

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การอบแห้งใบชาโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่มีความซับซ้อน ซึ่งอาศัยองค์ความรู้หลาย ๆ ด้านในการวิเคราะห์พฤติกรรม เช่น ความรู้ทางด้านการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูน ความรู้ทางด้านพลังงานไมโครเวฟ รวมไปถึงความรู้ทางด้านคุณภาพของใบชา ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่าง ๆ ที่มีความเกี่ยวข้องกับงานวิจัยฉบับนี้

3.1 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูน

ในส่วนนี้อธิบายเกี่ยวกับกลไกของกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายในวัสดุพูน ความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกและปรากฏการณ์พื้นฐานนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูนโดยใช้กรรมวิธีการให้ความร้อนแบบไมโครเวฟต่อไป

3.1.1 กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูน

เพื่อให้เกิดความเข้าใจอย่างแท้จริงในกระบวนการอบแห้ง การวิเคราะห์เชิงลึกของกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในระหว่างกระบวนการอบแห้งวัสดุพูนถือเป็นสิ่งสำคัญ กระบวนการอบแห้งวัสดุจะเกิดกระบวนการพื้นฐานสองกระบวนการพร้อมกัน (ผดุงศักดิ์รัตน์เดโช [3-1]) ซึ่งได้แก่

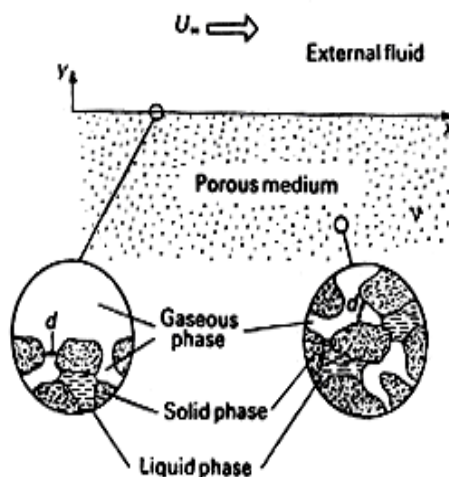
1. กระบวนการถ่ายเทความร้อนเป็นกระบวนการที่ถ่ายเทความร้อนจากสิ่งแวดล้อม (เช่น ลมร้อนและไอน้ำ เป็นต้น) ไปยังเนื้อวัสดุ เพื่อทำการเคลื่อนย้ายความชื้นและระเหย ความชื้นที่มีอยู่
2. กระบวนการถ่ายเทมวลสารเป็นกระบวนการที่ขับเคลื่อนของไหล (สถานะของเหลวและก๊าซ) ภายในเนื้อวัสดุหรือที่ผิววัสดุ

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูน เช่น อัตราอบแห้ง การกระจายตัวของอุณหภูมิและความชื้นภายในเนื้อวัสดุ เป็นปัจจัยที่ขึ้นกับเวลา

เป็นที่ทราบกันดีว่าการอบแห้งวัสดุพูนจะเกิดกระบวนการถ่ายเทความร้อนและความชื้นหรือมวลสาร (ประกอบไปด้วยของเหลว ไอ้ น้ำ และอากาศ) ขึ้นพร้อมกัน แต่การวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งเชิงทฤษฎีทำได้ยากมากเนื่องจากสมการที่ใช้วิเคราะห์หลายชุดมีลักษณะไม่เชิงเส้นและเงื่อนไขขอบเขตมีความซับซ้อนกว่าปกติ ดังนั้นการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีจึงไม่เป็นที่ยอมรับ แต่ในปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีสมรรถนะสูงสามารถใช้แก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ที่มีเงื่อนไขซับซ้อนได้ ดังนั้นทฤษฎีต่าง ๆ ทางด้านการถ่ายเทความร้อนและมวลสารจึงมีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว

3.1.2 รูปแบบโครงสร้าง กลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลสารสำหรับกระบวนการอบแห้งในวัสดุพูน

หัวข้อที่แล้วกล่าวถึงกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลสารสำหรับกระบวนการอบแห้งในวัสดุพูนแบบคาพิลลารี ซึ่งอยู่บนสมมติฐานที่ว่าอิทธิพลจากความดันคาพิลลารีเป็นกลไกหลักในการเคลื่อนย้ายมวลความชื้นออกจากโครงสร้างวัสดุพูน แต่ในทางปฏิบัติวัสดุพูนมีโครงสร้างซับซ้อนและมีกลไกหลายอย่างที่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนย้ายมวลความชื้น



ภาพที่ 3.1

ไดอะแกรมของกระบวนการอบแห้งวัสดุพูน (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช [3-1])

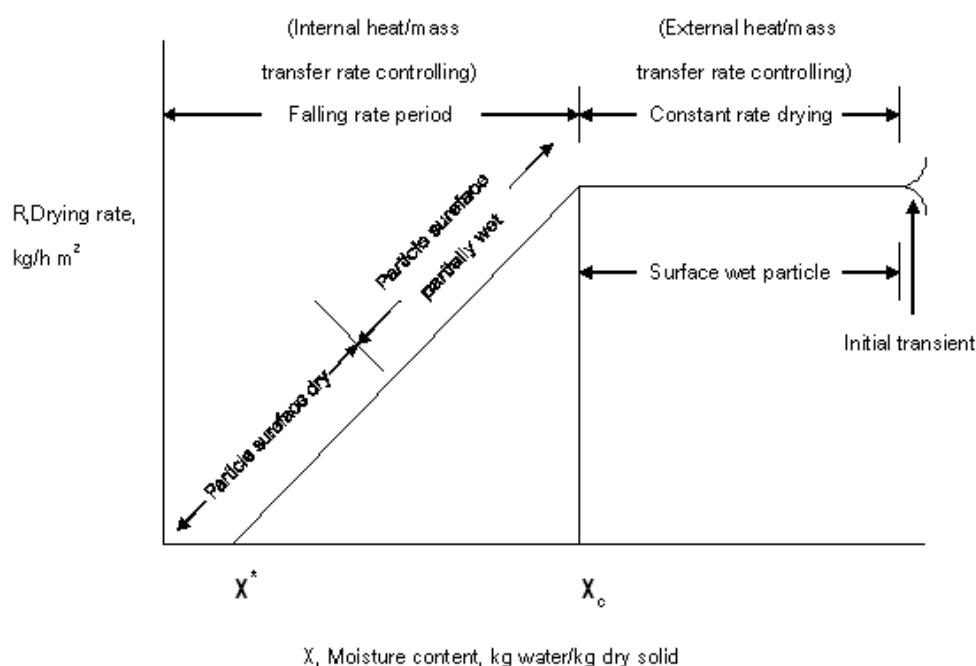
จากภาพที่ 3.1 เมื่อวัสดุพูนเปียกขึ้นผ่านกระบวนการอบแห้งภายใต้สภาวะภายนอกคงที่ กล่าวคือ อุณหภูมิ ความชื้นและความเร็วอากาศถูกรักษาให้คงที่ตลอดช่วงการ

ทดสอบ การเคลื่อนตัวของความชื้นจากภายในสู่ผิวหน้าภายใต้อิทธิพลของกลไกต่าง ๆ จะปรากฏขึ้น โดยที่กลไกที่ควบคุมการเคลื่อนตัวของความชื้น (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช [3-2]) สามารถสรุปได้ดังนี้

1. แรงดันคาพิลลารี
2. การแพร่กระจายตัว (Diffusion) เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสสาร
3. การเปลี่ยนสถานะของสสาร กล่าวคือเกิดการระเหยและการกลั่นตัว (Evaporation-Condensation Mechanism) ภายในรูพรุน
4. การแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุ (Surface Diffusion)
5. การเคลื่อนตัวของความชื้นเนื่องจากความแตกต่างของความดันรวม
6. การเคลื่อนตัวของความชื้นเนื่องจากอิทธิพลของแรงโน้มถ่วง
7. การเคลื่อนตัวหาความชื้นเนื่องจากการกระจายตัวเชิงอุณหภูมิ (Thermo-Diffusion)

โดยทั่วไปกลไกที่กล่าวมาข้างต้นมีความสำคัญต่อกระบวนการการอบแห้งวัสดุพูนที่คาบเวลาต่างกัน ซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถแยกกลไกแต่ละชนิดออกจากกันได้ชัดเจน เนื่องจากความซับซ้อนของกระบวนการอบแห้ง ทำได้เพียงพิจารณาเฉพาะกลไกหลักที่สำคัญกว่าเท่านั้น การพิจารณาว่ากลไกใดมีความสำคัญต่อกระบวนการอบแห้งนั้นขึ้นอยู่กับชนิดและโครงสร้างของวัสดุรวมไปถึงวิธีการให้พลังงานความร้อน โดยทั่วไปข้อมูลจากการทดลองในห้องปฏิบัติการมักนำมาใช้ประกอบการวิเคราะห์กลไกหลักด้วย

จากภาพที่ 3.2 กระบวนการอบแห้งสามารถแบ่งออกเป็นสองคาบเวลาใหญ่ ๆ คือ คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งคงที่ (Constant Rate Period) อัตราการระเหยของไอน้ำที่ผิวหน้าจะเท่ากับอัตราการเคลื่อนตัวของน้ำ (ของเหลว) ภายในวัสดุพูนที่เติมเต็มผิวหน้า ช่วงปลายของคาบเวลานี้ความชื้นภายในวัสดุเข้าใกล้ค่าความชื้นวิกฤติ (Critical Moisture Content, x_c) โดยค่าความชื้นวิกฤติขึ้นอยู่กับชนิดของโครงสร้างและการเกาะตัวของความชื้นในวัสดุ เมื่อความชื้นในวัสดุมีค่าน้อยกว่าค่าความชื้นวิกฤติ กระบวนการอบแห้งจะเข้าสู่คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลง (Falling Rate Period) โดยปกติคาบเวลานี้กินระยะเวลามากกว่าคาบเวลาที่อัตราการอบแห้งคงที่ เมื่ออัตราการอบแห้งมีค่าลดลงเข้าใกล้ศูนย์จะมีความชื้นคงเหลืออยู่ค่าหนึ่ง (มีค่าน้อยมาก) ภายใต้สภาวะการอบแห้ง ค่าความชื้นนี้เราเรียกว่าค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content) อย่างไรก็ตามจุดสำคัญในภาพที่ 3.2 สามารถอธิบายได้เป็นข้อย่อย ๆ ดังนี้



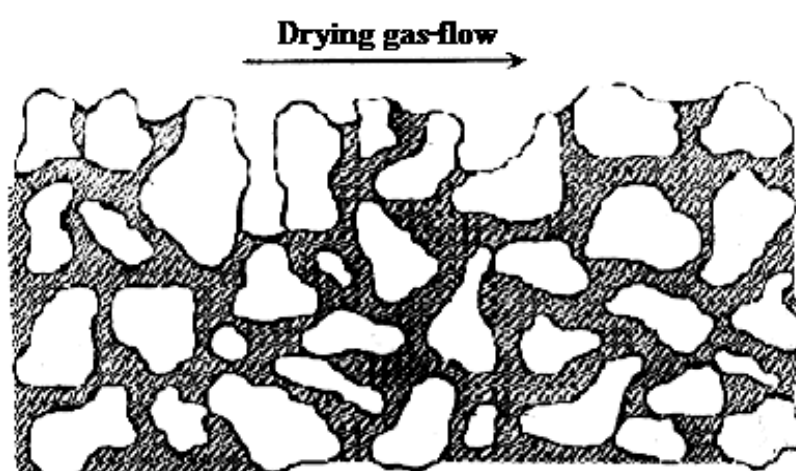
ภาพที่ 3.2

คาบเวลาของกระบวนการอบแห้งและกลไกที่ควบคุมการถ่ายเทมวลสาร (Mujumdar [3-3])

1. คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งคงที่ (Constant Rate Period) โดยปกติเมื่อวัสดุมีความชื้นสูงมาก ๆ อัตราการอบแห้งจะถูกควบคุมโดยอิทธิพลภายนอกซึ่งมีผลต่อวัสดุที่นำมาอบแห้ง เช่น อุณหภูมิ ความเร็วของก๊าซ ความดันรวม และความดันย่อยของไอน้ำ หากอิทธิพลภายนอกถูกควบคุมให้คงที่ อัตราการระเหยของไอน้ำที่ผิวหน้าจะเท่ากับอัตราการเคลื่อนตัวของน้ำภายในวัสดุพูนที่มาเติมเต็มที่ผิวหน้าทำให้มีฟิล์มของเหลวปกคลุมที่ผิวหน้าวัสดุตลอดเวลา ตัวแปรที่ควบคุมกระบวนการอบแห้งในคาบเวลานี้ คือ พลังงานความร้อนที่ป้อนให้กับตัววัสดุหรือการถ่ายเทมวลสารออกจากผิววัสดุ

การถ่ายเทมวลสารในช่วงนี้เกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุ (Surface Diffusion) เป็นหลัก เป็นที่ทราบกันดีว่าหากความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำซึ่งถ่ายเทมาจากลมร้อน อุณหภูมิผิวหน้าของวัสดุสามารถประมาณได้ด้วยอุณหภูมิกระเปาะเปียก การคำนวณอัตราการอบแห้งในคาบเวลานี้สามารถทำได้ง่าย โดยปกติการถ่ายเทความร้อนโดยการพา (Force Convection) จะใช้คาบเวลาดังกล่าวในการวิเคราะห์

2. คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลง (Falling Rate Period) เมื่อกระบวนการอบแห้งดำเนินต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ จนความชื้นเข้าสู่ความชื้นวิกฤติ (ค่าความชื้นวิกฤตินี้ขึ้นกับความสามารถในการเคลื่อนตัวของความชื้นภายในโครงสร้างวัสดุเป็นสำคัญ) ความชื้นในวัสดุที่เคลื่อนตัวไปยังผิวหน้าภายใต้อิทธิพลการแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุเริ่มมีไม่เพียงพอต่อปริมาณความชื้นที่ระเหยออกไป ทำให้ฟิล์มของเหลวที่บริเวณผิวหน้าวัสดุเกิดการแยกตัวและเกิดขึ้นความแห้งในบางจุดดังแสดงในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3

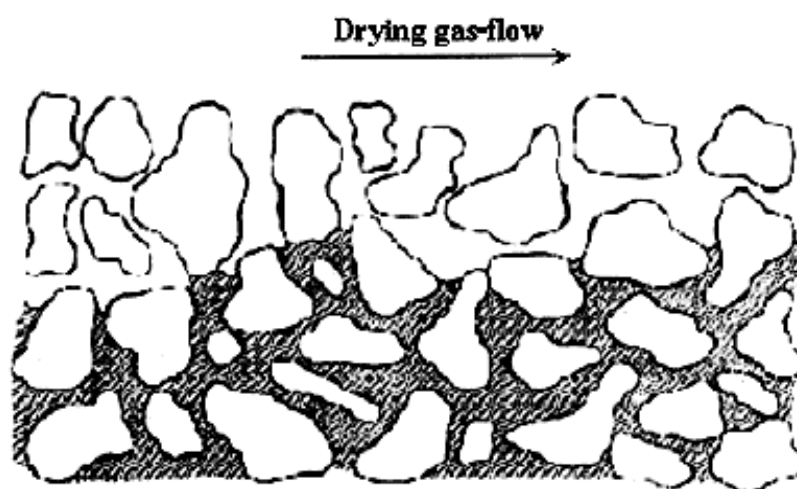
ปรากฏการณ์ที่อัตราการอบแห้งลดลงระยะแรก (First Falling Rate Period)

(ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช [3-1])

หลังจากกระบวนการอบแห้งเข้าสู่ค่าความชื้นวิกฤติ กระบวนการอบแห้งก็เข้าสู่คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลงอย่างสมบูรณ์ ในช่วงต้นของในคาบเวลานี้อัตราการอบแห้งโดยรวมเริ่มลดลง บางครั้งเรียกช่วงเวลานี้ว่าคาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลงระยะแรก (First Falling Rate Period) เมื่อกระบวนการอบแห้งดำเนินต่อไปจนถึงขั้นของความแห้งก่อดำเนินอย่างสมบูรณ์ที่ผิวของวัสดุและเคลื่อนตัวเข้าสู่เนื้อวัสดุดังแสดงในภาพที่ 3.4 ช่วงนี้เรียกว่าคาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลงระยะที่สอง (Second Falling Rate Period) การระเหยความชื้นในช่วงนี้เกิดขึ้นที่บริเวณผิวรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุแห้ง (ความชื้นในวัสดุบริเวณนี้จะระเหยออกหมด) กับชั้นวัสดุเปียก (เนื้อวัสดุบริเวณที่ยังมีความชื้นอยู่) ซึ่งเรียกว่าผิวการระเหย (Evaporation Front) หรือผิวการอบแห้ง (Drying Front) หรือขอบเขตของการเคลื่อนที่ (Moving Boundary) โดยที่ผิวการ

ระเหยจะเคลื่อนที่ตลอดคาบเวลาของการอบแห้ง การระเหยตัวของความชื้นที่ผิวของการระเหย ณ ตำแหน่งต่าง ๆ สามารถคำนวณได้จากกฎของเคลวิน (Kelvin's Law)

ในคาบเวลานี้อัตราการเคลื่อนตัวของมวลสารหรือความชื้นภายในเป็นตัวแปรสำคัญในการควบคุมกระบวนการ คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลงนี้อาจสังเกตได้จากการลดลงอย่างรวดเร็วของอัตราการถ่ายเทมวลสารและความดันไอที่ผิววัสดุ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ คาบเวลานี้สังเกตได้ยากจากการทดลองเนื่องจากความซับซ้อนของปรากฏการณ์

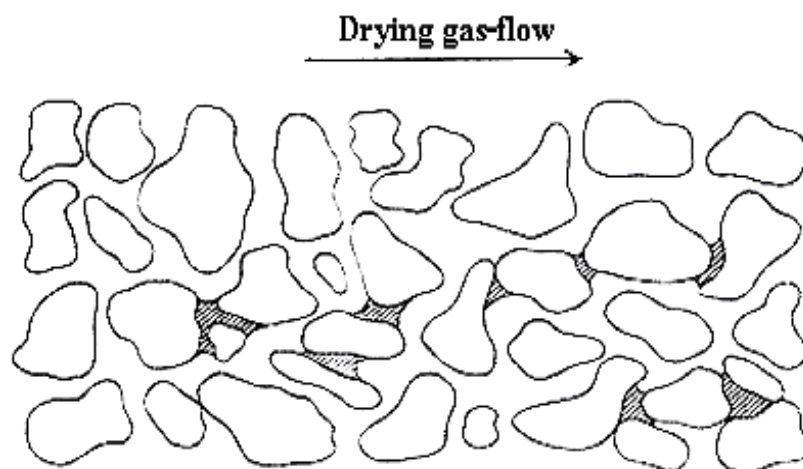


ภาพที่ 3.4

ปรากฏการณ์ที่อัตราการอบแห้งลดลงระยะที่สอง (Second Falling Rate Period)

(ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช [3-1])

ช่วงปลายของคาบเวลาอัตราการอบแห้งลดลงระยะที่สองสังเกตได้ว่า ความชื้นภายในวัสดุเหลืออยู่เพียงเล็กน้อยและกระจายตัวในช่องว่างหรือรูพรุนขนาดเล็ก ดังแสดงในภาพที่ 3.5 ช่วงสุดท้ายของกระบวนการนี้ อัตราการอบแห้งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งในกรณีนี้ ความชื้นที่เหลืออยู่เรียกว่าค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content)



ภาพที่ 3.5

ปรากฏการณ์ที่อัตราการอบแห้งขั้นสุดท้าย (End Stage of Drying)

(ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช [3-1])

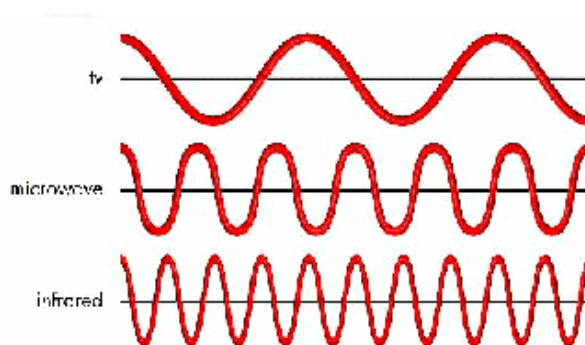
3.2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนโดยใช้พลังงานไมโครเวฟ

ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนโดยใช้พลังงานไมโครเวฟเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการศึกษาพฤติกรรมของการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ ไม่ว่าจะเป็นกระบวนการทำความร้อน กระบวนการอบแห้ง กระบวนการฆ่าเชื้อ เป็นต้น เนื่องจากเป็นหัวใจหลักของงานวิจัย ถ้าทำการวิจัยโดยขาดความรู้พื้นฐาน งานวิจัยดังกล่าวจะขาดความน่าเชื่อถือ และไม่มีคุณภาพ และหากงานวิจัยเน้นการศึกษาในเชิงทฤษฎี ความรู้พื้นฐานเชิงทฤษฎีทางด้านไมโครเวฟยิ่งมีความจำเป็น เพราะหากขาดองค์ความรู้พื้นฐานดังกล่าวก็ไม่สามารถทำนายพฤติกรรมทางความร้อนที่เกิดจากพลังงานไมโครเวฟได้ ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟมีดังนี้

3.2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไมโครเวฟ

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่คลื่นของไมโครเวฟ (0.3 - 300 GHz หรือในช่วงความยาวคลื่น 30 cm - 0.3 mm ดังภาพที่ 3.6) มาใช้เป็นแหล่งพลังงานให้ความร้อนในทางอุตสาหกรรมดังแสดงในเอกสารอ้างอิง ([3-4]-[3-10]) การให้ความร้อนแก่วัตถุด้วยไมโครเวฟเป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจและไม่เหมือนวิธีการให้ความร้อนแบบเก่า

ที่ให้ความร้อนจากภายนอกผ่านผิววัตถุรังสีไมโครเวฟมีความลึกในการทะลุทะลวงเท่ากับ 2 cm ในระหว่างที่รังสีไมโครเวฟผ่านเข้าไปในน้ำ พลังงานของไมโครเวฟจะลดลงโดยจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนภายในน้ำ ซึ่งในการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟนั้นดีกว่าการให้ความร้อนแบบเก่า คือการใช้อากาศร้อนหรือไอน้ำ ซึ่งจะมีปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพของผลผลิตภัณฑ์เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของการกระจายอุณหภูมิและความชื้นภายในผลิตภัณฑ์นั้น



ภาพที่ 3.6

ลักษณะของคลื่นไมโครเวฟ (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช [3-2])

3.2.2 ข้อดีของไมโครเวฟ (Advantages of Microwave Heating)

1. ร้อนขึ้นทันที (Rapid Heating) ไมโครเวฟจะเข้าสู่วัสดุและทำให้ร้อนขึ้นทันที โดยไม่รวม เวลาการนำความร้อนในเนื้อวัสดุ
2. มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว (Rapid Response) เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟมีสมบัติของความเร็วคล้ายความเร็วแสง (3×10^8 m/s)
3. ให้ความร้อนอย่างสม่ำเสมอ (Uniform Heating) ทุกส่วนของวัสดุถูกทำให้ร้อน จึงมีความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวและด้านในน้อยกว่าการให้ความร้อนแบบธรรมดา มาก จึงเรียกว่าเป็นการทำความร้อนอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ
4. การเลือกวัสดุในการรับความร้อน (Selective Heating) วัสดุบางอย่างสามารถดูดซับพลังงานจากไมโครเวฟได้ทันที แต่วัสดุบางอย่างก็ไม่สามารถดูดซับพลังงาน ยกตัวอย่างเช่น น้ำในแก้วเซรามิกส์ น้ำจะถูกทำให้ร้อนก่อนเพราะดูดซับคลื่นได้ดีกว่าแก้วเซรามิกส์

5. ประสิทธิภาพสูง (High Efficiency) เนื่องจากวัสดุถูกทำให้ร้อนด้วยตัวเอง จึงไม่มีการสูญเสียต่อสภาวะแวดล้อมภายนอก

6. เป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการทำงานและเป็นเทคโนโลยีสะอาดมากกว่า การให้ความร้อนโดยวิธีอื่น เนื่องจากกระบวนการมีชิ้นส่วนการทำงานที่มีลักษณะเคลื่อนไหวน้อย ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงและมีชิ้นส่วนประกอบที่มีขนาดเล็ก ทำให้ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อยและไม่มีการปล่อยควันไอเสียออกมาในระหว่างกระบวนการทำให้ไม่มีปัญหากับสิ่งแวดล้อม

3.2.3 การแบ่งการแผ่รังสีของคลื่นตามความถี่

ในการแบ่งการแผ่รังสีของคลื่นตามความถี่นั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 ข้อคือ

1. การแผ่รังสีแบบไม่ทำให้อะตอมภายในสสารแตกตัว (Nonionizing Rays) ได้แก่ คลื่นวิทยุ ทีวี ไมโครเวฟ เรดาร์ อินฟราเรด และแสงที่ตามองไม่เห็น ซึ่งคลื่นเหล่านี้เป็นอันตรายแก่สิ่งมีชีวิตน้อย

2. การแผ่รังสีแบบทำให้อะตอมภายในสสารแตกตัว (Ionizing Rays) ได้แก่ แสงอัลตราไวโอเลต รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา ซึ่งคลื่นเหล่านี้ทำอันตรายกับสิ่งมีชีวิตได้ถ้าได้รับรังสี ในปริมาณมาก เช่น การฉายรังสีแกมมาเพื่อกำจัดเซลล์มะเร็งจะทำให้เซลล์ของสิ่งมีชีวิตเปลี่ยนแปลงหรือตายไป

3.2.4 คุณลักษณะของคลื่นไมโครเวฟ

1. การสะท้อนของคลื่น

คลื่นไมโครเวฟเมื่อตกกระทบโลหะจะเกิดการสะท้อนออกและคลื่นไมโครเวฟไม่สามารถทะลุผ่านโลหะไปได้

2. การทะลุผ่านของคลื่น

คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านวัสดุบางชนิดได้ คล้ายช่องกระจกหน้าต่างที่ยอมให้แสงธรรมดาส่องผ่านตัวมันได้ วัสดุที่คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านได้ คือ แก้ว โดยทั่ว ๆ ไป (ยกเว้นแก้วเจียระไนที่มีส่วนผสมของตะกั่วซึ่งเป็นโลหะ) แก้วทนความร้อน เครื่องถ้วยเคลือบ กระดาษ และพลาสติก เป็นต้น ดังนั้นเมื่อนำวัสดุเหล่านี้มาทำเป็นภาชนะบรรจุอาหารตัวภาชนะจะไม่ร้อน จะร้อนเฉพาะอาหาร

3. การดูดกลืนของคลื่น

คลื่นไมโครเวฟสามารถดูดกลืนได้โดยน้ำในอาหาร หรือวัสดุที่มีส่วนผสมของน้ำอยู่ทำให้กำลังของคลื่นลดลงไป ซึ่งกำลังที่ถูกกลืนไว้จะเปลี่ยนสภาพทำให้

วัสดุร้อนขึ้น วัสดุที่ดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟนอกจากจะเป็นอาหาร น้ำ หรือวัสดุที่มีส่วนประกอบของน้ำอยู่ ยังประกอบไปด้วยเครื่องปั้นดินเผาที่ไม่ได้เคลือบทั้งหมด เนื่องมาจากเครื่องปั้นดินเผาที่ไม่ได้เคลือบจะมีรูพรุนมากมายทำให้มีความชื้นหรือละอองน้ำแทรกอยู่รูพรุนนั้น เมื่อนำมาใช้ในเตาไมโครเวฟละอองน้ำจะร้อน ส่งผลให้ตัววัสดุร้อนไปด้วย วัสดุที่เป็นพลาสติกบางประเภทมีค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ (Power Factor) เป็นฉนวนสูง เมื่อนำมาเข้าในเตาไมโครเวฟจะถูกทำให้ร้อนขึ้น ตัวพลาสติกจะหลอมละลาย

3.2.5 ระบบการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ

การทำความร้อนด้วยไมโครเวฟมีองค์ประกอบหลัก 3 ส่วนคือ ตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ (Magnetron) ท่อนำคลื่นไมโครเวฟ (Waveguide) และบริเวณทำความร้อน (ที่ใส่วัสดุทำความร้อน (Applicator)) การเคลื่อนที่ของคลื่นไมโครเวฟจะเคลื่อนที่จากตัวกำเนิดผ่านมายังท่อนำคลื่นและเข้าสู่บริเวณทำความร้อนตามลำดับ

คลื่นสะท้อนที่เกิดจากการสะท้อนกลับของคลื่นเมื่อชนกับวัสดุทำความร้อนอาจทำให้ตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟเสียหายได้ ดังนั้นโดยทั่วไปเครื่องไมโครเวฟจะติดตั้งตัวดักคลื่น (Isolator) ระหว่างตัวกำเนิดคลื่นและท่อนำคลื่นเพื่อป้องกันการเสียหายดังกล่าว นอกจากนั้นยังติดตั้งอุปกรณ์ปรับแต่งคลื่นระหว่างท่อนำคลื่นและบริเวณทำความร้อนเพื่อให้ระบบไมโครเวฟเกิดประสิทธิภาพสูงสุดอีกด้วย

บริเวณทำความร้อนเป็นตัวบ่งบอกถึงรูปแบบคลื่นไมโครเวฟที่กระทำต่อวัสดุว่าเป็นลักษณะคลื่นเดี่ยว (Single-mode) หรือคลื่นผสม (Multi-mode) สำหรับบริเวณทำความร้อนที่ออกแบบมาเพื่อให้คลื่นไมโครเวฟมีลักษณะเป็นคลื่นเดียวนั้นจะเกิดความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าภายในบริเวณทำความร้อน วัสดุทดสอบจะมีอุณหภูมิสูงที่บริเวณสนามไฟฟ้าสูง ดังนั้นต้องมีความระมัดระวังในการเลือกขนาดและชนิดวัสดุ เครื่องไมโครเวฟชนิดคลื่นเดี่ยว (Single-mode) เหมาะกับวัสดุที่มีขนาดเล็กหรือวัสดุที่มีการดูดกลืนคลื่นน้อย (Low-Lossy Materials) แต่ไม่เหมาะกับวัสดุที่มีขนาดใหญ่ สำหรับเครื่องไมโครเวฟที่มีลักษณะเป็นคลื่นผสม (Multi-mode) สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าโดยทำให้บริเวณทำความร้อนมีขนาดใหญ่กว่าวัสดุและมีการเพิ่มความถี่จากแหล่งกำเนิดคลื่นทำให้คลื่นมีการกระจายตัวมากขึ้น ส่งผลให้การทำความร้อนภายในวัสดุมีความสม่ำเสมอ ดังนั้นเครื่องไมโครเวฟลักษณะคลื่นผสมจึงเหมาะสำหรับการทำความร้อนวัสดุขนาดใหญ่หรือวัสดุที่มีการดูดกลืนคลื่นสูง (High-lossy Materials) หรือเมื่อต้องการให้วัสดุที่ทำความร้อนมีอุณหภูมิสม่ำเสมอ

โดยทั่วไปเครื่องไมโครเวฟที่ผลิตมีอยู่สองชนิด คือ แบบเตาอบ (มีลักษณะเป็นคลื่นผสม) และแบบท่อนำคลื่น (มีลักษณะเป็นคลื่นเดียว) ที่ผ่านมาเครื่องไมโครเวฟส่วนใหญ่ผลิตแบบเตาอบ ซึ่งการวิเคราะห์พฤติกรรมการทำงานร้อนที่เกิดขึ้นภายในเตาอบนั้นทำได้ยากมาก มีกระบวนการซับซ้อนไม่เหมาะสำหรับการวิเคราะห์เชิงทฤษฎี

สำหรับเครื่องไมโครเวฟแบบท่อนำคลื่น จะเกิดคลื่นเดียวมีลักษณะเป็นระนาบ และตกกระทบลงบนผิวหน้าวัสดุ ดังนั้นพฤติกรรมจึงไม่ซับซ้อนเหมือนเครื่องไมโครเวฟชนิดเตาอบ ดังนั้นการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีจึงอ้างอิงจากเครื่องไมโครเวฟลักษณะเดียวเป็นหลัก

3.2.6 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสนามไฟฟ้ากับวัสดุไดอิเล็กตริก

1. หลักการพื้นฐานของการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ

สารที่เป็นฉนวนไฟฟ้าหรือวัสดุไดอิเล็กตริก เช่น ไม้ กระดาษ พลาสติก เมื่อถูกนำเข้าไปในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โมเลกุลของสารวัสดุไดอิเล็กตริกจะหมุนและเคลื่อนที่หลายล้านครั้ง โดยจะเคลื่อนที่ตามการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า

ภาพที่ 3.7 โมเลกุลภายในวัสดุไดอิเล็กตริกจะมีสภาพเชิงขั้ว (Dipole) ที่เรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ สภาพเชิงขั้วในแต่ละโมเลกุลของวัสดุไดอิเล็กตริกประกอบไปด้วยขั้วบวกและขั้วลบ เมื่อมีสนามไฟฟ้าวิ่งผ่านวัสดุไดอิเล็กตริกทำให้สภาพเชิงขั้วในแต่ละโมเลกุลเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบและสลับขั้วตามการเปลี่ยนแปลงของคลื่น การสลับขั้วไปมาอย่างรวดเร็วของสภาพเชิงขั้วทำให้เกิดความเสียดทานขึ้นระหว่างโมเลกุล ส่งผลให้เกิดพลังงานออกมาในรูปของความร้อนภายในวัสดุไดอิเล็กตริก

โดยทั่วไปความถี่ของคลื่นไมโครเวฟจะวัดในหน่วยเมกะเฮิรตซ์ (Megahertz, MHz) ซึ่งข้อตกลงนานาชาติว่าด้วยการกำหนดคลื่นความถี่สำหรับความถี่วิทยุ (Radio frequency) และคลื่นความถี่สำหรับอุปกรณ์ไมโครเวฟ (Microwave Application) (Jones and Rowley [3-7]) กำหนดความถี่วิทยุไว้ดังนี้

$$1) 13.56 \text{ MHz} \pm 0.05\% (\pm 0.00678 \text{ MHz})$$

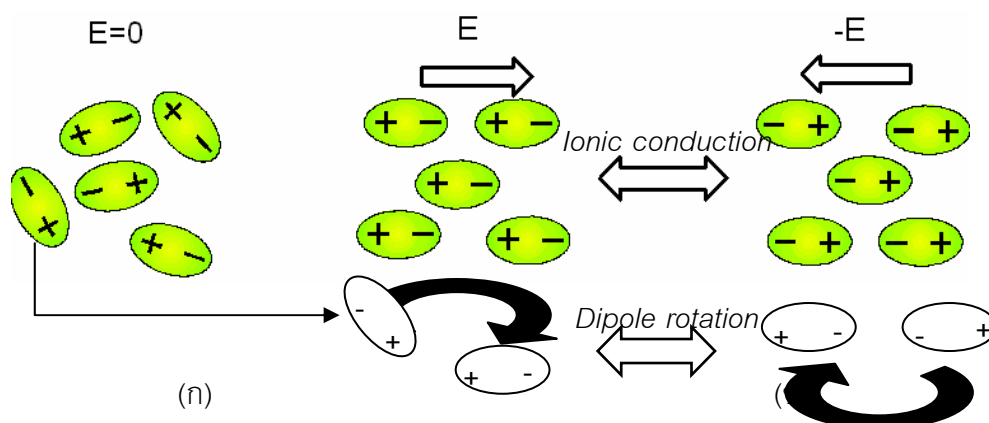
$$2) 27.12 \text{ MHz} \pm 0.6\% (\pm 0.16272 \text{ MHz})$$

$$3) 40.68 \text{ MHz} \pm 0.05\% (\pm 0.02034 \text{ MHz})$$

และได้กำหนดความถี่ของคลื่นไมโครเวฟไว้ดังนี้

$$1) 900 \text{ MHz (ขึ้นอยู่กับแต่ละประเทศ)}$$

$$2) 2450 \text{ MHz} \pm 50 \text{ MHz}$$



ภาพที่ 3.7

ปฏิกิริยาระหว่างวัสดุไดอิเล็กตริกและสนามไฟฟ้า (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช [3-1])

(ก) การเรียงตัวของสภาพเชิงขั้วภายในวัสดุไดอิเล็กตริกเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้า

(ข) การเรียงตัวของสภาพเชิงขั้วเมื่อมีสนามไฟฟ้า

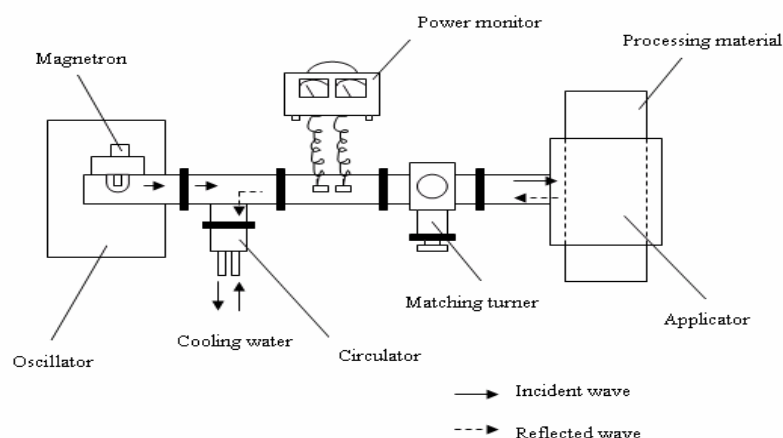
ซึ่งในปัจจุบัน เตาไมโครเวฟที่ใช้ทั่วไปตามครัวเรือนจะใช้ความถี่ 2,450 MHz ซึ่งจะมีควมยาวคลื่นในอากาศเท่ากับ 4.8 inch (12.192 cm) ในขณะที่ความถี่เท่ากับ 900 MHz จะมีความยาวคลื่นในอากาศประมาณ 13 inch (33.02 cm) ส่วนการวัดกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟจะวัดในหน่วยกิโลวัตต์ที่อุณหภูมิห้องและความดันหนึ่งบรรยากาศ ซึ่งคลื่นไมโครเวฟกำลัง 1 kW สามารถทำให้น้ำจำนวน 2.5 lb (1.134 Kg) ระเหยได้ภายในเวลา 1 ชั่วโมง ปัญหาของการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟเกี่ยวข้องโดยตรงกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า การกระจายของอุณหภูมิ การกระจายของความชื้น รวมทั้งตัวขึ้นทดสอบ (Sample) ซึ่งเป็นสมบัติวัสดุไดอิเล็กตริก (Dielectric Materials) ดังนั้น การรู้สมบัติของวัสดุไดอิเล็กตริก (Dielectric Properties) จึงมีความจำเป็น รวมทั้งการควบคุมสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ก่อให้เกิดความร้อนภายในวัสดุไดอิเล็กตริกความร้อนที่เกิดขึ้นจะส่งผลถึงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความชื้นและสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุเอง

3.2.7 อุปกรณ์สำหรับกระบวนการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

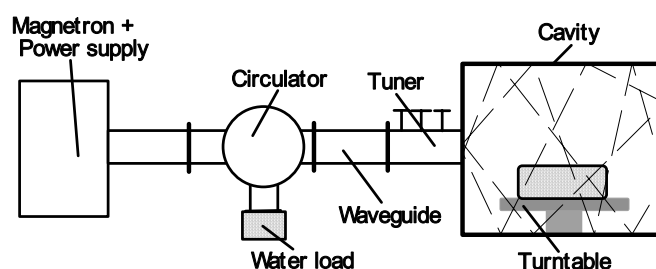
ในระบบไมโครเวฟทั่วไปประกอบด้วยส่วนหลัก ๆ 3 ส่วนคือ ตัวกำเนิดคลื่น (Generator) ท่อนำคลื่น (Waveguide) และเตาอบ (Cavity) ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะมีความสำคัญตามหน้าที่ของมัน เมื่อเราเข้าใจว่าเตาอบทำงานอย่างไร การทำงานภายในของไมโครเวฟ จะทำให้

การทำความร้อนได้นั้นขึ้นอยู่กับ การออกแบบส่วนประกอบและเอาส่วนประกอบเหล่านี้มารวมกันเป็นระบบเดียวกัน เมื่อเราเข้าใจถึงอิทธิพลต่าง ๆ ของเงื่อนไขไมโครเวฟเราก็จะสามารถนำความเข้าใจที่มีอยู่ไปออกแบบไมโครเวฟขึ้นได้นั้นอย่างน้อยเราต้องเข้าใจการทำงานของส่วนประกอบต่าง ๆ ในหัวข้อนี้จะสรุปถึงความถี่ของไมโครเวฟที่มาประยุกต์ใช้ในการให้ความร้อนชนิดของส่วนประกอบไมโครเวฟที่นำไปใช้งานได้

การทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กทริกมีกลไกเช่นเดียวกันแต่มีวิธีการในการที่ทำให้บรรลุเป้าหมายแตกต่างกัน โดยระบบพื้นฐานของระบบเหล่านี้จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดพลังงานความถี่สูงหรือเจนเนอเรเตอร์และใช้ท่อนำคลื่นไปยังชิ้นงาน (Load) ที่อยู่ภายในแอปพลิเคชัน (Applicator) ดังภาพที่ 3.8



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.8

องค์ประกอบพื้นฐานของระบบทำความร้อนด้วยไมโครเวฟในลักษณะต่าง ๆ

(ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช [3-1])

จากภาพที่ 3.8 พบว่าแมกนีตรอน (Magnetron) ที่ติดตั้งบนท่อนำคลื่นทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟหรือสร้างพลังงานไมโครเวฟ ไมโครเวฟจะเคลื่อนที่ผ่านท่อนำคลื่นไปยังวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการที่อยู่ภายในคาวิตีหรือแอปพลิเคชัน เมื่อพลังงานไมโครเวฟเข้าสู่วัสดุแล้ว ส่วนที่นอกเหนือจากการดูดซับ (Absorbed Wave) โดยตัววัสดุ จะมีบางส่วนที่ทะลุผ่าน (Transmitted Wave) วัสดุและจะมีบางส่วนที่สะท้อนกลับ (Reflected Wave) ไป ซึ่งอัตราพลังงานไมโครเวฟที่สะท้อนกลับ จะขึ้นอยู่กับค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุและคุณลักษณะประจำตัวของวัสดุเอง คลื่นสะท้อนที่เกิดจากการสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟขณะชนกับวัสดุ อาจทำให้ตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟเสียหายได้ (โดยเฉพาะระบบที่ใช้ไมโครเวฟกำลังสูง) ดังนั้นโดยทั่วไประบบไมโครเวฟจะติดตั้งตัวดักคลื่น หรือที่เรียกทั่วไปว่า เซอร์คูลเตอร์ (Circulator) (อุปกรณ์ทำให้คลื่นไมโครเวฟเดินได้ทางเดียว) ระหว่างตัวกำเนิดคลื่นและท่อนำคลื่นเพื่อป้องกันการเสียหายดังกล่าว นอกจากนั้นยังติดตั้งอุปกรณ์ปรับแต่งคลื่นเพื่อที่จะลดพลังงานสะท้อนกลับนี้ โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าอุปกรณ์ปรับค่าคลื่น (Matching Tuner) มาติดตั้งระหว่างท่อนำคลื่นและบริเวณทำความร้อน อุปกรณ์ตัวนี้ทำหน้าที่ปรับให้คลื่นไมโครเวฟมีการดูดซับในตัววัสดุได้ดีขึ้นโดยการสะท้อนของคลื่นที่ผิววัสดุลดลง ส่งผลทำให้ระบบไมโครเวฟทำงานที่ประสิทธิภาพสูงสุดอีกด้วย

3.2.8 ระบบควบคุมการรั่วไหลและความปลอดภัย (Leakage and Safety Control Systems)

ในการใช้คลื่นไมโครเวฟจำเป็นต้องมีการควบคุมปริมาณการรั่วของรังสีจากระบบทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ทั้งการลดการแทรกของคลื่นที่รบกวนในย่านความถี่คลื่นวิทยุให้อยู่ภายในข้อจำกัดที่ยอมรับได้และเพื่อความปลอดภัยของบุคคล ซึ่งอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่นี้คือ ไซค์ (Chokes) หรือโพรงลดกำลัง (Attenuating Tunnels) โดยทำการติดตั้งไซค์ที่บริเวณช่องเปิดของสายพานลำเลียง รอบประตู หรือหน้าต่าง รอยต่อ และบริเวณอื่นซึ่งมีลักษณะคล้ายกัน โดยหลักการออกแบบที่ดีในทางวิศวกรรมคือ การรักษาระดับการรั่วให้อยู่ในระดับต่ำข้อกำหนดซึ่งถูกควบคุมโดยองค์กรของรัฐบาล โดยคลื่นไมโครเวฟนี้จัดเป็นคลื่นที่ปลอดภัยไม่มีสารกัมมันตรังสีตกค้าง แต่คลื่นไมโครเวฟก็ยังมีอันตรายเมื่อโดนคลื่นไมโครเวฟเป็นเวลานานและในปริมาณมาก โดยอาจมีผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์หากมีไมโครเวฟรั่วไหลและรับคลื่นไมโครเวฟมากกว่า 5 mW/cm^2 เช่น มะเร็งผิวหนัง ตาเป็นต้อกระจก ผู้หญิงมีครรภ์อาจแท้งบุตรได้ ทำให้เกิดการเป็นหมันชั่วคราวสำหรับผู้ชาย การไหลเวียนของเลือดผิดปกติ เกิดอาการหน้ามืด

และวงเวียน ทำให้มีอาการความจำเสื่อมได้ แต่ในกรณีที่ได้รับคลื่นไมโครเวฟน้อยกว่า 5 mW/cm^2 ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัย



ภาพที่ 3.9

เครื่องตรวจสอบการรั่วไหล (Portable Microwave Leakage Detector)

3.2.9 สมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric Properties)

ความรู้เกี่ยวกับคุณลักษณะของสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุไดอิเล็กตริกกระบวนการของไมโครเวฟมีความจำเป็นเพื่อใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ใช้งานด้านไมโครเวฟได้อย่างเหมาะสม การแผ่รังสีเป็นรูปแบบหนึ่งของพลังงานที่สามารถทะลุผ่านที่ว่าง อากาศ วัตถุได้ ไมโครเวฟนั้นประกอบไปด้วยสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเช่นเดียวกับแสง (การแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า) แต่จะแตกต่างจากแสงตรงที่ความถี่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่างกัน

ในการที่จะควบคุมความร้อนของวัสดุไดอิเล็กตริกอันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าหรือไมโครเวฟ เราจำเป็นที่จะต้องทราบสมบัติการดูดซับพลังงานของคลื่นไมโครเวฟ โดยวัสดุไดอิเล็กตริก โดยเริ่มจากการกำหนดไดอิเล็กตริกเปอรมิตติวิตี (Dielectric Permittivity) ของวัสดุไดอิเล็กตริก ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้ (Osepchuk [3-11])

$$\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon'' = \varepsilon_0(\varepsilon_r' + j\varepsilon_r'') = \varepsilon_0\left(\varepsilon_r' + j\frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0}\right) \quad (3.1)$$

เมื่อ $j = \sqrt{-1}$, ϵ คือ คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ (Complex Dielectric Permittivity) (โดยทั่วไปเรียก ไดอิเล็กตริกคอนสแตนต์ (Dielectric Constant) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่อธิบายถึงความสามารถในการดูดซับ ส่งผ่าน และสะท้อนพลังงานที่เป็นสนามไฟฟ้าของวัสดุ โดย ϵ_0 คือคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของที่ว่าง (Free Space) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.86×10^{-12} F/m ϵ'_r เป็นจำนวนจริงของคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Relative Permittivity หรือ Relative Dielectric Constant) ใช้อธิบายความสามารถในการส่งผ่าน และสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟในวัสดุ ϵ''_r เป็นจำนวนจินตภาพของคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (โดยทั่วไปเรียกไดอิเล็กตริกลอสมแฟกเตอร์ (Dielectric Loss Factor)) ใช้อธิบายการสูญเสียพลังงานของคลื่นไมโครเวฟเมื่อผ่านวัสดุ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือความสามารถของวัสดุในการดูดซับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ และ σ คือความสามารถในการนำไฟฟ้า (Electric Conductivity) ความสัมพันธ์ระหว่าง Dielectric Loss Factor กับค่าการนำไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\epsilon'' = \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \quad (3.2)$$

เมื่อ ω คือ ความเร็วเชิงมุมของคลื่นไมโครเวฟ และสามารถยุบรวมกันเป็นตัวแปรใหม่เพื่อความสะดวกเรียกว่า ประสิทธิภาพลอสมแทนเจนท์ (Loss Tangent Coefficient ($\tan \delta$))

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''_r}{\epsilon'_r} = \frac{\sigma}{\omega \epsilon'_r \epsilon_0} \quad (3.3)$$

ประสิทธิภาพลอสมแทนเจนท์ ($\tan \delta$) เป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้อธิบายความสามารถในการผลิตความร้อนของวัสดุไดอิเล็กตริกเมื่อดูดกลืนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ

Von Hippel [3-9] รวบรวมคุณสมบัติไดอิเล็กตริกสำหรับวัสดุต่าง ๆ (เช่น คริสตัล เซรามิก แก้ว น้ำ พลาสติก ยางมะตอย ซีเมนต์ และ ไม้ เป็นต้น) ในช่วงความถี่และอุณหภูมิ $100 < f < 10^{10}$ และ $12 < T < 200$ °C

3.2.10 ความยาวคลื่นและความลึกในการทะลุทะลวง (Wavelength and Penetration Dept)

ค่าไดอิเล็กตริกคอนสแตนต์และประสิทธิภาพลอสแทนเจนท์สามารถใช้ประมาณความยาวคลื่นภายในวัสดุไดอิเล็กตริกและความลึกในการทะลุทะลวงได้ สำหรับคลื่นไมโครเวฟชนิดโหมด TE_{10} ที่ความถี่ 2.45 GHz เมื่อผ่านเข้าไปในท่อร์ปทรงสี่เหลี่ยมที่มีขนาดภายในเท่ากับ $a \times b$ ความยาวคลื่น (λ_g) ภายในท่อร์ปทรงสี่เหลี่ยมสามารถหาได้จาก

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{1 \cdot \lambda_0}{2a}\right)^2 - \left(\frac{0 \cdot \lambda_0}{2b}\right)^2}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{1 \cdot \lambda_0}{2a}\right)^2}} \quad (3.4)$$

เมื่อความยาวคลื่นในสุญญากาศ (λ_0) มีค่าเท่ากับ $\frac{2\pi}{\omega} \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}}$ ดังนั้นความยาวคลื่นในวัสดุไดอิเล็กตริก (λ_{mg}) สามารถคำนวณได้จาก (Barringer et al. [3-12])

$$\lambda_{mg} = \frac{2\pi}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\frac{\epsilon_r' \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}\right)^2} + 1 \right)}{2}}} = \frac{2\pi}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\frac{\epsilon_r' \left(\sqrt{1 + (\tan \delta)^2} + 1 \right)}{2}}} \quad (3.5)$$

เมื่อ v คือ ความเร็วของคลื่นไมโครเวฟ

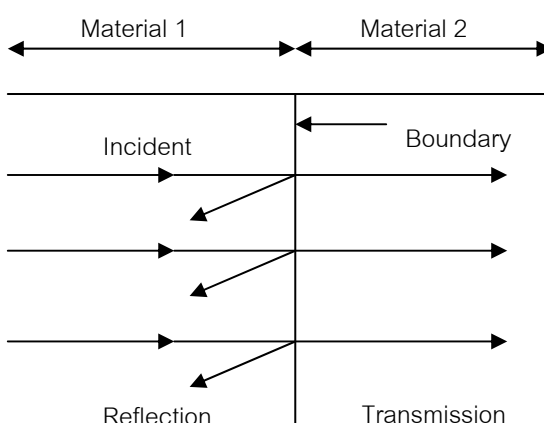
ความลึกในการทะลุทะลวง (D_p) หรือ ระยะทางที่สนามไฟฟ้าทะลุเข้าไปได้สามารถหาได้จาก

$$D_p = \frac{1}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\frac{\epsilon_r' \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}\right)^2} - 1 \right)}{2}}} = \frac{1}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\frac{\epsilon_r' \left(\sqrt{1 + (\tan \delta)^2} - 1 \right)}{2}}} \quad (3.6)$$

เมื่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและลอสแทนเจนท์เปลี่ยนไป ค่าความลึกในการทะลุทะลวงภายในวัสดุไดอิเล็กตริกจะมีค่าเปลี่ยนไปด้วย

3.2.11 การสะท้อน การส่งผ่าน และการดูดซับ (Reflection, Transmission and Absorption)

คลื่นไมโครเวฟมีความหมายคล้ายคลึงกับแสงหลายประการกล่าวคือ คลื่นไมโครเวฟสามารถสะท้อน ทะลุผ่าน และถูกดูดซับพลังงานโดยวัสดุใดๆ ได้ (ดังภาพที่ 3.10) ซึ่งความสามารถทั้งสามอย่างนั้นสัมพันธ์กับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุด้วย



ภาพที่ 3.10

รังสีการตกกระทบและการดูดซับโดยวัสดุไดอิเล็กตริก (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช [3-1])

เมื่อคลื่นไมโครเวฟเคลื่อนที่มาปะทะผิวรอยต่อระหว่างวัสดุไดอิเล็กตริก 2 ชนิด (เช่น รอยต่อระหว่างวัสดุทดสอบกับอากาศ) คลื่นส่วนหนึ่งจะถูกสะท้อนกลับ พลังงานของคลื่นไมโครเวฟที่ถูกสะท้อนกลับสามารถคำนวณได้จากค่าไดอิเล็กตริกคอนสแตนต์ของวัสดุทดสอบตามสมการต่อไปนี้

$$P_{reflect} \cong \left(\frac{\sqrt{\epsilon} - 1}{\sqrt{\epsilon} + 1} \right)^2 \quad (3.7)$$

สมการนี้ใช้ได้กับสมมติฐานที่ว่าผิวหน้าของวัสดุราบเรียบและคลื่นไมโครเวฟตกกระทบตั้งฉากกับผิวหน้าของวัสดุทดสอบ

สำหรับพลังงานคลื่นไมโครเวฟที่เคลื่อนที่ทะลุผ่านผิวรอยต่อระหว่างวัสดุไดอิเล็กตริกสองชนิดสามารถคำนวณได้โดยสมการต่อไปนี้

$$P_{Transmit} = 1 - P_{reflect} \quad (3.8)$$

สำหรับวัสดุไดอิเล็กตริกบางชนิด (เช่น แก้วและพลาสติก) คลื่นไมโครเวฟสามารถเคลื่อนที่ทะลุผ่านโดยไม่มีการดูดซับและสะท้อนกลับของพลังงาน

เมื่อคลื่นไมโครเวฟเคลื่อนที่ผ่านวัสดุไดอิเล็กตริกวัสดุจะถูกดูดซับพลังงานและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นเรียกว่าการผลิตปริมาณความร้อนเชิงปริมาตร (Local Volumetric Heat Generations : Q) ซึ่งปริมาณความร้อนเชิงปริมาตรจะสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในวัสดุไดอิเล็กตริกดังแสดงตามสมการต่อไปนี้ (Metaxas [3-12])

$$Q = \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' |E|^2 + \omega \mu_0 \mu_r'' |H|^2 \quad (3.9)$$

เมื่อ E คือสนามไฟฟ้าซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง H คือสนามแม่เหล็ก เนื่องจากวัสดุไดอิเล็กตริกไม่มีสภาพเชิงขั้วทางแม่เหล็ก จึงไม่มีการดูดซับพลังงานจากสนามแม่เหล็ก ดังนั้นสามารถเขียนสมการ (3.10) ใหม่ได้เป็น

$$Q = \sigma |E|^2 = \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' |E|^2 \quad (3.10)$$

ในระหว่างการแผ่รังสีไมโครเวฟการเปลี่ยนแปลงเฟสของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยเวลาจะเร็วมาก ดังนั้นจึงใช้ค่าเฉลี่ยรากที่สอง (Root Mean Square Value) ของความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อประมาณค่าการดูดซับพลังงานไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กตริก เมื่อสมมติให้ไม่มีการสูญเสียสนามแม่เหล็กค่าการผลิตปริมาณความร้อนเชิงปริมาตร (Local Volumetric Heat Generation) ดังรูปสมการต่อไปนี้ (Ratanadecho et al. [3-14])

$$Q = \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' E^2 = 2\pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r (\tan \delta) E^2 \quad (3.11)$$

จากสมการ (3.11) ค่าการผลิตปริมาณความร้อนเชิงปริมาตรจะแปรผันตรงกับความถี่ของสนามไฟฟ้า ค่าไดอิเล็กตริกลอสมแพกเตอร์ และค่าสนามไฟฟ้ากำลังสอง นอกจากนั้นยังแปรผันตรงกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าประสิทธิภาพลอสมแพกแทนเจนท์ของวัสดุอีกด้วย อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นยังมีผลจากปัจจัยอื่น ๆ อีกเช่น ค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุ (Specific Heat) และขนาดของวัสดุทดสอบ เป็นต้น

สมการ (3.11) มีความสำคัญมากในการศึกษาเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนและการอบแห้งวัสดุด้วยพลังงานไมโครเวฟ ซึ่งค่าการผลิตปริมาณความร้อนเชิงปริมาตรดังกล่าวจะแปรเปลี่ยนไปตามคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ

3.2.12 การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและความร้อน

ในการวิเคราะห์หาการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในควาวิทัศน์นั้น สามารถหาได้จากสมการแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกเวลล์ตามรายละเอียดต่อไปนี้ (Metaxas [3-13])

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times E) - k_0^2 \left[\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon_0} \right] E = 0 \quad (3.12)$$

$$\epsilon_r = n^2 \quad (3.13)$$

เมื่อ

- E คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้า (Electric Field Intensity, V/m)
- H คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Intensity, A/m)
- k_0 คือ การแผ่ของคลื่น (Propagation of Wave)
- j คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current Density, A/m²)
- σ คือ สมบัติการนำไฟฟ้า (Electric Conductivity, S/m)
- μ_r คือ สมบัติการซึมผ่านของสนามแม่เหล็กสัมพัทธ์ (Relative Magnetic Permeability)
- ω คือ ความเร็วเชิงมุมของคลื่นไมโครเวฟ (Angular Frequency, rad/s)
- ϵ_0 คือ สมบัติไดอิเล็กตริกในสภาวะสุญญากาศ (Permittivity of Vacuum, F/m)
- n คือ ดัชนีหักเห (Refractive Index)
- ϵ_r คือ สมบัติไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Relative Dielectric Constant) ซึ่งบ่งบอกถึงคุณสมบัติของวัสดุใด ๆ ที่อธิบายถึงความสามารถในการดูดซับ การส่งผ่านและการสะท้อนพลังงานจากส่วนที่เป็นสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ

ในส่วนของการวิเคราะห์ปัญหาการถ่ายเทความร้อนจะทำการวิเคราะห์เฉพาะความร้อนที่เกิดขึ้นภายในโหลดภายใต้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในควาวิทัศน์ 3 มิติ (อากาศไม่มีผลต่อการดูดซับพลังงานไมโครเวฟเป็นความร้อน) โดยสมมติให้ภายในโหลดมีการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว และโหลดเองสามารถที่จะกำเนิดความร้อน

ภายในด้วยการเปลี่ยนพลังงานไมโครเวฟเป็นพลังงานความร้อน สมมติฐานดังกล่าวสามารถเขียนเป็นสมการถ่ายเทความร้อนในโหมดการถ่ายเทความร้อนเป็นดังนี้

$$\delta_{ts} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q \quad (3.14)$$

เมื่อ

δ_{ts} คือ สัมประสิทธิ์เชิงเวลา (Time-Scaling Coefficient)

T คือ อุณหภูมิ (Temperature, K)

t คือ เวลา (Time, s)

C_p คือ ความจุความร้อนของสสาร (Heat Capacity at Constant Pressure, $J/(kg \cdot K)$)

ρ คือ ความหนาแน่น (Density, kg/m^3)

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity, $W/(m \cdot K)$)

Q คือ ปริมาณความร้อนเชิงปริมาตรที่ผลิตขึ้นภายในวัสดุ (Local Volumetric Heat Generation Term, W/m^3) ซึ่งได้จากการดูดซับพลังงานไมโครเวฟและแปรเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน

3.3 กระบวนการไมโครเวฟภายใต้สภาวะสุญญากาศ (Microwave Vacuum Processing)

กระบวนการเชิงอุตสาหกรรมหลายประเภทที่ต้องทำงานที่สภาวะความดันต่ำ เพื่อต้องการลดอุณหภูมิจุดเดือดของสารละลาย (Solvent) ที่อยู่ภายในวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการ รวมทั้งเพิ่มความแตกต่างของอัตราการแพร่กระจาย (Diffusion Rate) ของสสาร ในทุกกระบวนการที่อยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศขณะรับพลังงานความร้อน พบว่าการถ่ายเทความร้อนไปยังตัววัสดุกลับยากขึ้นทั้งนี้เพราะข้อจำกัดของการถ่ายเทความร้อนในโหมดของการพาความร้อนซึ่งปกติจะมีความสำคัญมากสำหรับกรณีกระบวนการที่ทำงานในสภาวะบรรยากาศปกติ แต่การพาความร้อนกลับกลายเป็นสิ่งไม่สำคัญสำหรับกรณีกระบวนการที่ทำงานที่สภาวะความดันต่ำหรือกระบวนการสุญญากาศ

กลไกการถ่ายเทความร้อนที่สำคัญในกระบวนการสุญญากาศทั่ว ๆ ไปจึงอยู่บนพื้นฐานของโหมดการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการนำความร้อนที่มาจากแหล่งความร้อนที่เป็นของไหล และในบางกระบวนการจะประยุกต์ใช้วิธีการฉีดไอน้ำที่ความดันต่ำเข้าไปในระบบเพื่อทำ

ให้เกิดการถ่ายเทความร้อนโดยการกลั่นตัว (Condensation) ของไอน้ำบนตัววัสดุ การนำความร้อนโดยปกติจะช้าและยากต่อการควบคุมและยังต้องการพื้นผิวในแลกเปลี่ยนความร้อนที่มาก ดังนั้นในหลายกรณีเทคนิคการใช้ไอน้ำที่กลั่นตัวนี้ จึงไม่เป็นที่ยอมรับ

กระบวนการทำความร้อนภายใต้สภาวะสุญญากาศมักนิยมใช้ในอุตสาหกรรมโลหะ เช่นกระบวนการหลอมละลายโลหะเพื่อทำให้มันบริสุทธิ์มากขึ้นโดยที่กรรมวิธีการให้ความร้อนแบบธรรมดายังมีปัญหาในเรื่องของประสิทธิภาพ ดังนั้นในอุตสาหกรรมหลอมละลายโลหะส่วนใหญ่จะอาศัยกระบวนการหลอมละลายโดยใช้เทคนิคการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำ (Low Frequency Introduction) เพราะตัววัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่สูง (High Electrical Inductivity) เช่นกัน การใช้เทคนิคไมโครเวฟในกระบวนการหลอมละลายโลหะก็เป็นกระบวนการหนึ่งที่ได้รับความสะดวกเพราะสามารถเร่งอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สภาวะสุญญากาศ เมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ

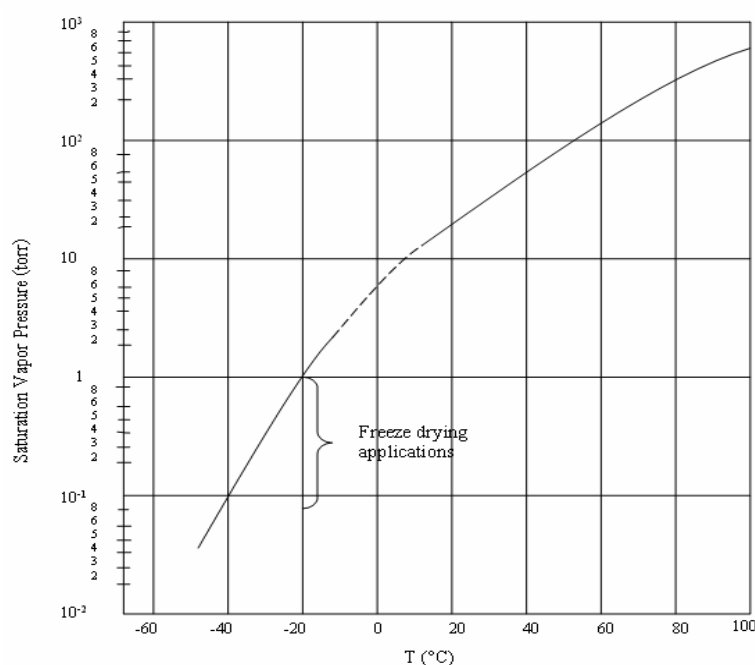
หากเราทราบอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการ ค่ากำลังกำลังการดูดซับทั้งหมดก็สามารถประเมินได้เช่นกัน ในขั้นตอนนี้เราสามารถที่จะประมาณค่าปริมาตรวัสดุที่น้อยที่สุดที่สามารถบรรจุไว้ในแอพพลิเคเตอร์ โดยปกติขนาดของแอพพลิเคเตอร์เพื่อทำความร้อนจะออกแบบมาเป็นรูปแบบเฉพาะสำหรับแต่ละกระบวนการ ขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร อาทิ เช่น ชนิดของวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการ อุณหภูมิสูงสุดภายในระบบและความถี่ที่ใช้ในระบบ เป็นต้น อย่างไรก็ตามในแง่ความคุ้มทุนเชิงเศรษฐศาสตร์ ระบบเชิงอุตสาหกรรมนิยมใช้ความถี่ที่ 2450 MHz มากกว่า 915 MHz

สำหรับแอพพลิเคเตอร์หรือควิตี้ที่ใช้กับกระบวนการไมโครเวฟภายใต้สภาวะสุญญากาศจะต้องคำนึงถึงข้อจำกัดในการเกิดเบรกดาวน์ (Breakdown) ของสนามไฟฟ้าที่สภาวะความดันนั้น ๆ ด้วย ในการออกแบบสร้างแอพพลิเคเตอร์นั้น ส่วนใหญ่มาจากการขึ้นรูปของแผ่นโลหะที่สามารถทำงานภายใต้สภาวะสุญญากาศได้ โดยการออกแบบจะต้องอิงตามโค้ดมาตรฐานสากล เช่น British Standard Specification No.5500)

พื้นฐานของการดำเนินการในระบบการอบแห้งสุญญากาศก็คือ การดำเนินการในส่วนความดันเพื่อควบคุมให้อุณหภูมิของสารละลายที่อยู่ภายในวัสดุให้อยู่ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด นั่นคือควบคุมให้อุณหภูมิจุดเดือดให้ต่ำลงนั่นเอง ซึ่งข้อกำหนดของอุณหภูมินี้มักขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการและชนิดของกระบวนการด้วย ดังนั้นในการออกแบบระบบเพื่อใช้งานจริงจะต้องหาเงื่อนไขที่เหมาะสมและดีที่สุดสำหรับแต่ละกระบวนการ จุดสำคัญที่ต้องพิจารณาต่อไปก็คือ จุดเดือดของสารละลายที่เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น (เช่น สารละลาย

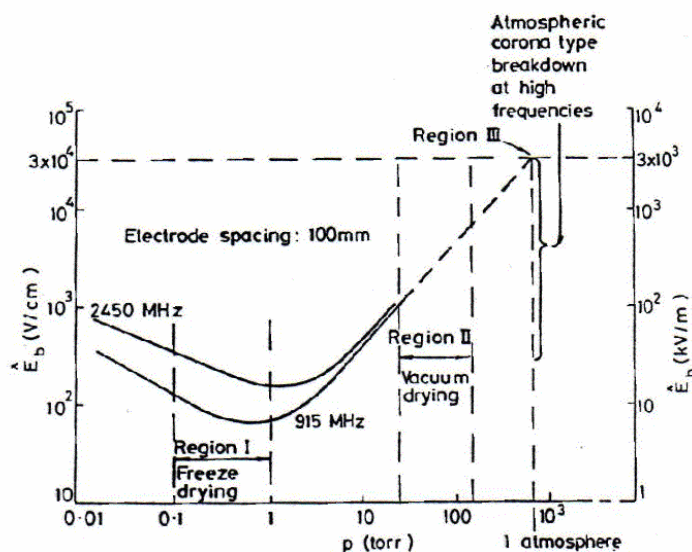
น้ำตาล-น้ำ) กรณีนี้เราอาจต้องออกแบบกระบวนการให้ทำงานที่ความดันต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่ได้แสดงไว้ในกราฟคุณลักษณะของอุณหภูมิจุดเดือดและความดันซึ่งเป็นกรณีสารละลายบริสุทธิ์ ภาพที่ 3.11 แสดงอุณหภูมิจุดเดือดของน้ำกับความดันในช่วง 1-133 kPa (หรือประมาณ 0.01 ถึง 1000 torr) จะสังเกตเห็นว่าเส้นโค้งลาดลดลงอย่างต่อเนื่อง (จุดเยือกแข็งเปลี่ยนแปลงตามความดันบรรยากาศ) และที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0°C แสดงถึงบริเวณของการเกิดการระเหิด (Sublimation) ซึ่งมีการเปลี่ยนสถานะจากน้ำแข็งกลายเป็นไอ สำหรับกระบวนการการทำแห้งเยือกแข็ง (Freeze Drying) สามารถดำเนินการได้ที่ความดันในช่วง 13-133 Pa (ประมาณ 0.1 ถึง 1 torr) ดังแสดงในช่วง I ของภาพที่ 3.12

พิจารณาจากภาพที่ 3.12 ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นนี้เป็นปรากฏการณ์ที่ควรหลีกเลี่ยง โดยอาจใช้ติดตั้งอุปกรณ์ปรับแต่งกำลังไมโครเวฟที่มีคุณภาพที่ตัวแหล่งจ่าย เพื่อลดค่าของมันเป็นลง โดยปกติการเกิดเบรกดาวน์ของสนามไฟฟ้าจะลดลงตามสภาวะสุญญากาศ ยกเว้นในช่วง I ค่าสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ในอากาศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าความดันที่ลดลง หากความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์มีค่าสูงเกินไป อาจทำให้เกิดปรากฏการณ์การอาร์คหรือเกิดพลาสมาขึ้นมาได้



ภาพที่ 3.11

ความดันที่สภาวะอิ่มตัวด้วยไอน้ำซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ (1 torr=133.31 Pa) (Metaxas [3-13])



ภาพที่ 3.12

การเกิดเบรกดาวนซ์ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในอากาศ (ค่าสูงสุด)
ที่ขึ้นอยู่กับความดันที่ความถี่สองค่า (1 torr=133.31 Pa) (Metaxas [3-13])

3.3.1 ข้อดีของการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟสุญญากาศ

เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งโดยทั่วไป ไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านเข้าไปได้ด้วยความลึกที่มากกว่า สิ่งที่เกี่ยวข้องกับการเกิดความร้อนทั่วทั้งปริมาตร (Volume Heating) มีข้อได้เปรียบดังนี้

1. การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะถ่ายเทจากภายในไปสู่ผิวนั่นคือ อุณหภูมิภายในจะสูงกว่าภายนอก ความดันบางส่วนที่เพิ่มขึ้นจะขับเคลื่อนให้ของเหลวระเหยออกสู่ผิวน้ำ
2. เนื่องจากชั้นที่อยู่บนสุดไม่ได้แห้งแบบสมบูรณ์ ผิวน้ำจึงยังคงแพร่กระจายอยู่
3. ของเหลวจะระเหยจากภายในผลิตภัณฑ์ออกมาตามโครงสร้างรูพรุนของวัสดุ เป็นแบบ Macro-Capillary ทำให้วัสดุแห้งอย่างรวดเร็ว
4. ความร้อนของน้ำและสารละลายที่เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่มีการเลือกอย่างเหมาะสม เนื่องจากการสูญเสียค่าไดอิเล็กตริกของน้ำที่มีมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่แห้ง

5. ความชื้นของผลิตภัณฑ์จะถูกทำให้แห้งอย่างรวดเร็วและทั่วถึงด้วยความสามารถการนำความร้อนที่ต่ำ

6. มีการแห้งที่คงที่ของพื้นผิว ปราศจากการสูญเสียจากความเสียดทาน

7. มีประสิทธิภาพสูงเมื่อพิจารณาจากพลังงานที่ใส่เข้าไป

8. ควบคุมด้วยความเร็วสูงของการส่งถ่ายพลังงาน

9. ใช้เวลาในกระบวนการน้อยนั่นคือ เหมาะสมกับการผลิตที่คุมโดยระบบ

อัตโนมัติ

ด้วยความเหมาะสมของเทคโนโลยีการอบแห้งสุญญากาศ จะเกิดประโยชน์กับผลิตภัณฑ์ดังนี้

1. อุณหภูมิอบแห้งต่ำทำให้รักษาสภาพของผลิตภัณฑ์

2. ไม่มีออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์

3. คงคุณค่าทางโภชนาการสูง

4. มีกลิ่น รสที่ดี

5. ผลิตภัณฑ์มีความชื้นต่ำ

6. สูญเสียผลิตภัณฑ์น้อยมาก

7. การแห้งของชั้นผิวคงที่ ปราศจากการสูญเสียจากความเสียดทาน เพราะไม่มีความเค้นทางกลต่อผลิตภัณฑ์

ผลของเทคโนโลยีไมโครเวฟสุญญากาศเกี่ยวกับลักษณะเฉพาะกระบวนการเทคโนโลยี ซึ่งให้ประโยชน์ดังนี้

1. การควบคุมขอบเขตทั่วไปของพลังงานด้วยการควบคุมความเร็วสูง

2. กำหนดและใช้เวลาสั้นในการอบแห้งผลิตภัณฑ์

3. บริเวณที่หล่อเย็นอยู่ที่ทางออกสำหรับผลิตภัณฑ์ที่หนึ่ง

4. เป็นระบบปิด

5. การตั้งค่าการทำงานที่แตกต่างกันของเครื่องทำได้ง่ายในแต่ละผลิตภัณฑ์

6. การทำงานต่อเนื่องสามารถทำได้

7. ใช้เวลาน้อย ประสิทธิภาพสูงและคุ้มค่าในทางเศรษฐกิจ

8. เครื่องขนาดเล็กกว่าระบบการอบแห้งโดยเครื่องสุญญากาศแบบธรรมดา

9. ทำงานได้ดีเพราะระบบสามารถนำมาปรับเข้ากันได้ดีและมีความสะอาด