

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ยางมีมากมายหลายชนิด ทั้งยางธรรมชาติ และยางสังเคราะห์ การเลือกชนิดของยางหลักเป็นเรื่องจำเป็น เพราะว่า สารเคมีที่ใส่เข้าไปในยางนั้น ให้ผลค่อนข้างจำกัด เช่น กรณีที่ยางธรรมชาติมีสมบัติที่ไม่ทนทานต่อน้ำมันปิโตรเลียม การใส่สารเคมีต่างๆ เข้าไป ก็ไม่สามารถทำให้ยางธรรมชาติ ทนทานต่อน้ำมันปิโตรเลียมได้ เป็นต้น จำเป็นที่จะต้องเลือกใช้ยางให้ถูกชนิดก่อนจึงจะสามารถใช้งานได้ หรือ กรณีการที่จะใช้ยางให้ทนความร้อน การใส่สารป้องกันเสื่อม ไม่ทำให้ยางธรรมชาติสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง แต่ถ้าเลือกใช้อื่น เช่น ยางบิวไทล์ หรือยางอีพดีเอ็ม หรือยางซิลิโคน แล้วจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีความคงทนต่อความร้อนดีกว่าการใช้ยางธรรมชาติที่ใส่สารกันเสื่อมมาก

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 การเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเนื้อยางระหว่างกระบวนการอบคงรูป พบว่าเมื่อยางได้รับความร้อนในช่วงแรกขณะอบยางซึ่งเป็นช่วงที่ยางมีอุณหภูมิเป็นอุณหภูมิห้อง ยางจะมีความสามารถในการนำความร้อนในลักษณะคงที่ จนกระทั่งยางมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงช่วงระหว่าง 60 – 110 องศาเซลเซียส ความสามารถในการนำความร้อนของยางจะลดลงเล็กน้อย เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยช่วงนี้เป็นช่วงที่ยางเกิดการเชื่อมโยง (Crosslink) ระหว่างโซ่โมเลกุลของยาง ซึ่งยางจะต้องคายพลังงานออกมา บางส่วนที่เรียกว่าค่าความร้อนที่ยางผลิตขึ้นได้เอง (Heat generation) สำหรับการวิเคราะห์หาระดับการสุกตัวของยางโดยใช้ทีทีซีชาร์ตเปรียบเทียบกับวิธีการทดสอบการบวมพองสามารถสรุปได้ว่า ยางสุกจริงเมื่ออบล้อย่างต้นเป็นเวลา 3.5 ชั่วโมง ดังนั้นจึงสามารถทำนายผลการสุกตัวของยางเมื่อได้ทราบขนาด ภาวะเริ่มต้น และเวลาที่ใช้ในการอบคงรูปยาง เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบภาวะที่เหมาะสมที่สุด ในการอบคงรูปยาง จะเห็นได้ว่าข้อดีของการวิจัยนี้ สามารถประมาณหาระดับการสุกตัวของยางมีความแม่นยำ แต่ยังคงขาดการศึกษาให้ชัดเจนในการใช้อุปกรณ์อื่นในการอบคงรูปงาน [4]

2.1.2 การวิจัยเรื่อง การประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟในการทำความร้อนยาง (Application of microwave energy of rubber heating) ทำการทดลองให้ความร้อนแก่ยางโดยใช้วิธีแบบธรรมดา (Conventional heating) กับวิธีการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave heating) เพื่อเปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานและเวลาในการให้ความร้อนรวม สำหรับการใช้กระบวนการให้

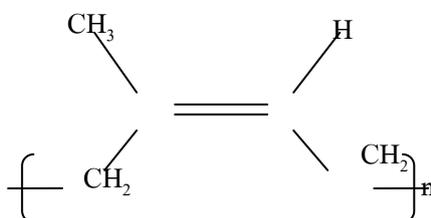
ความร้อนแต่ละแบบ พบว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟในการทำความร้อน เป็นการให้ความร้อนเชิงปริมาตร (Volumetric heating) จะทำให้ยางมีความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและอุณหภูมิภายในเนื้อยางกระจายตัวอย่างทั่วถึงภายในเวลาอันรวดเร็วอันเนื่องมาจากความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งจะเป็นการลดเวลาในการให้ความร้อนแก่ยางได้ดี จะเห็นได้ว่าข้อดีของการวิจัยนี้ สามารถทำให้ลดเวลาในการให้ความร้อนแก่ยาง และลดต้นทุนในกระบวนการผลิตด้วย แต่ยังคงการศึกษาในเรื่อง การนำชิ้นงานไปทำการทดสอบเกี่ยวกับความสามารถนำไปใช้งานจริง [5]

2.2 ยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติ ได้จากต้นยางพันธุ์ *Hevea Brasiliensis* ซึ่งนิยมปลูกมากในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ในปี พ.ศ. 2539 ปริมาณการใช้ของยางธรรมชาติ ประมาณ 5.984 ล้านตัน จากปริมาณการใช้ยางทั้งหมดทั่วโลก 15.629 ล้านตัน [6] เนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติที่ดีเลิศ ประกอบกับมีราคาต่ำ ทำให้ยางธรรมชาติ ถูกจัดให้เป็นยางที่อยู่ในลำดับแรกของการเลือกใช้งานจากบรรดายางทั้งหมด ยางธรรมชาติ ที่ได้จากต้นยางอยู่ในรูปของน้ำยาง จะต้องแยกยางออกจากน้ำยาง ทำโดยการให้ยางจับตัวเป็นก้อน ด้วยน้ำกรด แล้วนำยางที่เป็นก้อนนั้นมารีดให้เป็นแผ่น หรือตัดให้เล็กลง แล้วทำให้แห้ง นำไปใช้ในรูปของยางแห้ง

2.2.1 โครงสร้างทางเคมีและสมบัติ

ยางธรรมชาติเป็นสารพอลิเมอร์ ที่มีน้ำหนักโมเลกุล (Mn) สูง เฉลี่ยประมาณสองแสนถึงห้าแสน [9] มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลกว้าง ยางธรรมชาติมีสูตรโมเลกุลเป็น cis-1,4-polyisoprene โดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 5,000 จนถึงประมาณ 15,000 ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สูตรโมเลกุลของยางธรรมชาติ [5]

ยางธรรมชาติมีความถ่วงจำเพาะ 0.934 ที่ 20 °C และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อยางถูกยืดหรือเย็นตัวลง มีดรรชนีหักเหของแสงเท่ากับ 1.5215-1.5238 ที่ 20 °C [10] โครงสร้างหลักที่มีผลกระทบต่อสมบัติของยาง คือ

1) ประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนล้วน ทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติไม่ทนน้ำมันปิโตรเลียมหรือน้ำมันพืช แต่จะเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี

2) พันธะคู่ที่ว่องไวในปฏิกิริยา ทำให้สามารถวัลคาไนซ์ได้ด้วยการกำมะถัน และทำให้ยางทำปฏิกิริยาได้ง่ายด้วยออกซิเจน และ โอโซน ซึ่งเป็นสาเหตุของการเสื่อมของยาง ทำให้การออกสูตรยางธรรมชาติ จำเป็นต้องมีสารกันเสื่อม (Antioxidant) และ สารต้านโอโซน (Antiozonant) ร่วมด้วย

3) สายโซ่ที่เคลื่อนไหวหักงอไปมาได้ง่าย ทำให้ยางธรรมชาติคงสภาพยืดหยุ่นได้ดี อาจจะสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำมาก ยางธรรมชาติมีค่า $T_g = -72$ °C ซึ่งต่ำกว่ายางสังเคราะห์อื่นๆ ยกเว้นเฉพาะยางบิวทาไดอินและยางซิลิโคนเท่านั้น [11]

4) ความสม่ำเสมอในโครงสร้างโมเลกุล ทำให้ยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้เมื่อยืด ทำให้มีความต้านทานแรงดึงสูงมาก และทำให้มีค่า “green strength” สูง และ “tack” ดี

5) น้ำหนักโมเลกุลสูงทำให้ยางแข็งเกินไปที่จะนำไปแปรรูปโดยตรง จะต้องนำยางไปบด เพื่อให้ได้โมเลกุลเล็กลง ก่อนนำไปใช้งาน

2.3 ส่วนประกอบของสารเคมีในสูตรยาง

ยางที่ผสมกับสารเคมีแล้ว มีชื่อเรียกว่า ยางคอมพาวด์ (Compound rubber) ในยางคอมพาวด์สูตรหนึ่งๆ จะมีสารเคมีอยู่หลายตัวด้วยกัน

2.3.1 สารในระบบวัลคาไนซ์

การวัลคาไนซ์ เป็นการก่อให้เกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติยาง เช่น เปลี่ยนจากสมบัติเทอร์โมพลาสติก ไปเป็นสมบัติเทอร์โมเซต เปลี่ยนจากสมบัติกึ่งพลาสติก กึ่งอีลาสติก ไปเป็นอีลาสติก เปลี่ยนจากการละลายในตัวทำละลายไปเป็นการไม่ละลาย ดังนั้นการวัลคาไนซ์จึงเป็นการแก้ไขข้อเสียบางประการของยางดิบ การมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก หมายความว่า ยางจะอ่อนตัวและไหลได้ง่าย เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งเป็นข้อเสียอย่างมาก ที่จะนำยางดิบไปใช้ทำผลิตภัณฑ์ เพราะหมายถึง ผลิตภัณฑ์จะนิ่มเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และสมบัติของยางจะเปลี่ยนไป

ระบบการวัลคาไนซ์ที่ใช้กันมากที่สุด คือ ระบบกำมะถัน ถึงแม้ว่า การใช้กำมะถันจะจำกัดอยู่ในยางจำพวกที่มีพันธะคู่เท่านั้น แต่มียางหลายตัว เช่น ยางธรรมชาติ ยางเอสปีอาร์ และยาง

ไนไตรล์ มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลของมันอยู่แล้ว แต่บางอย่าง เช่น ยางอีพีเอ็ม อาจจะต้องปรับโมเลกุลโดยการใส่ไดอินโมโนเมอร์เข้าไปในขณะการโพลิเมอร์ไรซ์ (กลายเป็น ยางอีพีดีเอ็ม) เพื่อให้มีพันธะคู่ในยางดังกล่าว ซึ่งจะทำให้สามารถใช้กำมะถัน ในการวัลคาไนซ์แบบนี้ได้ ระบบการวัลคาไนซ์ทั่วไปที่ใช้กับยางธรรมชาติมีดังนี้

ยางธรรมชาติ	100	ส่วน
กำมะถัน	2.5	ส่วน
ซิงค์ออกไซด์	5.0	ส่วน
กรดสเตียริก	1.0	ส่วน
สารตัวเร่ง	1.0	ส่วน (สารตัวเร่ง เช่น MBT หรือ CBS)

2.3.2 สารตัวเติม

สารตัวเติม มีผลต่อการปรับสภาพของสมบัติทางกายภาพของยางเป็นอย่างมาก สารตัวเติมที่ใช้โดยมากมีสภาพเป็นเม็ดผง เช่น เขม่าดำ ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น ยิ่งสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคเล็ก ก็ยิ่งเสริมความแข็งแรงให้แก่ยางมากขึ้น เช่น ให้ความต้านทานต่อแรงดึงสูงขึ้น และมีความต้านทานต่อการสึกหรอมากขึ้น เป็นต้น สารตัวเติมดังกล่าว เรียกว่า สารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพ (Reinforcing filler)

แต่สารตัวเติมที่มีราคาถูกเพื่อที่จะลดต้นทุน มักจะเป็นสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ นอกจากจะช่วยลดต้นทุนแล้ว ยังทำให้ความแข็งแรงและโมดูลัสของยางเพิ่มขึ้นด้วย แต่จะให้สมบัติด้านความต้านทานแรงดึง และความต้านทานต่อการสึกหรอ ลดลง สารตัวเติมดังกล่าวนี้ เรียกว่า สารตัวเติมไม่เสริมประสิทธิภาพ (Non-reinforcing filler หรือ diluent) ปริมาณสารตัวเติมที่เสริมประสิทธิภาพ จะใช้ประมาณ 30-50 phr ส่วนสารตัวเติมที่ใช้ลดต้นทุน จะใช้ในปริมาณ 50-150 phr [5]

2.3.3 สารป้องกันยางเสื่อม

ตลอดอายุการใช้งานของยาง ยางจะเสื่อมทำให้ไม่สามารถจะใช้งานต่อไปได้ ปัจจัยหลักสำคัญที่ทำให้ยางเสื่อม คือ ออกซิเจน กับ โอโซน ถึงแม้ว่า ยางจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนอย่างช้าๆ ก็ตาม (เว้นไว้แต่จะมีการกระตุ้น) แต่ออกซิเจนก็มีความสำคัญยิ่งต่อการเสื่อมของยาง ตัวอย่างสิ่งที่กระตุ้นให้ยางเสื่อมสภาพได้เร็ว ได้แก่ แสง ความร้อน เกลือโลหะหนักที่เจือปน โอโซน และการหักงอไปมา เป็นต้น

ในระหว่างการเสื่อมของยาง ผิวของยางเกิดการเปลี่ยนแปลง และอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงในตัวยางทั้งหมดด้วย โดยเฉพาะยางบางๆ ซึ่งออกซิเจนสามารถทำปฏิกิริยาได้ตลอดตัวอย่างสภาพการเสื่อมของยางที่ปรากฏ ได้แก่

ก) ผิวแตก อันเป็นผลเนื่องมาจากแสงที่มีต่ออย่าง เห็นได้ชัดมากในผลิตภัณฑ์ยางที่ไม่ใช่สีดำ

ข) ผิวผลิตภัณฑ์แข็งขึ้น จนยึดไม่ได้ และสมบัติกายภาพเลวลง ตัวอย่างเช่น กรณีของยางเอสบีอาร์ที่เสื่อมจากความร้อน จะทำให้ยางแข็งตัว (แตกต่างไปจากยางธรรมชาติที่มักจะนิ่มลงเมื่อเสื่อม)

ยางสามารถป้องกันทำให้เสื่อมช้าลงได้โดยการใช้สารแอนติออกซิแดนท์ และสารแอนติโอโซแนนท์ รวมไปถึงการใช้ซีฟิ่งด้วย แอนติออกซิแดนท์ที่ใช้มีด้วยกัน 2 ชนิดใหญ่ๆ คือพวกฟีนอลิก ซึ่งใช้กับยางสีกับพวกสารประกอบอะมีน แต่สารประกอบอะมีนทำให้สีของยางเปลี่ยนแปลงไปบ้าง จึงมักใช้สารประกอบอะมีนในยางสีดำต่อไป

เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างแอนติออกซิแดนท์สองชนิดนี้ จะพบว่า พวกสารประกอบอะมีนจะมีประสิทธิภาพมากกว่าสารประกอบฟีนอลิก

ปริมาณปกติ ของแอนติออกซิแดนท์ ที่ใช้คือ 1-2 phr ปริมาณดังกล่าว ถือว่าเป็นจุดสูงสุดแล้ว ถ้าใช้มากเกินไปก็จะไม่ให้ผลเหนือไปกว่านี้อีก และอาจจะทำให้เกิดการซึมออกมาที่ผิวของผลิตภัณฑ์ (Bloom) ได้อีกด้วย [5]

2.3.4 สารตัวเร่งให้ยางคงรูป (Accelerators)

การใช้สารตัวเร่งให้ยางคงรูป เพื่อลดเวลาที่จะทำยางคงรูป โดยการเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาของยางรูปให้เร็วขึ้น โดยปกติแล้ว การเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวนี จะช่วยปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ด้วย โดยทั่วไปแล้ว ยางสังเคราะห์จะต้องการปริมาณสารตัวเร่งให้ยางคงรูปมาก และต้องการกำมะถันน้อยกว่ายางธรรมชาติ ทั้งนี้เนื่องด้วยสายโมเลกุลของยางสังเคราะห์ มีส่วนของโครงสร้างที่ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาการคงรูป (Non-vulcanization structure) ซึ่งจะไม่ต้องการกำมะถัน

2.3.4 สารอื่นๆ

สารอื่นๆ นี้ หมายถึง สารพิเศษนอกเหนือไปจากที่กล่าวแล้ว เช่น สารฟูสำหรับทำฟองน้ำ สารป้องกันติดไฟสำหรับพรม สารลดไฟฟ้าสถิตสำหรับทำยางปูพื้น และสารลดกลิ่น เป็นต้น ปริมาณการใช้สารเหล่านี้ ขึ้นอยู่กับชนิดของการใช้งาน และชนิดของสารเคมีที่ใช้อีกด้วย

2.4 การค้นพบการทำยางคงรูป หรือ การวัลคาไนซ์

ภายหลังจากที่ Hancock ได้พบกรรมวิธีการบดยางแล้ว ได้มีการนำยางมาใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง แต่วัตถุดิบสำเร็จรูปต่างๆ ที่ผลิตขึ้นเกิดการเสื่อมคุณภาพใช้งานไม่ได้ภายใน

ระยะเวลาอันสั้น ทำให้การผลิตวัสดุสำเร็จรูปยางซังกอลง การเสื่อมคุณภาพของวัสดุสำเร็จรูปยางนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของยางอันเป็นผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ กล่าวคือยางจะมีลักษณะเหนียว และอ่อนเมื่ออุณหภูมิสูง และจะแข็งกระด้าง และเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ดังนั้น จึงได้มีการค้นหาวิธีขจัดข้อบกพร่องดังกล่าวของยาง ประมาณปี พ.ศ. 2382 Charles Goodyear ชาวเมือง Woburn, Mass., U.S.A. ได้ค้นพบว่าเมื่อให้ยางทำปฏิกิริยากับกำมะถันที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของกำมะถันแล้ว ยางจะมีสมบัติที่ทนทานต่อสภาพการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ คือ รักษา (cure) ให้ยางปราศจากสมบัติที่อ่อนแอ และแข็งเปราะเป็นยางที่มีสภาพคงรูปในอุณหภูมิต่างๆ ได้ ซึ่งต่อมาปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นที่รู้จักกันในชื่อของปฏิกิริยา “เคียว” หรือ “วัลคาไนซ์เซชัน” (Cure or Vulcanisation ซึ่ง Wiliam Brockeon of The Macintosh Co. เป็นคนแรกที่ใช้คำว่า Vulcanisation: มาจาก Vulcan = the God of Fire) สำหรับภาษาไทยเรียกปฏิกิริยานี้ตามผลการเปลี่ยนแปลงของยางอันเนื่องมาจากปฏิกิริยา คือ “ยางคงรูป” อนึ่ง แม้ว่า Goodyear จะเป็นคนแรกที่ค้นพบวิธีการวัลคาไนซ์ยางก็ตาม เขาก็ไม่ได้จดสิทธิบัตรในทันที เนื่องจากว่ามีสภาพยากจนมาในขณะนั้น นอกจากนี้เขายังต้องการค้นคว้ารายละเอียดเพิ่มเติมให้ถี่ถ้วนเสียก่อน ดังนั้น Thomas Hancock ผู้ซึ่งได้ค้นคว้าและศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาดังกล่าวจากตัวอย่างของ Goodyear จึงได้ทำการขอจดสิทธิบัตรการค้นพบวิธีการวัลคาไนซ์ยางเมื่อวันที่ 21 พฤศจิกายน พ.ศ. 2386 ซึ่งเป็นเวลาก่อนหน้าที่ Goodyear จะยื่นขอสิทธิบัตรเพียง 10 สัปดาห์เท่านั้น ต่อมาในปี พ.ศ. 2389 Alexander Parkes ได้พบอีกว่าการวัลคาไนซ์ยางสามารถทำให้เกิดขึ้นได้ โดยใช้สารซัลเฟอร์คอลลอยด์ด้วย (Cold cure) จากการค้นพบวิธีการวัลคาไนซ์ยางดังกล่าวมานี้เป็นผลให้มีการผลิตวัสดุสำเร็จรูปยางชนิดต่างๆ ขึ้นใช้กันอย่างแพร่หลาย [13,14] การขึ้นรูปและการทำให้ยางคงรูปเป็นขั้นตอนที่สำคัญในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง หลังจากการผสมยางคอมพาวด์ที่ได้จะต้องถูกนำไปขึ้นรูปให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างต่างๆ ตามต้องการก่อนที่จะนำไปคงรูปต่อไป สารทำให้ยางคงรูปเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ต้องผสมลงไปในยางเพื่อทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ที่เรียกว่า ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชันหรือปฏิกิริยาคงรูป การเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวจะส่งผลทำให้โมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมโยงกันเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ซึ่งจะทำให้ยางเปลี่ยนสภาพจากอ่อนเหนียวหนึบ (Tacky) และไหลได้แบบเทอร์โมพลาสติกไปเป็นยางคงรูป (เทอร์โมเซต) ที่มีความยืดหยุ่นสูง มีความทนทาน และมีสมบัติที่เสถียรไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนัก

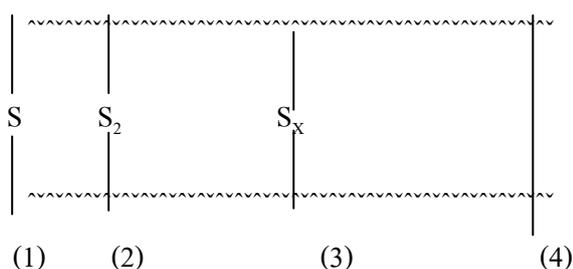
ความหมายของยางการทำให้ยางคงรูปอีกอย่างหนึ่งก็คือ การให้ความร้อนและขึ้นรูปยางเพื่อให้ยางมีคุณสมบัติยืดหยุ่นและสามารถรักษารูปร่างเดิมหลังจากที่มีแรงกระทำ ทั้งนี้เนื่องจากธรรมชาติที่ผ่านการบดผสมกับกำมะถันและตะกั่วคาร์บอนเมื่อได้รับความร้อน อะตอมของกำมะถันจะเกิดพันธะเคมียึดโซ่โพลิเมอร์ แต่ละเส้นใยยางเข้าด้วยกัน ทำให้โมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น

และเคลื่อนไหวยาก ในการให้ความร้อนมักใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้า น้ำมันร้อนหรือน้ำให้ความร้อน ปฏิกิริยาวัลคาไรเซชัน (Vulcanization) ต้องอาศัยสารเคมีกลุ่มที่ทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing or curing agents) และความร้อน เพื่อให้สารดังกล่าวสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ [3]

2.4.1 ระบบกำมะถันปกติ (Convention System)

ระบบกำมะถันปกติ เป็นระบบที่มีราคาถูกที่สุดในระบบทั้งหมด แต่ละพันธะเชื่อมโยง จะมีกำมะถันอยู่หลายอะตอม (Polysulphidic cross-link) จึงให้ยางที่มีสมบัติทางเชิงกล เช่น ความทนทานต่อแรงดึงดี ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานการล้าดี และมีสมบัติในการต้านการตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำดีมาก แต่ไม่ต้านสมบัติการกลับสู่สภาพเดิม (Reversion) เช่น สมบัติตกลงเมื่ออบสุกเกินไป หรือ เสื่อมเนื่องจากการถูกออกซิไดซ์

ส่วนสมบัติในด้านการทนทานต่อความร้อน ด้านการต้านความเสื่อม และสมบัติการจับตัวเมื่อได้รับแรงอัด (Compression set) ของยาง จะด้อยกว่าระบบอื่นๆ



รูปที่ 2.2 ลักษณะพันธะเชื่อมโยงโดยใช้กำมะถันและเปอร์ออกไซด์

(1) Monosulphidic , (2) Disulphidic , (3) Polysulphidic และ (4) เปอร์ออกไซด์ [5]

2.4.2 ระบบอีวี (Efficient Vulcanizing System)

ระบบนี้ใช้กำมะถันน้อย และสารตัวเร่งมาก หรือ ใช้ระบบสารให้กำมะถันซึ่ง ทำให้การใช้กำมะถันเชื่อมโยงแต่ละพันธะ มีประสิทธิภาพมาก แต่ละพันธะเชื่อมโยง จะมีกำมะถันอยู่เพียงหนึ่ง หรือ สองอะตอมเท่านั้น (Monosulphidic และ Disulphidic cross-link) ทำให้ยางมีสมบัติทางกลด้อยกว่าการใช้กำมะถันแบบธรรมดา แต่จะให้ยางมีความต้านทานต่อการกลับสู่สภาพเดิมดี สมบัติในด้านการทนทานต่อความร้อนดี และมีสมบัติด้านการเสื่อมเมื่อถูกออกซิไดซ์และมีสมบัติการจับตัวเมื่อได้รับแรงอัดที่ดี

2.4.3 ระบบเซมิอีวี (Semi Efficient Vulcanizing system)

ระบบนี้ใช้กำมะถันและสารตัวเร่ง กึ่งกลางระหว่างการใช้กำมะถัน และสารตัวเร่งในระบบปกติ กับการใช้ในระบบอีควี ทำให้สมบัติด้านทางกลและด้านต้านความเสื่อมอยู่ระหว่างทั้งสองระบบนี้

2.4.4 ระบบเปอร์ออกไซด์

ยางที่วัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ที่มีแอนติออกซิแดนท์ที่เหมาะสม จะให้ยางมีความต้านทานต่ออนุมูลอิสระสูงที่สุดในระบบทั้งหมด แต่อย่างไรก็ตาม ระบบเปอร์ออกไซด์จะอบสุกช้าและสก็อชเร็ว ระยะเวลาการอบสุก จะใช้ประมาณ 6 เท่าของอายุครึ่งชีวิต (Half life) ของเปอร์ออกไซด์ เพื่อไม่ให้มีเปอร์ออกไซด์หลงเหลืออยู่ ที่จะทำให้ความต้านทานต่อการออกซิไดซ์ของยางเสียไป แต่ต้องระมัดระวังเกี่ยวกับการใช้แอนติออกซิแดนท์ เพราะแอนติออกซิแดนท์บางตัว จะทำให้การใช้เปอร์ออกไซด์ไม่ได้ผล ตัวอย่างของแอนติออกซิแดนท์พวกนั้น ได้แก่ p-phenylenediamines เป็นต้น แอนติออกซิแดนท์ที่เหมาะสม ได้แก่ MBI หรือ ZMBI ผสมกับ TMQ และ ZDMC เป็นต้น

เปอร์ออกไซด์ที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ Dicumyl peroxide แต่อย่างที่ได้อาจมีกลิ่นพิเศษ เปอร์ออกไซด์ตัวอื่นที่อาจจะใช้ได้ คือ bis-(t-butylperoxy-isopropyl benzene) ซึ่งจะอบสุกช้ากว่ายางที่วัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ มีความต้านทานตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำไม่ตี และมีสมบัติทางกลดีกว่าการใช้ระบบกำมะถันปกติ และยังไม่เหมาะในการวัลคาไนซ์โดยใช้ไอน้ำ หรือ อากาศร้อน เพราะสารเปอร์ออกไซด์จะกระตุ้นให้เกิดการออกซิไดซ์ได้

2.4.5 ระบบยูรีเทน

สารวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติชนิดยูรีเทน มีชื่อเรียกทางการค้าว่า โนวอร์ (Novor) ให้ยางวัลคาไนซ์ที่มีสมบัติต้านทานต่อการกลับสู่สภาพเดิมได้ดี ทนความร้อนได้สูง และมีสมบัติทางเชิงกลดี และระบบนี้ยังสามารถใช้ร่วมกับระบบวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันได้ การปรับอัตราส่วนระหว่างสองระบบนี้ ทำให้สามารถปรับคุณสมบัติและราคาต้นทุนได้

2.5 การขึ้นรูปและคงรูปยางโดยใช้แม่พิมพ์

การใช้แม่พิมพ์ขึ้นรูปยาง เป็นการขึ้นรูปยางพร้อมกับการคงรูป (Vulcanization) โดยอาศัยความร้อนและแรงอัด การขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์เป็นวิธีการที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน ผลิตภัณฑ์ยางส่วนใหญ่ไม่ว่าจะเป็นยางโอริง ประเก็น ยางรองแท่นเครื่อง พื้นรองเท้า หรือแม่แต่ยางล้อรถยนต์ ก็ล้วนแล้วแต่ใช้วิธีการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ทั้งสิ้น การขึ้นรูปด้วยวิธีนี้ต้องให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ก่อนที่จะนำยางไปใส่ลงในแม่พิมพ์เพราะความร้อนจากแม่พิมพ์จะทำให้ยางมีความหนืดต่ำลง ยางจึงไหลเต็มแม่พิมพ์ได้ง่ายยิ่งขึ้น และเมื่อยางไหลเต็มแม่พิมพ์แล้วความร้อนจากแม่พิมพ์ก็จะทำให้

ยางเกิดปฏิกิริยาของรูปต่อไป แม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปมีหลายแบบ ได้แก่ แม่พิมพ์แบบกดอัด (Compression mould) แม่พิมพ์แบบกึ่งฉีด (Transfer mould) และแม่พิมพ์แบบฉีด (Injection mould) เป็นต้น

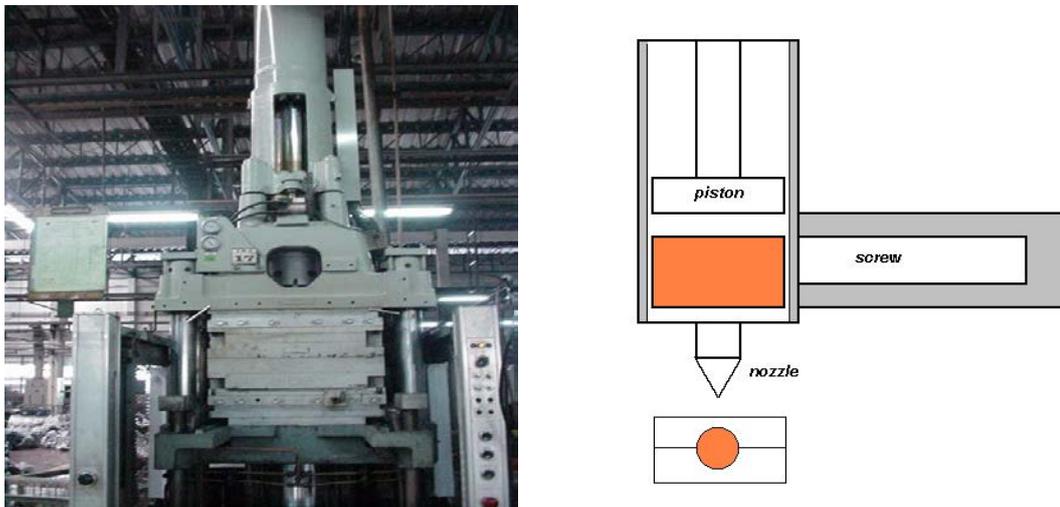
2.5.1 การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบกดอัด (Compression Moulding)

การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบกดอัดเป็นวิธีที่ง่ายและไม่ต้องลงทุนทางด้านเครื่องจักรสูง เพราะทั้งเครื่องกดอัดและแม่พิมพ์มีราคาไม่สูงมากนัก เครื่องกดอัดที่นิยมใช้ ได้แก่ เครื่องกดอัดระบบไฮดรอลิก ดังแสดงในรูปที่ 2.3 จากรูปจะเห็นได้ว่าเครื่องกดอัดประกอบด้วยแผ่นกดอัด (Platen) จำนวน 2 แผ่น (บน-ล่าง) หรือในบางกรณีอาจมีมากกว่า 2 แผ่น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการออกแบบเครื่องกดอัดให้เหมาะกับกระบวนการผลิต แผ่นกดอัดจะทำหน้าที่เลื่อนขึ้นลงด้วยระบบไฮดรอลิกเพื่ออัดและส่งผ่านแรงดันไปสู่แม่พิมพ์ที่อยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นกดอัดทั้งสอง นอกจากเครื่องกดอัดจะต้องได้รับการออกแบบให้มีแรงอัดที่สูงเพียงพอสำหรับการใช้งานแล้ว ยังต้องได้รับการออกแบบให้มีระบบให้ความร้อน และควบคุมอุณหภูมิของแผ่นกดอัดให้คงที่ในระหว่างการใช้งาน โดยทั่วไป แหล่งให้ความร้อนแก่แผ่นกดอัด ได้แก่ ใช้น้ำ น้ำมันร้อน หรือไฟฟ้า เป็นต้น [3]

2.5.2 การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบฉีด (Injection Moulding)

การขึ้นรูปแบบนี้จำเป็นต้องใช้เครื่องฉีดซึ่งมีหน้าที่ทำให้ยางนั้นมาก่อนที่ฉีดจะเข้าสู่เบ้าของแม่พิมพ์เครื่องฉีด และแม่พิมพ์แบบนี้มีราคาสูงมาก แต่ยังคงรูปที่ได้จะมีขนาดที่ถูกต้องมากกว่าการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อื่นๆ จึงเหมาะกับการผลิตชิ้นส่วนที่ซับซ้อน นอกจากนี้การขึ้นรูปด้วยวิธีนี้ยังมีอัตราเร็วในการผลิตของเสียต่ำกว่าการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบอื่นๆ อีกด้วย โดยทั่วไปเครื่องฉีดที่นิยมใช้ในปัจจุบันสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่ เครื่องฉีดยางแบบเกลียวหนอน (Screw-type injection moulding machine) และเครื่องฉีดยางแบบผสมระหว่างเกลียวหนอนกับแท่งกด (Plunger screw injection moulding)

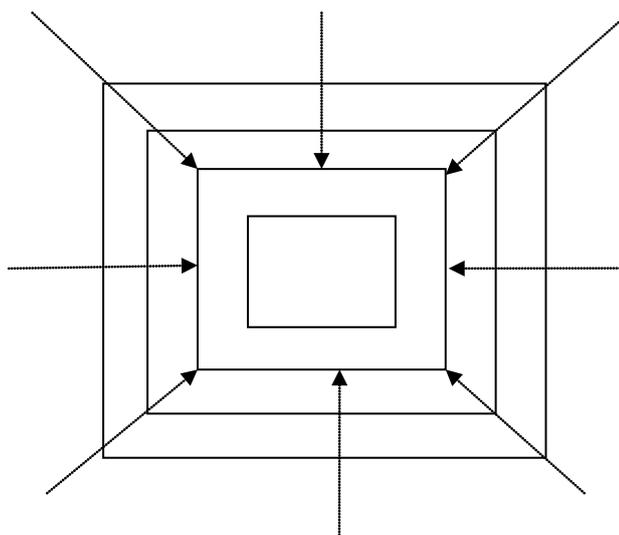
สำหรับในกรณีของเครื่องฉีดยางแบบผสมระหว่างเกลียวหนอนกับแท่งกดนั้น ภารของเครื่องฉีดจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนแยกออกจากกันอย่างชัดเจน ยางคอมพาวด์จะถูกป้อนเข้าสู่บาร์เรล (แวนอน) ที่มีเกลียวหนอนอยู่ภายใน การหมุนของเกลียวหนอนนอกจากจะทำให้ยางมีอุณหภูมิสูงขึ้นแล้ว ยังทำให้ยางไหลไปทางด้านหน้าและไปสะสมอยู่ที่ห้องเก็บยาง (Material chamber) ในบริเวณด้านหน้าของบาร์เรล เมื่อยางคอมพาวด์ที่ไหลมาอยู่ทางด้านหน้านี้อุณหภูมิและอุณหภูมิสูงพอเหมาะแล้ว ลิ้นเปิด - ปิด ที่อยู่บริเวณช่องรอยต่อก็จะปิดเพื่อป้องกันไม่ให้ยางไหลย้อนกลับเข้าสู่บาร์เรลที่มีเกลียวหนอนอยู่ด้านใน หลังจากนั้นแท่งกดซึ่งอยู่เหนือห้องเก็บยางก็จะเริ่มทำงานโดยการเลื่อนลงมาทางด้านล่างเพื่อฉีดยางเข้าสู่แม่พิมพ์ที่ร้อน



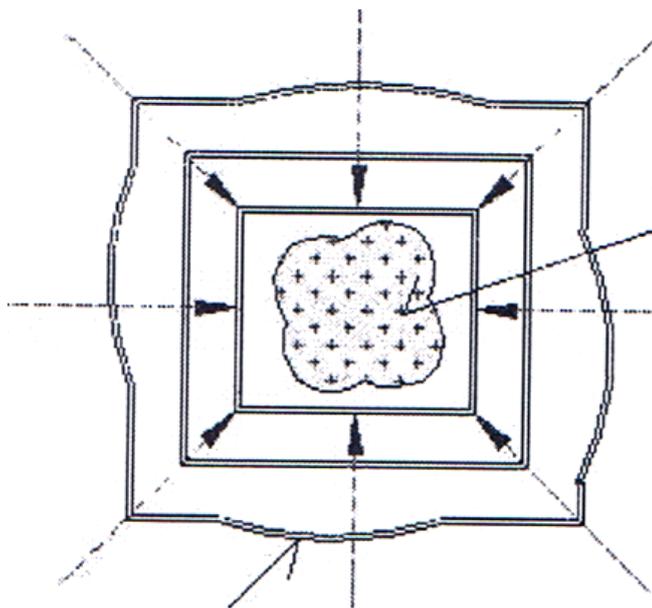
รูปที่ 2.3 เครื่องอบยางอินเจกชั่น และ แม่พิมพ์แบบฉีด

2.5.2 ปัญหาการอบคงรูปชิ้นงานที่มีความหนา

ผลิตภัณฑ์หรือชิ้นงานที่มีความหนามากจะคงรูป (Vulcanizing) ไม่เท่ากันตลอดชิ้นงาน ด้านนอกจะคงรูปมากกว่าด้านใน ดังรูปที่ 2.4 การคงรูปจากด้านนอกเข้าไปด้านใน และกรณียางด้านในไม่สุกจะเกิดเป็นรูพรุน ทำให้ยางปูดพองหรือการบวมของชิ้นงาน ดังรูปที่ 2.5 การบวมพองของชิ้นงาน



รูปที่ 2.4 การคงรูปยางจากด้านนอกเข้าไปสู่ด้านใน



รูปที่ 2.5 การบวมพองของชิ้นงาน [13]

2.6 กาวติดระหว่างยางกับโลหะ (Rubber-Metal Adhesives)

ผลิตภัณฑ์ที่ใช้งานในทางวิศวกรรมส่วนใหญ่ไม่ได้ทำขึ้นจากเพียงยางเดี่ยว อาจการเสริมความแข็งแรงให้แก่โครงสร้างด้วยโลหะ เช่น ยางล้อรถยนต์ หรือในผลิตภัณฑ์บางประเภทอาจมีการนำโลหะไปยึดติดกับยางเพื่อความสะดวกในการติดตั้ง เช่น ยางกันกระแทก ดังนั้น กาวที่ใช้ติดระหว่างยางกับโลหะจึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในกระบวนการผลิต ในอดีต การยึดติดระหว่างยางกับโลหะนิยมใช้เทคนิคที่เรียกว่า การชุบทองเหลือง (Brass plating) ในวิธีนี้พื้นผิวโลหะที่สะอาดจะถูกเคลือบบางๆ ด้วยแผ่นฟิล์มทองเหลืองโดยวิธีการชุบด้วยไฟฟ้า (Electrodeposition) ก่อนที่จะถูกนำไปยึดติดกับยาง แรงยึดเหนี่ยวหรือพันธะระหว่างยางกับโลหะจะเกิดขึ้นในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีโดยกัมมันต์ซึ่งเป็นสารทำให้ยางคงรูปที่มีอยู่ในยางจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับทองแดงซึ่งเป็นองค์ประกอบหลัก (68 – 75%) ของทองเหลืองเกิดเป็นแรงยึดเหนี่ยวทางเคมีขึ้น ซึ่งการยึดติดด้วยวิธีนี้ให้ผลดีเนื่องจากพันธะที่เกิดขึ้นสามารถทนต่อความร้อนและตัวทำละลายได้เป็นอย่างดี แต่ว่าการเคลือบด้วยชั้นทองเหลืองนี้จะต้องลงทุนสูงทางด้านเครื่องจักร และเป็นการยากจะควบคุมตัวแปรต่างๆ ให้คงที่ และเทคนิคนี้จะใช้ได้ดีในกรณีที่ยางได้รับแรงดันสูงๆ ในกระบวนการขึ้นรูป เช่น เครื่องฉีด เป็นต้น การเคลือบด้วยชั้นทองเหลืองนิยมใช้กันมากในการยึดติดยางกับลวดเหล็ก (Steel cord) ในยางล้อรถยนต์ แต่ปัจจุบันเทคนิคนี้ไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากได้มีการคิดค้นกาวหรือสารเชื่อม (Bonding agent) ชนิดต่างๆ ขึ้นมาอย่างมากมายเพื่อให้เหมาะสมกับชนิดของยางและโลหะที่ใช้ ดังตารางที่ 2.1 นอกจากนี้ การยึดติดโดยใช้กาวเหล่านี้มีวิธีการไม่

ซับซ้อน ทำให้สะดวกและรวดเร็ว อีกทั้งพันธะระหว่างยางกับโลหะที่เกิดขึ้นก็มีความแข็งแรงสูงมาก ด้วยเหตุนี้ กาวเหล่านี้จึงเหมาะกับการใช้งานแทบทุกประเภท

ตารางที่ 2.1 กาวที่ใช้ในการยึดติดยางกับโลหะ

ประเทศ	ผู้จำหน่าย	ชื่อทางการค้า	หมายเหตุ
สหรัฐอเมริกา อังกฤษ	Hughson Chemical Durham Raw Materials	Chemlok	มีผลิตภัณฑ์หลายชนิดให้เลือกใช้
เยอรมนี	Kautschuk Gesellschaft	Megum	มีผลิตภัณฑ์หลายชนิดให้เลือกใช้
สหรัฐอเมริกา อังกฤษ	Mabon Anchor Chemical	Ty-Ply	มีผลิตภัณฑ์หลายชนิดให้เลือกใช้
สหรัฐอเมริกา	Vanderbilt	Braze	เหมาะสมกับการเชื่อมติดระหว่างโลหะกับยางธรรมชาติ (NR) ยางบิวทิล (IIR) ยางสไตรีน-บิวทาไดอีน (SBR)

2.6.1 ชนิดของกาว กาวที่ใช้แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

1) ไอโซไซยานต (Isocyanates) เช่น ไตรฟีนิลมีเทนไอโซไซยานต (triphenyl methane triisocyanate) และไทโอโนโพรริกเอซิดไตรไอโซไซยานต (thionophoric acid-tri-(p-isocyanato-phenyl)-ester) กาวกลุ่มนี้นอกจากจะให้การยึดติดที่ดีแล้ว พันธะระหว่างยางกับโลหะยังมีความทนทานต่อความร้อน และต้านทานต่อการบวมพองในตัวทำละลายได้ดีอีกด้วย กาวกลุ่มนี้ยังสามารถใช้ได้กับยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์หลากหลายชนิด และให้การยึดติดที่ดีกับทั้งโลหะหนักและโลหะเบาแทบทุกชนิด (ยกเว้นบรอนซ์) การใช้กาวในกลุ่มไอโซไซยานตจะทำให้ต้นทุนในกระบวนการผลิตไม่สูงมากนักเนื่องจากกาวกลุ่มนี้มีประสิทธิภาพสูง อย่างไรก็ตาม

เนื่องจากหมู่ไฮโซไซยานเนตมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาสูง จึงสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงที่ไม่ต้องการได้ง่ายและยังมีความว่องไวต่อความชื้น และไอน้ำอีกด้วย

2) กาวที่ประกอบไปด้วยธาตุหมู่ 7 (Halogenated adhesives) ได้แก่ กาวที่ทำจากยางธรรมชาติ และยางสังเคราะห์ที่มีอะตอมของคลอรีน (Chlorinated rubber) หรืออะตอมของโบรมีน (Brominated rubber) เป็นองค์ประกอบ ตัวอย่างของกาวกลุ่มนี้ ได้แก่ ของผสมระหว่างยางที่มีอะตอมของคลอรีนและพอลิเมอร์ของคลอโรบิวทาไดอินหรือไดคลอโรบิวทาไดอิน (Polymerized 2-chlorobutadiene หรือ 2,3-dichlorobutadiene) ซึ่งหลังจากที่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรซ์เชชันแล้ว อาจทำการเติมอะตอมของคลอรีนเข้าไปในโมเลกุลด้วยปฏิกิริยาคลอรีเนชัน (Chlorination) นอกจากนี้ ยังมีการเติมสารตัวเติม ตัวทำละลาย และสารเชื่อมโยง (Crosslinking agents) เช่น ไทริโนโทโรโซเบนซีน (Trinitrosobenzene) และควิโนนไดออกไซด์ (P-quinonidioxime) ที่ผสมกับตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) ลงไปด้วย กาวกลุ่มนี้ให้ผลค่อนข้างสม่ำเสมอเนื่องจากมีปฏิกิริยาข้างเคียงน้อยกว่ากาวในกลุ่มของไฮโซไซยานเนต แต่ว่าจะมีความเสถียรต่อความร้อนและต้านทานต่อการบวมพองในตัวทำละลายต่ำกว่า และในบางครั้งอาจทำให้เกิดสนิมขึ้นที่บริเวณใต้ชั้นกาวได้

2.7 การเตรียมพื้นผิวโลหะ

สิ่งสำคัญอันดับแรกต้องพิจารณาในการยึดติดเข้ากับโลหะ คือการเตรียมผิวโลหะให้สะอาด ด้วยเหตุนี้ ก่อนที่จะทา กาวจึงจำเป็นต้องกำจัดสิ่งสกปรกต่างๆ ที่ติดอยู่บนพื้นผิว เช่น น้ำมัน คราบไขมัน ฝุ่น หรือสนิมออกให้หมด เพราะสิ่งสกปรกเหล่านี้เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ความแข็งแรงของพันธะระหว่างยางกับกับโลหะลดลง ส่งผลทำให้อายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์นั้นๆ ต่ำลงด้วยเช่นกัน การกำจัดน้ำมันและคราบไขมัน วิธีที่ใช้มากที่สุดคือ การใช้ไอระเหยของตัวทำละลายอินทรีย์ (Organic solvent) เช่น ไทริคลอโรเอทีลีน (Trichloethylene) ในบางครั้งอาจใช้ของผสมของสารละลายต่างๆ (aqueous alkali mixtures) ที่อุณหภูมิสูงแทนได้ โดยทั่วไป การกำจัดสิ่งสกปรกเหล่านี้สามารถจำแนกได้เป็น 2 วิธีคือ

2.7.1 วิธีการทางกล (Mechanical method) วิธีที่ใช้มากที่สุด ได้แก่ การพ่นขัดผิวด้วยผงขัด (Grit blasting) ผงขัดที่เลือกใช้ควรมีสมบัติใกล้เคียงกับโลหะที่ถูกขัด เช่น การใช้ผงเหล็กในการขัดโลหะที่ไม่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบหลัก หรือการใช้ผงอะลูมิเนียมออกไซด์ในการขัดอะลูมิเนียมหรือโลหะที่ไม่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ (Non-ferrous metals) เป็นต้น หลังจากการใช้วิธีการเชิงกลเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกตกค้างแล้ว ควรใช้ไทริคลอโรเอทีลีนทำความสะอาดอีกรอบ เพื่อชำระล้างคราบไขมันและกำจัดเศษผงขัดออกจากผิวโลหะ

2.7.2 วิธีการทางเคมี (Chemical method) คือ การใช้สารละลายเคมีในการทำทำความสะอาดพื้นผิวโลหะ สารละลายเคมีที่นิยมใช้ ได้แก่ สารละลายกรด สารละลายด่าง และสารละลายฟอสเฟต การเลือกใช้สารละลายเคมีในการทำทำความสะอาดขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่ต้องการใช้ เช่น สารละลายฟอสเฟตเหมาะสำหรับใช้ทำความสะอาดเหล็กกล้าละมุน (Mild steel) กรดไฮโดรคลอริกหรือกรดโครมิกเหมาะสำหรับใช้ทำความสะอาดเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) หรือกรดไฮโดรฟลูออริก เหมาะสำหรับใช้ทำความสะอาดไทเทเนียม เป็นต้น หลังจากการทำทำความสะอาดพื้นผิวโลหะด้วยสารละลายเคมีแล้ว ควรใช้น้ำอุ่นล้างอีกรอบเพื่อกำจัดสารละลายเคมีที่ตกค้างอยู่บนผิวโลหะก่อนที่จะนำโลหะไปผึ่งหรืออบให้แห้งต่อไป

2.8 การเคลือบผิวโลหะด้วยกาว

การเคลือบกาวลงบนผิวโลหะควรทำทันที หลังจากที่ได้เตรียมพื้นผิวโลหะเรียบร้อยแล้ว เพื่อป้องกันการกัดกร่อนและปนเปื้อนต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นได้ในระหว่างการเก็บรักษา วิธีการเคลือบกาวเพื่อให้ได้ผิวเคลือบที่บาง (ประมาณ 25 ไมครอน) และสม่ำเสมอสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเคลือบผิวโดยใช้พู่กันหรือแปรง (Brushing) การจุ่ม (Dipping) หรือการฉีดพ่น (Spraying) เป็นต้น โดยทั่วไปการเลือกใช้จะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมหลายประการ เช่น รูปร่างของชิ้นงาน พื้นที่ที่จะถูกเคลือบ และปริมาณของวัสดุที่มีอยู่ ซึ่งการเคลือบผิวโลหะด้วยกาวสามารถแบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ

2.8.1 การเคลือบแบบชั้นเดียว (One-coat system) ระบบนี้ประกอบด้วยกาวเพียงชนิดเดียวที่เรียกว่า สารเคลือบชั้นต้น (Primer coat) ซึ่งสารเคลือบหรือกาวชนิดนี้ได้ถูกคิดค้นมาเป็นพิเศษเพื่อให้มีสมบัติยึดติดกับโลหะได้ดี โดยทั่วไป สารเคลือบชั้นต้นประกอบด้วยวัสดุที่มีความเป็นขี้ผึ้ง เช่น ยางที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ (Chlorinated rubbers) พอลิไอโซไซยาเนต (Polyisocyanates) และฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resins) ที่ละลายหรือแขวนลอยอยู่ในตัวทำละลายอินทรีย์ที่เหมาะสม

2.8.2 การเคลือบแบบ 2 ชั้น (Two-coat system) ระบบนี้ประกอบด้วยกาวสองชนิด คือ สารเคลือบชั้นต้น (Primer coat) และสารเคลือบปกคลุม (Cover coat) ส่วนประกอบที่สำคัญของสารเคลือบปกคลุม ได้แก่ ของผสมของพอลิเมอร์หลายชนิดที่มีความเป็นขี้ผึ้งปานกลาง นอกจากนี้ สารเคลือบปกคลุมยังต้องประกอบด้วยวัสดุที่สามารถก่อให้เกิดการเชื่อมโยงทางเคมีระหว่างพอลิเมอร์กับยาง สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในระบบนี้คือสารเคลือบชั้นต้นต้องแห้งสนิทก่อนที่จะมีการเคลือบทับด้วยสารเคลือบปกคลุม โดยปรกติแล้ว สารเคลือบส่วนใหญ่จะมีระยะเวลาแห้งตัวประมาณ 30 นาทีที่อุณหภูมิห้อง

ยางทุกชนิดไม่ว่าจะเป็นยางธรรมชาติหรือยางสังเคราะห์สามารถนำไปยึดติดกับโลหะได้ทั้งสิ้น (เมื่อเลือกใช้กาว หรือสารเคลือบที่เหมาะสม) โดยทั่วไป ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อแรงยึดเหนี่ยวหรือพันธะระหว่างยางกับโลหะคือ ความเป็นขรุขระของยาง ยางที่มีความเป็นขรุขระสูง เช่น NBR และ CR จะเกิดพันธะกับโลหะได้ง่าย ดังนั้น จึงสามารถใช้ระบบการเคลือบแบบชั้นเดียวได้ (โดยมียางที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบหรือฟีนอลฟอร์มอลดีไฮด์เรซินเป็นส่วนประกอบสำคัญของสารเคลือบชั้นต้น) พันธะที่ได้จะมีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับการใช้งานทั่วไป แต่จะเกิดขึ้นได้ยากกว่า ดังนั้น ในกรณีนี้จึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้ระบบการเคลือบแบบ 2 ชั้น เพื่อให้ได้การยึดติดที่ดี

2.9 การยึดติดยางคงรูปโลหะ

หลักการและเทคนิคการยึดติดระหว่างยางกับโลหะที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นนั้นเป็นการยึดติดระหว่างยางที่ยังไม่คงรูป (ยางคอมพาวด์) กับโลหะ โดยที่พันธะเคมีระหว่างยางกับโลหะจะเกิดขึ้นในขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาของรูป อย่างไรก็ตาม ยางที่ได้รับการคงรูปแล้วสามารถนำไปยึดติดโลหะได้เช่นกัน โดยการใช้กาวที่เหมาะสม การยึดติดของยางคงรูปกับโลหะนิยมใช้กรณีที่ยื่นส่วนโลหะนั้นมีขนาดใหญ่ ทำให้ไม่เหมาะที่จะใส่เข้าไปในแม่พิมพ์ ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการขึ้นรูปยางก่อนที่จะนำไปยึดติดกับโลหะในขั้นตอนถัดไป การนำยางที่คงรูปแล้วไปยึดติดโลหะมีข้อดีเหนือกว่าการนำยางคอมพาวด์ไปยึดติดกับโลหะตรงที่การยึดติดระหว่างยางคงรูปกับโลหะสามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิต่ำ (อาจเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิห้อง) ทำให้ความเค้นภายในของพันธะที่เกิดขึ้นเนื่องจากการหดตัวของยางจะต่ำกว่า

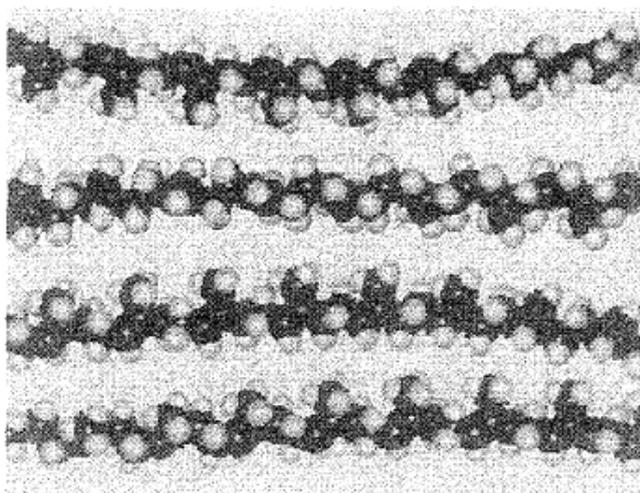
กาวที่นิยมใช้ในกรณีที่ต้องการความแข็งแรงของพันธะสูงๆ ได้แก่ กาวประเภทไซยาโนอะไครเลต (Cyanoacrylate) และอีพอกไซด์ (Epoxy) กาวประเภทไซยาโนอะไครเลต ต้องการพื้นผิวยางที่สะอาดเท่านั้น แต่กาวประเภทอีพอกไซด์จะให้ประสิทธิภาพในการยึดติดสูงก็ต่อเมื่อมีการเตรียมพื้นผิวทางเคมีของยางโดยใช้ปฏิกิริยาการเติมคลอรีน (ปฏิกิริยาคลอรีนเนชัน) หรือโดยการจุ่มยางลงในกรดซัลฟิวริกก่อนเท่านั้น [14]

2.10 พฤติกรรมการนำความร้อน

การนำความร้อน หมายถึง การถ่ายเทพลังงานความร้อนที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในเนื้อยาง โดยความร้อนจะเกิดจากการถ่ายเทจากบริเวณที่มีพลังงานความร้อนสูง (อุณหภูมิสูง) ไปยังบริเวณที่มีพลังงานความร้อนต่ำ (อุณหภูมิต่ำ) โดยทั่วไปยางมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำมากและค่าการนำความร้อนของยางดิบและยางคงรูปก็ไม่แตกต่างกันมากนักแม้ว่าปฏิกิริยาของรูปอาจมีผลทำให้ค่าการนำความร้อนของยางสูงขึ้นเล็กน้อยก็ตาม

สมบัติการนำความร้อนของยางมีความสำคัญต่ออย่างทั้งในระหว่างกระบวนการผลิต (ในขั้นตอนของการอบคงรูป) และในระหว่างการใช้งานของผลิตภัณฑ์ (โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ยางที่มีขนาดใหญ่และหนา) โดยในระหว่างกระบวนการผลิตยางที่มีค่าการนำความร้อนสูงก็จะใช้ระยะเวลาในการคงรูปสั้นลงเนื่องจากความร้อนจากแม่พิมพ์สามารถถ่ายเทเข้าสู่ยางที่อยู่บริเวณด้านในสุดได้อย่างรวดเร็ว ในทำนองเดียวกัน ความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นในระหว่างการใช้งานของผลิตภัณฑ์ก็จะสามารถถ่ายเทจากบริเวณด้านในสุดออกสู่บริเวณด้านนอกสุดและสุดท้ายก็ถ่ายเทต่อให้สิ่งแวดล้อมได้อย่างรวดเร็วเช่นกัน ด้วยเหตุนี้ยางที่มีค่าการนำความร้อนที่สูงจึงมักมีค่าความร้อนสะสมต่ำกว่ายางที่มีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ

โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลเป็นแบบอสัณฐาน (Amorphous) แต่ในบางสภาวะเช่นนี้ที่อุณหภูมิต่ำ หรือเมื่อถูกยืดออก โมเลกุลของยางจะสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบ จึงทำให้สามารถเกิดผลึกได้ (Crystallize) ได้ และกลับสู่สภาพเดิมในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (Strain induced crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดี นั่นคือมีความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance) และต้านทานต่อการขัดสี (Abrasion resistance) สูง



รูปที่ 2.6 การจัดเรียงตัวแบบโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ

ทฤษฎีควอนตัม คือ พลังงานในระดับอะตอม เป็นพลังงานที่เกาะกลุ่มกันและมีสมบัติเป็นอนุภาค เมื่อมีการชนกัน โดยควอนตัมของพลังงานที่เรียกว่า โฟนอน (Phonon) จะเป็นสัดส่วนกับคลื่นความถี่หรือความยาวคลื่นของเสียงนั้น สำหรับการนำความร้อนในยางจะนำความร้อนผ่านโฟนอน โฟนอนมีสมบัติเหมือนอนุภาคใดๆ ซึ่งจัดเรียงตัวไปตามโซ่โมเลกุลของยาง โดยเมื่อ

ได้รับความร้อนจะถูกส่งถ่ายผ่านอนุภาคของโฟนอน ซึ่งโฟนอนจะเก็บสะสมพลังงานและโมเมนตัมไว้ในอนุภาค จากนั้นจะเคลื่อนที่ไปชนโฟนอนอนุภาคอื่นตามทิศทางของโซ่โมเลกุล โดยพลังงานและโมเมนตัมที่สะสมอยู่ในอนุภาคนั้นจะถ่ายเทสู่อุณหภูมิที่ถูกระบายและเป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนสุดท้ายโซ่โมเลกุล

ยางจะมีความสามารถในการนำความร้อนลดลง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นระหว่างช่วงการอบคงรูปยางหรืออาจกล่าวได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของยางจะคงที่ในช่วงอุณหภูมิที่เริ่มต้นอบยาง เพราะ การเชื่อมโยงระหว่างโซ่โมเลกุลของยางยังไม่เกิดขึ้นมาก จนกระทั่งที่อุณหภูมิหนึ่งจะเริ่มเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโซ่โมเลกุลของยางมากขึ้น และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นก็ยิ่งเกิดการเชื่อมโยงมากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของยางในช่วงอุณหภูมินี้ลดลงตามลำดับ และที่อุณหภูมิหนึ่ง เมื่อโซ่โมเลกุลของยางถูกเชื่อมโยงจนเกือบหมด (ยางสุกทั่วทั้งเนื้อยาง) ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของยางก็จะคงที่ ซึ่งค่าคงที่นี้จะเป็นค่าที่ต่ำเมื่อเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของยางก่อนการอบคงรูป

2.11 การทดสอบที่เกี่ยวข้อง

การที่จะนำยางไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ใดๆ นั้น ผู้ผลิตจำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับสมบัติพื้นฐานของยางรวมถึงวิธีการทดสอบสมบัติเหล่านั้น เพราะสมบัติพื้นฐานบางอย่างของยาง เช่น ความแข็งและความทนทานต่อแรงดึง มักถูกนำไปใช้ในการควบคุมคุณภาพของสินค้า (Quality control purpose) นอกจากนี้ ผู้ใช้งานยังนิยมใช้สมบัติดังกล่าวในการกำหนดมาตรฐานคุณภาพของผลิตภัณฑ์อีกด้วย โดยทั่วไป ยางสามารถจำแนกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ ยางดิบ และยางคงรูป เมื่อนำยางดิบไปผสมกับสารตัวเติมและสารเคมีต่างๆ จะเรียกกางที่ได้ว่ายาวคอมพาวด์ ยางในสภาวะนี้ยังสามารถไหลได้ เพราะโมเลกุลของยางยังไม่เกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ดังนั้นสมบัติของยางคอมพาวด์จึงมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการผลิต โดยเฉพาะในระหว่างกระบวนการคงรูป และเมื่อนำยางคอมพาวด์ไปผ่านกระบวนการคงรูปด้วยความร้อนและความดัน ยางคงรูปที่ได้ก็จะมีสมบัติเปลี่ยนไปจากยางคอมพาวด์ เพราะในระหว่างการคงรูปนั้นยางจะทำปฏิกิริยากับสารเคมีทำให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลยางเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ สมบัติต่างๆ ก็จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมากยิ่งขึ้น ความยืดหยุ่นและสมบัติต่างๆ ของยางก็จะดีขึ้น ยางในสภาวะนี้จึงเป็นยางที่พร้อมจะถูกนำไปใช้งาน

2.11.1 การทดสอบสมบัติการกระด้งกระดอน (Testing of Rebound Resilience)

เป็นสมบัติที่บ่งชี้ถึงความสามารถของยางที่จะกลับคืนสู่รูปร่างเดิมอย่างรวดเร็วภายหลังจากที่ยางได้รับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างชั่วคราว เมื่อยางถูกกระทำให้ผิดรูป พลังงาน

จำนวนหนึ่งที่ถูกป้อนให้แก่ยาง ส่วนหนึ่งของพลังงานดังกล่าวจะปล่อยกลับออกมาเมื่อยางกลับคืนสู่รูปร่างเดิม พลังงานที่เหลือ จะสูญหายไปในเรื่องยาง ในรูปของความร้อน อัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ยางเก็บไว้ได้กับพลังงานที่ป้อนเข้าไป เรียกว่า ความกระด้างตัว (Resilience หรือ rebound resilience) การกระด้างตัว เป็นความสามารถของยางวัลคาไนซ์และเป็นค่าที่ใช้แสดงคุณลักษณะเชิงพลวัต (Dynamic mechanical property) ที่สำคัญประเภทหนึ่ง ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าถ้าการกระด้างตัวของยางดี อัตราส่วนระหว่างความสูงของการกระดอนกับความสูงที่ตกกระทบนั่นเอง ยางที่มีการกระด้างกระดอนจึงเหมาะที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่ที่ได้รับการใช้งานแบบพลวัต เพราะจะทำให้เกิดความร้อนสะสมต่ำ

ก) เครื่องทดสอบการกระด้างตัวของยาง

เครื่องมือที่ใช้ทดสอบแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

- ประเภทปล่อยมวลตกกระทบยางตัวอย่าง วัดความสูงการตกกระทบ กับความสูงของการกระดอน คำนวณค่าความกระด้างตัวตามสมการ $R(\%) = (h/H) \times 100$
- ประเภทปล่อยมวลเหวี่ยงหรือแกว่งลงมากระทบยางตัวอย่างแบบลูกตุ้ม (Pendulum Type) วัดมุมตกกระทบกับมุมกระดอน
- ชนิดแกว่งอิสระแบบหน่วง (Free Damped Oscillation) ใช้มวลอัดยางตัวอย่างแล้วปล่อยให้คืนตัวแบบอิสระภายใต้ความเฉื่อยของมวลที่กำลังกอดอยู่นั้น วัดอัมพลิจูดของการสั่นจนกระทั่งหยุด อัตราส่วนอัมพลิจูดของคาบที่อยู่ติดกัน เป็นค่าความกระด้างตัวของยางตัวอย่างทดสอบประเภทนี้เรียกว่า Yertzley Oscilograph และความกระด้างตัวเรียก Yertzley Resilience

ข) ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความกระด้างตัวของยาง

ความกระด้างตัว ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ โดยเฉพาะน้ำหนักรูปร่างของลูกตุ้มแต่ละชนิดไม่เหมือนกัน ปล่อยจากความสูงต่างกัน พลังงานที่กระทบยางตัวอย่างจึงไม่เท่ากัน นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับขนาดและความหนาของชิ้นทดสอบและอุณหภูมิของการทดสอบด้วย