

# การวิเคราะห์เชิงการทดลองของกระบวนการทำความร้อนในวัสดุไดอิเล็กตริก (กรณีศึกษา : น้ำและวัสดุพรุนอิ่มตัว) โดยใช้ไมโครเวฟติดท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (โหมด: TE<sub>10</sub>)

## Experimental Analysis of Microwave Heating of Dielectric Materials (Case study: Water layer and Saturated porous medium) Using a Rectangular Wave Guide (MODE: TE<sub>10</sub>)

วารารณ ชะอุม<sup>1</sup>, ธนายุทธ พจนโยธิน<sup>2</sup> และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช<sup>1\*</sup>

<sup>1,2</sup> หน่วยงานวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม (R.C.M.E.)

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ คลองหลวง ปทุมธานี 12120

โทร 0-2564-3001-9 โทรสาร 0-2564-3001-9 \*อีเมล ratphadu@engr.tu.ac.th

Waraporn Cha-um<sup>1</sup>, Thanayut Photyotin<sup>2</sup> and Phadungsak Rattanadecho<sup>1\*</sup>

<sup>1,2</sup> Research Center of Microwave Utilization in Engineering (R.C.M.E.)

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University (Rangsit Campus), Pathumthani

12120, Thailand, Tel: 0-2564-3001-9, Fax: 0-2564-3001-9, \*E-mail: [ratphadu@engr.tu.ac.th](mailto:ratphadu@engr.tu.ac.th)

### บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์เชิงทดลองกระบวนการทำความร้อนในวัสดุไดอิเล็กตริก โดยใช้ไมโครเวฟติดท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (โหมด TE<sub>10</sub>) ซึ่งวัสดุไดอิเล็กตริกที่ใช้ในงานวิจัย คือ น้ำและวัสดุพรุนชนิดอิ่มตัว โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาค้นคว้า ได้แก่ กำลังวัตต์ คลื่นไมโครเวฟที่เปลี่ยนแปลงไป ชนิดของวัสดุทดสอบซึ่งมีสมบัติไดอิเล็กตริกที่ต่างกัน ขนาดของวัสดุทดสอบ และตำแหน่งของวัสดุทดสอบภายในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม ที่มีต่ออัตราการดูดกลืนพลังงานของคลื่นไมโครเวฟ และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในวัสดุทดสอบ ผลที่ได้จากการวิจัยพบว่า กำลังวัตต์คลื่นไมโครเวฟที่เปลี่ยนแปลงไป ชนิดของวัสดุทดสอบซึ่งมีสมบัติไดอิเล็กตริกที่ต่างกัน ขนาดของวัสดุทดสอบ และตำแหน่งของวัสดุทดสอบภายในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม ล้วนมีผลต่ออัตราการดูดกลืนพลังงานของคลื่นไมโครเวฟ และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในวัสดุทดสอบทั้งสิ้น นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการดูดกลืนพลังงานของคลื่นไมโครเวฟ และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในวัสดุทดสอบจะขึ้นกับสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุไดอิเล็กตริกเป็นสำคัญ ซึ่งความรู้ดังกล่าวจะเป็นพื้นฐานของการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในอนาคต เพื่อให้ทำนายปรากฏการณ์พื้นฐานในกรณีทั่วไปได้

### Abstract

The present paper investigates the experimental analysis of the heating of dielectric materials by microwave with a

rectangular wave guide (mode: TE<sub>10</sub>). It was performed for two different dielectric materials: water layer and saturated porous medium. In this work, the microwave power level, kind of dielectric materials, size and location of dielectric material on the microwave power absorb and temperature distributions in dielectric material were examined. The results show all parameters that were studied have an effect on microwave power absorbed and temperature distribution in dielectric materials and major factor of microwave power absorbed and temperature distribution is dielectric properties of dielectric material. The results are basic for develop mathematic model in future to predict heat transfer phenomenon.

### 1. บทนำ

ปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีไมโครเวฟ (Microwave Technology) มาประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ มากมาย ไม่ว่าจะเป็นด้าน การสื่อสารซึ่งจะใช้ไมโครเวฟคลื่นสั้นในระบบเรดาร์หรือการสื่อสารผ่าน จานดาวเทียม และไมโครเวฟที่มีความยาวระดับเซนติเมตรในด้าน อุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การอบแห้ง การฆ่าเชื้อ การวัลคาไนซ์ยาง ธรรมชาติ การเร่งปฏิกิริยาเคมี การกำจัดสารพิษ และการกำเนิด พลาสมา เป็นต้น เนื่องด้วยข้อดีของการทำความร้อนด้วยคลื่น ไมโครเวฟที่มีหลายประการ อาทิเช่น 1. มีประสิทธิภาพทางความร้อน

สูง โดยรวมประมาณ 60-70 เปอร์เซ็นต์ 2.การทะลุทะลวงของพลังงาน ทำให้มีการกระจายของความร้อนสม่ำเสมอทั่วทั้งวัตถุ 3.ความสามารถในการเลือกรับความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟของวัสดุ ทำให้ไม่ทำลายหีบห่อของผลิตภัณฑ์เมื่อได้รับความร้อน 4.การควบคุมด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์อย่างทันทีทันใด ส่งผลให้อุณหภูมิสามารถเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีภายในเสี้ยววินาที 5.ประหยัดเนื้อที่และแรงงาน ลดจำนวนวัสดุและอุปกรณ์ที่เสีย เนื่องจากอุปกรณ์ทำงานส่วนใหญ่ไม่เคลื่อนที่และใช้เวลาในการทำงานน้อย 6.ไม่สร้างมลภาวะและมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เป็นต้น กล่าวถึงการศึกษาของ Metaxas และ Meredith [1] และ Saltiel และ Datta [2] ที่เกี่ยวกับบทบาทของการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในกระบวนการทำความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ และงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟตั้งอ้างอิงรายการที่ [3-11] พบว่า โดยส่วนมากในการศึกษาที่ก่อนหน้านี้ งานวิจัยมักเน้นที่ การสร้างแบบจำลองของกระบวนการทำความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟในวัตถุแข็ง และมีเพียงเล็กน้อยที่ศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟในชั้นของเหลว ที่พิจารณาในหลายมิติ [1-1] ดังนั้น งานวิจัยฉบับนี้จึงเป็นการนำเสนอการวิเคราะห์เชิงทดลองกระบวนการทำความร้อนในวัสดุไดอิเล็กตริกโดยใช้ไมโครเวฟติดท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (โหมด TE<sub>10</sub>) ซึ่งวัสดุไดอิเล็กตริกที่ใช้ในงานวิจัย คือ น้ำและวัสดุพูนชนิดอิมิตัว ตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ กำลังวัตต์คลื่นไมโครเวฟที่เปลี่ยนแปลงไป ชนิดของวัสดุทดสอบซึ่งมีสมบัติไดอิเล็กตริกที่ต่างกัน ขนาดของวัสดุทดสอบ และตำแหน่งของวัสดุทดสอบภายในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม ที่มีต่ออัตราการดูดกลืนพลังงานของคลื่นไมโครเวฟ และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในวัสดุทดสอบ ผลที่ได้จากการวิจัยนี้จะเป็นพื้นฐานของการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในอนาคต เพื่อใช้ทำนายปรากฏการณ์พื้นฐานในกรณีทั่วไปได้

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ความยาวคลื่นและความลึกในการทะลุทะลวง (Wavelength and Penetration Depth)

ค่า Dielectric Constant ( $\epsilon'$ ) และ Loss Tangent Coefficient ( $\tan\delta$ ) สามารถใช้ประมาณความลึกในการทะลุทะลวงได้ ความลึกในการทะลุทะลวง หรือ ระยะทางที่สนามไฟฟ้าทะลุเข้าไปได้ (Penetration Depth) สามารถคำนวณได้จาก (Barringer et al [2-2])

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

พบว่า เมื่อค่า Dielectric Constant และ Loss Tangent Coefficient เปลี่ยน ความลึกในการทะลุทะลวงและสนามไฟฟ้าภายในวัสดุไดอิเล็กตริกก็จะเปลี่ยนด้วย คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านวัสดุไดอิเล็กตริกจะถูกดูดซับและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนซึ่งเราเรียกว่า การกำเนิดปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (Volumetric Internal

Heat Generation, Q) โดยปริมาณภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรนั้นสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในวัสดุไดอิเล็กตริกแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้ (Rattanadecho et al [2-3])

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

เมื่อ E คือ ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

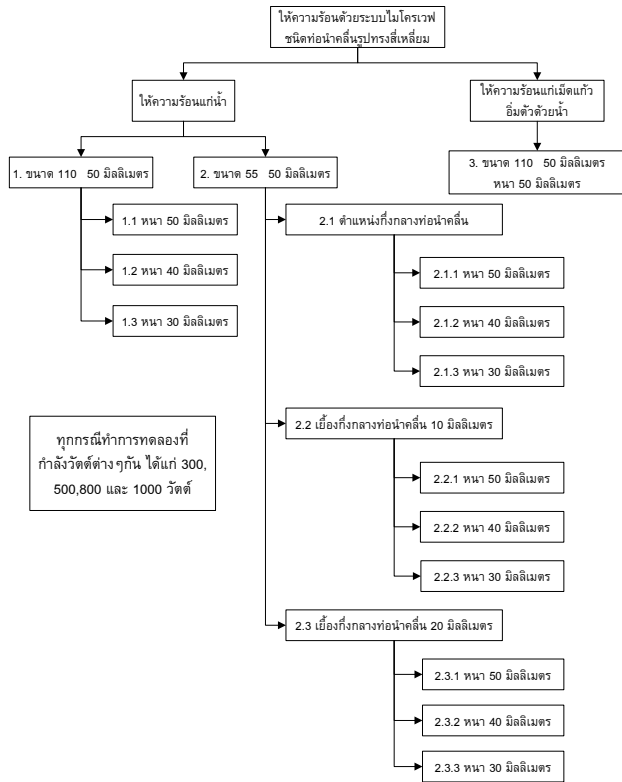
จากสมการด้านบน ค่าพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับจะแปรผันตรงกับความถี่ของสนามไฟฟ้า ค่า Dielectric Loss Factor และค่ากำลังสองของสนามไฟฟ้า พบว่าหากค่า Dielectric Constant และค่า Dielectric Loss Tangent Coefficient ของวัสดุไดอิเล็กตริก มีค่ามากจะส่งผลให้การดูดซับพลังงานจากไมโครเวฟ และปริมาณความร้อนเกิดขึ้นมากขึ้นตาม แต่ถ้าค่า Dielectric Constant และค่า Dielectric Loss Tangent Coefficient มีค่าน้อย, คลื่นไมโครเวฟจะทะลุผ่านวัสดุไดอิเล็กตริกหรือชิ้นงานทดสอบโดยไม่เกิดความร้อนขึ้น สมการ (2) มีความสำคัญในการศึกษาความสามารถในการดูดซับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กตริกเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าที่มีความถี่สูง อย่างไรก็ตาม อันตรกิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและวัสดุไดอิเล็กตริกก็ขึ้นอยู่กับ Dielectric Property ของวัสดุนั้นด้วย หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ Dielectric Property ขึ้นอยู่กับการทำไมโครเวฟไปประยุกต์ใช้งานในกระบวนการต่าง ๆ เช่น การทำความร้อน การอบแห้ง หรือการหลอมเหลว เป็นต้น (Rattanadecho et al. [2-4])

## 3. เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

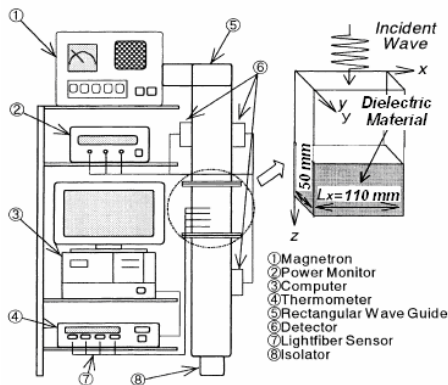
การทดลองทำการแบ่งออกเป็น 3 ตอน คือ ตอนที่ 1 การทดลองให้ความร้อนแก่น้ำด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยบรรจุในภาชนะที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม ตอนที่ 2 การทดลองให้ความร้อนแก่น้ำด้วยคลื่นไมโครเวฟเช่นเดียวกัน แต่ขนาดของภาชนะบรรจุมีความกว้างเพียงครึ่งหนึ่งของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม และทำการทดสอบโดยวางตำแหน่งภาชนะบรรจุต่างกัน และตอนที่ 3 การทดลองให้ความร้อนแก่วัสดุพูนชนิดอิมิตัว (เม็ดแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 มิลลิเมตร ผสมกับน้ำ จนมีความอิมิตัวเท่ากับ 1) ด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยบรรจุในภาชนะที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม ทั้งนี้วัสดุทดสอบในทุกตอนมีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 28°C ขั้นตอนการทดลองทั้งหมดแสดงได้ตามแผนภูมิที่ 3.1

รูปที่ 3.1 แสดงอุปกรณ์การทดลองสำหรับกระบวนการทำความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ โหมด TE<sub>10</sub> ความถี่ 2.45 จิกะเฮิร์ต คลื่นไมโครเวฟถูกผลิตจากแมกนีตรอน (MICRO DENSHI., model UM-1500) และถูกส่งไปตามแกน z ของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาดพื้นที่หน้าตัด 109.22 × 54.61 ตารางมิลลิเมตร ที่บริเวณด้านบนและล่างของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมจะใส่เข้าไป เพื่อดูดซับคลื่นไมโครเวฟที่สะท้อนและทะลุผ่านวัตถุตัวอย่าง เป็นการป้องกันการถูกทำลายของแมกนีตรอนกำลังของคลื่นไมโครเวฟที่สะท้อนและทะลุผ่านวัตถุตัวอย่าง จะถูกวัดค่าโดยวัตต์มิเตอร์ที่ใช้ Directional coupler (MICRO DENSHI., model DR-5000) วัตถุตัวอย่างที่ทำการศึกษาคือ น้ำและวัสดุพูนชนิดอิมิตัว ใส่เข้าไปในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม ภาชนะ

บรรจุตัวตัวอย่างทำจากโพลีโพลีเอทิลีนหนา 0.75 มิลลิเมตร การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในวัตถุตัวอย่างวัดค่าโดยใช้ Light fiber sensors (LUXTRON Fluoroptic Thermometer., model 790, accurate to  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ) ที่ติดตั้งกึ่งกลางของวัตถุตัวอย่างและตำแหน่งต่างๆในช่วงระยะ 5 มิลลิเมตร นอกจากนี้ยังใช้กล้องอินฟราเรดในการวัดค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในวัตถุตัวอย่าง ในระนาบ x-z อีกด้วย



×  
แผนภูมิที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการทดลอง



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของระบบไมโครเวฟชนิดท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม

#### 4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

##### 4.1 อิทธิพลเนื่องมาจากสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ

จากการทดลองให้ความร้อนแก่น้ำพบว่า บริเวณผิวด้านบน(ตามแนวแกน Z) ที่รับคลื่นไมโครเวฟ จะมีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิต่อ

เวลาสูงกว่าบริเวณอื่นๆ ทั้งนี้เพราะ น้ำเป็นวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีความสามารถในการดูดซับคลื่นไมโครเวฟได้ดี (High Lossy Material) เมื่อคลื่นไมโครเวฟตกกระทบบริเวณผิวน้ำ คลื่นบางส่วนสะท้อนกลับและคลื่นส่วนที่เหลือจะทะลุผ่านผิวน้ำ สำหรับส่วนที่สามารถทะลุผ่านผิวน้ำจะถูกดูดซับเกือบทั้งหมด มีน้อยมากที่ทะลุผ่านชั้นน้ำ (จากตารางผลการทดลองที่ 4.1 fwd คือกำลังวัตต์คลื่นไมโครเวฟที่เคลื่อนที่ไปยังน้ำ และ rev คือกำลังวัตต์คลื่นไมโครเวฟที่ย้อนกลับจากผิวน้ำ) และเมื่อวิเคราะห์ค่าความลึกทะลุทะลวง (Penetration Depth) (กำลังของไมโครเวฟจะลดลงเหลือ 0.37 เท่าเทียบจากผิวน้ำวัสดุที่มีความลึกที่ตำแหน่งดังกล่าว ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (1) อธิบายในหัวข้อที่ 2) โดยใช้คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำจาก [4-2] (ซึ่งแปรผันกับอุณหภูมิ) และแสดงผลในตารางที่ 4.2 พบว่า ค่าความลึกทะลุทะลวงมีค่าน้อยกว่าความหนาของวัสดุ ส่งผลให้สามารถใช้กฎของแลมเบิร์ต (Lambert's Law) วิเคราะห์ได้ จากที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าในกรณีนี้ น้ำจะมีการดูดซับพลังงานไมโครเวฟสูงบริเวณผิวน้ำวัสดุและลดลงเป็นลักษณะเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะความลึก ดังนั้นผิวด้านล่างของน้ำจะได้รับคลื่นที่มีพลังงานน้อยกว่าผิวด้านบนอย่างชัดเจนเมื่ออ้างอิงจากกฎของแลมเบิร์ต และเมื่อวิเคราะห์ร่วมกับผลการทดลองในส่วนของการกระจายอุณหภูมิของน้ำ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ที่ได้รับพลังงานไมโครเวฟพบว่ามีความสอดคล้องกัน นอกจากนี้เมื่อเทียบตามแนวนอน (แกน X) พบว่า บริเวณกึ่งกลางจะมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิต่อเวลาสูงที่สุด เป็นผลมาจากคลื่นไมโครเวฟแบบโหมด  $\text{TE}_{10}$  ที่ใช้ในการทดลองซึ่งจะมีความหนาแน่นของสนามไฟฟ้ามากบริเวณกึ่งกลางของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 4.1 และแผนภูมิที่ 4.1

ในการทำการทดลองให้ความร้อนแก่วัสดุพูนชนิดอิมิตัว พบว่า บริเวณกึ่งกลางตามแนวนอน (แกน X) เป็นบริเวณที่มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิต่อเวลาสูงที่สุดเช่นเดียวกับกรณีของน้ำ แต่แตกต่างกันในส่วนของการกระจายอุณหภูมิตามระยะความลึก (แกน Z) ซึ่งพฤติกรรมที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ดังนี้ ในกรณีที่วัสดุพูนซึ่งกำหนดให้เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติไดอิเล็กตริกในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟต่ำมาก (Low Lossy Material) หากองค์ประกอบของวัสดุทดลองประกอบไปด้วยกลุ่มเม็ดแก้วและช่องว่างภายในอิมิตัวไปด้วยอากาศ (ภายในไม่มีความชื้น) การดูดซับพลังงานภายในบริเวณวัสดุจะมีลักษณะใกล้เคียงกับสภาวะที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านอากาศ อ้างอิงจาก [1-1] นอกจากนั้นเมื่อทำการคำนวณค่าความลึกทะลุทะลวง (สมการที่ (1)) ของเม็ดแก้วและกลุ่มเม็ดแก้วที่อิมิตัวด้วยอากาศพบว่า มีค่าสูงมาก (ดังตารางที่ 4.3) ซึ่งข้อมูลที่ได้สนับสนุนกันเป็นอย่างดี เมื่อนำวัสดุพูนซึ่งมีค่าความพูนเท่ากับ 0.385 [4-4] มาทำให้อิมิตัวด้วยน้ำ สิ่งที่น่าประจักษ์ชัดคือการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยของสมบัติไดอิเล็กตริกและค่าความลึกทะลุทะลวงในวัสดุอันเกิดจากการรวมกันของน้ำ (High Lossy Material) และกลุ่มเม็ดแก้ว (Low Lossy Material) ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ส่งผลให้เกิดพฤติกรรมดูดซับพลังงานไมโครเวฟที่แตกต่างจากกรณีของกลุ่มเม็ดแก้วแห้งและน้ำ จากผลการทดลองตอนที่ 3 ในรูปที่ 4.2 และแผนภูมิที่ 4.2 และข้อมูลค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกในตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบกับกรณีวัสดุเป็นน้ำแสดงให้เห็นว่า คุณสมบัติไดอิเล็กตริกส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่น

และรูปแบบการดูดซับพลังงานไมโครเวฟในตัววัสดุ ค่าความลึกทะลุทะลวงของกลุ่มเม็ดแก้วที่อิมิตด้วยน้ำมีค่ามากกว่าค่าความลึกทะลุทะลวงของน้ำ และมีค่ามากกว่าความหนาของวัสดุทำให้พฤติกรรมของการดูดซับพลังงานไมโครเวฟเปลี่ยนแปลงไป และไม่สามารถอธิบายได้ด้วยกฎของแลมเบิร์ตเนื่องจากการดูดซับพลังงานที่เกิดขึ้นไม่ได้เกิดมากที่สุดที่บริเวณผิวหน้าวัสดุที่รับคลื่นไมโครเวฟ สำหรับในกรณีที่ค่าความลึกทะลุทะลวงมีค่ามากกว่าความหนาวัสดุคลื่นไมโครเวฟจะสามารถเคลื่อนผ่านทะลุวัสดุออกไปได้ (สังเกตได้จากตารางที่ 4.4) และมีคลื่นบางส่วนที่เกิดการสะท้อนที่ผิวรอยต่อระหว่างผิวล่างวัสดุและอากาศ ส่งผลให้เกิดคลื่นนิ่งภายในวัสดุขึ้น หากสภาวะคลื่นนิ่งเหมาะสมจะทำให้วัสดุเกิดความร้อนภายในกึ่งกลางวัสดุ สำหรับกรณีกลุ่มเม็ดแก้วนี้เมื่อสังเกตถึงการกระจายอุณหภูมิพบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสูงบริเวณผิวด้านล่างแสดงว่าคลื่นนิ่งที่เกิดขึ้นจะมีความเข้มสูงที่บริเวณด้านล่าง

จากผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า สมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุในการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟมีผลต่อรูปแบบการกระจายความร้อนในวัสดุเป็นอย่างมาก ซึ่งหากกรณีศึกษาเป็นกรณีการอบแห้ง อิทธิพลดังกล่าวจะยิ่งมีความชัดเจนเนื่องจากน้ำ (High Lossy Material) หรือความชื้นในวัสดุจะเกิดการระเหย ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติไดอิเล็กตริกวัสดุเปลี่ยน ทำให้พฤติกรรมของการดูดซับและการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าภายในวัสดุเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งในทางปฏิบัติการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอาจส่งผลให้วัสดุที่ทำการอบแห้งเกิดความเสียหายได้ เช่น เกิดปรากฏการณ์เทอร์มอลรันเอเวย์ (Thermal Runaway Effect) [4-5] (วัสดุที่อบแห้งร้อนขึ้นอีกครั้งเมื่อปริมาณความชื้นเฉลี่ยภายในต่ำ)

ตารางที่ 4.1 กำลังวัตต์ด้านบนและด้านล่างวัสดุทดลอง (กรณี 1.1 กำลังวัตต์ไมโครเวฟ 1,000 วัตต์)

เวลา (วินาที)	กำลังด้านบน (วัตต์)		กำลังด้านล่าง (วัตต์)	
	fwd	rev	fwd	rev
0	1.00	0.54	0.00	0.00
30	1.00	0.54	0.00	0.00
60	1.00	0.57	0.01	0.00
90	1.00	0.58	0.01	0.00
120	1.00	0.55	0.02	0.01

ตารางที่ 4.2 ค่าความลึกทะลุทะลวงของน้ำจาก [5-2]

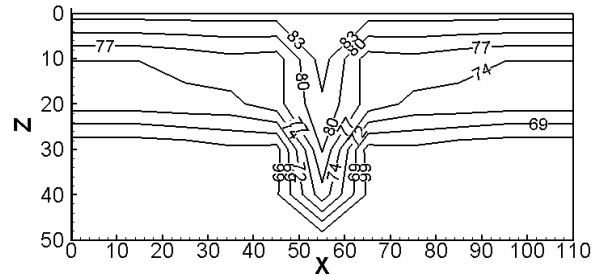
อุณหภูมิ (°C)	20	40	60	80
ค่าความลึกทะลุทะลวง (cm)	2.56	4.46	6.40	8.42

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติไดอิเล็กตริกและค่าความลึกทะลุทะลวง

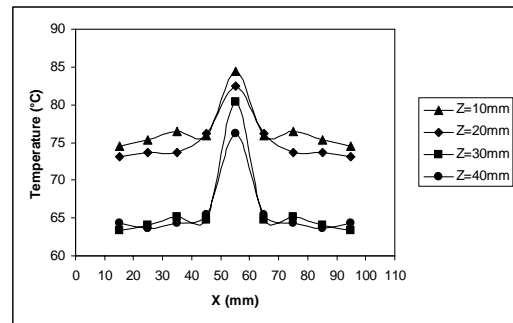
ชนิด	$\epsilon_r$	$\tan \delta$	$D_p (m)$
เม็ดแก้ว	5.1	0.01	1.80
เม็ดแก้ว, ความพรุน 0.385	3.5215	0.0062	3.53
เม็ดแก้ว, ความพรุน 0.385, อิมิน้ำ	33.37	0.065	0.107

ตารางที่ 4.4 กำลังวัตต์ด้านบนและด้านล่างวัสดุทดลอง (ตอนที่ 3 กำลังวัตต์ไมโครเวฟ 1,000 วัตต์)

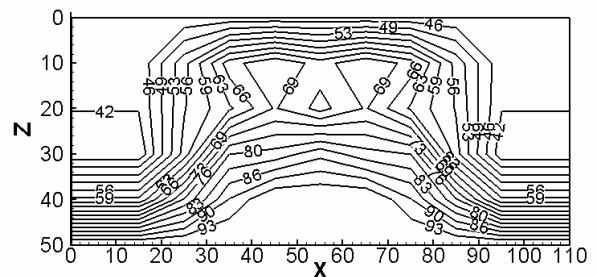
เวลา (วินาที)	กำลังด้านบน (วัตต์)		กำลังด้านล่าง (วัตต์)	
	fwd	rev	fwd	rev
0	1.00	0.37	0.01	0.00
30	0.97	0.35	0.04	0.00



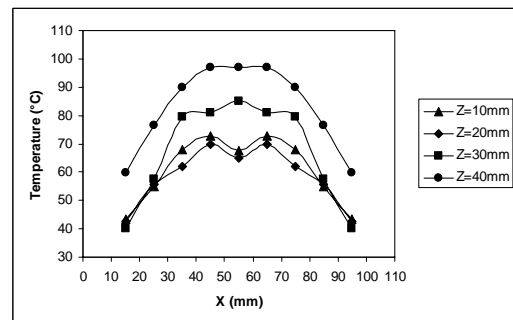
รูปที่ 4.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ที่เวลา 120 วินาที กรณี 1.1 กำลังวัตต์ไมโครเวฟ 800 วัตต์



แผนภูมิที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะตามแนวนอน (แกน X) ที่เวลา 120 วินาที กรณี 1.1 กำลังวัตต์ไมโครเวฟ 800 วัตต์



รูปที่ 4.2 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ที่เวลา 40 วินาที ตอนที่ 3 กำลังวัตต์ไมโครเวฟ 800 วัตต์



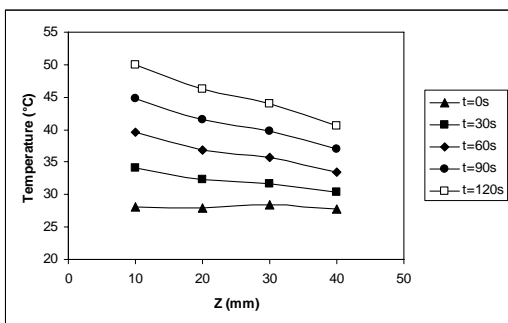
แผนภูมิที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะตามแนวนอน (แกน X) ที่เวลา 40 วินาที ตอนที่ 3 กำลังวัตต์ไมโครเวฟ 800 วัตต์

#### 4.2 อิทธิพลเนื่องจากการไหลวนของของไหลในวัสดุ

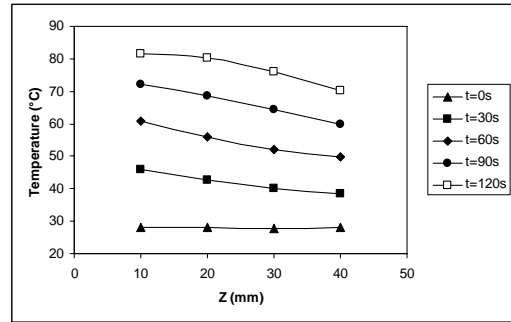
ในการทดลองเปรียบเทียบระหว่างกรณีน้ำและกลุ่มเม็ดแก้วซึ่งอิมิตด้วยน้ำ นอกจากการกระจายอุณหภูมิในระนาบแกน Z ของวัสดุที่ไม่เหมือนกันแล้ว ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิในระนาบแกน X ยังแตกต่างกันอีกด้วย กล่าวคือในกรณีของน้ำอุณหภูมิจะมีการกระจายอุณหภูมิที่มีลักษณะสม่ำเสมอมากกว่ากรณีเม็ดแก้วซึ่งอิมิตด้วยน้ำ ซึ่งพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเป็นผลโดยตรงจากลักษณะการไหลวนของของไหลในวัสดุภายใต้พฤติกรรมไมโครเวฟ โดยในกรณีของน้ำการไหลจะเป็นอิสระไม่มีแรงต้านจากตัววัสดุ(โดยลักษณะการไหลวนจะมีลักษณะอ้างอิงจาก [4-3]) ส่งผลให้อุณหภูมิสูงที่บริเวณตรงกลาง (เนื่องจากระบบโหมด TE<sub>10</sub>) เกิดการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบการนำและความร้อนไปยังบริเวณที่อุณหภูมิต่ำกว่าซึ่งอยู่บริเวณขอบ ดังนั้นผลต่างระหว่างอุณหภูมิบริเวณตรงกลางและที่ขอบในระนาบแกน X จึงมีความแตกต่างกันน้อย ดังรายละเอียดในแผนภูมิที่ 4.1 สำหรับในกรณีกลุ่มเม็ดแก้วซึ่งอิมิตด้วยน้ำ พบว่า ผลต่างอุณหภูมิที่ระนาบแกน X ที่กึ่งกลางและที่ขอบมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนดังแผนภูมิที่ 4.2 ทั้งนี้เนื่องจากการไหลของของไหลภายในวัสดุนั้นไม่สามารถเคลื่อนตัวได้อย่างเป็นอิสระ เนื่องจากการต้านทานการไหลของโครงสร้างแข็ง (กลุ่มเม็ดแก้ว) ซึ่งลักษณะการไหลภายในดังกล่าวอธิบายไว้ในกฎของดาร์ซี (Darcy's Law) นอกจากนี้ที่กล่าวข้างต้นเกี่ยวกับการไหลวนของน้ำในระนาบแกน X แล้ว ในกรณีระนาบแกน Z ยังมีข้อมูลที่น่าสนใจ กล่าวคือ ในการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ ต่าง ๆ กัน การกระจายอุณหภูมิในระนาบแกน Z จะเปลี่ยนไป ซึ่งการกระจายอุณหภูมิจะมีความสม่ำเสมอมากขึ้นในกรณีที่กำลังวัตต์สูง (เช่น กรณี 1,000 วัตต์ ในแผนภูมิที่ 4.4) เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังวัตต์ต่ำ (ในแผนภูมิที่ 4.3) แสดงว่า กำลังวัตต์ส่งผลต่อพฤติกรรมการเกิดความร้อนและอุณหภูมิ รวมทั้งลักษณะการไหลวนของน้ำซึ่งการไหลวนจะเกิดขึ้นมากเมื่อกำลังวัตต์คลื่นไมโครเวฟสูง และสำหรับลักษณะการไหลวนในกรณีน้ำที่ส่งผลต่อการกระจายอุณหภูมิที่เวลาต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.5 และ 4.6

#### 4.3 อิทธิพลเนื่องมาจากกำลังวัตต์ของคลื่นไมโครเวฟ

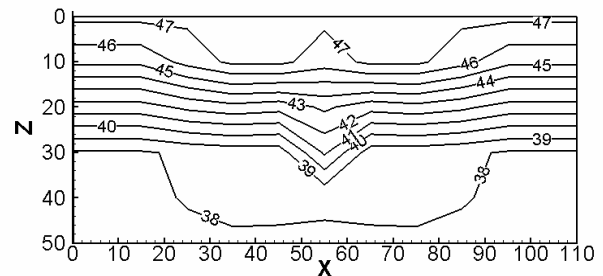
จากผลการทดลองพบว่า เมื่อกำลังวัตต์ของคลื่นไมโครเวฟเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิต่อเวลาภายในวัสดุเพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อกำลังวัตต์ไมโครเวฟเพิ่มขึ้น ความเข้มของสนามไฟฟ้าก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วยซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีและ



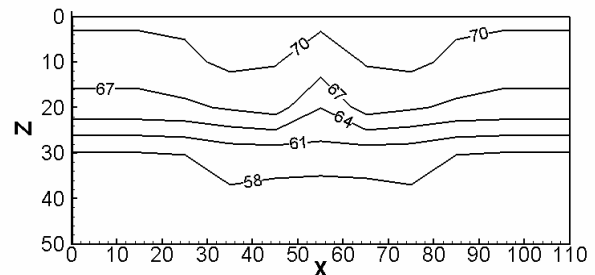
แผนภูมิที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะความหนา ที่เวลาต่าง ๆ X = 55 มิลลิเมตร กรณี 1.1 กำลังวัตต์ไมโครเวฟ 300 วัตต์



แผนภูมิที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะความหนา ที่เวลาต่าง ๆ X = 55 มิลลิเมตร กรณี 1.1 กำลังวัตต์ไมโครเวฟ 1,000 วัตต์



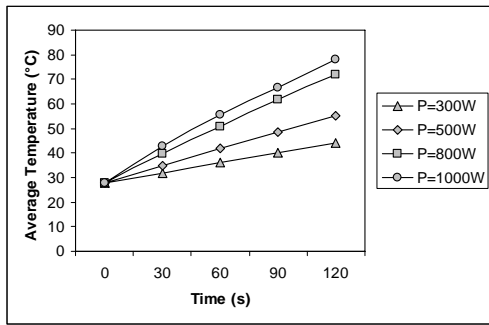
รูปที่ 4.5 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ที่เวลา 100 วินาที กรณี 1.1 กำลังวัตต์ไมโครเวฟ 300 วัตต์



รูปที่ 4.6 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ที่เวลา 80 วินาที กรณี 1.1 กำลังวัตต์ไมโครเวฟ 1,000 วัตต์

สามารถอธิบายได้ตามสมการที่ (2) นอกจากนี้ เมื่อกำลังวัตต์ไมโครเวฟมากขึ้น คลื่นจะสามารถทะลุทะลวงเข้ามาให้ความร้อนภายในได้มากขึ้น (อธิบายได้จากผลการวัดพลังงานไมโครเวฟที่ทะลุผ่านผิวน้ำดังตารางที่ 4.5 และ 4.6) ส่งผลให้มีการกระจายตัวของความร้อนอย่างทั่วถึง ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวจะเกิดควบคู่กับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำซึ่งมีค่าความลึกทะลุทะลวงสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (ดังตารางที่ 4.2) นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์เพิ่มเติม ได้ดังนี้ ในกรณีกลุ่มเม็ดแก้วการให้กำลังวัตต์คลื่นไมโครเวฟที่มากเกินไปจะส่งผลให้อุณหภูมิที่ผิวด้านล่างสูงมากกว่าด้านบนมาก ดังนั้นกำลังวัตต์คลื่นไมโครเวฟที่น้อย ๆ จึงเหมาะกับการให้ความร้อนแก่เม็ดแก้วซึ่งอิมิตด้วยน้ำเพื่อลดผลต่างอุณหภูมิดังกล่าว อย่างไรก็ตาม สำหรับวัสดุที่มีคุณสมบัติไดอิเล็กตริกต่างกันที่ กำลังวัตต์เท่ากันพบว่าอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิจะไม่เท่ากัน (ดังแผนภูมิที่ 4.1 และ 4.2 ซึ่งใช้กำลังวัตต์ไมโครเวฟ 800 วัตต์เท่ากัน แต่กรณีของน้ำจะใช้เวลามากกว่าในการเพิ่มอุณหภูมิ) ซึ่งเป็นผลมาจากสมการที่ (2) และสมบัติทางความร้อน

ของวัสดุซึ่งแตกต่างกัน สำหรับกรณีนี้สมบัติทางความร้อนสามารถหาได้จาก [4-4]



แผนภูมิที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยทุกจุดที่วัดกับเวลา กรณี 1.1 กำลังวัตต์ไม่โครเวฟต่างกัน

ตารางที่ 4.5 กำลังวัตต์ด้านบนและด้านล่างวัสดุทดลองกรณี 300 วัตต์

เวลา (วินาที)	กำลังด้านบน (วัตต์)		กำลังด้านล่าง (วัตต์)	
	fwd	rev	fwd	rev
0	0.30	0.16	0.00	0.00
30	0.30	0.16	0.00	0.00
60	0.30	0.16	0.00	0.00
90	0.30	0.16	0.00	0.00
120	0.30	0.15	0.00	0.00

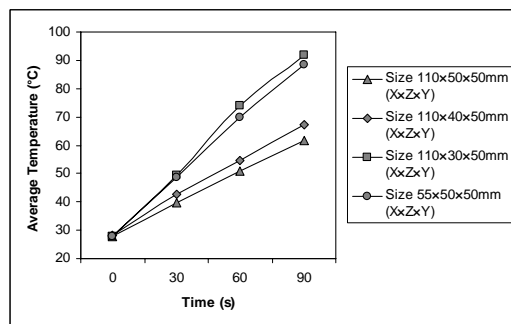
ตารางที่ 4.6 กำลังวัตต์ด้านบนและด้านล่างวัสดุทดลองกรณี 800 วัตต์

เวลา (วินาที)	กำลังด้านบน (วัตต์)		กำลังด้านล่าง (วัตต์)	
	fwd	rev	fwd	rev
0	0.80	0.41	0.00	0.00
30	0.80	0.39	0.01	0.00
60	0.80	0.40	0.02	0.00
90	0.80	0.41	0.04	0.00
120	0.80	0.41	0.05	0.00

#### 4.4 อิทธิพลเนื่องมาจากขนาดของวัสดุทดลอง

ในการศึกษาที่จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คืออิทธิพลของความหนา (แกน Z) และอิทธิพลของความกว้าง (แกน X) จากกฎเกณฑ์ทั่วไปซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าเมื่อวัสดุมีปริมาตรลดลงในขณะที่ การป้อนพลังงานความร้อนเท่าเดิม อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิภายในวัสดุจะสูงขึ้นเนื่องจากปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรสูงขึ้นซึ่งหากปริมาตรวัสดุมีขนาดเล็กลงครั้งหนึ่ง อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิก็จะเพิ่มเร็วขึ้นเป็น 2 เท่า แต่ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับกรณีการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟนั้นพบความน่าสนใจเนื่องจากมิติของวัสดุมีผลต่อการเกิดความร้อนหรืออัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ซึ่งเกิดทั้งในกรณีน้ำและกลุ่มเม็ดแก้วซึ่งอ้อมตัวด้วยน้ำ สำหรับการวิเคราะห์ในส่วนนี้จะยกตัวอย่างการทดลองในกรณีของน้ำเนื่องจากการศึกษาที่ครอบคลุมมากกว่ากลุ่มเม็ดแก้ว โดยตั้งตัวอย่างในกรณีการทำความร้อนที่ 800 วัตต์ ดังแผนภูมิที่ 4.6 จากการศึกษา พบว่า สำหรับระดับความหนาที่

แตกต่างกัน (Z) ความหนา 50 และ 40 มิลลิเมตรมีความแตกต่างของอัตราการเพิ่มอุณหภูมิไม่มากนัก โดยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิในกรณี 40 มิลลิเมตรมีมากกว่าเล็กน้อย แต่เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีความหนา 30 มิลลิเมตรพบว่า เกิดความแตกต่างของอัตราการเพิ่มอุณหภูมิอย่างชัดเจน จากการศึกษาจากงานวิจัยต่าง ๆ พบว่า เมื่อวัสดุมีความหนาใกล้เคียงความลึกทะลุทะลวง คลื่นจะสามารถทะลุทะลวงผ่านวัสดุและเกิดการสะท้อนที่ผิวรอยต่อด้านล่างของวัสดุทำให้เกิดคลื่นนิ่งและส่งผลให้เกิดความร้อนสูงอย่างรวดเร็ว ซึ่งคลื่นนิ่งดังกล่าวทำให้เกิดพฤติกรรมอื่น ๆ ตามมา เช่นเกิดความร้อนที่ผิวด้านล่าง หรือตรงกลางวัสดุ รวมทั้งปรากฏการณ์เทอร์มอลร่นอเวย์ซึ่งอธิบายมาก่อนหน้านี้ได้ [4-5] ซึ่งค่าความลึกทะลุทะลวงของน้ำมีค่าประมาณ 30 มิลลิเมตรที่อุณหภูมิ 20-40 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 4.2 จะมีความเป็นไปได้สูงที่จะเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นจนทำให้อุณหภูมิวัสดุสูงมากกว่าที่ควรจะเป็นได้ และเมื่อศึกษาถึงกรณีความกว้าง (X) เล็กลงเป็นครึ่งหนึ่ง พบว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสูงขึ้นแต่ยังมีค่าน้อยกว่ากรณีความหนา 30 มิลลิเมตร ทั้งนี้เมื่อเทียบปริมาตรแล้ว ที่ความหนา 30 มิลลิเมตรมีปริมาตรมากกว่าจึงทำให้เห็นถึงอิทธิพลของคลื่นนิ่งว่ามีผลต่ออุณหภูมิวัสดุเป็นอย่างมาก และมีผลมากกว่าปริมาตรของวัสดุ จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ารูปทรง มิติ และปริมาตร ของวัสดุมีอิทธิพลต่อการเกิดความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ ดังนั้นในการออกแบบอุปกรณ์การให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟจึงต้องคำนึงถึงรูปทรงของวัสดุเป็นสำคัญด้วย

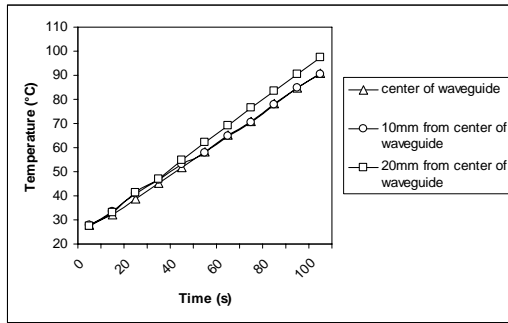


แผนภูมิที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยทุกจุดที่วัดกับเวลา ตอนที่ 1 กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์

#### 4.5 อิทธิพลเนื่องมาจากตำแหน่งของวัสดุทดลองภายในห้องนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม

ในการทดลองตอนที่ 2 พบว่า วัสดุทดลองที่วางตำแหน่งเยื้องกึ่งกลางห้องนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม 20 มิลลิเมตรมีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิต่อเวลาสูงที่สุด รองลงมาคือตำแหน่งเยื้องกึ่งกลาง 10 มิลลิเมตร และตำแหน่งกึ่งกลางห้องนำคลื่นวัสดุมีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิต่อเวลาต่ำที่สุด ดังแผนภูมิที่ 4.7 กรณีวัสดุทดลองหนา 50 มิลลิเมตร ทั้งนี้เนื่องจากเป็นที่ทราบกันดีว่าคลื่นไมโครเวฟโหมด TE<sub>10</sub> โดยปกติจะมีความเข้มสูงสุดที่กึ่งกลางของห้องนำคลื่นในกรณีที่เป็นการทอเปล่า และกรณีที่วัสดุทดลองมีขนาดเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของห้องนำคลื่น แต่ในกรณีที่วัสดุมีขนาดไม่เต็มห้องนำคลื่น จะส่งผลให้เกิดการสะท้อนของคลื่นอย่างไม่เป็นระเบียบแน่นอนเกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ผ่าน 2 ตัวกลางในเวลาเดียวกัน (บางส่วนเคลื่อนที่ผ่านวัสดุ บางส่วนเคลื่อนที่

ผ่านอากาศ) ซึ่งลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นดังกล่าวจะกลายเป็นแบบมัลติโหมดทันที (ตัวอย่างไมโครเวฟมัลติโหมด เช่น เตาไมโครเวฟสำหรับครัวเรือน) ส่งผลให้พฤติกรรมคลื่นหนึ่งในวัสดุเปลี่ยนไปและไม่สามารถทำนายได้ชัดเจนต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น และจากการทดลองพบว่ายังมีการวางเยื้องตำแหน่งกึ่งกลางมากพฤติกรรมคลื่นหนึ่งจะยังส่งผลให้เกิดการดูดซับพลังงานไมโครเวฟในวัสดุและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนสูงมากขึ้น ซึ่งเป็นไปได้ว่าไมโครเวฟมัลติโหมดที่เกิดขึ้นส่งผลให้เกิดการสั่นพ้องอย่างรุนแรง (Resonance) กว่ากรณีวางวัสดุไว้ตรงกึ่งกลาง



แผนภูมิที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ระยะ  $Z = 30$  มิลลิเมตร  $X = 27.5$  มิลลิเมตร กับเวลา ตอนที่ 2 กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์ [2]

## 5. สรุปผลงานวิจัย

จากผลการทดลองให้ความร้อนด้วยระบบท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมโหมด  $TE_{10}$  แก้วสุทุดลอง 2 ชนิดได้แก่ น้ำและเม็ดแก้วซึ่งอิมมิดด้วยน้ำ พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในวัสดุไดอิเล็กตริกมีความแตกต่างกันกับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ กำลังวัตต์คลื่นไมโครเวฟ ความหนาของวัสดุไดอิเล็กตริก และตำแหน่งของวัสดุไดอิเล็กตริกในท่อนำคลื่น เป็นต้น โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ต่างกันขึ้นกับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุเป็นสำคัญ กล่าวคือ คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุส่งผลต่อค่าความลึกทะลุทะลวงของคลื่นไมโครเวฟและค่าการดูดซับพลังงานภายในวัสดุ นอกจากนี้ยังอาจทำให้เกิดการสั่นพ้องหรือเกิดคลื่นหนึ่งในวัสดุที่มีรูปแบบแตกต่างกันอีกด้วย
2. กำลังวัตต์ไมโครเวฟที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิต่อเวลาภายในวัสดุเพิ่มสูงขึ้นซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่พลังงานการดูดซับจะแปรผันตามกำลังสองของความเข้มสนามไฟฟ้า
3. วัสดุทดลองที่มีปริมาตรน้อยกว่าจะมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิต่อเวลาภายในวัสดุที่สูงกว่า เนื่องจากพลังงานป้อนเข้าระบบเท่าเดิมแต่ปริมาตรของวัสดุลดลง
4. วัสดุทดลองที่มีความหนาน้อยกว่าส่งผลให้มีการกระจายตัวของความร้อนทั่วถึงกว่าวัสดุทดลองที่มีความหนาเนื่องจากเกิดการสะท้อนของคลื่นเกิดเป็นคลื่นหนึ่งในวัสดุ
5. ตำแหน่งของวัสดุทดลองในกรณีวัสดุมีขนาดเล็กกว่าพื้นที่หน้าตัดท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมส่งผลต่อรูปแบบของคลื่นหนึ่งในวัสดุเนื่องจากเมื่อวัสดุมีขนาดเล็ก

กว่าที่อลักษณะคลื่นจะกลายเป็นแบบมัลติโหมดและการจัดวางวัสดุจะมีผลต่อคลื่นหนึ่งที่ ซึ่งจากการทดลองพบว่ายังวัสดุเยื้องจุดกึ่งกลางมากจะยังเกิดคลื่นหนึ่งที่มีกำลังสูง

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (สกว.)

## เอกสารอ้างอิง

- [1-1] Ratanadecho P., Aoki K. and Akahori M., "A Numerical and Experimental Investigation of the Modeling of Microwave Heating for Liquid Layers Using a Rectangular Wave Guide (Effects of Natural Convection and Dielectric properties)" Applied Mathematical Modelling, Volume 26, 2002, Pages 449-472
- [2-2] Barringer, S.A., Davis, EA., Gordon, J., Ayappa, K.G. and Davis, H.T., 1994, "Effect of Sample Size on the Microwave Heating Rate; Oil vs. Water", AIChE J., Volume 40, Pages 1433-1439
- [2-3] Ratanadecho, P., Aoki, K. and Akahori, M., "Influence of Irradiation Time, Particle Sizes and Initial Moisture Content during Microwave Drying of Multi Layered Capillary Porous Materials", ASME J. Heat Transfer, Volume 124, Issue 1, 2002, Pages 151-161 Drying Technology an International J., Volume 19, Issue 9, 2001, Pages 2209-2234
- [2-4] ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, "การวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งในวัสดุพูน (I หลักการเบื้องต้นของการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในกระบวนการอบแห้งวัสดุพูน)", วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ภาษาไทย) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ฉบับที่ 12, เล่มที่ 1, ม.ค.-เม.ย.47, หน้า 1-11
- [4-2] Rattanadecho P., "Theoretical and Experimental Investigation of Microwave Thawing of Frozen Layer Using a Microwave Oven (Effects of Layered Configurations and Layer Thickness)" ASME J. Heat and Mass Transfer, Volume 47, 2004, Pages 937-945.
- [4-4] Ratanadecho P., Aoki K. and Akahori M., "Experimental and Numerical Study of Microwave Drying in Unsaturated Porous Material", Int. Commun Heat and Mass Transfer, Volume 28 Issue 5, 2001, Pages 605-616.
- [4-5] Turner I.W. and Jolly P.G., "Combined Microwave and Convective Drying of a Porous Material", Drying Technology, Volume 9 Issue 5, 1991, Pages 1209-1269.