

Ram Murthy Krishnan อดีตรังคกรผู้มีประสบการณ์มากมายในการผลิตยางล้อและนวัตกรรมการพัฒนาผลิตภัณฑ์ของบริษัท Goodyear Tire & Rubber Company และมีสิทธิบัตรเป็นของตนเองจำนวน 16 ฉบับ ปัจจุบันเป็นที่ปรึกษาและรองประธานกลุ่ม Tyre and Reinforcement Group of S&V Industries ที่ยังคงติดตามแนวทางเทคโนโลยีและแก้ปัญหาให้กับลูกค้าของเขา ได้ให้สัมภาษณ์ในวารสาร Polymer & Tyre Asia ว่า เขาสนับสนุนให้มีการใช้ยางรีเคลมและยางรีเคลมบิวไทล์ในการผลิตยางล้อ และด้วยเทคโนโลยีใหม่ที่ได้พัฒนาขึ้นนี้จะช่วยทำให้คุณภาพของยางรีเคลมดีขึ้น เช่น มีค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้มีการคาดการณ์ว่าจะมีการใช้ยางรีเคลมในการผลิตยางล้อเพิ่มขึ้นร้อยละ 10-20 หรืออาจจะสูงกว่านี้ก็ได้

ยางล้อรถบรรทุกจะถูกนำมอลอกเอาส่วนที่เป็นดอกยางออก รวมทั้งแยกเอาเส้นใย เหล็ก และสิ่งเจือปนออกมาก่อนที่จะนำไปผลิตเป็นยางรีเคลม ซึ่งจะได้ยางธรรมชาติเป็นส่วนใหญ่ แต่ในส่วนของขยะยางล้อที่เป็นยางในจะนำไปผลิตเป็นยางรีเคลมบิวไทล์

ในสหรัฐอเมริกา มียางล้อที่ถูกทิ้งเป็นขยะประมาณ 270-300 ล้านเส้นต่อปี และในจำนวนนี้มีเพียงร้อยละ 10 เท่านั้นที่ถูกนำมารีไซเคิล ในขณะที่ยางล้อส่วนใหญ่ (มากกว่าร้อยละ 50) จะถูกนำไปเผาเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่ได้จากยางล้อ (tyre derived fuel; TDF)

การผลิตยางรีเคลม คือ การดีวัลคาไนซ์ยางเทอร์โมเซตที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้วโดยใช้สารเคมีและความร้อนที่จะเข้าไปทำลายพันธะเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โพลีเมอร์ (แต่ยังคงพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลในแนวสายโซ่ไว้) และสามารถจะนำยางรีเคลมที่ได้มาผสมใช้งานร่วมกับยางใหม่ได้

ยางรีเคลมนอกจากจะมีข้อดีในเรื่องต้นทุนที่ถูกกว่ายางธรรมชาติ (ที่ปัจจุบันมีราคาแพง) แล้ว กระบวนการผลิตยางรีเคลมยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากเป็นการรีไซเคิลขยะและเศษยางอีกด้วย

โดยทั่วไปกระบวนการดีวัลคาไนซ์ต้องทำที่อุณหภูมิและความดันสูงพร้อมกับใช้สารเคมี (reclamation agent) ซึ่งจะทำให้โมเลกุลยางจะถูกดีโพลีเมอร์ที่ตำแหน่งพันธะเชื่อมโยงของกำมะถัน (polysulfidic linkage) และในขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการล้างกำจัดน้ำ และทำให้แห้ง ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จะถูกกรอง คัดแยก และเอ็กซ์ทรูดออกมาเป็นยางรีเคลมเกรดต่างๆ เช่น เกรดหยาบ เกรดละเอียด หรือเกรดละเอียดที่สุด

ในช่วงเริ่มแรกของเทคโนโลยีดีวัลคาไนซ์จะใช้สารดีวัลคาไนซ์ (devulcanising agents) ทำปฏิกิริยาภายในหม้อนึ่งอัดไอ (autoclave) ซึ่งวิธีการนี้ต้องใช้เวลานานและอันตราย ต่อมาได้มีการปรับปรุงเทคโนโลยีโดยใช้วิธีการต่างๆ เช่น กระบวนการทางฟิสิกส์ (อัลตราโซนิกและไมโครเวฟ) การใช้ความร้อนร่วมกับแรงเชิงกล (thermo-mechanical stress) และการใช้แรงเชิงกลร่วมกับสารเคมี (ใช้สารดีลิงค์; Delink) ซึ่งกระบวนการเหล่านี้จะช่วยให้ยางรีเคลมที่ได้มีคุณภาพดีขึ้น

## กระบวนการรีเคลม

การทำรีเคลมหรือการดีวัลคาไนซ์ยางสามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้

1. การใช้ความร้อนร่วมกับแรงเชิงกล เช่น กระบวนการย่อย (digester process)
2. การใช้แรงเชิงกลร่วมกับสารเคมี เช่น กระบวนการดีลิงค์ (Delink process)
3. การใช้คลื่นไมโครเวฟและคลื่นอัลตราโซนิก
4. กระบวนการอื่นๆ



### 1. กระบวนการย่อย (digester process)

กระบวนการย่อยเป็นการดีวัลคาไนซ์ยางที่อุณหภูมิสูง (150-250°C) ร่วมกับการกวนเป็นเวลานาน (5-12 ชั่วโมง) กระบวนการนี้ต้องใช้พลังงานสูง ผลที่ได้ไม่เพียงแต่จะทำให้เกิดการแตกหักของพันธะโพลีซัลฟิดิกเท่านั้น แต่ยังอาจทำให้เกิดการแตกหักของสายโซ่หลักของโพลีเมอร์อีกด้วย ส่งผลทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงของยางรีเคลมต่ำลง (4-5 MPa) ซึ่งถือว่าเป็นข้อจำกัดของกระบวนการนี้

ส่วนในกรณีที่ผลิตยางรีเคลมภายใต้สภาวะความร้อนที่ต่ำลงและใช้เครื่องจักรที่ออกแบบมาเป็นพิเศษ เช่น เครื่องเอ็กซ์ทรูดชนิดเกลียวคู่ที่มีแรงเฉือนสูง (high shear mix (HSM) twin screw extruder) หรือในหม้อนึ่งอัดไอ และใช้สารรีเคลมและสภาวะการผลิตที่เหมาะสม จะทำให้ได้ยางรีเคลมที่มีความแข็งแรงปานกลาง (6-9 MPa)

### 2. กระบวนการดีลิงค์ (Delink process)

กระบวนการดีลิงค์เป็นการใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยา สารกระตุ้นปฏิกิริยา และสารรีเคลมใส่ลงในยางมาสเตอร์แบดท์ ซึ่งจะผสมในเครื่องบดผสมแบบ 2 ลูกกลิ้งหรือเครื่องแบนบิวรี่ (banbury) ที่อุณหภูมิต่ำ (80-90°C) ทำให้เกิดการแตกออกของพันธะเชื่อมโยงกำมะถันของยางวัลคาไนซ์

### 3. การใช้คลื่นไมโครเวฟและคลื่นอัลตราโซนิก

เทคโนโลยีการดีวัลคาไนซ์ยางด้วยคลื่นไมโครเวฟ (ที่ความถี่ 915-2450 เมกะเฮิร์ตซ์ ปริมาณคลื่นที่ใช้อยู่ในช่วง 41-177 วัตต์-ชั่วโมงต่อปอนด์) และคลื่นอัลตราโซนิก (20-50 กิโลเฮิร์ตซ์) สามารถใช้ได้กับขยะยางทั่วไปขนาด 30-40 เมช (mesh) และให้ยางรีไซเคิลที่มีความทนต่อแรงดึงสูง วิธีนี้แม้ว่าจะผลิตด้วยอุปกรณ์ที่ทันสมัย แต่ก็ยังไม่สามารถให้ผลผลิตทางอุตสาหกรรมที่มีประสิทธิภาพได้

### 4. กระบวนการอื่นๆ

นอกจากนี้ยังมีกระบวนการอื่นๆ เช่น เทคนิคการดีวัลคาไนซ์ยางด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต (supercritical CO<sub>2</sub>) ทำโดยใช้เครื่องเอกซทูดแบบเกลียวคู่ (ที่ความเร็วรอบ 100-200 rpm อุณหภูมิ 200°C) และให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเข้าไปในระบบ ซึ่งจะทำให้โครงสร้างร่างแห (rubber network) ของยางเกิดการบวมตัวและพันธะกำมะถัน-กำมะถันเกิดการแตกออก ปริมาณยางรีไซเคิลที่ได้จากกระบวนการนี้อยู่ที่ 100-200 ปอนด์ต่อชั่วโมง

สามวิธีการหลังนี้จะทำให้อย่างรีไซเคิลมีความทนต่อแรงดึงสูง (10-16 MPa) เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่มีค่าความทนต่อแรงดึงอยู่ที่ประมาณ 20 MPa วิธีการเหล่านี้มีผลอย่างมากต่อพันธะกำมะถัน-กำมะถัน และพันธะคาร์บอน-กำมะถัน แต่จะไม่ส่งผลกระทบต่อพันธะคาร์บอน-คาร์บอนที่เป็นสายโซ่หลักของโพลิเมอร์ ทั้งนี้เนื่องจากความแข็งแรงของพันธะเชื่อมโยงกำมะถัน-กำมะถันเท่ากับ 54 kcal/mol ซึ่งต่ำกว่าพันธะคาร์บอน-คาร์บอนที่เป็นสายโซ่หลัก (83 kcal/mol) พลังงานที่ทำให้พันธะคาร์บอน-กำมะถันแตกออกได้จึงอยู่ระหว่าง 2 ค่านี้ และพันธะเชื่อมโยงกำมะถัน-กำมะถันจะแตกก่อนพันธะคาร์บอน-กำมะถันและพันธะคาร์บอน-คาร์บอนที่เชื่อมติดอยู่กับสายโซ่หลักของโพลิเมอร์

นอกจากค่าความทนต่อแรงดึงที่ต้องการแล้ว ยางรีไซเคิลบิวไทล์ของยางในรถยนต์ยังมีสมบัติอื่นๆ ที่สำคัญ เช่น การซึมผ่านของก๊าซและความต้านทานต่อการพอง ซึ่งปริมาณการใช้ยางรีไซเคิลบิวไทล์จะอยู่ที่ 5-30 phr ขึ้นอยู่กับสภาวะการใช้งาน

โดยทั่วไปสารรีไซเคิลใช้ปริมาณเล็กน้อยเพียงร้อยละ 1-2 ซึ่งประกอบด้วยของผสมของสารตัวเร่งปฏิกิริยา (เช่น ซัลโฟนาไมด์ ไดแอริลไดซัลไฟต์ ไดเพนทีน) เกลือสังกะสี (zinc salts; ZnSt) สารกระตุ้นปฏิกิริยา (ซิงก์ออกไซด์) กรดสเตียริก และกำมะถัน เป็นต้น

### การเปรียบเทียบต้นทุน

Krishnan คิดว่า การที่ราคายางธรรมชาติสูงขึ้นจะเป็นปัจจัยที่ทำให้ผู้ผลิตยางล้อตัดสินใจเลือกนำยางรีไซเคิล (ที่มีความแข็งแรงสูงขึ้น) มาใช้แทนที่ยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น เพื่อผลิตยางล้อเกรดที่มีคุณภาพดีและราคาสามารถแข่งขันได้

ปัจจุบันการนำยางรีไซเคิลมาใช้ในยางล้อส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงร้อยละ 5-10 แต่เนื่องจากยางรีไซเคิลได้รับการปรับปรุงให้มีสมบัติดีขึ้น เช่น ค่าความทนต่อแรงดึงสูงขึ้น ดังนั้นจึงอาจเป็นไปได้ว่าปริมาณการใช้ยางรีไซเคิลในยางล้ออาจจะเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 10-20 หรืออาจจะสูงกว่านี้

บางที่ก็มีการนำสารรีไซเคิลเหล่านี้มาเติมลงไปคอมพาวด์มาสเตอร์แบตช์ของยางใหม่โดยตรง ซึ่งจากการศึกษาสูตรยางคอมพาวด์ที่เหมาะสมในห้องปฏิบัติการตามเกณฑ์การทดสอบยางล้อ เช่น มาตรฐาน DOT พบว่ามีการใช้ยางรีไซเคิลในยางล้อเพิ่มขึ้น

ยางรีไซเคิลประกอบด้วยส่วนที่เป็นไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 50 โดยประมาณ คิดเป็นราคา 0.50 เหรียญดอลลาร์สหรัฐต่อปอนด์ ถ้าหากนำยางรีไซเคิล 20 phr มาแทนที่ยางธรรมชาติ 10 phr ที่เหลือเป็นยางธรรมชาติ 90 phr ก็จะสามารถประหยัดต้นทุนได้ 1.50 เหรียญดอลลาร์สหรัฐต่อปอนด์ของยางธรรมชาติที่ถูกแทนที่

นอกจากข้อดีที่เห็นได้ชัดในเรื่องต้นทุนที่ลดลงเมื่อใช้ยางรีไซเคิลร่วมกับยางใหม่แล้ว การใช้ยางรีไซเคิลร่วมกับยางใหม่นี้ยังส่งผลดีต่อการผลิตอีกด้วย เช่น เวลาในการผสมลดลง ประหยัดพลังงานมากขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องเอกซทูดและคาเลนเดอร์มีขนาดและรูปทรงสม่ำเสมอ การบวมพองและการหดตัวระหว่างการเอกซทูดลดลง การยึดติด (building tack) ดีขึ้น วัลคาไนซ์ได้เร็วขึ้น ให้ผลผลิตสูงขึ้น และต้านทานต่อการบ่มเร่ง (age resistance) ได้ดีขึ้น

Krishnan ระบุว่า การผลิตยางล้อที่มีสมรรถนะสูง เช่น ยางล้อเครื่องบินและยางล้อรถแข่ง สามารถจะเลือกใช้ยางรีไซเคิลเกรดที่มีความแข็งแรงสูงได้ อย่างไรก็ตามเรื่องราคาไม่ใช่ปัจจัยที่สำคัญเท่ากับความปลอดภัย ดังนั้นผู้ผลิตยางล้อส่วนใหญ่จึงใช้ยางธรรมชาติใหม่ทั้งหมด (ไม่ใช่ยางรีไซเคิล) ในสูตรยางล้อเหล่านี้

อย่างไรก็ตามยางล้อที่ผลิตในปัจจุบันนี้จะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดของยุโรปและอเมริกา (เช่น REACH และข้อกำหนดฉลากยางล้อ) ไม่ว่าจะมีส่วนผสมของยางรีไซเคิลหรือไม่ก็ตาม ตามข้อกำหนดของ REACH ห้ามจำหน่ายยางล้อหรือส่วนประกอบของยางล้อที่มีส่วนผสมของน้ำมันอะโรมาติกในปริมาณที่เกินกว่าที่กำหนดระหว่างกระบวนการผลิตยางล้อ

เกณฑ์กำหนดปริมาณน้ำมันอะโรมาติกหรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีวงแหวนอะโรมาติกที่เรียกว่า PAH (polyaromatic hydrocarbon) ในยางคอมพาวด์ คือ ไม่เกินร้อยละ 0.35 bay protons (เป็นตำแหน่งที่มีอะตอมของไฮโดรเจนเกาะอยู่) ตามมาตรฐาน ISO 21461 ซึ่งบริษัทยางล้อในสหรัฐอเมริกาส่วนใหญ่ต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดกฎหมายของตลาดยุโรป เรื่องดังกล่าวจะมีผลกระทบต่อตลาดยางล้อทั้งในสหรัฐอเมริกาและทั่วโลกในช่วงอีก 5 ปีข้างหน้า

- ที่มา... 1. วารสาร Polymers & Tyre Asia ฉบับเดือนเมษายน/พฤษภาคม 2011  
2. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง ปีที่ 3 ฉบับที่ 3 กรกฎาคม-กันยายน 2552