บทที่ 2
วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันยางพาราได้เข้ามาเกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันของมนุษย์เป็นอย่างยิ่ง ซึ่งยางพาราได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์เป็นระยะเวลานานหลายศตวรรษ มนุษย์มีการใช้ประโยชน์จากยางพาราอย่างเต็มที่และหลากหลายโดยจะพบในรูปแบบของยางรถยนต์ ยางรองพื้นรองเท้า ยางรัดของ ถุงมือยาง เป็นต้น ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดยางพารา ยางแท่งและกระบวนการผลิตยางแท่ง พื้นฐานการอบแห้ง คลื่นไมโครเวฟ และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ยางพารา

1.1 ประวัติยางพารา

ในอดีตก่อนสงครามโลกครั้งที่ 1 ประมาณ พ.ศ. 2457 วัตถุดิบยางที่ใช้ทำผลิตภัณฑ์ยางมีเพียงยางที่ได้มาจากธรรมชาติคือจากต้นพืช ซึ่งเรียกว่า "ยางธรรมชาติ" (Natural Rubber; NR) และสืบเนื่องจากจุดเริ่มต้นของต้นพืชในสกุล Hevea Brasiliensis มีศูนย์กลางการเพาะปลูก และซื้อขายอยู่ที่เมืองท่าบนฝั่งแม่น้ำอะเมซอน เมืองพารา ประเทศบราซิล โดยที่ในการซื้อขาย "ยาง" จากต้นไม้นี้ใช้ชื่อเรียกว่า "ยางพารา" ซึ่งเป็นชื่อที่คุ้นเคยกันโดยทั่วไปสำหรับประเทศไทย และใช้ชื่อนี้เรียกต้นพืชที่ให้น้ำยางว่า "ต้นยางพารา" (วราภรณ์ ขจรไชยกูล, 2549)

การปลูกยางในประเทศไทย ไม่มีการบันทึกเป็นหลักฐานแน่นอน แต่เป็นที่เข้าใจว่าอยู่ในช่วงประมาณปี พ.ศ. 2442-2444 ซึ่งในขณะนั้น พระยารัษฎานุประดิษฐ์ มหิศรภักดี ผู้ซึ่งดำรงตำแหน่งเป็นเจ้าเมืองตรัง ได้นำเมล็ดยางพารามาปลูกเป็นครั้งแรกที่อำเภอกันตัง ชาวบ้านเรียกต้นยางชุดแรกนี้ว่า "ต้นยางเทศา" เวลาต่อมาได้มีการขยายพันธุ์ปลูกยางพารากันอย่างกว้างขวางทั่วทั้ง 14 จังหวัดภาคใต้และ 3 จังหวัดทางภาคตะวันออก หลังจากนั้นมีการพยายามขยายพันธุ์ยางมาปลูกในภาคกลาง ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคเหนือ จนกระทั่งปัจจุบันยางพารากลายเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยมีการผลิตเป็นอันดับหนึ่งของโลก ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543 เป็นต้นมา (เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังสี, 2546)

1.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ยางพาราเป็นไม้ยืนต้น ที่มีลำต้นสูงใหญ่ เป็นพืชที่มีอายุยืน มีใบเลี้ยงคู่ สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้นาน และถ้าอยู่ในพื้นที่ที่เหมาะสม มีการดูแลรักษาอย่างดี สามารถทำให้ต้นยางพารามีอายุยืนและให้ผลผลิตนานหลายสิบปี (คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2548) โดยมีรายละเอียดลักษณะและส่วนประกอบของยางพาราดังนี้

1.2.1 ราก (Roots)

ยางพารามีระบบของรากแก้ว (Top root system) ที่ประกอบด้วยรากแก้ว (top root) ที่มีความยาวโดยเฉลี่ยตามความลึกของดินประมาณ 2.5 เมตร ในยางที่มีอายุ 3 ปี ทำหน้าที่ยึดเกาะพยุงลำต้นไม่ให้โค่นล้มเมื่อลมแรงและมีน้ำท่วม รากแขนง (lateral root) แตกแขนงออกมาจากชั้น pericycle ของรากแก้ว มีความยาวเฉลี่ย

7 - 10 เมตร เจริญอยู่ในระดับผิวดินบริเวณทรงพุ่ม ทำหน้าที่ดูดยึดน้ำและธาตุอาหารส่งไปยังใบเพื่อขบวนการสังเคราะห์แสง

1.2.2 ลำต้น (Stem)

ลำต้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามชนิดของวัสดุที่ปลูกคือ ลำต้นรูปกรวย (cone) เป็นลำต้นที่เกิดจากการปลูกด้วยเมล็ด (seeding tree) จะสังเกตเห็นได้ชัดว่า ส่วนฐานของลำต้นจะโตแล้วค่อยเล็กลงตามความสูง ลำต้นอีกชนิดหนึ่งคือ ลำต้นรูปทรงกระบอก (cylinder) เป็นลำต้นที่เกิดจากการปลูกด้วยต้นติดตา (budded stump) ลักษณะของลำต้นส่วนล่างสุดมีขนาดใหญ่มากเรียกว่า "เท้าช้าง" เลยจากจุดนี้ขึ้นไปจะเป็นลำต้นที่มีขนาดเท่ากันทั้งส่วนโคนต้นและส่วนปลายความสูงของลำต้นเปลือยแตกต่างกันออกไปโดยเฉลี่ยแล้วประมาณ 2 - 2.5 เมตร ส่วนประกอบของลำต้นที่เราจะนำมาใช้ประโยชน์ในการสกัดน้ำยาง ได้แก่ เปลือก ซึ่งประกอบด้วย

1.2.2.1 เปลือกแห้ง (corky bark) เปลือกที่อยู่ส่วนนอกสุดของลำต้นมีสีน้ำตาลถึงดำ ไม่มีท่อน้ำยางอยู่ภายในเลย เกิดจากการสร้าง outer soft cell ของชั้น cortex ที่ยังมีชีวิตอยู่ที่เรียกว่า bark cambium ต่อมามีสารพวกลิกนิน ซูเบอร์ลิน มาสะสมทำให้เห็นเป็นสีน้ำตาล โดยทั่วไปเปลือกชั้นนี้มีความหนาประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ของเปลือกทั้งหมด

1.2.2.2 เปลือกแข็ง (hard bark) อยู่ถัดจากเปลือกแห้งเข้ามา มีสีส้ม หรือสีน้ำตาลอ่อน เกิดจากการแบ่งเซลล์ของ bark cambium แล้วเจริญเข้าทางด้านใน มีการสะสมสารพวกลิกนิน และซูเบอร์ลินน้อยกว่าเปลือกแห้ง แต่มี stone cell อยู่เป็นจำนวนมาก กระจัดกระจายอยู่ทั่วไปในชั้นนี้ ทำให้ท่อน้ำยางมีลักษณะขาดตอน (interupted latex vessel) และมีจำนวนน้อย ชั้นนี้อาจเรียกว่า outer cortex

1.2.2.3 เปลือกอ่อน (soft bark) เป็นเปลือกชั้นในสุดถัดจากเปลือกแข็งเข้าไปเกือบใกล้เนื้อไม้ เป็นส่วนของ inner cortex ประกอบด้วยเนื้อเยื่อที่อ่อนนุ่ม มีชีวิต และหนาของเนื้อเยื่อลำเลียงอาหาร (sieve tube) ซึ่งวางตัวอยู่ในแนวตั้ง ภายในเป็นแหล่งสะสมอาหารจำนวนมาก เนื้อเยื่อดังกล่าวติดต่อกันตลอดทั้งในลำต้น กิ่งก้าน และใบ อาหารที่มาสะสมก็คือน้ำยางนั่นเอง ซึ่งเรียกว่า latex น้ำยางที่ถูกสร้างขึ้นเป็นโพลิเมอร์ของ cis-1, 4-polyisoprene ส่วนของเนื้อเยื่อลำเลียงอาหารก็คือ ท่อน้ำยาง (lacitifer) ที่มีลักษณะเชื่อมติดต่อกันตลอดไม่ขาดตอน (continuous latex vessel) มีการจัดเรียงตัวในแนวเอียง ทำมุม 2 - 5 องศากับแนวดิ่ง วนจากขวาวนมายังซ้ายล่าง ในชั้นนี้ยังพบเนื้อเยื่ออีกชนิดหนึ่งรอบๆ เนื้อเยื่อลำเลียงอาหารคือ medulla rays มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นน้ำ เป็นตัวที่คอยควบคุมความเข้มข้นของน้ำยางในท่อน้ำยาง และช่วยรักษาความเต่งสภาพสมดุลของท่อน้ำยางด้วย ชั้นเปลือกอ่อนมีความหนาแน่นของท่อน้ำยางสูง จึงทำให้ขนาดของท่อน้ำยางเล็กกว่าในชั้นเปลือกแข็ง

1.2.3 ใบยางพารา (Leaf)

ใบยางพาราจัดเป็นใบประกอบ (Compound leaf) แบบ palmate ในใบประกอบชุดหนึ่งของยางพารามี 3 ใบย่อย ใบยางจะแตกออกมาเป็นชั้นๆ หรือเรียกกันว่า "ฉัตร" การเรียงตัวของใบในฉัตรเป็นแบบเกลียว (spiral) ใบที่แก่ที่สุดของกลุ่มใบย่อยคือ ใบที่ใหญ่ที่สุดและมี peteolule ยาวกว่า ใบจะมีหน้าที่หายใจ คายน้ำ อีกทั้งยังเป็นส่วนที่ปรุงอาหารเพื่อนำไปเลี้ยงส่วนต่าง ๆ ของต้นยางให้มีความเจริญเติบโต และยังช่วยในการผลิตน้ำยางให้มีคุณภาพด้วย

1.2.4 ดอกยางพารา (Flowers)

ดอกยางพารามีลักษณะเป็นช่อสั้นๆ ตรงฐานของกลุ่มใบใหม่ ในแต่ละช่อดอกหนึ่ง ๆ ประกอบไปด้วยดอก 2 ชนิดแยกกัน คือ ดอกตัวเมียที่มีขนาดใหญ่ ตั้งอยู่ส่วนปลายสุดของแขนงช่อดอก และดอกตัวผู้ ที่มีขนาดเล็กตั้งอยู่ในตำแหน่งที่ต่ำกว่าดอกตัวเมียในแขนงเดียวกันของช่อดอก โดยมีหน้าที่ผสมพันธุ์และออกผลเพื่อนำไปเพาะพันธุ์ ขยายลงปลูกในแปลงต่อไป (ธีระชัย ฤกษ์มงคลวิทย์, 2548)

1.2.5 ผล (Fruits)

หลังจากที่ดอกทำหน้าที่ผสมพันธุ์แล้ว ต่อไปรังไข่จะพัฒนามาเป็นผลภายในเวลา 3 เดือนและต่อมาอีก 3 เดือนผลก็จะสุก ผลที่แก่มีขนาดใหญ่ แน่น มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 - 5 เซนติเมตร ประกอบด้วย 3 พู ภายในจะมีเมล็ด 1 เมล็ด ผลอ่อนจะมีสีเขียวและผลแก่จะมีสีน้ำตาล

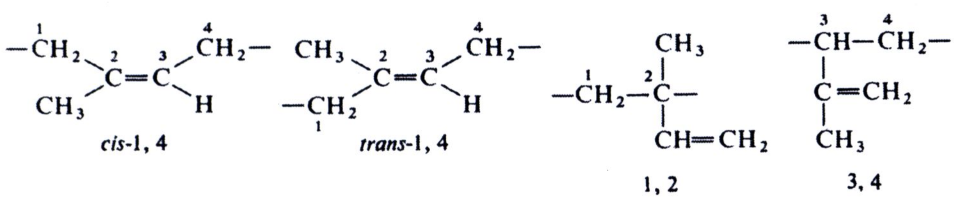
1.2.6 เมล็ด (Seed)

เมล็ดมีรูปร่างกลมถึงรี มีความกว้างประมาณ 1.5 – 2.5 เซนติเมตร ยาวประมาณ 2 – 2.5 เซนติเมตร มีน้ำหนักประมาณ 3 – 6 กรัม ถ้าต้องการนำเมล็ดไปทำการเพาะพันธุ์ควรรีบทำหลังจากที่เมล็ดร่วงลงมาใหม่ ๆ เพราะจะมีเปอร์เซ็นต์การงอกสูง แต่หลังจากนั้นจะสามารถเก็บความงอกไว้ได้ประมาณ 20 วัน เท่านั้น

1.3 สมบัติของยางธรรมชาติ

1.3.1 สมบัติทางเคมี (Chemical Properties)

ยางธรรมชาติหรือยางพารา มีสมบัติทางเคมีเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีหน่วยย่อยของแต่ละหน่วยประกอบด้วยคาร์บอน 5 อะตอม และไฮโดรเจน 8 อะตอม เขียนเป็นสูตรทางเคมีคือ C_5H_8 เรียกชื่อทางเคมีว่าไอโซพรีน (isoprene) ดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของยางธรรมชาติ (Maurice, 1973)

โครงสร้าง 1 โมเลกุลยางประกอบด้วยหน่วยไอโซพรีนที่ต่อกันเป็นสายเส้นตรงแบบซิส ประมาณ 3,000 ถึง 5,000 หน่วยไอโซพรีน มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยประมาณ 200,000 ถึง 400,000 มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลกว้างขวางมาก ซึ่งทำให้ยางธรรมชาติมีลักษณะกระบวนการแปรรูปที่ดีเลิศ ส่วนประกอบของยางพาราสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของยางธรรมชาติ

ส่วนประกอบ	**ค่าเฉลี่ย (%)**	**ช่วง (%)**
ความชื้น (Moisture)	0.5	0.3 – 1.0
สารที่สกัดได้ด้วยอะซีโตน (Acetone Extract)	2.5	1.5 – 4.5
โปรตีน (Protein)	2.5	2.0 – 3.0
เถ้า (Ash)	0.3	0.2 – 0.5
ไฮโดรคาร์บอน (Rubber Hydrocarbon)	94.2	
Total	100.0	

ที่มา: ดัดแปลงจาก Maurice, 1973

เนื่องจากแต่ละหน่วยไอโซพรีนของยางธรรมชาติมีพันธะคู่ (Double bond) และหมู่อัลฟาเมทธีลิน ที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยายางคงรูปด้วยกำมะถัน นั่นคือ พันธะคู่ของยางเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการคงรูปด้วยกำมะถัน อย่างไรก็ตามพันธะคู่ดังกล่าวก็ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาอื่นๆ เช่น ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเกิด hydrogenated rubber กับคลอรีนเกิด chlorinated rubber กับไฮโดรคลอไรด์เกิด hydrochlorinated rubber และสามารถทำให้เกิดยางที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นวง (cyclised rubber) โดยปฏิกิริยา cyclisation

1.3.2 สมบัติทางกายภาพ (Physical Properties)

คุณสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติ ซึ่งโดยทั่วไปมีผลต่อการเป็นผลึกหรือการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วและสามารถแตกได้ เมื่อเก็บยางไว้ที่ 10 องศาเซลเซียส การเกิดผลึกทำให้ความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงจาก 0.92 – 0.95 (Blow and Hepburn, 1985) สมบัติทางกายภาพมีรายละเอียดดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติ

Density	0.92
Refractive index (20°C)	1.52
Coefficient of cubical expansion	0.00062/°C
Cohesive energy density	63.7 cal./c.c.
Heat of combustion	10,700 cal./g
Thermal conductivity	0.00032 cal./sec/cm^2/°C
Dielectric constant	2.37
Power factor (1,000 cycle)	0.15 – 0.2
Volume resistivity	10^{15} ohms/c.c.
Dielectric strength	1,000 volts/mil

ที่มา: ดัดแปลงจาก Maurice, 1973

1.4 วัตถุดิบยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบันเป็นวัตถุดิบที่ได้จากการแปรรูปขั้นต้นของน้ำยางสดจากต้นยางพาราซึ่งอาจจำแนกได้ 2 ประเภทหลัก คือ ประเภทยางแห้ง (solid form or dry rubber) และประเภทของเหลว คือ น้ำยางข้น (concentrated latex) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.4.1 ยางแห้ง ยางธรรมชาติในรูปของยางแห้งอาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ตามลักษณะของกรรมวิธีการผลิต คือ

1.4.1.1 ยางแบบธรรมดา ผลิตโดย concentrated process ได้แก่ ยางแผ่นรมควัน ยางแผ่นผึ่งแห้ง และยางเครพ

1.4.1.2 ยางแบบระบุคุณภาพมาตรฐาน ผลิตโดยมีเงื่อนไขการระบุคุณภาพมาตรฐานตามสากล (technically specified process) ได้แก่ ยางแท่งมาตรฐาน (standard block rubber)

1.4.1.3 ยางแบบอื่นๆ ที่มีวิธีการผลิตเฉพาะตัว เพื่อให้ได้ผลผลิตเหมาะสมกับงานขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ชนิดใดชนิดหนึ่งโดยเฉพาะ หรือเพื่อวัตถุประสงค์จะปรับปรุงสมบัติบางประการของยางธรรมชาติ ตัวอย่างยางกลุ่มนี้ได้แก่ ยางที่มีความหนืดคงที่ (viscosity stabilized tubbet; CV) ยางที่มีสมบัติความพิเศษในกระบวนการผลิต (superior processing rubber; SP) ยางผสมน้ำมัน (oil extended natural rubber; OENR) ยางเทอร์โมพลาสติก ยางอิพอกซิไดซ์ ยางผง และยางเหลว เป็นต้น

โดยมีวัตถุดิบจากต้นยางพาราที่จะนำไปผลิตเป็นยางแห้งชนิดต่างๆ มีอยู่ 2 ชนิด ได้แก่ ชนิดแรกคือ น้ำยางจากสวน (fresh or field latex) นำไปผลิตเป็น ยางแผ่นรมควัน ยางแผ่นผึ่งแห้ง ยางเครพคุณภาพดีและยางแท่งคุณภาพดี ชนิดที่สองคือ ยางแห้งที่จับตัวแล้ว (dried rubber, naturally coagulated) ได้แก่ พวกเศษยางก้อนที่ติดก้นถ้วยรับน้ำยาง (cup lump) เศษยางตามรอยกรีด (tree lace) ยางแห้งตามเปลือกไม้ ยางแห้งตามพื้นดิน (bark scrap, earth scrap) เป็นต้น เศษยางเหล่านี้หรือที่ชาวสวนเรียกว่า “ขี้ยาง” ซึ่งในอดีตจะถูกนำไปผลิตเป็นยางเครพคุณภาพต่ำ แต่ปัจจุบันเนื่องจากได้มีการพัฒนาการผลิตยางแท่ง ขี้ยางดังกล่าวจึงเป็นวัตถุดิบสำคัญสำหรับการผลิตยางแท่งคุณภาพกลาง

1.4.2 น้ำยางข้น น้ำยางข้นที่ผลิตจำหน่ายทั่วไป อาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ น้ำยางข้นธรรมดาที่ไม่ผ่านการทรีต (treated) กับสารเคมีหรือวิธีการใดๆ เพื่อให้โมเลกุลยางเปลี่ยนไป ส่วนอีกประเภทหนึ่งเป็นน้ำยางข้นที่ได้ผ่านกระบวนการทรีตด้วยสารเคมี หรือด้วยการฉายรังสีให้โมเลกุลยางเปลี่ยนแปลงไป ประเภทหลังนี้เรียกว่า “น้ำยางคงรูป” หรือ “น้ำยางพรีวัลคาไนซ์” (prevulcanised or vulcanized latex) หรือบางครั้งอาจเรียกน้ำยางผสมเสร็จ

2. ยางแท่ง (Block Rubber)

ยางพาราสามารถเป็นวัตถุดิบในการผลิตสิ่งของเครื่องใช้ต่างๆ ได้มากมาย แล้วแต่ประเภทตามลักษณะการผลิตต่างๆ ที่เหมาะสมต่อผลิตภัณฑ์นั้นๆ แต่ในการวิจัยนี้จะเน้นในเรื่องของยางแห้งแบบระบุคุณภาพมาตรฐาน ซึ่งก็คือ “ยางแท่ง” เท่านั้น โดยรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับการผลิตยางแท่งมีดังต่อไปนี้

2.1 จุดประสงค์ในการผลิตยางแท่ง

ยางแท่ง (Block Rubber) เป็นยางธรรมชาติที่ผลิตโดยมีการควบคุมคุณภาพให้ได้มาตรฐานมีการระบุคุณภาพของของยางดิบที่ผลิตได้แน่นอน ซึ่งก่อนปี พ.ศ. 2508 ยางธรรมชาติส่วนใหญ่มีการผลิตในรูปของยางแผ่นรมควัน ยางเครพ หรือน้ำยางข้น ไม่มีการระบุมาตรฐานการจัดชั้นยางที่ชัดเจนจะพิจารณาโดยใช้สายตาในการตัดสินชั้นยาง ต่อมาในปี พ.ศ. 2508 สถาบันวิจัยยางมาเลเซีย ได้มีการผลิตยางแท่งขึ้นเป็นครั้งแรก เพื่อพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพของยางธรรมชาติให้มีมาตรฐาน มีขนาดเหมาะสมต่อการนำมาใช้งาน โดยมีจุดประสงค์ของการผลิต ดังนี้

2.1.1 เพื่อปรับปรุงกรรมวิธีการผลิตยางดิบแบบเก่าที่ไม่มีมาตรฐานการจัดชั้นยางมาก่อน

2.1.2 เพื่อการแก้ไขวิธีการ การจัดชั้นยางซึ่งใช้สายตา ให้มีคุณภาพยิ่งขึ้นโดยการทดสอบคุณภาพยางแท่งในห้องปฏิบัติการ

2.1.3 เพื่อแข่งขันกับยางสังเคราะห์ที่ผลิตขึ้นมาใช้แทนยางธรรมชาติ โดยยางสังเคราะห์มีการระบุคุณภาพยาง สามารถนำมาใช้งานได้ดี และมีสมบัติบางอย่างดีกว่ายางธรรมชาติ เช่น สมบัติทางด้านทนต่อน้ำมันและการทนต่อความร้อน เป็นต้น ดังนั้นยางสังเคราะห์จึงเป็นคู่แข่งที่สำคัญของยางธรรมชาติทำให้จำเป็นต้องมีการปรับปรุงและควบคุมคุณภาพการผลิตของยางธรรมชาติ เพื่อให้สามารถแข่งขันกับยางสังเคราะห์ได้

2.1.4 ขนาดของยางแท่งมีความสะดวกในการเก็บและขนส่ง

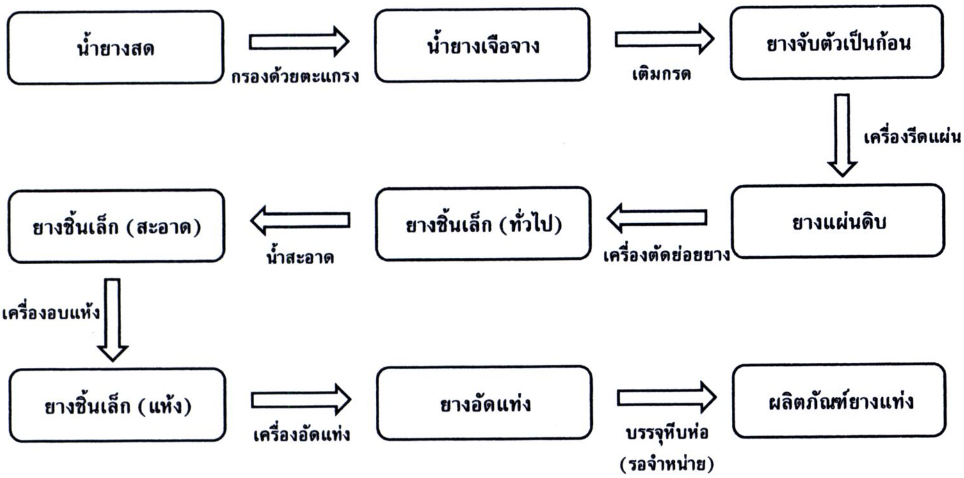
2.2 กระบวนการผลิตยางแท่ง

หลักสำคัญในกระบวนการผลิตยางแท่ง คือ การทำให้ยางเป็นชิ้นเล็ก ๆ โดยมีการใช้เครื่องตัดรีดและย่อยยางก้อนให้เป็นเม็ดหรือชิ้นเล็กๆ แล้วนำมาอบให้แห้งอัดเป็นแท่ง การผลิตยางแท่ง สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบที่สะอาด คือน้ำยางสด (Fresh or field latex) และวัตถุดิบยางแห้ง คือยางที่จับตัวแล้ว (field coagula material) ซึ่งขั้นตอนของกระบวนการผลิตโดยใช้ยางทั้ง 2 ประเภทมีดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.2.1 การผลิตยางแท่งจากน้ำยาง

เริ่มจากรวบรวมน้ำยางสดจากสวนยางลงในถังรวมน้ำยาง น้ำยางที่ใส่ลงไปจะต้องผ่านการกรองด้วยตะแกรงขนาด 40 หรือ 60 เมช ก่อน เพื่อให้สิ่งสกปรกแยกตัวออกไป แล้วนำน้ำยางมาเจือจางด้วยน้ำ 1:1 จะทำให้น้ำยางมีความเจือจางประมาณ 15-20 เปอร์เซ็นต์ แล้วทำให้น้ำยางจับตัวด้วยกรดฟอร์มิกหรือกรดอะซิติก ปริมาณกรดที่จำเป็นต้องใช้จะขึ้นอยู่กับสมบัติของยางธรรมชาติ เมื่อได้ยางที่จับตัวแล้ว สภาพของยางก้อนขาวที่จับตัวอาจสังเกตได้ 2 ลักษณะคือ ยางก้อนจับตัวกันแน่น จำเป็นต้องนำยางมาตัดและเข้าเครื่องรีดเป็นแผ่นก่อนด้วยเครื่องครัชเชอร์ มาซิเรเตอร์ และเครื่องเครพ แต่หากเป็นยางที่มีลักษณะเป็นรูพรุนมีโพรงอากาศ สามารถนำมารีดแผ่นโดยป้อนเข้าเครื่องเครพหรืออาจนำเข้าเครื่องตัดชนิดที่เรียกว่าแกรนูเลเตอร์ (granulator) ได้เลย ในขณะที่รีดยางเป็นแผ่น ยางจะถูกฉีดด้วยน้ำเพื่อชะล้างสิ่งสกปรก หลังจากนั้นทำการย่อยยาง โดยป้อนยางผ่านเข้าสู่เครื่องเครพ 3-4 ครั้งด้วยสายพาน หลังจากนั้นจะป้อนยางเข้าสู่เครื่องย่อย เพื่อย่อยยางให้เป็นเม็ดเล็กๆ (crumb) ให้มีพื้นที่ผิวมาก สามารถระบายความชื้นออกได้เร็วขณะการอบแห้ง โดยใช้เครื่องจักรในการย่อย ได้แก่เครื่องเครพเปอร์-แฮมเมอร์มิล เครื่องเชร็ดเดอร์ หรือเครื่องเพเลไตเซอร์ เมื่อได้ยางอยู่ในลักษณะเป็นชิ้นหรือเม็ดเล็ก ๆ แล้ว รวบรวมยางเหล่านี้ลงกระบะอบ เข้าเครื่องอบแบบใช้ลมร้อนที่มีอุณหภูมิประมาณ 100 -110 องศา

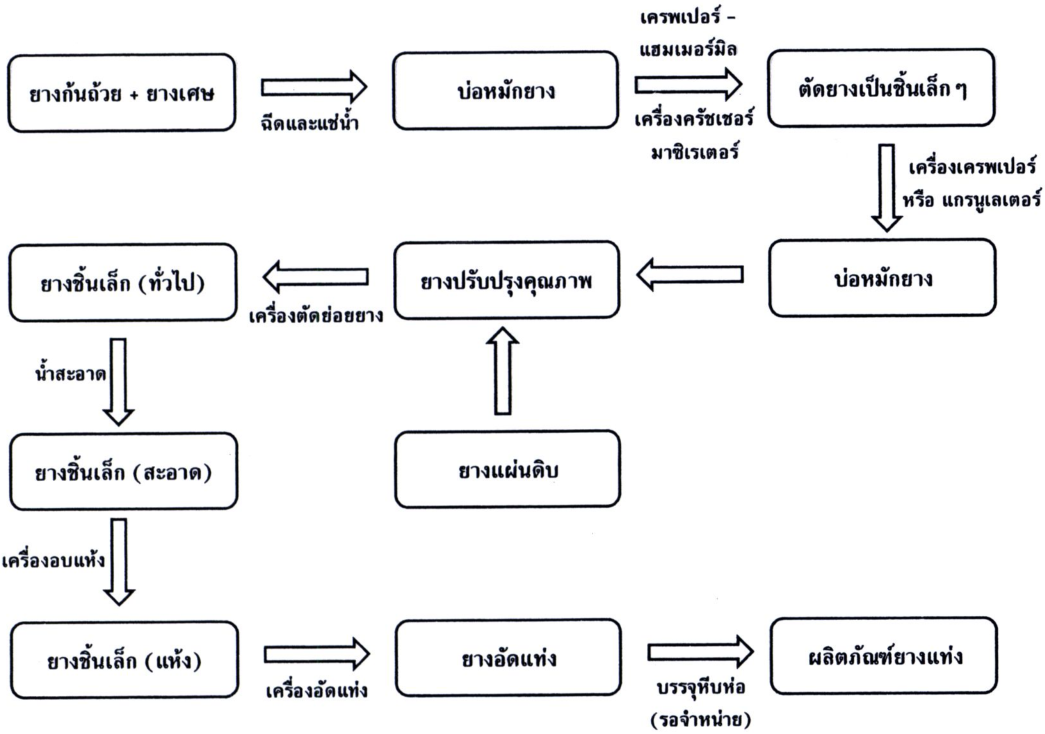
เซลเซียส ใช้เวลาอบแห้งประมาณ 4 ชั่วโมง แล้วจึงใช้ลมเป่ายางที่แห้งแล้วให้เย็นลง อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส ในกรณีที่ยางบางส่วนในกะบะอบยางไม่แห้ง อาจใช้วิธีเพิ่มเวลาในการอบแห้งยางชุดนั้นให้นานต่อไปอีกเล็กน้อย และในการอบแห้งควรอบครั้งเดียวให้ยางแห้งเลย มิฉะนั้นจะต้องนำมาอบใหม่อีกครั้ง หากจำเป็นต้องอบใหม่ควรทำให้ยางชุ่มด้วยน้ำใหม่อีกครั้งหนึ่ง เพื่อป้องกันยางเยิ้ม ยางที่อบแห้งแล้วนำมาชั่งน้ำหนัก และอัดเป็นแท่งๆ ละ 33.3 กิโลกรัม ขนาด 670 x 330 x 170 มิลลิเมตร และห่อด้วยพลาสติกโพลีเอทีลีน (polyethylene) แล้วบรรจุลงลัง สามารถเขียนรายละเอียดข้างต้นเป็นแผนผังดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 กระบวนการผลิตยางแท่งจากน้ำยาง (ดัดแปลงจาก เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังสี, 2540)

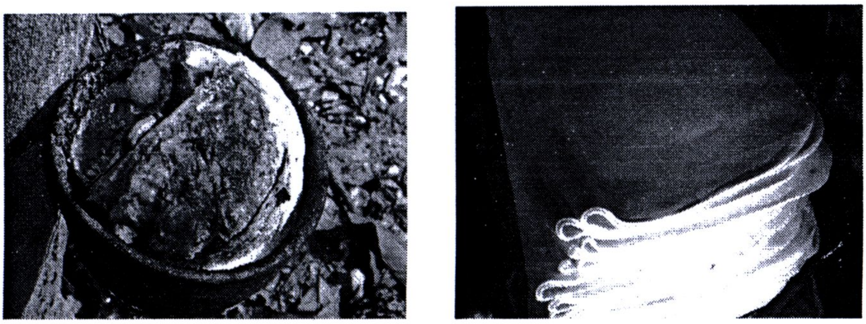
2.2.2 การผลิตยางแท่งจากยางแห้ง

จากการผลิตยางแท่งภายในโรงงานทั่วไป มีขั้นตอนการผลิตที่ประกอบด้วยเครื่องจักรต่างๆ มากมาย จึงทำให้สายการผลิตมีช่วงยาว ดังนั้น เพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้น จึงอธิบายอย่างคร่าว ๆ ในแผนผังดังภาพที่ 2.3 และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



ภาพที่ 2.3 กระบวนการผลิตยางแท่งด้วยยางก้อนจับตัว (ดัดแปลงจาก เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังสี, 2540)

2.2.2.1 ยางแท่งที่ผลิตโดยใช้วัตถุดิบประเภทยางแห้ง เช่น ยางก้นถ้วย ยางแผ่นดิบ และเศษยางต่างๆ ดังภาพที่ 2.4 นำยางต่างๆ มาหมักโดยการแช่น้ำเป็นเวลา 5 - 6 วัน เพื่อชะล้างสิ่งสกปรกที่ติดอยู่ในยางให้เกิดการพองตัวและหลุดออกง่าย นอกจากนี้เป็นการทำให้ยางนิ่มและคละยางให้เข้ากัน

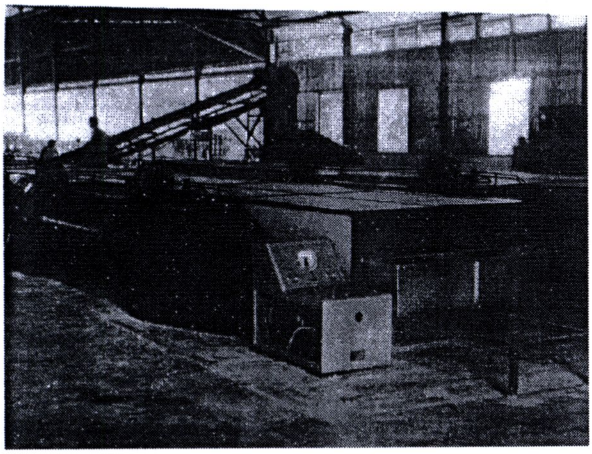


(ก) ยางก้นถ้วย (ข) ยางแผ่นดิบ

ภาพที่ 2.4 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตยางแท่ง เช่น ยางแผ่นดิบ (ข) เศษยางและยางก้นถ้วย (ก)

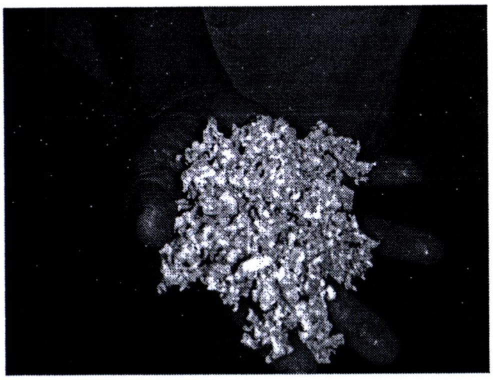
2.2.2.2 ยางก้อนจับตัวที่มีขนาดใหญ่จะนำมาบด หรือตัดทำให้เป็นชิ้นเล็กลงด้วยเครื่องครัชเชอร์ เครื่องมาซิเรเตอร์ หรือเครื่องแฮมเมอร์มิล

2.2.2.3 หลังจากนั้นยางที่ตัดเป็นชิ้นเล็กๆ จะแช่ในน้ำ และถูกลำเลียงผ่านเครื่องเครพหลายๆ ครั้ง และตัดเป็นชิ้นเล็กๆ อีกด้วยเครื่องแกรนูเลเตอร์ ดังภาพที่ 2.5 แล้วปล่อยลงบ่อพักขนาดใหญ่ มีน้ำฉีดอย่างแรงทำให้ยางหมุนไปรอบๆ ยางจะถูกล้างและทำให้สะอาดขึ้น



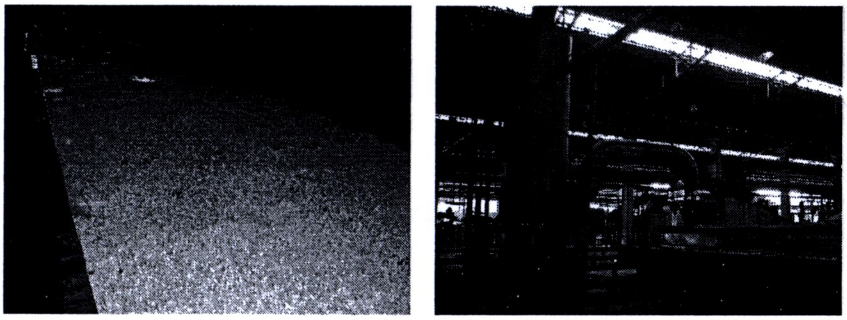
ภาพที่ 2.5 เครื่องแกรนูเลเตอร์ (Verhaar, 1973)

2.2.2.4 นำมารีดด้วยเครื่องเครพอีกครั้ง จึงป้อนยางเข้าสู่เครื่องย่อยยาง เช่น เครื่องเชร็ดเดอร์ หรือเครื่องแกรนูเลเตอร์ เพื่อย่อยยางครั้งสุดท้ายจะได้ลักษณะยางดังภาพที่ 2.6



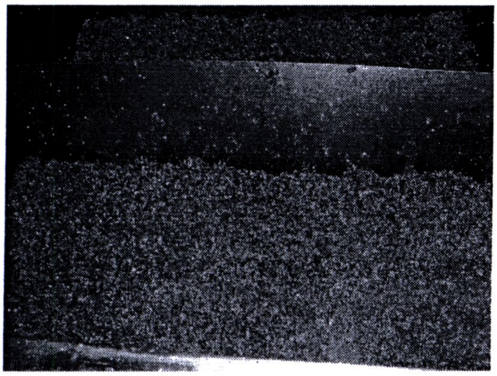
ภาพที่ 2.6 ลักษณะของยางที่ได้ทำการบดย่อยเรียบร้อยแล้ว

2.2.2.5 แล้วลำเลียงยางลงกระบะเข้าสู่ห้องอบยางเพื่ออบให้ยางแห้ง ดังภาพที่ 2.7 ที่อุณหภูมิ 100 - 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 - 4 ชั่วโมง โดยใช้ความร้อนจากน้ำมันเตา และภายในห้องอบยาง มีพัดลมเป่าเพื่อถ่ายเทความร้อนหลังอบแห้งเรียบร้อยแล้วจะได้ยางดังภาพที่ 2.8



(ก) ยางที่บดย่อยแล้วบรรจุอยู่ในกะบะอบ (ข) ห้องอบแห้งยางแท่ง

ภาพที่ 2.7 การลำเลียงยางลงกระบะก่อนนำเข้าห้องอบแห้ง



ภาพที่ 2.8 ลักษณะยางหลังจากอบแห้ง

2.2.2.6 นำไปอัดแท่งด้วยเครื่องอัดไฮโดรลิค แล้วลำเลียงยางแท่งดังกล่าวด้วยสายพาน เพื่อนำมาตรวจโลหะ สิ่งเจือปน และปริมาณจุดขาวภายในเนื้อยาง ก่อนที่จะนำไปห่อด้วยแผ่นพลาสติกใส ดังภาพที่ 2.9

(ก) ยางที่ถูกอัดแท่งแล้ว (ข) ยางแท่งที่ถูกพบโลหะ

ภาพที่ 2.9 ยางที่ถูกอัดแท่งแล้วจะนำไปตรวจโลหะที่อยู่ภายในเนื้อยาง

2.2.2.7 เมื่อยางแท่งผ่านการตรวจโลหะแล้ว เก็บตัวอย่างยางแท่งเพื่อนำไปทดสอบคุณภาพและออกใบรับรองคุณภาพของยางก่อนส่งจำหน่าย และส่วนยางแท่งที่ได้ทำการเก็บตัวอย่างแล้วก็นำมาห่อด้วยแผ่นพลาสติกใส ติดสัญลักษณ์แสดงชนิดของยางแท่งที่ผลิต แล้วจึงนำไปบรรจุหีบห่อเพื่อรอจำหน่าย ดังภาพที่ 2.10

(ก)

(ข)

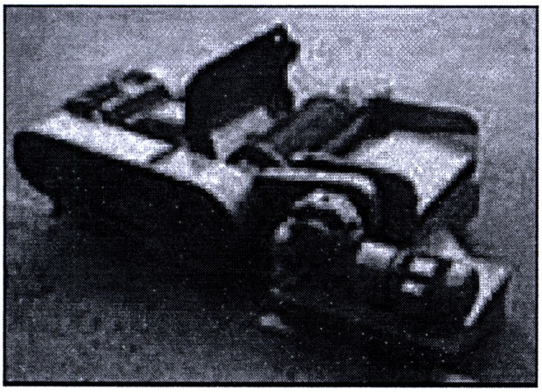
ภาพที่ 2.10 การเก็บตัวอย่างยางเพื่อทดสอบคุณภาพ (ก) และยางห่อด้วยพลาสติกรอการจำหน่าย (ข)

2.2.3 เครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิตยางแท่งมาตรฐาน STR 20 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2544)

2.2.3.1 เครื่องรีด (Creper) ดังภาพที่ 2.11 เครื่องนี้ประกอบด้วยลูกกลิ้งทำด้วยเหล็กกล้า 2 ลูกกลิ้ง หมุนได้ในทิศตรงกันข้าม ผิวหน้าของลูกกลิ้งจะเป็นร่องเพื่อช่วยให้ชิ้นยางเกาะลูกกลิ้งและเพื่อให้เกิดแรงอัด ขณะใช้เครื่องจักรยางที่ป้อนเข้าเครื่องจะถูกรีดอัดให้กระจายเต็มผิวหน้าของลูกกลิ้งแล้วชิ้นยางก็จะถูกรีดออกจากเครื่องซึ่งความหนาบางของแผ่นยางจะสม่ำเสมอและโดยที่มีท่อน้ำตามแนวยาวของลูกกลิ้ง และติดอยู่เหนือลูกกลิ้ง ขณะรีดยางจะมีการฉีดน้ำลงบนเนื้อยางเพื่อประโยชน์ในการทำความสะอาดและเป็นตัวแลกเปลี่ยนประจุระหว่างเนื้อยางและลูกกลิ้งเพื่อไม่ให้เกิดอาการลื่น (zero friction)

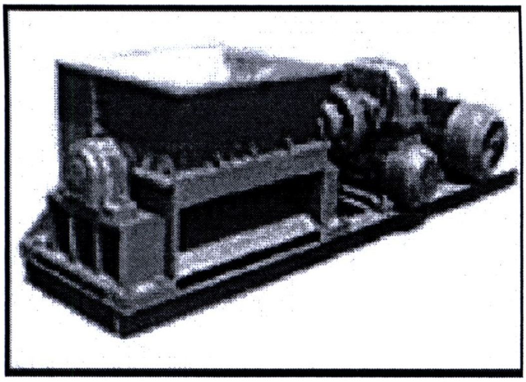
ภาพที่ 2.11 เครื่องรีดยาง (Creper) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2544)

2.2.3.2 เครื่องบด/อัด (Shredder) ดังภาพที่ 2.12 เครื่องบด/อัด มีลักษณะการทำงานคล้ายเครื่องรีด ความแตกต่างอยู่ที่ความเสียดทานที่สูงกว่า เนื่องจากเครื่องบด/อัดจะมีชิ้นส่วนเพิ่มเติม เช่น ลูกกลิ้งสำหรับตัดยางซึ่งลูกกลิ้งดังกล่าวจะตัดยางที่ผ่านลูกรีดแล้ว วิธีการดังกล่าวจะช่วยทำให้ยางถูกบดย่อยเป็นชิ้นเล็กและทำให้แห้งเนื่องจากกระบวนการการตัดยางทำให้เกิดความร้อนเนื่องจากใช้ความเร็วรอบในการตัดสูง เครื่องบด/อัด นิยมใช้เพื่อย่อยยางที่จับตัวแข็งแล้วเพื่อบดและอัดให้เนื้อยางแตกและง่ายต่อการทำความสะอาดหรือแปรรูปผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนต่อไป



ภาพที่ 2.12 เครื่องบดอัด (Shredder) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2544)

2.2.3.3 เครื่องตัดย่อยยาง (Slab Cutter) ดังภาพที่ 2.13 หลักการทำงานของเครื่องเป็นการใช้เขี้ยวที่มีลักษณะคล้ายตะขอทำการเกี่ยวและตัดยาง ให้เป็นชิ้นเล็กซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อทำการย่อยยางชิ้นใหญ่ หรือขนาดที่คละให้มีขนาดเล็กและสม่ำเสมอมากขึ้น ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการทำความสะอาดขั้นต่อไปยางที่ผ่านเครื่องตัดย่อยยางจะง่ายต่อการทำความสะอาดและการหลุดออกของสิ่งสกปรกที่ติดอยู่บนเนื้อยาง โรงงานผลิตยางแท่งมาตรฐาน STR 20 นิยมใช้เครื่องตัดย่อยยาง (Slab Cutter) เป็นเครื่องจักรชิ้นแรก เพื่อทำการตัดย่อยยางก่อนเข้ากระบวนการทำความสะอาดส่วนอื่นต่อไป โดยเครื่องตัดย่อยยางนี้แทบไม่มีผลต่อการเฉือนเนื้อยาง หรือการดีดออกของสิ่งสกปรกจากเนื้อยาง

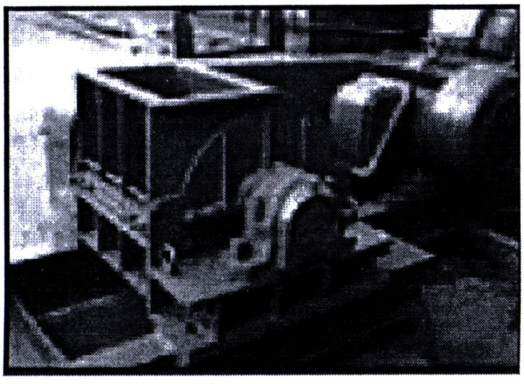


ภาพที่ 2.13 เครื่องตัดย่อยยาง (Slab cutter) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2544)

2.2.3.4 พรี เบรคเกอร์ (Pre Breaker) ดังภาพที่ 2.14 หลักการทำงานของเครื่องนั้นมีลักษณะคล้ายกับเครื่องบดย่อยเนื้อ เนื่องจากลักษณะงานส่วนใหญ่จะก่อให้เกิดแรงเฉือน (Shear force) ให้เกิดบนเนื้อยางเพื่อช่วยในการดึดตัวของสิ่งสกปรกบนเนื้อยางให้ออกมา รวมทั้งมีประโยชน์ในการทำเนื้อยางให้มีการคลายตัวและยุ่ยทำให้น้ำสามารถซึมผ่านเข้าเนื้อยางได้ง่ายขึ้นในกระบวนการทำความสะอาดขั้นต้น เนื้อยางหลังจากผ่านเครื่องพรี เบรคเกอร์จะมีลักษณะยุ่ยและเป็นริ้ว ซึ่งเกิดจากการทำงานของใบพัดที่เป็นส่วนประกอบหลักของเครื่องพรี เบรคเกอร์ อนึ่ง เครื่องพรี เบรคเกอร์นิยมมีการจ่ายน้ำเพื่อหล่อเลี้ยงเนื้อยางระหว่างถูกการเฉือนในตัวเครื่องและประโยชน์ในการถ่ายเทความร้อน

ภาพที่ 2.14 พรี เบรกเกอร์ (Pre Breaker) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2544)

2.2.3.5 โรตารี่ คัตเตอร์ (Rotary Cutter) ดังภาพที่ 2.15 ประกอบด้วยโรเตอร์ที่มีใบมีด 3 – 5 ใบติดอยู่ หลักการทำงานของเครื่อง ยางจะถูกป้อนเข้าในช่องระหว่างใบมีดจะตัดย่อยยางเป็นชิ้นเล็ก ๆ ชิ้นยางถูกตัดที่มีขนาดเล็กพอจะลอดผ่านรูตะแกรงที่อยู่ใต้ที่ตัดย่างและผ่านออกไป ส่วนชิ้นยางที่มีขนาดใหญ่กว่ารูตะแกรงก็จะถูกหมุนกลับไปถูกตัดใหม่จะเป็นเช่นนี้จนกว่ายางที่ป้อนเข้าเครื่องทั้งหมดถูกตัดจนมีขนาดผ่านรูตะแกรงออกมาได้หมด



ภาพที่ 2.15 โรตารี่ คัตเตอร์ (Rotary Cutter) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2544)

2.3 มาตรฐานและการทดสอบคุณภาพยางแท่ง

2.3.1 สำหรับประเทศไทย เริ่มผลิตยางแท่งขึ้นครั้งแรกประมาณปี พ.ศ. 2511 ตามโครงการพัฒนายาง ซึ่งได้รับความช่วยเหลือจากสหประชาชาติ และให้เอกชนสามารถจดทะเบียนเป็นผู้ผลิตยางแท่งได้ โดยใช้ชื่อว่า ยางแท่งทีทีอาร์ (TTR : Thai Tested Rubber) มีสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร เป็นหน่วยงานที่รับผิดชอบ ในปี พ.ศ. 2537 สถาบันวิจัยยางมีนโยบายให้ทบทวนมาตรการยางแท่งไทย โดยศึกษาคุณภาพยางแท่งไทยในสภาวะขณะนั้น และวิธีปฏิบัติที่ปรับเปลี่ยนไปตามพัฒนาการการบริโภคยางของผู้ใช้ยางแท่ง การทบทวนมาตรการยางแท่งไทยครั้งนี้ ได้พิจารณาในส่วนของการเรียกชื่อยางแท่งไทยจาก TTR เป็น STR (Standard Thai Rubber) เพื่อให้เป็นสากลตามผู้ผลิตประเทศอื่นๆ ชั้นยาง และขีดจำกัดคุณภาพ ให้สอดคล้องกับความสามารถของผู้ผลิต โดยกำหนดให้ยางแท่ง STR ประกอบด้วยชั้นยาง 8 ชั้น ซึ่งเป็นชั้นยางเหมือนเดิม 4 ชั้น ได้แก่ STR 5L, STR 5, STR 10 และ STR 20 เพิ่มชั้นยางใหม่ 4 ชั้นได้แก่ STR XL, STR 5CV, STR 10CV และ STR 20CV และทบทวนวิธีปฏิบัติของการบรรจุหีบห่อ การควบคุมคุณภาพ ตลอดจนการส่งออกยาง ซึ่งให้มีผลบังคับใช้มาตรการดังกล่าวตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2539

ยางแท่งที่ผลิตในประเทศไทย ภายใต้ความดูแลรับผิดชอบของสถาบันยาง กรมวิชาการเกษตรและสหกรณ์ ได้กำหนดขีดจำกัดสมบัติต่าง ๆ ของยางแท่งเอสทีอาร์ ซึ่งระบุในเอกสารวิชาการยางแท่งเอสทีอาร์ 3/2538 “คู่มือมาตรการยางแท่งเอสทีอาร์” ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานยางแท่งชั้นต่าง ๆ

Parameter	STR XL	STR 5L	STR 5	STR 5CV	STR 10	STR 10 CV	STR 20	STR 20 CV
	Latex		Latex / Sheets		Lump / Sheets			
Dirt retained on 44 lLl aperture (max, % wt.)	0.02	0.04	0.04	0.04	0.08	0.08	0.16	0.16
Ash (max, % wt.)	0.4	0.4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.8	0.8
Nitrogen*(max, %, wt.)	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Volatile matter* (max, % wt.)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Initial plasticity (Po), (min)	35	35	30	-	30	-	30	-
Plasticity Retention Index (PRI), (min)	60	60	60	60	50	50	40	40
Colour Lovibond Scale (individual value, max.)	4	6	-	-	-	-	-	-
Mooney Viscosity, ML (1′ + 4′)100C	-	-	-	**	-	**	-	**
Colour Coding Marker	blue	light green	light green	white on green backgroun	brown	white on brown backgroun	red	white on red backgroun

ที่มา: ดัดแปลงจาก เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังสี, 2540

* Producer limit is not more than 0.50%

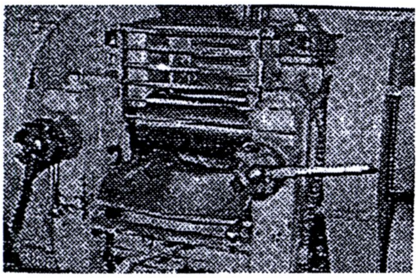
** Producer limit of 70(+7,-5), 60(+7,-5) and 50(+7,-5) for STR 5 CV
60(+7,-5) for STR 10 CV and 65(+7,-5) for STR 20 CV

2.4 การทดสอบคุณภาพยางแท่ง (เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังสี, 2540)

ยางแท่งเป็นยางธรรมชาติที่ผลิตขึ้นมาโดยมีการระบุคุณภาพมาตรฐานของยางที่แน่นอนเช่นเดียวกับยางสังเคราะห์ ดังนั้นยางแท่งทุกชุด (Lot) ที่ทำการผลิตจะต้องมีการตรวจสอบสมบัติของยางให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนด สมบัติที่ทดสอบ ได้แก่ การหาค่าปริมาณสิ่งสกปรก ปริมาณขี้เถ้า ปริมาณไนโตรเจน ความชื้น ความอ่อนตัวเริ่มต้น ดัชนีความอ่อนตัว ความเข้มของสียาง และความหนืดของยาง เป็นต้น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.4.1 การเตรียมชิ้นทดสอบ (SMR Bulletin, 1970)

ตัวอย่างยางดิบที่เก็บมาจากยางแท่งที่ผลิตแต่ละครั้ง ก่อนทำการทดสอบต้องผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน(Homogenisation) โดยนำมาบดด้วยเครื่องบดยาง 2 ลูกกลิ้ง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 นิ้ว ยาว 12 นิ้ว ลูกกลิ้งตัวหลังหมุนด้วยความเร็วเท่ากับ 31 รอบต่อวินาที และอัตราส่วนความเร็วของลูกกลิ้งหลังต่อลูกกลิ้งหน้าเท่ากับ 1.46 : 1



ภาพที่ 2.16 เครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง (สำหรับห้องปฏิบัติการ)

อุณหภูมิของลูกกลิ้งหลังเย็นเท่ากับอุณหภูมิห้อง (มีน้ำหล่อเลี้ยงตลอดเวลา) ช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง (nip) ต้องปรับให้เหมาะสมกับชิ้นงานที่ทดสอบด้วย คือ

0.065 นิ้ว (1.65 มิลลิเมตร) สำหรับผสมยางให้เป็นเนื้อเดียวกัน

0.020 นิ้ว (0.51 มิลลิเมตร) สำหรับการเตรียมขิ้นทดสอบปริมาณสิ่งระเหย

0.013 นิ้ว (0.33 มิลลิเมตร) สำหรับการเตรียมชิ้นทดสอบปริมาณสิ่งสกปรก

เครื่องบดยางก่อนใช้ต้องสะอาดเสมอ นำยางมาบดผ่านลูกกลิ้ง 6 ครั้ง แต่ละครั้งที่ยางผ่านลูกกลิ้งออกมา ให้ม้วนเป็นรูปทรงกระบอก ใส่ปลายข้างหนึ่งเข้าเครื่องเพื่อบดครั้งต่อไป สำหรับครั้งที่ 6 ให้รีดยางออกมาเป็นแผ่น(ไม่ต้องม้วน) ในระหว่างบดยางครั้งที่ 1-5 ถ้ามีเศษยางตกลงมาบนภาชนะรองรับลูกกลิ้ง ให้นำมารวมกับยางที่จะบดในครั้งต่อไปให้หมด ตัวอย่างยางที่บดเรียบร้อยแล้วเป็นส่วนๆ โดยมีน้ำหนักดังแสดงในตาราง

ตารางที่ 2.4 น้ำหนักชิ้นทดสอบสมบัติยาง

สมบัติที่ทดสอบ	น้ำหนักชิ้นทดสอบ (กรัม)
- ปริมาณสิ่งสกปรก	15
- ปริมาณเถ้า	10
- ปริมาณไนโตรเจน	10
- ปริมาณสิ่งระเหย	15
- ดัชนีความอ่อนตัว	25
- ความหนืด	25

2.4.2 สิ่งสกปรก (Dirt content) (ASTM D1278-91a)

สิ่งสกปรก หมายถึง ปริมาณสารที่ได้จากการกรองด้วยตะแกรงขนาด 325 เมช หรือ 44 ไมครอน สารที่กรองได้ประกอบด้วยเศษดิน เปลือกไม้ และใบไม้ เป็นต้น โดยประมาณและชนิดของสิ่งสกปรกที่มีในยาง มีความสำคัญต่อการแปรรูปและคุณภาพของยางเป็นอย่างมาก

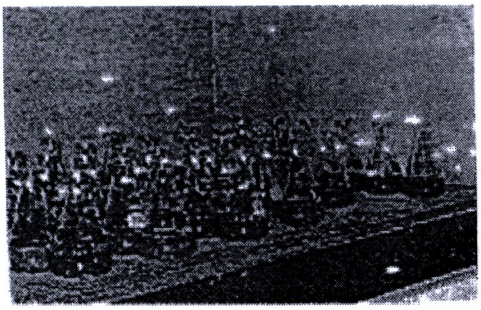
2.4.2.1 เครื่องมือและสารเคมี

เครื่องมือ

1) ขวดรูปชมพู่
2) เทอร์โมมิเตอร์ ขนาด 200 °C
3) ถ้วยกรองทำด้วยสแตนเลส รูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร หนา 2-3 มิลลิเมตร สูง 13 มิลลิเมตร มีตะแกรงขนาดรู 325 เมช หรือ 44 ไมครอน น้ำหนักของถ้วยกรองรวมแผ่นตะแกรงประมาณ 15 กรัม
4) เตาไฟฟ้า ขนาด 1500 วัตต์
5) เครื่องชั่งละเอียด 0.1 มิลลิกรัม
6) เตาอบ
7) เครื่องทำความสะอาดถ้วยกรอง (Ultrasonic cleaning kit)
8) กระดาษกรองเบอร์ 1 และกรวยพลาสติก

สารเคมี

1) น้ำมันสน (Turpentine)
2) Peptising Agent : RPA 3 (Xylyl Mercaptan)



ภาพที่ 2.17 การละลายน้ำมันสนด้วยความร้อน

2.4.2.2 วิธีทดสอบ

1) นำตัวอย่างยางที่บดผสมไว้แล้ว ประมาณ 15 กรัม มาผ่านลูกกลิ้งหนา 0.013 นิ้ว จำนวน 2 ครั้ง แบ่งยางมา 10 กรัม (ชั่งละเอียดถึงทศนิยม 3 ตำแหน่ง) ตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร มีน้ำมันสน 250 มิลลิลิตร และสารเร่งการละลายอยู่ 1 มิลลิลิตร

2) ละลายยางโดยใช้ความร้อนอุณหภูมิประมาณ 140 °C (ให้ยกขวดละลายยางแกว่งบ่อย ๆ เพื่อให้สารละลายภายในหมุนเวียนและละลายเร็วขึ้น) ใช้เวลาละลายยางประมาณ ½ -1 ชั่วโมง

3) กรองสารละลายยางขณะร้อน โดยเทสารละลายผ่านที่กรองที่สะอาด ทราบน้ำหนักแน่นอน ขณะเทให้ผงในขวดละลายยางหมด ให้ใช้น้ำมันสนที่ร้อน 30-50 มิลลิลิตร ล้างขวดละลายยาง 2 ครั้ง แล้วตะแคงขวด ฉีดด้วยน้ำมันเย็นเพื่อล้างผงออกให้หมด แล้วจึงใช้น้ำมันร้อนล้างรอบ ๆของภายในที่กรองอีกครั้ง

4) อบผงให้แห้ง ที่ 90 – 100 °C ทำให้เย็นในเดสซิเคเตอร์ประมาณ 30 นาที แล้วนำมาชั่งด้วยเครื่องชั่งละเอียดความถูกต้อง 0.1 มิลลิกรัม

2.4.2.3 การคำนวณ

คำนวณจากสมการที่ (1)

$$\%\ \text{สิ่งสกปรก} = \frac{\text{น้ำหนักสิ่งสกปรก}}{\text{น้ำหนักชิ้นทดสอบ}} \times 100 \qquad (1)$$

2.4.3 ปริมาณเถ้า (Ash content) (ASTM D1278-91a)

เถ้า เป็นตัวบ่งชี้ปริมาณแร่ธาตุที่มีอยู่ในยาง เป็นสารพวกเกลืออนินทรีย์ (inorganic salt) พวกฟอสเฟตของโปแตสเซียม แมกนีเซียม แคลเซียมและธาตุอื่น ๆ นอกจากนี้อาจเป็นสารพวก ซิลิกา หรือ ซิลิเกตในยาง รวมทั้งเป็นสารที่เกิดจากการปะปนจากภายนอก

2.4.3.1 เครื่องมือ

1) ครูซิเบิลขนาด 50 มิลลิลิตร

2) เตาอบความร้อนสูง

3) กระดาษกรองชนิดไม่มีเถ้า

4) เครื่องชั่งละเอียด

5) เดสซิเคเตอร์

2.4.3.2 วิธีทดสอบ

1) ตัดยางที่บดผสมเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว 5-10 กรัม (ละเอียด 0.1 มิลลิกรัม)

2) ห่อชิ้นยางด้วยกระดาษกรอง ใส่ในครูซิเบิลที่รู้น้ำหนักแก้ว (ก่อนใช้ต้องเผาในเตาให้ร้อนแดง ทำให้เย็นในเดสซิเคเตอร์แล้วชั่งละเอียด 0.1 มิลลิกรัม)

3) นำถ้วยครูซิเบิลที่ใส่ยางไปเผาในเตา ที่คุมอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 530 ± 20 °C เป็นเวลา 2-4 ชั่วโมง ต่อจากนั้นนำถ้วยครูซิเบิลทำให้เย็นในเดสซิเคเตอร์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4) นำมาชั่งด้วยเครื่องชั่งละเอียด 0.1 มิลลิกรัม

2.4.3.3 การคำนวณ

คำนวณจากสมการที่ (2)

$$\% \text{ ASH} = \frac{A - B - C}{D} \times 100 \qquad (2)$$

เมื่อ A คือ น้ำหนักเถ้า + ถ้วยครูซิเบิล

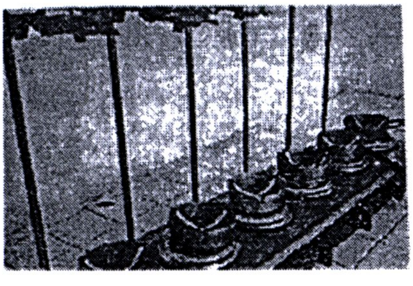
เมื่อ B คือ น้ำหนักถ้วยคูรซิเบิล

เมื่อ C คือ น้ำหนักเถ้าของกระดาษกรอง

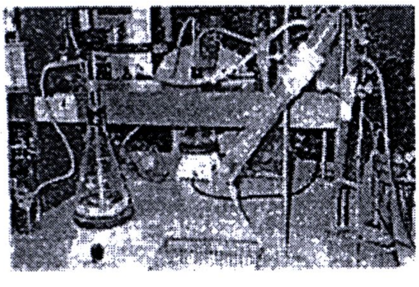
เมื่อ D คือ น้ำหนักยางก่อนทดสอบ

2.4.4 ไนโตรเจน (Nitrogen content) (ASTM D3533-90)

ไนโตรเจนในยางดิบจะอยู่ในรูปของโปรตีน ดังนั้นปริมาณของไนโตรเจน จึงเป็นตัว บ่งชี้ปริมาณของโปรตีนในยาง ปริมาณไนโตรเจนสูงจะมีผลกระทบต่อลักษณะการคงรูปของยาง ทำให้ต้องเข้มงวดในการควบคุมระบบสารที่จะใช้ทำให้ยางคงรูป ในทางเทคนิคสารที่มีองค์ประกอบของไนโตรเจนเป็นตัวช่วยเร่งในการทำให้ยางคงรูป หากสามารถควบคุมปริมาณให้สม่ำเสมอและแน่นอนได้ก็จะให้ผลในเชิงบวกต่อกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ เพราะอาจลดปริมาณการใช้สารตัวเร่งในสูตรทำผลิตภัณฑ์ยางได้



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.18 เตาเผาสำหรับย่อยยาง (ก) และชุดเครื่องกลั่นด้วยไอน้ำ (ข)

2.4.4.1 เครื่องมือและสารเคมี

เครื่องมือ

1) Micro-Kjeldahl and distillation
2) บิวเรตและปิเปต
3) เครื่องชั่งละเอียด
4) เตาไฟฟ้า ขนาด 1500 วัตต์

สารเคมี

1) กรดกำมะถันเข้มข้น
2) สารละลายมาตรฐานกรดกำมะถันเข้มข้น 0.01 นอร์มัล
3) สารละลายมาตรฐานโซเดียมคาร์บอเนตเข้มข้น 0.01 นอร์มัล
4) สารละลายกรดบอริค 2% น้ำหนักต่อปริมาตร
5) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 67% W/V
6) สารเร่งปฏิกริยา (ประกอบด้วย CuSO4 5H2O 2 ส่วน K2SO4 15 ส่วน Se 1 ส่วน)
7) สารละลายเมทธิลเรด 0.15% น้ำหนักต่อปริมาตร (ประกอบด้วย Methyl Red = 0.1 g + Methyl Blue = 0.05 g + Ethanol = 100 ml)
8) สารละลายเมทธิลออเรนจ์ 0.1% W/V

2.4.4.2 วิธีทดสอบ

1) ชั่งยาง 0.1 กรัม ใส่ใน Micro-Kjeldahl flash เติมส่วนผสมสารเร่งปฏิกริยา 0.65 กรัม กรดกำมะถัน 2.5 มิลลิลิตร
2) ให้ความร้อนจนกระทั่งสารละลายใสสีเขียว (หรือไม่มีสี) ใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง และต้องไม่มีสีเหลืองอ่อนๆ ปนหรือเหลืออยู่
3) ตั้งทิ้งให้เย็น แล้วทำให้เจือจางด้วยน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร
4) เทสารละลายให้ในเครื่องกลั่นซึ่งเตรียมผ่านไอน้ำร้อนไว้แล้ว 30 นาที ล้างภาชนะด้วยน้ำกลั่น 2-3 มิลลิลิตร ประมาณ 2-3 ครั้ง
5) นำขวดแก้วรูปชมพู่ บรรจะบอริค 10 มิลลิลิตร และสารละลายเมทธิลเรด 2-3 หยด มารับสารที่กลั่นได้ (ให้ปลายหลอดแก้วจุ่มลงในสารละลาย)
6) เติมสารละลาย NaOH 67% W/V 10 มิลลิลิตร ลงในเครื่องกลั่น แล้วล้างด้วยน้ำไม่เกิน 5 มิลลิลิตร
7) ปล่อยให้ไอน้ำเข้าเครื่องกลั่นสารเป็นเวลา 5 นาที
8) เลื่อนขวดแก้วรูปชมพู่ที่รองรับสารที่กลั่น ให้ปลายหลอดอยู่เหนือสารละลาย กลั่นต่อไป 1 นาที แล้วใช้น้ำกลั่นฉีดล้างปลายหลอดแก้ว
9) นำสารละลายที่ได้ไปไตเตรตกับสารละลายกระกำมะถันเข้มข้น 0.01 N จนได้ยุติสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียว – ม่วง

10) ทำ BLANK ตามวิธีทดสอบเดิมทุกอย่าง แต่ไม่ใส่ตัวอย่างยาง

2.4.4.3 การคำนวณ

คำนวณจากสมการที่ (3)

$$\text{ปริมาณโปรตีน} = 6.25 \times 100 \tag{3}$$

2.4.5 ปริมาณสิ่งระเหย (Volatile matter content : VM) (ASTM D1278-91a)

สิ่งระเหยได้ในยาง หมายถึง ความชื้นที่มีอยู่ในยาง ถ้าปริมาณความชื้นในยางสูงยางจะขึ้นราได้ง่าย มีกลิ่นเหม็น และเกิดปัญหาระหว่างกระบวนการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ เพราะว่าจะต้องใช้เวลา และอุณหภูมิบดยางเพื่อไล่ความชื้นออกเสียก่อน มิฉะนั้นแล้วสารต่าง ๆ ที่จะเติมผสมกับยางจะคลุกเคล้าเป็นเนื้อเดียวกันกับยางได้ยาก จึงต้องมีการกำหนดขีดจำกัดของสิ่งระเหย เพื่อต้องการให้ผู้ผลิตยางแท่งอบยางให้แห้ง

2.4.5.1 เครื่องมือ

1) เครื่องชั่งละเอียด 0.001 กรัม
2) ถุงโพลิทีน (กว้าง 4 นิ้ว ยาว 8 นิ้ว หนา 0.06 มิลลิเมตร)
3) ถาดอลูมิเนียม (กว้าง 6.5 นิ้ว ยาว 14 นิ้ว สูง 1.5 นิ้ว) บุด้วยตะแกรงขนาด 7 เมช
4) ที่หนีบถุง
5) เดสซิเคเตอร์ (โถแก้วดูดความชื้น)
6) เตาอบ

2.4.5.2 วิธีทดสอบ

1) ชั่งยางที่เตรียมไว้ น้ำหนักแน่นอน 10 กรัม ± 0.001 มิลลิกรัม
2) ชั่งยางที่เตรียมไว้ น้ำหนักแน่นอน 10 กรัม ± 0.001 มิลลิกรัม
3) วางตัวอย่างยางชิ้นทดสอบบนถาดอลูมิเนียม (วางซ้อนกันได้ไม่เกิน 7 ถาด)
4) อบยางที่อุณหภูมิ 100 ± 3 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
5) เอายางออกจากเตาทีละถาด พร้อมกับปิดประตูเตาอบทุกครั้งที่ยกถาดออก นำยางใส่ถุงโพลิทีน พับปากถุง 3 ครั้ง พับกลางอีกครั้ง แล้วหนีบแขวนไว้บนราว (การใส่ยางในถุงควรใช้เวลาทั้งหมดไม่เกิน 1½ นาที ในถาดหนึ่งๆ)
6) ปล่อยยางในถุงให้เย็นโดยวางในเดสซิเคเตอร์ประมาณ 30 นาที
7) นำยางไปชั่งละเอียด 0.001 กรัม

2.4.5.3 การคำนวณ

คำนวณจากสมการที่ (4)

$$\% \text{ ASH} = \frac{A - B}{A} \times 100 \tag{4}$$

เมื่อ A คือ น้ำหนักตัวอย่างยางก่อนอบ (กรัม)

เมื่อ B คือ น้ำหนักตัวอย่างยางหลังอบ (กรัม)

2.4.6 ความอ่อนตัวเริ่มแรกและดัชนีความอ่อนตัวของยาง (Original Wallace Plasticity and Plasticity Retention Index : Po และ PRI) (ASTM D3194-84, ISO2007-1981)

ค่าความอ่อนตัวเริ่มแรกของยาง (Po) เป็นค่าที่ใช้ประมาณขนาดของโมเลกุลของยาง ยางที่มีค่า Po สูงแสดงว่ามีขนาดโมเลกุลของยางสูง อย่างที่ถูกออกซิไดซ์มากจะนิ่ม มีค่า Po ต่ำ ส่วนค่าดัชนีความอ่อนตัวของยาง เป็นค่าที่แสดงว่ายางที่ทดสอบนั้นมีความต้านทานต่อการออกซิเดชั่นที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที (กรณียางที่ทนต่อการถูกออกซิเดชั่นสูง โมเลกุลของยางจะทนต่อการถูกออกซิไดซ์) หรือเป็นการแสดงความต้านทานของยางดิบ ต่อการแตกหักของโมเลกุลยางที่อุณหภูมิสูง

2.4.6.1 เครื่องมือ

1) Wallace rapid plastimeter
2) Wallace stream generator
3) Wallace punch
4) เตาอบ สามารถควบคุมอุณหภูมิที่ 140±0.5 °C ตลอดเวลา เมื่อปิดฝาตู้แล้วอุณหภูมิต้องกลับไปอยู่ที่เดิมภายใน 6 นาที

2.4.6.2 วิธีทดสอบ (การเตรียมชิ้นทดสอบ การอบและการวัดค่า)

การเตรียมชิ้นทดสอบ

1) ตัดตัวอย่างยางที่บดเป็นเนื้อเดียวกันมา 20±5 กรัม
2) รีดยางผ่านเครื่องบด 2 ครั้งที่อุณหภูมิห้อง โดยปรับช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งเท่ากับ 1.65 มิลลิเมตร
3) พับแผ่นยางเป็น 2 ทบ โดยกดเบาๆ ให้ได้ความหนา 3.2-3.6 มิลลิเมตร
4) ตัดชิ้นทดสอบยาง 6 ชิ้นด้วยเครื่องตัดโดยเฉพาะ
5) เก็บชิ้นทดสอบ 3 ชิ้น เพื่อทดสอบหาค่าพลาสติซิตี้ (Po) และชิ้นทดสอบที่เหลืออีก 3 ชิ้นเพื่อนำมาทดสอบค่า P30

การอบ

1) นำยางชิ้นทดสอบมาอบที่อุณหภูมิ 140 °C เป็นเวลา 30 นาที (อุณหภูมิต้องคงที่ก่อนใส่ยางใน เตาอบอย่างน้อย 5 นาที และเริ่มจับเวลาหลังจากที่ใส่ยางแล้ว 6 นาที เพื่อให้อุณหภูมิของยางและเตาอบคงที่ด้วย)
2) เมื่อครบ 30 นาทีแล้ว ทิ้งยางให้เย็นเป็นเวลา 30 นาที จึงทำการทดสอบ
3) พับแผ่นยางเป็น 2 ทบ โดยกดเบาๆ ให้ได้ความหนา 3.2-3.6 มิลลิเมตร

การวัดค่า

1) นำชิ้นยางปิดด้วยกระดาษมวนบุหรี่ใส่เครื่องทดสอบ
2) ยกแขนปิดเครื่อง 15 วินาทีแรก แท่งโลหะกลม บน-ล่าง จะกดยางให้หนา 1 มิลลิเมตร และอุ่นยางที่อุณหภูมิ 100 °C 15 วินาทีหลัง เครื่องจะกดยางด้วยแรง 10±0.1 กิโลกรัม โดยอัตโนมัติ
3) ความหนาของยางที่วัดได้มีความถูกต้อง อ่านได้ละเอียด 0.01 มิลลิเมตร เป็นค่าพลาสติซิตี้ ของยางที่การทดสอบ

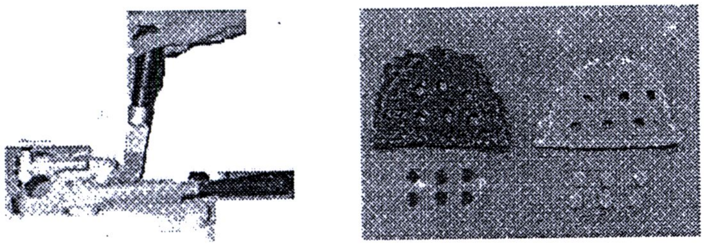
2.4.6.3 การคำนวณ

คำนวณจากสมการที่ (5)

$$\% \, PRI = \frac{\text{Aged median plasticity value}}{\text{Unaged median plasticity value}} \times 100 \quad (5)$$

เมื่อ P_O คือ เป็นค่ามัธยฐานความอ่อนตัวของยางชุดเริ่มแรก

เมื่อ P_{30} คือ เป็นค่ามัธยฐานความอ่อนตัวของยางชุดที่หลังอบ



ภาพที่ 2.19 เครื่องตัดชิ้นทดสอบ และ ชิ้นทดสอบสำหรับหาค่าพลาสติซิตี้

2.4.7 สียาง (ASTM D3517-84)

ยางแท่งที่ผลิตจากน้ำยางมีการจัดชั้นซึ่งระบุในการจัดมาตรฐานชั้นยาง โดยการเปรียบเทียบความเข้มของสียางด้วยสีของโลวิบอนด์ (Lovibond) มาตรฐาน เช่น ความเข้มของสียางต่ำกว่าสีของโลวิบอนด์ เบอร์ 6 แสดงว่า เป็นยางแท่ง ชั้น STR 5L หากความเข้มของสียางมีค่ามากกว่าสีมาตรฐานโลวิบอนด์ เบอร์ 6 แสดงว่ายางที่ผลิตได้จัดเป็นยางแท่ง ชั้น STR 5 เป็นต้น ยางแท่งที่ผลิตจากยางก้อนจับตัวไม่จำเป็นต้องตรวจสอบคุณภาพสีของยาง

2.4.8 ความหนืด

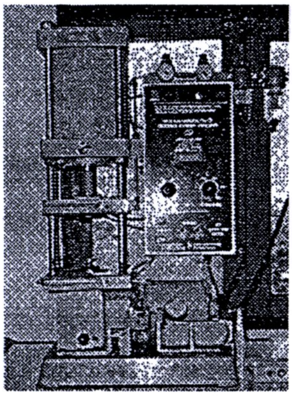
ความหนืดเป็นสมบัติทางกายภาพของยาง โดยความหนืดของยางจะสัมพันธ์กับน้ำหนักโมเลกุลของยาง ยางที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะมีค่าความหนืดสูงด้วย ปกติจะวัดโดยเครื่อง Mooney Viscometer เป็นค่าบ่งชี้หรือมีความหมายทำนองเดียวกับค่า Po เพียงแต่การใช้เครื่องมือทดสอบที่มีระบบการทำงานของเครื่องต่างกัน

2.4.8.1 เครื่องทดสอบ

เครื่องทดสอบความหนืดของยางแห้งมีชื่อเรียกว่า มูนี่ วิสโคมิเตอร์(mooney viscometer) เป็นเครื่องมือมาตรฐานสากล (ASTM D1646-94 และ ISO R 289-1963) ใช้วัดค่าความหนืดของยางดิบทั้งยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์

ชิ้นยางที่ทดสอบจะใส่อยู่ระหว่างจานโลหะในห้องใส่ยาง อัดยางด้วยแรงกดเท่ากับ 11500±500 นิวตัน จานโลหะจะหมุนเพื่อเฉือนยางซึ่งอยู่ในห้องใส่ยาง ด้วยความเร็วคงที่ 2 รอบต่อนาที แรงบิด (Torque) ที่เฉือนยางกับจานโลหะจะแสดงค่าความหนืดของยาง

ตามมาตรฐานเครื่องทดสอบ กำหนดให้แรงบิดที่ใช้ขนาด 8.3±0.2 นิวตันเมตร มีค่าความหนืดเทียบเท่ากับ 100 หน่วยมูนี่ (MV scale)



ภาพที่ 2.20 เครื่องมือทดสอบความหนืด (Mooney viscometer)

2.4.8.2 วิธีทดสอบ

1) ตั้งอุณหภูมิเครื่องทดสอบให้คงที่เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส พร้อมกับอุ่นจานหมุนโลหะที่จะให้สำหรับทดสอบ

2) เตรียมยางชิ้นทดสอบ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 45 มิลลิเมตร หนา 6 มิลลิเมตร

3) ใส่ยางชิ้นทดสอบระหว่างจานหมุนโลหะ แล้ววางตรงตำแหน่งของห้องทดสอบ

4) ใช้ความดันลมอัดยางชิ้นทดสอบ อุ่นยางเป็นเวลา 1 นาที

5) อ่านค่าความหนืดของยางที่เวลาเดินเครื่อง 4 นาที

2.4.8.3 การคำนวณ

คำนวณจากสมการที่ (6)

$$\text{ความหนืด} = 50M\ L\ (1'+4')\ 100\ ^\circ C \qquad (6)$$

เมื่อ 50 M = ค่าความหนืด (Mooney viscosity) ของยางที่อ่านได้

เมื่อ L = จานหมุนโลหะตัวใหญ่

เมื่อ 1’ = เวลาเป็นนาที ที่ใช้อุ่นยาง

เมื่อ 4’ = เวลาเป็นนาที ที่ใช้ทดสอบและอ่านค่าความหนืด

เมื่อ 100 °C = อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ

หมายเหตุ

การวัดค่าความหนืดของยาง จำเป็นต้องมีการตรวจทานมาตรวัด (Calibration) ให้ถูกต้องก่อนเสมอ

3. การอบแห้ง

3.1 ทฤษฎีการอบแห้ง

การอบแห้ง คือ กระบวนการที่ความร้อนถูกถ่ายเทด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งไปยังวัสดุที่มีความชื้นเพื่อขับไล่ความชื้นออกโดยการระเหย โดยอาศัยความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย (เรียวโซ โทเอ, 2529) วัตถุประสงค์ของการขับไล่ความชื้นหรือการกำจัดน้ำคือ การยืดอายุการเก็บรักษาวัตถุดิบให้มีระยะเวลายาวนานขึ้นและเพื่อความสะดวกในการจัดเก็บผลิตภัณฑ์

3.1.1 ความชื้นในวัสดุ

ความชื้น (Moisture Content) หรือปริมาณน้ำที่อยู่ในวัสดุนั้น มักกำหนดเป็นอัตราส่วนร้อยละของน้ำต่อน้ำหนักของวัสดุทั้งหมด เรียกว่า ความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet Basis Moisture Content) หรืออัตราส่วนร้อยละของน้ำหนักของน้ำต่อน้ำหนักแห้งของวัสดุ เรียกว่า ความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry Basis Moisture Content) (ปฏิภาณ และ อารักษ์, 2544) สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

3.1.1.1 ความชื้นมาตรฐานเปียก

$$M_w = \frac{(w-d)}{w} x100 \ \% \tag{7}$$

เมื่อ	M_w	คือ	ความชื้นมาตรฐานเปียก, เปอร์เซ็นต์
	w	คือ	มวลของวัสดุ, kg
	d	คือ	มวลของวัสดุแห้ง(ไม่มีความชื้น), kg

การคำนวณความชื้นแบบมาตรฐานเปียกนี้ เป็นที่นิยมใช้ในวงการค้า เพราะเข้าใจง่าย โดยทั่วๆ ไปจะอ้างถึงในรูปของเปอร์เซ็นต์ (% M_w)

3.1.1.2 ความชื้นมาตรฐานแห้ง

$$M_d = \frac{(w-d)}{d} x100 \ \% \tag{8}$$

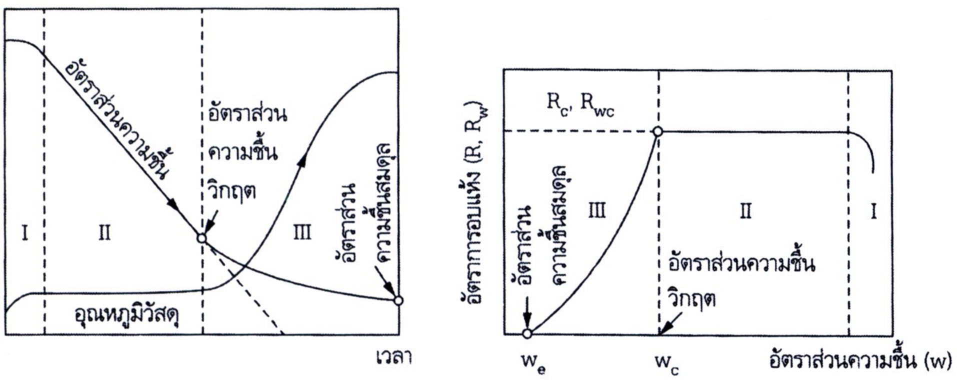
เมื่อ	M_d	คือ	ความชื้นมาตรฐานแห้ง, เปอร์เซ็นต์
	w	คือ	มวลของวัสดุ, kg
	d	คือ	มวลของวัสดุแห้ง(ไม่มีความชื้น), kg

การคำนวณความชื้นแบบมาตรฐานแห้งนิยมใช้กันในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี เพราะช่วยในการคำนวณสะดวกขึ้น ซึ่งเป็นเพราะมวลของวัสดุแห้งจะมีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ระหว่างการอบแห้ง ที่เกือบคงที่เพราะผลิตผลทางการเกษตรเป็นสิ่งมีชีวิต มีการหายใจ ดังนั้นจึงมีการเผาผลาญสารอาหาร ทำให้มวลแห้งลดลง ส่วนใหญ่แล้วมวลแห้งจะลดลงเพียงเล็กน้อย (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540)

3.1.2 เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง

ถ้าเอาวัสดุรูพรุนที่เปียกชื้นถึงผิวนอกมาแขวนในลมร้อนที่มีความชื้น H และอุณหภูมิ t แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความชื้นและอุณหภูมิของวัสดุเมื่อเทียบกับเวลาจะเป็นดังภาพที่ 2.21 (a)

ส่วนภาพที่ 2.21 (b) คือรูปที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยในวัสดุ โดยอัตราการอบแห้งหาได้จากการหาอนุพันธ์กับเวลาของเส้นโค้งการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นในภาพที่ 2.21 (a) สำหรับเส้นโค้งในภาพที่ 2.21 (b) นี้เป็นตัวแทนโดยตรงของลักษณะเฉพาะของการอบแห้งภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งคงที่ (เงื่อนไขภายนอกอย่างเช่น อุณหภูมิลมร้อน ความชื้นลมร้อน ความเร็วลม มีค่าคงที่) เพราะฉะนั้นเงื่อนไขเหล่านี้จึงเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญที่สุดในการออกแบบอุปกรณ์อบแห้ง



(a) ช่วงเวลา 3 ระยะของการอบแห้ง

(b) เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง

ภาพที่ 2.21 ลักษณะเฉพาะของการอบแห้งภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งคงที่ (Hajime et.al, 2548)

ขณะนี้ถ้าวัสดุมีอุณหภูมิภายในเท่ากันหมด และถ้าคิดว่าความร้อนที่ถ่ายเทจากลมร้อนไปยังวัสดุ ถูกใช้ไปในการระเหยน้ำภายในวัสดุ และในการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุแล้ว สมการดุลความร้อนจะเป็น

$$\left(\frac{W}{A}\right)(C_S + wC_w)\frac{dt_m}{d\theta} = h(t - t_m) - \frac{W}{A}\left(-\frac{dw}{d\theta}\right)r_m \tag{9}$$

เมื่อ W คือ มวลวัสดุปราศจากน้ำ, kg

A คือ พื้นที่ผิวการอบแห้ง, m^2

C_S คือ ความร้อนจำเพาะของวัสดุปราศจากน้ำ, $kJ.kg^{-1}.K^{-1}$

C_W คือ ความร้อนจำเพาะของน้ำ, $kJ.kg^{-1}.K^{-1}$

h คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างลมร้อนกับวัสดุ, $kJ.h^{-1}.m^{-2}.K^{-1}$

t_m คือ อุณหภูมิของวัสดุ, K

r_m คือ ความร้อนแฝงการกลายเป็นไอของน้ำที่อุณหภูมิ t_m, $kJ.kg^{-1}$

พจน์ทางด้านซ้ายของสมการเป็นการเปลี่ยนแปลงความร้อนสัมผัสของวัสดุ และพจน์ที่ 1 ของฝั่งขวาเป็นอัตราที่ความร้อนถ่ายเทไปยังวัสดุ พจน์ที่ 2 คือ อัตราที่ความร้อนถูกใช้ระเหยความชื้นออกจากวัสดุในขณะที่มีน้ำอิสระอยู่บนผิววัสดุ และสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{W}{A}\left(-\frac{dw}{d\theta}\right)=k(H_m - H) \qquad (10)$$

เมื่อ k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล, kg-น้ำ.$h^{-1}.m^{-2}.\Delta H^{-1}$

H_m คือ ความชื้นอิ่มตัวของอากาศ ณ อุณหภูมิ t_m

ถ้าเอาสมการที่ (4) แทนในสมการที่ (3) จะได้

$$\left(\frac{W}{A}\right)(C_s + wC_w)\frac{dt_m}{d\theta} = h(t-t_m)-k(H_m - H)r_m \qquad (11)$$

ในช่วงแรกเริ่มของการอบแห้ง t_m มีค่าน้อยจึงทำให้ H_m มีค่าน้อยด้วย และ $\frac{dt_m}{d\theta}$ มากกว่า 0 ดังนั้น t_m จะมีค่าเพิ่มขึ้นพร้อมกับเวลา ซึ่งนี่ก็คือ "ช่วงเวลาการอุ่นวัสดุ" ดังแสดงในภาพที่ 2.21 (a) เนื่องจาก $t-t_m$ จะลดลงไปตามการเพิ่มของ t_m ดังนั้นในท้ายที่สุด พจน์ด้านขวาของสมการ (11) จะมีค่าเท่ากับ 0 และหลังจากนี้ t_m ก็จะกลายเป็นค่าคงที่คือ t_w เพราะฉะนั้นช่วงเวลาการอุ่นวัสดุนั้นหมายถึงช่วงเวลาที่เริ่มจากอุณหภูมิเริ่มแรกจนถึงอุณหภูมิสมดุล ซึ่งถูกกำหนดโดยเงื่อนไขของการอบแห้ง (กรณีที่เป็นการพาความร้อนอย่างเดียว = t_w กรณีที่มีการนำและการแผ่รังสี $\neq t_w$)

ในช่วง II ของภาพที่ 2.21 (a) นั้น พจน์ที่อยู่ฝั่งขวาของสมการที่ (11) จะมีค่าเป็น 0 ดังนั้นอุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าคงที่ และปริมาณความร้อนที่ได้รับทั้งหมดจะถูกใช้ไปในการระเหยความชื้นออกจากวัสดุ นั่นคืออัตราการอบแห้งจะมีค่าคงที่หนึ่งดังแสดงในภาพที่ 2.21 (b) เราจึงเรียกช่วงเวลา II นี้ว่า "ช่วงเวลาการอบแห้งที่มีอัตราคงที่" ช่วงเวลานี้จะดำเนินต่อไปตราบใดที่มีน้ำอิสระเหลืออยู่ที่ผิววัสดุ และยังเกิดการระเหยอยู่

ถ้าอัตราส่วนความชื้นบริเวณผิวของวัสดุลดลงและน้ำอิสระจากภายในวัสดุไม่สามารถเคลื่อนมาชดเชยได้ทันกับอัตราการระเหยน้ำ น้ำอิสระที่ผิววัสดุจะหมดไป และพื้นผิวที่เกิดการระเหยของน้ำจะร่นเข้าจากผิวนอกของวัสดุเข้าสู่ภายในตัววัสดุ ทำให้เข้าไปสู่ช่วง III คือ "ช่วงเวลาการอบแห้งที่อัตราลดลง" ในช่วงเวลานี้อัตราที่ความร้อนไหลเข้ากับอัตราการระเหยจะไม่สมดุลกัน ส่งผลให้ฝั่งขวาของสมการ (11) มีค่ามากกว่า 0 อีกครั้ง ดังนั้นอุณหภูมิของวัสดุจะค่อยๆ เริ่มเพิ่มขึ้นจากบริเวณผิวนอกของวัสดุตามลำดับ และอัตราที่วัสดุได้รับความร้อนจากลมร้อนจะค่อยๆ ลดลง อัตราการอบแห้งจึงลดลงพร้อมกับเวลาที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 2.21 (b) ซึ่งความร้อนที่ได้รับนั้นส่วนหนึ่งจะใช้ไปในการระเหยน้ำ และที่เหลือจะถูกใช้ไปในการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุ

ค่าของอัตราส่วนความชื้นตรงเส้นแบ่งเขตระหว่างช่วง I กับ II คือ อัตราส่วนความชื้นวิกฤต w_c และอัตราส่วนความชื้นหลังจากเวลาผ่านไปเป็นอนันต์ ก็คือ อัตราส่วนความชื้นสมดุล w_e การคาดคะเนค่าของอัตราส่วนความชื้นวิกฤตทำได้ยาก แต่ในแง่ของแนวโน้มทั่วไปแล้ว ในวิธีการอบแห้งแบบเดียวกันถ้ายิ่งเงื่อนไขของการอบแห้งรุนแรงขึ้น w_c ก็จะมีค่ามากขึ้นประมาณ 2 - 3 เปอร์เซ็นต์ ในทางตรงกันข้าม ถ้าวิธีการอบแห้งเปลี่ยนไป w_c ก็อาจเปลี่ยนค่าไปอย่างเด่นชัด ยกตัวอย่างเช่นวัสดุเม็ดและผงในสภาพถูกกองสุมอยู่ ซึ่งมีอัตราส่วนความชื้นวิกฤต 15-20 เปอร์เซ็นต์ นั้น ค่าของ w_c จะลดลงรวดเดียวเหลือประมาณ 1.0 – 0.5 เปอร์เซ็นต์ ถ้าหากถูก

อบแห้งในสภาพที่เม็ดและผงกระจัดกระจายอยู่ในลมร้อน หรือกำลังถูกกวนผสม ด้วยเหตุนี้เพื่อทำให้ช่วงเวลาการอบแห้งสั้นลงจึงควรเลือกวิธีอบแห้งที่ทำให้อัตราส่วนความชื้นวิกฤตเหลือค่าน้อยๆ (Hajime, 2548)

3.1.3 อัตราการอบแห้งคงที่

ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ การถ่ายเทความร้อนและมวลจะเกิดขึ้นที่ผิวนอกของวัสดุเท่านั้น น้ำจะเกาะที่ผิวหน้าวัสดุจำนวนมาก เมื่อเพิ่มความเร็วลมที่ไหลผ่านวัสดุจะทำให้ฟิล์มอากาศนิ่งมีความหนาลดลง เป็นผลให้ความต้านทานต่อการไหลของความร้อนและมวลลดลงด้วยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศอบแห้ง เป็นผลให้ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิววัสดุและของอากาศที่ไหลอย่างมีอิสระมากขึ้น เป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนและมวลเพิ่มขึ้น และเมื่อลดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้งจะเป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนและมวลดีขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วลมจะพบว่าความหนาของฟิล์มอากาศนิ่งมีค่าลดลง เป็นผลให้ความต้านทานลดลงเนื่องจากความต้านทานฟิล์มอากาศมีค่าน้อย เมื่อเทียบกับความต้านทานในตัวผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงไม่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลมากขึ้น (ดวงทิพย์ เจนถาวร, 2548)

3.1.4 อัตราการอบแห้งลดลง

ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ปริมาณความชื้นของวัสดุมีค่าต่ำกว่าค่าปริมาณความชื้นวิกฤต การถ่ายเทความร้อนและมวลไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของวัสดุเท่านั้น และการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในวัสดุมายังผิวช้ากว่าการพาความชื้นจากผิววัสดุไปยังอากาศ ทำให้อัตราการเคลื่อนที่ของความชื้นและอุณหภูมิภายในวัสดุมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ และมีผู้นำหลักการทางทฤษฎีหลายทฤษฎีมาอธิบายการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุซึ่งมีลักษณะพรุนในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง Luikov ได้เสนอกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุ ซึ่งอาจเกิดขึ้นในแบบต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ (Luikov, 1966 อ้างถึงใน สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540)

3.1.4.1 การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของเหลวเนื่องจาก Capillary flow ซึ่งเป็นผลมาจากแรงตึงผิว (Surface force)

3.1.4.2 การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของเหลวเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (Liquid diffusion)

3.1.4.3 การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของเหลวเนื่องจากการแพร่ความชื้นบนผิวของรูพรุนเล็กๆ (Surface diffusion)

3.1.4.4 การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของไอเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (Vapor diffusion)

3.1.4.5 การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปแบบของไอ ในลักษณะความแตกต่างของอุณหภูมิไอน้ำ (Thermal different)

3.1.4.6 การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปแบบของเหลวและไอน้ำเนื่องจากความแตกต่างของความดันรวม (Hydrodynamic flow)

แต่เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุ โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของของเหลว ซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น

3.2 เตาอบยางและการอบแห้งยางด้วยลมร้อน

3.2.1 เตาอบยาง

การอบแห้งยางแท่งที่มีกระบะเป็นภาชนะรองรับเม็ดยางที่ทำการบดย่อยเรียบร้อยแล้ว ชั้นของเม็ดยางมีความหนาพอสมควร อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งจึงต้องมีอุณหภูมิสูงและมีการกระจายอย่างทั่วถึง จึงสามารถทำให้ยางที่อบนั้นสุกได้ ดังนั้นการออกแบบสำหรับเตาอบยางที่เป็นเม็ดเล็กๆ (crumb rubber) จะออกแบบให้มีอุณหภูมิสูงกว่าการอบยางแบบธรรมดา นั่นคือ

	อบแห้งด้วยอุณหภูมิประมาณ (องศาเซลเซียส)
ยางที่ตัดบ่อยเป็นเม็ดเล็กๆ (เตาอบ)	100 – 120
ยางแผ่นรมควัน (โรงรม)	50 – 60
ยางแผ่นผึ่งแห้ง (โรงอบแห้ง)	50 – 60
ยางเครพ (โรงผึ่งเครพ)	45

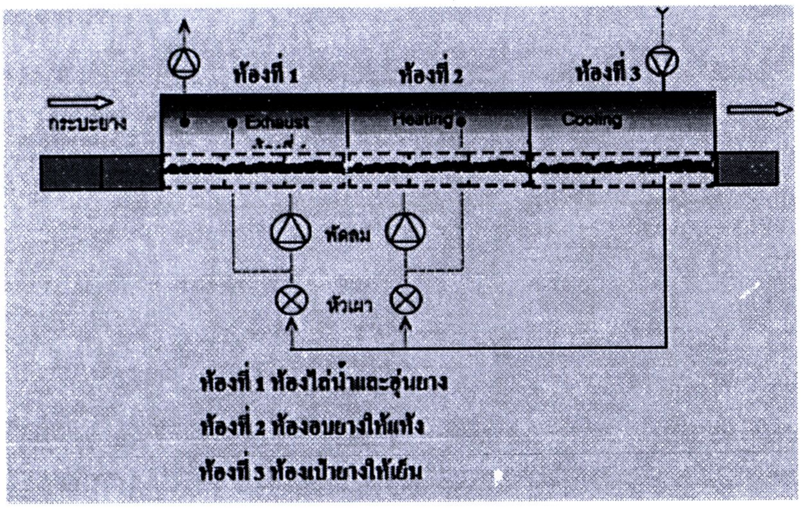
โดยปกติเม็ดยางเปียกที่ผ่านกรรมวิธีผลิตยางแท่งมาแล้วจะถูกบรรจุอย่างหลวมๆ ลงในกระบะนำเข้าเตาอบเพื่อเป่าลมร้อนไปที่กระบะยางดังภาพที่ 2.22 ลมร้อนจะถูกทำให้หมุนเวียนในเตาอบอย่างทั่วถึง โดยอาศัยระบบของพัดลม ส่วนความชื้นจากยางจะแยกออกโดยระบบการระบายตามแรงโน้มถ่วง (gravitational drainage) ระบบซิเนอริซิส (syneresis) การระเหย ตลอดจนการกระจายออก

เตาที่ใช้เพื่อการอบให้ยางแท่งแห้งนั้นมีด้วยกันหลายแบบ แต่อย่างไรก็ตามเตาแบบต่างๆ เหล่านั้นมีหลักการเหมือนๆ กัน นั่นคือ การใช้กระบะอบยางรูปทรงลึก ใช้ความร้อนหมุนเวียนประมาณ 100 - 120 องศาเซลเซียส ความแตกต่างของเตาอยู่ที่การออกแบบสร้างที่เหมาะสมกับสายการผลิต การป้อนยางเข้าเตา ชนิด และจำนวนของอุปกรณ์ที่จะให้ความร้อนพัดลมหมุนเวียนในเตา และอื่นๆ จุดประสงค์สำคัญของการใช้เตาอบยางคือ การอบให้ยางแห้งภายในเวลาอันสั้น และจะต้องมีราคาประหยัดโดยปราศจากการทำให้เกิดผลกระทบต่อสมบัติของยางแท่ง (Verhaar, 1973)

ภาพที่ 2.22 เตาอบแห้งยางแท่ง (Verhaar, 1973)

3.2.2 การอบแห้งยางแท่งด้วยลมร้อน

โดยทั่วไปเป็นเครื่องอบแห้งยางแท่งจะเป็นการอบแห้งต่อเนื่องแบบอุโมงค์ ประกอบด้วย ตัวเครื่องอบด้านนอกกรุด้วยเหล็กแผ่นชุบสังกะสี ด้านในกรุด้วยสแตนเลส ระหว่างกลางกรุด้วยไมโครไฟเบอร์หรือวัสดุกันความร้อนโดยรอบตัวเครื่อง ถาดวางวัตถุดิบเป็นสแตนเลสเชื่อมติดกับตะแกรง ด้านล่างของตะแกรงจะเป็นห้องลมร้อน มีพัดลมสำหรับกระจายความร้อนถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าภายในเครื่องอบแห้ง วัสดุยางที่ถูกย่อยเป็นชิ้นเล็กๆ จะถูกอบให้แห้งโดยการเป่าลมร้อน เพื่อการอบและไล่ความชื้น ซึ่งสามารถแยกประเภทของเครื่องอบแห้งได้เป็นสองประเภทหลักๆ ที่นิยมใช้กันในอุตสาหกรรม ได้แก่ เครื่องอบแห้งโดยใช้น้ำมันดีเซล (Diesel burner) และเครื่องอบแห้งชนิดใช้เทคโนโลยีน้ำมันร้อน (Hot oil burner) (ในโรงงานยางส่วนใหญ่จะนิยมการใช้ เครื่องอบแห้งชนิดใช้น้ำมันดีเซล) เครื่องอบแห้งส่วนใหญ่จะแบ่งออกเป็น 3 ห้องดังภาพที่ 2.23 และมีการทำงานที่สามารถแบ่งได้เป็น 4 ส่วน ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 2.23 ลักษณะการระบายความร้อนภายในเตาอบแห้งยางแท่ง

ส่วนที่ 1 ส่วนที่ใช้ในการปรับอุณหภูมิของตัวเนื้อยาง เพื่อให้ความชื้นในตัวเนื้อยางแพร่ออกมาที่ผิวของเนื้อยาง ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่จะลดโอกาสการไหม้ของผิวเนื้อยาง

ส่วนที่ 2 ส่วนการอบยาง อุณหภูมิภายในเตาอบจะสูงที่สุดในส่วนนี้ เพื่อให้ยางได้รับความร้อนและแห้งอย่างทั่วถึงทั้งผิวหน้าและภายในเม็ดหรือชิ้นยาง

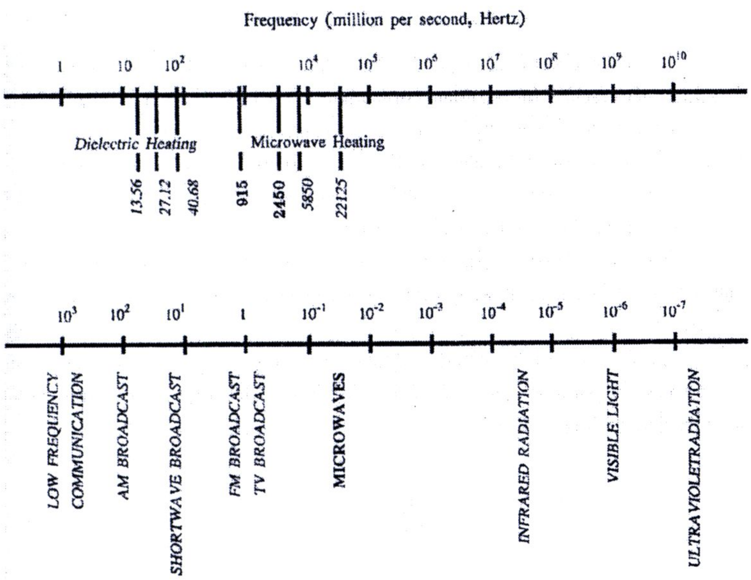
ส่วนที่ 3 ส่วนปรับลดอุณหภูมิ ส่วนนี้มีเพื่อให้เวลาในการถ่ายเทความร้อนให้ทั่วถึงเนื้อยางทุกส่วนจะได้รับความร้อนที่เพียงพอแต่ไม่มีการไหม้เยิ้มที่ผิวหน้า การทำยางให้สุกในขั้นตอนนี้

ส่วนที่ 4 ส่วนดูดกลิ่นและไล่ความชื้นในกระบวนการสุดท้ายก่อนมีการบรรจุหีบห่อ

4. คลื่นไมโครเวฟ

4.1 หลักการพื้นฐานของไมโครเวฟ (Microwave Fundamentals)

คลื่นไมโครเวฟเป็นส่วนหนึ่งของสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังภาพที่ 2.24 ซึ่งมีความถี่อยู่ระหว่าง 300 MHz ถึง 300 GHz โดยคลื่นไมโครเวฟถูกนำมาใช้ในกิจการหลายอย่าง เช่น ส่งสัญญาณโทรทัศน์ สัญญาณเรดาร์ และเตาไมโครเวฟ เป็นต้น สำหรับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ (Microwave heating) เป็นการทำความร้อนในวัสดุโดยใช้คลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ต่าง ๆ โดยความถี่ที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือคลื่นความถี่ 2.45 GHz และ 915 MHz โดยมักใช้ในการประกอบอาหารเป็นส่วนใหญ่



ภาพที่ 2.24 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551)

การแพร่กระจายของคลื่นไมโครเวฟผ่านวัสดุชนิดต่าง ๆ นั้นจะมีลักษณะคล้ายการแพร่กระจายของแสงผ่านวัสดุชนิดต่าง ๆ (รัชดา โสภาคะยัง, 2548) สามารถอธิบายได้ดังนี้

4.1.1 วัสดุโปร่งแสง (Transparent material) เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟมีการส่งถ่ายในลักษณะเดียวกับแสง ดังนั้น เมื่อคลื่นไมโครเวฟกระทบวัสดุที่โปร่งแสง คลื่นไมโครเวฟจึงสามารถทะลุผ่านไปได้ เช่น กระจก แก้ว เป็นต้น

4.1.2 วัสดุทึบที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำ (Opaque material) เมื่อคลื่นไมโครเวฟกระทบวัสดุทึบซึ่งมีความเป็นตัวนำสูง เช่น โลหะ เหล็ก เป็นต้น คลื่นจะถูกสะท้อนกลับโดยที่สนามไฟฟ้าที่ตกกระทบวัสดุจะส่งผลให้อิเลคตรอนอิสระในวัสดุเกิดการเคลื่อนที่

4.1.3 วัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับ (Absorber material) ส่วนมากเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวน เช่น ยาง วัสดุโพลิเมอร์ เป็นต้น เมื่อคลื่นไมโครเวฟส่งผ่านวัสดุประเภทนี้จะมีความสามารถในการดูดซับคลื่นบางส่วนและเกิดการสูญเสียไปเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งความลึกคลื่นสามารถส่งเข้าไปภายในเนื้อวัสดุเพื่อทำให้เกิดความร้อนจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการทะลุทะลวงของวัสดุ

4.1.4 กรณีผสมอนุภาคของสารบางอย่างในวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับ (Absorber Mixed) อนุภาคชนิดนี้มีคุณสมบัติคือเมื่อมีสนามไฟฟ้าตกกระทบอนุภาคจะเกิดความร้อนขึ้น และมีคุณสมบัติเป็นเหมือนแหล่งความร้อนตัวหนึ่ง (Source) ดังนั้นจึงมีการใช้อนุภาคเหล่านี้ผสมในวัสดุพวกฉนวนในกรณีที่ต้องการให้เกิดความร้อนภายในเนื้อวัสดุสูง อนุภาคของสารที่ใช้ผสมในปัจจุบัน เช่น คาร์บอน แกรไฟต์ เป็นต้น

4.2 คุณสมบัติไดอิเล็กทริก

วัสดุที่มีสมบัติเป็นฉนวนที่ถูกกระทำด้วยสนามไฟฟ้า จะสามารถอธิบายสมบัติทางฉนวนไฟฟ้า (Dielectric properties) ของวัสดุโดยพิจารณาจากปฏิกิริยาของวัสดุที่มีต่อการแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งวัสดุฉนวนโดยทั่วไปจะประกอบด้วยอะตอมซึ่งมีกลุ่มอิเลคตรอนอยู่โดยรอบและเป็นโมเลกุลที่มีขั้ว และเมื่อได้รับสนามไฟฟ้าก็จะมีผลให้เกิดการจัดเรียงตัวของประจุ เพื่อให้สอดคล้องกับสนามไฟฟ้าดังที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น ดังนั้นพลังงานจากสนามไฟฟ้าบางส่วนที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของกลุ่มอิเลคตรอนจะสูญเสียไปเนื่องจากแรงเสียดทานของอะตอมต่าง ๆ ซึ่งการจัดเรียงกลับไปมาของกลุ่มอิเลคตรอนเนื่องจากสนามไฟฟ้านี้จะเป็นการเพิ่มการสูญเสียให้มากขึ้นจึงเรียกว่าเป็นการสูญเสียของสนามไฟฟ้า และนำไปสู่การเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานความร้อน ดังนั้นวัสดุฉนวนที่ถูกกระทำด้วยสนามไฟฟ้าจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือส่วนที่แสดงถึงความสามารถในการทำให้พลังงานจากสนามไฟฟ้าที่เก็บสะสมได้เปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งสามารถอธิบายได้ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนซึ่งแสดงถึงค่าความสามารถในการดูดซับ (Permittivity) ของวัสดุ (Metaxas and Meredith, 1988) ดังแสดงในสมการ (12)

$$\varepsilon = \varepsilon' - \varepsilon'' j \tag{12}$$

เมื่อ ε คือ ค่าความสามารถในการดูดซับของวัสดุในรูปจำนวนเชิงซ้อน (Complex permittivity)

ε' คือ ค่าที่แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเก็บพลังงานไฟฟ้า (Dielectric constant)

ε'' คือ ค่าที่แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการทำให้พลังงานไฟฟ้าที่เก็บสะสมได้เปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน หรือเรียกว่าค่าการสูญเสียทางฉนวนไฟฟ้า (Dielectric loss) ซึ่งจะมีค่าเป็นบวกเสมอและมีขนาดเล็กกว่า ε'

j คือ ส่วนประกอบที่สมมุติขึ้น

สำหรับในการใช้งานทั่วไปจะแสดงเทอมเหล่านี้อยู่ในรูปเทอมไร้มิติซึ่งสัมพัทธ์กับค่าความสามารถในการดูดซับในสุญญากาศ (Absolute permittivity)

$$\varepsilon'_r = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon_0} \tag{13}$$

และ

$$\varepsilon''_r = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon_0} \tag{14}$$

เมื่อ ε_0 คือ ค่าความสามารถในการดูดซับในสุญญากาศมีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m

ε_r คือ ค่าความสามารถในการดูดซับสัมพัทธ์ของวัสดุ (Relative permittivity)

วัสดุที่มีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานจากสนามไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนได้ดีนั้น เรียกว่า วัสดุที่มีความสามารถในการสูญเสีย (Lossy materials) ซึ่งพลังงานจากสนามไฟฟ้าที่สูญเสียให้กับวัสดุและเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานความร้อนสามารถแสดงได้ในรูปของค่าการสูญเสียทางฉนวนไฟฟ้า (Dielectric loss) ของวัสดุ ดังสมการ (14)

$$P_{ave} = \omega\varepsilon_0\varepsilon_r'' |E|^2 V \tag{14}$$

เมื่อ P_{ave} คือ กำลังเฉลี่ยที่ถูกแพร่อยู่ในวัสดุ (W)

V คือ ปริมาตรของวัสดุ (m^3)

ω คือ ความถี่เชิงมุม

E คือ พลังสนามไฟฟ้า (V/m)

จากสมการที่ (14) แทนค่าความถี่เชิงมุมด้วย $2\pi f$ และหารด้วยปริมาตรจะสามารถแสดงสมการของอัตราความร้อนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุต่อปริมาตรหนึ่งหน่วยได้คือ

$$q = 2\pi f\varepsilon_0\varepsilon_r'' |E|^2 \tag{15}$$

เมื่อ q คือ อัตราความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุ (W/m^3)

f คือ ความถี่ (Hz)

ดังนั้นเมื่อคลื่นไมโครเวฟตกกระทบวัสดุฉนวนแล้วจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในเนื้อวัสดุ โดยอัตราของความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่าขึ้นอยู่กับขนาดกำลังของสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบ และค่าการสูญเสียทางฉนวนไฟฟ้า (Dielectric loss) รวมถึงความถี่ของคลื่นที่ใช้ด้วยนั่นเอง (รัชดา โสภาคะยัง, 2548)

4.3 การเกิดความร้อนด้วยไมโครเวฟ

เมื่อวัสดุไดอิเล็กทริกดูดซับคลื่นไมโครเวฟ จะทำให้เกิดปฏิสัมพันธ์ (interaction) โดยพลังงานที่ให้เข้าไปจะส่งผลให้อุณหภูมิภายในวัสดุเพิ่มขึ้น การให้พลังงานไมโครเวฟกับวัสดุไดอิเล็กทริกจะมีกลไกการเกิดความร้อน 2 แบบร่วมกันคือ (ดวงทิพย์ เจนถาวร, 2548)

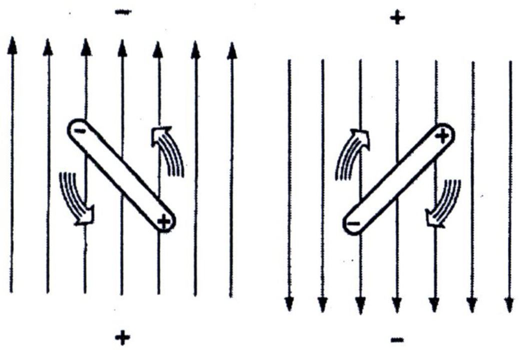
4.3.1 Ionic polarization

เป็นการเกิดความร้อนเนื่องจากผลของการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลายเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ไอออนซึ่งมีประจุไฟฟ้าจะถูกกระตุ้นและเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ ไอออนแต่ละตัวก็เกิดการเสียดสีกันและเกิดพลังงานจลน์ขึ้นแล้วจึงเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานความร้อน เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น พลังงานจลน์ก็จะเพิ่มขึ้น การทำให้น้ำระเหยก็มีมากขึ้น เช่นที่ความถี่ 2450 เมกะเฮิตซ์ โมเลกุลจะกลับตัวในช่วงคลื่นไมโครเวฟบวกเข้ามา 2450 ล้านครั้งต่อวินาที ซึ่งก็คือ การสั่นสะเทือนอย่างรวดเร็วของโมเลกุลของน้ำ 2450 ล้านครั้งต่อ

วินาที ส่งผลให้อุณหภูมิภายและความดันในวัสดุเพิ่มขึ้น เมื่อน้ำมีความดันสูงขึ้นกว่าภายนอกเป็นเหตุให้เกิดการระเหยได้อย่างรวดเร็ว

4.3.2 Dipole rotation

เป็นการเกิดความร้อนกับสารประกอบมีขั้ว (polar) ก็คือ น้ำที่อยู่ภายในวัสดุนั่นเอง ภายใต้สภาวะปกติ โมเลกุลของสารประกอบมีขั้วจะเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ (Randomly oriented) แต่เมื่อเข้าไปอยู่ในสนามแม่เหล็ก สารประกอบที่มีขั้วจะมีการเคลื่อน โดยประจุบวกและลบในโมเลกุลจะหมุนเปลี่ยนทิศทางเพื่อเรียงตัวอย่างมีระเบียบ ตามทิศของสนามไฟฟ้านั้นๆ ดังภาพที่ 2.20 ความร้อนเกิดขึ้นจากผลการหมุนกลับไปกลับมาของโมเลกุลอย่างรวดเร็ว ขึ้นอยู่กับระดับความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ



ภาพที่ 2.25 การหมุนตัวของสารประกอบเนื่องจากไมโครเวฟ (Decareau and Peterson, 1986)

ความร้อนที่เกิดจากไมโครเวฟขึ้นอยู่กับสถานะทางกายภาพของวัสดุ คือความสามารถในการดูดกลืนไมโครเวฟ การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำในสนามไมโครเวฟที่ถูกจำกัด การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในวัสดุ และการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและการกลับสู่สภาวะการเรียงตัวไม่เป็นระเบียบของสารประกอบอย่างรวดเร็ว (Decareau and Peterson, 1986)

4.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Factors Having Effects on Microwave Heating) (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551)

4.4.1 ค่าความชื้น (Moisture content)

ค่าความชื้นอิสระในสสารมีผลอย่างมากต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) เนื่องจากน้ำมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่อุณหภูมิห้องประมาณ 78 เหตุนี้เมื่อมีปริมาณน้ำมากในสสารหรือวัสดุย่อมทำให้ค่าคงที่ไดเล็กตริกเพิ่มขึ้นตามไปด้วยซึ่งโดยปกติจะเป็นสัดส่วนซึ่งกันและกัน และเมื่อวัสดุไดอิเล็กตริกหลายชนิดมาผสมกันเกิดพฤติกรรมที่เกิดขึ้นมีความซับซ้อนและยากต่อการอธิบายได้ แต่อย่างไรก็ตามได้มีกฎหลัก (Rules of Thumb) สำหรับอธิบายปรากฏการณ์นี้ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.4.1.1 ความชื้นสูงขึ้นมีผลทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงขึ้น

4.4.1.2 โดยปกติค่าไดอิเล็กตริกลอส (Dielectric loss) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความชื้นเพิ่มขึ้นแต่อยู่ในช่วงความชื้นประมาณ 20 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ แต่ก็เป็นไปได้ที่จะมีค่าลดลงเมื่อความชื้นเพิ่มสูงขึ้นไปมากกว่านี้ (ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ)

4.4.1.3 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุผสมจะอยู่ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของแต่ละองค์ประกอบ

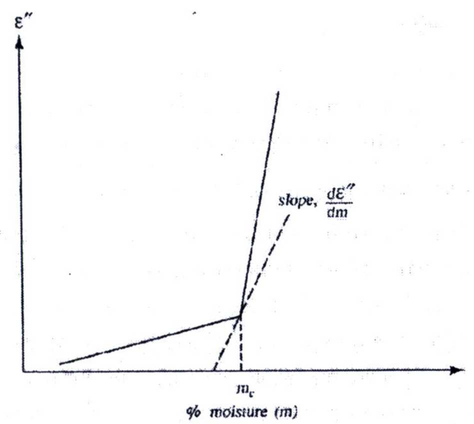
สำหรับวัสดุหลาย ๆ ประเภทซึ่งประกอบด้วยแอลกอฮอล์และตัวทำละลายอินทรีย์จะมีสมบัติไดอิเล็กตริกที่เหมาะสำหรับการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟและไดอิเล็กตริก ดังนั้นจึงมีพฤติกรรมคล้ายกับน้ำ ดังแสดงค่าสมบัติตามประเภทวัสดุในการทำความร้อน ดังเช่นในตารางที่ 2.4

ด้วยเหตุที่การอบแห้งเกี่ยวข้องกับการไล่น้ำหรือสารละลายออกจากวัสดุ สิ่งที่เราทราบกันดีว่าถ้าน้ำหรือความชื้นถูกขับออกมาก็จะทำให้ค่าไดอิเล็กตริกลอสแฟกเตอร์มีค่าลดลง โดยในหลาย ๆ กรณีที่น้ำถูกไล่ออกทำให้การทำความร้อนของตัววัสดุเองมีขีดกำจัดและกลายเป็นวัสดุที่สามารถทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทะลุผ่านของตัววัสดุไปได้ที่ระดับความชื้นต่ำ โดยภาพที่ 2.25 ได้แสดงการแปรเปลี่ยนของค่าไดอิเล็กตริกลอสแฟกเตอร์กับค่าความชื้น ซึ่งน้ำที่อยู่ในวัสดุในหลายสภาวะ ยกตัวอย่างเช่น น้ำที่ถูกตรึงกับโครงสร้างวัสดุ (Bound Water) และน้ำอิสระ (Free Water) ซึ่งอยู่ในรูพรุน (Pore) จากรูปที่ 2.25 นี้เราจะสนใจตรงค่าความชัน ($d\varepsilon''/dm$) ของเส้นโค้ง โดยที่ค่าความชื้นต่ำกว่าค่าความชื้นวิกฤต (critical moisture content; m_c) จะพิจารณาน้ำดังกล่าวเป็นน้ำที่ถูกตรึงกับโครงสร้าง (มีค่าความชื้นอยู่ระหว่าง 10 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์) และจุดที่ค่าความชื้นสูงกว่าค่าความชื้นวิกฤติก็จะพิจารณาน้ำให้เป็นน้ำอิสระ (ข้อสังเกตคือ ค่าไดอิเล็กตริกลอสแฟกเตอร์ของน้ำถูกตรึงกับโครงกสร้างจะมีค่าต่ำเพราะน้ำประเภทนี้ไม่สามารถเคลื่อนที่โดยอิสระเมื่อมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามากระทำ ยกตัวอย่างในกรณีของน้ำแข็งสามารถวิเคราะห์ค่าไดอิเล็กตริกลอสแฟกเตอร์ประมาณ 0.003 ในขณะที่น้ำธรรมดามีค่าประมาณ 12)

ตารางที่ 2.4 ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกตามประเภทวัสดุในการทำความร้อน

วัสดุที่สามารถทำความร้อนได้ดี	วัสดุที่สามารถทำความร้อนได้ต่ำ
น้ำ (Water)	ไฮโดรคาร์บอน
กรดแอนไฮไดร์ (Acid Anhydrides)	ฮาโลเจน ไฮโดรคาร์บอน (Halogenated Hydrocarbons)
แอลกอฮอล์ (Alcohols)	อัลคาลิเฮไลด์ เช่น เกลือ (Alkali Halides, e.g., Salt)
แอลดิไฮด์ (Aldehydes)	ออกไซด์อนินทรีย์ เช่น อะลูมิเนียม (Inorganic Oxides, e.g., Sulfur)
คีโตน (Ketones)	ธาตุบางชนิด เช่น ซัลเฟอร์ (Some Elements, e.g., Sulfur)
เอไมด์ (Amides)	โบรอนไนโตรด์ (Boron Nitride)
เอมี (Amines)	ไมก้า (Mica)
ไซยาไนด์ (Cyanides)	
โปรตีน (Porteins)	
เฟอร์ไรต์ (Ferrites)	
เฟอร์โรอิเล็กทริค (Ferroelectrics)	
สารละลายไอออนิค (Ionic Solutions)	

ที่มา: ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551



ภาพที่ 2.26 ค่าความแปรเปลี่ยนของค่าไดอิเล็กตริกลอสแฟกเตอ (Dielectric Loss Factor, ε'') กับค่าความชื้น (m) (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551)

4.4.2 ความหนาแน่น (Density)

โดยปกติค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในวัสดุจะมีค่าลดลงเมื่อความหนาแน่นของวัสดุลดลงซึ่งจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่ลดลงตามไปด้วย

4.4.3 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิมีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในลักษณะที่ซับซ้อนโดยอาจมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามอุณหภูมิแต่อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปวัสดุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งก็จะแสดงว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและไดอิเล็กตริกลอสแฟกเตอร์จะมีค่าต่ำ และในช่วงที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็งจะไม่สามารถชี้ชัดได้ถึงแนวโน้มที่จะเกิดขึ้น ด้วยเหตุนี้ทั้งค่าความชื้นและอุณหภูมิมีความสำคัญต่อค่าสมบัติไดอิเล็กตริกและกระบวนการ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่ต้องเข้าใจถึงอันตรกิริยาของคลื่นและวัสดุไดอิเล็กตริกอย่างท่องแท้ ยกตัวอย่างเช่น ไม้ที่มีค่าความชื้นระดับต่ำระดับหนึ่ง พบว่าค่าไดอิเล็กตริกลอสแฟกเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิจึงมีผลทำให้เกิดปรากฏการณ์เทอร์มอลรันอะเวย์ซึ่งเป็นสาเหตุให้ไม้เกิดการไหม้ได้หากถูกอบแห้งอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน

4.4.4 ความถี่ (Frequency)

ความถี่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำมีผลต่อค่าสมบัติอิเล็กตริกด้วยเช่นกัน แต่อย่างไรก็ตามด้วยเหตุที่กระบวนการทำความร้อนในงานอตุสาหกรรมถูกจำกัดด้วยความถี่ที่คงที่อยู่แล้วตามมาตรฐาน ISM ทำให้วิศวกรถูกจำกัดการใช้งานในเรื่องของความถี่นี้

4.4.5 การนำไฟฟ้า (Conductivity)

ค่าการนำไฟฟ้าคือ ความสามารถของวัสดุในการนำกระแสไฟฟ้าโดยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออน โดยทั้งอิเล็กตรอนและไอออนสามารถที่จะเป็นผลกระทบหลักในการทำความร้อนและการอบแห้งเนื่องจากผลของน้ำที่ถูกเคลื่อนย้ายออกสู่ภายนอกทำให้ความเข้มข้นของไอออนภายในที่สูงขึ้น

4.4.6 ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity)

ค่าการนำความร้อนมีบทบาทที่ลดลงในกระบวนการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริกเมื่อเทียบกับกระบวนการทำความร้อนด้วยวิธีแบบเก่า อันเนื่องมาจากพลังงานไมโครเวฟส่งผลทำให้ความเร็วในการทำความร้อนมีค่าสูงกว่าจนค่าการนำความร้อนมีผลกระทบกับระบบไม่มากนักอย่างไรก็ตาม มีบางกรณีที่ค่าการนำความร้อนมีบทบาทหลัก ยกตัวอย่างเช่น เมื่อความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับความลึกของวัสดุที่ต้องการทำความร้อนขึ้น ดังนั้น การนำความร้อนจึงเป็นตัวกำหนดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนภายในเนื้อวัสดุ ณ ตำแหน่งที่คลื่นทะลุเข้าไปไม่ถึง

4.4.7 ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat)

โดยปกตินักวิจัยและวิศวกรหรือผู้ออกแบบที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟและไดอิเล็กตริกจะตัดตัวแปรนี้ทิ้งไป และมุ่งพิจารณาที่ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกเป็นสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามโดยความเป็นจริง ค่าความจุความร้อนจำเพาะเป็นตัวแปรสำคัญซึ่งเป็นสาเหตุให้วัสดุมีความร้อนเพิ่มขึ้นได้มากขึ้นตามธรรมชาติ ดังนั้นการพิจารณาทั้งค่าไดอิเล็กตริกและค่าความจุความร้อนจำเพาะจึงนับว่าเป็นสิ่งที่สำคัญเป็นอย่างยิ่ง

4.4.8 ค่าความลึกในการทะลุทะลวง (Penetration depth)

ปกติตัวแปรนี้มีการเรียกกันในหลายชื่อ เช่น ความลึกในการทะลุทะลวง (penetration depth) หรือ ความลึกเชิงกำลัง (power penetration depth) เป็นต้น แต่ไม่ว่าจะเรียกชื่อใดก็ตามก็จะมีความหมายทางกายภาพเดียวกัน แม้ว่าค่าความลึกในการทะลุทะลวงจะไม่ได้เป็นคุณสมบัติของวัสดุแต่ก็ส่งผลต่อคุณสมบัติหลาย ๆ อย่างของวัสดุและค่านี้ยังมีความสำคัญมากที่สุดสำหรับการวิเคราะห์เชิงลึกของกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ ด้วยเหตุที่การทะลุทะลวงของพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งหากคลื่นไม่สามารถทะลุทะลวงผ่านวัสดุไปได้ การทำความร้อนจะถูกจำกัดอยู่เพียงแค่ที่ผิวของวัสดุเท่านั้น สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อค่าความลึกของการทะลุทะลวงของสนามคือ ความยาวคลื่น (wavelength, λ) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant, ε') และค่าไดอิเล็กตริกลอสแฟกเตอร์ (Dielectric loss factor) ดังแสดงสัมพันธ์ตามสมการที่ 16

$$D_p = \frac{\lambda_0 \sqrt{\varepsilon'}}{2\pi\varepsilon''} \tag{16}$$

เมื่อ

D_p คือ ระดับความลึกในแนวตั้งฉากกับผิวตกกระทบซึ่งแสดงความสามารถในการทะลุทะลวงได้ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจนระดับพลังงานของคลื่นลดลงเหลือร้อยละ 37 (1/e)

λ_0 คือ ความยาวคลื่นในฟรีสเปซหรือที่ว่าง (Free Space) (m)

จากสมการที่ (16) จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า วัสดุที่มีค่าไดอิเล็กตริกลอสแฟกเตอร์สูงจะมีค่าความลึกในการทะลุทะลวงของคลื่นได้ต่ำเมื่อเทียบกับวัสดุที่มีค่าไดอิเล็กตริกลอสแฟกเตอร์ต่ำกว่า และยังพบว่าความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรืออีกนัยหนึ่งคือความถี่มีผลต่อความลึกในการทะลุทะลวงของคลื่นด้วยเช่นกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ความยาวคลื่นกับค่าความลึกในการทะลุทะลวงของคลื่นที่ระดับความถี่ต่าง ๆ

ความถี่ของคลื่น	**ความยาวคลื่น (ในหน่วย)**		**ความลึกในการทะลุทะลวง (ในหน่วย)**	
(MHz)	**เมตร (meter)**	**ฟุต (feet)**	**เมตร (meter)**	**ฟุต (feet)**
5.0	60.00	196.83	23.90	78.41
13.56	22.10	72.51	8.80	28.87
27.12	11.10	36.42	4.40	14.44
40.0	7.50	24.61	3.00	9.84
915	0.328	1.076	0.130	0.426
2450	0.122	0.400	0.049	0.161

ที่มา: ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551

4.5 ข้อได้เปรียบของระบบคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริก (advantages of microwave and dielectric systems)

4.5.1 ข้อได้เปรียบของระบบการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริก (Advantages of microwave and dielectric heating)

ทำความร้อนและการอบแห้งด้วยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟไดอิเล็กตริกมีความแตกต่างไปจากระบบดั้งเดิมที่ใช้กันอยู่ โดยระบบดั้งเดิมที่ใช้จะเกิดความล่าช้าในการเคลื่อนที่ของความร้อนจากผิวของวัสดุเข้าสู่ภายในซึ่งถูกกำหนดจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างภายนอกที่ร้อนกับภายในที่เย็นกว่า ในขณะที่การทำความร้อนและการอบแห้งด้วยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริกจะมีผลในเชิงการทำความร้อนทั่วถึงทั้งก้อน (bulk heating) ซึ่งเกิดขึ้นจากอันตรกิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและวัสดุตลอดเนื้อวัสดุ โดยในทางทฤษฎีการทำความร้อนจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใดและรวดเร็วแม้ว่าในทางปฏิบัติอาจจะไม่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเหมือนทางทฤษฎีก็ตาม แต่อย่างไรก็ตามความเร็วของการทำความร้อนเป็นข้อได้เปรียบที่สำคัญประการหนึ่งสำหรับการออกแบบเชิงอุตสาหกรรมซึ่งมีความเป็นไปได้ในการใช้เวลาเพียงช่วงวินาทีหรือนาทีในบางกระบวนการผลิต ในขณะที่วิธีการดั้งเดิมใช้เวลาเป็นนาที ชั่วโมงหรืออุตสาหกรรมที่มีความเร็วสูงที่สุดซึ่งเป็นที่ทราบกันอยู่คือ การให้ความร้อนพลาสติกบางชนิดที่สามารถทำได้ในอัตรา 30,000 $^{\circ}$C/s ในทางตรงกันข้าม หากต้องการทำความร้อนที่ระดับต่ำมาก สามารถทำได้ที่อัตรา 1 $^{\circ}$C ต่อ 100

สำหรับตัวแปรที่กำหนดความเร็วของการทำความร้อนได้แก่ ความจุความร้อนจำเพาะ สมบัติไดอิเล็กตริก ลักษณะรูปร่าง ประสิทธิภาพของการเกิดคัปปลิ้งของคลื่นภายในคาวิตี้ (coupling efficiency) พลังงานที่ถูกสร้างขึ้นภายในวัสดุและกำลังไมโครเวฟและไดอิเล็กตริกที่ป้อนเข้าไปรวมถึงตัวแปรอื่นที่มีคุณสมบัติเทียบเท่ากันพบว่า ความเร็วในการทำความร้อนจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเมื่อกำลังที่ป้อนเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า

กล่าวโดยสรุป ข้อได้เปรียบของการทำความร้อนคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริกคือ

4.5.1.1 ใช้เวลาน้อย (high speed) ประหยัดเนื้อที่และแรงงาน ลดจำนวนวัสดุที่เสียเนื่องจากอุปกรณ์ทำงานส่วนใหญ่ไม่เคลื่อนที่ (stationary part)

4.5.1.2 การทะลุทะลวงของพลังงาน (energy penetration) ไมโครเวฟสามารถทะลุทะลวงเข้าไปกำเนิดพลังงานความร้อนภายในวัสดุทำให้มีความร้อนกระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งก้อนวัสดุดังรูปที่ 2.26 ในขณะที่การให้ความร้อนแบบอื่นจะให้ความร้อนที่ผิววัสดุซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายที่ผิวด้านนอกเพราะมีอุณหภูมิสูงเกินไปในขณะที่ภายในเนื้อวัสดุยังได้รับความร้อนไม่ทั่วถึงทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่ได้คุณภาพตามที่ต้องการ นอกจากนี้ยังใช้เวลามากเพราะมีข้อจำกัดทางด้านความสามารถในการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟจึงทำให้คุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ดีกว่า

(a) พลังงานไมโครเวฟ (b) พลังงานแบบดั้งเดิม (ให้ความร้อนที่ผิว)

ภาพที่ 2.27 การกระจายเกิดความร้อนภายในวัสดุด้วยพลังงานต่างๆ (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551)

4.5.1.3 ความสามารถในการเลือกที่จะซับพลังงานไมโครเวฟภายในวัสดุ (Selective Energy Absorption) วัสดุบางชนิดสามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ทันทีแต่วัสดุบางชนิดไม่สามารถดูดซับพลังงานได้ คุณสมบัติเหล่านี้เป็นข้อได้เปรียบอีกประการหนึ่งของกระบวนการไมโครเวฟ ตัวอย่างเช่น สามารถให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์ที่บรรจุหีบห่อได้โดยไม่ทำลายหีบห่อนั้น

4.5.1.4 การควบคุมระบบสามารถกระทำได้ดีและรวดเร็วกว่า โดยธรรมชาติของการปิดเปิดสามารถเปลี่ยนแปลงระดับการทำความร้อนอย่างทันทีทันใด เพียงแค่ทำการควบคุมพลังงานในช่วงขาออกของแหล่งกำเนิดทำให้ระบบมีประสิทธิภาพและมีความแน่นอนในการควบคุมการทำความร้อน อุปกรณ์ให้ความร้อนแบบเก่าเช่น เตาอบลมร้อนหรือไฟฟ้า ต้องใช้เวลามากในการปรับอุณหภูมิ แต่เตาไมโครเวฟสามารถปรับอุณหภูมิด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งใช้เวลาน้อยมาก (ภายในเสี้ยววินาที)

4.5.1.5 ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ดีขึ้นเมื่อเทียบกับระบบการทำความร้อนแบบดั้งเดิม เนื่องจากที่ระดับความร้อนที่สูงจะไม่เกิดขึ้นที่ผิวของวัสดุ เหมือนที่เกิดขึ้นกับระบบการทำความร้อนแบบดั้งเดิม

4.5.1.6 สามารถทำให้เกิดผลกระทบทางกายภาพและเคมีเท่าที่ต้องการได้ โดยปกติปฏิกิริยาทางเคมีและกายภาพจะถูกเร่งให้เกิดขึ้นจากความร้อนที่สร้างด้วยวิธีนี้ ซึ่งได้แก่ ปฏิกิริยาการพองตัว (Puffing) การอบแห้ง (Drying) การหลอมละลาย (melting) การทำให้โปรตีนเปลี่ยนสภาพไป (protein denaturation) การที่แป้งเกิดเจลาทิไนเซชัน (starch gelatinization) หรือปฏิกิริยาอื่น ๆ ที่คล้ายกัน

4.5.1.7 มีประสิทธิภาพสูง (high efficiency) การทำความร้อนด้วยไมโครเวฟใช้พลังงานน้อยกว่าการทำความร้อนแบบเก่ามากเมื่อเทียบกับการเกิดปริมาณความร้อนภายในวัสดุที่เท่ากัน (การทำความร้อนแบบเก่ามีประสิทธิภาพโดยรวมประมาณ 10-30 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การทำความร้อนด้วยไมโครเวฟมีประสิทธิภาพโดยรวมประมาณ 60-70 เปอร์เซ็นต์) โดยในการทำความร้อนด้วยวิธีนี้ พลังงานจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกแปลงโดยตรงเพื่อทำให้วัสดุเกิดความร้อนขึ้น โดยไม่เกิดการสูญเสียไปกับอากาศ ผนังของเตา สายพานลำเลียงหรือส่วนอื่น ๆ ของระบบ อันจะนำสู่การประหยัดพลังงาน

4.5.1.8 ไมโครเวฟเป็นกระบวนการสะอาด (clean processing) กระบวนการทางไมโครเวฟไม่สร้างมลภาวะต่างจากกระบวนการให้ความร้อนแบบอื่นที่ใช้เชื้อเพลิงในการเผาไหม้ ทำให้มีก๊าซไอเสียออกมาด้วย

4.5.2 ข้อได้เปรียบของระบบการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริก (advantages of microwave and dielectric drying)

สำหรับกลไกของการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริกมีความแตกต่างไปจากวิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิม โดยวิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิมจะเห็นว่า มวลความชื้นสามารถเคลื่อนที่ออกสู่ภายนอกในช่วงเวลาที่เริ่มต้นและน้ำที่คงเหลืออยู่จะค่อยแพร่กระจายไปยังผิว ถึงแม้ว่าศักยภาพของการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการทำความร้อนจะอยู่ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิซึ่งเป็นผลให้มีการถ่ายเทพลังงานไปยังภายในเนื้อวัสดุ ในขณะที่ศักยภาพของการเคลื่อนย้ายมวลความชื้นจะอยู่ที่ความแตกต่างของความเข้มข้นของมวลภายในที่อยู่ในสภาวะเปียกและภายนอกที่อยู่ในสภาวะแห้งกว่า เช่นนี้แล้วกระบวนการไล่ความชื้นก็จะช้าอันเนื่องจากข้อจำกัดของอัตราการแพร่จึงต้องการอุณหภูมิภายนอกที่สูงเพื่อทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิ

ด้วยกลไกการเกิดความร้อนจากภายในของระบบที่ใช้คลื่นไมโคเวฟและไดอิเล็กตริกพบว่าการถ่ายเทมวลความชื้นในช่วงต้นจะเกิดขึ้นจากความแตกต่างของความดันรวมที่ก่อตัวขึ้น ทั้งนี้เพราะการเกิดไออย่างรวดเร็วภายในวัสดุ โดยส่วนมากความชื้นซึ่งถูกทำให้เป็นไอก่อนที่จะออกจากวัสดุ ซึ่งหากวัสดุมีความชื้นเริ่มต้นสูงจะมีผลให้ความดันภายในเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วอันมีผลต่อเนื่องให้ของเหลวเคลื่อนที่ออกจากวัสดุภายใต้อิทธิพลของความแตกต่างของความดันรวม นอกจากนี้ กรณีที่วัสดุมีค่าความชื้นเริ่มต้นที่สูงทำให้ความแตกต่างของความดันสูงขึ้นซึ่งมีผลอย่างมากต่อมวลความชื้นที่เคลื่อนที่ออกไปอย่างรวดเร็วกว่าปกติ ด้วยเหตุนี้จึงเรียกชนิดของปรากฏการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์ปั๊มของเหลว (pumping effect) หรือการที่มีแรงซึ่งโดยปกติจะเป็นแรงดันไอกระทำทำให้ของเหลวเคลื่อนที่ขึ้นสู่ผิวหน้าโดยตรงโดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงสถานะ และปรากฏการณ์ดังกล่าวจะนำไปสู่การแห้งตัวอย่างรวดเร็วโดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มการให้ความร้อนเข้าไปอีก ซึ่งกรณีนี้อาจเป็นเหตุให้เกิดการแข็งตัวของผิวหรือผิวมีอุณหภูมิที่สูงจนเกินไป

ประเด็นความสนใจที่มีอยู่มากทุกวันนี้คือ ศักยภาพของระบบทำให้การใช้พลังงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งอาจพิจารณาความเร็วของการอบแห้ง การคัปปลิ้งของพลังงานภายในคาวิตี้เป็นต้น โดยระบบอาจมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นได้เมื่อมีการผสมผสานร่วมกันระหว่างกระบวนการที่ใช้คลื่นไมโครเวฟกับอื่น ๆ (hybrid system)

สำหรับข้อควรระวังซึ่งควรอธิบายให้ชัดเจนคือ ระบบเหล่านี้สามารถทำความร้อนและอบแห้งอย่างรวดเร็วแต่อัตราที่รวดเร็วดังกล่าวจะต้องไม่เป็นการทำลายคุณสมบัติของวัสดุ ซึ่งต้องระมัดระวังไม่ทำให้เกิดความร้อนอย่างรวดเร็วจนวัสดุไหม้เกรียมหรือมีความเสียหายอื่น ๆ อันเนื่องมาจากไอน้ำหรือไอไม่สามารถเคลื่อนที่ออกมาได้รวดเร็วเพียงพอจนทำให้เกิดแรงดันสะสมขึ้นภายในแล้วเกิดการแตกร้าวของชิ้นงานหรือการระเบิดขึ้นได้

โดยปกติการอบแห้งหรือทำความร้อนด้วยคลื่นไดอิเล็กตริกจะผสมผสานร่วมกับระบบอากาศร้อน (hot air system) โดยเฉพาะกับระบบที่ใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งพลังงานด้วยเหตุผลทั้งในเชิงประสิทธิภาพและความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์ โดยอากาศร้อนมีประสิทธิภาพในการไล่น้ำอิสระ (free water) บริเวณผิวหรือใกล้กับผิวออกได้ดี ในขณะที่ปรากฏการณ์ปั๊มของเหลวเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้สามารถขับน้ำอิสระที่มีอยู่ภายในออกสู่ภายนอกได้เป็นอย่างดี เช่นเดียวกันกับน้ำที่ถูกยึดตรึงกับโครงสร้างและด้วยผลของการเสริมกันทั้งสองกลไกนี้จึงมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดข้อได้เปรียบและลดต้นทุนที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งเมื่อเทียบกับการใช้คลื่นไมโครเวฟหรือไดอิเล็กตริกเพียงอย่างใดอย่างหนึ่งซึ่งมีราคาแพงทั้งในส่วนของอุปกรณ์และการเดินระบบ

ในปัจจุบันมี 3 วิธี ที่มีการผสมผสานกันระหว่างระบบที่ใช้ไมโครเวฟหรือไดอิเล็กตริกกับระบบดั้งเดิมดังแสดงดังภาพที่ 2.27

4.5.2.1 การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟในกระบวนการช่วงต้น (Preheating)

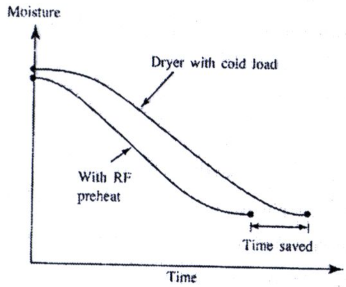
โดยการใส่พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านไมโครเวฟหรือไดอิเล็กตริกในตอนต้นของกระบวนการอบแห้ง ซึ่งเป็นผลทำให้ภายในวัสดุเกิดความร้อนจนถึงอุณหภูมิของการระเหย ด้วยเหตุนี้มวลความชื้นจึงเคลื่อนที่มายังบริเวณผิววัสดุอย่างทันทีทันใด และต่อเนื่องด้วยการเดินเครื่องระบบการอบแห้งแบบดั้งเดิมภายใต้สภาวะที่ควบคุม ดังแสดงรูปในที่ 2.27 (a) ซึ่งเส้นโค้งของการอบแห้งด้วยคลื่นมีความชันมากกว่าการอบแห้งแบบดั้งเดิมและนอกจากนี้ยังใช้เวลาในการอบแห้งที่สั้นลง

4.5.2.2 การเร่งการอบแห้ง (Booster Drying)

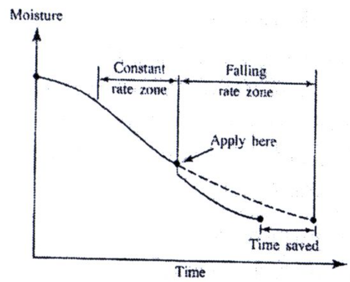
เมื่ออัตราการอบแห้งหรืออัตราของการสูญเสียความชื้นเริ่มลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.27 (b) ผลที่เกิดขึ้นคือ ผิวของวัสดุแห้งและมวลความชื้นเคลื่อนที่เข้ามารวมกันที่บริเวณกึ่งกลางวัสดุ ต่อจากนั้นจึงทำการใส่พลังงานไมโครเวฟหรือไดอิเล็กตริกเข้าไป โดยพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้เกิดความร้อนและแรงดันไอขึ้นภายในช่วยไล่ความชื้นให้เคลื่อนที่ไปยังผิวหน้าของวัสดุได้สะดวกขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากความชันในกราฟการอบแห้งที่มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

4.5.2.3 จุดสิ้นสุดของการอบแห้ง (Finish drying)

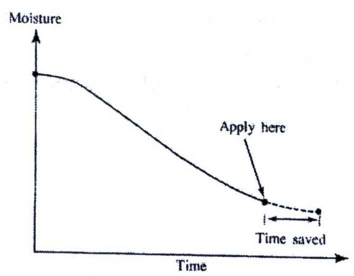
ด้วยเหตุที่ประสิทธิภาพของระบบการอบแห้งแบบดั้งเดิมที่ลดลงมากเมื่อปริมาณความชื้นในวัสดุลดลงที่เวลาใกล้ช่วงจุดสิ้นสุดของกระบวนการอบแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.27 (c) ดังนั้นหากมีการใส่พลังงานไมโครเวฟหรือไดอิเล็กตริกที่ต่อเนื่องกับขั้นตอนการอบแห้งแบบดั้งเดิมทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการอบแห้งโดยรวมได้ และด้วยวิธีนี้จึงทำให้ปริมาณงานต่อเวลาที่ได้เพิ่มขึ้นและยิ่งมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อระบบมีการควบคุมความชื้นสุดท้ายเพื่อหลีกเลี่ยงการอบแห้งที่ใช้เวลามากจนเกินไป กล่าวในภาพรวมด้วยวิธีการนี้ทำให้ช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งทั้งหมดและลดการใช้พลังงานเมื่อเทียบกับระบบที่ใช้วิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิม



(a) การให้ความร้อนช่วงต้น (Preheating)



(b) การเร่งการอบแห้ง (Booster Drying)



(c) จุดสิ้นสุดของการอบแห้ง (Finish Drying)

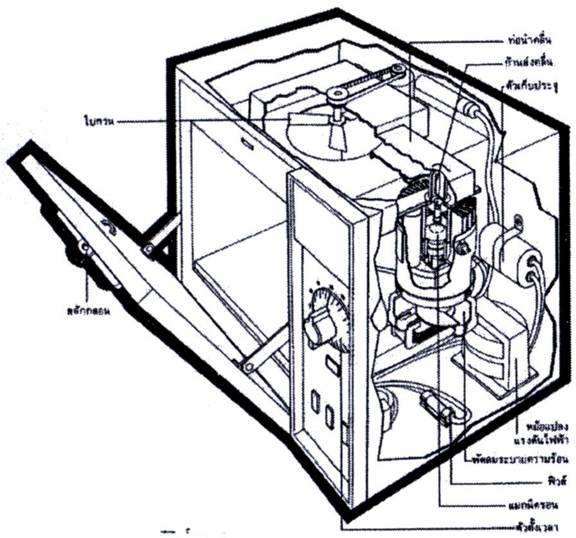
ภาพที่ 2.28 ตัวอย่างเส้นโค้งความสัมพันธ์ของระบบการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริก (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551)

4.6 หลักการทำงานและส่วนประกอบของเตาไมโครเวฟ

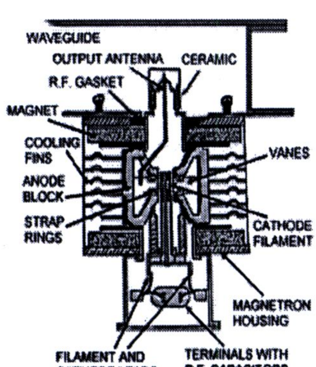
หลักการทำงานของเตาไมโครเวฟมีขั้นตอนดังนี้คือ เริ่มจากชุดจ่ายกำลังไฟฟ้าส่งกำลังให้แก่หลอดแมกนีตรอนเพื่อให้หลอดแมกนีตรอนผลิตคลื่นไมโครเวฟออกมาตามกำลังที่ชุดกำลังควบคุมไว้ ซึ่งคลื่นไมโครเวฟนี้จะถูกส่งไปตามท่อนำคลื่นเพื่อไปยังห้องอุ่น จากนั้นคลื่นไมโครเวฟจะถูกใบพัดกวนคลื่นกวน (ในกรณีที่ติดใบพัดกวนคลื่น) ให้คลื่นกระจายตัวไปอย่างสม่ำเสมอและตกกระทบสู่ชิ้นงานซึ่งวางอยู่บนจานหมุนต่อไป สำหรับการควบคุมอุณหภูมิในห้องอุ่นให้อยู่ในภาวะที่พอดีนั้นจะใช้โลหะคู่ขวางวางไว้ภายในเตาอบไมโครเวฟซึ่งโลหะนี้จะขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน และเมื่อขยายตัวไปถึงจุด ๆ หนึ่งที่เพียงพอแล้วก็จะมีสวิทซ์อัตโนมัติตัดไม่ให้ไฟเข้าเตาอบไมโครเวฟได้เลยทันที องค์ประกอบหลักของเตาไมโครเวฟโดยทั่วไปแสดงดังภาพที่ 2.28 องค์ประกอบหลักของเตาไมโครเวฟโดยทั่วไปซึ่งประกอบด้วยส่วนที่สำคัญดังนี้คือ

4.6.1 หลอดแมกนีตรอน (Magnetron)

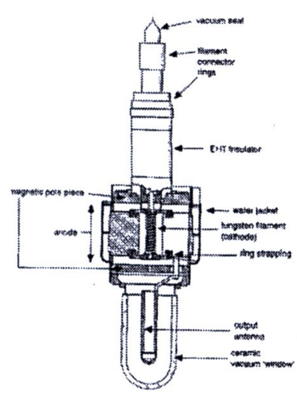
หลอดแมกนีตรอนถือว่าเป็นหัวใจของเตาไมโครเวฟเพราะเป็นตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ เพื่อนำไปใช้ในการทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในเนื้อวัสดุ เนื่องจากคุณสมบัติที่ดีหลายประการคือ มีขนาดเล็กแต่ให้ประสิทธิภาพและกำลังงานสูง มีเสถียรภาพในการทำงานดี ปัจจุบันแมกนีตรอนโดยทั่วไปจะสร้างความถี่ที่ 2,450±50 เมกะเฮิตซ์ เมื่อโหลดมีการดึงกระแสสูงหรือกระแสต่ำมากตัวแมกนีตรอนยังคงสร้างความถี่ค่อนข้างคงที่ ข้อดีของแมกนีตรอนอีกข้อคือ สร้างง่าย ราคาถูก อันเนื่องมาจากอุปกรณ์ภายในน้อยมาก (สญชัย พลตื้อ, 2546) สำหรับหลอดแมกนีตรอนที่ใช้งานอุตสาหกรรมเพื่อทำความร้อนให้แก่วัสดุนั้นโดยทั่วไปจะใช้ที่ความถี่ 2,450 และ 915 เมกะเฮิตซ์ ซึ่งมีลักษณะดังภาพที่ 2.29



ภาพที่ 2.29 องค์ประกอบหลักของเตาไมโครเวฟโดยทั่วไป



Magnetron 2,450 MHz



Magnetron 915 MHz

ภาพที่ 2.30 ลักษณะของหลอดแมกนีตรอนความถี่ 2,450 และ 915 เมกะเฮิตซ์ (Meredith, 1998)

โดยทั่วไปแล้วสามารถสรุปข้อสังเกตเกี่ยวกับหลอดแมกนีตรอนได้ดังนี้คือ

4.6.1.1 หลอดแมกนีตรอนความถี่ 2.45 GHz จะมีประสิทธิภาพประมาณ 50 - 72 % ในขณะหลอดที่ความถี่ 915 MHz จะมีประสิทธิภาพประมาณ 80 – 87 %

4.6.1.2 หลอดที่มีความถี่ต่ำจะมีความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นได้ดีกว่า

4.6.1.3 การที่จะทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิมีความสม่ำเสมอนั้นมักจะใช้หลอดแมกนีตรอนหลาย ๆ หลอดร่วมกัน

4.6.1.4 หลอดแมกนีตรอนความถี่ 2.45 GHz จะมีช่วงกำลังอยู่ระหว่าง 1 kW ถึง 30 kW และที่ความถี่ 915 MHz จะมีช่วงกำลังอยู่ระหว่าง 5 kW ถึง 100 kW โดยจะไม่มีขนาดกำลังต่ำกว่า 5 kW

4.6.1.5 การใช้หลอดแมกนีตรอนที่ความถี่ต่างกันจะทำให้กลไกการส่งถ่ายพลังงานซึ่งทำให้เกิดความร้อนภายในเนื้อวัสดุนั้นแตกต่างกัน อาจส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาทางความร้อนหรือคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้

4.6.1.6 การออกแบบให้ลักษณะและขนาดของห้องอุ่นมีความซับซ้อนมากขึ้นจะส่งผลดีกว่าการใช้หลอดแมกนีตรอนหลาย ๆ หลอด

4.6.1.7 ขนาดของห้องอุ่นซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าจะทำให้เกิดการสูญเสียทางความร้อน และจะทำให้ประสิทธิภาพของไมโครเวฟลดลง แต่ก็ยังจำเป็นต้องใช้ห้องอุ่นขนาดใหญ่ เมื่อมีการใช้หลอดแมกนีตรอนหลาย ๆ หลอดร่วมกัน

4.6.1.8 การติดตั้งหลอดแมกนีตรอนหลายหลอดจะลดอายุการใช้งานของหลอดแมกนีตรอนให้สั้นลงเนื่องจากอาจเกิดการคลับปลิ้ง (Coupling) ของหลอดที่อยู่ตรงข้ามกัน

4.6.2 ชุดจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power supply)

โดยรวมหมายถึงชุดหม้อแปลงในการปรับเปลี่ยนแรงดันทางไฟฟ้าเพื่อให้ได้ขนาดกำลังทางไฟฟ้าตามที่ต้องการ โดยชุดกำลังไฟฟ้าจะเป็นตัวกำหนดขนาดของกำลังที่ให้แก่หลอดแมกนีตรอนเพื่อให้หลอดแมกนีตรอนสามารถกำเนิดคลื่นไมโครเวฟให้ได้กำลังตามที่ต้องการ สำหรับชุดกำเนิดกำลังไมโครเวฟ (Microwave power generators) ที่ได้สร้างขึ้นสำหรับให้ความร้อนแก่ชิ้นงานโดยทั่วไปจะมีขนาดกำลังจาก 300 W ถึง 100 kW โดยจะมีระบบควบคุมการทำงานของหลอดแมกนีตรอนอยู่ด้วย ซึ่งสามารถแยกออกจากกันได้กรณีที่ต้องการแยกเฉพาะหลอดแมกนีตรอนออกไป

4.6.3 ท่อนำคลื่น (Waveguide)

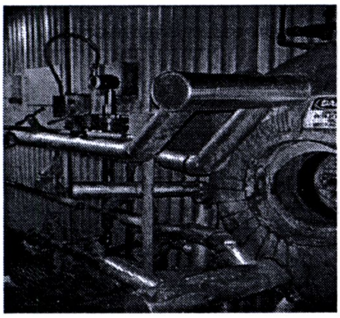
เป็นส่วนที่ลำเลียงคลื่นไมโครเวฟที่ส่งออกจากหลอดแมกนีตรอนไปยังห้องอบ (Cavity Oven) โดยท่อนำคลื่นที่ใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไปจะเป็นแบบหน้าตัดเป็นมุมฉากหรือแบบหน้าตัดกลม ดังภาพที่ 2.30 แสดงการต่อท่อนำคลื่นเข้ากับไมโครเวฟในโรงงานอุตสาหกรรม

4.6.4 ชุดจานหมุนชิ้นงาน (Turntable and baseplate)

เป็นส่วนในการหมุนชิ้นงานขณะรับคลื่นไมโครเวฟเพื่อให้ชิ้นงานมีการรับคลื่นอย่างสม่ำเสมอและหลีกเลี่ยงการเกิดจุดร้อน (Hot Spot) ขึ้นภายในชิ้นงาน โดยชุดจานหมุนประกอบด้วยชุดมอเตอร์และอินเวอร์สเตอร์สำหรับควบคุมความเร็วรอบของการหมุน

4.6.5 ใบพัดกวนคลื่น (Stirrer blade)

ใช้สำหรับกระจายคลื่นที่มาจากท่อนำคลื่นเพื่อให้คลื่นกระจายตัวเข้ากระทบกับผิวของวัสดุได้อย่างสม่ำเสมอ



ภาพที่ 2.31 การตัดท่อนำคลื่นเข้ากับไมโครเวฟในโรงงานอุตสาหกรรม

4.6.6 อุปกรณ์เสริมทั่วไปที่ใช้ร่วมกับเตาไมโครเวฟ เช่น มิเตอร์วัดขนาดกำลังไฟฟ้า เครื่องตรวจวัดการรั่วของคลื่น ในการสร้างอุปกรณ์ไมโครเวฟจะต้องคำนึงถึงความปลอดภัยเป็นอันดับแรก โดยระดับที่สามารถใช้งานได้คือคลื่นที่แผ่ออกมาจากเตาไมโครเวฟมีค่าไม่เกิน 10 mW/cm^2 ที่ระยะ 50 mm จากเตาไมโครเวฟ

5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

5.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการอบแห้งยางแท่ง

Cousin et al. (1993) ทำการอบแห้งยางธรรมชาติ โดยทำการวิเคราะห์กลไกการอบแห้งยางแท่งแบบชั้นหนาด้วยอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.2 เมตรต่อวินาที ในการทดลองได้เก็บข้อมูลพื้นฐาน ได้แก่ ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ อุณหภูมิและความชื้นของยางเมื่อเวลาอบแห้งผ่านไป ผลการทดลองพบว่า มีช่วงการอบแห้ง 3 ช่วง คือ ช่วงแรกชั้นยางอิ่มตัวด้วยน้ำ อุณหภูมิของอากาศและเม็ดยางจะเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียก ช่วงที่ 2 เป็นการอบแห้งแบบอัตราคงที่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และปริมาณน้ำในยางลดลงอย่างรวดเร็ว ช่วงที่ 3 จะเป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง และแบบจำลองที่สร้างขึ้นอธิบายผลการทดลองได้ดีพอสมควร

Naon et al. (1995) ศึกษาการอบแห้งในระดับขยายส่วน โดยใช้เครื่องอบแห้งขนาด 3 X 1 X 2 เมตร ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิลมร้อน 120 – 150 องศาเวลเวียส เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งยางแท่ง ผลการทดลองพบว่าอัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เวลาการอบแห้ง และค่าความชื้นสัมพัทธ์ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของวัสดุและอุณหภูมิของอากาศ และเมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากการอบแห้งแบบชั้นบางจึงนำค่าที่ได้ไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายเปรียบเทียบเครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม พบว่าให้ผลใกล้เคียงกันทั้งด้านความชื้น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง

สุภวรรณ ฎิระวณิชย์กุล และคณะ (2548) ทำการทดลองอบแห้งยางแท่ง 2 รูปแบบได้แก่ รูปแบบที่หนึ่งเป็นการอบแห้งต่อเนื่องโดยใช้อุณหภูมิ 108 - 130 องศาเซลเซียส และรูปแบบที่สองเป็นการให้อุณหภูมิ 2 ช่วง คือ ช่วงแรกอุณหภูมิสูงที่ 130 องศาเซลเซียส และช่วงสองอุณหภูมิต่ำที่ 105 - 110 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่า รูปแบบที่หนึ่งไม่เหมาะสมต่อการอบแห้ง เนื่องจากผลผลิตที่ได้ไม่ผ่านคุณภาพมาตรฐานยางแท่ง ส่วนรูปแบบที่สอง ความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก จากนั้นค่อยๆ ลดลงอย่างช้าๆ ในช่วงที่สอง และผลผลิตผ่านคุณภาพมาตรฐานยางแท่ง STR 20

ปิยะพงศ์ ม่วงมณี และ วีรยุทธ ลิ่มสกุล (2549) ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทำนายการอบแห้งยางแท่งด้วยลมร้อน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองและพบว่า การอบแห้งแบบ 2 ช่วงอุณหภูมิมีความเหมาะสมมากกว่าการอบแห้งแบบใช้อุณหภูมิคงที่ ทั้งในด้านความสิ้นเปลืองพลังงาน และคุณภาพตามมาตรฐานยางแท่ง โดยในการทดลอง มีความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนน้อยที่สุดคือ 22.88 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหย

คำนึง วาทโยธา และ เฉลิมขวัญ อริยะวงศ์ (2550) ทำการศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งยางแท่งด้วยลมร้อนและไมโครเวฟ โดยการอบแห้งด้วยลมร้อนด้วยอุณหภูมิ 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส พบว่าการลดลงของความชื้นในช่วง 30 นาทีแรกเป็นไปอย่างรวดเร็ว และหลังจากนั้นความชื้นลดลงอย่างช้าๆ ส่วนการอบแห้งยางแท่งด้วยเตาไมโครเวฟที่ระดับกำลัง 800 วัตต์ โดยการเปิด - ปิดให้พลังงานเป็นระยะๆ พบว่าความชื้นลดลงเร็วมากในช่วง 20 นาที ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าลมร้อน จึงทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งลดลงมาก

คำนึง วาทโยธา และ จาริณี จงปลื้มปิติ (2550) ทำการศึกษาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของแผ่นยางธรรมชาติที่มีความชื้น 26.8 – 37.6 เปอร์เซ็นต์มาตรเปียก วัดโดยวิธีโพรบแบบแกนร่วมปลายเปิด ณ ความถี่ 2 ค่า พบว่า ที่ความถี่ 915 เมกะเฮิรตซ์ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่าระหว่าง 6.39 – 14.32 และค่าแฟกเตอร์การสูญเสียมีค่าระหว่าง 0.10 - 2.23 ส่วนที่ความถี่ 2450 เมกะเฮิรตซ์ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่าระหว่าง 7.29 – 14.17 และค่าแฟกเตอร์การสูญเสียมีค่าระหว่าง 0.48 – 2.32 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าแฟกเตอร์สูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นกับความชื้น โดยที่ความถี่ 2450 เมกะเฮิรตซ์ มีค่าทั้งสองมากกว่าที่ความถี่ 915 เมกะเฮิรตซ์ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าแฟกเตอร์การสูญเสียทั้งสองความถี่มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับความชื้น

จาริณี จงปลื้มปิติ และ คำนึง วาทโยธา (2551) ทำการศึกษาการอบแห้งยางแท่งด้วยการควบคุมอุณหภูมิภายในโดยการเปิดให้กำลังไมโครเวฟเพื่อเพิ่มอุณหภูมิยางสลับกับการการเป่าลมเพื่อลดอุณหภูมิยาง พบว่าการเปิดให้กำลังไมโครเวฟที่ระดับกำลัง 800 วัตต์ สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในยางแท่งให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิเฉลี่ย 100 องศาเวลเซียสได้ มีผลต่อคุณลักษณะต่อการอบแห้ง คือ เมื่อน้ำหนักมากขึ้น เวลาในการอบแห้งนานขึ้น ขณะเดียวกันน้ำหนักมากขึ้น ส่งผลให้ความสิ้นเปลืองพลังงานลดลง ยางที่อบแห้งด้วยวิธีนี้ผ่านคุณภาพมาตรฐานยางแท่ง STR 20

5.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ไมโครเวฟ

สญชัย พลตื้อ (2546) ศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งมะม่วงแช่อิ่มด้วยเทคนิคสเปาเต็ดเบดร่วมกับไมโครเวฟ อุณหภูมิลมร้อนประมาณ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วลมที่ทางเข้าด้านล่างห้องอบ 6.1 เมตรต่อวินาที

อัตราการหมุนเวียนอากาศ 80 เปอร์เซ็นต์ และให้พลังงานที่ระดับ 300 450 และ 600 วัตต์ พบว่าเมื่อระดับพลังงานสูงขึ้นทำให้ลดเวลาการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลง และค่าที่เหมาะสมของการให้พลังงานคือ 600 วัตต์ 5 นาที โดยใช้เวลาอบแห้ง 4 ชั่วโมง ความสามารถในการอบแห้ง 0.42 กิโลกรัมมะม่วงแห้งต่อชั่วโมง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 10.48 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหย

โสภา แคนสี (2546) ศึกษาเพื่อปรับปรุงคุณลักษณะของกล้วยด้วยไมโครเวฟดัดแปลง โดยการอบแห้งเป็นช่วง ๆ พบว่าผลิตภัณฑ์สุดท้ายของการอบแบบ 9 ชั่วโมง – พัก 15 ชั่วโมง มีสีผิวและเนื้อสัมผัสใกล้เคียงกับการอบกล้วยด้วยลมร้อน และการอบนี้มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเป็น 4.61 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหย ใช้เวลาอบนาน 3 วัน (28 ชั่วโมง) ซึ่งสามารถลดเวลา พลังงานจำเพาะและต้นทุนพลังงานในการอบได้ เมื่อเปรียบเทียบกับการอบกล้วยด้วยลมร้อนจากแก๊ส