บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

3.1 สารเคมี

วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย

3.1.1 ยางธรรมชาติ (natural rubber, NR) ยางธรรมชาติที่ใช้ในการทดลอง คือ ยางแผ่นรมควัน (RSS No.3) จากตลาดกลางยางพารา อำเภอหาดใหญ่ ยางแผ่นผึ่งแห้ง ยางแท่ง STR 5L ยางแท่ง STR 5CV 60 ยางสกิม ยางแท่ง STR 20 ยางแท่ง STR 20CV 60 และยางเครพขาว ผลิตโดยบริษัท Chana Latex Co., Ltd.

3.1.2 เขม่าดำ (carbon black) ชนิด high abrasion furnace black (HAF black) เกรด N330 ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมชนิดเสริมประสิทธิภาพ (reinforcing filler) มีลักษณะเป็นผงสีดำ จัดจำหน่ายโดยห้างหุ้นส่วน กิจไพบูลย์เคมี จำกัด

3.1.3 ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide, ZnO) ชนิด White seal ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้น (activator) มีลักษณะเป็นผงสีขาวละเอียด เป็นเกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง ผลิตโดยบริษัท Univenture Public Co., Ltd.

3.1.4 กรดสเตียริก (stearic acid) ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้น (activator) สำหรับสารตัวเร่งในยาง มีลักษณะเป็นเกร็ดสีขาวอมเหลือง เป็นเกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง จัดจำหน่ายโดยห้างหุ้นส่วน กิจไพบูลย์เคมี จำกัด

3.1.5 กำมะถัน (sulphur) เกรด 325 (mesh) ทำหน้าที่เป็นสารวัลคาไนซ์ (vulcanizing agent) มีลักษณะเป็นผงสีเหลือง ผลิตโดยบริษัท สยามเคมี จำกัด

3.1.6 N-tert-butyl-2-benzothiazyl sulfenamide (TBBS) ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่ง มีลักษณะเป็นเม็ดสีขาว เป็นเกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง จัดจำหน่ายโดยห้างหุ้นส่วน กิจไพบูลย์เคมี จำกัด

3.1.7 N-phenyl-N'-1,3-dimethylbutyl-p-phenylenediamine (6PPD) ทำหน้าที่เป็นสารแอนตี้ออกซิแดนซ์ มีลักษณะเป็นเม็ดสีน้ำตาลดำ เป็นเกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง ผลิตโดยบริษัท Bayer

3.1.8 3-(3-tert-butyl-4-hydroxy-5-methylphenyl)propionate (Wingstay L) ทำหน้าที่เป็นสารแอนตี้ออกซิแดนซ์ มีลักษณะเป็นผงสีเหลืองอ่อน เป็นเกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง จัดจำหน่ายโดยห้างหุ้นส่วน กิจไพบูลย์เคมี จำกัด

3.1.9 spindle oil ทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม มีลักษณะเป็นน้ำมันสีเหลืองอ่อน เป็นเกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง จำหน่ายโดยห้างหุ้นส่วน กิจไพบูลย์เคมี จำกัด

3.1.10 paraffin wax ทำหน้าที่เป็นสารแอนตี้โอโซแนนซ์ มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาวจำหน่ายโดยห้างหุ้นส่วน กิจไพบูลย์เคมี จำกัด

3.1.11 กาวเคมลอค 205A เป็นกาวรองพื้นสีเทาใช้คู่กับกาวทับหน้าเบอร์ต่าง ๆ เหมาะสำหรับใช้ติดยางดิบชนิดต่าง ๆ เข้ากับโลหะหรือพลาสติกทางวิศวกรรม เช่น Nylon จำหน่ายโดยบริษัทพรีซิสชั่น เอนยีเนียริ่ง จำกัด

3.1.12 กาวเคมลอค 220 เป็นกาวทับหน้าสีดำใช้คู่กับกาวรองพื้น 205A ติดยางดิบชนิดต่าง ๆ เช่น NR, NBR, SBR, CR เป็นต้น (ความแข็งของยาง $\geq$ 60 shore A และเป็นยางที่ต้องใช้กำมะถันเป็นสารวัลคาไนซ์) กับโลหะ จำหน่ายโดยบริษัพรีซิสชั่น เอนยีเนียริ่ง จำกัด

3.1.13 methyl ethyl ketone (MEK) ใช้ทำความสะอาดผิวหน้าของยางก่อนนำไปติดกับแผ่นเหล็กที่ทากาวเรียบร้อยแล้ว ผลิตโดยบริษัท Laboratory Unilab Reagent

3.1.14 โทลูอีน (toluene) เป็นตัวทำละลายเพื่อใช้ในการทดสอบการหาความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง (crosslink density) ผลิตโดยบริษัท Fisher Scientific

3.1.14 อะซีโตน เป็นตัวทำละลาย ใช้ในการทำความสะอาดผิวเหล็ก ผลิตโดยบริษัท Laboratory Unilab Reagent

3.2 อุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย

3.2.1 เครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง (two roll mill) รุ่น YFM 160 B เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการบดผสมยางและสารเคมีต่างๆ เข้าด้วยกัน ลูกกลิ้งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว ความยาว 15 นิ้ว จำนวน 2 ลูก หมุนเข้าหากันด้วยอัตราความเร็วลูกกลิ้งหน้าต่อลูกกลิ้งหลัง (friction ratio) เท่ากับ 1:1.22 ผลิตโดย บริษัท Yong Fong Machinery Co., LTD.

ภาพประกอบ 3.1 เครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง (two roll mill)

3.2.2 เครื่องผสมยางแบบปิด (kneader) ใช้ในการเตรียมมาสเตอร์แบทช์ (master batch) ของเขม่าดำ โรเตอร์หมุนด้วยความเร็ว เท่ากับ 970 รอบต่อนาที ความจุของห้องผสม 3 ลิตร ผลิตโดย บริษัท Yong Fong Machinery Co., LTD.

ภาพประกอบ 3.2 เครื่องผสมยางแบบปิด (Kneader)

3.2.3 เครื่องทดสอบเวลาการวัลคาไนซ์ของยาง (Moving die rheometer, MDR 2000) รุ่น 36 AIG 2953 ใช้สำหรับหาเวลาการวัลคาไนซ์ (cure time) และเวลาการสุกของยาง

ก่อนกำหนด (scorch time) ผลิตโดย บริษัท Alpha Technologies Services Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา

ภาพประกอบ 3.3 เครื่องทดสอบเวลาการวัลคาไนซ์ของยาง (Moving die rheometer, MDR 2000)

3.2.4 เครื่องอัดเบ้า (compression moulding) รุ่น LCC 140 เป็นเครื่องมือสำหรับอัดยางเข้าเบ้าพิมพ์ โดยใช้ระบบไฮโดรลิก ให้ความร้อนด้วยไฟฟ้า ความดันสูงสุด 200 kg/cm^2 ที่ยึดเบ้าพิมพ์ขนาด 18x18 นิ้ว ผลิตโดย บริษัท TANG-MASTER Co., LTD. ประเทศไต้หวัน

ภาพประกอบ 3.4 เครื่องอัดเบ้า (compression moulding)

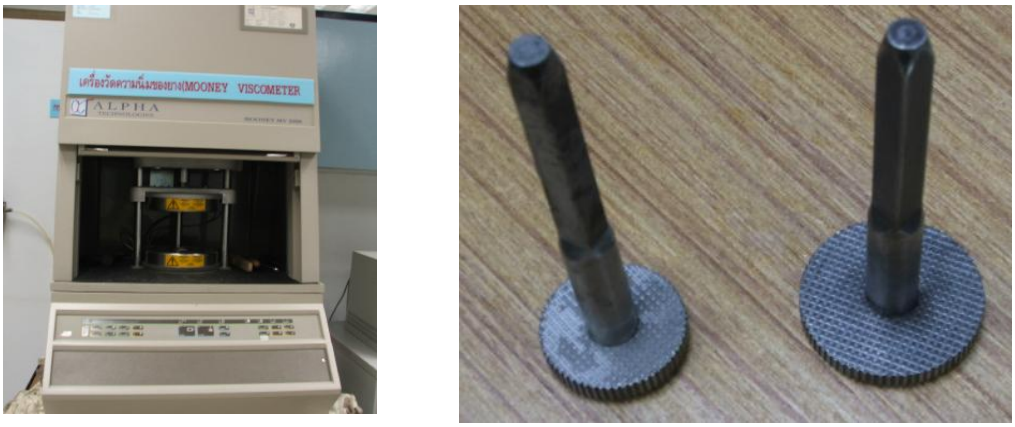
3.2.5 เครื่องวัดความแข็ง (hardness tester) ใช้แบบ shore durometer รุ่น PTC 408 ความแข็งที่ทดสอบได้มีหน่วยเป็น Shore A

ภาพประกอบ 3.5 เครื่องวัดความแข็ง (hardness tester)

3.2.6 เครื่องทดสอบแรงดึง (tensometer) เป็นเครื่องที่ใช้วัดแรงกด หรือดึงชิ้นทดสอบ รุ่น LR 10 K ผลิตโดย บริษัท อินโทรเอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด

ภาพประกอบ 3.6 เครื่องทดสอบแรงดึง (tensometer)

3.2.7 เครื่องทดสอบความหนืดของยาง (Mooney viscometer, MV2000) รุ่น 24 SIE 2338 เป็นเครื่องมือสำหรับวัดความหนืดของยางดิบ และยางผสมสารเคมี วัดความหนืดจากแรงบิด (torque) ที่เกิดขึ้นบนจานโลหะที่หมุนอยู่ในเนื้อยางด้วยความเร็ว 2 รอบต่อนาที หน่วยความหนืดที่วัดได้คือ mooney viscosity (MV) ผลิตโดย บริษัท Alpha Technologies Services Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา



ภาพประกอบ 3.7 เครื่องทดสอบความหนืด (Mooney viscometer, MV2000) และโรเตอร์ (rotor)

3.2.8 ตู้อบบ่มเร่งชนิด Gear aging รุ่น GPHH-100 สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ในช่วงตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 300 °C ใช้ในการบ่มเร่งยางเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล ผลิตโดย บริษัท Tabai Espec Corp. ประเทศญี่ปุ่น

ภาพประกอบ 3.8 ตู้อบบ่มเร่งชนิด Gear Aging

3.2.9 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอ (Akron machine) เป็นเครื่องมือสำหรับวัดความสึกหรอของยาง โดยที่ลูกกลิ้งยางตัวอย่าง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร ถูกขับด้วยมอเตอร์หมุนด้วยความเร็ว 250 รอบต่อนาที ทำมุมไถล 15 องศากับล้อหินขัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร หน้ากว้าง 2.5 เซนติเมตร โดยมีน้ำหนัก 4.5 กิโลกรัม กดให้ติดกับชิ้นทดสอบ ผลิตโดย บริษัท Yasuda Seiki Seisakusho Ltd. ประเทศญี่ปุ่น

ภาพประกอบ 3.9 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอ (Akron machine)

3.2.10 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการหักงอ (De Mattia flexing machine) รุ่น DM 01 เป็นเครื่องมือสำหรับ วัดความต้านทานต่อการหักงอ และความต้านทานต่อการขยายตัวของรอยแตก เครื่องทดสอบประกอบด้วยที่จับบนล่าง ด้านหนึ่งอยู่กับที่ อีกด้านหนึ่งเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวดิ่งด้วยความถี่ 300 รอบต่อนาที โดยมีระยะชักสูงสุด (ระยะห่างระหว่างที่จับบนล่าง) เท่ากับ 100 มิลลิเมตร ผลิตโดย บริษัท Toyoseiki ประเทศญี่ปุ่น

ภาพประกอบ 3.10 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการหักงอ (De Mattia flexing machine)

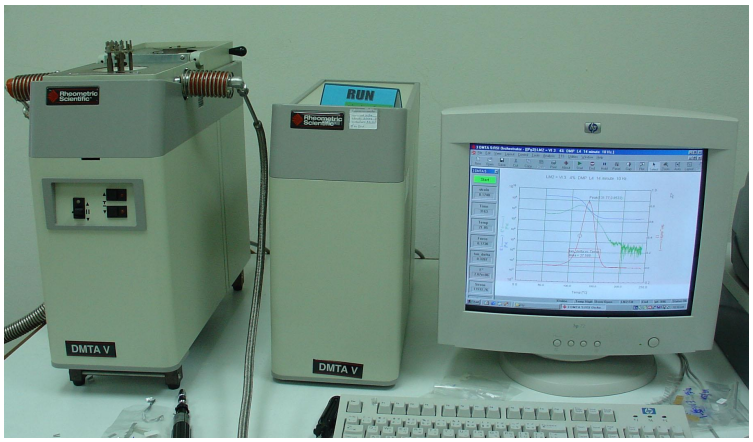
3.2.11 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อโอโซน (ozone aging tester) รุ่น PPHM-S เป็นเครื่องมือสำหรับ ทดสอบความต้านทานการแตกด้วยโอโซน ผลิตโดย บริษัท Toyoseiki ประเทศญี่ปุ่น

ภาพประกอบ 3.11 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อโอโซน (ozone aging tester)

3.2.13 เครื่องทดสอบการกระดอนตัว รุ่น MODEL SRI No. 7400 เป็นการวัดความสามารถของยางวัลคาไนซ์ที่จะส่งพลังงานที่ใส่เข้าไปให้กลับคืนมา ความกระดอนตัว คือ อัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ยางเก็บไว้ได้กับพลังงานที่ป้อนเข้าไป

3.2.14 เครื่อง wallace rapid plastometer เป็นเครื่องที่ใช้วัดค่าพลาสติซิตีและการคง พลาสติซิตี PRI (plasticity retention index) เป็นค่าที่แสดงถึงความต้านทานของยางต่อการแตกหักของโมเลกุลที่อุณหภูมิสูงและการออกซิเดชั่น (oxidation) ยางที่มีค่า PRI สูงแสดงว่ามีความต้านทานต่อการแตกหักของโมเลกุลสูง

3.2.15 เครื่อง Dynamic mechanical thermal analyzer (DMTA) รุ่น DMTA V 9002-50010 เป็นเครื่องที่ใช้วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของวัสดุที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิและเวลา เช่น glass transition temperature, storage modulus, loss modulus และ tan delta เป็นการวิเคราะห์แบบ dynamic และสามารถวิเคราะห์แบบ tension, bending, compression และ shear ในช่วงอุณหภูมิ -150 ถึง 500 $^{\circ}$C



ภาพประกอบ 3.12 เครื่อง dynamic mechanical thermal analyzer (DMTA)

3.2.16 เบ้ายางรองคอสะพาน ทำจากเหล็กกล้าขนาดกว้างxยาวxหนา เท่ากับ 22x26x10 เซนติเมตร มีจำนวน 3 ชั้น ชั้นบนและชั้นล่างหนา 2.5 เซนติเมตร และชิ้นกลางหนา 5 เซนติเมตร อัดยางได้ครั้งละ 2 ชิ้น ซึ่งขนาดช่องที่ใส่ยางมีขนาดกว้างxยาวxหนา เท่ากับ 5.3x15.7x5 เซนติเมตร

ภาพประกอบ 3.13 เบ้ายางรองคอสะพานขนาดกว้างxยาวxหนา เท่ากับ 22x26x10 เซนติเมตร

3.2.17 เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง รุ่น PL 3002 ผลิตโดยบริษัท Mettler Toledo Ltd. ประเทศสวิสเซอร์แลนด์

3.2.18 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง รุ่น AB 204 ผลิตโดยบริษัท Mettler Toledo Ltd. ประเทศสวิสเซอร์แลนด์

3.2.19 แบบตัดชิ้นตัวอย่างรูปดัมเบลและชิ้นตัวอย่างแบบมุม สำหรับการทดสอบความทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดตามลำดับ

3.2.20 เครื่องวัดความหนา Teclock รุ่น SM-112 ช่วงความหนา 0.01-10 mm

3.2.21 เครื่องวัดค่าแรงดึงของวัสดุ (universal testing machine) รุ่น AG-100 kNG Shimadzu ใช้สำหรับการทดสอบการผิดรูปในแนวแรงกดของยางรองคอสะพาน

ภาพประกอบ 3.14 เครื่องวัดค่าแรงดึงของวัสดุ (universal testing machine)

3.2.22 ชุดเครื่องทดสอบหาความหนาแน่น ใช้หลักอาร์คีมีดิสที่ว่า แรงพยุงของของเหลวมีค่าเท่ากับมวลของของเหลวที่ถูกแทนที่ เมื่อทำการชั่งวัตถุในของเหลวนั้น สามารถหาปริมาณของวัตถุได้ดังนี้

ชั่งวัตถุในอากาศได้ w กรัม

ชั่งวัตถุในน้ำได้ w_1 กรัม

น้ำหนักวัตถุหายไปในน้ำเท่ากับ $w-w_1$ กรัม ซึ่งจะมีค่าเท่ากับปริมาตรของน้ำที่ถูกวัตถุแทนที่อยู่ ดังนั้นปริมาตรของวัตถุ $V = (w-w_1)/d$

นั่นคือ ความหนาแน่นของน้ำ เท่ากับ $w/(w-w_1)$ g/cm^3

เมื่อ d คือ ความหนาแน่นของน้ำ

ภาพประกอบ 3.15 เครื่องทดสอบหาความหนาแน่น

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 ศึกษาสมบัติของยางธรรมชาติดิบ

นำยางธรรมชาติดิบทั้ง 8 เกรด คือ ยางแผ่นรมควัน (RSS No.3) ยางแผ่นผึ่งแห้ง ยางแท่ง STR 5L ยางแท่ง STR 5CV 60 ยางสกิม ยางแท่ง STR 20 ยางแท่ง STR 20CV 60 และ

ยางเครพขาว มาทดสอบหาค่าความหนืดมูนนี่ ค่า Po และ PRI โดยมีรายละเอียดการทดลองดังหัวข้อ 3.3.1.1 และ 3.3.1.2

3.3.1.1 การหาค่าความหนืดมูนนี่ของยางดิบ

หาค่าความหนืดมูนนี่ของยางดิบตามมาตรฐาน ASTM D 1646 โดยตัวอย่างยางที่ใช้เป็นชิ้นทดสอบประกอบด้วยยาง 2 ชิ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 มิลลิเมตร น้ำหนักรวมกันประมาณ 25 กรัม นำตัวอย่างยางน้ำหนักประมาณ 250 กรัมมาผ่านลูกกลิ้งที่ตั้งระยะห่างไว้ 2.5 มิลลิเมตร อุณหภูมิของลูกกลิ้งเท่ากับ 70 °C ผ่านลูกกลิ้งรวม 10 ครั้ง โดยแต่ละครั้งม้วนยางเป็นก้อนใส่เข้าไป ครั้งที่ 10 ให้ปล่อยยางออกมาเป็นแผ่น หลังจากตัดเป็นชิ้นทดสอบแล้วตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 30 นาที ก่อนนำไปทดสอบด้วยเครื่อง mooney viscometer โดยอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ คือ 100 °C เวลาอุ่นยาง 1 นาที และเวลาทดสอบ 4 นาที

3.3.1.2 การหาค่า Po และ PRI ของยางดิบ

ชั่งตัวอย่างยางให้ได้น้ำหนักประมาณ 300 กรัม นำมาผ่านเครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง 10 ครั้ง โดยระยะ nip ของลูกกลิ้งให้ได้ประมาณ 1.65 มม. นำยางที่เตรียมได้จำนวน 30 กรัม มาผ่านลูกกลิ้งที่ได้จัด nip ให้ได้แผ่นยางมาเท่ากับ 1.7 มม. นำมาผ่านลูกกลิ้ง 3 ครั้ง แล้วนำยางไปตัดเป็นชิ้นทดสอบจำนวน 6 ชิ้น เพื่อการทดสอบ

ส่วนที่ 1 นำไปหาค่า plasticity โดยไม่อบ (Po)

ส่วนที่ 2 นำไปหาค่า plasticity โดยอบตัวอย่างก่อนทดสอบ 30 นาทีที่ 140 °C (P30)

คำนวณหาค่า PRI ดังสมการ

$$PRI\ (\%) = 100 \times (P30 / Po) \qquad (3.1)$$

โดยที่ P30 คือ ค่า median ของ wallace plasticity จากการทดสอบ 3 ตัวอย่างของยางภายหลังการอบแล้ว 30 นาทีที่ 140 °C

Po คือ ค่า median ของ wallace plasticity จากการทดสอบ 3 ตัวอย่างก่อนอบ

3.3.2 ศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์และพลังงานกระตุ้นการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถันปกติ เซมิอีวี และอีวี

นำยางธรรมชาติดิบทั้ง 8 เกรด คือ ยางแผ่นรมควัน (RSS No.3) ยางแผ่นผึ่งแห้ง ยางแท่ง STR 5L ยางแท่ง STR 5CV 60 ยางสกิม ยางแท่ง STR 20 ยางแท่ง STR 20CV 60 และ

ยางเครพขาว มาศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์โดยผสมยางและสารเคมีบนเครื่องบดผสมยางสองลูกกลิ้ง ตามสูตรดังตาราง 3.1 โดยในขั้นแรกเป็นการบดยาง จากนั้นใส่ ซิงค์ออกไซด์ กรดสเตียริก Wingstay L TBBS และกำมะถัน ตามลำดับ รีดยางคอมปาวด์เป็นแผ่นพักยางเป็นเวลาอย่างน้อย 16 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบหาลักษณะการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง MDR 2000 ที่อุณหภูมิ 150, 160, 170 และ 180 $^{\circ}$C ตามลำดับ

ตาราง 3.1 สูตรที่ใช้ศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์และค่าพลังงานกระตุ้น

สารเคมี	ระบบกำมะถันปกติ	ระบบอีวี	ระบบเซมิอีวี
ยางธรรมชาติ	100	100	100
กำมะถัน	2.5	0.5	1.5
TBBS	1	5	2
ซิงค์ออกไซด์	4	4	4
กรดสเตียริก	1	1	1
Wingstay L	1	1	1

จากกราฟแสดงลักษณะการวัลคาไนซ์จากเครื่อง MDR สามารถนำมาคำนวณหาค่าสัดส่วนโมดูลัสที่เพิ่มขึ้นหรือ fractional modulus (K) ได้ตามสมการ 2.6 หน้า 34 คือ

$$K = \frac{M}{M_{\alpha}}$$

เมื่อ K คือ สัดส่วนโมดูลัสที่เพิ่มขึ้น (fractional modulus)

M_{α} คือ ทอร์กที่เพิ่มสูงสุดที่ได้เมื่อยางวัลคาไนซ์เต็มที่

M คือ ทอร์กที่เพิ่มขึ้นที่เวลา t

คำนวณหาค่าคงที่อัตราการวัลคาไนซ์ (curing rate constant, k) ได้ตามสมการ 2.9 หน้า 34 คือ

$$t_K = t_0 + (1/k)\ln(1-K)^{-1}$$

เมื่อ t_k คือ ค่าเวลาการวัลคาไนซ์ (TC 90) ที่ได้จากเครื่อง MDR

K คือ สัดส่วนโมดูลัสที่เพิ่มขึ้นที่เวลาเท่ากับ TC 90

t_0 คือ ช่วงเวลาก่อนยางเริ่มวัลคาไนซ์ (scorch time)

จากสมการ 2.7 และ 2.8 หน้า 34 สามารถเปลี่ยนใหม่ได้เป็น

$$\ln k = \ln A - \frac{E_1}{RT}$$

และ $$\ln t_0 = \ln B + \frac{E_2}{RT}$$

การหาค่าพลังงานการกระตุ้น E_1 และ E_2 ทำได้โดยการ plot กราฟระหว่าง ln k กับ 1/T และ ln t_0 กับ 1/T ตามลำดับ

3.3.3 ศึกษาสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ

นำยางธรรมชาติดิบทั้ง 8 เกรด คือ ยางแผ่นรมควัน (RSS No.3) ยางแผ่นผึ่งแห้ง ยางแท่ง STR 5L ยางแท่ง STR 5CV 60 ยางสกิม ยางแท่ง STR 20 ยางแท่ง STR 20CV 60 และยางเครพขาว ผสมสารเคมี มาทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงกล เพื่อช่วยในการวิเคราะห์เลือกชนิดของยางไปผลิตยางรองคอสะพาน โดยมีรายละเอียดของการทดลองดังหัวข้อ 3.3.3.1 ถึง 3.3.3.3

3.3.3.1 การเตรียมยางคอมปาวด์

ผสมยางและสารเคมีบนเครื่องบดผสมยางสองลูกกลิ้ง ตามสูตรดังตาราง 3.2 โดยในขั้นแรกเป็นการบดยาง จากนั้นใส่ ซิงค์ออกไซด์ กรดสเตียริก เขม่าดำ spindle oil, wingstay L, TBBS และกำมะถัน ตามลำดับ รีดยางคอมปาวด์เป็นแผ่นพักยางเป็นเวลาอย่างน้อย 16 ชั่วโมงก่อนนำไปทดสอบหาลักษณะการวัลคาไนซ์ และอัดเบ้าชิ้นทดสอบเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล

ตาราง 3.2 สูตรที่ใช้ศึกษาสมบัติเชิงกล

สารเคมี	ปริมาณที่ใช้ (phr)	สารเคมี	ปริมาณที่ใช้ (phr)
ยางธรรมชาติ	100	กรดสเตียริก	1
กำมะถัน	2.5	Wingstay L	1
TBBS	1	เขม่าดำ N-330	30
ซิงค์ออกไซด์	4	Spindle oil	3

3.3.3.2 การทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์

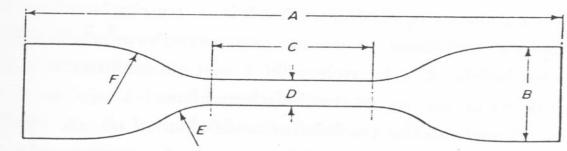
ทำการทดสอบด้วยเครื่อง MDR 2000 ที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 30 นาที โดยเครื่องทดสอบจะรายงานผลเป็นค่าทอร์กต่ำสุด (M_L) ค่าทอร์กสูงสุด (M_H) ค่า scorch time (TS 2) และ 90% cure time (TC 90)

3.3.3.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล

นำยางคอมปาวด์ที่เตรียมได้มาอัดเบ้าเพื่อเตรียมชิ้นทดสอบด้วยเครื่องอัดเบ้าแบบไฮโดรลิค โดยใช้อุณหภูมิ 150 °C ตามเวลา 90% cure time หลังจากนั้นนำชิ้นทดสอบที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติดังต่อไปนี้

3.3.3.3.1 การทดสอบความทนต่อแรงดึง

เตรียมชิ้นตัวอย่างสำหรับทดสอบความทนต่อแรงดึง เตตามมาตรฐาน ASTM D 412 โดยนำแผ่นยางที่ผ่านการขึ้นรูปโดยการอัดความดัน (compression molding) ของแต่ละสูตร มาตัดเป็นรูปดัมเบล โดยใช้มีดตัด แบบ die C และใช้จำนวนชิ้นตัวอย่างของแต่สูตร 6 ชิ้น แล้วนำชิ้นตัวอย่างไปทดสอบด้วยเครื่อง tensometer ที่อัตราการดึง 500 mm/min



ภาพประกอบ 3.16 ลักษณะตัวอย่างชิ้นทดสอบรูป dumbbell

ตาราง 3.3 ขนาดของตัวอย่างทดสอบความทนต่อแรงดึง

ขนาด	Type 1 (mm)
A (ความยาวทั้งหมด (ต่ำสุด))	115.0
B (ความกว้างปลาย)	25.0 ± 1.0
C (ความยาวส่วนที่คอดขนาน)	33.0 ± 2.0
D (ความกว้างส่วนที่คอดขนาน)	6.0 ± 0.4
E (small radius)	14.0 ± 1.0
F (large radius)	25.0±2.0
ความหนา	2.0 ± 0.2

การคำนวณ

$$\text{tensile strength} = F/A \quad (3.2)$$

F คือ แรงดึงที่ทำให้ชิ้นทดสอบขาด (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบขณะยังไม่ยืด (mm^2)

$$\text{300 \% modulus} = F/A \quad (3.3)$$

F คือ แรงดึงที่ทำให้ชิ้นทดสอบยืด 300% (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบขณะยังไม่ยืด (mm^2)

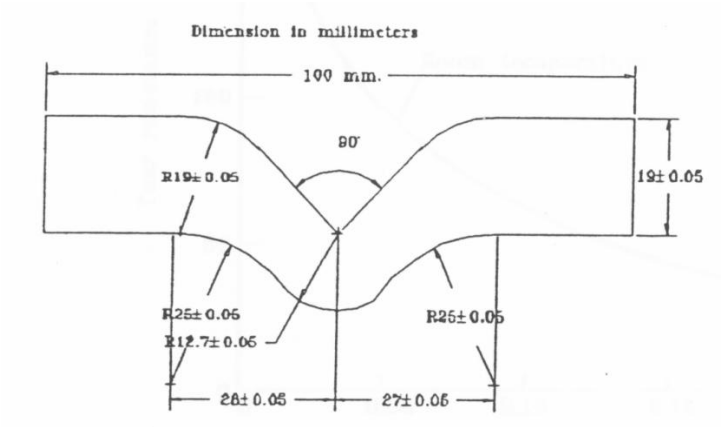
$$\text{elongation at break} = 100 \times (L-L_0) \quad (3.4)$$

L คือ ระยะที่ชิ้นทดสอบสามารถยืดตัวได้จนขาด (cm)

L_0 คือ ระยะกำหนดก่อนทำการทดสอบ (cm)

3.3.3.3.2 การทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด

เตรียมชิ้นตัวอย่างเพื่อทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด ตามมาตรฐาน ASTM D 624 โดยตัดชิ้นตัวอย่างแบบมุม (angle) ที่ไม่มีรอยบากตรงมุม ซึ่งจะตัดจากชิ้นตัวอย่างยางที่ได้จากการขึ้นรูปแบบอัดความดันมาแล้ว (compression mold) และในแต่ละสูตรจะใช้จำนวนชิ้นตัวอย่าง 6 ชิ้นต่อสูตร นำชิ้นตัวอย่างไปทดสอบด้วยเครื่อง tensometer ที่อัตราการดึง 500 mm/min บันทึกค่าแรงดึงที่ทำให้ชิ้นตัวอย่างฉีกขาด เพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear strength)



ภาพประกอบ 3.17 ลักษณะตัวอย่างชิ้นทดสอบแบบมุม

การคำนวณ

$$T_S = F/d \quad (3.5)$$

T_S คือ ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear strength, N/mm)

F คือ ค่าแรงดึงสูงสุด (N)

D คือ ความหนาของชิ้นตัวอย่าง (mm)

3.3.3.3.3 การทดสอบการบ่มเร่งของยาง

ทดสอบการบ่มเร่งของยางตามมาตรฐาน ASTM D 573 โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 70 ^{O}C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง ในตู้บ่มเร่งแบบ gear oven เมื่อครบกำหนดนำชิ้นทดสอบไปทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง และความต้านทานต่อการฉีกขาด

คำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง

$$P = \left(\frac{A - O}{O} \right) \times 100 \tag{3.6}$$

เมื่อ P คือ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง

A คือ สมบัติของยางหลังอบ

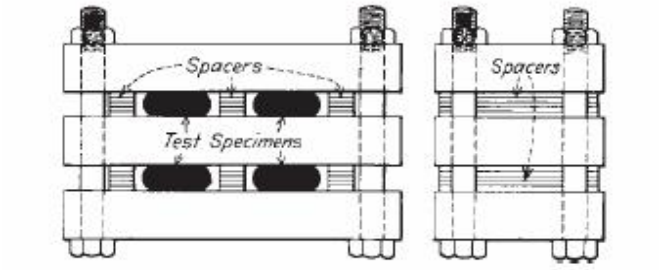
O คือ สมบัติของยางก่อนอบ

3.3.3.3.4 การทดสอบความแข็ง

ทดสอบความแข็งตามมาตรฐาน ASTM D 2240 เป็นการวัดค่าความแข็งแบบ shore A ทดสอบด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบ shore A ใช้ชิ้นทดสอบที่มีความหนาอย่างน้อย 6 มิลลิเมตร ให้หัวกดกดยางค้างไว้ 30 วินาที แล้วจึงอ่านค่าความแข็งที่ได้

3.3.3.3.5 การทดสอบ compression set

ทดสอบ compression set ตามมาตรฐาน ASTM D 395 ชิ้นทดสอบมีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 29.0 ± 0.5 มม. หนา 12.5 ± 0.5 มม. อัดให้ผิดรูป 25 % ของความหนาอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 $^{\circ}$C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาแล้วนำยางออกจากแผ่นอัดทันที ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที บนพื้นที่ไม่นำความร้อน แล้วจึงวัดความหนา รายงานผลในรูปของเปอร์เซ็นต์ของความหนาเดิม



ภาพประกอบ 3.18 เครื่องมือที่ใช้ทำการทดลอง compression set

การคำนวณ

$$\text{compression set (\%)} = \left[\left(t_0 - t_r\right)/\left(t_0 - t_s\right)\right]\times 100 \quad (3.7)$$

t_0 คือ ความหนาเดิม (mm)

t_s คือ ความหนาเมื่อถูกอัด (mm)

t_r คือ ความหนาหลังการคืนรูป (mm)

3.3.3.3.6 การทดสอบการกระดอนตัวในแนวดิ่ง

ทดสอบการกระดอนตัวของยางวัลคาไนซ์ตามมาตรฐาน ASTM D 2632 โดยวัดความสูงของการกระดอนของมวลที่ปล่อยให้ตกในแนวดิ่งจากความสูงหนึ่งกระทบแผ่นยางด้วยแรงโน้มถ่วงซึ่งจะปล่อยให้ตัวกระแทกกระทบแผ่นยาง 6 ครั้งติดต่อกัน บันทึกการกระดอนตัวเฉพาะครั้งที่ 4, 5 และ 6 เป็นผลการทดลอง

การคำนวณ

$$\text{R.R. \%} = 100 \text{ x } (h/H) \quad (3.8)$$

เมื่อ h คือ ความสูงของการกระดอนตัว

H คือ ความสูงในการตกกระทบ

3.3.3.3.7 การทดสอบความต้านทานต่อการหักงอ

ทดสอบความต้านทานต่อการหักงอตามมาตรฐาน ASTM D 430 ด้วยเครื่องเดอแม็ทเทีย (De Mattia flexing machine) ชิ้นทดสอบมีขนาดกว้าง 25 มิลลิเมตร หนา 6.3 มิลลิเมตร ยาว 152 มิลลิเมตร ตรงกลางแผ่นมีร่องครึ่งวงกลมรัศมี 2.38 มิลลิเมตร ดังภาพประกอบ 3.19 (ก) ติดตั้งชิ้นทดสอบเข้ากับเครื่องแล้วจึงเดินเครื่อง หยุดตรวจสอบรอยแตกเป็นครั้งคราวด้วยแว่นขยาย โดยปรับระยะห่างระหว่างที่จับเท่ากับ 65 มิลลิเมตรในขณะตรวจหารอยแตก บันทึกจำนวนรอบเมื่อพบรอยแตกที่เห็นได้เป็นครั้งแรก เดินเครื่องทดสอบและบันทึกระดับของรอยแตกต่อไปจนถึงระดับที่ต้องการ

การรายงานผลตามมาตรฐาน ASTM D 430 ได้กำหนดความรุนแรงของรอยแตกเป็น 10 ระดับโดยมีรายละเอียดดังนี้

ระดับ 0 ไม่เกิดรอยแตก

ระดับ 1 เมื่อเห็นรอยแตกเป็นจุดปลายเข็มจำนวนไม่เกิน 10 จุด และยาวไม่เกิน 0.5 มิลลิเมตร

ระดับ 2 มีจำนวนมากกว่า 10 จุด หรือจำนวนไม่เกิน 10 จุด แต่มีจุดหนึ่งหรือมากกว่าที่การแตกเกินระดับการเป็นจุดแต่ยังไม่มีความลึกและความยาวไม่เกิน 0.5 มิลลิเมตร

ระดับ 3 เมื่อมีจุด (หนึ่งหรือมากกว่า) มีความยาวมากกว่า 0.5 มิลลิเมตร แต่ไม่เกิน 1.0 มิลลิเมตร

ระดับ 4 รอยแตกใหญ่ที่สุดยาวกว่า 1.0 มิลลิเมตร แต่ไม่เกิน 1.5 มิลลิเมตร

ระดับ 5 รอยแตกใหญ่ที่สุดยาวกว่า 1.5 มิลลิเมตร แต่ไม่เกิน 3.0 มิลลิเมตร

ระดับ 6 รอยแตกใหญ่ที่สุดยาวกว่า 3.0 มิลลิเมตร แต่ไม่เกิน 5.0 มิลลิเมตร

ระดับ 7 รอยแตกใหญ่ที่สุดยาวกว่า 5.0 มิลลิเมตร แต่ไม่เกิน 8.0 มิลลิเมตร

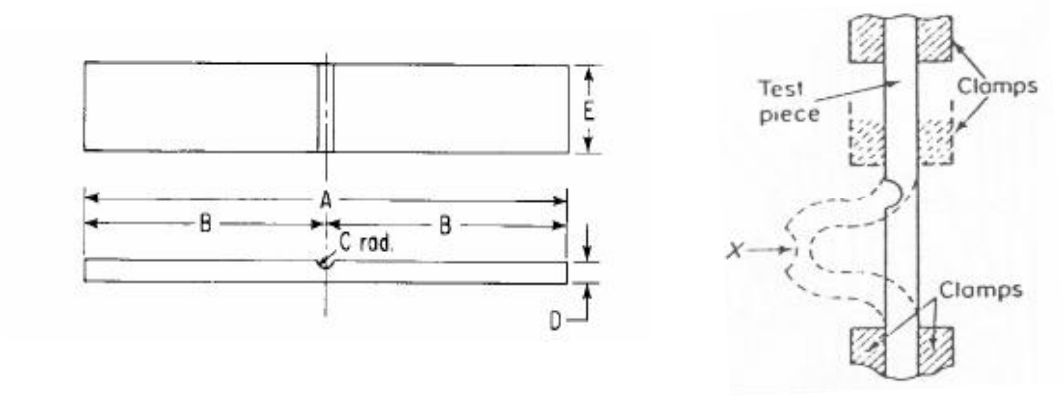
ระดับ 8 รอยแตกใหญ่ที่สุดยาวกว่า 8.0 มิลลิเมตร แต่ไม่เกิน 12.0 มิลลิเมตร

ระดับ 9 รอยแตกใหญ่ที่สุดยาวกว่า 12.0 มิลลิเมตร แต่ไม่เกิน 15.0 มิลลิเมตร

ระดับ 10 รอยแตกใหญ่ที่สุดยาวกว่า 15.0 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นเครื่องหมายแสดงว่าชิ้นทดสอบขาดจากกัน

3.3.3.3.8 การทดสอบการเติบโตของรอยแตก

ทดสอบการเติบโตของรอยแตกตามมาตรฐาน ASTM D 813 ด้วยเครื่องเดอแม็ทเทีย (De Mattia flexing machine) ชิ้นทดสอบมีขนาดกว้าง 25 มิลลิเมตร หนา 6.3 มิลลิเมตร ยาว 152 มิลลิเมตร ตรงกลางแผ่นมีร่องครึ่งวงกลมรัศมี 2.38 มิลลิเมตร นำชิ้นทดสอบมาเจาะรูตรงกลางยาว 2 มิลลิเมตร โดยเจาะให้ทะลุโดยเจาะเพียงครั้งเดียว ติดตั้งชิ้นทดสอบเข้ากับเครื่องแล้วจึงเดินเครื่อง หยุดตรวจสอบรอยแตกด้วยแว่นขยายเป็นช่วง ๆ ในขณะตรวจวัดรอยแตกปรับระยะห่างระหว่างที่จับเท่ากับ 65 มิลลิเมตร บันทึกจำนวนรอบเมื่อรอยแตกขยายตัวจาก 2 เป็น 4 มิลลิเมตร จาก 4 เป็น 8 มิลลิเมตร และจาก 8 เป็น 12 มิลลิเมตร



(ก) (ข)

ภาพประกอบ 3.19 (ก) ลักษณะชิ้นทดสอบการหักงอ (ข) ลักษณะของยางในขณะการโค้งงอ

3.3.3.3.9 การทดสอบความต้านทานต่อสึกหรอ

ทดสอบการสึกหรอของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ ด้วยเครื่อง akron machine โดยนำตัวอย่างยางที่ได้จากการอัดเบ้าใส่ไปในเครื่องทดสอบหมุนให้ครบ 500 รอบ แล้วนำตัวอย่างไปชั่งแล้วคำนวณหาปริมาตรยางที่หายไป จากปริมาตรที่หายไปนี้ให้นำยางดังกล่าวไปเดิน running-in โดยมีจำนวนรอบเท่ากับที่แสดงในตาราง 3.4 หลังจาก running-in แล้วนำยางไปชั่งแล้วนำไป test run เป็นจำนวน 5 ครั้ง

ตาราง 3.4 จำนวนรอบ Running-in การทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอ

ปริมาตรที่หายไป(V_L) ต่อ500 รอบ (cm^3)	running-in (รอบ)	test run (ครั้ง/รอบ)
$0.05<V_L<0.10$	4,000	1,000
$0.10<V_L<0.20$	2,000	500
$0.20<V_L<0.40$	750	250
$V_L>0.40$	125	125

จาก Test run ทั้ง 5 ครั้ง หาค่าเฉลี่ยปริมาตรที่หายไปต่อ 1,000 รอบ แล้วคำนวณดัชนีการสึกหรอ

$$Abrasion\ \ Index\ (A.I.) = 100 \times \left(\frac{S}{T}\right) \tag{3.9}$$

S คือ ปริมาตรยางมาตรฐานที่หายไปต่อ 1,000 รอบ

T คือ ปริมาตรยางตัวอย่างที่หายไปต่อ 1,000 รอบ

ตาราง 3.5 สูตรยางมาตรฐานที่ใช้ในการหาความต้านทานการสึกหรอ (ชลดา และคณะ, 2547)

สารเคมี	ปริมาณที่ใช้ (phr)
ยางธรรมชาติ	100
กำมะถัน	5
MBTS	1
เขม่าดำ (HAF N330)	50
ซิงค์ออกไซด์	5
กรดสเตียริก	3
TMQ	1

3.3.3.3.11 การทดสอบสมบัติทางพลวัติด้วยเครื่อง DMTA

นำยางธรรมชาติคอมปาวด์ทั้ง 8 เกรด ที่เตรียมตามสูตรดังตาราง 3.2 มาอัดเบ้าสำหรับชิ้นทดสอบ tensile เพื่อเตรียมชิ้นทดสอบด้วยเครื่องอัดเบ้าแบบไฮโดรลิค โดยใช้อุณหภูมิ 150 $^{\circ}$C ตามเวลา 90% cure time

ชิ้นทดสอบมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 10x25x10 mm ทดสอบยางด้วยเครื่อง DMTA ด้วยเงื่อนไขในการทดสอบดังนี้

Geometry	Type Temperature Ramp
Test Type	Dynamic Temperature Ramp
Frequency	3.5 Hz.
Strain Control	0.16 %
Temperature	(-120) – 50 $^{\circ}$C
Ramp Rate	2 $^{\circ}$C / min

บันทึกค่า E', E'' และ tan δ และ อุณหภูมิกลาสทรานสิชั่น (T_g) ที่ tan δ สูงสุดในช่วงอุณหภูมิ (-120) ถึง 50 $^{\circ}$C

โดยที่ tan δ = E''/ E

3.3.4 ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนเบลนด์ (blend) ของยางธรรมชาติที่มีราคาสูงและต่ำ ปริมาณกำมะถัน และสารตัวเร่งที่มีผลต่อลักษณะการวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงกลของยาง โดยใช้หลักสถิติที่เรียกว่า Response Surface Methodology (RSM) ในการออกสูตรยาง

3.3.4.1 การเตรียมยางคอมปาวด์

การทดลองนี้ได้ใช้หลักสถิติที่เรียกว่า Response Surface Methodology (RSM) ในการออกสูตรยาง โดยใช้ตัวแปรอิสระ 3 ตัว คือ อัตราส่วนยางแผ่นรมควันต่อยางสกิม ปริมาณกำมะถัน และปริมาณสารตัวเร่ง TBBS แต่ละตัวแปรจะแปรค่า 5 ระดับ โดยสูตรที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตาราง 3.6

ตาราง 3.6 สูตรที่ใช้ในการทดลอง RSM

สารเคมี	ปริมาณที่ใช้ (phr)
อัตราส่วนยาง RSS No.3/Skim	แปรปริมาณ 0.25 - 4
กำมะถัน	แปรปริมาณ 0.5 - 2.5
TBBS	แปรปริมาณ 0.75 – 5.0
เขม่าดำ	40
ซิงค์ออกไซด์	4
กรดสเตียริก	1
6 PPD	1
Wax	3
Spindle oil	3

การเตรียมมาสเตอร์แบทช์ (master batch) ของเขม่าดำ

ในการวิจัยนี้มีการใช้เขม่าดำในปริมาณ 40 phr เพื่อสะดวกในการผสมยางกับเขม่าดำ จึงได้เตรียมเขม่าดำให้อยู่ในรูปของมาสเตอร์แบทช์ของยางแผ่นรมควันและยางสกิมซึ่งมีขั้นตอนการการเตรียมดังนี้

ตัวอย่างวิธีการคำนวณมาสเตอร์แบทช์ของเขม่าดำในยางแผ่นรมควัน

1. คำนวณชั่งสารเคมีที่จะใช้ในการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด
2. คำนวณหาปริมาตรสารแต่ละตัว เช่น ยางแผ่นรมควัน

$$V = \frac{M}{D} \tag{3.10}$$

$$V = \frac{100}{0.93} = 107.53$$

ในการคำนวณสารตัวอื่นก็คำนวณในทำนองเดียวกัน

การผสมจะทำในเครื่องผสมแบบปิด (kneader) ปริมาตร 3 ลิตร หรือ 3,000 cm^3

ในการผสมจะใช้ fill factor คือ 0.85

ดังนั้นปริมาตรทั้งหมดในการผสม คือ 3,000 x 0.85 = 2,550 cm^3

ความหนาแน่นรวมของสูตรยาง ดังแสดงรายละเอียดในตาราง 3.7

$$D = \frac{M_{total}}{V_{total}} \tag{3.11}$$

$$D = \frac{144}{134.42} = 1.07 \text{ g/cm}^3$$

ถ้ายางมาสเตอร์แบทช์ 1 cm^3 มีน้ำหนัก 1.07 กรัม

ถ้ายางมาสเตอร์แบทช์ 2,550 cm^3 มีน้ำหนัก 2,550 x 1.07 = 2,728.5 กรัม

เพราะฉะนั้นปริมาตรของยางผสม คือ 2,550 cm^3หรือ น้ำหนัก 2,728.5 กรัม

ดังนั้น mulsifying factor คือ $\frac{2,728.5}{144} = 18.95$

นำ 18.95 ไปคูณกับส่วนประกอบแต่ละตัวก็จะได้เป็นน้ำหนักของสารเคมีแต่ละตัว

3. ทำการเปิดเครื่องผสมแบบปิด (kneader) แล้วทำการล้างห้องผสม

4. ทำการผสมโดยการใส่ยางลงไปบดจนนิ่ม แล้วก็ทำการเติมสารเคมีลงไป โดยเริ่มจาก กรดสเตรียริก เขม่าดำปริมาณครึ่งหนึ่งก่อน แล้วเติม spindle oil ปริมาณครึ่งหนึ่งก่อน เพื่อให้การผสมของเขม่าดำเข้ากับยาง แล้วจึงเติมเขม่าดำและน้ำมันที่เหลือจนหมด ผสมยาง สารเคมี และเขม่าดำให้เข้ากัน

5. เมื่อทำการผสมเสร็จแล้วก็เทยางออกจากเครื่องผสมแบบปิด แล้วนำยางผสมที่ได้ ไปรีดด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง แล้วเก็บยางผสม

ตาราง 3.7 ปริมาณยางและสารเคมีที่ใช้เตรียมมาสเตอร์แบทช์ (master batch) ของเขม่าดำ

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr) (M)	Density (g/cm^3) (D)	$V = \frac{M}{D}$	น้ำหนักที่ใช้ (กรัม)
ยางแผ่นรมควัน	100.00	0.93	107.53	1,895
เขม่าดำ	40.00	1.80	22.22	758
น้ำมันสปินเดิล	3.00	0.86	3.49	56.85
Stearic acid	1.00	0.85	1.18	18.95
รวม	**144.00**		**134.42**	**2,728.5**

หมายเหตุ การคำนวณมาสเตอร์แบทช์ของยางสกิม ก็คำนวณในทำนองเดียวกัน

ตัวอย่าง การคำนวณการใช้มาสเตอร์แบทช์ที่อัตราส่วนยางแผ่นรมควันต่อยางสกิมเท่ากับ 50/50

นั่นคือ ใช้เขม่าดำมาสเตอร์แบทช์ของยางแผ่นรมควัน เท่ากับ 50 กรัม

และ ใช้เขม่าดำมาสเตอร์แบทช์ของยางสกิม เท่ากับ 50 กรัม

การตรวจเช็คความถูกต้องของปริมาณเขม่าดำ

ในยาง 100 กรัม มีเขม่าดำ 40 กรัม

ในยาง 50 กรัม มีเขม่าดำ (40x50)/100 = 20 กรัม

นั่นคือเขม่าดำมาสเตอร์แบทช์ของยางแผ่นรมควัน 50 กรัม จะมีปริมาณของเขม่าดำ 20 กรัม เมื่อรวมกับเขม่าดำมาสเตอร์แบทช์ของยางสกิม 50 กรัม จะมีปริมาณของเขม่าดำ 40 กรัม และ spindle oil 3 กรัม กับกรดสเตียริก 1 กรัม จากมาสเตอร์แบทช์เขม่าดำของยางทั้งสองชนิด

วิธีการทดลองตามหลัก RSM

1. คำนวณหา scale of variable (S) โดยใช้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$S = \text{พิสัย} / 2a \quad (3.12)$$

โดยที่ $a = 2^{k/4}$ (3.13)

เมื่อ k เป็นจำนวนตัวแปรอิสระ

ดังนั้น $a = 2^{3/4} = 1.682$

ตัวอย่างการหาค่า scale of variable ของอัตราส่วนยางแผ่นรมควันต่อยางสกิม

$$S = (4 - 0.25) / (2 \times 1.682)$$

$$S = 1.115$$

2. คำนวณหาปริมาณจริงของตัวแปร จากความสัมพันธ์

ปริมาณจริง = (S x code) + Mean (3.14)

เมื่อ code = -a, -1, 0, +1 หรือ +a (3.15)

ปริมาณจริง = (1.115 x 1.682) + [(4+0.25)/2]

ปริมาณจริง = 4

นั่นคือ อัตราส่วนยางแผ่นรมควันต่อยางสกิมที่รหัส 1.682 ใช้จริงเท่ากับ 4 หรือ เท่ากับ 80/20

หมายเหตุ สำหรับตัวแปรต่าง ๆ สามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกัน และปริมาณจริงตามค่ารหัส (code) แสดงดังตาราง 3.8

ตาราง 3.8 ปริมาณจริงของแต่ละตัวแปรตามรหัส

ตัวแปร	ค่าตามรหัสและปริมาณที่ใช้จริง				
	-1.682	-1	0	+1	+1.682
อัตราส่วนยาง RSS No.3/Skim	0.25 (20/80)	1.01 (50/50)	2.12 (68/32)	3.24 (76.4/23.6)	4.00 (80/20)
กำมะถัน (phr)	0.50	0.91	1.50	2.09	2.50
TBBS (phr)	0.75	1.61	2.88	4.14	5.0

สำหรับการทดลองที่มี 3 ตัวแปร แต่ละตัวแปรค่า 5 ระดับ จะมีจำนวนการทดลองทั้งหมด 20 การทดลอง ดังตาราง 3.9

ตาราง 3.9 จำนวนการทดลองและปริมาณจริงในแต่ละการทดลองของแต่ละตัวแปร

สูตรที่	รหัส			ปริมาณที่ใช้จริง (phr)		
	RSS No.3/Skim	กำมะถัน	TBBS	RSS No.3/Skim	กำมะถัน	TBBS
1	-1	-1	-1	1.01	0.91	1.61
2	+1	-1	-1	3.24	0.91	1.61
3	-1	+1	-1	1.01	2.09	1.61
4	+1	+1	-1	3.24	2.09	1.61
5	-1	-1	+1	1.01	0.91	4.14
6	+1	-1	+1	3.24	0.91	4.14
7	-1	+1	+1	1.01	2.09	4.14
8	+1	+1	+1	3.24	2.09	4.14
9	-1.682	0	0	0.25	1.50	2.88
10	+1.682	0	0	4.00	1.50	2.88
11	0	-1.682	0	2.12	0.50	2.88
12	0	+1.682	0	2.12	2.50	2.88
13	0	0	-1.682	2.12	1.50	0.75
14	0	0	+1.682	2.12	1.50	5.0
15	0	0	0	2.12	1.50	2.88
16	0	0	0	2.12	1.50	2.88
17	0	0	0	2.12	1.50	2.88
18	0	0	0	2.12	1.50	2.88
19	0	0	0	2.12	1.50	2.88
20	0	0	0	2.12	1.50	2.88

หลังจากคำนวณหาปริมาณจริงของแต่ละตัวแปรแล้ว ผสมยางและสารเคมีตามสูตรด้วยเครื่องบดผสมยางสองลูกกลิ้งโดยในขั้นแรกเป็นการเบลนด์ยางแผ่นรมควันและยางสกิมที่เตรียมเป็นมาสเตอร์แบทช์ของเขม่าดำให้เข้ากันก่อน จากนั้นใส่ซิงค์ออกไซด์ 6PPD TBBS และกำมะถันตามลำดับ รีดยางคอมปาวด์เป็นแผ่นพักยางเป็นเวลาอย่างน้อย 16 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบหาลักษณะการวัลคาไนซ์ และอัดเบ้าชิ้นทดสอบเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล

3.3.4.2 การทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์

ทำการทดสอบด้วยเครื่อง MDR 2000 ที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 60 นาที โดยเครื่องทดสอบจะรายงานผลเป็นค่าทอร์กต่ำสุด (M_L) ค่าทอร์กสูงสุด (M_H) ค่า scorch time (TS 2) และ 90% cure time (TC 90)

3.3.4.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล

นำยางคอมปาวด์ที่เตรียมได้มาอัดเบ้าเพื่อเตรียมชิ้นทดสอบด้วยเครื่องอัดเบ้าแบบไฮโดรลิค โดยใช้อุณหภูมิ 150 °C ตามเวลา 90% cure time หลังจากนั้นนำชิ้นทดสอบที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความแข็ง compression set การบ่มเร่งของยาง และความต้านทานต่อโอโซน ดังรายละเอียดการทดสอบในหัวข้อ 3.3.3.3

ความต้านทานโอโซนมีรายละเอียดการทดสอบดังนี้

ทดสอบความต้านทานต่อโอโซนของยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ ด้วยเครื่อง ozone aging tester โดยชิ้นทดสอบมีลักษณะเป็นแถบยาง มีความกว้างเท่ากับ 1 เซนติเมตร ความยาวเท่ากับ 7 เซนติเมตร ยืดชิ้นทดสอบ 20% วางไว้ในที่มืดเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จึงนำเข้าตู้โอโซนเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ความเข้มข้นโอโซน 25 pphm อุณหภูมิ 40 °C เมื่อครบกำหนดจึงนำตัวอย่างมาตรวจรอยแตกที่ผิวด้วยแว่นขยาย

3.3.5 การศึกษาการพัฒนาสูตรยางรองคอสะพาน

จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้ง 3 และกราฟคอนทัวร์ของสมบัติต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองหัวข้อ 3.3.4 นำมาใช้ประโยชน์ในการออกสูตรยางคอมปาวด์ให้มีสมบัติที่ต้องการได้ ดังนั้นการเลือกสูตรยางรองคอสะพานที่ผ่านตามมาตรฐานมอก. 951-2533 สามารถทำได้โดยนำกราฟคอนทัวร์ของสมบัติต่าง ๆ ที่ต้องการมาเขียนลงในกราฟรูปเดียวกัน คือ สมบัติ elongation at break, tensile strength, compression set และ ความแข็ง แล้วแรเงาส่วนที่เราสนใจซึ่งเป็นส่วนที่มีสมบัติตามที่ต้องการ เลือกจุดใดจุดหนึ่งมาผลิตเป็นยางรองคอสะพาน

3.3.5.1 การคำนวณทำนายระดับการวัลคาไนซ์ของยางที่ตรงกลางเบ้า

ผสมยางและสารเคมีตามสูตรที่ได้สมบัติยางรองคอสะพานที่ต้องการดังตาราง 3.10 ด้วยเครื่องบดผสมยางสองลูกกลิ้งโดยในขั้นแรกเป็นการบดยางแผ่นรมควันและยางสกิมที่เตรียมเป็นมาสเตอร์แบทช์ของเขม่าดำให้เข้ากันก่อน จากนั้นใส่ซิงค์ออกไซด์ 6PPD, TBBS และกำมะถัน ตามลำดับ รีดยางคอมปาวด์เป็นแผ่นพักยางเป็นเวลาอย่างน้อย 16 ชั่วโมง ก่อน

นำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการวัลคาไนซ์โดยใช้จากเครื่อง MDR 2000 ซึ่งทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 120 – 180 °C ทำนายระดับการวัลคาไนซ์ของยางตรงกลางเบ้าได้ตามสมการ 2.28 หน้า 47 ดังต่อไปนี้

สมการของระดับการวัลคาไนซ์ของยาง (ชลดา และคณะ, 2547) คือ

$$\frac{\int c^{\left(\frac{T-\theta}{10}\right)} dt}{\tau}$$

T เป็นค่าของอุณหภูมิ (^{0}C) ของเนื้อยางซึ่งแปรเปลี่ยนตามเวลา

คุณสมบัติของยางถูกกำหนดโดย C , θ และ τ โดยที่

C คือ ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของการวัลคาไนซ์ (Temperature coefficient of vulcanization) เป็นค่าเฉพาะของยางแต่ละสูตร โดยยางจะสุกเมื่อถูกอบที่อุณหภูมิ θ °C เป็นระยะเวลา τ

ตาราง 3.10 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการวัลคาไนซ์เครื่อง MDR

สารเคมี	ปริมาณที่ใช้ (phr)
อัตราส่วนยาง RSS No.3/Skim	68/32
กำมะถัน	0.5
TBBS	5.0
เขม่าดำ	40
ซิงค์ออกไซด์	4
กรดสเตียริก	1
6 PPD	1
Wax	3
Spindle oil	3

จากนั้นนำเวลาในการวัลคาไนซ์ของยางแต่ละอุณหภูมิมาเปรียบเทียบกันโดยใช้สมการเส้นตรง $\log t = AT + B$

จากสมการเส้นตรงของยางแต่ละสูตรที่ได้นั้น (Gregory *et al*, 1999) ทำให้สามารถทราบถึงค่าความชัน (A) ได้ จากนั้นนำค่าความชัน (A) ที่ได้ มาแทนในสมการดังนี้

$$C = 10^{-10A} \tag{3.16}$$

โดยค่า C คือ จำนวนเท่าของเวลาเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป 10 ^{0}C หรือสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของการวัลคาไนซ์

นั่นคือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10 $^{\circ}$C เวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์จะลดลง C เท่า

จากนั้นทำการคำนวณทำนายหาค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่จุดศูนย์กลางของชิ้นยางโดยใช้สมการ 2.25 หน้า 39

$$\frac{T_s - T}{T_s - T_0} = \frac{64}{\pi^3} e^{-\pi^{2Dt\left(a^{-2}+b^{-2}+c^{-2}\right)}}$$

เมื่อ D = 0.009 $in^2.min^{-1}$ (เป็นค่าประมาณระหว่างยางธรรมชาติ (natural rubber gum stock) ค่า D = 0.0075 $in^2.min^{-1}$ และยางล้อ (tread stock) ค่า D = 0.01 $in^2.min^{-1}$)

ความกว้าง a = 2 นิ้ว

ความยาว b = 4 นิ้ว

ความหนา c = 2 นิ้ว

อุณหภูมิที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ T_s = 150 $^{\circ}$C = 302 $^{\circ}$F

อุณหภูมิเริ่มต้น T_0 = 30 $^{\circ}$C = 86 $^{\circ}$F

ดังนั้น เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ 2.25 จะได้ว่า

$$\frac{302 - T}{302 - 86} = \frac{64}{\pi^3} e^{-\pi^{2x0.009xt\left(2^{-2}+4^{-2}+2^{-2}\right)}}$$

$$T(^{\circ}F) = 302 - 446e^{-0.05t} \tag{3.17}$$

สมการ 3.17 จะเป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณหาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่จุดศูนย์กลางของชิ้นยาง เมื่อคำนวณได้ค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่จุดศูนย์กลางของชิ้นยางแล้วนำไปหา % cure ดังรายละเอียดในหัวข้อ 2.6.3

การคำนวณค่า % reversion

จากลักษณะกราฟการวัลคาไนซ์ที่ได้จากเครื่อง MDR ใช้เวลาในการทดสอบ 60 นาที สามารถคำนวณ ค่า % reversion ได้ตามสมการ 3.18

$$\%\, reversion = \left(\frac{Torque_{\max} - Torque_{final(60\,\min)}}{Torque_{\max}} \right) x100 \qquad (3.18)$$

3.3.5.2 การขึ้นรูปยางรองคอสะพานขนาด 2 x 4 x 2 นิ้ว

3.3.5.2.1 การเตรียมยางคอมปาวด์

ผสมยางและสารเคมีตามสูตรดังตาราง 3.10 ด้วยเครื่องบดผสมยาง สองลูกกลิ้งโดยในขั้นแรกเป็นการเบลนด์ (blend) ยางให้เข้ากันก่อน จากนั้นใส่ซิงค์ออกไซด์ 6PPD, TBBSและกำมะถัน ตามลำดับ รีดยางคอมปาวด์เป็นแผ่นพักยางเป็นเวลาอย่างน้อย 16 ชั่วโมง ก่อนนำไปอัดเบ้า

3.3.5.2.2 การขึ้นรูป

การเตรียมผิวโลหะ

1. ควรสวมถุงมือผ้าที่สะอาดในขณะจับชิ้นงาน
2. ขจัดคราบน้ำมัน ด้วยการล้างทำความสะอาดผิวเหล็กด้วยอะซีโตน จากนั้นขัดผิวเหล็กด้วยกระดาษทรายเบอร์หยาบ แล้วล้างผิวเหล็กด้วยอะซีโตนอีกครั้ง ควรรีบทากาวทันที หรือภายใน 1 ชั่วโมง หลังจากทำความสะอาดเสร็จ

การเคลือบกาว

1. คนกาวให้เข้ากัน ใช้แปรงทากาวเคมลอค 205A ซึ่งเป็นกาวรองพื้นสีเทา ให้ทั่วและไปในทิศทางเดียวกัน บนผิวเหล็กที่ทำความสะอาดเรียบร้อยแล้ว ตั้งทิ้งไว้ประมาณ 30 – 45 นาที ที่อุณหภูมิห้อง
2. เมื่อกาวเคมลอค 205A แห้ง จึงใช้แปรงทากาวเคมลอค 220 ซึ่งเป็นกาวทับหน้าสีดำ ให้ทั่วและไปในทิศทางเดียวกัน ตั้งทิ้งไว้ประมาณ 45 – 60 นาที ที่อุณหภูมิห้อง (แผ่นเหล็กที่ทากาวแล้วเมื่อไม่ใช้งานต้องเก็บไว้ในถุงพลาสติกที่มิดชิด ปราศจากฝุ่นความชื้น)

การเตรียมยาง

ยางที่ใช้ควรเป็นยางใหม่ ทำความสะอาดผิวหน้าของยางคอมปาวด์ที่เตรียมได้สูตรดังตาราง 3.10 ด้วย methyl ethyl ketone (MEK) ก่อนนำไปติดกับเหล็ก

อัดเบ้ายางรองคอสะพานด้วยเครื่องอัดเบ้าแบบไฮโดรลิคโดยใช้อุณหภูมิ 150 $^{\circ}$C โดยแปรเวลาในการอัดที่ 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที

3.3.5.2.3 การหาความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง (crosslink density)

ตัดชิ้นตัวอย่างยางรองคอสะพานด้านในและด้านนอกที่ได้จากการอัดที่เวลาต่าง ๆ มาชั่งน้ำหนักให้มีค่าที่แน่นอน (w) โดยใช้เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง จากนั้นนำตัวอย่างมาแช่ในตัวทำละลายโทลูอีนในขวดแบบปิดเป็นเวลา 7 วัน เมื่อครบกำหนดนำตัวอย่างที่เกิดการบวมตัวมาซับด้วยกระดาษทิชชูให้แห้งแล้วนำมาชั่งน้ำหนัก (w_1) แล้วจึงนำตัวอย่างไปอบในตู้อบแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 2 วัน เมื่อครบกำหนดแล้วนำตัวอย่างชั่งน้ำหนัก (w_2) อีกครั้ง

ค่าความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง ($1/2M_c$) คำนวณตามสมการ 3.19 (Marykutty, *et.al.*, 2003)

$$-\left[\ln(1-V_r)+V_r+\chi V_r^{\,2}\right]=\frac{\rho_r V_s (V_r)^{1/3}}{M_c} \qquad (3.19)$$

V_s คือ ปริมาตรโมลาร์ (molar volume) ของโทลูอีน มีค่าเท่ากับ 106.2 cm^3/mol

χ คือ ค่าพารามิเตอร์ของการเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารละลาย (Rubber-solvent interaction parameter) ค่า χ (NR-toluene) มีค่าเท่ากับ 0.42

M_c คือ ค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของสายโซ่ยางที่อยู่ระหว่างพันธะเชื่อมโยง (number-average molecular weight of rubber chains between crosslinks)

V_r คือ สัดส่วนปริมาตร (volume fraction) ของยาง

ค่าน้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่ที่อยู่ระหว่างพันธะเชื่อมโยง (M_c) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ที่ว่า $M_c = 1/2\nu$ (Marykutty, *et.al.*, 2003)

คำนวณค่า volume fraction (V_r) (Alex, 2003) ตามสมการ 3.20

$$V_r = \left(\frac{w_2(\delta_r)^{-1}}{w_2(\delta_r)^{-1} + (w_1 - w_2)(\delta_s)^{-1}} \right) \quad (3.20)$$

เมื่อ δ_r และ δ_s คือ ค่าความหนาแน่นของยางและตัวทำละลายตามลำดับ ค่าความหนาแน่นของโทลูอีน เท่ากับ 0.886 g/cm^3 สำหรับค่าความหนาแน่นของยางสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.21)

w_1 น้ำหนักของตัวอย่างหลังจากแช่ในตัวทำละลายโทลูอีน

w_2 น้ำหนักของตัวอย่างหลังจากแช่ในตัวทำละลายโทลูอีนแล้วนำไปอบในตู้อบแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 60 $^\circ$C เป็นเวลา 2 วัน

การวัดค่าความหนาแน่นของยาง

ตัดชิ้นตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบโดยมีขนาดไม่เล็กหรือใหญ่จนเกินไป

⇩

นำชิ้นตัวอย่างชั่งน้ำหนักในอากาศและจดบันทึกค่า

⇩

นำชิ้นตัวอย่างชั่งน้ำหนักในน้ำ และจดบันทึกค่า

⇩

นำค่าน้ำหนักที่ชั่งในน้ำและชั่งในอากาศมาคำนวณหาค่าความหนาแน่นของชิ้นตัวอย่าง

ความหนาแน่นของวัตถุ = $\frac{w}{(w - w_1)}$ หน่วยเป็น กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (3.21)

โดยที่ w คือ น้ำหนักของชิ้นตัวอย่างที่ชั่งในอากาศ

w_1 คือ น้ำหนักของชิ้นตัวอย่างที่ชั่งในน้ำ

3.3.8.2.4 การทดสอบยางรองคอสะพานภายใต้แรงกด

1. ผสมยางคอมปาวด์ตามสูตรดังตาราง 3.10 แล้วนำไปขึ้นรูปชิ้นตัวอย่างยางรองคอสะพานที่มีความกว้าง x ความยาว x ความหนา เท่ากับ 2x4x2 นิ้ว

2. นำชิ้นตัวอย่างแต่ละชิ้นไปทดสอบการผิดรูปในแนวแรงกด ซึ่งเป็นการทดสอบด้วยอัตราเร็ว 10 mm/min แล้วเก็บข้อมูลในขณะเพิ่มแรงรอบที่ 4, 5 และ 6 เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยของแรงกดของชิ้นตัวอย่างแต่ละชิ้น โดยจำกัดไม่ให้แรงกดสูงสุดเกิน 50 kN (ระยะกดสูงสุดแปรค่าตั้งแต่ 1 – 21 มิลลิเมตร)