

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

ยางธรรมชาติ (natural rubber) เป็นอย่างที่ได้อาจมาจากน้ำยาง (latex) มีโพลีไอโซพรีน (cis-1,4-polyisoprene) เป็นองค์ประกอบหลัก ยางธรรมชาติมีสมบัติความยืดหยุ่นสูง ยางจะกลายเป็นของแข็งเปราะได้ถ้าเย็นลงถึงอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิสภาพแก้ว ( $T_g$ ) เช่น ยางธรรมชาติมีค่า  $T_g$  เท่ากับ  $-70^{\circ}\text{C}$  ซึ่งต่ำกว่ายางสังเคราะห์อื่นๆ ยกเว้นเฉพาะยางบิวทาไดอีนและยางซิลิโคน ดังนั้น ที่อุณหภูมิสูงกว่า  $T_g$  ยางธรรมชาติก็ยังคงสภาพยืดหยุ่นได้สูง (พรพรรณ นิธิอุทัย, 2528) ยางธรรมชาติเป็นที่เหมาะสมสำหรับใช้ทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ ไปที่ไม่ต้องการสมบัติพิเศษเฉพาะเจาะจง เช่น ไม่ต้องการสมบัติการทนน้ำมัน หรือทนต่อความร้อนที่อุณหภูมิสูงๆ ปัจจุบันยางสังเคราะห์ เช่น สไตรีน-บิวทาไดอีน (styrene-butadiene) โพลีบิวทาไดอีน (polybutadiene) ได้เข้ามาแทนที่การใช้งานจากยางธรรมชาติ เนื่องจากยางสังเคราะห์เหล่านี้มีสมบัติทางกลและทางความร้อนที่ดีกว่า แต่ความยืดหยุ่นก็ดีกว่ายางธรรมชาติ ดังนั้นการนำยางธรรมชาติมาทำผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการปรับปรุงสมบัติเพื่อให้รับแรงได้มากขึ้นและต้านทานการเปลี่ยนรูปที่ดี โดยการใส่สารเคมีและสารตัวเติมเข้าไปในยาง หรือที่เรียกว่าการทำยางคอมปาวด์ (rubber compounds) ก่อนนำไปขึ้นรูปหรือทำการวัลคาไนซ์ต่อไป

เถ้าลอยลิกไนต์ เป็นผลพลอยได้จากการเผาไหม้ของถ่านหินลิกไนต์ในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า ในการเผาถ่านหินลิกไนต์จะได้เถ้าลิกไนต์ออกมา ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ เถ้าหนัก (wet ash) และเถ้าเบาหรือเถ้าลอย (dry ash or fly ash) เถ้าหนักจะตกสู่ก้นเตา ส่วนเถ้าลอยจะปนไปกับก๊าซร้อนและถูกดักจับโดยเครื่องดักจับฝุ่นไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) เพื่อแยกออกจากก๊าซร้อน ปริมาณเถ้าลอยที่เกิดขึ้นมีประมาณ 80-95% ของเถ้าที่เกิดขึ้นทั้งหมด เถ้าลอยลิกไนต์มีลักษณะทั่วไปเป็นรูปทรงกลม มีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมครอน จนถึง 150 ไมครอน ความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 2.00-2.60 องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) อลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ซึ่งอัตราส่วนของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดจะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ สภาพแวดล้อมขณะเผา และชนิดของถ่านหินที่ใช้เผา

## 2.1 ส่วนประกอบของยางคอมปาวด์

### 2.1.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber)

น้ำยางสดที่กรีตจากต้นยางพารา มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวเหมือนน้ำมัน มีสภาพเป็นคอลลอยด์ (colloid) มี pH ประมาณ 6.5-7.0 ความหนืดของน้ำยางมีค่าประมาณ 12-15 เซนติพอยส์ มีความหนาแน่นประมาณ 0.975-0.980 g/cm<sup>3</sup> อนุภาคเม็ดยางที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเป็นสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน มีชื่อโครงสร้างทางเคมีว่า โพลีไอโซพรีน ลักษณะอนุภาคยางค่อนข้างกลมคล้ายลูกแพร์ มีขนาดอยู่ระหว่าง 0.04-4 ไมครอน (อนุภาคยางส่วนใหญ่จะมีขนาดเกิน 0.4 ไมครอน มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 1 ไมครอน) (เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังสี, 2546)

### 2.1.2 สารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agents)

สารวัลคาไนซ์เป็นสารที่ทำให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์ คือ จะเกิดการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลของยาง ซึ่งจะเกิดโครงสร้างเป็นแบบ 3 มิติ ทำให้สมบัติของยางเปลี่ยนไปดังนี้

- เพิ่มความแข็งแรง มอดูลัส และความต้านทานต่อการสึกหรอของยาง
  - เปลี่ยนสภาพของยางจากการละลายได้ในสารละลายเป็นยางที่ไม่ละลายในสารละลาย
- สารวัลคาไนซ์ที่นิยมใช้กันมากในยางไม่อิมตัว เช่น ยางธรรมชาติ ยางไนไตรล์ ได้

แก่ กำมะถัน แต่ในยางอิมตัว เช่น ยางบิวทาย ยาง EPM จะใช้สารเพอร้ออกไซด์ phenolic resin หรือ p-quinone dioxide เป็นสารวัลคาไนซ์ การใช้กำมะถันมีข้อดีและข้อเสียดังนี้

#### ข้อดี

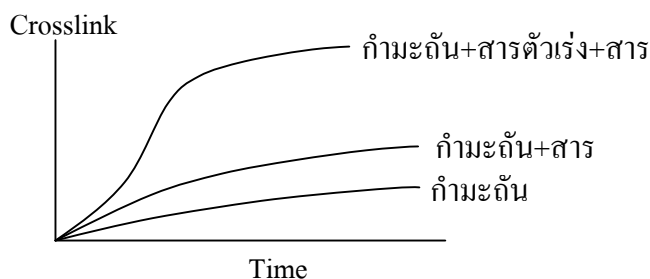
- ราคาค่อนข้างถูก ส่งผลให้ต้นทุนต่ำ
- การกระจายตัวดี
- ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ
- มีผลโดยตรงต่อสารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ (accelerator) ดังนั้นจึงเป็นตัวควบคุม

อัตราการเกิดการวัลคาไนซ์

#### ข้อเสีย

- มีแนวโน้มทำให้เกิดการตกผลึกออกมาที่ผิวยาง (bloom)
- การติดสีของซัลไฟด์
- เมื่อนำยางที่ผสมกำมะถันไปอบ ทำให้ทนทานต่อความร้อนได้ไม่ดี
- มีขีดจำกัดในการใช้คือ ใช้ได้เฉพาะยางที่ไม่อิมตัว

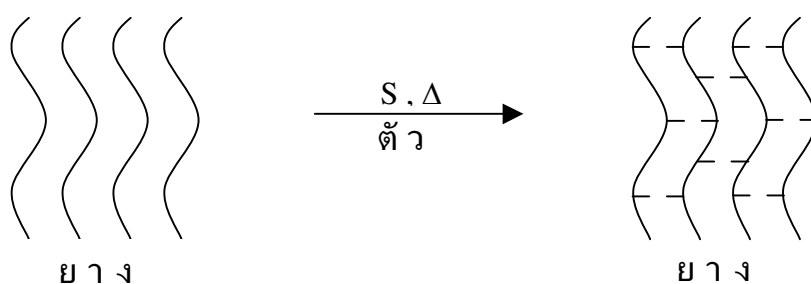
ปกติการทำไหมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมขวางโดยกำมะถันอย่างเดียว แม้จะใช้ อุณหภูมิสูงถึง  $150^{\circ}\text{C}$  ก็จะทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ที่ช้ามาก แต่หากเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้ อุณหภูมิที่เหมาะสม เช่น  $140-180^{\circ}\text{C}$  ก็จะทำให้อัตราการเกิดการวัลคาไนซ์เร็วขึ้น



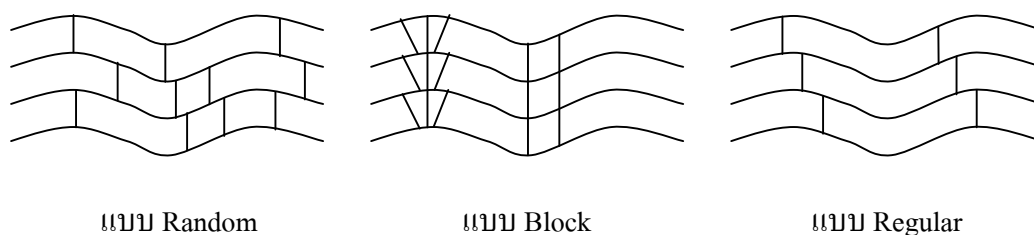
รูปที่ 2.1 ปริมาณพันธะเชื่อมโยงกับเวลาของระบบวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน (พรพรรณ นิธิอุทัย, 2536)

ลักษณะการเชื่อมขวางของโมเลกุลของยาง แบ่งตามลักษณะที่เกิดขึ้นได้ 3 แบบ คือ

- 1) Random crosslink จะเกิดการเชื่อมขวางของโมเลกุลอย่าง random
- 2) Block crosslink จะเกิดการเชื่อมขวางของ โมเลกุลในรูปของ block
- 3) Regular crosslink การเชื่อมขวางแบบ regular จะเกิดในยางที่มีคุณสมบัติพิเศษ เท่านั้น โดยปกติการเชื่อมขวางของโมเลกุล โครงสร้างจะมีทั้งแบบ random และแบบ block ผสม กัน



รูปที่ 2.2 แสดงการเกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลของยาง (พรพรรณ นิธิอุทัย, 2528)



รูปที่ 2.3 แสดงการเกิดการเชื่อมขวาง โมเลกุลของยางทั้ง 3 แบบ (วราภรณ์ ขจรไชยกูล, 2530)

### 2.1.3 สารเร่งปฏิกิริยา (Accelerators)

สารเร่งปฏิกิริยาเป็นสารที่ช่วยให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์เร็วขึ้น ในระยะแรกสารเร่งปฏิกิริยาจะจัดหมวดหมู่ตามความเร็วในการเร่งให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์ แต่เมื่อมียางสังเคราะห์เพิ่มขึ้น สารเร่งปฏิกิริยาที่เคยจัดเป็นสารเร่งปฏิกิริยาที่เร็วสำหรับยางธรรมชาติ อาจกลายเป็นสารเร่งปฏิกิริยาที่ช้าสำหรับยางสังเคราะห์นั้นๆ ได้ จึงมีการแบ่งสารเร่งปฏิกิริยาตามลักษณะโครงสร้างทางเคมีของสารเร่งปฏิกิริยานั้นๆ การจัดหมวดหมู่สารเร่งปฏิกิริยาตามวิธีนี้จะแบ่งออกเป็นหมู่ต่างๆ ดังนี้

#### 2.1.3.1 ไดไธโอคาร์บาเมต (Dithiocarbamate)

เป็นสารเร่งปฏิกิริยาที่เร่งให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์เร็วมาก สารเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ยังแบ่งเป็น แอมโมเนียมไดไธโอคาร์บาเมต โซเดียมไดไธโอคาร์บาเมต และซิงค์ไดไธโอคาร์บาเมต ซิงค์ไดไธโอคาร์บาเมตเป็นสารเร่งปฏิกิริยาที่สำคัญและมีจำหน่ายมากที่สุดในกลุ่มนี้ ซิงค์ไดไธโอคาร์บาเมตใช้มากในกรณีสำหรับน้ำยาง สำหรับยางทั่วไป ซิงค์ไดไธโอคาร์บาเมตอาจใช้เพียงตัวเดียวหรือรวมกับสารเร่งปฏิกิริยาอื่นเพื่อให้ผลผลิตที่มีคุณสมบัติโปร่งใส ขาว หรือมีสีสนดใส เพราะวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำ สีของยางไม่เปลี่ยนแปลงมาก ซิงค์ไดไธโอคาร์บาเมตให้ผลผลิตที่ไม่มีริส ไม่มีกลิ่น ทำให้ใช้กับยางที่สัมผัสกับอาหารได้ นอกจากนั้นยังใช้ทำอุปกรณ์การแพทย์ อุปกรณ์เพื่อสุขภาพ เป็นต้น ซิงค์ไดไธโอคาร์บาเมตอาจใช้ควบคู่กับสารเร่งปฏิกิริยาชนิดโซฮาโซล เพราะจะช่วยกระตุ้นให้โซฮาโซลทำงานได้รวดเร็วขึ้น ตัวอย่างสารเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในกลุ่มนี้ ได้แก่ zinc-N-dimethyl dithiocarbamate (ZDMC) zinc-N-diethyl dithiocarbamate (ZDC หรือ ZDEC) และ zinc-N-dibutyl dithiocarbamate (ZDBC)

#### 2.1.3.2 แซนแทท (Xanthates)

เป็นสารเร่งปฏิกิริยาที่ทำให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์เร็วมาก เร็วกว่าเกลือแอมโมเนียมของไดไธโอคาร์บาเมตเสียอีก จึงนิยมใช้ในอุตสาหกรรมน้ำยางโดยเฉพาะการทำยางฟองน้ำ เนื่องจากสารเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ทำให้เกิดการวัลคาไนซ์เร็วมาก ดังนั้นอุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ควรจะต่ำประมาณ 80-110°C แซนแททต้องใช้ซิงค์ออกไซด์กระตุ้นในการทำงาน ตัวอย่างสารเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในกลุ่มนี้ ได้แก่ sodium isopropylxanthate (SIX) zinc isopropylxanthate (ZIX) และ zinc butylxanthate (ZBX)

### 2.1.3.3 ไธยูเรม (Thiurams)

จัดเป็นสารเร่งปฏิกิริยาที่มีความเร็วสูงพิเศษสำหรับยางธรรมชาติ แต่ในกระบวนการแปรรูปยาง ยางจะ scorch ซ้ำกว่าพวกไดโซโอคาร์บาเมต ยางที่ใช้ไธยูเรมเป็นสารเร่งปฏิกิริยาสามารถวัลคาไนซ์ได้หลายวิธี เช่น วัลคาไนซ์โดยใช้เครื่องอัดไอน้ำและอากาศร้อน ในบางครั้งไธยูเรมอาจใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยาเสริมกระตุ้นสารเร่งปฏิกิริยาอื่น เช่น ไธอาโซลและ ซัลฟิनाไมด์ แต่สำหรับการใช้ไธยูเรมกับซัลฟิनाไมด์แล้วจะทำให้การเริ่มต้นวัลคาไนซ์ช้าลงไป แต่เวลาในการวัลคาไนซ์สมบูรณ์จะสั้นลง การใช้ไธยูเรมจะต้องมีซิงค์ออกไซด์อยู่ด้วยเพื่อให้ประสิทธิภาพสูงสุด อุณหภูมิที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ไม่ควรเกิน 125-135°C เพราะถ้าเกินกว่านี้จะ ทำให้ยางสุกเกินไป (over cure) ได้ง่าย ไธยูเรมไม่มีรส ไม่มีกลิ่น สามารถใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ที่โปร่งใส สีขาว หรือสีต่างๆ ใช้ทำอุปกรณ์ที่สัมผัสกับอาหารได้ ตัวอย่างสารเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในกลุ่มนี้ได้แก่ tetramethyl thiurammonosulphide (TMTM) tetramethyl thiuramdisulphide (TMTD) tetraethyl thiuramdisulphide (TET, TETD) และ dipentamethylene thiuramtetrasulphide (DPTS)

### 2.1.3.4 ไธอาโซล (Thiazole)

เป็นสารเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้กันมากที่สุด ยางที่ใช้ไธอาโซลเป็นสารเร่งปฏิกิริยาสามารถวัลคาไนซ์ได้ทุกรูปแบบของการวัลคาไนซ์ อย่างไรก็ตาม การที่เป็นแบบ delay action ในการวัลคาไนซ์ ทำให้เหมาะแก่การวัลคาไนซ์โดยใช้เครื่องอัดเป็นอย่างยิ่ง สารเร่งปฏิกิริยากลุ่มนี้สามารถกระตุ้นให้เร็วขึ้นได้โดยการใส่สารเร่งปฏิกิริยาที่เป็นค่า เช่น พวกไดโซโอคาร์บาเมตและไธยูเรม แต่การกระตุ้นนี้ยังผลให้ scorch time สั้นลงไปด้วย สารเร่งปฏิกิริยาพวกไธอาโซลจำเป็นต้องใช้ซิงค์ออกไซด์และกรดไขมันร่วมด้วย สำหรับกรดไขมันแล้วยิ่งความยาวโซ่ยาวจะทำให้ความว่องไวในปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น สารเร่งปฏิกิริยาไธอาโซลมีรสขม ดังนั้นจึงไม่อาจใช้ในยางที่ต้องสัมผัสกับอาหาร ตัวอย่างสารเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในกลุ่มนี้ได้แก่ 2-mercaptobenzothiazole (MBT) dibenzothiazyl disulphide (MBTS) และ zinc salt 2-mercaptobenzothiazole (ZMBT)

### 2.1.3.5 ซัลฟิनाไมด์ (Sulphenamide)

ประกอบด้วยส่วนที่เป็นไธอาโซลและส่วนที่เป็นอะมีน ซัลฟิनाไมด์เป็นสารเร่งปฏิกิริยาที่ delay action หรือ scorch time ยาวกว่าพวกไธอาโซลเสียอีกเพราะเมื่อซัลฟิनाไมด์ได้รับความร้อนก็จะแตกตัวออกให้ MBT และเบสออกมา ระยะเวลาก่อนที่จะแตกตัวออกมานี้ก่อให้เกิด delay action MBT ที่แตกตัวออกมาก่อนทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ และเบสจะเป็นตัวกระตุ้นให้สารเร่งปฏิกิริยาทำงานเร็วขึ้น มอดุลัสสูงขึ้นเนื่องจากว่าซัลฟิनाไมด์ให้ delay action ทำให้การวัลคาไนซ์

ในเบ้าพิมพ์ดีเพราะมีเวลาพอให้ยางไหลได้เต็มพิมพ์ ซัลฟิनाไมด์เป็นสารเร่งปฏิกิริยาที่ทำให้ยางมีมอดุลัสสูงมาก และมีสมบัติเชิงกลดี ซัลฟิनाไมด์ส่วนใหญ่ใช้ทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องรับแรงเค้นสูงๆ เช่น ยางรถยนต์ ยางกันชน และสายพานลำเลียง ซัลฟิनाไมด์ใช้ได้ทั้งยางธรรมชาติ ยางบิวไทล์ ยางไนไตรล์ และยางเอสปีอาร์ ตัวอย่างสารเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในกลุ่มนี้ได้แก่ N-cyclohexyl-2-benzothiazyl sulphenamide (CBS) และ N-tert-butyl-2-benzothiazyl sulphenamide (TBBS)

### 2.1.3.6 กัวนิติน (Guanidine)

เป็นสารเร่งปฏิกิริยาที่วัลคาไนซ์ช้า เหมาะที่จะใช้กับยางหนา เพราะต้องวัลคาไนซ์นาน ยางที่ใช้กัวนิตินจะมีมอดุลัสสูง ถ้าใช้กัวนิตินเป็นสารเร่งปฏิกิริยาเสริมจะมีการกระตุ้นสูงมาก โดยเฉพาะการกระตุ้นพวกโครอาโซล แต่ไม่นิยมใช้เป็นตัวกระตุ้นไธยูเรม ไดไฮโอคาร์บาเมต เพราะทั้งสองตัวนี้วัลคาไนซ์เร็วอยู่แล้ว เมื่อใช้กัวนิตินเป็นสารเร่งปฏิกิริยาหลักจะไม่สามารถวัลคาไนซ์โดยใช้อากาศร้อนได้เพราะจะจับตัวช้าเกินไป สารเร่งปฏิกิริยากลุ่มกัวนิตินนิยมใช้ในงานทำยางรถยนต์ รองเท้า สายไฟฟ้า เป็นต้น ตัวอย่างสารเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในกลุ่มนี้ได้แก่ diphenyl guanidine (DPG) และ di-o-tolyl guanidine (DOTG) (พรพรรณ นิธิอุทัย, 2528)

### 2.1.4 สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activators)

สารกระตุ้นปฏิกิริยา คือ สารที่ช่วยเสริมให้สารเร่งปฏิกิริยาทำงานมีประสิทธิภาพสูงขึ้น สารกระตุ้นปฏิกิริยาอาจเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ สารอนินทรีย์ที่เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาที่สำคัญและนิยมใช้คือ ซิงค์ออกไซด์ ส่วนสารกระตุ้นปฏิกิริยาที่เป็นสารอินทรีย์ที่สำคัญคือ พวกกรดไขมัน เช่น กรดสเตียริก กรดปาล์มมิติก และกรดลอริก เป็นต้น สารกระตุ้นปฏิกิริยามีคุณสมบัติที่สำคัญคือ เมื่อใส่เข้าไปในยางปริมาณเล็กน้อยจะทำให้ยางมีมอดุลัสสูงขึ้น และบางครั้งถ้าไม่มีสารกระตุ้นปฏิกิริยาก็จะไม่มีการวัลคาไนซ์เกิดขึ้น

#### 2.1.4.1 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO)

ในการทำให้ยางวัลคาไนซ์ได้สมบูรณ์ ซิงค์ออกไซด์มีความจำเป็นมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารเร่งปฏิกิริยาประเภทโครอาโซล โดยทั่วไปนิยมใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาในปริมาณตั้งแต่ 3-5 phr (part per hundred rubber) แต่ถ้าซิงค์ออกไซด์มีขนาดอนุภาคเล็กก็สามารถลดปริมาณการใช้เหลือเพียง 1 phr ได้ ปริมาณซิงค์ออกไซด์มีผลต่อสมบัติเชิงกลของยางคือ มอดุลัส ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความแข็งแรงดึง และความกระด้างตัวของยางจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซิงค์ออกไซด์ จนกระทั่งปริมาณของซิงค์ออกไซด์เพิ่มเป็น 2.5 phr แล้วก็จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง

#### 2.1.4.2 กรดไขมัน (Fatty acid)

กรดไขมันเป็นสารที่จำเป็นในการใช้เป็นส่วนประกอบปฏิกิริยา โดยเฉพาะพวกไฮโอโซล กรดไขมันที่ใช้ส่วนมากเป็นของผสมของกรดลอเลอิกที่มีคาร์บอน 12-18 อะตอม ซึ่งประสิทธิภาพของการกระตุ้นขึ้นกับความยาวโมเลกุลของมัน ปริมาณการใช้กรดไขมันในการผสมเข้าไปในยางจะขึ้นกับชนิดของยาง ถ้ายางชนิดใดมีกรดไขมันอยู่แล้ว ก็ไม่จำเป็นต้องใส่หรือถ้าใส่ก็เป็นปริมาณน้อยมาก กรดไขมันที่นิยมใช้คือ กรดสเตียริก (stearic acid) (พหุพจน์ นิธิอุทัย, 2528)

#### 2.1.5 สารตัวเติม (Fillers)

สารตัวเติมหมายถึงสารอื่นๆ ที่ไม่ใช่ยางที่ใส่ลงไปในยาง เพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ เช่น เพื่อลดต้นทุน เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์และเชิงกลของยาง เพื่อช่วยในขบวนการผลิต เพื่อลดการพองตัวของยางในน้ำมัน เพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้า และเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของยาง เป็นต้น สารตัวเติมสามารถแบ่งตามลักษณะได้ 3 ลักษณะคือ

1) สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเม็ด (particulated filler) ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกา ดินเหนียว และเขม่าดำ เป็นต้น สารตัวเติมประเภทนี้ยังแบ่งออกเป็น 2 พวกใหญ่ๆ คือ

- สารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพ (reinforcing filler) คือ สารตัวเติมที่ใส่เข้าไปในยางแล้วช่วยให้ยางมีความต้านทานต่อแรงดึงสูง ความต้านทานต่อการสึกหรอสูง ความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง เป็นต้น ส่วนใหญ่นุภาคจะมีขนาดเล็กประมาณ 0.18-0.60  $\mu\text{m}$  เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเขม่า (fumed product) เช่น เขม่าดำและซิลิกา เป็นต้น

- สารตัวเติมไม่เสริมประสิทธิภาพ (diluent filler) สารตัวเติมชนิดนี้จะมีราคาถูก มีอนุภาคขนาดใหญ่ประมาณตั้งแต่ 10  $\mu\text{m}$  ขึ้นไป เช่น แคลเซียมคาร์บอเนตและแป้งทัลคัม เป็นต้น สารตัวเติมบางตัวมีขนาดอนุภาคปานกลาง เช่น อลูมิเนียมซิลิเกตและแคลเซียมซิลิเกต จะจัดอยู่ในพวกกึ่งเสริมประสิทธิภาพ (semi-reinforcing filler)

ปัจจุบันสารตัวเติมที่นิยมใช้มากที่สุดคือ เขม่าดำและซิลิกา เนื่องจากสามารถปรับปรุงข้อด้อยเชิงกลของยางได้ ในระยะหลังได้พยายามปรับสภาพผิวของสารตัวเติมของสาร อนินทรีย์บางตัว เพื่อให้ยึดติดกับโมเลกุลของยางได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจะช่วยให้สมบัติของยางเหล่านี้ ไม่ต่างจากการใช้เขม่าดำหรือซิลิกามากนัก

2) สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเส้นใย (fibrous filler) เช่น ใยฝ้าย (cotton froc) และ ใยไม้ (wood froc) สารตัวเติมประเภทนี้ใส่ในยางบางชนิดเพื่อป้องกันไม่ให้ยางหดตัว แต่ออกเพื่อรักษารูปทรง มักจะใช้เป็นสารตัวเติมในยางประเภทเกรดต่ำ เช่น พวกยางเปลือกแบตเตอรี่ ตุ๊กตา และพื้นรองเท้า เป็นต้น

3) สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเรซิน (resinous filler) ยางที่เติมเรซินจะมีความแข็งเป็นพิเศษ ตามปกติแล้วการทำให้ยางแข็งขึ้นมักจะใช้สารตัวเติมที่เป็นผง เช่น เชมดำ ซิลิกา หรือ ดินเหนียว เป็นต้น แต่สารเคมีที่เป็นผงนี้ผสมเข้าไปในยางได้ในปริมาณที่จำกัด ถ้ามากเกินไปแล้วจะทำให้ผสมได้ยาก ยางแข็ง และมีความร้อนเกิดขึ้นในขณะผสม รวมทั้งความกระด้างตัวของยางต่ำลง การใช้สารตัวเติมที่เป็นผงนี้จะทำให้ยางมีความแข็งเพียงประมาณ 70-75 IRHD เท่านั้น ถ้าต้องการให้ความแข็งมากกว่านั้นแล้วมักจะใช้สารพวกเรซินแทน เช่น ไฮสไตรีนเรซิน (high styrene resin) และฟีนอลฟอर्मัลดีไฮด์เรซิน (phenol formaldehyde resin) (พรพรรณ นิธิอุทัย, 2528)

### 2.1.6 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers)

พลาสติไซเซอร์เป็นสารที่ใส่เข้าไปในยางเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและความสามารถในการใช้งาน พลาสติไซเซอร์จะทำให้ความแข็งของยางลดลงและช่วยให้แปรรูปได้ง่ายขึ้น ในบางครั้งพลาสติไซเซอร์จะมีชื่อเรียกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นกับหน้าที่และปริมาณที่ใช้ เช่น ถ้าใช้ในปริมาณไม่เกิน 5 phr จะเรียกว่า “Processing aid” คือช่วยในการแปรรูป ช่วยให้การผสมสารเคมีเข้าไปในยางกระทำได้ง่ายขึ้น ถ้าใช้ปริมาณ 5-15 phr จะเรียกว่า “Softener” คือใส่เพื่อให้ยางนิ่มลง ทั้งในขณะที่ยังไม่วัลคาไนซ์และวัลคาไนซ์แล้ว และถ้าใช้เกิน 15 phr จะเรียกว่า “Extender” กรณีนี้ใส่เพื่อลดต้นทุน จุดมุ่งหมายของการใช้พลาสติไซเซอร์ในยางมีหลายประการคือ

- 1) เพื่อช่วยในการแปรรูป การใส่พลาสติไซเซอร์เข้าไปจะทำให้ผลกันตรงข้ามกับสารตัวเติมคือ จะทำให้ยางนิ่มลง แปรรูปได้ง่ายขึ้น
- 2) เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของยาง ยางที่ใส่พลาสติไซเซอร์จะทำให้ความแข็งลดลง เป็นผลให้มอดูลัสลดลง ระยะยืดเมื่อขาดและความยืดหยุ่นสูงขึ้น
- 3) เพื่อลดต้นทุน
- 4) เพื่อการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ พลาสติไซเซอร์จะทำให้ยางมีความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำลงไปอีก และสามารถขยายขอบเขตการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำลงไปได้อีก
- 5) เพื่อลดพลังงานในการแปรรูปยาง พลาสติไซเซอร์จะทำให้ยางนิ่มลง พลังงานที่ใช้ในการผสมยาง แปรรูปยาง รวมทั้งอุณหภูมิในการแปรรูปยางจะลดลงได้
- 6) เพื่อใช้เป็นสารแทกซิไฟเออร์ พลาสติไซเซอร์บางตัวมีผลให้ยางมีความสามารถในการติดกันได้ง่ายขึ้น (พรพรรณ นิธิอุทัย, 2528)



### 2.1.7 สารแอนติออกซิแดนซ์ (Antioxidant)

ตลอดอายุการใช้งานของยาง ยางจะเสื่อมทำให้ไม่สามารถจะใช้งานต่อไปได้ ปัจจัยหลักสำคัญที่ทำให้ยางเสื่อมคือ ออกซิเจนกับโอโซน ถึงแม้ว่ายางจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนอย่างช้าๆ ก็ตาม (เว้นไว้แต่จะมีการกระตุ้น) แต่ออกซิเจนก็มีความสำคัญยิ่งต่อการเสื่อมของยางตัวอย่าง สิ่งที่กระตุ้นให้ยางเสื่อมสภาพได้เร็ว ได้แก่ แสง ความร้อน กลือโลหะหนักที่เจือปนโอโซน และการหักงอไปมา เป็นต้น

ในระหว่างการเสื่อมของยาง ผิวของยางเกิดการเปลี่ยนแปลง และอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงในตัวอย่างทั้งหมดด้วย โดยเฉพาะยางบางๆ ซึ่งออกซิเจนสามารถทำปฏิกิริยาได้ตลอดตัวอย่างสภาพการเสื่อมของยางที่ปรากฏได้แก่

- ผิวแตก อันเป็นผลเนื่องมาจากแสงที่มีต่อยาง เห็นได้ชัดมากในยางสี
- ผิวแข็งและสมบัติกายภาพตก ตัวอย่างเช่น กรณียางเอสปีอาร์ที่เสื่อมจากความร้อน ยางสามารถป้องกันให้เสื่อมช้าลงได้โดยการใช้สารแอนติออกซิแดนซ์ และสารแอนตีโอโซนแทนท์ รวมไปถึงซีฟิ่งด้วย

แอนติออกซิแดนซ์ที่ใช้มีด้วยกัน 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ พวกฟีนอลิก ซึ่งใช้กับยางสี และพวกสารประกอบอะมีน ซึ่งทำให้สีของยางเปลี่ยนแปลงไปบ้าง จึงใช้กันทั่วไปในยางดำ เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างแอนติออกซิแดนซ์ 2 ชนิดนี้ จะพบว่า พวกสารประกอบอะมีนจะมีประสิทธิภาพมากกว่าพวกสารฟีนอลิก

ปริมาณปกติของแอนติออกซิแดนซ์คือ 1-2 phr ปริมาณดังกล่าวถือว่าเป็นจุดสูงสุดแล้ว ถ้าใช้มากเกินไปก็จะไม่ให้เกิดผลเหนือไปกว่านี้อีก และอาจจะทำให้เกิดการ bloom ในผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย (พรพรรณ นิธิอุทัย, 2536)

### 2.1.8 สารเคมีอื่นๆ

สารเคมีอื่นๆ ที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็นสารที่ไม่ถือว่าเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องใช้สำหรับยางทั่วไป แต่บางครั้งใส่เข้าไปในยางโดยมีวัตถุประสงค์เพื่องานเฉพาะอย่าง เช่น

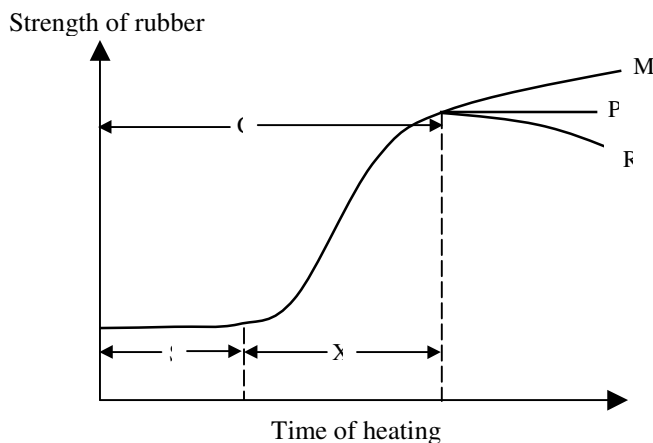
- สี เมื่อต้องการใช้ยางในรูปสีต่างๆ เพื่อความสวยงามหรือบอกลักษณะบางประการ
- สารลดการติดไฟ เมื่อต้องการให้ยางติดไฟได้ช้าลง หรือไม่ควรติดไฟลุกไหม้เอง
- สารป้องกันรังสี เมื่อต้องการให้รังสีผ่านยางได้ยากขึ้น ใช้ทำชุดพนักงานที่ทำงานเกี่ยวกับรังสีเอ็กซ์ หรือสารกัมมันตรังสีต่างๆ
- สารขัดสี ในการทำยางลบหมึก ยางลบจะต้องแข็งและมีสมบัติที่จะขูดกระดาษ เอารอยหมึกออกได้ (พรพรรณ นิธิอุทัย, 2528)

## 2.2 ลักษณะการวัลคาไนซ์หรือคุณลักษณะการบ่ม (Cure characteristics)

เมื่อนำยางคอมปาวด์มาทำให้ร้อน สารเคมีวัลคาไนซ์ที่อยู่ในยางก็เริ่มต้นเกิดปฏิกิริยา เช่น อาจเกิดการแตกตัว หรืออาจจะทำปฏิกิริยากันเอง ในตอนเริ่มต้นนี้จะใช้ระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งอาจจะช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้และชนิดของสารเคมีที่ใช้ด้วย โดยทั่วไปถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นระยะเวลาดังกล่าวก็จะสั้นลง ระยะเวลาช่วงนี้เป็นช่วงเวลาที่เริ่มต้นก่อนที่สารเคมีจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับยาง ช่วงระยะเวลาดังกล่าวมีชื่อเรียกว่า “Induction time” แล้วในเวลาต่อมาสารเคมีก็จะทำปฏิกิริยากับยางก่อให้เกิดการเชื่อมขวางของโมเลกุล ทำให้มอดุลัสของยางสูงขึ้นและยางแข็งขึ้น ระยะเวลาที่ยางเกิดการแข็งตัวจนเห็นได้ชัดเรียกกันว่า “Scorch time” เมื่อยางเกิดการ scorch แล้วยางจะแปรรูปได้ยากขึ้น ขณะที่เกิดการ scorch นี้เรียกกันว่ายางเริ่ม “สุก”

เมื่อสารเคมีทำปฏิกิริยากับยางต่อไป ยางก็จะแข็งขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งสารเคมีกระทำกับยางจนหมด ยางก็จะแข็งสูงสุด ระยะเวลาที่ใช้เพื่อให้ยางทำปฏิกิริยากับสารเคมีจนหมดเรียกว่า “100% Vulcanization time” หรือ “100% Cure time” แต่ในการปฏิบัติจริงนั้นพบว่า 100% Cure time ใช้เวลานานเกินไป และอาจจะทำให้สมบัติทางฟิสิกส์ด้านอื่นของยางด้อยลงไปอีกด้วย ดังนั้นการวัลคาไนซ์ยางจึงมักจะกระทำที่ยางมีมอดุลัสสูงขึ้นเพียง 90% หรือ 95% ของมอดุลัสที่จะขึ้นสูงสุด ระยะเวลาดังกล่าวจะถือเป็น 90% Cure time หรือ 95% Cure time ตามลำดับ ระยะเวลาดังกล่าวอาจจะถือเป็น optimum cure ก็ได้ ยางใดที่ได้รับความร้อนไม่ถึง optimum cure เรียกว่าเกิด under cure (หรือยางไม่สุก) จะได้ยางที่มีคุณสมบัติที่ดีเต็มที่ไม่ได้ ถ้ายางไม่สุกมากๆ ยางจะรักษารูปทรงไม่ได้ เมื่อทำให้ยางเกิดการเปลี่ยนรูปจะเกิดการคืนตัวซ้ำหรือเปลี่ยนรูปถาวรได้

ถ้าหากปล่อยให้ยางรับความร้อนต่อไปอีกหลังจากที่ได้ผ่าน 100% cure แล้ว นั่นหมายถึง การเกิด over cure (ยางสุกเกินไป) โมเลกุลของยางจะสลายตัว ยางจะนิ่มลง (ถ้ายางนั้นเป็นยางธรรมชาติ) เรียกว่าเกิดการ reversion หรือยางอาจจะแข็งขึ้นไปอีก (ถ้ายางนั้นเป็นยางเอสปีอาร์ เป็นต้น) เรียกว่า เกิด Marching modulus ยางคอมปาวด์บางชนิดเกิดการ reversion ได้ง่ายเรียกว่า ยางนั้นมีลักษณะเป็น Peaky cure แต่ยางใดที่สามารถรักษามอดุลัสไม่ให้ตกลงไปได้นาน ถึงแม้จะเกินกว่า 100% cure แล้ว ยางคอมปาวด์นั้นจะเรียกว่าเป็นยางที่มี Flat cure หรือ Plateau cure



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงสมบัติของยางคอมปาวด์ เมื่อให้ความร้อนแก่ยาง  
(บุญธรรม นิธิอุทัย และปรีชา ป้องภัย, 2534)

รูปที่ 2.4 แสดงถึงขั้นตอนของการเปลี่ยนแปลงมอดุลัสของยาง ในระหว่างการให้ความร้อนแก่ยางนี้โดย

S = ระยะเวลาการ scorch เป็นช่วงของ induction period

X = ระยะเวลาการเกิดการเชื่อมขวางจนถึงจุด optimum

C = ระยะเวลาการวัดคาไนซ์จนถึงจุด optimum

M = เส้นแสดง marching modulus

P = เส้นแสดง plateau cure

R = เส้นแสดง reversion cure

ในสมัยก่อน การตรวจสอบหาเวลาที่ยางจะสุกทำโดยการนำยางคอมปาวด์ไปทำให้ร้อนภายในหลอดทดลองที่บรรจุลิเซอริน แล้วใช้แท่งแก้วหรือโลหะกดลงไปที่ยางนั้น ในช่วงระยะเวลาหนึ่งๆ ให้สังเกตการแข็งตัวของยาง โดยวิธีการนี้ก็จะทำให้ทราบถึงเวลาที่ยางเริ่ม scorch และเวลายางสุกโดยประมาณได้ แต่ปัจจุบันนิยมใช้เครื่องมือ cure-meter มากกว่าอย่างอื่น

### 2.3 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

ยางวัลคาไนซ์ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางเพราะเป็นวัสดุที่มีสมบัติหลากหลาย การประยุกต์ใช้งานนั้นเฉพาะสมบัติประเภทใดประเภทหนึ่งเพียงอย่างเดียว แต่บางงานต้องการ

สมบัติหลายๆ อย่างพร้อมกัน บางงานต้องการสมบัติพิเศษ เช่น สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซต่ำ จึงมักไม่ค่อยทำการทดสอบ เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติที่ใช้ในงานทั่วไป ตัวอย่างเช่น การวัดสมบัติความเค้น-ความเครียด (แรงดึงและส่วนยืด) ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความแข็ง เป็นต้น

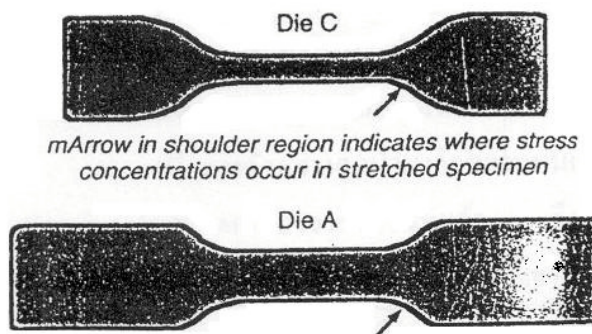
### 2.3.1 การยืดแกนเดียว (Uniaxial tension)

หมายถึงการดึงยางให้ยืดในทิศทางเดียว การทดสอบต่างๆ ไปเรียกว่า การดึงยาง (tensile test) หลักการนี้ได้รับความสนใจค่อนข้างสูง เพราะมีการถือปฏิบัติมากมายในอุตสาหกรรมยาง ซึ่งก็มีเหตุผลรองรับหลายประการ การทดสอบด้วยชิ้นทดสอบแบบดึง ผลการทดสอบที่ได้จะชี้ว่า ยางคอมพาวด์นั้นมียืดหยุ่นประกอบเหมาะสมทั้งในเชิงชนิดและปริมาณหรือไม่ และสถานะการวัลคาไนซ์เป็นอย่างไร เป็นต้น โดยดึงยางเพียงครั้งเดียว จะได้ทั้งความเค้นที่ส่วนยืดที่กำหนด (มอดุลัส 300%) ระยะยืดเมื่อขาด (elongation at break) และความเค้นเมื่อขาด (stress at break) ข้อมูลเหล่านี้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการควบคุมคุณภาพและการกำหนดสมบัติของผลิตภัณฑ์

ในการวัดสมบัติการดึงยาง นิยมบอกความเครียดหรือความยืดเป็นเปอร์เซ็นต์ ส่วนยืดที่ 300% หมายถึงการที่ชิ้นทดสอบที่มีพื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอถูกดึงให้ยืดออกเป็น 4 เท่าของความยาวเดิม สำหรับชิ้นทดสอบรูปดัมเบลจะต้องวัดส่วนยืดระหว่างเส้นที่ขีดไว้ (Benchmark) เท่านั้น

วิธีหลักโดยการวัดสมบัติของยางโดยวิธีดึงคือ มาตรฐาน ASTM D 412 ซึ่งใช้ชิ้นทดสอบรูปดัมเบลที่เจาะจากแผ่นยางด้วยแม่พิมพ์ นำมาจับด้วยที่จับของเครื่องดึง ปกติดึงแยกด้วยอัตรา 8.5 มิลลิเมตรต่อวินาที ชิ้นทดสอบอีกแบบหนึ่งคือ แบบแหวน ชิ้นทดสอบแบบนี้แก้ปัญหาการจับได้ ข้อเสียหลักของชิ้นทดสอบแบบแหวนคือ ความเครียดผิวในกับผิวนอกของวงแหวนไม่เท่ากัน โดยผิวในยืดมากกว่าผิวนอก ดังนั้นค่าความทนแรงดึงจากชิ้นทดสอบแบบแหวนจะต่ำกว่าที่ได้จากแบบดัมเบล

ชิ้นทดสอบแบบดัมเบลออกแบบเพื่อป้องกันการขาดบริเวณที่จับ และเพื่อให้ขาดที่ส่วนคอดช่วงกลาง เพราะความเค้นจะมีค่าสูงสุดที่บริเวณที่มีพื้นที่หน้าตัดเล็กที่สุด นั่นคือ การขาดจะเกิดขึ้นที่ส่วนคอดของชิ้นทดสอบเสมอ บางครั้งยางขาดที่บริเวณไหล่ของดัมเบลดังแสดงด้วยลูกศรในรูปที่ 2.5 ซึ่งจะเห็นว่า บริเวณไหล่ของพิมพ์ C จะโค้งกว่าของพิมพ์ A หมายความว่า พิมพ์ C จะมีความเข้มข้นความเค้น (stress concentration) น้อยกว่าพิมพ์ A การจับชิ้นทดสอบจะต้องทำอย่างระมัดระวังเพื่อลดความเข้มข้นความเครียดให้น้อยที่สุด โดยเฉพาะเมื่อทำการทดสอบกับชิ้นทดสอบแบบพิมพ์ A เพราะความเข้มข้นความเครียดอาจเป็นสาเหตุของการขาดที่บริเวณไหล่



รูปที่ 2.5 ชิ้นทดสอบสำหรับทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D 412 (พิมพ์ A และ พิมพ์ C)  
(ปรีชา ป้องภัย, 2542)

การมีตำหนิ (flaw) เกิดขึ้นที่บริเวณไหล่ชิ้นทดสอบ บวกกับเกิดความเค้น ความเครียด จะเป็นสาเหตุที่ทำให้ได้ค่าความแข็งแรงลดลงมากที่สุด ยิ่งตำหนิมีขนาดใหญ่ ค่าความแข็งแรงดึงและระยะยืดเมื่อขาดยิ่งลดลงมาก ตำหนิในชิ้นทดสอบอาจเกิดได้จากหลายสาเหตุ ที่สำคัญได้แก่ เกิดจากการครูดของคมแม่พิมพ์ที่มีรอย เกิดจากการกระจายตัวไม่ดีของสารตัวเติม แม่พิมพ์ที่ท้อหรือมีรอยแหว่งที่คมจับเป็นสาเหตุที่ยางขาดเร็ว ควรนำชิ้นทดสอบมาวางซ้อนกันแล้ว สังเกตว่า รอยขาดเกิดขึ้นที่เดียวกันหรือใกล้ๆ กันหรือไม่ ถ้าขาดที่เดียวกันอาจมีจุดที่คมแม่พิมพ์ท้อหรือมีรอยแหว่ง

บางครั้งสมบัติด้านความแข็งแรงดึงและระยะยืดเมื่อขาดอาจจำเป็นต้องหาจากชิ้นทดสอบที่เตรียมมาจากตัวผลิตภัณฑ์โดยตรง เช่น ยางรถยนต์ โดยตัดยางจากผลิตภัณฑ์มาฝน (buffing) จนได้ขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบ แต่เป็นที่ยอมรับกันว่า การฝนหรือตัดแต่งจะทำให้ความแข็งแรงลดลง (เมื่อเทียบกับชิ้นทดสอบที่ได้จากการอัดเข้าโดยตรง) ในบางกรณี การฝนยางอาจทำให้ความแข็งแรงลดลงได้อย่างมาก

สมบัติของยางโดยวิธีดึงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับสมรรถนะการใช้งานของผลิตภัณฑ์ยางน้อยหรือไม่มีเลย และไม่ค่อยได้ใช้ข้อมูลในการออกแบบผลิตภัณฑ์มากนัก เพราะส่วนใหญ่ผลิตภัณฑ์ไม่ได้ใช้รับแรงดึง ยกเว้นยางรัด ส่วนใหญ่จะใช้ข้อมูลเหนือนหรือการผิดรูป 2 มิติมากกว่า

### 2.3.2 ความแข็ง (Hardness)

ความแข็งของยางเป็นความต้านทานของยางต่อแรงกด เป็นสมบัติที่ใช้ระบุถึงคุณภาพของยางทั่วไปเสมอ การวัดความแข็งของยางสามารถทำได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ ความแข็ง

ของยางเป็นสมบัติที่แสดงถึงหน้าที่-ความสามารถการใช้งานของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นความแข็งของยางจึงใช้เป็นสมบัติที่มักกำหนดในมาตรฐานผลิตภัณฑ์ยางทุกครั้ง นอกจากนั้นความแข็งของยางยังสามารถใช้เป็นตัวควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย เช่น การชั่งสารเคมีหลักๆ ผิดพลาดหรือการอบยางไม่สุกหรือสุกมากเกินไป จะทำให้ความแข็งของยางเปลี่ยนไปอย่างเห็นได้ชัด

วิธีการวัดความแข็งของยางคือ ใช้เหล็กที่มีรูปทรงกำหนดไว้กดลงไปบนแผ่นยาง แล้ววัดรอยบุ๋มของยางขณะที่กำลังกดอยู่ เครื่องมือวัดความแข็งของยางที่ใช้กันทั่วไปได้แก่ เครื่อง Shore Durometer ซึ่งวัดความแข็งออกมาเป็นหน่วย Shore A (สำหรับยางนิ่มปกติ) เครื่อง Wallace Rubber Hardness Tester วัดความแข็งออกมาเป็นหน่วยเป็น IRHD (International Rubber Hardness Degree) ความแข็งของยางหน่วยวัด IRHD มีสเกลสูงสุด (ยางที่แข็งมาก) มีค่าเป็น 100 ส่วนสเกลต่ำสุด (ยางที่นิ่มมากๆ) จะมีค่าเป็น 0 ค่าสเกล IRHD นี้มีค่าใกล้เคียงกับ Shore A นอกจากนั้นยังมีเครื่องมือวัดความแข็งของยางในกรณีที่ยางมีขนาดเล็กและบางได้แก่ เครื่อง Micro Hardness Tester กับเครื่องมือวัดความแข็งในกรณีที่ยางมีผิวโค้งได้แก่ เครื่องวัดความแข็งแบบ Puzzy and Jones สำหรับลูกกลิ้งยาง เป็นต้น

ความแข็งของยางวัลคาไนซ์จะขึ้นกับ

- ความแข็งของตัวยางเองขณะที่ไม่มีสารตัวเติม
- ชนิดและปริมาณของสารตัวเติม
- ชนิดและปริมาณของพลาสติกไซเซออร์
- ชนิดและปริมาณของความเข้มข้น
- สารอื่นที่ใส่เข้าไปพิเศษ เช่น เรซิน เป็นต้น

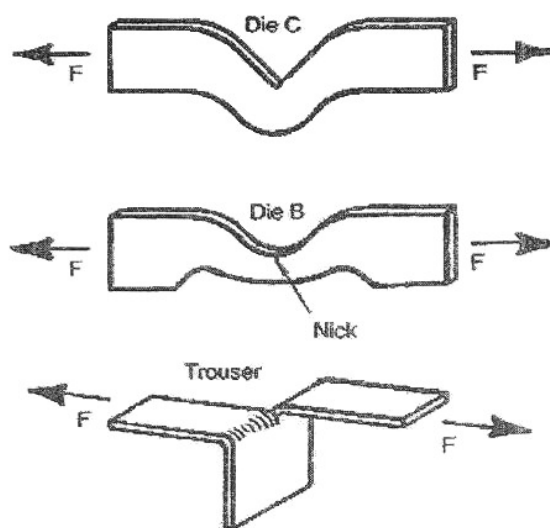
ยางวัลคาไนซ์ทั่วไป เช่น ยางธรรมชาติ ยางเอสปีอาร์ หรือยางอีพีดีเอ็ม จะมีความแข็ง (ขณะที่ไม่มีสารตัวเติมใดๆ) ประมาณ 40-45 IRHD แต่ยางบางชนิดมีความแข็งมากกว่านี้ เช่น ยางฟลูออโรคาร์บอน มีความแข็งประมาณ 60 IRHD เป็นต้น การออกสูตรยางเพื่อให้ได้ความแข็งเพิ่มขึ้นในช่วง 45-80 IRHD อาจทำได้โดยการเพิ่มปริมาณสารตัวเติม หรือลดความแข็งลงโดยการเพิ่มปริมาณพลาสติกไซเซออร์ ในช่วงความแข็งของยางดังกล่าวพบว่า ความแข็งกับปริมาณสารตัวเติมหรือปริมาณพลาสติกไซเซออร์มีความสัมพันธ์กันเกือบเป็นเส้นตรง ดังนั้นเราสามารถออกสูตรให้ความแข็งของยางได้ตามต้องการอย่างตรงไปตรงมาได้

โดยทั่วไป การใช้สารตัวเติมในปริมาณที่เท่าๆ กัน สารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าจะให้ความแข็งมากกว่า แต่ในกรณีที่ต้องการจะให้ยางแข็งพิเศษเกิน 80 IRHD ออกไปอีกก็ต้องใช้สารประเภทเรซิน ได้แก่ high styrene resin และ phenolic resin เป็นต้น (พรพรรณ นิธิอุทัย, 2536; บุญธรรม นิธิอุทัย, 2542)

### 2.3.3 ความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance)

ในอุตสาหกรรมยาง มีการวัดการฉีกขาดของยางอยู่บ่อยๆ ส่วนหนึ่งเป็นเพราะมีกำหนดไว้ในมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ยางหลายชนิด มาตรฐาน ASTM D 624 กล่าวว่า ค่าที่วัดได้จากการทดสอบด้วยวิธีหนึ่งมีคุณลักษณะทั่วไปตามชนิดชั้นทดสอบ ผลการทดสอบได้ค่าที่ถือเป็นเพียงค่าการวัดความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear Resistance) ของการทดสอบนั้นๆ เท่านั้น ไม่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับพฤติกรรมของการใช้งานของตัวผลิตภัณฑ์ในขณะที่ใช้งาน

ตามรูปที่ 2.6 แสดงรูปร่างชิ้นทดสอบแบบพิมพ์ B และ C ตามมาตรฐาน ASTM D 624 แบบพิมพ์ C ซึ่งเป็นแบบม้วนนั้น ไม่มีการเจาะให้เป็นรอยตัด ส่วนพิมพ์ B มีการทำรอยตัดไว้ก่อนการทดสอบ ชิ้นทดสอบอีกแบบหนึ่งคือ แบบขากางเกง อักษร F ในรูปแสดงทิศทางของแรงฉีก สำหรับยางสูตรหนึ่งๆ แรงฉีกเพิ่มขึ้นตามชนิดชิ้นทดสอบเรียงตามลำดับจากแบบขากางเกง พิมพ์ C และ พิมพ์ B ตามลำดับ รอยตัดในพิมพ์ B ทำหน้าที่เป็นตำแหน่งเริ่มต้นของการขยายตัวของการฉีกขาด และต้องระมัดระวังให้รอยตัดลึกเท่าๆ กันเสมอ เพราะปัญหาการควบคุมรอยตัดนี้เอง จึงทำให้ต้องออกแบบพิมพ์ C ขึ้นมาใช้อีกแบบหนึ่ง เนื่องจากผิวหักเป็นมุม ทำให้เกิดความเครียดสูงสุดขณะรับแรงดึง และเป็นตำแหน่งที่เกิดการฉีกและขาด ดังนั้นพิมพ์ C จึงให้ผลที่เปรียบเทียบกันได้ (Reproducibility) ดีกว่าถึงแม้จะให้ค่าต่ำกว่าพิมพ์ B ก็ตาม

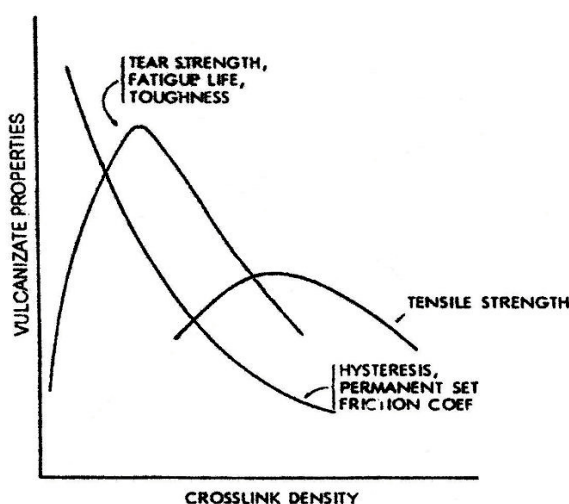


รูปที่ 2.6 ชิ้นทดสอบสำหรับทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดพิมพ์ C พิมพ์ B และแบบขากางเกง (ปรีชา ป้องภักย์, 2543)

ชิ้นทดสอบทั้งแบบพิมพ์ B และ C มีรูปร่างคล้ายคลึงกัน และต้องใช้แรงดึงค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับแบบขากางเกง เนื่องจากแรงดึงเกี่ยวข้องกับพลังงาน ซึ่งประกอบด้วย

พลังงาน ที่ใช้ยึดเข้ากับพลังงานที่ใช้ทำให้ยางฉีกและขาด ดังนั้นการใช้ชั้นทดสอบแบบพิมพ์ B และ C จึงเกี่ยวข้องกับระดับพลังงานที่สูงกว่าการใช้ชั้นทดสอบแบบขาทางแง ส่วนขาของยางไม่ค่อยยึดเท่าใด ซึ่งเมื่อหักออกจากพลังงานการฉีกขาดทั้งหมด จะได้พลังงานการฉีกขาด (Tearing Energy) มีหน่วยเป็น kN/m หรือ lbf/in การคำนวณค่าพลังงานการฉีกขาดด้วยชั้นทดสอบแบบขาทางแงจะทำได้ง่ายขึ้นถ้าใช้แถบขากว้างหรือเสริมส่วนขาด้วยเส้นใยให้แข็งแรงขึ้น ในกรณีเช่นนี้ ถ้าถือว่าส่วนขาไม่ยึดเลยจะได้พลังงานการฉีกขาดเท่ากับ  $2F/t$  เมื่อ  $F$  เป็นแรงฉีก และ  $t$  เป็นความหนา

สารตัวเติมและระบบการวัลคาไนซ์มีผลต่อสมบัติการฉีกขาดของยาง เขม่าดำมักทำให้รอยฉีกของยางตัวอย่างเปลี่ยนทิศทาง เรียกการฉีกลักษณะนี้ว่า การฉีกแบบเงื่อนปม (Knotty Tearing) และมักให้ค่าพลังงานการฉีกขาดสูง การเลือกระดับการวัลคาไนซ์ (Crosslink Density) ที่เหมาะสมก็ได้พลังงานการฉีกขาดสูงเช่นเดียวกัน แต่ระดับการวัลคาไนซ์ที่ให้พลังงานการฉีกขาดสูงจะมีค่าน้อยกว่าระดับที่ให้ความทนแรงดึงสูงสุด การฉีกขาด ความแข็งแรงดึง และสมบัติอื่นๆ ของยางแสดงได้ในกราฟเชิงอุดมคติดังรูปที่ 2.7 ซึ่งเป็นกราฟระหว่างสมบัติของยางกับระดับการคลอสลิงค์ แต่ต้องระลึกอยู่เสมอว่าปัจจัยอื่นๆ เช่น ชนิดยางและชนิดสารตัวเติมต่างมีผลต่อสมบัติเหล่านี้ด้วย



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของยางกับระดับการเชื่อมขวาง (ปรีชา ป้องภัย, 2543)

### 2.3.4 การสึกหรอ (Abrasion)

การทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอของยาง เป็นการวัดปริมาตรของยางที่หลุดออกไปจากเนื้อยาง ภายใต้สภาวะที่กำหนดไว้ เครื่องมือที่ใช้ทดสอบความสึกหรอของยาง



มีอยู่หลายชนิดด้วยกัน อาจแบ่งออกได้ตามชนิดของสารที่ทำให้ยางสึกหรอได้แก่ สารสึกหรอที่เป็นผง และสารสึกหรอที่เป็นของแข็ง

**แบบผง** การสึกหรอเนื่องมาจากสิ่งสัมผัสกับยางเป็นผงของแข็ง เช่น การสึกหรอของท่อพ่นทราย การสึกหรอของยางบุเครื่องสูบลม และการสึกหรอของสายพานลำเลียง เป็นต้น

**แบบของแข็ง** การสึกหรอเนื่องมาจากสิ่งสัมผัสกับยางเป็นชิ้นของแข็ง เช่น การสึกหรอของยางรถกับพื้นคอนกรีต และการสึกหรอของรองเท้า เป็นต้น

เครื่องมือที่เป็นของแข็งที่ใช้ทดสอบทำให้ยางสึกหรออาจเป็นแผ่นหินขัด แผ่นกระดาษทราย และแท่งโลหะ เป็นต้น การเลือกชนิดของตัวทำให้ยางสึกหรอควรพิจารณาว่าลักษณะของการสึกหรอเหมือนกับการใช้งานจริงหรือไม่ ผลของการทดสอบอาจจะให้ค่าที่แตกต่างไปจากการใช้งานจริงได้ การทดสอบนี้ไม่ควรจะใช้เป็นมาตรฐานในการซื้อขาย เนื่องจากมาตรฐานสำหรับห้องทดสอบต่างๆ ไม่อาจจะทำได้เหมือนกันจริง จุดมุ่งหมายของการทดสอบนี้เป็นเพียงแต่ใช้เปรียบเทียบข้อมูลในห้องปฏิบัติการเดียวกันเท่านั้น

เครื่องมือทดสอบความสึกหรอต่างชนิดกันให้ผลการเปรียบเทียบแตกต่างกัน ดังนั้นชนิดของเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบควรจะต้องเลือกให้เหมาะสมกับการใช้งานจริง ผลการทดสอบจะให้ออกมาในลักษณะของการเปรียบเทียบ โดยค่าออกมาเป็น “ดัชนีของการสึกหรอ” (Abrasion Index) หรือ (Wear Index) อันเป็นค่าความต้านทานต่อการสึกหรอของยางเมื่อเปรียบเทียบกับยางมาตรฐาน เครื่องมือในการทดสอบตามมาตรฐานมีหลายชนิด เช่น Du Pont abrader, Taper abrader, Akron abrader, Dunlop abrader, Pico abrader, NBS abrader และ Schiefer abrader เป็นต้น เครื่องแต่ละเครื่องเหมาะสำหรับการทดสอบยางแตกต่างกัน เช่น เครื่อง Akron เหมาะสำหรับการทดสอบยางรถยนต์ เครื่อง Du Pont เหมาะสำหรับการทดสอบยางรถยนต์ พื้นรองเท้า และพื้นรองเท้า เครื่อง Dunlop เหมาะสำหรับการทดสอบยางรถยนต์และให้ค่าที่เหมาะสมกับการทดสอบพื้นและพื้นรองเท้า รวมทั้งยางสายพานอีกด้วย เป็นต้น (บุญธรรม นิธิอุทัย และปรีชา ป้องภัย, 2534)

## 2.4 สมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties)

การทดสอบเชิงพลวัต (Dynamic Tests) หมายถึง การทดสอบเชิงกลพลวัต (Dynamic Mechanical Tests) เป็นการทดสอบที่ความเค้น-ความเครียดเป็นแบบมีคาบ (Cyclic Stress-Strain) เพื่อวัดสมบัติเชิงพลวัตของยางวัลคาไนซ์ การทดสอบเชิงพลวัตไม่ใช่การทดสอบ

หักงอ เพราะการทดสอบหักงอต้องการวัดการเกิดและการขยายตัวของรอยแตก (crack initiation and crack-growth) และวัฏอายุความล้า (fatigue life) ซึ่งเป็นสมบัติสุดท้าย

การทดสอบเชิงพลวัตเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non Destructive Test) ในขณะที่การทดสอบการหักงอเป็นการทดสอบแบบทำลาย (Destructive Test) สมบัติเชิงพลวัตเป็นสมบัติที่สำคัญต่อการออกแบบผลิตภัณฑ์อย่างที่ใช้งานทางวิศวกรรม เช่น ยางสปริง (rubber spring) หรือยางกันกระแทก (rubber dampers) การทดสอบเชิงพลวัตหมายถึง การที่ทำให้ยางตัวอย่างถูกกระทำด้วยความเค้น/ความเครียดที่แปรค่าอย่างรวดเร็ว ขึ้นลงและต่อเนื่องเป็นคลื่น แบ่งได้เป็น 3 ลักษณะคือ

- ความเค้น/ความเครียดแบบต่อเนื่องและแอมพลิจูดคงที่
- ความเค้น/ความเครียดแบบต่อเนื่องแต่แอมพลิจูดลดลงตามเวลา
- ความเค้น/ความเครียดแบบครั้งคลื่นทยอยไปเป็นลำดับ

ยางวัลคาไนซ์เป็นวัสดุวิสโคอิลาสติก ทำให้สมบัติพลวัตประกอบด้วยองค์ประกอบ

2 ส่วน คือ

1) สมบัติที่สะสมไว้ได้ (storage property) เป็นสมบัติเชิงพลวัตส่วนใหญ่ของยาง แสดงความสามารถเก็บพลังงานที่กระทำจากภายนอกไว้โดยการเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่น และคืนพลังงานกลับสู่รูปร่างเดิมได้ทันทีที่ที่แรงหยุดกระทำ สมบัติดังกล่าวนี้คือ ความยืดหยุ่นอย่างยาง (rubber elasticity) หรือความเป็นสปริงของยาง

2) สมบัติสูญเสีย (loss property) ซึ่งเป็นสมบัติเชิงพลวัตส่วนน้อย แสดงขนาดการสูญเสียพลังงาน โดยรูปร่างเกิดการเปลี่ยนอย่างถาวร เนื่องจากการไหลหรือการลื่นไหลของโมเลกุล สมบัติแห่งการไหลได้ดังกล่าวคือ ความหนืด (viscosity) หรือการหน่วง (damping)

ดังนั้น เมื่อนำยางวัลคาไนซ์มารับแรง (รับโหลด หรือความเค้น) ที่แปรค่าตามเวลา การเปลี่ยนแปลงการผิดรูป (การยืด หด หรือความเครียด) จึงเกิดไม่ทัน หรือเกิดการล่าช้า (time lag) ขึ้น เช่น ถึงค่าศูนย์หรือค่าสูงสุดต่ำสุดไม่พร้อมกัน วัดขนาดด้วยค่า มุมต่าง (phase difference,  $\delta$ ) หรือ มุมสูญเสีย (loss angle) ซึ่งเกิดขึ้นในทุกรอบของการรับแรง ผลคือ เกิดการสูญเสียพลังงานขึ้นในเนื้อยางในรูปความร้อนในทุกรอบของการแกว่ง การสั่น หรือการกระแทกที่ยางถูกกระทำ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ยางทุกชนิดเมื่อใช้งานพลวัต

การทดสอบเชิงพลวัต เป็นการวัดมอดุลัสเชิงซ้อน (complex modulus,  $E^*$ ,  $G^*$ ) ของยาง โดย E หมายถึงมอดุลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus or Young's Modulus) และ G หมายถึงมอดุลัสเฉือน (Shear Modulus) มอดุลัสเชิงซ้อนแสดงคุณลักษณะพื้นฐานของยางวัลคาไนซ์ 2 ประการคือ

(1) In-phase modulus ( $E'$ ,  $G'$ ) ซึ่งเป็นมอดูลัสสะสม (storage modulus) แสดงความยืดหยุ่น หรือความสามารถเก็บพลังงานจากภายนอกโดยการผิดรูป (deformation)

(2) Out-of-phase modulus ( $E''$ ,  $G''$ ) ซึ่งแสดงเป็นมอดูลัสสูญเสีย (loss modulus) ที่แสดงส่วนของพลังงานกลที่สูญเสียไปในรูปความร้อน

มอดูลัสเชิงซ้อนมีความสัมพันธ์กับมอดูลัสสะสมและมอดูลัสสูญเสีย ดังสมการ (2.1) (2.2) (2.3) และ (2.4) ทั้ง 3 ค่าเป็นปริมาณเวกเตอร์

$$E^* = E' + iE'' \quad (2.1)$$

สำหรับ Young's Modulus

$$\text{และ} \quad G^* = G' + iG'' \quad (2.2)$$

สำหรับ Shear Modulus

$$\text{และ} \quad E^* = [(E')^2 + (E'')^2]^{(1/2)} \quad (2.3)$$

$$G^* = [(G')^2 + (G'')^2]^{(1/2)} \quad (2.4)$$

อัตราส่วนระหว่างมอดูลัสทั้งสองเรียกว่า แทนเจนต์สูญเสีย (loss tangent) ดังสมการ

$$\text{Tan } \delta = \frac{E''}{E'} = \frac{G''}{G'} \quad (2.5)$$

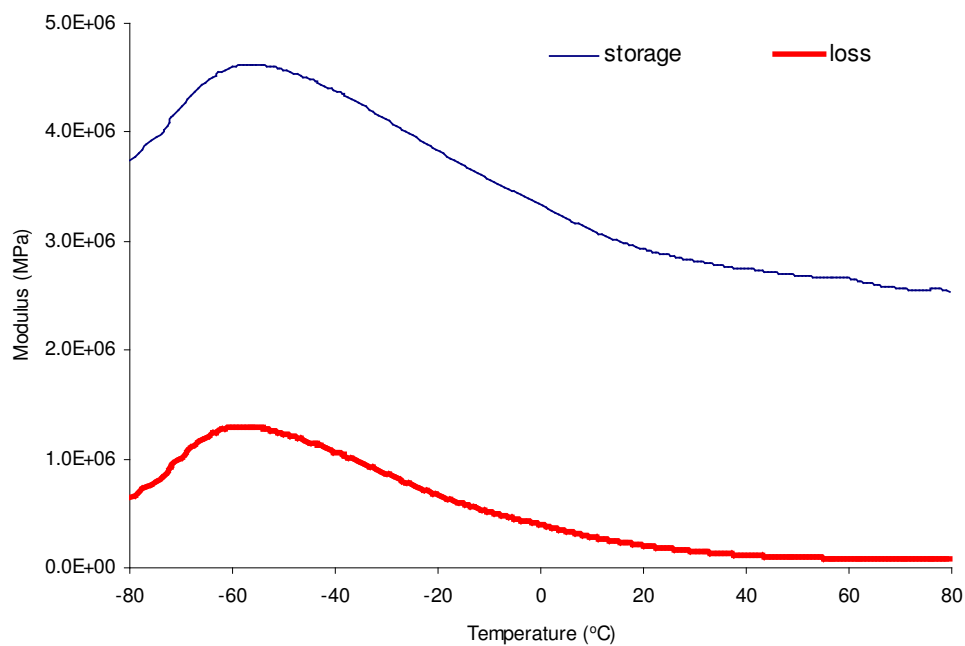
แทนเจนต์สูญเสียแสดงความเป็นวิสโคอีลาสติกของยาง

ในทางเทคโนโลยี แทนเจนต์สูญเสียบอกได้ทั้งชนิดของยาง ชนิดและปริมาณสารตัวเติม และสถานะการวัลคาไนซ์ได้ จะเห็นว่า การทดสอบเชิงสถิต มอดูลัสมีองค์ประกอบเดียวคือ Young's Modulus ( $E$ ) และ Shear Modulus ( $G$ ) นอกจากชนิดและองค์ประกอบของสูตรยางแล้ว มอดูลัสเชิงพลวัตยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ ดังต่อไปนี้

- สภาวะการทดสอบ
- รูปทรงและขนาดของชิ้นทดสอบ
- ชนิดของการผิดรูปว่าเป็นการดึง โต้ งอ อัด เหนือ หรือบิด
- แอมพลิจูดของการผิดรูป
- ประวัติการผิดรูป (strain history)
- ความถี่ของการกระทำ

เครื่องทดสอบยางเชิงพลวัตคือ อุปกรณ์ที่สามารถทำให้เกิดการกระทบ หรือ กระแทก (impact) หรือเกิดการแกว่งหรือการสั่น (oscillation) ต่ออย่างตัวอย่าง เครื่องทดสอบ

สามารถแปรขนาดการกระแทกหรือการแกว่ง แปรอัตราหรือความถี่ และอุณหภูมิของการทดสอบ ได้ (ชลดดา เลวิส, 2546) ซึ่งตัวอย่างของผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงพลวัตด้วย เครื่อง Dynamic Mechanical Thermal Analyzer (DMTA) แสดงอยู่ในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างผลการทดสอบผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเชิงพลวัตของยางคอมโพสิต