

## บทที่ 4

### ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 สมบัติการไหลของยางดิบ

##### 4.1.1 ความหนืดมูนนี่ของยางดิบ

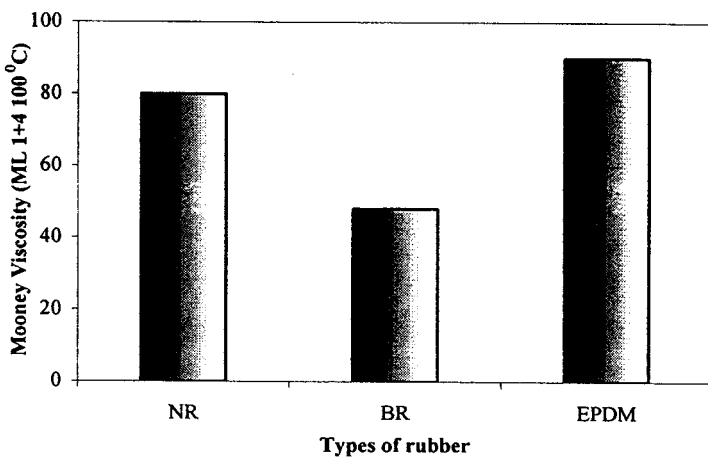
##### 4.1.1.1 ความหนืดมูนนี่ของยางแต่ละชนิด

ทดสอบความหนืดมูนนี่ของยางดิบ คือ ยางธรรมชาติ ยางบิวทาไดอีน และยางอีพีดีเอ็ม ตามวิธีการในหัวข้อที่ 3.3.1.1 โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 100 °C ด้วยเครื่องวัดความหนืดมูนนี่ ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความหนืดมูนนี่ของยางแต่ละชนิด

ชนิดของยาง	เกรด	ความหนืดมูนนี่ (ML 1+4, 100 °C)
NR	ADS	80
BR	BR 01	48
EPDM	Royalene 505	91

จากข้อมูลในตารางที่ 4.1 นำมาเขียนกราฟแสดงค่าความหนืดมูนนี่ของยางแต่ละชนิด ดังแสดงในรูปที่ 4.1

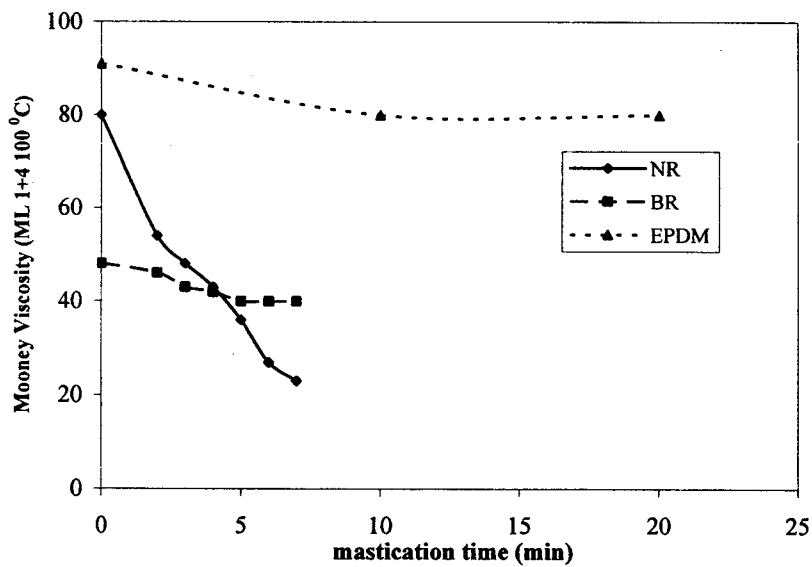


รูปที่ 4.1 ค่าความหนืดมูนนี่ของยางดิบ

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 พบว่า ยางอีพดีเอ็มที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่าความหนืดสูงกว่ายางธรรมชาติ และยางบิวทาไดอิน ตามลำดับ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการบดขย้างเพื่อลดน้ำหนักโมเลกุลก่อนการผสมสารเคมี โดยเฉพาะยางธรรมชาติ เพื่อให้มีความหนืดใกล้เคียงกับยางสังเคราะห์มากที่สุด เพื่อลดปัญหาความไม่เข้ากันทางความหนืดของการเบลนดระหว่างยางชนิดต่างๆ

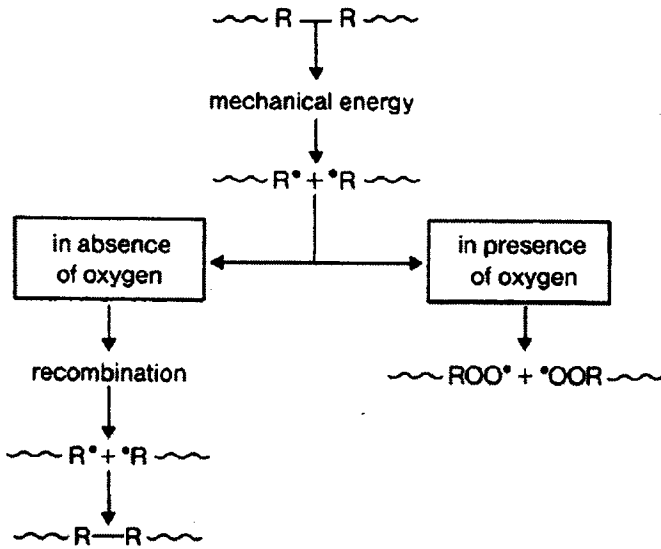
#### 4.1.1.2 อิทธิพลของระยะเวลาการบดต่อค่าความหนืดมูนนี่

นำยางธรรมชาติ ยางบิวทาไดอิน และยางอีพดีเอ็ม มาบดด้วยเครื่องบดผสมยางสองลูกกลิ้งที่เวลาต่างๆ เพื่อหาระยะเวลาการบดขย้างที่เหมาะสม ก่อนนำยางแต่ละชนิดมาทำการเบลนด ได้ผลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.2



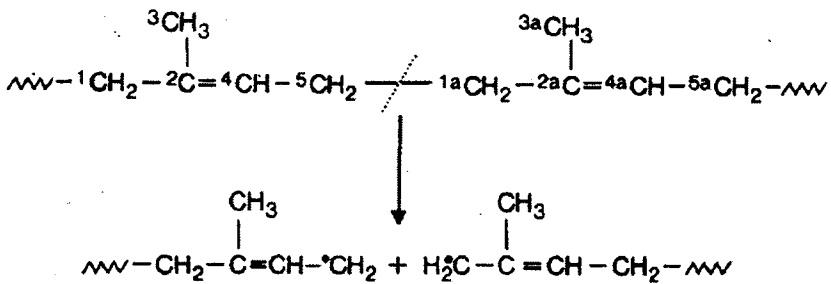
รูปที่ 4.2 ความหนืดมูนนี่ของยางดิบที่เวลาการบดต่างๆ

จากรูปที่ 4.2 พบว่า ยางธรรมชาติ ยางบิวทาไดอิน และยางอีพดีเอ็ม จะมีความหนืดลดลง แต่ยางธรรมชาติจะมีการตอบสนองต่อการบดมากกว่า กล่าวคือ เมื่อบดขย้างเป็นเวลานานขึ้น ยางธรรมชาติจะมีแนวโน้มของความหนืดมูนนี่ลดลง เนื่องจากขณะทำการบดขย้างด้วยเครื่องบดขย้างสองลูกกลิ้ง แรงเฉือนที่เกิดขึ้น ทำให้โมเลกุลของยางเกิดการขาดออกจากกัน ส่งผลให้ปลายสายโซ่เกิดเป็นอนุมูลอิสระ การมีสารรับอนุมูลอิสระ เช่น ออกซิเจน โมเลกุลของยางจะขาดอย่างถาวร เนื่องจากออกซิเจนจะเข้าไปจับกับปลายสายโซ่ส่วนที่ขาด ทำให้โมเลกุลไม่สามารถรวมตัวกลับดังเดิมได้ ขนาดโมเลกุลของยางจึงเล็กลง ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.3 กลไกปฏิกิริยาการบดขาง (Fries and Pandit, 1981)

เนื่องจากยางธรรมชาติมีพันธะคู่สูง เมื่อได้รับแรงเฉือนขณะทำการบด ทำให้พันธะแตกออกจะเกิดอัลลิล (allyl) อนุมูลอิสระ 2 ตัว และทำให้พลังงานพันธะลดลง นอกจากนี้โมเลกุลของยางธรรมชาติมีหมู่เมทิลซึ่งส่งอิเล็กตรอนเข้าไปที่พันธะคู่ ทำให้อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นรับออกซิเจนได้ง่ายขึ้นอีกด้วย



รูปที่ 4.4 การแตกของพันธะขณะบดขางธรรมชาติ (Fries and Pandit, 1981)

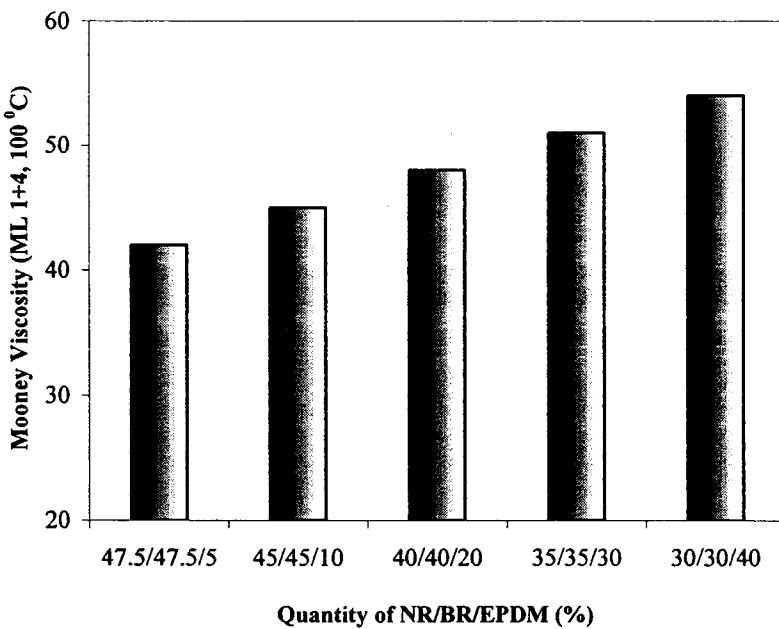
ยางบิวทาไดอีนนั้นเป็นยางสังเคราะห์ ซึ่งการสังเคราะห์นั้นได้ทำการควบคุมให้มีขนาดโมเลกุลตามต้องการ และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลแคบ แม้มีพันธะคู่มาก แต่เป็นพันธะคู่ที่ไม่ว่องไวต่ายางธรรมชาติ (Brydson, 1988) แม้บดเป็นเวลานาน ความหนืดของมันจึงมีแนวโน้มลดลงได้น้อยกว่า ส่วนยางอีพิดีเอ็มเป็นยางที่มีโครงสร้างอิมิตัว ไม่มีพันธะคู่อยู่ในสายโซ่หลักของโมเลกุล ทำให้เกิดการออกซิเดชันได้ยาก เนื่องจากพันธะคู่ที่มีอยู่ในโครงสร้างเป็นเพียงกิ่งก้านสาขาเท่านั้น

การเกิดออกซิเดชันจึงไม่มีผลต่อน้ำหนักโมเลกุลของยางมากนัก (Karpeles and Grossi, 2001) ดังนั้นการบดยางเป็นเวลานานนั้นความหนืดมูนิของยางจึงมีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

จากผลการทดลองข้างต้น พบว่า ต้องใช้เวลาในการบดยางธรรมชาติเป็นเวลา 4 นาที จึงจะมีค่าความหนืดมูนิใกล้เคียงกับยางบิวทาไดอิน เพื่อให้ยางเบลนค์ระหว่างยางทั้งสองชนิดสามารถเข้ากันได้ดีขึ้น ส่วนยางอีพีดีเอ็มมีค่าความหนืดมูนิสูงและไม่สามารถบดให้มีความหนืดลดลงได้ ดังนั้นในการเบลนค์ยางจึงเลือกใช้ยางธรรมชาติที่บดเป็นเวลา 4 นาที ก่อนทำการเบลนค์กับยางบิวทาไดอิน และยางอีพีดีเอ็ม ตามลำดับ

#### 4.1.1.3 ความหนืดมูนิของยางเบลนค์

เตรียมยางเบลนค์โดยการบดผสมยางธรรมชาติก่อนเป็นเวลา 4 นาที จากนั้นทำการเบลนค์กับยางบิวทาไดอิน และยางอีพีดีเอ็ม ตามวิธีการในหัวข้อที่ 3.3.1.1.2 ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ความหนืดของยางเบลนค์ NR/BR/EPDM ที่ปริมาณอีพีดีเอ็มต่างๆ

จากรูปที่ 4.5 พบว่า ค่าความหนืดของยางเบลนด์ NR/BR/EPDM มีค่าสูงขึ้นตามปริมาณของยางอีพดีเอ็ม แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของการเบลนด์มีอิทธิพลต่อค่าความหนืดมุนนี้ เพราะว่าเมื่ออัตราส่วนของยางอีพดีเอ็มเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าความหนืดของยางเบลนด์สูงขึ้นตามปริมาณของยางอีพดีเอ็ม กล่าวคือ ยางอีพดีเอ็มดิบ มีค่า ML (1+4 100 °C) เท่ากับ 91 ซึ่งมีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติและยางบิวทาไดอิน และเป็นยางที่ไม่มีพันธะคู่ในโครงสร้างหลัก ทำให้ไม่สามารถบดให้มีความหนืดลดลงได้

#### 4.1.2 สมบัติการไหลทดสอบด้วยเครื่องคาปิลลารีโอมิเตอร์

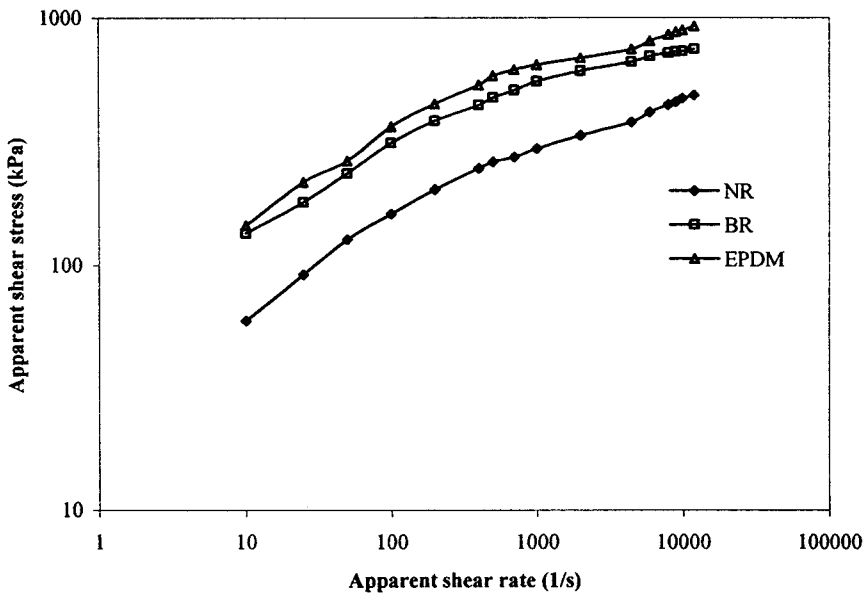
##### 4.1.2.1 ยางชนิดต่างๆ

ทดสอบเปรียบเทียบสมบัติการไหลของยางธรรมชาติ ยางบิวทาไดอิน และยางอีพดีเอ็ม ตามวิธีการทดลองหัวข้อที่ 3.3.1.2.1 โดยทำการศึกษาในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏ (Apparent shear stress) กับอัตราเฉือนปรากฏ (Apparent shear rate) หรือที่เรียกว่า เส้นโค้งการไหล (flow curve) ได้ผลการทดลองดังแสดงใน ตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏ ของยางแต่ละชนิด

Apparent shear rate (1/s)	Apparent shear stress (kPa)		
	NR	BR	EPDM
10	59.60	134.93	144.92
25	91.76	180.58	217.34
50	127.35	236.07	264.88
100	161.44	313.80	364.53
200	202.74	384.49	450.09
400	247.45	444.73	536.16
500	262.19	476.54	582.87
700	274.58	510.62	617.38
1000	297.28	553.48	644.87
2000	335.61	609.67	686.65
4500	379.95	662.37	746.20
6000	416.27	700.00	806.84
8000	446.66	721.00	854.92
9000	458.97	729.00	877.78
10000	473.33	732.00	893.08
12000	488.37	748.00	924.46

จากตารางที่ 4.2 นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนของยางแต่ละชนิดได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของยางแต่ละชนิด

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.6 พบว่าเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น ค่าความเค้นเฉือนของยางทุกชนิดมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาที่อัตราเฉือนเดียวกัน พบว่าค่าความเค้นเฉือนของยางอีพดีเอ็มมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ ยางบิวทาไดอินและยางธรรมชาติ ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากยางอีพดีเอ็มมีความทนต่อการเกิดออกซิเดชันมากกว่ายางธรรมชาติ ทำให้การบดไม่มีผลต่อโมเลกุลยางมากนัก ดังนั้นสายโซ่โมเลกุลที่ยาว มีแนวโน้มด้านการจัดเรียงตัวตามแนวแรงหรือหลุดออกจากกันได้ยากกว่า ในขณะที่ยางธรรมชาติมีข้อด้อยด้านความทนต่อการออกซิเดชัน เมื่อยางธรรมชาติถูกบดทำให้สายโซ่โมเลกุลยางขาดออกจากกัน ออกซิเจนจะเข้าไปจับที่ปลายของโมเลกุลส่วนที่ขาด โมเลกุลไม่สามารถรวมตัวกลับคืนเดิมได้ ขนาดโมเลกุลของยางจึงเล็กลง เมื่อได้รับแรงเฉือนสายโซ่โมเลกุลจะด้านการจัดเรียงตัวตามแนวแรงหรือหลุดจากกันได้ง่ายกว่ายางอีพดีเอ็มและยางบิวทาไดอิน ตามลำดับ ส่งผลให้ค่าความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่ายางบิวทาไดอิน และยางอีพดีเอ็มตามลำดับ นอกจากนี้ยางอีพดีเอ็มมีโครงสร้างที่เกาะกะ ซึ่งจะขัดขวางการไหลของสายโซ่โมเลกุล ส่งผลให้การเลื่อนไหลของสายโซ่เกิดขึ้นได้ยาก ทำให้ต้องใช้แรงในการดันผ่านคาปิลลารีสูงกว่าชนิดอื่น ส่วนยางบิวทาไดอินและยางธรรมชาติมีโครงสร้างโมเลกุลที่มีความสม่ำเสมอมากกว่าทำให้สามารถเกิดการเลื่อนไหลของสายโซ่ได้ดี แรงที่ใช้ในการดันผ่านคาปิลลารีจึงน้อยกว่ายางอีพดีเอ็ม ตามลำดับ

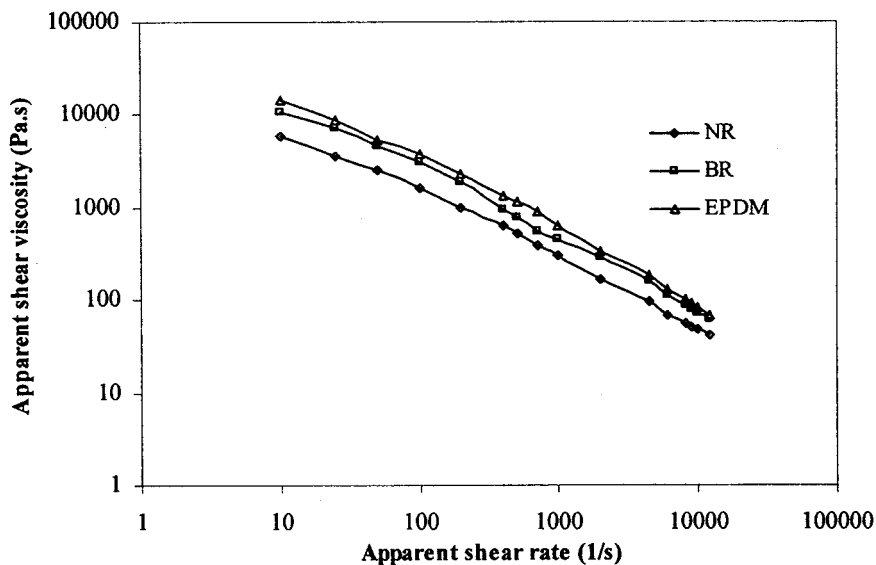
ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏ หรือ เส้นโค้งความหนืด (viscosity curve) ของยางธรรมชาติ ยางบิวทาไดอิน และยางอีพดีเอ็ม ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏ ของยางแต่ละชนิด

Apparent shear rate (1/s)	Apparent shear viscosity (Pa.s)		
	NR	BR	EPDM
10	5959.55	10735.87	14722.97
25	3670.27	7214.56	8828.40
50	2546.88	4715.49	5375.68
100	1614.40	3134.22	3696.04
200	1013.69	1920.11	2277.99
400	618.64	945.85	1352.85
500	524.38	766.79	1175.22
700	392.27	555.29	886.76
1000	297.28	438.43	645.71
2000	167.80	282.37	339.14
4500	94.99	159.34	179.76
6000	69.38	110.08	126.81
8000	55.83	85.67	98.74
9000	51.00	77.30	89.25
10000	47.33	71.17	80.89
12000	40.70	60.54	68.42

จากตารางที่ 4.3 นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของยางแต่ละชนิด ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.7





รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของยางแต่ละชนิด

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.7 พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราเฉือนปรากฏ ทำให้ค่าความหนืดเฉือนปรากฏของยางทุกชนิดมีค่าลดลง ซึ่งแสดงว่ายางมีพฤติกรรมการไหลแบบความหนืดเฉือนลดลงตามอัตราเฉือน (shear thinning behavior) และเมื่อพิจารณาที่อัตราเฉือนเดียวกัน พบว่าค่าความหนืดเฉือนของยางอีพดีเอ็มมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือยางบิวทาไดอินและยางธรรมชาติ ตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายโดยใช้เหตุผลในทำนองเดียวกับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนในรูปที่ 4.6

#### 4.1.2.2 อิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ของยางชนิดต่างๆ

ทดสอบสมบัติการไหลของยางเบลนด์ ตามหัวข้อที่ 3.3.1.2.2 โดยทำการศึกษาในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (shear stress) กับอัตราเฉือน (shear rate) หรือที่เรียกว่าเส้นโค้งการไหล (flow curve) และความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏ (Apparent shear viscosity) กับอัตราเฉือน (shear rate)

##### 4.1.2.2.1 สมบัติการไหลของยาง NR/BR/EPDM

ทำการทดสอบสมบัติการไหลของยางเบลนด์จากหัวข้อที่ 3.3.1.1.2 โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนที่อัตราเฉือนต่างๆ ของยางเบลนด์ระหว่าง ยางธรรมชาติ/ยางบิวทาไดอิน/ยางอีพดีเอ็ม ที่อัตราส่วนต่างๆ คือ 50/50/0, 47.5/47.5/5, 45/45/10, 40/40/20, 35/35/30,

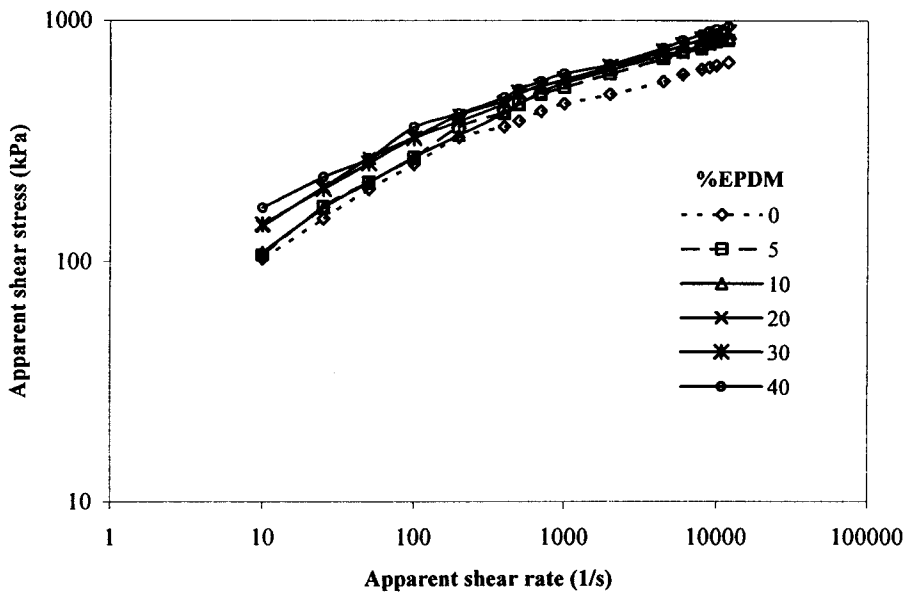
30/30/40 ตามลำดับ ทดสอบด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบคาปิลลารีที่อุณหภูมิ 120 °C ที่ค่าอัตราการเฉือน ในช่วง 10-12,000 s<sup>-1</sup>

ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของยาง เบลนด์ NR/BR/EPDM ที่อัตราส่วนต่างๆ ได้ผลดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของยาง เบลนด์ NR/BR/EPDM เมื่อแปรปริมาณยางอีพดีเอ็ม 5, 10, 20, 30 และ 40%

Apparent shear rate(1/s)	Apparent shear stress (kPa)					
	0	5	10	20	30	40
10	102.59	106.23	109.31	140.24	143.05	167.14
25	150.69	169.15	167.04	203.46	200.04	224.76
50	199.47	214.16	212.98	267.94	256.30	269.21
100	253.57	270.27	271.40	328.68	325.16	361.50
200	326.76	361.66	334.38	404.50	382.28	412.62
400	362.32	417.32	412.95	463.41	452.28	479.79
500	382.91	452.62	449.25	496.13	502.69	519.79
700	419.49	493.29	503.82	541.32	532.08	559.33
1000	451.48	527.56	549.92	562.26	570.07	602.76
2000	494.22	600.97	623.86	642.64	643.75	658.34
4500	558.90	696.14	719.77	743.92	745.93	768.65
6000	597.68	736.43	751.19	785.50	791.44	826.48
8000	626.64	764.19	789.89	828.90	838.12	877.17
9000	638.75	797.76	809.76	846.27	853.66	902.51
10000	649.20	814.76	829.24	858.20	869.61	921.49
12000	669.76	828.16	845.20	891.46	895.14	944.85

จากตารางที่ 4.4 นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏ ได้ผลดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของยางเบลนด์ระหว่าง NR/BR/EPDM ที่อัตราส่วนต่างๆ

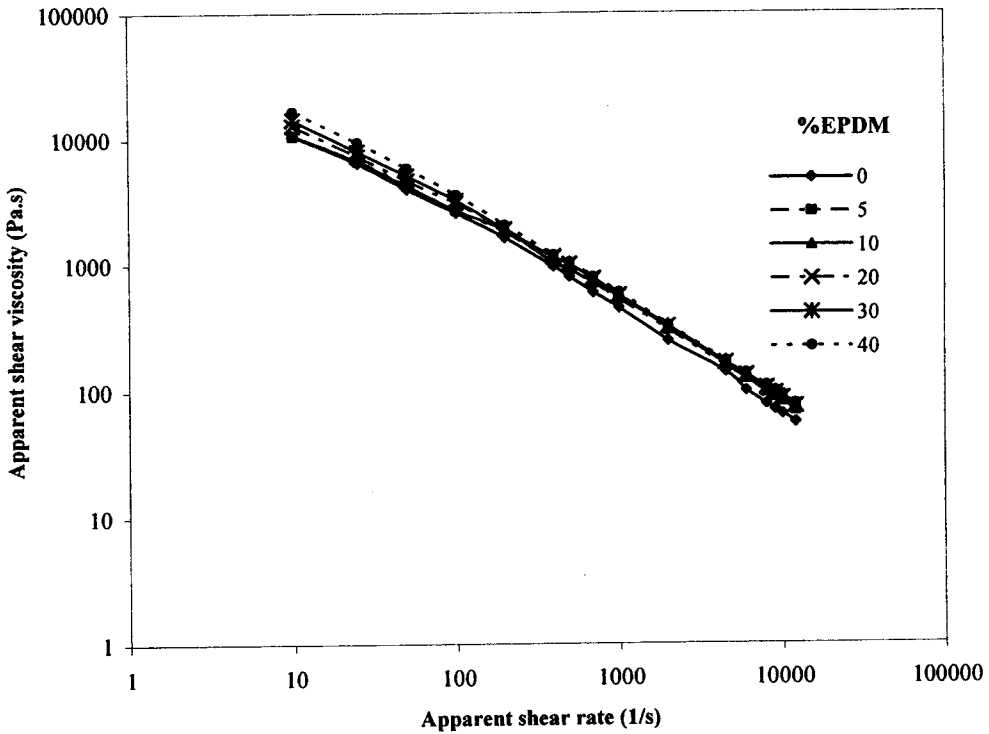
จากรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราเฉือนทำให้ค่าความเค้นเฉือนของยางเบลนด์ระหว่าง NR/BR/EPDM ทุกอัตราส่วนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราเฉือนเดียวกัน พบว่า ค่าความเค้นเฉือนที่อัตราส่วน 40% มีค่าสูงสุด ในขณะที่อัตราส่วนที่ไม่ใช่ยางอีพดีเอ็มมีค่าต่ำสุด ที่อัตราส่วนการเบลนด์อื่นๆ พบว่า ค่าความเค้นเฉือนจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางอีพดีเอ็มที่ใช้ในยางเบลนด์ แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของการเบลนด์มีอิทธิพลต่อค่าความเค้นเฉือน กล่าวคือ เมื่อยางอีพดีเอ็มในยางเบลนด์มีปริมาณมากขึ้นจะทำให้ค่าความเค้นเฉือนของยางเบลนด์สูงขึ้นตามสมบัติของยางอีพดีเอ็มซึ่งมีค่าความเค้นเฉือนสูง ทั้งนี้เนื่องจากยางอีพดีเอ็มมีโครงสร้างโมเลกุลที่เกาะกะ ดังนั้นทำให้แนวโน้มที่จะด้านการจัดเรียงตัวตามแนวแรงหรือหลุดออกจากกันได้ยาก ทำให้ยางเบลนด์ให้ค่าความเค้นเฉือนสูงขึ้นเมื่อปริมาณยางอีพดีเอ็มเพิ่มขึ้น

ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของยางเบลนด์ NR/BR/EPDM ที่อัตราส่วนต่างๆ ได้ผลดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของยางเบลนด์ NR/BR/EPDM เมื่อแปรปริมาณยางอีพดีเอ็ม 5, 10, 20, 30 และ 40%

Apparent shear rate (1/s)	Apparent shear viscosity (Pa.s)					
	0	5	10	20	30	40
10	10743.03	10624.4	10931.72	12825.20	14306.29	16716.13
25	6411.25	6766.46	6681.89	7338.76	8001.89	9490.60
50	3989.34	4283.00	4259.46	4658.61	5125.94	5884.09
100	2581.79	2702.74	2714.05	3086.80	3251.63	3615.00
200	1633.77	1808.31	1871.90	1922.46	1911.40	2063.09
400	957.61	1043.32	1032.39	1158.55	1130.72	1199.50
500	797.12	905.23	898.49	992.25	1005.35	1039.56
700	599.28	704.71	719.76	773.32	760.13	799.05
1000	451.49	527.57	549.93	562.26	570.08	602.77
2000	247.11	300.52	311.96	321.35	321.91	329.20
4500	139.72	154.70	159.94	165.32	165.76	170.81
6000	99.61	122.74	125.20	130.92	131.91	137.75
8000	78.33	95.52	98.73	103.61	104.76	109.64
9000	70.97	88.64	89.97	94.03	94.85	100.28
10000	64.92	81.48	82.92	85.82	86.96	92.15
12000	55.81	69.01	70.43	74.29	74.60	78.74

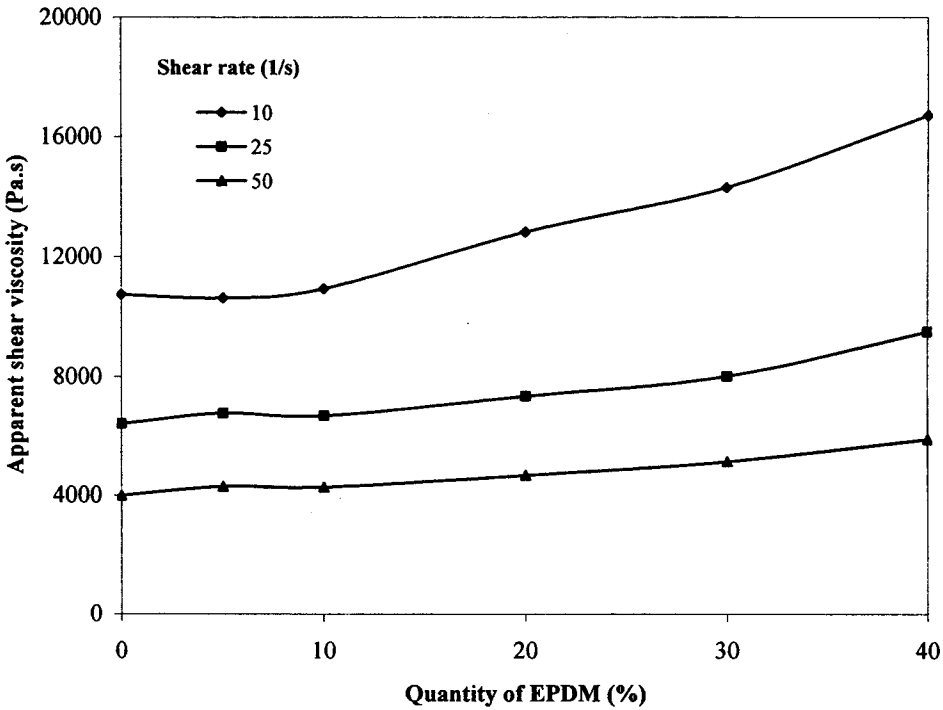
จากตารางที่ 4.5 นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏ ได้ผลดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของยางเบลนด์ระหว่าง NR/BR/EPDM ที่อัตราส่วนต่างๆ

จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.9 พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราเฉือนปรากฏ ทำให้ค่าความหนืดเฉือนปรากฏของยางทุกชนิดมีค่าลดลง ซึ่งแสดงว่ายางเบลนด์มีพฤติกรรมการไหลแบบความหนืดเฉือนลดลงตามอัตราเฉือน (shear thinning behavior) และเมื่อพิจารณาที่อัตราเฉือนเดียวกัน พบว่า ค่าความหนืดเฉือนของยางเบลนด์ที่มีปริมาณยางอีพดีเอ็ม 40% มีค่าสูงสุด ในขณะที่ไม่ใช้ยางอีพดีเอ็มมีค่าต่ำสุด ที่อัตราส่วนอื่นๆ ค่าความหนืดเฉือนจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางอีพดีเอ็มที่ใช้ในยางเบลนด์ ซึ่งสอดคล้องกับเส้นโค้งการไหลรูปที่ 4.8

จากตารางที่ 4.5 นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนกับปริมาณของยางอีพดีเอ็มที่อัตราส่วนต่างๆ ที่อัตราเฉือนปรากฏเดียวกัน ได้ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏกับปริมาณของยางอีพดีเอ็มที่อัตราเฉือน 10, 25 และ 50 s<sup>-1</sup>

จากรูปที่ 4.10 พบว่า ลักษณะเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏกับปริมาณของยางอีพดีเอ็มที่อัตราเฉือนต่างๆ พบว่า ความหนืดเฉือนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของยางอีพดีเอ็ม ซึ่งการเบลนด์ในลักษณะนี้สามารถอธิบายได้ด้วย log additive rule (Kundu and Tripathy, 1998) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้อธิบายความหนืดของพอลิเมอร์เบลนด์ว่ามีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสที่แข็งแรงหรืออ่อนแอ แสดงดังสมการที่ 4.1

$$\log \eta_B = \sum W_i \log \eta_i \quad (4.1)$$

โดย  $\eta_B$  คือ ความหนืดรวมของพอลิเมอร์เบลนด์

$\eta_i$  คือ ความหนืดของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในพอลิเมอร์เบลนด์

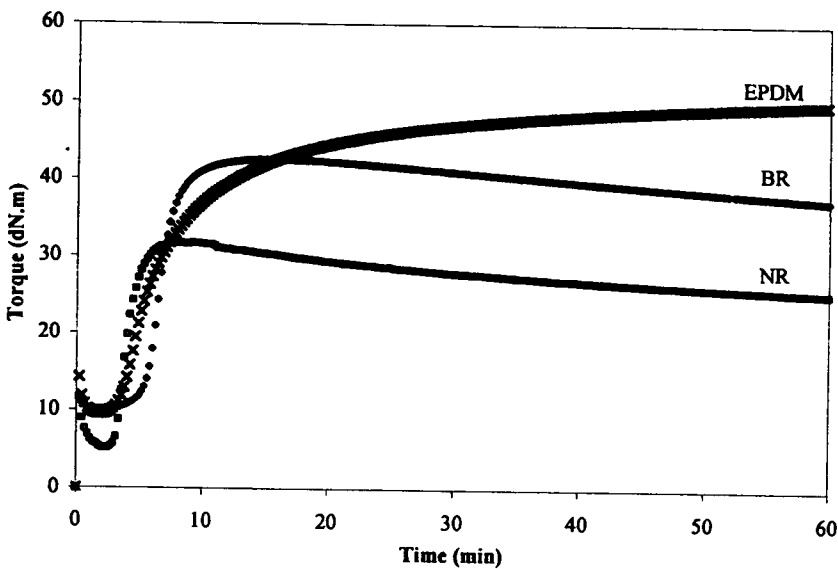
$W_i$  คือ อัตราส่วน โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในพอลิเมอร์เบลนด์ (weight fraction of the component)

จากสมการที่ 4.1 สามารถอธิบายได้ว่า ความหนืดของพอลิเมอร์เบลนด์ที่สามารถวัดได้มาจากพอลิเมอร์ 2 ชนิด นั้นคือเป็นผลรวมของความหนืดของยางธรรมชาติคูณด้วยอัตราส่วนโดยน้ำหนัก ความหนืดของยางบิวทาไดอีนคูณด้วยอัตราส่วน โดยน้ำหนัก และความหนืดของยางอีพทีเอ็มคูณด้วยอัตราส่วนโดยน้ำหนัก ซึ่งถ้าระดับความหนืดของพอลิเมอร์เบลนด์มีแนวโน้มเชิงบวก (Positive deviation blend, PDB) กล่าวคือ ได้กราฟความหนืดเดือนในลักษณะของระฆังคว่ำ แสดงว่าองค์ประกอบของพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ในการเบลนด์มีความเข้ากันได้ (miscible blend) แต่ถ้าพอลิเมอร์ที่นำมาเบลนด์มีความไม่เข้ากัน (immiscible blend) จะทำให้ความหนืดรวมของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้จาก log additive rule มีแนวโน้มเชิงลบ (Negative deviation blend, NDB) หรือระฆังหงาย ดังนั้นจากสมการ log additive rule พบว่า ระดับความหนืดของพอลิเมอร์เบลนด์มีแนวโน้มเชิงลบแสดงว่ายางเบลนด์ NR/BR/EPDM มีความไม่เข้ากัน (immiscible blend)

## 4.2 สมบัติการวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงกล

### 4.2.1 สมบัติการวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงกลของยางชนิดต่างๆ

นำยางคอมปาวด์ที่เตรียมได้จากหัวข้อที่ 3.3.2.1 ทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์ยางธรรมชาติ ยางบิวทาไดอีน และยางอีพทีเอ็ม ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบแผ่นหมุน (ODR 2000) ที่อุณหภูมิ 150 °C ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางชนิดต่างๆที่อุณหภูมิ 150 °C

จากรูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับเวลาของการวัลคาไนซ์ พบว่า ช่วงเริ่มต้นของปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Induction period) ของยางธรรมชาติ มีช่วงแคบกว่ายางบิวทาไดอีน และยางอีพิตีเอ็ม กล่าวคือมีความยาวประมาณ 3 นาที ส่วนบิวทาไดอีน และยางอีพิตีเอ็มจะมีความกว้างของช่วงนี้ประมาณ 4 นาที แสดงให้เห็นว่ายางบิวทาไดอีนและยางอีพิตีเอ็ม มีความปลอดภัยในการแปรรูป หรือยางไหลได้นานกว่ายางธรรมชาติ หลังจากนั้นเมื่ออัตราการเพิ่มความชันอย่างรวดเร็วเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล โดยยางธรรมชาติ มีความชันสูงกว่าการวัลคาไนซ์ยางบิวทาไดอีน และยางอีพิตีเอ็ม ตามลำดับ ซึ่งกราฟความสัมพันธ์ในช่วงนี้ สามารถบ่งบอกถึงอัตราการวัลคาไนซ์ของยาง โดยอัตราการวัลคาไนซ์จะแปรผันตรงตามความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับเวลา จะเห็นว่ายางธรรมชาติมีอัตราการวัลคาไนซ์ที่เร็วกว่ายางบิวทาไดอีนและยางอีพิตีเอ็มตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากยางธรรมชาติมีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลสูง และอิทธิพลของหมู่เมทิลในโครงสร้างของยางธรรมชาติ ซึ่งส่งอิเล็คตรอนให้กับพันธะคู่ ทำให้โมเลกุลของยางธรรมชาติมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์มากขึ้น ยางจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงได้อย่างรวดเร็วกว่ายางบิวทาไดอีน ส่วนยางอีพิตีเอ็มเป็นยางที่ไม่มีพันธะคู่อยู่ในสายโซ่หลัก ทำให้ยางมีความว่องไวต่อการปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์น้อยกว่า จากนั้นยางจะเข้าสู่ช่วงเวลากการวัลคาไนซ์ที่เข้าสู่สมดุล (Optimum vulcanization) เป็นช่วงที่ยางสุกเต็มที่ พบว่า ยางธรรมชาติ และยางบิวทาไดอีน มีลักษณะกราฟที่ความชันมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆหรือกราฟแบบรีเวอร์ชัน (Reversion curve) เนื่องจากเกิดการขาดของพันธะเชื่อมโยง ส่งผลให้พันธะเชื่อมโยงลดลงส่งผลให้ค่าแรงบิดมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาการทดสอบยางมากขึ้น (Schotman *et al.*, 1996) ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถแสดงดังนี้



รูปที่ 4.12 การขาดของสายโซ่ที่เชื่อมโยงพันธะแบบโพลิสัลฟิดิก (polysulfidic)

ส่วนยางอีพิตีเอ็มให้กราฟที่ความชันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ หรือกราฟแบบมาซซิง (Marching curve) คือ ค่าแรงบิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการทดสอบยางเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาการเชื่อมโยงยังคงดำเนินต่อไป นอกจากนี้ยังเกิดการเชื่อมโยงพันธะแบบไซคลิก (cyclic) ส่งผลให้ยางมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น (Indian Rubber Institute, 1998)

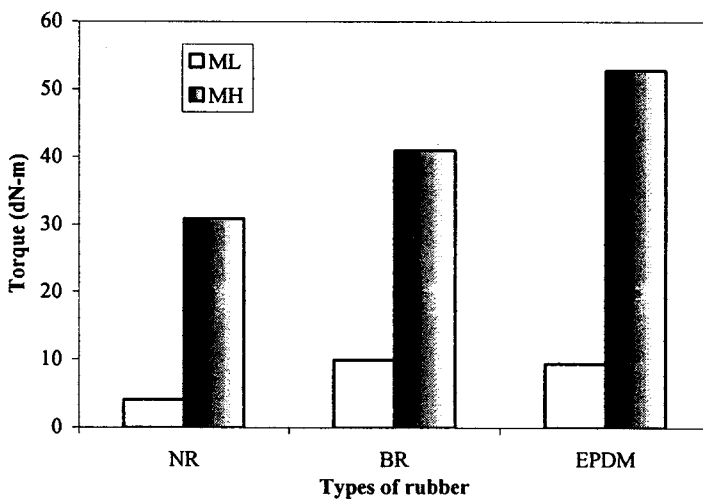


จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดกับเวลาในรูปที่ 4.11 ค่าแรงบิดสูงสุด (Maximum Torque,  $M_H$ ) แรงบิดต่ำสุด (Minimum Torque,  $M_L$ ) เวลาที่ยางแปรรูปได้ (scorch time) เวลาการวัลคาไนซ์ (cure time) และอัตราการวัลคาไนซ์ (cure rate index) ของยางคอมปาวด์แต่ละชนิดได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางแต่ละชนิดที่อุณหภูมิ 150 °C

ชนิดยาง	$M_L$ (dN-m)	$M_H$ (dN-m)	$M_H - M_L$ (dN-m)	Scorch time (min)	Cure time (min)	CRI
NR	4.1	30.9	26.8	3.00	6.14	32.15
BR	10.0	41.0	31.0	4.12	9.24	19.53
EPDM	9.4	52.8	43.4	4.12	21.33	5.81

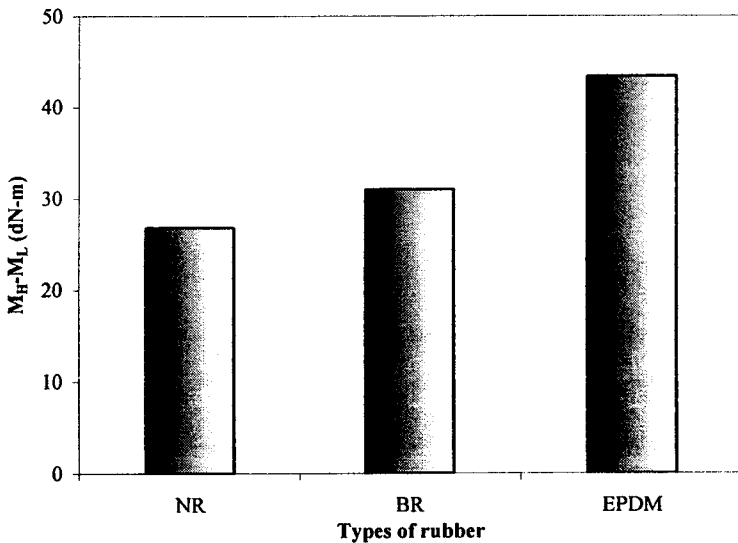
จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดกับเวลาในตารางที่ 4.6 นำมาเขียนกราฟแสดงค่าแรงบิดสูงสุด (Maximum Torque,  $M_H$ ) แรงบิดต่ำสุด (Minimum Torque,  $M_L$ ) ของยางคอมปาวด์แต่ละชนิดดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ค่า  $M_L$  และ  $M_H$  ของยางชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 150 °C

จากรูปที่ 4.13 พบว่ายางธรรมชาติ มีค่าแรงบิดต่ำสุดต่ำกว่ายางบิวทาไดอิน และยางอีพิตีเอ็ม ตามลำดับ เนื่องจากค่าแรงบิดต่ำสุดเป็นสิ่งที่บอถึงความแข็งหรือความนิ่มของยางในขณะที่ยังไม่วัลคาไนซ์ แสดงให้เห็นว่ายางธรรมชาติมีความหนืดในช่วงเริ่มต้นปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์น้อยกว่ายางบิวทาไดอิน และยางอีพิตีเอ็ม ตามลำดับ ทำให้แปรรูปได้ง่าย ส่วนแรงบิดสูงสุดของยางอีพิตีเอ็มมีค่าสูงสุด รองลงมาคือยางบิวทาไดอินและยางธรรมชาติ ตามลำดับ ค่าแรงบิดสูงสุดนี้แสดงถึงค่าแรงบิดที่เวลาการวัลคาไนซ์เต็มทีซึ่งเป็นจุดที่มีปริมาณพันธะเชื่อมโยงสูงสุด แต่ค่าแรงบิดของยางอีพิตีเอ็มนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการทดสอบยางเพิ่มมากขึ้นแสดงว่าปฏิกิริยาการเชื่อมโยงยังคงดำเนินต่อไป

คำนวณหาผลต่างของค่าแรงบิดสูงสุดกับค่าแรงบิดต่ำสุด ของคอมปาวด์แต่ละชนิดได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ค่า  $M_H - M_L$  ของยาง NR, BR และ EPDM ที่อุณหภูมิ 150 °C

จากรูปที่ 4.14 พบว่า ผลต่างของค่าแรงบิดสูงสุดกับค่าแรงบิดต่ำสุดของคอมปาวด์ยางอีพิตีเอ็มมีค่าสูงสุด รองลงมาคือยางบิวทาไดอิน และยางธรรมชาติตามลำดับ ซึ่งผลต่างของค่าแรงบิดสูงสุดกับค่าแรงบิดต่ำสุด เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงปริมาณการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลยาง กล่าวคือ เมื่อเริ่มเกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลยางค่าแรงบิดจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งค่าแรงบิดถึงจุดสูงสุดหรือจุดคงที่ ถือเป็นจุดที่เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลยางสูงสุดด้วย นอกจากนี้ผลต่างของค่าแรงบิดสูงสุดกับค่าแรงบิดต่ำสุดเป็นค่าที่แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (stress) ที่เกิดขึ้น

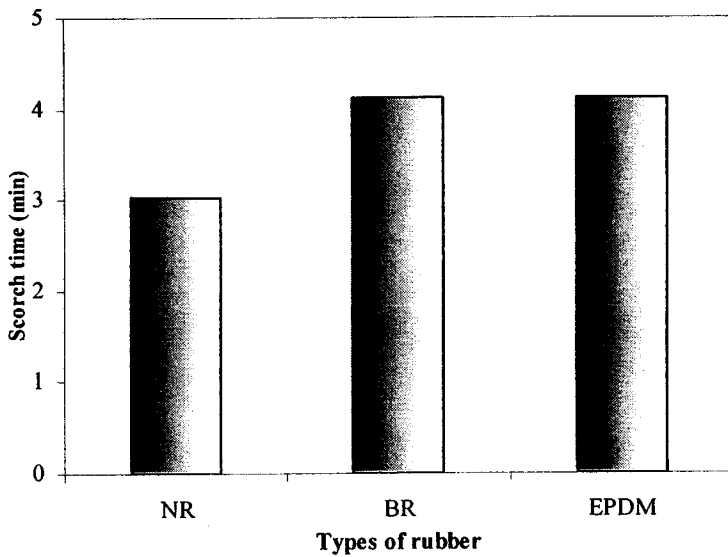
จากการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ของเครื่องรีโอมิเตอร์แบบแผ่นหมุน (ODR 2000) และมีความสัมพันธ์กับค่ามอดูลัสที่ระยะยืดต่างๆ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้น (stress value,  $\rho$ ) กับความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง (crosslink density,  $M_c$ ) แสดงดังสมการที่ 4.2

$$\rho = \delta R T A_0^{-1} M_c^{-1} (l-l^2) \tag{4.2}$$

- เมื่อ  $\rho$  คือ ค่าความเค้น
- $\delta$  คือ ความหนาแน่นของยาง
- $R$  คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (gas constant) มีค่าเท่ากับ  $8.314 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$
- $T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
- $A_0$  คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบก่อนการดึง
- $M_c$  คือ น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยระหว่างจุดเชื่อมโยงโมเลกุล 2 จุด
- $l$  คือ ความยาวการยืด

จากสมการที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าความเค้นที่ระยะยืดใดๆ ขึ้นอยู่กับส่วนกลับของค่าน้ำหนักโมเลกุลของยางระหว่างตำแหน่งพันธะเชื่อมโยง 2 ตำแหน่ง กล่าวได้ว่า เราสามารถคาดคะเนพันธะเชื่อมโยงจากค่าความเค้นได้ เมื่อค่า  $M_c$  น้อย แสดงว่ายางมีจุดหรือตำแหน่งในการเชื่อมโยงมาก ทำให้ปริมาณพันธะเชื่อมโยงสูง (Hofmann, 1989) ส่งผลให้โมเลกุลยางสามารถเคลื่อนที่ได้น้อย จึงทำให้ค่าผลต่างของแรงบิดสูงสุดกับแรงบิดต่ำสุดมีค่ามาก แสดงให้เห็นว่ายางอีพดีเอ็มมีปริมาณพันธะเชื่อมโยงสูงสุด และค่าแรงบิดของยางอีพดีเอ็มนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการทดสอบยางเพิ่มมากขึ้น แสดงว่าปฏิกิริยาการเชื่อมโยงยังดำเนินต่อไปในอัตราที่ต่ำลง ส่งผลให้ปริมาณพันธะเชื่อมโยงยังคงเพิ่มขึ้น ส่วนยางบิวทาไดอีนมีปริมาณพันธะเชื่อมโยงสูงกว่ายางธรรมชาติ

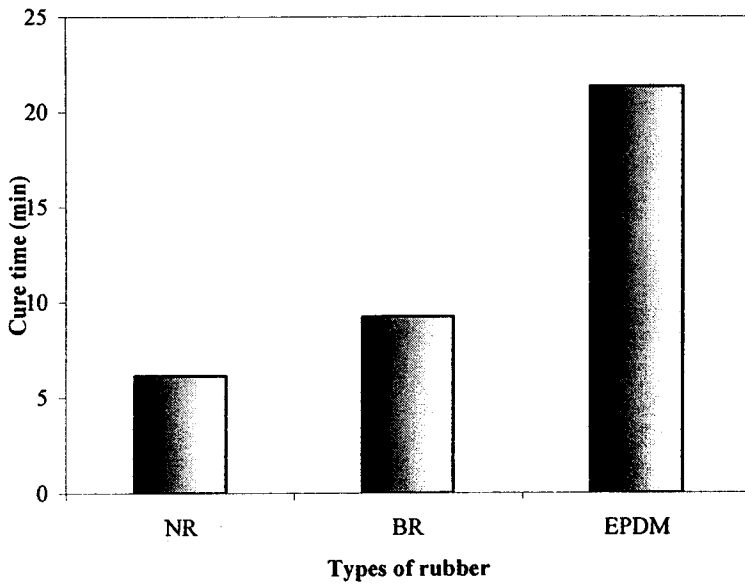
จากตารางที่ 4.6 เขียนกราฟแสดงเวลาการสกอช (Scorch time) ของยางแต่ละชนิดได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 เวลาในการสกอชของยางแต่ละชนิดที่อุณหภูมิ 150 °C

จากรูปที่ 4.15 เปรียบเทียบระยะเวลาที่สามารถแปรรูปได้ (Scorch time) ของยางแต่ละชนิด พบว่า ยางธรรมชาติมีระยะเวลาที่ย่างสามารถแปรรูปได้สั้นที่สุด ส่วนยางบิวทาไดอินและอีพีดีเอ็มจะให้เวลาที่ย่างสามารถแปรรูปได้ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่ายางบิวทาไดอินและยางอีพีดีเอ็มมีความปลอดภัยในการแปรรูป หรือยางสามารถไหลได้นานกว่ายางธรรมชาติ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากยางธรรมชาติมีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลสูง และอิทธิพลของหมู่เมทิลในโครงสร้างของยางธรรมชาติซึ่งส่งอิเล็คตรอนให้กับพันธะคู่ ทำให้โมเลกุลของยางธรรมชาติมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์มากขึ้น ยางจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงได้อย่างรวดเร็วกว่ายางบิวทาไดอิน ส่วนยางอีพีดีเอ็มเป็นยางอิมตัว ไม่มีพันธะคู่ในสายโซ่หลักทำให้มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์น้อยกว่า

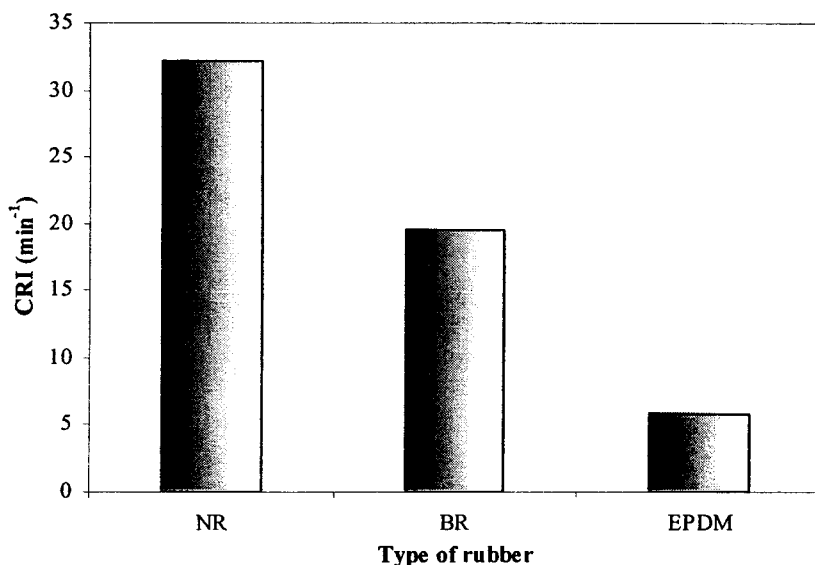
จากตารางที่ 4.6 เขียนกราฟแสดงเวลาการวัลคาไนซ์ (cure time) ของยางแต่ละชนิด ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 เวลาการวัลคาไนซ์ของยางแต่ละชนิดที่อุณหภูมิ 150 °C

จากตารางที่ 4.6 และ รูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่ายางอีพดีเอ็มใช้เวลาในการวัลคาไนซ์สูงสุด รองลงมาคือยางบิวทาไดอิน และยางธรรมชาติตามลำดับ การที่ยางอีพดีเอ็มใช้เวลาในการทำให้เกิดการเชื่อมโยงนาน อาจมีผลมาจากเป็นยางที่มีลักษณะ โมเลกุลที่ไม่มีพันธะคู่อยู่ในสายโซ่หลักของ โมเลกุล จึงทำให้ไม่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับกำมะถันและสารตัวเร่ง ส่วนยางธรรมชาติมีอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์สูงกว่ายางบิวทาไดอินเล็กน้อย เนื่องจากยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินเป็นยางที่มีพันธะคู่ในโมเลกุลสูง ทำให้ง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ แต่ยางธรรมชาติมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยามากกว่ายางบิวทาไดอิน เนื่องจากอิทธิพลของหมู่เมทิลในโครงสร้าง ซึ่งส่งอิเล็กตรอนให้กับพันธะคู่ ทำให้โมเลกุลของยางธรรมชาติมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์มากขึ้น ยางจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงได้อย่างรวดเร็ว

จากตารางที่ 4.6 เขียนกราฟแสดงดัชนีความเร็วในการวัลคาไนซ์ (cure rate index, CRI) ของยางแต่ละชนิดได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 คชนี้ความเร็วในการวัลคาไนซ์ (cure rate index, CRI) ของยางแต่ละชนิด

จากรูปที่ 4.17 จะเห็นได้ว่ายางธรรมชาติมีอัตราการวัลคาไนซ์สูงที่สุด รองลงมาคือยางบิวทาไดอิน และยางอีพีดีเอ็ม ตามลำดับ การที่ยางอีพีดีเอ็มมีอัตราการวัลคาไนซ์ต่ำอาจมีผลมาจากเป็นยางที่มีลักษณะโมเลกุลที่ไม่มีพันธะคู่อยู่ในสายโซ่หลักของโมเลกุล จึงทำให้ไม่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับกำมะถันและสารตัวเร่ง ส่วนยางธรรมชาติมีอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์สูงกว่ายางบิวทาไดอินเล็กน้อย เนื่องจากยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินเป็นยางที่มีพันธะคู่ใน โมเลกุลสูง แต่ยางธรรมชาติมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยามากกว่ายางบิวทาไดอิน เนื่องจากอิทธิพลของหมู่เมทิลในโครงสร้างซึ่งส่งอิเล็คตรอนให้กับพันธะคู่ ทำให้โมเลกุลของยางธรรมชาติมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์มากขึ้น ยางจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงได้อย่างรวดเร็ว

#### 4.2.2 การทดสอบหาพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์

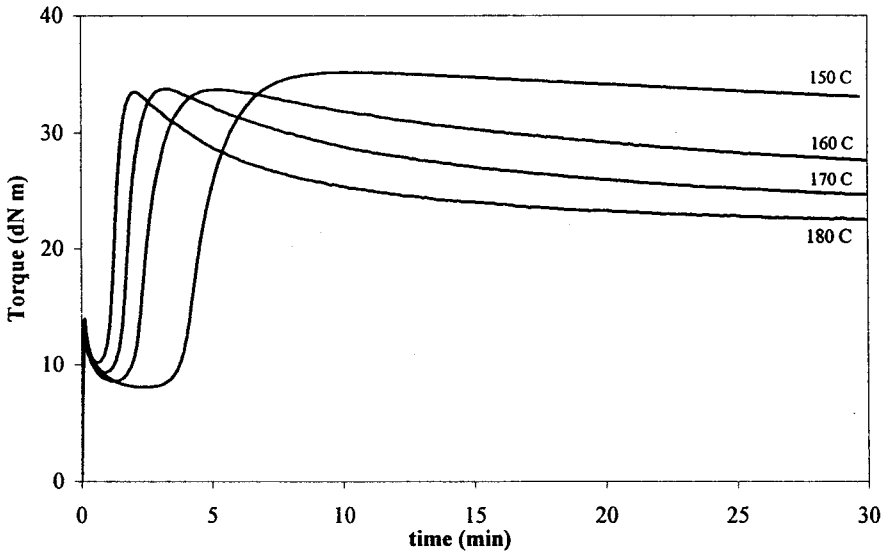
ทำการทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติ ยางบิวทาไดอิน และยางอีพีดีเอ็ม ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบแผ่นหมุนที่อุณหภูมิ 150, 160, 170 และ 180 °C ตามวิธีการในหัวข้อที่ 3.3.2.1

#### 4.2.2.1 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อลักษณะการวัลคาไนซ์

##### 4.2.2.1.1 ยางธรรมชาติ

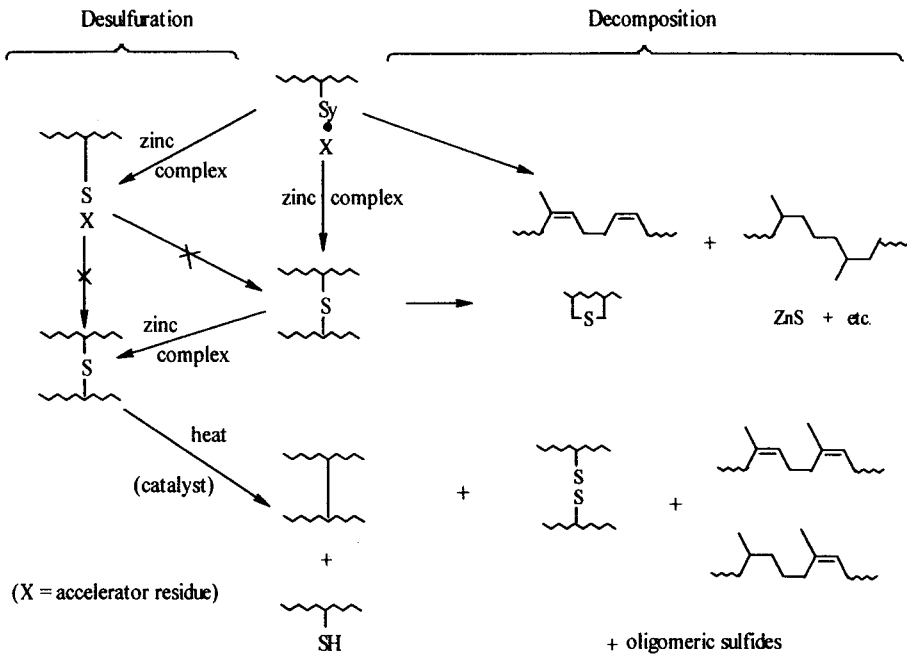
ทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ของคอมปาวด์ยางธรรมชาติด้วยเครื่อง

รีโอมิเตอร์แบบแผ่นหมุน ที่อุณหภูมิต่างๆ ได้กราฟการวัลคาไนซ์ดังแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับเวลาของการวัลคาไนซ์ พบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์สูงขึ้น ยางจะมีแนวโน้มช่วงเริ่มต้นปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ (Induction period) สั้นลง แสดงให้เห็นว่ายางธรรมชาติมีความปลอดภัยในการแปรรูป หรือยางไหลได้ในช่วงเวลาการแปรรูปที่สั้นลง ความชันของกราฟหลังช่วงเริ่มต้นปฏิกิริยาวัลคาไนซ์สูงขึ้น แสดงว่า อัตราการวัลคาไนซ์ของยางมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการวัลคาไนซ์สูงขึ้น นอกจากนี้ พบว่า การวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้พันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นในยางลดลง และทำให้อุณหภูมิหรือระดับการรีเวอร์ชันเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้ เนื่องจากขณะวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิสูงนั้นจะมีปฏิกิริยาการแข่งขันกันระหว่างปฏิกิริยาการเกิดพันธะเชื่อมโยง และการแตกตัวของพันธะเชื่อมโยง (desulfuration) ทำให้สมบัติของยางวัลคาไนซ์ลดลง นอกจากนี้การลดลงของสมบัติของยางวัลคาไนซ์ยังเกิดจากปฏิกิริยา 2 รูปแบบที่เกิดควบคู่กัน คือ desulfuration และ decomposition ดังแสดงในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ปฏิกิริยา desulfuration และ decomposition ของ pendent group และพันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้น (อาชีขัน, 2542)

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาในรูปที่ 4.18 สามารถคำนวณหาค่าแรงบิดสูงสุด (Maximum Torque,  $M_H$ ) แรงบิดต่ำสุด (Minimum Torque,  $M_L$ ) เวลาที่ยางแปรรูปได้ (scorch time) เวลาการวัลคาไนซ์ (cure time) และอัตราการวัลคาไนซ์ (cure rate index) ของยางแต่ละชนิดได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติที่อุณหภูมิ 150 ถึง 180 องศาเซลเซียส

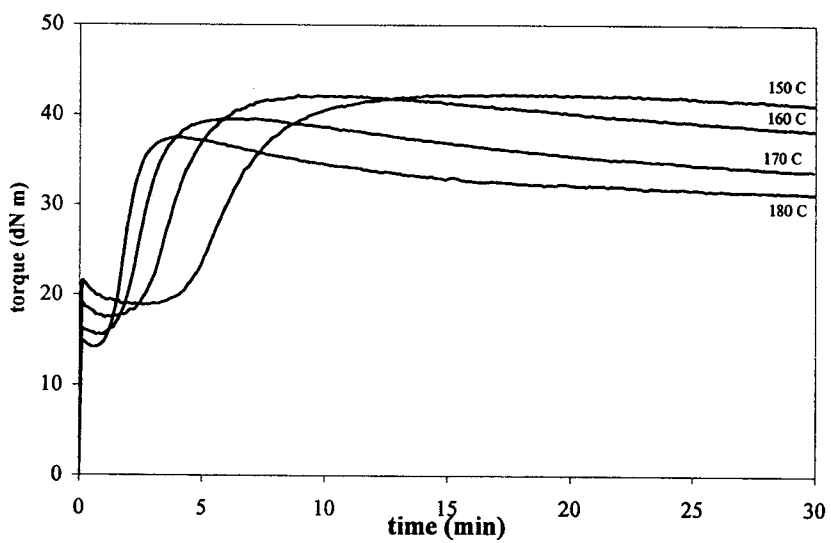
Properties	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	150	160	170	180
$M_L$ (dN-m)	8.05	9.85	10.39	10.53
$M_H$ (dN-m)	35.16	33.69	33.77	33.47
Scorch time (min)	3.94	2.03	1.42	0.94
Cure time (min)	6.45	3.56	2.37	1.61



จากตารางที่ 4.7 พบว่า เวลาในการวัลคาไนซ์มีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ยางมีอัตราการวัลคาไนซ์สูงขึ้น ทำให้ยางมีเวลาในการแปรรูป และเวลาการวัลคาไนซ์ที่ลดลง

4.2.2.1.2 ยางบิวทาไดอิน

การทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางบิวทาไดอิน ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 150 องศาเซลเซียส ถึง 180 องศาเซลเซียส ได้กราฟการวัลคาไนซ์ดังแสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางบิวทาไดอินที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับเวลาของการวัลคาไนซ์ พบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์สูงขึ้น ยางบิวทาไดอินจะมีแนวโน้มช่วงเริ่มต้นปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ (Induction period) สั้นลง ความชันของกราฟหลังช่วงเริ่มต้นปฏิกิริยาวัลคาไนซ์สูงขึ้น และพบว่า การวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้พันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นในยางลดลง และทำให้ห้องสสารหรือระดับการรีเวอร์ชันเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายโดยใช้เหตุผลในทำนองเดียวกับยางธรรมชาติ (รูปที่ 4.19)

จากรูปที่ 4.20 สามารถคำนวณหาค่าทอร์กสูงสุด (Maximum Torque,  $M_H$ ) ทอร์กต่ำสุด (minimum Torque,  $M_L$ ) เวลาการสกอช (Scorch time) และเวลาการวัลคาไนซ์ (cure time) ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.8

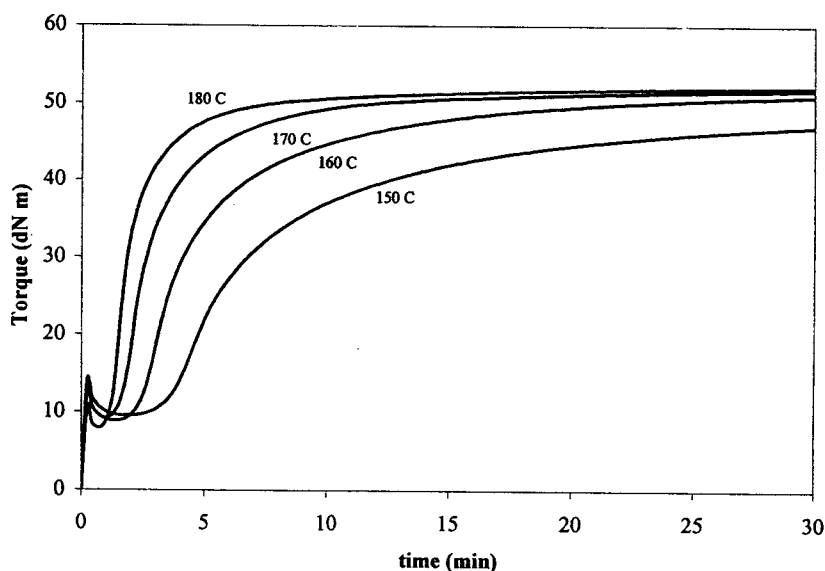
ตารางที่ 4.8 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางบิวทาไดอินที่อุณหภูมิ 150 ถึง 180 องศาเซลเซียส

Properties	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	150	160	170	180
$M_L$ (dN-m)	20.55	18.37	15.87	14.30
$M_H$ (dN-m)	42.33	42.11	39.52	37.48
Scorch time (min)	4.55	2.52	1.47	1.08
Cure time (min)	9.59	5.97	3.82	2.64

จากตารางที่ 4.8 พบว่า เวลาในการวัลคาไนซ์ของยางบิวทาไดอินมีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ยางมีอัตราการวัลคาไนซ์สูงขึ้น ทำให้ยางมีเวลาสกอช และเวลาการวัลคาไนซ์ที่ลดลง เช่นเดียวกับยางธรรมชาติ

#### 4.2.2.1.3 ยางอีพดีเอ็ม

การทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางอีพดีเอ็มที่อุณหภูมิตั้งแต่ 150 องศาเซลเซียส ถึง 180 องศาเซลเซียส ได้กราฟการวัลคาไนซ์ดังแสดงในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางอีพดีเอ็มที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับเวลาของการวัลคาไนซ์ พบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์สูงขึ้น ยางจะมีแนวโน้มช่วงเริ่มต้นปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ (Induction period) สั้นลง แสดงให้เห็นว่ายางอีพดีเอ็มมีความปลอดภัยในการแปรรูป หรือยางไหลได้ในช่วงเวลาการแปรรูปที่สั้นลง ความชันของกราฟหลังช่วงเริ่มต้นปฏิกิริยาวัลคาไนซ์สูงขึ้น แสดงว่า อัตราการวัลคาไนซ์ของยางมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการวัลคาไนซ์สูงขึ้น นอกจากนี้ พบว่ายางอีพดีเอ็มแสดงกราฟที่ความชันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ หรือกราฟแบบมาซซิง (marching cure) แสดงถึงโมดูลัสของยางยังคงสูงต่อไปเรื่อยๆ เมื่อเวลาการวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาการเชื่อมโยงยังคงดำเนินต่อไป ทำให้ปริมาณพันธะเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าแรงบิดจึงมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

จากรูปที่ 4.21 สามารถคำนวณหาค่าทอร์กสูงสุด (Maximum Torque, MH) ทอร์กต่ำสุด (minimum Torque, ML) เวลาการสกอช (Scorch time) และเวลาการวัลคาไนซ์ (cure time) ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางอีพดีเอ็มที่อุณหภูมิ 150 ถึง 180 องศาเซลเซียส

	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	150	160	170	180
$M_L$ (dN-m)	10.81	9.72	9.66	7.92
$M_H$ (dN-m)	49.85	52.65	52.58	52.61
Scorch time (min)	3.55	2.27	1.46	0.98
Cure time (min)	24.87	16.07	8.52	5.40

จากตารางที่ 4.9 พบว่า เวลาในการวัลคาไนซ์ของยางอีพดีเอ็มมีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ยางมีอัตราการวัลคาไนซ์สูงขึ้น ทำให้ยางมีเวลาสกอช และเวลาการวัลคาไนซ์ที่ลดลง เช่นเดียวกับยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอิน

#### 4.2.2.2 การคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น

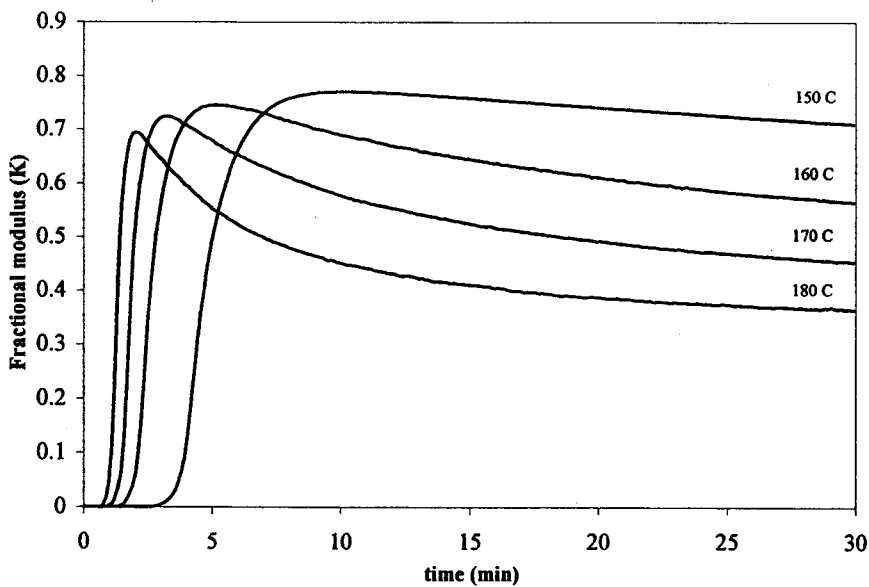
จากกราฟแสดงลักษณะการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบแผ่นหมุน (ODR2000) ของยางทั้งสามชนิด สามารถนำมาคำนวณหาสัดส่วนโมดูลัสที่เพิ่มขึ้นหรือ Fractional modulus (K) ของแต่ละอุณหภูมิได้ (Claxton *et al.*, 1961) โดยใช้สูตรดังแสดงในสมการที่ 4.2

$$K = \frac{M}{M_\alpha} \quad (4.2)$$

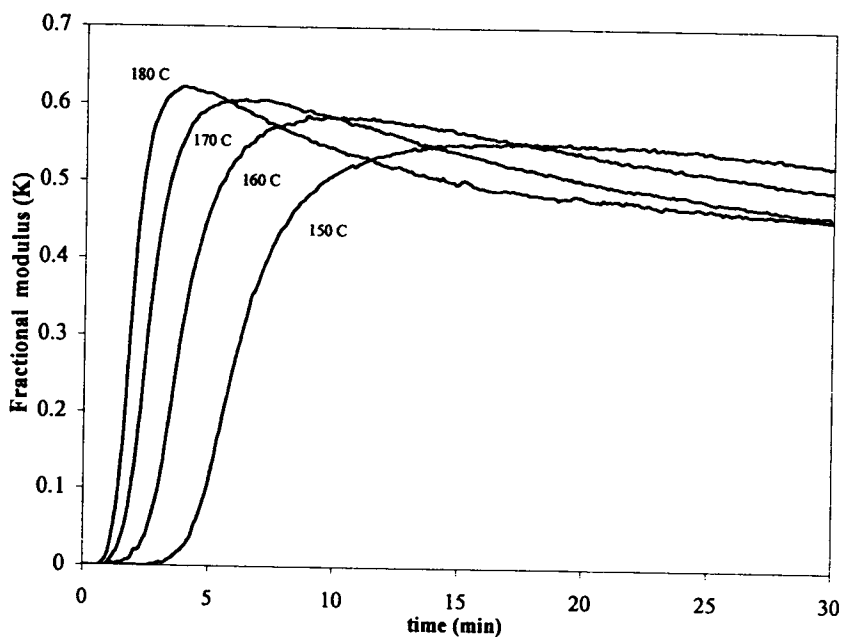
เมื่อ  $M$  คือ โมดูลัสของยางที่เพิ่มขึ้นที่เวลา  $t$

$M_\alpha$  คือ โมดูลัสที่เพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อยางวัลคาไนซ์เต็มที่

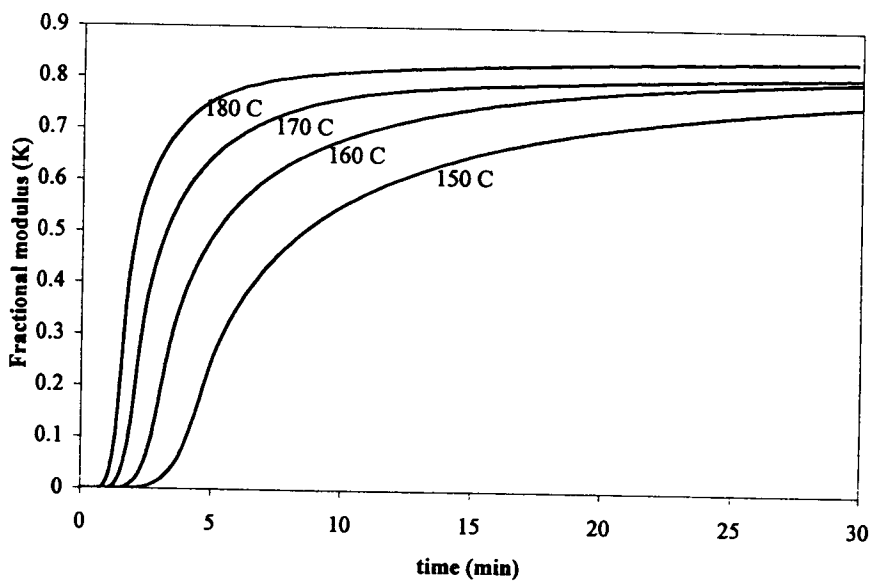
คำนวณหาสัดส่วนโมดูลัสที่เพิ่มขึ้น (Fractional modulus, K) ของยางธรรมชาติ ยางบิวทาไดอิน และยางอีพดีเอ็ม ตามสมการที่ 4.2 แล้วเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง K กับ เวลา (นาที) ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.22-4.24



รูปที่ 4.22 Fractional modulus (K) ของยางธรรมชาติ

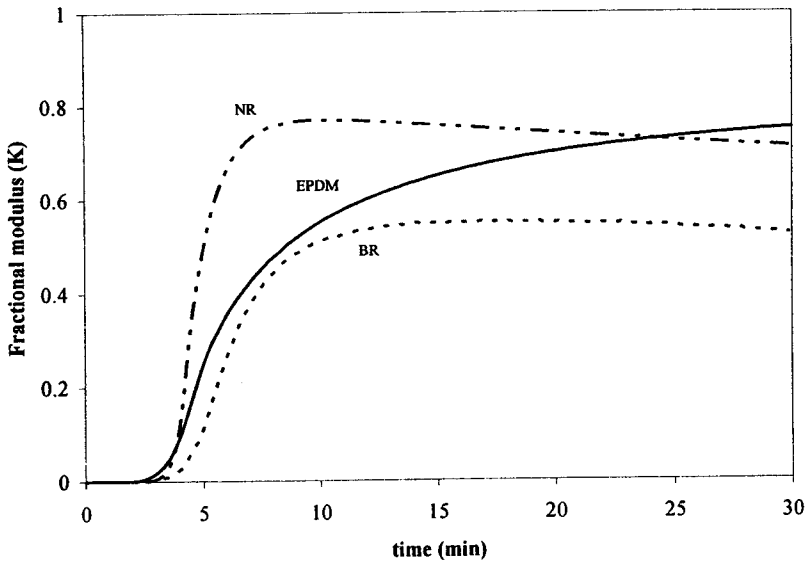


รูปที่ 4.23 Fractional modulus (K) ของยางบิวทาไดอิน



รูปที่ 4.24 Fractional modulus (K) ของยางอีพดีเอ็ม

จากรูปที่ 4.22-4.24 พบว่า เมื่อเปรียบเทียบค่าสัดส่วนโมดูลัสที่เพิ่มขึ้นของยางชนิดต่างๆ ได้ผล ดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 Fractional modulus (K) ของยางแต่ละชนิดที่อุณหภูมิ 150 °C

จากรูปที่ 4.22-4.25 พบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิในการวัดคาบในสูงขึ้น ส่งผลทำให้ค่าสัดส่วนโมดูลัสที่เพิ่มขึ้น (K) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเหมือนกันทั้งในยางธรรมชาติ ยางบิวทาไดอิน และยางอีพดีเอ็ม นอกจากนี้พบว่า เมื่อเวลาการวัดคาบในเพิ่มขึ้นถึงจุดสูงสุด ค่าสัดส่วนโมดูลัสของยางธรรมชาติ และยางบิวทาไดอินมีค่าลดลง แสดงว่ายางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินมีลักษณะการวัดคาบในแบบรีเวอร์ชัน แต่ยางอีพดีเอมมีค่าสัดส่วนโมดูลัสเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการวัดคาบในสูงขึ้น แสดงว่ายางอีพดีเอมมีลักษณะการวัดคาบในแบบมาซซิง เมื่ออุณหภูมิการวัดคาบในสูงขึ้น

จากกราฟแสดงลักษณะการวัดคาบในด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบแผ่นหมุน (ODR2000) ของยางทั้งสามชนิด สามารถนำมาคำนวณหาค่าคงที่ของอัตราการวัดคาบใน โดยใช้สูตรดังแสดงในสมการที่ 4.3 (Claxton *et al.*, 1961)

$$k = (\ln(1-K))/(t-t_0) \quad (4.3)$$

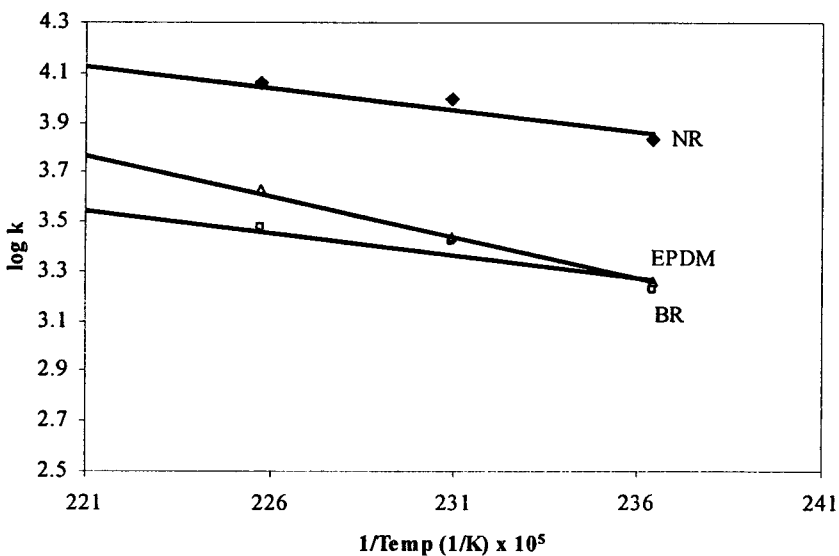
เมื่อ  $t_0$  คือ ช่วงเวลาก่อนที่จะเริ่มวัดคาบในหรือช่วงเวลาที่ยางมีโมดูลัสเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน  
 $k$  คือ ค่าคงที่อัตราการวัดคาบใน

ตารางที่ 4.10 ค่าคงที่อัตราการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติ ยางบิวทาไดอีน และยางอีพดีเอ็ม

ชนิดของยาง	ค่าคงที่อัตราการวัลคาไนซ์ ( $k \times 10^4$ ) ที่อุณหภูมิต่างๆ			
	150	160	170	180
NR	6729	9844	11518	12637
BR	4958	5834	8705	13861
EPDM	1820	2735	4272	5859

จากตารางที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการวัลคาไนซ์ ค่าคงที่อัตราการวัลคาไนซ์ของยาง ( $k$ ) จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ในขณะที่ค่าคงที่อัตราการวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ช่วงเวลาการวัลคาไนซ์ของยางลดต่ำลง นอกจากนี้ พบว่า ค่าคงที่อัตราการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติ มีค่าสูงกว่ายางบิวทาไดอีน และยางอีพดีเอ็ม ตามลำดับ แสดงว่ายางธรรมชาติมีอัตราการวัลคาไนซ์สูงกว่ายางบิวทาไดอีน และยางอีพดีเอ็ม ตามลำดับ

นอกจากนี้คำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นในการวัลคาไนซ์ของยาง (Activation energy) หรือ ค่า  $E_a$  ซึ่งเป็นพลังงานกระตุ้นให้เกิดการวัลคาไนซ์ สามารถคำนวณได้จากความชันของกราฟระหว่าง  $\log k$  กับ  $1/T$  ดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log k$  กับส่วนกลับของอุณหภูมิสัมบูรณ์

จากความชันที่ได้จากรูปที่ 4.26 สามารถนำมาคำนวณหา  $E_a$  โดยใช้สูตรความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 4.4

$$k = Ae^{-E_a/RT} \quad (4.4)$$

ตารางที่ 4.11 ค่าพลังงานกระตุ้นในการวัลคาไนซ์ (Activation energy,  $E_a$ )

ชนิดของยาง	พลังงานกระตุ้น (kcal/mol)
NR	78.76
BR	84.29
EPDM	151.54

จากตารางที่ 4.11 ค่าพลังงานกระตุ้นของยางอีพดีเอ็มมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือยางบิวทาไดอินและยางธรรมชาติ ตามลำดับ ทำให้ทราบว่า ยางอีพดีเอ็มต้องใช้พลังงานกระตุ้นในเกิดปฏิกิริยาสูงกว่ายางบิวทาไดอิน และยางธรรมชาติ ตามลำดับ โดยสอดคล้องกับโครงสร้างโมเลกุลของยาง ซึ่งยางอีพดีเอ็มมีพันธะคู่ในโครงสร้างน้อยกว่ายางชนิดอื่น ๆ แม้จะมีไดอินอยู่ แต่ไม่ได้อยู่ในสายโซ่หลักของโมเลกุลเป็นส่วนที่ทำให้ยางอีพดีเอ็มมีการวัลคาไนซ์ที่ช้า และไม่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ส่วนยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินเป็นยางที่มีพันธะคู่ในโมเลกุลสูง ทำให้ง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ แต่ยางธรรมชาติมีความไวในการทำปฏิกิริยามากกว่ายางบิวทาไดอิน เนื่องจากอิทธิพลของหมู่เมทิลในโครงสร้างซึ่งส่งอิเล็คตรอนให้พันธะคู่ทำให้พันธะคู่ของยางธรรมชาติมีความไวต่อปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ ยางจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงได้อย่างรวดเร็ว

#### 4.2.3 สมบัติเชิงกลของยางแต่ละชนิด

ทดสอบสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์ที่ได้จากสูตรในตารางที่ 3.3 โดยทำการทดสอบสมบัติด้านการดึง ความทนทานต่อการบ่มเร่ง ความต้านทานต่อการหักงอ และความร้อนสะสม และความทนทานต่อการสึกหรอ โดยทำการทดสอบตามวิธีการในหัวข้อที่ 3.3.5 ได้ผลการทดลอง ดังนี้



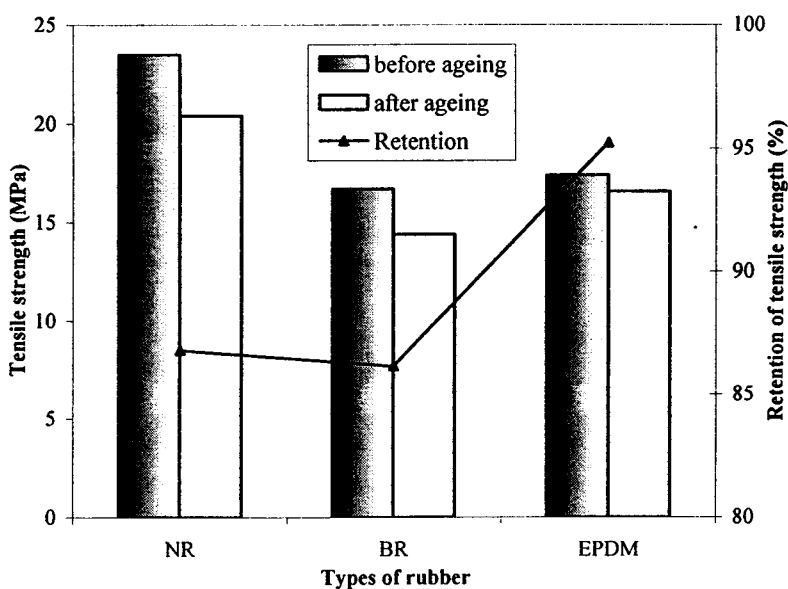
#### 4.2.3.1 สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง

ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยางแต่ละชนิดทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่ง โดยสังเกตการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานต่อแรงดึง ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300% และความสามารถในการยืดจนขาด ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยางแต่ละชนิดทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่ง

Type of rubber	Tensile strength (MPa)		Retention of tensile strength (%)
	before ageing	after ageing	
NR	23.48	20.38	86.80
BR	16.70	14.39	86.17
EPDM	17.40	16.57	93.23

จากตารางที่ 4.12 นำมาเขียนกราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อการดึงของยางธรรมชาติ ยางบิวทาไดอิน และยางอีพดีเอ็ม ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.27



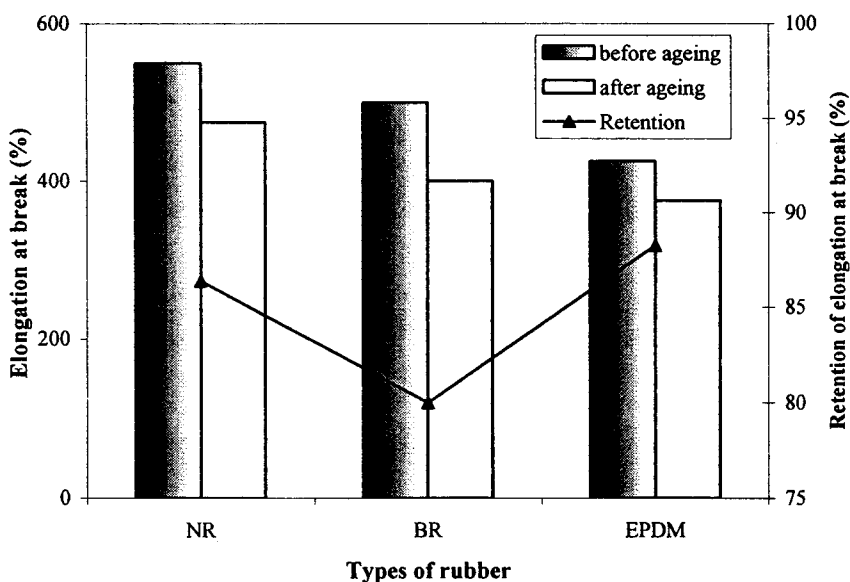
รูปที่ 4.27 ความต้านทานต่อแรงดึงของยางแต่ละชนิด

จากรูปที่ 4.27 พบว่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ มีค่าสูงกว่ายางอีพียีเอ็มและยางบิวทาไดอิน ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ายางธรรมชาติมีความแข็งแรงของโครงสร้างสูงกว่ายางบิวทาไดอิน และยางอีพียีเอ็ม ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากยางธรรมชาติมีโครงสร้างโมเลกุลที่สม่ำเสมอ ทำให้สามารถดกผลึกได้เมื่อคั่ง ดังนั้นเมื่อยางได้รับแรงดึง โมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงโครงสร้างให้เป็นระเบียบทำให้ยางมีความแข็งแรง โดยตัวเอง ส่วนยางบิวทาไดอินไม่สามารถดกผลึกได้เมื่อได้รับแรงดึง ทำให้มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงต่ำกว่ายางธรรมชาติ นอกจากนี้ยางอีพียีเอ็มนั้นมีการจัดเรียงตัวของโมโนเมอร์แบบสุ่ม (German, *et al.*, 1966) ทำให้ได้ยางที่ไม่มีความเป็นผลึก ไม่มีความแข็งแรงในตัวเอง ยางอีพียีเอ็มดิบ (gum strength) มีความต้านทานต่อแรงดึงต่ำ (2 MPa) เมื่อเติมเขม่าดำทำให้ยางมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น (พรพรรณ, 2540) และนอกจากนี้ยังพบว่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติ ยางบิวทาไดอิน และยางอีพียีเอ็ม มีค่าลดลงหลังจากการบ่มเร่ง เนื่องจาก เมื่อยางธรรมชาติ และยางบิวทาไดอินถูกบ่มด้วยอากาศร้อนทำให้เกิดการขาดของสายโซ่หรือพันธะการเชื่อมโยง (พรพรรณ, 2540) ส่วนยางอีพียีเอ็มเมื่อถูกบ่มเร่งด้วยอากาศร้อนจะทำให้ยางมีพันธะเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น (Deuri and Bhowmick, 1987) ยางทั้งสามมีความต้านทานต่อแรงดึงลดลง แต่ความต้านทานต่อแรงดึงของยางอีพียีเอ็มลดลงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากมีพันธะคู่ในโมเลกุลน้อยมาก และพันธะคู่ดังกล่าวไม่ได้อยู่ในสายโซ่หลัก ทำให้ความไม่อึดตัวในส่วนนั้นจึงไม่เป็นจุดอ่อนของการออกซิเดชัน

ตารางที่ 4.13 ความสามารถในการยืดขนาดของยางแต่ละชนิดทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่ง

Type of rubber	Elongation at break (%)		Retention of elongation at break (%)
	before ageing	after ageing	
NR	550	475	86.36
BR	500	400	80.00
EPDM	450	375	88.24

จากตารางที่ 4.13 นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการยืดขนาดของยางแต่ละชนิดทั้งก่อนและหลังบ่มเร่ง ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.28



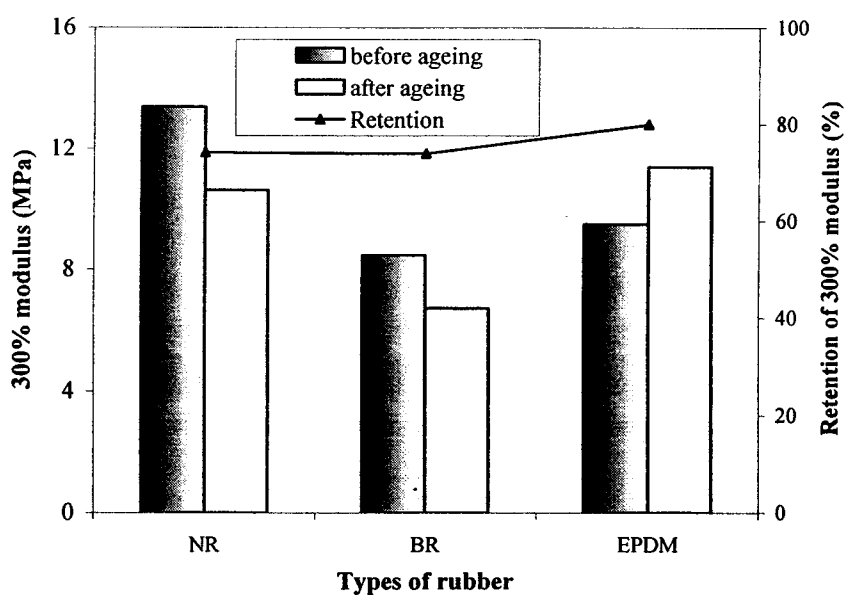
รูปที่ 4.28 ความสามารถในการยืดจนขาดของยางแต่ละชนิด

จากรูปที่ 4.28 พบว่า ความสามารถในการยืดจนขาดของยางธรรมชาติมีค่าสูงสุด รองลงมาคือ ยางบิวทาไดอีน และยางอีพิตีเอ็ม ตามลำดับ เนื่องจากยางธรรมชาติมีโครงสร้างโมเลกุลที่สม่ำเสมอ ทำให้สามารถคกผลึกได้เมื่อดึง ดังนั้นเมื่อยางได้รับการดึงยางสามารถจัดเรียง โครงสร้างให้เป็นระเบียบทำให้ยางมีความแข็งแรง สามารถยืดตัวได้มาก ส่วนยางบิวทาไดอีนและ ยางอีพิตีเอ็ม ไม่สามารถคกผลึกเมื่อได้รับแรงดึง ทำให้ความสามารถในการยืดจนขาดต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่าความสามารถในการยืดจนขาดของยางทั้งสามชนิดมีค่าลดลงหลังจากการบ่มแรง เนื่องจากยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอีนถูกบ่มแรงด้วยอากาศร้อนทำให้เกิดการขาดของสายโซ่หรือพันธะเชื่อม โยง เป็นผลให้สมบัติความสามารถในการยืดลดลง ส่วนการลดลงของความสามารถในการยืดจนขาดในยางอีพิตีเอ็ม นั้นเป็นผลจากยางเกิดการเชื่อม โยงที่เพิ่มขึ้นหลังจากการบ่มแรง ทำให้โมเลกุลของยางเกิดการเชื่อม โยงเป็นร่างแหมากขึ้น ส่งผลทำให้ความสามารถในการยืดลดลง

ตารางที่ 4.14 ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300% ของยางแต่ละชนิด ทั้งก่อนและหลังบ่มเร่ง

Type of rubber	300% modulus (MPa)		Retention of 300% modulus (%)
	before ageing	after ageing	
NR	13.37	10.63	85.04
BR	8.47	6.72	73.96
EPDM	9.49	11.39	79.98

จากตารางที่ 4.14 นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300% ของยางแต่ละชนิด ทั้งก่อนและหลังบ่มเร่ง ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300% ของยางแต่ละชนิด

จากรูปที่ 4.29 พบว่าค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300% ของยางธรรมชาติมีค่าสูงกว่ายางอีพียดีเอ็ม และยางบิวทาไดอิน ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า เมื่อยางธรรมชาติได้รับแรงดึงยางจะสามารถจัดเรียงโครงสร้างให้เป็นระเบียบทำให้ยางมีความแข็งแรงโดยตัวเองทำให้ยางมีค่ามอดูลัสสูงกว่ายางอีพียดีเอ็ม และยางบิวทาไดอิน ซึ่งเป็นยางที่ไม่สามารถเกิดผลึกได้เมื่อได้รับแรงดึง นอกจากนี้ยังพบค่ามอดูลัส

ของยางธรรมชาติ และยางบิวทาไดอีนมีค่าลดลงหลังจากการบ่มเร่ง แต่ค่ามอดูลัสของยางอีพียีเอ็มหลังการบ่มเร่งนั้นมีค่าเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุผลที่ได้อธิบายไปแล้ว ดังรูปที่ 4.27

#### 4.2.3.2 การทดสอบความต้านทานต่อการหักงอ

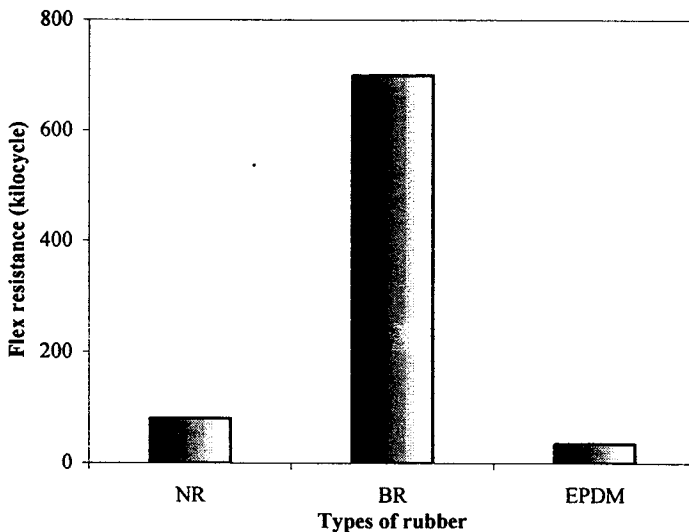
นำยางวัลคาไนซ์แต่ละชนิดมาทดสอบความต้านทานต่อการหักงอด้วยเครื่อง

De-Matia Flexing Machine ตามวิธีการในหัวข้อ 3.3.5.2 ได้ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 ความต้านทานต่อการหักงอของยางชนิดต่างๆ

Type of rubber	Flex resistance (kilocycle)
NR	80
BR	700
EPDM	35

จากตารางที่ 4.15 นำมาเขียนกราฟเปรียบเทียบความต้านทานต่อการหักงอของยางแต่ละชนิดได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 ค่าความต้านทานต่อการหักงอของยางแต่ละชนิด

จากรูปที่ 4.30 พบว่ายางบิวทาไดอิน มีความต้านทานต่อการหักงอสูงสุด รองลงมาคือ ยางธรรมชาติ และยางอีพิตีเอ็ม ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากยางบิวทาไดอินมีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่ำมาก ( $-103^{\circ}\text{C}$ ) กล่าวคือยางบิวทาไดอินมีความเป็นยางสูง สายโซ่โมเลกุลสามารถเคลื่อนไหวได้ง่าย และมีความยืดหยุ่นได้ดีเมื่อได้รับแรงกระทำ ส่งผลให้ยางมีสมบัติความต้านทานต่อการหักงอได้ดี ส่วนยางอีพิตีเอ็มมีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $-66^{\circ}\text{C}$ ) สูงกว่ายางธรรมชาติ ( $-73^{\circ}\text{C}$ ) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากยางอีพิตีเอ็มมีการกีดกันทางสเตอริโอเคมี (steric hindrance) และมีหมู่ข้างเคียง คือ Ethylidene norbornene ซึ่งมีขนาดใหญ่ ส่งผลทำให้มีอุณหภูมิจากสถานะคล้ายแก้วสูงกว่า เมื่อได้รับแรงกระทำ สายโซ่โมเลกุลจะสามารถเคลื่อนไหวได้น้อย ทำให้มีความต้านทานต่อการหักงอต่ำกว่ายางธรรมชาติ

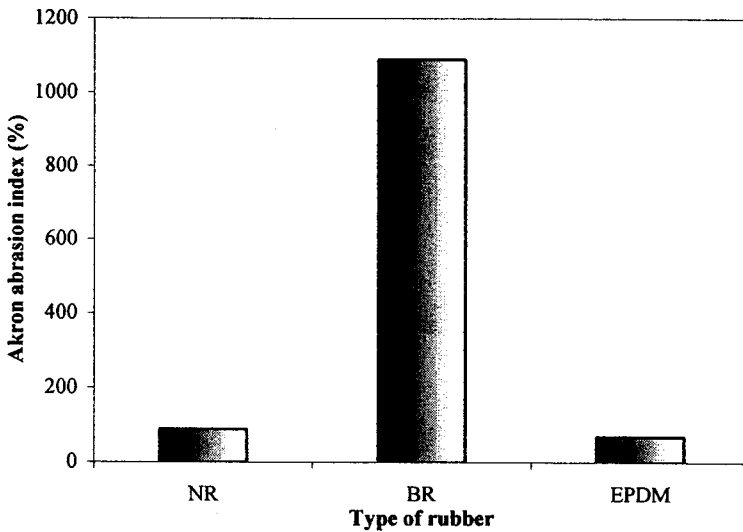
#### 4.2.3.4 การทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอ

นำยางวัลคาไนซ์ของยางแต่ละชนิดมาทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอด้วยเครื่อง Akron abrader ตามวิธีการในหัวข้อ 3.3.5.4 ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ความต้านทานต่อการสึกหรอของยางชนิดต่างๆ

Type of rubber	Akron abrasion index (%)
NR	89
BR	1089
EPDM	69

จากตารางที่ 4.16 นำมาเขียนกราฟเปรียบเทียบความต้านทานต่อการสึกหรอของยางแต่ละชนิด ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 ความต้านทานต่อการสึกหรอของยางแต่ละชนิด

จากรูปที่ 4.31 พบว่า ยางบิวทาไดอิน มีความต้านทานต่อการสึกหรอสูงสุด รองลงมาคือยางธรรมชาติ และยางอีพดีเอ็ม ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากอิทธิพลของอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Tg) ของยาง โดยยางบิวทาไดอินมีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่ำมาก กล่าวคือ ยางบิวทาไดอินมีความเป็นยางสูง สายโซ่โพลีเมอร์มีความยืดหยุ่นสูง เมื่อได้รับแรงกระทำ ดังนั้น ยางจึงมีความยืดหยุ่นสามารถทนต่อการผิดรูปได้ดี ทำให้ยางมีความทนทานต่อการสึกหรอได้ดี (พรพรรณ, 2540) ส่วนยางธรรมชาติมีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่ำกว่ายางอีพดีเอ็มเล็กน้อย ทำให้ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อการสึกหรอดีกว่ายางอีพดีเอ็ม แต่ค้อยกว่ายางบิวทาไดอิน

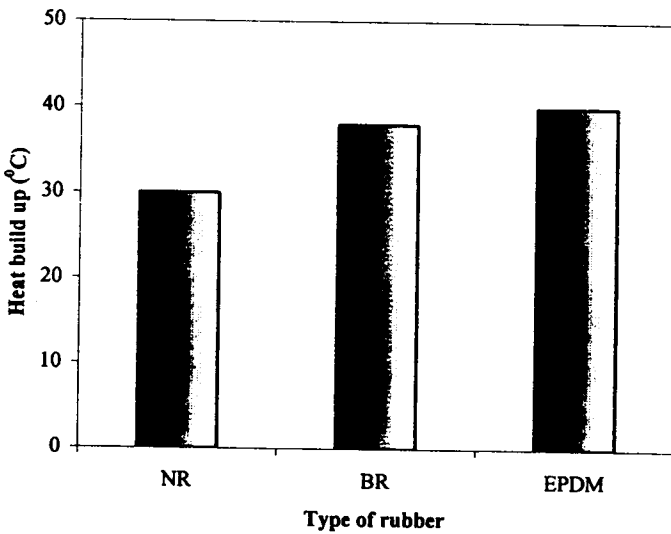
#### 4.2.3.5 การทดสอบความร้อนสะสม

เมื่อทำการทดสอบค่าความร้อนสะสมของยางแต่ละชนิด ด้วยเครื่อง B.F Goodrich flexometer ตามวิธีการในหัวข้อ 3.3.5.4 ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ได้ผลการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 ความร้อนสะสมของยางชนิดต่างๆ

Type of rubber	Heat build up ( $^{\circ}\text{C}$ )
NR	30
BR	38
EPDM	40

จากตารางที่ 4.17 นำมาเขียนกราฟเปรียบเทียบความร้อนสะสมของยางแต่ละชนิดได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 ค่าความร้อนสะสมของยางแต่ละชนิด

จากรูปที่ 4.32 เป็นค่าความร้อนสะสมของยางแต่ละชนิดโดยทำการทดสอบด้วยเครื่องกู๊ดริช เฟลกโซมิเตอร์ (Goodrich Flexometer) จะเห็นได้ว่าค่าความร้อนสะสมของยางอีพียีเอ็มมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ ยางบิวทาไดอิน และยางธรรมชาติ ตามลำดับ กล่าวคือ เมื่อยางได้รับพลังงานจำนวนหนึ่ง จากแรงกระทำแบบพลวัตเชิงกล พลังงานส่วนหนึ่งจะถูกปล่อยออกมาเมื่อยางคืนสู่รูปร่างเดิม และมีพลังงานส่วนหนึ่งจะสูญหายไปในเรื่องยางในรูปของความร้อน แสดงให้เห็นว่ายางธรรมชาติจะสะสมพลังงานไว้ในตัวมันเมื่อได้รับแรงกระทำต่ำ ทำให้ความร้อนสะสมของยางต่ำสุด รองลงมาคือยางบิวทาไดอิน และยางอีพียีเอ็ม ตามลำดับ เนื่องจากยางบิวทาไดอินเป็นยางที่มีความกระด้างตัวสูง น่าจะมีความ



ร้อนสะสมต่ำสุด แต่การทดลองพบว่ายางบิวทาไดอีนมีความร้อนสะสมสูงกว่ายางธรรมชาติ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ วุฒิสักดิ์ (2540) พบว่า ยางบิวทาไดอีนที่ใส่เขม่าดำ 45 phr มีค่าความร้อนสะสมสูงกว่ายางธรรมชาติ

#### 4.3 ศึกษาอิทธิพลของการทำการวัลคาไนซ์บางส่วน (precurring) ต่อสมบัติของยางเบลนด์

##### 4.3.1 การเบลนด์โดยใช้เทคนิคการวัลคาไนซ์บางส่วนแบบสแตติก (Static precuring technique)

###### 4.3.1.1 ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการทำการวัลคาไนซ์บางส่วนแบบสแตติก

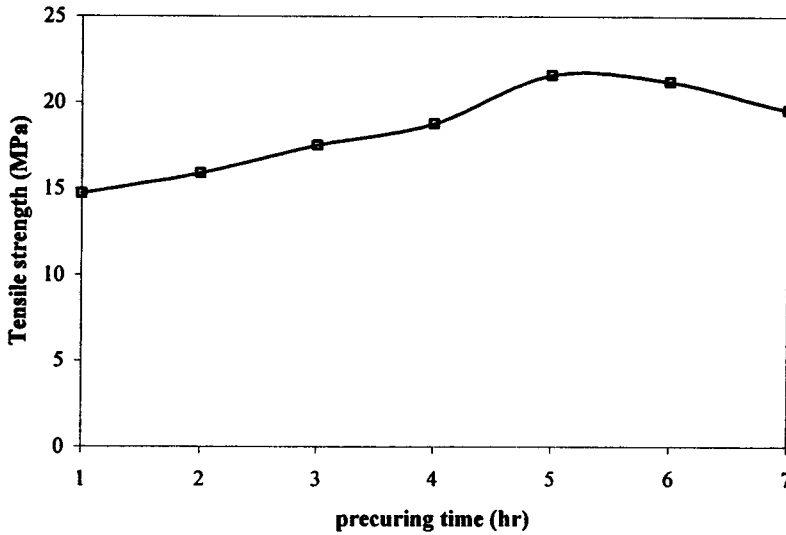
เตรียมคอมปาวด์ของยางอีพดีเอ็ม ด้วยเครื่องผสมยางสองลูกกลิ้งโดยใช้สารเคมีชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.7 และมีลำดับขั้นตอนการเติมสารเคมี ดังแสดงในตารางที่ 3.4 จากนั้นนำคอมปาวด์ของยางอีพดีเอ็มรีดเป็นแผ่นหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร แล้วนำมาทำการวัลคาไนซ์บางส่วนโดยการอบในตู้อบอากาศร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 100 °C แปรเวลาการอบที่ 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 ชั่วโมง ตามลำดับ จากนั้นนำยางอีพดีเอ็มที่วัลคาไนซ์แล้วบางส่วนมาเบลนด์กับยางธรรมชาติ ที่อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการให้ความร้อนยางอีพดีเอ็มก่อนทำการเบลนด์

นำคอมปาวด์มาทำการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 150 °C โดยใช้เวลาในการวัลคาไนซ์จากการทดสอบด้วยเครื่อง ODR 2000 จากนั้นนำยางวัลคาไนซ์ที่เตรียมได้มาทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง เพื่อเป็นแนวทางในการเบลนด์กับ ยางธรรมชาติ/ยางบิวทาไดอีนต่อไป ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.18

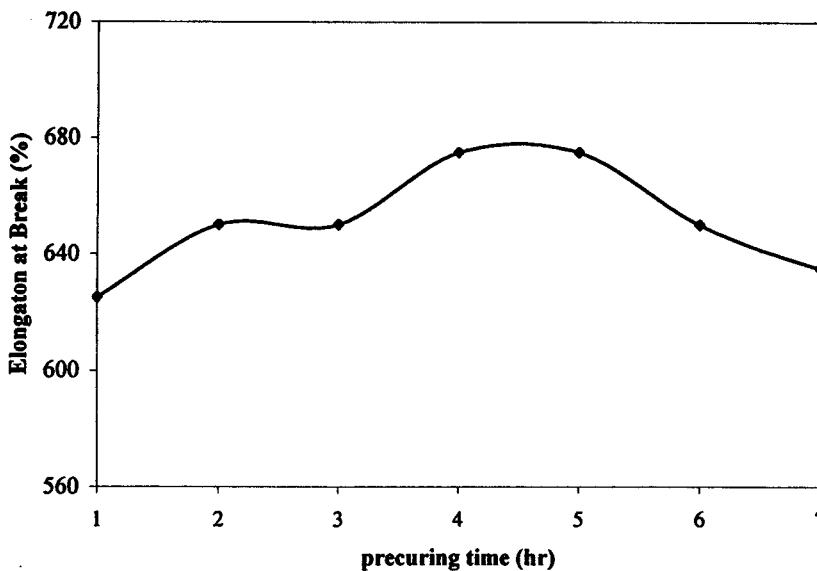
ตารางที่ 4.18 สมบัติด้านการดึงของยางเบลนด์ NR/EPDM ที่เวลาการอบต่างๆ

Precuring time (hr)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	300% modulus (MPa)
1	14.72	625	6.30
2	15.91	650	7.02
3	17.53	650	7.05
4	18.79	675	7.20
5	21.60	675	7.44
6	21.22	650	7.42
7	19.59	635	7.20

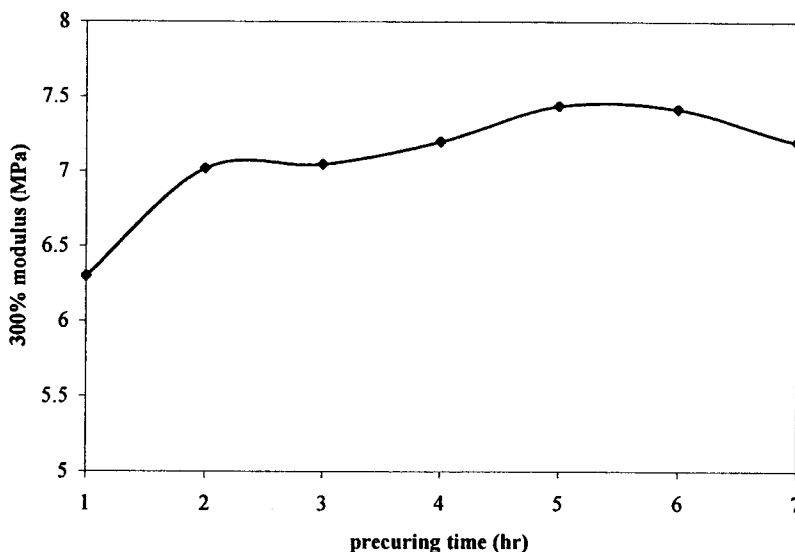
จากตารางที่ 4.18 เขียนกราฟค่าความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด และค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300% ของยางเบลนค์ระหว่าง NR/EPDM ที่ทำการวัลคาไนซ์ยางอีพียีเอ็มบางส่วนแบบสแตติกที่เวลาการอบต่างๆ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.33-4.35



รูปที่ 4.33 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนค์ระหว่าง NR/EPDM ที่ทำการวัลคาไนซ์ยางอีพียีเอ็มบางส่วนแบบสแตติก



รูปที่ 4.34 ค่าระยะยืดของยางเบลนค์ระหว่าง NR/EPDM ที่ทำการวัลคาไนซ์ยางอีพียีเอ็มบางส่วนแบบสแตติก



รูปที่ 4.35 ค่า 300% มอดูลัสของยางเบลนค์ระหว่าง NR/EPDM ที่ทำการวัลคาไนซ์ ยางอีพีดีเอ็มบางส่วน

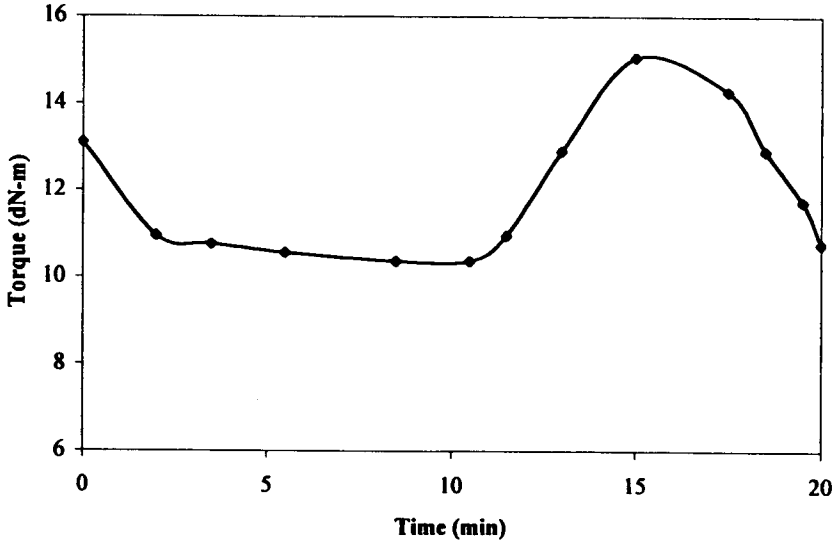
จากรูปที่ 4.33 ถึง 4.35 พบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ค่าความสามารถในการยืดจนขาด และ มอดูลัสที่ระยะยืด 300% ของยางเบลนค์ NR/EPDM มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาในการอบ และจะมีค่าสูงสุดที่เวลาในการอบ 5 ชั่วโมง หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากขณะอบยางนั้นยางอีพีดีเอ็มจะเกิดการวัลคาไนซ์ไปบางส่วน ทำให้ยางเบลนค์มีปริมาณพันธะเชื่อมโยงในเฟสยางอีพีดีเอ็ม และที่บริเวณผิวสัมผัส (interface) ของยางมีค่าใกล้เคียงกัน (Suma *et al.*, 1993) ดังนั้น การอบยางอีพีดีเอ็มที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จึงมีความเหมาะสม ก่อนนำยางอีพีดีเอ็มที่วัลคาไนซ์บางส่วนมาเบลนค์กับยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอิน

#### 4.3.2 การเบลนค์โดยใช้เทคนิคการวัลคาไนซ์บางส่วนแบบไดนามิกส์ (Dynamic curing technique)

##### 4.3.2.1 ศักยภาพการให้ความร้อนที่เหมาะสมในการทำวัลคาไนซ์บางส่วนแบบไดนามิกส์

นำยางคอมปาวด์ยางอีพีดีเอ็มมาทำการวัลคาไนซ์บางส่วนด้วยเครื่องบราเวนเดอร์พลาสติกอร์เดอร์ ที่อุณหภูมิ 100 °C โดยแปรเวลาในการทำให้ได้ค่าทอร์ก เท่ากับ 20, 40, 60 และ

80% ของค่าทอร์กสูงสุด ตามลำดับ ค่าทอร์กของคอมปาวด์ยางอีพิตีเอ็มที่ได้จากเครื่องบราเบนเดอร์ พลาสติกอร์เคอร์ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.36



รูปที่ 4.36 ค่าทอร์กจากเครื่องบราเบนเดอร์ พลาสติกอร์เคอร์

จากรูปที่ 4.36 นำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของค่าทอร์กของยางอีพิตีเอ็มที่ระดับ 0, 20, 40, 60 และ 80% ได้เวลาในการทำการวัดคาบในซ้บางส่วนแบบไดนามิกส์ดังตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 เปอร์เซนต์ของค่าทอร์กสูงสุดที่เวลาต่างๆ

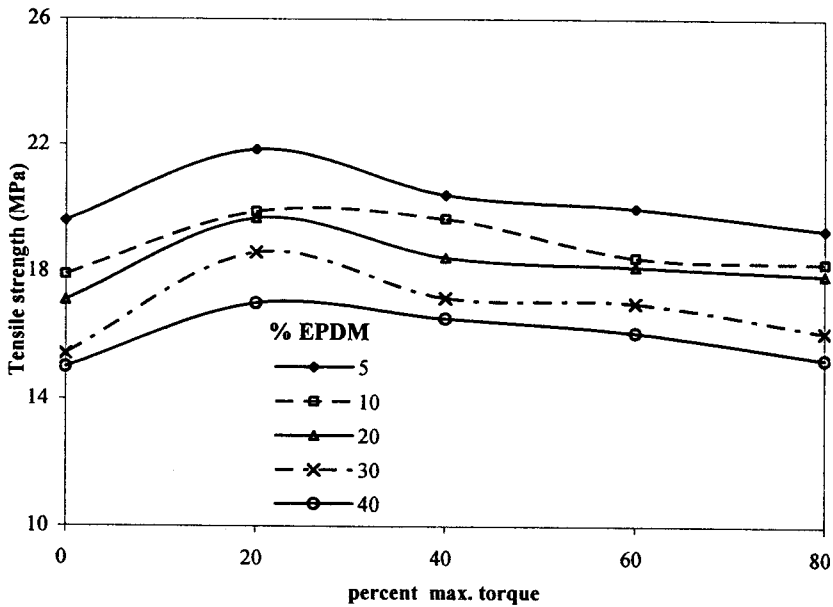
เปอร์เซนต์ของค่าทอร์กสูงสุด	เวลา (นาท)
20	11.4
40	12.3
60	13.2
80	14.1

เมื่อยางอีพดีเอ็มคอมปาวด์ได้รับความร้อนจากเครื่องบราวนเดอร์พลาสติกอร์เคอร์ ค่าทอร์กของยางคอมปาวด์จะลดลงเรื่อยๆ จนถึงจุดๆ หนึ่ง เนื่องจากยางเกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ ยางจะมีค่าทอร์กสูงขึ้นกล่าวคือ ยางจะมีค่าทอร์กต่ำสุดที่เวลาประมาณ 11 นาที จากนั้นยางจะเริ่มเกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ และจะมีค่าทอร์กสูงสุด ที่เวลาประมาณ 14 นาที ณ จุดนี้แสดงให้เห็นว่าเป็นเวลาที่ยางเกิดการสกอซ จากนั้นนำคอมปาวด์ยางอีพดีเอ็มมาทำการวัลคาไนซ์บางส่วน โดยการแปรเวลาในการให้ความร้อนเป็น 0, 20, 40, 60, 80% ของค่าทอร์กสูงสุด มาเบลนค้กับยางคอมปาวด์ของยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอิน ที่อัตราส่วนการเบลนค้เท่ากับ 1 : 1 โดยใช้สูตรดังตารางที่ 3.5 โดยแปรปริมาณของยางอีพดีเอ็มเป็น 5, 10, 20, 30 และ 40% ตามลำดับ จากนั้นนำยางเบลนค้ที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 150 °C และอัดเบ้าตามเวลาการวัลคาไนซ์ จากนั้นนำยางวัลคาไนซ์ไปทดสอบสมบัติด้านการดึง ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.20-4.22

**ตารางที่ 4.20** ความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนค้ NR/BR/EPDM ที่ทำการวัลคาไนซ์ยางอีพดีเอ็มบางส่วนด้วยเครื่องบราวนเดอร์ พลาสติกอร์เคอร์ที่เปอร์เซ็นต์ของค่าทอร์กสูงสุดต่างๆ

Quantity of EPDM (%)	Percent maximum torque (%)				
	0	20	40	60	80
5	19.60	21.86	20.42	20.00	19.32
10	17.89	19.89	19.66	18.44	18.27
20	17.10	19.68	18.44	18.15	17.89
30	15.42	18.60	17.17	17.00	16.10
40	15.00	17.00	16.53	16.08	15.27

จากตารางที่ 4.20 เขียนกราฟแสดงความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนค้ระหว่าง NR/BR/EPDM ที่ทำการวัลคาไนซ์ยางอีพดีเอ็มบางส่วนด้วยเครื่องบราวนเดอร์ พลาสติกอร์เคอร์ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.37



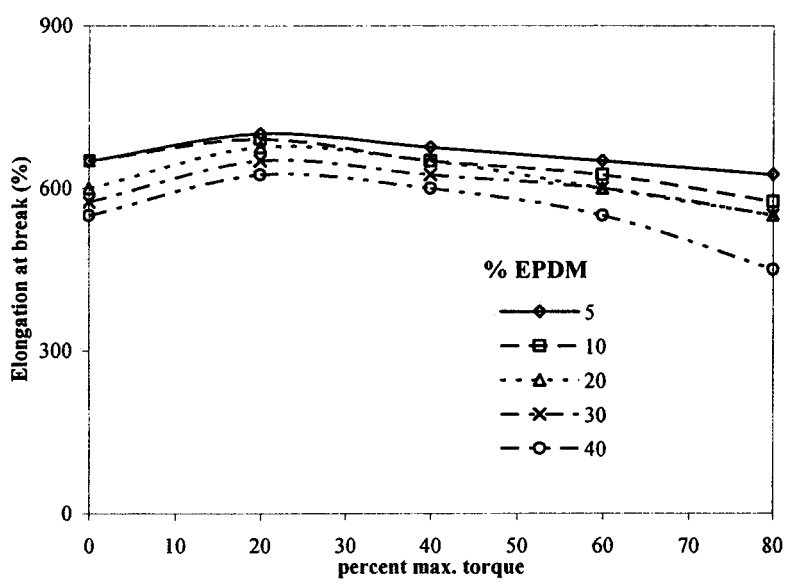
รูปที่ 4.37 ความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนค์เมื่อทำการวัลคาไนซ์ยางอีพดีเอ็มบางส่วนด้วยเครื่องบราเบนเดอร์ พลาสติกอร์เคอร์

จากรูปที่ 4.37 พบว่า ความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนค์มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของยางอีพดีเอ็ม ทั้งนี้อาจมีผลมาจากการเพิ่มปริมาณยางอีพดีเอ็มส่งผลทำให้ปริมาณของพันธะเชื่อมโยงในยางเบลนค์ลดลง (Suma *et al.*, 1993) การมีปริมาณของพันธะเชื่อมโยงในยางเบลนค์น้อยทำให้ยางเบลนค์มีความแข็งแรงต่ำ เนื่องจากมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลต่ำ ยางเบลนค์จึงมีความต้านทานต่อแรงดึงลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อเพิ่มเวลาการให้ความร้อนต่อยางอีพดีเอ็มค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลง โดยที่ระดับการเพิ่มขึ้นของค่าทอร์ก 20% ของค่าทอร์กสูงสุดจะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด ทั้งนี้อาจเนื่องจากปริมาณพันธะเชื่อมโยงในเฟสยางอีพดีเอ็มและที่บริเวณผิวสัมผัส (interface) ของยางมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น (Suma *et al.*, 1993)

ตารางที่ 4.21 ความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ NR/BR/EPDM ที่ทำการวัลคาไนซ์ยางอีพดีเอ็มบางส่วนด้วยเครื่องบราเบนเคอร์ พลาสติกอร์เคอร์ที่เปอร์เซ็นต์ของค่าทอร์กสูงสุดต่างๆ

Quantity of EPDM (%)	Percent maximum torque (%)				
	0	20	40	60	80
5	625	700	675	650	625
10	575	690	650	625	575
20	550	675	650	600	550
30	550	650	625	600	550
40	450	625	600	550	450

จากตารางที่ 4.21 เขียนกราฟเปรียบเทียบความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ระหว่าง NR/BR/EPDM ที่ทำการวัลคาไนซ์ยางอีพดีเอ็มบางส่วนด้วยเครื่องบราเบนเคอร์ พลาสติกอร์เคอร์ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.38



รูปที่ 4.38 ความสามารถในการยืดของยางเบลนด์เมื่อทำการวัลคาไนซ์ยางอีพดีเอ็มบางส่วนด้วยเครื่องบราเบนเคอร์ พลาสติกอร์เคอร์

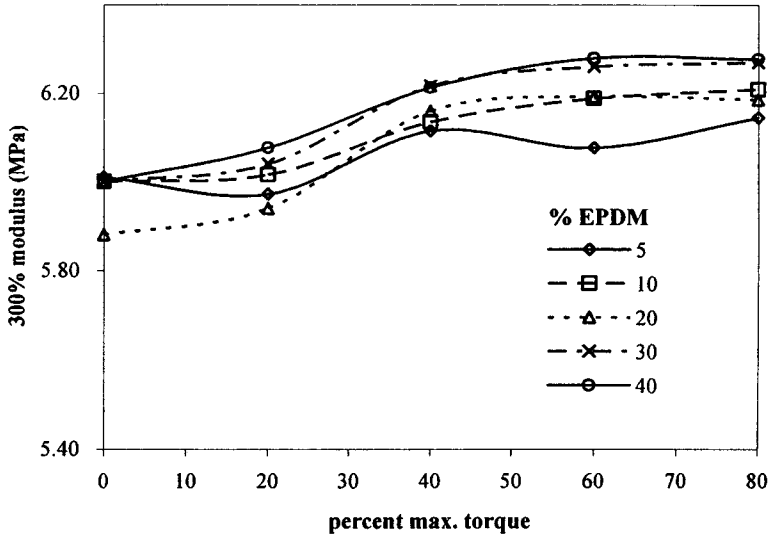
จากรูปที่ 4.38 พบว่า ความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนค์มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มปริมาณของยางอีพดีเอ็ม ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากการเพิ่มปริมาณยางอีพดีเอ็มส่งผลทำให้ปริมาณของพันธะเชื่อมโยงในยางเบลนค์น้อยลง (Suma et al., 1993) ซึ่งสามารถอธิบายโดยใช้เหตุผลในทำนองเดียวกับสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (รูปที่ 4.37)

ตารางที่ 4.22 ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300% ของยางเบลนค์ NR/BR/EPDM ที่ทำการวัลคาไนซ์ยางอีพดีเอ็มบางส่วนด้วยเครื่องบราเบนเดอร์ พลาสติกอร์เคอร์ที่เปอร์เซ็นต์ของค่าทอร์กสูงสุดต่างๆ

Quantity of EPDM (%)	Percent maximum torque (%)				
	0	20	40	60	80
5	6.00	5.97	6.12	6.08	6.15
10	6.00	6.02	6.14	6.19	6.21
20	5.88	5.94	6.16	6.19	6.19
30	6.00	6.04	6.22	6.26	6.27
40	6.00	6.08	6.21	6.28	6.28

จากตารางที่ 4.22 เขียนกราฟเปรียบเทียบค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300% ของยางเบลนค์ระหว่าง NR/BR/EPDM ที่ทำการวัลคาไนซ์ยางอีพดีเอ็มบางส่วนด้วยเครื่องบราเบนเดอร์ พลาสติกอร์เคอร์ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.39





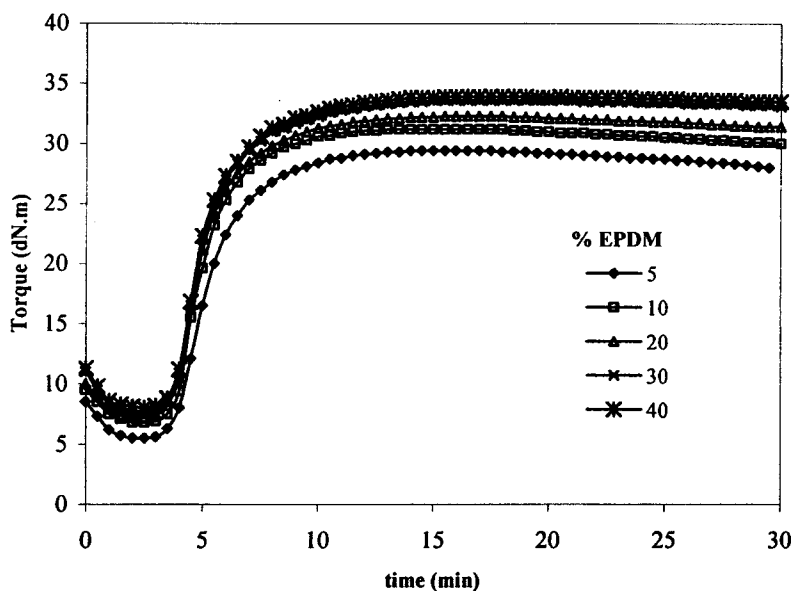
รูปที่ 4.39 ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300% ของยางเบลนค์แบบไดนามิกส์

จากรูปที่ 4.39 จะเห็นได้ว่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300% ของยางเบลนค์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มระดับของการวัลคาไนซ์บางส่วน ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากการให้ความร้อนต่อยางอีพดีเอ็มเป็นเวลานานอาจทำให้ปริมาณพันธะเชื่อมโยงในยางเบลนค์เพิ่มขึ้น เมื่อได้รับแรงดึงทำให้โมเลกุลยางเคลื่อนที่ได้น้อย ส่งผลทำให้ต้องใช้แรงในการดึงมากขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่ระดับการวัลคาไนซ์เดียวกัน พบว่า การเพิ่มปริมาณยางอีพดีเอ็มนั้นส่งผลให้ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300% เพิ่มขึ้น ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Suma *et al.*, (1993) โดยพบว่าเมื่อปริมาณยางอีพดีเอ็มเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ยางเบลนค์มีค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดหนึ่งหลังจากนั้นยางเบลนค์จะมีค่ามอดูลัสลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากอัตราส่วนยางอีพดีเอ็มที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ปริมาณพันธะเชื่อมโยงในยางเบลนค์ลดลง

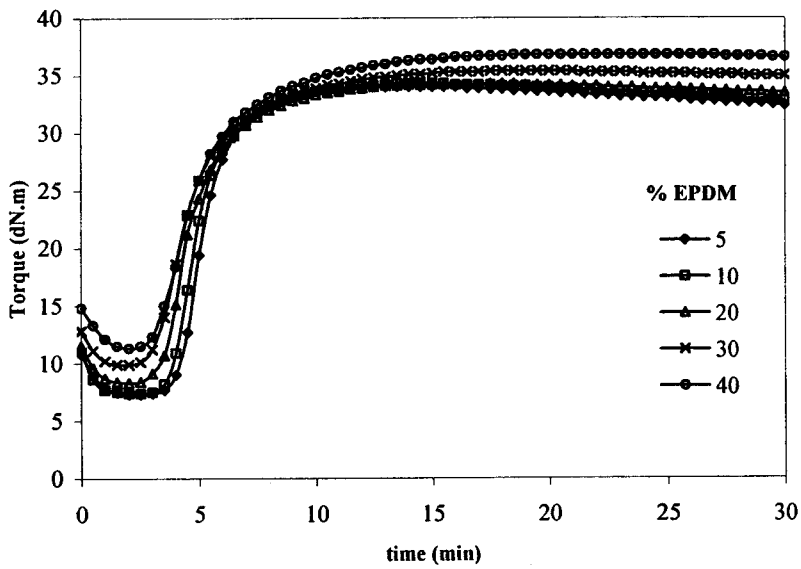
จากรูปที่ 4.37 ถึง 4.39 พบว่า สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนค์ที่ทำการวัลคาไนซ์ยางอีพดีเอ็มบางส่วนด้วยเครื่องบราเบนเคอร์พลาสติกอร์เคอร์ มีค่าลดลงตามปริมาณของยางอีพดีเอ็มที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณยางอีพดีเอ็มส่งผลทำให้ปริมาณของพันธะเชื่อมโยงในยางเบลนค์ลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อเพิ่มเวลาการให้ความร้อนต่อยางอีพดีเอ็มค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลง โดยที่ระดับการวัลคาไนซ์ 20% ของค่าทอร์กสูงสุดจะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณพันธะเชื่อมโยงของยางเบลนค์ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงเลือกการวัลคาไนซ์ที่ 20% มาศึกษาสมบัติการวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงกลต่างๆ

#### 4.4 อิทธิพลของเทคนิคการเบลนด์ต่อลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์

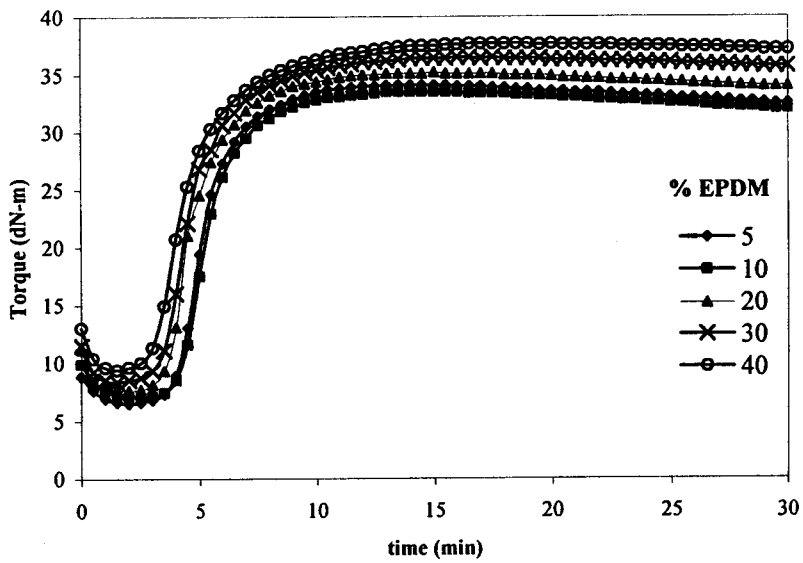
เปรียบเทียบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ NR/BR/EPDM ที่เบลนด์โดยใช้เทคนิคการเบลนด์แบบปกติ การเบลนด์โดยการวัลคาไนซ์ยางอีพดีเอ็มบางส่วนแบบสแตติกที่เวลาการอบ 5 ชั่วโมง และแบบไดนามิกส์ ที่ 20% ของค่าทอร์กสูงสุด โดยแปรปริมาณของยางอีพดีเอ็มเป็น 5, 10, 20, 30 และ 40% ตามลำดับ จากนั้นนำยางเบลนด์ที่เตรียมได้ไปศึกษาสมบัติการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบแผ่นหมุนที่อุณหภูมิ 150 °C ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.40 ถึง 4.42 และข้อมูลที่ได้จากกราฟวัลคาไนซ์สรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 4.23



รูปที่ 4.40 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ NR/BR/EPDM แบบปกติที่อัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.41 ลักษณะการวัดคาไนซ์ของยางเบลดแบบสเตติกที่อัตราส่วนต่างๆ

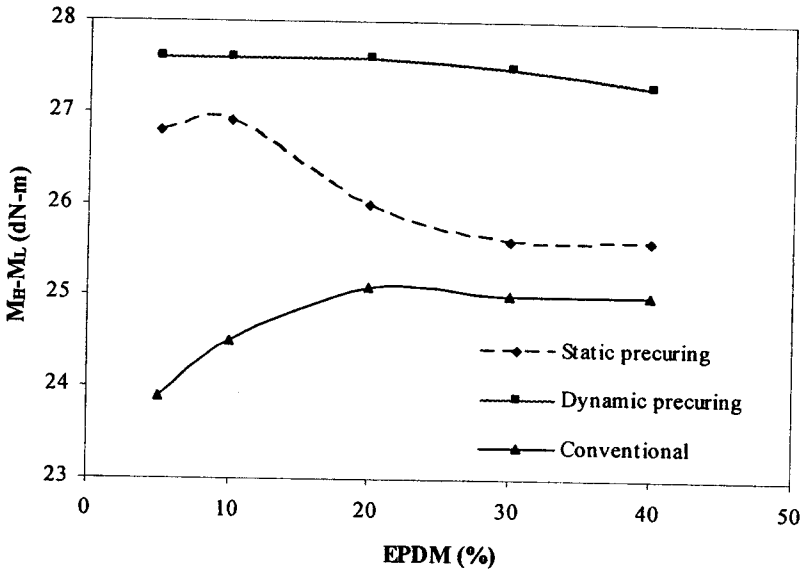


รูปที่ 4.42 ลักษณะการวัดคาไนซ์ของยางเบลดแบบไดนามิกที่อัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ 4.23 อิทธิพลของเทคนิคการเบลนดัดต่อลักษณะการวัดค่าในช่องของยางเบลนดัด NR/BR/EPDM

Properties	Quantity of EPDM (%)															
	Static precuring				Dynamic precuring				Conventional							
	5	10	20	30	40	5	10	20	30	40	5	10	20	30	40	
$M_H$ (dN-m)	34.10	34.30	34.30	35.40	36.90	34.10	33.60	35.20	36.50	36.70	29.40	31.30	32.30	33.70	33.90	
$M_L$ (dN-m)	7.30	7.40	8.30	9.80	11.30	6.50	7.00	7.60	9.00	9.40	5.50	6.80	7.20	7.70	8.00	
$M_H-M_L$ (dN-m)	26.80	26.90	26.00	25.60	25.60	27.60	27.60	27.60	27.50	27.30	23.90	24.50	25.10	26.00	25.90	
$t_{s1}$ (min)	3.46	3.24	3.07	2.50	2.58	3.56	3.30	3.16	3.00	2.65	3.29	3.29	3.29	3.29	2.55	
$t_{90}$ (min)	7.14	7.19	7.40	8.19	9.11	7.25	7.15	7.19	7.36	7.36	8.06	7.86	7.77	7.50	7.65	
CRU ( $\text{min}^{-1}$ )	27.17	25.32	23.09	17.57	15.31	27.10	25.97	24.81	22.94	21.23	20.96	24.33	23.81	20.96	18.18	

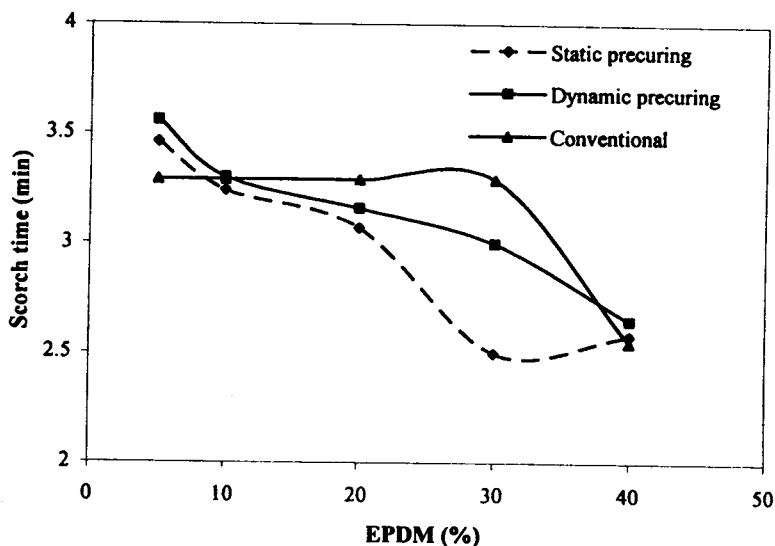
คำนวณหาผลต่างของค่าแรงบิดสูงสุดกับค่าแรงบิดต่ำสุด ของคอมปาวด์ที่เบลนด์แบบต่างๆ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.43



รูปที่ 4.43 ค่า  $M_H - M_L$  ของยางเบลนด์ที่ใช้ยางอีพดีเอ็มแบบต่างๆ

จากรูปที่ 4.43 พบว่า ผลต่างของค่าแรงบิดสูงสุดกับค่าแรงบิดต่ำสุดของยางเบลนด์แบบวัลคาไนซ์บางส่วนแบบไดนามิกมีค่าสูงกว่ายางเบลนด์แบบวัลคาไนซ์บางส่วนแบบสแตติก และแบบปกติตามลำดับ ซึ่งผลต่างของค่าแรงบิดสูงสุดกับค่าแรงบิดต่ำสุดเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงปริมาณการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลยาง กล่าวคือ เมื่อเริ่มเกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลยางค่าแรงบิดจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งค่าแรงบิดถึงจุดสูงสุดหรือจุดคงที่ ถือว่าเป็นจุดที่เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลยางสูงสุดด้วย กล่าวได้ว่ายางเบลนด์แบบวัลคาไนซ์บางส่วนแบบไดนามิกมีปริมาณพันธะเชื่อมโยงสูงกว่าแบบสแตติก และแบบปกติ ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณยางอีพดีเอ็มของเบลนด์ที่ใช้ยางอีพดีเอ็มที่ทำการวัลคาไนซ์บางส่วนแบบสแตติกมีแนวโน้มทำให้ค่าผลต่างของค่าแรงบิดสูงสุดกับค่าแรงบิดต่ำสุดลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Suma *et al.*, (1993) ซึ่งพบว่าการเพิ่มปริมาณยางอีพดีเอ็มส่งผลทำให้ปริมาณของพันธะเชื่อมโยงในยางเบลนด์ลดลง ส่วนยางเบลนด์ที่ใช้ยางอีพดีเอ็มที่ทำการวัลคาไนซ์แบบปกติมีผลต่างของค่าแรงบิดสูงสุดและต่ำสุด เพิ่มขึ้นตามปริมาณยางอีพดีเอ็ม ส่วนยางเบลนด์ที่ทำการวัลคาไนซ์บางส่วนแบบไดนามิกมีผลต่างของค่าแรงบิดสูงสุดและต่ำสุดมีค่าค่อนข้างคงที่ เมื่อเพิ่มปริมาณของยางอีพดีเอ็มตั้งแต่ 5-40%

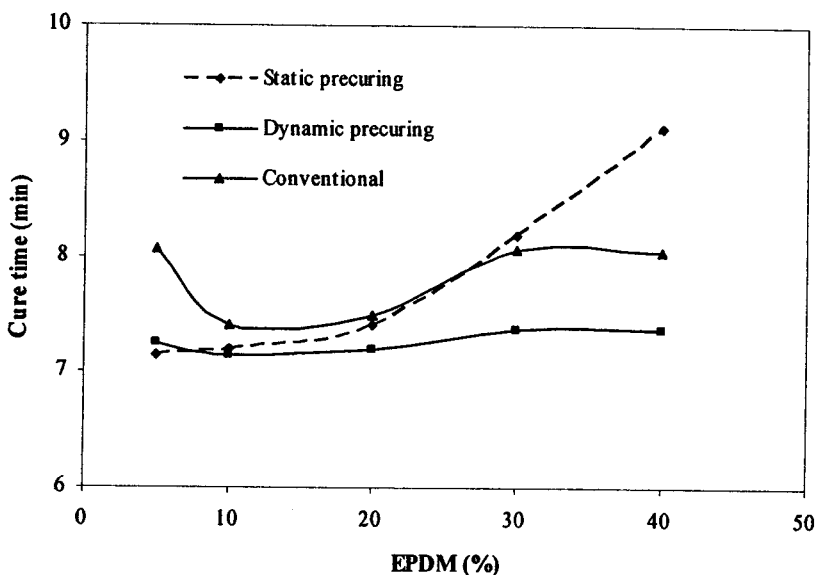
จากตารางที่ 4.23 เขียนกราฟแสดงเวลาการสกอซ (Scorch time) ของยางเบลนด์แบบต่างๆ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.44



รูปที่ 4.44 เวลาการสกอซของยางเบลนด์ที่ใช้ยางอีพดีเอ็มแบบต่างๆ

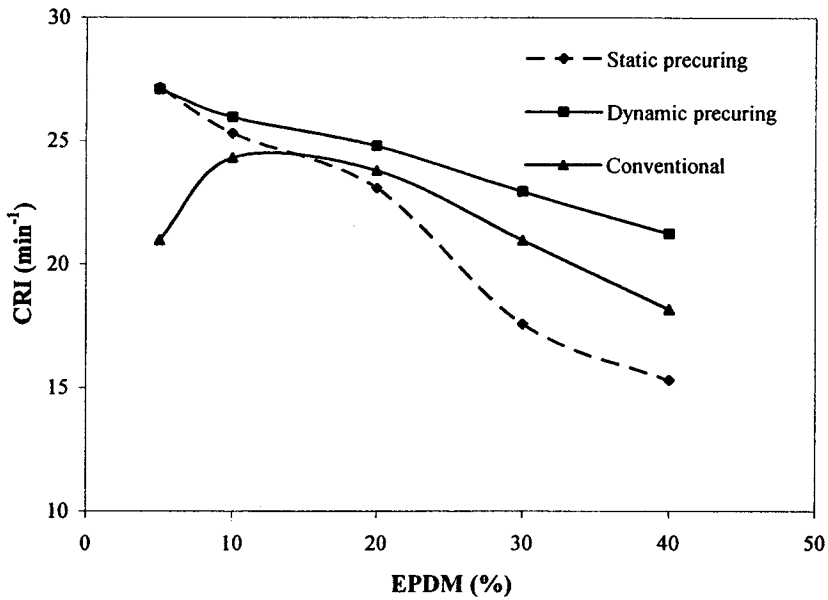
จากรูปที่ 4.44 เปรียบเทียบระยะเวลาที่สามารถแปรรูปได้ (Scorch time) ของยางเบลนด์ที่ใช้ยางอีพดีเอ็มที่วัลคาไนซ์บางส่วนแบบสแตติกมีระยะเวลาที่ยางสามารถแปรรูปได้สั้นที่สุด ส่วนยางเบลนด์แบบไดนามิกส์จะให้เวลาที่ยางสามารถแปรรูปได้สูงกว่า แสดงให้เห็นว่ายางเบลนด์แบบไดนามิกส์มีความปลอดภัยในการแปรรูป หรือยางสามารถไหล ได้นานกว่ายางเบลนด์แบบสแตติก ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากการวัลคาไนซ์บางส่วนแบบสแตติกนั้น ยางได้รับความร้อน แต่ขณะได้รับความร้อนยางไม่ได้รับแรงเฉือนร่วมด้วย ประกอบกับยางเป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดี ทำให้เกิดการสกอซ หรือเชื่อมโยงบางส่วนได้เพียงบริเวณผิวของบริเวณที่สัมผัสความร้อนเป็นส่วนใหญ่ ส่งผลทำให้ยางเบลนด์ที่ใช้ยางอีพดีเอ็มที่วัลคาไนซ์บางส่วนแบบสแตติกมีเวลาที่ยางสามารถแปรรูปได้สั้นกว่าการเบลนด์แบบไดนามิกส์ ซึ่งการเกิดการวัลคาไนซ์บางส่วนของยางอีพดีเอ็มสามารถเกิดได้อย่างทั่วถึง ส่วนยางเบลนด์แบบปกติมีแนวโน้มระยะเวลาที่ยางสามารถแปรรูปได้ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

จากตารางที่ 4.23 เขียนกราฟแสดงเวลาการวัลคาไนซ์ (cure time) ของยางเบลนด์แบบต่างๆ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.45



รูปที่ 4.45 เวลาการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ที่ใช้ยางอีพดีเอ็มแบบต่างๆ

จากรูปที่ 4.45 จะเห็นได้ว่า เวลาในการวัลคาไนซ์ยางเบลนด์แบบปกติยาวกว่ายางที่วัลคาไนซ์โดยใช้ยางอีพดีเอ็มที่เกิดการวัลคาไนซ์บางส่วนแบบสแตติกและแบบไดนามิกส์ ตามลำดับ และการเบลนด์ที่วัลคาไนซ์เฟสยางอีพดีเอ็มบางส่วนด้วยเทคนิคแบบสแตติกมีระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ยาวกว่าแบบไดนามิกส์เล็กน้อย นอกจากนี้พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณยางอีพดีเอ็มในยางเบลนด์ ส่งผลทำให้ระยะเวลาในการวัลคาไนซ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางอีพดีเอ็ม เนื่องจากยางอีพดีเอ็มเกิดการวัลคาไนซ์ได้ช้ากว่ายางธรรมชาติและยางบิวทาไดอีน



รูปที่ 4.46 อัตราการวัลคาไนซ์ของยางเบลนค์ที่ใช้ยางอีพดีเอ็มแบบต่างๆ

จากรูปที่ 4.46 จะเห็นได้ว่ายางเบลนค์ที่ใช้ยางอีพดีเอ็มที่วัลคาไนซ์บางส่วนแบบไดนามิกมีอัตราการวัลคาไนซ์สูงกว่ายางเบลนค์แบบปกติ และแบบสแตติก ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากยางเบลนค์ที่ใช้ยางอีพดีเอ็มที่วัลคาไนซ์บางส่วนแบบไดนามิกเกิดการวัลคาไนซ์ร่วม (covulcanization) ของยางเบลนค์ทั้ง 3 ชนิด คือ ยางธรรมชาติ ยางบิวทาไดอิน และยางอีพดีเอ็มได้ดี ส่งผลให้ยางเบลนค์มีปริมาณพันธะเชื่อมโยงในเฟสยางอีพดีเอ็มและที่บริเวณผิวสัมผัส (interface) ของยางเบลนค์มีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น (Suma, *et al.*, 1993) ทำให้อัตราการวัลคาไนซ์เพิ่มสูงขึ้น ส่วนการเบลนค์ที่ใช้ยางอีพดีเอ็มที่วัลคาไนซ์บางส่วนแบบสแตติกให้อัตราการวัลคาไนซ์ที่ต่ำกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการวัลคาไนซ์บางส่วนแบบสแตติกนั้น ยางได้รับความร้อนเป็นเวลานาน ทำให้เกิดการสกอซ หรือเชื่อมโยงบางส่วนได้เพียงบริเวณผิวข้างเป็นส่วนใหญ่ ส่งผลทำให้ยางเบลนค์แบบสแตติกมีการเชื่อมโยงบริเวณผิวสัมผัสที่ต่ำกว่ายางเบลนค์แบบไดนามิก



#### 4.5 เปรียบเทียบอิทธิพลของเทคนิคการเบลนด์แบบต่างๆ ต่อสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์

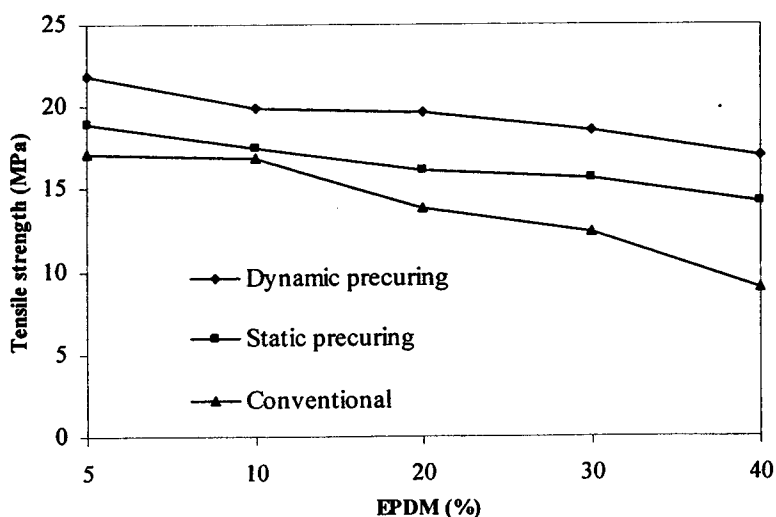
##### 4.5.1 สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง

ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยางวัลคาไนซ์ที่ได้จากการเบลนด์ที่ใช้ยางอีพดีเอ็มแบบไม่วัลคาไนซ์บางส่วนกับการเบลนด์ที่วัลคาไนซ์อีพดีเอ็มบางส่วน ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.24

ตารางที่ 4.24 ความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนด์ NR/BR/EPDM ด้วยเทคนิคแบบต่างๆ

Quantity of EPDM (%)	Tensile strength (MPa)		
	Conventional	Static precuring	Dynamic precuring
5	17.07	18.91	21.86
10	16.90	17.45	19.89
20	13.87	16.15	19.68
30	12.39	15.64	18.6
40	8.92	14.69	17.00

จากตารางที่ 2.24 นำมาเขียนกราฟเปรียบเทียบความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนด์แบบต่างๆ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.47



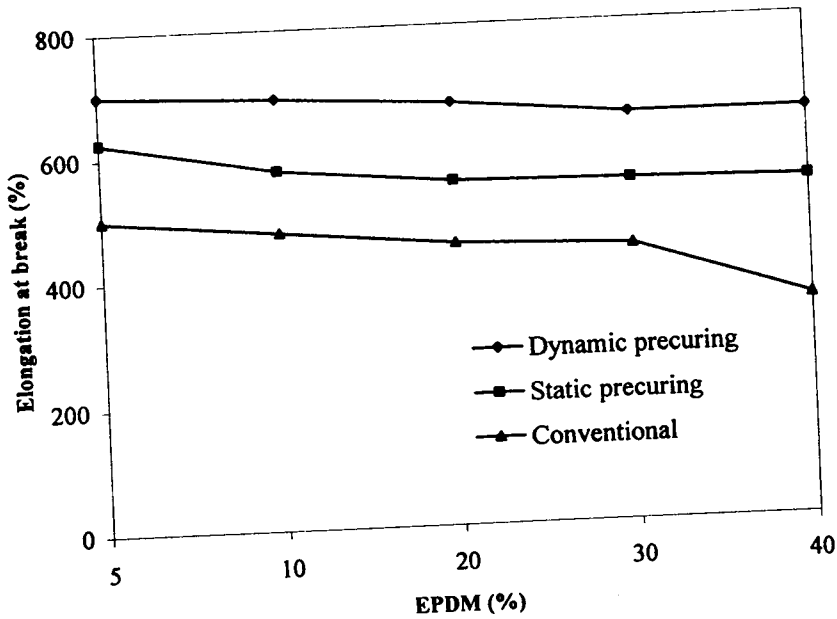
รูปที่ 4.47 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนด์ NR/BR/EPDM

จากรูปที่ 4.47 พบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ที่ทำการเบลนด์แบบปกติ ยางเบลนด์ที่ทำการวัลคาไนซ์ยางอีพดีเอ็มบางส่วนแบบสแตติกและแบบไดนามิกส์ พบว่า ความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลนด์มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของยางอีพดีเอ็มที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณยางอีพดีเอ็มในยางเบลนด์ส่งผลทำให้ปริมาณพันธะเชื่อมโยงในยางเบลนด์ลดลง นอกจากนี้การเบลนด์ที่ทำการวัลคาไนซ์ยางอีพดีเอ็มบางส่วนแบบไดนามิกส์ มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่าการเบลนด์แบบสแตติกและแบบปกติ ตามลำดับ เนื่องจากการเบลนด์โดยการวัลคาไนซ์ยางอีพดีเอ็มบางส่วนทั้งแบบสแตติกและแบบไดนามิกส์ทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ร่วม (covulcanization) ส่งผลให้ยางเบลนด์มีปริมาณพันธะเชื่อมโยงในเฟสยางอีพดีเอ็มและที่บริเวณผิวสัมผัส (interface) ของยางมีค่าใกล้เคียงกัน (Suma, *et al.*, 1993) ส่วนการเบลนด์แบบปกติให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงต่ำที่สุด เนื่องมาจากสารวัลคาไนซ์แพร่ไปยังเฟสของยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอีนมากกว่าในระหว่างการบดผสมและการวัลคาไนซ์ ทำให้เฟสยางอีพดีเอ็มเกิดการวัลคาไนซ์ไม่เต็มที่ (undercure) ทำให้ยางไม่เกิดการวัลคาไนซ์ร่วม (covulcanization) ยางเบลนด์แบบปกติจึงมีความต้านทานต่อแรงดึงที่ต่ำกว่า (Suma *et al.*, 1993)

ตารางที่ 4.25 ความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ NR/BR/EPDM ด้วยเทคนิคแบบต่างๆ

Quantity of EPDM (%)	Elongation at break (%)		
	Conventional	Static precuring	Dynamic precuring
5	500	625	700
10	475	575	690
20	450	550	675
30	440	545	650
40	350	540	650

จากตารางที่ 4.25 นำมาเขียนกราฟเปรียบเทียบความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์แบบต่างๆ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.48



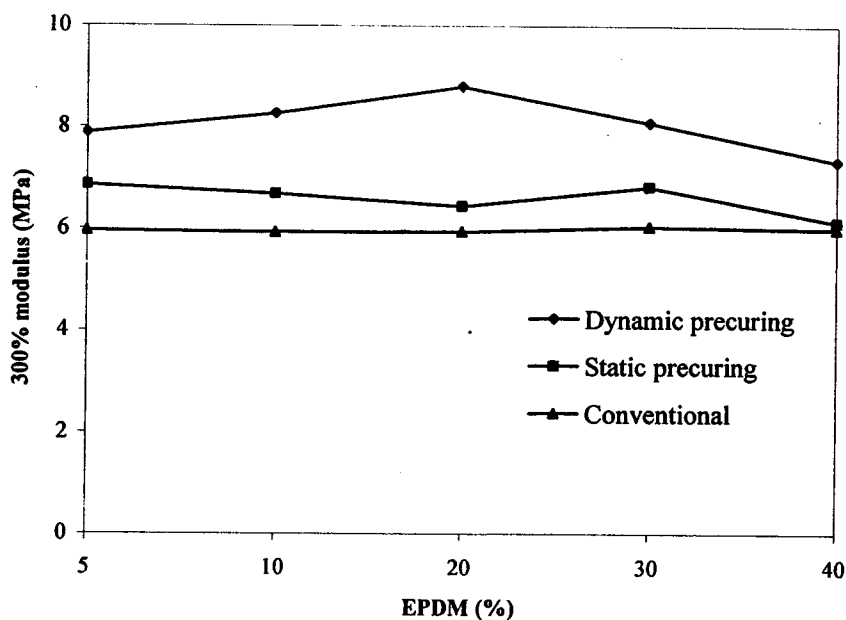
รูปที่ 4.48 ความสามารถในการยืดของยางเบลนค์ NR/BR/EPDM

จากรูปที่ 4.48 พบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบความสามารถในการยืดจนขาดของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนค์แบบปกติ ยางเบลนค์ที่ทำการวัลคาไนซ์ยางอีพดีเอ็มบางส่วนแบบสแตติกและแบบไดนามิกส์ พบว่า ความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนค์มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มปริมาณของยางอีพดีเอ็ม เนื่องจากการเพิ่มปริมาณยางอีพดีเอ็มทำให้ปริมาณพันธะเชื่อมโยงลดลง เมื่อปริมาณพันธะเชื่อมโยงลดลงความแข็งแรงของยางลดลงตามไปด้วย แต่เนื่องจากอิทธิพลของยางธรรมชาติ ยางบิวทาไดอีนซึ่งมีความสามารถในการยืดจนขาดสูงกว่ายางอีพดีเอ็ม ทำให้ยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอีนแสดงสมบัติออกมาได้เด่นกว่า (Suma *et al.*, 1993) นอกจากนี้ยังพบว่า การเบลนค์แบบปกติมีค่าความสามารถในการยืดจนขาดต่ำที่สุด เนื่องจากการเบลนค์แบบปกติสารวัลคาไนซ์จะแพร่ไปยังเฟสยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอีนมากกว่า เป็นผลให้เฟสยางทั้งสองสุกเกินไป (over cure) (Suma *et al.*, 1993) ส่วนเฟสยางอีพดีเอ็มเกิดการวัลคาไนซ์ไม่เต็มที่ (under cure) ทำให้ยางเบลนค์ไม่เกิดการวัลคาไนซ์ร่วม ยางจึงมีสมบัติด้านการยืดลดลง ส่วนการทำการวัลคาไนซ์ยางอีพดีเอ็มบางส่วนแบบไดนามิกส์ให้ค่าความสามารถในการยืดจนขาดสูงกว่าการเบลนค์แบบสแตติก อาจเนื่องมาจากการเกิดวัลคาไนซ์ร่วม (covulcanization) ทำให้ยางเบลนค์มีปริมาณพันธะเชื่อมโยงในเฟสยางอีพดีเอ็มและบริเวณผิวสัมผัสมีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.26 ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300% ของยางเบลนค์ NR/BR/EPDM ด้วยเทคนิคแบบต่างๆ

Quantity of EPDM (%)	300% modulus (MPa)		
	Conventional	Static precuring	Dynamic precuring
5	5.96	6.86	7.89
10	5.93	6.69	8.27
20	5.94	6.44	8.80
30	6.04	6.83	8.09
40	6.00	6.13	7.33

จากตารางที่ 4.26 นำมาเขียนกราฟเปรียบเทียบมอดูลัสที่ระยะยืด 300% ของยางเบลนค์แบบต่างๆ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.49



รูปที่ 4.49 ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300% ของยางเบลนค์ NR/BR/EPDM

จากรูปที่ 4.49 พบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบมอดูลัสที่ระยะยืด 300% ของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์แบบปกติ ยางเบลนด์ที่ทำการวัลคาไนซ์ยางอีพดีเอ็มบางส่วนแบบสแตติกและแบบไดนามิกส์ พบว่า ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300% ของเบลนด์ที่ใช้ยางอีพดีเอ็มที่วัลคาไนซ์บางส่วนแบบไดนามิกส์สูงกว่ายางเบลนด์แบบสแตติกและแบบปกติ ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากการวัลคาไนซ์ยางอีพดีเอ็มบางส่วน ก่อนทำการเบลนด์กับยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินส่งผลทำให้ยางเบลนด์เกิดวัลคาไนซ์ร่วม (covulcanization) ทำให้ยางเบลนด์มีปริมาณพันธะเชื่อมโยงในเฟสยางอีพดีเอ็มและบริเวณผิวสัมผัสกับยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น ทำให้ยางมีมอดูลัสที่ระยะยืด 300% สูงขึ้น

#### 4.5.2 สมบัติความต้านทานต่อการหักงอ

ทดสอบความต้านทานต่อการหักงอของยางเบลนด์ด้วยเครื่อง De Mattia Flexing Machine ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.27

ตารางที่ 4.27 ความต้านทานต่อการหักงอของยางเบลนด์ NR/BR/EPDM ด้วยเทคนิคแบบต่างๆ

Quantity of EPDM (%)	flex resistance (kilocycle)		
	Conventional	Static precuring	Dynamic precuring
5	250	850	> 2,500
10	130	550	> 2,500
20	100	260	> 2,500
30	70	170	> 2,500
40	60	140	> 2,500

จากตารางที่ 4.27 พบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบความต้านทานต่อการหักงอของยางเบลนด์แบบปกติกับกับยางเบลนด์ที่ทำการวัลคาไนซ์ยางอีพดีเอ็มบางส่วนแบบสแตติกและแบบไดนามิกส์ พบว่าความต้านทานต่อการหักงอของยางเบลนด์มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณยางอีพดีเอ็มที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเพิ่มปริมาณยางอีพดีเอ็มในยางเบลนด์ส่งผลให้ปริมาณพันธะเชื่อมโยงลดลง โดยการ

เบลนค์แบบปกติมีความต้านทานต่อการหักงอต่ำที่สุด เนื่องจากการเบลนค์แบบปกติสารวัลคาไนซ์จะแพร่ไปยังเฟสยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินมากกว่า เป็นผลให้เฟสยางทั้งสองสุกเกินไป (Suma *et al.*, 1993) ทำให้สมบัติด้านความต้านทานต่อการหักงอลดลง ยางเบลนค์ที่ใช้ยางอีพดีเอ็มที่ทำการวัลคาไนซ์บางส่วนแบบไดนามิกมีค่าความต้านทานต่อการหักงอสูงกว่าแบบสแตติก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากยางทั้งสามชนิด คือ ยางธรรมชาติ ยางบิวทาไดอิน และยางอีพดีเอ็มเกิดการเกิดวัลคาไนซ์ร่วม (covulcanization) ทำให้ยางเบลนค์มีปริมาณพันธะเชื่อมโยงในเฟสยางอีพดีเอ็มและบริเวณผิวสัมผัสกับยางอีก 2 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน ส่งผลให้การแยกชั้นของยางเบลนค์ลดลง ทำให้ความต้านทานการหักงอดีขึ้น

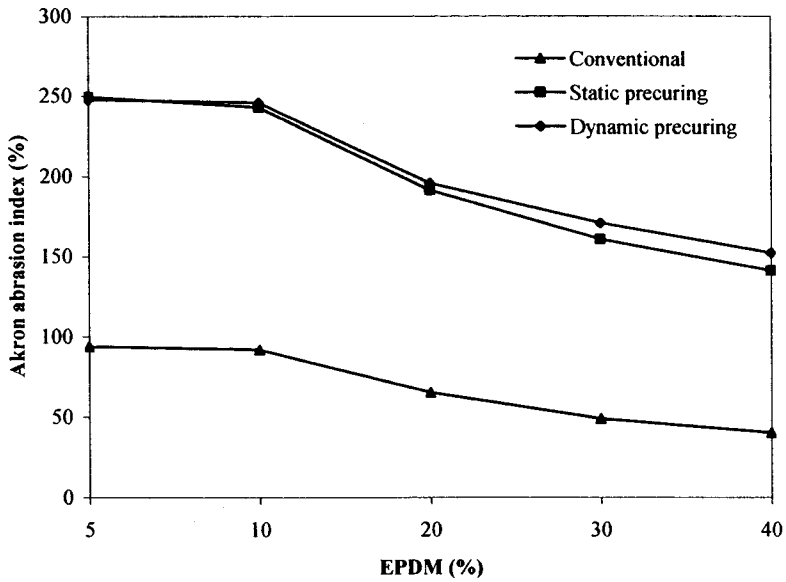
#### 4.5.3 สมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอ

ทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอของยางแต่ละชนิดด้วยเครื่อง Akron abrader ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.28

ตารางที่ 4.28 ความต้านทานต่อการสึกหรอของยางเบลนค์ NR/BR/EPDM ด้วยเทคนิคแบบต่างๆ

Quantity of EPDM (%)	Akron abrasion index (%)		
	Conventional	Static precuring	Dynamic precuring
5	99.66	249.33	247.6
10	91.55	242.90	245.8
20	65.04	191.41	195.78
30	48.80	160.61	170.85
40	40.18	141.19	152.23

จากตารางที่ 4.28 นำมาเขียนกราฟเปรียบเทียบความต้านทานต่อการสึกหรอของยางเบลนค์แบบต่างๆ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.50



รูปที่ 4.50 ความต้านทานต่อการสึกหรอของยางที่เบลนด์เทคนิคแบบต่างๆ

จากรูปที่ 4.50 พบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบความต้านทานต่อการสึกหรอของยางเบลนด์แบบปกติกับยางเบลนด์ที่ทำการวัลคาไนซ์ยางอีพดีเอ็มบางส่วนแบบสแตติกและแบบไดนามิกส์พบว่า ความต้านทานต่อการสึกหรอของยางเบลนด์มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของยางอีพดีเอ็ม ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเพิ่มปริมาณยางอีพดีเอ็มในยางเบลนด์ส่งผลให้ปริมาณพันธะเชื่อมโยงลดลง ทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลน้อย ส่งผลให้สมบัติด้านความต้านทานต่อการสึกหรอลดลง ยางเบลนด์ที่ใช้ยางอีพดีเอ็มที่ทำการวัลคาไนซ์บางส่วนแบบไดนามิกส์มีค่าความต้านทานต่อการสึกหรอสูงกว่าแบบสแตติกและแบบปกติ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเกิดวัลคาไนซ์ร่วม (covulcanization) ทำให้ยางเบลนด์มีปริมาณพันธะเชื่อมโยงในเฟสยางอีพดีเอ็มและบริเวณผิวสัมผัสมีค่าใกล้เคียงกัน (Suma *et al.*, 1993) ส่งผลทำให้ยางมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสูง เมื่อได้รับแรงขจัดทำให้ยางมีปริมาตรที่หลุดออกไปน้อยกว่าการเบลนด์แบบปกติ เนื่องจากการเบลนด์แบบปกติมีการแพร่ของสารวัลคาไนซ์จากเฟสยางอีพดีเอ็มไปยังเฟสยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอีน ทำให้เฟสยางอีพดีเอ็มวัลคาไนซ์ไม่เต็มที่ส่วนเฟสของยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอีนสุกเกินไป ส่งผลให้ยางเบลนด์มีสมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอต่ำ

#### 4.5.4 สมบัติความร้อนสะสมของยาง

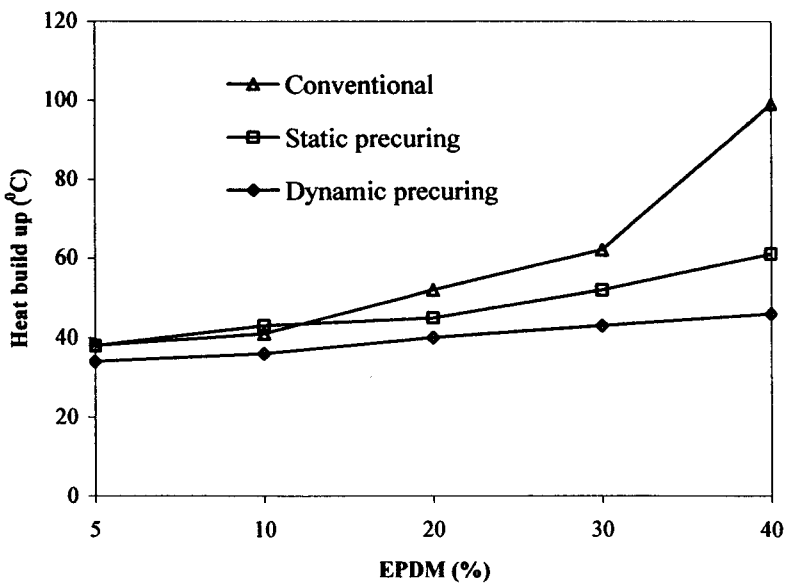
ทดสอบความร้อนสะสมของยางเบลนค์ ด้วยเครื่อง B.F Goodrich flexometer ที่

อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.29

ตารางที่ 4.29 ค่าความร้อนสะสมของยางเบลนค์ NR/BR/EPDM ด้วยเทคนิคแบบต่างๆ

Quantity of EPDM (%)	Heat build up ( $^{\circ}\text{C}$ )		
	Conventional	Static precuring	Dynamic precuring
5	38	38	34
10	41	43	36
20	52	45	40
30	62	52	43
40	99	61	46

จากตารางที่ 4.29 นำมาเขียนกราฟเปรียบเทียบความร้อนสะสมของยางเบลนค์แบบต่างๆ ได้ผล  
ดังแสดงในรูปที่ 4.51



รูปที่ 4.51 ค่าความร้อนสะสมของยางเบลนค์



จากรูปที่ 4.51 เปรียบเทียบค่าความร้อนสะสมของการเบลนค์แบบต่างๆ พบว่า การเบลนค์แบบธรรมดาให้ค่าความร้อนสะสมสูงสุด รองลงมาคือยางเบลนค์ที่ใช้ยางอีพิตีเอ็มที่วัลคาไนซ์บางส่วนแบบสแตติก และแบบไดนามิกส์ ตามลำดับ และพบว่า การเพิ่มปริมาณอีพิตีเอ็มทำให้ค่าความร้อนสะสมมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณยางอีพิตีเอ็มนั้นส่งผลให้ปริมาณพันธะเชื่อมโยงลดลง ความเป็นยางหรือความยืดหยุ่นน้อยลง ดังนั้นเมื่อยางได้รับพลังงานจำนวนหนึ่งจากแรงกระทำแบบพลวัตเชิงกล พลังงานส่วนหนึ่งจะถูกปล่อยออกมาเมื่อยางคืนสู่รูปร่างเดิม และมีพลังงานส่วนหนึ่งจะสูญหายไปในเรื่องยางในรูปของความร้อนมาก ดังนั้นการเพิ่มปริมาณยางอีพิตีเอ็มจึงทำให้ยางเบลนค์มีค่าความร้อนสะสมสูงขึ้น นอกจากนี้ พบว่าการเบลนค์โดยการวัลคาไนซ์ยางอีพิตีเอ็มบางส่วนแบบไดนามิกส์ ให้ค่าความร้อนสะสมต่ำกว่าแบบสแตติก ตามลำดับ เนื่องจากการเบลนค์แบบไดนามิกส์ให้ปริมาณพันธะเชื่อมโยงมากกว่า ทำให้ยางมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความร้อนสะสมต่ำกว่า เนื่องจากพลังงานสูญหายไปในเรื่องยางในรูปของความร้อนน้อยกว่า

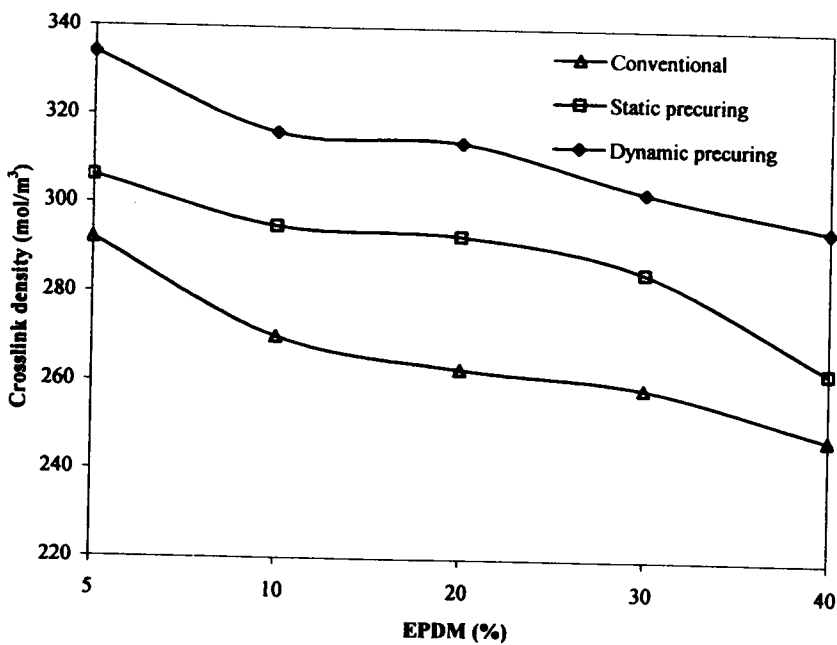
#### 4.5.5 ความหนาแน่นพันธะเชื่อมโยง

เปรียบเทียบความหนาแน่นพันธะเชื่อมโยงของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนค์ NR/BR/EPDM แบบปกติ ยางเบลนค์ที่ใช้ยางอีพิตีเอ็มที่วัลคาไนซ์บางส่วนแบบสแตติก โดยการอบที่เวลา 5 ชั่วโมง และยางเบลนค์ที่วัลคาไนซ์ยางอีพิตีเอ็มบางส่วนแบบไดนามิกส์ ที่ระดับค่าทอร์กเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ของค่าทอร์กสูงสุดจากเครื่องบราเบนเดอร์ พลาสติกอร์เคอร์ โดยแปรปริมาณยางอีพิตีเอ็ม เท่ากับ 5, 10, 20, 30 และ 40% ตามลำดับ ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.30

ตารางที่ 4.30 ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงของยางเบลนด์ NR/BR/EPDM ด้วยเทคนิคแบบต่างๆ

Quantity of EPDM (%)	Crosslink density ( $\text{mol/m}^3$ )		
	Conventional	Static precuring	Dynamic precuring
5	292	306	334
10	270	295	316
20	263	293	314
30	259	285	303
40	248	263	295

จากตารางที่ 4.30 เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง เมื่อทำการเบลนด์แบบปกติ แบบสแตติก และแบบไดนามิกส์ ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.52



รูปที่ 4.52 ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงของยางเบลนด์

จากรูปที่ 4.52 พบว่า ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงของยางเบลนด์มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณยางอีพิตีเอ็มที่เพิ่มขึ้น ทั้ง 3 เทคนิคที่ใช้ในการเบลนด์ โดยที่การเบลนด์แบบไดนามิกส์ให้ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงสูงสุด รองลงมาคือยางเบลนด์แบบสแตติก และ ยางเบลนด์แบบปกติตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการวัลคาไนซ์บางส่วนแบบไดนามิกส์นั้น ยางได้รับความร้อนอย่างต่อเนื่องและเกิดการวัลคาไนซ์บางส่วนอย่างสม่ำเสมอขณะได้รับแรงเฉือน ยางจึงมีความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงที่สูง ส่วนการวัลคาไนซ์บางส่วนแบบสแตติกนั้น ซึ่งยางได้รับความร้อน แต่ขณะได้รับความร้อนนั้นยางไม่ได้รับแรงเฉือน ประกอบกับยางเป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดี ทำให้เกิดการสกอกซ์หรือเชื่อมโยงบางส่วนได้เพียงบริเวณผิวยางเป็นส่วนใหญ่ ส่งผลให้ยางเบลนด์ NR/BR/EPDM ที่วัลคาไนซ์ยางอีพิตีเอ็มบางส่วนแบบสแตติกมีค่าความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงต่ำกว่าแบบไดนามิกส์นอกจากนี้พบว่า การเพิ่มปริมาณยางอีพิตีเอ็มส่งผลทำให้ปริมาณของพันธะเชื่อมโยงในยางเบลนด์ลดลง (Suma *et al.*, 1993)

#### 4.5.6 สมบัติด้านความต้านทานต่อโอโซนแบบพลวัต (Dynamic Ozone resistance)

เปรียบเทียบความต้านทานต่อโอโซนของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์แบบปกติ การวัลคาไนซ์ยางอีพิตีเอ็มบางส่วนแบบสแตติก และแบบไดนามิกส์ โดยทำการทดสอบแบบพลวัต (Dynamic) โดยยึดชิ้นทดสอบเป็นระยะ  $25 \pm 3\%$  ด้วยความถี่ 0.5 รอบต่อวินาที ที่สภาวะความเข้มข้นของโอโซนเท่ากับ 50 ppm และอุณหภูมิ  $40^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.31

ตารางที่ 4.31 ความต้านทานต่อโอโซนของยางเบลนด์แบบต่างๆ

ตัวอย่าง	ผลการศึกษา
NR	ปรากฏรอยแตกจำนวนนับไม่ถ้วน ความยาวรอยแตกมากกว่า 3 มม.
BR	”
EPDM	ไม่ปรากฏรอยแตก
NR/BR	ปรากฏรอยแตกจำนวนนับไม่ถ้วน ความยาวรอยแตกประมาณ 3 มม.
<b>การเบลนด์แบบปกติ</b>	
NR/BR/5% EPDM	ปรากฏรอยแตกจำนวนนับไม่ถ้วน ความยาวรอยแตกมากกว่า 3 มม.
NR/BR/10 %EPDM	ปรากฏรอยแตกจำนวนนับไม่ถ้วน ความยาวรอยแตกประมาณ 1 มม.
NR/BR/20%EPDM	”
NR/BR/30%EPDM	”
NR/BR/40%EPDM	”
<b>การเบลนด์โดยการวัดคาบในซึ่ยาง</b>	
<b>อีพีดีเอ็มบางส่วนแบบสแตติก</b>	
NR/BR/5% EPDM	ปรากฏรอยแตกเล็กๆ จำนวนมาก ความยาวรอยแตกละเอียดกว่า 1 มม.
NR/BR/10 %EPDM	”
NR/BR/20%EPDM	”
NR/BR/30%EPDM	”
NR/BR/40%EPDM	”
<b>การเบลนด์โดยการวัดคาบในซึ่ยาง</b>	
<b>อีพีดีเอ็มบางส่วนแบบไดนามิกส์</b>	
NR/BR/5%EPDM	ปรากฏรอยแตกเล็กๆ จำนวนมาก ความยาวรอยแตกละเอียดกว่า 1 มม.
NR/BR/10%EPDM	”
NR/BR/20%EPDM	”
NR/BR/30%EPDM	”
NR/BR/40%EPDM	”

จากตารางที่ 4.31 พบว่ายางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินเกิดรอยแตกมากกว่า 3 มม. ในขณะที่ยางอีพิตีเอ็มไม่ปรากฏรอยแตก แสดงว่ายางธรรมชาติ และยางบิวทาไดอิน มีความต้านทานต่อโอโซน ค่อนข้างกว่ายางอีพิตีเอ็ม ทั้งนี้เนื่องจากยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินมีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อการถูกทำลายโดยโอโซน ในขณะที่ยางอีพิตีเอ็มมีโครงสร้างที่อึดตัว ไม่มีพันธะคู่ในสายโซ่หลักของโมเลกุล ทำให้มีความทนทานต่อโอโซนดีมาก นอกจากนี้พบว่า การเบลนค์ยางแบบปกติ จะให้ความต้านทานต่อโอโซน คีขึ้นเมื่อใช้ปริมาณยางอีพิตีเอ็มในยางเบลนค์มากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการเบลนค์ที่ใช้ยางอีพิตีเอ็มที่วัลคาไนซ์บางส่วนแบบไดนามิกส์และแบบสแตติกให้ผลที่ใกล้เคียงกัน คือปรากฏรอยแตกเล็กๆ ความยาวไม่เกิน 1 มม. เท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากเฟสยางอีพิตีเอ็มกระจายตัวเป็นเฟสกระจาย (disperse phase) ในยางเบลนค์มากขึ้น ส่งผลทำให้ให้ยางเบลนค์มีความต้านทานต่อโอโซนจะเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการวัลคาไนซ์ยางอีพิตีเอ็มบางส่วนกับกรณีการเบลนค์แบบปกติ พบว่าการวัลคาไนซ์ยางอีพิตีเอ็มบางส่วนจะให้สมบัติความต้านทานต่อโอโซนดีกว่า