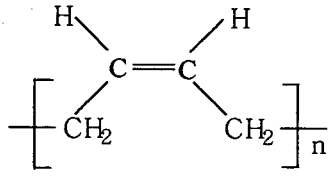
บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุ

3.1.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber) เป็นยางแผ่นผึ่งแห้ง (Air dry sheet, ADS) มีความหนืดมูนนี ML 1+4 100 °C เท่ากับ 80 ผลิตโดยสหกรณ์บ้านควนปันแต จำกัด จ. พัทลุง

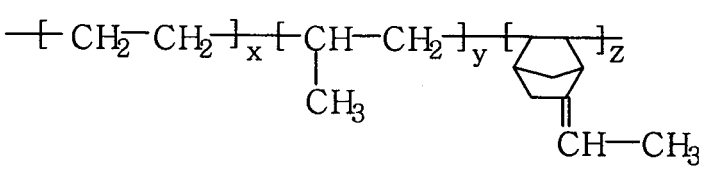
3.1.2 ยางบิวทาไดอีน (Butadiene rubber, BR) ชื่อทางการค้า BSTE BR 01 ผลิตโดยบริษัท BST Elastomers Co., Ltd. จ. ระยอง มีสูตรโครงสร้างและสมบัติพื้นฐาน ดังนี้



ตารางที่ 3.1 สมบัติพื้นฐานของยางบิวทาไดอีน

Raw polymer	Specification Value			Test Method
	Unit	Min.	Max.	
Volatile Matter Content	%	-	0.75	ASTM D 1416
Ash Content	%	-	0.50	ASTM D 1416
Cis-1,4 Content	%	95	-	A-4104
Cold Flow	mg/min	0.1	0.8	A-4105
Raw Mooney Viscosity, ML(1+4)100 °C	MU	40	50	ASTM D 1646

3.1.3 ยางอีพีดีเอ็ม (Ethylene propylene diene rubber, EPDM) ชื่อทางการค้า Royalene 505 มีส่วนที่เป็นไดอีน ชนิด Ethylidene Norbonene (ENB) เท่ากับ 8% โดยน้ำหนัก ผลิตโดยบริษัท Crompton Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา มีสูตรโครงสร้าง ดังนี้



ตารางที่ 3.2 สมบัติพื้นฐานของยางอีพีดีเอ็ม

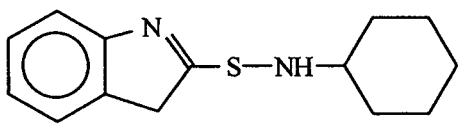
Raw polymer	Specification Value			Test Method	Typical
	Unit	Min.	Max.		
Volatile Matter Content	%	-	0.7	ZS 1008K	-
Ash Content	%	-	0.15	ZS 1005	-
E/P Weight ratio	-	-	-	ZS 1231	60/40
Molecular Weight Distribution	-	-	-	ZS 1296A	Medium
Specific gravity	-	-	-	ASTM D 792	0.86
Mooney Viscosity, ML(1+4)125 °C	MU	50	60	ZS 1220B	-

3.1.4 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) ชนิด white seal ความบริสุทธิ์ 99.7% ใช้เป็นสารกระตุ้น(Activator) มีลักษณะเป็นผงสีขาวละเอียด มีความหนาแน่น 5.57 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ผลิตโดยบริษัท China National Chemical Construction Ltd. ประเทศจีน

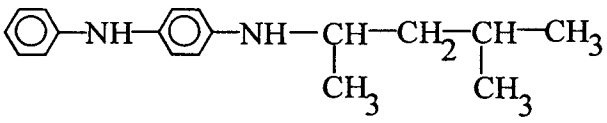
3.1.5 กรดสเตียริก (Stearic acid) ใช้เป็นสารกระตุ้น (Activator) มีลักษณะเป็นเกล็ดสีขาวขุ่น มีความหนาแน่น 0.85 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ผลิตโดยบริษัท Imperial Chemical Co., Ltd. ประเทศไทย

3.1.6 กำมะถัน (Sulphur) ใช้เป็นสารวัลคาไนซ์ มีสูตรทางเคมี คือ S_8 มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเหลือง มีความหนาแน่น 2.07 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ผลิตโดยบริษัท Ajax Chemical Co., Ltd ประเทศเนเธอร์แลนด์

3.1.7 เอ็น-ไซโคลเฮกซิล-2-เบนโซไทอาร์ซิลซัลฟีนาไมด์ (N-cyclohexyl-2-benzothiazyl sulphenamide, CBS)ใช้เป็นสารตัวเร่ง มีจุดหลอมเหลว 96 องศาเซลเซียส ปริมาณการใช้ทั่วไป 0.5-2 phr อยู่ในกลุ่มสารตัวเร่งชนิดซัลฟีนาไมด์ ซึ่งใช้เป็นสารตัวเร่งที่เกิดการหน่วง (delayed action) หรือมีเวลาการสกอช (scorch time) ยาว ผลิตโดยบริษัท Bayer Co., Ltd. ประเทศเยอรมัน มีสูตรโครงสร้าง ดังนี้



3.1.8 เอ็น-(1,3-ไดเมทิลบิวทิล)-เอ็น'-ฟีนิลพาราฟีนีลีนไดเอมีน (N-(1,3-dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylenediamine, 6PPD) ใช้เป็นสารป้องกันการเสื่อมจากการออกซิเดชัน (Antioxidant) ของยาง เป็นสารเคมีในกลุ่มอนุพันธ์ของเอมีน มีลักษณะเป็นเม็ดสีน้ำตาล ผลิตโดยบริษัท Monsanto Co., Ltd ประเทศสหรัฐอเมริกา

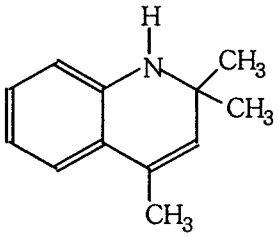


3.1.9 ขี้ผึ้งพาราฟิน (Paraffin wax) ใช้เป็นสารป้องกันการเสื่อมเนื่องจากโอโซน (antiozonant) มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว ผลิตโดยบริษัท Nippon Seiro Co., Ltd. ประเทศญี่ปุ่น

3.1.10 เขม่าดำ (Carbon black) เป็นชนิด High Abrasion Furnace (HAF) เกรด N-330 เป็นสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพ (Reinforcing filler) มีค่าการดูดซึมของไอโอดีน เท่ากับ 80 mg/g และมีค่าการดูดซับไดบิวทิลพทาเลท (Dibutyl phthalate) เท่ากับ 101.0 cc/100g ผลิตโดยบริษัท ไทยคาร์บอนแบล็ค จำกัด (มหาชน)

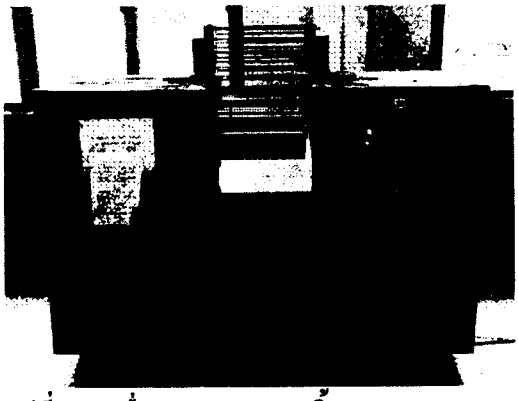
3.1.11 โทลูอีน (Toluene) เป็นเกรดวิเคราะห์ (AR-grade) มีความบริสุทธิ์ 99.5% มีจุดเดือดเท่ากับ 110.6 $^{\circ}C$ น้ำหนักโมเลกุล 92.14 g/mol ความหนาแน่น 0.867 g/cm^3 ใช้เป็นตัวทำละลายในการหาพันธะเชื่อมโยงในยาง ผลิตโดยบริษัท Lab Scan Co., Ltd. ประเทศสาธารณรัฐไอร์แลนด์

3.1.12 2,2,4-ไตรเมทิล-1,2-ไดไฮโดรควิโนลีน (2,2,4-Trimethyl-1,2-dihydroquinoline, TMQ) ทำหน้าที่เป็นสารแอนตี้ออกซิแดนท์ ลักษณะเม็ดสีน้ำตาล ผลิตโดยบริษัท Flexsys Co., Ltd. ประเทศสหรัฐอเมริกา มีสูตรโครงสร้าง ดังนี้



3.2 อุปกรณ์

3.2.1 เครื่องผสมยางสองลูกกลิ้ง (Two Roll Mill) เป็นเครื่องสำหรับบดผสมยางกับสารเคมี ประกอบด้วยลูกกลิ้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว ความยาว 15 นิ้ว มีอัตราส่วนระหว่างความเร็วผิวของลูกกลิ้งหน้าต่อลูกกลิ้งหลัง (Friction ratio) เท่ากับ 1:1.05 สามารถตั้งอุณหภูมิลูกกลิ้งได้ ผลิตโดย หจก. ชัยเจริญการช่าง ประเทศไทย ลักษณะของเครื่องแสดงดังรูปที่ 3.1

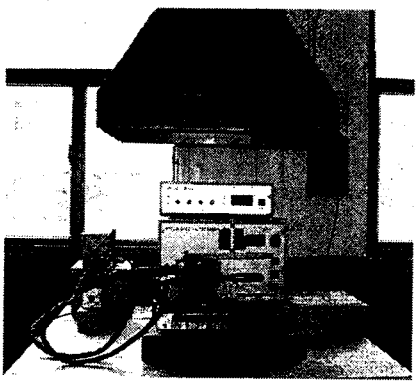


รูปที่ 3.1 เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two Roll Mill)

3.2.2 เครื่องรีโอมิเตอร์แบบแผ่นหมุน (Oscillating Disk Rheometer) เป็นเครื่องรุ่น ODR-2000 เป็นเครื่องสำหรับทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยาง (Cure characteristics) ใช้จานโลหะแบบ Biconical Disk ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.3996 นิ้ว การหมุนของจานใช้มุมแกว่งกลับไปมาด้วยมุมบิด 1 องศา ความถี่ 100 รอบต่อนาที สามารถปรับอุณหภูมิทดสอบได้สูงสุดที่ 200 °C ผลิตโดยบริษัท Monsanto ประเทศสหรัฐอเมริกา ลักษณะของเครื่องแสดงดังรูปที่ 3.2

รูปที่ 3. 2 เครื่องรีโอมิเตอร์แบบแผ่นหมุน (ODR 2000)

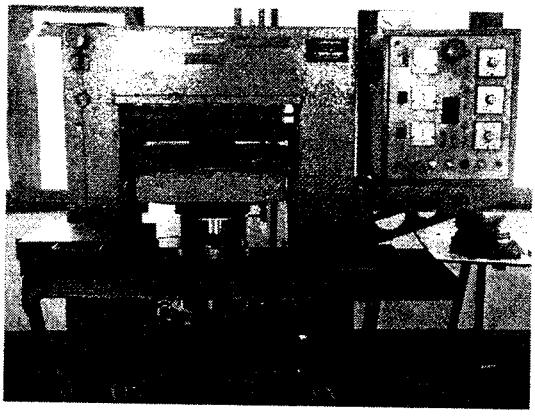
3.2.3 เครื่องบราเบนเดอร์ พลาสติคอร์เดอร์ (Brabender Plasticorder) เป็นเครื่องผสมแบบปิดขนาดเล็กรุ่น PLE 331 ประกอบด้วยโรเตอร์ 2 ตัว มีปริมาตรความจุของห้องผสมเท่ากับ 80 cm^3 สามารถควบคุมความเร็วของโรเตอร์และอุณหภูมิขณะผสมได้ ประกอบด้วยอุปกรณ์หลักคือ เครื่องผสม (Plasti-Corder PLE 331) เครื่องผลิตน้ำมันร้อนเพื่อควบคุมอุณหภูมิห้องผสมซึ่งควบคุมความร้อนด้วยเทอร์โมสแตท (thermostat) ตัวเครื่องจะเชื่อมต่อกับระบบรับสัญญาณข้อมูล (Data acquisition system) เพื่อวัดค่าทอร์กและอุณหภูมิของการผสม ผลิตโดยบริษัท Brabender Ohg Duisburg ประเทศเยอรมัน เป็นเครื่องมือสำหรับบดผสมยาง และจัดเป็นอุปกรณ์ประเภท Torque Rheometer โดยเครื่องจะบันทึกกราฟที่แสดงลักษณะตามการเปลี่ยนแปลงของการผสมที่สำคัญ 2 ปริมาณ คือ กราฟระหว่างทอร์กกับเวลา และกราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ลักษณะของเครื่องแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องบราเบนเดอร์ พลาสติคอร์เดอร์ (Brabender Plasticorder)

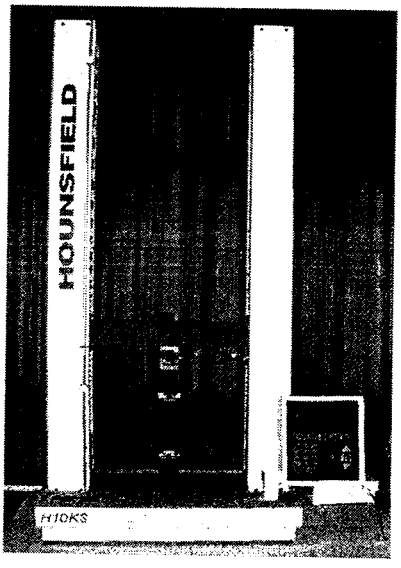
3.2.4 เครื่องอัดเบ้า (Compression moulding machine)

เป็นเครื่องอัดโดยใช้แรงดันไฮดรอลิกแบบ 2 ชั้น ใช้สำหรับอัดยางชิ้นทดสอบ แผ่นอัดมีขนาด 15x15 นิ้ว ให้ความร้อนโดยไฟฟ้า เส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกไฮดรอลิก 10 นิ้ว สามารถกำหนดแรงดันสูงสุด 6,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และสามารถปรับอุณหภูมิได้ถึง 399±10 องศาเซลเซียส ผลิตโดยห้างหุ้นส่วนจำกัด ชัยเจริญการช่าง กรุงเทพฯ ประเทศไทย ลักษณะของเครื่องแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่องอัดเบ้า (Compression moulding machine)

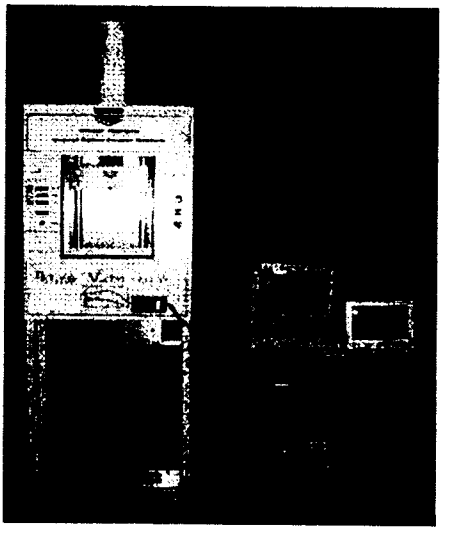
3.2.5 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Tensometer) เป็นเครื่องที่ใช้ทดสอบแรงกดหรือแรงดึง สามารถรับแรงได้สูงสุด 10 kN มีตัวรับแรง (load cell) ทำหน้าที่แปลงสัญญาณจากค่าแรงที่ได้ผ่านวงจรอิเล็กทรอนิกส์เป็นค่าแรงดึงหรือแรงกดในหน่วยนิวตัน สามารถตั้งความเร็วในการเคลื่อนที่ 0.01 ถึง 1000 มิลลิเมตรต่อนาที เป็นเครื่องยี่ห้อ Hounsfield รุ่น H 10KS ผลิตโดยบริษัท Hounsfield Test Equipment ประเทศอังกฤษ ลักษณะของเครื่องแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Tensometer)

3.2.6 เครื่องรีโอมิเตอร์แบบคาปิลลารี่ (Capillary Rheometer) เป็นเครื่องวิเคราะห์สมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอม ยี่ห้อโรซาน (Rosand) มีส่วนประกอบหลัก คือ กระบอกโลหะ

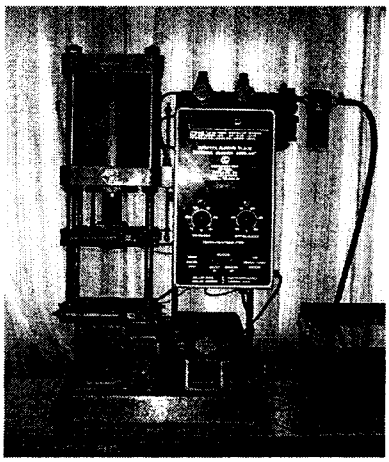
(Barrel) ซึ่งห่อหุ้มด้วยตัวให้ความร้อน 3 ชุด ซึ่งสามารถตั้งโปรแกรมได้ ที่บริเวณตรงกลางของกระบอกจะมีการเจาะรูที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร จำนวน 1 รู ให้มีความยาวตลอดแนวของกระบอก ส่วนปลายกระบอกจะมีร่องเกลียวที่สามารถติดตั้งหัวคายได้ ส่วนบนของเครื่องมีส่วนประกอบหลัก คือ ระบบขับเคลื่อนลูกสูบกดพอลิเมอร์หลอมด้วยอัตราเร็วที่กำหนดไว้ ในหน่วย cm/min นอกจากนี้ความเร็วในการทดลองจะแปรผันโดยตรงกับอัตราเฉือนที่ใช้ในการทำให้พอลิเมอร์ หลอมเกิดการไหล ในการทดลองนี้ใช้ดายที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร และมีความยาว 16 มิลลิเมตร โดยกำหนดค่าอัตราการเฉือนอยู่ในช่วง 10-12,000 s^{-1} ใช้อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 100 องศาเซลเซียส ลักษณะของเครื่องแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องรีโอมิเตอร์แบบคาปิลลารี ยี่ห้อโรซาน (Rosand Capillary Rheometer)

3.2.7 เครื่องบ่มเร่ง (Gear Aging Oven) เป็นเครื่องที่ใช้ในการให้ความร้อนแก่ยาง เพื่อใช้ในการทดสอบการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพหลังจากการให้ความร้อนในช่วงเวลาที่กำหนด สามารถตั้งอุณหภูมิสูงสุดได้ถึง 300 ^{o}C มีช่องสำหรับแขวนชิ้นตัวอย่าง 2 ชั้น ชั้นละ 56 ช่อง เครื่องรุ่น GPHH-200 ผลิตโดยบริษัท Tabai Espec Corp Co., Ltd. ประเทศญี่ปุ่น

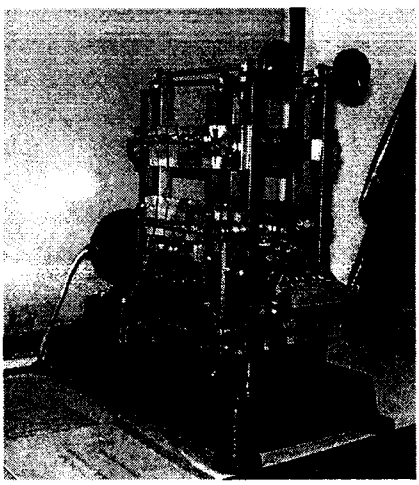
3.2.8 เครื่องมูนนี่วิสโคมิเตอร์ (Mooney viscometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดความหนืดและลักษณะการวัลคาไนซ์ของยาง ใช้ระบบปิด-เปิดด้วยลม สามารถตั้งอุณหภูมิการทดสอบได้ตั้งแต่ 80-180 องศาเซลเซียส จานโลหะมี 2 ขนาด คือ ขนาดใหญ่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 38.01±0.01 มิลลิเมตร หนา 5.54±0.03 มิลลิเมตร ขนาดเล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.00±0.13 มิลลิเมตร หนา 10.62 ± 0.03 มิลลิเมตร หมุนด้วยความเร็ว 2 รอบ/นาที ผลิตโดยบริษัท SPRI Co., Ltd. ประเทศอังกฤษ ลักษณะของเครื่องแสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เครื่องมูนนีวิสโคมิเตอร์

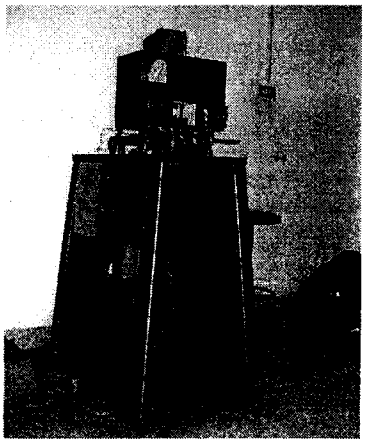
3.2.9 เครื่องทดสอบความทนทานต่อการหักงอ (De Mattia flexing machine)

ใช้สำหรับทดสอบความทนทานต่อการหักงอ และความทนทานต่อการขยายตัวของรอยแตก ประกอบด้วยหัวที่จับยางที่อยู่กับที่และหัวจับยางที่เคลื่อนไหวได้ หัวจับดังกล่าวจะจับปลายของยางตัวอย่างทดสอบเอาไว้ หัวจับที่เคลื่อนไหวนั้น จะเคลื่อนขึ้นลงอยู่ในแนวตั้ง ระยะห่างระหว่างที่จับทั้งสองในขณะใกล้ที่สุดเท่ากับ 19.0 มม. และระยะที่ห่างที่สุดระหว่างที่จับทั้งสองเท่ากับ 76.2 มม. โดยระยะชิดห่างจากที่จับอยู่กับที่นั้นสามารถปรับได้ ความเร็วของการเคลื่อนไหวนี้เท่ากับ 300 ± 10 รอบ/นาที ระยะการเคลื่อนไหวสูงสุดของที่จับนั้นควรปรับได้ถึง 100 มม. ผลิตโดยบริษัท H.W Wallace Co.,Ltd. ประเทศอังกฤษ ลักษณะของเครื่องแสดงดังรูปที่ 3.8



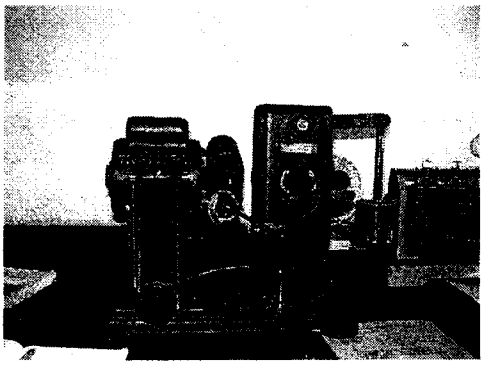
รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบความทนทานต่อการหักงอ

3.2.10 เครื่องกู๊ดริชเฟลกโซมิเตอร์ (Goodrich flexometer) ใช้สำหรับทดสอบค่าความร้อนสะสม (Heat Build up) ในยาง ชิ้นทดสอบจะถูกกระทำด้วยความถี่ 1800 รอบ/นาที ตรงฐานของแท่นวางชิ้นทดสอบจะมีเทอร์โมคับเปิ้ล (thermocouple) สำหรับวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (Temperature rise) ของยาง ชิ้นทดสอบเป็นรูปทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 17.8± 0.1 มิลลิเมตร (0.700± 0.005 นิ้ว) สูง 25.00±0.15 มิลลิเมตร (1.000 ± 0.010 นิ้ว) ผลิตโดย Ferry Machine Company ประเทศสหรัฐอเมริกา ลักษณะของเครื่องแสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เครื่อง Goodrich Flexometer

3.2.11 เครื่องทดสอบความสึกหรอแบบอาครอน (Akron abrader) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบค่าการสึกหรอของยาง มีความเร็วในการหมุน 250 ± 5 รอบ/นาที แผ่นหินขัดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร หนา 2.5 เซนติเมตร หินขัดมีความหยาบเกรด A36-P5-V30 ระนาบการหมุนของยางกับหินขัด 15 องศา หินขัดกดลงบนยางโดยใช้น้ำหนัก 4.5 กิโลกรัม ผลิตโดยบริษัท H.W Wallace Co.,Ltd, ประเทศอังกฤษ ลักษณะของเครื่องแสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบความทนทานต่อการสึกหรอแบบอาครอน

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 อิทธิพลของการเบลนด์ยางดิบชนิดต่างๆ ต่อสมบัติการไหล

3.3.1.1 การทดสอบความหนืดมูนนี

3.3.1.1.1 ยางดิบชนิดต่างๆ ทดสอบหาค่าความหนืดของยางธรรมชาติ ยางบิวทาไดอีน และยางอีพีดีเอ็มด้วยเครื่องมูนนีวิสโคมิเตอร์ (Mooney viscometer) โดยใช้โรเตอร์ (Rotor) ขนาดใหญ่ ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 100 °C โดยอุ่นยาง 1 นาที แล้วเดินเครื่องให้โรเตอร์หมุนต่ออีก 4 นาที รายงานค่าที่ได้เป็น ML (1+4, 100 °C)

3.3.1.1.2 ยางเบลนด์ ทำการบดยางโดยนำยางธรรมชาติก่อนเป็นเวลา 4 นาที จากนั้นจึงใส่ยางบิวทาไดอีน บดต่อจนเป็นเป็นเนื้อเดียวกันประมาณ 1 นาที และใส่ยางอีพีดีเอ็ม บดต่ออีก 1 นาที โดยบดยางผ่านลูกกลิ้งขนาด 6 นิ้ว ที่อุณหภูมิ 60 °C ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 1.3 มิลลิเมตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นดำเนินการทดลองเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.3.1.1.1 ซึ่งในการทดสอบจะทำการเปรียบเทียบความหนืดมูนนีของยางเบลนด์ที่แปรอัตราส่วนยางต่างๆ คือ ยางธรรมชาติ/ยางบิวทาไดอีน/ยางอีพีดีเอ็ม ที่อัตราส่วนต่างๆ คือ 50/50/0, 47.5/47.5/5, 45/45/10, 40/40/20, 35/35/30, 30/30/40 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

3.3.1.2 การทดสอบด้วยเครื่องคาปิลลารีรีโอมิเตอร์

3.3.1.2.1 ยางดิบชนิดต่างๆ บดยางธรรมชาติ ยางบิวทาไดอีน และยางอีพีดีเอ็ม โดยบดยางผ่านลูกกลิ้งขนาด 6 นิ้ว ที่อุณหภูมิ 60 °C ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 1.3 มิลลิเมตร เป็นเวลา 6 นาที แล้วทำการทดสอบสมบัติทางรีโอโลยีของยางดิบด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบคาปิลลารี (Rosand capillary rheometer) ที่อุณหภูมิ 120 °C และตั้งอัตราการเฉือนในช่วง 10–12,000 s^{-1} โดยใช้ดายที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ความยาว 16 มิลลิเมตร และมุมไหลเข้า 180 องศา ซึ่งในการทดสอบจะทำการเปรียบเทียบสมบัติทางรีโอโลยีของยางดิบแต่ละชนิด

3.3.1.2.2 ยางเบลนด์ นำยางเบลนด์ที่ได้จากหัวข้อ 3.3.1.1.2 ไปทดสอบด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบคาปิลลารี ที่อุณหภูมิ 120 °C และตั้งอัตราการเฉือนในช่วง 10–12,000 s^{-1} โดยใช้ดายที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ความยาว 16 มิลลิเมตร และมุมไหลเข้า 180 องศา ซึ่งในการทดสอบจะทำการเปรียบเทียบสมบัติการไหลของยางเบลนด์ที่แปรอัตราส่วนยางต่างๆ ดังนี้ คือ ยางธรรมชาติ/ยางบิวทาไดอีน/ยางอีพีดีเอ็ม ที่อัตราส่วนต่างๆ คือ 50/50/0, 47.5/47.5/5, 45/45/10, 40/40/20, 35/35/30, 30/30/40 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

3.3.2 การศึกษาสมบัติการวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงกลของยางชนิดต่างๆ

3.3.2.1 การเตรียมคอมปาวด์ยางแต่ละชนิด

เตรียมคอมปาวด์ของยางแต่ละชนิด เพื่อศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์แต่ละชนิด โดยทำการบดผสมยางธรรมชาติ (ADS) ยางบิวทาไดอีน (BR) และยางอีพีดีเอ็ม (EPDM) กับสารเคมีชนิดต่างๆ ดังสูตรในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สูตรที่ใช้ในการเตรียมคอมปาวด์

Ingredients	Quantity (phr)		
	1	2	3
ADS	100	-	-
BR (BR 01)	-	100	-
EPDM (Royalene 505)	-	-	100
ZnO	4	4	4
N-330	50	50	50
Naphthenic oil	6	6	6
Stearic acid	1	1	1
6PPD	2.5	2.5	2.5
TMQ	1.5	1.5	1.5
Paraffin wax	2.0	2.0	2.0
CBS	1.0	1.0	1.0
Sulfur	1.2	1.2	1.2

ทำการผสมยางกับสารเคมีโดยใช้เครื่องบดผสมยางสองลูกกลิ้งขนาด 6x15 นิ้ว ซึ่งมีลำดับขั้นตอนและระยะเวลาการผสมแสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ลำดับขั้นตอนการผสมยางกับสารเคมี

ขั้นตอน	เวลา (นาที)
บดยาง	4
เติมซิงค์ออกไซด์	2
เติมเขม่าดำและน้ำมัน	12
เติมกรดสเตียริก	2
เติม 6PPD	3
เติม TMQ	2
เติมพาราฟิน	1
เติม CBS	2
เติมกำมะถัน	2
ม้วนยาง	10 ครั้ง
รวม	30

3.3.2.2 การทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ (Cure characteristic)

นำยางคอมปาวด์มาทำการทดสอบด้วยเครื่อง ODR 2000 ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D2084-95 (2000) ที่อุณหภูมิ 150 °C จานโลหะมีมุมบิด 1 องศา เครื่องจะบันทึกกราฟการวัลคาไนซ์ (curing curve) หรือ ODR curve ซึ่งสามารถหาค่าต่างๆ จากกราฟได้ดังนี้

- ช่วงเวลาที่ยางสามารถแปรรูปได้ (Scorch time : ts1) ซึ่งเป็นเวลาที่ยางมีค่าแรงบิดสูงขึ้น 1 dN-m หรือ 1 lb-in จากจุดต่ำสุด M_L
- ค่าแรงบิดต่ำสุดที่เกิดจากการเฉือนระหว่างยางกับจานโลหะ (minimum torque (M_L), dN-m)
- แรงบิดสูงสุดที่เกิดจากการเฉือนระหว่างยางกับจานโลหะ (maximum torque (M_H), dN-m)
- เวลาการวัลคาไนซ์ (cure time (t'90), min) ซึ่งเป็นเวลาที่ยางมีค่าแรงบิดเป็น $M_L + 90(M_H-M_L)/100$

- ดัชนีความเร็วในการวัลคาไนซ์ (cure rate index (CRI), min^{-1}) คำนวณตามสมการที่ 3.1

$$\text{Cure rate index, CRI} = \frac{100}{\text{Cure time-Scorch time}} \qquad (3.1)$$

หลังจากนั้นนำยางคอมปาวด์ที่ได้จากการเตรียมในหัวข้อ 3.3.2.1 ไปทดสอบสมบัติตามหัวข้อ 3.3.5

3.3.2.3 การทดสอบหาพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ของยางแต่ละชนิด

ทำการทดสอบด้วยเครื่อง ODR 2000 ซึ่งมีวิธีการทดสอบดังนี้ นำยางคอมปาวด์ที่ได้จากการเตรียมจากตารางที่ 3.3 และขั้นตอนการผสมสารเคมีตามตารางที่ 3.4 ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง มาทดสอบหาลักษณะการวัลคาไนซ์โดยการแปรอุณหภูมิที่ 150, 160, 170 และ 180 $^{\circ}C$ และใช้เวลาการทดสอบ 30 นาที เพื่อใช้ในการคำนวณหาพลังงานกระตุ้นในการวัลคาไนซ์ ตามสมการของอาร์รีเนียส (Arrhenius equation) แสดงดังสมการที่ 3.2

$$k = Ae^{-Ea/RT} \qquad (3.2)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่อัตราการวัลคาไนซ์ของยาง

A คือ ค่าคงที่ของรูปร่าง (dimension constant)

E_a คือ พลังงานกระตุ้นให้เกิดการวัลคาไนซ์

T คือ อุณหภูมิองศาสัมบูรณ์ (K)

R คือ ค่าคงที่ก๊าซ (Gas constant) มีค่า 1.987 $cal.mol^{-1}g^{-1}$

3.3.3 ศึกษาอิทธิพลของการทำการวัลคาไนซ์บางส่วน (Precuring) ต่อสมบัติของยางเบลนด์

3.3.3.1 การเตรียมยางเบลนด์แบบปกติ (Conventional blending)

เตรียมคอมปาวด์ของยางเบลนด์ เพื่อศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์โดยการบดผสมยางธรรมชาติก่อนเป็นเวลา 4 นาที จากนั้นจึงใส่ยางบิวทาไดอีน บดต่อจนเป็นเนื้อเดียวกันประมาณ 2 นาที และใส่ยางอีพีดีเอ็ม บดต่ออีก 2 นาที เติมสารเคมีชนิดต่างๆ ดังรายละเอียดการผสมยางกับสารเคมีแสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 สูตรที่ใช้ในการเตรียมคอมปาวด์

Ingredients	Quantity (phr)					
	1	2	3	4	5	6
ADS	50	47.5	45	40	35	30
BR (BR 01)	50	47.5	45	40	35	30
EPDM (Royalene 505)	-	5	10	20	30	40
ZnO	4	4	4	4	4	4
N-330	50	50	50	50	50	50
Naphthenic oil	6	6	6	6	6	6
Stearic acid	1	1	1	1	1	1
6PPD	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
TMQ	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Paraffin wax	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
CBS	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Sulfur	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2

ทำการผสมยางกับสารเคมีโดยใช้เครื่องบดผสมยางสองลูกกลิ้ง ซึ่งมีลำดับขั้นตอนและระยะเวลาการผสมแสดงดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ลำดับขั้นตอนการผสมยางกับสารเคมี

ขั้นตอน	เวลา (นาที)
บดยางธรรมชาติ	4
ใส่ยางบิวทาไดอีน	2
ใส่ยางอีพีดีเอ็ม	2
เติมซิงค์ออกไซด์	2
เติมเขม่าดำและน้ำมัน	10
เติมกรดสเตียริก	1
เติม 6PPD	2
เติม TMQ	2
เติมพาราฟิน	1
เติม CBS	2
เติมกำมะถัน	2
ม้วนยาง	10 ครั้ง
รวม	30

3.3.3.1.1 การศึกษาสมบัติการวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงกล

นำยางคอมปาวด์จากหัวข้อที่ 3.3.3.1 ไปทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบแผ่นหมุน (ODR 2000) ที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อหาลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์ตามหัวข้อที่ 3.3.2.2 หลังจากนั้นนำยางคอมปาวด์ไปอัดเบ้าตามเวลาการวัลคาไนซ์ จากนั้นนำยางวัลคาไนซ์ที่ได้ไปทดสอบสมบัติเชิงกลตามหัวข้อ 3.3.5

3.3.3.2 การเตรียมยางเบลนด์แบบทำวัลคาไนซ์บางส่วนแบบสแตติก (Static precuring technique)

3.3.3.2.1 ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการทำวัลคาไนซ์บางส่วนของยางอีพีดีเอ็มโดยเทคนิคสแตติก (Static precuring technique)

เตรียมคอมปาวด์ของยางอีพีดีเอ็ม ด้วยเครื่องผสมยางสองลูกกลิ้งโดยใช้สารเคมีชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.7 และมีลำดับขั้นตอนและระยะเวลาการผสมแสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.7 สูตรที่ใช้ในการเตรียมคอมปาวด์

Ingredients	Quantity (phr)
EPDM (Royalene 505)	100
ZnO	4
N-330	50
Naphthenic oil	6
Stearic acid	1
6PPD	2.5
TMQ	1.5
Paraffin wax	2.0
CBS	1.0
Sulfur	1.2

นำคอมปาวด์ของยางอีพีดีเอ็มรีดเป็นแผ่นหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร แล้วนำมาทำการวัลคาไนซ์บางส่วนโดยการอบในตู้อบอากาศร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 100 °C โดยแปรเวลาการอบยางที่เวลาต่างๆ คือ 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 ชั่วโมง ตามลำดับ

นำยางอีพีดีเอ็มคอมปาวด์ที่ผ่านการอบที่เวลาต่างๆ มาเบลนด์กับคอมปาวด์ของยางธรรมชาติที่ใช้สูตรเดียวกันกับยางอีพีดีเอ็ม ตามตารางที่ 3.3 โดยทำการเบลนด์บนเครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง ในอัตราส่วนยางธรรมชาติ:ยางอีพีดีเอ็ม เท่ากับ 1:1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นำยางเบลนด์ที่ได้ มาทดสอบเวลาการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบแผ่นหมุนแบบ ODR 2000 และขึ้นรูปเพื่อเตรียมชิ้นทดสอบด้วยเครื่องอัดเบ้าที่อุณหภูมิ 150 °C ตามเวลาการวัลคาไนซ์ แล้วทำการทดสอบสมบัติด้านการดึงตามรายละเอียดการทดสอบในหัวข้อที่ 3.3.5.1 เพื่อวิเคราะห์หาเวลาที่เหมาะสมในการทำการวัลคาไนซ์บางส่วนแบบสแตติกของยางอีพีดีเอ็ม

เมื่อทราบเวลาในการทำการวัลคาไนซ์บางส่วนของยางอีพีดีเอ็มที่เหมาะสมแล้ว จึงนำยางอีพีดีเอ็มที่วัลคาไนซ์บางส่วนที่เวลาการอบที่เหมาะสมมาทำการเบลนด์กับคอมปาวด์ของยางธรรมชาติ/ยางบิวทาไดอีน ที่อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก โดยแปรอัตราส่วนของยางอีพีดีเอ็มเท่ากับ 5, 10, 20, 30 และ 40% ตามลำดับ ดังตารางที่ 3.5

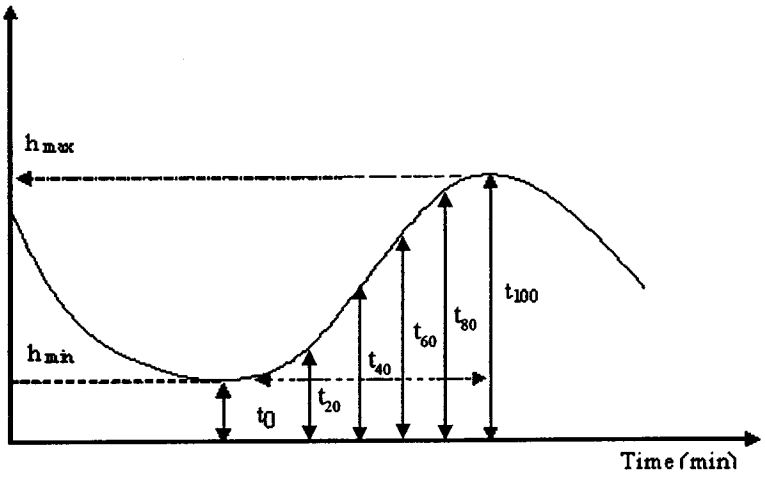
3.3.3.2.2 การศึกษาสมบัติการวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงกล

นำยางอีพีดีเอ็มที่วัลคาไนซ์บางส่วนที่เวลาการวัลคาไนซ์เหมาะสมมาเบลนด์กับคอมปาวด์ของยางธรรมชาติ/ยางบิวทาไดอีนที่อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก โดยแปรปริมาณยางอีพีดีเอ็มเท่ากับ 5, 10, 20, 30 และ 40% ไปทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบแผ่นหมุน (ODR 2000) ที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อหาลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ตามหัวข้อที่ 3.3.2.2 จากนั้นจึงทำการทดสอบสมบัติเชิงกลตามหัวข้อ 3.3.5

3.3.3.3 การวัลคาไนซ์บางส่วนของยางอีพีดีเอ็มโดยเทคนิคไดนามิกส์ (Dynamic precuring technique)

3.3.3.3.1 ศึกษาระดับการทำวัลคาไนซ์บางส่วนของยางอีพีดีเอ็มที่เหมาะสม โดยเทคนิคไดนามิกส์ (Dynamic precuring technique)

เตรียมคอมปาวด์ของยางอีพีดีเอ็มที่อัตราส่วนต่างๆ บนเครื่องบดผสมยางสองลูกกลิ้ง โดยใช้สารเคมีชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.7 และมีลำดับขั้นตอนและระยะเวลาดังแสดงในตารางที่ 3.4 หลังจากนั้นนำยางคอมปาวด์ที่เตรียมได้มาทำการวัลคาไนซ์บางส่วนโดยให้ความร้อนในเครื่องบราเบนเดอร์พลาสติคอร์เดอร์ (Brabender Plasticorder) ที่อุณหภูมิ 100 °C ความเร็วโรเตอร์ 60 รอบต่อนาที และ Fill factor เท่ากับ 0.8 โดยแปรระดับของค่าทอร์ก โดยสังเกตจากค่าทอร์กของเครื่องบราเบนเดอร์พลาสติคอร์เดอร์ ที่ระดับ 20, 40, 60 และ 80 % ของค่าทอร์กสูงสุดดังแสดงในรูปที่ 3.11 เมื่อ t_0, t_{20}, t_{40}, t_{60} และ t_{80} คือ ค่าทอร์กที่ต่ำสุด ค่าทอร์กที่ 0, 20, 40, 60 และ 80% ของค่าทอร์กสูงสุด (t_{100}) ตามลำดับ



รูปที่ 3.11 แผนภาพค่าทอร์กที่วัดจากห้องผสมของเครื่องบราเบนเดอร์ พลาสติคอร์เดอร์

จากนั้นนำยางคอมปาวด์ของอีพีดีเอ็ม ที่วัลคาไนซ์บางส่วนที่ระดับของค่าทอร์ก เท่ากับ 0, 20, 40, 60 และ 80 % ของค่าทอร์กสูงสุด มาเบลนด์กับคอมปาวด์ของ ยางธรรมชาติ/ยางบิวทาไดอีน ที่อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก โดยแปรปริมาณของคอมปาวด์ยางอีพีดีเอ็ม เท่ากับ 5, 10, 20, 30 และ 40% ตามลำดับ จากนั้นนำยางเบลนด์ที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง

นำยางอีพีดีเอ็มที่วัลคาไนซ์บางส่วนที่ระดับของค่าทอร์กที่เหมาะสมมาเบลนด์กับคอมปาวด์ของยางธรรมชาติ/ยางบิวทาไดอีนที่อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก โดยแปรอัตราส่วนของยางอีพีดีเอ็ม เท่ากับ 5, 10, 20, 30 และ 40% ตามลำดับ ตามสูตรในตารางที่ 3.5 จากนั้นทดสอบสมบัติเชิงกลอื่นๆ ตามหัวข้อ 3.3.5

3.3.3.3.2 การศึกษาสมบัติการวัลคาไนซ์

ยางคอมปาวด์ที่เตรียมได้จากหัวข้อที่ 3.3.3.3.1 ไปทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบแผ่นหมุน (ODR 2000) ที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อหาลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ตามหัวข้อที่ 3.3.2.2 จากนั้นจึงทำการทดสอบสมบัติเชิงกลตามหัวข้อ 3.3.5

3.3.4 การเตรียมชิ้นทดสอบ

นำยางคอมปาวด์ที่ได้ทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง ODR 2000 ไปอัดเบ้าด้วยเครื่องอัดเบ้า (Compression moulding) ที่อุณหภูมิ 150 °C ความดัน 1000 ปอนด์/ตารางนิ้ว โดยใช้เวลาการวัลคาไนซ์ที่ T_{90} จากนั้น ทิ้งยางวัลคาไนซ์เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ก่อนนำไปตัดเป็นชิ้นทดสอบ หรือทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆ

3.3.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล

เตรียมชิ้นทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3182-89 (1996) ด้วยเครื่องอัดเบ้าไฮดรอลิกที่อุณหภูมิ 150 °C หลังจากนั้นนำชิ้นทดสอบที่ได้ไปทดสอบสมบัติเชิงกล ตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.5.1 การทดสอบสมบัติด้านการดึง (Tensile Properties)

ทดสอบสมบัติด้านการดึง ตามมาตรฐาน ASTM D412 (2000) โดยนำแผ่นยางที่ได้จากการอัดเบ้า มาตัดชิ้นทดสอบเป็นรูปดัมเบลขนาด Die Type C ใช้อัตราเร็วในการดึงชิ้นทดสอบ 500 มิลลิเมตรต่อนาที ด้วยเครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง ดังรูปที่ 3.5 วัดแรงดึง

และระยะยืด แล้วนำไปคำนวณสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้

(1) การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength, TS)

สูตรคำนวณความต้านทานต่อแรงดึง แสดงดังสมการที่ 3.3

$$\text{Tensile strength (MPa)} = \frac{F}{A} \qquad (3.3)$$

เมื่อ F คือ แรงที่ใช้ในการดึงชิ้นทดสอบจนขาด (นิวตัน)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ (ตารางมิลลิเมตร)

(2) การทดสอบความสามารถในการยืด (%Elongation at break, %EB)

สูตรคำนวณความสามารถในการยืด แสดงดังสมการที่ 3.4

$$\text{Elongation at break (\%)} = \frac{(L - Lo)}{Lo} \times 100 \qquad (3.4)$$

เมื่อ L คือ ระยะที่ชิ้นทดสอบสามารถยืดตัวได้จนขาด (เซนติเมตร)

L_0 คือ ระยะที่กำหนดก่อนทำการทดสอบ (เซนติเมตร)

(3) การทดสอบค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300 เปอร์เซ็นต์ (300% Modulus)

สูตรคำนวณค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังสมการที่ 3.5

$$\text{300 \% Modulus} = \frac{F}{A} \qquad (3.5)$$

เมื่อ F คือ แรงที่ใช้ในการดึงชิ้นทดสอบที่ระยะยืด 300 เปอร์เซ็นต์ (นิวตัน)

A คือ พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของยาง (ตารางมิลลิเมตร)

3.3.5.2 การทดสอบความทนทานต่อการหักงอแบบ De Mattia (Flex resistance)

ทดสอบความทนทานต่อการหักงอตามมาตรฐาน ASTM D 813-95 (2005) โดยใช้ชิ้นทดสอบมาตรฐานความกว้าง 25 มม. ยาว 152 มม. หนา 6.35 ± 0.13 มม. ตรงกลางแผ่นมีร่องครึ่งวงกลมรัศมี 2.39 ± 0.03 มม. ความหนาของชิ้นทดสอบต้องมีความหนาแตกต่างกันไม่เกิน 0.1 มม. ตั้งตัวอย่างทิ้งไว้ในห้องทดสอบอย่างน้อย 12 ชั่วโมง ทำการทดสอบโดยใส่ยางเข้าไปที่จับแล้วเดินเครื่อง ความเร็วของการเคลื่อนไหวเท่ากับ 300 รอบต่อนาที พร้อมกับบันทึกเวลา ให้เดินเครื่องตลอดเวลาและให้หยุดตรวจสอบรอยแตกบ่อยๆ จนกระทั่งรอยแตกยาว 2 เซนติเมตร (ในการตรวจสอบรอยแตกควรจัดให้ระยะห่างระหว่างที่จับเท่ากับ 65 มม.) บันทึกจำนวนรอบที่ใช้

3.3.5.3 การทดสอบความร้อนสะสมในยาง (Heat build up)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D623-99 (2005) ทำการทดสอบโดยใช้ชิ้นทดสอบมาตรฐานมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 17.8±0.1 มิลลิเมตร (0.700± 0.005 นิ้ว) สูง 25.00±0.15 มิลลิเมตร (1.000 ± 0.010 นิ้ว) ทดสอบโดยเครื่องกู๊ดริชเฟล็กโซมิเตอร์ (Goodrich Flexometer) โดยตั้งอุณหภูมิของห้องทดสอบเท่ากับ 100 °C ก่อนเริ่มทำการทดสอบให้อุ่นชิ้นทดสอบก่อนอย่างน้อย 20 นาที ชิ้นทดสอบจะถูกกระทำด้วยความถี่ 1800 รอบต่อนาที ตรงฐานของแท่นวางชิ้นทดสอบจะมีเทอร์โมคัปเปิ้ล (Thermocouple) สำหรับวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (Temperature rise) ของยาง ใช้เวลาในการทดสอบ 25 นาที ทำการทดสอบ 3 ครั้ง แล้วบันทึกอุณหภูมิเริ่มต้น และอุณหภูมิสุดท้าย คำนวณหาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น แสดงดังสมการที่ 3.6

$$\text{Temperature rise } (\Delta T) = T_{25} - T_0 \qquad (3.6)$$

เมื่อ ΔT คือ ค่าความร้อนสะสม (°C)

T_{25} คือ อุณหภูมิของยางที่เวลาทดสอบ 25 นาที (°C)

T_0 คือ อุณหภูมิของยางเริ่มต้นทดสอบ (°C)

3.3.5.4 การทดสอบความทนทานต่อการสึกหรอแบบอาครอน (Akron Abrasion resistance)

ทดสอบตามมาตรฐาน B.S. 903 : Part A (1957) โดยเตรียมตัวอย่างชิ้นทดสอบให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 63.5 มิลลิเมตร ตรงกลางมีรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร ชั่งน้ำหนัก แล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่อง Akron abrader โดยให้เครื่องทดสอบหมุนให้ครบ 500 รอบ นำตัวอย่างไปชั่ง คำนวณหาปริมาตรของยางที่หายไป แล้วนำไปเปรียบเทียบกับตารางที่ 3.8 เพื่อหาจำนวนรอบที่จะ running in และทำการทดสอบจริง 5 ครั้ง หาค่าเฉลี่ยของปริมาตรที่หายไป โดยในการทดสอบจะต้องทดสอบยางมาตรฐานด้วย โดยยางมาตรฐานมีสูตรดังตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.8 "Running in" และระยะเดินที่ต้องทดสอบจริง

ปริมาตร (ลบ. ซม.) ที่หายไปจากการเดิน 500 รอบแรก	การหมุนเพิ่มหลังจาก 500 รอบแรกเพื่อ	
	Running in	ระยะเดินที่ต้องทดสอบจริง
สูงกว่า 0.05 แต่ไม่เกิน 0.10	4000	1000
สูงกว่า 0.10 แต่ไม่เกิน 0.20	2000	500
สูงกว่า 0.20 แต่ไม่เกิน 0.40	750	250
สูงกว่า 0.40	125	125

ตารางที่ 3.9 สูตรยางมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอ

ยางและสารเคมี	ปริมาณ (phr)
ยางธรรมชาติ (RSS3)	100
ZnO	5
Stearic acid	3
TMQ	1
TBBS	1
HAF (N-330)	50
Sulfur	3

การรายงานผลเป็นค่าดัชนีการสึกหรอ แสดงดังสมการที่ 3.7

$$\text{Abrasion index} = 100 \times (S / T) \qquad (3.7)$$

เมื่อ S คือ ปริมาตรของยางมาตรฐานที่สูญหายไปจากการหมุนหินขัด 1000 รอบ โดยปริมาตรดังกล่าวเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการหมุน 5 ครั้ง

T คือ ปริมาตรของยางตัวอย่างที่สูญหายไปจากการหมุนหินขัด 1000 รอบ โดยปริมาตรดังกล่าวเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการหมุน 5 ครั้ง

3.3.4.5 การทดสอบความต้านทานต่อโอโซน (Ozone resistance)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 3395 (2005) มีวิธีการทดสอบดังนี้ คือ เตรียมตัวอย่างชิ้นทดสอบยางเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ให้มีขนาดความกว้าง เท่ากับ 10.00± 0.03 มม. ความยาว เท่ากับ 100±25 มม. แล้วนำไปทดสอบที่สภาวะความเข้มข้นของโอโซน เท่ากับ 50 pphm และอุณหภูมิ 40 $^{\circ}$C โดยทำการทดสอบแบบพลวัติ (Dynamic) โดยยืดชิ้นทดสอบเป็นระยะ 25±3% ด้วยความถี่ 0.5 รอบต่อวินาที เป็นเวลา 72 ชั่วโมง บันทึกลักษณะของรอยแตกที่เกิดขึ้น

3.3.6 ความหนาแน่นพันธะเชื่อมโยง (crosslink density)

นำยางวัลคาไนซ์หนัก 0.8 กรัม แช่ในโทลูอีนปริมาตร 80 มล. แล้วนำไปเก็บในที่มืดเป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำชิ้นทดสอบที่บวมพองตัวชั่งน้ำหนัก แล้วคำนวณหาความหนาแน่นพันธะเชื่อมโยงตามสมการของ Flory-Rehner ดังนี้ (Hamed, 2002)

$$\rho_c = -\frac{1}{2V_s}\frac{\ln(1-V_r^o)+V_r^o+\chi(V_r^o)^2}{V_r^{o\,1/3}-\frac{V_r^o}{2}} \qquad (3.8)$$

โดย

ρ_c = ความหนาแน่นพันธะเชื่อมโยง (โมล/เมตร^3)

V_s = ปริมาตรเป็นโมลาร์ของโทลูอีน (1.069 x 10^{-4} เมตร^3/โมล)

V_r^0 = สัดส่วนโดยปริมาตรของยางวัลคาไนซ์ที่พองตัว

χ = interaction parameter ของยางอีพีดีเอ็ม (0.48)