

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 บทนำ

ยางเป็นสารพอลิเมอร์ ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ประกอบด้วยโมโนเมอร์หลายพันหน่วยเข้าต่อกัน ยางแตกต่างไปจากพอลิเมอร์อื่น กล่าวคือ เมื่อมีแรงกระทำ ยางสามารถเกิดการผิดรูปได้และกลับสู่รูปเดิมได้เมื่อเอาแรงกระทำออก ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ที่ยังเป็นยางดิบ ไม่อาจที่จะนำไปใช้งานได้โดยตรง จะต้องมีการปรับปรุง โดยการใส่สารเคมีบางอย่างเข้าไปในยางเพื่อวัตถุประสงค์ดังนี้

1. เพื่อให้ได้สมบัติทางกายภาพตามที่ผลิตภัณฑ์ต้องการ
2. เพื่อให้สามารถแปรรูปยางได้ในงานผลิตโดยไม่มีปัญหา
3. เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีต้นทุนค่าที่จะแข่งขันในตลาดได้

ยางดิบยังมีสมบัติค่อนข้างจำกัด เช่น มีความแข็งแรงต่ำ มีความแข็ง-นิ่ม ขณะเดียวกันไม่อาจจะใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ทุกประเภท ดังนั้นการใส่สารเคมี สารตัวเติมบางตัวจะไปเสริมความแข็งของยางได้ รวมทั้งยางดิบยังมีราคาค่อนข้างแพง ถ้าจะใช้เพียงยางอย่างเดียว จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่อาจจะอยู่ในตลาดที่แข่งขันกันได้ แต่การใส่สารเคมีมากเกินไป เป็นสิ่งที่พึงระวัง เพราะจะทำให้ระบบยุ่งยากมากก่อให้เกิด การสับสน และบางครั้งสารเคมีที่ใส่เข้าไป เกิดการหักล้างกันเอง ทำให้สิ้นเปลือง

การวัลคาไนซ์ เป็นการก่อให้เกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติยางดังนี้

1. เปลี่ยนจากสมบัติเทอร์โมพลาสติก ไปเป็น สมบัติเทอร์โมเซต
2. เปลี่ยนจากสมบัติกึ่งพลาสติก กึ่งอีลาสติก ไปเป็น อีลาสติก
3. เปลี่ยนจากการละลายในตัวทำละลาย ไปเป็น การไม่ละลาย

ดังนั้นการวัลคาไนซ์จึงเป็นการแก้ไขข้อเสียบางประการของยางดิบ ที่ได้กล่าวมาแล้ว ระบบการวัลคาไนซ์ที่ใช้กันมากที่สุดคือ ระบบการใช้กำมะถัน ถึงแม้ว่า การใช้กำมะถันจะจำกัดอยู่ในยางจำพวกที่มีพันธะคู่ที่ว่องไวเท่านั้น เช่น ยางธรรมชาติ ยางเอสปีอาร์ และยางไนไตรล์ เป็นต้น การเชื่อมโยงโดยใช้กำมะถันเพียงอย่างเดียว ถึงแม้จะทำที่อุณหภูมิสูง ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงจะเป็นไปได้ช้ามาก แต่การใส่สารตัวเร่งเข้าไปเพียงเล็กน้อยจะช่วยลดเวลาการวัลคาไนซ์ลง และการใช้สารกระตุ้นก็จะทำให้ยางวัลคาไนซ์อย่างสมบูรณ์ และใช้กำมะถันได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

2.2 ยางสไตรีนบิวทาไดอีน (Styrene-Butadiene Rubber, SBR)

พพรธณ (2540) ยางเอสปีอาร์ นับเป็นยางที่ใช้กันทั่วไปเช่นเดียวกับยางธรรมชาติ จึงนับว่ายางทั้งสองนี้เป็นคู่แข่งกันโดยตรงที่จะทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ แต่ยางทั้งสองก็ยังคงมีความแตกต่างกันทางด้านสมบัติและการการออกสูตรยาง

2.2.1 โครงสร้างทางเคมี

ยางเอสปีอาร์เป็นโคพอลิเมอร์ของสไตรีนและบิวทาไดอีน มอนอเมอร์สองชนิดนี้จะมาเชื่อมต่อกันมีสูตร โครงสร้างดังนี้



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางเอสปีอาร์ (พพรธณ, 2540)

ยางเอสปีอาร์เป็นยางที่สังเคราะห์ขึ้น การสังเคราะห์โดยสูตรที่ต่างกันและสภาวะที่ต่างกัน จะทำให้เกิดเป็นพอลิเมอร์ต่างๆ หลายชนิด และมีสมบัติที่แตกต่างกัน ซึ่งสมบัติที่แตกต่างกันนั้น จะขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1. สัดส่วนของบิวทาไดอีนต่อสไตรีน
2. น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายของโมเลกุล
3. ลำดับของการจัดตัวของมอนอเมอร์ในสายโซ่
4. โครงสร้างระดับจุลภาค (Microstructure)
5. ส่วนที่ไม่ใช่ยาง

2.2.2 สมบัติทางกายภาพ

2.2.2.1 ยางคียบ

ยางเอสบีอาร์ เป็นยางที่สังเคราะห์ขึ้น สามารถควบคุมขนาดของโมเลกุลได้ จึงทำให้ได้ยางที่มีความหนืดตามต้องการ ดังนั้นยางเอสบีอาร์สามารถนำมาใช้งานได้โดยไม่ต้องมีการบดขยักก่อนที่จะนำมาผสมกับสารเคมีเหมือนกับยางธรรมชาติ

การบดขยักยางเอสบีอาร์ ไม่ทำให้ยางนิ่มลงเหมือนกับยางธรรมชาติ ทำให้ยางเอสบีอาร์สามารถควบคุมความหนืดได้ดี และจะไม่มีปัญหาของยางนิ่มเกินไป ถ้าต้องการจะให้ยางนิ่มพิเศษจะต้องใช้พลาสติกไซเซอร์ใส่เข้าไป

ยางเอสบีอาร์พันลูกกลิ้งได้ไม่ดีเหมือนยางธรรมชาติ ยางเอสบีอาร์มักจะห้อยย้อยจากลูกกลิ้ง จึงมักจะผสมยางเอสบีอาร์ในเครื่องผสมแบบปิด แต่ถ้าจะผสมในเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง ควรจะตั้งอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 50 องศาเซลเซียส ยางเอสบีอาร์จะใช้พลังงาน ในการผสมยางสูงกว่ายางธรรมชาติ และให้ความร้อนออกมามากกว่า

เนื่องจากใน โมเลกุลของยางเอสบีอาร์ มีบิวทาไดอีนเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ในยาง บิวทาไดอีนนี้มีความว่องไวในปฏิกิริยาช้ากว่าไอโซพรีน ที่มีอยู่ในโมเลกุลของยางธรรมชาติ ดังนั้นยางเอสบีอาร์จึงวัลคาไนซ์ช้ากว่ายางธรรมชาติ เมื่อต้องการให้อัตราการอบสุกของยางเอสบีอาร์ใกล้เคียงกับยางธรรมชาติ จำเป็นต้องใช้สารตัวเร่งมากกว่ายางธรรมชาติในปริมาณร้อยละ 25-30 หรือใช้สารตัวเร่งที่แรงกว่า เช่น ยางธรรมชาติใช้สารตัวเร่ง CBS ในปริมาณ 1.0 phr ยางเอสบีอาร์จะใช้ CBS ในปริมาณ 1.3 phr จึงจะทำให้อัตราการวัลคาไนซ์ใกล้เคียงกัน

2.2.2.2 ยางวัลคาไนซ์

ยางเอสบีอาร์ประกอบด้วยสไตรีนร้อยละ 23 และมีการจัดตัวของหน่วยโมโนเมอร์ในสายโซ่แบบไม่มีระเบียบ ไม่ว่าจะเตรียมโดยวิธีอิมัลชัน หรือวิธีโซลูชันก็ตาม โมเลกุลไม่สามารถตกผลึกได้เมื่อถึง ทำให้ยางไม่แข็งแรง การออกสูตรยางจำเป็นต้องใช้สารตัวเติมที่เสริมประสิทธิภาพ

ยางเอสบีอาร์มีพันธะคู่ที่ว่องไวในปฏิกิริยา (แต่ว่องไวน้อยกว่าพันธะคู่ในยางธรรมชาติ) ทำให้ยางเอสบีอาร์สามารถวัลคาไนซ์ได้ด้วยกำมะถัน (แต่วัลคาไนซ์ได้ช้ากว่ายางธรรมชาติ) และสามารถถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายเหมือนยางธรรมชาติ (แต่ยางเอสบีอาร์เหนียวกว่ายางธรรมชาติเล็กน้อย)

ยางไนไตรล์จะวัลคาไนซ์ช้ากว่ายางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์ ซึ่งสามารถแก้ได้โดยการเพิ่มปริมาณสารตัวเร่ง เช่น ใช้ในปริมาณ 1.25-1.75 phr เป็นต้น

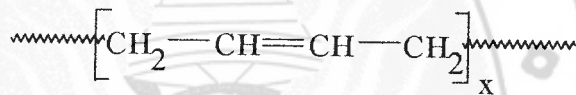
เมื่อต้องการให้ยางไนไตรล์ใช้งานที่อุณหภูมิสูงและมีการจัดตัวจากแรงอัดต่ำ จะใช้ระบบการวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ (เช่น Dicap 2.0 phr) หรือใช้ระบบอีวี หรือ เชมอีวี

2.4 ยางบิวทาไดอีน (Butadiene Rubber, BR)

บุญธรรม (2530) ยางบิวทาไดอีนหรือไนชมเรียกสั้นๆ ว่า ยางบีอาร์ ยางชนิดนี้จะมีส่วนใหญ่จะผสมกับยางชนิดอื่นเพื่อช่วยให้ยางแข็งขึ้นและมีสมบัติดีขึ้น

2.4.1 โครงสร้างทางเคมี

สูตรโครงสร้างของยางบีอาร์เป็นดังนี้



รูปที่ 2.3 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางบีอาร์ (บุญธรรม, 2530)

2.4.2 สมบัติ

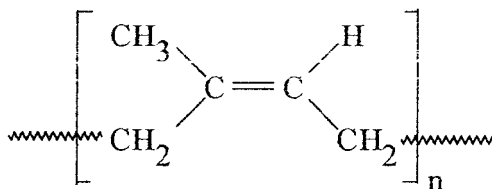
ยางบีอาร์มีความต้านทานต่อการสึกหรอดีมากและมีความต้านทานต่อการแตกเนื่องจากการหักงอดี พันธะคู่ไม่ว่องไวและสามารถวัลคาไนซ์โดยใช้กำมะถันได้เช่นเดียวกับยางอื่นๆ

2.5 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber)

ยางธรรมชาติ ที่ได้จากต้นยางพาราอยู่ในรูปของน้ำยาง จะต้องแยกยางออกจากน้ำโดยการทำให้ยางจับตัวเป็นก้อนด้วยกรด แล้วนำยางที่เป็นก้อนนั้นมารีดให้เป็นแผ่น หรือตัดให้เล็กลง แล้วทำให้แห้งนำไปใช้ในรูปของยางแห้ง

2.5.1 โครงสร้างทางเคมี

ยางธรรมชาติเป็นสารพอลิเมอร์ ที่มีน้ำหนักโมเลกุล (Mn) สูงเฉลี่ยประมาณ แสนถึงห้าแสน มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลสูงกว้าง โดยมีสูตร โมเลกุลเป็น cis-1,4 – polyisoprene



รูปที่ 2.4 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ โดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 5,000 จนถึงประมาณ 15,000 (พรพรรณ, 2540)

2.5.2 สมบัติ

ยางธรรมชาติสามารถวัลคาไนซ์ให้มีความแข็งต่างๆ กัน ได้มาก ตั้งแต่นุ่มมาก (เช่น 30-50 IRHD) ไปจนถึงความแข็งของอีโบนี (98 + IRHD) การปรับความแข็งของยางทำได้โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณของสารตัวเติม หรือ โดยการเปลี่ยนปริมาณกำมะถัน ในช่วงของการใช้กำมะถันปริมาณ 10-20 phr จะให้ยางที่มีความแข็งคล้ายหนัง (leather like) สำหรับงานกระเบื้องยางปูพื้นและยางลูกกลิ้ง แต่จะมีความแข็งแรงต่ำและเสื่อมสภาพได้ง่าย

พันธะคู่ที่ว่องไวในปฏิกิริยาซึ่งทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ได้อย่างรวดเร็วเมื่อใช้กำมะถันเป็นตัววัลคาไนซ์ ซึ่งเป็นจุดอ่อนที่ทำให้ถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายด้วยออกซิเจนและโอโซน โดยทั่วไปยางธรรมชาติไม่เหมาะสมกับงานที่ต้องการความต้านทานต่อการเสื่อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิสูงและมีโอโซนอยู่ด้วย

ระบบการวัลคาไนซ์แบบอีวี หรือ เปอร์ออกไซด์ หรือ ยูรีเทน จะให้ความทนทานต่อความร้อนดีขึ้น รวมทั้งควรให้วัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำลง และให้บางสุกน้อย

2.6 สารตัวเร่ง

พรพรรณ (2528) ก่อนที่จะมีการค้นพบสารตัวเร่ง (accelerator) ซาลส์ กู๊ดเยียร์ ได้ค้นพบวิธีการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติโดยการใช้กำมะถันเพียงอย่างเดียว ซึ่งต้องใช้กำมะถันปริมาณมากและการวัลคาไนซ์ใช้เวลานานที่อุณหภูมิสูง ผลลัพธ์ที่ได้มีสีคล้ำ และเกิดการซึมออกมาที่ผิวของกำมะถันเมื่อตั้งทิ้งไว้ ต่อมาในปี 1906 ได้มีการค้นพบสารตัวเร่งอินทรีย์ โดย Oenslager และเมื่อนำสารตัวเร่งอินทรีย์มาใช้ร่วมกับกำมะถันในการวัลคาไนซ์ยางพบว่าสารตัวเร่งจะช่วยลดเวลาในการวัลคาไนซ์ลงอย่างมาก อุณหภูมิที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ก็ลดลง และปริมาณกำมะถันที่ใช้เพื่อให้ได้ยางที่มีสมบัติทาง

ฟิสิกส์สูงสุดก็ลดลง ผลลัพธ์อย่างที่ได้อาจมีความต้านทานต่อการตั้งทิ้งไว้เป็นเวลานาน (good aging resistance) และลดการซึมออกมาที่ผิวของกำมะถันลงด้วย หลังจากนั้นมาสารตัวเร่งจึงเป็นสารที่จำเป็นที่จะต้องใช้ในการวัลคาไนซ์ทั้งยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์

2.6.1 ชนิดของสารตัวเร่ง

สารตัวเร่งได้ถูกค้นพบเพิ่มขึ้นอีกมากมาย จนต้องจัดออกเป็นหมวดหมู่ ซึ่งในระยะแรกการจัดหมวดหมู่ของสารตัวเร่งจะจัดตามความเร็วในการเร่งให้ยางธรรมชาติเกิดการวัลคาไนซ์ โดยแบ่งออกเป็นหมวดหมู่ดังนี้

1. ตัวเร่งที่มีความเร็วสูงพิเศษ (Ultra accelerators)
2. ตัวเร่งที่มีความเร็วสูงปานกลาง (Semi - accelerators)
3. ตัวเร่งที่มีความเร็วปานกลาง (Medium fast accelerators)
4. ตัวเร่งที่มีความเร็วช้า (Slow accelerators)

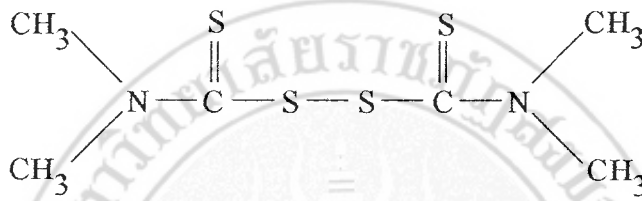
เมื่อมียางสังเคราะห์เพิ่มขึ้น สารตัวเร่งที่เคยจัดว่าเป็นสารตัวเร่งที่เร็ว หรือเร็วที่สุด สำหรับยางธรรมชาติอาจกลายเป็นสารตัวเร่งที่ช้าสำหรับยางสังเคราะห์นั้นๆ ไปได้ ดังนั้นในระยะต่อมาจึงมีการจัดแบ่งสารตัวเร่งใหม่ออกเป็นหมวดหมู่ ตามลักษณะ โครงสร้างทางเคมีของสารตัวเร่งนั้นๆ แบ่งออกเป็นหมู่ต่าง ๆ ดังนี้

1. หมู่ไดไซโอคาร์บาเมต (Dithiocarbamate)
 - 1.1 เกลือแอมโมเนียม (Ammonium salts)
 - 1.2 เกลือโลหะ (Metal salts)
2. หมู่แซนเทท (Xanthates)
3. หมู่ไธยูเรม (Thiurams)
 - 3.1 ไธยูเรม โมโนซัลไฟด์ (Thiuram monosulphides)
 - 3.2 ไธยูเรม ไดซัลไฟด์ (Thiuram disulphides)
4. หมู่ไธอาโซล (Thiazole)
 - 4.1 เมอร์แคปโต (Mercapto accelerator)
5. หมู่ซัลฟีนามีด์ (Sulphenamide accelerator)
6. หมู่อัลดีไฮด์อะมีน (Aldehyde amine accelerator)
7. หมู่เบส (Basic accelerators)
 - 7.1 กัวนิดีน (Guanidine)

สารตัวเร่งจะมีอิทธิพลในอัตราการเกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลในยาง การที่จะดูว่าสารตัวเร่งใดมีอิทธิพลในการเกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลมากน้อยเพียงใดนั้น ดูได้จากการวัดด้วยเครื่องมือ เช่น เครื่อง Mooney viscometer และ Monsanto oscillating disk rheometer (ODR) เป็นต้น

2.6.2 ตัวอย่างสารตัวเร่ง

2.6.2.1 หมู่ไซยูแรม เช่น Tetramethyl thiuramdisulphide (TMTD)



รูปที่ 2.5 สูตรโครงสร้างทางเคมีของ TMTD (พหุพรรณ, 2528)

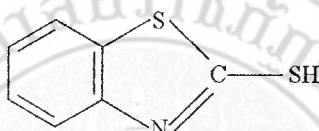
ไซยูแรมจัดเป็นสารตัวเร่งที่มีความเร็วสูงพิเศษ สำหรับยางธรรมชาติ แต่ในขบวนการแปรรูปยาง ยางจะ scorch ซ้ำกว่าพวกไดไซโอคาร์บาเมตและ วัลคาไนซ์ ซ้ำกว่า สำหรับหมู่ไซยูแรมด้วยกันเอง TMTD เป็นตัวที่วัลคาไนซ์ เร็วที่สุด ยางที่ใช้ไซยูแรมเป็นตัวเร่งสามารถวัลคาไนซ์ได้หลายวิธี เช่น วัลคาไนซ์โดยใช้เครื่องอัดไอน้ำและอากาศร้อน เนื่องจากว่าไซยูแรม วัลคาไนซ์ ซ้ำกว่าไดไซโอคาร์บาเมตเล็กน้อย ทำให้การไหลในการเครื่องอัดเป็นไปได้ (ไม่เหมือนกับไดไซโอคาร์บาเมตซึ่ง scorch ก่อนที่จะไหลเต็มพิมพ์เมื่อ วัลคาไนซ์ ในเครื่องอัด) ส่วนการที่ไซยูแรมสามารถ วัลคาไนซ์ โดยใช้ไอน้ำหรืออากาศร้อนนั้น เป็นเพราะไซยูแรม วัลคาไนซ์ เร็วพอสมควร ทำให้ยางเกิดการจับตัวก่อนที่จะเสียรูปในขณะที่ วัลคาไนซ์ โดยไอน้ำหรืออากาศร้อน

ในบางครั้งไซยูแรมอาจใช้เป็นตัวเร่งเสริมกระตุ้นตัวเร่งอื่น เช่น โซลาโซลและซัลฟิनाไมด์ แต่สำหรับการใช้ไซยูแรมกับซัลฟิनाไมด์แล้ว จะให้ปรากฏการณ์พิเศษ คือ ไซยูแรมจะทำให้การเริ่มต้น วัลคาไนซ์ ช้าลงไปแต่เวลาวัลคาไนซ์ สมบูรณ์จะสั้นลง การใช้ไซยูแรมกระตุ้นตัวเร่งซัลฟิनाไมด์มีความสำคัญมาก โดยเฉพาะแบบที่ใช้กัมละดินน้อย (EV system) ในการวัลคาไนซ์ แต่ถ้าใช้ไซยูแรมปริมาณน้อย ๆ ปนลงไปในยางที่มีไดไซโอคาร์บาเมตจะทำให้ระยะเวลาที่สามารถแปรรูปได้ยาวนาน ในกรณีนี้ TMTD และ ไดเมทิลไดฟีนิลไซยูแรม (dimethyl diphenylthiuram) จะมีผลต่อการทำให้ระยะเวลาที่สามารถแปรรูปได้ยาวนานกว่าการใช้ TMTD

การใช้ไซยูแรมจะต้องมีขิงค์ออกไซด์อยู่ด้วย เพื่อให้ประสิทธิภาพสูงสุด แต่ไม่จำเป็นต้องมี

กรดไขมันก็ได้ อุณหภูมิที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ไม่ควรเกิน 125-135 องศาเซลเซียส เพราะถ้าเกินกว่านี้ จะทำให้ยางสุกเกินไป (over cure) ได้ง่าย การใช้ไซยูแรมเป็นสารตัวเร่งในยางโดยใช้ไซยูแรมเป็น ปริมาณมาก กำมะถันปริมาณน้อย จะให้ยางที่สามารถทนทานต่อความร้อนดีขึ้น มี compression set ต่ำ รวมทั้ง hysteresis ต่ำ แต่ถ้าหากใช้ไซยูแรมอย่างเดียวโดยไม่มีกำมะถันเลย ในกรณีนี้จะให้ยางที่มี โมดูลัสต่ำ แต่ถ้าต้องการให้มีโมดูลัสสูงขึ้นก็ควรใส่กำมะถันเข้าไปด้วยเล็กน้อย

2.6.2.2 หมู่ไซโอโซล เช่น 2 – Mercaptobenzothiazole (MBT)



รูปที่ 2.6 สูตรโครงสร้างทางเคมีของ MBT (พรพรรณ, 2528)

เมื่อเปรียบเทียบยางที่ใช้ตัวเร่งกลุ่มไซโอโซลกับไดไซโอคาร์บามตและไซยูแรมแล้วจะพบ ว่า ต้องใช้ไซโอโซลปริมาณมากกว่าและใช้กำมะถันปริมาณมากกว่า จึงจะให้โมดูลัสพอๆ กับเมื่อใช้ ไดไซโอคาร์บามตหรือไซยูแรม รวมทั้งอุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ก็สูงกว่าด้วย ถ้าใช้ไซโอโซลเป็นตัว เร่งตัวเดียวส่วนๆ แล้ว ยางที่ได้จะมีความปลอดภัยในขบวนการผลิตกว่าพวกสารตัวเร่งความเร็วสูง พิเศษอื่นๆ ดังนั้นไซโอโซลบางที่จัดไว้ในกลุ่มของสารตัวเร่งความเร็วสูงปานกลาง

ในกลุ่มไซโอโซลเดียวกันระยะเวลาที่สามารถแปรรูปได้ของยางจะเรียงตามลำดับตัวเร่งดังนี้

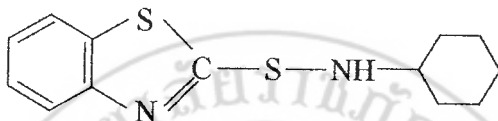


โดย MBTS จะมีระยะเวลาที่สามารถแปรรูปได้ยาวที่สุด

ยางผสมสารเคมีที่ใช้ไซโอโซล สามารถวัลคาไนซ์ได้ทุกรูปแบบของการวัลคาไนซ์ เช่น ด้วยเครื่องอัด ใอน้ำ อากาศร้อน เป็นต้น อย่างไรก็ตามการที่เป็นแบบ delay action ในการวัลคา ไนซ์ ทำให้ไซโอโซลเหมาะแก่การวัลคาไนซ์โดยใช้เครื่องอัดเป็นอย่างยิ่ง MBTS และ MBT เป็น ตัวที่ช่วยให้ยางนี้ในการบดผสม ดังนั้นจึงช่วยในการแปรรูปของยางได้ดี มักใส่ลงในยางขณะที่เริ่ม ต้นการบดผสม ตัวเร่งกลุ่มไซโอโซลสามารถกระตุ้นให้เร็วขึ้นได้โดยการใช้สารตัวเร่งที่เป็นค่า เช่น พวกไดไซโอคาร์บามตและไซยูแรม แต่การกระตุ้นนี้ยังผลให้ระยะเวลาที่สามารถแปรรูปได้สั้นลงไป ด้วย ถ้าหากใช้ร่วมกับสารตัวเร่งมาตรฐานตัวอื่นๆ โดยใช้สัดส่วนจำนวนโมลเท่ากัน จะให้ผลสูงสุด และความเร็วในการวัลคาไนซ์เร็วกว่าที่จะใช้ตัวมันเองเดี่ยวๆ เสียอีก

ตัวเร่งพวกไฮโอโซลจำเป็นต้องใช้ซิงค์ออกไซด์และกรดไขมันร่วมด้วย สำหรับกรดไขมันแล้วยิ่งความยาวโซ่ยาว จะทำให้ความว่องไวในปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเช่น กรดสเตียริก (คาร์บอน 17 ตัว) จะทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นแต่ยังน้อยกว่า behenic acid (คาร์บอน 22 ตัว)

2.6.2.3 หมู่ซัลฟิनाไมด์ เช่น N-cyclohexyl-2-benzothiazyl sulphenamide (CBS)



รูปที่ 2.7 สูตรโครงสร้างทางเคมีของ CBS (พรพรรณ, 2528)

เนื่องจากซัลฟิनाไมด์ให้ Delayed action ทำให้การ Cure ในเบ้าพิมพ์ดีเพราะมีเวลาพอให้ยางไหลได้เต็มที่ แต่ไม่เหมาะกับการ Cure เพราะ เมื่อซัลฟิनाไมด์ได้รับความร้อนก็จะแตกตัวออกให้ MBT และเบสออกมา ระยะเวลาก่อนที่จะแตกตัวออกมานี้ ก่อให้เกิด Delayed action ซึ่งเป็นตัวก่อให้เกิดการวัลคาไนซ์ และเบสจะเป็นตัวกระตุ้นให้ตัวเร่งทำงานเร็วขึ้น โมดูลัสสูงขึ้น

ซัลฟิनाไมด์เป็นตัวเร่งที่ทำให้ยางมีโมดูลัสสูงขึ้น และมีสมบัติทางเชิงกลดี รวมทั้งให้ flat cure และ aging ดีมาก การให้ flat cure จะมีลักษณะแบบเดียวกับ ไฮโอโซล และเบส

ซัลฟิनाไมด์ให้ Delayed action ฉะนั้นจึงเหมาะกับยางที่ใช้ furnace black เป็นสารตัวเติม การใช้ ซัลฟิनाไมด์จำเป็นต้องใช้ซิงค์ออกไซด์อย่างน้อย 3 phr เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

2.7 ระบบวัลคาไนซ์

พรพรรณ (2528) ได้ให้ความหมายการวัลคาไนซ์คือ ขบวนการเปลี่ยนแปลงที่อยู่สภาพที่ไม่คงตัวให้เป็นยางที่รักษารูปทรงได้ในลักษณะยืดหยุ่นหรือแข็งกระด้าง โดยการใช้สารวัลคาไนซ์ (vulcanizing agent) ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลตรงจุดที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา ซึ่งสารที่นิยมใช้วัลคาไนซ์จะเป็นกำมะถัน สารที่ให้กำมะถัน (sulphur donor) และเปอร์ออกไซด์

2.7.1 การวัลคาไนซ์โดยใช้กำมะถัน (Sulphur Vulcanization)

เมื่อนำกำมะถันใส่เข้าไปในยางแล้วนำยางนั้นมาให้ความร้อน จะเกิดการวัลคาไนซ์ขึ้น ซึ่งจะทำให้ยางมีคุณสมบัติดีขึ้นคือ เมื่อร้อน ไม่เหลว เมื่อเย็น ไม่แข็ง ไม่มีกลิ่น ไม่เหนียว ไม่ละลายในตัว

ทำละลายเป็นต้น เพราะกำมะถันทำให้โมเลกุลของยางมาเชื่อมต่อกัน เรียกว่าการ crosslink ดังรูปแสดง การเชื่อมโยงโมเลกุลยางด้วยกำมะถัน

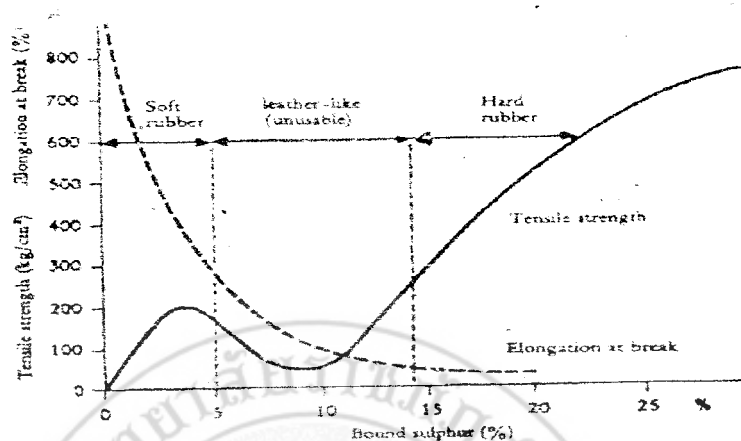


รูปที่ 2.8 การเชื่อมโมเลกุลของยางด้วยกำมะถัน (พรพรรณ, 2528)

การเกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลในยางจะทำให้โมเลกุลของยางใหญ่ขึ้น ดังนั้นการหลอมเหลว เมื่อถูกความร้อนหรือแข็งตัวเมื่อเย็นเป็นไปได้น้อย รวมทั้งการละลายในตัวทำละลายก็เป็นไปได้น้อย จะเพียงแต่บวมพองเท่านั้น การใช้กำมะถันในยางยิ่งถ้าเพิ่มปริมาณขึ้น การเชื่อมโยงโมเลกุลก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และสมบัติของยาง เช่น ความต้านทานต่อแรงดึง ความแข็ง โมดูลัส ความสามารถในการยืดจนขาด และความกระด้างตัวของยาง ก็จะเปลี่ยนแปลงไปตามการเชื่อมโยงโมเลกุล ดังรูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นอิทธิพลของปริมาณกำมะถันต่อความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาด

ระบบวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบกำมะถันมี 3 ระบบ คือ

1. ระบบกำมะถันปกติ (Conventional Vulcanization Systems) ใช้กำมะถันมากและใช้สารตัวเร่งน้อย เช่น ใช้กำมะถัน 2.5 phr และใช้สารตัวเร่ง 0.5 – 1 phr จะเกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลแบบไม่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากเกิดเป็นแบบ polysulphidic crosslink ถึง 70%
2. ระบบอีวี (Efficient Vulcanization Systems) ใช้กำมะถันน้อยและสารตัวเร่งมาก เช่น ใช้กำมะถัน 0.5 phr และสารตัวเร่ง 6 phr จะเกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลแบบ monosulphidic ถึง 90% ทำให้ทนต่อการเสื่อมเนื่องจากการออกซิเดชัน
3. ระบบเซมิอีวี (Semi-Efficient Vulcanization Systems) ใช้กำมะถันและปริมาณสารตัวเร่งเท่า ๆ กัน ซึ่งจะให้คุณสมบัติอยู่ระหว่างการที่ใช้ระบบกำมะถันปกติและระบบอีวี



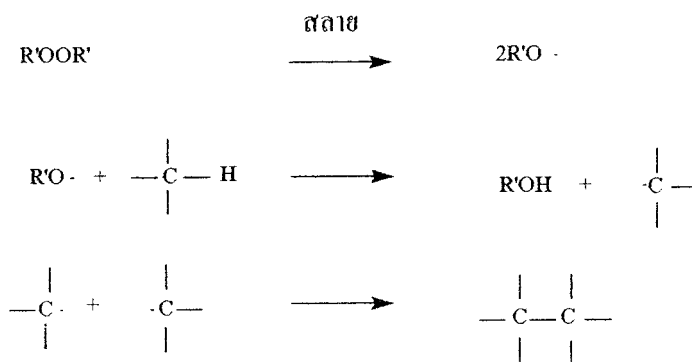
รูปที่ 2.9 อิทธิพลของปริมาณกำมะถันต่อความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืด
จนขาด (พรพรรณ, 2528)

2.7.2 การวัลคาไนซ์โดยใช้สารให้กำมะถัน (Sulphur Donor Vulcanization)

สารให้กำมะถัน (Sulphur donor) เป็นสารที่สลายให้กำมะถันออกมาที่อุณหภูมิของการวัลคาไนซ์ เช่น thiuramtetrasulphide, di-morpholyl disulphide และ benzothiazyl-2-N-dithiomorpholide เป็นต้น ถึงแม้สารเหล่านี้จะให้กำมะถันออกมาไม่มาก แต่มีประสิทธิภาพในการเชื่อมโยงโมเลกุลมาก และจะให้โมดูลัสสูงกว่าการใช้กำมะถันล้วนๆ ในปริมาณเดียวกัน ตัวอย่างเช่น การใช้ di-morpholyl disulphide เพียง 3 phr จะให้กำมะถันออกมาเพียง 0.8 phr แต่จะให้ยางที่มีโมดูลัสเทียบเท่ากับการใช้กำมะถัน 2.5 phr

2.7.3 การวัลคาไนซ์โดยใช้สารเปอร์ออกไซด์ (Peroxide Vulcanization)

สารเปอร์ออกไซด์แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ สารอินทรีย์เปอร์ออกไซด์ สารซิลิกอน-อินทรีย์เปอร์ออกไซด์ และสารอินทรีย์เปอร์ออกไซด์ โดยเฉพาะสารอินทรีย์เปอร์ออกไซด์เป็นที่นิยมใช้กันมาก สารเหล่านี้ต้องมีความเสถียรพอที่จะเก็บไว้ได้นาน มีความว่องไวพอสมควรในการเชื่อมโยงโมเลกุลกับยางที่อุณหภูมิของการวัลคาไนซ์ และมีความปลอดภัยในการใช้



รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาการเกิดการเชื่อมโองโมเลกุลโดยใช้สารเปอร์ออกไซด์ (พรพรรณ, 2528)

จากปฏิกิริยาจะเห็นว่าเมื่อสารอินทรีย์เปอร์ออกไซด์แตกตัว จะให้อนุมูลอิสระซึ่งเป็นตัวไปดึงไฮโดรเจนอะตอมจากยาง ทำให้เกิดยางที่เป็นอนุมูลอิสระขึ้น และยางที่เป็นอนุมูลอิสระจะมารวมกันเกิดการเชื่อมโองโมเลกุล ดังนั้นการเชื่อมโองโมเลกุลจะเกิดเป็นแบบพันธะคาร์บอนและหนึ่งโมเลกุลของเปอร์ออกไซด์จะทำให้เกิดการเชื่อมโองโมเลกุลในยาง

ข้อดีของการวัลคาไนซ์โดยใช้สารเปอร์ออกไซด์

1. compression set ต่ำมาก
2. มีความต้านทานต่อความร้อนดีมาก
3. คุณสมบัติทางไฟฟ้าดีมาก
4. ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีสน้ำใส
5. ไม่มีปัญหาเรื่องโลหะหลงเหลือมาทำปฏิกิริยา
6. ไม่มีปัญหาการบวมซึ่งมักเกิดเมื่อใช้กำมะถัน
7. การวัลคาไนซ์จะให้ป็นแบบ flat cure
8. ยางหลายอย่างสามารถวัลคาไนซ์พร้อมกันได้

2.8 เครื่องมือทดสอบ

2.8.1 เครื่องบดผสมยางสองลูกกลิ้ง (Two-Roll Mill)

วัชรินทร์ (2541) กล่าวถึง Thomas Hancock (ค.ศ. 1820) เป็นผู้ริเริ่มคิดค้นเครื่องมือ เพื่อใช้ในการบดยาง และเครื่องบดผสมระบบเปิดที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในปัจจุบัน เป็นผลมาจากการพัฒนาแนวคิดสร้างเครื่องมือบดยางของ Thomas Hancock

เครื่องบดผสมยางระบบเปิดประกอบด้วยลูกกลิ้ง 2 ลูก เรียงในแนวนอนและขนานกัน ลูกกลิ้งหน้าจะมีสกรูสำหรับปรับระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งทั้งสอง (nip หรือ gap) ลูกกลิ้งบดยางจะต้องมีผิวหน้าที่แข็งแรงทนทานต่อการใช้งาน โดยเฉพาะทนทานต่อเม็ดที่ตกลงบนผิวลูกกลิ้งขณะบดยาง ลูกกลิ้งบดยางทำจากเหล็กหล่ออย่างดี ผิวหน้าจะต้องเรียบ การควบคุมอุณหภูมิของลูกกลิ้งทำได้ 2 ลักษณะ คือ

ก. Cored roll จะมีการเจาะให้เป็นช่องกลวงภายในลูกกลิ้ง เพื่อผ่านน้ำเย็นหรือไอน้ำเข้าไปภายในทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิของลูกกลิ้งได้ตามที่ต้องการ

ข. Drilled roll จะมีการเจาะเป็นช่องทาง เพื่อเป็นช่องทางเดินของน้ำเย็นหรือไอน้ำ โดยเจาะช่องทางนี้ที่ระดับความลึกจากผิวลูกกลิ้งลงไปประมาณ 50 มิลลิเมตร

ลูกกลิ้งทั้งสองจะหมุนด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน ก่อให้เกิดแรงเฉือนกระทำต่อยางในขณะที่ยางโมเลกุลของยางเกิดการฉีกขาดออกจากกัน ซึ่งจะทำให้ขนาดโมเลกุลของยางลดลง และทำนองเดียวกันในการผสมยางกับสารเคมีต่างๆ จะทำให้สารเคมีกระจายเข้าผสมในยางได้ โดยทั่วไปนั้นลูกกลิ้งหน้าจะหมุนช้ากว่าลูกกลิ้งหลัง เรียกอัตราส่วนระหว่าง ความเร็วผิวของลูกกลิ้งลูกหน้ากับลูกกลิ้งลูกหลังว่า “ Friction Ratio “ ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าวที่ใช้กับยางมักจะกำหนดให้อยู่ในช่วง 1:1 ถึง 1.4:1 แต่จะขึ้นอยู่กับชนิดของยางด้วย เช่น ยางธรรมชาติจะใช้ Friction ratio เท่ากับ 1.25:1 (ลูกกลิ้งหน้า:ลูกกลิ้งหลัง) ส่วนยางสังเคราะห์บางชนิดจะบดโดยใช้ความเร็วของสองลูกกลิ้งเกือบเท่ากันหรือเท่ากัน แต่ยางสังเคราะห์บางชนิดควรบดโดยใช้ความเร็วของลูกกลิ้งหน้าเร็วกว่าลูกกลิ้งหลัง

เครื่องบดยางสองลูกกลิ้งทำงานโดยการนำยางใส่ลงในช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง (nip หรือ gap) ลูกกลิ้งจะบีบและฉีกยาง ในการทำงานกับเครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง ฟิงระมัดระวังอันตรายอันจะเกิดจากลูกกลิ้งหนีบนิ้วหรือมือด้วย เครื่องบดยางสองลูกกลิ้งโดยทั่วไปจะมีอุปกรณ์ป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้น หรือเมื่อต้องการที่จะหยุดเครื่องฉุกเฉิน ซึ่งลูกกลิ้งจะหยุดเครื่องทันทีทันใด หรือลูกกลิ้งอาจจะหมุนกลับ (ถอยหลัง) เล็กน้อย เป็นต้น ดังนั้นในการใช้งานเครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง จำเป็นที่จะต้องศึกษาระบบการหยุดเครื่องฉุกเฉินก่อนด้วย และผู้ควบคุมเครื่องบดยางสองลูกกลิ้งจะต้องมีความ

เข้าใจถึงบริเวณที่จะก่อให้เกิดอันตรายด้วย ซึ่งเป็นบริเวณที่ไม่ควรเอื้อมมือไปทำงาน ในบริเวณนั้น (Safety limit) และควรเข้าใจการใช้มือในการผลักยาง ม้วนยางใส่เข้าในลูกกลิ้ง หรือเติมสารเคมีเข้าไป ในยางที่อยู่บนลูกกลิ้งด้วย

การผสมยางกับสารเคมีต่างๆเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการแปรรูปยาง ทำให้ยางดิบเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์และองค์ประกอบทางเคมี โดยเริ่มจากการ(Mastication) ให้นิ่มลง แล้วจึงทำการเติมสารเคมีต่างๆ ลงไป โดยสารเคมีเหล่านี้จะช่วยทำให้ยางแปรรูปได้ง่ายขึ้น หรือเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติตามต้องการ

ยางที่ผสมสารเคมีแล้ว เรียกว่า ยางผสมสารเคมี (Compound Rubber หรือ Compound หรือ Mix) ยางและสารเคมีที่ใช้ผสมจะมีสัดส่วนที่แน่นอนตามสูตร (Compound Recipe) โดยทั่วไปปริมาณของสารเคมีที่ใช้จะบอกเป็นน้ำหนักเมื่อเทียบกับยางหนัก 100 ส่วน เรียกว่า phr หรือ pphr (parts per hundred rubber by weight) น้ำหนักขององค์ประกอบ phr นี้ จะเป็นหน่วยน้ำหนักใดก็ได้ เช่น กรัม กิโลกรัม

ตัวอย่างเช่น สูตรยางที่มีการใช้กำมะถัน 2.5 phr หมายถึง

- ถ้าใช้ยาง 100 กรัม ก็จะใช้กำมะถันในปริมาณ 2.5 กรัม
- ถ้าใช้ยาง 100 กิโลกรัม ก็จะใช้กำมะถันในปริมาณ 2.5 กิโลกรัม

ความสม่ำเสมอของสารเคมีที่กระจายอยู่ในยางคอมพอนด์ เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญมากนอกเหนือจากขนาดของ Batch size ระยะเวลาการบดยาง และระยะเวลาการผสม เพราะถ้าสารเคมีกระจายในยางคอมพอนด์อย่างสม่ำเสมอและเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous compound) จะทำให้ยางที่มีคุณสมบัติทางฟิสิกส์สม่ำเสมอและดีที่สุดสำหรับยางคอมพอนด์สูตรหนึ่งๆ เงื่อนไขที่สำคัญที่มีผลต่อการกระจายอย่างสม่ำเสมอของสารเคมีในยางคอมพอนด์ก็คือ Plasticity ของยาง

เทคนิคที่ทำให้สารเคมีกระจายในยางได้ดี ขึ้นอยู่กับการจัดให้มี Bank การม้วนยาง การตัดยาง และระยะเวลาการผสม ในการผสมยางบนลูกกลิ้งจะต้องจัดระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งและระยะห่างระหว่าง guide ให้เหมาะสม เพื่อให้ยางเหลือเป็น bank อยู่เล็กน้อยบน nip เสมอ ถ้าไม่มี bank แรงที่จะกระทำต่อยางที่ผ่านลูกกลิ้ง จะมีเพียงแรงอัดที่กระทำในทิศทางที่ตั้งฉากกับผิวของแผ่นยางนั้น ดังนั้นการผสมยางจึงเกิดขึ้นเฉพาะตามผิวของแผ่นยาง แต่ไม่เกิดการผสมตามความหนาในระดับลึกลงไป แต่ ถ้ามี bank อยู่จะทำให้ชั้นบนสุดของแผ่นยางม้วนตัวเกิดเป็นลอนขึ้น ทำให้สารเคมีแทรกเข้าไปในระหว่างลอนนี้ได้ แล้วจึงดึง โดยแรงเฉือนเข้าไปอยู่ภายในยางเมื่อยางผ่านลูกกลิ้ง ดังนั้นการเกิด bank จึงเป็นสาเหตุให้เกิดการผสมตามแนวรัศมีหรือตามความหมายของแผ่นยางได้ แต่การม้วนตัวของยางบน

bank ก็ไม่สามารถทำให้สารเคมีเข้าไปผสมได้ตลอดความหนาของยาง จำเป็นจะต้องมีการตัดพลิกหน้ายางและจะต้องมีการคัตยางม้วนเป็นแท่ง แล้วใส่ไปในลูกกลิ้งใหม่ประกอบไปด้วย การผสมจึงจะเกิดขึ้นได้อย่างสม่ำเสมอทั่วถึงทั้งก้อน

ในกรณีที่ลูกกลิ้งร้อนเกินไปและ/หรือ nip แคบเกินไป ยางจะติดลูกกลิ้งหลังที่หมุนเร็วกว่าได้ ดังนั้นถ้าต้องการจะให้ยางติดลูกกลิ้งด้านหน้า ต้องขยาย nip ให้กว้างออกไปในทางตรงกันข้ามหากยางไม่ยอมพันลูกกลิ้ง แต่จะห้อยข้อย (bagging) ลงมา ซึ่งมีสาเหตุมาจากยางมี Elongation at break ต่ำ เช่นยางสังเคราะห์บางชนิด หรือยางที่มีสารตัวเติมมากเกินไป สามารถแก้ไขโดยการขัน nip ให้แคบเข้า

การเติมสารเคมีเข้าไปในยาง ให้เริ่มใส่ทันทีที่ยางพันลูกกลิ้งมีผิวเรียบ เป็นแผ่นต่อเนื่อง โดยเติมสารตัวเร่ง (Accelerator) และสารตัวเร่ง (Activator) ก่อน แล้วจึงใส่ Antioxidant จากนั้นให้ทยอยใส่สารตัวเติมและน้ำมันสลักกัน ไปการคัตยางในขณะที่มีผงสารเคมีเป็นอิสระอยู่บน nip ควรกระทำแต่น้อยเท่าที่จำเป็น เพื่อไม่ให้เกิดช่องบนแผ่นยางและบน nip อันจะทำให้ผงสารเคมีหล่นไปบน mill pan ได้ ในขณะเดียวกันต้องขยายความกว้างของ nip ขึ้นเรื่อยๆเพื่อรักษาขนาดของ bank ให้พอเหมาะเนื่องจากของยางที่ผสมกับสารเคมีสูงขึ้น

หากอุณหภูมิยางสูงเกินไปขณะผสม ให้เปิดระบบน้ำหล่อเย็น เพื่อลดอุณหภูมิของยางลงเมื่อสารเคมีเข้าไปในยางแล้ว ให้ทำการคัตยางและม้วนยาง เพื่อให้สารเคมีแพร่กระจายในยางได้ทั่วถึงกัน ลำดับสุดท้ายจึงเติมสารวัลคาไนซ์

เมื่อเติมสารเคมีทุกตัวเข้าไปในยางหมดแล้วก็จะถือเป็นการเสร็จสิ้นการผสมให้อายางคอมปานด์ออกจากลูกกลิ้งทันทีเพื่อลดอุณหภูมิของยาง อาจนำแผ่นยางนั้นวางบน โลหะหนาผิบบนราวหรือจุ่มลงในน้ำ เพื่อให้ยางเย็นลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นการป้องกันการสุก (scorch) ได้อีกด้วย เมื่อยางผสมสารเคมีเย็นลงแล้ว จึงนำไปเก็บเพื่อใช้งานต่อไป

การผสมยางกับสารเคมีเพียงตัวเดียวหรือสองตัว จะไม่เรียกว่า Compound Rubber แต่จะมีชื่อพิเศษว่า Masterbatch ซึ่งจะใช้ในกรณีที่สารเคมีดังกล่าวอาจจะกระจายตัวในยางได้ไม่ดีหรือใช้สารเคมีดังกล่าวในปริมาณน้อยมากซึ่งทำให้เกิดการผิดพลาดง่ายมากถ้าสารเคมีเกิดฟุ้งกระจายหายไป

2.8.2 เครื่องทดสอบการวัลคาไนซ์ของยาง (Oscillating Disk Rheometer, ODR)

เมื่อนำตัวอย่างยางที่ผสมสารเคมีเรียบร้อยแล้วใส่ลงในห้องใส่ยางที่ปิดมิดชิด ใช้ความดันกดยางให้อยู่ภายในห้องนั้น รักษาอุณหภูมิของห้องให้สุตามกำหนดที่ต้องการจะทดสอบ ภายในห้องมีจานโลหะรูปกรวยป้านสองด้านประกบกันอยู่ (Biconical disk) จานโลหะดังกล่าวจะถูกห่อหุ้มด้วยยางตัวอย่างที่ใส่เข้าไป จานโลหะจะแกว่งทำมุมน้อยๆ กลับไป-มาตามแนวแกนตั้ง การหมุนเช่นนี้ก่อให้เกิด

เกิดแรงเฉือนกระทำต่อตัวอย่างยาง แรงที่ต้องใช้ในการหมุนงาน โลหะให้อยู่ในตำแหน่งสูงสุดจะขึ้นกับ ความแข็งหรือ โมดูลัสเฉือน (Shear Modulus) ของตัวอย่างยางนั้นๆ แรงบิดดังกล่าวจะแสดงผลบันทึก ตามเวลาที่ผ่านไป ความแข็งของยางจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในระหว่างการวัลคาไนซ์ การทดสอบถือว่าสิ้นสุด เมื่อแรงบิดที่บันทึกได้ถึงจุดสมดุล หรือถึงจุดสูงสุด หรือถึงเวลาที่กำหนดไว้ ซึ่งเวลาดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับ ส่วนผสมของสารเคมีในยางและอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องทดสอบการวัลคาไนซ์ของยางมีส่วนประกอบดังนี้

1. Curemeter เครื่องมือประกอบด้วยงานโลหะรูปกรวยป้านสองด้านอยู่ภายในช่องใส่ยาง ที่ควบคุมอุณหภูมิได้ งานโลหะดังกล่าวมีแกนยึดติดอยู่กับก้านจับให้งานนั้นหมุนกลับไปมาด้วยความถี่คงที่ แรงบิดที่เกิดขึ้นที่งานโลหะเกิดขึ้นจากความต้านทานของยางที่ใส่ในช่องนั้น จะมีการบันทึกแรงบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นในการหมุนแต่ละครั้งตลอดระยะเวลาทดสอบ

2. อุณหภูมิและระบบการวัดระบบการวัดของอุณหภูมิของห้องใส่ยางจะต้องสามารถวัดได้ถูกต้องได้ 0.5 องศาเซลเซียสและจะต้องวัดได้ตลอดเวลา เพื่อตรวจสอบอุณหภูมิของห้องใส่ยาง อุปกรณ์การตรวจอุณหภูมิควรจะใช้ประเภทเชื่อถือได้ เช่น ประเภท transister เป็นต้น

3. ห้องใส่ยาง เป็นโลหะที่แข็งแรง ไม่เปลี่ยนรูป มีความแข็งอย่างน้อย Rockwell 50 HRC ขนาดและลักษณะทั่วไปของห้องมาตรฐาน เปลือกของห้องใส่ยางทั้งบนและล่างจะมีการเจาะรูไว้เพื่อใส่อุปกรณ์วัดอุณหภูมิของห้องใส่ยางทั้งบนและล่างจะมีการเจาะร่องเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า จัดเรียงตัวกันเป็นแนวรัศมีรอบๆ ศูนย์กลางและมีระยะห่างระหว่างช่องเท่ากับ 200 ห้องใส่ยางด้านล่างจะมีรูตรงกลางเพื่อให้แกนยาง โลหะสอดแทงทะลุลงไป จะมีร่องสำหรับใส่ซิลที่เหมาะสม ซึ่งจะมีความเสียดทานน้อย ตัวอย่างของซิลที่เหมาะสมควรทำด้วย PTFE ซิลดังกล่าวจะป้องกันไม่ให้ยางไหลผ่านเข้าไปยังรูที่ใส่แกนงาน โลหะนั้น ห้องใส่ยางจะปิดยางตัวอย่างไว้ในตลอดเวลาการทดสอบ การปิดดังกล่าวใช้ระบบไฮดรอลิกลม ด้วยแรง 11.0 ± 0.5 kN

4. งานโลหะ เป็นโลหะที่แข็งแรง เปลี่ยนรูปยาก และมีความแข็ง Rockwell อย่างต่ำเท่ากับ 51 HRC งานโลหะนี้จะหมุนกลับไปมาด้วยความถี่ 100 รอบต่อนาที ระยะหมุนไปทางซ้ายและขวา 1 รอบจุดศูนย์กลาง รวมระยะแกว่งทั้งหมดทำมุม 2 องศาเซลเซียส แต่ความถี่และระยะหมุนอื่นๆ อาจใช้ได้เช่นกันแต่ต้องระบุลงไปด้วยเสมอ นอกจากนั้นอาจจะใช้ระยะหมุนเป็น 3 องศาเซลเซียส ได้ (ถ้าหากว่าผิวของห้องสะอาดไม่มีปัญหา การหมุนด้วยระยะองศาที่กว้างขึ้นนั้นจะทำให้การวัดมีความไวขึ้น)

5. การวัดแรงบิดบนงานโลหะจะต้องใช้อุปกรณ์ที่แสดงสัญญาณออกมาโดยให้ สัมพันธ์โดยตรงกับแรงบิดนั้นจะต้องมีอุปกรณ์สามารถบันทึกสัญญาณสูงสุดของแรงบิดในแต่ละรอบของการ

หมุนได้ และต้องสามารถบันทึกข้อมูลได้ไวภายใน 1 วินาที หรือน้อยกว่านั้น แรงบิดที่วัดจะต้องทำให้ถูกต้องถึง $\pm 0.5\%$ ระยะการวัดแรงบิด (Chart Range) ควรจะสามารถจัดได้หลายๆช่วง เช่น 0-25, 0-50 0-100 dN.m และ 0-200 dN.m เป็นต้น

6. ตัวอย่างยางที่ใช้ทดสอบ จะมีปริมาตรสูงสุดประมาณ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยตัดชิ้นทดสอบให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 20 มม. และหนา 12.5 มม. ตัวอย่างจะต้องมีปริมาตรที่เหมาะสมให้ยางได้ไหลเข้าไปตลอดช่องว่างในห้องใส่ยางนั้น ถ้ามียางมากเกินไปจะทำให้อุณหภูมิของห้องใส่ยางตกลงมากในระยะเริ่มต้นของการทดสอบตัวอย่างที่จะทดสอบควรจะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ก่อนที่จะใส่ยางเข้าไปในเครื่อง

2.9 คุณลักษณะการวัลคาไนซ์

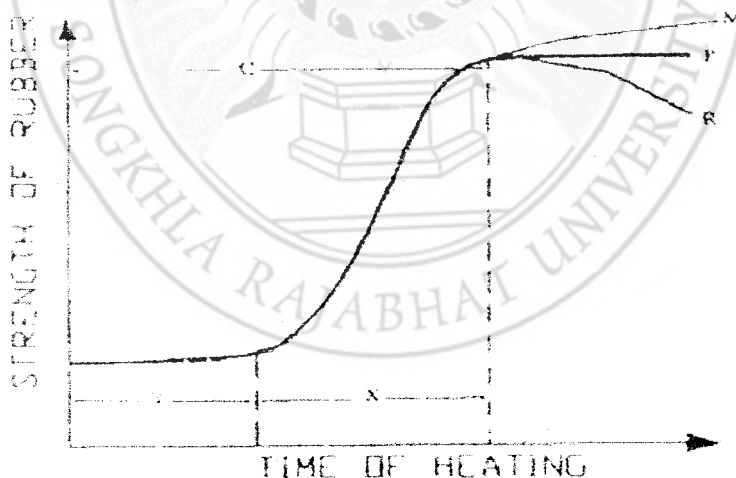
พรพรรณ (2532) กระบวนการวัลคาไนซ์เป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปร่าง “ดิบ” ที่อยู่ในสภาพไม่คงตัว ให้เป็นยางคงรูป ที่อยู่ในสภาพคงตัว คือรักษารูปร่างได้ โดยการใส่สารวัลคาไนซ์ซึ่งเป็นสารที่ไปทำปฏิกิริยากับยางเพื่อให้เกิดพันธะเชื่อมโยงโมเลกุล สารที่เป็นสารวัลคาไนซ์ที่นิยมคือกำมะถัน และสามารถเร่งให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้น โดยการใส่สารตัวเร่ง สารตัวเร่งมีหลายชนิด อัตราการเร่งปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณสารตัวเร่งและอุณหภูมิที่ใช้ในปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ยาง โดยใช้กำมะถันร่วมกับสารตัวเร่ง พบว่าการเพิ่มปริมาณกำมะถันจะทำให้ได้สมบัติทางฟิสิกส์เปลี่ยนแปลงไป โดยมีค่าโมดูลัส และความแข็งเพิ่มขึ้น ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดลดลง ส่วนความกระด้างตัวไม่เปลี่ยนแปลง สารตัวเร่งทุกชนิดเมื่อเพิ่มปริมาณและอุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ จะทำให้อัตราการวัลคาไนซ์เร็วขึ้น อัตราการเร่งปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นกับชนิดของสารตัวเร่งดังนี้ ZDC > TMTD > TMTM > MBT > CBS > ZMBT > MBTS

เมื่อนำยางคอมพอนด์ มาทำให้ร้อน สารวัลคาไนซ์ที่อยู่ในยางจะเริ่มต้นเกิดปฏิกิริยา เช่น อาจทำปฏิกิริยากันเอง ในตอนเริ่มต้นนี้จะใช้ระยะเวลาหนึ่งอาจจะช้าหรือเร็ว ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ และสารเคมีที่ใช้ด้วย (บุญธรรมและปรีชา, 2538) โดยทั่วไป ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นระยะเวลาดังกล่าวจะสั้นลง ระยะเวลาวงนี้ เป็นช่วงเวลาที่เริ่มต้น ก่อนที่สารเคมีจะเข้าทำปฏิกิริยากับยาง ช่วงเวลาดังกล่าว เรียกว่า ช่วงเวลาก่อนยางสุก (Induction period) แล้วในเวลาต่อมาสารเคมีก็จะเข้าทำปฏิกิริยากับยาง ก่อให้เกิดการแข็งตัวจนเห็นได้ชัด เรียกว่า ระยะเวลาที่สามารถแปรรูปได้ (Scorch time) เมื่อยางแปรรูปได้ยาก ขณะที่เกิดการ Scorch นี้เรียกกันว่ายางเริ่มสุก

เมื่อสารเคมีทำปฏิกิริยากับยางต่อไปยางจะแข็งขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งสารเคมีกระทำกับยางจนหมดยางก็จะสุกเต็มที่ (Optimum Cure) ระยะเวลาที่ใช้เพื่อให้ยางทำปฏิกิริยากับสารเคมีจนหมดเรียกว่า เวลา ยางสุกเต็มที่ (100% Cure time) แต่ในการทำปฏิกิริยาจริงนั้น พบว่าเวลาที่ยางสุกเต็มที่ใช้เวลา นานเกินไป และอาจจะทำให้สมบัติทางฟิสิกส์ด้านอื่น ๆ ของยางด้อยลงไปอีกด้วย ดังนั้นระยะเวลา ยางสุกจึงมักจะกระทำที่ยางมีโมดูลัสสูงขึ้นเพียง 90% หรือ 95 % ของโมดูลัสที่จะขึ้นสูงสุด ระยะเวลาเรียกว่า 90% ของยางสุก หรือ 95 % ของยางสุก ตามลำดับ ระยะเวลาดังกล่าวอาจจะถือเป็นเวลา ยางสุกเต็มที่ก็ได้ ยางใดที่ได้รับความร้อนไม่เพียงพอ ยางจะไม่สุก (Under Cure) จะได้ยางที่มีสมบัติที่ตีไม่เต็มที่ และ จะรักษารูปทรงไม่ได้ แต่ถ้าหากปล่อยยางรับความร้อนต่อไปอีกหลังจากที่ได้ผ่านระยะเวลา ยางสุก ยาง จะสุกเกินไป (Over Cure) โมเลกุลของยางจะสลายตัว ยางจะกลับนิ่มลง (ถ้ายางนั้นเป็นยางธรรมชาติ) เรียกว่า เกิดการพลิกกลับสู่สภาพเดิม (Reversion) หรือยางอาจจะแข็งขึ้นไปอีก (ถ้ายางนั้นเป็นยางเอสปี อาร์ เป็นต้น) เรียกว่า Marching Modulus ยางคอมปานด์บางชนิดเกิดการกลับสู่สภาพเดิมได้ง่าย เรียกว่า ยางนั้นมีลักษณะเป็น Peaky Cure แต่ในยางใดสามารถรักษาโมดูลัสไม่ให้ตกลงไปได้นาน ถึงแม้ว่า เกินเวลา ยางสุกเต็มที่ที่จะเรียกว่า เป็น Flat Cure หรือ Plateau Cure ดังนั้น เมื่อให้ความร้อนแก่ยางคอมปานด์ จะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องผ่านลำดับขั้นตอนต่างๆดังนี้

เริ่มร้อน Induction time, Scorch time, Under time, Optimum time, 100% Cure, Over Cure, Reversion Cure หรือ Marching Modulus



รูปที่ 2.11 การเปลี่ยนแปลงสมบัติของยางคอมปานด์เมื่อให้ความร้อนแก่ยาง
(บุญธรรมและปรีชา, 2538)

จากรูปที่ 11 ขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงโมดูลัสของยางในระหว่างการให้ความร้อนกับยางนี้โดย

S = ระยะเวลาการ Scorch เป็นช่วงของ Induction period

X = ระยะเวลาการเกิด Crosslink จนถึงจุด Optimum

C = ระยะเวลาการเกิด Cure จนถึงจุด Optimum

M = เส้นแสดง Marching modulus

P = เส้นแสดง Plateau cure

R = เส้นแสดง Reversion cure

อาซีชัน (2542) เพอร์ออกไซด์มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เป็นสารเริ่มปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาการพอลิเมอไรส์ แบบอนุมูลอิสระ และถือเป็นสารวัลคาไนซ์ชนิดใหม่ เพอร์ออกไซด์สามารถใช้กับยางที่มีพันธะคู่หรือไม่มีก็ได้ กรณีที่ต้องการยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยเพอร์ออกไซด์ที่มีสมบัติดี จะต้องใช้เวลานานเมื่อเปรียบเทียบกับการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน เพื่อแก้ปัญหาลักษณะการวัลคาไนซ์ที่เกิดขึ้นช้าของการใช้สารเพอร์ออกไซด์ สามารถทำได้โดยการเพิ่มปริมาณการใช้สารเพอร์ออกไซด์ ทำให้ระยะเวลาการวัลคาไนซ์ สั้นลง

Osswald (2001) ในการวัลคาไนซ์ยางคอมพอนด์เวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์จะส่งผลต่อสมบัติของยางวัลคาไนซ์ ซึ่งยางธรรมชาติจะเกิดการ reversion ได้ถ้าใช้อุณหภูมิสูงเกินไป สำหรับเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ก็ขึ้นอยู่กับความหนาของยาง กล่าวคือ ถ้ายางคอมพอนด์ที่หนานำไปวัลคาไนซ์จะใช้เวลาในการวัลคาไนซ์นานกว่ายางคอมพอนด์ที่บางกว่า โดยในการวัลคาไนซ์ยางบาง การเพิ่มอุณหภูมิที่สูงขึ้น 10 องศาเซลเซียส จะสามารถลดเวลาการวัลคาไนซ์ลงไปครึ่งหนึ่ง แต่ขณะเดียวกันระยะเวลาที่สามารถแปรรูปได้ (Scorch time) ของยางคอมพอนด์จะลดลงไปครึ่งหนึ่งด้วย

2.10 พลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์

อรุณ (2521) ทฤษฎีเกี่ยวกับอัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ ทฤษฎีการปะทะ เชื่อว่าปฏิกิริยาเคมีจะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่ออนุภาคของตัวทำปฏิกิริยามาสัมผัสหรือชนหรือปะทะซึ่งกันและกัน เมื่อปะทะกันแล้วถ้ามีพลังงานมากพอก็จะมีการจัดอะตอมกันใหม่ พันธะเดิมหมดไปเกิดพันธะใหม่ ได้สารใหม่เป็นผลของปฏิกิริยา นอกจากโมเลกุลชนกันด้วยอัตราเร็วขนาดหนึ่งแล้วจะต้องถูกจังหวะหรือถูกตำแหน่งที่เหมาะสมจึงจะทำให้พันธะเดิมหมดไปแล้วเกิดพันธะใหม่ขึ้นเกิด โมเลกุลใหม่ขึ้น

โสมถและคณะ (2543) โสมถทุก โสมถทุกจะมีพลังงานจลน์อยู่ในตัวเองทำให้เคลื่อนที่ตลอดเวลา บางโสมถก็เคลื่อนที่เร็ว บางโสมถก็เคลื่อนที่ช้า ขึ้นกับมวลของโสมถ ถ้ามวลโสมถมากอนุภาคก็เคลื่อนที่ได้ช้า ถ้ามวลโสมถน้อยก็เคลื่อนที่ได้เร็ว การเคลื่อนที่ของโสมถก่อให้เกิดการชนกันขึ้น ทำให้มีการถ่ายเทพลังงานให้แก่กัน แต่พลังงานทั้งหมดของอนุภาคที่ชนกันจะยังคงที่ ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ถ้าการชนกันนั้นรุนแรงจนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานในโสมถได้มาก ก็จะมีการสลายพันธะและมีการสร้างพันธะใหม่ ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้ผลิตภัณฑ์ขึ้น แต่ทว่าโสมถทุกตัวไม่ได้มีพลังงานในตัวสูงเท่ากัน ขณะที่โสมถวิ่งเข้าใกล้กัน ความเร็วลดลง พลังงานจลน์ก็จะลดลงและเปลี่ยนไปเป็นพลังงานศักย์ ถ้าโสมถเคลื่อนที่ช้า พอชนกันอนุภาคก็หยุดและเปลี่ยนทิศทางปฏิกิริยาก็ไม่เกิดขึ้น แต่ถ้าโสมถเคลื่อนที่เร็วมาก มีพลังงานจลน์สูง ซึ่งเปลี่ยนไปเป็นพลังงานศักย์ที่สูง พอชนกันจึงเกิดปฏิกิริยาได้ผลิตภัณฑ์ ดังนั้นโสมถที่วิ่งด้วยความเร็วสูง (มีพลังงานมาก) เท่านั้นจึงจะเกิดปฏิกิริยา เปรียบเทียบกับลูกบอลที่ถูกกลิ้งขึ้นภูเขา ถ้าถูกกลิ้งขึ้นอย่างช้า ๆ (พลังงานจลน์น้อย) จะขึ้นได้ไม่ถึงยอดเขา จะหยุดแล้วกลิ้งกลับมา ซึ่งเหมือน โสมถที่มีพลังงานจลน์น้อยเวลาชนกันจะแยกจากกันโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลง ถ้าลูกบอลถูกกลิ้งขึ้นภูเขาอย่างรวดเร็ว (พลังงานจลน์มาก) ลูกบอลจะถึงยอดเขาและกลิ้งลงสู่อีกด้านหนึ่งของภูเขา คล้ายกับโสมถที่มีพลังงานจลน์มากเข้าชนกัน มีการจัดตัวกันใหม่ได้เป็นผลิตภัณฑ์ขึ้น

พลังงานที่น้อยที่สุดที่โสมถต้องมีขณะชนกันเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา เรียกว่าพลังงานกระตุ้น (E_a) เมื่อโสมถที่มีพลังงานจลน์เท่ากับพลังงานกระตุ้น หรือมากกว่าพลังงานกระตุ้นเข้าชนกัน จะทำให้พันธะสลายตัวพร้อม ๆ กับการสร้างพันธะใหม่ขึ้น อนุภาคที่กำลังมีการสร้างพันธะและทำลายพันธะพร้อม ๆ กัน เรียกว่า activated complex ซึ่งจะมีพลังงานศักย์สูงกว่าสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ activated complex อาจเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์หรือสารตั้งต้นก็ได้ พลังงานที่จะทำให้เกิด activated complex คือพลังงานกระตุ้นนั่นเอง ถ้าแฟกเตอร์อื่น ๆ ของปฏิกิริยาเหมือนกันหมด ปฏิกิริยาที่มีพลังงานกระตุ้นสูงจะเกิดปฏิกิริยาช้า มีค่าคงที่อัตราเร็ว k น้อย ส่วนปฏิกิริยาที่มีพลังงานกระตุ้นต่ำจะเกิดปฏิกิริยาเร็ว มีค่าคงที่อัตราเร็ว k มาก

กฤษณา (2519) การปะทะกันระหว่างอนุภาคที่จะให้เป็นผลสำเร็จนั้น ต้องประกอบด้วย การหันเหตัวของอนุภาคให้ถูกทิศทางขณะปะทะกัน และพลังงานของอนุภาคก็ต้องสูงพอเพียงด้วย เราเรียกพลังงานจำนวนน้อยสุดที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ว่า พลังงานกระตุ้น ถ้าพลังงานสูงไม่ถึงพลังงานกระตุ้น ปฏิกิริยาจะไม่เกิด



เมื่อพลังงานกระตุ้นมีค่าน้อยปฏิกิริยามีอัตราเร็ว ปฏิกิริยาเร็วบางปฏิกิริยาแทบไม่มีพลังงานกระตุ้นเลย อนุภาคของสารเข้าทำปฏิกิริยามีพลังงานรวมกันแล้วเกินค่าพลังงานกระตุ้นได้ง่าย ถ้าพลังงานกระตุ้นมีค่ามากปฏิกิริยาเกิดช้า การเพิ่มอุณหภูมิทำให้อัตราของปฏิกิริยาเพิ่มเร็วขึ้น เพราะเป็นการเพิ่มพลังงานจนทำให้แก่อนุภาคของสารเข้าทำปฏิกิริยา และเพิ่มจำนวนอนุภาคที่มีพลังงานสูงพอที่จะทำให้พลังงานศักย์ของระบบเกินพลังงานกระตุ้นซึ่งทำให้ปฏิกิริยาบังเกิดผลสำเร็จ

สมการของ Arrhenius

$$k = Ae^{-E_a/RT} \quad (2.1)$$

k = ค่าคงที่ของอัตรา

A = Arrhenius factor (เกี่ยวกับจำนวนการปะทะ, การหันเหทิศทางและอื่น ๆ)

e = 2.718 (ฐานของ natural log)

E_a = พลังงานกระตุ้น

R = ค่าคงที่ของก๊าซ = 8.314 จูล โมล⁻¹ เคลวิน⁻¹ หรือ 1.987 แคลอรี โมล⁻¹ เคลวิน⁻¹

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์

2.11 ค่าคงที่ปฏิกิริยาการวัดคาบไชนซ์

อรุณ (2525) ผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ทำให้โมเลกุลมีพลังงานจลน์มากกว่าพลังงานกระตุ้น (E_a) จากสมการของอาร์เรเนียส จากสมการที่ (2.1)

k จะมีค่าน้อยเมื่อพลังงานกระตุ้น (E_a) มีค่ามากหรือเมื่ออุณหภูมิ (T) ของปฏิกิริยาค่า ในการวัดพลังงานกระตุ้นและค่าคงที่ k จะต้องวัดที่อุณหภูมิแตกต่างกันอย่างน้อย 2 อุณหภูมิ

การใช้สมการอาร์เรเนียส คำนวณหาค่าต่าง ๆ นั้น โดยปกติจะได้ค่าออกมาโดยประมาณ แม้ว่าในบางครั้งจะได้ค่าออกมาตรงกับผลการทดลองก็ตาม

จากที่กล่าวมาทั้งหมดนี้พอจะสรุปโดยทั่วไปได้ว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้น แม้ว่าบางปฏิกิริยาที่มีกลไกของปฏิกิริยาซับซ้อนจะไม่เป็นไปตามนี้ก็ตาม

โสภณและคณะ (2543) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น พลังงานจลน์มากขึ้น โอกาสที่จะชนกันมีมากขึ้น และการชนกันจะรุนแรงทำให้จำนวนโมเลกุลที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าพลังงานกระตุ้นเพิ่มขึ้น อัตราเร็วของปฏิกิริยาข้อมจะมากตามไปด้วย

๙

๖๗๘.๒

๙ ๕๑๓๖

150535

- 8 ๓. ๒551

ค่าคงที่อัตราเร็ว k ขึ้น โดยตรงกับอุณหภูมิ และค่าของ E_a เช่น ถ้า E_a มากหรืออุณหภูมิต่ำ ค่าคงที่อัตราเร็ว k จะน้อย การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย จะทำให้ค่าคงที่อัตราเร็ว k เปลี่ยนไปมาก ยิ่งพลังงานกระตุ้นสูงเท่าไร ผลของอุณหภูมิต่ำต่อค่า k ก็ยิ่งมากด้วย

อุมาร์ (2543) ยางแต่ละชนิดนั้นจะมีอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์และพลังงานกระตุ้นในการวัลคาไนซ์ที่แตกต่างกัน การทดลองนี้ได้ศึกษาถึง ลักษณะการวัลคาไนซ์และพลังงานกระตุ้นในการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติและยางอีพิตีเอ็ม ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางนั้นจะประกอบไปด้วยขั้น 3 ขั้น ตอน คือ ช่วงเวลาก่อนการวัลคาไนซ์ ช่วงเวลาที่เกิดการวัลคาไนซ์ และช่วงเวลาหลังเกิดการวัลคาไนซ์ จากการทดสอบพบว่ายางธรรมชาติ (STR 5L, STR 20, RSS No3) ที่ทำการทดสอบมีลักษณะการวัลคาไนซ์ที่ไม่แตกต่างกันมากนักและพบว่ายางธรรมชาติมีลักษณะการวัลคาไนซ์เร็วกว่ายางอีพิตีเอ็มมาก ช่วงเวลาหลังการวัลคาไนซ์ของยางอีพิตีเอ็มนั้นจะต่างจากยางธรรมชาติโดยมีลักษณะเป็นแบบ Marching cure

2.12 ระดับของการวัลคาไนซ์

สาโรช และคณะ (2541) ความแตกต่างของระดับการวัลคาไนซ์ของยาง ที่เวลาและอุณหภูมิต่าง กันนั้น มีปัจจัยมาจากปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดของยาง ระบบการวัลคาไนซ์ และสารเคมีอื่น ๆ ที่ผสมลงในสูตรยาง ปัจจัยหนึ่งที่สำคัญได้แก่ ชนิดของยาง ซึ่งเมื่อกำหนดให้ใช้สารเคมีชนิดอื่น ๆ เหมือนกันแล้ว ค่าพลังงานกระตุ้นการวัลคาไนซ์และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิกการวัลคาไนซ์สามารถใช้เป็นค่าที่อ้างอิงถึงระดับการวัลคาไนซ์ยางที่เวลาหรืออุณหภูมิต่าง ๆ ได้ สมการที่ใช้ในปัจจุบันจะมีพื้นฐาน มาจากระดับการวัลคาไนซ์ของยางซึ่งพิจารณาในส่วนของอุณหภูมิต่ำและเวลาวัลคาไนซ์ และตัวแปรพื้นฐานในการวัลคาไนซ์ของยาง การใช้วิธีนี้จะทำให้ได้ผลที่รวดเร็ว และเป็นการศึกษาที่มีระบบรู้ถึงผลกระทบหลัก และผลของตัวแปรต่างๆ ในการพิจารณาระดับการวัลคาไนซ์ของยาง