

เทคโนโลยีการวัลคาไนซยาง

ธนรัตน์ ลากุลระนอง

จากการที่จำนวนประชากรมนุษย์มีแนวโน้มสูงขึ้นทุกปี อัตราการบริโภคปัจจัย 4 ก็เพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณขยะที่เกิดจากมนุษย์มีมากขึ้นตามไปด้วย ขยะบางชนิดสามารถรีไซเคิลได้แต่บางชนิดต้องเผาทำลาย ซึ่งการเผาทำลายหรือการฝังกลบจะมีผลต่อการทำลายสิ่งแวดล้อม นักวิทยาศาสตร์และนักอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมจึงได้พยายามแก้ปัญหาเหล่านี้ด้วยการรณรงค์ให้คนเห็นความสำคัญของการรีไซเคิลเพื่อนำผลิตภัณฑ์เก่ากลับมาใช้ใหม่ โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพลาสติกบางชนิดที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หลายครั้งและบางชนิดก็สามารถนำกลับไปแปรรูปให้เป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ได้ ด้วยเหตุนี้การรณรงค์เรื่องการรีไซเคิลขยะพลาสติกจึงเป็นเรื่องที่พบเห็นกันโดยทั่วไปเพราะมีการรณรงค์กันอย่างกว้างขวางผ่านสื่อต่างๆ แม้ว่าการรีไซเคิลขยะจากเศษยางจะไม่ได้ได้รับความสนใจจากสื่อต่างๆ สูงเท่าขยะจากพลาสติก แต่เทคโนโลยีที่นำมาใช้ในการรีไซเคิลยางก็ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะเทคโนโลยีที่ใช้ในการรีไซเคิลขยะจากยางล้อเก่าเพราะขยะเหล่านี้มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นทุกปี ปัจจุบันการรีไซเคิลขยะจากเศษยางหรือจากยางล้อเก่านั้นสามารถทำได้หลายวิธี ที่สำคัญได้แก่

- การนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงาน (ใช้เป็นเชื้อเพลิงในหม้อต้มหรือเตาเผา)
- การนำไปแปรรูปเป็นก๊าซและน้ำมันด้วยกระบวนการไพโรไลซิส
- การนำไปแปรรูปเป็นยางผงเพื่อนำไปใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมต่างๆ
- การนำยางผงไปผ่านกระบวนการดีวัลคาไนซ์ (devulcanization) เพื่อผลิตเป็นยางรีเคลม

บทความนี้จะกล่าวถึงเทคโนโลยีการรีไซเคิลเศษยางหรือยางล้อเก่าด้วยวิธีการดีวัลคาไนซ์

เทคโนโลยีการดีวัลคาไนซยาง

ปกติยางจำเป็นต้องได้รับการวัลคาไนซ์ (vulcanization) คือทำให้โมเลกุลเชื่อมโยกันก่อนที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้ดี ทั้งนี้เพื่อเป็นการเพิ่มความยืดหยุ่นของยางและทำให้ยางแข็งแรงขึ้น แต่การวัลคาไนซ์ก็มีข้อเสีย คือ ทำให้ยางไหลขึ้นรูปใหม่ไม่ได้ ฉะนั้นหากต้องการนำผลิตภัณฑ์ยางใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ในรูปของยางตั้งต้น ก็จำเป็นต้องทำลายพันธะเชื่อมโยโมเลกุลของยางเสียก่อน กระบวนการดังกล่าว คือ กระบวนการดีวัลคาไนซยาง และยางที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์แล้วจะเรียกว่า ยางรีเคลม (reclaimed rubber)

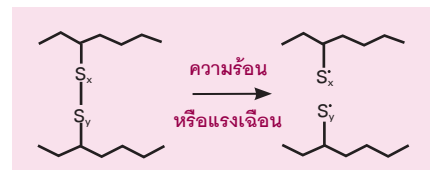
การดีวัลคาไนซยางสามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้

1. การใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมี

การดีวัลคาไนซยางด้วยวิธีนี้เป็นวิธีเก่าแก่ที่นิยมใช้กันมานาน การดีวัลคาไนซยางเริ่มต้นด้วยการนำยางผงไปผสมกับสารเคมีที่เรียกว่าสารรีเคลม จากนั้นนำไปให้ความร้อนเพื่อให้ยางเกิดการดีวัลคาไนซ์ สารรีเคลมที่นิยมใช้ ได้แก่ ไดเอริลไดซัลไฟด์ (diaryl disulfide) และ ไดฟีนิลไดซัลไฟด์ (diphenyl disulfide) [1] (รูปที่ 1) นอกจากสารรีเคลมแล้ว ในการดีวัลคาไนซ์โดยวิธีนี้จะมีการเติมน้ำมันลงไปด้วยเพื่อช่วยให้ยางไหลได้ดียิ่งขึ้น การดีวัลคาไนซยางด้วยความร้อนร่วมกับสารเคมียังสามารถแบ่งออกได้เป็นวิธีย่อยตามกระบวนการที่ใช้ ดังนี้



รูปที่ 1 โครงสร้างของสารรีเคลม (ก) ไดเอริลไดซัลไฟด์ และ (ข) ไดฟีนิลไดซัลไฟด์



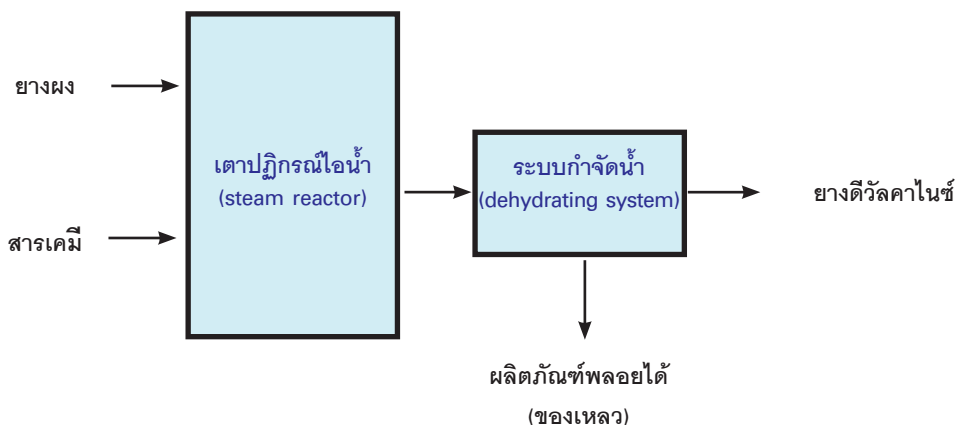
รูปที่ 2 การทำลายพันธะข้ามโยกันด้วยความร้อนหรือแรงเฉือน

1.1 วิธีที่ใช้กระบวนการแพน (PAN process) [2]

วิธีนี้เป็นวิธีที่เก่าแก่ที่สุดและง่ายที่สุด กระบวนการที่ใช้ได้รับการจดสิทธิบัตรโดย Hall ในปี ค.ศ. 1858 [3] กระบวนการผลิตประกอบด้วยการใช้ยางที่ไม่มีเส้นใยที่บดละเอียดแล้วมาผสมกับสารรีเคลมและน้ำมันในอัตราผสม จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 180°C เป็นเวลา 5-10 ชั่วโมง ในหม้ออบไอน้ำ เมื่อยางเริ่มนิ่มและไหลได้ จึงนำยางออกมาแล้วรีดด้วยเครื่องรีดให้เป็นแผ่นก่อนจะนำไปใช้งานต่อไป แม้ว่าวิธีนี้จะต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาค่อนข้างนาน แต่วิธีนี้ก็ยังมีข้อดี คือ เป็นวิธีที่มีต้นทุนต่ำและสามารถใช้ได้กับยางหลายชนิด เช่น ยางธรรมชาติ (NR) ยางสไตรีนบิวทาไดเอิน (SBR) ยางนีโอพรีน (CR) ยางไนไตรล์ (NBR) และยางบิวไทล์ (IIR)

1.2 วิธีที่ใช้กระบวนการไดเจสเทอร์ (Digester process)

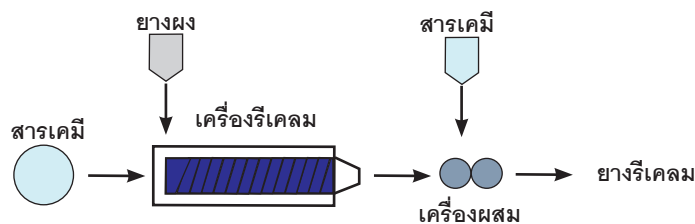
ในปี ค.ศ. 1899 Marks [3] ได้จดสิทธิบัตรกระบวนการไดเจสเทอร์ ซึ่งกระบวนการนี้แตกต่างจากกระบวนการแปรรูปยางที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบส่วนใหญ่จะเป็นยางผงที่มีเส้นใยผสมอยู่ การดีวัลคาไนซ์ด้วยวิธีนี้เริ่มต้นด้วยการนำยางผงไปผสมกับน้ำและสารย่อยเส้นใย เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมคลอไรด์ หรือซิงก์คลอไรด์ ในบางกรณีอาจมีการเติมพลาสติกไซเซอร์หรือสารรีเคลมลงไปด้วยก็ได้ จากนั้นนำของผสมไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 180-210°C เป็นเวลา 5-24 ชั่วโมง ในหม้ออบไอน้ำที่มีการติดตั้งไบกวนเพื่อให้ยางได้รับความร้อนอย่างทั่วถึง เมื่อเส้นใยถูกย่อยหมดและยางเริ่มนิ่มแล้ว นำยางไปล้างให้สะอาดเพื่อกำจัดสารเคมีตกค้างต่างๆ ออกไป (โดยเฉพาะสารย่อยเส้นใยที่เติมลงไป) จากนั้นนำยางไปอบแห้งและรีดผ่านลูกกลิ้งก่อนที่จะนำไปใช้งานต่อไป



รูปที่ 3 กระบวนการดีวัลคาไนซ์ด้วยไอน้ำ [4]

2. การใช้ความร้อนร่วมกับแรงเชิงกล

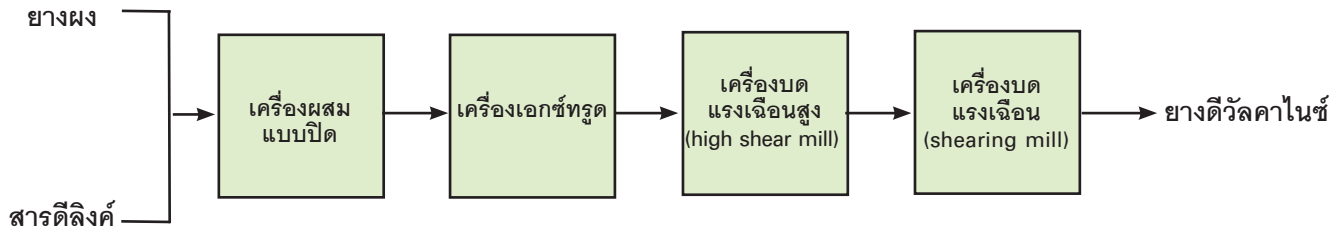
นอกจากเทคนิคการรีไซเคิลยางด้วยการใช้ความร้อนร่วมกับสารรีเคลมแล้ว ในปี ค.ศ. 1960 ได้มีการพัฒนาระบบการรีไซเคิลขึ้นมาอีกรูปแบบหนึ่ง ซึ่งกระบวนการนี้เป็นการใช้ความร้อนร่วมกับแรงเชิงกลที่คาดกันว่าจะทำให้เกิดการทำลายพันธะคาร์บอน-คาร์บอนและพันธะเชื่อมโยงบแบบกำมะถัน (sulfur crosslink) เรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการรีเคลมเมเตอร์ (Reclaimator process) (รูปที่ 4) การดีวัลคาไนซ์ด้วยวิธีนี้เริ่มต้นด้วยการนำยางผงที่ไม่มีเส้นใยปนอยู่ [5] ไปผสมกับสารเคมีในเครื่องรีเคลมเมเตอร์ (reclaimator) ที่มีลักษณะคล้ายเครื่องเอกซ์ทรูดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (single-screw extruder) แรงเฉือนและความร้อนที่ได้จากบาริลของเครื่องรีเคลมเมเตอร์จะทำให้ยางร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิ 200°C ความร้อนและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะทำให้ยางเกิดการดีวัลคาไนซ์ จากนั้นนำยางที่ได้ไปผสมกับสารเคมีอื่นๆ ในเครื่องบดผสมจนได้เป็นยางรีเคลมที่พร้อมจะนำไปใช้งานอื่นๆ ต่อไป เนื่องจากกระบวนการนี้ใช้ระยะเวลาค่อนข้างสั้นเพราะยางจะอยู่ในเครื่องเอกซ์ทรูดเพียงแค่ประมาณ 3 นาทีเท่านั้น วิธีการนี้จึงเหมาะสำหรับใช้ในการดีวัลคาไนซ์ยางสังเคราะห์ที่หากใช้ระยะเวลาในการรีไซเคิลนานมากเกินไปจะแข็งขึ้น เช่น ยางสไตรีนบิวทาไดอีน (SBR)



รูปที่ 4 การดีวัลคาไนซ์โดยกระบวนการรีเคลมเมเตอร์ [2]

3. การใช้แรงเชิงกลร่วมกับสารเคมี

เนื่องจากการใช้ความร้อนร่วมกับสารรีเคลมเป็นวิธีที่ต้องใช้เวลานาน สิ้นเปลืองต้นทุน ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ ขึ้นมา เพื่อลดต้นทุนและความยุ่งยากในการดีวัลคาไนซ์ยาง ซึ่งเทคโนโลยีที่กำลังได้รับความสนใจและเริ่มมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย คือ การใช้สารเคมีชนิดใหม่ที่เรียกว่า “ดีลิงค์” (delink)¹ ไปผสมกับยางผงโดยใช้เครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง เมื่อทำงานร่วมกับแรงเฉือนที่เกิดจากเครื่องผสม สารเคมีชนิดนี้จะช่วยให้โครงสร้างตาข่าย 3 มิติของโมเลกุลยางถูกทำลายภายในระยะเวลาไม่ก่นาที ทำให้กระบวนการดีวัลคาไนซ์เกิดขึ้นได้ภายในระยะเวลาอันสั้น สะดวก รวดเร็ว และประหยัดค่าใช้จ่าย อย่างไรก็ตามปัจจุบันยังได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการดีวัลคาไนซ์ยางอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจและมีศักยภาพสูงที่จะถูกนำไปต่อยอดเพื่อใช้งานจริงในอนาคตมีอยู่อีก 2 เทคโนโลยี คือ การดีวัลคาไนซ์ยางด้วยคลื่นไมโครเวฟและการดีวัลคาไนซ์ยางด้วยคลื่นอัลตราโซนิก



รูปที่ 5 กระบวนการดีวัลคาไนซ์ด้วยสารดีลิงค์

หมายเหตุ: รายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับ “ดีลิงค์” ดูได้ในวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง ปีที่ 1 ฉบับที่ 2 ตุลาคม-ธันวาคม 2550 หน้า 25-29

4. การใช้คลื่นไมโครเวฟ

เทคโนโลยีไมโครเวฟได้รับการนำไปใช้อย่างกว้างขวางขึ้นในอุตสาหกรรมยาง ทั้งในขั้นตอนของการอบแห้ง การขึ้นยาง และการวัลคาไนซ์ยาง ปัจจุบันได้มีการนำคลื่นไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ในการดีวัลคาไนซ์เศษยางเก่าด้วย เพราะความร้อนที่เกิดจากคลื่นไมโครเวฟมีพลังงานสูงเพียงพอที่จะทำลายพันธะการเชื่อมโยงของคาร์บอน-กำมะถัน (C-S) และกำมะถัน-กำมะถัน (S-S) ทำให้โครงสร้างตาข่าย 3 มิติของโมเลกุลยางถูกทำลายลงได้ (ใช้เฉพาะในการดีวัลคาไนซ์ยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันเท่านั้น) การดีวัลคาไนซ์ยางด้วยคลื่นไมโครเวฟนอกจากจะเป็นวิธีการที่ประหยัดเพราะยางจะได้รับความร้อนอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอแล้ว ยังเป็นวิธีการที่สะอาดปราศจากสิ่งปนเปื้อน เพราะการดีวัลคาไนซ์สามารถเกิดขึ้นได้โดยไม่ต้องเติมสารเคมีใดๆ ลงไป นอกจากนี้ยางรีเคลมที่ได้อาจมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่ายางรีเคลมที่ได้จากการดีวัลคาไนซ์ด้วยเทคนิคเก่าๆ อีกด้วย

4.1 หลักการของไมโครเวฟ

ในปี ค.ศ. 1940 นักวิทยาศาสตร์ได้ประดิษฐ์อุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่เรียกกันว่า “แมกนีตรอน” [6] เพื่อใช้ในการผลิตคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งเป็นการแผ่รังสีคลื่นสั้นรูปแบบหนึ่ง คลื่นไมโครเวฟทำงานด้วยการสั่นสะเทือนด้วยความถี่ที่สูงถึง 2,450 เมกะเฮิรตซ์ หรือ 2,450 ล้านครั้งต่อวินาที [7] เมื่อผ่านคลื่นไมโครเวฟเข้าไปในวัสดุที่มีความเป็นขั้ว คลื่นไมโครเวฟจะเหนี่ยวนำทำให้เกิดการโพลาไรซ์ (polarization) หรือเกิดการจัดเรียงตัวของประจุตามทิศทางของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบแกว่ง นั่นคือประจุบวกและลบที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจะแกว่งตัวสลับไปมาด้วยความถี่ที่สูงถึง 2,450 ล้านครั้งต่อวินาที ซึ่งการแกว่งตัวของประจุในวัสดุด้วยความถี่ที่สูงมากนี้ก่อให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว ด้วยเหตุนี้การนำคลื่นไมโครเวฟไปประยุกต์ใช้ในการให้ความร้อนแก่วัสดุ (โดยเฉพาะวัสดุที่มีความเป็นขั้ว) จึงเป็นวิธีการที่สะดวก รวดเร็ว และประหยัดพลังงานอีกด้วย

¹ ดีลิงค์ คือ ของผสมของสารเคมีที่ประกอบด้วย ซิงก์ไดเมทิลไดไทโอคาร์บาเมต เมอร์แคปโตเบนโซโทซอล กรดสเตียริก ซิงก์ออกไซด์ กำมะถัน และไดออกไซด์

4.2 การใช้ไมโครเวฟกับเศษยาง

เนื่องจากวัสดุที่ตอบสนองต่อคลื่นไมโครเวฟได้ดีนั้นต้องเป็นวัสดุที่มีความเป็นขั้ว ดังนั้นหากต้องการใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่อให้ยางร้อนจนถึงขั้นที่ทำให้เกิดการดีวัลคาไนซ์ได้นั้น ยางที่จะนำมาดีวัลคาไนซ์ควรเป็นยางที่มีความเป็นขั้วสูง เช่น ยางคลอโรพรีน (CR) ยางไนไตรล์ (NBR) หรือยางคลอริเนตโพลิเอทิลีน (CPE) อย่างไรก็ตามในกรณีของเศษยางล้อที่มีองค์ประกอบเป็นยางธรรมชาติ ยางบิวทาไดอีน และ/หรือยางสไตรีนบิวทาไดอีน แม้ว่ายางเหล่านี้จะมีความเป็นขั้วต่ำแต่เศษยางล้อก็ยังสามารถตอบสนองต่อคลื่นไมโครเวฟได้ดีเนื่องจากในเนื้อยางมีเขม่าดำเป็นองค์ประกอบอยู่ในปริมาณสูง ทำให้ยางสามารถตอบสนองต่อคลื่นไมโครเวฟได้ดียิ่งขึ้น ส่วนขนาดของเศษยางที่จะนำไปดีวัลคาไนซ์ก็ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดีวัลคาไนซ์ด้วยเช่นกัน โดยทั่วไปแล้วควรตัดหรือย่อยชิ้นเศษยางให้มีขนาดเล็ก (สามารถร่อนผ่านตะแกรงที่มีขนาด $\frac{1}{4}$ นิ้ว) ก่อนที่จะนำไปผ่านกระบวนการดีวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ

คลื่นไมโครเวฟที่นำไปใช้ในการดีวัลคาไนซ์ยางส่วนใหญ่จะมีความถี่ 915 และ 2,450 เมกะเฮิรตซ์ นอกจากความถี่ของคลื่นไมโครเวฟแล้วยังมีตัวแปรอื่นๆ อีกที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดีวัลคาไนซ์ ได้แก่ ปริมาณคลื่น (dose) อัตราเร็วในการให้คลื่น (dose rate) รวมถึงอุณหภูมิเป็นต้น โดยทั่วไปแล้วการดีวัลคาไนซ์ผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ท่อยางและสายพานนั้น ปริมาณคลื่นที่ใช้จะอยู่ในช่วง 165 ถึง 220 วัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัม [8-9] การตั้งค่าปริมาณคลื่น อัตราเร็วในการให้คลื่น และความถี่ของคลื่นไมโครเวฟนั้นต้องพิจารณาเป็นแต่ละกรณีไป เพราะค่าของตัวแปรเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับชนิดหรือสูตรของยางที่จะนำมาดีวัลคาไนซ์ด้วย มีการรายงานว่าการแตกของเขม่าดำก็ส่งผลต่ออัตราเร็วในการดีวัลคาไนซ์ นอกจากนี้ในบางกรณีที่มีการเติมซิลิกาลงไป ขนาดอนุภาคของซิลิกาก็ส่งผลต่ออัตราเร็วในการดีวัลคาไนซ์ด้วยเช่นกัน

ในปี ค.ศ.1976 Novotny และคณะ ได้ยื่นจดสิทธิบัตร [9] เกี่ยวกับการดีวัลคาไนซ์ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนโมโนเมอร์ (EPDM) ด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยในสิทธิบัตรนี้ได้อ้างว่าการดีวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟส่งผลทำให้ยางรีคอมที่ได้นั้นมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่ายางรีคอมที่ได้จากการดีวัลคาไนซ์ด้วยวิธีการรีคอมแบบดั้งเดิม ในงานวิจัยของ Novotny นั้นใช้คลื่นไมโครเวฟในการดีวัลคาไนซ์ท่อยางที่ทำจากยาง EPDM โดยการนำเศษยาง EPDM ผ่านเข้าไปในเครื่องมือที่มีลักษณะคล้ายเครื่องเอกซเรย์ทูด คือ ประกอบด้วยท่อแก้วหรือท่อเซรามิกที่มีสกรู (ที่ทำจากแก้ว เซรามิก หรือโลหะเพื่อให้คลื่นไมโครเวฟผ่านได้) อยู่ภายใน จากนั้นก็ดีวัลคาไนซ์โดยใช้สภาวะต่างๆ ดังนี้

- อัตราการไหลของยาง 7.26 กิโลกรัมต่อชั่วโมง
- อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส
- กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป 2.6 กิโลวัตต์
- กำลังที่ออกมาจากแมกนีตรอน (magnetron output) 1.5 กิโลวัตต์
- ความเร็วรอบในการหมุนของสกรู 1.7 รอบต่อนาที

จากนั้นจึงนำยางรีคอมที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบกับยาง EPDM ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 1 จากตารางจะเห็นว่ายางรีคอมที่ได้นั้นมีสมบัติเชิงกลด้อยกว่ายาง EPDM ใหม่เล็กน้อยดังจะเห็นได้จากการลดลงของค่าความทนต่อแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดของยาง เมื่อทดลองนำยางรีคอมหรือยางดีวัลคาไนซ์ไปผสมกับยาง EPDM ที่สัดส่วนการผสมต่างๆ และทดสอบสมบัติต่างๆ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 2 จากตารางจะเห็นว่ายางผสม (ยางรีคอมกับยางใหม่) มีสมบัติเชิงกลที่ใกล้เคียงกับยางใหม่ ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าการดีวัลคาไนซ์ยาง EPDM โดยใช้คลื่นไมโครเวฟสามารถทำได้หลายครั้งโดยไม่ส่งผลเสียอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติเชิงกลของยางรีคอมที่ได้ เพราะจากตารางพบว่ายางสูตรที่ 4 (ซึ่งเป็นยางที่ได้จากการนำยางสูตรที่ 3 ไปดีวัลคาไนซ์ซ้ำอีกครั้ง) ยังคงมีสมบัติเชิงกลอยู่ในเกณฑ์ที่ดี

ตารางที่ 1 สมบัติเชิงกลของยาง EPDM และยางดีวีลคาไนซ์ EPDM (DEPDM)

สมบัติ	EPDM	DEPDM
ยาง DEPDM (%)	-	100
เวลาวัลคาไนซ์ (min/°C)	20/160	11/182
ความทนต่อแรงดึง (MPa)	11.03	9.86
การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	300	175
ความถ่วงจำเพาะ	1.15	1.15
ความแข็ง (Shore A)	67	66

ตารางที่ 2 สมบัติเชิงกลของยาง EPDM และยางผสมระหว่าง EPDM และ DEPDM

สมบัติ	สูตร			
	1	2	3	4
ยาง DEPDM (%)	-	18	26	26
t ₉₀ (min)	4.7	4.7	4.55	4.5
200% โมดูลัส (MPa)	6.89	7.31	6.62	7.17
ความทนต่อแรงดึง (MPa)	8.55	9.24	7.86	8.48
การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	315	375	330	290
ความแข็ง (Shore A)	73	70	71	71
การยุบตัวถาวร ที่ 120°C 70 ชั่วโมง	44	51	50	48

5. การใช้คลิ่นอัลตราโซนิค

คลิ่นอัลตราโซนิคเป็นคลิ่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นความถี่ที่สูงเกินกว่าที่มนุษย์จะได้ยินเพราะโดยทั่วไปแล้วมนุษย์จะได้ยินเสียงที่มีความถี่สูงเพียงแค่ประมาณ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ เท่านั้น [10] ปัจจุบันคลิ่นอัลตราโซนิคได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ หลายอุตสาหกรรมรวมถึงอุตสาหกรรมยางด้วย เพราะคลิ่นอัลตราโซนิคสามารถทำให้ยางร้อนขึ้นได้เช่นเดียวกับคลิ่นไมโครเวฟ ดังนั้นจึงได้มีการนำคลิ่นชนิดนี้ไปใช้ในการวัลคาไนซ์ยางด้วย ในส่วนของการวัลคาไนซ์นั้น Pelofsky [11] ได้ทดลองใช้คลิ่นอัลตราโซนิคเพื่อการวัลคาไนซ์ยางเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1973 ผลการศึกษารูปได้ว่า คลิ่นอัลตราโซนิคสามารถวัลคาไนซ์ยางได้เช่นกัน โดยการวัลคาไนซ์ยางด้วยวิธีนี้มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสูงเนื่องจากไม่มีการใช้สารเคมีใดๆ อีกทั้งยังเป็นวิธีที่สามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องได้ด้วย ดังนั้นวิธีนี้จึงเป็นวิธีที่กำลังได้รับความสนใจจากนักวิจัยจำนวนมากและเป็นวิธีที่มีศักยภาพสูงที่จะพัฒนาต่อยอดในอนาคต

5.1 หลักการทำงานของคลื่นอัลตราโซนิก

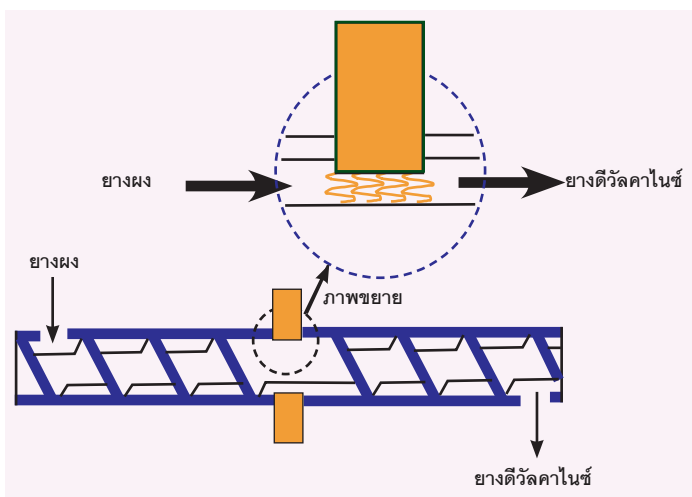
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำให้เกิดคลื่นอัลตราโซนิกเรียกว่า อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ (ultrasonic transducer) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่แปลงพลังงานรูปแบบต่างๆ ให้เป็นพลังงานทางกลด้วยการสั่นไปมาทำให้เกิดคลื่นเสียงอัลตราโซนิกกระจายไปในวัตถุตัวกลาง ซึ่งอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์มีหลายแบบขึ้นอยู่กับหลักการที่ใช้ ได้แก่

แบบเพียโซอิเล็กทริก (Piezo-electric transducer) ซึ่งแปลงไปมาระหว่างพลังงานไฟฟ้าและพลังงานทางกล โดยมีความถี่เรโซแนนซ์คงที่ อยู่ค่าหนึ่ง

แบบแมกนีโตสตริกทิฟ (Magnetostrictive transducer) ซึ่งแปลงไปมาระหว่างพลังงานไฟฟ้าในขดลวดกับตำแหน่งความยาวของแกนเหล็กที่สวมขดลวดนั้นอยู่

แบบอิเล็กโตรสตริกทิฟ (Electrostrictive transducer) ซึ่งแปลงไปมาระหว่างพลังงานไฟฟ้ากับพลังงานทางกล

อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์แบบนี้นิยมใช้มากที่สุด คือ แบบเพียโซอิเล็กทริก (Piezo-electric transducer) ซึ่งประกอบด้วยเซรามิกส์สี่เหลี่ยม 2 แผ่นประกบกัน และจะโก่งงอเมื่อป้อนแรงดันในทิศทางหนึ่ง ทรานสดิวเซอร์แบบเพียโซอิเล็กทริกจะมีอยู่ 2 แบบ คือ ตัวส่ง และตัวรับ (เสียง) โดยตัวส่ง (transmitter) คือ อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ที่ถูกออกแบบมาให้แปลงสัญญาณไฟฟ้าที่ให้แก่ตัวมันให้ออกมาเป็นคลื่นเสียงอัลตราโซนิก และตัวรับ (receiver) คือ อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ที่ถูกออกแบบมาให้แปลงคลื่นเสียงอัลตราโซนิกที่มาจากวัตถุกระทบตัวมันให้ออกมาเป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งทั้งตัวส่งและตัวรับต้องมีความถี่เรโซแนนซ์เดียวกัน



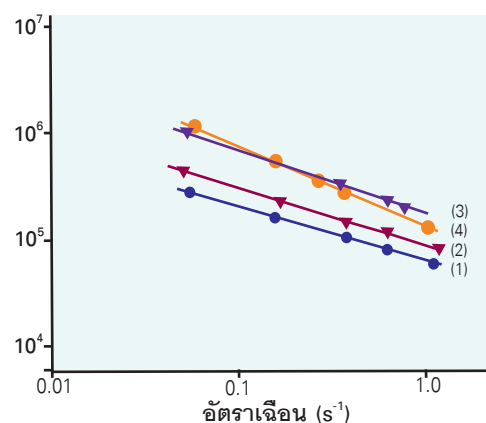
รูปที่ 6 กระบวนการวัดคาบของยางผงด้วยคลื่นอัลตราโซนิก [12]

5.2 การใช้คลื่นอัลตราโซนิกกับยาง

การใช้คลื่นอัลตราโซนิกในการวัดวัฏคาบในยางได้มีการรายงานครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1973 ตามสิทธิบัตรของ Pelofsky [11] โดยใช้คลื่นอัลตราโซนิกที่มีคลื่นความถี่ในช่วง 10-40 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่ระดับพลังงานสูงกว่า 100 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตรในการวัดวัฏคาบในยาง วิธีการเริ่มต้นด้วยการแช่ยางลงในสารละลายไฮโดรคาร์บอน จากนั้นจึงผ่านคลื่นอัลตราโซนิกเข้าไปในยางโดยใช้อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์แบบเพียโซอิเล็กทริก [13] เพื่อให้พัลส์ระหว่างคาร์บอน-กำมะถัน และกำมะถัน-กำมะถันถูกทำลาย และทำให้ยางสามารถเกิดการวัดวัฏคาบในยางได้ในที่สุด

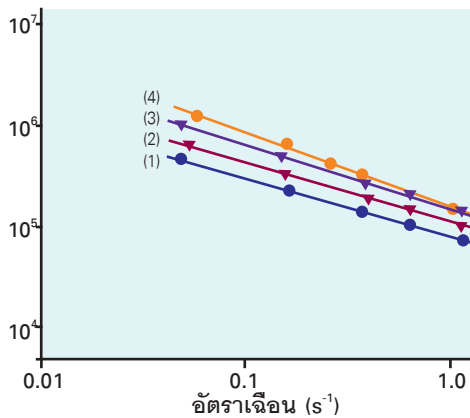
ต่อมาในปี ค.ศ. 1994 Isayev ได้จดสิทธิบัตร [14] เกี่ยวกับการวัดวัฏคาบในยางโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ร่วมกับอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์แบบเพียโซอิเล็กทริกที่มีค่าแอมพลิจูดเท่ากับ 96 ไมโครเมตรที่มีความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ และศึกษาผลของความถี่รอบในการหมุนของสกรูต่อประสิทธิภาพในการวัดวัฏคาบในยางไนไทรล์ไฮโดรเจนเนต (HNBR) ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 7 จากการทดลองพบว่า การปรับลดความเร็วรอบในการหมุนของสกรูจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการทำลายพันธะคาร์บอน-คาร์บอนสูงขึ้น ดังจะเห็นได้จากการลดลงอย่างรวดเร็วของค่าความหนืด ทั้งนี้เพราะการปรับลดระดับความเร็วรอบในการหมุนของสกรูจะทำให้ระยะเวลาที่ยางอยู่ในบริเวณของคลื่นอัลตราโซนิกยาวนานมากขึ้น อันจะส่งผลต่อเนื่องทำให้ระดับการดีโพลีเมอไรซ์สูงขึ้นตามไปด้วย เมื่อปรับค่าแอมพลิจูดของคลื่นอัลตราโซนิกลดลงเป็น 82 ไมโครเมตรก็ให้ผลเช่นเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 8

ความหนืด (Pa.S)



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอัตราเร็วของยาง HNBR ที่ผ่านการวัดคาบในยางที่แอมพลิจูด 96 ไมโครเมตร และความเร็วรอบของสกรูต่างๆ (1) 5 rpm (2) 15 rpm (3) 25 rpm (4) ยาง HNBR ที่ไม่ผ่านการวัดคาบในยาง

ความหนืด (Pa.S)



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอัตราเฉือนของยาง HNBR ที่ผ่านการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 82 ไมโครเมตร และความเร็วรอบของสกรูต่างๆ (1) 5 rpm (2) 15 rpm (3) 25 rpm (4) ยาง HNBR ที่ไม่ผ่านการวัลคาไนซ์

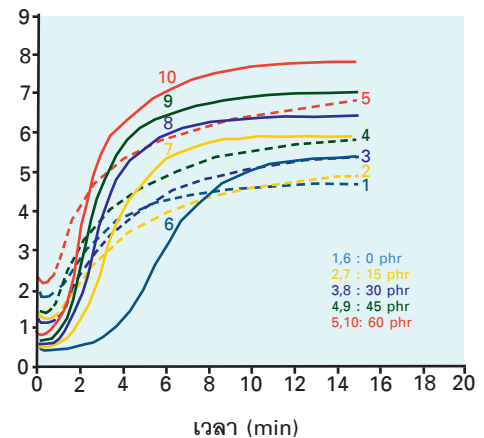
นอกจากนี้ Isayev [15] ยังได้ศึกษาผลของปริมาณเคมีต่อประสิทธิภาพในการวัลคาไนซ์ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนโมโนเมอร์ (EPDM) โดยใช้เครื่องเอกซทูดที่มีกำลังอุณหภูมิไว้ที่ 120°C และใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรูส่วนใหญ่เท่ากับ 50.8 มิลลิเมตร ยกเว้นสกรู ณ บริเวณก่อนที่จะถึงบริเวณที่มีการติดตั้งคลื่นอัลตราโซนิก เพื่อให้เกิดการวัลคาไนซ์ที่มีการปรับลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรูลดลงเหลือ 38.1 มิลลิเมตร ซึ่งการปรับลดขนาดของสกรูดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยให้ยางไหลเข้าสู่บริเวณที่ทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ได้ดียิ่งขึ้น โดยบริเวณที่เกิดการวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นอัลตราโซนิกมีอัตราการไหล 0.63 กรัมต่อวินาที ที่แอมพลิจูด 10 ไมโครเมตร

หลังจากการวัลคาไนซ์เรียบร้อยแล้ว นำยางที่ได้ไปผสมสารวัลคาไนซ์ตามสูตรที่แสดงในตารางที่ 3 และศึกษาสมบัติการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 160°C ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 9 จากรูปพบว่า การเพิ่มปริมาณเคมีส่งผลทำให้ค่าแรงบิดสูงสุดมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเสริมแรงของเคมีดำ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางที่ไม่ได้ผ่านการวัลคาไนซ์และยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์จะพบว่ายางที่ผ่านการวัลคาไนซ์จะมีค่าแรงบิดสูงสุดต่ำกว่ายางที่ไม่ได้ผ่านการวัลคาไนซ์

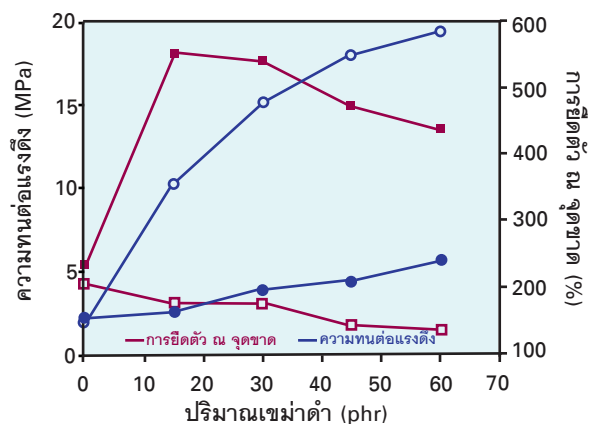
ตารางที่ 3 สูตรผสมเคมีของยาง EPDM ที่ผ่านการวัลคาไนซ์ และยาง EPDM ที่ไม่ผ่านการวัลคาไนซ์

สารเคมี	ปริมาณ (phr)
ซิงก์ออกไซด์	5.0
กรดสเตียริก	1.0
กำมะถัน	1.5
เทตระเมทิลไทูแรมไดซัลไฟด์ (TMTD)	1.0
เมอร์แคปโทเบนโซโทอะโซล (MBT)	0.5

แรงบิด (Nm)



รูปที่ 9 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยาง EPDM ที่ไม่ผ่านการวัลคาไนซ์ (เส้นทึบ, 6-10) และยาง EPDM ที่ผ่านการวัลคาไนซ์ (DEPDM) (เส้นประ, 1-5)



รูปที่ 10 ค่าความทนต่อแรงดึงและการยึดตัว ณ จุดขาดของยาง EPDM ที่ไม่ผ่านการวัลคาไนซ์ (สัญลักษณ์โปร่งใส) และยาง DEPDM (สัญลักษณ์ทึบ) ที่ปริมาณเคมีดำต่างๆ

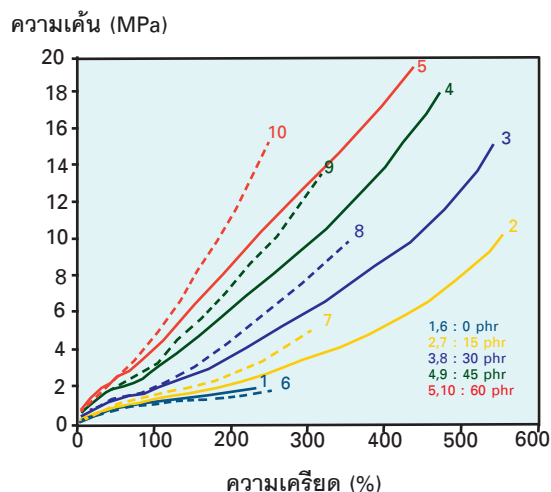
เมื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของยาง EPDM ทั้งที่ผ่านและไม่ได้ผ่านการดีวัลคาไนซ์ (รูปที่ 10 และตารางที่ 4) จะเห็นว่ายางที่เติมเขม่าดำ จะมีสมบัติเชิงกลสูงกว่ายางที่ไม่มีการเติมเขม่าดำทั้งในยางที่ผ่านและไม่ได้ผ่านการดีวัลคาไนซ์ ทั้งนี้เพราะเขม่าดำที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ คือ เขม่าดำเกรด N330 ซึ่งเป็นเกรดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคปฐมภูมิเล็กมากประมาณ 32 นาโนเมตร (มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง) เขม่าดำ จึงสามารถเสริมแรงให้แก่ยางได้ดี [16] ส่งผลทำให้สมบัติต่างๆ เช่น ความทนต่อแรงดึงและโมดูลัสมีค่าสูงขึ้น

ตารางที่ 4 สมบัติเชิงกลของยาง EPDM ทั้งที่ผ่านและไม่ได้ผ่านการดีวัลคาไนซ์

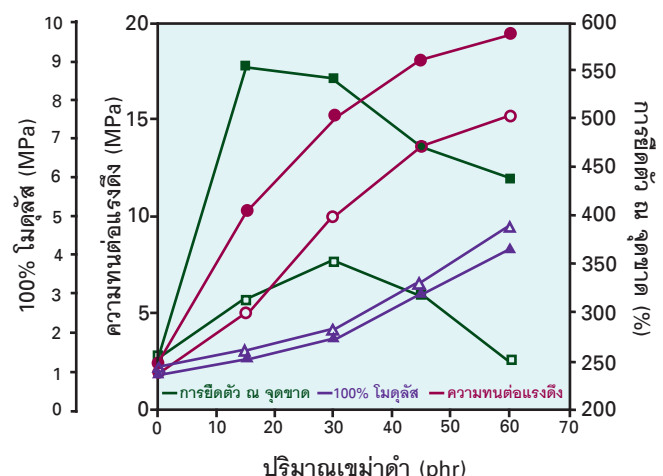
ตัวอย่าง	การดีวัลคาไนซ์				สมบัติเชิงกล			
	เขม่าดำ (phr)	ระยะห่าง* (mm)	แอมพลิจูด (μm)	ผลผลิต (g/s)	100% โมดูลัส (MPa)	ความทนต่อแรงดึง (MPa)	การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	พลังงานที่ใช้ในการสลายพันธะ (J)
ยาง EPDM	0	-	-	-	1.1	1.8	234	1.8
ยาง DEPDm	0	1.02	10	0.63	1.3	2.9	206	3.8
ยาง DEPDm	0	2.03	10	1.26	1.3	2.0	183	2.0
ยาง EPDM	30	-	-	-	1.8	15.1	541	36
ยาง DEPDm	30	1.02	10	0.63	2.1	4.5	176	3.8
ยาง DEPDm	30	2.03	10	1.26	2.7	4.4	146	3.8

* ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิก (ultrasonic horn) กับสกรู

เมื่อนำยาง EPDM กับยาง DEPDm ไปผสมกันในสัดส่วน 75 ต่อ 25 และศึกษาสมบัติเชิงกลของยางผสมเปรียบเทียบกับยาง EPDM ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 11 และ 12 จากรูปพบว่าเมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณเขม่าดำเท่ากัน ยาง EPDM จะมีค่าความทนต่อแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดสูงกว่ายางผสม และเมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้นความทนต่อแรงดึงและโมดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่งแล้วลดลงทั้งในยาง EPDM และยางผสม ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความสามารถในการยึดติดกันระหว่างยาง EPDM และยาง DEPDm ที่ไม่ดีเท่าที่ควร



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียด (Stress-Strain curves) ของยาง EPDM (1-5) และยางผสม DEPDm/EPDM ที่ 25/75 (6-10)



รูปที่ 12 สมบัติเชิงกลของยาง EPDM (สัญลักษณ์ทึบ) และยางผสม DEPDm/EPDM ที่ 25/75 (สัญลักษณ์โปร่ง) ที่ปริมาณเขม่าดำต่างๆ

สรุป

การรีไซเคิลเศษยางและยางล้อเก่าจะมีความสำคัญมากขึ้น เนื่องจากการลดการใช้ทรัพยากรยางของโลกและลดผลกระทบต่อของขยะยางต่อสิ่งแวดล้อม การผลิตยางรีไซเคิลจากผลิตภัณฑ์ยางใช้แล้ว เช่น ยางล้อ เป็นวิธีการรีไซเคิลยางวิธีหนึ่งที่มีการใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบันเนื่องจากยางรีไซเคิลผลิตโดยกระบวนการตีวัลคาไนซ์ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำลายพันธะเชื่อมโยงโมเลกุลของยาง ทำให้ยางรีไซเคิลสามารถไหลขึ้นรูปได้เหมือนยางที่ยังไม่ได้วัลคาไนซ์ เทคโนโลยีการตีวัลคาไนซ์ยางมีหลายวิธี เช่น การใช้ความร้อนร่วมกับสารรีไซเคิลหรือแรงเชิงกล การใช้สารดีลิงค์ การใช้คลื่นไมโครเวฟหรือคลื่นอัลตราโซนิก แต่เทคโนโลยีที่มีอยู่ในปัจจุบันก็ยังมียังจำกัดทั้งในเรื่องต้นทุนการผลิต คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ระยะเวลาการผลิต ตลอดจนสมบัติการไหลของยาง ซึ่งข้อจำกัดเหล่านี้ทำให้จำเป็นต้องพัฒนาเทคโนโลยีการตีวัลคาไนซ์ต่อไปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตให้สูงขึ้นและมีต้นทุนต่ำลง ซึ่งจะส่งผลทำให้โรงงานอุตสาหกรรมยางสามารถนำเทคโนโลยีดังกล่าวไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวางมากยิ่งขึ้น

ธีรรัตน์ ลากพุลธนอนันต์

การศึกษา: ปริญญาโท (เทคโนโลยีพอลิเมอร์)

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (วิทยาเขตปัตตานี)

สถานที่ทำงานปัจจุบัน: เจ้าหน้าที่สารสนเทศ

ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย มหาวิทยาลัยมหิดล

เอกสารอ้างอิง

1. Vega, B., Montero, L., Lincoln, S., Agullo, N. and S.Borros, *J. App. Pol. Sci.*, **108**, 1969, (2008)
2. Rajan, V.V., Dierkes, W.K., Joseph, R. and Noordermeer, J.W.M., *Prog. Polym. Sci.*, **31**, 811, (2006)
3. Manuel, H.J. and Dierkes, W., “Recycling of Rubber”, Rapra Technology Limited, 1997.
4. Integrated Waste Management Board., “Evaluation of waste tire devulcanization technologies”, CalRecovery Inc., California, 2004.
5. <http://rubberboard.org.in>
6. <http://th.wikipedia.org>
7. <http://www.school.net.th/library/create web/10000/technology/10000-811.html>
8. Mark, J.E., Erman, B. and Eirich, F.R., “The Science and Technology of Rubber” 3rd Edition, California, 665, 2005.
9. Novotny, D.S., et al., “Microwave devulcanization of rubber”, US patent 4104205, 1978.
10. <http://student.nu.ac.th/electronic/Part01/Ultrasonic.doc>
11. Pelofsky, A.H., “Rubber reclamation using ultrasonic energy”, US patent 3725314, 1973.
12. Sherri, B., “Breaking links: groups seeking to commercialize ultrasonic devulcanization process”, *Rubber & Plastics News*, 10, 1999.
13. Ruhman, A.A., et al., “Magnetostriiction-based ultrasound in rubber devulcanization and related processes”, US patent 6545060, 2003.
14. Isayev, A., et al., “Continuous ultrasonic devulcanization of vulcanized elastomers”, US patent 5284625, 1994.
15. Yun, J., Yashin, V.V. and Isayev, A.I., *J. App. Pol. Sci.*, **91**, 1646 (2004)
16. พงษ์ธร แซ่ฮุย. สารเคมีสำหรับยาง. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร: ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ, 2548.