

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 บทนำ

ยางเป็นสารพอลิเมอร์ ที่มีขนาดไม่เล็กไป远 ประกอบด้วยโนโนเมอร์หลายพันหน่วยเข้าต่อตัวกัน ยางแตกต่างไปจากพอลิเมอร์อื่น กล่าวคือ เมื่อมีแรงมีแรงกระทำ ยางสามารถเกิดการผิดรูปได้และกลับสู่รูปเดิม ได้เมื่อเอานแรงกระทำออก ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ที่ยังเป็นยางดิบ ไม่อาจที่จะนำไปใช้งานได้โดยตรง จะต้องมีการปรับปรุง โดยการใส่สารเคมีบางอย่างเข้าไปในยางเพื่อวัตถุประสงค์ดังนี้

- เพื่อให้ได้สมบัติทางกายภาพตามที่ผลิตภัณฑ์ต้องการ
- เพื่อให้สามารถปรับรูปยางได้ในงานผลิตโดยไม่มีปัญหา
- เพื่อให้ผลิตภัณฑ์นี้ดันทุนค่าที่จะแบ่งขันในตลาดได้

ยางดิบยังมีสมบัติค่อนข้างจำกัด เช่น มีความแข็งแรงต่ำ มีความแข็ง-นิ่น ขณะเดียวกัน ไม่อาจจะใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ทุกประเภท ดังนั้นการใส่สารเคมี สารตัวเติมบางตัวจะไปเสริมความแข็งของยางได้ รวมทั้งยางดิบมีราคาค่อนข้างแพง ถ้าจะให้พิจารณาอย่างเดียว จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่อาจจะอยู่ในตลาดที่แบ่งขันกันได้ แต่การใช้สารเคมีมากตัวเดียวไป เป็นสิ่งที่ฟังระวัง เพราะจะทำให้ระบบยุงยากมากก่อให้เกิด การสับสน และบางครั้งสารเคมีที่ใส่เข้าไป เกิดการหักล้างกันเอง ทำให้เสื่อมปลีอง

การวัสดุภายในซึ่ง เป็นการก่อให้เกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติยางดังนี้

- เปลี่ยนจากสมบัติเทอร์โมพลาสติก ไปเป็น สมบัติเทอร์โมเซต
- เปลี่ยนจากสมบัติกึ่งพลาสติก กึ่งอีลัสติก ไปเป็น อีลัสติก
- เปลี่ยนจากการละลายในตัวทำละลาย ไปเป็น การไม่ละลาย

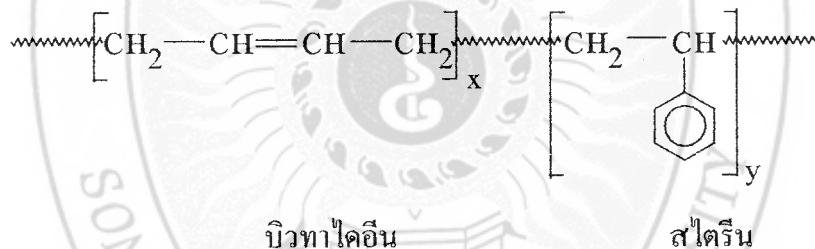
ดังนั้นการวัดค่าไนซ์จึงเป็นการแก้ไขข้อเสียบางประการของยางดิบ ที่ได้ก่อตัวมาแล้ว ระบบการวัดค่าไนซ์ที่ใช้กันมากที่สุดคือ ระบบการใช้กําเนดัน ถึงแม้ว่า การใช้กําเนดันจะจำกัดอยู่ในยาง จำพวกที่มีพันธะคู่ที่ว่องไวเท่านั้น เช่น ยางธรรมชาติ ยางเอสบีอาร์ และยางไนโตรล์ เป็นต้น การเชื่อมโยงโดยใช้กําเนดันเพียงอย่างเดียว ถึงแม้จะทำให้อุณหภูมิสูง ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงจะเป็นไปได้ช้ามาก แต่การใส่สารตัวเร่งเข้าไปเพียงเล็กน้อยจะช่วยลดเวลาการวัดค่าไนซ์ลง และการใช้สารกรดคุ้น ก็จะทำให้ยางวัดค่าไนซ์อย่างสมบูรณ์ และใช้กําเนดันได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

2.2 ยางสไตรีนบิวท่าไดอีน (Styrene-Butadiene Rubber, SBR)

พรพรรณ (2540) ย่างເອສນີ້ອາຮ້ ນັບປັດຢາງທີ່ໃຊ້ງານຫົວໄປເຊັ່ນເດືອກນັບຢາງຮຽນຫາຕີ ຈຶ່ງນັບວ່າຢາງທີ່
ສອງນີ້ເປັນຄູ່ແປ່ງກັນ ໂດຍຕຽບທີ່ຈະກຳເປັນພລິຕົກລົມທີ່ຕ່າງໆ ແຕ່ຢາງທີ່ສອງກີ່ຍັງມີຄວາມແຕກຕ່າງກັນທາງດ້ານ
ສົມບັດແລະການກາຮອກສຸດຖານ

2.2.1 โครงสร้างทางเคมี

ยางเอสบีอาร์ เป็นโภคภัณฑ์ของสหราชอาณาจักรและนิรภัย อนุรักษ์ส่องชันนิกนีจะมา เชื่อมต่อ กัน มีสูตรโครงสร้างดังนี้



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างทางคณิตของยางแอสบีวี (พรพรรณ, 2540)

ยางอสปีอาร์เป็นยางที่สังเคราะห์ขึ้น การสังเคราะห์โดยสูตรที่ต่างกันและสภาพะที่ต่างกันจะทำให้เกิดเป็นพอลิเมอร์ต่างๆ หลายชนิด และมีสมบัติที่แตกต่างกัน ซึ่งสมบัติที่แตกต่างกันนั้น จะขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1. สัคส่วนของบิวท่าไดอีนต์อสไตรีน
 2. น้ำหนักโนเลกุลและการกระจายของโนเลกุล
 3. ลำดับของการจัดตัวของอนอมอร์ในสายโซ่
 4. โครงสร้างระดับจุลภาค (Microstructure)
 5. ส่วนที่ไม่ใช่ยาง

2.2.2 สมบัติทางกายภาพ

2.2.2.1 ยางดีบ

ยางเอสนบีอาร์ เป็นยางที่สังเคราะห์ขึ้น สามารถควบคุมขนาดของโนเบกูลได้ จึงทำให้ได้ยางที่มีความหนืดตามต้องการ ดังนั้นยางเอสนบีอาร์สามารถนำมารันานาใช้งานได้โดยไม่ต้องมีการบดยางก่อนที่จะนำมาทดสอบกับสารเคมีเหมือนกับยางธรรมชาติ

การบดยางเอสนบีอาร์ ไม่ทำให้ยางนิ่มลงเหมือนกับยางธรรมชาติ ทำให้ยางเอสนบีอาร์สามารถควบคุมความหนืดได้ดี และจะไม่มีปัญหาของยางนิ่มเกินไป ถ้าต้องการจะให้ยางนิ่มพิเศษจะต้องใช้พลาสติดีไซเรอร์ใส่เข้าไป

ยางเอสนบีอาร์พันลูกกลิ้งได้ไม่ดีเหมือนยางธรรมชาติ ยางเอสนบีอาร์มักจะห้อยยื่นจากลูกกลิ้ง จึงมักจะทดสอบยางเอสนบีอาร์ในเครื่องทดสอบแบบปิด แต่ถ้าจะทดสอบในเครื่องทดสอบสองลูกกลิ้ง ควรจะตั้งอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 50 องศาเซลเซียส ยางเอสนบีอาร์จะใช้พลังงานในการทดสอบยางสูงกว่ายางธรรมชาติ และให้ความร้อนออกมากกว่า

เนื่องจากในโนเบกูลของยางเอสนบีอาร์ มีบิวทาไดอีนเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการวัลภาไนซ์ในยาง บิวทาไดอีนนี้มีความว่องไวในปฏิกริยาช้ากว่าไอโอพรีน ที่มีอยู่ในโนเบกูลของยางธรรมชาติ ดังนั้น ยางเอสนบีอาร์จึงวัลภาไนซ์ช้ากว่ายางธรรมชาติ เมื่อต้องการให้อัตราการอบสุกของยางเอสนบีอาร์ใกล้เคียงกับยางธรรมชาติ จำเป็นต้องใช้สารตัวเร่งมากกว่ายางธรรมชาติในปริมาณร้อยละ 25-30 หรือใช้สารตัวเร่งที่แรงกว่า เช่น ยางธรรมชาติใช้สารตัวเร่ง CBS ในปริมาณ 1.0 phr ยางเอสนบีอาร์จะใช้ CBS ในปริมาณ 1.3 phr จึงจะทำให้อัตราการวัลภาไนซ์ใกล้เคียงกัน

2.2.2.2 ยางวัลภาไนซ์

ยางเอสนบีอาร์ประกอบด้วยสไตรีนร้อยละ 23 และมีการจัดตัวของหน่วยโนโนเมอร์ในสายโซ่แบบไม่มีระเบียบ ไม่ว่าจะเตรียมโดยวิธีอิมลัชัน หรือวิธีโซลูชันก็ตาม โนเบกูลไม่สามารถลดผลึกได้เมื่อคึ่ง ทำให้ยางไม่แข็งแรง การออกสูตรยางจำเป็นต้องใช้สารตัวเติมที่เสริมประสิทธิภาพ

ยางเอสนบีอาร์นี้พันธะคู่ที่ว่องไวในปฏิกริยา (แต่ว่องไวน้อยกว่าพันธะคู่ในยางธรรมชาติ) ทำให้ยางเอสนบีอาร์สามารถวัลภาไนซ์ได้ด้วยกำลังดัน (แต่วัลภาไนซ์ได้ช้ากว่ายางธรรมชาติ) และสามารถดูดออกซิไดซ์ได้ง่ายเหมือนยางธรรมชาติ (แต่ยางเอสนบีอาร์เหนือกว่ายางธรรมชาติเล็กน้อย)

2.3 ยางไนไตรล์ (Acrylonitrile Butadiene Rubber, NBR)

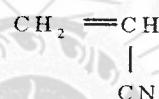
ยางอะคริโลไนไตรล์บิวท้าไคอีน มีชื่อเรียกอย่างย่อว่า ยางไนไตรล์ และตัวย่อตาม ASTM ใช้เป็น NBR ยางไนไตรล์ เป็นยางใช้งานเชิงพาณิชย์ เพื่อวัสดุประสงค์หลัก โดยเฉพาะด้านการทนนำมัน ทนต่อตัวทำละลาย และจาระบี

หลังจากการค้นพบวิธีการโคพอลิเมอร์ไรซ์ ระหว่างสไตรีนและบิวท้าไคอีน ในปี พ.ศ. 2472 ทำให้สามารถเตรียมโคพอลิเมอร์ ระหว่างอะคริโลไนไตรล์และบิวท้าไคอีนได้สำเร็จในห้องปฏิบัติการ ในปี พ.ศ. 2473 หลังจากนั้น จึงได้ผลิตทางการค้าออกสู่ตลาด

2.3.1 โครงสร้างทางเคมี

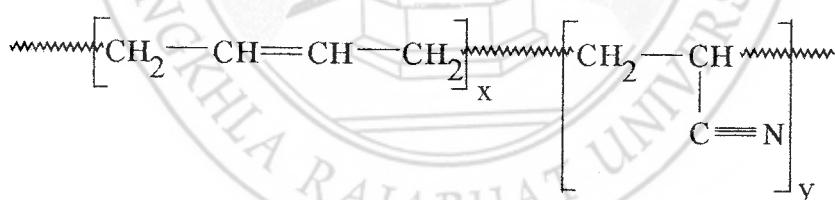
ยางไนไตรล์ เป็นโคพอลิเมอร์ระหว่าง อะคริโลไนไตรล์มอนومอร์ กับ บิวท้าไคอีนมอนอมอร์

มอนอมอร์อะคริโลไนไตรล์ [CAN] มีโครงสร้างเป็น



และบิวท้าไคอีน (BU) มีโครงสร้างเป็น $\text{CH}_2 - \text{CH} - \text{CH} = \text{CH}_2$

มอนอมอร์ทั้งสองมาทำการโพลิเมอร์ไรซ์ร่วมกันแบบอิมลชัน ได้พอลิเมอร์ที่จัดตัวแบบสุ่ม (random) มีสูตรทั่วไปดังนี้



รูปที่ 2.2 สูตร โครงสร้างทางเคมีของยางไนไตรล์ (พพรรรณ, 2540)

2.3.2 สมบัติ

ยางไนไตรล์สามารถวัตถุภายในที่โดยการใช้กำมะถัน เนื่องจากมีพันธะคู่ที่ว่องไวในส่วนของบิวท้าไคอีน ปกติจะใช้กำมะถันในปริมาณ 1.5 phr สำหรับสารตัวเดินที่เป็นชนิดจำและใช้กำมะถันในปริมาณ 1.5-2.0 phr สำหรับสารตัวเดินอื่น ๆ

ยางในไตรล์จะวัลภาในชั้นกว่ายางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ ซึ่งสามารถแก้ไขโดยการเพิ่มปริมาณสารตัวเร่ง เช่น ใช้ในปริมาณ 1.25-1.75 phr เป็นต้น

เมื่อต้องการให้ยางในไตรล์ใช้งานที่อุณหภูมิสูงและมีการจัดตัวจากแรงอัดต่ำ จะใช้ระบบการวัลภาในชั้นวัสดุเปลอร์ออกไซด์ (เช่น Dicup 2.0 phr) หรือใช้ระบบอีวี หรือ เชมิอีวี

2.4 ยางบิวทาไดอีน (Butadiene Rubber, BR)

บัญชรรน (2530) ยางบิวทาไดอีนหรือนิยมเรียกสั้นๆ ว่า ยางบีอาร์ ยางชนิดนี้จะนิ่มส่วนใหญ่จะผสมกับยางชนิดอื่นเพื่อช่วยให้ยางแข็งขึ้นและมีสมบัติดีขึ้น

2.4.1 โครงสร้างทางเคมี

สูตรโครงสร้างของยางบีอาร์เป็นดังนี้



รูปที่ 2.3 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางบีอาร์ (บัญชรรน, 2530)

2.4.2 สมบัติ

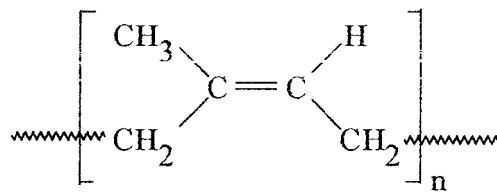
ยางบีอาร์มีความต้านทานต่อการสึกหรอค่อนข้างมากและมีความต้านทานต่อการแตกเนื่องจากการหักหดี พันธะคู่ไม่ว่องไวและ สามารถวัลภาในชั้นโดยใช้กำมะถันได้ เช่นเดียวกับยางอื่นๆ

2.5 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber)

ยางธรรมชาติ ที่ได้จากดันยางพาราอยู่ในรูปของน้ำยาง จะต้องแยกยางออกจากน้ำโดยการทำให้ยางขับตัวเป็นก้อนคั่วกรด แล้วนำยางที่เป็นก้อนน้ำมารีดให้เป็นแผ่น หรือตัดให้เล็กลง แล้วทำให้แห้ง นำไปใช้ในรูปของยางแห้ง

2.5.1 โครงสร้างทางเคมี

ยางธรรมชาติเป็นสารโพลิเมอร์ ที่มีน้ำหนักโมเลกุล (Mn) สูง เคลื่ยประมวล แสนถึงห้าแสน มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าง โดยมีสูตรโมเลกุลเป็น cis-1,4 – polyisoprene



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

2.5.2 สมบัติ

ยางธรรมชาติสามารถวัลภาในซึ่งให้มีความแข็งต่างๆ กัน ได้นาก ตึงแต่นิ่มมาก (เช่น 30-50 IRHD) ไปจนถึงความแข็งของอิโโนไนต์ (98 + IRHD) การปรับความแข็งของยางทำได้โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณของสารตัวเดิน หรือโดยการเปลี่ยนปริมาณกำมะถันในช่วงของการใช้กำมะถันปริมาณ 10-20 phr จะให้ยางที่มีความแข็งคล้ายหนัง (leather like) สำหรับงานกระเบื้องยางปูพื้นและยางลูกกลิ้งแต่จะมีความแข็งแรงค่อนและเลื่อนสภาพได้ง่าย

พันธะคู่ที่ว่องไวในปฏิกริยาซึ่งทำให้เกิดการวัลภาในซึ่งได้อ่ายاردเร็วเมื่อใช้กำมะถันเป็นตัววัลภาในซึ่งเป็นจุดอ่อนที่ทำให้ถูกออกซิไดซ์ไดง่ายด้วยออกซิเจนและโอโซน โดยทั่วไปยางธรรมชาติไม่เหมาะสมกับงานที่ต้องการความต้านทานต่อการเสื่อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิสูงและมีโอโซนอยู่ด้วย

ระบบการวัลภาในซึ่งแบบอิว หรือ เปอร์ออกไซด์ หรือ บูรีเทน จะให้ความทนทานต่อความร้อนดีขึ้น รวมทั้งการให้วัลภาในซึ่งที่อุณหภูมิต่ำลง และให้ยางสูญน้อย

2.6 สารตัวเร่ง

พญพรรณ (2528) ก่อนที่จะมีการค้นพบสารตัวเร่ง (accelerator) ชาลส์ กฎดเบียร์ ได้ค้นพบวิธีการวัลภาในซึ่งยางธรรมชาติโดยการใช้กำมะถันเพียงอย่างเดียว ซึ่งต้องใช้กำมะถันปริมาณมากและการวัลภาในซึ่งใช้เวลานานที่อุณหภูมิสูง ผลิตภัณฑ์ยางที่ได้มีสีคล้ำ และเกิดการซึมออกมาที่ผิวของกำมะถันเมื่อตั้งทิ้งไว้ ต่อมาในปี 1906 ได้มีการค้นพบสารตัวเร่งอินทรี โดย Oenslager และเมื่อนำสารตัวเร่งอินทรีมาร่วมกับกำมะถันในการวัลภาในซึ่งยางพบว่าสารตัวเร่งจะช่วยลดเวลาในการวัลภาในซึ่งอย่างมาก อุณหภูมิที่ใช้ในการวัลภาในซึ่งก็ลดลง และปริมาณกำมะถันที่ใช้เพื่อให้ได้ยางที่มีสมบัติทาง

พิสิกส์สูงสุดก็ลดลง ผลิตภัณฑ์ยางที่ได้จะมีความด้านทานต่อการตั้งทิ่งไว้เป็นเวลานาน (good aging resistance) และลดการซึมออกน้ำที่ผิวของถ่านลงด้วย หลังจากนั้นมาสารตัวเร่งจึงเป็นสารที่จำเป็นที่จะต้องใช้ในการวัสดุในชั้นยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์

2.6.1 ชนิดของสารตัวเร่ง

สารตัวเร่งได้ถูกค้นพบเพิ่มขึ้นอีกมาก many จนต้องจัดออกเป็นหมวดหมู่ ซึ่งในระยะแรกการจัดหมวดหมู่ของสารตัวเร่งจะจัดตามความเร็วในการเร่งให้ยางธรรมชาติเกิดการวัสดุในชั้น โดยแบ่งออกเป็นหมวดหมู่ดังนี้

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

เมื่อมียางสังเคราะห์เพิ่มขึ้น สารตัวเร่งที่เคยจัดว่าเป็นสารตัวเร่งที่เร็ว หรือเร็วสูงสุด สำหรับยางธรรมชาติอาจกลายเป็นสารตัวเร่งที่ช้าสำหรับยางสังเคราะห์นั้นๆ ไปได้ ดังนั้นในระยะต่อมาจึงมีการจัดแบ่งสารตัวเร่งใหม่ออกเป็นหมวดหมู่ ตามลักษณะ โครงสร้างทางเคมีของสารตัวเร่งนั้นๆ แบ่งออกเป็นหมู่ต่าง ๆ ดังนี้

1. หมู่ไดโซкарบามาต (Dithiocarbamate)
 - 1.1 เกลืออัมโมเนียม (Ammonium salts)
 - 1.2 เกลือโลหะ (Metal salts)
2. หมู่แซนแทท (Xanthates)
3. หมู่ไธยูรัม (Thiurams)
 - 3.1 ไธยูรัม โอนิโอนัลไฟด์ (Thiuram monosulphides)
 - 3.2 ไธยูรัม ไดซัลไฟด์ (Thiuram disulphides)
4. หมู่ไธอาโซล (Thiazole)
 - 4.1 เมอร์แคปโต (Mercapto accelerator)
5. หมู่ซัลฟีโนไมด์ (Sulphenamide accelerator)
6. หมู่อัลเดไฮดีไอะซ์อะมีน (Aldehyde amine accelerator)
7. หมู่เบส (Basic accelerators)
 - 7.1 กัวนิดีน (Guanidine)

สารตัวเร่งจะมีอิทธิพลในอัตราการเกิดการเขื่อน โดยไม่เลกูลในยาง การที่จะคุ้ว่าสารตัวเร่งได้มีอิทธิพลในการเกิดการเขื่อน โดยไม่เลกูลมากน้อยเพียงใดนั้น จึงได้จากการวัดด้วยเครื่องมือ เช่น เครื่อง Mooney viscometer และ Monsanto oscillating disk rheometer (ODR) เป็นต้น

2.6.2 ตัวอย่างสารตัวเร่ง

2.6.2.1 ไธยแรม เช่น Tetramethyl thiuramdisulphide (TMTD)



รูปที่ 2.5 สูตรโครงสร้างทางเคมีของ TMTD (พรพ.ร.๙๘, ๒๕๒๘)

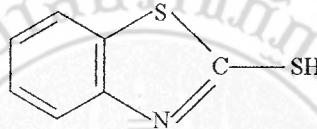
ไธยแรมจัดเป็นสารตัวเร่งที่มีความเร็วสูงพิเศษ สำหรับยางธรรมชาติ แต่ในขบวนการประรูปยาง ยางจะ scorch ช้ากว่าพลาสติก โดยการบานเมตและวัลภาในชั้นที่สุด ยางที่ใช้ไธยแรมเป็นตัวเร่งสามารถวัลภาในชั้นได้หลายวิธี เช่น วัลภาในชั้นโดยใช้เครื่องอัดไอน้ำและอากาศร้อน เนื่องจากว่าไธยแรม วัลภาในชั้นช้ากว่าได้โดยการบานเมตเด็กน้อย ทำให้การให้ไอลในกระบวนการเครื่องอัดเป็นไปได้ (ไม่เหมือนกับได้โดยการบานเมตซึ่ง scorch ก่อนที่จะไอลเต็มพินพีเมื่อ วัลภาในชั้นในเครื่องอัด) ส่วนการที่ไธยแรมสามารถวัลภาในชั้นโดยใช้ไอน้ำหรืออากาศร้อนนั้น เป็นเพราะไธยแรม วัลภาในชั้นเร็วพอสมควร ทำให้ยางเกิดการจัดตัวก่อนที่จะเสียรูปในขณะ วัลภาในชั้นโดยไอน้ำหรืออากาศร้อน

ในบางครั้งไธยแรมอาจใช้เป็นตัวเร่งเสริมกระดุนตัวเร่งอื่น เช่น ไฮอาโซลและชัลฟินไนด์ แต่สำหรับการใช้ไธยแรมกับชัลฟินไนด์แล้ว จะให้ปรกฏการณ์พิเศษ คือ ไธยแรมจะทำให้การเริ่มนต้นวัลภาในชั้นช้าลงไป แต่เวลาวัลภาในชั้น สมบูรณ์จะสั้นลง การใช้ไธยแรมกระดุนตัวเร่งชัลฟินไนด์มีความสำคัญมาก โดยเฉพาะแบบที่ใช้กำมะถันน้อย (EV system) ในกระบวนการวัลภาในชั้น แต่ถ้าใช้ไธยแรมปริมาณน้อย ๆ ปนลงไปในยางที่มีได้โดยการบานเมตทำให้ระยะเวลาที่สามารถประรูปได้ยาวขึ้น ในการกรณี TMTD และ ไดเมทธิลไดฟินิลไธยแรม (dimethyl diphenylthiuram) จะมีผลต่อการทำให้ระยะเวลาที่สามารถประรูปได้ยาวกว่าการใช้ TMTD

การใช้ไธยแรมจะต้องมีชิงค์ออกไซด์ด้วย เพื่อให้ประสิทธิภาพสูงสุด แต่ไม่จำเป็นต้องมี

กรดไบมันก์ได้ อุณหภูมิที่ใช้ในการวัลภาในช่วงไม่ควรเกิน 125-135 องศาเซลเซียส เพราะถ้าเกินกว่านี้ จะทำให้ยางสุกเกินไป (over cure) ได้ร้าย การใช้ไธอยแรมเป็นสารตัวเร่งในยาง โดยใช้ไธอยแรมเป็นปริมาณมาก กำนัลถันปริมาณน้อย จะให้ยางที่สามารถทนทานต่อความร้อนดีขึ้น มี compression set ต่ำ รวมทั้ง hysteresis ต่ำ แต่ถ้าหากใช้ไธอยแรมอย่างเดียวโดยไม่มีกำนัลถันเลย ในกรณีจะให้ยางที่มีโมดูลสต์ต่ำ แต่ถ้าต้องการให้มีโมดูลสูงขึ้นก็ควรใส่กำนัลเข้าไปคู่กับไธอยแรมน้อย

2.6.2.2 ทูฟิโซาโซล เท่น 2 – Mercaptobenzothiazole (MBT)



รูปที่ 2.6 สูตรโครงสร้างทางเคมีของ MBT (พพรรษ, 2528)

เมื่อเปรียบเทียบยางที่ใช้ตัวเร่งกลุ่มไธอาโซลกับไดโซ่อิโโคาร์บามีดและไธอยแรมแล้วจะพบว่า ต้องใช้ไธอาโซลปริมาณมากกว่าและใช้กำนัลถันปริมาณมากกว่า จึงจะให้มोดูลส์พอยกับเมื่อใช้ไดโซ่อิโโคาร์บามีดหรือไธอยแรม รวมทั้งอุณหภูมิในการวัลภาในช่วงสูงกว่าด้วย ถ้าใช้ไธอาโซลเป็นตัวเร่งตัวเดียวล้วนๆ แล้ว ยางที่ได้จะมีความปลดภัยในขบวนการผลิตกว่าพวกรubber ตัวเร่งความเร็วสูงพิเศษอื่นๆ ดังนั้นไธอาโซลบางทีจัดไว้ในกลุ่มของสารตัวเร่งความเร็วสูงปานกลาง

ในกลุ่มไธอาโซลเดียวกันระยะเวลาที่สามารถแปรรูปได้ของยางจะเรียงตามลำดับตัวเร่งดังนี้

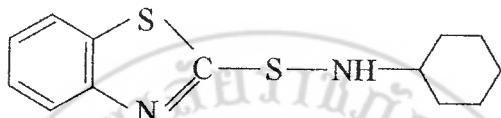


โดย MBTS จะมีระยะเวลาที่สามารถแปรรูปได้ยาวที่สุด

ยางผสมสารเคมีที่ใช้ไธอาโซล สามารถวัลภาในช่วงไดทุกรูปแบบของการวัลภาในช่วง เช่น ตัวเยริ่งอัด ไอ้น้ำ อากาศร้อน เป็นต้น อย่างไรก็ตามการที่เป็นแบบ delay action ใน การวัลภาในช่วง ทำให้ไธอาโซลเหมาะสมแก่การวัลภาในช่วงโดยใช้เครื่องอัดเป็นอย่างยิ่ง MBTS และ MBT เป็นตัวที่ช่วยให้ยางนิ่มในการบดผสม ดังนั้นจึงช่วยในการแปรรูปของยางได้ดี นักสั่งในยางขณะที่เริ่มต้นการบดผสม ตัวเร่งกลุ่มไธอาโซลสามารถกระตุ้นให้เร็วขึ้น ได้โดยการใช้สารตัวเร่งที่เป็นค่าง เช่น พวกรubber ไดโซ่อิโโคาร์บามีดและไธอยแรม แต่การกระตุ้นนี้ยังผลให้ระยะเวลาที่สามารถแปรรูปได้สั้นลงไปด้วย ถ้าหากใช้ร่วมกับสารตัวเร่งมาตรฐานตัวอื่นๆ โดยใช้สัดส่วนจำนวนไม่เท่ากัน จะให้ผลสูงสุดและความเร็วในการวัลภาในช่วงเร็วกว่าที่จะใช้ตัวบันรองเดียวฯ เสียอีก

ตัวเร่งพวกไชอาโซลจำเป็นต้องใช้ซิงค์ออกไซด์และกรดไนนันร่วมด้วย สำหรับกรดไนนันแล้วยิ่งความเยาว์ใช้ยาวยาจะทำให้ความว่องไวในปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น เช่น กรดสเตียริก (การ์บอน 17 ตัว) จะทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นแต่ยังน้อยกว่า behenic acid (การ์บอน 22 ตัว)

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



รูปที่ 2.7 สูตรโครงสร้างทางเคมีของ CBS (พพรรษ, 2528)

เนื่องจากชัลฟีนาไมด์ให้ Delayed action ทำให้การ Cure ในเก้าพินพดิเพรามีเวลาพอให้ยางไหลดได้เต็มที่ แต่ไม่เหมาะสมกับการ Cure เพราะ เมื่อชัลฟีนาไมด์ได้รับความร้อนก็จะแตกตัวออกให้ MBT และเบสออกมาระยะเวลาถัดก่อนที่จะแตกตัวออกมานี้ ก่อให้เกิด Delayed action ซึ่งเป็นตัวก่อให้เกิดการวัลภาไนซ์ และเบสจะเป็นตัวกระตุ้นให้ตัวเร่งทำงานเร็วขึ้น โนดูลัสสูงขึ้น

ชัลฟีนาไมด์เป็นตัวเร่งที่ทำให้ยางมีโนดูลัสสูงขึ้น และมีสมบัติทางเชิงกลดี รวมทั้งให้ flat cure และ aging ดีมาก การให้ flat cure จะมีลักษณะแบบเดียวกับ ไชอาโซล และเบส

ชัลฟีนาไมด์ให้ Delayed action จะนั่นจึงเหมาะสมกับยางที่ใช้ furnace black เป็นสารตัวเติม การใช้ชัลฟีนาไมด์จำเป็นต้องใช้ซิงค์ออกไซด์อย่างน้อย 3 phr เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

2.7 ระบบวัลภาไนซ์

พพรรษ (2528) ได้ให้ความหมายการวัลภาไนซ์คือ กระบวนการเปลี่ยนยางที่อยู่ในสภาพที่ไม่คงตัวให้เป็นยางที่รักษารูปทรงได้ในลักษณะยืดหยุ่นหรือแข็งกระด้าง โดยการใช้สารวัลภาไนซ์ (vulcanizing agent) ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลตรงจุดที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา ซึ่งสารที่นิยมใช้วัลภาไนซ์จะเป็นกำมะถัน สารที่ให้กำมะถัน (sulphur donor) และเปอร์ออกไซด์

2.7.1 การวัลภาไนซ์โดยใช้กำมะถัน (Sulphur Vulcanization)

เมื่อนำกำมะถันใส่เข้าไปในยางแล้วนำยางนั้นมาให้ความร้อน จะเกิดการวัลภาไนซ์ขึ้น ซึ่งจะทำให้ยางมีคุณสมบัติเดียวกัน เมื่อร้อนไม่เหลว เมื่อยเย็นไม่แข็ง ไม่มีกลิ่น ไม่เหนียว ไม่ละลายในตัว

ทำละลายเป็นตื้น เพราะกำมะถันทำให้โมเลกุลของยางไม่เชื่อมต่อกัน เรียกว่าการ crosslink ดังรูปแสดง การเชื่อมโยงโมเลกุลยางด้วยกำมะถัน



รูปที่ 2.8 การเชื่อมโยงโมเลกุลของยางด้วยกำมะถัน (พรพรม, 2528)

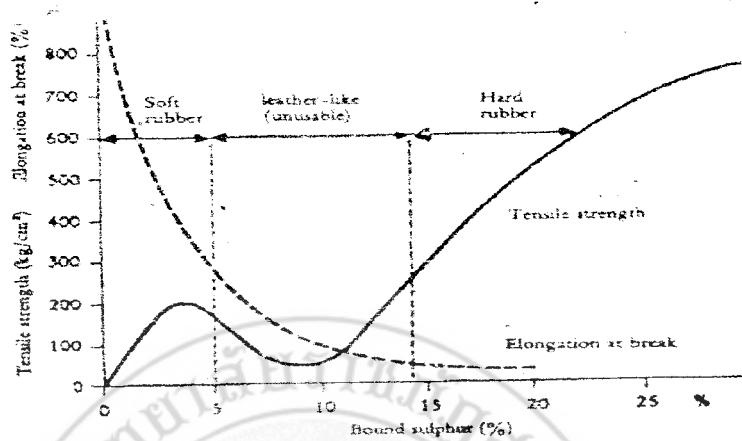
การเกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลในยางจะทำให้โมเลกุลของยางใหญ่ขึ้น ดังนั้นการหลอมเหลว เมื่อถูกความร้อนหรือเข็มตัวเมื่อยืนเป็นไปได้ยาก รวมทั้งการละลายในตัวทำละลายก็เป็นไปได้ยาก จะเพียงแค่บวนพองเท่านั้น การใช้กำมะถันในยางยังถ้าเพิ่มปริมาณขึ้น การเชื่อมโยงโมเลกุลก็จะเพิ่มขึ้น เรื่อยๆ และส่วนบดของยาง เช่น ความด้านทานต่อแรงดึง ความแข็ง โมดูลัส ความสามารถในการยึดจับ ขาด และความสามารถเด้งตัวของยาง ก็จะเปลี่ยนแปลงไปตามการเชื่อมโยงโมเลกุล ดังรูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นอิทธิพลของปริมาณกำมะถันต่อความด้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยึดจับขาด

ระบบวัลคานิกซ์ที่ใช้ระบบกำมะถันมี 3 ระบบ คือ

1. ระบบกำมะถันปกติ (Conventional Vulcanization Systems) ใช้กำมะถันมากและใช้สารตัวเร่งน้อย เช่น ใช้กำมะถัน 2.5 phr และใช้สารตัวเร่ง 0.5 – 1 phr จะเกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลแบบไม่มีประสิทธิภาพนัก เนื่องจากเกิดเป็นแบบ polysulphidic crosslink ถึง 70%

2. ระบบอีวี (Efficient Vulcanization Systems) ใช้กำมะถันน้อยและสารตัวเร่งมาก เช่นใช้กำมะถัน 0.5 phr และสารตัวเร่ง 6 phr จะเกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลแบบ monosulphidic ถึง 90% ทำให้ทนต่อการเสื่อมเนื่องจากการออกซิเดชัน

3. ระบบเซมิอีวี (Semi-Efficient Vulcanization Systems) ใช้กำมะถันและปริมาณสารตัวเร่งเท่าๆ กัน ซึ่งจะให้คุณสมบัติอยู่ระหว่างการใช้ระบบกำมะถันปกติและระบบอีวี



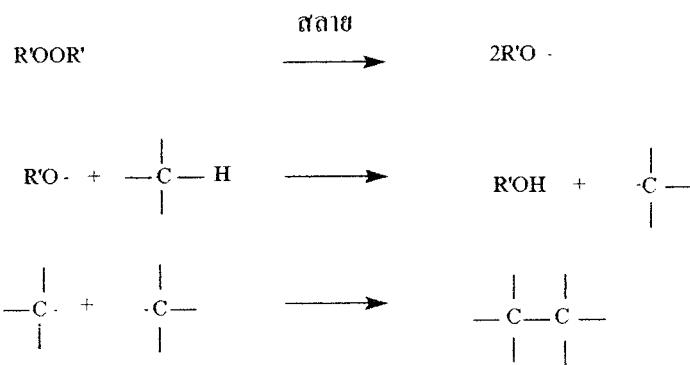
รูปที่ 2.9 อิทธิพลของปริมาณกำมะถันต่อความด้านทานคือแรงดึง และความสามารถในการยึด
ชนขาด (พรพรรณ, 2528)

2.7.2 การวัลคาไนซ์โดยใช้สารให้กำมะถัน (Sulphur Donor Vulcanization)

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

2.7.3 การวัลคาไนซ์โดยใช้สารเปอร์ออกไซด์ (Peroxide Vulcanization)

สารเปอร์ออกไซด์แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ใหญ่ๆ คือ สารอินทรีเปอร์ออกไซด์ สารซิลิกอน-อินทรีเปอร์ออกไซด์ และสารอินทรีเปอร์ออกไซด์ โดยเฉพาะสารอินทรีเปอร์ออกไซด์เป็นที่นิยมใช้กันมาก สารเหล่านี้ต้องมีความเสถียรพอที่จะเก็บไว้ได้นาน มีความว่องไวพอดีกับการเชื่อมโยงโมเลกุลกับยางที่อุณหภูมิของการวัลคาไนซ์ และมีความปลดปล่อยในการใช้



รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาการเกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลโดยใช้สารเปอร์ออกไซด์ (พรพรม, 2528)

จากปฏิกิริยาจะเห็นว่าเมื่อสารอินทรีย์เปอร์ออกไซด์แตกตัว จะให้ออนุญาติสารซึ่งเป็นตัวไปดึงไฮดروเจนอะตอมจากยาง ทำให้เกิดยางที่เป็นอนุญาติสารเข้ม และยางที่เป็นอนุญาติสารจะนำร่วมกัน เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุล ดังนั้นการเชื่อมโยงโมเลกุลจะเกิดเป็นแบบพันธะคาร์บอนและหนึ่งโมเลกุล ของเปอร์ออกไซด์จะทำให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลในยาง

ข้อดีของการวัสดุไนซ์โดยใช้สารเปอร์ออกไซด์

1. compression set ค่อนข้างมาก
2. มีความต้านทานต่อความร้อนค่อนข้างมาก
3. คุณสมบัติทางไฟฟ้าค่อนข้างดี
4. ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีสันสดใส
5. ไม่มีปัญหารืองโลหะหลงเหลือมาทำปฏิกิริยา
6. ไม่มีปัญหาการบลูมซึ่งมักเกิดเมื่อใช้กำมะถัน
7. การวัสดุไนซ์จะให้เป็นแบบ flat cure
8. ยางหลายอย่างสามารถวัสดุไนซ์พร้อมกันได้

2.8 เครื่องมือทดสอบ

2.8.1 เครื่องบดผสมยางสองลูกกลิ้ง (Two-Roll Mill)

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

เครื่องบดผสมยางระบบปีดประกอบด้วยลูกกลิ้ง 2 ลูก เรียงในแนวนอนและขนานกัน ลูกกลิ้งหน้าจะมีสกรูสำหรับปรับระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งทั้งสอง (nip หรือ gap) ลูกกลิ้งบดยางจะต้องมีผิวน้ำที่แข็งแรงทนทานต่อการใช้งาน โดยเฉพาะท่านานต่อเมื่อที่กัดลบนผิวลูกกลิ้งขณะบดยาง ลูกกลิ้งบดยางทำจากเหล็กหล่ออย่างดี ผิวน้ำจะต้องเรียบ การควบคุมอุณหภูมิของลูกกลิ้งทำได้ 2 ลักษณะ คือ

ก. Cored roll จะมีการเจาะให้เป็นช่องกลวงภายในลูกกลิ้ง เพื่อผ่านน้ำเย็นหรือไอน้ำเข้าไปภายในทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิของลูกกลิ้งได้ตามที่ต้องการ

ข. Drilled roll จะมีการเจาะเป็นช่องทาง เพื่อเป็นช่องทางเดินของน้ำเย็นหรือไอน้ำโดยจะช่องทางนี้ที่ระดับความลึกจากผิвлูกกลิ้งลงไปประมาณ 50 มิลลิเมตร

ลูกกลิ้งทั้งสองจะหมุนด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน ก่อให้เกิดแรงเฉือนกระทำต่อยางในขณะที่บดยาง โดยลูกของยางเกิดการฉีกขาดออกจากกัน ซึ่งจะทำให้ขนาดโดยลูกของยางลดลง และทำลายเดียวกันในการผสมยางกับสารเคมีต่างๆ จะทำให้สารเคมีกระจายเข้าผสมในยางได้ โดยทั่วไปนิยมลูกกลิ้งหน้าจะหมุนช้ากว่าลูกกลิ้งหลัง เรียกอัตราส่วนระหว่าง ความเร็วผิวของลูกกลิ้งลูกหน้ากับลูกกลิ้งลูกหลังว่า “Friction Ratio” ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าวที่ใช้กับยางมักจะกำหนดให้อยู่ในช่วง 1:1 ถึง 1.4:1 แต่จะขึ้นอยู่กับชนิดของยางด้วย เช่น ยางธรรมชาติจะใช้ Friction ratio เท่ากัน 1.25:1 (ลูกกลิ้งหน้า:ลูกกลิ้งหลัง) ส่วนยางสังเคราะห์บางชนิดจะโดยใช้ความเร็วของสองลูกกลิ้งเท่ากันหรือมากกว่ากัน แต่ยางสังเคราะห์บางชนิดควรบดโดยใช้ความเร็วของลูกกลิ้งหน้าเร็วกว่าลูกกลิ้งหลัง

เครื่องบดยางสองลูกกลิ้งทำงานโดยการนำยางใส่ลงในช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง (nip หรือ gap) ลูกกลิ้งจะบีบและฉีกยาง ในการทำงานกับเครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง พึงระวังอันตรายอันจะเกิดจากลูกกลิ้งหนึบนิวหรือมือด้วย เครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง โดยทั่วไปจะมีอุปกรณ์ป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้น หรือเมื่อต้องการที่จะหยุดเครื่องฉุกเฉิน ซึ่งลูกกลิ้งจะหยุดเครื่องทันทีทันใด หรือลูกกลิ้งอาจจะหมุนกลับ (ตอบหลับหลัง) เล็กน้อย เป็นต้น ดังนั้นในการใช้งานเครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง จำเป็นที่จะต้องศึกษาระบบการหยุดเครื่องฉุกเฉินก่อนด้วย และผู้ควบคุมเครื่องบดยางสองลูกกลิ้งจะต้องมีความ

เข้าใจถึงบริเวณที่จะก่อให้เกิดอันตรายด้วย ซึ่งเป็นบริเวณที่ไม่ควรเอื้อมมือไปทำงานในบริเวณนั้น (Safety limit) และควรเข้าใจการใช้มือในการผลักยาง ม้วนยางใส่เข้าในลูกกลิ้ง หรือเติมสารเคมีเข้าไปในยางที่อยู่บนลูกกลิ้งด้วย

การผสมยางกับสารเคมีต่างๆ เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการแปรรูปยาง ทำให้ยางคืนกิจการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์และองค์ประกอบทางเคมี โดยเริ่มจากการ (Mastication) ให้น้ำลงแล้วจึงทำการเติมสารเคมีต่างๆ 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 จะเป็นหน่วยน้ำหนักไดก์ไซด์ เซนติเมตร คิลограм

ตัวอย่างเช่น สูตรยางที่มีการใช้กำมะถัน 2.5 phr หมายถึง

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

ความสม่ำเสมอของสารเคมีที่กระจายอยู่ในยางคอมแพนด์ เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญมากนอกเหนือจากขนาดของ Batch size ระยะเวลาการบดยาง และระยะเวลาการผสม เพราะถ้าสารเคมีกระจายในยางคอมแพนด์อย่างสม่ำเสมอจะเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous compound) จะทำให้ยางที่มีคุณสมบัติทางฟิสิกส์สม่ำเสมอและดีที่สุดสำหรับยางคอมแพนด์สูตรหนึ่งๆ เช่น ไขที่สำคัญที่มีผลต่อการกระจายอย่างสม่ำเสมอของสารเคมีในยางคอมแพนด์คือ Piasticty ของยาง

เทคนิคที่ทำให้สารเคมีกระจายในยาง ได้แก่ ขึ้นอยู่กับการจัดให้มี Bank การม้วนยาง การตัดยาง และระยะเวลาการผสม ในการผสมยางบนลูกกลิ้งจะต้องจัดระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งและระยะห่างระหว่าง guide ให้เหมาะสม เพื่อให้ยางหลือเป็น bank อยู่เล็กน้อยบน guide เมื่อเสียด้าไม่มี bank แรงที่จะกระทำต่อยางที่ผ่านลูกกลิ้ง จะมีเพียงแรงอัดที่กระทำในทิศทางที่ตั้งฉากกับผิวของแผ่นยางนั้น ดังนั้น การผสมยางจึงเกิดขึ้นเฉพาะตามผิวของแผ่นยาง แต่ไม่เกิดการผสมตามความหนาในระดับลึกลงไป แต่ถ้ามี bank อยู่จะทำให้ขึ้นบนสุดของแผ่นยางม้วนตัวเกิดเป็นลอนขึ้น ทำให้สารเคมีแทรกเข้าไปในระหว่างลอนนี้ได้ แล้วจึงคงโดยแรงนีออนเข้าไปอยู่ภายในยางเมื่อยางผ่านลูกกลิ้ง ดังนั้นการเกิด bank จึงเป็นสาเหตุให้เกิดการผสมตามแนวรัศมีหรือตามความหมายของแผ่นยาง ได้ แต่การม้วนตัวของยางบน

bank ก็ไม่สามารถทำให้สารเคมีเข้าไปผสมได้ตลอดความหนาของยาง จำเป็นจะต้องมีการตัดพลิกหน้ายางและจะต้องมีการตัดยางม้วนเป็นแท่ง แล้วใส่ไปในลูกกลิ้งใหม่ประกอบไปด้วย การผสมซึ่งจะเกิดได้อย่างสม่ำเสมอทั่วถึงทั่งก้อน

ในกรณีที่ลูกกลิ้งร้อนเกินไปและ/หรือ มีรูรั่วบนผิว ยางจะติดลูกกลิ้งหลังที่หมุนเร็วกว่าได้ดังนั้นถ้าต้องการจะให้ยางติดลูกกลิ้งด้านหน้า ต้องขยาย มีรูให้กว้างออกไปในทางตรงกันข้ามหากยางไม่ยอมพันลูกกลิ้ง แต่จะห้อยข้อบ (bagging) ลงมา ซึ่งมีสาเหตุมาจากยางมี Elongation at break ต่ำ เช่นยางสังเคราะห์บางชนิด หรือยางที่มีสารตัวเติมมากเกินไป สามารถแก้ไขโดยการขัน nip ให้แน่นเข้า

การเติมสารเคมีเข้าไปในยาง ให้เริ่นใส่ทันทีที่ยางพันลูกกลิ้งมีผิวนรีบบ เป็นแผ่นต่อเนื่อง โดยเติมสารตัวเร่ง (Accelerator) และสารตัวเร่ง (Activator) ก่อน แล้วจึงใส่ Antioxidant จากนั้นให้ทยอยใส่สารตัวเติมและนำมันสับกันไปการตัดยางในขณะที่มีผิวสารเคมีเป็นอิสระอยู่บน nip ควรกระทำแต่น้อยเท่าที่จำเป็น เพื่อไม่ให้เกิดช่องบันเพ่นยางและบน nip อันจะทำให้ผิวสารเคมีหล่นไปบน mill pan ได้ ในขณะเดียวกันต้องขยายความกว้างของ nip ขึ้นเรื่อยๆเพื่อรักษาขนาดของ bank ให้พอดีเหมาะสมนี้เอง จากของยางที่ผสมกับสารเคมีสูงขึ้น

หากอุณหภูมิยางสูงเกินไปขณะผสมให้เปิร์คอบน้ำหล่อเย็น เพื่อลดอุณหภูมิของยางลง เมื่อสารเคมีเข้าไปในยางแล้วให้ทำการตัดยางและม้วนยาง เพื่อให้สารเคมีแพร่กระจายในยาง ได้ทั่วถึง กัน ลำดับสุดท้ายจึงเติมสารวัลคาไนซ์

เมื่อเติมสารเคมีทุกตัวเข้าไปในยางหมดแล้วก็จะถือเป็นการเสริมสิ่นการผสมให้เจ้ายางคอม เป็นเดือดออกจากลูกกลิ้งทันทีเพื่อลดอุณหภูมิของยาง อาจนำเพ่นยางน้ำลงบนโลหะหนาผึ่งบนราหรือจุ่มลงในน้ำ เพื่อให้ยางเป็นลงอย่างเร็ว ซึ่งเป็นการป้องกันการสูญ (scorch) ได้อีกด้วย เมื่อยางผสมสารเคมีเป็นลงแล้ว จึงนำไปเก็บเพื่อใช้งานต่อไป

การผสมยางกับสารเคมีเพียงตัวเดียวหรือสองตัว จะไม่เรียกว่า Compound Rubber แต่จะมีชื่อพิเศษว่า Masterbatch ซึ่งจะใช้ในกรณีที่สารเคมีดังกล่าวอาจจะกระจายตัวในยางได้ไม่ดีหรือใช้สารเคมีดังกล่าวในปริมาณน้อยมากซึ่งทำให้เกิดการผิดพลาดด้วยมากถ้าสารเคมีเกิดฟู๊กกระจายหายไป

2.8.2 เครื่องทดสอบการวัลคาไนซ์ของยาง (Oscillating Disk Rheometer, ODR)

เมื่อนำตัวอย่างยางที่ผสมสารเคมีเรียบร้อยแล้วใส่ลงในห้องไส่ายางที่ปิดมิดชิด ใช้ความดันกดยางให้อุ่นภายในห้องนั้น รักษาอุณหภูมิของห้องให้สูตรามกำหนดที่ต้องการจะทดสอบ ภายในห้องมี詹โลหะรูปกรวยปีนสองด้านประนบกันอยู่ (Biconical disk) 詹โลหะดังกล่าวจะถูกห่อหุ้มด้วยยาง ตัวอย่างที่ใส่เข้าไป 詹โลหะจะแกว่งทำหมุนน้อบฯ กลับไป-มาตามแนวแกนตั้ง การหมุนเช่นนี้ก่อให้

เกิดแรงเนื้องกระทำต่อตัวอย่างยาง แรงที่ต้องใช้ในการหมุนงานโลหะให้อยู่ในตำแหน่งสูงสุดจะขึ้นกับความแข็งหรือโมดูลัสเฉือน(Shear Modulus) ของตัวอย่างยางนั้นๆ แรงบิดค้างกล่าวจะแสดงผลบันทึกตามเวลาที่ผ่านไป ความแข็งของยางจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในระหว่างการวัดภายในช่วงทดสอบถือว่าสิ้นสุดเมื่อแรงบิดที่บันทึกได้ถึงจุดสมดุล หรือถึงจุดสูงสุด หรือถึงเวลาที่กำหนดไว้ ซึ่งเวลาดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับส่วนผสมของสารเคมีในยางและอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องทดสอบการวัดภายในช่องยางมีส่วนประกอบดังนี้

1. Curemeter เครื่องมือประกอบด้วยงานโลหะรูปวงปี่านสองด้านอยู่ภายในห้องใส่ยางที่ควบคุมอุณหภูมิได้ งานโลหะดังกล่าวมีแกนยึดติดอยู่กับก้านขันให้จานนั้นหมุนกลับไปมาด้วยความถี่คงที่ แรงบิดที่เกิดขึ้นที่งานโลหะเกิดขึ้นจากความด้านทันของยางที่ใส่ในห้องนั้น จะมีการบันทึกแรงบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นในการหมุนแต่ละครั้งตลอดระยะเวลาทดสอบ
2. อุณหภูมิและระบบการวัดระบบการวัดของอุณหภูมิของห้องใส่ยางจะต้องสามารถวัดได้ถูกต้องได้ 0.5 องศาเซลเซียสและจะต้องวัดได้ตลอดเวลา เพื่อตรวจสอบอุณหภูมิของห้องใส่ยาง อุปกรณ์การตรวจอุณหภูมิควรจะใช้ประเภทเชื่อมต่อได้ เช่น ประเภท transmister เป็นต้น

3. ห้องใส่ยาง เป็นโลหะที่แข็งแรง ไม่เปลี่ยนรูป มีความแข็งของยางน้อย Rockwell 50 HRC ขนาดและลักษณะทั่วไปของห้องมาตรฐาน เป็นรูปของห้องใส่ยางทึบบันและล่างจะมีการเจาะรูไว้เพื่อใส่อุปกรณ์วัดอุณหภูมิของห้องใส่ยางทึบบันและล่างจะมีการเจาะร่องเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า จัดเรียงตัวกันเป็นแนวรัศมีรอบๆ ศูนย์กลางและมีระยะห่างระหว่างห้องท่ากัน 200 ห้องใส่ยางด้านล่างจะมีรูตรงกลางเพื่อให้แกนยาง โลหะสอดแทงทะลุลงไป จะมีร่องสำหรับใส่ชิลที่เหมาะสม ซึ่งจะมีความเสียดทานน้อย ตัวอย่างของชิลที่เหมาะสมควรทำด้วย PTFE หลังคังกล่าวจะป้องกันไม่ให้ยางไหลผ่านเข้าไปยังรูที่ใส่แกนงาน โลหะนั้น ห้องใส่ยางจะปิดยางตัวอย่างไว้ภายในตลอดเวลาการทดสอบ การปิดคังกล่าวใช้ระบบไฮดรอลิกลม ด้วยแรง $11.0 \pm 0.5 \text{ kN}$

4. งานโลหะ เป็นโลหะที่แข็งแรง เป็นรูปปีก และมีความแข็ง Rockwell อย่างต่ำเท่ากับ 51 HRC งานโลหะนี้จะหมุนกลับไปมาด้วยความถี่ 100 รอบต่อนาที ระยะหมุนไปทางซ้ายและขวา 1 รอบจุดศูนย์กลาง รวมระยะกว้างทั้งหมดทำมุน 2 องศาเซลเซียส แต่ความถี่และระยะหมุนอื่นๆ อาจใช้ได้ เช่นกันแต่ต้องระบุลงไปด้วยเสนอ นอกจากนั้นอาจใช้ระยะหมุนเป็น 3 องศาเซลเซียส ได้ (ถ้าหากว่าผิวของห้องสะอาดไม่มีปัญหา การหมุนด้วยระยะของค่าที่กว้างขึ้นนั้นจะทำให้การวัดมีความไม่แน่นอน)

5. การวัดแรงบิดบนงานโลหะจะต้องใช้อุปกรณ์ที่แสดงสัญญาณออกมารอยด์ให้ สัมพันธ์โดยตรงกับแรงบิดนั้นจะต้องมีอุปกรณ์สามารถบันทึกสัญญาณสูงสุดของแรงบิดในแต่ละรอบของการ

หมุนได้ และต้องสามารถบันทึกข้อมูลได้ไว้ภายใน 1 วินาที หรือน้อยกว่าหนึ่ง แรงบิดที่วัดจะต้องทำให้ถูกต้องถึง $\pm 0.5\%$ ระยะการวัดแรงบิด (Chart Range) ควรจะสามารถจัดได้หลายช่วง 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 ถ้ามียางมากเกินไปจะทำให้อุณหภูมิของห้องใส่ยางตกลงมากในระยะเริ่มต้นของการทดสอบตัวอย่างยางที่จะทดสอบควรจะมีอุณหภูมิท่ากับอุณหภูมิห้อง ก่อนที่จะใส่ยางเข้าไปในเครื่อง

2.9 คุณลักษณะการวัดค่าไนซ์

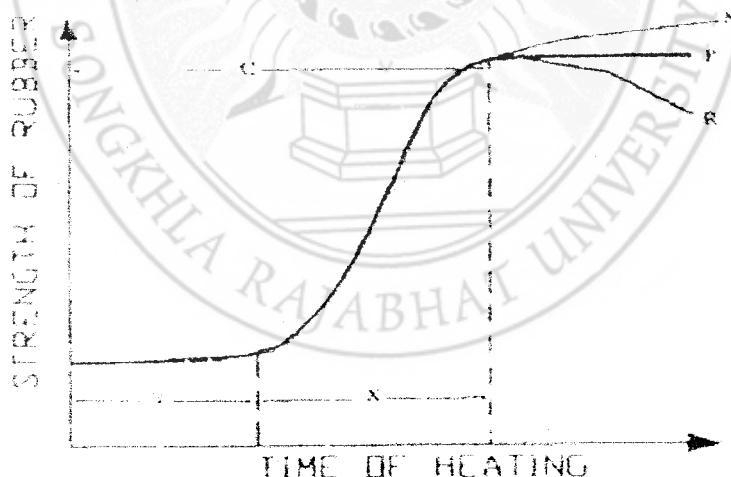
พรพรม (2532) กระบวนการวัดค่าไนซ์เป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปยาง “ดิบ” ที่อยู่ในสภาพไม่คงตัว ให้เป็นยางคงรูป ที่อยู่ในสภาพคงตัว คือรักษารูปทรงได้ โดยการใช้สารวัดค่าไนซ์ซึ่งเป็นสารที่นำไปทำปฏิกิริยากับยางเพื่อให้เกิดพันธะเชื่อมโยงโมเลกุล สารที่เป็นสารวัดค่าไนซ์ที่นิยมก็อ名字กัน และสามารถเร่งให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้น โดยการใช้สารตัวเร่ง สารตัวเร่งมีหลายชนิด อัตราการเร่งปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณสารตัวเร่งและอุณหภูมิที่ใช้ในปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาการวัดค่าไนซ์ยาง โดยใช้กำลังคลันร่วมกับสารตัวเร่ง พนวจการเพิ่มปริมาณกำลังคลันจะทำให้ได้สมบัติทางฟิสิกส์เปลี่ยนแปลงไป โดยมีค่าโนดูลัส และความแข็งเพิ่มขึ้น ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดหยดลง ส่วนความกระเด้งตัวไม่เปลี่ยนแปลง สารตัวเร่งทุกชนิดเมื่อเพิ่มปริมาณและอุณหภูมิในการวัดค่าไนซ์ จะทำให้อัตราการวัดค่าไนซ์เร็วขึ้น อัตราการเร่งปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นกับชนิดของสารตัวเร่งดังนี้ ZDC > TMTD > TMTM > MBT > CBS > ZMBT > MBTS

เมื่อนำยางคอมเพ่นด์ มาทำให้ร้อน สารวัดค่าไนซ์ที่อยู่ในยางจะเริ่มต้นเกิดปฏิกิริยา เช่น อาจทำปฏิกิริยาถังเอง ในตอนเริ่มต้นนี้จะใช้ระยะเวลาหนึ่งจากช้าหรือเร็ว ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ และสารเคมีที่ใช้ด้วย (บัญชารมและปรีชา, 2538) โดยทั่วไป ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นระยะเวลาดังกล่าวจะสั้นลง ระยะเวลาช่วงนี้เป็นช่วงเวลาเริ่มต้น ก่อนที่สารเคมีจะเข้าทำปฏิกิริยากับยาง ช่วงเวลาดังกล่าว เรียกว่า ช่วงเวลาค่ออย่างสุก (Induction period) แล้ว ในเวลาต่อมาสารเคมีจะเข้าทำปฏิกิริยากับยาง ก่อให้เกิดการแข็งตัวจนเห็นได้ชัด เรียกว่า ระยะเวลาที่สามารถแปรรูปได้ (Scorch time) เมื่อยางแปรรูปได้มาก ขณะที่เกิดการ Scorch นี้เรียกกันว่ายางเริ่มสุก

เมื่อสารเคมีทำปฏิกิริยากับยางต่อไปยางจะแข็งขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งสารเคมีกระทำกับยางจนหมดยางก็จะสุกเต็มที่ (Optimum Cure) ระยะเวลาที่ใช้เพื่อให้ยางทำปฏิกิริยากับสารเคมีจนหมดเรียกว่า เวลายางสุกเต็มที่ (100% Cure time) แต่ในการทำปฏิกิริยาจริงนั้น พนวณเวลาที่ยางสุกเต็มที่ใช้เวลานานเกินไป และอาจทำให้สมบัติทางฟิสิกส์ด้านอื่นๆ ของยางด้อยลงไปอีกด้วย ดังนั้นระยะเวลายางสุกจึงมักจะกระทำที่ยางมีโมดูลัสสูงขึ้นเพียง 90% หรือ 95% ของโมดูลัสที่จะขึ้นสูงสุด ระยะเวลาเรียกว่า 90% ของยางสุก หรือ 95% ของยางสุก ตามลำดับ ระยะเวลาดังกล่าวอาจจะถือเป็นเวลายางสุกเต็มที่ได้ ยางใดที่ได้รับความร้อนไม่เพียงพอจะไม่สุก (Under Cure) จะได้ยางที่มีสมบัติค่อนข้างดีไม่เต็มที่ และจะรักษารูปทรงไม่ได้ แต่หากปล่อยยางรับความร้อนต่อไปอีกหลังจากที่ได้ผ่านระยะเวลายางสุก ยางจะสุกเกินไป (Over Cure) โมเดลลุของยางจะถูกยืดตัว ยางจะกลับนิ่มลง (ถ้ายังนั้นเป็นยางธรรมชาติ) เรียกว่า เกิดการพลิกกลับสู่สภาพเดิม (Reversion) หรือยางอาจจะแข็งขึ้นไปอีก (ถ้ายังนั้นเป็นยางเอสบี อาร์ เป็นต้น) เรียกว่า Marching Modulus ยางคอมเป่นคือยางชนิดเกิดการกลับสู่สภาพเดิมได้ช้า เรียกว่า ยางนั้นมีลักษณะเป็น Peaky Cure แต่ในยางไดสามารถรักษาโมดูลัสไว้ให้คงไปได้นาน ถึงแม้ว่าเกินเวลายางสุกเต็มที่จะเรียกว่า เป็น Flat Cure หรือ Plateau Cure ดังนั้น เมื่อให้ความร้อนแก่ยางคอมเป่นค์ จะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องผ่านลำดับขั้นตอนต่างๆดังนี้

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



รูปที่ 2.11 การเปลี่ยนแปลงสมบัติของยางคอมเป่นค์เมื่อให้ความร้อนแก่ยาง
(บุญธรรมและปรีชา, 2538)

จากรูปที่ 11 ขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงในคุลลสของยางในระหว่างการให้ความร้อนกับยางนี้โดย

S = ระยะเวลาการ Scorch เป็นช่วงของ Induction period

X = ระยะเวลาการเกิด Crosslink จนถึงจุด Optimum

C = ระยะเวลาการเกิด Cure จนถึงจุด Optimum

M = เส้นแสดง Modulus

P = เส้นแสดง Plateau cure

R = เส้นแสดง Reversion cure

อาศัย (2542) เปอร์ออกไซด์มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เป็นสารเริ่มปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาการพอลิเมอร์ไรซ์ แบบอนุมูลอิสระ และถือเป็นสารวัลภาไนซ์ชนิดใหม่ เปอร์ออกไซด์สามารถใช้กับยางที่มีพันธะคู่หรือไม่มีคู่ได้ กรณีที่ต้องการยางธรรมชาติวัลภาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ที่มีสมบัติดี จะต้องใช้ระยะเวลานานแม้จะเปรียบเทียบกับการวัลภาไนซ์ด้วยกำมะถัน เพื่อแก้ปัญหาลักษณะการวัลภาไนซ์ที่เกิดขึ้นจากการใช้สารเปอร์ออกไซด์ สามารถทำได้โดยการเพิ่มปริมาณการใช้สารเปอร์ออกไซด์ ทำให้ระยะเวลาการวัลภาไนซ์ สั้นลง

Osswald (2001) ในการวัลภาไนซ์ยางคอมเป่นด์เวลาที่ใช้ในการวัลภาไนซ์จะส่งผลต่อสมบัติของยางวัลภาไนซ์ ซึ่งยางธรรมชาติจะเกิดการ reversion ได้ถ้าใช้อุณหภูมิสูงเกินไป สำหรับเวลาที่ใช้ในการวัลภาไนซ์ที่ขึ้นอยู่กับความหนาของยาง กล่าวคือ ถ้ายางคอมเป่นด์ที่หนาหน้าไปวัลภาไนซ์จะใช้เวลาในการวัลภาไนซ์นานกว่ายางคอมเป่นด์ที่บางกว่า โดยในการวัลภาไนซ์ยางบาง การเพิ่มอุณหภูมิที่สูงขึ้น 10 องศาเซลเซียส จะสามารถลดเวลาการวัลภาไนซ์ลงไปครึ่งหนึ่ง แต่ขณะเดียวกันระยะเวลาที่สามารถปรับรูปได้ (Scorch time) ของยางคอมเป่นด์จะลดลงไปครึ่งหนึ่งด้วย

2.10 พลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาการวัลภาไนซ์

อรุณ (2521) ทฤษฎีเกี่ยวกับอัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ ทฤษฎีการประทະ เชื่อว่าปฏิกิริยาเคมีจะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อมีอนุภาคของตัวทำปฏิกิริยามาสัมผัสหรือชนหรือประทະซึ่งกันและกัน เมื่อประทະกันแล้วถ้ามีพลังงานมากพอจะมีการขัดขวางกันใหม่ พันธะเดิมหมดไปเกิดพันธะใหม่ ได้สารใหม่เป็นผลของปฏิกิริยา นอกจากโมเลกุลชนิดเดียวกันแล้วจะต้องถูกจังหวะหรือถูกตำแหน่งที่เหมาะสมซึ่งจะทำให้พันธะเดิมหมดไปแล้วเกิดพันธะใหม่ขึ้นเกิดโมเลกุลใหม่ขึ้น

โสภณและคณะ (2543) โนเมเลกุลทุก โนเมเลกุลจะมีพลังงานจลน์อยู่ในตัวของทำให้เคลื่อนที่ตลอดเวลา บาง โนเมเลกุลก็เคลื่อนที่เร็ว บาง โนเมเลกุลก็เคลื่อนที่ช้า ขึ้นกับมวลของโนเมเลกุล ถ้ามวลโนเมเลกุลมาก อนุภาคก็เคลื่อนที่ได้ช้า ถ้ามวลโนเมเลกุลน้อยก็เคลื่อนที่ได้เร็ว การเคลื่อนที่ของโนเมเลกุลก่อให้เกิดการชนกันขึ้น ทำให้มีการถ่ายเทพลังงานให้แก่กัน แต่พลังงานทั้งหมดของอนุภาคที่ชนกันจะยังคงที่ ไม่มี การเปลี่ยนแปลง ถ้าการชนกันนี้นรุนแรงจนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานในโนเมเลกุลได้มาก ก็จะ มีการถ่ายพันธะและมีการสร้างพันธะใหม่ ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้ผลิตภัณฑ์ขึ้น แต่ทว่าโนเมเลกุล ทุกด้วยไม่ได้มีพลังงานในตัวสูงเท่ากัน ขณะที่โนเมเลกุลวิ่งเข้าใกล้กัน ความเร็วลดลง พลังงานจลน์ก็จะ ลดลงและเปลี่ยนไปเป็นพลังงานศักย์ ถ้าโนเมเลกุลเคลื่อนที่ช้า พอนอนกันอนุภาคก็หยุดและเปลี่ยนทิศทางปฏิกิริยาที่ไม่เกิดขึ้น แต่ถ้าโนเมเลกุลเคลื่อนที่เร็วมาก มีพลังงานจลน์สูง ซึ่งเปลี่ยนไปเป็นพลังงาน ศักย์ที่สูง พอนอนกันจึงเกิดปฏิกิริยาได้ผลิตภัณฑ์ ดังนั้นโนเมเลกุลที่วิ่งด้วยความเร็วสูง (มีพลังงานมาก) เท่านั้นจึงจะเกิดปฏิกิริยา เปรียบเทียบกับลูกบอลที่ลูกกลิ้งขึ้นภูเขา ถ้าลูกกลิ้งขึ้นอย่างช้าๆ (พลังงาน จลน์น้อย) จะขึ้นได้ไม่ถึงยอดเขา จะหยุดแล้วกลิ้งกลับมา ซึ่งเหมือน โนเมเลกุลที่มีพลังงานจลน์น้อย เวลาชนกันจะแยกจากกัน โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลง ถ้าลูกบอลลูกกลิ้งขึ้นภูเขาอย่างรวดเร็ว (พลังงาน จลน์มาก) ลูกบอลจะถึงยอดเขาและกลิ้งลงสู่อีกด้านหนึ่งของภูเขา คล้ายกับ โนเมเลกุลที่มีพลังงานจลน์ มากเข้าชนกัน มีการจัดตัวกันใหม่ได้เป็นผลิตภัณฑ์ขึ้น

พลังงานที่น้อยที่สุดที่โนเมเลกุลต้องมีขณะชนกันเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา เรียกว่าพลังงานกระตุน (Ea) เมื่อโนเมเลกุลที่มีพลังงานจลน์เท่ากับพลังงานกระตุน หรือมากกว่าพลังงานกระตุนเข้าชนกัน จะทำให้ พันธะถ่ายตัวพร้อมๆ กับมีการสร้างพันธะใหม่ขึ้น อนุภาคที่กำลังมีการสร้างพันธะและถ่ายพันธะ พร้อมๆ กัน เรียกว่า activated complex ซึ่งจะมีพลังงานศักย์สูงกว่าสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ activated complex อาจเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์หรือสารตั้งต้นก็ได้ พลังงานที่จะทำให้เกิด activated complex คือพลังงานกระตุนนั้นเอง ถ้าแฟกเตอร์อื่นๆ ของปฏิกิริยาเหมือนกันหมด ปฏิกิริยาที่มีพลังงานกระตุนสูงจะเกิดปฏิกิริยาช้า มีค่าคงที่อัตราเร็ว k น้อย ส่วนปฏิกิริยาที่มีพลังงานกระตุนต่ำจะเกิดปฏิกิริยาเร็ว มีค่าคงที่อัตราเร็ว k มาก

กฤษณา (2519) การประทับน้ำระหว่างอนุภาคที่จะให้เป็นผลสำเร็จนั้น ต้องประกอบด้วยการหันเห ตัวของอนุภาคให้ถูกทิศทางของประทับน้ำ และพลังงานของอนุภาคที่ต้องสูงพอเพียงด้วย เราเรียกพลังงานจำนวนน้อยสุดที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ว่า พลังงานกระตุน ถ้าพลังงานสูงไม่ถึงพลังงานกระตุน ปฏิกิริยาจะไม่เกิด



เมื่อพัฒนากระตุ้นมีค่าน้อยปฎิกริยามีอัตราเร็ว ปฎิกริยารีวนางปฎิกริยานแทนไม่มีพัฒนากระตุ้นเลย อนุภาคของสารเข้าท้าไปปฎิกริยามีพัฒนารวมกันแล้วกินค่าพัฒนากระตุ้นได้ง่ายถ้าพัฒนากระตุ้นมีค่านักบุญมากปฎิกริยาเกิดข้า การเพิ่มอุณหภูมิทำให้อัตราของปฎิกริยาเพิ่มเร็วขึ้น เพราะเป็นการเพิ่มพัฒนาชนน์ให้แก่อนุภาคของสารเข้าทำปฎิกริยา และเพิ่มจำนวนอนุภาคที่มีพัฒนาสูงพอที่จะทำให้พัฒนาศักย์ของระบบเกินพัฒนากระตุ้นซึ่งทำให้ปฎิกริยานังเกิดผลสำเร็จ

สมการของ Arrhenius

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

k = ค่าคงที่ของอัตรา

A = Arrhenius factor (เกี่ยวกับจำนวนการประทະ, การหันเหทิศทางและอื่น ๆ)

e = 2.718 (ฐานของ natural log)

E_a = พัฒนากระตุ้น

R = ค่าคงที่ของกําช = 8.314 จูล/โมล⁻¹ เคลวิน⁻¹ หรือ 1.987 คาลอรี่/โมล⁻¹ เคลวิน⁻¹

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์

2.11 ค่าคงที่ปฎิกริยาการวัดค่าในชีวิต

อรุณ (2525) ผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการเกิดปฎิกริยา ทำให้โนಡกูลมีพัฒนาจนมากกว่าพัฒนากระตุ้น (E_a) จากสมการของอาร์ริเนียส จากสมการที่ (2.1)

k จะมีค่าน้อยเมื่อพัฒนากระตุ้น (E_a) มีค่านักบุญหรือเมื่ออุณหภูมิ (T) ของปฎิกริยาต่ำ ในการวัดพัฒนากระตุ้นและค่าคงที่ k จะต้องวัดที่อุณหภูมิแตกต่างกันอย่างน้อย 2 อุณหภูมิ

การใช้สมการอาร์ริเนียส คำนวณหาค่าต่าง ๆ นั้น โดยปกติจะได้ค่าอุณหภูมิโดยประมาณ แม้ว่าในบางครั้งจะได้ค่าอุณหภูมิตรงกับผลการทดลองก็ตาม

จากที่กล่าวมาทั้งหมดนี้พอจะสรุปโดยทั่วไปได้ว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราการเกิดปฎิกริยาจะเพิ่มขึ้น แม้ว่าบางปฎิกริยาที่มีค่าไกของปฎิกริยาซับซ้อนจะไม่เป็นไปตามนี้ก็ตาม

โสภณและคณะ (2543) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้โนಡกูลเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น พัฒนาจนมากขึ้น โอกาสที่จะชนกันมีมากขึ้น และการชนกันจะรุนแรงทำให้จำนวนโนಡกูลที่มีพัฒนาทำกันหรือมากกว่าพัฒนากระตุ้นเพิ่มขึ้น อัตราเร็วของปฎิกริยาอยู่ระหว่างตามไปด้วย

ค่าคงที่อัตราเร็ว ก ขึ้น โดยตรงกับอุณหภูมิ และค่าของ Ea เช่น ถ้า Ea มากหรืออุณหภูมิต่ำ ค่าคงที่อัตราเร็ว ก จะน้อย การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย จะทำให้ค่าคงที่อัตราเร็ว ก เปลี่ยนไปมาก ยิ่งพลังงานกระตุ้นสูงเท่าไร พลของอุณหภูมิที่มีต่อค่า ก ก็ยิ่งมากด้วย

อุนาร์ (2543) ยังแต่ละชนิดนั้นจะมีอัตราเร็วในการวัดค่าในซ์และพลังงานกระตุ้นในการวัดค่า ในซ์ที่แตกต่างกัน การทดลองนี้ได้ศึกษาถึง ลักษณะการวัดค่าในซ์และพลังงานกระตุ้นในการวัดค่า ในซ์ของยางธรรมชาติและยางอีพีดีเอ็น ลักษณะการวัดค่าในซ์ของยางนั้นจะประกอบไปด้วยขั้น ตอน คือ ช่วงเวลาก่อนการวัดค่าในซ์ ช่วงเวลาที่เกิดการวัดค่าในซ์ และช่วงเวลาหลังเกิดการวัดค่าในซ์ จากการทดสอบพบว่ายางธรรมชาติ (STR 5L, STR 20, RSS No3) ที่ทำการทดสอบมีลักษณะการวัดค่า ในซ์ที่ไม่แตกต่างกันมากนักและพบว่ายางธรรมชาติมีลักษณะการวัดค่าในซ์เร็วกว่ายางอีพีดีเอ็นมาก ช่วงเวลาหลังการวัดค่าในซ์ของยางอีพีดีเอ็นนั้นจะต่างจากยางธรรมชาติโดยมีลักษณะเป็นแบบ Marching cure

2.12 ระดับของการวัดค่าในซ์

สาโรช และคณะ (2541) ความแตกต่างของระดับการวัดค่าในซ์ของยาง ที่เวลาและอุณหภูมิต่าง กันนั้น นี้ปัจจัยมาจากปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดของยาง ระบบการวัดค่าในซ์ และสารเคมีอื่น ๆ ที่ผสมลงในสูตรยาง ปัจจัยหนึ่งที่สำคัญได้แก่ ชนิดของยาง ซึ่งเมื่อกำหนดให้ใช้สารเคมีชนิดอื่น ๆ เมนีอนกันแล้ว ค่าพลังงานกระตุ้นการวัดค่าในซ์และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิการวัดค่าในซ์สามารถให้เป็น ค่าที่อ้างอิงถึงระดับการวัดค่าในซ์ของยางที่เวลาหรืออุณหภูมิต่าง ๆ ได้ สมการที่ใช้ในปัจจุบันจะมีพื้นฐาน มาจากการดับการวัดค่าในซ์ของยางซึ่งพิจารณาในส่วนของอุณหภูมิและเวลาวัดค่าในซ์ และตัวแปรพื้น ฐานในการวัดค่าในซ์ของยาง การใช้วิธีนี้จะทำให้ได้ผลที่รวดเร็ว และเป็นการศึกษาที่มีระบบรู้สึกผล กระบวนการหลัก และผลของตัวแปรต่างๆ ในการพิจารณาการดับการวัดค่าในซ์ของยาง