

ลำอิเล็กตรอน: เพื่อปรับปรุงคุณภาพและเพิ่มผลิตภาพในการผลิต

เรียบเรียงโดย ธารณี เจริญสุข

ศูนย์วิจัยเทคโนโลยียาง

พลังงานจากรังสีเป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งที่มีอยู่มากมายบนพื้นโลก การวัลคาไนซ์ด้วยรังสีในระดับอุตสาหกรรมเป็นการใช้แหล่งพลังงานของรังสีจากธรรมชาติและจากที่มนุษย์สร้างขึ้นเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่มีความปลอดภัย ใช้งานได้ และเกิดประโยชน์ การวัลคาไนซ์ด้วยรังสีเป็นเทคโนโลยีที่ประหยัดพลังงานและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าเมื่อเทียบกับการวัลคาไนซ์แบบปกติ (conventional cure)¹

หลังสงครามโลกครั้งที่ 2 ได้มีการนำโพลีเมอร์มาวัลคาไนซ์ด้วยรังสี โดยได้พัฒนามาจากเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (nuclear reactor) การวิจัยพื้นฐานได้เริ่มต้นขึ้นในช่วงปลายทศวรรษที่ 1940 และได้พัฒนาต่อมาจนกลายเป็นเทคโนโลยีที่สามารถนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ได้

ปัจจุบันรังสีต่างๆ เช่น รังสีเอกซ์ (X-rays) รังสีแกมมา รังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) และลำอิเล็กตรอน (electron beam) ได้ถูกนำมาใช้ในการวัลคาไนซ์โพลีเมอร์ อย่าง สี หมึกพิมพ์ สารเคลือบผิวและกาว รวมถึงการนำไปทำกราฟต์โคโพลีเมอร์ ความโดดเด่นของการใช้เทคนิควัลคาไนซ์ด้วยลำอิเล็กตรอนก็คือ เทคนิคนี้จะให้อัตราเร็วในการวัลคาไนซ์สูงมากและสม่ำเสมอมากกว่าการวัลคาไนซ์โดยใช้กัมมันต์ และจัดเป็นวิธีเดียวที่ทำให้ยางเกิดพันธะเชื่อมโยงโมเลกุลได้หลายแบบผสมกัน

ลำอิเล็กตรอน (Electron beam radiation)

ในกระบวนการผลิตลำอิเล็กตรอนนั้น อิเล็กตรอนที่เกิดจากเครื่องยิงอิเล็กตรอน (electron gun or injector) ถูกเร่งให้มีความต่างศักย์ 150-250,000 โวลต์ ภายใต้สภาวะสุญญากาศ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะเคลื่อนที่ทะลุผ่านช่องกรงะจกไปยังผลิตภัณฑ์เป้าหมาย ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการผลิตลำอิเล็กตรอน เรียกว่า เครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอน (electron accelerator) หรือเครื่องกำเนิดอิเล็กตรอน (EB generator)

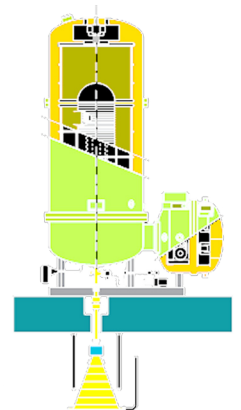
ลำอิเล็กตรอนเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้นแต่มีความถี่สูงกว่ารังสีอื่นๆ (ตารางที่ 1) ทำให้มีพลังงานและความสามารถในการทะลุทะลวงสูง และจัดอยู่ในรังสีประเภทที่แตกตัวเป็นประจุหรือไอออน (ionizing radiation) ซึ่งแตกต่างจากไมโครเวฟและรังสีอินฟราเรดที่เป็นรังสีประเภทที่ไม่เกิดการแตกตัวเป็นไอออน (non-ionizing radiation)

ตารางที่ 1 ความถี่และความยาวคลื่นของรังสีประเภทต่างๆ

รังสี	ความถี่ (Hz)	ความยาวคลื่น (μm)
ลำอิเล็กตรอน	10^{21} - 10^{18}	10^{-7} - 10^{-4}
อัลตราไวโอเล็ต	10^{17} - 10^{15}	10^{-2} -1
อินฟราเรด	10^{15} - 10^{12}	1-100
ไมโครเวฟ	10^{12} - 10^{10}	10^3 - 10^5

ข้อดีของเทคนิคการวัลคาไนซ์ผลิตภัณฑ์ยางด้วยลำอิเล็กตรอน คือ ไม่มีของเสียเกิดขึ้นในกระบวนการผลิต ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ใช้พลังงานต่ำ ไม่ก่อให้เกิดรังสีตกค้าง สามารถควบคุมการผลิตลำอิเล็กตรอนได้ด้วยการเปิด-ปิดสวิตช์ ลำอิเล็กตรอนมีพลังงานในการทะลุทะลวงสูง จึงทำให้สามารถวัลคาไนซ์ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาให้เกิดความสม่ำเสมอได้ นอกจากนี้ยังทำให้สามารถวัลคาไนซ์ยางได้ที่อุณหภูมิห้อง และเมื่อวัลคาไนซ์ยางด้วยลำอิเล็กตรอนร่วมกับระบบกัมมันต์จะทำให้เกิดระบบการเชื่อมโยงพันธะผสมระหว่างพันธะคาร์บอน-คาร์บอนกับพันธะกัมมันต์-กัมมันต์

การทำพรีวัลคาไนซ์ (pre-curing) ยางด้วยลำอิเล็กตรอนจะช่วยลดเวลาการวัลคาไนซ์ (optimum cure time) ของยางคอมพาวด์ลง ส่งผลให้ผลิตภาพในการผลิตเพิ่มขึ้น และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ยางดีขึ้นด้วย



¹การวัลคาไนซ์แบบปกติ (conventional curing) คือ การวัลคาไนซ์โดยใช้กัมมันต์และความร้อน

กลไกการวัลคาไนซ์คอมโพสิตยางล้อ (tire composite) ด้วยลำอิเล็กตรอน

เมื่อนำลำอิเล็กตรอนลงบนวัสดุจะเกิดการถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนวงนอกสุดที่โคจรรอบนิวเคลียสของวัสดุ และเกิดการหลุดออกจากอะตอม ได้เป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอนอิสระ (free electron) อิเล็กตรอนบางตัวที่ได้รับพลังงานจากลำอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงและมีพลังงานสูงขึ้นทำให้เกิดเป็นฟรีเรดิคัล (free radical) ดังนั้นในระบบการวัลคาไนซ์ด้วยลำอิเล็กตรอนจะมีทั้งส่วนที่เป็นไอออน อิเล็กตรอน และฟรีเรดิคัล นอกจากนี้ระหว่างการทำวัลคาไนซ์ด้วยลำอิเล็กตรอน จะเกิดปฏิกิริยาการตัดขาดสายโซ่ (chain scission) และปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโมเลกุลไปพร้อมๆ กัน แต่ผลลัพธ์สุดท้ายจะขึ้นอยู่กับว่าปฏิกิริยาใดสามารถเกิดขึ้นได้มากกว่ากัน

การใช้ลำอิเล็กตรอนในอุตสาหกรรมยาง

การเลือกสภาวะที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ยางด้วยลำอิเล็กตรอนจะส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของวัสดุ ไม่ว่าจะเป็นสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางเคมี ขนาดของอนุภาค สมบัติการหลอมเหลว ความเข้ากันได้ของวัสดุ สมบัติเชิงพื้นผิว และสมบัติอื่นๆ ปัจจัยที่มีผลต่อการวัลคาไนซ์ยางด้วยลำอิเล็กตรอนในเชิงอุตสาหกรรมมี 4 ปัจจัย ได้แก่ การเชื่อมโยงโมเลกุล (crosslinking) การโพลิเมอไรซ์ (polymerization) การกราฟต์ (grafting) และการเสื่อมสภาพ (degradation)

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้เทคนิคลำอิเล็กตรอน ได้แก่ สายไฟและสายเคเบิล ท่อที่สามารถหดได้ด้วยความร้อน ข้อต่อ พิล์มวัสดุคอมโพสิตที่มีความหนา เช่น ยางล้อ และสายพาน เป็นต้น

อุตสาหกรรมที่มีการใช้เทคโนโลยีลำอิเล็กตรอนมากที่สุด คือ อุตสาหกรรมการผลิตยางล้อ ซึ่งมีการใช้ทั้งยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ ในปี ค.ศ. 1957 บริษัท B.F Goodrich เป็นบริษัทแรกที่วัลคาไนซ์ยางล้อทั้งเส้นด้วยรังสีโคบอลต์-60 แต่ไม่มีรายละเอียดของกระบวนการผลิตที่บริษัทใช้ สำหรับการวัลคาไนซ์ยางล้อทั้งเส้นด้วยลำอิเล็กตรอนหรือรังสีชนิดอื่นๆ นั้นยังไม่ค่อยประสบความสำเร็จ และยังไม่สามารถใช้งานได้จริง ดังนั้นการวัลคาไนซ์ด้วยรังสีในอุตสาหกรรมยางล้อจึงเป็นเพียงการใช้เพื่อวัลคาไนซ์ส่วนประกอบต่างๆ ของยางล้อเพื่อช่วยเพิ่มผลผลิตในการผลิตและปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์เท่านั้น ซึ่งอย่างไรก็ดีได้มีการศึกษามากมายที่เกี่ยวกับการฉายรังสีส่วนประกอบยางล้อก่อนการวัลคาไนซ์ (pre-irradiation) แล้วนำชิ้นส่วนเหล่านี้มาประกอบเข้าด้วยกันแล้ววัลคาไนซ์ และทดสอบสมบัติต่างๆ

ข้อดีของการใช้ลำอิเล็กตรอนมาฉายลงบนส่วนประกอบของยางล้อก่อน (pretreatment) ทำใหยางล้อที่ยังไม่วัลคาไนซ์ (uncured tyre) สามารถคงรูปร่าง (dimensional stability) อยู่ได้ และมีความแข็งแรง (green strength) เพิ่มขึ้น ลดความหนาของชั้นยางบุเคลือบผิวภายใน ลดน้ำหนักล้อยางลง ป้องกันไม่ให้คอร์ด (cord) เคลื่อนที่ระหว่างการวัลคาไนซ์ เพิ่มสมบัติความต้านทานการซึมผ่าน (barrier property)² ลดเวลาการวัลคาไนซ์ ลดต้นทุนในกระบวนการผลิต (ลดวัตถุดิบและของเสีย) เพิ่มอัตราการผลิตยางล้อ และสามารถวัลคาไนซ์ชิ้นยางได้อย่างสม่ำเสมอและยืดอายุการใช้งาน เมื่อเทียบกับการวัลคาไนซ์ด้วยกัมมันต์และความร้อนแบบปกติ

การวัลคาไนซ์ยางด้วยลำอิเล็กตรอน

โดยทั่วไปยางล้อจะผลิตจากยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์ปิโตรเลียม และยางโพลีบิวทาไดอีน โดยใช้ยางหลายๆ เกรดที่สัดส่วนต่างๆ กัน ซึ่งสูตรผสมเคมีพื้นฐานของยางได้รับการออกแบบให้เหมาะกับการใช้เป็นยางเรเดียล/ยางผ้าใบขนาดต่างๆ

การศึกษานี้เป็นผลของการฉายลำอิเล็กตรอนไปยังส่วนประกอบยางล้อ (ได้แก่ ดอกยางและยางบุเคลือบผิวภายใน) ต่อสมบัติของยางคอมพาวด์และสมบัติของยางล้อทั้งเส้น โดยฉายลำอิเล็กตรอนในอากาศที่อุณหภูมิห้อง ใช้ปริมาณลำอิเล็กตรอนในช่วง 5-10 Mrad (จากเครื่องกำเนิดอิเล็กตรอน (รุ่น ILU 6)) เพื่อจะหาปริมาณลำอิเล็กตรอน (dose) ที่เหมาะสมในการวัลคาไนซ์ส่วนประกอบต่างๆ ของล้อยาง ดอกยางและยางบุเคลือบผิวภายในชุดที่หนึ่งได้รับปริมาณลำอิเล็กตรอน 5 Mrad (ตัวอย่าง A) ดอกยางและยางบุเคลือบผิวภายในชุดที่สองได้รับปริมาณลำอิเล็กตรอน 7 Mrad (ตัวอย่าง B) ใช้พลังงานในการเร่งอนุภาคของอิเล็กตรอน (acceleration energy) 1.8 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (MeV) และใช้กระแสลำอิเล็กตรอน (beam current) 1 มิลลิแอมแปร์ (mA) จากนั้นจึงนำมาศึกษาสมบัติต่างๆ เช่น สมบัติการวัลคาไนซ์ การเหนียวติด (tack) ความแข็งแรงในการยึดติด (adhesion strength) ความแข็งแรงของยางที่ยังไม่วัลคาไนซ์ (green strength) ก่อนที่จะสร้างขึ้นรูปเป็นล้อยาง (green tire)

ด้านในของดอกยางที่ผ่านการฉายลำอิเล็กตรอนจะเกิดการวัลคาไนซ์บางส่วน เมื่อนำมาประกอบเป็นล้อยางแล้วจะช่วยให้ล้อยางนั้นสามารถวัลคาไนซ์ได้อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งจะแตกต่างจากการวัลคาไนซ์ล้อยางทั่วไปที่ใช้กัมมันต์และความร้อน (เป็นการวัลคาไนซ์จากด้านนอกเข้าไปด้านใน ทำให้การวัลคาไนซ์ไม่สม่ำเสมอ) โครงสร้างตาข่าย (network) ที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเมื่อมีการใช้ทั้งกัมมันต์และลำอิเล็กตรอนในการวัลคาไนซ์

² สมบัติความต้านทานการซึมผ่าน (barrier property) เป็นสมบัติความต้านทานการซึมผ่านของผลิตภัณฑ์ เช่น สมบัติความต้านทานการซึมผ่านของน้ำ สมบัติความต้านทานการซึมผ่านของก๊าซ เป็นต้น

ผลการศึกษาคอมพาวด์ยางล้อแต่ละชนิดที่นำมาฉายลำอิเล็กตรอนในปริมาณต่างๆ และวัดเวลาการวัลคาไนซ์คอมพาวด์ดอกยางพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณลำอิเล็กตรอนให้สูงขึ้น คอมพาวด์ยางล้อจะใช้เวลาในการวัลคาไนซ์ลดลง ในขณะที่เวลาในการวัลคาไนซ์ของคอมพาวด์ยางบุเคลือบผิวภายในไม่เปลี่ยนแปลง (ดูตารางที่ 2, 3, 4) นอกจากนี้ยังพบว่าความแข็งแรงของยางบุเคลือบผิวภายในที่ฉายลำอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นเนื่องจากพันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นเป็นพันธะคาร์บอน-คาร์บอน (ตารางที่ 3) ยางคอมพาวด์ที่มีความแข็งแรงของยางที่ยังไม่ได้วัลคาไนซ์สูง จะช่วยให้รักษาทิศทางการจัดเรียงตัวของของสารเสริมแรง (reinforced material) ระหว่างการขึ้นรูป (final molding) และป้องกันการเกิดการเสียรูป (distortion) ของผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่วัลคาไนซ์ได้ ความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างชั้นผ้าใบกับยางบุเคลือบผิวภายในที่ฉายลำอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น (ที่ปริมาณลำอิเล็กตรอน 5 Mrad) (ตารางที่ 7)

ตัวอย่างดอกยางที่ฉายด้วยลำอิเล็กตรอนปริมาณ 10 Mrad วัดปริมาณเจล (gel content) จากพื้นผิวเข้าไปลึก 6 มิลลิเมตร จะได้ปริมาณเจลในระดับเดียวกัน (ตารางที่ 8)

ดอกยางและยางบุเคลือบผิวภายในที่ผ่านการวัลคาไนซ์ด้วยลำอิเล็กตรอนจะใช้เวลาในการวัลคาไนซ์ลดลงร้อยละ 14 (5 Mrad, ตัวอย่าง A) และร้อยละ 23.5 (7 Mrad, ตัวอย่าง B) ตามลำดับ เมื่อเทียบกับยางล้อที่ใช้การวัลคาไนซ์แบบปกติ (ใช้กำมะถันและความร้อน) ดังตารางที่ 9 และเมื่อนำมาทดสอบการประลัย (failure) แล้วพบว่ายางล้อตัวอย่าง A (ใช้เวลาในการวัลคาไนซ์ลดลงร้อยละ 14) จะเกิดการประลัยในเวลา 136.8 ชั่วโมง ซึ่งเป็นผลมาจากพันธะเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้น (additional crosslink) จากการฉายลำอิเล็กตรอนที่เพิ่มความแข็งแรงของดอกยางคอมพาวด์และยางบุเคลือบผิวภายในที่ยังไม่ได้วัลคาไนซ์ให้สูงขึ้น อย่างไรก็ตามในกรณียางล้อตัวอย่างที่ผลิตจากชั้นส่วนที่ฉายลำอิเล็กตรอนที่ปริมาณ 7 Mrad จะยังทำให้ชั้นงานเกิดการประลัยได้เร็วขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะว่าการฉายลำอิเล็กตรอนในปริมาณที่สูงกว่า 5 Mrad จะทำให้มีปริมาณความหนาแน่นของพันธะคาร์บอน-คาร์บอนเพิ่มขึ้นอย่างมาก ส่งผลให้ดอกยางคอมพาวด์มีลักษณะแข็งเกินไป ทำให้ด้านทานต่อแรงที่ใส่เข้าไปได้น้อยลง นอกจากนี้ยังเป็นไปได้ด้วยว่าผลิตภัณฑ์เหล่านี้จะใช้เวลาในการวัลคาไนซ์เพียงร้อยละ 77 ของเวลาในการวัลคาไนซ์ปกติ อาจจะสั้นเกินไปที่จะให้พันธะคาร์บอน-กำมะถันที่มีความแข็งแรงเพียงพอ (ตารางที่ 9)

การผ่าวิเคราะห์ยางล้อตามแนวพื้นที่หน้าตัดเพื่อหาข้อบกพร่องในการขึ้นรูป วัดความหนาของยางบุเคลือบผิวภายในและการเสียรูปของโครงยาง พบว่าตัวอย่างยางบุเคลือบผิวภายในที่ฉายด้วยลำอิเล็กตรอนปริมาณ 5 Mrad มีระดับการวัลคาไนซ์ของความหนาทุกส่วนได้ใกล้เคียงกันไม่เหมือนกับตัวอย่างยางที่วัลคาไนซ์ในระบบปกติ

ในอุตสาหกรรมยางล้อ การลดความหนาของยางบุเคลือบผิวภายในและการประหยัดวัตถุดิบถือเป็นปัจจัยที่สำคัญมากสำหรับการผลิตยางล้อแบบไม่ใช้ยางใบ (tubeless) ตารางที่ 10 แสดงค่าการกระจายตัวของความหนาของยางบุเคลือบผิวภายใน

ตารางที่ 2 สูตรผสมเคมี

สูตรผสมเคมี	ปริมาณ (phr)
ยางธรรมชาติ (RMA IV)	70
ยางโพลีบิวทาไดอีน (Cissamer-1220)	30
ซิงก์ออกไซด์	5
กรดสเตียริก	2
6PPD	1
TDQ	1
เขม่าดำ (เกรด FEF)	50
น้ำมันอะโรมาติก	7
MOR	1.5
กำมะถัน	1.75

ตารางที่ 3 ความแข็งแรงของยางคอมพาวด์ผสม NR/BR ที่ยังไม่ได้วัลคาไนซ์

สมบัติ	ปริมาณรังสี (Mrad)			
	0	5	10	15
ปริมาณเจล (%)	30	45	50	58
ความแข็งแรงของยางที่ยังไม่ได้วัลคาไนซ์ (kg/cm ²)	7	53	66	78
ค่าการยึดติด (kg/cm ²)	1.5	3.0	2.8	2.9

ตารางที่ 4 สมบัติเชิงกลของคอมพาวด์ผสม NR/BR หลังการวัลคาไนซ์ด้วยลำอิเล็กตรอน

สมบัติ	ปริมาณรังสี (Mrad)			
	0	5	7	10
เวลาวัลคาไนซ์ที่ 150°C (นาที)	9	7	7	7
100% โมดูลัส (kg/cm ²)	28	27	27	25
300% โมดูลัส (kg/cm ²)	114	128	133	140
ความทนต่อแรงดึง (kg/cm ²)	256	225	222	215
การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	600	500	500	450
ความแข็ง (Shore A)	62	61	61	62

ตารางที่ 5 สมบัติเชิงกลของยางบุเคลือบผิวภายใน

สมบัติ	ปริมาณรังสี (Mrad)			
	0	5	10	15
ความหนืดมูนี (ML 1+4 ที่ 100°C)	69	122	-	-
เวลาวัลคาไนซ์ที่ 150°C (min)	25	27	26	28
100% โมดูลัส (kg/cm ²)	28	29	28	31
300% โมดูลัส (kg/cm ²)	124	135	136	143
ความทนต่อแรงดึง (kg/cm ²)	199	200	200	195
การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	475	445	440	415
ความแข็ง (Shore A)	65	66	65	65

ตารางที่ 6 สมบัติเชิงกลของคอมพาวด์ดอกยาง

สมบัติ	ปริมาณรังสี (Mrad)			
	0	5	10	15
ความหนืดมูนนี่ (ML 1+4 ที่ 100°C)	53	98	150	-
เวลาวัลคาไนซ์ที่ 150°C (min)	13.3	11.3	9.9	9.4
100% โมดูลัส (kg/cm ²)	21	27	29	29
300% โมดูลัส (kg/cm ²)	92	131	140	112
ความทนต่อแรงดึง (kg/cm ²)	241	190	186	111
การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	600	407	400	320
ความแข็ง (Shore A)	62	64	66	66
ดัชนีความต้านทานต่อการสึกกร่อน	238	206	192	-

ตารางที่ 7 ความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างยางกับสิ่งทอ

คอมพาวด์	Kg/25 mm
ยางบุเคลือบผิวด้านใน (0 Mrad) + ชั้นผ้าใบ (0 Mrad)	15 (ชิ้นงานทดสอบเกิดการประลัย)
ยางบุเคลือบผิวด้านใน (0 Mrad) + ชั้นผ้าใบ (5 Mrad)	30
ยางบุเคลือบผิวด้านใน (5 Mrad) + ชั้นผ้าใบ (5 Mrad)	29
ชั้นผ้าใบ (0 Mrad) + ชั้นผ้าใบ (5 Mrad)	12
ชั้นผ้าใบ (5 Mrad) + ชั้นผ้าใบ (5 Mrad)	16 (ชิ้นงานทดสอบเกิดการประลัย)

ตารางที่ 8 ปริมาณเจล (gel content) ของคอมพาวด์ดอกยางที่มีความหนา 15 มิลลิเมตร วัลคาไนซ์ด้วยล้าอิเล็กตรอน 10 Mrad

ระดับความลึกจากพื้นผิว (มิลลิเมตร)	ปริมาณเจล (ร้อยละ)
2	70
4	70
6	70
8	55
15	40

ตารางที่ 9 ความทนทานของดอกยาง (endurance tread)

ประเภทยางล้อ	เวลาที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการประลัย (ชั่วโมง)	น้ำหนักที่ทำให้เกิดการประลัย (ร้อยละ)	ตำแหน่งที่เกิดการประลัย	เวลาวัลคาไนซ์ที่ 169°C
ยางล้อปกติที่ไม่ผ่านการฉายลำอิเล็กตรอน	130	180	เกิดการแยกที่ไหล่ยาง	21.3
ยางล้อที่มีชิ้นส่วนที่ฉายด้วยลำอิเล็กตรอน 5 Mrad	136.8	200	เกิดการแยกที่ไหล่ยาง	18.3
ยางล้อที่มีชิ้นส่วนที่ฉายด้วยลำอิเล็กตรอน 7 Mrad	117.5	180	เกิดการแยกที่ไหล่ยาง	16.3
ยางล้อที่เป็นไปตามข้อกำหนดขั้นต่ำตามมาตรฐาน BIS*	34	100	ไม่พบการแยก	-

หมายเหตุ: BIS = Bureau of Indian Standard

ตารางที่ 10 การเปรียบเทียบความหนาของยางบุเคลือบผิวภายใน

ตำแหน่ง	ความหนาของยางบุเคลือบผิวภายในที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันและความร้อน (mm)	ความหนาของยางบุเคลือบผิวด้านในที่ฉายลำอิเล็กตรอน (mm)
C/L	1.09	1.12
UT1	1.02	1.10
BB1	0.84	1.02
UT2	0.82	1.00
CC	0.87	1.17
C1	0.93	1.14
C2	1.05	1.23
C3	1.04	1.22
SW	1.00	1.20

เทคนิคฉายลำอิเล็กตรอนสามารถนำไปใช้กับวัสดุคอมโพสิตระหว่างยางกับเส้นใย เช่น ล้อยาง แม้ว่าจะยังไม่ปรากฏชัดว่าสามารถทดแทนการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันแบบปกติได้ทั้งหมด (ยกเว้นต้องมีการออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่) แต่อย่างไรก็ตามได้มีการทำพรีวัลคาไนซ์ (precuring) ขึ้นส่วนยางบางส่วนด้วยลำอิเล็กตรอนร่วมกับการวัลคาไนซ์แบบเดิม (ใช้กำมะถันและความร้อน) เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของยางล้อเนื่องจากมีพันธะการเชื่อมโยงในโครงสร้างยางทั้งที่เป็นพันธะคาร์บอน-คาร์บอนและพันธะกำมะถัน-กำมะถัน โดยไม่ทำให้ความแข็งแรงในการยึดติดระหว่างส่วนประกอบยางกับผ้าใบเสียหายไป

นอกจากนี้การฉายลำอิเล็กตรอนยังทำให้ความต้านทานต่อการสึกกร่อนของดอกยางเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเป็นผลจากพันธะเชื่อมโยงคาร์บอน-คาร์บอน ยิ่งไปกว่านั้นยังทำให้รูปทรงของยางล้อที่ผลิตจากชั้นส่วนยางที่ฉายลำอิเล็กตรอนคงรูปไม่เกิดการบิดเบี้ยว วัลคาไนซ์ได้สม่ำเสมอ ไม่ก่อให้เกิดของเสียในกระบวนการผลิต ช่วยประหยัดวัตถุดิบ และลดต้นทุน ดังนั้นอุตสาหกรรมยางล้อที่พิจารณาการทำพรีวัลคาไนซ์ขึ้นส่วนยาง เช่น ยางบุเคลือบผิวภายใน ดอกยาง และผ้าใบ ด้วยเทคนิคลำอิเล็กตรอนนี้ จะสามารถผลิตยางล้อที่มีคุณภาพดีขึ้นประมาณร้อยละ 14 และเพิ่มผลผลิตภาพในการผลิตยางล้อได้ถึงร้อยละ 15 เมื่อเทียบกับการวัลคาไนซ์ยางล้อด้วยระบบปกติ

ที่มา..www.tiretechnologyinternational.com

