

บทที่ 2

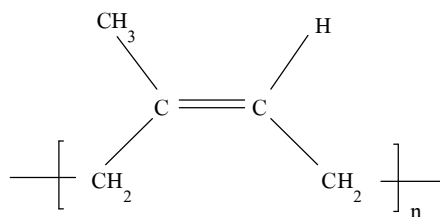
ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางธรรมชาติ

2.1.1 โครงสร้างทางเคมีและสมบัติ

ยางธรรมชาติเป็นสารพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเฉลี่ยโดยน้ำหนักประมาณ 30,000 ถึง 10,000,000 (De and White, 2001) มีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลกว้าง ยางธรรมชาติมีความถ่วงจำเพาะ 0.934 ที่ 20 องศาเซลเซียส และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อยางถูกยืดหรือเย็นตัวลง มีดัชนีหักเหของแสงเท่ากับ 1.5215 – 1.5238 ที่ 20 องศาเซลเซียส (Hoffmann, 1989)

ยางธรรมชาติมีสูตรโมเลกุลเป็น cis-1,4-polyisoprene



ภาพประกอบ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติโดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 5,000 ถึง 15,000

โครงสร้างที่มีผลกระทบต่อสมบัติของยาง คือ

- 1) ประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนล้วน ทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือน้ำมันพืช แต่จะเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี
- 2) พันธะคู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา ทำให้สามารถวัลคาไนซ์ได้ด้วยกำมะถัน และทำให้ยางทำปฏิกิริยาได้ง่ายด้วยออกซิเจนและโอโซน ซึ่งเป็นสาเหตุของการเสื่อมของยาง ทำให้การออกสูตรยางธรรมชาติจำเป็นต้องมีสารกันเสื่อม (antioxidant) และสารต้าน โอโซน (antiozonant) ร่วมด้วย
- 3) โซโมเลกุลที่เคลื่อนไหวหักงอไปมาได้ง่ายทำให้ยางธรรมชาติคงสภาพยืดหยุ่นได้ดี อาจจะสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำมาก ยางธรรมชาติมีค่า T_g เท่ากับ -72 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่ายางสังเคราะห์อื่นๆ ยกเว้นเฉพาะยางบิวทาไดอีนและยางซิลิโคนเท่านั้น

4) ความสม่ำเสมอในโครงสร้างโมเลกุล ทำให้ยางธรรมชาติตกผลึกได้เมื่อยืด ทำให้มีความต้านทานแรงดึงสูงมากและทำให้มีค่า green strength สูง และ tack ดี

5) น้ำหนักโมเลกุลสูง ทำให้ยางแข็งเกินไปที่จะนำไปแปรรูปโดยตรง ดังนั้นต้องนำยางไปบด เพื่อให้ได้โมเลกุลเล็กลงก่อนนำไปใช้งาน

2.1.2 การจัดเกรดยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติที่ผลิตในประเทศไทยทั้งยางแท่งและยางแผ่นมีวัตถุประสงค์และวิธีการเตรียมที่แตกต่างกัน ซึ่งวัตถุประสงค์และวิธีการเตรียมอาจส่งผลกระทบต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงมีความสำคัญที่ต้องมีการจัดเกรดยางประเภทต่าง ๆ เพื่อความสะดวกในการพิจารณาเลือกนำไปใช้งาน (เสาวนีย์, 2543)

2.1.2.1 ยางแผ่นรมควัน (ribbed smoked sheet) เรียกย่อว่า RSS เป็นยางที่ทำมาจากน้ำยางโดยตรง ทำให้แห้งโดยวิธีการรมควันเพื่อป้องกันเชื้อรา ไม่มีมาตรฐานการตรวจสอบคุณภาพยางที่แน่นอนเหมือนยางแท่ง

2.1.2.1.1 การจัดชั้นยางแผ่นรมควัน ตามหนังสือ The Green Book ได้กำหนดการแบ่งชั้นยางแผ่นรมควันโดยใช้สายตาได้ 6 ชั้น ดังนี้

2.1.2.1.1.1 ยางแผ่นรมควันชั้น 1 พิเศษ (RSS 1X)

ยางชนิดนี้ต้องเป็นยางแผ่นใสที่มีคุณภาพดี และมีความสม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่น สะอาดและแห้งสนิท ไม่มีรอยดำหนิ จุดดำงดำหรือรอยเปื้อน ไม่มีเม็ดทรายหรือสิ่งสกปรกอื่น ไม่มีราสนิมหรือราแดงบนผิวของยางแผ่น ยางแผ่นต้องไม่รมควันมากเกินไปจนมีสีคล้ำ และไม่เหนียวตรงจุดใดจุดหนึ่ง สำหรับแผ่นยางที่ใช้ห่อตรงผิวนอกของก้อนยางอาจมีฟองเล็ก ๆ ขนาดเท่าหัวเข็มหมุดกระจายอยู่เล็กน้อยได้

2.1.2.1.1.2 ยางแผ่นรมควันชั้น 1 (RSS 1)

แผ่นยางต้องแห้งและสะอาด ไม่มีเม็ดทรายหรือสิ่งสกปรกอื่นเจือปนบนแผ่นยาง ไม่มีสนิมหรือราขึ้นบนยาง แผ่นยางอาจรมควันไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยได้ แต่สีต้องไม่คล้ำจนเกินไป และไม่เหนียวตรงจุดใดจุดหนึ่ง บนผิวของยางแผ่นที่ใช้ห่อก้อนยางหรือตรงผิวของก้อนยางที่ติดอยู่กับยางที่ใช้ห่ออาจมีราแห้งปะปนอยู่ปริมาณเล็กน้อย มีฟองอากาศเล็ก ๆ ขนาดเท่าหัวเข็มหมุดกระจายอยู่เล็กน้อย

2.1.2.1.1.3 ยางแผ่นรมควันชั้น 2 (RSS 2)

แผ่นยางต้องแห้งและสะอาด ไม่มีดำหนิจากรอยเปื้อนหรือฟอง ไม่มีเม็ดทรายหรือสิ่งสกปรกอื่นเจือปน บนผิวของยางแผ่นที่ใช้ห่อ หรือ

ตรงผิวของยางก้อน ยางแผ่นรมควันอาจมีฟองอากาศ มีราสนิม หรือราแห้งขึ้นปะปนเล็กน้อยได้ แต่ต้องมีปริมาณไม่เกินกว่า 5% ของตัวอย่างที่แสดงไว้ สีของยางแผ่นรมควันอาจไม่สม่ำเสมอ

2.1.2.1.1.4 ยางแผ่นรมควันชั้น 3 (RSS 3)

แผ่นยางต้องแห้ง สีอาจไม่ใส มีฟองอากาศ เล็ก ๆ มีเศษผงสิ่งสกปรก หรือเศษเปลือกต้นยางที่กริดปะปนอยู่ปริมาณเล็กน้อยได้แต่ต้องไม่มีรอยพุพอง ไม่มีเม็ดทรายหรือสิ่งสกปรกขณะห่อยางก้อน บนแผ่นยางที่ใช้ห่อหรือภายในยางแผ่นอาจมีราสนิมหรือราแดงและราแห้งขึ้นเล็กน้อยได้ แต่ต้องมีปริมาณไม่มากกว่า 10% ของตัวอย่างที่แสดงไว้ ไม่มีจุดรมควันไม่แห้งหรือจุดเหนียวบนยางแผ่น ยางอาจมีสีคล้ำบ้างแต่ต้องมีสีไม่ทึบจนดำ

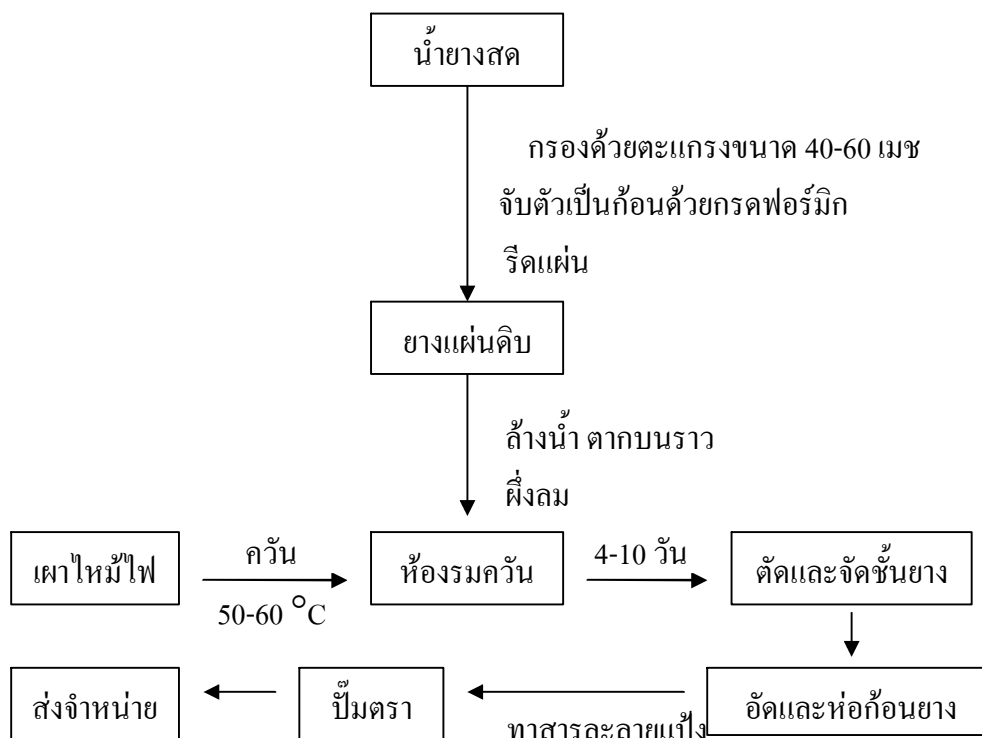
2.1.2.1.1.5 ยางแผ่นรมควันชั้น 4 (RSS 4)

ยางแผ่นต้องแห้ง มีฟองอากาศ เศษผงสิ่งสกปรกหรือเปลือกไม้ขนาดกลางปะปน มีรอยเปื้อนจาง ๆ เหนียวเล็กน้อย บนแผ่นยางที่ใช้ห่อหรือภายในยางแผ่นรมควันอาจมีราสนิม หรือราแดงและราแห้งปะปนอยู่เล็กน้อยปริมาณมากกว่า 20% ของตัวอย่างที่แสดงไว้ แผ่นยางต้องไม่มีจุดเหนียวหรือจุดรมควันไม่แห้ง ไม่มีตำหนิจากรอยพุพอง ไม่มีเม็ดทรายหรือสิ่งสกปรกอื่นปน ยางแผ่นอาจมีสีคล้ำได้แต่สีไม่ทึบจนดำแบบถูกไฟไหม้

2.1.2.1.1.6 ยางแผ่นรมควันชั้น 5 (RSS 5)

ยางแผ่นต้องแห้ง มีฟองอากาศและผงเปลือกไม้ขนาดค่อนข้างใหญ่ มีรอยฟองเล็ก ๆ รอยเปื้อน สีคล้ำ เหนียวและเหนอะหนะเล็กน้อยได้ บนแผ่นยางที่ใช้ห่อหรือภายในยางแผ่นรมควันอาจมีราสนิม หรือราแดงและราแห้งปะปนอยู่เล็กน้อยปริมาณมากกว่า 30% ของตัวอย่างที่แสดงไว้ แผ่นยางต้องไม่พุพองมากและไม่เหนียวจนเกินไป ไม่มีเม็ดทรายหรือสิ่งสกปรกอื่น ๆ ยางแผ่นอาจมีสีคล้ำได้แต่สีไม่ทึบจนไหม้ดำ

2.1.2.1.2 การผลิตยางแผ่นรมควัน



ภาพประกอบ 2.2 การผลิตยางแผ่นรมควัน

2.1.2.1.3 การใช้งาน

ยางแผ่นรมควันใช้เป็นวัตถุดิบในการทำผลิตภัณฑ์ยางที่ไม่ใช่ยางสี ซึ่งต้องการทนการเสียดสีและมีความยืดหยุ่นดี ได้แก่

1. ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ เช่น ยางล้อรถยนต์ ยางในจักรยาน
2. ใช้ในอุตสาหกรรมวิศวกรรม เช่น ยางรองคอสะพาน ยางกันเขื่อน
3. ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิต เช่น ยางลูกกลิ้ง ยางสายพานลำเลียง
4. ใช้ในอุตสาหกรรมคริวเรือ เช่น ยางปะเก็นท่อน้ำ ยางท่อแอร์

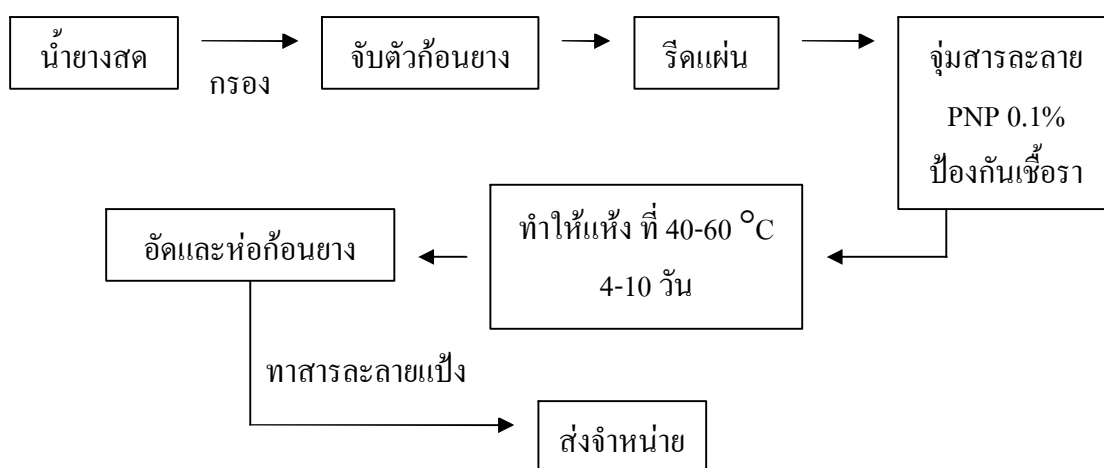
2.1.2.2 ยางแผ่นผึ่งแห้ง (air dried sheet) เรียกว่า ADS เป็นยางที่ผลิตขึ้นเพื่อใช้ทดแทนยางเครพขาว มีการควบคุมการผลิตแต่ละขั้นตอนอย่างพิถีพิถัน ทำให้แห้งโดยไม่ต้องรมควัน จะใช้อากาศร้อนหรืออากาศธรรมดาแทน

2.1.2.2.1 ประเภทของยางแผ่นผึ่งแห้ง ยางแผ่นผึ่งแห้ง สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.1.2.2.1.1 ยางแผ่นผึ่งแห้งที่ทำให้แห้งโดยวิธีการผึ่งลม (air dried sheet) ยางชนิดนี้สามารถผลิตขึ้นโดยไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงความใสของสี เพียงแต่เป็นยางที่ทำให้แห้งโดยการไม่รมควันเท่านั้น โดยทั่วไปอาจไม่แห้งสนิทและมีค่อนข้างคล้ำ

2.1.2.2.1.2 ยางแผ่นไม่รมควันที่มีชื่อทางการค้าว่า pale amber unsmoked sheet (PAUS) ยางแผ่นชนิดนี้จำเป็นต้องควบคุมการผลิตทุกขั้นตอนอย่างพิถีพิถัน และอบให้แห้งด้วยอากาศร้อน เพื่อให้ได้ยางที่แห้งสนิทและมีสีสวย

2.1.2.2.2 การผลิตยางแผ่นผึ่งแห้ง



ภาพประกอบ 2.3 การผลิตยางแผ่นผึ่งแห้ง

2.1.2.2.3 การใช้งาน

ยางแผ่นผึ่งแห้งสามารถใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนยางเครพขาว เพื่อทำผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีต่าง ๆ ยกเว้นผลิตภัณฑ์ประเภทอาหารหรือยาซึ่งระบุเกี่ยวกับความสะอาดและปลอดภัยจากสารป้องกันเชื้อราพวกไนโตรฟินอล เช่น

1. อุตสาหกรรมการทำรองเท้า
2. อุตสาหกรรมการผลิตกระเป๋าหนังร้อน หมวกว่ายน้ำ

3.อุตสาหกรรมเส้นด้ายยางยืด

4.อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางโปรงใสประเภทต่าง ๆ

เช่น ยางรัดของ

2.1.2.3 ยางเครพ (crepe rubber) เป็นยางที่ผลิตขึ้นโดยใช้วัตถุดิบจากน้ำยางธรรมชาติ หรือยางซึ่งจับตัวเป็นก้อน เช่น ยางก้อนถ้วย ยางติดเปลือกไม้ เป็นต้น ยางเครพที่ผลิตจากน้ำยางเป็นยางเครพที่มีคุณภาพดี ได้แก่ เครพขาว (white crepe) หรือยางเครพสีจาง (pale crepe) ส่วนยางเครพที่ผลิตจากก้อนยางจับตัว เป็นยางเครพที่มีคุณภาพต่ำ ขึ้นอยู่กับปริมาณสิ่งสกปรกที่เจือปนอยู่มากน้อย

2.1.2.3.1 ประเภทของยางเครพ

2.1.2.3.1.1 ยางเครพขาวและเครพสีจาง (white and pale crepe) ยางเครพชนิดนี้ผลิตจากน้ำยาง ยางแผ่นที่ผลิตได้จะต้องสะอาดและแห้ง มีสีขาวหรือจางอย่างสม่ำเสมอ ไม่มีสิ่งสกปรกเจือปน

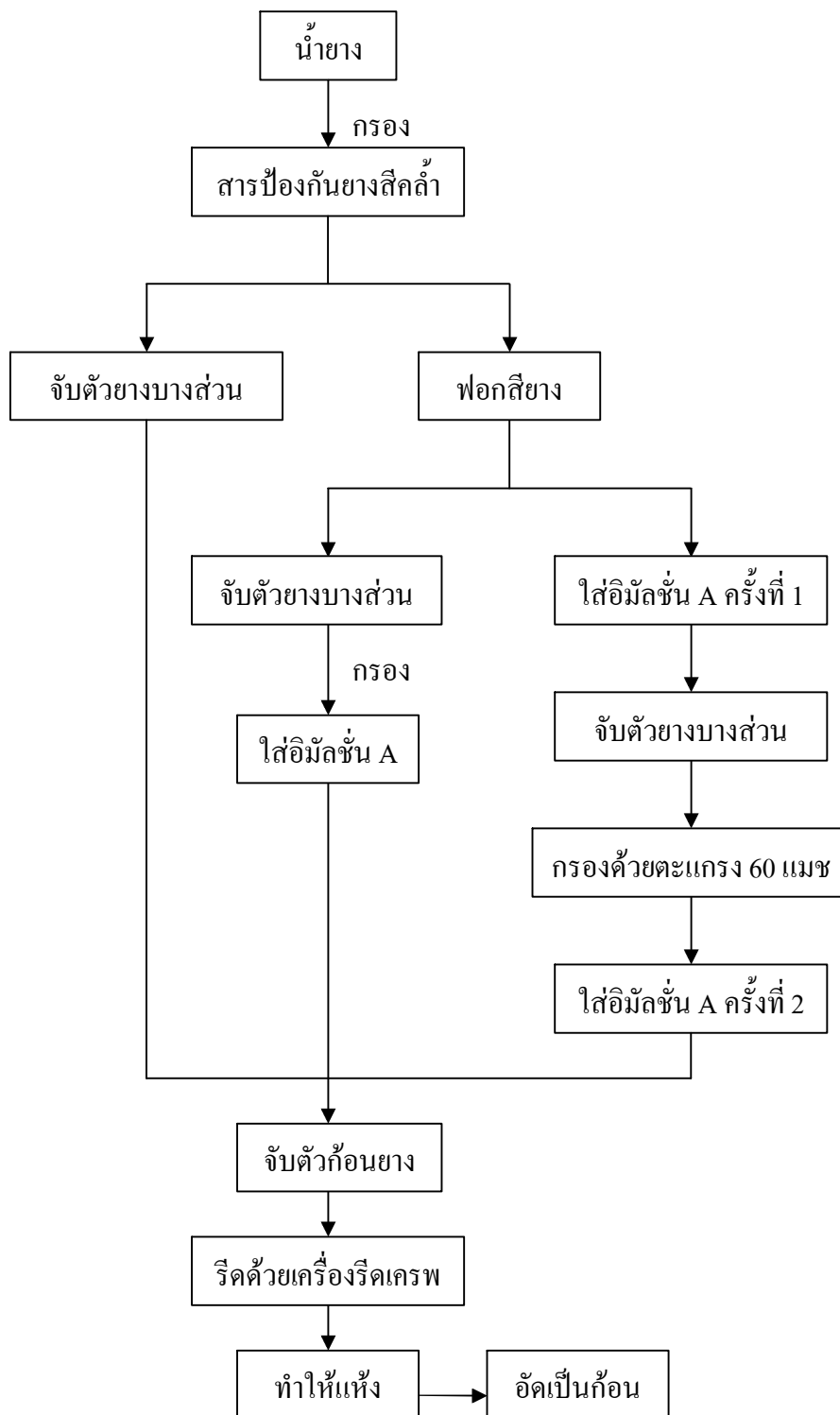
2.1.2.3.1.2 ยางเครพสีน้ำตาล (brown crepe) ยางเครพชนิดนี้ผลิตจากก้อนยางจับตัวในถ้วยรองรับน้ำยาง เป็นเศษยางคุณภาพ ห้ามใช้เศษยางที่ตกอยู่ตามพื้นหรือเศษยางแผ่นรมควัน

2.1.2.3.1.3 ยางเครพคอมโป (compo crepe) ยางชนิดนี้ทำมาจากยางก้อนจับตัว ยางเส้นตามรอยกรีด เศษยางตัดทิ้งจากยางแผ่นรมควัน ยางก้อนเปียก การทำยางชนิดนี้จำเป็นต้องใช้เครื่องบดล้างยางก่อนเข้าเครื่องเครพรีดยางเป็นแผ่น ห้ามใช้เศษยางที่ตกอยู่ตามพื้น

2.1.2.3.1.4 ยางเครพสีน้ำตาลชนิดบาง วัตถุดิบที่ใช้เป็นยางก้อนเปียก ยางแผ่นดิบ ยางก้อนจับตัว หากใช้ยางติดเปลือกไม้ต้องล้างทำความสะอาดเปลือกไม้ ออกให้หมด ห้ามใช้เศษยางที่ตกตามพื้น

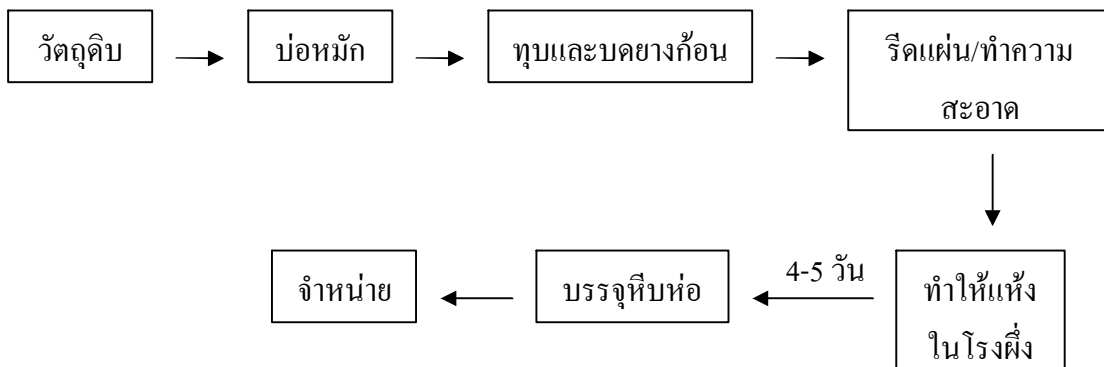
2.1.2.3.2 การผลิตยางเครพ

2.1.2.3.2.1 การผลิตยางเครพขาวหรือเครพสีจาง



ภาพประกอบ 2.4 การผลิตยางเครพขาวหรือเครพสีจาง

2.1.2.3.2 การผลิตยางเครพน้ำตาล



ภาพประกอบ 2.5 การผลิตยางเครพน้ำตาล

วัตถุดิบในการผลิตยางเครพน้ำตาล ได้แก่ ยางจับตัวกันด้วย ชี้อย่าง เศษยางตามรอยกรีดหรือตาม เปลือกไม้แหล่งต่าง ๆ เศษยางแผ่นรมควันหรือยางแผ่นที่ไม่ได้คุณภาพ เป็นต้น

2.1.2.3.3 การใช้งาน

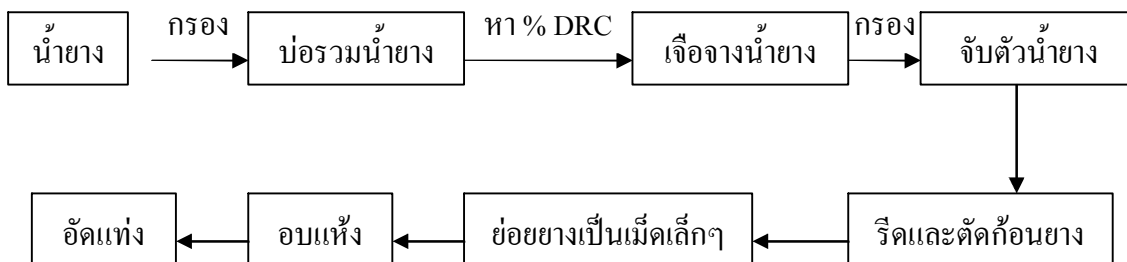
ยางเครพขาวหรือยางเครพสีจางเหมาะสำหรับทำ ผลิตภัณฑ์ยางประเภทยางสี ได้แก่ ยางกระเป๋าน้ำร้อน ยางรัดของ เป็นต้น ส่วนยางเครพน้ำตาล เหมาะสำหรับทำผลิตภัณฑ์ยางที่ไม่ค้ำนึ่งถึงสี ไม่ต้องการความแข็งแรงมากนักและราคาต้นทุนต่ำ ได้แก่ ยางปูพื้น ยางกันโคลน ยางพองน้ำ เป็นต้น

2.1.2.4 ยางแท่ง (block rubber) ยางแท่งเป็นยางธรรมชาติที่ผลิตโดยมีการ

ควบคุมคุณภาพให้ได้ตามมาตรฐาน มีการระบุคุณภาพของยางดิบที่ผลิตได้อย่างแน่นอน

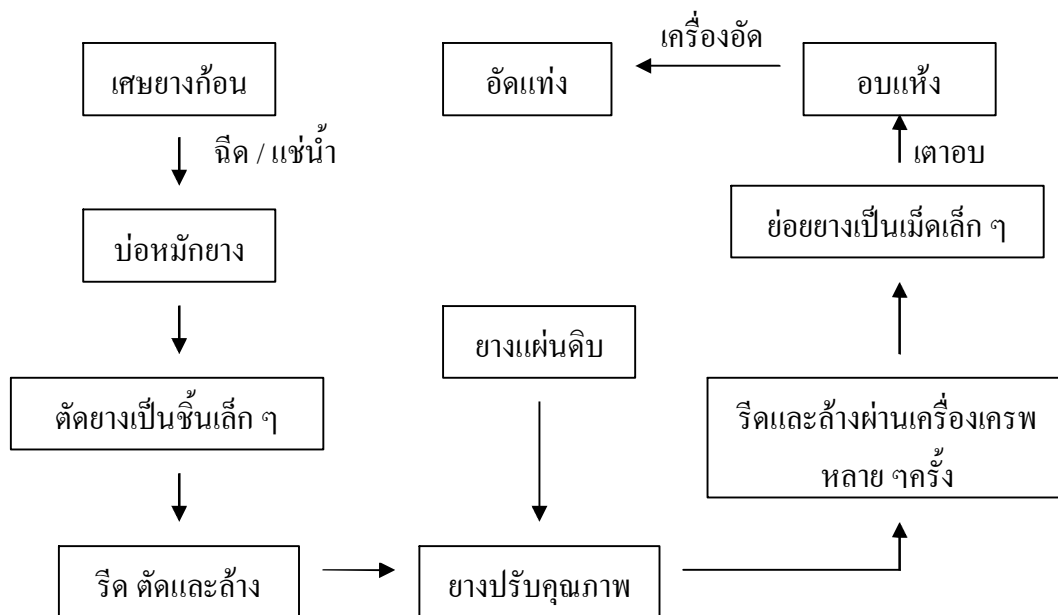
2.1.2.4.1 การผลิตยางแท่ง

2.1.2.4.1.1 การผลิตยางแท่งจากน้ำยาง



ภาพประกอบ 2.6 การผลิตยางแท่งโดยใช้น้ำยาง

2.1.2.4.1.2 การผลิตยางแท่งจากก้อนยางจับตัว



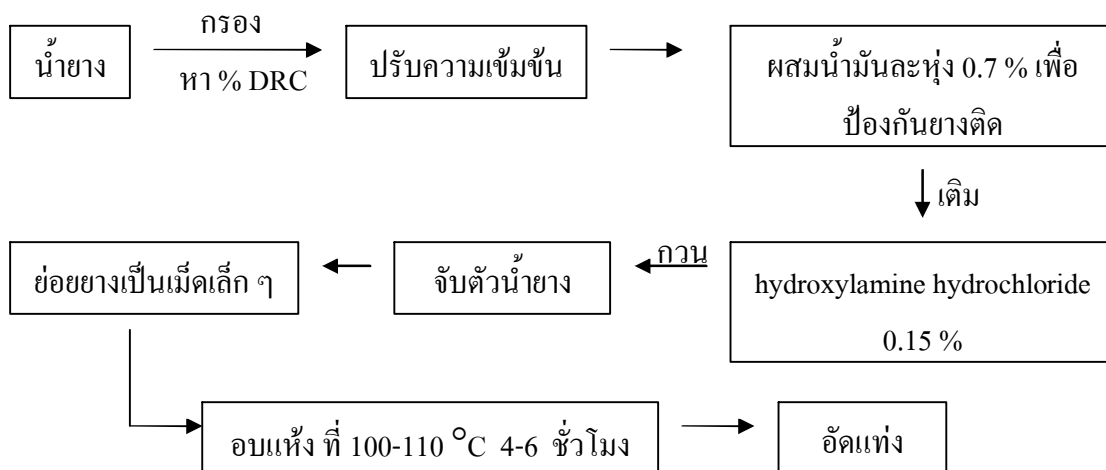
ภาพประกอบ 2.7 การผลิตยางแท่งโดยใช้ยางก้อนจับตัว

2.1.2.5 ยางแท่งความหนืดคงที่ (constant viscosity rubber) ยางธรรมชาติ เมื่อตั้งทิ้งไว้ความหนืดจะค่อยๆเพิ่มขึ้น ทำให้ต้องเสียพลังงานในการแปรรูปมากขึ้นกว่าเดิม ปรากฏการณ์ของการเพิ่มความหนืดของยาง เรียกว่า storage hardening ยางที่เตรียมให้มีความหนืดคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลง เรียกว่า ยาง CV เป็นยางที่เตรียม โดยการนำน้ำยางมาใส่สารเคมีที่ใช้ควบคุมความหนืดของยาง แล้วนำไปจับตัวให้เป็นก้อน ทำออกมาในรูปของยางแท่งต่อไป

สารเคมีที่ใช้ควบคุมความหนืดของยาง เช่น กลุ่ม monofunctionaldehydic condensing reagents ได้แก่ ไฮดรอกซิลามีน ไฮโดรคลอไรด์ (hydroxylamine hydrochloride) ไฮดรอกซิลามีน นิวตรอนซัลเฟต (hydroxylamine neutralsulphate) และเซมิคาร์บาไซด์ ไฮโดรคลอไรด์ (semicarbazide hydrochloride) เป็นต้น

2.1.2.5.1 การผลิตยางแท่งความหนืดคงที่

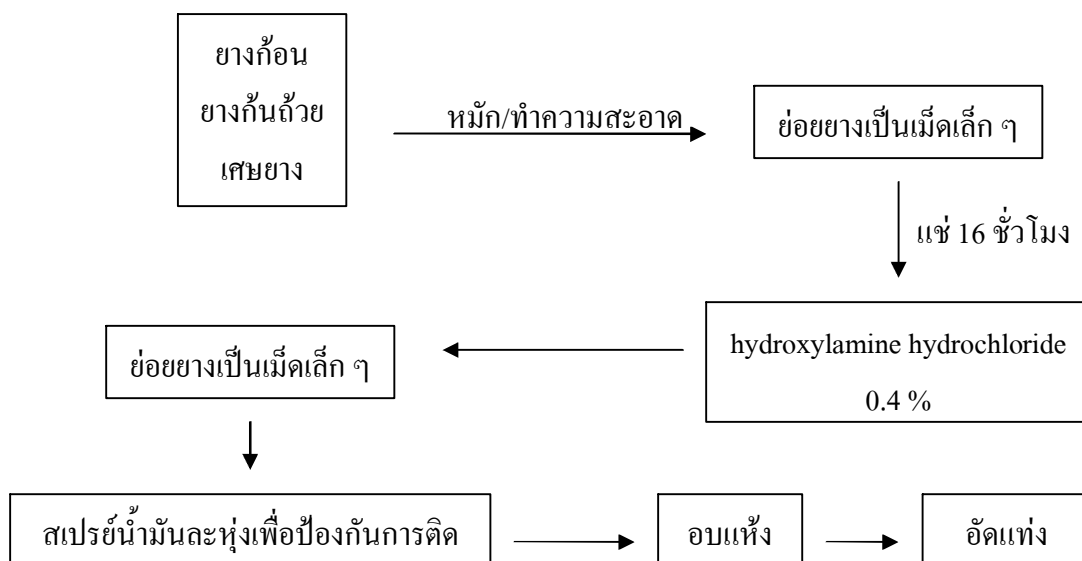
2.1.2.5.1.1 การผลิตยางแท่งความหนืดคงที่จากน้ำยาง



ภาพประกอบ 2.8 การผลิตยางแท่งความหนืดคงที่จากน้ำยาง

2.1.2.5.1.2 การผลิตยางแท่งความหนืดคงที่จากยาง

ก้อนจับตัว



ภาพประกอบ 2.9 การผลิตยางแท่งความหนืดคงที่จากยางก้อนจับตัว

2.1.2.6 ยางskim (skim rubber) ยางskim คือ ยางธรรมชาติที่เป็นผลพลอยได้จากการทำน้ำยางข้น ทำโดยการนำน้ำยางสดมาเซนตริฟิวจ์ แยกน้ำและอนุภาคเม็ดยางออกไป จากนั้น อนุภาคเม็ดยางส่วนใหญ่ซึ่งเบากว่าน้ำ จะแยกออกไปเป็นน้ำยางข้น มีเนื้อยางอยู่ประมาณ 60-63 % ที่เหลือเป็นน้ำ ส่วนทางด้านน้ำจะมีอนุภาคเม็ดยางขนาดเล็กๆปนออกมาด้วย น้ำส่วนนี้จะมีเนื้อยางอยู่ประมาณ 3-6 % เรียกน้ำยางนี้ว่า น้ำยางskim (skim latex) ซึ่งเมื่อนำกรดใส่ลงไป น้ำยางskimจะทำให้ยางแยกตัวออกมา น้ำยางดังกล่าวมารีดแผ่น ทำให้แห้ง ได้ยางที่เรียกว่า ยางskim

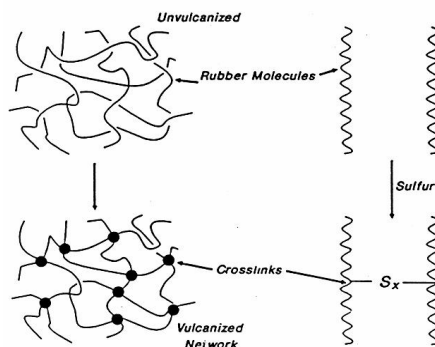
ยางskimมีส่วนประกอบเหมือนยางปกติทุกประการ ยกเว้นมีปริมาณไนโตรเจนและปริมาณสารที่ระเหยได้สูงกว่ายางธรรมดาทั่วไป ยางskimมีไนโตรเจนประมาณ 2 % และสารที่ระเหยได้ประมาณ 1.5 %

การมีไนโตรเจนในยางสูงทำให้เกิดผล ดังนี้

1. ยางskimสกอซเร็วกว่ายางธรรมดา โดยเฉพาะเมื่อวัลคาไนซ์ด้วยสารตัวเร่งที่เป็นกรด
2. ยางskimแข็งกว่ายางปกติ
3. ยางskimมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่ายางปกติ

2.2 การวัลคาไนซ์

กระบวนการวัลคาไนซ์คือ กระบวนการเปลี่ยนแปลงยางที่อยู่ในสภาพที่ไม่คงตัวให้เป็นยางที่รักษารูปร่างได้ในลักษณะยืดหยุ่น (elastic) หรือแข็งตึง (stiffness) โดยการใช้สารวัลคาไนซ์ (vulcanizing agent) ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลตรงจุดที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (Morrison and Porter, 1983) สารวัลคาไนซ์ที่สำคัญ คือ กำมะถัน ซึ่งเป็นสารตัวแรกที่ใช้วัลคาไนซ์ยางธรรมชาติ เมื่อนำกำมะถันใส่เข้าไปในยางธรรมชาติแล้วนำยางนั้นมาให้ความร้อน จะเกิดการวัลคาไนซ์ขึ้น ซึ่งจะทำให้ยางมีสมบัติดีขึ้น คือ เมื่อร้อนไม่เหลว เมื่อเย็นไม่แข็ง ไม่เหนียว ไม่ละลายในตัวทำละลาย เป็นต้น เพราะกำมะถันทำให้โมเลกุลของยางมาเชื่อมต่อกัน ซึ่งการเชื่อมต่อกันระหว่างโมเลกุลนี้เรียกว่าการเกิดพันธะเชื่อมโยง (crosslink)



ภาพประกอบ 2.10 การเกิดพันธะเชื่อมโยงในโมเลกุลยาง (Coran, 1964)

2.2.1 การวัลคาไนซ์โดยใช้กำมะถัน (sulfur vulcanization)

2.2.1.1 ระบบการวัลคาไนซ์

ระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันของยางธรรมชาติมีอยู่ 3 ระบบด้วยกัน (พรพรรณ, 2540) คือ

2.2.1.1.1 ระบบกำมะถันปกติ (conventional system) เป็นระบบที่มีราคาถูกที่สุดในระบบทั้งหมด แต่ละพันธะเชื่อมโยงจะมีกำมะถันอยู่หลายอะตอม (polysulphidic crosslink) จึงให้สมบัติทางเชิงกล เช่น ความทนทานต่อแรงดึงดี ความต้านทานต่อการฉีกขาดและความต้านการล้าดี และมีสมบัติในการต้านทานตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำดีมาก แต่ไม่ต้านสมบัติการถดถอยของสมบัติหลังได้รับความร้อน (reversion) ส่วนสมบัติในการต้านทานต่อความร้อนด้านการต้านความเสื่อม และสมบัติการจับตัวเมื่อได้รับแรงอัด (compression set) ของยางจะด้อยกว่าระบบอื่น ๆ

ตัวอย่าง การใช้กำมะถันและสารตัวเร่งในระบบนี้ ในหน่วย phr เป็นดังนี้

กำมะถัน 2 – 3.5 + sulphenamide 0.5 – 1

กำมะถัน 2 – 3.5 + thiazole 0.5 – 1 + DPG หรือ TMTD 0.1 – 0.5

กำมะถัน 2 – 3 + thiuram หรือ dithiocarbamate 0.3

2.2.1.1.2 ระบบอีวี (efficient vulcanizing system) ระบบนี้ใช้กำมะถันน้อยและสารตัวเร่งมาก หรือใช้ระบบสารให้กำมะถัน ซึ่งทำให้การใช้กำมะถันเชื่อมโยงแต่ละพันธะมีประสิทธิภาพมาก แต่ละพันธะเชื่อมโยงจะมีกำมะถันอยู่เพียงหนึ่งหรือสองอะตอมเท่านั้น ทำให้ยางมีสมบัติทางกลด้อยกว่าการใช้กำมะถันธรรมดา แต่จะให้อย่างมีความต้านทานต่อการ reversion ดี สมบัติในการต้านทานต่อความร้อนดี และสมบัติการจับตัวเมื่อได้รับแรงอัดดี

ตัวอย่างของระบบการวัลคาไนซ์แบบอีวี ได้แก่

กำมะถัน 0.5 + CBS 6

กำมะถัน 0.3 + CBS 3 + TMTD 2

TMTD 3

DTDM 1 + CBS 1 + TMTD 1

2.2.1.1.3 ระบบเซมิอีวี (semi efficient vulcanizing system)

ระบบนี้ใช้กำมะถันและสารตัวเร่งกึ่งกลางระหว่างการใช้กำมะถันและสารตัวเร่งในระบบปกติกับการใช้ในระบบอีวี ทำให้สมบัติด้านทางกลและด้านด้านความเสื่อมอยู่ระหว่างทั้งสองระบบนี้

ตัวอย่างของระบบการวัลคาไนซ์แบบเซมิอีวี ได้แก่

กำมะถัน 2 + sulphenamide 1

กำมะถัน 1.5 + sulphenamide 1.5

กำมะถัน 1 + sulphenamide 2

2.2.2 ปฏิกริยาการวัลคาไนซ์โดยใช้กำมะถันโดยไม่มีสารตัวเร่ง (vulcanization by sulfur without accelerator)

การวัลคาไนซ์ยางโดยใช้กำมะถัน 8 phr ที่อุณหภูมิ 140 °C ต้องใช้เวลานานถึง 5 ชั่วโมง การใช้ ZnO สามารถลดเวลาลงได้เหลือ 3 ชั่วโมง และการใช้สารตัวเร่งในปริมาณที่เล็กน้อยเพียง 0.5 สามารถลดเวลาวัลคาไนซ์เหลือเพียงแค่ 1 ถึง 3 นาที ในปัจจุบันการวัลคาไนซ์โดยใช้กำมะถัน โดยไม่มีสารตัวเร่งไม่เป็นที่นิยม

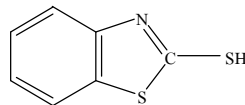
2.2.3 ปฏิกริยาการวัลคาไนซ์โดยใช้กำมะถันและสารตัวเร่ง (sulfur-accelerator vulcanization)

นับตั้งแต่ได้มีการค้นพบปฏิกริยาวัลคาไนซ์เซชัน โดย Charles Goodyear ซึ่งเป็นการเกิดปฏิกิริยาโดยไม่มีสารตัวเร่งปฏิกิริยา (Krejsa และ Koenig, 1993) ต่อมาได้ค้นพบว่าออกไซด์ของโลหะ เช่น ZnO ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชัน พร้อมทั้งช่วยลดระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาให้สั้นลงด้วย จนถึงปี ค.ศ. 1906 ได้ค้นพบว่าสารอะนิลีน (aniline) สามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชัน ในปี ค.ศ. 1925 ได้มีการค้นพบสารตัวเร่ง คือ 2-เมอร์แคปโทเบนโซไทอาโซล (2-mercaptobenzothiazole, MBT) และ 2,2-ไดไทโอโอ-บิส-เบนโซไทอาโซล (2,2-dithio-bis-benzothiazole, MBTS) ซึ่งต่อมาในปี ค.ศ. 1937 ได้มีการค้นพบสารตัวเร่งประเภทไทอาโซลซัลฟีนามาไมด์ (thiazole sulfenamide) ซึ่งเป็นสารตัวเร่งประเภทชะลอเวลาดีก่อนยางสุก ที่นิยมใช้กันมากในเชิงอุตสาหกรรม

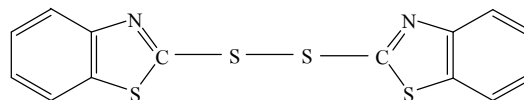
ตัวอย่างชนิดของสารตัวเร่งที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางแสดงในภาพประกอบ 2.11

Thiazoles accelerators

2-mercaptobenzothiazole (MBT)

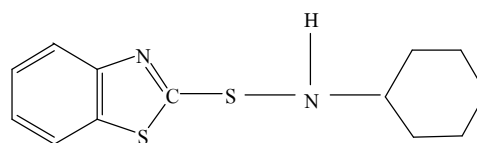


2-2'-dithiobisbenzothiazole (MBTS)

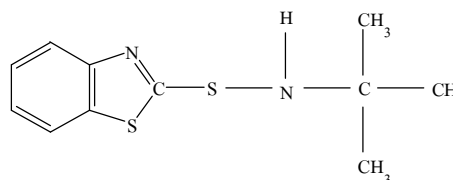


Sulphenamides accelerators

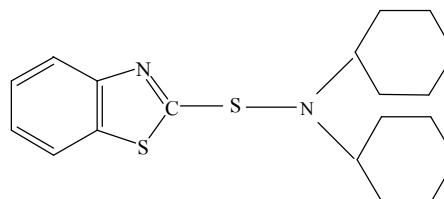
N-cyclohexylbenzothiazole-2-sulfenamides (CBS)



N-t-butylbenzothiazole-2-sulfenamides (TBBS)

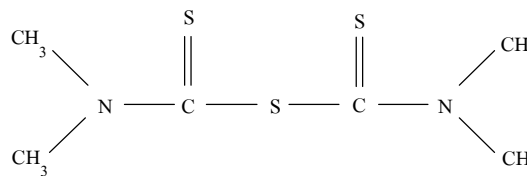


N-dicyclohexylbenzothiazole-2-sulfenamide (DCBS)

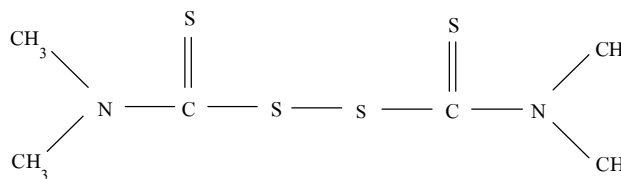


Thiuram accelerators

Tetramethylthiuram monosulfide (TMTM)

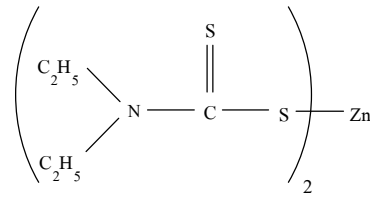


Tetramethylthiuram disulfide (TMTD)



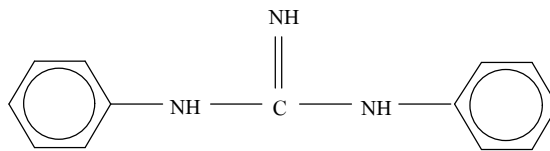
Dithiocarbamates accelerators

Zinc diethyldithiocarbamate (ZDEC)

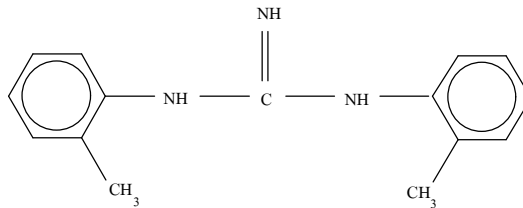


Amines

Diphenylguanidine (DPG)

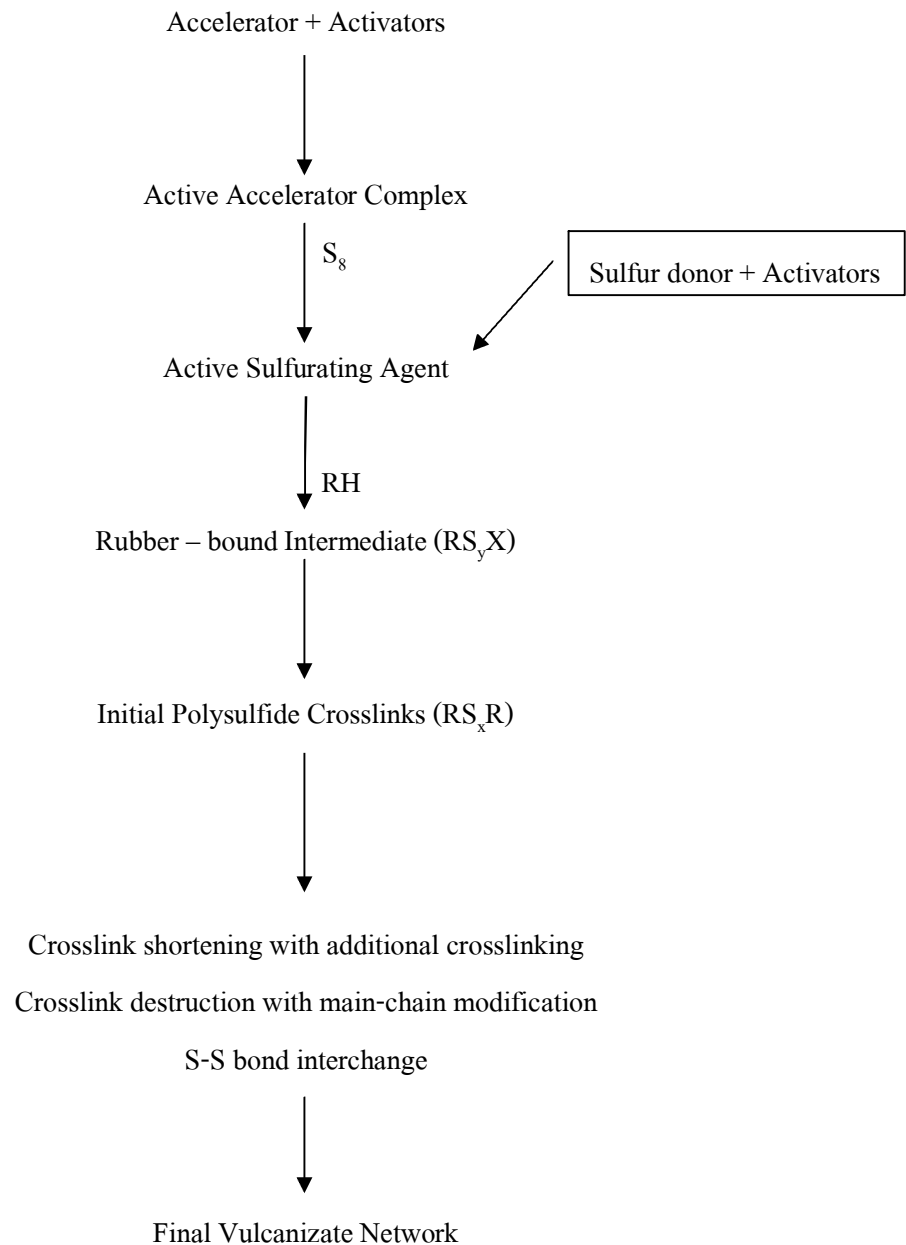


Di-o-tolylguanidine (DOTG)



ภาพประกอบ 2.11 ตัวอย่างสารตัวเร่งปฏิกิริยารัดคาไนซ์เซชันประเภทต่างๆ (วรพงษ์, 2540)

การรัดคาไนซ์เมื่อใช้กำมะถันเพียงอย่างเดียว จะทำให้ต้องใช้เวลาการรัดคาไนซ์ นานมากและเป็นการใช้กำมะถันอย่างไม่มีประสิทธิภาพ การใส่สารเคมีอื่น ๆ ลงไปจะช่วยลด อุณหภูมิและเวลาในการรัดคาไนซ์ ทำให้สามารถใช้กำมะถันได้อย่างมีประสิทธิภาพ (สามารถลด ปริมาณกำมะถันลงได้) สารเคมีดังกล่าว ได้แก่ สารกระตุ้น สารตัวเร่ง เป็นต้น สารเหล่านี้เมื่อ เกิดปฏิกิริยากับกำมะถันจะเกิดเป็น active sulfurating agent ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาต่อไปกับโมเลกุลยาง ปฏิกิริยาการรัดคาไนซ์โดยใช้กำมะถันนั้นจะมีกระบวนการในการเกิดปฏิกิริยาดัง แสดงในภาพประกอบ 2.12



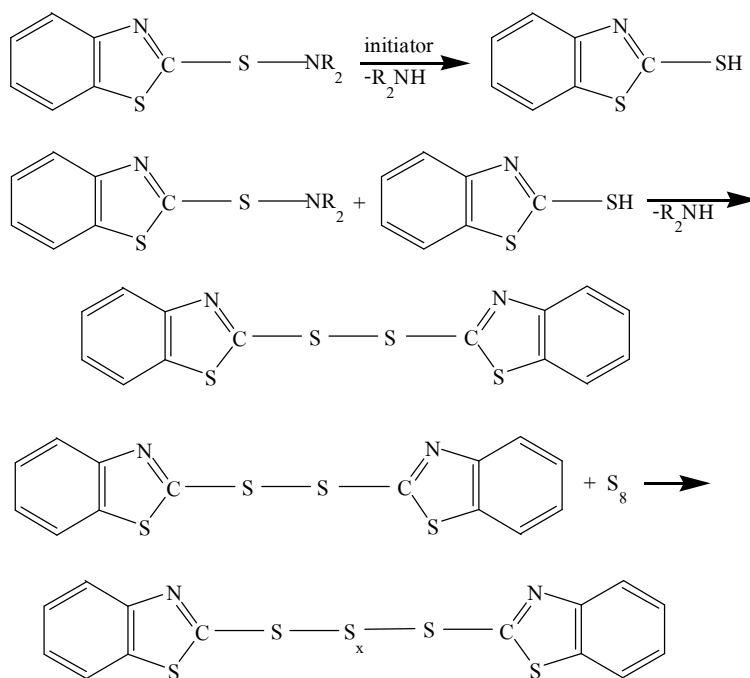
เมื่อ R = Rubber chain
H = Allylic proton
X = Accelerator residue

ภาพประกอบ 2.12 ลำดับขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันซึ่งมีสารตัวเร่งและสารกระตุ้นรวมอยู่ด้วย (Morrison and Porter, 1983)

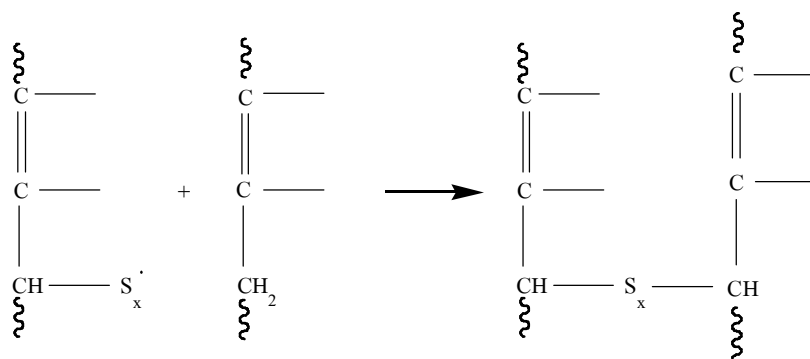
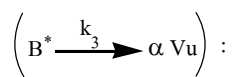
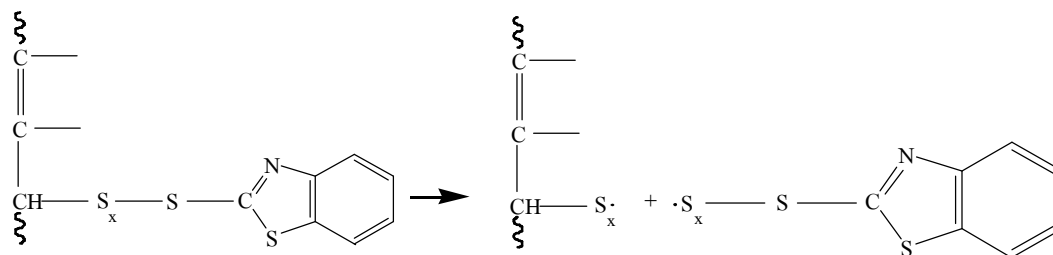
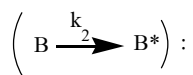
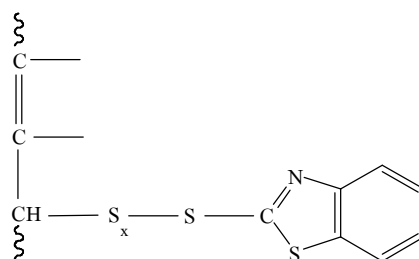
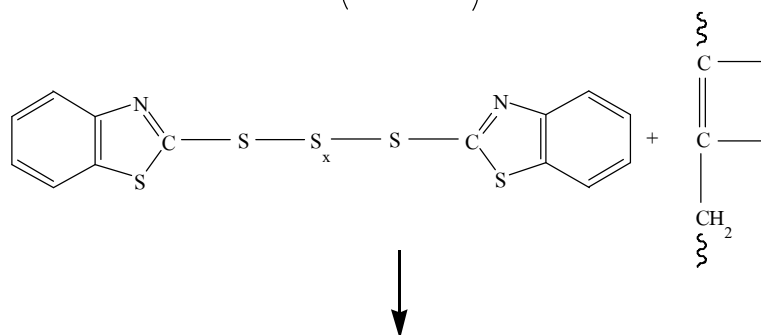
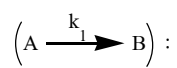
2.2.3.1 ปฏิกริยาล่าช้าเร่งขึ้นที่มีสารตัวเร่งประเภทชะลอเวลาอ่อนยาง

ลู่ก (Delayed-Action Accelerated Vulcanization)

จากผลงานของ Coran (1964) ที่มีการศึกษากลไกของการเกิดปฏิกริยาล่าช้าเร่งขึ้นของยางธรรมชาติที่มีสารตัวเร่งประเภทซัลฟิनाไมด์ ซึ่งเป็นสารตัวเร่งประเภทชะลอเวลาอ่อนยางสูงในการศึกษาและใช้เครื่อง ODR (oscillating disk rheometer) ในการติดตามการเกิดปฏิกริยาล่าช้าเร่งขึ้น เสนอกลไกการเกิดปฏิกริยาไว้บนสมมติฐานที่ว่า ความเข้มข้นของยางนั้นมีมากจึงกำหนดให้เป็นค่าคงที่ตลอดการเกิดปฏิกริยา ซึ่งได้สมมติว่าค่า k_4 มีค่ามากกว่า k_3 นั่นคือมีการเกิดพันธะเชื่อมโยงน้อยมาก จนกว่า A จะถูกใช้หมด และสมมติให้ค่าของ k_3 มากกว่า k_2 จึงถือว่า k_2 เป็นอัตรากำหนดปฏิกริยา ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกริยาได้ดำเนินไปในลักษณะของปฏิกริยาอันดับหนึ่งภายหลังที่สาร A ถูกใช้หมดและอัตราเร็วที่เป็นตัวกำหนดพันธะเชื่อมโยง และเป็นอัตราเร็วในการเกิดปฏิกริยารวมทั้งระบบ คือ k_2 โดยเสนอลักษณะการเกิดปฏิกริยาเคมีดังแสดงในภาพประกอบ 2.13



A



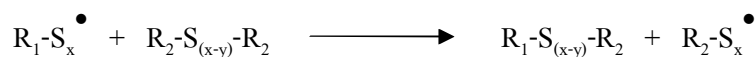
Rubber

Crosslink

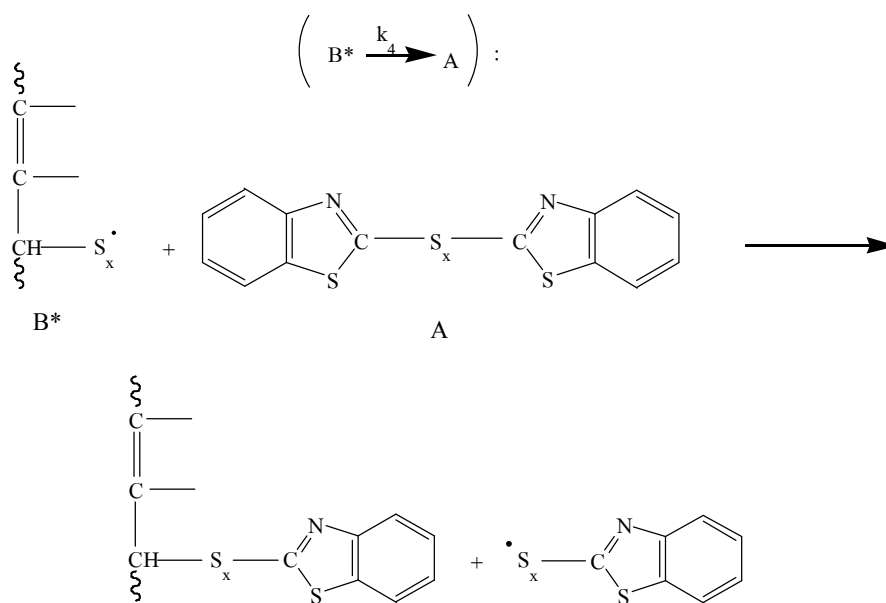
- เมื่อ A = สารตัวเร่งหรือสารประกอบเชิงซ้อนของสารตัวเร่งกับ Zn
 B = สารพอลิเมอร์ในขั้นก่อนเกิดพันธะเชื่อมโยง
 B* = รูปที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาสารพอลิเมอร์ในขั้นก่อนเกิดพันธะเชื่อมโยง
 Vu = พันธะเชื่อมโยง
 α, β = ค่าปรับสมดุลของสมการ

ภาพประกอบ 2.13 กลไกการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ในชั้นเซชันของสารตัวเร่งประเภทชะลอเวลา ก่อน
 ยางสุก Coran (1964)

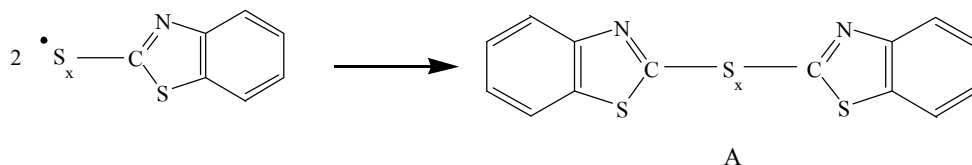
นอกจากนี้ยังมีการเสนอว่าที่อุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ในชั้นเซชัน สารพอลิเมอร์พอลิซัลไฟด์อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงไปโดยการเข้าทำปฏิกิริยาของไธอิลเรดิคัล (thiyl radical) ดังนี้



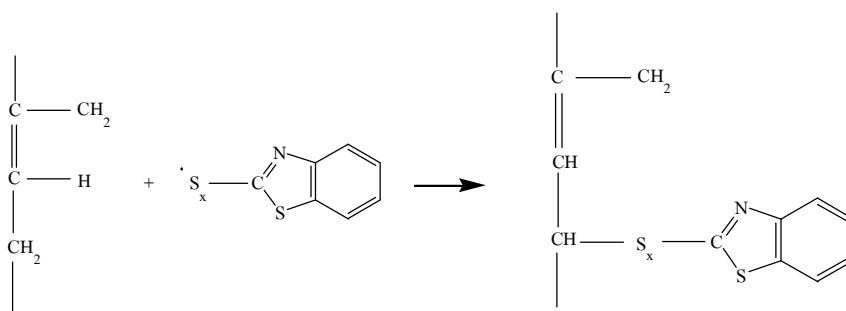
และนอกจากนี้สารพอลิเมอร์พอลิไธอิลเรดิคัลอาจถูกยับยั้งโดยมอนอเมอร์ริคพอลิซัลไฟด์ ดังรูป



ซึ่งเรดิคัลอิสระของสารตัวเร่งที่เกิดขึ้นมาในช่วงปฏิกิริยาช่วง k_2 และ k_4 สามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับไปเป็นสาร A ได้ดังนี้



หรือสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อไปกับยางธรรมชาติได้ ดังนี้



2.3 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมเพาต์

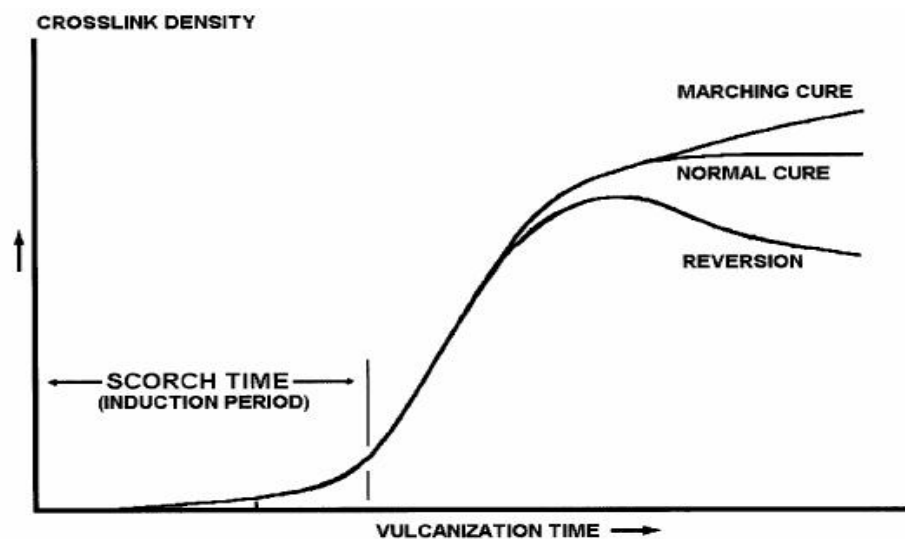
เมื่อนำยางคอมเพาต์มาทำให้ร้อน สารเคมีที่วัลคาไนซ์ที่อยู่ในยางจะเริ่มเกิดปฏิกิริยา เช่น อาจจะทำปฏิกิริยากันเอง ในตอนเริ่มต้นนี้จะใช้ระยะเวลาหนึ่งอาจจะช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและสารเคมีที่ใช้ โดยทั่วไป ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นระยะเวลาดังกล่าวก็จะสั้นลง ระยะเวลาดังนี้เป็นเวลาเริ่มต้นก่อนที่สารเคมีจะเข้าทำปฏิกิริยากับยาง เรียกว่า ช่วงเวลาก่อนยางสุก (induction period) แล้วในเวลาต่อมาสารเคมีก็จะเข้าทำปฏิกิริยากับยาง ก่อให้เกิดการแข็งตัวจนเห็นได้ชัด เรียกว่าสกอชไทม์ (scorch time) เมื่อยางเกิดการสกอชยางจะแปรรูปได้ยาก ขณะที่เกิดการสกอชนี้เรียกว่ายางเริ่มสุก (บุญธรรม, 2534)

เมื่อสารเคมีทำปฏิกิริยากับยางต่อไปยางจะแข็งขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งสารเคมีกระทำกับยางจนหมด ยางก็จะสุกเต็มที่ (optimum cure) ระยะเวลาที่ใช้เพื่อให้ยางทำปฏิกิริยากับสารเคมีจนหมดเรียกว่า เวลายางสุกเต็มที่ (100% cure time) แต่ในการทำปฏิกิริยาจริงนั้น พบว่า เวลายางสุกเต็มที่ใช้เวลานานเกินไป และอาจจะทำให้สมบัติทางฟิสิกส์ด้านอื่นของยางด้อยลงไปอีกด้วย ดังนั้นระยะเวลายางสุกจึงมักกระทำที่ยางมีโมดูลัสสูงขึ้นเพียง 90% หรือ 95% ของโมดูลัสที่สูงขึ้นสูงสุด ระยะเวลาดังกล่าวอาจจะถือเป็นเวลายางสุกเต็มที่ก็ได้ ยางใดที่ได้รับความร้อนไม่

เพียงพอยังจะไม่สุก (under cure) จะได้ยางที่มีสมบัติที่ดีไม่เต็มที่ และจะรักษารูปทรงไม่ได้ แต่ถ้าหากปล่อยให้ยางได้รับความร้อนต่อไปอีกหลังจากที่ได้ผ่านระยะเวลาขางสุก ขางจะสุกเกินไป (over cure) โมเลกุลของยางจะสลายตัว ขางจะกลับนิ่มลง เรียกว่า เกิดการพลิกกลับสู่สภาพเดิม (reversion) หรือยางอาจจะแข็งขึ้น เรียกว่า เกิดมาร์ชชิงเคียว (marching cure) แต่อย่างไรก็ตามการรักษาโมดูลัสไม่ให้ตกได้นาน ถึงแม้ว่าเกินเวลาขางสุกเต็มที่จะเรียกว่าเป็นขางแฟลทเคียว (flat cure)

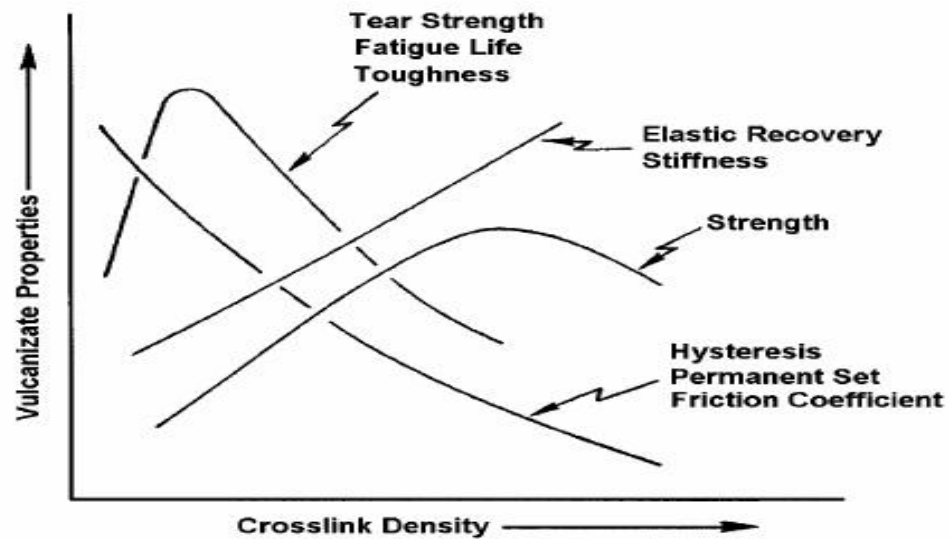
เมื่อให้ความร้อนแก่ขางคอมเปาวด์จะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องผ่านลำดับขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

เริ่มร้อน ----> induction time ----> scorch time ----> under cure ----> optimum cure ----> 100% cure ----> reversion หรือ marching modulus



ภาพประกอบ 2.14 ลักษณะของการวัลคาไนซ์ของยางที่ได้จากเครื่องรีโอมิเตอร์ (Coran, 2003)

ความหนาแน่นของการเชื่อมโยง (crosslink density) จะเป็นตัวกำหนดสมบัติทางกายภาพของยาง ดังแสดงในภาพประกอบ 2.15 จึงจำเป็นต้องควบคุมกระบวนการวัลคาไนซ์ให้เหมาะสม



ภาพประกอบ 2.15 คุณสมบัติเปรียบเทียบกับความหนาแน่นของการเชื่อมโยง (Coran, 2003)

2.4 จลนพลศาสตร์การวัลคาไนซ์

สมการโดยทั่วไปสำหรับการพิจารณาจลนพลศาสตร์การวัลคาไนซ์ (Hills, 1971)

คือ

$$dx/dt = k(a-x)^n \quad (2.1)$$

เมื่อ	n	คือ	อันดับปฏิกิริยา
	k	คือ	ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา
	a	คือ	ความเข้มข้นเริ่มต้นของ reactant
	x	คือ	ปริมาณที่เกิดปฏิกิริยาที่เวลา t

อินทิเกรตสมการที่ 2.1 จะได้

$$\text{สำหรับปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง} \quad \ln(a-x) = -kt + \ln a \quad (2.2)$$

$$\text{สำหรับปฏิกิริยาอันดับสอง} \quad (a-x)^{-1} = kt + a^{-1} \quad (2.3)$$

ในทางปฏิบัติจะนิยมวัดค่าสมบัติทางฟิสิกส์ เช่น ค่าโมดูลัส มากกว่าการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ reactant ดังนั้นจะได้ว่า

$$(a-x) = (M_\alpha - M) \quad (2.4)$$

$$a = (M_\alpha - M_0) \quad (2.5)$$

เมื่อ	M_α	คือ	โมดูลัสสูงสุด
	M_0	คือ	โมดูลัสที่เวลาศูนย์ (โมดูลัสต่ำสุด)
	M	คือ	โมดูลัสที่เวลา t

พิจารณาให้ปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง จากกราฟที่พล็อต (plot) ระหว่าง $\log(a-x)$ หรือ $(M_\alpha - M)$ กับ เวลา จะได้กราฟเป็นเส้นตรง โดยที่ค่าความชันของกราฟ คือ ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k)

Craig (1957 อ้างโดย Hills, 1971) เสนอว่าขั้นตอนการเกิดพันธะเชื่อมโยง ต้องการตำแหน่งที่ว่างไว้ต่อการเกิดปฏิกิริยาบนโมเลกุลยาง และความเข้มข้นตรงตำแหน่งนี้มีความสำคัญ ดังนั้นปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ควรเป็นปฏิกิริยาอันดับสองจากกราฟที่พล็อต (plot) ระหว่าง $(a-x)^{-1}$ หรือ $(M_\alpha - M)^{-1}$ กับ เวลา จะได้กราฟเป็นเส้นตรง โดยที่ค่าความชันของกราฟ คือ k

Juve (1964 อ้างโดย Hills, 1971) เสนอว่าอันดับปฏิกิริยาอาจจะมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง เช่นในกรณีของส่วนผสมของยางกับกำมะถันซึ่งไม่มีสารตัวเร่ง แต่โดยทั่วไปอันดับปฏิกิริยาคือหนึ่ง และการลดลงของความเข้มข้นของสารกระตุ้นและการลดลงของกำมะถันอิสระจะไม่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการเกิด crosslink

ถ้าพิจารณาการวัดค่าโมดูลัส พบว่าเป็นไปไม่ได้ที่จะได้ค่าที่แท้จริงของ M_α เนื่องจากในกรณีของคอมเปาวด์ที่เป็นแบบ marching cure จะไม่มีโมดูลัสสูงสุด ในขณะที่คอมเปาวด์ที่เป็นแบบ reversion จะไม่ถึงจุดสูงสุด เมื่อการเกิดขึ้น reversion อย่างต่อเนื่อง ดังนั้นปฏิกิริยาอินเทอมีเดียตอาจเกิดขึ้นหรือเกิด crosslink ต่อไปเรื่อย ๆ ดังนั้นจะมีเพียงส่วนหนึ่งของกราฟการวัลคาไนซ์ที่เหมาะสมเพื่อกำหนดอันดับปฏิกิริยา

2.5 การศึกษาค่าพลังงานกระตุ้นการวัลคาไนซ์

ความแตกต่างของระดับการวัลคาไนซ์ของยาง ที่เวลาและอุณหภูมิต่างกัันนั้นมีผลมาจากปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดของยาง ระบบการวัลคาไนซ์ และสารเคมีอื่น ๆ ที่ผสมลงในสูตรยาง ปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ ได้แก่ ชนิดของยาง ซึ่งเมื่อกำหนดให้ใช้สารเคมีชนิดอื่น ๆ เหมือนกันแล้ว ค่าพลังงานกระตุ้นการวัลคาไนซ์ (activation energy of vulcanization) และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิการวัลคาไนซ์ (temperature coefficient of vulcanization) สามารถใช้เป็นค่าที่ใช้อ้างอิงถึงระดับการวัลคาไนซ์ของยางที่เวลาหรืออุณหภูมิต่าง ๆ ได้ สมการที่ใช้ในปัจจุบันจะมีพื้นฐานมาจากระดับการวัลคาไนซ์ของยางซึ่งพิจารณาในส่วนของอุณหภูมิและวงจรเวลาวัลคาไนซ์ (cure cycle time)

และตัวแปรพื้นฐานในการวัดคาบในซ์ของยาง การใช้วิธีนี้จะทำให้ได้ผลที่รวดเร็วกว่าเป็นการศึกษาที่มีระบบ รู้ถึงผลกระทบหลักและผลของตัวแปรต่าง ๆ ในการพิจารณาระดับการวัดคาบในซ์ของยาง การศึกษาค่าพลังงานกระตุ้นต้องเข้าใจพื้นฐานที่เกี่ยวข้องในการทำนายระดับการวัดคาบในซ์ของยางซึ่งเป็นระบบเนื้อเดียวกัน Claxton และ Liska (1964) ได้เสนอว่า

$$K = \frac{M}{M_\alpha} = 1 - e^{-k(t-t_0)} \quad \text{โดยที่ } t \geq t_0 \quad (2.6)$$

เมื่อ K คือ สัดส่วนโมดูลัสที่เพิ่มขึ้น (fractional modulus)
 M_α คือ โมดูลัสที่เพิ่มสูงสุดที่ได้เมื่อยางวัดคาบในซ์เต็มที
 M คือ โมดูลัสที่เพิ่มขึ้นที่เวลา t
 k คือ ค่าคงที่อัตราการวัดคาบในซ์ของยางซึ่งเป็นส่วนกลับของเวลา (curing rate constant)

t_0 คือ ช่วงเวลาก่อนยางเริ่มวัดคาบในซ์ (scorch time)

ค่า k และ t_0 สามารถหาให้ถูกต้องได้โดยใช้สมการ Arrhenius equation โดยที่

$$k = Ae^{-E_1/RT} = e^{(S_1 - E_1/2T)} \quad (2.7)$$

$$t_0 = Be^{E_2/RT} = e^{(-S_2 + E_2/2T)} \quad (2.8)$$

เมื่อ A และ B เป็นค่าคงที่รูปร่าง (dimensioned constant)
 E_1 และ E_2 เป็นพลังงานกระตุ้นให้เกิดการวัดคาบในซ์ ซึ่งเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาการวัดคาบในซ์และปฏิกิริยาการวัดคาบในซ์ช่วงเริ่มแรก ตามลำดับ

R เป็นค่าคงที่ก๊าซ (gas constant) มีค่าประมาณ 2.0 cal.mol⁻¹.g⁻¹

T เป็นอุณหภูมิองศาสัมบูรณ์ (K)

S_1 และ S_2 เป็นตัวแปรที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ

จากสมการที่ 2.7 สามารถเปลี่ยนใหม่เพื่อให้ได้เวลา t_K ซึ่งเป็นเวลาที่ต้องการเพื่อให้ได้สัดส่วนโมดูลัสที่เพิ่มขึ้น (K) ที่อุณหภูมิ T ซึ่ง

$$t_K = t_0 + (1/k) \ln(1-K)^{-1} \quad \text{เมื่อ } 0 \leq K \leq 1 \quad (2.9)$$

ที่อุณหภูมิอ้างอิง (T_r) ให้เวลาเท่ากัน คือ t_{Kr} เพื่อให้ได้สัดส่วนโมดูลัสที่เพิ่มขึ้นเหมือนกัน (K) หรือมีระดับการวัดคาบในซ์ที่เท่ากัน ดังนั้น

$$t_{Kr} = t_{0r} + (1/k_r) \ln(1-K)^{-1} \quad (2.10)$$

ดังนั้น $t_{Kr} = t_{0r} + (t_K - t_0)(k/k_r)$ (2.11)

ใช้สมการที่ 2.8 และแทนที่ $T = T_r$

$$t_{0r} = e^{(-S_2 + E_2/2T_r)} \quad (2.12)$$

จากสมการที่ 2.12 และ 2.8 จะได้ $t_{0r}/t_0 = e^{[(E_2/2)(1/T_r - 1/T)]}$ (2.13)

โดยวิธีการเดียวกันนี้ เราจะได้

$$k_r = e^{(S_1 - E_1/2T_r)} \quad (2.15)$$

และ $k/k_r = e^{[(E_1/2)(1/T_r - 1/T)]}$ (2.16)

ดังนั้นที่เวลาเท่ากัน ที่อุณหภูมิอ้างอิง T_r สามารถหาได้โดยการนำสมการที่ 2.13 และ 2.15 ไปแทนในสมการที่ 2.6 จะได้

$$t_{Kr} = t_0 e^{[(E_2/2)(1/T_r - 1/T)]} + (t_K - t_0) e^{[(E_1/2)(1/T_r - 1/T)]} \quad (2.17)$$

ดังนั้นเพื่อให้ได้เวลาการวัดคาบในชั่งที่เท่ากันที่อุณหภูมิอ้างอิง T_r สามารถคำนวณได้โดยง่ายเมื่อรู้ค่า induction period (t_0) และเวลา t_K ที่อุณหภูมิ T

2.6 การวัดคาบในชั่งอย่างหนา

ยางเป็นวัสดุที่นำความร้อนได้ไม่ดี เพราะฉะนั้นเวลาของการวัดคาบในชั่งจะขึ้นอยู่กับความหนาของยางหรือขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทความร้อน (heat transfer) ในชิ้นงานนั้น

2.6.1 การถ่ายเทความร้อน (heat transfer)

ความร้อนเคลื่อนที่จากจุด ๆ หนึ่งไปยังจุดอีกจุดหนึ่งได้ 3 วิธีด้วยกัน คือ การนำ การพาและการแผ่รังสี การเคลื่อนที่ของความร้อนทั้ง 3 วิธีนี้ จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้น แต่กลไกในการที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนแต่ละวิธีแตกต่างกัน (นักสิทธิ์, 2535 และ Frank and David, 1990 อ้างโดย จิตทิภัทร, 2547)

2.6.1.1 การนำ (conduction)

การนำความร้อน คือ วิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำภายในตัวกลางเดียวกัน หรือเป็นการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างตัวกลางที่ติดกัน แต่มีอุณหภูมิต่างกัน ในการนำความร้อน ความร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านโมเลกุลของสาร โดยที่โมเลกุลไม่เคลื่อนที่ การนำความร้อนจะเกิดขึ้นได้ดีมากในตัวกลางที่เป็นของแข็ง การเคลื่อนที่ของความร้อนแบบการนำเกิดขึ้นบ้างในของเหลวและก๊าซ ความร้อนเคลื่อนที่โดยการนำได้โดยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่จุดที่มีอุณหภูมิต่ำ

2.6.1.2 การพา (Convection)

การพา คือ วิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่ระหว่างผิวของของแข็งและของเหลว ของเหลวจะเป็นตัวพาความร้อนมาให้หรือพาความร้อนจากผิวของของแข็ง กลไกที่ทำให้

เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพา^{นั้น} เกิดจากผลรวมของการนำความร้อน การสะสมพลังงานและการเคลื่อนที่ของของไหล

หลักการพาความร้อน เมื่อของเหลวหรือก๊าซได้รับความร้อน โมเลกุลส่วนที่ได้รับความร้อนนั้นจะรับเอาความร้อนเข้าไปในลักษณะเดียวกันก็จะมี การขยายตัว มีความหนาแน่นลดลง จึงสามารถลอยสูงขึ้นและพาเอาความร้อนที่มีอยู่ในโมเลกุลนั้นตามไปด้วย โมเลกุลของของเหลวหรือก๊าซบริเวณที่ไม่ได้รับความร้อนที่มีความหนาแน่นมากกว่าก็จะมาแทนที่ เป็นเหตุให้ความร้อนไหลวนเวียนตามโมเลกุลไปด้วยและถ่ายเทให้โมเลกุลอื่นต่อไป

2.6.1.3 การแผ่รังสี (radiation)

ในการแผ่รังสี ความร้อนเคลื่อนที่ได้ไม่ต้องอาศัยตัวกลางดังเช่นในการนำและการพาในการแผ่รังสี ความร้อนจะเคลื่อนที่ได้ดีที่สุดในสุญญากาศ ลักษณะของการแผ่รังสีจะเคลื่อนที่เป็นแนวเส้นตรงจากแหล่งพลังงานไปยังแหล่งที่มันจะดูดกลืนแสง

2.6.2 สมการที่ใช้ในการคำนวณเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน

โจเซฟ โฟริเออร์ (Joseph Fourier) (อ้างโดยนักสถิติ, 2535) เป็นผู้ที่ศึกษาการนำความร้อนอย่างละเอียด พบว่า อัตราการถ่ายเทความร้อน โดยการนำ แปรผันโดยตรงกับค่าการนำความร้อน พื้นที่ที่ตั้งฉากกับการไหล และอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับระยะทาง (temperature gradient) ในกรณีที่ค่าการนำความร้อนมีค่าคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ Fourier ได้เสนอสมการที่ใช้ในการคำนวณอัตราการนำความร้อน ซึ่งเรียกว่า สมการของโฟริเออร์ (Fourier rate equation) (Hills, 1971) ดังนี้ คือ

$$\frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dL} \quad (2.18)$$

เมื่อ dQ/dt คือ อัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนกับเวลา

A คือ พื้นที่ที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่านและตั้งฉากกับทิศ

ทางการเคลื่อนที่ของความร้อน

dT/dL คือ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับระยะทางในทิศ

ทางการเคลื่อนที่ของความร้อน เครื่องหมายลบ แสดงว่าความร้อนจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่อุณหภูมิลดลงเสมอ

k คือ ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) ซึ่งค่า k เป็นสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุต่างๆ วัสดุที่มีความสามารถในการนำความร้อนสูง เช่น โลหะ จะมีค่า k สูง ส่วนวัสดุที่มีความสามารถในการนำความร้อนต่ำ เช่น ยาง จะมีค่า k ต่ำ (นักสถิติ, 2535)

ตัวอย่างเช่นวัตถุที่มีความหนา เท่ากับ L มีอุณหภูมิที่ผิวด้านหนึ่ง เท่ากับ T_2 ซึ่งมีค่าสูงกว่าที่ผิวอีกด้านหนึ่งที่มีอุณหภูมิ เท่ากับ T_1 ดังนั้นปริมาณการถ่ายเทความร้อนของวัตถุนี้จะเท่ากับ

$$Q = \frac{kA(T_2 - T_1)}{L} \quad (2.19)$$

ในกรณีของการนำความร้อนในสภาวะไม่สม่ำเสมอ (unsteady-state conduction) สมการ 2.18 ของ Fourier สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k\partial^2 T}{c\rho\partial L^2} \quad (2.20)$$

เมื่อ $k/c\rho$ คือ ค่าการแผ่กระจายความร้อน (thermal diffusivity, D)
 c คือ ค่าความร้อนจำเพาะ (specific heat)
 ρ คือ ความหนาแน่น

ค่าการแผ่กระจายความร้อน (D) ขึ้นอยู่กับค่าการนำความร้อน ความหนาแน่น และ ความร้อนจำเพาะของสาร ค่าการแผ่กระจายความร้อนเป็นค่าที่บ่งถึงความเร็วของการเคลื่อนที่ของ ความร้อนในวัตถุ วัตถุใดที่มีค่าการแผ่กระจายความร้อนสูง ความร้อนก็จะแผ่กระจายไปในวัตถุนั้น ได้เร็ว

ค่า D มีหน่วยเป็น $\text{ft}^2.\text{hr}^{-1}$, $\text{in}^2.\text{min}^{-1}$ และ $\text{cm}^2.\text{sec}^{-1}$

ตัวอย่าง ค่า D ของยางธรรมชาติ เช่น

ยางธรรมชาติ (natural rubber gum stock) ค่า $D = 0.00075 \text{ cm}^2.\text{sec}^{-1} = 0.0075 \text{ in}^2.\text{min}^{-1} = 0.003 \text{ ft}^2.\text{hr}^{-1}$

ยางล้อ (tread stock) ค่า $D = 0.001 \text{ cm}^2.\text{sec}^{-1} = 0.01 \text{ in}^2.\text{min}^{-1} = 0.004 \text{ ft}^2.\text{hr}^{-1}$

ยางที่มีปริมาณสารตัวเติมมาก (highly-load stock) ค่า $D = 0.0015 \text{ cm}^2.\text{sec}^{-1} = 0.015 \text{ in}^2.\text{min}^{-1} = 0.006 \text{ ft}^2.\text{hr}^{-1}$

วิธีการคำนวณหาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตรงกลาง

สมการ (2.20) สามารถนำมาใช้แก้ปัญหของสองสภาวะที่แตกต่างกันชัดเจน คือ

1. ชั้นตัวอย่างแบบยาว (infinite slab) ได้รับความร้อนที่ผิวทั้งสองด้าน โดยอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ผิว

2. การถ่ายเทความร้อนที่ผิวจะเกิดขึ้นช้ากว่า ดังนั้นอุณหภูมิตรงผิวจะสูงขึ้นอย่างช้า ๆ ระหว่างรอบการให้ความร้อน

การหาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตรงกลางชิ้นงานในกรณีที่ไม่พิจารณาค่าความต้านทานที่ผิว (negligible surface resistance)

ในกรณีที่ไม่พิจารณาค่าความต้านทานที่ผิว การกระจายอุณหภูมิในตัวอย่างแบบยาว (slab) สามารถหาได้โดยสมการ (2.21) คือ

$$\left(\frac{T_s - T_x}{T_s - T_0}\right) = \frac{4}{\pi} \sum \frac{\sin[(2n-1)\pi x / 2l] e^{[2n-1]^2 \pi^2 Dt / 4l^2}}{2n-1} \quad (2.21)$$

เมื่อ T_x คือ อุณหภูมิตรงกลางชิ้นงาน โดยมีระยะห่าง x จากผิว

T_s คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการวัดคาโนซ์และอุณหภูมิที่ผิวของ slab

T_0 คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของ slab

l คือ ความหนาครึ่งหนึ่งของ slab = $(1/2)L$

L คือ ความหนาของชิ้นงาน

D คือ ค่าการแผ่กระจายความร้อน

t คือ เวลาใด ๆ ที่ให้ความร้อน

จากสมการ (2.21) จะได้ว่า

$$\left(\frac{T_s - T_x}{T_s - T_0}\right) = \frac{4}{\pi} \left[\sin \frac{\pi x}{L} e^{-\pi^2 x} + \frac{1}{3} \sin \frac{3\pi x}{L} e^{-9\pi^2 x} + \frac{1}{5} \sin \frac{5\pi x}{L} e^{-25\pi^2 x} \dots \right] \quad (2.22)$$

เมื่อ $X = Dt/L^2$ (หรือ $Dt/4l^2$)

โดยทั่วไปเทอมแรกของสมการ (2.22) ก็เพียงพอสำหรับการหาอุณหภูมิตรงกลางแล้ว เนื่องจากเทอมอื่น ๆ จะไม่มีผลหลังเวลาที่สั้นในรอบการให้ความร้อน ($Dt/4l^2 \geq 0.06-0.08$)

ในกรณีที่ต้องการหาอุณหภูมิตรงกลางของตัวอย่างแบบ slab ที่มีความยาวและความกว้างเป็นอนันต์ โดยที่ให้ความร้อนที่ผิวทั้งสองด้าน ค่าต่ำสุดของ T_x เกิดที่ตรงกลางระนาบเมื่อ $x=l$ ดังนั้นอุณหภูมิตรงกลางสามารถคำนวณได้ตามสมการ (2.23)

$$\left(\frac{T_s - T}{T_s - T_0} \right) = \frac{4}{\pi} \left[e^{-\pi^2 x} - \frac{1}{3} e^{-9\pi^2 x} + \frac{1}{5} e^{-25\pi^2 x} - \frac{1}{7} e^{-49\pi^2 x} \dots \right] \quad (2.23)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิตรงกลางชิ้นงาน

อัตราส่วนของเทอมทางด้านซ้ายมีค่าลดลงจนกระทั่งเท่ากับศูนย์ที่ความร้อนถึงสมดุล อัตราส่วนนี้จะไม่ขึ้นกับหน่วยของอุณหภูมิที่ใช้ สำหรับตัวอย่างแบบ slab สมการ (2.23) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\left(\frac{T_s - T}{T_s - T_0} \right) = f(X) = Y \quad (2.24)$$

เมื่อ $X = Dt/L^2$ และ $f(X)$ คือ ฟังก์ชันของเทอมด้านขวาของสมการ (2.23)

Newman (1936 อ้าง โดย Hills, 1971) เสนอวิธีการคำนวณอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตรงกลางของชิ้นงานที่เป็นสี่เหลี่ยมตามสมการ (2.25) โดยชิ้นงานมีความกว้าง ความยาว และความหนาเท่ากับ a , b และ c ตามลำดับ

$$\frac{T_s - T}{T_s - T_0} = \frac{64}{\pi^3} e^{-\pi^2 (a^{-2} + b^{-2} + c^{-2}) Dt} \quad (2.25)$$

สมการ (2.25) สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับงานอัดเข้าโดยทั่วไป และการใช้เทอมแรกจะให้ผลที่ดีสำหรับวัตถุชิ้นเล็ก ค่าที่ใช้จากการคำนวณในสมการ (2.25) มักจะมีค่าสูงกว่าที่วัดจากเทอร์โมคัปเปิล อาจเนื่องจากผิวทั้งหมดของตัวอย่างมีค่าความจุความร้อน (heating capacity) ไม่เท่ากัน และอีกปัจจัยหนึ่ง คือ ความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างวางยางลงในเบ้า (mould) ตัวอย่าง การคำนวณหาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตรงกลางของตัวอย่าง slab ของยางที่ไม่มีสารตัวเติม (gum stock) ($D = 0.008 \text{ in}^2 \text{ min}^{-1}$) หนา 1 นิ้ว อุณหภูมิเริ่มต้น เท่ากับ 21°C (70°F) ให้ความร้อนกับผิวทั้งสองด้านที่อุณหภูมิ เท่ากับ 150°C (302°F) แทนค่าลงในสมการ (2.23) จะได้ว่า

$$\left(\frac{302 - T}{302 - 70} \right) = \frac{4}{\pi} \left[e^{-At} - \frac{1}{3} e^{-9At} + \frac{1}{5} e^{-25At} \right]$$

$$\text{เมื่อ } A = \pi^2 D/L^2$$

ในกรณีนี้ค่า $D = 0.008$, $L = 1$ in ดังนั้น $A = 0.079$ จะได้ว่า

$$\left(\frac{302-T}{232}\right) = 1.273 \left[e^{-0.079t} - \frac{1}{3}e^{-0.71t} + \frac{1}{5}e^{-1.97t} \right]$$

$$302-T = 295 \left[e^{-0.079t} - \frac{1}{3}e^{-0.71t} + \frac{1}{5}e^{-1.97t} \right]$$

$$T = 302 - 295e^{-0.079t} + 98.3e^{-0.71t} - 59e^{-1.97t}$$

$$T = 302 - 295/U + 98.3/V - 59/W$$

เมื่อ $U = e^{-0.079t}$, $V = e^{0.71t}$ และ $W = e^{1.97t}$ ดังนั้น $T_1 = 302-295/U$, $T_2 = T_1 + 98.3/V$ และ $T_3 = T_2 - 59/W$ จากความสัมพันธ์เหล่านี้สามารถหาค่า T_1 , T_2 และ T_3 ที่เวลาต่าง ๆ ดังแสดงในตาราง 2.1

ตาราง 2.1 แสดงค่าอุณหภูมิตรงกลางที่เพิ่มขึ้นที่คำนวณได้ จะเห็นว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า 93.3 °C (200 °F) อุณหภูมิ T_1 , T_2 และ T_3 มีค่าไม่แตกต่างกัน ดังนั้นในการคำนวณหาอุณหภูมิตรงกลางที่เพิ่มขึ้น จึงคำนวณเพียงแต่อุณหภูมิ T_1 ก็สามารถนำไปใช้งานได้

ตาราง 2.1 ค่าอุณหภูมิตรงกลางที่เพิ่มขึ้นที่คำนวณได้

Time (min)	T_1 (°F)	T_2 (°F)	T_3 (°F)
0	7	105.3	46.3
1	29.4	77.7	69.5
2	50.1	73.9	72.7
5	103.2	106.0	106.0
10	168.0	168.1	168.1
20	241.2	241.2	241.2
50	296.3	296.3	296.3
100	301.9	301.9	301.9
200	302	302	302
500	302	302	302
1000	302	302	302

2.6.3 การคำนวณระดับการวัลคาไนซ์ (calculation state of cure)

การคำนวณเพื่อหาระดับการวัลคาไนซ์ (state of cure) มีความจำเป็นต้องทำในกรณีที่ไม่สามารถวัดระดับการวัลคาไนซ์ของชิ้นยางโดยวิธีทางกายภาพ เนื่องจากไม่สามารถตัดชิ้นตัวอย่างมาได้ หรือเช่นในกรณีการวัลคาไนซ์ยางหนา ซึ่งยางชั้นในตรงกลางชิ้นงานจะมีระดับการวัลคาไนซ์ที่ต่ำกว่ายางชั้นนอกซึ่งได้รับความร้อนโดยตรง

การคำนวณระดับการ cure นั้นได้มีการศึกษากันมานานแล้ว ในปี 1928 Sheppard และ Wiegand (1928 อ้างโดย Hills, 1971) ได้เสนอวิธีการคำนวณโดยใช้หลักการที่ว่าปฏิกิริยาในการ cure เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าทุก ๆ ครั้งที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 15°F งานในลักษณะเดียวกันได้ถูกนำเสนอโดย Claxton และ Liska (1964) โดยที่มีการวัดค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่ละเอียดมากขึ้นโดยใช้เครื่อง CEPAR และมีการเน้นถึงความสำคัญของช่วงการเย็นตัวของชิ้นยางที่ยังมีการ cure อย่างต่อเนื่อง Conant *et al.* (1958 อ้างโดย Hills, 1971) ได้ออกแบบ monograph ที่ใช้เครื่องมือที่ช่วยในการคำนวณเวลา cure สำหรับชิ้นยางรูปร่าง และขนาดต่าง ๆ กัน Hills (1971) ได้รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน และการวัลคาไนซ์ ของยางไว้ในหนังสือ และเมื่อไม่นานมานี้ Gregory *et al.* (1999) ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนในยางด้วยวิธี ไฟไนติเม้นท์ ในขณะเดียวกันก็ได้มีการคำนวณระดับการ cure ตามหลักการเดียวกันกับนักวิจัยท่านอื่น ๆ

สำหรับการคำนวณระดับการวัลคาไนซ์ เป็นการคำนวณจากข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่วัดโดยตรงจากเทอร์โมคัปเปิล กับเวลาที่อ่านจากแผงควบคุม โดยความเข้มของการวัลคาไนซ์ (I) (ชลดา และคณะ, 2547) คือ

$$I = C \frac{T(t) - T_r}{10} \quad (2.26)$$

$T(t)$ คือ ค่าอุณหภูมิของยางที่อ่านจากเทอร์โมคัปเปิล ณ เวลา t และสามารถหาได้จาก การคำนวณตามสมการ 2.23

T_r คือ ค่าอุณหภูมิอ้างอิงที่ใช้ในการหาค่า cure time จากเครื่อง MDR (moving die rheometer)

C คือ ค่าจำนวนเท่าของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10°C หรือค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิการวัลคาไนซ์

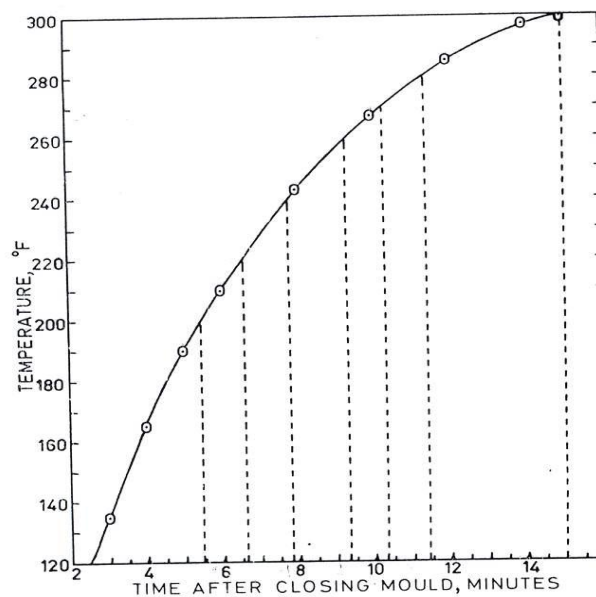
จะสังเกตเห็นว่าความเข้มของการวัลคาไนซ์ (I) จะเท่ากับ 1 เมื่ออุณหภูมิของยางเท่ากับอุณหภูมิอ้างอิงจาก MDR

ดังนั้นผลจากการวัลคาไนซ์ (E) นั่นคือพื้นที่ใต้กราฟระหว่าง I และ เวลา (t) หรือ

$$E = \int_0^t Idt \quad (2.27)$$

ระดับการวัลคาไนซ์ (% cure) สามารถหาได้จากการเทียบกับค่ามาตรฐานจาก MDR (moving die rheometer) ($E_r = t_{\text{cure}}$) ในขณะที่ t_r คือ cure time ที่ได้จาก MDR ที่อุณหภูมิอ้างอิง T_r หรือ $\% \text{ cure} = (E/E_r) \times 100$

จากภาพประกอบ 2.16 เป็นการแสดงตัวอย่างของความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิที่จุดศูนย์กลางของยาง SBR ที่ใช้ clay เป็นสารตัวเติม มีความแข็ง 70 Shore A อยู่ในเบ้าหนานขนาด 3 x 3 x 7/8 โดยให้ความร้อนเบ้าที่อุณหภูมิเท่ากับ 152 °C (306 °F)



ภาพประกอบ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของยางหนานในเบ้าหนาน 7/8 นิ้ว ให้ความร้อน 306 °F โดยที่ค่า Cure Time (พิจารณาจาก Mooney Test) ที่อุณหภูมิ 266 °F เท่ากับ 15.1 นาที (Hills, 1971)

จากรูปความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นกับเวลาที่ได้รับความร้อน สามารถแบ่งระยะห่างของเวลาออกเป็นช่วงเวลานั้น ๆ (small time interval) จากนั้นหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละช่วงเวลา และคำนวณหาระดับการ cure ในแต่ละช่วงนั้น ๆ จากนั้นจึงนำแต่ละช่วงมารวมกันเพื่อหาระดับการวัลคาไนซ์ในเวลาที่ต้องการ

(a) **Interval** คือ ระยะห่างของเวลาในการเก็บข้อมูล ภายในช่วงเฉพาะ เช่น ระหว่าง 104.5 °C กับ 115.5 °C ในเวลา 1.2 นาที

Interval	1.15	1.2	1.45	1	1.1	1.3	2.3
C-value	0.1	0.25	0.5	1	1.5	2.2	3.2
Δ -vulc.	0.12	0.3	0.73	1	1.65	2.86	10.36
T-vulc.	0.12	0.42	1.15	2.15	3.80	6.66	17.02
% Cure	0.1	3	7.5	14	25	44	113

(b) **C-value** คือ หมายถึง ค่าเฉลี่ยของการวัลคาไนซ์ในช่วงของอุณหภูมิ นั่นก็คือ เวลาของการวัลคาไนซ์ที่ 130 °C (266 °F) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 นาที ที่อุณหภูมิเฉลี่ยในช่วงนั้น

(c) **Δ -vulcanization** คือ ผลที่ได้มาจากระยะห่างและค่าของการวัลคาไนซ์ นั่นคือมีค่าเท่ากับปริมาณการวัลคาไนซ์ (ที่ 130 °C หรือที่ระดับมาตรฐาน) ของยางซึ่งอยู่ในช่วงของระยะห่างนั้น (interval)

(d) **T-vulcanization** คือ ผลรวมของเวลา Δ -vulcanization ที่ดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ

(e) **% cure** คือ อัตราส่วนของเทอมเดิมก่อนหน้านี้ต่อเวลาการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์ที่ 130 °C ซึ่งจากกราฟในภาพประกอบ 2.16 ที่จุดแกนในของยาง จะเกิดการวัลคาไนซ์เต็มที่ ก่อนที่จะมีอุณหภูมิถึง 149 °C (300 °F) และจากการเขียนความสัมพันธ์ระหว่างค่า % cure กับเวลา พบว่า ยางส่วนในเกิดการวัลคาไนซ์ 50% cure ที่เวลา 13 นาที และเกิดการวัลคาไนซ์เต็มที่เมื่อเวลา 14.30 นาที โดยที่เวลาสุดท้ายนี้ยางส่วนชั้นนอกหรือผิวหน้าเกิดการวัลคาไนซ์ถึง 300% cure

ตัวอย่างการคำนวณระดับการวัลคาไนซ์ (ตัวอย่างจากรายงานการวิจัยการปรับปรุงความทนทานและการขับจีที่สะดวกสบายของยางรถล้อตัน โดย ชลดา และคณะ, 2547)

สามารถคำนวณระดับการวัลคาไนซ์ได้โดยใช้สมการ (Hill, 1971 อ้างโดย ชลดา และคณะ, 2547) ดังนี้

$$\frac{\int c \left(\frac{T-\theta}{10} \right) dt}{\tau} \quad (2.28)$$

T เป็นค่าของอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ของเนื้อยางซึ่งแปรเปลี่ยนตามเวลา

คุณสมบัติของยางถูกกำหนดโดย C, θ และ τ โดยที่

C คือ ค่าอุณหภูมิสัมประสิทธิ์ของการวัลคาไนซ์ (Temperature coefficient of vulcanization) เป็นค่าเฉพาะของยางแต่ละสูตรโดยยางจะสุกเมื่อถูกอบที่อุณหภูมิ $\theta^{\circ}\text{C}$ เป็นระยะเวลา τ นาที

ค่าต่าง ๆ จากผลการทดลองดังตาราง 2.4 สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. **t interval** = $t_1 - t_0, t_2 - t_1, t_3 - t_2, \dots$ ในการทดลองจะเท่ากับ 3 ตลอดเพราะได้ทำการเก็บข้อมูลทุกๆ 3 นาที

$$2. \mathbf{n} = [\text{Tave} - \text{Tref}] / 10$$

โดยที่ Tave คือ ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิของเนื้อยางที่แปรไปตามเวลา

Tref คือ อุณหภูมิที่จะทำการอบยาง ในที่นี้คือ 130°C

ตัวอย่างเช่น ในแถวที่ 1 จากตาราง 2.3

$$\text{Tave} = (59.74 + 60.12) / 2 = 59.93$$

$$\text{Tref} = 130$$

$$\text{ดังนั้น } n = (59.93 - 130) / 10 = -7.007$$

3. **C-value** = C^n ซึ่งในการทดลองค่า C จะเท่ากับ 1.81 และค่า n ได้มาจากการคำนวณข้างต้น ดังนั้น $C\text{-value} = 1.81^{-7.007} = 0.0156$

$$4. \mathbf{\Delta\text{-vulcanization}} = (\text{C-value}) \times (\text{t Interval})$$

$$\text{ตัวอย่างเช่น } \Delta\text{-vulcanization} = 0.0156 \times 3 = 0.0469$$

5. **T-vulcanization** = $\int \Delta\text{-vulcanization} (\Delta\text{-vulc}_1, \Delta\text{-vulc}_{1+2}, \Delta\text{-vulc}_{2+3}, \dots)$

ตัวอย่างเช่น $\Delta - \text{vulc}_1 = 0.0469$

$$\Delta - \text{vulc}_{1+2} = 0.0469 + 0.0485 = 0.0955$$

6. $\% \text{ cure} = [T - \text{vulc.} / \tau (T=130^\circ\text{C})] \times 100$

โดยที่ τ คือ เวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์เมื่ออุณหภูมิ 130 °C คือ 20.96

นาที

ตัวอย่างเช่น $\% \text{ cure} = (0.0469 / 20.96) \times 100$

$$= 22.40 \%$$

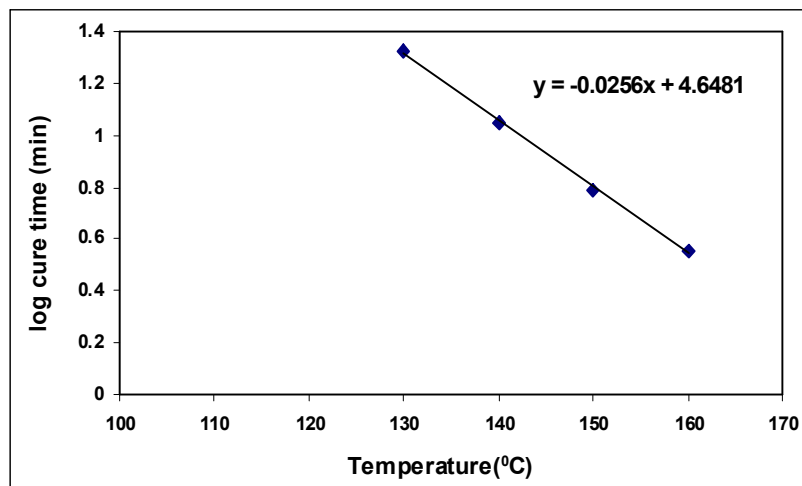
ตาราง 2.2 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาการวัลคาไนซ์ระดับการวัลคาไนซ์ด้วยเป้าหมาย โดยใช้เครื่องวัลคาไนซ์ระดับการวัลคาไนซ์

Ingradients	ปริมาณที่ใช้ (phr)
RSS No.3	100
Stearic acid	4
ZnO	6
Carbon black N-330	40
Silica	10
Silane	0.2
Paraphinic oil	5
Sulphur	1.4
6PPD	1
TMQ	1
CBS	1.7
DEG	0.60% (Silica)

ตาราง 2.3 เวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ ของสูตรยางตาราง 2.2 ที่อุณหภูมิการวัลคาไนซ์ต่างๆ

Temp.(⁰ C)	130	140	150	160
Time(min)	20.96	11.23	6.19	3.57

นำเวลาของการวัลคาไนซ์มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการวัลคาไนซ์เพื่อหาค่า C (Temperature coefficient of vulcanization) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.17



ภาพประกอบ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ(°C) กับเวลา (min) ที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ของสูตรยางจากตาราง 2.2

จากนั้นนำเวลาในการวัลคาไนซ์ของยางแต่ละอุณหภูมิมาเปรียบเทียบกันโดยใช้สมการเส้นตรง $\log t = AT + B$

จากสมการเส้นตรงที่ได้นี้ ทำให้สามารถนำค่าความชัน (A) ไปหาค่า C ได้ จากสูตร $C = 10^{-10A}$ และค่าที่ได้จากการคำนวณ คือ 1.81 ซึ่งสามารถนำมาคำนวณระดับการวัลคาไนซ์ (% cure) ได้ตามสมการ 2.26

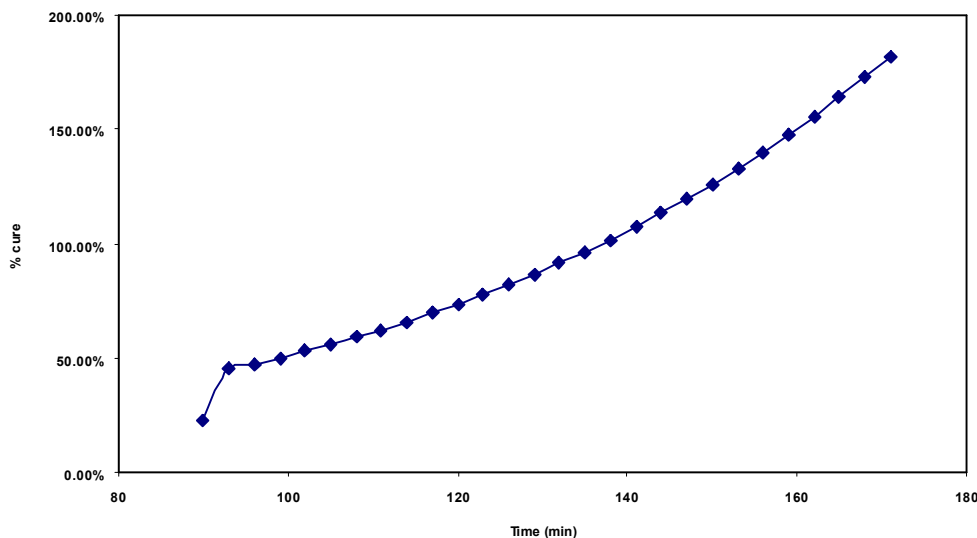
ตาราง 2.4 ตัวอย่าง เวลา, อุณหภูมิและเปอร์เซ็นต์การวัลคาไนซ์ที่คำนวณได้

Time(min)	Temp(°C)	Interval	Tave	n	C-Value	Δ -Vulc	T-Vulc	% Cure
90	59.74	3	59.93	-7.007	1.56E-02	4.69E-02	4.69E-02	22.40%
93	60.12	3	60.485	-6.9515	1.62E-02	4.85E-02	9.55E-02	45.54%
96	60.85	3	61.295	-6.8705	1.70E-02	5.09E-02	9.94E-02	47.43%
99	61.74	3	62.25	-6.775	1.80E-02	5.39E-02	1.05E-01	49.99%
102	62.76	3	63.245	-6.6755	1.90E-02	5.71E-02	1.11E-01	52.97%
105	63.73	3	64.125	-6.5875	2.01E-02	6.02E-02	1.17E-01	55.99%

ตาราง 2.4 (ต่อ)

Time(min)	Temp(^o C)	Interval	Tave	n	C-Value	Δ -Vulc	T-Vulc	% Cure
108	64.52	3	65.005	-6.4995	2.11E-02	6.34E-02	1.24E-01	58.99%
111	65.49	3	65.94	-6.406	2.24E-02	6.71E-02	1.30E-01	62.26%
114	66.39	3	66.865	-6.3135	2.36E-02	7.08E-02	1.38E-01	65.79%
117	67.34	3	67.795	-6.2205	2.50E-02	7.49E-02	1.46E-01	69.51%
120	68.25	3	68.73	-6.127	2.64E-02	7.91E-02	1.54E-01	73.47%
123	69.21	3	69.69	-6.031	2.79E-02	8.38E-02	1.63E-01	77.72%
126	70.17	3	70.595	-5.9405	2.95E-02	8.84E-02	1.72E-01	82.13%
129	71.02	3	71.49	-5.851	3.11E-02	9.32E-02	1.82E-01	86.64%
132	71.96	3	72.42	-5.758	3.28E-02	9.85E-02	1.92E-01	91.46%
135	72.88	3	73.28	-5.672	3.45E-02	1.04E-01	2.02E-01	96.44%
138	73.68	3	74.15	-5.585	3.64E-02	1.09E-01	2.13E-01	101.52%
141	74.62	3	75.08	-5.492	3.84E-02	1.15E-01	2.24E-01	107.10%
144	75.54	3	76.025	-5.3975	4.07E-02	1.22E-01	2.37E-01	113.22%
147	76.51	3	76.96	-5.304	4.30E-02	1.29E-01	2.51E-01	119.72%
150	77.41	3	77.78	-5.222	4.51E-02	1.35E-01	2.64E-01	126.10%
153	78.15	3	78.63	-5.137	4.75E-02	1.42E-01	2.78E-01	132.51%
156	79.11	3	79.56	-5.044	5.01E-02	1.50E-01	2.93E-01	139.71%
159	80.01	3	80.44	-4.956	5.28E-02	1.59E-01	3.09E-01	147.41%
162	80.87	3	81.33	-4.867	5.57E-02	1.67E-01	3.26E-01	155.35%
165	81.79	3	82.24	-4.776	5.88E-02	1.76E-01	3.43E-01	163.88%
168	82.69	3	83.105	-4.6895	6.19E-02	1.86E-01	3.62E-01	172.73%
171	83.52	3	84.015	-4.5985	6.53E-02	1.96E-01	3.82E-01	182.08%

นำค่าเวลา และ % cure ที่คำนวณได้มา plot กราฟได้ดังแสดงในภาพประกอบ



ภาพประกอบ 2.18 เปอร์เซนต์การวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์ที่ได้จากการคำนวณโดยเก็บข้อมูลจากเครื่องวัดระดับวัลคาไนซ์ (ชลดา และคณะ, 2547)

จากตาราง 2.4 และ ภาพประกอบ 2.18 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิภายในยางจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการอัดเบ้ามากขึ้นแต่อุณหภูมิภายในยางจะเพิ่มขึ้นช้ามาก เนื่องจากยางมีสมบัติเป็นฉนวนความร้อนทำให้น้ำความร้อนได้ช้าและเปอร์เซนต์การวัลคาไนซ์ที่คำนวณได้จะแปรผันตามเวลาในการอัดเบ้า ถ้าใช้เวลาในการอัดเบ้ามาก เปอร์เซนต์การวัลคาไนซ์ก็จะมากขึ้นไปด้วย

2.7 การใช้หลักสถิติเพื่อการออกสูตรยาง

โดยทั่วไปการทดลองมีเป้าหมาย 2 ประการ คือ ทำเพื่อหาค่าอธิบายหรือเพื่อการทำนาย เช่น ตัวเต็มชนิดนี้ส่งผลต่อความทนแรงดึงอย่างไร หรือตัวเร่ง ก กับตัวเร่ง ข เสริมซึ่งกันละกันหรือไม่ การทดลองเช่นนี้เป็นการทดลองเพื่อต้องการค่าอธิบาย ส่วนการทดลองเพื่อการทำนายอาจมีลักษณะทำนองนี้ เช่น จะต้องใช้ตัวเต็มกี่เปอร์เซนต์จึงจะ ได้ความแข็ง 70 IRHD จะตั้งเครื่องอย่างไรจึงจะได้ผลผลิตสูงสุด เป็นต้น

จะเห็นได้ว่าการทดลองเพื่อการออกสูตรยาง เป็นการทดลองที่มีจำนวนตัวแปร มาก บางตัวเป็นอิสระจากกันแต่หลายตัวมีปฏิริยาเสริมหรือหักล้างซึ่งกันและกัน ซึ่งหากทำการทดลองแบบ fractional โดยแปรค่าตัวแปรทีละตัวจะต้องทำการทดลองจำนวนมาก ทำให้สิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่าย เช่น

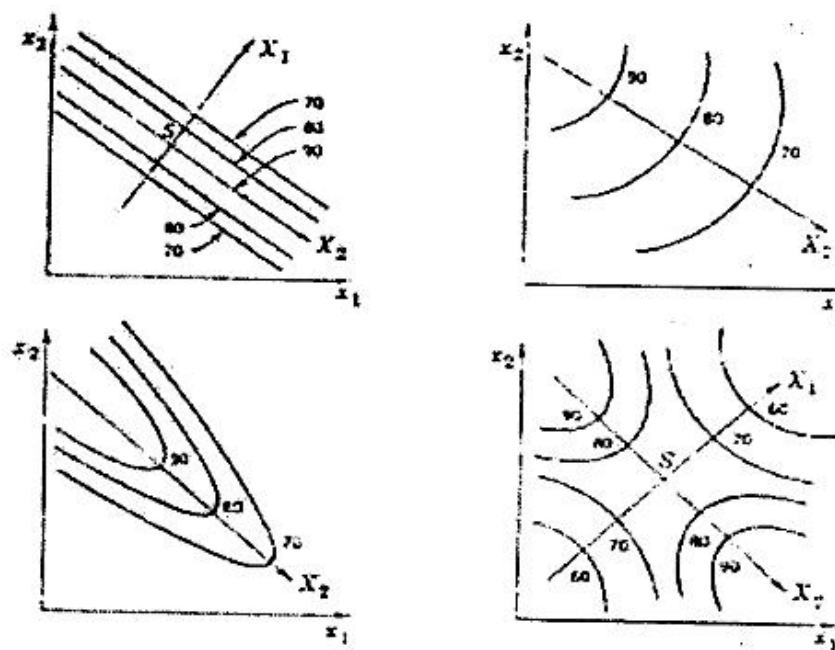
ถ้าต้องการศึกษาตัวแปร 2 ตัว แต่ละตัวแปรค่า 5 ระดับ จะต้องทำการทดลอง $5^2 = 25$ การทดลอง

ถ้าต้องการศึกษาตัวแปร 3 ตัว แต่ละตัวแปรค่า 5 ระดับ จะต้องทำการทดลอง $5^3 = 125$ การทดลอง

ถ้าต้องการศึกษาตัวแปร 4 ตัว แต่ละตัวแปรค่า 5 ระดับ จะต้องทำการทดลอง $5^4 = 625$ การทดลอง

ซึ่งจะเห็นว่า เมื่อมีตัวแปรที่จะต้องทำการศึกษามากกว่าตัวแปรนั้น แทนจะเป็นไปไม่ได้เลยในทางปฏิบัติ นอกจากนั้นการทดลองโดยการแปรปริมาณตัวแปรทีละตัว จะเป็นวิธีที่ยืดเยื้อไม่เห็นผลของปฏิกริยาที่สารแต่ละตัวมีต่อกัน แต่ถ้าแปรหลาย ตัวพร้อม ๆ กัน จำนวนสูตรที่จะทดลองจะมีจำนวนมากเกินไปไม่เหมาะในทางปฏิบัติ วิธีที่เหมาะสมมากกว่าสำหรับการทดลองเพื่อออกสูตรยาง ได้แก่การออกแบบการทดลองโดยอาศัยหลักสถิติตัวอย่างเช่น วิธี Response Surface Methodology (RSM) (Cochran and Cox, 1957; Derringer, 1988; Diamond, 1981) ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถลดจำนวนการทดลองลงได้มากโดยได้ผลลัพธ์ที่เชื่อถือได้อย่างมีความเชื่อมั่นทางสถิติ

หลักการของ RSM นั้นเป็นวิธีที่จะใช้ผลการทดลองจริงมาสร้างเป็นสมการเอมไพริคัล แล้วนำไปเขียนเป็นกราฟคอนทัวร์ ดังตัวอย่างตามภาพประกอบ 2.19 จากนั้นก็จะนำไปพิจารณาหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานต่อไป



ภาพประกอบ 2.19 ตัวอย่างกราฟคอนทัวร์แบบต่าง ๆ (Cochran and Cox, 1957)

สมการเอมไพริคัลที่ใช้โดยทั่วไปเป็นสมการโพลิโนเมียลอันดับสอง ซึ่งเขียนได้ดังนี้ (Derringer, 1988)

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k b_{ij} X_i X_j \quad (2.29)$$

เมื่อ Y คือ สมบัติที่สนใจ
 X คือ รหัสของตัวแปรอิสระที่ทำการศึกษา
 b คือ สัมประสิทธิ์ของตัวแปร ซึ่งเป็นตัวเลขที่แสดงขนาดของผลกระทบที่เกิดจากตัวแปรแต่ละตัว อาจมีค่าเป็นบวกเป็นลบ ขึ้นอยู่กับว่าตัวแปรนั้นส่งผลเชิงบวกหรือลบต่อสมบัตินั้น ๆ

k คือ จำนวนตัวแปรที่ทำการทดลอง
 เพราะฉะนั้นสมการการทดลองที่มี 2 ตัวแปรจะเป็นดังนี้

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{12} X_1 X_2 \quad (2.30)$$

สำหรับการทดลองที่ประกอบด้วยตัวแปร 3 ตัว สมการจะเป็นดังนี้

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{33} X_3^2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 \quad (2.31)$$

โดยทั่วไปการทดลองตามวิธี RSM มีขั้นตอนตามลำดับดังนี้

1. กำหนดตัวแปรอิสระที่จะทดลอง เช่น จะศึกษาผลของสารตัวเร่ง สารกระตุ้น และสารตัวเติมรวม 3 ตัว ที่แปรปริมาณพร้อม ๆ กัน
2. วางแผนการทดลองที่เหมาะสม เช่น จะแปรปริมาณกี่ระดับ จะเลือกปริมาณกลางที่ระดับใด และจะทดสอบสมบัติใดบ้าง
3. ทำการทดลอง ทดสอบตามแผนการทดลองที่กำหนดไว้
4. นำข้อมูลที่ได้มาหาสัมประสิทธิ์ของตัวแปรที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม (สมบัติของยาง) กับตัวแปรอิสระ (ชนิด ปริมาณ สารเคมี และตัวเติมที่ใช้)
5. สร้างกราฟคอนทัวร์ของความสัมพันธ์ที่ต้องการจากสมการที่ได้
6. เลือกสูตรที่เหมาะสมสำหรับใช้งานจากกราฟ

วิธี RSM เป็นวิธีการออกแบบการทดลองที่ดัดแปลงมาจากการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียล ซึ่งอาจเรียกการออกแบบการทดลองในลักษณะนี้ว่าเป็นการออกแบบการทดลองแบบ central composite rotatable design (Freakley, 1985) ซึ่งสามารถลดจำนวนการทดลองจริงลงได้มากแต่จะเพิ่มจุดที่จะทำให้ประมาณค่าได้ดีขึ้น โดยแบ่งกลุ่มการทดลองออกเป็น 3 กลุ่มคือ

1. factorial trials เป็นกลุ่มการทดลองที่ค่าของตัวแปรทั้งหมดมีค่าสูง หรือต่ำกว่าค่าปานกลาง 1 หน่วย (+1 หรือ -1)
2. star trials เป็นกลุ่มของการทดลองที่ค่าของตัวแปรมีค่าสูง หรือต่ำกว่าค่าปานกลาง a หน่วย (-a หรือ +a) ตามแนวแกนของตัวแปรทั้งหมด โดยที่ $a = 2^{(k/4)}$ เมื่อ k เป็นจำนวนตัวแปรอิสระ และค่า a แสดงดังตาราง 2.5

ตาราง 2.5 ค่า a ของจำนวนตัวแปรอิสระต่าง ๆ

จำนวนตัวแปรอิสระ (k)	ค่า a ($a = 2^{(k/4)}$)
2	1.414
3	1.632
4	2.000
5	2.378

3. center trials เป็นกลุ่มของการทดลองที่ค่าของตัวแปรมีค่าเท่ากับค่าปานกลาง (0) และมีการทำซ้ำเพื่อความถูกต้องที่ระดับเดิมอีก 4 ชุด

การดำเนินการทดลองตามวิธี RSM

1. กำหนดจำนวนตัวแปรอิสระ และช่วงของตัวแปรที่จะทดลอง (ช่วงของค่าตัวแปร)

2. คำนวณหา scale of variable (S) โดยใช้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$S = \text{พิสัย} / 2a \quad (2.32)$$

$$\text{เมื่อ } \text{พิสัย} = \text{ค่าสูงสุด} - \text{ค่าต่ำสุด} \quad (2.33)$$

3. คำนวณหาปริมาณจริงของตัวแปร จากความสัมพันธ์

$$\text{ปริมาณจริง} = (S \times \text{code}) + \text{Mean} \quad (2.34)$$

$$\text{เมื่อ } \text{code} = -a, -1, 0, +1 \text{ หรือ } +a$$

ตาราง 2.6 จำนวนระดับการแปรปรมาณของตัวแปรอิสระ

จำนวนตัวแปรอิสระ (k)	ระดับการแปรปรมาณ				
	-a	-1	0	+1	+a
2	-1.414	-1	0	+1	+1.414
3	-1.682	-1	0	+1	+1.682
4	-2.000	-1	0	+1	+2.000
5	-2.378	-1	0	+1	+2.378

4. ทำการทดลองตามปริมาณจริงของตัวแปรที่คำนวณได้ ตามจำนวนการทดลอง
ดังนี้

ตาราง 2.7 จำนวนการทดลองของจำนวนตัวแปรต่างๆ

จำนวนตัวแปรอิสระ (k)	จำนวนการทดลองที่แปรค่า 5 ระดับ			
	Factorial	Star	Center	รวม
2	4	4	5	13
3	8	6	6	20
4	16	8	7	31
5	32	10	10	52

ตาราง 2.8 แบบการทดลอง 2 ตัวแปรแปรค่า 5 ระดับ

สูตรที่	ตัวแปรที่ 1	ตัวแปรที่ 2	สูตรที่	ตัวแปรที่ 1	ตัวแปรที่ 2
1	-1	-1	8	0	-1.414
2	-1	+1	9	0	0
3	+1	-1	10	0	0
4	+1	+1	11	0	0
5	-1.414	0	12	0	0
6	+1.414	0	13	0	0
7	0	+1.414			

ตาราง 2.9 แบบการทดลอง 3 ตัวแปรแปรค่า 5 ระดับ

สูตรที่	ตัวแปรที่ 1	ตัวแปรที่ 2	ตัวแปรที่ 3	สูตรที่	ตัวแปรที่ 1	ตัวแปรที่ 2	ตัวแปรที่ 3
1	-1	-1	-1	11	0	-1.682	0
2	+1	-1	-1	12	0	+1.682	0
3	-1	+1	-1	13	0	0	-1.682
4	+1	+1	-1	14	0	0	+1.682
5	-1	-1	+1	15	0	0	0
6	+1	-1	+1	16	0	0	0
7	-1	+1	+1	17	0	0	0
8	+1	+1	+1	18	0	0	0
9	-1.682	0	0	19	0	0	0
10	+1.682	0	0	20	0	0	0

5. นำผลการทดลองที่ได้ไปคำนวณหาสัมประสิทธิ์ของความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติที่สนใจกับ ตัวแปรอิสระ (b_0, b_1, b_{11}, b_{12}) และ Standard error (SE.) ของสัมประสิทธิ์แต่ละตัว จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้ (Diamond, 1981)

สำหรับการทดลองที่มี 2 ตัวแปร

$$b_0 = 0.2(T) - 0.1(A^2+B^2) \quad (2.35)$$

$$b_i = 0.125(i) \quad (2.36)$$

$$b_{ii} = 0.125(ii) + 0.01875(A^2+B^2) - 0.1(T) \quad (2.37)$$

$$b_{ij} = 0.25 (ij) \quad (2.38)$$

โดยที่ I คือ A, B

ii คือ A^2, B^2

ij คือ AB

T คือ ผลรวมของผลคูณระหว่างจำนวนการทดลองกับผลการทดลอง

ทั้งหมด

A คือ ผลรวมของผลคูณระหว่าง code ของตัวแปร A กับผลการทดลอง

ทั้งหมด

B คือ ผลรวมของผลคูณระหว่าง code ของตัวแปร B กับผลการทดลอง

ทั้งหมด

A^2 คือ ผลรวมของผลคูณระหว่าง (code ของตัวแปร A)² กับผลการ

ทดลองทั้งหมด

B^2 คือ ผลรวมของผลคูณระหว่าง (code ของตัวแปร B)² กับผลการ

ทดลองทั้งหมด

AB คือ ผลรวมของผลคูณระหว่าง (code ของตัวแปร A คูณกับ code ของตัวแปร B) กับผลการทดลองทั้งหมด

ส่วนค่า Standard error (S.E.) สามารถคำนวณได้โดยอาศัยความสัมพันธ์

$$SE.(b_0) = S\sqrt{0.125} \quad (2.39)$$

$$SE.(b_{ii}) = S\sqrt{0.125 + 0.01875} \quad (2.40)$$

$$SE.(b_{ij}) = S\sqrt{0.25} \quad (2.41)$$

โดยที่ S คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ซึ่งคำนวณได้จาก

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (2.42)$$

สำหรับการทดลองที่มี 3 ตัวแปร

$$b_0 = 0.1663402267(T) - 0.05679210581(A^2+B^2+C^2) \quad (2.43)$$

$$b_i = 0.0732233047(i) - 0.05679210581(A^2+B^2+C^2) \quad (2.44)$$

$$b_{ii} = 0.062500(ii) + 0.00689003779(A^2+B^2+C^2) - 0.05679210581(T) \quad (2.45)$$

$$b_{ij} = 0.125000(ij) \quad (2.46)$$

$$SE.(b_i) = 0.271(S) \quad (2.47)$$

$$SE.(b_{ii}) = 0.263(S) \quad (2.48)$$

$$SE.(b_{ij}) = 0.354(S) \quad (2.49)$$

โดยที่ i คือ A, B

ii คือ A^2, B^2

ij คือ AB

T คือ ผลรวมของผลคูณระหว่างจำนวนการทดลองกับผลการทดลอง

ทั้งหมด

A คือ ผลรวมของผลคูณระหว่าง code ของตัวแปร A กับผลการทดลอง

ทั้งหมด

B คือ ผลรวมของผลคูณระหว่าง code ของตัวแปร B กับผลการทดลอง

ทั้งหมด

A^2 คือ ผลรวมของผลคูณระหว่าง (code ของตัวแปร A)² กับผลการ

ทดลองทั้งหมด

B^2 คือ ผลรวมของผลคูณระหว่าง (code ของตัวแปร B)² กับผลการ

ทดลองทั้งหมด

C^2 คือ ผลรวมของผลคูณระหว่าง (code ของตัวแปร C)² กับผลการ

ทดลองทั้งหมด

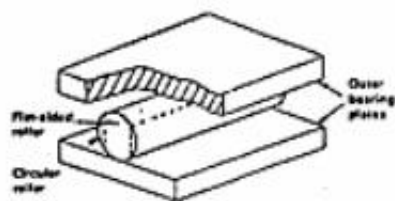
6. สร้างสมการเอมไพริคัลแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติที่ต้องการกับตัวแปร
ที่ทำการศึกษา

7. สร้างกราฟคอนทัวร์จากสมการเอมไพริคัลที่สร้างขึ้นโดยแทนค่าสมการด้วย
รหัสของตัวแปรที่ค่าต่าง ๆ

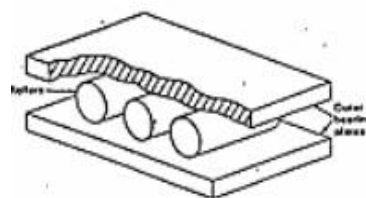
8. เลือกสูตรหรือพารามิเตอร์ที่เหมาะสมไปใช้ในการปฏิบัติจริงตามหลัก
optimization ต่อไป

2.8 ยางรองคอสสะพาน (bridge bearing)

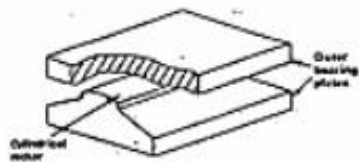
ยางรองคอสสะพาน (bridge bearing) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันการเคลื่อนไหวของสะพานขณะที่อยู่บนตอม่อ เนื่องจากการขยายตัวและหดตัวของสะพานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในแต่ละวัน รวมถึงการเคลื่อนไหวเนื่องจากการจราจรที่ผ่านไปมาบนสะพาน ยางรองคอสสะพานมีหลายประเภทเช่น roller bridge bearing, rocker bridge bearing และ elastomeric laminated bearing เป็นต้น ดังแสดงในภาพประกอบ 2.20 แต่ละประเภทมีข้อดีและข้อจำกัดต่างกัน วัสดุที่นำมาทำอาจใช้โลหะหรือยาง แต่ที่ทำจากโลหะ มีข้อเสียหลายข้อ เช่น เกิดการกัดกร่อน ต้องมีการบำรุงรักษาป้องกันสนิม การหล่อลื่นต้องทำอย่างสม่ำเสมอ จึงนิยมยางรองคอสสะพานที่ทำมาจากยาง เพราะมีราคาถูกกว่าที่ทำจากโลหะ การบำรุงรักษาน้อย ไม่ต้องมีการหล่อลื่น ไม่เกิดสนิม แต่อาจจะเกิดการเสื่อมสภาพเร็วกว่าประเภทโลหะ ยางรองคอสสะพานที่ทำมาจากยางอาจเป็นได้ทั้งแผ่นยางล้วน ๆ ที่เรียกว่า plain bearing หรือมีเหล็กเสริมแรงภายในที่ทำให้สามารถต้านทานแรงกดได้มากขึ้น ในกรณีนี้เรียกว่า elastomeric laminated bearing



(ก) single roller bearing



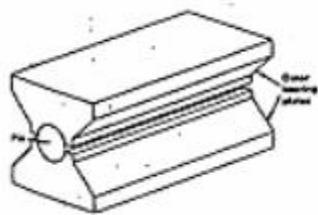
(ข) multiple roller bearing



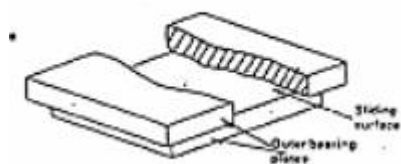
(ค) linear rocker bearing



(ง) cylindrical knuckle bearing



(จ) knuckle pin bearing



(ฉ) plane sliding bearing

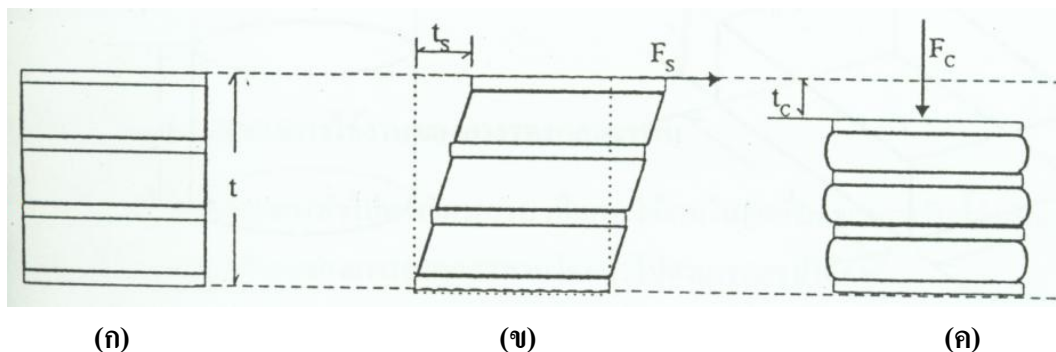
ภาพประกอบ 2.20 ตัวอย่างยางรองคอสะพานประเภทต่าง ๆ (วิไลพร และคณะ, 2541)

2.8.1 ข้อกำหนดของยางรองคอสะพาน

การออกแบบสร้างยางรองคอสะพานจะต้องออกแบบให้เหมาะสมกับสภาพการรับแรง ซึ่งเกิดจากน้ำหนักที่คงตัวของสะพาน (dead load) และน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นบนสะพานเนื่องจากการจรจร (live load) ตามข้อกำหนดที่จัดไว้เป็นมาตรฐาน กำหนดขึ้นโดยองค์กรต่าง ๆ หลายองค์กร รวมทั้งนักวิทยาศาสตร์ที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับยางรองคอสะพาน เช่น มาตรฐานของ BS5400 (1983 อ้างโดยวิไลพร และคณะ, 2541), BE 1/76 (1976 อ้างโดยวิไลพร และคณะ, 2541) และ Lindley (1962) เป็นต้น นิยามและข้อกำหนดที่สำคัญมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

2.8.1.1 ความเครียดในยาง

ความเครียดในยางเกิดจากแรงเฉือนและแรงกดที่กระทำต่อยาง ดังแสดงในรูปที่ 2.21 โดยนิยามของความเครียดเนื่องจากแรงเฉือนและแรงกดมีดังนี้



ภาพประกอบ 2.21 แผนภาพของแผ่นยางรองสะพานที่มีเหล็กเสริมแรงภายใน 2 ชั้น และเหล็กประกบบนล่าง 2 ชั้น โดยแบริง (ก) ไม่มีแรงกระทำ (ข) มีแรงเฉือน F_s กระทำ (ค) มีแรงกด F_c กระทำ

จากแผนภาพของยางรองคอสะพาน กำหนดให้ A เป็นพื้นที่รับแรงของยางรองคอสะพานที่มีความหนาทั้งหมดขณะที่ไม่มีแรงกระทำเป็น t โดยที่ G และ E_0 เป็นมอดุลัสเฉือน (shear modulus) และมอดุลัสยืดหยุ่น (Young's modulus) ของยางตามลำดับ

จากรูปที่ 2.21 (ข) ขณะที่มอดุลัสเฉือน F_s กระทำต่อพื้นที่ A ทำให้ผิวบนของยางถูกเฉือนไปเป็นระยะ t_s ทำให้ความเครียดเฉือน (หรือความเครียดเฉือนเฉลี่ยของแบร็ง γ_b) นิยามได้ดังนี้

$$\gamma_b = \frac{t_s}{t} = \frac{GA}{F_s} \quad (2.50)$$

ส่วนในกรณีที่ยางมีแรงกด F_c กระทำ (รูปที่ 2.21 (ค)) แล้วทำให้ยุบไปเป็นระยะ t_c ความเครียดกด (หรือความเครียดกดเฉลี่ยของแบร็ง e_c) จะมีความสัมพันธ์กับ compressive modulus (E_c) ดังนี้

$$e_c = \frac{t_c}{t} = \frac{E_c A}{F_c} \quad (2.51)$$

เมื่อ $E_c = \frac{F_c/A}{t_c/t} = \text{ความเค้น} / \text{ความเครียด}$ (2.52)

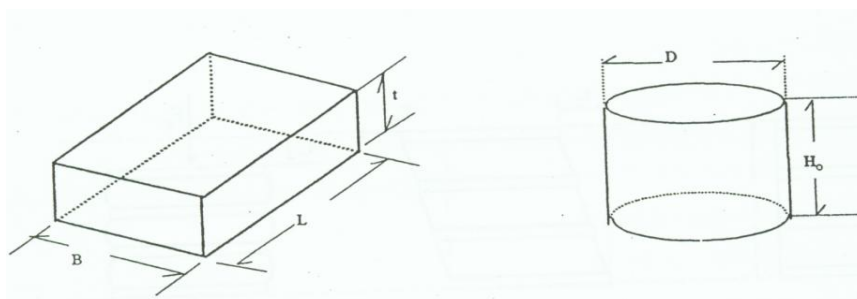
โดย E_c สามารถเขียนในรูปของ E_0 และ shape factor (S) ดังนี้

$$E_c = E_0 (1 + 2kS^2) \quad (2.53)$$

เมื่อ k เป็นค่าคงตัวที่ขึ้นกับความแข็งของยางที่มีค่าแสดงในตาราง 2.10

ส่วนค่า S เป็นอัตราส่วนของพื้นที่ที่รับน้ำหนัก (loaded area) ต่อพื้นที่อิสระจากแรง ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 2.22 หรือ

$$\text{shape factor (S)} = \text{load area} / \text{force free area} \quad (2.54)$$



$$(ก) S = \frac{BL}{2t(B+L)}$$

$$(ข) S = \frac{\pi D^2 / 4}{\pi D H_0} = \frac{D}{4H_0}$$

ภาพประกอบ 2.22 การหา shape factor (S) ของ(ก) แผ่นยางกว้าง B ยาว L หนา t และ (ข) ทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง D สูง H_0

ตาราง 2.10 ค่าความแข็งและค่ามอดูลัสของยาง

ความแข็ง (IRHD)	Young's modulus E_0 , N/mm ²	shear modulus G , N/mm ²	k	bulk Modulus E_b , N/mm ²
45	1.80	0.54	0.80	1,000
50	2.20	0.64	0.73	1,030
55	3.25	0.81	0.64	1,090
60	4.45	1.06	0.57	1,150
65	5.85	1.37	0.54	1,210
70	7.35	1.73	0.53	1,270
75	9.40	2.22	0.52	1,330

2.8.1.2 ข้อกำหนดของการใช้งานของแผ่นยางรองคอสะพาน

การใช้งานของยางทั่วไปทางวิศวกรรม เป็นการใช้งานในลักษณะของการรับน้ำหนักและรับแรงเฉือน ที่มีข้อกำหนดของการใช้งานของยางรองคอสะพานโดยทั่วไปสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ความทนทานต่อการกด ยางต้องรับน้ำหนักแล้วทำให้ความสูงยุบไปไม่เกิน 10 - 15% (Gobel, 1974) หรือต้องไม่เกิน 15% ของความหนาเดิม (Lindley, 1962)
2. ยางควรรับแรงเฉือนสูงสุดไม่เกิน 0.3 – 0.4 N/mm² (Gobel, 1974) หรือ shear strain สูงสุดไม่เกิน 50% (Lindley, 1962)

2.9 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมยางรองคอสะพาน (มอก.951-2533)

2.9.1 ขอบข่าย

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้กำหนดประเภท ชนิดและแบบ มิติและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน การทำคุณลักษณะที่ต้องการ เครื่องหมายและฉลาก การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน และการทดสอบยางรองคอสะพาน

2.9.2 บทนิยาม

ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ มีดังต่อไปนี้

2.9.2.1 ยางรองคอสะพาน ซึ่งต่อไปนี้เป็นมาตรฐานนี้จะเรียกว่า “แผ่นยาง” หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นแผ่น ทำจากยางโดยอาจมีวัสดุเสริมแรงด้วยก็ได้ ใช้ติดตั้งบนตอม่อสะพานเพื่อรองรับน้ำหนักโครงสร้างส่วนบน และน้ำหนักบรรทุก

2.9.2.2 วัสดุเสริมแรง หมายถึง แผ่นเหล็กกล้าที่ละมุนที่ใช้เสริมระหว่างชั้นยาง หรือเสริมผิวของแผ่นยาง

2.9.3 ประเภท ชนิดและแบบ

2.9.3.1 แผ่นยาง แบ่งตามชนิดของยางที่ใช้ทำออกเป็น 2 ประเภท คือ

2.9.3.1.1 ประเภท CR ทำจากยางสังเคราะห์ชนิดคลอโรพรีน

2.9.3.1.2 ประเภท NR ทำจากยางธรรมชาติ

2.9.3.2 แผ่นยางแต่ละประเภท แบ่งตามความแข็งออกเป็น 3 ชนิด คือ

2.9.3.2.1 ชนิด 50 IRHD

2.9.3.2.2 ชนิด 60 IRHD

2.9.3.2.3 ชนิด 70 IRHD

2.9.3.3 แผ่นยางแต่ละชนิด แบ่งออกเป็น 4 แบบ คือ

2.9.3.3.1 แบบไม่มีวัสดุเสริมแรง ดังตัวอย่างในภาพประกอบ 2.23

2.9.3.3.2 แบบมีวัสดุเสริมแรงที่ผิวด้านใดด้านหนึ่งหรือทั้ง 2 ด้าน

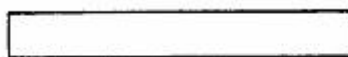
ดัง ภาพประกอบ 2.24

2.9.3.3.3 แบบมีวัสดุเสริมแรงระหว่างชั้นยาง ดังภาพประกอบที่

ภาพประกอบ 2.25

2.9.3.3.4 แบบมีวัสดุเสริมแรงระหว่างชั้นยางและที่ผิวด้านใดด้าน

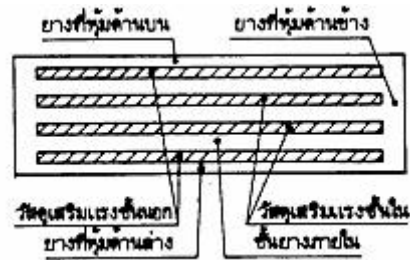
หนึ่งหรือทั้ง 2 ด้าน ดังภาพประกอบ 2.26



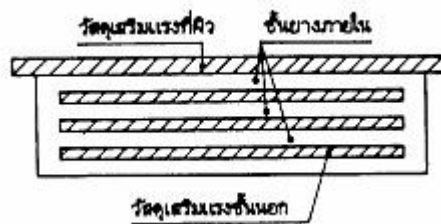
ภาพประกอบ 2.23 ตัวอย่างแผ่นยางแบบไม่มีวัสดุเสริมแรง



ภาพประกอบ 2.24 ตัวอย่างแผ่นยางแบบมีวัสดุเสริมแรงที่ผิว



ภาพประกอบ 2.25 ตัวอย่างแผ่นยางแบบมีวัสดุเสริมแรงระหว่างชั้นยาง



ภาพประกอบ 2.26 ตัวอย่างแผ่นยางแบบมีวัสดุเสริมแรงระหว่างชั้นยางและที่ผิว

2.9.4 มิติและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน

2.9.4.1 ความกว้างและความยาว หรือเส้นผ่านศูนย์กลางกลาง และความหนา

ให้เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้ซื้อและผู้ขาย โดยจะมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนได้ไม่เกินค่าที่กำหนดในตาราง 2.11

การทดสอบให้ปฏิบัติตามข้อ 2.9.9.2 และข้อ 2.9.9.3

ตาราง 2.11 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของมิติ

มิติ	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อน (มิลลิเมตร)
ความกว้างและความยาว หรือเส้นผ่านศูนย์กลาง (D)	+ 50 + 0.005 D
ความหนารวมของแผ่นยาง (T)	+ 20 + 0.04 D
ความหนาของยางที่หุ้มด้านบน ด้านล่างและด้านข้าง	+ 30
ความหนาของชั้นยางภายใน	± ร้อยละ 20
ขนาดของรู ร่อง และรางลื่น (ถ้ามี)	+ 20
ตำแหน่งรู ร่อง และรางลื่น (ถ้ามี)	± 3

2.9.4.2 ความหนาของวัสดุเสริมแรง

วัสดุเสริมแรงระหว่างชั้นยางต้องหนาไม่น้อยกว่า 2.0 มิลลิเมตร นอกจากแผ่นยางที่มีความยาวหรือเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 450 มิลลิเมตร วัสดุเสริมแรงระหว่างชั้นยางต้องหนาไม่น้อยกว่า 1.5 มิลลิเมตร การทดสอบให้ทำโดยการวัดด้วยเครื่องวัดที่วัดได้ละเอียดถึง 0.05 มิลลิเมตร

2.9.4.3 ความหนาของชั้นยาง

ความหนาของชั้นยางภายใน ความหนาของยางที่หุ้มด้านบนบนด้านล่าง และด้านข้าง ต้องเป็นไปตามที่ระบุไว้ในแบบ (drawing) ซึ่งไม่น้อยกว่า 4.5 มิลลิเมตร โดยมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนได้ไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ในตาราง 2.11

การทดสอบให้ทำโดยการวัดด้วยเครื่องวัดที่ละเอียดถึง 0.05 มิลลิเมตร

2.9.4.4 ความลาดเอียง

ผิวระนาบบนและล่างจะมีความลาดเอียงเฉลี่ยจากระนาบได้ไม่เกิน 0.005

การทดสอบให้ปฏิบัติตามข้อ ข้อ 2.9.9.4

2.9.5 การทำ

2.9.5.1 แผ่นยางแบบไม่มีวัสดุเสริมแรงอาจหล่อขึ้นรูป หรือตัดให้ได้ขนาดตามต้องการจากยางที่ได้จากการหล่อขึ้นรูปหรือการอัดรีด การตัดไม่ควรใช้ความร้อน และผิวที่เกิดจากการตัดควรเรียบ

2.9.5.2 แผ่นยางแบบมีวัสดุเสริมแรงทุกแบบควรหล่อขึ้นรูปเป็นชิ้นเดียวกัน โดยใช้ความร้อนและแรงอัด

2.9.5.3 การยึดติดของยางและวัสดุเสริมแรงควรกระทำในระหว่างการหล่อขึ้นรูป ขอบนอกของยางที่ยึดติดกับวัสดุเสริมแรงภายนอกควรมีรูปร่างที่ไม่ก่อให้เกิดการรวมตัวของความเค้น ดังตัวอย่างในภาพประกอบ 2.24

2.9.5.4 ขอบวัสดุเสริมแรงระหว่างชั้นยางควรลบมุม

2.9.6 คุณลักษณะที่ต้องการ

2.9.6.1 ลักษณะทั่วไป

ผิวต้องเรียบ ปราศจากข้อบกพร่องที่อาจเป็นผลเสียหายต่อการใช้งาน เช่น รอยแตก รุพูน ฟองอากาศ รอยดำหนึ่ เนื่องจากมีสิ่งแปลกปลอม แบบมีวัสดุเสริมแรงที่ผิวต้องมีการเคลือบผิวเพื่อป้องกันสนิม

การทดสอบให้ทำโดยการพินิจ

2.9.6.2 สมบัติทางฟิสิกส์

สมบัติทางฟิสิกส์ของส่วนที่เป็นเนื้อยาง ไม่รวมวัสดุเสริมแรงของแผ่นยาง ต้องเป็นดังนี้

2.9.6.2.1 ประเภท CR เป็นไปตามที่กำหนดในตาราง 2.12

2.9.6.2.2 ประเภท NR เป็นไปตามที่กำหนดในตาราง 2.13

ตาราง 2.12 สมบัติทางฟิสิกส์ของแผ่นยางประเภท CR

รายการ ที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด			วิธีทดสอบ ตาม
		ชนิด 50	ชนิด 60	ชนิด 70	
1	ความแข็ง IRHD	50 ± 5	60 ± 5	70 ± 5	ข้อ 2.9.9.5
2	ความต้านแรงดึง เมกะพาสคัล ไม่น้อยกว่า	17.0	17.0	17.0	ข้อ 2.9.9.6
3	ความยืดเมื่อขาด ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	400	350	300	ข้อ 2.9.9.6
4	ความทนอุณหภูมิสูง				ข้อ 2.9.9.7
	- ความแข็ง เพิ่มขึ้น IRHD ไม่เกิน	15	15	15	
	- ความต้านแรงดึง ลดลง ร้อยละ ไม่เกิน	15	15	15	
	- ความยืดเมื่อขาด ลดลง ร้อยละ ไม่เกิน	40	40	40	
5	การยุบตัวเนื่องจากแรงอัด ร้อยละ ไม่เกิน	35	35	35	ข้อ 2.9.9.8

ตาราง 2.13 สมบัติทางฟิสิกส์ของแผ่นยางประเภท NR

รายการ ที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด			วิธีทดสอบ ตาม
		ชนิด 50	ชนิด 60	ชนิด 70	
1	ความแข็ง IRHD	50 ± 5	60 ± 5	70 ± 5	ข้อ 2.9.9.5
2	ความต้านแรงดึง เมกะพาสคัล ไม่น้อยกว่า	17.0	17.0	17.0	ข้อ 2.9.9.6
3	ความยืดเมื่อขาด ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	450	400	300	ข้อ 2.9.9.6
4	ความทนอุณหภูมิสูง				ข้อ 2.9.9.7
	- ความแข็ง เพิ่มขึ้น IRHD ไม่เกิน	10	10	10	
	- ความต้านแรงดึง ลดลง ร้อยละ ไม่เกิน	25	25	25	
	- ความยืดเมื่อขาด ลดลง ร้อยละ ไม่เกิน	25	25	25	
5	การยุบตัวเนื่องจากแรงอัด ร้อยละ ไม่เกิน	25	25	25	ข้อ 2.9.9.8

2.9.6.3 ความทน โอโซน

เมื่อทดสอบตามข้อ 2.9.9.9 แล้ว ต้องไม่มีรอยแตก

2.9.6.4 ความทนแรงกด (เฉพาะแผ่นยางแบบมีวัสดุเสริมแรง)

เมื่อทดสอบตามข้อ 2.9.9.10 แล้ว ต้องเป็นดังนี้

2.9.6.4.1 ค่าความแข็งดิ่งการอัด (compression stiffness) ของแผ่นยางแต่ละแผ่นแตกต่างจากค่ามัธยฐาน (median) ไม่นเกินร้อยละ 10

2.9.6.4.2 ภายหลังจากทดสอบตามข้อ 2.9.9.10.2 แล้ว ไม่เกิดการล่อนหลุดระหว่างยางกับวัสดุเสริมแรง และไม่มีรอยแตกขนาดกว้างและลึกเกิน 2 มิลลิเมตรมากกว่า 2 รอยขึ้นไป

2.9.6.4.3 ความหนาของชั้นยางคลาดเคลื่อนได้ไม่เกินค่าที่กำหนดในตาราง 2.10

2.9.6.4.4 ความต้านทานแรงยึดเหนี่ยว (เฉพาะแผ่นยางแบบมีวัสดุเสริมแรง)

ความต้านทานแรงยึดเหนี่ยวระหว่างยางกับวัสดุเสริมแรง ต้องไม่น้อยกว่า 7.0 นิวตันต่อความกว้าง 1 มิลลิเมตร

การทดสอบให้ปฏิบัติตาม ISO 813

2.9.7 เครื่องหมายและฉลาก

2.9.7.1 ที่แผ่นยางทุกแผ่นอย่างน้อยต้องมีเลข อักษร หรือเครื่องหมายแจ้งรายละเอียดต่อไปนี้ให้เห็นได้ง่ายชัดเจน

2.9.7.1.1 ประเภท ชนิดและแบบ

2.9.7.1.2 ขนาด เป็นมิลลิเมตร

2.9.7.1.3 น้ำหนักกดที่ออกแบบ (เฉพาะแบบมีวัสดุเสริมแรง)

2.9.7.1.4 เดือน ปีที่ทำ หรือรหัสรุ่นที่ทำ

2.9.7.1.5 ชื่อผู้ทำหรือโรงงานที่ทำ หรือเครื่องหมายการค้าที่จดทะเบียน

ทะเบียน

2.9.7.1.6 ประเทศที่ทำ

ในกรณีที่ใช้ภาษาต่างประเทศ ต้องมีความหมายตรงกับภาษาไทยที่กำหนดไว้ข้างต้น

2.9.7.2 ผู้ทำผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่เป็นไปตามมาตรฐานนี้ จะแสดงเครื่องหมายมาตรฐานกับผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนั้น ได้ต่อเมื่อได้รับใบอนุญาตจากคณะกรรมการมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแล้ว

2.9.8 การชักตัวอย่างและเกณฑ์การตัดสิน

2.9.8.1 รุ่น ในที่นี้หมายถึง แผ่นยางประเภท ชนิด แบบและขนาดเดียวกัน รูปร่างเหมือนกัน มีส่วนประกอบและการทำอย่างเดียวกัน ที่ทำหรือส่งมอบหรือซื้อขายในระยะเวลาเดียวกัน

2.9.8.2 การชักตัวอย่างและเกณฑ์การตัดสิน ให้เป็นไปตามแผนการชักตัวอย่างที่กำหนดต่อไปนี้ หรืออาจใช้แผนการชักตัวอย่างอื่นที่เทียบเท่าทางวิชาการกับแผนที่กำหนดไว้

2.9.8.2.1 การชักตัวอย่าง

ให้ชักตัวอย่างโดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกันตามจำนวนที่กำหนดในตาราง 2.11

2.9.8.2.2 เกณฑ์ตัดสิน

จำนวนตัวอย่างที่ไม่เป็นไปตามข้อ 2.9.4 ข้อ 2.9.6 และข้อ 2.9.7 ในแต่ละรายการ ต้องไม่เกินเลขจำนวนที่ยอมรับที่กำหนดในตารางที่ 2.14 จึงจะถือว่าแผ่นยางรุ่นนั้นเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้

ตาราง 2.14 แผนการซักร้อยตัวอย่าง (ข้อ 2.9.8.2.1 และข้อ 2.9.8.2.2)

ขนาดรุ่นแผ่น	ขนาดตัวอย่างแผ่น	เลขจำนวนที่ยอมรับ
ไม่เกิน 150	3	0
151 ขึ้นไป	13	1

2.9.9 การทดสอบ

2.9.9.1 ภาวะทดสอบ

หากมิได้กำหนดไว้เป็นอย่างอื่น ให้ทดสอบที่อุณหภูมิ 27 ± 2 °C และความชื้นสัมพัทธ์ ร้อยละ 65 ± 5 ภายหลังจากเก็บขึ้นทดสอบไว้ที่ภาวะดังกล่าวเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 16 ชั่วโมง

หมายเหตุ ถ้าทดสอบในภาวะที่กำหนดไม่ได้ ให้ทดสอบทันทีที่นำขึ้นทดสอบออกจากภาวะดังกล่าว

2.9.9.2 ความกว้างและความยาว หรือเส้นผ่านศูนย์กลาง

ใช้เครื่องวัดที่วัดได้ละเอียดถึง 0.5 มิลลิเมตร วัดความกว้างและความยาวหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นยาง ไม่น้อยกว่า 3 แห่ง และรายงานผลทุกค่า

2.9.9.3 ความหนา

ใช้เครื่องวัดที่วัดได้ละเอียดถึง 0.05 มิลลิเมตร วัดความหนาของแผ่นยางไม่น้อยกว่า 3 แห่ง และรายงานผลทุกค่า

2.9.9.4 ความลาดเอียง

2.9.9.4.1 เครื่องมือ

2.9.9.4.1.1 โต๊ะระดับ

2.9.9.4.1.2 เครื่องวัดแบบมีหน้าปิดที่วัดละเอียดได้ถึง 0.001 มิลลิเมตร พร้อมขาตั้งซึ่งสามารถเคลื่อนที่บนโต๊ะระดับได้

2.9.9.4.2 วิธีทดสอบ

2.9.9.4.2.1 วัดความลาดเอียงของผิวระนาบบนและล่าง โดยวางตัวอย่างบนโต๊ะระดับให้ผิวด้านใดด้านหนึ่งอยู่ด้านบน

2.9.9.4.2.2 ใช้เครื่องวัดแบบมีหน้าปิดวัดค่าเบี่ยงเบนที่ผิวด้านบนตามแนวความยาวและแนวความกว้างของตัวอย่าง หากตัวอย่างเป็นแผ่นกลมให้วัดตาม

แนวเส้นผ่านศูนย์กลาง จำนวน 2 แนวตั้งฉากกัน โดยให้วัดแต่ละจุดห่างกันไม่เกิน 100 มิลลิเมตร พร้อมขาตั้งซึ่งสามารถเคลื่อนที่บนโต๊ะระดับได้และแต่ละแนวต้องไม่น้อยกว่า 3 จุด

2.9.9.4.2.3 นำค่าเบี่ยงเบนที่วัดได้ทุกค่ามาคำนวณหา

ค่าความลาดเอียงเฉลี่ย ตามวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least squares method)

2.9.9.4.2.4 กลับตัวอย่างให้ผิวอีกด้านหนึ่งอยู่ด้านบน

แล้วปฏิบัติตามข้อ 2.9.9.4.2.2 และข้อ 2.9.9.4.2.3

2.9.9.4.3 วิธีคำนวณ

$$\text{ความลาดเอียงเฉลี่ย} = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (2.55)$$

n คือ จำนวนจุดที่วัด

x_i คือ ระยะของจุดแต่ละจุดที่วัดจากจุดตั้งต้นตามแนวระนาบ

y_i คือ ค่าเบี่ยงเบนแต่ละจุดที่วัดตามแนวตั้ง เป็นมิลลิเมตร

2.9.9.5 ความแข็ง

ให้ปฏิบัติตาม ISO 48 โดยใช้ชิ้นทดสอบซึ่งเตรียมจากส่วนผิวด้านนอกของแผ่นยาง

2.9.9.6 ความต้านแรงดึงและความยืดเมื่อขาด

ให้ปฏิบัติตาม ISO 37 โดยใช้ชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ ชนิดที่ 1 ซึ่งเตรียมจากส่วนผิวด้านนอกของแผ่นยาง

2.9.9.7 ความทนอุณหภูมิสูง

ใช้ชิ้นทดสอบตามข้อ 2.9.9.5 และข้อ 2.9.9.6 นำไปอบตาม ISO 188 air-oven method โดยใช้อุณหภูมิและเวลาตามตาราง 2.15 แล้วนำชิ้นทดสอบไปทดสอบความแข็งและความต้านแรงดึงและความยืดเมื่อขาด แล้วนำไปคำนวณเปรียบเทียบค่าก่อนอบข้อ 2.9.9.5 และข้อ 2.9.9.6

ตาราง 2.15 อุณหภูมิและเวลาในการอบ (ข้อ 2.9.9.5 และข้อ 2.9.9.6)

ประเภท	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)
CR	100 ± 1	70
NR	70 ± 1	168

2.9.9.8 การยุบตัวเนื่องจากแรงอัด

ให้ปฏิบัติตาม ISO 815 โดยใช้ชั้นทดสอบชนิดใหญ่ ทดสอบที่อุณหภูมิตามที่กำหนดในตาราง 2.15 เวลา 22 ชั่วโมง

2.9.9.9 ความทนไอโซน

ให้ปฏิบัติตาม ISO 1431/1 procedure A โดยใช้ชั้นทดสอบซึ่งเตรียมจากส่วนผิวด้านนอกของแผ่นยาง ดึงให้ยืดร้อยละ 20 ทดสอบที่อุณหภูมิ 40 ± 2 องศาเซลเซียส โดยใช้ความเข้มข้นของไอโซนและเวลาตามตาราง 2.16 แล้วตรวจสอบรอยแตกด้วยแว่นขยายที่มีกำลังขยาย 7 เท่า

ตาราง 2.16 ความเข้มข้นของไอโซนและเวลาในการทดสอบความทนไอโซน (ข้อ 2.9.9.9)

ประเภท	ความเข้มข้นของไอโซน (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อ 100 ลูกบาศก์เมตร)	เวลา (ชั่วโมง)
CR	100 ± 10	96
NR	25 ± 5	48

2.9.9.10 ความทนแรงกด

2.9.9.10.1 ใช้น้ำหนักกดลงบนแผ่นยาง โดยเพิ่มน้ำหนักครั้งละ 0.2 เท่าของน้ำหนักกดที่ออกแบบ ภายในเวลา 84 ถึง 156 วินาที เมื่อน้ำหนักกดแต่ละครั้งให้ทิ้งไว้เป็นเวลา 30 วินาที แล้วบันทึกค่าของน้ำหนักกด และระยะยุบตัว (deflection) เพิ่มน้ำหนักกดจนเท่ากับน้ำหนักกดที่ออกแบบ แล้วนำค่าที่บันทึกไว้มาคำนวณหาค่าความแข็งดึงอัด

2.9.9.10.2 เพิ่มน้ำหนักกดลงบนแผ่นยางให้มีค่า 1.5 เท่าของน้ำหนักกดที่ออกแบบ ทิ้งไว้จนกระทั่งน้ำหนักกดหรือการยุบตัวมีค่าคงที่ แล้วตรวจพินิจ

2.9.9.10.3 ปล่อน้ำหนักกดออก แล้ววัดความหนาของชั้นยาง