

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูน

ในส่วนนี้จะอธิบายเกี่ยวกับกลไกของกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายในวัสดุพูน ซึ่งความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกและปรากฏการณ์พื้นฐานนี้สามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูนโดยใช้กรรมวิธีการให้ความร้อนแบบไมโครเวฟต่อไป

3.1.1 กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูน

เพื่อให้เกิดความเข้าใจในกระบวนการอบแห้ง การวิเคราะห์ในเชิงลึกของกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารที่เกิดขึ้นในวัสดุพูนในระหว่างกระบวนการอบแห้งถือว่าเป็นสิ่งสำคัญ ก่อนที่จะไปออกแบบระบบที่ใช้ในงานในทางปฏิบัติ กระบวนการอบแห้งวัสดุจะคาบเกี่ยวกับกระบวนการเบื้องต้นที่เกิดขึ้นพร้อมกันสองกระบวนการ (ผดุงศักดิ์, 2547) นั่นก็คือ

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

ปัจจัยสำคัญที่ครอบคลุมถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการเพื่อหาปรากฏการณ์ต่าง ๆ ในกระบวนการ เช่น อัตราอบแห้ง การกระจายตัวของอุณหภูมิและความชื้นภายในเนื้อวัสดุเป็นปัจจัยที่ขึ้นกับเวลา

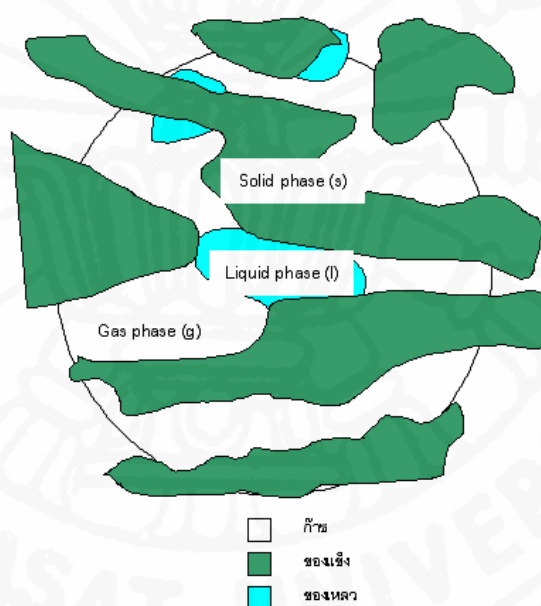
การอบแห้งวัสดุพูนที่ไม่อิมตัวจะต้องเกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนและการเคลื่อนตัวของความชื้น (ประกอบไปด้วยของเหลว ไอน้ำและอากาศ) ซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกันในวัสดุพูน อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีของกระบวนการอบแห้งจะมีความซับซ้อนเป็นอันมากเนื่องจากการคาบเกี่ยวกันของสมการหลายชุดที่เป็นลักษณะไม่เชิงเส้น รวมถึงเงื่อนไขขอบเขตที่ซับซ้อนกว่ากรณีทั่ว ๆ ไป อย่างไรก็ตามปัจจุบันการคำนวณของคอมพิวเตอร์มีสมรรถนะสูงมากสามารถใช้ในการแก้ปัญหาที่มีเงื่อนไขที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดี ทฤษฎีต่าง ๆ ทางด้านการถ่ายเท

ความร้อนและมวลสารก็มีการพัฒนาเป็นอย่างมากเมื่อมีคอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูงมาช่วยในการคำนวณ

3.1.2 รูปแบบโครงสร้างของวัสดุพูน

วัสดุส่วนใหญ่ในทางวิศวกรรมเป็นวัสดุพูน กล่าวคือ ตัววัสดุประกอบด้วยสารที่มี 3 สถานะ คือ สถานะของแข็ง (solid phase หรือ solid matrix) ของเหลว (liquid phase) และก๊าซ (gas phase) ที่อยู่ในช่องว่างหรือรูพูน (void) ดังแสดงในภาพที่ 3.1

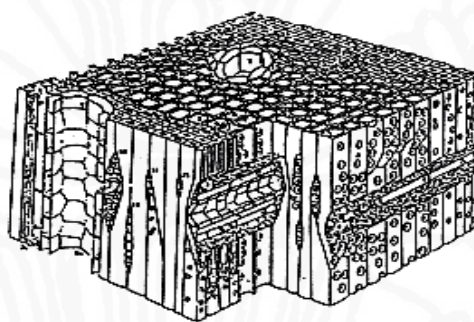
ตัวอย่างวัสดุพูนที่ใช้งานในทางวิศวกรรม เช่น ดินและคอนกรีตในงานวิศวกรรมปฐพี Ceramic ในงานวิศวกรรมโลหะ Catalyst ในงานวิศวกรรมเคมี ฉนวนความร้อนในงานวิศวกรรมเครื่องกลและเคมี เนื้อเยื่อต่าง ๆ ผิว หรือ Membrane ในงานวิศวกรรมชีวภาพและการแพทย์ รวมถึงอาหารและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรในงานวิศวกรรมเกษตร



ภาพที่ 3.1 โครงสร้างของวัสดุพูนทั่วไป

เมื่อพิจารณาในระดับโครงสร้างของวัสดุพูน เราสามารถแบ่งออกเป็นสองรูปแบบใหญ่ ๆ ชนิดแรกของเหลวหรือความชื้นจะเคลือบตัวอยู่รอบนอกอนุภาคของแข็ง (solid matrices) ไปตามช่องว่าง (pores) ที่เกิดขึ้นจากส่วนประกอบของผิวอนุภาคของแข็ง โดยที่ความชื้นดังกล่าวนี้ไม่สามารถส่งผ่านหรือดูดกลืนเข้าไปในชั้นผิวของอนุภาคของแข็งได้ เราเรียกวัสดุพูนชนิดนี้ว่า วัสดุพูนแบบไม่ชื้นมาก (nonhygroscopic porous media) หากพิจารณาโครงสร้างของวัสดุพูนชนิดนี้ พบว่าช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็งหรือรูพูนมีขนาดใหญ่พอ ดังนั้นอิทธิพลของความดันไอบนภายใน

ช่องว่างจะมีความสำคัญน้อย โครงสร้างของวัสดุพอร์ซันชนิดที่สองความชื้นจะยึดอยู่กับโครงสร้างของอนุภาคของแข็งภายใต้พันธะทางเคมีและฟิสิกส์ ซึ่งจะเป็นพันธะที่สำคัญในการหน่วงให้ความชื้นคงอยู่ในโครงสร้างเมื่อพิจารณาโครงสร้างของวัสดุพอร์ซันชนิดนี้ พบว่าช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็งมีขนาดรัศมีเล็กมากประมาณ 0 ถึง 1 นาโนเมตร เราจะเรียวัสดุพอร์ซันชนิดนี้ว่าวัสดุพอร์ซันแบบชื้นมาก (hygroscopic porous media) ซึ่งกรณีนี้จะรวมถึงวัสดุพอร์ซันบางชนิด เช่น วัสดุชีวภาพที่ไม่สามารถแบ่งแยกลักษณะโครงสร้างได้ชัดเจน ตัวอย่างเช่น เนื้อไม้ ดังแสดงในภาพที่ 3.2 ซึ่งจะมีโครงสร้างเนื้อวัสดุที่ซับซ้อนที่เรียกว่าโครงสร้างวัสดุพอร์ซันแบบเซลล์ลูลาร์-คาพิลลารี (cellular capillary) ซึ่งในกรณีนี้การเคลื่อนที่ของความชื้นจะไม่เสถียรภาพและการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีจะทวีความซับซ้อนกว่าในกรณีแรก



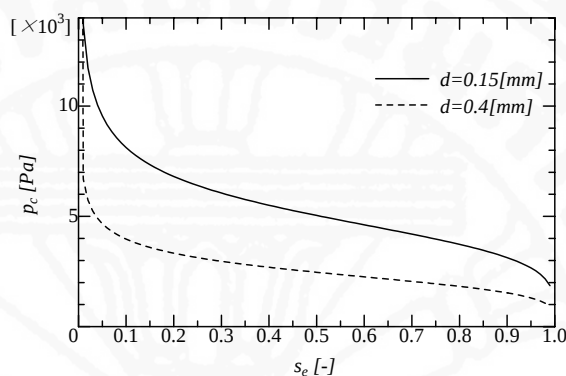
ภาพที่ 3.2 โครงสร้างวัสดุพอร์ซันแบบเซลล์ลูลาร์-คาพิลลารี (cellular capillary)

สำหรับวัสดุพอร์ซันในกรณีแรก (nonhygroscopic porous media) ส่วนใหญ่จะเรียกว่าวัสดุพอร์ซันแบบคาพิลลารี (capillary porous media) เนื่องจากของเหลวหรือความชื้นภายในวัสดุจะเคลื่อนตัวในช่องว่างที่เป็นรูพอร์ซัน (ภาพที่ 3.4) เนื่องจากอิทธิพลของความดันคาพิลลารี (capillary pressure) โดยที่ความดันคาพิลลารีนี้จะเป็นฟังก์ชันของแรงตึงผิว มุมสัมผัสและลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของวัสดุพอร์ซัน ความดันคาพิลลารีสามารถนิยามได้ดังนี้คือ เมื่อของไหลสองชนิดที่ไม่ผสมกัน (immiscible fluids) (เช่น น้ำและอากาศ) เกิดการสัมผัสกันในช่องว่างของวัสดุพอร์ซัน การไม่ผสมกันของของไหลสองชนิดทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของความดันตลอดช่วงผิวรอยต่อ เรียกว่าความดันคาพิลลารี (P_c) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P_c = P - P_l \quad (3.1)$$

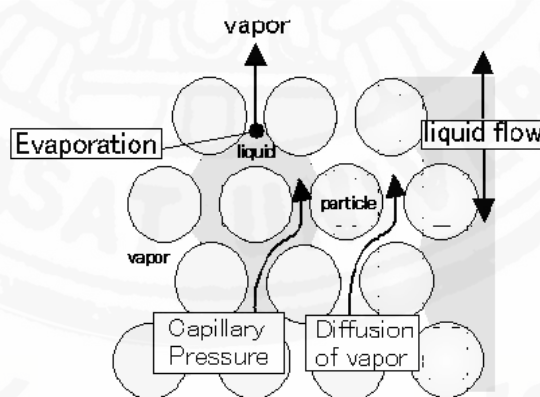
เมื่อ P คือความดันในของไหลที่มีสถานะแห้ง (non-wetting phase) เช่น อากาศ ส่วน P_l คือ ความดันในของไหลที่มีสถานะเปียก (wetting phase) ความดันคาพิลลารีมีคุณสมบัติที่

สมดุลและสัมพันธ์โดยตรงกับแรงดึงดูดระหว่างของไหลทั้งสองชนิด จากการศึกษาพบว่าค่าความดันคาพิลลารีเพิ่มขึ้นเมื่อค่าอิมิตัวของของไหลสถานะแห้งเพิ่มขึ้น แต่ก็ขึ้นกับคุณสมบัติของความอิมิตัวของวัสดุนั้น ๆ ด้วย ภาพที่ 3.3 แสดงข้อมูลจากการทดลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาพิลลารีภายในวัสดุพูนและคุณสมบัติของของไหลที่สภาวะต่าง ๆ (Ratanadecho et al., 2001)



ภาพที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาพิลลารีภายในวัสดุพูนและสมบัติของของไหล

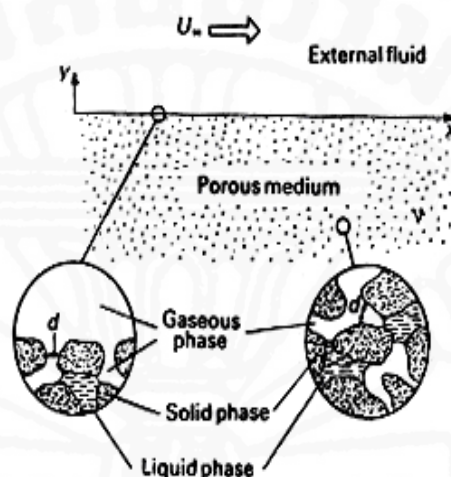
กลไกสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนตัวของไอน้ำในช่องว่างที่เป็นรูพูน คือผลของการแพร่กระจายไอน้ำ (vapor diffusion force) ซึ่งอธิบายได้ด้วยกฎของฟิคส์ (Fick's law) ภาพที่ 3.4 แสดงถึงกลไกที่สำคัญต่อกระบวนการถ่ายเทมวลสารในวัสดุพูนแบบคาพิลลารี



ภาพที่ 3.4 กระบวนการถ่ายเทมวลสารในวัสดุพูน

3.1.3 กลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในกระบวนการอบแห้งในวัสดุพูน

กลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในกระบวนการอบแห้งในวัสดุพูนแบบคาพิลลารีอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าอิทธิพลจากความดันคาพิลลารี ถือว่าเป็นกลไกหลักในการเคลื่อนย้ายมวลความชื้นออกจากโครงสร้างวัสดุพูน แต่ในวัสดุพูนทั่วไปในทางปฏิบัติวัสดุพูนมีโครงสร้างซับซ้อนและมีกลไกหลายอย่างที่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนย้ายมวลความชื้น



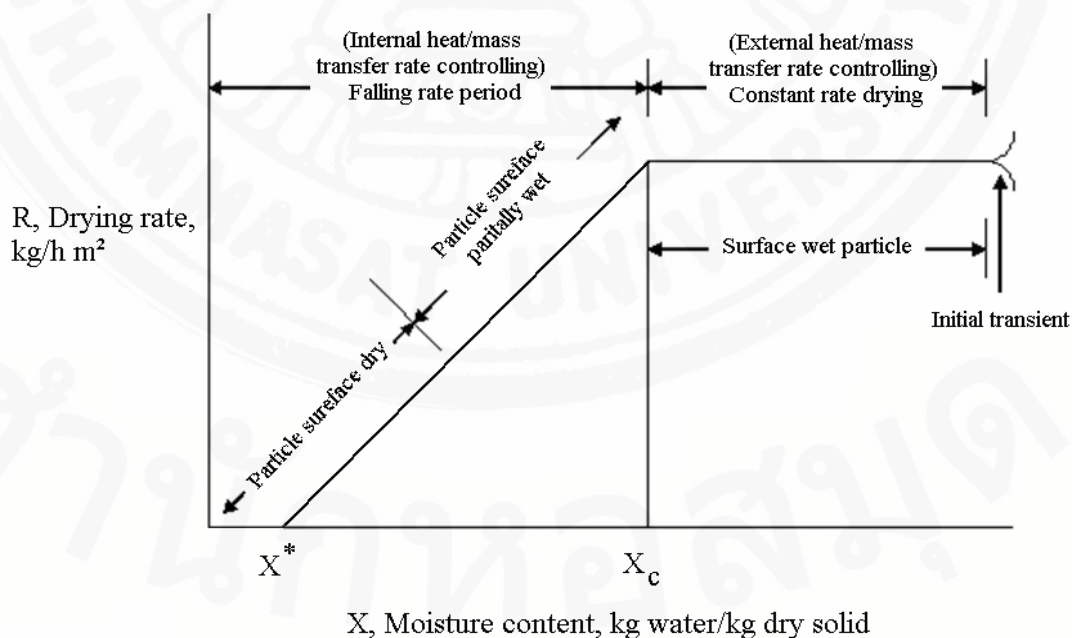
ภาพที่ 3.5 ไดอะแกรมของกระบวนการอบแห้งวัสดุพูน

ภาพที่ 3.5 แสดงตัวอย่างวัสดุพูนที่เปียกชื้นผ่านกระบวนการอบแห้งภายใต้สภาวะภายนอกคงที่ กล่าวคืออุณหภูมิ ความชื้นและความเร็วอากาศถูกรักษาให้คงที่ตลอดช่วงการทดสอบ การเคลื่อนตัวของความชื้นจากภายในสู่ผิวหน้าภายใต้อิทธิพลของกลไกต่าง ๆ จะปรากฏขึ้น (ภาพที่ 3.4) โดยที่กลไกที่ควบคุมการเคลื่อนตัวของความชื้น (ผดุงศักดิ์, 2547) สามารถสรุปได้ดังนี้

1. แรงดันคาพิลลารี
2. การแพร่กระจายตัว (diffusion) เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสสาร
3. การเปลี่ยนสถานะของสสาร กล่าวคือเกิดการระเหยและการกลั่นตัว (evaporation-condensation mechanism) ภายในรูพูน
4. การแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุ (surface diffusion)
5. การเคลื่อนตัวของความชื้นเนื่องจากความแตกต่างของความดันรวม
6. การเคลื่อนตัวของความชื้นเนื่องจากอิทธิพลของแรงโน้มถ่วง
7. การเคลื่อนตัวหาความชื้นเนื่องจากการกระจายตัวเชิงอุณหภูมิ (thermo-diffusion)

โดยทั่วไปกลไกที่กล่าวมาข้างต้นมีความสำคัญต่อกระบวนการการอบแห้งวัสดุพูนที่คาบเวลาต่างกัน ซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถแยกกลไกแต่ละชนิดออกจากกันได้ชัดเจนเนื่องจากความซับซ้อนของกระบวนการอบแห้ง ทำได้เพียงพิจารณาเฉพาะกลไกหลักที่สำคัญกว่าเท่านั้น การพิจารณาว่ากลไกใดมีความสำคัญต่อกระบวนการอบแห้งนั้นขึ้นอยู่กับชนิดและโครงสร้างของวัสดุ รวมไปถึงวิธีการให้พลังงานความร้อน โดยทั่วไปข้อมูลจากการทดลองในห้องปฏิบัติการมักนำมาใช้ประกอบการวิเคราะห์หลักอีกด้วย

ภาพที่ 3.6 กระบวนการอบแห้งสามารถแบ่งออกเป็นสองคาบเวลาใหญ่ ๆ คือ คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งคงที่ (constant rate period) อัตราการระเหยของไอน้ำที่ผิวหน้าจะเท่ากับอัตราการเคลื่อนตัวของน้ำ (ของเหลว) ภายในวัสดุพูนที่เต็มเต็มที่ผิวหน้า ช่วงปลายของคาบเวลานี้ความชื้นภายในวัสดุเข้าใกล้ค่าความชื้นวิกฤติ (critical moisture content, x_c) โดยค่าความชื้นวิกฤติขึ้นอยู่กับชนิดของโครงสร้างและการเกาะตัวของความชื้นในวัสดุ เมื่อความชื้นในวัสดุมีค่าน้อยกว่าค่าความชื้นวิกฤติ กระบวนการอบแห้งจะเข้าสู่คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลง (falling rate period) โดยปกติคาบเวลานี้ใช้ระยะเวลามากกว่าคาบเวลาที่อัตราการอบแห้งคงที่ เมื่ออัตราการอบแห้งมีค่าลดลงเข้าใกล้ศูนย์จะมีความชื้นคงเหลืออยู่ค่าหนึ่ง (มีค่าน้อยมาก) ภายใต้สภาวะการอบแห้ง ค่าความชื้นนี้เราเรียกว่าค่าความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) อย่างไรก็ตามจุดสำคัญในภาพที่ 3.6 สามารถอธิบายได้เป็นข้อย่อย ๆ ดังนี้



ภาพที่ 3.6 คาบเวลาของกระบวนการอบแห้งและกลไกที่ควบคุมการถ่ายเทมวลสาร

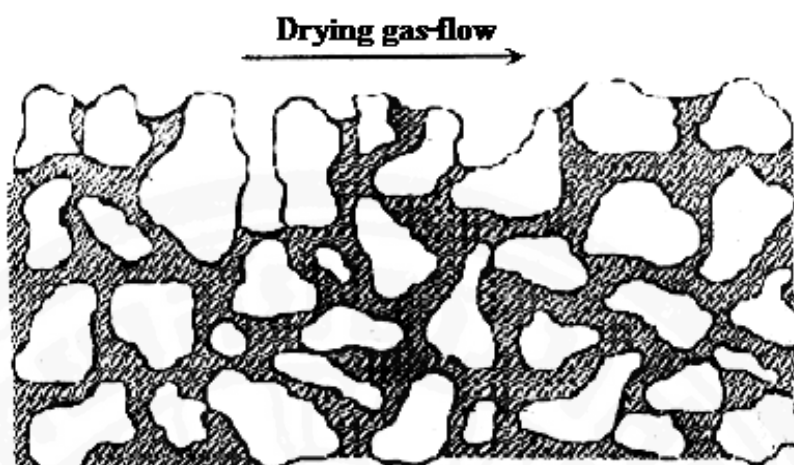
(Mujumdar, 1997)

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) เมื่อกระบวนการการอบแห้งดำเนินต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ จนความชื้นเข้าสู่ความชื้นวิกฤติ (ค่าความชื้นวิกฤตินี้ขึ้นกับความสามารถในการเคลื่อนตัวของความชื้นภายในโครงสร้างวัสดุเป็นสำคัญ) ความชื้นในวัสดุที่เคลื่อนตัวไปยังผิวหน้าภายใต้อิทธิพลการแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุเริ่มมีไม่เพียงพอต่อปริมาณความชื้นที่ระเหยออกไป ทำให้ฟิล์มของเหลวที่บริเวณผิวหน้าวัสดุเกิดการแยกตัวและเกิดขึ้นความแห้งในบางจุดดังแสดงในภาพที่ 3.7

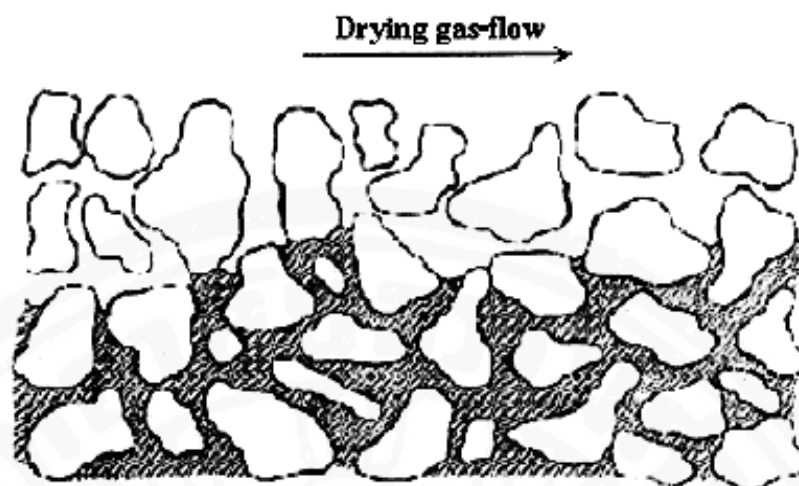
3. คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลง (falling rate period) เมื่อกระบวนการอบแห้งดำเนินต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ เมื่อความชื้นมีค่าเข้าสู่ความชื้นวิกฤติ ซึ่งค่าของความชื้นวิกฤตินี้จะขึ้นอยู่กับความยากง่ายของการเคลื่อนตัวของความชื้นภายในโครงสร้างที่แตกต่างกันของวัสดุเป็นสำคัญ น้ำที่เคลื่อนตัวไปยังผิวหน้าภายใต้อิทธิพลของความดันคาพิลลารีมีไม่เพียงพอที่จะไปเติมเต็มแทนที่น้ำที่เพิ่งระเหยออกไป ทำให้ฟิล์มของของเหลวบาง ๆ ที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าเกิดการแยกตัวในบางจุดดังแสดงในภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 ปรากฏการณ์ที่อัตราการอบแห้งลดลงระยะแรก
(first falling rate period)

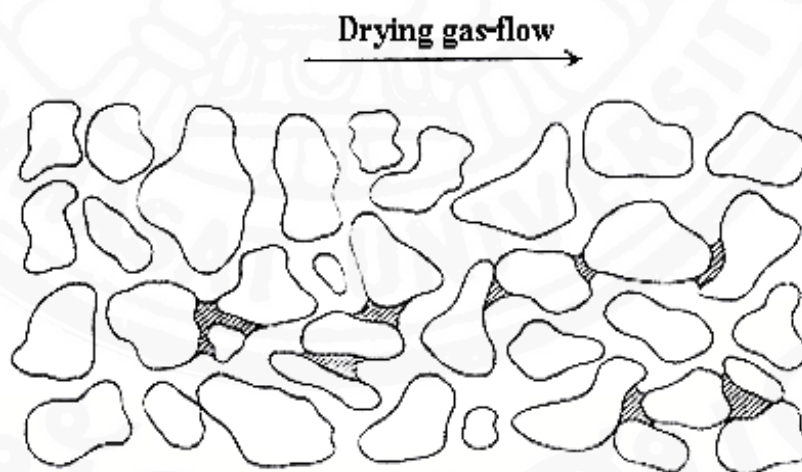
คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลงอย่างสมบูรณ์ ในช่วงต้นของในคาบเวลานี้อัตราการอบแห้งโดยรวมเริ่มลดลง บางครั้งเรียกช่วงเวลานี้ว่าคาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลงระยะแรก (first falling rate period) เมื่อกระบวนการอบแห้งดำเนินต่อไปจนถึงขั้นของความแห้งก่อดำเนินอย่างสมบูรณ์ที่ผิวของวัสดุและเคลื่อนตัวเข้าสู่เนื้อวัสดุดังแสดงในภาพที่ 3.8 ช่วงนี้เรียกว่าคาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลงระยะที่สอง (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 คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลงนี้อาจสังเกตได้จากการลดลงอย่างรวดเร็วของอัตราการถ่ายเทมวลสารและความดันไอที่ผิววัสดุ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติคาบเวลานี้สังเกตได้ยากจากการทดลองเนื่องจากความซับซ้อนของปรากฏการณ์



ภาพที่ 3.8 ปรากฏการณ์ที่อัตราการอบแห้งลดลงระยะที่สอง
(second falling rate period)

ช่วงปลายของคาบเวลาอัตราการอบแห้งลดลงระยะที่สองสังเกตได้ว่าความชื้นภายในวัสดุเหลืออยู่เพียงเล็กน้อยและกระจายตัวในช่องว่างหรือรูพรุนขนาดเล็ก ดังแสดงในภาพที่ 3.9 ช่วงสุดท้ายของกระบวนการนี้ อัตราการอบแห้งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งในกรณีนี้ความชื้นที่เหลืออยู่เรียกว่า ค่าความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content)



ภาพที่ 3.9 ปรากฏการณ์ที่อัตราการอบแห้งสิ้นสุดท้าย (end stage of drying)

3.1.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพรุน

โดยทั่วไปการวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนภายในวัสดุพรุนอยู่บนพื้นฐานของสมการส่งถ่าย (transport equation) ซึ่งเป็นผลมาจากกฎการสมดุลเชิงอนุพันธ์ในการทำนายพฤติกรรมรวมของกระบวนการ เช่น อัตราการไหล หรือฟลักซ์ความร้อน ต้องอาศัยข้อมูลจากสิ่งแวดล้อมหรือเงื่อนไขขอบเขตของระบบมาช่วยประกอบในการคำนวณ

เมื่อมีของไหลไหลผ่านโครงสร้างที่ซับซ้อน เช่น วัสดุพรุน สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ต้องอาศัยสมการเฉพาะตำแหน่ง (เชิงจุลภาค) เพื่ออธิบายพฤติกรรมการไหลภายในช่องว่างหรือรูพรุน แต่เนื่องจากวัสดุพรุนมีโครงสร้างรูพรุนภายในซับซ้อนทำให้ปรากฏการณ์ทางกายภาพในวัสดุพรุนมีความซับซ้อนตาม ดังนั้นการหาคำตอบสำหรับวิเคราะห์ความชื้นและอุณหภูมิจึงเป็นไปได้ยาก เพื่อจัดการความยุ่งยากดังกล่าวปรากฏการณ์ทางกายภาพในวัสดุพรุนจึงมักอธิบายในรูปสมการเชิงมหภาค (macroscopic equations) ซึ่งเป็นจริงก็ต่อเมื่อโดเมนที่พิจารณาถือว่าเป็นปริมาตรเฉลี่ยที่ประกอบจากรูพรุนจำนวนมาก รากฐานสมการนี้หาได้จากสมการเชิงจุลภาคโดยเทคนิคปริมาตรเฉลี่ย (volume average technique) (Whitaker, 1997 และ Ratanadecho et al., 2003) โดยสมการดังกล่าวสามารถใช้ได้จริงสำหรับค่าเฉลี่ยปริมาณเชิงจุลภาคต่าง ๆ ซึ่งพบกันบ่อยในการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุพรุน อาทิเช่น ความพรุน (porosity) ϕ และความเร็ว u ซึ่งปริมาณเหล่านี้ถือว่าเป็นค่าเฉลี่ยเท่านั้น

สำหรับสมการที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพรุนเคยเสนอไว้โดย Phillip et al. (1951) และในช่วงเวลาเดียวกันโดย Luikov (1966) หลังจากนั้นก็มีนักวิจัยหลายท่าน (Sherwood, 1930 Cealgske, 1937 Huang, 1979 และ Harmathy, 1969) ได้พิสูจน์ที่มาของสมการสมดุลเชิงมหภาคในการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในกระบวนการอบแห้งโดยอาศัยวิธีปริมาตรเฉลี่ยเช่นกัน

3.1.4.1 สมการอนุรักษ์มวล (Mass Conservation Equations)

สมการอนุรักษ์มวลสำหรับของเหลว ไอน้ำ อากาศ และก๊าซได้เขียนอยู่ในสมการสมดุลดังต่อไปนี้ (Ratanadecho et al., 2001)

สำหรับของเหลว

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_l \phi s) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_l u_l) = -\dot{n} \quad (3.2)$$

สำหรับไอน้ำ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_v \phi(1-s)) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_v u_v) = \dot{n} \quad (3.3)$$

สำหรับอากาศ

$$\frac{\partial}{\partial t} \{ \rho_a \phi (1-s) \} + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_a u_a) = 0 \quad (3.4)$$

สำหรับก๊าซ

$$\frac{\partial}{\partial t} \{ \rho_g \phi (1-s) \} + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_g u_g) = \dot{n} \quad (3.5)$$

เมื่อ

t คือ เวลา

ρ_i คือ ความหนาแน่นของสารแต่ละสถานะ

u_i คือ ความเร็วเฉลี่ยเชิงมวล

s คือ ปริมาณความอิมตัวของน้ำ

ในที่นี้ $\dot{n}$ คือ อัตราการกลั่นตัวหรืออัตราการกลายเป็นไอระหว่างการเปลี่ยนสถานะ และ ϕ คือ ความพรุนของวัสดุพรุนและสัญลักษณ์ l, v, g, a คือสถานะของ ของเหลว ไอน้ำ ก๊าซ และ อากาศ ตามลำดับ

3.1.4.2 สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Conservation Equations)

ในการวิเคราะห์จะไม่คำนึงถึงผลของพลังงานจลน์และความดัน การวิเคราะห์สมการอนุรักษ์พลังงานจะสมมุติให้ทุกสถานะนั้นสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ อุณหภูมิของวัสดุทดสอบคำนวณจากสมการถ่ายโอนความร้อนซึ่งรวมเทอมของความหนาแน่นของพลังงานความร้อนที่ผลิตขึ้นภายในวัสดุ (local volumetric heat generation) สมการถ่ายโอนความร้อนซึ่งอธิบายการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในวัสดุทดสอบโดยขึ้นกับเวลา คือ (Ratanadecho et al., 2001)

$$\frac{\partial}{\partial t} [(\rho C_p)_T T] + \nabla [(\rho C_{pl} u_l + (\rho_a C_{pa} + \rho_v C_{pv}) u_g) T] + H_v \dot{n} = -\nabla q + Q \quad (3.6)$$

เมื่อ

T คือ อุณหภูมิ

C_{pi} คือ ความจุความร้อนจำเพาะของสารแต่ละสถานะ

q คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์ความร้อน

โดย H_v คือ ความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอของน้ำ และ Q คือความหนาแน่นของพลังงานความร้อนที่ผลิตขึ้นภายในวัสดุ (local volumetric heat generation term)

3.1.4.3 Phenomenological Relations

ความเร็วเฉลี่ยของของเหลวและก๊าซภายในวัสดุพอร์นสามารถอธิบายด้วยกฎของดาร์ซี (Darcy's law) ดังนี้ (Ratanadecho et al., 2001)

$$u_l = -\frac{KK_{rl}}{\mu_l} [\nabla P_g - \nabla P_c - \rho_l g], \quad u_g = -\frac{KK_{rg}}{\mu_g} [\nabla P_g - \rho_g g] \quad (3.7)$$

สำหรับความเร็วของไอน้ำและอากาศสามารถอธิบายด้วยกฎของฟิคส์ (Fick's law) ดังนี้ (Ratanadecho et al., 2001)

$$\rho_v u_v = \rho_v u_g - \rho_g D_m \nabla \left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right), \quad \rho_a u_a = \rho_a u_g - \rho_g D_m \nabla \left(\frac{\rho_a}{\rho_g} \right) \quad (3.8)$$

โดยความดันคาพิลลารี, P_c สัมพันธ์กับความดันของก๊าซและของเหลวดังนี้

$$P_c = P_g - P_l \quad (3.9)$$

และ D_m คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายเชิงมวลของไอน้ำที่ผสมอยู่กับอากาศในวัสดุพอร์น (effective molecular mass diffusion) (Rogers and Kaviany, 1992)

$$D_m = \frac{2\phi}{3-\phi} (1-s) D_0 \quad (3.10)$$

เมื่อ D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายเชิงมวลในระนาบวัสดุ (binary mass diffusion in plain media) และสามารถหาได้จาก

$$D = D_0 \left(\frac{p_0}{p} \right) \left(\frac{T}{T_0} \right)^{2.2} \quad (3.11)$$

กฎของฟูริเยร์ (Fourier's law) ใช้ในการอธิบายฟลักซ์ความร้อนที่ผ่านวัสดุพอร์น

$$q = -\lambda_{eff} \nabla T \quad (3.12)$$

3.1.4.4 Equilibrium Relations

สมการอนุรักษ์การส่งถ่ายของสารในหลาย ๆ สถานะต้องการสมการประกอบต่าง ๆ เหล่านี้ได้แก่ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (relative permeability) K_r , ความดันคาพิลลารี P_c , ค่าฟังก์ชันของความดันคาพิลลารี (leverett functions) J และ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (effective thermal conductivity) λ_{eff} โดยที่สมการของการซึมผ่าน (permeability) สำหรับของเหลวและก๊าซมีดังนี้ (Kaviany and Mittal, 1987)

$$K_{rl} = s_e^3, K_{rg} = (1 - s_e)^3 \quad (3.13)$$

เมื่อ s_e คือ ประสิทธิภาพความอิ่มตัวของน้ำ (effective water saturation) ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความอิ่มตัวของน้ำต่ำสุดที่ยอมให้ได้ (irreducible water saturation), s_{ir} สามารถหาได้จาก

$$s_e = \frac{s - s_{ir}}{1 - s_{ir}} \quad (3.14)$$

ความดันคาพิวลารี P_c แสดงอยู่ในรูปฟังก์ชันของความดันคาพิวลารี (leverett functions) $J(s_e)$ ความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาพิวลารี และความอิ่มตัวของน้ำจะถูกนิยามโดยใช้ฟังก์ชันของความดันคาพิวลารี (Ratanadecho et al., 2001)

$$P_c = P_g - P_l = \frac{\xi}{\sqrt{K/\phi}} J(s_e) \quad (3.15)$$

เมื่อการซึมผ่าน (permeability) ของวัสดุพูนหาจากสมการของคาร์แมนโคเซนี (Carman-Kozeny equation) (Rogers and Kaviany, 1992)

$$K = \frac{d^2 \phi^3}{180(1 - \phi)^2} \quad (3.16)$$

ξ คือ ความตึงผิวที่ผิวรอยต่อระหว่างก๊าซและของเหลว (gas-liquid interfacial tension) (Aoki et al., 1991) กำหนดความสัมพันธ์ของข้อมูลของความดันคาพิวลารีในรูปของฟังก์ชันของความดันคาพิวลารีดังนี้

$$J(s_e) = 0.325(1/s_e - 1)^{0.217} \quad (3.17)$$

3.1.4.5 สมการสภาวะ (State Equations)

การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูนต้องมีสารที่มีสถานะเป็นก๊าซเป็นส่วนผสมระหว่างไอน้ำและอากาศภายในวัสดุพูน โดยสมมุติให้ก๊าซเป็นก๊าซผสมในอุดมคติ (Ideal mixture of perfect gases) ดังนั้นความหนาแน่นของก๊าซแต่ละชนิดหาได้จากนิยามของความหนาแน่นรวมของก๊าซ ρ_g และความเร็วเฉลี่ยของมวลของก๊าซจากสมการสภาวะ (state equations) (Ratanadecho et al., 2001)

$$\begin{aligned}
\rho_a &= \frac{P_a M_a}{R_o T} \\
\rho_v &= \frac{P_v M_v}{R_o T} \\
\rho_g &= \rho_a + \rho_v \\
P_a &= \rho_a R_a T \\
P_v &= \rho_v R_v T \\
P_g &= P_a + P_v \\
\rho_g u_g &= \rho_a u_g + \rho_v u_v
\end{aligned} \tag{3.18}$$

ความดันย่อย (partial pressure) สำหรับไอน้ำสามารถแสดงในรูปสมการของ เคลวิน (Kelvin's equation) ที่พิจารณาแรงคาพิลลารีดังต่อไปนี้

$$P_v = P_{vs} \exp\left(\frac{P_c}{\rho_l R_v T}\right) \tag{3.19}$$

เมื่อ P_{vs} คือ ความดันย่อย (partial pressure) ของไอน้ำอิ่มตัว (saturated vapor)

3.1.4.6 สมการส่งถ่ายความชื้น (Moisture Transport Equation)

ปรากฏการณ์การส่งถ่ายความชื้นภายในวัสดุทดสอบสามารถอธิบายโดยสมการอนุรักษ์มวลสำหรับน้ำทั้งในรูปของเหลว (สมการ (3.2)) และไอน้ำ (สมการ (3.3)) โดยพิจารณาสมการเหล่านี้ในลักษณะ 1 มิติ สมการสำหรับการส่งถ่ายความชื้นทั้งหมดแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้ (Ratanadecho et al., 2001)

$$\phi \frac{\partial}{\partial t} \{\rho_l s + \rho_v (1-s)\} + \frac{\partial}{\partial z} [\rho_l u_l + \rho_v u_v] = 0 \tag{3.20}$$

ใช้กฎของดาร์ซี (3.7) และกฎของฟิคส์ (3.8) แทนในสมการ (3.20) และสมมติให้ไม่มีผลจากแรงโน้มถ่วงในแกน z ดังนั้นจะได้รูปสมการเป็น

$$\phi \frac{\partial}{\partial t} \{\rho_l s + \rho_v (1-s)\} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho_l \frac{KK_{rl}}{\mu_l} \left(\frac{\partial P_c}{\partial z} - \frac{\partial P_g}{\partial z} + \rho_l g_z \right) + \rho \frac{KK_{rg}}{\mu_g} \left(-\frac{\partial P_g}{\partial z} + \rho_g g_z \right) - D_m \frac{\partial \rho_v}{\partial z} \right] = 0 \tag{3.21}$$

3.1.4.7 สมการความดัน (Total Pressure Equation)

พิจารณากฎของดาร์ซี (3.7) และกฎของฟิคส์ (3.8) และสมมติให้ก๊าซมีสมบัติเป็นก๊าซในอุดมคติ สามารถจัดรูปสมการ (3.4) ใหม่ได้เป็น (Ratanadecho et al., 2001)

$$\phi \frac{\partial}{\partial t} \{ \rho_a (1-s) \} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho_a \frac{KK_{rg}}{\mu_g} \left(-\frac{\partial P_g}{\partial z} + \rho_g g_z \right) - D_m \frac{\partial \rho_a}{\partial z} \right] = 0 \quad (3.22)$$

3.1.4.8 สมการส่งถ่ายความร้อน (Heat Transport Equation)

สำหรับการไหลที่อุณหภูมิไม่คงที่ (non-isothermal flow) อุณหภูมิเป็นอีกตัวแปรหนึ่ง จึงนำสมการอนุรักษ์พลังงานสำหรับแบบจำลอง 1 มิติมาใช้นำมาใช้อธิบายอุณหภูมิ ดังนั้นสมการ (3.5) จะกลายเป็น (Ratanadecho et al., 2001)

$$\frac{\partial}{\partial t} [(\rho C_p)_T T] + \frac{\partial}{\partial z} [(\rho_l C_{pl} u_l + (\rho_a C_{pa} + \rho_v C_{pv}) u_g) T] + H_v \dot{n} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial z} \right] + Q \quad (3.23)$$

เมื่อ

$$(\rho C_p)_T = \rho_l C_{pl} \phi s + \{ (\rho C_p)_a + (\rho C_p)_v \} \phi (1-s) + \rho_p C_{pp} (1-\phi) \quad (3.24)$$

และ

$$\dot{n} = \frac{\partial}{\partial t} \{ \rho_v \phi (1-s) \} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho_v \frac{KK_{rg}}{\mu_g} \rho_g g_z - D_m \frac{\partial \rho_v}{\partial z} \right] \quad (3.25)$$

การทำนายอัตราการแห้งตัวหรือการกระจายตัวของความชื้นภายในวัสดุ การคำนวณพร้อมกันของระบบสมการที่ควบคุมปรากฏการณ์การอบแห้งทั้งหมดต้องอาศัยระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลข

3.2 ทฤษฎีพื้นฐานระบบไมโครเวฟ

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งซึ่งมีความถี่ตั้งแต่ 300 MHz ถึง 300 GHz และมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 1 m. ถึง 1 mm. (Schiffmann, 1987) และมีความถี่ 2,450 MHz มีความยาวคลื่นเป็น 12.24 cm.

ตารางที่ 3.1 ระดับของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Shunji-Murai, 1993)

Class			Wavelength	Frequency
Ultraviolet			100 ~ 0.4 μm.	750 ~ 3,000 THz
Visible			0.4 ~ 0.7 μm.	430 ~ 750 THz
Infrared	Near Infrared		0.7 ~ 1.3 μm.	230 ~ 430 THz
	Short wave infrared		1.3 ~ 3 μm.	100 ~ 230 THz
	Intermediate Infrared		3 ~ 8 μm.	38 ~ 100 THz
	Thermal Infrared		8 ~ 14 μm.	22 ~ 38 THz
	Far Infrared		14 μm. ~ 1 mm.	0.3 ~ 22 THz
Radio Wave	Sub millimeter		0.1 ~ 1 mm.	0.3 ~ 3 THz
	Microwave	Millimeter (EHF)	1 ~ 10 mm.	30 ~ 300 GHz
		Centimeter (SHF)	1 ~ 10 cm.	3 ~ 30 GHz
		Decimeter (UHF)	0.1 ~ 1 m.	0.3 ~ 3 GHz
	Very short wave (VHF)		1 ~ 10 m.	30 ~ 300 MHz
	Short wave (HF)		10 ~ 100 m.	3 ~ 300 MHz
	Medium wave (MF)		0.1 ~ 1 km.	0.3 ~ 300 kHz
	Long wave (LF)		1 ~ 10 km.	30 ~ 300 kHz
	Very long wave (VLF)		10 ~ 100 km.	30 kHz

3.2.1 การแบ่งการแผ่รังสีของคลื่นตามความถี่

3.2.1.1 การแผ่รังสีแบบไม่ทำให้อะตอมภายในสสารแตกตัว (nonionizing rays) ได้แก่ คลื่นวิทยุ ทีวี ไมโครเวฟ เรดาร์ อินฟราเรด และแสงที่ตามองไม่เห็น ซึ่งคลื่นเหล่านี้เป็นอันตรายแก่สิ่งมีชีวิตน้อย

3.2.1.2 การแผ่รังสีแบบทำให้อะตอมภายในสสารแตกตัว (Ionizing rays) ได้แก่ แสงอัลตราไวโอเลต รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา ซึ่งคลื่นเหล่านี้ทำอันตรายกับสิ่งมีชีวิตได้ถ้าได้รับรังสีในปริมาณมาก เช่น การฉายรังสีแกมมาเพื่อกำจัดเซลล์มะเร็งจะทำให้เซลล์ของสิ่งมีชีวิตเปลี่ยนแปลงหรือตายไป

คลื่นไมโครเวฟจัดเป็นคลื่นที่ปลอดภัยไม่มีสารกัมมันตรังสีตกค้าง แต่คลื่นไมโครเวฟก็ยังมีอันตรายเมื่อโดนคลื่นไมโครเวฟเป็นเวลานานและในปริมาณมาก โดยอาจมีผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์หากมีไมโครเวฟรั่วไหลและรับคลื่นไมโครเวฟมากกว่า 5 mW/cm^2 เช่น มะเร็งผิวหนัง ตาเป็นต้อกระจก ผู้หญิงมีครรภ์อาจแท้งบุตรได้ ทำให้เกิดการเป็นหมันชั่วคราวสำหรับผู้ชาย การไหลเวียนของเลือดผิดปกติ เกิดอาการหน้ามืดและเวียนศีรษะ ทำให้มีอาการความจำเสื่อมได้ แต่ในกรณีที่ได้รับคลื่นไมโครเวฟน้อยกว่า 5 mW/cm^2 ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัย

โดยความถี่ของคลื่นไมโครเวฟจะวัดในหน่วย MHz ซึ่งในข้อตกลงนานาชาติว่าด้วยการกำหนดคลื่นความถี่สำหรับความถี่วิทยุ (radio frequency) และการใช้คลื่นไมโครเวฟ (Jones and Rowley, 1996): ISM (Industrial, Scientific and Medical) bands 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 MHz
- 2) $2,450 \text{ MHz} \pm 50 \text{ MHz}$

3.2.2 คุณสมบัติของคลื่นไมโครเวฟ

3.2.2.1 การสะท้อนของคลื่น

คลื่นไมโครเวฟเมื่อตกกระทบโลหะจะเกิดการสะท้อนออกและคลื่นไมโครเวฟไม่สามารถทะลุผ่านโลหะไปได้

3.2.2.2 การทะลุผ่านของคลื่น

คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านวัสดุบางชนิดได้ คล้ายช่องกระจกหน้าต่างที่ยอมให้แสงธรรมชาติส่องผ่านตัวมันได้ วัสดุที่คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านได้ คือ แก้วโดยทั่ว ๆ ไป (ยกเว้นแก้วเจียระไนที่มีส่วนผสมของตะกั่วซึ่งเป็นโลหะ) แก้วทนความร้อน เครื่องถ้วยเซรามิกเคลือบ กระดาษ และพลาสติก เป็นต้น ดังนั้นเมื่อนำวัสดุเหล่านี้มาทำเป็นภาชนะบรรจุอาหารตัวภาชนะจะไม่ร้อน จะร้อนเฉพาะอาหาร

3.2.2.3 การดูดกลืนของคลื่น

คลื่นไมโครเวฟสามารถดูดกลืนได้โดยน้ำในอาหาร หรือวัสดุที่มีส่วนประกอบของน้ำอยู่ ทำให้กำลังของคลื่นลดลงไป ซึ่งกำลังที่ถูกกลืนไว้จะเปลี่ยนสภาพทำให้วัสดุร้อนขึ้น วัสดุที่ดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟนอกจากจะเป็นอาหาร น้ำ หรือวัสดุที่มีส่วนประกอบของน้ำอยู่ ยังประกอบไปด้วยเครื่องปั้นดินเผาที่ไม่ได้เคลือบทั้งหมด เนื่องจากเครื่องปั้นดินเผาที่ไม่ได้เคลือบจะมีรูพรุนมากมายทำให้มีความชื้นหรือละอองน้ำแทรกอยู่รูพรุนนั้น เมื่อนำมาใช้ในเตาไมโครเวฟละอองน้ำจะร้อน ส่งผลให้ตัววัสดุร้อนไปด้วย วัสดุที่เป็นพลาสติกบางประเภทมีค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ (power factor) เป็นฉนวนสูง เมื่อนำมาใช้ในเตาไมโครเวฟจะถูกทำให้ร้อนขึ้น ตัวพลาสติกจะหลอมละลาย

3.2.3 กลไกเบื้องต้นในการระเหยน้ำออกจากวัสดุที่ห่อหุ้มด้วยไมโครเวฟ

ความเร็วในการระเหยน้ำออกจากวัสดุห่อหุ้มจะขึ้นอยู่กับ ความแตกต่างของความดันระหว่างน้ำหรือความชื้นภายในวัสดุที่ห่อหุ้มกับภายนอก กล่าวคือ ถ้าความดันของน้ำภายในสูงกว่าภายนอกวัสดุ การระเหยน้ำก็จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ด้วยเหตุนี้ไมโครเวฟซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ค่อนข้างสูง จะทะลุทะลวงเข้าไปในเนื้อวัสดุที่ห่อหุ้มไปสั่นโมเลกุลของน้ำด้วยความถี่เท่ากับความถี่ของไมโครเวฟ เมื่อโมเลกุลของสสารกลับตัวไปมาตามความถี่ของคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ 2,450 MHz โมเลกุลจะกลับตัวในช่วงคลื่นไมโครเวฟช่วงบวกเข้ามา 2,450 ล้านครั้งต่อวินาที ซึ่งผลก็คือ เกิดการสั่นสะเทือนอย่างรวดเร็วของโมเลกุลของน้ำ 2,450 ล้านครั้งต่อวินาที ทำให้ได้รับความร้อนเนื่องจากการเสียดสีกันของโมเลกุลของน้ำส่งผลให้น้ำมีอุณหภูมิและความดันสูงขึ้น เมื่อน้ำมีความดันสูงขึ้นกว่าภายนอกเป็นเหตุให้เกิดการระเหยน้ำอย่างรวดเร็ว

3.2.4 แหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ

ในธรรมชาติแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟมาจากดวงอาทิตย์ ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานขนาดใหญ่ แต่มนุษย์ไม่สามารถควบคุมกำลังงานที่ได้มาจากดวงอาทิตย์ อันนำไปสู่การนำเอาพลังงานไมโครเวฟจากธรรมชาติไปใช้ประโยชน์ได้ ดังนั้นหาจะนำพลังงานไมโครเวฟมาใช้ประโยชน์มนุษย์จะต้องสร้างคลื่นไมโครเวฟขึ้นมาเอง ซึ่งตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟถูกสร้างมาจากอุปกรณ์ 2 แบบ

3.2.4.1 แบบหลอดสุญญากาศ (microwave tubes)

แหล่งคลื่นไมโครเวฟแบบสุญญากาศให้กำลังงานคลื่นไมโครเวฟออกมาสูงมากกว่าแบบโซลิดสเตตแม้ว่าจะใช้ในวงจรความถี่สูงมาก ๆ เป็น 10 GHz กำลังที่ได้จะตกลงไปไม่มากนัก เช่น นำหลอดไมโครเวฟไปใช้ขยายคลื่นไมโครเวฟภาคสุดท้ายของเครื่องส่งวิทยุในย่านไมโครเวฟใช้ในเรดาร์ใช้ในเตาไมโครเวฟ เป็นต้น หลอดกำเนิดคลื่นไมโครเวฟแบบสุญญากาศแบ่งได้ 3 แบบ

หลอดไคลสตรอน (klystron) เป็นหลอดแบบแรกที่มีประวัติสร้างขึ้นเพื่อใช้ในย่านความถี่ไมโครเวฟมีการใช้อยู่ 2 แบบคือใช้เป็นตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟและเป็นตัวขยายคลื่นไมโครเวฟใช้ในย่านความถี่ 300 MHz ถึง 30 GHz จะใช้หลอดนี้ในภาคขยายสุดท้ายก่อนส่งออกอากาศของสถานีภาคพื้นดินของดาวเทียมแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟแบบนี้ปัจจุบันไม่ค่อยใช้แล้วเนื่องจากอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำสามารถทำได้ดีกว่า

หลอดแตรเวลลิงเวฟ (travelling wave tubes) บางครั้งเรียกแบบหลอดคลื่นจรเป็นหลอดที่พัฒนาขึ้นจากหลอดไคลสตรอนเนื่องจากในหลอดไคลสตรอนมีแบนด์วิธ (bandwidth) ของคลื่นแคบประมาณ 1 ถึง 8% เท่านั้นเมื่อพัฒนามาเป็นหลอดแตรเวลลิงมีแบนด์วิธกว้างขึ้นคือ 10 ถึง 15% เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการขยายสัญญาณไมโครเวฟตั้งแต่ความถี่ 500 MHz ถึง 16 GHz ในเครื่องรับไมโครเวฟย่านเอ็กซ์แบนด์ใช้ขยายกำลังภาคสุดท้ายในระบบสื่อสารและดาวเทียมและเรดาร์

หลอดแมกนีตรอน (magnetron tubes) เป็นหลอดกำเนิดคลื่นไมโครเวฟที่ให้กำลังออกมาสูงสุด ปัจจุบันหลอดแมกนีตรอนสามารถให้กำลังงานสูงสุด 40 MW ที่ระดับความต่างศักย์ 50 kV ที่ความถี่ 10 GHz เนื่องจากแมกนีตรอนมีขนาดเล็กและเบาเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพที่สูงจึงถูกนำไปใช้ในอุปกรณ์ที่ต้องการกำลังงานสูงเช่นใช้ในเตาไมโครเวฟใช้เป็นตัวส่งคลื่นเรดาร์

3.2.4.2 แบบโซลิดสเตต (solid state microwave sources)

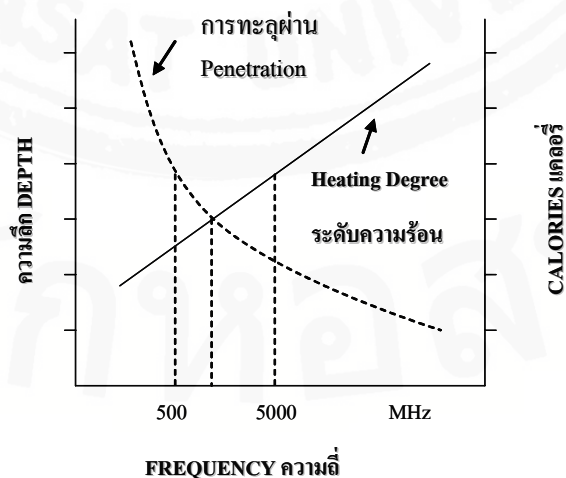
เนื่องจากสารกึ่งตัวนำมีขนาดเล็กและเบา เมื่อมีการพัฒนาจนสามารถใช้งานได้ที่มีความถี่ไมโครเวฟ สารกึ่งตัวนำเหล่านี้จึงถูกนำไปแทนที่หลอดไมโครเวฟ ในส่วนที่ใช้กับกำลังงานต่ำจนถึงกำลังงานปานกลาง เช่น ใช้กันไดโอด (gunn diode) เป็นตัวกำเนิดความถี่ไมโครเวฟแทนหลอดไคลสตรอน แต่ใช้กำลังงานออกมาต่ำประมาณ 10 mW ถึง 1 W ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ที่

เกี่ยวข้องกับกันน้ำไดโอดถูกนำไปใช้ประยุกต์ใช้ในวงจรกำเนิดคลื่นไมโครเวฟในการรับส่งคลื่นไมโครเวฟกำลังต่ำใช้ในงานที่ต้องการเอาต์พุตสูงไม่ได้ เช่น เรดาร์ของตำรวจ เนื่องมาจากกันน้ำไดโอดมีประสิทธิภาพต่ำใช้ในงานที่ต้องการเอาต์พุตสูงไม่ได้จึงพัฒนาขึ้นมาเป็นอิมแพคไดโอดทำให้ได้เอาต์พุตที่สูงถึง 4 ถึง 5 W ในย่านความถี่เอ็กซ์แบนด์

หลังจากพัฒนาไดโอดก็มาสู่การพัฒนาทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในย่านไมโครเวฟทำให้ขยายกำลังทางด้านเอาต์พุตได้สูงขึ้นอีก นำไปใช้ในวงจรอื่น ๆ ในย่านความถี่ไมโครเวฟได้มากขึ้น เช่น นำไปใช้ในวงจรมอดูเลเตอร์ วงจรดีมอดูเลเตอร์ วงจรมิกเซอร์

แมกนีตรอน (magnetron) แมกนีตรอนเป็นตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟชนิดหนึ่งที่นิยมใช้อยู่ในเตาไมโครเวฟ และเรดาร์ที่ผู้ผลิตไมโครเวฟเลือกใช้แมกนีตรอนเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟเนื่องจากคุณสมบัติที่ดีหลายประการ คือ มีขนาดเล็กแต่ให้ประสิทธิภาพและกำลังงานสูง มีเสถียรภาพในการทำงานที่ความถี่ต้องการดี ในปัจจุบันเครื่องไมโครเวฟทั่วไป ตัวแมกนีตรอนจะสร้างความถี่ 2450 ± 50 MHz เมื่อโหลดมีการดึงกระแสสูงหรือกระแสดำมากตัวแมกนีตรอนยังคงสร้างความถี่ค่อนข้างคงที่การกำเนิดคลื่นผิดพลาดน้อยมากเมื่อเทียบกับส่วนความถี่หลักที่สร้างขึ้นคือผิดพลาดเพียง ± 50 MHz เท่านั้นซึ่งการผิดพลาดของความถี่มีค่าน้อยมากต่อการปรุงอาหารข้อดีของแมกนีตรอนอีกข้อคือสร้างง่าย ราคาถูก อันเนื่องมาจากอุปกรณ์ภายในน้อยมาก

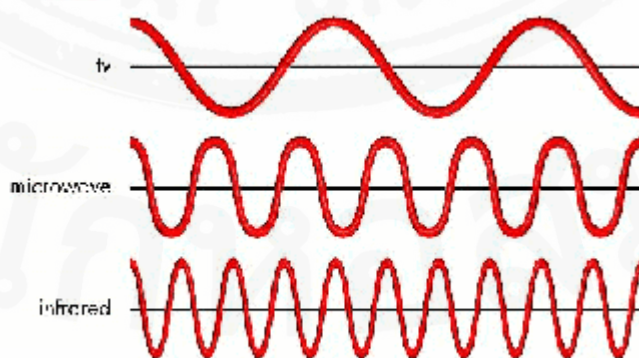
คลื่นไมโครเวฟมีความถี่ตั้งแต่ 300 MHz ถึง 300 GHz เป็นย่านที่กว้างมาก จากการวิจัยพบว่า คลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่ตั้งแต่ 500 ถึง 5,000 MHz มีประสิทธิภาพเหมาะสมในการนำมาใช้กำเนิดความร้อน แต่ในเตาอบไมโครเวฟสำหรับที่ใช้ในบ้านใช้ความถี่ 2,450 MHz เนื่องมาจากการวิจัยพบว่าความถี่นี้สามารถทำให้อาหารส่วนใหญ่สุกได้เร็วและสุกเข้าไปถึงภายใน ดังนั้นในเตาอบไมโครเวฟโดยทั่วไปจึงสร้างให้มีความถี่ 2,450 MHz



ภาพที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Depth, Heating degree และ Frequency

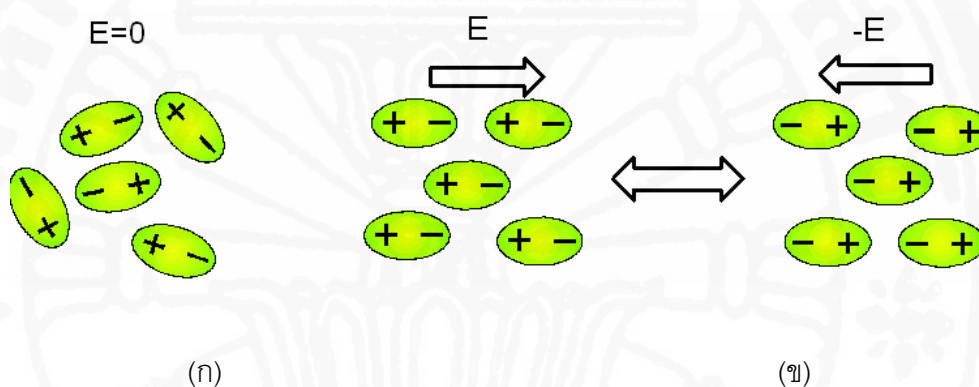
จากภาพที่ 3.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการทะลุผ่านกับระดับอุณหภูมิของความร้อนและความถี่ พบว่าที่ความถี่ต่ำกว่าจะมีการทะลุผ่านของคลื่นได้ดีกว่า แต่เวลาปรุงอาหารจะเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากระดับความร้อนที่ได้ต่ำ ที่ความถี่สูงกว่าเวลาในการปรุงอาหารจะเร็วกว่าเนื่องจากได้รับความร้อนมากกว่าแต่การทะลุผ่านจะตื้นกว่า

ซึ่งในปัจจุบัน เตาไมโครเวฟที่ใช้ทั่วไปตามครัวเรือนจะใช้ความถี่ 2,450 MHz ซึ่งจะมีความยาวคลื่นในอากาศเท่ากับ 4.8 นิ้ว (12.192 cm.) ในขณะที่ความถี่เท่ากับ 900 MHz จะมี ความยาวคลื่นในอากาศประมาณ 13 นิ้ว (33.02 cm.) ส่วนการวัดกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟจะวัดในหน่วยกิโลวัตต์ที่อุณหภูมิห้องและความดันหนึ่งบรรยากาศ ซึ่งคลื่นไมโครเวฟกำลัง 1 kW สามารถทำให้น้ำจำนวน 2.5 ปอนด์ (1.134 Kg) ระเหยได้ภายในเวลา 1 ชั่วโมง ปัญหาของการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟเกี่ยวข้องโดยตรงกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า การกระจายของอุณหภูมิ การกระจายของความชื้น รวมทั้งตัวขึ้นทดสอบ (sample) ซึ่งเป็นสมบัติวัสดุไดอิเล็กตริก (dielectric materials) ดังนั้น การรู้สมบัติของวัสดุไดอิเล็กตริก (dielectric properties) จึงมีความจำเป็น รวมทั้งการควบคุมสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ก่อให้เกิดความร้อนภายในวัสดุไดอิเล็กตริกความร้อนที่เกิดขึ้นจะส่งผลถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความชื้นและสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยการให้ความร้อนแก่วัสดุด้วยไมโครเวฟเป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจและไม่เหมือนวิธีการให้ความร้อนแบบเก่าที่ให้ความร้อนจากภายนอกผ่านผิววัสดุ โดยเมื่อนำวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าหรือวัสดุที่ไม่เป็นสื่อทางไฟฟ้า เช่น อาหาร ไม้ ยาง ไปวางในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟอยู่ชั่ววอกและลบในวัสดุจะเกิดการสั่นและจัดเรียงตัวใหม่อย่างมีระเบียบ ซึ่งจากการสั่นและการจัดเรียงตัวนี้รวมทั้งการหมุนจากการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าก่อให้เกิดแรงเสียดทานในเนื้อวัสดุและเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในเนื้อวัสดุ (ภาพ 3.11)



ภาพที่ 3.11 แสดงลักษณะของคลื่นไมโครเวฟ

โดยหลักการทำความร้อนของคลื่นไมโครเวฟนั้นจะเปลี่ยนพลังงานของคลื่นถูกดูดซับสู่ วัสดุเป็นความร้อน ทำให้วัสดุร้อนขึ้นทั้งก้อน (volumetric heating) ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิภายใน วัสดุค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่มีวัสดุบางประเภทที่ไม่เป็นแบบนี้ เช่น น้ำ ความร้อนจะเกิดขึ้นที่ผิวหน้า เท่านั้น (surface heating) และเกิดการไหลวนขึ้นมารับความร้อนใหม่ การที่จะรู้ว่าเป็นการให้ ความร้อนแบบไหนนั้นดูได้จาก สมบัติการเป็นฉนวน หรือสมบัติการดูดกลืนคลื่น (dielectric property : ϵ , $\tan \delta$) ถ้าเป็นวัสดุดูดกลืนคลื่นได้ดีมีสมบัติไดอิเล็กตริกสูง เช่น น้ำ จะเป็นการให้ ความร้อนที่ผิวหน้า (surface heating) แต่ถ้าเป็นวัสดุที่มีสมบัติการดูดกลืนคลื่นต่ำ เช่น ไข่ อาหาร เป็นการให้ความร้อนตลอดเนื้อวัสดุ (volumetric heating)



ภาพที่ 3.12 ปฏิกริยาระหว่างวัสดุไดอิเล็กตริกและสนามไฟฟ้า (electric field)

(ก) การเรียงตัวของ Dipole ภายในวัสดุไดอิเล็กตริกขณะที่ยังไม่ผ่านสนามไฟฟ้า

(collect of microscopic dipole)

(ข) การเรียงตัวของ Dipole เมื่อผ่านสนามไฟฟ้าเข้าไป (depolarization field)

เมื่อ f คือความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ, $\tan \delta$ คือ Loss Tangent Coefficient, ϵ_r และ μ_r คือ Relative Permittivity หรือ Relative Dielectric Constant และ Relative Magnetic Permeability ตามลำดับ ถ้าพิจารณาจากสนามแม่เหล็กค่า Magnetic Permeability, μ ของ วัสดุไดอิเล็กตริกที่ใช้ในงานประยุกต์ทางการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟสามารถประมาณได้ เท่ากับ μ_0 ในอากาศ โดยทั่วไป สมบัติไดอิเล็กตริก (dielectric properties) ของวัสดุจะถูกสมมุติ ให้แปรผันตามอุณหภูมิเพียงอย่างเดียวในกรณีของการทำความร้อน (heating) และการ หลอมเหลว (melting) ด้วยไมโครเวฟ และจะแปรผันตามอุณหภูมิและความชื้นในกรณีการอบแห้ง (drying) ด้วยไมโครเวฟ

ข้อมูลต่าง ๆ ของสมบัติไดอิเล็กตริกที่แปรผันตามอุณหภูมิได้นำมาจาก Von (1954) ในส่วนที่แปรผันตามอุณหภูมิและความชื้นรวมทั้งทฤษฎีที่เกี่ยวข้องได้ประยุกต์จาก Wang et al. (1980) ซึ่งรายละเอียดในการอธิบายเกี่ยวกับไดอิเล็กตริกจะกล่าวถึงในภายหลัง

3.2.6 สมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric properties)

ปฏิกิริยาระหว่างสนามไฟฟ้ากับวัสดุไดอิเล็กตริก เกิดขึ้นเมื่อวัสดุไดอิเล็กตริก หรือ สารที่เป็นฉนวนไฟฟ้า เช่น ไม้ กระดาษ พลาสติก ถูกนำเข้าไปในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โมเลกุลของสาร วัสดุไดอิเล็กตริกจะหมุนและเคลื่อนที่หลายล้านครั้ง โดยจะเคลื่อนที่ตามการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า ภายในวัสดุไดอิเล็กตริกจะมี Dipole ของแต่ละโมเลกุลเรียงตัวอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่ง Dipole ในแต่ละโมเลกุลจะประกอบไปด้วยขั้วบวกและขั้วลบ เมื่อมีสนามไฟฟ้าวิ่งผ่านวัสดุ ไดอิเล็กตริก ทำให้ Dipole ในแต่ละโมเลกุลจะเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบและสลับขั้วตามการเปลี่ยนแปลงของคลื่นซึ่งจากการสลับขั้วไปมาอย่างรวดเร็วของ Dipole ทำให้ความเสียดทานเกิดขึ้นกับโมเลกุลตัวอื่น ๆ ทำให้เกิดพลังงานออกมาในรูปของความร้อนภายในวัสดุไดอิเล็กตริก

ความรู้เกี่ยวกับคุณลักษณะของสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุไดอิเล็กตริกกระบวนการของไมโครเวฟมีความจำเป็นเพื่อใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ใช้งานด้านไมโครเวฟได้อย่างเหมาะสม การแผ่รังสีเป็นรูปแบบหนึ่งของพลังงานที่สามารถทะลุผ่านที่ว่าง อากาศ วัตถุได้ ไมโครเวฟนั้นประกอบไปด้วยสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเช่นเดียวกับแสง (การแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า) แต่จะแตกต่างจากแสงตรงที่ความถี่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่างกัน

ในการที่จะควบคุมความร้อนของวัสดุไดอิเล็กตริกอันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า หรือไมโครเวฟ เราจำเป็นที่จะต้องทราบสมบัติการดูดซับพลังงานของคลื่นไมโครเวฟ โดยวัสดุ ไดอิเล็กตริก โดยจะเริ่มจากการกำหนด Dielectric Permittivity ของวัสดุไดอิเล็กตริก (Osepchuk, 1984)

$$\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon'' = \varepsilon_0(\varepsilon_r' + j\varepsilon_r'') = \varepsilon_0\left(\varepsilon_r' + j\frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0}\right) \quad (3.26)$$

เมื่อ $j = \sqrt{-1}$, ε คือ Complex Dielectric Permittivity (โดยทั่วไปเรียก Dielectric Constant) และเป็นสมบัติของวัสดุใด ๆ ที่อธิบายถึงความสามารถในการดูดซับ ส่งผ่านและสะท้อนพลังงานจากส่วนที่เป็นสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ โดย $\varepsilon_0 = 8.86 \times 10^{-12}$ F/m คือ Permittivity ของที่ว่าง (free space), ε_r' คือส่วนที่เป็นจำนวนจริงของ Relative Permittivity หรือ Relative Dielectric Constant และอธิบายความสามารถในการสะท้อนกลับคลื่นไมโครเวฟจากผิวของชิ้นทดสอบ (sample) หรือวัสดุไดอิเล็กตริกและบอกว่าคลื่นไมโครเวฟ ที่ส่งผ่านวัสดุ

ไดอิเล็กตริกมีมากเท่าไร ϵ'' คือส่วนจินตภาพ โดยทั่วไปเรียก Dielectric Loss Factor ซึ่งจะบอกถึงความสูญเสียพลังงานภายในขึ้นทดสอบ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือวัสดุสามารถดูดซับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟที่ผ่านเข้ามาแล้วสามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนได้เท่าไร และ σ คือความสามารถในการนำไฟฟ้า (electric conductivity) ความสัมพันธ์ระหว่าง Dielectric Loss Factor กับค่า Conductivity สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\epsilon'' = \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \quad (3.27)$$

เมื่อ ω คือ ความเร็วเชิงมุมของคลื่นไมโครเวฟ σ คือความสามารถในการนำไฟฟ้า (electric conductivity) และ ϵ'' แสดงถึงความสูญเสียเชิงกล โดยสามารถยุบรวมกันเป็นตัวแปรใหม่เพื่อความสะดวกเรียกว่า Loss Tangent Coefficient, $\tan \delta$

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} = \frac{\sigma}{\omega \epsilon_r' \epsilon_0} \quad (3.28)$$

Dielectric Loss Tangent Coefficient ($\tan \delta$) เป็นอีกตัวแปรที่สำคัญตัวหนึ่งที่ใช้อธิบายความสามารถในการผลิตความร้อนของวัสดุไดอิเล็กตริกในขณะที่ถูกคลื่นพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ (Von, 1954) ได้ทำตารางค่าสมบัติไดอิเล็กตริก (dielectric properties) สำหรับวัสดุไดอิเล็กตริก (เช่น คริสตัล เซรามิก แก้ว น้ำ พลาสติก ยางมะตอย ซีเมนต์ และ ไม้ เป็นต้น) ในช่วงความถี่และอุณหภูมิ $100 < f < 10^{10}$ และ $12 < T < 200$ °C ตามลำดับ

3.2.7 ความยาวคลื่นและความลึกในการทะลุทะลวง (Wavelength and Penetration Dept)

ค่า Dielectric Constant และ Loss Tangent Coefficient สามารถใช้ประมาณความยาวคลื่นภายในวัสดุไดอิเล็กตริกและความลึกในการทะลุทะลวงได้ คลื่นไมโครเวฟที่ผ่านเข้าไปในชิ้นงานซึ่งความยาวคลื่นในวัสดุไดอิเล็กตริกสามารถคำนวณได้จาก

$$\lambda_s = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\frac{\epsilon_r'}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}\right)^2} + 1}} \quad (3.29)$$

เมื่อความยาวคลื่นในสุญญากาศ

$$\lambda_0 = \frac{2\pi}{\omega} \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (3.30)$$

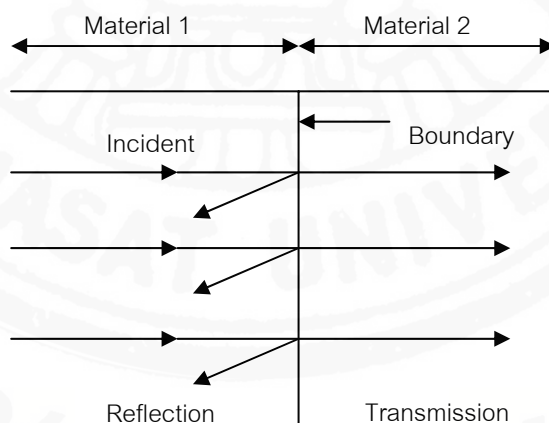
ความลึกในการทะลุทะลวง หรือ ระยะทางที่สนามไฟฟ้าทะลุเข้าไปได้คลื่น (penetration deep: D_p) ถ้าให้ L คือ ความลึกของวัสดุที่นำมาทดสอบ ถ้า $D_p > L$ นั่นคือ คลื่นสามารถทะลุผ่านเข้าไปได้ตลอดทั้งวัสดุ (volumetric heating) อุณหภูมิกระจายสม่ำเสมอ ถ้า $D_p < L$ คือ คลื่นสามารถทะลุผ่านเข้าไปได้เพียงบางส่วนของเนื้อวัสดุ (surface heating) ทำให้อุณหภูมิกระจายได้ไม่สม่ำเสมอ ซึ่ง D_p สามารถหาได้จาก

$$D_p = \frac{\lambda_0}{\pi \sqrt{2\varepsilon'} \sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2 - 1}} \quad (3.31)$$

พบว่าเมื่อค่า Dielectric Constant และ Loss Tangent Coefficient เปลี่ยน ความลึกในการทะลุทะลวงและสนามไฟฟ้าภายในวัสดุไดอิเล็กตริกก็จะเปลี่ยนด้วย

3.2.8 การสะท้อน การส่งผ่าน และการดูดซับ (Reflect, Transmit and Absorb)

คลื่นไมโครเวฟมีความหมายคล้ายคลึงกับแสงหลายประการ คลื่นไมโครเวฟสามารถเป็นรังสีตกกระทบสามารถทะลุผ่านช่องว่างและสามารถและดูดซับโดยวัสดุไดอิเล็กตริกได้ (ดูภาพที่ 3.13) และความสามารถทั้งสามอย่างนั้นสัมพันธ์กับสมบัติไดอิเล็กตริกของชิ้นทดสอบด้วย



ภาพที่ 3.13 รังสีการตกกระทบและการดูดซับโดยวัสดุไดอิเล็กตริก

คลื่นไมโครเวฟจะถูกสะท้อนจากรอยต่อระหว่างวัสดุไดอิเล็กตริก 2 ชนิด (เช่น รอยต่อระหว่างชิ้นทดสอบกับอากาศ) พลังงานของคลื่นไมโครเวฟที่ถูกสะท้อนกลับสามารถคำนวณได้จากค่า Dielectric Constant ของชิ้นทดสอบตามสมการต่อไปนี้

$$P_{reflect} \cong \left(\frac{\sqrt{\epsilon} - 1}{\sqrt{\epsilon} + 1} \right)^2 \quad (3.32)$$

นอกจากนี้สมการนี้ใช้ได้กับข้อสมมุติฐานที่ว่าผิวหน้าของวัตถุราบเรียบและคลื่นไมโครเวฟตกกระทบตั้งฉากกับผิวหน้าของชิ้นทดสอบ

คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านวัสดุไดอิเล็กตริก เช่น แก้วและพลาสติกได้โดยไม่มีการดูดซับและสะท้อน พลังงานของคลื่นไมโครเวฟที่ทะลุผ่านผิวรอยต่อระหว่างวัสดุไดอิเล็กตริก 2 ชนิดสามารถคำนวณได้โดยสมการต่อไปนี้

$$P_{Transmit} = 1 - P_{reflect} \quad (3.33)$$

คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่าน Dielectric materials สามารถถูกดูดซับและเปลี่ยนความร้อนได้ เรียกว่า การกำเนิดปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (density of microwave power absorbed) Q โดยปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรนั้นสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในวัสดุไดอิเล็กตริก เมื่อ E คือ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง อย่างไรก็ตามวัสดุไดอิเล็กตริกไม่มีผลต่อ Magnetic Polarization เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก ดังนั้นจึงไม่มีสนามแม่เหล็กสูญเสีย ในระหว่างการแผ่รังสีไมโครเวฟ การเปลี่ยนแปลงเฟสของสนามไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยเวลาจะเร็วมาก ดังนั้นค่าเฉลี่ยรากที่สอง (root mean square value) ของความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกใช้ในการประมาณค่าพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับโดยวัสดุไดอิเล็กตริก เมื่อสมมุติให้ไม่มีการสูญเสียสนามแม่เหล็ก ค่าของการกำเนิดปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (local volumetric heat generation) หรือความหนาแน่นของพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับ (density of microwave power absorbed) สามารถแสดงได้ในรูปสมการต่อไปนี้

$$Q = -\frac{\partial P}{\partial x} dx = 2\alpha P dx = 2\alpha dx \cdot 2\pi f \epsilon (\tan \delta) E^2 e^{-2\alpha x} \quad (3.34)$$

โดยที่ α คือ Attenuation Constant ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\alpha = 2\pi \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0}{2}} (\sqrt{\tan^2 \delta + 1} - 1) = \frac{2\pi}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_r}{2}} (\sqrt{\tan^2 \delta + 1} - 1) \quad (3.35)$$

จากสมการด้านบน ค่าพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับจะแปรผันตรงกับความถี่ของสนามไฟฟ้า ค่า Dielectric Loss Factor และค่ากำลังสองของสนามไฟฟ้า ดังนั้นถ้าค่า Dielectric Constant และค่า Dielectric Loss Tangent Coefficient ของชิ้นทดสอบมีค่ามากจะส่งผลให้การ

ดูดซับพลังงานจากไมโครเวฟและปริมาณความร้อนเกิดขึ้นมากขึ้นตาม แต่ถ้าค่า Dielectric Constant และค่า Dielectric Loss Tangent Coefficient ของขึ้นทดสอบมีค่าน้อย คลื่นไมโครเวฟจะทะลุผ่านขึ้นทดสอบโดยไม่เกิดความร้อนขึ้น อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิที่สูงขึ้นอาจจะขึ้นกับตัวแปรอื่น ๆ เช่น ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat) คุณลักษณะของขึ้นทดสอบและขนาดของขึ้นทดสอบ

สมการ 3.34 มีความสำคัญในการศึกษาความสามารถในการดูดซับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กตริกเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าที่ความถี่สูง อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและวัสดุไดอิเล็กตริกก็ส่งผลต่อสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุนั้นด้วย หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ คุณลักษณะของสมบัติไดอิเล็กตริกขึ้นอยู่กับการนำไมโครเวฟไปประยุกต์ใช้งานในกระบวนการต่าง ๆ เช่น การทำความร้อน (heating) การอบแห้ง (drying) หรือการหลอมเหลว (melting) เป็นต้น

3.2.9 ข้อดีของไมโครเวฟ (The Advantages of Microwave Heating)

3.2.9.1 ร้อนขึ้นทันที (rapid heating) ไมโครเวฟจะเข้าสู่วัสดุและทำให้ร้อนขึ้นทันทีโดยไม่รวม เวลาการนำความร้อนในเนื้อวัสดุ

3.2.9.2 มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว (rapid response) เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟมีสมบัติของความเร็วคล้ายความเร็วแสง (3×10^8 m/s)

3.2.9.3 ให้ความร้อนอย่างสม่ำเสมอ (uniform heating) ทุกส่วนของวัสดุถูกทำให้ร้อนจึงมีความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวและด้านในน้อยกว่าการให้ความร้อนแบบธรรมดา มาก จึงเรียกว่าเป็นการทำความร้อนอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ

3.2.9.4 การเลือกวัสดุในการรับความร้อน (selective heating) วัสดุบางอย่างสามารถดูดซับพลังงานจากไมโครเวฟได้ทันที แต่วัสดุบางอย่างก็ไม่สามารถดูดซับพลังงาน ยกตัวอย่างเช่น น้ำในแก้วเซรามิกส์ น้ำจะถูกทำให้ร้อนก่อนเพราะดูดซับคลื่นได้ดีกว่า แก้วเซรามิกส์

3.2.9.5 ประสิทธิภาพสูง (high efficiency) เนื่องจากวัสดุถูกทำให้ร้อนด้วยตัวเองจึงไม่มีการสูญเสียต่อสภาวะแวดล้อมภายนอก

3.2.9.6 เป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการทำงานและเป็นเทคโนโลยีสะอาดมากกว่าการให้ความร้อนโดยวิธีอื่น เนื่องจากกระบวนการมีชิ้นส่วนการทำงานที่มีลักษณะเคลื่อนไหวน้อย ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงและมีชิ้นส่วนประกอบที่มีขนาดเล็ก ทำให้ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย และไม่มีการปล่อยควันไอเสียออกมาในระหว่างกระบวนการ ทำให้ไม่มีปัญหากับสิ่งแวดล้อม

3.2.10 ข้อด้อยของไมโครเวฟ (The Disadvantages of Microwave Heating)

- 3.2.10.1 มีวัสดุบางชนิดไม่สามารถทำให้ร้อนขึ้นได้ เนื่องจากสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้า และสมบัติการนำไฟฟ้า
- 3.2.10.2 ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากโลหะไม่สามารถทำให้ร้อนได้
- 3.2.10.3 ขอบเขตความยาวของคลื่นไมโครเวฟรวมถึงความแตกต่างของอุณหภูมิของเนื้อวัสดุ แปรผันตาม ขนาด รูปร่าง สมบัติทางไฟฟ้าของแต่ละวัสดุ ทำให้การทำความร้อนแปรผันตามด้วย
- 3.2.10.4 อุปกรณ์ค่อนข้างแพงกว่าแบบอื่น

ในปัจจุบันกระบวนการทางไมโครเวฟได้ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม เช่น การอบแห้งอาหาร อบแห้งสิ่งทอ อบแห้งไม้และกระดาษ อุตสาหกรรมพลาสติก การทำเซมิคอนดักเตอร์และอื่น ๆ อีกมากมาย กระบวนการไมโครเวฟยังได้ถูกนำไปใช้งานทางการแพทย์ เช่น การคลายเนื้อเยื่อที่แข็งตัว การอุ่นเลือดและกำจัดเนื้องอก นอกจากนี้ไมโครเวฟยังสามารถนำไปใช้ในงานแยกส่วนประกอบที่เป็นสารระเหยจากวัสดุ เช่น การแยกกำมะถันออกจากถ่านหินโดยการ Pre-Combustion Treatment และการแยกสารสกปรกออกจากดิน เป็นต้น

3.3 ทฤษฎีพื้นฐานระบบอินฟราเรด

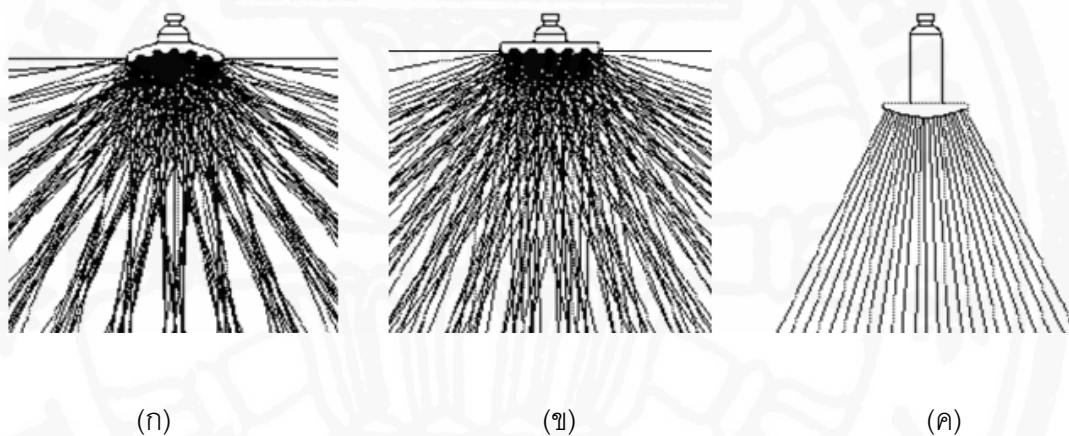
รังสีอินฟราเรด (infrared ray) ถูกค้นพบโดย Sir Frederick William Herschel ซึ่งเป็นนักดาราศาสตร์ชาวอังกฤษ ในปี ค.ศ. 1800 ขณะทำการศึกษาเกี่ยวกับแสงจากดวงอาทิตย์

รังสีอินฟราเรดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) เรียกว่า รังสี IR แปลว่า รังสีที่แสงสีแดงคือมีเลขน้อยกว่าแสงสีแดง รังสีอินฟราเรดมีช่วงความยาวคลื่นกว้างมาก คือตั้งแต่ 0.7 ถึง 100 μm . โดยทั่วไปแบ่งช่วงคลื่นอินฟราเรดเป็นระดับตามความยาวคลื่นได้ 3 ระดับคืออินฟราเรดใกล้ (near infrared) มีความยาวคลื่น 0.7 ถึง 3 μm . อินฟราเรดกลาง (medium infrared) มีความยาวคลื่น 3 ถึง 25 μm . และอินฟราเรดไกล (far infrared) มีความยาวคลื่น 25 ถึง 1000 μm . แต่มีการแบ่งระดับของอินฟราเรดอย่างละเอียดตามการนำไปใช้ประโยชน์เป็น 5 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

สมบัติของรังสีอินฟราเรด เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งผ่านพลังงานออกมาจากวัตถุร้อนในรูปของการแผ่รังสีความร้อน (thermal radiation) รังสีอินฟราเรดมีลักษณะเช่นเดียวกับแสงแดดที่เรามองเห็น คลื่นวิทยุและรังสีเอกซ์ ฯลฯ คือ มีการแผ่พลังงานออกมาในรูปของคลื่น

แม่เหล็กไฟฟ้าด้วยอุณหภูมิของตัวเองโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางหรือตัวนำในการส่งผ่านความร้อนไปยังวัสดุ (Mohsenin, 1980)

ข้อดีของรังสีชนิดนี้ คือ สามารถแผ่รังสีได้รวดเร็ว โดยไม่ทำให้อุณหภูมิของอากาศบริเวณรอบ ๆ รัศมีที่มีรังสีกระจายไปถึงสูงขึ้น ทำให้เกิดความร้อนได้อย่างรวดเร็ว และสม่ำเสมอที่บริเวณของผิววัตถุที่แสงนี้ได้สัมผัส ความร้อนจะกระจายลงสู่เนื้อในของวัตถุโดยการนำ วัตถุที่ได้รับรังสีนี้จะไม่ถูกทำลาย ยกเว้นวัตถุที่อยู่ใกล้จนเกินไปอุณหภูมิจะสูงขึ้นจนไหม้ได้ เนื่องจากรังสีอินฟราเรดเป็นรังสีที่ให้พลังงานความร้อนกับวัตถุ จึงได้มีผู้คิดค้นนำไปใช้ประโยชน์ในหลายสาขา เช่น ทางเกษตรกรรม ทางการแพทย์ ทางการทหาร ทางอุตุนิยมวิทยา ทางเคมี และอื่น ๆ อีกมาก



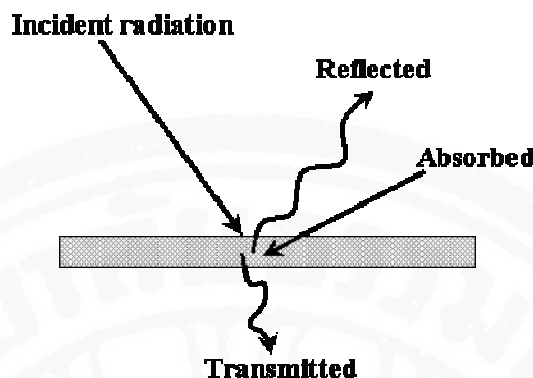
ภาพที่ 3.14 ลักษณะการแผ่รังสีของอุปกรณ์กำเนิดรังสีแบบ ceramic

(ก) การกระจายรังสีแบบเข้มข้น

(ข) การกระจายรังสีมีความสม่ำเสมอ

(ค) การกระจายรังสีแบบ Wide Area

จากภาพที่ 3.14 แสดงลักษณะการแผ่รังสีของอุปกรณ์กำเนิดรังสีแบบเซรามิค (radiant emission patterns of ceramic emitters) โดยรังสีความร้อนที่แผ่ไปตกกระทบกับวัสดุ นั้นจะทำให้เกิดการดูดซับพลังงานซึ่งแปลงเป็นพลังงานความร้อน (absorptivity, α) การส่งผ่าน (transmissivity, τ) และการสะท้อนกลับ (reflectivity, ρ) ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ (ภาพที่ 3.15) หากวัสดุสามารถดูดซับพลังงานไว้ได้สูงโดยไม่มีการส่งผ่านและสะท้อนกลับจะเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น $\alpha + \rho + \tau = 1$ ซึ่งมีชื่อเรียกว่าวัตถุดำ (Black body) (Ozisik, 1985 : Mujumdar, 1995)



ภาพที่ 3.15 การสะท้อน การดูดซับ และการส่งผ่านพลังงานของวัสดุ (Ozisik, 1985)

ปริมาณความร้อนในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากพื้นผิวของวัตถุที่ดูดซับรังสีได้สมบูรณ์ (black body) สามารถคำนวณได้จากสมการของ Stefan-Boltzmann ได้ดังนี้ (Fellows, 1990)

$$Q = \sigma AT^4 \quad (3.36)$$

- เมื่อ Q คือ อัตราการปลดปล่อยรังสีต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ในหนึ่งหน่วยเวลา ($\text{J}\cdot\text{s}^{-1}$)
 σ คือ ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann มีค่าเท่ากับ $5.6703 \times 10^{-8} \text{ (J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$
 A คือ พื้นที่ผิวรับรังสีของวัตถุ (m^2)
 T คือ อุณหภูมิของพื้นผิวเป็นเคลวิน ($\text{K} = ^\circ\text{C} + 273$)

โดยที่ปริมาณของความร้อนในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากพื้นผิวใด ๆ ในหนึ่งหน่วยเวลาซึ่งขึ้นอยู่กับสมบัติและอุณหภูมิของพื้นผิวนั้น โดยสมการที่ 3.36 ต้องคูณด้วยค่าคงที่ซึ่งมีค่าขึ้นกับสมบัติของพื้นผิวที่แผ่รังสี ซึ่งเรียกว่า สภาพเปล่งรังสี (emissivity, ε) ของพื้นผิว โดยจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ดังสมการ

$$Q = \varepsilon \sigma AT^4 \quad (3.27)$$

อย่างไรก็ตามสมการที่ 3.27 เป็นการดัดแปลงเพื่อใช้คำนวณในสมการ Stefan-Boltzmann สำหรับอุปกรณ์แผ่รังสีอินฟราเรดซึ่งโดยทั่วไปที่ไม่ใช่วัตถุร้อนที่สามารถแผ่รังสีได้สมบูรณ์ ที่มีค่าการดูดซับสูงก็ตามจะเรียกว่า วัตถุเทา (gray body)

สำหรับปริมาณรังสีที่ถูกดูดซับด้วยวัตถุเทาที่มีความสามารถในการดูดซับรังสี (absorptivity, α) จะมีค่าเท่ากับ ε และเมื่อมีความยาวคลื่นของรังสีอินฟราเรดจากต้นกำเนิด

รังสีมีอุณหภูมิสูงกว่าจะให้ความยาวคลื่นที่สั้นกว่าและการแทรกซึมลึกกว่า อัตราสุทธิของการถ่ายเทความร้อนสู่วัตถุจึงเท่ากับอัตราการดูดซับลบจากอัตราการแผ่รังสี (Ozisik, 1985)

3.3.1 การลดความชื้นโดยใช้รังสีอินฟราเรด

การทำให้วัสดุที่จะอบมีความชื้นลดลงโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่เหมาะสมนั้น วัสดุจะต้องมีค่าการสะท้อนรังสีต่ำและมีค่าการดูดซับสูง (high absorptivity) ประกอบกับอัตราการถ่ายเทความร้อนของวัสดุยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นอีก ได้แก่ อุณหภูมิของผิวหน้าวัสดุที่ให้และรับความร้อน สมบัติของผิวหน้าวัสดุที่ให้และรับความร้อน รูปร่างของวัสดุที่แผ่รังสีและส่งรังสี

สำหรับการลดความชื้นวัสดุที่มีชั้นหนาและความชื้นสูง เช่น อาหาร ก็จะต้องมีค่าการส่งผ่านของรังสีสูงเพื่อที่ผิวหน้าของวัสดุจะไม่ถูกทำลายโดยรังสี (Fellow, 1990; Ozisik, 1985) ดังนั้นสำหรับวัสดุชื้น (moist materials) นอกจากสมบัติการดูดซับและการส่งผ่านพลังงานของวัสดุแล้วควรศึกษาสมบัติของความยาวคลื่นและความหนาแน่นของวัสดุที่รับพลังงานโดยจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำในวัสดุด้วย แต่อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปวัสดุชื้นส่วนมากจะมีค่าการดูดซับพลังงานต่ำหากมีค่าการส่งผ่านพลังงานสูง ซึ่งความสัมพันธ์ของการดูดซับคลื่นอินฟราเรดของน้ำในวัสดุมักพบว่ามีค่าการส่งผ่านพลังงานสูงที่ความยาวคลื่นสั้น (Mujarndar, 1995)

3.3.2 การอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดในอุตสาหกรรม

การอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดจะใช้ในลักษณะของการทำแห้งผิววัสดุ (surface drying) เช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ กระดาษ งานเคลือบสีผลิตภัณฑ์ ฯลฯ แต่สำหรับการอบแห้งวัสดุที่มีความหนา เช่น อาหาร เมล็ดพันธุ์ ยังมีการพัฒนาไม่มาก ซึ่งในอุตสาหกรรมอาหารของประเทศญี่ปุ่นพบว่ามีการใช้ในการทำแห้งสาหร่าย (seaweed) ผงกะหรี่ แครอทและผักทอง นอกจากนั้นยังใช้ในอุตสาหกรรมการอบแห้งอาหารที่มีความชื้นต่ำ เช่น ผงโกโก้ แป้ง เมล็ดธัญพืช มอลต์ ผลิตภัณฑ์พาสตาและผงชูรส เป็นต้น

ซึ่งเครื่องอบแห้งที่ใช้มีทั้งแบบ อบเป็นถาด (batch type) วัสดุอยู่กับที่และแบบต่อเนื่อง (continuous type) วัสดุเคลื่อนที่ แต่จุดประสงค์หลักในการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่เหมือนกันคือต้องออกแบบให้เกิดการแผ่รังสีตรงสู่วัสดุที่ต้องการอบแห้ง โดยปัจจุบันได้มีการออกแบบสำหรับการอบแห้งในหลายรูปแบบ ได้แก่ แบบสายพานลำเลียง (conveyor dryer) แบบถังหมุน (rotary drum dryer) เป็นต้น (Mujarndar, 1995)

3.3.3 ระบบการแผ่รังสี

โดยอุณหภูมิที่ทำให้เกิดความร้อนจะเป็นสัดส่วนกับระยะของการแผ่รังสีของแท่งทำความร้อน กล่าวคือ ยิ่งอยู่ใกล้วัตถุมากเท่าใดประสิทธิภาพในการให้ความร้อนจะมีมากขึ้นเท่านั้น อย่างไรก็ตาม หากวัตถุอยู่ใกล้กันมากเกินไปอาจมีผลทำให้การกระจายพลังงานที่เกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอหรือผิวของวัตถุที่อบไหม้ได้ ดังนั้น เพื่อหลีกเลี่ยงการกระจายพลังงานไม่สมดุล ควรพิจารณาระยะห่างของวัตถุกับคอมะท้อนที่ใช้ ขึ้นอยู่กับวัตถุที่จะอบ อย่างไรก็ตามหากวัตถุนั้นมีลักษณะเรียบและเคลื่อนที่ไปตามสายพาน ความไม่สมดุลของพลังงานดังกล่าวอาจไม่เกิดขึ้นก็ได้ ดังนั้น ระยะห่างของคอมะท้อนกับวัตถุที่อบก็จะน้อยลงเป็น ประมาณ 50 mm. ระยะห่างมาตรฐานระหว่างแท่งทำความร้อนแต่ละตัวควรอยู่ระหว่าง 120 ถึง 250 mm.

3.3.3.1 การแผ่รังสีตรง

เนื่องจากความร้อนที่ได้จากการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นยาวเกิดจากการกระจายรังสี (radiator) ดังนั้นรังสีที่กระจายออกมาจึงพุ่งตรงเข้าหาวัสดุเป้าหมายโดยไม่ถูกรบกวนจากชั้นของอากาศที่อยู่รอบ ๆ ดังนั้นเพื่อขจัดปัญหารังสีส่องไปไม่ถึงบางส่วนของวัตถุ จะต้องออกแบบคอมะท้อนที่สามารถกระจายรังสีไปได้ทุกทิศทางเพื่อให้วัตถุสัมผัสรังสีได้ทั่วถึง

3.3.4 อุปกรณ์อบแห้งที่ใช้รังสีอินฟราเรด

อุปกรณ์กำเนิดรังสีอินฟราเรด (infrared radiation section หรือ radiator หรือ emitter) สำหรับการอบแห้งสามารถแบ่งตามแหล่งพลังงานของแหล่งกำเนิดได้สองประเภท คือ ชนิดไฟฟ้า (electrically heater) กับชนิดแก๊ส (gas fired)

3.3.4.1 อุปกรณ์กำเนิดรังสีแบบใช้ไฟฟ้า (electrically heater radiation) จะทำงานโดยการปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านตัวกระจายความร้อน เช่น ลวดนิโครม ซึ่งจะกระจายความร้อนให้แก่วัตถุกำเนิดรังสีที่มีหลายประเภท ได้แก่ Metal sheath, Radiation rod, Halogen, Quartz tube และ Quartz lamp โดยอุณหภูมิของอุปกรณ์กำเนิดรังสีแบบใช้ไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 30°C ถึง 1,200°C และมีความยาวคลื่น 4 ถึง 50 μm .

3.3.4.2 อุปกรณ์กำเนิดรังสีแบบใช้แก๊ส (gas-fired radiator) ส่วนประกอบหลักของอุปกรณ์กำเนิดรังสีแบบใช้แก๊สประกอบด้วยแผ่นรูพรุน (perforate plate) ซึ่งด้านบนจะเป็นส่วนของเตาแก๊ส เมื่อเกิดการเผาไหม้พลังงานความร้อนจะแผ่ผ่านรูพรุนจะทำให้แผ่นรูพรุนแผ่รังสีความร้อนออกมา อุณหภูมิของอุปกรณ์กำเนิดรังสีแบบใช้แก๊สอยู่ระหว่าง 1,500 ถึง 1,700°C ที่ความยาวคลื่น 2.7 ถึง 2.3 μm . โดยมีประสิทธิภาพการแผ่รังสีประมาณ 60%