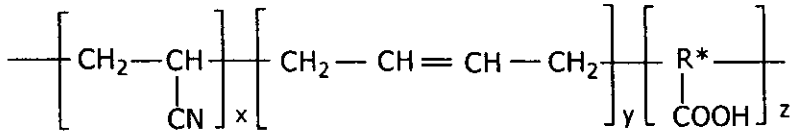


# เนื้อหา

## 1 ความสำคัญและความเป็นมาของการวิจัย

เป็นที่ทราบกันดีว่าในปัจจุบันประเทศไทยได้กลายเป็นผู้ผลิตยางธรรมชาติที่สำคัญและมากเป็นลำดับที่หนึ่งของโลก แต่ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) ที่ผลิตในประเทศจะส่งออกในรูปยางดิบเป็นหลัก ปริมาณของยางธรรมชาติที่ผลิตเป็นยางดิบค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับปริมาณของยางที่มีการนำไปใช้ทำผลิตภัณฑ์ที่สามารถเพิ่มมูลค่าของยางธรรมชาติได้มากกว่า ยางธรรมชาติสามารถแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ถุงมือ ที่นอน ตุ๊กตายาง จนถึง ผลิตภัณฑ์ที่ใช้งานด้านวิศวกรรม เช่น ยางรองคอตระพาน เนื่องจากยางธรรมชาติมีความแข็งแรงและยืดหยุ่นที่ดี แต่ในขณะที่เดียวกันยางธรรมชาติจะเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วเมื่อถูกกระทำด้วยออกซิเจน โอโซน ความร้อนและน้ำมัน เนื่องจากยางธรรมชาติมีความไม่อิ่มตัวในโครงสร้างและประกอบด้วยโมเลกุลที่เป็นไฮโดรคาร์บอนล้วน

ยางไนไตรล์คาร์บอกซิเลต (Carboxylated Nitrile Rubber, XNBR) จัดเป็นยางสังเคราะห์ที่สำคัญมากชนิดหนึ่งในเชิงพาณิชย์ มีส่วนประกอบของโครงสร้างที่เป็นพอลิอะคริโลไนไตรล์ พอลิบิวทาไดอีน และกรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid, -COOH)



จากโครงสร้างข้างต้นทำให้ยางชนิดนี้มีสมบัติต่างๆ ใกล้เคียงกับยางไนไตรล์ แต่เนื่องจากหมู่กรดคาร์บอกซิลิกที่อยู่ในโครงสร้าง ส่งผลให้ยางนี้มีความทนต่อน้ำมันและการสึกหรมากกว่ายางไนไตรล์ปกติ นอกจากนี้หมู่กรดคาร์บอกซิลิกที่กระจายอยู่ในสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะออกไซด์ เช่น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เกิดการเชื่อมโยงแบบไอออนิก (ionic crosslinking) ( $\text{COO}^- - \text{Zn}^{2+} - \text{OOC}$ ) การเสริมแรงของยางด้วยพันธะไอออนิกร่วมกับการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันทำให้ได้ยางวัลคาไนซ์ที่มีสมบัติเชิงกล เช่น ความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) โมดูลัส (modulus) ความแข็ง (hardness) ความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear strength) และความต้านทานต่อการสึกหรม (abrasion resistance) สูงขึ้นกว่าปกติเป็นพิเศษ (Chakraborty *et al.*, 1981; Chakraborty and DE, 1983; Ibarra, 1999; Ibarra and Alzorz, 2000) ยางชนิดนี้จึงถูกใช้งานเฉพาะทางในอุตสาหกรรมยานยนต์ เช่น การทำท่อส่งน้ำมัน สายพานรถยนต์ ปะเก็น เป็นต้น แต่ยาง XNBR มีราคาแพงเนื่องจากเป็นยางที่มีต้นทุนการผลิตสูงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ดังนั้นอุตสาหกรรมที่ต้องใช้ยางชนิดนี้ต้องคำนึงถึงการแข่งขันกันในเรื่องของราคาผลิตภัณฑ์นอกเหนือไปจากคุณภาพที่ดีของผลิตภัณฑ์จากยางชนิดนี้และแนวทางหนึ่งในการลดต้นทุนการผลิตทำได้โดยการเบลนด์ยาง XNBR กับยาง NR แต่อย่างไรก็ตาม ยาง NR และยาง XNBR มีสภาพขั้วที่แตกต่างกันจึงผสมเข้ากันได้น้อย ส่งผลอย่างมากต่อสมบัติ (จันทร์สมร, 2549) นอกจากนี้สมบัติของเบลนด์สามารถที่จะถูกปรับให้เหมาะต่อการใช้งานได้หากเลือกใช้สัดส่วนเบลนด์ ระบุวัล

กาโนซ์ ชนิดและปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ที่เหมาะสม และการใช้สารตัวเติมเพื่อเสริมประสิทธิภาพของยางเบลนด์จะเป็นแนวทางสนับสนุนการปรับปรุงสมบัติของเบลนด์ให้ดียิ่งขึ้น

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาสมบัติยางเบลนด์ของยางธรรมชาติกับยางคาร์บอกซิเลตไนไตรล์ โดยศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้นต่อสมบัติเบลนด์ เพื่อหาเทคนิคที่เหมาะสมในการผลิตท่อทนความร้อนและน้ำมัน

## 2 วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาเทคนิคการเตรียมยางเบลนด์และสมบัติของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ (NR) กับยางไนไตรล์คาร์บอกซิเลต (XNBR)

2.2 เพื่อผลิตท่อทนความร้อนและน้ำมัน และหรือผลิตภัณฑ์อื่นๆ จากยางเบลนด์ NR/XNBR

## 3 ทฤษฎี แนวคิดในการทำวิจัย และผลงานที่เกี่ยวข้อง

การเตรียมวัสดุใหม่ๆ เพื่อใช้งานเฉพาะทางในปัจจุบัน มีแนวโน้มพัฒนาจากยางเบลนด์โดยการผสมยางชนิดต่างๆ เข้าด้วยกัน แล้วควบคุมให้เกิดรูปร่างเฟส ขนาดของเฟส การยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ต่างชนิดที่ต้องการ ทำให้สามารถผลิตวัสดุพอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่มีสมบัติหลากหลาย ที่สามารถสนองความต้องการในการใช้งานในรูปแบบต่างๆ ได้ ซึ่งใช้เทคโนโลยีการเบลนด์อย่างง่าย ๆ ไม่มีความซับซ้อน การลงทุนและความพยายามที่มากกว่าการสังเคราะห์ชนิดใหม่ สมบัติที่ได้รับการปรับปรุงเนื่องจากการเบลนด์ เช่น ความง่ายในการแปรรูป (processability) การทนทานต่อความร้อนและสารเคมี ทนทานต่อการกระแทกและการดึง และสมบัติเชิงกลอื่นๆ เป็นต้น ในการเตรียมยางเบลนด์ จะพิจารณาความเข้ากันได้ (compatibility) ของการผสมเป็นหลัก (Bonner and Hope, 1993) ดังนั้นการเข้ากันได้จึงเป็นสิ่งสำคัญในการเตรียมยางเบลนด์ การผสมยางที่เข้ากันไม่ได้หรือเข้ากันได้ไม่ดี จะส่งผลเสียต่อสมบัติของยางเบลนด์ เนื่องจากเกิดการแยกเฟสของพอลิเมอร์แต่ละชนิดอย่างชัดเจน ซึ่งแต่ละเฟสจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันต่ำ จึงทำให้พอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้เกิดการแตกหักได้ง่าย สมบัติเชิงกลและสมบัติอื่นๆ ค่อยกว่าพอลิเมอร์เดิมที่นำมาเบลนด์ ในโครงการวิจัยนี้มีเป้าหมายศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยของการเตรียม เช่น เทคนิคการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ การแปรปริมาณของยาง NR และ XNBR ในเบลนด์ การใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ ที่สามารถสร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสของ NR และ XNBR และการใช้สารตัวเติม เช่น เขม่าดำ ซิลิกา แคลเซียมคาร์บอเนต ต่อสมบัติการแปรรูป สมบัติเชิงกลและบ่มเร่ง การทนต่อน้ำมัน และความเข้ากันได้ของยางเบลนด์ ตลอดจนเทคนิคการผลิตท่อยางด้วยการเอกซ์ทรูดเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาวัสดุยางชนิดใหม่จากยางธรรมชาติและไนไตรล์คาร์บอกซิเลตที่สามารถนำไปเตรียมเป็นท่อยาง หรือผลิตภัณฑ์ที่ทนความร้อนและน้ำมันประเภทอื่น จากการค้นคว้ารายงานวิจัยที่ศึกษาการเบลนด์ยางธรรมชาติและยางไนไตรล์คาร์บอกซิเลต พบว่ามีการกล่าวรายงานว่าการนำยางธรรมชาติและยางไนไตรล์คาร์บอกซิเลตมาเบลนด์ด้วยสัดส่วนเบลนด์ต่างๆ ให้ผลดังต่อไปนี้ คือ สมบัติเชิงกลและการทนต่อน้ำมันของยางเบลนด์คู่นี้เพิ่มขึ้นตามปริมาณยางไนไตรล์คาร์บอกซิเลต แต่ยางเบลนด์ NR/XNBR มีความเข้ากันได้ต่ำ จึงพยายามแก้ปัญหาด้วยการใช้สารตัวเร่งที่สังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ คือ ไบโอฟอสฟอริลไดซัลไฟด์ (bis(diisopropyl) thiophosphoryl disulfide, DIPDIS) เปรียบเทียบกับสารตัวเร่ง TMTD ผลการศึกษาพบว่าการใช้ DIPDIS ให้ยางเบลนด์ที่มีสมบัติ

เชิงกลและการทนต่อน้ำมันได้ดีกว่า TMTD เนื่องจาก DIPDIS สามารถทำหน้าที่เป็นตัวประสานระหว่างยางไนไตรด์คาร์บอกรีลกับยางธรรมชาติ ส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงทางเคมีระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางทั้งสองชนิด (Naskar *et al.*, 1994) ต่อมากลุ่มคณะวิจัยของ Naskar *et al.* (2001) ได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณซัลเฟอร์ในสารตัวเร่งกลุ่มโรโอฟอสฟอริลพอลิซัลไฟด์ 2 ชนิด คือ bis(diisopropyl) thiophosphoryl trisulfide (DIPTRI) และ bis(diisopropyl) thiophosphoryl tetrasulfide (DIPTET) พบว่าเมื่อจำนวนซัลเฟอร์เพิ่มขึ้น อัตราและระดับการวัลคาไนซ์ยางเบลนด์เพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและการทนต่อน้ำมันของยางเบลนด์ยางคาร์บอกรีลไนไตรด์กับยางธรรมชาติ จากผลงานวิจัยเบื้องต้นชี้ให้เห็นว่าการใช้ยาง NR และ ยาง XNBR ร่วมกันจำเป็นต้องอาศัยสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้เพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างเฟสยางทั้งสอง ดังนั้นการเพิ่มความเข้ากันได้ในกลุ่มยางเบลนด์นี้สามารถทำได้โดยเลือกใช้ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ซึ่งมีส่วนของหมู่วงไวอิพอกไซด์ที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับหมู่กรดของยาง XNBR (Alex *et al.*, 1991) และสายโซ่หลักของโมเลกุลของยางธรรมชาติอิพอกไซด์มีโครงสร้างที่คล้ายกับยางธรรมชาติ จึงคาดว่าส่งผลให้ความเข้ากันได้ของยาง NR และยาง XNBR เพิ่มขึ้น และจะเพิ่มสมบัติของยางเบลนด์ โดยเฉพาะสมบัติเชิงกล นอกจากนี้การศึกษาค้นคว้าของ Alex *et al.* ได้กล่าวถึงการศึกษาผลของการใช้สารตัวเติมเช่น ซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตร่วมกับยางเบลนด์ชนิดนี้เป็นแนวทางเพิ่มเติมในการปรับปรุงสมบัติวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงกล โดยจากรายงานวิจัยของ Alex *et al.* ในปี 1991 ได้กล่าวว่าการเติมสารตัวเติมเช่น 2 เกรด ได้แก่ ISAF และ SRF และซิลิกา เกรด Vulcanis S ต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ และสมบัติเชิงกลของเบลนด์ ENR/neoprene/XNBR ผลการศึกษาพบว่าสมบัติวัลคาไนซ์ และเชิงกลขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของยางแต่ละชนิดและชนิดของสารตัวเติมที่ใช้ แต่อย่างไรก็ตามสมบัติเทนไซล์ การเซตตัวเนื่องจากการกดอัด (compression set) และการต้านทานต่อการสึกหรอของเบลนด์ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับเบลนด์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม Chakraborty and DE (1983) ได้ศึกษาผลของการเติมเช่นค่าต่อสมบัติและรูปแบบการวิบัติ (failure modes) ของยาง XNBR ซึ่งใช้ระบบวัลคาไนซ์ชนิดใช้กำมะถันและใช้เปอร์ออกไซด์ เมื่อเติมเช่นค่าปริมาณต่างๆ ลงในยาง XNBR พบว่าสมบัติเชิงกลของยางเด่นขึ้น โดยการเติมเช่นค่าในปริมาณน้อยๆ จะให้สมบัติของยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบต่างๆ แตกต่างกันอย่างชัดเจน แต่ในกรณีที่มีการเติมเช่นค่าในปริมาณมากขึ้น พบว่าสมบัติของยางวัลคาไนซ์ด้วยระบบวัลคาไนซ์แบบกำมะถันและเปอร์ออกไซด์ไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากผลของการเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางและสารตัวเติมเด่นมากกว่าผลของการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลยาง ดังนั้นผลจากงานวิจัยนี้จะให้สูตรยางเบลนด์ที่เหมาะสมต่อการเอ็กซ์ทรูดที่ทนน้ำมันและความร้อน ซึ่งมีสมบัติเชิงกลและความทนทานต่อการใช้ และมีความเป็นไปได้ในการนำผลงานวิจัยจากการศึกษานี้ไปประยุกต์ใช้ต่อการผลิตท่อทนน้ำมันหรือผลิตภัณฑ์ที่ทนน้ำมันและความร้อนจากยางเบลนด์นี้เข้าสู่ระดับอุตสาหกรรมต่อไป

## 4. วิธีการ

### 4.1 การเตรียมยางธรรมชาติ

นำยางแผ่นรมควันชั้น 3 (Ribbed smoked sheet 3) ซึ่งผลิตโดยกลุ่มเกษตรกรกรรควนปิ่นเต ตำบลควนขนุน จังหวัดพัทลุงมาบดผ่านลูกกลิ้ง 70 รอบ ที่อุณหภูมิห้องเพื่อลดน้ำหนักโมเลกุลของยาง ให้มีความหนืดมูนนี้ที่ 100 องศาเซลเซียส (ML<sub>1-4</sub>, 100) เท่ากับ 40-46 ก่อนที่จะนำไปเบลนด์ร่วมกับยาง XNBR (เกรด Nipol NX775

ประกอบด้วยส่วนที่เป็นอะคริโลไนไตรล์ของบิวตาไดอีนประมาณ 26.15 เปอร์เซ็นต์โมล และมีหมู่กรดคาร์บอกซิลิก 7 เปอร์เซ็นต์โมล มีค่าความหนืดมูนี่ ML<sub>1-4</sub> ที่ 100 °C เท่ากับ 44-46 และมีความถ่วงจำเพาะ 0.98 ผลิตโดยบริษัท Zeon ประเทศญี่ปุ่น)

## 4.2 การเตรียมและการศึกษาสมบัติเบลนด์ของยางธรรมชาติกับยางไนไตรล์คาร์บอกซิเลต (NR/XNBR)

### 4.2.1 ศึกษาผลของสัดส่วนเบลนด์ต่อสมบัติของยางเบลนด์ NR/XNBR

เตรียมคอมเปาวด์ของยาง NR, XNBR และยางเบลนด์ NR/XNBR ที่อัตราส่วนการเบลนด์ NR/XNBR เท่ากับ 75/25, 50/50 และ 25/75 ส่วนโดยน้ำหนักตามสูตรในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สูตรคอมเปาวด์ของยางเบลนด์ NR/XNBR ในระบบวัลคาไนซ์แบบ Semi-EV

สารเคมี	ปริมาณ (phr)				
NR	100	75	50	25	0
XNBR	0	25	50	75	100
ZnO	5	5	5	5	5
Stearic acid	1	1	1	1	1
TMTD	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Sulphur	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2

การเตรียมยางคอมเปาวด์ของยางธรรมชาติหรือคอมเปาวด์ของยางไนไตรล์คาร์บอกซิเลต เริ่มจากนำยางจากขั้นตอนที่ 4.1 ที่ผ่านการพักทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10-15 นาที มาผสมกับสารเคมีด้วยเครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง โดยใช้ขั้นตอนการผสมดังนี้ คือ บดยาง NR หรือ XNBR ให้พ่นลูกกลิ้ง 3 นาที ที่อุณหภูมิห้อง ใส่ Sulphur บดผสมเป็นเวลา 10 นาที ผ่านยางทางปลาย 5 รอบ แล้วพักยางทิ้งไว้ 10 นาที นำยางมาบดให้พ่นลูกกลิ้ง 1 นาที ใส่ Stearic acid บดผสมเป็นเวลา 2 นาที ใส่สารตัวเร่ง TMTD บดผสมเป็นเวลา 3 นาที ใส่ ZnO บดผสมเป็นเวลา 10 นาที ผ่านยางทางปลาย 5 รอบ ก่อนที่จะออกแผ่นตามความหนาที่ต้องการ สำหรับการเตรียมยางคอมเปาวด์ของเบลนด์เริ่มจากบดยาง XNBR ให้พ่นลูกกลิ้ง 3 นาที ใส่ Sulphur บดผสมเป็นเวลา 10 นาที ผ่านยางทางปลาย 5 รอบ พักยางทิ้งไว้ 10 นาที ที่อุณหภูมิห้อง นำยาง NR ที่ลดน้ำหนักโมเลกุลมาบดผสมกับยาง XNBR ให้พ่นลูกกลิ้งเป็นเวลา 1 นาที ใส่ Stearic acid บดผสมเป็นเวลา 2 นาที ใส่สารตัวเร่งผสมเป็นเวลา 3 นาที ใส่ ZnO ผสมเป็นเวลา 10 นาที (ถ้ามีสารตัวเติม ก็ให้เติมหลังจากเติม stearic acid แล้ว โดยบดผสมสารตัวเติมกับยางเบลนด์เป็นเวลา 5 นาที) แล้วผ่านยางทางด้านปลาย 5 ครั้ง ก่อนออกแผ่นตามความหนาที่ต้องการ นำคอมเปาวด์ NR, XNBR และยางเบลนด์ NR/XNBR เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง ODR 2000 ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส จากนั้นอัดเข้าด้วยเครื่องอัดไฮโดรลิก โดยใช้เวลาการอัดเข้าจากการทดสอบด้วยเครื่อง ODR 2000 นำแผ่นยางที่อัดเข้าตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาตัดชิ้น

ทดสอบเพื่อศึกษาสมบัติเทนไซล์ตามมาตรฐาน ASTM D412-98a สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาดตามมาตรฐาน ASTM D624-98 สมบัติความต้านทานต่อการบ่มแรงตามมาตรฐาน ASTM D412-51T ความต้านทานต่อการบวมพองตามมาตรฐาน ASTM D 573-81 และความเข้ากันได้โดยการศึกษาสมบัติพลวัตเชิงกลด้วยเทคนิค DMTA และ SEM

#### 4.2.2 ศึกษาผลของสารตัวเร่งและปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อสมบัติของยางเบลนด์ NR/XNBR

ในขั้นตอนการศึกษานี้เลือกใช้สัดส่วนเบลนด์ที่เหมาะสมจากการศึกษาสัดส่วนเบลนด์ในขั้นตอนที่ 4.2.1 เพื่อศึกษาผลของสารตัวเร่งและซิงค์ออกไซด์ต่อสมบัติของยางเบลนด์ โดยบุคคลสมยาง NR และ XNBR และเติม sulphur, ZnO, Stearic acid และสารตัวเร่งชนิดต่างๆ ได้แก่ ทีเอ็มทีดี (TMTD), ซิบีเอส (CBS) และเอ็มบีทีเอส (MBTS) ตามสูตรในตารางที่ 4.2 และวิธีการตามขั้นตอนในหัวข้อที่ 4.2.1

ตารางที่ 4.2 สูตรคอมเปาวด์ของยางเบลนด์ NR/XNBR ซึ่งแปรชนิดสารตัวเร่ง คือ TMTD, CBS และ MBTS ในระบบวัลคาไนซ์แบบ Semi-EV

สารเคมี	ปริมาณ (phr)					
NR/XNBR	100	100	100	100	100	100
ZnO	5	5	5	5	5	10
Stearic acid	1	1	1	1	1	1
TMTD	1.5	-	-	0.5	0.5	0.5
CBS	-	1.5	-	1.0	-	1.0
MBTS	-	-	1.5	-	1.0	-
Sulphur	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2

จากนั้นนำคอมเปาวด์ NR/XNBR ไปหาสมบัติการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง ODR 2000 ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส อัตราส่วนผสมด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกเพื่อเตรียมชิ้นทดสอบ แล้วจึงทดสอบสมบัติต่างๆ เพื่อหาสารตัวเร่งและปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับการเบลนด์ยาง NR และ XNBR ในหัวข้อต่อไป

#### 4.2.3 ศึกษาผลของสารเพิ่มความเข้ากันได้ต่อสมบัติของยางเบลนด์ NR/XNBR

เตรียมคอมเปาวด์ของยางเบลนด์ NR/XNBR โดยเลือกใช้สัดส่วนเบลนด์ สารตัวเร่งและซิงค์ออกไซด์ที่เหมาะสมจากขั้นตอนการศึกษาที่ 4.2.1 – 4.2.2 และเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ 2 ชนิด คือ ขงธรรมชาติ อีพอกไซด์ที่มีหมู่อีพอกไซด์ 25 และ 50 เปอร์เซนต์โมล (Epoxyprene®25 และ Epoxyprene®50) ในปริมาณ 0.5 และ 1 phr ตามตารางที่ 4.3 และขั้นตอนการผสมตามวิธีการที่ให้รายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1 โดยนำสารเพิ่มความเข้ากันได้บดผสมพร้อมกับการบดผสมยาง NR และยาง XNBR ด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง

ตารางที่ 4.3 สูตรคอมเปาวด์ของยางเบลนค์ NR/XNBR ซึ่งใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีหมู่อีพอกไซด์ 25 และ 50 เปอร์เซนต์โมล (Epoxyprene<sup>®</sup> 25 และ Epoxyprene<sup>®</sup> 50) เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้

สารเคมี	ปริมาณ (phr)	
NR/XNBR	100	100
Epoxyprene <sup>®</sup> 25	0.5 และ 1	-
Epoxyprene <sup>®</sup> 50	-	0.5 และ 1
ZnO	10	10
Stearic acid	1	1
CBS+TMTD	1.5	1.5
Sulphur	1.2	1.2

เตรียมชั้นทดสอบยางเบลนค์ตามวิธีการในหัวข้อที่ 4.2.1 นำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ เพื่อหาชนิดและปริมาณของสารเพิ่มความเข้ากันได้ที่เหมาะสมสำหรับยางเบลนค์ NR และ XNBR ในหัวข้อต่อไป

#### 4.2.4 ศึกษาผลของสารตัวเติมต่อสมบัติของยางเบลนค์ NR/XNBR

เตรียมคอมเปาวด์ของยางเบลนค์ระหว่าง NR/XNBR ใช้สูตรที่เหมาะสมจากการศึกษาจากหัวข้อที่ 4.2.1 – 4.2.3 และแปรชนิดสารตัวเติม คือ เขม่าดำ ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต ตามตารางที่ 4.4 และใช้ขั้นตอนการบดผสมตามระเอียดที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1

ตารางที่ 4.4 สูตรคอมเปาวด์ของยางเบลนค์ NR/XNBR ที่ผสมสารตัวเติม เขม่าดำ ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต

สารเคมี	ปริมาณ (phr)		
NR/XNBR	100	100	100
Compatibilizer	0.5	0.5	0.5
ZnO	10	10	10
Stearic acid	1	1	1
N 220	30	-	-
Silica	-	30	-
CaCO <sub>3</sub>	-	-	30
CBS+TMTD	1.5	1.5	1.5
Sulphur	1.2	1.2	1.2

อัดเบ้ายางเบลนค์ และเตรียมชั้นทดสอบก่อนนำไปศึกษาสมบัติต่างๆ เพื่อหาชนิดของสารตัวเติมที่เหมาะสมสำหรับยางเบลนค์ NR และ XNBR หลังจากนั้นเตรียมคอมเปาวด์โดยใช้สูตรเช่นเดียวกับตารางที่ 4.4 โดยเลือก

ใช้สารตัวเติมที่เหมาะสมซึ่งได้จากการศึกษาขั้นต้นและบดผสมกับยางเบลนค์ในปริมาณต่างๆ คือ 15, 30 และ 45 phr ทดสอบสมบัติต่างๆ ของยางเบลนค์ที่ได้ เพื่อหาปริมาณของสารตัวเติมที่เหมาะสมการเบลนค์ต่อไป

#### 4.2.5 ศึกษาผลของอุณหภูมิและความเร็วของสกรูที่มีผลต่อการขึ้นรูปท่อยางเบลนค์ NR/XNBR

เตรียมคอมเปาวด์จากสูตรที่เหมาะสมซึ่งได้จากการศึกษาดังแต่ขั้นตอนที่ 4.2.1 – 4.2.4 จากนั้นนำคอมเปาวด์ไปเอกซ์ทรูดผ่านเครื่อง Cold feed single-screw extruder โดยตั้งอุณหภูมิของสกรูเท่ากับ 80°C และทำการเอกซ์ทรูดท่อยางคอมเปาวด์ที่ความเร็วต่างๆ คือ 30, 40 และ 50 รอบต่อนาที และที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 80, 90 และ 100°C พร้อมทั้งวัดขนาดของท่อยางที่เอกซ์ทรูดได้มาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การบวมพอง (die swell, %) และสังเกตลักษณะผิวของท่อยาง NR/XNBR

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์บวมพอง (Die swell, %)

$$\text{Die swell (\%)} = \frac{(D - D_0) \times 100}{D_0}$$

เมื่อ D = เส้นผ่านศูนย์กลางของยาง extrudate (มิลลิเมตร)

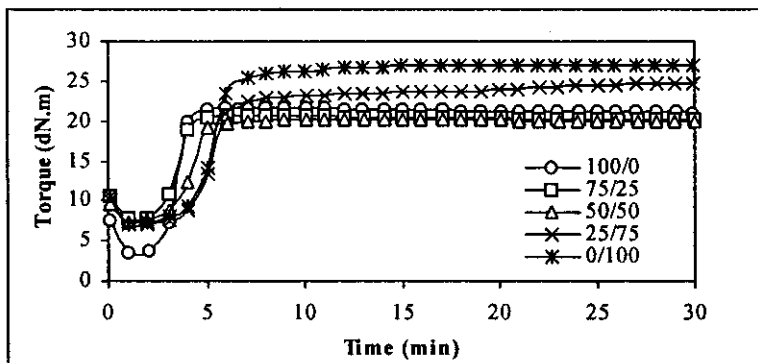
D<sub>0</sub> = เส้นผ่านศูนย์กลางของ die (มิลลิเมตร)

### 5. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

#### 5.1 อิทธิพลของสัดส่วนเบลนค์ระหว่างยางธรรมชาติ (NR) กับยางไนไตรล์คาร์บอซิมิต (XNBR) ต่อสมบัติของยางเบลนค์

##### 5.1.1 สมบัติวัลคาไนซ์ (Cure characteristics)

พฤติกรรมและสมบัติการวัลคาไนซ์ของคอมเปาวด์ยางเบลนค์ NR/XNBR แสดงตามรูปที่ 5.1 และตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลนค์ NR/XNBR ที่สัดส่วน 100/0, 75/25, 50/50, 25/75 และ 0/100 ส่วน โดยน้ำหนัก ทดสอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง ODR 2000

กราฟในรูปที่ 5.1 แสดงลักษณะการวัดคาบของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วนต่าง ๆ ใช้กำมะถันเป็นสารวัดคาบในในระบบวัดคาบแบบ semi-EV และใช้สารตัวเร่งในกลุ่มไทยูเรม คือ TMTD จากรูปพบว่ายาง NR (สัดส่วน 100/0 ส่วนโดยน้ำหนัก) ให้กราฟการวัดคาบเป็นแบบ reversion ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อทำการวัดคาบในเวลาที่กำหนดจะทำให้เกิดการตัดสายโซ่ของโมเลกุลยาง ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในยางธรรมชาติโดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง และอาจเกิดจากการสลายพันธะซัลเฟอร์ที่เชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล (Varghese et al., 1994) ซึ่งในระบบวัดคาบแบบ semi-EV จะให้การเชื่อมโยงแบบ โมโนซัลฟิดิกและไดซัลฟิดิกเป็นส่วนใหญ่ แต่ก็จะมีส่วนที่เชื่อมโยงแบบพอลิซัลฟิดิกซึ่งพันธะดังกล่าวมีพลังงานของพันธะต่ำไม่ทนต่อความร้อน ผลทั้งสองประการทำให้มีลักษณะกราฟการวัดคาบเป็นแบบ reversion ในกรณียาง XNBR (ที่สัดส่วน = 0/100 ส่วนโดยน้ำหนัก) พบว่ากราฟการวัดคาบเป็นแบบ marching แสดงถึงการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นตามเวลาการวัดคาบ ซึ่งลักษณะกราฟดังกล่าวจะบ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานต่อความร้อนดีกว่ากราฟแบบ reversion เมื่อพิจารณาที่สัดส่วนเบลนด์ต่างๆ พบว่า กราฟการวัดคาบของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วนเบลนด์ 75/25 และ 50/50 ส่วนโดยน้ำหนัก จะให้กราฟแบบ reversion เนื่องจากในเบลนด์มีปริมาณยาง NR สูง แต่กราฟการวัดคาบของเบลนด์ 27/75 ส่วนโดยน้ำหนัก เป็นแบบ marching เพราะมีสัดส่วนโดยน้ำหนักของยาง XNBR สูงกว่า แสดงว่าการให้ความร้อนที่นานขึ้นแก่เบลนด์ (NR/XNBR) 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก ส่งผลให้การเชื่อมโยงเกิดได้มากขึ้นและความต้านทานต่อความร้อนดีกว่าสัดส่วนเบลนด์อื่นๆ ผลการทดสอบสมบัติวัดคาบของยาง NR/XNBR ที่สัดส่วนเบลนด์ต่างๆ สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 5.1 ซึ่งได้แก่ เวลาสกอช ( $t_s$ ) เวลาวัดคาบ ( $t_{c90}$ ) ค่าทอร์กต่ำสุด ( $M_L$ ) และสูงสุด ( $M_H$ ) และความแตกต่างของค่าทอร์กสูงสุดและต่ำสุด ( $M_H - M_L$ )

ตารางที่ 5.1 สมบัติวัดคาบของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วน 100/0, 75/25, 50/50, 25/75 และ 0/100 ส่วนโดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง ODR 2000

NR/XNBR (% wt/wt)	$t_s$ (min)	$t_{c90}$ (min)	$M_L$ (dN.m)	$M_H$ (dN.m)	$M_H - M_L$ (dN.m)
100/0	2.35	4.50	3.18	21.76	18.58
75/25	2.59	4.50	7.77	20.67	13.90
50/50	2.82	5.00	7.31	20.14	12.83
25/75	3.43	8.50	6.95	24.77	17.82
0/100	3.05	7.00	7.01	27.08	20.07

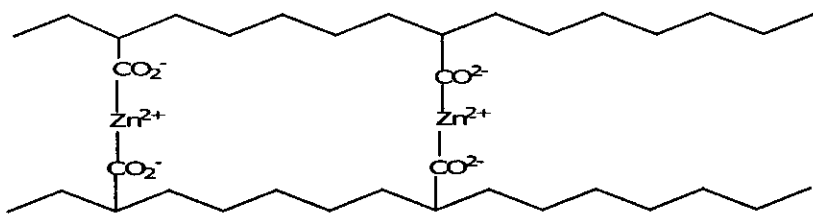
เวลาสกอช คือระยะเวลาเริ่มต้นของการวัดคาบและบ่งบอกถึงความปลอดภัยในการขึ้นรูปยาง เวลาวัดคาบใน คือเวลาที่ใช้ในการอบยางให้สุกเพื่อให้ได้สมบัติการใช้งานที่เหมาะสม ค่าทอร์กต่ำสุดบ่งบอกถึงความหนืดของยางคอมปาวด์ ค่าทอร์กสูงสุดบ่งบอกถึงโมดูลัสหรือความแข็งของยาง สำหรับความแตกต่างของค่าทอร์กสูงสุดและต่ำสุดจะสัมพันธ์กับระดับการวัดคาบหรือระดับการเกิดพันธะเชื่อมโยง จากตารางพบว่า ยาง NR มีค่าเวลาสกอชและเวลาวัดคาบต่ำกว่ายาง XNBR และยางเบลนด์ เพราะว่าในยางธรรมชาติมีพันธะคู่ที่ว่องไวทำให้



เกิดการวัลคาไนซ์แบบใช้ซัลเฟอร์ได้อย่างรวดเร็ว เมื่อพิจารณาจาก XNBR ซึ่งมีค่าเวลาสกอชและวัลคาไนซ์ค่อนข้างสูง และสูงกว่ายาง NR เป็นเพราะว่ายาง XNBR มีส่วนที่เป็นพันธะคู่ในปริมาณที่น้อยกว่ายาง NR และมีส่วนที่เป็นหมู่กรดในโครงสร้างโมเลกุลซึ่งเป็นตัวหน่วงให้เวลาการวัลคาไนซ์เกิดช้าลง อีกทั้งซัลเฟอร์จะกระจายตัวในยาง XNBR ได้น้อยกว่ายาง NR ด้วยเหตุผลดังกล่าวส่งผลให้ต้องใช้เวลานานขึ้นในการอบยางให้สุก เมื่อพิจารณาที่สัดส่วน เบลนด์ต่างๆ พบว่า ค่าเวลาสกอชและเวลาวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของยาง XNBR และที่สัดส่วนเบลนด์ (NR/XNBR) 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก จะให้เวลาสกอชและเวลาวัลคาไนซ์นานที่สุดเมื่อเทียบกับสัดส่วนเบลนด์อื่น

เมื่อพิจารณาค่าทอร์คต่ำสุด ( $M_L$ ) ของยาง NR พบว่า ยาง NR มีค่า  $M_L$  (3.18 dN.m) น้อยกว่ายาง XNBR ซึ่งมีค่า  $M_L$  เท่ากับ 7.01 dN.m ค่า  $M_L$  สามารถบ่งบอกถึงความยากง่ายในการแปรรูปซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นว่ายาง XNBR มีความหนืดมากกว่ายาง NR และจะแปรรูปยากกว่ายาง NR และเมื่อพิจารณาที่สัดส่วนเบลนด์ต่างๆ พบว่า ค่าทอร์คต่ำสุดจะไม่ขึ้นอยู่กัสัดส่วนเบลนด์ เมื่อพิจารณาค่าทอร์คสูงสุด ( $M_H$ ) พบว่ายาง NR จะมีค่าทอร์คสูงสุดอยู่ที่ 21.76 dN.m ซึ่งจะน้อยกว่ายาง XNBR ที่มีค่า  $M_H$  เท่ากับ 27.08 dN.m และเมื่อพิจารณาที่สัดส่วนเบลนด์ต่างๆ จะพบว่า ค่า  $M_H$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนเบลนด์ของยาง XNBR

เมื่อพิจารณาความแตกต่างของค่าทอร์คสูงสุดและต่ำสุด ( $M_H - M_L$ ) พบว่า ยาง NR จะมีค่า  $M_H - M_L$  เท่ากับ 18.59 dN.m ซึ่งต่ำกว่ายาง XNBR ซึ่งเท่ากับ 20.07 dN.m จากรายงานวิจัยของ Naskar และคณะ (1994) ได้อธิบายว่า ค่าทอร์คสูงสุดของยาง XNBR ที่วัลคาไนซ์ด้วย TMTD มากกว่ากรีนิของยาง NR เนื่องจากหมู่คาร์บอกซิลิกในโครงสร้างของยาง XNBR สามารถเกิดอันตรกิริยากับซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงแบบพันธะไอออนิก ซึ่งทำให้ระดับการเชื่อมโยงพันธะเพิ่มสูงขึ้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอาจจะแสดงตามรูปที่ 5.2



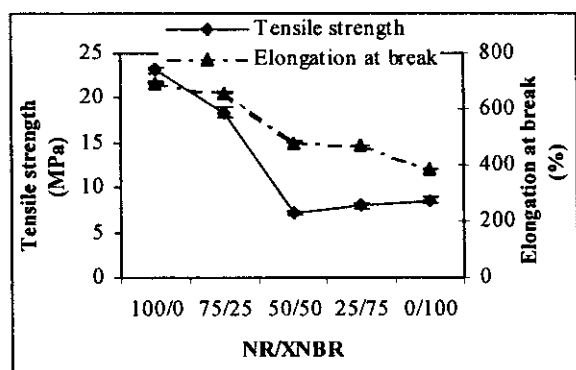
รูปที่ 5.2 พันธะเชื่อมโยงแบบไอออนิกระหว่างยางไนไตรล์คาร์บอกซิเลตกับซิงค์ออกไซด์

### 5.1.2 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

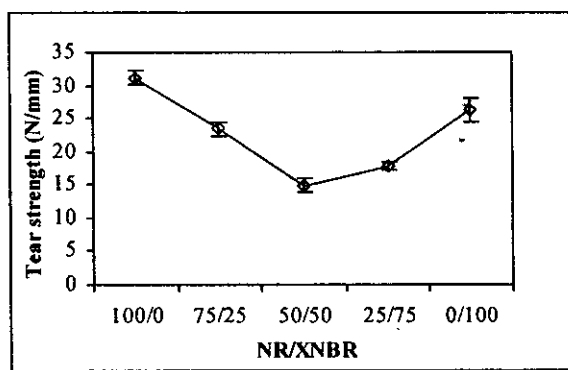
ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) ความสามารถในการยืดขาด (elongation at break) และความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear strength) ก่อน-หลังการบ่มเร่งของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วนเบลนด์ต่างๆ แสดงตามตารางที่ 5.2 และรูปที่ 5.3

ตารางที่ 5.2 สมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วนเบลนด์ต่างๆ ก่อน-หลังการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งใช้ระบบวัลคาไนซ์แบบ semi-EV

NR/XNBR (% wt/wt)	Tensile strength (MPa)			Elongation at break (%)			Tear strength (N/mm)
	Before	After	Retention (%)	Before	After	Retention (%)	
100/0	23.14±0.27	15.79±0.04	68.24	694.33±3.21	571.25±6.08	82.27	31.22±0.94
75/25	18.37±0.57	14.31±0.31	77.90	660.33±3.51	557.33±2.52	84.40	23.42±1.16
50/50	7.21±0.21	6.02±0.31	83.50	481.33±3.51	422.67±2.52	87.81	14.93±1.12
25/75	7.98±0.31	8.15±0.25	107.80	470.00±2.65	422.33±2.52	89.86	17.68±0.60
0/100	8.59±0.34	12.63±1.00	147.03	384.17±1.26	358.67±3.79	93.36	26.24±2.94



(a)



(b)

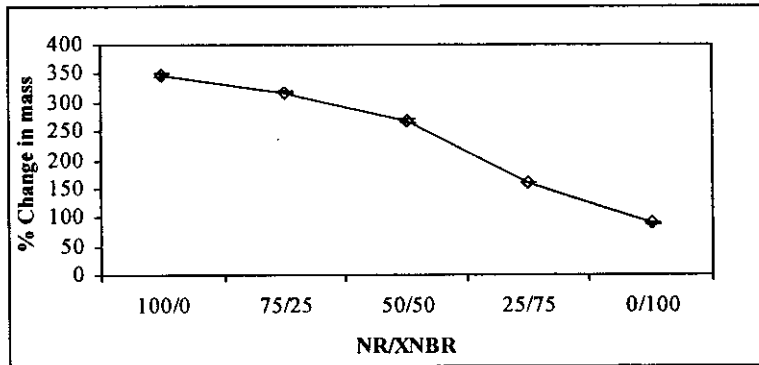
รูปที่ 5.3 กราฟแสดง (a) ความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) และความสามารถในการยืดขาด (Elongation at break) และ (b) ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วนเบลนด์ต่างๆ

จากตารางที่ 5.2 และกราฟในรูปที่ 5.3 จะพบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดขาด ความต้านทานต่อฉีกขาดของยาง NR จะอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างสูงและสูงกว่ายาง XNBR ถึงแม้ว่ายาง XNBR จะมีระดับการเชื่อมโยงซึ่งพิจารณาจากค่า  $M_H - M_L$  มากกว่ายาง NR ก็ตาม เนื่องจากยาง NR สามารถตกผลึกขณะดึงยืด ทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นเมื่อถูกดึง ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะตัวของยาง NR ส่วนยาง XNBR ไม่สามารถตกผลึกเมื่อถูกดึงยืด และเมื่อพิจารณาที่สัดส่วนเบลนด์ต่างๆ จะพบว่า สมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วนเบลนด์ต่างๆ จะแสดงแนวโน้มที่ลดลงตามปริมาณของยาง XNBR ที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงด้วยความร้อน จะพบว่าเบลนด์แสดงสมบัติเชิงกลที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้หลังการบ่มแรง แต่ค่าร้อยละการกลับคืนสมบัติเดิม (%) ของยางเบลนด์ NR/XNBR (ตารางที่ 5.2) โดยเฉพาะค่าร้อยละการกลับคืนสมบัติเดิมของค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดขาดจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของยาง XNBR โดยเฉพาะในกรณียาง XNBR มากกว่า 50 ส่วนโดยน้ำหนัก ค่าร้อยละการกลับคืนสมบัติเดิมของค่าความต้านทานแรงดึงมากกว่า 100% ซึ่งอาจเป็นเพราะว่ายาง XNBR เกิดการเชื่อมโยงต่อได้อีกในขณะที่ถูกบ่มแรงด้วยความร้อน อันเนื่องจากยางเบลนด์มีพฤติกรรมการวัลคาไนซ์แบบ Marching (รูปที่ 5.1) ดังนั้นแนวโน้มของการรักษาสมบัติเดิมหลังบ่มแรงจึง

สูงขึ้นตามปริมาณของยาง XNBR ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าความต้านทานต่อความร้อนของยางเบลนด์จะ  
เด่นขึ้นตามปริมาณของยาง XNBR

### 5.1.3 สมบัติความต้านทานต่อการบวมพอง (Swelling resistance)

ผลการศึกษาความสามารถในการต้านทานต่อการบวมพองในตัวทำละลายผสมไอโซออกเทนกับทูลอีนด้วย  
อัตราส่วน 70/30 ส่วนโดยปริมาตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วนเบ  
ลนด์ต่างๆ แสดงตามรูปที่ 5.4

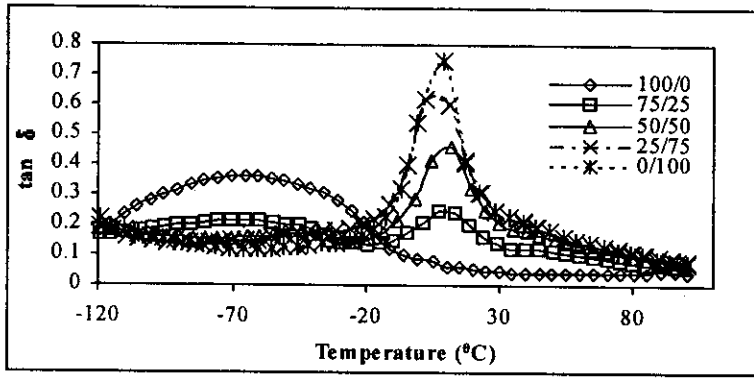


รูปที่ 5.4 ความต้านทานต่อการบวมพองของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วนเบลนด์ต่างๆ ในตัวทำละลายผสมไอ  
โซออกเทนกับทูลอีนด้วยอัตราส่วน 70/30 ส่วน โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง

จากรูปที่ 5.4 จะพบว่าเมื่อปริมาณของยาง XNBR เพิ่มขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์ของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของยาง  
เบลนด์ลดลง ซึ่งแสดงถึงความต้านทานต่อการบวมพองในตัวทำละลายดีขึ้น เนื่องจากยาง XNBR เป็นยางที่มีหมู่  
ของอะคริโลไนไตรล์ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้ยาง XNBR มีความต้านทานต่อการบวมพองในตัวทำละลายไม่มีสภาพขั้ว  
และน้ำมัน ประกอบกับยาง XNBR มีการเพิ่มหมู่กรดคาร์บอกซิลิกเข้าไปในโครงสร้างจึงทำให้อังมีความต้านทาน  
ต่อการบวมพองมากขึ้นอีก ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วน 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก  
จะมีความสามารถในการต้านทานต่อการบวมพองในตัวทำละลายผสมไอโซออกเทนกับทูลอีน มากที่สุดเมื่อ  
เทียบกับเบลนด์ที่สัดส่วนอื่น

### 5.1.4 อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของยางเบลนด์ NR/XNBR

ผลการทดสอบยางเบลนด์ NR/XNBR ด้วยเทคนิค DMTA เพื่อวิเคราะห์อุณหภูมิกลาส ทรานซิชันของยางเบ  
ลนด์ที่สัดส่วนเบลนด์ต่างๆ แสดงตามรูปที่ 5.5 และสรุปผลการทดสอบตามตารางที่ 5.3



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแทนเจนต์สูญเสีย ( $\tan \delta$ ) และอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วนเบลนด์ต่างๆ

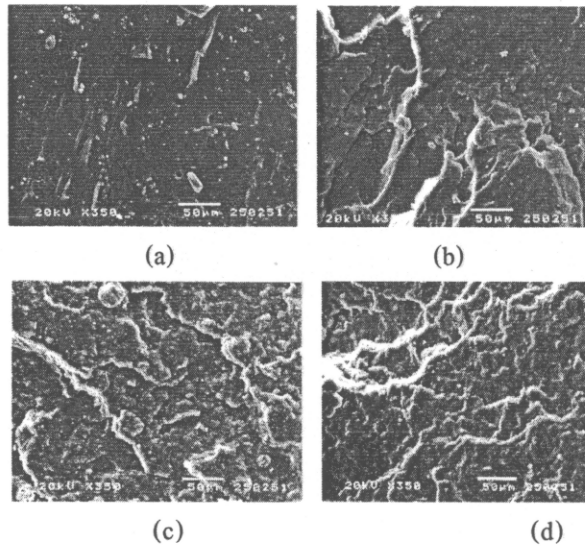
ตารางที่ 5.3 ค่า  $T_{g1}$  และ  $T_{g2}$  ของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วนเบลนด์ต่างๆ

NR/XNBR (%)	$T_{g1}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)
100/0	-70.63	-
75/25	-64.96	8.02
50/50	-44.28	12.62
25/75	-41.54	2.37
0/100	-	9.21

จากรูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแทนเจนต์สูญเสีย ( $\tan \delta$ ) กับอุณหภูมิทดสอบตั้งแต่ -120 ถึง 100°C ของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วนต่างๆ จากกราฟที่ได้จะเห็นว่าอุณหภูมิที่ค่าแทนเจนต์สูญเสียมีค่าสูงสุดแสดงถึงอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะจากคล้ายแก้วเป็นแบบยืดหยุ่นคล้ายยางหรืออุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature,  $T_g$ ) พิจารณายาง NR และยาง XNBR พบว่ามี  $T_g$  เพียงค่าเดียว คือ ที่ประมาณ -70.63 และ 9.2°C ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาเบลนด์ที่สัดส่วนเบลนด์ต่างๆ พบว่ายางเบลนด์จะแสดงอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน 2 ช่วง คือ ที่อุณหภูมิต่ำ (low glass transition temperature,  $T_{g1}$ ) ซึ่งปรากฏอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของยาง NR และที่อุณหภูมิสูง (high glass transition temperature,  $T_{g2}$ ) ซึ่งจะใกล้เคียงกับอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของยาง XNBR (ตารางที่ 5.3) แสดงให้เห็นว่ายางเบลนด์ประกอบไปด้วยยาง NR และยาง XNBR ที่แยกเฟสออกจากกันหรือกล่าวได้ว่า ยางเบลนด์ของยาง NR และยาง XNBR ที่สัดส่วนเบลนด์ต่างๆ มีความไม่เข้ากันเกิดขึ้น (immiscible blend) เนื่องจากยางทั้งสองชนิดมีสภาพขั้วที่แตกต่างกัน โดยที่ยาง NR เป็นยางที่ไม่มีโครงสร้างเป็นไฮโดรคาร์บอนล้วนๆ ในขณะที่ยาง XNBR จะมีหมู่ฟังก์ชัน -COOH และหมู่อะคริโลไนไตรล์ (-CN) เป็นผลให้ยางทั้งสองชนิดผสมเข้ากันได้บ้าง ซึ่งจะส่งผลให้เบลนด์มีสมบัติที่ด้อยกว่าสมบัติของยางที่นำมาเบลนด์ ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ผลการทดสอบ DMTA ที่ได้สนับสนุนผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ซึ่งด้อยกว่าสมบัติเชิงกลของยาง NR และยาง XNBR

### 5.1.5 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology)

ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของผิวรอยแตกหักของยาง NR ยาง XNBR และยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วน 50/50 และ 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก แสดงตามรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผิวรอยแตกหักของ (a) ยาง NR (b) ยาง XNBR และยางเบลนด์ ระหว่างยาง NR/XNBR ที่สัดส่วน (c) 50/50 ส่วนโดยน้ำหนัก และ (d) 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก

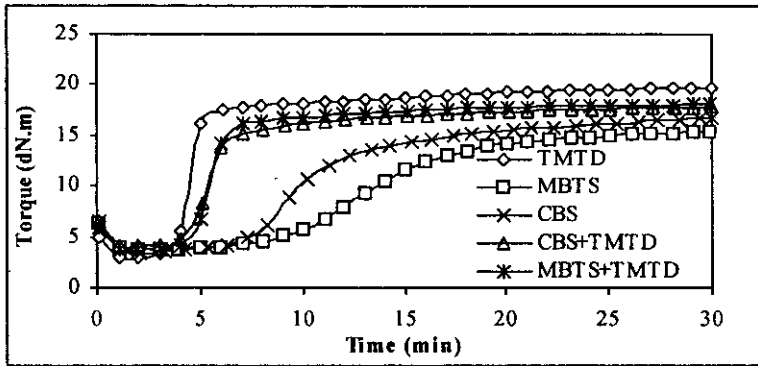
จากรูปที่ 5.6 ซึ่งแสดงถึงผิวรอยแตกหักของยาง NR ยาง XNBR และยางเบลนด์ NR/XNBR จะพบว่า ยาง NR (รูปที่ 5.6 (a)) และยาง XNBR (รูปที่ 5.6 (b)) จะมีผิวรอยแตกที่ค่อนข้างเรียบและเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วน 50/50 และ 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก จะแสดงผิวรอยหักที่หยาบและไม่สม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งจะสังเกตเห็นการกระจายของอนุภาคยางบนผิวของยางเบลนด์ได้จากรูปที่ 5.6 (c) และ (d) ตามลำดับ ผลจากการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าในการผสมยาง NR และยาง XNBR มีความไม่เข้ากันเกิดขึ้นและผลการทดลองที่ได้สนับสนุนการแยกเฟสของยาง NR และยาง XNBR ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DMTA

ดังนั้นจากผลการศึกษาสัดส่วนเบลนด์ต่างๆ ของยาง NR/XNBR ต่อสมบัติของยางเบลนด์ พบว่า ยางเบลนด์มีเวลาสกออกและเวลาวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของ XNBR ค่าทอร์คต่ำสุดจะไม่ขึ้นอยู่กับสัดส่วนเบลนด์ แต่ค่าทอร์คสูงสุดจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของยาง XNBR ที่เพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดขาดและความต้านทานต่อการฉีกขาดจะลดลงตามปริมาณของยาง XNBR สมบัติความต้านทานต่อการบวมแรงและความต้านทานต่อการบวมพองจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนโดยน้ำหนักของยาง XNBR และจากผลการทดสอบด้วยเทคนิค DMTA และ SEM แสดงให้เห็นว่ายางเบลนด์ NR/XNBR มีความไม่เข้ากันเกิดขึ้น ดังนั้นจากผลการศึกษาที่ผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้ยางเบลนด์ที่สัดส่วน 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก ซึ่งมีสมบัติวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงกลอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้และมีความต้านทานต่อความร้อนและการบวมพองในตัวทำละลายไม่มีขั้วดีที่สุด

## 5.2 อิทธิพลของสารตัวเร่งชนิดต่างๆ และปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อสมบัติของยางเบลนด์ NR/XNBR

### 5.2.1 สมบัติวัลคาไนซ์ (Cure characteristics)

พฤติกรรมการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์ NR/XNBR ที่สัดส่วน 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก แสดงตามรูปที่ 5.7 และตารางที่ 5.4



รูปที่ 5.7 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วน 25/75 ส่วน โดยน้ำหนัก ซึ่งใช้สารตัวเร่งชนิดต่างๆ ทดสอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง ODR 2000

ตารางที่ 5.4 สมบัติวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วนเบลนด์ 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก ที่ใช้สารตัวเร่งชนิดต่างๆ ทดสอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง ODR 2000

Accelerator	$T_{S1}$ (min)	$T_{C90}$ (min)	$M_L$ (dN.m)	$M_H$ (dN.m)	$M_H - M_L$ (dN.m)
TMTD	3.53	9.50	2.86	19.69	16.83
CBS	6.85	20.00	3.41	16.71	13.30
MBTS	8.14	23.50	3.64	15.34	11.70
CBS+TMTD	4.27	12.00	4.06	17.85	13.79
MBTS+TMTD	4.04	9.00	3.65	18.06	14.41
CBS+TMTD +ZnO 10 phr	2.38	5.24	4.26	20.65	17.41

รูปที่ 5.7 แสดงลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วน 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก โดยใช้สารตัวเร่งชนิดต่างๆ ในระบบวัลคาไนซ์แบบ Semi-EV ตามที่ให้รายละเอียดไว้ในตารางที่ 4.2 จากรูปพบว่าสารตัวเร่งทุกตัวจะให้ลักษณะกราฟการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ NR/XNBR เป็นแบบ marching ซึ่งแสดงว่า ยางเบลนด์สามารถเกิดการเชื่อมโยงได้เพิ่มขึ้นเมื่อให้เวลาการทดสอบนานขึ้นซึ่งจะมีผลต่อความแข็งแรงและสมบัติของยางเบลนด์ ผลการวิเคราะห์สมบัติการวัลคาไนซ์ซึ่งแสดงตามตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบระหว่างการใช้สารตัวเร่ง

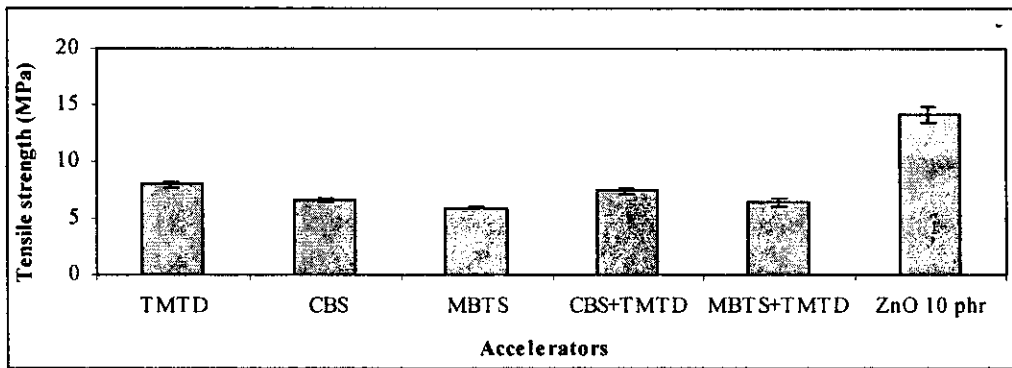
ชนิดต่างๆ หากพิจารณาการใช้สารตัวเร่งเดี่ยว 3 ชนิด ปริมาณ 1.5 phr ร่วมกับ ZnO phr ซึ่งสารตัวเร่งเดี่ยว 3 ชนิดที่ใช้เป็นสารตัวเร่งในกลุ่มไทอูเรม (TMTD) ไธอาโซล (MBTS) และซัลฟีนามิค (CBS) จากผลการทดลองพบว่า TMTD จะให้เวลาสกอกซ์และเวลาการวัลคาไนซ์สั้นกว่าสารตัวเร่ง CBS และ MBTS เพราะว่า TMTD เป็นสารตัวเร่งที่เร็วและไวมากต่อปฏิกิริยาเชื่อมโยงในการวัลคาไนซ์ยาง นอกจากนี้ยังเป็นสารที่ใช้ในการวัลคาไนซ์โดยสามารถให้กำมะถัน (sulfur donor) สำหรับสารตัวเร่ง CBS และ MBTS เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการแตกตัวให้สารเมอร์แคปโตเบนโซไธอาโซล (Mercapto benzothiazole, MBT) และนอกจากนี้ CBS จะให้เบสออกมาด้วย ซึ่งระยะเวลาก่อนที่จะแตกตัวออกมานี้ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า delayed action (พรพรรณ, 2528) ทำให้มีความปลอดภัยและช่วยให้ยางสามารถไหลได้ดีไม่เกิดสกอกซ์ หรือที่เรียกว่า “ยางตาย” ก่อนที่จะไหลเต็มเบ้า แต่เนื่องจากในระดับอุตสาหกรรมการใช้ TMTD ให้เวลาสกอกซ์ที่เร็วมาก ทำให้ยางไม่สามารถไหลได้ทัน ยางจะไหลได้ไม่เต็มเบ้า ขณะที่สารตัวเร่ง CBS และ MBTS เป็นสารที่มีเวลาวัลคาไนซ์ยาวจึงไม่เหมาะที่จะใช้เดี่ยวๆ เพราะจะทำให้เกิดสั้นเปลืองเวลาและพลังงาน ดังนั้นในงานวิจัยจึงได้นำสารตัวเร่ง TMTD ไปใช้เป็นส่วนประกอบร่วมกับสารตัวเร่งหลัก คือ CBS และ MBTS โดยปรับปริมาณของสารตัวเร่งหลักและร่วม ให้เท่ากับ 1.5 phr และพบว่าเวลาสกอกซ์และเวลาวัลคาไนซ์ หรืออัตราการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ในกรณีที่ใช้สารตัวเร่งร่วมกันเกิดได้เร็วขึ้นกว่าการใช้ CBS และ MBTS เดี่ยวๆ ซึ่งเดิมเวลาวัลคาไนซ์ของเบลนด์ที่ใช้ CBS และ MBTS มีค่าประมาณ 20.00 และ 23.50 นาที จะลดเหลือ 12.00 และ 9.00 นาที ตามลำดับ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการใช้สารตัวเร่งร่วมสองชนิดจะช่วยเสริมประสิทธิภาพกัน แต่เนื่องจากยาง XNBR มีลักษณะพิเศษ คือ สามารถวัลคาไนซ์ด้วยโลหะออกไซด์ได้อย่างรวดเร็ว และจากผลการทดลองเบื้องต้นโดยการแปรชนิดของสารตัวเร่ง สามารถระบุได้ว่าระบบวัลคาไนซ์ที่ใช้ CBS (1.0 phr) + TMTD (0.5 phr) + ZnO (5 phr) ร่วมกันมีประสิทธิภาพดี มีความปลอดภัยในการแปรรูป ให้ระดับการเชื่อมโยงที่สูง แต่เวลาวัลคาไนซ์ยังคงค่อนข้างนาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาเพิ่มเติมถึงผลของการเติมซิงค์ออกไซด์ในปริมาณ 10 phr ต่อสมบัติวัลคาไนซ์ ซึ่งผลการทดลองแสดงในตารางที่ 5.4 การเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์เป็น 10 phr จะให้สมบัติวัลคาไนซ์โดยเฉพาะเวลาวัลคาไนซ์ลดลงจาก 12 นาที เป็น 5 นาที นอกจากนี้ยังเพิ่ม ค่า  $M_L$ ,  $M_H$  และ  $M_H - M_L$  ของเบลนด์

### 5.2.2 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

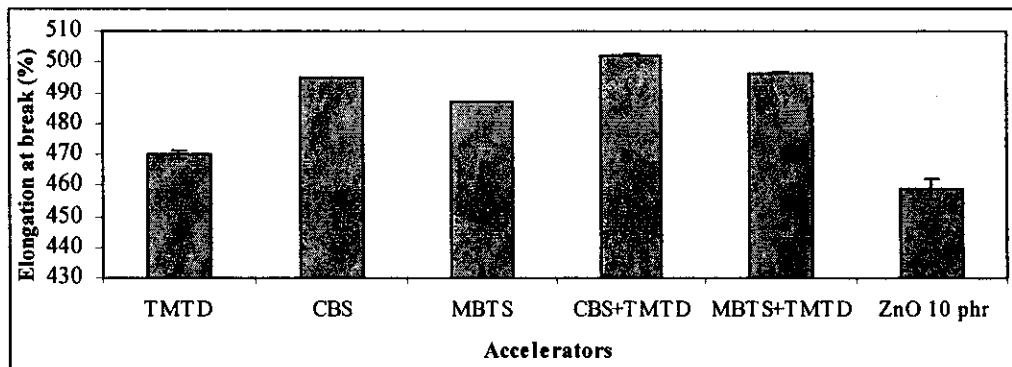
ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลก่อน-หลังการบ่มเร่งของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วน 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก โดยใช้สารตัวเร่งชนิดต่างๆ แสดงตามตารางที่ 5.5 และรูปที่ 5.8-5.10

ตารางที่ 5.5 สมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วนเบลนด์ 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก โดยใช้สารตัวเร่งต่างๆ ก่อน-หลังการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

Accelerators	Tensile strength (MPa)			Elongation at break (%)			Tear strength (N/mm)
	Before	After	Retention (%)	Before	After	Retention (%)	
TMTD	7.98±0.31	7.58±1.17	94.99	470.00±2.65	436.00±1.41	92.77	17.51±0.16
CBS	6.62±0.15	5.40±0.13	81.57	495.00±1.41	423.50±3.54	85.56	15.44±1.00
MBTS	5.98±0.01	4.46±0.12	74.58	487.00±4.24	406.00±2.83	83.37	11.92±1.24
CBS+TMTD	7.44±0.28	6.38±0.21	85.75	502.33±2.08	439.00±1.41	87.39	16.98±0.79
MBTS+TMTD	6.46±0.33	4.20±0.22	65.02	496.50±4.95	440.67±6.03	88.76	15.58±0.70
CBS+TMTD +ZnO 10 phr	14.17±0.70	14.90±1.70	105.15	458.67±3.21	388.80±6.22	84.77	21.77±1.04

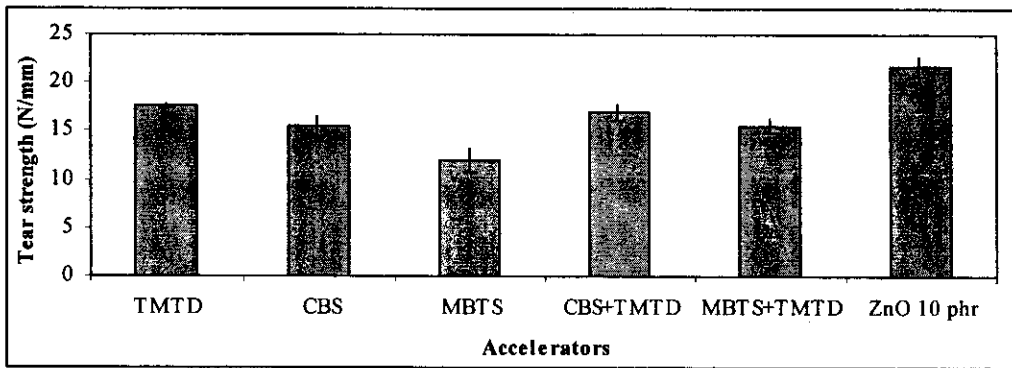


รูปที่ 5.8 ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วนเบลนด์ 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก เมื่อใช้สารตัวเร่งชนิดต่างๆ และเพิ่ม ZnO เป็น 10 phr



รูปที่ 5.9 ความสามารถในการยืดขาด (Elongation at break) ของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วนเบลนด์ 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก เมื่อใช้สารตัวเร่งชนิดต่างๆ และเพิ่ม ZnO เป็น 10 phr





รูปที่ 5.10 ความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear strength) ของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วน 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก เมื่อใช้สารตัวเร่งชนิดต่างๆ และเพิ่ม ZnO เป็น 10 phr

จากตารางที่ 5.5 และรูปที่ 5.8 – 5.10 ซึ่งแสดงผลการใช้สารตัวเร่งชนิดต่างๆ ต่อสมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วนเบลนด์ 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก พบว่าการใช้สารตัวเร่ง TMTD เดี่ยวๆ ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเบลนด์มากกว่ากรณีใช้ CBS และ MBTS เนื่องจากว่าสารตัวเร่งชนิดนี้สามารถให้กลุ่มะถันได้ 2 อะตอม ในขณะที่ CBS และ MBTS สามารถให้กลุ่มะถันเพียง 1 อะตอม จึงทำให้ยางเบลนด์มีโอกาสเกิดพันธะเชื่อมโยงได้มากกว่าสารตัวเร่งอื่นที่ใช้ ซึ่งผลการทดลองนี้พบว่าสอดคล้องกับแนวโน้มของค่า  $M_n$ - $M_L$  (ตารางที่ 5.4) แต่ระยะยึดจนขาดมีค่าต่ำกว่าเพราะยางเบลนด์แข็งแรงขึ้นทำให้ความยืดหยุ่นลดลง เมื่อพิจารณาผลการใช้สารตัวเร่งร่วม คือ CBS+TMTD และ MBTS+TMTD พบว่าสมบัติเชิงกลของเบลนด์ดีกว่าการใช้ CBS และ MBTS เดี่ยวๆ เพราะ TMTD จะทำให้ความแข็งแรงของยางเพิ่มมากขึ้นและให้ความยืดหยุ่นดีขึ้น

พิจารณาความต้านทานต่อการบวมเร่งและค่าร้อยละการกลับคืนสมบัติเดิม (Retention, %) ของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วน 25/75 ส่วน โดยน้ำหนัก ตามตารางที่ 5.5 พบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดขาดของยางเบลนด์ที่ใช้สารตัวเร่ง TMTD มีการรักษาสสมบัติเดิมหรือความต้านทานต่อการบวมเร่งดีที่สุดที่สุดเมื่อเทียบกับสารตัวเร่ง CBS และ MBTS แต่อย่างไรก็ตามเบลนด์ที่ใช้สารตัวเร่งร่วม CBS+TMTD และ MBTS+TMTD จะมีแนวโน้มในการต้านทานต่อการบวมเร่งดีกว่า CBS และ MBTS เนื่องจาก TMTD จะช่วยปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อการบวมเร่งของ CBS และ MBTS ให้ดีขึ้น

เมื่อพิจารณาผลการเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ในเบลนด์ที่ใช้ CBS+TMTD เป็นสารตัวเร่งร่วม พบว่า เบลนด์มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตามปริมาณซิงค์ออกไซด์ แต่ความสามารถในการยืดขาดของเบลนด์จะลดลง ซึ่งเป็นผลจากการทำงานของซิงค์ออกไซด์ที่เป็นสารกระตุ้นให้เกิดการวัลคาไนซ์และเป็นสารวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ โดยซิงค์ออกไซด์ทำปฏิกิริยากับหมู่กรดคาร์บอกซิลิกในยาง XNBR เกิดเกลือคาร์บอกซิเลต ซึ่งจะเชื่อมโยงโมเลกุลยางเชิงกายภาพผ่านพันธะไอออนิก ( $\text{COO}^- \text{--} \text{Zn}^{2+} \text{--} \text{OOC}$ ) และเสริมความแข็งแรงให้แก่ยางเบลนด์ NR/XNBR

ดังนั้นจากการศึกษาหาชนิดสารตัวเร่งที่เหมาะสมต่อการเตรียมยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วน 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก พบว่าการใช้สารตัวเร่งร่วม CBS+TMTD+ZnO 10 phr จะให้สมบัติวัลคาไนซ์ที่เหมาะสม สมบัติ

เชิงกลก่อน-หลังการบ่มเร่งเพิ่มขึ้นอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างดี ในการศึกษาขั้นต่อไปจึงเลือกใช้ CBS+TMTD เป็นสารตัวเร่งและใช้ซิงค์ออกไซด์ในปริมาณ 10 phr

### 5.3 อิทธิพลของการใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ต่อสมบัติและความเข้ากันได้ของยางเบลนด์ NR/XNBR

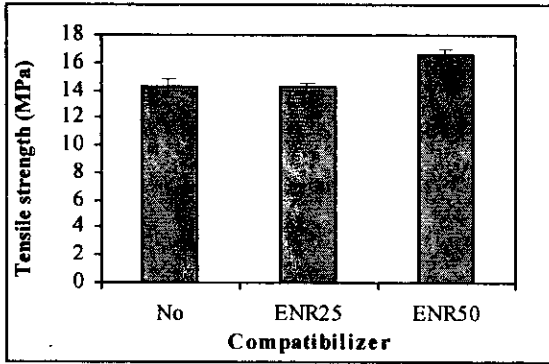
#### 5.3.1 ศึกษาชนิดของยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ (Epoxyprene<sup>®</sup>25 และ Epoxyprene<sup>®</sup>50) ต่อสมบัติของยางเบลนด์ NR/XNBR

##### 5.3.1.1 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

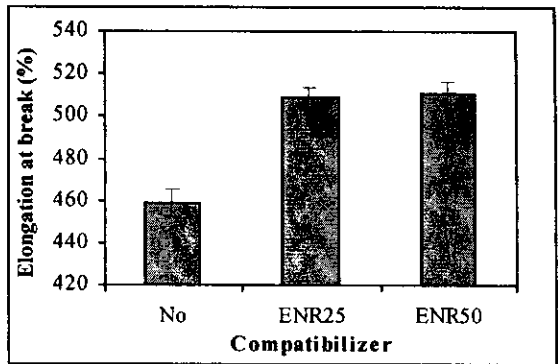
ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลก่อน-หลังการบ่มเร่งของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR ใช้ Epoxyprene<sup>®</sup>25 และ Epoxyprene<sup>®</sup>50 เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ แสดงตามตารางที่ 5.6 และรูปที่ 5.11

ตารางที่ 5.6 สมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR ที่ไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้และใช้ Epoxyprene<sup>®</sup>25 และEpoxyprene<sup>®</sup>50 เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ ปริมาณ 0.5 phr ก่อน-หลังการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

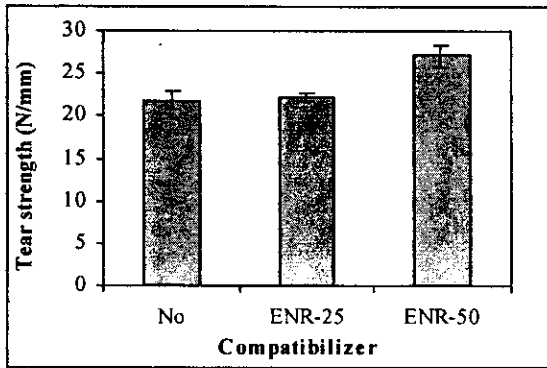
Compatibilizer	Tensile strength (MPa)			Elongation at break (%)			Tear strength (N/mm)
	Before	After	Retention (%)	Before	After	Retention (%)	
No	14.17±0.17	12.95±0.45	91.39	458.67±3.21	358.66±1.77	78.20	21.77±1.04
ENR-25	14.20±0.34	13.63±1.40	95.99	508.67±4.52	410.00±6.93	80.60	22.18±0.50
ENR-50	16.49±0.48	16.36±1.36	99.21	511.00±2.65	404.33±5.13	79.13	27.08±1.22



(a)



(b)



(c)

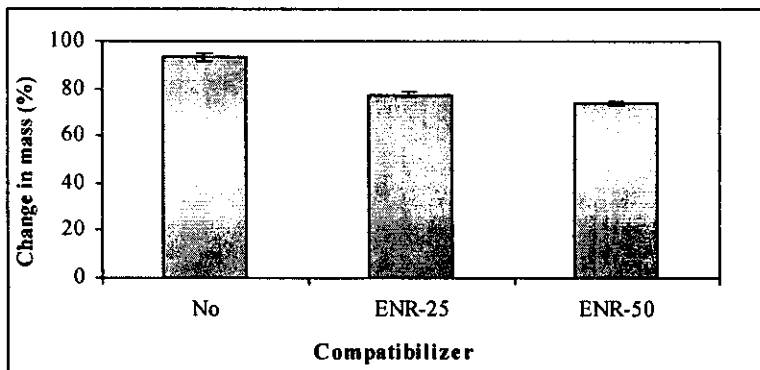
รูปที่ 5.11 กราฟแสดง (a) ความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) (b) ความสามารถในการยืดขาด (Elongation at break) และความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR ที่ไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันและใช้ Epoxyprrene<sup>®</sup>25 และ Epoxyprrene<sup>®</sup>50 เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ ปริมาณ 0.5 phr

ตารางที่ 5.6 และรูปที่ 5.11 แสดงสมบัติเชิงกลก่อนและหลังการบ่มแรงของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR ตามชนิด คือ เบลนด์ที่ไม่ผสมสารเพิ่มความเข้ากัน เบลนด์ที่ผสมด้วยสารเพิ่มความเข้ากันได้ คือ Epoxyprrene<sup>®</sup>25 และ Epoxyprrene<sup>®</sup>50 ปริมาณ 0.5 phr จากผลการทดลองพบว่าเมื่อใส่ Epoxyprrene<sup>®</sup>25 ลงไปในเบลนด์ ไม่ส่งผลให้มีการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ ยกเว้นความสามารถในการยืดขาดเพิ่มขึ้นประมาณ 11% แต่การใส่ Epoxyprrene<sup>®</sup>50 มีแนวโน้มเพิ่มความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดขาดและความต้านทานต่อการฉีกขาดประมาณ 16% 11% และ 24% ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของสมบัติเชิงกล อธิบายได้ว่าเกิดจากการยึดติดระหว่างเฟสดีซึ้น (adhesion at interface) (Barlow and Paul, 1984) หมู่อิพอกไซต์ในสารเพิ่มความเข้ากันได้ สามารถเกิดอันตรกิริยา (interaction) กับหมู่อกรด (-COOH) ของยาง XNBR (Ramesh and DE, 1993) และในขณะที่เดียวกันยาง Epoxyprrene<sup>®</sup>25 และ Epoxyprrene<sup>®</sup>50 ก็จะมีส่วนของยางธรรมชาติในโครงสร้างทำให้เข้ากันได้กับยาง NR ดังนั้นแรงดึงคู่ระหว่างเฟสยางจึงมากขึ้น ยางเข้ากันได้มากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบผลการใช้ยาง Epoxyprrene<sup>®</sup>25 และ Epoxyprrene<sup>®</sup>50 พบว่า สมบัติเชิงกลของเบลนด์ที่ใช้ยาง Epoxyprrene<sup>®</sup>50 จะเด่นกว่ากรณีเบลนด์ที่ใช้ Epoxyprrene<sup>®</sup>25 เนื่องจากจำนวนหมู่อิพอกไซต์ที่มากกว่า

เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่งของยางเบลนด์ NR/XNBR ทั้งสามชนิด จากตารางที่ 5.6 พบว่า ภายหลังจากการบ่มเร่ง ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดขาดลดลง เพราะในขณะที่บ่มเร่งด้วยความร้อน การสลายพันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นในยางเบลนด์ การเชื่อมโยงใหม่ของโมเลกุลยาง และการตัดโซ่โมเลกุลยางอาจจะเกิดขึ้นได้ซึ่งผลการทดสอบสมบัติเชิงกลจะสอดคล้องกับการทดลองของ Naskar *et al.*, (2002) ที่กล่าวว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ลดลงเกิดจากการสลายพันธะของพันธะเชื่อมโยงในยางเบลนด์ เนื่องจากความร้อนและนอกจากนี้ยังทำให้ความยืดหยุ่นของเบลนด์ลดลงด้วย แต่อย่างไรก็ตามหากเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การรักษาสสมบัติเดิมของยาง เบลนด์ต่างๆ จะเห็นได้ชัดเจนว่าเบลนด์ที่ผสมสารเพิ่มความเข้ากันได้มีเปอร์เซ็นต์การรักษาสสมบัติเดิมดีกว่าเบลนด์ที่ไม่ผสมสารเพิ่มความเข้ากันได้และแนวโน้มความสามารถในการต้านทานต่อการบ่มเร่งขึ้นอยู่กับปริมาณหมู่อีพอกไซด์ในสารเพิ่มความเข้ากันได้ ผลการทดลองนี้ พบว่าคล้ายกับผลรายงานวิจัยของ Tanrattanakul and Petchkeaw (2005) ที่ได้กล่าวว่าการใช้ยาง Epoxyprrene เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ ในเบลนด์ของยางธรรมชาติและคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอททิลีน (CSM) จะปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อความร้อนในยางเบลนด์ให้ดีขึ้น

### 5.3.1.2 ความต้านทานต่อการบวมพอง (Swelling resistance)

ผลการศึกษาความสามารถในการต้านทานต่อการบวมพองในตัวทำละลายผสมไอโซออกเทนกับทูโลอินด้วยอัตราส่วน 70/30 ส่วนโดยปริมาตร ของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR ชนิดต่างๆ แสดงตามรูปที่ 5.12

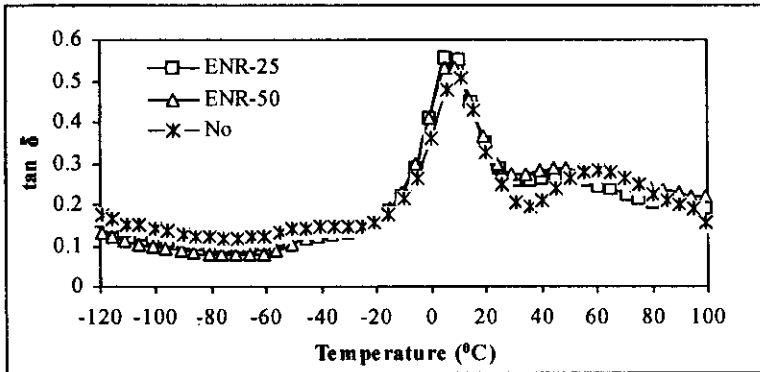


รูปที่ 5.12 ความต้านทานต่อการบวมพองของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR ที่ไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้และใช้ Epoxyprrene<sup>®</sup>25 และ Epoxyprrene<sup>®</sup>50 เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ ปริมาณ 0.5 phr ในตัวทำละลายผสมไอโซออกเทนกับทูโลอินด้วยอัตราส่วน 70/30 ส่วนโดยปริมาตร ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง

รูปที่ 5.12 แสดงความต้านทานต่อการบวมพองในตัวทำละลายผสมไอโซออกเทนกับทูโลอินของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR จากรูป พบว่าการใส่ Epoxyprrene<sup>®</sup>25 และ Epoxyprrene<sup>®</sup>50 จะทำให้เบลนด์มีความต้านทานต่อการบวมพองในตัวทำละลายดีขึ้น และขึ้นอยู่กับปริมาณหมู่อีพอกไซด์ในตัวประสาน เนื่องจากระดับการติดประสานที่ดีขึ้นระหว่างเฟสยาง NR และ ยาง XNBR

### 5.3.1.3 อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเบลนค์ยาง NR/XNBR

ผลการทดสอบยางเบลนค์ 25/75 NR/XNBR ด้วยเทคนิค DMTA เพื่อวิเคราะห์ผลการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ต่ออุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเบลนค์ แสดงตามรูปที่ 5.13 และตารางที่ 5.7



รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแทนเจนต์สูญเสีย ( $\tan \delta$ ) และอุณหภูมิของยางเบลนค์ 25/75 NR/XNBR ที่ไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้และใช้ Epoxyprrene<sup>®</sup>25 และ Epoxyprrene<sup>®</sup>50 เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ ปริมาณ 0.5 phr

ตารางที่ 5.7 ค่า  $T_{g1}$  และ  $T_{g2}$  ของยางเบลนค์ 25/75 NR/XNBR ที่ไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้และใช้ Epoxyprrene<sup>®</sup>25 และ Epoxyprrene<sup>®</sup>50 เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ ปริมาณ 0.5 phr

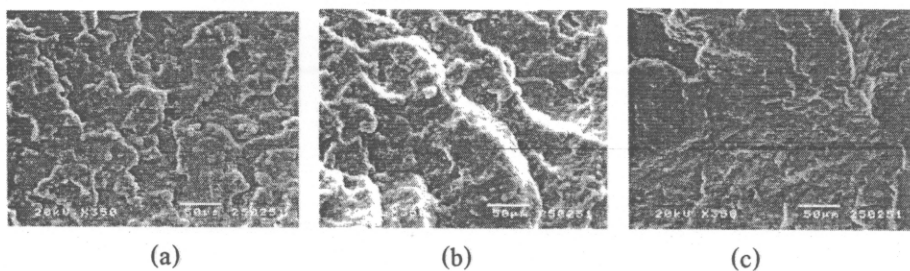
Compatibilizer	$T_{g1}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)
No	-48.12	10.74
Epoxyprrene <sup>®</sup> 25	-45.95	7.57
Epoxyprrene <sup>®</sup> 50	-45.22	6.58

จากรูปที่ 5.13 ซึ่งแสดงอิทธิพลของการใช้ยาง Epoxyprrene<sup>®</sup>25 และ Epoxyprrene<sup>®</sup>50 ต่อกราฟแทนเจนต์สูญเสียที่อุณหภูมิต่างๆ ของยางเบลนค์ 25/75 NR/XNBR พบว่า การใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้จะให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชันปรากฏขึ้น 2 ค่า เช่นเดียวกับกรณีที่ไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ แต่กรณีที่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ นั้นพบว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเฟสยาง XNBR ( $T_{g2}$ ) ในเบลนค์เลื่อนไปยังอุณหภูมิต่ำลง (ตารางที่ 5.7) ซึ่งอาจแสดงให้เห็นถึงอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเฟสยาง NR และ XNBR Lopattananon et al. (2007) ได้ศึกษาความเข้ากันได้ของเบลนค์ NR/CSM โดยใช้ยางธรรมชาติอิพอกไซค์เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ และกล่าวรายงานว่าเบลนค์มีความไม่เข้ากัน โดยยางเบลนค์จะแสดงอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของยาง NR (ประมาณ -65 °C) และยาง CSM (ประมาณ -7 °C) แต่การเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างเฟสยาง NR และ CSM จากการใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ ทำให้เกิดการเลื่อนของอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเฟสยาง CSM ไปยังอุณหภูมิต่ำลง

### 5.3.1.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology)

ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของฉนวนยางเบรอนด์ 25/75 NR/XNBR ชนิดต่างๆ แสดงตามรูปที่

5.14



รูปที่ 5.14 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฉนวนยางเบรอนด์ 25/75 NR/XNBR (a) ไม่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ (b) ใส่ยาง Epoxyprene® 25 ปริมาณ 0.5 phr และ (c) ใส่ยาง Epoxyprene® 50 ปริมาณ 0.5 phr ที่กำลังขยาย 350 เท่า

จากรูปที่ 5.14 เปรียบเทียบลักษณะฉนวนยางเบรอนด์ 25/75 NR/XNBR ก่อนและหลังผสมสารเพิ่มความเข้ากันได้ Epoxyprene® 50 พบว่า ฉนวนยางเบรอนด์ก่อนผสมสารเพิ่มความเข้ากันได้มีลักษณะหยาบขรุขระ ไม่เรียบ แต่ฉนวนยางเบรอนด์จะเรียบและเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น หลังจากใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเข้ากันได้ดีขึ้นของยางเบรอนด์ และการใช้ยาง Epoxyprene® 50 จะให้ลักษณะฉนวนยางที่เรียกว่าการใช้ Epoxyprene® 25 จากผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติเชิงกล และการทดสอบด้วยเทคนิค DMTA

จากผลการทดลองเปรียบเทียบการใช้ Epoxyprene® 25 และ ยาง Epoxyprene® 50 ปริมาณ 0.5 phr เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ในยาง NR/XNBR ได้แสดงให้เห็นว่ายาง Epoxyprene® 50 มีประสิทธิภาพในการเป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ดี ดังนั้นจึงเลือกใช้ยาง Epoxyprene® 50 ในการศึกษาขั้นต่อไป

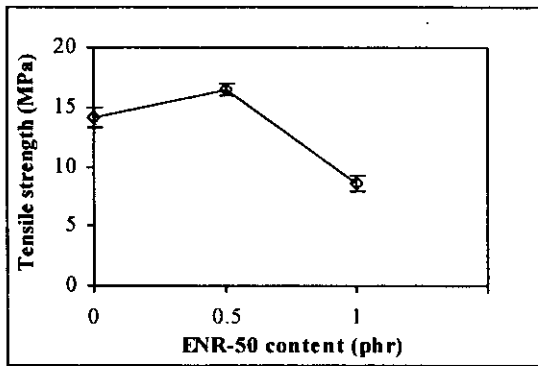
### 5.3.2 ศึกษาปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ Epoxyprene® 50 ต่อสมบัติของยางเบรอนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วน 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก

#### 5.3.2.1 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

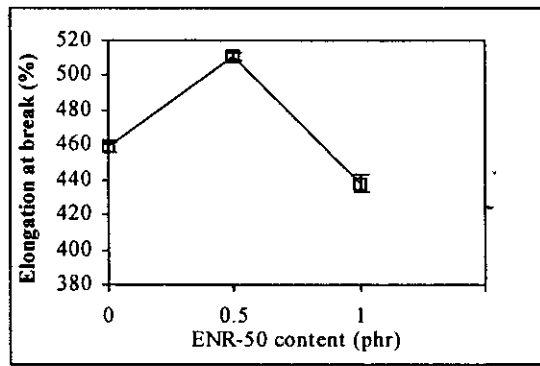
ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลก่อนและหลังการบ่มแรงของยางเบรอนด์ 25/75 NR/XNBR+ Epoxyprene® 50 ซึ่งแปรปริมาณยาง Epoxyprene® 50 แสดงตามตารางที่ 5.9 และรูปที่ 5.15

ตารางที่ 5.9 สมบัติเชิงกลของยางเบลนค์ระหว่างยางเบลนค์ 25/75 NR/XNBR ที่ใช้ Epoxyprene® 50 เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ ในปริมาณต่างๆ ก่อน-หลังการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

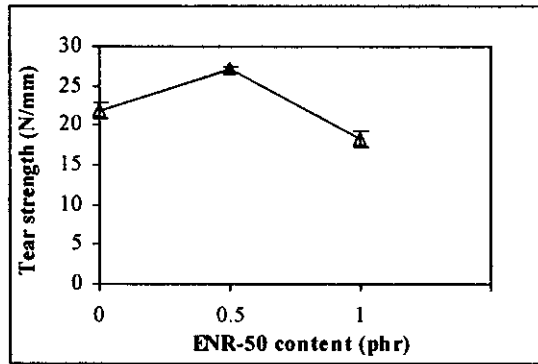
ENR-50 content (phr)	Tensile strength (MPa)			Elongation at break (%)			Tear strength (N/mm)
	Before	After	Retention (%)	Before	After	Retention (%)	
0	14.17±0.17	12.95±0.45	91.39	458.67±3.21	358.66±1.77	78.20	21.77±1.04
0.5	16.49±0.48	16.36±1.36	99.21	511.00±2.65	404.33±5.13	79.13	27.08±1.22
1	8.50±1.61	8.34±1.61	98.12	437.67±5.13	319.33±5.51	72.96	18.27±0.96



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 5.15 กราฟแสดง (a) ความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) (b) ความสามารถในการยืดขาด (Elongation at break) และ (c) ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางเบลนค์ 25/75 NR/XNBR ที่ใช้ Epoxyprene® 50 เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ ในปริมาณต่างๆ

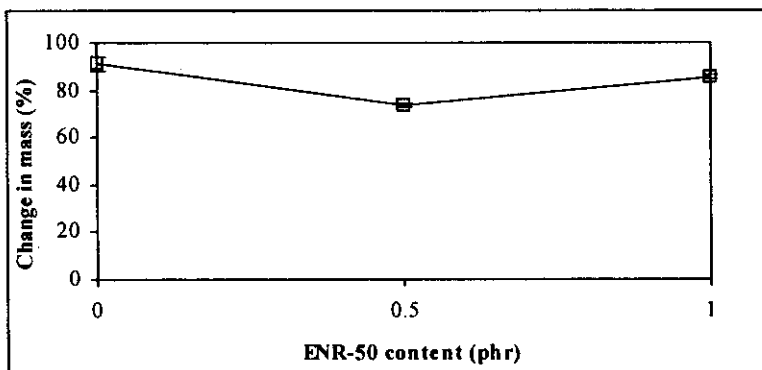
จากตารางที่ 5.9 และรูปที่ 5.15 แสดงสมบัติเชิงกลก่อนการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ของยางเบลนค์ 25/75 NR/XNBR+ Epoxyprene® 50 พบว่า การใช้ยาง Epoxyprene® 50 ปริมาณ 0.5 phr จะทำให้สมบัติเชิงกลมากกว่ากรณีของเบลนค์ที่ไม่มีใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ และเมื่อพิจารณาการใส่ยาง Epoxyprene® 50 ในปริมาณที่มากขึ้น (1.0 phr) พบว่าสมบัติดังกล่าวจะมีค่าลดลงและมีค่าน้อยกว่ากรณีเบลนค์ที่ไม่ใส่สารเพิ่มความ

เข้ากันได้ แสดงว่าการใช้ยาง Epoxyprene® 50 ในปริมาณที่มากขึ้น Epoxyprene® 50 จะไม่เป็นทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ต่อสมบัติบ่มเร่งของเบลนด์ (ตารางที่ 5.9) พบว่าสมบัติบ่มเร่งของเบลนด์ที่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ 0.5 phr จะดีกว่า เบลนด์ที่ไม่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้และเบลนด์ที่เติม Epoxyprene® 50 ในปริมาณ 1.0 phr

### 5.3.2.2 สมบัติความต้านทานต่อการบวมพอง (Swelling resistance)

ผลการศึกษาคความต้านทานต่อการบวมพองของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR ที่แปรปริมาณการใส่ Epoxyprene® 50 ต่างๆ แสดงตามรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 สมบัติความต้านทานต่อการบวมพองของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR ที่ใช้ Epoxyprene® 50 เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ ปริมาณต่างๆ ในตัวทำละลายผสมไอโซออกเทนกับทูลอีนด้วยอัตราส่วน 70/30 ส่วนโดยปริมาตร เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

จากรูปที่ 5.16 แสดงให้เห็นว่าการเติม Epoxyprene® 50 ในปริมาณ 0.5 และ 1.0 phr จะลดเปอร์เซ็นต์การบวมพองของเบลนด์ในตัวทำละลาย เนื่องจาก Epoxyprene® 50 เพิ่มการติดประสานระหว่างเฟสดีซัน (adhesion at interface) ทำให้เบลนด์เข้ากันได้เพิ่มขึ้น และทนต่อทำละลาย แต่ระดับการบวมพองขึ้นอยู่กับปริมาณของ Epoxyprene® 50 กล่าวคือ การใส่ Epoxyprene® 50 ปริมาณมากกว่า 0.5 phr จะทำให้ความต้านทานต่อการบวมพองในตัวทำละลายลดลง

จากการศึกษาผลของปริมาณของ Epoxyprene® 50 ต่อสมบัติของยางเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วน 25/75 ส่วน โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณที่เหมาะสมในการเป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ คือ 0.5 phr ดังนั้นจึงเลือกใช้ Epoxyprene® 50 ปริมาณ 0.5 phr เพื่อเตรียมเบลนด์ในขั้นตอนศึกษาต่อไป



## 5.4 อิทธิพลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมต่อสมบัติของยางเบลด NR/XNBR

### 5.4.1 ศึกษาชนิดของสารตัวเติมชนิดต่างๆ ต่อสมบัติของยางเบลด NR/XNBR

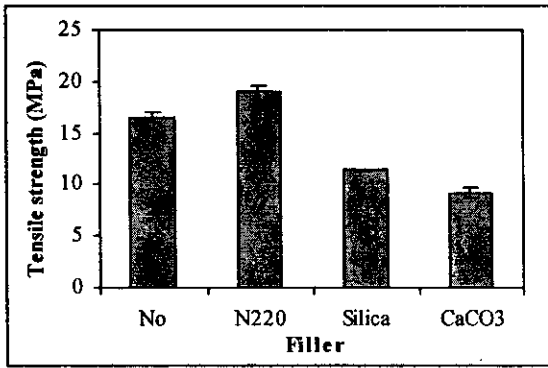
#### 5.4.1.1 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

ผลของชนิดสารตัวเติมต่อสมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มแรงของยางเบลด 25/75 NR/XNBR+ Epoxyprene<sup>®</sup> 50 แสดงตามตารางที่ 5.10 และรูปที่ 5.17

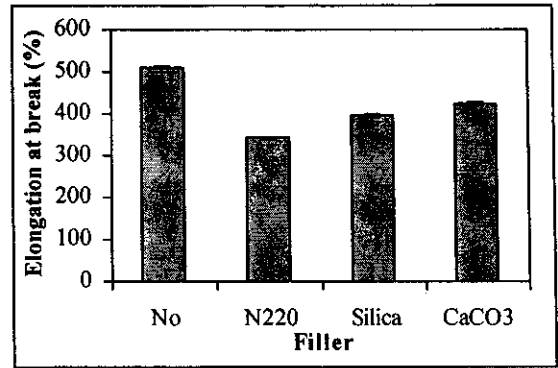
ตารางที่ 5.10 สมบัติเชิงกลของยางเบลด 25/75 NR/XNBR+Epoxyprene<sup>®</sup> 50 ที่ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ ปริมาณ 30 phr ก่อน-หลังการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

Filler	Tensile strength (MPa)			Elongation at break (%)			Tear strength (N/mm)
	Before	After	Retention (%)	Before	After	Retention (%)	
No	16.49±0.48	16.36±1.36	99.21	511.00±2.65	404.33±5.51	79.12	27.08±0.34
N220	18.90±0.06	19.02±0.63	100.63	341.33±3.21	236.25±6.40	69.21	39.60±1.60
Silica	11.39±0.11	12.54±0.30	110.10	395.67±3.51	293.67±3.21	74.22	30.91±1.54
CaCO <sub>3</sub>	9.35±0.05	9.98±0.94	109.07	423.33±4.16	325.25±3.85	76.83	19.93±0.86

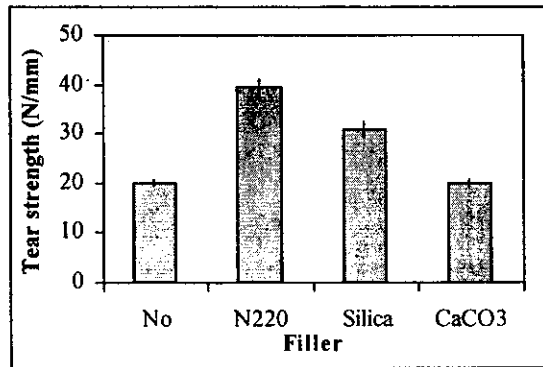
จากตารางที่ 5.10 และรูปที่ 5.17 แสดงผลการใช้สารตัวเติมต่างๆ ต่อสมบัติเชิงกลก่อนและหลังการบ่มแรงของยางเบลด 25/75 NR/XNBR+ Epoxyprene<sup>®</sup> 50 พบว่าการใส่สารตัวเติมทุกชนิดลดความสามารถในการยึดขาดของยางเบลด เมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมต่างๆ จะเห็นว่าเขม่าดำให้ความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดดีกว่ากรณีไม่ใส่สารตัวเติม และดีกว่ากรณีใช้ซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากการกระจายที่สม่ำเสมอซึ่งพิจารณาได้จากภาพถ่าย SEM ของผิวรอยแตกหักของยางเบลดที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆ (รูปที่ 5.19) เมื่อพิจารณาความต้านทานต่อการบ่มแรงด้วยความร้อนจากตารางที่ 5.10 พบว่าการใส่สารตัวเติมเพิ่มความสามารถในการรักษาสมบัติเดิมของความต้านทานต่อแรงดึง แต่ลดความสามารถในการรักษาสมบัติความสามารถในการยึดขาด



(a)



(b)

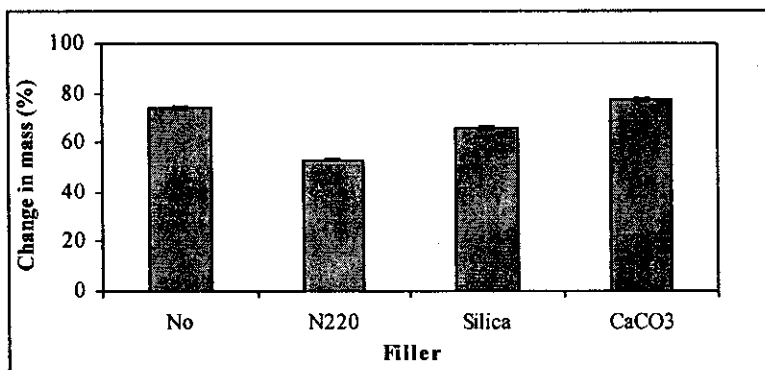


(c)

รูปที่ 5.17 กราฟแสดง (a) ความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) (b) ความสามารถในการยืดขาดและ (c) ความต้านทานต่อแรงดึงของยางเบลด 25/75 NR/XNBR+ Epoxyprene<sup>®</sup> 50 ที่ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ ปริมาณ 30 phr

#### 5.4.1.2 สมบัติความต้านทานต่อการบวมพอง (Swelling resistance)

ผลการใช้สารตัวเติมต่อความต้านทานต่อการบวมพองของยางเบลด 25/75 NR/XNBR+ Epoxyprene<sup>®</sup> 50 ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ แสดงตามรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18 ความต้านทานต่อการบวมพองของยางเบลด 25/75 NR/XNBR+ Epoxyprene<sup>®</sup> 50 ที่ใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ ในตัวทำละลายผสมไอโซออกเทนกับทูลอีนด้วยอัตราส่วน 70/30 ส่วนโดยปริมาตร เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

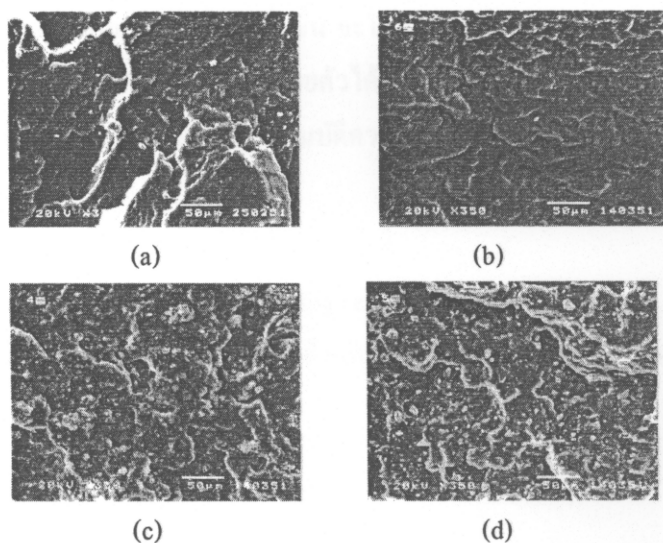
จากรูปที่ 5.18 แสดงความต้านทานต่อการบวมพองของยางเบลนค์ในตัวทำละลายผสมไอโซออกเทน กับทูโลอิน การใส่เขม่าดำและซิลิกาปริมาณ 30 phr เพิ่มความต้านทานต่อการบวมพองในตัวทำละลายให้ดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบความต้านทานต่อการบวมพองของเบลนค์ จะสังเกตว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นดังนี้ คือ แคลเซียมคาร์บอเนต <ไม่ใส่สารตัวเติม<ซิลิกา<เขม่าดำ ซึ่งมีแนวโน้มสอดคล้องกับระดับการกระจายตัวของสารตัวเติมในยาง (รูปที่ 5.19)

#### 5.4.1.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology)

ผลการใช้สารตัวเติมต่างๆ ต่อสัณฐานวิทยาผิวรอยแตกของยางเบลนค์ 25/75 NR/XNBR+ Epoxyprene<sup>®</sup> 50 แสดงตามรูปที่ 5.19

จากการศึกษาเปรียบเทียบลักษณะสัณฐานวิทยาของผิวรอยแตกของยางเบลนค์ต่างๆ ตามรูปที่ 5.19 พบว่า การใส่สารตัวเติมเขม่าดำเกรด N220 (รูปที่ 5.19(b)) จะให้ผิวรอยแตกที่ละเอียด แสดงให้เห็นถึงการกระจายที่สม่ำเสมอของอนุภาคเขม่าดำ แต่เมื่อพิจารณาการใส่สารตัวเติมซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนต (รูปที่ 5.19(c)-(d)) พบว่าผิวรอยแตกมีความหยาบ ขรุขระกว่ากรณีใช้เขม่าดำ และจะสังเกตเห็นว่ามีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของสารตัวเติมทั้งสองชนิดในยางเบลนค์ ซึ่งมีลักษณะการเกาะกันเป็นกลุ่ม (aggregate) ก่อตัวเป็นอนุภาคใหญ่มากขึ้น ซึ่งผลการทดลองนี้สนับสนุนสมบัติเชิงกลของยางเบลนค์

จากผลการทดลองเปรียบเทียบการใช้สารตัวเติมชนิดต่างๆ คือ เขม่าดำ (N220) ซิลิกา และ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO<sub>3</sub>) แสดงให้เห็นว่า การใช้สารตัวเติมเขม่าดำเกรด N220 จะให้ประสิทธิภาพดีที่สุดในขณะนั้นจึงเลือกสารตัวเติมชนิดนี้ในการศึกษาขั้นต่อไป

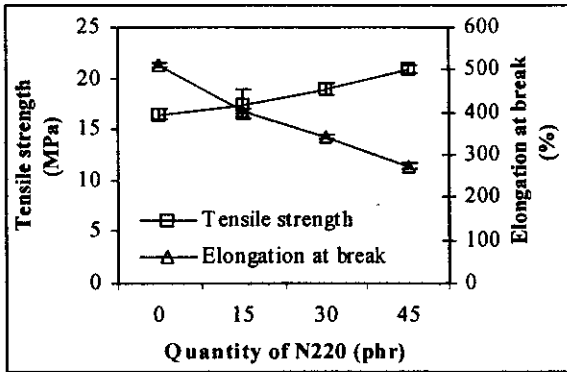


รูปที่ 5.19 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผิวรอยแตกของยางเบลนค์ 25/75 NR/XNBR+ Epoxyprene<sup>®</sup> 50 (a) ไม่ใส่สารตัวเติม (b) ใส่เขม่าดำ (N220) (c) ซิลิกา และ (d) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO<sub>3</sub>) โดยกำหนดปริมาณสารตัวเติม 30 phr (กำลังขยาย 350 เท่า)

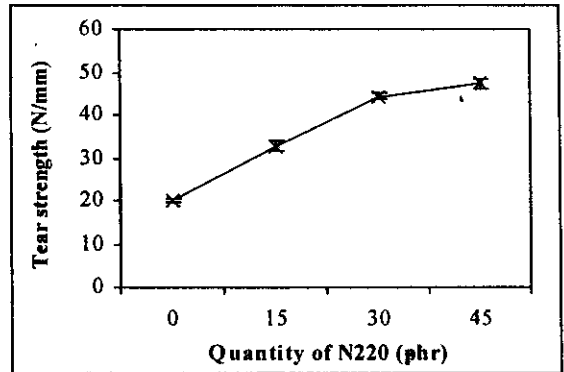
## 5.4.2 ศึกษาปริมาณของเขม่าดำเกรด N220 ต่อสมบัติของยางเบลนด์ NR/XNBR

### 5.4.2.1 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

ผลของปริมาณเขม่าดำเกรด N220 ต่อสมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR+Epoxyprene<sup>®</sup> 50 แสดงตามตารางที่ 5.11 และรูปที่ 5.20



(a)



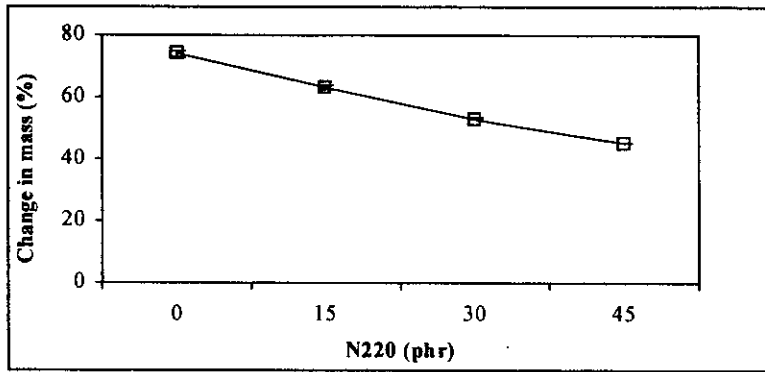
(b)

รูปที่ 5.20 กราฟแสดง (a) ความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) และความสามารถในการยืดขาด (Elongation at break) และ (b) ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR+ Epoxyprene<sup>®</sup> 50 ใช้สารตัวเติมเขม่าดำ เกรด N220 ปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 5.20 แสดงสมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR+ Epoxyprene<sup>®</sup> 50 ที่ใส่สารตัวเติมเขม่าดำ ปริมาณต่างๆ พบว่า เมื่อปริมาณของเขม่าดำเพิ่มขึ้น จะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเขม่าดำสามารถกระจายตัวได้ในยางเบลนด์และอาจเกิดอันตรกิริยาได้กับเฟสยางเบลนด์ได้มากขึ้น แต่การใส่สารตัวเติมเพิ่มขึ้นจะลดสมบัติความเป็นยางซึ่งสังเกตได้จากความสามารถในการยืดขาดที่ลดลงตามปริมาณของเขม่าดำ

### 5.4.2.2 สมบัติความต้านทานต่อการบวมพอง (Swelling resistance)

ผลของปริมาณเขม่าดำ เกรด N220 ต่อความต้านทานต่อการบวมพองของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR+ Epoxyprene<sup>®</sup> 50 แสดงตามรูปที่ 5.21



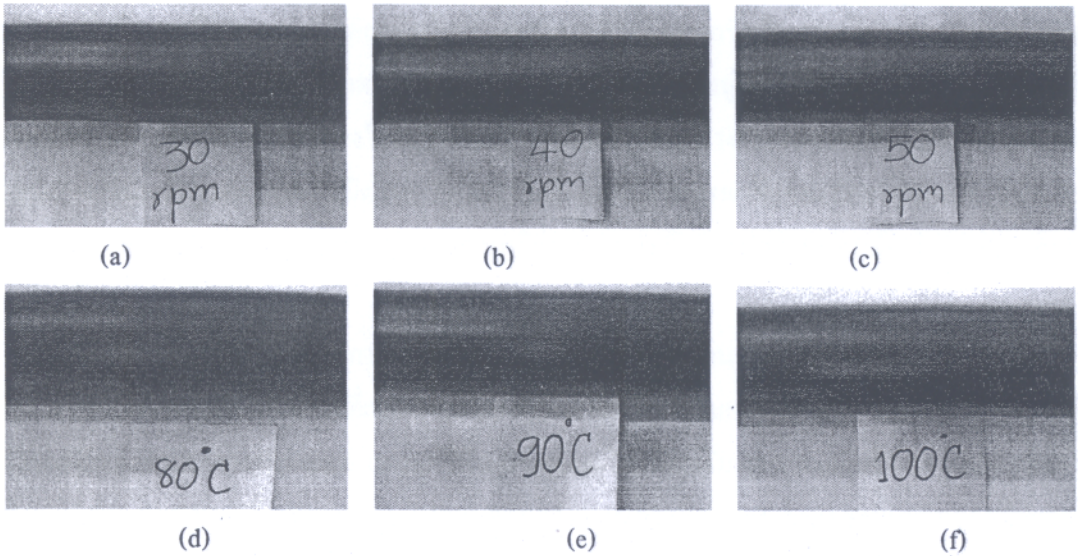
รูปที่ 5.21 ความต้านทานต่อการบวมพองของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR+Epoxyrene<sup>®</sup> 50 ใช้สารตัวเติมเขม่าดำเกรด N220 ปริมาณต่างๆ ในตัวทำละลายผสมไอโซออกเทนกับทูลอีนด้วยอัตราส่วน 70/30 ส่วนโดยปริมาตร เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

จากรูปที่ 5.21 แสดงให้เห็นผลของปริมาณเขม่าดำเกรด N220 ต่อความสามารถในการต้านทานตัวทำละลายผสมไอโซออกเทนกับทูลอีน ซึ่งพบว่าความต้านทานต่อการบวมพองในตัวทำละลายจะดีขึ้นตามปริมาณเขม่าดำ เพราะแรงดึงดูดระหว่างยางและเขม่าดำเกิดได้มากตามปริมาณเขม่าดำ ทำให้สามารถต้านทานต่อทำละลายดีขึ้นและขึ้นอยู่กับปริมาณเขม่าดำ

จากผลการศึกษาปริมาณของเขม่าดำเกรด N220 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำ ทำให้สมบัติเชิงกลของยางเบลนด์เพิ่มขึ้น แต่ความยืดหยุ่นลดลง และตัวทำละลายดีขึ้น และเมื่อพิจารณาผลของสัดส่วนเบลนด์ ระบบวัลคาไนซ์สารเพิ่มความเข้ากันได้ และสารตัวเติม ผู้วิจัยจึงเลือกเบลนด์ NR/XNBR ที่สัดส่วน 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก ใช้ระบบวัลคาไนซ์แบบ Semi-EV ซึ่งใช้ CBS+TMTD+ZnO 10 phr ใช้ Epoxyrene<sup>®</sup> 50 ปริมาณ 0.5 phr เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ของระบบนี้ และเสริมประสิทธิภาพด้วยเขม่าดำเกรด N220 ปริมาณ 30 phr พบว่ามีสมบัติเชิงกล ความต้านทานต่อความร้อนและตัวทำละลายไม่มีสภาพขั้วอยู่ในเกณฑ์ที่ดี ดังนั้นในการเตรียมวัสดุเบลนด์เพื่อศึกษาการผลิตต่อทนความร้อนและน้ำมันในการศึกษาขั้นต่อไป จึงเลือกใช้สภาวะข้างต้นในการเตรียมต่อทนความร้อนและน้ำมัน

### 5.5 อิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วของสกรูที่มีผลต่อการขึ้นรูปท่อยางเบลนด์ NR/XNBR

ผลการศึกษาความเร็วรอบสกรูและอุณหภูมิในการเอกทรีตซ์ท่อยางเบลนด์ NR/XNBR ต่อเปอร์เซ็นต์การบวมพองคายน์และลักษณะผิวของท่อ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปท่อยางเบลนด์ NR/XNBR โดยใช้สูตรยางเบลนด์ที่เหมาะสมจากการศึกษาตามขั้นตอนต่างๆ แสดงตามรูปที่ 5.22 และตามตารางที่ 5.11



รูปที่ 5.22 ลักษณะทางกายภาพของผิวท่อยางเบลนด์ NR/XNBR ที่เอกซทรูดด้วยความเร็วรอบสกรูและอุณหภูมิต่างๆ ด้วยเครื่องเอกซทรูดแบบเย็น (cold feed extruder) (a) 30 rpm, 80°C (b) 40 rpm, 80°C และ (c) 50 rpm, 80°C (d) 80°C, 40 rpm (e) 90°C, 40 rpm และ (f) 100°C, 40 rpm

ตารางที่ 5.11 เปอร์เซ็นต์การบวมพองคายน์ (Die swell, %) ของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR ที่เอกซทรูดด้วยเครื่องเอกซทรูดแบบเย็น ที่ตั้งความเร็วรอบสกรู (รอบต่อนาที) และอุณหภูมิต่างๆ

Rate (rpm)	Die swell (%)		
	Temperature (°C)		
	80	90	100
30	27.04	-	-
40	27.55	28.57	29.08
50	28.57	-	-

จากตารางที่ 5.11 แสดงเปอร์เซ็นต์การบวมพองคายน์ (die swell, %) ของยางเบลนด์ 25/75 NR/XNBR หลังผ่านการเอกซทรูดที่ความเร็วและอุณหภูมิต่างๆ จะเห็นได้ว่าการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 80°C โดยตั้งความเร็วรอบให้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การบวมพองคายน์ของเบลนด์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะการที่ยางเบลนด์อยู่ภายในสกรูที่มีความเร็วรอบหรืออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น โมเลกุลยางจะมีการจัดเรียงตัวตามแนวแรงได้ดีขึ้น เมื่อยางไหลออกจากคายน์ โมเลกุลยางก็จะพยายามหดตัวกลับคืนรูป ดังนั้นการบวมพองของยางเบลนด์หลังออกจากคายน์จึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบสกรู แต่อย่างไรก็ตามการบวมพองคายน์ที่ทดสอบได้จากการแปรความเร็วรอบสกรู 3 ค่า ให้ค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ในทำนองเดียวกันการบวมพองคายน์ของยางเบลนด์ที่เอกซทรูดด้วยความเร็วรอบเท่ากัน (40 rpm) จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ เนื่องจากความร้อนที่เพิ่มขึ้นไปเร่งให้โมเลกุลเกิดการเคลื่อนไหวเพิ่มขึ้น ทำให้มีปริมาตรอิสระในเนื้อยางมากขึ้น และไปลดโอกาสของการเกี่ยวพัน (entanglement) ของโซ่โมเลกุล อีกทั้งยังลดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของยาง (intermolecular interaction) จึงทำให้โมเลกุลยางเคลื่อนไหวอย่างอิสระได้ง่าย

ขึ้น และเรียงตัวเป็นระเบียบตามแนวเดียวกับทิศทางของแรงที่ได้รับมากขึ้น ในขณะที่ไหลผ่านหัวคाय หลังจากที่ยาง เบลนค์ได้ถูกคั่นให้ออกมาผ่านหัวคाय (die) ก็จะพยายามคืนตัวกลับสู่รูปร่างเดิม ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการบวมพองเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ แต่อย่างไรก็ตาม ไม่พบความแตกต่างอย่างชัดเจนของเปอร์เซ็นต์การบวมพองคायของยางเบลนค์ที่เอ็กซ์ทรูดผ่านอุณหภูมิต่างๆ ในงานวิจัยนี้ และเมื่อพิจารณาผิวของท่อยางเบลนค์ (รูปที่ 5.22) ที่เอ็กซ์ทรูดผ่านคायโดยตั้งความเร็วรอบสกรูและอุณหภูมิต่างๆ พบว่า ผิวของท่อยางเบลนค์จะมีลักษณะคล้ายกัน คือ ผิวเรียบเป็นมัน

ดังนั้นจากผลการทดลองตั้งแต่การเตรียมยางเบลนค์เพื่อผลิตท่อทนความร้อนและน้ำมัน โดยแปรปัจจัยและเงื่อนไขต่างๆ สามารถสรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิต คือ ใช้สัดส่วนเบลนค์ NR/XNBR 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก ใช้สารตัวเร่ง CBS+TMTD+ZnO 10 phr ใช้ Epoxyprene<sup>®</sup>50 ในปริมาณ 0.5 phr เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ และใช้เขม่าคาร์บอน N220 ปริมาณ 30 phr ในการเตรียมวัสดุเบลนค์ และควรเอ็กซ์ทรูดท่อยางด้วยความเร็วรอบสกรู 40 rpm ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เพื่อประหยัดเวลาและพลังงานในการผลิตท่อจากยางเบลนค์ NR/XNBR

## 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 6.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้เตรียมยางทนความร้อนและน้ำมันจากการเบลนค์ยางธรรมชาติ (NR) และยางไนไตรล์คาร์บอออกซิเลต (XNBR) โดยศึกษาปัจจัยการเตรียมยางเบลนค์ ดังต่อไปนี้ คือ อัตราส่วนการเบลนค์ อิทธิพลของสารตัวเร่งและปริมาณซิงค์ออกไซด์ การใช้ Epoxyprene<sup>®</sup>25 และ <sup>®</sup>50 เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ ชนิดและปริมาณของสารตัวเติมต่อสมบัติวัลคาไนซ์ สมบัติเชิงกล ความต้านทานต่อความร้อนและตัวทำละลายของยางเบลนค์ การผสมยาง NR และ XNBR ในปริมาณ 25 และ 75 ส่วนโดยน้ำหนัก ให้ยางซึ่งมีสมบัติเชิงกลค่อนข้างต่ำ แต่ยางมีความสามารถในการทนความร้อนและตัวทำละลายดีที่สุดเมื่อเทียบกับยางเบลนค์ที่สัดส่วนอื่น การใช้สารตัวเร่ง CBS (1.0 phr)+TMTD (0.5 phr) ร่วมกับ ZnO 10 phr ในระบบวัลคาไนซ์แบบใช้กำมะถันชนิด Semi-EV สามารถปรับปรุงสมบัติวัลคาไนซ์และเชิงกลของยางเบลนค์ 25/75 NR/XNBR ให้ดีขึ้น เมื่อเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ 2 ชนิด คือ Epoxyprene<sup>®</sup>25 และ Epoxyprene<sup>®</sup>50 ในยางเบลนค์ส่งผลให้เกิดการเข้ากันได้ดีขึ้นระหว่างเฟสของ NR และ XNBR ทำให้ความต้านทานต่อความร้อนและการบวมพองในตัวทำละลายเพิ่มมากขึ้นอีก และพบว่าสารเพิ่มความเข้ากันได้ที่เหมาะสมในระบบเบลนค์นี้ คือ การใช้ Epoxyprene<sup>®</sup>50 ปริมาณ 0.5 phr ซึ่งได้ให้สมบัติเชิงกลของยางเบลนค์เพิ่มขึ้นประมาณ 11-22 % เมื่อเปรียบเทียบผลการเติมสารตัวเติมเขม่าคาร์บอน N220 และซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่า เขม่าคาร์บอนเสริมสมบัติเชิงกล ความต้านทานต่อความร้อนและตัวทำละลายของยางเบลนค์ได้อย่างมีประสิทธิภาพกว่าสารตัวเติมอีกสองชนิด นอกจากนี้การใส่เขม่าคาร์บอนในปริมาณ 30 phr ให้ยางเบลนค์ซึ่งมีสมบัติเชิงกล ทนต่อความร้อนและตัวทำละลายดีที่สุดสำหรับการเบลนค์ ดังนั้นสูตรยางเบลนค์ที่เหมาะสมต่อการเตรียมยางทนความร้อนและน้ำมันหรือตัวทำละลาย โดยมีความต้านทานต่อความร้อนในระดับที่ไม่แตกต่างจากยางไนไตรล์คาร์บอออกซิเลตมากนักและสามารถต้านทานต่อตัวทำละลายได้ดีกว่ายางไนไตรล์คาร์บอออกซิเลต อีกทั้ง

มีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสม คือ การใช้อัตราส่วนเบลนด์ NR/XNBR = 25/75 ส่วนโดยน้ำหนัก ใช้สารตัวเร่ง CBS (1.0 phr)+TMTD (0.5 phr) ร่วมกับ ZnO 10 phr ในระบบวัลคาไนซ์แบบใช้กำมะถันชนิด Semi-EV ใช้ Epoxyprene<sup>®</sup> 50 ปริมาณเพียง 0.5 phr และควรรีไซม์ดำปริมาณ 30 phr เป็นสารตัวเติม เมื่อนำสูตรยางเบลนด์ที่เหมาะสมนี้ไปเตรียมยางเบลนด์โดยการบดผสมบนเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง และเอ็กซ์ทรูดท่อยางซึ่งคาดว่าจะมีความทนความร้อนและตัวทำละลายหรือน้ำมันได้ระดับหนึ่งใกล้เคียงกับยางเบลนด์ที่เตรียมได้ในการศึกษาเบื้องต้น ผลการเอ็กซ์ทรูดท่อยางที่อุณหภูมิ (80, 90 และ 100°C) และความเร็วรอบของสกรูต่างๆ (30, 40 และ 50 rpm) ด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูดแบบสกรูเดี่ยว พบว่าท่อยางมีผิวเรียบ สม่ำเสมอ ในขณะที่ร้อยละของการบวมพองคายของยางเบลนด์ภายหลังการเอ็กซ์ทรูดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามอุณหภูมิและความเร็วรอบสกรู ดังนั้นการเอ็กซ์ทรูดท่อยางเบลนด์ด้วยเงื่อนไขการเบลนด์ที่เหมาะสมจากการศึกษานี้ด้วยความเร็วรอบสกรู 40 rpm ที่อุณหภูมิไม่สูงมากนัก คือ 80°C เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตท่อยางทนความร้อนและน้ำมัน เนื่องจากเป็นเงื่อนไขที่สามารถลดประหยัดเวลาและพลังงานในการผลิต

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 ศึกษาการเบลนด์ของยาง 3 ชนิดร่วมกัน คือ ยาง NR ยาง XNBR และยาง ENR เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทนน้ำมันและความร้อนที่เสริมจากการใช้ยางธรรมชาติดัดแปลงโมเลกุล คือยาง ENR ร่วมในสูตรยางเบลนด์

6.2.2 ศึกษาวิจัยเพิ่มเติมและหาวิธีการพัฒนาการผลิตท่อยางจากยางเบลนด์ NR/XNBR ที่ลดต้นทุน และมีศักยภาพในเชิงพาณิชย์