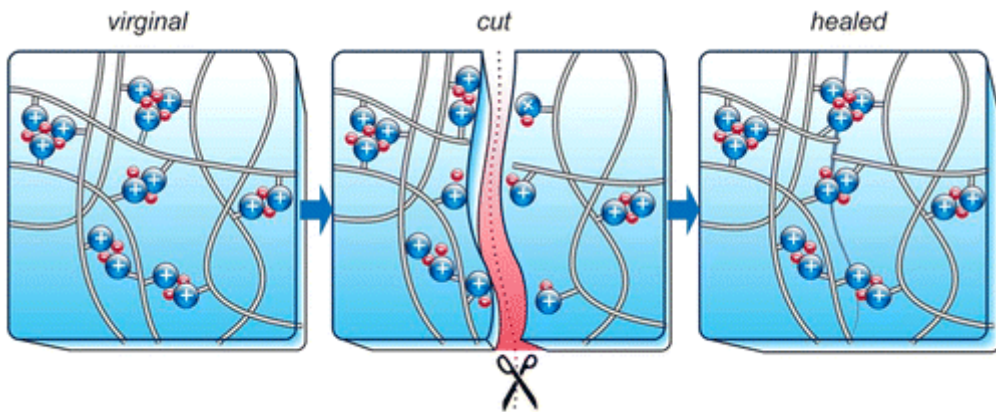


ยางซ่อมแซมตัวเองได้ (self-healing rubber)

ในช่วง 5 ปี ที่ผ่านมา ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีต่างๆ มีมากมายขึ้น โดยเฉพาะนวัตกรรมที่ใช้ในการประดิษฐ์จักรกลต่างๆ แต่่นวัตกรรมที่น่าสนใจมากที่สุดคือ การสร้างอุปกรณ์เทียมในเครื่องจักรกล เช่น แขนกลเทียม ผิวน้ำเทียม ซึ่งวัสดุที่ใช้จะต้องมีความยืดหยุ่นได้ดี มีการฉีกขาดต่ำ เป็นการพัฒนายางเชิงการซ่อมแซมตัวเองได้ (self-healing) ได้ นับเป็นการพัฒนาที่สำคัญนับตั้งแต่ Charles Goodyear ได้ค้นพบการวัลคาไนซ์ยาง



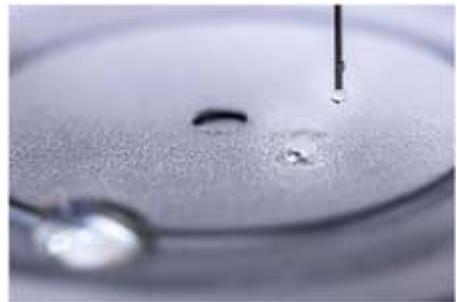
รูปที่ 1 กลไกการเกิดการซ่อมแซมตัวเอง (self-healing) ในพอลิเมอร์

นักวิจัยจากหลายมหาวิทยาลัยกำลังสนใจในเรื่องการซ่อมแซมตัวเองได้ (self-healing) ของยาง เนื่องจากวัสดุที่ซ่อมแซมตัวเองได้จะต้องสามารถเชื่อมติดกันได้โดยไม่มีการทำลายระบบโครงสร้างของผลิตภัณฑ์โดยใน ปี 2008 นักวิจัยจากมหาวิทยาลัย Matiere Molle et Chimie ประเทศฝรั่งเศส ได้ประสบความสำเร็จกับการคิดค้นพัฒนายางที่สามารถซ่อมแซมตัวเองได้เมื่อฉีกขาด โดยนักวิจัยระบุว่า ยางชนิดใหม่นี้มีข้อดีคือ สามารถซ่อมแซมตัวเองได้ และนำกลับมาใช้ซ้ำๆ ได้โดยจะยังคงรูปเดิมและไม่เกิดการคืบ (creep) และเมื่อยางขาดก็สามารถนำมาเชื่อมติดกันได้ง่ายๆ ด้วยการนำส่วนที่ขาดมาติดกันในอุณหภูมิห้องหรือที่ประมาณ 20 องศาเซลเซียส ในขณะที่ยางอย่างอื่นต้องใช้ความร้อนมาช่วยในการปะยางให้ติดกันโดยทั่วไปแล้วยางประกอบด้วยโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่ที่ยึดโยงกันอย่างแข็งแรง แต่โครงสร้างของยางแบบใหม่นี้ประกอบด้วยโมเลกุลขนาดเล็กกว่า ที่ยึดโยงกันด้วยธาตุไฮโดรเจนที่มีการเชื่อมโยงโมเลกุลในลักษณะที่เรียกว่าเครือข่ายซูปราโมเลกุล (supramolecular polymers) เมื่อยางมีรอยแตกหรือขาดออกจากกัน โมเลกุลก็จะเกิดการเชื่อมติดกันกับโมเลกุลใกล้ๆ ดังนั้นเมื่อให้แรงกดยาง โมเลกุลที่ขาดจะเกิดการซ่อมแซมตัวเองได้ด้วยการเชื่อมติดกัน ยางก็จะติดกันเองเหมือนใหม่ แต่กระบวนการนี้มีข้อจำกัดเรื่องเวลา เพราะต้องนำส่วนที่ขาดมาปะติดกันให้รวดเร็ว หากรอนานเกินไปจะทำให้ยางไม่สามารถเชื่อมติดกันได้อีกต่อไป เพราะโมเลกุลแต่ละข้างก็จะเชื่อมติดกับโมเลกุลใกล้ๆ ตัวเอง ซึ่งนักวิจัย ระบุว่า ควรให้ผิวน้ำของยางสัมผัสเข้าด้วยกันให้ได้ภายในหนึ่งสัปดาห์ หลังจากที่ที่ยางฉีกขาดหรือร้าว ซึ่งการพัฒนายางที่ซ่อมแซมตัวเองได้จะเป็นหนทางนำไปสู่การผลิตสินค้าใหม่ๆ เช่น เสื้อผ้าที่ซ่อมแซมตัวเองได้ ล้อยางหรือลูกโป่งที่ปะตัวเองได้ หรือของเล่นเด็กที่สามารถเชื่อมติดกันตัวเอง [1, 2]

ในปี 2015 นักวิจัยจาก The Leibniz Institute for Polymer Research และ The Dresden University of Technology ประเทศเยอรมนี และนักวิจัยจาก The Tampere University of Technology ประเทศฟินแลนด์ นำเสนอผลงานการพัฒนายางล้อรถยนต์ที่มีคุณสมบัติพิเศษที่สามารถซ่อมแซมได้ด้วยตัวเอง (self-healing tires) โดยการพัฒนาระบบการขึ้นรูปยางด้วยการเพิ่มองค์ประกอบของสารเสริมแรง (reinforcing agents) เช่น ซิลิกา หรือเคมีคาร์บอน ในสูตรยางคอมพาวด์ ให้มีสมบัติเทียบเท่ากับการขึ้นรูปยางแบบดั้งเดิมด้วยเทคนิควัลคาไนเซชัน ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญในการขึ้นรูปยางเพื่อให้ยางมีสมบัติที่แข็งแรง โดยการสร้างพันธะเชื่อมโยง (crosslinks) ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ โดยการขึ้นรูปยางแบบดั้งเดิมนั้น จะไม่สามารถซ่อมแซมผลิตภัณฑ์ยางได้เมื่อสายโซ่ถูกทำลาย จากการทดลองพบว่า ยางที่ผ่านการขึ้นรูปแบบใหม่นี้ สามารถซ่อมแซมตัวเองได้ที่อุณหภูมิห้อง และสามารถเร่งกระบวนการซ่อมแซมตัวเองได้ เมื่อเพิ่มความร้อนให้ยางที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที และจากการทดลอง ตัวอย่างยางที่ได้รับการซ่อมแซมเป็นเวลา 8 วัน พบว่า สามารถทนต่อความดันได้ถึง 754 psi (52 bar) ซึ่งสูงกว่ายางทั่วๆ ไป [3]

นักวิจัยจากมหาวิทยาลัย Beijing ได้ทำการพัฒนายางซิลิโคนที่สามารถซ่อมแซมตัวเองได้ โดยการปรับผิวยางซิลิโคนให้มีสมบัติเป็นซูเปอร์ไฮโดรโฟบิกหรือไม่ชอบน้ำยิ่งยวด (superhydrophobic) โดยใช้เลเซอร์กำลังสูง (high-power picoseconds laser) และเสียงสะท้อนทางตรง (direct replication) ซึ่งใช้มุมสัมผัส (contact angle) ที่ 151 องศา และมุมสไลด์ (sliding angle) 5 องศา หลังจากทำการบ่มเร่งด้วยโคโรนา (corona aging) ซึ่งพบว่า ยางซิลิโคนสามารถเปลี่ยนสมบัติจากซูเปอร์ไฮโดรโฟบิกเป็นซูเปอร์ไฮโดรฟิลิกหรือชอบน้ำยิ่งยวด (superhydrophilic) ซึ่งสมบัติซูเปอร์ไฮโดรโฟบิกเป็นตัวค้นพบที่สมบูรณ์ผ่านกระบวนการการซ่อมแซมตัวเอง (self healing) หลังจากนำยางมาผ่านเครื่อง water immersion aging พบว่า มุมสัมผัสบนผิวยางกว้างขึ้น เมื่อพลังงานอิสระพื้นผิว (surface free energy) เพิ่มขึ้น แรงตึงผิวเพิ่มขึ้น มีผลทำให้การเกิดการซ่อมแซมตัวเองของวัสดุซูเปอร์ไฮโดรโฟบิกมีความเสถียรขึ้น

นอกจากนี้ในปี 2017 นักวิจัยจากมหาวิทยาลัย Michigan ในสหรัฐอเมริกาได้ทำการพัฒนายางที่สามารถซ่อมแซมตัวเองได้ โดยการผสมยางพอลิยูรีเทนฟลูออโรเน (fluorinated polyurethane elastomer) กับสารกึ่งน้ำชนิดพิเศษที่มีชื่อว่า “fluorinated-decyl polyhedral oligomeric silsesquioxane (F-POSS)” ซึ่งสามารถพันวัสดุนี้ลงบนผิววัสดุ และทำให้วัสดุมีลักษณะคล้ายยางเคลือบที่มีความทนทานสูงและยืดหยุ่นมากกว่าผลงานวิจัยเดิม หากโมเลกุลของ F-POSS ถูกขีดข่วนออกจากผิว สารนี้ก็จะเกิดการเคลื่อนย้ายมาแทนที่ผิวที่ถูกขีดข่วนได้ ทำให้เกิดการเคลือบผิวได้ซ้ำๆ หลายร้อยครั้ง แต่ความสามารถในการซ่อมแซมตัวเองมีข้อจำกัดตามความหนาของการเคลือบผิว Anish Tuteja ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศูนย์วิศวกรรมและวัสดุ หัวหน้าโครงการนี้ระบุว่า "ตลอด 20-30 ปีที่ผ่านมา ได้มีการค้นหาผิวซูเปอร์ไฮโดรโฟบิกหลายชนิด แต่ก็ไม่มีสารตัวไหนที่ทนทานได้ดี นี่ถือเป็นความสำเร็จของทีมงาน ซึ่งเราจะพัฒนาให้สารเคลือบซูเปอร์ไฮโดรโฟบิกให้มีราคาถูกลงและมีคุณภาพดีขึ้น" [4, 5]



เมื่อปี 2017 นักวิจัยจากคณะวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัย Harvard (Harvard John A. Paulson School of Engineering and Applied Sciences หรือ SEAS) ได้พัฒนายางชนิดใหม่ที่มี

ความเหนียวเหมือนยางธรรมชาติ แต่สามารถซ่อมแซมตัวเองได้ (self-healing) การวิจัยดังกล่าวได้รับการตีพิมพ์ในวารสาร Advanced Materials ทั้งนี้ วัสดุที่ซ่อมแซมตัวเองได้ไม่ใช่สิ่งใหม่ นักวิจัยที่ SEAS ได้พัฒนาไฮโดรเจลที่สามารถซ่อมแซมตัวเองได้ โดยใช้น้ำในการทำปฏิกิริยากับพันธะที่ผันกลับได้ (reversible bonds) จึงทำให้เกิดการซ่อมแซมหรือเชื่อมติดได้ อย่างไรก็ตาม สมบัติเชิงวิศวกรรมด้านการซ่อมแซมตัวเองได้ต้องเป็นวัสดุที่คล้ายยางซึ่งเป็นสิ่งที่ท้าทาย เนื่องจากยางเป็นพอลิเมอร์ที่มีการเชื่อมโยงพันธะโควาเลนต์แบบถาวร ทำให้พันธะมีความแข็งแรงสูง เมื่อแตกออกจะไม่สามารถเชื่อมต่อใหม่ได้ หากต้องการทำให้ยางสามารถซ่อมแซมตัวเองได้จะต้องทำให้พันธะเกิดการเชื่อมต่อได้แบบพอลิเมอร์ที่ผันกลับได้ เพื่อให้พันธะสามารถแยกตัวออกและกลับมารวมตัวใหม่

Li-Heng Cai นักศึกษาหลังปริญญาเอกที่ SEAS กล่าวว่า การวิจัยที่ผ่านมาใช้พันธะไฮโดรเจนที่ผันกลับในการเชื่อมกับพอลิเมอร์ที่เป็นยาง แต่พันธะผันกลับมีความอ่อนแอกว่าพันธะโควาเลนต์ จึงเกิดคำถามขึ้นว่า เราจะสามารถผลิตวัสดุที่เหนียวและซ่อมแซมตัวเองได้หรือไม่

Cai และ Jinrong Wu ศาสตราจารย์รับเชิญจากมหาวิทยาลัย Sichuan ประเทศจีน และ David A. Weitz ศาสตราจารย์ด้านฟิสิกส์และฟิสิกส์ประยุกต์ ได้ทำการพัฒนาไฮบริดที่มีทั้งพันธะโควาเลนต์และพันธะผันกลับ ซึ่งแนวคิดในการนำเอาพันธะทั้งโควาเลนต์และผันกลับมาอยู่รวมกันจะทำให้ได้ยางเหนียวที่ซ่อมแซมตัวเองได้ แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถทำได้ เพราะพันธะโควาเลนต์และพันธะผันกลับไม่สามารถอยู่รวมกันได้

Cai ระบุว่า พันธะทั้งสองชนิดไม่สามารถผสมเข้ากันได้ เหมือนน้ำกับน้ำมัน ดังนั้น นักวิจัยจึงได้พัฒนาโมเลกุลที่สามารถยึดพันธะทั้งสองเข้าด้วยกัน ซึ่งเรียกว่า พอลิเมอร์แบบกิ่งที่จัดเรียงแบบสุ่ม (randomly branched polymers) ทำให้พันธะเดิมที่รวมตัวติดกันไม่ได้ ให้สามารถอยู่ติดกันได้ในระดับโมเลกุล และด้วยวิธีนี้ทำให้ได้ยางโปร่งใส เหนียวและซ่อมแซมตัวเองได้ ทั้งนี้ ยางทั่วไปมีแนวโน้มที่จะขาด ณ จุดความเค้นเมื่อมีแรงกระทำ เมื่อทำการยืดยางไฮบริดที่พัฒนาขึ้น ซึ่งเรียกว่า รอยร้าว (craze) ซึ่งจะเหมือนรอยแตกแต่ยังมีเส้นใยเชื่อมติดอยู่ รอยร้าวดังกล่าวจะกระจายความเค้นออกไป จึงทำให้ไม่มีจุดศูนย์รวมของความเค้น เมื่อความเค้นถูกปลดปล่อย วัสดุจะกลับไปยังรูปทรงเดิมและรอยร้าวจะซ่อมแซมตัวเอง ขณะนี้ สำนักงานการพัฒนาเทคโนโลยีของมหาวิทยาลัย Harvard ได้ยื่นขอจดสิทธิบัตรเทคโนโลยีและมองหาโอกาสการนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์อย่างจริงจัง

จากผลงานวิจัยต่างๆ เห็นได้ชัดถึงความพยายามในการพัฒนาให้สามารถซ่อมแซมตัวเองได้ ทั้งวิธีการทางเคมีและทางกายภาพ เพื่อให้ยางสามารถซ่อมแซมตัวเองได้เร็วที่สุด แต่ยังมีเรื่องข้อจำกัดเรื่องเวลาที่ติดประสาน ราคาของสารตั้งต้น หรือเครื่องมือทดสอบ ซึ่งอาจเป็นเหตุให้ยางที่ซ่อมแซมตัวเองได้อาจจะมีราคาสูงในช่วงแรก หากมีการพัฒนาในระยะยาว ยางที่ซ่อมแซมตัวเองได้ย่อมมีราคาถูกลงในอนาคต

ที่มา

1. <https://www.nature.com/articles/nature06669>
2. <https://www.voathai.com/a/a-47-2008-03-31-voa4-90640264/921448.html>
3. <https://functionalmat.wordpress.com/2015/10/08>
4. <http://rubberjournalasia.com/researchers-develop-rubbery-self-healing-water-repellent-coating/>
5. <http://www.rubbernews.com/article/20170428/NEWS/170429948/waterproof-fluorinated-elastomer-coating-heals-itself>
6. <https://www.thairath.co.th/content/1076602>