

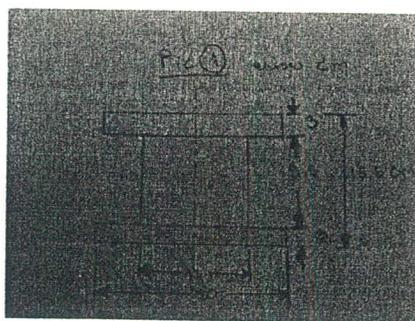
บทที่ 3

ระเบียบวิธีการวิจัย

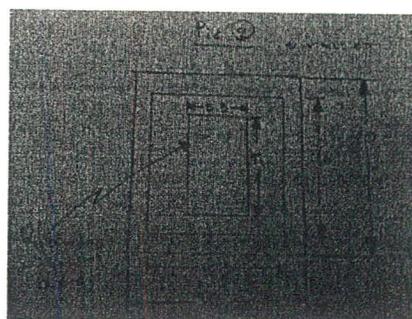
งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการพัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับระบบไมโครเวฟร่วมกับระบบพาคความร้อนภายในควาวิตีที่ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมโหมดทีอี 10 เพื่อใช้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุไดอิเล็กทริกที่จะออกแบบ โดยประกอบไปด้วยส่วนหลักๆ คือ แหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ ควาวิตีสำหรับใส่วัสดุทำความร้อนชนิดท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม แหล่งกำเนิดระบบพาคความร้อนเชื่อมต่อกับควาวิตี ระบบป้องกันคลื่นสะท้อนทางด้านบนและด้านล่างท่อนำคลื่น และระบบวัดผลเก็บข้อมูลที่จำเป็น โดยที่ระบบดังกล่าวจะต้องมีการควบคุมการรั่วไหลของคลื่นไมโครเวฟให้อยู่ในมาตรฐานที่กำหนด (มาตรฐานสากลกำหนดให้ไม่เกิน 10 mW/cm^2) เพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้งาน สำหรับรายละเอียดการพัฒนาเครื่องต้นแบบมีดังต่อไปนี้

1. การสร้างโมเดลจำลองระบบไมโครเวฟร่วมกับระบบพาคความร้อนภายในควาวิตีที่ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมโหมดทีอี 10 ด้วยมือและซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์

หลังจากได้แบบจำลองลักษณะการทำงานเบื้องต้นจากภาพที่ 1-1 จึงดำเนินการต่อโดยการกำหนดขนาดต่างๆ ของวัสดุ อาทิเช่น ท่อนำคลื่นให้ใช้ขนาดตามมาตรฐานท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมที่มาตรฐาน WR 430 (ใช้ในช่วงความถี่ R (R band)) ซึ่งมีขนาดหน้าตัดท่อนำคลื่นเท่ากับ 55×110 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 3-1



(a)

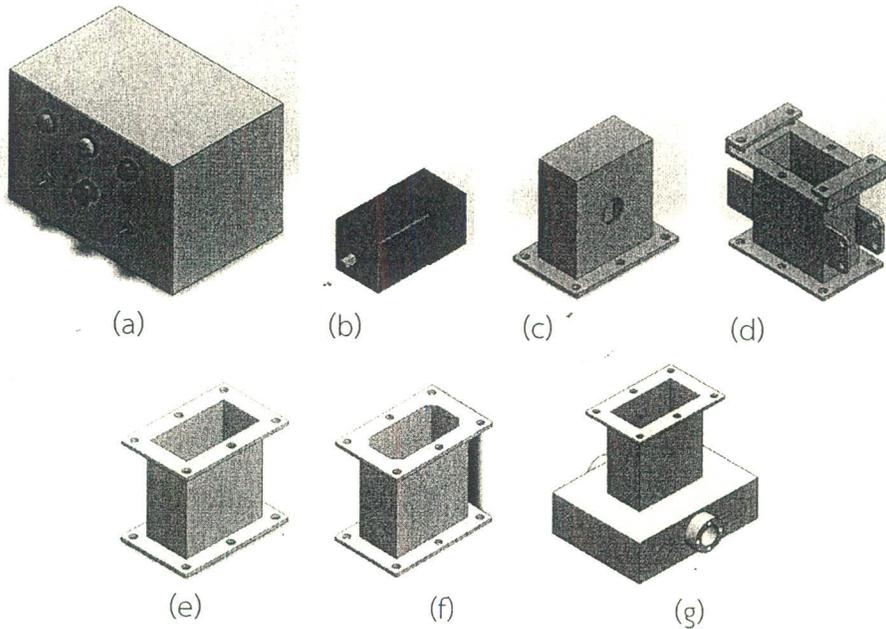


(b)

ภาพที่ 3-1 ตัวอย่างการกำหนดขนาดมาตรฐานท่อนำคลื่น ในการสร้างเครื่องต้นแบบ

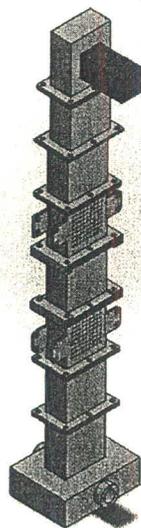
(a) ภาพฉายด้านหน้า (b) ภาพฉายด้านบน

จากนั้นจึงนำโครงสร้างท่อนำคลื่นทั้งหมดไปเขียนเป็นโมเดลจำลองทั้งชิ้นส่วนแยก และ ชิ้นส่วนประกอบ ซึ่งโมเดลจำลองดังกล่าวแสดงดังภาพที่ 3-2 และ 3-3



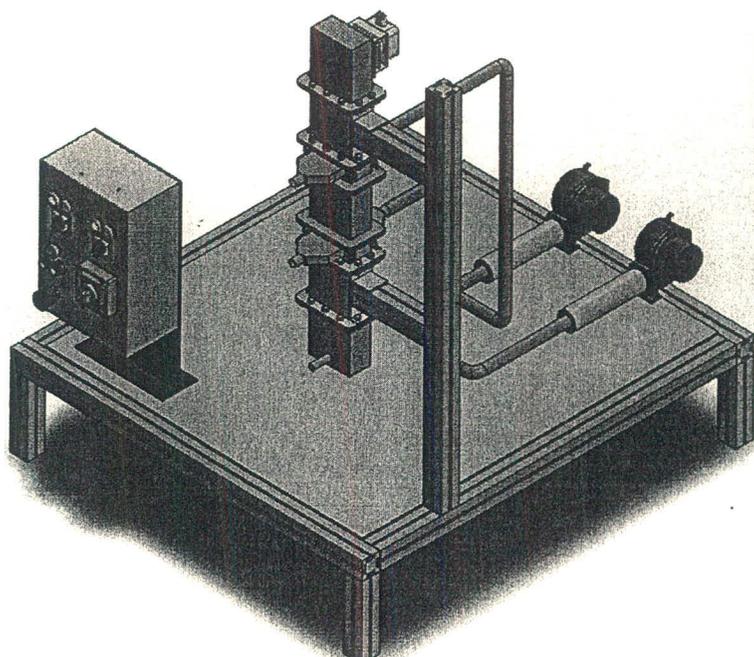
ภาพที่ 3-2 โมเดลจำลอง ในการสร้างเครื่องต้นแบบแบบแยกชิ้นส่วน

- (a) ชุดควบคุม (b) แมกนีตรอนสำหรับกำเนิดคลื่น (c) ท่อนำคลื่นส่วนหัวที่ประกอบด้วยแมกนีตรอน
 (d) ท่อนำคลื่นเจาะรูเพื่อเชื่อมต่อกับระบบพาความร้อน (e) ท่อนำคลื่นปกติ
 (f) ท่อนำคลื่นที่มีเหลี่ยมใช้สำหรับวางชิ้นงานทดสอบ (g) ท่อนำคลื่นส่วนท้ายเพื่อดักพลังงานคลื่นที่เหลือ



ภาพที่ 3-3 โมเดลจำลอง ท่อนำคลื่นในการสร้างเครื่องต้นแบบ

เมื่อสร้างแบบจำลองท่อนำคลื่นและแหล่งจากคลื่นไมโครเวฟแล้ว จึงประกอบชิ้นส่วนเพิ่มเติม ภายนอกที่เกี่ยวข้องได้แก่ระบบดูดซับคลื่นด้วยน้ำ ระบบการจ่ายลมร้อนสำหรับพาความร้อนที่ผิวชิ้นงานทดสอบ และอุปกรณ์ชุดควบคุม ดังแสดงในภาพที่ 3-4

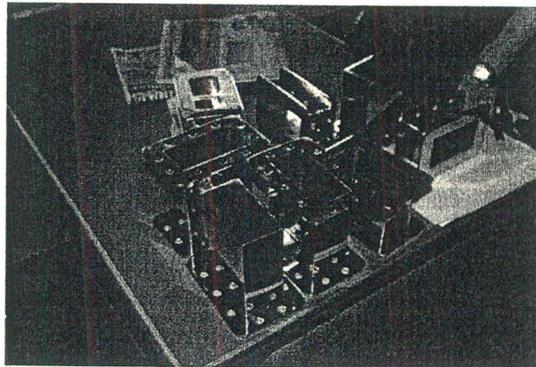


ภาพที่ 3-4 โมเดลจำลอง ระบบทั้งหมด

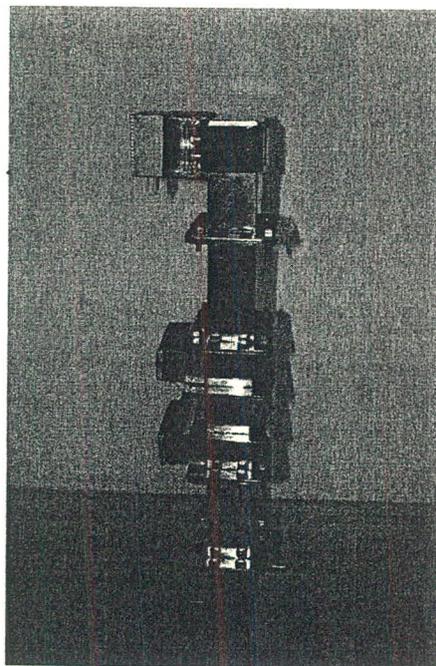
2. ขั้นตอนการสร้างเครื่องต้นแบบ

หลังจากได้แบบจำลองสมบูรณ์ จึงเข้าสู่การขั้นตอนการสร้างเครื่องต้นแบบโดยใช้ข้อมูลจากแบบที่เขียนขึ้นในคอมพิวเตอร์ เริ่มจากการขึ้นรูปท่อนำคลื่นด้วยวัสดุโลหะ ซึ่งหลังจากพิจารณาองค์ประกอบหลายๆ ด้าน ทั้งในแง่ความยากง่ายในการขึ้นรูป ราคาและคุณสมบัติวัสดุ และแหล่งรับจ้างผลิตในพื้นที่ใกล้เคียงพบว่า การขึ้นรูปด้วยโลหะอะลูมิเนียมแม้ว่าจะได้วัสดุที่มีคุณภาพดี น้ำหนักเบา แต่ไม่สามารถหาแหล่งผลิตขึ้นรูปได้ง่ายอีกทั้งยังมีราคาสูง ทางผู้วิจัยจึงเลือกใช้เป็นวัสดุที่เป็นสแตนเลส (Stainless) เนื่องจากเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำยิ่งยวดเหมาะสำหรับทำท่อนำคลื่น ไม่เกิดสนิมง่าย (ชิ้นงานบางส่วนมีการสัมผัสกับน้ำหรือไอน้ำ) และมีความสวยงามเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นที่หาได้ง่ายตามท้องตลาดเช่น เหล็ก โดยการขึ้นรูปชิ้นงานท่อนำคลื่นแสดงดังภาพที่ 3-5

เมื่อได้ชิ้นส่วนประกอบท่อนำคลื่น จึงนำมาประกอบต่อกัน พร้อมทั้งติดตั้งอุปกรณ์ แหล่งกำเนิดคลื่นหรือแมกนีตรอนที่บริเวณส่วนบนของท่อนำคลื่น ซึ่งต้องติดตั้ง ณ ตำแหน่งที่เหมาะสมส่งผลให้คลื่นเกิดการสั่นพ้องสูงที่สุดที่บริเวณ ระยะเท่ากับ ความยาวคลื่นไมโครเวฟใน อากาศ/4 จากขอบท่อนำคลื่นด้านบน (หากตำแหน่งไม่เหมาะสมจะส่งผลต่อพฤติกรรมของคลื่น และ ส่งผลเสียต่อแหล่งกำเนิดได้) จากนั้นจึงทำการเชื่อมต่อระบบควบคุมการทำงานของแหล่งกำเนิดคลื่น ดังภาพที่ 3-6



ภาพที่ 3-5 รูปชิ้นงานสำหรับประกอบท่อนำคลื่นไมโครเวฟ



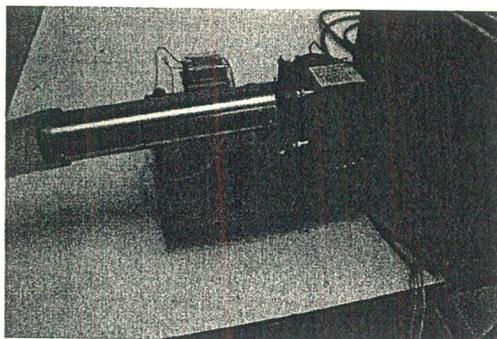
ภาพที่ 3-6 ท่อนำคลื่นไมโครเวฟที่ประกอบเสร็จ พร้อมติดตั้งแมกนีตรอน

จากนั้นประกอบระบบดูดซับคลื่นโดยใช้ระบบน้ำไหลผ่านส่วนล่างของท่อนำคลื่นเพื่อดูดซับคลื่นส่วนเกินที่ทะลุผ่านชิ้นงานทดสอบ ดังภาพที่ 3-7 พร้อมทั้งทดสอบระบบการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ

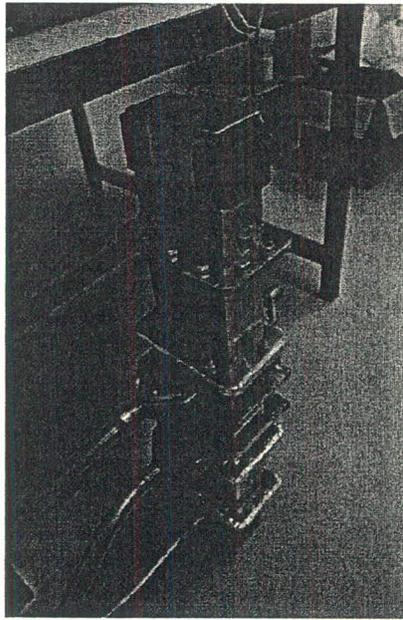


ภาพที่ 3-7 ระบบทำความร้อนด้วยไมโครเวฟที่สมบูรณ์

เมื่อทดสอบระบบไมโครเวฟสมบูรณ์ สามารถใช้งานได้จึงติดตั้งระบบการพาความร้อนที่ผิวด้วยลมร้อนที่ตำแหน่งใ่วัดทดสอบทั้งผิวหน้าด้านบน และผิวหน้าด้านล่าง ซึ่งรายละเอียดการติดตั้งระบบลมร้อนดังภาพที่ 3-8 และอุปกรณ์เชื่อมต่อลมร้อนไปยังท่อนำคลื่นไมโครเวฟดังภาพที่ 3-9

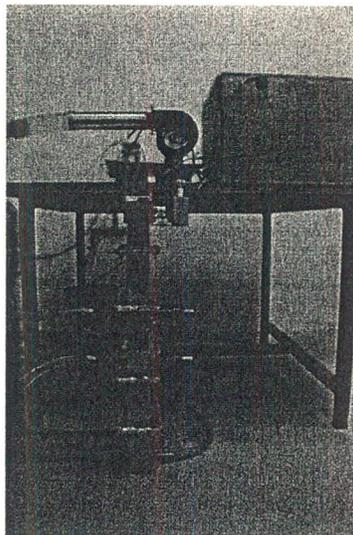


ภาพที่ 3-8 อุปกรณ์ติดตั้งระบบการพาความร้อนที่ผิววัสดุในท่อนำคลื่น



ภาพที่ 3-9 อุปกรณ์เชื่อมต่อลมร้อนไปยังท่อนำคลื่นไมโครเวฟ

จากนั้นประกอบระบบทั้งหมดเข้าด้วยกันดังภาพที่ 3-10 แล้วเริ่มตรวจสอบความสมบูรณ์ด้วยการทดสอบระบบ จากนั้นออกแบบเงื่อนไขการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพเครื่องที่พัฒนาขึ้นต่อไป



ภาพที่ 3-10 เครื่องต้นแบบสำหรับกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุไดอิเล็กทริกโดยใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับระบบพาความร้อนภายใต้ควิต์ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมโหมดทีอี 10

3. การวิเคราะห์ข้อมูล

หลังจากการสร้างเครื่องและทดสอบระบบอย่างสมบูรณ์ จึงออกแบบการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบที่พัฒนาขึ้น สำหรับวัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นไม้ที่ตัดให้มีขนาดรูปทรงเท่ากับ $55 \times 110 \times 50 \text{ mm}^3$ นำไปแช่น้ำให้เกิดการอิมตัว จากนั้นทำการทดลองโดยนำไปใส่ในท่อนำคลื่น ณ ตำแหน่งใส่ชิ้นงานทดสอบ และปิดให้สนิทก่อนทำการทดลองเพื่อป้องกันการรั่วไหลของคลื่นไมโครเวฟ โดยการทดลองถูกแบ่งออกได้ตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้

3.1 การทดลองการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ

ในเบื้องต้นทางผู้วิจัยได้ตั้งเงื่อนไขในการทดลองหลายรูปแบบ แต่เนื่องจากด้วยข้อจำกัดทางด้านระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้นยังไม่เหมาะสม กล่าวคือ เมื่อให้แมกนิตรอนทำงานทำงาน 100% เครื่องจะทำงานตลอดเวลา แต่ถ้าให้ทำงานน้อยกว่า 100% กลไกการทำงานจะเป็นลักษณะเปิดปิดเครื่องเป็นช่วงจังหวะ (Pulse) ซึ่งส่งโดยตรงต่อพฤติกรรมอุณหภูมิเนื่องจากมีช่วงที่สร้างพลังงานความร้อน และช่วงที่หยุดสร้างพลังงานความร้อน อีกเครื่องมือวัดทางความร้อนที่มีไม่สามารถใช้วัดข้อมูลความร้อนภายใต้สภาวะไมโครเวฟได้ กล่าวคือ ไม่สามารถใช้เทอร์โมคัปเปิลได้เนื่องจากเป็นโลหะ ในขณะที่อินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์สามารถวัดได้ที่ผิวหน้าวัสดุเท่านั้น ในขณะที่เครื่องมือวัดที่สามารถวัดพฤติกรรมขณะให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟได้นั้นมีราคาสูง (ไฟเบอร์ออปติก) ดังนั้นในการทดลอง จึงตั้งเงื่อนไขให้ใช้พลังงานไมโครเวฟ 700 วัตต์ หรือ 100% เท่านั้น และใช้การจับเวลารอจนสิ้นสุดการทดลอง ในแต่ละกรณีได้แก่ 15 วินาที 30 วินาที 45 วินาที และ 60 วินาที จากนั้นวัดอุณหภูมิที่ผิวตำแหน่งต่างๆ ด้วยอินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์

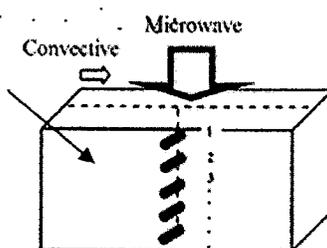
3.2 การทดลองการทำความร้อนด้วยระบบพาความร้อนที่ผิว

เพื่อให้สอดคล้องกับการทดลองในกรณีที่ 1 การทดลองจะให้ความร้อนจากสภาวะการพาความร้อนที่อุณหภูมิและความเร็วลมค่าเดียวตลอดการทดลองได้แก่ อุณหภูมิ $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และความเร็วลมประมาณ 2.5 m/s และใช้การจับเวลารอจนสิ้นสุดการทดลอง ในแต่ละกรณีได้แก่ 15 วินาที 30 วินาที 45 วินาที และ 60 วินาที จากนั้นวัดอุณหภูมิที่ผิวตำแหน่งต่างๆ ด้วยอินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์

3.3 การทดลองการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟร่วมกับระบบพาความร้อน

เพื่อให้สอดคล้องกับการทดลองในกรณีที่ 1 การทดลองจะให้ความร้อนจาก ไมโครเวฟ ร่วมกับการพาความร้อน โดยที่กำลังไมโครเวฟที่ใช้คือ 700 วัตต์ หรือ 100% ในขณะที่การพาความร้อนใช้อุณหภูมิและความเร็วลมค่าเดียวตลอดการทดลองคือ อุณหภูมิ 60 °C และความเร็วลม ประมาณ 2.5 m/s และใช้การจับเวลารอจนสิ้นสุดการทดลอง ในแต่ละกรณีได้แก่ 15 วินาที 30 วินาที 45 วินาที และ 60 วินาที จากนั้นวัดอุณหภูมิที่ผิวตำแหน่งต่างๆ ด้วยอินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์

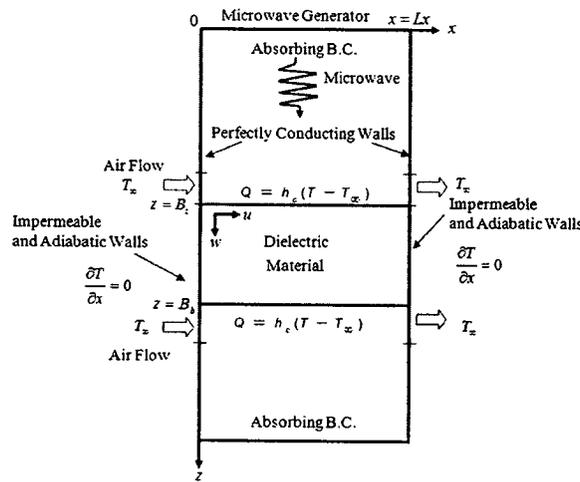
สำหรับตำแหน่งการวัดมี 5 ตำแหน่ง ตามความหนาของชิ้นงาน (50 mm) ตั้งแต่ตำแหน่ง ที่ ผิวหน้าด้านบนเป็นตำแหน่งที่ 1 (0 mm) ตำแหน่งจากผิวด้านบนลงมา 12.5 mm เป็นตำแหน่งที่ 2 ตำแหน่งตรงกลางเป็นตำแหน่งที่ 3 (25 mm) ตำแหน่ง 37.5 mm จากผิวด้านบนเป็นตำแหน่งที่ 4 และ ตำแหน่งผิวล่างเป็นตำแหน่งที่ 5 ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังภาพที่ 3-11



ภาพที่ 3-11 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิด้วยอินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ 5 ตำแหน่ง

4. การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำลองพฤติกรรมภายในเครื่องต้นแบบ

งานวิจัยอีกส่วนหนึ่งที่พัฒนาขนานกับการสร้างเครื่องต้นแบบคือการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ช่วยทำนายพฤติกรรมทางความร้อนที่เกิดขึ้นภายในวัสดุไดอิเล็กตริกจากพลังงานไมโครเวฟ ซึ่งใช้หลักการแบบจำลองจากหัวข้อที่ 1.4 - 1.7 ในบทที่ 2 เพื่อเขียนโปรแกรมออกมาแก้ปัญหาโดยมีรายละเอียดโดเมนทางฟิสิกส์ ทั้งภาพรวมและเงื่อนไขขอบเขตต่างๆ ดังภาพที่ 3-12



ภาพที่ 3-12 โดเมนทางฟิสิกส์

สำหรับรายละเอียดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นประกอบไปด้วย ผิวหน้าวัสดุที่มีการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนที่ผิว ซึ่งเป็นเงื่อนไขขอบเขตเปิดที่มีสมการสมดุลทางความร้อนดังนี้

$$-\lambda_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial z} = h_c (T - T_\infty). \tag{31}$$

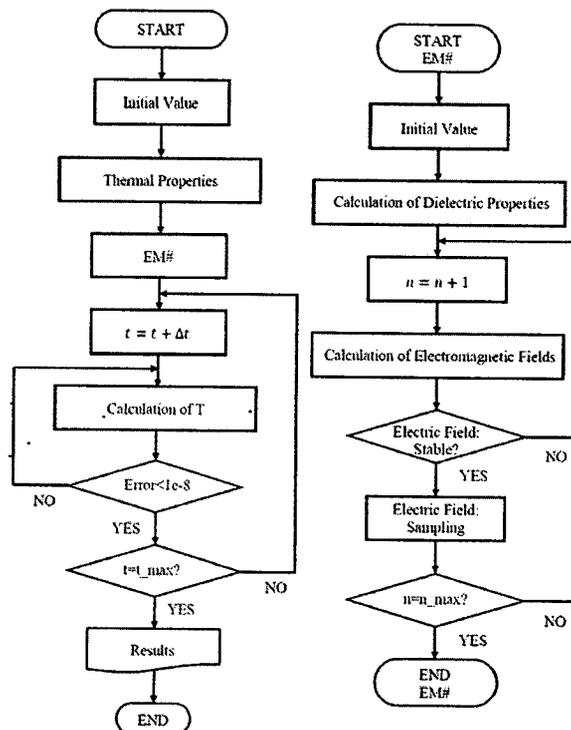
และรายละเอียดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นผิวหน้าปิดหุ้มด้วย ฉนวนซึ่งไม่มีการถ่ายเทความร้อน โดยมีสมการสมดุลทางความร้อนดังนี้

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \tag{32}$$

5. ขั้นตอนการคำนวณระเบียบวิธีเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม

ในการวิเคราะห์ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากไมโครเวฟจะต้อง อาศัยการวิเคราะห์ควบคู่กันระหว่างสมการการถ่ายเทความร้อน และสมการคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อใช้ทำนายพฤติกรรมภายในวัสดุ

ในการที่จะทำนายสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลา ส่วนการวิเคราะห์ทางด้านความร้อนจะใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม ซึ่งขั้นตอนการวิเคราะห์สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3-13



ภาพที่ 3-13 ขั้นตอนการวิเคราะห์ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

สำหรับวัสดุตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์จากแบบจำลอง จะใช้แตกต่างจากการทดลอง เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านข้อมูล และความซับซ้อนของแบบจำลอง โดยในการวิเคราะห์จะใช้กลุ่มเม็ดแก้วขนาดเล็กผสมน้ำตามสัดส่วนความชื้น ซึ่งมีสมบัติต่างๆ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุไดอิเล็กตริกสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

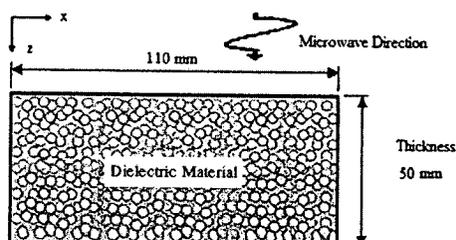
Particle size d(mm.)	Porosity ϕ (-)	Permeability K (m^2)
0.4	0.371	3.52×10^{-11}

สำหรับข้อมูลป้อนเข้าสำหรับสมบัติแม่เหล็กไฟฟ้า สมบัติทางความร้อน และสภาวะการทำความร้อนแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สมบัติแม่เหล็กไฟฟ้า สมบัติทางความร้อน และสภาวะการทำความร้อน

$\epsilon_0 = 8.85419 \times 10^{12} \text{ [F/m]}$	$\mu_0 = 4.0\pi \times 10^{-7} \text{ [H/m]}$
$\epsilon_{ra} = 1.0, \mu_{ra} = 1.0$	$\epsilon_{rp} = 5.1, \mu_{rp} = 1.0$
$\mu_{ri} = 1.0$	$\tan \delta_p = 0.01, \tan \delta_a = 0.00$
$\rho_a = 1.205 \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$\rho_l = 1,000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
$\rho_p = 2,500 \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$C_{pa} = 1.007 \text{ [kJ/(kg} \cdot \text{K)]}$
$C_{pp} = 0.80 \text{ [kJ/(kg} \cdot \text{K)]}$	$C_{pp} = 4.186 \text{ [kJ/(kg} \cdot \text{K)]}$
$\lambda_l = 0.610 \text{ [W/(m} \cdot \text{K)]}$	$\lambda_p = 1.0 \text{ [W/(m} \cdot \text{K)]}$
$\lambda_a = 0.0256 \text{ [W/(m} \cdot \text{K)]}$	$s = 0.8 \text{ (High lossy)}$
$T_{\infty} = 75^\circ\text{C (Hot air)}$	$s = 0.1 \text{ (Low lossy)}$
$h_c = 50 \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{K)]}$	$f = 2.45 \text{ [GHz]}$
$\text{Power} = 200 \text{ [Watt]}$	$T_{\text{int}} = 25^\circ\text{C}$

และขนาดของวัสดุไดอิเล็กทริกในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถแสดงขนาด โดยมีรายละเอียดดังภาพที่ 3-14



ภาพที่ 3-14 ขนาดวัสดุไดอิเล็กทริกในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์