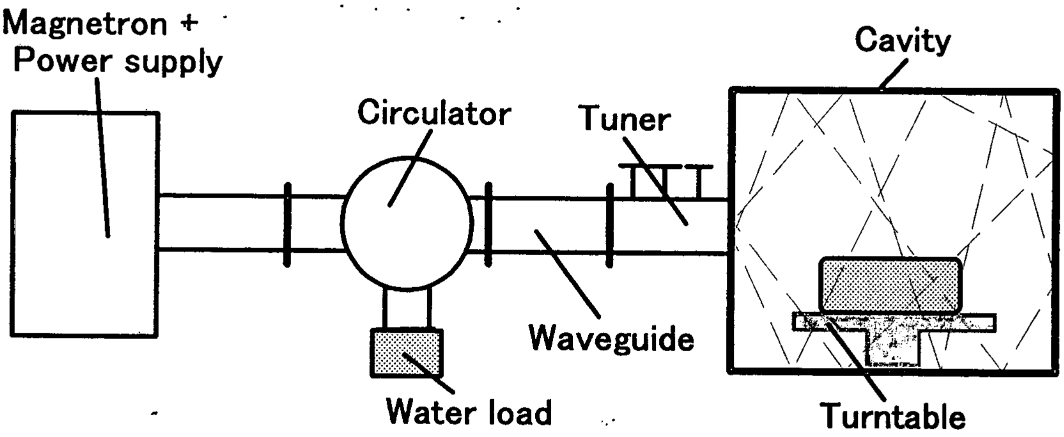
บทที่ 2
ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง / ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.1 กระบวนการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

กระบวนการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟประกอบด้วยองค์ประกอบพื้นฐานของระบบประกอบด้วย แหล่งกำเนิดพลังงานความถี่สูงหรือเจเนเรเตอร์ และใช้ท่อนำคลื่น (Waveguide) ไปยังชิ้นงานหรือโหลด (Load) ที่อยู่ภายในแอพพลิเคเตอร์ (Applicator) ดังแสดงในภาพที่ 2-1

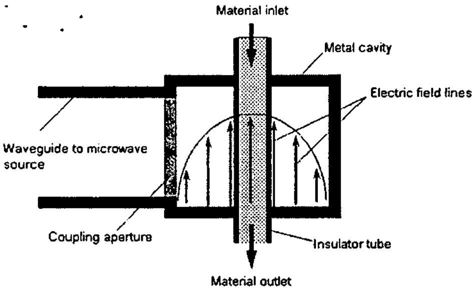


ภาพที่ 2-1 องค์ประกอบพื้นฐานของระบบทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ

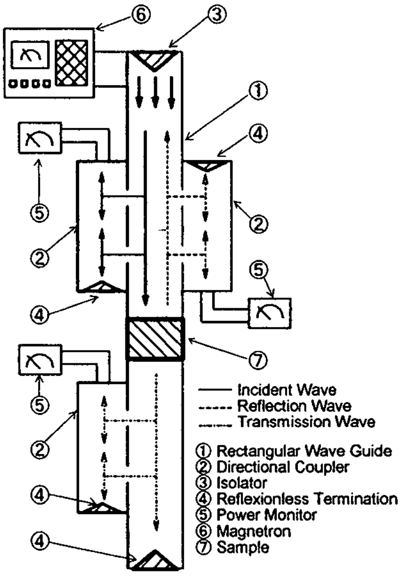
จากภาพที่ 2-1 แมกนีตรอน (Magnetron) ที่ติดตั้งบนท่อนำคลื่น (Waveguide) ทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟหรือสร้างพลังงานไมโครเวฟ ไมโครเวฟจะเคลื่อนที่ผ่านท่อนำคลื่นไปยังวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการที่อยู่ภายในคาวิตี้ (Cavity) หรือ แอพพลิเคเตอร์ (Applicator) เมื่อพลังงานไมโครเวฟเข้าสู่วัสดุแล้ว ส่วนที่นอกเหนือจากการดูดซับ (Absorbed Wave) โดยตัววัสดุ จะมีบางส่วนที่ทะลุผ่าน (Transmitted Wave) วัสดุและจะมีบางส่วนที่สะท้อนกลับ (Reflected Wave) ไป ซึ่งอัตราพลังงานไมโครเวฟที่สะท้อนกลับ จะขึ้นอยู่กับค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric Properties) ของวัสดุและคุณลักษณะประจำตัวของวัสดุเอง คลื่นสะท้อนที่สะท้อนกลับนี้ อาจทำให้ตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟเสียหายได้ (โดยเฉพาะระบบที่ใช้ไมโครเวฟกำลังสูง) ดังนั้นโดยทั่วไประบบ

ไมโครเวฟจะติดตั้งตัวดักคลื่น หรือที่เรียกทั่วไปว่า เซอร์คูเลเตอร์ (Circulator) (อุปกรณ์ทำให้คลื่นไมโครเวฟเดินได้ทางเดียว หากทำการติดตั้งโหลดหลอกเข้าไปในระบบด้วยเราจะเรียกเป็นชื่อใหม่แทนว่า ไอโซเลเตอร์ (Isolator)) ระหว่างตัวกำเนิดคลื่นและท่อนำคลื่นเพื่อป้องกันการเสียหายดังกล่าว นอกจากนั้นยังติดตั้งอุปกรณ์ปรับแต่งคลื่นเพื่อที่จะลดพลังงานสะท้อนกลับนี้ โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าอุปกรณ์ปรับค่าคลื่น (Matching Tuner) มาติดตั้งระหว่างท่อนำคลื่นและบริเวณทำความร้อน อุปกรณ์ตัวนี้ทำหน้าที่ปรับให้คลื่นไมโครเวฟมีการดูดซับในตัววัสดุได้ดีขึ้นโดยที่การสะท้อนของคลื่นที่ผิววัสดุลดลง ส่งผลทำให้ระบบไมโครเวฟทำงานที่ประสิทธิภาพสูงสุดอีกด้วย

คาวิตี้ (Cavity) หรือแอพพลิเคเตอร์ (Applicator) เป็นส่วนที่มีไว้สำหรับการทำความร้อนของกระบวนการ โดยได้รับพลังงานไมโครเวฟมาจากเจนเนอเรเตอร์หรือแมกนีตรอน แอพพลิเคเตอร์เป็นตัวบ่งบอกถึงรูปแบบคลื่นไมโครเวฟที่กระทำต่อวัสดุว่าเป็นลักษณะคลื่นโหมดเดียว (Single Mode) หรือคลื่นมัลติโหมด (Multimode)



(a)



(b)

ภาพที่ 2-2 แสดงระบบทำโความร้อนโดยใช้แอพพลิเคเตอร์ลักษณะเรโซแนนซ์โหมดเดียว (a) โหมด TM_{010} (b) โหมด TE_{10} (Ratanadecho, [7])

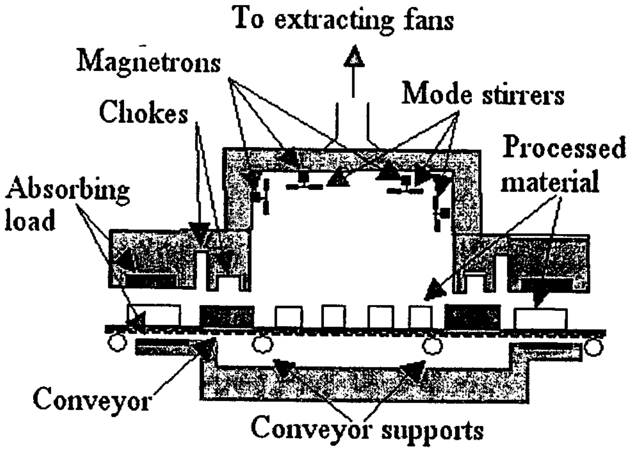
1.2 แอพพลิเคเตอร์แบบโหมดเดียว (Single Mode Applicators)

แอพพลิเคเตอร์แบบโหมดเดียว คือการออกแบบแอพพลิเคเตอร์ ให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีลักษณะเป็นเรโซแนนซ์โหมดเดียว (Single Resonant Mode) หรือเรโซแนนซ์เดียว (Single Resonance) ที่ทำงานใกล้เคียงกับความถี่ทำงาน ตัวอย่างแอพพลิเคเตอร์ลักษณะนี้จะแสดงดังในภาพที่ 2-2 ซึ่งมีรูปแบบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีความเข้มสูงบริเวณตรงส่วนกลางของแอพพลิเคเตอร์ ดังนั้นการวางหรือป้อนวัสดุทดสอบหรือโหลดจะกระทำที่ตรงส่วนกลางของแอพพลิเคเตอร์

มีข้อสังเกตที่พบก็คือ แอพพลิเคเตอร์แบบนี้ก็ง่ายต่อการควบคุมการกระจายตัวของคลื่น เมื่อเทียบกับแอพพลิเคเตอร์แบบมัลติโหมด ส่งผลให้ง่ายต่อการศึกษาทำนายพฤติกรรมทางความร้อนที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ

1.3 แอพพลิเคเตอร์แบบมัลติโหมด (Multimode Applicators)

แอพพลิเคเตอร์แบบมัลติโหมด คือแอพพลิเคเตอร์ที่มีการออกแบบให้เกิดการกระจายตัวของคลื่นในลักษณะหลายเรโซแนนซ์กลายเป็นลักษณะคลื่นแบบมัลติโหมด ส่งผลให้ให้คลื่นมีการกระจายตัวมากขึ้น โดยคลื่นนี้จะมาจากหลายระนาบและหลายทิศทางจากการตกกระทบและสะท้อนภายในคาวิตี้ ซึ่งผลรวมของคลื่นดังกล่าวก่อให้เกิดคลื่นเรโซแนนซ์ หรือมัลติโหมด ทำให้การกระจายของสนามมีความซับซ้อนมากขึ้น ยิ่งเมื่อใส่วัสดุทดสอบจำทำให้ยากแก่การทำนายพฤติกรรมเนื่องจากตัววัสดุทดสอบเองส่งผลโดยตรงต่อการกระจายตัวของคลื่นภายในคาวิตี้ด้วย



ภาพที่ 2-3 แสดงรูปการประยุกต์ใช้แอพพลิเคเตอร์แบบมัลติโหมด

ตัวอย่างระบบแอพพลิเคเตอร์แบบมัลติโหมด แสดงในภาพที่ 2-3 ภายในระบบจะมีการป้อนไมโครเวฟผ่านหลายช่องทาง (Multi Feed Ports) และการสะท้อนกลับไปมาหลายๆล้านครั้งของคลื่นไมโครเวฟภายในแอพพลิเคเตอร์ก่อให้เกิดเรโซแนนซ์ของคลื่นนิ่ง (Standing Wave) ขึ้นภายในแอพพลิเคเตอร์

1.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแอพพลิเคเตอร์แบบโหมดเดียว

สมการพื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าคือสมการแมกเวลส์ (Maxwell curl relation) รูปอนุพันธ์ของสมการแมกเวลส์ (Maxwell's equation) สามารถอธิบายในรูปของความเข้มสนามไฟฟ้า (electric field intensity, E) และความเข้มสนามแม่เหล็ก (magnetic field intensity, H) ซึ่งความสัมพันธ์ของสมการแมกเวลส์ (Maxwell's equation) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = q \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4)$$

เมื่อ E และ H คือความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามลำดับ, J คือความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (current density), D คือความหนาแน่นของฟลักซ์ (flux density) และ B คือความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (megnetic flux density) โดยความสัมพันธ์ระหว่าง J, D และ B กับ E และ H คือ

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (5)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (6)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (7)$$

โดย σ คือคุณสมบัติการนำไฟฟ้า (electric conductivity), μ คือคุณสมบัติการซึมผ่านของสนามแม่เหล็ก (magnetic permeability) และ ε คือค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (dielectric permittivity หรือ dieletric constant) แทนสมการ (5) ถึง (7) ลงในสมการ (1) ถึง (4) จะได้

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \tag{8}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \tag{9}$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{q}{\varepsilon} \tag{10}$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \tag{11}$$

สมการ (8) และ (9) (the curl relation) อ้างอิงมาจาก กฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) และกฎของแอมแปร์ (Ampere's law) ตามลำดับ สมการ (10) และ (11) (divergence equations) เป็นผลมาจากกฎของเกาซ์ (Gauss's law) the curl relation ในสมการของแมกเวลส์ (Maxwell's equation) ใช้วัดการหมุนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า สมการที่ (8) อธิบายการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กตามเวลาก่อให้เกิดสนามไฟฟ้า สมการที่ (10) แสดงถึงความแปรผัน (divergence) ของสนามแม่ไฟฟ้าที่จุดใด ๆ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับสภาพความหนาแน่นของประจุ (position charge density) และสมการที่ (11) แสดงถึงการไม่มีแหล่งกำเนิด (source) หรือแหล่งรับ (sink) ของสนามแม่เหล็ก คุณสมบัติต่าง ๆ ที่ปรากฏในสมการข้างต้นนี้สามารถแสดงในรูปความสัมพันธ์ดังนี้

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \tag{12}$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r \tag{13}$$

$$\sigma = 2\pi f \varepsilon \tan\delta \tag{14}$$

เมื่อ f คือความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ, $\tan\delta$ คือ ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานดูดซับเป็นพลังงานความร้อน หรือประสิทธิภาพลอสแทนเจนท์ (loss tangent coefficient) ε_r และ μ_r คือ สมบัติไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (relative dielectric permittivity หรือ relative dielectric constant) และสมบัติการซึมผ่านของสนามแม่เหล็กสัมพัทธ์ (relative magnetic permeability) ตามลำดับ

สำหรับการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในกรณีท่อนำคลื่นที่มีคลื่นลักษณะเป็นคลื่นเดี่ยว (monochromatic หรือ single-mode) ที่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ TE_{10} mode คุณสมบัติสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในแกนต่าง ๆ เป็นดังนี้

$$E_x = E_z = H_y = 0, E_y, H_x, H_z \neq 0 \tag{15}$$

x, y และ z แสดงถึงทิศทางของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาสมการที่ (8) ตามนิยามของสมการแมกเวลล์ สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{E} &= -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \\ &= \left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z}\right)\bar{i} - \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z}\right)\bar{j} + \left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y}\right)\bar{k} \\ &= -\mu\left(\frac{\partial H_x}{\partial t}\bar{i} + \frac{\partial H_y}{\partial t}\bar{j} + \frac{\partial H_z}{\partial t}\bar{k}\right)\end{aligned} \tag{16}$$

แทนสมการ (15) ลงในสมการ (16) จะได้

$$\frac{\partial E_y}{\partial z} = \mu \frac{\partial H_x}{\partial t} \tag{17}$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -\mu \frac{\partial H_z}{\partial t} \tag{18}$$

ตามนิยามของสมการแมกเวลล์ สามารถจัดรูปสมการที่ (9) ใหม่ได้เป็น

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \bar{E} + \varepsilon \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} \tag{19}$$

แทนค่าสมการ (15) ลงในสมการ (19) จะได้

$$-\left(\frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial z}\right) = \sigma E_y + \varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} \tag{20}$$

สมการที่ (17), (18) และ (19) ใช้สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาแบบ 2 มิติในกรณีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นแบบ TE_{10} mode โดยสมมติให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวแกน y มีค่าสม่ำเสมอ (uniform) และไม่สิ้นสุด (infinite) โดยที่ค่า ε, μ และ σ ถูกแสดงความสัมพันธ์ในสมการที่ (12), (13) และ (14) ตามลำดับ

1.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับสมบัติไดอิเล็กตริก

ความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุในกระบวนการไมโครเวฟมีความจำเป็นต่อการออกแบบอุปกรณ์ใช้งานด้านไมโครเวฟให้เหมาะสม คลื่นไมโครเวฟเป็นรูปแบบหนึ่งของพลังงานที่สามารถทะลวงผ่านที่ว่าง อากาศ และวัตถุได้ คลื่นไมโครเวฟประกอบไปด้วยสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเช่นเดียวกับแสง (การแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า) แต่จะแตกต่างจากแสงตรงที่ความถี่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่างกัน

ในการควบคุมกระบวนการทำความร้อนวัสดุไดอิเล็กตริกด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าหรือไมโครเวฟ ควรทราบถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กตริกซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon'' = \varepsilon_0\left(\varepsilon_r' + j\varepsilon_r''\right) = \varepsilon_0\left(\varepsilon_r' + j\frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0}\right) \qquad (21)$$

เมื่อ $j = \sqrt{-1}$, ε คือ คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ (complex dielectric permittivity) (โดยทั่วไปเรียก ไดอิเล็กตริกคอนแสตนท์ (dielectric constant) ซึ่งเป็นคุณสมบัติ ที่อธิบายถึงความสามารถในการดูดซับ ส่งผ่าน และสะท้อนพลังงานที่เป็นสนามไฟฟ้าของวัสดุ โดย ε_0 คือคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของที่ว่าง (free space) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.86×10^{-12} F/m ε_r' เป็นจำนวนจริงของคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (relative permittivity หรือ relative dielectric constant) ใช้อธิบายความสามารถในการส่งผ่าน และสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟในวัสดุ ε_r'' เป็นจำนวนจินตภาพของคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (โดยทั่วไปเรียกไดอิเล็กตริกลอสแฟกเตอร์ (dielectric loss factor)) ใช้อธิบายการสูญเสียพลังงานของคลื่นไมโครเวฟเมื่อผ่านวัสดุ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือความสามารถของวัสดุในการดูดซับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ และ σ คือความสามารถในการนำไฟฟ้า (electric conductivity) ความสัมพันธ์ระหว่าง dielectric loss factor กับค่าการนำไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\varepsilon'' = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \tag{22}$$

เมื่อ ω คือ ความเร็วเชิงมุมของคลื่นไมโครเวฟ และสามารถยุบรวมกันเป็นตัวแปรใหม่เพื่อความสะดวกเรียกว่าประสิทธิภาพลอสแทนเจนท์ (loss tangent coefficient ($\tan\delta$))

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_r' \varepsilon_0} \tag{23}$$

ประสิทธิภาพลอสแทนเจนท์ ($\tan\delta$) เป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้อธิบายความสามารถในการผลิตความร้อนของวัสดุไดอิเล็กตริกเมื่อดูดกลืนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ

1.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์สมการส่งผ่านความร้อน

อุณหภูมิของวัสดุทดสอบที่เกิดจากพลังงานไมโครเวฟสามารถพิจารณาได้จากสมการการส่งผ่านความร้อน (conventional heat transport equation) ซึ่งรวมเทอมของพลังงานความร้อนที่ผลิตขึ้นในวัสดุเนื่องจากไมโครเวฟ ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการสภาวะไม่คงตัวในกรณีปัญหา 2 มิติได้ดังนี้

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + \frac{Q}{\rho \cdot C_p} \tag{24}$$

เทอมของความร้อนเนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าหรือคลื่นไมโครเวฟ (Q) ขึ้นอยู่กับการกระจายของความเข้มของสนามไฟฟ้า และสามารถเขียนได้ดังนี้

$$Q = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r'' E^2 = 2\pi \cdot f \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r (\tan\delta) E^2 \tag{25}$$

และเพื่อให้สอดคล้องกับการวิเคราะห์ปัญหาการทำความร้อนที่ใช้ระบบพาความร้อนร่วมที่ผิววัสดุแบบจำลองในการวิเคราะห์ สมการขอบเขตต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขดังต่อไปนี้

เมื่อพิจารณาเป็นขอบเขตปิดและไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อน สมการเงื่อนไขขอบเขตเขียนได้ดังนี้

$$\left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{wall} = \left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{wall} = 0 \tag{26}$$

เมื่อพิจารณาเป็นขอบเขตที่มีการใช้ระบบพาความร้อนร่วมที่ผิววัสดุ สมการเงื่อนไขขอบเขตเขียนได้ดังนี้

$$q = h(T_\infty - T) \tag{27}$$

1.7 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการวิเคราะห์การทำความร้อนในวัสดุไดอิเล็กตริกด้วยไมโครเวฟ สมการการส่งถ่ายความร้อน (24) จะใช้ควบคู่กับสมการความสัมพันธ์ของแมกเวลส์ ((17), (18), (19) และ (20)) ซึ่งระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการวิเคราะห์การกระจายสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

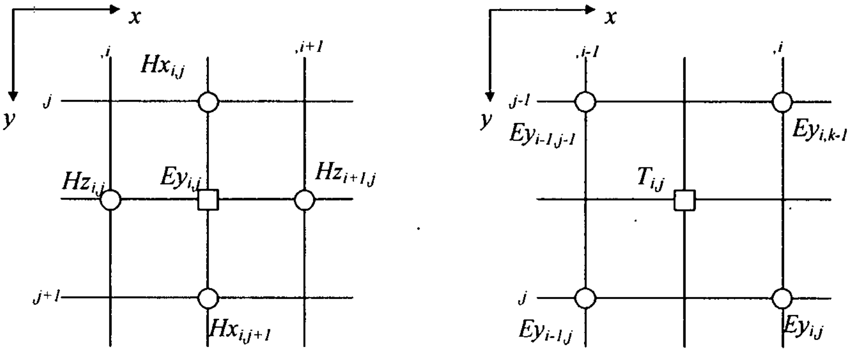
โดยปกติการวิเคราะห์การกระจายตัวของกำลังไมโครเวฟต้องอาศัยสมการที่เกี่ยวข้องกับการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น สมการแมกเวลส์สำหรับท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม การใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา (finite difference time domain (FDTD)) ในการวิเคราะห์สมการที่เกี่ยวข้องกับการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถให้รายละเอียดถึงการกระจายและการดูดซับพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

การวิเคราะห์การคำนวณของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงทฤษฎีด้วยสมการแมกเวลส์จะใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา (finite difference time domain (FDTD)) วิธีการคือแบ่งกริด (grid) ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามภาพที่ 2-4 โดยเวคเตอร์ของสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก ค่าของสนามทั้งสองคำนวณที่ครึ่งช่วงเวลาผ่านการทดสอบแล้วว่ากระบวนการคำนวณมีผลลัพธ์ลู่เข้าองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กโดยวิธี FDTD สามารถแสดงได้ดังนี้

$$E_y^{n}(i,k) = \frac{1-\dfrac{\sigma(i,k)\Delta t}{2\varepsilon(i,k)}}{1+\dfrac{\sigma(i,k)\Delta t}{2\varepsilon(i,k)}} E_y^{n-1}(i,k) + \frac{1}{1+\dfrac{\sigma(i,k)\Delta t}{2\varepsilon(i,k)}}\frac{\Delta t}{\varepsilon(i,k)} \left\{ \frac{-\left(H_z^{n-1/2}(i+1/2,k) - H_z^{n-1/2}(i-1/2,k)\right)}{\Delta x} + \frac{\left(H_x^{n-1/2}(i,k+1/2) - H_x^{n-1/2}(i,k-1/2)\right)}{\Delta z} \right\} \tag{28}$$

$$H_x^{n+1/2}(i,k+1/2) = H_x^{n-1/2}(i,k+1/2) + \frac{\Delta t}{\mu(i,k+1/2)}\left\{\frac{E_y^{\,n}(i,k+1) - E_y^{\,n}(i,k)}{\Delta z}\right\} \tag{29}$$

$$H_z^{n+1/2}(i+1/2,k) = H_z^{n-1/2}(i+1/2,k) - \frac{\Delta t}{\mu(i+1/2,k)}\left\{\frac{E_y^{\,n}(i+1,k) - E_y^{\,n}(i,k)}{\Delta x}\right\} \tag{30}$$



ภาพที่ 2-4 การแบ่งกริดของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (grid system configuration)

ส่วนการวิเคราะห์สมการการส่งถ่ายความร้อนเชิงทฤษฎี (สมการที่ (24)) สามารถวิเคราะห์ด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่อง (finite difference) บนพื้นฐานวิธีปริมาตรควบคุม (control volume)

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หากกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนวัสดุด้วยพลังงานไมโครเวฟในเชิงทฤษฎีและทดลองมีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง เช่น Ayappa et al, [1] ศึกษาเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของวัสดุไดอิเล็กตริกตามเวลาที่เปลี่ยนไป โดยการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมินั้นขึ้นกับสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ใช้วิเคราะห์ แบบจำลองทางทฤษฎีในงานวิจัยนี้ยังสามารถทำนายปรากฏการณ์เทอร์มอลรันอะเวย์ (Thermal Runaway Effect) ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการ Ayappa et al., [2] ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษากระบวนการทำความร้อนแก่วัสดุด้วยไมโครเวฟในระนาบ 2 มิติ โดยกำหนดให้สมบัติไดอิเล็กตริกเป็นฟังก์ชั่นของอุณหภูมิซึ่งเน้นย้ำถึงผลกระทบจากคุณสมบัติไดอิเล็กตริกต่อกระบวนการความร้อนแก่วัสดุทดสอบหลายชนิด Fu et al., [3] ศึกษาเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับการกระจายตัวของกำลังการดูดซับ (Microwave Power

Absorbed) ภายในคาวิตี้ที่มีคลื่นเป็นลักษณะมัลติโหมด (Multi-Mode Cavity) โดยอาศัยแบบจำลอง 3 มิติ ผลจากการคำนวณเชิงทฤษฎีและการทดลองนั้นสอดคล้องกัน Ma et al., [4] ศึกษาความเป็นไปได้ของการสร้างแบบจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้ารวมกับแบบจำลองทางความร้อนเพื่อใช้วิเคราะห์พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนภายในเตาไมโครเวฟสำหรับครัวเรือน โดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้ศึกษาคือวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอร์เรนซ์ไทม์โดเมน (Finite Different Time Domain; FDTD) ผลการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีที่ได้ยังไม่สอดคล้องกับผลการทดลองเท่าที่ควร Torres and Jecko., [5] ศึกษาความเป็นไปได้ของการสร้างแบบจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้ารวมกับแบบจำลองทางความร้อนเพื่อใช้วิเคราะห์การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและความร้อนภายในเตาไมโครเวฟสำหรับครัวเรือน โดยงานวิจัยนี้พัฒนาต่อเนื่องมาจากงานวิจัยของ Fu et al., [6] และพบว่าความถี่ไมโครเวฟส่งผลต่อการเกิดความร้อนภายในวัสดุอย่างชัดเจน Lui et al., [7] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนในวัสดุโพลิเมอร์ที่เกิดจากพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า โดยใช้ท่อนำคลื่นแบบสัน (Ridge) ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีสอดคล้องกันเมื่ออุณหภูมิไม่เกิน 150 องศาเซลเซียส Clemens and Saltiel., [8] ศึกษาเชิงทฤษฎีโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและความร้อนภายในวัสดุตัวอย่าง และกำหนดให้สมบัติไดอิเล็กตริกเป็นฟังก์ชั่นของอุณหภูมิ แต่ผลที่ได้จากการคำนวณไม่สอดคล้องกับผลจากการทดลอง Zhao et al., [9] พัฒนาแบบจำลอง 3 มิติ สำหรับวิเคราะห์ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟในวัสดุตัวอย่างคือ ไม้ที่มีความชื้นต่ำ งานวิจัยนี้ทำให้ทราบถึงอันตรกิริยาระหว่างคลื่นไมโครเวฟกับวัสดุทดสอบ คือ ไม้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังไม่มีการยืนยันผลกับการทดลองจริง Ratanadecho et al., [10] ศึกษากระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟในวัสดุทดสอบที่มีหลายชั้น (Multi-Layer Material) โดยเน้นการศึกษาความสามารถในการส่งผ่านพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟเข้าไปในวัสดุทดสอบ โดยตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ การเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นป้องกันการสะท้อนคลื่นและตำแหน่งของชั้นป้องกันการสะท้อน งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองกับผลที่ได้จากการทดลองจริงซึ่งสอดคล้องกันเป็นอย่างดี งานวิจัยนี้ถือว่าเป็นแนวคิดที่สำคัญการประยุกต์พลังงานไมโครเวฟกับวัสดุที่หลายชิ้นและเป็นผลงานชิ้นแรกในระดับนานาชาติที่วิจัยเกี่ยวกับปัญหานี้อย่างสมบูรณ์ Rattanadecho et al., [11] ศึกษาทดลองการนำพลังงานไมโครเวฟร่วมกับระบบสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่องมาประยุกต์ใช้กับงานบ่มคอนกรีต ซึ่งเป็นงานที่มุ่งเน้นการทดสอบเพื่อเป็นแนวทางในการใช้งานเชิงอุตสาหกรรมต่อไปในอนาคตเนื่องจากระบบสายพานลำเลียงสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง สำหรับอิทธิพลที่ศึกษาในงานนี้ศึกษาถึงกำลังไมโครเวฟ ระยะเวลาที่ผ่านกระบวนการบ่มเร่งด้วยไมโครเวฟ และชนิดวัสดุคอนกรีต จากผลการศึกษาที่ได้พบว่าพลังงานไมโครเวฟสามารถเร่งพัฒนาการบ่มคอนกรีตในระบบสายพานลำเลียงได้หากใช้พลังงานที่เหมาะสมและวัสดุคอนกรีตที่มีสัดส่วนผสมต่างกัน พฤติกรรมทางความร้อนจะแตกต่างกัน Rattanadecho et

al., [12] พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับศึกษากระบวนการทำความร้อนในวัสดุคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟ (โหมด : TE10) โดยศึกษาถึงอิทธิพลของความหนาของวัสดุและความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ พบว่าอิทธิพลทั้งสองอย่างส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมการกระจายตัวทางความร้อนที่เกิดจากคลื่นไมโครเวฟภายในวัสดุคอนกรีต Suwannapum and Rattanadecho., [13] พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับศึกษากระบวนการถ่ายเทมวลสารและความร้อนในวัสดุพรุนชนิดไม่อิ่มตัว ภายใต้พลังงานไมโครเวฟ (โหมด : TE10) โดยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนั้น สามารถที่จะทำนายพฤติกรรมของ อุณหภูมิ ความชื้น และความดัน ที่เปลี่ยนแปลงไปภายในวัสดุในแต่ละช่วงเวลา สำหรับอิทธิพลที่ทำการศึกษานั้นมุ่งเน้นไปที่ขนาดของอนุภาควัสดุพรุน และความหนาของวัสดุ ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการถ่ายเทมวลและความร้อนในวัสดุ จากการศึกษาพบว่า ขนาดอนุภาค และความหนาของวัสดุส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมการถ่ายเทมวลสารและความร้อนภายในวัสดุ ส่งผลให้แต่ละแบบจำลองใช้เวลาในกระบวนการถ่ายเทมวลความชื้นออกจากระบบ และเกิดพฤติกรรมทางความร้อนและการกระจายตัวของความดันภายในวัสดุแตกต่างกัน

จากที่นำเสนอข้างต้นจะเห็นได้ว่าพลังงานไมโครเวฟที่ประยุกต์ใช้กับงานทางด้านความร้อนในวัสดุไดอิเล็กตริก มีการพัฒนาคู่ขนานกันไปทั้งในส่วนของการวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และงานในส่วนของงานเชิงทดลองทดสอบ และจะเห็นได้ว่างานวิจัยบางชิ้นที่สามารถศึกษาวิจัยถึงพฤติกรรมเชิงลึกจากแบบจำลองได้ดีจะใช้ระบบไมโครเวฟแบบระบบโหมดเดียวเพื่อทำการศึกษา ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการเสนอหัวข้อโครงการวิจัยชิ้นนี้