

การวิเคราะห์การใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้งแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้ระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่อง

Analysis of Energy Consumption in Microwave and Hot-Air Drying Process of Particleboards from Montong durian peel Using a Continuous Belt System

วันชนะ ยั่งยืน¹, สโรชา เจริญวัย^{1*}, สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย² และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช^{2*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

*ติดต่อ (Corresponding Author): E-mail sarochakuk@hotmail.com เบอร์โทรศัพท์ 0-2549-3430-9 เบอร์โทรสาร 0-2549-3432

² หน่วยวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม (R.C.M.E.)

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

99 หมู่ 18 ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์การใช้พลังงานโดยทำการทดลองในกระบวนการอบแห้งแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้ระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่อง โดยโครงสร้างระบบประกอบด้วยแมกนีตรอนซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 (GHz) ขนาด 800 วัตต์ จำนวน 12 ตัว ติดตั้งในตำแหน่งสมมาตรภายในอุโมงค์ของระบบไมโครเวฟซึ่งมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าหน้าตัด 90 ซม. X 45 ซม. X 270 ซม. และเครื่องกำเนิดลมร้อน ที่มีอุณหภูมิการทำงานสูงสุด 240 องศาเซลเซียส วัสดุที่ใช้ในการศึกษา คือ แผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง ขนาด 20 X 20 เซนติเมตร จากการทดลองพบว่า การให้ความร้อนในช่วงแรกควรใช้ลมร้อนก่อน เพราะวิธีดังกล่าวของกระบวนการอบแห้งจะให้ความร้อนได้ดีที่ผิว หลังจากนั้นเมื่อความชื้นที่บริเวณผิวลดลงจึงให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ เนื่องจากที่ผิวสามารถทำให้การดูดซับคลื่นไมโครเวฟได้ดีและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจะเกิดความร้อนจากภายในแผ่นขึ้นไม้อัดจึงสามารถขับเคลื่อนความชื้นมาสู่ผิวหน้าได้รวดเร็ว จากการสังเกตภาพถ่ายความร้อนของแผ่นขึ้นไม้อัด ดังนั้นการอบแห้งด้วยพลังงานไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนในกระบวนการอบแห้งทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับใช้พลังงานไมโครเวฟเพียงอย่างเดียว

คำหลัก: พลังงาน, การอบแห้ง, ไมโครเวฟ, แผ่นขึ้นไม้อัด

Abstract

The paper presents the energy analysis in drying process of particleboards from Monthong durian peel using microwave energy and hot-air in a continuous belt system, consists of twelve 800 watts 2.45 GHz coupled into the cavity wall inside the system. A rectangular microwave cavity of dimensions 45cm x 90 cm x 270 cm combined with hot-air generator having the maximum operating temperature at 240 °C was chosen. Particleboards from Monthong peel with dimension of 20 cm x 20 cm were manufactured. The test results and thermal photograph show that using hot-air drying in the first stage, the surface of samples should be greatly dried out. As the result of hot-air drying, this was dedicated to moisture removal of the surface of samples. Afterward, the samples were heated by microwave drying that caused the heat was generated inside the samples, thus transporting rapidly of moisture to the surface of samples. Therefore it would seem that the combination of microwave and hot-air drying process provides more efficiency compared with a single microwave drying.

Keywords: Energy, Drying, Microwave, Particleboards

1. บทนำ

การใช้วัสดุทดแทนไม้ธรรมชาติ เป็นแนวทางหนึ่งเพื่อช่วยลดปัญหาที่ทรัพยากรป่าไม้มีจำนวนลดลง ในขณะที่ความต้องการใช้ไม้ยังมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น และเนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ผลผลิตทางการเกษตร เช่น ผลไม้ มีแนวโน้มสูงขึ้นในแต่ละปี ส่งผลทำให้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร มีจำนวนมากขึ้นเป็นเงาตามตัว จึงเกิดแนวคิดการนำวัสดุเหลือใช้จำพวกเปลือกผลไม้ เช่น เปลือกทุเรียนหมอนทอง เนื่องจากเปลือกทุเรียนหมอนทองมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำเท่ากับ 0.0921 W/m.K เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัดเพื่อเป็นวัสดุภายในอาคารเพื่อการประหยัดพลังงาน ลดความร้อนภายในอาคารเนื่องจากพลังงานเป็นสิ่งที่มีความสำคัญดังนั้นการอนุรักษ์และประหยัดพลังงานจึงเป็นวิธีการหนึ่งที่ช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน

โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมนั้นมีหลายกระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้ง ซึ่งวิธีการที่ใช้อยู่กันทั่วไปส่วนใหญ่เป็นการให้ความร้อนโดยวิธีธรรมชาติ ซึ่งมีการป้อนความร้อนที่ผิวหน้าชิ้นงาน บางครั้งอาจเกิดปัญหากับชิ้นงานที่มีความหนาแน่นมาก ๆ เนื่องจากชิ้นงานจะได้รับความร้อนไม่ทั่วถึงหรือสม่ำเสมอ นอกจากนี้กระบวนการผลิตใช้เวลานาน อีกทั้งยังทำให้สมบัติเชิงโครงสร้างและสมบัติเชิงคุณภาพเปลี่ยนไป จึงเป็นที่มาของการแสวงหาวิธีใหม่ในการจัดปัญหาที่เกิดขึ้น การประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟมาก็เป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูงและยังเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการปรับปรุงคุณภาพของแผ่นขึ้นไม้อัด เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟมีข้อได้เปรียบหลายประการ กล่าวคือ มีประสิทธิภาพทางความร้อนและคุณภาพของผลิตภัณฑ์สูง เพราะเป็นการให้ความร้อนเชิงปริมาตร ใช้ระยะเวลาสั้น พลังงานที่ใช้เป็นพลังงานสะอาดไม่มีเขม่าไอเสีย เป็นต้น

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่คลื่นไมโครเวฟระหว่าง 0.3 ถึง 300 GHz หรือในช่วงความยาวคลื่น 1 mm. ถึง 1 m. มาใช้เป็นแหล่งพลังงานให้ความร้อนเพื่อแปรรูปวัสดุต่างๆ ในอุตสาหกรรม งานวิจัยในระดับนานาชาติที่ผ่านมาที่[1-7] เกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนและอบแห้งวัสดุในประเภทต่างๆ ที่ใช้พลังงานไมโครเวฟ ได้แก่ Rattanadecho et al. [1] ได้ทำการศึกษาจลนศาสตร์กระบวนการอบแห้งวัสดุไดอิเล็กตริก โดยใช้เตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง วัสดุไดอิเล็กตริกที่ใช้

ในการศึกษา คือ ยางพารา และเซรามิกส์ J. Varith et al. [2] ได้ทำการอบแห้งลำไยด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption) ที่ระดับอุณหภูมิ 40 50 และ 60 °C กำลังไมโครเวฟ 100, 180, 300 และ 450 W G.P. Sharma และ Suresh Prasad [7] ได้ศึกษาการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ ซึ่งอุปกรณ์การอบแห้งที่ใช้เป็นตู้อบไมโครเวฟที่มีใช้ทั่วไป เพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงพลังงาน (Specific Energy Consumption)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาวิเคราะห์การใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้งแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้ระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่อง โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ กำลังงานไมโครเวฟที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (2400 W) อุณหภูมิลมร้อนที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (40, 50 และ 60 °C) เพื่อหาสภาวะในการอบแห้งที่เหมาะสม เป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการอบแห้งต่อไป

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สมการความรู้พื้นฐานของการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ

คลื่นไมโครเวฟเมื่อทะลุผ่านวัสดุไดอิเล็กตริกจะถูกดูดซับและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน เรียกว่าค่ากำลังการดูดซับคลื่นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (Density of Microwave Power Absorbed, Q) ซึ่งสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในวัสดุไดอิเล็กตริก อย่างไรก็ตามวัสดุไดอิเล็กตริกไม่มีผลต่อสภาพเชิงขั้วแม่เหล็กเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก ดังนั้นจึงไม่มีสนามแม่เหล็กสูญเสียในระหว่างการแผ่รังสีไมโครเวฟ แต่วัสดุไดอิเล็กตริกจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเฟสของสนามไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยเวลา ดังนั้นค่าเฉลี่ยรากที่สองของความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกใช้ในการประมาณค่าพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับโดยวัสดุไดอิเล็กตริก เมื่อสมมติให้ไม่มีการสูญเสียสนามแม่เหล็ก ค่าของการกำเนิดปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรสามารถแสดงได้ดังนี้

$$Q = \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' \square^2 = 2\pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r'' (\tan \delta) \square^2 \quad (1)$$

เมื่อ E คือ สนามไฟฟ้าซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง f คือ ค่าความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ ω คือ ความเร็วเชิงมุมของคลื่นไมโครเวฟ ϵ_r'' คือ relative

dielectric constant ซึ่งบอกถึงคุณสมบัติของวัสดุใดๆที่อธิบายถึงความสามารถในการดูดซับ ส่งผ่านและสะท้อนพลังงานจากส่วนที่เป็นสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ โดย ϵ_0 คือ Dielectric Constant ของอากาศ และ $\tan\delta$ คือ Dielectric Loss Tangent Coefficient ซึ่งบอกถึงความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานที่วัสดุดูดซับพลังงานความร้อน ค่าพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับจะแปรผันตรงกับค่าความถี่ของสนามไฟฟ้า $\tan\delta$ และค่ากำลังสองของสนามไฟฟ้า แต่ถ้าค่า $\tan\delta$ ของแผ่นขึ้นไม้อัดมีค่ามาก จะส่งผลให้การดูดซับพลังงานไมโครเวฟและปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นมีมากไปด้วย แต่ถ้าค่า $\tan\delta$ มีค่าน้อย คลื่นไมโครเวฟจะทะลุผ่านแผ่นขึ้นไม้อัดโดยไม่เกิดความร้อนขึ้น อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นอาจจะขึ้นอยู่กับตัวแปรอื่น เช่น ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) ค่าความชื้น (Moisture content) ลักษณะของแผ่นขึ้นไม้อัดและขนาดของแผ่นขึ้นไม้อัด ค่าความลึกในการทะลุทะลวงหรือระยะทางที่สนามไฟฟ้าเข้าไปได้ สามารถหาได้จากสมการที่ 2

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

เมื่อ v = ความเร็วแสง (3×10^8 m/s) f คือ ค่าความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ ϵ_r' คือ relative dielectric constant $\tan\delta$ คือ Dielectric Loss Tangent Coefficient

จะเห็นว่าค่า Dielectric Constant และ Loss Tangent Coefficient เปลี่ยนความลึกในการทะลุทะลวงและสนามไฟฟ้าภายในวัสดุได้อิเล็กทรอนิกส์จะเปลี่ยนแปลงด้วย

2.2 การสมดุล มวล พลังงานในกระบวนการอบแห้ง

จากกฎการอนุรักษ์มวลของปริมาณควบคุมตามรูปที่ 1 ทำการสมดุลมวลเมื่อ $\dot{m}_{g1}$ ที่จุด 1 และ $\dot{m}_{g2}$ ที่จุด 2 เป็นอัตราการไหลเข้าและออก $\dot{W}_d$ เป็นมวลของวัสดุแผ่นขึ้นไม้อัด X_1 และ X_2 เป็นอัตราส่วนความชื้นของอากาศเข้าและออกจะได้สมการสมดุลมวลของกระบวนการอบแห้งดังนี้

$$\frac{dm_{cv}}{dt} = \dot{m}_{g1} - \dot{m}_{g2} \quad (3)$$

$$\dot{W}_d \frac{dM_p}{dt} = \dot{m}_a (X_1 - X_2)$$

(4)

$$\dot{m}_w = \dot{m}_a (X_2 - X_1) \quad (5)$$

เมื่อ $\dot{W}_d$ เป็นมวลของวัสดุแผ่นขึ้นไม้อัด (kg) $\dot{m}_a$ เป็นอัตราการไหลของอากาศแห้ง (kg/s) $X_{1,2}$ อัตราส่วนความชื้นในอากาศ (kg water/kg dry air) $\dot{m}_w$ อัตราการไหลของน้ำออกจากวัสดุแผ่นขึ้นไม้อัด (kg water/s)

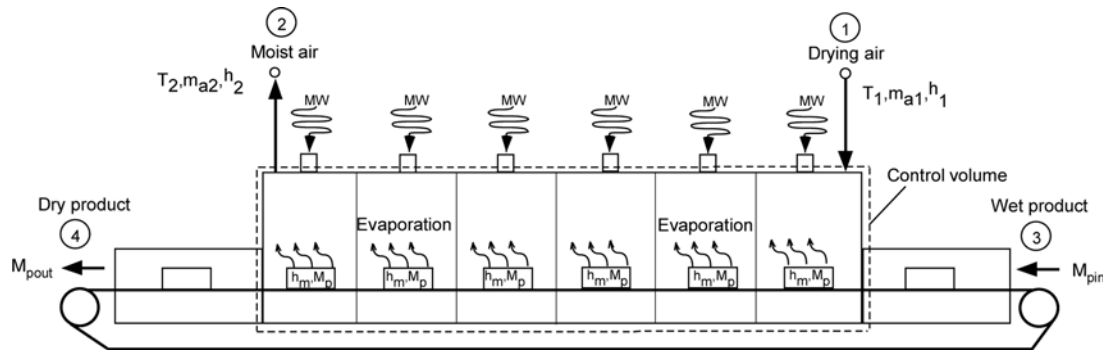
สำหรับการวิเคราะห์การสมดุลพลังงานตามกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ หรือกฎการอนุรักษ์พลังงานของระบบควบคุม เกิดการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากการพาความร้อนและความร้อนที่เกิดขึ้นในโมเลกุลของน้ำภายในวัสดุแผ่นขึ้นไม้อัด ทำให้เกิดการระเหยของน้ำหรือความชื้นภายในวัสดุแผ่นขึ้นไม้อัดและความร้อนส่วนหนึ่งสูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อม สมการสมดุลพลังงานเขียนได้ดังนี้

$$\sum \dot{E}_{in} - \sum \dot{E}_{out} + \dot{E}_{st} = \Delta \dot{E}_{system} \quad (6)$$

ในวัสดุแผ่นขึ้นไม้อัดเมื่อมีการพาความร้อนและพลังงานไมโครเวฟจะเกิดความร้อนสะสมขึ้นในวัสดุแผ่นขึ้นไม้อัด อัตราการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการระเหยของน้ำและอัตราการถ่ายเทความร้อนไปสู่สิ่งแวดล้อม โดยความสัมพันธ์สามารถเขียนในรูปสมการดังนี้

$$\frac{\dot{W}_d (h_{m2} - h_{m1})}{\Delta t} = \dot{Q}_{evap} + \dot{m}_a (h_1 - h_2) + \dot{Q}_{MW} - \dot{Q}_{loss} \quad (7)$$

เมื่อ $\dot{W}_d$ เป็นมวลของวัสดุแผ่นขึ้นไม้อัด (kg) เป็นเอนทาลปีของวัสดุแผ่นขึ้นไม้อัด (kJ/kg) เป็นเวลา (s) $\dot{Q}_{evap}$ เป็นอัตราการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากการระเหยของน้ำ (kJ/s) $\dot{m}_a$ เป็นอัตราการไหลของอากาศแห้ง (kg/s) h เป็นเอนทาลปีของอากาศแห้ง (kJ/kg) $\dot{Q}_{MW}$ เป็นพลังงานไมโครเวฟ (kW) $\dot{Q}_{loss}$ เป็นอัตราการถ่ายเทความร้อนไปสู่สิ่งแวดล้อม (kJ/s)



รูปที่ 1 กระบวนการอบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้ระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่อง [1]

2.3 การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในกระบวนการอบแห้ง (Specific Energy Consumption in Drying Process)

การวิเคราะห์การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเป็นการประเมินจากการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้ระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่อง พิจารณาจากการป้อนพลังงาน ในการอบแห้งที่อุณหภูมิลมป้อน 40 °C, 50 °C และ 60 °C ความเร็วลม 0.5 m/s กำลังไมโครเวฟ (เปิดแมกนีตรอน 3 ตัว) 2400 W การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) หาได้จากสมการที่ 3

$$SEC = \frac{\text{Total electrical power supplied in drying}}{\text{Amount of water removed during drying}} \left[\frac{kW \cdot hr}{kg} \right] \quad (8)$$

$$SEC = \frac{P_{total}}{\text{Amount of water removed during drying}} \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (9)$$

เมื่อ P_{total} คือพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง สามารถหาได้จากสมการที่ 5

$$P_{total} = P_{mg} + P_{heater} + P_{exfan} + P_{cofan} + P_{con} \quad [kW \times 3600s] \quad (10)$$

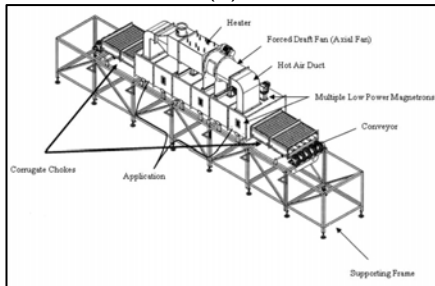
เมื่อ P_{mg} เป็นพลังงานไฟฟ้าจำหน่ายใน magnetron, P_{heater} เป็นพลังงานไฟฟ้าเครื่องทำความร้อน, P_{exfan} เป็นพลังงานไฟฟ้าพัดลมดูดอากาศ, P_{blfan} เป็นพลังงานไฟฟ้าพัดลมเป่าลม, P_{cofan} เป็นพลังงานไฟฟ้าพัดลมระบายความร้อน และ P_{con} เป็นพลังงานไฟฟ้าระบบสายพานลำเลียง

3.ระเบียบวิธีการทดลอง

แผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองที่ใช้ในการทดลอง มีส่วนประกอบคือ เส้นใย, ผง และน้ำ แบ่งส่วนผสมออกเป็น 4 สูตร คือ 1:1:1, 1:1:1.5, 2:1:1.5, 2:1:2 ตามลำดับ ขนาด 20x20 เซนติเมตร และอบแห้งโดยระบบไมโครเวฟซึ่งเป็นระบบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้ระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่องที่ทางหน่วยวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรมพัฒนาขึ้น โดยอาศัยหลักการคือ วัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการจะถูกลำเลียงโดยสายพานผ่านเข้าไปในอุโมงค์ที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม (rectangular cavity) ซึ่งภายในระบบจะติดตั้งแมกนีตรอน คลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz ไว้จำนวน 12 ตัว (กำลัง 800 วัตต์/ตัว) และเครื่องกำเนิดลมร้อน อุณหภูมิสูงสุดที่ได้โดยประมาณ 240 องศาเซลเซียส (ขึ้นอยู่กับสมบัติวัสดุ) วัสดุอุณหภูมิร้อนโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล โดยใช้ระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่อง คลื่นไมโครเวฟถูกยิงจากแมกนีตรอน ซึ่งติดตั้งอยู่รอบๆ บริเวณทำความร้อนสามารถทำได้โดยลำเลียงวัสดุใส่สายพานที่บริเวณปากทางเข้าระบบ จากนั้นสายพานจะลำเลียงวัสดุเข้าไปยังบริเวณทำความร้อน การปรับแต่งกำลังสามารถทำได้โดยการเปิดและปิดแมกนีตรอนตามตำแหน่งต้องการ บริเวณปากทางเข้าและออกระบบไมโครเวฟมีระบบการดักคลื่นไมโครเวฟที่อาจรั่วไหลออกมาเพื่อไม่ให้เป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานซึ่งค่าการรั่วไหลมีมาตรฐานอยู่ไม่เกิน 5 มิลลิวัตต์/ตารางเซนติเมตร สำหรับการวัดอุณหภูมิวัสดุทดสอบสามารถ วัดได้ที่ตำแหน่งปากทางเข้าและออกเตาไมโครเวฟโดยใช้อินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ (ความแม่นยำในช่วง ± 0.5 องศาเซลเซียส)



(ก)



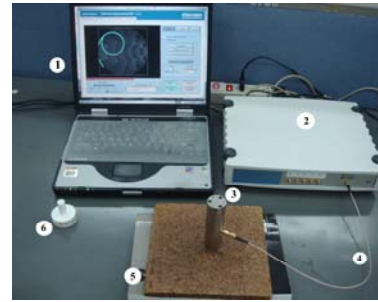
(ข)

รูปที่ 2 (ก) เครื่องไมโครเวฟแบบระบบสายพานลำเลียง
ต่อเนื่อง (ข) ไดอะแกรมรายละเอียดเครื่องมือทดลอง [1]

การวิเคราะห์การทำความร้อนในวัสดุไดอิเล็กตริก โดยการวัดค่าไดอิเล็กตริกด้วยเครื่องเน็ตเวิร์คแอนาไลเซอร์ (Network Analyzer) ดังแสดงในรูปที่ 3 เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานเปรียบเทียบในการวิเคราะห์เชิงลึกเป็นข้อมูลป้อนเข้าสำหรับการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีด้วยสมบัติไดอิเล็กตริกในวัสดุเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งในกระบวนการไมโครเวฟเพราะสมบัติไดอิเล็กตริกเป็นสมบัติที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟ ตัวเครื่องมือมีองค์ประกอบที่จำเป็นต่อการวัดอย่างสมบูรณ์แบบ เช่น การรักษาสัญญาณไมโครเวฟ การคำนวณสัญญาณ การเก็บข้อมูลจากการคำนวณ และการนำผลดังกล่าวมาแสดงเป็นกราฟ ควบคุมการทำงานด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์เพื่อวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นภายในวัสดุที่ถูกทดสอบ จากนั้นจะตรวจจับความถี่การสั่นพ้องของคลื่นภายในหัววัด (cavity) รวมไปถึงปัจจัยคุณภาพ (quality factor) และนำข้อมูลที่ได้แปรกลับเป็นค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ถูกทดสอบ

3.1 ขั้นตอนการทดลอง

การวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก นำวัสดุแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง ทำการวัด 5 จุดต่อหนึ่งชิ้นงาน ใช้เครื่องเน็ตเวิร์คแอนาไลเซอร์ (Network Analyzer) บันทึกค่าที่ได้แล้วนำมาหาค่า $\tan\delta$



1. Software
2. Microwave Reflect meter
3. Coaxial Cavity
4. Coaxial Cable
5. Sample
6. Female Calibration Standards

รูปที่ 3 เครื่องเน็ตเวิร์คแอนาไลเซอร์ [1]

การอบแห้งนำแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองทำการวัดความชื้นเริ่มต้นก่อนการทดลอง ทำการทดลองแบ่งออกเป็น 3 กรณีดังนี้

กรณี 1 ใช้แมกนีตรอนจำนวน 3 ตัว (กำลัง 800 วัตต์/ตัว) 2400 W อุณหภูมิความร้อนที่ 40 °C แผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองที่ใช้ในการทดลอง มีส่วนประกอบคือ เส้นใย, ผง และน้ำ แบ่งส่วนผสมออกเป็น 4 สูตร คือ 1:1:1, 1:1:1.5, 2:1:1.5, 2:1:2 ตามลำดับ ขนาด 20x20 cm.

กรณี 2 ใช้แมกนีตรอนจำนวน 3 ตัว (กำลัง 800 วัตต์/ตัว) 2400 W อุณหภูมิความร้อนที่ 50 °C แผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองที่ใช้ในการทดลอง มีส่วนประกอบคือ เส้นใย, ผง และน้ำ แบ่งส่วนผสมออกเป็น 4 สูตร คือ 1:1:1, 1:1:1.5, 2:1:1.5, 2:1:2 ตามลำดับ ขนาด 20x20 cm.

กรณี 3 ใช้แมกนีตรอนจำนวน 3 ตัว (กำลัง 800 วัตต์/ตัว) 2400 W อุณหภูมิความร้อนที่ 60 °C แผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองที่ใช้ในการทดลอง มีส่วนประกอบคือ เส้นใย, ผง และน้ำ แบ่งส่วนผสมออกเป็น 4 สูตร คือ 1:1:1, 1:1:1.5, 2:1:1.5, 2:1:2 ตามลำดับ ขนาด 20x20 cm.

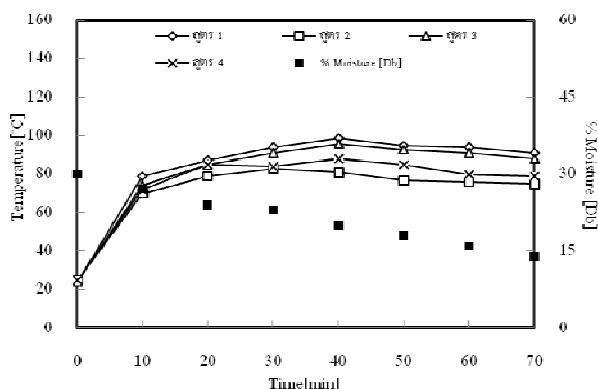
4. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง ที่วัดโดยใช้เครื่องเน็ตเวิร์คแอนาไลเซอร์ (Network Analyzer) แสดงดังในตารางที่ 1

จากรูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับเวลา โดยมีกำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิความร้อน 40 °C พบว่าช่วงแรกอุณหภูมิแผ่นขึ้นไม้อัดสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากแผ่นขึ้นไม้อัดมีความชื้นและค่า Loss Tangent Coefficient ($\tan\delta$) สูง ทำให้แผ่นขึ้นไม้อัด

อัดดูดซับพลังงานได้มาก ทำให้ความร้อนภายในแผ่นขึ้นไม้อัด(Q) สูงตามไปด้วย (ดังในสมการที่ 1) ในช่วงเวลาต่อมา อุณหภูมิของแผ่นขึ้นไม้อัดมีค่าค่อยๆ ลดต่ำลง เพราะความชื้นภายในวัสดุได้เคลื่อนตัวออกไป เนื่องจากในช่วงแรกของการกระบวนการอบแห้งภายในแผ่นขึ้นไม้อัด จะมีเฟสของของเหลวอยู่อย่างต่อเนื่อง ทำให้อิทธิพลของความดันพิวลารี (Capillary Pressure) ที่ขับเคลื่อนของเหลวไปยังผิวหน้าของแผ่นขึ้นไม้อัดมีค่าสูง แต่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณความชื้นลดลง ทำให้การเคลื่อนที่ของตารางที่ 1 ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง

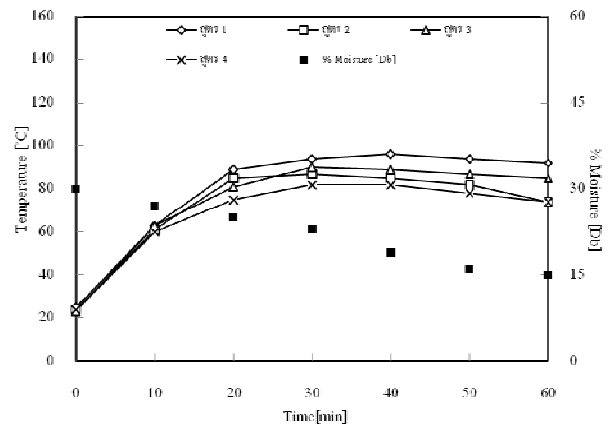
ชุดที่	แผ่นขึ้นไม้อัด	ค่า Dielectric constant (ϵ_r')	ค่า Dielectric loss factor (ϵ_r'')	ค่า Loss tangent coefficient ($\tan\delta$)
1	1:1:1	2.18862	0.345547	0.157533942
	1:1:1.5	2.14632	0.379913	0.176934528
	2:1:1.5	2.25451	0.446069	0.197688973
	2:1:2	2.31650	0.443787	0.191471577
2	1:1:1	2.37493	0.525012	0.220931119
	1:1:1.5	2.39608	0.539043	0.224797550
	2:1:1.5	2.23818	0.455578	0.203464611
	2:1:2	1.88531	0.306049	0.162227395
3	1:1:1	2.59829	0.610489	0.234860799
	1:1:1.5	2.18999	0.419730	0.191616784
	2:1:1.5	2.72758	0.677368	0.255083833
	2:1:2	2.23574	0.422795	0.189115917



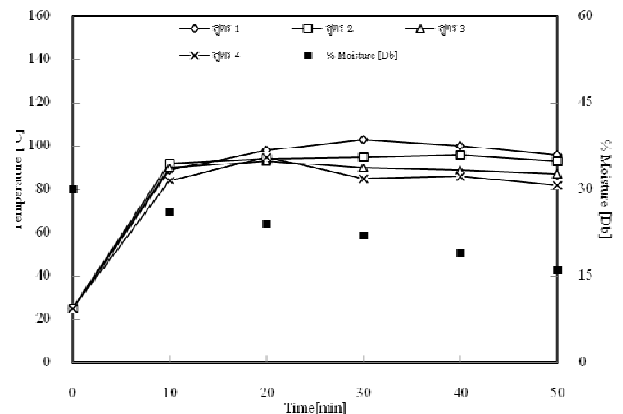
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับเวลา โดยมีกำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิความร้อน 40 °C

ความชื้น (ซึ่งเป็นไอส่วนใหญ่) ออกสู่ผิวน้ำนั้นเป็นอิทธิพลของการแพร่ของไอ (Vapor Diffusion) และ

ความดันก๊าซ (Gas Pressure) เป็นหลัก ประกอบกับอิทธิพลของการพาความร้อนบริเวณผิวหน้าของแผ่นขึ้นไม้อัดจึงทำให้การเคลื่อนย้ายความชื้นที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นขึ้นไม้อัดสูง และเมื่อพิจารณาภาพถ่ายความร้อนของแผ่นขึ้นไม้อัด พบว่าภายในบริเวณกึ่งกลางจะมีอุณหภูมิสูงกว่าด้านนอกอันเนื่องมาจากอิทธิพลการกระจายของความชื้นภายในแผ่นขึ้นไม้อัด



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับเวลา โดยมีกำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิความร้อน 50 °C

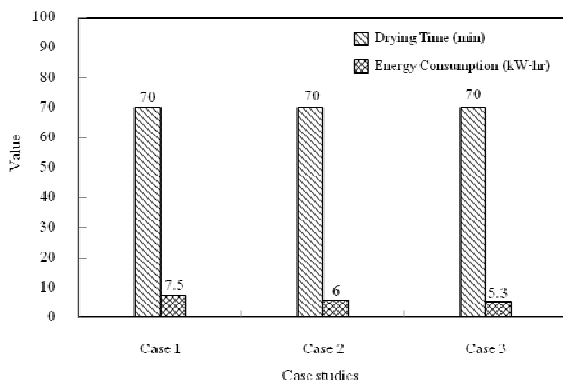


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับเวลา โดยมีกำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิความร้อน 60 °C

จากรูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับเวลา โดยมีกำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิความร้อน 50 °C พบว่าช่วงแรก แผ่นขึ้นไม้อัดมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากแผ่นขึ้นไม้อัดมีการดูดซับพลังงานไมโครเวฟอย่างต่อเนื่องส่งผลให้เกิดความร้อนขึ้น และเมื่อมีการดูดซับพลังงานลดลง ค่าอุณหภูมิจึงมีค่าลดลงตามไปด้วย เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับกรณีใช้กำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิความร้อน 40 °C พบว่าเมื่อใช้

อุณหภูมิลมร้อนสูงขึ้น จะช่วยให้ความชื้นสามารถเคลื่อนตัวออกจากผิวแผ่นชิ้นไม้อัดได้เร็วขึ้น

จากรูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับเวลา โดยมีกำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิลมร้อน 60 °C พบว่าช่วงแรก แผ่นชิ้นไม้อัดมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากแผ่นชิ้นไม้อัดมีการดูดซับพลังงานไมโครเวฟอย่างต่อเนื่องส่งผลให้เกิดความร้อนขึ้น เมื่อระยะเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น แผ่นชิ้นไม้อัดมีการดูดซับกำลังไมโครเวฟลดลง แต่ความร้อนสะสมในชิ้นไม้ยังมีค่าสูง ทำให้อุณหภูมิแผ่นชิ้นไม้อัดมีค่าสูงอยู่ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับกรณีใช้กำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิลมร้อน 40 °C และ 50 °C พบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิลมร้อนสูงขึ้น จะช่วยให้ความชื้นสามารถเคลื่อนตัวออกจากผิวแผ่นชิ้นไม้อัดได้เร็วขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด และให้อัตราการอบแห้งสูงที่สุดด้วย

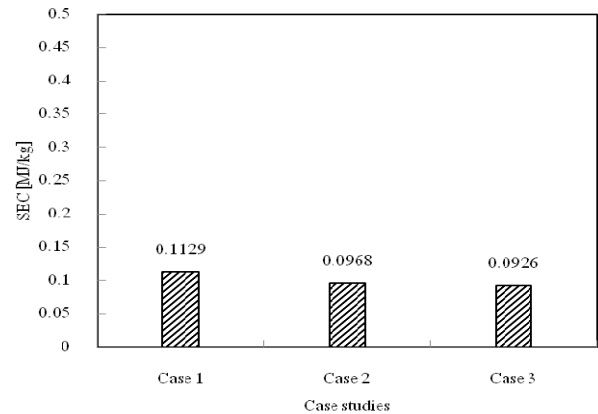


รูปที่ 7 การใช้กำลังพลังงานไฟฟ้าและเวลาในการอบแห้ง

จากรูปที่ 7 การใช้พลังงานกำลังไฟฟ้าในกระบวนการอบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้ระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่อง กรณี 1 ใช้กำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิลมร้อน 40 °C ใช้พลังงานไฟฟ้า 7.5 kW-hr กรณี 2 ใช้กำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิลมร้อน 50 °C ใช้พลังงานไฟฟ้า 6 kW-hr กรณี 3 ใช้กำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิลมร้อน 60 °C ใช้พลังงานไฟฟ้า 5.3 kW-hr โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อน 60 °C การใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อน 40 °C และ 50 °C ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนช่วยเพิ่มความสามารถในการระเหยของน้ำในแผ่นชิ้นไม้อัดให้มากขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยลง ทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยลงด้วย

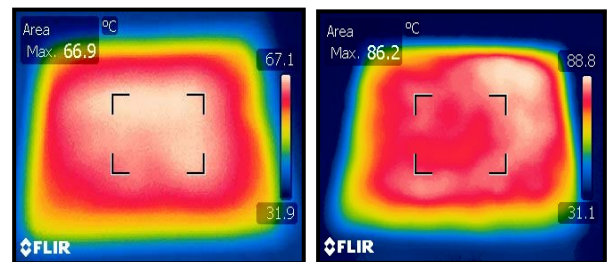
จากรูปที่ 8 แสดงค่าความสิ้นเปลืองพลังงานเฉพาะที่ใช้ในการทดลองอบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัดด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้ระบบสายพานลำเลียง

ต่อเนื่อง ใช้ กำลังไมโครเวฟ 2400 W ที่อุณหภูมิ 40 °C, 50 °C



รูปที่ 8 การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในกระบวนการอบแห้ง (Specific Energy Consumption in Drying Process)

และ 60 °C พบว่า ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน เท่ากับ 0.1129, 0.0968 และ 0.0926 MJ/kg ตามลำดับ แต่ที่อุณหภูมิลมร้อน 60 °C ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีต่ำสุดเท่ากับ 0.0926 MJ/kg ทั้งนี้เนื่องจากระยะเวลาในการอบแห้งมีผลโดยตรงต่อค่าความสิ้นเปลืองพลังงาน เมื่อใช้อุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง ความสิ้นเปลืองพลังงานก็จะลดลงตามไปด้วย



รูปที่ 9 ภาพถ่ายความร้อนแผ่นชิ้นไม้อัด

จากรูปที่ 9 ภาพถ่ายความร้อนแผ่นชิ้นไม้อัด เมื่อพิจารณาภาพถ่ายความร้อนแผ่นชิ้นไม้อัด บริเวณภายในแผ่นชิ้นไม้อัดมีอุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิบริเวณภายนอก เนื่องจากบริเวณภายในแผ่นชิ้นไม้อัดมีความชื้นและค่า Loss Tangent Coefficient ($\tan\delta$) สูง ทำให้แผ่นชิ้นไม้อัดดูดซับพลังงานได้มาก ทำให้ความร้อนภายในแผ่นชิ้นไม้อัดสูงตามไปด้วย การให้ความร้อนในช่วงแรกด้วยลมร้อนวิธีดังกล่าวจะให้ความร้อนได้ดีที่ผิว หลังจากนั้นเมื่อความชื้นที่บริเวณผิวลดลง มวลของความชื้นเคลื่อนที่เข้าไปรวมที่จุดกึ่งกลางวัสดุ จึงทำการให้ความร้อนด้วย

ไมโครเวฟในช่วงนี้จะทำให้เกิดความร้อนและแรงดันไอขึ้นภายในช่วยไล่ความชื้นให้เคลื่อนตัวได้สะดวกขึ้น

จากตารางที่ 2 แสดงผลการทดลองโดยใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนในกรณีต่างๆ จะเห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนจะช่วยให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้นแต่ต้องคำนึงถึงการควบคุมอุณหภูมิภายในแผ่นขึ้นไม้อัดอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมเพื่อป้องกันแผ่นขึ้นไม้อัดเสียหาย ตารางที่ 2 ผลการทดลองโดยใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนในกรณีต่างๆ

กำลังไมโครเวฟ (W)	อุณหภูมิลมร้อน	สูตร	น้ำหนักก่อนอบแห้ง (g)	น้ำหนักหลังอบแห้ง (g)	อัตราการอบแห้ง (Drying rate)
2400	40	1:1:1	366	322	0.63
		1:1:1.5	361	311	0.71
		2:1:1.5	371	315	0.80
		2:1:2	369	313	0.80
	50	1:1:1	375	312	0.90
		1:1:1.5	375	311	0.91
		2:1:1.5	354	308	0.66
		2:1:2	357	307	0.71
	60	1:1:1	387	325	0.89
		1:1:1.5	357	304	0.76
		2:1:1.5	383	315	0.97
		2:1:2	358	302	0.80

5.สรุปผลการทดลอง

การอบแห้งแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้ระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่อง พบว่าการให้ความร้อนในช่วงแรกควรใช้ลมร้อนก่อนเพราะวิธีดังกล่าวของกระบวนการกระบวนการอบแห้งจะให้ความร้อนได้ดีที่สุด หลังจากนั้นเมื่อความชื้นที่บริเวณผิวลดลงจึงให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ เนื่องจากที่ผิวสามารถทำให้การดูดซับคลื่นไมโครเวฟได้ดีและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจะเกิดความร้อนจากภายในแผ่นขึ้นไม้อัดจึงสามารถขับเคลื่อนความชื้นมาสู่ผิวหน้าได้รวดเร็ว จากการสังเกตภาพถ่ายความร้อนของแผ่นขึ้นไม้อัด ดังนั้นการอบแห้งด้วยพลังงานไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนในกระบวนการอบแห้งทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับใช้พลังงานไมโครเวฟเพียงอย่างเดียว

6.กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณงบประมาณแผ่นดินจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และสำนักงาน

คณะกรรมการสภาวิจัยแห่งชาติที่สนับสนุนเงินในการดำเนินการวิจัย และสมาชิกในหน่วยวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม (R.C.M.E.) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

7.เอกสารอ้างอิง

- [1] Rattanadecho, P., Suwannapum, N., Watanasungsuit, A. and Duangduen, A., 2007, "Drying of Dielectric Materials Using Microwave-Continuous Belt Furnace.", ASME J. Manufacturing Sciences and Engineering, Vol. 129 (1), pp. 157-163.
- [2] Varith, J., Dijkanarukkul, P., Achariyaviriya, A. and Achariyaviriya, S., 2007, Combined Microwave-Hot air Drying of Peeled Longon, Journal of Food Engineering., Vol.31, pp. 459-468.
- [4] Rattanadecho, P., Aoki, K. and Akahori, M., 2002, "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 (1), 2002, pp. 151-161.
- [5] Jindarat, W., Rattanadecho, P., Vongpradubchai, S. and Pianroj, Y., 2011, Analysis of Energy Consumption in Drying Process of Non-Hygroscopic Porous Packed Bed Using a Combined Multi-Feed Microwave - Convective Air and Continuous Belt System (CMCB), Drying Technology An International J., Vol.29(08), pp. 926 - 938.
- [6] Rattanadecho, P., Duangduen, A., Vongpradubchai, S., 2006, "Drying of a Slip Casting for Tableware Product Using Microwave-Continuous Belt Furnace.", Drying Technology An International J., Vol. 26, pp. 589-594.
- [7] Jindarat, W., Rattanadecho, P. and Vongpradubchai, S., 2011, "Analysis of Energy Consumption in Microwave and Convective Drying Process of Multi-Layer Porous Material Inside a Rectangular Wave Guide", Experimental Thermal and Fluid Science. 35, pp.728-737