

## บทที่ 4

### ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 การศึกษาสมบัติเบื้องต้นของน้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันมะพร้าว

การศึกษาสมบัติเบื้องต้นของน้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม และน้ำมันถั่วเหลืองเพื่อให้ทราบถึงองค์ประกอบทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมัน ได้ผลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สมบัติเบื้องต้นของน้ำมัน

การวิเคราะห์	ผลการวิเคราะห์		
	น้ำมันมะพร้าว	น้ำมันปาล์ม	น้ำมันถั่วเหลือง
ค่าไอโอดีน (mgI <sub>2</sub> /g)	9	51	132
ค่าเปอร์ออกไซด์ (meq peroxide/g oil)	0.54	0.27	0.02
ค่าสaponนิไฟเคชัน (mg KOH/g oil)	249	198	187
ค่าความเป็นกรด (mg KOH/g oil)	8.75	0.76	0.68
น้ำหนักโมเลกุล (g/mol)	674	847	897
ความหนืด (cp) R3	30	38	50
จุดเดือด (°C)	144-150	338-340	194-198
R <sub>f</sub>	0.62	0.67	0.63

จากตารางที่ 4.1 พบว่า ค่าไอโอดีน (ทดสอบตามมาตรฐาน AOAC 993.20) แสดงถึงความไม่อิ่มตัวของกรดไขมัน หรือจำนวนพันธะคู่ที่มีในโมเลกุลน้ำมัน น้ำมันที่มีความไม่อิ่มตัวสูงจะเกิดการเหม็นหืนได้ง่ายเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย ซึ่งทางกระทรวงสาธารณสุข ได้กำหนดค่าไอโอดีนในช่วง 6-11 mgI<sub>2</sub>/g ซึ่งจะเห็นว่าค่าไอโอดีนที่ได้จากตารางที่ 4.1 มีค่าไม่สูงเกินไปที่จะทำให้ไขมันทั้งสามชนิดเหม็นหืนได้ง่าย

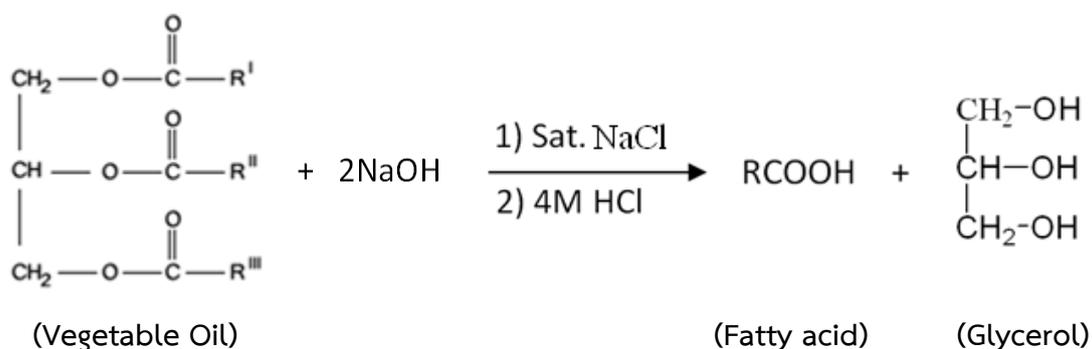
ค่าเปอร์ออกไซด์ (ทดสอบตามมาตรฐาน AOAC 965.33) แสดงถึง ปริมาณสารเปอร์ออกไซด์ที่มีในน้ำมันซึ่งเกิดจากการที่น้ำมันทำปฏิกิริยากับออกซิเจนหรืออากาศ มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีเป็นสารที่ระเหยได้และมีกลิ่นหืน น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม และน้ำมันถั่วเหลือง มีค่าเปอร์ออกไซด์เป็นไปตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขกำหนดไว้ที่ ไม่เกิน 10 meq/g ซึ่งส่งผลต่อการเก็บรักษา

ค่าสaponนิไฟเคชัน (ทดสอบตามมาตรฐาน AOAC 920.160) สามารถนำไปคำนวณน้ำหนักโมเลกุลของน้ำมัน โดยค่าสaponนิไฟเคชันน้อย จะให้ค่าน้ำหนักโมเลกุลมาก จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า น้ำมันถั่วเหลืองมีน้ำหนักโมเลกุลมากที่สุด รองลงมาคือ น้ำมันปาล์มและน้ำมันมะพร้าว ตามลำดับ

ค่าความเป็นกรด แสดงถึงปริมาณหมู่คาร์บอกซิลิกในน้ำมัน โดยบ่งบอกถึงปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในน้ำมัน จากตารางที่ 4.1 ค่าความเป็นกรดของน้ำมันมะพร้าวสูงกว่าที่กระทรวงสาธารณสุขกำหนดไว้ไม่เกิน 4 mg KOH/g oil เนื่องจากน้ำมันมะพร้าวที่ใช้เป็นน้ำมันมะพร้าวจากโรงงาน ไม่ได้ผ่านกรรมวิธีทำให้บริสุทธิ์ จึงมีค่าปริมาณกรดไขมันอิสระสูง

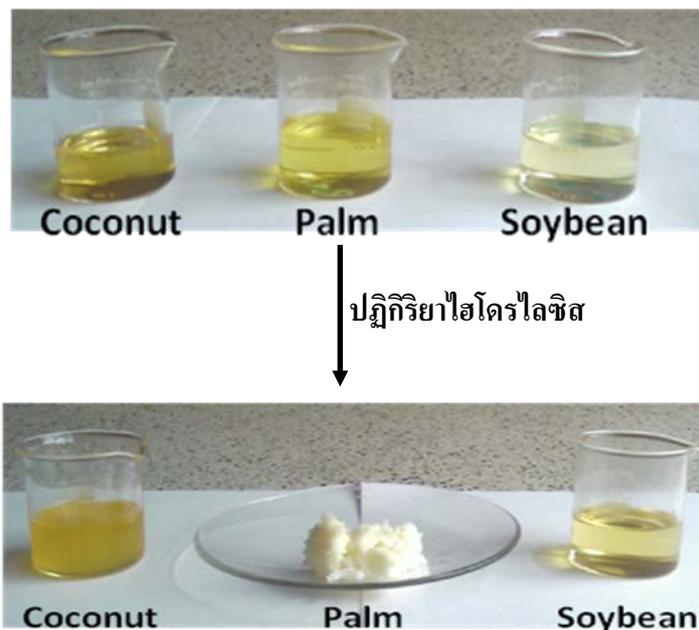
#### 4.2 การ Hydrolysis น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันมะพร้าว

การเตรียมกรดไขมันจากน้ำมันพืชสามารถทำปฏิกิริยา (ดังรูปที่ 4.1) ที่อุณหภูมิ 70 °C ใช้เวลา 9 ชั่วโมง ระหว่างน้ำมันพืชและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในสัดส่วนโดยโมล 1:2 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่ทำให้ได้กรดไขมันในปริมาณสูงถึงร้อยละ 96



รูปที่ 4.1 การไฮโดรไลซิสน้ำมันพืช เพื่อเตรียมกรดไขมัน

ลักษณะทางกายภาพของกรดไขมัน ที่ได้จากน้ำมันพืชทั้งสามชนิดมีลักษณะแตกต่างกัน คือ น้ำมันมะพร้าวให้กรดไขมันเป็นของเหลวสีเหลืองค่อนข้างขุ่น น้ำมันปาล์มให้กรดไขมันเป็นของแข็งสีเหลืองจาง และน้ำมันถั่วเหลืองให้กรดไขมันเป็นของเหลวสีเหลืองใส ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งการที่น้ำมันปาล์มให้กรดไขมันที่เป็นของแข็งเนื่องจากน้ำมันปาล์มประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัวที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าน้ำมันมะพร้าว และกรดไขมันไม่อิ่มตัวชนิด Mono unsaturated ทำให้มีพันธะคู่น้อยกว่าน้ำมันถั่วเหลือง จึงส่งผลให้กรดไขมันจากน้ำมันปาล์มมีลักษณะเป็นของแข็ง แสดงข้อมูลอ้างอิงดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพของกรดไขมันที่ได้จากการไฮโดรไลซิสน้ำมันพืช

ตารางที่ 4.2 ส่วนประกอบของน้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม และน้ำมันถั่วเหลือง (Wenzel and Lammers, 1997)

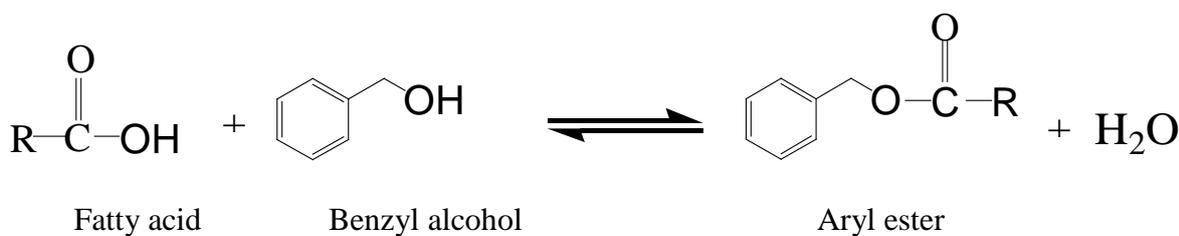
Oils	Unsat./ Sat ratio	Saturated fatty acid					Mono unsaturated	Poly unsaturated	
		Capric acid C10:0	Lauric acid C12:0	Myristic acid C14:0	Palmitic acid C16:0	Stearic acid C18:0		Oleic acid C18:1	Linoleic acid ( $\omega$ 6) C18:2
Coconut	0.1	6	47	18	9	3	6	2	-
Palm	1.0	-	-	1	45	4	40	10	-
Soybean	5.7	-	-	-	11	4	24	54	7

#### 4.3 การสังเคราะห์เอริลเอสเทอร์จากอะโรมาติกแอลกอฮอล์ ที่มีวงเบนซิน 1-2 วง ใช้กรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่ง

##### 4.3.1 สังเคราะห์เอริลเอสเทอร์จากอะโรมาติกแอลกอฮอล์ ที่มีวงเบนซิน 1วง ใช้กรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่ง

การสังเคราะห์เอริลเอสเทอร์ โดยการนำกรดไขมันทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันกับเบนซิลแอลกอฮอล์ ใช้กรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทำการแปรสัดส่วนระหว่างกรดไขมันกับเบนซิลแอลกอฮอล์ (1:1, 1.5:1 และ 2:1) ปริมาณตัวเร่ง (0.25, 1.00 และ 1.50 wt % of benzyl alcohol) อุณหภูมิ (70, 100 และ 130

°C) เวลา (0 -24 hr.) เพื่อหาสภาวะที่ให้ร้อยละเอริลเอสเทอร์มากที่สุด ซึ่งร้อยละเอริลเอสเทอร์ที่ได้จากการแปรตัวแปรต่างๆแสดงดังตารางที่ 2.3 พบว่า สัดส่วนระหว่างกรดไขมันต่อเบนซิลแอลกอฮอล์ต่อกรดซัลฟูริก คือ 1.5:1:0.017 โมล อุณหภูมิ ปฏิกริยา 100 °C และดำเนินปฏิกริยาเป็นเวลา 3 ชม. เป็นสภาวะที่ให้ร้อยละผลิตภัณฑ์มากที่สุด แสดงสมการปฏิกริยาดังรูปที่ 4.3 โดยลักษณะของเอริลเอสเทอร์จากน้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม และน้ำมันถั่วเหลือง มีลักษณะเป็นของเหลวใสสีเหลือง เป็นเจลสีเหลืองและเป็นของเหลวใสสีเหลืองจาง ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 ปฏิกริยาการเตรียมน้ำมันแปรรูปยางเอริลเอสเทอร์จากอะโรมาติกแอลกอฮอล์ ที่มีวงเบนซิน 1 วง

ตารางที่ 4.3 ร้อยละเอริลเอสเทอร์ ที่ได้จากการแปรตัวแปรต่างๆ

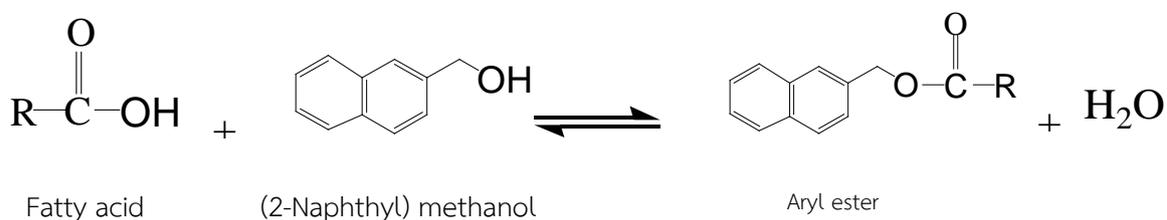
ชนิดของตัวแปร	การแปรปริมาณ	ร้อยละของเอริลเอสเทอร์
กรดไขมัน :	1 : 1	66.24
เบนซิลแอลกอฮอล์	1 : 1.5	80.95
	1 : 2	79.82
ปริมาณตัวเร่ง (wt % of benzyl alcohol)	0.25	77.2
	1.00	76.6
	1.50	79.1
อุณหภูมิ (°C)	70	45.9
	100	97.8
	130	85.4
เวลา (hr.)	1	43.2
	3	97.8
	6	95.4
	12	90.0
	24	89.4



รูปที่ 4.4 ลักษณะทางกายภาพของเอริลเอสเทอร์ที่ได้จากการเอสเทอร์ฟิเคชันน้ำมันพืช

#### 4.3.2 สังเคราะห์เอริลเอสเทอร์จากอะโรมาติกแอลกอฮอล์ ที่มีวงเบนซิน 2 วง ใช้กรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่ง

การสังเคราะห์เอริลเอสเทอร์จากอะโรมาติกแอลกอฮอล์ที่มีวงเบนซิน 2 วง โดยเลือก (2-Naphthyl) methanol มาทำปฏิกิริยากับกรดไขมันเพื่อให้เกิดเป็นสารเอริลเอสเทอร์ที่มีวงแหวนอะโรมาติกในโครงสร้าง 2 วง แสดงปฏิกิริยาการเตรียมดังรูปที่ 4.5 โดยแปรสภาวะการเกิดปฏิกิริยา เช่นเดียวกับการสังเคราะห์เอริลเอสเทอร์จากอะโรมาติกแอลกอฮอล์ที่มีวงเบนซิน 1 วง พบว่าเมื่อนำ (2-Naphthyl) methanol ซึ่งมีลักษณะเป็นเกร็ดของแข็งสีน้ำตาลอ่อนใส่ลงใน reactor ที่ละน้อย พบว่ามีเกร็ดผลึกสีขาวใสเกาะบริเวณรอบผิวด้านในของ reactor และเมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปพิสูจน์เอกลักษณ์สารเบื้องต้นด้วยเทคนิค Thin layer chromatography (TLC) พบว่าไม่พบสารใดตรงตำแหน่งเอสเทอร์ แสดงว่าไม่มีผลิตภัณฑ์เกิดขึ้น



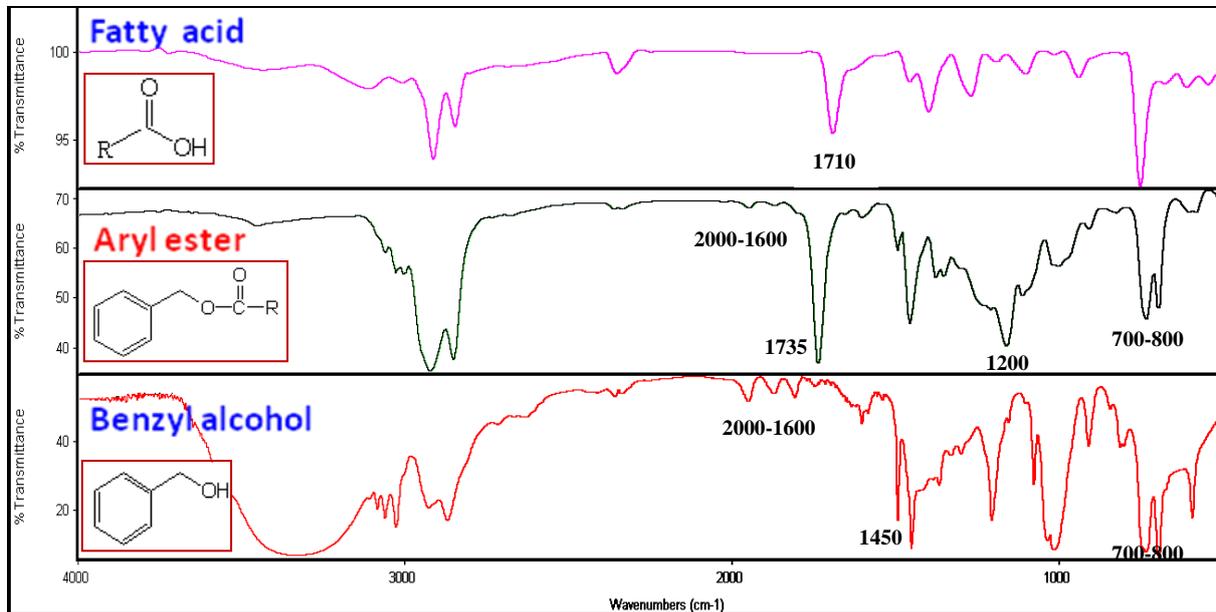
รูปที่ 4.5 ปฏิกิริยาการเตรียมน้ำมันแปรรูปร่างเอริลเอสเทอร์จากอะโรมาติกแอลกอฮอล์ที่มีวงเบนซิน 2 วง

### 4.4 การพิสูจน์โครงสร้างของเอริลเอสเทอร์

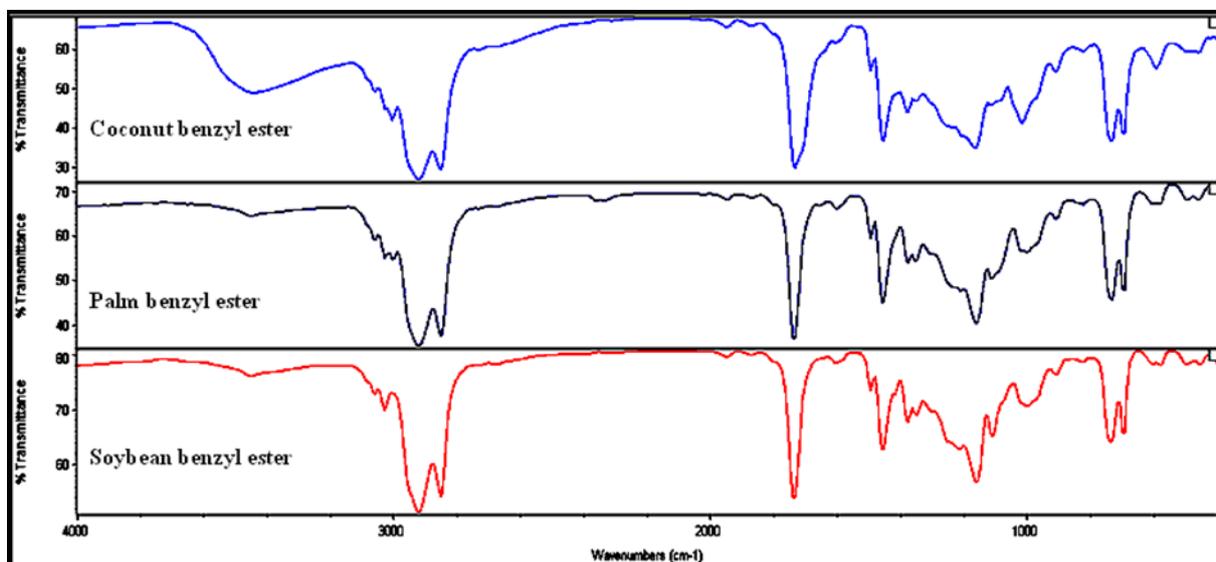
#### 4.4.1 การพิสูจน์โครงสร้างของเอริลเอสเทอร์ด้วยเทคนิค FTIR

การพิสูจน์โครงสร้างเอริลเอสเทอร์ที่ได้จากการเอสเทอร์ฟิเคชันน้ำมันพืช เปรียบเทียบกับสารตั้งต้นทั้งสองชนิดคือ กรดไขมันและเบนซิลแอลกอฮอล์ โดยใช้เทคนิค FTIR ดังรูปที่ 4.6 จะเห็นการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งเลขคลื่นที่พันธะ C=O ของกรดไขมันที่  $1710 \text{ cm}^{-1}$  เป็นตำแหน่งเลขคลื่นที่  $1740 \text{ cm}^{-1}$  ของพันธะ C=O ในโครงสร้างเอริลเอสเทอร์ และจะเห็นพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $2000-1600 \text{ cm}^{-1}$ ,  $1200 \text{ cm}^{-1}$  และ  $800-700 \text{ cm}^{-1}$  แสดงถึงตำแหน่งพันธะ C=C ring stretching, C-O stretching

และ=C-H bending ตามลำดับ ในโครงสร้างของเอริลเอสเทอร์อย่างเห็นได้ชัด และเมื่อพิจารณาการพิสูจน์โครงสร้างเอริลเอสเทอร์จากน้ำมันทั้งสามชนิด พบว่ามีโครงสร้างที่เหมือนกัน ดังรูปที่ 4.7



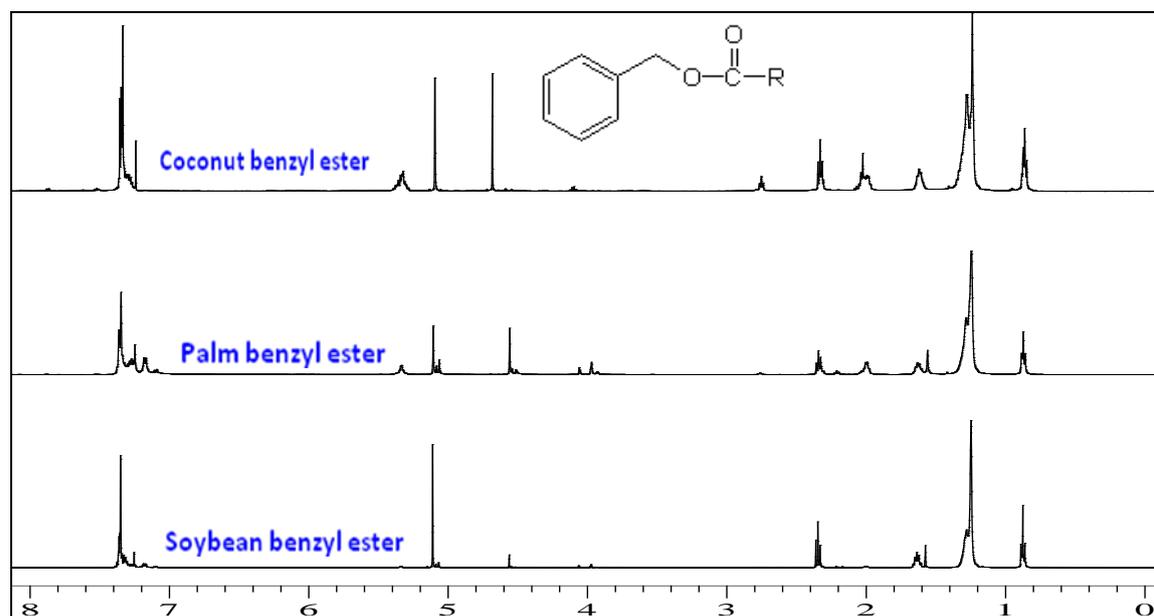
รูปที่ 4.6 สเปกตรัมของกรดไขมัน เอริลเอสเทอร์และเบนซิลแอลกอฮอล์ที่ได้ด้วยเทคนิค FTIR



รูปที่ 4.7 สเปกตรัมของเอริลเอสเทอร์ที่ได้จากการเอสเทอร์ฟิเคชั่นน้ำมันพืช ด้วยเทคนิค FTIR

#### 4.4.2 การพิสูจน์โครงสร้างของเอริลเอสเทอร์ด้วยเทคนิค $H^1$ -NMR

จากการพิสูจน์โครงสร้างเอริลเอสเทอร์ด้วยเทคนิค  $H^1$ -NMR ดังรูปที่ 4.8 พบสัญญาณที่  $\delta = 0.9$  ppm เป็น triplet ซึ่งเป็นตำแหน่งของ H ใน  $CH_3$  ปลายสายโซ่โมเลกุลของเอริลเอสเทอร์ ถัดมาพบสัญญาณที่  $\delta = 1.2-1.6$  เป็นตำแหน่งของ H ใน  $CH_2$  ของสายโซ่โมเลกุลของเอริลเอสเทอร์ ที่  $\delta = 2.3$  เป็นตำแหน่งของ H ใน  $CH_2COO$  ที่  $\delta = 5.1$  เป็นตำแหน่งของ H ใน  $CH_2$  ที่ต่อกับวงเบนซีน และพบสัญญาณที่  $\delta = 7.4$  ppm เป็น ของวงเบนซีน จากค่า chemical shift ที่ปรากฏในแต่ละตำแหน่งสามารถยืนยันโครงสร้างของเอริลเอสเทอร์ที่ได้จากการเอสเทอร์ฟิเคชันน้ำมันพืชทั้งสามชนิด



รูปที่ 4.8 สเปกตรัมของเอริลเอสเทอร์ที่ได้จากการเอสเทอร์ฟิเคชันน้ำมันพืชทั้งสามชนิด ด้วยการพิสูจน์โครงสร้างด้วยเทคนิค  $H^1$ -NMR

#### 4.5 การทดสอบสมบัติเบื้องต้นของเอริลเอสเทอร์ที่เตรียมได้

จากตารางที่ 4.4 แสดงถึงสมบัติทางกายภาพของน้ำมันแต่ละชนิด พบว่า เอริลเอสเทอร์เป็นของเหลวสีเหลืองอ่อน ขณะที่น้ำมันอะโรมาติกเป็นของเหลวหนืดที่น้ำตาลเข้ม สำหรับค่าความถ่วงจำเพาะของเอริลเอสเทอร์จากน้ำมันทุกชนิดจะไม่แตกต่างกัน และค่าดัชนีหักเหของเอริลเอสเทอร์มีค่าต่ำกว่าน้ำมันอะโรมาติก ซึ่งเป็นการยืนยันความใสของน้ำมันที่ได้ นอกจากนี้ค่าความหนืดของเอริลเอสเทอร์ให้ค่าความหนืดที่น้อยกว่าน้ำมันอะโรมาติกมาก เอริลเอสเทอร์จึงจัดเป็นน้ำมันที่สะดวกต่อการใช้งาน และเมื่อพิจารณาถึงค่า Aromatic content จะเห็นได้ว่า เอริลเอสเทอร์ให้ค่า Aromatic content ต่ำกว่ามากเช่นกัน แสดงว่า เอริลเอสเทอร์มีความเป็นพิษน้อยกว่าน้ำมันอะโรมาติก สำหรับค่า  $T_g$  จะเห็นได้ว่า เอริลเอสเทอร์ให้ค่า  $T_g$  ต่ำกว่าน้ำมันอะโรมาติกมาก แสดงว่าเอริลเอสเทอร์มีขอบเขตอุณหภูมิในการใช้งานกว้างกว่าน้ำมันอะโรมาติก เมื่อพิจารณาถึงจุดไหลเทจะเห็นได้ว่าเอริลเอสเทอร์ให้อุณหภูมิในการไหลเทน้อยกว่าน้ำมันอะโรมาติก และค่า

aniline point ของเอริลเอสเทอร์มีค่าสูงว่าน้ำมันอะโรมาติก แสดงให้เห็นว่าในเอริลเอสเทอร์มีส่วนที่เป็นวงแหวนอะโรมาติกต่ำ

**ตารางที่ 4.4** สมบัติทางกายภาพของน้ำมันแต่ละชนิดที่ได้จากการศึกษา

	Aromatic oil	Coconut benzyl ester	Palm benzyl ester	Soybean benzyl ester
Appearance	Viscous fluid, dark brown	Liquid, pale yellow	Liquid, pale yellow	Liquid, pale yellow
Specific gravity at 25°C	0.9780	0.9965	0.9551	0.9793
Refractive index at 20°C	1.570	1.489	1.477	1.484
Viscosity at 25°C [cp]	60.6	3.3	7.5	5.2
Aromatics contents [%wt]	73	26.6	20.7	20.8
Glass transition point, $T_g$ [°C]	-43	-112	-107	-110
Pour point [°C]	30	-8	20	18
Aniline point [°C]	50	Inapplicable	79.5	81.0

#### 4.6 การทดลองขยายส่วนการเตรียมเอริลเอสเทอร์

จากการทดลองขยายส่วนการเตรียมเอริลเอสเทอร์ซึ่งเริ่มต้นทำการเตรียมในภาชนะทำปฏิกิริยาขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นขยายส่วนโดยการเตรียมในภาชนะทำปฏิกิริยาขนาด 2000 มิลลิลิตร โดยกำหนดสภาวะการเตรียมเอริลเอสเทอร์ที่สภาวะเดียวกันสำหรับการเตรียมเอริลเอสเทอร์ทุกชนิด นั่นคือสัดส่วนระหว่างเบนซิลแอลกอฮอล์ต่อกรดไขมัน คือ 1:1.5 โมล และใช้กรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่งในสัดส่วนร้อยละหนึ่งของน้ำหนักกรดไขมัน อุณหภูมิปฏิกิริยา 100 °C เป็นเวลา 3 ชม. เนื่องจากสภาวะดังกล่าวให้ร้อยละผลผลิตที่สูงสำหรับเอริลเอสเทอร์ทุกชนิด ซึ่งให้ร้อยละการผลิตดังตารางที่ 4.5

**ตารางที่ 4.5** ร้อยละเอริลเอสเทอร์ ที่ได้จากการขยายส่วนการเตรียม

ชนิดเอริลเอสเทอร์	ร้อยละของเอริลเอสเทอร์
Coconut benzyl ester	81.27
Palm benzyl ester	85.84
Soybean benzyl ester	80.47

#### 4.7 การทดสอบสมบัติของยางธรรมชาติคอมปาวด์เบื้องต้นที่ใช้เอริลเอสเทอร์เป็นน้ำมันแปรรูปยาง

ในการทดสอบสมบัติของยางคอมปาวด์จะทำการเปรียบเทียบสมบัติของยางคอมปาวด์ที่ผสมเอริลเอสเทอร์ที่เตรียมจากน้ำมันพืชทั้งสามชนิดมาประยุกต์ใช้เป็นน้ำมันแปรรูปยาง เทียบกับน้ำมันอะโรมาติกที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ โดยทำการผสมน้ำมันแปรรูปยางลงในยางธรรมชาติ ซึ่งสูตรยางคอมปาวด์ที่ใช้ในงานวิจัย ได้แสดงไว้ดังตารางที่ 4.6 และลำดับการผสมของการคอมปาวด์ยางแสดงไว้ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.6 สูตรยางธรรมชาติคอมปาวด์ ตามมาตรฐาน ASTM D3184

Ingredients	phr
Natural rubber	100
Zinc oxide	5
Stearic acid	2
<i>Process Oil</i>	<i>0-20</i>
Filler (High abrasion furnace black, N330 )	50
Sulfur	2.25
TBBS	0.7

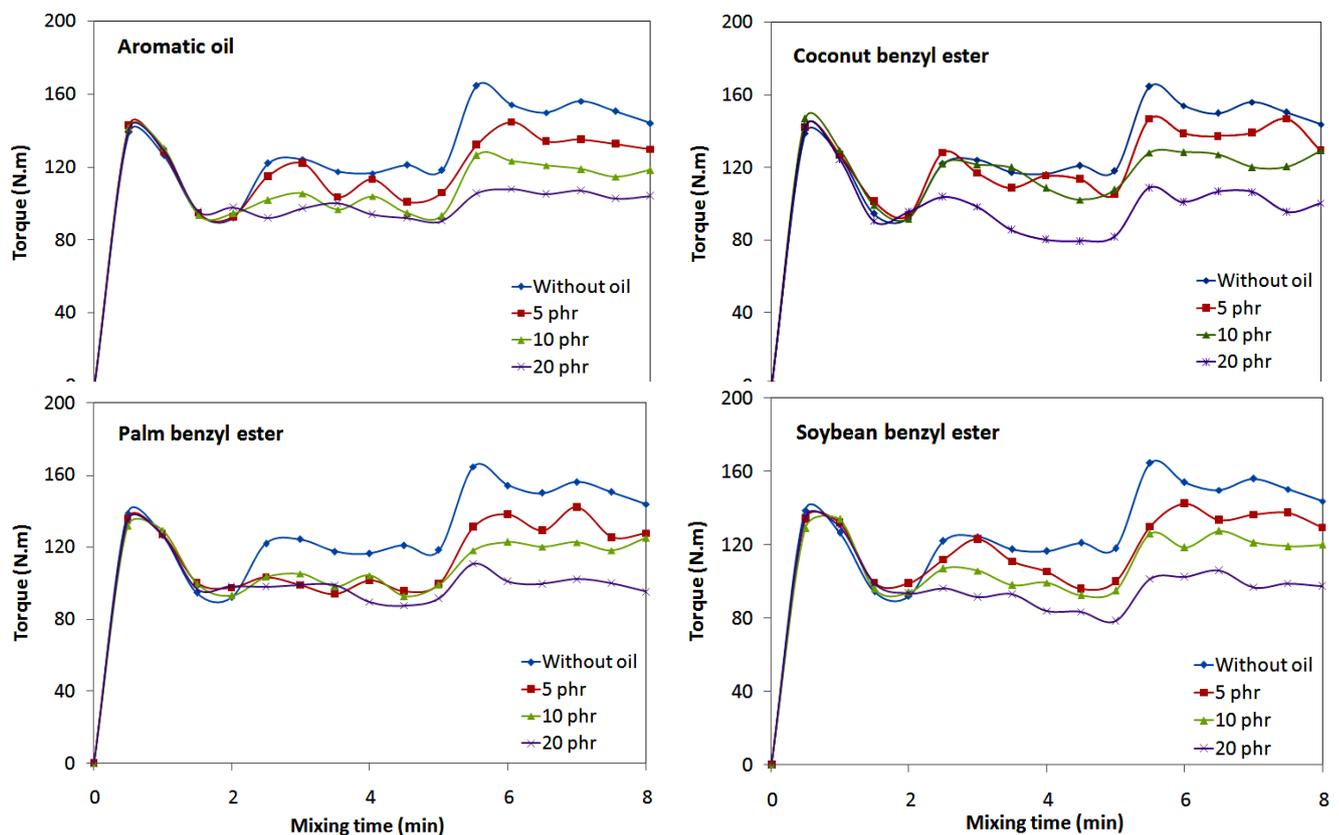
ตารางที่ 4.7 ลำดับการผสมในสูตรยางคอมปาวด์

Ingredients	Time (min)
Rubber (NR)	0-1
Zinc oxide	1-1.5
TBBS	1.5-2
Process Oil + Filler + Stearic acid	2-5
Process Oil + Filler + Stearic acid	5-8
Sulfur	Masticate by roller

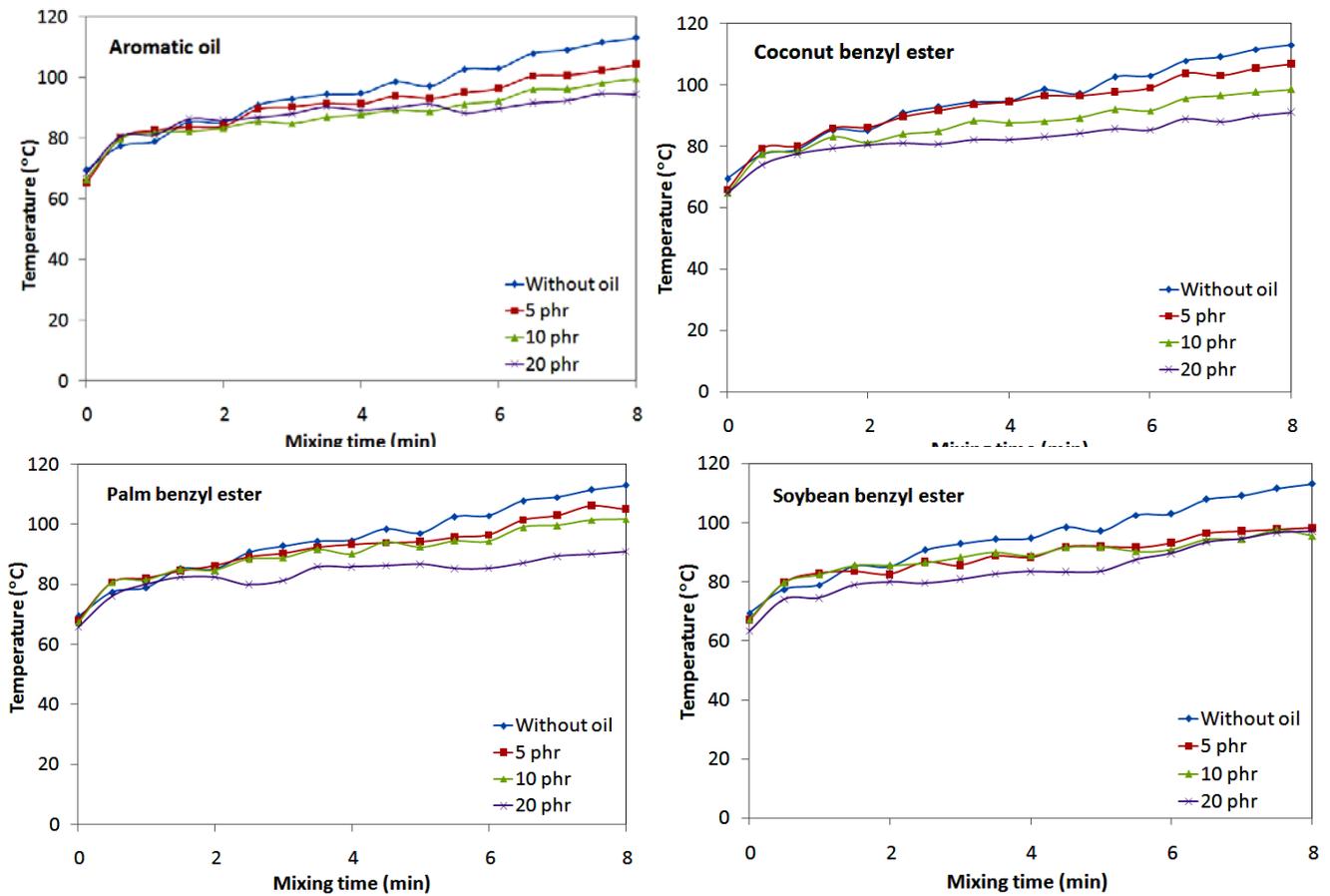
#### 4.8 การทดสอบสมบัติของยางธรรมชาติคอมปาวด์ที่ใช้เอริลเอสเทอร์เป็นน้ำมันแปรรูปยาง

##### 4.8.1 การทดสอบพลังงานและอุณหภูมิการบดผสมยางธรรมชาติคอมปาวด์

ค่าทอร์คและอุณหภูมิที่ใช้ในการบดผสมยางคอมปาวด์ ทดสอบโดยใช้เครื่อง internal mixer (MX 500-D75L90; Chareon Tut Co., Ltd.) มีความจุ 0.5 L อุณหภูมิเริ่มต้นการผสม  $70 \pm 3$  °C, 60 rpm และ Fill factor เท่ากับ 0.7 ได้แสดงผลที่ได้ไว้ดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 ซึ่งพบได้ว่าเอริลเอสเทอร์ที่เตรียมจากน้ำมันพืชทั้งสามชนิดรวมถึงน้ำมันอะโรมาติก จะให้ค่าทอร์คและอุณหภูมิการผสมลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของเอริลเอสเทอร์หรือน้ำมันอะโรมาติกเพิ่มขึ้น เนื่องจากเอริลเอสเทอร์ที่เตรียมได้มีคุณสมบัติเป็นน้ำมันช่วยแปรรูป ซึ่งจะช่วยลดความหนืดของยางคอมปาวด์ขณะผสม ทำให้ความต้านทานต่อการหมุนของ rotor ลดลงเช่นเดียวกับน้ำมันอะโรมาติก

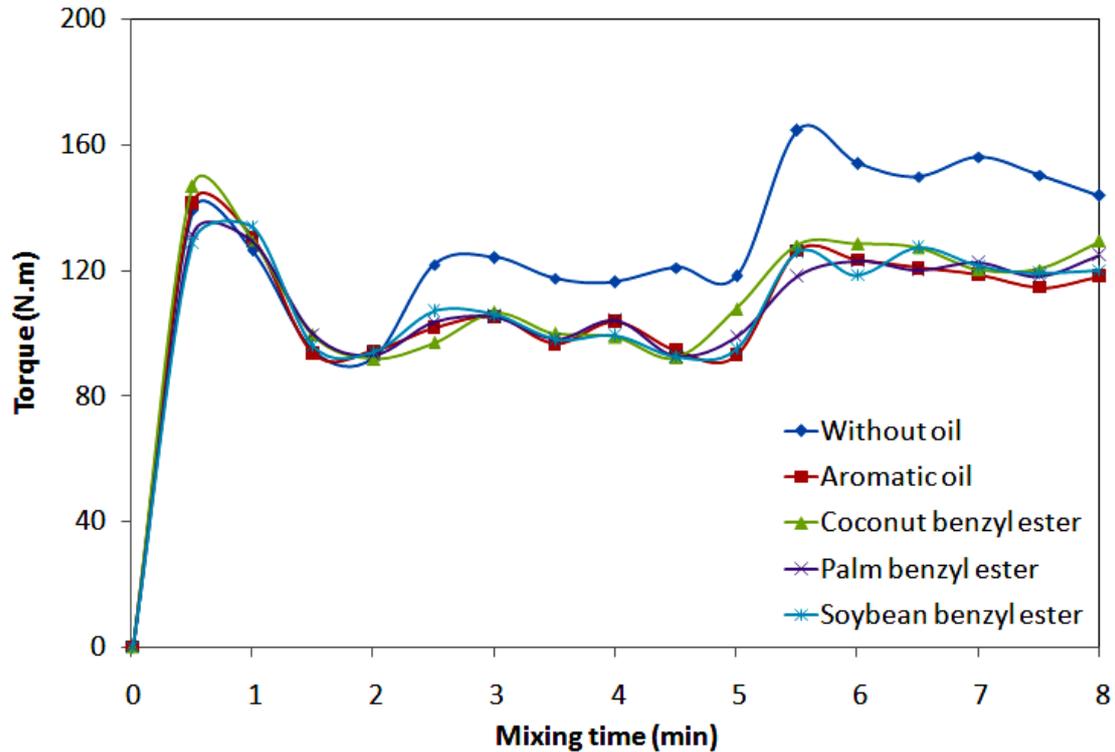


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์คการผสมกับเวลาการผสมของการคอมปาวด์ยางธรรมชาติ โดยแปรชนิดน้ำมันแปรรูปยางและปริมาณที่ใช้

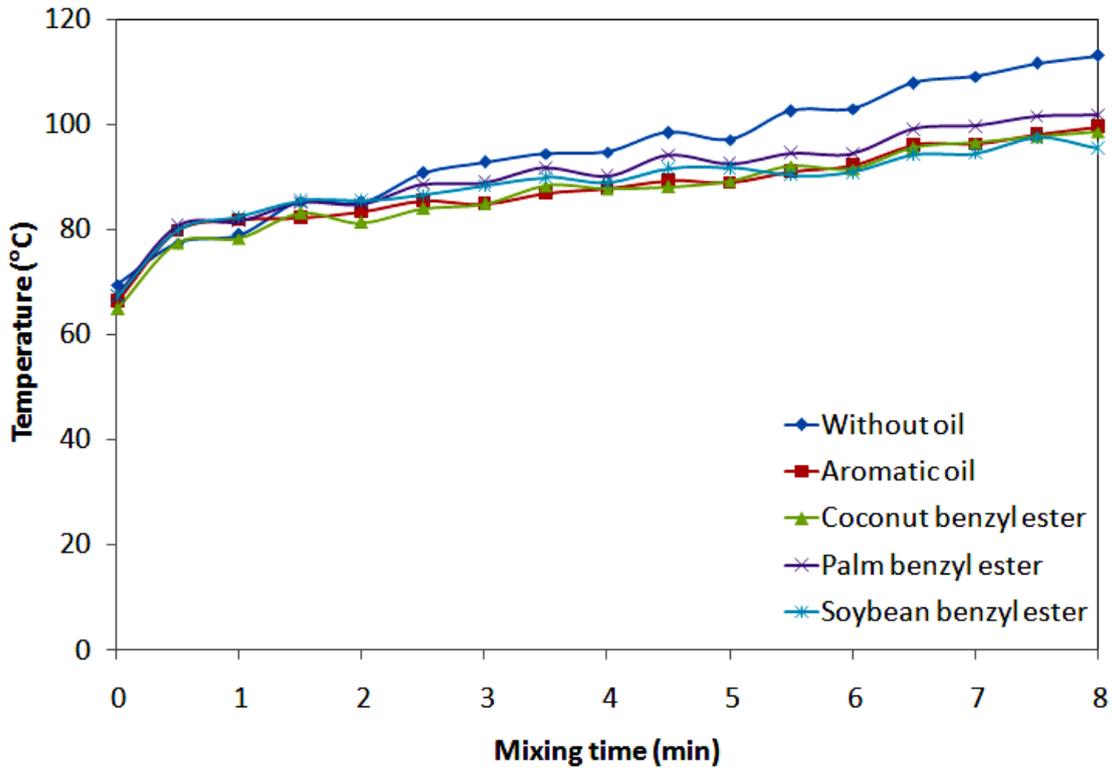


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการผสมกับเวลาการผสมของการคอมปาวด์ยางธรรมชาติ โดยแปรชนิดน้ำมันแปรรูปร่างและปริมาณที่ใช้

จากรูปที่ 4.11 และ 4.12 เป็นการเปรียบเทียบค่าทอร์คและอุณหภูมิขณะผสม โดยเป็นการเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันแปรรูปร่างเอริลเอสเทอร์ชนิดต่างๆกับน้ำมันอะโรมาติก โดยกำหนดปริมาณน้ำมันแปรรูปร่าง 10 phr พบว่า น้ำมันแปรรูปร่างเอริลเอสเทอร์ชนิดต่างๆให้ค่าทอร์คและอุณหภูมิผสมที่ใกล้เคียงกับน้ำมัน อะโรมาติก และเมื่อพิจารณาพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์คการผสมกับเวลาการผสม จะแสดงถึงค่าพลังงานที่ใช้ในการผสม แสดงผลดังตารางที่ 4.8 และกราฟรูปที่ 4.12 โดยทำการแปรชนิดและปริมาณน้ำมัน พบว่า เมื่อปริมาณน้ำมันแปรรูปร่างเพิ่มขึ้น พลังงานการผสมจะมีแนวโน้มลดลง ในทำนองเดียวกันหากพิจารณาเปรียบเทียบน้ำมันแปรรูปร่างแต่ละชนิด จะเห็นได้ว่าค่าพลังงานการผสมของน้ำมันแปรรูปร่างเอริลเอสเทอร์ไม่ต่างกับน้ำมันอะโรมาติก



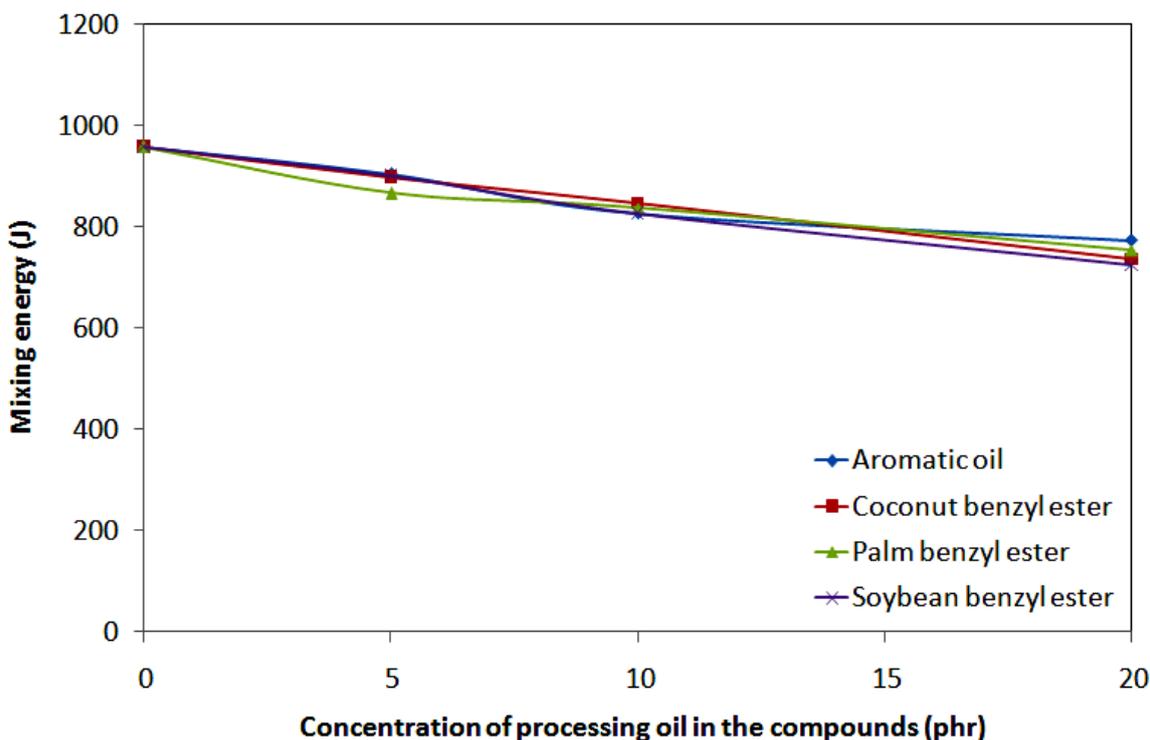
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์คการผสมกับเวลาการผสมของการคอมปาวด์อย่างธรรมชาติ โดยแปรชนิดน้ำมันแปรรูปร่าง (กำหนดปริมาณน้ำมันแปรรูปร่างที่ใช้เท่ากับ 10 phr)



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิการผสมกับเวลาการผสมของการคอมปาวด์อย่างธรรมชาติ โดยแปรชนิดน้ำมันแปรรูปร่าง (กำหนดปริมาณน้ำมันแปรรูปร่างที่ใช้เท่ากับ 10 phr)

ตารางที่ 4.8 ค่าพลังงานการผสมของยางเอสปีอาร์คอมปาวด์โดยแปรชนิดน้ำมันแปรรูปร่างและปริมาณที่ใช้

Processing oils in rubber compound	Loading level	Mixing energy (J)
Without oil	0 phr	958
Aromatic oil	5 phr	905
	10 phr	827
	20 phr	774
Coconut benzyl ester	5 phr	899
	10 phr	847
	20 phr	737
Palm benzyl ester	5 phr	867
	10 phr	837
	20 phr	754
Soybean benzyl ester	5 phr	902
	10 phr	827
	20 phr	724



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานการผสมที่ใช้คอมปาวด์ยางธรรมชาติกับปริมาณและชนิดน้ำมันแปรรูปยาง

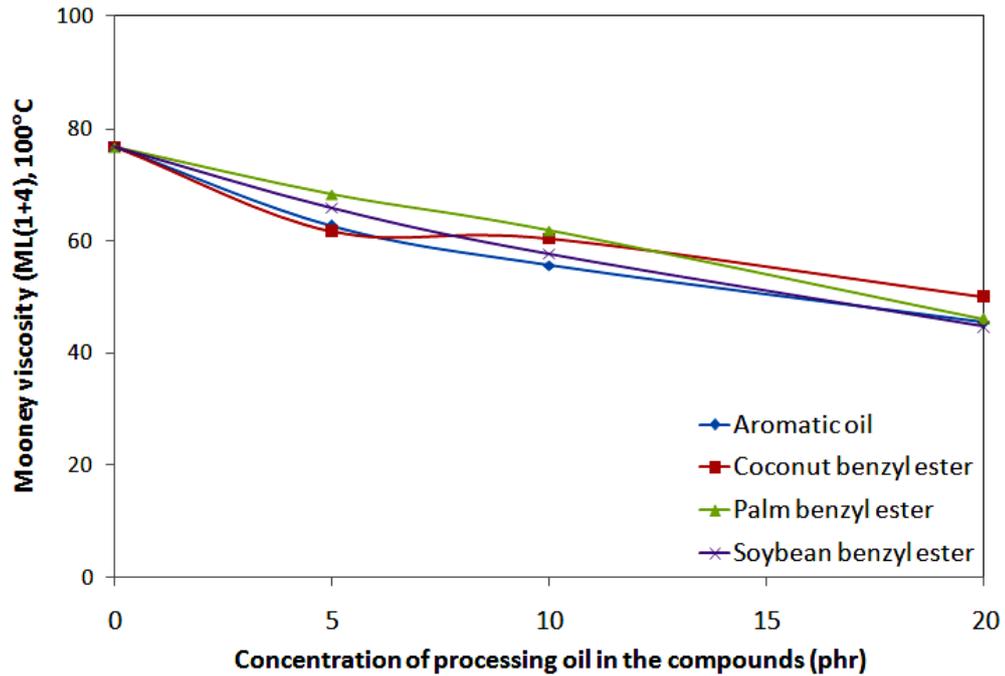
#### 4.8.2 ความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) และการคลายความเค้น (stress relaxation)

การวัดค่าความหนืดมูนนี่และการคลายความเค้นของยางธรรมชาติคอมปาวด์ ทดสอบโดยใช้เครื่อง moving die rheometer (rheoTech MD plus) ผลการทดลองได้แสดงดังตารางที่ 4.9 จะพบว่ายางคอมปาวด์ที่ผสมน้ำมันแปรรูปยางเอริลเอสเทอร์จะให้ค่าความหนืดมูนนี่ลดลงเมื่อทำการเพิ่มปริมาณน้ำมัน และการผสมปริมาณน้ำมันแปรรูปยางที่ระดับปริมาณเดียวกันในยางคอมปาวด์ พบว่า น้ำมันแปรรูปยางเอริลเอสเทอร์ให้ค่าความหนืดมูนนี่สูงกว่าคอมปาวด์ที่ผสมน้ำมันอะโรมาติก เนื่องจากโครงสร้างของน้ำมันแปรรูปยางเอริลเอสเทอร์มีความไม่อิมิตัวน้อยกว่าน้ำมันอะโรมาติก โอกาสการเข้าแทรกระหว่างโมเลกุลยางธรรมชาติซึ่งจัดเป็นยางชนิดไม่อิมิตัวได้น้อยลง แสดงแนวโน้มดังกล่าว ดังรูปที่ 4.14

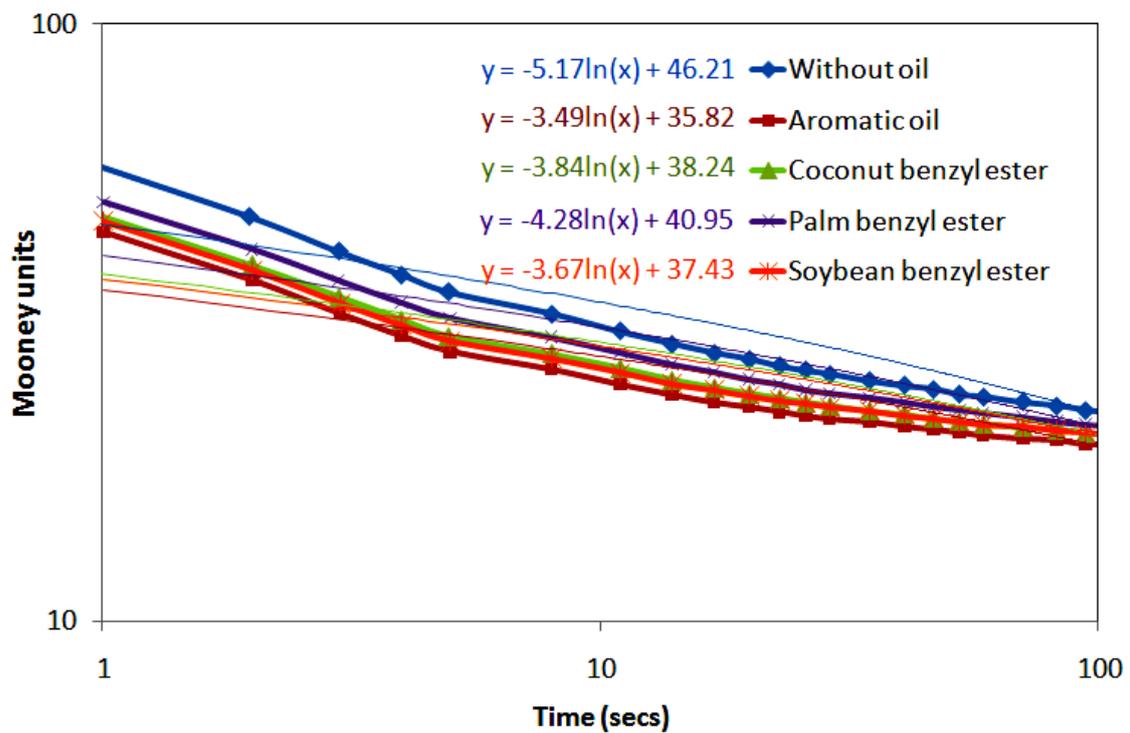
กราฟรูปที่ 4.14 ใช้หาค่า rate of stress relaxation จากความชันของเส้นกราฟที่เกิดจากการ plot กราฟระหว่าง Mooney unit และเวลา และเมื่อนำค่า rate of stress relaxation มา plot กราฟเทียบกับชนิดและปริมาณน้ำมันแปรรูปยางเอริลเอสเทอร์ที่ผสมในยางคอมปาวด์ แสดงดังตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่ายางธรรมชาติคอมปาวด์ที่ผสมน้ำมันแปรรูปยางเอริลเอสเทอร์จะมี rate of stress relaxation สูงกว่ายางธรรมชาติคอมปาวด์ที่ผสมน้ำมันอะโรมาติก ซึ่งจากมาตรฐาน ASTM D 1646 กล่าวถึงค่า rate of relaxation ไว้ว่า ถ้า rate of relaxation ต่ำ แสดงว่ามีส่วนที่มีความยืดหยุ่นสูงในคอมปาวด์ แต่ถ้า rate of relaxation สูง แสดงว่ามีส่วนที่ไม่ยืดหยุ่นสูงในคอมปาวด์ ดังนั้นน้ำมันอะโรมาติกมีโครงสร้างที่ไม่อิมิตัวสูงกว่าน้ำมันแปรรูปยางเอริลเอสเทอร์ ส่งผลให้น้ำมันอะโรมาติกสามารถแทรกไปอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลยางได้ง่ายกว่าน้ำมันแปรรูปยางเอริลเอสเทอร์ จึงทำให้ยางธรรมชาติคอมปาวด์ที่ผสมน้ำมันอะโรมาติกมี rate of stress relaxation ต่ำกว่ายางธรรมชาติคอมปาวด์ที่ผสมน้ำมันแปรรูปยางเอริลเอสเทอร์

ตารางที่ 4.9 ค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) และค่าคลายความเค้น (Stress relaxation)

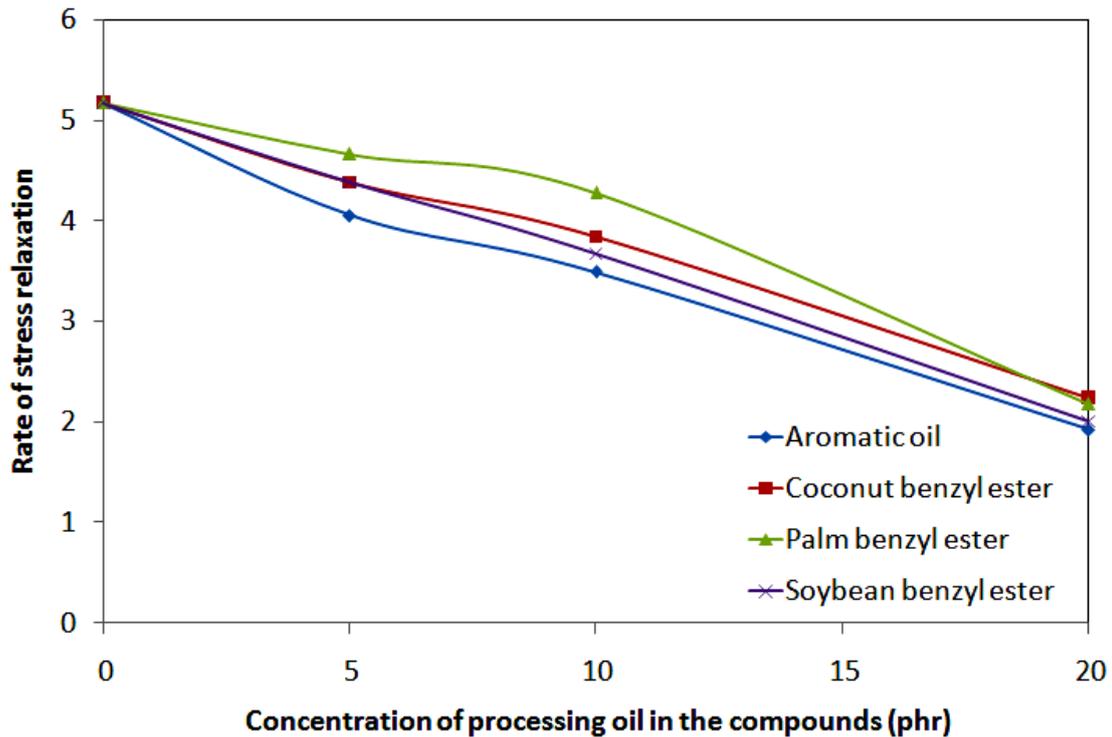
Processing oils in rubber compound	Loading level	Mooney viscosity (ML(1+4), 100°C)	Rate of stress relaxation
Without oil	0 phr	77	5.17
Aromatic oil	5 phr	63	4.05
	10 phr	56	3.49
	20 phr	45	1.92
Coconut benzyl ester	5 phr	62	4.38
	10 phr	60	3.84
	20 phr	50	2.24
Palm benzyl ester	5 phr	68	4.66
	10 phr	62	4.28
	20 phr	46	2.18
Soybean benzyl ester	5 phr	66	4.38
	10 phr	58	3.67
	20 phr	45	2.00



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานการผสมของยางธรรมชาติคอมปาวด์กับชนิดและปริมาณน้ำมันเอริลเอสเทอร์



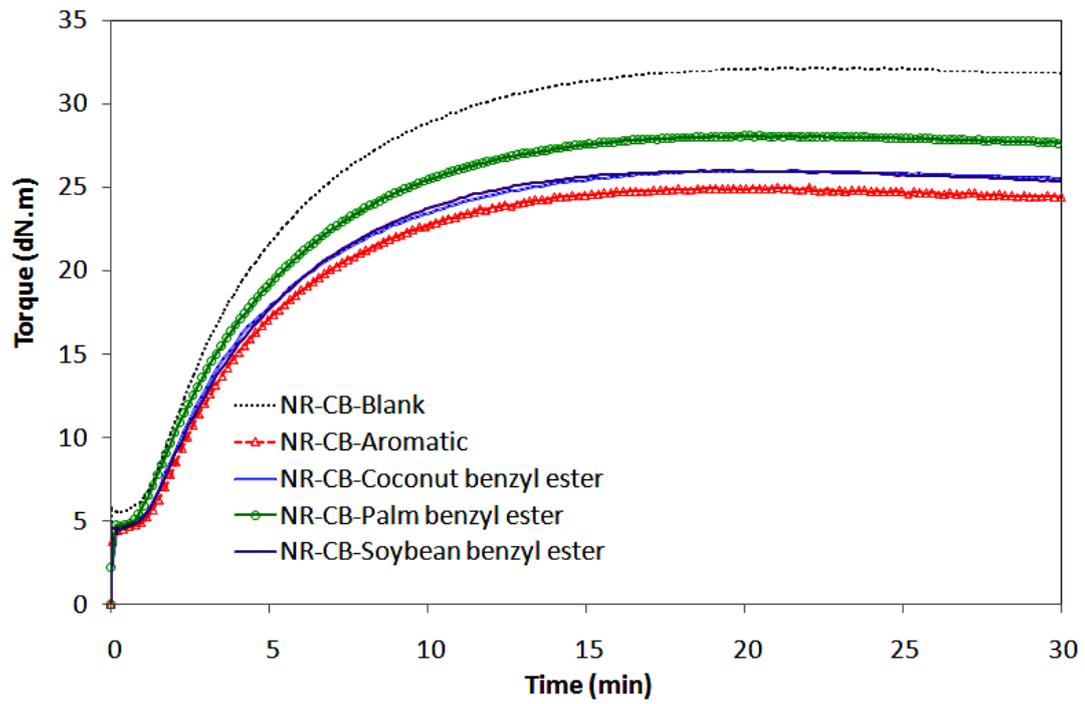
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง Log Mooney Units ของยางธรรมชาติคอมปาวด์กับเวลา เพื่อใช้พิจารณาการทดสอบการคลายความเค้น โดยทำการแปรชนิดของน้ำมันแปรรูปร่าง



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า rate of stress relaxation ของยางธรรมชาติคอมปาวด์เปรียบเทียบกับชนิดและปริมาณน้ำมันแปรรูปอย่างที่ใช้

#### 4.8.3 การคงรูปของยาง (Cure properties)

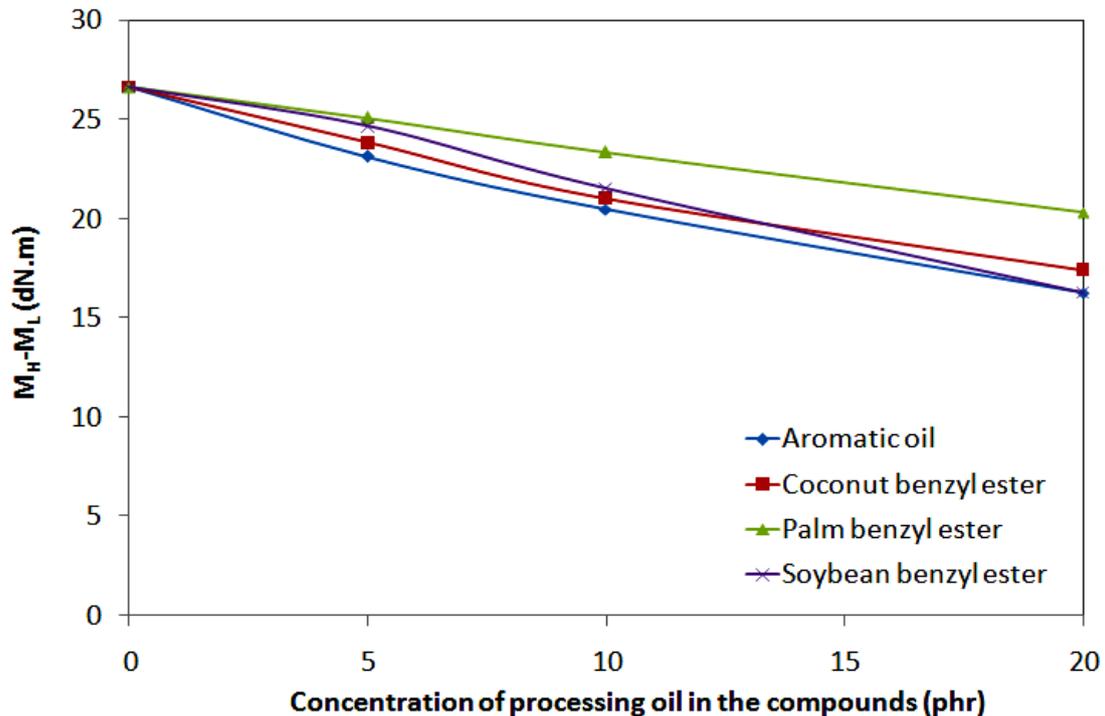
การตรวจสอบการคงรูปของยางธรรมชาติคอมปาวด์ ด้วยเครื่อง Moving die rheometer (rheoTech MD plus) ตามมาตรฐาน ASTM D 1646-94 ที่อุณหภูมิทดสอบ  $150^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 30 นาที ผลการทดลองได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.17 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์คการทำให้ยางคงรูปกับเวลา จะเห็นได้ว่าน้ำมันแปรรูปอย่างทุกชนิดให้ลักษณะกราฟเป็นแบบ plateau โดยค่าที่แสดงคุณสมบัติการคงรูป ได้แก่ค่า maximum torque ( $M_H$ ), minimum torque ( $M_L$ ), torque difference ( $M_H - M_L$ ), scorch time, 90% cure time ( $tc_{90}$ ) และ cure rate index ได้สรุปไว้ดังตารางที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าการผสมน้ำมันแปรรูปยางเอริลเอสเทอร์ในยางธรรมชาติคอมปาวด์ให้ค่า torque difference สูงกว่ายางธรรมชาติคอมปาวด์ที่ผสมน้ำมันอะโรมาติก แสดงได้ดังรูปที่ 4.18 ซึ่งค่า torque difference ( $M_H - M_L$ ) ที่สูงขึ้น แสดงถึงระดับการ Crosslink สูงขึ้นด้วยเช่นกัน ดังนั้นน้ำมันแปรรูปยางเอริลเอสเทอร์ให้ระดับการ Crosslink ของยางคอมปาวด์สูงกว่าน้ำมันแปรรูปยางอะโรมาติก เนื่องจากน้ำมันอะโรมาติกเข้าไปแทรกระหว่างโมเลกุลยางได้ง่าย จึงขัดขวางปฏิกิริยาการ crosslink ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง ซึ่งสอดคล้องกับผลของการเพิ่มปริมาณน้ำมันมากขึ้น จะเห็นได้ว่าค่า torque difference ( $M_H - M_L$ ) ต่ำลง แสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำมันและความเข้าได้ดีของน้ำมันแปรรูปยางกับโมเลกุลยางมีผลต่อระดับการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุล และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันแปรรูปยางเอริลเอสเทอร์ด้วยกัน พบว่า palm benzyl ester ให้ค่า torque difference สูงสุด



รูปที่ 4.17 Curing curves ของยางธรรมชาติคอมพาวด์โดยทำการแปรชนิดและปริมาณน้ำมันแปรรูปที่ใช้

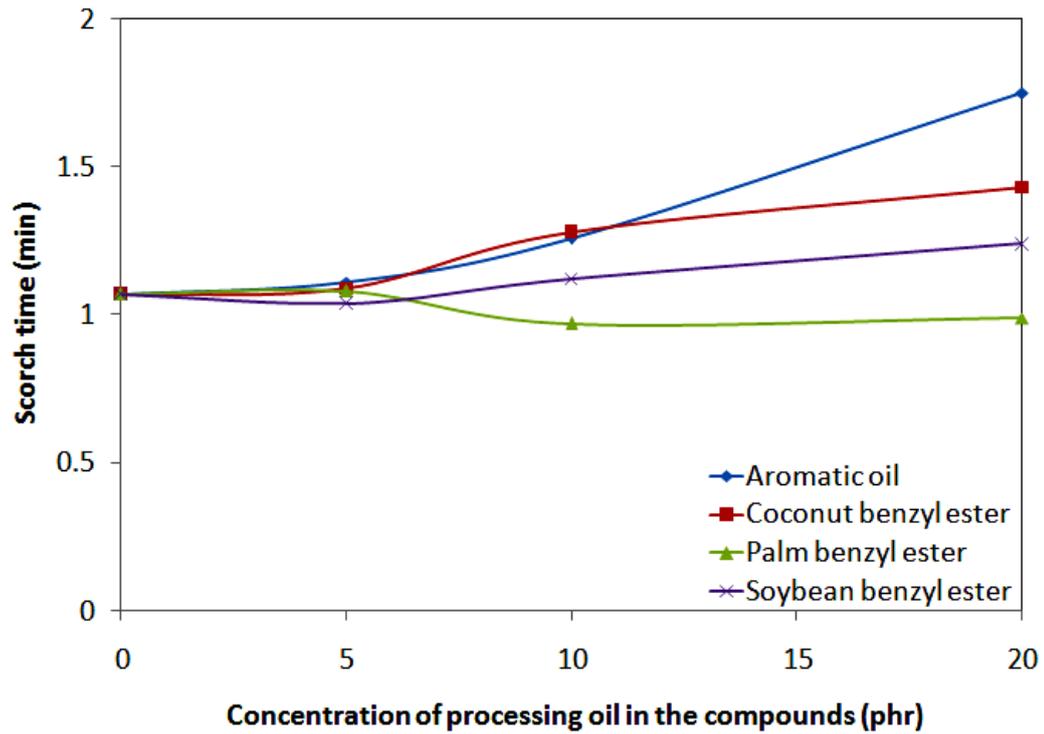
ตารางที่ 4.10 คุณสมบัติการคงรูปของยางธรรมชาติคอมปาวด์ โดยทำการแปรชนิดและปริมาณของน้ำมันแปรรูปร่างเอริลเอสเทอร์

Processing oils in rubber compound	Loading level	Test parameter					
		Minimum torque (dN.m)	Maximum torque (dN.m)	MH-ML (dN.m)	Scorch time, Ts1 (min)	Cure time, Tc90 (min)	Cure rate index, CRI (min <sup>-1</sup> )
Without oil	0 phr	5.51	32.15	26.64	1.07	10.16	10.92
Aromatic oil	5 phr	5.1	28.23	23.13	1.11	10.71	10.45
	10 phr	4.49	24.97	20.47	1.26	10.99	10.37
	20 phr	3.65	19.92	16.27	1.75	10.15	11.6
Coconut benzyl ester	5 phr	5.12	28.96	23.84	1.09	10.51	10.61
	10 phr	4.93	25.96	21.04	1.28	10.59	10.53
	20 phr	3.86	22.28	17.42	1.43	10.47	10.95
Palm benzyl ester	5 phr	5.18	30.26	25.08	1.08	10.22	10.87
	10 phr	4.69	28.05	23.36	0.97	10.56	10.44
	20 phr	3.46	23.8	20.34	0.99	9.69	11.31
Soybean benzyl ester	5 phr	4.51	29.18	24.67	1.04	10.61	10.47
	10 phr	4.46	25.99	21.52	1.12	11.03	10.18
	20 phr	3.62	19.9	16.28	1.24	10.91	10.4

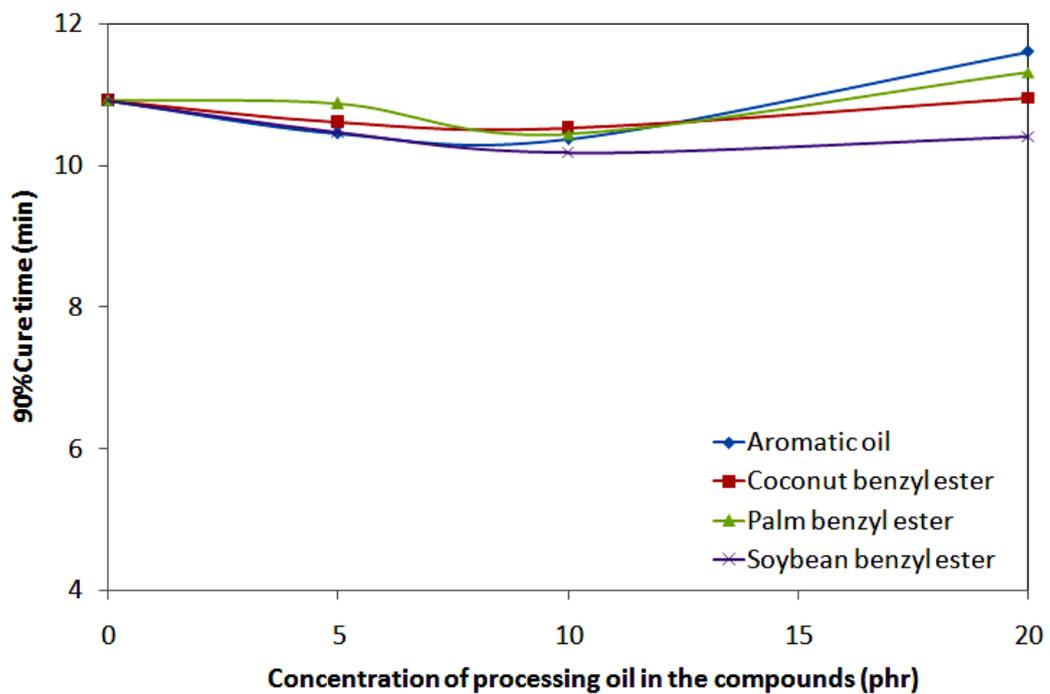


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Torque difference ( $M_H - M_L$ ) ของยางธรรมชาติคอมปาวด์เปรียบเทียบกับชนิดและปริมาณน้ำมันแปรรูปยางที่ใช้

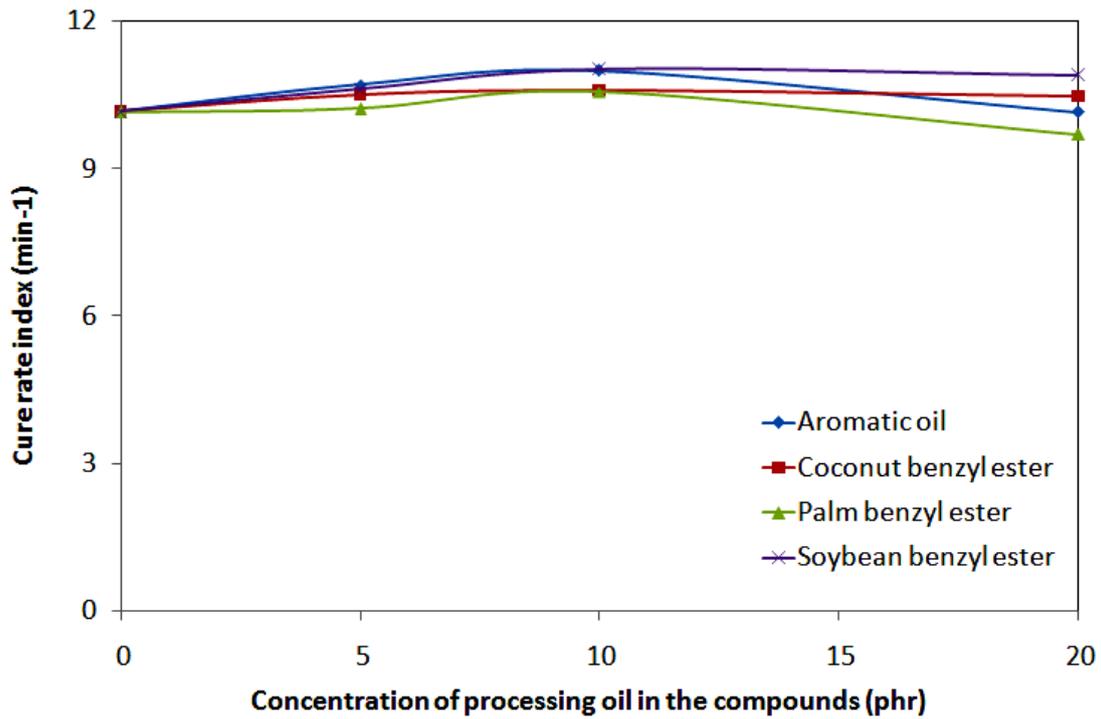
เมื่อพิจารณา scorch time,  $t_1$  และ cure time,  $t_{90}$  โดยแปรชนิดและปริมาณของน้ำมันแปรรูปยางเอริลเอสเทอร์ จะพบว่าน้ำมันแปรรูปยางเอริลเอสเทอร์มีแนวโน้มให้อัตราการวัลคาไนซ์ที่เร็วกว่าน้ำมันอะโรมาติก สังเกตได้จากค่า  $t_1$  และ  $t_{90}$  ดังตารางที่ 4.10 รูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 ซึ่งพบว่าค่า  $t_1$  และ  $t_{90}$  เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันแปรรูปยางเพิ่มขึ้น และน้ำมันมะพร้าวให้ค่า  $t_1$  เร็วที่สุดตามด้วยน้ำมันถั่วเหลืองและน้ำมันปาล์ม แต่อย่างไรก็ตามพบว่าน้ำมันถั่วเหลืองให้ผล  $t_{90}$  ต่ำกว่าน้ำมันพืชตัดแปลงชนิดอื่นและเมื่อศึกษาถึงค่า cure rate index,  $CRI$  พบว่า น้ำมันทุกชนิดให้ผลไม่แตกต่างกันมากนัก แสดงดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Scorch time ของยางธรรมชาติคอมปาวด์เปรียบเทียบกับชนิดและปริมาณน้ำมันแปรรูปอย่างที่ใช้



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 90% Cure time ของยางธรรมชาติคอมปาวด์เปรียบเทียบกับชนิดและปริมาณน้ำมันแปรรูปอย่างที่ใช้



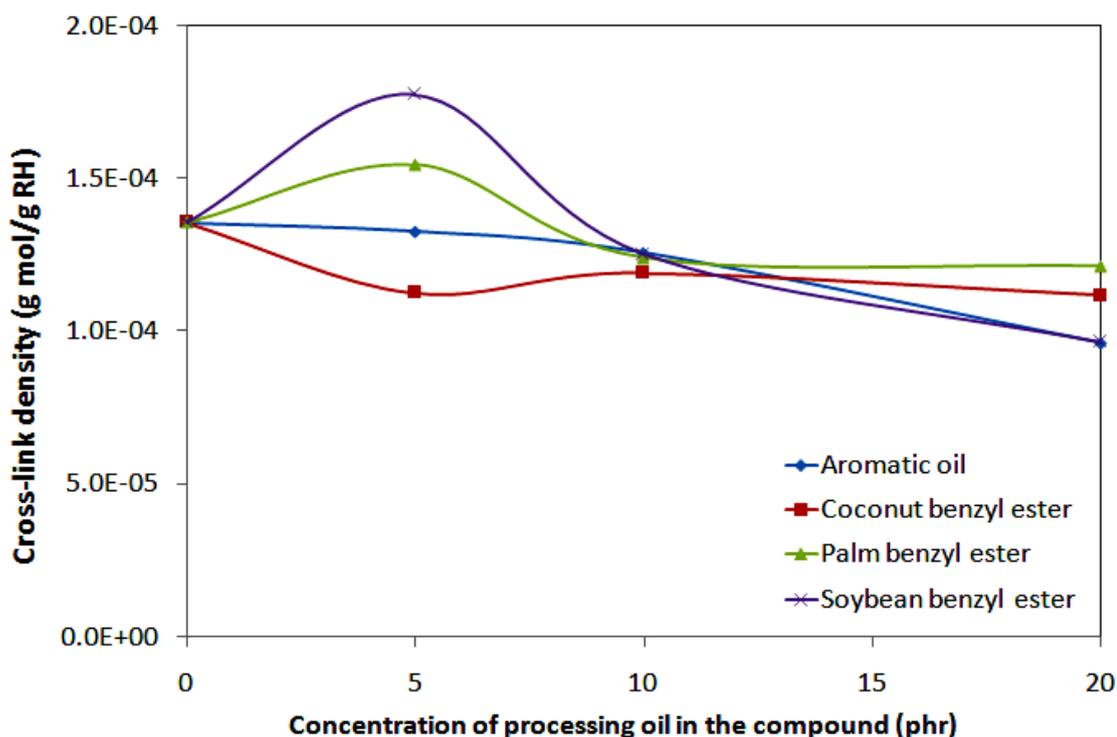
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Cure rate index ของยางธรรมชาติคอมปาวด์เปรียบเทียบกับชนิดและปริมาณน้ำมันแปรรูปอย่างที่ใช้

#### 4.8.4 ความหนาแน่นของการเชื่อมโยง (Crosslink density)

จากตารางที่ 4.11 เป็นการเปรียบเทียบค่า Cross-link density ยางธรรมชาติที่ผสมน้ำมันแปรรูป ยางชนิดและปริมาณต่างๆ พบว่าการผสมน้ำมันแปรรูปยางในปริมาณมากขึ้นส่งผลให้ค่า Cross-link density มีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.22 และพบว่า palm benzyl ester มีแนวโน้มให้ค่า Cross-link density ดีที่สุด ตามด้วย coconut benzyl ester, soybean benzyl ester และ น้ำมันอะโรมาติก ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับค่า torque difference

ตารางที่ 4.11 ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงในยางธรรมชาติคอมพาวด์

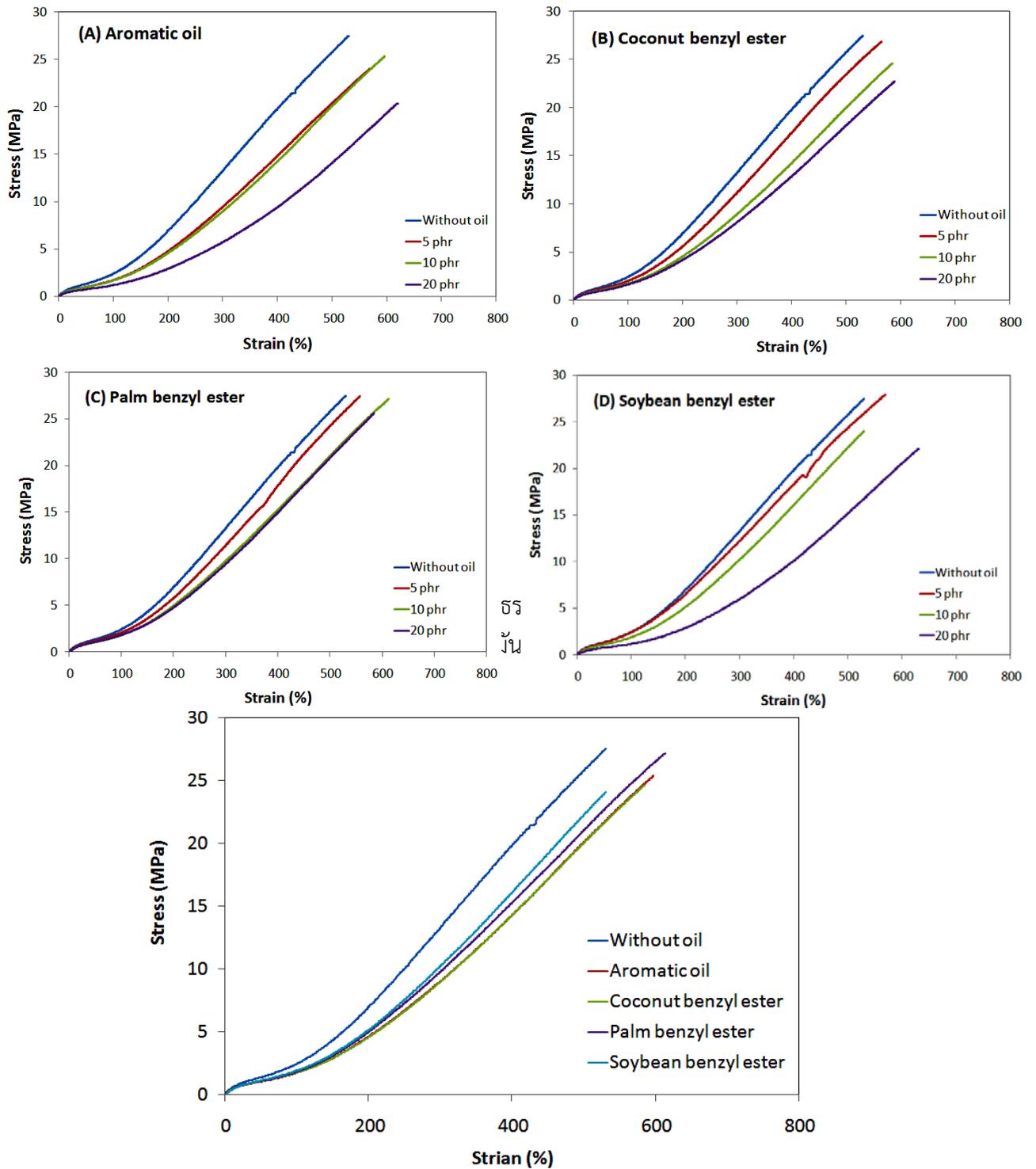
Processing oils in rubber compound	Loading level	Cross-link density (g mol/g RH)
Without oil	0 phr	1.36E-04 ± 2.54E-05
Aromatic oil	5 phr	1.33E-04 ± 3.73E-06
	10 phr	1.26E-04 ± 1.12E-06
	20 phr	0.96E-04 ± 1.78E-07
Coconut benzyl ester	5 phr	1.12E-04 ± 2.28E-05
	10 phr	1.19E-04 ± 6.07E-06
	20 phr	1.12E-04 ± 2.48E-06
Palm benzyl ester	5 phr	1.55E-04 ± 1.59E-06
	10 phr	1.24E-04 ± 3.16E-06
	20 phr	1.21E-04 ± 1.04E-05
Soybean benzyl ester	5 phr	1.77E-04 ± 9.60E-05
	10 phr	1.25E-04 ± 2.72E-06
	20 phr	0.96E-04 ± 6.13E-06



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Cross-link density ของยางธรรมชาติคอมปาวด์เปรียบเทียบกับชนิดและปริมาณน้ำมันแปรรูปอย่างที่ใช้

#### 4.8.5 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในที่นี้เราจะใช้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เป็นหลัก โดยจะพลอตค่าของความเค้นในแกนตั้งและความเครียดในแกนนอน ดังรูป 4.23 การทดสอบแรงดึง นอกจากจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดแล้ว ยังจะแสดงความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ ซึ่งจากรูปที่ 4.23 พบว่า ความเค้นสูงสุด(ความแข็งแรงของวัสดุ) จะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันแปรรูปอย่างมากขึ้น แต่สามารถพบได้ว่าการผสมน้ำมันแปรรูปยางเอริลเอสเทอร์ในสัดส่วน 5 phr สามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุขึ้นเล็กน้อย และรูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด โดยแปรชนิดน้ำมันแปรรูปยาง พบว่า palm benzyl ester ให้ค่าความเค้นสูงสุด โดย coconut benzyl ester ให้ค่าความเค้นที่ใกล้เคียงกับน้ำมันอะโรมาติกมากที่สุด



รูปที่ 4.23 กราฟ stress-strain ของยางธรรมชาติคอมปาวด์โดยแปรชนิดน้ำมันแปรรูปยาง (กำหนดปริมาณน้ำมันแปรรูปยางที่ใช้เท่ากับ 10 phr)

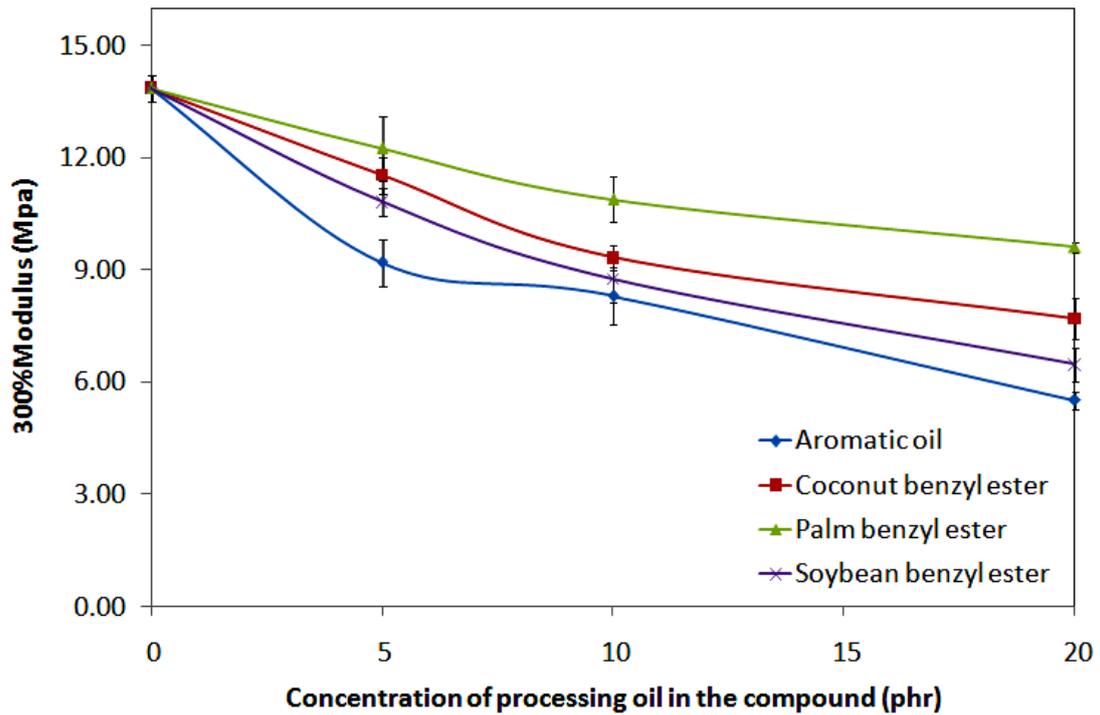
เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของยางคอมปาวด์ในด้านค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300% (Modulus at 300%) ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ความสามารถในการยืดจนขาด (Elongation at break) ความสามารถในการคืนรูป (Compression set) และความแข็ง (Hardness) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.12

**ตารางที่ 4.12** ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น ความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด ความสามารถในการคืนรูป และความแข็งของยางคอมปาวด์ โดยแปรชนิดและปริมาณน้ำมันแปรรูปร่าง

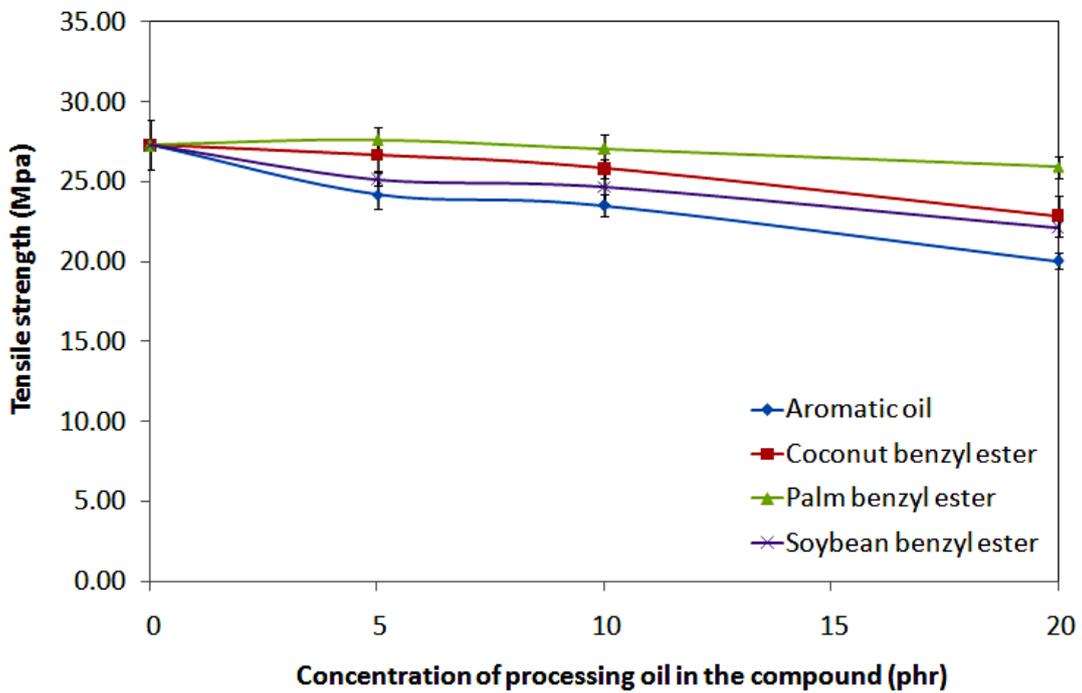
Mechanical properties	Processing oils												
	Without oil	Aromatic oil			Coconut benzyl ester			Palm benzyl ester			Soybean benzyl ester		
		5 phr	10 phr	20 phr	5 phr	10 phr	20 phr	5 phr	10phr	20 phr	5 phr	10 phr	20 phr
Modulus at 300% (MPa)	13.87	9.19	8.30	5.53	11.54	9.33	7.70	12.25	10.89	9.61	10.82	8.76	6.48
Tensile strength (MPa)	27.28	24.21	23.51	20.05	26.66	25.8	22.85	27.60	27.05	25.93	25.17	24.64	22.12
Elongation at break (%)	519.4	580.6	626.2	624.8	551.2	577.	601.6	544.4	572.8	587.0	548.0	572.4	621.8
Compression set (%)	53.6	35.4	38.6	51.2	38.7	41.3	60.5	41.5	45.3	63.2	44.3	49.6	64.6
Hardness (Shore A)	58.92	55.08	51.83	46.30	54.50	52.0	48.67	54.75	53.50	50.50	54.38	51.13	45.00

จากตารางที่ 4.12 เขียนกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น ความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด ความสามารถในการคืนรูป และความแข็งของยางคอมปาวด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.24-4.28 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของยางธรรมชาติคอมปาวด์ระหว่างที่ใส่น้ำมันกับไม่ใส่น้ำมัน พบว่ายางธรรมชาติคอมปาวด์ชนิดที่ใส่น้ำมันมีค่ามอดูลัสยืดหยุ่น ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่าความแข็งต่ำกว่าชนิดไม่ใส่น้ำมัน ดังรูปที่ 4.24-4.28 ตามลำดับ แต่มีความสามารถในการยืดจนขาดและความสามารถในการคืนรูปดีกว่าชนิดที่ใส่น้ำมัน ดังรูปที่ 4.26 และ 4.27 ตามลำดับ เนื่องจากน้ำมันแปรรูปยางที่ใส่ลงไปจะไปขัดขวางปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลยาง ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงและความแข็งของยางคอมปาวด์ลดลง นอกจากนี้น้ำมันที่ใส่ลงไปยังไปลดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลยาง และเพิ่มปริมาตรอิสระระหว่างสายโซ่โมเลกุลยาง ทำให้สายโซ่โมเลกุลยางบิดตัวและเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น ความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น จึงทำให้ยางคอมปาวด์ที่ผสมน้ำมัน มีความสามารถในการยืดจนขาดสูงและความสามารถในการคืนรูปดีกว่ายางคอมปาวด์ที่ไม่ผสมน้ำมัน แต่ทั้งนี้พบว่าการใส่น้ำมันมากเกินไปส่งผลให้ความสามารถในการคืนรูปด้อยลงเนื่องจากการผสมน้ำมันจะเข้าไปจะทำให้สมบัติ viscoelastic เพิ่มขึ้น (Pechurai, 2009)

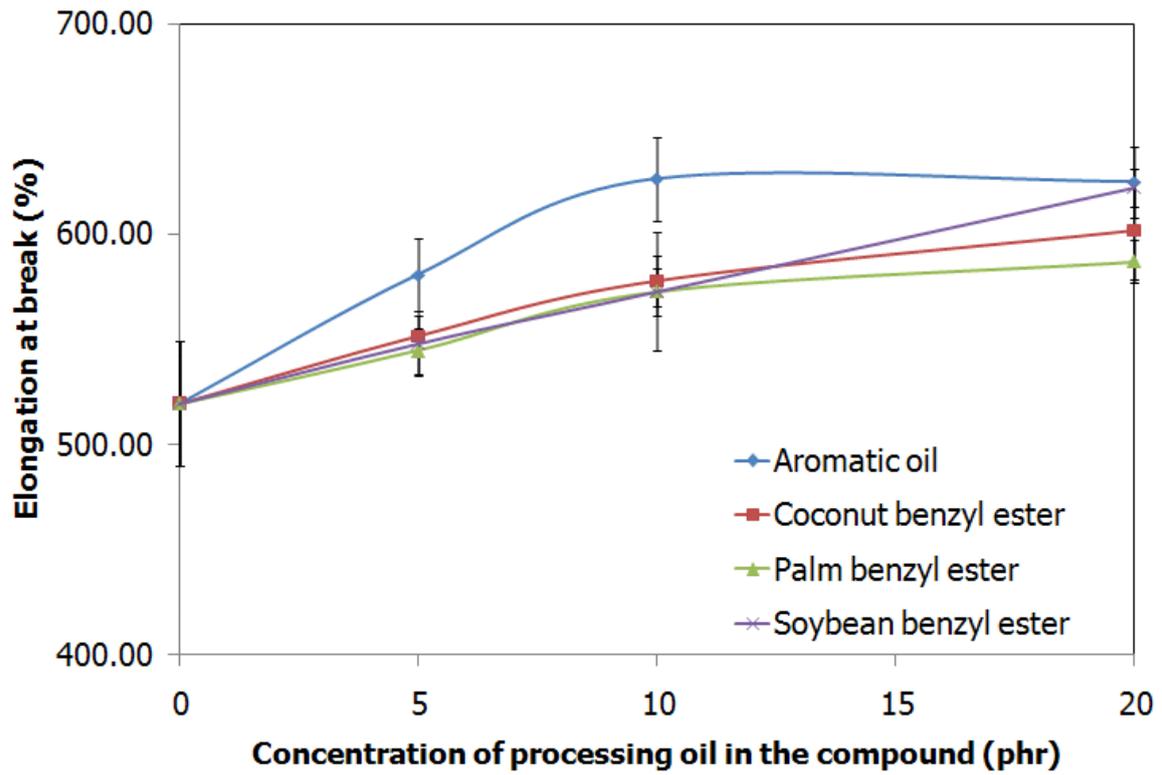
และเมื่อเปรียบเทียบชนิดของน้ำมันพบว่ายางคอมปาวด์ที่ผสม palm benzyl ester จะมีค่ามอดูลัสยืดหยุ่น ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความแข็งสูงที่สุดเนื่องจาก palm benzyl ester มีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่ coconut benzyl ester และมีพันธะคู่น้อยกว่า soybean benzyl ester ทำให้การเคลื่อนที่เข้าแทรกระหว่างโมเลกุลยางเกิดยากกว่า ทำให้สายโซ่โมเลกุลยางมีโอกาสเกิดพันธะเชื่อมโยงได้มากกว่า ส่วนน้ำมันที่มีสมบัติดังกล่าวรองลงมา ได้แก่ ยางคอมปาวด์ที่ผสม coconut benzyl ester, soybean benzyl ester และน้ำมันอะโรมาติก ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.24, 4.25 และ 4.28 และจากรูปที่ 4.26 พบว่ายางคอมปาวด์ที่ผสมน้ำมันอะโรมาติก จะมีความสามารถในการยืดจนขาดสูงที่สุด รองลงมาคือ soybean benzyl ester, coconut benzyl ester และ palm benzyl ester ตามลำดับ เนื่องจากน้ำมันที่มีความไม่อิ่มตัวมากกว่า หรือสายโซ่โมเลกุลสั้นกว่า จะมีโอกาสแทรกตัวระหว่างสายโซ่โมเลกุลยางได้ง่ายกว่า ส่งผลให้ไปลดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลยางและเพิ่มปริมาตรอิสระระหว่างสายโซ่โมเลกุลยางทำให้สายโซ่โมเลกุลยางบิดตัวและเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น ความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น จึงทำให้ยางคอมปาวด์มีความสามารถในการยืดจนขาดสูง ส่วนสมบัติความสามารถในการคืนรูปของยางธรรมชาติคอมปาวด์ที่ผสมน้ำมันชนิดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.27 พบว่าผลมีแนวโน้มเช่นเดียวกับสมบัติความสามารถในการยืดจนขาด



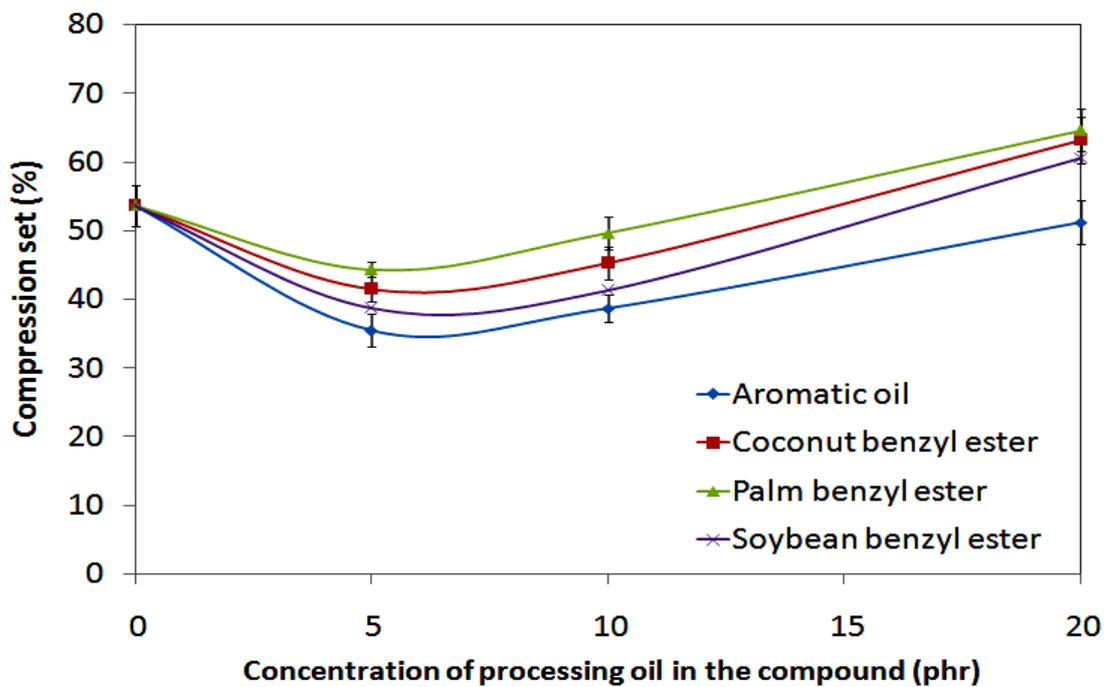
รูปที่ 4.24 กราฟ 300%Modulus ของยางธรรมชาติคอมปาวด์เปรียบเทียบกับชนิดและปริมาณน้ำมันแปรรูปยางที่ใช้



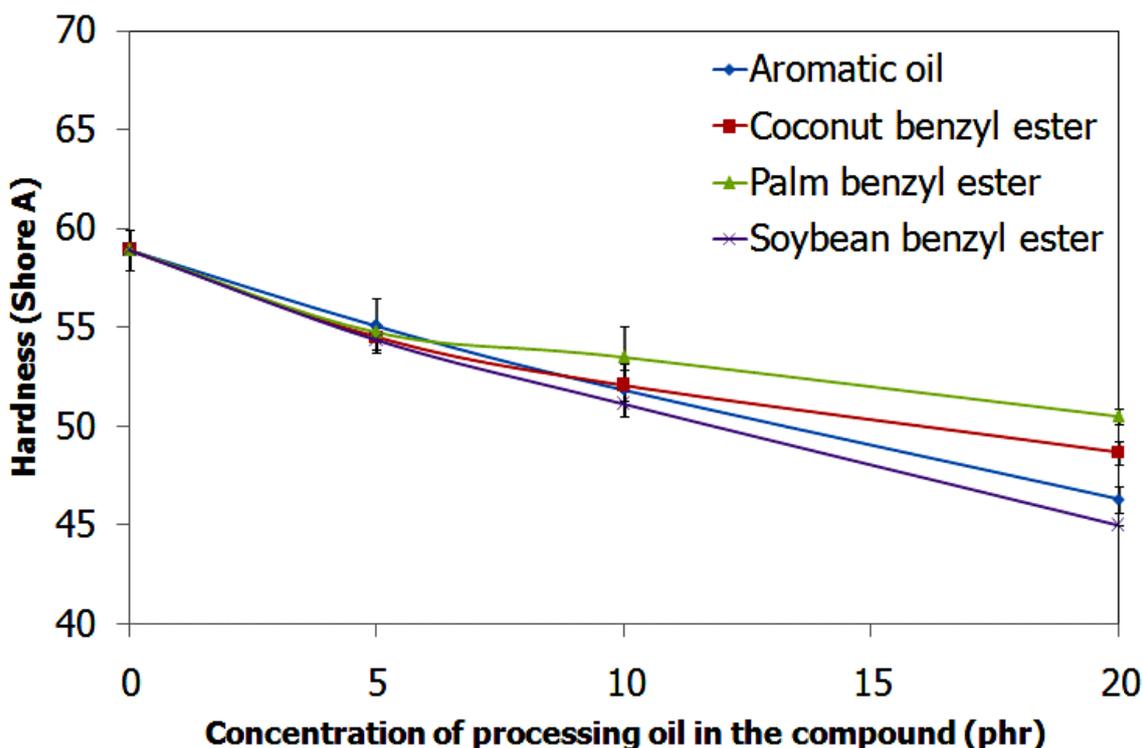
รูปที่ 4.25 กราฟ Tensile strength ของยางธรรมชาติคอมปาวด์เปรียบเทียบกับชนิดและปริมาณน้ำมันแปรรูปยางที่ใช้



รูปที่ 4.26 กราฟ Elongation at break ของยางธรรมชาติคอมปาวด์เปรียบเทียบกับชนิดและปริมาณน้ำมันแปรรูปยางที่ใช้



รูปที่ 4.27 กราฟ Compression set ของยางธรรมชาติคอมปาวด์เปรียบเทียบกับชนิดและปริมาณน้ำมันแปรรูปยางที่ใช้



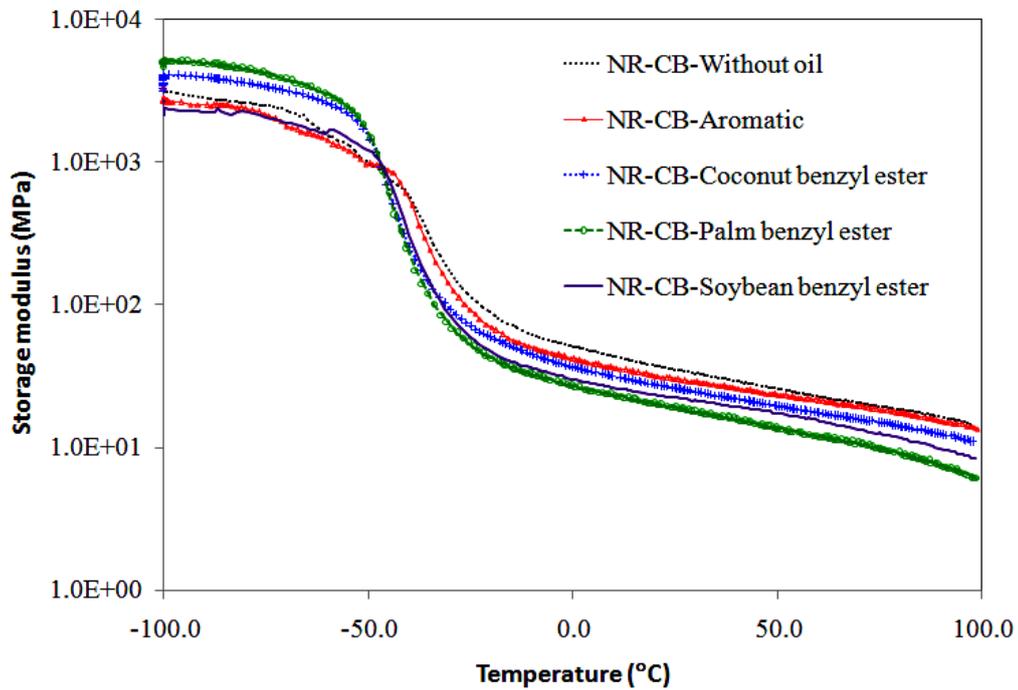
รูปที่ 4.28 กราฟ Hardness ของยางธรรมชาติคอมปาวด์เปรียบเทียบกับชนิด และปริมาณน้ำมันแปรรูปยางที่ใช้

#### 4.8.6 สมบัติเชิงพลวัต (Dynamic mechanical properties)

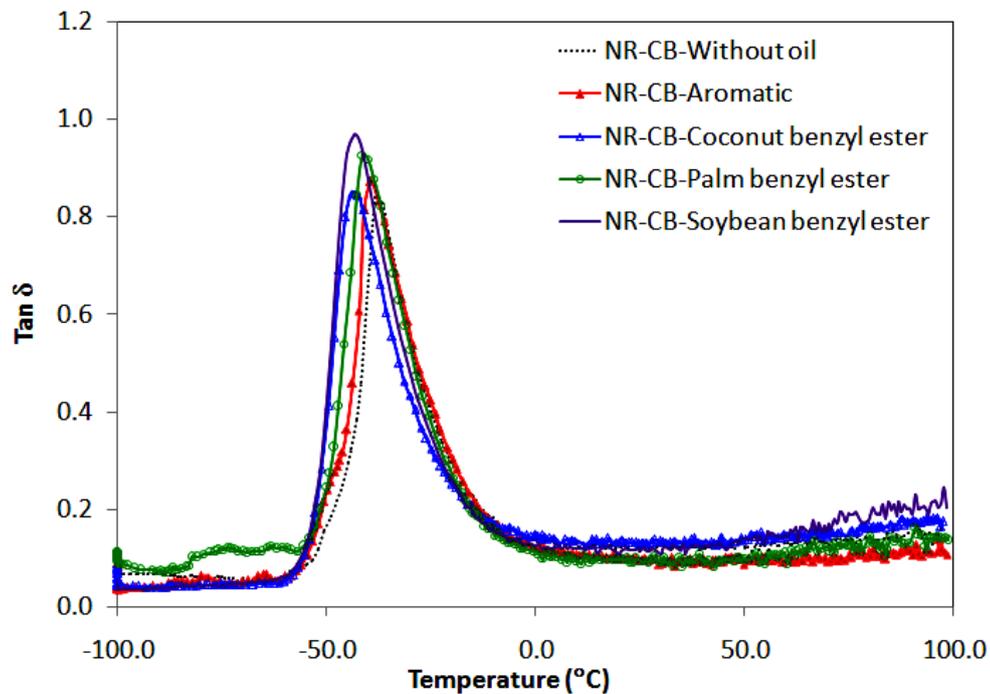
การศึกษาสมบัติเชิงพลวัต ใช้เครื่อง Dynamic mechanical analyzer (DMA) โดยทำการแปรรูปชนิดและปริมาณน้ำมันแปรรูปยางที่ใช้ผสมในยางคอมปาวด์ จากรูปที่ 4.29 ได้แสดงกราฟ Storage modulus ที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิ จะเห็นการใส่น้ำมันลงในยางธรรมชาติคอมปาวด์จะทำให้ค่า storage modulus ลดลง เนื่องจากน้ำมันจะเข้าไปเพิ่มสมบัติ viscoelastic ของวัสดุ (Pechurai, 2009) และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติคอมปาวด์ที่ผสมน้ำมันชนิดต่างๆ พบว่าน้ำมันอะโรมาติกให้ค่า storage modulus สูงที่สุด รองลงมาคือ Coconut benzyl ester, Soybean benzyl ester และ Palm benzyl ester ตามลำดับ

และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\tan \delta$  และอุณหภูมิ ทำให้ทราบค่า  $\tan \delta$  ที่อุณหภูมิต่างๆ และค่าอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature,  $T_g$ ) ดังรูปที่ 4.30 และตารางที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าการใส่น้ำมันลงในยางธรรมชาติคอมปาวด์ ทำให้ค่า  $T_g$  ลดลง เนื่องจากน้ำมันจะทำให้สายโซ่มีความยืดหยุ่นมากขึ้น ส่งผลให้ค่า  $T_g$  ลดลง และเมื่อพิจารณายางธรรมชาติคอมปาวด์ที่ใส่น้ำมัน พบว่ายางคอมปาวด์ที่ผสมน้ำมันแปรรูปยางเอริลเอสเทอร์ให้ค่า  $T_g$  ใกล้เคียงกับน้ำมันอะโรมาติก แต่ น้ำมันอะโรมาติกให้ค่า  $T_g$  สูงกว่าเล็กน้อย เนื่องจากของน้ำมันอะโรมาติกที่มีวงแหวนเบนซีนอยู่ในโครงสร้าง ส่งผลให้ค่า  $T_g$  สูงกว่าน้ำมันที่โครงสร้างแบบอลิฟาติก เมื่อนำมาผสมในยางธรรมชาติคอมปาวด์ จึงส่งผลต่อค่า  $T_g$  สูงเช่นกัน (Opaprakasit, 2010) และเมื่อเปรียบเทียบค่า  $T_g$  ของยางคอมปาวด์ที่ผสมน้ำมันแปรรูปยาง

เอริลเอสเทอร์ พบว่า ยางคอมปาวด์ที่ผสม coconut benzyl ester ให้ค่า  $T_g$  ต่ำสุด รองลงมาคือ Soybean benzyl ester และ Palm benzyl ester ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับลำดับค่า  $T_g$  ของน้ำมันแต่ละชนิด



รูปที่ 4.29 กราฟ Storage modulus ของยางธรรมชาติคอมปาวด์เปรียบเทียบกับชนิดน้ำมันแปรรูปต่างๆที่ใช้



รูปที่ 4.30 กราฟ Storage modulus ของยางธรรมชาติคอมปาวด์เปรียบเทียบกับชนิดน้ำมันแปรรูปต่างๆที่ใช้

การทดสอบสมบัติเชิงพลวัตของยางธรรมชาติคอมปาวด์ จะสามารถพิจารณาขีดความสามารถในการใช้งานจริงโดยศึกษาสมบัติเชิงพลวัตที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.13 เมื่อพิจารณาค่า  $\text{Tan } \delta$  ที่อุณหภูมิ 0, 30, 70 และ 100 °C จะแสดงถึงสมบัติการยืดเกาะถนน ความต้านทานการลื่นไถล ความต้านทานการหมุนของล้อ และความร้อนสะสม ตามลำดับ (Dasgupta, *et al.*, 2007, 2008) เมื่อพิจารณาค่า  $\text{Tan } \delta$  ที่ 0°C พบว่ายางธรรมชาติคอมปาวด์ที่ผสม coconut benzyl ester ให้ค่า  $\text{Tan } \delta$  สูงที่สุดเมื่อเทียบกับน้ำมันแปรรูปยางชนิดอื่น แสดงว่าสมบัติการยืดเกาะถนนบนพื้นเปียกดีที่สุด เมื่อพิจารณาค่า  $\text{Tan } \delta$  ที่อุณหภูมิ 30 และ 70 °C พบว่ายางธรรมชาติคอมปาวด์ที่ผสม aromatic oil และ palm benzyl ester ให้ค่าต่ำกว่า coconut benzyl ester และ soybean benzyl ester แสดงว่าการผสม aromatic oil และ palm benzyl ester จะช่วยต้านทานการลื่นไถล ลดความต้านทานการหมุนให้ต่ำลง (Lappoontana-anan, 2011) เมื่อพิจารณาค่า  $\text{Tan } \delta$  ที่อุณหภูมิ 100 °C พบว่ายางธรรมชาติคอมปาวด์ที่ผสม aromatic oil และ palm benzyl ester ให้ค่าต่ำกว่า coconut benzyl ester และ soybean benzyl ester แสดงว่าการผสม aromatic oil และ palm benzyl ester จะเกิดการสะสมความร้อนได้มากกว่า coconut benzyl ester และ soybean benzyl ester ตามลำดับ

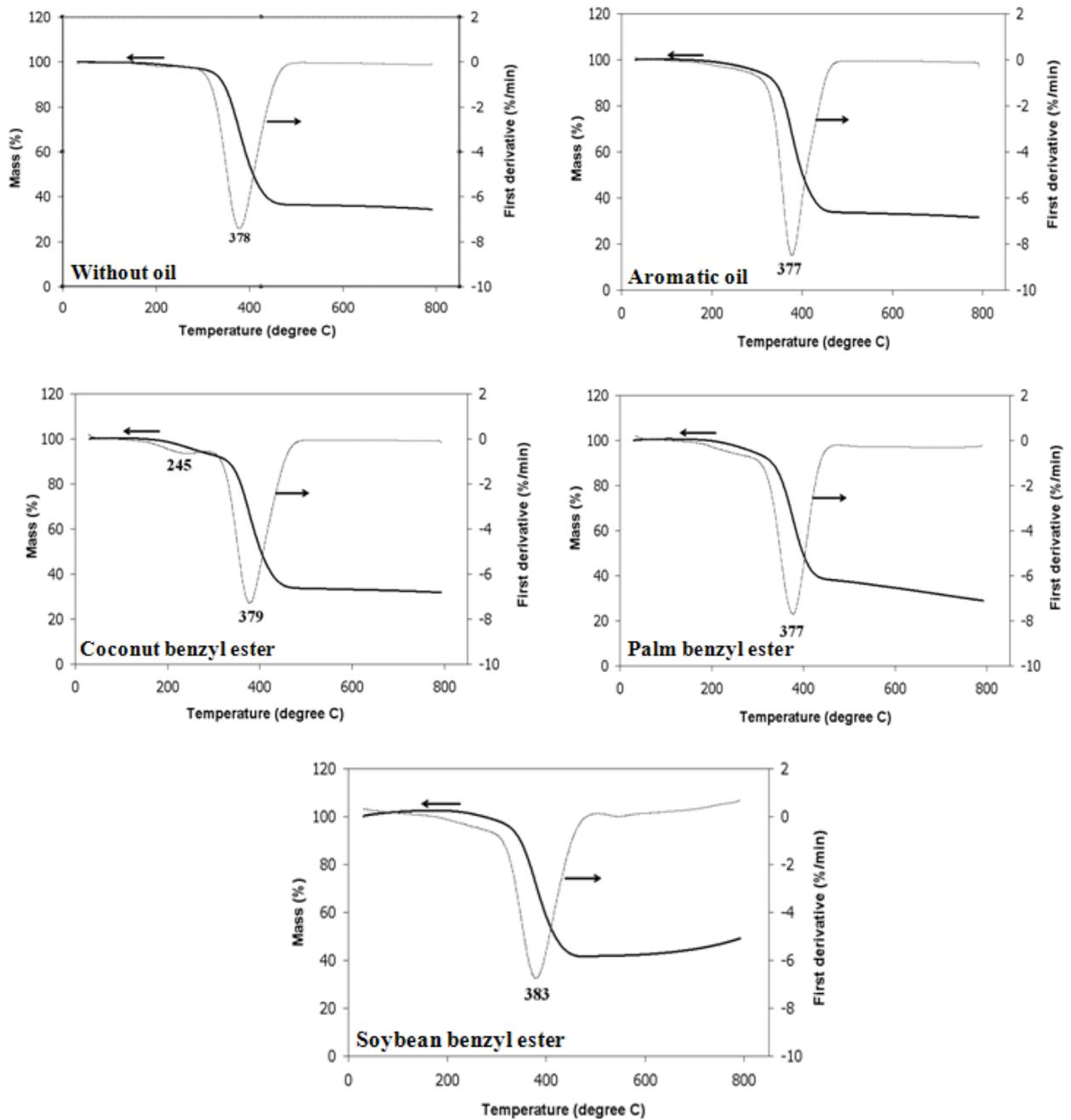
ตารางที่ 4.13 สมบัติเชิงพลวัตของยางธรรมชาติคอมปาวด์โดยแปรชนิดน้ำมันแปรรูปยาง

Type of oil in NR compound	$T_g$ (°C)	$\text{Tan } \delta$ at 0 °C	$\text{Tan } \delta$ at 30 °C	$\text{Tan } \delta$ at 70 °C	$\text{Tan } \delta$ at 100 °C
Without oil	-38.1	0.14	0.13	0.13	0.16
Aromatic oil	-39.3	0.12	0.09	0.09	0.11
Coconut benzyl ester	-43.8	0.15	0.13	0.14	0.17
Palm benzyl ester	-41.3	0.11	0.09	0.09	0.14
Soybean benzyl ester	-43.3	0.13	0.11	0.14	0.20

#### 4.8.7 สมบัติเชิงความร้อน (Thermal properties)

การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน เป็นการวิเคราะห์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของยางธรรมชาติคอมปาวด์ ซึ่งได้ทำการศึกษาโดยใช้เครื่อง Thermogravimetric analyzer ควบคุม heating rate ที่ 10 °C/min โดยแสดงผลในรูปของ weight loss curves และ derivative curves แสดงดังรูปที่ 4.31 และตารางที่ 4.14 จะเห็นได้ว่า น้ำมันแปรรูปยางเอริลเอสเทอร์ทนความร้อนได้น้อยกว่าน้ำมันอะโรมาติก สังเกตจากอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้น แต่พบว่า ร้อยละการสลายตัวสูงสุด ของน้ำมันแปรรูปยางเอริลเอสเทอร์มีความใกล้เคียงกับยางธรรมชาติคอมปาวด์ที่ผสมน้ำมันอะโรมาติก อยู่ในช่วงร้อยละ 65-69 และอุณหภูมิสลายตัวสูงสุดให้ผลใกล้เคียงกันเช่นกัน คืออยู่ในช่วง 377-379°C ยกเว้น soybean benzyl ester ที่มี

อุณหภูมิสลายตัวสูงสุดที่  $383^{\circ}\text{C}$  น้ำมันแปรรูปยางเกือบทุกชนิดให้การสลายแบบขั้นตอนเดียวยกเว้น coconut benzyl ester ที่มีการสลายตัวแบบสองขั้นตอน



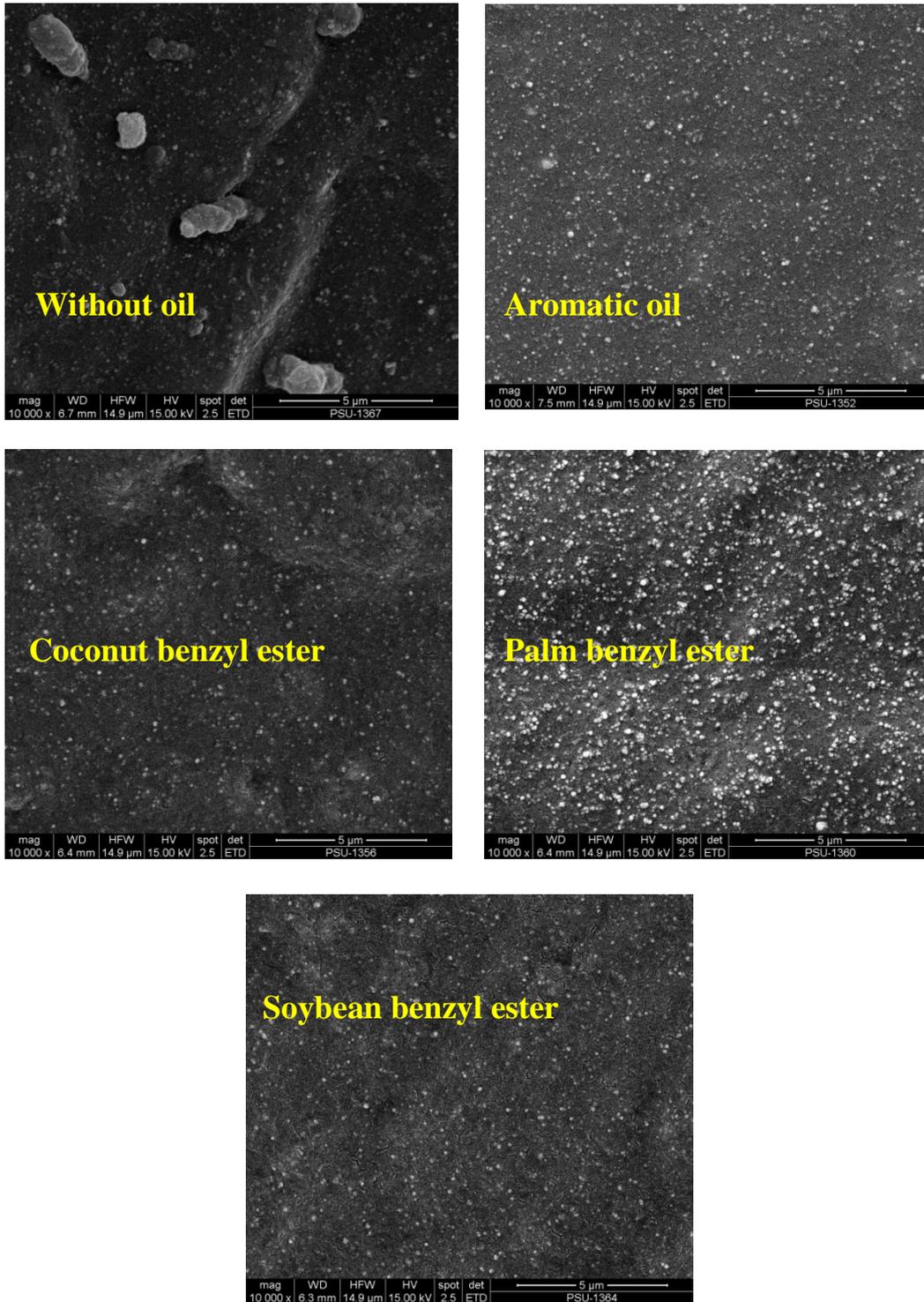
รูปที่ 4.31 กราฟการเสื่อมสลายตัวทางความร้อนของยางธรรมชาติคอมปาวด์เปรียบเทียบกับชนิดน้ำมันแปรรูปยางที่ใช้

ตารางที่ 4.14 สมบัติเชิงความร้อนของยางธรรมชาติคอมปาวด์โดยแปรชนิดน้ำมันแปรรูปร่าง

Type of processing oil in NR compound	Degradation temperature (°C)	Degradation weight % (%)
Without oil	379	69.2
Aromatic oil	377	68.3
Coconut benzyl ester	245 (step I)	96.1
	379 (step II)	65.8
Palm benzyl ester	377	65.3
Soybean benzyl ester	383	69.2

#### 4.8.8 การกระจายตัวของสารตัวเติม (Filler dispersion study)

ในการตรวจสอบการกระจายตัวของสารตัวเติม ได้แก่ เขม่าดำ ที่ผสมลงไปในยางธรรมชาติคอมปาวด์ ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope:SEM) แสดงผล ดังรูปที่ 4.32 จะเห็นได้ว่า น้ำมันแปรรูปร่างจะทำให้เขม่าดำกระจายตัวดีขึ้น ไม่จับตัวเป็นกลุ่มก้อน และพบว่า ยางธรรมชาติคอมปาวด์ที่ผสม coconut benzyl ester และ soybean benzyl ester จะทำให้เขม่าดำมีการกระจายตัวดีกว่ายางธรรมชาติคอมปาวด์ที่ผสมน้ำมันอะโรมาติกเล็กน้อย สังเกตได้จากขนาดการเกาะกลุ่มกันของเขม่าดำที่ต่างกันแต่พบว่า ยางธรรมชาติคอมปาวด์ที่ผสม palm benzyl ester มีขนาดการเกาะกลุ่มกันของเขม่าดำที่ใหญ่กว่าน้ำมันแปรรูปร่างเอริลเอสเทอร์จากน้ำมันมะพร้าว และน้ำมันถั่วเหลือง เนื่องจาก palm benzyl ester มีความอิมิตันน้อยกว่าน้ำมันอะโรมาติก และ soybean benzyl ester และมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่า coconut benzyl ester จึงแทรกตัวระหว่างโมเลกุลยางได้ยากขึ้น ส่งผลให้เขม่าดำกระจายตัวได้น้อยลง



รูปที่ 4.32 ผล SEM ที่แสดงถึงการกระจายตัวของเขม่าดำ (N330) ในยางธรรมชาติคอมปาวด์ โดยแปรชนิดน้ำมันแปรรูปร่างที่ใช้

#### 4.9 การทดสอบสมบัติของยางเอสบีอาร์คอมปาวด์เบื้องต้นที่ใช้เอริลเอสเทอร์เป็นน้ำมันแปรรูปยาง

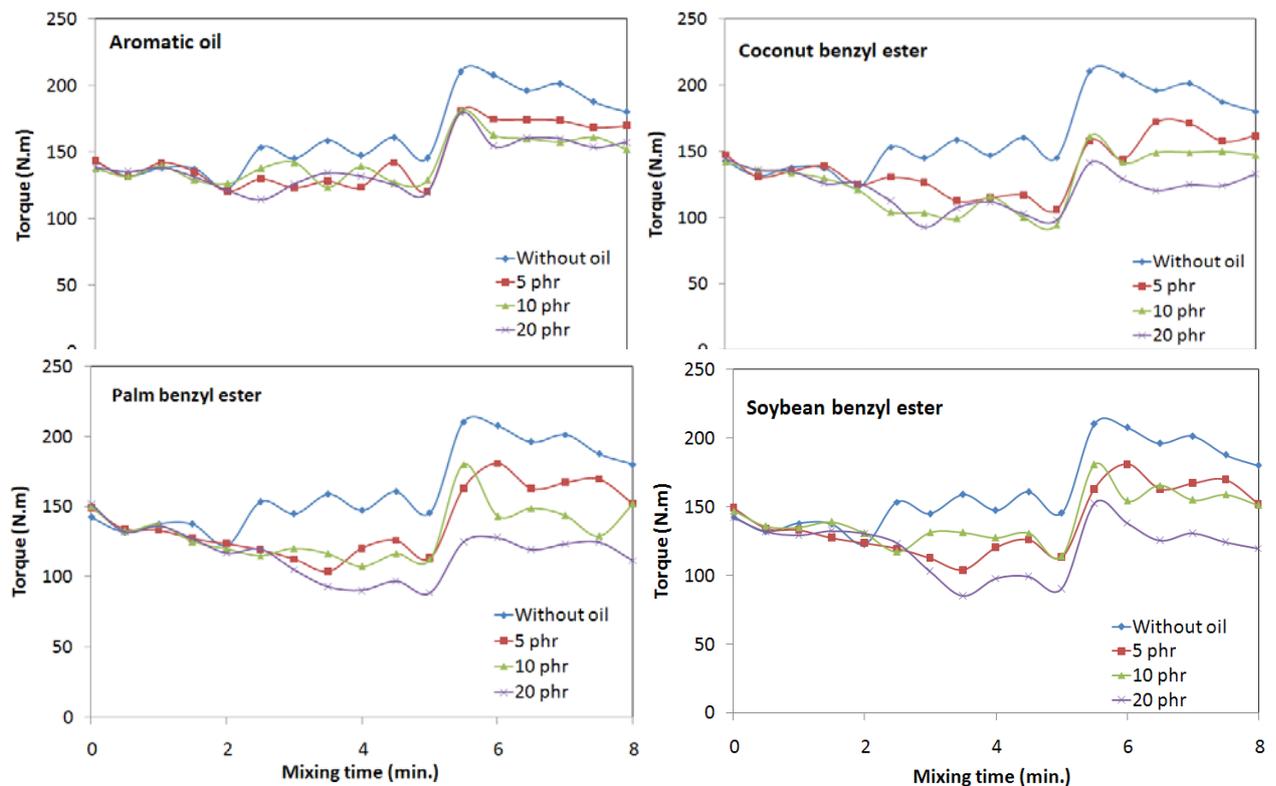
ในการทดสอบสมบัติของยางเอสบีอาร์คอมปาวด์ เพื่อจะทำการเปรียบเทียบระหว่างสมบัติของยางคอมปาวด์ที่ผสมน้ำมันแปรรูปยางเอริลเอสเทอร์กับน้ำมันอะโรมาติก สูตรการคอมปาวด์ได้แสดงไว้ดังตารางที่ 4.15 และลำดับการผสมของการคอมปาวด์ยางเอสบีอาร์กระทำเช่นเดียวกับยางธรรมชาติคอมปาวด์

ตารางที่ 4.15 สูตรยางเอสบีอาร์คอมปาวด์ ตามมาตรฐาน ASTM D3185

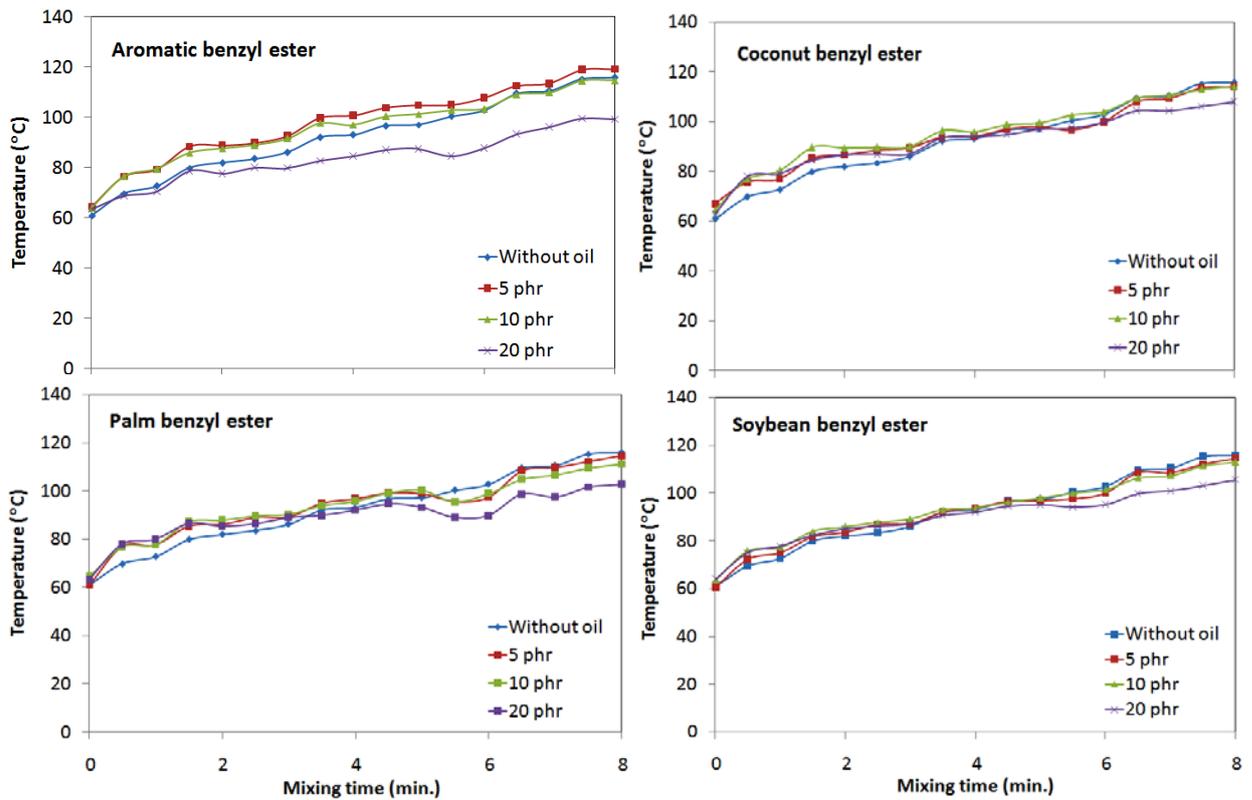
Ingredients	phr
Styrene-Butadiene Rubber (SBR)	100
Zinc oxide	3
Stearic acid	1
<i>Process Oil</i>	<i>0-20</i>
Filler (High abrasion furnace black, N330)	50
Sulfur	1.75
TBBS	1.00

#### 4.9.1 การทดสอบพลังงานและอุณหภูมิการบดผสมยางเอสปีอาร์คอมปาวด์

ค่าทอร์คและอุณหภูมิที่ใช้ในการบดผสมยางเอสปีอาร์คอมปาวด์ ทดสอบโดยใช้เครื่อง internal mixer (MX 500-D75L90; Chareon Tut Co., Ltd.) มีความจุ 0.5 L อุณหภูมิเริ่มต้นการผสม  $70 \pm 3^{\circ}\text{C}$ , 60 rpm และ Fill factor เท่ากับ 0.7 ได้แสดงผลที่ได้ไว้ดังรูปที่ 4.33 และ 4.34 ซึ่งพบได้ว่า เอริลเอสเทอร์ที่เตรียมจากน้ำมันทุกชนิดให้ค่าทอร์คและอุณหภูมิการผสมลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของน้ำมันเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำมันจะช่วยลดความหนืดของยางคอมปาวด์ขณะผสม ทำให้ความต้านทานต่อการหมุนของ rotor ลดลง

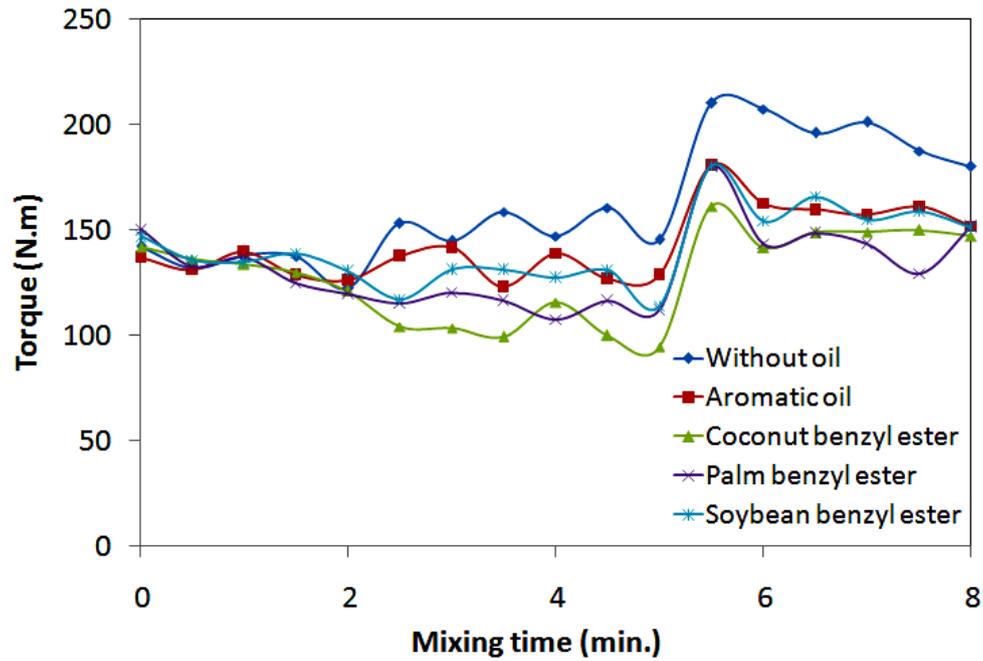


รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์คการผสมกับเวลาการผสมของการคอมปาวด์เอสปีอาร์ โดยแปรชนิดน้ำมันแปรรูปร่างและปริมาณที่ใช้

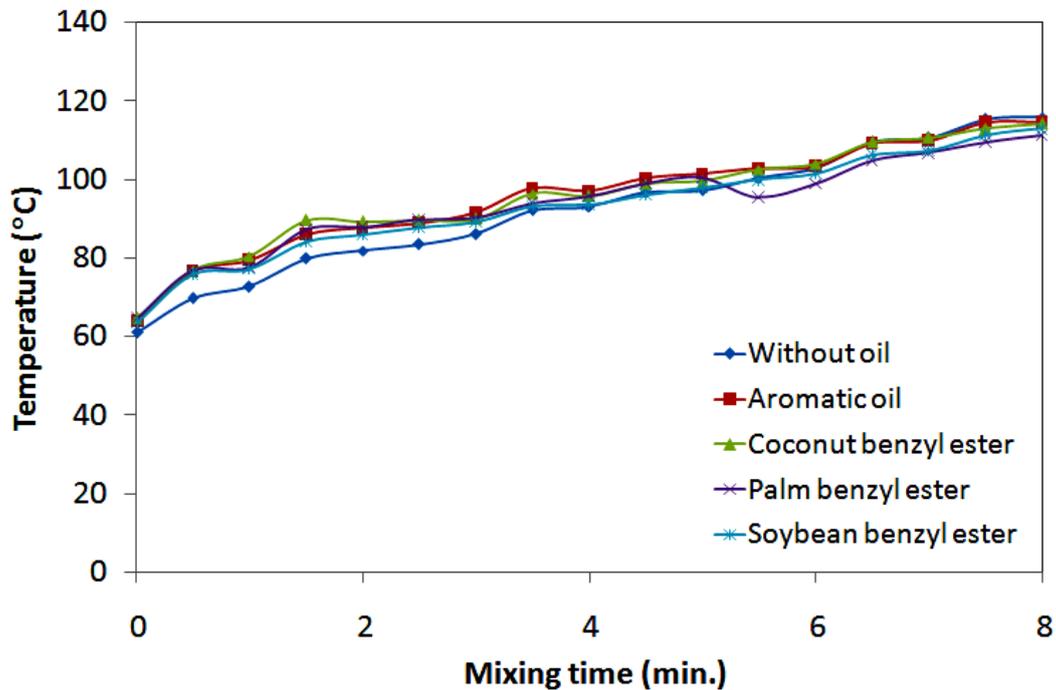


รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการผสมกับเวลาการผสมของการคอมปาวด์ยางเอสปีอาร์ โดยแปรชนิดน้ำมันแปรรูปร่างและปริมาณที่ใช้

จากรูปที่ 4.35 และ 4.36 เป็นการเปรียบเทียบค่าทอร์คและอุณหภูมิขณะผสม โดยเป็นการเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันแปรรูปร่างเอริลเอสเทอร์ชนิดต่างๆกับน้ำมันอะโรมาติก โดยกำหนดปริมาณน้ำมันแปรรูปร่างที่ 10 phr พบว่าน้ำมันแปรรูปร่างเอริลเอสเทอร์ชนิดต่างๆให้ค่าทอร์คต่ำกว่าการใช้น้ำมันอะโรมาติก ขณะที่อุณหภูมิการผสมของยางคอมปาวด์ที่ใช้ใช้น้ำมันเอริลเอสเทอร์ จะให้อุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับการใช้น้ำมันอะโรมาติก และเมื่อพิจารณาพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์คการผสมกับเวลาการผสมจะแสดงถึงค่าพลังงานที่ใช้ในการผสม แสดงผลดังตารางที่ 4.16 และกราฟรูปที่ 4.37 โดยทำการแปรชนิดและปริมาณน้ำมัน พบว่าเมื่อปริมาณน้ำมันแปรรูปร่างเพิ่มขึ้น พลังงานการผสมจะมีแนวโน้มลดลง ในทำนองเดียวกันหากพิจารณาเปรียบเทียบน้ำมันแปรรูปร่างแต่ละชนิด จะเห็นได้ว่าค่าพลังงานการผสมของน้ำมันแปรรูปร่างเอริลเอสเทอร์ให้ค่าที่ต่ำกว่าการใช้ใช้น้ำมันอะโรมาติก



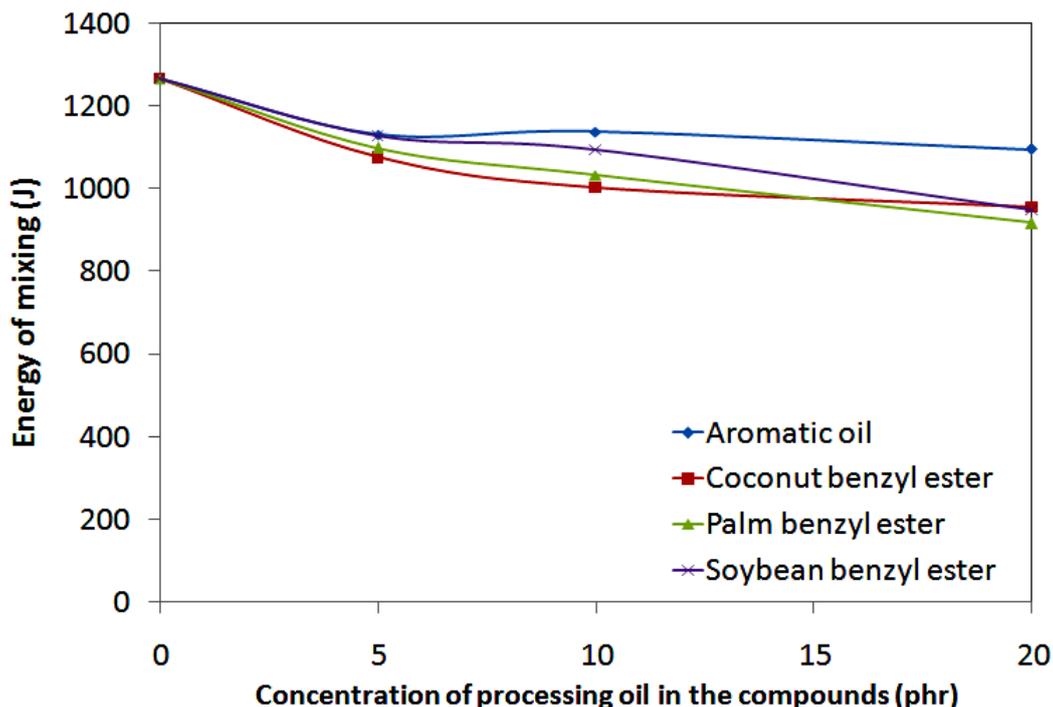
รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์คการผสมกับเวลาการผสมของการคอมปาวด์ยางเอสปีอาร์ โดยแปรชนิดน้ำมันแปรรูปร่าง (กำหนดปริมาณน้ำมันแปรรูปร่างที่ใช้เท่ากับ 10 phr)



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิการผสมกับเวลาการผสมของการคอมปาวด์ยางเอสปีอาร์ โดยแปรชนิดน้ำมันแปรรูปร่าง (กำหนดปริมาณน้ำมันแปรรูปร่างที่ใช้เท่ากับ 10 phr)

ตารางที่ 4.16 ค่าพลังงานการผสมของยางเอสบีอาร์คอมปาวด์โดยแปรชนิดน้ำมันแปรรูปร่างและปริมาณที่ใช้

Processing oils in rubber compound	Loading level	Mixing energy (J)
Without oil	0 phr	1267
Aromatic oil	5 phr	1132
	10 phr	1139
	20 phr	1096
Coconut benzyl ester	5 phr	1077
	10 phr	1003
	20 phr	956
Palm benzyl ester	5 phr	1100
	10 phr	1034
	20 phr	918
Soybean benzyl ester	5 phr	1129
	10 phr	1095
	20 phr	949



รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานการผสมที่ใช้คอมปาวด์ยางเอสปีอาร์กับปริมาณและชนิดน้ำมันแปรรูปยาง

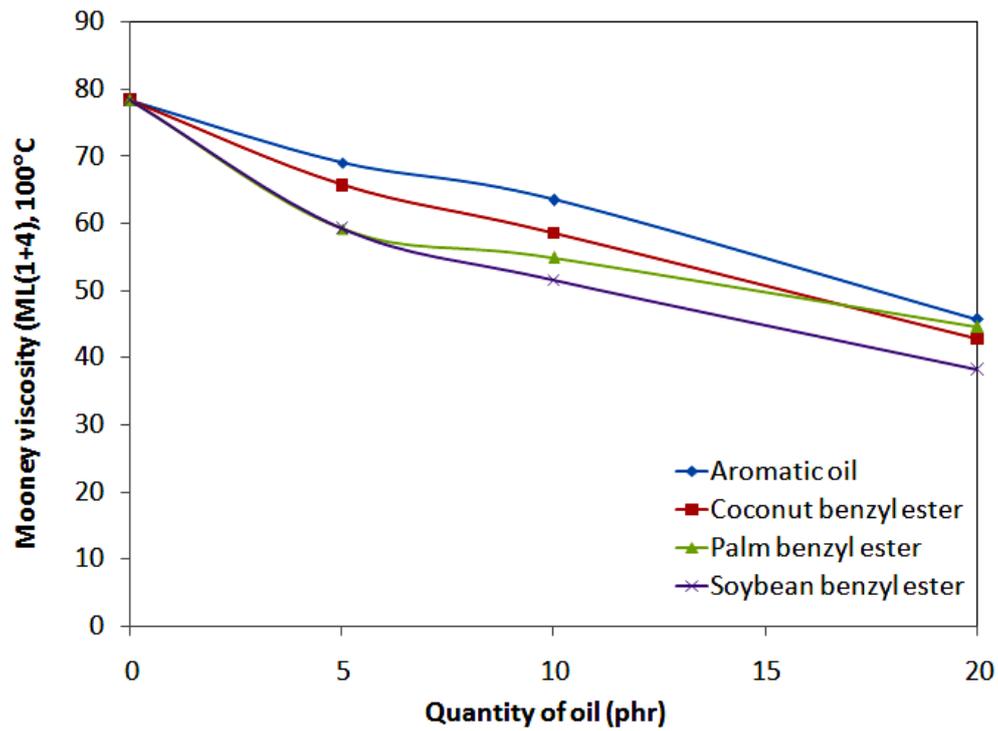
#### 4.9.2 ความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) และการคลายความเค้น (stress relaxation)

การวัดค่าความหนืดมูนนี่และการคลายความเค้นของยางเอสปีอาร์คอมปาวด์ ทดสอบโดยใช้เครื่อง moving die rheometer (rheoTech MD plus) ผลการทดลองได้แสดงดังตารางที่ 4.17 จะพบว่ายางคอมปาวด์ที่ผสมน้ำมันแปรรูปยางจะให้ค่าความหนืดมูนนี่ลดลงเมื่อทำการเพิ่มปริมาณน้ำมัน และการผสมปริมาณน้ำมันแปรรูปยางที่ระดับปริมาณเดียวกันในยางคอมปาวด์ พบว่า น้ำมันแปรรูปยางเอริลเอสเทอร์ให้ค่าความหนืดมูนนี่ต่ำกว่าคอมปาวด์ที่ผสมน้ำมันอะโรมาติก เนื่องจากขนาดโมเลกุลของน้ำมันแปรรูปยางเอริลเอสเทอร์มีขนาดเล็กกว่าน้ำมันอะโรมาติก โอกาสการเข้าแทรกระหว่างโมเลกุลยางเอสปีอาร์ได้ง่ายกว่าน้ำมันอะโรมาติก ส่งผลให้ค่าความหนืดมูนนี่ลดลงแสดงแนวโน้มดังกล่าว ดังรูปที่ 4.38

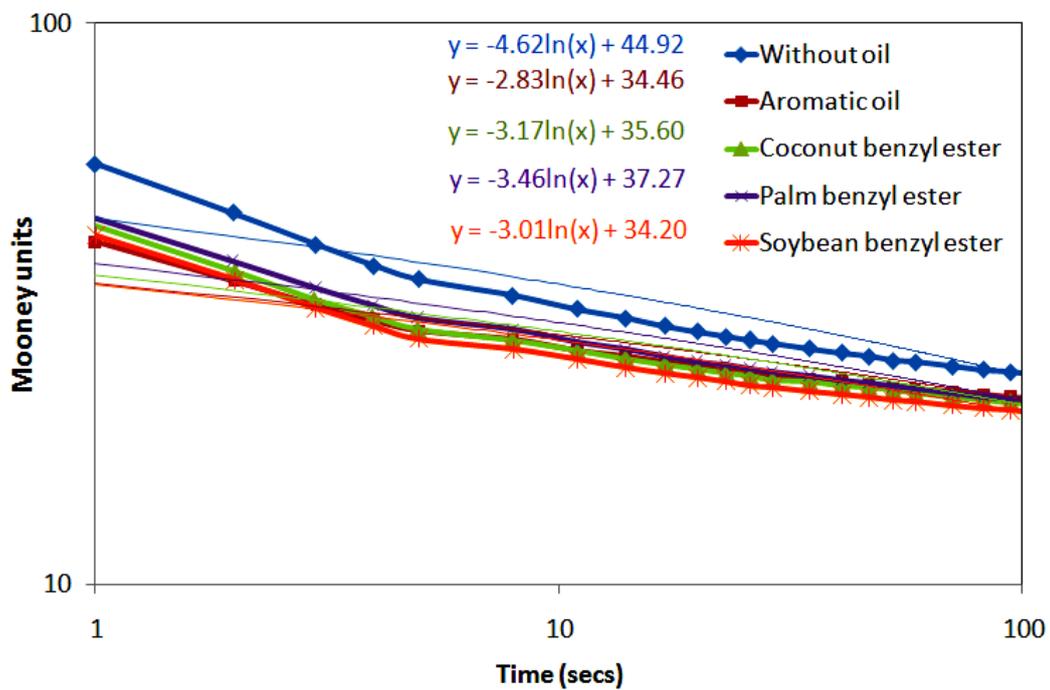
รูปที่ 4.39 เป็นตัวอย่างกราฟเพื่อใช้หาค่า rate of stress relaxation จากความชันของเส้นกราฟที่เกิดจากการ plot กราฟระหว่าง Mooney unit และเวลา และเมื่อนำค่า rate of stress relaxation มา plot กราฟเทียบกับชนิดและปริมาณน้ำมันแปรรูปยางเอริลเอสเทอร์ที่ผสมในยางคอมปาวด์ แสดงรูปที่ 4.40 จะเห็นได้ว่ายางเอสปีอาร์คอมปาวด์ที่ผสมน้ำมันแปรรูปยางเอริลเอสเทอร์จะมี rate of stress relaxation สูงกว่ายางเอสปีอาร์คอมปาวด์ที่ผสมน้ำมันอะโรมาติก ซึ่งจากมาตรฐาน ASTM D 1646 กล่าวถึงค่า rate of relaxation ไว้ว่า ถ้า rate of relaxation ต่ำ แสดงว่ามีส่วนที่มีความยืดหยุ่นสูงในคอมปาวด์ แต่ถ้า rate of relaxation สูง แสดงว่ามีส่วนที่ไม่ยืดหยุ่นสูงในคอมปาวด์ ดังนั้นน้ำมันอะโรมาติกมีโครงสร้างที่ไม่อึดตัวสูงกว่าน้ำมันแปรรูปยางเอริลเอสเทอร์ ส่งผลให้เข้ากันได้ง่ายกับยางที่มีความไม่อึดตัวแบบเดียวกัน ดังเช่น ยางเอสปีอาร์

ตารางที่ 4.17 ค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) และค่าคลายความเค้น (Stress relaxation)

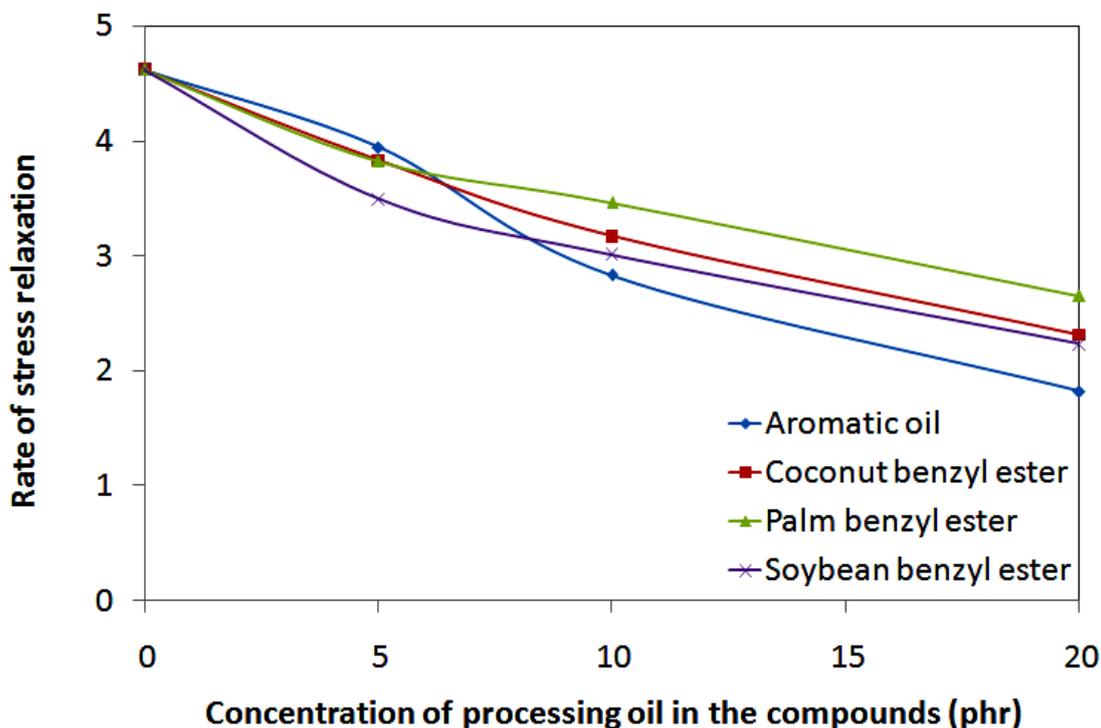
Processing oils in rubber compound	Loading level	Mooney viscosity (ML(1+4), 100°C)	Rate of stress relaxation
Without oil	0 phr	53.158	78.351
Aromatic oil	5 phr	78.351	69.017
	10 phr	69.017	63.501
	20 phr	48.501	45.616
Coconut benzyl ester	5 phr	65.685	65.685
	10 phr	58.468	58.468
	20 phr	42.692	42.692
Palm benzyl ester	5 phr	59.133	59.133
	10 phr	54.858	54.858
	20 phr	44.538	44.538
Soybean benzyl ester	5 phr	59.228	59.228
	10 phr	51.522	51.522
	20 phr	38.258	38.258



รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานการผสมของยางเอสปีอาร์คอมปาวด์กับชนิดและปริมาณน้ำมันเอริลเอสเทอร์



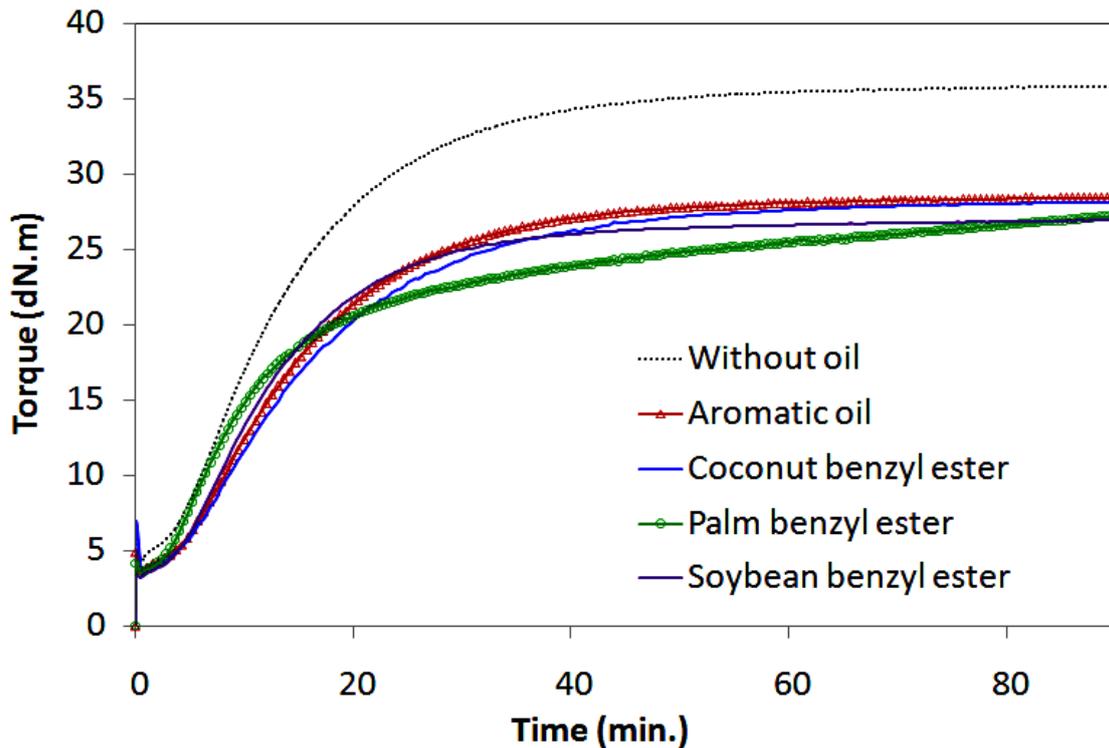
รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่าง Log Mooney Units ของยางเอสปีอาร์คอมปาวด์กับเวลา เพื่อใช้พิจารณาการทดสอบการคลายความเค้น โดยทำการแปรชนิดของน้ำมันแปรรูปร่าง



รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า rate of stress relaxation ของยางเอสปีอาร์คอมปาวด์เปรียบเทียบกับชนิดและปริมาณน้ำมันแปรรูปยางที่ใช้

#### 4.9.3 การคงรูปของยาง (Cure properties)

การตรวจสอบการคงรูปของยางเอสปีอาร์คอมปาวด์ ด้วยเครื่อง Moving die rheometer (rheoTech MD plus) ตามมาตรฐาน ASTM D 1646-94 ที่อุณหภูมิทดสอบ  $160^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 60 นาที ผลการทดลองได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.41 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์คการทำให้ยางคงรูปกับเวลา จะเห็นได้ว่าน้ำมันแปรรูปยางทุกชนิดให้ลักษณะกราฟเป็นแบบ plateau โดยค่าที่แสดงคุณสมบัติการคงรูป ได้แก่ค่า maximum torque ( $M_H$ ), minimum torque ( $M_L$ ), torque difference ( $M_H - M_L$ ), scorch time, 90% cure time ( $tc_{90}$ ) และ cure rate index ได้สรุปไว้ดังตารางที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าการผสมน้ำมันแปรรูปยางเอริลเอสเทอร์ในยางเอสปีอาร์คอมปาวด์ให้ค่า torque difference ต่ำกว่ายางเอสปีอาร์คอมปาวด์ที่ผสมน้ำมันอะโรมาติก แสดงได้ดังรูปที่ 4.42 ซึ่งค่า torque difference ( $M_H - M_L$ ) ที่สูงขึ้น แสดงถึงระดับการ Crosslink สูงขึ้นด้วยเช่นกัน ดังนั้นน้ำมันแปรรูปยางเอริลเอสเทอร์ให้ระดับการ Crosslink ของยางคอมปาวด์ต่ำกว่าน้ำมันแปรรูปยางอะโรมาติก เนื่องจากน้ำมันเอริลเอสเทอร์เข้าไปแทรกระหว่างโมเลกุลยางได้ง่ายกว่าน้ำมันอะโรมาติก จึงขัดขวางปฏิกิริยาการ crosslink ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง จึงส่งผลให้ค่า torque difference ( $M_H - M_L$ ) ต่ำลง แสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำมันและความเข้ากันได้ของน้ำมันแปรรูปยางกับโมเลกุลยางมีผลต่อระดับการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุล และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันแปรรูปยางเอริลเอสเทอร์ด้วยกัน พบว่า palm benzyl ester ให้ค่า torque difference สูงสุด

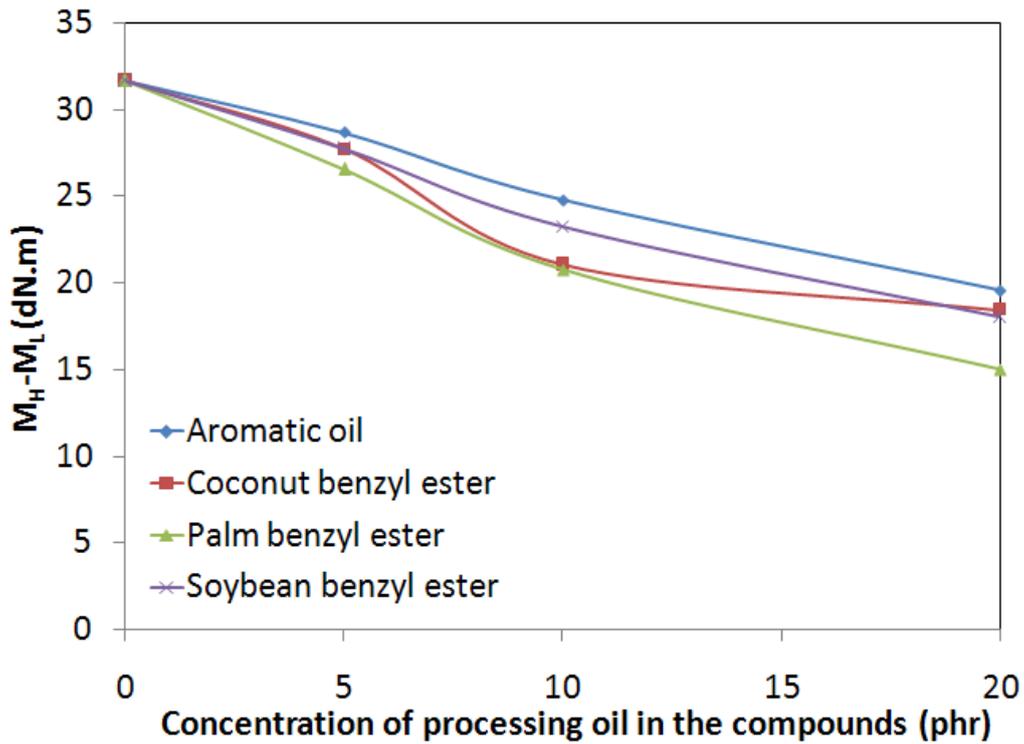


รูปที่ 4.41 Curing curves ของยางเอสบีอาร์คอมปาวด์โดยทำการแปรชนิด และปริมาณน้ำมันแปรรูปอย่างที่ใช้

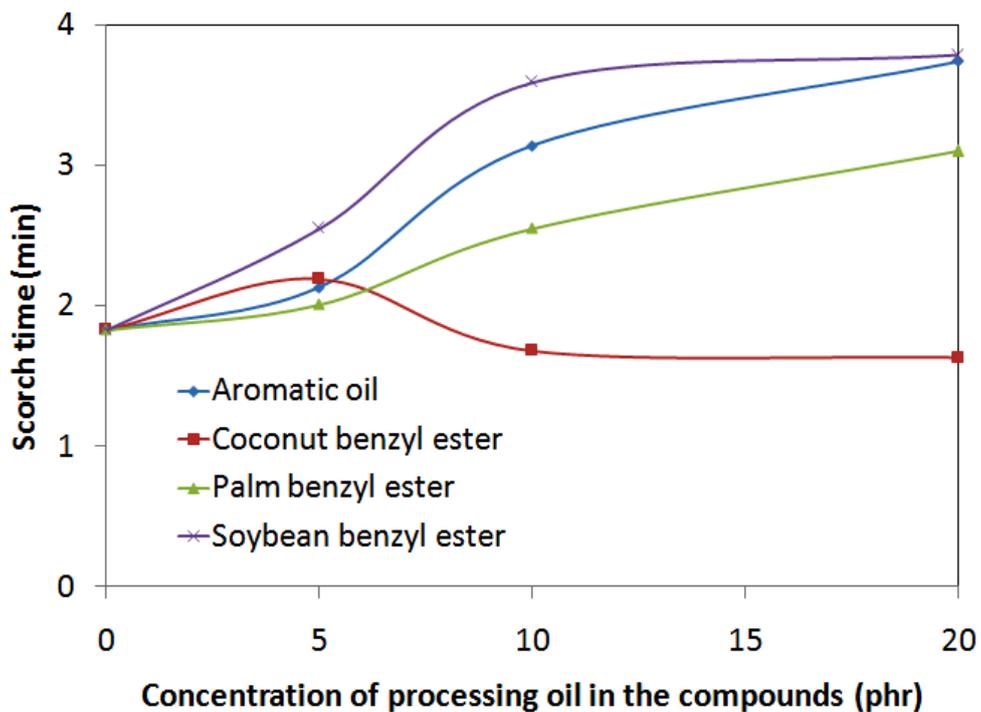
เมื่อพิจารณา scorch time,  $T_{s1}$  และ cure time,  $T_{c90}$  โดยแปรชนิดและปริมาณของน้ำมันแปรรูป ปรากฏว่ายิ่งปริมาณน้ำมันเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า  $T_{s1}$  เพิ่มขึ้น ยกเว้น coconut benzyl ester จะทำให้ค่า  $T_{s1}$  มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมัน และเมื่อเปรียบเทียบชนิดน้ำมันพบว่า soybean benzyl ester ให้ค่า  $T_{s1}$  ที่สูงว่าน้ำมันชนิดอื่นดังรูปที่ 4.43 และยิ่งพบอีกว่าน้ำมันเอริลเอสเทอร์ทุกชนิดให้ค่า  $T_{c90}$  ต่ำกว่า น้ำมันอะโรมาติกดังรูปที่ 4.44 แสดงว่าน้ำมันเอริลเอสเทอร์สามารถช่วยลดระยะเวลาการสุกของยางเอสบีอาร์คอมปาวด์ลงได้ ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับค่า cure rate index,  $CRI$  ดังรูปที่ 4.45

ตารางที่ 4.18 คุณสมบัติการคงรูปของยางเอสบีอาร์คอมปาวด์ โดยทำการแปรชนิดและปริมาณของน้ำมันแปรรูปยางเอริลเอสเทอร์

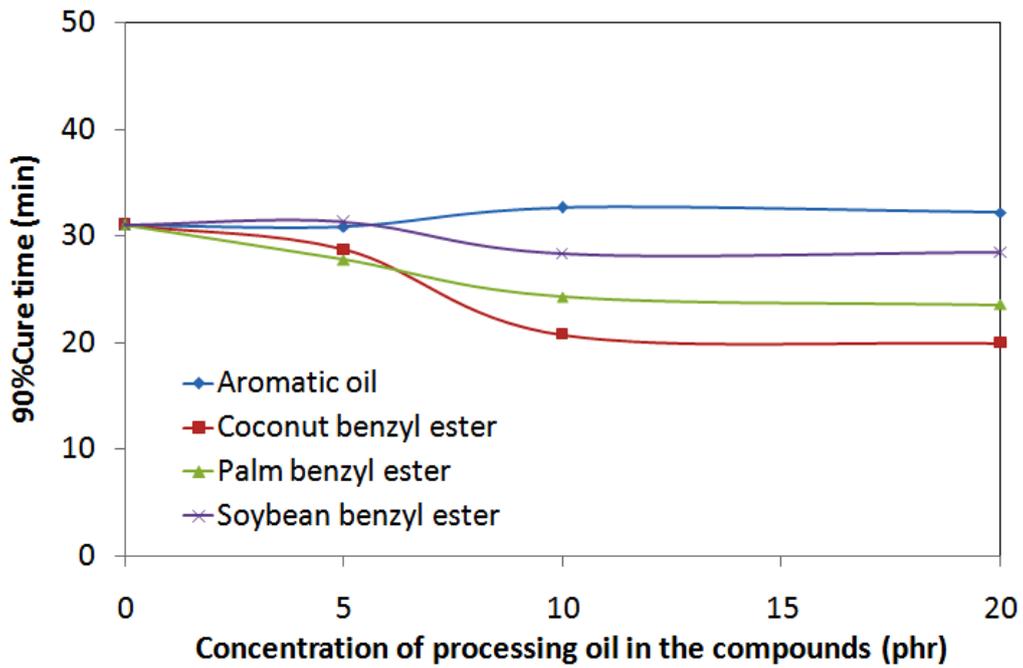
Processing oils in rubber compound	Loading level	Test parameter					
		Minimum torque (dN.m)	Maximum torque (dN.m)	MH-ML (dN.m)	Scorch time, Ts1 (min)	Cure time, Tc90 (min)	Cure rate index, CRI (min <sup>-1</sup> )
Without oil	0 phr	4.2	35.84	31.64	1.83	31.03	3.42
Aromatic oil	5 phr	3.91	32.57	28.66	2.13	30.85	3.48
	10 phr	3.69	28.42	24.74	3.14	32.65	3.39
	20 phr	2.85	22.38	19.54	3.74	32.18	3.52
Coconut benzyl ester	5 phr	3.65	31.33	27.68	2.19	28.71	4.17
	10 phr	4.93	25.96	21.04	1.68	20.73	4.59
	20 phr	3.86	22.28	18.42	1.63	19.95	5.47
Palm benzyl ester	5 phr	4.54	31.07	26.53	2.01	27.74	4.08
	10 phr	3.5	27.24	20.74	2.55	24.27	4.35
	20 phr	3.22	12.23	15.01	3.1	23.55	4.89
Soybean ester	5 phr	3.48	31.19	27.72	2.55	31.32	3.48
	10 phr	3.7	26.93	23.23	3.59	28.33	4.04
	20 phr	2.66	20.69	18.03	3.78	28.45	3.97



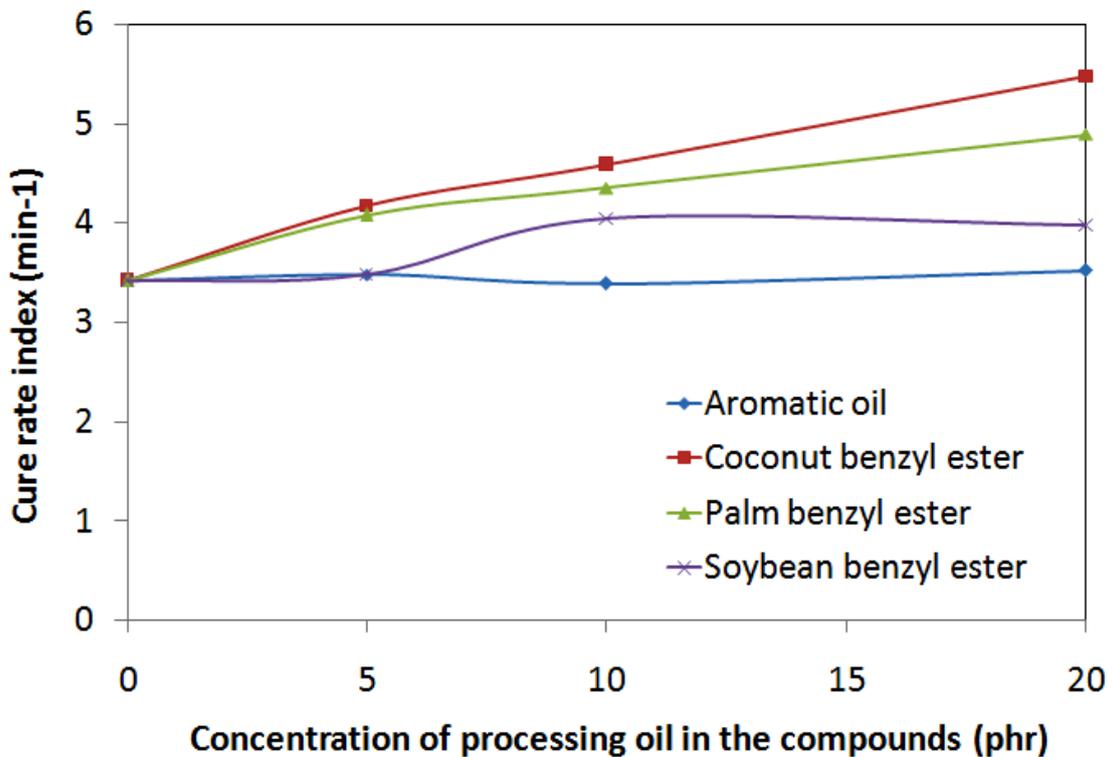
รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Torque difference ( $M_H-M_L$ ) ของยางเอสปีอาร์คอมปาวด์เปรียบเทียบกับชนิดและปริมาณน้ำมันแปรรูปยางที่ใช้



รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Scorch time ของยางเอสปีอาร์คอมปาวด์เปรียบเทียบกับชนิดและปริมาณน้ำมันแปรรูปยางที่ใช้



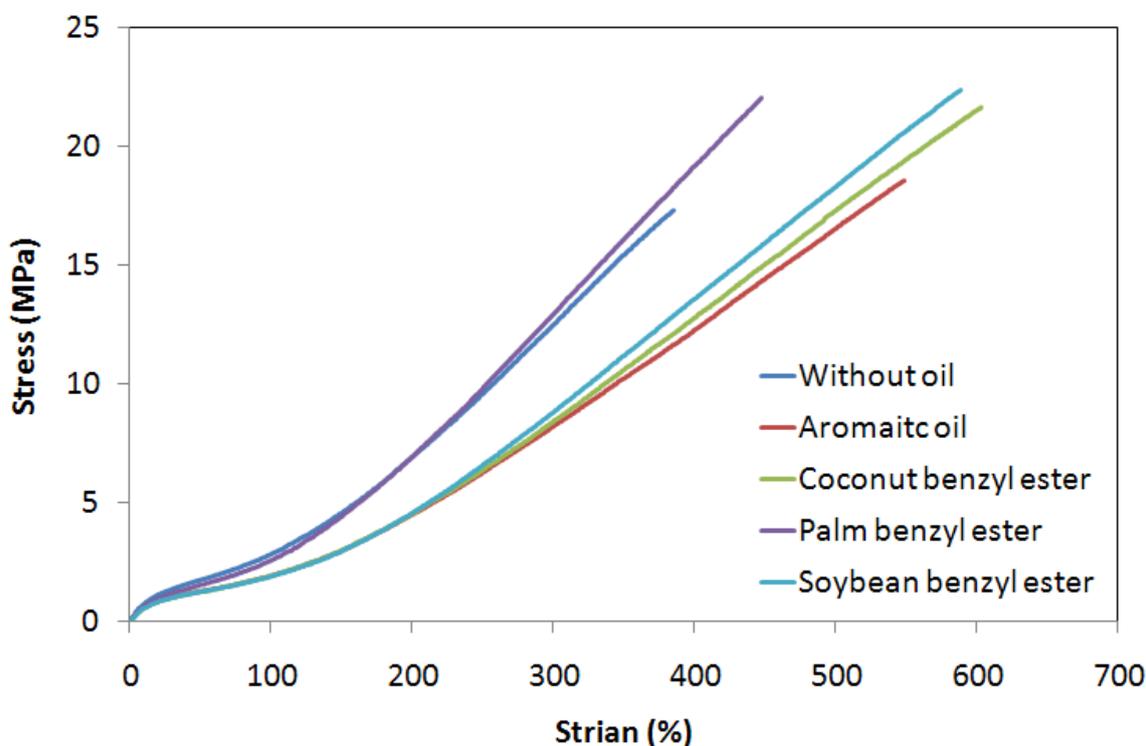
รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 90% Cure time ของยางเอสปีอาร์คอมปาวด์  
เปรียบเทียบกับชนิดและปริมาณน้ำมันแปรรูปยางที่ใช้



รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Cure rate index ของยางเอสปีอาร์คอมปาวด์  
เปรียบเทียบกับชนิดและปริมาณน้ำมันแปรรูปยางที่ใช้

#### 4.9.4 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด จะใช้เส้นโค้งความเค้นความเครียด (Stress-Strain Curve) ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เป็นหลัก โดยจะพลอตค่าของความเค้นในแกนตั้งและความเครียดในแกนนอน ในการทดสอบแรงดึง นอกจากจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดแล้ว ยังจะแสดงความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ ซึ่งจากรูปที่ 4.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด โดยแปรชนิดน้ำมันแปรรูปร่าง พบว่า น้ำมันเอริลเอสเทอร์ทุกชนิดให้ค่าความเค้น(ความแข็งแรงของวัสดุ)สูงกว่าน้ำมันอะโรมาติก แสดงว่า น้ำมันเอริลเอสเทอร์ให้ค่าความแข็งแรงของวัสดุสูงกว่าน้ำมันอะโรมาติก



รูปที่ 4.46 กราฟ stress-strain ของยางเอสปีอาร์คอมปาวด์โดยแปรชนิดน้ำมันแปรรูปร่าง (กำหนดปริมาณน้ำมันแปรรูปร่างที่ใช้เท่ากับ 10 phr)

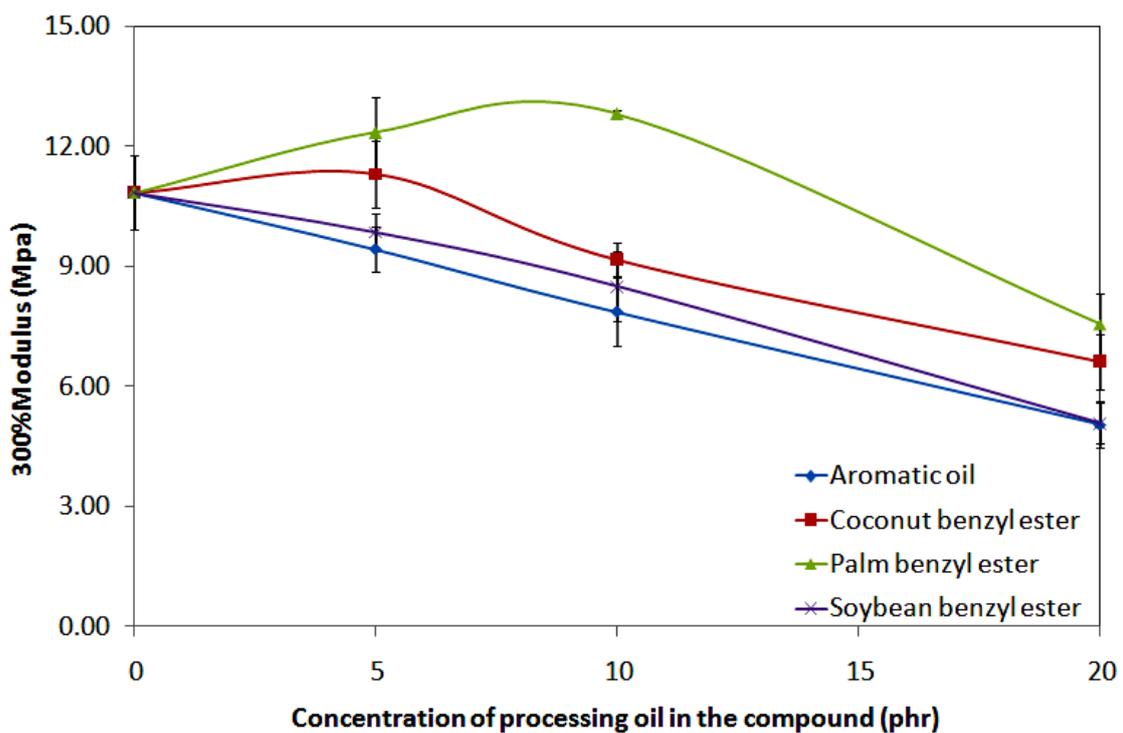
เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของยางคอมปาวด์ในด้านค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300% (Modulus at 300%) ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ความสามารถในการยืดจนขาด (Elongation at break) ความสามารถในการคืนรูป (Compression set) และความแข็ง (Hardness) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.19 และจากตารางที่ 4.19 สามารถเขียนกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น ความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด ความสามารถในการคืนรูป และความแข็งของยางคอมปาวด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.47-4.51 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของยางเอสปีอาร์คอมปาวด์ ระหว่างชนิดที่ใส่น้ำมันกับชนิดไม่ใส่น้ำมัน พบว่า ยางเอสปีอาร์คอมปาวด์ชนิดที่ใส่น้ำมันมีค่ามอดูลัสยืดหยุ่นและค่าความแข็งต่ำกว่าชนิดไม่ใส่น้ำมัน แต่มีค่าความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาดและความสามารถในการคืนรูปดีกว่า

ชนิดที่ไม่ใส่น้ำมัน เนื่องจากน้ำมันแปรรูปยางที่ใส่ลงไปจะไปทำให้สายโซ่โมเลกุลยางยึดหยุ่นได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งและค่ามอดูลัสยืดหยุ่นลดลง และน้ำมันยังช่วยให้เขม่าดำกระจายตัวได้ดีในยางเอสบีอาร์ ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้น้ำมันที่ใส่ลงไปยังไปลดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลยาง และเพิ่มปริมาตรอิสระระหว่างสายโซ่โมเลกุลยาง ทำให้สายโซ่โมเลกุลยางบิดตัวและเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น จึงทำให้ยางคอมปาวด์ที่ผสมน้ำมันมีความสามารถในการยืดจนขาดสูงและความสามารถในการคืนรูปดีกว่ายางคอมปาวด์ที่ไม่ผสมน้ำมัน แต่ทั้งนี้พบว่าการใส่น้ำมันมากเกินไปส่งผลให้ความสามารถในการคืนรูปด้อยลง เนื่องจากการผสมน้ำมันจะเข้าไปจะทำให้สมบัติ viscoelastic เพิ่มขึ้น (Pechurai, 2009)

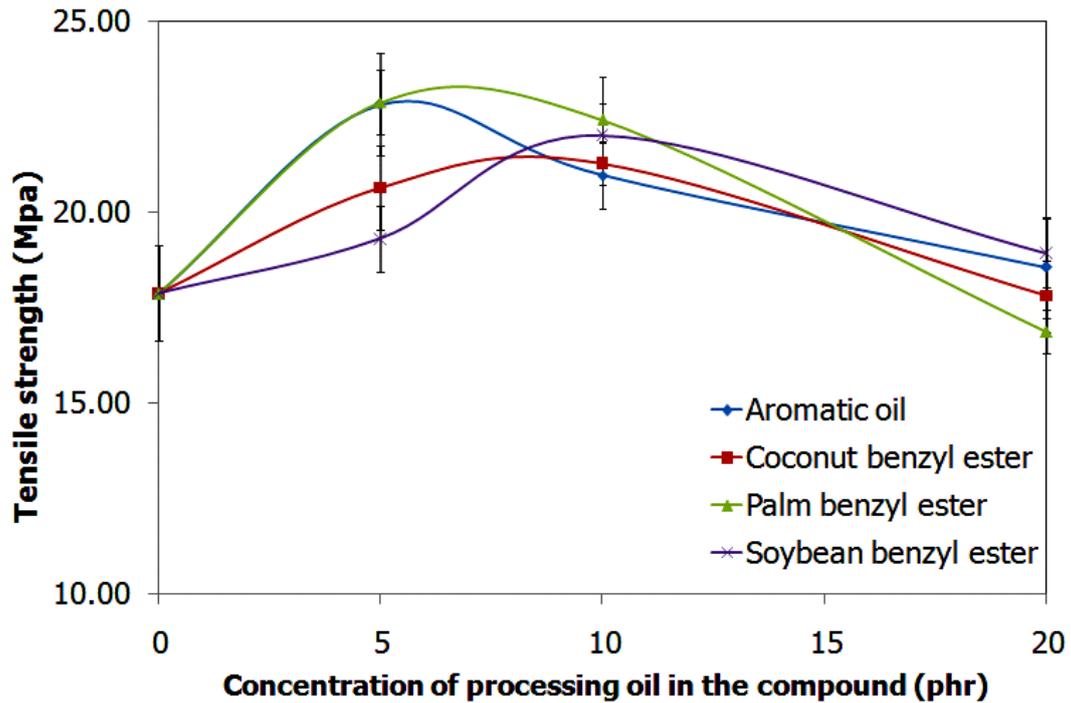
**ตารางที่ 4.19** ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น ความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด ความสามารถในการคืนรูป และความแข็งของยางคอมปาวด์ โดยแปรชนิดและปริมาณน้ำมันแปรรูปร่าง

Mechanical properties	Processing oils												
	Without oil	Aromatic oil			Coconut benzyl ester			Palm benzyl ester			Soybean benzyl ester		
		5 phr	10 phr	20 phr	5 phr	10 phr	20 phr	5 phr	10 phr	20 phr	5 phr	10 phr	20 phr
Modulus at 300% (MPa)	10.83	9.42	7.85	5.04	11.29	9.16	6.62	12.34	12.80	7.55	9.84	8.48	5.07
Tensile strength (MPa)	17.87	22.82	20.96	18.55	20.63	21.26	17.80	22.86	22.41	16.86	19.30	22.01	18.93
Elongation at break (%)	453.56	592.80	574.80	759.00	468.96	527.00	609.40	491.56	457.80	541.60	445.00	564.00	722.60
Compression set (%)	51.4	33.1	34.7	51.6	33.3	37.2	53.2	37.3	40.5	58.3	40.5	43.4	57.4
Hardness (Shore A)	57.20	55.25	53.58	47.00	54.83	51.88	47.67	54.40	54.80	50.20	54.00	50.50	45.20

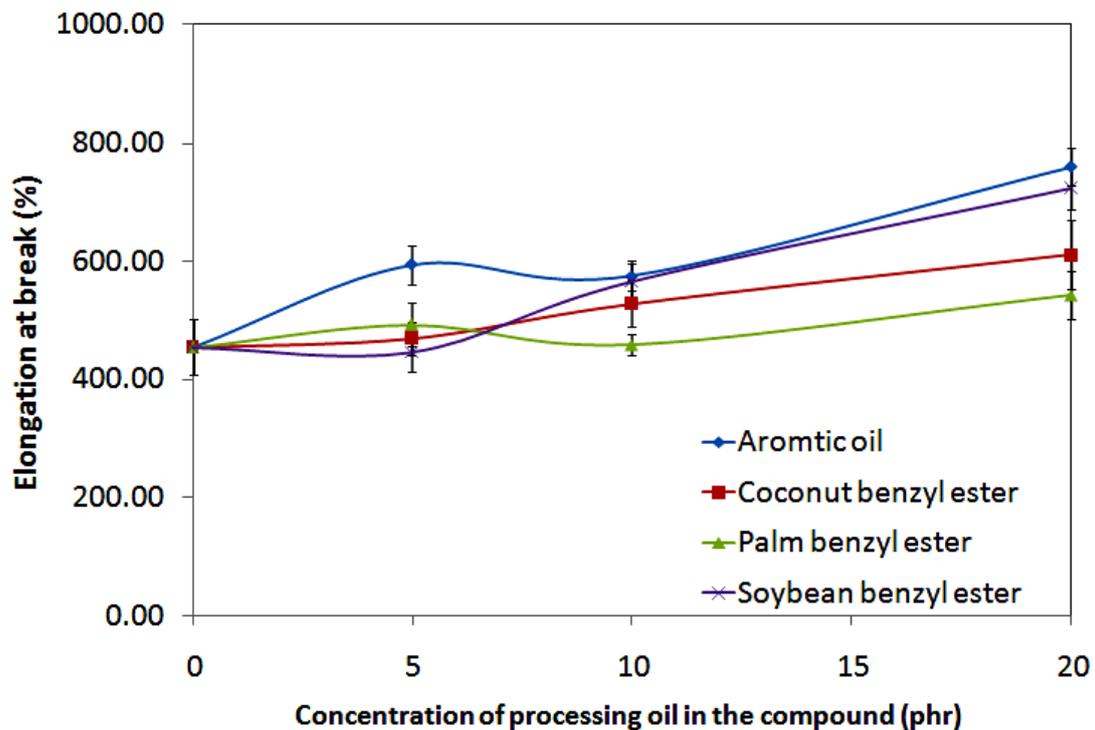
และเมื่อเปรียบเทียบชนิดของน้ำมันพบว่ายางเอสบีอาร์คอมปาวด์ที่ผสม palm benzyl ester จะมีค่ามอดูลัสยืดหยุ่น ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และความแข็งสูงสุด ดังรูปที่ 4.47, 4.48 และ 4.51 เนื่องจาก palm benzyl ester มีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่กว่า coconut benzyl ester และมีพันธะคู่น้อยกว่า soybean benzyl ester ทำให้การเคลื่อนที่เข้าแทรกระหว่างโมเลกุลยางเกิดยากกว่า ทำให้สายโซ่โมเลกุลยางมีโอกาสเกิดพันธะเชื่อมโยงได้มากกว่า และจากรูปที่ 4.49 พบว่ายางคอมปาวด์ที่ผสมน้ำมันอะโรมาติก จะมีความสามารถในการยืดจนขาดสูงที่สุด รองลงมาคือ soybean benzyl ester, coconut benzyl ester และ palm benzyl ester ตามลำดับ เนื่องจากน้ำมันที่มีความไม่อิ่มตัวมากกว่าหรือสายโซ่โมเลกุลสั้นกว่า จะมีโอกาสแทรกตัวระหว่างสายโซ่โมเลกุลยางได้ง่ายกว่า ส่งผลให้ปลดแรงดึงดูระหว่างโมเลกุลยางและเพิ่มปริมาตรอิสระระหว่างสายโซ่โมเลกุลยาง ทำให้สายโซ่โมเลกุลยางบิดตัวและเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น ความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น จึงทำให้ยางเอสบีอาร์คอมปาวด์มีความสามารถในการยืดจนขาดสูง ส่วนสมบัติความสามารถในการคืนรูปของยางเอสบีอาร์คอมปาวด์ที่ผสมน้ำมันชนิดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 51 พบว่าผลมีแนวโน้มเช่นเดียวกับสมบัติความสามารถในการยืดจนขาด นั่นคือ น้ำมันอะโรมาติกให้ความสามารถในการคืนรูปที่ดีที่สุด รองลงมา soybean benzyl ester, coconut benzyl ester และ palm benzyl ester ตามลำดับ



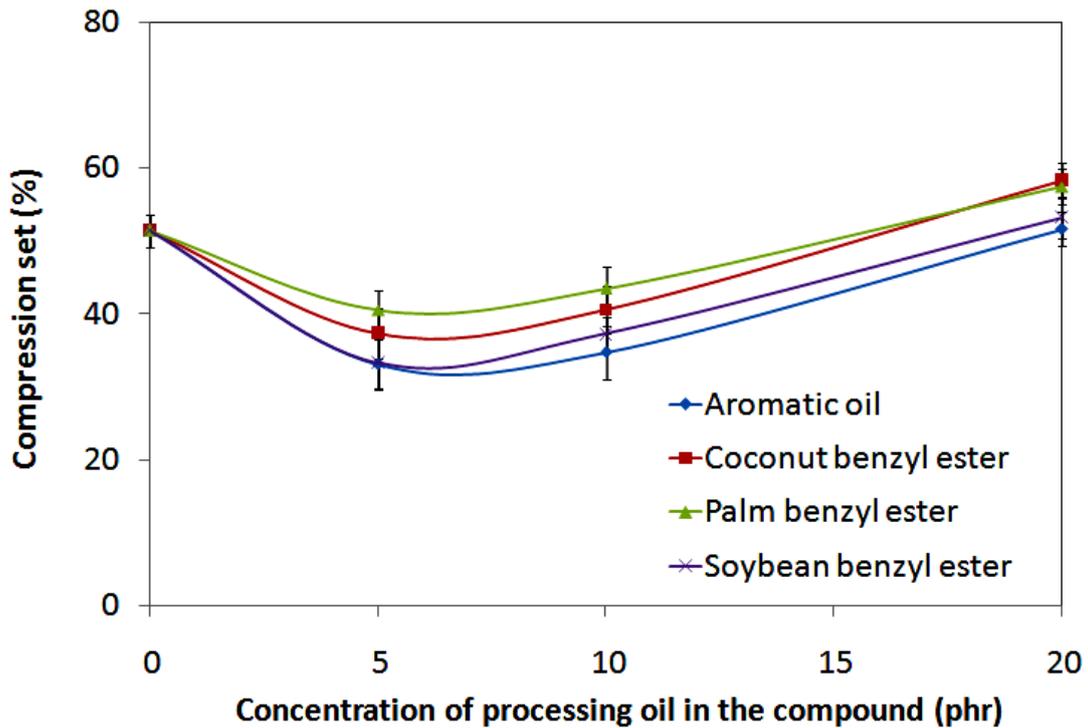
รูปที่ 4.47 กราฟ 300%Modulus ของยางเอสบีอาร์คอมปาวด์เปรียบเทียบกับชนิดและปริมาณน้ำมันแปรรูปยางที่ใช้



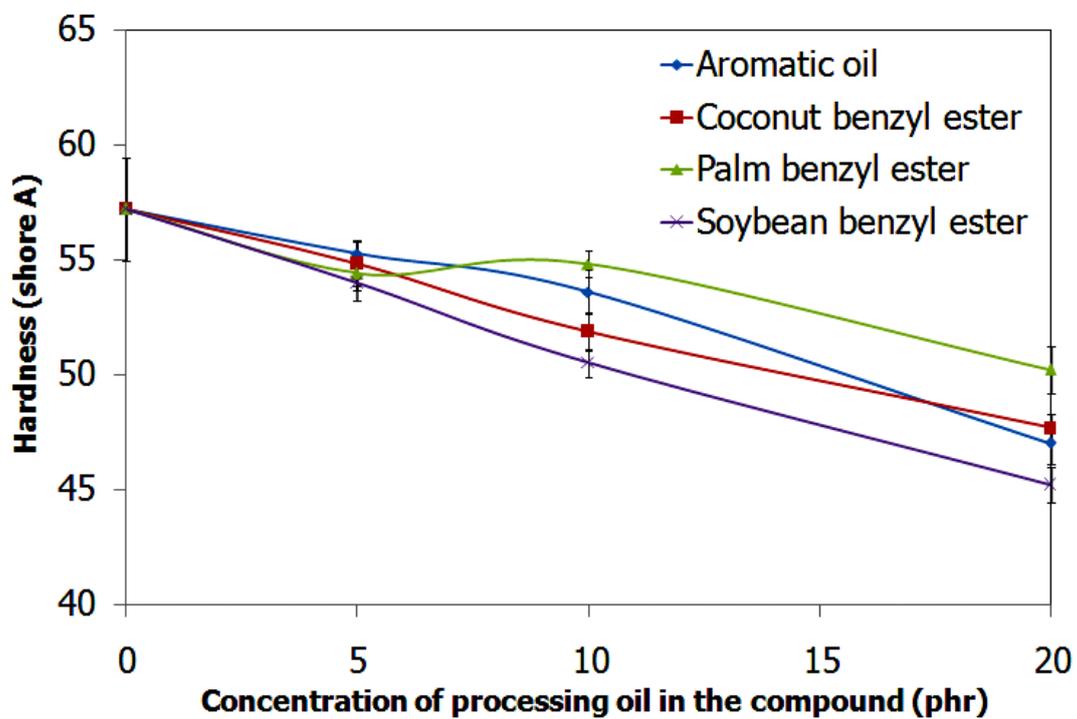
รูปที่ 4.48 กราฟ Tensile strength ของยางเอสปีอาร์คอมปาวด์เปรียบเทียบกับชนิดและปริมาณน้ำมันแปรรูปร่างที่ใช้



รูปที่ 4.49 กราฟ Elongation at break ของยางเอสปีอาร์คอมปาวด์เปรียบเทียบกับชนิดและปริมาณน้ำมันแปรรูปร่างที่ใช้



รูปที่ 4.50 กราฟ Compression set ของยางเอสปีอาร์คอมปาวด์เปรียบเทียบกับชนิดและปริมาณน้ำมันแปรรูปยางที่ใช้

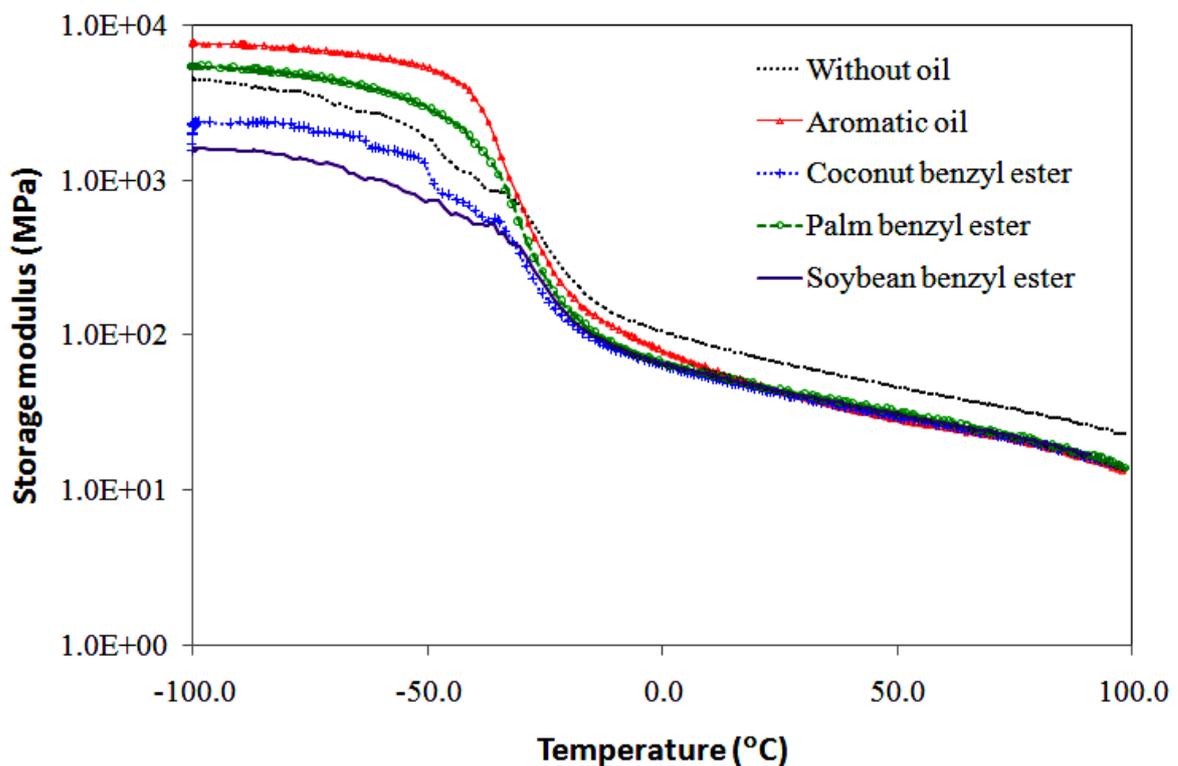


รูปที่ 4.51 กราฟ Hardness ของยางเอสปีอาร์คอมปาวด์เปรียบเทียบกับชนิดและปริมาณน้ำมันแปรรูปยางที่ใช้

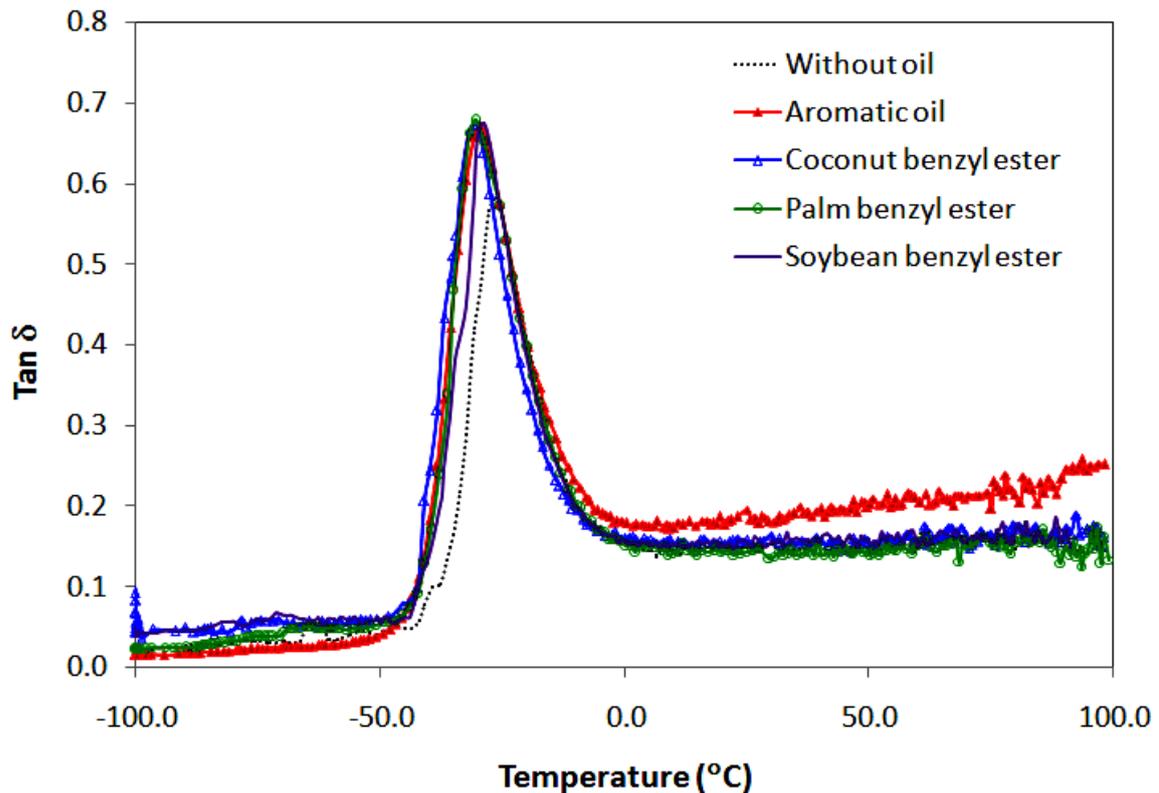
#### 4.9.5 สมบัติเชิงพลวัต (Dynamic mechanical properties)

การศึกษาสมบัติเชิงพลวัต ใช้เครื่อง Dynamic mechanical analyzer (DMA) โดยทำการแปรชนิดและปริมาณน้ำมันแปรรูปร่างที่ใช้ผสมในยางคอมปาวด์ จากรูปที่ 4.52 ได้แสดงกราฟ Storage modulus ที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิ จะเห็นการใส่น้ำมันลงในยางเอสปีอาร์คอมปาวด์จะทำให้ค่า storage modulus ลดลง เนื่องจากน้ำมันจะเข้าไปเพิ่มสมบัติ viscoelastic ของวัสดุ (Pechurai, 2009) และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางเอสปีอาร์คอมปาวด์ที่ผสมน้ำมันชนิดต่างๆ พบว่าน้ำมันทุกชนิดให้ค่า storage modulus ใกล้เคียงกัน

และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\tan \delta$  และอุณหภูมิ ทำให้ทราบค่า  $\tan \delta$  ที่อุณหภูมิต่างๆ และค่าอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature,  $T_g$ ) ดังรูปที่ 4.53 และตารางที่ 4.20 จะเห็นได้ว่าการใส่น้ำมันลงไปยังยางเอสปีอาร์คอมปาวด์ ทำให้ค่า  $T_g$  ลดลง เนื่องจากน้ำมันจะทำให้สายโซ่มีความยืดหยุ่นมากขึ้น ส่งผลให้ค่า  $T_g$  ลดลง และเมื่อพิจารณาจากยางเอสปีอาร์คอมปาวด์ที่ใส่น้ำมัน พบว่ายางคอมปาวด์ที่ผสมน้ำมันแปรรูปร่างเอริลเอสเทอร์ ให้ค่า  $T_g$  ใกล้เคียงกับน้ำมันอะโรมาติกอย่างมาก



รูปที่ 4.52 กราฟ Storage modulus ของยางเอสปีอาร์คอมปาวด์เปรียบเทียบกับชนิดน้ำมันแปรรูปร่างที่ใช้



รูปที่ 4.53 กราฟ Storage modulus ของยางเอสปีอาร์คอมปาวด์เปรียบเทียบกับชนิดน้ำมันแปรรูปอย่างที่ใช้

การทดสอบสมบัติเชิงพลวัตของยางเอสปีอาร์คอมปาวด์ที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.20 ค่า  $\text{Tan } \delta$  ที่อุณหภูมิ 0, 30, 70 และ 100 °C จะแสดงถึงสมบัติการยืดเกาะถนน ความต้านทานการลื่นไถล ความต้านทานการหมุนของล้อ และความร้อนสะสม ตามลำดับ (Dasgupta, *et al.*, 2007, 2008) ค่า  $\text{Tan } \delta$  ที่ 0°C พบว่า ยางเอสปีอาร์คอมปาวด์ที่ผสม coconut benzyl ester ให้ค่า  $\text{Tan } \delta$  สูงที่สุดเมื่อเทียบกับน้ำมันแปรรูปอย่างชนิดอื่น แสดงว่า สมบัติการยืดเกาะถนนบนพื้นเปียกดีที่สุด ค่า  $\text{Tan } \delta$  ที่อุณหภูมิ 30 และ 70 °C พบว่า ยางเอสปีอาร์คอมปาวด์ที่ผสมน้ำมันเอริล เอสเทอร์ให้ค่าต่ำกว่าน้ำมันอะโรมาติก แสดงว่า การผสมน้ำมันเอริลเอสเทอร์จะช่วยต้านทานการลื่นไถล ลดความต้านทานการหมุนให้ต่ำลงได้ดีกว่า การใช้ น้ำมันอะโรมาติกในยางเอสปีอาร์คอมปาวด์ (Lappoontana-anan, 2011) ค่า  $\text{Tan } \delta$  ที่อุณหภูมิ 100 °C พบว่า ยางเอสปีอาร์คอมปาวด์ที่ผสมน้ำมันเอริลเอสเทอร์ให้ค่าต่ำกว่ายางเอสปีอาร์คอมปาวด์ที่ผสมน้ำมันอะโรมาติก แสดงว่า การผสมน้ำมันเอริลเอสเทอร์ จะทำให้เกิดการสะสมความร้อนขณะใช้งานได้มากกว่าการผสมน้ำมันอะโรมาติก และยังพบได้อีกว่า palm benzyl ester ให้การสะสมความร้อนในยางเอสปีอาร์ได้มากที่สุด

**ตารางที่ 4.20** สมบัติเชิงพลวัตของยางเอสปีอาร์คอมปาวด์โดยแปรชนิดน้ำมันแปรรูปร่าง

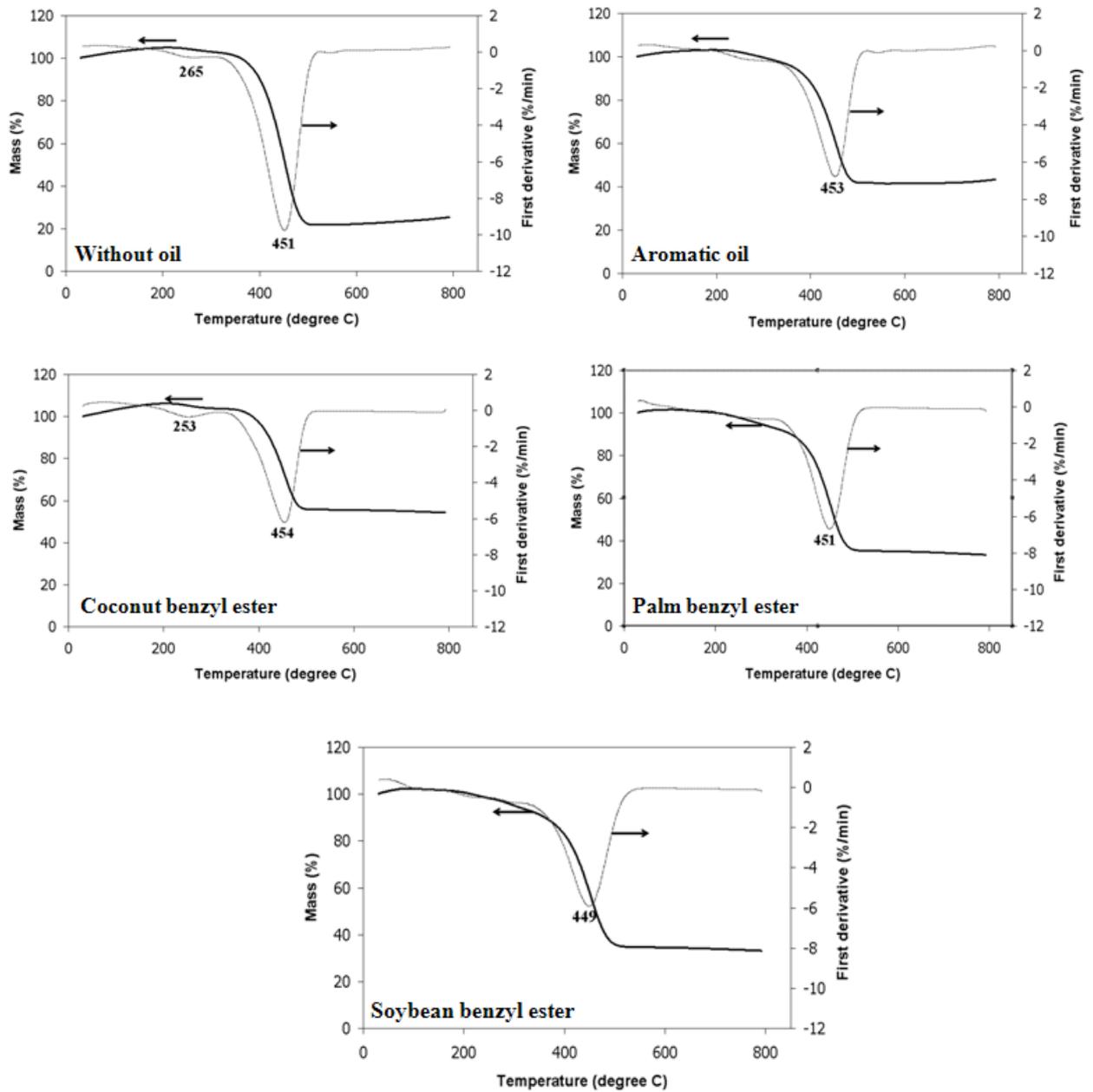
Type of oil in SBR compound	$T_g$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Tan $\delta$ at 0 $^{\circ}\text{C}$	Tan $\delta$ at 30 $^{\circ}\text{C}$	Tan $\delta$ at 70 $^{\circ}\text{C}$	Tan $\delta$ at 100 $^{\circ}\text{C}$
Blank	-26.1	0.15	0.15	0.17	0.15
Aromatic	-29.4	0.18	0.18	0.20	0.26
Coconut benzyl ester	-30.1	0.16	0.16	0.15	0.16
Palm benzyl ester	-30.3	0.15	0.14	0.15	0.13
Soybean benzyl ester	-28.8	0.16	0.16	0.15	0.17

#### 4.9.6 สมบัติเชิงความร้อน (Thermal properties)

การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน เป็นการวิเคราะห์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของยางเอสปีอาร์คอมปาวด์ ซึ่งได้ทำการศึกษาโดยใช้เครื่อง Thermogravimetric analyzer ควบคุม heating rate ที่ 10  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  แสดงผลในรูปของ weight loss curves และ derivative curves แสดงดังรูปที่ 4.54 และตารางที่ 4.21 จะเห็นได้ว่า น้ำมันแปรรูปร่างเอริลเอสเทอร์ทนความร้อนได้ใกล้เคียงกับน้ำมันอะโรมาติก สืบเนื่องจากอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้น แต่พบว่า ร้อยละการสลายตัวสูงสุดของน้ำมันแปรรูปร่างเอริลเอสเทอร์มีความใกล้เคียงกับยางเอสปีอาร์คอมปาวด์ที่ผสมน้ำมันอะโรมาติก อยู่ในช่วงร้อยละ 50-60 และอุณหภูมิสลายตัวสูงสุดให้ผลใกล้เคียงกันเช่นกัน คือ อยู่ในช่วง 449-454  $^{\circ}\text{C}$  ยกเว้น soybean benzyl ester และจะเห็นได้ว่าน้ำมันทุกชนิดที่เติมลงในยางเอสปีอาร์มีส่วนช่วยลดร้อยละการสลายตัวของยางเอสปีอาร์ลงได้

**ตารางที่ 4.21** สมบัติเชิงความร้อนของยางเอสปีอาร์คอมปาวด์โดยแปรชนิดน้ำมันแปรรูปร่าง

Type of processing oil in SBR compound	Degradation temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	Degradation weight (%)
Without oil	266 (step I)	104
	452 (step II)	51.5
Aromatic oil	454	60.2
	Coconut benzyl ester	253 (step I)
454 (step II)		72.5
Palm benzyl ester	451	57.3
Coconut benzyl ester	449	58.7



รูปที่ 4.54 กราฟการเสื่อมสลายตัวทางความร้อนของยางเอสปีอาร์คอมปาวด์เปรียบเทียบกับชนิดน้ำมันแปรรูปยี่ห้อที่ใช้