

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

3.1 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองเป็น 3 ขั้นตอน คือ

- 3.1.1 การสังเคราะห์คาร์บอนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน
- 3.1.2 การผสมเรซินกับยางธรรมชาติ และสารเคมีอื่น ๆ
- 3.1.3 การทดสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์ยาง

3.2 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 การสังเคราะห์คาร์บอนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน

- 3.2.1.1 เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์
- 3.2.1.2 เฮกเซน (AR grade : Merck Company)
- 3.2.1.3 ฟอร์มัลดีไฮด์ (40% w/w ในรูปฟอร์มาลิน : บริษัท ทีซี. สถาพร)
- 3.2.1.4 สารละลายแอมโมเนีย (25%, AR grade : Merck Company)
- 3.2.1.5 กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (98%, AR grade : Merck Company)
- 3.2.1.6 ไทลูอิน (AR grade : Merck Company)
- 3.2.1.7 HMTA (Hexamethylenetetramine : Merck Company)

3.2.2 การผสมเรซินกับยางธรรมชาติ และสารเคมีอื่น ๆ

- 3.2.2.1 ยางธรรมชาติ (STR XL : Rayong Bangkok Rubber Company)
- 3.2.2.2 กำมะถัน (vulcanizing agent : Loxley Public Company)
- 3.2.2.3 ซิงก์ออกไซด์ (activator : Univertures Public Company)
- 3.2.2.4 ซิงก์สเตียเรต (activator : Imperial Company)
- 3.2.2.5 MBT (accelerator : Flexsys Company)
- 3.2.2.6 คาร์บอนแบล็ก N330 (Thai Carbon Black Company)
- 3.2.2.7 ซิลิกา (FK Company)
- 3.2.2.8 PEG 3350 (FK Company)

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.3.1 การสังเคราะห์และวิเคราะห์คาร์บอนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน

- 3.3.1.1 อุปกรณ์เครื่องแก้ว
- 3.3.1.2 เครื่องสกัดตัวทำละลายชนิดสุญญากาศ (BUCHI Rotavapour R-205)
- 3.3.1.3 ตู้อบสุญญากาศ
- 3.3.1.4 เครื่องบดแบบบอลมิลล์
- 3.3.1.5 FT-IR (Nicolet Impact FT-IR Spectrometer)
- 3.3.1.6 NMR (Bruker, ACF 200 MHz)
- 3.3.1.7 TGA (Netzsch รุ่น STA 409C)
- 3.3.1.8 เครื่องหาขนาดอนุภาค (Micromeritics Sedigraph 5100 Particle Size Analyzer)

3.3.2 การผสมเรซินกับยางธรรมชาติ และสารเคมีอื่นๆ

- 3.3.2.1 เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (2-roll mill) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8×20 นิ้ว (Model R11-3FF)
- 3.3.2.2 เครื่องวัลคาไนซ์แบบอัด (Vulcanizing Press) ขนาดแทนอัด 50×50 เซนติเมตร แรงอัด 150 กก./cm^2 ของโรงงานชัยเจริญการช่าง
- 3.3.2.3 เครื่องทดสอบหาเวลาและลักษณะการวัลคาไนซ์ยางผสม (Monsanto Oscillating Disk Rheometer)

3.3.3 การทดสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์ยาง

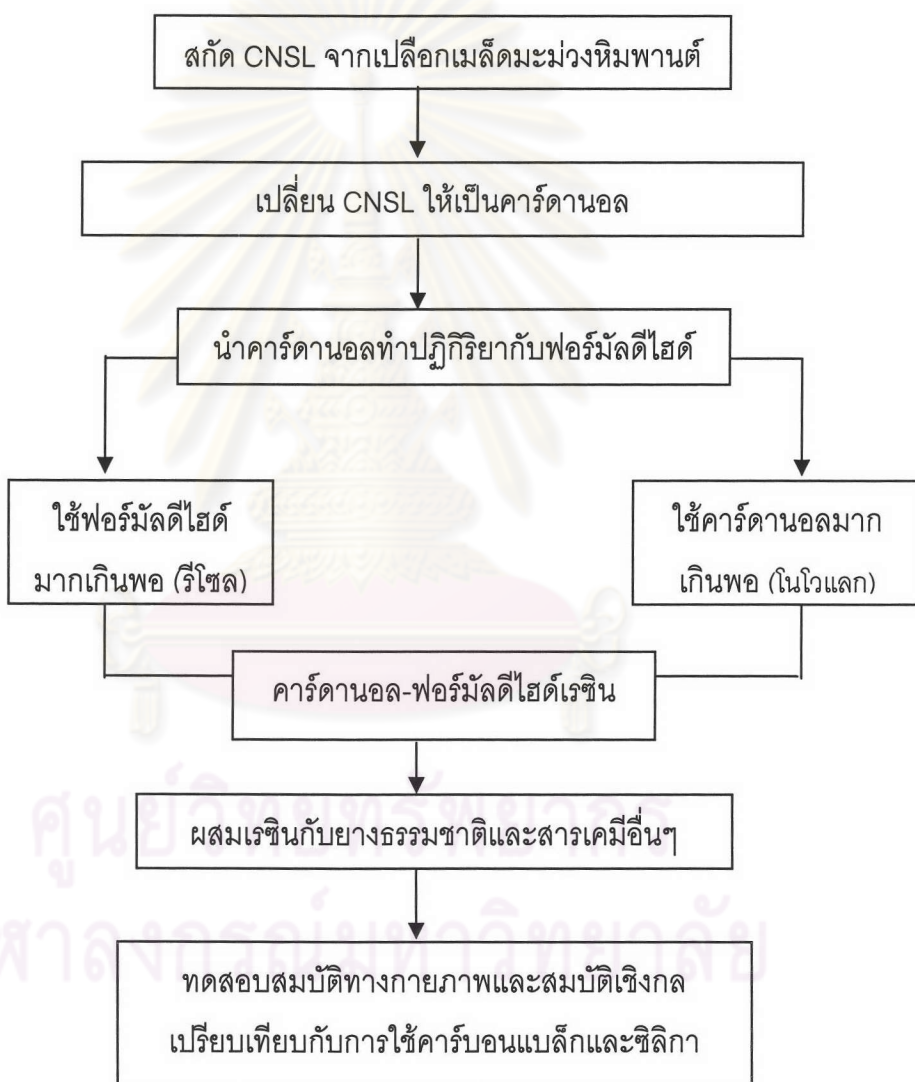
- 3.3.3.1 เครื่องตัดตัวอย่างแบบใช้กำลังลม (Compress Air Sample Cutter) (Model SDAP-100-N)
- 3.3.3.2 เครื่องทดสอบความทนแรงดึง (Tensile Tester) (Model 1101)
- 3.3.3.3 เครื่องทดสอบความต้านทานการสึกหรอ (Akron Abrasion Tester) (Model APH-40)
- 3.3.3.4 เครื่องทดสอบการคืนตัว (Compression Set Tester) (Milano/Italia)
- 3.3.3.5 เครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness Tester) (Model 917 Maximum Hardness Indicator)

3.3.3.6 ตู้อบยาง (Geers Rubber Aging Oven) (Ueshima A 0103 Japan)

3.3.3.7 SEM (JEOL, JSM-5800LV)

3.4 ขั้นตอนการวิจัย

ขั้นตอนการวิจัยแสดงไว้ในรูปที่ 3.1

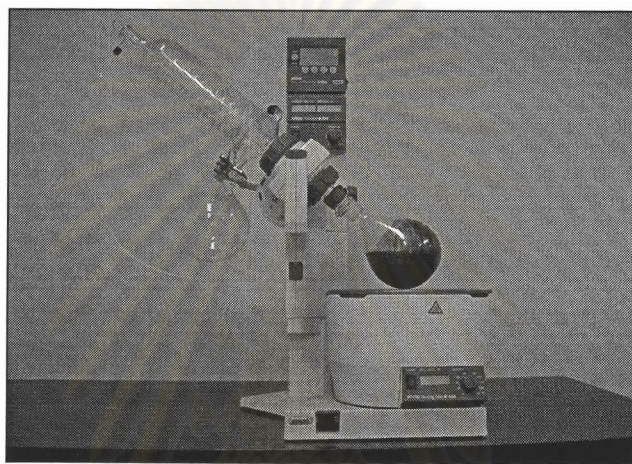


รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการวิจัย

3.4.1 การสังเคราะห์คาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน

การสกัดน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

นำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มาล้างน้ำให้สะอาด จากนั้นนำไปตากให้แห้งเป็นเวลา 2 วัน เมื่อแห้งสนิทแล้วนำไปแช่ในเฮกเซน (hexane) เป็นเวลา 1 สัปดาห์ จะได้สารละลายน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปสกัดเอาเฮกเซนออกด้วยเครื่องสกัดตัวทำละลายชนิดสูญญากาศ (rotavapour) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 เพื่อนำเฮกเซนกลับมาใช้ใหม่



รูปที่ 3.2 เครื่อง BUCHI Rotavapour R-205

สิ่งที่เหลืออยู่หลังการสกัดเฮกเซนออกไปแล้ว คือ น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (cashew nut shell liquid, CNSL) จากนั้นนำ CNSL ที่ได้ไปวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR โดยใช้ความละเอียด 4 cm^{-1} และความถี่ $4000\text{-}400\text{ cm}^{-1}$

กระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน

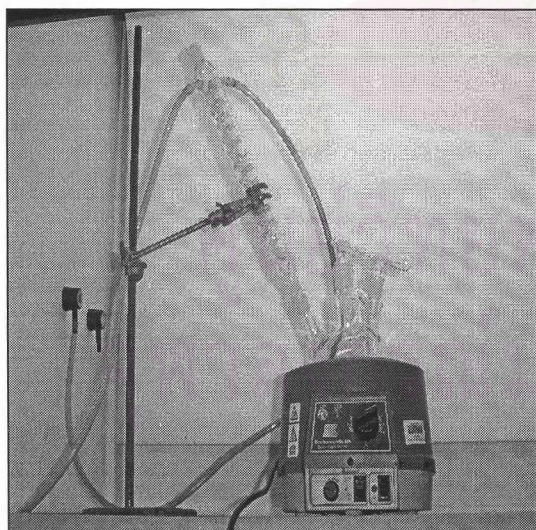
การเปลี่ยนน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (CNSL) ให้เป็นคาร์ดานอลด้วยกระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation) ทำโดยการให้ความร้อนแก่ CNSL ที่อุณหภูมิประมาณ 130-140 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันบรรยากาศ 300-400 มิลลิเมตรปรอท ด้วยเครื่องสกัดตัวทำละลายชนิดสูญญากาศ ของเหลวที่เหลือถูกนำไปกลั่นภายใต้ภาวะสูญญากาศอีกครั้งเพื่อให้ได้คาร์ดานอลที่บริสุทธิ์ แล้วนำคาร์ดานอลที่ได้ไปวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR และเทคนิค NMR โดยใช้โหมด ^{13}C ความถี่ 200 MHz ที่มี CDCl_3 เป็นตัวทำละลาย

การสังเคราะห์คาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซล

การสังเคราะห์คาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิด 'รีโซล' ต้องใช้ฟอร์มัลดีไฮด์ปริมาณมากเกินไปและใช้สารละลายแอมโมเนียเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งในการทดลองได้แบ่งเป็น 3 ส่วนเพื่อหาอัตราส่วนโดยโมลของฟอร์มัลดีไฮด์/คาร์ดานอล ($[F]/[C]$) ค่า pH และอุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อให้ได้เรซินปริมาณมากที่สุด แล้วนำเรซินที่ได้ไปวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR และสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA ซึ่งใช้ช่วงอุณหภูมิ 0-600 องศาเซลเซียส โดยให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส/นาที ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน

ส่วนที่ 1 : หาอัตราส่วนโดยโมลของฟอร์มัลดีไฮด์/คาร์ดานอล ($[F]/[C]$)

ปฏิกิริยาระหว่างฟอร์มัลดีไฮด์ (F) และคาร์ดานอล (C) ดำเนินไปภายใต้ระบบปิด พร้อมทั้งมีการกวนและให้ความร้อนคงที่ ณ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (ก) ของผสมถูกควบคุมให้มี pH เท่ากับ 8 ด้วยการใส่สารละลายของแอมโมเนีย (25%) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีอัตราส่วนโดยโมลของ $[F]/[C]$ เท่ากับ 1.6, 1.8, 2.0 และ 2.2 ซึ่งเมื่อครบเวลาของการเกิดปฏิกิริยาแล้ว ให้นำของผสมที่ได้ไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.3 (ข) แล้วนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซิน จากนั้นจะนำเรซินไปทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.3 (ก) อุปกรณ์ที่ใช้สังเคราะห์เรซิน และ (ข) ตู้อบสุญญากาศ

ส่วนที่ 2 : หาค่า pH

ทำการทดลองเหมือนในส่วนที่ 1 แต่ใช้อัตราส่วนโดยโมลของ $[F]/[C]$ ที่ให้เปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซินมากที่สุด (คำนวณจากส่วนที่ 1) มาทำการเปลี่ยนแปลงค่า pH เป็น 7.6, 7.8, 8.0, 8.2 และ 8.4 แล้วนำผลที่ได้ทั้งหมดไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซิน จากนั้นจะนำเรซินไปทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

ส่วนที่ 3 : หาอุณหภูมิ

ทำการทดลองเหมือนในส่วนที่ 2 แต่ใช้ค่า pH ที่ให้เปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซินมากที่สุด (คำนวณจากส่วนที่ 2) มาทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการทดลองเป็น 70, 80, 90 และ 100 องศาเซลเซียส แล้วนำผลที่ได้ทั้งหมดไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซิน จากนั้นจะนำเรซินไปทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

การสังเคราะห์คาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลก

การสังเคราะห์คาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิด 'โนโวแลก' ต้องใช้คาร์ดานอลปริมาณมากเกินพอ และใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 98% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งในการทดลองได้แบ่งเป็น 3 ส่วน เพื่อหาอัตราส่วนโดยโมลของฟอร์มัลดีไฮด์/คาร์ดานอล ($[F]/[C]$) ค่า pH และอุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อให้ได้เรซินปริมาณมากที่สุด แล้วนำเรซินที่ได้ไปวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR และสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA ซึ่งใช้ช่วงอุณหภูมิ 0-600 องศาเซลเซียส โดยให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส/นาที ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน

ส่วนที่ 1 : หาอัตราส่วนโดยโมลของฟอร์มัลดีไฮด์/คาร์ดานอล ($[F]/[C]$)

ปฏิกิริยาระหว่างฟอร์มัลดีไฮด์ (F) และคาร์ดานอล (C) ดำเนินไปภายใต้ระบบปิด พร้อมทั้งมีการกวนและให้ความร้อนคงที่ ณ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 ชั่วโมง ของผสมถูก ควบคุมให้มี pH เท่ากับ 2.2 ด้วยการใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 98% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีอัตราส่วนโดยโมลของ $[F]/[C]$ เท่ากับ 0.6, 0.7, 0.8 และ 0.9 ซึ่งเมื่อครบเวลาการเกิดปฏิกิริยาแล้วให้เติม HMTA ลงในของผสม และนำของผสมที่ได้ไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซิน จากนั้นจะนำเรซินไปทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

ส่วนที่ 2 : หาค่า pH

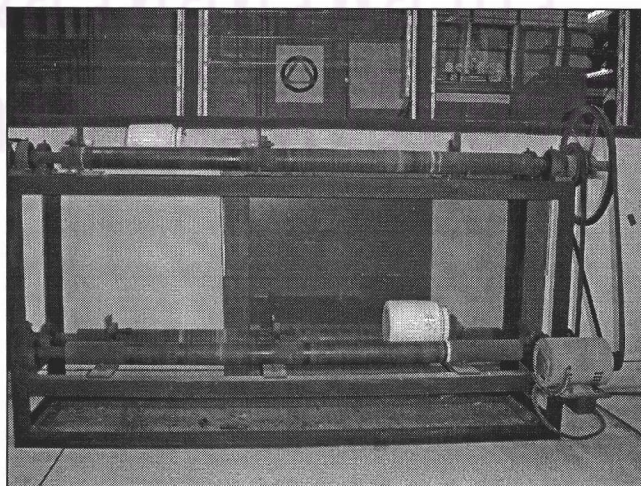
ทำการทดลองเหมือนในส่วนที่ 1 แต่ใช้อัตราส่วนโดยโมลของ $[F]/[C]$ ที่ให้เปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซินมากที่สุด (คำนวณจากส่วนที่ 1) มาทำการเปลี่ยนแปลงค่า pH เป็น 1.8, 2.0, 2.2 และ 2.4 แล้วนำผลที่ได้ทั้งหมดไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิถึง 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซิน จากนั้นจะนำเรซินไปทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

ส่วนที่ 3 : หาอุณหภูมิ

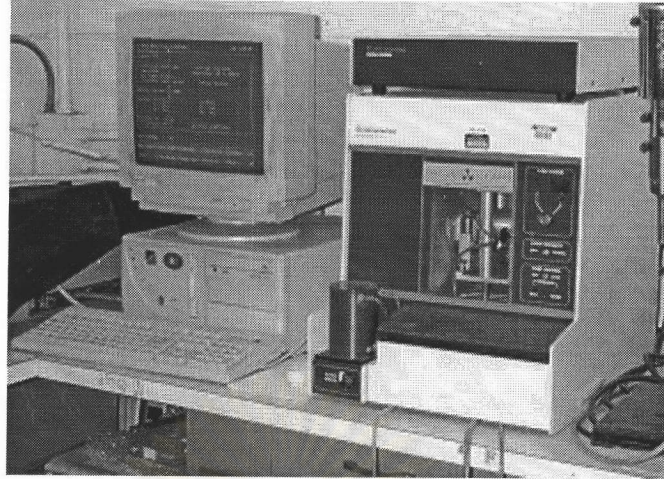
ทำการทดลองเหมือนในส่วนที่ 2 แต่ใช้ค่า pH ที่ให้เปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซินมากที่สุด (คำนวณจากส่วนที่ 2) มาทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการทดลองเป็น 80, 90, 100 และ 110 องศาเซลเซียส แล้วนำของผสมที่ได้ทั้งหมดไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซิน จากนั้นจะนำเรซินไปทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

การเตรียมคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินเพื่อผสมกับยางธรรมชาติ

นำคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน ทั้งชนิดรีโซลและโนโวแลกที่เตรียมได้ไปบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดแบบบอลมิลล์ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ในระบบดิสเพอร์ชัน (ใช้น้ำเป็นตัวกลาง) เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นนำเรซินที่ได้มาแยกเอาน้ำออก และนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เรซินที่ได้จะเกาะเป็นก้อนจึงนำไปบดแบบแห้งให้ละเอียดอีกครั้งด้วยเครื่องบอลมิลล์ แล้วนำเรซินที่ได้ไปหาขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Micromeritics Sedigraph 5100 Particle Size Analyzer ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 เครื่องบดชนิดบอลมิลล์



รูปที่ 3.5 เครื่อง Micromeritics Sedigraph 5100 Particle Size Analyzer

3.4.2 การผสมเรซินกับยางธรรมชาติ และสารเคมีอื่นๆ

ยางธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ ยางแท่ง STR XL จากบริษัทระยองบางกอกรับเบอร์ จำกัด ซึ่งได้ผ่านการวิเคราะห์หาปริมาณผงหรือสิ่งสกปรก ปริมาณเถ้า ปริมาณสิ่งระเหย ปริมาณไนโตรเจน ค่าดัชนีความอ่อนตัว ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติของยางแท่ง STR XL

สมบัติ	ผลการวิเคราะห์
ปริมาณสิ่งสกปรก (%wt)	0.02
ปริมาณเถ้า (%wt)	0.40
ปริมาณสิ่งระเหย (%wt)	0.80
ปริมาณไนโตรเจน (%wt)	0.50
ค่าดัชนีความอ่อนตัวเริ่มแรก (P_0)	35
ค่าดัชนีความอ่อนตัวของยาง (PRI)	60

สูตรการผสมยางที่ใช้ในการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำคาร์บอนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินที่เตรียมได้มาใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงให้กับยางธรรมชาติ และทำการเปรียบเทียบกับการใช้คาร์บอนแบล็คและซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมแรงโดยมีสูตรสารประกอบอย่างทั้งหมด 13 สูตร ดังนี้

- สูตรที่ 1 คือ ไม่ใส่สารตัวเติมเสริมแรง
 สูตรที่ 2-4 คือ ใส่คาร์บอนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีไซเคิล (CF-RE)
 สูตรที่ 5-7 คือ ใส่คาร์บอนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลก (CF-NO)
 สูตรที่ 8-10 คือ ใส่คาร์บอนแบล็ค
 สูตรที่ 11-13 คือ ใส่ซิลิกา

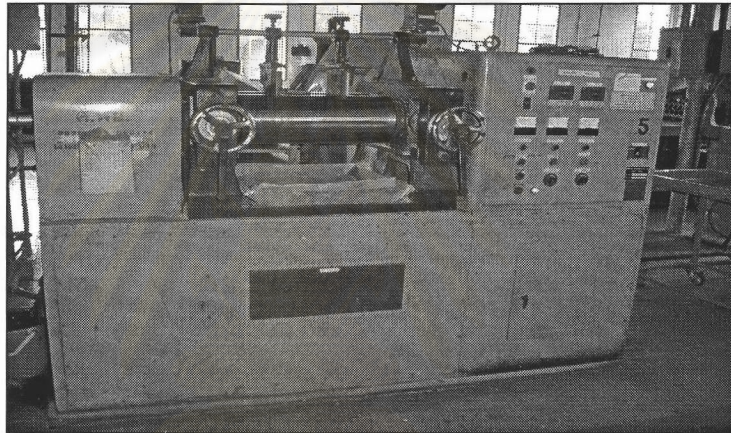
ชนิดและปริมาณของสารเคมีต่างๆ ที่ใส่เข้าไปในยางแสดงไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการผสมยางสูตรต่างๆ

องค์ประกอบ	ปริมาณที่ใช้ (phr)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
STR XL	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
CF-RE	-	30	45	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF-NO	-	-	-	-	30	45	60	-	-	-	-	-	-
C-black	-	-	-	-	-	-	-	30	45	60	-	-	-
Silica	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	45	60
Sulphur	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
ZnO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Zn-stearate	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
MBT	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
PEG 3350	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1

การบดผสมยางกับสารเคมี

ทำการบดผสมยางธรรมชาติกับสารเคมีต่างๆ ตามสูตรสารประกอบยางในตารางที่ 3.2 ด้วยเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยเริ่มบดยางให้นิ่มและเหนียวติดลูกกลิ้งก่อน ที่อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที แล้วจึงใส่สารตัวเติมเสริมแรง (คาร์บอนออล-ฟอร์มาลดีไฮด์เรซิน คาร์บอนแบล็ก หรือซิลิกา) ตามสูตรในตารางที่ 3.2 ลงไปบดผสมกับยางธรรมชาติ โดยให้ลูกกลิ้งอยู่ห่างกันประมาณ 1-2 มิลลิเมตร เนื่องจากสารตัวเติมมีปริมาณมากจึงต้องใส่ทีละน้อยเพื่อป้องกันการฟุ้งกระจาย ซึ่งใช้เวลาประมาณ 10 นาที โดยตัดและม้วนยางสลับไปมาเพื่อให้สารตัวเติมกระจายตัวในยางอย่างสม่ำเสมอ



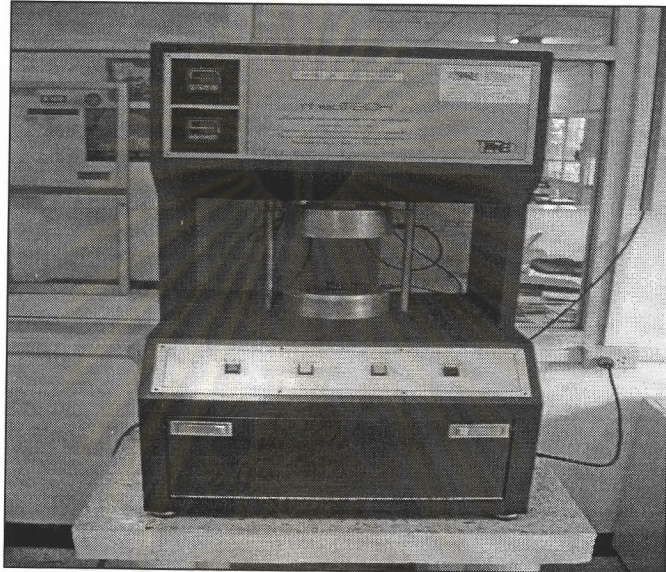
รูปที่ 3.6 เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง

เมื่อสารตัวเติมกระจายในยางสม่ำเสมอแล้วจึงใส่ซิงก์ออกไซด์ ซิงก์สเตียเรต และ MBT เข้าไปบดผสมกับยาง โดยให้ลูกกลิ้งอยู่ห่างกันประมาณ 2 มิลลิเมตร ใช้เวลา 3 นาที (ในบางช่วงของการบดผสมควรลดช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งให้อยู่ประมาณ 1 มิลลิเมตร เพื่อบดให้สารเคมีแตกตัว) และสุดท้ายจึงค่อยๆ ใส่กำมะถันเข้าไปบดผสมกับยาง โดยให้ลูกกลิ้งอยู่ห่างกันประมาณ 2 มิลลิเมตร ใช้เวลาประมาณ 3 นาที

เก็บยางผสมไว้ 1 คืน แล้วนำบางส่วนมาหาเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ หลังจากนั้นจึงนำไปขึ้นรูปโดยการใช้แม่แบบ แล้วนำไปทดสอบสมบัติของยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้วต่อไป

การหาเวลาที่เริ่มวัลคาไนซ์ (scorch time) และเวลาการคงรูป (cure time)

นำยางที่ผสมสารเคมีต่างๆ แล้วไปหาเวลาทางเริ่มวัลคาไนซ์ และเวลาการคงรูป ด้วยเครื่อง Monsanto Oscillating Disk Rheometer ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ตามมาตรฐาน ISO 3417 : 1991 (E) โดยเตรียมชิ้นทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสยาวด้านละ 1.5 เซนติเมตร หนา 5 มิลลิเมตร ทดสอบที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 3.7 เครื่อง Monsanto Oscillating Disk Rheometer

การขึ้นรูปและเตรียมชิ้นทดสอบ

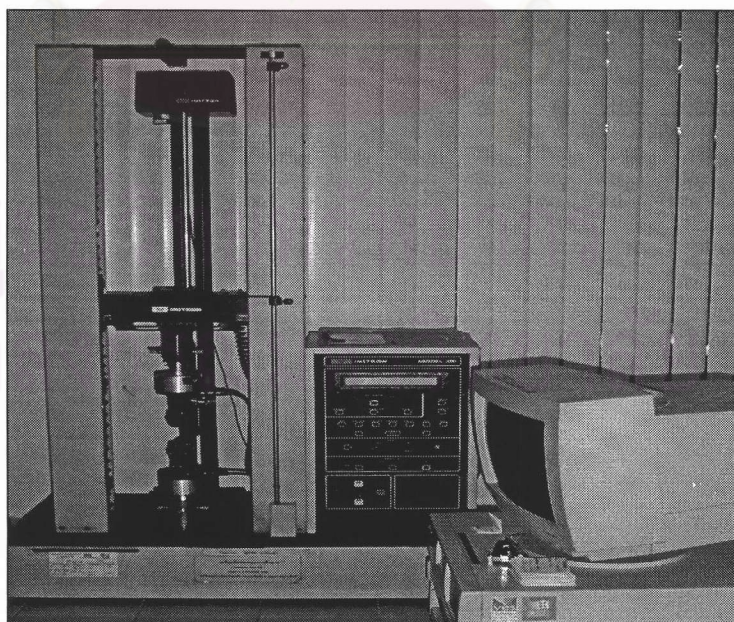
นำยางผสมสารเคมีวางบนพื้นโลหะที่เรียบแห้งและสะอาด แล้วทำการตัดยางให้มีความกว้างและความยาวน้อยกว่าแม่แบบเล็กน้อย จากนั้นทิ้งชิ้นยางที่ตัดแล้วพักทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง และความชื้นต่ำกว่า 5% ต่อจากนั้นนำชิ้นยางอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดที่ความดันต่ำกว่า 3.5 MPa อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ตามระยะเวลาการคงรูปของยางแต่ละสูตร ที่หาได้จากเครื่อง Monsanto Oscillating Disk Rheometer โดยขึ้นทดสอบที่หนาไม่เกิน 1 เซนติเมตร จะใช้ $t_c(95)$ เป็นเวลาในการทำให้คงรูป ส่วนขึ้นทดสอบที่หนาเกิน 1 เซนติเมตร ให้ใช้เวลาการคงรูปเป็น 2 เท่าของ $t_c(95)$ และเมื่ออัดขึ้นรูปขึ้นทดสอบตามเวลาการคงรูปแล้ว ให้นำชิ้นทดสอบออกจากแม่แบบมาตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 16 ชั่วโมง แต่ไม่เกิน 96 ชั่วโมง ก่อนที่นำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ซึ่งขึ้นทดสอบที่ได้มีลักษณะแตกต่างกันตามลักษณะแม่พิมพ์ ดังนี้

- สีเหลืองมีเส้นผ่า กว้าง 14 เซนติเมตร ยาว 16 เซนติเมตร หนา 4 มิลลิเมตร สำหรับทดสอบความทนแรงดึง และความแข็ง
- รูปทรงกระบอก ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร หนา 2 เซนติเมตร สำหรับทดสอบการคืนตัว
- รูปทรงกระบอก ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร หนา 3 เซนติเมตร สำหรับทดสอบการสึกหรอ

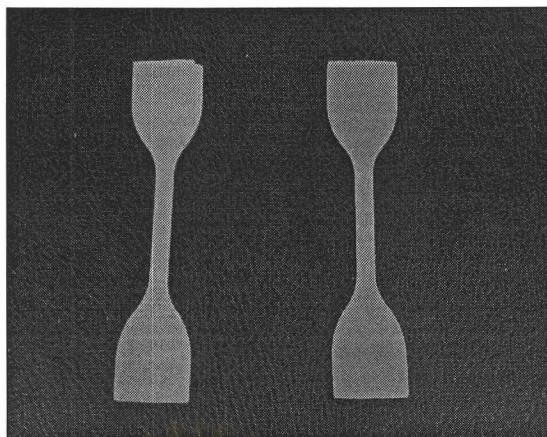
การทดสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์ยาง

สมบัติด้านการดึง

ทดสอบสมบัติด้านการดึงของยางที่ผ่านการคงรูปแล้ว เพื่อหาค่าความทนแรงดึง (tensile strength) อีลาสติคโมดูลัส (modulus of elasticity) และระยะยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) โดยใช้วิธีตามมาตรฐาน ISO 37 : 1994 (E) ด้วยเครื่อง Instron Testing Machine ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ที่มี load cell ขนาด 500 นิวตัน และดึงด้วยความเร็ว 500 มิลลิเมตร/นาที โดยมี extensometer เป็นตัวจับระยะการยืดของชิ้นทดสอบซึ่งเป็นรูปดัมเบลล์ (dumbell) ที่มีความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.9



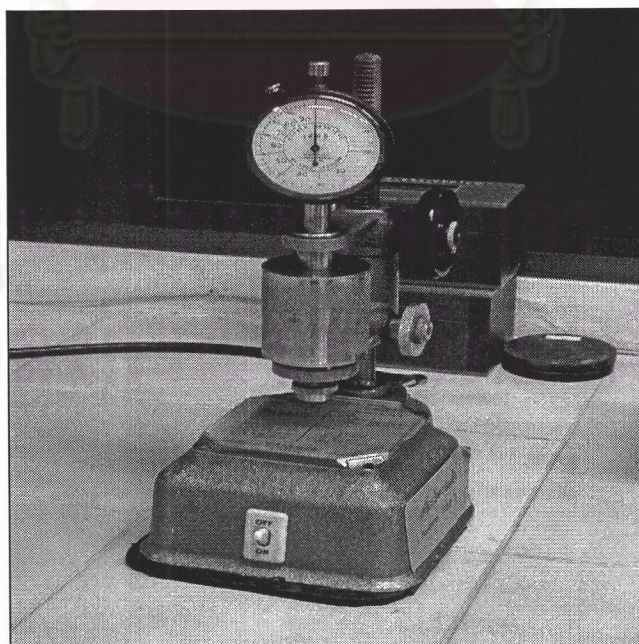
รูปที่ 3.8 เครื่อง Instron Testing Machine Model 1101



รูปที่ 3.9 ชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์สำหรับหาค่าความทนแรงดึง

ความแข็ง (Hardness)

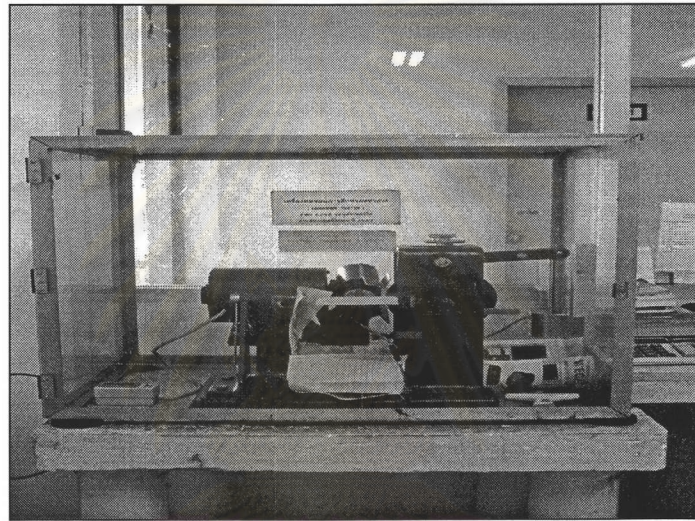
ทดสอบหาความแข็งของยางที่ผ่านการคงรูป โดยวิธีตามมาตรฐาน ASTM D 2240 - 97 ด้วยเครื่อง Model 917 Maximum Hardness Indicator แบบ Shore A ดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยนำชิ้นทดสอบที่ใช้หาความทนแรงดึง 3 ชิ้น มาวางซ้อนกัน เพื่อให้มีความหนาอย่างน้อย 6 มิลลิเมตร นอกจากนี้ ชิ้นทดสอบต้องมีพื้นผิวเรียบ และขนานกับผิวสัมผัสของหัวเข็มที่กดลงบนชิ้นทดสอบ



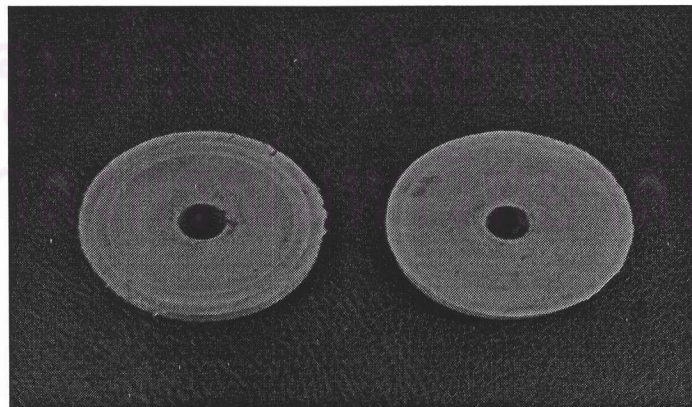
รูปที่ 3.10 เครื่อง Model 917 Maximum Hardness Indicator แบบ Shore A

ความต้านทานการสึกหรอ (Abrasion resistance)

ทดสอบหาความต้านทานการสึกหรอของยางที่ผ่านการคงรูปแล้ว โดยใช้วิธีตามมาตรฐาน BS 903 : Part A9 : 1998 Method B ด้วยเครื่องทดสอบการสึกหรอของยาง (abrasion tester) แบบAbrasion Akron ดังแสดงในรูปที่ 3.11 โดยใช้ชั้นทดสอบ 2 ชั้น ที่มีลักษณะเป็นวงล้อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงนอก 6.3 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางวงใน 1.3 เซนติเมตร หนา 1.3 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.12 โดยชั้นทดสอบที่วัดค่าความหนาแน่นแล้วจะถูกขัดสีกับวงล้อหิน หลังจากนั้น ชั่งน้ำหนักที่หายไปแล้วคำนวณหาปริมาตรที่หายไปต่อการถูกขัดสี 1,000 รอบ



รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบความต้านทานการสึกหรอ (Akron Abrasion Tester) Model APH-40

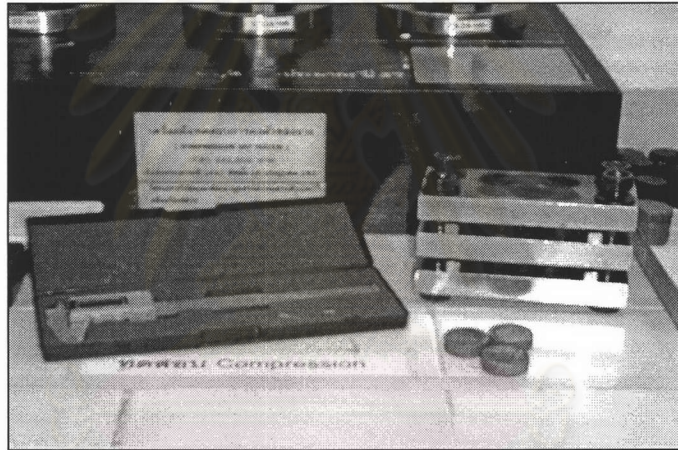


รูปที่ 3.12 ชั้นทดสอบสำหรับหาค่าความต้านทานการสึกหรอ

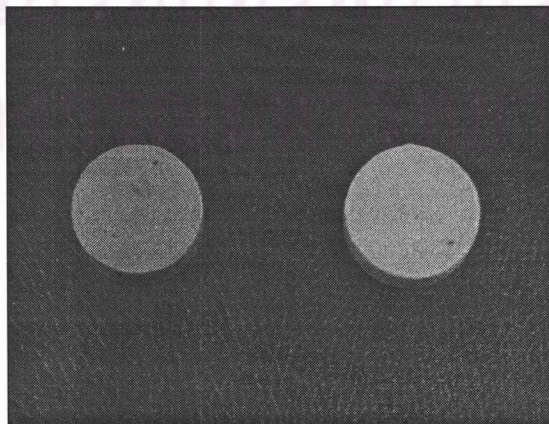
การคืบตัว (Compression set)

ทดสอบการคืบตัวของยางที่ผ่านการคงรูปแล้ว โดยใช้วิธีตามมาตรฐาน ASTM D 395-98 ด้วยเครื่อง Compression Set Tester Milano/Italia ดังแสดงในรูปที่ 3.13 โดยใช้ชิ้นทดสอบจำนวน 6 ชิ้น ที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกตันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.9 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ให้นำชิ้นทดสอบมาทดสอบจนความหนาลดลงประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ โดยเหลือความหนาประมาณ 9.5 มิลลิเมตร แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ชั่วโมง จากนั้น วัดความหนาที่ลดลง นำมาคำนวณเปอร์เซ็นต์การคืบตัว ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{การคืบตัว} = \frac{[\text{ความหนาชิ้นงานก่อนทดสอบ} - \text{ความหนาของชิ้นงานหลังทดสอบ}]}{[\text{ความหนาชิ้นงานก่อนทดสอบ} - \text{ความหนาของชิ้นทดสอบเมื่อเริ่มกด (9.5 มม.)}]} \times 100$$



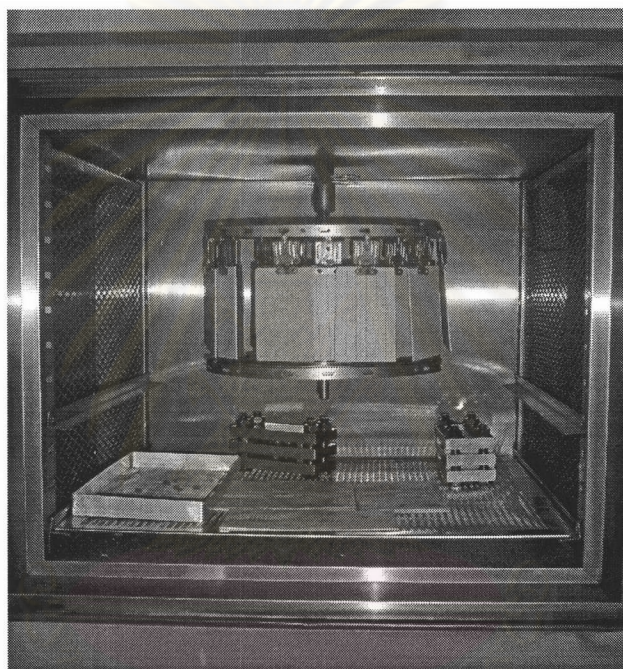
รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบการคืบตัว (Compression Set Tester Milano/Italia)



รูปที่ 3.14 ชิ้นทดสอบการคืบตัว

การบ่มเร่งด้วยความร้อน (Heat ageing)

ใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 573-99 ด้วยตู้อบสำหรับบ่มเร่งยาง (Geers Rubber Aging Oven) ดังแสดงในรูปที่ 3.15 โดยอบชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ชั่วโมง เมื่อนำออกจากตู้อบให้ตั้งทิ้งไว้อย่างน้อยครึ่งชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง นำไปตัดชิ้นทดสอบสมบัติต่างๆ แล้วทิ้งไว้อีกอย่างน้อย 16 ชั่วโมง จึงนำไปทดสอบความทนแรงดึงและความแข็งต่อไป



รูปที่ 3.15 การบ่มเร่งด้วยความร้อนในตู้อบ
ศูนย์วิจัยและพัฒนา
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย