

## บทที่ 4

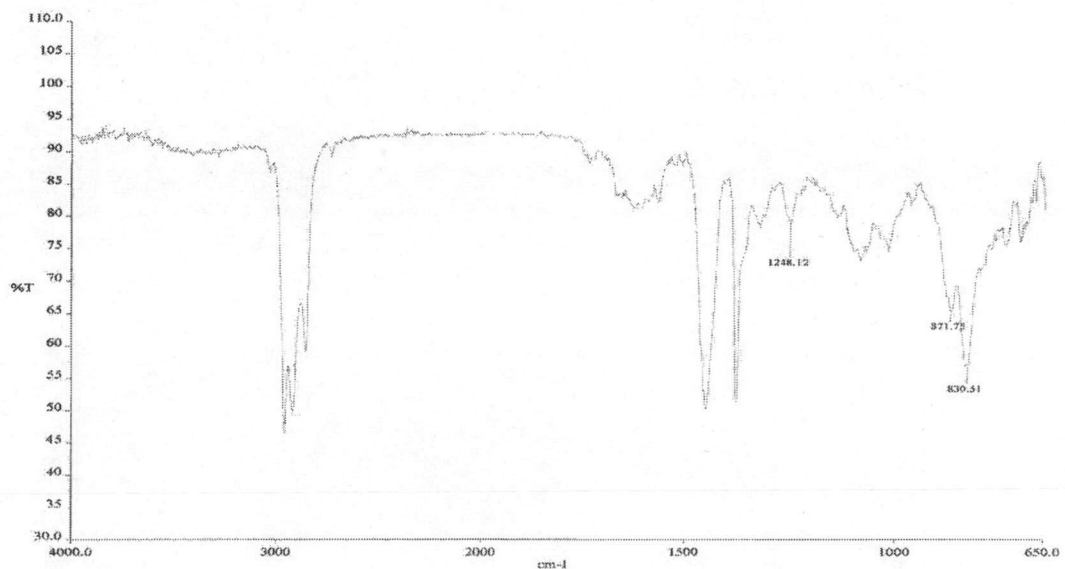
### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 การวิเคราะห์ยาง ENR ด้วยเทคนิค FT-IR

รูปที่ 4.1 แสดง FT-IR สเปกตรัม ของยาง ENR ที่เตรียมได้จากการใช้สารเคมีสูตรที่ 1 ที่เวลา 10 ชั่วโมง สูตรการเตรียมยาง ENR แสดงในตารางที่ 4.1

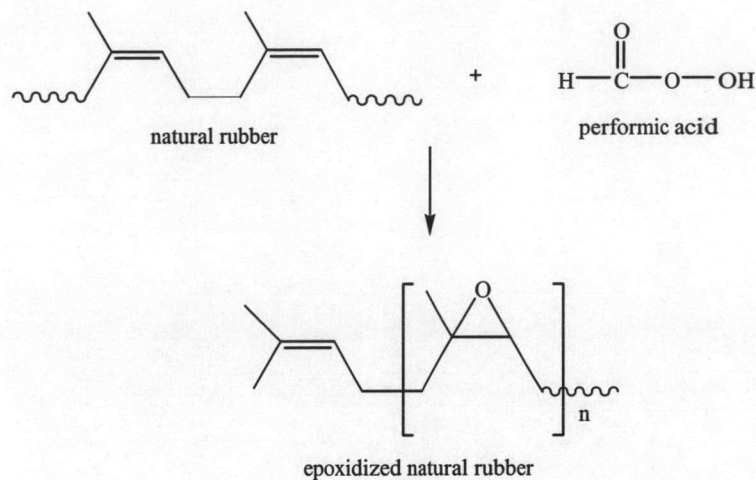
ตารางที่ 4.1 สูตรการเตรียมยาง ENR

สารเคมี	สูตร						
	1	2	3	4	5	6	7
Latex 20% DRC (g)	380	380	380	380	380	380	380
Terric16A-16 (g)	2.28	2.28	2.28	2.28	2.28	2.28	2.28
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์(M)	0.25	0.50	0.75	1.00	0.75	0.75	0.75
กรดฟอร์มิก (M)	0.75	0.75	0.75	0.75	0.25	0.50	1.00



รูปที่ 4.1 ตัวอย่าง FT-IR สเปกตรัมของยาง ENR

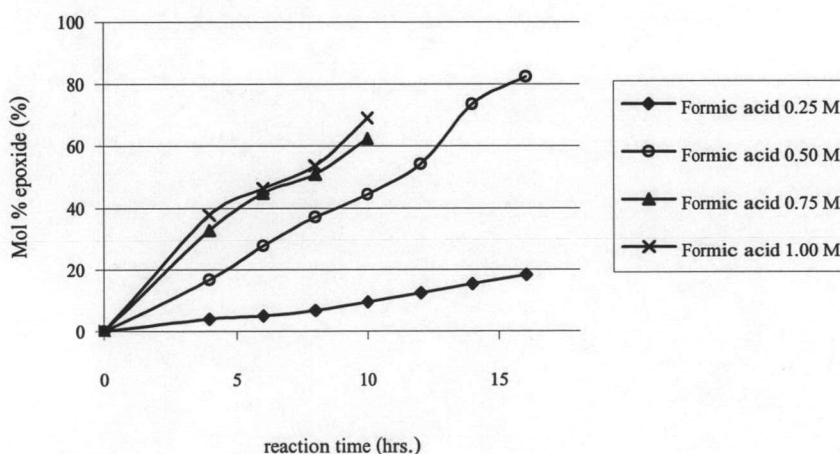
จากรูปที่ 4.1 พบว่า มีตำแหน่งของแถบการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของหมู่เอพอกไซด์ที่เลขคลื่น 870 และ 1240  $\text{cm}^{-1}$  และไม่พบแถบการดูดกลืนแสงของหมู่คาร์บอนิล ไฮดรอกซิล และวงแหวนไฮโดรฟูแรนที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1720, 3600–3200 และ 1065  $\text{cm}^{-1}$  ตามลำดับ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการเปิดวงแหวนเอพอกไซด์ ดังนั้น จึงสรุปได้ว่ายางธรรมชาติได้เกิดปฏิกิริยาเอพอกซิเดชันดังสมการในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ปฏิกิริยาเอพอกซิเดชันของยางธรรมชาติ

#### 4.2 ผลของสารเคมีและเวลาที่ใช้ในการเอพอกซิเดชันยางธรรมชาติ

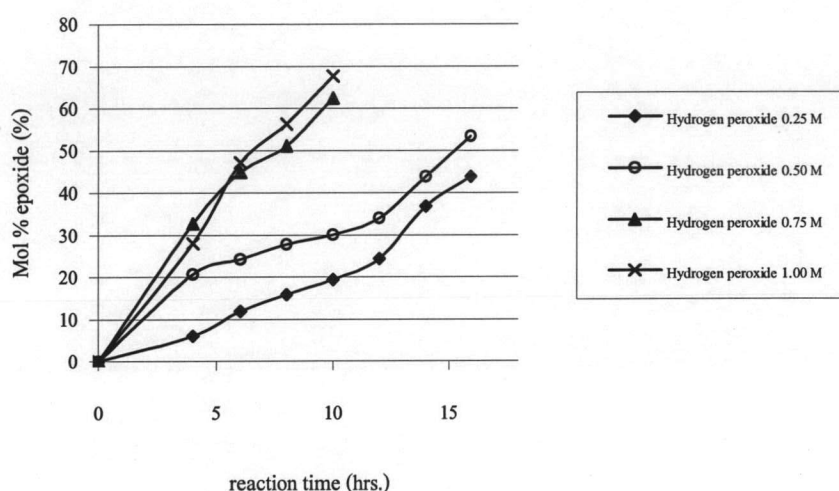
รูปที่ 4.3 แสดงปริมาณหมู่เอพอกไซด์ที่เกิดขึ้นเมื่อทำการเอพอกซิเดชันยางธรรมชาติด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.75 M และกรดฟอร์มิก 0.25 0.50 0.75 และ 1.00 M ที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 4 6 8 10 12 14 และ 16 ชั่วโมง



รูปที่ 4.3 ปริมาณหมู่เอพอกไซด์ที่เกิดภายใต้ภาวะของปฏิกิริยาเอพอกซิเดชันต่างๆ กัน

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าปริมาณหมู่เอพอกไซด์ในยาง ENR เพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของกรดฟอร์มิกและเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ จากการทดลองยังพบว่าเมื่อใช้กรดฟอร์มิกความเข้มข้น 0.75 และ 1.00 M ทำให้น้ำยางจับตัวเป็นก้อนเมื่อเวลาที่ใช้ผ่านไป 12 ชั่วโมง ในขณะที่เมื่อใช้กรดฟอร์มิกความเข้มข้น 0.50 และ 0.25 M แม้เวลาผ่านไปถึง 16 ชั่วโมง น้ำยางยังคงสภาพเป็นของเหลวอยู่ได้

รูปที่ 4.4 แสดงปริมาณหมู่เอพอกไซด์ที่เกิดขึ้นเมื่อทำการอิพอกซิไดซ์ยางธรรมชาติด้วยกรดฟอร์มิก 0.75 M และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.25 0.50 0.75 และ 1.00 M ที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 4 6 8 10 12 14 และ 16 ชั่วโมง



รูปที่ 4.4 ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการเกิดปฏิกิริยาอิพอกซิเดชัน

จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าปริมาณหมู่เอพอกไซด์ในยาง ENR เพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ จากการทดลองยังพบว่าเมื่อใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 0.75 และ 1.00 M ทำให้น้ำยางจับตัวเป็นก้อนเมื่อเวลาที่ใช้ผ่านไป 12 ชั่วโมง ในขณะที่เมื่อใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 0.50 และ 0.25 M แม้เวลาผ่านไปถึง 16 ชั่วโมง น้ำยางยังคงสภาพเป็นของเหลวอยู่ได้

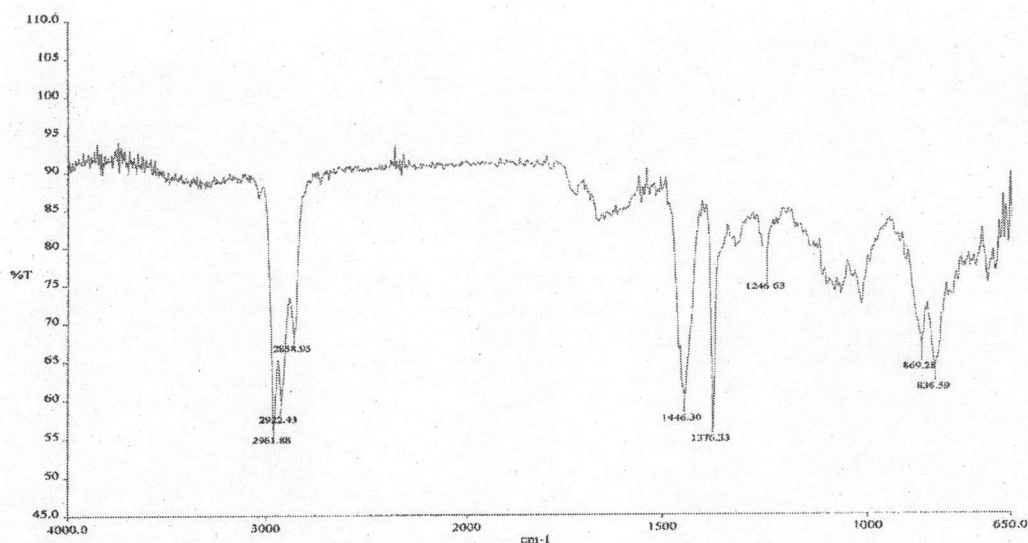
ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณหมู่เอพอกไซด์ที่เกิดขึ้นเมื่อใช้สูตรและเวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ กัน

ตารางที่ 4.2 โมลเปอร์เซ็นต์ฟอกไซด์ของยาง ENR ที่ภาวะต่างๆ

ชั่วโมง สูตร (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> : Formic acid)	โมลเปอร์เซ็นต์ฟอกไซด์ (%)						
	1 (0.25 : 0.75)	2 (0.50 : 0.75)	3 (0.75 : 0.75)	4 (1.00 : 0.75)	5 (0.75 : 0.25)	6 (0.75 : 0.50)	7 (0.75 : 1.00)
4	5.93	20.61	32.73	28.04	3.96	16.67	<b>37.63</b>
6	11.79	24.16	44.79	47.12	4.94	27.63	46.37
8	15.82	27.81	51.02	56.36	6.73	<b>36.93</b>	53.66
10	19.38	30.02	62.42	67.62	9.41	44.47	69.25
12	24.29	34.04	–	–	12.31	54.17	–
14	<b>36.80</b>	43.87	–	–	15.40	73.71	–
16	43.79	53.33	–	–	18.18	82.50	–

รูปที่ 4.2–4.3 และตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณกรดฟอร์มิกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น มีผลทำให้เกิดกรดเปอร์ออกซอินทรีย์ในน้ำยางธรรมชาติเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับยางธรรมชาติเกิดเป็นยาง ENR ที่มีปริมาณหมู่ฟอกไซด์ได้มากขึ้น และเมื่อให้เวลาในการเกิดปฏิกิริยานานขึ้น กรดเปอร์ออกซอินทรีย์จะสามารถทำปฏิกิริยากับยางธรรมชาติได้ หมู่ฟอกไซด์มากขึ้น

การศึกษาผลของสารตัวเติมต่อสมบัติทางกายภาพของยาง ENR ที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้ว สำหรับงานวิจัยนี้ ได้ใช้ยาง ENR ที่มีปริมาณหมู่ฟอกไซด์อยู่ในช่วง 35–40 โมลเปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเป็นปริมาณที่ไม่สูงมากจนทำให้สูญเสียสมบัติการเป็นยาง เพราะหากมีหมู่ฟอกไซด์มาก จะทำให้ยางมีเปอร์เซ็นต์การยึดต่ำ มีความแข็งแรงสูง ไวต่อความชื้น และตัวทำละลายที่มีขี้ว ดังนั้น จึงได้เลือกสูตรที่ 7 (อัตราส่วนความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อกรดฟอร์มิกเป็น 0.75 : 1.00 M) และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 4 ชั่วโมง เพื่อเตรียมยาง ENR สำหรับนำไปทดสอบหาผลของระบบวัลคาไนซ์และสารตัวเติมต่างๆ ต่อไป ทั้งนี้เนื่องจากยาง ENR ที่ได้มีปริมาณหมู่ฟอกไซด์ตามต้องการ คือ 37.63 โมลเปอร์เซ็นต์ และใช้เวลาทำปฏิกิริยาสั้นที่สุด โดยรูปที่ 4.5 แสดง FT-IR สเปกตรัม ของยาง ENR ที่ได้จากการใช้สูตรที่ 7 เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

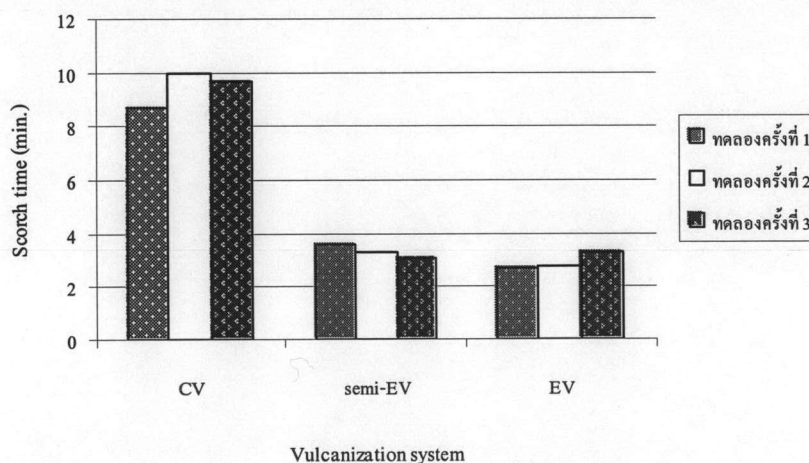


รูปที่ 4.5 FT-IR สเปกตรัม ของยาง ENR ที่ได้จากการใช้สูตรที่ 7 เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

### 4.3 พฤติกรรมการคงรูปของยาง ENR

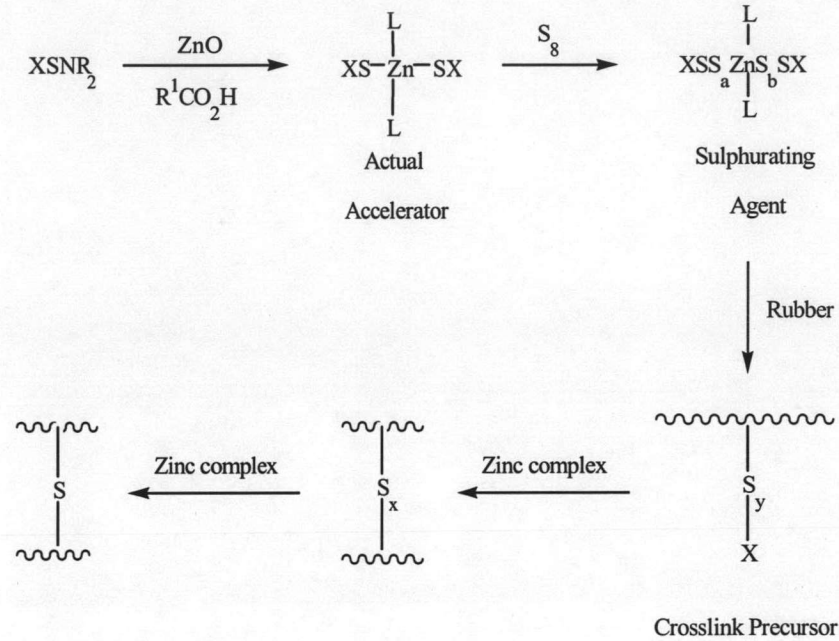
#### 4.3.1 ผลของระบบวัลคาไนซ์ต่อยาง ENR

รูปที่ 4.6 แสดงเวลาที่ยาง ENR เริ่มคงรูป ที่หาด้วยเครื่อง Rheotech Protech ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส โดยใช้ซัลเฟอร์เป็นสารวัลคาไนซ์, CBS เป็นสารเร่งวัลคาไนซ์, กรดสเตียริก และ ZnO เป็นสารกระตุ้น วัลคาไนซ์ ซึ่งได้ทำการวัลคาไนซ์ 3 ระบบ คือ conventional vulcanization (CV), semi-efficient vulcanization (semi-EV) และ efficient vulcanization (EV) และทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ในการทดลองแต่ละครั้งจะใช้ยาง ENR คอมปาวด์ที่เตรียมขึ้นคนละ batch กัน



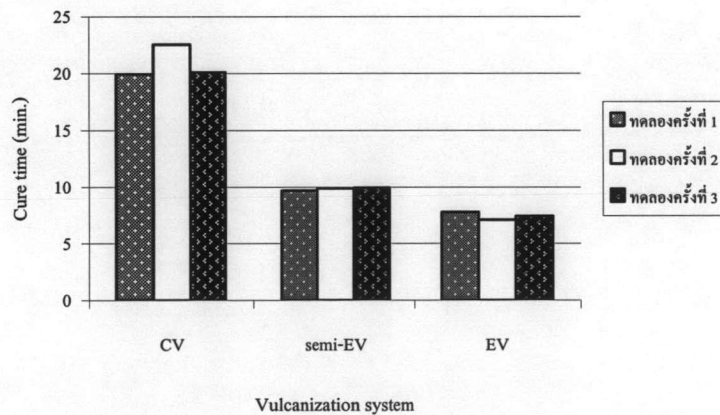
รูปที่ 4.6 เวลาเริ่มคงรูปของยาง ENR ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ

รูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าการวัลคาไนซ์ยาง ENR ด้วยระบบ EV ทำให้มีเวลาเริ่มคงรูปยางสั้นกว่ายาง ENR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบ semi-EV และ CV คือ เฉลี่ยที่ 2.94 นาที ส่วนระบบ semi-EV และ CV มีระยะเวลาเริ่มคงรูปดังนี้ คือ 3.33 และ 9.44 นาที ตามลำดับ ทั้งนี้เพราะในระบบ EV ใช้สารเร่งวัลคาไนซ์ปริมาณมากกว่าระบบอื่น จึงทำให้มีปริมาณ active sulphurating agent มากกว่า (ดังแสดงในรูปที่ 4.7) ซึ่งมีผลทำให้มีเวลาเริ่มคงรูปที่สั้นกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบอื่นๆ



รูปที่ 4.7 แสดง active sulphurating agent ที่เกิดขึ้น โดย X คือ สารเร่งวัลคาไนซ์ และ L คือ ligan<sup>22</sup>

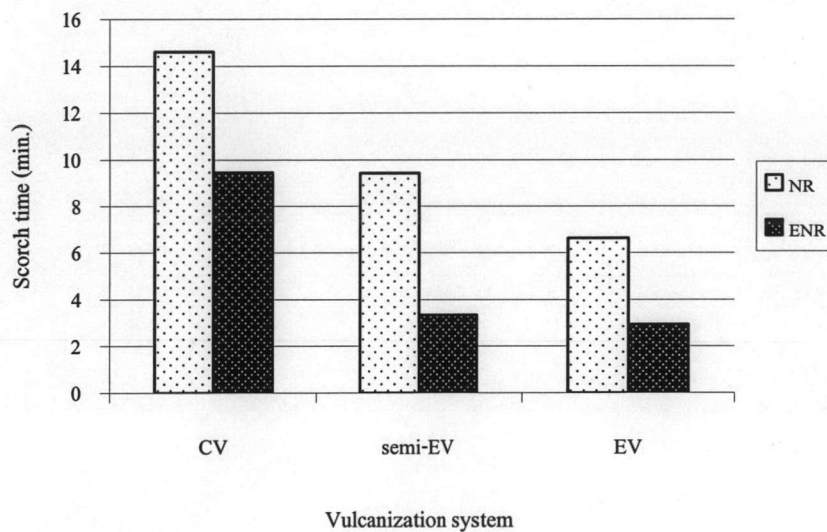
รูปที่ 4.8 แสดงเวลาที่ยาง ENR คงรูป ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ซึ่งได้ทำการวัลคาไนซ์ 3 ระบบ คือ CV, semi-EV และ EV โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แต่แต่ละครั้งจะใช้ยาง ENR คอมปาวด์ที่เตรียมขึ้นคนละ batch กัน



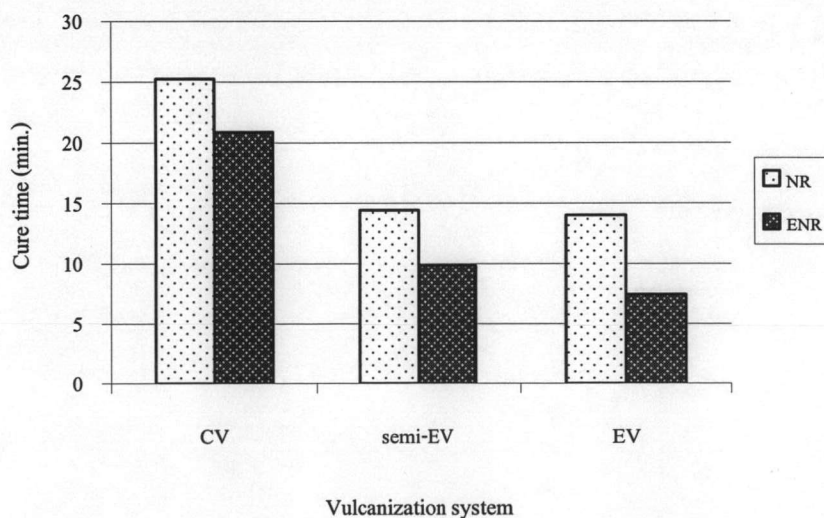
รูปที่ 4.8 เวลาที่ยาง ENR คงรูป ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ

รูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าการวัลคาไนซ์ยาง ENR ด้วยระบบ EV ทำให้ยางคงรูปได้เร็วกว่ายาง ENR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบ semi-EV และ CV คือ เฉลี่ยที่ 7.44 นาที ส่วนระบบ semi-EV และ CV มีเวลาคงรูปดังนี้ คือ 9.83 และ 20.87 นาที ตามลำดับ เนื่องจากในระบบ EV ใช้สารเร่งวัลคาไนซ์ปริมาณมากกว่าระบบอื่น จึงทำให้มีปริมาณ active sulphurating agent มากกว่า (ดังแสดงในรูปที่ 4.7) ซึ่งมีผลทำให้มีเวลาเริ่มคงรูปที่สั้นกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบอื่นๆ

รูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบเวลาเริ่มคงรูปและการคงรูปของยางธรรมชาติ และยาง ENR ตามลำดับที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เมื่อใช้ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ กัน



รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบเวลาเริ่มคงรูปของยางธรรมชาติ และยาง ENR ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ

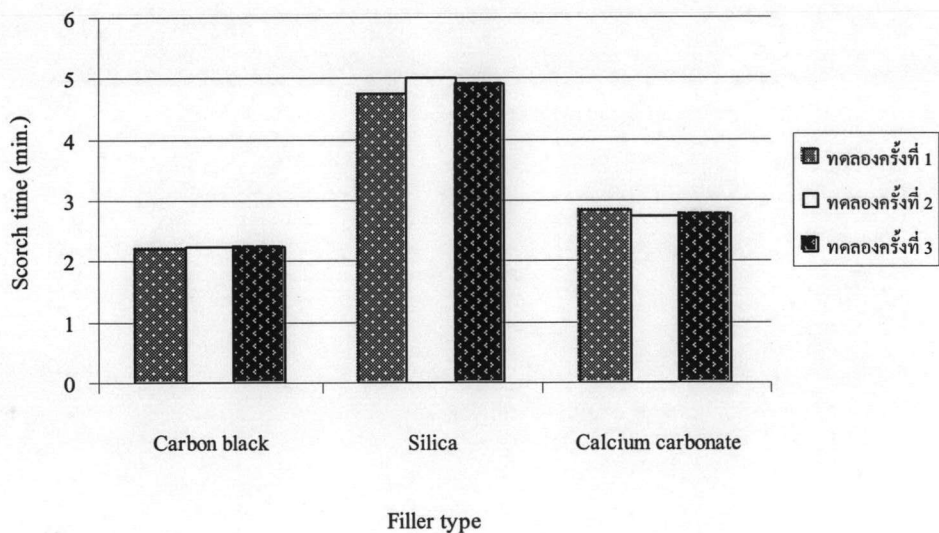


รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบเวลาการคงรูปของยางธรรมชาติ และยาง ENR ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ

รูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงให้เห็นว่ายาง ENR มีเวลาเริ่มคงรูป และเวลาการคงรูปสั้นกว่ายางธรรมชาติในทุกระบบของการวัลคาไนซ์ เนื่องจากหมู่เอพอกไซด์ซึ่งเป็นหมู่มีขั้วที่อยู่บนโมเลกุลของยาง ENR ได้กระตุ้นพันธะคู่ที่อยู่ใกล้ๆ โดยถ่ายเทอิเล็กตรอนไปยังพันธะคู่ในหน่วยของไอโซพรีน ทำให้พันธะคู่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเชื่อมขวางมากขึ้น<sup>23</sup>

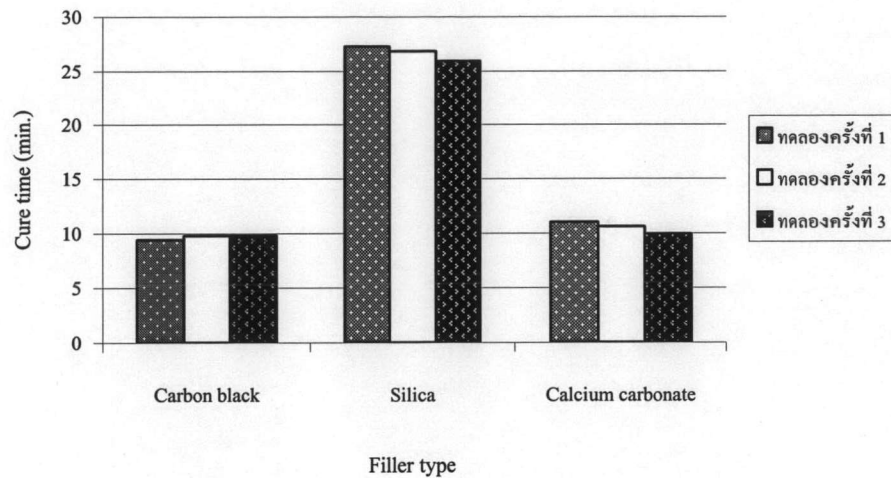
#### 4.3.2 ผลของสารตัวเติมต่อยาง ENR

รูปที่ 4.11 และ 4.12 แสดงเวลาเริ่มเกิดการคงรูปและเวลาการคงรูปของยาง ENR ที่ใส่สารตัวเติมคาร์บอนแบล็ก ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ทำการวัลคาไนซ์ด้วยระบบ CV เนื่องจาก โดยทั่วไปยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบ CV มีสมบัติความทนแรงดึงดีกว่าการวัลคาไนซ์ด้วยระบบอื่น แม้ว่าสมบัติด้านอื่นจะด้อยกว่าแต่เพื่อรักษาความทนแรงดึงที่ดีไว้จึงเลือกใช้ระบบวัลคาไนซ์ CV ในการศึกษาสมบัติของตัวเติมต่อสมบัติทางกายภาพของยาง ENR



รูปที่ 4.11 เวลาเริ่มเกิดการคงรูปของยาง ENR ที่ใส่สารตัวเติมชนิดต่างๆ

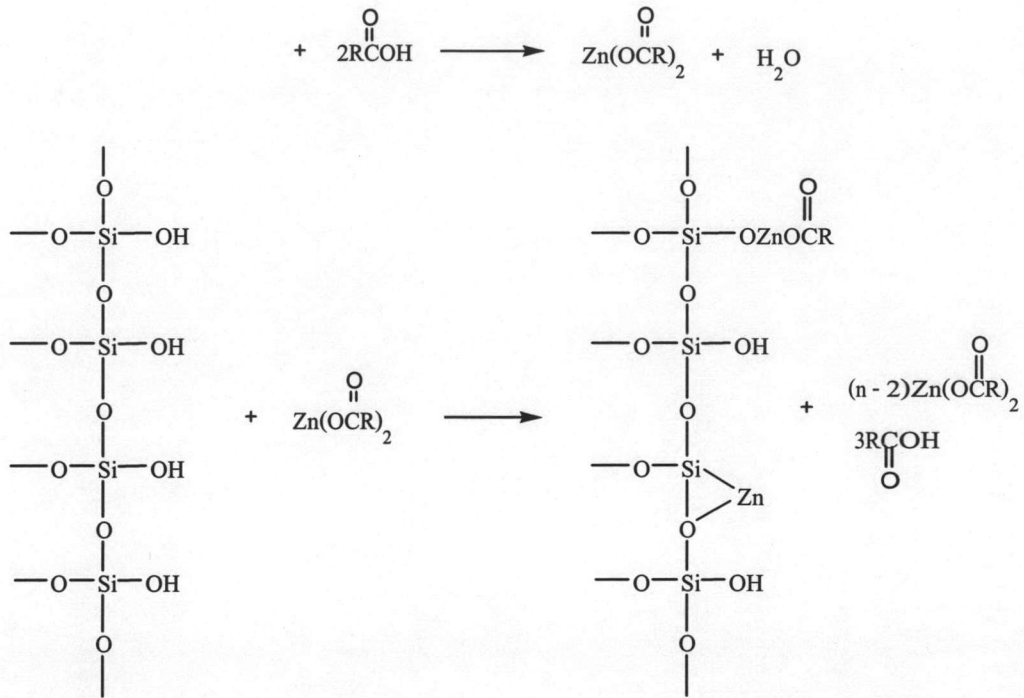




รูปที่ 4.12 เวลาการคงรูปของยาง ENR ที่ใส่สารตัวเติมชนิดต่างๆ

จากรูปที่ 4.11 และ 4.12 พบว่า เวลาเริ่มการคงรูปและเวลาการคงรูปของยาง ENR ที่ใส่คาร์บอนแบล็กมีระยะเวลาสั้นกว่ายาง ENR ที่ใส่แคลเซียมคาร์บอเนต และซิลิกา ตามทฤษฎีแล้ว สารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคใหญ่จะมีเวลาที่ขยับเริ่มการคงรูปและเวลาการคงรูปสั้นที่สุด<sup>24</sup> แต่ทว่าคาร์บอนแบล็กซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กที่สุด กลับมีเวลาที่ขยับเริ่มการคงรูป และเวลาการคงรูปสั้นกว่ายาง ENR ที่ใส่แคลเซียมคาร์บอเนต และซิลิกา เนื่องจากสารเร่งวัลคาไนซ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ CBS (สารเร่งวัลคาไนซ์ชนิด sulfenamide) ซึ่งจำเป็นที่พันธะ S-N ในโมเลกุลของ CBS ต้องแตกออกก่อนที่สารเร่งวัลคาไนซ์จะเริ่มทำงาน จากงานวิจัยของ Lee และ Poh<sup>25</sup> ได้แสดงให้เห็นว่าคาร์บอนแบล็กได้เข้าไปทำให้พันธะ S-N แตกออกขณะที่คาร์บอนแบล็กถูกให้ความร้อนพร้อมกับสารเร่งวัลคาไนซ์ ทั้งในกรณีที่มีและไม่มีส่วนผสมอื่น ดังนั้น คาร์บอนแบล็กจึงทำให้เวลาที่ขยับเริ่มการคงรูปและเวลาการคงรูปสั้นลง

สำหรับกรณีที่ยางผสมซิลิกามีเวลาเริ่มการคงรูป และเวลาการคงรูปยาวกว่ายาง ENR ที่ใส่แคลเซียมคาร์บอเนต และคาร์บอนแบล็ก เนื่องจากซิลิกาจะไปจับตัวกับซิงค์บางส่วนที่มาจากซิงค์ออกไซด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นวัลคาไนซ์ ตามรูปที่ 4.13 ทำให้ซิงค์ไม่สามารถทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นวัลคาไนซ์ได้เต็มที่ จึงทำให้เวลาที่ขยับเริ่มการคงรูป และเวลาการคงรูปยาวกว่ายาง ENR ที่ใส่แคลเซียมคาร์บอเนต และคาร์บอนแบล็ก



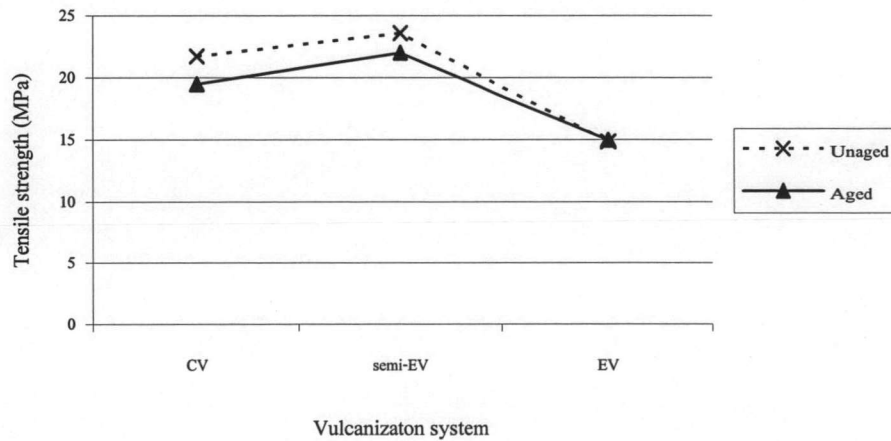
รูปที่ 4.13 ปฏิกิริยาที่ซิลิกาจับตัวกับซิงก์บางส่วนที่มาจากซิงก์ออกไซด์<sup>26</sup>

4.4 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของยาง ENR

4.4.1 สมบัติทางกายภาพของยาง ENR ที่ยังไม่ได้ใส่สารตัวเติม

สมบัติด้านการดึง (Tensile properties)

รูปที่ 4.14 แสดงค่าความทนแรงดึงของยาง ENR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบต่างๆ ก่อนและหลังบ่มแรง



รูปที่ 4.14 ความทนแรงดึงของยาง ENR ก่อนและหลังบ่มแรงด้วยความร้อนที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ

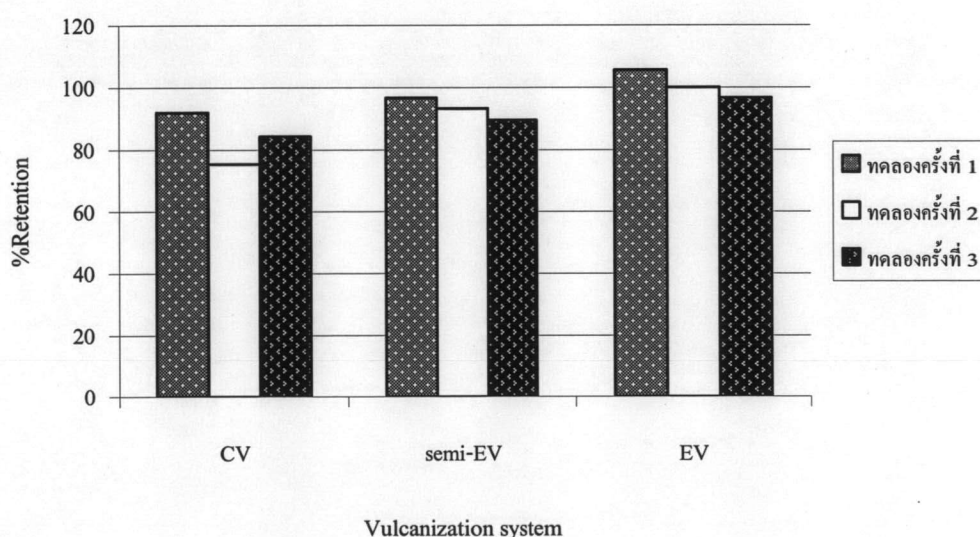
รูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่า ยาง ENR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบ semi-EV ทั้งก่อนบ่มแรงและหลังบ่มแรงด้วยความร้อนมีความทนแรงดึงมากกว่ายาง ENR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบ CV และ EV ตามลำดับ และการที่ความทนแรงดึงของยาง ENR หลังบ่มแรงด้วยความร้อนมีค่าลดลงเนื่องจากการแตกออกของการเชื่อมขวาง โดยเฉพาะการเชื่อมขวางที่เป็น polysulphide

ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.15 แสดงผลของการบ่มแรงด้วยความร้อนต่อค่าความทนแรงดึงของยาง ENR ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ ซึ่งแสดงในรูปของ % retention ที่คำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$\% \text{ retention} = \frac{\text{ความทนแรงดึงหลังบ่มแรงด้วยความร้อน}}{\text{ความทนแรงดึงก่อนบ่มแรงด้วยความร้อน}} \times 100$$

ตารางที่ 4.3 % retention ของความทนแรงดึงของยาง ENR ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ

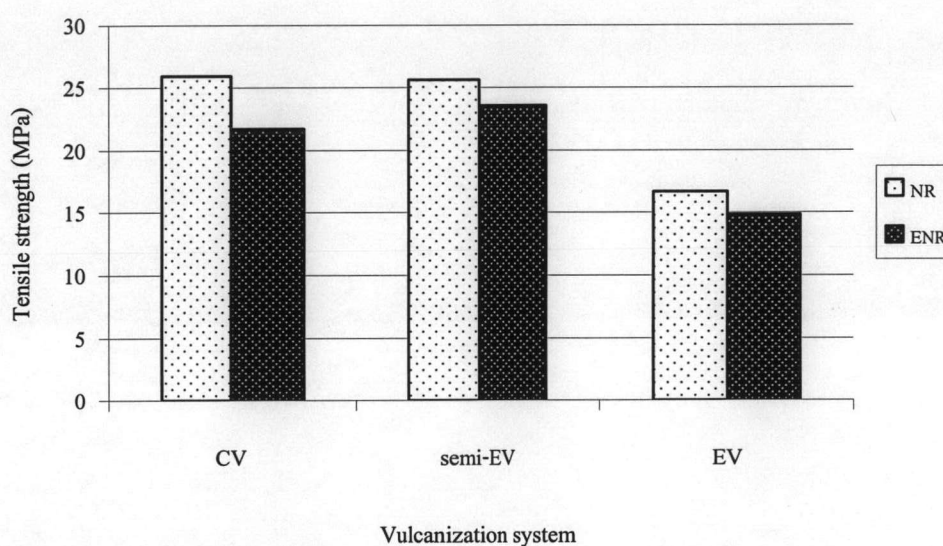
ครั้งที่	% retention		
	CV	semi-EV	EV
1	92.10	96.76	105.69
2	75.28	93.31	100.07
3	84.29	89.54	96.81
เฉลี่ย	83.89	93.20	100.86



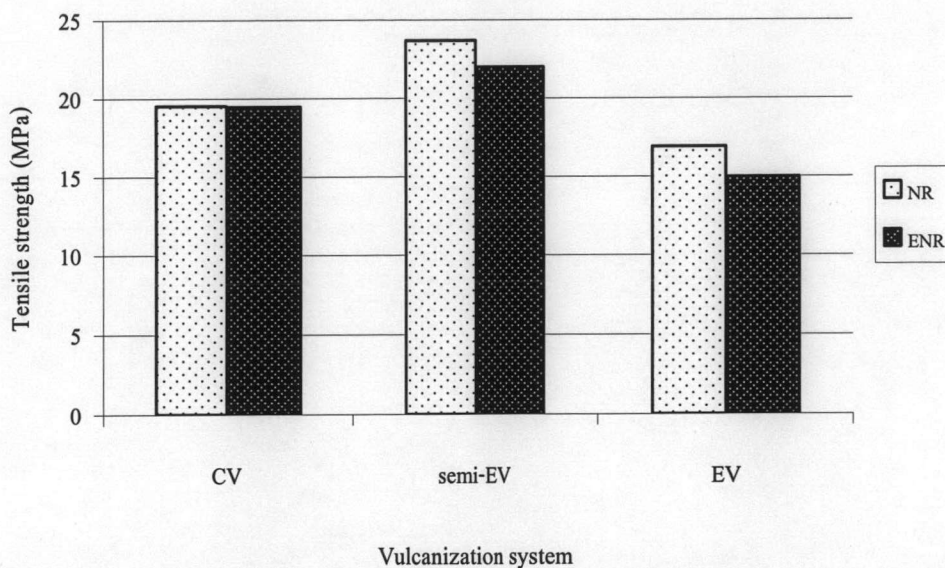
รูปที่ 4.15 % retention ของความทนแรงดึงของยาง ENR ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ

ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.15 แสดงว่ายาง ENR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบ EV มี % retention สูงกว่ายาง ENR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบ semi-EV และ CV ทั้งนี้ เนื่องจากในระบบ EV มีการเชื่อมขวางที่เป็นแบบ polysulphide น้อย (ใช้ปริมาณซัลเฟอร์น้อย) จึงทำให้มีการแตกออกของ polysulphide น้อย แต่ในระบบ CV ซึ่งมีการเชื่อมขวางแบบ polysulphide มากกว่าระบบอื่น (ใช้ปริมาณซัลเฟอร์มากกว่า) จึงทำให้มีการแตกออกของ polysulphide มากกว่า ดังนั้น ในระบบ EV จึงมี % retention สูงกว่าระบบ CV และมีผลทำให้มี aging properties ดีกว่า

รูปที่ 4.16 และ 4.17 แสดงการเปรียบเทียบค่าความทนแรงดึงก่อนบ่มแรงและหลังบ่มแรงแรงด้วยความร้อน ของยางธรรมชาติและยาง ENR ตามลำดับ เมื่อใช้ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ กัน



รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบความทนแรงดึง ก่อนบ่มแรงด้วยความร้อน ของยางธรรมชาติ และยาง ENR ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ

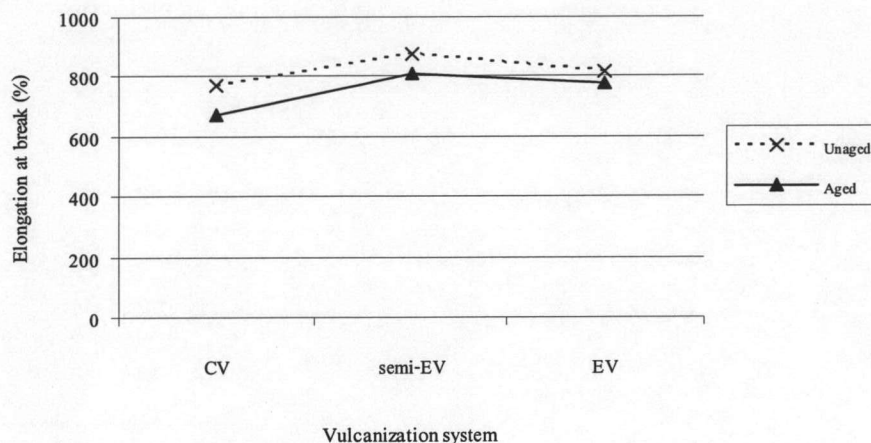


**รูปที่ 4.17** เปรียบเทียบความทนแรงดึงต่างๆ หลังบ่มเร่งด้วยความร้อนของยางธรรมชาติ และยาง ENR ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ

รูปที่ 4.16 และ 4.17 แสดงให้เห็นว่า ความทนแรงดึงทั้งก่อนบ่มเร่ง และหลังบ่มเร่งด้วยความร้อนของยางธรรมชาติสูงกว่ายาง ENR เล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากหมู่ไอพอกซิไดซ์ทำให้เกิด strain crystallization ได้น้อยกว่ายางธรรมชาติ ซึ่งยืนยันได้จากการศึกษาของ Davies และคณะ<sup>13</sup> ที่ทำการศึกษา เกี่ยวกับการเกิด strain crystallization ของยางธรรมชาติ และยาง ENR ด้วยเทคนิค X-ray diffraction

#### **ระยะยืด ณ จุดขาด (Elongation at Break)**

รูปที่ 4.18 แสดงค่าระยะยืด ณ จุดขาดของยาง ENR ก่อนบ่มเร่ง และหลังบ่มเร่งด้วยความร้อน ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบต่างๆ ตามลำดับ



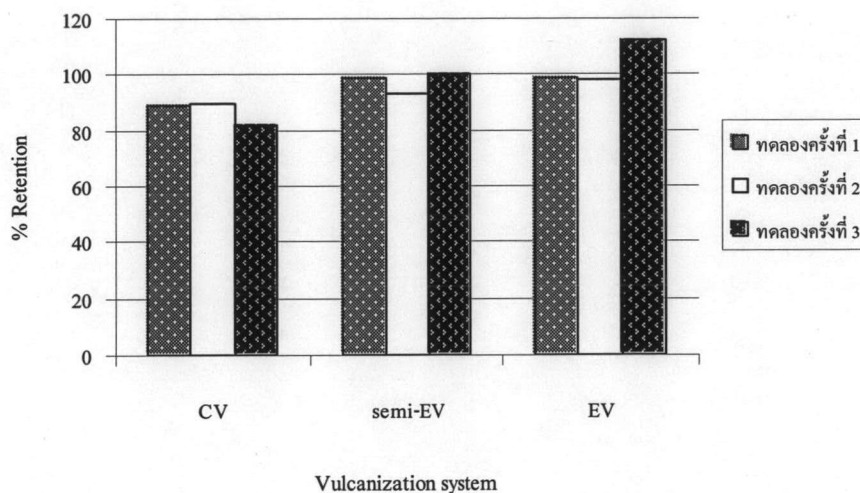
**รูปที่ 4.18** ระยะยืด ณ จุดขาดของยาง ENR ก่อนและหลังบ่มเร่งด้วยความร้อนที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ

รูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่ายาง ENR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบ semi-EV มีระยะยืด ณ จุดขาดทั้งก่อนและหลังบ่มเร่งด้วยความร้อนมากกว่ายาง ENR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบ EV และ CV ตามลำดับ โดยระยะยืด ณ จุดขาดหลังบ่มเร่งด้วยความร้อนของยาง ENR มีค่าลดลง ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลเดียวกับค่าความทนแรงดึง นั่นคือ เกิดการแตกออกของการเชื่อมขวางแบบ polysulphide การที่ระยะยืด ณ จุดขาดของระบบ CV มีค่าต่ำกว่ายาง ENR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบ EV และ semi-EV เนื่องจากความหนาแน่นของการเชื่อมขวางที่เพิ่มขึ้น อันเป็นผลมาจากการเกิดการเชื่อมขวางด้วยพันธะอีเทอร์ที่เกิดเนื่องมาจากกรดซัลเฟอร์ที่ได้จากการออกซิเดชันของซัลไฟด์

ตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.19 แสดงผลของการบ่มเร่งด้วยความร้อนต่อค่าระยะยืด ณ จุดขาดของยาง ENR ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ ซึ่งแสดงในรูปของ % retention

**ตารางที่ 4.4** % retention ของระยะยืด ณ จุดขาดของยาง ENR ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ

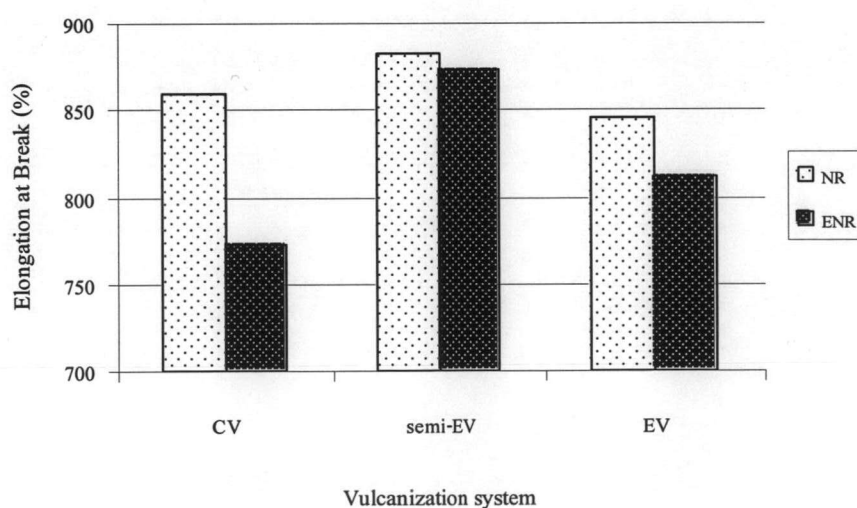
ครั้งที่	% retention		
	CV	semi-EV	EV
1	88.69	98.78	99.08
2	89.57	92.85	98.24
3	81.58	100.22	112.19
เฉลี่ย	86.61	97.28	103.17



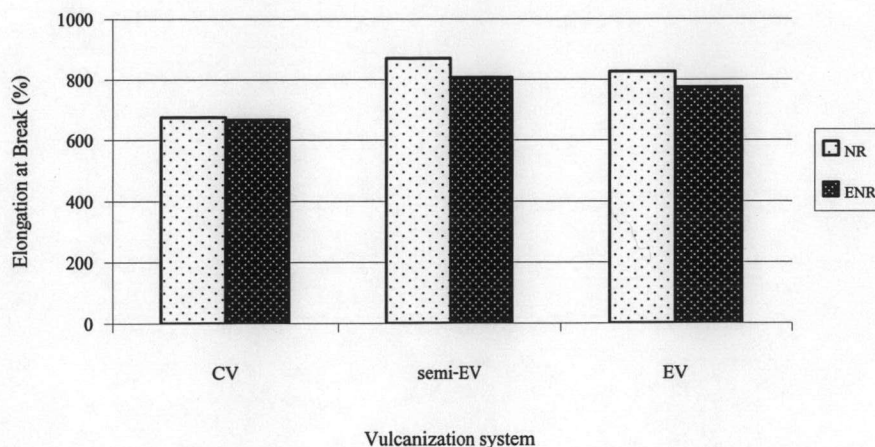
รูปที่ 4.19 % retention ของระยะยืด ณ จุดขาดของยาง ENR ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ

ตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นว่ายาง ENR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบ EV มี % retention สูงกว่ายาง ENR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบ semi-EV และระบบ CV ตามลำดับ ทั้งนี้เพราะในระบบ EV มีการเชื่อมขวางแบบ polysulphide น้อย จึงมีการแตกของ polysulphide น้อย ดังนั้นจึงมีสมบัติหลังการบ่มเร่งที่ดี

รูปที่ 4.20 และ 4.21 แสดงการเปรียบเทียบระยะยืด ณ จุดขาด ก่อนบ่มเร่งและหลังบ่มเร่งเร่งด้วยความร้อนของยางธรรมชาติและยาง ENR ตามลำดับ เมื่อใช้ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ กัน



รูปที่ 4.20 ระยะยืด ณ จุดขาดของยางธรรมชาติ และยาง ENR ก่อนการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ

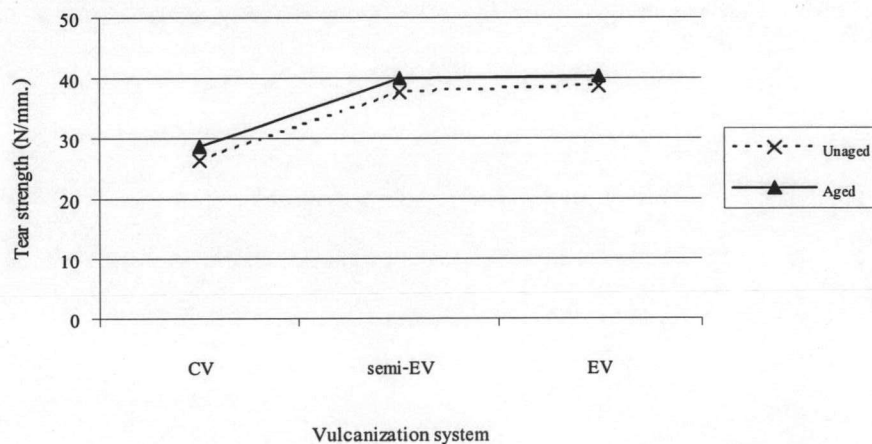


**รูปที่ 4.21** ระยะยืด ณ จุดขาดของยางธรรมชาติ และยาง ENR หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ

รูปที่ 4.20 และ 4.21 แสดงให้เห็นว่า ระยะยืด ณ จุดขาด ทั้งก่อนบ่มเร่ง และหลังบ่มเร่งด้วยความร้อนของยางธรรมชาติสูงกว่ายาง ENR เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีอิสระในการเคลื่อนไหวได้มากกว่ายาง ENR เพราะยาง ENR มีหมู่ไอพอกไซด์ซึ่งเป็นหมู่ที่มีขั้ว จึงมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลสูง

#### ความต้านทานการฉีกขาด (Tear strength)

รูปที่ 4.22 แสดงค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดก่อนบ่มเร่ง และหลังบ่มเร่งด้วยความร้อนของยาง ENR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบต่างๆ

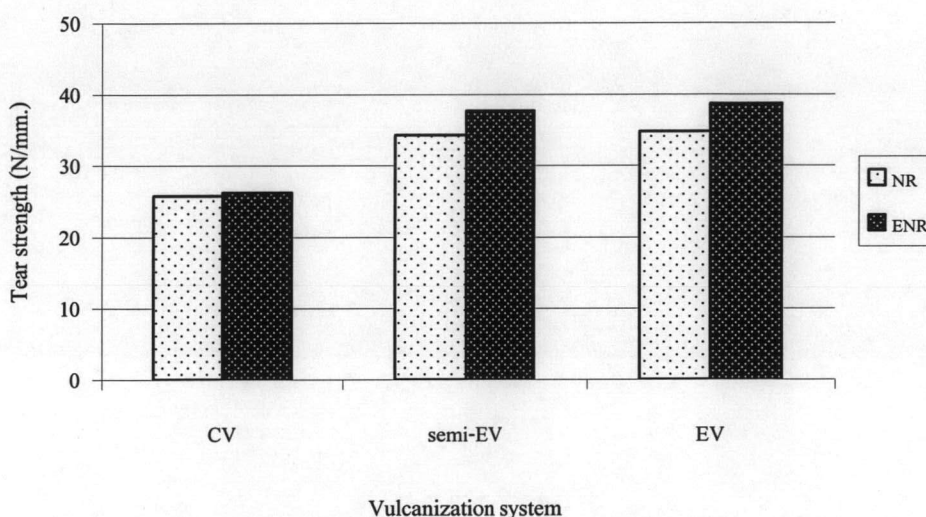


**รูปที่ 4.22** ความต้านทานการฉีกขาดของยาง ENR ก่อนและหลังบ่มเร่งด้วยความร้อนที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ



จากรูปที่ 4.22 พบว่ายาง ENR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบ CV ทั้งก่อนและหลังการบ่มแรงด้วยความร้อนมีความต้านทานการฉีกขาดต่ำกว่ายาง ENR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบ EV และ semi-EV โดยยาง ENR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบ EV และ semi-EV มีค่าความต้านทานการฉีกขาดใกล้เคียงกัน การที่ความต้านทานการฉีกขาดในระบบ EV มีค่าสูงสุด เนื่องมาจากความหนาแน่นของการเชื่อมขวางที่เพิ่มขึ้น โดยหลังบ่มแรงความต้านทานการฉีกขาดมีค่าสูงขึ้น เนื่องมาจากเกิดการเปิดออกของวงแหวนอิพอกไซด์อันเนื่องมาจากความร้อน ทำให้เกิดการเชื่อมขวางด้วยพันธะอีเทอร์

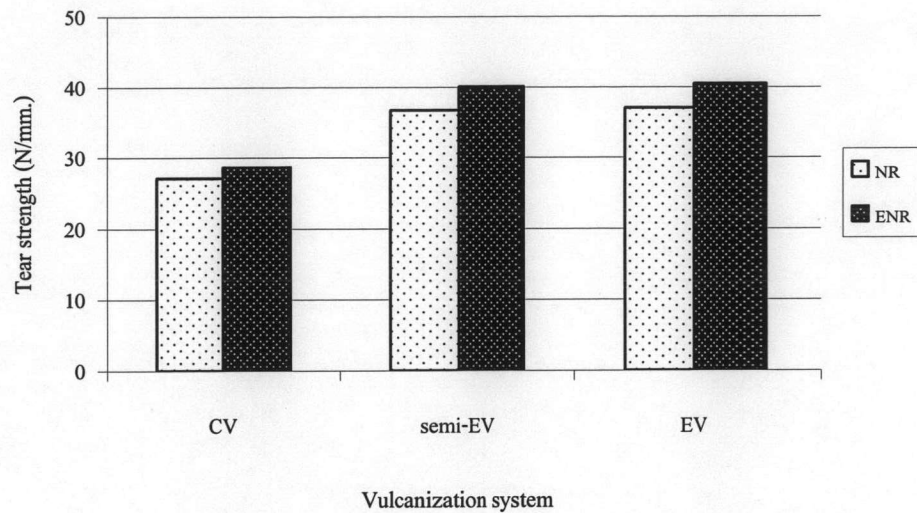
รูปที่ 4.23 แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติและยาง ENR ก่อนบ่มแรงด้วยความร้อน



รูปที่ 4.23 ความต้านทานการฉีกขาดของยางธรรมชาติและยาง ENR ก่อนการบ่มแรงด้วยความร้อนที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ

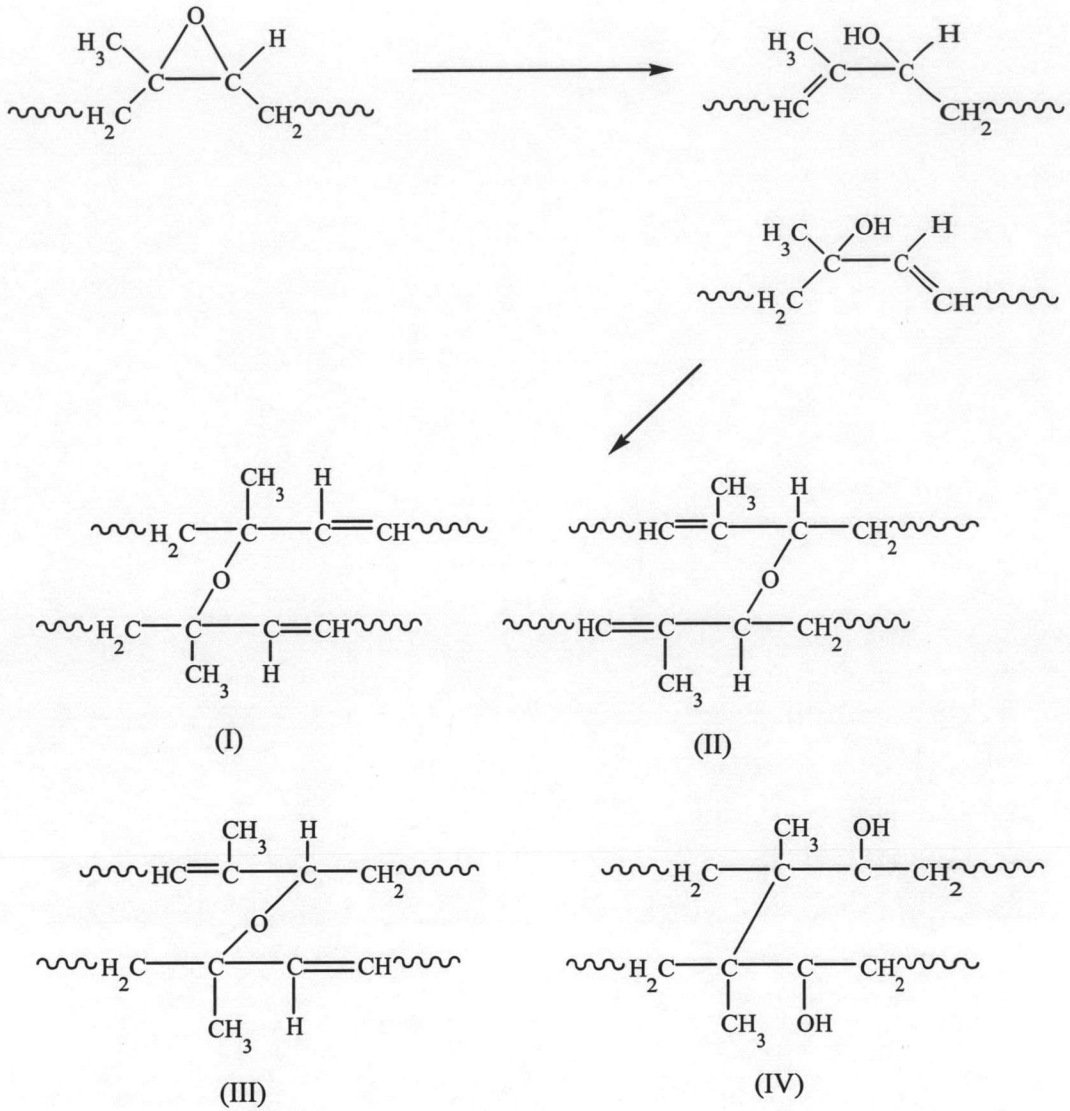
รูปที่ 4.23 แสดงให้เห็นว่าความต้านทานการฉีกขาดของยาง ENR มีค่าสูงกว่าของยางธรรมชาติเล็กน้อย เนื่องจากยาง ENR มีหมู่อิพอกไซด์ซึ่งเป็นหมู่ที่มีขั้ว จึงทำให้มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมากกว่ายางธรรมชาติ จึงทำให้มีความต้านทานการฉีกขาดสูงกว่า

รูปที่ 4.24 แสดงความต้านทานการฉีกขาดหลังการบ่มแรงด้วยความร้อนของยางธรรมชาติและยาง ENR



**รูปที่ 4.24** ความต้านทานการฉีกขาดของยางธรรมชาติ และยาง ENR หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ

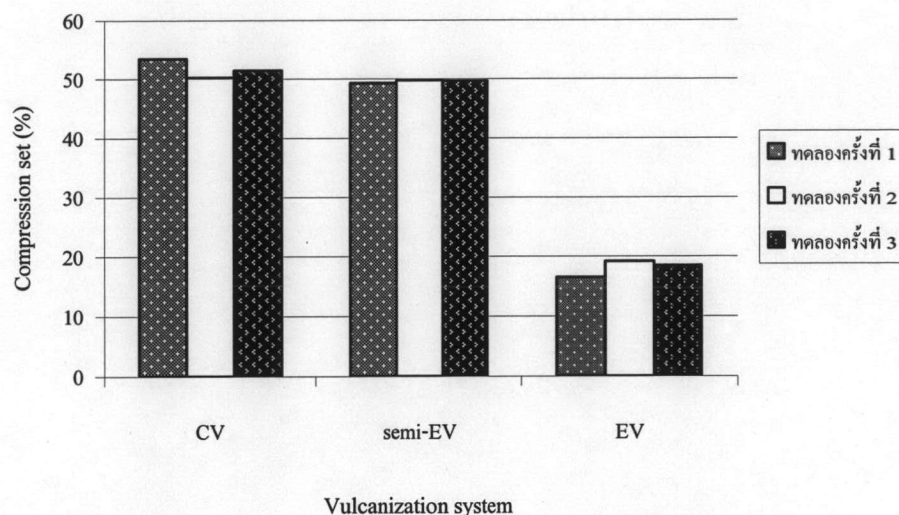
รูปที่ 4.24 แสดงให้เห็นว่าหลังจากผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนค่าความต้านทานการฉีกขาดของยางธรรมชาติ และยาง ENR มีค่าสูงขึ้น แต่ยาง ENR มีความต้านทานการฉีกขาดเพิ่มขึ้นมากกว่ายางธรรมชาติ ซึ่งสามารถอธิบายได้จากการศึกษาของ Roy และคณะ<sup>5</sup> โดยเขาพบว่าเมื่อยาง ENR ได้รับความร้อนจะทำให้วงแหวนอีพอกไซด์เปิดออก และเปลี่ยนไปเป็นแอลกอฮอล์ทุติยภูมิ (secondary alcohol) และแอลกอฮอล์ตติยภูมิ (tertiary alcohol) ซึ่งสามารถทำให้เกิดการเชื่อมขวางโมเลกุลของยาง ENR ด้วยพันธะอีเทอร์และไซคลิกอีเทอร์ ส่งผลให้ปริมาณการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยง<sup>20</sup>

#### สมบัติการคืนตัว (Compression set properties)

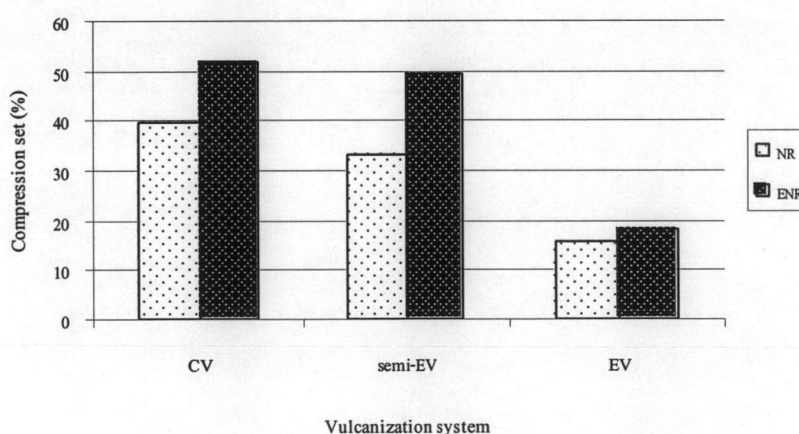
เป็นการทดสอบหาค่าความหนาที่เปลี่ยนไปเมื่อยางได้รับแรงกดอัดที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง เพื่อหาค่าความสามารถในการคืนตัว โดยรูปที่ 4.26 แสดงค่า compression set ของยาง ENR ที่วัดคาไนซ์ด้วยระบบต่างๆ



รูปที่ 4.26 ค่า compression set ของยาง ENR ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ

จากรูปที่ 4.26 พบว่า ยาง ENR ที่ผ่านการวัลคาไนซ์ด้วยระบบ EV มีค่าการคืนตัวดีกว่ายาง ENR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบ semi-EV และ CV ตามลำดับ เนื่องจากในระบ CV นั้นมีการเชื่อมขวางแบบ polysulphide มาก ดังนั้น เมื่อได้รับความร้อน polysulphide จึงแตกออกมากกว่าในระบบอื่น ทำให้ยางขาดความยืดหยุ่นจึงมีการคืนตัวที่ไม่ดี

รูปที่ 4.27 แสดงการเปรียบเทียบค่า compression set ของยางธรรมชาติและยาง ENR ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ



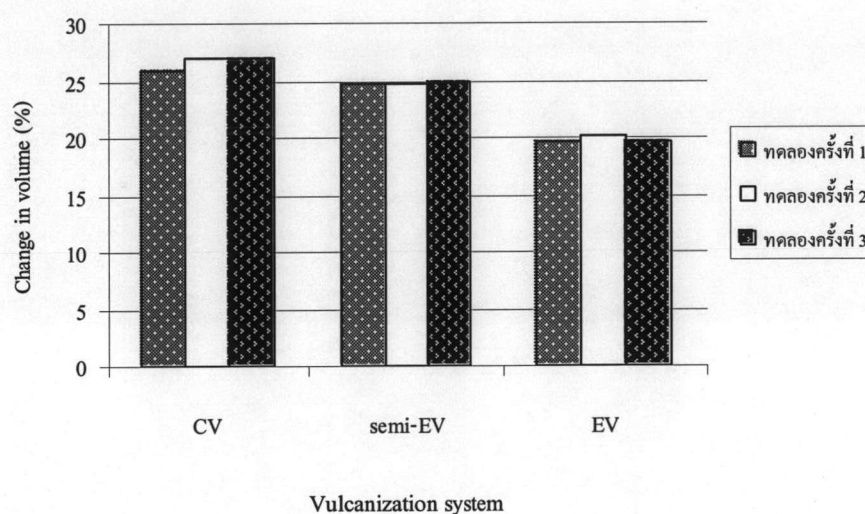
รูปที่ 4.27 ค่า compression set ของยางธรรมชาติ และยาง ENR ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ

จากรูปที่ 4.27 พบว่า ยางธรรมชาติมีค่า compression set ต่ำกว่ายาง ENR แสดงว่า ยางธรรมชาติสามารถคืนตัวได้ดีกว่ายาง ENR เนื่องจากยาง ENR มีหมู่ไอพอกไซค์ซึ่งเป็นหมู่ที่มีขั้ว จึงทำให้มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลสูง นอกจากนี้ยังเกิดการเชื่อมขวางด้วยพันธะอีเทอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.25 ส่งผลให้ยาง ENR คืนตัวได้น้อยกว่ายางธรรมชาติ

### สมบัติความต้านทานน้ำมัน (Oil resistance properties)

#### การทดสอบด้วยน้ำมัน ASTM Oil No.1

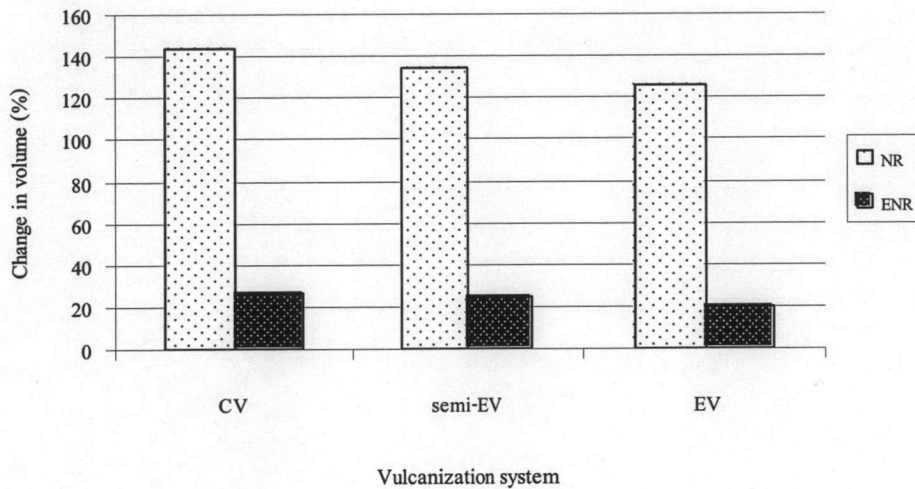
รูปที่ 4.28 แสดงสมบัติความต้านทานน้ำมันของยาง ENR ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ ต่อน้ำมัน ASTM Oil No.1 ซึ่งมีจุดอะนีสีน 123.8°C



รูปที่ 4.28 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของยาง ENR ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ ในน้ำมัน ASTM Oil No.1

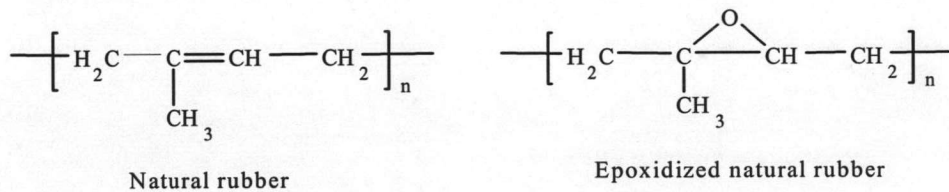
จากรูปที่ 4.28 พบว่า ยาง ENR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบ EV มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่ำกว่ายาง ENR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบ semi-EV และ CV ตามลำดับ เนื่องจากระบบ EV มีความหนาแน่นของการเชื่อมขวางมากกว่าระบบอื่น และการเชื่อมขวางโมเลกุลของยางยังเป็นแบบ mono- และ disulphide ส่งผลให้มีช่องว่างระหว่างโมเลกุลน้อยกว่า จึงทำให้น้ำมันแทรกตัวเข้าไปในยางได้น้อยกว่าในระบบ CV ซึ่งมีการเชื่อมขวางเป็นแบบ polysulphide

รูปที่ 4.29 แสดงการเปรียบเทียบความต้านทานน้ำมัน ASTM Oil No.1 ของยางธรรมชาติ กับยาง ENR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบต่างๆ



**รูปที่ 4.29** การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของยางธรรมชาติ และยาง ENR ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ ในน้ำมัน ASTM Oil No.1

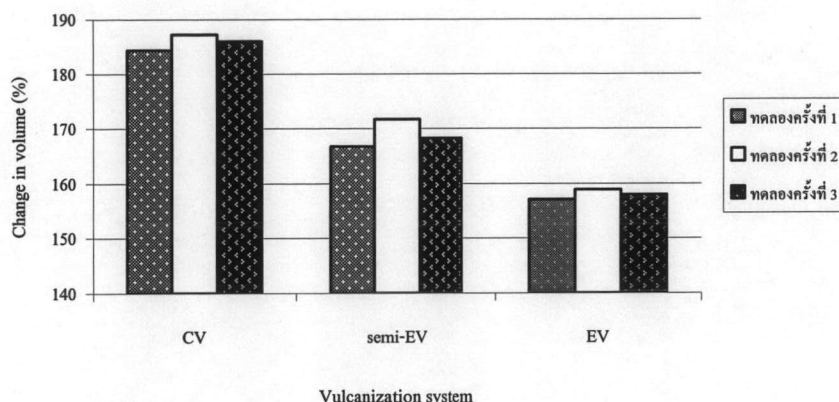
จากรูปที่ 4.29 พบว่ายาง ENR สามารถต้านทานน้ำมันได้ดีกว่ายางธรรมชาติ สังเกตได้จากยาง ENR มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่ำกว่ายางธรรมชาติ ทั้งนี้เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นยางที่ไม่มีขั้วแต่ยาง ENR เป็นยางที่มีขั้วอันเกิดจากหมู่อีพอกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.33 ซึ่งเมื่อนำไปแช่ในน้ำมัน ASTM Oil No.1 ที่มีจุดอะนิตินสูง (มีโครงสร้างเป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีขั้วต่ำหรือไม่มีขั้ว) จึงทำให้ยางธรรมชาติบวมตัวในน้ำมันได้มากกว่ายาง ENR



**รูปที่ 4.30** โครงสร้างที่ไม่มีขั้วของยางธรรมชาติ และมีขั้วของยาง ENR

#### การทดสอบด้วยน้ำมัน IRM 903

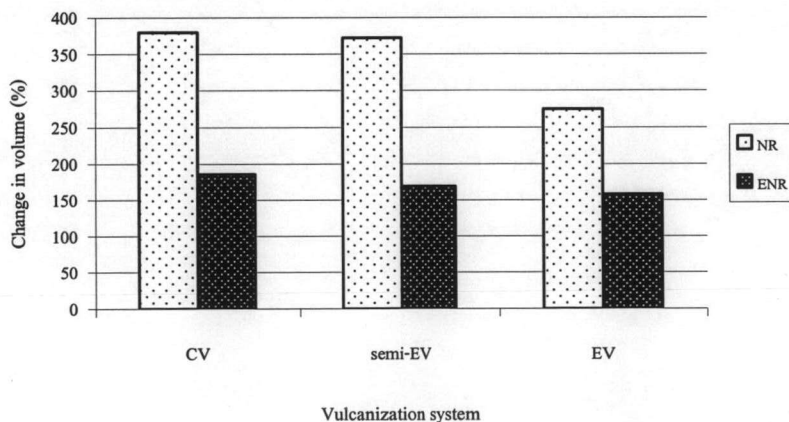
รูปที่ 4.31 แสดงสมบัติความต้านทานน้ำมันของยาง ENR ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ ต่อน้ำมัน IRM 903 ซึ่งมีจุดอะนิติน 89.5°C



รูปที่ 4.31 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของยาง ENR ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ ในน้ำมัน IRM 903

จากรูปที่ 4.31 พบว่า ยาง ENR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบ EV มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่ำกว่าระบบ semi-EV และ CV ตามลำดับ ด้วยเหตุผลเดียวกับการทดสอบด้วยน้ำมัน ASTM Oil No.1 คือ ตามลำดับ เนื่องจากระบบ EV มีความหนาแน่นของการเชื่อมขวางมากกว่าระบบอื่น และการเชื่อมขวางโมเลกุลของยางยังเป็นแบบ mono- และ disulphide ส่งผลให้มีช่องว่างระหว่างโมเลกุลน้อยกว่า จึงทำให้น้ำมันแทรกตัวเข้าไปในยางได้น้อยกว่าในระบบ CV ซึ่งมีการเชื่อมขวางเป็นแบบ polysulphide

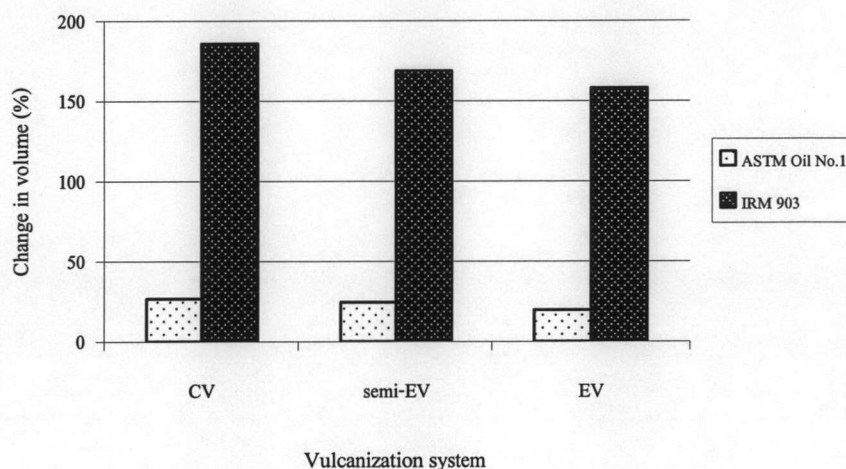
รูปที่ 4.32 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติความต้านทานน้ำมัน IRM 903 ของยางธรรมชาติ และยาง ENR ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบต่างๆ



รูปที่ 4.32 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของยางธรรมชาติ และยาง ENR ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ ในน้ำมัน IRM 903

จากรูปที่ 4.32 พบว่ายาง ENR มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่ำกว่ายางธรรมชาติ เนื่องจากโครงสร้างของยาง ENR มีความเป็นขั้วมากกว่ายางธรรมชาติจึงสามารถต้านทานน้ำมัน IRM 903 ได้ดีกว่า

รูปที่ 4.33 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติความต้านทานน้ำมัน ASTM Oil No.1 และน้ำมัน IRM 903 ของยาง ENR



รูปที่ 4.33 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของยาง ENR ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ ในน้ำมัน ASTM Oil No.1 และ IRM 903

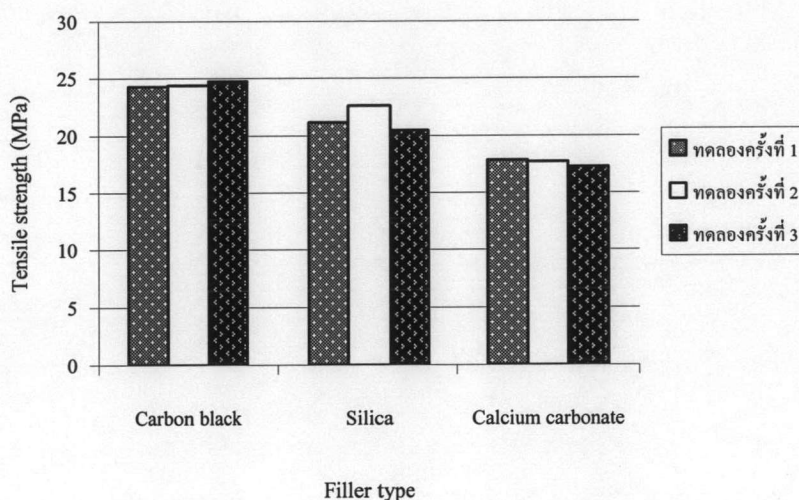
จากรูปที่ 4.33 พบว่า ยาง ENR มีการบวมตัวในน้ำมัน IRM 903 มากกว่าในน้ำมัน ASTM Oil No.1 เนื่องจากน้ำมัน IRM 903 มีขั้วมากกว่าน้ำมัน ASTM Oil No. 1 เพราะมีจุดอะนิลีนต่ำกว่า จึงทำให้ยาง ENR บวมตัวได้มากกว่า

#### 4.4.2 สมบัติทางกายภาพของยาง ENR ที่ใส่สารตัวเติม

##### ความทนแรงดึง (Tensile strength)

รูปที่ 4.34 แสดงค่าความทนแรงดึงของยาง ENR ที่ใส่สารตัวเติมคาร์บอนแบล็ก ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต ที่ผ่านการวัลคาไนซ์ด้วยระบบ CV



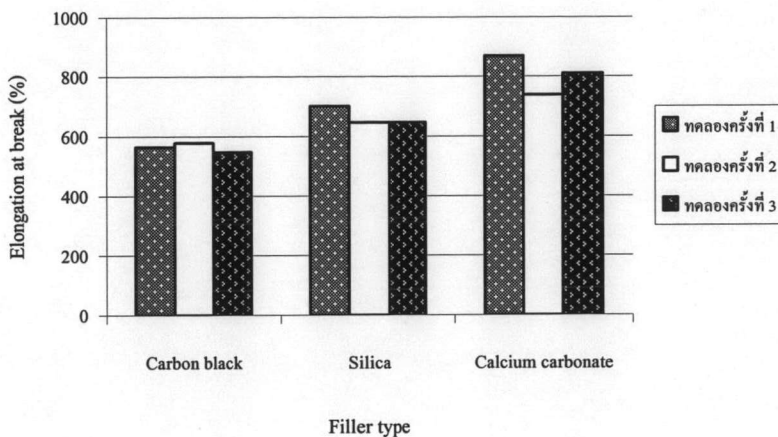


รูปที่ 4.34 ความทนแรงดึงของยาง ENR ที่ใส่สารตัวเติมชนิดต่างๆ

จากรูปที่ 4.34 พบว่า ยาง ENR ที่มีคาร์บอนแบล็กเป็นสารตัวเติมมีค่าความทนแรงดึงสูงกว่ายาง ENR ที่ใส่ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต ที่เป็นเช่นนี้เพราะคาร์บอนแบล็กมีขนาดอนุภาคเล็กที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต ดังนั้นคาร์บอนแบล็กจึงมีพื้นที่ผิวมากที่สุด โดยเมื่อสารตัวเติมมีพื้นที่ผิวมากอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมและยางจะดี และการที่ซิลิกามีความทนแรงดึงต่ำกว่าคาร์บอนแบล็ก เพราะมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวน้อยกว่า นอกจากนี้ การกระจายตัวของซิลิกาในยาง ENR ไม่ดีเท่าคาร์บอนแบล็ก เนื่องจากซิลิกาสามารถจับตัวกันเองเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นตามโครงสร้างที่มีขั้วของซิลิกา ส่วนแคลเซียมคาร์บอเนตมีความทนแรงดึงต่ำกว่ายาง ENR ที่ใส่ซิลิกา และคาร์บอนแบล็ก เพราะเป็นสารตัวเติมที่มีอนุภาคใหญ่ที่สุดจึงมีพื้นที่ผิวน้อยที่สุด ดังนั้น สรุปได้ว่าทั้งคาร์บอนแบล็กและซิลิกาสามารถเพิ่มความทนแรงดึงหรือเสริมแรงให้กับยาง ENR ในขณะที่แคลเซียมคาร์บอเนตไม่ทำให้ความทนแรงดึงของยาง ENR เพิ่มขึ้น

#### ระยะยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)

รูปที่ 4.35 แสดงค่าระยะยืด ณ จุดขาดของยาง ENR ที่ใส่สารตัวเติมคาร์บอนแบล็ก ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต

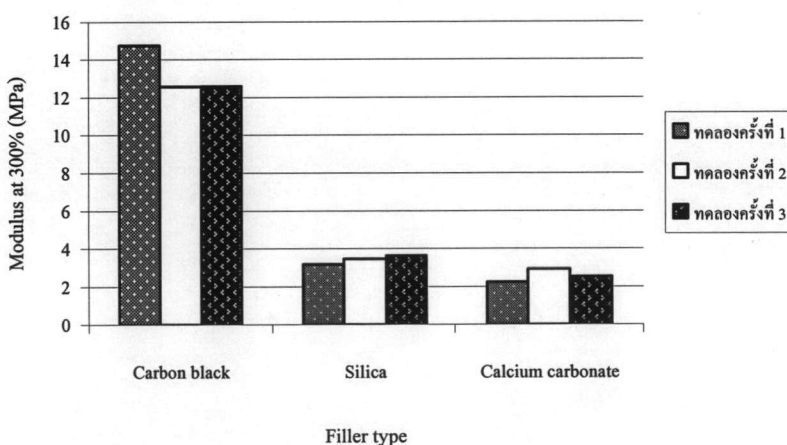


รูปที่ 4.35 ระยะยืด ณ จุดขาดของยาง ENR ที่ใส่สารตัวเติมชนิดต่างๆ

จากรูปที่ 4.35 พบว่าระยะยืด ณ จุดขาดของยาง ENR ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าสูงกว่ายาง ENR ที่ใส่ซิลิกา และคาร์บอนแบล็ก ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากสารตัวเติมที่มีอันตรกิริยากับยางมากจะทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น และมีความยืดหยุ่นลดลง

**มอดูลัสที่ระยะยืด 300% (Modulus at 300% elongation)**

รูปที่ 4.36 แสดงค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300% ของยาง ENR ที่ใส่สารตัวเติมคาร์บอนแบล็ก ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต



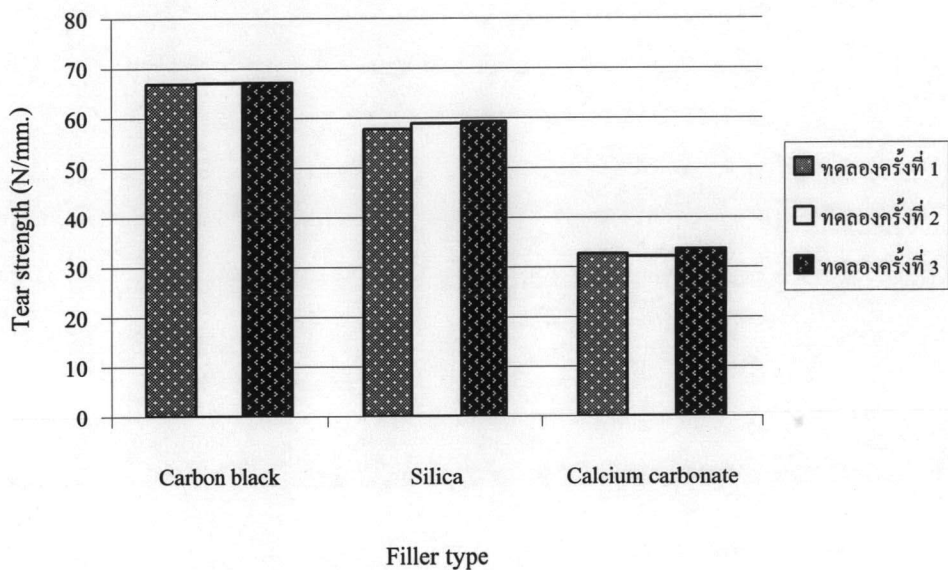
รูปที่ 4.36 มอดูลัสที่ระยะยืด 300% ของยาง ENR ที่ใส่สารตัวเติมชนิดต่างๆ

จากรูปที่ 4.36 พบว่า คาร์บอนแบล็กมีค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300% สูงกว่ายาง ENR ที่ใส่ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากสารตัวเติมที่มีอันตรกิริยากับยางมากจะทำ

ให้สายโซ่โมเลกุลของยางเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น และมีความยืดหยุ่นลดลง การดึงชิ้นงานให้ยืดออก ต้องใช้แรงมาก ส่งผลให้มอดุลัสมีค่าสูง

#### ความต้านทานการฉีกขาด (Tear strength)

รูปที่ 4.37 แสดงค่าความต้านทานการฉีกขาดของยาง ENR ที่ใส่สารตัวเติมคาร์บอนแบล็ก ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต

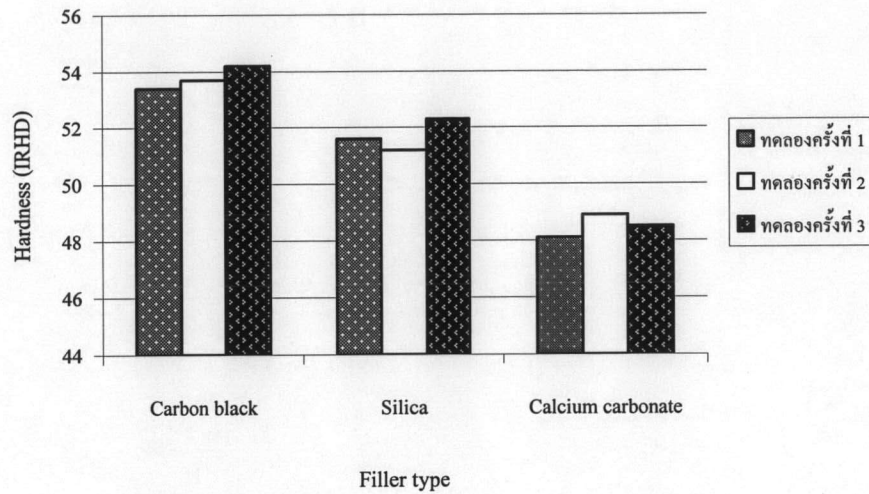


รูปที่ 4.37 ความต้านทานการฉีกขาดของยาง ENR ที่ใส่สารตัวเติมชนิดต่างๆ

จากรูปที่ 4.37 พบว่าความต้านทานการฉีกขาดของยาง ENR มีแนวโน้มเช่นเดียวกับความทนแรงดึง คือ คาร์บอนแบล็กมีค่าความต้านทานการฉีกขาดสูงกว่ายาง ENR ที่ใส่ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต เพราะคาร์บอนแบล็กมีพื้นที่ผิวมากกว่ายาง ENR ที่ใส่ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต โดยเมื่อสารตัวเติมมีพื้นที่ผิวมากอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมและยางจะดี ส่งผลให้ต้องใช้แรงมากขึ้นในการทำให้เกิดการฉีกขาด

#### สมบัติความแข็ง (Hardness property)

รูปที่ 4.38 แสดงค่าความแข็งของยาง ENR ที่ใส่สารตัวเติมคาร์บอนแบล็ก ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต

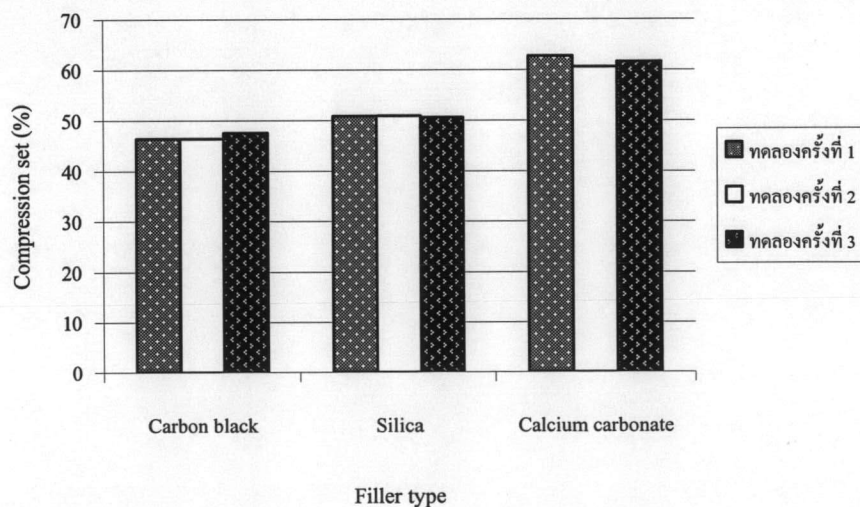


รูปที่ 4.38 ความแข็งของยาง ENR ที่ใส่สารตัวเติมชนิดต่างๆ

จากรูปที่ 4.38 พบว่ายาง ENR ที่ใส่คาร์บอนแบล็กมีความแข็งมากกว่ายาง ENR ที่ใส่ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ เนื่องจากคาร์บอนแบล็กมีอันตรกิริยากับยาง ENR มากที่สุด ทำให้ยึดเกาะกับสายโซ่โมเลกุลของยางได้ดี ส่งผลให้มีความยืดหยุ่นต่ำ และมีความแข็งสูงกว่าสารตัวเติมชนิดอื่น

#### สมบัติการคืนตัว (Compression set property)

รูปที่ 4.39 แสดงค่า compression set ของยาง ENR ที่ใส่สารตัวเติมคาร์บอนแบล็ก ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต



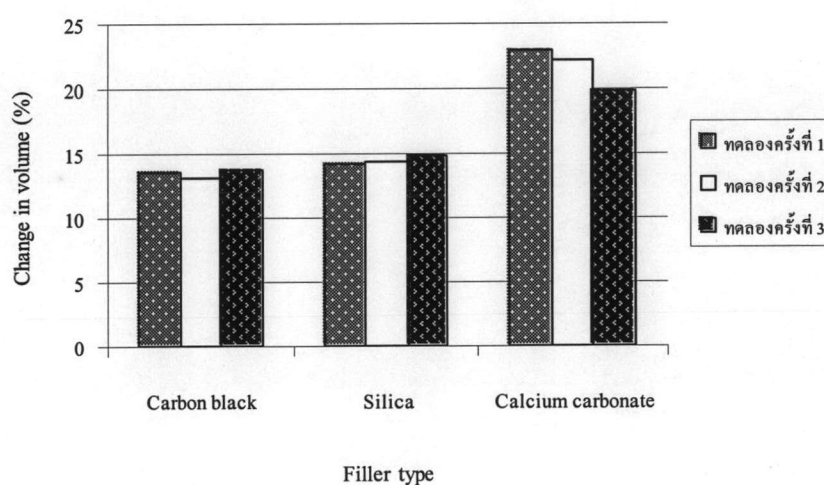
รูปที่ 4.39 ค่า compression set ของยาง ENR ที่ใส่สารตัวเติมชนิดต่างๆ

จากรูปที่ 4.39 พบว่า ยาง ENR ที่ใส่คาร์บอนแบล็กเป็นสารตัวเติมมีการคืนตัวดีกว่า ยาง ENR ที่ใส่ ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ (compression set ต่ำที่สุด) ทั้งนี้เนื่องจาก สารตัวเติมที่มีอนุภาคขนาดใหญ่กว่าจะสามารถขัดขวางการคืนตัวของยาง ENR ได้มากกว่า

### สมบัติความต้านทานน้ำมัน (Oil resistance property)

#### การทดสอบด้วยน้ำมัน ASTM Oil No.1

รูปที่ 4.40 แสดงสมบัติความต้านทานน้ำมันของยาง ENR ที่ใส่สารตัวเติมคาร์บอนแบล็ก ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต

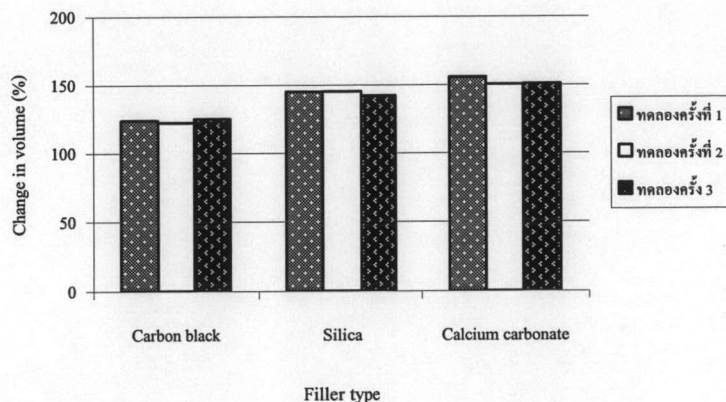


รูปที่ 4.40 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของยาง ENR ที่ใส่สารตัวเติมชนิดต่างๆ ในน้ำมัน ASTM Oil No.1

จากรูปที่ 4.40 พบว่า ยาง ENR ที่ใส่คาร์บอนแบล็กมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่ำกว่ายาง ENR ที่ใส่ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ เนื่องจากคาร์บอนแบล็กสามารถเกิดอันตรกิริยากับยางได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับซิลิกา และคาร์บอนแบล็ก ทำให้มีช่องว่างระหว่างโมเลกุลของยางน้อยที่สุด ดังนั้น น้ำมันจึงแทรกตัวเข้าไปได้ยากกว่า ส่งผลให้ยาง ENR ที่ใส่คาร์บอนแบล็กมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้อยที่สุด

#### การทดสอบด้วยน้ำมัน IRM 903

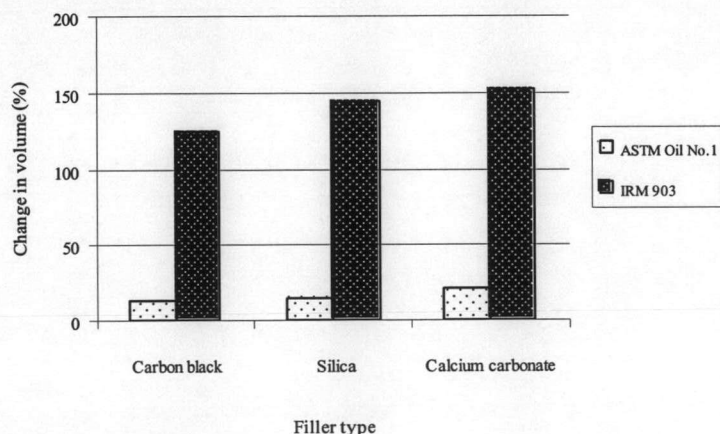
รูปที่ 4.41 แสดงสมบัติความต้านทานน้ำมันของยาง ENR ที่ใส่สารตัวเติมคาร์บอนแบล็ก ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต



รูปที่ 4.41 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของยาง ENR ที่ใส่สารตัวเติมชนิดต่างๆ ในน้ำมัน IRM 903

จากรูปที่ 4.41 พบว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงปริมาณของยาง ENR ในน้ำมัน IRM 903 มีแนวโน้มเดียวกับในน้ำมัน ASTM Oil No.1 นั่นคือ ยาง ENR ที่ใส่คาร์บอนแบล็กมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงปริมาณต่ำกว่ายาง ENR ที่ใส่ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากคาร์บอนแบล็กสามารถเกิดอันตรกิริยากับยางได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต ทำให้มีช่องว่างระหว่างโมเลกุลของยางน้อยที่สุด ดังนั้น น้ำมันจึงแทรกตัวเข้าไปได้ยากกว่า ส่งผลให้ยาง ENR ที่ใส่คาร์บอนแบล็กมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้อยกว่ายาง ENR ที่ใส่ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต

รูปที่ 4.42 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติความต้านทานน้ำมัน ASTM Oil No.1 และน้ำมัน IRM 903 ของยาง ENR

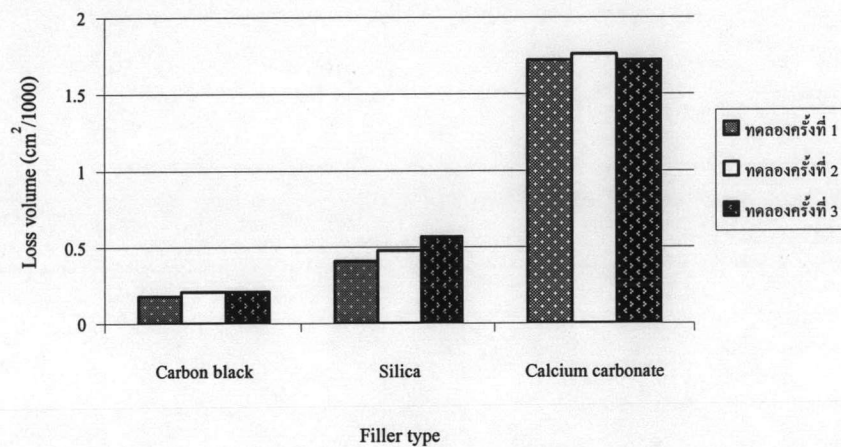


รูปที่ 4.42 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงปริมาณของยาง ENR ที่ใส่สารตัวเติมชนิดต่างๆ ในน้ำมัน ASTM Oil No.1 และ IRM 903

จากรูปที่ 4.42 พบว่า ยาง ENR มีการบวมตัวในน้ำมัน IRM 903 มากกว่าในน้ำมัน ASTM Oil No.1 เนื่องจากน้ำมัน IRM 903 มีขี้วมากกว่าน้ำมัน ASTM Oil No. 1 เพราะมีจุดอะนิลีนต่ำกว่า จึงทำให้ยาง ENR บวมตัวได้มากกว่า

#### ความต้านทานการสึกหรอ (Abrasion resistance)

รูปที่ 4.43 แสดงความต้านทานการสึกหรอของยาง ENR ที่ใส่สารตัวเติมคาร์บอนแบล็ก ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต



รูปที่ 4.43 ปริมาตรที่หายไปของยาง ENR ที่ใส่สารตัวเติมชนิดต่างๆ

จากรูปที่ 4.43 พบว่ายาง ENR ที่ใส่คาร์บอนแบล็กมีปริมาตรที่หายไปน้อยกว่ายาง ENR ที่ใส่ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ (ความต้านทานการสึกหรอดี) ทั้งนี้เนื่องจากคาร์บอนแบล็กมีอันตรกิริยากับยาง ENR มากที่สุด จึงทำให้มีความต้านทานการสึกหรอมากกว่า ส่วนแคลเซียมคาร์บอเนตมีอันตรกิริยากับยาง ENR น้อยกว่ายาง ENR ที่ใส่ซิลิกา และคาร์บอนแบล็ก จึงมีความต้านทานการสึกหรอต่ำที่สุด