR50/HNR15

เตรียมยางธรรมชาติที่ดัดแปลงด้วยไดบิวทิลฟอสเฟตจากน้ำยางธรรมชาติอพอกไซค์ที่มีปริมาณอพอกไซค์ 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โมล ผสมกับยางธรรมชาติไฮโดรเจนที่มีปริมาณไฮโดรเจนชั้น 15 เปอร์เซ็นต์โมล ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ แล้วทดสอบสมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่งได้ผลดังรูปที่ 3.52 และ 3.53



รูปที่ 3.52 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานต่อแรงดึงหลังจากการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 22 hr ของยางเบลนด์ DSNR/HNR ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์



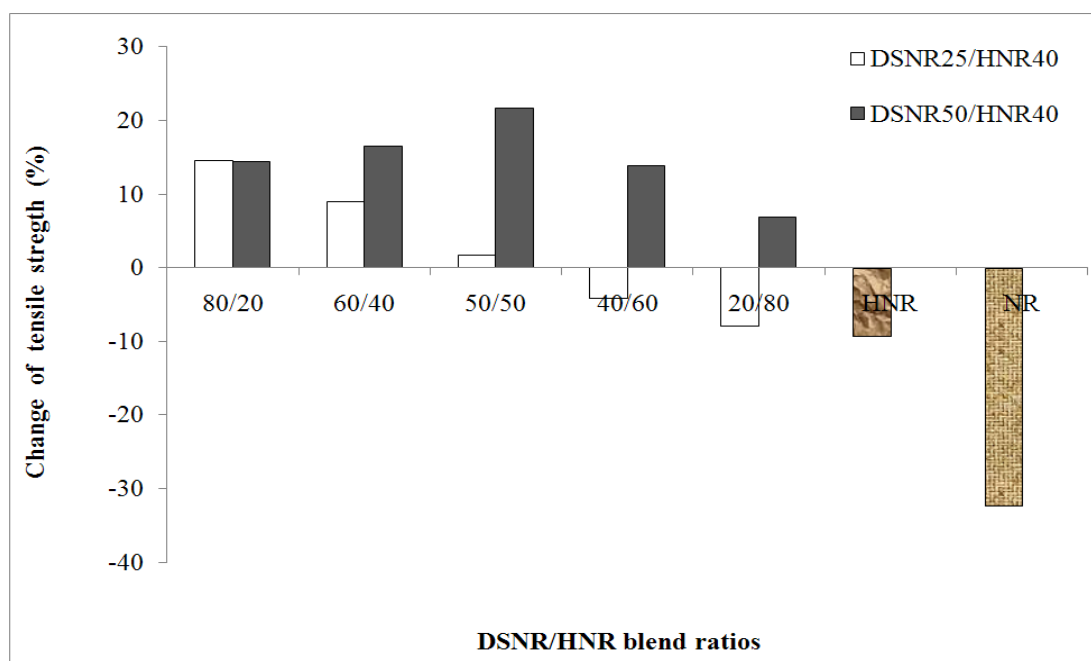
รูปที่ 3.53 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการยืดจนขาดหลังจากการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 22 hr ของยางเบลนด์ DSNR/HNR ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์

จากรูปที่ 3.52 และ 3.53 พบว่ายางธรรมชาติมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาดมากกว่ายางเบลนด์ DSNR/HNR เนื่องจากความไม่อึดตัวใน

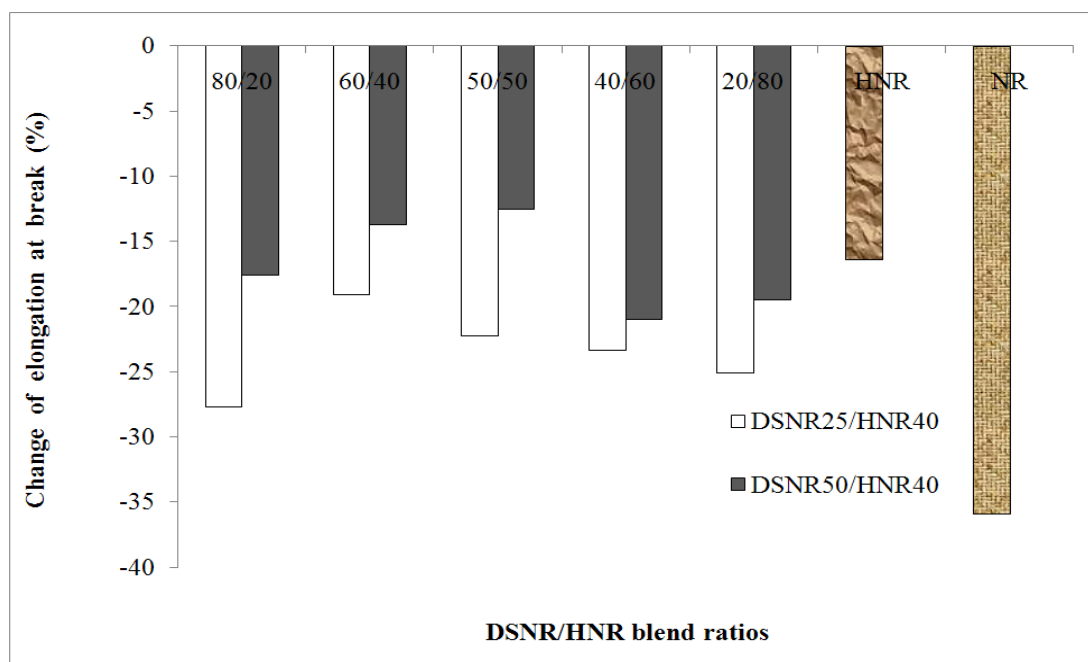
โมเลกุลของยางธรรมชาติ ส่วนเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดตัวของยางเบลนด์ DSNR25/HNR15 และยางเบลนด์ DSNR50/HNR15 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของยาง HNR15 เนื่องจากในโมเลกุลของยางที่ดัดแปลงโมเลกุลยังมีโครงสร้างที่เป็นพันธะคู่เหลืออยู่ค่อนข้างมาก เมื่อทำการบ่มแรงที่อุณหภูมิสูงจึงเกิดการเชื่อม แต่จะสังเกตได้ว่ายางเบลนด์ DSNR50/HNR15 มีการเปลี่ยนแปลงที่ต่ำกว่ายางเบลนด์ DSNR25/HNR15 ทั้งนี้อาจเนื่องจากยาง DSNR50 จะมีส่วนที่เป็นพันธะคู่เหลืออยู่ในโมเลกุลน้อยกว่ายาง DSNR25

DSNR25/HNR40 และ DSNR50/HNR40

เตรียมยางธรรมชาติที่ดัดแปลงด้วยไดบิวทิลฟอสเฟตจากน้ำยางธรรมชาติอพอกไซค์ที่มีปริมาณอพอกไซค์ 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โมล ผสมกับยางธรรมชาติไฮโดรจิเนตที่มีปริมาณไฮโดรจิเนชัน 40 เปอร์เซ็นต์โมล ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ แล้วทดสอบสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงได้ผลดังรูปที่ 3.54 และ 3.55



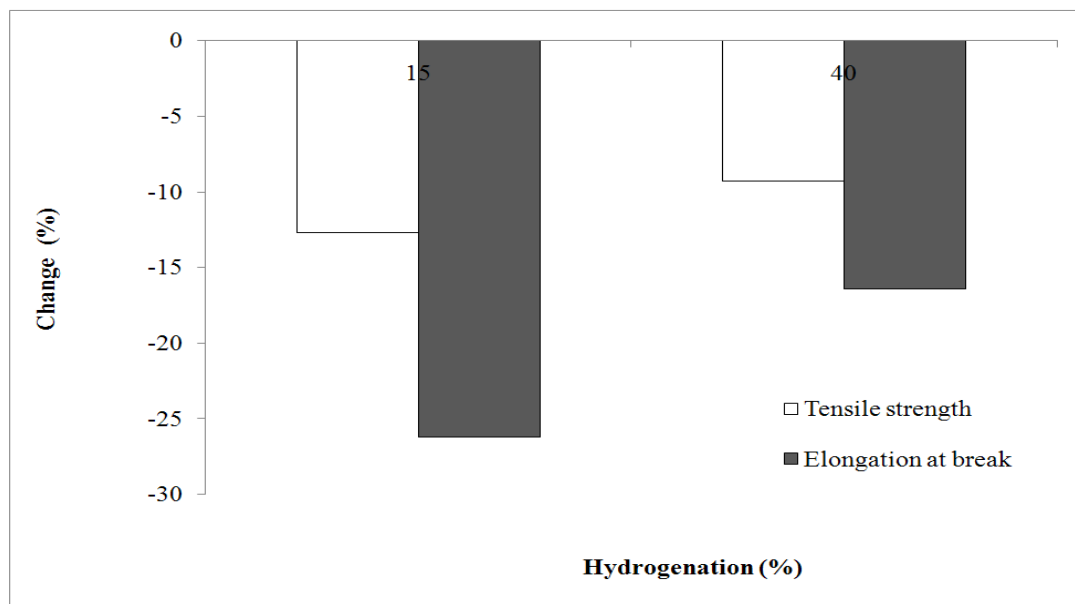
รูปที่ 3.54 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานต่อแรงดึงหลังจากการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 22 hr ของยางเบลนด์ DSNR/HNR ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์



รูปที่ 3.55 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการยืดจนขาดหลังจากการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 22 hr ของยางเบลนด์ DSNR/HNR ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์

จากรูปที่ 3.54 และ 3.55 พบว่ายางธรรมชาติมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาดมากกว่ายางเบลนด์ DSNR/HNR เนื่องจากความไม่อึดตัวในโมเลกุลของยางธรรมชาติ เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนด์ DSNR25/HNR40 ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของยาง HNR40 และยางเบลนด์ DSNR50/HNR40 ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานต่อแรงดึงในทางด้านบวก เนื่องจากยางเบลนด์ DSNR50/HNR40 มีระยะเวลาการวัลคาไนซ์ที่ช้า เมื่อทำการบ่มแรงจึงมีการวัลคาไนซ์ต่อ เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ DSNR25/HNR40 และยางเบลนด์ DSNR50/HNR40 ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของยาง HNR40 แต่จะสังเกตได้ว่ายางเบลนด์ DSNR50/HNR40 มีการเปลี่ยนแปลงที่ต่ำกว่ายางเบลนด์ DSNR25/HNR40 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากยาง DSNR50 จะมีส่วนที่เป็นพันธะคู่เหลืออยู่ในโมเลกุลน้อยกว่ายาง DSNR25

เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานต่อแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางธรรมชาติไฮโดรจิเนตที่มีเปอร์เซ็นต์ไฮโดรจิเนชันแตกต่างกัน ดังที่แสดงในรูปที่ 3.56



รูปที่ 3.56 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาด หลังจากการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 22 hr ของยาง HNR วัลคาไนซ์ที่เปอร์เซ็นต์ไฮโดรจิเนชันต่างๆ

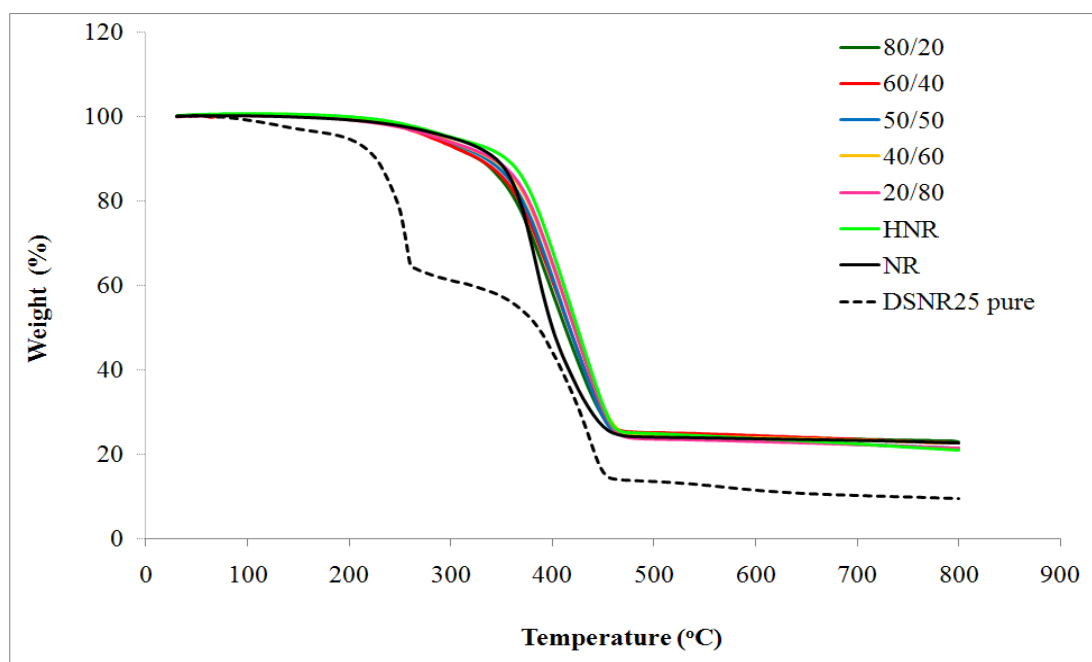
จากรูปที่ 3.56 พบว่ายางธรรมชาติไฮโดรจิเนตที่มีเปอร์เซ็นต์ไฮโดรจิเนชัน 40 เปอร์เซ็นต์โมล (HNR40) มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาดต่ำกว่ายางธรรมชาติไฮโดรจิเนตที่มีเปอร์เซ็นต์ไฮโดรจิเนชัน 15 เปอร์เซ็นต์โมล (HNR15) ถึงแม้ว่ายาง HNR40 จะมีความแข็งแรงที่ต่ำกว่ายาง HNR15 แต่มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ต่ำกว่า ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณพันธะคู่ที่อยู่ในโมเลกุลของยาง HNR40 มีน้อยกว่ายาง HNR15

3.3.3.3 อัตราส่วนการเบลนด์ต่อสมบัติเชิงความร้อน

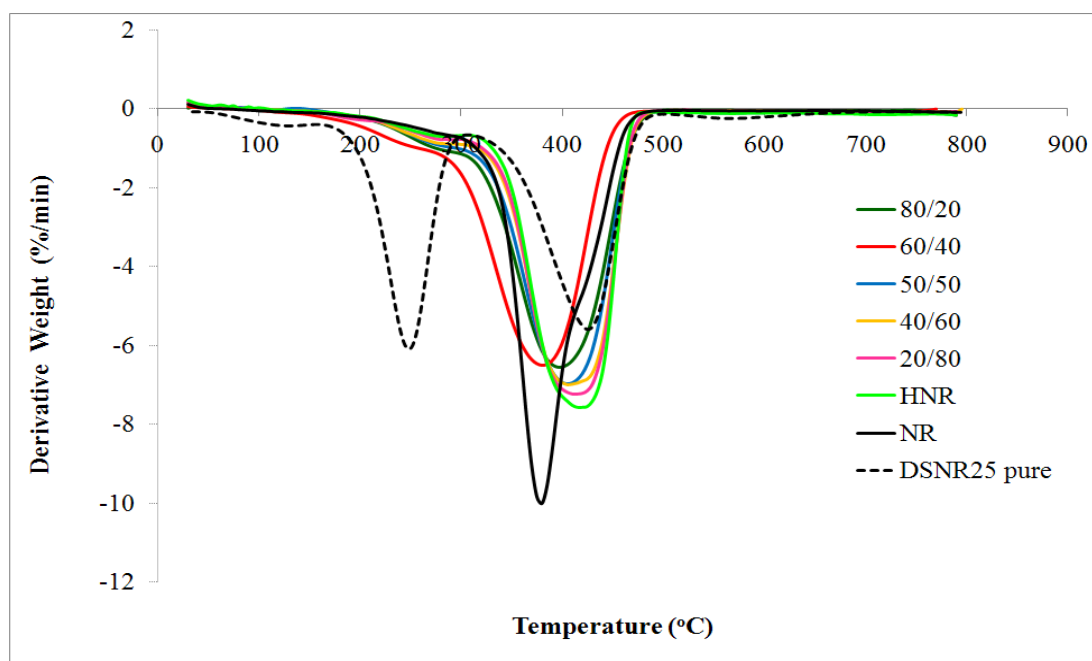
ทดสอบสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค TGA รุ่น STA 6000 ขึ้นตัวอย่างที่มีน้ำหนักอยู่ในช่วง 7 ถึง 12 มิลลิกรัม โดยทดสอบในสภาวะไนโตรเจน อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 20 ml/min ทดสอบที่อุณหภูมิในช่วง 30-800 °C อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 10 °C /min แล้วทำการทดสอบสมบัติเชิงกลตามหัวข้อที่ 2.3.7 ได้ผลดังนี้

DSNR25/HNR15 และ DSNR50/HNR15

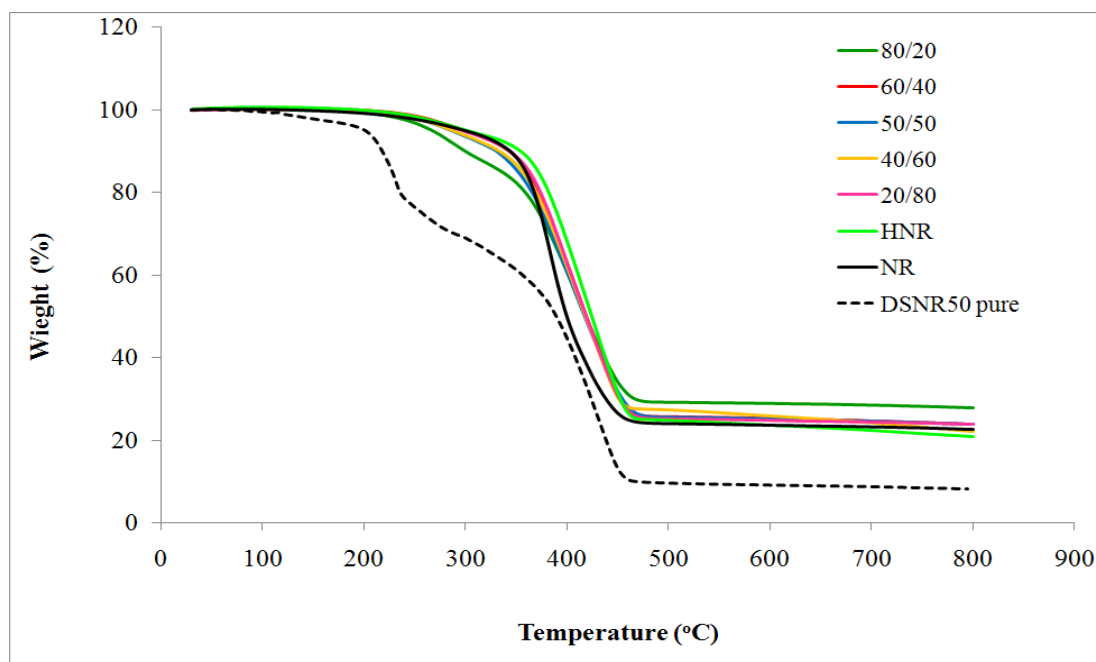
ทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของยางธรรมชาติที่ดัดแปลงด้วยไดบิวทิลฟอสเฟตจากน้ำยางธรรมชาติอโฟกไซค์ที่มีปริมาณอโฟกไซค์ 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โมล กับยางธรรมชาติไฮโดรจิเนตที่มีปริมาณไฮโดรจิเนชัน 15 เปอร์เซ็นต์โมล ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ได้ผลดังรูปที่ 3.57 – 3.60 และตารางที่ 3.16



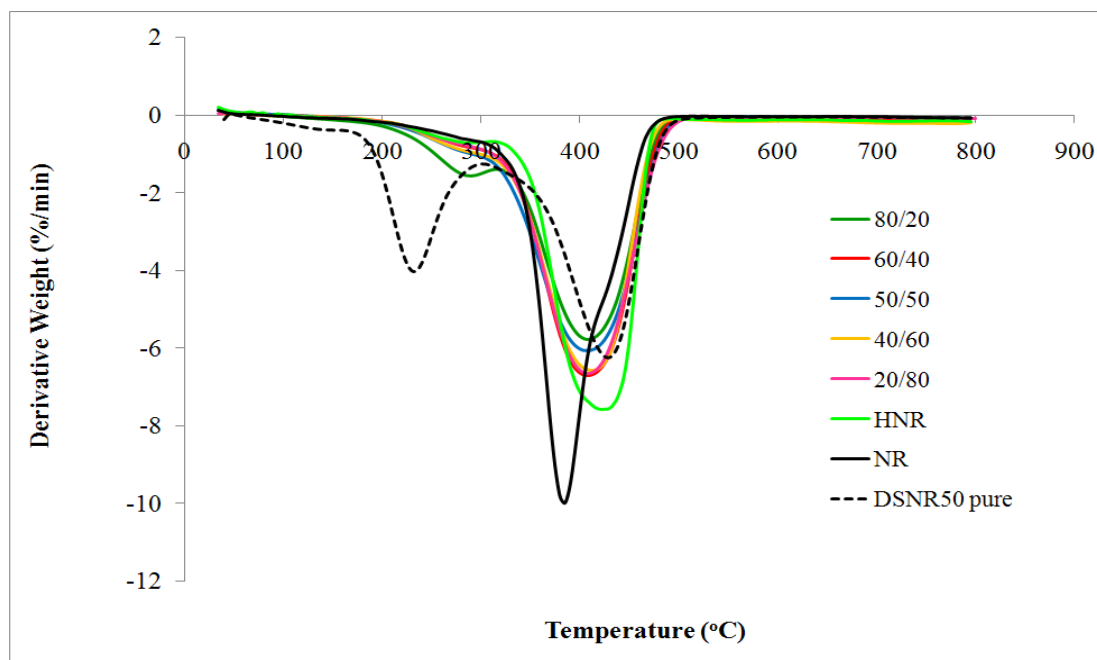
รูปที่ 3.57 เทอร์โมแกรม TGA ของยางเบลนด์ DSNR25/HNR15 ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์



รูปที่ 3.58 เทอร์โมแกรม DTG ของยางเบลนด์ DSNR25/HNR15 ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์



รูปที่ 3.59 เทอร์โมแกรม TGA ของยางเบลนด์ DSNR50/HNR15 ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์



รูปที่ 3.60 เทอร์โมแกรม DTG ของยางเบลนด์ DSNR50/HNR15 ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์

ตารางที่ 3.16 อุณหภูมิการสลายตัวของยางธรรมชาติ ยางเบลนด์ DSNR25/HNR15 และยางเบลนด์ DSNR50/HNR15 ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ

Sample	Decomposition temperature, Td (°C)	
	1 st step	2 nd step
NR	-	379.08
DSNR25 pure	240.30	418.76
DSNR50 pure	223.52	420.76
HNR15	263.92	411.72
DSNR25/HNR15		
80/20	273.05	395.67
60/40	264.23	404.85
50/50	-	403.31
40/60	266.60	403.39
20/80	266.43	413.00
DSNR50/HNR15		
80/20	281.25	402.09
60/40	276.05	401.13
50/50	282.79	400.69
40/60	285.99	405.32
20/80	281.22	401.95

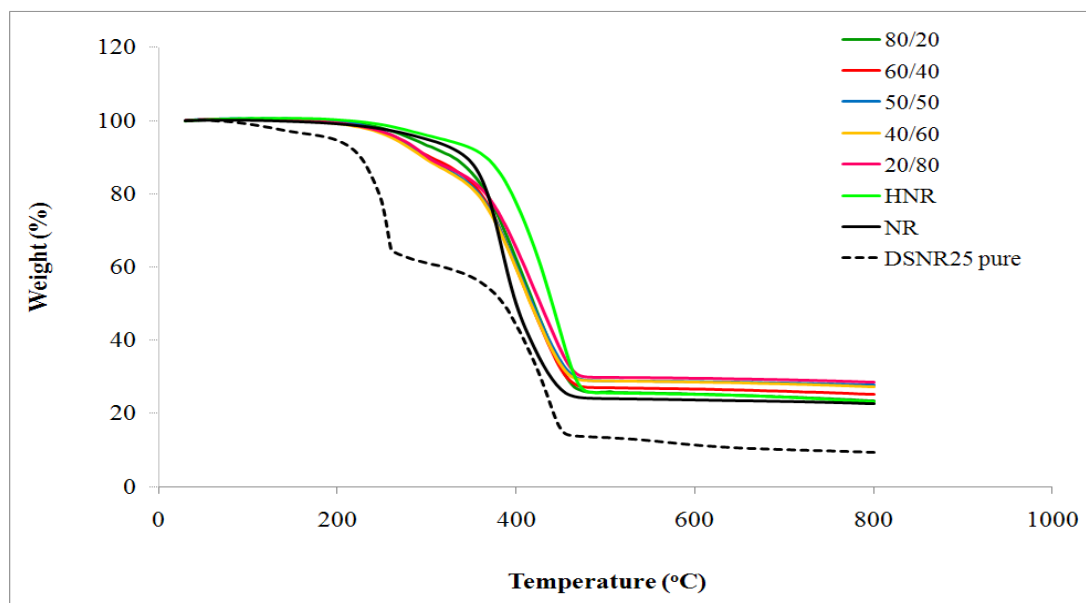
จากรูปที่ 3.57 - 3.60 และตารางที่ 3.16 จะเห็นได้ว่ายางดิบ DSNR25 และ DSNR50 มีอุณหภูมิการสลายตัวเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรกเป็นอุณหภูมิการสลายตัวของหมู่ฟอสเฟต และในช่วงที่สองเป็นอุณหภูมิการสลายตัวของยางธรรมชาติ และจะสังเกตได้ว่าอุณหภูมิการสลายตัวในช่วงที่สองของยางดิบ DSNR25 และ DSNR50 สูงกว่าในยางธรรมชาติ ทั้งนี้เนื่องมาจากยางธรรมชาติที่ผ่านการดัดแปลงโมเลกุลจะมีพันธะคู่ที่ลดลง ทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของยางธรรมชาติที่ผ่านการดัดแปลงโมเลกุลเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณายางเบลนด์ DSNR25/HNR15 และยางเบลนด์ DSNR50/HNR15 ที่แปรอัตราส่วนต่างๆ พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ถึงอย่างไรก็เห็นการปรับปรุงของสมบัติให้ดีขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งอุณหภูมิการสลายตัวในช่วงที่ 2 ของยางเบลนด์จะสูงกว่าในยางธรรมชาติ

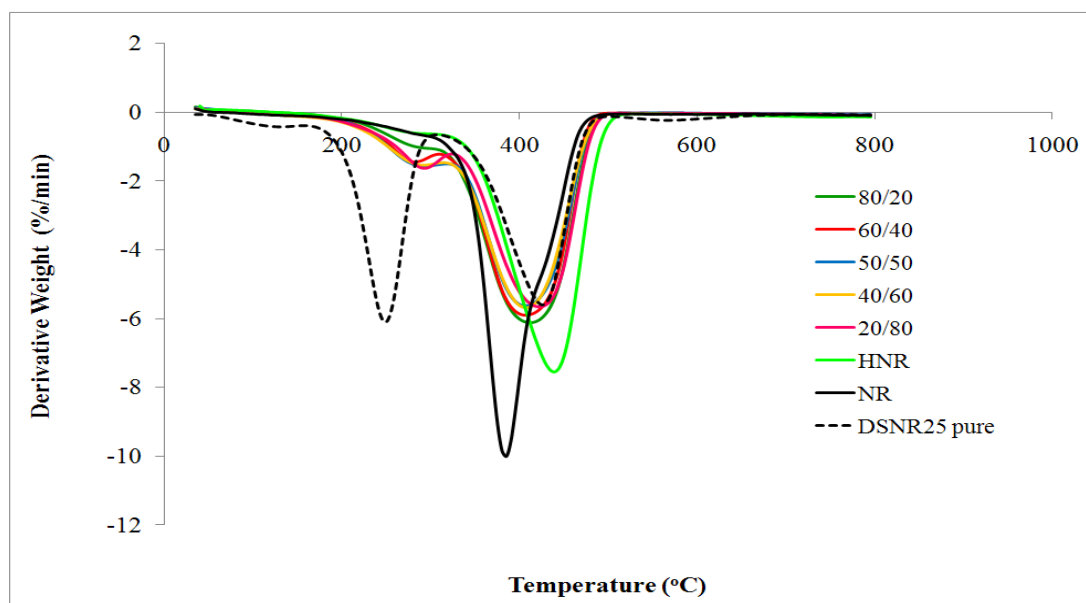
DSNR25/HNR40 และ DSNR50/HNR40

ทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของยางธรรมชาติที่ดัดแปลงด้วยไดบิวทิลฟอสเฟตจากน้ำยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีปริมาณอีพอกไซด์ 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โมล ผสมกับยางธรรมชาติไฮโดรเจนที่มี

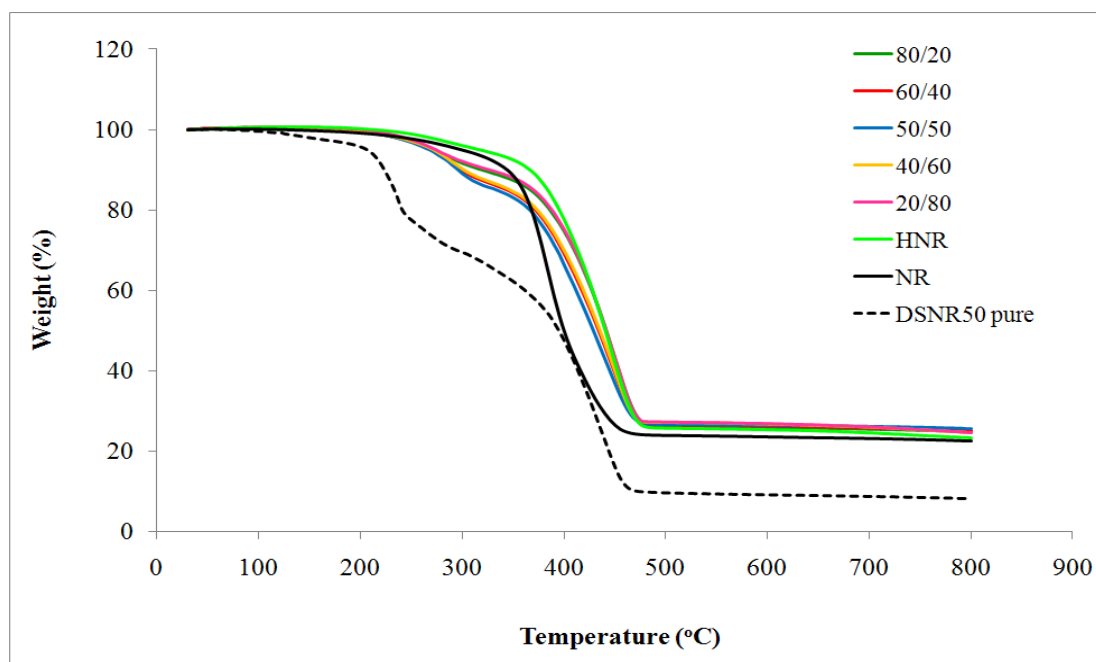
ปริมาณไฮโดรจีนชั้น 40 เปอร์เซนต์โมล ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ได้ผลดังรูปที่ 3.61 - 3.64 และตารางที่ 3.17



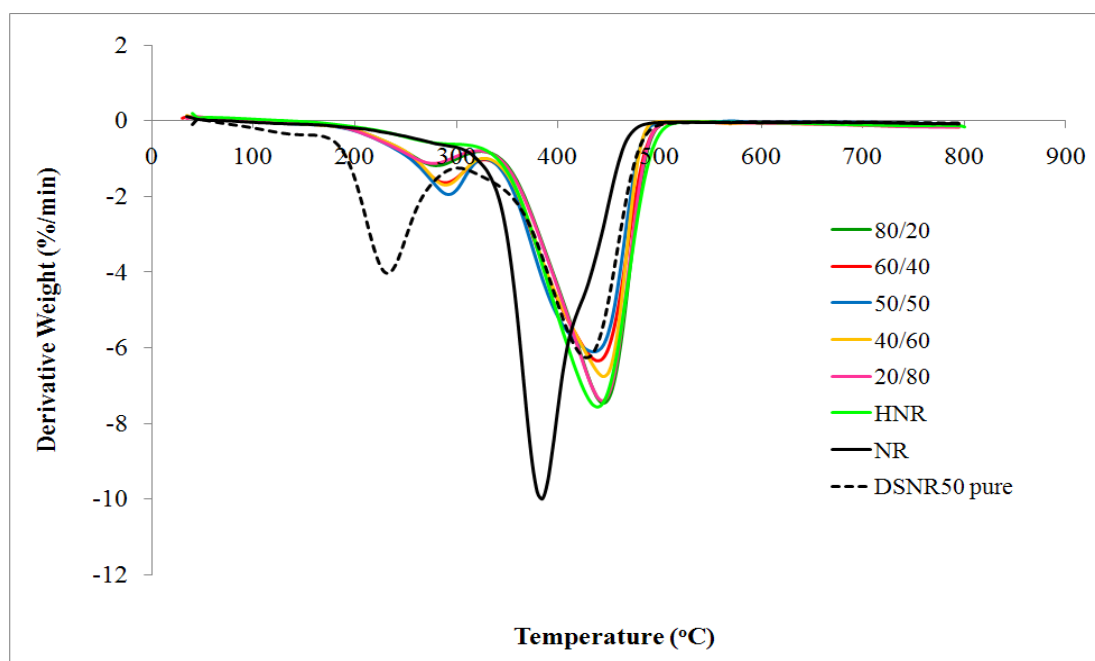
รูปที่ 3.61 เทอร์โมแกรม TGA ของยางเบลนด์ DSNR25/HNR40 ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์



รูปที่ 3.62 เทอร์โมแกรม DTG ของยางเบลนด์ DSNR25/HNR40 ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์



รูปที่ 3.63 เทอร์โมแกรม TGA ของยางเบลนด์ DSNR50/HNR40 ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์



รูปที่ 3.64 เทอร์โมแกรม DTG ของยางเบลนด์ DSNR50/HNR40 ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์

ตารางที่ 3.17 อุณหภูมิการสลายตัวของยางธรรมชาติ ยางเบลด DSNR25/HNR40 และยางเบลด DSNR50/HNR40 ที่แปรอัตราส่วนการเบลดต่างๆ

Sample	Decomposition temperature, Td (°C)	
	1st step	2nd step
NR	-	379.08
DSNR25 pure	240.30	418.76
DSNR50 pure	223.52	420.76
HNR40	286.96	436.23
DSNR25/HNR40		
80/20	283.49	404.26
60/40	271.29	399.22
50/50	284.21	398.59
40/60	283.10	402.20
20/80	284.66	415.86
DSNR50/HNR40		
80/20	272.77	438.48
60/40	280.55	433.05
50/50	285.37	429.20
40/60	280.65	438.50
20/80	268.94	432.32

จากรูปที่ 3.61 - 3.64 และตารางที่ 3.17 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนการเบลด พบว่ายางเบลด DSNR25/HNR40 มีอุณหภูมิการสลายตัวที่ใกล้เคียงกัน ในทำนองเดียวกันกับยางเบลด DSNR50/HNR40 แต่เมื่อพิจารณาปริมาณหมู่ไดออกซาฟอสโฟเลน พบว่ายางเบลด DSNR50/HNR40 มีอุณหภูมิการสลายตัวในช่วงที่ 2 เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากยาง DSNR50 และยาง HNR40 มีปริมาณของพันธะคู่ที่ลดลงอย่างมากเมื่อมีการดัดแปลงโครงสร้าง ทำให้ยางเบลดทนต่อการเสื่อมสลายด้วยความร้อนเพิ่มมากขึ้น

3.3.3.4 อัตราส่วนการเบลดต่อสมบัติทนไฟ

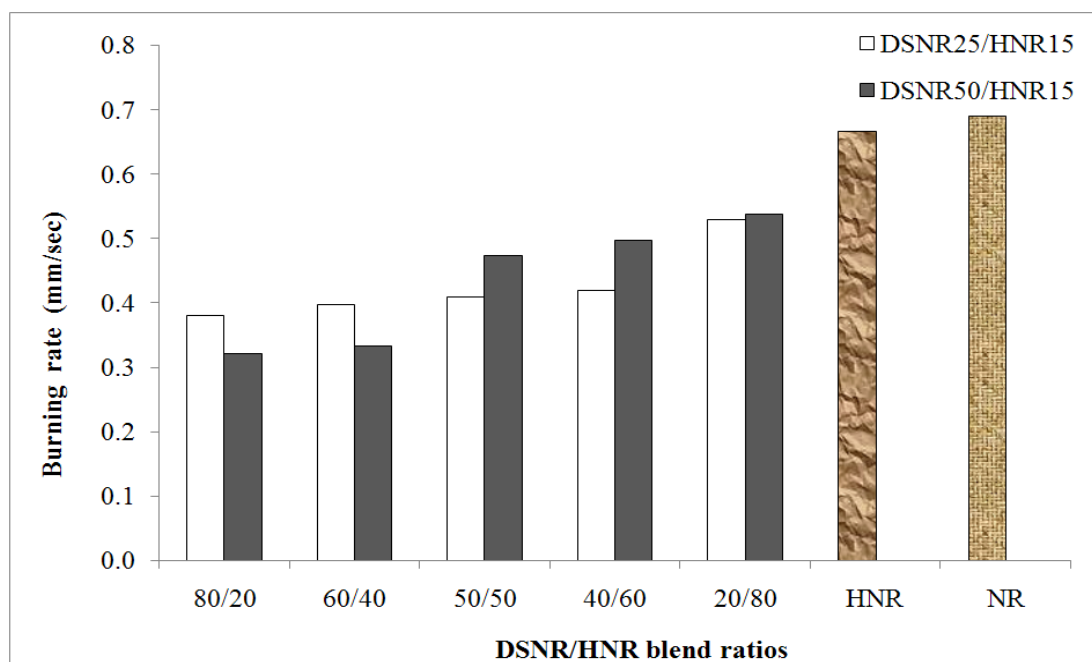
ทำการทดสอบการทนไฟตามมาตรฐาน ISO 3582 รายงานผลเป็นอัตราการเผาไหม้ (Burning rate) ในหน่วยมิลลิเมตรต่อวินาที

DSNR25/HNR15 และ DSNR50/HNR15

ทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของยางธรรมชาติที่ดัดแปลงด้วยไดบิวทิลฟอสเฟตจากน้ำยางธรรมชาติอพอกไซค์ที่มีปริมาณอพอกไซค์ 25 และ 50 เปอร์เซนต์โมล กับยางธรรมชาติไฮโดรจิเนตที่มีปริมาณไฮโดรจิเนชัน 15 เปอร์เซนต์โมล ที่แปรอัตราส่วนการเบลนค์ได้ผลดังตารางที่ 3.18 และรูปที่ 3.65

ตารางที่ 3.18 อัตราการเผาไหม้ของยางธรรมชาติ ยางเบลนค์ DSNR25/HNR15 และยางเบลนค์ DSNR50/HNR15 แปรอัตราส่วนการเบลนค์ต่างๆ

Sample	Burning rate (mm/sec)
NR	0.69
HNR15	0.67
DSNR25/HNR15	
80/20	0.38
60/40	0.40
50/50	0.41
40/60	0.42
20/80	0.53
DSNR50/HNR15	
80/20	0.32
60/40	0.33
50/50	0.47
40/60	0.50
20/80	0.54



รูปที่ 3.65 อัตราการเผาไหม้ของยางธรรมชาติ ยางเบลนด์ DSNR25/HNR15 และยางเบลนด์ DSNR50/HNR15 แปรอัตราส่วนการเบลนด์ต่างๆ

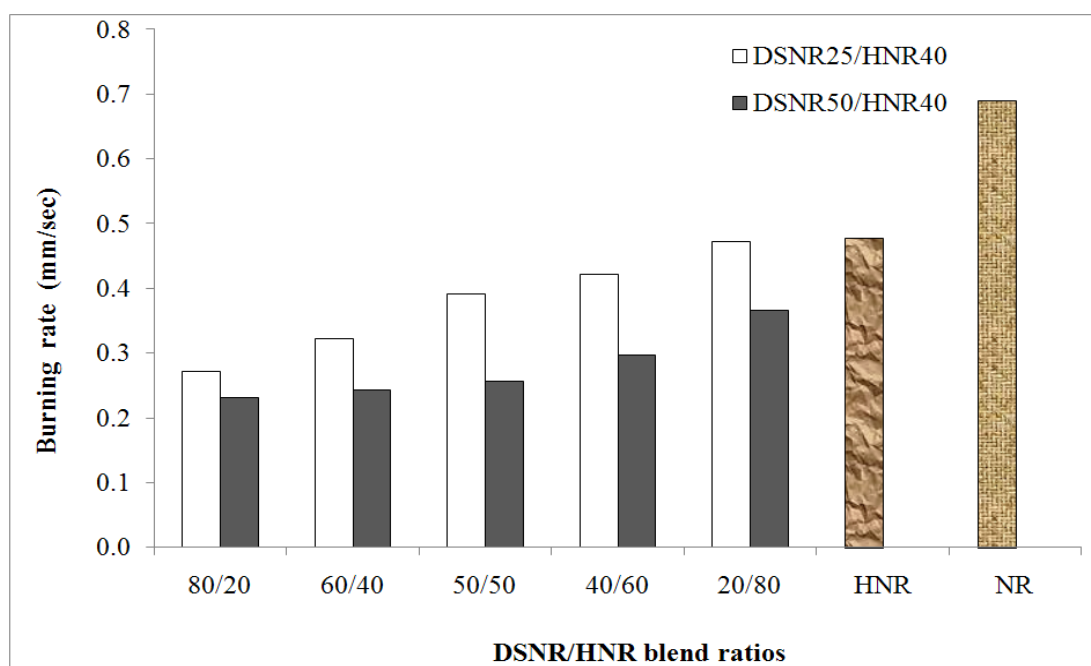
จากตารางที่ 3.18 และรูปที่ 3.65 พบว่าอัตราการเผาไหม้ของยางเบลนด์ DSNR25/HNR15 และ DSNR50/HNR15 ทุกอัตราส่วนมีค่าต่ำกว่ายางธรรมชาติ เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์พวกไฮโดรคาร์บอน ซึ่งจะติดไฟได้ง่ายกว่า จึงทำให้ยางธรรมชาติมีอัตราการเผาไหม้สูง เมื่อพิจารณาจากเบลนด์ DSNR/HNR ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ DSNR จะทำให้อัตราการเผาไหม้ลดลง เนื่องจากในโครงสร้างโมเลกุลยางมีสารประกอบฟอสฟอรัสเป็นส่วนประกอบซึ่งสารดังกล่าวเหมาะที่จะใช้กับยางที่มีออกซิเจนอยู่ หน้าที่ของสารประกอบฟอสฟอรัสจะเป็นตัวคายน้ำออกมาในขณะที่การลุกไหม้ของยางที่มีออกซิเจนทำให้ผิวยางเกรียมเป็นฉนวนความร้อนทำให้ยางสลายตัวช้าลงไป และในขณะเดียวกันจะเกิดกรดฟอสฟอริกคลุมผิวของยางนั้นไว้ (พรพรรณ, 2528) ทำให้ยางเบลนด์ที่มีอัตราส่วนของยาง DSNR สูงขึ้นมีอัตราการเผาไหม้ลดลง นอกจากนี้ในแต่ละอัตราส่วนพบว่ายางเบลนด์ DSNR25/HNR15 และ DSNR50/HNR15 มีอัตราการเผาไหม้ที่แตกต่างกันไม่ชัดเจน

DSNR25/HNR40 และ DSNR50/HNR40

ทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของยางธรรมชาติที่ดัดแปลงด้วยไดบิวทิลฟอสเฟตจากน้ำยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีปริมาณอีพอกไซด์ 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โมล ผสมกับยางธรรมชาติไฮโดรจิเนตที่มีปริมาณไฮโดรจิเนต 40 เปอร์เซ็นต์โมล ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ได้ผลดังตารางที่ 3.19 และรูปที่ 3.66

ตารางที่ 3.19 อัตราการเผาไหม้ของยางธรรมชาติ ยางเบลด DSNR25/HNR40 และยางเบลด DSNR50/HNR40 แปรอัตราส่วนการเบลดต่างๆ

Sample	Burning rate (mm/sec)
NR	0.69
HNR40	0.48
DSNR25/HNR40	
80/20	0.27
60/40	0.32
50/50	0.39
40/60	0.42
20/80	0.47
DSNR50/HNR40	
80/20	0.23
60/40	0.24
50/50	0.26
40/60	0.30
20/80	0.37



รูปที่ 3.66 อัตราการเผาไหม้ของยางธรรมชาติ ยางเบลด DSNR25/HNR40 และยางเบลด DSNR50/HNR40 แปรอัตราส่วนการเบลดต่างๆ

จากตารางที่ 3.19 และรูปที่ 3.66 พบว่าอัตราการเผาไหม้ของยางเบลนด์ DSNR25/HNR40 และ DSNR50/HNR40 ทุกอัตราส่วนมีค่าต่ำกว่ายางธรรมชาติ เนื่องจากธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์พวกไฮโดรคาร์บอนหรือสารอินทรีย์ ซึ่งจะติดไฟได้ง่ายกว่า จึงทำให้ยางธรรมชาติมีอัตราการเผาไหม้สูง เมื่อพิจารณาจากเบลนด์ DSNR/HNR ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณยาง DSNR จะทำให้อัตราการเผาไหม้ลดลง เนื่องจากในโครงสร้างโมเลกุลของยางมีสารประกอบฟอสฟอรัสเป็นส่วนประกอบ ซึ่งสารดังกล่าวเหมาะที่จะใช้กับยางที่มีออกซิเจนอยู่ หน้าที่ของสารประกอบฟอสฟอรัสจะเป็นตัวคายน้ำออกมาในขณะการลุกไหม้ของยางที่มีออกซิเจนทำให้ผิวยางเกรียมเป็นฉนวนความร้อนทำให้ยางสลายตัวช้าลงไปในขณะเดียวกันจะเกิดกรดฟอสฟอริกคลุมผิวของยางนั้นไว้ (พรพรรณ, 2528) ทำให้ยางเบลนด์ที่มีอัตราส่วนของยาง DSNR สูงขึ้นมีอัตราการเผาไหม้ลดลง นอกจากนี้ยังเห็นได้ว่ายางเบลนด์ DSNR50/HNR40 มีอัตราการเผาไหม้ที่ต่ำกว่ายางเบลนด์ DSNR25/HNR40 เนื่องจากในโมเลกุลของยาง DSNR50 มีเปอร์เซ็นต์ของสารประกอบฟอสฟอรัสที่สูงกว่ายาง DSNR25 จึงทำให้อัตราการเผาไหม้ที่ลดลง

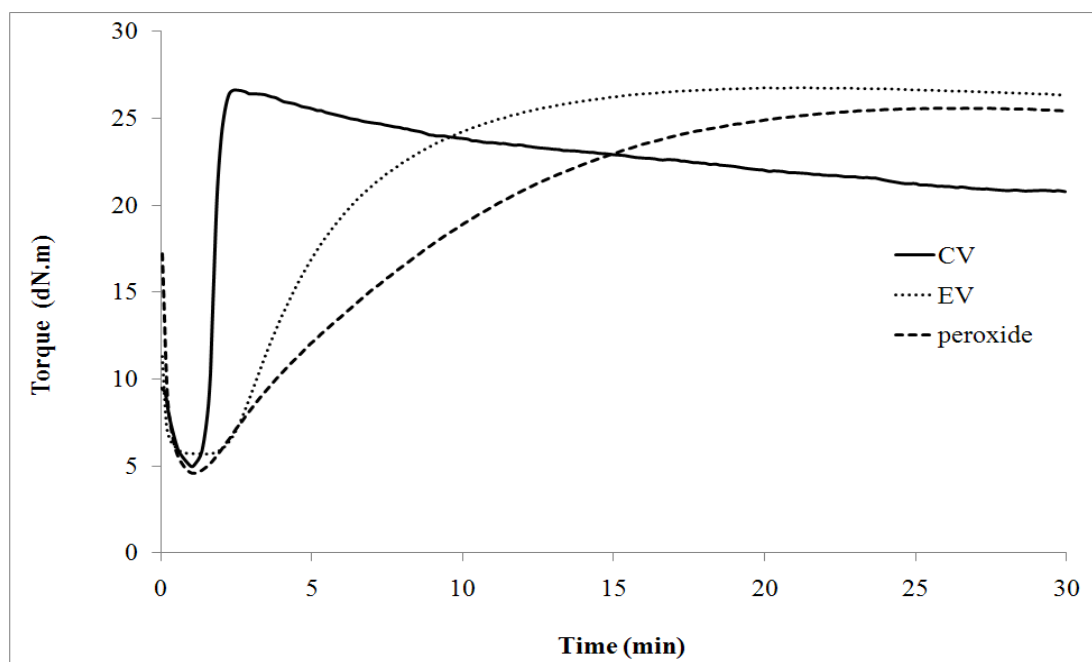
3.3.4 ศึกษาอิทธิพลของระบบวัลคาไนซ์ต่อสมบัติของยางเบลนด์ (DSNR/HNR)

จากการทดสอบแปรอัตราส่วนตามผลที่ได้จากข้อที่ 2.3.1 พบว่าอัตราส่วนการเบลนด์ยาง DSNR/HNR = 40/60 ดีที่สุด จึงได้เลือกสัดส่วนนี้มาแปรระบบการวัลคาไนซ์โดยเลือกใช้ระบบการวัลคาไนซ์ 3 ระบบ คือ 1) ระบบกำมะถันปกติ 2) ระบบอีวี และ 3) ระบบเปอร์ออกไซด์ ซึ่งสารเคมีที่ใช้ดังตารางที่ 2.10 จากนั้นนำยางคอมปาวด์ที่ได้ไปทำการทดสอบตามหัวข้อที่ 2.3.5-2.3.8

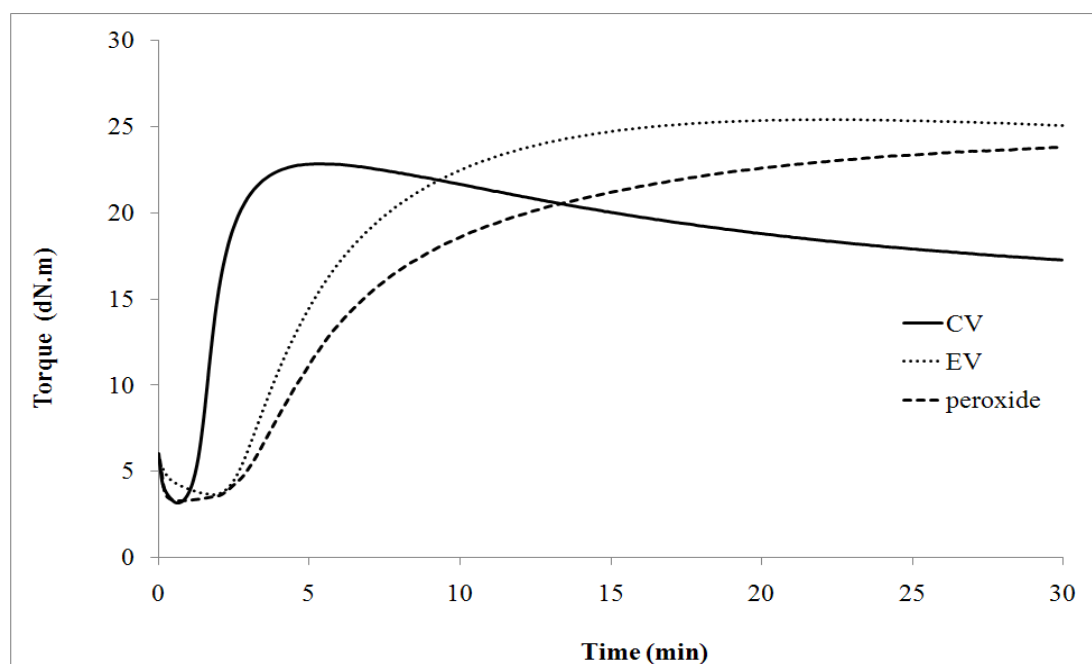
3.3.4.1 ระบบวัลคาไนซ์ต่อลักษณะการวัลคาไนซ์

DSNR25/HNR15 และ DSNR50/HNR15

ผสมยางธรรมชาติที่ดัดแปลงด้วยไดบิวทิลฟอสเฟตจากน้ำยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีปริมาณอีพอกไซด์ 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โมล กับยางธรรมชาติไฮโดรเจนที่มีปริมาณไฮโดรเจนชั้น 15 เปอร์เซ็นต์โมล ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ แล้วทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ได้ผลดังรูปที่ 3.67 และ 3.68



รูปที่ 3.67 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดกับเวลาของยางเบลนด์ระหว่าง DSNR25/HNR15 = 40/60 แปลงระบบการวัดคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 160 °C



รูปที่ 3.68 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดกับเวลาของยางเบลนด์ระหว่าง DSNR50/HNR15 = 40/60 แปลงระบบการวัดคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 160 °C

จากรูปที่ 3.67 และ 3.68 พบว่าลักษณะการวัดคาไนซ์ระบบก้ำมะถันปกติ (Conventional, CV) เป็นแบบรีเวอร์ชัน ส่วนลักษณะการวัดคาไนซ์ระบบอีวีและระบบเปอร์ออกไซด์เป็นแบบ plateau เนื่องจาก

พฤติกรรมการรีเวอร์ชันของยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันปกติจะเกิดการสลายของพันธะการเชื่อมโยงแบบไดซัลฟิดิกและพอลิซัลฟิดิกด้วยความร้อน (Poh *et al.*, 1995)

และจากรูปที่ 3.67 และ 3.68 สามารถนำมาหาค่าสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ระหว่างยางเบลนด์ DSNR25/HNR15 และ DSNR50/HNR15 ที่แปรระบบการวัลคาไนซ์ดังตารางที่ 3.20

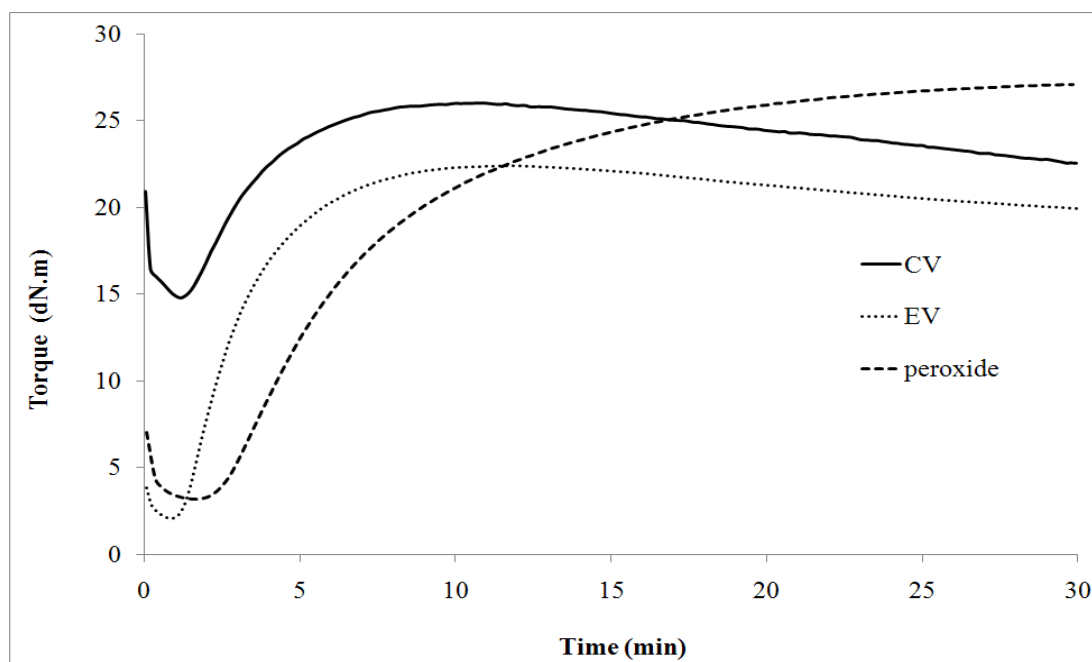
ตารางที่ 3.20 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ DSNR25/HNR15 และ DSNR50/HNR15 แปรระบบการวัลคาไนซ์

Sample	M_H (dN.m)	M_L (dN.m)	$M_H - M_L$ (dN.m)	t_{90} (min)	t_{91} (min)	CRI (min ⁻¹)
DSNR25/HNR15 = 40/60						
CV	26.65	5.00	21.65	2.06	1.40	151.52
EV	26.79	5.70	21.09	10.63	2.39	12.14
peroxide	25.59	4.58	21.01	15.94	1.85	7.10
DSNR50/HNR15 = 40/60						
CV	22.87	3.14	19.73	2.97	1.12	54.05
EV	25.41	3.65	21.76	11.08	2.57	11.75
peroxide	23.82	3.30	20.52	16.64	2.55	7.10

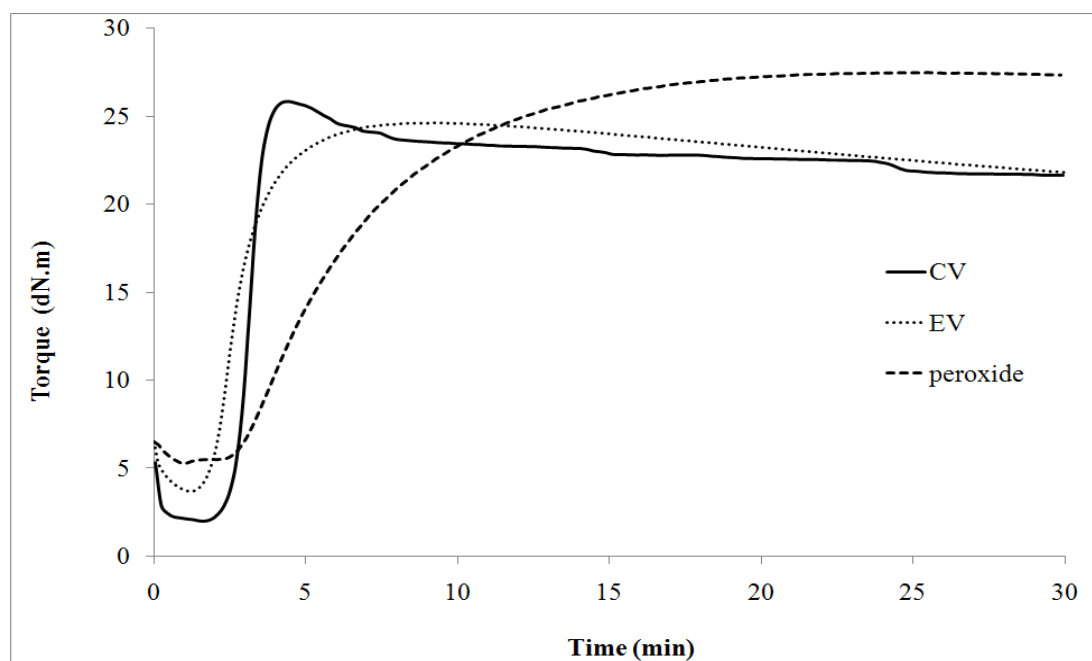
ตารางที่ 3.20 พบว่าค่าความแตกต่างของแรงบิดของยางเบลนด์ DSNR25/HNR15 และ DSNR50/HNR15 ในการวัลคาไนซ์ทั้งสามระบบมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ DSNR25/HNR15 และยางเบลนด์ DSNR50/HNR15 ในการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันปกติจะใช้ระยะเวลาในการวัลคาไนซ์เร็วกว่าระบบอีวีและระบบเปอร์ออกไซด์ตามลำดับ เนื่องจากระบบเปอร์ออกไซด์ต้องเกิดการสลายตัวของเปอร์ออกไซด์ถึง 97% จึงจะถึงระยะเวลากาววัลคาไนซ์ (Baker, 1988) ซึ่งจะตรงกันข้ามกับดัชนีอัตราการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ DSNR25/HNR15 และยางเบลนด์ DSNR50/HNR15

DSNR25/HNR40 และ DSNR50/HNR40

ผสมยางธรรมชาติที่ดัดแปลงด้วยไดบิวทิลฟอสเฟตจากน้ำยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีปริมาณอีพอกไซด์ 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โมล กับยางธรรมชาติไฮโดรจินตที่มีปริมาณไฮโดรจินชั้น 40 เปอร์เซ็นต์โมล ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ แล้วทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ได้ผลดังรูปที่ 3.69 และ 3.70



รูปที่ 3.69 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดกับเวลาของยางเบลนด์ระหว่าง DSNR25/HNR40 = 40/60 แปลงระบบการวัดคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 160 °C



รูปที่ 3.70 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดกับเวลาของยางเบลนด์ระหว่าง DSNR50/HNR40 = 40/60 แปลงระบบการวัดคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 160 °C

จากรูปที่ 3.69 และ 3.70 พบว่าลักษณะการวัดคาไนซ์ระบบกัมมันตปฏิกิริยาและระบบอีวีเป็นแบบรีเวอร์ชัน ส่วนลักษณะการวัดคาไนซ์ระบบเปอร์ออกไซด์เป็นแบบ plateau เนื่องจากพฤติกรรมการรีเวอร์ชัน

ของยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันปกติจะเกิดการสลายของพันธะการเชื่อมโยงแบบไดซัลฟิดิกและพอลิซัลฟิดิกด้วยความร้อน (Poh *et al.*, 1995)

จากรูปที่ 3.69 และ 3.70 สามารถนำมาหาค่าสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ระหว่างยางเบลนด์ DSNR25/HNR20 และ DSNR50/HNR20 ที่แปรระบบการวัลคาไนซ์ดังตารางที่ 3.21

ตารางที่ 3.21 ลักษณะการวัดค่าไนซ์ของยางเบลนด์ DSNR25/HNR40 และ DSNR50/HNR40 แปรระบบการวัดค่าไนซ์

Sample	M_H (dN.m)	M_L (dN.m)	M_H-M_L (dN.m)	t_{90} (min)	t_{91} (min)	CRI (min ⁻¹)
DSNR25/HNR40 = 40/60						
CV	26.02	14.79	11.23	4.15	1.40	21.84
EV	22.41	2.04	20.37	6.09	1.36	21.14
peroxide	27.08	3.16	23.92	15.86	2.57	7.52
DSNR50/HNR40 = 40/60						
CV	25.86	1.99	23.87	3.61	2.41	83.33
EV	24.64	3.70	20.94	4.62	1.80	35.46
peroxide	27.49	5.24	22.25	12.73	2.88	10.15

จากตารางที่ 3.21 พบว่าค่าความแตกต่างของแรงบิดของยางเบลนด์ DSNR25/HNR40 ที่วัดค่าไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์มีค่าสูงกว่าการวัดค่าไนซ์ด้วยระบบอีวี และระบบกัมมะถันปกติตามลำดับ เนื่องจากพันธะคู่ที่มีอยู่ในโมเลกุลยางที่น้อยลง ทำให้ปริมาณพันธะเชื่อมโยงที่วัดค่าไนซ์ด้วยกัมมะถันลดลง ส่วนระบบเปอร์ออกไซด์เหมาะที่จะใช้วัดค่าไนซ์ยางที่มีความอึดตัวน้อย ส่วนค่าความแตกต่างของแรงบิดของยางเบลนด์ DSNR50/HNR40 มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาระยะเวลาในการวัดค่าไนซ์ยางเบลนด์ DSNR25/HNR40 และยางเบลนด์ DSNR50/HNR40 ในการวัดค่าไนซ์ด้วยระบบกัมมะถันปกติจะใช้ระยะเวลาในการวัดค่าไนซ์เร็วกว่าระบบอีวีและระบบเปอร์ออกไซด์ตามลำดับ เนื่องจากระบบเปอร์ออกไซด์ต้องเกิดการสลายตัวของเปอร์ออกไซด์ถึง 97% จึงจะถึงระยะเวลากำหนดการวัดค่าไนซ์ (Baker, 1988) ซึ่งจะตรงกันข้ามกับดัชนีอัตราค่าไนซ์ของยางเบลนด์ DSNR25/HNR40 และยางเบลนด์ DSNR50/HNR40

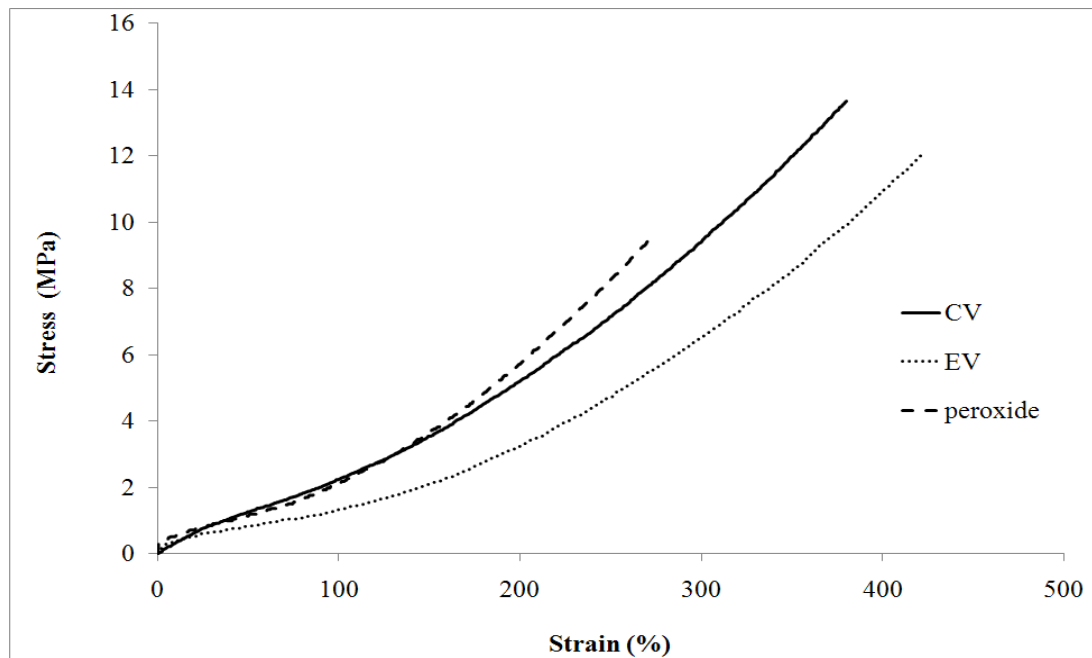
3.3.4.2 ระบบวัดค่าไนซ์ต่อสมบัติเชิงกล

นำยางคอมปาวด์ที่เตรียมได้จากหัวข้อ 2.3.3.2 มาอัดเข้าขึ้นทดสอบด้วยเครื่องอัดเข้าไฮดรอลิกที่อุณหภูมิ 160 °C ตามระยะเวลาการวัดค่าไนซ์ของยางคอมปาวด์แต่ละสูตร ตั้งแผ่นยางที่ได้ไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 24 hr ซึ่งการทดสอบจะทดสอบทั้งก่อนการบ่มแรงและหลังการบ่มแรง โดยบ่มแรงด้วยอากาศร้อนอุณหภูมิ 100 °C เป็นระยะเวลา 22 hr แล้วทำการทดสอบสมบัติเชิงกลตามหัวข้อที่ 2.3.6

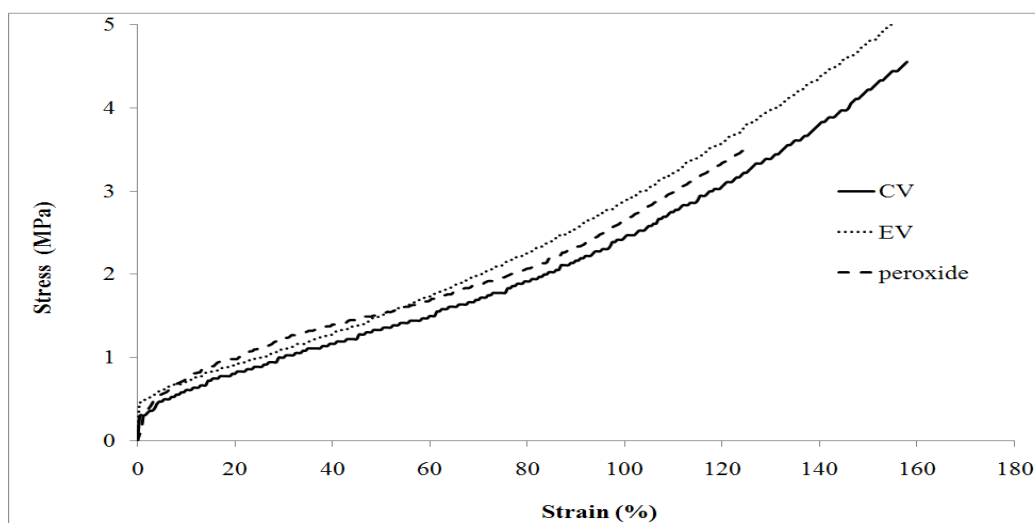
3.3.4.2.1 สมบัติเชิงกลก่อนการบ่มแรง

DSNR25/HNR15 และ DSNR50/HNR15

ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลด DSNR25/HNR15 = 40/60 และยางเบลด DSNR50/HNR15 = 40/60 โดยแปรรูป 3 ระบบ คือ ระบบกำมะถันปกติ ระบบอีวี และระบบเปอร์ออกไซด์ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด แสดงดังรูปที่ 3.71 และ 3.72



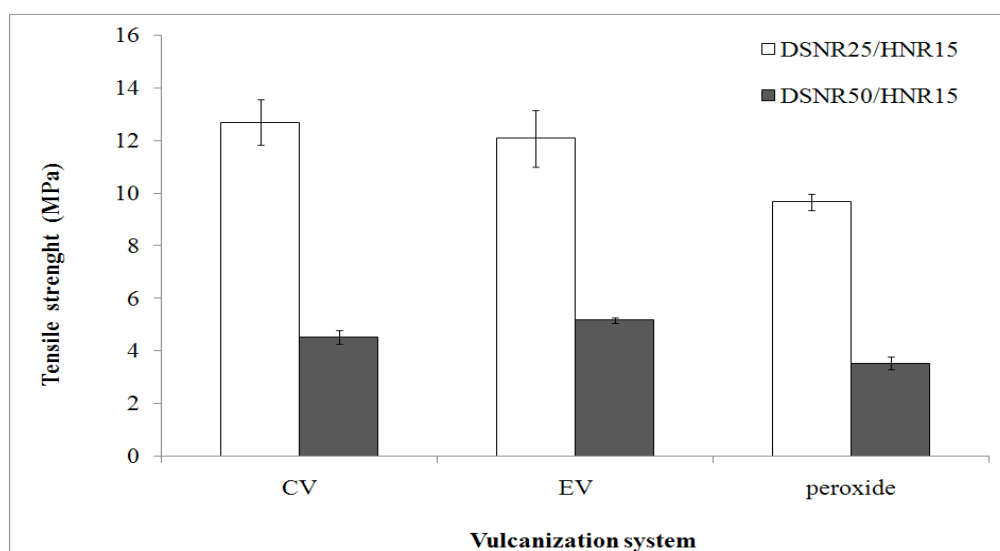
รูปที่ 3.71 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางเบลด DSNR25/HNR15 = 40/60 แปรรูประบบการวัลคาไนซ์



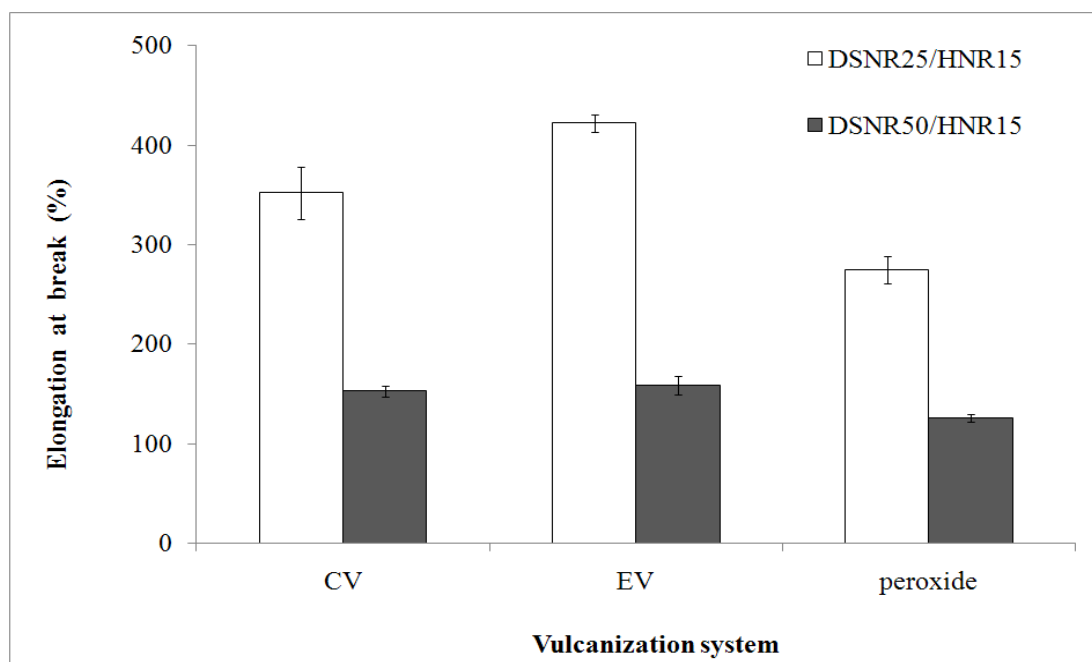
รูปที่ 3.72 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางเบลนด์ DSNR50/HNR15 = 40/60 แปรรูประบบการวัลคาไนซ์

จากรูปที่ 3.71 และ 3.72 พบว่ายางเบลนด์ DSNR50/HNR15 ที่แปรรูประบบการวัลคาไนซ์ต่างๆ จะมีค่ามอดุลัสที่ระยะยืดน้อยๆ สูงกว่ายางเบลนด์ DSNR25/HNR15 เนื่องจากยางเบลนด์ DSNR50/HNR15 มีความแข็งแรงมากกว่า

จากความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด สามารถคำนวณหาความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดได้ดังรูปที่ 3.73 และ 3.74



รูปที่ 3.73 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนด์ DSNR/HNR แปรรูประบบการวัลคาไนซ์

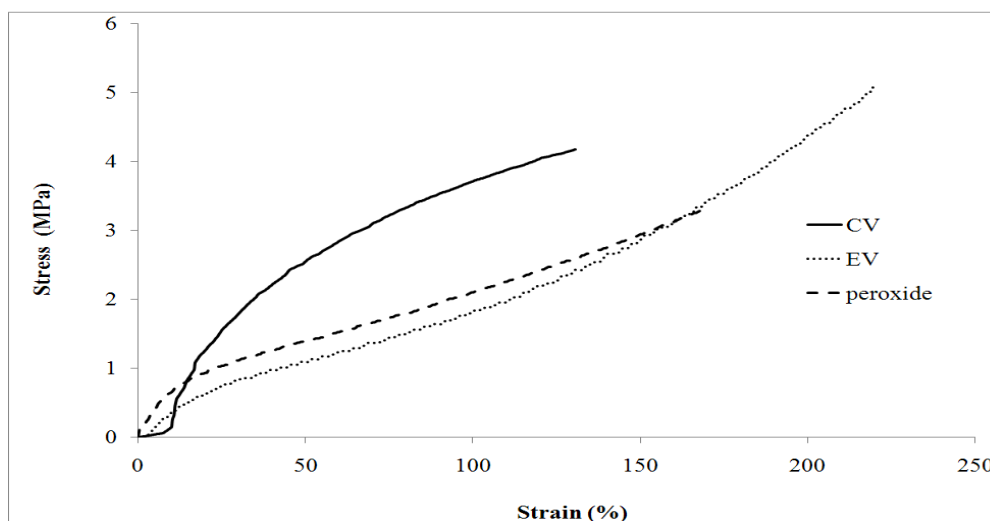


รูปที่ 3.74 ค่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ DSNR/HNR แปรระบบการวัลคาไนซ์

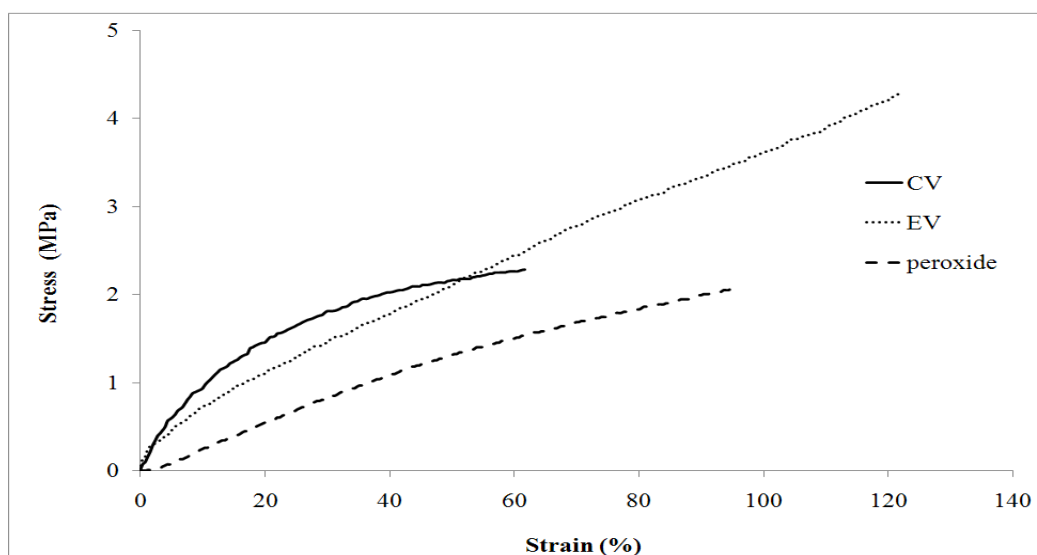
จากรูปที่ 3.73 และ 3.74 พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนด์ DSNR25/HNR15 ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันปกติและระบบอีวีมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนการวัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์จะมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงต่ำที่สุด เนื่องจากการวัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์จะมีพันธะการเชื่อมโยงแบบคาร์บอน-คาร์บอน ซึ่งเป็นพันธะที่มีความแข็งแรงและความยาวของพันธะสั้น ทำให้โมเลกุลของยางขยับตัวได้ยาก ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงต่ำ ส่วนความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ DSNR25/HNR15 ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบอีวีสูงกว่าการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันปกติและระบบเปอร์ออกไซด์ เมื่อพิจารณาของยางเบลนด์ DSNR50/HNR15 พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันปกติและระบบอีวีมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนการวัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์จะมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดต่ำที่สุด เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงควบคู่ไปกับการเกิดพันธะเชื่อมโยง ทำให้ระดับการเกิดพันธะเชื่อมโยงในการวัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ลดลง

DSNR25/HNR40 และ DSNR50/HNR40

ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลด DSNR25/HNR40 = 40/60 และยางเบลด DSNR50/HNR40 = 40/60 โดยแปรรูป 3 ระบบ คือ ระบบกำมะถันปกติ ระบบอีวี และระบบเปอร์ออกไซด์ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด แสดงดังรูปที่ 3.75 และ 3.76

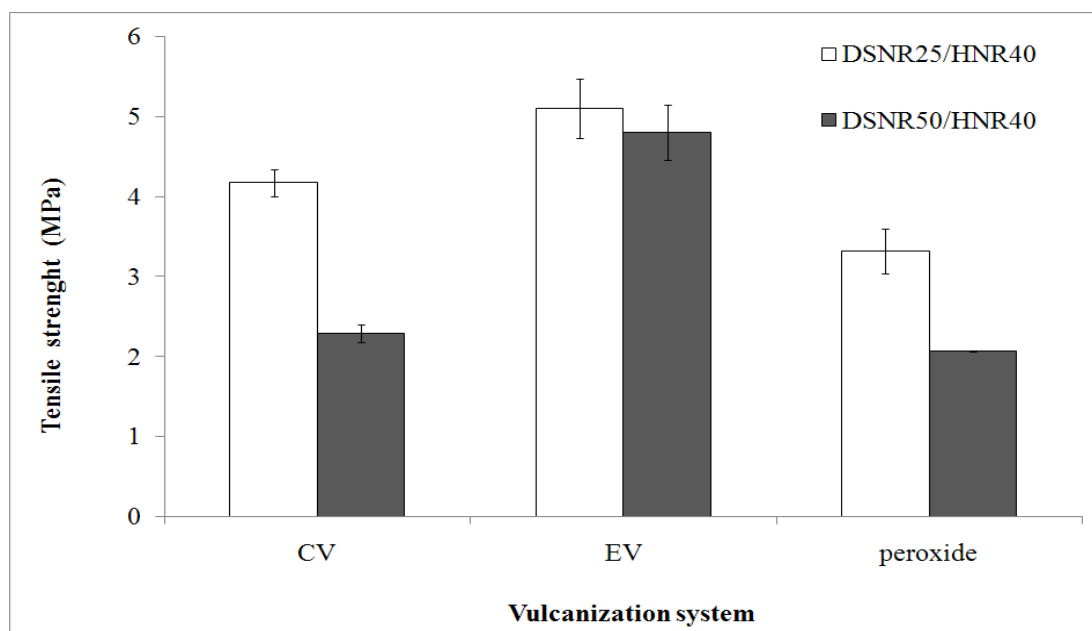


รูปที่ 3.75 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางเบลด DSNR25/HNR40 = 40/60 แปรรูประบบการวัลคาไนซ์

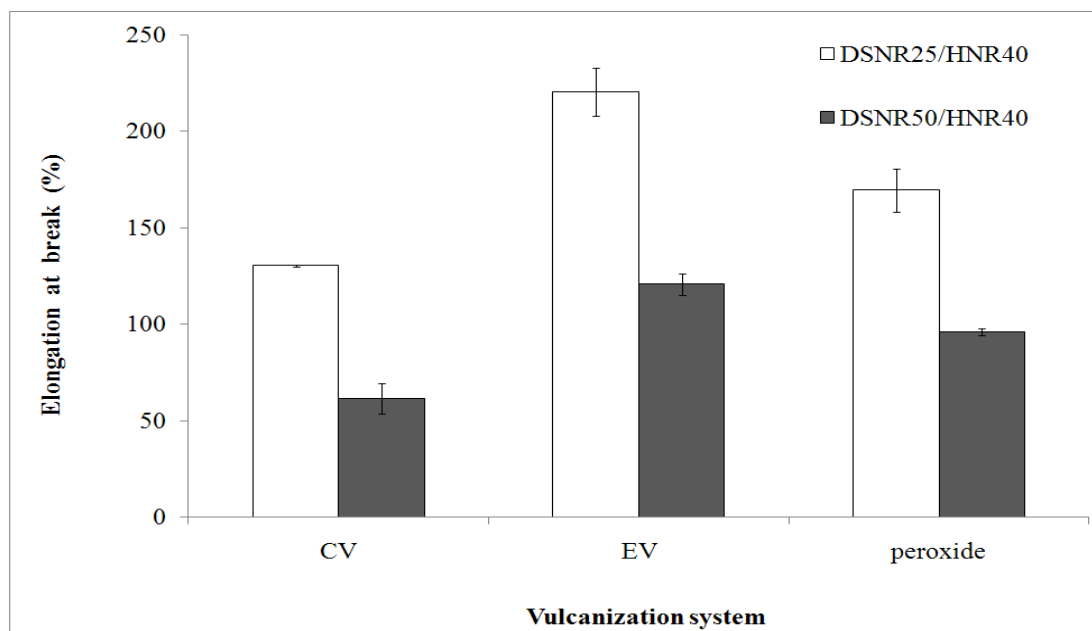


รูปที่ 3.76 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางเบลด DSNR50/HNR40 = 40/60 แปรรูประบบการวัลคาไนซ์

จากความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด สามารถคำนวณหาความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดได้ดังรูปที่ 3.77 และ 3.78



รูปที่ 3.77 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนด์ DSNR/HNR แปรรูประบบการวัลคาไนซ์



รูปที่ 3.78 ค่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ DSNR/HNR แปรรูประบบการวัลคาไนซ์

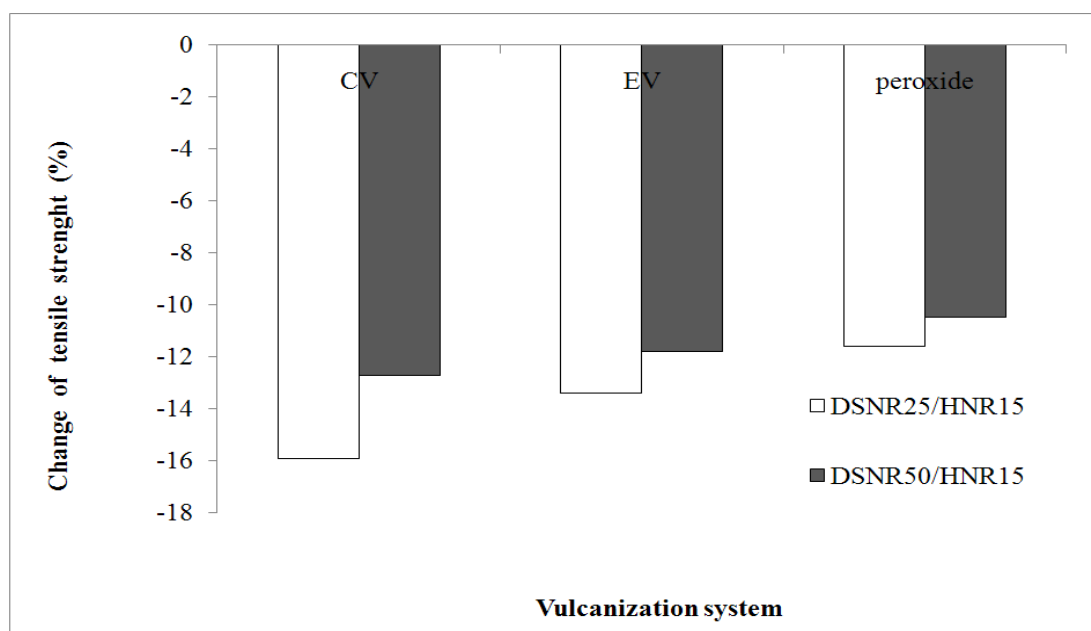
จากรูปที่ 3.77 และ 3.78 พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ DSNR25/HNR40 และยางเบลนด์ DSNR50/HNR40 ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบบิวิมีค่าสูงกว่าระบบ

อื่นๆ เนื่องจากระบบการวัลคาไนซ์แบบอีวีจะมีพันธะการเชื่อมโยงแบบคาร์บอน-ซัลเฟอร์ ซึ่งความยาวของพันธะจะยาวกว่าพันธะการเชื่อมโยงในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถันปกติและระบบเปอร์ออกไซด์ ทำให้โมเลกุลของยางขยับตัวได้ง่าย ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูง

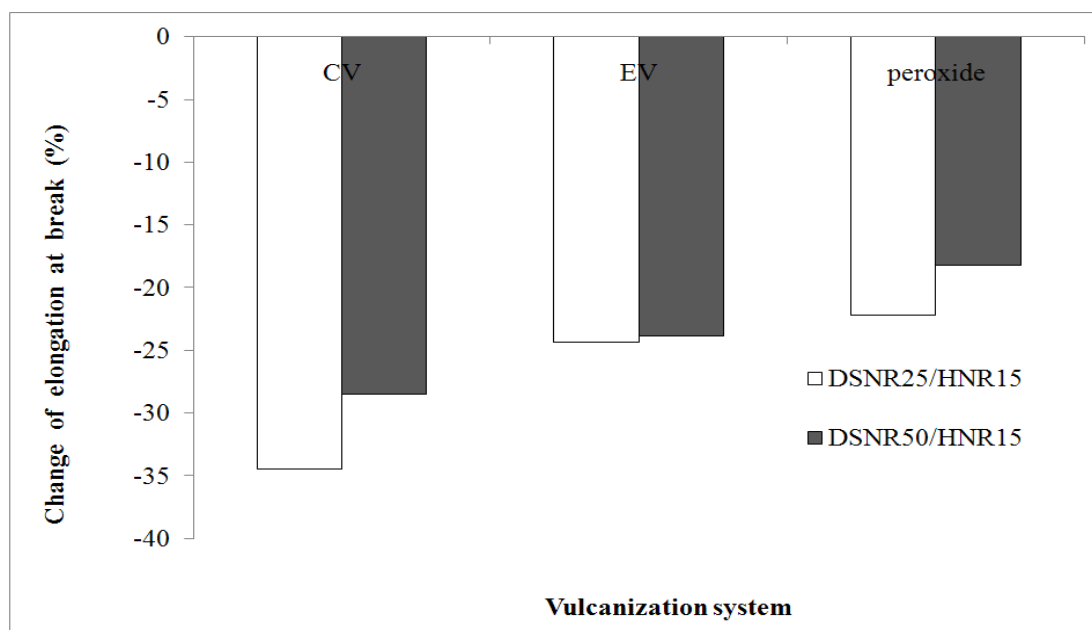
3.3.4.2.2 สมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่ง

DSNR25/HNR15 และ DSNR50/HNR15

ทดสอบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดของยางเบลนด์ DSNR/HNR แปรรูประบบการวัลคาไนซ์ 3 ระบบ



รูปที่ 3.79 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานต่อแรงดึงหลังจากการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 100°C 22 hr ของยางเบลนด์ DSNR/HNR ที่แปรรูประบบการวัลคาไนซ์

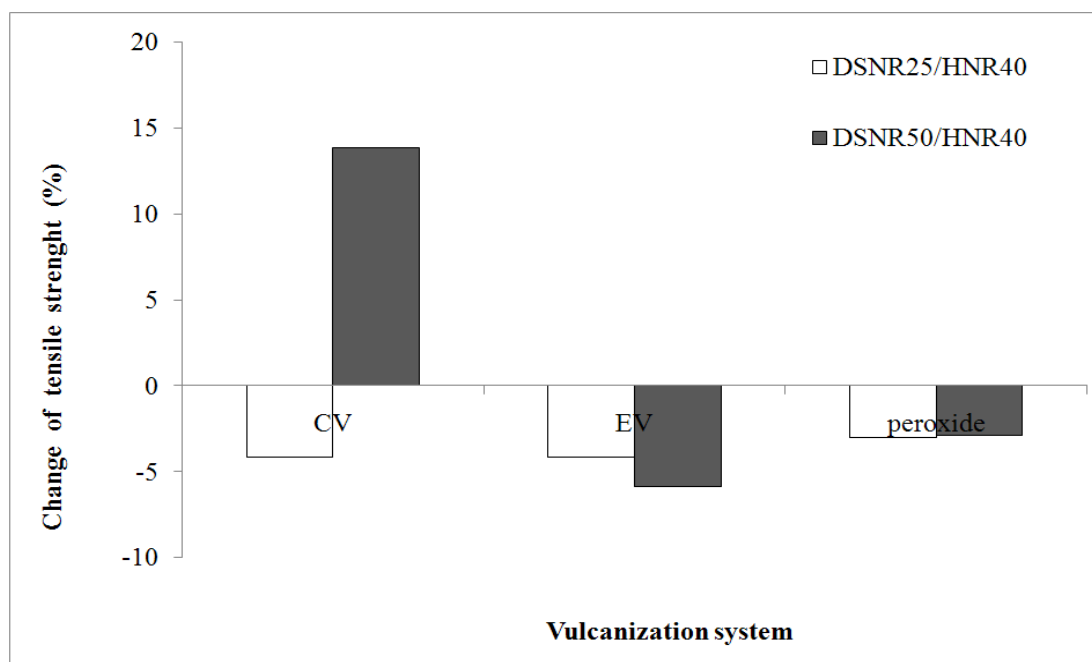


รูปที่ 3.80 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการยืดจนขาดหลังจากการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 100°C 22 hr ของยางเบลนด์ DSNR/HNR ที่แปรรูปการวัลคาไนซ์

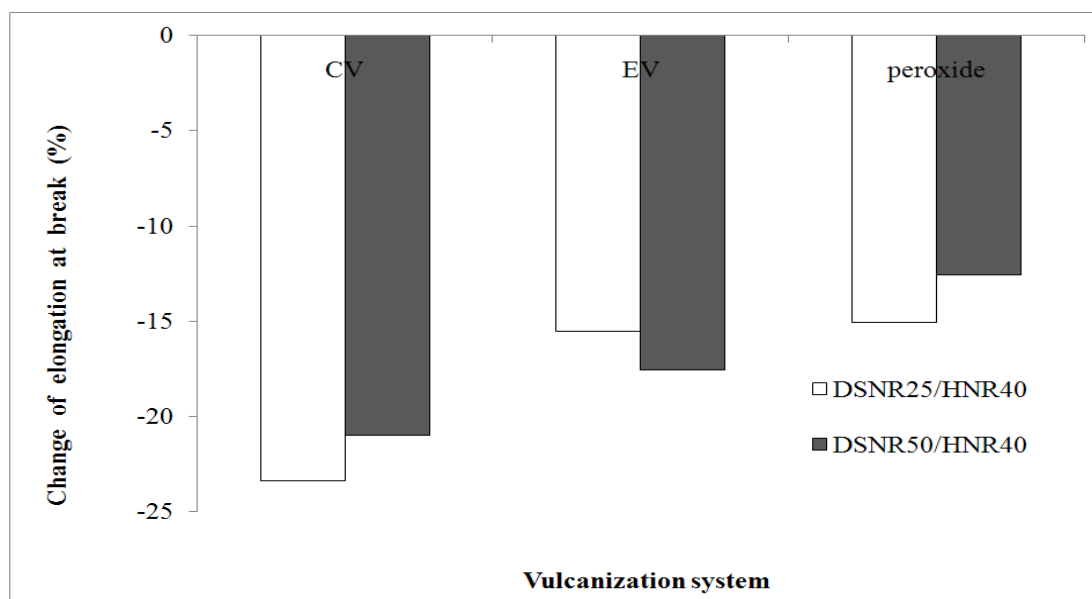
จากรูปที่ 3.79 และ 3.80 พบว่ายางเบลนด์ DSNR25/HNR15 และ DSNR50/HNR15 ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันปกติมีเปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดสูงกว่าระบบอีวีและระบบเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากระบบกำมะถันปกติจะมีกำมะถันมากจะเกิดโครงสร้างการเชื่อมโยงแบบพอลิซัลฟิดิกมาก ซึ่งไม่เสถียรต่อความร้อนและเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ง่าย ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดการแข่งขันกันกับปฏิกิริยาที่เกิดการเชื่อมโยง จึงเกิดการทำลายพันธะเชื่อมโยง จึงมีการเปลี่ยนแปลงที่สูงเมื่อทำการบ่มแรงที่อุณหภูมิสูง ส่วนระบบอีวีจะเกิดพันธะเชื่อมโยงเป็นแบบโมโนซัลฟิดิกและไดซัลฟิดิก ส่วนระบบเปอร์ออกไซด์นั้นเกิดพันธะเชื่อมโยงแบบคาร์บอน-คาร์บอน ซึ่งเสถียรต่อความร้อนได้ดีกว่า

DSNR25/HNR40 และ DSNR50/HNR40

ทดสอบเปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดของยางเบลนด์ DSNR/HNR แปรรูปการวัลคาไนซ์ 3 ระบบ



รูปที่ 3.81 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานต่อแรงดึงหลังจากการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 100°C 22 hr ของยางเบลนด์ DSNR/HNR ที่เป้ระบบการวัลคาไนซ์



รูปที่ 3.82 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการยืดจนขาดหลังจากการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 100°C 22 hr ของยางเบลนด์ DSNR/HNR ที่เป้ระบบการวัลคาไนซ์

จากรูปที่ 3.81 และ 3.82 พบว่ายางเบลนด์ DSNR25/HNR40 และ DSNR50/HNR40 ที่วัลคาไนซ์ ด้วยระบบกำมะถันปกติมีเปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานต่อแรงดึงและเปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการยืดจนขาดสูงกว่าระบบอีวีและระบบเปอร์ออกไซด์ตามลำดับ

เนื่องจากระบบกักมะถันปกติจะมีกักมะถันมากจะเกิดโครงสร้างการเชื่อมโยงแบบพอลิซัลฟิดิกมาก ซึ่งไม่เสถียรต่อความร้อนและเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ง่าย ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดการแข่งขันกันกับปฏิกิริยาที่เกิดการเชื่อมโยง จึงเกิดการทำให้พันธะเชื่อมโยง จึงมีการเปลี่ยนแปลงที่สูงเมื่อทำการบ่มแรงที่อุณหภูมิสูง ส่วนระบบอีวีจะเกิดพันธะเชื่อมโยงเป็นแบบโมโนซัลฟิดิกและไดซัลฟิดิก ส่วนระบบเปอร์ออกไซด์นั้นเกิดพันธะเชื่อมโยงแบบคาร์บอน-คาร์บอน ซึ่งเสถียรต่อความร้อนได้ดีกว่า

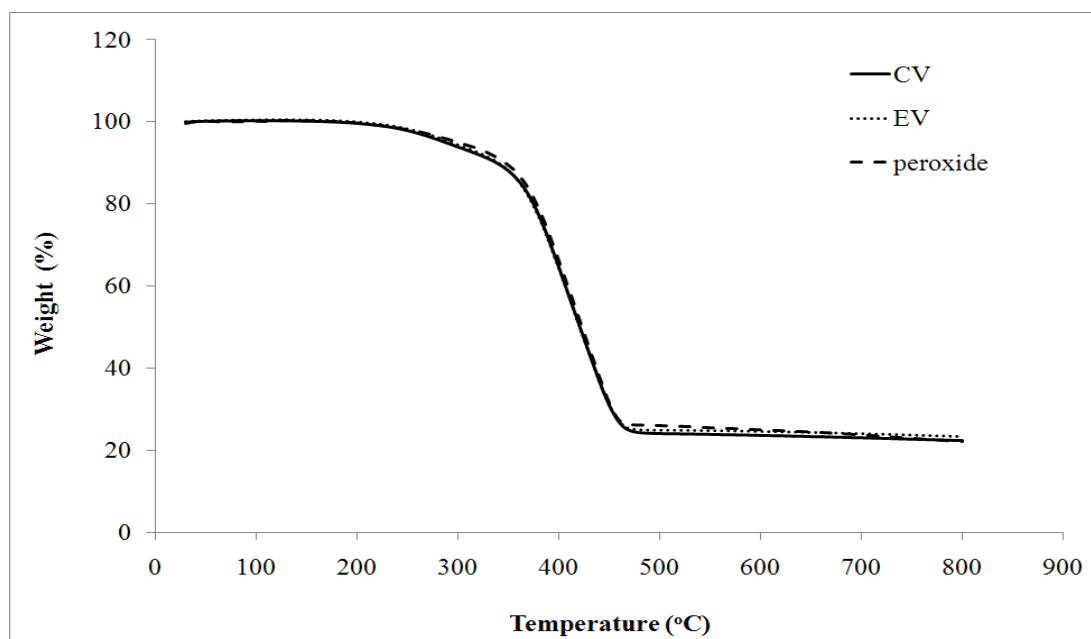
นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางเบลนด์ DSNR25 หรือ DSNR50 กับ HNR15 และ ยางเบลนด์ DSNR25 หรือ DSNR50 กับ HNR40 พบว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดตัวของยางเบลนด์ DSNR25 หรือ DSNR50 กับ HNR40 จะต่ำกว่ายางเบลนด์ DSNR25 หรือ DSNR50 กับ HNR15 เนื่องจากในโครงสร้างโมเลกุลของยาง HNR40 มีพันธะที่ไม่อิ่มตัวต่ำกว่ายาง HNR15 ทำให้มีความเสถียรต่อความร้อนได้ดีกว่า

3.3.4.3 ระบบการวัดค่าไนซ์ต่อสมบัติเชิงความร้อน

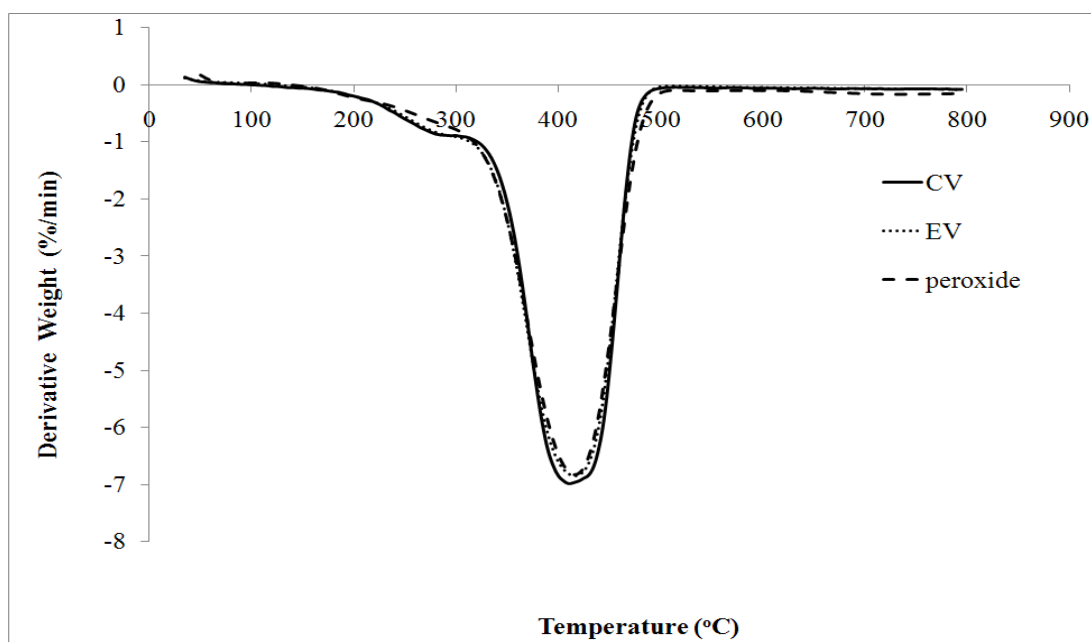
ทดสอบสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค TGA รุ่น STA 6000 ขึ้นตัวอย่างที่มีน้ำหนักอยู่ในช่วง 7 ถึง 12 มิลลิกรัม โดยทดสอบในสถานะไนโตรเจนอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 20 ml/min ทดสอบที่อุณหภูมิในช่วง 30-800 °C อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 10 °C /min แล้วทำการทดสอบสมบัติเชิงกลตามหัวข้อที่ 2.3.7

DSNR25/HNR15 และ DSNR50/HNR15

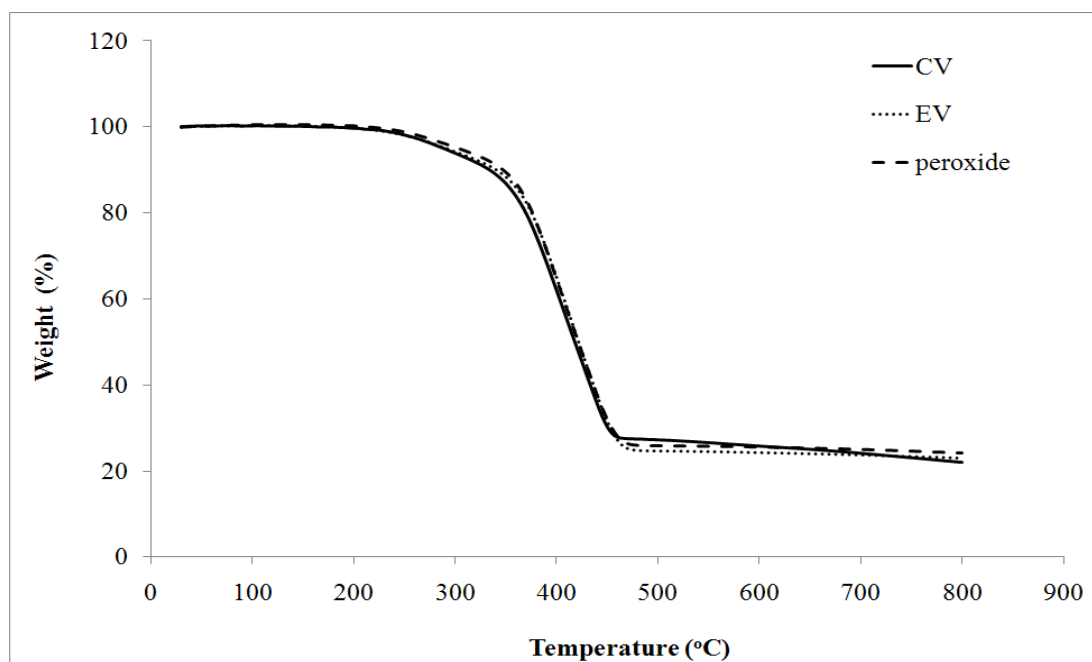
ทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของยางธรรมชาติที่ดัดแปลงด้วยไดบิวทิลฟอสเฟตจากน้ำยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีปริมาณอีพอกไซด์ 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โมล ผสมกับยางธรรมชาติไฮโดรจิเนตที่มีปริมาณไฮโดรจิเนต 15 เปอร์เซ็นต์โมล ที่แปรรูปการวัดค่าไนซ์ ได้ผลดังรูปที่ 3.83 – 3.86 และตารางที่



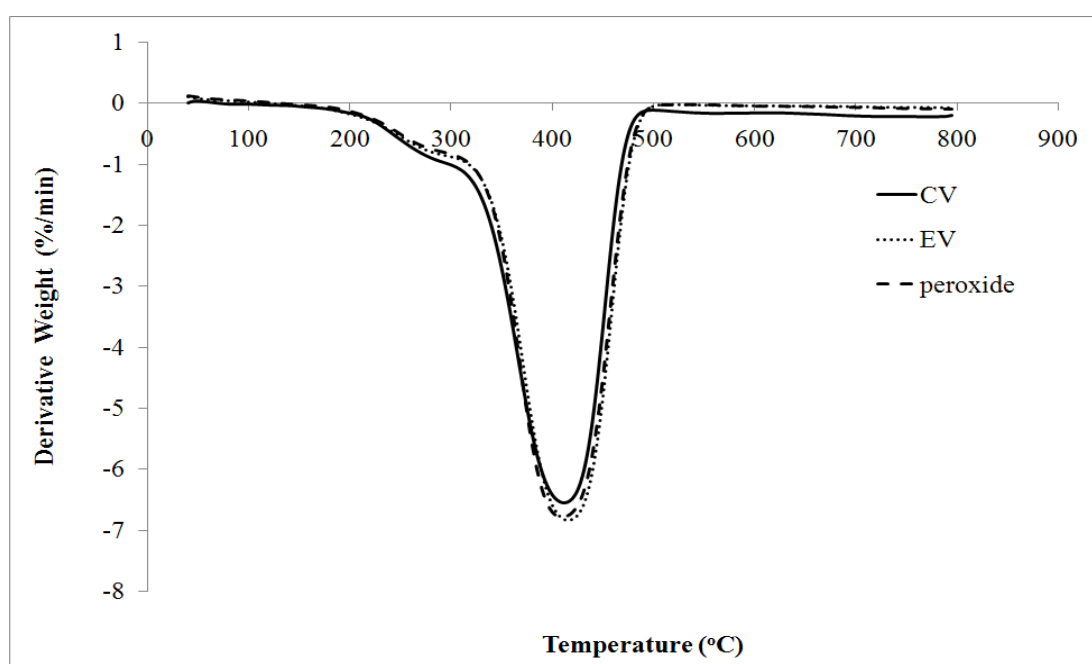
รูปที่ 3.83 เทอร์โมแกรม TGA ของยางเบลดน้ DSNR25/HNR15 = 40/60 ที่แปรระบบการวัลคาไนซ์



รูปที่ 3.84 เทอร์โมแกรม DTG ของยางเบลดน้ DSNR25/HNR15 = 40/60 ที่แปรระบบการวัลคาไนซ์



รูปที่ 3.85 เทอร์โมแกรม TGA ของยางเบลดน้ DSNR50/HNR15 = 40/60 ที่แปรระบบการวัลคาไนซ์



รูปที่ 3.86 เทอร์โมแกรม DTG ของยางเบลดน้ DSNR50/HNR15 = 40/60 ที่แปรระบบการวัลคาไนซ์

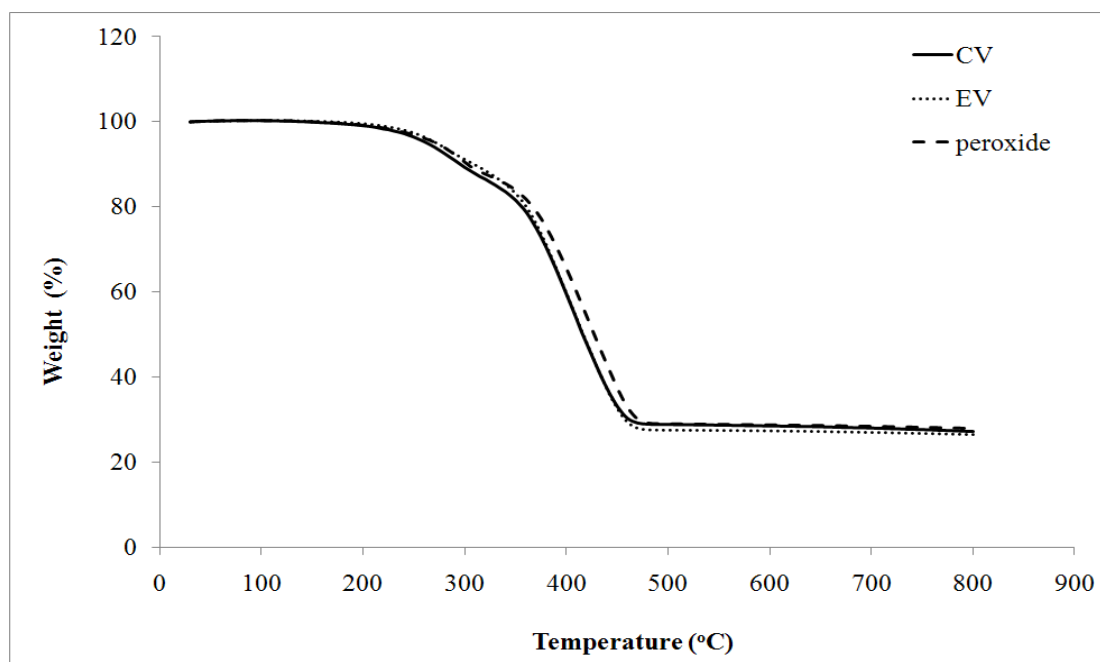
ตารางที่ 3.22 อุณหภูมิการสลายตัวของยางเบลนด์ DSNR25/HNR15 = 40/60 และ DSNR50/HNR15 = 40/60 แปรรูประบบการวัลคาไนซ์

Sample	Decomposition temperature, Td (°C)	
	1 st step	2 nd step
DSNR25/HNR15 = 40/60		
CV	266.60	403.39
EV	288.48	409.95
peroxide	-	409.64
DSNR50/HNR15 = 40/60		
CV	285.99	405.32
EV	285.98	402.28
peroxide	276.97	409.19

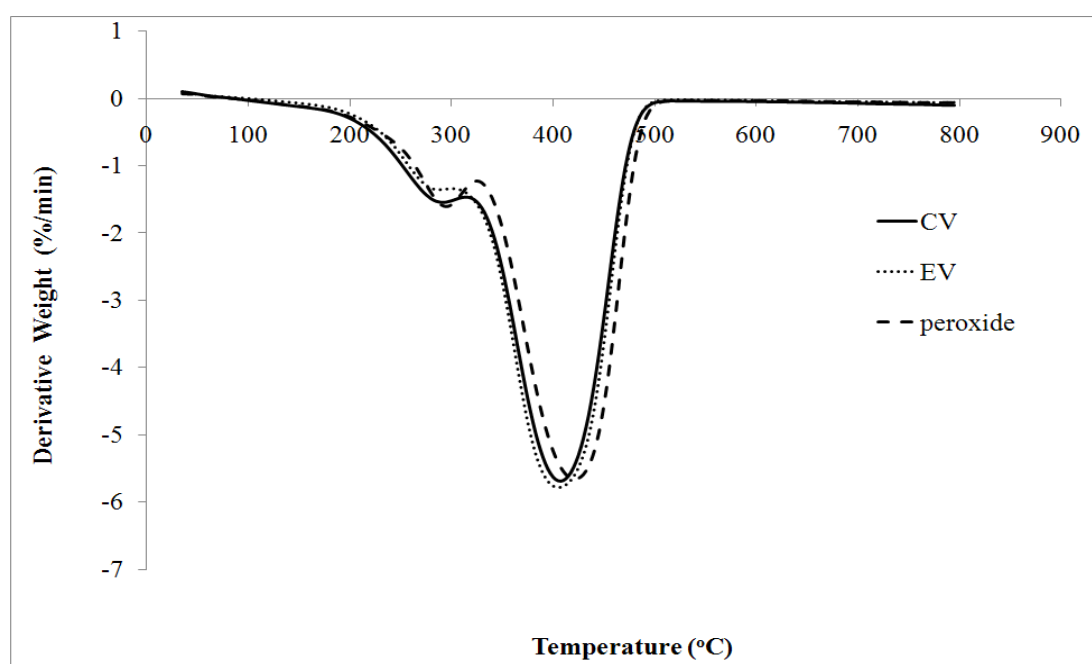
จากรูปที่ 3.83 – 3.86 และตารางที่ 3.22 พบว่ายางเบลนด์ DSNR25/HNR15 = 40/60 และ DSNR50/HNR15 = 40/60 ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ค่าอุณหภูมิการสลายตัวมีแนวโน้มสูงกว่าการใช้ระบบกำมะถันปกติและระบบอีวี เนื่องจากระบบเปอร์ออกไซด์มีพันธะเชื่อมโยงเป็นแบบคาร์บอน-คาร์บอน ซึ่งเสถียรต่อความร้อนดีกว่าระบบที่ใช้กำมะถัน

DSNR25/HNR40 และ DSNR50/HNR40

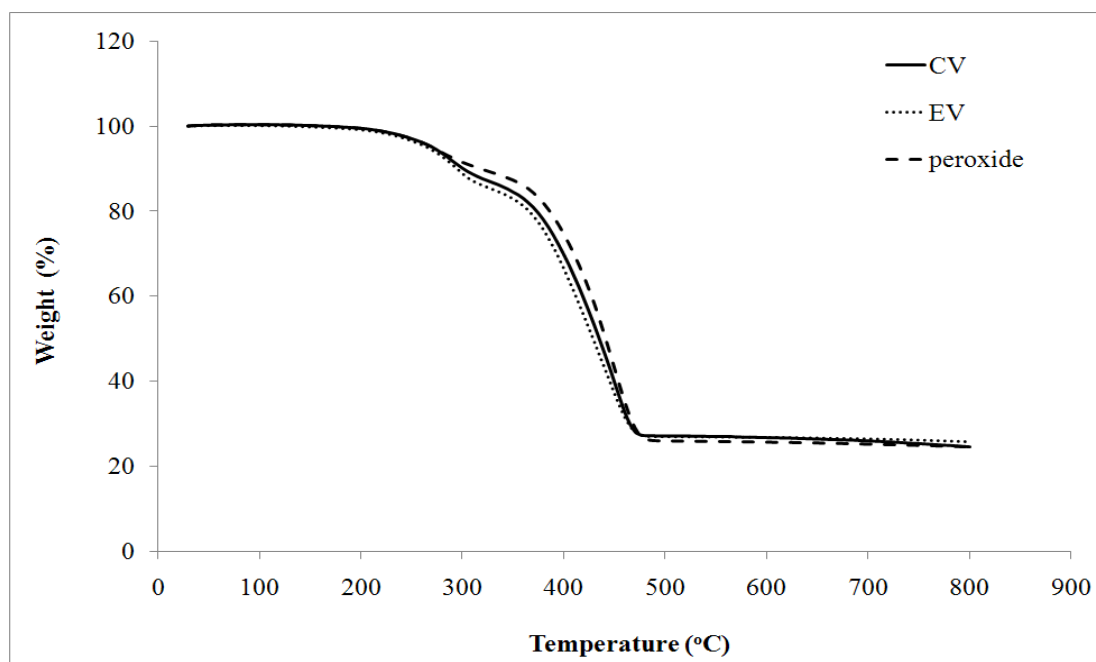
ทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของยางธรรมชาติที่ดัดแปลงด้วยไดบิวทิลฟอสเฟตจากน้ำยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีปริมาณอีพอกไซด์ 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โมล ผสมกับยางธรรมชาติไฮโดรจิเนตที่มีปริมาณไฮโดรจิเนต 40 เปอร์เซ็นต์โมล ที่แปรรูประบบการวัลคาไนซ์ ได้ผลดังรูปที่ 3.87 – 3.90 และตารางที่ 3.23



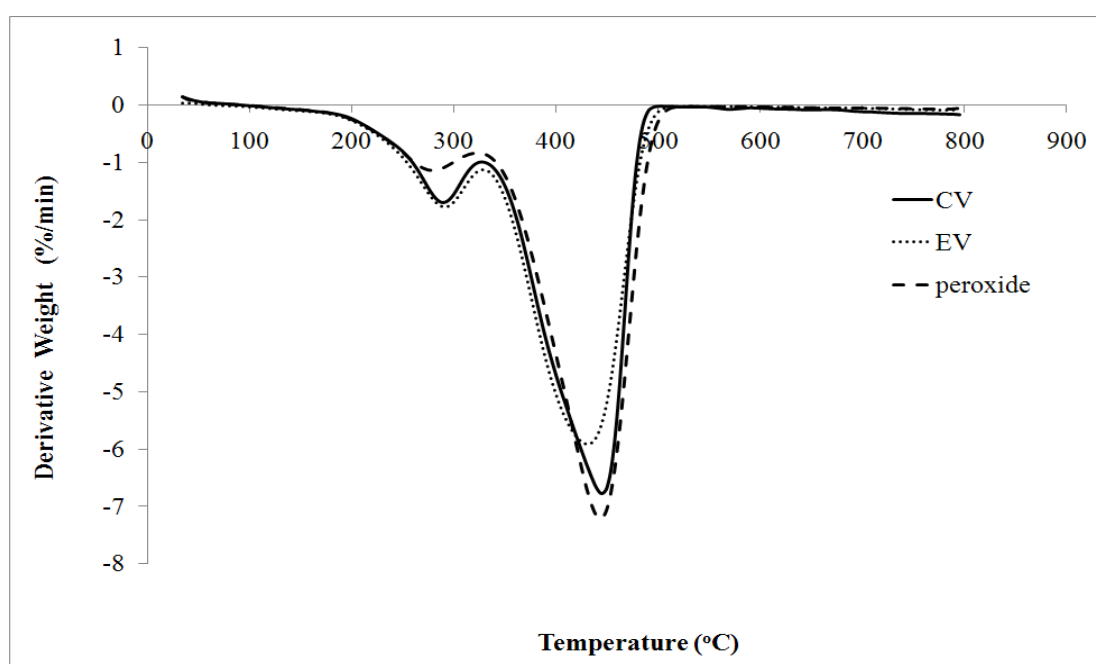
รูปที่ 3.87 เทอร์โมแกรม TGA ของยางเบลด DSNR25/HNR40 = 40/60 ที่แปรระบบการวัลคาไนซ์



รูปที่ 3.88 เทอร์โมแกรม DTG ของยางเบลด DSNR25/HNR40 = 40/60 ที่แปรระบบการวัลคาไนซ์



รูปที่ 3.89 เทอร์โมแกรม TGA ของยางเบลดชนิด DSNR50/HNR40 = 40/60 ที่แปรระบบการวัลคาไนซ์



รูปที่ 3.90 เทอร์โมแกรม DTG ของยางเบลดชนิด DSNR50/HNR40 = 40/60 ที่แปรระบบการวัลคาไนซ์

ตารางที่ 3.23 อุณหภูมิการสลายตัวของยางเบลนด์ DSNR25/HNR40 = 40/60 และ DSNR50/HNR40 = 40/60 แปรรูปการวัลคาไนซ์

Sample	Decomposition temperature, Td (°C)	
	1 st step	2 nd step
DSNR25/HNR40 = 40/60		
CV	283.10	402.20
EV	281.66	398.84
peroxide	285.69	414.62
DSNR50/HNR40 = 40/60		
CV	280.65	438.50
EV	282.20	424.36
peroxide	271.01	436.91

จากรูปที่ 3.87 – 3.90 และตารางที่ 3.23 พบว่ายางเบลนด์ DSNR25/HNR40 = 40/60 ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ค่าอุณหภูมิการสลายตัวมีแนวโน้มสูงกว่าการใช้ระบบกำมะถันปกติและระบบอีวีเนื่องจากระบบเปอร์ออกไซด์มีพันธะเชื่อมโยงเป็นแบบคาร์บอน-คาร์บอน ซึ่งเสถียรต่อความร้อนดีกว่าระบบที่ใช้กำมะถัน ส่วนยางเบลนด์ DSNR50/HNR40 = 40/60 ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันปกติและระบบเปอร์ออกไซด์มีอุณหภูมิการสลายตัวที่ใกล้เคียงกัน ส่วนการวัลคาไนซ์ด้วยระบบอีวีมีอุณหภูมิการสลายตัวที่ต่ำกว่า นอกจากนี้ยังเห็นได้ว่ายางเบลนด์ DSNR50/HNR40 มีอุณหภูมิการสลายตัวสูงกว่ายางเบลนด์ DSNR25/HNR40 เนื่องจากในโครงสร้างโมเลกุลของยาง DSNR50 มีพันธะที่ไม่อิ่มตัวต่ำกว่ายาง DSNR25 ทำให้มีความเสถียรต่อความร้อนได้ดีกว่า

4.3.4.4 อัตราส่วนการเบลนด์ต่อสมบัติทนไฟ

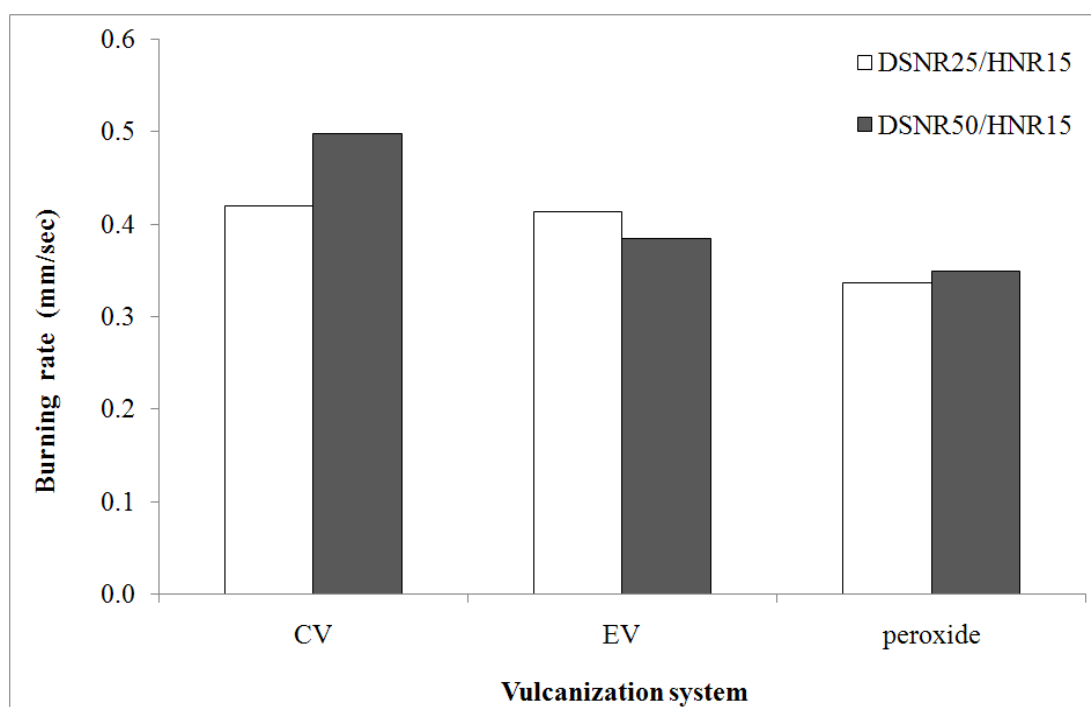
ทำการทดสอบการทนไฟตามมาตรฐาน ISO 3582 รายงานผลเป็นอัตราการเผาไหม้ (Burning rate) ในหน่วยมิลลิเมตรต่อวินาที

DSNR25/HNR15 และ DSNR50/HNR15

ทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของยางธรรมชาติที่ดัดแปลงด้วยไดบิวทิลฟอสเฟตจากน้ำยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีปริมาณอีพอกไซด์ 25 และ 50 เปอร์เซนต์โมล ผสมกับยางธรรมชาติไฮโดรจิเนตที่มีปริมาณไฮโดรจิเนต 15 เปอร์เซนต์โมล ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ได้ผลดังตารางที่ 3.24 และรูปที่ 3.91

ตารางที่ 3.24 อัตราการเผาไหม้ของยางเบลด DSNR25/HNR15 = 40/60 และยางเบลด DSNR50/HNR15 = 40/60 แปรรูประบบการวัลคาไนซ์

Sample	Burning rate (mm/sec)
DSNR25/HNR15 = 40/60	
CV	0.42
EV	0.41
peroxide	0.34
DSNR50/HNR15 = 40/60	
CV	0.50
EV	0.38
peroxide	0.35



รูปที่ 3.91 อัตราการเผาไหม้ของยางเบลด DSNR25/HNR15 = 40/60 และยางเบลด DSNR50/HNR15 = 40/60 แปรรูประบบการวัลคาไนซ์

จากตารางที่ 3.24 และรูปที่ 3.91 พบว่ายางเบลด DSNR25/HNR15 ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน ปกติ ระบบอีวีและระบบเปอร์ออกไซด์มีอัตราการเผาไหม้ที่ใกล้เคียงกัน ส่วนยางเบลด DSNR50/HNR15 ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบอีวีและระบบเปอร์ออกไซด์มีอัตราการเผาไหม้ที่ใกล้เคียงกัน และที่วัลคาไนซ์ระบบ

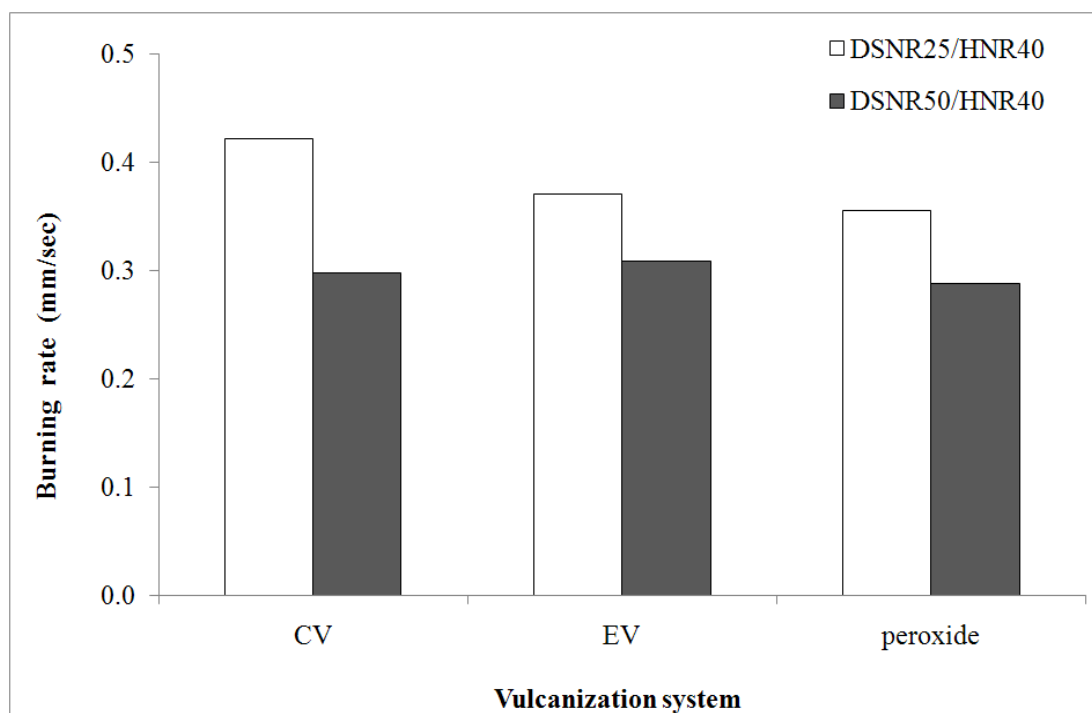
กัมมันตภาพมีอัตราการเผาไหม้สูงกว่า เนื่องจากระบบกัมมันตภาพพลังงานพันธะต่ำจึงใช้พลังงานในการสลายพันธะที่ต่ำ ดังนั้นจึงใช้เวลาการเผาไหม้ที่สั้นกว่า

DSNR25/HNR40 และ DSNR50/HNR40

ทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของยางธรรมชาติที่ดัดแปลงด้วยไดบิวทิลฟอสเฟตจากน้ำยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีปริมาณอีพอกไซด์ 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โมล กับยางธรรมชาติไฮโดรจิเนตที่มีปริมาณไฮโดรจิเนต 40 เปอร์เซ็นต์โมล ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์ได้ผลดังตารางที่ 3.25 และรูปที่ 3.92

ตารางที่ 3.25 อัตราการเผาไหม้ของยางเบลนด์ DSNR25/HNR40 = 40/60 และยางเบลนด์ DSNR50/HNR40 = 40/60 แปรระบบการวัดคาโนซ์

Sample	Burning rate (mm/sec)
DSNR25/HNR40 = 40/60	
CV	0.42
EV	0.37
peroxide	0.36
DSNR50/HNR40 = 40/60	
CV	0.30
EV	0.31
peroxide	0.29



รูปที่ 3.92 อัตราการเผาไหม้ของยางเบลด DSNR25/HNR40 = 40/60 และยางเบลด DSNR50/HNR40 = 40/60 แปรรูประบบการวัลคาไนซ์

จากตารางที่ 3.25 และรูปที่ 3.92 พบว่ายางเบลด DSNR25/HNR40 และยางเบลด DSNR50/HNR40 ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันปกติ ระบบอีวีและระบบเปอร์ออกไซด์มีอัตราการเผาไหม้ที่ใกล้เคียงกัน

บทที่ 4 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผลการทดลอง

4.1.1 สถานะการเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซค์ และยางธรรมชาติที่ดัดแปลงโมเลกุลด้วยไดบิวทิลฟอสเฟต

4.1.1.1 การเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซค์ที่ 25 และ 50 เปอร์เซนต์โมล ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 และ 5 ชั่วโมง ตามลำดับ

4.1.1.2 การเตรียมยางธรรมชาติที่ดัดแปลงโมเลกุลด้วยไดบิวทิลฟอสเฟตในสถานะน้ำยาง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จากการใช้อย่างธรรมชาติอิพอกไซค์ที่ 25 และ 50 เปอร์เซนต์โมล มีการเกาะติดของหมู่ไดออกซาฟอสโฟเลนเท่ากับ 6.25 เปอร์เซนต์โมลและ 24.76 เปอร์เซนต์โมล ตามลำดับ

4.1.2 สถานะการเตรียมยางธรรมชาติไฮโดรจิเนต

4.1.2.1 การเตรียมยางธรรมชาติไฮโดรจิเนตในสถานะน้ำยาง ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง โดยใช้สารตัวเร่ง มีเปอร์เซนต์ไฮโดรจิเนชันเท่ากับ 18.7 เปอร์เซนต์โมล

4.1.2.2 การเตรียมยางธรรมชาติไฮโดรจิเนตในสถานะน้ำยาง ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยไม่ใช้สารตัวเร่ง มีเปอร์เซนต์ไฮโดรจิเนชันเท่ากับ 14.53 เปอร์เซนต์โมลและ 39.15 เปอร์เซนต์โมล

4.1.3 สมบัติเชิงกล

4.1.3.1 สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาด

พิจารณาแปรอัตราส่วนการเบลนด์ พบว่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ DSNR25/HNR15 และ DSNR25/HNR20 ที่สัดส่วนการเบลนด์ 40/60 สูงที่สุด ยางเบลนด์ DSNR25/HNR40 มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มอัตราส่วนยาง HNR40 ส่วนยางเบลนด์ DSNR50/HNR15, DSNR50/HNR20 และ DSNR50/HNR40 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอัตราส่วนยาง HNR เมื่อพิจารณาแปรระบบการวัลคาไนซ์พบว่าวัลคาไนซ์ด้วยระบบอีวีดีที่สุด

4.1.3.2 สมบัติหลังการบ่มเร่ง

พิจารณาแปรอัตราส่วนการเบลนด์ พบว่าเปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ DSNR25/HNR15, DSNR50/HNR15, DSNR25/HNR20, DSNR50/HNR20 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอัตราส่วนของยาง HNR ส่วนยางเบลนด์ DSNR25/HNR40

และ DSNR50/HNR40 มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของยาง HNR เมื่อพิจารณาแปรระบบการวัลคาไนซ์พบว่าการวัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ไฮด์มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด

4.1.4 สมบัติเชิงความร้อน

พิจารณาแปรอัตราส่วนการเบลนด์ พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวของยางเบลนด์ DSNR25/HNR15, DSNR50/HNR15, DSNR25/HNR20, DSNR50/HNR20, DSNR25/HNR40 และ DSNR50/HNR40 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอัตราส่วนของยาง HNR เมื่อพิจารณาแปรระบบการวัลคาไนซ์พบว่าการวัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์มีอุณหภูมิการสลายตัวที่สูง

4.1.5 สมบัติการทนไฟ

พิจารณาแปรอัตราส่วนการเบลนด์ พบว่าอัตราการเผาไหม้ของยางเบลนด์ DSNR25/HNR15, DSNR50/HNR15, DSNR25/HNR20, DSNR50/HNR20, DSNR25/HNR40 และ DSNR50/HNR40 มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มอัตราส่วนของ DSNR เมื่อพิจารณาแปรระบบการวัลคาไนซ์พบว่าการวัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์จะให้อัตราการการเผาไหม้ที่ต่ำที่สุด

4.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

4.2.1 ศึกษาสารเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างยางทั้งสองชนิด เนื่องจากยางทั้งสองชนิดมีความเป็นขั้วที่แตกต่างกันมาก

4.2.2 ศึกษาวิธีการเตรียมยางเบลนด์ด้วยวิธีอื่น เช่น เนื่องจากสารเคมีส่วนใหญ่มีขั้วจะเข้ากับเฟสยางที่ขั้วมากกว่า เพื่อให้สารเคมีกระจายตัวดีควรผสมสารเคมีกับยางที่ไม่มีขั้วก่อน แล้วจึงผสมกับยางที่มีขั้วทีหลัง เป็นต้น

4.2.3 ศึกษาเทคนิคการควบคุมโครงสร้างของยาง DSNR และยาง HNR ให้มีหมู่ข้างเคียงให้น้อยที่สุด

บรรณานุกรม

- ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. *เคมีพอลิเมอร์พื้นฐาน*. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2526.
- บุญญานิช อินทรพัฒน์. *เทอร์โทพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์เอทิลีนไวนิลอะซิเตทกับยางธรรมชาติอิพอกไซค์และยางธรรมชาติที่ดัดแปลงโมเลกุลด้วยไดบิวทิลฟอสเฟต*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2546.
- พรพรรณ นิธิอุทัย. *สารเคมีสำหรับยาง*. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2528.
- สิทธิพร สงกล. *การดัดแปลงทางเคมีของโมเลกุลยางธรรมชาติอิพอกไซค์ด้วยไดบิวทิลฟอสเฟต*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2550.
- Annual Book of ASTM D2084-95. *Standard Test Method for Rubber Property—Vulcanization Using Oscillating Disk Cure Meter*. Section 9: Rubber. Volume 09:01 Rubber, Natural and Synthetic General Test Method; Carbon Black, 2005.
- Annual Book of ASTM D3182-89. *Standard Practice for Rubber—Materials, Equipment, and Procedures for Mixing Standard Compounds and Preparing Standard Vulcanized Sheets*. Section 9: Rubber. Volume 09:01 Rubber, Natural and Synthetic General Test Method; Carbon Black, 2001.
- Annual Book of ASTM D412. *Standard Test Method for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomer-Tension*. Section 9: Rubber. Volume 09:01 Rubber, Natural and Synthetic General Test Method; Carbon Black, 2000.
- Annual Book of ASTM D573. *Standard Test Method for Rubber—Deterioration in an Air Oven*. Section 9: Rubber. Volume 09:01 Rubber, Natural and Synthetic General Test Method; Carbon Black.
- Baker, C.S.L. *Natural Rubber Science and Technology*. (Roberts A.D., ed.). Oxford University Press. Oxford, 1988: 457-507.

- Brosse, J.C., Campistron, I., Derouet, D., El Hamdaoui, A., Houdayer, S., Reyx, D. and Ritoit-Gillier, S. *Chemical Modifications of Polydiene Elastomers: A Survey and Some Recent Results*. J. Appl. Polym. Sci, 2000; 78: 1461–1477.
- Brydson, J.A. *Rubbery Materials and Their Compounds*. Essex, England: Elsevier Ltd, 1988; 85-87.
- Derouet, D., Brosse, J.C., Cauret, L., Morvan, F. and Mulder Houdayer, S. *Chemical Modification of Polydienic Elastomers by Organophosphorated Reagents*. J. Appl. Polym. Sci, 2003; 87: 47-60.
- Derouet, D., Morvan, F. and Brosse, J.C. *Chemical Modification of 1,4-polydienes by di(alkyl or aryl)phosphates*. Eur. Polym. J, 2001; 37(7): 1297-1313.
- Gelling, I.R. *Epoxidised Natural Rubber*. J. nat. Rubb. Res, 1991; 6(3): 184-205.
- Grassie, N. and Scott, G. *Polymer Degradation and Stabilization*. Cambridge Univwesity Press. Cambridge, 1985; 170-180.
- Ikeda, Y., Phinyocheep, P., Kittipoom, S., Ruancharoen, J., Kokubo, Y., Morita, Y., Hijikata, K. and Kohjiya, S. *Mechanical Characteristics of Hydrogenated Natural Rubber Vulcanizates*. Polym. Adv. Technol, 2008; 19: 1608-1615.
- International Standard. ISO 3582-1978. *Cellular Plastic and Cellular Rubber Materials-Laboratory Assessment of Horizontal Burning Characteristics of Small Specimens Subjected to a Small Flame*, 2006.
- Inoue, S. I. and Nishio, T. *Synthesis and Properties of Hydrogenated Natural Rubber*. J. Appl. Polym. Sci, 2007; 103: 3957–3963.
- Loadman, M.J.R. and Tidd, B.K. *Natural Rubber Science and Technology*. (Roberts A.D., ed.). Oxford University Press. Oxford, 1988; 999-1004.
- Mahittikul, A., Prasassarakich, P. and Rempel, G.L. *Structure and Properties of Hydrogenated Natural Rubber Latex using $\text{OsHCl}(\text{CO})(\text{O}_2)(\text{PCy}_3)_2$ as a Catalyst and Diimide Reduction.*, Department of Chemical Technology Faculty of Science Chulalongkorn University, 2005; ISBN 974-53-2451-5.
- Mahittikul, A., Prasassarakich, P. and Rempel, G.L. *Hydrogenation of Natural Rubber Latex in the Presence of $\text{OsHCl}(\text{CO})(\text{O}_2)(\text{PCy}_3)_2$* , J. Appl. Polym. Sci, 2006; 100: 640–655.

- Mahittikul, A., Prasassarakich, P. and Rempel, G.L. *Hydrogenation of Natural Rubber Latex in the Presence of $[Ir(cod)(PCy_3)(py)]PF_6$* , J Mol Cat A: Chem 2008, doi:10.1016 / j. molcata. 2008.09.006.
- Nghia, P.T., Onoe, H., Yamamoto, Y. and Kawahara, S. *Hydrogenation of natural rubber having epoxy group.*, Colloid Polym. Sci, 2008; 286: 993-998.
- Phinyocheep, P. and Boonjairak, K. *Investigation on Hydrogenation and Epoxidation of Natural Rubber in Latex Stage*. Proceedings of International Rubber Conference. Lyon. France-May 16-18. 2006.
- Poh, B.T., Kwok, C.P. and Lim, G.H. *Reversion Behavior of Epoxidized Natural Rubber*. Eur. Polym. J, 1995; 31(3): 223-226.
- Sarkar, D.M., De, P.P. and Bhowmick, A.K. *Diimide Reduction of Carboxylated Styrene-butadiene Rubber in Latex Stag*. Polymer, 1999; 41: 907-915.
- Samran, J., Phinyocheep, P., Daniel, P. and Kittipoom, S. *Hydrogenation of Unsaturated Rubbers Using Diimide as a Reducing Agen.*, J. Appl. Polym. Sci, 2005; 95: 16–27.
- Singha, N.K., De, P.P. and Sivaram, S. *Homogeneous Catalytic Hydrogenation of Natural Rubber using $RhCl(PPh_3)_3$* , J. Appl. Polym. Sci, 1997; 66: 1647-1652.
- Xie, H.Q., Li, X.D., Liu, X.Y. and Guo, J.S. *Hydrogenation and Neutralization of Carboxylic Styrene-Butadiene Latex to Form Thermoplastic Elastomer with Excellent Thermooxidation Resistance.*, J. Appl. Polym. Sci, 2002; 83:1375–1384.
- Xie, H.Q., Li, X.D. and Guo, J.S. *Hydrogenation of Nitrile-Butadiene Rubber Latex to Form Thermoplastic Elastomer with Excellent Thermooxidation Resistance.*, J. Appl. Polym. Sci, 2003; 90: 1026–1031.
- Yoksan, R. *Epoxidized Natural Rubber for Adhesive Applications*. Kasetsart. J. Nat. Sci, 2008; 42: 325-332.
- Zhou, S., Bai, H. and Wang, J. *Hydrogenation of Acrylonitrile-Butadiene Rubber Latexes*. J. Appl. Polym. Sci, 2004; 91: 2072–2078.