

บทที่ 3

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ผลของการใช้สารเคมีชนิดต่าง ๆ เพียงชนิดเดียวต่อสมบัติของยาง
ทำการทดลองดังหัวข้อที่ 1 ได้ผลดังตาราง 16

ตาราง 16 ผลของสารเคมีเพียงชนิดเดียวต่อสมบัติทางกายภาพของยาง

ส่วนผสม (น้ำหนักเปียก, กรัม)	สูตรที่				
	1	2	3	4	5
น้ำยาง	200	200	200	200	200
t-BHPO	1.43	-	-	-	-
TEPA	-	0.24	-	-	-
TETA	-	-	0.20	-	-
n-BA	-	-	-	5.05	-
A-NPG	-	-	-	-	1.0

สมบัติและลักษณะยางวัลคาไนซ์

-อัตราส่วนการบวมพอง

- - - - -

-ลักษณะแผ่นยางแห้ง

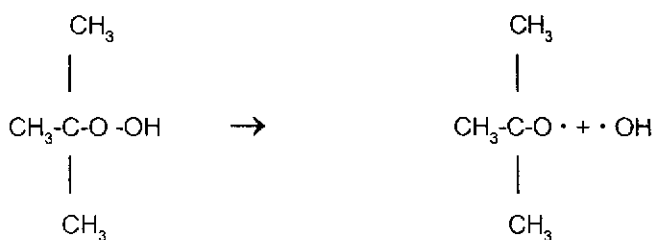
ขาวใส ขาวใส ขาวใส ขาวใส เหลืองใส
นิ่ม ขาดง่าย

-ลักษณะแผ่นยางแห้งเมื่อทิ้งไว้ 15 วัน

ยางทุกสูตรจะมีสีเหลืองใสขึ้น ส่วนสูตรยางที่ใส่ A-NPG จะให้สีเหลืองออกดำคล้ำ และ
สูตรยางที่ผสม n-BA จะให้ยางที่มีสีขาวใสมากที่สุด

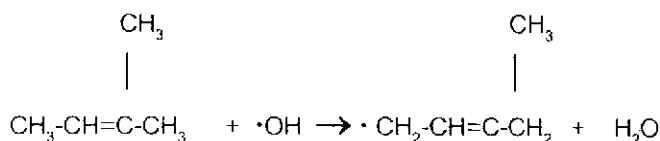
ผลของสารเคมีแต่ละชนิด

จากตาราง 16 พบว่าการใช้สารเคมีเพียงชนิดเดียวไม่มีผลต่อการวัลคาไนซ์น้ำยางเลย ไม่
 ว่าจะเป็นการใช้ t-BHPO, TEPA, TETA, n-BA, และ A-NPG แสดงว่าสารเคมีแต่ละชนิดที่ใช้ไม่ได้ทำ
 ให้ยางเกิดการเชื่อมโยงได้ โดยยางทุกสูตรที่ได้จะแห้งช้า ไม่สามารถนำไปหาค่าความต้านทานต่อ
 แรงดึงได้เนื่องจากขาดง่าย และเมื่อนำไปหาสมบัติการบวมพองยางจะบวมมากและมีลักษณะเป็น
 เจล ดังนั้นในการวัลคาไนซ์น้ำยางจึงต้องมีการใช้สารเคมีร่วมกัน โดยสารเคมีแต่ละตัวมีหน้าที่แตก
 ต่างกันออกไป ในการทดลองครั้งนี้จะเห็นว่า t-BHPO ซึ่งปกติทำหน้าที่เป็นตัววัลคาไนซ์ยางตัว
 หนึ่ง แต่ในการทดลองนี้ไม่ได้ทำหน้าที่ดังกล่าว แต่ทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวเริ่มต้นปฏิกิริยาโดยการ
 แตกตัวดังนี้



t-butyl hydroperoxide

หลังจากนั้นอนุมูลของเปอร์ออกไซด์จะไปดึงอะตอมไฮโดรเจนของพอลิไอโซพรีน ทำให้เกิดเป็น
 อนุมูลอิสระดังนี้



อนุมูลอิสระของพอลิไอโซพรีนที่ได้จะไปจับกับสารเคมีตัวอื่น เช่น เอมีน หรือ อะโครเลต ทำให้ยาง
 มีการคลอซลิงค์เกิดขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้เอมีนหรืออะโครเลตเพียงตัวเดียวไม่ได้ทำให้เกิด
 การคลอซลิงค์เช่นเดียวกัน แสดงว่าในการวัลคาไนซ์ยางต้องใช้สารเคมีทั้งสามชนิดร่วมกัน

2. ปริมาณที่เหมาะสมของเอมีน

2.1 ปริมาณที่เหมาะสมของเตตระเอทิลีนเพนตะมีนร่วมกับ n-BA/t-BHPO

ทำการทดลองดังหัวข้อที่ 2 และ 3 ได้ผลดังตาราง 17 และภาพประกอบ 4 ถึง 5

ตาราง 17 ผลของปริมาณที่เหมาะสมของเตตระเอทิลีนเพนตะมีนร่วมกับ

n-BA/t-BHPO

ส่วนผสม (น้ำหนักเปียก, กรัม)	สูตรที่					
	1	2	3	4	5	6
น้ำยาง	200	200	200	200	200	200
t-BHPO	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43
n-BA	5.05	5.05	5.05	5.05	5.05	5.05
TEPA	0.0	0.12	0.24	0.35	0.47	0.59

สมบัติยางวัลคาไนซ์

ที่อุณหภูมิ 80 °C

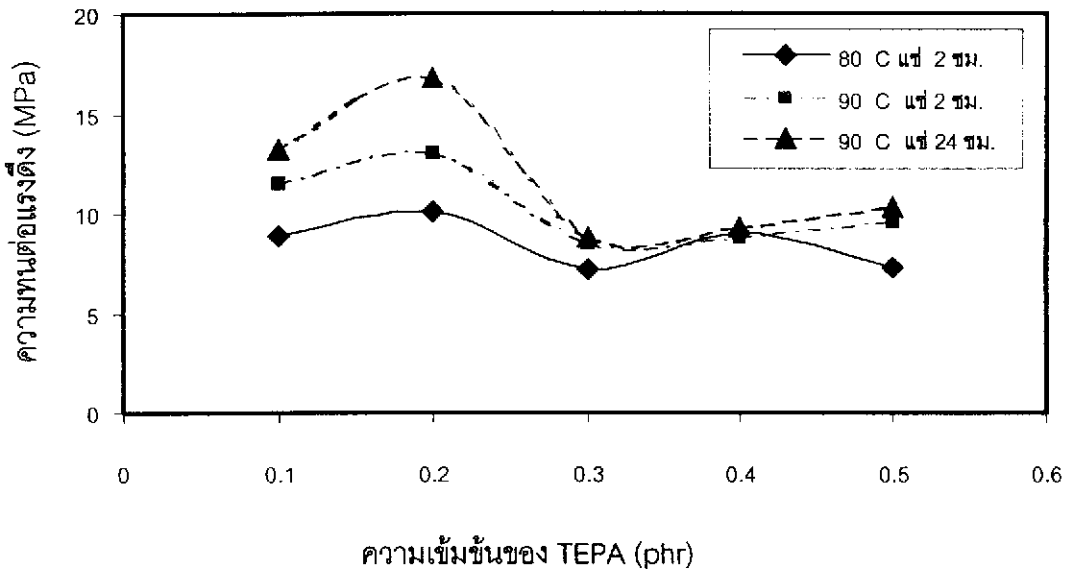
ความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)	-	8.86	10.15	7.22	8.96	7.23
ความยืดจนขาด (%)	-	1721	1901	1574	1886	1793
โมดูลัส (N/m ²)	-	1.017	1.069	0.974	0.923	0.888
อัตราส่วนการบวม	-	9.344	9.256	10.219	10.842	10.838

ที่อุณหภูมิ 90 °C

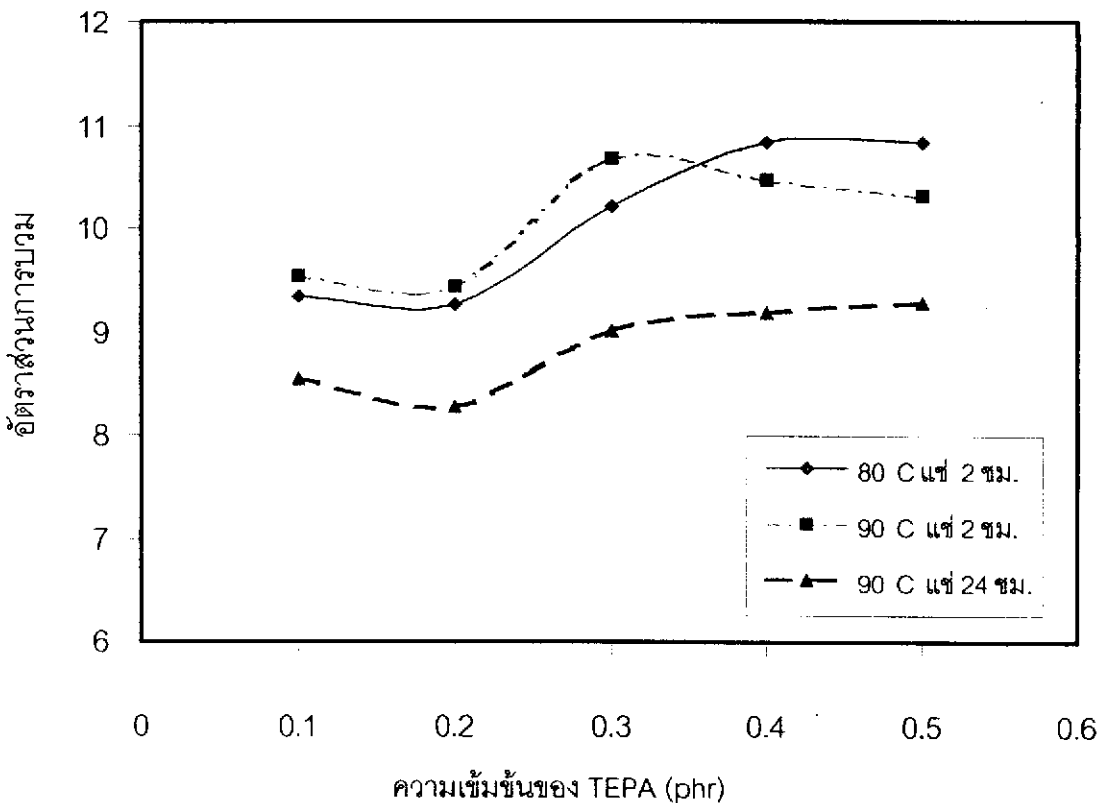
ความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)	-	11.47	12.98	8.44	8.77	9.57
ความยืดจนขาด (%)	-	1762	2135	1620	1006	1518
โมดูลัส (N/m ²)	-	1.192	0.872	0.974	1.676	1.157
อัตราส่วนการบวม	-	9.523	9.433	10.675	10.472	10.311

ที่อุณหภูมิ 90 °C (ทำการแช่ 24 ชม.)

ความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)	-	13.26	16.78	8.81	9.25	10.28
ความยืดจนขาด (%)	-	1793	1886	1614	1574	1760
โมดูลัส (N/m ²)	-	1.540	1.625	1.582	1.441	1.492
อัตราส่วนการบวม	-	8.538	8.272	9.009	9.177	9.2850



ภาพประกอบ 4 แสดงผลความเข้มข้นของ TEPA ต่อความทนต่อแรงดึง



ภาพประกอบ 5 แสดงผลความเข้มข้นของ TEPA ต่ออัตราส่วนการบวม

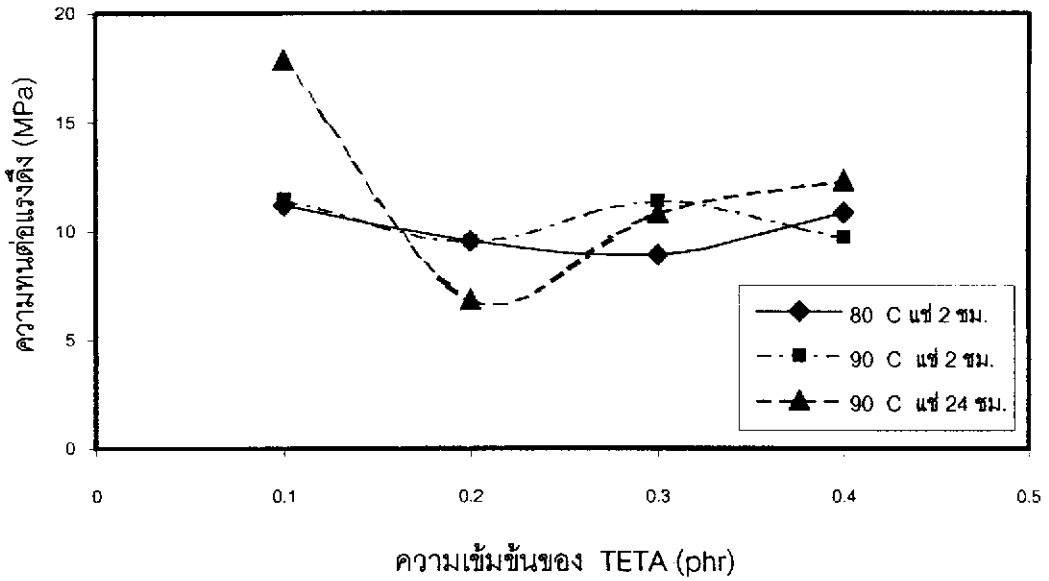
2.2 ปริมาณที่เหมาะสมของไตรเอทิลีนเตตระมีนร่วมกับ n-BA/t-BHPO

ทำการทดลองดังหัวข้อที่ 2 และ 3 ได้ผลดังตาราง 18 และภาพประกอบ 6 ถึง 9

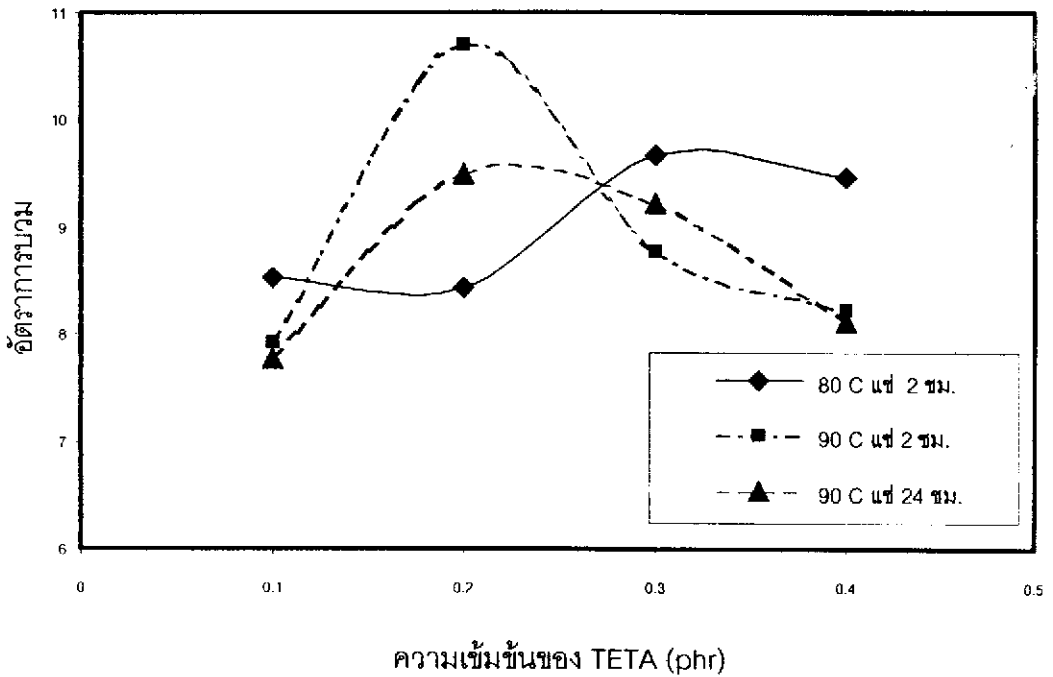
ตาราง 18 ผลของปริมาณที่เหมาะสมของไตรเอทิลีนเตตระมีนร่วมกับ n-BA/t-BHPO

ส่วนผสม (phr)	สูตรที่					
	1	2	3	4	5	6
น้ำยาง	200	200	200	200	200	200
t-BHPO	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43
n-BA	5.05	5.05	5.05	5.05	5.05	5.05
TETA	0.0	0.10	0.21	0.31	0.41	0.52
สมบัติยางวัลคาไนซ์						
ที่อุณหภูมิ 80° C						
ความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)	-	11.22	9.50	8.87	10.80	8.37
ความยืดจนขาด (%)	-	1732	1791	1730	1797	1788
โมดูลัส (N/m ²)	-	1.253	1.095	1.030	1.168	0.858
อัตราส่วนการบวม	-	8.523	8.433	9.675	9.472	9.311
ที่อุณหภูมิ 90 ° C						
ความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)	-	11.52	9.52	11.42	9.69	-
ความยืดจนขาด (%)	-	1821	1718	1790	1588	-
โมดูลัส (N/m ²)	-	1.332	1.399	1.285	1.346	-
อัตราส่วนการบวม	-	7.933	10.695	8.777	8.228	-
ที่อุณหภูมิ 90 ° C (ทำการแช่ 24 ชม.)						
ความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)	-	17.89	6.87	10.80	12.36	-
ความยืดจนขาด (%)	-	1764	1610	1731	1936	-
โมดูลัส (N/m ²)	-	1.652	1.695	1.521	1.354	-
อัตราส่วนการบวม	-	7.787	9.502	9.228	8.121	-

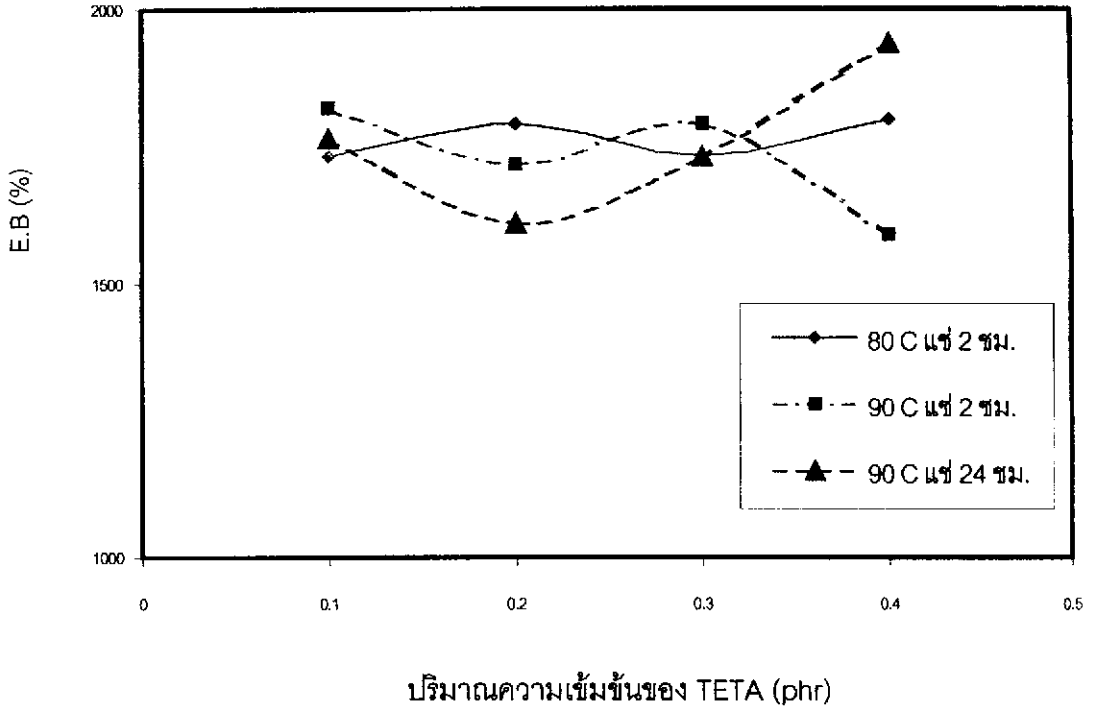
หมายเหตุ : - หมายถึง ไม่สามารถหาสมบัติทางกายภาพของยางได้เนื่องจากยางขาดง่าย



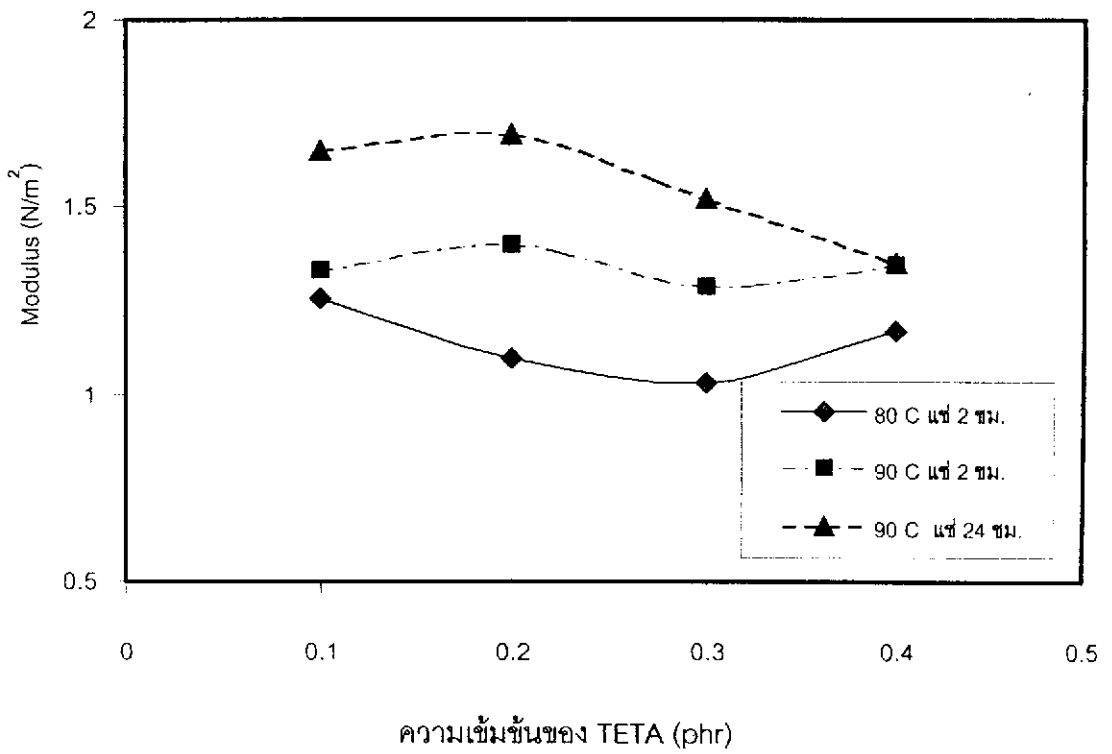
ภาพประกอบ 6 แสดงผลของความเข้มข้นของ TETA ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



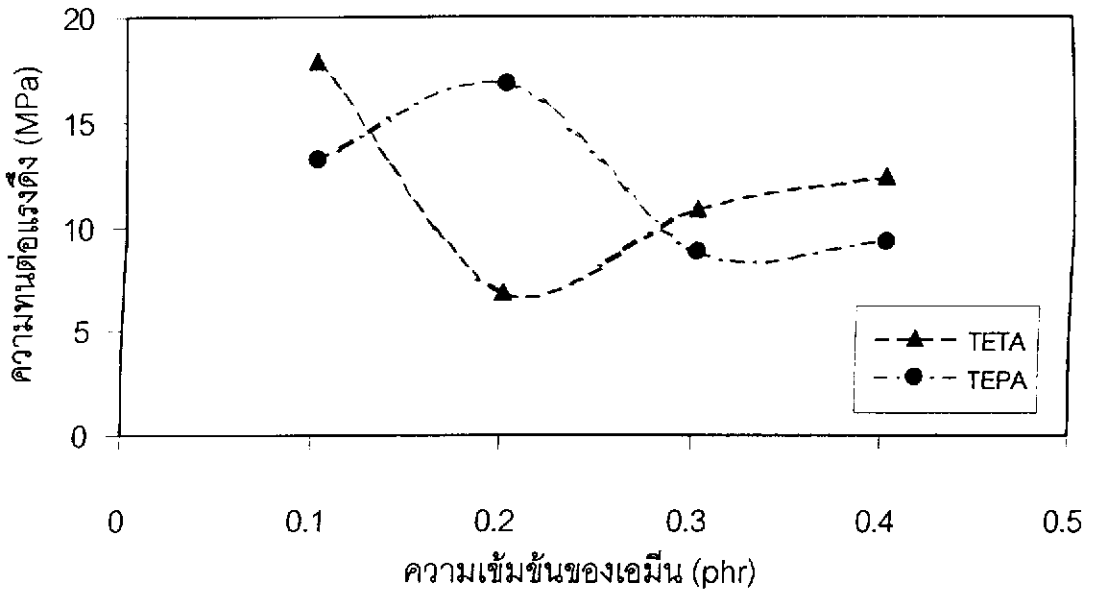
ภาพประกอบ 7 แสดงผลความเข้มข้นของ TETA ต่ออัตราการบวม



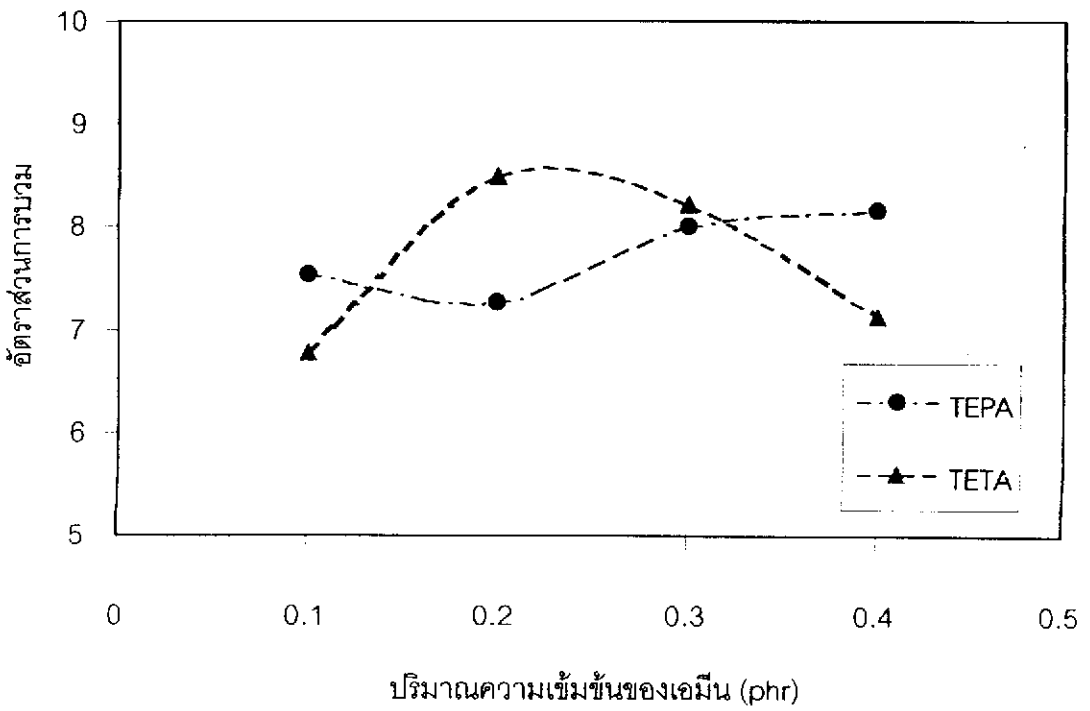
ภาพประกอบ 8 ผลความเข้มข้นของ TETA ต่อความยืดขาด



ภาพประกอบ 9 แสดงผลความเข้มข้นของ TETA ต่อค่าโมดูลัส



ภาพประกอบ 10 แสดงชนิดของเอมีนต่อความทนต่อแรงดึง



ภาพประกอบ 11 แสดงชนิดเอมีนต่ออัตราส่วนการบวม

ผลของปริมาณเอมีน

จากตาราง 17 และภาพประกอบ 4 ถึง 5 การใช้ TEPA ร่วมกับ n-BA/t-BHPO ทำการแปรปริมาณ TEPA ตั้งแต่ 0.0-0.5 phr โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.1 phr และทำการแช่ 1 ชม. พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดที่ 0.2 phr เท่ากับ 10.15 MPa ที่อุณหภูมิ 80°C และเริ่มลดลงเป็น 7.23 MPa ที่ 0.5 phr และอัตราส่วนการบวมต่ำสุดเท่ากับ 9.256 และ ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเป็น 10.838 ที่ 0.5 phr และที่อุณหภูมิ 90°C ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 12.98 MPa ที่ 0.2 phr และเริ่มลดลงเป็น 9.57 MPa ที่ 0.5 phr และค่าอัตราส่วนการบวมพองต่ำสุดเท่ากับ 9.433 และ ค่อยเพิ่มขึ้นเป็น 10.311 ที่ 0.5 phr ส่วนค่าความยืดจนขาดมีค่าสูงขึ้นเมื่อความต้านทานต่อแรงดึงสูงขึ้น แสดงว่าแผ่นฟิล์มยางที่มีความต้านทานต่อแรงดึงสูงสามารถยืดออกได้มาก

จากตาราง 18 และภาพประกอบ 6 ถึง 9 การใช้ TETA ร่วมกับ n-BA/t-BHPO ทำการแปรปริมาณ TETA ตั้งแต่ 0.0-0.5 phr โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.1 phr และทำการแช่ 2 ชม. พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดที่ 0.1 phr เท่ากับ 11.22 MPa ที่อุณหภูมิ 80°C และเริ่มลดลงเป็น 8.37 MPa ที่ 0.5 phr และอัตราส่วนการบวมต่ำสุดเท่ากับ 8.523 และ ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเป็น 9.311 ที่ 0.5 phr และที่อุณหภูมิ 90°C ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 11.52 MPa ที่ 0.1 phr และเริ่มลดลงเป็น 9.65 MPa ที่ 0.4 phr และค่าอัตราส่วนการบวมพองต่ำสุดเท่ากับ 7.933 และ ค่อยเพิ่มขึ้นเป็น 8.228 ที่ 0.4 phr เนื่องจากที่ 0.5 phr ไม่สามารถทำการผสมได้เนื่องจากยางมีความหนืดมากและจับตัวเป็นก้อนแข็ง ส่วนค่าความยืดจนขาดมีค่าสูงขึ้นเมื่อความต้านทานต่อแรงดึงสูงขึ้น แสดงว่าแผ่นฟิล์มยางที่มีความต้านทานต่อแรงดึงสูงสามารถยืดออกได้มาก

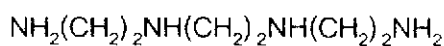
จากการทดลองจะเห็นว่า การใช้ t-BHPO ร่วมกับ n-BA เพียงสองตัวไม่สามารถทำให้เกิดการคลอสลิงค์ในยางได้ แสดงว่า TEPA และ TETA มีผลต่อการวัลคาไนซ์น้ำยางมาก ถ้าไม่ใส่สารดังกล่าวจะไม่สามารถหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงได้เนื่องจากยางจะขาดง่าย และเมื่อนำไปแช่ในโทลูอีนยางจะบวมพองกลายเป็นเจล แสดงว่าในการวัลคาไนซ์น้ำยางนอกจากจะมี t-BHPO เป็นตัวเริ่มต้นปฏิกิริยาแล้วยังต้องมีเอมีนเป็นตัวประกอบหลักที่สำคัญอีกตัวด้วยเช่นกัน และปริมาณที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด และค่าอัตราส่วนการบวมต่ำสุดซึ่งแสดงว่าเกิดการวัลคาไนซ์ดีที่สุดสำหรับ TEPA เท่ากับ 0.2 phr และสำหรับ TETA เท่ากับ 0.1 phr ซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยมากและถ้าเพิ่มปริมาณขึ้นจะทำให้ยางเกิดความหนืดขณะทำการผสมและค่าการบวมพองจะเพิ่มขึ้นแสดงว่าการวัลคาไนซ์ลดลง แสดงว่าการใช้ปริมาณเอมีนที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ทำให้การวัลคาไนซ์น้ำยางเพิ่มขึ้น เนื่องจากถ้าใส่สารดังกล่าวมากเกินไปจะทำสารเคมีเหล่านี้เหลือค้างอยู่ในแผ่นฟิล์มยาง และจะเป็นตัวแทรก (inclusion) ในเนื้อยางและขัดขวางการคลอสล

ลิ่งค์ของยางเนื่องจากโมเลกุลของสารที่มากเกินไปถูกยึดตรึงอยู่ระหว่างโมเลกุลที่คลอสลิงค์ทำให้อณูภาคของยางรวมกันได้ยากยิ่งขึ้น ทำให้แผ่นฟิล์มยางมีความสามารถในการทนต่อแรงดึงต่ำลงและอัตราส่วนการบวมพองสูงขึ้น (Limtasiri, 1982)

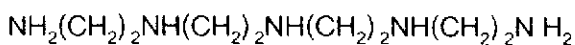
โดยปกติแล้วเอมีนจะให้ป็นสารกระตุ้นสำหรับปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันโดยจะทำการกระตุ้นอนุมูลอิสระของตัวเริ่มต้นปฏิกิริยาให้มีความว่องไวสูงขึ้น เช่น การใช้ TETA เป็นตัวกระตุ้นคิวเมนไฮโดรเปอร์ออกไซด์ที่อุณหภูมิต่ำในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของบิวตะไดอิน เป็นต้น แสดงว่าในปฏิกิริยานี้เอมีนมีส่วนช่วยในการกระตุ้นอนุมูลของ t-BHPO เช่นเดียวกัน นอกจากนี้ยังใช้ TEPA เข้มข้น 0.2 % เป็นตัวกระตุ้นในการเตรียมกราฟโคพอลิเมอริ์ Heveaplus MG จากน้ำยางร่วมกับเมทิลเมทาไครเลตอีกด้วยโดยใช้ t-BHPO เป็นตัวเริ่มต้นปฏิกิริยา (Bryson, 1982)

ผลของชนิดของเอมีน

จากตาราง 17 และ 18 และภาพประกอบ 10 ถึง 11 จะเห็นได้ว่าชนิดของเอมีนมีผลต่อการวัลคาไนซ์น้ำยาง โดยเมื่อเปรียบเทียบกับเอมีน 2 ชนิดคือไตรเอทิลีนเตตระมีนและเตตระเอทิลีนเพนตะมีน พบว่าไตรเอทิลีนเตตระมีนให้สมบัติทางกายภาพที่ดีกว่าเตตระเอทิลีนเพนตะมีน นอกจากนี้ยังใช้ในปริมาณที่น้อยกว่าอีกด้วย ซึ่งปริมาณที่เหมาะสมของ TEPA เท่ากับ 0.2 phr ให้ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดที่อุณหภูมิ 90°C และทำการแช่ 24 ชม. เท่ากับ 16.78 เปอร์เซนต์ความยืดขาดเท่ากับ 1886 และอัตราส่วนการบวมเท่ากับ 8.272 ปริมาณที่เหมาะสมของ TETA เท่ากับ 0.1 phr ให้ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดที่อุณหภูมิ 90°C และทำการแช่ 24 ชม. เท่ากับ 17.89 เปอร์เซนต์ความยืดขาดเท่ากับ 1 764 และอัตราส่วนการบวมเท่ากับ 8.787 จากผลดังกล่าวอธิบายได้ว่าน่าจะมาจากสูตรโครงสร้างของ TEPA และ TETA ซึ่งมีสูตรโครงสร้างดังนี้

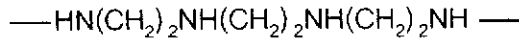


ไตรเอทิลีนเตตระมีน (TETA)



เตตระเอทิลีนเพนตะมีน (TEPA)

จากสูตรโครงสร้างของสารทั้งสองจะเป็นได้ว่าในการเกิดปฏิกิริยาน่าจะเกิดที่ปลายของสายโซ่โมเลกุลโดยการแตกออกดังนี้



ไตรเอทิลีนเตตระมีน (TETA)



เตตระเอทิลีนเพนตะมีน (TEPA)

ดังนั้นสายโมเลกุลของ TETA มีโครงสร้างโมเลกุลที่สั้นกว่า TEPA จึงน่าจะเป็นตัวยึดให้โครงสร้างโมเลกุลมีความเหนียวแน่นมากกว่าจึงทำให้ได้สมบัติการวัลคาไนซ์ที่ดีกว่า

ผลของอุณหภูมิในการพรีวัลคาไนซ์น้ำยาง

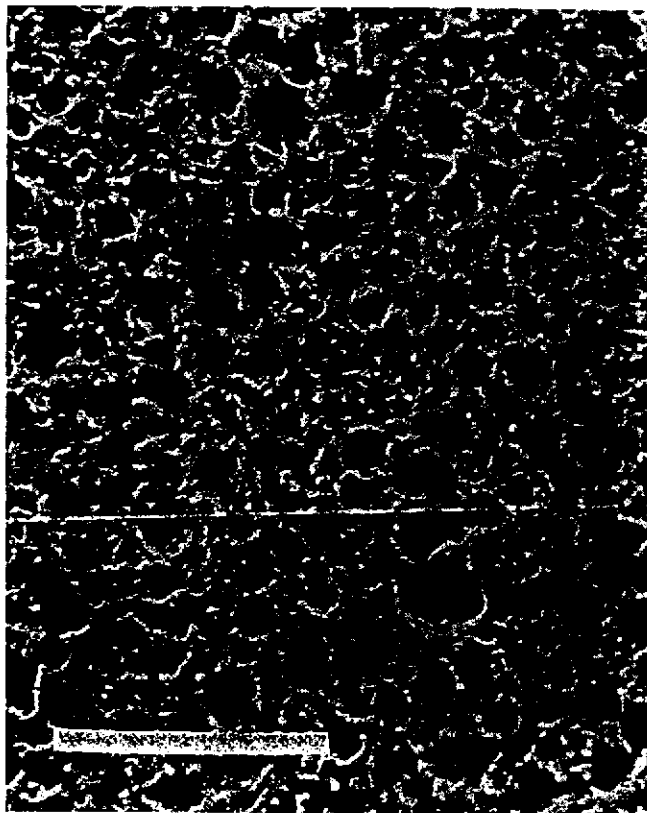
จากตาราง 17 และตาราง 18 ภาพประกอบ 4 ถึง 9 พบว่าเมื่อทำการพรี วัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 80°C และ 90°C พบว่าเมื่อทำการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิสูงกว่าคือที่ 90°C จะทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงสูงและอัตราส่วนการบวมพองต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 80°C แสดงว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการวัลคาไนซ์น้ำยางเกิดได้ดีขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิดการเหนียวนำทำให้เกิดเป็นเอ็กซ์ตราคลอสลิงค์หรือเกิดการจัดเรียงตัวขึ้นใหม่ (Robert, 1988) นอกจากนี้ t-BHPO ที่ใช้เป็นตัวเริ่มต้นปฏิกิริยาสามารถแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระได้ดีที่อุณหภูมิสูงอีกด้วย และปริมาณน้ำที่อยู่ในน้ำยางมีอัตราการระเหยสูงทำให้ปริมาณน้ำในน้ำยางลดลงเป็นผลให้น้ำยางเกิดการหนืดได้ง่ายยิ่งขึ้น ดังนั้นในการทดลองในห้องทดลองขนาดเล็กจึงทำการพรีวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิสูงได้ แต่ในทางอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ควรลดอุณหภูมิลง เนื่องจากน้ำยางอาจจับตัวเป็นก้อนได้

ผลของการล้าง

จากตาราง 17 และ 18 และภาพประกอบ 4 ถึง 9 เมื่อทำการวัลคาไนซ์ที่ 90°C และทำการแช่ที่ 2 ชม. และที่ 24 ชม. พบว่าทั้ง TEPA และ TETA เมื่อทำการแช่ที่ 24 ชม. จะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงขึ้น และค่าอัตราส่วนการบวมต่ำกว่าทำการแช่ที่ 2 ชม. สำหรับ TEPA ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดที่ 0.2 phr เท่ากับ 12.98 MPa เมื่อแช่ 2 ชม. และเท่ากับ 16.78 MPa เมื่อแช่ 24 ชม. ส่วนที่ปริมาณอื่นค่าใกล้เคียงกันทั้งที่ทำการแช่ 2 ชม. และ 24 ชม. ส่วนค่าอัตราส่วนการบวมเท่ากับ 9.433 เมื่อแช่ 2 ชม. และเท่ากับ 8.272 เมื่อแช่ 24 ชม. และ สำหรับ

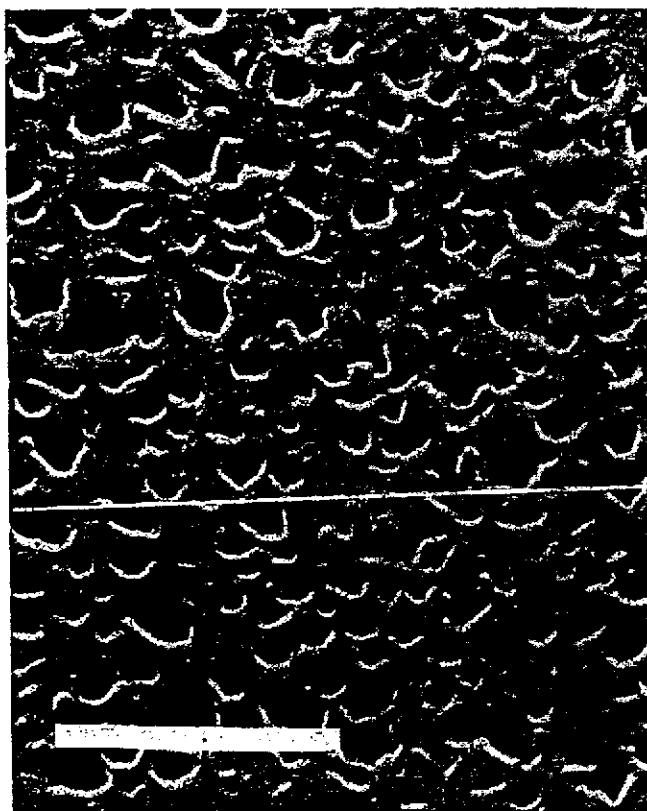
TETA ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดที่ 0.1 phr เท่ากับ 11.52 MPa เมื่อแช่ 2 ชม. และเท่ากับ 17.89 MPa เมื่อแช่ 24 ชม. ส่วนที่ปริมาณอื่นค่าใกล้เคียงกันทั้งที่ทำการแช่ 2 ชม. และ 24 ชม. ส่วนค่าอัตราส่วนการบวมเท่ากับ 7.993 เมื่อแช่ 2 ชม. และเท่ากับ 7.787 เมื่อแช่ 24 ชม.

จากการทดลองจะเห็นว่าการล้างเป็นเวลานานมีผลต่อการวัลคาไนซ์น้ำยางโดยจะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงขึ้นและอัตราส่วนการบวมต่ำลง นอกจากนี้ค่าโมดูลัสของยางยังสูงขึ้นมากอีกด้วยและมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในระดับความยืดจนขาด ซึ่งผลของการล้างทำให้เกิดกระบวนการดังต่อไปนี้ (Gazeley, 1985) ในขั้นตอนแรกน้ำจะถูกดูดซับเข้าไปในชั้นผิวของยางโดยกระบวนการคาปิลลารีแอกชัน (capillary action) หลังจากนั้นสารที่สามารถละลายได้ในน้ำจะก่อตัวขึ้นที่เยื่อเลือกผ่านของยางและจะเคลื่อนที่ผ่านเยื่อเลือกผ่านอันเนื่องมาจากปริมาณน้ำที่มากยิ่งขึ้นที่เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในยางด้วยกระบวนการออสโมซิส ในยางวัลคาไนซ์การบวมพองของน้ำจะถูกต้านจากแรงยืดหยุ่นของยาง (elastic force) จนถึงจุดที่แรงออสโมซิสสมดุลกับแรงยืดหยุ่นที่จุดนี้ น้ำจะถูกดูดซับเข้าไปสูงสุด อย่างไรก็ตามความไม่สมบูรณ์ของเยื่อเลือกผ่านของยางทำให้สารที่ละลายน้ำได้แพร่ผ่านจากยางเข้าไปในน้ำในสัดส่วนที่เท่ากับปริมาณของน้ำที่ถูกดูดซับ ซึ่งขึ้นอยู่กับธรรมชาติและปริมาณสารที่ละลายน้ำได้และอัตราที่สารแพร่ไปสู่ น้ำ ดังนั้นในการแช่ยางเพียง 2 ชม. ไม่เพียงพอที่จะขจัดสารที่ละลายน้ำที่ซ่อนอยู่ในแผ่นฟิล์มยางถูกขจัดออกไม่หมด การล้างเป็นเวลานานจะช่วยขจัดสัดส่วนที่ใหญ่ของสารที่ไม่ใช่ยางออกไปทำให้แผ่นฟิล์มเป็นเนื้อเดียวกัน ดังแสดงในภาพประกอบ 12 และภาพประกอบ 13 การมีสารปริมาณมากอยู่ในแผ่นฟิล์มยางจะเป็นตัวขัดขวางการคลอสรลิงค์เนื่องจากโมเลกุลของสารดังกล่าวถูกยึดตรึงอยู่ด้วยการเชื่อมโยงทำให้อนุภาครวมกันได้ยากยิ่งขึ้น นอกจากนี้การล้างยางยังช่วยขจัดสารที่เป็นพิษ หรือสารที่ก่อให้เกิดการระคายเคืองที่เหลือนอกจากการทำปฏิกิริยาออกไปจากแผ่นฟิล์มยางได้อีกด้วย



ภาพประกอบ 12 แสดงผิวของแผ่นฟิล์มจากการพรีวัลคาไนซ์
น้ำยางที่ไม่ทำการล้าง

ที่มา: Robert, 1988



ภาพประกอบ 13 แสดงผิวของแผ่นฟิล์มจากการพรีวัลคาไนซ์น้ำยาง
ที่ทำกรล้าง

ที่มา: Robert, 1988

3. ปริมาณที่เหมาะสมของนอร์มัลบิวทิลอะโครเลต

3.1 ปริมาณที่เหมาะสมของนอร์มัลบิวทิลอะโครเลตร่วมกับ TEPA/t-BHPO

ทำการทดลองดังหัวข้อที่ 4 ได้ผลดังตาราง 19 และภาพประกอบ 14 ถึง 15

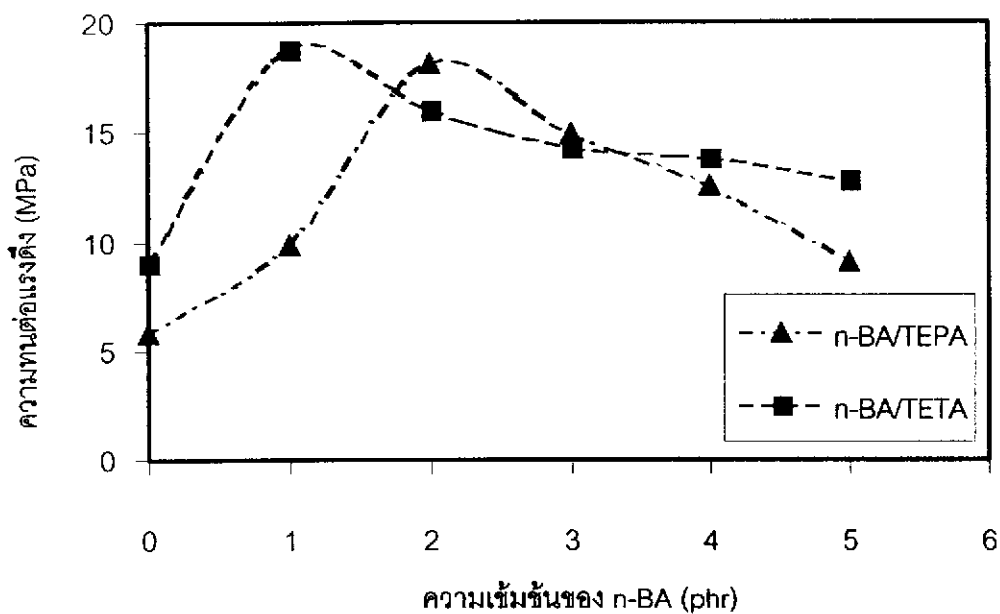
ตาราง 19 ผลของปริมาณที่เหมาะสมของนอร์มัลบิวทิลอะโครเลตร่วมกับ TEPA/t- BHPO

ส่วนผสม (น้ำหนักเปียก,กรัม)	สูตรที่					
	1	2	3	4	5	6
น้ำยาง	200	200	200	200	200	200
t-BHPO	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43
TEPA	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
n-BA	0.00	0.202	0.404	0.606	0.808	1.01
สมบัติยางวัลคาไนซ์						
ความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)	5.83	5.68	8.26	8.50	9.56	9.83
ความยืดจนขาด (%)	1382	1582	1553	1489	1733	1404
โมดูลัส (N/m ²)	1.323	1.409	1.425	1.660	1.622	1.542
อัตราส่วนการบวม	12.957	12.542	10.996	9.883	9.817	9.670

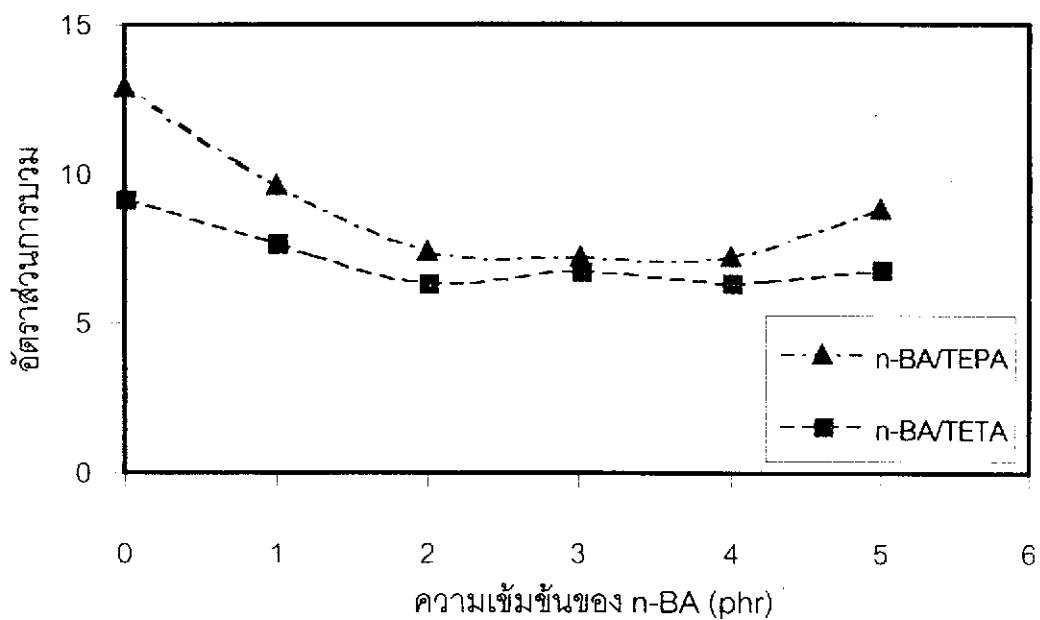
ตาราง 19 (ต่อ)

ส่วนผสม (น้ำหนักเปียก,กรัม)	สูตรที่					
	7	8	9	10	11	12
น้ำยาง	200	200	200	200	200	200
t-BHPO	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43
TEPA	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
n-BA	0.0	1.01	2.02	3.03	4.04	5.05
สมบัติยางวัลคาไนซ์						
ความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)	5.83	9.83	18.14	14.90	12.58	9.02
ความยืดจนขาด (%)	1382	1404	1658	1692	1534	1301
โมดูลัส (N/m ²)	1.323	1.542	1.580	1.587	1.597	1.672
อัตราส่วนการบวม	12.957	9.835	7.446	7.234	7.254	8.868

จากตาราง 19 และภาพประกอบ 14 ถึง 15 การใช้ n-BA ร่วมกับ TEPA/t-BHPO ทำการแปรปริมาณตั้งแต่ 0.0-1.0 phr โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.2 phr พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจาก 5.83 Mpa ที่ 0.0 phr เป็น 9.83 Mpa ที่ 1.0 phr และค่าอัตราส่วนการบวมค่อย ๆ ลดลงจาก 12.957 ที่ 0.0 phr เป็น 9.670 ที่ 1.0 phr แต่ค่าดังกล่าวยังไม่สูงพอและไม่มี ความแตกต่างทางนัยสำคัญมากนักจึงทำการแปรปริมาณ n-BA อีกครั้งตั้งแต่ 1.0-5.0 phr โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 1.0 phr พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจาก 9.83 MPa ที่ 1.0 phr เป็น 18.14 MPa ที่ 2.0 phr และเริ่มลดลงเป็น 9.02 MPa ที่ 5.0 phr และค่าอัตราส่วนการบวม พองมีค่าลดลงจาก 9.670 ที่ 0.0 phr เป็น 7.234 ที่ 2.0 phr และค่อยเพิ่มขึ้นเป็น 8.868 ที่ 5 phr ส่วนค่าความยืดจนขาดมีค่าสูงขึ้นเมื่อความต้านทานต่อแรงดึงสูงขึ้น แสดงว่าแผ่นฟิล์มยางที่มีความต้านทานต่อแรงดึงสูงสามารถยืดออกได้มาก โดยที่ n-BA เท่ากับ 2.0 phr ให้ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 18.14 Mpa ,% ความยืดขาดเท่ากับ 1658 และอัตราส่วนการบวมเท่ากับ 7.446



ภาพประกอบ 14 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้น n-BA กับความทนต่อแรงดึง



ภาพประกอบ 15 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้น n-BA กับอัตราส่วนการบวม

3.2 ปริมาณที่เหมาะสมของนอร์มัลบิวทิลอะโครเลตร่วมกับ TETA/t-BHPO

ทำการทดลองดังหัวข้อที่ 4 ได้ผลการทดลองดังตาราง 20 และภาพประกอบ 14 ถึง 15

ตาราง 20 ผลของปริมาณที่เหมาะสมของ n-BA ร่วมกับ TETA/t-BHPO

ส่วนผสม (น้ำหนักเปียก,กรัม)	สูตรที่					
	1	2	3	4	5	6
น้ำยาง	200	200	200	200	200	200
t-BHPO	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43
TETA	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
n-BA	0.00	1.01	2.02	3.03	4.04	5.05
สมบัติยางวัลคาไนซ์						
ความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)	9.04	18.78	16.01	14.28	13.87	12.85
ความยืดจนขาด (%)	1574	1727	1603	1620	1544	1550
โมดูลัส (N/m ²)	1.752	1.916	1.554	1.554	1.387	1.296
อัตราส่วนการบวม	9.202	7.727	6.385	6.744	6.336	6.840

จากตาราง 20 และภาพประกอบ 14 ถึง 15 การใช้ n-BA ร่วมกับ TETA/t-BHPO ทำการแปรปริมาณ n-BA ตั้งแต่ 1.0-5.0 phr โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 1.0 phr พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจาก 9.04 MPa ที่ 0.0 phr เป็น 18.78 MPa ที่ 1.0 phr และเริ่มลดลงเป็น 12.85 MPa ที่ 5.0 phr และค่าอัตราส่วนการบวมพองมีค่าลดลงจาก 9.202 ที่ 0.0 phr เป็น 6.385 ที่ 2.0 phr และค่อยเพิ่มขึ้นเป็น 6.840 ที่ 5 phr ส่วนค่าความยืดจนขาดมีค่าสูงขึ้นเมื่อความต้านทานต่อแรงดึงสูงขึ้น แสดงว่าแผ่นฟิล์มยางที่มีความต้านทานต่อแรงดึงสูงสามารถยืดออกได้มาก โดยที่ n-BA เท่ากับ 1.0 phr ให้ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 18.78 MPa ,% ความยืดขาดเท่ากับ 1727 และอัตราส่วนการบวมเท่ากับ 7.727

จากการทดลองจะเห็นว่าถ้าใส่ t-BHPO ร่วมกับเอมีนเพียงสองตัวเกิดการวัลคาไนซ์น้อย แสดงว่า n-BA มีผลต่อการวัลคาไนซ์น้ำยาง ถ้าไม่ใส่ n-BA ยางจะมีความต้านทานต่อแรงดึงต่ำ

มาก และค่าอัตราส่วนการบวมสูง และเมื่อเพิ่มปริมาณ n-BA ความต้านทานต่อแรงดึงค่อย ๆ เพิ่มขึ้น และอัตราส่วนการบวมค่อย ๆ ลดลง จนถึงค่าหนึ่งคือ 2.0 phr สำหรับ TEPA/t-BHPO และ 1.0 phr สำหรับ TETA/t-BHPO จะให้ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดและอัตราส่วนการบวมต่ำสุด หลังจากนั้นความต้านทานต่อแรงดึงค่อย ๆ ลดลง และอัตราส่วนการบวมค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากเมื่อใส่ n-BA มากขึ้นจะทำให้ยางมีลักษณะแข็ง เปราะ แตกง่าย ทำให้ทนต่อแรงดึงได้น้อยลง

4. ปริมาณที่เหมาะสมของเอมีนร่วมกับนีโอเพนธิลไกลคอลไดอะโครเลต

4.1 ปริมาณที่เหมาะสมของนีโอเพนธิลไกลคอลไดอะโครเลตร่วมกับ TEPA/t-BHPO

ทำการทดลองดังหัวข้อที่ 5 ได้ผลดังตาราง 21 และภาพประกอบ 16 ถึง 17

ตาราง 21 แสดงผลของปริมาณที่เหมาะสมของนีโอเพนธิลไกลคอลไดอะโครเลตร่วมกับ TEPA/t-BHPO

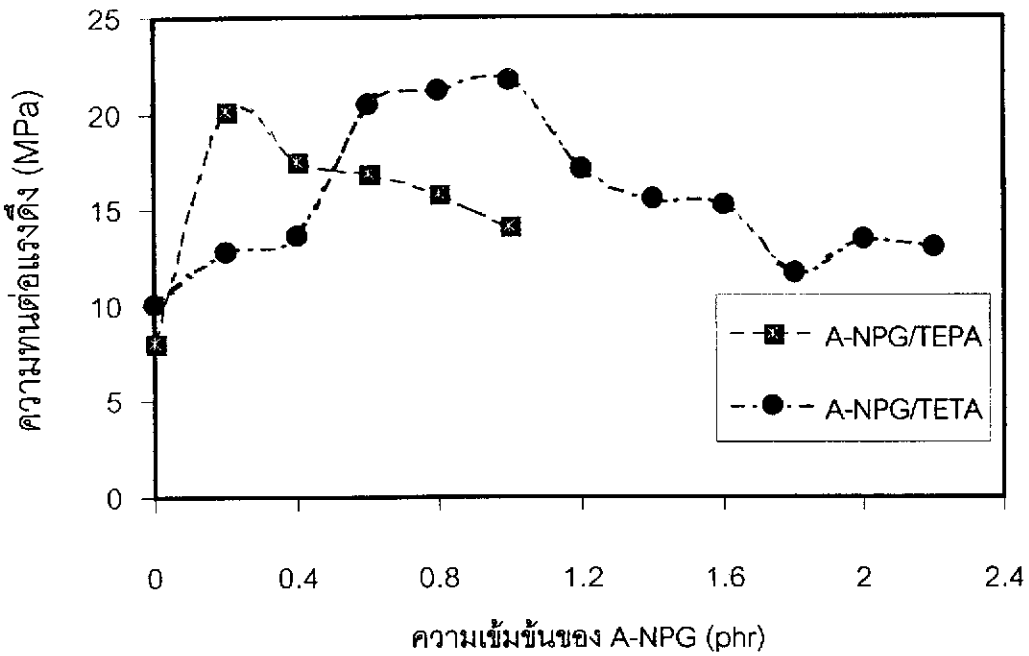
ส่วนผสม (น้ำหนักเปียก, กรัม)	สูตรที่					
	1	2	3	4	5	6
น้ำยาง	200	200	200	200	200	200
t-BHPO	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43
TEPA	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
NGA	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
สมบัติยางวัลคาไนซ์						
ความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)	8.14	20.19	17.52	16.87	15.85	14.13
ความยืดจนขาด (%)	1467	1918	1872	1718	1856	1716
โมดูลัส (N/m ²)	1.816	1.738	1.563	1.505	1.628	1.747
อัตราส่วนการบวม	11.291	8.731	8.826	8.083	8.005	8.009

4.2 ปริมาณที่เหมาะสมของนีโอเพนซิลไกลคอลไดอะโครเลตร่วมกับ TETA/t-BHPO

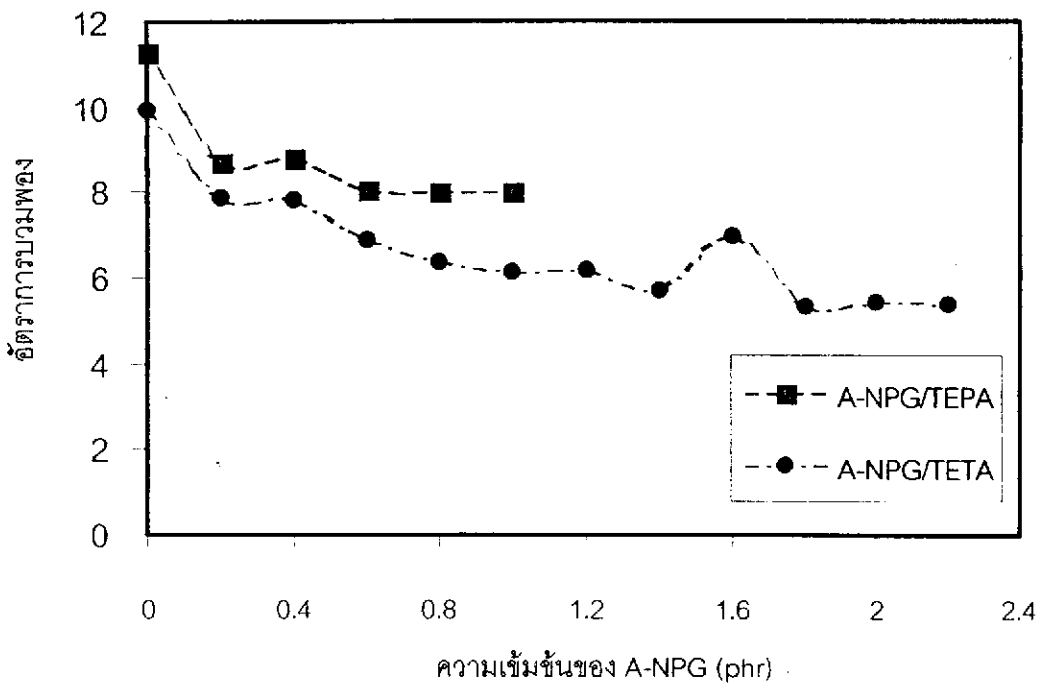
ทำการทดลองดังหัวข้อที่ 5 ได้ผลดังตาราง 22 และภาพประกอบ 16 ถึง 17

ตาราง 22 แสดงผลของปริมาณที่เหมาะสมของนีโอเพนซิลไกลคอลไดอะโครเลตร่วมกับ TETA/t-BHPO

ส่วนผสม (น้ำหนักเปียก, กรัม)	สูตรที่											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
น้ำยาง	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
t-BHPO	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43
TETA	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
NGA	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2
สมบัติยางวัลคาไนซ์												
ความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)	10.05	12.86	13.62	20.48	21.17	21.72	17.15	15.57	15.25	11.71	13.44	12.99
ความยืดจนขาด (%)	1849	1725	1876	1937	1836	1824	1578	1395	1587	1186	1250	1240
โมดูลัส (N/m ²)	1.196	1.410	1.332	1.054	1.068	1.350	1.346	1.123	1.286	1.076	0.955	0.972
อัตราส่วนการบวม	9.919	7.864	7.847	6.905	6.379	6.120	6.176	5.709	6.980	5.367	5.429	5.382



ภาพประกอบ 16 ความเข้มข้นของ A-NPG กับความทนต่อแรงดึง



ภาพประกอบ 17 ผลความเข้มข้นของ A-NPG กับอัตราการบวมพอง

ผลของปริมาณ A-NPG

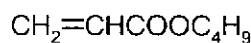
จากตาราง 21 และภาพประกอบ 16 ถึง 17 การใช้ A-NPG ร่วมกับ TEPAt-BHPO โดยแปรปริมาณ A-NPG ตั้งแต่ 0.2-1.0 phr โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.2 phr พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจาก 8.14 MPa ที่ 0.0 phr เป็น 20.19 MPa ที่ 0.2 phr และเริ่มลดลงเป็น 14.13 MPa ที่ 1.0 phr และค่าอัตราส่วนการบวมพองมีค่าลดลงจาก 11.291 ที่ 0.0 phr เป็น 8.731 ที่ 0.2 phr และค่อยลดลงเล็กน้อยเป็น 8.009 ที่ 1.0 phr ส่วนค่าความยืดจนขาดมีค่าสูงขึ้นเมื่อความต้านทานต่อแรงดึงสูงขึ้น แสดงว่าแผ่นฟิล์มยางที่มีความต้านทานต่อแรงดึงสูงสามารถยืดออกได้มาก โดยที่ A-NPG เท่ากับ 0.2 phr ให้ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 20.19 MPa ,% ความยืดขาดเท่ากับ 1918 และอัตราส่วนการบวมเท่ากับ 8.731

จากตาราง 22 และภาพประกอบ 16 ถึง 17 การใช้ A-NPG ร่วมกับ TETA/t-BHPO โดยแปรปริมาณ A-NPG ตั้งแต่ 0.2-1.0 phr โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.2 phr พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจาก 10.05 MPa ที่ 0.0 phr เป็น 21.72 MPa ที่ 1.0 phr และเริ่มลดลงเป็น 12.99 MPa ที่ 2.2 phr และค่าอัตราส่วนการบวมพองมีค่าลดลงจาก 9.919 ที่ 0.0 phr เป็น 5.382 ที่ 2.2 phr ส่วนค่าความยืดจนขาดมีค่าสูงขึ้นเมื่อความต้านทานต่อแรงดึงสูงขึ้น แสดงว่าแผ่นฟิล์มยางที่มีความต้านทานต่อแรงดึงสูงสามารถยืดออกได้มาก โดยที่ A-NPG เท่ากับ 1.0 phr ให้ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 21.72 MPa ,% ความยืดขาดเท่ากับ 1824 และอัตราส่วนการบวมเท่ากับ 6.120

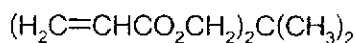
จากการทดลองจะเห็นว่า A-NPG มีผลต่อการวัลคาไนซ์น้ำยางเช่นเดียวกับ n-BA ถ้าไม่ใส่ A-NPG ยางจะมีความต้านทานต่อแรงดึงต่ำมาก และค่าอัตราส่วนการบวมสูง แสดงว่ายังเกิดการวัลคาไนซ์ไม่ดี และเมื่อเพิ่มปริมาณ A-NPG ความต้านทานต่อแรงดึงค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ปริมาณที่เหมาะสมของ A-NPG คือ 0.2 phr เมื่อใช้ร่วมกับ TEPAt-BHPO และ 1.0 phr สำหรับ TETA/t-BHPO จะให้ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดและอัตราส่วนการบวมต่ำสุด หลังจากนั้นความต้านทานต่อแรงดึงค่อย ๆ ลดลง และอัตราส่วนการบวมค่อย ๆ ลดลงแสดงว่าเกิดการวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น แต่เมื่อใส่ A-NPG มากขึ้นจะทำให้ยางมีลักษณะแข็ง เปราะ แตกง่าย ทำให้ทนต่อแรงดึงได้น้อยลง เนื่องจากสารพวกอะโครเลตมีสมบัติเป็นสารเพิ่มความแข็งในผลิตภัณฑ์ เช่น การเพิ่มสัดส่วนของ เมทิลเมทาคริเลต หรือ การใช้เอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลตเป็นสารเพิ่มความเหนียวในเรซินพอลิเอสเทอร์เป็นต้น (Bryson,1982)

ผลของชนิดอะโครเลต

การใช้อะโครเลตทั้ง 2 ชนิด คือ A-NPG และ n-BA จะมีผลต่อการวัลคาไนซ์น้ำยางโดยต้องใส่ในปริมาณที่เหมาะสมค่าหนึ่ง คือ n-BA เท่ากับ 2 phr และ A-NPG เท่ากับ 0.2 phr เมื่อใช้ร่วมกับ TEPA/t-BHPO และ n-BA และ A-NPG เท่ากับ 1 phr เมื่อใช้ร่วมกับ TETA/t-BHPO การใช้อะโครเลตทั้งสองชนิดใช้ในปริมาณที่มากพอสมควร เมื่อเทียบกับปริมาณของเอมีน คือ TEPA และ TETA ซึ่งใช้เพียง 0.2 และ 0.1 ตามลำดับ ดังนั้นในระบบนี้จึงจัด อะโครเลตเป็นสารตัวเร่ง (Accelerator) ที่ช่วยทำให้การวัลคาไนซ์เกิดได้ดีขึ้น และเกิดปฏิกิริยาร่วมกับเอมีนซึ่งจัดเป็นตัวกระตุ้น เนื่องจากใช้ในปริมาณที่น้อยกว่าเชื่อกันว่าสารพวกนี้จะเกิดปฏิกิริยาเพื่อการพอร์มสารที่มีโครงสร้างซับซ้อน (intermediate complexes) กับสารกระตุ้น ทำให้เกิดความว่องไวต่อปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Morton, 1987) ผลที่ได้คือ เร่งอัตราการวัลคาไนซ์ยางให้เร็วขึ้นและเมื่อเปรียบเทียบผลของ A-NPG และ n-BA ดังภาพประกอบ 14 ถึง 17 พบว่า A-NPG จะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่า และอัตราส่วนการบวมดีกว่า n-BA เล็กน้อย โดย A-NPG จะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดประมาณ 20 – 22 Mpa และอัตราส่วนการบวมประมาณ 8 สำหรับ TEPA/t-BHPO และประมาณ 6 สำหรับ TETA/t-BHPO ส่วน n-BA จะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดประมาณ 18 – 19 MPa และอัตราส่วนการบวมประมาณ 7 สำหรับ TEPA/t-BHPO และประมาณ 6 สำหรับ TETA/t-BHPO ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของ A-NPG และ n-BA มีความแตกต่างกันดังนี้



นอร์มัลบิวทิลอะโครเลต (n-BA)



นีโอเพนทิลไกลคอลไดอะโครเลต (A-NPG)

จากโครงสร้างโมเลกุลจะเห็นว่า A-NPG มีโครงสร้างโมเลกุลที่เป็นกิ่งมากกว่า n-BA ทำให้สามารถเกิดโครงสร้างที่ซับซ้อนได้มากกว่าส่งผลให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์ได้ดียิ่งขึ้นทำให้ยางมีสมบัติทางกายภาพที่ดี คือ มีสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงสูง และอัตราส่วนการบวมต่ำนั่นเอง นอกจากนี้การใส่ นีโอเพนทิลไกลคอลไดอะโครเลต (A-NPG) ในยางในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ยางมีความแข็ง เปราะ และแตกง่าย มากกว่าการใส่ n-BA เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลที่เป็นกิ่งก้านมากนั่นเอง

5. ปริมาณที่เหมาะสมของเติร์ท-บิวทิลไฮโดรเปอร์ออกไซด์ร่วมกับเอมีนและอะโครเลต

5.1 ปริมาณที่เหมาะสมของเติร์ท-บิวทิลไฮโดรเปอร์ออกไซด์ร่วมกับเตตระเอทิลดีนเพนตะมีนและนอร์มัลบิวทิลอะโครเลต

ทำการทดลองดังหัวข้อที่ 6 ได้ผลการทดลองดังตาราง 23,24,25 และ 26 และภาพประกอบ 18 ถึง 19

ตาราง 23 แสดงผลของปริมาณที่เหมาะสมของเติร์ท-บิวทิลไฮโดรเปอร์ออกไซด์ร่วมกับเตตระเอทิลดีนเพนตะมีนและนอร์มัลบิวทิลอะโครเลต

ส่วนผสม (น้ำหนักเปียก,กรัม)	สูตรที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
น้ำยาง	200	200	200	200	200	200	200	200	200	
n-BA	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	
TEPA	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	
t-BHPO	0.0	0.71	1.43	2.14	2.86	3.57	4.28	5.00	5.71	
สมบัติยางวัลคาไนซ์										
ความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)	3.98	9.99	13.04	17.00	14.57	9.97	16.42	10.71	10.07	
ความยืดจนขาด (%)	1756	1755	1751	1712	1724	1716	1735	1684	1704	
อัตราส่วนการบวม	12.579	8.897	8.922	7.541	8.890	8.760	9.103	9.421	9.597	

5.2 ปริมาณที่เหมาะสมของเติร์ท-บิวทิลไฮโดรเปอร์ออกไซด์ร่วมกับเตตระเอทิลลีนเพนตะมีนและนีโอเพนทิลไกลคอลไดอะโครเลต

ตาราง 24 แสดงผลของปริมาณที่เหมาะสมของเติร์ท-บิวทิลไฮโดรเปอร์ออกไซด์ร่วมกับเตตระเอทิลลีนเพนตะมีนและนีโอเพนทิลไกลคอลไดอะโครเลต

ส่วนผสม (น้ำหนักเปียก, กรัม)	สูตรที่								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
น้ำยาง	200	200	200	200	200	200	200	200	200
A-NPG	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
TEPA	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
t-BHPO	0.0	0.71	1.43	2.14	2.86	3.57	4.28	5.00	5.71
สมบัติยางวัลคาไนซ์									
ความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)	3.98	14.30	17.84	19.12	21.50	20.23	15.93	15.25	8.35
ความยืดจนขาด (%)	1756	1733	1715	1739	1771	1721	1700	1642	1629
อัตราส่วนการบวม	12.579	7.610	7.184	7.809	8.803	8.428	8.738	9.207	9.359

5.3 ปริมาณที่เหมาะสมของเติร์ท-บิวทิลไฮโดรเปอร์ออกไซด์ร่วมกับไตรเอทิลีนเตตระมีนและนอร์มัลบิวทิลอะโครเลต

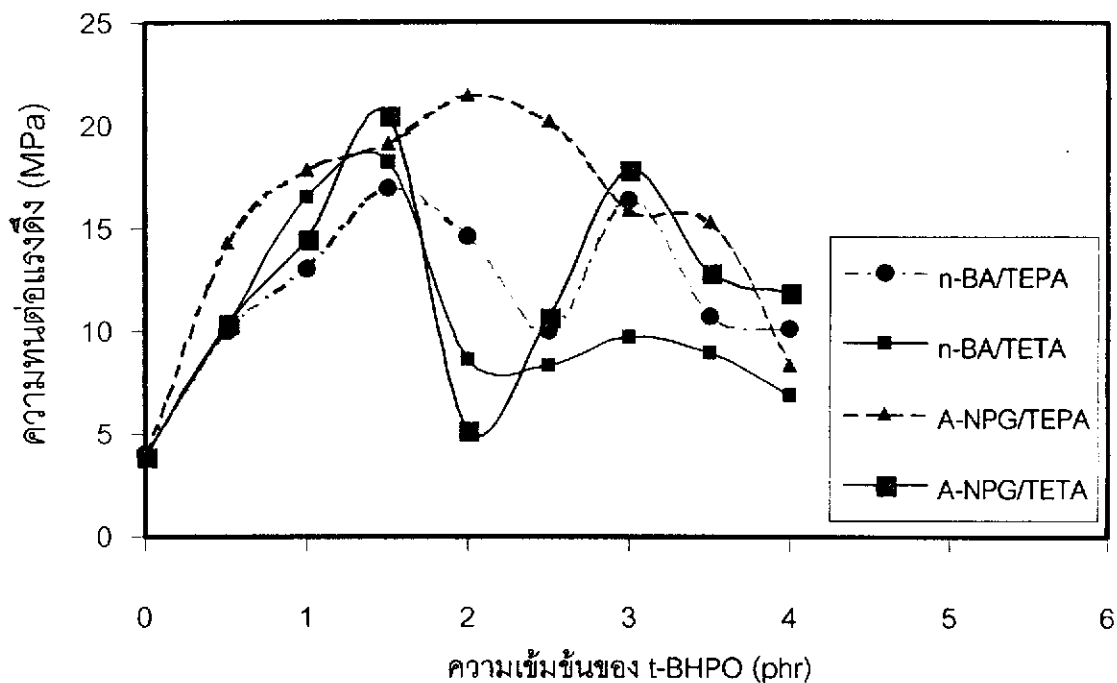
ตาราง 25 แสดงผลของปริมาณที่เหมาะสมของเติร์ท-บิวทิลไฮโดรเปอร์ออกไซด์ร่วมกับไตรเอทิลีนเตตระมีนและนอร์มัลบิวทิลอะโครเลต

ส่วนผสม (น้ำหนักเปียก,กรัม)	สูตรที่								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
น้ำยาง	200	200	200	200	200	200	200	200	200
n-BA	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
TETA	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
t-BHPO	0.0	0.71	1.43	2.14	2.86	3.57	4.28	5.00	5.71
สมบัติยางวัลคาไนซ์									
ความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)	3.98	10.28	16.61	18.19	8.67	8.32	9.69	8.96	6.90
ความยืดจนขาด (%)	1756	1673	1740	1739	1624	1621	1658	1682	1654
โมดูลัส (N/m ²)	1.093	1.422	1.405	1.417	1.343	1.333	1.344	1.295	1.289
อัตราส่วนการบวม	12.579	7.3591	7.074	6.774	8.643	8.247	8.549	8.827	9.764

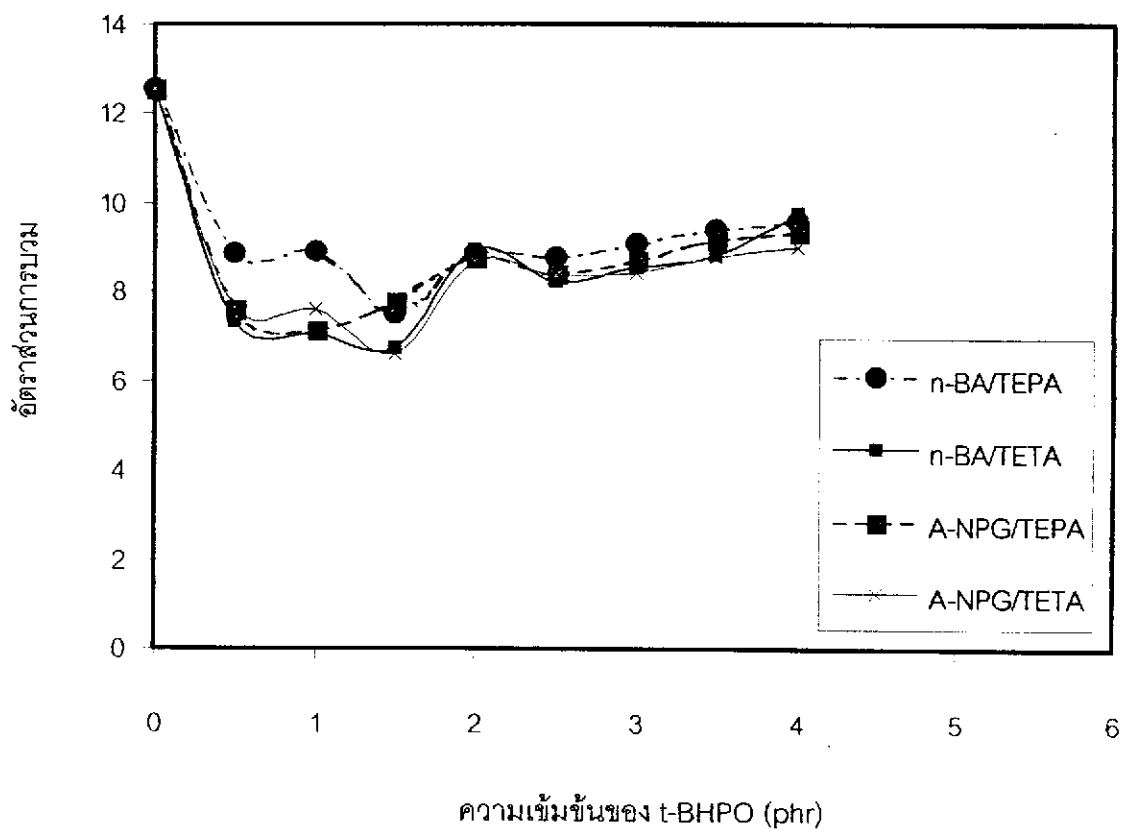
5.4 ปริมาณที่เหมาะสมของเตีร์ท-บิวทิลไฮโดรเปอร์ออกไซด์ร่วมกับไตรเอทิลีนเตตระมีนและนีโอเพนทิลไกลคอลไดอะโครเลต

ตาราง 26 แสดงผลของปริมาณที่เหมาะสมของเตีร์ท-บิวทิลไฮโดรเปอร์ออกไซด์ร่วมกับไตรเอทิลีนเตตระมีนและนีโอเพนทิลไกลคอลไดอะโครเลต

ส่วนผสม (น้ำหนักเปียก, กรัม)	สูตรที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
น้ำยาง	200	200	200	200	200	200	200	200	200	
A-NPG	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
TETA	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
t-BHPO	0.0	0.71	1.43	2.14	2.86	3.57	4.28	5.00	5.71	
สมบัติยางวัลคาไนซ์										
ความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)	3.97	10.35	14.50	20.53	5.23	10.65	17.85	12.88	11.85	
ความยืดจนขาด (%)	1756	1712	1749	1754	1724	1748	1718	1753	1738	
อัตราส่วนการบวม	12.579	7.671	7.638	6.610	8.712	8.384	8.428	8.803	9.010	



ภาพประกอบ 18 ผลความเข้มข้นของ t-BHPO กับความทนต่อแรงดึง



ภาพประกอบ 19 ผลความเข้มข้นของ t-BHPO กับอัตราส่วนการบวม

ผลของปริมาณ t-BHPO

จากตาราง 23 และตาราง 25 และภาพประกอบ 18 ถึง 19 แสดงการใช้ t-BHPO ร่วมกับ TEPA/n-BA และ TETA/n-BA โดยแปรปริมาณ t-BHPO ตั้งแต่ 0.0-4.0 phr โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.5 phr พบว่าค่าความทนต่อแรงดึงค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจาก 3.98 MPa ที่ 0.0 phr เป็น 17.00 MPa ที่ 1.5 phr และเริ่มลดลงเป็น 10.07 MPa ที่ 4.0 phr และค่าอัตราการบวมพองมีค่าลดลงจาก 12.579 ที่ 0.0 phr เป็น 7.541 ที่ 1.5 phr และค่อยเพิ่มขึ้นเป็น 9.597 ที่ 4.0 phr และสำหรับ TETA/n-BA ก็เช่นเดียวกันคือความทนต่อแรงดึงค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจาก 3.98 MPa ที่ 0.0 phr เป็น 18.19 MPa ที่ 1.5 phr และเริ่มลดลงเป็น 6.90 MPa ที่ 4.0 phr และค่าอัตราการบวมพองมีค่าลดลงจาก 12.579 ที่ 0.0 phr เป็น 6.774 ที่ 1.5 phr และค่อยเพิ่มขึ้นเป็น 9.764 ที่ 4.0 phr มาก โดยที่ t-BHPO เท่ากับ 1.5 phr สำหรับ TEPA/n-BA ให้ความทนต่อแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 17.00 MPa ,% ความยืดขาดเท่ากับ 1712 อัตราส่วนการบวมเท่ากับ 7.541 และสำหรับ TETA/n-BA ให้ความทนต่อแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 18.19 Mpa ,% ความยืดขาดเท่ากับ 1739 อัตราส่วนการบวมเท่ากับ 6.774

จากตาราง 24 และตาราง 26 และภาพประกอบ 18 ถึง 19 แสดงการใช้ t-BHPO ร่วมกับ TEPA/A-NPG และ TETA/A-NPG ทำการทดลองเช่นเดียวกันโดยแปรปริมาณ t-BHPO ตั้งแต่ 0.0-4.0 phr โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.5 phr พบว่าค่าความทนต่อแรงดึงค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจาก 3.97 MPa ที่ 0.0 phr เป็น 21.50 MPa ที่ 2.0 phr และเริ่มลดลงเป็น 8.35 MPa ที่ 4.0 phr และค่าอัตราการบวมพองมีค่าลดลงจาก 12.579 ที่ 0.0 phr เป็น 7.184 ที่ 1.0 phr และค่อยเพิ่มขึ้นเป็น 9.359 ที่ 4.0 phr และสำหรับ TETA/A-NPG ก็เช่นเดียวกันคือความทนต่อแรงดึงค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจาก 3.97 MPa ที่ 0.0 phr เป็น 20.53 MPa ที่ 1.5 phr และเริ่มลดลงเป็น 11.85 MPa ที่ 4.0 phr และค่าอัตราการบวมพองมีค่าลดลงจาก 12.579 ที่ 0.0 phr เป็น 6.610 ที่ 1.5 phr และค่อยเพิ่มขึ้นเป็น 9.010 ที่ 4.0 phr มาก โดยที่ t-BHPO เท่ากับ 1.5 phr สำหรับ TEPA/A-NPG ให้ความทนต่อแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 21.50 Mpa ,% ความยืดขาดเท่ากับ 1771 อัตราส่วนการบวมเท่ากับ 8.803 และสำหรับ TETA/A-NPG ให้ความทนต่อแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 20.53 Mpa ,% ความยืดขาดเท่ากับ 1754 อัตราส่วนการบวมเท่ากับ 6.610

จากการทดลองจะเห็นว่าปริมาณที่เหมาะสมของ t-BHPO ที่ให้ความทนต่อแรงดึงสูงและอัตราการบวมพองต่ำสุดเท่ากับ 1.5 phr สำหรับ TEPA/n-BA ,TETA/n-BA และ TETA/A-NPG ส่วน TETA/n-BA ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดที่ 2.0 phr แต่อัตราการบวมพองต่ำสุดที่ 1.5 phr จึงเลือกปริมาณที่น้อยกว่าคือ 1.5 phr ไปทำเป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งไม่มากและไม่น้อยจนเกินไปที่จะทำ

และไม่น้อยจนเกินไปที่จะทำหน้าที่เป็นตัวเริ่มต้นปฏิกิริยาโดยไปทำให้ง่ายเกิดเป็นอนุมูลอิสระแล้วสามารถเกิดการเชื่อมโยงได้ถ้าใส่ t-BHPO ในปริมาณมากจะทำให้ผิวของผลิตภัณฑ์มีลักษณะเหนียวเยิ้ม ซึ่งเป็นลักษณะของสารเคมีที่เหลือใช้หลุดออกมาที่ผิวของผลิตภัณฑ์ดูขัดกับความชื้นและสิ่งสกปรกในบรรยากาศมาติดที่ผิวของผลิตภัณฑ์ แต่ถ้าใส่ t-BHPO ในปริมาณน้อยเกินไปจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ไม่เต็มที่ ทำให้ได้ยางที่มีสมบัติทางกายภาพต่ำลง

6. นำสูตรยางที่เหมาะสมมาทำเป็นผลิตภัณฑ์

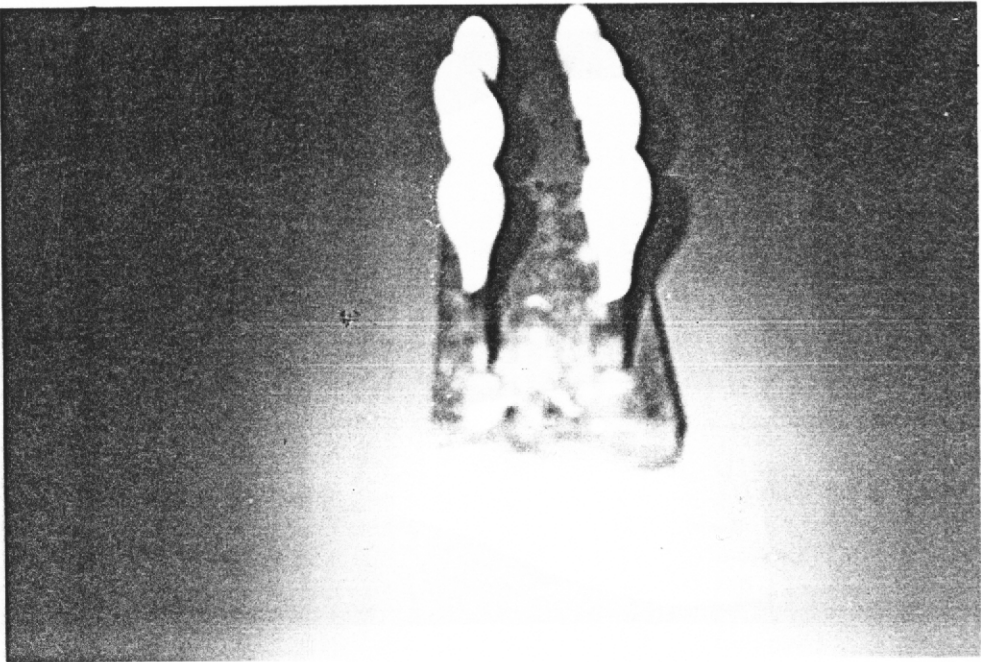
ทำการทดลองดังหัวข้อที่ 7 ได้ผลดังตาราง 27 และภาพประกอบ 20 ถึง 25

ตาราง 27 แสดงสมบัติของสูตรน้ำยางที่เหมาะสมนำมาทำผลิตภัณฑ์ก่อนและหลังการบ่มเร่ง

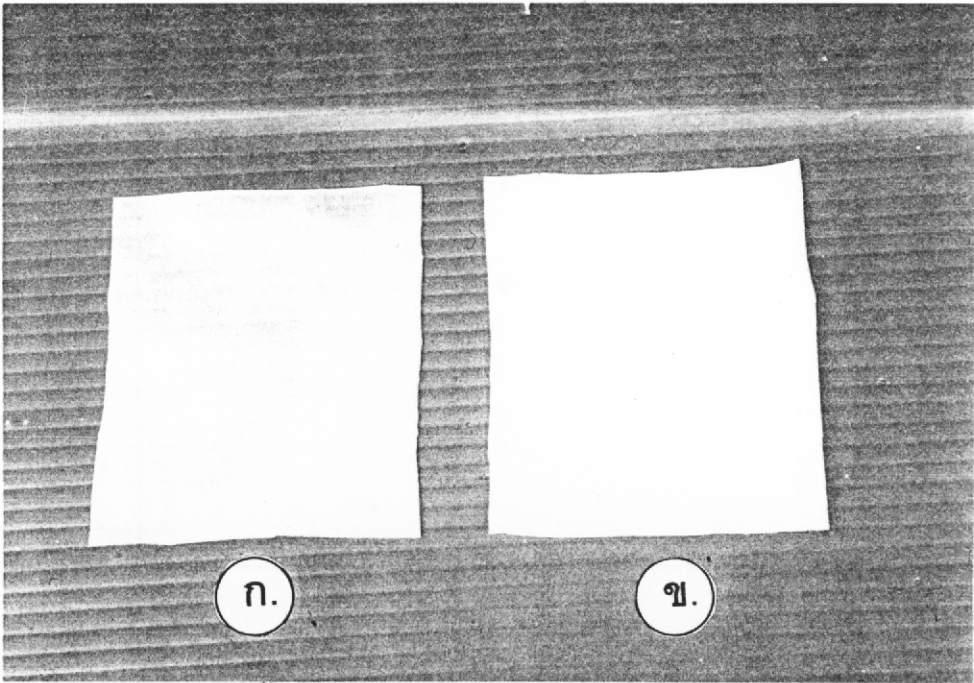
ส่วนผสม (น้ำหนักเปียก, กรัม)	สูตรที่			
	1	2	3	4
น้ำยาง	200	200	200	200
t-BHPO	2.14	2.14	2.14	2.14
n-BA	2.02	1.01	-	-
A-NGA	-	-	0.2	1.0
TEPA	0.24	-	0.24	-
TETA	-	0.1	-	0.1
สมบัติยางวัลคาไนซ์ก่อนการบ่มเร่ง				
ความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)	17.89	18.59	20.45	19.50
ความยืดจนขาด (%)	1725	1674	1757	1614
อัตราส่วนการบวม	7.549	7.359	6.648	6.556
สมบัติยางวัลคาไนซ์หลังการบ่มเร่ง				
ความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)	13.36	13.69	14.46	14.63
ความยืดจนขาด (%)	1572	1528	1612	1588
การเปลี่ยนแปลงความทนแรงดึง	-4.53	-4.90	-5.99	-4.87
การเปลี่ยนแปลงความยืดจนขาด	-153	-146	-145	-26



ภาพประกอบ 20 แสดงผลิตภัณฑ์ลูกโป่งที่ได้จากการพรีวัลคาไนซ์
ด้วยระบบไฮโดรเปอร์ออกไซด์

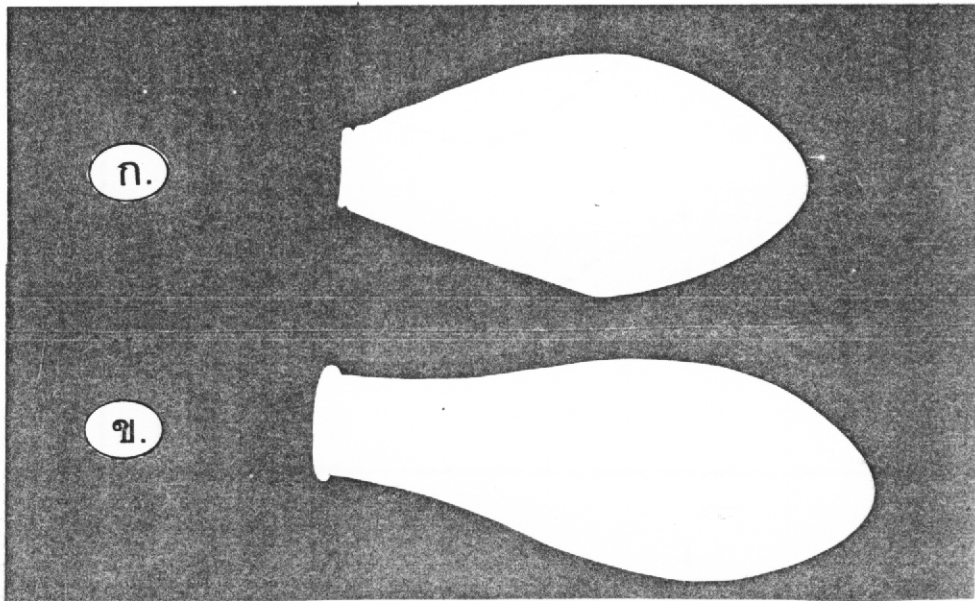


ภาพประกอบ 21 แสดงผลิตภัณฑ์ลูกโป่งที่ได้จากการพรีวัลคาไนซ์
ด้วยระบบซัลเฟอร์



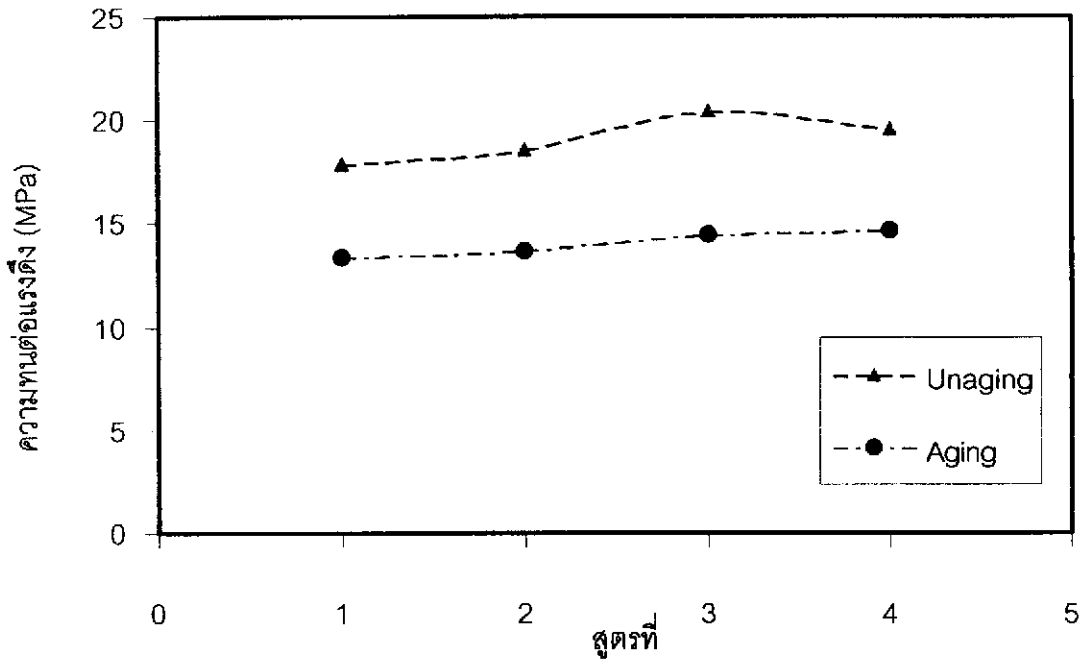
ภาพประกอบ 22 เปรียบเทียบแผ่นฟิล์มยางที่ได้จากการพรีวัลคาไนซ์

- ก. ระบบไฮโดรเปอร์ออกไซด์
- ข. ระบบซัลเฟอร์

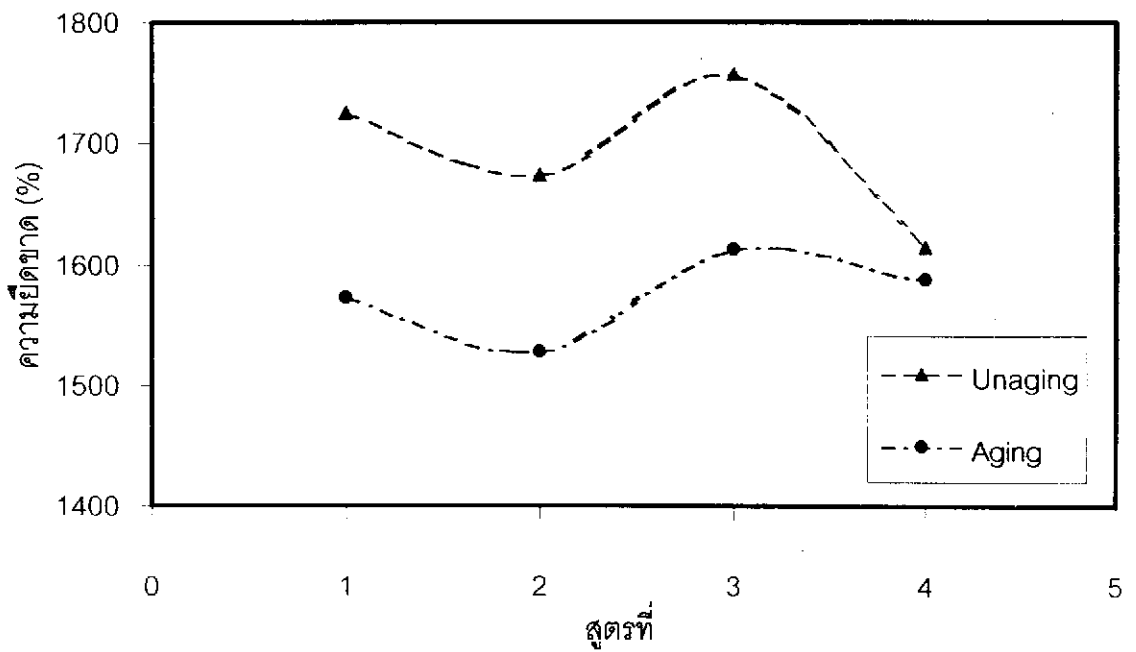


ภาพประกอบ 23 เปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ลูกโป่งสำเร็จรูปที่ได้จากการพรีวัลคาไนซ์

- ก. ระบบไฮโดรเปอร์ออกไซด์
- ข. ระบบซัลเฟอร์



ภาพประกอบ 24 แสดงสมบัติความทนต่อแรงดึงก่อนและหลังการบ่มเร่ง



ภาพประกอบ 25 เปอร์เซ็นต์ความยืดขาดก่อนและหลังการบ่มเร่ง

ผลของการบ่มเร่ง

จากตาราง 27 และภาพประกอบ 16-18 ทำการบ่มเร่งสูตรยางที่มีปริมาณสารเคมีทั้งสามชนิดในปริมาณที่เหมาะสมโดยทำการอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 7 วัน พบว่าค่าความทนต่อแรงดึงของทุกสูตรมีค่าลดลง โดยสูตรที่ 1 (TEPA/n-BA/t-BHPO) ความทนต่อแรงดึงลดลงจาก 17.89 MPa เป็น 13.36 MPa และความยืดจนขาดลดลงจาก 1725 เป็น 1572 และสูตรที่ 2 (TETA/n-BA/t-BHPO) ความทนต่อแรงดึงลดลงจาก 18.59 MPa เป็น 13.69 MPa และความยืดจนขาดลดลงจาก 1674 เป็น 1528 และสูตรที่ 3 (TEPA/A-NPG/t-BHPO) ความทนต่อแรงดึงลดลงจาก 20.45 MPa เป็น 14.46 MPa และความยืดจนขาดลดลงจาก 1757 เป็น 1612 และสูตรที่ 4 (TETA/n-BA/t-BHPO) ความทนต่อแรงดึงลดลงจาก 19.50 MPa เป็น 14.63 MPa และความยืดจนขาดลดลงจาก 1614 เป็น 1588 แสดงว่าการสูญเสียสมบัติทางกายภาพของยางจะเกิดขึ้นเมื่อยางอยู่ภายใต้กระบวนการที่ทำให้เสื่อมสภาพ ซึ่งโดยปกติเกิดเนื่องมาจากการขาดของสายโมเลกุลยาง หรือเกิดการฟอร์มสารบางอย่าง สารที่ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพเหล่านั้นได้แก่ ออกซิเจน โอโซน ความร้อน แสง อากาศ เป็นต้น (Morton, 1987)

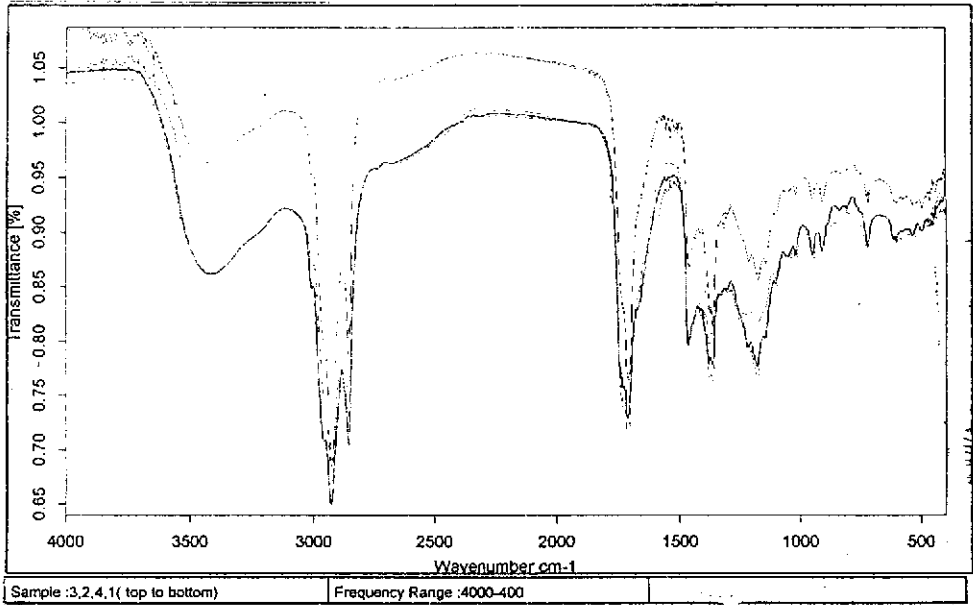
ลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ได้

จากภาพประกอบที่ 20-23 จะเห็นว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการวัลคาไนซ์น้ำยางโดยใช้พอลิเอมีนร่วมกับอะโครเลตจะมีความใสมากจนเห็นเนื้อของแม่พิมพ์และผลิตภัณฑ์จะมีความบางมาก เนื่องจากเมื่อทำการจุ่มสารคัลเซียมคลอไรด์เพื่อช่วยให้น้ำยางแข็งตัวเร็วขึ้นไม่สามารถทำได้เนื่องจากจะทำให้ผิวของผลิตภัณฑ์ขรุขระเป็นร่องและร่วน ซึ่งแสดงว่าระบบนี้จะเกิดปฏิกิริยากับคัลเซียมคลอไรด์ และเมื่อเปรียบเทียบกับระบบซัลเฟอร์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความใสมากกว่ามาก ดังนั้นจึงเหมาะที่จะทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความใสและความบาง เช่น ถุงมือ ถุงยางอนามัย เป็นต้น

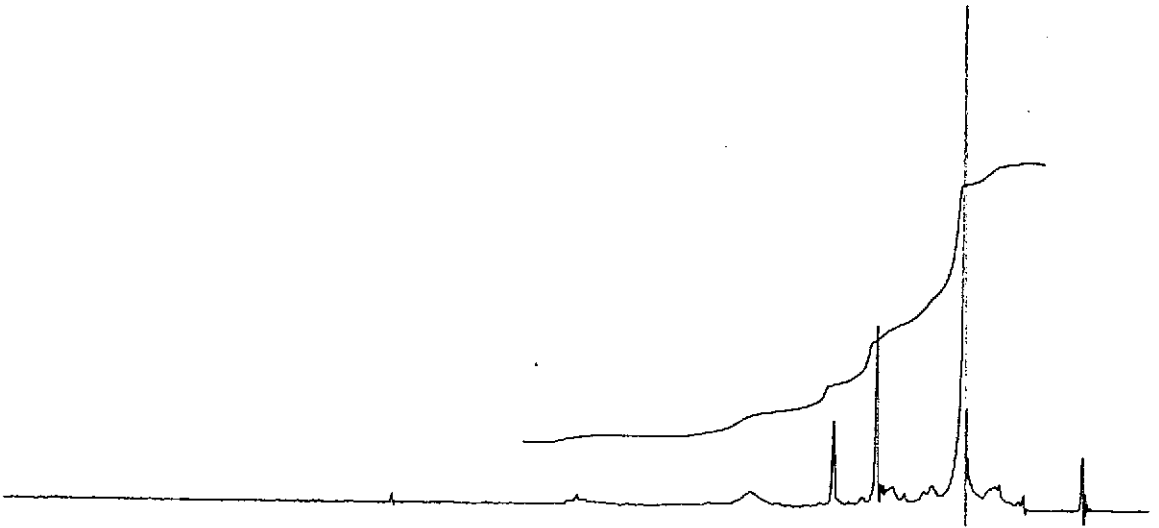
7. นำสูตรยางที่เหมาะสมมาวิเคราะห์หาสารตกค้างและไนโตรซามีน

และตรวจสอบโครงสร้าง

จากการที่นำแผ่นฟิล์มยางที่ทำการพรีวัลคาไนซ์แล้วมาสกัดด้วยอะซิโตนเพื่อสกัดสารที่ใช้ในปฏิกิริยาที่ไม่เข้าไปทำปฏิกิริยากับสายโซ่หลักของโมเลกุลยางออก ดังนั้นแผ่นฟิล์มยางที่ได้จากการสกัดจะไม่เหลือสารตกค้างที่ไม่ทำปฏิกิริยาอีก หลังจากนั้นนำสารที่สกัดได้ไปหาสารตกค้างจากเครื่อง FTIR จะได้ดังภาพประกอบ 26 และทดสอบกับเครื่อง NMR ได้ดังภาพประกอบ 27 และนำยางที่ได้จากการสกัดไปทดสอบด้วยเครื่อง FTIR จะได้ดังภาพประกอบ 28 และทดสอบกับเครื่อง NMR ได้ดังภาพประกอบ 29 (ดูรายละเอียดในภาคผนวก)

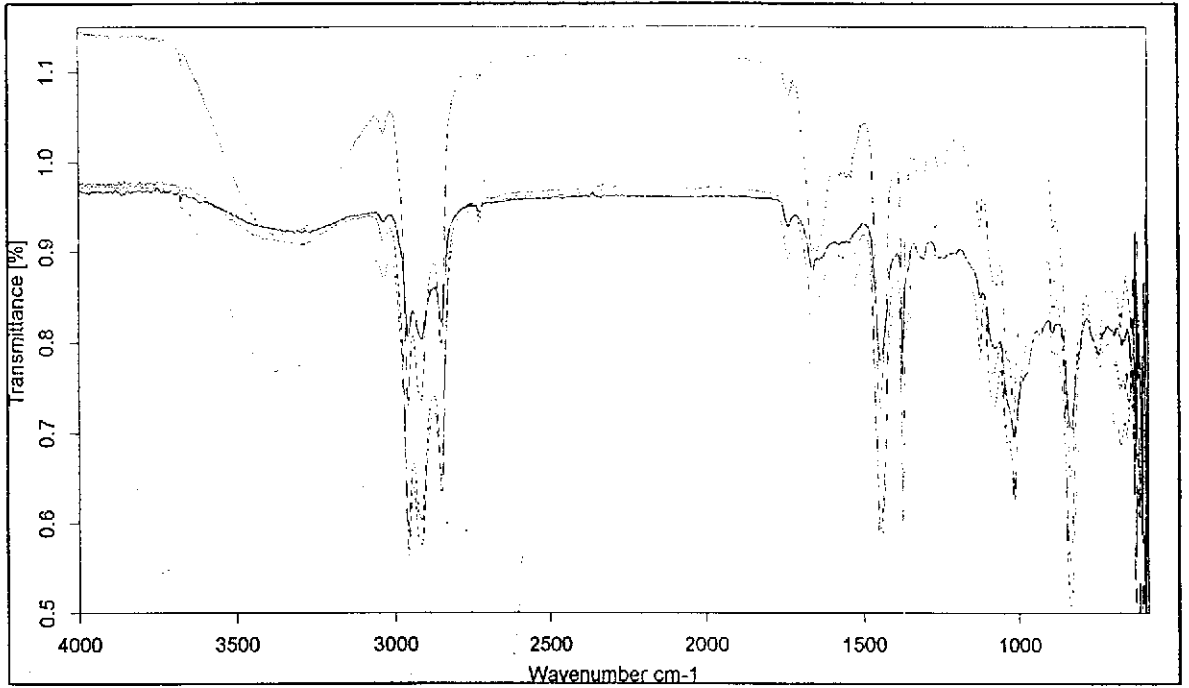


ภาพประกอบ 26 สเปกตรัม IR ของสารที่สกัดได้จากยาง

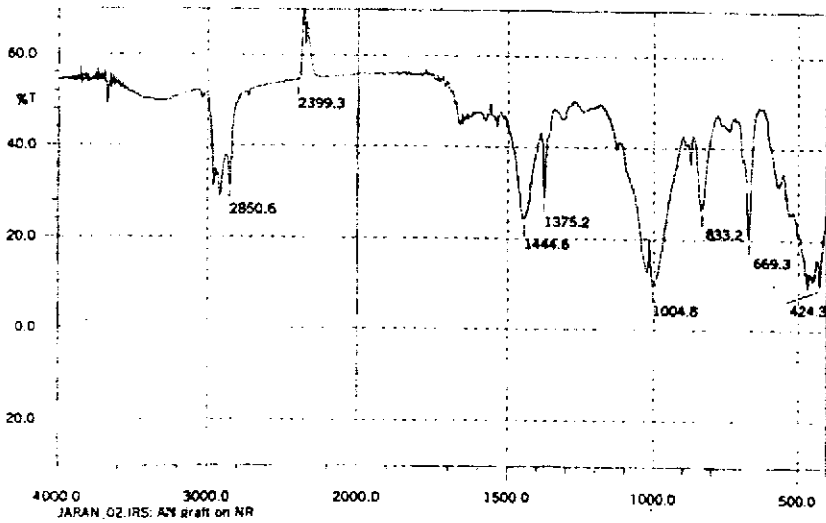


F-1.

ภาพประกอบ 27 ^1H NMR สเปกตรัมของสารที่สกัดได้จากยาง



ภาพประกอบ 28 สเปกตรัม IR ของยางที่สกัดแล้ว



ภาพประกอบ 29 สเปกตรัม IR ของยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารเคมี
ที่มา: Phumnok et al., 2002

7.1 ผลการวิเคราะห์สารที่ได้จากการสกัด

จากภาพประกอบ 26-27 ซึ่งทำการทดสอบด้วยเครื่อง FTIR และ NMR จะเห็นว่าสารที่ได้จากการสกัดทั้ง 4 สูตรมีลักษณะของสเปกตรัมคล้าย ๆ กัน ดังนี้

- แสดงหมู่ N—H (การยืด) ที่ $3500-3300\text{ cm}^{-1}$ (สูตร 1 ที่ 33313.84 cm^{-1} , สูตร 2 ที่ 3382.82 cm^{-1} , สูตร 3 ที่ 3302.09 cm^{-1} , สูตร 4 ที่ 3380.69 cm^{-1})
- แสดงหมู่ C=O ที่ $1820-1660\text{ cm}^{-1}$ (สูตร 1 ที่ 1662.44 cm^{-1} , สูตร 2 ที่ 1655.38 cm^{-1} , สูตร 3 ที่ 11651.04 cm^{-1} , สูตร 4 ที่ 1660.62 cm^{-1})
- แสดงหมู่ CH_2 (การยืด) ที่ความถี่ $3000-2800\text{ cm}^{-1}$ (สูตร 1 ที่ $2959.60, 2915.44$ และ 2850.83 cm^{-1} , สูตร 2 ที่ 2960.14 และ 2852.01 cm^{-1} , สูตร 3 ที่ 2960.18 และ 2852.59 cm^{-1} , สูตร 4 ที่ 2960.17 และ 2852.02 cm^{-1})
- แสดงหมู่ C—H (การงอ) มีพีคใกล้ 1450 และ 1375 cm^{-1}
- แสดงหมู่ C—O (การยืด) ที่ $1300-1000\text{ cm}^{-1}$
- แสดงหมู่ $\text{CH}_2\text{—C=O}$ ในช่วง 2-3
- แสดงหมู่ $\text{C—CH}_2\text{—C}$ ในช่วง 1-2 และไม่แสดงหมู่ C=CH ในช่วง 5-7

จากการวิเคราะห์จากเครื่องมือทั้งสองอย่างแสดงว่าสารตกค้างในยางน่าจะเป็นโครงสร้างที่มาจากอะโครเลตเนื่องจากใช้ในปริมาณที่มาก (1-2 phr) และจากเอมีนในปริมาณเล็กน้อย ซึ่งสารทั้งสองชนิดน่าจะเกิดปฏิกิริยาเป็นสารชนิดอื่นที่ไม่ใช่ตัวเดิมสังเกตได้จากพันธะคู่ที่อยู่ในอะโครเลตหายไป และจากการตรวจสอบไม่พบไนโตรซามีน เนื่องจากหมู่ไนโตรจะแสดงพีคใหญ่ 2 พีค ที่ความถี่ $1600-1500\text{ cm}^{-1}$ และที่ $1650-1450\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งที่ได้จากเครื่อง FTIR ทั้งหมดตรวจไม่เจอหมู่ฟังก์ชันดังกล่าว (อดิศร รัต นพันธ์ และ เจษฎี ม่านสะอาด, 2543; ทิมพิจิต ดามพวรรณ และ วิชรินทร์ รุขไชยศิริกุล, 2539)

7.2 ผลการวิเคราะห์ยางที่ได้จากการสกัด

จากภาพประกอบ 28 ซึ่งทำการทดสอบด้วยเครื่อง FTIR จะเห็นว่ายางที่ได้จากการสกัดทั้ง 4 สูตรมีลักษณะของสเปกตรัมคล้าย ๆ กัน ดังนี้

- แสดงหมู่ N—H (การยืด) ที่ $3500-3300\text{ cm}^{-1}$ แสดงว่าเป็นเอ ไมด์ (สูตร 1 ที่ 3417.81 cm^{-1} , สูตร 2 ที่ 3346.80 cm^{-1} , สูตร 3 ที่ 3424.98 cm^{-1} , สูตร 4 ที่ 3417.81 cm^{-1})

- แสดงหมู่ C=O ที่ 1820-1660 cm^{-1} (สูตร 1 ที่ 1712.71 cm^{-1} , สูตร 2 ที่ 1711.28 cm^{-1} , สูตร 3 ที่ 1708.37 cm^{-1} , สูตร 4 ที่ 1712.49 cm^{-1})
- แสดงหมู่ CH_2 (การยืด) ที่ความถี่ 3000-2800 cm^{-1} (สูตร 1 ที่ 2927.04 และ 2855.04 cm^{-1} สูตร 2 ที่ 2926.38 และ 2854.70 cm^{-1} , สูตร 3 ที่ 2927.05 และ 2855.29 cm^{-1} , สูตร 4 ที่ 2926.85 และ 2855.07 cm^{-1})
- แสดงหมู่ C—H (การงอ) มีพีคใกล้ 1450 และ 1375 cm^{-1}
- แสดงหมู่ C—O (การยืด) ที่ 1300-1000 cm^{-1}

จากการวิเคราะห์ด้วย FTIR จะเห็นว่าหมู่ของสารที่แสดงว่าเอมีนและอะไครเลตได้เข้าไปอยู่ในโครงสร้างของยางที่เกิดการคลอซลิงค์ แสดงว่าสารทั้งสองตัวนี้เป็นตัวที่เชื่อมโยงอยู่ระหว่างโมเลกุลของยางโดยการเกิดปฏิกิริยาพอร์มสารที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น ส่วนที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง NMR ดังภาพประกอบ 29 พบว่าทั้ง 4 สูตร มีลักษณะคล้ายกันเช่นกัน โดยแสดงหมู่ฟังก์ชันของยางหมด เนื่องจากหมู่ N—H หรือหมู่ C=O จะถูกบดบังด้วยหมู่ของยาง แต่ข้อมูลที่ได้จาก IR สเปกตรัม และ NMR ยังไม่เพียงพอสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างที่ซับซ้อนของการคลอซลิงค์ได้ ยังต้องอาศัยข้อมูลอย่างอื่นประกอบด้วย เช่น น้ำหนักโมเลกุล สมบัติทางกายภาพและทางเคมี และข้อมูลทางสเปคโตรสโคปีอื่น ๆ ได้แก่ UV และ แมสสเปคโตรสโคปีด้วย (อติศร รัตนพันธ์ และ เจษฎี ม่านสะอาด, 2543; ทิมพีจิต ตามพวรรณ และ วัชรินทร์ รุกขไชยศิริกุล, 2539)