

ตารางที่ 4.3 ความเข้มข้นในเฟสยางแต่ละชนิดของยางเบลนด์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

ชนิดยาง	ความเข้มข้น (mol/m^3)		
	NR	EPDM (BEPDM)	ความแตกต่าง
NR	100.4	-	-
NR/EPDM 75/25	106.5	14.6	91.9
NR/EPDM 50/50	124.3	71.0	55.3
NR/EPDM 25/75	148.0	58.4	89.6
EPDM	-	102.4	-
NR/BEPDM 75/25	61.5	45.6	15.9
NR/BEPDM 50/50	70.5	31.0	39.5
NR/BEPDM 25/75	56.0	28.2	27.8
BEPDM	-	109.3	-

จากตารางที่ 4.3 การเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางอีพียีดีเอ็ม พบว่า เมื่อปริมาณของยางธรรมชาติลดลง ความเข้มข้นเชื่อมขวางในเฟสยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น จะสังเกตได้ว่ายางเบลนด์ที่มีปริมาณอีพียีดีเอ็มเพียง 25% ความเข้มข้นเชื่อมขวางในเฟสของยางอีพียีดีเอมมีน้อยมาก เมื่อปริมาณของยางอีพียีดีเอมมากขึ้น ความเข้มข้นเชื่อมขวางในเฟสของยางอีพียีดีเอมก็มากขึ้นด้วย

การเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโพรเมทอีพียีดีเอ็ม พบว่าความเข้มข้นเชื่อมขวางในเฟสยางธรรมชาติมากที่สุดที่อัตราส่วน 50/50 รองลงมาคือที่อัตราส่วน 75/25 และ 25/75 ตามลำดับ ในขณะที่ความเข้มข้นในเฟสของยางโพรเมทอีพียีดีเอ็ม พบว่า เมื่อปริมาณของยางโพรเมทอีพียีดีเอมลดลง ความเข้มข้นเชื่อมขวางก็เพิ่มขึ้นด้วย

จากการเปรียบเทียบความเข้มข้นเชื่อมขวางในเฟสของยางชนิดต่าง ๆ ในยางเบลนด์แต่ละชนิด ทำให้ทราบว่า การดัดแปรโครงสร้างของยางอีพียีดีเอ็ม เป็นยางโพรเมทอีพียีดีเอ็มทำให้ความเข้มข้นเชื่อมขวางในเฟสยางธรรมชาติแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด คือ ในเฟสยางธรรมชาติของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางอีพียีดีเอ็ม พบว่า ความเข้มข้นเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นมีค่าสูงมาก คือ มากกว่า 100 mol/m^3 ในขณะที่ในเฟสของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโพร - เมทอีพียีดีเอม ความเข้มข้นเชื่อมขวางในเฟสของยางธรรมชาติอยู่ในช่วง 56 ถึง 70 mol/m^3

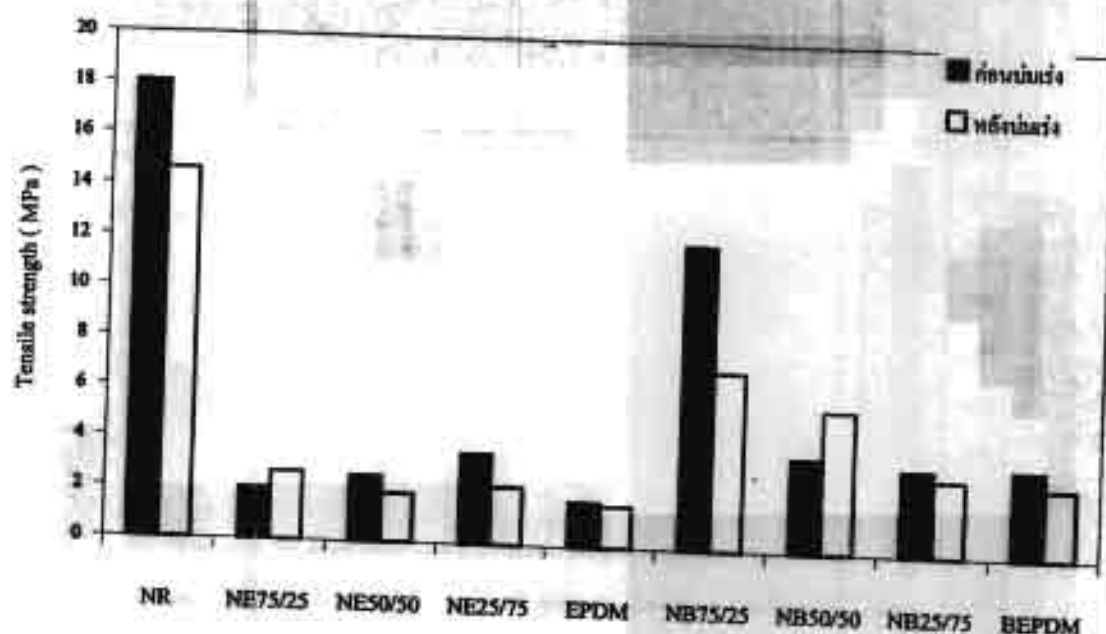
ในเฟสของยางอีพียีดีเอ็มหรือ ยางโพรเมทอีพียีดีเอ็ม พบว่า ความเข้มข้นในเฟสของยางอีพียีดีเอ็มที่อัตราส่วนการเบลนด์ 50/50 และ 25/75 มีค่ามากกว่า เฟสของยางโพรเมทอีพียีดีเอ็มแต่

ที่ อัตราส่วน 75/25 พบว่า ความเข้มข้นพันธะเชื่อมขวางในเฟสของยางโบรมิเนตอิพิตีเอ็มมีมากกว่าในเฟสของยางอีพิตีเอ็ม ทั้งนี้เนื่องจาก การทำปฏิกิริยาโบรมิเนชันในยางอีพิตีเอ็ม ทำให้พันธะคู่บางส่วนแตกออก คือ โบรมีนเข้าไปในโครงสร้างโมเลกุลตรงตำแหน่งของพันธะคู่ ทำให้ปริมาณของพันธะคู่ลดลงดังผลการศึกษาด้วย $^1\text{H-NMR}$ ดังนั้น ความเข้มข้นพันธะเชื่อมขวางในเฟสของยางอีพิตีเอ็ม ที่อัตราส่วน 50/50 และ 25/75 จึงมีมากกว่า แต่ที่อัตราส่วน 75/25 เห็นว่าความเข้มข้นพันธะเชื่อมขวางในเฟสของยางอีพิตีเอ็มมีค่าน้อยมาก อาจเนื่องจาก การที่อัตราส่วนการวัลคาไนซ์ของอีพิตีเอ็มช้ากว่ายางธรรมชาติมาก เมื่อปริมาณของยางอีพิตีเอ็มในการเบลนด์มีเพียง 25% ทำให้สารเคมีและสารวัลคาไนซ์ จะเข้าไปในเฟสของยางธรรมชาติมากกว่า เนื่องจากยางธรรมชาติมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาเร็วกว่ายางอีพิตีเอ็มมาก ดังนั้น ความเข้มข้นพันธะเชื่อมขวางในเฟสของยางอีพิตีเอ็มที่อัตราส่วน 75/25 จึงมีค่าน้อยมาก

จากตารางที่ 4.3 พบว่า ความแตกต่างของความเข้มข้นพันธะเชื่อมขวางในเฟสของยางสองชนิดมีความแตกต่างกัน คือ ในการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางอีพิตีเอ็ม พบว่า ความเข้มข้นพันธะเชื่อมขวางของยางธรรมชาติมีค่าแตกต่างจากความเข้มข้นพันธะเชื่อมขวางในเฟสของยางอีพิตีเอ็มมาก ทั้งนี้เนื่องจากความแตกต่างของอัตราการวัลคาไนซ์ของยางทั้งสองชนิดมีค่าแตกต่างกันมากดังการศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์และพลังงานการกระตุ้น ซึ่งก็คือ ยางธรรมชาติมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่ายางอีพิตีเอ็มมาก ทำให้สารเคมีต่าง ๆ และ สารวัลคาไนซ์ที่ใช้ในการทำยางคอมปาวด์ ถูกยางธรรมชาติดึงไปใช้เร็วกว่า จึงมีปริมาณมากกว่า ทำให้ความเข้มข้นพันธะเชื่อมขวางในเฟสของยางธรรมชาติมีมากกว่าในเฟสของยางอีพิตีเอ็มมาก แต่เมื่อทำการโบรมิเนชันให้แก่ยางอีพิตีเอ็ม พบว่า ความแตกต่างของระดับความเข้มข้นพันธะเชื่อมขวางในเฟสของยางธรรมชาติกับยางโบรมิเนตอิพิตีเอ็มมีน้อยลง ซึ่งก็เนื่องจาก ยางโบรมิเนตอิพิตีเอ็มที่มีโบรมีนอยู่ในโครงสร้างทำให้วัลคาไนซ์ได้เร็วกว่ายางธรรมชาติและยางอีพิตีเอ็ม ดังผลการศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์และพลังงานการกระตุ้นทำให้สารเคมีและสารวัลคาไนซ์ถูกยางโบรมิเนตอิพิตีเอ็มนำไปใช้ก่อน จึงเกิดพันธะเชื่อมขวางขึ้น และความเข้มข้นพันธะเชื่อมขวางในเฟสของยางธรรมชาติลดลงเพราะสารเคมีบางส่วนถูกนำไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับยางโบรมิเนตอิพิตีเอ็ม แต่แม้ว่าสารเคมีจะถูกดึงไปใช้ก่อน แต่เนื่องจากพันธะคู่บางส่วนถูกจับกับโบรมีน ทำให้พันธะคู่ที่มีในยางโบรมิเนตอิพิตีเอ็มมีน้อยกว่ายางอีพิตีเอ็ม

4.1.6 ความทนต่อแรงดึงและความสามารถยืดจนขาดของยาง

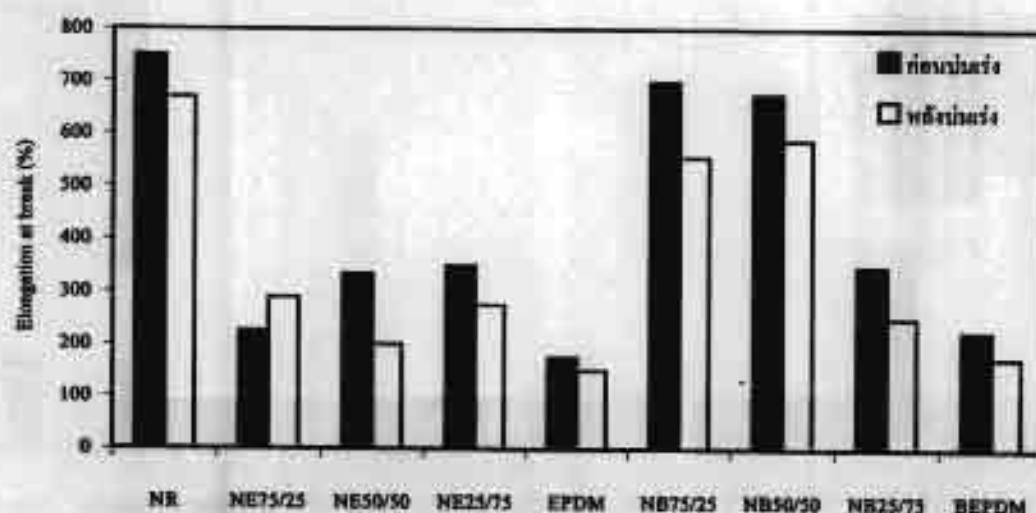
จากการทดลองที่ 3.3.1.6 เป็นการศึกษาถึงความสามารถในด้านความทนต่อแรงดึงและความสามารถยืดจนขาดของยางเบลนด์ในสภาวะปกติ และการเปลี่ยนแปลงของสมบัติของยางเบลนด์เมื่อผ่านการให้ความร้อนแก่ยางเป็นเวลา 3 วัน ที่อุณหภูมิ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.20 ความทนต่อแรงดึงของยางเบลนด์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ก่อนและหลังการบ่มแรง
(หมายเหตุ : NE คือ NR/EPDM และ NB คือ NR/BEPDM)

จากรูปที่ 4.20 จะเห็นได้ว่ายางธรรมชาติมีความทนต่อแรงดึงสูงที่สุดเพราะยางธรรมชาติจะเกิดการตกผลึกเมื่อได้รับแรงดึง ซึ่งเป็นผลให้โมเลกุลของยางมีความแข็งแรงมากขึ้น ในขณะที่ยางอีพดีเอ็มไม่เกิดการตกผลึกจึงทำให้มีความสามารถในการต้านทานต่อแรงดึงได้ต่ำกว่า และยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโพรพิลีนมีเทนอีพดีเอ็มมีความทนทานต่อแรงดึงที่สูงกว่ายางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางอีพดีเอ็มในทุกสัดส่วนการเบลนด์ ทั้งๆที่ยางเบลนด์ยางธรรมชาติกับยางอีพดีเอ็มมีความเข้มข้นสูงกว่า แสดงว่าการกระจายของพันธะเชื่อมขวางในฟลอสยางแต่ละชนิดในยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโพรพิลีนมีเทนอีพดีเอ็มดีกว่า มีอิทธิพลมากกว่าความเข้มข้น จึงส่งผลให้ความแข็งแรงภายในพันธะของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโพรพิลีนมีเทนอีพดีเอ็มมีมากกว่า ความทนต่อแรงดึงจึงสูงขึ้นไปกว่าการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางอีพดีเอ็ม และแม้ว่าจะผ่านการบ่มแรงความทนต่อแรงดึงของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโพรพิลีนมีเทนอีพดีเอ็มก็ยังคงสูงกว่า

อาจสังเกตได้ว่า ในบางอัตราส่วนมีการเพิ่มขึ้นของความทนต่อแรงดึงเมื่อผ่านการบ่มแรง อาจเนื่องมาจาก การบ่มแรงทำให้เกิดพันธะภายในโมเลกุลยางเพิ่มขึ้น ความทนต่อแรงดึงจึงสูงขึ้นด้วย และเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นความทนต่อแรงดึงจะสูงขึ้นด้วยในการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโพรพิลีนมีเทนอีพดีเอ็ม



รูปที่ 4.21 ความสามารถยืดจนขาดของยางเบลนด์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ก่อนและหลังการปมแรง (หมายเหตุ : NE คือ NR/EPDM และ NB คือ NR/BEPDM)

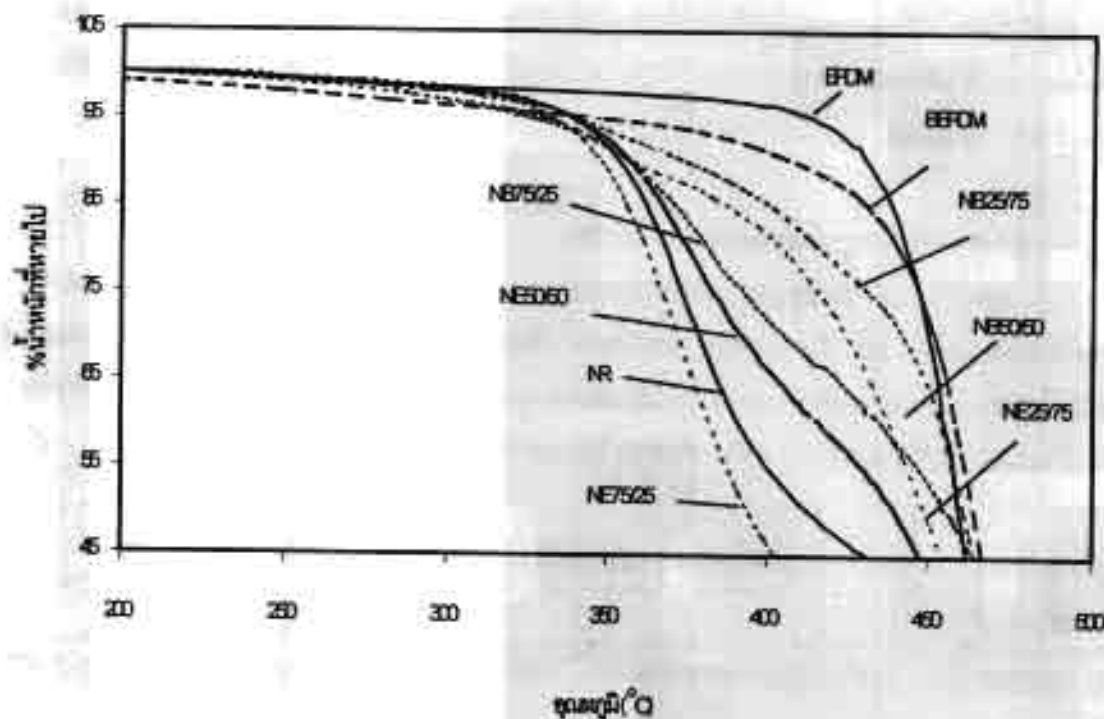
จากรูปที่ 4.21 พบว่า ความสามารถยืดจนขาดของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยาง อีพดีเอ็มมีค่าค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นที่สูง (ตารางที่ 4.3) ส่วนยางเบลนด์ยางธรรมชาติกับยางโพรพิลีนอีพดีเอ็มมีความเข้มข้นที่ต่ำจึงมีความสามารถยืดจนขาดที่สูงกว่านั่นเอง

แสดงว่า การดัดแปลงโครงสร้างยางอีพดีเอ็มเป็นยางโพรพิลีนอีพดีเอ็ม เมื่อให้การวัลคาไนซ์ที่ไม่ต่างจากยางธรรมชาติ ทำให้ยางเบลนด์มีความเข้ากันได้ทางการวัลคาไนซ์ส่งผลให้การกระจายพันธะเชื่อมขวางในแต่ละเฟสดีขึ้น สมบัติทางด้านความต้านทานต่อการดึงจึงสูงขึ้นอย่างชัดเจน

4.1.7 การทดสอบความทนต่อความร้อนของยางวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง

Thermogravimetric analyser (TGA)

จากการทดลองที่ 3.3.1.7 เป็นการศึกษาความสามารถด้านความทนต่อความร้อนของยางวัลคาไนซ์ที่อัตราส่วนการเบลนด์ต่าง ๆ ของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางอีพดีเอ็ม และยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโพรพิลีนอีพดีเอ็ม โดยศึกษาความร้อนที่ทำให้น้ำหนักยางหายไป 50 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักยางเริ่มต้น ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 น้ำหนักยางวัลคาไนซ์ที่เหลืออยู่ต่อความร้อนของยางเบลนด์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.22 จะเห็นได้ว่า ยางอีพิตีเอ็มมีความสามารถต้านความทนต่อความร้อนที่สูงกว่ายางโบรมิเนตอีพิตีเอ็มทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก ยางโบรมิเนตอีพิตีเอ็มได้มาจากการตัดแปรรูปโครงสร้างทางเคมีให้แก่ยางอีพิตีเอ็มโดยการทำปฏิกิริยาโบรมิเนชัน แล้วทำให้แห้งโดยการอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 72 ชั่วโมง นั่นก็คือ ยางโบรมิเนตอีพิตีเอ็มได้รับความร้อนมาแล้วครั้งหนึ่งก่อนการทดสอบหาความสามารถในด้านความทนต่อความร้อน ซึ่งก็คือ ยางโบรมิเนตอีพิตีเอ็มมีประวัติทางความร้อนมากกว่ายางอีพิตีเอ็ม ทำให้ความสามารถในด้านความทนต่อความร้อนของยางโบรมิเนตอีพิตีเอ็มต่ำกว่ายางอีพิตีเอ็ม ซึ่งหากเปลี่ยนขั้นตอนในการทำยางให้แห้งจากการใช้ความร้อนมาเป็นการใช้ความเย็นในการทำให้แห้ง (Freezing dry) ยางโบรมิเนตอีพิตีเอ็มที่ได้อาจมีความสามารถในการต้านความทนทานต่อความร้อนที่ดีขึ้น

อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ชัดเจนว่า การเบลนด์ยางธรรมชาติกับยางโบรมิเนตอีพิตีเอ็ม ให้สมบัติด้านความทนต่อความร้อนที่ดีกว่าการเบลนด์ยางธรรมชาติกับยางอีพิตีเอ็มในทุกสัดส่วนการผสม ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณพันธะคู่ที่ลดลงเนื่องจากการทำปฏิกิริยาโบรมิเนชันของยางอีพิตีเอ็มและความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของพันธะเชื่อมขวางในเฟสของยางโบรมิเนตอีพิตีเอ็มและยางธรรมชาติ ทำให้ความสามารถในด้านความทนต่อความร้อนของยางเบลนด์นี้ดีกว่าเมื่อเพิ่มปริมาณยางอีพิตีเอ็มหรือยางโบรมิเนตอีพิตีเอ็ม จะทำให้สมบัติด้านความทนต่อความร้อนของยางเบลนด์ดีขึ้น แต่จะสังเกตได้ว่า ยางธรรมชาติที่วัลคาไนซ์แล้วมีความทนต่อความร้อนมาก

กว่ายางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางอีพิตีเอ็มที่อัตราส่วน 75/25 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก ยางธรรมชาติเกิดการเชื่อมขวางของพันธะที่สมบูรณ์กว่าและการกระจายความเข้มข้นของยางแต่ละเฟสในยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางอีพิตีเอ็มที่อัตราส่วนนี้แย่ที่สุด ยางธรรมชาติมีความทนความร้อนที่สูงกว่า แต่ก็ไม่มากนัก

4.1.8 สมบัติความต้านทานต่อโอโซน

สมบัติเด่นอีกด้านของยางอีพิตีเอ็มนอกจากความทนต่อการเกิดออกซิเดชัน คือ ความต้านทานต่อโอโซน และ สิ่งแวดล้อม เมื่อทำการปรับสภาพของยางอีพิตีเอ็มเป็นยางโบรมิเนตอีพิตีเอ็ม โดยทำการทดสอบที่ความเข้มข้น 50 ppm อุณหภูมิ 40°C เปอร์เซนต์การยืดยางเท่ากับ 20 เป็นเวลา 72 ชั่วโมง (ISO 1431 Part 1) ได้ผลการทดสอบดังนี้

ตารางที่ 4.4 ความต้านทานต่อโอโซนของยางชนิดต่าง ๆ

ชนิดยาง	ผลการศึกษา
ยางธรรมชาติ	ปรากฏรอยแตกจำนวนนับไม่ถ้วน ความยาวรอยแตกมากกว่า 3 มม. (เกรต C-5)
NR/EPDM 75/25	ปรากฏรอยแตกจำนวนนับไม่ถ้วน ความยาวรอยแตกมากกว่า 1 มม. (เกรต C-3)
NR/EPDM 50/50	ไม่ปรากฏรอยแตก
NR/EPDM 25/75	ไม่ปรากฏรอยแตก
EPDM	ไม่ปรากฏรอยแตก
NR/BEPDM 75/25	ปรากฏรอยแตกจำนวนนับไม่ถ้วน ความยาวรอยแตกมากกว่า 1 มม. (เกรต C-3)
NR/BEPDM 50/50	ไม่ปรากฏรอยแตก
NR/BEPDM 25/75	ไม่ปรากฏรอยแตก
BEPDM	ไม่ปรากฏรอยแตก

จากตารางที่ 4.4 พบว่ายางธรรมชาติเกิดรอยแตกมากที่สุด เพราะโครงสร้างของยางธรรมชาติที่มีพันธะคู่อยู่มาก จึงทำให้ไม่ทนต่อโอโซน ดังนั้นจึงเกิดรอยแตกมากที่สุด ในขณะที่ยางอีพิตี-เอ็มที่มีพันธะคู่น้อยกว่าและพันธะคู่ไม่ได้อยู่ในโซ่หลัก ทำให้มีสมบัติเด่นด้านความทนทานต่อโอโซน ดังนั้น เมื่อนำยางเบลนด์ของยางทั้งสองชนิดนี้ศึกษาสมบัติด้านความต้านทานต่อโอโซน พบว่า ยางเบลนด์ที่มีปริมาณของยางธรรมชาติมาก มีความทนทานต่อโอโซนต่ำกว่า ยางเบลนด์ที่มีปริมาณของยางอีพิตีเอ็มมากกว่า

จากการปรับปรุงโครงสร้างยางอีพิตีเอ็มด้วยการทำโบรมิเนชัน พบว่า ยางโบรมิเนตอีพิตี-เอ็มก็ยังคงสมบัติด้านความต้านทานต่อโอโซนเช่นเดียวกับยางอีพิตีเอ็ม และเห็นได้ว่า ยางเบลนด์

ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโบรมิเนตอีพิตีเอ็มก็ยังคงมีสมบัติเช่นเดียวกับยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางอีพิตีเอ็ม ที่ทุกอัตราส่วนการเบลนด์

4.2 การเบลนด์ยางธรรมชาติกับยางมาลิเอตอีพิตีเอ็ม

4.2.1 ยางมาลิเอตอีพิตีเอ็ม

ผสมยางสูตรตามตารางที่ 3.5 แปรปริมาณมาลิเอตอีพิตีเอ็มเป็น 1, 2, 3 และ 4 phr ตามลำดับโดยใช้สภาวะในการผสมเดียวกันคือ อุณหภูมิ 180 °C เวลาผสม 3 นาที ลักษณะยางที่ได้แสดงในตารางที่ 4.5 เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะของยางอีพิตีเอ็มเกรด Keltan 714 พบว่าลักษณะและสีของยางเปลี่ยนแปลงไป ยางอีพิตีเอ็มเกรด Keltan 714 จะมีลักษณะเป็นก้อนสีขาวแต่หลังจากทำปฏิกิริยากราฟต์ด้วยมาลิเอตอีพิตีเอ็มโดยใช้ MBTS เป็นโปรโมเตอร์ (promoter) พบว่ายางที่เตรียมได้จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลและสีจะเข้มขึ้นจนเป็นสีม่วงออกสีดำเมื่อเพิ่มปริมาณมาลิเอตอีพิตีเอ็มจนถึง 4 phr สูตรที่ใช้มาลิเอตอีพิตีเอ็ม 3 และ 4 phr จะมีบางตำแหน่งเกิดเป็นสีน้ำตาลไหม้กระจายอยู่ทั่วไป สีน้ำตาลไหม้ที่พบนี้อาจมีสาเหตุมาจากการเกิดปฏิกิริยาโฮโมพอลิเมอร์ไรเซชัน (Homopolymerisation) ของมาลิเอตอีพิตีเอ็ม เนื่องจากความไม่เข้ากันของมาลิเอตอีพิตีเอ็มซึ่งเป็นสารเคมีที่มีความเป็นขั้วกับยางอีพิตีเอ็มซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว ทำให้มาลิเอตอีพิตีเอ็มสามารถแพร่เข้าไปอยู่ระหว่างโมเลกุลของยางอีพิตีเอ็มในได้ปริมาณที่จำกัด เมื่อมีปริมาณมาลิเอตอีพิตีเอ็มมากเกินไปในยางอีพิตีเอ็มทำให้เกิดการแยกส่วนกันระหว่างมาลิเอตอีพิตีเอ็มและยางอีพิตีเอ็ม เมื่อมาลิเอตอีพิตีเอ็มที่แยกเฟสออกไปเกิดอนุมูลอิสระขึ้นก็จะทำปฏิกิริยากันเองเกิดเป็นสีน้ำตาลไหม้กระจายอยู่บนยาง (Grigoryeva and Karger-Kocsis, 2000)

ผสมยางสูตรที่มีมาลิเอตอีพิตีเอ็ม 2 phr MBTS 0.2 phr โดยใช้เวลาและอุณหภูมิการผสมแตกต่างกันลักษณะยางที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.5 พบว่าสีของยางคล้ายกันเกือบทั้งหมด แต่จะพบยางที่มีสีน้ำตาลไหม้ปนอยู่เฉพาะสูตรที่ใช้เวลาผสม 5 นาที ที่อุณหภูมิ 180 °C และสูตรที่ใช้เวลาผสม 3 และ 5 นาที ที่อุณหภูมิ 200 °C เนื่องจากการผสมโดยใช้เวลานานจะทำให้มาลิเอตอีพิตีเอ็มที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเกิดเป็นอนุมูลอิสระและทำปฏิกิริยากันเอง ส่วนการผสมที่อุณหภูมิ 200 °C จะทำให้มาลิเอตอีพิตีเอ็มเกิดอนุมูลอิสระได้ง่ายและเร็วขึ้น จึงเกิดปฏิกิริยาโฮโมพอลิเมอร์ไรเซชันก่อนที่จะกระจายในเนื้อยาง

ตารางที่ 4.5 ลักษณะยางที่ได้ก่อนและหลังการกราฟต์มาลิกแอโนไฮโดรด์ลงบนโมเลกุลยางอีพิตีเอ็มด้วยเครื่องบราเบนเดอร์

สูตรที่ใช้เตรียม MEPDM	ลักษณะยาง
Keltan 714	มีลักษณะเป็นก้อนสีขาว
MAH1	มีลักษณะเป็นก้อนสีน้ำตาลอ่อน
MAH2	มีลักษณะเป็นก้อนสีน้ำตาลอ่อน (สีเข้มขึ้นกว่าสูตร MAH1)
MAH3	มีลักษณะเป็นก้อนสีน้ำตาล
MAH4	มีลักษณะเป็นก้อนสีม่วงเข้ม
3m-180	มีลักษณะเป็นก้อนสีน้ำตาล
5m-180	มีลักษณะเป็นก้อนสีน้ำตาล
3m-200	มีลักษณะเป็นก้อนขนาดเล็กสีน้ำตาล
5m-200	มีลักษณะเป็นก้อนขนาดเล็กสีน้ำตาล

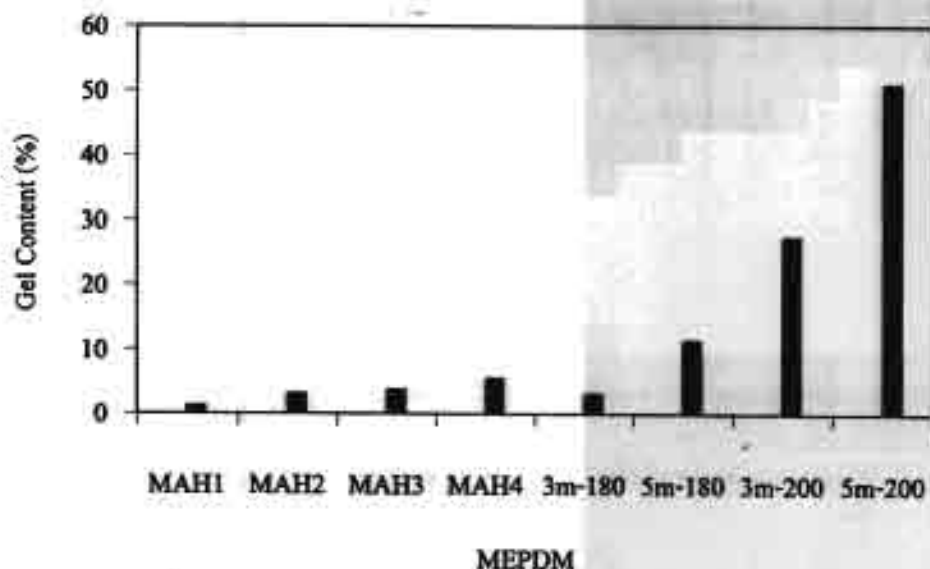
หมายเหตุ

MAH X หมายถึง การกราฟต์มาลิกแอโนไฮโดรด์บนโมเลกุลยางอีพิตีเอ็มโดยใช้มาลิกแอโนไฮโดรด์ X phr ผสมในเครื่องบราเบนเดอร์อุณหภูมิ 180 °C เวลาผสม 3 นาที ใช้ Fill Factor เท่ากับ 0.8 ความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 60 รอบต่อนาที

Xm-Y หมายถึง การกราฟต์มาลิกแอโนไฮโดรด์บนโมเลกุลยางอีพิตีเอ็มโดยใช้มาลิกแอโนไฮโดรด์ 2 phr ผสมในเครื่องบราเบนเดอร์อุณหภูมิ Y °C เวลาผสม X นาที ใช้ Fill Factor เท่ากับ 0.8 ความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 60 รอบต่อนาที

4.2.1.1 การหาเปอร์เซ็นต์เจลของยางมาลิกแอโนอีพิตีเอ็ม

นำยางมาลิกแอโนอีพิตีเอ็มที่เตรียมมาหาเปอร์เซ็นต์เจลได้ผลดังรูปที่ 4.23

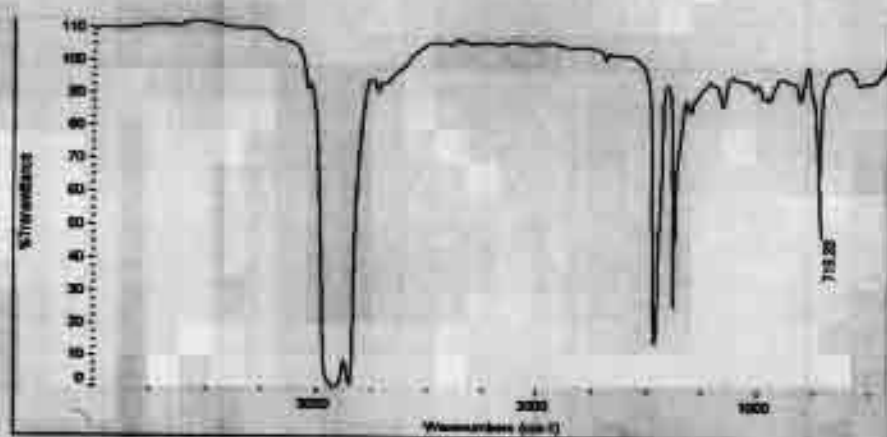


รูปที่ 4.23 เปอร์เซนต์เจลของยางมาลิกเอทอีพีดีเอ็มที่เตรียมที่สภาวะต่างๆ

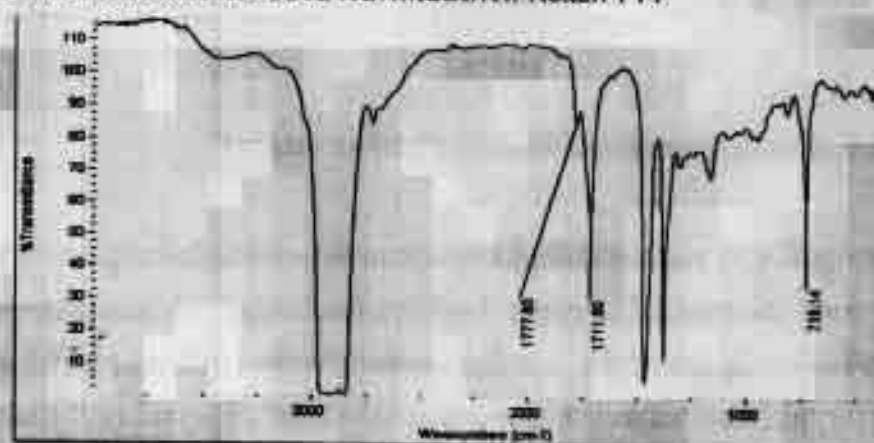
จากรูปที่ 4.23 พบว่าเปอร์เซนต์เจลของยางมาลิกเอทอีพีดีเอ็มขึ้นอยู่กับปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์ เวลา และอุณหภูมิในการผสม โดยที่การเพิ่มปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์ทำให้เปอร์เซนต์เจลเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เวลาในการผสมจะมีผลต่อการเพิ่มของเปอร์เซนต์เจลมากกว่า เนื่องจากการใช้เวลาการผสมมากโมเลกุลของยางอีพีดีเอ็มได้รับแรงเฉือนเป็นเวลานาน ทำให้สายโซ่โมเลกุลขาดและเกิดอนุมูลอิสระขึ้นเชื่อมโยงกับโมเลกุลข้างเคียงที่มีอนุมูลอิสระที่พร้อมจะทำปฏิกิริยาเช่นกัน แต่การเพิ่มขึ้นของเปอร์เซนต์เจลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณมาลิก-แอนไฮไดรด์และเวลาผสมยังไม่เด่นชัดเท่ากับการเพิ่มอุณหภูมิในการผสม คือเพิ่มจาก 180 เป็น 200 °C เนื่องจากอุณหภูมิที่ 200 °C จะทำให้โมเลกุลของยางอีพีดีเอ็มเกิดอนุมูลอิสระได้ง่าย และสามารถรวมตัวกับโมเลกุลข้างเคียงได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ได้เปอร์เซนต์เจลมากและเมื่อเพิ่มเวลาในการผสมต่อไปอีกจาก 3 นาที เป็น 5 นาที เปอร์เซนต์เจลทั้งสองสภาวะจะแตกต่างกันอย่างมากคือเพิ่มจาก 27.5 % เป็น 51.1% จะเห็นได้ว่าเปอร์เซนต์เพิ่มขึ้นเกือบเท่าตัวเมื่อใช้เวลาผสมเพิ่มขึ้นเพียง 2 นาที

4.2.1.2 การหาปริมาณการกราฟต์ของมาลิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลยางอีพีดีเอ็มด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรโฟโตมิเตอร์

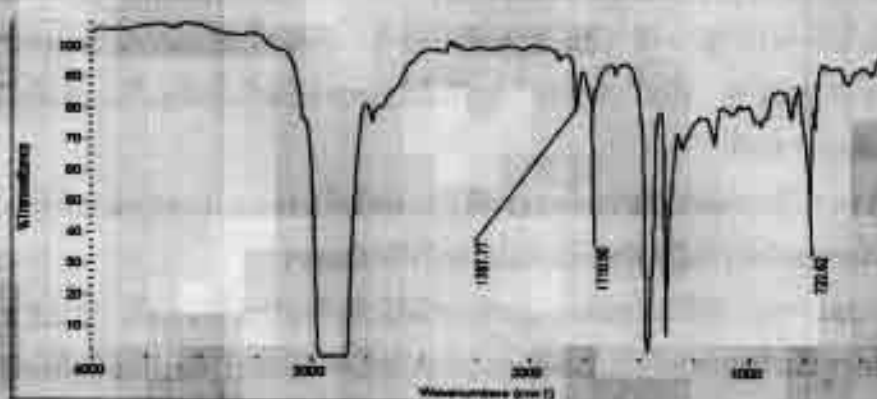
นำสารละลายยางอีพีดีเอ็มและยางมาลิกเอทอีพีดีเอ็มที่เตรียมได้จากข้อ 3.3.2.3 ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ได้สเปกตรัมอินฟราเรดแสดงดังรูปที่ 4.24 - 4.26



รูปที่ 4.24 สเปกตรัมอินฟราเรดของยางอีพิตีเอ็มเกรด Kellan 714



รูปที่ 4.25 สเปกตรัมอินฟราเรดของยางมาลิเอตอีพิตีเอ็มที่ใช้มาลิอิกแอนไฮไดรด์ 2 phr ผสม โดยใช้อุณหภูมิ 180 °C เวลา 3 นาที ด้วยเครื่องบราเบนเดอร์



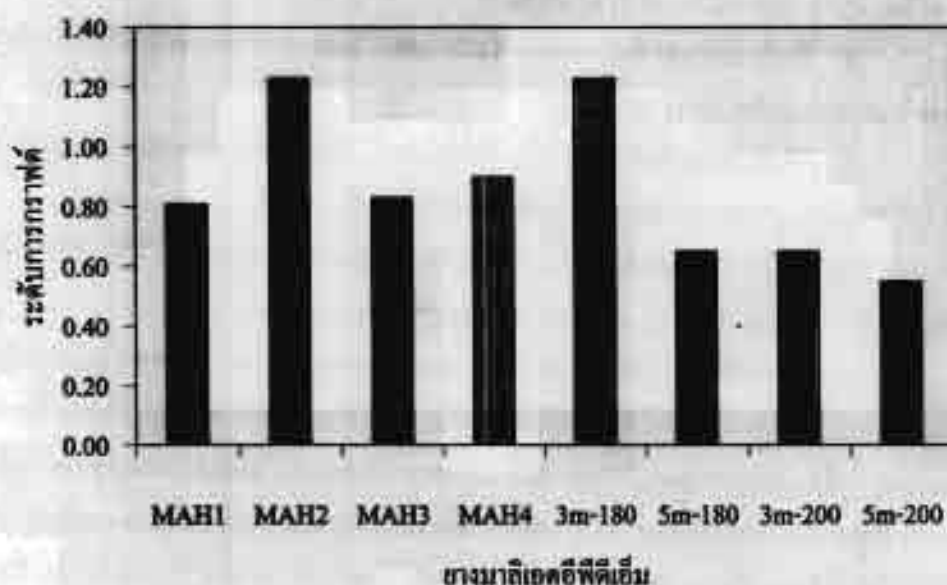
รูปที่ 4.26 สเปกตรัมอินฟราเรดของยางมาลิเอตอีพิตีเอ็ม ใช้มาลิอิกแอนไฮไดรด์ 2 phr ผสม 5 นาที ที่อุณหภูมิ 200 °C ด้วยเครื่องบราเบนเดอร์

จากรูปที่ 4.24 พบตำแหน่งการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่สำคัญอยู่ 4 ตำแหน่ง คือ

1. ที่บริเวณเลขคลื่น $2990 - 2850 \text{ cm}^{-1}$ แสดงค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ C - H ใน $-\text{CH}_2$ และ $-\text{CH}_3$ แบบ stretching
2. ที่บริเวณเลขคลื่น $1490 - 1400 \text{ cm}^{-1}$ แสดงค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ C - H ในสายโซ่อัลคิล แบบ bending
3. ที่บริเวณเลขคลื่น $1375 - 1300 \text{ cm}^{-1}$ แสดงค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ C - H ใน $-\text{CH}_3$ แบบ bending (พิมพ์จิตและวัชรินทร์, 2542)
4. ที่บริเวณเลขคลื่น $721 - 718 \text{ cm}^{-1}$ แสดงการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ C - H ใน $-\text{CH}_2$ แบบ rocking (Grigoryeva and Karger-Kocsis, 2000)

สำหรับรูปที่ 4.25 และรูปที่ 4.26 เป็นตัวอย่างสเปกตรัมอินฟราเรดของยางมาลิเอคอีฟิดีเอ็ม พบตำแหน่งการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเพิ่มขึ้น 2 ตำแหน่งที่ใกล้เคียงกันคือที่เลขคลื่น $1830 - 1750 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งแสดงการดูดกลืนของ C - O stretching แบบไม่สมมาตรและสมมาตรตามลำดับ แถบการดูดกลืนในช่วงนี้แสดงถึงการกราฟต์มาลิอิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลยางอีฟิดีเอ็ม มาลิอิกแอนไฮไดรด์อิสระก็สามารถดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วงคลื่นบริเวณนี้เช่นเดียวกันสามารถบอกความแตกต่างได้ว่ามีส่วนที่ไม่เกิดการกราฟต์อยู่หรือไม่ โดยดูที่ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ 700 cm^{-1} ซึ่งแสดงการดูดกลืนของ C = C ของมาลิอิกแอนไฮไดรด์ การกำจัดมาลิอิกแอนไฮไดรด์อิสระออกไป สามารถสังเกตได้จากการหายไปของแถบดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ 700 cm^{-1} และต้องมีแถบการดูดกลืนต่อไปนี้คงอยู่คือ แถบการดูดกลืนที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1792 cm^{-1} แสดงค่าการดูดกลืนของ n-octadecyl succinic anhydride ที่เลขคลื่น 1784 cm^{-1} แสดงค่าการดูดกลืนของพอลิมาลิอิกแอนไฮไดรด์ (polymaleic anhydride) ที่เลขคลื่น 1780 cm^{-1} แสดงค่าการดูดกลืนของ citraconic anhydride และมาลิอิกแอนไฮไดรด์ และที่บริเวณเลขคลื่น 1770 cm^{-1} แสดงค่าการดูดกลืนของ 2,3 - dimethylmaleic anhydride (Roover et al, 1995) ซึ่งถ้าเกิดแถบดูดกลืนขึ้นบริเวณดังกล่าวนี้แสดงว่าเกิดการกราฟต์ของมาลิอิกแอนไฮไดรด์ในรูปใดรูปหนึ่งตามที่กล่าวมาและอยู่ในรูปของแอนไฮไดรด์ แต่ถ้าเกิดแถบดูดกลืนขึ้นที่บริเวณเลขคลื่น 1710 cm^{-1} ซึ่งเป็นแถบการดูดกลืนของหมู่ dimeric carboxylic acid แสดงว่ามาลิอิกแอนไฮไดรด์ที่กราฟต์ติดถูกไฮโดรไลซ์ไปบางส่วน (Grigoryeva and Karger-Kocsis, 2000) จากรูปที่ 4.25 พบแถบดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1777 cm^{-1} และ 1711 cm^{-1} รูปที่ 4.26 พบแถบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1787 cm^{-1} และ 1705 cm^{-1} แสดงว่ามีหมู่แอนไฮไดรด์จำนวนหนึ่งถูกไฮโดรไลซ์ เป็น dimeric carboxylic acid แต่ก็ยังมีบางส่วนที่ยังอยู่ในรูปของแอนไฮไดรด์ ในรูปที่ 4.25 มาลิอิกแอนไฮไดรด์ที่กราฟต์ติดอยู่ในรูปของ citraconic anhydride หรือ maleic anhydride ส่วนรูปที่ 4.26 จะอยู่ในรูปของ polymaleic anhydride

นำอินฟราเรดสเปกตรัมที่ได้มาคำนวณหาอัตราส่วนการกราฟต์โดยใช้สมการที่ 3.7 ได้อัตราส่วนการกราฟต์แสดงดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 ระดับการกราฟต์ของยางมาลิกแอตอีพิตีเอ็มที่เตรียมที่สภาวะต่างๆ

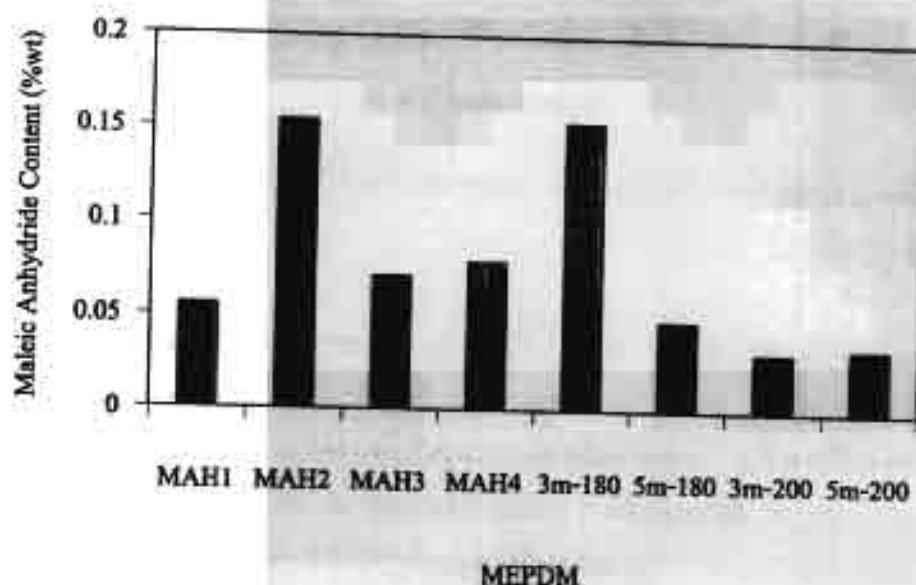
สมการที่ 3.7 เป็นอัตราส่วนของพื้นที่ใต้แถบดูดกลืนที่เกิดจากการกราฟต์ของมาลิก-แอนไฮไดรด์กับพื้นที่ใต้แถบดูดกลืนที่ตำแหน่งของ $-\text{CH}_2-$ rocking ของส่วนที่เป็นเอทิลีนโมโนเมอร์ของยางอีพิตีเอ็ม พื้นที่ใต้แถบดูดกลืนที่ตำแหน่งดังกล่าว จะขึ้นอยู่กับความหนาของฟิล์มจากหยดของสารละลายยางมาลิกแอตอีพิตีเอ็ม เมื่อนำพื้นที่ใต้แถบดูดกลืนที่ตำแหน่งของ $-\text{CH}_2-$ rocking ไปหารออกจากพื้นที่ใต้สเปกตรัมที่ตำแหน่งที่แสดงการเกิดการกราฟต์ (แถบดูดกลืนที่บริเวณเลขคลื่น $1830-1750$ และ $1750-1660 \text{ cm}^{-1}$) ทำให้อัตราส่วนพื้นที่ใต้สเปกตรัมไม่ขึ้นอยู่กับความหนาของฟิล์มแต่จะแสดงระดับการกราฟต์ของมาลิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลยางอีพิตีเอ็ม (Grigoryeva and Karger-Kocsis, 2000)

จากรูปที่ 4.27 พบว่าการเพิ่มปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์จะไม่ทำให้ปริมาณการกราฟต์เพิ่มขึ้น อัตราส่วนการกราฟต์ของ MAH 2 จะมีค่าสูงที่สุด รองลงมาเป็น MAH 4 MAH 3 และ MAH 1 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถในการละลายของมาลิกแอนไฮไดรด์ในยางอีพิตีเอ็ม ที่อุณหภูมิ 180°C มีอยู่อย่างจำกัด การใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ 1 phr ได้อัตราส่วนการกราฟต์น้อยที่สุดเนื่องจากปริมาณดังกล่าวน้อยเกินไป สำหรับการใช่มาลิกแอนไฮไดรด์ 3 และ 4 phr เป็นปริมาณที่มากเกินไปทำให้บางส่วนของมาลิกแอนไฮไดรด์หลอมที่ไม่ละลายในยางแยกตัวมาอยู่รวมกัน เมื่อเกิดอนุมูลอิสระขึ้นมาลิกแอนไฮไดรด์จะทำปฏิกิริยากันเองเกิดเป็นของแข็งสีน้ำตาลไหม้ เกาะอยู่ที่ยาง แทนที่จะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลยางอีพิตีเอ็มทำให้อัตราส่วนการกราฟต์น้อยลง

เมื่อแปรสภาวะการผสมเป็น 4 สภาวะ คือ ผสม 3 นาที ที่อุณหภูมิ 180 °C (3m-180), ผสม 5 นาที ที่อุณหภูมิ 180 °C (5m-180), ผสม 3 นาที ที่อุณหภูมิ 200 °C (3m-200), และผสม 5 นาที ที่อุณหภูมิ 200 °C (5m-200) สูตร 3m-180 มีอัตราส่วนการกราฟต์สูงที่สุดรองลงมาเป็น 5m-180, 3m-200 และ 5m-200 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการผสมที่อุณหภูมิสูงทำให้มาลิกแอนไฮไดรด์และยางอีพิตีเอ็มเกิดอนุมูลอิสระขึ้นได้ง่าย ถ้าหากการกระจายของมาลิกแอนไฮไดรด์ในยางไม่สม่ำเสมอ จะทำให้โมเลกุลยางเกิดการรวมตัวกันเองหรือโมเลกุลมาลิกแอนไฮไดรด์รวมตัวกันเอง ทำให้อัตราส่วนการกราฟต์น้อยลงแต่เปอร์เซ็นต์เจลจะเพิ่มขึ้น

4.2.1.3 การหาปริมาณการกราฟต์ของมาลิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลยางพิตีเอ็ม โดยวิธีการไตเตรต

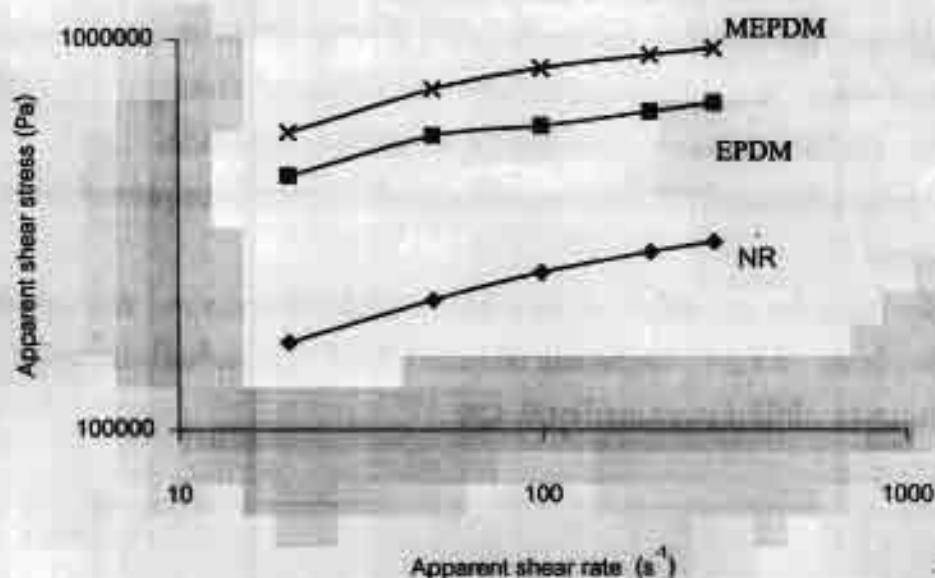
เมื่อนำยางที่ตกตะกอนได้มาอบได้มาลิกแอนไฮไดรด์อิสระออก นำยางที่ได้มาทดสอบตามวิธีการในข้อ 3.3.2.4 ได้ปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ที่กราฟต์อยู่บนโมเลกุลยางอีพิตีเอ็มแสดงผลดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 ปริมาณการกราฟต์ของมาลิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลอีพิตีเอ็มด้วยวิธีการไตเตรต

จากรูปที่ 4.28 จะเห็นได้ว่าการแปรปริมาณมาลิกแอนไฮไดรด์ จะทำให้ปริมาณการกราฟต์สูงสุดเมื่อใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ 2 phr มีแนวโน้มเดียวกันกับการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ การทดลองต่อไปจึงใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ 2 phr MBTS 0.2 phr ผสม 3 นาทีที่อุณหภูมิ 180 °C ในการเตรียมยางมาลิกเอคอี-พิตีเอ็ม

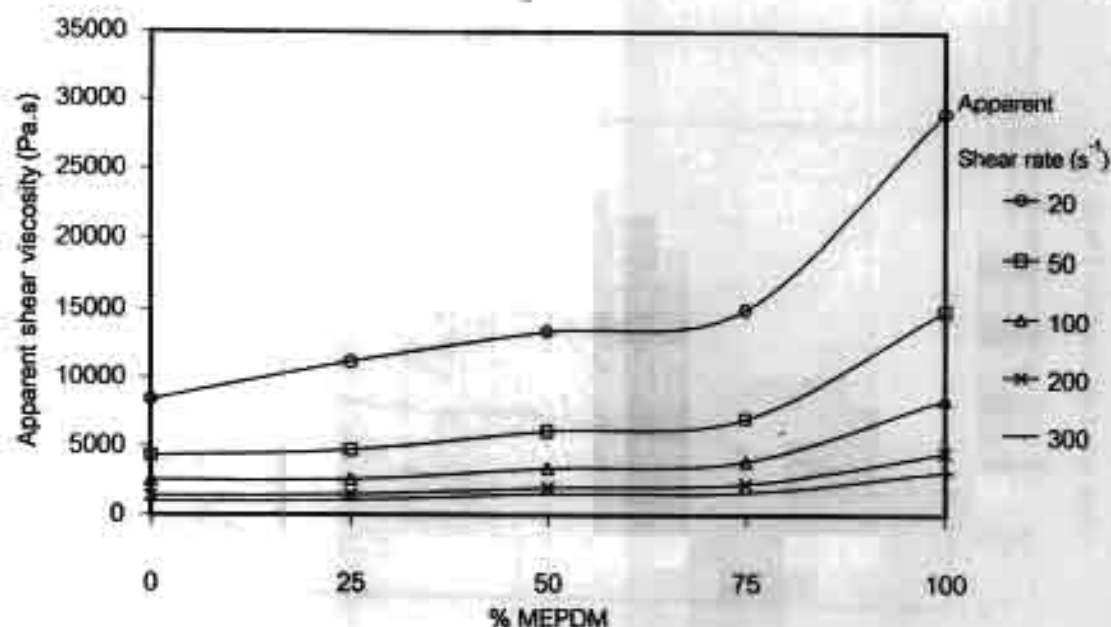
4.2.2 การทดสอบสมบัติทางรีโอโรยีของยาง ด้วยเครื่องคาริปิตลารีรีโอมิเตอร์
 การทดสอบสมบัติทางรีโอโรยีของยางธรรมชาติ ยางอีพดีเอ็ม ยางมาลีเอคอีพดีเอ็ม
 และยางเบลนค์ที่สัดส่วนต่างๆ ได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent shear viscosity กับ Apparent shear rate ของยาง
 เตียวยที่อุณหภูมิ 100 °C

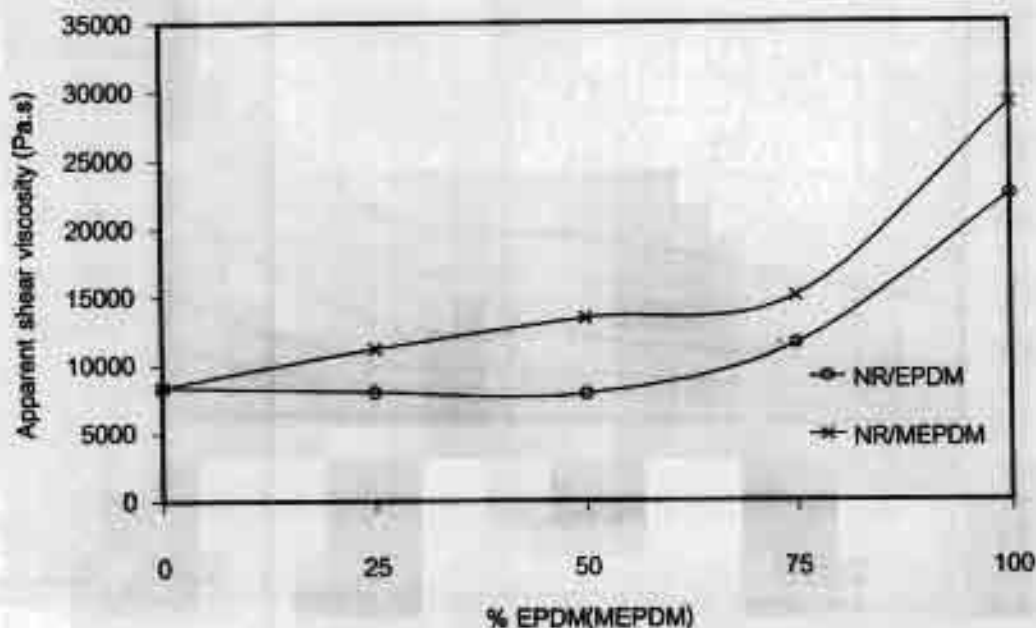
จากการที่ดัดแปรโครงสร้างของยางอีพดีเอ็ม โดยการกราฟต์มาลีอิกแอโนไฮโดรคาร์บอน
 โมเลกุลยางอีพดีเอ็ม มีผลทำให้เกิดส่วนของมาลีอิกเข้าเกาะในตำแหน่งตรงกิ่งของไซโมเลกุล
 ทำให้กิ่งมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น และการเกิดเจลบางส่วนในโครงสร้าง มีผลต่อการไหลของไซโมเลกุล
 ซึ่งส่งผลต่อค่าความเค้นเฉือนและค่าความหนืดเฉือนของยางมาลีเอคอีพดีเอ็มมีค่าที่สูงที่สุด

เมื่อนำยางธรรมชาติมาเบลนค์ร่วมกับยางมาลีเอคอีพดีเอ็มที่อัตราส่วนต่างๆ Apparent
 shear viscosity ของยางเบลนค์ได้ผลดังนี้



รูปที่ 4.30 Apparent shear viscosity ของยางเบลนด์ยางธรรมชาติกับยางมาลีเอตอีพีดีเอ็ม ที่ %MEPDM ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 100 °C

พบว่าลักษณะเส้นกราฟระหว่างความเค้นเฉือนและความหนืดเฉือนกับอัตราเฉือนของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางมาลีเอตอีพีดีเอมมีลักษณะที่คล้ายกับยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางอีพีดีเอม และจากรูปที่ 4.30 พบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนของยางมาลีเอตอีพีดีเอม ไม่ว่าที่อัตราเฉือนใดๆ ค่าความหนืดเฉือนของยางเบลนด์มีค่าเพิ่มสูงขึ้น และจากรูปที่ 4.31 เปรียบเทียบความหนืดเฉือนของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติและยางอีพีดีเอมกับยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางมาลีเอตอีพีดีเอม พบว่ายางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางมาลีเอตอีพีดีเอมมีค่าความหนืดเฉือนที่มากกว่ายางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางอีพีดีเอมที่ทุกๆ อัตราส่วน ทั้งนี้เนื่องจากความหนืดเฉือนของยางมาลีเอตอีพีดีเอมมีค่าสูงกว่ายางอีพีดีเอมนั่นเอง

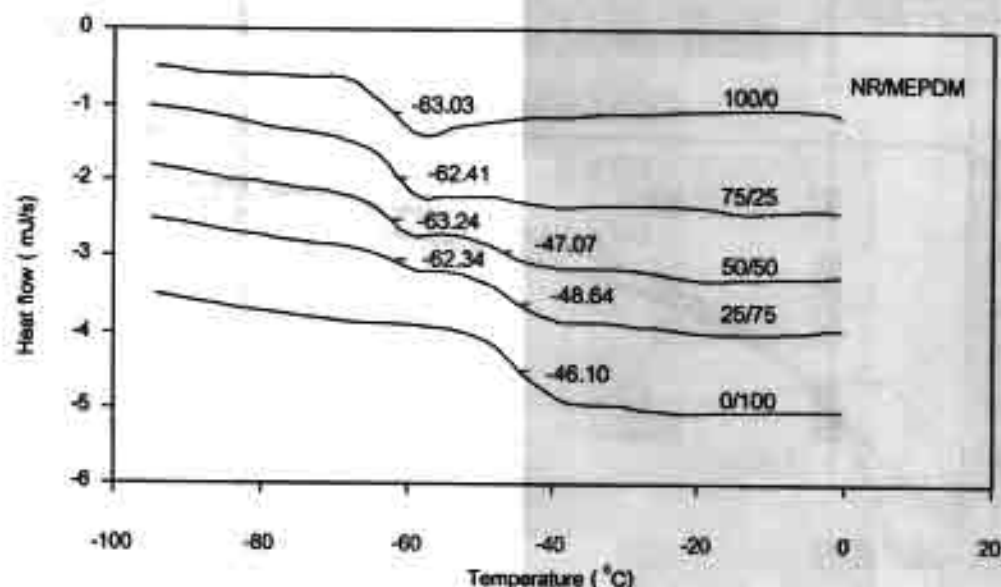


รูปที่ 4.31 เปรียบเทียบ Apparent shear viscosity ของยางเบลนด์ยางธรรมชาติกับยางอีพียูรีน และ ยางมาดีเอตอีพียูรีน ที่ % EPDM และ MEPDM ต่างๆ อัตราเฉือน 20 s^{-1} ที่อุณหภูมิ 100°C

เมื่อนำค่าความหนืดเฉือนจริงของยางเดี่ยวไปคำนวณหาความหนืดเฉือนจริงของยางเบลนด์ตามกฎผลบวกลอการิทึมตั้งสมการที่ 2.2 พบว่าค่าความหนืดเฉือนจริงของยางเบลนด์มีส่วนเบี่ยงเบนที่เป็นลบ หรือมีค่าที่น้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับผลบวกลอการิทึม ไม่ว่าที่อัตราส่วนใดๆ แสดงว่า ยางเบลนด์ยางธรรมชาติกับยางมาดีเอตอีพียูรีน ไม่เข้ากันทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางอีพียูรีน และยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโพรเมตอีพียูรีน

4.2.3 การทดสอบหา Glass Transition Temperature ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC)

นำยางเบลนด์ดิบที่เตรียมได้ระหว่างยางธรรมชาติกับยาง มาดีเอตอีพียูรีน มาทดสอบด้วยเครื่อง Differential Scanning calorimeter (DSC) เพื่อศึกษาความเข้ากันได้ของยางเบลนด์ และค่า T_g ของยางเบลนด์ทั้งสอง แสดงได้ดังรูปที่ 4.32



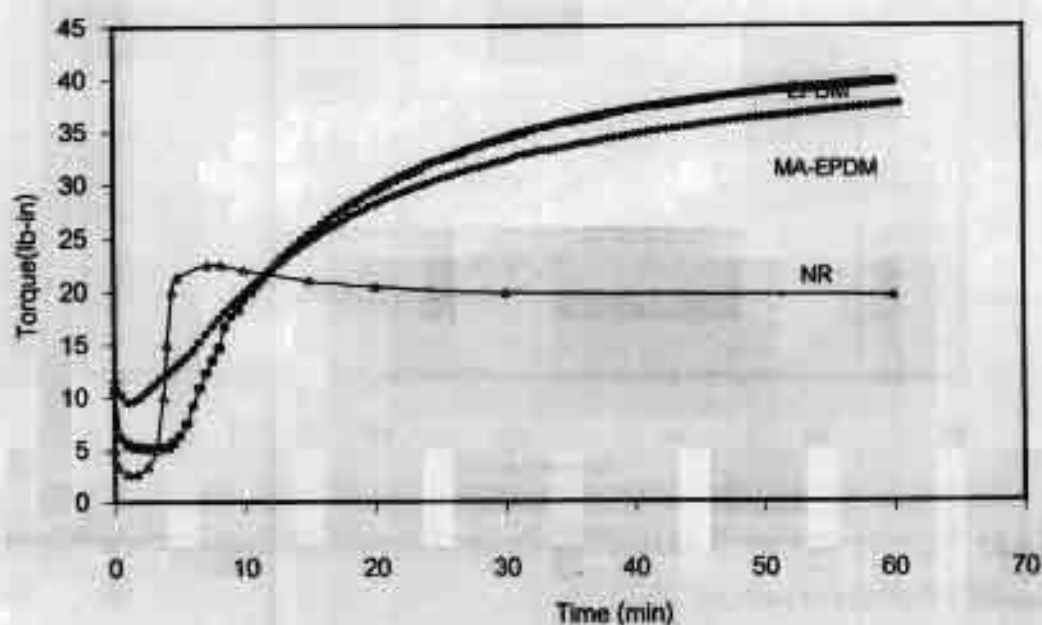
รูปที่ 4.32 T_g ของยางธรรมชาติ ของยางอีพิตีเอ็ม และยางเบลนค์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางมาลีเอตอีพิตีเอ็มที่อัตราส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 4.32 สังเกตได้ว่าการเบลนค์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางอีพิตีเอ็ม และยางธรรมชาติกับยางมาลีเอตอีพิตีเอ็ม แสดงค่า T_g สองค่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ที่อัตราส่วนการเบลนค์ต่างกันของยางเบลนค์ทั้งสองไม่สามารถเข้ากันได้ และเมื่อพิจารณาจากค่า T_g พบว่าค่า T_g จะแสดงค่า T_g ของยางแต่ละชนิดได้ชัดเจนมากขึ้น เมื่อสัดส่วนของยางแต่ละชนิดมีสัดส่วนที่มากขึ้น เมื่อสังเกตจากค่า T_g ของยางมาลีเอตอีพิตีเอ็มเปรียบเทียบกับยางอีพิตีเอ็ม พบว่ามีค่าที่สูงกว่าเล็กน้อย

4.2.4 ลักษณะการวัลคาไนซ์ และพลังงานกระตุ้นการวัลคาไนซ์ของยาง

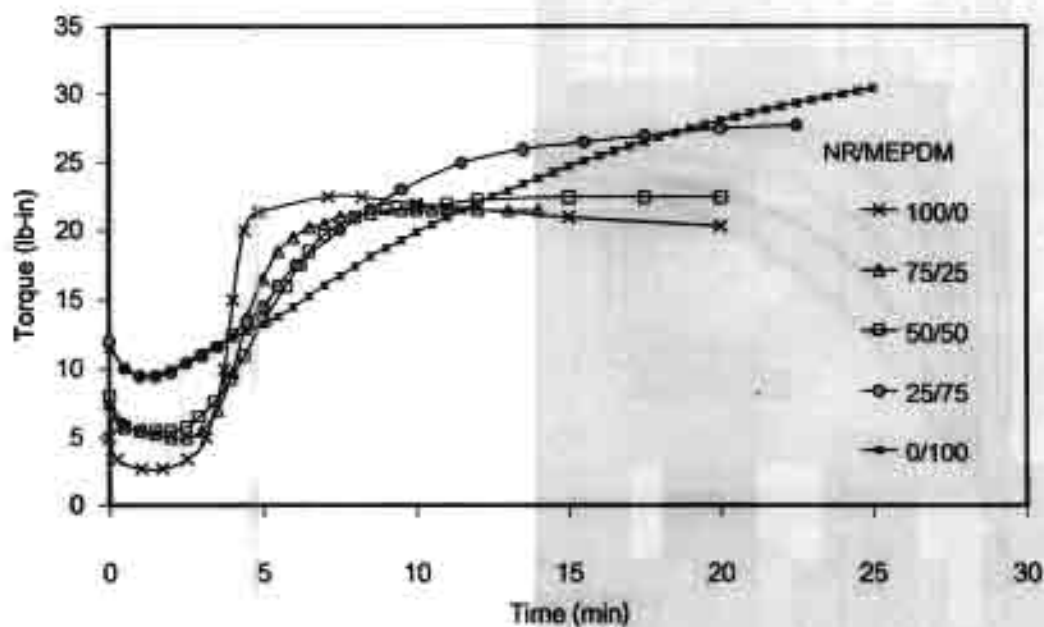
4.2.4.1 ลักษณะการวัลคาไนซ์

นำยางคอมปาวด์ตามสูตรหัวข้อที่ 3.3.1.4 โดยใช้ยางมาลีเอตอีพิตีเอ็มแทนยางโบรมิเนตอีพิตีเอ็ม ทำการศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางดังแสดงในรูปที่ 4.33 และ 4.34



รูปที่ 4.33 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติ ยางอีพดีเอ็ม ยางมาลิเอตอีพดีเอ็ม ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.33 เมื่อทำการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของยางอีพดีเอ็ม (MEPDM) มีผลทำให้ค่า scorch time ลดลง และค่า cure time มีค่ามากขึ้นเล็กน้อย ส่วนช่วงหลังการวัลคาไนซ์ของยางอีพดีเอ็มแสดงลักษณะที่เรียกว่า Marching cure

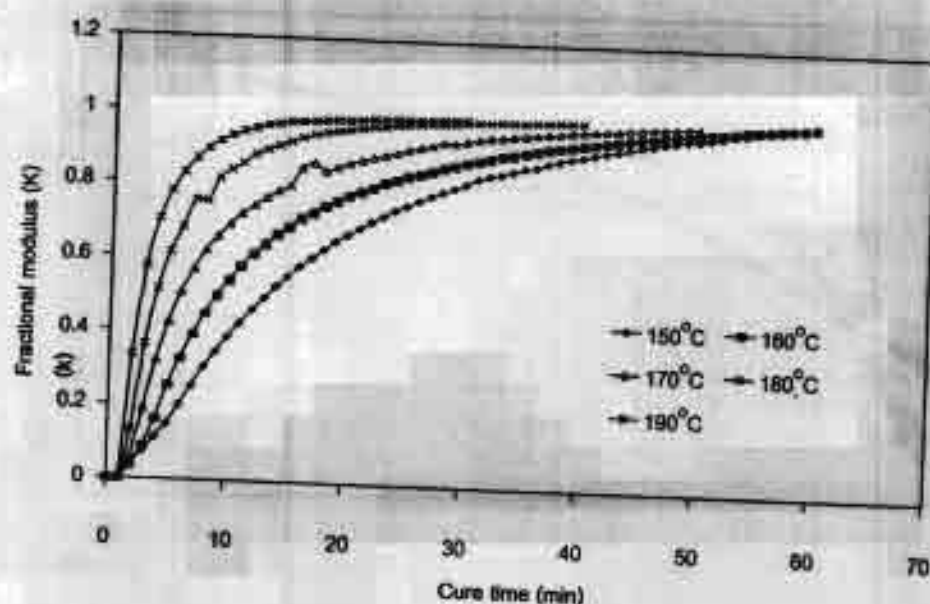


รูปที่ 4.34 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางมาลิเอคอีพีดีเอ็ม ที่สัดส่วนต่างๆ ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.34 พบว่าเมื่ออัตราส่วนยางมาลิเอคอีพีดีเอ็มมากขึ้นค่า scorch time ของยางเบลนด์ ระหว่างยางธรรมชาติกับยางมาลิเอคอีพีดีเอ็ม มีค่าน้อยลง ส่วนค่า Cure time มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนยางมาลิเอคอีพีดีเอ็มมากขึ้น เมื่อพิจารณาว่า Cure time ของยางเบลนด์ พบว่าการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางมาลิเอคอีพีดีเอ็มมีค่า cure time ที่มากกว่าการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางอีพีดีเอ็ม ซึ่งเป็นผลมาจากการปรับเปลี่ยนโครงสร้างยางอีพีดีเอ็ม

4.2.4.2 พลังงานกระตุ้นการวัลคาไนซ์

จากกราฟแสดงลักษณะการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง ODR ยางมาลิเอคอีพีดีเอ็ม สามารถนำมาคำนวณหา Fractional modulus ของแต่ละอุณหภูมิแสดงผลได้ดังรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.35 fractional modulus (K) ของยางมาลีเอตอีพีดีเอ็มที่อุณหภูมิต่างๆ

ส่วนค่าพลังงานการกระตุ้นในการวัลคาไนซ์ของยางชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 พารามิเตอร์ในการวัลคาไนซ์ของยางที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ

	STR 5L	STR 20	RSS No3	EPDM	BEPDM	MEPDM
E_1 (kcal/mol)	11.98	10.69	12.39	16.90	7.78	17.41
E_2 (kcal/mol)	14.74	15.29	16.58	15.94	11.65	6.73
S_1 (kcal/mol)	13.88	12.32	14.20	17.54	8.83	17.74
S_2 (kcal/mol)	-16.25	-16.94	-18.35	-17.29	-18.35	-9.53

จากตารางที่ 4.6 ค่า E_1 ของยางมาลีเอตอีพีดีเอ็ม มีพลังงานการกระตุ้นสูงกว่ายางอีพีดีเอ็มเล็กน้อย โดยที่ยางธรรมชาติมีค่าต่ำกว่า โดยที่ RSS No.3 มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ STR 5L และ STR 20 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ายางธรรมชาติ STR 5L , STR20 และ RSS No3 ใช้พลังงานในการกระตุ้นให้เกิดการวัลคาไนซ์ที่ต่ำกว่ายางอีพีดีเอ็ม และยางมาลีเอตอีพีดีเอ็ม และพบว่าค่า E_2 ของยางมาลีเอตอีพีดีเอ็ม มีค่าที่น้อยกว่ายางธรรมชาติ (STR 5L , STR 20 , RSS No.3) และยางอีพีดีเอ็ม แสดงว่า ยางมาลีเอตอีพีดีเอ็มใช้พลังงานกระตุ้นใน

การวัดคาบในซีในคอนกรีตเริ่มตันปฏิกริยาน้อยกว่ายางธรรมชาติ และยางอีพดีเอ็ม แต่ยางโพรพิลีนที่ตีเอ็มมีค่าพลังงานกระตุ้นในการวัดคาบในซีในคอนกรีตเริ่มตันปฏิกริยาต่ำที่สุด

4.2.5 ความเข้มข้นในเฟสยางแต่ละเฟสของยางเบลนด์

จากสมการของกราฟมาตรฐานตั้งหัวข้อ 4.1.5 สามารถคำนวณหาความเข้มข้นเชื่อมโยงของเฟสยางธรรมชาติ และยางอีพดีเอ็ม แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ความเข้มข้นในยางแต่ละชนิดของยางเบลนด์ที่สัดส่วนต่างๆ

ชนิด	ความเข้มข้น (mol/m ³)		
	NR	EPDM (MEPDM)	ความแตกต่าง
NR	85.80	-	-
NR/EPDM 75/25	111.69	14.64	97.05
NR/EPDM 50/50	130.38	70.97	59.41
NR/EPDM 25/75	153.97	58.39	95.58
EPDM	-	102.37	-
NR/MEPDM 75/25	40.49	38.85	1.64
NR/MEPDM 50/50	35.89	23.97	11.92
NR/MEPDM 25/75	52.40	17.44	34.96
MEPDM	-	56.81	-

จากตารางที่ 4.7 การเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางอีพดีเอ็ม พบว่าเมื่อปริมาณยางธรรมชาติลดลง ความเข้มข้นเชื่อมขวางในเฟสยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณยางอีพดีเอ็มมีมากขึ้น ความเข้มข้นในเฟสยางอีพดีเอ็มก็มีมากขึ้นเช่นกัน โดยที่ยางเบลนด์ที่มีอีพดีเอ็ม 25 % ความเข้มข้นเชื่อมขวางในเฟสยางอีพดีเอ็มมีค่าน้อยมาก

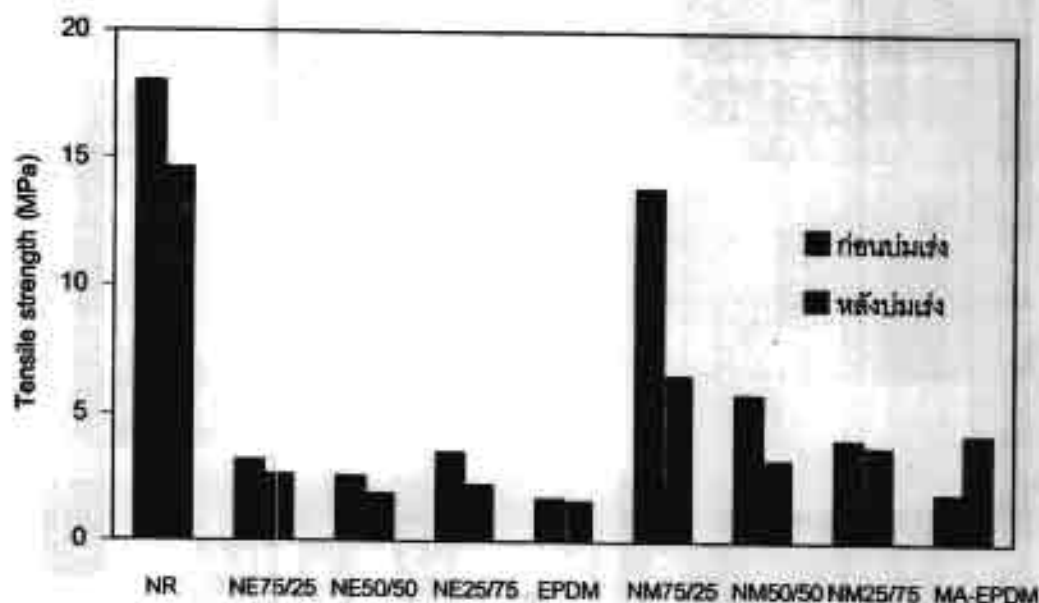
การเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางมาลีเอตอีพดีเอ็ม พบว่าความเข้มข้นเชื่อมขวางในเฟสยางธรรมชาติมากที่สุดที่อัตราส่วน 25/75 , 50/50 และ 75/25 ตามลำดับ ในขณะที่ความเข้มข้นในเฟสยางมาลีเอตอีพดีเอ็มพบว่าเมื่อปริมาณของยางมาลีเอตอีพดีเอ็มลดลง ความเข้มข้นเชื่อมขวางก็มีค่ามากขึ้น ตามลำดับ

จากการเปรียบเทียบความเข้มข้นเชื่อมขวางในเฟสของยางแต่ละชนิดต่างๆ ในยางเบลนด์ พบว่าการดัดแปลงโครงสร้างของยางอีพิตีเอ็มให้เป็นยางมาลีเอตอีพิตีเอ็ม ทำให้ความเข้มข้นเชื่อมขวางในเฟสยางธรรมชาติมีค่าที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน คือ ความเข้มข้นเชื่อมขวางในเฟสยางธรรมชาติของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางอีพิตีเอ็มมีค่ามากกว่า 100 mol/m^3 ในขณะที่ในเฟสยางธรรมชาติของยางเบลนด์ยางธรรมชาติกับยางมาลีเอตอีพิตีเอ็มมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 40 ถึง 55 mol/m^3 ทั้งนี้เนื่องจากความว่องไวต่อปฏิกิริยาที่มากกว่าของยางธรรมชาติ ในยาง NR/EPDM ทำให้สารเคมีเข้าไปในเฟสยางธรรมชาติมากกว่า ในขณะที่เมื่อดัดแปลงโครงสร้างของยางอีพิตีเอ็ม ทำให้อัตราการวัดคาไนซ์ในช่วงเริ่มต้นขึ้น ส่งผลให้ MEPDM ดูดซึมสารตัวเร่งจากเฟสยางธรรมชาติ จึงมีผลทำให้พันธะเชื่อมขวางในเฟสยางธรรมชาติมีค่าลดลง

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาในเฟสยางอีพิตีเอ็ม หรือ ยางมาลีเอตอีพิตีเอ็ม พบว่า ความเข้มข้นในเฟสของยางอีพิตีเอ็มที่อัตราส่วนการเบลนด์ 50/50 และ 25/75 มีค่ามากกว่าในเฟสยางมาลีเอตอีพิตีเอ็มในยางเบลนด์ NR/MEPDM แต่ที่อัตราส่วนการเบลนด์ 75/25 พบว่า ความเข้มข้นเชื่อมโยงในเฟสของยางอีพิตีเอ็มมีค่าน้อยกว่าในเฟสยางมาลีเอตอีพิตีเอ็ม อาจเนื่องจากการมีปริมาณยางอีพิตีเอ็มอยู่เพียง 25 % ทำให้สารเคมีและสารวัดคาไนซ์ จะเข้าไปในเฟสยางธรรมชาติมากกว่าเนื่องจากยางธรรมชาติมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาเร็วกว่ายางอีพิตีเอ็ม ดังนั้น จึงทำให้ที่อัตราส่วน 75/25 ความเข้มข้นในเฟสยางอีพิตีเอ็มจึงมีค่าที่น้อยมาก และเมื่อเปรียบเทียบยางเบลนด์มาลีเอตอีพิตีเอ็มกับยางเบลนด์โบรมิเนตอีพิตีเอ็ม พบว่ายางเบลนด์โบรมิเนตอีพิตีเอ็มมีความเข้มข้นเชื่อมขวางที่สูงกว่า

4.2.6 สมบัติความทนต่อแรงดึงและความสามารถยืดจนขาด

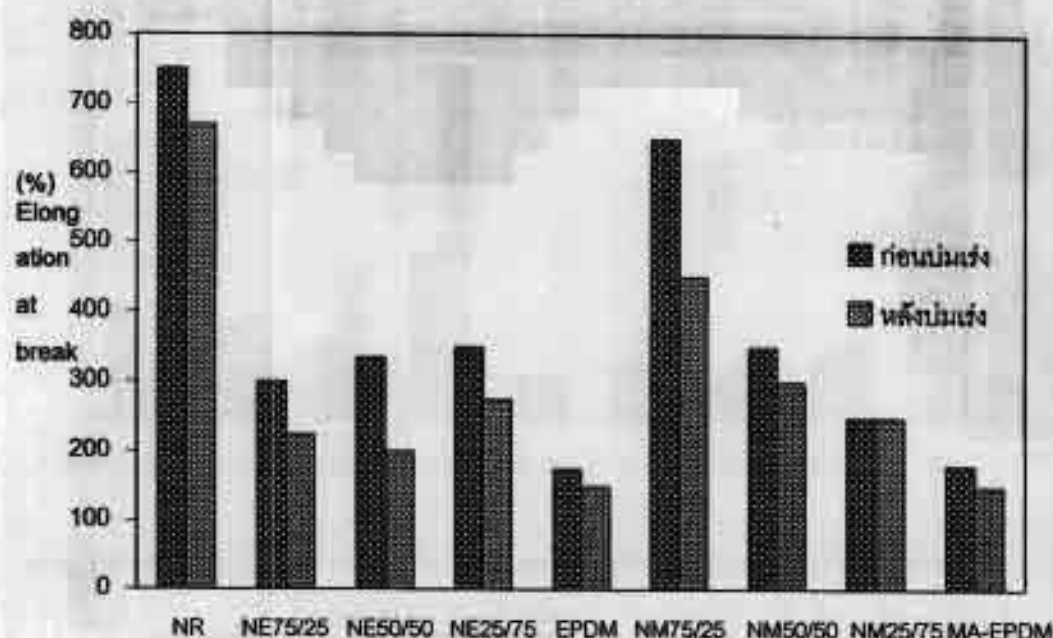
นำยางเบลนด์มาทดสอบความทนต่อแรงดึงและความสามารถยืดจนขาดด้วยเครื่อง Tensometer ระหว่างยางเบลนด์ธรรมชาติกับยางอีพิตีเอ็ม และยางธรรมชาติกับยางมาลีเอตอีพิตีเอ็ม ที่สัดส่วน 100/0 , 75/25 , 50/50 , 75/25 , 0/100 ตามลำดับทั้ง ก่อนและหลังการปมเร่ง ได้ผลดังนี้



รูปที่ 4.36 ความทนต่อแรงดึงของยางเบลนด์ที่สัดส่วนต่างๆ ก่อนและหลังการบ่มแรง
(หมายเหตุ : NE คือ NR/EPDM และ NM คือ NR/MEPDM)

จากรูปที่ 4.36 พบว่าเมื่อทำการกราฟดัมมาลีเอตบนโมเลกุลยางอีพิตีเอ็มพบว่า ค่าความทนต่อแรงดึงของยางเบลนด์ยางธรรมชาติกับยางมาลีเอตอีพิตีเอ็มเพิ่มขึ้นทุกสัดส่วนการเบลนด์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ยางมาลีเอตอีพิตีเอ็มที่ถูกตัดแปรรโครงสร้างมีความสามารถในการดูดซับสารเคมีได้ดีขึ้นในช่วงเริ่มต้นปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ (จากค่า E_2) ส่งผลทำให้การกระจายตัวของพันธะเชื่อมโยงในเฟสยางแต่ละชนิดดีขึ้น จึงทำให้ค่าความแข็งแรงภายในพันธะของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางมาลีเอตอีพิตีเอ็มดีขึ้น โดยค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าลดลงตามสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นของยางมาลีเอตอีพิตีเอ็ม เนื่องจากค่าความทนต่อแรงดึงที่ต่ำของยางมาลีเอตอีพิตีเอ็ม

ความทนต่อแรงดึงของยางหลังบ่มเร่งของยางเบลนค์ NR/MEPDM พบว่ามีค่าต่ำกว่า ก่อนบ่มเร่ง โดยที่ เปอร์เซนต์ความเปลี่ยนแปลงหลังบ่มเร่งของยาง NR/MEPDM มีแนวโน้มที่สูงกว่า



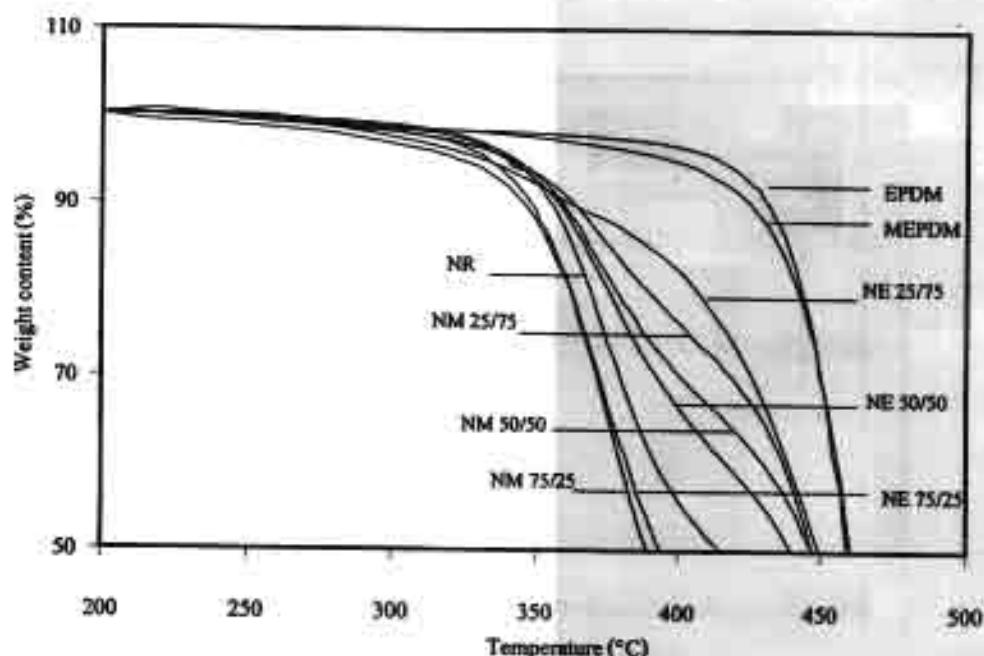
รูปที่ 4.37 ความสามารถบิดจนขาดของยางเบลนค์ที่สัดส่วนต่างๆ ก่อนและหลังการบ่มเร่ง (หมายเหตุ : NE คือ NR/EPDM และ NM คือ NR/MEPDM)

จากรูปที่ 4.37 พบว่าระหว่างยางเบลนค์ยางธรรมชาติกับยางมาลีเอคอีพีดีเอ็มความสามารถบิดจนขาดมีค่ามากกว่ายางเบลนค์ยางธรรมชาติกับยางอีพีดีเอ็ม เนื่องจากความเข้มข้นที่น้อยกว่านั่นเอง

แสดงว่าการดัดแปรโครงสร้างยางอีพีดีเอ็มเป็นยางมาลีเอคอีพีดีเอ็ม ที่ทำให้การกระจายตัวของพันธะเชื่อมขวางดีขึ้น ส่งผลให้สมบัติทางด้านทนต่อแรงดึงสูงขึ้นอย่างชัดเจน และมีค่าที่แตกต่างจากยางโพรมิแนคอีพีดีเอ็มไม่มากนัก

4.2.7 การทดสอบความทนต่อความร้อนด้วยเครื่อง Thermal Gravimetric Analysis

นำยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมได้จากหัวข้อข้างต้น ศึกษาความทนต่อความร้อนด้วยเครื่อง Thermal gravimetric ได้ผลดังแสดงใน รูปที่ 4.38



รูปที่ 4.38 น้ำหนักยางที่เหลืออยู่ต่อความร้อนของยางเบลนด์วัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 4.38 พบว่ายางอีพดีเอ็มมีความสามารถทนต่อความร้อนที่สูงกว่ายางมาลีเอคอีพีดีเอ็ม เนื่องจากยางมาลีเอคอีพีดีเอ็มมาจากการตัดแปรงโครงสร้างทางเคมีให้แก่ยางอีพดีเอ็ม โดยการทำปฏิกิริยาการกราฟต์มาลีอิกแอนไฮไดรด์ โดยผ่านการผสมในเครื่องผสมแบบปิด Brabender Plasticorder ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส นั่นก็คือยางมาลีเอคอีพีดีเอ็มได้รับความร้อนมาแล้วครั้งหนึ่ง ก่อนการทดสอบหาความสามารถในด้านความทนต่อความร้อน ซึ่งก็คือยางมาลีเอคอีพีดีเอ็มมีประวัติทางความร้อนมากกว่ายางอีพดีเอ็ม

อย่างไรก็ตาม สำหรับยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางมาลีเอคอีพีดีเอ็ม ที่อัตราส่วน 50/50 และ 25/75 มีความทนต่อความร้อนที่ดีกว่ายางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางอีพดีเอ็ม

4.2.8 สมบัติความต้านทานต่อโอโซน

นำยางเบลนด์ระหว่างยางเบลนด์ยางธรรมชาติกับยางอีพดีเอ็ม และยางเบลนด์ยางธรรมชาติกับยางมาลีเอคอีพีดีเอ็มที่สัดส่วน 100/0, 75/25, 50/50, 25/75, 0/100 ทำการทดสอบความต้านทานต่อโอโซนที่ความเข้มข้น 50 ppm อุณหภูมิ 40°C เปอร์เซนต์การยืดยางเท่ากับ 20 % เป็นเวลา 72 ชั่วโมง (ISO 1431 Part 1) ได้ผลการทดสอบดังนี้

ตารางที่ 4.8 ความต้านทานต่อโอโซนของยางเบลนด์ชนิดต่างๆ

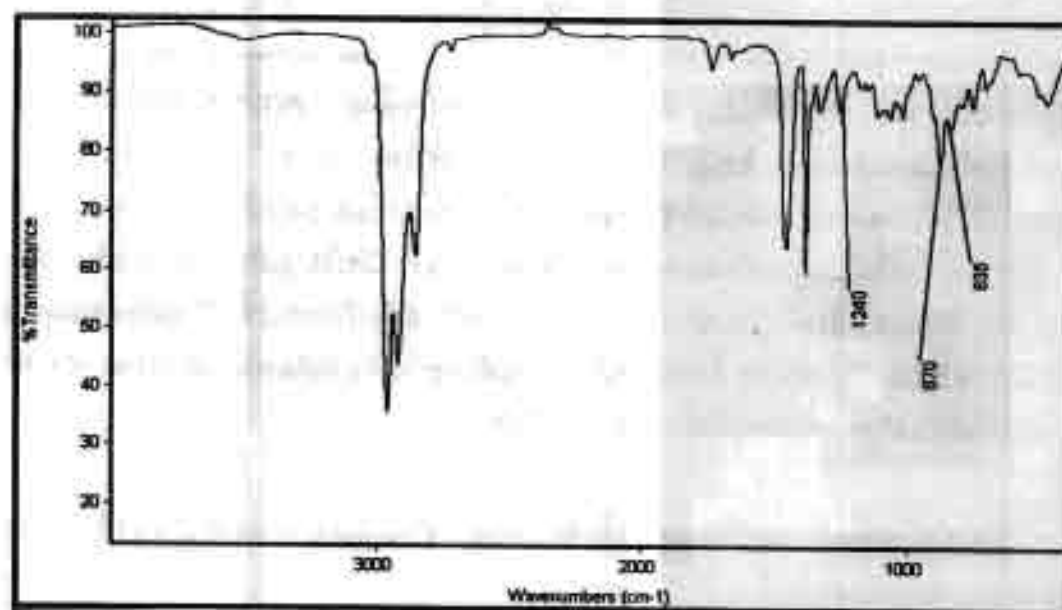
ตัวอย่าง	ลักษณะยาง
NR	ปรากฏรอยแตกจำนวนนับไม่ถ้วน ความยาวรอยแตกมากกว่า 3 มม (เกรด C-5)
NE 75/25	
NE 50/50	ปรากฏรอยแตกจำนวนนับไม่ถ้วน ความยาวรอยแตกน้อยกว่า 1 มม (เกรด C-3)
NE 25/75	
EPDM	ไม่ปรากฏรอยแตก
NM 75/25	ไม่ปรากฏรอยแตก
NM 50/50	ไม่ปรากฏรอยแตก
NM 25/75	ปรากฏรอยแตกจำนวนมาก ความยาวรอยแตกมากกว่า 3 มม (เกรด B-5)
MEPDM	ไม่ปรากฏรอยแตก
	ไม่ปรากฏรอยแตก
	ไม่ปรากฏรอยแตก

จากตารางที่ 4.8 พบว่ายางเบลนด์ที่มีเปอร์เซ็นต์อีพิตีเอ็มหรือมาลีเอตอีพิตีเอ็มเท่ากับ 50% และ 75% ไม่ก่อให้เกิดรอยแตกเกิดขึ้น ในขณะที่อัตราส่วน 75/25 ของยางเบลนด์ยางธรรมชาติกับยางมาลีเอตอีพิตีเอ็มมีรอยแตกที่มีขนาดใหญ่กว่ายางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางอีพิตีเอ็ม อาจเนื่องจากการเตรียมยางมาลีเอตอีพิตีเอ็มที่อุณหภูมิสูง ทำให้ยางเบลนด์ระหว่างธรรมชาติกับยางมาลีเอตอีพิตีเอ็ม ผ่านการถูกความร้อนมากกว่ายางเบลนด์ยางธรรมชาติกับยางอีพิตีเอ็ม เมื่อเปรียบเทียบกับยางเบลนด์โบรมิเนตอีพิตีเอ็ม (ตารางที่ 4.5) ยางเบลนด์ระหว่างธรรมชาติกับยางมาลีเอตอีพิตีเอ็มมีแนวโน้มทนทานต่อโอโซนน้อยกว่า

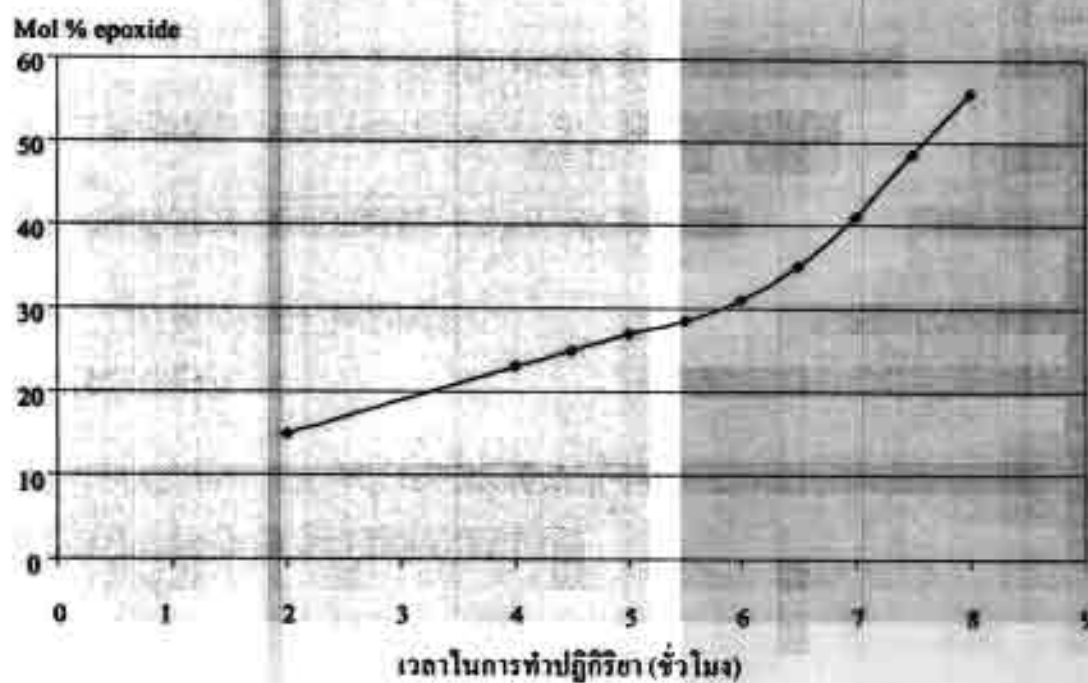
4.3 การเบลนด์ยางธรรมชาติกับยางโพรโมทิวไทล์

4.3.1 การเตรียมยางธรรมชาติอีพอกไซด์

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมยางธรรมชาติอีพอกไซด์โดยการแปรเวลาในการทำปฏิกิริยา และนำตัวอย่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ได้ไปทดสอบด้วยเครื่อง FT-IR จะได้สเปกตรัมอินฟราเรดของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ แสดงดังรูปที่ 4.39 พบว่ามีพีคของการดูดกลืนแสงของหมู่อีพอกไซด์ คือ ตำแหน่งเลขคลื่น 870 และ 1240 cm^{-1} วิเคราะห์หาปริมาณหมู่ อีพอกไซด์โดยใช้วิธีการวัด Absorbance ratio ของพีคที่ 870/835 cm^{-1} จำนวนหาปริมาณหมู่ อีพอกไซด์ตามผลงานวิจัยของ Davey and Loadman (1984) ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.40



รูปที่ 4.39 สเปกตรัมอินฟราเรดของยางธรรมชาติอีพอกไซด์



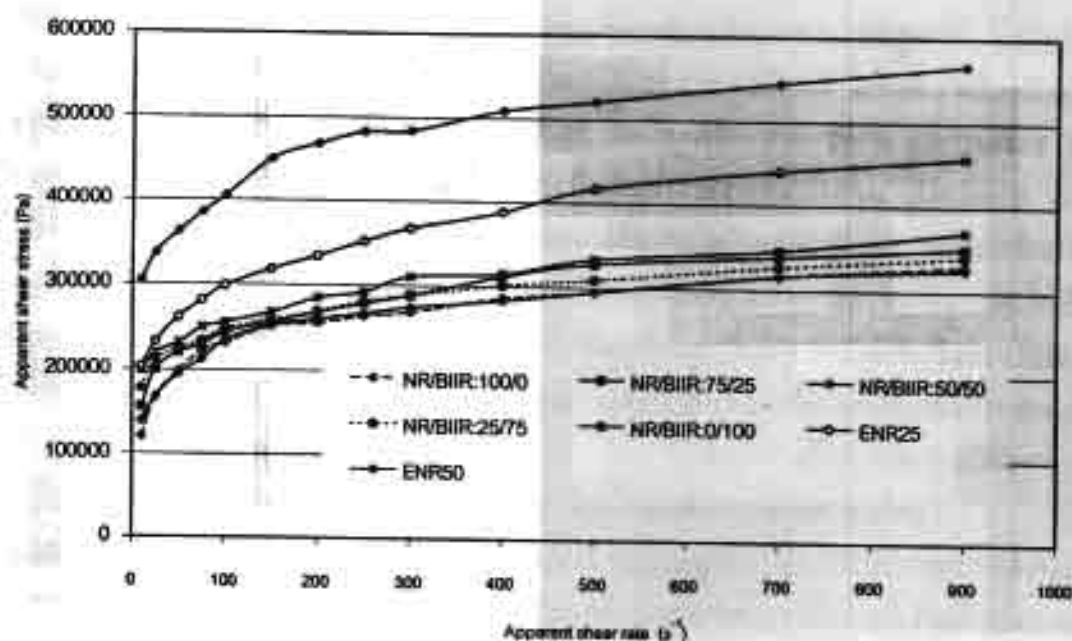
รูปที่ 4.40 ผลของเวลาการทำปฏิกิริยาอีพอกไซด์ต่อปริมาณหมู่อีพอกไซด์

จากรูปที่ 4.40 พบว่าเวลาในการทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน มีความสัมพันธ์กับการเกิดปริมาณหมู่อีพอกไซด์ในยางธรรมชาติ นั่นคือเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดปริมาณหมู่อีพอกไซด์ในยางธรรมชาติมากยิ่งขึ้น จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 4.5 ชั่วโมง เกิดปริมาณหมู่อีพอกไซด์ในยางธรรมชาติประมาณ 25 โมลเปอร์เซ็นต์ และเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 7.5 ชั่วโมง จะเกิดปริมาณหมู่อีพอกไซด์ในยางธรรมชาติประมาณ 48.5 โมลเปอร์เซ็นต์ (ซึ่งใกล้เคียงกับ 50 โมลเปอร์เซ็นต์มากที่สุด)

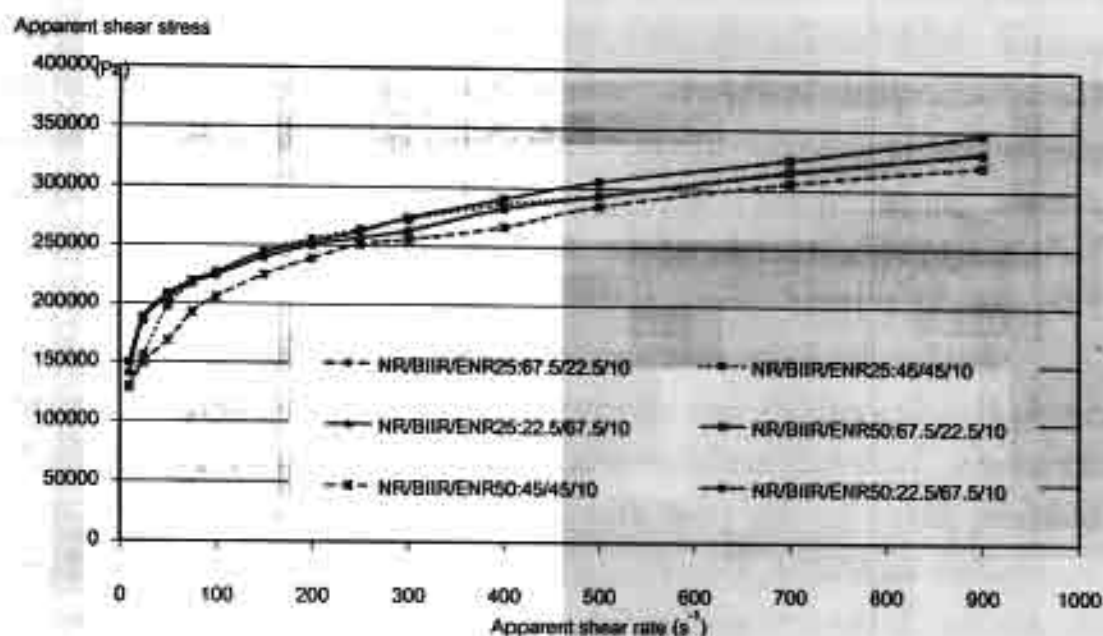
ดังนั้นในการเตรียมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ให้มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์เท่ากับ 25 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ (ENR-25 และ ENR-50) จึงยึดที่สภาวะนี้ คือเตรียมยางที่เวลาทำปฏิกิริยา 4.5 และ 7.5 ชั่วโมง ซึ่งจะเกิดปริมาณหมู่อีพอกไซด์ใกล้เคียงกับที่ต้องการมากที่สุด เพื่อนำยางที่ได้นี้ไปทำการทดสอบในขั้นตอนอื่นๆ ต่อไป

4.3.2 ทดสอบสมบัติทางรีโอโลยีด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบคาปิลลารี (Capillary Extrusion Rheometer)

ทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบกันระหว่างยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโพรไมวไทล์ ที่อัตราส่วนต่างๆ คือ 100/0, 75/25, 50/50, 25/75 และ 0/100 ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เดี่ยว และเปรียบเทียบยางเบลนด์ที่มีการใส่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นตัวเชื่อมประสาน (ปริมาณ 10 phr) ในการทดสอบโดยทำการศึกษาในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (apparent shear stress) กับอัตราเฉือน (apparent shear rate) ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 100 °C



รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนของยางธรรมชาติอิพอกไซด์และยางเบลดระหว่างยางธรรมชาติกับยางโพรโมบิวไทล์ ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ



100 °C

รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนของยางเบลดระหว่างยางธรรมชาติกับยางโพรโมบิวไทล์ที่มียางธรรมชาติอิพอกไซด์เป็นตัวเชื่อมประสาน ที่อุณหภูมิ 100 °C

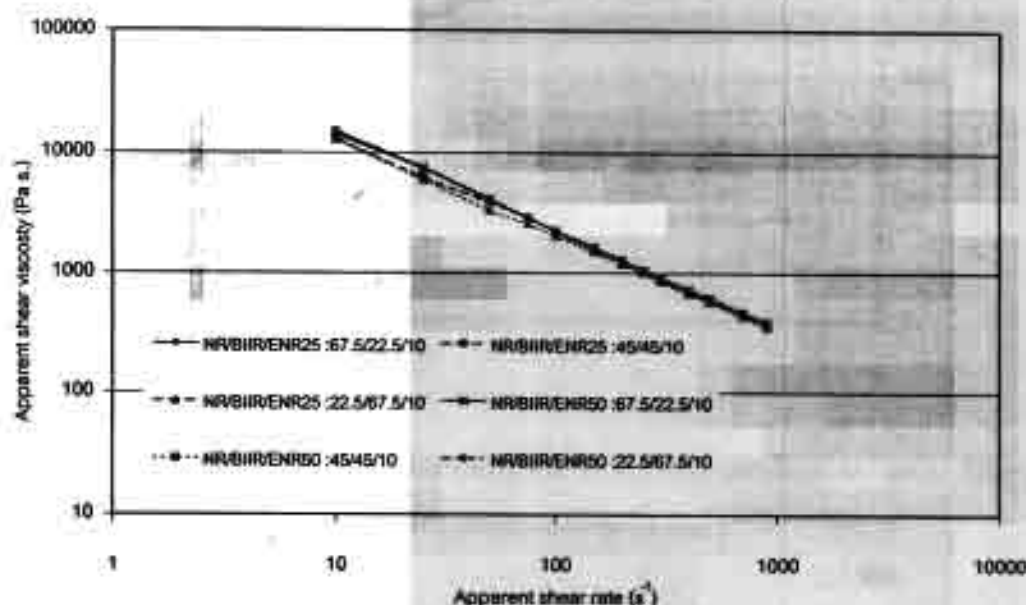
จากรูปที่ 4.41 เมื่อเปรียบเทียบอย่างเฉียวพบว่าการเพิ่มอัตราแอลกอฮอล์จะทำให้ค่าความเค้นแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้น โดยที่อย่างธรรมชาติของโพกไซด์ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ มีค่าเส้นโค้งการไหลสูงสุด รองลงมาคือ อย่างธรรมชาติของโพกไซด์ 25 โมลเปอร์เซ็นต์ อย่างโบรไมบิวไทล์ และอย่างธรรมชาติ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าอย่างโบรไมบิวไทล์ซึ่งเป็นยางสังเคราะห์ที่มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอน และโบรมีนอยู่ในโครงสร้างตลอดจนการมีพันธะคู่ที่ว่องไวน้อย ทำให้ยางมีความเป็นขี้ผึ้งกว่าในส่วนอย่างธรรมชาติทำให้ไฮโดรคาร์บอนมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันสูง ส่วนอย่างธรรมชาติมีโครงสร้างที่มีพันธะคู่ว่องไวสูงกว่าในอย่างโบรไมบิวไทล์ ซึ่งพันธะคู่ว่องไวจะมีพลังงานถึงจุดต่ำสามารถแตกออกจากกันได้ง่ายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างไฮโดรคาร์บอนต่ำ ดังนั้นเส้นโค้งการไหลจึงมีค่าต่ำกว่าในส่วนอย่างโบรไมบิวไทล์

สำหรับอย่างธรรมชาติของโพกไซด์ มีกราฟเส้นโค้งการไหลที่เด่นชัดโดยที่เส้นโค้งการไหลของอย่างธรรมชาติของโพกไซด์สูงกว่าอย่างธรรมชาติและอย่างโบรไมบิวไทล์ แสดงถึงความเป็นขี้ผึ้งของโพกไซด์มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสูงกว่าความเป็นขี้ผึ้งในอย่างโบรไมบิวไทล์ และอย่างธรรมชาติของโพกไซด์มี 50 โมลเปอร์เซ็นต์มีค่าสูงกว่าอย่างธรรมชาติของโพกไซด์ 25 โมลเปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าอย่างธรรมชาติของโพกไซด์ที่มีปริมาณหมู่โพกไซด์สูงกว่าจะมีค่าความเค้นแอลกอฮอล์สูงกว่าอย่างธรรมชาติของโพกไซด์ที่มีปริมาณหมู่โพกไซด์ต่ำกว่า ซึ่งการเพิ่มขึ้นของเส้นการไหลตามปริมาณหมู่โพกไซด์นั้นเนื่องจากการมีหมู่โพกไซด์ทำให้เพิ่มความเป็นขี้ผึ้งในโมเลกุลของยางธรรมชาติ ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างไฮโดรคาร์บอนสูงขึ้นจึงทำให้สมบัติการไหลของยางยากยิ่งขึ้นตามปริมาณหมู่โพกไซด์ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้จะพบว่าในขณะหลอม วงแหวนโพกไซด์ในอย่างธรรมชาติของโพกไซด์จะมีการเปิดออกแล้วเกิดเป็นหมู่แอลกอฮอล์ชนิดทุติยภูมิ (secondary alcoholic groups) ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงกันเองได้และยังมีปริมาณหมู่โพกไซด์ในโมเลกุลของยางธรรมชาติมากยิ่งขึ้น ก็ยังมีโอกาสทำให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงมากยิ่งขึ้น (Alex et al 1989)

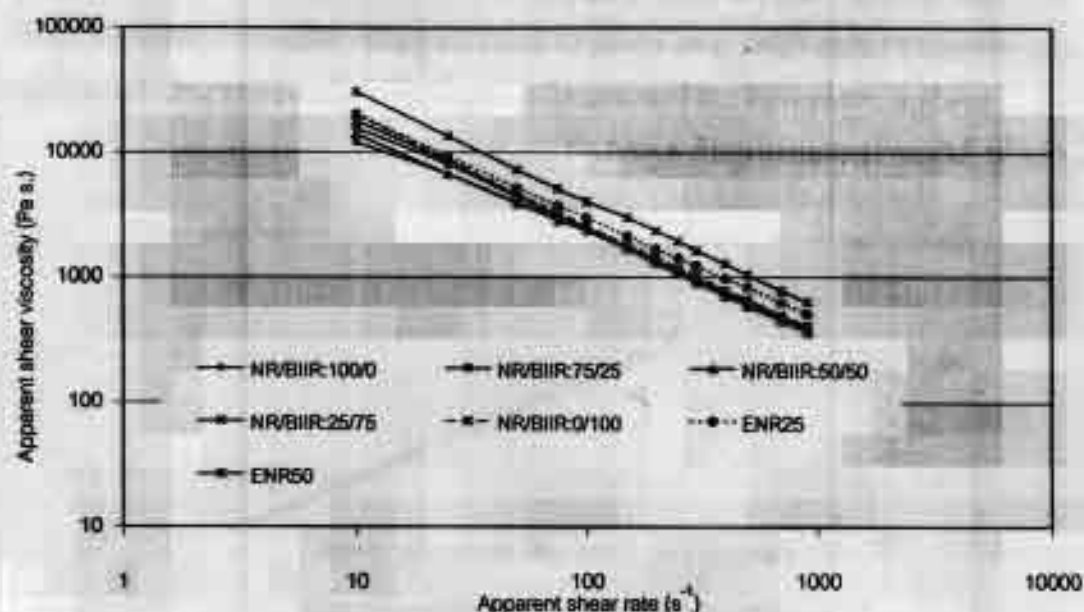
เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับอย่างโบรไมบิวไทล์ พบว่าการเพิ่มอัตราแอลกอฮอล์จะทำให้ยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับอย่างโบรไมบิวไทล์มีค่าความเค้นแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้น โดยมีเส้นโค้งการไหลของยางเบลนด์มีค่าอยู่ระหว่างยางธรรมชาติกับอย่างโบรไมบิวไทล์เดี่ยวๆ นั่นคือที่อัตราส่วน 0/100 หรืออย่างโบรไมบิวไทล์เดี่ยวๆ จะมีค่าสูงสุด รองลงมาคือยางเบลนด์ระหว่าง NR/BIR ที่อัตราส่วน 25/75, 75/25, 50/50 และ 100/0 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบสมบัติการไหลของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับอย่างโบรไมบิวไทล์ที่มีการใส่ยางธรรมชาติของโพกไซด์เป็นตัวเชื่อมประสาน (รูปที่ 4.42) พบว่าการเพิ่มอัตราแอลกอฮอล์ทำให้ค่าความเค้นแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้น โดยมีเส้นโค้งการไหลเป็นแนวโน้มมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แต่จะพบว่าค่าความเค้นแอลกอฮอล์ของยางเบลนด์ที่ใส่ยางธรรมชาติของโพกไซด์เป็นตัวเชื่อมประสานที่อัตราส่วนต่างๆ มีแนวโน้มต่ำกว่ายางเบลนด์ที่ไม่มีการใส่ยางธรรมชาติของโพกไซด์เป็นตัวเชื่อมประสานเล็กน้อยเมื่อเทียบกับอัตราส่วนของยางเบลนด์ของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับอย่างโบรไมบิวไทล์ใกล้เคียงกัน

(เช่น NR/BIIR/ENR ที่อัตราส่วน 67.5/22.5/10 เปรียบเทียบกับ NR/BIIR ที่อัตราส่วน 75/25) ยกเว้น NR/BIIR/ENR25 ที่อัตราส่วน 45/45/10 มีแนวโน้มสูงกว่า NR/BIIR ที่อัตราส่วน 50/50

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนกับอัตราเฉือนของยางที่ทดสอบทั้งอุณหภูมิ 100 °C ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.43-4.44



รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนกับอัตราเฉือนของยางธรรมชาติอีพอกไซด์และยางเบลดระหว่างยางธรรมชาติกับยางโพรโมบิวไทล์ ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 100 °C



รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนกับอัตราเฉือนของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโพรไมบิวไทล์ที่มียางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นตัวเชื่อมประสาน ที่อุณหภูมิ 100°C

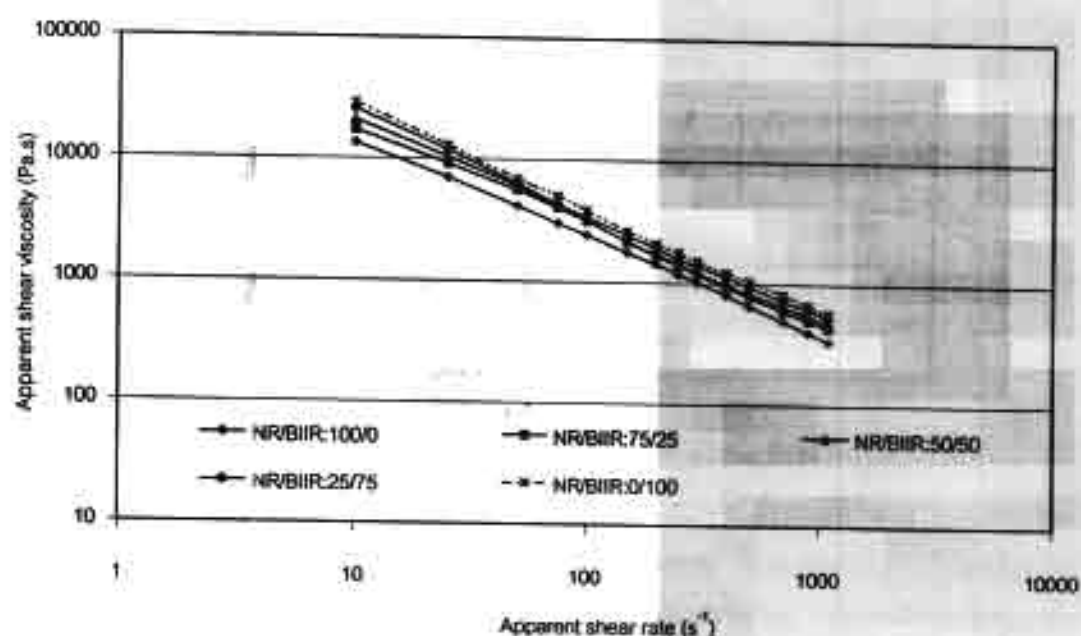
จากรูปที่ 4.43 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนกับอัตราเฉือนของยางเดี่ยว พบว่าความหนืดเฉือนจะน้อยลงตามอัตราเฉือนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงพฤติกรรมแบบการลดความหนืด (shear-thinning behavior) เช่นเดียวกับลักษณะของของไหลซูโดพลาสติก (Pseudoplastic fluid) โดยที่เส้นโค้งความหนืด (viscosity curve) มีลักษณะเช่นเดียวกับเส้นโค้งการไหลจากข้างต้น นั่นคือยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงสุด รองลงมาคือยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 25 โมลเปอร์เซ็นต์ ยางโพรไมบิวไทล์และยางธรรมชาติ ตามลำดับ สำหรับยางธรรมชาติอีพอกไซด์พบว่ามีกราฟเส้นโค้งความหนืดของยางธรรมชาติอีพอกไซด์สูงกว่ายางธรรมชาติ และจะมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์ในโมเลกุลยางธรรมชาติ โดยที่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 50 โมลเปอร์เซ็นต์มีค่าความหนืดเฉือนสูงกว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์ 25 โมลเปอร์เซ็นต์

จากรูปที่ 4.43 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนกับอัตราเฉือนของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโพรไมบิวไทล์ โดยที่เส้นโค้งความหนืด มีลักษณะเช่นเดียวกับเส้นโค้งการไหลจากข้างต้น โดยจะพบว่าเส้นโค้งความหนืดของยางเบลนด์ที่อัตราส่วน 0/100 หรือยางโพรไมบิวไทล์เดี่ยวมีค่าสูงสุด รองลงมาคือที่อัตราส่วน 25/75, 75/25, 50/50 และ 100/0 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนยางเบลนด์จะมีอิทธิพลต่อค่าความหนืด โดยที่เส้นโค้งความหนืดของยางเบลนด์จะมีค่าอยู่ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโพรไมบิวไทล์เดี่ยว

จากรูปที่ 4.44 ซึ่งเปรียบเทียบยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโพรไมบิวไทล์ที่อัตราส่วน 75/25, 50/50 และ 25/75 ที่มียางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นตัวเชื่อมประสาน พบว่าการ

เพิ่มอัตราเฉือนทำให้ความหนืดเฉือนมีค่าลดลง โดยที่มีเส้นโค้งความหนืดเป็นแนวโน้มมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แต่พบว่าค่าความหนืดเฉือนของยางเบลนด์ที่ใส่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นตัวเชื่อมประสานที่อัตราส่วนต่างๆ มีค่าต่ำกว่ายางเบลนด์ที่ไม่มียางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นตัวเชื่อมประสานเล็กน้อย ยกเว้น NR/BIIR/ENR25 ที่อัตราส่วน 45/45/10 สูงกว่า NR/BIIR ที่อัตราส่วน 50/50

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนกับอัตราเฉือนของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโบรโมบิวไทล์ ที่มีการใส่เคมีค่าปริมาณ 40 phr ทดสอบที่อุณหภูมิ 100 °C แสดงดังรูปที่ 4.45



รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนกับอัตราเฉือนของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโบรโมบิวไทล์ที่มีเคมีค่า ที่อุณหภูมิทดสอบ 100°C

จากรูปที่ 4.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนกับอัตราเฉือนของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโบรโมบิวไทล์ที่มีการใส่เคมีค่าเข้าไป พบว่าความหนืดเฉือนน้อยลงตามอัตราเฉือนที่เพิ่มขึ้น โดยที่เส้นโค้งความหนืดของยางเบลนด์ที่อัตราส่วน 0/100 หรือยางโบรโมบิวไทล์เดี่ยวมีค่าสูงสุด รองลงมาคือที่อัตราส่วน 25/75, 50/50, 75/25 และ 100/0 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนยางเบลนด์จะมีอิทธิพลต่อค่าความหนืด และเมื่อเปรียบเทียบกับยางเบลนด์ที่มีเคมีค่า พบว่าค่าความหนืดเฉือนของยางเบลนด์ทุกอัตราส่วนจะมีค่าสูงขึ้น

ตารางที่ 4.14 ค่าดัชนีสมการกำลัง (Power law index, n) และค่าดัชนีคอนซิสเทนซี (Consistency of flow, K) ของยางธรรมชาติ ยางโพรโมบิวไทล์ ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ ยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโพรโมบิวไทล์ ยางเบลนด์ที่มียางธรรมชาติอิพอกไซด์เป็นตัวเชื่อมประสาน และยางเบลนด์ที่มีเขม่าดำ ที่อัตราส่วนต่างๆ อุณหภูมิทดสอบ 100°C

NR/BIIR	n	K (KPa)	NR/BIIR + C-Black	n	K (KPa)
100/0	0.20	195.0	100/0	0.20	216.0
75/25	0.18	213.9	75/25	0.20	268.0
50/50	0.18	197.9	50/50	0.18	280.4
25/75	0.14	222.9	25/75	0.18	311.2
0/100	0.14	233.4	0/100	0.17	348.2
NR/BIIR/ENR25	n	K (KPa)	NR/BIIR/ENR50	n	K (KPa)
67.5/22.5/10	0.17	197.1	67.5/22.5/10	0.17	200.1
45/45/10	0.20	192.5	45/45/10	0.20	175.1
22.5/67.5/10	0.17	197.1	22.5/67.5/10	0.17	200.2
ENR25	0.18	259.7	ENR50	0.14	372.6

การเปรียบเทียบถึงความเข้ากันได้ของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโพรโมบิวไทล์และยางเบลนด์ที่มีการใส่ยางธรรมชาติอิพอกไซด์เป็นตัวเชื่อมประสาน ตรวจสอบจากค่าความหนืดเฉือนจริงของยางเบลนด์ โดยนำความเค้นเฉือนและอัตราเฉือนไปแก้ไขเป็นค่าความเค้นเฉือนจริงและอัตราเฉือนจริง แล้วคำนวณหาค่าความหนืดเฉือนจริงของยางเบลนด์ และใช้กฎผลบวกลอการิทึมคำนวณส่วนเบี่ยงเบนการเบลนด์และส่วนเบี่ยงเบนการเบลนด์สัมพัทธ์ของการเบลนด์ (Relative positive deviation, RPD) โดยใช้ความสัมพันธ์ (Kundu et al. 1997) ดังนี้

$$\Delta\eta_p = \eta_{a,\infty} - \sum W_i \log \eta_i = \eta_{a,\infty} - \eta_{a,exp}$$

$$\frac{\Delta\eta_p}{\eta_{a,\infty}} = 1 - \frac{\eta_{a,exp}}{\eta_{a,\infty}}$$

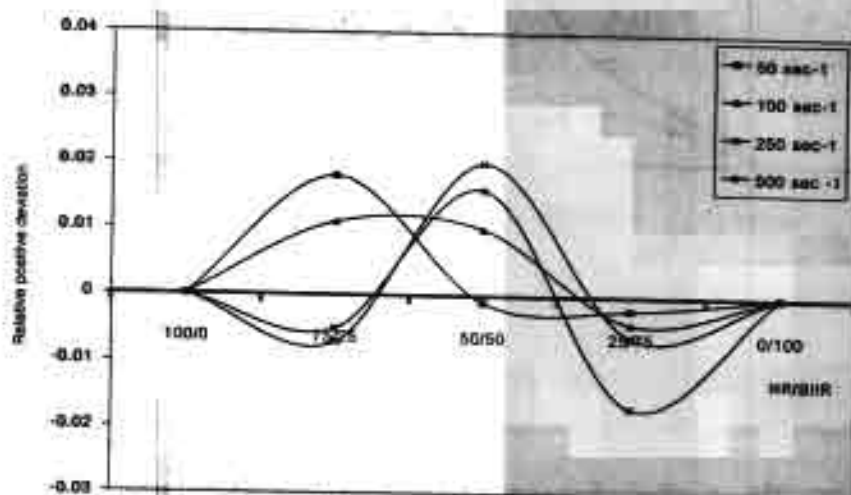
เมื่อ ; $\Delta\eta_p$ คือ ส่วนเบี่ยงเบนของการเบลนด์

$\frac{\Delta\eta_p}{\eta_{a,\infty}}$ คือ ส่วนเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ของการเบลนด์ (Relative positive deviation, RPD)

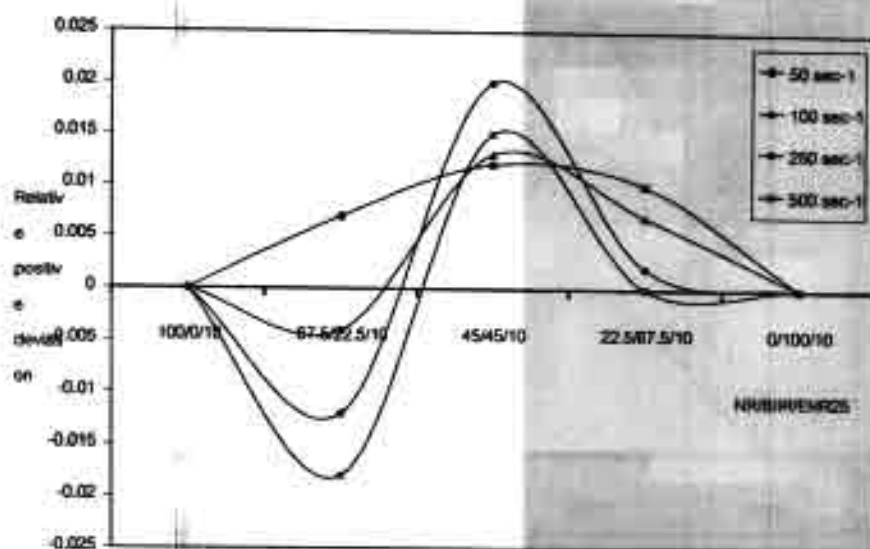
$\eta_{a,exp}$ คือ ความหนืดที่คำนวณได้จากการทดลอง

และ $\eta_{a,add}$ คือ ความหนืดที่คำนวณได้จากกฎผลบวกลอการิทึม

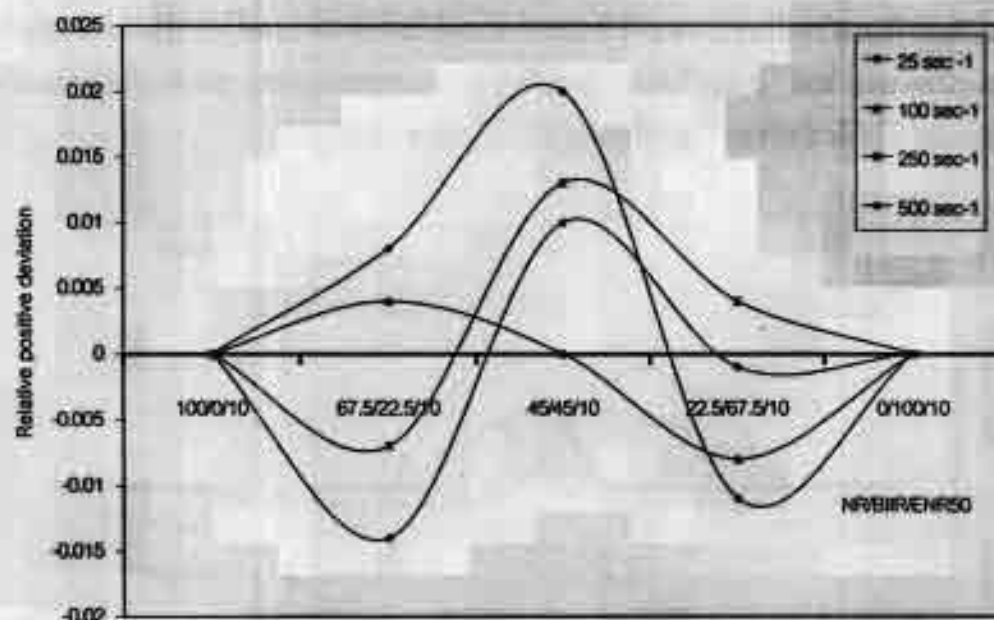
เปรียบเทียบส่วนเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ของการเบลนด์ของยางเบลนด์โดยทำการเปรียบเทียบกันที่อุณหภูมิทดสอบ 100°C และที่อัตราเฉือนต่ำๆ เพราะสามารถบ่งบอกพฤติกรรมความเข้ากันได้ของยางเบลนด์ได้ดีกว่าการทดสอบที่อุณหภูมิสูงและอัตราเฉือนสูงๆ



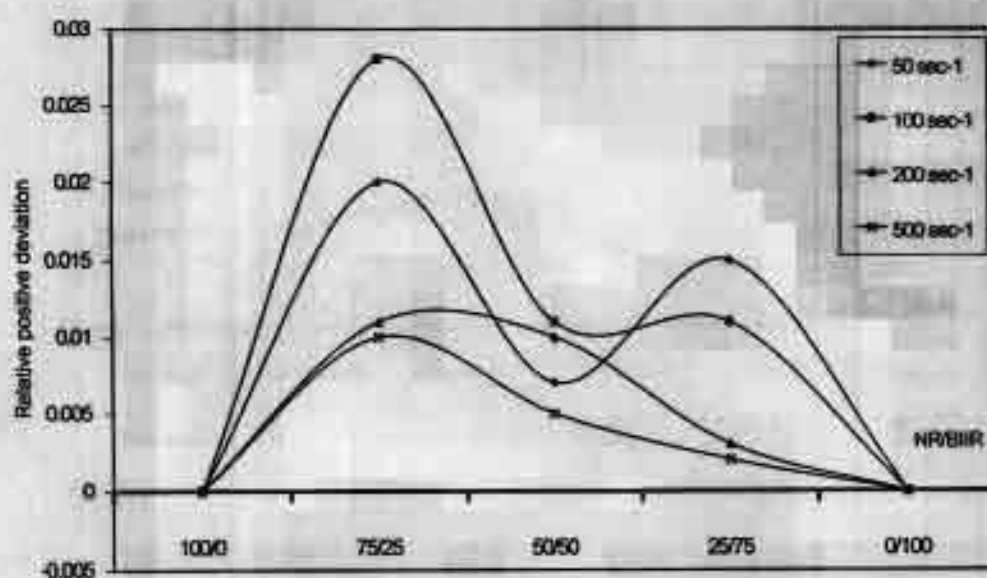
รูปที่ 4.46 ส่วนเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ของการเบลนด์ของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโบริวไทล์



รูปที่ 4.47 ส่วนเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ของการเบลนด์ของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโบริวไทล์ที่มียางธรรมชาติอีพอกไซด์ 25 เป็นตัวเชื่อมประสาน



รูปที่ 4.48 ส่วนเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ของการเบนด์ของยางเบนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโพรพิวไทล์ที่มียางธรรมชาติออกไซด์ 50 เป็นตัวเชื่อมประสาน



รูปที่ 4.49 ส่วนเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ของการเบนด์ของยางเบนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโพรพิวไทล์ที่มีการเติมเซมาค่า

จากรูปที่ 4.46 เปรียบเทียบส่วนเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ของการเบลนด์ของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโพรโมบิวไทล์ พบว่าที่อัตราส่วน 75/25 และ 25/75 มีแนวโน้มให้ค่าเป็นลบ อาจเนื่องมาจากความเป็นขั้วของยางเบลนด์ต่างกันโดยที่ยางโพรโมบิวไทล์จะมีความเป็นขั้วในส่วนของโพรหมินในโครงสร้างขณะที่ยางธรรมชาติเป็นยางที่ไม่มีขั้วจึงทำให้การเบลนด์กันระหว่างยางทั้งสองไม่สามารถเข้ากันได้ทางเทอร์โมไดนามิกส์ ขณะที่อัตราส่วน 50/50 มีส่วนเบี่ยงเบนการเบลนด์ของยางเบลนด์มีค่าเป็นบวกเล็กน้อยเมื่ออัตราเงือนสูงขึ้นแสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วนยางเท่ากันอาจมีผลให้เกิดการกระจายของยางแต่ละเฟสเข้ากันได้ดี

จากรูปที่ 4.47 และ 4.48 เปรียบเทียบส่วนเบี่ยงเบนของการเบลนด์และส่วนเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ของยางเบลนด์ที่มียางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นตัวเชื่อมประสาน พบว่ามีส่วนเบี่ยงเบนของการเบลนด์มีแนวโน้มเช่นเดียวกับยางเบลนด์ที่ไม่ใส่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ โดยที่อัตราส่วน 67.5/22.5/10 และ 22.5/67.5/10 มีแนวโน้มให้ค่าเป็นลบ ขณะที่อัตราส่วน 45/45/10 มีแนวโน้มให้ค่าเป็นบวก แสดงให้เห็นว่าการใส่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เพื่อเป็นตัวเชื่อมประสานโดยเพิ่มสภาพความเป็นขั้วของยางธรรมชาติไม่สามารถช่วยให้ยางเบลนด์เข้ากันได้ในทุกอัตราส่วน

จากรูปที่ 4.49 เปรียบเทียบส่วนเบี่ยงเบนของการเบลนด์และส่วนเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโพรโมบิวไทล์ที่ใส่เซพาค่า พบว่าส่วนเบี่ยงเบนของการเบลนด์มีแนวโน้มให้ค่าเป็นบวกทุกอัตราส่วน แสดงให้เห็นว่าเซพาค่าสามารถทำให้ยางเบลนด์เข้ากันได้มากขึ้น เนื่องจากเซพาค่าเป็นสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพและมีอนุภาคขนาดเล็กสามารถแทรกตัวเข้าไปในเฟสของยางเบลนด์ได้อย่างทั่วถึงกันและเป็นตัวเชื่อมให้ยางเบลนด์เข้ากันได้

4.3.3 อุณหภูมิสภาพแก้วของยางดิบ (glass transition temperature, T_g)

ในการทดลองเพื่อหาค่าอุณหภูมิสภาพแก้ว (glass transition temperature, T_g) โดยใช้ยางดังนี้ NR, BIIR, ENR25, ENR50, NR/BIIR:(50/50), NR/BIIR/ENR25:(45/45/10) และ NR/BIIR/ENR50:(45/45/10) เพื่อเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิสภาพแก้วของยางเดี่ยว และยางเบลนด์ที่ใส่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เข้าไป ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่าอุณหภูมิสภาพแก้ว (Tg) ของยางดิบชนิดต่างๆ

สูตรยาง	ค่า Tg (°C)
NR	- 59.33
BIIR	-58.00
ENR25	-38.17
ENR50	-27.50
NR/BIIR : (50/50)	-59.50
NR/BIIR/ENR25 : (45/45/10)	-59.17
NR/BIIR/ENR50 : (45/45/10)	-59.33

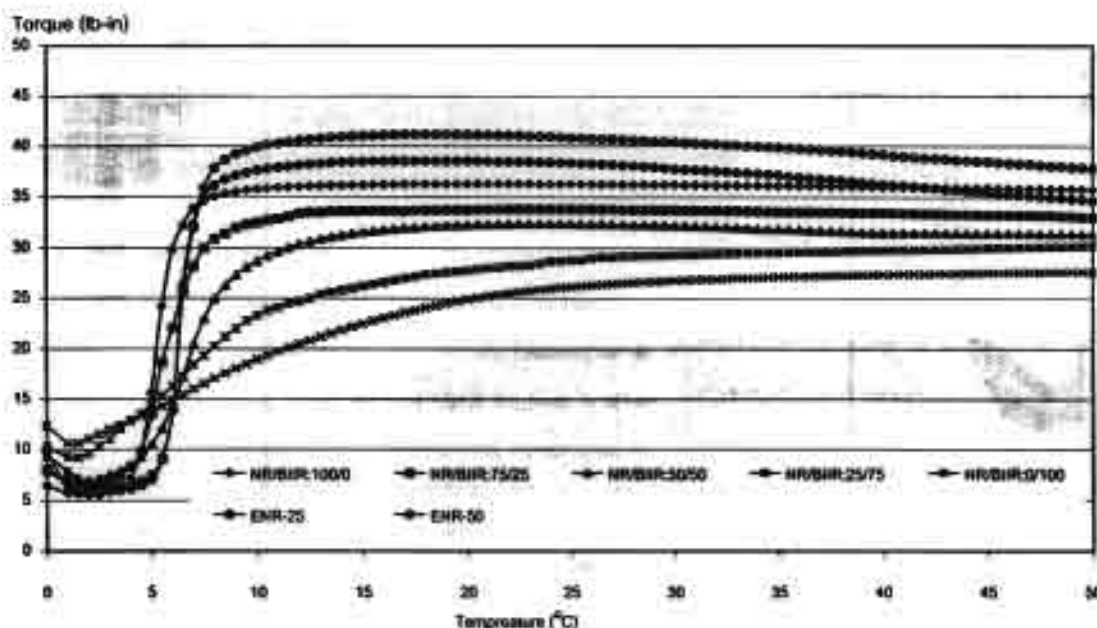
จากตารางที่ 4.9 พบว่ายางธรรมชาติและยางโบรโมปรีนไทล์มีค่าอุณหภูมิสภาพแก้ว (Tg) ที่ใกล้เคียงกันมากคือ -59.33 และ -58.00 °C ตามลำดับ โดยที่ Tg ของยางธรรมชาติมีค่าที่ต่ำกว่ายางโบรโมปรีนไทล์เล็กน้อย และเมื่อทำการเบลนด์ยางธรรมชาติกับยางโบรโมปรีนไทล์เข้าด้วยกันทำให้ Tg มีเพียงค่าเดียวคือ -59.50°C ซึ่งแสดงว่ายางเบลนด์มีความเข้ากันได้ (miscible) ซึ่งจะสอดคล้องกับการวิจัยของ รัฐพล (2544) พบว่าค่า Tg ของยางธรรมชาติเท่ากับ -63.08°C และยางโบรโมปรีนไทล์เท่ากับ -62.11°C และยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโบรโมปรีนไทล์มี Tg ค่าเดียวเช่นกันเท่ากับ -62.60°C

และเมื่อเปรียบเทียบยางธรรมชาติอีพอกไซด์ พบว่ามีค่า Tg สูงกว่ายางธรรมชาติ และมีค่าที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่มีอยู่ในโมเลกุลยางธรรมชาติ นั่นคือยาง ENR25 และยาง ENR50 จะมีค่า Tg เท่ากับ -38.17 และ -27.50 °C ตามลำดับ

สำหรับเมื่อใส่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เข้าไปในยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโบรโมปรีนไทล์ พบว่าไม่มีผลต่อค่า Tg ของยางเบลนด์มากนักโดยจะมีค่า Tg เพียงค่าเดียว แสดงถึงความเข้ากันได้ของยางเบลนด์

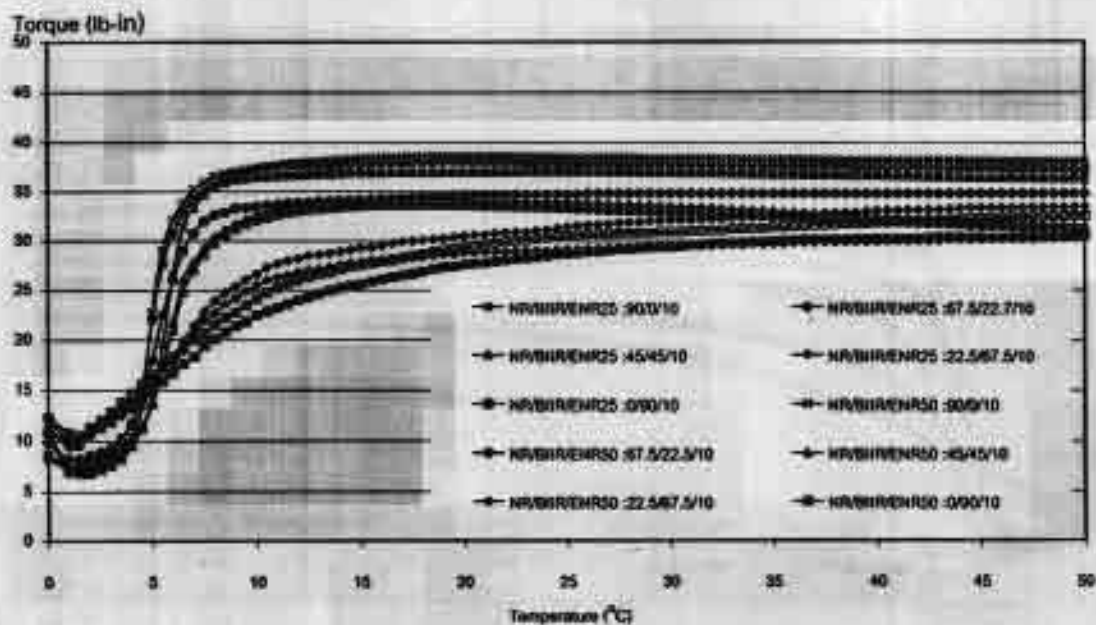
4.3.4 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์

ทำการทดลองศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติ ยางโบรโมปรีนไทล์ ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ ยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโบรโมปรีนไทล์ที่อัตราส่วน 100/0, 75/25, 50/50, 25/75, 0/100 และยางเบลนด์ที่ได้ยางยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นตัวเชื่อมประสาน โดยใช้สูตรการทดลองดังตารางที่ 3.9 ซึ่งมีเขม่าดำ 40 phr โดยทดสอบอุณหภูมิ 150 °C ใช้ระยะเวลา 50 นาที ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.50 -4.51



รูปที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาของยางธรรมชาติ ยางโบรโมปิวไทล์ ยางธรรมชาติอีพอกไซด์และยางเบลนด์ ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโบรโมปิวไทล์

จากรูปที่ 4.50 พบว่าลักษณะของกราฟการวัลคาไนซ์ (cure curve) ของยางแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกัน โดยที่ยางธรรมชาติมีลักษณะการวัลคาไนซ์เป็นแบบ Flat cure และมีค่าทอร์กสูงกว่ายางโบรโมปิวไทล์ สำหรับยางโบรโมปิวไทล์จะมีลักษณะการวัลคาไนซ์เป็นแบบ Marching cure และมีการ delayed action ที่ค่อนข้างยาว สำหรับยางเบลนด์ระหว่างธรรมชาติกับยางโบรโมปิวไทล์ที่อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 จะมีลักษณะการวัลคาไนซ์เป็นแบบ Reversion cure ขณะที่อัตราส่วน 25/75 ลักษณะการวัลคาไนซ์จะคล้ายกับยางโบรโมปิวไทล์เดี่ยว ๆ ถือเป็นแบบ Marching cure และมีการ delay action ที่ค่อนข้างยาวเช่นกัน สำหรับยางธรรมชาติอีพอกไซด์จะมีลักษณะการวัลคาไนซ์แบบ reversion cure และมีค่าทอร์กที่สูงกว่ายางธรรมชาติและจะสูงขึ้นตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์ในยางธรรมชาติ



รูปที่ 4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโพรโมทิลที่มียางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นตัวเชื่อมประสาน

จากรูปที่ 4.51 พบว่าเมื่อใส่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นตัวเชื่อมประสานเข้าไปในยาง เบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโพรโมทิล จะไม่ส่งผลต่อลักษณะการวิคคาไนซ์ของยาง เบลนด์มากนัก โดยที่ cure curve จะเหมือนกับยางเบลนด์ที่ไม่ใส่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ แต่ค่าทอร์กจะมีค่าเพิ่มขึ้นทุกอัตราส่วนยางเบลนด์ และจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์

ตารางที่ 4.10 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์สูตรต่าง ๆ

สูตรยาง	อัตราส่วน	M_L (lb-in)	M_H (lb-in)	Scorch time(min)	Cure time (min)
NR/BIIR	100/0	5.52	36.29	3.37	6.23
	75/25	6.53	33.83	2.27	9.1
	50/50	6.94	31.45	2.27	10.58
	25/75	9.23	30.31	2.2	17.11
	0/100	10.62	27.71	3.59	24.28
ENR25	100	5.71	38.57	6.34	7.14
ENR50	100	5.85	41.18	6.43	7.69
NR/BIIR/ENR25	90/0/10	6.71	37.01	2.34	6.78
	67.5/22.5/10	7.26	34.8	2.34	8.49
	45/45/10	7.39	33.67	2.16	11.33
	22.5/67.5/10	9.9	30.3	2.11	17.1
	0/90/10	10.4	30.51	2.08	25.1
NR/BIIR/ENR50	90/0/10	7.5	38.6	3.06	8.55
	67.5/22.5/10	8.2	38.1	2.25	10.48
	45/45/10	7.02	34.23	2.33	12.37
	22.5/67.5/10	9.4	33.46	2.08	20.27
	0/90/10	10.2	32.64	2.25	28.48

จากตารางที่ 4.10 พบว่าค่าแรงบิดต่ำสุด (M_L) ของยางธรรมชาติมีค่าต่ำสุด ยางโพรโมบิวไทล์จะมีค่าสูงสุด ส่วนยางเบลนด์จะมีค่าเป็นแนวโน้ที่สูงขึ้นตามปริมาณอัตราส่วนของยางโพรโมบิวไทล์ ซึ่งเป็นผลมาจากค่าความหนืดที่สูงของยางโพรโมบิวไทล์ สำหรับยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีค่าที่สูงกว่ายางธรรมชาติเล็กน้อย นอกจากนี้ค่าแรงบิดต่ำสุดจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในยางธรรมชาติ ส่วนยางเบลนด์ที่มีการใส่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นตัวเชื่อมประสานจะมีค่าแรงบิดต่ำสุดเพิ่มขึ้นทุกสัดส่วนยางเบลนด์

ค่าแรงบิดสูงสุด (M_H) ของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโพรโมบิวไทล์พบว่าขึ้นอยู่กับยางธรรมชาติ นั่นคืออัตราส่วนของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าแรงบิดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากยางธรรมชาติมีพันธะคู่ที่วงไวนและมีเฟสของยางธรรมชาติที่มากกว่ายางโพรโมบิว

โพลี ดังนั้นจึงเกิดการเชื่อมโยง (Crosslink) ในเฟสของยางธรรมชาติมากกว่าในยางโพรไมบิวโพลี จึงทำให้แรงบิดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณอัตราส่วนของยางธรรมชาติ สำหรับยางธรรมชาติอิพอกไซด์มีค่าแรงบิดสูงสุดที่สูงกว่ายางธรรมชาติ และเพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู่อิพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น นั่นคือความเป็นขั้วในยางธรรมชาติอิพอกไซด์ จะทำให้ยางเกิดพันธะเคมีหรือการเชื่อมขวางที่เพิ่มขึ้น ยางจะแข็งขึ้น จึงทำให้ค่าแรงบิดสูงสุดมีค่าที่สูงขึ้น

ค่า Scorch time หรือค่าเวลาที่สามารถแปรรูป พบว่ายางธรรมชาติและยางโพรไมบิวโพลี จะมีค่าใกล้เคียงกันคือประมาณ 3-4 นาที สำหรับยางเบลนด์มีค่าเวลาที่สามารถแปรรูปที่สั้นลงกว่ายางเดี่ยวเล็กน้อย คือประมาณ 2-3 นาที สำหรับยางธรรมชาติอิพอกไซด์มีค่าเวลาที่สามารถแปรรูปที่มากกว่ายางธรรมชาติ นอกจากนี้ค่าจะมากขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณหมู่อิพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น คือประมาณ 6-7 นาที สำหรับยางเบลนด์ที่ใส่ยางธรรมชาติอิพอกไซด์เป็นตัวยึดประสานจะมีค่าเวลาสามารถแปรรูปใกล้เคียงกับยางเบลนด์ที่ไม่ใส่ยางธรรมชาติอิพอกไซด์

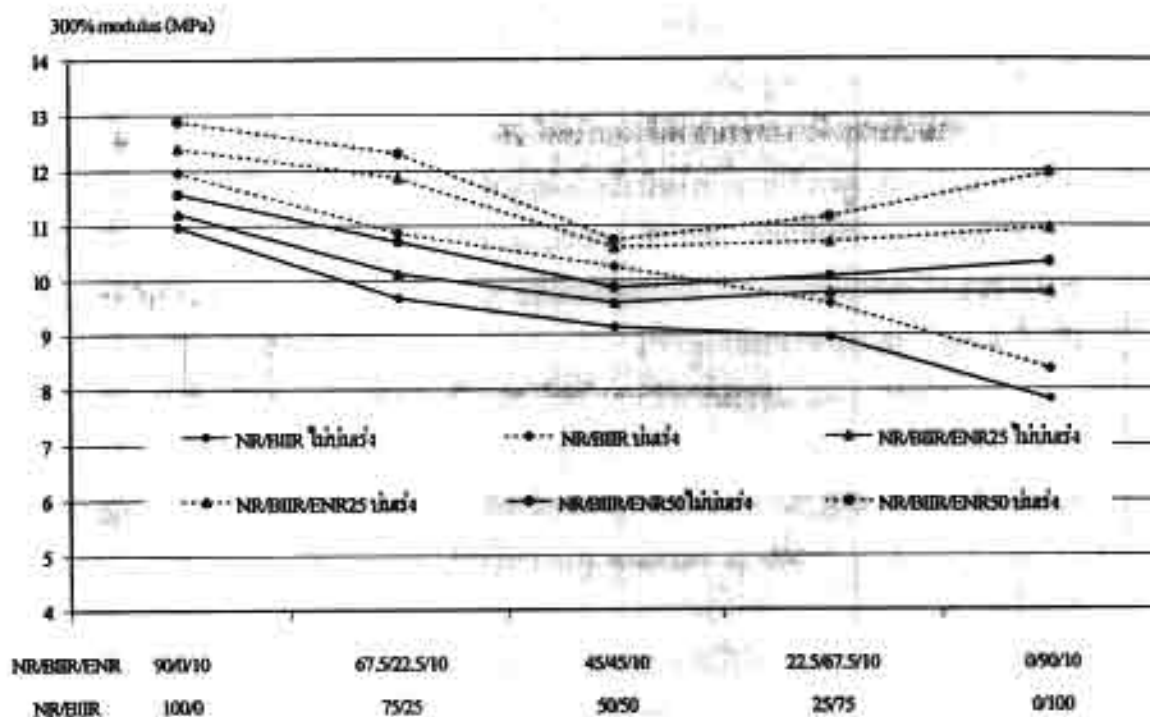
ค่า Cure time พบว่ายางธรรมชาติเดี่ยวมีค่าต่ำสุด ขณะที่ยางโพรไมบิวโพลีมีค่าสูงสุด และค่า Cure time ของยางเบลนด์ขึ้นอยู่กับปริมาณยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น นั่นคืออัตราส่วนของยางธรรมชาติสูงจะทำให้มีค่า Cure time ต่ำลงหรือ Cure เร็วขึ้น เนื่องจากยางธรรมชาติมีพันธะคู่ที่ว่องไวและมีเฟสของยางธรรมชาติที่มากกว่ายางโพรไมบิวโพลี ดังนั้นจึงเกิดการเชื่อมพันธะ (Crosslink) ในเฟสของยางธรรมชาติเร็วกว่าในยางโพรไมบิวโพลี ซึ่งการเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติในยางเบลนด์จะเป็นการเพิ่มเฟสของยางธรรมชาติจึงทำให้มีการเชื่อมพันธะกันเร็วขึ้น ค่า cure time จึงต่ำลงตามปริมาณของยางธรรมชาติ สำหรับยางธรรมชาติอิพอกไซด์มีค่า cure time สูงกว่ายางธรรมชาติ และเพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู่อิพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น โดยที่การแตกของวงแหวนอิพอกไซด์เป็นหมู่ไฮดรอกซิลอาจจะมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงกันช้าลง สำหรับยางเบลนด์ที่ใส่ยางธรรมชาติอิพอกไซด์เป็นตัวยึดประสานจะทำให้ค่า cure time ของยางเบลนด์ช้าลงทุกสัดส่วน และเพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู่อิพอกไซด์ แสดงว่าหมู่อิพอกไซด์อาจจะไปรบกวนหรือขวางการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงในยางเบลนด์จึงส่งผลให้ cure time ช้าลงได้

4.3.5 สมบัติทางฟิสิกส์ของยางเบลนด์วัลคาไนซ์

นำยางคอมปาวด์ที่เตรียมได้จากหัวข้อ 3.3.3.5 มาอัดเข้าเพื่อเตรียมชิ้นทดสอบด้วยเครื่องอัดเข้าแบบไฮโดรลิกโดยใช้อุณหภูมิ 150°C ตามเวลา 90% cure time หลังจากนั้นนำชิ้นทดสอบที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติดังต่อไปนี้

4.3.5.1 ความต้านทานต่อแรงดึง

ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D 412-98 และทดสอบสมบัติหลังปฏิกิริยาตามหัวข้อ 3.3.3.6 ได้ผลการทดลองรูปที่ 4.52



รูปที่ 4.52 ค่า 300 % modulus ของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโบรโมปิวไทล์ที่มีและไม่มียางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นตัวยึดประสาน (ปน-ไม่ปนแร่)

เมื่อเปรียบเทียบยางเดี่ยวพบว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์ 50 มีค่า 300%modulus สูงสุด (12.66 MPa) รองลงมาคือ ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 25 (11.54 MPa) ยางธรรมชาติ (10.98 MPa) และยางโบรโมปิวไทล์ (7.81 MPa) ตามลำดับ เหตุที่ยางธรรมชาติมีค่าสูงกว่ายางโบรโมปิวไทล์เนื่องจากในโมเลกุลยางธรรมชาติมีพันธะคู่ที่ว่องไวมากกว่าในโมเลกุลยางโบรโมปิวไทล์ จึงทำให้ยางธรรมชาติมีพันธะเชื่อมโยงที่พันธะคู่ระหว่างโซ่โมเลกุลในปริมาณมากตามไปด้วยยางจึงมีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยางธรรมชาติเป็นยางที่สามารถตกผลึกได้เมื่อถึง ดังนั้นจึงมีค่า 300%modulus ที่สูงกว่ายางโบรโมปิวไทล์ สำหรับยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีค่า 300% modulus ที่สูงกว่ายางธรรมชาติและยางโบรโมปิวไทล์ และเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่มีในยางธรรมชาติ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการมีหมู่อีพอกไซด์ซึ่งเป็นหมู่ที่มีสภาพขั้วในยางธรรมชาติ จะทำให้เกิดพันธะการเชื่อมโยงได้ดีมากยิ่งขึ้น ยางจึงมีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น

สำหรับอัตราส่วนของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโบรโมปิวไทล์มีผลต่อค่า 300%modulus นั่นคือการเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติในยางเบลนด์จะทำให้มีค่า 300% modulus สูงยิ่งขึ้น เนื่องมาจากยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อการดึงที่สูงกว่ายางโบรโมปิวไทล์ และพบว่ายางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโบรโมปิวไทล์ที่มียางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นตัวยึดประสานทุกอัตราส่วน มีค่า 300 % modulus เป็นแนวโน้มที่เพิ่มสูงกว่ายางเบลนด์ที่ไม่มียางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นตัวยึดประสานและจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่มีในยางธรรมชาติ

นั่นคือ เมื่อเบลนด์ยางธรรมชาติอิพอกไซค์ 25 ในยางธรรมชาติที่อัตราส่วน 90/10 มีค่า 300 % modulus สูงกว่ายางธรรมชาติเดี่ยว เพราะความเป็นขั้วของยางธรรมชาติอิพอกไซค์เสริมให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสูงขึ้น

เมื่อเบลนด์ยางธรรมชาติอิพอกไซค์ 25 ในยางโบรโมบิวไทล์ที่อัตราส่วน 0/90/10 มีค่า 300 % modulus สูงกว่ายางโบรโมบิวไทล์เดี่ยว เนื่องจากเหตุผลเช่นเดียวกัน นอกจากนี้พบว่า ยางเบลนด์ที่อัตราส่วนนี้มีค่า 300 % modulus สูงขึ้นมากเป็นพิเศษอาจเนื่องมาจากการใส่ยางธรรมชาติอิพอกไซค์เข้าไปในยางเบลนด์ที่มียางโบรโมบิวไทล์เดี่ยว อาจเป็นอัตราส่วนที่ความเป็นขั้วสมดุลกันความแข็งแรงจึงสูงขึ้น

เมื่อเบลนด์ยางธรรมชาติอิพอกไซค์ 25 เป็นตัวเชื่อมประสานในยางเบลนด์ที่อัตราส่วน 67.5/22.5/10 มีค่า 300 % modulus สูงกว่าเมื่อเทียบกับที่อัตราส่วน 75/25, ที่อัตราส่วน 45/45/10 มีค่า 300 % modulus สูงกว่าเมื่อเทียบกับที่อัตราส่วน 50/50 และที่อัตราส่วน 22.5/67.5/10 มีค่า 300 % modulus สูงกว่าเมื่อเทียบกับที่อัตราส่วน 25/75 เนื่องจากเหตุผลเช่นเดียวกัน

สำหรับยางเบลนด์ที่ใส่ยางธรรมชาติอิพอกไซค์ 50 เป็นตัวเชื่อมประสานทุกอัตราส่วน มีค่า 300 % modulus มีแนวโน้มเช่นเดียวกับยางที่ใส่ยางธรรมชาติอิพอกไซค์ 25 เป็นตัวเชื่อมประสาน แต่มีค่า 300 % modulus สูงกว่าทุกอัตราส่วน

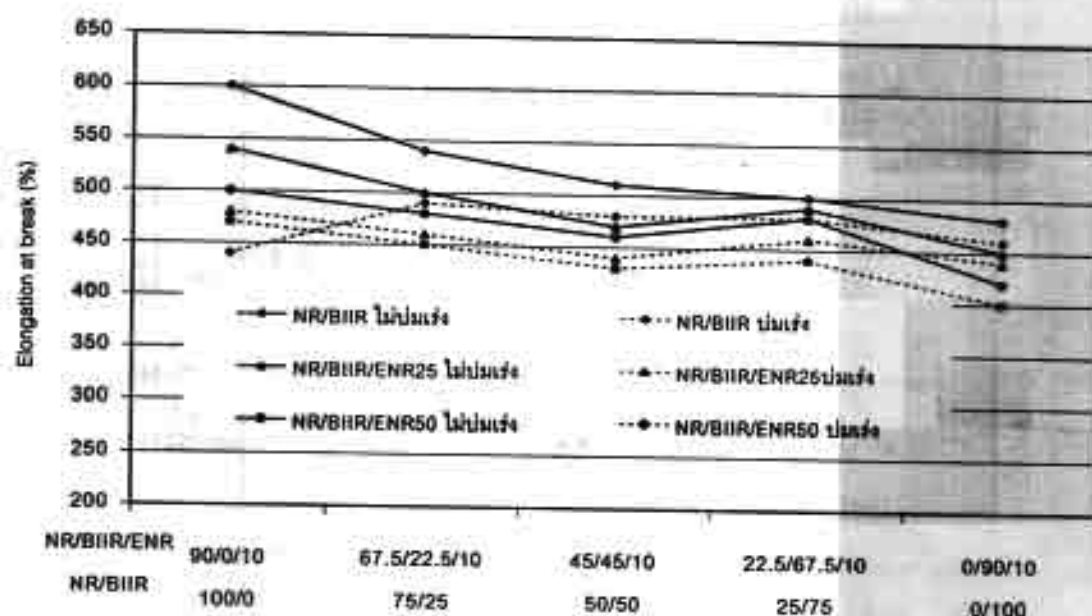
สำหรับสมบัติหลังปมเร่งจะพบว่าค่า 300 % modulus สูงขึ้นทุกอัตราส่วนยางเบลนด์ เนื่องมาจากการปมเร่งทำให้โมเลกุลของยางกับสารเคมีจะเกิดการเชื่อมพันธะกันอีก จึงทำให้ยางมีความแข็งแรงมากกว่าเดิม

จากรูปที่ 4.53 พบว่าอัตราส่วนของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโบรโมบิวไทล์มีผลต่อค่าความต้านทานต่อการดึงลักษณะเช่นเดียวกับค่า 300% modulus นั่นคือการเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติในยางเบลนด์ทำให้มีค่าความต้านทานต่อการดึงสูงขึ้น โดยที่ยางธรรมชาติเดี่ยวมีความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดเนื่องจากในโมเลกุลของยางธรรมชาติจะมีพันธะคู่ที่ว่องไวมากกว่าในโมเลกุลยางโบรโมบิวไทล์ จึงทำให้ยางธรรมชาติมีพันธะเชื่อมโยงที่พันธะคู่ระหว่างโซ่โมเลกุลในปริมาณมากตามไปด้วย นอกจากนี้ยางธรรมชาติสามารถแตกหักได้เมื่อถึงจึงมีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้นอีก

เมื่อเปรียบเทียบในส่วนของยางธรรมชาติอิพอกไซค์ 25 (17.45 MPa) และยางธรรมชาติอิพอกไซค์ 50 (15.80 MPa) พบว่าจะมีค่าต่ำกว่ายางธรรมชาติ และจะต่ำลงตามปริมาณหมู่อิพอกไซค์ที่มีในยางธรรมชาติ โดยที่ยางธรรมชาติอิพอกไซค์สามารถเกิดผลึกได้เมื่อถึงเช่นเดียวกับยางธรรมชาติ แต่ยางธรรมชาติอิพอกไซค์จะแสดงการมีพันธะคู่และมีการมีหมู่อิพอกไซค์ซึ่งเป็นหมู่ที่เพิ่มความสภาพขั้วในยางธรรมชาติ อาจจะทำให้เกิดพันธะการเชื่อมโยงน้อยกว่ายางธรรมชาติ ตลอดจนยางจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นทำให้ยางเปราะขาดได้ง่ายขึ้น

สำหรับสมบัติของยางหลังปมเร่งจะพบว่าทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโบรโมบิวไทล์ทุกอัตราส่วนจะมีค่าต่ำลง , แต่ยางธรรมชาติอิพอก

ไซค์จะมีค่าสูงขึ้นกว่า แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการปมแรงโมเลกุลของยางธรรมชาติพอกไซค์กับสารเคมีจะเกิดการเชื่อมพันธะกันอีกและมีการเชื่อมอย่างสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น จึงทำให้ยางมีความแข็งแรงมากกว่าเดิม



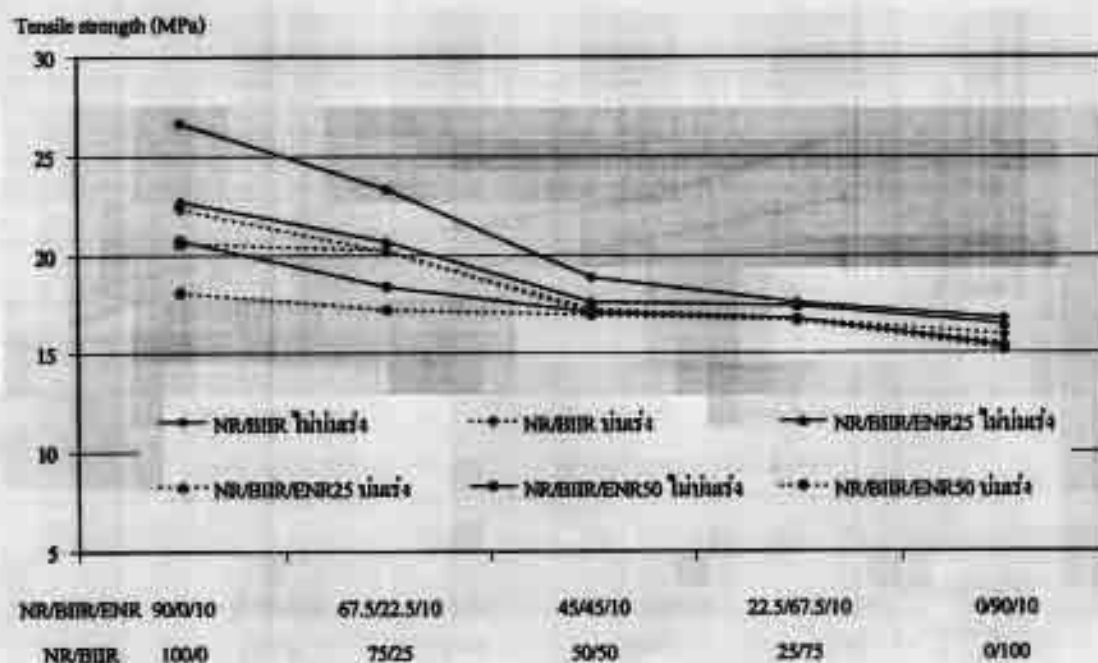
รูปที่ 4.53 ค่าความต้านทานแรงดึงของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโบรโมปิวไทล์ที่มีและไม่มียางธรรมชาติพอกไซค์เป็นตัวยึดประสาน (ปม-ไม่ปมแรง)

จากรูปที่ 4.53 พบว่ายางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโบรโมปิวไทล์ที่มียางธรรมชาติพอกไซค์เป็นตัวยึดประสานจะมีค่าความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มที่ต่ำกว่ายางเบลนด์ที่ไม่มีทุกอัตราส่วน และลดลงตามปริมาณพอกไซค์ที่มีในยางธรรมชาติ นั่นก็คือยางเบลนด์ที่ใส่ยางธรรมชาติพอกไซค์ 50 โมลเปอร์เซ็นต์เข้าไปทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มลดลงกว่ายางเบลนด์ที่ใส่ยางธรรมชาติพอกไซค์ 25 โมลเปอร์เซ็นต์ อาจเนื่องมาจากการใส่ยางธรรมชาติพอกไซค์จะเป็นการเสริมความเป็นฉนวนให้กับยางธรรมชาติจึงทำให้สามารถเกิดพันธะระหว่างขั้วของยางโบรโมปิวไทล์และยางจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นแต่จะเป็นความแข็งแรงเพราะจึงสามารถขาดได้ง่ายขึ้น และการที่มีพันธะคู่น้อยอาจทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลน้อยลง

สำหรับสมบัติหลังปมแรงจะพบว่ายางเบลนด์ทุกอัตราส่วนจะมีค่าความต้านทานแรงดึงเป็นแนวโน้มต่ำลง เนื่องมาจากการปมแรงทำให้เกิดการเชื่อมพันธะการเชื่อมโยงอย่างสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ยางจะมีความแข็งแรงแต่จะเป็นความแข็งแรงเพราะจึงสามารถขาดได้ง่ายขึ้น เช่นเดียวกับข้างต้น

4.3.5.2 ความสามารถในการยืดจนขาด

ทดสอบความสามารถในการยืดจนขาดตามมาตรฐาน ASTM D 412-98 ทดสอบด้วยเครื่อง Tensometer ที่อัตราความเร็ว 500±50 มม./นาที ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.54



รูปที่ 4.54 ค่าความสามารถยืดจนขาดของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโพรไมบิวไทล์ที่มี และไม่มียางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นตัวเชื่อมประสาน (ปม-ไม่ปนแร่)

จากรูปที่ 4.54 พบว่าอัตราส่วนของยางเบลนด์มีอิทธิพลต่อค่าความสามารถยืดจนขาด โดยที่ยางธรรมชาติเดี่ยวมีความสามารถยืดจนขาดมากที่สุด รองลงมาคือที่อัตราส่วน 75/25, 50/50, 25/75 และยางโพรไมบิวไทล์ ตามลำดับ นั่นคือการเพิ่มปริมาณยางโพรไมบิวไทล์ทำให้ความสามารถยืดจนขาดลดลง

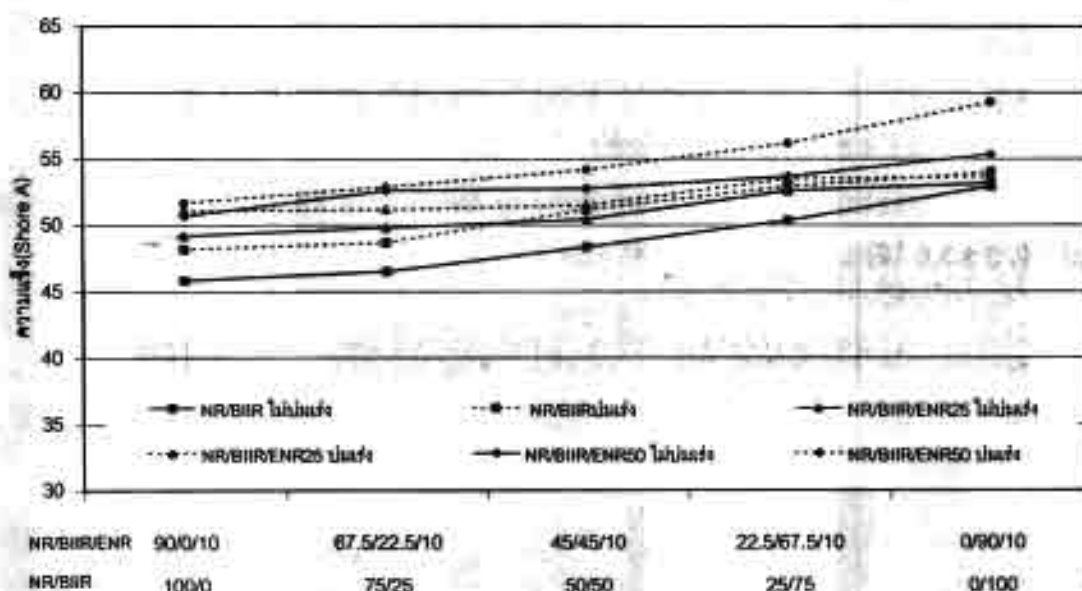
สำหรับยางธรรมชาติอีพอกไซด์ พบว่ามีความสามารถยืดจนขาดต่ำกว่ายางธรรมชาติเช่นกัน และลดลงตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์ในโมเลกุลยางธรรมชาติ นั่นคือปริมาณยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 50 (500%) มีความสามารถยืดจนขาดต่ำกว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์ 25 (500%) เนื่องจากการมีหมู่อีพอกไซด์บนโมเลกุลของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ทำให้โมเลกุลมีความอ่อนตัวต่ำลงเนื่องจากแรงดึงดูดภายในระหว่างโมเลกุลเพิ่มขึ้น

และพบว่ายางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโพรไมบิวไทล์ที่ใส่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นตัวเชื่อมประสาน มีค่าความสามารถยืดจนขาดมีแนวโน้มที่ลดลงทุกอัตราส่วน และลดลงตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่มีในยางธรรมชาติ นั่นก็คือยางเบลนด์ที่ใส่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 50 เข้าไปทำให้ค่าความสามารถยืดจนขาดมีแนวโน้มต่ำกว่ายางเบลนด์ที่ใส่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 25 อาจเนื่องมาจากการใส่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์จะเป็นการเสริมความเป็นขั้วให้กับยางธรรม

ชาติจึงทำให้สามารถเกิดพันธะระหว่างขั้วของยางโบรโมบิวไทล์และยางจะมีความแข็งเพิ่มขึ้นแต่จะเป็นความแข็งเปราะจึงสามารถขาดได้ง่ายขึ้นเช่นเดียวกับความต้านทานต่อแรงดึง หรืออาจเกิดจากการที่ใส่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ทำให้เกิดเป็นจุดอ่อน (weak point) ขึ้น ทำให้ขึ้นทดสอบขาดได้อย่างรวดเร็ว สำหรับสมบัติหลังปมเร่งพบว่ายางเบลนด์ทุกอัตราส่วนมีค่าความสามารถยึดจนขาดเป็นแนวโน้มต่ำลง

4.3.5.3 ความแข็ง

ทดสอบความแข็งตามมาตรฐาน ASTM D 2240-97 เป็นการวัดค่าความแข็งแบบ shore A โดยใช้ขึ้นทดสอบที่มีความหนาน้อย 6 มม. หรือ 0.25 นิ้ว ทำการทดสอบด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบ shore A ให้หักกดคดยางค้างไว้ 30 วินาที แล้วจึงอ่านค่าความแข็งที่ได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.55



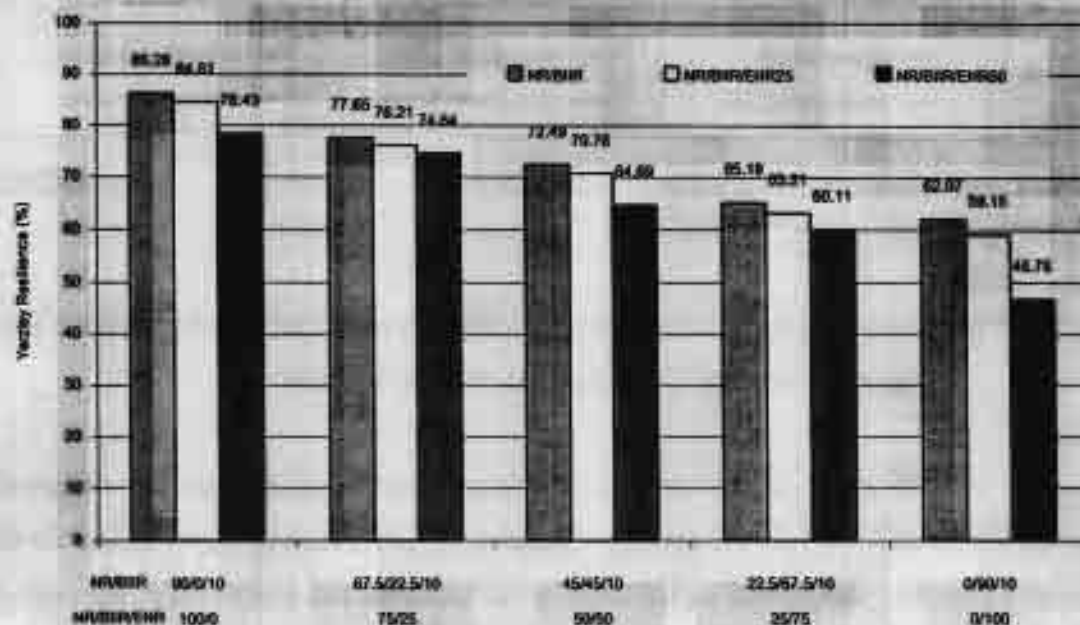
รูปที่ 4.55 ค่าความแข็งของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโบรโมบิวไทล์ที่มีแลไม่มียางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นตัวเชื่อมประสาน (ปม-ไม่ปมเร่ง)

จากรูปที่ 4.55 แสดงความสัมพันธ์ของความแข็งของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโบรโมบิวไทล์ พบว่าอัตราส่วนของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโบรโมบิวไทล์มีผลต่อค่าความแข็ง นั่นคือการเพิ่มปริมาณยางโบรโมบิวไทล์ในยางเบลนด์ทำให้มีค่าความแข็งสูงขึ้น โดยที่ยางโบรโมบิวไทล์มีความแข็งสูงสุดอาจเนื่องมาจากยางโบรโมบิวไทล์ซึ่งเป็นยางสังเคราะห์แสดงความอึดตัวในโครงสร้างและการมีความเป็นขั้วสูงกว่ายางธรรมชาติจึงทำให้ยางเบลนด์มีความแข็งมากขึ้นตามปริมาณของยางโบรโมบิวไทล์

สำหรับยางธรรมชาติอีพอกไซด์พบว่ามีความแข็งแรงสูงกว่ายางธรรมชาติและยางโม่บิวไทล์ และสูงขึ้นตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่มีในยางธรรมชาติ เนื่องจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์จะแสดงการมีหมู่อีพอกไซด์ซึ่งเป็นหมู่ที่เพิ่มความสภาพขั้วในยางธรรมชาติทำให้ยางมีความแข็งแรงมากขึ้น และพบว่ายางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโม่บิวไทล์ที่ใส่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นตัวเชื่อมประสานมีค่าความแข็งแรงเป็นแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นทุกอัตราส่วน และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่มีในยางธรรมชาติเช่นกัน นั่นก็คือยางเบลนด์ที่ใส่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 50 มีส่วนทำให้ยางมีความแข็งแรงสูงกว่ายางเบลนด์ที่มีการใส่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 25 เนื่องมาจากการใส่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีความแข็งแรงสูงและอาจเป็นการเสริมความเป็นขั้วให้กับยางธรรมชาติจึงทำให้สามารถเกิดพันธะระหว่างขั้วของยางโม่บิวไทล์ตลอดจนอาจจะเพิ่มความเข้ากันได้ของยางเบลนด์ดีขึ้น ดังนั้นการใส่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ในยางเบลนด์ทำให้ยางมีความแข็งแรงยิ่งขึ้น สำหรับสมบัติของยางหลังปมเร่งพบว่ามีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันอาจเนื่องจากเมื่อได้รับความร้อนจากการปมเร่งยางจะเกิดการวัลคาไนซ์ต่อไปได้อีกจึงทำให้ยางมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

4.3.5.4 สมบัติการกระเดื่องตัว

ทดสอบด้วยเครื่องเยอร์ลีย์ (Yerzley Mechanical Oscillograph) ตั้งรายละเอียดในหัวข้อ 3.3.3.6 ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.56-4.57



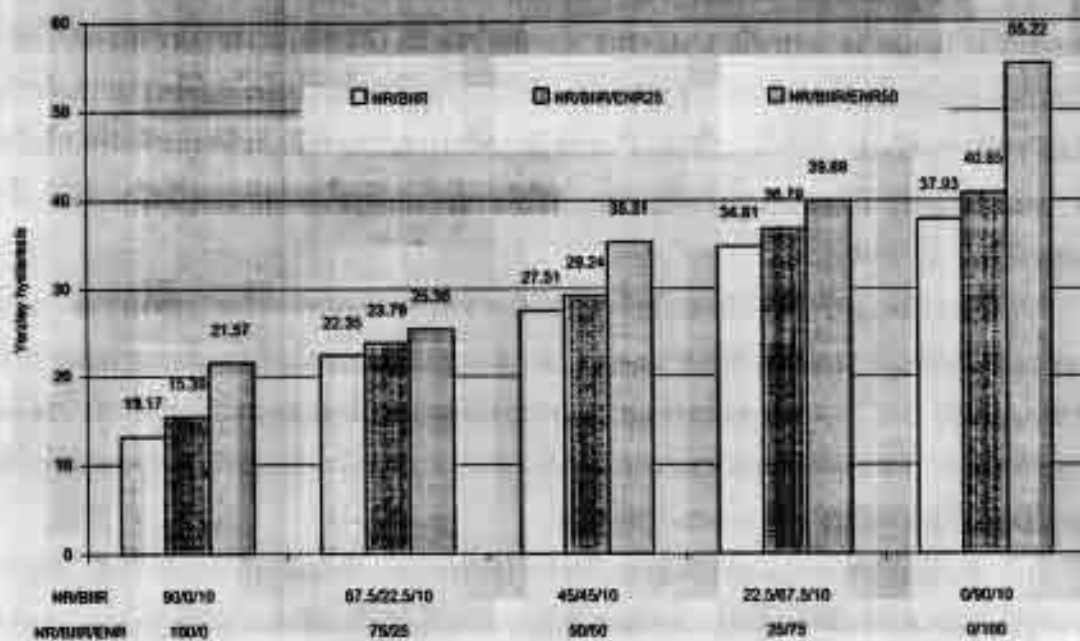
รูปที่ 4.56 ค่า Yerzley resilience (%) ของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโม่บิวไทล์ที่มีและไม่มียางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นตัวเชื่อมประสาน

จากรูปที่ 4.56 เปรียบเทียบความกระด้างตัวของยางเดี่ยวพบว่า ยางธรรมชาติมีค่าความกระด้างตัวสูงสุด รองลงมาคือ ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ 25 (73.3%) ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ 50 (70.1%) และยางโบรโมบิวไทล์ (62.07%) ตามลำดับ เหตุที่ยางโบรโมบิวไทล์มีความกระด้างตัวต่ำเนื่องจากโครงสร้างยางโบรโมบิวไทล์มีพันธะคู่น้อยกว่ายางธรรมชาติและมีหมู่เมทิลที่จับกับโซ่หลัก (isobutylene) มีจำนวนมากอัดกันแน่น ทำให้สายโซ่โมเลกุลไม่สามารถเคลื่อนไหวได้ดี จึงแสดงสมบัติความกระด้างตัวต่ำ

สำหรับยางธรรมชาติอิพอกไซด์พบว่ามีความกระด้างตัวต่ำกว่ายางธรรมชาติ และต่ำลงตามปริมาณหมู่อิพอกไซด์ที่มีในยางธรรมชาติ แต่สูงกว่ายางโบรโมบิวไทล์และยางเบลนด์ที่อัตราส่วน 50/50 และ 25/75 อาจเนื่องจากยางธรรมชาติอิพอกไซด์จะแสดงการมีหมู่อิพอกไซด์ซึ่งเป็นหมู่ที่เพิ่มความสภาพขี้ในยางธรรมชาติ มีพันธะคู่น้อยลงทำให้ความยืดหยุ่นของสายโซ่โมเลกุลลดลง จึงแสดงสมบัติความกระด้างตัวต่ำลง

สำหรับความกระด้างตัวของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโบรโมบิวไทล์ พบว่าอัตราส่วนของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโบรโมบิวไทล์มีผลต่อค่าความกระด้างตัว นั่นคือการเพิ่มปริมาณยางโบรโมบิวไทล์ที่มีความกระด้างตัวต่ำในยางเบลนด์ ทำให้มีค่าความกระด้างตัวต่ำลง

จากรูปที่ 4.56 พบว่ายางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโบรโมบิวไทล์ที่ใส่ยางธรรมชาติอิพอกไซด์เป็นตัวเชื่อมประสานจะทำให้ค่าความกระด้างตัวของยางเบลนด์ทุกอัตราส่วนมีแนวโน้มที่ต่ำลง และมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณหมู่อิพอกไซด์ที่มีในยางธรรมชาติเช่นกัน นั่นก็คือยางเบลนด์ที่ใส่ยางธรรมชาติอิพอกไซด์จะเพิ่มความเปราะบาง และปริมาณพันธะคู่ที่ลดลงให้กับยางเบลนด์จึงทำให้ความยืดหยุ่นของสายโซ่ลดลง ทำให้ความกระด้างตัวจึงต่ำลง

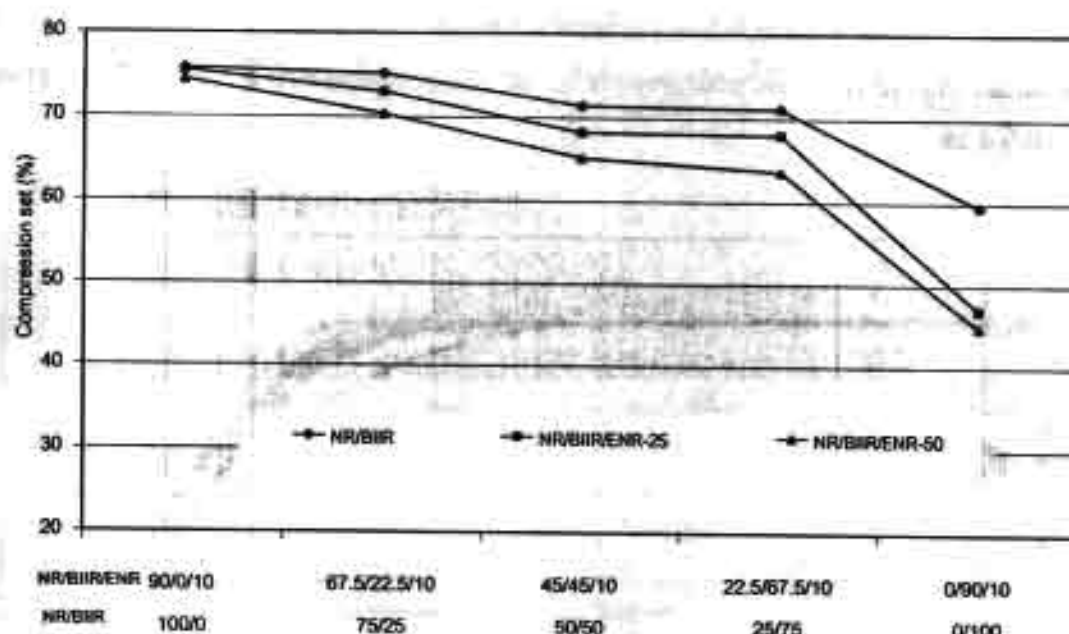


รูปที่ 4.57 ค่า Yezley hysteresis ของยางเบลดระหว่างยางธรรมชาติกับยางโพรไมบิวไทล์ที่มี และไม่มียางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นตัวเชื่อมประสาน

จากรูปที่ 4.57 พบว่าค่า Hysteresis ของยางมีความสัมพันธ์กับค่า Resilience ($Hysteresis = 100 - Resilience$) นั่นคือหากค่าความกระด้างตัวสูงค่า hysteresis จะต่ำและหากค่าความกระด้างตัวต่ำค่า hysteresis จะสูง เนื่องจากหากยางปล่อยพลังงานที่รับได้ออกมามากก็จะทำให้ยางมีความกระด้างตัวมากจึงมีการเก็บพลังงานไว้ในตัวน้อยนั่นคือมี hysteresis ต่ำนั่นเอง จากการทดลองจะพบว่าอัตราส่วนยางเบลดระหว่างยางธรรมชาติกับยางโพรไมบิวไทล์มีผลต่อค่า hysteresis นั่นคือยางธรรมชาติเดี่ยวมีค่าต่ำสุด ที่อัตราส่วน 75/25, 50/50, 25/75 และ 0/100 จะเพิ่มขึ้นตามลำดับ และเมื่อใส่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ในยางเบลดจะทำให้ค่า hysteresis สูงขึ้นทุกอัตราส่วน และจะสูงขึ้นตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์ในยางธรรมชาติ สำหรับยางธรรมชาติอีพอกไซด์จะมีค่า hysteresis สูงกว่ายางธรรมชาติและจะสูงขึ้นตามหมู่เปอร์เซนต์อีพอกไซด์

4.3.5.5 สมบัติ Compression Set

ทดสอบ Compression Set ตามมาตรฐาน ASTM D 395-98 ซึ่งทดสอบมีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 29.0 ± 0.5 มม. หนา 12.5 ± 0.5 มม. อัดให้ผิดรูป 25% ของความหนา อบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.58

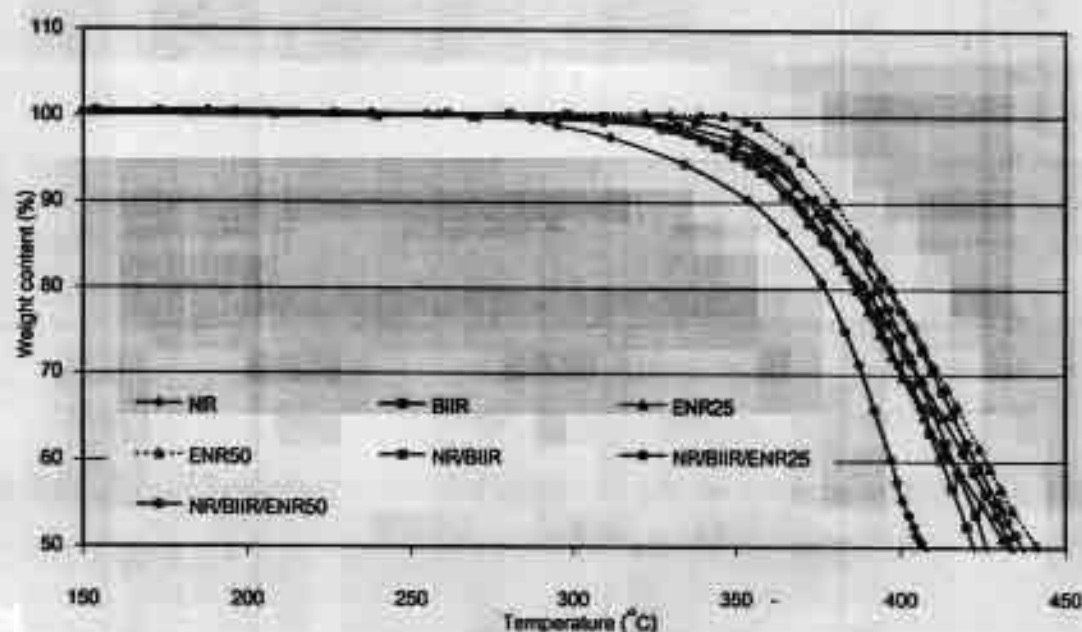


รูปที่ 4.58 ค่า Compression set (%) ของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโพรไมบิวไทล์ ที่มีและไม่มียางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นตัวเชื่อมประสาน

จากรูปที่ 4.58 พบว่ายางธรรมชาติเดี่ยวมีค่า Compression set สูงที่สุดรองลงมาคือที่อัตราส่วน 75/25, 50/50, 25/75 และยางโพรไมบิวไทล์เดี่ยว ตามลำดับ อาจเนื่องมาจากยางธรรมชาติมีความสามารถทนต่อความร้อนไม่ดัดนัก เมื่อได้รับความร้อนพันธะเชื่อมโยงบางอย่างถูกทำลายไป การคืนตัวไม่ดีจึงทำให้ค่า Compression set สูง ในขณะที่ยางโพรไมบิวไทล์มีความสามารถทนต่อความร้อนดีกว่าจึงทำให้ค่า Compression set ต่ำกว่า สำหรับยางธรรมชาติอีพอกไซด์จะมีค่า Compression set ต่ำกว่ายางธรรมชาติและจะต่ำลงตามหมู่เปอร์เซ็นต์อีพอกไซด์ โดยที่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 25 โมลเปอร์เซ็นต์จะมีค่า Compression set ต่ำกว่ายางธรรมชาติเพียงเล็กน้อยในขณะที่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 50 โมลเปอร์เซ็นต์มีค่า Compression set ต่ำลงมาก เหตุที่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีค่า Compression set ต่ำเพราะเมื่อได้รับความร้อนวงแหวนอีพอกไซด์แตกออกและเกิดการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น สำหรับยางเบลนด์ที่มีการใส่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์จะมีส่วนทำให้ค่า Compression set มีแนวโน้มต่ำลงเพียงเล็กน้อยทุกอัตราส่วน ยกเว้นยางเบลนด์ที่อัตราส่วน 0/90/10 ค่า Compression set จะต่ำมาก

4.3.6 สมบัติความทนต่อความร้อน

การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนทำการทดสอบแบบลดน้ำหนักด้วยเครื่อง TGA โดยศึกษาความร้อนที่ทำให้น้ำหนักยางหายไป 50 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเดิม ได้ผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.59



รูปที่ 4.59 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักยางแบบลดน้ำหนักที่ลดลง ณ อุณหภูมิต่างๆ จากเครื่อง TGA

จากรูปที่ 4.59 ซึ่งแสดงสมบัติการทนต่อความร้อนของยางวัลคาไนซ์ โดยพบว่ายางโบรโมปิวไทล์ที่วัลคาไนซ์จะมีการทนต่อความร้อนที่ดีกว่ายางธรรมชาติที่วัลคาไนซ์ ถึงแม้ว่ายางธรรมชาติที่วัลคาไนซ์จะมีพันธะการเชื่อมโยงมากกว่ายางโบรโมปิวไทล์เพราะการมีพันธะคู่ที่วงไวน์ แต่ยางโบรโมปิวไทล์ก็แสดงสมบัติการมีความอึดตัวในโครงสร้างที่สูงกว่าในยางธรรมชาติจึงทำให้การทนต่อความร้อนของยางโบรโมปิวไทล์สูงกว่ายางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีสมบัติการทนต่อความร้อนที่สูงกว่ายางธรรมชาติ และสูงขึ้นตามปริมาณของหมู่อีพอกไซด์ที่มีในยางธรรมชาติ เนื่องจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์จะแสดงการมีความอึดตัวของโซ่โมเลกุลและการมีความเป็นขั้วที่สูงกว่ายางธรรมชาติ ซึ่งเมื่อมีการวัลคาไนซ์อีพอกไซด์จะแตกออกเกิดพันธะเชื่อมโยงที่มีความแข็งแรงมาก ทำให้โซ่โมเลกุลขาดออกจากกันยากขึ้น จึงทำให้สมบัติการทนต่อความร้อนดีขึ้น

สำหรับยางแบบลดน้ำหนักวัลคาไนซ์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโบรโมปิวไทล์มีความทนต่อความร้อนกึ่งกลางระหว่างยางธรรมชาติกับยางโบรโมปิวไทล์และมีความทนต่อความร้อนสูงกว่ายางแบบลดน้ำหนัก สำหรับยางแบบลดน้ำหนักวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นตัวเชื่อมประสาน

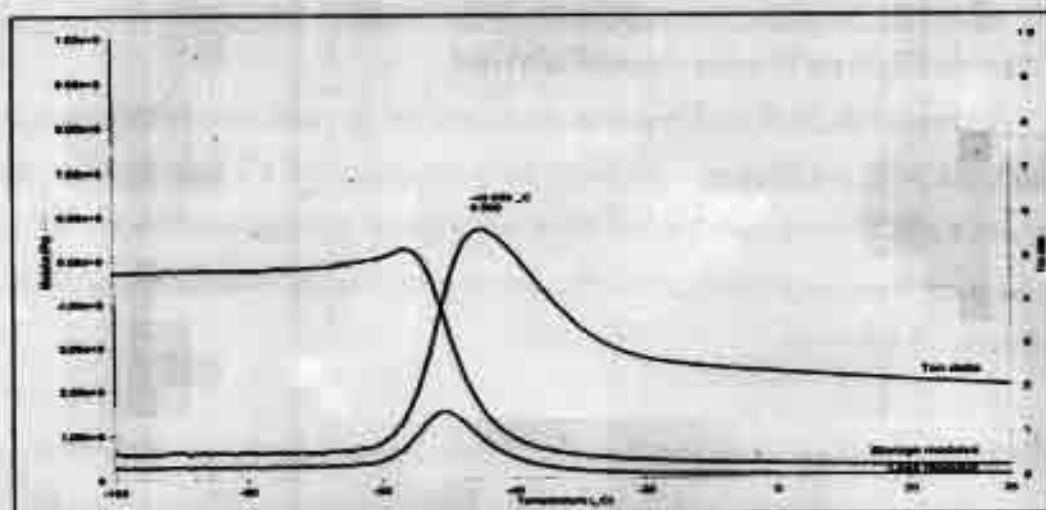
ผลให้ค่าความทนต่อความร้อนดีกว่ายางเบลดชนิดดิบ และมีความทนต่อความร้อนที่สูงกว่ายางเบลดที่ไม่ใส่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์และจะสูงขึ้นตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์

4.3.6 สมบัติเชิงพลวัตของยางเบลดวัลคาไนซ์

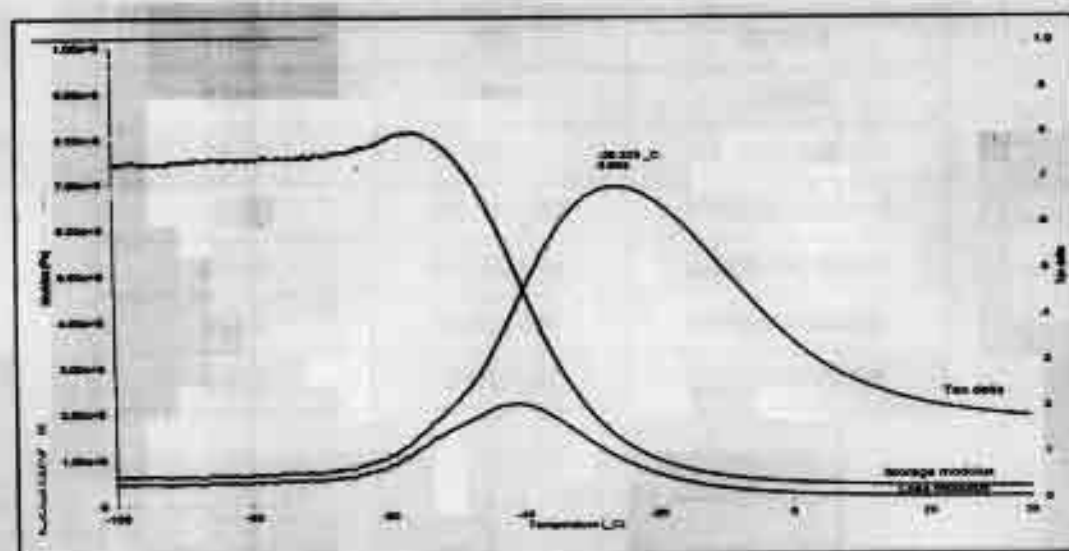
การทดสอบสมบัติเชิงพลวัตของยางเบลดวัลคาไนซ์ โดยจะทำการทดสอบที่อุณหภูมิช่วง -100°C ถึง 35°C ภายใต้บรรยากาศฮีเลียม อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ความถี่ 1 Hz ผลการทดสอบสมบัติเชิงพลวัตของยางเบลด คือ ค่ามอดูลัสสะสม (Storage modulus, E'), ค่ามอดูลัสสูญเสีย (Loss modulus, E'') และแฟกเตอร์ของการสูญเสีย ($\tan \delta$) ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.60-4.68

ตารางที่ 4.11 ค่า $\tan \delta$ ของยางธรรมชาติ ยางโบรโมบิวไทล์ ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ ยางเบลดระหว่างยางธรรมชาติกับยางโบรโมบิวไทล์ และยางเบลดที่มียางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นตัวเชื่อมประสาน

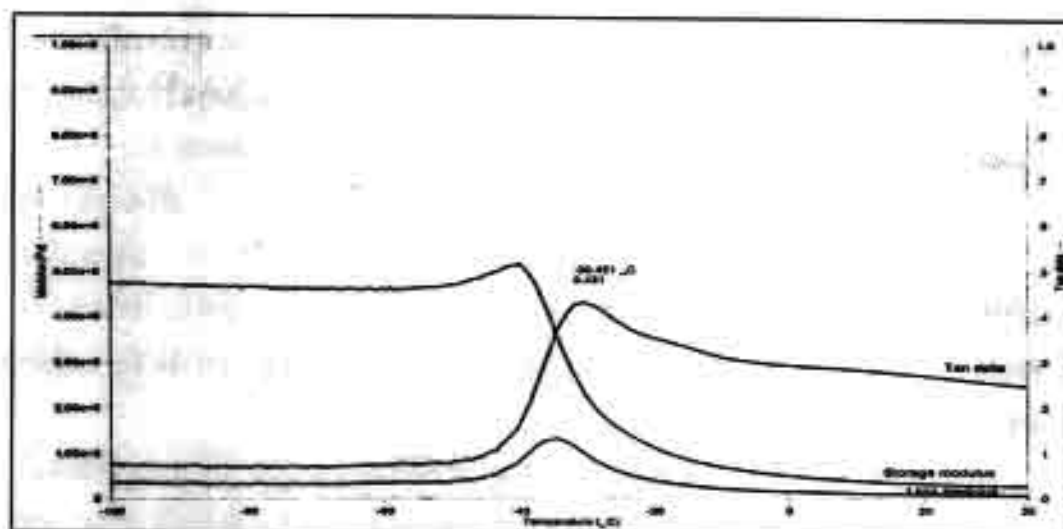
สูตรยาง	อัตราส่วน	$\tan \delta$
NR	100	0.566
BIIR	100	0.685
ENR25	100	0.431
ENR50	100	0.488
NR/BIIR	50/50	0.483
NR/BIIR/ENR25	47.5/47.5/5	0.421
NR/BIIR/ENR50	47.5/47.5/5	0.365
NR/BIIR/ENR25	45/45/10	0.478
NR/BIIR/ENR50	45/45/10	0.250



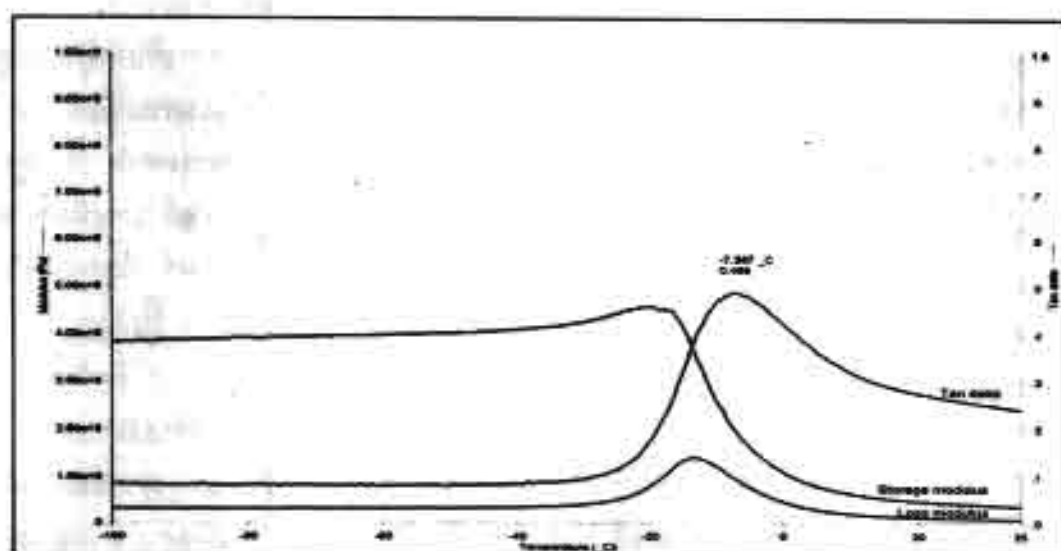
รูปที่ 4.60 DMA เทอร์โมแกรมของยาง NR



รูปที่ 4.61 DMA เทอร์โมแกรมของยาง BIIR



รูปที่ 4.62 DMA เทอร์โมแกรมของยาง ENR-25



รูปที่ 4.63 DMA เทอร์โมแกรมของยาง ENR-50

จากรูป 4.60-4.63 พบว่าค่ามอดูลัสสะสม (Storage modulus, E') มีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ทั้งอย่างเดี่ยวๆ และบางเบนด์จะมีลักษณะคล้ายกัน คือจะสามารถแบ่งเป็น 3 บริเวณ คือที่ช่วงแรกเป็นช่วงที่ยังมีลักษณะคล้ายแก้ว ช่วงที่สองเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าโมดูลัสสะสมจะลดลงอย่างรวดเร็วจะเป็นช่วงที่เรียกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนไปคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) และต่อมาเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่ามอดูลัสสะสมจะคงที่ จะเป็นช่วงของระนาบความเป็นยาง ค่ามอดูลัสสะสมจะมีความสัมพันธ์กับการเก็บสะสมพลังงานไว้ในรูปพลังงานศักย์ (potential energy) และจะปลดปล่อยออกมาในลักษณะของการผิดรูปแบบคาบ

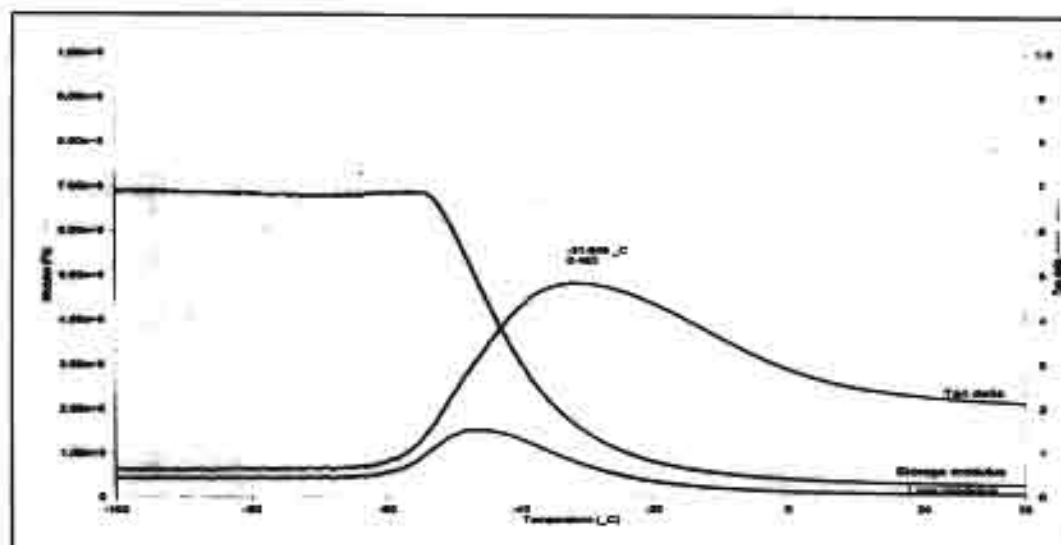
จากรูปที่ 4.60 และ 4.61 พบว่าค่ามอดูลัสสะสมของยางโบรโมบิวไทล์มีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติ และช่วง T_g ใกล้เคียงกัน เนื่องจากโครงสร้างของยางโบรโมบิวไทล์มีส่วนของพอลิไอโซบิวทิลีนที่เป็นระเบียบ ทำให้หมู่เมทิลสามารถเกิด interlock ทำให้โซ่โมเลกุลเคลื่อนไหวอย่างอิสระไม่ได้ (Booth et al., 1965) จึงทำให้ยางโบรโมบิวไทล์มีค่ามอดูลัสสะสมสูง อย่างไรก็ตามก็มีค่าที่สูงกว่ายางธรรมชาติไม่มากนัก

จากรูปที่ 4.62 และ 4.63 พบว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์ 25 มีค่ามอดูลัสสะสมใกล้เคียงกับยางธรรมชาติ และช่วง T_g สูงกว่ายางธรรมชาติ ส่วนยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 50 จะมีค่ามอดูลัสสะสมต่ำลงและช่วง T_g สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 25

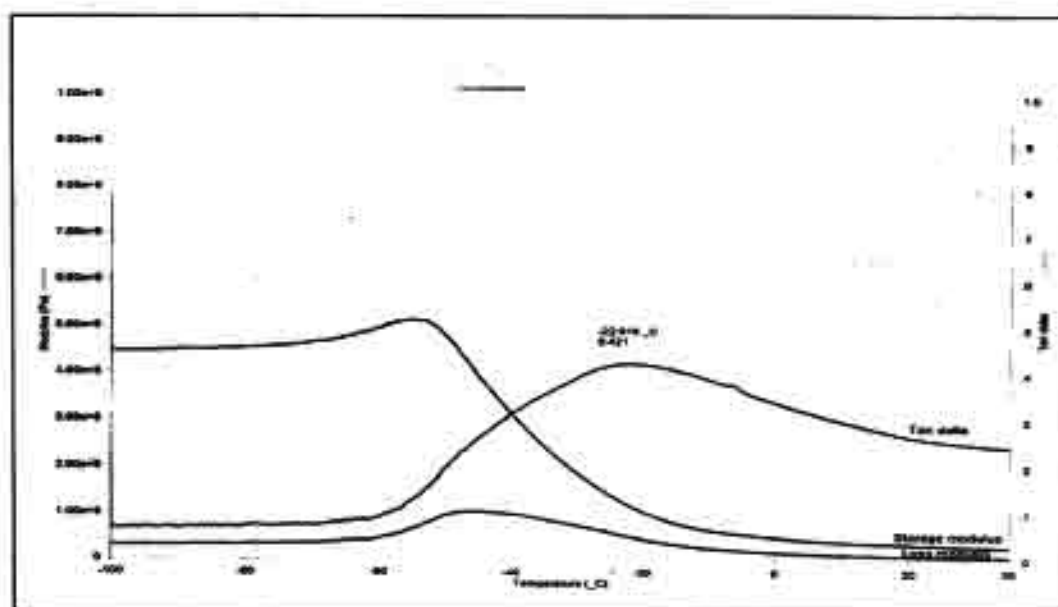
สำหรับมอดูลัสสูญเสีย (Loss modulus, E'') ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับการซึมหาย (dissipation) ของพลังงานไปเป็นความร้อนเมื่อผิดรูป จากรูปที่ 4.60-4.63 พบว่าค่ามอดูลัสสูญเสียของยางโบรโมบิวไทล์จะมีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติ ในขณะที่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 25 และ 50 มีค่ามอดูลัสสูญเสียใกล้เคียงกับยางธรรมชาติ เนื่องจากยางธรรมชาติมีพันธะคู่ที่ว่องไวมากกว่ายางโบรโมบิวไทล์ที่มีความอิ่มตัวสูง ทำให้ยางธรรมชาติเกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างโซ่โมเลกุลมากกว่ายางโบรโมบิวไทล์ โซ่โมเลกุลจึงเคลื่อนไหวผ่านกันได้ยากขึ้น เป็นเหตุให้มอดูลัสสูญเสียมีค่าต่ำ หรือมีพลังงานที่สูญเสียไปในรูปของความร้อนขณะที่มีแรงเค้นกระทำต่ำ ขณะที่ยางโบรโมบิวไทล์อาจจะเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างโซ่โมเลกุลน้อยกว่ายางธรรมชาติ การดูดซับพลังงานที่สูง หรือการมีสมบัติการหน่วง (damping) ที่ดีของยางโบรโมบิวไทล์ อาจเนื่องมาจากการเกิด interaction ของหมู่เมทิลตามแนวสายโซ่โมเลกุลของยางโบรโมบิวไทล์ ซึ่งทำให้โซ่หลักของโมเลกุลทำหน้าที่เป็นโซ่หลักเดี่ยว และมีการ interaction ระหว่างโซ่โมเลกุลอื่นน้อย ทำให้โซ่โมเลกุลเคลื่อนผ่านกันและกันง่ายขึ้น (Booth et al., 1965) เป็นเหตุให้มอดูลัสสูญเสียมีค่าสูง (ซึ่งเป็นสมบัติเอกลักษณ์ของยางโบรโมบิวไทล์) สำหรับยางธรรมชาติอีพอกไซด์จะมีค่ามอดูลัสสูญเสียต่ำกว่ายางธรรมชาติอาจเนื่องมาจากการมีโครงสร้างที่มีขั้วสูงยางจึงมีแรงดึงดูดระหว่างกันได้ดีทำให้โซ่โมเลกุลสามารถเคลื่อนผ่านกันได้ยากมากยิ่งขึ้น เป็นเหตุให้ค่าโมดูลัสสูญเสียมีค่าต่ำ

สำหรับเฟกเตอร์การสูญเสีย (Loss tangent, $\tan \delta$) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างยางมอดูลัสสูญเสียต่อมอดูลัสสะสม จากรูปที่ 4.60-4.63 พบว่ายางโบรโมบิวไทล์มีค่า $\tan \delta$ สูงที่สุด รองลงมาคือยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติอีพอกไซด์ ตามลำดับ โดยที่ยางธรรมชาติอีพอก

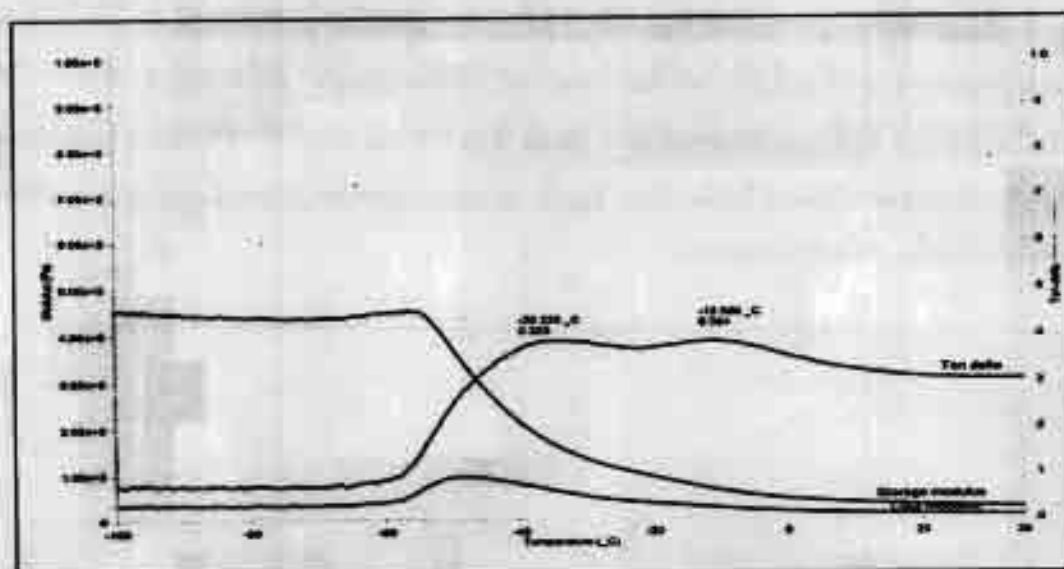
ไซท์ 25 และ 50 มีค่า $Tan\delta$ ใกล้เคียงกัน เหตุที่ยางธรรมชาติมีค่า $Tan\delta$ ต่ำกว่ายางโพรไมบิวไทล์อาจเนื่องมาจากยางธรรมชาติเป็นยางไม่อิ่มตัวมีพันธะคู่ที่สามารถเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างโซ่โมเลกุลมากกว่ายางโพรไมบิวไทล์ที่มีโครงสร้างที่อิ่มตัวมากกว่า โซ่โมเลกุลยางธรรมชาติจึงเคลื่อนไหวได้น้อย ดังนั้นยางธรรมชาติมีค่า $Tan\delta$ ต่ำกว่ายางโพรไมบิวไทล์ซึ่งมีการ damping ที่ดี สำหรับยางธรรมชาติอีพอกไซด์จะมีค่า $Tan\delta$ ต่ำกว่ายางธรรมชาติอาจเนื่องมาจากการมีโครงสร้างที่มีขั้วที่ยังไม่เข้าใจชัดเจนมากนัก



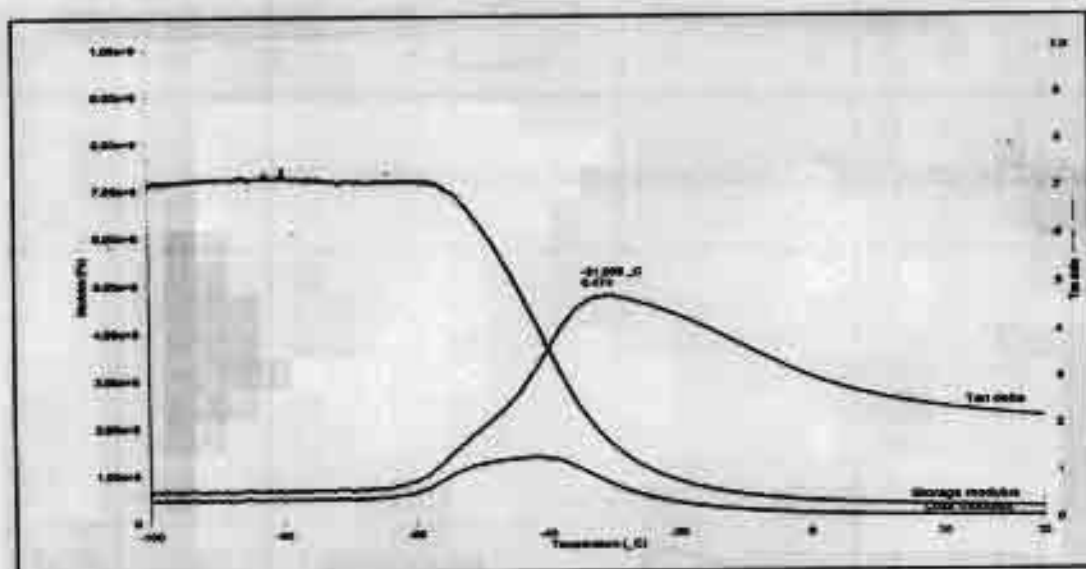
รูปที่ 4.64 DMA เทอร์โมแกรมของยางเบลนด์ระหว่าง NR/BIIR : 50/50



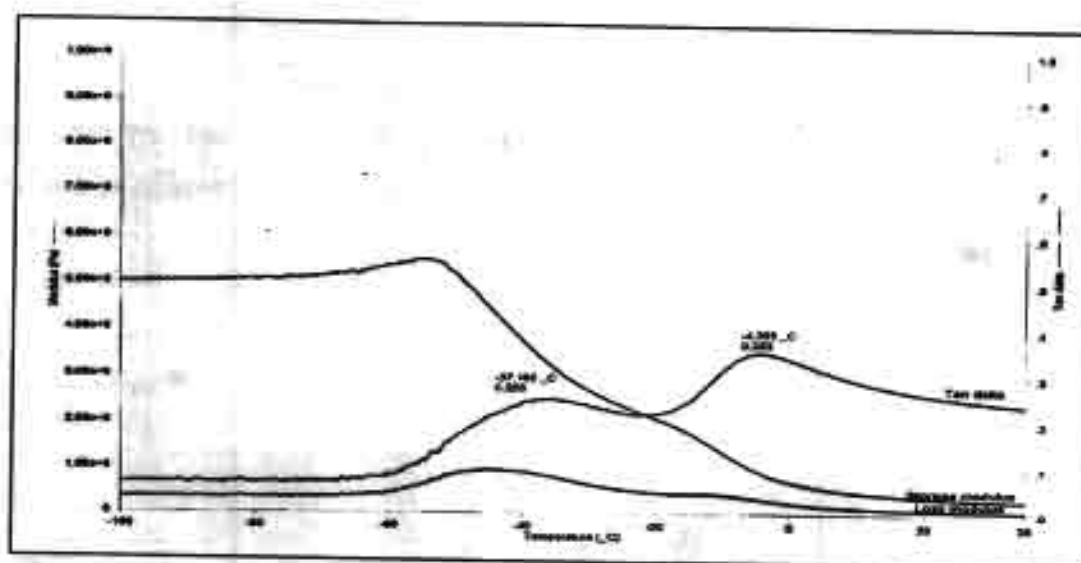
รูปที่ 4.65 DMA เทอร์โมแกรมของยางเบลนด์ระหว่าง NR/BIIR/ENR25 : 47.5/47.5/5



รูปที่ 4.66 DMA เทอร์โมแกรมของยางของยางเบลนด์ระหว่าง NR/BIIR/ENR50 : 47.5/47.5/5



รูปที่ 4.67 DMA เทอร์โมแกรมของยางเบลนด์ระหว่าง NR/BIIR/ENR25 : 45/47/10



รูปที่ 4.68 DMA เทอร์โมแกรมของยางเบลนค์ระหว่าง NR/BIIR/ENR50 : 45/45/10

จากรูปที่ 4.64 ซึ่งเป็นยางเบลนค์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโพรโมบิวไทล์อัตราส่วน 50/50 จะพบว่าค่ามอดูลัสสะสมอยู่ระหว่างยางเดี่ยว และช่วง T_g ไม่เปลี่ยนแปลง, ค่ามอดูลัสสูญเสียจะอยู่ระหว่างยางเดี่ยว ส่วนค่า $Tan\delta$ จะมีค่าที่ต่ำกว่ายางเดี่ยวๆ อาจจะแสดงถึงความเข้ากันได้ของเฟสยางไม่ดีมากนัก

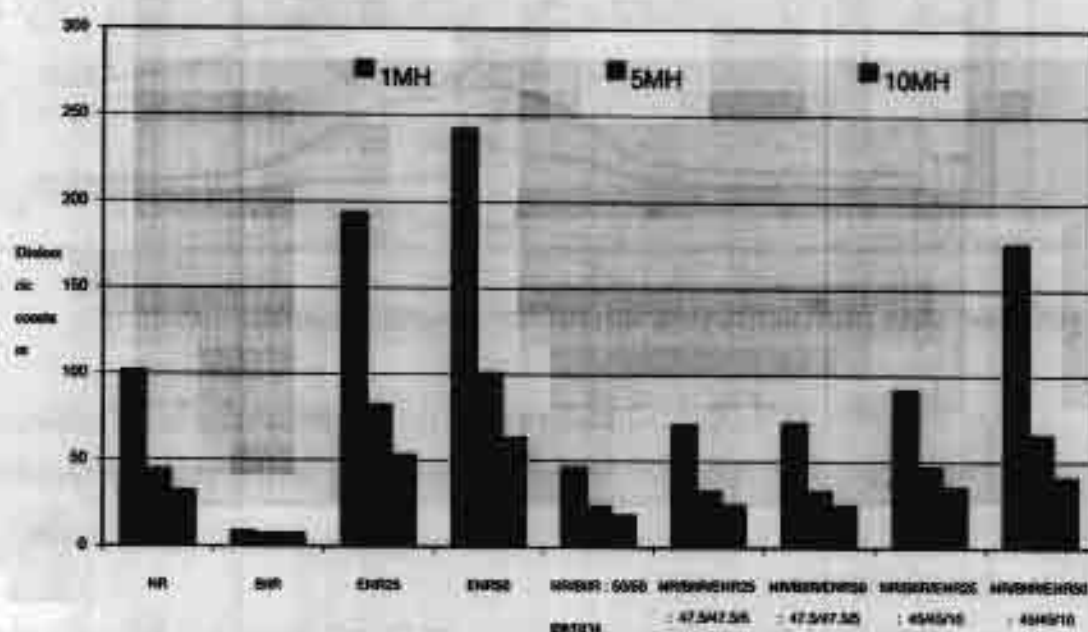
จากรูปที่ 4.65 และ 4.66 ซึ่งเป็นยางเบลนค์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโพรโมบิวไทล์ที่มีการใส่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 25 และ 50 เป็นตัวเชื่อมประสานในปริมาณ 5 phr พบว่าค่ามอดูลัสสะสมมีค่าที่ต่ำลงและช่วง T_g ไม่เปลี่ยนแปลง, ค่ามอดูลัสสูญเสียจะอยู่ระหว่างยางเดี่ยว และค่า $Tan\delta$ จะมีค่าที่ต่ำลงเล็กน้อยแต่ในขณะที่ยางเบลนค์ที่ใส่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 50 จะมีค่า $Tan\delta$ ต่ำลงมาก

จากรูปที่ 4.67 และ 4.68 ซึ่งเป็นยางเบลนค์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโพรโมบิวไทล์ที่มีการใส่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 25 และ 50 เป็นตัวเชื่อมประสานในปริมาณ 10 phr พบว่าค่ามอดูลัสสะสมของยางเบลนค์ที่ใส่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 25 มีค่าที่สูงมากและสูงกว่ายางเบลนค์ที่ไม่ใส่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เล็กน้อย และช่วง T_g ไม่เปลี่ยนแปลง อาจจะแสดงให้เห็นถึงอัตราส่วนยางที่สามารถเกิด interaction หรือสามารถเกิดพันธะระหว่างเฟสของยางมากขึ้นทำให้โซ่โมเลกุลเคลื่อนไหวได้ยากและมีความแข็งแรงมากขึ้น จึงเป็นเหตุให้มอดูลัสสะสมมีค่าสูง ส่วนยางเบลนค์ที่ใส่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 50 มีค่ามอดูลัสสะสมต่ำลงกว่ายางเบลนค์ที่ไม่ใส่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์แต่จะมีค่าสูงกว่ายางเบลนค์ที่ใส่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ปริมาณ 5 phr เล็กน้อย, ค่ามอดูลัสสูญเสียจะอยู่ระหว่างยางเดี่ยว และค่า $Tan\delta$ จะมีค่าที่ต่ำลงเล็กน้อยแต่ในขณะที่ยางเบลนค์ที่ใส่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 50 จะมีค่า $Tan\delta$ ต่ำลงมาก ผลที่ได้จากการทดลองยังสรุปความสัมพันธ์ได้ไม่ชัดเจน อาจต้องมีการทดลองซ้ำที่สภาวะการทดสอบที่กว้างขึ้น

4.4 ศึกษาสมบัติไดอิเล็กตริกของยาง

4.4.1 ยางเบลนด์ยางธรรมชาติกับยางโพรโมบิวไทล์

ทำการทดสอบยางเบลนด์วัลคาไนซ์จากหัวข้อ 3.3.3.5 โดยการทดสอบภายใต้ความถี่ 1, 5 และ 10 MHz ซึ่งผลการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของยางเบลนด์คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant) ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.69



รูปที่ 4.69 ค่า Dielectric constant ของยางสูตรต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.69 พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant) ของยางทุกสูตรจะมีค่าต่ำลงเมื่อเพิ่มความถี่ โดยที่ยางโพรโมบิวไทล์จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำสุด ถัดมาคือยางธรรมชาติ, ยางธรรมชาติอิพอกไซค์ 25 และยางธรรมชาติอิพอกไซค์ 50 มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ตามลำดับ สำหรับยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโพรโมบิวไทล์จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกอยู่ระหว่างยางเดี่ยวทั้งสอง ในขณะที่ยางเบลนด์ที่มียางธรรมชาติอิพอกไซค์เป็นตัวเชื่อมประสานจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเป็นแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณหมู่อิพอกไซค์และอัตราส่วนยางที่เพิ่มขึ้น

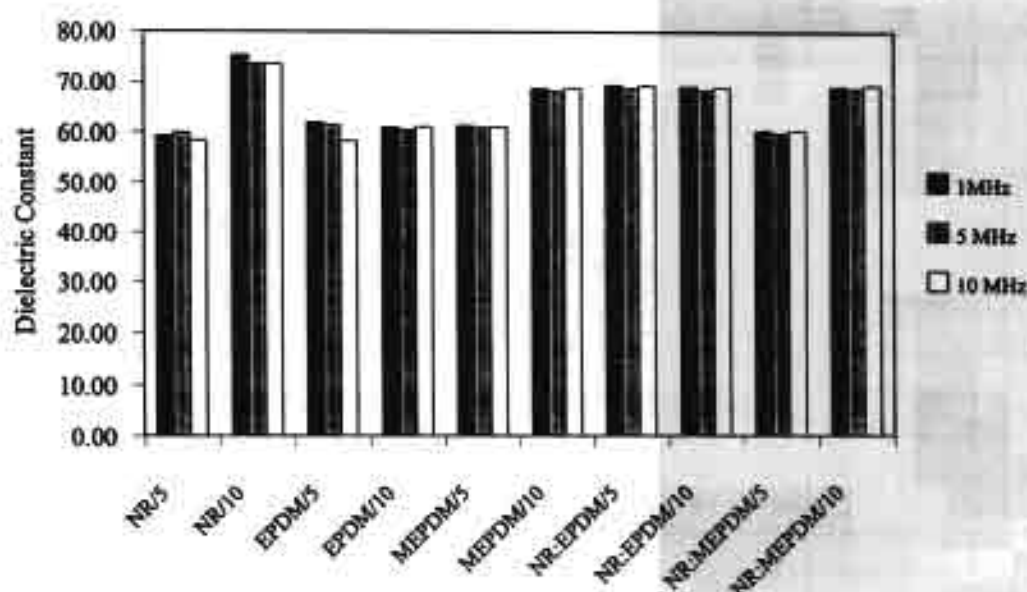
สมบัติทางไดอิเล็กตริกของยางบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดกลืนประจุหรือกระแสไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไป มีผลทำให้ยางเกิดการสะสมพลังงานแล้วเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนนั่นคือทำให้ยางมีอุณหภูมิสูงขึ้น (อาจจะสังเกตได้จากอุณหภูมิของยางที่ผ่านการอบด้วยคลื่นไมโครเวฟ) นอกจากนี้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกยังเกี่ยวข้องกับขอบเขตหรือระดับของการเชื่อมโยง โดยที่ระดับการเชื่อมโยงสูงจำกัดความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเพราะฉะนั้นจึงมีผลค่าคงที่ไดอิเล็กตริกดังนั้นสมบัติทางไดอิเล็กตริกอาจจะใช้ในการตรวจสอบขอบเขตของการ cure ของยางได้เช่นกัน

สมบัติทางไดอิเล็กตริกจึงเป็นสมบัติเฉพาะตัวของยางแต่ละชนิด การที่โบรโมปิวไทล์มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำ จึงมีการดูดกลืนประจุไฟฟ้าต่ำหรืออาจเนื่องจากการมีพันธะคู่ย่อยจึงทำให้มีปริมาณการเชื่อมโยงของโซ่โมเลกุลต่ำ ขณะที่ยางธรรมชาติมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงขึ้นเนื่องจากมีพันธะคู่ที่ว่องไวมากกว่าปริมาณการเชื่อมโยงของโซ่โมเลกุลมากขึ้น สำหรับยางธรรมชาติอีพอกไซค์ 25 และยางธรรมชาติอีพอกไซค์ 50 มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงขึ้น ตามลำดับ อาจเนื่องมาจากสมบัติความเป็นขั้วสูงที่แข็งแรงและปริมาณการเชื่อมโยงที่สูงกว่ายางโบรโมปิวไทล์ มีผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของยางธรรมชาติอีพอกไซค์มีค่าสูง

จะสังเกตได้ว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของยางวัลคาไนซ์แล้วอาจนำไปใช้บอกถึงความสามารถในการดูดซับคลื่นไมโครเวฟของยางคอมปาวด์ได้ไม่ผิดนัก เนื่องจากพันธะเชื่อมขวางในโครงสร้างของยางมีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริก การวัดค่านี้ของยางคอมปาวด์โดยตรงน่าจะให้ผลดีกว่า แต่มีปัญหาในการเตรียมผิวชิ้นตัวอย่างให้เรียบ

4.4.2 ยางเบลนด์ยางธรรมชาติกับยางอีพีดีเอ็ม

ผสมยางตามสูตรดังตารางที่ 3.10 นำไปอัดแก้วโดยใช้แก้ว tensile แล้วนำไปทดสอบหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ได้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกดังรูปที่ 4.70



รูปที่ 4.70 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของยางชนิดต่างๆ ความถี่ในการทดสอบเท่ากับ 1, 5 และ 10 MHz

จากรูปที่ 4.70 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของยางชนิดต่างๆ ที่มีเซมาค่าปริมาณ 5 และ 10 phr พบว่ายางทุกสูตรมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเซมาค่า เมื่อเปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของยางสูตรที่มีเซมาค่าเท่ากันพบว่ามีความใกล้เคียงกันที่ทุกความถี่การ

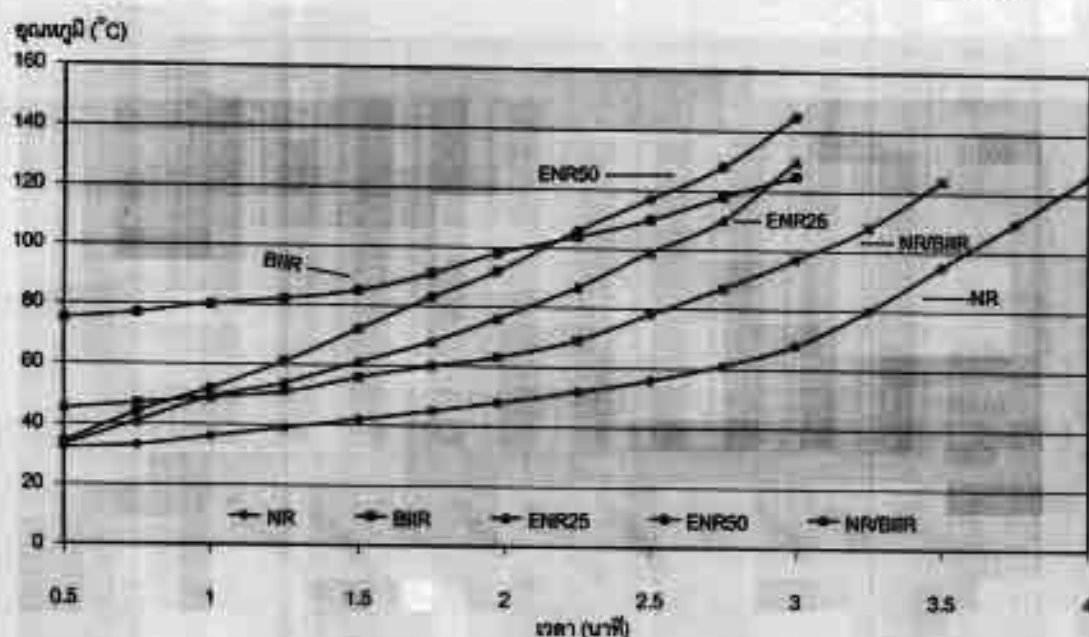
ทดสอบ สำหรับยางสูตรที่ใช้เซมาค่า 10 phr ยางธรรมชาติ มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมากที่สุดรองลงมาคือ ยางมาลีเอตอีพีดีเอ็ม ยางเบลนค์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางมาลีเอตอีพีดีเอ็ม ยางเบลนค์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางอีพีดีเอ็ม และยางอีพีดีเอ็มตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากค่าคงที่ไดอิเล็กตริกแสดงความเป็นขั้วของยางโดยจะเห็นได้ว่ายางมาลีเอตอีพีดีเอ็มมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมากเนื่องจากการมีหมู่มาลีอิกแอนไฮไดรด์เช่นเดียวกับยางเบลนค์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางมาลีเอตอีพีดีเอ็ม ในกรณีของยางธรรมชาติจะมีปริมาณการเชื่อมโยงมากที่สุดเนื่องจากเป็นยางที่มีพันธะคู่มากที่สุดทำให้ได้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมากที่สุด เมื่อแปรความถี่ในการทดสอบหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกพบว่าค่าที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนัก

4.5 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของยางเบลนค์ที่ผ่านการอบด้วยคลื่นไมโครเวฟ

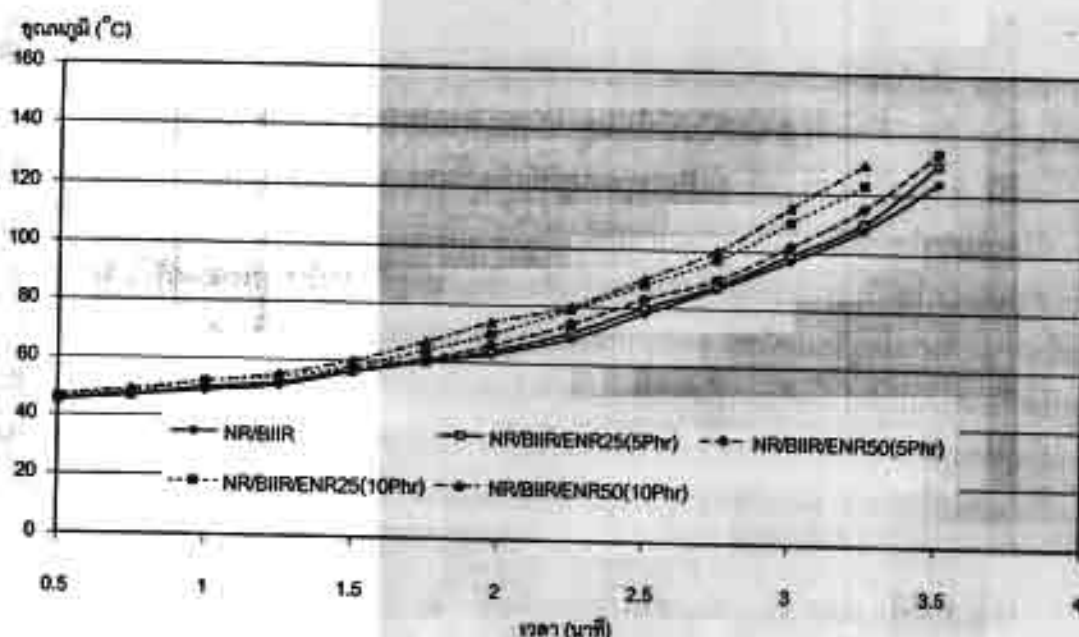
4.5.1 ยางเบลนค์ยางธรรมชาติกับยางโบรโมบิวไทล์

ทำการทดสอบยางคอมปาวด์เบลนค์จากหัวข้อ 3.3.5 ซึ่งการศึกษาสมบัติของยางเบลนค์ที่ผ่านการอบด้วยคลื่นไมโครเวฟนี้ ศึกษาถึงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของยางเบลนค์ที่ผ่านการอบที่เวลาต่าง ๆ ของยางที่ผ่านการอบด้วยคลื่นไมโครเวฟ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.71 -4.72

จากการทดลองเลือกใช้ระดับพลังงานของคลื่นต่ำ (Low power) และใช้เวลาเพียงสั้น ๆ เพราะสังเกตเห็นว่าเมื่อทำการอบยางยางจะร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วมากและจะไหม้ในที่สุด



รูปที่ 4.71 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของยางธรรมชาติ ยางโบรโมบิวไทล์ ยางธรรมชาติอีพอกไซด์และยางเบลนค์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโบรโมบิวไทล์ ที่ผ่านการอบด้วยคลื่นไมโครเวฟ ด้วยระยะเวลาต่าง ๆ



รูปที่ 4.72 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของยางคอมปาว์เบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโบรโมบิวไทล์ที่มีและไม่มียางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นตัวเชื่อมประสาน ที่ผ่านการอบด้วยไมโครเวฟ ด้วยระยะเวลาต่างๆ

จากรูปที่ 4.71 พบว่ายางคอมปาว์ด์ทุกสูตรที่ผ่านการอบด้วยคลื่นไมโครเวฟจะมีอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นตามเวลาการอบโดยใช้เวลาอบเพียงไม่กี่นาที เพราะคลื่นไมโครเวฟสามารถแทรกไปยังสายโซ่โมเลกุลของยางอย่างทั่วถึงกันอย่างรวดเร็วโดยที่คลื่นจะไปกระทบกับโซ่โมเลกุลของยางทำให้เกิดความร้อนแล้วจึงเกิดการสั่นของสายโซ่โมเลกุลจนกระทั่งมีการเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน และในสูตรยางที่ใช้มีการใส่เซมาค่าถึง 40 phr ซึ่งเซมาค่าเป็นสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพมีความเป็นขี้ผึ้งสามารถเป็นตัวนำและเร่งให้คลื่นสามารถส่งผ่านไปยังโซ่โมเลกุลยางได้ดี ยางจึงมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จากการทดลองพบว่ายางโบรโมบิวไทล์มีความร้อนเกิดขึ้นสูงกว่ายางธรรมชาติและเกิดการไหม้เพียงเวลา 3 นาที ในขณะที่ยางธรรมชาติมีความร้อนเกิดขึ้นต่ำกว่า และเกิดการไหม้ใช้เวลา ประมาณ 4 นาที ทั้งนี้เนื่องมาจากยางโบรโมบิวไทล์มีความเป็นขี้ผึ้งและสามารถดูดซับพลังงาน (absorption) ได้ดีกว่ายางธรรมชาติจึงทำให้เป็นตัวนำให้คลื่นสามารถส่งผ่านไปได้ดีจึงเกิดความร้อนสูงกว่ายางธรรมชาติ สำหรับยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโบรโมบิวไทล์พบว่ายางจะมีความร้อนสูงขึ้นกว่ายางธรรมชาติเดี่ยว ๆ เพราะยางโบรโมบิวไทล์ที่เบลนด์เข้าไปจะส่วนที่ทำให้ยางมีความร้อนเก็บสะสมได้ดีขึ้น

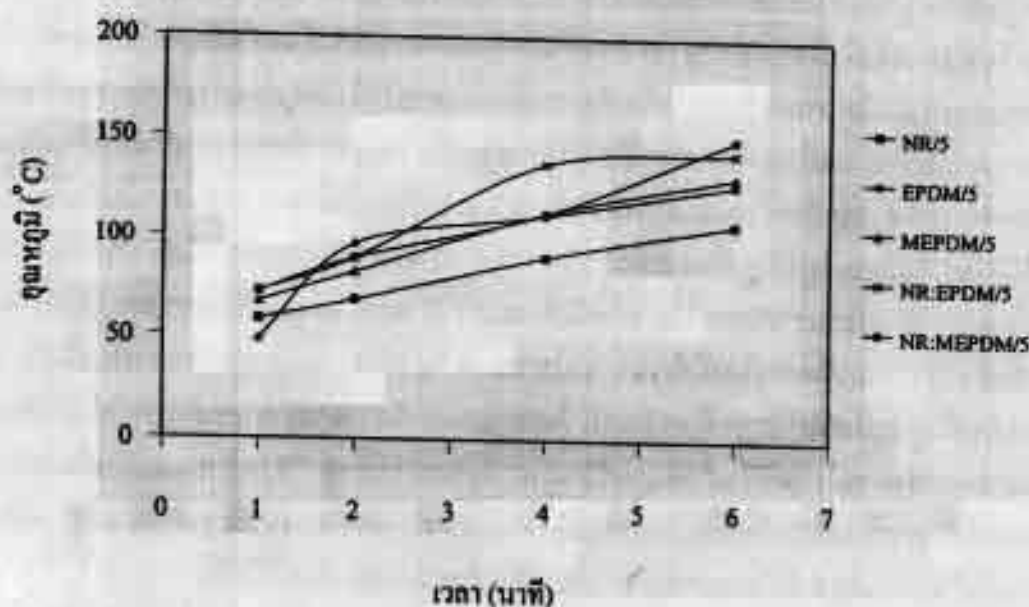
สำหรับยางธรรมชาติอีพอกไซด์จะพบว่า เมื่ออบยางที่เพียงเวลา 30 วินาที ยางจะมีความร้อนใกล้เคียงกับยางธรรมชาติมาก แต่เมื่ออบนานขึ้นยางธรรมชาติอีพอกไซด์จะมีความร้อนที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วกว่ายางธรรมชาติ และจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่มีในยางธรรมชาติ แสดงให้เห็นว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์มีสภาพความเป็นขี้ผึ้งจึงทำให้เป็นตัวนำให้คลื่น

สามารถส่งผ่านไปได้อีกจึงเกิดความร้อนอย่างรวดเร็วและสูงกว่ายางธรรมชาติ และยางธรรมชาติอิพอกไซด์ 50 ที่อบนานกว่า 2 นาทีมีแนวโน้มสูงกว่ายางโบรโมบิวไทล์

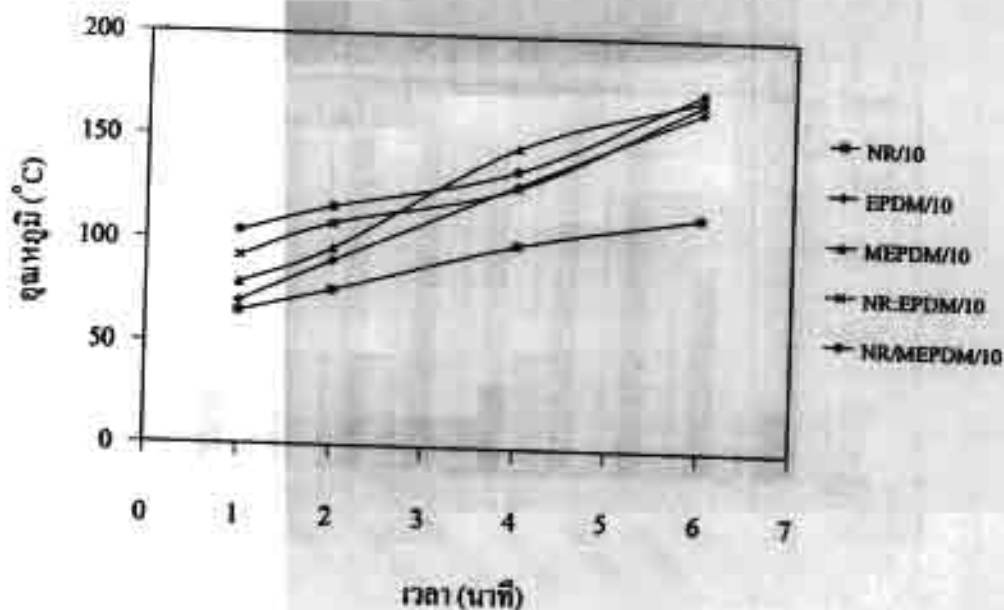
จากรูปที่ 4.72 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางโบรโมบิวไทล์ที่มีการใส่ยางธรรมชาติอิพอกไซด์เป็นตัวเชื่อมประสาน พบว่าการใส่ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ในยางเบลนด์ทำให้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสูงกว่ายางเบลนด์ที่ไม่ใส่ และจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู่อิพอกไซด์ นอกจากนี้พบว่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางธรรมชาติอิพอกไซด์ในยางเบลนด์ นั่นคือการใส่ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ปริมาณ 10 phr มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสูงกว่าการใส่ปริมาณ 5 phr แสดงว่าการใส่ยางธรรมชาติอิพอกไซด์จะเพิ่มความเปราะในยางธรรมชาติ ส่งผลให้ของอุณหภูมิของยางเบลนด์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

4.5.2 ยางเบลนด์ยางธรรมชาติกับยางอีพิดีเอ็ม

นำยางคอมปาวด์สูตรดังตารางที่ 3.10 มาเอ็กซ์ทรูด แล้วอบด้วยเครื่องไมโครเวฟ เวลา 1, 2, 4, และ 6 นาที วัดอุณหภูมิของยางทันทีที่ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.73-4.74



รูปที่ 4.73 ผลของเวลาที่ใช้อบยางด้วยเครื่องไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน HIGH ต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของยางที่มีเมมาต้า 5 phr ขนาดตาย 6.5 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.74 ผลของเวลาที่ใช้อบยางด้วยเครื่องไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน HIGH ต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของยางที่มีส่วนผสม 10 phr ขนาดตาย 6.5 มิลลิเมตร

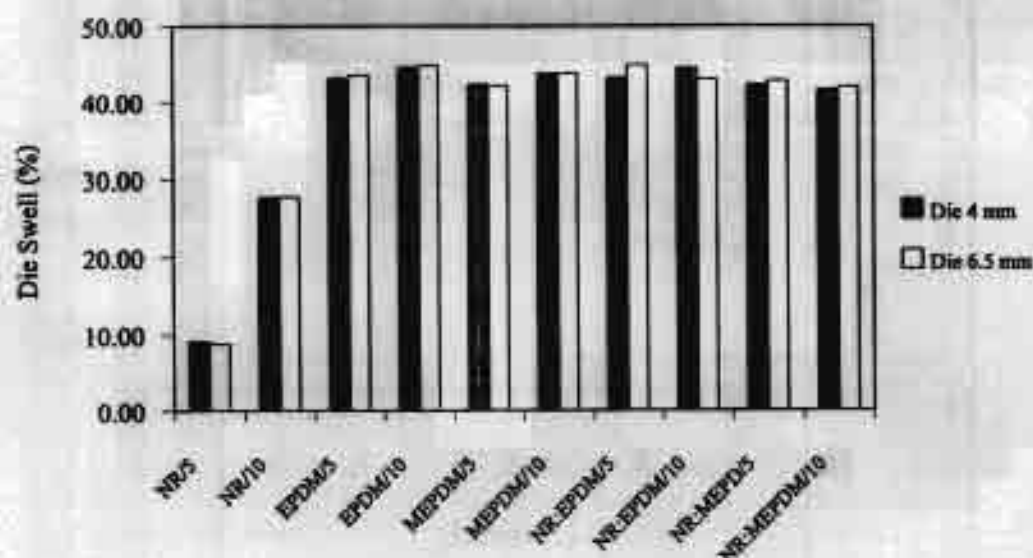
จากรูปที่ 4.73 และรูปที่ 4.74 พบว่ายางเบลนด์ของยางมาลีเอตอีพีดีเอ็มและยางมาลีเอตอีพีดีเอ็ม มีอุณหภูมิสูงที่สุดเนื่องจากความเป็นขั้วของยาง ปริมาณส่วนผสมมากขึ้นทำให้ยางมีอุณหภูมิสูงขึ้น และพบว่าน้ำหนักยางที่ใช้อบมากกว่า (ตายขนาดใหญ่กว่า) จะทำให้ยางเกิดความร้อนมากกว่า

4.6 การเตรียมโฟมยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางมาลีเอตอีพีดีเอ็ม และสมบัติของโฟมยางที่ได้

การทดลองนี้เป็นการเตรียมโฟมยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางอีพีดีเอ็ม โดยในการอบใช้เครื่องไมโครเวฟร่วมกับตู้อบอากาศร้อน การเตรียมและสมบัติของโฟมที่ได้มีรายละเอียดดังนี้

4.6.1 Die swell ของยางคอมปาวด์

ผสมยางตามสูตรในตารางที่ 3.10 นำยางไปเอ็กซ์ทรูดโดยใช้ตายขนาด 4.0 มิลลิเมตร และ 6.5 มิลลิเมตร คำนวณ Die Swell (%) ได้ผลรูปที่ 4.75



รูปที่ 4.75 ค่า Die Swell (%) ของยางสูตรต่างๆ จากเครื่องเอ็กซ์ทรูดแบบมือนยางร้อน

จากรูปที่ 4.75 พบว่าลักษณะยางที่เอ็กซ์ทรูดได้มีผิวเรียบทั้งหมดโดยเฉพาะยางธรรมชาติ ยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางมาลีเอตอีพีดีเอ็ม ยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางอีพีดีเอ็มมีผิวเรียบเป็นมัน ยางมาลีเอตอีพีดีเอ็มและยางอีพีดีเอ็มมีผิวแตกเป็นเส้นตามขวางที่บางตำแหน่ง การแปรรูปยางมาลีเอตอีพีดีเอ็มทำได้ยากต้องใช้อุณหภูมิในการแปรรูปสูงเนื่องจากที่อุณหภูมิเท่ากันยางมาลีเอตอีพีดีเอ็มไหลได้ยากที่สุดเพราะเมื่อโมเลกุลยางมาลีเอตอีพีดีเอ็มได้รับความร้อนทำให้โมเลกุลไหลไม่สม่ำเสมอเนื่องจากบางส่วนเกิดการเชื่อมโยงจากการกราฟต์ผิวจึงเรียบได้ยากกว่า เมื่อนำยางมาหา die swell (%) พบว่า die swell (%) ของยางธรรมชาติมีค่าน้อยกว่า die swell (%) ของยางเบลนด์ ยางอีพีดีเอ็ม และยางมาลีเอตอีพีดีเอ็ม เมื่อใช้เขม่าดำเพิ่มขึ้นทำให้ die swell (%) เพิ่มขึ้น ขนาดสายไม่มีผลต่อ die swell (%) ยางธรรมชาติมี die swell (%) น้อยกว่ายางสูตรอื่นมาก ยาง อีพีดีเอ็ม ยางมาลีเอตอีพีดีเอ็มและยางเบลนด์มี die swell (%) ใกล้เคียงกัน

4.6.2 ความหนืดมูนและลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์

ผสมยางตามสูตรในตารางที่ 3.10 คัดยางบางส่วนไปหาค่าความหนืดมูน (ML (1+4) 120 °C) และลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.12

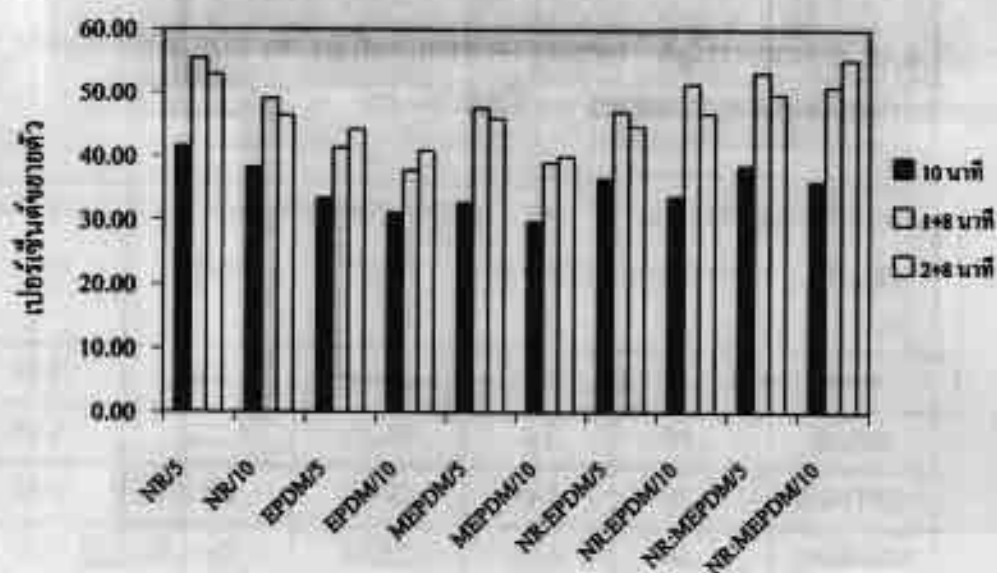
ตารางที่ 4.12 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางทดสอบโดยใช้เครื่อง ODR 2000 ที่อุณหภูมิ 180 °C และค่าความหนืดมูนนีของยางคอมปาวด์ที่ใช้ทำโฟมยาง

สูตรยาง/ปริมาณ เคมี	Mooney Viscosity	Min. Torque (lb- in)	Max. Torque (lb-in)	Scorch Time (min)	Cure Time (min)
NR/5	11	1.61	23.08	0.63	1.24
NR/10	14	1.8	25.38	0.62	1.19
EPDM/5	33	4.43	20.94	0.77	2.37
EPDM/10	36	4.72	21.79	0.69	2.37
MEPDM/5	42	5.46	37.6	0.96	4.19
MEPDM/10	44	4.86	37.79	0.79	3.81
NR:EPDM/5	24	3.44	20.78	1.13	1.85
NR:EPDM/10	27	4.23	22.43	0.7	2.01
NR:MEPDM/5	28	3.58	32.24	0.95	4.1
NR:MEPDM/10	30	3.69	33.43	0.96	4.39

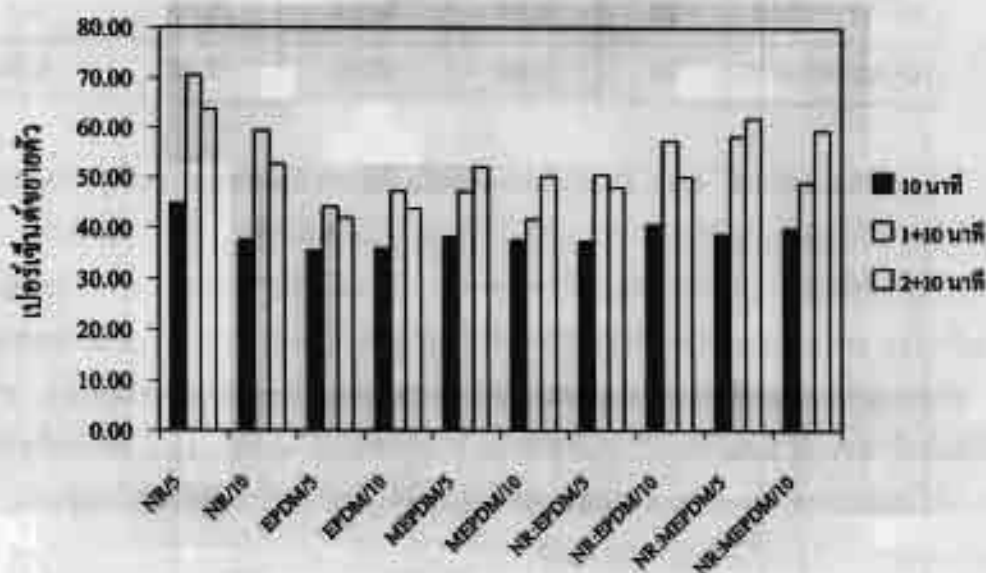
จากตารางที่ 4.12 ยางมาลีเอคอีพีดีเอ็มมีค่าความหนืดมูนนีสูงที่สุด รองลงมาคือยางอีพีดีเอ็ม ยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางมาลีเอคอีพีดีเอ็ม ยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางอีพีดีเอ็ม และยางธรรมชาติ ตามลำดับ เมื่อเพิ่มปริมาณเคมีค่าความหนืดมูนนีเพิ่มขึ้นเล็กน้อย scorch time ของยางธรรมชาติสั้นที่สุด scorch time ของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางมาลีเอคอีพีดีเอ็มสั้นกว่ายางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางอีพีดีเอ็ม ยางมาลีเอคอีพีดีเอ็มมี scorch time สั้นกว่ายางอีพีดีเอ็ม ยางทุกชนิดมี scorch time ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเคมีค่าในสูตรยาง cure time ของยางมาลีเอคอีพีดีเอ็มมากกว่ายางอีพีดีเอ็มเช่นเดียวกับยางเบลนด์ของยางทั้งสองชนิดกับยางธรรมชาติ

4.6.3 การหาเปอร์เซ็นต์ขยายตัวของโฟมยาง

ผสมยางสูตรโฟมดังตารางที่ 3.10 โดยเติมสารฟูปริมาณ 15 phr ในแต่ละสูตรเอ็กทรา แล้วนำยางไปอบด้วยตู้อบอากาศร้อนและอบด้วยเครื่องไมโครเวฟร่วมกับตู้อบอากาศร้อน วัดเปอร์เซ็นต์ขยายตัวของยาง ผลของการอบยางด้วยเครื่องไมโครเวฟ 2 นาที ร่วมกับตู้อบอากาศร้อน แสดงดังรูปที่ 4.76-4.77

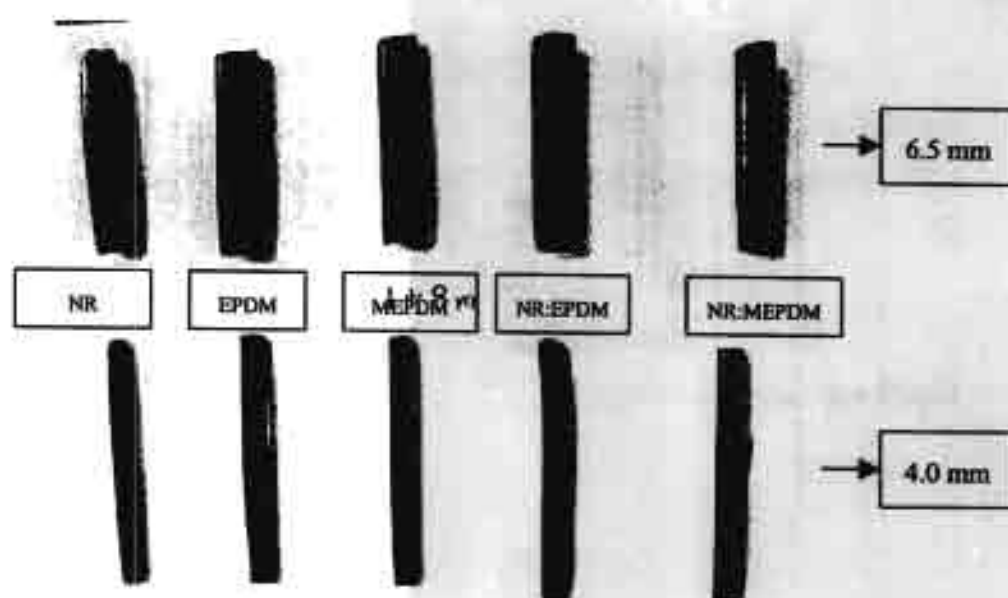


รูปที่ 4.76 เปอร์เซนต์ขยาดตัวของโฟมยางที่อบโดยใช้ตู้อบอากาศร้อน อบด้วยเครื่องไมโครเวฟ 1 นาทีร่วมกับตู้อบอากาศร้อน และอบด้วยเครื่องไมโครเวฟ 2 นาทีร่วมกับตู้อบอากาศร้อน ที่เวลาอบใกล้เคียงกัน ใช้ด้าย 4.0 มิลลิเมตร

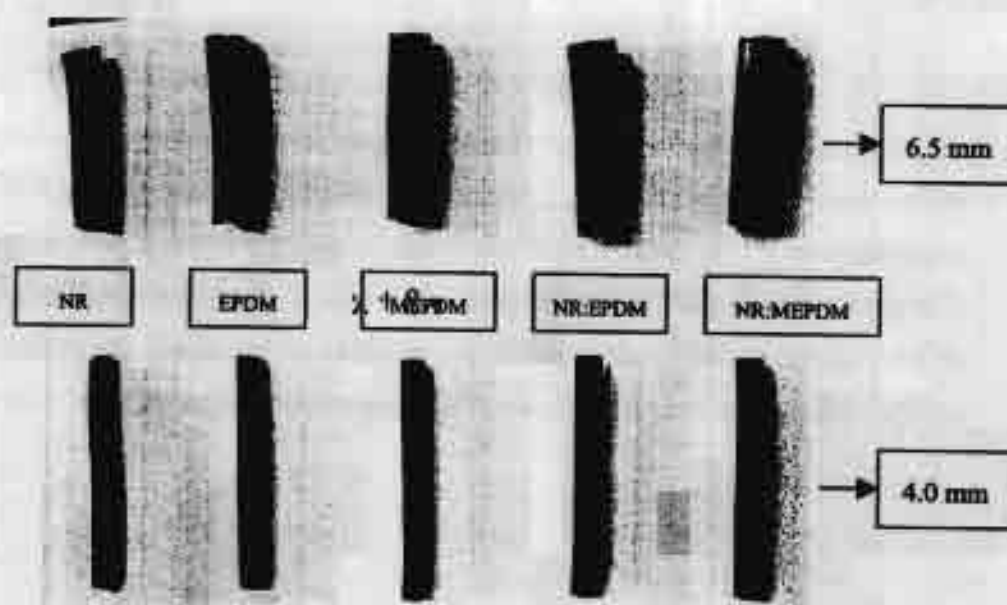


รูปที่ 4.77 เปอร์เซนต์ขยาดตัวของโฟมยางที่อบโดยใช้ตู้อบอากาศร้อน อบด้วยเครื่องไมโครเวฟ 1 นาทีร่วมกับตู้อบอากาศร้อน และอบด้วยเครื่องไมโครเวฟ 2 นาทีร่วมกับตู้อบอากาศร้อน ที่เวลาอบใกล้เคียงกัน ใช้ด้าย 6.5 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.76 และรูปที่ 4.77 แสดงเปอร์เซ็นต์ขยายตัวของยางที่ใช้เวลาอบใกล้เคียงกัน พบว่าเปอร์เซ็นต์ขยายตัวของยางขึ้นอยู่กับความหนืดของยาง ยางที่ให้เปอร์เซ็นต์ขยายตัวสูงสุดคือ ยางธรรมชาติรองลงมาคือ ยางเบลนด์ ยางอีพดีเอ็ม และยางมาลีเอคอีพดีเอ็มตามลำดับ พบว่ายางสูตรเดียวกัน การอบโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับตู้อบอากาศร้อน จะทำให้เปอร์เซ็นต์ขยายตัวมากกว่าการอบโดยใช้ตู้อบอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากการอบด้วยไมโครเวฟก่อนจะทำให้ยางเกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว ความหนืดของยางจะลดลง และสารเคมีบางส่วนจะถูกกระตุ้นให้พร้อมที่จะเกิดปฏิกิริยาเมื่อนำเข้าอบด้วยตู้อบอากาศร้อนต่อทำให้ยางขยายตัวได้ง่ายขึ้น



รูปที่ 4.78 ลักษณะโฟมยางชนิดต่างๆ อบโดยใช้เครื่องไมโครเวฟ 1 นาที่ร่วมกับตู้อบอากาศร้อน 8 นาที่



รูปที่ 4.79 ลักษณะโฟมยางชนิดต่างๆ อบโดยใช้เครื่องไมโครเวฟ 2 นาทีร่วมกับตู้อบอากาศร้อน 8 นาที

จากรูปที่ 4.78 และ รูปที่ 4.79 แสดงโฟมยางชนิดต่างๆ ที่ใช้เวลาอบใกล้เคียงกันคืออบโดยใช้เครื่องไมโครเวฟ 1 นาทีร่วมกับตู้อบอากาศร้อน 8 นาที และอบโดยใช้เครื่องไมโครเวฟ 2 นาทีร่วมกับตู้อบอากาศร้อน 8 นาที ได้โฟมยางที่มีขนาดใกล้เคียงกัน โฟมยางเบลนด์จะมีผิวเรียบมัน

4.6.4 ความหนาแน่นของโฟมยาง

นำโฟมยางที่เตรียมได้มาหาความหนาแน่นโดยใช้วิธีในข้อ 3.3.5.4.2 ผลแสดงดังรูปที่ 4.80 และรูปที่ 4.81