

เทคโนโลยีการรีไซเคิลยาง

ดร.พชร รัชฎ์



1. บทนำ

ตั้งแต่มีการค้นพบการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติใน ปี ค.ศ. 1839 ของ Charles Goodyear การประยุกต์ใช้งานของยางธรรมชาติก็เริ่มมีความหลากหลายมากยิ่งขึ้น ต่อมาเมื่อประเทศเยอรมนีได้เริ่มพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตยางสังเคราะห์ขึ้นในช่วงหลังสงครามโลกครั้งที่ 1 เทคโนโลยีการผลิตยางสังเคราะห์ก็ได้รับการพัฒนาเรื่อยมาจนทำให้ผู้ผลิตในปัจจุบันสามารถผลิตยางสังเคราะห์ชนิดต่างๆ ที่มีสมบัติตรงตามความต้องการของผู้ใช้งาน ส่งผลทำให้ปริมาณการใช้ยางสังเคราะห์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามสภาวะเศรษฐกิจในยุคปัจจุบัน โดยอุตสาหกรรมที่มีปริมาณการใช้ยางสูงสุด คือ อุตสาหกรรมยานยนต์และชิ้นส่วนยานยนต์

แม้ว่าการวัลคาไนซ์ยางจะทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลและมีความยืดหยุ่นสูงขึ้น แต่ยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้วจะมีสมบัติเป็นเทอร์โมเซตที่ไม่สามารถนำกลับมาหลอมเพื่อขึ้นรูปใหม่ได้ ทำให้การรีไซเคิลหรือการนำผลิตภัณฑ์ยางกลับมาใช้ใหม่ทำได้ยาก อีกทั้งยางยังจัดเป็นวัสดุที่ย่อยสลายตามธรรมชาติได้ยากหรืออาจไม่ย่อยสลาย ดังนั้นขยะที่เกิดจากผลิตภัณฑ์ยางเก่าจึงสามารถก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมได้ หากไม่ได้รับการแก้ไขอย่างถูกวิธี ปัญหาที่เกิดจากขยะยางก็จะมีมากขึ้นตามปริมาณการใช้ยางที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ขยะที่เกิดจากผลิตภัณฑ์ยางเก่าแล้ว เศษยาง (scrap) หรือยางตายที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิต (ส่วนใหญ่จะมีปริมาณอยู่ในช่วงร้อยละ 3-15) ก็ถือเป็นปัญหาหลักอีกอย่างหนึ่งของผู้ประกอบการ เพราะการกำจัดขยะจากเศษยางทำให้ผู้ประกอบการส่วนใหญ่ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น อันจะส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้การพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ ที่สามารถนำขยะยางกลับมาใช้ใหม่จึงเป็นเรื่องที่มีความสำคัญและได้รับความสนใจจากทั้งผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมยางเองและจากนักอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมทั่วโลก

2. วิธีการทั่วไปที่ใช้ในการกำจัดขยะยาง

โดยหลักๆ แล้วการกำจัดขยะยางอย่างถูกวิธี ต้องเป็นการทำให้ขยะยางนั้นกลับมามีประโยชน์หรือใช้งานได้ใหม่อีกครั้งไม่ว่าจะอยู่ในรูปของผลิตภัณฑ์เดิมหรือผลิตภัณฑ์ใหม่ก็ตาม คนส่วนใหญ่จะเรียกขั้นตอนของการนำขยะกลับมาใช้ใหม่นี้ว่า การรีไซเคิล ในทางปฏิบัติแล้วการรีไซเคิลขยะยางสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมบางประเภท การนำกลับมาประยุกต์ใช้ใหม่ (reuse) และการนำไปผ่านกระบวนการเพื่อแปรรูปหรือเพื่อให้ได้ส่วนประกอบดั้งเดิมของผลิตภัณฑ์เก่าที่นำกลับมาใช้ใหม่ ตัวอย่างของการนำกลับมาใช้ใหม่ เช่น การนำโครงยางล้อที่ผ่านการใช้งานแล้วแต่ยังคงมีสภาพดีไปหล่อดอกเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ หรือการนำยางล้อเก่าไปประยุกต์ทำเฟอร์นิเจอร์ เหล่านี้เป็นต้น อย่างไรก็ตามเนื่องจากเหตุผลเรื่องความปลอดภัย การหล่อดอกยางล้อก็ยังคงมีข้อจำกัดในเรื่องจำนวนครั้งที่สามารถนำโครงยางเก่าไปหล่อดอกได้ ยางเหล่านี้ก็จะยังคงกลายเป็นขยะอยู่ดี ด้วยเหตุนี้การนำผลิตภัณฑ์เก่ามาใช้ใหม่จึงเป็นเพียงการเลื่อนปัญหาออกไปในอนาคตเท่านั้นเองเพราะคุณภาพที่ด้อยลงไปแล้วๆ ตามจำนวนครั้งของการนำกลับมาใช้ใหม่จะทำให้ผลิตภัณฑ์ยางนั้นไม่เป็นที่ยอมรับในที่สุด ส่วนการนำขยะยางกลับไปแปรรูปใหม่นั้นเป็นวิธีที่ได้ค่อนข้างยากเพราะต้องทำลายโครงสร้างตาข่าย 3 มิติที่เกิดจากการวัลคาไนซ์ของโมเลกุลยางก่อน ซึ่งการทำลายโครงสร้างตาข่ายดังกล่าวแม้ว่าจะทำให้ผู้ประกอบการสามารถนำยางไปแปรรูปหรือขึ้นรูปใหม่ได้อีกครั้ง แต่ก็ต้องทราบด้วยว่ายางที่ได้จากการรีไซเคิลนั้นส่วนใหญ่จะมีสมบัติที่ด้อยกว่ายางใหม่ค่อนข้างมาก วิธีการกำจัดขยะยางในปัจจุบันมี 5 วิธี ดังต่อไปนี้

2.1 การนำไปถมที่

การนำขยะยางไปถมที่ถือเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการกำจัดขยะยางในอดีต เพราะเมื่อประมาณ 30 ปีที่แล้ว ขยะยางประมาณกว่าร้อยละ 70 ถูกนำไปกำจัดโดยการถมที่ ปัจจุบันวิธีการถมที่ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากเป็นวิธีที่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมเพราะสารเคมีที่มีอยู่ในยางอาจถูกน้ำชะลงสู่ดินหรือแหล่งน้ำที่อยู่บริเวณใกล้เคียง ซึ่งสารเคมีเหล่านี้ส่วนใหญ่เป็นสารพิษ ดังนั้นการปลดปล่อยสารเคมีดังกล่าวออกสู่สิ่งแวดล้อมอาจส่งผลให้แบคทีเรียที่มีประโยชน์หรือสิ่งมีชีวิตเล็กๆ ที่อยู่ในน้ำหรือดินตายได้ นอกจากนี้การนำขยะยางบางประเภทที่สามารถเก็บกักน้ำได้เมื่อฝนตก เช่น ยางล้อเก่าไปถมที่อาจก่อให้เกิดปัญหาอื่น ๆ ตามมา เพราะยางล้อเก่าเหล่านี้อาจเป็นแหล่งเพาะพันธุ์ยุงหรือเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของหนูอันเป็นสาเหตุทำให้โรคติดต่อระบาดได้ ด้วยเหตุนี้หลายๆ ประเทศในทวีปยุโรปรวมถึงสหรัฐอเมริกาจึงเริ่มออกกฎหมายห้ามนำยางล้อเก่าไปถมที่อีกต่อไป

2.2 การนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงาน

ยางเป็นโพลิเมอร์ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน โมเลกุลของยางมีอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ยางจึงจัดเป็นสารอินทรีย์ที่สามารถนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานหรือแหล่งเชื้อเพลิงได้ จากข้อมูลวิจัยพบว่า ยางล้อ 1 กิโลกรัม สามารถให้พลังงานได้สูงใกล้เคียงกับน้ำมันปิโตรเลียม คือ ประมาณ 32.6 เมกะจูล ในขณะที่ถ่านหินทั่วไปสามารถให้พลังงานได้เพียงแค่ว่า 18.6-27.9 เมกะจูล เท่านั้น [1] นอกจากนี้ถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้ยังมีโลหะหนักในปริมาณที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงอีกด้วย ด้วยเหตุนี้เชื้อเพลิงที่ได้จากยางล้อ (tire derived fuel; TDF) จึงได้มีการนำไปใช้อย่างกว้างขวางทั้งในอุตสาหกรรมซีเมนต์ อุตสาหกรรมกระดาษ รวมถึงอุตสาหกรรมการผลิตกระแสไฟฟ้า ปัจจุบันเทคโนโลยีการนำขยะยางไปใช้เป็นเชื้อเพลิงกำลังได้รับความสนใจจากนักวิจัยและผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมมาก อย่างไรก็ตามเนื่องจากการเผาไหม้ของเศษยางอาจก่อให้เกิดก๊าซพิษบางชนิด เช่น ไดออกซิน (dioxin) รวมถึงออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) และกำมะถัน (SO_x) ดังนั้นเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นจึงต้องเป็นเทคโนโลยีที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม คือ ต้องไม่มีการปลดปล่อยสารพิษออกสู่ชั้นบรรยากาศ

2.3 การรีไซเคิลทางเคมี

การรีไซเคิลทางเคมี หมายถึง การนำขยะหรือเศษยางซึ่งเป็นโพลิเมอร์สายโซ่ยาวไปผ่านกระบวนการทางเคมีเพื่อทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางเกิดการแตกตัวกลายเป็นสายโซ่สั้นๆ ทำให้ยางที่เคยมีน้ำหนักโมเลกุลสูง (อยู่ในสภาวะของแข็ง) กลายเป็นโมโนเมอร์ (monomer) หรือโอลิโกเมอร์ (oligomer) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำและอยู่ในสภาวะของเหลว



รูปที่ 1 ตัวอย่างแสดงการสลายตัวของโพลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อน

กระบวนการทางเคมีที่นิยมใช้ในการรีไซเคิลยางก็คือ ไพโรไลซิส (pyrolysis) หรือการใช้ความร้อนเพื่อทำให้โมเลกุลยางเกิดการแตกตัวกลายเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กและสั้นลงนั่นเอง ในการทำไพโรไลซิส ยางจะได้รับความร้อนในช่วง 500-700°C ภายใต้สภาวะที่ปราศจากอากาศหรือมีอากาศเพียงเล็กน้อย จนกระทั่งโมเลกุลยางเกิดการแตกตัวกลายเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กๆ จำนวนมาก (อาจมีสารประกอบอื่นๆ เช่น แอลกอฮอล์ ปนอยู่ด้วยทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของยาง) เนื่องจากการทำไพโรไลซิสต้องใช้อุณหภูมิที่สูงและต้องทำภายใต้ระบบสุญญากาศ (หรือมีอากาศเพียงเล็กน้อย) จึงทำให้การทำไพโรไลซิสมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง ปัจจุบันได้มีการจดสิทธิบัตรจำนวนมากเกี่ยวกับการนำยางล้อเก่ามาทำไพโรไลซิสเพื่อให้ได้เป็นน้ำมันดิบ โมโนเมอร์ และเขม่าดำ [2-4] ข้อเสียหลักของการรีไซเคิลทางเคมีก็คือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำไพโรไลซิส (เช่น น้ำมัน ก๊าซ และเขม่าดำ) มักมีมูลค่าต่ำไม่สามารถแข่งขันกับผลิตภัณฑ์ใหม่ที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีโดยตรงได้ แต่ปัจจุบันก็ได้มีการศึกษามากขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว

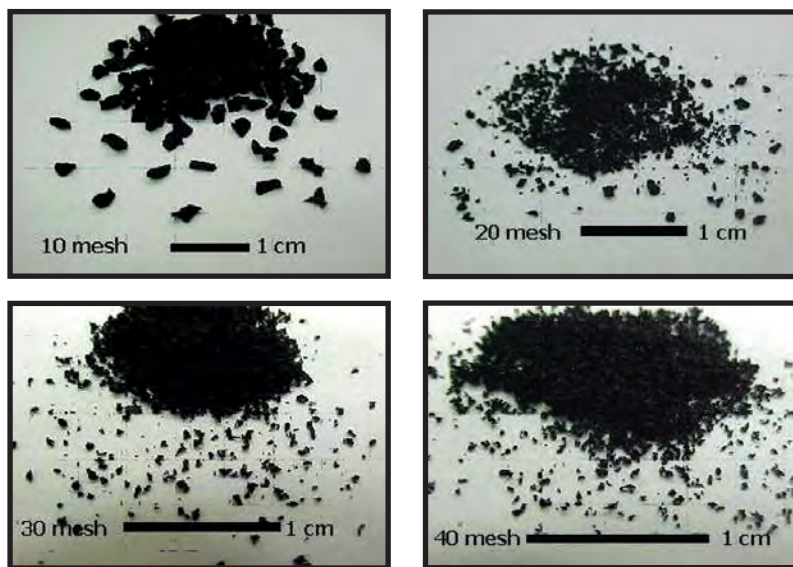
2.4 การแปรรูปให้เป็นยางผง

การรีไซเคิลโดยการแปรรูปขยะยางให้เป็นยางผงเพื่อนำไปใช้งานในหลากหลายรูปแบบถือเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับกันในวงกว้าง เพราะวิธีการนี้สามารถทำได้ค่อนข้างง่ายและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากขนาดและรูปร่างของยางผงขึ้นอยู่กับเทคนิคที่ใช้ในการบด ดังนั้นหัวใจสำคัญของการรีไซเคิลจึงอยู่ที่เทคนิคการเตรียมยางผงซึ่งต้องเป็นเทคนิคที่ดีและมีต้นทุนต่ำ

การผลิตยางผงสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การบดที่อุณหภูมิต่ำ (cryogenic grinding) การบดที่อุณหภูมิห้อง (ambient grinding) หรือการบดแบบเปียกที่อุณหภูมิห้อง (wet ambient grinding) ซึ่งวิธีการบดและการคัดขนาดด้วยการร่อนผ่านตะแกรง (sieving) จะมีผลค่อนข้างมากต่อขนาดอนุภาค โครงสร้าง รวมถึงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของยางผงที่ได้ ตารางที่ 1 แสดงการแบ่งกลุ่มของยางผงตามขนาดอนุภาคและการนำไปประยุกต์ใช้งานของยางผง

ตารางที่ 1 การแบ่งกลุ่มและตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานของยางผง

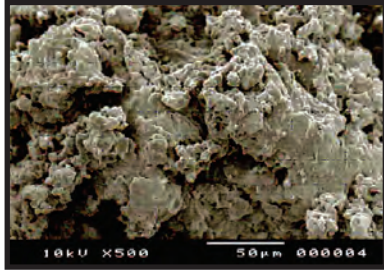
กลุ่มของยางผง	ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	ตัวอย่างการใช้งาน
ขนาดใหญ่	500-1,400	บล็อกรยาง ผ่นยางปูพื้น และวัสดุดิบในการผลิตยางรีเคลม
ขนาดเล็ก	300-500	
ขนาดละเอียด	75-300	ส่วนประกอบของสูตรในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ท่อน้ำ กระถาง ผ่นยางปูพื้น รวมถึงการนำไปผสมกับยางมะตอยเพื่อปูพื้นถนนหรือบ่อน้ำ
ขนาดละเอียดมาก	ต่ำกว่า 75	ส่วนประกอบของสูตรในการผลิตยางล้อ (ขนาดต้องน้อยกว่า 20 ไมโครเมตร)



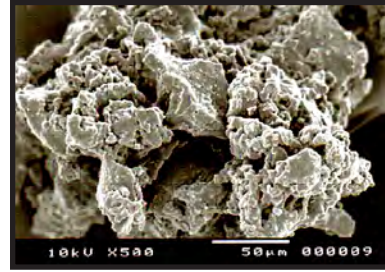
รูปที่ 2 ยางผงที่ได้จากการร่อนผ่านตะแกรงขนาดต่างๆ

2.4.1 การบดที่อุณหภูมิห้อง

การบดที่อุณหภูมิห้อง คือ การบดเศษชาให้เป็นชิ้นเล็กๆ ที่อุณหภูมิห้องโดยใช้เครื่องมือบดชนิดต่างๆ เช่น เครื่องบดที่มีการบดหลายหรือเซาระ่องบนลูกกลิ้ง (cracker mill) เครื่องแกรนูลเลเตอร์ (granulator) เครื่องพัลเวอร์ไรเซอร์ (pulverizer) รวมถึงเครื่องบดแบบ 2 ลูกกลิ้ง (two-roll mill) ยางผงที่ได้จากการบดด้วยวิธีนี้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคอยู่ในช่วง 0.5-1.5 มิลลิเมตร (ไม่เกิน 40 เมช) และมีลักษณะพื้นผิวที่ค่อนข้างขรุขระ ดังแสดงในรูปที่ 3 ข้อเสียหลักของวิธีนี้ก็คือ ต้องใช้พลังงานในการบดค่อนข้างมาก อีกทั้งยังมีความร้อน ผุน และมลภาวะทางเสียงในกระบวนการบดอีกด้วย นอกจากนี้หากไม่มีระบบระบายความร้อนที่ดีเพียงพอในระหว่างการบด ความร้อนที่สูงมากเกินไปอาจทำให้ยางผงเกิดการเสื่อมสภาพได้



(ก)



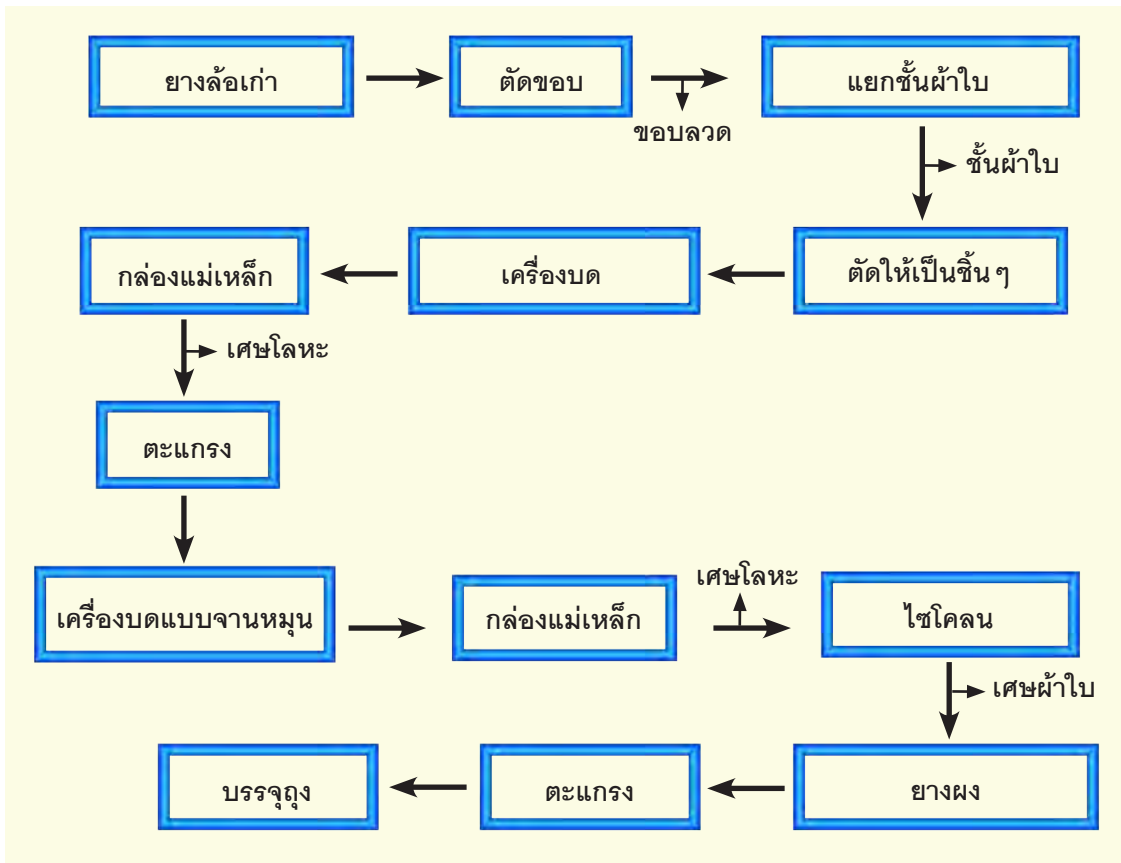
(ข)

รูปที่ 3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของยางผงที่ได้จากการบดที่อุณหภูมิห้อง (ก) ขนาด 20 เมช และ (ข) ขนาด 40 เมช

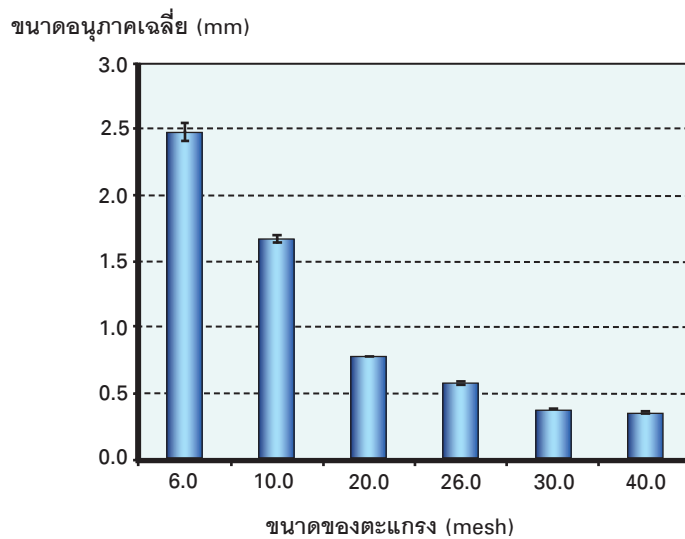
รูปที่ 4 เป็นแผนผังแสดงตัวอย่างการบดยางล้อรถบรรทุกให้เป็นยางผงโดยใช้วิธีการบดที่อุณหภูมิห้อง ในภาพรวมการบดยางล้อสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนหลักๆ คือ

- ขั้นตอนที่ 1 นำยางล้อไปตัดขอบ ลอกชั้นผ้าใบเสริมแรงออก และตัดให้เป็นชิ้นๆ
- ขั้นตอนที่ 2 นำเศษชิ้นยางไปบดด้วยเครื่องบดที่มีการเซาระ่องบนลูกกลิ้งเพื่อลดขนาดของชิ้นยาง บดโดยผ่านเศษยางไปบนลูกกลิ้งหลายรอบจนกว่าจะได้ชิ้นยางที่มีขนาดเล็กตามต้องการ ระหว่างการบดแต่ละรอบอาจมีการติดตั้งระบบแม่เหล็กเพื่อกำจัดเศษโลหะที่อาจหลงเหลืออยู่ในเนื้อยาง
- ขั้นตอนที่ 3 ใช้เครื่องบดแบบจานหมุน (grinding disc) เพื่อบดยางให้มีขนาดเล็กจนกลายเป็นยางผงที่มีขนาดต่างๆ ตามต้องการ ในขั้นตอนนี้อาจมีการติดตั้งระบบแม่เหล็กเพื่อกำจัดเศษโลหะที่อาจยังคงหลงเหลืออยู่ให้หมดไป จากนั้นจึงใช้ระบบไซโคลนเพื่อแยกยางผงและเศษผ้าใบออกจากกัน
- ขั้นตอนที่ 4 ยางผงที่ได้จะถูกคัดเกรดโดยการร่อนผ่านตะแกรงคัดขนาดและบรรจุเพื่อจำหน่ายต่อไป





รูปที่ 4 แผนผังการเตรียมยางพองด้วยวิธีการบดที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 5 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของยางพองที่ร้อนผ่านตะแกรงขนาดต่างๆ

2.4.2 การบดที่อุณหภูมิต่ำ

การบดด้วยวิธีนี้เริ่มต้นด้วยการใช้ในโทรเจนเหลวเพื่อทำให้เศษยางเย็นตัวลงจนมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature; T_g) ซึ่งที่อุณหภูมิต่ำมากเช่นนี้ ยางจะเปลี่ยนสภาพจากที่เคยอ่อนและมีความยืดหยุ่นสูง กลายเป็นวัสดุที่แข็งเปราะคล้ายแก้ว จากนั้นจึงบดอย่างด้วยแรงเชิงกลโดยใช้เครื่องมือที่ทำให้เกิดอัตราเร็วของความเครียดสูงๆ (high strain rate) เช่น เครื่องบดแบบกระแทกทั้งแบบที่มีค้อนแบบแกว่งและแบบยึดติดกับที่ (swing or fixed-hammer impact mills) [5] ข้อดีหลักๆ ของวิธีนี้ก็คือ ใช้กำลังไฟฟ้าในการบดต่ำและสามารถแยกผ้าใบหรือโลหะออกจากยางได้ง่าย (ในกรณีของการบดยางล้อรถ) นอกจากนี้การบดที่อุณหภูมิต่ำยังช่วยลดโอกาสที่ยางผงจะเกิดการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือจากความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการบดได้อีกด้วย การบดด้วยวิธีนี้ถือเป็นวิธีการบดที่มีต้นทุนค่อนข้างสูงเนื่องจากค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่จะอยู่ที่ปริมาณการใช้ในโทรเจนเหลวซึ่งมีราคาแพง อย่างไรก็ตามในกรณีที่ต้องการผลิตยางผงที่มีความละเอียดสูงๆ การบดด้วยวิธีนี้จะมีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าวิธีการบดที่อุณหภูมิห้อง นอกจากนี้ยังมีการรายงานว่าการบดด้วยวิธีนี้ทำให้ได้ยางผงที่มีพื้นผิวเรียบและมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่ค่อนข้างแคบอีกด้วย [6]

มีรายงานว่า การผสมยางผงที่ได้จากการบดด้วยวิธีนี้ลงไป ในสูตรยางล้อรถโดยสารและยางล้อรถบรรทุกในปริมาณเล็กน้อย (5-10 phr) จะทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำลงโดยที่ไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการใช้งานของยางล้อ สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องขึ้นรูปด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูชัน แม้ว่าจะสามารถเติมยางผงที่ได้จากการบดด้วยวิธีนี้ลงไปได้ด้วยเช่นกัน (ยางผงจะช่วยลดปัญหาฟองอากาศและทำให้ยางที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูชันมีการบวมตัวต่ำ) แต่ผู้ประกอบการไม่ควรเติมยางผงลงไป ในปริมาณที่สูงกว่าร้อยละ 5 ของเนื้อยางใหม่และยางผงที่ใช้ต้องมีขนาดเล็กกว่า 100 ไมครอน ไมเช่นนั้นอาจก่อให้เกิดผลเสียต่อความสวยงามของผลิตภัณฑ์ได้ [7]

2.4.3 การบดแบบเปียกที่อุณหภูมิห้อง

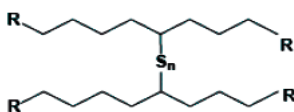
เทคนิคนี้จะมีหลักการเช่นเดียวกับเทคนิคการบดที่อุณหภูมิห้อง ยกเว้นการบดจะถูกกระทำภายใต้ตัวกลางที่เป็นของเหลว โดยเริ่มต้นด้วยการนำยางผงที่มีขนาดใหญ่ไปผสมกับของเหลว เช่น น้ำ จากนั้นจึงบดด้วยวงล้อบด 2 อันที่อยู่ใกล้กันมากๆ ขนาดของอนุภาคยางผงจะถูกควบคุมโดยระยะเวลาที่ใช้ในการบด วิธีนี้เหมาะสำหรับใช้ในการผลิตยางผงที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 400-500 ไมครอน แม้ว่ายางผงที่ได้จากการบดด้วยวิธีนี้จะเหมาะกับการนำไปใช้ในสูตรยางที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูชันหรือเครื่องคาลเลนเดอร์เพราะทำให้ยางที่ขึ้นรูปได้มีพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบ แต่ว่าการบดด้วยวิธีนี้ก็ยังมีต้นทุนที่ค่อนข้างสูง

2.4.4 การบดด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูชัน

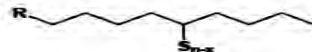
วิธีนี้เป็นการบดยางโดยใช้แรงเฉือนจากเครื่องเอ็กซ์ทรูชัน โดยตั้งอุณหภูมิในช่วงต้นของบารเรลให้สูง (100-200°C) เพื่อทำให้ยางนิ่มและตั้งอุณหภูมิในช่วงท้ายของบารเรลให้ต่ำ (30-80°C) เพื่อทำให้เกิดแรงเฉือนสูงเพียงพอที่จะบดยางให้มีขนาดเล็กลง วิธีนี้ได้จดสิทธิบัตรภายใต้ชื่อว่า “การเอ็กซ์ทรูชันแบบเฉือนในสถานะของแข็ง (solid state shear extrusion; SSSE)” [8] การนำยางไปบดด้วยวิธีนี้หลายๆ ครั้ง สามารถทำให้ยางผงมีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก คือ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 50-200 ไมครอนเมตร และยางผงที่ได้จะมีพื้นผิวที่ค่อนข้างหยาบ จากการวิเคราะห์ทางเคมีพบว่า การบดในเครื่องเอ็กซ์ทรูชันดังกล่าว นอกจากจะทำให้ยางมีขนาดอนุภาคเล็กกลงแล้ว ยังทำให้พันธะการเชื่อมโยงของโมเลกุลยางบางส่วนถูกทำลายได้ด้วย

2.5 การรีไซเคิล

การรีไซเคิล หมายถึง กระบวนการเปลี่ยนยางเก่าที่มีโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ (เทอร์โมเซต) และไม่สามารถละลายหรือหลอมเหลวเพื่อขึ้นรูปใหม่ได้ไปเป็นยางที่มีสมบัติแบบเทอร์โมพลาสติก คือ นิ่ม มีสมบัติเหนียวติดกัน สามารถไหลและขึ้นรูปใหม่ได้ กล่าวคือ ทำให้เกิดการตัดพันธะเชื่อมโยงโมเลกุลของยาง ดังแสดงในรูปที่ 6 นอกจากนี้ยางรีไซเคิลยังสามารถเกิดการวัลคาไนซ์ได้เหมือนเช่นในกรณีของยางดิบหรือยางคอมพาวด์ทั่วไป การรีไซเคิลด้วยวิธีนี้นอกจากจะช่วยลดปัญหาขยะยางแล้ว ยังเป็นการช่วยประหยัดทรัพยากรปิโตรเคมีอันมีค่าของโลกอีกด้วย



(ก) ก่อนการรีไซเคิล



(ข) หลังการรีไซเคิล

กระบวนการรีไซเคิลแบบดั้งเดิมประกอบด้วยการบดหรือลดขนาดเศษยางให้เป็นยางผงก่อนโดยใช้วิธีการบดแบบต่างๆ ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น จากนั้นจึงนำยางผงไปผสมกับน้ำมันและสารเคมีที่เรียกว่าสารรีไซเคิลพร้อมทั้งให้ความร้อน (200-280°C) และความดัน โดยสารรีไซเคิลที่เติมลงไปจะเข้าไปเร่งกระบวนการทำลายพันธะการเชื่อมโยงที่เกิดจากกำมะถัน ทำให้ได้ยางรีไซเคิลที่มีลักษณะนิ่ม สามารถไหลและขึ้นรูปใหม่ได้อีกครั้ง ตัวอย่างที่สำคัญของสารรีไซเคิลที่มีจำหน่ายเชิงการค้า ได้แก่ ไดไซลีนไดซัลไฟด์ (dixylene disulfide) ไดอัลลิลไดซัลไฟด์ (diallyl disulfide) และไดเอริลไดซัลไฟด์ (diaryl disulfide) ในเชิงเทคนิคแล้ว เราเรียกปฏิกิริยาการทำลายพันธะการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลนี้ว่า ปฏิกริยาดีวัลคาไนเซชัน (devulcanization) หรือปฏิกริยาดีซัลฟูไรเซชัน (desulfurization) ซึ่งเป็นปฏิกริยาที่ย้อนกลับหรือส่งผลตรงกันข้ามกับปฏิกริยาวัลคาไนเซชัน (vulcanization)

นอกจากกระบวนการดังกล่าวข้างต้นแล้ว ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการรีไซเคิลขึ้นมาใหม่โดยการใช้สารเคมีที่มีชื่อทางการค้าว่า ดีลิงค์ (delink) หรือฟรีลิงเกอร์ (freelinker) เมื่อนำสารเคมีเหล่านี้ไปผสมกับยางผงที่มีขนาดในช่วง 20-40 เมช และให้แรงเฉือนโดยใช้เครื่องมือทัวปที่มีอยู่ในอุตสาหกรรมยาง เช่น เครื่องผสมระบบปิด เครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง หรือเครื่องเอกซ์ทรูดแบบเกลียวหนอนคู่ สารเคมีเหล่านี้จะเข้าไปทำลายพันธะระหว่างกำมะถันกำมะถัน (S-S bond) ที่มีอยู่ในยางทำให้โครงสร้างตาข่าย 3 มิติของยางถูกทำลาย

ข้อดีหลักของการใช้สารเคมีเหล่านี้ก็คือ

- การรีไซเคิลสามารถเกิดขึ้นได้แม้ที่อุณหภูมิต่ำ
- การให้แรงเฉือนกับยางผงสามารถทำได้ง่ายโดยใช้เครื่องมือทัวปที่มีอยู่ภายในโรงงาน
- การดีวัลคาไนซ์สามารถเกิดได้ค่อนข้างเร็ว (อาจใช้ระยะเวลาไม่ถึง 10 นาที ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของยางและชนิดของเครื่องมือที่ใช้ในการรีไซเคิล)
- การรีไซเคิลสามารถเกิดขึ้นได้โดยใช้สารเคมีเหล่านี้ในปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (≥ 2 ส่วนโดยน้ำหนักของยางผง)

อย่างไรก็ดีเนื่องจากดีลิงค์หรือฟรีลิงเกอร์จะเข้าไปทำลายพันธะการเชื่อมโยงที่เกิดจากกำมะถันเท่านั้น ยางผงที่จะนำมารีไซเคิลโดยใช้สารเคมีเหล่านี้ได้จะต้องเป็นยางผงที่ได้รับการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันเท่านั้น หลังจากทีรีไซเคิลแล้ว หากยางรีไซเคิลที่มีความหนืดที่สูงมากก็สามารถเติมยางดิบและกรดสเตียริกลงไป ในยางรีไซเคิลในปริมาณเล็กน้อย (2-5 ส่วนโดยน้ำหนัก) เพื่อช่วยทำให้ยางรีไซเคิลมีสมบัติในกระบวนการผลิตที่ดีขึ้น

แม้ว่ายางรีไซเคิลจะสามารถกลับมาไหลและขึ้นรูปใหม่ได้เหมือนเช่นยางคอมพาวด์ทัวป แต่เนื่องจากยางรีไซเคิลได้ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง (โดยเฉพาะในกรณีของการใช้วิธีการรีไซเคิลแบบดั้งเดิม) ดังนั้นยางรีไซเคิลจึงมีสมบัติเชิงกลที่ค่อนข้างต่ำ ด้วยเหตุนี้ยางรีไซเคิลจึงมักถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการสมบัติเชิงกลที่ดีมากนักหรือนำยางรีไซเคิลไปผสมกับยางใหม่เพื่อลดต้นทุนในการผลิต ปัจจุบันมีการนำยางรีไซเคิลไปใช้เพื่อลดต้นทุนการผลิตในอุตสาหกรรมต่างๆ มาก เช่น อุตสาหกรรมยางล้อ อุตสาหกรรมการผลิตสายพานลำเลียง อุตสาหกรรมรองเท้า รวมถึงอุตสาหกรรมท่ออย่าง แม้ว่าการเติมยางรีไซเคิลจะส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์มีสมบัติเชิงกลด้อยลง แต่ยางรีไซเคิลก็ส่งผลดีบางประการต่อกระบวนการผลิต เช่น ช่วยลดฟองอากาศในยางคอมพาวด์ (air entrapment) ลดความหยุ่นหนืด (nerve) ลดความเสี่ยงต่อการบิดเบี้ยวหรือเสียรูป (distortion) ของเอกซ์ทรูเดเตอร์ระหว่างการวัลคาไนซ์ และการบวมตัวหลังผ่านตาย (die swell)

3. แนวโน้มการพัฒนาเทคโนโลยีการรีไซเคิล

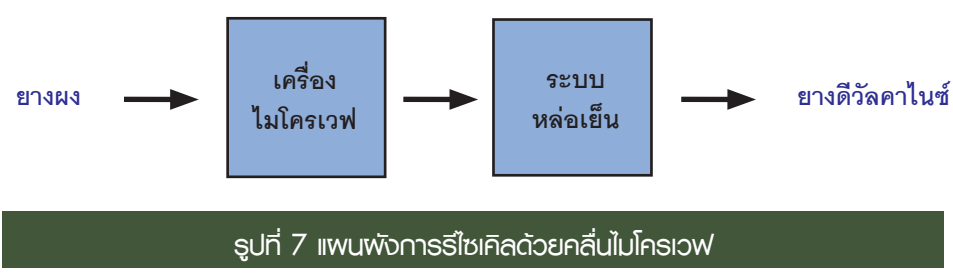
นอกจากการรีไซเคิลยางด้วยวิธีการต่างๆ ที่กล่าวมาแล้ว ปัจจุบันได้มีการนำเอาพลังงานรูปแบบต่างๆ มาประยุกต์ใช้ในการรีไซเคิลยางด้วย เช่น พลังงานจากคลื่นความถี่สูงที่เรียกว่า คลื่นไมโครเวฟ หรือพลังงานจากคลื่นเสียงอัลตราโซนิก

3.1 การรีไซเคิลด้วยคลื่นไมโครเวฟ

เป็นที่ทราบกันดีว่าเมื่อยางได้รับคลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่สูง (915 และ 2,450 เมกะเฮิรตซ์) คลื่นไมโครเวฟจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า หากโมเลกุลของยางมีความเป็นขั้วสนามแม่เหล็กไฟฟ้างดังกล่าวก็จะเหนี่ยวนำทำให้โมเลกุลเกิดการเคลื่อนที่หรือหมุนตัวเพื่อให้ประจุที่มีอยู่ในโมเลกุลเกิดการจัดเรียงตัวตามทิศทางของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แกว่งไป-มาด้วยความถี่ที่สูงมาก ดังนั้นโมเลกุลยางจึงเกิดการเคลื่อนที่หรือหมุนตัวด้วยความถี่ที่สูงมากอยู่ตลอดเวลา ส่งผลทำให้อุณหภูมิของยางเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากการเสียดสีของโมเลกุล จากหลักการนี้นักเทคโนโลยีจึงได้ศึกษาเพื่อนำคลื่นไมโครเวฟไปประยุกต์ใช้ในการรีไซเคิลเศษยางให้กลายเป็นวัสดุที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่หรือนำมาวัลคาไนซ์ใหม่ได้



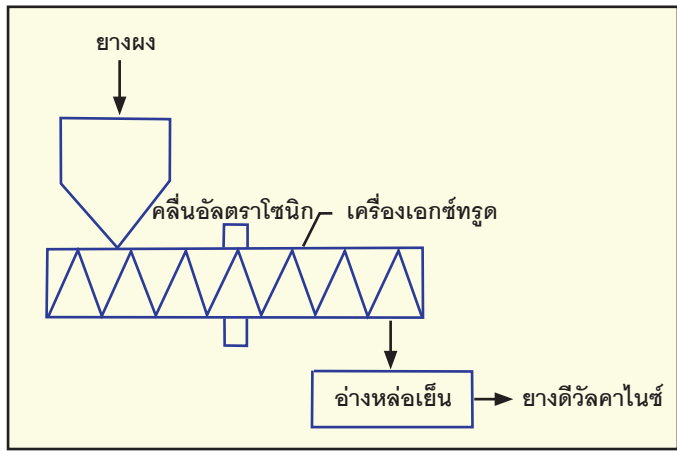
เทคนิคนี้อาศัยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟที่มีการควบคุมความถี่และระดับพลังงานให้มีค่าสูงเพียงพอเพื่อทำให้คุณสมบัติของยางสูงขึ้นจนสามารถทำลายพันธะการเชื่อมโยงภายในโมเลกุลยาง (ทำให้ยางเกิดการดีวัลคาไนซ์) วิธีนี้ถือเป็นวิธีที่มีต้นทุนต่ำและมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสูงเพราะเป็นวิธีที่สามารถนำเอาเศษยางหรือผลิตภัณฑ์ยางเก่าไปแปรรูปให้เป็นผลิตภัณฑ์ชนิดเดิมได้ ทั้งนี้เพราะการรีไซเคิลไม่ได้ส่งผลทำให้สมบัติของยางเปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญ โดยทั่วไปคลื่นไมโครเวฟที่ใช้จะก่อให้เกิดพลังงานสูงเพียงพอที่จะทำให้เกิดการดีวัลคาไนซ์ นั่นคือ สามารถทำลายพันธะการเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นภายในยาง แต่พลังงานที่ให้ก็ยังไม่สูงเพียงพอที่จะทำให้เกิดการทำลายพันธะของโมเลกุลบนสายโซ่หลักได้ เทคนิคนี้จะใช้ได้ดีสำหรับการรีไซเคิลยางที่วัลคาไนซ์โดยใช้กำมะถันและสามารถตอบสนองต่อคลื่นไมโครเวฟได้ดีเพราะคุณสมบัติที่ทำให้ยางเกิดการดีวัลคาไนซ์ส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 180-350°C ทั้งนี้หลังจากการดีวัลคาไนซ์แล้ว จำเป็นต้องลดอุณหภูมิของยางลงอย่างรวดเร็วเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเสื่อมสภาพจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน



รูปที่ 7 แผนผังการรีไซเคิลด้วยคลื่นไมโครเวฟ

3.2 การรีไซเคิลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

การรีไซเคิลยางโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิกได้ถูกริเริ่มขึ้นในปี ค.ศ. 1973 โดย Pelofsky ได้ทดลองนำคลื่นอัลตราโซนิกไปใช้ในการทำให้ยางผงเกิดการดีวัลคาไนซ์ [9] การรีไซเคิลด้วยวิธีนี้เริ่มต้นด้วยการนำเศษยางไปแช่ลงในของเหลวและผ่านคลื่นอัลตราโซนิกเข้าไปเพื่อทำให้ก้อนยางเกิดการแตกออกและละลายเข้าไปในของเหลว การรีไซเคิลยางส่วนใหญ่จะใช้คลื่นอัลตราโซนิกที่มีความถี่สูงประมาณ 20-50 กิโลเฮิรตซ์ และใช้ความเข้มของพลังงานสูงกว่า 1,000 วัตต์ ได้มีการคาดการณ์ไว้ว่าการผ่านคลื่นอัลตราโซนิกเข้าไปในยางอย่างต่อเนื่องจะทำให้พันธะระหว่างคาร์บอน-กำมะถัน (C-S bond) และกำมะถัน-กำมะถัน (S-S bond) ที่มีอยู่ในยางถูกทำลายลงได้ ส่งผลทำให้ยางเกิดการดีวัลคาไนซ์ [10] โดยทั่วไปแล้วการใช้คลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับความร้อนและความดันที่ได้จากเครื่องเอกซท์รููด (รูปที่ 8) สามารถทำให้ยางเกิดการดีวัลคาไนซ์ได้อย่างรวดเร็ว ในภาพรวมแล้วการรีไซเคิลด้วยคลื่นอัลตราโซนิกจัดเป็นวิธีการรีไซเคิลที่ง่าย สะดวก มีประสิทธิภาพสูง และไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีอื่นๆ เข้าช่วย ด้วยเหตุนี้การรีไซเคิลวิธีนี้จึงเป็นวิธีที่มีศักยภาพสูงที่จะพัฒนาต่อยอดในอนาคตเพราะนอกจากข้อดีต่างๆ ที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ยางที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยเทคนิคนี้ยังมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่ายางที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยเทคนิคอื่นๆ อีกด้วย อย่างไรก็ตามการดีวัลคาไนซ์ด้วยวิธีนี้อาจทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพได้ด้วยเช่นกันหากได้รับคลื่นอัลตราโซนิกเป็นระยะเวลาที่นานมากเกินไป ซึ่งอาจส่งผลทำให้ยางที่ได้จากการรีไซเคิลมีสมบัติเชิงกลด้อยลงเช่นกัน



รูปที่ 8 แผนผังการรีไซเคิลยางด้วยคลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับเครื่องเอกซท์รููด

4. การย่อยสลายด้วยเทคโนโลยีชีวภาพ

เป็นที่ทราบกันดีว่าแบคทีเรียสามารถเจริญเติบโตในยางธรรมชาติที่อยู่ในรูปของน้ำยางลาเท็กซ์ได้ดี ได้มีรายงานว่าแบคทีเรียสามารถทำให้เกิดการย่อยสลายของยางธรรมชาติได้ อย่างไรก็ตามการทำให้โมเลกุลยางเกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติผ่านปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันส่งผลทำให้อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพของยางธรรมชาติลดลงค่อนข้างมาก ปัจจุบันได้มีการจดสิทธิบัตรเกี่ยวกับการนำแบคทีเรีย chemolithiotrope ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำไปใช้ในการย่อยยางผง โดยการย่อยสลายจะเกิดเฉพาะที่บริเวณพื้นผิวของยางเท่านั้น เมื่อนำยางผงที่ผ่านการย่อยสลายไปผสมกับยางใหม่พบว่า โมเลกุลของยางใหม่สามารถแพร่เข้าไปในยางผงได้ดียิ่งขึ้นทำให้อัตราการย่อยสลายของยางผงและยางใหม่สูงขึ้น การดีวัลคาไนซ์เศษยางด้วยการแช่ยางลงไปในส่วนแขวนลอยของแบคทีเรีย chemolithiotrope ภายใต้สภาวะที่มีอากาศจะทำให้พันธะซัลฟิดิกที่มีอยู่ในยางเกิดการย่อยสลายกลายเป็นธาตุกำมะถันและกรดซัลฟิวริก การย่อยสลายด้วยแบคทีเรียชนิดนี้จึงทำให้ได้ยางรีไซเคิลและธาตุกำมะถัน นอกจากนี้ยังได้มีการรายงานว่าแบคทีเรียในกลุ่มของ Nocardia สามารถทำให้โมเลกุลของยางธรรมชาติเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้ (ทำให้ยางมีน้ำหนักลดลงอย่างเห็นได้ชัดหลังการย่อยสลาย) [11] อีกการศึกษาหนึ่ง คือ การทดลองย่อยสลายยางผงที่เตรียมได้จากเศษยางล้อโดยใช้แบคทีเรียในกลุ่มของ Thiobacillus เช่น T. ferrooxidans, T. thiooxidans และ T. thioparus พบว่ากำมะถันที่มีอยู่ในยางผงเกิดการออกซิไดซ์ ซึ่งอัตราเร็วของการออกซิไดซ์หรือการย่อยสลายขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคของยางผงในการทดลองนี้พบว่า ยางผงที่มีขนาดของอนุภาคในช่วง 100-200 ไมโครเมตร สามารถเกิดการออกซิไดซ์กลายเป็นซัลเฟตได้ภายในระยะเวลา 40 วัน [12]

5. สรุป

การกำจัดขยะยางโดยใช้วิธีการที่ไม่เหมาะสมอาจก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการนำขยะยางไปใช้ในการถมที่เพราะเมื่อเกิดไฟไหม้อาจทำให้ยากต่อการดับ นอกจากนี้การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์อาจก่อให้เกิดสารไดออกซินที่เป็นพิษต่อทั้งคนและสิ่งแวดล้อม ขยะยางยังอาจเป็นแหล่งเพาะพันธุ์ของยุงและหนูซึ่งเป็นพาหะนำโรคติดต่อร้ายแรงมาสู่คน ด้วยเหตุนี้การกำจัดขยะยางอย่างถูกวิธีจึงนับเป็นเรื่องสำคัญที่นอกจากจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพความเป็นอยู่ของมนุษย์แล้ว ยังส่งผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมรวมถึงภาวะโลกร้อนอีกด้วย ปัจจุบันเทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดขยะยางส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปที่การนำขยะยางกลับมาใช้ใหม่โดยใช้วิธีการต่างๆ ที่ไม่ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามการวิจัยและพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีการรีไซเคิลก็ยังคงดำเนินต่อไปโดยมีจุดประสงค์เพื่อทำให้กระบวนการรีไซเคิลมีประสิทธิภาพสูงขึ้นและมีต้นทุนต่ำลง

เอกสารอ้างอิง

1. Mark, H.F., Bikales, N.M., Overberger C.G. and Menges, G., "Encyclopedia of Polymer Science and Engineering", Wiley, New York, 14, 787, 1988.
2. Holley, C.A., "Method for recovering carbon black composites", US patent 5728361, 1998.
3. Meador, W.R., "Method and apparatus for recovering constituents from discarded tires", US patent 5720232, 1998.
4. Roy, C., "Recovery of commercially valuable products from scrap tires", US patent 5229099, 1993.
5. Swor, R.A., Jensen, L.W. and Budzol, M., "Ultrafine recycled rubber", *Rubber Chem Technol*, **53**, 1215, (1980)
6. Myhre, M. and MacKillop, D.A., "Rubber recycling", *Rubber Chem Technol*, **75**, 429, (2002)
7. Klingensmith, B., "Recycling, production and use of reprocessed rubbers", *Rubber World*, **203**, 16, (1991)
8. Arastoopour, H., "Single-screw extruder for solid state shear extrusion pulverization and method", US patent 5704555, 1998.
9. Pelofsky, A.H., "Rubber reclamation using ultrasonic energy", US patent 3725314, 1973.
10. Isayev, A.I., "Continuous ultrasonic devulcanization of vulcanized elastomers", US patent 5258413, 1993.
11. Tsuchii, A., Takeda, K. and Tokiwa, Y., "Degradation of the rubber in truck tires by a strain of Nocardia", *Biodegradation*, **7**, 405, (1997)
12. Scheirs, J., "Polymer Recycling-Science: Technology and Applications", Wiley, New York, 411, 1998.

ดร.พงษ์ธร ไข่อ้อย
 การศึกษา: ปริญญาเอก (วิศวกรรมยาง) Loughborough University ประเทศอังกฤษ
 สถานที่ทำงานปัจจุบัน: นักวิจัย ฝ่ายวิจัยและพัฒนา
 ห้องปฏิบัติการวิจัยยาง ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ