

TSF-34

การวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อนในการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยไมโครเวฟ
ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรต์ร่วมกับการพาความร้อน ในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมโหมด TE 10

Analysis of Heat Transfer in Microwave Paddy Dehydration Frequency of 2.45 GHz

Combined with Heat Convection TE10 Mode Rectangular Waveguide

บุรณพิภพ อึ้งไพเราะ¹, นิธิ ไทรชมภู¹ และ สรวุฒิ เขียวแสง¹ และ ณัฐวุฒิ สุวรรณภูมิ^{1*}

¹สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (ศาลายา)

96 หมู่.3 ถนนพุทธมณฑล สาย 5 ตำบล ศาลายา อำเภอ พุทธมณฑล จังหวัด นครปฐม 73170

*ติดต่อ: nattawut.suw@rmutr.ac.th, fitvan@gmail.com, เบอร์โทรศัพท์ 02-889-4585-7 ต่อ 2675, เบอร์โทรสาร 02-889-4585-7 ต่อ 2621

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษากระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวล ในการอบข้าวเปลือกด้วยพลังงานไมโครเวฟ ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรต์ (GHz) ขนาด 100-200 วัตต์ แบบคลื่นระนาบภายใต้ค่าที่ดีท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมโหมด TE 10 ร่วมกับการพาความร้อนผ่านผิวหน้าวัสดุด้านบนและด้านล่าง โดยท่อนำคลื่นมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าหน้าตัด 5.5x11 เซนติเมตร² ส่งผลให้คลื่นไมโครเวฟมีพฤติกรรมเป็นคลื่นระนาบแบบโหมดเดี่ยวง่ายต่อการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อน ตัวระบบที่พัฒนาขึ้นมีการป้องกันการรั่วไหลของไมโครเวฟไม่ให้เกิดมาตรฐานที่ 5 มิลลิวัตต์/เซนติเมตร² โดยทำการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและความชื้นในเมล็ดข้าวที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ และกระบวนการพาความร้อนด้วยลม ในการศึกษาวัสดุทดสอบจะบรรจุในภาชนะที่ไม่ดูดกลืนพลังงานไมโครเวฟ ขนาดของ วัสดุทดสอบ เท่ากับ 5.5x11x8 เซนติเมตร³ และความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้นที่ 20 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อ ให้ความพลังงานด้วยไมโครเวฟสามารถทำความร้อนแก่ข้าวเปลือกที่มีความหนา 8 เซนติเมตรได้ทั่วทั้งปริมาตร และพบว่าเมื่อ เพิ่มกระบวนการพาด้วยลมร้อน (อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการลดปริมาณความชื้นได้ดี ยิ่งขึ้น

คำหลัก: ไมโครเวฟ, การพาความร้อน, ข้าวเปลือก

Abstract

The presented study investigated heat and mass transfer in microwave drying process of paddy using TE10 mode rectangular waveguide cavity combined with heat convection by passing through a material at top and bottom surface at frequency of 2.45 GHz and power of 100-200 Watt. The cross section area of waveguide was 5.5x11 cm². Therefore electromagnetic behavior was single mode plane wave which was easy to study of thermal behavior. The microwave leakage from developed system was controlled below the standard of 5 mW/cm². Heat transfer and moisture transport of paddy was discussed between microwave energy and heat convection. The dimension and initial moisture contain of paddy were 5.5x11x8 cm³ and 20 percent, respectively. The results showed that the microwave energy could heat throughout the volume of paddy with a thickness of 8 cm. As a result, when added heat convection (Temperature of 60° C) could optimized to reduce the moisture content.

Keywords: Microwave, Heat convection, Paddy

TSF-34

1. บทนำ

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศมาอย่างยาวนาน และเป็นสินค้าเกษตรส่งออกที่สำคัญของประเทศอย่างต่อเนื่องมาหลายทศวรรษ ดังนั้นการพัฒนาเทคนิควิธีการต่างๆ ด้วยเทคโนโลยีสมัยใหม่จึงมีความจำเป็นต่องานทางด้านอุตสาหกรรมข้าวเป็นอย่างมากไม่ว่าจะเป็นเทคโนโลยีทางการปลูก ผลิต และปรับปรุงพันธุ์ เพื่อจำหน่ายเป็นข้าวสาร หรือการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากข้าวเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ เพื่อเพิ่มมูลค่า เช่น เครื่องดื่มธัญพืช ส่วนผสมเครื่องสำอาง วัตถุดิบแปรรูปอาหาร รวมถึงผลิตภัณฑ์ทางด้านแอลกอฮอล์ เป็นต้น สำหรับการกระบวนการปลูกและผลิตข้าวสารเพื่อจำหน่ายนั้น จะเริ่มต้นด้วยการปลูกข้าว เก็บเกี่ยวเมล็ดพันธุ์ กระบวนการลดปริมาณความชื้น และแปรรูปเป็นข้าวสารเพื่อจำหน่าย

ขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่งจากที่กล่าวข้างต้นในกระบวนการผลิตข้าวคือกระบวนการลดปริมาณความชื้นด้วยวิธีการอบแห้งข้าวโดยใช้ความร้อนเป็นกลไกหลักในการขับเคลื่อนความชื้น ซึ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีการอบแห้งข้าวได้มีการวิจัยพัฒนาเพิ่มมากขึ้น มีการเลือกใช้แหล่งพลังงานต่างๆ รวมถึงเทคนิควิธีการที่เหมาะสมสำหรับใช้ในกระบวนการอบแห้งข้าว เพื่อเป็นทางเลือกใหม่ๆ ให้กับผู้ประกอบการในการเลือกใช้เพื่อลดต้นทุนค่าใช้จ่ายและเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับกระบวนการผลิต รวมไปถึงการรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งในกระบวนการลดปริมาณความชื้นในข้าวเปลือกนั้น มีกระบวนการที่หลากหลาย อาทิเช่น การลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้หอบแห้งชนิดท่อเกลียว (ฉัตรชัย นิยมผล [1]) การอบแห้งข้าวด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ ([2]-[4]) เครื่องอบข้าวแบบโรตารี (ยงยุทธ พิชกมทุร [5]) การชะลอความเสียหายของกองข้าวเปลือกขึ้นโดยการระบายอากาศ (อรรถพร อภิวัฒนากุล และคณะ [6]) การลดความชื้นข้าวเปลือกโดยใช้วัสดุพูนช่วยเป็นตัวกลางในการดูดซับร่วมกับลมร้อน (Wiriyumpaiwong และคณะ [7]) การใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดในกระบวนการอบข้าว (Izadifara และ Mowlab [8]) จะเห็นได้ว่าแต่ละวิธีการล้วนน่าสนใจและเป็นวิธีการที่มีจุดมุ่งหมายเดียวกันคือ เพื่อปรับปรุงพัฒนาประสิทธิภาพและเทคนิคการอบไล่ความชื้นข้าวให้ใช้พลังงานน้อยลง ใช้ระยะเวลาในกระบวนการอบน้อยลง ใช้ค่าใช้จ่ายในกระบวนการน้อยลง รวมทั้งลดความเสียหายที่มีต่อ

ผลผลิตด้วย (งานวิจัยที่รายงานด้านนี้อย่างชัดเจนเช่น [9] - [11])

เทคโนโลยีหนึ่งที่น่าสนใจคือการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ เนื่องจากหลักการของไมโครเวฟเป็นการปล่อยพลังงานคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปในวัสดุและวัสดุนั้นจะดูดซับพลังงานทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้าและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนด้วยตัวมันเอง ส่งผลให้เกิดการปล่อยพลังงานความร้อนจากภายในตัวของวัสดุ ซึ่งมีตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้วิธีการนี้ในผลิตภัณฑ์ต่างๆ ดัง [12] – [14] แต่หลักการดังกล่าวก็มีข้อเสียตรงที่ความซับซ้อนของโหมดคลื่นที่ไม่แน่นอนอันเกิดจากขนาดควาิตี้ ขนาดความหนาวัสดุ รวมถึงปริมาณความชื้นในวัสดุ ส่งผลให้เกิดบริเวณจุดที่สะสมความร้อนและจุดที่ไม่ได้รับพลังงานในกระบวนการทำความร้อน รวมถึงอุณหภูมิบริเวณผิววัสดุที่มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิแวดล้อมส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลด้วยวิธีการพาความร้อนแบบธรรมชาตินั้นเกิดขึ้นน้อย อันส่งผลเสียต่อพฤติกรรมความชื้นในภาพรวม จึงทำให้การประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟในการลดความชื้นแก่ข้าวเปลือกยังอยู่ในวงจำกัด

สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้มีแนวคิดที่จะประยุกต์ใช้พลังงานทางด้านไมโครเวฟร่วมกับการพาความร้อนด้วยลมร้อนในสภาวะที่สมดุลกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งของข้าวเปลือกหลังจากการเก็บเกี่ยว และศึกษากลไกทางด้านความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการให้ความร้อน โดยมุ่งเน้นไปที่ระบบขนาดห้องปฏิบัติการเพื่อลดความซับซ้อนของตัวแปรอื่นๆ ที่ไม่เกี่ยวข้อง รวมถึงโหมดคลื่นไมโครเวฟที่ถูกออกแบบให้ลดความซับซ้อนโดยอยู่ในรูปคลื่นระนาบเดียวจากแหล่งคลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์เคลื่อนที่ในควาิตี้ที่ออกแบบสี่เหลี่ยมโหมด TE₁₀ และบริเวณควาิตี้ที่ใส่ชิ้นงานทดสอบจะใช้ระบบการพาความร้อนด้วยลมร้อนที่ผิวทางด้านบนและด้านล่างวัสดุ เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัวทางความร้อนที่เกิดขึ้นภายในวัสดุในแต่ละช่วงเวลาการอบ และเพื่อหาแนวทางในการลดปริมาณความชื้นข้าวเปลือก โดยผลการศึกษาที่ได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบพัฒนากระบวนการทำความร้อนในบางปฏิบัติต่อไปในอนาคต

TSF-34

2.ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้พื้นฐานของการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ

สำหรับกรรมวิธีทางความร้อนโดยทั่วไปจะอาศัยหลักการของผลต่างอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิแวดล้อมและอุณหภูมิผิวหน้าวัสดุที่ทำให้อุณหภูมิผิวหน้าวัสดุสูงขึ้นตามอุณหภูมิแวดล้อมจากนั้นพลังงานความร้อนจะถูกส่งต่อภายในวัสดุไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าด้วยกลไกการนำความร้อนในตัววัสดุ แต่วิธีการดังกล่าวมีข้อเสีย กล่าวคือใช้ระยะเวลานาน ประสิทธิภาพจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อระยะเวลาเปลี่ยนไป มีปัญหาเรื่องคุณภาพของวัสดุ เนื่องจากใช้ระยะเวลานาน ในทางตรงข้ามกรรมวิธีไมโครเวฟเป็นการให้ความร้อนเชิงปริมาตร (volumetric heating) และหากขนาดของวัสดุมีค่าน้อยกว่าค่าความสามารถในการทะลุทะลวงหรือความลึกทะลุทะลวง (penetration depth) จะเกิดปรากฏการณ์การสะท้อนของคลื่น (resonance) ภายในวัสดุทำให้การกระจายของสนามมีลักษณะเป็นคลื่นนิ่งที่มีจุดร้อนเกิดอยู่บริเวณกึ่งกลางวัสดุ และการสะท้อนของคลื่นดังกล่าวยังส่งผลให้ความเข้มของสนามไมโครเวฟในวัสดุสูงขึ้น

ในการศึกษาความร้อนจากกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟความรู้เกี่ยวกับสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุมีความจำเป็นเพราะสมบัตินี้ส่งผลต่อการเกิดความร้อนและการกระจายตัวของความร้อนภายในวัสดุที่ผ่านกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ ซึ่งความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กตริกสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้ [15]

$$\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon'' = \varepsilon_0(\varepsilon_r' + j\varepsilon_r'') \quad (1)$$

เมื่อ $j = \sqrt{-1}$, ε คือ สมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ (complex dielectric permittivity) ซึ่งเป็นสมบัติ ที่อธิบายถึงความสามารถในการดูดซับ ส่งผ่าน และสะท้อนพลังงานที่เป็นสนามไฟฟ้าของวัสดุ โดย ε_0 คือสมบัติไดอิเล็กตริกของที่ว่าง (free space) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.86×10^{-12} F/m, ε_r' เป็นจำนวนจริงของสมบัติไดอิเล็กตริก (relative permittivity หรือ relative dielectric constant) ใช้อธิบายความสามารถในการส่งผ่าน และสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟในวัสดุ และ ε_r'' เป็นจำนวนจินตภาพของสมบัติไดอิเล็กตริก โดยทั่วไปเรียกไดอิเล็กตริก LOSS FACTOR (dielectric loss factor) ใช้

อธิบายการสูญเสียพลังงานของคลื่นไมโครเวฟเมื่อผ่านวัสดุ

สำหรับค่าประสิทธิภาพลอสมแทนเจนท์ (loss tangent coefficient ($\tan \delta$)) เป็นตัวแปรที่สำคัญอีกตัวแปรหนึ่งที่ใช้อธิบายความสามารถในการผลิตความร้อนของวัสดุไดอิเล็กตริกเมื่อถูกคลื่นพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ [15]

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_r' \varepsilon_0} \quad (2)$$

และในการวิเคราะห์การทำความร้อนในวัสดุไดอิเล็กตริก โดยปกติจะใช้กำลังสองของความเข้มของสนามไฟฟ้าในการประมาณค่าการดูดกลืนพลังงานในวัสดุไดอิเล็กตริก ซึ่งค่าการดูดกลืนหรือความร้อนเชิงปริมาตร (Q) สามารถอธิบายเป็นสมการได้ดังนี้ [15]

$$Q = \sigma |E|^2 = 2\pi \cdot f \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r'' (\tan \delta) E^2 \quad (3)$$

เมื่อ σ คือ สมบัติการนำไฟฟ้า, f คือ ความถี่ (GHz) และ E คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า

จากสมการดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสนามไฟฟ้า ความถี่ไมโครเวฟ และสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุไดอิเล็กตริกที่ส่งผลต่อการเกิดความร้อนเชิงปริมาตรในวัสดุ โดยปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบของสนามไมโครเวฟอีกสิ่งหนึ่งซึ่งค่าความลึกทะลุทะลวง (penetration depth) ซึ่งบ่งบอกถึงรูปแบบการกระจายสนามไฟฟ้าในวัสดุรวมไปถึงสนามอุณหภูมิ ซึ่งค่าความลึกทะลุทะลวงนี้เป็นระยะความเข้มของพลังงานในวัสดุ [15]

$$D_p = \frac{1}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\varepsilon_r' \left(\sqrt{1 + (\tan \delta)^2} - 1 \right)}} \quad (4)$$

เมื่อ D_p คือ ค่าความลึกทะลุทะลวง และ v คือ ค่าความเร็วคลื่นไมโครเวฟ

ค่าความลึกทะลุทะลวงสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (4) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการทะลุทะลวงขึ้นอยู่กับสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ ถ้าวัสดุมีความหนาแน่นน้อยกว่าค่าความลึกทะลุทะลวงวัสดุจะมีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงที่บริเวณผิวหน้าวัสดุที่ได้รับคลื่นและอุณหภูมิจะลดลงในลักษณะเอ็กซ์โปเนนเชียล แต่หากวัสดุมีความหนาแน่นน้อยกว่าค่าความลึกทะลุทะลวงค่าความเข้มสนามไฟฟ้าจะไม่เป็นลักษณะเอ็กซ์โปเนนเชียล ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการวิเคราะห์อันตรกิริยาระหว่างพลังงานไมโครเวฟกับวัสดุไดอิเล็กตริก

TSF-34

2.2 อัตราการอบแห้ง

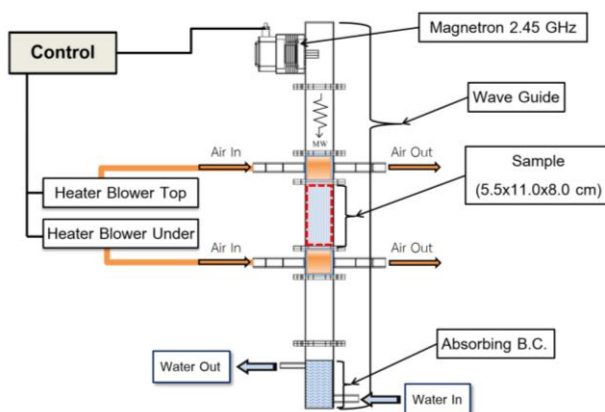
จากผลการทดลองทำการคำนวณหาอัตราการอบแห้ง เพื่อหาประสิทธิภาพในการลดปริมาณความชื้นในแต่ละกระบวนการ โดยความชื้นในเมล็ดพืชคือ ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในเมล็ดพืช เมื่อพิจารณาจะพบว่าในเมล็ดพืชประกอบด้วย 2 ส่วน คือส่วนที่เป็นน้ำหนักแห้งของเมล็ดพืชซึ่งจะมีค่าคงที่ตลอด กับส่วนที่เป็นน้ำหนักน้ำที่มีอยู่ในเมล็ดพืช ส่วนน้ำหนักน้ำในเมล็ดพืชจะเปลี่ยนแปลงตามความชื้นของเมล็ดพืช โดยคำนวณจากฐานมวลแห้ง (dry basis) [16]

$$M = \frac{w-d}{d}(100\%) \quad (5)$$

เมื่อ M คือ ปริมาณความชื้น (%), w คือ น้ำหนักเปียก (g) และ d คือ น้ำหนักแห้ง (g)

3.ระเบียบวิธีทดลอง

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 1 ระบบไมโครเวฟควิตี้ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมโหมด TE 10

ระบบไมโครเวฟที่ใช้สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้เป็นระบบไมโครเวฟระบบไมโครเวฟควิตี้ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมโหมด TE 10 ที่ทางผู้วิจัยพัฒนาขึ้น โดยอาศัยหลักการเบื้องต้นคือ วัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการจะถูกใส่ไว้ในบริเวณตำแหน่งวางชิ้นงาน (sample) ภายในควิตี้แบบสี่เหลี่ยม (rectangular cavity) ที่มีขนาดหน้าตัดตลอดท่อเท่ากับ 55 X 110 มิลลิเมตร ซึ่งด้านบนของท่อนำคลื่นจะติดตั้งแมกนีตรอน (magnetron) ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต (GHz) กำลังสูงสุด 900 วัตต์ ไว้จำนวน 1 ตัว เพื่อกำเนิดคลื่นซึ่งป้อนคลื่นระนาบ (โหมด TE₁₀) และระบบพาความร้อนผ่านผิวหน้าวัสดุด้านบนและด้านล่าง เพื่อกำเนิดความ

ร้อนภายในวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการ (รูปที่ 1) โดยระบบไมโครเวฟจะมีการดัดคลื่นไมโครเวฟที่อาจรั่วไหลออกมาเพื่อไม่ให้เป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งค่าการรั่วไหลมีมาตรฐานอยู่ไม่เกิน 5 mW/cm²

การวัดอุณหภูมิวัสดุทดสอบนั้นทางผู้วิจัยมีข้อจำกัดในด้านอุปกรณ์การวัดที่ไม่สามารถใช้วัดโดยตรงในการทดลองขณะเปิดคลื่นไมโครเวฟได้ (เทอร์โมคัปเปิลเป็นโลหะซึ่งเป็นตัวนำยิ่งยวดจะส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมของการกระจายตัวของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า) ดังนั้นการวัดอุณหภูมิจึงใช้วิธีการนำชิ้นงานทดสอบออกมาวัดด้านนอกควิตี้ โดยวัดค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิวัสดุที่อยู่ภายในภาชนะจากเครื่องมือบันทึกอุณหภูมิ (Data Logger) ด้วยสายวัดอุณหภูมิ (Thermocouples) โดยวัดอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางภายในภาชนะ (เป็นค่าอุณหภูมิที่เกิดจากผิวสายวัดอุณหภูมิสัมผัสกับเปลือกข้าวเปลือกและโพรงอากาศภายใน ไม่ใช่ภายในเมล็ดข้าว) และมีระยะห่างในแต่ละช่วงเท่ากับ 1 cm (รูปที่ 2) พร้อมทั้งบันทึกพฤติกรรมทางความร้อนบริเวณผิวด้านนอกของวัสดุด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermography) (รูปที่ 3) เพื่อสังเกตพฤติกรรมการกระจายตัวทางความร้อน



รูปที่ 2 ภาชนะที่ใช้ข้าวเปลือก และตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิด้วยสายเทอร์โมคัปเปิล



(ก)

(ข)

รูปที่ 3 อุปกรณ์สำหรับเก็บค่าอุณหภูมิ

(ก) เครื่องมือบันทึกอุณหภูมิ (Data Logger) YOKOGAWA โมเดล FX1012 พร้อมสายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K

(ข) กล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermography) FLIR โมเดล T640

TSF-34

3.2 กระบวนการทดลองที่เงื่อนไขต่าง ๆ

สำหรับวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ คือ เมล็ดพันธุ์ข้าวประเภทปทุมธานี 60 หรือ กข 31 ที่มีความชื้นหลังจากการเก็บเกี่ยวประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยการทดสอบจะใช้ภาชนะขนาด 80x55x110 มม.³ (ความหนาของวัสดุ 8 เซนติเมตร) ที่ก้นภาชนะด้านล่างมีลักษณะเป็นตาข่าย (รูปที่ 2) เพื่อให้สามารถศึกษาอิทธิพลการพาความร้อนได้ทั้งผิวด้านบนและด้านล่างของวัสดุข้าวเปลือก โดยกำหนดเงื่อนไขในการทดลองดังนี้

1.) ทำการทดลองโดยการปล่อยพลังงานไมโครเวฟกำลัง 200 วัตต์ และกำลัง 100 วัตต์ ในท่อนำคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz เป็นเวลา 5, 15, 30, 45 และ 60 นาที ตามลำดับ

2.) ทำการทดลองโดยการปล่อยความร้อนผ่านบริเวณผิวด้านบนและด้านล่างที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5, 15, 30, 45 และ 60 นาที ตามลำดับ

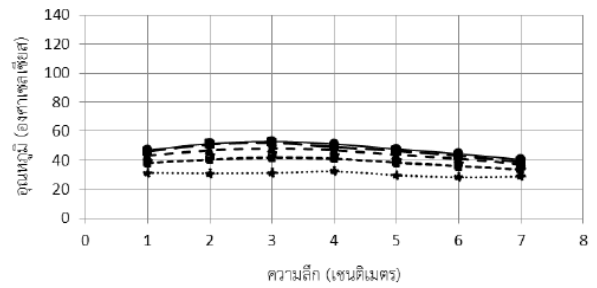
3.) ทำการทดลองโดยปล่อยพลังงานไมโครเวฟกำลัง 200 วัตต์ และกำลัง 100 วัตต์ ร่วมกับการปล่อยลมที่อุณหภูมิห้องผ่านบริเวณผิวด้านบนและด้านล่างที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5, 15, 30, 45 และ 60 นาที ตามลำดับ

4.) ทำการทดลองโดยการปล่อยพลังงานไมโครเวฟกำลัง 200 วัตต์ และกำลัง 100 วัตต์ ร่วมกับการปล่อยลมร้อนผ่านบริเวณผิวด้านบนและด้านล่างที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5, 15, 30, 45 และ 60 นาที ตามลำดับ

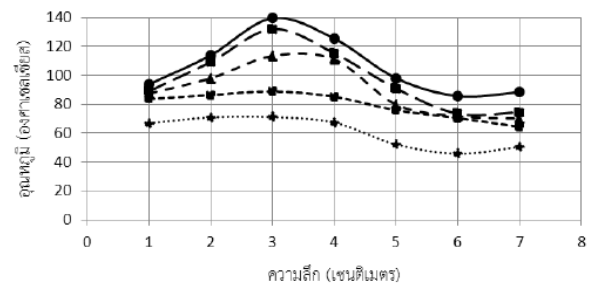
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

จากผลการทดลองเปรียบเทียบพฤติกรรมความร้อนของข้าวเปลือก โดยการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟกำลัง 100 และ 200 วัตต์ พิจารณาได้ว่าการให้พลังงานไมโครเวฟกำลัง 100 วัตต์ (รูปที่ 4ก) พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ความลึก 1-7 เซนติเมตรค่อนข้างสม่ำเสมอทั่วทั้งวัสดุ ซึ่งเกิดอุณหภูมิไม่สูงมากนักประมาณ 40-50 องศาเซลเซียส เนื่องจากปริมาณความชื้นของสนามไฟฟ้าที่ไม่มากนักส่งผลต่อการดูดกลืนพลังงานที่ต่ำตามไปด้วย และผลจากการกระจายตัวลักษณะนี้แสดงให้เห็นว่าคลื่นไมโครเวฟมีพลังงานเพียงพอที่จะเดินทางผ่านชั้นข้าวเปลือกความหนา 8 ซม. หรือ

กล่าวอีกนัยหนึ่งคือค่าความลึกทะลุทะลวง (D_p) จากสมการ (4) มีค่ามากกว่าชั้นความหนาของข้าว



(ก)



(ข)

รูปที่ 4 เปรียบเทียบการกระจายตัวอุณหภูมิโดยให้ความร้อนแก่ข้าวเปลือกด้วยพลังงานไมโครเวฟ เวลา 60 วินาที

(ก) การให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟกำลัง 100 วัตต์

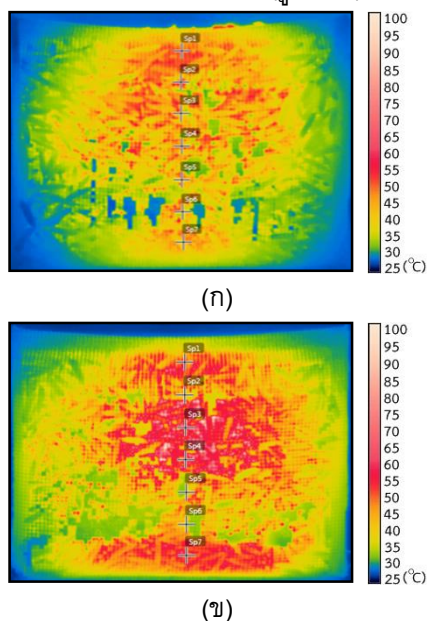
(ข) การให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟกำลัง 200 วัตต์

เมื่อทำการเพิ่มความเข้มของสนามไฟฟ้า (กำลังวัตต์ป้อนเข้าเพิ่มขึ้น) โดยการให้พลังงานไมโครเวฟกำลังไฟฟ้า 200 วัตต์ (รูปที่ 4ข) พบว่าพฤติกรรมการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ความลึกเริ่มต้น 1 เซนติเมตร จะมีอุณหภูมิสูงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 140 องศาเซลเซียส ที่ความลึก 3 เซนติเมตร และอุณหภูมิเริ่มลดลงตามระยะความลึกและกลับเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยที่ระยะ 7 ซม. แสดงถึงการเกิดสภาพคลื่นนิ่งเป็นช่วงคลื่น ซึ่งช่วยยืนยันว่าคลื่นไมโครเวฟสามารถเคลื่อนที่และส่งถ่ายพลังงานที่ชั้นข้าวเปลือกหนา 8 ซม. ได้ (จึงเป็นที่มาของขอบเขตการศึกษาที่ความหนาขนาด 8 เซนติเมตร) และเมื่อเปรียบเทียบผลระหว่างกำลังไฟฟ้าจะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้า 200 วัตต์ ให้อุณหภูมิที่สูงกว่าและมีผลต่างอุณหภูมิจุดสูงสุดและต่ำสุดมากกว่าเนื่องจากค่าความร้อนที่เกิดขึ้นในวัสดุจะแปรผันตรงกับค่ากำลังสอง

TSF-34

ของความเข้มสนามไฟฟ้า (ตามกลไกจากสมการ (2)) และแปรผันกับค่าสมบัติไดอิเล็กตริก (สมการ (1) และ (2)) ทำให้ใช้ระยะเวลาในการทำความร้อนสั้นกว่ากำลังไฟฟ้าต่ำหากต้องการอุณหภูมิทำความร้อนที่เท่ากัน

หากวิเคราะห์การใช้งานในทางปฏิบัติการให้พลังงานไมโครเวฟกำลังไฟฟ้า 200 วัตต์ ลักษณะทางด้านอุณหภูมิโดยรวมค่อนข้างสูงและมีความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างจุดสูงสุดและต่ำสุดมากพอสมควร จึงไม่เหมาะสมสำหรับการลดความชื้นแก่ข้าวเปลือก เพราะอาจทำให้ข้าวเปลือกเกิดการไหม้เกรียมและเสียหายได้ สังเกตการกระจายตัวทางความร้อนเพิ่มเติม (รูปที่ 5)



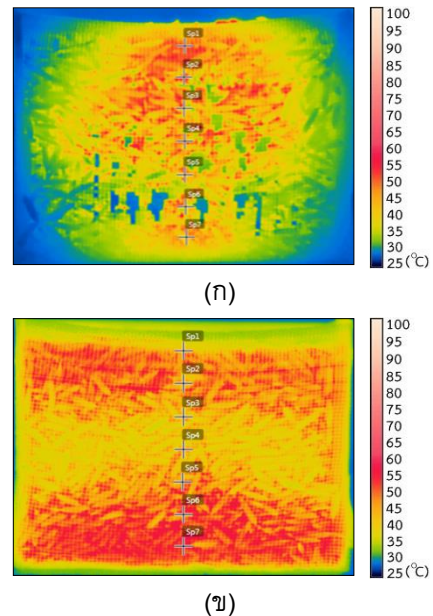
รูปที่ 5 เปรียบเทียบการให้ความร้อนแก่ข้าวเปลือกด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เวลา 60 นาที

(ก) การให้พลังงานความร้อนด้วยไมโครเวฟกำลัง 100 วัตต์

(ข) การให้พลังงานความร้อนด้วยไมโครเวฟกำลัง 200 วัตต์

รูปที่ 5 แสดงผลเปรียบเทียบการกระจายตัวอุณหภูมิเพื่อยืนยันข้อมูลจากรูปที่ 4 อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งจากข้อมูลพบว่าการถ่ายภาพความร้อนที่ผิวด้านนอกแม้จะให้ลักษณะการกระจายตัวอุณหภูมิที่ชัดเจน แต่มีข้อเสียคืออุณหภูมิที่วัดได้จากกล้องจะมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิที่วัดภายในด้วยเทอร์โมคัปเปิลมากพอสมควร และหากพิจารณาเพิ่มเติมถึงการกระจายตัวทางความร้อนจากไมโครเวฟในรูปที่ 5 พบว่าการเรียงตัวของข้าวเปลือกจะมีโพรงอากาศส่งผลให้สมบัติไดอิเล็กตริกเฉลี่ยในชั้นข้าวซึ่งประกอบไปด้วยข้าวซึ่งเป็นวัสดุไดอิเล็กตริกที่ดูดซับคลื่น

(ตั้งสมการ (1)-(3)) และอากาศที่ไปวัสดุส่งผ่านคลื่นเรียงซ้อนกันอยู่มีค่าลดน้อยลง (จะศึกษาเพิ่มเติมด้วยเครื่องมือวัดสมบัติไดอิเล็กตริกต่อไปในอนาคต)



รูปที่ 6 เปรียบเทียบการให้ความร้อนแก่ข้าวเปลือกด้วยพลังงานไมโครเวฟ และการพาความร้อนด้วยลมร้อน ที่เวลา 60 นาที

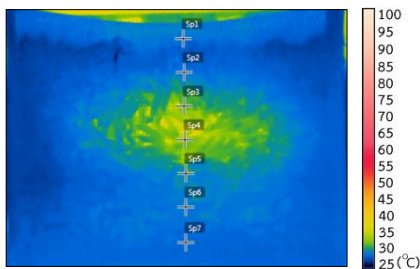
(ก) การให้พลังงานความร้อนด้วยไมโครเวฟกำลัง 100 วัตต์

(ข) การพาความร้อนที่ผิวด้านบน-ล่างด้วยลมร้อน กำลัง 700 วัตต์ (อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส)

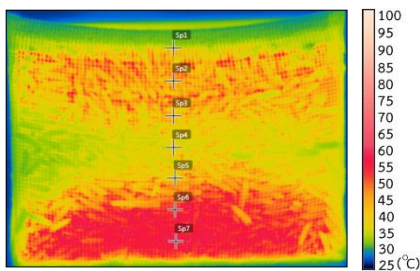
จากผลการทดลองเปรียบเทียบพฤติกรรมความร้อนของข้าวเปลือก โดยการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟกำลัง 100 วัตต์ และการพาความร้อนด้วยลมอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่าในการให้พลังงานความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ (รูปที่ 6ก) พฤติกรรมการกระจายตัวของอุณหภูมิจะเกิดจากบริเวณกึ่งกลางของวัสดุและมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอไปยังบริเวณด้านข้างของวัสดุ เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟมีความสามารถในการทะลุทะลวงสูงและทำความร้อนได้ดีกับวัสดุที่มีความชื้น (สมบัติไดอิเล็กตริก) ประกอบกับข้าวเปลือกนั้นเรียงตัวแบบไม่หนาแน่นมากจึงทำให้เกิดความร้อนจากภายในจากค่าสมบัติไดอิเล็กตริกที่เฉลี่ยร่วมกับโพรงอากาศ ส่วนการให้พลังงานความร้อนด้วยการพาความร้อนด้วยลมร้อนด้านบน-ล่าง (รูปที่ 6ข) พฤติกรรมการกระจายตัวของอุณหภูมิจะเกิดจากบริเวณผิวด้านบนและด้านล่างของวัสดุเข้าสู่กึ่งกลางของวัสดุ โดย

TSF-34

จะสังเกตได้ว่าการพาความร้อนด้วยลมร้อนจะมีอุณหภูมิสูงที่ผิวและค่อยๆ ลดลงเมื่อเข้าสู่กึ่งกลางวัสดุ สาเหตุเพราะกลไกการพาความร้อนทำได้เพียงถ่ายเทพลังงานจากผิวหน้าจากนั้นจะส่งต่อพลังงานความร้อนไปยังเนื้อในวัสดุด้วยกลไกการนำความร้อน ซึ่งวัสดุชีวภาพทั่วไปมีค่าการแพร่ความร้อน (thermal diffusivity) ไม่สูง แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากการเรียงตัวของข้าวเปลือกที่ไม่หนาแน่นทำให้มีช่องว่างระหว่างเม็ดข้าว ดังนั้นการพาความร้อนด้วยลมแก่ข้าวเปลือกจึงสามารถถ่ายเทความร้อนด้วยกลไกนี้ที่ลึกจากผิวหน้าได้ในระดับหนึ่ง



(ก)



(ข)

รูปที่ 7 เปรียบเทียบการให้ความร้อนแก่ข้าวเปลือกด้วยพลังงานไมโครเวฟร่วมกับการพาความร้อนด้วยลมที่เวลา 60 นาที

(ก) การให้พลังงานความร้อนด้วยไมโครเวฟกำลัง 100 วัตต์ร่วมกับการพาความร้อนที่ผิวด้วยลมปกติ (อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

(ข) การให้พลังงานความร้อนด้วยไมโครเวฟกำลัง 100 วัตต์ร่วมกับลมร้อนกำลัง 700 วัตต์ (อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส)

จากผลการทดลองเปรียบเทียบพฤติกรรมความร้อนของ ข้าวเปลือก โดยการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟกำลัง 100 วัตต์ร่วมกับการพาความร้อนด้วยลมอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสและการให้พลังงานไมโครเวฟ 100 วัตต์ ร่วมกับการพาความร้อนด้วยลมร้อน อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในเรื่องเจดสีที่บ่งบอกถึงความร้อนภายในวัสดุทดสอบ พิจารณาจากการให้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับการพา

ความร้อนด้วยลมปกติ (อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส) (รูปที่ 7ก) พฤติกรรมการกระจายตัวทางความร้อนที่ไม่สูงมากนักอยู่ในช่วงประมาณ 26-36 องศาเซลเซียส โดยมีปัจจัยหลักที่เป็นตัวกำหนดความร้อนที่เกิดขึ้น คือ ลม เนื่องจากมีอุณหภูมิที่ต่ำเกิดการพาความร้อนและความชื้นเข้าสู่ระบบซึ่งเป็นการเพิ่มภาระทางความร้อน จึงทำให้พลังงานความร้อนที่เกิดจากกระบวนการไมโครเวฟนั้นลดประสิทธิภาพลงอย่างมาก ซึ่งแตกต่างจากการให้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับการพาความร้อนด้วยลมร้อน (อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส) (รูปที่ 7ข) พฤติกรรมการกระจายตัวทางความร้อนที่สม่ำเสมอในช่วงประมาณ 40-60 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดความร้อนทั่วบริเวณวัสดุทดสอบ สังเกตได้ว่ามีการกระจายตัวความร้อนบริเวณด้านบนและด้านล่างเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากอิทธิพลของการพาความร้อนด้วยลมผ่านผิวด้านบนและด้านล่าง ทำให้เกิดความร้อนสะสมบริเวณดังกล่าว

รูปที่ 8 แสดงพฤติกรรมทางความร้อนเมื่ออบข้าวเปลือกที่ความชื้น 20 เปอร์เซ็นต์ ด้วยพลังงานไมโครเวฟ 100 และ 200 วัตต์ ร่วมกับการพาความร้อนด้วยลมที่ระยะเวลา 0-60 นาที ภายในกระบวนการให้พลังงานความร้อนอุณหภูมิแรกเริ่มของข้าวเปลือกประมาณ 25 องศาเซลเซียสพบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของวัสดุ (ข้าวเปลือก) โดยรวมเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการให้พลังงานความร้อน เนื่องจากเกิดการสะสมปริมาณความร้อนภายในวัสดุตามระยะเวลาการอบ พิจารณาที่การอบด้วยพลังงานไมโครเวฟ 100 วัตต์ เนื่องจากความชื้นของสนามไฟฟ้าต่ำทำให้การผลิตปริมาณความร้อนไม่สูงมากนักซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับการอบข้าวเปลือกโดยอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 50 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 60 นาที เปรียบเทียบกับกระบวนการพาความร้อนด้วยลมร้อน 60 องศาเซลเซียส พฤติกรรมการเกิดความร้อนตามช่วงเวลาการอบมีลักษณะใกล้เคียงกับการอบด้วยพลังงานไมโครเวฟ 100 วัตต์ สังเกตได้ว่าอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่าเล็กน้อยประมาณไม่เกิน 5 องศาเซลเซียส เมื่อทำการให้พลังงานไมโครเวฟ 100 วัตต์ ร่วมกับการพาความร้อนด้วยลมร้อน 60 องศาเซลเซียส ลักษณะการเกิดความร้อนจึงพัฒนาไปในทิศทางเดียวกันและเมื่อให้พลังงานไมโครเวฟ 100 วัตต์ ร่วมกับการพาความร้อนด้วยลม 25 องศาเซลเซียส เห็นได้ชัดเจนว่าอุณหภูมิในกระบวนการอบนั้นต่ำลงอย่างมาก โดย

TSF-34

อุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 30-35 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 60 นาที เนื่องจากอิทธิพลของการพาที่อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากพลังงานไมโครเวฟออกไปพร้อมกับการพา

เมื่อพิจารณาที่การอบด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ 200 วัตต์ อุณหภูมิระหว่างกระบวนการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยอุณหภูมิเฉลี่ยสูงมากประมาณ 105 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 60 นาที เนื่องจากความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงขึ้นทำให้ส่งผลโดยตรงต่อปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้น เมื่อทำการให้พลังงานไมโครเวฟ 200 วัตต์ ร่วมกับการพาความร้อนด้วยลมร้อน 60 องศาเซลเซียส กระบวนการอบช่วงแรกที่ 0-30 นาที อุณหภูมิเพิ่มขึ้นไม่สูงมากนัก สังเกตได้ช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าการอบด้วยพลังงานไมโครเวฟ 200 วัตต์ ประมาณ 10-20 องศาเซลเซียส เนื่องจากกระบวนการพานั้นส่งผลโดยตรงต่อปริมาณความร้อนภายในที่เกิดจากพลังงานไมโครเวฟ เพราะว่าความร้อนที่เกิดจากกระบวนการพามีอุณหภูมิต่ำกว่าความร้อนที่เกิดจากพลังงานไมโครเวฟจึงส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนออกไปจากระบบ แต่เมื่อการอบถึงช่วงระยะเวลา 45-60 นาที สังเกตได้ว่าอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนใกล้เคียงกับการอบด้วยพลังงานไมโครเวฟ 200 วัตต์ เนื่องจากความร้อนที่เกิดจากพลังงานไมโครเวฟมีอิทธิพลสูงกว่าการพาด้วยลม เพราะว่ากระบวนการเกิดความร้อนภายในวัสดุด้วยพลังงานไมโครเวฟมีการกระจายตัวอุณหภูมิทั่วทั้งปริมาตร และเมื่อให้พลังงานไมโครเวฟ 200 วัตต์ ร่วมกับการพาความร้อนด้วยลม 25 องศาเซลเซียส สังเกตว่าอุณหภูมิในกระบวนการอบนั้นต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด โดยอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 85 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 60 นาที เนื่องจากอิทธิพลของการพาที่อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากพลังงานไมโครเวฟออกไปพร้อมกับการพาเช่นเดียวกับการอบด้วยพลังงานไมโครเวฟ 100 วัตต์

การลดปริมาณความชื้นในทางปฏิบัติ มีได้สนใจในเรื่องระยะเวลาการอบและความสามารถในการลดปริมาณความชื้นเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ยังต้องคำนึงถึงการรักษาคุณภาพของวัสดุด้วย ซึ่งการลดความชื้นของข้าวเปลือกให้ยังมีคุณภาพข้าวที่ดีนั้นอุณหภูมิการไล่ความชื้นไม่ควรสูงเกิน 60 องศาเซลเซียส ซึ่งจากการทดลองเห็นได้ว่าอุณหภูมิข้าวเปลือกในกระบวนการอบด้วยพลังงานไมโครเวฟกำลัง 200 วัตต์ มีบางคาบเวลาที่มีอุณหภูมิสูง

มาก (ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิเนื่องจากต้องการศึกษาพฤติกรรมพื้นฐาน) ส่วนการอบที่เหมาะสมสำหรับข้าวเปลือกนั้นควรใช้พลังงานไมโครเวฟที่ไม่เกิน 100 วัตต์ ซึ่งจะเป็นกระบวนการอบที่ไม่สูญเสียคุณภาพของข้าวเปลือก อย่างไรก็ตามข้อมูลการศึกษาพฤติกรรมการลดความชื้นในทุกกรณีที่ศึกษาข้างต้นเป็นข้อเสนอข้อมูลซึ่งแสดงดังรูปที่ 9

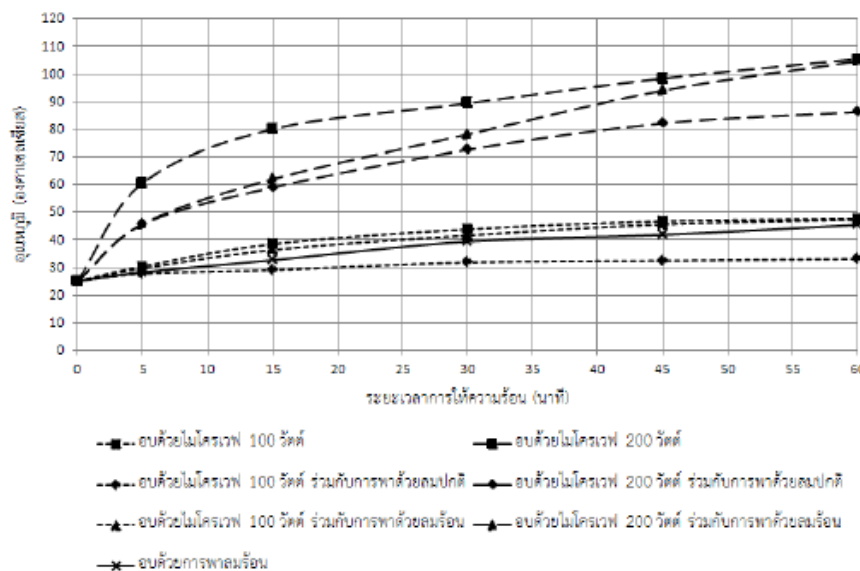
รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น (คำนวณจากสมการ (5)) ต่อระยะเวลาในการให้พลังงานความร้อน โดยทำการทดสอบข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มแรกประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งทำการเปรียบเทียบพลังงานไมโครเวฟที่กำลัง 100 วัตต์ และ 200 วัตต์ ตามลำดับ พบว่าปริมาณความชื้นในข้าวเปลือกที่อบด้วยพลังงานไมโครเวฟ 100 วัตต์ สามารถระเหยออกจากข้าวเปลือกได้ช้ากว่าการอบด้วยลมร้อน เมื่อพิจารณาในส่วนของการอบข้าวเปลือกด้วยพลังงานไมโครเวฟ 200 วัตต์ ความชื้นสามารถระเหยออกจากข้าวเปลือกได้เร็วกว่าการอบด้วยลมร้อน เนื่องจากน้ำหรือความชื้นเป็นวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานไมโครเวฟและแปรเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้มาก ดังนั้นเมื่อทำการเพิ่มปริมาณความเข้มสนามไฟฟ้าหรือกำลังวัตต์ป้อนเข้าสู่ (เช่น 200 วัตต์) อุณหภูมิของข้าวเปลือกจึงสูงอย่างรวดเร็วเพราะปริมาณความชื้น (น้ำ) ภายในโครงสร้าง เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในข้าวเปลือกจึงส่งผลต่อกลไกการเคลื่อนย้ายมวลสารในข้าวเปลือก การระเหยความชื้นออกจากข้าวเปลือกจึงทำได้อย่างรวดเร็วมากขึ้น

สำหรับกระบวนการอบข้าวเปลือกด้วยการพาความร้อนด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (ใช้พลังงาน 700 วัตต์ ในการผลิตความร้อน) พิจารณาเมื่อทำการให้พลังงานความร้อนด้วยลมร้อนผ่านผิวด้านบนและด้านล่างที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่าอัตราส่วนความชื้นลดลงตามระยะเวลาการให้พลังงานความร้อน เนื่องจากภายในข้าวเปลือกมีความชื้นสูง ทำให้การถ่ายเทมวลของน้ำจากข้าวเปลือกออกไปยังผิวด้านทำได้ง่ายและรวดเร็ว ซึ่งปริมาณความชื้นภายในระเหยออกมาสู่ผิววัสดุจากความร้อนซึ่งถ่ายเทมาจากลมร้อน โดยความชื้นมีปริมาณลดลงตามระยะเวลาการให้ความร้อน เนื่องจากคาบระยะเวลาการอบแห้งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นที่สูญเสียออกไปภายนอกกระบวนการ

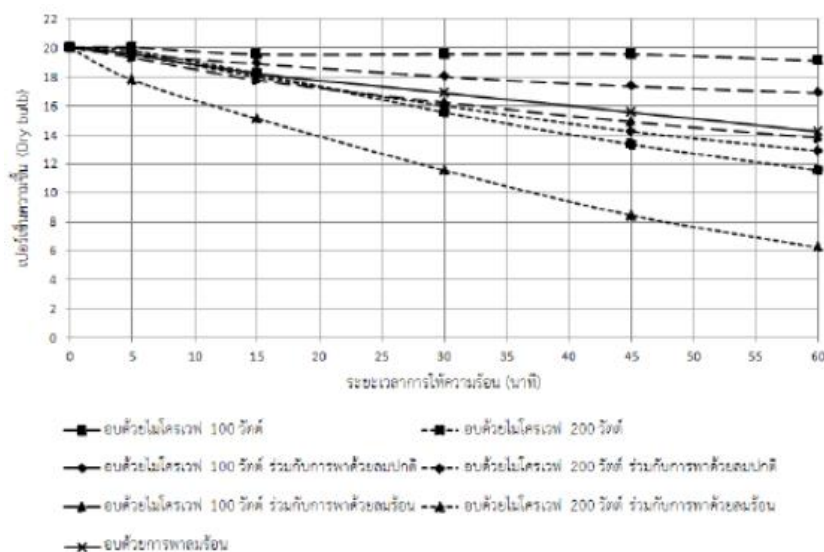
TSF-34

เมื่อเปรียบเทียบกับ การให้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับการพาความร้อนด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (ใช้พลังงาน 700 วัตต์ ในการผลิตความร้อน) เห็นได้ชัดว่า สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการลดปริมาณความชื้นได้อย่างมาก เนื่องจากการเกิดความร้อนจากพลังงานไมโครเวฟส่งผลให้ความชื้นภายในเกิดการระเหยขึ้นสู่ผิวด้านบนของวัสดุร่วมกับกระบวนการพาความร้อนพาพาความชื้นออกไปจากผิววัสดุด้วยลมร้อน ทำให้การเคลื่อนย้ายของมวลความชื้นออกไปได้อย่างรวดเร็วมากยิ่งขึ้น ส่วนการให้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับการพาความร้อนด้วยลมปกติอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (ไม่ใช้

พลังงานในการผลิตความร้อน) อัตราส่วนความชื้นลดลงน้อยมาก เนื่องจากลมที่สภาวะธรรมชาติ (อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส) จะมีความชื้นของอากาศที่สูงกว่าลมร้อน (อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส) ทำให้ประสิทธิภาพในการลดปริมาณความชื้นข้าวเปลือกได้ผลที่ไม่ดีนัก ซึ่งสังเกตเพิ่มเติมได้จากการอบด้วยพลังงานไมโครเวฟ 200 วัตต์ ร่วมกับการพาความร้อนด้วยลมปกติ พบว่าปริมาณความชื้นในข้าวเปลือกหลังจากการอบมีอัตราส่วนความชื้นที่มากกว่าการอบด้วยพลังงานไมโครเวฟ 200 วัตต์เพียงอย่างเดียว



รูปที่ 8 การกระจายตัวของอุณหภูมิเฉลี่ยข้าวเปลือกที่ความชื้น 20เปอร์เซ็นต์ โดยการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟและการพาความร้อนด้วยลม



รูปที่ 9 ประสิทธิภาพการลดปริมาณความชื้นของข้าวเปลือก

TSF-34

5. สรุปผลการศึกษา

ในการศึกษาการอบข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้พลังงานไมโครเวฟความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต (GHz) ขนาด 100 วัตต์และ 200 วัตต์แบบคลื่นระนาบภายใต้ค่าวิถีที่ค่อนข้างแบบสี่เหลี่ยม โหมด TE₁₀ และการพาความร้อนด้วยลมร้อนสามารถกล่าวสรุปได้ดังนี้

ปริมาณกำลังงานไมโครเวฟที่ใช้ในการลดความชื้นข้าวเปลือกควรปล่อยในปริมาณที่เหมาะสม (100 วัตต์) ไม่ควรให้มากเกินไป เนื่องจากหากอุณหภูมิในวัสดุสูงเกินไป (อุณหภูมิการไล่ความชื้นไม่ควรสูงเกิน 60 องศาเซลเซียส) จะทำให้เกิดการสูญเสียคุณภาพของข้าวเปลือก กล่าวคือ ถ้าหากใช้กำลังวัตต์ที่สูง (200 วัตต์) ข้อดีคือ ความชื้นจะออกไปอย่างรวดเร็วแต่แลกมาด้วยข้อเสีย คือ อุณหภูมิจะสูงมากทำให้ข้าวเปลือกเกิดการไหม้เกรียม ดังนั้นจึงควรเลือกปรับกำลังวัตต์และควบคุมระยะเวลาการให้พลังงานที่เหมาะสม

ปริมาณความชื้นมีผลต่อการเก็บรักษาเมล็ดพืช และลักษณะการนำไปใช้ ดังนั้นการลดปริมาณความชื้นควรอยู่ในปริมาณที่เหมาะสม เช่น เมล็ดพันธุ์ข้าวที่เก็บไว้ทำพันธุ์ความชื้นให้เหลือ 9-10% หากต้องการเก็บรักษาไว้นานควรลดความชื้นให้เหลือประมาณ 12% ดังนั้นจากผลการทดลองปริมาณกำลัง 100 วัตต์ ร่วมกับการพาความร้อนด้วยลม 60 องศาเซลเซียส จึงเป็นช่วงที่เหมาะสมในการลดความชื้นในกรณีเงื่อนไขขอบเขตที่ศึกษานี้

การให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟร่วมกับการพาความร้อนด้วยลมแก่ข้าวเปลือก จากการทดสอบนั้นเป็นการปล่อยคลื่นระนาบเดียว เพื่อที่จะสังเกตพฤติกรรม การเกิดความร้อนของพลังงานไมโครเวฟ ลักษณะความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นจึงเกิดขึ้นจากบริเวณด้านบน โดยสามารถทำความร้อนแก่ข้าวเปลือกที่มีความหนา 8 ซม. ได้ทั่วทั้งปริมาตร และเมื่อมีการทำงานร่วมกับการพาความร้อนด้วยลมทั้งด้านบนและล่างนั้น สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการลดปริมาณความชื้นได้เป็นอย่างดี ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาต่อยอดในการให้ความร้อนด้วยระบบไมโครเวฟและระบบการพาความร้อนด้วยลม แก่วัตถุที่มีลักษณะใกล้เคียงได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบที่จำเป็นต่องานวิจัย และสนับสนุนให้ทุนวิจัยเพื่อสร้างเครื่องต้นแบบงบประมาณเงินรายได้มหาวิทยาลัยฯ ปี 2555

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ฉัตรชัย นิยมล, "ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้หอบแห้งชนิดท่อเกลียว", วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น ฉบับที่ 17, เล่มที่ 1, มกราคม 2555, หน้า 97-109.
- [2] สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, "การอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ในประเทศไทย", วารสารราชบัณฑิตยสถาน ปีที่ 22 ฉบับที่ 2, 2540, หน้า 121-136.
- [3] Bal, L.M., Satya, S., and Naik, S.N., "Solar dryer with thermal energy storage systems for drying agricultural food products: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 14, Issue 8, October 2010, Pages 2298–2314.
- [4] VijayaVenkataRamana, S., Iniyanb, S., and Goicc, R., "A review of solar drying technologies", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 16, Issue 5, June 2012, Pages 2652–2670.
- [5] ยงยุทธ พิชกมูท, "เครื่องอบข้าวแบบโรตารี", การประชุมวิชาการประจำปีมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 24, มกราคม 2529, หน้า 15-27.
- [6] อรรถพร อภิพัฒนานุกุล สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ ทิพาพร อยู่วิทยา และอดิศักดิ์ นาถรัตนกุล, "การชะลอความเสียหายของกองข้าวเปลือกขึ้นโดยการระบายอากาศ" วิทยาสารเกษตรศาสตร์ (สาขาวิทยาศาสตร์) ปีที่ 30 ฉบับที่ 3. 2539. หน้า 351-363
- [7] Wiriyaumpaiwong, S., Raikham, K., Yangvo, P., and Soponronnarit, S., "Moisture desorption of paddy by two different porous media", Mathematical Models and Experimental Data. 2009, Journal of Food Engineering, Volume 32:(3), June 2009, Pages 319-337.

TSF-34

- [8] Izadifara, M., and Mowlab, D., "Simulation of a cross-flow continuous fluidized bed dryer for paddy rice", *Journal of Food Engineering*, Volume 58, Issue 4, August 2003, Pages 325–329.
- [9] Jittanit, W., Saeteaw, N., and Charoenchaisri, A., "Industrial paddy drying and energy saving options", *Journal of Stored Products Research*, Volume 46, Issue 4, October 2010, Pages 209–213.
- [10] Sarkera, M.S.H., M. Ibrahima, N., Aziza, N.A., and Sallehc, P.M., "Energy and rice quality aspects during drying of freshly harvested paddy with industrial inclined bed dryer". *Energy Conversion and Management*, Volume 77, January 2014, Pages 389–395.
- [11] Nimmola, C., and Devahastinb, S., "Evaluation of performance and energy consumption of an impinging stream dryer for paddy", *Applied Thermal Engineering*, Volume 30, Issues 14–15, October 2010, Pages 2204–2212.
- [12] Tulasidas, T. N., Raghavan, G.S.V. & Mujumdar and A.S., 1995, "Microwave drying of grapes in a single mode at 2450 MHz-II and energy aspect", *Drying Technology*, Vol.13, pp.1973-1992.
- [13] Varith, J., Dijkanarukkul, P., Achariyaviriya, A. & Achariyaviriya and S., 2007, "Combined microwave-hot air drying of peeled longan", *Journal of Food Engineering*, Vol.81, pp.459-466.
- [14] S. Vongpradubchai, P. Rattanadecho, "The microwave processing of wood using a continuous microwave belt drier", *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, Volume 48, Issue 5, May 2009, Pages 997-1003.
- [15] Rattanadecho, P., Suwannapum, N., and Cha-um, W., "Interactions between electromagnetic and thermal fields in microwave heating of hardened type i-cement paste using a rectangular waveguide (influence of frequency and sample size)", *ASME J. Heat Transfer*, Volume 131, 2009, Pages 082101-12,
- [16] สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, "คู่มือการอบแห้งเมล็ดพืชในที่เก็บ", กรุงเทพฯ : คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2538.