

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับยางธรรมชาติ

3.1.1 รูปแบบของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติ (Nature Rubber, NR) ได้มาจากต้นยางสายพันธุ์ *Hevea Braziliensis* ซึ่งมีถิ่นกำเนิดในแถบลุ่มแม่น้ำอะเมซอนทวีปอเมริกาใต้ น้ำยางสดที่กรีดยได้จากต้นยางมีลักษณะคล้ายน้ำนมเป็นสีขาว มีเนื้อยางแห้ง (dry rubber content, DRC) ประมาณ 30-35% (โดยน้ำหนัก) มีสภาพเป็นคอลลอยด์หรือสารแขวนลอย การแปรรูปยางธรรมชาติสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบใหญ่ ๆ ได้แก่

1. น้ำยางข้น (Concentrated Latex)

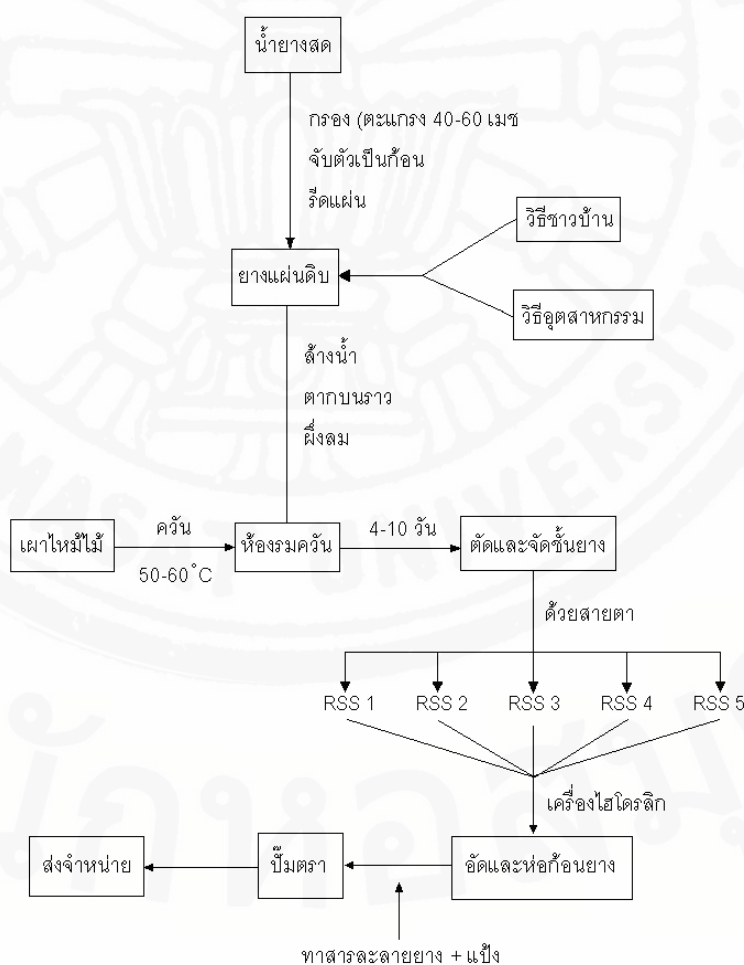
น้ำยางสดที่กรีดยได้จากต้นยางจะมีปริมาณน้ำค่อนข้างมาก ไม่เหมาะที่จะนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์และสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการขนส่ง จำเป็นต้องนำน้ำยางที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนการบางอย่าง (เช่น การปั่นเหวี่ยง (centrifuged)) เพื่อลดปริมาณน้ำในน้ำยางสดจนมีปริมาณเนื้อยางแห้งเพิ่มขึ้นจาก 35% เป็น 60% โดยน้ำหนัก เรียกน้ำยางที่ได้นี้ว่า น้ำยางข้น (concentrated latex) แต่เนื่องจากในน้ำยางมีสารอินทรีย์ต่าง ๆ เช่น โปรตีน และ ฟอสโฟไลปิด (phospholipid) หรือสารประกอบที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบผสมอยู่ซึ่งสามารถถูกย่อยสลายด้วยเชื้อจุลินทรีย์ ทำให้น้ำยางข้นบูดเน่าส่งกลิ่นเหม็นได้ ต้องมีการเติมแอมโมเนียหรือแอมโมเนียร่วมกับสารอื่น ๆ ลงไปเพื่อช่วยรักษาสภาพของน้ำยางข้นให้เก็บไว้ได้นาน น้ำยางข้นที่ใช้แอมโมเนียอย่างเดียวจะต้องใช้แอมโมเนียที่มีความเข้มข้นสูงถึง 0.7% น้ำยางข้นชนิดนี้มีชื่อเรียกว่า High Ammonia Latex หรือ HA latex ส่วนน้ำยางข้นที่ใช้แอมโมเนียความเข้มข้นต่ำเพียง 0.2% จำเป็นต้องใช้สารเคมีอื่น ๆ ร่วมด้วย เช่น ZnO/TMTD 0.02% หรือใช้กรดบอริก 0.2% หรือใช้ Santobrite 0.2% เป็นต้น น้ำยางข้นชนิดนี้เรียกว่า low Ammonia Latex หรือ LA latex น้ำยางข้นส่วนหนึ่งจะถูกส่งออกสู่ตลาดต่างประเทศ ส่วนที่เหลือจะถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมยาง (พงษ์ธร [3-1]) ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ดังกล่าวได้แก่ ถุงมือยาง ถุงยางอนามัย ลูกโป่ง จุกหัวนม เบ้า

หล่อปูนพลาสติก ฟองน้ำที่นอน และหมอนฟองน้ำ เป็นต้น

II. ยางดิบแห้ง (Dry Rubber)

ยางดิบแห้งได้จากเศษก้อนยางหรือจากการนำน้ำยางสดที่กรี๊ดได้มาเติมกรด (นิยมใช้ กรดฟอร์มิก หรือกรดซัลฟูริก) เพื่อให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันเป็นของแข็งแยกตัวจากน้ำ จากนั้นก็ทำการไล่ความชื้นออกจากเนื้อยางเพื่อป้องกันการเกิดเชื้อรา ยางดิบแห้งมีหลายรูปแบบ ได้แก่

1) ยางแผ่นรมควัน ประเทศไทยสามารถผลิตยางแผ่นรมควันได้ประมาณ 80% ของยางดิบที่ผลิตได้ทั้งหมด ซึ่งทำการแปรรูปน้ำยางสดให้เป็นยางแผ่นดิบไม่รมควัน (Unsmoked Sheet) ก่อนโดยนำยางแผ่นดิบที่ได้มาผึ่งให้แผ่นยางมีความชื้นลดลง แล้วไปผ่านกระบวนการอบรมควันต่อไป การจัดชั้นคุณภาพของยางแผ่นรมควันสามารถแบ่ง ได้เป็นชั้นต่าง ๆ ดังนี้ คือ ยางแผ่นรมควันชั้น 1, ยางแผ่นรมควันชั้น 2, ยางแผ่นรมควันชั้น 3, ยางแผ่นรมควันชั้น 4 และยางแผ่นรมควันชั้น 5



ภาพที่ 3.1 การผลิตยางแผ่นรมควัน (พลชิต [3-2])

2) ยางแท่ง (Block Rubber) เป็นยางที่ทำมาจากน้ำยางสด หรือยางแผ่นดิบและเศษก้อนยาง โดยทำให้ยางเป็นชิ้นเล็ก ๆ นำมาอบด้วยลมร้อนให้แห้งแล้วจึงอัดเป็นแท่ง ยางแท่งเป็นยางที่มีการระบุคุณภาพมาตรฐานมีการใช้เครื่องจักรเข้ามาใช้ในกระบวนการผลิต บรรจุหีบห่อเพื่อให้ทันสมัยสะดวกในการขนส่งและใช้งาน ยางแท่งของประเทศไทยมีชื่อเรียกว่า เอส ที อาร์ (Standard Thai Rubber, STR) สมบัติที่ใช้ระบุเป็นคุณภาพมาตรฐานยางแท่ง ตามตารางที่ 3.1

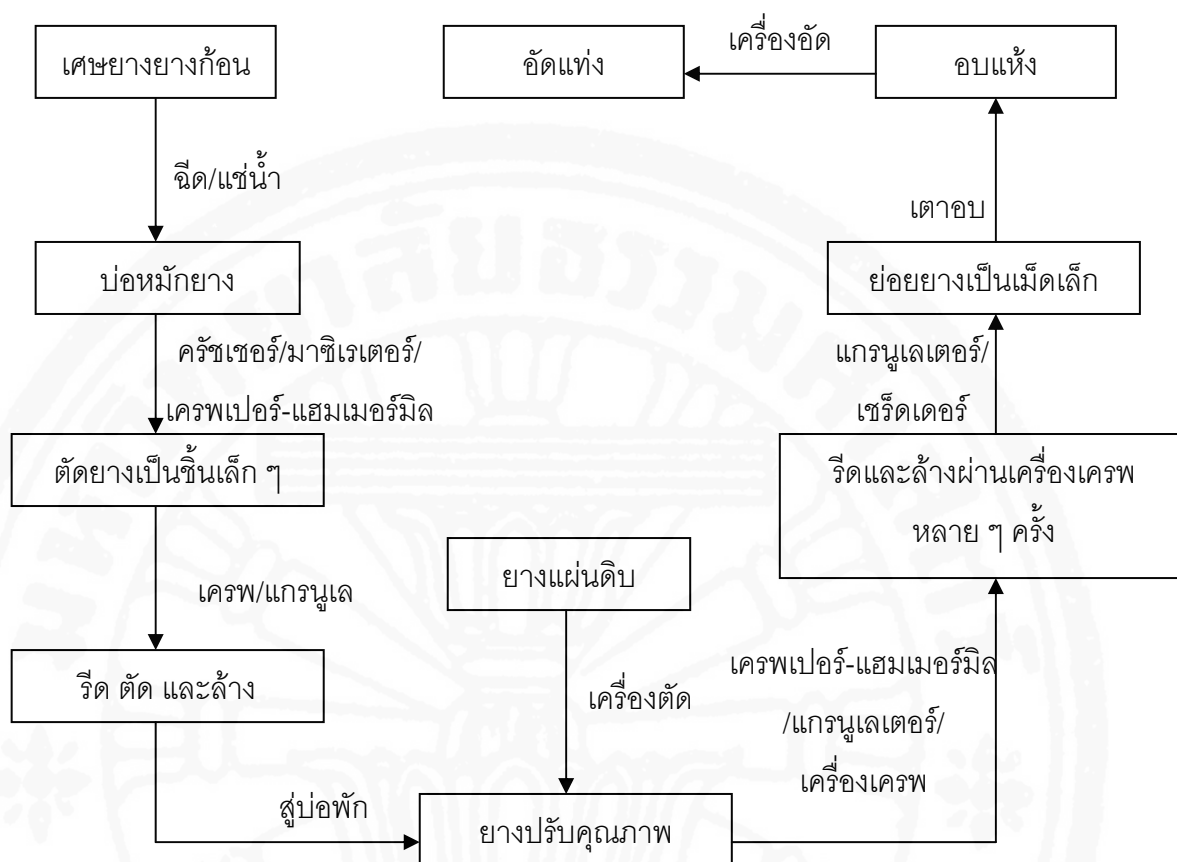
ตารางที่ 3.1 คุณภาพของยางแท่ง เอส ที อาร์ ชนิดต่าง ๆ (พลซิด [3-2])

สมบัติ	ชั้นยางเอส ที อาร์							
	เอกซ์แอล	5 แอล	5	5 ซีวี	10	10 ซีวี	20	20 ซีวี
เปอร์เซ็นต์เถ้าไม่เกิน	0.02	0.04	0.04	0.04	0.08	0.08	0.16	0.16
เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนไม่เกิน	0.4	0.4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.8
เปอร์เซ็นต์สิ่งระเหยไม่เกิน	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
ดัชนีความอ่อนตัวไม่เกิน	60	60	60	60	50	50	40	40
ค่าความอ่อนตัวเริ่มแรก (PO) ไม่ต่ำกว่า	35	35	30	-	30	-	30	-
สียางเทียบโดยไลวีนอลไม่เกิน	4	6	-	-	-	-	-	-
รหัสชั้นสี	น้ำเงิน อ่อน	เขียว อ่อน	เขียว อ่อน	เขียว	น้ำ ตาล	น้ำ ตาล	แดง	แดง

การผลิตยางแท่ง (เสาวนีย์ [3-3]) หลักสำคัญในการผลิตยางแท่ง คือ กระบวนการทำให้ยางเป็นชิ้นเล็ก ๆ โดยมีการใช้เครื่องตัดรีด และย่อยยางก้อนให้เป็นเม็ดหรือชิ้นเล็ก ๆ แล้วนำมาอบให้แห้ง และอัดให้เป็นแท่ง ภาพที่ 3.2 แสดงลำดับและจำนวนเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตยางแท่งที่ผลิตโดยใช้ยางก้อนจับตัว

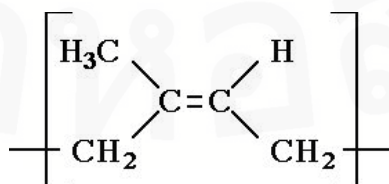
3.1.2 โครงสร้างของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีว่า โพลีไอโซพรีน (Polyisoprene, $(C_5H_8)_n$) หรือ ซีส-1,4-โพลีไอโซพรีน (cis-1,4-polyisoprene) ซึ่งได้จากหน่วยไอโซพรีนต่อกันแบบหัวต่อหาง (head to tail)



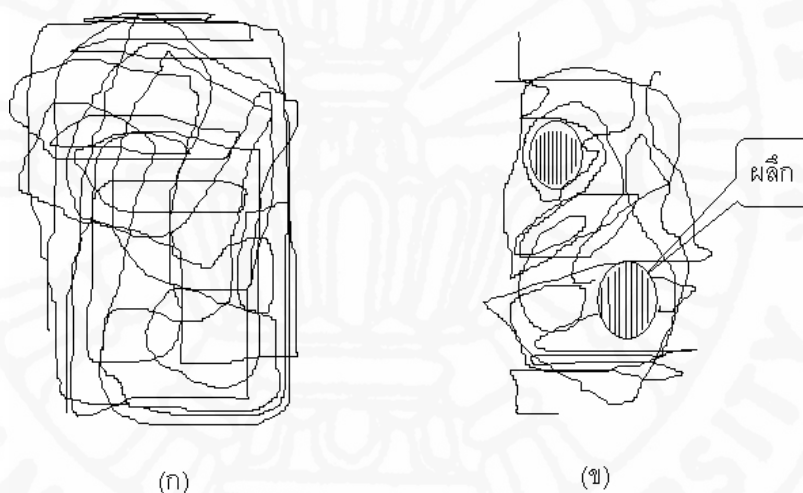
ภาพที่ 3.2 ตัวอย่างขั้นตอนการผลิตยางแท่งโดยใช้ยางก้อนจับตัว (เสาวณีย์[3-3])

กล่าวคือใน 1 โมเลกุลยางจะประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีนมาต่อกันเป็นสายยาว (แบบเส้นตรง) โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 200,000 ถึง 400,000 และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างมาก ยางธรรมชาติมีความหนาแน่นประมาณ 0.93 g/cm^3 ที่อุณหภูมิ 20°C และมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ประมาณ -72°C นั้นหมายความว่าหากนำยางธรรมชาติไปเก็บไว้ในที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า -72°C สมบัติของยางธรรมชาติจะเปลี่ยนจากที่เคยยืดหยุ่นไปเป็นของแข็งเปราะเช่นเดียวกับแก้ว



ภาพที่ 3.3 ลักษณะของ cis-configuration ของยางธรรมชาติ

จากภาพที่ 3.3 จะเห็นว่าใน 1 หน่วยของไอโซพรีนจะมีพันธะคู่และมีหมู่แอลฟาเมทธิลีน (α -methylene) ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกัมมันตอยู่ อย่างไรก็ตาม พันธะคู่เหล่านี้ยังสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่น ๆ ได้อีก เช่น ออกซิเจน หรือโอโซน ทำให้ยางเกิดการเสื่อมคุณภาพ หรืออาจทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจน คลอรีน ไฮโดรเจนคลอไรด์ เป็นต้น ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างยางธรรมชาติ (ที่ตำแหน่งพันธะคู่) กับสารเคมีต่าง ๆ เหล่านี้จะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่ในบางสภาวะ เช่น ที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อยางธรรมชาติถูกยืด โมเลกุลของยางธรรมชาติบางส่วนสามารถจัดเรียงตัวได้อย่างค่อนข้างเป็นระเบียบ ยางธรรมชาติจึงสามารถเกิดผลึก (crystallize) ได้ (ดูภาพที่ 3.4 ประกอบ) ในกรณีที่เก็บยางธรรมชาติไว้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 20°C



ภาพที่.3.4.ลักษณะสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ (พงษ์ธร [3-1])

(ก) ในสภาวะปกติ และ

(ข) ในสภาวะที่ถูกยืด

เป็นเวลานานจะทำให้ยางธรรมชาติเกิดผลึกได้เรียกว่า “low temperature crystallization” โดยจะมีอัตราในการตกผลึกสูงสุดที่อุณหภูมิต่ำประมาณ -26°C การตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำนี้ทำให้ยางธรรมชาติแข็งมากขึ้น ไม่สามารถนำไปผสมให้เข้ากับสารเคมีหรือสารตัวเติมอื่น ๆ ได้ ต้องเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นเพื่อให้ผลึกที่เกิดขึ้นถูกทำลาย ยางธรรมชาติก็จะอ่อนตัวลงแล้วกลับสู่สภาพเดิมด้วยเหตุนี้ ประเทศในเขตอบอุ่นจึงต้องนำยางธรรมชาติมาอบที่อุณหภูมิประมาณ $50-70^{\circ}\text{C}$ เพื่อให้ยางธรรมชาติอ่อนตัวก่อนที่จะนำไปใช้ในกระบวนการผลิตต่อไป ส่วนการเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัวหรือที่เรียกว่า “strain-induced crystallization” พบเมื่อยางธรรมชาติถูกยืดจนมีความ

ยาวมากกว่าความยาวตั้งต้นประมาณ 2-3 เท่า ทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน กล่าวคือ เปลี่ยนจากสภาพโปร่งแสง (transparent) ไปเป็นทึบแสง (opaque) นอกจากนี้ การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัวยังทำให้ยางธรรมชาติคงรูปมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น กล่าวคือ จะมีความทนทานต่อแรงดึงความทนทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการขัดถูสูงขึ้น

3.1.3 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ

เมื่อยางธรรมชาติถูกยืดออกโมเลกุลจะจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบหรือที่เรียกว่าเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัวทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความต้านทานต่อแรงดึงสูง (tensile strength) เนื่องจากผลึกที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวเสริมความแข็งแรงทำให้ยางธรรมชาติแข็งแรงโดยตัวมันเอง ทนต่อการฉีกขาด (Tear Strength) โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง และทนทานต่อการขัดสี (abrasion resistance) สูง นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีลักษณะเด่นอีกหลายประการ เช่น มีความยืดหยุ่น (elasticity) สูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับมันหมดไปก็จะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) อย่างรวดเร็ว มีสมบัติดีเยี่ยมด้านการเหนียวติดกัน (tack) ทำให้สามารถทำผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่มีหลายชิ้นส่วนประกอบกันหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบ (assemble) ชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางรถยนต์ เป็นต้น มีความร้อนสะสม (heat build-up) ต่ำ จึงนิยมใช้ในการใช้ทำยางล้อรถบรรทุก ซึ่งต้องรับงานหนัก เกิดความร้อนสูงได้ง่าย สมบัติการคืนตัวและการกระดอน (Resilience) สูงกว่ายางสังเคราะห์ มีความทนทานต่อน้ำ กรด ต่างเจือจางและเกลือได้ดี แต่จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน โอโซน แสงแดดและแสงอัลตราไวโอเล็ต (เนื่องจากมีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา) ทำให้ยางธรรมชาติเกิดรอยแตกหรือเกิดการแตกหักได้ และถ้าจุ่มยางธรรมชาติลงในกรด เช่น กรดไนตริก กรดซัลฟูริก กรดโครมิก ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หรือไฮเดรียมไฮเปอร์คลอไรด์ ก็จะถูกทำลายอย่างรวดเร็ว ความทนน้ำมันของยางธรรมชาติมีค่าต่ำมากแต่มีความทนทานต่อของเหลวที่มีขี้ผึ้ง เช่น อะซีโตน หรือ แอลกอฮอล์ ได้ดี

3.1.4 สารเคมียาง

ยางดิบมีข้อจำกัดในการใช้งานต่าง ๆ มากมาย เช่น มีสมบัติเชิงกลที่ไม่ดีและสามารถเปลี่ยนแปลงได้ง่ายตามอุณหภูมิ นอกจากนี้ ยางดิบยังมีความทนทานต่อสารเคมีและสารละลายต่าง ๆ ต่ำ อีกทั้งยังไม่สามารถรักษารูปทรงเอาไว้ได้หลังจากทำการขึ้นรูปแล้ว ด้วยเหตุนี้ จึงจำเป็นต้องพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพของยางธรรมชาติเพื่อให้เหมาะกับการนำไปใช้งาน โดย

การเปลี่ยนสภาพจากยางดิบให้กลายเป็นยางคงรูปก่อน ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเรียกว่า” กระบวนการคงรูปยาง (Vulcanization process)” หลังจากนั้นจึงจะสามารถนำไปใช้งานได้

การนำยางธรรมชาติมาผสมกับสารเคมีได้ถูกพัฒนาโดย Goodyear ซึ่งเขาพบว่าถ้านำยางแผ่นบางมาชุบกำมะถันร้อนที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 45 นาทียางที่ได้มีสภาพเป็นของแข็งที่มีความยืดหยุ่นดีทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศไม่เปลี่ยนแปลงสภาพตามอุณหภูมิ ต่อมา Hancock ได้นำแนวความคิดของ Goodyear มาทำเช่นเดียวกันแต่เปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 110 °C เป็นเวลา 30 นาที ยางที่ได้มีความยืดหยุ่นดี ต่อจากนั้นก็ได้มีการพัฒนาสูตรการผสมเรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน

ในการผสมสารเคมีลงไปนยางนอกจากจะต้องคำนึงถึงลักษณะการใช้งานของผลิตภัณฑ์แล้ว ยังต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่น ๆ ประกอบด้วย เช่น ต้นทุนและกรรมวิธีการผลิต เป็นต้น เพื่อให้ได้สูตรการผสมเคมียางที่ดีจึงจำเป็นต้องอาศัยความรู้ในการเลือกใช้ชนิดของยาง ชนิดและปริมาณของสารเคมีหรือสารตัวเติมอื่น ๆ เพื่อให้ได้ยางที่สามารถขึ้นรูปได้ง่ายและผลิตภัณฑ์ยางที่ได้ก็มีคุณภาพดีและมีต้นทุนต่ำ

โดยทั่วไป วัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางสามารถแบ่งออกได้เป็น 8 กลุ่มหลัก ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 (พงษ์ธร [3-4])

ตารางที่ 3.2 การแบ่งกลุ่มขององค์ประกอบที่ใช้ในการผสมเคมียาง

กลุ่ม	องค์ประกอบ
1	ยาง (elastomers)
2	สารทำให้ยางคงรูป (vulcanizing agents)
3	สารตัวเร่งปฏิกิริยา (accelerators)
4	สารกระตุ้นและสารหน่วงปฏิกิริยา (activators and retarders)
5	สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (antidegradants)
6	สารตัวเติม (fillers)
7	สารทำให้ยางนิ่มและสารช่วยในกระบวนการผลิต (plasticizers and processing aids)
8	องค์ประกอบอื่น ๆ เช่น สี (pigment) สารทำให้เกิดฟอง (blowing agents) สารหน่วงการติดไฟ (flame retardants) สารป้องกันการเกิดไฟฟ้าสถิต (anti-static agents) เป็นต้น

โดยทั่วไป การออกสูตรการผสมเคมียางนิยมใช้หน่วย phr (parts per hundred of rubber) นั่นคือจะใช้สารเคมีในปริมาณที่เทียบกับยาง 100 ส่วน (โดยน้ำหนัก) เช่น ใช้ กำมะถัน (sulphur) 2.5 phr หมายถึงถ้าใช้ยางดิบ 100 กรัมก็จะเติมกำมะถันลงไป 2.5 กรัม เป็นต้น ตารางที่ 3.3 แสดงตัวอย่างสูตรการผสมเคมียางพื้นฐานของยางเคลือบสายพานลำเลียง (conveyor belt cover) จากตารางจะสังเกตเห็นว่าในการออกสูตรการผสมเคมียางนั้น นิยมนำยางมาเขียนไว้บนสุดและนำสารเคมีกลุ่มที่มีผลต่อปฏิกิริยาโครงสร้าง เช่น สารตัวเร่งปฏิกิริยาและสารทำให้ยางคงรูปมาเขียนไว้หลังสุด

ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างสูตรการผสมเคมีของยางเคลือบสายพานลำเลียง (พงษ์ธร [3-4])

องค์ประกอบ	phr	กลุ่ม (หน้าที่)
ยางธรรมชาติ (SMR CV)	100.0	ยาง
เขม่าดำ (N220)	45.0	สารตัวเติมเสริมแรง
ซิงก์ออกไซด์ (ZnO)	4.0	สารกระตุ้นปฏิกิริยา
กรดสเตียริก	2.0	สารกระตุ้นปฏิกิริยา
น้ำมัน	4.0	สารทำให้ยางนิ่ม
Agerite Resin D*	2.5	สารป้องกันการเสื่อมสภาพ
ไขพาราฟิน (Paraffin wax)	1.0	สารป้องกันการเสื่อมสภาพ
N-Cyclohexylbenzothiazole-2-sulfenamide	0.5	สารตัวเร่งปฏิกิริยา
กำมะถัน	2.5	สารทำให้ยางคงรูป

*ชื่อการค้าของบริษัท R.T. Vanderbilt

I. สารทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing Agent หรือ Curing Agent)

● คำจำกัดความของการคงรูปยาง

(พงษ์ธร [3-4]) สารทำให้ยางคงรูปเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ต้องผสมลงไปในยางเพื่อทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่เรียกว่าปฏิกิริยาคัลคาไนซ์เซชันหรือปฏิกิริยาโครงสร้าง การเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวจะส่งผลทำให้โมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมโยงกันเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ซึ่งจะทำให้ยางเปลี่ยนสภาพจากอ่อน เหนียวหนึบ (tacky) และไหลได้แบบเทอร์โมพลาสติก

ไปเป็นยางคงรูป (เทอร์โมเซต) ที่มีความยืดหยุ่นสูง มีความทนทาน และมีสมบัติที่เสถียรไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนัก

โดยทั่วไป การคงรูปยางที่ใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระบบใหญ่ ๆ ได้แก่ ระบบที่ใช้กำมะถัน (sulphur) ระบบที่ใช้เพอร์ออกไซด์ (peroxide) และระบบที่ใช้สารเคมีอื่น ๆ เช่น โลหะออกไซด์ เป็นต้น แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะระบบที่ใช้กำมะถันเท่านั้น

● ระบบคงรูปด้วยกำมะถัน

เป็นระบบที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบันเพราะมีต้นทุนต่ำ การคงรูปเกิดขึ้นได้เร็ว (เมื่อใช้กำมะถันร่วมกับสารตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่เหมาะสม) และยางคงรูปที่ได้ก็มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี นิยมใช้ในการคงรูปยางแทบทุกชนิดที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล โดยเฉพาะยางธรรมชาติ อัตราเร็วของการคงรูปจะขึ้นอยู่กับปริมาณพันธะคู่ที่มีอยู่ในสายโซ่โมเลกุลของยาง

ชนิดของกำมะถัน

กำมะถันที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. กำมะถันรอมบิก (rhombic) นิยมใช้กันมากที่สุด มีลักษณะโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวนที่มีกำมะถันอยู่ 8 อะตอม (S_8) สามารถตกผลึกได้ (crystalline) บางครั้งอาจเรียกกำมะถันชนิดนี้ว่ากำมะถันละลายได้ (soluble sulfur) เนื่องจากกำมะถันชนิดนี้สามารถละลายเข้าไปในพอลิเมอร์ได้ในระดับหนึ่ง ซึ่งระดับความสามารถในการละลายของกำมะถันชนิดนี้อาจก่อให้เกิดปัญหาการบวม (bloom) ได้ ตัวอย่างเช่น ที่อุณหภูมิห้องกำมะถันชนิดนี้สามารถละลายเข้าไปในยางธรรมชาติได้ประมาณ 1 phr และที่อุณหภูมิ $75^\circ C$ สามารถละลายได้ประมาณ 5 phr หากเติมกำมะถันลงไปยางธรรมชาติ 2.5 phr กำมะถันก็จะละลายเข้าไปในยางธรรมชาติได้ทั้งหมด เนื่องจากในระหว่างกระบวนการผสมยางธรรมชาติจะมีอุณหภูมิสูงมาก แต่เมื่อยางคอมพาวด์เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง กำมะถันส่วนที่ไม่สามารถละลายได้อีก 1.5 phr ก็จะเคลื่อนตัวมาที่บริเวณพื้นผิวอย่างช้า ๆ และตกผลึกเป็นคราบสีเหลืองอ่อนอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของยางคอมพาวด์ เรียกว่าปรากฏการณ์นี้ว่า “กำมะถันบวม (sulfur bloom)” ปรากฏการณ์ดังกล่าวจะทำให้สมบัติความเหนียวติดกัน (tack) ของยางคอมพาวด์เสียไป ก่อให้เกิดปัญหาในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องอาศัยการประกบหลายชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน นอกจากนี้ ปรากฏการณ์กำมะถันบวมนี้ยังพบได้ในยางคงรูปที่ยังเกิดปฏิกิริยาการคงรูปไม่สมบูรณ์ หรือในยางคงรูปที่มีการใส่กำมะถันมากเกินไป ทำให้มีกำมะถันส่วนเกินที่ไม่เกิดปฏิกิริยาอยู่ค่อนข้างมาก แม้ว่าการบวมของกำมะถันจะไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติของยางคงรูป แต่ก็ก่อให้เกิดผลเสียในแง่ของความสวยงามของผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตาม การบวมที่เกิดขึ้นในยางทั้งหมดไม่ใช่การบวมของกำมะถันเพียงอย่างเดียว

เพราะสารเคมีอื่น ๆ โดยเฉพาะสารเคมีในกลุ่มสารตัวเร่งปฏิกิริยาก็สามารถทำให้เกิดการบลูมได้เช่นกัน

2. กำมะถันอสัณฐาน (amorphous) เกิดจากอะตอมของกำมะถันจำนวนมากมาเรียงต่อกัน มีลักษณะโครงสร้างทางเคมีคล้ายพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (~100,000-300,000) ไม่ละลายในยางและในตัวทำละลายส่วนใหญ่มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่ากำมะถันที่ไม่ละลาย (insoluble sulfur) นิยมใช้ในการป้องกันการบลูมของกำมะถัน ทำให้ยางคอมพาวด์มีสมบัติความเหนียวติดกันที่ดี จึงเหมาะสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมผลิตรายล้อรถยนต์ แต่ถ้าอุณหภูมิระหว่างกระบวนการผลิตสูงเกิน 99-105 °C ก็สามารถเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นกำมะถันรอมบิกได้ ดังนั้นจึงต้องควบคุมอุณหภูมิในระหว่างการผสมให้ดีเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง นอกจากนี้สารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นด่างก็สามารถเร่งให้กำมะถันอสัณฐานเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีไปเป็นกำมะถันรอมบิกได้เร็วยิ่งขึ้น ดังนั้น ในการเตรียมยางมาสเตอร์แบตช์ของกำมะถันจึงไม่ควรเติมสารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นด่างลงไปและในระหว่างการเก็บรักษาก็ไม่ควรนำกำมะถันชนิดนี้ไปวางใกล้กับสารเคมีที่สามารถปล่อยเอมีนอิสระออกมาได้ เช่น ไดไทโอไดมอร์โฟลีน (dithiodimorpholine, DTDM) หรือสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มซัลฟิनाไมด์ (sulfenamide) เพราะไฮดรอกซีของเอมีนและสารที่มีฤทธิ์เป็นด่างอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นจากสารเคมีเหล่านี้จะทำให้กำมะถันชนิดนี้เปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปเป็นกำมะถันรอมบิกได้อย่างรวดเร็วแม้ที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 3.4 การเปรียบเทียบสมบัติพื้นฐานของกำมะถันทั้งสองชนิด (พงษ์ธร [3-4])

สมบัติ	กำมะถัน	
	รอมบิก	อสัณฐาน
น้ำหนักอะตอม	32.06	32.06
ลักษณะภายนอก	ผงสีเหลือง	ผงสีเหลือง
ความถ่วงจำเพาะ	2.07	1.92
จุดหลอมเหลว (°C)	112.8-119	>110
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (mm)	<30	<30

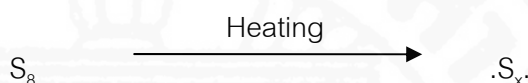
*ความถ่วงจำเพาะจะลดลงตามปริมาณน้ำมันที่อยู่ในกำมะถัน

ปริมาณการใช้กำมะถัน

โดยทั่วไป นิยมใช้อยู่ในช่วง 0.5-3.0 phr ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารตัวเร่งปฏิกิริยา รวมถึงสมบัติของยางคงรูปที่ต้องการ

กลไกการเกิดปฏิกิริยาคงรูปด้วยกำมะถัน

ถ้านำยางธรรมชาติคอมพาวด์มาให้ความร้อน กำมะถันจะเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นอนุมูลอิสระดังสมการ



อิเล็กตรอนของอนุมูลอิสระซึ่งอยู่ที่ปลายด้านหนึ่งก็จะเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของยาง (สายโซ่ที่ 1) ในขณะที่อิเล็กตรอนซึ่งอยู่ที่ปลายอีกด้านหนึ่งของอนุมูลอิสระก็จะเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของยางอีกสายโซ่หนึ่ง (สายโซ่ที่ 2) เกิดเป็นการเชื่อมโยงทางเคมีขึ้น แต่ปฏิกิริยาดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้ช้ามาก ต้องใช้กำมะถันในปริมาณที่สูงและต้องใช้อุณหภูมิสูงมาก ๆ จึงจะทำให้ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นได้ดี จึงได้มีการพัฒนานำสารเคมีชนิดต่าง ๆ มาช่วยให้ปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกำมะถันเกิดขึ้นได้เร็วขึ้น สารเคมีเหล่านี้ได้แก่ สารตัวเร่งปฏิกิริยา (accelerator) และสารกระตุ้นปฏิกิริยา (activator) เป็นต้น รายละเอียดของสารตัวเร่งปฏิกิริยาและสารกระตุ้นปฏิกิริยาจะได้กล่าวถึงต่อไป

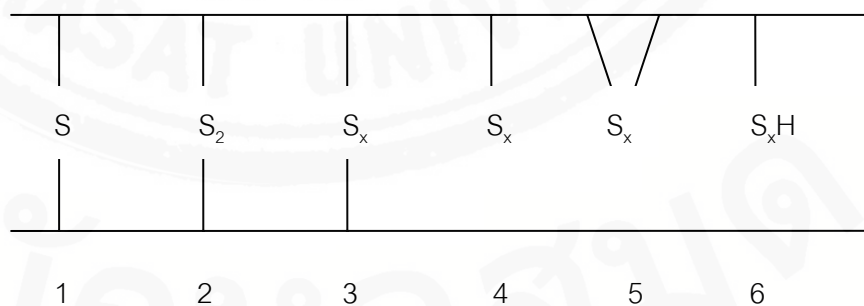
เมื่อมีการเติมสารตัวเร่งปฏิกิริยาและสารกระตุ้นปฏิกิริยา (เช่น ซิงก์ออกไซด์และกรดสเตียริก) ลงไปในระบบ ปฏิกิริยาการคงรูปจะเริ่มต้นด้วยการเข้าทำปฏิกิริยากันของซิงก์ออกไซด์และกรดสเตียริกได้เป็นซิงก์สเตียเรต (เกลือ) ที่สามารถละลายในยางได้ หลังจากนั้น ซิงก์สเตียเรตจึงเข้าทำปฏิกิริยากับสารตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของซิงก์ (I) สารประกอบเชิงซ้อนของซิงก์ที่เกิดขึ้นนี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับกำมะถันเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของซิงก์ (II) และท้ายสุดก็จะเข้าทำปฏิกิริยากับยางที่ตำแหน่งพันธะคู่หรือที่คาร์บอนตรงตำแหน่ง α -methylene ได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างยาง-กำมะถัน-สารตัวเร่งปฏิกิริยา (III) ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อน (III) ที่เกิดขึ้นนี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของยางอีกสายโซ่หนึ่งเกิดเป็นการเชื่อมโยงทางเคมีแบบพันธะซัลฟิดิก (sulfidic) ขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 3.5

รูปแบบของการเชื่อมโยง

ในระบบการคงรูปด้วยกำมะถันการเชื่อมโยงอาจเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของกำมะถันต่อสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ ดังแสดงในภาพที่ 3.6 ระบบการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระบบใหญ่ ๆ คือ



ภาพที่ 3.5 แผนผังแสดงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาควบคู่ด้วยกำมะถัน (พงษ์ธร [3-4])



ภาพที่ 3.6 โครงสร้างการเชื่อมโยงแบบต่าง ๆ : (1) มอนอซัลฟิดิก (2) ไดซัลฟิดิก (3) พอลิซัลฟิดิก เมื่อ $x \geq 3$ (4) สายโซ่กำมะถัน (5) โครงสร้างแบบวง และ (6) หมู่ไทโธล (thiol)

1. ระบบทั่วไป (Conventional vulcanization, CV)
2. ระบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-efficient vulcanization, Semi-EV)
3. ระบบประสิทธิภาพ (Efficient vulcanization, EV)

สำหรับอัตราส่วนของสารเร่งกับกำมะถันในระบบต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 3.5 (ชาญพนธ์ [3-5])

ตารางที่ 3.5 อัตราส่วนระหว่างสารเร่ง (Accelerator) กับกำมะถัน (Sulfur) ในระบบต่าง ๆ

ระบบการวัลคาไนซ์	ปริมาณกำมะถัน (phr)	ปริมาณสารตัวเร่ง (phr)	อัตราส่วนสารตัวเร่ง ต่อกำมะถัน
ทั่วไป	2.0-3.5	1.2-0.4	1-0.6
กึ่งประสิทธิภาพ	1.0-1.7	2.5-1.2	0.7-2.5
ประสิทธิภาพ	0.4-0.8	5.0-2.0	2.5-1.2

ระบบวัลคาไนซ์ที่แตกต่างกันทำให้สมบัติของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติแตกต่างกันด้วยยางธรรมชาติที่วัลคาไนซ์ในระบบทั่วไป ให้การเชื่อมโยงแบบพอลิซัลฟิดิกมากกว่าโมโนซัลฟิดิกและไดซัลฟิดิก ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) การกระดอน (Rebound resilience) ความต้านทานต่อการสึกหรอ (Abrasion resistance) ดี ส่วนความต้านทานการเสียรูป (Creep) และการคลายตัวเนื่องจากความเค้น (Stress relaxation) ดีพอสมควร แต่ความต้านทานการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน (Heat-aging resistance) และการยุบตัวเนื่องจากแรงกด (Compression set) ไม่ดี สำหรับในระบบประสิทธิภาพจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความต้านทานการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนและการยุบตัวเนื่องจากแรงกดดี แต่ความต้านทานการเสียรูปทรงและการกระดอนต่ำ และสุดท้ายยางธรรมชาติที่วัลคาไนซ์ในระบบกึ่งประสิทธิภาพมีสมบัติอยู่ระหว่างการวัลคาไนซ์ในระบบทั่วไปและระบบประสิทธิภาพ สำหรับสมบัติต่าง ๆ ของยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์ในระบบต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 3.6

II. สารตัวเร่งปฏิกิริยา

โดยทั่วไปการคงรูปที่ใช้กำมะถันเพียงอย่างเดียวจะใช้เวลาในการคงรูปนานและยังต้องใช้กำมะถันในปริมาณที่มาก นอกจากนี้สมบัติยางคงรูปที่ได้ยังไม่ค่อยดีมากนักจึงจำเป็นต้องมีการใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคงรูปและทำให้ยางคงรูปที่ได้มีสมบัติที่ดีขึ้น

● การแบ่งกลุ่มสารตัวเร่งปฏิกิริยา

สารตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ที่มีทั้งไนโตรเจนและกำมะถันเป็นองค์ประ-

กอบ ปัจจุบันสามารถแบ่งกลุ่มของสารตัวเร่งปฏิกิริยาออกได้เป็นหลายกลุ่มดังแสดงในตารางที่ 3.7 (พงษ์ธร [3-4])

ตารางที่ 3.6 สมบัติต่าง ๆ ของยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์ในระบบต่าง ๆ (ชาญพจน์ [3-5])

สมบัติของยาง	ทั่วไป	กึ่งประสิทธิภาพ	ประสิทธิภาพ
Poly- and disulfidic crosslink, %	95	50	20
Monosulfidic crosslink, %	5	50	80
Cyclic sulfide concentration	สูง	ปานกลาง	ต่ำ
Low-temperature crystallization	สูง	ปานกลาง	ต่ำ
Heat-aging resistance	ต่ำ	ปานกลาง	สูง
Reversion resistance	ต่ำ	ปานกลาง	สูง
Compression set, 22 hr at 70°C, %	30	20	10

ตารางที่ 3.7 ชนิด ตัวอย่าง และหน้าที่ของสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นสารประกอบอินทรีย์

ชนิด	ตัวอย่าง	การใช้งานทั่วไป
อัลดีไฮด์-อะมีน (aldehyde-amine)	สารที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่าง บิวทิลอัลดีไฮด์ (butylaldehyde) และ อนีลีน (aniline)	สารตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว ใช้ใน ยางรีไซเคิลและยางแข็ง (มีความ เป็นพิษสูง)
เอมีน (amines)	เฮกซะเมทิลีนเททราอะมีน (hexamethylene tetramine, HEXA)	สารตัวเร่งปฏิกิริยาแบบช้าและมี ผล delayed action ใช้ในยาง ธรรมชาติ
กัวนิดีน (guanidine)	ไดฟีนิลกัวนิดีน (diphenyl guanidine, DPG)	สารตัวเร่งปฏิกิริยาทุติยภูมิที่นิยม ใช้ร่วมกับสารตัวเร่งปฏิกิริยาใน กลุ่มไทอาโซล
ไทโอยูเรีย (thioureas)	เอทิลีนไทโอยูเรีย (ethylene thioureas, ETU)	สารตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเร็ว ใช้ใน ยาง CR EPDM CSM และ ECO (มีความเป็นพิษสูง)
ไทอาโซล (thiazoles)	เบนโซไทอาซอลไดซัลไฟด์	สารตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเร็วปาน

ชนิด	ตัวอย่าง	การใช้งานทั่วไป
	เบนโซไทอาซิลไดซัลไฟด์ (benzothiazyl disulfide, MBTS)	สารตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเร็ว ปานกลางใช้ในยางธรรมชาติ และยางสังเคราะห์ชนิดต่าง ๆ เช่น SBR IR NBR และ EPDM เป็นต้น
ไทูรัม (thiurams)	เททระเมทิลไทูรัมไดซัลไฟด์ (tetramethylthiuramdisulfide, TMTD)	สารตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเร็วที่ สามารถแตกตัวให้กำมะถันได้ ใช้ในยางธรรมชาติและยาง สังเคราะห์ชนิดต่าง ๆ เช่น SBR IIR และ EPDM เป็นต้น
ซัลฟิनाไมด์ (sulfenamides)	ไซโครเฮกซิลเบนโซไทอาซิล ซัลฟิनाไมด์ (N-cyclohexyl-2- benzothiazyl-sulfenamide, CBS)	สารตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเร็วที่มี ผล delayed action ใช้ในยาง ธรรมชาติและยางสังเคราะห์ เช่น SBR IR NBR และ EPDM เป็นต้น
ไดไทโอคาร์บาเมต (dithiocarbamates)	ซิงค์ไดเมทิลไดไทโอคาร์บาเมต (zinc dimethyldithiocarbamate, DMC)	สารตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเร็ว มากใช้ในยาง SBR และ IIR
แซนเทต (xanthates)	ไดบิวทิลแซนโทเจนไดซัลไฟด์ (dibutylxanthogendisulfide)	สารตัวเร่งปฏิกิริยาแบบที่ สามารถทำให้เร็วมากยางคง รูปได้ในอุณหภูมิต่ำ ใช้ในยาง ธรรมชาติและยาง SBR

แม้ว่าโดยทั่วไปจะใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณเพียงเล็กน้อยแต่สารเคมีในกลุ่มนี้ก็มีผลอย่างมากต่อสมบัติต่าง ๆ ของยาง เนื่องจากสารเคมีในกลุ่มนี้จะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วและลักษณะการเชื่อมโยงของโมเลกุลยาง ด้วยเหตุนี้ เพื่อให้ได้สมบัติของยางคงรูปตามต้องการ จำเป็นต้องเลือกชนิดและปริมาณของสารตัวเร่งปฏิกิริยาให้เหมาะสม หลักเกณฑ์ทั่วไปในการเลือกใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยามี 5 ข้อหลัก ๆ ได้แก่

1. ต้องทำให้ยางคอมพาวด์มีระยะเวลาสกร๊ชที่ยาวเพียงพอที่จะไม่ก่อให้เกิดปัญหา
ยางตายในระหว่างกระบวนการผลิต
2. ต้องทำให้ยางคอมพาวด์มีอัตราเร็วในการคงรูปที่สูงและยางคงรูปที่ได้ก็มีความ
หนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงด้วยเช่นกัน
3. ต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับอุณหภูมิและระยะเวลาที่จะใช้ในการคงรูปยาง
4. ต้องไม่ก่อให้เกิดปัญหาของยางคงรูปในการยึดติดกับผ้าใบหรือโลหะ
5. ต้องไม่ก่อให้เกิดปัญหาการบวม

ในบางครั้ง อาจใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิดหรือมากกว่ามาผสมกัน สารตัวเร่ง
ปฏิกิริยาหลักที่ใส่ในปริมาณมากเรียกว่าสารตัวเร่งปฏิกิริยาปฐมภูมิ (primary accelerator) ส่วน
สารตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น ๆ ที่ใส่ลงไปปริมาณที่น้อยกว่าจะเรียกว่าสารตัวเร่งปฏิกิริยาทุติยภูมิ
(secondary accelerator) สารตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดเมื่อทำงานร่วมกันจะให้ผลแบบเสริมกัน
(synergistic effect) จึงทำให้ยางมีอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาคงรูปสูงมากยิ่งขึ้น

สำหรับยางธรรมชาติคอมพาวด์ในงานวิจัยนี้ จะใช้สารตัวเร่ง 2 ชนิด คือ MBTS และ
DPG ซึ่งเป็นสารตัวเร่งในกลุ่มของไทอะโซล (thiazole) และ กัวนิดีน (guanidine) ตามลำดับ
ดังนั้นจึงจะกล่าวรายละเอียดของสารตัวเร่งเฉพาะสองกลุ่มที่ใช้ในที่นี้เท่านั้น

■ ไทอะโซล (thiazole)

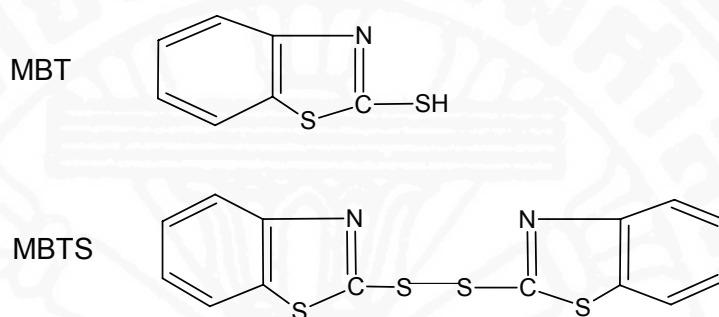
สารตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มไทอะโซลนิยมใช้กันมากที่สุดในโรงงานอุตสาหกรรมเนื่องจาก
เหตุผลทางด้านต้นทุนการผลิต เพราะมีราคาไม่แพงและยังทำให้ยางเกิดการคงรูปได้เร็วอีกด้วย
แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มย่อย ดังนี้

a) กลุ่มเมอร์แคปโต (mercapto)

ตัวอย่างที่สำคัญของสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มเมอร์แคปโตนี้ได้แก่ เมอร์แคปโตเบนโซ
ไทอะโซล (2-mercaptobenzothiazole, MBT) และไดเบนโซไทอะซัลไดซัลไฟด์ (dibenzothiazyl
disulphide, MBTS) สารตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มนี้ใช้ได้กับยางแทบทุกประเภททำให้ยางมีอัตราเร็ว
ในการคงรูปปานกลางและยางคงรูปที่ได้ก็จะมีสมบัติเชิงกลที่ดีและมีความต้านทานต่อการ
เสื่อมสภาพสูง สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้จึงนิยมใช้กับยางธรรมชาติในกรณีที่ต้องการให้ยางที่ได้
มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพที่ดีเมื่ออย่างได้รับการคงรูปมากเกินไป

สาร MBT ทำให้ยางเริ่มเกิดปฏิกิริยาคงรูปได้เร็วกว่า MBTS เพราะ MBTS ต้องแตกตัว
ด้วยความร้อนเป็น MBT ก่อนจึงจะสามารถเร่งปฏิกิริยาคงรูปได้ ด้วยเหตุนี้ MBTS จึงทำให้ยางมี
ความปลอดภัยในการขึ้นรูปที่สูงกว่า (มีระยะเวลาสกร๊ชที่ยาวกว่า) แต่ยางจะมีอัตราการคงรูปที่

ต่ำกว่า MBT โดยภาพรวม ทั้ง MBT และ MBTS เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูง แต่ว่าการใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้เพียงอย่างเดียวอาจให้ยางคงรูปที่ได้มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงต่ำ ดังนั้นจึงนิยมใช้ร่วมกับสารตัวเร่งปฏิกิริยาทุติยภูมิอีกเล็กน้อยจะทำให้ยางมีอัตราเร็วในการคงรูปและมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้น โดยส่วนใหญ่จะนิยมใช้คู่ผสมของสารตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่าง MBTS/DPG และ MBTS/DOTG

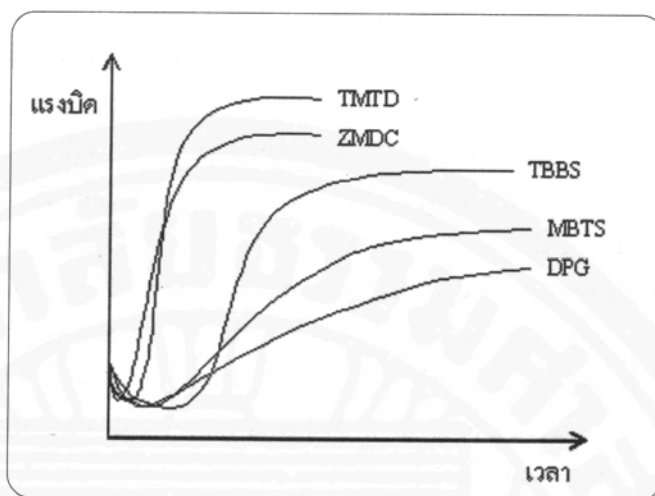


ภาพที่ 3.7 สูตรโครงสร้างทางเคมีของ MBT และ MBTS

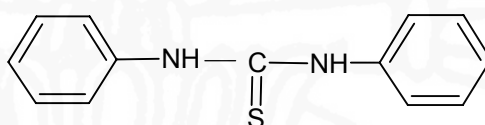
สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มเมอร์แคปโตจะทำงานได้ดีก็ต่อเมื่อมีการเติมซิงก์ออกไซด์และกรดสเตียริก โดยทั่วไป สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้เหมาะกับการใช้งานเกือบทุกประเภท และยังสามารถใช้ได้กับเทคนิคการคงรูปแบบต่าง ๆ เช่น การคงรูปด้วยแม่พิมพ์ การคงรูปด้วยอากาศร้อน การคงรูปด้วยไอน้ำ การคงรูปด้วยถังเกลือกหลอม รวมถึงการคงรูปโดยใช้คลื่นพลังงานสูง เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามในการใช้งานส่วนใหญ่จำเป็นต้องเติมสารตัวเร่งปฏิกิริยาทุติยภูมิเข้าไปด้วยเล็กน้อยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการคงรูป

■ กัวนิดิน (guanidines)

สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ไม่นิยมนำมาใช้แบบเดี่ยว ๆ เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาดต่ำกว่ากลุ่มอื่น ๆ (ดูภาพที่ 3.8 ประกอบ) และสมบัติของยางคงรูปที่ได้ก็ไม่ดี ส่วนใหญ่นิยมนำไปใช้ร่วมกับสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มเมอร์แคปโตเพื่อเพิ่มอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาคงรูป และความหนาแน่นของการเชื่อมโยง ตัวอย่างที่สำคัญของสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ ได้แก่ ไดฟีนิลกัวนิดิน (diphenylguanidine, DPG) ไดโทลิลกัวนิดิน (di-tolylguanidine, DOTG) และโทลิลไบกัวไนด์ (tolylbiguanide, OTBG)



ภาพที่ 3.8 ตัวอย่างแสดงการเปรียบเทียบอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มต่าง ๆ (พงษ์ธร [3-4])



ภาพที่ 3.9 สูตรโครงสร้างทางเคมีของ DPG

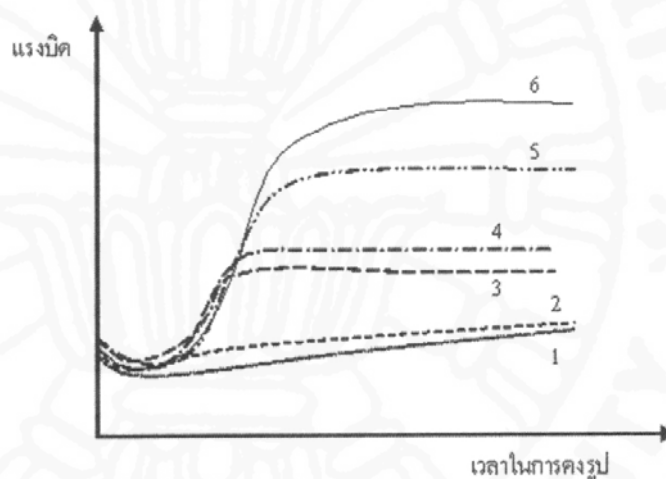
สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้จะทำงานได้เต็มประสิทธิภาพก็ต่อเมื่อในระบบต้องมีซิงก์ออกไซด์ อย่างไรก็ดี เนื่องจากกาวดินมีฤทธิ์เป็นด่าง ดังนั้น การเติมกรดสเตียริก (หรือกรดชนิดอื่น ๆ) ลงไปในระบบจะส่งผลให้อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของสารตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง เพราะกรดจะไปหน่วงปฏิกิริยาของสารตัวเร่งปฏิกิริยา (การเติมกรดสเตียริกลงไปในปริมาณที่สูงกว่า 1 phr จะทำให้ยางมีสมบัติแข็งกลดน้อยลง)

III. สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activators)

สารกระตุ้นปฏิกิริยาเป็นสารเคมีที่เติมลงไปเพื่อเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของสารตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจะไปกระตุ้นสารตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีประสิทธิภาพการทำงานสูงขึ้น แบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ ได้แก่ สารอนินทรีย์ กรดอินทรีย์ และสารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นด่าง ในงานวิจัยนี้จะใช้ซิงก์ออกไซด์ (ZnO) และกรดสเตียริกเป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยา ดังนั้นจะไม่กล่าวถึงรายละเอียดในส่วน of สารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นด่าง

a) สารอนินทรีย์

สารอินทรีย์ที่ใช้เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาควบรูปส่วนใหญ่เป็นออกไซด์ของโลหะ เช่น ซิงก์ออกไซด์ (ZnO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และออกไซด์ของตะกั่ว เป็นต้น นอกจากนี้ ยังสามารถใช้สารประกอบไฮดรอกไซด์ เช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาได้อีกด้วย โดยซิงก์ออกไซด์จัดเป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาที่นิยมใช้กันมากที่สุดในโรงงานอุตสาหกรรม การใช้ซิงก์ออกไซด์เพียงอย่างเดียวสามารถเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาควบรูปได้ แต่จะมีประสิทธิภาพสูงขึ้นหากใช้ร่วมกับกรดไขมัน (นิยมใช้กรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมในช่วง 12-18) เพราะเมื่อสารเคมีทั้งสองทำปฏิกิริยากันจะเกิดเป็นสารประกอบที่สามารถละลายในยางได้ง่าย ทำให้อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นดังแสดงในภาพที่ 3.10 (พงษ์ธร [3-4]) รายละเอียดของสูตรการผสมเคมียางในกราฟแต่ละเส้นแสดงในตารางที่ 3.8



ภาพที่ 3.10 ผลของสารกระตุ้นปฏิกิริยาต่ออัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาควบรูป

ตารางที่ 3.8 รายละเอียดของสูตรการผสมเคมียาง

สูตร	ระบบการควบรูป
1	กำมะถัน (2.5 phr)
2	กำมะถัน + กรดสเตียริก (2 phr) + ซิงค์ออกไซด์ (5 phr)
3	กำมะถัน + TBBS (0.6 phr)
4	กำมะถัน + TBBS + กรดสเตียริก
5	กำมะถัน + TBBS + ซิงค์ออกไซด์
6	กำมะถัน + TBBS + กรดสเตียริก + ซิงค์ออกไซด์

b) กรดอินทรีย์

แม้ว่ายางดิบบางชนิดอาจมีกรดไขมันอยู่เล็กน้อย เช่น ในยางธรรมชาติอาจมีกรดไขมันในปริมาณเทียบเท่ากับกรดสเตียริกปริมาณ 2 phr แต่กรดไขมันที่เกิดขึ้นตามธรรมชาตินี้จะมีปริมาณที่ไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น สายพันธุ์ ชนิด และฤดูกาลเก็บเกี่ยวยาง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเติมกรดไขมันลงไปเพิ่ม โดยทั่วไป ปริมาณของกรดสเตียริกที่นิยมใช้มักอยู่ในช่วง 1-3 phr นอกจากกรดสเตียริกจะทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาแล้ว ยังทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (lubricant) ทำให้ยางมีความหนืดลดลง กรดสเตียริกที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางไม่ได้จัดเป็นสารเคมีที่บริสุทธิ์แต่จัดเป็นของผสมของกรดไขมันหลายชนิด ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยกรดสเตียริก 60 % กรดปาล์มมิติก 21 % และยังมีกรดไมริสติกผสมกับกรดโอเลอิกอีกในปริมาณเล็กน้อย

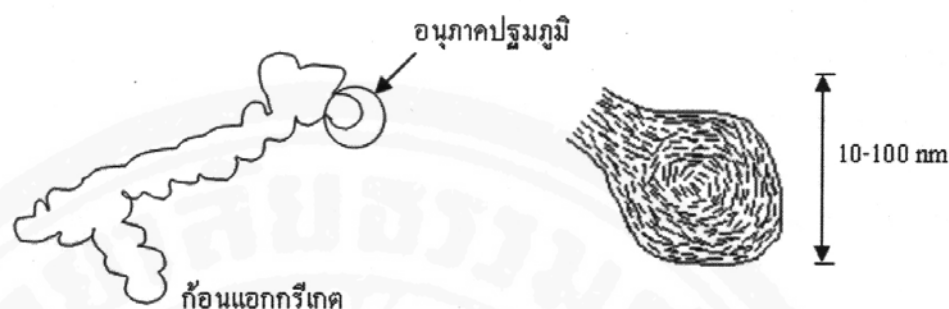
IV. สารตัวเติม (Fillers)

สารตัวเติมที่เติมเข้าไปในยางมีจุดประสงค์หลายอย่าง เช่น เพื่อเสริมแรงให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เพื่อให้ยางคอมพาวด์มีสมบัติเฉพาะที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิต เพื่อเพิ่มความสวยงามให้กับผลิตภัณฑ์ หรือเพื่อลดต้นทุนในการผลิต ฯลฯ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ ตามประสิทธิภาพของการเสริมแรง คือ สารตัวเติมเสริมแรง (reinforcing fillers) และสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรงหรือเรียกว่าสารตัวเติมเฉื่อย (non-reinforcing หรือ inert fillers) หรืออาจแบ่งตามสีของสารตัวเติมได้เป็น 2 กลุ่มเช่นกัน ได้แก่ ผงเขม่าดำ และสารตัวเติมสีอ่อน

การเสริมแรงที่เกิดขึ้นในยางแต่ละชนิดจะไม่เหมือนกัน โดยทั่วไป ผลของการเสริมแรงจะเห็นได้เด่นชัดในยางสังเคราะห์มากกว่าในยางธรรมชาติ แม้ว่าตัวยางธรรมชาติเองจะมีสมบัติเชิงกลที่ดีอยู่แล้วเพราะสามารถตกผลึกได้เมื่อถูกยืด (strain-induced crystallization) แต่การเติมสารตัวเติมเสริมแรงก็จะช่วยปรับปรุงสมบัติของยางให้ดียิ่งขึ้น

เขม่าดำ (carbon black)

เขม่าดำเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง องค์ประกอบหลักของเขม่าดำคือธาตุคาร์บอน โดยอะตอมของคาร์บอนจะจัดเรียงตัวเป็นชั้น ๆ ขนานกัน (โดยเฉพาะชั้นด้านนอก) บางส่วนก็เกิดการเชื่อมล้ากันเล็กน้อย ทำให้อนุภาคมีโครงสร้างแบบกิ่งแกรไฟต์ ดังแสดงในภาพที่ 3.11 (พงษ์ธร [3-4]) เขม่าดำที่ใช้กันในอุตสาหกรรมยางส่วนใหญ่จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคปฐมภูมิอยู่ในช่วง 10-100 นาโนเมตร ($\times 10^9$ เมตร)



ภาพที่ 3.11 โครงสร้างของเขม่าดำ

เขม่าดำแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดหลัก ๆ ตามกรรมวิธีการผลิต ได้แก่

เฟอร์แนสแบล็ก (furnace black) ปัจจุบันนิยมใช้กันมากที่สุด ได้จากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของน้ำมันที่มีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นวงแหวน (highly aromatic oils) อนุภาคปฐมภูมิมีขนาดค่อนข้างเล็กโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 20-80 นาโนเมตร

เทอร์มอลแบล็ก (thermal black) ได้จากการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิ 1,300 °C ในภาวะที่ไม่มีอากาศของก๊าซธรรมชาติ มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิต่อเนื่องค่อนข้างใหญ่โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 120-500 นาโนเมตร และที่พื้นผิวของเขม่าดำชนิดนี้จะไม่มีความพรุนทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะไม่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับเขม่าดำชนิดอื่น ๆ จึงไม่เสริมแรงในยางเพราะทำให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางคงรูปสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่จะทำให้ยางมีกระบวนการผลิตที่ง่ายและยางคงรูปที่ได้ก็จะมีสมบัติการกระด้างกระดอนและสมบัติเชิงพลวัตที่ดีกว่าเฟอร์แนสแบล็ก ปัจจุบันมีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมน้อยมากเพราะสามารถใช้เฟอร์แนสแบล็กซึ่งมีราคาถูกกว่าแทนได้ จะใช้เฉพาะในกรณีพิเศษเท่านั้น

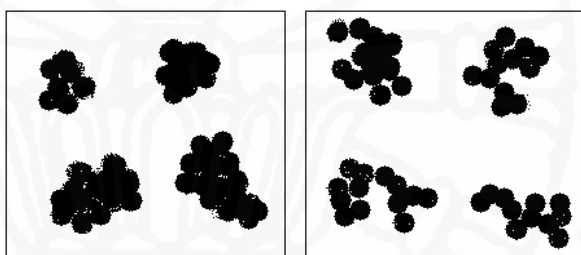
ชาแนลแบล็ก (channel black) ได้จากการเผาไหม้บางส่วน (partial combustion) โดยการผ่านก๊าซธรรมชาติไปยังช่องเปลวไฟ (burner channel) เขม่าที่เกิดขึ้นจะไปเกาะบนฝาเหล็กด้านบน อนุภาคปฐมภูมิจะมีขนาดเล็กมาก (มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 9-30 นาโนเมตร) และมีความเป็นกรดค่อนข้างสูงจึงมีฤทธิ์หน่วงปฏิกิริยาของยาง ปัจจุบันจึงมีการนำไปใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมน้อยมาก

อนุภาคปฐมภูมิของเขม่าดำมีรูปร่างเป็นทรงกลมและไม่อยู่อย่างเดี่ยว ๆ แต่จะถูกห่อหุ้มอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนเรียกว่าแอกกรีเกต การเสริมแรงของเขม่าดำไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของแอกกรีเกตแต่จะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคปฐมภูมิ เขม่าดำที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมยาง

ทั่วไปมีขนาดของอนุภาคปฐุมภูมิในช่วง 19-95 นาโนเมตร โดยทั่วไป เขม่าดำเกรดที่มีขนาดของอนุภาคปฐุมภูมิเล็กจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงทำให้เสริมแรงให้แกยางได้ดี

การเกาะกลุ่มกันของแอกรีเกิดส่งผลให้ผงเขม่าดำมีรูพรุนภายในเกิดขึ้น ปริมาณของรูพรุนภายในนี้จะขึ้นอยู่กับระดับการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนของเขม่าดำ สามารถแบ่งโครงสร้างออกได้เป็น 3 แบบตามระดับของการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน คือ โครงสร้างแบบต่ำ (low structure) โครงสร้างแบบปกติ (normal structure) และโครงสร้างแบบสูง (high structure) เขม่าดำที่มีโครงสร้างแบบต่ำคือเขม่าดำที่มีอนุภาคปฐุมภูมิมาเกาะกันอยู่เป็นกลุ่มก้อนอย่างแน่นหนาทำให้มีรูพรุนหรือช่องว่างภายในน้อย ส่วนเขม่าดำที่มีโครงสร้างแบบสูงคือเขม่าดำที่มีอนุภาคปฐุมภูมิมาเกาะกันอย่างหลวม ๆ ทำให้มีรูพรุนภายในมาก

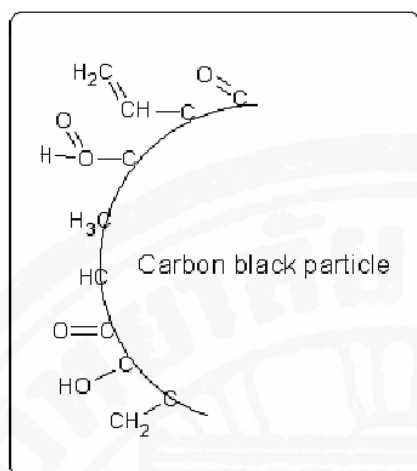
โดยทั่วไป เทอร์มอลแบล็กจะมีโครงสร้างต่ำมาก ซาแนลแบล็กจะมีโครงสร้างปานกลาง ส่วนเฟอร์แนชแบล็กจะมีโครงสร้างสูงมาก



ภาพที่ 3.12 โมเดลแสดงโครงสร้างของเขม่าดำ

(ก) แบบต่ำ และ (ข) แบบสูง

ลักษณะทางเคมีของพื้นผิวเขม่าดำค่อนข้างแตกต่างกันมากเพราะพื้นผิวของเขม่าดำประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันเคมีมากมายและการกระจายตัวของหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้บนพื้นผิวก็แตกต่างกันด้วย หมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวเหล่านี้ไม่เพียงจะมีผลต่อความว่องไวทางปฏิกิริยา (surface activity) ยังมีผลต่ออัตราเร็วของการคงรูปยางอีกด้วย การเพิ่มขึ้นของปริมาณออกซิเจนในเขม่าดำจะทำให้ยางมีค่าระยะเวลาสกริชที่ยาวขึ้นมีอัตราเร็วในการคงรูปและค่ามอดูลัสที่ต่ำลง



รูปที่ 3.13 หมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิว
ของเขม่าดำ

เขม่าดำสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้เป็นอย่างดี ค่าการนำไฟฟ้าจะเพิ่มสูงขึ้นตามโครงสร้างและพื้นที่ผิวของเขม่าดำที่เพิ่มขึ้น หมู่ฟังก์ชันเคมีที่อยู่บนพื้นผิวโดยเฉพาะหมู่ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบก็มีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าของเขม่าดำเช่นกัน เพราะได้มีการศึกษาพบว่า การกำจัดหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้โดยการให้ความร้อนภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อยก็จะทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าของเขม่าดำลดลงอย่างมาก ในอดีต นิยมแบ่งชนิดของเขม่าดำออกเป็น 6 เกรด คือ

- 1) Super-Abrasion Furnace (SAF)
- 2) Intermediate super-Abrasion Furnace (ISAF)
- 3) High Abrasion Furnace (HAF)
- 4) Super-processing Furnace (SPF)
- 5) General-purpose Furnace (GPF)
- 6) Semi-reinforcing Furnace (SRF)

แต่ในปัจจุบัน นิยมใช้มาตรฐาน ASTM ในการตั้งชื่อและแบ่งเกรดของเขม่าดำโดยเริ่มต้นด้วยตัวอักษรซึ่งบ่งบอกถึงอัตราเร็วของปฏิกิริยา curing กล่าวคือ ใช้อักษร "N" สำหรับเขม่าดำที่ให้อัตราเร็วของปฏิกิริยา curing ปกติ (normal curing) และอักษร "S" สำหรับเขม่าดำที่ให้อัตราเร็วของปฏิกิริยา curing ช้า (slow curing) และตามด้วยตัวเลขสามตัว โดยตัวเลขตัวแรกจะบ่งบอกถึงขนาดของอนุภาคปฐมนุญ ส่วนตัวเลขสองตัวหลังไม่ได้มีความหมายใด ๆ ยกเว้นในกรณีที่เขม่าดำเกรดนั้นมีระดับของโครงสร้างมาตรฐาน (standard level of structure) ตัวเลขตัวที่สองมักจะใช้ซ้ำกับตัวเลขตัวแรกและตามด้วยเลขศูนย์ เช่น N330 เป็นต้น

เนื่องจากเขม่าดำแต่ละเกรดมีสมบัติพื้นฐานโดยเฉพาะขนาดของอนุภาคปฐมนุญ พื้นที่ผิวจำเพาะและโครงสร้างที่แตกต่างกัน ดังนั้น เขม่าดำแต่ละเกรดจึงมีความสามารถในการ

เสริมแรงในยางได้ไม่เท่ากัน การเลือกใช้เกรดของเขม่าดำให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิตและชนิดของผลิตภัณฑ์จึงเป็นเรื่องที่สำคัญ ตารางที่ 3.9 แสดงหน้าที่และการใช้งานของเขม่าดำบางเกรด

ตารางที่ 3.9 หน้าที่และการใช้งานของเขม่าดำบางเกรด (พงษ์ธร [3-4])

เกรด	หน้าที่การใช้งาน
N110	ให้การเสริมแรงดีที่สุด (ให้ความต้านทานต่อการขาดและสมบัติแรงดึงสูงที่สุด) นิยมใช้ทำดอกยางรถทั่วไปและรถวิ่งทางวิบาก (Off-the-road) ทำแผ่นรองสะพาน (bridge pads) และสายพานลำเลียง
N121	คล้าย N110 แต่มีโครงสร้างแบบสูงกว่า จึงทำให้ออกยางมีการสึกหรอสูงกว่า เขม่าดำในซีรีส์ N100 เกรดอื่น ๆ แต่ว่าเขม่าดำเกรดนี้สามารถกระจายตัวในยางได้ง่ายพอ ๆ กับเขม่าดำในซีรีส์ N200
N134	ให้ความต้านทานต่อการขาดที่สูงกว่า N121 ใช้ผลิตดอกยางรถบรรทุกและรถยนต์โดยสารต่าง ๆ
N220	ให้ความต้านทานต่อการขาด ความทนทานต่อการฉีกขาด และสมบัติแรงดึงสูงมาก มีค่าการนำไฟฟ้าปานกลาง ใช้ผลิตดอกยางรถบรรทุกและรถยนต์โดยสารรวมถึงผลิตภัณฑ์ที่ใช้งานเชิงกลต่าง ๆ
N231	มีโครงสร้างแบบต่ำ ให้ความต้านทานต่อการขาดสูง ใช้ในการผลิตยางล้อรถที่ต้องการสมบัติความทนทานต่อการฉีกขาดสูง ๆ
N234	ให้ความต้านทานต่อการขาดสูงกว่า N220 ให้ยางที่มีสมบัติการอัดผ่านตาย (die) ที่ดี นิยมใช้ปรับปรุงกระบวนการผลิตในกรณีที่ใช้เขม่าดำที่มีโครงสร้างแบบสูง เขม่าดำเกรดนี้สามารถใช้ได้กับยางทุกประเภท โดยเฉพาะยางผสม SBR/BR ที่ใช้สำหรับผลิตดอกยางล้อรถ
N299	ให้ความต้านทานต่อการขาดใกล้เคียงกับเกรด N234 (สูงกว่า N339 N375 และ N220) ใช้ผลิตยางล้อรถบรรทุกและรถยนต์โดยสาร ใช้ผลิตดอกยางและผลิตภัณฑ์ที่ใช้งานเชิงกลต่าง ๆ
N326	มีโครงสร้างแบบต่ำ ให้การเสริมแรงที่ดี ใช้ในการผลิตโครงยางล้อ (tire carcasses) สายพาน ดอกยางรถวิ่งทางวิบาก และผลิตภัณฑ์ที่ใช้งานเชิงกลต่าง ๆ
N330	ให้ความต้านทานต่อการขาด ความทนทานต่อแรงดึง และความทนทานต่อ

เกรด	หน้าที่การใช้งาน
N339	การฉีดขาดสูง ยางมีสมบัติการกระด้างกระดอนที่ดี มีกระบวนการผลิตที่ง่าย สามารถใช้งานได้หลากหลายทั้งในยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ นิยมใช้ในการผลิตยางล้อและผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในงานเชิงกลต่าง ๆ ให้ความต้านทานต่อการขีดถูและความต้านทานต่อการล้าตัวที่สูงกว่า N347 ให้ยางที่มีสมบัติการอัดผ่านตายที่ดี นิยมใช้ปรับปรุงกระบวนการผลิตในกรณีที่ใช้เขม่าดำที่มีโครงสร้างแบบสูง ใช้ในการผลิตดอกยางของรถยนต์โดยสาร และผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในงานเชิงกลต่าง ๆ
N343	ให้ความต้านทานต่อการขีดถูสูง และให้สมบัติในกระบวนการผลิตที่ดีคล้ายกับ N339 แต่เขม่าดำเกรดนี้มีโครงสร้างสูงกว่า นิยมใช้ผลิตดอกยางรถยนต์โดยสารและรถบรรทุก
N347	ให้สมบัติในกระบวนการผลิตที่ดีมาก ทำให้สามารถใช้น้ำมันในปริมาณที่สูงได้ โดยที่ยังมีค่าการบวมตัวหลังอัดผ่านตาย (die swell) ต่ำ สามารถใช้ได้ทั้งใน ยางธรรมชาติและในยางสังเคราะห์ ใช้ผลิตดอกยางและผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในงานเชิงกลต่าง ๆ
N351	ให้ความต้านทานต่อการขีดถูสูงพอ ๆ กับ N330 มีโครงสร้างแบบสูงจึงทำให้ยางมีค่ามอดูลัสสูงแต่มีกระบวนการผลิตที่ง่าย ยางจะมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดีมาก นิยมใช้ในการผลิตดอกยางและโครงยางล้อ
N358	มีโครงสร้างที่สูงมาก ทำให้สามารถรับน้ำมันได้มากกว่าการใช้เขม่าดำเกรดอื่น ๆ (ที่ความแข็งและมอดูลัสเท่ากัน) ใช้ผลิตดอกยางและผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในงานเชิงกลต่าง ๆ
N550	ให้ความต้านทานต่อการขีดถูปานกลาง แต่ให้สมบัติความทนทานต่อแรงดึงที่ดี ยางหดตัวน้อยและมีการบวมตัวหลังอัดผ่านตายต่ำ สามารถอัดผ่านตายได้อย่างรวดเร็วและได้ผิวเรียบ ยางคงรูปที่ได้มีสมบัติการกระด้างกระดอนที่ค่อนข้างสูง ส่วนใหญ่ใช้ผลิตโครงยางล้อ ท่อยาง ปลอกหุ้มสายเคเบิล รวมถึงผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีอัดผ่านตายในกรณีที่ต้องการความเสถียรทางด้านรูปร่างสูง ๆ
N650	มีโครงสร้างแบบสูง ให้การเสริมแรงปานกลาง ให้ค่าการบวมตัวหลังอัดผ่านตายต่ำ สามารถอัดผ่านตายได้ง่าย มีกระบวนการผลิตที่ง่ายและราคาไม่แพง

เกรด	หน้าที่การใช้งาน
N660	ใช้ในการผลิตโครงยางล้อ แก้มยางล้อ ปลอกหุ้มสายเคเบิล ท่อยาง และยางในรถ
N762	ให้การเสริมแรงปานกลาง เป็นเขม่าดำเกรดที่ใช้งานทั่วไป ทำให้เกิดความร้อนขณะการใช้งานต่ำ ทำให้ยางมีกระบวนการผลิตที่ง่าย ใช้ในการผลิตโครงยางล้อ แก้มยางล้อ และผลิตภัณฑ์ที่ใช้งานเชิงกลต่าง ๆ
N772	ให้การเสริมแรงปานกลาง ยางมีสมบัติการกระด้างกระดอนและสมบัติเชิงพลวัตที่ดี ยางมีการเปลี่ยนพลังงานภายนอกให้เป็นพลังงานความร้อน (hysteresis) ต่ำ สามารถเติมเขม่าดำลงไปได้อย่างได้ในปริมาณสูง ส่วนใหญ่ใช้ในการผลิตสายพาน ท่อยาง ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีอัดผ่านตาย และผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์
N774	ให้การเสริมแรงปานกลาง ทำให้ยางมีสมบัติการกระด้างกระดอนสูงและมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดี นิยมใช้ในการผลิตโครงยางล้อและผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้ในงานในเชิงกลต่าง ๆ
N774	ให้การเสริมแรงปานกลาง ทำให้ยางมีสมบัติการกระด้างกระดอนสูงและมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดี ยางมีการเปลี่ยนพลังงานภายนอกให้เป็นพลังงานความร้อนต่ำ สามารถเติมเขม่าดำลงไปได้อย่างได้ในปริมาณสูง ใช้ในการผลิตโครงยางล้อ แก้ม ยางล้อ สายพาน ท่อยาง และผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีอัดผ่านตาย

เขม่าดำที่มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิเล็กหรือมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงจะให้การเสริมแรงที่ดี แต่ก็จะทำให้ยางมีกระบวนการผลิตที่ยุ่งยากเนื่องจากความหนืดของยางคอมพาวด์สูงมาก ส่วนโครงสร้างของเขม่าดำจะมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตมากกว่าสมบัติของยางคงรูป ตารางที่ 3.23 (พงษ์ธร [3-5]) แสดงผลของขนาดอนุภาคปฐมภูมิและโครงสร้างของเขม่าดำต่อสมบัติของยาง หมูฟุ้งกึ่งชั้นเคมีบนพื้นผิวของเขม่าดำก็จะส่งผลกระทบต่ออัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาคงรูป โดยเฉพาะหมูคาร์บอกซิลิกและหมูฟีนอลิก เพราะทำให้เขม่าดำมีความเป็นกรดสูงขึ้นจึงส่งผลทำให้ปฏิกิริยาคงรูปเกิดได้ช้าลง

ปัจจุบัน เขม่าดำชนิดที่ใช้กันมากที่สุดคือเฟอร์แนชแบล็กเพราะเขม่าดำชนิดนี้สามารถนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ได้มากมายหลากหลาย

ตารางที่ 3.10 ผลของขนาดอนุภาคปฐุมภูมิและโครงสร้างของเขม่าดำต่อสมบัติของยาง

สมบัติ	เมื่อขนาดอนุภาค ปฐุมภูมิเล็กลง	เมื่อโครงสร้าง สูงขึ้น
<u>สมบัติของยางในกระบวนการผลิต</u>		
ปริมาณของเขม่าดำที่ยางสามารถรับได้	ลดลง	ลดลง
เวลาที่ต้องใช้ในการทำให้ยางและเขม่าดำเข้ากัน	ยาวขึ้น	ยาวขึ้น
ความสามารถในการแตกตัว	ลดลง	สูงขึ้น
ความหนืดของยางคอมพาวด์	สูงขึ้น	สูงขึ้น
ระยะเวลาสกอรัช	สั้นลง	สั้นลง
อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาควบรูป	ลดลง	มีผลเล็กน้อย
การบวมตัวหลังอัดผ่านด้าย	ลดลง	ลดลง
ความเรียบของผิวยางหลังอัดผ่านด้าย	สูงขึ้น	สูงขึ้น
อัตราเร็วในการอัดผ่านด้าย	ลดลง	มีผลเล็กน้อย
<u>สมบัติของยางคงรูป</u>		
ความทนทานต่อแรงดึง	สูงขึ้น	ลดลง
มอดูลัส	สูงขึ้น	สูงขึ้น
ความแข็ง	สูงขึ้น	สูงขึ้น
การยืดตัว ณ จุดขาด	ลดลง	ลดลง
ความต้านทานต่อการขีดข่วน	สูงขึ้น	สูงขึ้น
ความทนทานต่อการฉีกขาด	สูงขึ้น	มีผลเล็กน้อย
ความต้านทานต่อการขยายตัวของรอยแตก	สูงขึ้น	ลดลง
ความต้านทานต่อการหักงอ	สูงขึ้น	ลดลง
การกระเดื่องกระดอน	ลดลง	มีผลเล็กน้อย
ความร้อนสะสม	สูงขึ้น	สูงขึ้นเล็กน้อย
การเสียรูปหลังการกดอัด	มีผลเล็กน้อย	มีผลเล็กน้อย
การนำไฟฟ้า	สูงขึ้น	มีผลเล็กน้อย

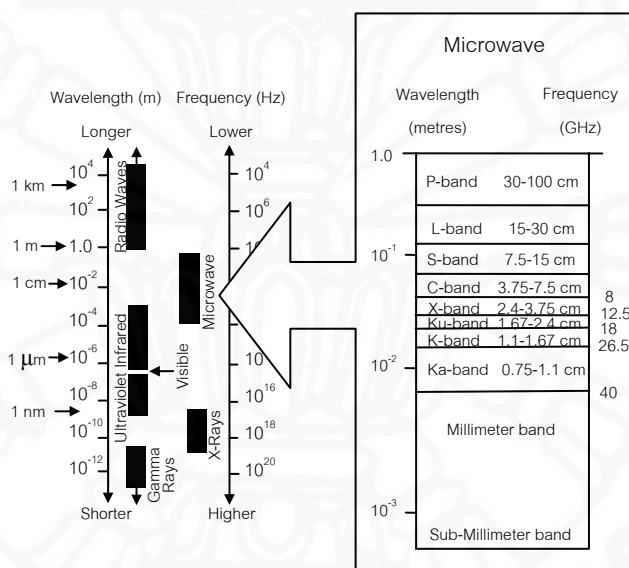
3.1.5 การเตรียมยางธรรมชาติคอมพาวด์

เนื่องจากยางดิบไม่สามารถนำไปใช้งานตามลำพังได้ จำเป็นต้องมีการผสมกับสารเคมีต่าง ๆ เช่น กำมะถัน สารกระตุ้น สารตัวเร่งปฏิกิริยาและสารตัวเติม เป็นต้น ยางธรรมชาติผสมที่ได้เรียกกันโดยทั่วไปว่ายางธรรมชาติคอมพาวด์ (Natural rubber-compound) โดยการนำยางดิบมาทำการบดให้นิ่มเพราะยางธรรมชาติมีความเหนียวและความหนืดสูงมากยากที่สารเคมีต่าง ๆ จะสามารถกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกันได้ การบดยางจึงถือเป็นการลดความหนืดของยางโดยการตัดโมเลกุลของยาง (ลดน้ำหนักโมเลกุล) ด้วยกระบวนการเชิงกล นั่นคืออาศัยแรงเฉือนของลูกกลิ้งในเครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง (two-roll mill) หรือโรเตอร์ในเครื่องผสมระบบปิด (internal mixer) ขั้นตอนนี้เรียกว่า "มาสติเคชัน (mastication)" การบดยางที่อุณหภูมิต่ำจะให้ประสิทธิภาพการบดที่ดีเนื่องจากยางจะมีความหนืดสูงส่งผลทำให้เกิดแรงเฉือนสูง โมเลกุลยางฉีกขาดได้ดี แต่ที่อุณหภูมิสูงความหนืดของยางจะลดลงแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในระหว่างการผสมก็ลดลงด้วย ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบดยางอันเนื่องจากแรงเชิงกลลดลง แต่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบดยางที่อุณหภูมิสูงได้โดยการเติมสารเปปไทเซอร์ (peptizer) ลงไปเล็กน้อยเพื่อช่วยทำให้โมเลกุลยางที่ถูกตัดขาดไปแล้วไม่สามารถกลับเข้าไปทำปฏิกิริยารวมตัวกันใหม่ การบดยางที่ใช้เวลานานเกินไปจะทำให้ยางอ่อนเกินไป ไม่สามารถรับสารตัวเติมในปริมาณมากได้ ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติยางคงรูป ดังนั้นจึงควรใช้เวลาในการบดยางเท่าที่จำเป็น (ใช้เวลาให้สั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้) เพราะนอกจากจะทำให้ยางคงรูปที่ได้มีสมบัติที่ดีแล้ว ยังช่วยลดต้นทุนในการผลิตอีกด้วย

3.2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ

3.2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไมโครเวฟ

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีความถี่อยู่ในช่วง 300 MHz-300 GHz ในสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ไมโครเวฟมีความถี่อยู่ระหว่างช่วงความถี่ของคลื่นวิทยุกับรังสีอินฟราเรด ช่วงความถี่ถัดไปคือแสงที่ตามองเห็น (visible light) ซึ่งเป็นช่วงความถี่สูง ดังนั้นไมโครเวฟจึงเป็นส่วนหนึ่งของการแผ่รังสีแบบไม่ทำให้อะตอมภายในสสารแตกตัว (non-ionizing radiations) ซึ่งคลื่นแบบนี้จะเป็นอันตรายกับสิ่งมีชีวิตน้อยมาก



ภาพที่ 3.14 สเปกตรัมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและช่วงความถี่ของไมโครเวฟ

ไมโครเวฟจัดเป็นคลื่นที่ปลอดภัย ไม่มีสารกัมมันตรังสีตกค้างอยู่บนอาหารหรือคนที่ได้รับคลื่น แต่อย่างไรก็ตาม หากได้รับคลื่นไมโครเวฟมากกว่า 5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (mW/cm^2) ก็อาจทำให้เกิดอันตรายต่ออวัยวะต่าง ๆ ได้ เช่น ตาบอด อวัยวะสุกใช้การไม่ได้ เป็นต้น

ตามภาพที่ 3.14 ช่วงความถี่ของไมโครเวฟจะอยู่ติดกับช่วงความถี่คลื่นของวิทยุที่ใช้ในการกระจายเสียง แต่ช่วงความถี่ของไมโครเวฟมักจะนำไปใช้สำหรับการโทรคมนาคม เช่น โทรศัพท์มือถือ และสัญญาณเรดาร์ เพื่อป้องกันปัญหาการขัดแย้ง (Schbert et al [3-6]) จึงได้มีการจำกัดช่วงความถี่เฉพาะสำหรับการใช้งานในเชิงอุตสาหกรรม, วิทยาศาสตร์ และการแพทย์ เรียกว่า ISM (Industrial, Scientific and Medical) ซึ่งความถี่ของรังสีบางอย่างยอมให้นำไปใช้งานในด้านอื่นได้ เช่น อุปกรณ์สื่อสาร ความถี่ไมโครเวฟในช่วงความถี่ ISM คือ ที่ตำแหน่ง 433

MHz, 915 MHz และ 2,450 MHz ความถี่แรกไม่ค่อยเป็นที่นิยมใช้กันทั่วไป ความถี่ที่สองไม่อนุญาตให้ใช้โดยทั่วไปในทวีปยุโรป นอกจากได้รับอนุญาต โดยต้องจำกัดการรั่วไหล เนื่องจากความถี่ 915 MHz มีข้อได้เปรียบบางอย่างในการใช้งานเชิงอุตสาหกรรม สำหรับเตาอบไมโครเวฟบ้านจะใช้กับความถี่ 2,450 MHz เท่านั้น โดยมีความยาวคลื่นในอากาศเท่ากับ 4.8 นิ้ว (12.192 cm) ปัญหาของการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟเกี่ยวข้องโดยตรงกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า การกระจายตัวของอุณหภูมิและความชื้น รวมทั้งสมบัติของวัสดุไดอิเล็กตริก ดังนั้นจึงต้องรู้สมบัติของวัสดุไดอิเล็กตริกรวมทั้งการควบคุมสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ก่อให้เกิดความร้อนภายในวัสดุไดอิเล็กตริก ความร้อนที่เกิดขึ้นจะส่งผลถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความชื้น และสมบัติไดอิเล็กตริกด้วย

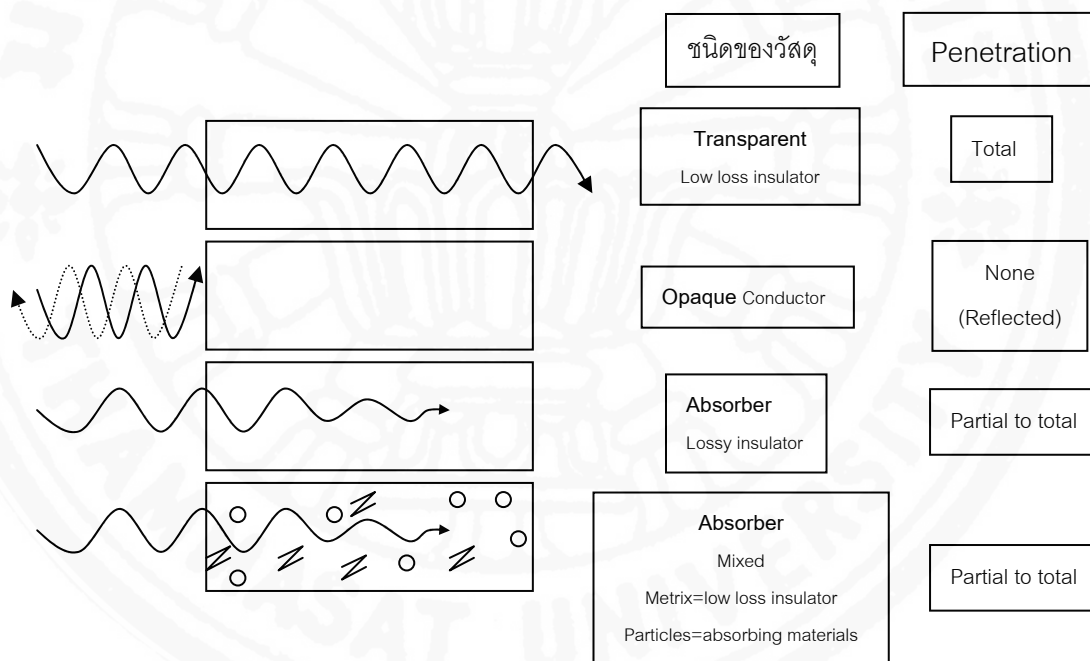
ในขณะที่ไมโครเวฟแพร่ผ่านอากาศ พลังงานซึ่งพิจารณาให้มีสมบัติเหมือนอนุภาคที่ไม่มีมวลเรียกว่าโฟตอน (Photon) นั้นจะแพร่ผ่านพื้นที่ว่างด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วแสง (3×10^8 m/s) อนุภาคจะเคลื่อนที่ในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกันเสมอและอยู่บนระนาบตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น สำหรับในอากาศไมโครเวฟจะแพร่กระจายด้วยความเร็วแสงซึ่งเป็นความเร็วสูงสุดที่พลังงานสามารถเดินทางได้ แต่สำหรับวัสดุ เมื่อไมโครเวฟผ่านเข้าไปภายในเนื้อวัสดุที่มีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานที่ถูกดูดซับไว้ไปเป็นความร้อนนั้นขนาดของความยาวคลื่นจะลดลงเรื่อย ๆ อันเนื่องมาจากการส่งถ่ายของพลังงานนั่นเอง โดยความหนาแน่นของสนามไฟฟ้ากำลังจะลดลงแบบเอ็กโปเนนเชียล (Exponential) เมื่อเทียบกับระยะจากผิววัสดุ ความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่น (Penetration Depth) คือระยะจากผิววัสดุเข้าไยังภายในเนื้อวัสดุซึ่งทำให้สนามไฟฟ้ากำลังลดลงไปเป็น 0.38 เท่าจากผิววัสดุ โดยที่คลื่นนี้ยังคงแทรกสอดเข้าไปได้เมื่อเลยตำแหน่งนี้ไป การแพร่กระจายของไมโครเวฟผ่านวัสดุชนิดต่าง ๆ นั้นจะมีลักษณะคล้ายการแพร่กระจายของแสงผ่านวัสดุชนิดต่าง ๆ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3.15 และสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. วัสดุโปร่งแสง (Transparent Material) เมื่อไมโครเวฟเจอวัสดุที่โปร่งแสง ไมโครเวฟจะทะลุผ่านไป เช่น กระดาษ แก้ว พลาสติกบางประเภท (โพลีโพรพิลีน อะคริลิก ฯลฯ) เป็นต้น

2. วัสดุทึบแสงที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำ (Opaque Material) เมื่อไมโครเวฟเจอวัสดุทึบซึ่งมีความเป็นตัวนำสูง เช่น โลหะ เหล็ก เป็นต้น คลื่นจะถูกสะท้อนกลับโดยที่สนามไฟฟ้าที่ตกกระทบวัสดุส่งผลให้อิเล็กตรอนอิสระในวัสดุเกิดการเคลื่อนที่

3. (Absorber Material) ส่วนมากเป็นวัสดุที่มีสมบัติเป็นฉนวน เช่น ยาง วัสดุโพลีเมอร์ เป็นต้น วัสดุประเภทนี้เมื่อไมโครเวฟส่งผ่านจะมีความสามารถในการดูดซับคลื่นบางส่วน และเกิดการสูญเสียไปเป็นพลังงานความร้อนซึ่งความลึกที่คลื่นสามารถส่งเข้าไปภายในเนื้อวัสดุ เพื่อให้เกิดความร้อนจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการทะลุทะลวงของวัสดุ

4. กรณีผสมอนุภาคของสารบางอย่างในวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับ (Absorber mixed) อนุภาคชนิดนี้มีคุณสมบัติคือเมื่อสนามไฟฟ้าตกกระทบอนุภาคจะเกิดความร้อนขึ้น และมีคุณสมบัติเป็นเหมือนแหล่งความร้อนตัวหนึ่ง (Source) ดังนั้นจึงมีการใช้อนุภาคเหล่านี้ผสมในวัสดุพวกฉนวนในกรณีที่ต้องการให้เกิดความร้อนภายในเนื้อวัสดุสูง อนุภาคของสารที่ใช้ผสมในปัจจุบัน เช่น คาร์บอน แกรไฟต์ เป็นต้น



ภาพที่ 3.15 การแพร่ของคลื่นไมโครเวฟผ่านวัสดุชนิดต่าง ๆ

3.2.2 ความเกี่ยวข้องทางด้านอุตสาหกรรมของไมโครเวฟ

พลังงานจากไมโครเวฟถูกนำมาใช้ในระบบการทางอุตสาหกรรมเป็นเวลากว่าหลายปีมาแล้ว เนื่องจากพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟนั้นสามารถตอบสนองต่อการแข่งขันทางอุตสาหกรรมแทนกระบวนการทำความร้อนด้วยวิธีดั้งเดิมได้เป็นอย่างดี ซึ่งข้อดีหลัก ๆ ของกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ คือ เวลาที่ใช้ในระบบการสัน ประหยัดพลังงาน และ

ให้ผลผลิตที่มีคุณภาพสูง ทำให้ในหลาย ๆ อุตสาหกรรมได้มีการเปลี่ยนแปลงจากระบบเดิมที่มีอยู่มาใช้กระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ แต่เกิดปัญหาทางด้านเทคนิคบางประการจึงทำให้ไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร ส่งผลทำให้ปริมาณการใช้พลังงานจากไมโครเวฟในอุตสาหกรรมไม่ได้ได้รับความนิยมมากนัก ในปี 1960 เป็นช่วงเริ่มต้นของการใช้พลังงานจากไมโครเวฟในทางอุตสาหกรรม แต่เนื่องจากเป็นระบบที่ใหม่มากดังนั้นการควบคุมจึงเป็นไปได้ยาก ประกอบกับอุปกรณ์ที่ใช้มีราคาสูงและอยู่ในช่วงที่เศรษฐกิจมีการขยายตัว ไม่มีความชำนาญในการควบคุมและบริการหลังการขายที่สร้างความพอใจให้ลูกค้าเท่าที่ควร หลังจากความล้มเหลวหลาย ๆ ครั้งจากความพยายามในตอนต้น ความพยายามนี้ก็ค่อย ๆ เริ่มต้นอย่างช้า ๆ ในช่วงศตวรรษที่ 70 โดยการพยายามสร้างทีมออกแบบและวางแผนโดยมีวิศวกรที่มีประสิทธิภาพและมีความเชี่ยวชาญ ประกอบกับบริการหลังการขายที่เหมาะสม แม้จะยังไม่เป็นรูปเป็นร่างในช่วงแรก อย่างไรก็ตามเป็นการยากที่จะทำนายแนวโน้มของธุรกิจการให้ความร้อนจากพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟในอุตสาหกรรมหลังจากกระแสบูชาของธุรกิจในช่วงศตวรรษที่ 80 ต่อมาเกิดการถกเถียงในเรื่องของการลงทุนในการสร้างโรงงานใหม่ และเครื่องจักรกลใหม่ เนื่องจากมีความต้องการในการใช้กระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ เพราะมีการพิสูจน์และการประสบความสำเร็จของกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟในอุตสาหกรรมยางและอุตสาหกรรมอาหาร เป็นที่น่าสนใจว่าอนาคตของอุตสาหกรรมกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟอาจมีความยากลำบากเนื่องจากเกิดความแตกต่างที่หลากหลายของพลังงานที่เหมาะสมในแต่ละประเทศและประกอบกับความแตกต่างของนโยบายและแผนด้านพลังงานของแต่ละประเทศ โดยประเทศที่ไม่สามารถควบคุมเชื้อเพลิง พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากพลังงานน้ำ หรือแหล่งพลังงานนิวเคลียร์ และกระบวนการผลิตโดยทั่วไป มีแนวโน้มที่จะเลือกวิธีทางไฟฟ้า เนื่องจากมีโอกาสที่จะแพร่หลายในเทคนิคไมโครเวฟ อย่างไรก็ตามสำหรับประเทศที่ร่ำรวยเชื้อเพลิง การแทรกซึมของเทคโนโลยีความถี่สูงก็จะเป็นไปอย่างช้า

ที่ผ่านมาได้มีการนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาใช้เป็นแหล่งพลังงานให้ความร้อนเพื่อใช้แปรรูปวัสดุต่าง ๆ ในทางอุตสาหกรรม กระบวนการทำความร้อนในวัสดุด้วยไมโครเวฟเป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจและแตกต่างจากวิธีกระบวนการทำความร้อนแบบเก่าซึ่งให้ความร้อนจากภายนอกผ่านผิววัสดุ ในขณะที่ไมโครเวฟจะผ่านเข้าไปในวัสดุไดอิเล็กตริก หลังจากนั้นพลังงานของไมโครเวฟจะลดลงแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนภายในวัสดุไดอิเล็กตริกแทน กระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟนั้นดีกว่ากระบวนการทำความร้อนแบบเก่าซึ่งจะมีปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพของผลผลิตภัณฑ์เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของการกระจายอุณหภูมิและความชื้น

ภายในผลิตภัณฑ์นั้น ปัจจุบันกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟได้ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรมอาหาร นอกจากนี้ยังมีการใช้ในอุตสาหกรรมยางซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟกันอย่างกว้างขวาง เพราะสะดวก มีประสิทธิภาพสูง และคุ้มค่าในเรื่องพลังงานและเงิน เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟทำให้เกิดความร้อนเชิงปริมาตรและเวลาในการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสั้นกว่าระบบทั่วไปโดยความร้อนที่ไหลผ่านไปยังผิวของยางจะเคลื่อนที่เร็วกว่ามาก พลังงานจากไมโครเวฟสามารถให้ความร้อนแก่ยางสูงถึง 100 เท่า เร็วกว่าวิธีกระบวนการทำความร้อนแบบธรรมดาและลดเวลาในกระบวนการผลิตลงซึ่งมีความจำเป็นอย่างมากต่อการปรับปรุงความสามารถในการผลิต ในกระบวนการวัลคาไนซ์อย่างต่อเนื่องของยางที่ได้จากการเอ็กซ์ทรูด การปรับปรุงความสามารถในการผลิตจะช่วยเพิ่มความเร็วในสายการผลิต นอกจากนี้ยังช่วยลดการใช้พลังงานของโรงงานด้วย ยิ่งไปกว่านั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจะสะอาดและปราศจากสิ่งปนเปื้อนที่เกิดจาก liquid curing media ซึ่งยากที่จะขจัดออกให้หมด ผลิตภัณฑ์ที่มีพื้นที่หน้าตัดขนาดใหญ่และรูปร่างที่ซับซ้อนสามารถผลิตได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งก่อนหน้านี้มีแต่ batch curing ที่ทำได้ การติดตั้ง batch microwave curing ที่มีการปรับปรุงคุณภาพ, ประสิทธิภาพ, ราคา มีเพิ่มมากขึ้น ซึ่งดีกว่าการให้ความร้อนแบบธรรมดา นอกจากนี้ยังมีการนำกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟไปใช้เกี่ยวกับกระบวนการฆ่าเชื้อโรค การอบแห้งแบบสุญญากาศ (vacuum drying) กระบวนการทำให้สาร (อาหาร, พลาสติก, ยา หรืออื่น ๆ) เยือกแข็งและระเหิดเอาไอน้ำออก (Freeze drying) เป็นต้น

3.2.3 อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสนามไฟฟ้ากับวัสดุไดอิเล็กตริก

เมื่อไมโครเวฟตกกระทบบัวัสดุไดอิเล็กตริก พลังงานบางส่วนจะถูกส่งผ่าน บางส่วนจะสะท้อนกลับ และบางส่วนถูกดูดซับไว้โดยตัววัสดุ หลังจากนั้นจะค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ความร้อนที่เกิดขึ้นเกิดจากการเสียดสีกันของโมเลกุลที่มีขั้วภายในตัววัสดุที่พยายามจัดเรียงตัวใหม่ตามการสลับขั้วของสนามไฟฟ้า พลังงานที่เกิดขึ้นในวัสดุมีความสัมพันธ์กับความถี่ของแหล่งกำเนิด dielectric loss ของวัสดุ และความเข้มของสนามไฟฟ้ากำลังสองที่วัสดุได้รับ เราสามารถระบุชนิดของวัสดุและกระบวนการผลิตที่สามารถใช้กับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟอย่างมีประสิทธิภาพและเข้าใจถึงกลไกการเกิดอันตรกิริยาของไมโครเวฟได้ หลังจากนั้น นำเอาการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟมาใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่ ในรูปแบบที่เป็นลักษณะเฉพาะตัวของมัน (Schbert et al [3-6]) ซึ่งรวมถึงข้อเท็จจริงที่ไม่สัมพันธ์กับความถี่ของการระหว่างแหล่งพลังงาน

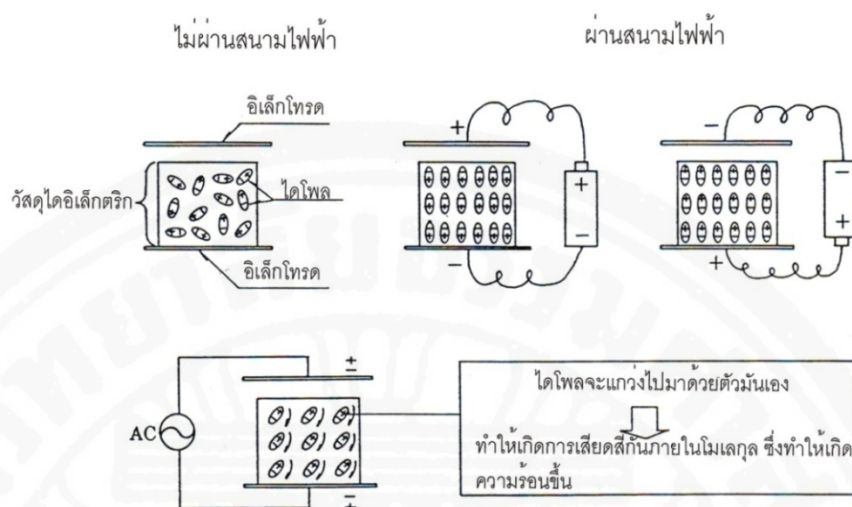
และเป้าหมาย การเกิดความร้อนนี้เป็นแบบเชิงปริมาตร, รวดเร็ว และมีลักษณะเฉพาะตัวสูงมากตามธรรมชาติ

ที่ความถี่ 2.45 GHz สนามไฟฟ้าจะทำให้โมเลกุลของน้ำหมุนเพื่อจัดเรียงตัวใหม่ 10^9 ครั้ง / วินาที ทำให้เกิดความร้อนมากขึ้นซึ่งสามารถเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วได้ถึง 10°C / วินาที น้ำซึ่งเป็นตัวที่ทำให้เกิดความร้อนได้โดยตรงมีอยู่มากในวัสดุชีวภาพ อย่างไรก็ตามมันยังคงเป็นปัจจัยรองลงมาจากปัจจัยที่เกิดจากตัววัสดุ โดยการเกิดความร้อนจะถูกกระตุ้นด้วยไอออน (ส่วนมากจะเป็นส่วนประกอบของเกลือ) และความร้อนจำเพาะของวัสดุ ความร้อนจำเพาะเป็นสมบัติที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งสำหรับพฤติกรรมทางความร้อนของอาหารที่ใช้กับไมโครเวฟ วัสดุที่มีความร้อนจำเพาะต่ำจะทำให้เกิดความร้อนอย่างรวดเร็วและจะเร็วกว่าน้ำที่มีน้ำหนักเท่ากัน น้ำมันจะร้อนได้เร็วกว่าน้ำเพราะตัวมันเองมีความร้อนจำเพาะต่ำกว่า ดังนั้นสำหรับวัสดุที่มีความมัน อิทธิพลจากความร้อนจำเพาะจะเป็นตัวแปรหลักที่ถูกพิจารณาในการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ

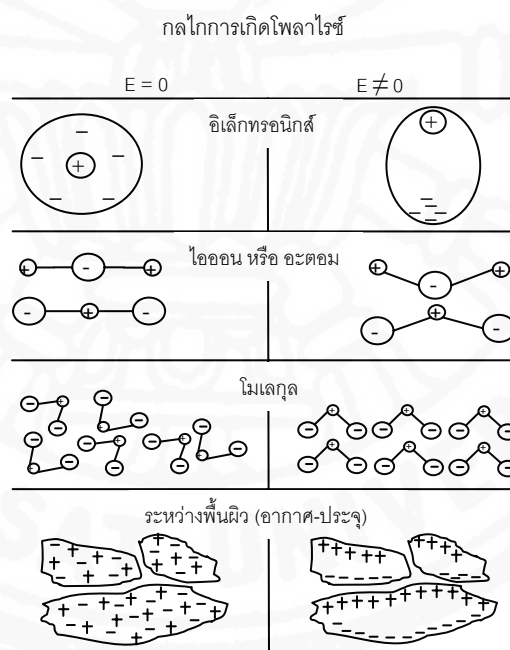
เมื่อวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าหรือ วัสดุไดอิเล็กตริก เช่น ไม้ กระดาษ พลาสติก ถูกนำเข้าไปในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โมเลกุลของวัสดุไดอิเล็กตริก จะหมุนและเคลื่อนที่หลายล้านครั้ง (4,900 ล้านครั้งต่อวินาที สำหรับไมโครเวฟที่ความถี่ 2,450 MHz) โดยจะเคลื่อนที่ตามการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าดังภาพที่ 3.16 ภายใน วัสดุไดอิเล็กตริก จะมี dipole ของแต่ละโมเลกุลเรียงตัวอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่ง dipole ในแต่ละโมเลกุลจะประกอบไปด้วยขั้วบวกและขั้วลบ เมื่อมีสนามไฟฟ้าวิ่งผ่าน วัสดุไดอิเล็กตริก ทำให้ dipole ในแต่ละโมเลกุลจะเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบและสลับขั้วตามการเปลี่ยนแปลงของคลื่นซึ่งจากการสลับขั้วไปมาอย่างรวดเร็วของ dipole ทำให้เกิดการเสียดสีกัน ชนกันกับโมเลกุลตัวอื่น ๆ เกิดพลังงานออกมาในรูปของความร้อนภายในโมเลกุล และเนื่องจากโมเลกุลอยู่ในวัสดุ ดังนั้น เมื่อเกิดความร้อนจากตัวโมเลกุลด้านใน แล้วค่อยส่งความร้อนออกมาด้านนอก จึงทำให้สามารถอธิบายได้ว่าทำไมไมโครเวฟจึงร้อนจากด้านในออกมายังด้านนอก

3.2.4 การเกิดโพลาไรซ์ (Polarization)

การเกิดโพลาไรซ์ในสสารเกิดจากอันตรกิริยาระหว่างไมโครเวฟกับวัสดุไดอิเล็กตริก ซึ่งกลไกมีอยู่ด้วยกันหลายกลไก ได้แก่ การเกิดโพลาไรซ์แบบอิเล็กทรอนิกส์, แบบไอออนิก, แบบโมเลกุล (ไดโพล) และแบบที่เกิดระหว่างพื้นผิว (อากาศ-ประจุ) โดยทั่วไปจะนำสนามไฟฟ้าไปใช้กับแต่ละกลไกในสภาวะปกติซึ่งทำให้ประจุเกิดการเคลื่อนที่ส่งผลให้เกิดโพลาไรซ์ในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า ผลที่ได้จากแต่ละกลไกแสดงดังภาพที่ 3.17



ภาพที่ 3.16 ทฤษฎีการเกิดความร้อน (Microdenshi Co.,Ltd.[3-7])



ภาพที่ 3.17 กลไกการเกิดโพลาไรซ์

❖ การเกิดโพลาไรซ์แบบอิเล็กตรอนิกส์ (Electronic Polarization)

สำหรับวัสดุไดอิเล็กตริกที่สภาวะปกติ อิเล็กตรอนจะอยู่ล้อมรอบอะตอมและถูกกำหนดให้มีการจัดวางที่สมดุล หลังจากให้สนามไฟฟ้าเข้าไปอิเล็กตรอนจะเกิดการเคลื่อนที่โดยจะสัมพันธ์กับตำแหน่งของประจุบวกตามทิศทางของสนามไฟฟ้า ที่สภาวะนี้อะตอมจะถูกเหนี่ยวนำให้แสดงพฤติกรรมไดโพลแบบไม่ถาวร

❖ การเกิดโพลาไรซ์แบบไอออนิก (Ionic or Atomic Polarization)

กลไกการเกิดโพลาไรซ์แบบไอออนิกหรือแบบอะตอมจะแตกต่างจากแบบอิเล็กทรอนิกส์ เพราะจะเกิดการเคลื่อนที่ของอะตอมแทนการเคลื่อนย้ายกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนรอบอะตอม เมื่อมีสนามไฟฟ้ามากระทำทำให้ประจุบวกและประจุลบในผลึกเกิดการเคลื่อนที่ โดยจะจัดให้ตัวมันมีความสมดุล โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ประจุบวกจะถูกดึงดูดไปยังขั้วไฟฟ้าที่เป็นลบและประจุลบจะถูกดึงดูดไปยังขั้วไฟฟ้าที่เป็นบวก

❖ การเกิดโพลาไรซ์แบบโมเลกุล (ไดโพล) (Molecular Polarization)

โมเลกุลในวัสดุจะจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบที่สภาวะปกติ ดังนั้นมันจึงไม่มีการแสดงประจุออกมา (หรือไม่มีขั้ว) การเกิดโพลาไรซ์ของไดโพลหรือโมเลกุลจะเกิดเมื่อสนามไฟฟ้าภายนอกวางในแนวเดียวกับไดโพลถาวร ในวัสดุบางชนิดการเกิดโพลาไรซ์สามารถจะรักษาสภาพไว้ได้จนกระทั่งถึงตอนที่ถูกระตุ้นเกิดเป็นความร้อนจากการหมุนของโมเลกุล

❖ การเกิดโพลาไรซ์แบบที่เกิดระหว่างพื้นผิว (อากาศ-ประจุ) (Interfacial or Space-Charge Polarization)

การเกิดโพลาไรซ์ระหว่างพื้นผิวหรือเรียกอีกอย่างว่าการเกิดโพลาไรซ์ระหว่างอากาศกับประจุ ตัวที่ทำหน้าที่พาประจุให้เคลื่อนที่ในวัสดุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวถูกกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจนกระทั่งถูกหน่วงเหนี่ยวโดยสิ่งกีดขวางสะสมเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ การเพิ่มขึ้นของประจุนี้จะทำให้เกิดการโพลาไรซ์ขึ้นในวัสดุ โดยทั่วไปตัวพาจะเป็นขอบของเกรน/เฟส และผิวหน้าอิสระ

การเกิดโพลาไรซ์จากกลไกเบื้องต้นมีอิทธิพลอย่างมากมาจากความถี่ การเปลี่ยนแปลงของแต่ละกลไกขึ้นอยู่กับเกิดการโพลาไรซ์ของตัวมันเองในช่วงความถี่ต่าง ๆ

3.2.5 สมการพื้นฐาน (Basic Equation)

สมการพื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าคือ Maxwell Curl Relation รูปอนุพันธ์ของ Maxwell's Equation สามารถแสดงในเทอมของความเข้มของสนามไฟฟ้า (Electric Field Intensity, E) และความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Intensity, H) เราสามารถแสดง Maxwell's Equation ในเทอมของเวลา (time) และระยะการจัดของตำแหน่ง (space) ได้ดังนี้ (Ratanadecho et al. [3.8])

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = q \quad (3.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.4)$$

เมื่อ E และ H คือความเข้มของสนามไฟฟ้าและความเข้มของสนามแม่เหล็กตามลำดับ, J คือความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current Density), D คือความหนาแน่นของฟลักซ์ (Flux Density) และ B คือความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux Density) โดยความสัมพันธ์ระหว่าง J , D และ B กับ E และ H คือ

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3.5)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (3.6)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.7)$$

โดย σ คือ Electric Conductivity, μ คือ Magnetic Permeability และ ϵ คือ Permittivity หรือ Dielectric Constant แทนสมการ (3.5) ถึง (3.7) ลงในสมการ (3.1) ถึง (3.4) จะได้

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (3.8)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (3.9)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{q}{\epsilon} \quad (3.10)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (3.11)$$

The curl relation หรือสมการ (3.8) และ (3.9) อ้างอิงมาจาก Faraday's Law และ Ampere's Law ตามลำดับและสมการ Divergence หรือสมการ (3.10) และ (3.11) เป็นผลมาจาก Gauss's Law. The Curl relation ใน Maxwell's Equation จะวัดการหมุนของสนาม จากสมการที่ (3.8) อธิบายว่าการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กตามเวลาจะก่อให้เกิดสนามไฟฟ้า สมการที่ (3.10) แสดงถึง divergence ของสนามแม่ไฟฟ้าที่จุดใด ๆ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ Position charge density และสมการที่ (3.11) แสดงถึงการไม่มีแหล่งกำเนิด (source) หรือแหล่งรับ (sink) ของสนามแม่เหล็กสำหรับคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ปรากฏในสมการข้างต้นนี้สามารถแสดงในรูปความสัมพันธ์ดังนี้

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (3.12)$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (3.13)$$

$$\sigma = 2\pi f \varepsilon \tan \delta \quad (3.14)$$

เมื่อ f คือความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ, $\tan \delta$ คือ loss tangent coefficient, ε_r และ μ_r คือ relative permittivity หรือ relative dielectric constant และ relative magnetic permeability ตามลำดับ ถ้าพิจารณาจากสนามแม่เหล็กค่า magnetic permeability, μ ของวัสดุไดอิเล็กตริกที่ใช้ในงานประยุกต์ทางการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟสามารถประมาณได้เท่ากับ μ_0 ในอากาศ โดยทั่วไป สมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุจะถูกสมมติให้แปรผันตามอุณหภูมิเพียงอย่างเดียวในกรณีของการทำความร้อน (Heating) และการหลอมเหลว (Melting) ด้วยไมโครเวฟ และจะแปรผันตามอุณหภูมิและความชื้นในกรณีการอบแห้ง (Drying) ด้วยไมโครเวฟ

อุณหภูมิของชิ้นทดสอบที่เกิดจากพลังงานไมโครเวฟสามารถพิจารณาได้จากสมการการส่งผ่านความร้อน (conventional heat transport equation) ซึ่งรวมเทอมของพลังงานความร้อนที่ผลิตขึ้นในวัสดุเนื่องจากไมโครเวฟ สมการพลังงานที่อธิบายการเพิ่มของอุณหภูมิในยางธรรมชาติคอมพาวด์คือสมการการส่งถ่ายความร้อนที่ขึ้นกับเวลา

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 T + \frac{Q}{k} \quad (3.15)$$

โดยกำหนดให้ ∇^2 เท่ากับ $\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ สำหรับพิกัดแกนฉาก แทนค่าลงในสมการ (3.15) จะได้

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{Q}{k} \quad (3.16)$$

$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p}$ คือ ค่าการกระจายความร้อน (thermal diffusivity) มีหน่วยเป็น m^2/s และค่า Q

สำหรับงานวิจัยนี้แทนด้วย Q ของไมโครเวฟ นำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการ (3-16) จะได้

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{Q}{\rho \cdot C_p} \quad (3-17)$$

จากสมการที่ (3.17) Ratanadecho et al. [3-9] ได้ทำการแปลงสมการเพื่อใช้สำหรับการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ

3.2.6 สมบัติไดอิเล็กตริก

ถ้าวัสดุที่ประกอบด้วยโมเลกุลที่มีขั้ว เช่น น้ำ อยู่ในสนามไฟฟ้า โมเลกุลจะจัดวางตัวเองตามทิศทางของสนามไฟฟ้า ความแข็งแรงของประจุที่ปลายโมเลกุลเรียกว่า ไดโพลโมเมนต์ (dipole moment) ซึ่งบอกถึงขนาดของปฏิริยาระหว่างประจุกับสนามไฟฟ้า นอกจากนั้นไดโพลโมเมนต์ยังเป็นค่าที่แสดงถึงค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant, ϵ') สำหรับโมเลกุลที่สมมาตรกันและไม่มีไดโพลโมเมนต์ คือ ไม่มีขั้ว จะไม่เกิดปฏิริยาในสนามไฟฟ้า เมื่อความถี่ในสนามไฟฟ้าสูงขึ้น โมเลกุลจะหมุนตามการสลับขั้วในสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น トラバ迪ที่โมเลกุลมีขั้วสามารถหมุนโดยอิสระ ไดโพลโมเมนต์จะมีประสิทธิภาพสูงและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะขึ้นกับความถี่เนื่องจากโมเลกุลมีอันตรกิริยากับโมเลกุลอื่นในวัสดุจึงเกิดความร้อนขึ้นภายในตัวอย่าง อย่างไรก็ตามเมื่อความถี่ในสนามไฟฟ้าเพิ่มสูงเกินกว่าระดับหนึ่งโมเลกุลจะไม่อิสระเต็มที่ ทำให้ประสิทธิภาพของไดโพลโมเมนต์ลดลงและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกลดลง

ไดอิเล็กตริก loss factor (ϵ'') หรือค่าการดูดซับพลังงานมีพฤติกรรมต่างออกไป ที่ความถี่ต่ำมากไดโพลจะหมุนตามสนามไฟฟ้าโดยอิสระและมีพลังงานถูกถ่ายเทไปยังสิ่งแวดล้อมน้อยมาก นั่นคือมีการดูดซับพลังงานน้อยมาก เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลจะยากขึ้น และทำให้มีการสูญเสียพลังงานแก่โมเลกุลรอบ ๆ มากขึ้น การดูดซับพลังงานจะเกิดขึ้นสูงสุดเมื่อเพิ่มความถี่ถึงจุดหนึ่ง ถ้าเพิ่มความถี่ไปเรื่อย ๆ ถึงระดับหนึ่งไดโพลจะไม่สามารถหมุนไปตามการสลับขั้วของสนามไฟฟ้าที่ความถี่สูงมากนั้นได้ การดูดซับจึงเท่ากับศูนย์

ความถี่ที่มีการดูดซับพลังงานสูงสุดเรียกว่า ความถี่รีแลกเซชัน (relaxation frequency) หรือความถี่วิกฤต (critical frequency, f) สมการส่วนกลับของความถี่ดังกล่าวเรียกว่า เวลารีแลกเซชัน (relaxation time) ซึ่งเท่ากับ $1/2\pi f_c$ หรือคิดเป็นเวลาเศษหนึ่งส่วนล้านของ 1 วินาที เวลารีแลกเซชันหมายถึงเวลาที่ต้องใช้ในการทำให้โมเลกุลที่หมุนอยู่กลับมาอยู่ที่ 36.8 % ของสภาวะที่ตั้งต้นตั้งแต่มีการกำจัดการกระตุ้นออกไป

ความรู้เกี่ยวกับคุณลักษณะของสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุไดอิเล็กตริกในกระบวนการไมโครเวฟมีความจำเป็นในการออกแบบอุปกรณ์ใช้งานด้านไมโครเวฟให้เหมาะสมต่อการใช้งาน การแผ่รังสีเป็นรูปแบบหนึ่งของพลังงานที่สามารถทะลุผ่านที่ว่าง อากาศ และวัตถุได้ ไมโครเวฟ

นั้นประกอบไปด้วยสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเช่นเดียวกับแสง (การแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า) แต่จะแตกต่างจากแสงตรงที่ความถี่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่างกัน

ในการที่จะควบคุมความร้อนของวัสดุไดอิเล็กตริกอันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าหรือไมโครเวฟ เราจำเป็นที่จะต้องทราบสมบัติการดูดซับพลังงานของคลื่นไมโครเวฟ โดยเริ่มจากการกำหนด dielectric permittivity ของวัสดุไดอิเล็กตริก

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon_0(\varepsilon'_r + j\varepsilon''_r) = \varepsilon_0\left(\varepsilon'_r + j\frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0}\right) \quad (3.18)$$

เมื่อ $j = \sqrt{-1}$, ε คือ complex dielectric permittivity (โดยทั่วไปเรียก dielectric constant) และเป็นสมบัติของวัสดุใดๆ ที่อธิบายถึงความสามารถในการดูดซับ ส่งผ่าน และสะท้อนพลังงานจากส่วนที่เป็นสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ โดย $\varepsilon_0 = 8.86 \times 10^{-12}$ F/m คือ permittivity ของที่ว่าง (free space), ε'_r คือส่วนที่เป็นจำนวนจริงของ relative permittivity หรือ relative dielectric constant และอธิบายความสามารถในการสะท้อนกลับคลื่นไมโครเวฟจากผิวของชิ้นทดสอบ (sample) หรือวัสดุไดอิเล็กตริก และบอกว่าคลื่นไมโครเวฟที่ส่งผ่านวัสดุไดอิเล็กตริกมีมากเท่าไร ε''_r คือส่วนจินตภาพ โดยทั่วไปเรียก Dielectric loss factor ซึ่งจะบอกถึงความสูญเสียพลังงานภายในชิ้นทดสอบ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือวัสดุสามารถดูดซับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟที่ผ่านเข้ามาแล้วสามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนได้เท่าไร และ σ คือความสามารถในการนำไฟฟ้า (Electric conductivity) ความสัมพันธ์ระหว่าง Dielectric loss factor กับค่า Conductivity สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\varepsilon''_r = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0} \quad (3.19)$$

เมื่อ ω คือ ความเร็วเชิงมุมของคลื่นไมโครเวฟ σ คือความสามารถในการนำไฟฟ้า (Electric conductivity) และ ε''_r แสดงถึงความสูญเสียเชิงกล โดยสามารถยุบรวมกันเป็นตัวแปรใหม่เพื่อความสะดวกเรียกว่า loss tangent coefficient, $\tan \delta$:

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''_r}{\varepsilon'_r} = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon'_r\varepsilon_0} \quad (3.20)$$

dielectric loss tangent coefficient ($\tan \delta$) เป็นอีกตัวแปรที่สำคัญตัวหนึ่งที่ใช้อธิบายความสามารถในการผลิตความร้อนของวัสดุไดอิเล็กตริก ในขณะที่ดูดกลืนพลังงานจาก

คลื่นไมโครเวฟ Von [3-10] ได้ทำตารางค่าสมบัติไดอิเล็กตริกสำหรับวัสดุไดอิเล็กตริก (เช่น คริสตัล เซรามิก แก้ว น้ำ พลาสติก ยางมะตอย ซีเมนต์ และ ไม้ เป็นต้น) ในช่วงความถี่และ อุณหภูมิ $100 < f < 10^{10}$ และ $12 < T < 200$ °C ตามลำดับ

3.2.7 การเกิดความร้อนในยางธรรมชาติคอมพาวด์โดยใช้ไมโครเวฟ

สำหรับการนำความร้อนในยางธรรมชาติคอมพาวด์แบบทั่วไป จะนำความร้อนผ่านอนุภาคที่เรียกว่าโฟนอน (Phonon) เป็นกลุ่มของพลังงานที่สามารถพิจารณาได้ว่ามีสมบัติเหมือนอนุภาคใด ๆ จัดเรียงตัวไปตามโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติคอมพาวด์ให้ความร้อนกับยางธรรมชาติคอมพาวด์ความร้อนจะถูกส่งผ่านโฟนอน ซึ่งโฟนอนจะเก็บสะสมพลังงานและโมเมนตัมไว้ในอนุภาค หลังจากนั้นจะเคลื่อนที่ไปชนโฟนอนอื่นตามทิศทางของโซ่โมเลกุล โดยพลังงานและโมเมนตัมที่สะสมอยู่ในโฟนอนนั้นจะถ่ายเทสู่อนุภาคที่ถูกชนเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนสุดท้ายโซ่โมเลกุลหรือจนกว่าจะเจอกับบริเวณสายโซ่โมเลกุลที่เกิดการเชื่อมโยง (crosslink) หรือบริเวณที่เกิดการเชื่อมต่อกับโมเลกุลอื่น ระดับของพลังงานและโมเมนตัมก็จะลดลง อย่างไรก็ตามโฟนอนสามารถที่จะบรรจุความร้อนไว้ได้ในระดับหนึ่งแต่ไม่มากนัก จึงส่งผลให้ความสามารถในการนำความร้อนของยางธรรมชาติคอมพาวด์มีค่าต่ำ แต่พฤติกรรมการเกิดความร้อนในยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่ใช้ไมโครเวฟจะแตกต่างจากพฤติกรรมการเกิดความร้อนในยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่ให้ความร้อนแบบทั่วไป กล่าวคือ วัสดุที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ การเกิดความร้อนเมื่อได้รับไมโครเวฟจะได้รับอิทธิพลมาจากผลของโมเลกุลของน้ำที่มีรูปแบบเป็นไดโพล เมื่อวัสดุดังกล่าวได้รับไมโครเวฟโมเลกุลของน้ำที่อยู่ภายในตัววัสดุจะเกิดการเคลื่อนที่เพื่อจัดเรียงตัวตามสนามไฟฟ้า ทำให้เกิดการเสียดสีกันเกิดเป็นพลังงานความร้อนขึ้น แต่ยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นเมื่อได้รับไมโครเวฟในช่วงแรกจะแสดงพฤติกรรมกลไกการเกิดโพลาริซีก่อนเพื่อทำให้เกิดการมีขั้วแบบชั่วคราว หลังจากนั้นจึงนำพลังงานที่ได้รับจากไมโครเวฟมาแปลงเป็นพลังงานความร้อนแต่ความร้อนที่เกิดขึ้นยังเกิดได้ค่อนข้างน้อยเนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีขนาดใหญ่มาก นอกจากนี้การจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลแต่ละสายโซ่ยังไม่เป็นระเบียบ ดังนั้นการเคลื่อนที่หรือการเคลื่อนตัวโมเลกุลเพื่อจัดเรียงตัวตามสนามไฟฟ้าจึงทำได้ค่อนข้างช้าและยาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีการเติมเข้ามาเข้าไปในยางธรรมชาติคอมพาวด์เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงานให้มีมากขึ้น เพราะตัวเข้ามาดำเป็นวัสดุที่สามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ดี ดังนั้นการเติมเข้ามาเข้าไปจะช่วยให้เวลาในการเพิ่มของอุณหภูมิลดลง ยางธรรมชาติคอมพาวด์ก็จะสามารถเกิดความร้อนได้มากขึ้นด้วย

3.2.8 ความยาวคลื่นและความลึกในการทะลุทะลวง (Wavelength and penetration dept)

วัสดุที่มีค่าความสามารถในการดูดซับไมโครเวฟสูง (ค่า loss factor สูง) จะทำให้การทะลุทะลวงของพลังงานไมโครเวฟเข้าไปในวัสดุนั้นลึกลง ค่าความลึกในการทะลุทะลวงเข้าไปในวัสดุขึ้นอยู่กับสมบัติไดอิเล็กตริก ได้แก่ dielectric constant และ loss factor

ความลึกในการทะลุทะลวงมีค่าจำกัดความที่ใช้ทั่วไป 3 แบบ ได้แก่ ความลึกในการทะลุทะลวงกำลัง (power penetration depth) ความลึกในการทะลุทะลวงสนามไฟฟ้า (electric field penetration depth) และความลึกทะลุทะลวงครึ่งกำลัง (half penetration depth, HPD) ค่า dielectric constant และ loss tangent coefficient สามารถใช้ประมาณความยาวคลื่นภายในวัสดุไดอิเล็กตริกและความลึกในการทะลุทะลวงได้ คลื่นไมโครเวฟ TE_{10} mode ที่ความถี่ 2.45 GHz เมื่อผ่านเข้าไปในชิ้นงานรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีขนาดภายในเท่ากับ $a \times b$, ความยาวคลื่นในชิ้นงานรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าสามารถหาได้จาก

$$\lambda_x = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{1 \cdot \lambda_0}{2a}\right)^2 - \left(\frac{0 \cdot \lambda_0}{2b}\right)^2}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{1 \cdot \lambda_0}{2a}\right)^2}} \quad (3.21)$$

เมื่อความยาวคลื่นในสุญญากาศ $\lambda_0 = \frac{2\pi}{\omega} \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}}$ ความยาวคลื่นในวัสดุไดอิเล็กตริกสามารถ

คำนวณได้จาก (Bamnger et al. [3-11])

$$\lambda_{mg} = \frac{2\pi}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\frac{\epsilon'_r \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''_r}{\epsilon'_r}\right)^2} + 1 \right)}{2}}} = \frac{2\pi}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\frac{\epsilon' \left(\sqrt{1 + (\tan \delta)^2} + 1 \right)}{2}}} \quad (3.22)$$

ความลึกในการทะลุทะลวง หรือ ระยะทางที่สนามไฟฟ้าทะลุเข้าไปได้ สามารถหาได้จาก

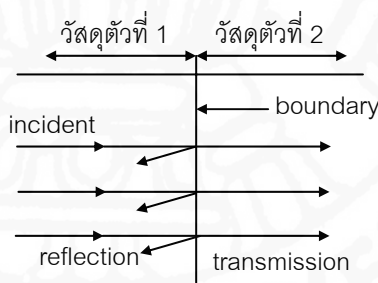
$$D_p = \frac{1}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\frac{\epsilon'_r \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''_r}{\epsilon'_r}\right)^2} - 1 \right)}{2}}} = \frac{1}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\frac{\epsilon' \left(\sqrt{1 + (\tan \delta)^2} - 1 \right)}{2}}} \quad (3.23)$$

พบว่าเมื่อค่า dielectric constant และ loss tangent coefficient เปลี่ยน ความลึกในการทะลุทะลวงและสนามไฟฟ้าภายในวัสดุไดอิเล็กตริกก็จะเปลี่ยนด้วย ดังนั้น ทำให้เราทราบว่าค่า loss factor ความยาวคลื่นและความถี่ของไมโครเวฟ เป็นตัวกำหนดความลึกในการทะลุทะลวงโดยไมโครเวฟได้ เนื่องจากไมโครเวฟจะสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนในขณะแทรกผ่านเข้าไปในตัววัสดุ ยิ่งค่า loss factor สูงก็จะเกิดความร้อนมากขึ้น กล่าวคือ คลื่นจะแทรกผ่านเข้าไปในตัววัสดุได้ตื้นลงก่อนที่จะพลังงานทั้งหมดจะถูกใช้ไป

สำหรับงานวิจัยนี้ ค่าความลึกในการทะลุทะลวงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งเนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการศึกษา คือ ยางธรรมชาติคอมพาวด์ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่มีขั้ว มีค่าความลึกในการทะลุทะลวงมากกว่าความหนาของชิ้นงาน ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นจะเกิดจากปรากฏการณ์เรโซแนนซ์

3.2.9 การสะท้อน, การส่งผ่าน และการดูดซับ (Reflect, Transmit and Absorb)

คลื่นไมโครเวฟมีความหมายคล้ายคลึงกับแสงหลายประการ คลื่นไมโครเวฟสามารถเป็นรังสีตกกระทบสามารถทะลุผ่านช่องว่างและสามารถดูดซับโดยวัสดุไดอิเล็กตริกได้ (ดังภาพที่ 3.18) และความสามารถทั้งสามอย่างนั้นสัมพันธ์กับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของชิ้นทดสอบด้วย



ภาพที่ 3.18 รังสีการตกกระทบและการดูดซับโดยวัสดุไดอิเล็กตริก

คลื่นไมโครเวฟจะถูกสะท้อนจากรอยต่อระหว่างวัสดุไดอิเล็กตริก 2 ชนิด (เช่น รอยต่อระหว่างชิ้นทดสอบกับอากาศ) พลังงานของคลื่นไมโครเวฟที่ถูกสะท้อนกลับสามารถคำนวณได้จากค่า dielectric constant ของชิ้นทดสอบตามสมการต่อไปนี้

$$P_{\text{reflect}} \cong \left(\frac{\sqrt{\epsilon} - 1}{\sqrt{\epsilon} + 1} \right)^2 \quad (3.24)$$

นอกจากนี้สมการนี้ใช้ได้กับข้อสมมติฐานที่ว่าผิวหน้าของวัตถุราบเรียบและคลื่นไมโครเวฟตกกระทบตั้งฉากกับผิวหน้าของชิ้นทดสอบ คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านวัสดุไดอิเล็กตริก เช่น แก้วและพลาสติกได้โดยไม่มีการดูดซับและสะท้อน พลังงานของคลื่นไมโครเวฟที่ทะลุผ่านผิวรอยต่อระหว่างวัสดุไดอิเล็กตริก 2 ชนิดสามารถคำนวณได้โดยสมการต่อไปนี้

$$P_{Transmit} = 1 - P_{reflect} \quad (3.25)$$

คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านวัสดุไดอิเล็กตริกสามารถถูกดูดซับและเปลี่ยนความร้อนได้ เรียกว่า การกำเนิดปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (density of microwave power absorbed) Q โดยปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรนั้นสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในวัสดุไดอิเล็กตริกดังแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้ (Metaxas [3-12])

$$Q = \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' |E|^2 + \omega \mu_0 \mu_r'' |H|^2 \quad (3.26)$$

เมื่อ E คือสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง H คือสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นปริมาณเชิงซ้อน (complementary complex patterns) อย่างไรก็ตามวัสดุไดอิเล็กตริกไม่มีผลต่อ magnetic polarization เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก ดังนั้น จึงไม่มีสนามแม่เหล็กสูญเสียและสามารถละเทอมที่สองของสมการด้านขวามือของสมการ (3.25) ได้

$$Q = \sigma |E|^2 = \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' |E|^2 \quad (3.27)$$

ในระหว่างการแผ่รังสีไมโครเวฟ การเปลี่ยนแปลงเฟสของสนามไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยเวลา จะเร็วมาก ดังนั้น ค่าเฉลี่ยรากที่สอง (root mean square value) ของความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกใช้ในการประมาณค่าพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับโดยวัสดุไดอิเล็กตริกเมื่อสมมติให้ไม่มีการสูญเสียสนามแม่เหล็ก ค่าของการกำเนิดปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (local volumetric heat generation) หรือความหนาแน่นของพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับ (density of microwave power absorbed) สามารถแสดงได้ในรูปสมการต่อไปนี้ (Ratanadecho et al. [3-13])

$$Q = \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' E^2 = 2\pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r'' (\tan \delta) E^2 \quad (3.28)$$

จากสมการด้านบนค่าพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับจะแปรผันตรงกับความถี่ของสนามไฟฟ้า ค่า dielectric loss factor และค่ากำลังสองของสนามไฟฟ้า แต่ถึงกระนั้นถ้าค่า dielectric constant และค่า dielectric loss tangent coefficient ของขึ้นทดสอบมีค่ามากจะส่งผลให้การดูดซับพลังงานจากไมโครเวฟ และปริมาณความร้อนเกิดขึ้นมากขึ้นตาม แต่ถ้าค่า dielectric constant และค่า dielectric loss tangent coefficient ของขึ้นทดสอบมีค่าน้อย จะส่งผลให้การดูดซับพลังงานจากไมโครเวฟ และปริมาณความร้อนเกิดขึ้นน้อยด้วย อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิที่สูงขึ้นอาจจะขึ้นกับตัวแปรอื่น ๆ เช่น ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat) คุณลักษณะของขึ้นทดสอบและขนาดของขึ้นทดสอบ

สมการ (3.27) มีความสำคัญในการศึกษาความสามารถในการดูดซับพลังงานจากไมโครเวฟของ วัสดุไดอิเล็กตริก เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าที่มีความถี่สูง อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและวัสดุไดอิเล็กตริกก็ส่งผลต่อคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัตถุนั้นด้วย หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ คุณลักษณะของคุณสมบัติไดอิเล็กตริกขึ้นอยู่กับการนำไมโครเวฟไปประยุกต์ใช้งานในกระบวนการต่าง ๆ เช่น การทำความร้อน (heating) การอบแห้ง (drying) หรือ การหลอมเหลว (melting) เป็นต้น

3.2.10 ท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (Rectangular Waveguide)

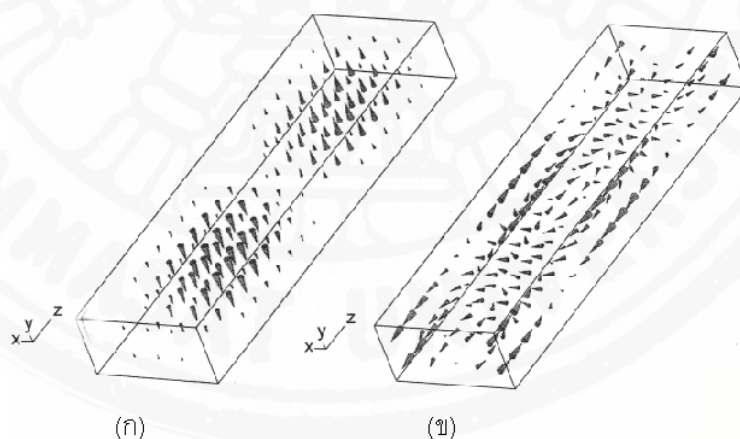
ท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม มีรูปหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง a ยาว b และมีความยาวไปตามแนวแกน z ซึ่งใช้กับไมโครเวฟที่มีความถี่ตั้งแต่ 1 GHz ถึง 220 GHz สำหรับงานวิจัยนี้จะพิจารณาท่อนำคลื่นที่ภายในเป็นอากาศ ไม่มีการสูญเสียของตัวกลาง กล่าวคือ ค่าความสามารถในการซึมผ่าน (permeability, μ) เท่ากับศูนย์ ($\mu = 0$) และค่าสภาพยอม (permittivity, ϵ) เท่ากับศูนย์ ($\epsilon = 0$) แกนของท่อเป็นเส้นตรงไม่คดงอ และรูปร่างหน้าตัดของท่อนำคลื่นไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามแนวแกน z

ท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม จะเกิดคุณลักษณะเฉพาะของสนามไฟฟ้า (E -field) และสนามแม่เหล็ก (H -field) ที่ประกอบกันเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนี้

- สนามไฟฟ้า ที่เกิดอยู่ภายในท่อนำคลื่น มีความเข้มสูงสุดอยู่ที่กึ่งกลางของด้านยาวของท่อนำคลื่น และมีความเข้มของสนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ที่ผนังหรือด้านกว้างของท่อนำคลื่น (สนามไฟฟ้าที่ขนานกับตัวนำมีค่าความเข้มเป็นศูนย์)

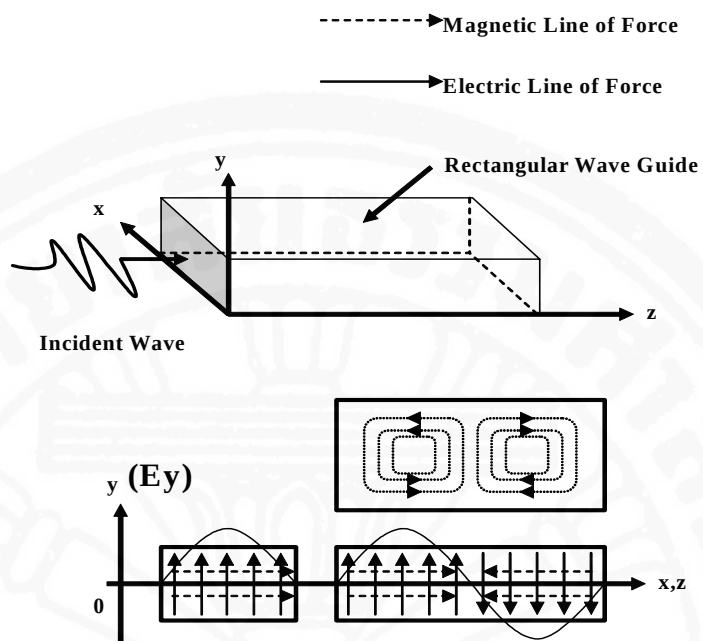
- สนามแม่เหล็ก ที่เกิดขึ้นภายในท่อนำคลื่นจะต่อเนื่องกันและวนไปรอบท่อนำคลื่น โดยที่เวกเตอร์ของสนามแม่เหล็กจะไม่ตั้งฉากกับผนังของตัวนำด้านใดเลย สนามแม่เหล็กจะวนต่อกันเป็นวงรอบ (complete loop) และขนานไปกับผนังทุก ๆ ด้าน

โครงสร้างของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีอยู่มากมายหลายชนิด แต่โครงสร้างหลัก ๆ แบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ Transverse Electric (TE mode) และ Transverse Magnetic (TM mode) โดย TE mode สนามไฟฟ้า (electric field) จะเป็นคลื่นตามขวาง (Transverse wave) ถ้า TM mode สนามแม่เหล็ก (magnetic field) จะเป็นคลื่นตามขวางโดยคลื่นตามขวางคือ คลื่นที่มีทิศของการกระจัด (ระนาบคลื่น) ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ รูปแบบของคลื่นที่ใช้ในการศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้เป็นแบบ TE_{10} mode (ดังแสดงในภาพที่ 3.19) ซึ่งเป็นรูปแบบพื้นฐานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่จะสะดวกในการทำควมเข้าใจ ในภาพที่ 3.20 แสดงถึงลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า TE_{10} mode ที่ใช้ในการศึกษา โดยความเข้มสนามไฟฟ้าจะมีค่ามากที่สุดที่จุดกึ่งกลางของแกน x และมีค่าเท่ากับศูนย์ที่ผนังด้านซ้าย ($x=a$) และผนังด้านขวา ($x=0$) ของท่อนำคลื่น นอกจากนี้สนามแม่เหล็กในแกน x (H_x) และสนามแม่เหล็กในแนวแกน z (H_z) สามารถรวมเป็นเส้นสนามแม่เหล็กในรูปเดียวกันได้



ภาพที่ 3.19 (ก) สนามไฟฟ้า (ข) สนามแม่เหล็ก ในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม

(Schbert et al [3-6])



ภาพที่ 3.20 แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ภายในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม