

วารสารปริทัศน์

ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์

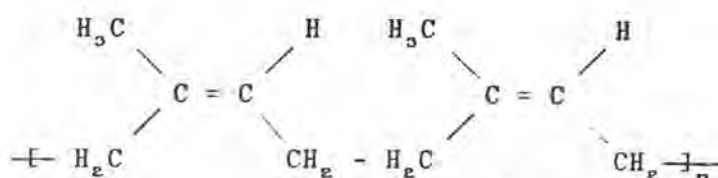
ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ เป็นสารโพลิเมอร์ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ประกอบด้วยโมโนเมอร์หลายพันหน่วยมาต่อเข้าด้วยกัน สามารถคืนสู่รูปร่างเดิมได้ หลังจากการถูกแรงกระทำให้เสียรูปได้อย่างรวดเร็ว ยางธรรมชาติได้จากธรรมชาติโดยการกรีดยางจากต้นยาง ในขณะที่ยางสังเคราะห์ได้จากกระบวนการโพลิเมอไรเซชัน โดยการนำโมโนเมอร์มาทำปฏิกิริยาให้โมเลกุลเกิดการเชื่อมกันเป็นโมเลกุลสาย มีน้ำหนักโมเลกุลสูง โมโนเมอร์ส่วนใหญ่เป็นสารไฮโดรคาร์บอน ได้มาจากการกลั่นแยกน้ำมันปิโตรเลียม หรือสังเคราะห์ขึ้นมาพิเศษ โมโนเมอร์บางตัวเป็นแก๊ส บางตัวเป็นของเหลว แต่ขณะที่เกิดปฏิกิริยาการเกิดโพลิเมอร์ โมโนเมอร์จะต่อกันเป็นสายยาวออกไป สมบัติทางกายภาพก็เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย จุดเดือดสูงขึ้น สภาพสารค่อนข้างเหนียวจนกลายเป็นของแข็ง

โพลิเมอร์ที่ได้ยังไม่มีคุณสมบัติหยุ่นที่ดีพอ สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้อย่างถาวร หรือมีการไหลได้เมื่อได้รับความร้อนหรือแรงกระทำ คุณสมบัติการยืดหยุ่นนี้สามารถปรับได้โดยการเชื่อมโองโมเลกุลเข้าด้วยกัน กระบวนการเชื่อมโองนี้ทำโดยใช้สารวัลคะไนซ์ หรือสารเชื่อมโอง เช่น กำมะถัน นำมาผสมเข้ากับยางและให้ความร้อน เรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการวัลคะไนซ์ ซึ่งสามารถปรับคุณสมบัติของยางให้เปลี่ยนไปได้อย่างมาก

1. ยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติ มีสูตรโมเลกุลเป็น cis-1,4-polyisoprene มีโครงสร้างดังนี้

คือ



มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ยางธรรมชาติได้จากการกรีดยางจากต้นยาง มีเม็ดยางกระจายอยู่ในน้ำเป็นเม็ดเล็ก ๆ ในรูปของอิมัลชัน มีเนื้อยางประมาณ 30-40% เมื่อเติมกรดเจือจางลงในน้ำยาง จะทำให้ยางจับตัวเป็นก้อนแยกเป็นเนื้อยางออกมา จากนั้นจึงผ่านกระบวนการทำให้ยางแห้งเพื่อนำไปใช้งานต่อไป

เนื่องจากยางเป็นผลิตภัณฑ์ทางเกษตร ทำให้ความบริสุทธิ์ของยางที่ผลิตขึ้นมาแตกต่างกันทำให้มีการจัดแบ่งชั้นของยางออกเป็นหลายชนิด โดยการวัดปริมาณสารปนเปื้อนที่มีอยู่ในเนื้อยาง สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ คือ มีความต้านทานต่อแรงดึงสูง มีความกระด้างตัวสูง มีความต้านทานต่อการฉีกขาด สามารถหักงอได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ มีความคงทนต่อการสึกหรอ และสามารถเกาะติดเส้นใยหรือโลหะได้ดี ยางธรรมชาติมีข้อจำกัดการใช้งานคือ มีความทนต่อความร้อน การออกซิเดชัน และโอโซนต่ำ ไม่คงทนต่อตัวทำละลายและน้ำมัน

ยางธรรมชาติเป็นยางที่มีราคาถูก มีคุณสมบัติทางกายภาพดี สามารถนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายชนิด ในการปรับคุณสมบัติอาจทำได้โดยการผสมกับยางสังเคราะห์หรือผสมสารเคมีต่าง ๆ เพื่อปรับคุณสมบัติให้ดีขึ้นและเหมาะกับการใช้งาน

2. ยางสังเคราะห์

ยางสังเคราะห์ได้มีการพัฒนาและการผลิตใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากเหตุผลต่าง ๆ คือ การขยายตัวของอุตสาหกรรมมากขึ้น ทำให้ยางธรรมชาติที่มีอยู่ไม่เพียงพอและความต้องการยางที่มีคุณสมบัติพิเศษ ที่ยางธรรมชาติไม่สามารถตอบสนองได้ เช่น ความคงทนต่อน้ำมัน ความคงทนต่อความร้อน การต้านทานการซึมผ่านของแก๊ส เป็นต้น

ยางสังเคราะห์มีหลายชนิดต่าง ๆ กัน เช่น ยางสไตรีน-บิวทาไดอีน (Styrene-butadiene rubber) ยางบิวทาไดอีน (Butadiene rubber) เป็นต้น

ยางสไตรีน-บิวทาไดอีน เป็นสารโคโพลิเมอร์ของสไตรีนกับบิวทาไดอีน สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดโคโพลิเมอร์ทั้งแบบอิมัลชัน และแบบสารละลาย โครงสร้างของยางสไตรีน-บิวทาไดอีนเป็นโคโพลิเมอร์แบบสุ่ม คุณสมบัติทั่วไปคล้ายยางธรรมชาติ มีข้อดีข้อด้อยต่างกันไม่มากนัก จึงนิยมใช้งานเหมือน ๆ กับยางธรรมชาติ

การผสมสารเคมีและการวัลคะไนซ์ของยาง

การผสมสารเคมีเข้าในยาง และการวัลคะไนซ์ เป็นการแปรรูปยางให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความเหมาะสมกับความต้องการ การผสมสารเคมีของยาง เป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนและใช้สารเคมีหลายชนิด โดยทั่วไปจะเกี่ยวข้องกับกำมะถันหรือการเกิดพันธะเชื่อมโสมอง ทำให้ได้ยางที่คงรูป มีรูปร่างและคุณสมบัติตามที่ต้องการ ในการผสมยาง ยางจะถูกอบที่นั่นมีตัวลงเนื่องจากความร้อนและการเชื่อมสลายเชิงกล ทำให้สามารถผสมสารเคมีลงในยางให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียวได้ เนื่องจากความร้อนมีผลต่อการวัลคะไนซ์ของยาง จึงควรระมัดระวังในการใช้สารเคมีและเทคนิคการผสมให้เหมาะสม การผสมยางที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน อาจทำให้ยางเกิดการวัลคะไนซ์ก่อนกำหนด ซึ่งมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิต

สารเคมีหลายชนิดเติมลงในระบบวัลคะไนซ์ รวมทั้งสารตัวเติม สารลดต้นทุน สารป้องกันการเสื่อมสภาพ สารพลาสติกไซเซอร์ สารให้สี และสารช่วยให้อายุการใช้งาน ซึ่งจะใช้ในสัดส่วนต่าง ๆ ตามความเหมาะสม เพื่อให้ได้ยางที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ

วัตถุประสงค์ของการผสมสารเคมีสำหรับยาง

1. เพื่อให้ได้สมบัติทางกายภาพตามต้องการ
2. เพื่ออำนวยความสะดวกในการผลิตหรือแปรรูป
3. เพื่อให้มีอัตราการแปรรูปได้มากที่สุด
4. เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความทนทาน

โดยปกติการกำหนดสูตรผสมของยางและสารเคมี จะใช้สัดส่วนของสารต่างๆ ต่อยาง 100 ส่วนโดยน้ำหนักเป็นเกณฑ์ ดังนั้นสูตรพื้นฐานทั่วไปสามารถแสดงได้ ดังนี้

	ส่วน
ยาง	100
กำมะถัน	2.5-3.5
สารกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา	1-5
สารเร่งการเกิดปฏิกิริยา	0.5-1.5
สารตัวเติม	ตามต้องการ

สารช่วยการผสม	5-10
สารป้องกันการเสื่อมสภาพ	1-2

จากส่วนผสมต่าง ๆ ตามสูตรพื้นฐานที่กล่าวข้างต้นนี้ เห็นได้ว่าปริมาณการใช้สารแต่ละชนิดนั้นไม่ได้จำกัดแน่นอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ผลิต สารเคมีที่ผสมในยางต่างมีหน้าที่เฉพาะตัวต่าง ๆ กันดังต่อไปนี้คือ

1. สารบ่ม(curing agent) หรือสารวัลคะไนซ์(vulcanizing agent)

สารวัลคะไนซ์เป็นสารที่ใส่เข้าไปเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในยางเกิดเป็นพันธะเชื่อมโองระหว่างโมเลกุลขึ้น การเชื่อมโองที่เกิดขึ้นนี้มีผลทำให้ยางเปลี่ยนสภาพจากที่เคยอ่อนตัวไม่แข็งแรง ไหลได้เมื่อได้รับความร้อน กลับมาเป็นยางที่แข็งแรง และคงทนต่อความร้อน

สารวัลคะไนซ์ตัวแรกถูกค้นพบโดยกูดเยียร์(Goodyear)ในปี 1893 คือ กำมะถัน ส่วนธาตุอื่น ๆ ที่อยู่ในกลุ่มเดียวกับกำมะถัน เช่น ซีลีเนียม เทลลูเรียม และอนุพันธ์ของธาตุเหล่านี้ สามารถทำให้เกิดการวัลคะไนซ์ได้ เช่นเดียวกับกำมะถัน สำหรับธาตุที่กล่าวถึงเหล่านี้จะใช้เมื่อมีความต้องการพิเศษ เช่นต้องการให้ผลิตภัณฑ์มีความทนทานต่อความร้อน เป็นต้น

ในปัจจุบันสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโองในยาง ยังคงนิยมให้กำมะถันอยู่ เนื่องจากมีราคาถูก หาได้ง่าย สามารถวัลคะไนซ์ได้เร็ว และไม่มีผลต่อสารเคมีอื่น ๆ อัตราการเกิดพันธะและคุณสมบัติของยาง สามารถปรับเปลี่ยนได้ โดยการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของกำมะถันนั่นเอง การใส่กำมะถันลงในยางนิยมใส่ในลำดับหลังสุดของการผสม เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาก่อนกำหนด

2. สารเร่งปฏิกิริยา(accelerator)

สารเร่งปฏิกิริยา เป็นสารที่เพิ่มอัตราเร็วของการวัลคะไนซ์ ทำให้ลดเวลาในการบ่มยาง สารเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ สารนี้มีผลต่อการเกิดพันธะและการเชื่อมโองซึ่งทำให้มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ความต้านทานต่อแรงดึง โมดูลัส ความกระด้างตัว และการเสื่อมสภาพของยาง จึงต้องมีการพิจารณาปริมาณที่ใช้ตามความเหมาะสม

3. สารกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา(activator)

สารนี้คือสารที่ใช้เพื่อกระตุ้น และปรับประสิทธิภาพของสารเร่งปฏิกิริยา ในระบบการวัลคะไนซ์ สารที่นิยมใช้คือ ซิงค์ออกไซด์ และกรดสเตียริก

4. สารต้านการเสื่อมสภาพ(antidegradant)

ในการนำผลิตภัณฑ์ยางไปใช้งาน ยางสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือเกิดปฏิกิริยากับโอโซนได้ ผลจากการเกิดปฏิกิริยาทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ จึงจำเป็นต้องใส่สารต่อต้านการเกิดออกซิเดชัน และต่อต้านการทำปฏิกิริยากับโอโซน

สารต้านการเสื่อมสภาพที่ใช้ในสมัยเริ่มแรกนั้นเพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ เป็นสารพวก เอมีน และฟีนอล ซึ่งในปัจจุบันยังคงใช้กันอยู่

5. สารตัวเติม(filler)

สารตัวเติม เป็นสารที่ใส่ในยางเพื่อวัตถุประสงค์ต่าง ๆ กัน เช่น ปรับคุณสมบัติทางกายภาพ หรือช่วยในการผลิต หรือเพื่อลดต้นทุน สารตัวเติมอาจแบ่งได้ 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

5.1 สารตัวเติมแบบเสริมความแข็งแรง (Reinforcing Filler) คือ สารที่มีผลในการเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ความต้านทานต่อแรงดึง โมดูลัส ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการสึกหรอ สารตัวเติมเหล่านี้ได้แก่ ผงเขม่าดำ และสารตัวเติมอนินทรีย์ ที่มีอนุภาคเล็ก เช่น ซิลิกา เป็นต้น

5.2 สารตัวเติมแบบไม่เสริมความแข็งแรง (Non-Reinforcing Filler) เป็นสารที่ใส่ลงไปเพื่อลดต้นทุน หรือช่วยในกระบวนการผลิต ไม่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพมากนัก สารตัวเติมชนิดนี้มีอนุภาคขนาดใหญ่กว่าสารตัวเติมแบบเสริมความแข็งแรง

ในการเลือกสารตัวเติมนั้น จำเป็นต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมต่อสภาพการนำไปใช้งานของผลิตภัณฑ์ เช่นถ้าต้องการผลิตภัณฑ์ที่ทนทานต่อสารเคมี โดยเฉพาะภาวะที่เป็นกรด การใช้สารพวกแคลเซียมคาร์บอเนตก็จะไม่เหมาะสม การใช้พวกซิลิกาจะเหมาะสมกว่า

6. สารช่วยการผลิต (processing aid)

สารช่วยการผลิต เป็นสารที่ใส่ในยางเพื่อช่วยการผสม ปรับความเหนียว ทำให้เกิดความเหนียวติดกัน ทำให้สามารถหั่นองได้ที่อุณหภูมิต่ำหรือใช้แทนที่ยางบางส่วน โดยไม่ทำให้สมบัติของยางเปลี่ยนแปลง

7. สารอื่น ๆ

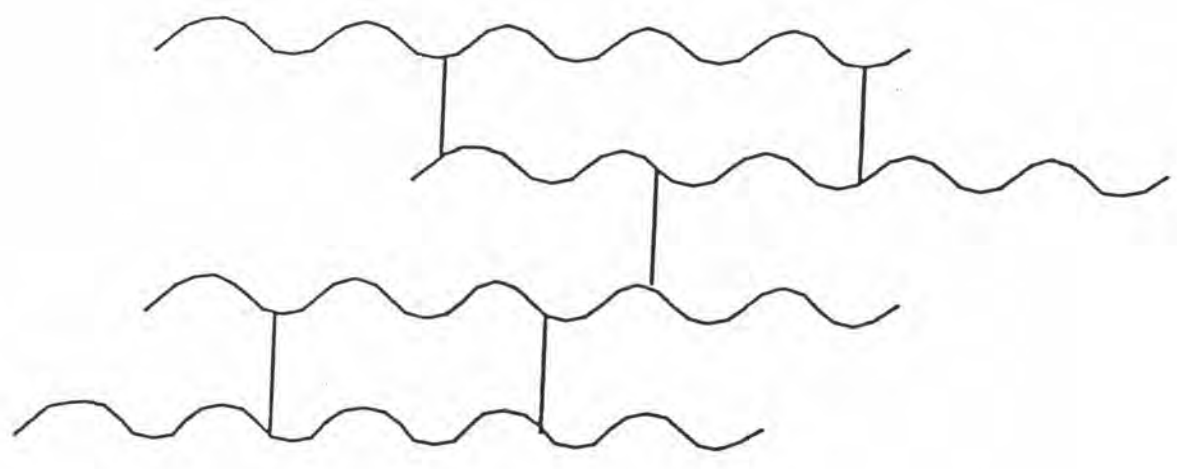
เป็นสารที่ใช้เพื่อปรับคุณสมบัติของยาง เพื่อให้มีสมบัติพิเศษ เช่น สารให้สี (colourant) สารป้องกันกลิ่น (deodorant) สารทำให้เกิดแก๊ส (blowing agent) สารเพิ่มคุณสมบัติการยึดติด (tackifier) เป็นต้น

การวัลคะไนซ์ (VULCANIZATION)

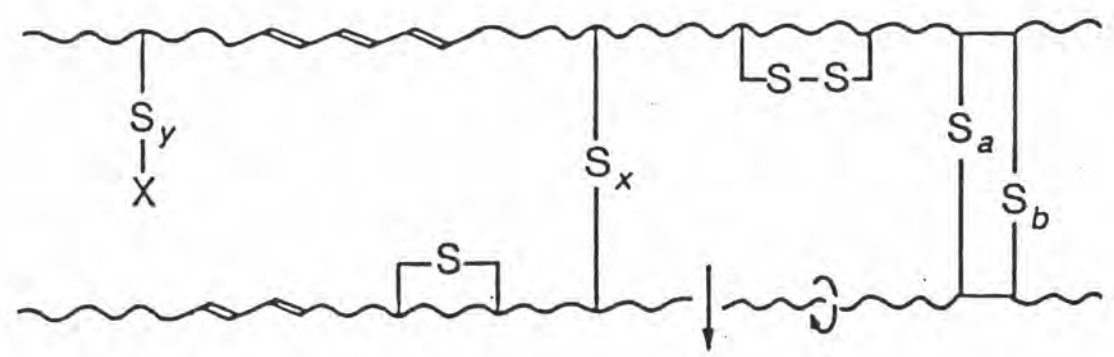
ยางธรรมชาติหรือยางสังเคราะห์ ในสภาพปกติจะอยู่ในรูปของแข็งที่มีการยึดตัวได้ มีการเปลี่ยนรูปร่างหรือมีการไหลได้ เมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอก ปรากฏการณ์นี้จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการละลายในตัวทำละลายได้ ทำให้มีข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน ทั้งนี้เนื่องมาจากโมเลกุลของยางที่เป็นสายโซ่ยาวยังมีการเคลื่อนผ่านกันได้

ในการวัลคะไนซ์ของยาง เป็นการทำให้เกิดการเชื่อมโอง (cross-linking) ในระหว่างโมเลกุลของยางในสามมิติ ทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย (network) ที่คงตัวอิสระระหว่างโมเลกุลของยางไว้ มีผลให้ความสามารถไหลของยางลดลง มีความยืดหยุ่นกลับสู่สภาพเดิมได้ดี เมื่อได้รับแรงกระทำ มีความคงทนต่อความร้อน สามารถนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ และมีความต้านทานต่อตัวทำละลายได้ดี

การเชื่อมโองระหว่างโมเลกุลของยาง เกิดขึ้นโดยสารเชื่อมโอง (cross-linking agent) สารที่นิยมใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรมคือ กำมะถัน (sulphur) โดยอาจใช้ในรูปแบบของสารกำมะถันโดยตรง หรือในรูปแบบสารประกอบที่สามารถแตกตัวให้อะตอมของกำมะถันออกมา



รูปที่ 2.1 การเชื่อมโยงระหว่างสายโมเลกุลของยาง



รูปที่ 2.2 ลักษณะของการเชื่อมโยงโดยกำมะถัน

ผลของการวัดคะไนซ์

- ปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพ
- มีรูปร่างคงตัว เพิ่มความยืดหยุ่นของยาง
- มีความคงทนต่อความร้อน
- เพิ่มความคงทนต่อสารละลาย

จลนพลศาสตร์เชิงเคมี

การวัดคะไนซ์เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของยาง จากสภาพที่ไม่คงรูป ระบบสารโพลิเมอร์เหลวไปเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนโดยปฏิกิริยาเคมี การเกิดการวัดคะไนซ์สามารถอธิบายได้ในรูปของจลนพลศาสตร์เชิงเคมี

ในปี 1894 เวเบอร์ (HILL, 1971) นักเคมีชาวอังกฤษ เป็นผู้ค้นพบว่ากำมะถันเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับโพลิเมอร์ของยางในระหว่างการเกิดการวัดคะไนซ์ และได้แสดงวิธีการซึ่งยังคงใช้บ้างในทุกวันนี้โดยการสกัดกำมะถันอิสระ ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาจากชิ้นงานที่ผ่านการวัดคะไนซ์แล้ว ด้วยอะซิโตน เขาได้พบว่าข้อมูลแสดงถึง ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่ใช้มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาของกำมะถันกับยาง

สมการทั่วไปสำหรับ จลนพลศาสตร์เชิงเคมี แสดงได้ดังนี้

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

เมื่อ n = อันดับของปฏิกิริยา (reaction order)

k = ค่าคงที่ของอัตราเกิดการเกิดปฏิกิริยา (reaction rate constant)

a = ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสาร (initial reactant concentration)

x = ปริมาณที่เกิดปฏิกิริยา ที่เวลาใดๆ (t)

Integration สมการจะได้

สำหรับปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (first-order reaction)

$$\ln(a-x) = -kt + \ln(a) \quad (2.2)$$

สำหรับปฏิกิริยาอนุพันธ์อันดับที่สอง (second-order reaction)

$$(a-x)^{-2} = kt + a^{-2} \quad (2.3)$$

ถ้าคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ค่าโมดูลัส สามารถวัดได้ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$(a-x) = (M_{\infty} - M) \quad (2.4)$$

$$a = (M_{\infty} - M_0) \quad (2.5)$$

เมื่อ M_{∞} คือค่าโมดูลัสสูงสุด
 M_0 คือค่าโมดูลัสเริ่มต้น (ค่าต่ำสุด)
 M คือค่าโมดูลัสที่เวลา t

การวัลคะไนซ์ หรือ การรวมตัวของกัมมะถัน ได้มีการพิจารณาจากการศึกษาค้นคว้า เชื่อกันว่าเป็นปฏิกิริยาอนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง

ในการพลอตระหว่างค่า $\ln(a-x)$ หรือ $(M_{\infty} - M)$ เทียบกับเวลา จะได้กราฟรูปเส้นตรง ซึ่งมีค่าความชัน เท่ากับ k

กรณีที่ปฏิกิริยาเป็นแบบปฏิกิริยาอนุพันธ์อันดับที่สอง การพลอตระหว่าง $(a-x)^{-2}$ หรือ $(M_{\infty} - M)^{-2}$ กับเวลาควรจะให้กราฟเป็นเส้นตรงที่มีค่าความชันคือ k

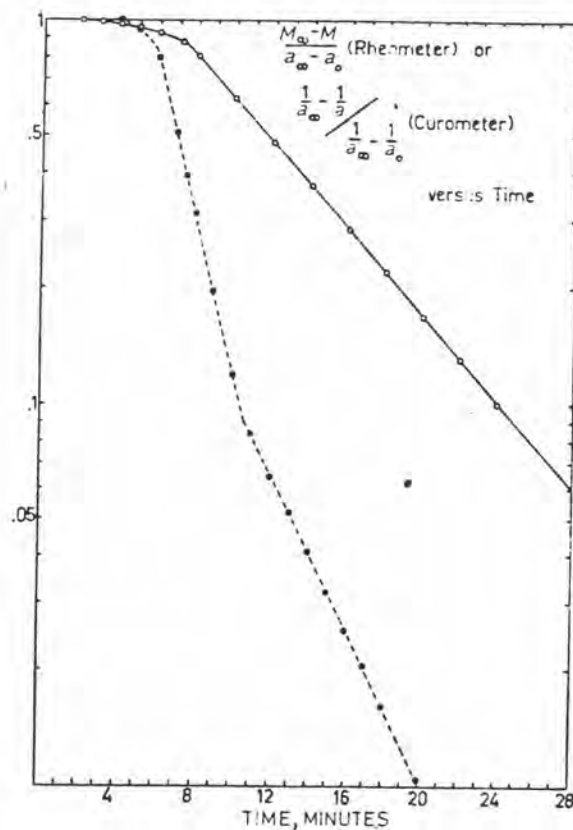
ในรูปที่ 2.3 เส้นทึบ แสดงถึงค่าจากการทดสอบด้วยเครื่อง Wallace Shawbury curometer ค่าของกราฟเป็นแบบปฏิกิริยาอนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง ดังแสดงเป็นเส้นตรง

ค่าจากเส้นประ แสดงถึงค่าการทดสอบโดยเครื่องวัดสมบัติการไหลของยางแบบจานสั่น (oscillating disk rheometer) โดยทดสอบกับยางผสมอีกสูตรหนึ่ง ซึ่งแสดงกราฟในรูปแบบเดียวกัน แต่มีเส้นตรง 2 เส้น ซึ่งมีความหมายว่า มีการเกิดปฏิกิริยาแบบปฏิกิริยาอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งเกิดขึ้น 2 ปฏิกิริยา

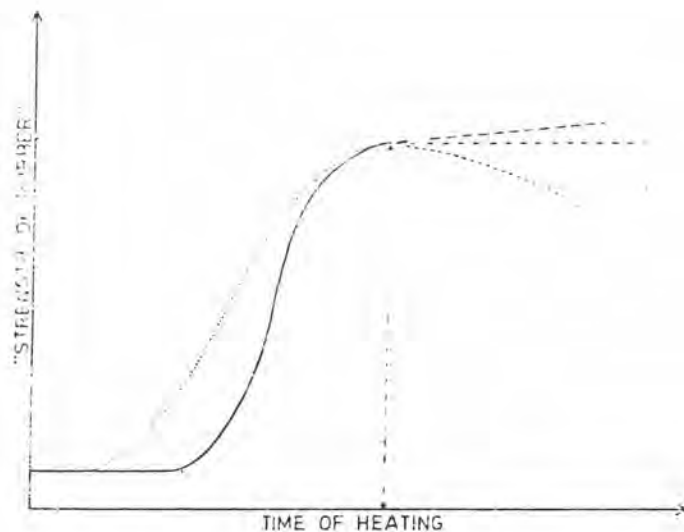
รูปร่างของการวัลคะไนซ์ (cure shape) เป็นสิ่งสำคัญในการพิจารณาการเกิดปฏิกิริยา

ดังแสดงในรูปที่ 2.4

ค่าความแข็งแรงของยาง ดังแสดงในแนวแกนตั้ง แสดงถึงคุณสมบัติทั่วไปของยางที่ปรับปรุงขึ้นเมื่อเกิดการวัลคะไนซ์



รูปที่ 2.3 อัตราการเกิดปฏิกิริยา จากการทดสอบด้วยเครื่อง curometer (เส้นทึบ) และ rheometer (เส้นประ)



รูปที่ 2.4 ลักษณะของการบ่ม

ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าอัตราการบ่ม

จากการทดลองและทฤษฎีที่กล่าวถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ในระหว่างกระบวนการวัลคะไนซ์ อัตราการเกิดปฏิกิริยา มีความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ สามารถแสดงได้ดังสมการพื้นฐานของ อาร์เรเนียส คือ

$$k = Se^{(-E/RT)} \quad (2.6)$$

ค่า k = ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา

S = ค่าคงที่

E = ค่าพลังงานกระตุ้น

R = ค่าคงที่ของแก๊ส (gas constant)

T = ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์

ในการพิจารณาความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ ความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดปฏิกิริยา กำหนดโดยค่าของพลังงานกระตุ้น ซึ่งแสดงหน่วยเป็นกิโลแคลอรีต่อโมล

โดยการจัดรูปสมการข้างบน โดยใช้ Logarithm จะได้

$$\log k = (-E/2.303 RT) + C \quad (2.7)$$

ดังนั้นการพลอตค่า k กับค่า $(1/T)$ จะได้กราฟเส้นตรง ที่มีค่าความชัน สามารถนำมาหาค่าพลังงานกระตุ้นได้ หรือเมื่อค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาสามารถหาค่าได้ที่อุณหภูมิต่างกัน 2 ค่า ค่าพลังงานกระตุ้นก็สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E = (4.576T_1T_2)/(T_2-T_1) \log (k_2/k_1) \quad (2.8)$$

ค่าพลังงานกระตุ้น จากรายงานที่ได้มีผู้ศึกษาไว้แสดงค่าตั้งแต่ 19 กิโลแคลอรีต่อโมล ไปจนถึง 36 กิโลแคลอรีต่อโมล ซึ่งขึ้นกับระบบการวัดคะไนซ์ หรือชนิดของยางที่ใช้

ค่าพลังงานกระตุ้นเป็นค่าที่สำคัญที่แสดงถึงสมบัติยาง และใช้ในการคำนวณค่าเวลาที่ใช้ในการบ่มยาง จากอุณหภูมิหนึ่งไปเป็นค่าที่อีกอุณหภูมิหนึ่ง เพื่อใช้ในการหาค่าผลของการบ่มที่เกิดขึ้นในระหว่างช่วงให้ความร้อน หรือช่วงลดความร้อน ซึ่งมีอุณหภูมิไม่คงที่

ค่าสมมูลของการบ่ม (CURE EQUIVALENCE) (ALLIGER, 1964)

รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการบ่มของยางรถยนต์ขนาดใหญ่ ในเครื่องอบยางที่ให้อุณหภูมิแม่พิมพ์ภายนอกมีค่าเท่ากับ $260^\circ F$ และอุณหภูมิภายในมีค่าเท่ากับ $305^\circ F$ เส้นโค้งทั้งสามเส้นแสดงค่าอุณหภูมิในบริเวณที่ต่าง ๆ กันในตัวยาง ดังนี้คือ เส้นแรก แสดงค่าอุณหภูมิที่บริเวณผิวหน้าของยางที่สัมผัสกับผิวของแม่พิมพ์ ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจะเข้าใกล้ $260^\circ F$ ซึ่งเป็นอุณหภูมิของผิวแม่พิมพ์ในคอนทาส เส้นที่สอง แสดงค่าอุณหภูมิที่บริเวณระหว่างถุงน้ำร้อนภายในกับท้องยาง แสดงถึงค่าอุณหภูมิที่ได้จากการส่งผ่านความร้อนจากถุงน้ำร้อนผ่านเข้าสู่ตัวยาง กราฟเส้นที่สามแสดงว่าอุณหภูมิภายในเนื้อยางเป็นอุณหภูมิที่ต่ำสุด จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่จุดนี้จะไม่คงที่ตลอดช่วงเวลาการบ่ม ค่าอุณหภูมิที่จุดนี้เพิ่มขึ้นจากจุดเริ่มต้นอย่างช้า ๆ จนมาถึงอุณหภูมิสูงสุดที่ $257^\circ F$ ที่เวลา 240 นาที การเกิดการวัลคะไนซ์ของเนื้อยางเริ่มเกิดจากการให้ความร้อนจนถึงขั้นการลดความร้อน ผลของการวัลคะไนซ์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตลอดเส้นโค้งนี้

ถูกคำนวณปรับเป็นค่าเวลาการบ่มที่อุณหภูมิอ้างอิงซึ่งเป็นอุณหภูมิที่นำมาใช้ในการทดสอบชิ้นตัวอย่าง
 รางในห้องทดลอง เพื่อจะหาค่าปริมาณการวัดคะไนซ์ของรางที่จุดภายในเนื้อรางนี้

การหาค่าปริมาณการวัดคะไนซ์ ทำโดยการคำนวณปรับค่าเวลาการบ่มที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ
 ไปเป็นค่าเวลาการบ่มที่อุณหภูมิอ้างอิง ในกรณีนี้ต้องมีการหาค่า E เพื่อใช้ในการคำนวณปรับค่า

การหาค่าปริมาณการวัดคะไนซ์ ทำโดยการแบ่งเส้นโค้งของค่าอุณหภูมิกับเวลา ทั้งใน
 ช่วงให้ความร้อน และลดความร้อน เป็นช่วงเวลานั้น ๆ เป็นช่วงเล็ก ๆ จากนั้นหาค่าอุณหภูมิ
 เฉลี่ยของช่วงเวลานั้น ๆ นี้ และคำนวณเปลี่ยนค่าเวลานั้น ๆ ที่อุณหภูมินี้ เป็นค่าเวลาการบ่มที่
 อุณหภูมิอ้างอิง ทำในทำนองเดียวกันนี้ตลอดทุก ๆ ช่วงของเส้นโค้ง ค่าผลรวมของเวลาที่
 คำนวณเทียบกับอุณหภูมิอ้างอิง จะเป็นค่าเวลาการบ่มของรางนี้ที่อุณหภูมิอ้างอิง ซึ่งสามารถหาสถานะ
 ของการบ่มได้จากการเทียบข้อมูลจากห้องทดลอง

การหาค่าปริมาณการวัดคะไนซ์แสดงได้ดังวิธีนี้ในรูปที่ 2.6 ค่าอุณหภูมิในแนวนอนตั้ง
 อยู่ในระบบของ exponential ซึ่งคำนวณโดยความสัมพันธ์กับค่า E ในกรณีนี้ใช้ค่า E เท่ากับ
 23.3 กิโลแคลอรีต่อโมล ในเส้นกราฟนี้ค่าพื้นที่ของทั้งสองอุณหภูมิเท่ากัน แสดงถึงปริมาณการ
 วัดคะไนซ์ที่เท่ากัน ในการบ่มที่อุณหภูมิ 280°F โดยใช้เวลา 6.8 นาที จะมีค่าปริมาณการ
 วัดคะไนซ์เท่ากันกับการบ่มที่อุณหภูมิ 260°F โดยใช้เวลา 15 นาที

โดยวิธีการทำนองเดียวกัน สามารถทำได้โดยการปรับค่า E ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของราง
 และสารเคมีที่ใช้

ในกรณีที่ค่าของอุณหภูมิกับเวลา ไม่เป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูป 2.7 นั้น ค่าพื้นที่ใต้
 กราฟสามารถหาได้ และเทียบเป็นเวลาการบ่มที่อุณหภูมิอ้างอิง ในกรณีนี้อุณหภูมิอ้างอิงที่ใช้มีค่า
 280°F ค่าเวลาการบ่มที่อุณหภูมินี้มีค่าเท่ากับ 67.1 นาที

การหาค่าสมมูลของการบ่ม

ค่าสมมูลของการบ่ม คือค่าที่แสดงถึง สถานะของการบ่มของยางผสมเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบค่าสถานะของการบ่มของยางผสมที่บ่มที่อุณหภูมิต่างกัน

ค่าสมมูลของการบ่ม สามารถหาได้จากค่าอัตราการบ่ม (Cure Rate) และค่าเวลา (Time)

การหาค่าอัตราการบ่มของยางผสมทำได้โดยการทดสอบยางผสมด้วยเครื่องวัดสมบัติการไหลของยางแบบจานสั้น ที่อุณหภูมิอ้างอิงค่าหนึ่ง ค่าอัตราการบ่มที่ได้จากการวัดเป็นค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงบิดต่อเวลา หรือเป็นค่าความชันของกราฟจากการทดสอบ

ค่าปริมาณการบ่ม (Cure Amount) หรือค่าสมมูลของการบ่ม สามารถหาได้จากผลคูณของอัตราการบ่มกับเวลา

$$\text{CURE RATE} \times \text{TIME} = \text{AMOUNT OF CURE} \quad (2.9)$$

การบ่มชิ้นงานที่มีความหนา ถ้าวัดอุณหภูมิในจุดกลางของส่วนที่หนาที่สุดของยาง เทียบกับเวลา จะได้กราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาดังรูป 2.8

จากกราฟอุณหภูมิกับเวลาที่ได้ สามารถนำมาหาค่าปริมาณการบ่มได้ดังนี้

1. แบ่งเส้นโค้งของอุณหภูมิกับเวลาเป็นช่องของช่วงเวลาเล็ก ๆ
2. หาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิในแต่ละช่องเล็ก ๆ นั้น
3. หาค่าอัตราการบ่มที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากข้อ 2
4. คำนวณค่าปริมาณการบ่มของยางแต่ละช่องย่อย ๆ นั้น

$$\text{amount of cure in segment } i = r_i \times t_i \quad (2.10)$$

5. รวมค่าปริมาณการบ่มของแต่ละช่อง จะได้ค่าผลรวมของการบ่ม

$$\text{total amount of cure} = \Sigma (r_i \times t_i) \quad (2.11)$$

การหาค่าอัตราการบ่มที่อุณหภูมิต่าง ๆ สามารถหาได้ในรูปของ relative rate จากสมการพื้นฐานของอาร์เรเนียส

$$k = Se^{-E/RT} \quad (2.12)$$

$$k_1/k_2 = e^{-E/RT_1} e^{E/RT_2} \quad (2.13)$$

$$k_1/k_2 = e^{(-E/R)(1/T_1 - 1/T_2)} \quad (2.14)$$

$k \propto r$

$$r_1/r_2 = e^{(-E/R)(1/T_1 - 1/T_2)} \quad (2.15)$$

กำหนดให้ค่าอัตราการบ่มที่อุณหภูมิอ้างอิงเท่ากับ 1

กำหนดให้ r_2 เท่ากับ อัตราการบ่มที่อุณหภูมิอ้างอิง 150 c หรือ 423.16 K

$$r_2 = 1$$

$$T_2 = 423.16 \text{ K}$$

$$r_1 = e^{(-E/R)(1/T_1 - 1/423.16)} \quad (2.16)$$

ค่า E สามารถหาได้จากการทดลอง ขึ้นอยู่กับสูตรผสมของยาง

จากสมการ (2.6) จัดรูปโดยใช้ Ln และแทนค่า k ด้วยค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาหรือ

ค่า cure

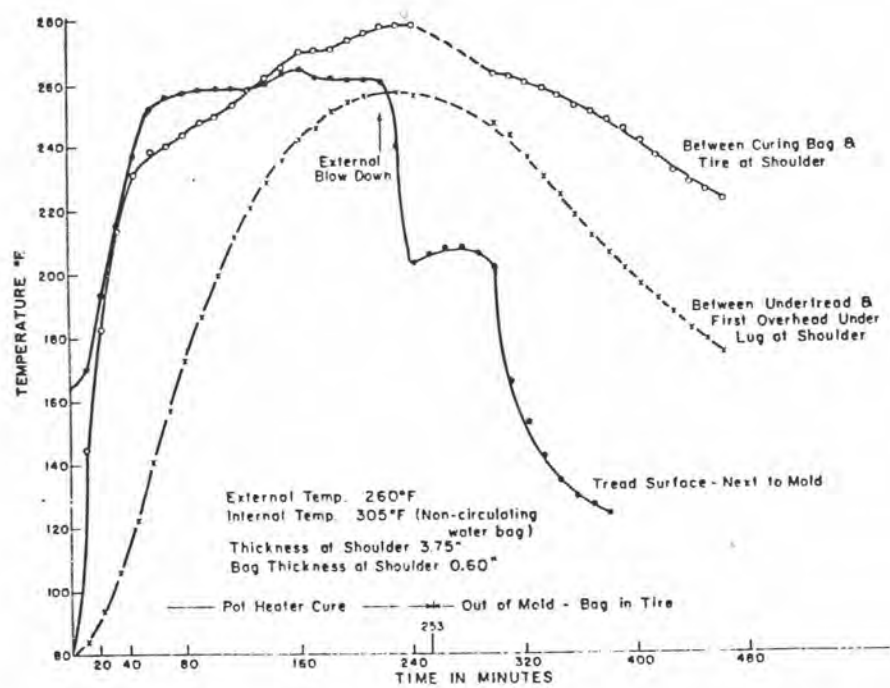
$$\text{Ln (cure)} = (-E/R)(1/T) + C \quad (2.17)$$

จากการพลอตกราฟระหว่างค่า Ln (cure) กับ (1/T) จะได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชัน $-E/R$ สามารถคำนวณหาค่า E ได้

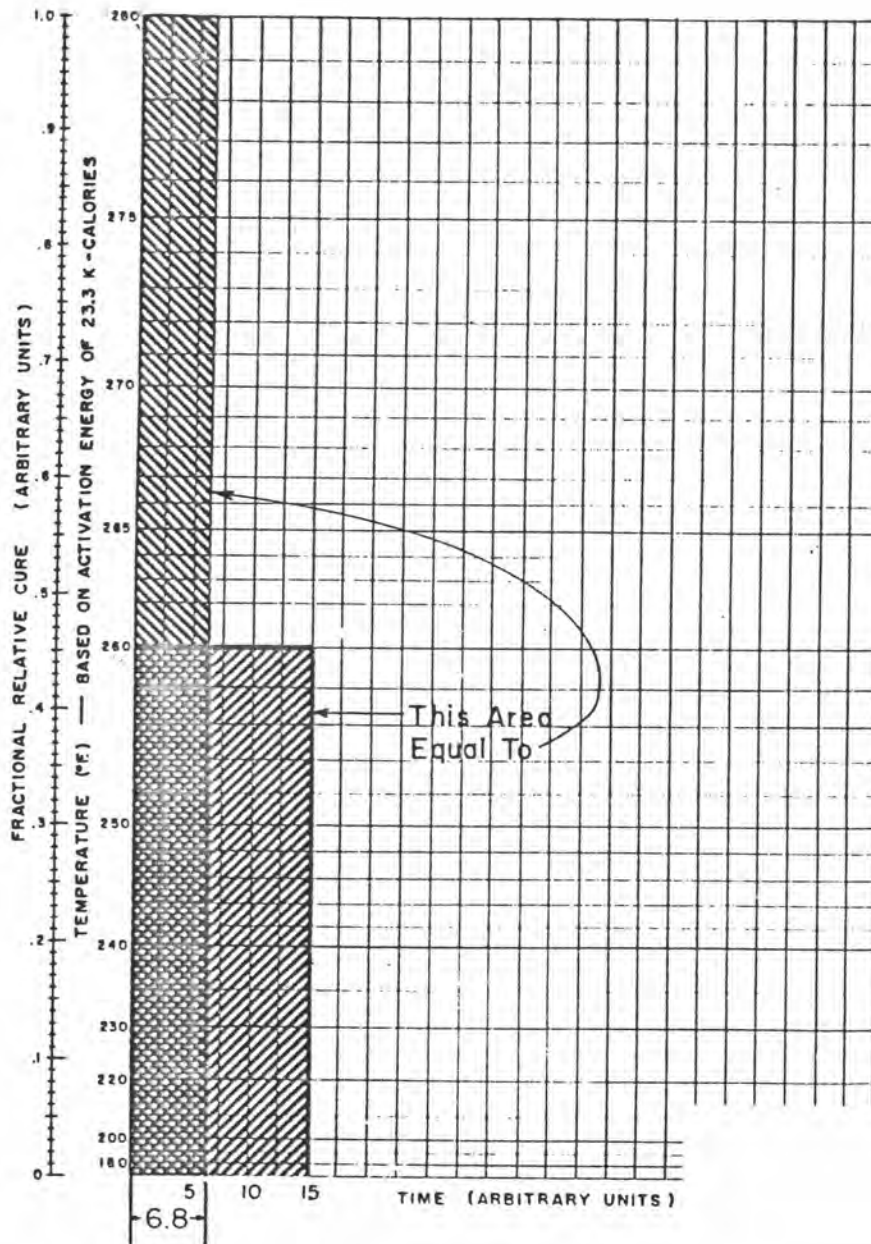
ค่า R เป็นค่าคงที่

เมื่อทราบค่า E สามารถคำนวณค่า relative rate ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้

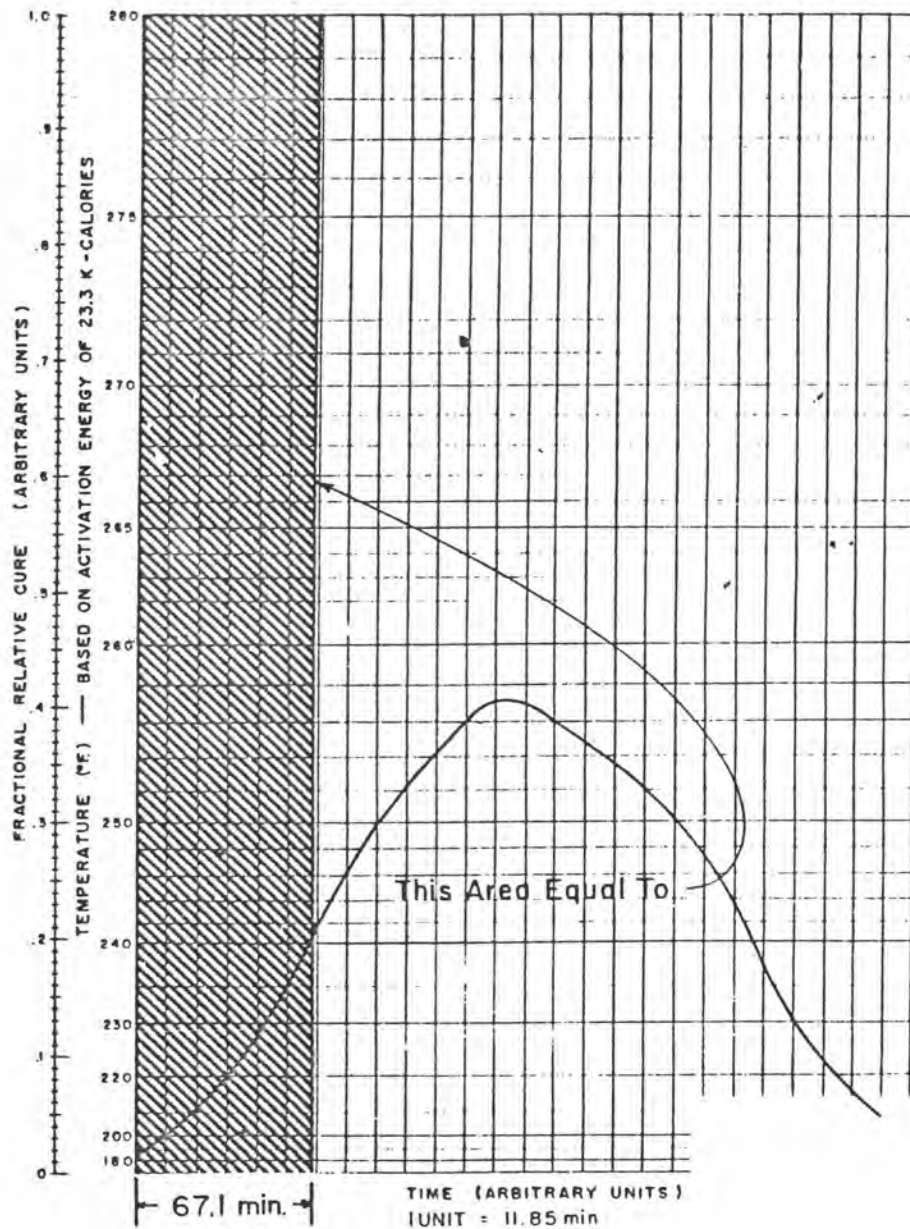
ค่ามาตรฐาน จากการทดสอบด้วยเครื่องวัดสมบัติการไหลของยางแบบจานสั้น ค่า t_{90} หรือค่า optimum cure เป็นจุดที่พอเหมาะในการบ่ม สามารถกำหนดค่าปริมาณการบ่มค่าสุดเท่ากับค่า optimum cure (ค่า $r_1 = 1$, ปริมาณการบ่ม = 1 x เวลาที่ t_{90} = เวลาที่ t_{90}) การหาค่าสมมูลของการบ่มของชิ้นงานจริง ต้องใช้เวลาการบ่มให้ได้ค่าที่ได้มากกว่าค่าปริมาณการบ่มค่าสุด เพื่อให้ยางมีสถานะที่อยู่ในช่วง optimum cure



รูปที่ 2.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับเวลา ในช่วงให้ความร้อนและลดความร้อนของยางขนาดโต (ALLIGER, 1964)



รูปที่ 2.6 การเปรียบเทียบค่าสมมูลของการบ่ม ที่อุณหภูมิคงที่
(ALLIGER, 1964)



รูปที่ 2.7 การเปรียบเทียบค่าสมมูลของการบ่ม ที่อุณหภูมิอ้างอิง และที่อุณหภูมิไม่คงที่
(ALLIGER, 1964)