บทที่ 3

วิธีการวิจัย

3.1 สารเคมี

วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย

1. ยางธรรมชาติ (natural rubber, NR) ยางธรรมชาติที่ใช้ในการทดลอง คือ ยางแท่ง STR5L ผลิตโดยบริษัท Chalong Latex Industry Co.,Ltd.

2. ยางธรรมชาติอิพ๊อกซิไดซ์ (epoxidized natural rubber, ENR) ผลิตโดยบริษัท Kupulan GuthrienBerhad Malaysia มี 2 ชนิด คือ

2.1 ชนิด Epoxyprene®25 (ENR25)

2.2 ชนิด Epoxyprene®50 (ENR50)

3. ยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีน (chlorosulfonated polyethylene, CSM) ชนิด Hypalon®40 ผลิตโดย DuPont Dow Elastomers Pte. Ltd.

4. ผงโลหะ ผลิตโดย บริษัท สยามโปรเดกซ์ จำกัด

4.1 ผงดีบุก (Lunar® S10 silver) อนุภาคมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 30 ไมโครเมตร (Sn 30 μm) มีค่าความหนาแน่น 7.31 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (http://en.wikipedia.org, 2005) และค่าสภาพนำไฟฟ้า 9.17 x 10^6 ซีเมนต์ต่อเมตร (http://tin.biography.ms/, 2006)

4.2 ผงอลูมิเนียม มีค่าความหนาแน่น 2.70 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (http://en.wikipedia.org, 2005) และค่าสภาพนำไฟฟ้า 37.7 x 10^6 ซีเมนต์ต่อเมตร (http://Aluminium.biography.ms/, 2006) อนุภาคมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 2 ขนาด คือ

- อนุภาคมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 13 ไมโครเมตร (Lunar® Aluminium Powder N-85) (Al 13 μm)
- อนุภาคมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 30 ไมโครเมตร (Lunar® Aluminium Powder N-95) (Al 30 μm)

5. เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า (conductive carbon black, CCB) ชื่อทางการค้า Ketjenblack EC-300J ผลิตโดย AKZO NOBEL® มีสมบัติดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า Ketjenblack EC-300J

Properties	Unit	Specification
Appearance	-	granular
DBP water absorption ratio	$cm^3/100\ g$	340
Pore volume	cm^3/g	1.15
Porosity	%	69.3
BET surface area	m^2/g	950
pH		8 – 10
Apparent bulk density	g/cm^3	0.125 – 0.145
Grain size	Å	365
Typical resistivity	Ω-cm	0.341

ที่มา : http://www.freepatentsonline.com/5041195.html, 2006

http://www.lion.co.jp/chem/en/cata_en/f48-49.htm, 2006

เอกสารแสดงสมบัติของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า Ketjenblack EC-300J ผลิตโดย บริษัท AKZO NOBEL

6. กรดสเตียริค (stearic acid) ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้น (activator) และเป็นสารช่วยบดย่อยยาง เพื่อทำให้ยางนิ่ม จัดจำหน่ายโดย ห้างหุ้นส่วน กิจไพบูลย์เคมี จำกัด

7. ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide, ZnO) ชนิด white seal ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้น ผลิตโดย บริษัท Univenture Public Co., Ltd.

8. บิวทิวเลต รีแอคชั่น โพรดักซ์ ออฟ พารา-ครีซอล แอนด์ ไดไซโคลเพนตะไดอีน (butylated reaction product of p-cresol and dicyclopentadiene, Wingstay®L) ทำหน้าที่เป็นสารแอนติออกซิแดนซ์ ผลิตโดยบริษัท Goodyears Co., Ltd.

9. นอร์มอล-ไซโคลเฮกซิล-2-เบนโซไธอะซิล ซัลฟีนาไมด์ (N-cyclohexyl-2-benzothiazyl sulphenamide, CBS) ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยา จัดจำหน่ายโดย บริษัท เคมีอินโนเวชัน จำกัด

10. กำมะถัน (sulfur) ทำหน้าที่เป็นสารวัลคาไนซ์ (vulcanizing agent) ผลิตโดย บริษัท สยามเคมี จำกัด

11. แมกนีเซียมออกไซด์ (high activity magnesium oxide (Maglite®D), magnesia) ทำหน้าที่เป็นสารช่วยในการจับกรด (acid acceptor) ที่เกิดขึ้นระหว่างการวัลคาไนซ์ของยางคลอโรซัลโฟเนตเตดพอลิเอทธิลีน ผลิตโดยบริษัท Sunny World Co., Ltd.

12. ไดเบนโซไธอะซิล ไดซัลไฟด์ (dibenzothiazyl disulphide, MBTS) ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่งและสารวัลคาไนซ์ จัดจำหน่ายโดย ห้างหุ้นส่วน กิจไพบูลย์เคมี จำกัด

13. เพนตะอิริไธรทอล (pentaerythritol, Hercules® PE-200) ทำหน้าที่เป็นสารตัวกระตุ้นใช้ร่วมกับแมกนีเซียมออกไซด์ ในยางคลอโรซัลโฟเนตเตดพอลิเอทธิลีน ผลิตโดยบริษัท Hercules, Inc.

14. ไดเพนตะเมทธิวลีน ไธยูแรม เตตระซัลไฟด์ (dipentamethylene thiuram tetrasulfide, Tetrone® A) ทำหน้าที่เป็นสารวัลคาไนซ์สำหรับยางคลอโรซัลโฟเนตเตดพอลิเอทธิลีน ผลิตโดยบริษัท DuPont Dow Elastomers Pte. Ltd.

15. แคลเซียมสเตียเรต (calcium stearate) ทำหน้าที่เป็นสารช่วยในการจับกรดที่เกิดจากหมู่อิพ็อกไซด์ สำหรับยางธรรมชาติอิพ็อกซิไดซ์ จัดจำหน่ายโดยบริษัท เคมีอินโนเวชัน จำกัด

16. น้ำมันสปินเดิล (spindle oil) ทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม จัดจำหน่ายโดยห้างหุ้นส่วนกิจไพบูลย์เคมี จำกัด

3.2 อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย

1. เครื่องบดสองลูกกลิ้ง (two roll mill) ขนาดมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 นิ้ว ความยาว 15 นิ้ว จำนวน 2 ลูกหมุนเข้าหากันด้วยความเร็วลูกกลิ้งหน้าต่อลูกกลิ้งหลัง (friction ratio) เท่ากับ 1 : 1.22 ผลิตโดย บริษัท Yong Fong Machinary Co.,Ltd.

2. เครื่องผสมยางแบบปิด (kneader) ใช้ในการเตรียมมาสเตอร์แบทช์ (master batch) เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้ากับยางชนิดต่างๆ โรเตอร์หมุนด้วยความเร็ว 970 รอบต่อนาที ความจุของห้องผสมคือ 3 ลิตร ผลิตโดย บริษัท Yong Fong Machinary Co.,Ltd.

3. เครื่องอัดความดัน (compression molding) เป็นเครื่องมือในการขึ้นรูปยางโดยการอัดยางเข้ากับเบ้าพิมพ์

3.1 เครื่องอัดยาง ผลิตโดยบริษัท Kao tieh รุ่น KT – 7014

3.2 เครื่องอัดยางระบบไฮโดรลิก รุ่น LCC 140 ผลิตโดย บริษัท TANG-MASTER Co.,Ltd.

4. เครื่องทดสอบหาเวลาการวัลคาไนซ์ของยาง (moving die rheometer, MDR 2000) ใช้สำหรับหาเวลาการวัลคาไนซ์ (cure time) ของยางคอมปาวด์ ผลิตโดยบริษัท Alpha Technologies Services Inc.

5. เบ้าพิมพ์ (mold)

5.1 รูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด 12 x 12 เซนติเมตร ที่มีความหนา 1, 3 และ 6 มิลลิเมตร

5.2 รูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด 9 x 9 เซนติเมตร ที่มีความหนา 15 มิลลิเมตร

5.3 รูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด 30 x 30 เซนติเมตร ที่มีความหนา 1 และ 3 มิลลิเมตร

5.4 รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 29.0 $\pm$ 0.5 มิลลิเมตร และมีความหนา 12.5 $\pm$ 0.5 มิลลิเมตร ใช้เตรียมชิ้นทดสอบเพื่อทดสอบค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (compression set) ตามมาตรฐาน ASTM D395

6. ชุดทดสอบการวัดค่าประสิทธิภาพการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ประกอบด้วย

6.1 เครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงความถี่ 8 ถึง 12 จิกะเฮิรตซ์ ผลิตโดยบริษัท Hewlett Packard รุ่น HP83620B

6.2 เครื่องบ่งชี้ระดับสัญญาณ โดยใช้เครื่อง V.S.W.R. Amplifier MK III

6.3 ท่อนำคลื่น (wave guide)

6.4 สายอากาศตัวส่ง (transmitting antenna) ชนิดปากแตร (horn antenna)

6.5 สายอากาศตัวรับ (receiving antenna) ชนิดปากแตร

6.6 เครื่องวัดกำลัง (power meter) ผลิตโดย บริษัท Agilent รุ่น 53147A พร้อมหัววัดกำลัง (power sensor) รุ่น 8485A

6.7 ฉากไม้ยึดชิ้นทดสอบ

7. ชุดทดสอบค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด ประกอบด้วย

7.1 แผ่นโลหะ (plates)

7.2 โลหะกั้นระยะ (spacer bars)

7.3 สกรู

8. เครื่องทดสอบสมบัติแรงดึง (universal testing machine) จำหน่ายโดย บริษัท อินโทรเอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด ผลิตโดย บริษัท LLOYD รุ่น LR10K

9. เครื่องทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant) และ ค่าอิมพิแดนซ์ (impedance) ผลิตโดย บริษัท Hewlett Packard รุ่น HP4263B LCR meter

10. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy, SEM) ผลิตโดย บริษัท JEOL รุ่น JSM-5800LV

11. ชุดทดสอบวัดค่าความถ่วงจำเพาะ

11.1 เครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่ง

11.2 อุปกรณ์สำหรับชั่งน้ำหนักในอากาศและในน้ำของชิ้นทดสอบ

12. เครื่องชั่งความละเอียด 2 ตำแหน่ง ผลิตโดยบริษัท Mettler Toledo Ltd. รุ่น PL 3002

13. เครื่องตัดชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ ตามมาตรฐาน ASTM D412-98a แบบ Die C

14. เครื่องตัดชิ้นทดสอบ สำหรับทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดแบบมุม ตามมาตรฐาน ASTM D624 แบบ Die C

15. เครื่องวัดความหนา ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร ผลิตโดยบริษัท Teclock® รุ่น SM-112

16. เครื่องวัดความแข็ง (hardness tester) ใช้วัดความแข็งของยาง แบบ shore durometer รุ่น PTC 408 ความแข็งที่วัดได้มีหน่วยเป็น shore A

17. ตู้อบบ่มเร่งชนิด gear aging ใช้ในการบ่มเร่งชิ้นทดสอบในการทดสอบสมบัติการบ่มเร่ง ผลิตโดย บริษัท Tabai Espec Corp. รุ่น GPHH-100

18. ตู้อบความร้อน ผลิตโดย บริษัท MEMMERT จัดจำหน่ายโดย บริษัท เค เอส พี อินเตอร์เคม จำกัด

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1. วิธีการเตรียมยางคอมปาวด์

มีการแปรปริมาณของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า (0, 10, 20, 30, 40 และ 50 phr) ปริมาณของผงโลหะ (0, 30, 50 และ 70 phr) ชนิดและขนาดของผงโลหะ โดยมีขั้นตอนการเตรียมยางคอมปาวด์ดังนี้

1. สูตรยางคอมปาวด์สำหรับยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติอิพ๊อกซิไดซ์ (ENR25 และ ENR50) และยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีน แสดงในตารางที่ 3.2, 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.2 สูตรยางธรรมชาติที่ใช้ในการทดลอง

ส่วนประกอบ	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก
STR 5L	100
เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า	0 – 50
กรดสเตียริค	2.00
ซิงค์ออกไซด์	5.00
วิงสเต แอล	1.00
CBS	1.20
ผงโลหะ	0, 30 และ 50
กำมะถัน	2.00

ตารางที่ 3.3 สูตรยาง ENR ที่ใช้ในการทดลอง

ส่วนประกอบ	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก
ENR (ENR25, ENR50)	100
เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า	0 – 50
แคลเซียมสเตียเรต	3.00
กรดสเตียริค	2.00
ซิงค์ออกไซด์	5.00
วิงสเต แอล	1.00
CBS	1.50
ผงโลหะ	0, 30 และ 50
กำมะถัน	1.50

ตารางที่ 3.4 สูตรยาง CSM ที่ใช้ในการทดลอง

ส่วนประกอบ	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก
CSM (Hypalon®40)	100
เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า	0 – 50
กรดสเตียริค	2.00
แมกนีเซียมออกไซด์	4.00
PE-200	3.00
เตตรอน เอ	2.00
ผงโลหะ	0, 30 และ 50
MBTS	1.50

2. ผสมยางตามสูตร ด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง โดยขั้นแรกทำการบดยาง และ/หรือ มาสเตอร์แบทช์ของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเข้าด้วยกันก่อน จากนั้นเติมสารเคมี ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ถึง 3.4 ของยางธรรมชาติ ยาง ENR (ENR25 และ ENR50) และยาง CSM ตามลำดับ ปริมาณยางและสารเคมีที่ใช้ จะมีการหักลบปริมาณยางและสารเคมีที่มีอยู่แล้วในมาสเตอร์แบทช์เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า ดังตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่าง การคำนวณการใช้มาสเตอร์แบทช์เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าในสูตรยางคอมปาวด์สำหรับยางธรรมชาติและยาง ENR โดยที่มาสเตอร์แบทช์มีเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 30.30 % คือ มาสเตอร์แบทช์เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าในยางธรรมชาติและยาง ENR หนัก 165 กรัม จะมีเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าปริมาณ 50 กรัม (สูตรยางมาสเตอร์แบทช์เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติและยาง ENR แสดงในตารางที่ 3.5)

วิธีการคำนวณ

ต้องการเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 50 กรัม ใช้มาสเตอร์แบทช์ 165 กรัม

ถ้าต้องการเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 30 กรัม ต้องใช้มาสเตอร์แบทช์ $\frac{30 \times 165}{50} = 99$ กรัม

จากการเตรียมมาสเตอร์แบทช์ 165 กรัม มียางธรรมชาติอยู่ 100 กรัม

ถ้ามาสเตอร์แบทช์หนัก 99 กรัม มียางธรรมชาติอยู่ $\frac{99 \times 100}{165} = 60$ กรัม

ดังนั้นต้องใช้ยางเพิ่มอีก 100 – 60 = 40 กรัม

จากการเตรียมมาสเตอร์แบทช์ 165 กรัม มีกรดสเตียริคอยู่ 2 กรัม

ถ้ามาสเตอร์แบทช์หนัก 99 กรัม มีกรดสเตียริคอยู่ $\frac{99 \times 2}{165} = 1.2$ กรัม

ดังนั้นต้องใช้กรดสเตียริคเพิ่มอีก 2.0 – 1.2 = 0.8 กรัม

ดังนั้นในสูตรยางคอมปาวด์ (ยางธรรมชาติหรือยาง ENR) ที่ต้องการเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 30 phr จะใช้มาสเตอร์แบทช์เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติหรือยาง ENR ปริมาณ 99 กรัม ซึ่งในมาสเตอร์แบทช์นี้จะมีเนื้อยาง 60 กรัม และมีกรดสเตียริค 1.2 กรัม ดังนั้นปริมาณยางและกรดสเตียริคที่จะนำมาผสมจึงมีปริมาณลดลงเป็น 40 กรัม และ 0.8 กรัม ตามลำดับ ในขณะที่สารเคมีอื่นๆ ยังคงต้องใส่ตามปริมาณที่ระบุไว้ในตารางที่ 3.2 และ 3.3

ในการคำนวณการใช้เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าในปริมาณอื่นๆ ทำการคำนวณในทำนองเดียวกัน และการเตรียมยางคอมปาวด์จากยาง CSM ก็คำนวณในทำนองเดียวกันนี้ สูตรยางมาสเตอร์แบทช์เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าของยาง CSM แสดงในตารางที่ 3.6

3. เมื่อเติมสารเคมีครบทุกชนิดแล้วทำการรีดยางเป็นแผ่น เก็บยางคอมปาวด์ไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 16 ชั่วโมง เพื่อลดอุณหภูมิของยางหลังจากการผสมและเป็นการปรับสภาพก่อนนำไปหาค่าเวลาในการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์ (t_{90}) และขึ้นรูปต่อไป

4. นำยางคอมปาวด์ปริมาณ 5 กรัมไปหาเวลาในการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์ (t_{90}) ด้วยเครื่อง moving die rheometer (MDR) ทดสอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

5. ขึ้นรูปยางคอมปาวด์ด้วยวิธีการอัดเบ้า ด้วยเวลาที่หาได้จากเครื่อง MDR ใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูป 150 องศาเซลเซียส โดยเตรียมชิ้นทดสอบเพื่อการทดสอบวัดค่าประสิทธิภาพการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึง ทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดและค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด

6. นำยางที่ขึ้นรูปแล้วไปทดสอบสมบัติต่างๆ ที่ต้องการ

7. กำหนดชื่อสูตรแทนด้วยสัญลักษณ์ ดังนี้

ตัวอย่าง NR 50/30/Al30 ≡ K X/Y/Z

เมื่อ

K คือ ชนิดของยางที่ใช้

X คือ ปริมาณของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า

Y คือ ปริมาณของผงโลหะ

Z คือ ชนิดของผงโลหะและขนาดอนุภาคเฉลี่ย

จากสูตร คือ ยางธรรมชาติที่ใช้เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าปริมาณ 50 phr และ ใช้ผงอลูมิเนียมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 30 μm ปริมาณ 30 phr

3.3.2 การเตรียมมาสเตอร์แบทช์ของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า

ในการวิจัยนี้จะมีการใช้เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าในปริมาณสูงสุดถึง 50 phr เพื่อความสะดวกในการผสมยางชนิดต่างๆ กับเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า จึงได้เตรียมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าให้อยู่ในรูปของมาสเตอร์แบทช์ของยางแต่ละชนิด เนื่องจากป้องกันการฟุ้งกระจายของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า และยังลดเวลาในการผสม (Whelan and Lee, 1981)

สูตรยางมาสเตอร์แบทช์ของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าในยางธรรมชาติ และยาง ENR50 แสดงในตารางที่ 3.5 ส่วนสูตรยางมาสเตอร์แบทช์เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าของยาง CSM แสดงในตารางที่ 3.6 มีวิธีการคำนวณและเตรียมมาสเตอร์แบทช์ มีขั้นตอนดังนี้

1. ผสมยางกับเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าจะทำในเครื่องผสมแบบปิด ชนิด kneader ที่มีปริมาตร 3 ลิตร หรือ 3,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร ในการผสมจะใช้ปริมาตร (fill factor) คือ 0.85 เท่าของห้องผสม ดังนั้นปริมาตรทั้งหมดในการผสม คือ 3,000 x 0.85 = 2,550 ลูกบาศก์เซนติเมตร

2. หาปริมาตรของสารแต่ละตัว โดยนำค่าความหนาแน่นของสารแต่ละตัวหารด้วยน้ำหนักที่ใช้ (ปริมาณ (phr)) ดังสมการที่ 3.1 เช่น การคำนวณหาปริมาตรของยางธรรมชาติ

$$V = \frac{M}{D} \tag{3.1}$$

เมื่อ V คือ ปริมาตร (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
M คือ น้ำหนัก (กรัม)
D คือ ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

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

ทำการคำนวณหาปริมาตรของสารเคมีทุกตัวที่ต้องใช้ตามสูตรยางมาสเตอร์แบทช์ในตารางที่ 3.5

3. นำค่าน้ำหนักรวม และปริมาตรรวมของสูตรยางมาสเตอร์แบทช์ มาหาความหนาแน่นรวมของสูตรยางมาสเตอร์แบทช์ ดังสมการที่ 3.2

$$D = \frac{M_{total}}{V_{total}} \quad (3.2)$$

$$D = \frac{165.00}{152.78} = 1.08 \text{ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

4. นำค่าความหนาแน่นรวมของสูตรยางมาสเตอร์แบทช์ หาน้ำหนักของสูตรยางที่ใช้ผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด คำนวนดังนี้

ถ้ายางมาสเตอร์แบทช์ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร มีน้ำหนัก 1.08 กรัม

ถ้ายางมาสเตอร์แบทช์ 2,550 ลูกบาศก์เซนติเมตร มีน้ำหนัก 2,550 x 1.08 = 2,754 กรัม

เพราะฉะนั้น น้ำหนักของยางมาสเตอร์แบทช์ที่จะผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด คือ 2,754 กรัม

5. นำน้ำหนักที่ใช้ทั้งหมดในเครื่องผสมแบบปิด หารด้วยน้ำหนักทั้งหมดของสูตรยางมาสเตอร์แบทช์ (multiplying factor) คือ $\frac{2,754}{165}$ = 16.69 คูณกับปริมาณสารทุกตัวในหน่วย phr ของสูตรยางมาสเตอร์แบทช์ ได้เป็นน้ำหนักของสารเคมีแต่ละตัวที่จะใช้ในการเตรียมยางมาสเตอร์แบทช์ เช่น 16.69 x 100 = 1,669 กรัม

ตารางที่ 3.5 สูตรการเตรียมยางมาสเตอร์แบทช์ของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าในยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพ๊อกซิไดซ์

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	ปริมาตรที่ใช้ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)	น้ำหนักที่ใช้ (กรัม)
ยางธรรมชาติ หรือ ยาง ENR	100.00	0.93	107.53	1,669
เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า	50.00	1.80	27.78	834.5
น้ำมันสปินเดิล	13.00	0.86	15.12	216.97
กรดสเตียริค	2.00	0.85	2.35	33.38
รวม	165.00		152.78	2,753.85

ตารางที่ 3.6 สูตรการเตรียมยางมาสเตอร์แบทช์ของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าในยางคลอโรซัลโฟเนตเตดพอลิเอทธิลีน

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	ปริมาตรที่ใช้ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)	น้ำหนักที่ใช้ (กรัม)
ยาง CSM	100.00	1.17	85.47	1,947
เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า	50.00	1.80	27.78	973.5
น้ำมันสปินเดิล	13.00	0.86	15.12	253.11
กรดสเตียริค	2.00	0.85	2.35	38.94
รวม	165.00		130.72	3,212.55

6. ทำการชั่งสารเพื่อผสมในเครื่องผสมแบบปิด

7. เปิดเครื่องผสมแบบปิด ล้างห้องผสมด้วยยาง

8. บดยางจนนิ่ม แล้วเติมสารเคมี โดยเริ่มจากกรดสเตรียริค เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าปริมาณครึ่งหนึ่ง เติมน้ำมันสปินเดิลปริมาณครึ่งหนึ่ง ทำการผสมยางผสมให้เข้ากับสารเคมีที่เติมเข้าไป เมื่อผสมเข้ากันแล้วจึงเติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าและน้ำมันสปินเดิลที่เหลือจนหมด ผสมยาง สารเคมี และเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าให้เข้ากัน โดยใช้ความเร็วของโรเตอร์ 970 รอบต่อนาที ใช้เวลาประมาณ 20 นาที

9. เมื่อผสมเสร็จแล้ว เทยางออกจากเครื่องผสมแบบปิด นำยางผสมที่ได้ไปรีดด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง เก็บยางมาสเตอร์แบทช์เพื่อใช้งานต่อไป

3.3.3 การวัดค่าประสิทธิภาพการกำบังของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

3.3.3.1 การวัดค่าประสิทธิภาพการกำบังของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเบื้องต้น

มีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. เตรียมเครื่องมือวัดค่าประสิทธิภาพการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ 8.5 ถึง 12 จิกะเฮิรตซ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ประกอบด้วยเครื่อง HP83620B (รูปที่ 3.2) เป็นตัวกำเนิดสัญญาณให้สายอากาศตัวส่งเพื่อปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา สายอากาศตัวส่ง และสายอากาศตัวรับ (รูปที่ 3.3) และเครื่องบ่งชี้ระดับสัญญาณ (รูปที่ 3.4)

2. ทำการปรับอุปกรณ์ตรวจวัดค่ากำลัง (detector) ให้เหมาะสมกับความถี่ที่ใช้วัด เรียกวิธีการนี้ว่า impedance matching เมื่อทำการเปลี่ยนความถี่ในการวัดก็จะต้องทำ impedance matching ใหม่ทุกครั้ง วิธีการทำ impedance matching อธิบายไว้ในภาคผนวก ก

3. นำอุปกรณ์ตรวจวัดค่ากำลังที่ผ่านการทำ impedance matching แล้วมาต่อกับสายอากาศตัวรับ และปรับระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวส่งกับสายอากาศตัวรับมีระยะเท่ากับ 70 เซนติเมตร

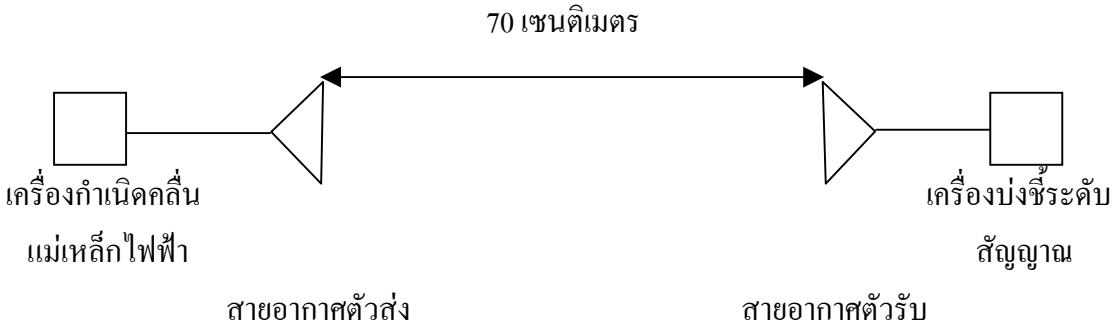
4. ทำการตั้งค่าระดับกำลัง (power level) เมื่อไม่มีชิ้นทดสอบกั้นระหว่างสายอากาศตัวส่งกับสายอากาศตัวรับ ตั้งค่าของเครื่องบ่งชี้ระดับสัญญาณให้มีค่าๆ หนึ่ง กำหนดค่าระดับกำลังนี้เป็นค่า P1

5. นำชิ้นทดสอบขนาด 12 x 12 เซนติเมตร ที่มีความหนา 1, 3 และ 6 มิลลิเมตร และชิ้นทดสอบขนาด 9 x 9 เซนติเมตร ที่มีความหนา 15 มิลลิเมตร ของยางสูตรต่างๆ มาบังที่หน้าสายอากาศตัวรับโดยแนบสนิท แสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งสายอากาศตัวรับมีขนาด 7 x 7 เซนติเมตร ปรับค่าระดับกำลังให้มีค่าเพิ่มขึ้น เพื่อทำให้เข็มของเครื่องบ่งชี้ระดับสัญญาณมาชี้ที่ค่าเดิมตอนตั้งต้น แล้วทำการอ่านค่าระดับกำลังที่ปรับได้ใหม่ กำหนดให้เป็นค่า P2

6. คำนวณหาค่าประสิทธิภาพการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีหน่วยเป็นเดซิเบล ดังสมการที่ 3.3

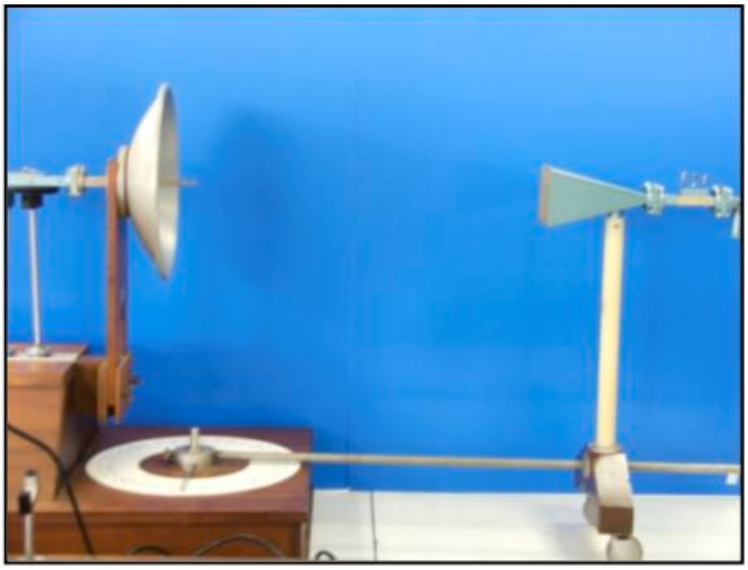
$$\text{shielding effectiveness} = P1 - P2 \qquad (3.3)$$

7. เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของยางสูตรต่างๆ แล้วทำการเลือกสูตรยางเพื่อนำไปทำการวัดค่าประสิทธิภาพการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามมาตรฐาน EN 50147 – 1 ต่อไป



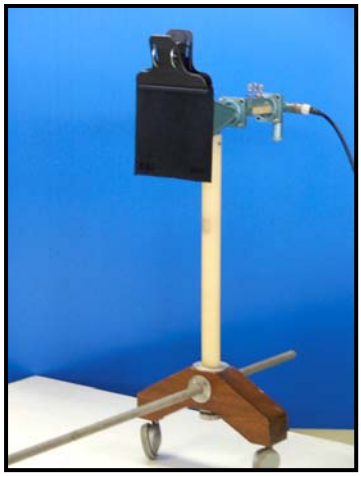
รูปที่ 3.1 การจัดเครื่องมือในการวัดค่าประสิทธิภาพการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเบื้องต้น

รูปที่ 3.2 เครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ช่วงความถี่ 8.5 ถึง 12.0 จิกะเฮิรตซ์ รุ่น HP 83620B



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวัดค่าประสิทธิภาพการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (ซ้าย) สายอากาศตัวส่ง (ขวา) สายอากาศตัวรับ

รูปที่ 3.4 เครื่องบ่งชี้ระดับสัญญาณ โดยใช้เครื่อง V.S.W.R. Amplifier MK III



รูปที่ 3.5 การนำชิ้นทดสอบปิดหน้าสายอากาศตัวรับ

สังเกตได้ว่า ถ้ามีการกำบังเกิดขึ้นสัญญาณที่ทะลุผ่านชิ้นทดสอบจะลดลง จึงทำการปรับค่าระดับกำลัง ให้มีค่าสูงขึ้นเพื่อทำให้ค่าของเครื่องบ่งชี้ระดับสัญญาณ มีค่าเท่ากับค่าที่ตั้งไว้เมื่อไม่มีชิ้นทดสอบขวางด้านหน้าสายอากาศตัวรับ ดังนั้นค่า SE ที่คำนวณได้จึงมีค่าติดลบ เนื่องจากค่า P2 มีค่ามากกว่าค่า P1 และค่า SE ที่วัดได้นี้เป็นแบบทะลุผ่าน (transmission) ในการวัดค่าประสิทธิภาพการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทุกครั้ง จะมียางธรรมชาติที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าปริมาณ 20 phr โดยไม่เติมผงโลหะ (NR 20/0) เป็นตัวอ้างอิง (reference) ทุกครั้งก่อนวัดค่า SE ของยางสูตรต่างๆ เพื่อเป็นการตรวจสอบความเบี่ยงเบนของการวัดค่า SE ในแต่ละครั้ง แสดงผลในภาคผนวก ข

3.3.3.2 การหาลำกว้างของสายอากาศที่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ 8.5 ถึง 12.0 GHz (Handbook of microwave trainer MWT530, 2000)

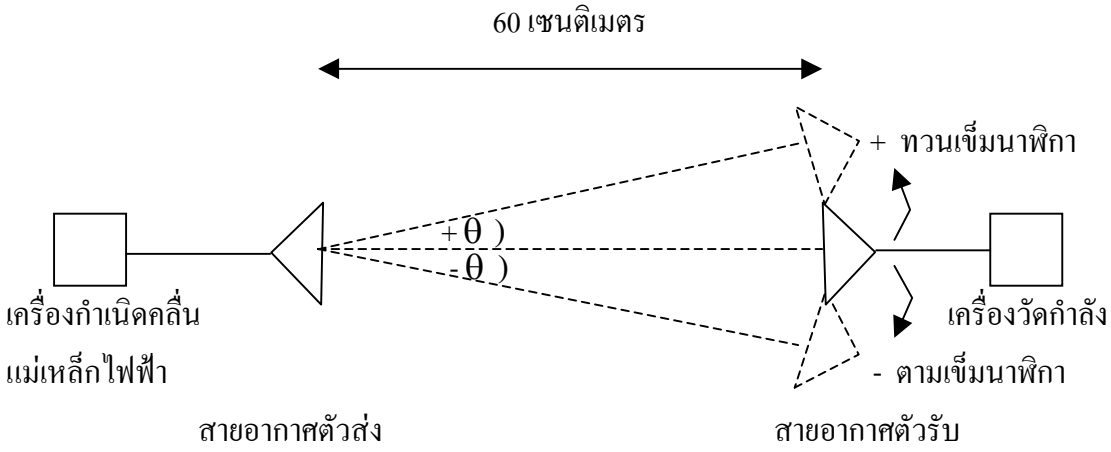
การหาลำกว้างของสายอากาศที่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อคำนวณหาขนาดของชิ้นทดสอบให้มีขนาดใหญ่กว่าลำกว้างของสายอากาศที่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ที่ใช้ทดสอบ มีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. เตรียมเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบแสดงในรูปที่ 3.6 ทำการจัดวางสายอากาศตัวส่งและสายอากาศตัวรับระยะห่างกัน 60 เซนติเมตร โดยจัดให้ช่องรับ – ส่งสัญญาณของสายอากาศทั้งสอง หันหน้าเข้าหากันและอยู่ในระนาบเดียวกัน เรียกทิศทางนี้ว่า 0 องศา
2. ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ 8.5, 10.0 และ 12.0 จิกะเฮิรตซ์ ปรับค่ากำลัง ณ ตำแหน่ง 0 องศานี้ให้เป็น 0 เดซิเบล

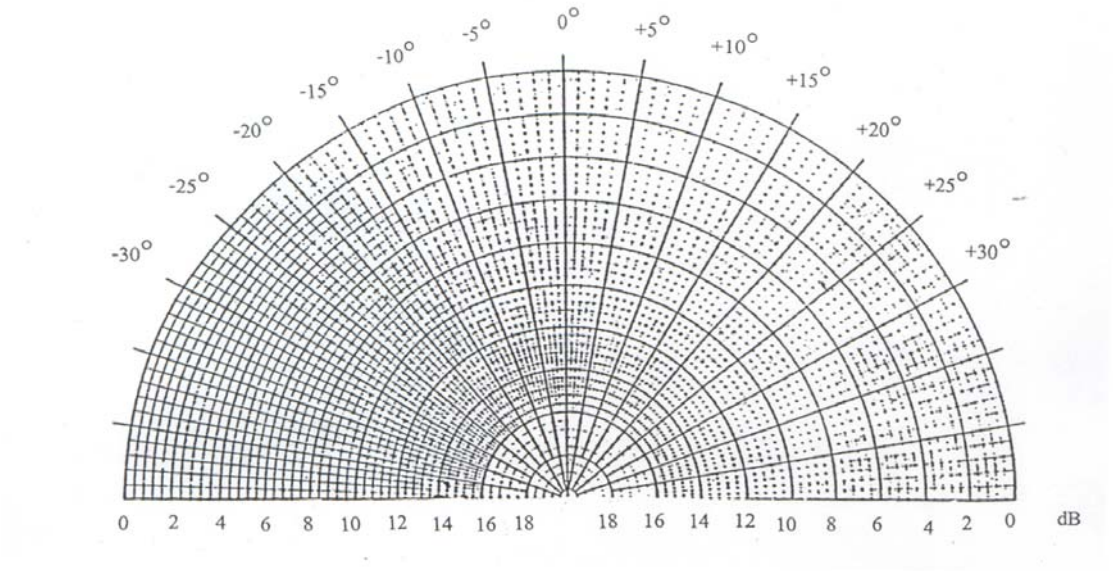
3. ปรับช่องสัญญาณของสายอากาศตัวรับให้ทำมุมกับสายอากาศตัวส่ง (θ) บันทึกค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มุมต่างๆ กำหนดให้เป็นมุมเป็นบวก (+θ) เมื่อหมุนสายอากาศตัวรับไปในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา และให้มุมเป็นลบ (-θ) เมื่อหมุนสายอากาศตัวรับไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

4. นำค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มุมต่างๆ ทั้งมุมที่เป็นบวกและมุมที่เป็นลบเขียนกราฟแสดงรูปแบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งพื้นที่ที่ใช้เขียนกราฟจะเป็นรูปครึ่งวงกลมแสดงในรูปที่ 3.7 โดยให้แกนแนวนอนเป็นค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งแกนจะสมมาตรกันโดยค่า 0 เดซิเบลจะอยู่ด้านนอกสุด และอีกแกนหนึ่งเป็นมุมของครึ่งวงกลมให้มุมกึ่งกลางเป็นมุม 0 องศา และด้านขวาให้มุมเป็นบวก (+θ) ส่วนด้านซ้ายให้มุมเป็นลบ (-θ) เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับค่ามุมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ

5. หาค่ามุมที่ให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 3 เดซิเบล ของความถี่ต่างๆ เลือกค่ามุมที่มีค่ามากที่สุด มาคำนวณหาลำกว้างของสายอากาศที่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ที่ใช้ทดสอบ เพื่อคำนวณหาขนาดของชิ้นทดสอบต่อไป



รูปที่ 3.6 การจัดเครื่องมือในการวัดหาค่าลำกว้างของสายอากาศที่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 3.7 กราฟสำหรับเขียนรูปแบบการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Handbook of microwave trainer MWT530, 2000)

3.3.3.3 การวัดค่าประสิทธิภาพการกำบังของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ตามมาตรฐาน EN 50147 - 1

มีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

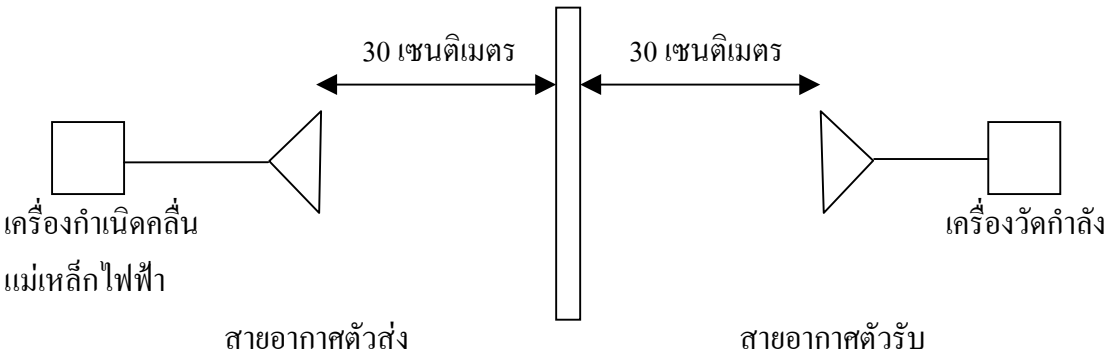
1. ก่อนการทดสอบวัดค่าประสิทธิภาพการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ตามมาตรฐาน EN 50147 – 1 ต้องทำการหาลำกว้างของสายอากาศที่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (beam width of electromagnetic wave) ในช่วงความถี่ที่ใช้ (8.5 ถึง 12.0 จิกะเฮิรตซ์) เพื่อทำการคำนวณหาขนาดของชิ้นทดสอบให้มีขนาดใหญ่ลำกว้างของสายอากาศที่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เตรียมชิ้นทดสอบตามขนาดที่ต้องการแล้วจึงทำการทดสอบ

2. เตรียมเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบตามรูปที่ 3.8 ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณส่งสัญญาณให้สายอากาศตัวส่งปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา เครื่องวัดระดับกำลัง สายอากาศตัวส่ง สายอากาศตัวรับ และฉากไม้ยึดชิ้นทดสอบ โดยจัดให้สายอากาศตัวส่งและสายอากาศตัวรับห่างกันเป็นระยะ 60 เซนติเมตร และฉากไม้ยึดชิ้นทดสอบสอบอยู่กึ่งกลางระหว่างสายอากาศทั้งสอง

3. ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยที่ไม่มีชิ้นทดสอบขวางอยู่ระหว่างสายอากาศตัวส่งกับสายอากาศตัวรับ และกำหนดค่า SE นี้เป็น 0 เดซิเบล ซึ่งกำหนดผ่านเครื่องวัดกำลัง (power meter) (รูปที่ 3.9)

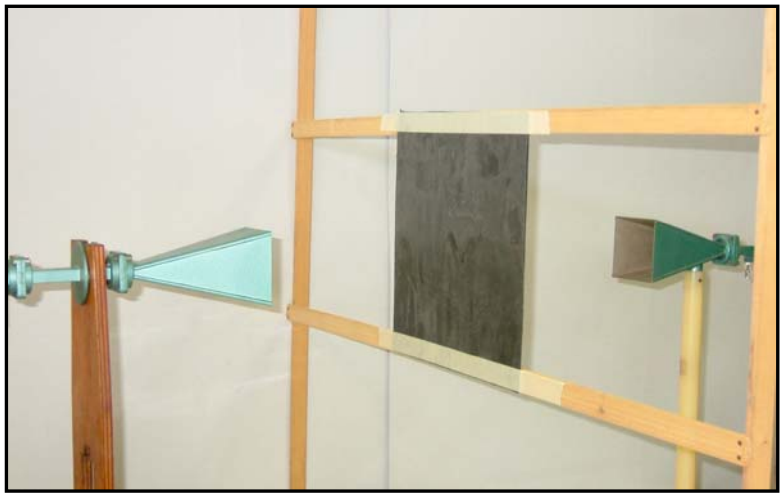
4. นำชิ้นทดสอบติดเข้ากับฉากกั้นซึ่งทำด้วยไม้ แสดงในรูปที่ 3.10 ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา อ่านค่าที่ได้จากเครื่องวัดกำลัง ซึ่งค่าที่อ่านได้จะเป็นค่าประสิทธิภาพการกำบังของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีหน่วยเป็นเดซิเบล

5. ในการวัดค่าประสิทธิภาพการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทุกครั้ง จะทำการวัดค่าของยางสูตร NR 30/0 ทุกครั้งเพื่อเป็นตัวอ้างอิงและเป็นการตรวจสอบเครื่องมือวัดทุกครั้ง แสดงผลในภาคผนวก ข



รูปที่ 3.8 การจัดเครื่องมือในการทดสอบวัดค่าประสิทธิภาพการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ตามมาตรฐาน EN 50147 – 1

รูปที่ 3.9 เครื่องวัดกำลัง (power meter) Agilent รุ่น 53147A Power meter



รูปที่ 3.10 การวัดค่าประสิทธิภาพการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีชิ้นทดสอบกั้นระหว่างสายอากาศตัวส่งและสายอากาศตัวรับ

3.3.4 การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า

การทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และค่าอิมพิแดนซ์

มีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. เตรียมชิ้นทดสอบขนาดกว้าง x ยาว คือ 2 x 2 เซนติเมตร หนา 1 มิลลิเมตร ยางหนึ่งสูตรจะใช้ชิ้นทดสอบ 3 ชิ้น

2. วัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และค่าอิมพิแดนซ์ของยางสูตรต่างๆ ด้วยเครื่อง HP4263B LCR meter แสดงในรูปที่ 3.11 โดยความถี่ที่ใช้ในการวัดเท่ากับ 100 กิโลเฮิรตซ์ และความต่างศักย์ไฟฟ้า 1,000 มิลลิโวลล์

3. ทำการเลือกค่าตัวแปรที่จะวัดหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริก คือ ค่า C_p (parallel capacitance) มีหน่วยเป็นฟาหรัด ส่วนตัวแปรที่จะวัดค่าอิมพิแดนซ์ คือ ค่า Z (impedance) ซึ่งค่าที่อ่านได้มีหน่วยเป็นโอห์ม

4. นำชิ้นทดสอบวางไว้ระหว่างพื้นกับหัววัด เลื่อนหัววัดลงมาจะแนบกับชิ้นทดสอบ (contact) ทำการบันทึกค่า C_p หรือค่า Z สำหรับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าอิมพิแดนซ์ ตามลำดับ นำค่า C_p ที่ได้มาคำนวณเพื่อหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกตามสมการที่ 3.8

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \tag{3.4}$$

$$\varepsilon = \frac{t}{A} C_p \tag{3.5}$$

$$\varepsilon_0 \varepsilon_r = \frac{t}{A} C_p \tag{3.6}$$

$$\varepsilon_r = \frac{t C_p}{A \varepsilon_0} \tag{3.7}$$

$$\varepsilon_r = \frac{t C_p}{\pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 \varepsilon_0} \tag{3.8}$$

โดยที่ ε คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ฟาหรัดต่อเมตร)

ε_0 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่สุญญากาศ = 8.854×10^{-12} ฟาหรัดต่อเมตร

ε_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของชิ้นทดสอบ

C_p คือ ค่าความจุไฟฟ้า (ฟาหรัด)

t คือ ความหนาของชิ้นทดสอบ (เมตร)

A คือ พื้นที่ของหัววัด (ตารางเมตร)

d คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของหัววัด = 5×10^{-3} เมตร

(a)

(b)

รูปที่ 3.11 (a) เครื่อง HP4263B LCR meter (b) หัววัด (probe)

3.3.5 การทดสอบสมบัติเชิงกลของยาง

3.3.5.1 การทดสอบความทนต่อแรงดึง (Tensile properties testing)

นำแผ่นยางที่ขึ้นรูปแล้วตัดเป็นชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ ตามมาตรฐาน ASTM D412 ใช้เครื่องตัดชิ้นทดสอบแบบ die C ดังรูปที่ 3.12 วัดความหนาของชิ้นทดสอบ 3 ตำแหน่งในช่วงระยะ L หาค่าเฉลี่ยของความหนา นำชิ้นทดสอบไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติการดึง โดยใช้ความเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที ยางหนึ่งสูตรจะใช้ชิ้นทดสอบ 8 ชิ้น บันทึกค่าความเค้นที่จุดขาด (stress at break) หรือค่าความทนต่อแรงดึง (tensile strength) และค่าระยะยืด ณ จุดขาด (elongation at break) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ค่าความทนต่อแรงดึง} = \frac{F}{A} \tag{3.9}$$

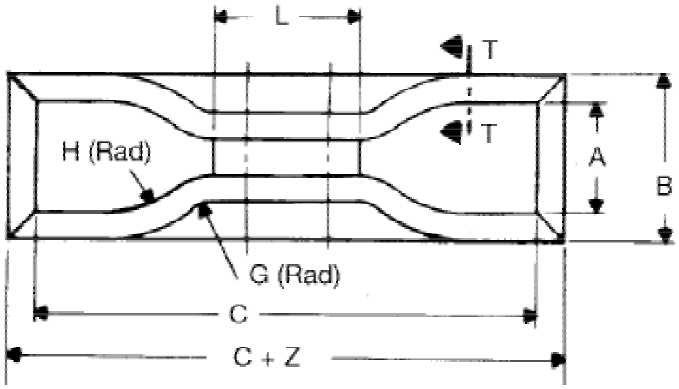
เมื่อ F คือ แรงดึงที่ทำให้ชิ้นทดสอบขาด (นิวตัน)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบขณะยังไม่ยืด (ตารางมิลลิเมตร)

$$\text{ค่าระยะยืด ณ จุดขาด} = \left(\frac{L - L_0}{L_0}\right) \times 100 \tag{3.10}$$

เมื่อ L คือ ระยะที่ชิ้นทดสอบสามารถยืดตัวได้จนขาด

L_0 คือ ระยะกำหนดก่อนทำการทดสอบ



รูปที่ 3.12 ชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ สำหรับการทดสอบความทนต่อแรงดึง

3.3.5.2 การทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance testing)

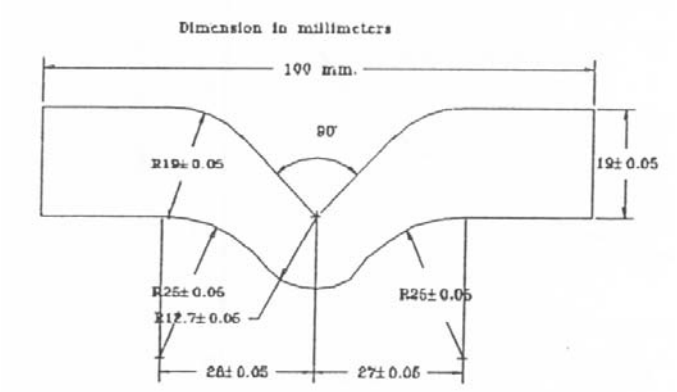
นำแผ่นยางที่ขึ้นรูปแล้วตัดเป็นชิ้นทดสอบแบบมุม ตามมาตรฐาน ASTM D624 ดังรูปที่ 3.13 วัดความหนาของชิ้นทดสอบ 3 ตำแหน่ง ตรงตำแหน่งมุม 90 องศา หาค่าเฉลี่ยของความหนา นำชิ้นทดสอบไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติการดึง โดยใช้ความเร็วในการดึงยืด 500 มิลลิเมตรต่อนาที ยางหนึ่งสูตรจะใช้ชิ้นทดสอบ 8 ชิ้น บันทึกค่าแรงดึงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นทดสอบฉีกขาด เพื่อนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดหรือความทนต่อการฉีกขาด (tear strength) ตามสูตรการคำนวณ ดังนี้

$$T_s = \frac{F}{d} \tag{3.11}$$

เมื่อ T_s คือ ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด(นิวตันต่อมิลลิเมตร)

F คือ ค่าแรงดึงสูงสุด (นิวตัน)

d คือ ความหนาของชิ้นทดสอบ (มิลลิเมตร)



รูปที่ 3.13 ชิ้นทดสอบแบบมุม เพื่อใช้ในการทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด

3.3.5.3 การทดสอบการบ่มเร่ง (Aging properties testing)

นำแผ่นยางที่ขึ้นรูปแล้วตัดเป็นชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ ตามมาตรฐาน ASTM D412 ใช้เครื่องตัดชิ้นทดสอบแบบ die C เช่นเดียวกับการทดสอบความทนต่อแรงดึง นำชิ้นทดสอบอบในตู้อบแบบเกียร์ ตามมาตรฐาน ASTM D573 ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดนำชิ้นทดสอบเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาอย่างน้อย 12 ชั่วโมงก่อนนำไปทดสอบ เพื่อเป็นการปรับสภาพของชิ้นทดสอบ ทำการทดสอบความทนต่อแรงดึง โดยใช้ความเร็วในการดึงยืด 500 มิลลิเมตรต่อนาที ยางหนึ่งสูตรจะใช้ชิ้นทดสอบ 8 ชิ้น บันทึกค่าความเค้นที่จุดขาด หรือค่าความทนต่อแรงดึง และค่าระยะยืด ณ จุดขาด นำค่าที่ได้คำนวณเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง ตามสูตรการคำนวณ ดังนี้

$$P = \left[\frac{A - O}{O}\right] \times 100 \tag{3.12}$$

เมื่อ P คือ ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง (%)

O คือ ค่าสมบัติของยางก่อนอบ

A คือ ค่าสมบัติของยางหลังอบ

3.3.5.4 การทดสอบค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (Compression set testing)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D395 ทำการเตรียมชิ้นทดสอบโดยการขึ้นรูปเป็นแท่งทรงกระบอกที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 29.0 ± 0.5 มิลลิเมตร หนา 12.5 ± 0.5 มิลลิเมตร ยางหนึ่งสูตรจะใช้ชิ้นทดสอบ 3 ชิ้น ก่อนการทดสอบทำการวัดความหนาของตัวอย่างแต่ละชิ้นบันทึกค่าเป็นค่าความหนาก่อนการทดสอบ นำชิ้นทดสอบไปวางในชุดทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด และอัดยางให้ยุบลงไป 25 เปอร์เซ็นต์ของความหนาเดิม (เท่ากับความหนาของโลหะกั้นระยะ) ดังรูปที่ 3.14 ทำการขันสกรูให้แผ่นโลหะกดแนบสนิทกับโลหะกั้นระยะจนครบทั้งสี่ด้าน ทำการทดสอบสองชุดคือ ชุดหนึ่งทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง และอีกชุดหนึ่งทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการทดสอบ 22 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลานำยางออกจากชุดทดสอบวางไว้บนโต๊ะไม้เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง ก่อนทำการวัดความหนาของชิ้นทดสอบ คำนวณค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของยางในรูปของเปอร์เซ็นต์ของความหนาเดิมตามสูตร ดังนี้

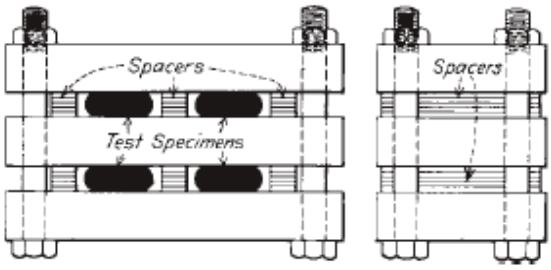
$$C = \left[\frac{(t_0 - t_i)}{(t_0 - t_n)}\right] \times 100 \qquad (3.13)$$

เมื่อ C คือ ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (เปอร์เซ็นต์)

t_0 คือ ความหนาเดิมก่อนการทดสอบ (มิลลิเมตร)

t_i คือ ความหนาหลังการทดสอบ (มิลลิเมตร)

t_n คือ ความหนาของโลหะกั้นระยะ (มิลลิเมตร)



รูปที่ 3.14 เครื่องมือที่ใช้ทำการทดสอบค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด

3.3.5.5 การทดสอบความแข็ง (Hardness testing)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2240 เป็นการวัดค่าความแข็งแบบ shore A ทดสอบด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบ shore A ใช้ชิ้นทดสอบที่มีความหนาอย่างน้อย 6 มิลลิเมตร ก่อนทำการทดสอบ ทำการปรับเทียบ (calibration) เครื่องวัดความแข็ง โดยใช้แท่งเหล็กที่มีรูตรงกลางมาวางให้ตรงกับหัวเข็มกดของเครื่องทดสอบแล้วปรับค่าที่หน้าปัดเป็นศูนย์ หลังจากนั้นนำแท่งเหล็กที่มีค่า ความแข็ง 40 shore A มาวางบนแท่งเหล็ก แล้วกดหัวกดลงบนแท่งเหล็ก 40 shore A แล้วอ่านค่าความแข็ง ค่าที่อ่านได้ควรจะเป็น 40 shore A เมื่อทำการปรับเทียบ เรียบร้อยแล้วนำชิ้นทดสอบวางไว้ให้ตรงกับหัวเข็มกดเลื่อนหัวเข็มกดลงมาให้กดลงบนยาง โดยใช้น้ำหนักกดคงที่ (1 กิโลกรัม) กดไว้เป็นเวลา 30 วินาที บันทึกค่าความแข็งของยางแต่ละสูตร

3.3.5.6 การวัดค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity testing)

การหาค่าความถ่วงจำเพาะของชิ้นทดสอบ นำชิ้นทดสอบชั่งน้ำหนักในอากาศจดบันทึกค่า จากนั้นนำชิ้นทดสอบชั่งน้ำหนักในน้ำจดบันทึกค่า ถ้าชิ้นทดสอบลอยน้ำจะใช้ที่หนีบกระดาษหนีบชิ้นทดสอบ โดยต้องชั่งน้ำหนักของตัวหนีบกระดาษในอากาศด้วย จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าความถ่วงจำเพาะตามสมการดังนี้

$$\text{ความถ่วงจำเพาะของวัตถุ} = \frac{w}{(w - w_1)} \tag{3.14}$$

โดยที่ w คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบที่ชั่งในอากาศ (กรัม)
w_1 คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบที่ชั่งในน้ำ (กรัม)

3.3.6 การตรวจสอบการกระจายของผงโลหะในยางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

นำชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบความทนต่อแรงดึงแล้ว มาทำการเตรียมตัวอย่างโดยการตัดชิ้นทดสอบด้านผิวหน้าที่เป็นรอยขาดจากการทดสอบความทนต่อแรงดึง นำมาติดลงบนแท่นทองเหลืองโดยให้ด้านรอยขาดอยู่ด้านบน ชิ้นทดสอบไม่ต้องเคลือบด้วยทอง นำไปศึกษาลักษณะเฉพาะด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด