

บทที่ 2

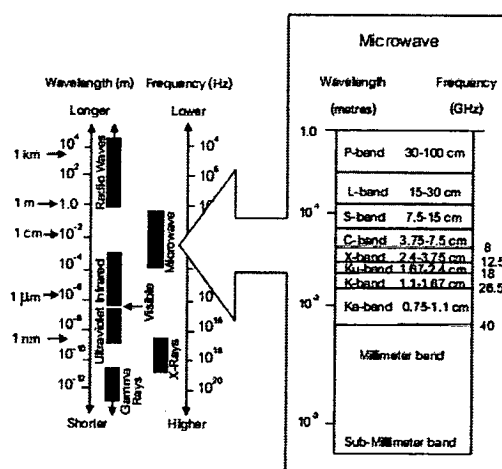
ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551)

ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟเป็นหัวใจหลักของงานวิจัย ถ้าทำการวิจัยโดยขาดความรู้พื้นฐานงานวิจัยดังกล่าวจะขาดความน่าเชื่อถือและไม่มีคุณภาพ และหากงานวิจัยเน้นการศึกษาในเชิงทฤษฎี ความรู้พื้นฐานเชิงทฤษฎีทางด้านไมโครเวฟยังมีความจำเป็น โดยองค์ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟมีดังนี้

2.1.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไมโครเวฟ

ช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงคลื่นของไมโครเวฟ (0.3 -300 GHz หรือในช่วงความยาวคลื่น 30 ซม. – 0.3 มม.) มาใช้เป็นแหล่งพลังงานให้ความร้อนเพื่อใช้แปรรูปวัตถุดิบต่าง ๆ ในทางอุตสาหกรรม การให้ความร้อนแก่วัตถุด้วยไมโครเวฟเป็นวิธีหนึ่งที่น่าสนใจและต่างจากวิธีการให้ความร้อนแบบเก่าที่ให้ความร้อนจากภายนอกผ่านผิววัตถุ เมื่อคลื่นไมโครเวฟผ่านเข้าไปในวัสดุไดอิเล็กตริกพลังงานของไมโครเวฟจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนโดยวัสดุไดอิเล็กตริก การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟนั้นดีกว่าการให้ความร้อนแบบเก่า (ใช้อากาศร้อนหรือไอน้ำ) ซึ่งมีปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของการกระจายอุณหภูมิและความชื้นภายใน



ภาพที่ 2.1 สเปกตรัมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและช่วงความถี่ของไมโครเวฟ (นพวรรณ คุณาม, 2550)

ตามภาพที่ 2.1 ช่วงความถี่ของไมโครเวฟจะอยู่ติดกับช่วงความถี่คลื่นของวิทยุที่ใช้ในการกระจายเสียงแต่ช่วงความถี่ของไมโครเวฟมักจะนำไปใช้สำหรับการโทรคมนาคม เช่น โทรศัพท์มือถือ และสัญญาณเรดาร์เพื่อป้องกันปัญหาการขัดแย้ง จึงได้มีการจำกัดช่วงความถี่เฉพาะสำหรับการใช้งานในเชิงอุตสาหกรรมวิทยาศาสตร์และการแพทย์ เรียกว่า ISM (Industrial Scientific and Medical) ซึ่งความถี่ของรังสีบางอย่างยอมให้นำไปใช้งานในด้านอื่นได้ เช่น อุปกรณ์สื่อสารความถี่ไมโครเวฟในช่วงความถี่ ISM คือที่ตำแหน่ง 433 MHz 915 MHz และ 2,450 MHz ความถี่แรกไม่ค่อยเป็นที่นิยมใช้กันทั่วไปความถี่ที่สองไม่อนุญาตให้ใช้โดยทั่วไปในทวีปยุโรป นอกจากได้รับอนุญาตโดยต้องจำกัดการรบกวนเนื่องจากความถี่ 915 MHz มีข้อได้เปรียบบางอย่างในการใช้งานเชิงอุตสาหกรรม สำหรับเตาอบไมโครเวฟบ้านจะใช้กับความถี่ 2,450 MHz เท่านั้นโดยมีความยาวคลื่นในอากาศเท่ากับ 4.8 นิ้ว (12.192 cm) ปัญหาของการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟเกี่ยวข้องกับโดยตรงกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าการกระจายตัวของอุณหภูมิและความชื้นรวมทั้งสมบัติของวัสดุไดอิเล็กตริก ดังนั้นจึงต้องรู้ สมบัติของวัสดุไดอิเล็กตริกรวมทั้งการควบคุมสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ก่อให้เกิดความร้อนภายในวัสดุไดอิเล็กตริก ความร้อนที่เกิดขึ้นจะส่งผลถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิความชื้น และสมบัติไดอิเล็กตริกด้วย

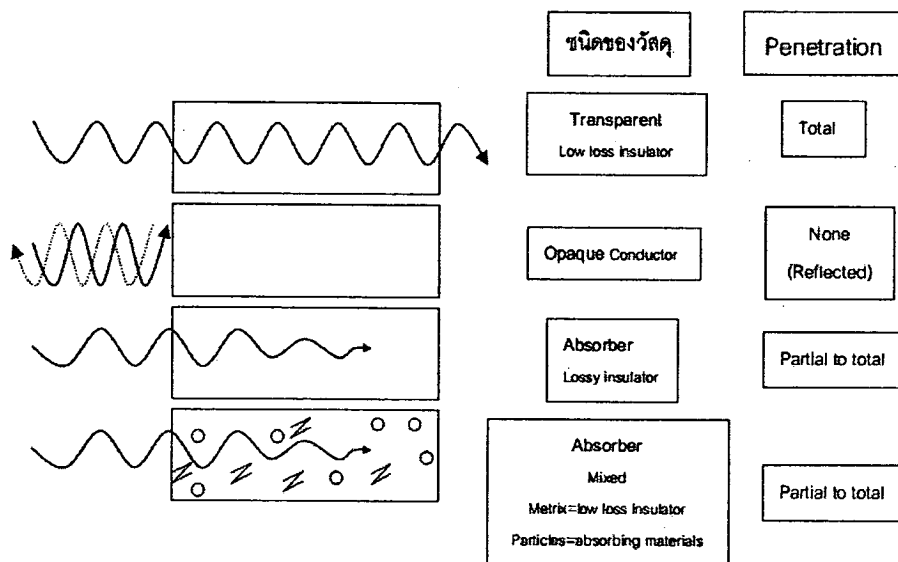
ในขณะที่ไมโครเวฟแพร่ผ่านอากาศพลังงานซึ่งพิจารณาให้มีสมบัติเหมือนอนุภาคที่ไม่มีมวลเรียกว่าโฟตอน (Photon) นั้นจะแพร่ผ่านพื้นที่ว่างด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วแสง (3×10^8 m/s) อนุภาคจะเคลื่อนที่ในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกันเสมอและอยู่บนระนาบตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นสำหรับในอากาศไมโครเวฟจะแพร่กระจายด้วยความเร็วแสงซึ่งเป็นความเร็วสูงสุดที่พลังงานสามารถเดินทางได้แต่สำหรับวัสดุเมื่อไมโครเวฟผ่านเข้าไปภายในเนื้อวัสดุที่มีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานที่ถูกดูดซับไว้ไปเป็นความร้อนนั้นขนาดของความยาวคลื่นจะลดลงเรื่อย ๆ อันเนื่องมาจากการส่งถ่ายของพลังงานนั่นเอง โดยความหนาแน่นของสนามไฟฟ้ากำลังจะลดลงแบบเอ็กโปเนนเชียล (Exponential) เมื่อเทียบกับระยะจากผิววัสดุความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่น (Penetration Depth) คือระยะจากผิววัสดุเข้าไปยังภายในเนื้อวัสดุซึ่งทำให้สนามไฟฟ้ากำลังลดลงไปเป็น 0.38 เท่าจากผิววัสดุโดยที่คลื่นนี้ยังคงแทรกสอดเข้าไปได้เมื่อเลยตำแหน่งนี้ไปการแพร่กระจายของไมโครเวฟผ่านวัสดุชนิดต่าง ๆ นั้นจะมีลักษณะคล้ายการแพร่กระจายของแสงผ่านวัสดุชนิดต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.2 และสามารถอธิบายได้ดังนี้

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

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

3. (Absorber Material) ส่วนมากเป็นวัสดุที่มีสมบัติเป็นฉนวน เช่น ขาง วัสดุโพลีเมอร์ เป็นต้น วัสดุประเภทนี้ เมื่อไมโครเวฟส่งผ่านจะมีความสามารถในการดูดซับคลื่นบางส่วนและเกิดการสูญเสียไปเป็นพลังงานความร้อนซึ่งความลึกที่คลื่นสามารถส่งเข้าไปภายในเนื้อวัสดุเพื่อทำให้เกิดความร้อนจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการทะลุทะลวงของวัสดุ

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



ภาพที่ 2.2 การแพร่ของคลื่นไมโครเวฟผ่านวัสดุต่างๆ (นพวรรณ คูงาม, 2550)

2.1.2 ข้อดีของการทำความร้อนไมโครเวฟ (The Advantages of Microwave Heating)

1. ใช้เวลาน้อย (High Speed) ประหยัดเนื้อที่และแรงงาน ลดจำนวนวัสดุที่เสียเนื่องจากอุปกรณ์ทำงานส่วนใหญ่ไม่เคลื่อนที่ (Stationary part)

2. การทะลุทะลวงของพลังงาน (Energy Penetration) ไมโครเวฟสามารถทะลุทะลวงเข้าไปกำเนิดพลังงานความร้อนภายในวัสดุทำให้มีความร้อนกระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งวัสดุการให้ความร้อนแบบนี้จะให้ความร้อนจากผิวนอกวัสดุจากก่อให้เกิดความเสียหายที่ผิวนอกเพราะมีอุณหภูมิสูงเกินไปในขณะที่ภายในเนื้อวัสดุยังไม่ได้คุณภาพตามที่ต้องการนอกจากนั้นยังใช้เวลานานเพราะข้อจำกัดทางการนำความร้อน ดังนั้นการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจึงให้คุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ดีกว่า



ภาพที่ 2.3 การเกิดความร้อนภายในวัสดุ (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551)

3. ความสามารถในการเลือกวัสดุรับความร้อน (Selective Energy Absorption) วัสดุบางชนิดสามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ทันทีแต่วัสดุบางชนิดไม่สามารถดูดซับพลังงานได้ คุณสมบัติเหล่านี้เป็นข้อได้เปรียบอีกประการหนึ่งของกระบวนการไมโครเวฟ ตัวอย่างเช่น สามารถให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์ที่บรรจุหีบห่อโดยไม่ทำลายหีบห่อนั้น

4. การควบคุมด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์อย่างทันทีทันใด (Instantaneous Electronic Control) อุปกรณ์ให้ความร้อนแบบเก่าเช่น เตาอบ ต้องใช้เวลานานในการปรับอุณหภูมิ แต่เตาไมโครเวฟสามารถปรับอุณหภูมิด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งใช้เวลาน้อยมาก (ภายในเสี้ยววินาที)

5. มีประสิทธิภาพสูง (High Efficiency) การทำความร้อนด้วยไมโครเวฟใช้พลังงานน้อยกว่าการทำความร้อนแบบเก่ามากเมื่อให้ปริมาณความร้อนเท่ากัน (การทำความร้อนแบบเก่ามีประสิทธิภาพโดยรวมประมาณ 10% - 30% ในขณะที่ไมโครเวฟมีประสิทธิภาพโดยรวมประมาณ 60% - 70%)

6. ไมโครเวฟเป็นกระบวนการสะอาด (Microwave Processing is Clean) กระบวนการทางไมโครเวฟไม่สร้างมลภาวะ ต่างจากกระบวนการให้ความร้อนแบบอื่นที่ใช้เชื้อเพลิงในการเผาไหม้

ในปัจจุบันกระบวนการทางไมโครเวฟถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม (เช่น การอบแห้งอาหาร อบแห้งไม้และกระดาษ อุตสาหกรรมพลาสติก งานทางการแพทย์ การคลายเนื้อเยื่อที่แข็งตัว การอุ่นเลือด และ กำจัดเนื้องอก นอกจากนี้ไมโครเวฟยังสามารถใช้ในงานแยกสารระเหยออกจากวัสดุ การประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟถูกสรุปไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การประยุกต์ใช้งานที่เกี่ยวกับไมโครเวฟ (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551)

วัสดุ (Materials)	กระบวนการ (Process)
Chemistry	1. Continuous Drying of fine Chemicals 2. Continuous Heating of Corrosive and Abrasive Product 3. Heating and Drying of Metal Oxide 4. Reaction Accelerator in Chemicals Processing 5. Heating/Liquefying of High Viscous Chemical Raw- Materials 6. Drying of Peroxide/Explosive Materials 7. Continuous High Process Thermo Chemicals Conversion of Organic Product
Pharmaceutical	1. Vacuum Drying of Tablets and Active Ingredients Removing Solvents Under Explosive Protection and CGMP 2. Pasteurization/Improvement of Shelf Life of Pharmaceutical Product 3. Heating/Liquefying of High Viscous Pharmaceutical and Cosmetically Raw- Materials 4. Continuous High-end Vacuum Drying 5. Ultra Fast Heating/Sterilization of Sera and Protein Product
Ceramics	1. Heating and Drying of Ceramics Goods 2. Drying of Ceramics Catalyses 3. Drying of Fiber Ceramics 4. Continuous Sintering of Ceramics Pellets 5. Sintering of Oxide Ceramics
Plastics	1. Heating of Laminated Sheet and Board 2. Polymerization of Fiber Glass Reinforced profiles 3. Preheating of Plastic Profiles 4. Heating of Epoxy Pipes/Tube

	5. Drying of plastic Raw- Materials and Granulate 6. Heating of Plastic Web and Sheet
Medical	1. Heating/Melting of Polyamide Tubing Used for Infusion System, Catheter etc. 2. Drying of Dialysers and Membrane Products
Paper/Sheet material	1. Drying/Preheating of Paper Webs in the Printing Industry 2. Drying of Adhesive Coatings On Paper Webs

2.2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูน

(ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551)

กลไกของกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายในวัสดุพูนซึ่งความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกและปรากฏการณ์พื้นฐานนี้สามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูนโดยใช้กรรมวิธีการให้ความร้อนแบบไมโครเวฟต่อไป

2.2.1 กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูน

เพื่อให้เกิดความเข้าใจในกระบวนการอบแห้งการวิเคราะห์ในเชิงลึกของกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารที่เกิดขึ้นในวัสดุพูนในระหว่างกระบวนการอบแห้งถือว่าเป็นสิ่งสำคัญก่อนที่จะไปออกแบบระบบที่ใช้งานในทางปฏิบัติกระบวนการอบแห้งวัสดุจะคาบเกี่ยวกับกระบวนการเบื้องต้นที่เกิดขึ้นพร้อมกันสองกระบวนการ นั่นก็คือ

1. กระบวนการถ่ายเทความร้อน กล่าวคือ ความร้อนที่ถ่ายเทจากสิ่งแวดล้อม (เช่น ลมร้อนและไอน้ำเป็นต้น) ไปยังเนื้อวัสดุเพื่อทำการเคลื่อนย้ายความชื้นและระเหยความชื้นที่มีอยู่
2. กระบวนการถ่ายเทมวลสาร กล่าวคือ มวลสารที่ถ่ายเทอาจอยู่ในรูปของเหลวภายในเนื้อวัสดุและที่ผิวของวัสดุ

ปัจจัยสำคัญที่ครอบคลุมถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการเพื่อหาปรากฏการณ์ต่าง ๆ ในกระบวนการ เช่น อัตราอบแห้ง การกระจายตัวของอุณหภูมิและความชื้นภายในเนื้อวัสดุเป็นปัจจัยที่ขึ้นกับเวลา

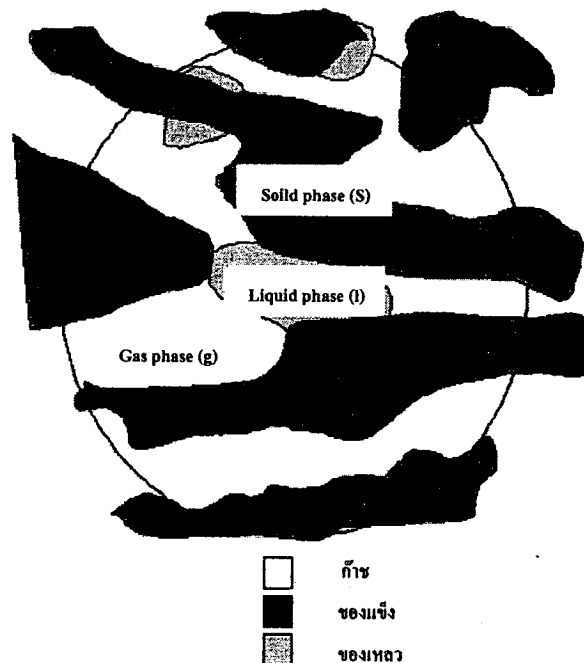
การอบแห้งวัสดุพูนที่ไม่อิมตัวจะต้องเกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนและการเคลื่อนตัวของความชื้น(ประกอบไปด้วยของเหลวไอน้ำและอากาศ) ซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกันในวัสดุพูนอย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีของกระบวนการอบแห้งจะมีความซับซ้อนเป็นอันมากเนื่องมาจากการคาบเกี่ยวกันของสมการหลายชุดที่เป็นลักษณะไม่เชิงเส้นรวมถึงเงื่อนไขขอบเขตที่ซับซ้อนกว่ากรณีทั่ว ๆ ไปอย่างไรก็ตามปัจจุบันการคำนวณของคอมพิวเตอร์มีสมรรถนะสูงมาก

สามารถใช้ในการแก้ปัญหาที่มีเงื่อนไขที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดี ทฤษฎีต่าง ๆ ทางด้านการถ่ายเทความร้อนและมวลสารก็มีการพัฒนาเป็นอย่างมากเมื่อมีคอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูงมาช่วยในการคำนวณ

2.2.2 รูปแบบโครงสร้างของวัสดุพูน

วัสดุส่วนใหญ่ในทางวิศวกรรมเป็นวัสดุพูน กล่าวคือ ตัววัสดุประกอบด้วยสสารที่มี 3 สถานะ คือ สถานะของแข็ง (Solid Phase หรือ Solid Matrix) ของเหลว (Liquid Phase) และก๊าซ (Gas Phase) ที่อยู่ในช่องว่างหรือรูพูน (Void) ในภาพที่ 2.4

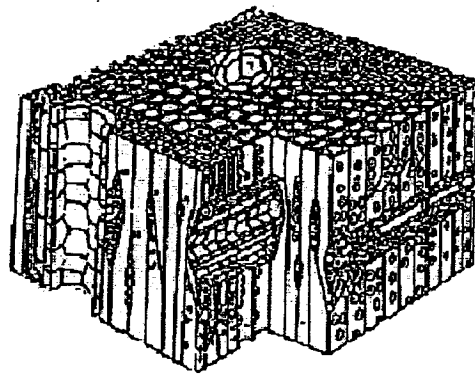
ตัวอย่างวัสดุพูนที่ใช้งานในทางวิศวกรรม เช่น ดินและคอนกรีตในงานวิศวกรรม ปูพื้น Ceramic ในงานวิศวกรรมโลหะในงานวิศวกรรมเคมีฉนวนความร้อนในงานวิศวกรรมเครื่องกล และเคมี เนื้อเยื่อต่าง ๆ ผิวหรือ Membrane ในงานวิศวกรรมชีวภาพและการแพทย์รวมถึงอาหาร และผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรในงานวิศวกรรมเกษตร



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของวัสดุพูนทั่วไป (โคภิดา สังข์สุนทร, 2550)

เมื่อพิจารณาในระดับโครงสร้างของวัสดุพูน เราสามารถแบ่งออกเป็นสองรูปแบบใหญ่ ๆ ชนิดแรก ของเหลวหรือความชื้นจะเคลื่อนตัวอยู่รอบนอกอนุภาคของแข็ง (Solid Matrices) ไปตามช่องว่าง (Pores) ที่เกิดขึ้นจากส่วนประกอบของผิวอนุภาคของแข็งโดยที่ความชื้นดังกล่าวนี้ไม่สามารถส่งผ่านหรือดูดกลืนเข้าไปในชั้นผิวของอนุภาคของแข็งได้ เราเรียกวัสดุพูนชนิดนี้ว่าวัสดุ

พูนแบบไม่ชื้นมาก (Nonhygroscopic Porous media) หากพิจารณาโครงสร้างของวัสดุพูนชนิดนี้ พบว่าช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็งหรือรูพูนมีขนาดใหญ่พอ ดังนั้นอิทธิพลของความดันไอกภายในช่องว่างจะมีความสำคัญน้อย โครงสร้างของวัสดุพูนชนิดที่ สองความชื้นจะยึดอยู่กับ โครงสร้างของอนุภาคของแข็งภายใต้พันธะทางเคมีและฟิสิกส์ ซึ่งจะเป็นพันธะที่สำคัญในการหน่วง ให้ความชื้นคงอยู่ในโครงสร้างเมื่อพิจารณาโครงสร้างของวัสดุพูนชนิดนี้ พบว่าช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็งมีขนาดรัศมีเล็กมากประมาณ 0 ถึง 1 นาโนเมตร เราจะเรียวัสดุพูนชนิดนี้ว่าวัสดุพูนแบบชื้นมาก (hygroscopic porous media) ซึ่งกรณีนี้จะรวมถึงวัสดุพูนบางชนิด เช่นวัสดุชีวภาพที่ไม่สามารถแบ่งแยกลักษณะ โครงสร้างได้ชัดเจน ตัวอย่างเช่น เนื้อไม้ดังแสดงในภาพที่ 2.5 ซึ่งจะมีโครงสร้างเนื้อวัสดุที่ซับซ้อนที่เรียกว่าโครงสร้างวัสดุพูนแบบเซลล์ูลาร์-คาพิลลารี (Cellular Capillary) ซึ่งในกรณีนี้ การเคลื่อนที่ของความชื้นจะไม่เสถียรภาพและการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีจะทวีความซับซ้อนกว่าในกรณีแรก

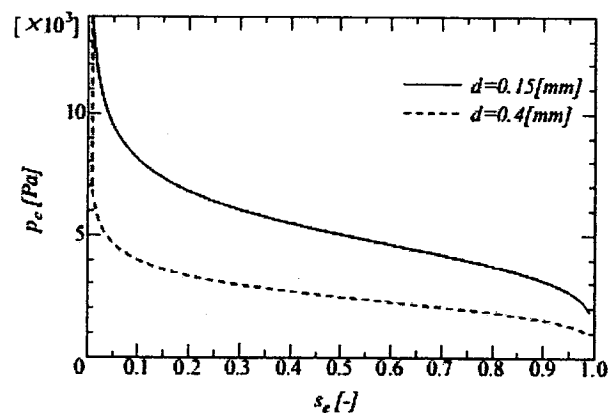


ภาพที่ 2.5 โครงสร้างวัสดุพูนแบบเซลล์ูลาร์-คาพิลลารี (Cellular Capillary) (โสภิตา, 2550)

สำหรับวัสดุพูนในกรณีแรก (Nonhygroscopic Porous media) ส่วนใหญ่จะเรียกว่าวัสดุพูนแบบคาพิลลารี (capillary porous media) เนื่องจากของเหลวหรือความชื้นภายในวัสดุจะเคลื่อนตัวในช่องว่างที่เป็นรูพูน เนื่องจากอิทธิพลของความดันคาพิลลารี (Capillary Pressure) โดยที่ความดันคาพิลลารีนี้จะเป็ฟังก์ชันของแรงตึงผิวมุมสัมผัสและลักษณะ โครงสร้างทางกายภาพของวัสดุพูน ความดันคาพิลลารีสามารถนิยามได้ดังนี้คือเมื่อของไหลสองชนิดที่ไม่ผสมกัน (Immiscible Fluids) (เช่น น้ำและอากาศ) เกิดการสัมผัสกัน ในช่องว่างของวัสดุพูน การไม่ผสมกันของของไหลสองชนิดทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของความดันตลอดช่วงผิวรอยต่อเรียกว่าความดันคาพิลลารี (P_c) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

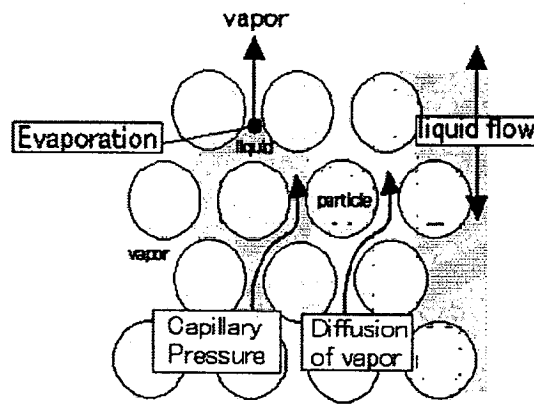
$$P_c = P - P_l \quad (2.1)$$

เมื่อ P คือความดันในของไหลที่มีสถานะแห้ง (Non-Wetting Phase) เช่นอากาศ ส่วน P_l คือ ความดันในของไหลที่มีสถานะเปียก (Wetting Phase) ความดันคาพิลลารีมีคุณสมบัติที่สมดุลและสัมพันธ์โดยตรงกับแรงตึงผิวระหว่างของไหลทั้งสองชนิด จากการศึกษาพบว่าค่าความดันคาพิลลารีเพิ่มขึ้นเมื่อค่าอิมิตัวของของไหลสถานะแห้งเพิ่มขึ้น แต่ก็ขึ้นกับคุณสมบัติของความอิมิตัวของวัสดุนั้นๆ ด้วยภาพที่ 2.6 แสดงข้อมูลจากการทดลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาพิลลารีภายในวัสดุพรุนและคุณสมบัติของของไหลที่สภาวะต่าง ๆ



ภาพที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาพิลลารีภายในวัสดุพรุนและค่าการอิมิตัวของน้ำ ที่อุณหภูมิของแข็งต่างกัน (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551)

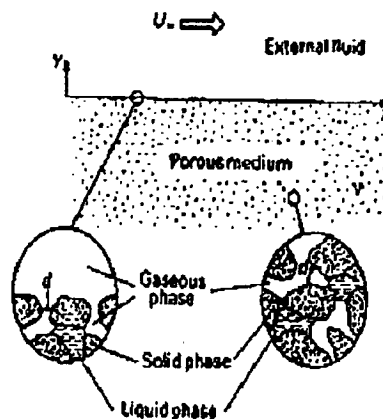
กลไกสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนตัวของไอน้ำในช่องว่างที่เป็นรูพรุนคือผลของการแพร่กระจายไอน้ำ (vapor diffusion force) ซึ่งอธิบายได้ด้วยกฎของฟิคส์ (Fick's Law) ภาพที่ 2.7 แสดงถึงกลไกที่สำคัญต่อกระบวนการถ่ายเทมวลสารในวัสดุพรุนแบบคาพิลลารี



ภาพที่ 2.7 กระบวนการถ่ายเทมวลสารในวัสดุพอร์นแบบคาพลารีต่างกัน (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551)

2.2.3 กลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในกระบวนการอบแห้งในวัสดุพอร์น

กลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในกระบวนการอบแห้งในวัสดุพอร์นแบบคาพิลลารีอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าอิทธิพลจากความดันคาพิลลารีถือว่าเป็นกลไกหลักในการเคลื่อนย้ายมวลความชื้นออกจากโครงสร้างวัสดุพอร์นแต่ในวัสดุพอร์นทั่วไปในทางปฏิบัติวัสดุพอร์นมีโครงสร้างซับซ้อนและมีกลไกหลายอย่างที่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนย้ายมวลความชื้น



ภาพที่ 2.8 ไดอะแกรมกระบวนการอบแห้งวัสดุพอร์น (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551)

ภาพที่ 2.8 แสดงตัวอย่างวัสดุพอร์นที่เปียกชื้นผ่านกระบวนการอบแห้งภายใต้สภาวะภายนอกคงที่ กล่าวคืออุณหภูมิความชื้นและความเร็วอากาศถูกรักษาให้คงที่ตลอดช่วงการทดสอบ

การเคลื่อนตัวของความชื้นจากภายในสู่ผิวหน้าภายใต้อิทธิพลของกลไกต่างๆจะปรากฏขึ้น (ภาพที่ 2.8) โดยที่กลไกที่ควบคุมการเคลื่อนตัวของความชื้นสามารถสรุปได้ดังนี้

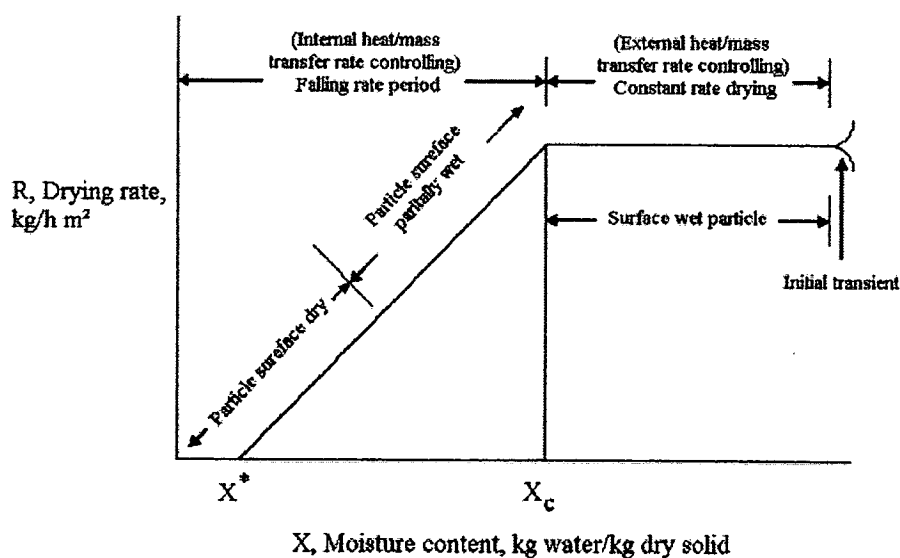
1. แรงดันคาพิลลารี
2. การแพร่กระจายตัว (Diffusion) เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสสาร
3. การเปลี่ยนสถานะของสสาร กล่าวคือเกิดการระเหยและการกลั่นตัว

(Evaporation-Condensation Mechanism) ภายในรูพรุน

4. การแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุ (surface diffusion)
5. การเคลื่อนตัวของความชื้นเนื่องจากความแตกต่างของความดันรวม
6. การเคลื่อนตัวของความชื้นเนื่องจากอิทธิพลของแรงโน้มถ่วง
7. การเคลื่อนตัวหาความชื้นเนื่องจากการกระจายตัวเชิงอุณหภูมิ (Thermo-Diffusion)

โดยทั่วไปกลไกที่กล่าวมาข้างต้นมีความสำคัญต่อกระบวนการการอบแห้งวัสดุพรุนที่คาบเวลาต่างกันซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถแยกกลไกแต่ละชนิดออกจากกันได้ชัดเจนเนื่องจากความซับซ้อนของกระบวนการอบแห้งทำได้เพียงพิจารณาเฉพาะกลไกหลักที่สำคัญกว่าเท่านั้นการพิจารณาว่ากลไกใดมีความสำคัญต่อกระบวนการอบแห้งนั้นขึ้นอยู่กับชนิดและโครงสร้างของวัสดุ รวมไปถึงวิธีการให้พลังงานความร้อนโดยทั่วไปข้อมูลจากการทดลองในห้องปฏิบัติการมักนำมาใช้ประกอบการวิเคราะห์กลไกหลักด้วย

ภาพที่ 2.9 กระบวนการอบแห้งสามารถแบ่งออกเป็นสองคาบเวลาใหญ่ๆคือคาบเวลาที่อัตราการอบแห้งคงที่ (Constant Rate Period) อัตราการระเหยของไอน้ำที่ผิวหน้าจะเท่ากับอัตราการเคลื่อนตัวของน้ำ (ของเหลว) ภายในวัสดุพรุนที่ เต็มเต็มที่ ผิวหน้า ช่วงปลายของคาบเวลานี้ความชื้นภายในวัสดุเข้าใกล้ค่าความชื้นวิกฤติ (Critical Moisture Content, x_c) โดยค่าความชื้นวิกฤติขึ้นอยู่กับชนิดของโครงสร้างและการเกาะตัวของความชื้นในวัสดุเมื่อความชื้นในวัสดุมีค่าน้อยกว่าค่าความชื้นวิกฤติ กระบวนการอบแห้งจะเข้าสู่คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลง (Falling Rate Period) โดยปกติคาบเวลานี้ใช้ระยะเวลามากกว่าคาบเวลาที่ อัตราการอบแห้งคงที่เมื่ออัตราการอบแห้งมีค่าลดลงเข้าใกล้ศูนย์จะมีความชื้นคงเหลืออยู่ค่าหนึ่ง (มีค่าน้อยมาก) ภายใต้สภาวะการอบแห้งค่าความชื้นนี้เราเรียกว่าค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content) ในภาพที่ 2.9



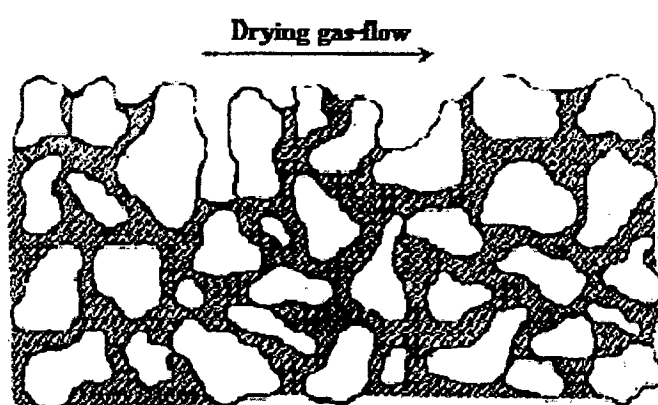
ภาพที่ 2.9 คาบเวลาของกระบวนการอบแห้งและกลไกควบคุมการถ่ายเทมวลสารในวัสดุพูน
(ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551)

2.2.4 คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งคงที่ (Constant Rate Period) โดยปกติเมื่อวัสดุมีความชื้นสูงมากๆ อัตราการอบแห้งจะถูกควบคุมโดยอิทธิพลภายนอกซึ่งมีผลต่อวัสดุที่นำมาอบแห้ง เช่น อุณหภูมิ ความเร็วของก๊าซ ความดันรวม และความดันย่อยของไอน้ำที่ผิวหน้าจะเท่ากับอัตราการเคลื่อนตัวของน้ำภายในวัสดุพูนที่มาเติมเต็มที่ผิวหน้าทำให้มีฟิล์มของเหลวปกคลุมที่ผิวหน้าวัสดุตลอดเวลา ตัวแปรที่ควบคุมกระบวนการอบแห้งในคาบเวลานี้คือพลังงานความร้อนที่ป้อนให้กับตัววัสดุหรือการถ่ายเทมวลสารออกจากผิววัสดุ การถ่ายเทมวลสารในช่วงนี้เกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุ (surface diffusion) เป็นหลักเป็นที่ทราบกันดีว่าหากความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำซึ่งถ่ายเทมาจากลมร้อน อุณหภูมิผิวหน้าของวัสดุสามารถประมาณได้ด้วยอุณหภูมิกระเปาะเปียก การคำนวณอัตราการอบแห้งในคาบเวลานี้สามารถทำได้ง่ายโดยปกติการถ่ายเทความร้อนโดยการพา (force convection) จะใช้คาบเวลาดังกล่าวในการวิเคราะห์

2.2.5 คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลง (Falling Rate Period) เมื่อกระบวนการการอบแห้งดำเนินต่อเนื่องไปเรื่อยๆ จนความชื้นเข้าสู่ความชื้นวิกฤติ (ค่าความชื้นวิกฤตินี้ขึ้นกับความสามารถในการเคลื่อนตัวของความชื้นภายในโครงสร้างวัสดุเป็นสำคัญ) ความชื้นในวัสดุที่เคลื่อนตัวไปยังผิวหน้าภายใต้อิทธิพลการแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุเริ่มมีไม่เพียงพอต่อปริมาณความชื้นที่ระเหย

ออกไปทำให้ฟิล์มของเหลวที่บริเวณผิวหน้าวัสดุเกิดการแยกตัวและเกิดขึ้นความแห้งในบางจุดดังแสดงในภาพที่ 2.10

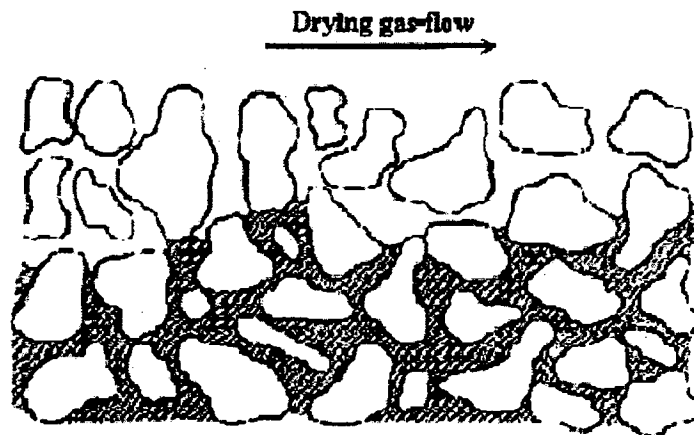
2.3.6 คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลง(falling rate period) เมื่อกระบวนการอบแห้งดำเนินต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ เมื่อความชื้นมีค่าเข้าสู่ความชื้นวิกฤติซึ่งค่าของความชื้นวิกฤตินี้จะขึ้นอยู่กับความยากง่ายของการเคลื่อนตัวของความชื้นภายในโครงสร้างที่แตกต่างกันของวัสดุเป็นสำคัญน้ำที่เคลื่อนตัวไปยังผิวหน้าภายใต้อิทธิพลของความดันคาพิลลารีมีไม่เพียงพอที่จะไปเติมเต็มแทนที่น้ำที่เพิ่งระเหยออกไปทำให้ฟิล์มของของเหลวบางๆที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าเกิดการแยกตัวในบางจุดในภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 ปรากฏการณ์ที่อัตราการอบแห้งลดลงระยะแรก (First Falling Rate Period)
(ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551)

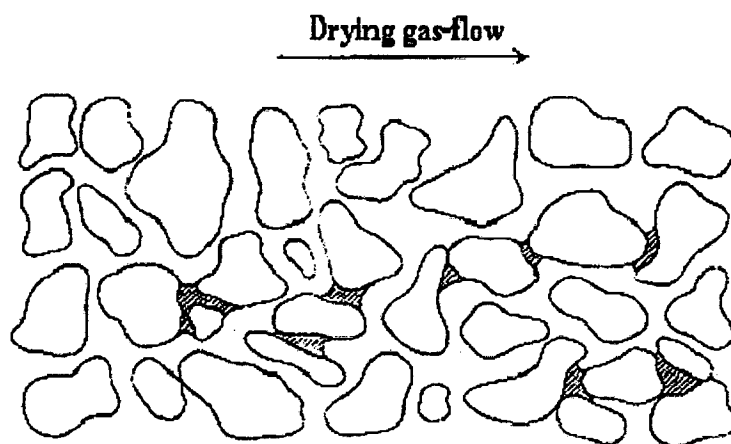
คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลงอย่างสมบูรณ์ในช่วงต้นของในคาบเวลานี้อัตราการอบแห้งโดยรวมเริ่มลดลงบางครั้งเรียกช่วงเวลานี้ว่าคาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลงระยะแรก (first falling rate period) เมื่อกระบวนการอบแห้งดำเนินต่อไปจนชั้นของความแห้งก่อตัวขึ้นอย่างสมบูรณ์ที่ผิวของวัสดุและเคลื่อนตัวเข้าสู่เนื้อวัสดุดังแสดงในภาพที่ 3.8 ช่วงนี้ เรียกว่าคาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลงระยะที่สอง (Second Falling Rate Period) การระเหยความชื้นในช่วงนี้เกิดขึ้นที่บริเวณผิวรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุแห้ง (ความชื้นในวัสดุบริเวณนี้ระเหยออกหมด) กับชั้นวัสดุเปียก (เนื้อวัสดุบริเวณที่ยังมีความชื้นอยู่)ซึ่งเรียกว่าผิวการระเหย (Evaporation Front) หรือผิวการอบแห้ง(Drying Front) หรือขอบเขตของการเคลื่อนที่ (Moving Boundary)โดยที่ผิวการระเหยจะเคลื่อนที่ตลอดคาบเวลาของการอบแห้ง การระเหยตัวของความชื้นที่ผิวของการระเหย ณ ตำแหน่งต่าง ๆ สามารถคำนวณได้จากกฎของเคลวิน (Kelvin's Law)ในคาบเวลานี้อัตราการเคลื่อนตัวของมวลสารหรือความชื้นภายในเป็นตัวแปรสำคัญในการควบคุมกระบวนการ คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลงนี้อาจ

สังเกตได้จากการลดลงอย่างรวดเร็วของอัตราการถ่ายเทมวลสารและความดันไอที่ผิววัสดุอย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติคาบเวลานี้สังเกตได้ยากจากการทดลองเนื่องจากความซับซ้อนของปรากฏการณ์



ภาพที่ 2.11 ปรากฏการณ์ที่อัตราการอบแห้งลดลงระยะที่สอง (Second Falling Rate Period)
(ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551)

ช่วงปลายของคาบเวลาอัตราการอบแห้งลดลงระยะที่สองสังเกตได้ว่าความชื้นภายในวัสดุเหลืออยู่เพียงเล็กน้อยและกระจายตัวในช่องว่างหรือรูพรุนขนาดเล็ก ดังภาพที่ 2.12 ช่วงสุดท้ายของกระบวนการนี้อัตราการอบแห้งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ซึ่งในกรณีนี้ความชื้นที่เหลืออยู่เรียกว่าค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content)



ภาพที่ 2.12 ปรากฏการณ์ที่อัตราการอบแห้งสิ้นสุดท้าย (End Stage of Drying)
(ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551)

2.3 ระบบการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551)

การทำความร้อนด้วยไมโครเวฟมีองค์ประกอบหลัก 3 ส่วนคือ ตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ (Magnetron) ท่อนำคลื่นไมโครเวฟ (Wave guide) และบริเวณทำความร้อน (ที่วัสดุทำความร้อน (Applicator) การเคลื่อนที่ของคลื่นไมโครเวฟจะเคลื่อนที่จากตัวกำเนิดผ่านมายังท่อนำคลื่นและเข้าสู่บริเวณทำความร้อนตามลำดับ

คลื่นสะท้อนที่เกิดจากการสะท้อนกลับของคลื่นเมื่อชนกับวัสดุทำความร้อนอาจทำให้ตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟเสียหายได้ ดังนั้นโดยทั่วไปเครื่องไมโครเวฟจะติดตั้งตัวคั่นคลื่น (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 (มีลักษณะเป็นคลื่นเดี่ยว) ที่ผ่านมาเครื่องไมโครเวฟส่วนใหญ่ผลิตแบบเตาอบ ซึ่งการวิเคราะห์พฤติกรรมของการทำความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเตาอบนั้นทำได้ยากมาก มีกระบวนการซับซ้อนไม่เหมาะสำหรับการวิเคราะห์เชิงทฤษฎี

สำหรับเครื่องไมโครเวฟแบบท่อนำคลื่น จะเกิดคลื่นเดี่ยวมีลักษณะเป็นระนาบและตกกระทบลงบนผิวหน้าวัสดุ ดังนั้นพฤติกรรมจึงไม่ซับซ้อนเหมือนเครื่องไมโครเวฟชนิดเตาอบ ดังนั้นการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีจึงอ้างอิงจากเครื่องไมโครเวฟลักษณะเดี่ยวเป็นหลัก

2.4 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสนามไฟฟ้ากับวัสดุไดอิเล็กตริก (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551)

หลักการพื้นฐานของการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟสารที่เป็นฉนวนไฟฟ้าหรือวัสดุไดอิเล็กตริก เช่น ไม้ กระดาษ พลาสติก เมื่อถูกนำเข้าไปในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโมเลกุลของสารวัสดุไดอิเล็กตริกจะหมุนและเคลื่อนที่หลายล้านครั้งโดยจะเคลื่อนที่ตามการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า โมเลกุลภายในวัสดุไดอิเล็กตริกจะมีสภาพเชิงขั้ว (Dipole) ที่เรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ สภาพเชิงขั้วในแต่ละโมเลกุลของวัสดุไดอิเล็กตริกประกอบไปด้วยขั้วบวกและขั้วลบ เมื่อมีสนามไฟฟ้าวิ่งผ่านวัสดุไดอิเล็กตริกทำให้สภาพเชิงขั้วในแต่ละโมเลกุลเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบและสลับขั้วตามการเปลี่ยนแปลงของเคลื่อน การสลับขั้วไปมาอย่างรวดเร็วของสภาพเชิงขั้วทำให้เกิดความเสียดทานขึ้นระหว่างโมเลกุล ส่งผลให้เกิดพลังงานออกมาในรูปของความร้อนภายในวัสดุไดอิเล็กตริก

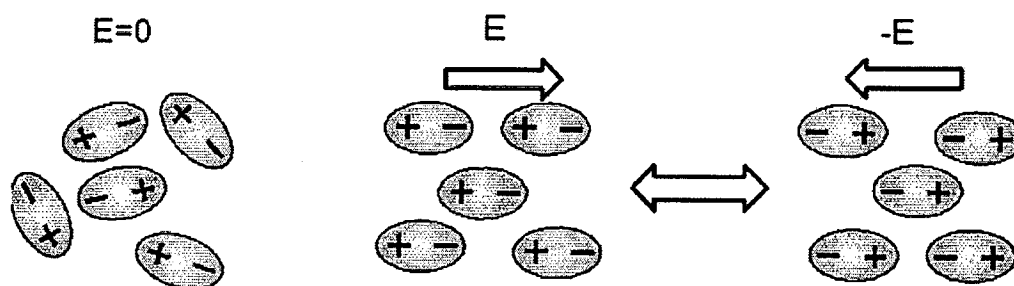
โดยทั่วไปความถี่ของคลื่นไมโครเวฟจะวัดในหน่วยเมกะเฮิรตซ์ (Megahertz, MHz) ซึ่งข้อตกลงนานาชาติว่าด้วยการกำหนดคลื่นความถี่สำหรับความถี่วิทยุ (Radio Frequency) และคลื่นความถี่สำหรับอุปกรณ์ไมโครเวฟ (Microwave Application) Jones and Rowley

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

กำหนดความถี่ของคลื่นไมโครเวฟดังนี้

- 4) 900 MHz (Depend on Country)
- 5) $2450 \text{ MHz} \pm 50 \text{ MHz}$



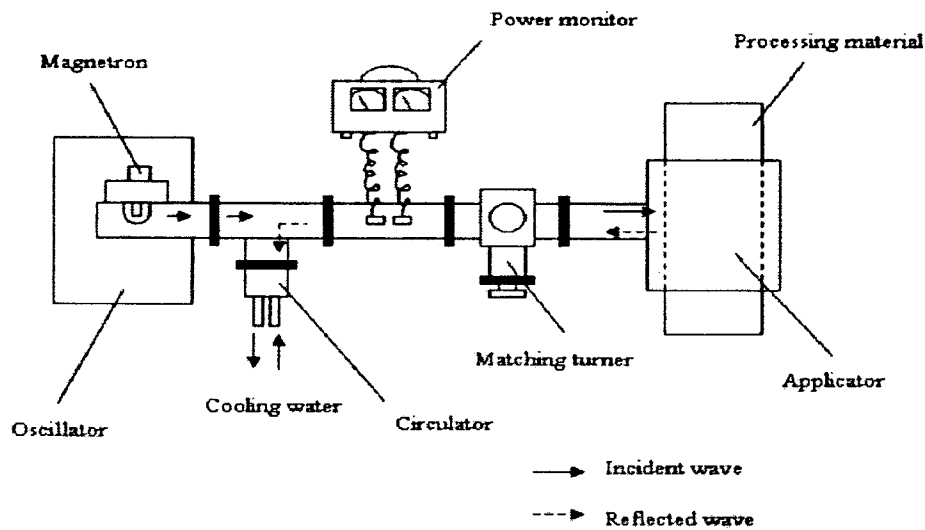
ภาพที่ 2.13 อันตรกิริยาระหว่างวัสดุไดอิเล็กตริกและสนามไฟฟ้า (Electric Field)

ในปัจจุบันเตาไมโครเวฟที่ใช้ทั่วไปตามครัวเรือนจะใช้ความถี่ที่ 2450 MHz ซึ่งมีความยาวคลื่นในอากาศเท่ากับ 4.8 นิ้ว (12.192 cm) ในขณะที่ความถี่เท่ากับ 900 MHz มีความยาวคลื่นในอากาศเท่ากับ 13 นิ้ว (33.02 cm) ส่วนการวัดกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟจะวัดในหน่วยกิโลวัตต์ที่อุณหภูมิห้องและความดันหนึ่งบรรยากาศ ซึ่งคลื่นไมโครเวฟกำลัง 1 kW สามารถทำให้น้ำจำนวน 2.5 lb (1.134 kg.) ระเหยได้ภายในเวลา 1 h ปัญหาการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าการกระจายของอุณหภูมิการกระจายของความชื้นรวมทั้งคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุทดสอบ ดังนั้นการรู้คุณสมบัติของวัสดุไดอิเล็กตริกรวมทั้งการควบคุมสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ก่อให้เกิดความร้อนภายในวัสดุไดอิเล็กตริกจึงมีความจำเป็น ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในวัสดุไดอิเล็กตริกส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความชื้นและคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุเองด้วย

2.5 อุปกรณ์สำหรับกระบวนการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ (ผดุงศักดิ์ รัตนเคโซ, 2551)

ในการวิจัยครั้งนี้ศึกษาการสร้างเครื่องไมโครเวฟไฟโรไลซิสต้นแบบ จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาส่วนประกอบของไมโครเวฟเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบระบบต่าง ๆ ในเครื่องไมโครเวฟไฟโรไลซิส ระบบไมโครเวฟทั่วไปประกอบด้วยส่วนหลัก 3 อย่าง คือ ตัวกำเนิดคลื่นท่อนำคลื่น และเตาอบ (Cavity) อุปกรณ์ง่าย ๆ พวกนี้จะมีความสำคัญตามหน้าที่ของมัน เมื่อเราเข้าใจว่าเตาอบทำงานอย่างไร การทำงานภายในของไมโครเวฟ จะทำให้การระร้อนได้นั้นขึ้นอยู่กับการออกแบบส่วนประกอบและเอาส่วนประกอบเหล่านี้มารวมกันเป็นระบบเดียวกัน เมื่อเราเข้าใจถึงอิทธิพลต่าง ๆ ของเงื่อนไขไมโครเวฟ เราก็จะสามารถนำความเข้าใจที่มีอยู่ไปออกแบบไมโครเวฟขึ้นได้ ฉะนั้นอย่างน้อยเราต้องเข้าใจทำงานของส่วนประกอบต่าง ๆ ในหัวข้อนี้จะสรุปนำไปใช้งานได้

การทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริกมีกลไกเช่นเดียวกันแต่มีวิธีการในการที่ทำให้บรรลุเป้าหมายแตกต่างกันโดยระบบพื้นฐานของระบบเหล่านี้จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดพลังงานความถี่สูงหรือ เจนเนอเรเตอร์ และใช้ท่อนำคลื่น (Waveguide) ไปยังชิ้นงาน (Load) ที่อยู่ภายในแอปพลิเคชัน (Applicator)



ภาพที่ 2.14 องค์ประกอบพื้นฐานของการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ (วราภรณ์ ชะอุ่ม, 2551)

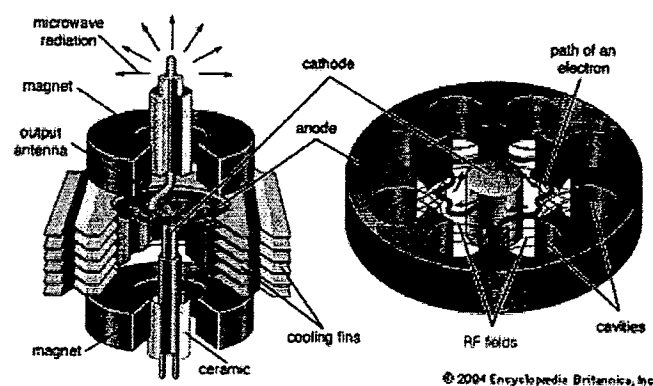
แมกนีตรอน (Magnetron) ที่ติดตั้งบนท่อนำคลื่น (Waveguide) ทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟหรือสร้างพลังงานไมโครเวฟ ไมโครเวฟจะเคลื่อนที่ผ่านท่อนำคลื่นไปยังวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการที่อยู่ภายในควิตี้ (Cavity) หรือ แอปพลิเคเตอร์ (Applicator) เมื่อพลังงานไมโครเวฟเข้าสู่วัสดุแล้ว ส่วนที่นอกเหนือจากการดูดซับ (Absorbed Wave) โดยตัววัสดุ จะมีบางส่วนที่ทะลุผ่าน (Transmitted Wave) วัสดุและจะมีบางส่วนที่สะท้อนกลับ (Reflected Wave) ไปซึ่งอัตราพลังงานไมโครเวฟที่สะท้อนกลับ จะขึ้นอยู่กับค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric Properties) ของวัสดุและคุณลักษณะประจำตัวของวัสดุเอง คลื่นสะท้อนที่เกิดจากการสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟขณะชนกับวัสดุ อาจทำให้ตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟเสียหายได้ (โดยเฉพาะระบบที่ใช้ไมโครเวฟกำลังสูง) ดังนั้นโดยทั่วไประบบไมโครเวฟจะติดตั้งตัวดักคลื่น หรือที่เรียกทั่วไปว่า เซอร์คิวเลเตอร์ (Circulator) (อุปกรณ์ทำให้คลื่นไมโครเวฟเดินได้ทางเดียว) ระหว่างตัวกำเนิดคลื่นและท่อนำคลื่นเพื่อป้องกันการเสียหายดังกล่าว นอกจากนั้นยังติดตั้งอุปกรณ์ปรับแต่งคลื่นเพื่อที่จะลดพลังงานสะท้อนกลับนี้ โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าอุปกรณ์ปรับค่าคลื่น (Matching Tuner) มาติดตั้งระหว่างท่อนำคลื่นและบริเวณทำความร้อน อุปกรณ์ตัวนี้ทำหน้าที่ปรับให้คลื่นไมโครเวฟมีการดูดซับในตัววัสดุได้ดีขึ้น โดยที่การสะท้อนของคลื่นที่ผิววัสดุลดลง ส่งผลทำให้ระบบไมโครเวฟทำงานที่ประสิทธิภาพสูงสุดอีกด้วย

รายละเอียดของอุปกรณ์แต่ละตัวภายในระบบทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ พร้อมหลักการทำงานเบื้องต้น

1) แหล่งกำเนิดพลังงานความถี่สูงหรือเจนเนอเรเตอร์ (Generator)

โดยแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟหรือเจนเนอเรเตอร์ (Generator) จะประกอบด้วยแหล่งจ่ายกำลังไฟกระแสตรงและตัวแมกนีตรอน (Magnetron) หรือไคลสตรอน (Klystron) โดยตัวแมกนีตรอน (Magnetron) เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดอันหนึ่งในระบบทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ แมกนีตรอนเป็นตัวสร้างคลื่นไมโครเวฟโดยอาศัยการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ (DC Energy) ภายใต้อิทธิพลของไฟฟ้าสูง ๆ มาเป็นพลังงานไมโครเวฟ โดยมีประสิทธิภาพประมาณ 70% - 90%

ภายในแมกนีตรอน ประกอบไปด้วยไส้หลอด (Filament) โดยแคโทด (Cathode) ซึ่งเป็นขั้วโคขี้หนึ่งของไส้หลอด (ทำจากขดลวดทั้งสแตน) และถูกบรรจุอยู่ในช่องสุญญากาศซึ่งส่วนของผนังรอบ ๆ จะทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด (Anode) คลื่นไมโครเวฟที่ถูกกำเนิดขึ้นจะถูกส่งออกมาภายนอกโดยแอนเทนนา (Antenna) ในการทำงานของแมกนีตรอนนั้น แมกนีตรอนจะถูกส่งจ่ายด้วยไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำประมาณ 3 - 4 V กระแส 10 A ที่ไส้หลอด ซึ่งจะทำให้ไส้หลอดร้อนและปล่อยอิเล็กตรอนออกมา และเมื่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงไปที่ขั้วโคขี้หนึ่งของไส้หลอดซึ่งทำหน้าที่เป็นแคโทดเทียบกับขั้วแอโนด จะทำให้อิเล็กตรอนถูกบังคับให้เคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กถาวร และเมื่อความต่างศักย์มีค่าสูงจนถึงค่าหนึ่งก็จะทำให้แมกนีตรอนสามารถปล่อยคลื่นไมโครเวฟออกมาได้ โดยที่ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟจะถูกกำหนดด้วยโครงสร้างภายในช่องสุญญากาศระหว่างขั้วแคโทดกับขั้วแอโนด ซึ่งทำให้มีความเหมาะสมที่ทำให้แมกนีตรอนสามารถกำเนิดคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz ออกมา



ภาพที่ 2.15 ภาพตัดขวางของแมกนีตรอน (วรารักษ์ ชะอุ่ม, 2551)

โดยทั่วไปแมกนีตรอนแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ ชนิดแรกเป็นแมกนีตรอนที่ทำงานเป็นจังหวะหรือพัลส์ (Pulsed Magnetron) ซึ่งประยุกต์ใช้ในงานเรดาร์ชนิดที่สองเป็นแมกนีตรอนที่ทำงาน

แบบต่อเนื่อง (Continuous – Wave (CW) Magnetron) ซึ่งมักใช้ประยุกต์กับกระบวนการทางความร้อน เช่นที่ใช้ในเตาไมโครเวฟตามบ้าน และกระบวนการทางอุตสาหกรรม

ขนาดกำลังของแมกนีตรอนที่ใช้ในอุตสาหกรรมคือ 100 W ถึง 30 kW ความถี่ 2450 MHz และ 5 kW ถึง 100 kW ความถี่ 915 MHz โดยทั่วไปจะใช้ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำ (Water Cooling) ตัวแมกนีตรอนที่ใช้ในอุตสาหกรรมขนาดกำลังเท่ากับ 3 kW และหล่อเย็นด้วยน้ำ หากพิจารณาถึงอายุการใช้งานของแมกนีตรอนตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่าอายุการใช้งานของแมกนีตรอนขึ้นอยู่กับปริมาณคลื่นที่สะท้อนกลับ นอกจากนั้นยังขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ อีกด้วยได้แก่

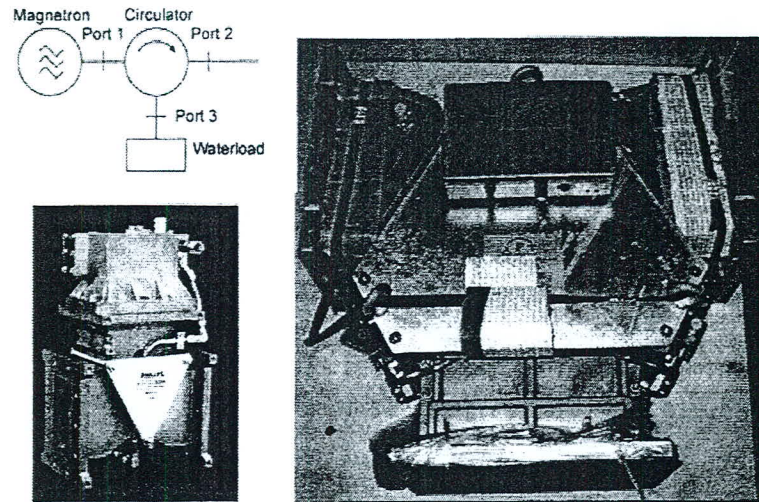
- การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าและความต่างศักย์ที่ส่งไป
- อุณหภูมิ ปริมาณ และคุณภาพของน้ำหล่อเย็น
- อัตราการไหลและอุณหภูมิของอากาศหล่อเย็น
- สภาพของการติดตั้ง เช่น การสั่น อุณหภูมิบรรยากาศ ฯลฯ
- ขั้นตอนการติดตั้งแมกนีตรอน
- ขั้นตอนการใช้งาน

จากการประมาณอายุการใช้งานของแมกนีตรอน โดยบริษัท Micro Denshi ประเทศญี่ปุ่น ทำการวัดจากแมกนีตรอน จำนวน 523 ตัว พบว่าอายุการใช้งานที่น้อยที่สุดที่พบคือ 1,000 h หรือประมาณ 1 ปี ส่วนอายุเฉลี่ยของการใช้งานอยู่ที่ 6,400 h และอายุการใช้งานที่พบคือ 10,000 h ทั้งนี้ อายุการใช้งานของแมกนีตรอน จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับเหตุผลดังที่ได้กล่าวในข้างต้น

2) อุปกรณ์ป้องกัน (Protective Devices)

อุปกรณ์ป้องกันหลาย ๆ อย่างได้ถูกนำมาใช้กับระบบไมโครเวฟเพื่อป้องกันการสะท้อนของพลังงานไมโครเวฟในระดับสูงที่อาจทำลายแมกนีตรอนหรือโครสตอน โดยมีวิธีอย่างง่าย คือ มีสวิตช์ความร้อนซึ่งเป็นหลอดที่มีความไวต่อการทำความร้อนที่สูงจนเกินไปและตัดพลังงานได้ แต่อย่างไรก็ตามด้วยหลอดที่ใช้เพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอต่อการป้องกันจึงได้มีวิธีอื่นเพิ่มเติมคือ การใช้ตัวตรวจวัดพลังงานที่สามารถกำหนดทิศทางได้ซึ่งช่วยลดพลังงานในส่วนที่กำลังเคลื่อนที่ไปข้างหน้ากับที่สะท้อนกลับและสามารถปิดระบบได้เมื่อพลังงานการสะท้อนมีค่ามากจนเกินไป โดยระบบที่มีความซับซ้อนจะมีเซอร์คูเลเตอร์ (Circulator) เป็นอุปกรณ์ที่เป็นแม่เหล็กถาวร ตั้งอยู่บนท่อนำคลื่นติดตั้งอยู่ระหว่าง เจเนอเรเตอร์ และ แอปพลิเคเตอร์ ตัวมันทำหน้าที่ส่งผ่านคลื่นที่สะท้อนกลับจากแอปพลิเคเตอร์เข้าไปในโหลดชดเชย (Dummy Load) เช่น โหลดจำพวกน้ำ หรือวัสดุอื่น ๆ การติดตั้งระบบน้ำเข้าร่วมกับระบบเซอร์คูเลเตอร์ที่สมบูรณ์แล้วบางทีเราจะเรียกระบบนี้ว่า ไอโซเลเตอร์ (Isolator) หรือ ไอโซ – เซอร์คูเลเตอร์ (Iso – Circulator) ซึ่งเป็นการช่วยปกป้องแมกนีตรอนจากคลื่น

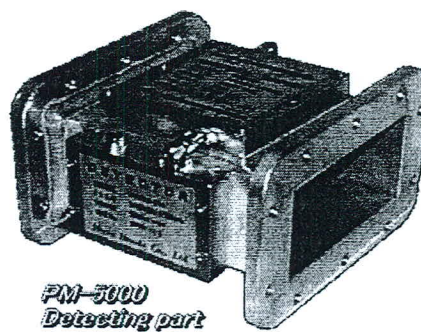
ที่สะท้อนกลับ ซึ่งช่วยยืดอายุการใช้งานของ แมกนีตรอนออกไป จึงนับได้ว่าระบบนี้มีประสิทธิภาพสูง โดยเฉพาะมีการแนะนำให้ประยุกต์ใช้กับระบบที่มีกำลังระดับสูง



ภาพที่ 2.16 โครงสร้างวัสดุพูนแบบเซลล์ลูลาร์-คาพิลลารี (Cellular Capillary) (วรากรณ์ ชะอุ่ม, 2551)

3) อุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณคลื่นที่สะท้อนกลับ (Reflection Monitor)

เป็นเครื่องที่ใช้ตรวจวัดปริมาณคลื่นที่สะท้อนกลับมาจากแอพพลิเคเตอร์ เนื่องจากวัสดุไม่ได้ดูดซับเอาไว้ โครงสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณคลื่นที่สะท้อนกลับ

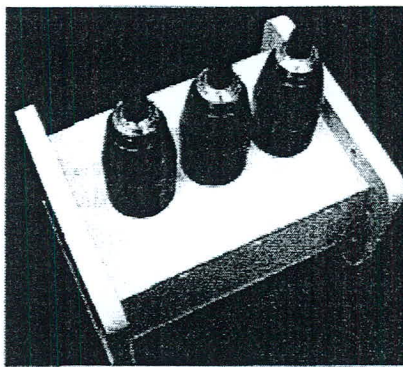


ภาพที่ 2.17 โครงสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นสะท้อนกลับ (วรากรณ์ ชะอุ่ม, 2551)

4) อุปกรณ์ปรับค่าคลื่น (Matching Tuner)

อุปกรณ์นี้อาศัยการปรับค่าตัวต้านทาน เพื่อปรับค่าคลื่นไมโครเวฟจากเจนเนอเรเตอร์ให้เหมาะสมกับวัสดุที่จะให้ความร้อน ซึ่งต้องใช้ร่วมกับอุปกรณ์วัดกำลังคลื่น (Power Monitor) เป็นตัวช่วยให้ระบบมีประสิทธิภาพและช่วยเรื่องการปกป้องและความปลอดภัยของตัวเจนเนอเรเตอร์

เมื่อใช้การปรับค่าจากอุปกรณ์นี้ ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพในการดูดซับคลื่นและปริมาณโหลดน้ำ ผลจากการปรับค่าทำให้อายุการใช้งานของแมกนีตรอนยาวนานขึ้น เนื่องจากสามารถช่วยลดการสะท้อนกลับของคลื่นตามที่กล่าวมาข้างต้น



ภาพที่ 2.18 โครงสร้างอุปกรณ์ปรับค่าคลื่น (3-Step Tuner) (วารสาร ชะอุ่ม, 2551)

5) แอปพลิเคเตอ์ (Applicator)

แอปพลิเคเตอ์ (Applicator) หรือ คาวิตี (Cavity) เป็นส่วนที่มีไว้สำหรับการทำความร้อนของกระบวนการโดยได้รับพลังงานไมโครเวฟมาจากเจนเนอเรเตอร์หรือแมกนีตรอนโดยปกติการจ่ายพลังงานไมโครเวฟไปยังโหลดหรือวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการ มีความแตกต่างกันตามชนิดของกระบวนการและตามชนิดของวัสดุ โดยพลังงานไมโครเวฟจะส่งผ่านผ่านที่ว่างและมีจุดรวมที่โหลด ดังจะอธิบายรายละเอียดตามข้างล่างต่อไป

หลังจากการสร้างคลื่นในย่านความถี่ไมโครเวฟแล้ว คลื่นจะถูกส่งไปยังแอปพลิเคเตอ์ ด้วยใช้ท่อนำคลื่น (Waveguides) แม้ว่าในบางครั้งสามารถใช้สายโคแอกเซียลได้แต่ก็เหมาะกับการส่งคลื่นในช่วงกำลังต่ำเท่านั้น โดยปกติท่อนำคลื่นจะเป็นท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้ากลวง ซึ่งอาจทำจากทองเหลืองหรืออะลูมิเนียม โดยที่ขนาดภายในนี้จะต้องใช้ความระมัดระวังในการออกแบบและเลือกใช้เพื่อที่จะสามารถควบคุมคุณสมบัติของคลื่นไมโครเวฟตามที่ต้องการไปยังแอปพลิเคเตอ์ได้ สำหรับตัวแอปพลิเคเตอ์แล้ว จะมีอยู่ด้วยกันหลายชนิดและสร้างจากวัสดุประเภทโลหะเสมอ โดยทั่วไปแอปพลิเคเตอ์ ถูกแบ่งประเภทตามชนิดคาวิตีและทำนำคลื่นดังนี้

ชนิดคาวิตี (Cavity Applicators)

- คาวิตี ชนิดทำงานเป็นกะ
- คาวิตี ชนิดทำงานแบบต่อเนื่อง

ชนิดท่อนำคลื่น (Waveguide Applicators)

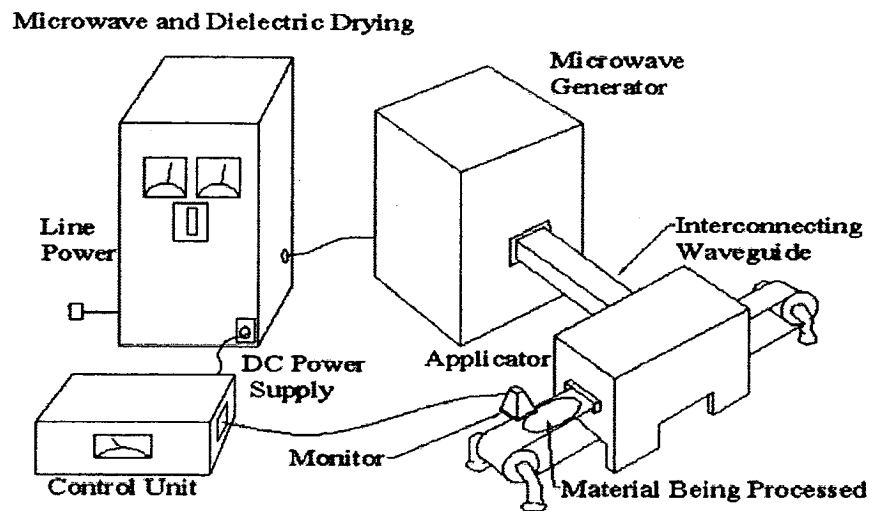
- ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม
- ท่อนำคลื่นแบบวงกลม
- ท่อนำคลื่นแบบอูโมงค์
- ท่อนำคลื่นแบบหักโค้ง

6) แอพพลิเคเคเตอร์ชนิดคาวิตี (Cavity Applicators)

ซึ่งจัดได้ว่าเป็นแอพพลิเคเคเตอร์ขนาดใหญ่ ยกตัวอย่างเตาไมโครเวฟของโฮโร (Horo) ระบบนี้จะประกอบด้วยคาวิตีโลหะซึ่งอาจต่อเชื่อมกันเป็นอูโมงค์ ภายในอูโมงค์นี้จะมีระบบสายพานลำเลียงเพื่อเคลื่อนย้ายปริมาตรของวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการ โดยพลังงานไมโครเวฟที่ป้อนเข้าไปในแอพพลิเคเคเตอร์ นี้โดยวิธีการใช้ท่อนำคลื่นหรือสายโคแอกเซียลผ่านจุดต่อ ต่อเคียวหรือหลายจุดต่อ ในระบบที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาจมีแมกนีตรอนมากกว่า 100 ตัว ติดตั้งแยกกันภายในคาวิตี นอกจากนั้นแอพพลิเคเคเตอร์ชนิดนี้จะพบว่าโหลดหรือวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการจะมีสัดส่วนโดยปริมาตรน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาตรของแอพพลิเคเคเตอร์ (เราจึงเรียกภาพแบบคลื่นไมโครเวฟที่กระทำต่อวัสดุในลักษณะนี้ว่าคลื่นมัลติโมด (Multi Model)) และจะถูกสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งสะท้อนกลับไปกลับมาจากด้านไปอีกด้านหนึ่งของแอพพลิเคเคเตอร์ ผ่านเข้าไปในโหลดจากทุก ๆ ด้าน สิ่งนี้จึงถูกเรียกว่าเป็นการทำความร้อนเชิงปริมาตรสามมิติที่มีลักษณะเฉพาะ ซึ่งหลักการของระบบนี้มีการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม

สำหรับปัญหาหนึ่งของแอพพลิเคเคเตอร์ชนิดคาวิตี คือไม่ความสม่ำเสมอของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในโหลดซึ่งผลต่อการกระจายตัวของความร้อนภายในโหลดดังนั้นเพื่อให้การทำความร้อนมีความสม่ำเสมอจึงได้มีขั้นตอนที่เป็นหลักประกันในปัญหาดังกล่าวซึ่ง โดยปกติจะใช้วิธีการผสมผสานได้แก่ ออกแบบให้มีการเคลื่อนที่หรือการหมุนของโหลดในแอพพลิเคเคเตอร์ ซึ่งอาจใช้ระบบสายพานลำเลียงหรือถาดหมุน และมีโหมดของการกวนสนามพลังงาน (Mode Stirrer) โดยอาจจะเป็นใบกวนที่การหมุนรอบด้า การเพิ่มจำนวนโหมดภายในคาวิตีก็เป็นผลให้เกิดการกระจายและสะท้อนของพลังงานได้ดีเช่นกัน นอกจากนั้นยังสามารถออกแบบให้มีช่องทางการป้อนพลังงานไมโครเวฟให้มีลักษณะหลายช่อง (Multi Feed System) หรือออกแบบให้มีการใช้แหล่งพลังงาน

ไมโครเวฟที่มีความถี่แตกต่างกันเล็กน้อยภายในแอฟฟลิเคเตอร์ยูนิตเดียวกัน เพื่อทำให้เกิดรูปแบบการกระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในแอฟฟลิเคเตอร์ที่ดีขึ้น



ภาพที่ 2.19 ตัวอย่างของระบบความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับสายพายลัมเลียง
(วรารณ ชะอุ่ม, 2551)

แอฟฟลิเคเตอร์ชนิดคาวิตี้ โดยมีระบบการป้อนกลับ (Feedback System) จากวัสดุที่ถูกทำให้ร้อนเพื่อปรับค่ากำลังของแมกนีตรอนที่ออกมาโดยอัตโนมัติซึ่งสามารถควบคุมระดับความชื้นสุดท้ายของวัสดุได้

2.6 สมการพื้นฐาน (Basic Equation) (สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย, 2548)

สมการพื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าคือสมการแมกเวลล์ (Maxwell Curl Relation) ภาพอนุพันธ์ของสมการแมกเวลล์ (Maxwell's Equation) สามารถอธิบายในภาพของความเข้มสนามไฟฟ้า (Electric Field Intensity, E) และความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Intensity, H) ซึ่งความสัมพันธ์ของสมการแมกเวลล์ (Maxwell's Equation) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = q \quad (2.4)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (2.5)$$

เมื่อ E และ H คือความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามลำดับ J คือความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current Density) D คือความหนาแน่นของฟลักซ์ (Flux Density) และ B คือความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (Megenetic Flux Pensity) โดยความสัมพันธ์ระหว่าง J, D และ B กับ E และ H คือ

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.6)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.7)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.8)$$

โดย σ คือคุณสมบัติการนำไฟฟ้า (Electric Conductivity) μ คือคุณสมบัติการซึมผ่านของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Permeability) และ ϵ คือค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric Permittivity หรือ Dielectric Constant) แทนสมการ 2.21 ถึง 2.23 ลงในสมการ 2.18 ถึง 2.20 จะได้

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (2.9)$$

$$\nabla \times \vec{E} = \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.10)$$

$$\nabla \times \vec{E} = \frac{q}{\epsilon} \quad (2.11)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (2.12)$$

สมการ 2.24 และ 2.25 (The Curl Relation) อ้างอิงมาจากกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) และกฎของแอมแปร์ (Ampere's Law) ตามลำดับ สมการ 2.26 และ 2.27 (Divergence Equation) เป็นผลมาจากกฎของเกาส์ (Gauss's Law or Curl Relation) ในสมการของแมกเวลล์ (Maxwell's Equation) ใช้วัดการหมุนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า สมการ 2.24 อธิบายการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กตามเวลาทำให้เกิดสนามไฟฟ้า สมการ 2.26 แสดงถึงความแปรผัน (Divergence) ของสนามแม่ไฟฟ้าที่จุดใด ๆ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับสภาพความหนาแน่นของประจุ (Position Charge Density) และสมการ 2.27 แสดงถึงการไม่มีแหล่งกำเนิด (Source) หรือแหล่งรับ (Sink) ของ

สนามแม่เหล็ก คุณสมบัติต่าง ๆ ที่ปรากฏในสมการข้างต้นนี้สามารถแสดงในภาพความสัมพันธ์ดังนี้

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (2.13)$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (2.14)$$

$$\sigma = 2\pi f \varepsilon \tan \delta \quad (2.15)$$

เมื่อ f คือ ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ, $\tan \delta$ คือ ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานดูดซับเป็นพลังงานความร้อน หรือประสิทธิภาพลอสมแทนเจนท์ (Loss Tangent Coefficient) ε_r และ μ_r คือ คุณสมบัติไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Relative Dielectric Permittivity หรือ Relative Dielectric Constant) และคุณสมบัติการซึมผ่านของสนามแม่เหล็กสัมพัทธ์ (Relative Magnetic Permeability) ตามลำดับ

โดยทั่วไปคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุถูกสมมุติให้แปรผันตามอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว ในกรณีของการทำความร้อน (Heating) และการหลอมเหลว (Melting) ด้วยไมโครเวฟและแปรผันตามอุณหภูมิและความชื้นในกรณีการอบแห้ง (Drying) ด้วยไมโครเวฟ

คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุต่างๆ ที่แปรผันตามอุณหภูมิสามารถหาได้จาก (Von Hippel) ส่วนคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุต่างๆ ที่แปรผันตามอุณหภูมิและความชื้นสามารถหาได้จาก (Wang and Schmugge)

2.7 คุณสมบัติไดอิเล็กตริก (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551)

ความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุในกระบวนการไมโครเวฟมีความจำเป็นต่อการออกแบบอุปกรณ์ใช้งานด้านไมโครเวฟให้เหมาะสม คลื่นไมโครเวฟเป็นภาพแบบหนึ่งของพลังงานที่สามารถทะลุผ่านที่ว่างอากาศและวัตถุได้ คลื่นไมโครเวฟประกอบไปด้วยสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเช่นเดียวกับแสง (การแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า) แต่จะแตกต่างจากแสงตรงที่ความถี่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่างกัน

ในการควบคุมกระบวนการทำความร้อนวัสดุไดอิเล็กตริกด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าหรือไมโครเวฟควรทราบถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กตริกซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon'' = \varepsilon_0(\varepsilon_r' + j\varepsilon_r'') = \varepsilon_0\left(\varepsilon_r' + j\frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0}\right) \quad (2.16)$$

เมื่อ $j = \sqrt{-1}$, ε คือ คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ (Complex Dielectric Permittivity) โดยทั่วไปเรียก ไดอิเล็กตริกคอนสแตนต์ (Dielectric Constant) ซึ่งเป็นสมบัติที่อธิบายถึงความสามารถในการดูดซับ ส่งผ่าน และสะท้อนพลังงานที่เป็นสนามไฟฟ้าของวัสดุ โดย ε_0 คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของที่ว่าง (Free Space) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $8.86 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ε_r' เป็นจำนวนจริงของคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Relative Permittivity หรือ Relative Dielectric Constant) ใช้อธิบายความสามารถในการส่งผ่าน และสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟในวัสดุ ε_r'' จินตภาพของคุณสมบัติไดอิเล็กตริก โดยทั่วไปเรียกไดอิเล็กตริกโลสแฟกเตอร์ (Dielectric Loss Factor) ใช้อธิบายการสูญเสียพลังงานของคลื่นไมโครเวฟเมื่อผ่านวัสดุ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือความสามารถของวัสดุในการดูดซับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ และ σ คือความสามารถในการนำไฟฟ้า (Electric Conductivity) ความสัมพันธ์ระหว่าง (Dielectric Loss Factor) กับค่าการนำไฟฟ้าสามารถแสดงได้

$$\varepsilon'' = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0} \quad (2.17)$$

เมื่อ ω คือความเร็วเชิงมุมของคลื่นไมโครเวฟ และสามารถยุบรวมกันเป็นตัวแปรใหม่เพื่อความสะดวกเรียกว่าประสิทธิภาพลอสแทนเจนต์ (Loss Tangent Coefficient ($\tan\delta$))

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0} \quad (2.18)$$

ประสิทธิภาพลอสแทนเจนต์ ($\tan\delta$) เป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้อธิบายความสามารถในการผลิตความร้อนของวัสดุไดอิเล็กตริกเมื่อดูดกลืนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ

Von Hippel รวบรวมคุณสมบัติไดอิเล็กตริกสำหรับวัสดุต่างๆ (เช่น คริสตัลเซรามิก แก้ว น้ำ พลาสติก ขางมะตอย ซีเมนต์ และไม้ เป็นต้น) ในช่วงความถี่และอุณหภูมิ $100 < f < 10^{10}$ และ $12 < T < 200^\circ \text{C}$

2.8 ความยาวคลื่นและความลึกในการทะลุทะลวง (Wavelength and Penetration Dept)

(ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551)

ค่าไดอิเล็กตริกคอนสแตนต์และประสิทธิภาพลอสแทนเจนต์สามารถใช้ประมาณความยาวคลื่นภายในวัสดุไดอิเล็กตริกและความลึกในการทะลุทะลวงได้ ความยาวคลื่นในวัสดุไดอิเล็กตริกสามารถคำนวณได้จาก

$$\lambda_{mg} = \frac{2\pi}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\frac{\epsilon_r' \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \right)^2} + 1 \right)}{2}}} = \frac{2\pi}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\frac{\epsilon_r' \left(\sqrt{1 + (\tan \delta)^2} + 1 \right)}{2}}} \quad (2.19)$$

เมื่อ v คือ ความเร็วของคลื่นไมโครเวฟ

จากสมการ 2.19 จะเห็นว่าความยาวคลื่นภายในวัสดุไดอิเล็กตริกจะลดลงหากวัสดุมีค่า ไดอิเล็กตริก ลอสแฟกเตอร์ (Dielectric Loss Factor) และค่าที่มีค่าเพิ่มมากขึ้น ความลึกในการทะลุทะลวง หรือระยะทางที่สนามไฟฟ้าทะลุเข้าไปได้ (Penetration Depth, D_p) สามารถคำนวณได้จาก

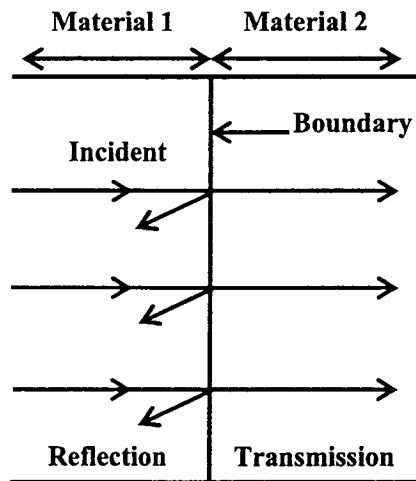
$$D_p = \frac{1}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\frac{\epsilon_r' \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \right)^2} - 1 \right)}{2}}} = \frac{1}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\frac{\epsilon_r' \left(\sqrt{1 + (\tan \delta)^2} - 1 \right)}{2}}} \quad (2.20)$$

เมื่อค่าไดอิเล็กตริกคอนสแตนต์และลอสแทนเจนต์เปลี่ยนไป ค่าความลึกในการทะลุทะลวงภายในวัสดุไดอิเล็กตริกจะมีค่าเปลี่ยนไปด้วย

2.9 การสะท้อน การส่งผ่าน และการดูดซับ (Reflect, Transmit and Absorb)

(ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551)

คลื่นไมโครเวฟมีความหมายคล้ายคลึงกับแสงหลายประการกล่าวคือ คลื่นไมโครเวฟสามารถสะท้อน ทะลุผ่าน และถูกดูดซับพลังงานโดยวัสดุใดๆ ได้ ซึ่งความสามารถทั้งสามนั้นสัมพันธ์กับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุด้วย



ภาพที่ 2.3 รังสีการตกกระทบและการดูดซับโดยวัสดุไดอิเล็กตริก (ผดุงศักดิ์ รัตนเค โช, 2551)

เมื่อคลื่นไมโครเวฟเคลื่อนที่มาปะทะผิวรอยต่อระหว่างวัสดุไดอิเล็กตริก 2 ชนิด เช่น (รอยต่อระหว่างวัสดุทดสอบกับอากาศ) คลื่นส่วนหนึ่งจะถูกสะท้อนกลับ พลังงานของคลื่นไมโครเวฟที่ถูกสะท้อนกลับสามารถคำนวณได้จากค่าไดอิเล็กตริกคอนสแตนต์ของวัสดุทดสอบตามสมการต่อไปนี้

$$P_{reflect} \cong \left(\frac{\sqrt{\epsilon} - 1}{\sqrt{\epsilon} + 1} \right)^2 \quad (2.21)$$

สมการนี้ใช้ได้กับข้อสมมติฐานที่ว่าผิวหน้าของวัสดุราบเรียบและคลื่นไมโครเวฟตกกระทบตั้งฉากกับผิวหน้าของวัสดุทดสอบ

สำหรับพลังงานคลื่นไมโครเวฟที่เคลื่อนที่ทะลุผ่านผิวรอยต่อระหว่างวัสดุไดอิเล็กตริก 2 ชนิดสามารถคำนวณได้โดยสมการต่อไปนี้

$$P_{transmit} = 1 - P_{reflect} \quad (2.22)$$

สำหรับวัสดุไดอิเล็กตริกบางชนิด (เช่น แก้วและพลาสติก) คลื่นไมโครเวฟสามารถเคลื่อนที่ทะลุผ่านโดยไม่มีการดูดซับและสะท้อนกลับของพลังงาน

เมื่อคลื่นไมโครเวฟเคลื่อนที่ผ่านวัสดุไดอิเล็กตริก วัสดุจะถูกดูดซับพลังงานและ

เปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นเรียกว่าการผลิตปริมาณความร้อนเชิงปริมาตร (Local Volumetric Heat Generations) Q ซึ่งปริมาณความร้อนเชิงปริมาตรจะสัมพันธ์กับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในวัสดุไดอิเล็กตริกดังสมการต่อไปนี้

$$Q = \omega \epsilon_0 \epsilon_r |E|^2 + \omega \mu_0 \mu_r |H|^2 \quad (2.23)$$

เมื่อ E คือสนามไฟฟ้าซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง H คือสนามแม่เหล็กเนื่องจากวัสดุไดอิเล็กตริกไม่มีสภาพเชิงขั้วทางแม่เหล็ก จึงไม่มีการดูดซับพลังงานจากสนามแม่เหล็ก ดังนั้นสามารถเขียนสมการ 2.23 ใหม่ได้เป็น

$$Q = \sigma |E|^2 + \omega \epsilon_0 \epsilon_r |E|^2 \quad (2.24)$$

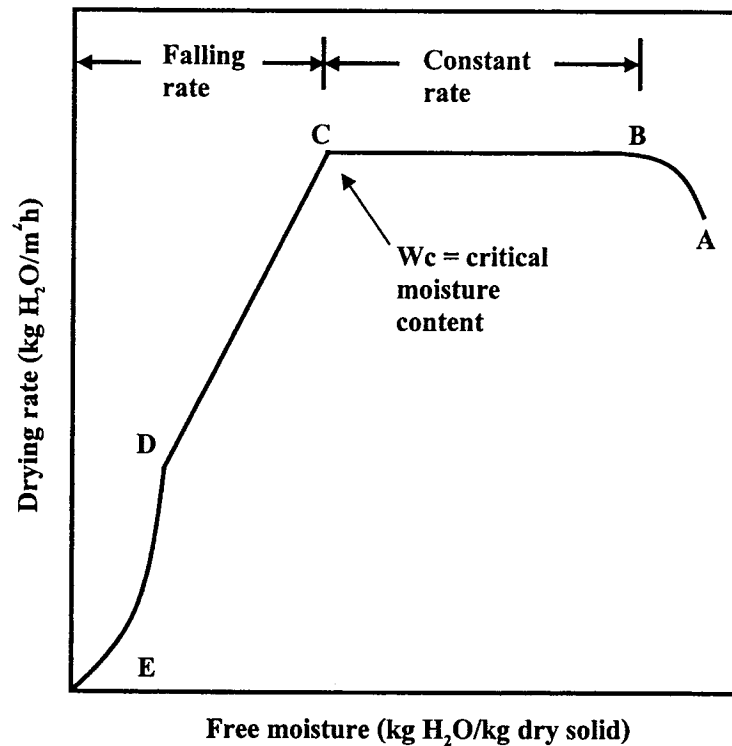
ในระหว่างการแผ่รังสีไมโครเวฟ การเปลี่ยนแปลงเฟสของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยเวลาจะเร็วมาก ดังนั้นจึงใช้ค่าเฉลี่ยรากที่สอง (Root Mean Square Value) ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อประมาณค่าการดูดซับพลังงานไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กตริก เมื่อสมมุติให้ไม่มีการสูญเสียสนามแม่เหล็กค่า การผลิตปริมาณความร้อนเชิงปริมาตร (Local Volumetric Heat Generations) สามารถแสดงได้ในภาพสมการต่อไปนี้

$$Q = \omega \epsilon_0 \epsilon_r E^2 = 2\pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r (\tan \delta) E^2 \quad (2.25)$$

จากสมการ 2.25 ค่าการผลิตปริมาณความร้อนเชิงปริมาตรจะแปรผันตรงกับความถี่ของสนามไฟฟ้า ค่าไดอิเล็กตริกคอสเฟกเตอร์ และสนามไฟฟ้ากำลังสอง นอกจากนั้นยังแปรผันตรงกับค่าไดอิเล็กตริกคอนสแตนต์และค่าประสิทธิภาพการสูญเสียแทนเจนต์ของวัสดุด้วย อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นยังมีผลจากปัจจัยอื่นๆ อีกเช่น ค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ (Specific Heat) และขนาดของวัสดุทดสอบ เป็นต้น สมการ 2.25 มีความสำคัญมากในการศึกษาเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนและการอบแห้งวัสดุด้วยพลังงานไมโครเวฟ ซึ่งค่าการผลิตปริมาณความร้อนเชิงปริมาตรดังกล่าวจะแปรเปลี่ยนไปตามคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ

2.10 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการอบแห้ง (สมชาติ, 2540)

การอบแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้นวัสดุ ด้วยการถ่ายเทความร้อนและมวลสารไปพร้อมๆกัน การอบแห้งวัสดุโดยทั่วๆไปมักจะใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการพาความชื้นออกไปจากวัสดุ ดังปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการอบแห้งจึงได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์และอัตราการไหลของอากาศ สำหรับปรากฏการณ์หลักที่เกิดขึ้นในการอบแห้งด้วยลมร้อน คือการถ่ายเทความร้อนและมวลสารระหว่างวัสดุและของไหล โดยมีแรงขับเคลื่อนจากความต่างศักย์ของอุณหภูมิและความชื้น กล่าวคือความร้อนจากการไหลจะถูกถ่ายเทสู่วัสดุ ทำให้ความชื้นระเหยไปกับอากาศในขณะเดียวกันไอน้ำจะเคลื่อนที่ออกมาที่ผิวหน้าวัสดุไปยังอากาศ ซึ่งการเคลื่อนที่ของความชื้นออกจากวัสดุมี 2 ลักษณะด้วยกัน คือ การเคลื่อนที่ด้วยแรงคาพิลลารี (Capillary) ซึ่งจะเกิดกับวัสดุที่มีเซลล์โปร่ง ความพรุนสูง และมีความต่อเนื่องระหว่างเซลล์ โดยมักจะเกิดขึ้นในช่วงต้นของการอบแห้ง และการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ (Diffusion) ผ่านเซลล์จะเกิดกับวัสดุที่มีเนื้อแน่นไม่มีช่องว่างระหว่างเซลล์ หรือเกิดกับวัสดุที่ผ่านการอบแห้งไประยะหนึ่ง เซลล์เกิดการหดตัวทำให้แรงคาพิลลารีหมดไป น้ำจึงต้องเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ (สุคนธ์ชื่น, 2543) ถ้าวัสดุมีเนื้อโปร่งการเคลื่อนที่ด้วยการไหลแบบคาพิลลารีน้ำจะเคลื่อนที่มาที่ผิวได้เร็วกว่าการระเหยกลายเป็นไอทำให้ผิววัสดุเปียกชุ่มไปด้วยน้ำ น้ำระเหยได้อย่างอิสระด้วยอัตราเร็วคงที่ จึงเรียกช่วงนี้ว่า ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant Rate Period) ต่อมาเมื่อการไหลแบบคาพิลลารีหมดไป น้ำต้องเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ ซึ่งช้าลงมากจนมาสู่ผิวหน้าไม่ทัน จึงทำให้ผิวของวัสดุแห้ง การระเหยน้ำเกิดขึ้นได้ช้าลงมีอัตราการอบแห้งลดลงจึงเรียกการอบแห้งช่วงนี้ว่า การอบแห้งลดลง (Falling rate period) สำหรับวัสดุที่มีเนื้อแน่น น้ำในวัสดุนั้นจะเคลื่อนที่มาสู่ผิวหน้าได้ช้า ซึ่งจะทำให้มีเฉพาะช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น และเมื่อความดันไอของความชื้นในห้องอบแห้งสมดุลกับความดันไอของ ความชื้นในวัสดุ การอบแห้งจะสิ้นสุดลงและเรียกความชื้นของวัสดุขณะนั้นว่า ความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content) และจุดเปลี่ยนแปลงจากช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ไปยังอัตราการอบแห้งลดลงเรียกว่า ความชื้นวิกฤต ลักษณะของกราฟอัตราการอบแห้งแสดง ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.21 ลักษณะของกราฟอัตราการอบแห้ง (สมชาติ, 2540)

จากภาพที่ 2.1 เส้นกราฟแบ่งออกเป็น 4 ช่วง ดังนี้

ช่วง A $\rightarrow$ B เป็นช่วงของการ Warm Up ของอุณหภูมิในวัสดุ

B $\rightarrow$ C เป็นช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant Rate Period) เกิดการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลระหว่างวัสดุและอากาศ จะมีลักษณะเหมือนกับการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นที่บริเวณกระเปาะเปียกของเทอร์โมมิเตอร์ คือการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลจะเกิดขึ้นที่ผิวนอกของวัสดุเท่านั้น น้ำจะเกาะอยู่ที่บริเวณผิวของวัสดุจำนวนมาก เมื่อเพิ่มความเร็วลมที่ไหลผ่านวัสดุจะทำให้ฟิล์มอากาศนี้มีความหนาลดลง เป็นผลให้ความต้านทานต่อการไหลของความร้อนและมวลลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง จะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิววัสดุและกระแสอากาศที่ไหลอย่างอิสระมีมากขึ้น เป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลดีขึ้นค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแห้งลดลง เมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้นทำให้ความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นอิ่มตัวที่ผิววัสดุและอัตราส่วนความชื้นอิ่มตัวของกระแสอากาศที่ไหลอย่างอิสระมีค่ามากขึ้น เกิดการถ่ายเทมวลดี

ขึ้น ดังนั้นตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งในช่วงนี้คือ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์และความเร็วลม

จุด C เรียกจุดนี้ว่าความชื้นวิกฤต (Critical Moisture Content) เกิดเนื่องจากในตอนแรกวัสดุมีความชื้นสูง เมื่ออบแห้งไปเรื่อยๆปริมาณความชื้นที่ผิวลดลงจนกระทั่งน้ำที่บริเวณผิวระเหยไปหมดและความชื้นในวัสดุต่ำลงทำให้อัตราการอบแห้งเปลี่ยนไป ซึ่งสามารถพบการเปลี่ยนแปลงเช่นนี้ในการอบแห้งวัสดุทางการเกษตรที่มีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุน

ช่วง $C \rightarrow D$ และ $D \rightarrow E$ เรียกว่าช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling Rate) ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงนี้ความชื้นของวัสดุจะมีค่าต่ำกว่าค่าความชื้นวิกฤต (ความชื้นวัสดุขณะเปลี่ยนจากอัตราการอบแห้งคงที่เป็นอัตราการอบแห้งลดลง) การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลไม่ได้เกิดขึ้นที่เฉพาะบริเวณผิวรอบนอกเท่านั้น แต่จะเกิดขึ้นภายในผิวและเนื้อของวัสดุด้วย การเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุมายังผิวนั้น ช้ากว่าการพาความชื้นจากผิววัสดุไปยังอากาศ ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง ซึ่งจะถูกลดควบคุมโดยความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำในวัสดุ ในขณะที่อุณหภูมิของวัสดุมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะของอากาศ การเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของเหลว ซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น โดยที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง จะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิมีมากขึ้น มีผลทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเพิ่มขึ้น เมื่อลดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้งจะเป็นผลทำให้การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลดีขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วลมจะพบว่าความหนาของฟิล์มอากาศนิ่งจะมีค่าลดลง เป็นผลให้ความต้านทานลดลง เนื่องจากความต้านทานที่ฟิล์มอากาศมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความต้านทานตัวอื่น ดังนั้นจึงไม่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลมากนัก ซึ่งจากราฟจะเห็นว่ามีช่วงอัตราการอบแห้งลดลง 2 ช่วง เนื่องจากช่วง $C \rightarrow D$ ยังคงมีความชื้นอยู่ที่ผิวหลงเหลืออยู่บ้างเล็กน้อย แต่ที่จุด D ความชื้นที่ผิวระเหยไปหมดทำให้ผิวหน้าแห้งสนิท อัตราการระเหยจึงช้าลงไปอีก

2.10.1 อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry-Bulb Temperature) (อัครเดช, 2543)

อุณหภูมิกระเปาะแห้ง คือ อุณหภูมิอากาศที่อ่านจากเทอร์โมมิเตอร์ธรรมดาทั่วไป ซึ่งในความหมายของอุณหภูมินี้เป็นตัวชี้ถึงความเข้มข้นของปริมาณความร้อนสัมผัสในวัตถุ

2.10.2 อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Dry-Bulb Temperature) (อัครเดช, 2543)

อุณหภูมิกระเปาะเปียก คือ อุณหภูมิของอากาศที่อ่านจากเทอร์โมมิเตอร์ที่มีการพันกระเปาะด้วยผ้าหรือสำลีชุบน้ำ แล้วแกว่งไปในอากาศเพื่ออ่านค่าอุณหภูมิ

2.11 ความชื้นในวัสดุ (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2540)

ความชื้นเป็นตัวบ่งบอกถึงปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในเนื้อวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุขึ้นหรือแห้ง ความชื้นในเนื้อวัสดุสามารถแสดงได้เป็น 2 แบบ ดังสมการที่ 2.23 และสมการที่ 2.24

1. ความชื้นมาตรฐานเปียก

$$M_w = \left(\frac{w-d}{w} \right) \times 100 \quad (2.23)$$

เมื่อ

M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก, เศษส่วน

w คือ มวลของวัสดุ, kg

d คือ มวลของวัสดุแห้ง (ไม่มีความชื้น), kg

ความชื้นแบบนี้นิยมใช้กันในการค้า โดยทั่ว ๆ ไปจะอ้างถึงในรูปของเปอร์เซ็นต์, 100 % M_w

2. ความชื้นมาตรฐานแห้ง

$$M_d = \left(\frac{w-d}{d} \right) \times 100 \quad (2.24)$$

เมื่อ

M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง, เศษส่วน

w คือ มวลของวัสดุ, kg

d คือ มวลของวัสดุแห้ง (ไม่มีความชื้น), kg

ความชื้นแบบนี้นิยมใช้กันในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี เพราะช่วยให้การคำนวณสะดวกขึ้น ซึ่งเป็นเพราะมวลของวัสดุแห้งจะมีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ระหว่างการอบแห้ง ที่ว่าเกือบคงที่นี้ เพราะผลผลิตทางการเกษตรเป็นสิ่งที่มีชีวิต มีการหายใจ ดังนั้นจึงมีการเผาผลาญสารอาหาร ทำให้มวลแห้งลดลง ส่วนใหญ่แล้วมวลแห้งจะลดลงเพียงเล็กน้อย

2.11.1 อัตราส่วนความชื้น, MR (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2540)

(สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2540) ได้เสนอรูปแบบความชื้นสัมพัทธ์พื้นฐานของการอบแห้งวัสดุใดๆ ไว้ในสมการ

$$MR = \frac{M_c - M_{eq}}{M_w - M_{eq}} \quad (2.25)$$

เมื่อ

MR คือ อัตราส่วนความชื้น

M_w คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ (%Wb)

M_c คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุที่เวลาใดๆ (%Wb)

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ (%Wb)

2.11.2 อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, R) (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2540)

ในการระเหยของน้ำออกจากวัสดุอบแห้งนั้น นิยมแสดงอยู่ในรูปแบบอัตราการอบแห้ง (Drying Rate, R)

อัตราการอบแห้ง = (ปริมาณน้ำที่ระเหย)/(ระยะเวลา)

$$R = \frac{W_2 - W_1}{t_2 - t_1} \quad (2.26)$$

เมื่อ

R คือ อัตราการอบแห้ง, (g/hr)

W_1 คือ น้ำหนักของวัสดุที่ตำแหน่งที่ 1, (kg)

W_2 คือ น้ำหนักของวัสดุที่ตำแหน่งที่ 2, (kg)

t_1 คือ เวลาที่ตำแหน่งที่ 1, (minute)

t_2 คือ เวลาที่ตำแหน่งที่ 2, (minute)

2.11.3 ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity, RH) (บัญญัติ, 2547)

ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity, RH) คือปริมาณของความชื้นในอากาศที่เป็นจริงที่เปรียบเทียบกับความชื้นทั้งหมดหรือความชื้นสูงสุดของอากาศที่มีในขณะนั้นค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเป็นค่าที่แสดงในลักษณะเปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างมวลของความชื้นในอากาศหนึ่งมวลที่อุณหภูมิหนึ่งๆกับมวลของความชื้นที่มากที่สุด ในอากาศหนึ่งหน่วยมวลที่อุณหภูมินั้นๆ หรือกล่าวอีกในหนึ่งได้ว่าเป็นมวลของความชื้นในอากาศอิ่มตัว (Saturated) หนึ่งหน่วยมวลนั่นเอง

$$RH = \frac{\text{Weight of water in 1 kg of air}}{\text{Weight of water in 1 kg of saturated air}} \times 100 \quad (2.27)$$

เมื่อ

RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) ของอากาศ%

2.11.4 ความชื้นวิกฤติ (Critical Moisture Content, W_c) (กิตติ, 2547)

ความชื้นที่ตรงสุดท้านของช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ นั้นเรียกว่าความชื้นวิกฤติ (Critical Moisture Content) ค่าความชื้นนี้จะขึ้นอยู่กับ ลักษณะการจัดวางวัสดุอบแห้ง เช่น การวางแบบกระจายกับการวางเป็นกองๆ ในกรณีแรกค่าความชื้นวิกฤติจะน้อยกว่ากรณีหลังมาก ค่าความชื้นวิกฤติมีความสำคัญในการอบแห้งมาก เพราะถ้าค่านี้ยิ่งต่ำการอบแห้งเพื่อให้ได้ความชื้นต่ำๆ ก็เสียพลังงานและค่าใช้จ่ายน้อยเพราะการระเหยของความชื้นที่เหลืออยู่ต่ำกว่านั้นจะเสียค่าใช้จ่ายหรือพลังงานและเวลาสำหรับการอบแห้งมาก เนื่องจากการอบแห้งจากค่าความชื้นวิกฤติเป็นช่วงอัตราการอบแห้งมีค่าลดลง

2.11.5 ความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content, W_e) (สมชาติ, 2540)

ความชื้นสมดุลของวัสดุมีความสำคัญต่อการศึกษาระบวนการอบแห้ง เพราะเมื่อทำการอบแห้งวัสดุโดยใช้อากาศที่สภาวะคงที่ (เช่น อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่) ความชื้นของวัสดุจะลดต่ำลงจนถึงจุดๆ หนึ่งซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะนั้นความชื้นในวัสดุมีความดันไอเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบๆ และอุณหภูมิของวัสดุเท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบๆ ด้วย เรียกความชื้นในขณะนั้นว่า ความชื้นสมดุล ค่าความชื้นสมดุลขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

2.12 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ (Conduction) (สุนันท์, 2545)

การถ่ายเทความร้อนโดยการนำหรือการนำความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนเพียงวิธีเดียวที่เกิดขึ้นในวัตถุที่เป็นตัวกลางทึบแสงเมื่อมีความหนาแน่นของอุณหภูมิเกิดขึ้นในก้อนวัตถุนั้น อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ (q_k) จะเป็นสัดส่วนกับ dT/dx ซึ่งเป็นค่าความลาดชันของอุณหภูมิ กับพื้นที่ A ที่ความร้อนไหลผ่าน ถ้าหากเขียนเป็นรูปสมการแล้วจะได้รูปสมการเป็น

$$q_k \propto A \frac{dT}{dx} \quad (2.28)$$

เมื่อ

q_k คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ หรือ การนำความร้อน

A คือ พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน

T คือ อุณหภูมิ

X คือ ระยะทางการเคลื่อนที่ของความร้อน

สำหรับอัตราการถ่ายเทความร้อนจริงนั้น จะขึ้นอยู่กับค่าการนำความร้อน (k) ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวกลางที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน ดังนั้นอัตราการนำความร้อนจึงมีค่าเป็น

$$q_k = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.29)$$

สมการนี้มีชื่อเรียกว่ากฎฟูเรียร์ (Fourier's Law of Conduction) เครื่องหมายลบที่อยู่ทางด้านขวามือของสมการเป็นผลเนื่องมาจาก กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ ที่กำหนดไว้ว่า ความร้อนจะต้องไหลจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำ แต่เนื่องจากความลาดชันของอุณหภูมิในรูปนั้นมีเครื่องหมายเป็นลบ ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิจะลดลงเมื่อระยะทาง (x) เพิ่มขึ้น ดังนั้นถ้าต้องการให้อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าเป็นบวก เมื่อไหลไปยังทิศทางที่เป็นบวกแล้ว ก็จะต้องเครื่องหมายลบไว้ทางด้านขวาของสมการ

สมการ 2.29 เป็นสมการที่ใช้สำหรับนิยามความหมายของค่าการนำความร้อน k สำหรับตัวแปรต่างๆ ที่อยู่ในระบบเอสไอ (SI) พื้นที่ A จะมีหน่วยเป็น m^2 อัตราการถ่ายเทความร้อน q_k มีหน่วยเป็น Watt ส่วนค่าการนำความร้อน k จะมีหน่วยเป็น $W/m \cdot k$

2.13 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา (Convection) (สุนันท์, 2545)

เมื่อของไหลสัมผัสกับผิววัตถุที่มีอุณหภูมิที่แตกต่างกันก็就会有การแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อน ระหว่างของไหลกับวัตถุ กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนนี้เรียกว่า การถ่ายเทความร้อนโดยการพา หรือการพาความร้อน กระบวนการพาความร้อนดังกล่าวนี้เป็นกระบวนการ พื้นๆแต่กลไกของการถ่ายเทความร้อนนั้นซับซ้อนมาก การถ่ายเทความร้อนโดยการพาหรือการพาความร้อนนี้แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ

1. การพาความร้อนแบบอิสระ (Free Convection) โดยการพาความร้อนแบบอิสระนี้ แรงที่ทำให้ของไหลเกิดการเคลื่อนไหวนั้นเกิดจากความแตกต่าง ของอุณหภูมิภายในก้อนของไหล

เนื่องจากการที่ของไหลสัมผัสกับผิวของก้อนวัตถุที่มีอุณหภูมิที่แตกต่างกันจนทำให้เกิดแรงลอยตัวขึ้น ตัวอย่างการพาความร้อนแบบอิสระได้แก่ การถ่ายเทความร้อนระหว่างผนังหรือหลังคาบ้านที่เกิดขึ้นในวันที่ไม่มีลมพัด เป็นต้น

2. การพาความร้อนแบบบังคับ (Force Convection) การพาความร้อนแบบบังคับจะเกิดขึ้นเมื่อมีแรงภายนอกมาบังคับให้ของไหลเกิดการเคลื่อนที่ผ่านวัตถุ ที่ร้อนกว่าหรือเย็นกว่า เนื่องจากการไหลของการพาความร้อนแบบบังคับมีความเร็วที่สูงกว่าแบบอิสระ ดังนั้นถ้าหากความแตกต่างของอุณหภูมิมีขนาดเท่าๆกันแล้ว การพาความร้อนแบบบังคับก็จะมีอัตราการพาความร้อนที่สูงกว่า แต่ไม่ว่าจะเป็นการพาความร้อนแบบไหนก็ตาม ต่างมีสมการสำหรับหาอัตราส่วนการพาความร้อนที่อยู่ในรูปของ กฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's Law of Cooling) ซึ่งมีสมการเป็น

$$q_c = \bar{h}_c A (T_s - T_{f,\infty}) \quad (2.30)$$

เมื่อ

$\bar{h}_c$ คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย ที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหล

กับวัตถุหรือหนึ่งหน่วยการนำจากการพาความร้อน W/m²·K

A คือ พื้นที่ผิวของวัตถุที่สัมผัสกับของไหล

T_s คือ อุณหภูมิของผิววัตถุ, K

$T_{f,\infty}$ คือ อุณหภูมิของของไหลอิสระที่อยู่ห่างออกไปจากผิววัตถุมากๆ, K

อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่น ความหนืดและความเร็วของของไหลรวมทั้งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางความร้อนต่างๆ เช่น ค่าการนำความร้อน (K) และค่าความร้อนจำเพาะ (C_p) ในการพาความร้อนแบบบังคับนั้น ความเร็วของของไหลในระบบจะถูกกำหนดด้วยปั๊มหรือพัดลม แต่สำหรับความเร็วของของไหลที่ใช้พาความร้อนแบบอิสระนั้นขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิระหว่างผิววัตถุกับของของไหล สัมประสิทธิ์การขยายตัวของของไหลและสนามของแรง เช่น แรงดึงดูดของโลกเมื่อระบบอยู่บนพื้นโลก เป็นต้น

2.14 พลังงานความร้อน (สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์, 2540)

พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง จะสามารถหาได้จากสมการ

$$Q^\circ = m^\circ C_a (T_i - T_{amb}) \quad (2.31)$$

โดยที่

m° คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า, kg/s

C_a คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศ, kJ/kg °C

T_i คือ อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าหอบแห้ง, °C

T_{amb} คือ อุณหภูมิอากาศภายนอกก่อนทำความร้อน, °C

จาก

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m^\circ}{V^\circ} \quad (2.32)$$

ได้

$$m^\circ = \rho V^\circ = \rho v A \quad (2.33)$$

ดังนั้น

$$Q^\circ = \rho_g v A C_a (T_i - T_{amb}) \quad (2.34)$$

โดยที่

ρ_g คือ ความหนาแน่นของของไหล, kg/m³

V° คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรอากาศที่อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า, m³/s

v คือ ความเร็วของลมร้อนตลอดพื้นที่หน้าตัดของเบด, m/s

A คือ พื้นที่หน้าตัดของเบด, m²

2.15 พลังงานความร้อนที่ใช้ต่ำสุดและสูงสุด ($Q^\circ_{\min, \max}$)

จากสมการ (2.12) จะได้

$$Q^\circ_{\min} = \rho_g U_{mf} v A C_a (T_i - T_{amb}) \quad (2.35)$$

และ

$$Q^\circ_{\max} = \rho_g U_t v A C_a (T_i - T_{amb}) \quad (2.36)$$

2.16 ประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้ง (Energy Effectiveness) (ผดุงศักดิ์, 2551)

ประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้ง สามารถแสดงได้ด้วยความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) และอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (Specific Moisture Extraction rate, SMER) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 2.37 และสมการที่ 2.38

$$SEC = \frac{\text{ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง}}{\text{ปริมาณน้ำที่ระเหยจากวัสดุอบแห้ง}}, \text{ MJ/kg water evap} \quad (2.37)$$

และ

$$SMER = \frac{\text{ปริมาณน้ำที่ระเหยจากวัสดุอบแห้ง}}{\text{ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง}}, \text{ kg water evap./kWh} \quad (2.38)$$

2.17 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแผ่นขึ้นไม้อัดชนิดอัดราบ (มอก.-876-2532 คณะกรรมการมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2532)

2.17.1 ความหนาแน่น

หาค่าความหนาแน่นจากสูตร

$$\text{ความหนาแน่น กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร} = \frac{m}{V} \times 10^6 \quad (2.39)$$

เมื่อ m คือ มวลของชิ้นทดสอบ เป็น g

V คือ ปริมาตรของชิ้นทดสอบ เป็น cm^3

2.17.2 ปริมาณความชื้น

หาค่าปริมาณความชื้นจากสูตร

$$\text{ปริมาณความชื้น ร้อยละ} = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad (2.40)$$

เมื่อ m_1 คือ มวลของชิ้นทดสอบก่อนอบ เป็น g

m_2 คือ มวลของชิ้นทดสอบหลังอบแห้ง เป็น g

2.17.3 การพองตัวตามความหนา

หาค่าการพองตัวตามความหนา จากสูตร

$$\text{การพองตัวตามความหนา ร้อยละ} = \frac{t_2 - t_1}{t_1} \times 100 \quad (2.41)$$

เมื่อ t_1 คือ ความหนาของชิ้นทดสอบก่อนแช่น้ำ เป็น mm

t_2 คือ ความหนาของชิ้นทดสอบหลังแช่น้ำ เป็น mm

2.17.4 ความต้านแรงดัดและมอดุลัสยืดหยุ่น

หาค่าความต้านแรงดัด จากสูตร
$$f_m = \frac{3 F_{\max} l_1}{2 b t^2} \quad (2.42)$$

เมื่อ f_m คือ ความต้านแรงดัด เป็น MPa

$F_{\max}$ คือ แรงกดสูงสุดที่ชิ้นทดสอบรับได้ เป็น N

l_1 คือ ระยะห่างของแท่งรองรับ เป็น mm

b คือ ความกว้างที่จุดกึ่งกลางด้านยาวของชิ้นทดสอบ เป็น mm

t คือ ความหนาที่จุดกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ เป็น mm

หาค่ามอดุลัสยืดหยุ่น จากสูตร
$$E_m = \frac{l_1^3 (F_2 - F_1)}{4 b t^3 (a_2 - a_1)} \quad (2.43)$$

เมื่อ E_m คือ มอดุลัสยืดหยุ่น เป็น MPa

l_1 คือ ระยะห่างของแท่นรองรับ เป็น mm

$F_2 - F_1$ คือ แรงกดที่เพิ่มขึ้นในช่วงกราฟเป็นเส้นตรง เป็น N

b คือ ความกว้างที่จุดกึ่งกลางด้านยาวของชิ้นทดสอบ เป็น mm

t คือ ความยาวที่จุดกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ เป็น mm

$a_2 - a_1$ คือ ระยะแอนตัวที่เพิ่มขึ้นในช่วงที่เส้นกราฟเป็นเส้นตรง เป็น mm

2.17.5 ความต้านแรงดัดตั้งฉากกับผิวหน้า

หาค่าแรงต้านแรงดัดตั้งฉากกับผิวหน้าจากสูตร

ความต้านแรงดัดตั้งฉากกับผิวหน้า เมกะพาสคัล
$$= \frac{F}{W \times L} \quad (2.44)$$

เมื่อ F คือ แรงดึงสูงสุด เป็น N

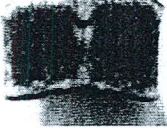
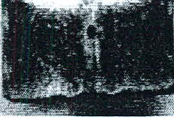
W คือ ความกว้างของชิ้นทดสอบ เป็น mm

L คือ ความยาวของชิ้นทดสอบ เป็น mm

2.18 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยในระดับประเทศและระดับนานาชาติที่ผ่านมาที่เกี่ยวกับกระบวนการอบแห้งแผ่นขึ้นไม้อัดโดยใช้คลื่นไมโครเวฟนั้น ได้มีการวิจัยกันไม่มากนัก ซึ่งส่วนใหญ่จะทำการวิจัยโดยใช้การอบด้วยลมร้อน การอบด้วยระบบสุญญากาศ และการอบด้วยระบบไอน้ำ โดยส่วนใหญ่ใช้เวลาในการอบนานและโครงสร้างของแผ่นขึ้นไม้อัดเกิดการบิดงอ สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนและอบแห้งวัสดุประเภทต่าง ๆ โดยใช้คลื่นไมโครเวฟได้แก่

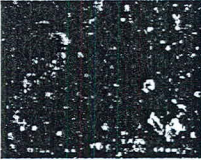
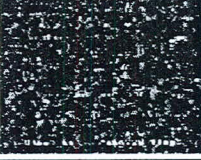
ผดุงศักดิ์ รัตนเดโชและคณะ, 2547 ได้ทำการศึกษาจลนศาสตร์กระบวนการอบแห้งวัสดุไคโอเล็คทริก โดยใช้เตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง โดยพารามิเตอร์ที่ศึกษาความเร็วของสายพานลำเลียง เวลาที่ใช้ในการรับคลื่นไมโครเวฟ ขนาดของวัสดุทดสอบ กำลังของแมกนีตรอน (800 W/1) และทิศทางการจ่ายคลื่นไมโครเวฟจากแมกนีตรอนที่มีต่อจลนศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งและคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุทดสอบ

ความหนา	จำนวนแมกนีตรอน			
	3 ตัว	4 ตัว	7 ตัว	14 ตัว
3 ซม.				
6 ซม.				
9 ซม.				

ภาพที่ 2.22 ลักษณะยางพาราหลังการอบแห้งด้วยไมโครเวฟระบบสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง
(ผดุงศักดิ์ รัตนเดโชและคณะ, 2547)

ซึ่งวัสดุไคโอเล็คทริกที่ใช้ในการศึกษา คือ ยางพารา เซรามิกส์ และผลผลิตทางการเกษตร จากการศึกษาพบว่า การใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นพลังงานนั้นสามารถช่วยประหยัดเวลา และลดระยะเวลาในการอบขึ้นงาน ชิ้นงานได้รับความร้อนทั่วถึงพร้อมกันทั้งปริมาตร และการกระจายตัวของความชื้นใน

โครงสร้างเป็นไปอย่างสม่ำเสมอสังเกตจากภาพที่ 2.20 และได้ขางพาราที่มีคุณภาพดี คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรอบแห้งแบบธรรมดาโดยสังเกตจากการเรียงตัวของโครงสร้างภายในของขางพาราในภาพที่ 2.20

กำลังขยาย	ขางอบด้วยไมโครเวฟ	ขางแผ่นรมควัน
500 เท่า		
5000 เท่า		
20000 เท่า		

ภาพที่ 2.23 โครงสร้างภายในของขางพาราที่วัดจาก SME ที่กำลังขยายต่างกัน
(ผดุงศักดิ์ รัตนเดโชและคณะ, 2547)

Ratanadecho et al., 2002 ศึกษากระบวนการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแก่วัสดุทดสอบที่เป็นของเหลว มีการคิดอิทธิพลของแรงตึงผิว (Surface Tension) ต่อกระบวนการพาความร้อนในชั้นของเหลว ผลที่ได้จากการทดลองสอดคล้องกับผลที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี

วิฑูรย์ อบรมและคณะ, 2551 งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งวัสดุชีวภาพด้วยระบบไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศ ซึ่งวัสดุชีวภาพที่ใช้ในการทดลองนี้คือ แครอท ใบกระเพรา โดยที่ระบบที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยห้องอบแห้งสุญญากาศรูปทรงกระบอก ภายใต้ความดัน -95 kPa ทำแห้งโดยแมกนีตรอนขนาด 800 W ความถี่ 2.5 GHz จากผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของวัสดุจะนำไปทำการสร้างเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศในเชิงพาณิชย์ต่อไป

สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย, 2548 ได้ทำการอบแห้งไม้โดยใช้ระบบเตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่องและการอบแห้งไม้โดยใช้เตาไมโครเวฟชนิดท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (โหมด TE_{10}) ซึ่งทำการศึกษากระบวนการเชิงตัวเลขและการทดลอง โดยตัวแปรที่ใช้ศึกษาคือ กำลังที่

ป้อนเข้าไปและระยะเวลาที่ใช้ในการอบที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของไม้ เช่น ความชื้นสุดท้าย สีของเนื้อไม้ รวมถึงคุณภาพเชิงกล จากนั้นทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติของไม้ที่อบโดยใช้ระบบเตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่องกับการอบแห้งโดยใช้เตาอบแบบการพาความร้อน พบว่าการใช้พลังงานไมโครเวฟเป็นแหล่งพลังงานนั้นจะช่วยประหยัดพลังงาน ลดระยะเวลาใช้ในระบบการอบได้ถึง 25 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เตาอบแบบพาความร้อน ชิ้นงานได้รับความร้อนทั่วทั้งปริมาตรเป็นการใช้พลังงานที่เต็มประสิทธิภาพ รวมทั้งคุณสมบัติเชิงกลของไม้ดีขึ้น

Vongpradubchai.S, 2010 งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการอบแห้งวัสดุไดอิเล็กตริกโดยใช้ระบบไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรและสายพายลำเลียงอย่างต่อเนื่อง โดยวัสดุไดอิเล็กตริกที่ใช้แบ่งเป็นสองจำพวกคือ วัสดุขึ้นน้อย (Nonhygroscopic Material) ได้แก่ แพคเบดวัสดุพรุน (Porous Packed Bed) และวัสดุขึ้นมาก (Hygroscopic Material) ได้แก่ ชั่นกล้วยหั่นบาง (Banana Sliced) โดยทำการศึกษา ชนิดของกระบวนการอบแห้ง ทิศทางการป้อนคลื่นและอุณหภูมิพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง ที่มีอิทธิพลต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งพบว่าจากการอบแพคเบดวัสดุพรุนการป้อนคลื่นไมโครเวฟด้านบนควาวิดีและใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูงสุด จากนั้นทำการอบแห้งวัสดุขึ้นมาก โดยใช้ชั่นกล้วยหั่นบาง พบว่าลักษณะการอบแห้งแบบไฮบริดโดยใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับลมบรรยากาศที่ 30°C เป็นกรณีศึกษาที่ดีที่สุด และจากการพิจารณาจลนพลศาสตร์การอบแห้งพบว่า พลังงานที่ใช้ภายในระบบและคุณภาพของกล้วย (สีและโครงสร้าง)สามารถนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ได้

Lehne M., 2006 งานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิในการอบแห้งโดยใช้พลังงานไมโครเวฟช่วยในการอบไม้ภายในประเทศออสเตรเลีย โดยทำการศึกษาถึงความร้อนที่เกิดขึ้นภายในชิ้นไม้ภายใต้กระบวนการให้ความร้อน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีลักษณะเป็น 1 มิติ ช่วยอธิบายถึงการดูดซับพลังงานไมโครเวฟของชิ้นไม้ โดยอาศัยสมการแมกเวลล์เป็นสมการพื้นฐาน แล้วนำมาปรับปรุง จำกัดขอบเขตก็จะได้ผลที่มีความแม่นยำขึ้น ซึ่งรวมไปถึงการพัฒนาค่าไดอิเล็กตริกในแนวเชิงเส้น การสะสมของอุณหภูมิและค่าความชื้นที่สอดคล้องกับค่าไดอิเล็กตริก รวมไปถึงการกระจายตัวของความร้อนในระบบภายใต้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อาศัยการทำนายถึงค่าของความชื้นและการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในชิ้นไม้ ลำดับต่อไปใช้วิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite Different) เริ่มจากการใช้สมการแมกเวลล์ ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขั้นสุดท้ายแสดงถึงปรากฏการณ์การสั่นพ้อง (Resonant) ที่สูงสุดในรูปแบบของค่าอุณหภูมิ แต่การกระจายตัวของอุณหภูมิจะมีค่าอย่างสม่ำเสมอ เมื่อเกิดการนำความร้อนขึ้นภายในชิ้นไม้

Perre P., Turner I.W., 2004 งานวิจัยฉบับนี้ได้ศึกษาถึงการอบแห้งโดยใช้ระบบสุญญากาศ ด้วยการแผ่กระจายความร้อนในโมเลกุล เก็บข้อมูลของค่าอุณหภูมิและค่าความดันโดยใช้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อแนวโน้มของกระบวนการอบแห้งทั้งระบบ ตัวอย่างเช่น ค่าของอุณหภูมิท้ายของกระบวนการอบแห้งยังมีค่าต่ำ (150°C) และอยู่ภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งด้วยการพาความร้อนโดยใช้ไอน้ำ รายละเอียดสำคัญขึ้นอยู่กับคุณสมบัติภายในของชิ้นงานในการส่งผ่านความร้อน ที่เกิดขึ้นในการอบแห้ง ทำการเปรียบเทียบโดยใช้ชนิดไม้ที่แตกต่างกัน คือ ไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อน ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะนำไปใช้เปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่อไป จุดประสงค์เพื่อวิเคราะห์ถึงกระบวนการอบแห้งในระบบสุญญากาศของ 2 ระบบที่มีความแตกต่างกัน

Lee H.W., 2003 งานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาถึงผลที่ได้จากการพาความร้อนด้วยอุณหภูมิของอากาศในระบบการอบแห้งด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยมีพื้นที่หน้าตัดขนาด 25 มิลลิเมตร x 50 มิลลิเมตร วิเคราะห์ถึงค่าที่เหมาะสมระหว่างการพาความร้อนและการใช้พลังงานไมโครเวฟในกระบวนการอบแห้ง ผลงานวิจัยนี้อธิบายอากาศร้อนที่เกิดความร้อนบริเวณผิวหน้าของชิ้นไม้และการเกิดความร้อนภายในของพลังงานไมโครเวฟ การเกิดความร้อนภายในดังกล่าวส่งผลให้มีการระเหยตัวของน้ำภายในชิ้นไม้ รวมไปถึงการพิจารณาถึงอัตราการอบแห้งที่แตกต่างระหว่างค่าความชื้นคงเหลือสูงกว่า 30% และค่าความชื้นคงเหลือของชิ้นไม้ต่ำกว่า 30% ซึ่งจะเป็นประเด็นสำคัญในการหาจุดอิ่มตัวในระบบของการอบแห้งโดยใช้พลังงานไมโครเวฟและระบบของการอบแห้งด้วยการพาความร้อน

Oloyede A., 2000 งานวิจัยนี้ศึกษาถึงระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งของชิ้นไม้ ในภาคอุตสาหกรรมมีวิธีการอบแห้งมากมาย ซึ่งวิธีใหม่ ๆ นี้จะช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งลงเรื่อย ๆ เช่น การอบแห้งโดยใช้หลักการด้วยการพาความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงภายในเตาอบ วิธีการอบแห้งด้วยคลื่นวิทยุหรือการอบแห้งด้วยเตาอบไมโครเวฟ ซึ่งจะมีความเข้าใจเกี่ยวกับผลกระทบของการอบแห้งแต่ละวิธีต่อคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นไม้ โดยเฉพาะการอบแห้งด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เกิดความร้อนจากภายในออกสู่ภายนอก ในงานวิจัยครั้งนี้ เป็นการกำหนดค่าความชื้นคงเหลือภายในชิ้นไม้ที่ขนาดเท่ากันทำการอบแห้งหลากหลายวิธี นำชิ้นไม้ที่อบแห้งแล้วไปทดสอบความแข็งแรงด้วยวิธี (Tensile Load) เพื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นไม้แห้ง ชิ้นงานถูกทำให้แห้งด้วยอุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ ในการอบแห้งโดยใช้เตาอบในการพาความร้อนจะให้ความแตกต่างของ 2 อุณหภูมิและการอบแห้งโดยพลังงานไมโครเวฟจะใช้กำลังงานที่แตกต่างกัน 2 ค่า ผลในการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลจากการอบแห้งหลากหลายวิธี พบว่าการอบแห้งโดยใช้พลังงานไมโครเวฟจะทำให้ชิ้นไม้มีความแข็งแรงลดลง 60%

Zhoa H.,Turner I.W., 2000 งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใน 3 ทิศทาง การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟในชิ้นไม้ที่มีความชื้นต่ำ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ใช้หลักการของ Finite Volume (FVTD) สำหรับในการแก้ปัญหาในสมการแมกเวลล์ ซึ่งสามารถใช้อธิบายในการกระจายตัวของความร้อนในชิ้นไม้ กระบวนการให้ความร้อนที่ซับซ้อนไม่เชิงเส้นนี้จะมีตัวแปรที่สำคัญ คือ การเปลี่ยนแปลงของค่าไดอิเล็กตริกจะขึ้นอยู่กับค่าความร้อนภายในชิ้นไม้ การเปลี่ยนแปลงค่ากำลังงานที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ งานวิจัยฉบับนี้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง ส่วนที่สำคัญในการวิเคราะห์ คือ การกระจายตัวของกำลังงานที่ใช้ในชิ้นงานภายใต้พลังงานไมโครเวฟและการเกิดความร้อนในกระบวนการอบแห้ง อย่างไรก็ตามการควบคุมคุณสมบัติของชิ้นไม้จะมีผลต่อการกระจายตัวของกำลังงานที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนภายในชิ้นงานจะมีความสัมพันธ์กับค่าไดอิเล็กตริก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้จะถูกออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งานในภาคอุตสาหกรรม ส่วนการกระจายตัวของอุณหภูมิจะนำไปใช้ในการเปรียบเทียบกับผลการทดลองต่อไป

Tuner I.W.,1998 งานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการศึกษาด้านการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในระบบของการอบแห้งด้วยพลังงานไมโครเวฟร่วมกับการพาความร้อน โดยวัสดุที่ใช้ในการศึกษาเป็นวัสดุพูนแบบชื้นมาก (Hygroscopic) ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้เป็นการพัฒนาแบบจำลองมาจากการอบแห้ง 1 มิติ (Wood 1D) จะศึกษาถึงความร้อนที่เกิดขึ้น เวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่สัมพันธ์กับความชื้นคงเหลือของชิ้นไม้ อุณหภูมิ ความดันและการกระจายตัวของพลังงานไมโครเวฟ ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นผลที่ช่วยในการทำความเข้าใจเกี่ยวกับพื้นฐานของกระบวนการอบแห้งได้ดี จากนั้นทำการคำนวณโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะปรับเปลี่ยนตัวพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้สอดคล้องกับงานวิจัยภายใต้การให้ความร้อนร่วมระหว่างพลังงานไมโครเวฟกับการพาความร้อน ซึ่งโปรแกรมจะสามารถออกแบบการอบแห้งให้ถึงจุดสูงสุดเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดได้และในงานวิจัยครั้งนี้ได้มีการทดลอง และนำเอาข้อมูลที่ได้จากการทดลองโดยใช้ความร้อนร่วมระหว่างพลังงานไมโครเวฟและการพาความร้อนมาเปรียบเทียบ โดยคำนึงถึงระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง อัตราในการอบแห้ง และประสิทธิภาพของการอบแห้งซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับค่าความชื้น อุณหภูมิ ความดัน กำลังงาน ผลที่คาดว่าจะได้ก็คืองานวิจัยฉบับนี้จะช่วยพัฒนากระบวนการอบแห้งที่ใช้ความร้อนร่วมระหว่างพลังงานไมโครเวฟและการพาความร้อนให้มีประสิทธิภาพดี สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในภาคธุรกิจต่อไป

Turner I.W., 1996 งานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาถึงการทำชิ้นไม้ให้แห้งก่อนไปสู่กระบวนการทางอุตสาหกรรม การอบแห้งจะช่วยในการป้องกันการเสียหายของชิ้นไม้และช่วยลดปริมาณความชื้น

ลงป้องกันการเกิดเชื้อรา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้จะมีความซับซ้อนในกระบวนการอบแห้ง วิเคราะห์ถึงปรากฏการณ์การเกิดความร้อนและการถ่ายเทมวลสาร ของวัสดุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Nonhomogeneous) วัสดุแบบชื้นมาก (Hygroscopic) ซึ่งมีลักษณะเป็น 2 มิติ โดยใช้หลักของ Control Volume และหลักการการพาความร้อน ในการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับ เทคนิคการคำนวณที่แตกต่าง 2 วิธี โดยวิธีแรกพิจารณาถึงระบบการเกิดของความร้อนในแต่ละเทคนิค โดยไม่มีความสัมพันธ์กัน ส่วนอีกวิธีเป็นการทำเอาเทคนิคทั้งสองวิธีมาประยุกต์เข้าด้วยกัน ซึ่งการประยุกต์เทคนิคเข้าด้วยกันสามารถอธิบายถึงพฤติกรรมของการเกิดความร้อนภายในและค่าความชื้น ได้ดี ทั้งกรณีของกระบวนการอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิต่ำ (50°C) อุณหภูมิปานกลาง (80°C) และอุณหภูมิสูง (120°C)

ซึ่งในงานวิจัยในครั้งนี้จึงได้ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์และ พฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนของมวลสารในกระบวนการอบแห้งภายใต้ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ 2.45 GHz โดยทำการให้ความร้อนโดยใช้เตาไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตร และสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง ประกอบด้วยแมกนีตรอนจำนวน 6 แมกนีตรอน ซึ่งกำลังงานสูงสุด คือ $6 \times 800 \text{ W}$ ด้วยระบบนี้จะทำให้ชิ้นงานได้รับคลื่นอย่างสม่ำเสมอตลอดชิ้นงานเนื่องจากการ เคลื่อนที่ด้วยระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่องภายในอุโมงค์ จึงทำให้ไม่มีความชื้นสะสมอยู่ภายในเตา อบเหมือนกับระบบไมโครเวฟแบบปกติ

Prommas et al., 2012 งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จีใน กระบวนการอบแห้งวัสดุแพคเกจขึ้นน้อย ด้วยไมโครเวฟร่วมกับความร้อนโดยใช้สายพานลำเลียง ต่อเนื่อง จากการทดลองพบว่า พลังงานความร้อนที่ใช้เป็นประโยชน์ในการระเหยความชื้น ภายในแพคเกจวัสดุพูนจะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ใน การอบแห้งมีค่ามากพลังงานความร้อนที่ใช้จึงมีค่ามาก ส่วนและเอ็กเซอร์จีที่สูญเสียที่ไหลเข้า และทางออกก็จะแปรเปลี่ยนไปกับชนิดของแพคเกจที่ใช้ในการอบแห้งเช่นกัน

Jindarat et al., 2011 งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์พลังงานในกระบวนการอบแห้งวัสดุ แพคเกจขึ้นน้อยด้วยไมโครเวฟร่วมกับความร้อนโดยใช้สายพานลำเลียงต่อเนื่อง เพื่อหารูปแบบ ในการให้ความร้อนและวิเคราะห์ถึงการสิ้นเปลืองพลังงาน พบว่าการใช้พลังงานจะขึ้นอยู่กับ โครงสร้างของวัสดุพูน อุณหภูมิของความร้อน และตำแหน่งการเปิดของแมกนีตรอน การอบแห้ง ด้วยไมโครเวฟร่วมกับความร้อนช่วยให้วัสดุได้รับความร้อนทั่วทั้งปริมาตร ลดระยะเวลาในการ อบแห้ง และประหยัดพลังงาน

Prommas et al., 2009 งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จีในกระบวนการอบแห้งวัสดุพูนหลายชั้นโดยใช้ลมร้อน โดยทำการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อน ทางเข้าก่อนการอบแห้ง และทางออกหลังการอบแห้งที่มีผลต่อจลนพลศาสตร์ในการวิเคราะห์อาศัยกฏข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ในการวิเคราะห์พลังงานที่ใช้เป็นประโยชน์ในการอบแห้งแพคเกจวัสดุพูน F - C และ C - F และประยุกต์ใช้กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ ในการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีที่ไหลเข้า เอ็กเซอร์จีที่ไหลออก เอ็กเซอร์จีที่สูญเสียและประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี ของกระบวนการอบแห้ง ผลจากการวิเคราะห์พลังงาน และเอ็กเซอร์จีช่วงแรกของการอบแห้งนั้นประสิทธิภาพของเอ็กเซอร์จีมีค่าต่ำเนื่องจากการสูญเสียน้อย และเมื่อเวลาในการอบแห้งมากขึ้นประสิทธิภาพของเอ็กเซอร์จีจะมีค่าสูงขึ้นด้วย เนื่องจากมีเอ็กเซอร์จีสูญเสียน้อย โดยที่ประสิทธิภาพของเอ็กเซอร์จีจะแปรผกผันกับประสิทธิภาพพลังงาน

Jindarat et al., 2008 งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์พลังงานในกระบวนการอบแห้งวัสดุพูนหลายชั้น โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนภายในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (โหมด TE_{10}) และไมโครเวฟใช้งานในย่านความถี่ 2.45 GHz. สำหรับวัสดุพูนที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้กำหนดเป็นองค์ประกอบของเม็ดแก้ว น้ำและโพรงอากาศ ซึ่งตัวอย่างวัสดุทดสอบที่ใช้มี 2 ลักษณะ คือ แพคเกจชั้นเดียวที่ใช้เม็ดแก้วขนาดเดียวกันหมด มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 mm แพคเกจมีความลึก 50 mm (F bed) และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 mm แพคเกจมีความลึก 50 mm (C bed) แพคเกจสองชั้นที่ใช้เม็ดแก้ว 2 ขนาดไว้ด้วยกันแต่อยู่คนละชั้น โดยแพคเกจ F - C bed อนุภาคนาขนาดเล็กอยู่ด้านบนของอนุภาคนาขนาดใหญ่ และแพคเกจ C-F bed อนุภาคนาใหญ่อยู่ด้านบนของอนุภาคนาขนาดเล็ก ผลจากการทดลองพบว่า ขนาดของอนุภาคของวัสดุพูนที่ต่างกันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับการทะลุทะลวงผ่านและการดูดซับของพลังงานไมโครเวฟในวัสดุพูน และพบว่าอนุภาคนาขนาดเล็กจะมีแรงดันพิลลารีสูงทำให้กระบวนการอบแห้งเป็นไปอย่างรวดเร็วกว่าเมื่อเทียบกับอนุภาคนาใหญ่

Wongpradubchai et al., 2008 งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งวัสดุพูนหลายชั้น โดยใช้ท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมร่วมกับการพาความร้อน (โหมด TE_{10} ความถี่ 2.45 GHz) สำหรับวัสดุพูนหลายชั้นที่ใช้ในการศึกษา คือ เม็ดแก้วผสมกับน้ำและอากาศ โดยมีการศึกษาอิทธิพลของขนาดเม็ดแก้วและความหนาแต่ละชั้นภายในวัสดุพูนที่มีผลต่อการถ่ายเทมวลและความร้อนภายในวัสดุพูนแบบไม่อิมิตัว พบว่าขนาดของอนุภาคภายในวัสดุพูน มีอิทธิพลต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง

Suwannapum et al., 2007 งานวิจัยนี้นำเสนอวัตกรรมการบ่มคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟร่วมกับระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่อง (โครงสร้างภายในระบบ ประกอบด้วยแมกนีตรอนซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz. ขนาด 800 W จำนวน 8 ตัว ติดตั้งกระจายภายในอุโมงค์ของระบบไมโครเวฟซึ่งมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าหน้าตัด 0.45×0.90 เมตร² และมีความยาวอุโมงค์ 3 m สำหรับระบบสายพานลำเลียงชิ้นงานจากบริเวณที่ใส่ชิ้นงานเข้าสู่อุโมงค์ด้วยความเร็ว 0 - 0.4 m/s โดยมีระบบป้องกันการรั่วไหลของคลื่นไมโครเวฟไม่ให้เกินค่ามาตรฐานของ DHHS ที่ 5 mW/cm^2) โดยทำการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและมวลสารที่เกิดขึ้นระหว่างการบ่มคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟ และการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่เกิดขึ้น ผลจากการศึกษาพบว่าพลังงานไมโครเวฟสามารถช่วยเร่งพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้นไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัดที่อายุ 28 วัน

Wongpradubchai et al., 2007 ศึกษาเชิงการทดลองการอบแห้งไม้ด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้ท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม ภายใต้ความถี่คลื่นไมโครเวฟ 2.45 GHz (โหมด TE_{10}) พารามิเตอร์ที่ศึกษาคือ กำลังคลื่นไมโครเวฟ (50, 100W) อุณหภูมิของลมร้อน (40, 60°C) และความหนาของชิ้นไม้ (50, 80 mm) ที่มีผลต่ออุณหภูมิภายในชิ้นไม้ ความชื้นของชิ้นไม้ และการดูดซับกำลังไมโครเวฟของชิ้นไม้ ผลจากการทดลองในช่วงแรกของการอบแห้งชิ้นไม้สามารถดูดซับกำลังไมโครเวฟได้ดีเนื่องจากชิ้นไม้ยังมีความชื้นสูง ทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในชิ้นไม้สูงตามไปด้วย และเมื่อระยะเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น การดูดซับกำลังไมโครเวฟจะมีค่าลดลง เนื่องจากชิ้นไม้มีความชื้นลดลง จึงทำให้อุณหภูมิภายในของชิ้นไม้มีค่าลดลง

Ekasilp et al., 2006 ศึกษาพลังงานและเอ็กเซอร์ยีของกระบวนการอบแห้งวัสดุชีวภาพโดยใช้กระบวนการสเปาต์เตดเบคร่วมกับไมโครเวฟ (Microwave Spouted Bed) ซึ่งทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งเร็วขึ้นและได้คุณภาพดีขึ้น และการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์ยี (Exergy) ของกระบวนการอบแห้งโดยใช้สเปาต์เตดเบคร่วมกับไมโครเวฟ โดยการเปลี่ยนอุณหภูมิอากาศที่ทางเข้า ให้ค่าความชื้นเริ่มต้นของวัสดุชีวภาพ อัตราการไหลของอากาศและพลังงานจากไมโครเวฟมีค่าคงที่ ผลการวิเคราะห์พบว่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีมีค่าน้อยกว่าประสิทธิภาพพลังงาน

Doongam et al., 2006 งานวิจัยนี้เสนอเกี่ยวกับการนำพลังงานไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้กับการให้ความร้อนในทางธรรมชาติคอมพิวเตอร์ที่มีปริมาณของกัมมันตภาพรังสีต่างกัน ทั้งหมด 4 สูตร โดยใช้ระบบไมโครเวฟชนิดท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (โหมด TE_{10})

ประกอบด้วยแมกนีตรอนซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟที่ระดับความถี่ 2.45 GHz สามารถแปรเปลี่ยนกำลังได้ตั้งแต่ 0 - 1500 W โดยตัวแปรที่ศึกษาคือ กำลังวัตต์ที่ป้อนเข้า ขนาดความหนาของชิ้นงาน ระยะเวลาที่ให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน และองค์ประกอบของส่วนผสมในชิ้นงานที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อนและการเกิดโครงสร้างตาข่ายสามมิติภายในชิ้นงานทดสอบที่มีสมบัติไดอิเล็กตริกต่างกัน(สูตรต่างกัน) รวมถึงโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ พบว่าพลังงานไมโครเวฟสามารถอุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ให้เริ่มร้อนก่อนเข้าสู่กระบวนการวัลคาไนซ์ที่มีความหนาแน่นมาก และการอุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์โดยใช้พลังงานไมโครเวฟสามารถเพิ่มการเชื่อมขวางพันธะได้ดีกว่าวิธีทั่วไป

Ratanadecho et al., 2004 ศึกษาเกี่ยวกับจลนศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งวัสดุไดอิเล็กตริกหรือชิ้นงานทดสอบชนิดต่างๆ โดยใช้เตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง โดยมีพารามิเตอร์ที่ศึกษาก็คือผลของความเร็วของสายพานลำเลียง เวลาที่ใช้ในการรับคลื่นไมโครเวฟ ขนาดของวัสดุทดสอบ กำลังของแมกนีตรอน (800 W/1 แมกนีตรอน) และทิศทางการจ่ายคลื่นไมโครเวฟจากแมกนีตรอนที่มีต่อจลนศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งและคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบ วัสดุที่ใช้ในการศึกษาคือ ยางพารา เซรามิกส์และผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ผลจากการศึกษาพบว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งพลังงานนั้นสามารถช่วยประหยัดพลังงาน ลดระยะเวลาในการอบชิ้นงาน ชิ้นงานได้รับความร้อนทั่วถึงพร้อมกันทั้งปริมาตร และการกระจายของความชื้นในโครงสร้างเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ