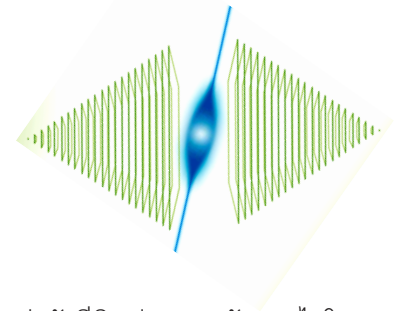


การวัดค่าโบซียงด้วยลำอิเล็กตรอน

เบญจมา นันสุวรรณ



บทนำ

การวัดค่าโบซียงเป็นกระบวนการสำคัญที่ทำให้อาซิงหรืออัลตราไวโอเล็ตเกิดการคงรูปและผสมกับที่ที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน เช่น มีความแข็ง มีความยืดหยุ่น โดยทั่วไปการวัดค่าโบซียงด้วยกัมมันตภาพรังสีและสารตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นระบบที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากมีต้นทุนต่ำและเกิดการวัดค่าโบซียงได้เร็ว แต่ถ้าอย่างที่จะนำมาวัดค่าโบซียงเป็นยาที่ไม่มีพันธะคู่ในโมเลกุลหรือต้องการผลิตผลิตภัณฑ์ยาที่ทนต่อความร้อนได้ดีขึ้นก็อาจเปลี่ยนไปใช้ระบบการวัดค่าโบซียงด้วยเพอร์ออกไซด์ อย่างไรก็ตามการใช้เพอร์ออกไซด์อาจทำให้เกิดกลิ่นหรือปฏิกิริยาข้างเคียงที่ไม่พึงประสงค์ได้ นอกจากนี้ 2 ระบบหลักที่กล่าวมาแล้ว ยังมีระบบการวัดค่าโบซียงด้วยสารเคมีอื่นๆ เช่น การใช้ซีลีเนียมและเทลลูเรียม แต่ปัจจุบันไม่นิยมเพราะสารเคมีมีราคาแพงและมีความเป็นพิษสูง หรือการใช้โลหะออกไซด์ ได้แก่ ซิงก์ออกไซด์ (ZnO) และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ในการวัดค่าโบซียงคลอโรฟริน ซึ่งทุกระบบที่กล่าวมานี้จำเป็นต้องอาศัยสารเคมีในการวัดค่าโบซียง และหากมีสารเหล่านี้หลงเหลืออยู่อาจมีผลต่อความปลอดภัยในการนำผลิตภัณฑ์ยาไปใช้งาน เช่น การปนเปื้อนของสารไนโตรซามีนซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งในกรณีที่ใช้วัดค่าโบซียงด้วยระบบกัมมันตภาพรังสี

การพัฒนาเทคนิคหรือวิธีการวัดค่าโบซียงในรูปแบบใหม่ เช่น การใช้รังสีหรือคลื่นพลังงาน ก็เป็นอีกหนทางเลือกในการวัดค่าโบซียง ในอดีตนิยมใช้รังสีแกมมาซึ่งได้จากสารกัมมันตภาพรังสีของโคบอลต์ 60 แต่เนื่องจากความไม่เสถียรของโคบอลต์ 60 ที่จะสลายตัวให้อิซโทปของนิกเกิล-60 ทำให้ความแรงของรังสีที่ใช้ในการวัดค่าโบซียงลดลงเรื่อยๆ ปัจจุบันการวัดค่าโบซียงด้วยลำอิเล็กตรอนได้รับการศึกษามากขึ้น เนื่องจากระบบนี้เป็นระบบที่สะอาด ใช้พลังงานน้อย แหล่งกำเนิดพลังงานมีความเสถียร ปลอดภัยจากอันตรายของสารเคมี ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว และยังประหยัดพลังงานเนื่องจากสามารถวัดค่าโบซียงได้ที่อุณหภูมิห้อง การวัดค่าโบซียงด้วยลำอิเล็กตรอนจึงเป็นเทคโนโลยีที่น่าจะมีความสำคัญสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ยาในอนาคต

ลำอิเล็กตรอน (electron beam)

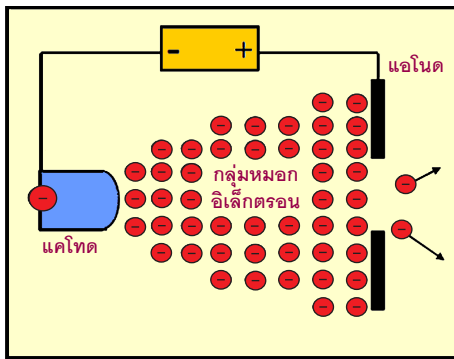
ลำอิเล็กตรอนมีพลังงานสูงมาก เมื่อกระทบกับวัสดุจะทำให้อนุภาคของวัสดุนั้นเกิดการแตกตัวเป็นประจุหรือไอออนได้ (ionizing radiation) ตารางที่ 1 แสดงค่าความถี่และความยาวคลื่นของลำอิเล็กตรอนเปรียบเทียบกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอื่น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า

ลำอิเล็กตรอนมีพลังงานสูงกว่ารังสีอินฟราเรด อัลตราไวโอเล็ต และไมโครเวฟ ลำอิเล็กตรอนผลิตได้จากเครื่องกำเนิดอิเล็กตรอน (electron generator) โดยมีหลักการคร่าวๆ ดังนี้ เมื่อให้ความต่างศักย์แก่เส้นลวดแคโทดในเครื่องยิงอิเล็กตรอนจนเส้นลวดเกิดความร้อนที่ผิวของเส้นลวดจะเกิดกลุ่มหมอกของอิเล็กตรอนขึ้น อิเล็กตรอนดังกล่าวซึ่งมีประจุลบจะถูกความต่างศักย์ภายในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าดึงให้หลุดออกจากกลุ่มหมอกและเร่งให้อิเล็กตรอนมีความเร็วสูงมากผ่านท่อสุญญากาศไปยังแอโนดและทะลุผ่านไปยังผลิตภัณฑ์เป้าหมาย (รูปที่ 1)

ตารางที่ 1 ความถี่และความยาวคลื่นของแหล่งให้รังสีประเภทต่างๆ

แหล่งให้รังสี	ความถี่ (Hz)	ความยาวคลื่น (nm)
อินฟราเรด	10^{15} - 10^{12}	10^3 - 10^5
อัลตราไวโอเล็ต	10^{17} - 10^{15}	0.1- 10^3
ไมโครเวฟ	10^{12} - 10^{10}	1-100
ลำอิเล็กตรอน	10^{21} - 10^{18}	10^{-4} -0.1

พลังงานของลำอิเล็กตรอนจากเครื่องกำเนิดที่ฉายลงไปบนวัสดุนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 อย่าง คือ ความต่างศักย์ที่ใช้ในการเร่งอิเล็กตรอน (accelerating voltage) และกระแสลำอิเล็กตรอน (beam current) ความต่างศักย์ที่ใช้ในการเร่งอิเล็กตรอนจะบ่งบอกถึงพลังงานของอิเล็กตรอน 1 ตัว ซึ่งจะมีผลต่อความลึกของวัสดุที่อิเล็กตรอนจะสามารถผ่านทะลุเข้าไปได้ กล่าวคือ ถ้าอิเล็กตรอนมีพลังงานสูงก็จะมีความสามารถในการผ่านทะลุเข้าไปในเนื้อวัสดุได้ลึกมากขึ้น ส่วนกระแสลำอิเล็กตรอนจะบ่งบอกถึงจำนวนของอิเล็กตรอนที่ถูกเร่ง (กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ (ampere; A) จะมีการไหลของอิเล็กตรอนจำนวน 6.3×10^{18} ต่อวินาที) ดังนั้นพลังงานรวมของลำอิเล็กตรอนที่ได้จากเครื่องกำเนิดอิเล็กตรอนจะได้จากความต่างศักย์ที่ใช้ในการเร่งอิเล็กตรอนคูณด้วยกระแสลำอิเล็กตรอน โดยพลังงานของอิเล็กตรอนที่ใช้กันทั่วไปจะอยู่ในช่วง 100 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) ถึง 10 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (MeV) และพลังงานของลำอิเล็กตรอนที่ให้กับวัสดุ (power) อยู่ในช่วง 0.5 กิโลวัตต์ ถึง 200 กิโลวัตต์ ปัจจุบันเครื่องกำเนิดอิเล็กตรอนนี้มีการผลิตและจำหน่ายในเชิงพาณิชย์แล้ว



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงการเกิดอิเล็กตรอนจากเครื่องกำเนิดอิเล็กตรอน

เครื่องกำเนิดอิเล็กตรอนสามารถแบ่งตามพลังงานของอิเล็กตรอนที่ผลิตได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ ประเภทพลังงานสูง พลังงานปานกลาง และพลังงานต่ำ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ประเภทและลักษณะของเครื่องกำเนิดอิเล็กตรอน

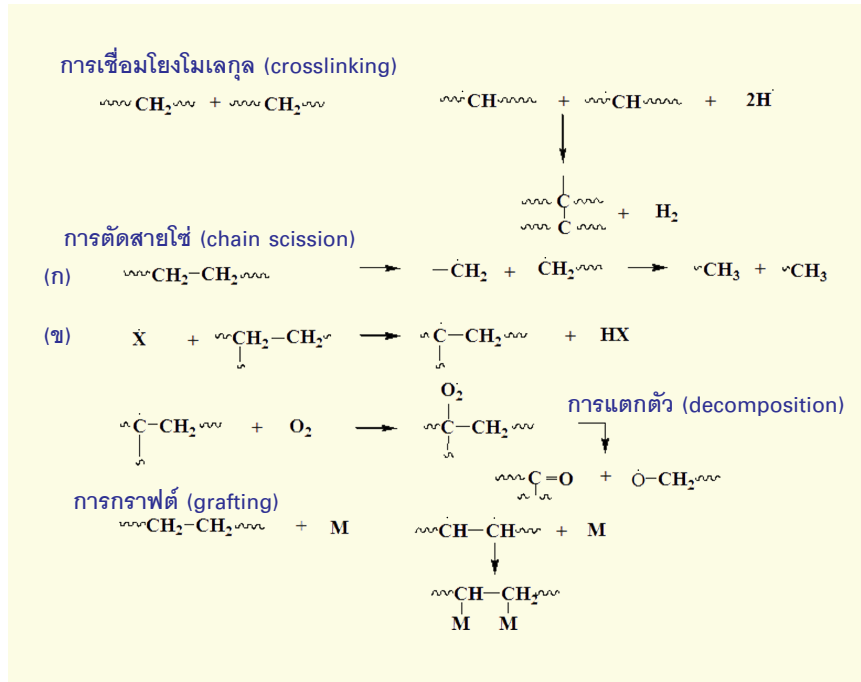
ประเภท	ช่วงระดับพลังงาน	ลักษณะ	การนำไปใช้งาน
พลังงานต่ำ	< 1 MeV	- อำนาจทะลุทะลวงน้อย - ความสะดวกในการบำรุงรักษาได้ง่าย - เครื่องขนาดเล็ก	- การเคลือบผิว - การเชื่อมโยงโมเลกุลของฟิล์มบาง
พลังงานปานกลาง	1-5 MeV	-	- การเชื่อมโยงของพลาสติกหรือยาง
พลังงานสูง	> 5 MeV	- อำนาจทะลุทะลวงสูง - ต้องใช้วัสดุหนามากในการบำรุงรักษา	- การฆ่าเชื้อ

การเกิดปฏิกิริยาเคมีเมื่อฉายลำอิเล็กตรอน

เมื่อฉายลำอิเล็กตรอนลงบนยางหรือโพลีเมอร์สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นได้ 3 ประเภท ได้แก่ การเชื่อมโยงโมเลกุล (crosslinking) การตัดสายโซ่ (chain scission) และการกราฟต์ (grafting) ดังแสดงในรูปที่ 2

ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงเป็นการเกิดพันธะเคมีระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง ระดับของการเกิดการเชื่อมโยงนั้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณลำอิเล็กตรอนที่ใช้ โดยไม่เกี่ยวกับการมีพันธะอิมมิตัวหรือโมเลกุลเดี่ยวหรือการมีหมู่ฟังก์ชันมากหรือน้อย ปกติแล้วกลไกการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงนี้จะเปลี่ยนไปตามชนิดของยาง กลไกทั่วไปที่เป็นที่ยอมรับว่าสามารถใช้ได้กับโพลีเมอร์และอิลาสโตเมอร์คือ การแตกออกของพันธะคาร์บอน-ไฮโดรเจน (C-H bond) ของสายโซ่โพลีเมอร์สายหนึ่งเกิดเป็นอะตอมหรืออนุมูลอิสระ (free radical) ของไฮโดรเจน จากนั้นจึงดึงอะตอมไฮโดรเจนอะตอมที่สองออกจากสายโซ่โพลีเมอร์ข้างเคียง เพื่อให้เกิดเป็นโมเลกุลของไฮโดรเจนและเกิดการรวมตัวกันของอนุมูลอิสระจากสายโซ่โพลีเมอร์ที่อยู่ใกล้เคียงกันเพื่อให้เกิดพันธะเชื่อมโยงขึ้น ปฏิกิริยาจะเกิดต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย (รูปที่ 2) ในทางตรงกันข้าม การตัดสายโซ่โมเลกุลเป็นกระบวนการทำให้เกิดการแตกออกของพันธะคาร์บอน-คาร์บอน (C-C bond) ทำให้นำหนักโมเลกุลเฉลี่ยลดลง ในกรณีที่มีออกซิเจนกลไกของการตัดสายโซ่โมเลกุลก็จะเกิดผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน อนุมูลอิสระของโพลีเมอร์ที่เกิดขึ้นจะเข้าทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นอนุมูลเปอร์ออกไซด์ซึ่งจะสลายตัวได้เป็นโมเลกุลเล็กๆ

การกราฟต์เป็นวิธีที่จะนำโมโนเมอร์เข้าไปติดกับสายโซ่ของโพลีเมอร์ อาจทำได้โดยฉายลำอิเล็กตรอนลงบนส่วนผสมของโพลีเมอร์โมโนเมอร์ และเซนซิไทเซอร์ (sensitizer) ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระขึ้น แล้วจึงเกิดปฏิกิริยาการกราฟต์ของโมโนเมอร์ขึ้น



รูปที่ 2 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดจากการฉายลำอิเล็กตรอน [1]

การวัดคาบไซยางด้วยลำอิเล็กตรอน

เมื่อฉายลำอิเล็กตรอนลงบนยางหรืออิลาสโตเมอร์อาจเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโมเลกุล (ถ้าอนุภาคอิสระที่เกิดขึ้นเข้ารวมตัวกัน) และ/หรือเกิดปฏิกิริยาการตัดสายโซ่ (ทำให้ยางเสื่อมสภาพ) ได้ ผลลัพธ์สุดท้ายจะขึ้นอยู่กับว่าปฏิกิริยาใดจะเกิดขึ้นได้เร็วกว่ากัน หากเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโมเลกุลเร็วกว่าและมากกว่าปฏิกิริยาการตัดสายโซ่ ผลลัพธ์คือยางนั้นจะเกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุล หากเกิดปฏิกิริยาการตัดสายโซ่มากกว่า ผลลัพธ์คือการลดลงของน้ำหนักโมเลกุลของยาง โดยทั่วไปอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาแต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับชนิดของยาง เช่น ยางบิวทาไดอีน (BR) และยางคลอโรพรีน (CR) เป็นยางที่มีหมู่ไว้นิลอยู่ในโมเลกุลมักจะเกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลมากกว่าการตัดสายโซ่โมเลกุล ในขณะที่ยางไอโซพรีน-ไอโซพรีนหรือยางบิวไทล์ (IIR) ซึ่งมีหมู่ไว้นิลติดอยู่ในโมเลกุลมักจะเกิดการตัดโมเลกุลมากกว่าการเชื่อมโยง ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของยาง

พันธะที่เกิดจากการเชื่อมโยงโดยใช้ลำอิเล็กตรอนจะเป็นพันธะคาร์บอน-คาร์บอนที่มีความแข็งแรงสูง เช่นเดียวกับพันธะการเชื่อมโยงที่เกิดจากการวัดคาบไซยางด้วยเพอร์ออกไซด์ ด้วยเหตุนี้ยางวัดคาบไซยางที่ได้จึงมีความทนต่อความร้อนสูง แต่มีสมบัติเชิงกลและเชิงพลวัตที่ต่ำกว่ายางที่วัดคาบไซยางด้วยระบบกัมมันต์

ข้อดีของการวัดคาบไซยางด้วยลำอิเล็กตรอน

เนื่องจากการวัดคาบไซยางด้วยลำอิเล็กตรอนไม่จำเป็นต้องเติมสารเคมีลงไปในระบบ จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่มีการปนเปื้อนหรือการตกค้างของสารเคมี เช่น ไนโตรซามีน (N-nitrosamine) ซิงก์ออกไซด์ (กรณีของการวัดคาบไซยางด้วยกัมมันต์) นอกจากนี้ยังมีความเป็นพิษต่อเซลล์ต่ำ สามารถย่อยสลายได้ในสภาวะแวดล้อมของธรรมชาติ หากเผาเพื่อทำลายจะไม่มีการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และมีปริมาณแก๊สน้อย ในกรณีที่นำไปวัดคาบไซยางธรรมชาติจะทำให้ฟิล์มที่ได้มีความโปร่งและความนุ่มมากกว่าและเกิดการแพ้โปรตีนลดลงซึ่งถือเป็นระบบที่สะอาดและปลอดภัย สามารถใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ได้

นอกจากข้อดีที่ไม่มีสารปนเปื้อนแล้ว การวัดคาบไซยางด้วยลำอิเล็กตรอนยังมีข้อดีในแง่ของเครื่องกำเนิดอิเล็กตรอนคือมีขนาดเล็กและใช้กระแสไฟฟ้า ทำให้สามารถควบคุมการผลิตลำอิเล็กตรอนได้ด้วยการเปิด-ปิดสวิทช์ ให้ระดับพลังงานที่สม่ำเสมอ สามารถวัดคาบไซยางได้ที่อุณหภูมิห้อง ทำให้ประหยัดพื้นที่และพลังงานในการผลิต

อย่างไรก็ตามแม้ว่าการวัดคาโนซ์ยางด้วยลำอิเล็กตรอนจะสามารถทำได้โดยไม่ต้องเติมสารเคมีใดๆ ลงไป แต่เพื่อเป็นการลดปริมาณพลังงานที่ต้องใช้และทำให้การวัดคาโนซ์เกิดขึ้นได้ในอัตราเร็วที่สูงขึ้น อาจมีความจำเป็นต้องเติมสารเคมีที่เรียกว่า “เซนซิไทเซอร์” ลงไปในยางด้วย ตัวอย่างของเซนซิไทเซอร์ที่ใช้ในเทคโนโลยีการวัดคาโนซ์ยางด้วยลำอิเล็กตรอน ได้แก่ บิวทิลอะคริเลต (n-BA) ไทรมะทิลอลโฟรเพนไทระอะคริเลต (TMPTA) ไทรมะทิลอลมีเทนเทระอะคริเลต (TMMT) ไทโรโพรพิลีนไกลคอลไดอะคริเลต (TPGDA) มาลอิไมด์ไทฮอล และสารประกอบฮาโลจีนเนต เซนซิไทเซอร์เหล่านี้มีแนวโน้มที่จะทำให้โพลิเมอร์ตอบสนองต่ออิเล็กตรอน (เกิดอนุมูลอิสระ) ได้เร็วขึ้น ส่งผลให้ใช้ปริมาณลำอิเล็กตรอนหรือโดส¹ (radiation dose) ในการเกิดปฏิกิริยาต่ำลง ในทางตรงกันข้าม สารบางประเภท เช่น อะโรมาติกเอมีนและควิโนน สามารถทำหน้าที่เป็นสารต้านการเกิดอนุมูลอิสระ (anti-radical) ในปฏิกิริยาได้

ตัวอย่างของการวัดคาโนซ์ยางด้วยลำอิเล็กตรอน

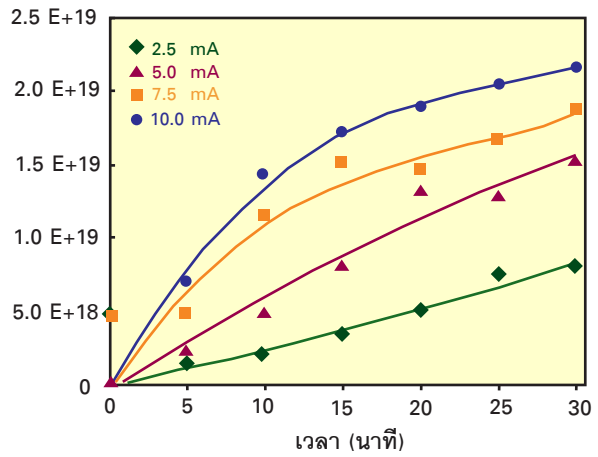
ในบทความนี้จะนำเสนอตัวอย่างการวัดคาโนซ์ยางชนิดต่างๆ ด้วยลำอิเล็กตรอน โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 การวัดคาโนซ์น้ำยางธรรมชาติด้วยลำอิเล็กตรอน (นิยมเติมเฉพาะสารเซนซิไทเซอร์ลงไปเพื่อช่วยให้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น) และส่วนที่ 2 การวัดคาโนซ์ยางแข็ง (อีลาสโตเมอร์) ด้วยลำอิเล็กตรอน ซึ่งส่วนใหญ่จะมีการเติมกำมะถันและสารตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณเล็กน้อยเพื่อเป็นการทำปรีวัลคาโนซ์ก่อนแล้วจึงใช้ฉายลำอิเล็กตรอนให้เกิดการวัดคาโนซ์อย่างสมบูรณ์หรือการใช้ลำอิเล็กตรอนเองในการทำให้เกิดการปรีวัลคาโนซ์เพื่อให้ยางคงรูปก่อนที่จะนำไปประกอบกับชิ้นส่วนอื่นๆ

1. การวัดคาโนซ์น้ำยางธรรมชาติด้วยลำอิเล็กตรอน

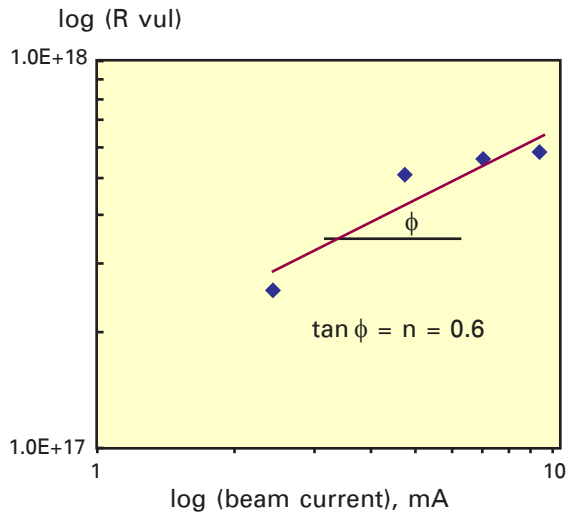
Chirinos และคณะ [2] ได้ศึกษาผลของปริมาณลำอิเล็กตรอนที่มีต่อการวัดคาโนซ์น้ำยางธรรมชาติพบว่า เมื่อให้กระแสลำอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น ปริมาณการเกิดวัดคาโนซ์หรือความหนาแน่นของโครงสร้างร่างแหจะเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งอัตราการวัดคาโนซ์หาได้จากสมการที่ 1 และค่า 0.6 นั้นได้มาจากความชันของกราฟในรูปที่ 4

	$R_{vul} = k \times I^{0.6}$	--- (1)
เมื่อ	R_{vul}	คือ อัตราการวัดคาโนซ์
	k	คือ ค่าคงที่
	I	คือ กระแสลำอิเล็กตรอน

ความหนาแน่นของโครงสร้างร่างแห



รูปที่ 3 ความหนาแน่นของโครงสร้างร่างแหของฟิล์มจากน้ำยางธรรมชาติที่วัดคาโนซ์ด้วยลำอิเล็กตรอน 250 keV และใช้เซนซิไทเซอร์ n-BA 5 phr

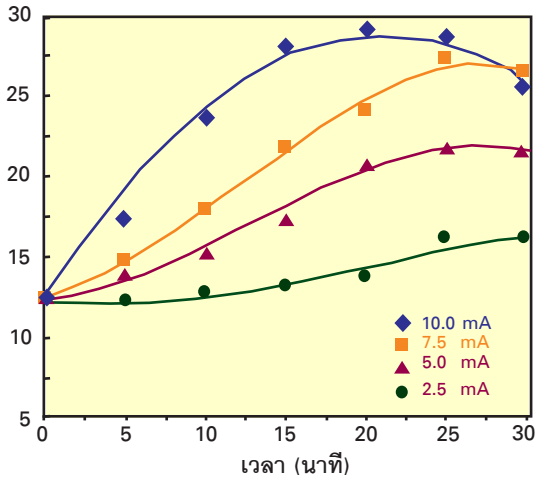


รูปที่ 4 พลาของกระแสลำอิเล็กตรอนต่ออัตราการวัดคาโนซ์ของน้ำยางธรรมชาติ

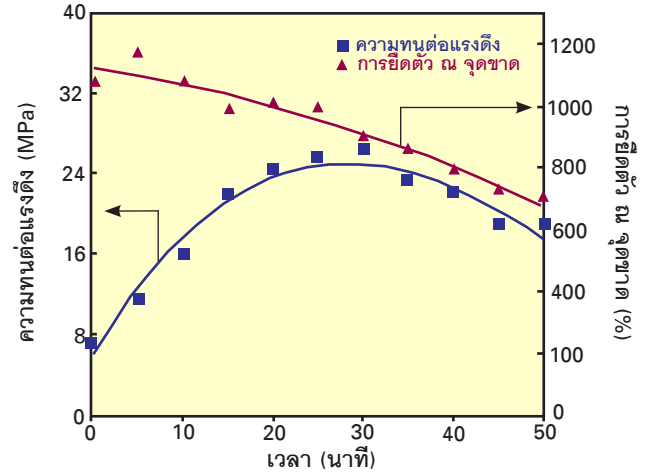
หลังการวัดคาโนซ์น้ำยางธรรมชาติด้วยลำอิเล็กตรอนแล้ว นำฟิล์มที่ได้มาทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการวัดคาโนซ์ ความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น การยืดตัว ณ จุดขาดและการบวมตัวจะลดลง ซึ่งฟิล์มที่ได้จะมีค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 29.1 MPa เมื่อให้กระแสลำอิเล็กตรอนขนาด 10 mA เป็นเวลา 20 นาที (รูปที่ 5)

4 ปริมาณลำอิเล็กตรอนหรือโดส (radiation dose) คือ พลังงานของลำอิเล็กตรอนที่มวลของวัสดุ 1 หน่วยได้รับ มีหน่วยตามมาตรฐาน SI (Standard International unit) คือ เกรย์ (Gy) โดยที่ 1 Gy = 1 J/kg = 1 W (sec/kg) และหน่วยที่นิยมใช้คือ rad โดยที่ 1 Mrad = 10 kGy = 10 kJ/kg

ความทนต่อแรงดึง (MPa)



รูปที่ 5 ความทนต่อแรงดึงของฟิล์มจากน้ำยางธรรมชาติ ที่วัลคาไนซ์ด้วยลำอิเล็กตรอน 250 keV และใช้เซนซีไทเซอร์ n-BA 5 phr



รูปที่ 6 สมบัติการรับแรงดึงของฟิล์มจากน้ำยางธรรมชาติ ที่วัลคาไนซ์ด้วยลำอิเล็กตรอน 250 keV, 10 mA

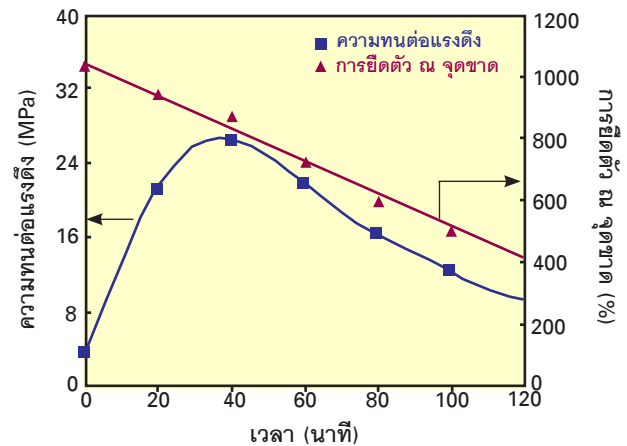
Haque และคณะ [3] ได้ศึกษาการวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติ ด้วยลำอิเล็กตรอนพบว่า

1. สารลดฟอง (defomer) ไม่มีผลต่อสมบัติของฟิล์มที่ได้ หลังการวัลคาไนซ์ และการใช้เพียง 0.2 phr ก็เพียงพอที่จะทำให้ ไม่เกิดฟองขึ้นเมื่อกวนน้ำยาง

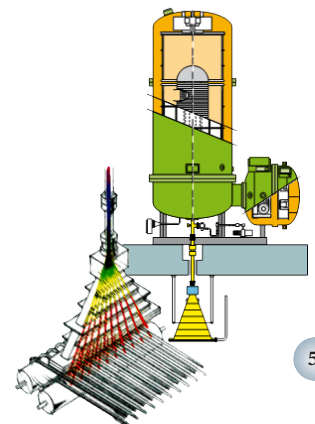
2. การวัลคาไนซ์โดยใช้กระแสลำอิเล็กตรอนสูงจะใช้เวลา ในการวัลคาไนซ์สั้นลง (รูปที่ 6 และรูปที่ 7) จากรูปที่ 6 (ใช้กระแส ลำอิเล็กตรอนเท่ากับ 10 mA) จะเห็นว่า เมื่อให้เวลาในการฉาย ลำอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น ความทนต่อแรงดึงจะมีค่าสูงขึ้นและจะมี ค่าสูงสุดประมาณ 26 MPa เมื่อฉายลำอิเล็กตรอนไป 30 นาที และการยืดตัว ณ จุดขาดจะมีค่าลดลงเมื่อเวลาที่ใช้การฉาย ลำอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น แต่เมื่อใช้อัตราการฉายของกระแส ลำอิเล็กตรอนต่ำ (5 mA) พบว่าจะได้ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุด ประมาณ 26 MPa ที่เวลาการฉายลำอิเล็กตรอนเท่ากับ 40 นาที และได้ค่าการบวมตัวที่ต่ำที่สุดและความหนาแน่นของการเชื่อมโยง สูงที่สุดด้วย

3. สารเซนซีไทเซอร์ทั้งสอง คือ โนเนนไดออกไซด์อะคริเลต (nonanediol diacrylate; NDDA) และบิวทิลอะคริเลต (butyl acrylate; n-BA) ให้สมบัติของฟิล์มจากน้ำยางไม่แตกต่างกัน และการเติม สารเซนซีไทเซอร์ในครั้งเดียวจะดีกว่าการแบ่งเติมเป็นครั้งย่อยๆ เนื่องจากการวัลคาไนซ์สามารถเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์ได้เร็วกว่า

4. น้ำยางที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solid content; TSC) ต่ำจะให้ความทนต่อแรงดึงสูงกว่าน้ำยางที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดสูง ทั้งนี้เนื่องจากน้ำยางที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดต่ำจะมีปริมาณน้ำ อยู่มาก ทำให้โมเลกุลของยางนั้นสามารถเคลื่อนที่ได้ดีและเกิดอนุมูล ได้ง่าย อนุมูลยางมีโอกาสที่จะสัมผัสกับลำอิเล็กตรอนมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลสูงขึ้นด้วย



รูปที่ 7 สมบัติการรับแรงดึงของฟิล์มจากน้ำยางธรรมชาติ ที่วัลคาไนซ์ด้วยลำอิเล็กตรอน 250 keV, 5 mA



2. การวัลคาไนซ์ยางแห้ง (อีลาสโทเมอร์) ด้วยลำอิเล็กตรอน

2.1 ยางอีพดีเอ็ม (EPDM)

Majumder และคณะ [4] ศึกษาผลของการเพิ่มปริมาณ TMPTA และปริมาณลำอิเล็กตรอนหรือโดสต่อสมบัติการรับแรงดึงที่อุณหภูมิห้องของยางอีพดีเอ็มพบว่า ที่ปริมาณลำอิเล็กตรอน 100 kGy เมื่อเพิ่มปริมาณ TMPTA จนถึงร้อยละ 20 จะให้ยางอีพดีเอ็มที่มีความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น (จาก 1.3 MPa ที่ TMPTA ร้อยละ 0 เพิ่มเป็น 1.9 MPa ที่ TMPTA ร้อยละ 20 ซึ่งเพิ่มขึ้นร้อยละ 46) และค่าโมดูลัสก็ให้ผลในทำนองเดียวกัน คือ 100% โมดูลัส และ 200% โมดูลัส จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 50 และ 63 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการยืดตัว ณ จุดขาดจะมีค่าลดลง ค่าความทนต่อแรงดึงของตัวอย่างควบคุม (ไม่มี TMPTA) จะเพิ่มขึ้นจาก 1.2 เป็น 1.5 MPa เมื่อได้รับปริมาณลำอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 50 kGy การยืดตัว ณ จุดขาดลดลง ในขณะที่ 100% โมดูลัส และ 200% โมดูลัสเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 50 สมบัติการรับแรงดึงแปรตามความหนาแน่นของการเชื่อมโยง น้ำหนักโมเลกุลที่ลดลงเนื่องมาจากการเกิดการเสื่อมสภาพ (degradation) เป็นต้น ข้อมูลในตารางที่ 3 ซึ่งให้เห็นว่าสมบัติของยางอีพดีเอ็มวัลคาไนซ์ด้วยลำอิเล็กตรอนที่ได้จะขึ้นกับปัจจัยหลายปัจจัยด้วยกัน ตัวอย่างเช่น ความทนต่อแรงดึงและโมดูลัสจะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของ TMPTA หรือปริมาณลำอิเล็กตรอน ซึ่งมีผลมาจากความหนาแน่นของการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น ส่วนการลดลงของค่าการยืดตัว ณ จุดขาดอาจเกิดจากการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของการเชื่อมโยงและการขาดของสายโซ่ที่เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณลำอิเล็กตรอนสูงขึ้น

ตารางที่ 3 สมบัติการรับแรงดึงของยางอีพดีเอ็ม

ตัวอย่าง	ความทนต่อแรงดึง (MPa)	การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	100% โมดูลัส (MPa)	200% โมดูลัส (MPa)
E _{0/0}	1.2	985	0.5	0.6
E _{0/50}	1.5	524	0.8	0.9
E _{0/100}	1.3	378	0.8	1.1
E _{0/200}	1.2	340	0.9	1.2
E _{0/500}	1.1	309	1.0	1.4
EB _{1/100}	1.4	360	0.9	1.2
EB _{2/100}	1.5	309	0.9	1.4
EB _{5/100}	1.8	293	1.0	1.5
EB _{10/100}	1.8	249	1.1	1.7
EB _{20/100}	1.9	230	1.2	1.8
EB _{10/0}	1.0	349	0.6	1.2
EB _{10/50}	1.4	261	0.9	1.4
EB _{10/100}	1.8	249	1.1	1.7
EB _{10/200}	2.0	229	1.4	1.8
EB _{10/500}	1.8	210	1.5	1.69
DB _{10/100}	1.4	309	0.8	1.4
TB _{10/100}	2.0	190	1.4	1.9

หมายเหตุ: Ex/y คือ ยางอีพดีเอ็ม (ควบคุม)
 EBx/y คือ ยางอีพดีเอ็มที่เติม TMPTA
 x คือ ปริมาณของโมโนเมอร์ (%)

DBx/y คือ ยางอีพดีเอ็มที่เติม TPGDA
 TBx/y คือ ยางอีพดีเอ็มที่เติม TMMT
 y คือ ปริมาณลำอิเล็กตรอน (kGy)

Bhowmick และคณะ [1] ได้ศึกษาการวัลคาไนซ์ยางอีพดีเอ็มสำหรับผลิตสายเคเบิลโดยใช้สูตรผสมเคมีดังแสดงไว้ในตารางที่ 4 ในการทดลองนี้ใช้ปริมาณล้าอิเล็กตรอนสูงสุดเท่ากับ 100 kGy (10 Mrad) สมบัติของยางคอมพาวด์แสดงไว้ในตารางที่ 5 ส่วนตารางที่ 6 แสดงสมบัติของยางคอมพาวด์ที่ใช้ผลิตสายเคเบิลที่ทนต่ออากาศและเปลวไฟสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล โดยใช้ปริมาณล้าอิเล็กตรอนในการวัลคาไนซ์เท่ากับ 15 Mrad

ตารางที่ 4 สูตรผสมเคมีสำหรับผลิตสายเคเบิลด้วยยางอีพดีเอ็ม

สูตรผสมเคมี	ปริมาณ (phr)
ยางอีพดีเอ็ม	100
สารต้านออกซิเดชัน (Naugard 445)	1
สารต้านออกซิเดชัน (TDQ)	1
ไซพาราฟิน	5
เคลย์ (calcined clay)	100
น้ำมันพาราฟินิก	5
ไซเลน (vinyl silane)	1
TMPTA	1
ปริมาณล้าอิเล็กตรอน	10 Mrad

หมายเหตุ: 1. Naugard 445 = 4,4'-bis (alpha,alpha-dimethylbenzyl) diphenylamine
 2. TDQ = 2,2,4-trimethyl-1,2-dihydroquinoline
 3. TMPTA = trimethylolpropane trimethacrylate

ตารางที่ 5 สมบัติของยางอีพดีเอ็ม

สมบัติ	ข้อกำหนด	ค่าที่ได้
สมบัติเชิงกล		
- ความทนต่อแรงดึง (MPa)	4	4
- การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	200	345
สมบัติทางไฟฟ้า		
- volume resistivity; VR (Ohm-cm)	1×10^{15}	9.7×10^{14}
- breakdown voltage; BVD (Volt)	25	27
สมบัติหลังการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 150°C, 10 วัน	ก่อนการบ่มแรง	หลังการบ่มแรง
- ความทนต่อดึง (MPa)	3	2 (ลดลง 33%)
- การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	345	145 (ลดลง 55%)



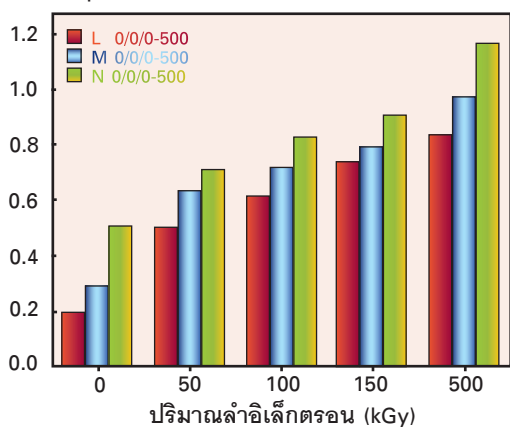
ตารางที่ 6 สมบัติของยางอีพดีเอ็มที่ใช้ผลิตสายเคเบิลที่ทนต่ออากาศและเปลวไฟสำหรับรถยนต์ดีเซล

สมบัติ	ข้อกำหนด	ค่าที่ได้
ความทนต่อแรงดึง (MPa)	12.0	17.2
การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	ไม่ต่ำกว่า 200	497
volume resistivity; VR (Ohm-cm)	1×10^{13}	1×10^{13}
สมบัติหลังการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 170°C, 7 วัน - ความทนต่อแรงดึง (MPa) - การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	เปลี่ยนแปลงไม่เกิน 50% เปลี่ยนแปลงไม่เกิน 50%	เปลี่ยนแปลง 33% เปลี่ยนแปลง 37%
การบวมตัวในน้ำมันดีเซลและมิเนอรัล สปิริต (สารละลายเนฟทา) ที่อุณหภูมิ 25°C, 96 ชั่วโมง	ไม่เกิน 10%	ผ่านข้อกำหนด
LOI ²	ไม่ต่ำกว่า 28	32

2.2. ยางไนไตรล์ (nitrile rubber)

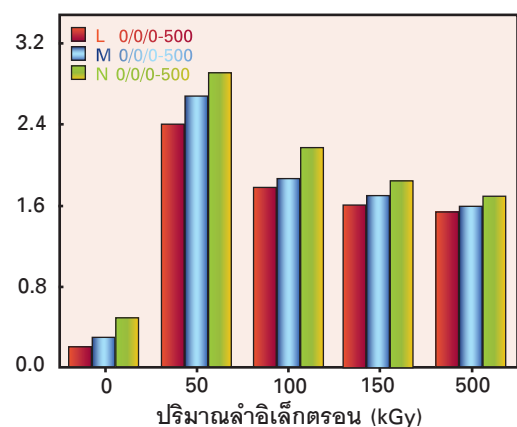
Vijayabaskar และคณะ [5] ศึกษาผลของล้าอเล็กตรอนที่มีต่อการวัลคาไนซ์ยางไนไตรล์เกรดต่างๆ (มีปริมาณอะคริไลไนไตรล์ต่างกัน) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณล้าอเล็กตรอน ค่า 100% โมดูลัสของยางไนไตรล์เกรดต่างๆ จะเพิ่มขึ้น โดยยางไนไตรล์ที่มีปริมาณอะคริไลไนไตรล์ร้อยละ 18 จะมีการเพิ่มขึ้นของค่า 100% โมดูลัสสูงกว่ายางเกรดอื่นๆ เช่น ที่ปริมาณล้าอเล็กตรอน 50 kGy ยางไนไตรล์ที่มีอะคริไลไนไตรล์ร้อยละ 18 จะมีการเพิ่มขึ้นของค่า 100% โมดูลัสเท่ากับร้อยละ 155 ในขณะที่ยางไนไตรล์ที่มีอะคริไลไนไตรล์ร้อยละ 39 และร้อยละ 33 จะมีการเพิ่มขึ้นของค่า 100% โมดูลัสเท่ากับร้อยละ 117 และ 50 ตามลำดับ (รูปที่ 8) ทั้งนี้สาเหตุน่าจะเนื่องมาจากปฏิกิริยาการเชื่อมโยงจะเกิดในสายโซ่ของบิวทาไดอีน เมื่อปริมาณอะคริไลไนไตรล์สูงขึ้น ปริมาณบิวทาไดอีนในยางไนไตรล์จะลดลง มีผลให้ปริมาณการเชื่อมโยงของโมเลกุลลดลงไปด้วย ฉะนั้นค่า 100% โมดูลัสจึงมีค่าลดลงตามปริมาณอะคริไลไนไตรล์ที่เพิ่มขึ้น จากรูปที่ 9 จะเห็นว่าที่ปริมาณล้าอเล็กตรอน 50 kGy จะให้ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดสำหรับยางทุกเกรด และที่ปริมาณล้าอเล็กตรอนสูงๆ ค่าความทนต่อแรงดึงจะลดลง โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้ ที่ปริมาณล้าอเล็กตรอนสูงจะมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูง กลุ่มของโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ ทำให้ระบบโดยรวมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและความยืดหยุ่นลดลง

100%โมดูลัส (MPa)



รูปที่ 8 โมดูลัสของยางไนไตรล์ที่ปริมาณล้าอเล็กตรอนต่างๆ

ความทนต่อแรงดึง (MPa)



รูปที่ 9 ความทนต่อแรงดึงของยางไนไตรล์ที่ปริมาณล้าอเล็กตรอนต่างๆ

² LOI หรือ Limiting Oxygen Index คือ ตัวเลขความเข้มข้นของออกซิเจนต่ำสุดในของผสมระหว่างออกซิเจนกับไนโตรเจนที่ช่วยให้เกิดการเผาไหม้ของชิ้นทดสอบ (ในแนวตั้ง) ภายใต้สภาวะทดสอบการติดไฟที่กำหนดของโพลีเมอร์ ถ้า LOI มีค่าสูงแสดงว่าวัสดุนั้นติดไฟได้ยาก

Bhowmick และคณะ [1] ได้ศึกษาสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางไนโตรลสำหรับผลิตซีลยางโดยใช้สูตรผสมเคมีดังแสดงไว้ในตารางที่ 7 ในการเตรียมยางคอมพาวด์ได้เติมกำมะถันและสารตัวเร่งปริมาณเล็กน้อยลงไปในสูตรผสมเคมีเพื่อทำวัลคาไนซ์บางส่วน (prevulcanization) จากนั้นจึงนำไปวัลคาไนซ์ต่อให้สมบูรณ์ด้วยปริมาณล้าอิเล็กตรอน 100 kGy (10 Mrad) สมบัติของยางไนโตรลวัลคาไนซ์แสดงไว้ในตารางที่ 8 ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีสมบัติผ่านตามข้อกำหนด

ตารางที่ 7 สูตรผสมเคมีสำหรับผลิตซีลยางด้วยยางไนโตรล

สูตรผสมเคมี	ปริมาณ (phr)
ยางไนโตรล (33% อะคริโลไนโตรล)	100
กำมะถัน	0.35
MBTS	1
TMTD	0.75
ปริมาณล้าอิเล็กตรอน	10 Mrad

หมายเหตุ: 1. MBTS = dibenzothiazyl disulfide
2. TMTD = tetramethylthiuram

ตารางที่ 8 สมบัติของยางไนโตรลที่ใช้ผลิตซีลยาง

สมบัติ	ข้อกำหนด	การวัลคาไนซ์	
		กำมะถัน/สารตัวเร่ง	ล้าอิเล็กตรอน
ความแข็ง (Shore A)	60 ± 5	58-61	63-64
ความทนต่อแรงดึง ไม่ต่ำกว่า (MPa)	12.0	9.5	10.0-15.0
การยืดตัว ณ จุดขาด ไม่ต่ำกว่า (%)	300	340	230-310
การเสียรูปถาวรหลังกดที่ระยะกด 25% อุณหภูมิ 100°C, 24 ชั่วโมง ไม่เกิน (%)	25.0	10.1	2.6-6.0
การบวมตัวในน้ำมันเชื้อเพลิง B ที่อุณหภูมิห้อง, 24 ชั่วโมง - ปริมาตรเปลี่ยนแปลงไม่เกิน (%)	30.0	27.5	22.0-29.0
การบวมตัวในน้ำมันเครื่องที่อุณหภูมิ 100°C, 72 ชั่วโมง - ปริมาตรเปลี่ยนแปลงไม่เกิน (%)	+10, -5	-6.2	-4.0 ถึง -1.5
การเปลี่ยนแปลงหลังบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 100°C, 72 ชั่วโมง ไม่เกิน (%)			
- ความแข็ง	+7, 0	+5	+4 ถึง +6
- ความทนต่อแรงดึง	± 20	-12.0	-5.0 ถึง +9.0
- การยืดตัว ณ จุดขาด	+10, -30	-23.1	-24.0 ถึง -10.0

2.3 ยางฮาโลบิวไทล์ (halo-butyl Rubber)

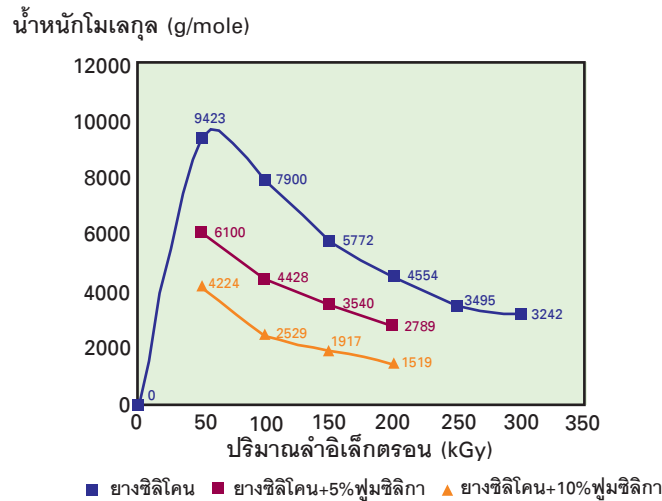
ล้าอิเล็กตรอนได้รับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมยางล้อเพื่อพรีวัลคาไนซ์หรือทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงบางส่วนในยางบุเคลือบผิวด้านใน (inner liner) ซึ่งจะช่วยให้มีความคงรูปดีขึ้น การประกอบยางง่ายขึ้นทำให้อัตราการผลิตเร็วขึ้น ยางที่จะพรีวัลคาไนซ์ต้องมีความแข็งแรงของยางดิบสูงและสามารถขึ้นรูปและวัลคาไนซ์ในแม่พิมพ์ได้ง่ายเพื่อลดของเสีย สมบัติของยางบุเคลือบผิวด้านในได้แสดงไว้ในตารางที่ 9 โดย Mohammed และ Walker [6]

ตารางที่ 9 สมบัติทางกายภาพของยางฮาโลบิวไทล์ที่ใช้ผลิตยางบุเคลือบผิวชั้นใน

ปริมาณล้าอิเล็กตรอน (kGy)	0	7.5	10	15	20	25	30	50
ยางโบรมิวไทล์								
ความแข็ง (Shore A)	53	50	50	48	48	48	48	46
100% โมดูลัส (MPa)	1.2	1.2	1.1	1.1	1.0	0.9	0.8	0.9
300% โมดูลัส (MPa)	4.8	4.3	4.3	4.2	4.3	3.8	3.6	4.0
ความทนต่อแรงดึง (MPa)	9.9	9.2	8.7	8.5	8.0	8.0	6.9	7.5
การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	640	630	600	620	610	630	670	620
การดึงลอกที่อุณหภูมิห้อง (kN/m)	4.2	3.7	3.2	5.7	6.4	3.5	3.8	3.6
การดึงลอกที่อุณหภูมิ 100°C (kN/m)	6.3	5.5	3.7	4.1	3.9	2.8	1.1	1.4
ยางคลอโรบิวไทล์								
ความแข็ง (Shore A)	48	46	44	45	44	44	43	40
100% โมดูลัส (MPa)	0.9	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	0.9	0.8
300% โมดูลัส (MPa)	4.1	4.3	4.3	4.2	4.0	3.9	3.9	3.5
ความทนต่อแรงดึง (MPa)	8.7	7.8	7.3	7.2	6.7	6.5	6.1	5.4
การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	600	550	530	520	510	510	480	470
การดึงลอกที่อุณหภูมิห้อง (kN/m)	2.2	4.0	4.3	4.6	3.9	3.5	3.0	2.4
การดึงลอกที่อุณหภูมิ 100°C (kN/m)	1.7	1.2	1.1	1.1	0.6	0.7	0.5	0.3

2.4 ยางซิลิโคน (silicone rubber)

Frounchi M. และคณะ [7] ศึกษาเปรียบเทียบการวัลคาไนซ์ยางซิลิโคนด้วยเพอร์ออกไซด์และล้าอิเล็กตรอนพบว่า การวัลคาไนซ์ยางซิลิโคนด้วยล้าอิเล็กตรอนโดยที่ไม่เติมสารเคมีอื่นใดเลยนั้นสามารถทำได้ และให้ค่าโมดูลัส ความทนต่อแรงดึง และความแข็งสูงกว่ายางซิลิโคนที่วัลคาไนซ์ด้วยเพอร์ออกไซด์ สำหรับที่ทุกปริมาณล้าอิเล็กตรอนที่ใช้ การยืดตัว ณ จุดขาดของยางซิลิโคนที่วัลคาไนซ์ด้วยปริมาณล้าอิเล็กตรอนต่ำ (150 kGy) จะมีค่าสูงกว่าค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของยางซิลิโคนที่วัลคาไนซ์ด้วยเพอร์ออกไซด์ และมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณล้าอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นและเมื่อวัดความหนาแน่นของการเชื่อมโยงโดยทดสอบการบวมตัวในตัวทำละลายพบว่า น้ำหนักโมเลกุลระหว่างพันธะเชื่อมโยงบ (molecular weight between crosslinks; M_c) ของยางซิลิโคนที่วัลคาไนซ์ด้วยปริมาณล้าอิเล็กตรอนจาก 50 kGy จนถึง 300 kGy ลดลงจาก 9,423 g/mol เหลือเพียง 3,242 g/mol (รูปที่ 10) การเติมฟุ้งซิลิกา (fumed silica) ร้อยละ 10 ลงในยางซิลิโคนจะทำให้โมดูลัสและความแข็งของยางเพิ่มขึ้น แต่จะทำให้ค่าน้ำหนักโมเลกุลระหว่างพันธะเชื่อมโยงบลดลงเหลือเพียง 1,519 g/mol เมื่อใช้ปริมาณล้าอิเล็กตรอนในการวัลคาไนซ์เท่ากับ 200 kGy นอกจากนี้การเติมฟุ้งซิลิกาจะไปช่วยลดปริมาณล้าอิเล็กตรอนที่ต้องใช้ในการวัลคาไนซ์เพื่อให้เกิดระดับการเชื่อมโยงโมเลกุลของยางเดียวกัน อย่างไรก็ตามการไม่เติมสารเคมีอื่นใดลงในยางที่วัลคาไนซ์ด้วยล้าอิเล็กตรอนจะให้ยางซิลิโคนที่สะอาด ปลอดภัย และเหมาะที่จะนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์



รูปที่ 10 น้ำหนักโมเลกุลระหว่างพันธะเชื่อมโยงของยางซิลิโคนที่เติมฟูลมซิลิกาที่ปริมาณลำอิเล็กตรอนต่างๆ

สรุป

การวัลคาไนซ์ยางด้วยลำอิเล็กตรอนเป็นเทคโนโลยีที่สะอาด ปลอดภัย ทำได้สะดวกรวดเร็ว ต้นทุนต่ำ และมีการนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางอย่างกว้างขวาง เช่น สายเคเบิล ยางซีล ยางล้อ ผลิตภัณฑ์จากน้ำยาง นอกจากนี้ยังมีการนำลำอิเล็กตรอนไปใช้ประโยชน์อื่นอีก ไม่ว่าจะเป็นการกราฟต์โพลีเมอร์ต่างๆ การวัลคาไนซ์ยางเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ หรือการนำลำอิเล็กตรอนไปใช้ฆ่าเชื้อโรคในการผลิตถุงมือผ้าตัด เป็นต้น ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติดี มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสอดคล้องกับความต้องการของตลาดในปัจจุบันและอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- Browmick, A.K. and Vijayabaskar V., "Electron beam curing of elastomers", *Rubber Chem. Technol.*, **79**, 402-428, (2006)
- Chirinos, H., Yoshii, F., Makuuchi, K. and Lugao, A., "Radiation vulcanization of natural rubber latex using 250 keV electron beam machine", *Nucl. Instr. And Meth. In Phys. Res. B*, **208**, 256-259, (2003)
- Haque, MD. E., Makuuchi, K., Mitomo, H., Yoshii, F. and Ikeda K., "A new trend in radiation vulcanization of natural rubber latex with a low energy electron beam", *Polym. J.*, **37**, 333-339, (2005)
- Majumder, P.S. and Bhowmick, A.K., "Structure-property relationship of electron-beam-modified EPDM rubber", *J. Appl. Polym. Sci.*, **77**, 323-337 (2000)
- Vijayabaskar, V., Tikku, V.K. and Bhowmick, A.K., "Electron beam modification and crosslinking: Influence of nitrile and carboxyl contents and level of unsaturation on structure and properties of nitrile rubber", *Radiat. Phys. Chem.*, **75**, 779-792 (2006)
- Mohammed, S.A.H. and Walker J., "Application of electron beam radiation technology in tire manufacturing", *Rubber Chem. Technol.*, **59**, 482-496, (1986)
- Frounchi M., Dadbin S. and Panahinia F., "Comparison between electron-beam and chemical crosslinking of silicone rubber", *Nucl. Instr. And Meth. In Phys. Res. B*, **243**, 354-358 (2006)
- Makuuchi, K., "An introduction to radiation vulcanization of natural rubber latex", T.R.I Global, Bangkok, 2003.

ชณภา นันสุวรรณ
 การศึกษา : ปริญญาโท (วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์) มหาวิทยาลัยมหิดล
 สถานที่ทำงานปัจจุบัน : นักวิเคราะห์โครงการ
 ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ