การอบแห้งไม้ด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน โดยใช้ท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม

Microwave and Hot-Air Drying of Wood Using a Rectangular Waveguide

สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย, วิโรจน์ จินดารัตน์ และผดุงศักดิ์ รัตนเดโช *
หน่วยวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม (R.C.M.E.)
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
99 หมู่ 18 ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง ปทุมธานี 12120
โทร 0-2564-3001-9 *อีเมล์ ratphadu@engr.tu.ac.th

Somsak Vangpradubchai, Wirot Jindarat, Phadungsak Ratanadecho *
Research Center of Microwave Utilization in Engineering (R.C.M.E.)
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University,
Rungsit Campus, 99 Mu 18, Klong Luang, Pathumthani 12120, Thailand,
Tel: 0-2564-3001-9, *E-mail: ratphadu@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลการทดลองจากการอบแห้งไม้โดยใช้ท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม พารามิเตอร์ที่ศึกษา คือ กำลังคลื่นไมโครเวฟ (50, 100 W) อุณหภูมิของลมร้อน (40, 60°C) และความหนาของชิ้นไม้ (5, 8 cm) ที่มีผลต่ออุณหภูมิภายในชิ้นไม้ ความชื้นของชิ้นไม้ (ชิ้นไม้มีความชื้นเริ่มต้น 89 - 95 %dry bulb) และการดูดซับพลังงานของชิ้นไม้ จากการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงกำลังคลื่นไมโครเวฟ อุณหภูมิของลมร้อนและความหนาของชิ้นไม้ มีผลต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งโดยรวมเป็นอย่างมาก ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานของกระบวนการอบแห้งวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัวโดยใช้ไมโครเวฟได้ รวมทั้งสามารถประยุกต์ใช้ในการออกแบบสร้างระบบอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟในภาคอุตสาหกรรมต่อไป

Abstract

In this study, The drying of wood with microwave energy was investigated experiment with rectangular waveguide. The Parameter are microwave power (50, 100W), Temperature of hot air (40, 60°C) and Thickness of wood (5, 8 cm) that influence to inside temperature, moisture content (initial moisture content 89 - 95% dry bulb) and microwave power absorbed of wood were studied. It is shown that the variation of microwave power, temperature of hot air and thickness of wood were affected to kinetic drying. Finally, the result of this research can be basis acknowledge in drying microwave unsaturated porous media process and can be apply to drying system design.

1. บทนำ

ในปัจจุบันสิ่งที่สำคัญนอกเหนือจากการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพออกสู่ท้องตลาดแล้ว คือการพยายามเพิ่มผลผลิตและลดค่าใช้จ่ายในการผลิต โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมนั้นมีหลายกระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้ง จะด้วยวิธีธรรมชาติหรือวิธีที่ใช้พลังงานจากแหล่งพลังงานอื่นมาใช้ ซึ่งในบางครั้งยังผลิตไม่ทันตามความต้องการหรือหากทันตามความต้องการก็ต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงและได้ประสิทธิภาพไม่คุ้มค่าเท่าที่ควร อันส่งผลให้เกิดแนวคิดในการหากรรมวิธีที่จะช่วยในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ให้มีคุณภาพที่ดี สะอาด ใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าและลดระยะเวลาในการอบแห้งให้สั้นที่สุดเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์จำนวนมากในเวลาอันรวดเร็ว เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการผลิต กรรมวิธีการอบแห้งนั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อรักษาผลิตภัณฑ์ให้มีอายุยืนยาวขึ้นสำหรับผลผลิตทางการเกษตร เพื่อไล่ความชื้นที่ไม่ต้องการออกจากผลิตภัณฑ์ เช่น การอบแห้งไม้ซึ่งไม้ถือว่าเป็นวัสดุแบบชื้นมาก (Hygroscopic Porous Media) กล่าวคือความชื้นยึดอยู่กับโครงสร้างของอนุภาคของแข็งภายใต้พันธะทางเคมีและฟิสิกส์ มีช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็งมีขนาดเล็กมากประมาณ 0 - 1 μm โครงสร้างเนื้อวัสดุที่ซับซ้อนที่เรียกว่าโครงสร้างวัสดุพรุนแบบเซลลูลาร์-คาพิวลารี (Cellular Capillary)

ผดุงศักดิ์ [1] การอบแห้งเพื่อลดความชื้นของเนื้อไม้ลงถึงค่าหนึ่งก่อนที่จะนำไม้ไปเข้าสู่ภาคอุตสาหกรรมต่อไป สามารถลดปัญหาเชื้อรา ปลวก มอด เป็นต้น

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการ นำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่คลื่นไมโครเวฟระหว่าง 0.3 ถึง 300 GHz หรือในช่วงความยาวคลื่น 1 mm. ถึง 1 m. มาใช้เป็นแหล่งพลังงานให้ความร้อนเพื่อแปรรูปวัสดุต่างๆในอุตสาหกรรม การให้ความร้อนแก่วัสดุด้วยไมโครเวฟเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงที่ได้รับความสนใจอย่างมาก การผลิตวัสดุด้วยคลื่นไมโครเวฟนี้ใช้เวลาในการผลิตวัสดุสั้นกว่ากระบวนการผลิตโดยใช้ความร้อนวิธีอื่นจึงทำให้ประหยัดเวลา พลังงานและช่วยลดต้นทุนการผลิต

งานวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการอบแห้งไม้ด้วยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟในระดับนานาชาติและระดับประเทศนั้นยังมีการทำกันน้อยมาก ซึ่งในส่วนของงานวิจัยระดับประเทศนั้นจะทำการวิจัยโดยใช้หลักการพาความร้อนเป็นส่วนใหญ่ เช่น การอบแห้งด้วยลมร้อน การอบแห้งด้วยไอน้ำ Yamsaengsung [2] การอบแห้งด้วยระบบสุญญากาศ ชาลิต [3] ซึ่งจะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งที่นานและลักษณะของไม้เกิดการบิดงอ สำหรับงานวิจัยในระดับนานาชาติที่ผ่านมาที่เกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนและอบแห้งวัสดุในประเภทต่างๆ ได้แก่ Masakasu [4] และ Oloyede [5] ได้ทำการอบแห้งไม้โดยใช้พลังงานไมโครเวฟ เพื่อทำการศึกษาถึงคุณสมบัติทางกายภาพของไม้หลังจากได้รับพลังงานไมโครเวฟ ซึ่งเตาไมโครเวฟที่ใช้เป็นเตาไมโครเวฟบ้าน, Zhao [6] และ Lehne [7] ได้ทำการทดลองอบไม้โดยใช้พลังงานไมโครเวฟและสร้างแบบจำลองขึ้นมาซึ่งแบบจำลองที่สร้างเป็นแบบจำลองพื้นฐานเท่านั้น จากงานวิจัยข้างต้นที่กล่าวมายังมีข้อจำกัดทางด้านอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและในส่วนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นแบบแบบจำลองพื้นฐาน

ซึ่งงานวิจัยครั้งนี้จะเน้นวิธีการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในกระบวนการอบแห้งภายใต้ความถี่คลื่นไมโครเวฟ 2.45 GHz (TE_{10} Mode) กำลังงานสูงสุด 1,500 W ซึ่งจะศึกษาเปรียบเทียบกำลังงานไมโครเวฟที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (50, 100 W) อุณหภูมิลมร้อนที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (40, 60°C) และความหนาของชิ้นงานทดสอบ (5, 8 cm)

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การอบแห้งโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

โดยทั่วไปแล้ววัตถุประสงค์ของการอบแห้งคือการถ่ายเทความชื้นหรือน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ การอบแห้งเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ดีนั้น กรรมวิธีที่ใช้ควรจะสามารถไล่ความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ในอัตราเร็วที่ใกล้เคียงกับอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวของผลิตภัณฑ์ ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วของอากาศและอุณหภูมิของอากาศในขณะนั้น การอบแห้งส่วนใหญ่จะใช้หลักการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวนอกและผิวภายในผลิตภัณฑ์ ด้วยการให้ความร้อนจากผิวนอกถ่ายเทเข้าสู่ผิวชั้นใน ความชื้นจะถูกไล่ออกมาที่ผิว ทำให้ที่ผิวผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิสูงและแห้ง ในขณะที่ภายในยังคงมีความชื้นเหลืออยู่และมีอุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งผิวภายนอกที่แห้งจะเกิดการหดตัวทำให้ความชื้นถ่ายเทออกมาที่ผิวผลิตภัณฑ์ลดลงตามลำดับและอาจส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เกิดรอยร้าว เนื่องมาจากอิทธิพลความดันก๊าซภายในวัสดุหรือการหดตัวของโครงสร้างผลิตภัณฑ์ นอกจากนั้นแล้ว สีของผลิตภัณฑ์จะเปลี่ยนแปลงง่ายและอาจเกิดรอยไหม้ได้

การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟจะอาศัยหลักการดูดกลืนพลังงานของผลิตภัณฑ์ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดและสมบัติทางไดอิเลคตริกของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ วัสดุที่เป็นฉนวนที่มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำ จะยอมให้คลื่นไมโครเวฟทะลุผ่าน เช่น แก้ว อากาศ โพลีโพรพิลีน อลูมินาเซรามิกส์ เป็นต้น ส่วนวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนสูง เช่น ชิ้นงานโลหะ จะสะท้อนคลื่นไมโครเวฟ คลื่นไม่สามารถทะลุผ่านไปได้ สำหรับวัสดุไดอิเลคตริกหรือวัสดุกึ่งฉนวนที่มีขั้วทางไฟฟ้า (Dipole) เช่น น้ำ ไม้ กระดาษ คาร์บอน เรซิน จะสามารถดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟและเปลี่ยนเป็นความร้อน ซึ่งความร้อนดังกล่าวเกิดจากแรงเสียดสีระหว่างการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลน้ำเมื่อดูดกลืนคลื่น ส่งผลให้เกิดเป็นความร้อนขึ้นภายในทั่วทั้งเนื้อวัสดุ (Volumetric Heating) ความร้อนและความชื้นจะถูกถ่ายเทจากภายในออกสู่ผิวนอกของผลิตภัณฑ์ ซึ่งแตกต่างไปจากการอบแห้งโดยวิธีทั่วไปซึ่งจะถ่ายเทความร้อนจากผิวเข้าไปสู่ภายในผลิตภัณฑ์ จากพฤติกรรมดังกล่าวของการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟจะทำให้ผิวของผลิตภัณฑ์ไม่เสียหายหรือต่างไปจากเดิมมากนัก เนื่องจากการระเหยของความชื้นภายในผลิตภัณฑ์เป็นไปอย่างรวดเร็วและมีการกระจายตัวของอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอ สามารถลดการแตกร้าวและรอยไหม้ในผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการอบแห้งวัสดุสำหรับอุตสาหกรรมต่อไป

2.2 สมการความรู้พื้นฐานของการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ

คลื่นไมโครเวฟเมื่อทะลุผ่านวัสดุไดอิเลคตริกจะถูกดูดซับและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน เรียกว่าการกำเนิดปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (Density of Microwave Power Absorbed, Q) ซึ่งสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายใน วัสดุไดอิเลคตริก Metaxas [8] อย่างไรก็ตามวัสดุไดอิเลคตริกไม่มีผลต่อสภาพเชิงขั้วแม่เหล็กเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก ดังนั้นจึงไม่มีสนามแม่เหล็กสูญเสียในระหว่างการแผ่รังสีไมโครเวฟ หรือกล่าวอีกทางหนึ่ง สนามแม่เหล็กไฟฟ้าส่งผลต่อการเกิดความร้อนภายในวัสดุไดอิเลคตริกได้น้อยมาก การเปลี่ยนแปลงเฟสของสนามไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยเวลาจะเร็วมาก ดังนั้นค่าเฉลี่ยรากที่สองของความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกใช้ในการประมาณค่าพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับโดยวัสดุไดอิเลคตริก เมื่อสมมติให้ไม่มีการสูญเสียสนามแม่เหล็ก ค่าของการกำเนิดปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรสามารถแสดงได้ดังนี้ Ratanadecho [9]

$$Q = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r'' E^2 = 2\pi \cdot f \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r' (tan\delta) E^2 \quad (1)$$

เมื่อ E คือ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง f คือค่าความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ ω คือ ความเร็วเชิงมุมของคลื่นไมโครเวฟ ε_r' คือ relative dielectric constant ซึ่งบอกถึงคุณสมบัติของวัตถุใดๆที่อธิบายถึงความสามารถในการดูดซับ ส่งผ่านและสะท้อนพลังงานจากส่วนที่เป็นสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ โดย ε_0 คือ Dielectric Constant ของอากาศ และ $\tan\delta$ คือ Dielectric Loss Tangent Coefficient ซึ่งบอก

ถึงความสามารถในการแปรเปลี่ยนพลังงานที่วัสดุดูดซับเป็นพลังงานความร้อน

จากสมการที่ 1 ค่าพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับจะแปรผันตรงกับค่าความถี่ของสนามไฟฟ้า, $\tan\delta$ และค่ากำลังสองของสนามไฟฟ้า แต่ถ้าค่า $\tan\delta$ ของชิ้นทดสอบมีค่ามาก จะส่งผลให้การดูดซับพลังงานไมโครเวฟและปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นมีมากขึ้น แต่ถ้าค่า $\tan\delta$ มีค่าน้อย คลื่นไมโครเวฟจะทะลุผ่านชิ้นทดสอบโดยไม่เกิดความร้อนขึ้น อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นอาจจะขึ้นกับตัวแปรอื่น เช่น ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) ลักษณะของชิ้นทดสอบและขนาดของชิ้นทดสอบด้วย

ส่วนค่าความลึกในการทะลุทะลวงของคลื่น หรือ ระยะทางที่สนามไฟฟ้าทะลุเข้าไปได้ สามารถหาได้จาก Ratanadecho [9]

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

เมื่อ υ = ความเร็วแสง (3×10^8 m/s)

จะเห็นว่าเมื่อค่า dielectric constant และ loss tangent coefficient เปลี่ยน ความลึกในการทะลุทะลวงและสนามไฟฟ้าภายในวัสดุไดอิเลคตริกก็จะเปลี่ยนแปลงด้วย

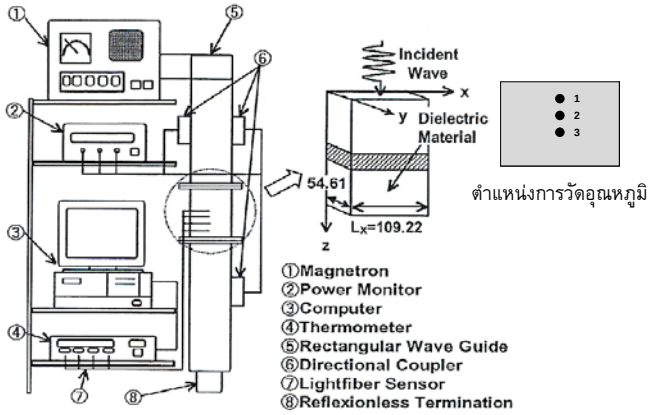
3. ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 ไมโครเวฟชนิดท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม

(Rectangular Wave Guide)

อุปกรณ์ไมโครเวฟชนิดท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม เป็นระบบไมโครเวฟที่ใช้คลื่นแบบ Monochromatic ชนิด TE_{10} mode ที่ความถี่ 2.45 GHz คลื่นไมโครเวฟกำเนิดจากแมกนีตรอน (Micro Denshi Co., Model UM-1500) และถูกส่งผ่านตามทิศทางในแนวแกน z ภายในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด 109.22 mm. x 54.61 mm. โดยมีน้ำเป็นตัวดูดซับที่ขอบเขตด้านล่าง (Lower Absorbing Boundary) เพื่อป้องกันการสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟไปสู่วัสดุทดสอบและมี Isolater (Upper Absorbing Boundary) เป็นตัวดักคลื่นไมโครเวฟที่สะท้อนมาจากวัสดุทดสอบเพื่อป้องกันไม่ให้ไปทำความเสียหายต่อแมกนีตรอนกำลังงานของแมกนีตรอนสามารถปรับได้ตั้งแต่ 0 - 1500 W กำลังของคลื่นตกกระทบ คลื่นสะท้อนและคลื่นส่งผ่าน จะถูกวัดด้วยวัตต์มิเตอร์โดยอาศัย Directional Coupler (Micro Denshi Co., Model DR-500) อุณหภูมิวัสดุทดสอบจะวัดโดยใช้ Luxtron Fluroptic Thermometer Model 790 (Accurate to $\pm$ 0.5 $^{\circ}$C) ณ ตำแหน่งลึกจากผิวหน้า 5, 15, 25 mm. เป็นจำนวน 3 ตำแหน่ง ในระหว่างทดลองบริเวณผิวหน้าของชิ้นไม้จะมีลมร้อนจากเครื่องกำเนิดลมร้อน (Hot Air generator) สำหรับการวัดปริมาณความชื้น เมื่อทดลองแต่ละกรณีเสร็จแล้วจะนำชิ้นไม้ไปอบเพื่อหาความชื้นคงเหลือโดยอาศัยการชั่งน้ำหนัก

ตัวอย่างวัสดุทดสอบที่ถูกให้ความร้อนคือชิ้นไม้ มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 107 mm. x 52 mm. ที่ความหนา 50 mm.และ 80 mm. ซึ่งภาชนะบรรจุชิ้นงานทดสอบทำมาจากโพลีโพรพิลีนหนา 1 mm. เมื่อทำการบรรจุลงในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมจะมีขนาดพอดีกับพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่น



รูปที่ 1 ไมโครเวฟชนิดท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

3.2 ขั้นตอนการทดลอง

นำชิ้นทดสอบไม้ขนาด 5 x 11 x 5 cm^3 มาทำการวัดความชื้นเริ่มต้นก่อนการทดลองจากนั้นทำการทดลองตามเงื่อนไขต่าง ๆ โดยทำการปรับค่ากำลังวัตต์เป็น 50 W 100 W ปรับเปลี่ยนความหนาของชิ้นงาน 5 cm., 8 cm. ปรับอุณหภูมิของลมร้อน 40°C, 60 $^{\circ}$C โดยทุกๆ เงื่อนไขมีการวัดอุณหภูมิภายในของชิ้นไม้ วัดความชื้นคงเหลือ ซึ่งไม้ที่ใช้อบนั้นมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 89 - 95% (Dry Bulb) และมีอุณหภูมิเริ่มต้น 28°C

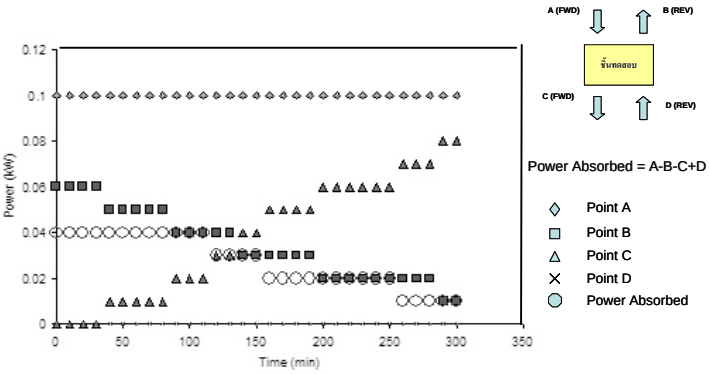
4. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

จากการศึกษาเพื่อวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งไม้ด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้ท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม โดยการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟนั้นจะเปลี่ยนพลังงานของคลื่นที่ถูกดูดซับสู่วัสดุเป็นความร้อนทำให้วัสดุนั้นร้อนขึ้นทั้งก้อน (volumetric heating) อุณหภูมิภายในจึงค่อนข้างสม่ำเสมอ ประกอบกับมีการพาความร้อนที่บริเวณผิวของชิ้นงานดังนั้นการถ่ายเทความชื้นที่เกิดขึ้นจึงเป็นไปอย่างรวดเร็ว สำหรับกรณีที่ 1 เป็นศึกษาโดยใช้กำลังงานไมโครเวฟ 100 W กับอุณหภูมิลมร้อน 40°C ความหนาชิ้นไม้ 5 cm. พบว่าในช่วงแรกของกระบวนการอบแห้ง (30นาที) ชิ้นไม้มีปริมาณความชื้นสูงและค่า Loss Tangent Coefficient สูง (ดังแสดงในสมการที่ 1) ทำให้อัตราการดูดกลืนพลังงานมาก จึงทำให้เกิดความร้อนสูง (รูปที่ 2) ดังนั้นอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจึงสูงตามไปด้วย (รูปที่ 3) และเนื่องจากอุณหภูมิตำแหน่งที่ 1 ใกล้ผิวชิ้นไม้ ซึ่งได้รับคลื่นโดยตรงจึงมีค่าสูงกว่าตำแหน่งที่ลึกลงไป และค่าความลึกในการทะลุทะลวง (D_P) (ดังแสดงในสมการที่ 2) นั้นในช่วงแรกจะมีค่าใกล้เคียงกับความหนาชิ้นไม้ ทำให้คลื่นถูกดูดกลืนไว้ที่บริเวณผิว ต่อมาค่าความทะลุทะลวงจะมีค่ามากขึ้นเนื่องจากความชื้นลดลง ค่าไดอิเลคตริกของไม้ลดลง ส่งผลให้ค่าความลึกในการทะลุทะลวง (D_P) มากขึ้น และเมื่อเวลามากขึ้น (รูปที่ 3) จะเห็นว่าอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งจะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ผ่านไป โดยอุณหภูมิของทุกตำแหน่งเกิดขึ้นสูงสุดที่เวลาประมาณ

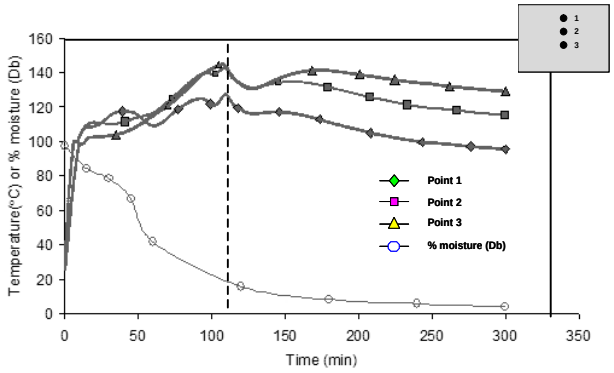
110 นาที หลังจากนั้นอุณหภูมิทุกตำแหน่งจะค่อย ๆ ลดลงและเริ่มคงที่ ที่เวลา 150 นาทีเป็นต้นไป แต่ตำแหน่งการเกิดอุณหภูมิสูงเริ่มเปลี่ยน กล่าวคือ อุณหภูมิ ณ ตำแหน่ง 3 จะมีอุณหภูมิสูงกว่าตำแหน่งอื่น โดยที่ตำแหน่งบริเวณผิว (ตำแหน่ง 1) กลับมีอุณหภูมิลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะความชื้นภายในวัสดุได้เคลื่อนตัวออกไป เนื่องจากในช่วงแรกของกระบวนการอบแห้งภายในชิ้นไม้จะมีเฟสของของเหลวอยู่อย่างต่อเนื่อง ทำให้อิทธิพลของความดันคาพิวลารี (capillary pressure) ที่ขับเคลื่อนของเหลวไปยังผิวหน้าของชิ้นไม้มีค่าสูง แต่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณความชื้นลดลง ทำให้การเคลื่อนที่ของความชื้น (ซึ่งเป็นไอส่วนใหญ่) ออกสู่ผิวหน้านั้นเป็นอิทธิพลของการแพร่ของไอ (vapor diffusion) เป็นหลัก ประกอบกับอิทธิพลของการพาความร้อนบริเวณผิวหน้าของชิ้นไม้จึงทำให้การเคลื่อนย้ายความชื้นที่บริเวณผิวหน้าของชิ้นไม้สูง

ตารางที่ 1 ค่าความความลึกในการทะลุทะลวงของคลื่นในชิ้นไม้(Dp)

Reference	data			D_p (m)
	ε'	ε''	$\tan\delta$	
Network Analyzer (Present study)	1.591	0.033	-	1.48827
Lehne [7]	2.4192	0.03612	-	1.67663
Datta [10]	1.5-4	-	0.01	1.94676-3.17905
Berger [11]	1.2-5	0.02-0.5	-	0.17434-3.55429



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของกำลังงานไมโครเวฟกับเวลา Power 100 W, Hot Air 40°C, Thickness 5 cm



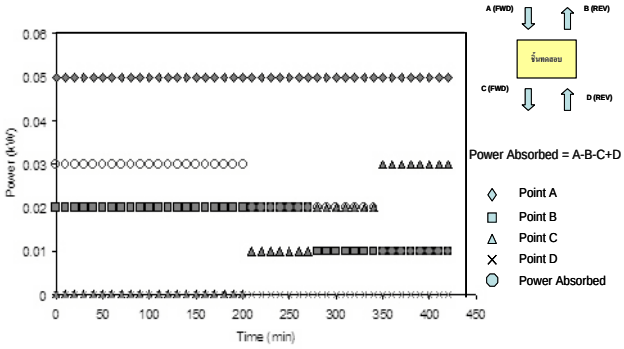
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับเวลา Power 100 W, Hot Air 40°C, Thickness 5 cm

ตารางที่ 2 ผลการทดลองโดยใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนในกรณีต่าง ๆ

กำลังงานไมโครเวฟ (W)	ความหนาชิ้นไม้ (ซม.)	อุณหภูมิลมร้อน (°C)	ความชื้นเริ่มต้น (% Dry bulb)	ความชื้นสุดท้าย (% Dry bulb)	อัตราการอบแห้ง (%/นาที)
50	5	40	95	15	0.19
		60	95	15	0.27
	8	40	89	8	0.15
		60	89	8	0.21
100	5	40	95	8	0.29
		60	95	8	0.48
	8	40	89	8	0.23
		60	89	8	0.54

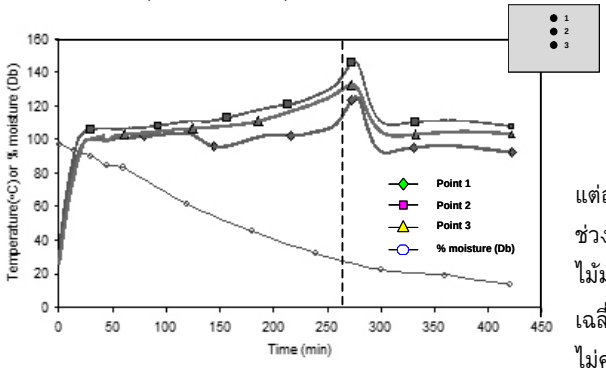
เมื่อศึกษาอิทธิพลของกำลังคลื่นไมโครเวฟโดยเปรียบเทียบ 50 W กับ 100 W ที่สภาวะอุณหภูมิลมร้อน 40°C ความหนาชิ้นไม้ 5 cm. จากรูปที่ 4 พบว่าอัตราการดูดกลืนพลังงานที่เกิดขึ้นมีค่า 30 W ซึ่งต่างจากกรณีที่ 1 (100 W) ที่พบว่ามีอัตราการดูดกลืนพลังงาน 60 W ในช่วงเริ่มต้น จะเห็นได้ว่าอัตราการดูดกลืนพลังงานของชิ้นไม้จะคิดเป็น 60% ของกำลังงานไมโครเวฟที่ป้อนเข้ามา

จากกำลังคลื่นไมโครเวฟที่ลดลง ส่งผลให้ใช้เวลาในการอบนานขึ้น (จากเดิม 110 นาทีเป็น 270 นาที) เมื่อเปรียบเทียบ ณ อุณหภูมิสูงสุดที่เท่ากัน เนื่องจากสนามไฟฟ้ามีค่าน้อย ส่งผลให้การเกิดความร้อนน้อยลงตามไปด้วย จึงต้องใช้ระยะเวลาในการอบนานขึ้น (ดังแสดงในสมการที่1)



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของกำลังงานไมโครเวฟกับเวลา

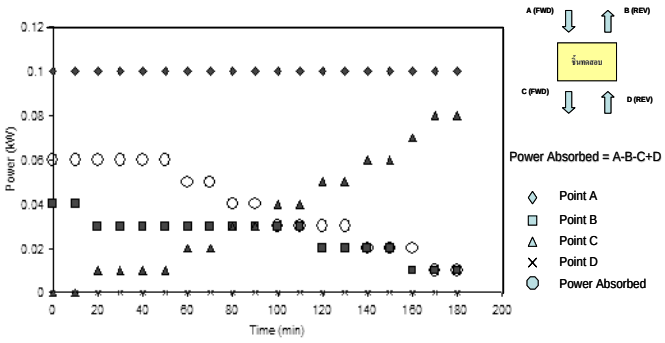
Power 50 W, Hot Air 40°C, Thickness 5 cm



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับเวลา

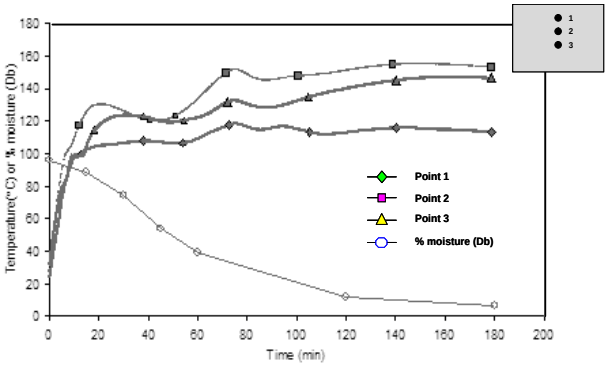
Power 50 W, Hot Air 40°C, Thickness 5 cm

เมื่อศึกษาอิทธิพลอุณหภูมิของลมร้อนโดยเปรียบเทียบ 40°C กับ 60°C ที่กำลังงานไมโครเวฟ 100 W ความหนาชิ้นไม้ 5 cm. จากรูปที่ 6 พบว่าอัตราการดูดกลืนพลังงานและการกระจายอุณหภูมิในช่วงแรกเหมือนกับกรณีที่ 1 โดยอุณหภูมิตำแหน่งใกล้ผิวชิ้นไม้ซึ่งได้รับคลื่นโดยตรงจะมีค่าสูงกว่าตำแหน่งที่ลึกลงไปแต่การกระจายของอุณหภูมิหลังจาก 30 นาที พบว่าอุณหภูมิตำแหน่ง 2 มีค่ามากกว่าอุณหภูมิตำแหน่ง 3 (อยู่ลึกลงในชิ้นไม้มากกว่า) ทั้งนี้เกิดจากการฟอร์มตัวของคลื่นเดินหน้าและคลื่นสะท้อน มีค่าสูงสุดบริเวณตำแหน่ง 2 ทำให้อุณหภูมิชิ้นไม้ตำแหน่ง 2 มีค่าสูง



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของกำลังงานไมโครเวฟกับเวลา

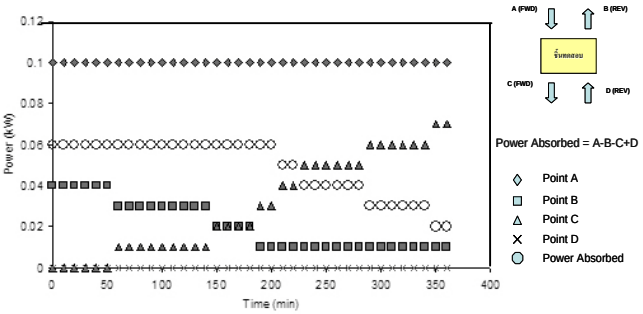
Power 100 W, Hot Air 60°C, Thickness 5 cm



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับเวลา

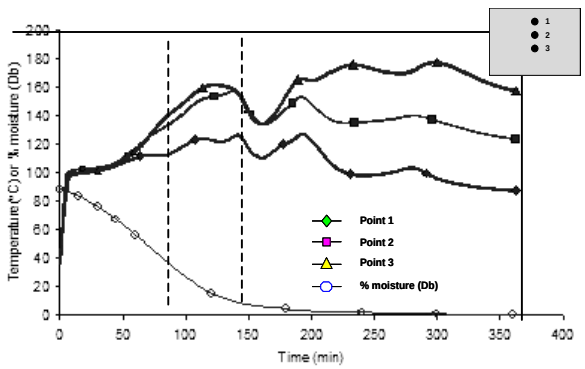
Power 100 W, Hot Air 60°C, Thickness 5 cm

พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิมีความซับซ้อนมากขึ้น อุณหภูมิแต่ละตำแหน่งมีค่าแตกต่างกันมากเมื่อเทียบกับกรณีที่ 1 (รูปที่ 9) โดยในช่วงแรกการดูดซับของชิ้นไม้มีค่าสูง การส่งผ่านต่ำ ทำให้คลื่นสะสมในชิ้นไม้มาก ทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้น อุณหภูมิจึงมีค่าสูงตามไปด้วย โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 160 °C ลักษณะการเกิดอุณหภูมิจะมีการเกิดความร้อนที่ไม่ค่อยคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากปรากฏการณ์ทางธรรมชาติของคลื่นไมโครเวฟเกิดการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในวัสดุเปลี่ยนไปกับเวลาและมีการฟอร์มตัวของคลื่นเดินหน้าและคลื่นสะท้อนภายในชิ้นไม้



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของกำลังงานไมโครเวฟกับเวลา

Power 100 W, Hot Air 40°C, Thickness 8 cm



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับเวลา

Power 100 W, Hot Air 40°C, Thickness 8 cm

5. สรุปผลการทดลอง

การอบแห้งด้วยท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม จากการทดสอบจะเห็นได้ว่า การอบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนของชิ้นไม้ซึ่งเป็นวัสดุพรุนแบบชื้นมาก (Hygroscopic Porous Media) จะขึ้นอยู่กับกำลังของไมโครเวฟและระยะเวลาในการอบที่จะทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงสุด และขึ้นอยู่กับค่าไดอิเลคตริกของไม้ ในช่วงแรกจะมีค่าสูง ซึ่งสามารถดูดซับพลังงานไว้เป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการอบแห้งภายในชิ้นไม้จะมีเฟสของของเหลวอยู่อย่างต่อเนื่อง ทำให้อิทธิพลของความดันคาพิวลารี (capillary pressure) ที่ขับเคลื่อนของเหลวไปยังผิวหน้าของชิ้นไม้มีค่าสูง แต่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณความชื้นลดลง ทำให้การเคลื่อนที่ของความชื้น (ซึ่งเป็นไอส่วนใหญ่) ออกสู่ผิวหน้านั้นเป็นอิทธิพลของการแพร่ของไอ (vapor diffusion) เป็นหลัก ประกอบกับอิทธิพลของการพาความร้อนบริเวณผิวหน้าของชิ้นไม้จึงทำให้การเคลื่อนย้ายความชื้นที่บริเวณผิวหน้าของชิ้นไม้สูงและเมื่อความชื้นลดลง และเมื่อกำลังของคลื่นไมโครเวฟที่ป้อนเข้าไปมีค่าสูงจะมีอัตราการดูดกลืนพลังงานสูง ทำให้เกิดความร้อนสูงจึงสามารถถ่ายเทมวลสารได้มากกว่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่มีค่าต่ำ ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการออกแบบระบบจริงในทางปฏิบัติและอาจจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่จะศึกษาวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพรุนสำหรับการวิเคราะห์ในกรณีอื่น ๆ อีกด้วย

6. กิตติกรรมประกาศ

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

7. เอกสารอ้างอิง

[1] ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช “การวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งในวัสดุพรุน” (หลักการเบื้องต้นของการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในกระบวนการ อบแห้งวัสดุพรุน) วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ภาษาไทย) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ฉบับที่ 1 ม.ค เม.ย 47 หน้า 1-11

[2] R.Yamsaengsung and K.Buaphud. “Superheated stream drying of rubberwood.” เอกสารประกอบการประชุม อบไม้ยางเลือกทางไหนดี, 2547

[3] ชวลิต เพ็ชร์น้ำสิน, “การปรับปรุงประสิทธิภาพการอบไม้ยางพาราของห้องอบไม้ระบบสุญญากาศ.”เอกสารประกอบการประชุม อบไม้ยางเลือกทางไหนดี, 2547

[4] Masakasu miura, Harumi Kaga, Akihiko Sakurai,Toyoji Kakuchi, Keji Takahashi ,2003,”Rapid pyrolysis of woodBlock by microwave heating.” J.Anal.Appl. pyrolysis ,1-13.

[5] A.Oloyede, P.Groombridge,2000, “The Influence of microwave heating on the mechanical properties of wood”, Journal of Materials Processing Technology,67-73.

[6] H.Zhao, I.W.Turner ,2000 ,”The use of a coupled computational model for studying the microwave heating of wood.”Applied Mathematical modeling , 183-197.

[7] M.Lehne, G.W.Barton and T.A.G.Langrish,1999, “Comparison of experimental and modeling studies for the microwave drying of ironbank timber.” Drying technology,2219-2235.

[8] A.C. Metaxas and R.J. Meridith, 1983, Industrial Microwave Heating: Peter Peregrinus, Ltd., London,1-100

[9] P. Ratanadecho, K. Aoki and M. Akahori, 2002(a).Influence of irradiation time, particle sizes and initial moisture content during microwave drying of multi-layered capillary porous materials: ASME J. Heat Transfer, Vol. 124, pp. 151-161

[10] Ashim K. Datta., “Heat and Mass Transfer in Microwave Processing“, Advances in Heat Transfer, Vol 33

[11] Berger, D. and Pei, D.C.T., "Drying of Hygroscopic Capillary Porous Solids: Theoretical Approach", Int. J. Heat and Mass Transfer, 16, 1973, pp. 293-302.