การศึกษาพลังงานและเอ็กเซอยี่ของกระบวนการอบแห้งวัสดุชีวภาพ โดยใช้สเปาเต็ดเบดร่วมกับไมโครเวฟ

Energy and exergy of microwave spouted bed drying of biomaterial

วรรณี เอกศิลป์ และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช
หน่วยวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม (M.R.C.E.)
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
99 หมู่ 18 แขวงคลองหนึ่ง เขตคลองหลวง ปทุมธานี 12120
โทร. 02-5643001 ต่อ 3153 โทรสาร 02-5643001 ต่อ 3049 E-mail: ratphadu@engr.tu.ac.th

Microwave Utilization Research Center for Engineering(M.R.C.E)
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University,
Rangsit Campus 99 Moo 18, KlongLuang, Pathumthani 12120 Thailand
Tel: 02-5643001 Ext. 3153 Fax: 02-5643001 Ext. 3049 E-mail: ratphadu@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษาพลังงานและเอ็กเซอยี่ของกระบวนการอบแห้งวัสดุชีวภาพ โดยใช้กระบวนการสเปาเต็ดเบดร่วมกับไมโครเวฟ (microwave spouted bed) ซึ่งทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งเร็วขึ้นและได้คุณภาพดีขึ้น และการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอยี่ (Exergy) ของระบบการอบแห้งโดยใช้สเปาเต็ดเบดร่วมกับไมโครเวฟ โดยการเปลี่ยนอุณหภูมิอากาศที่ทางเข้า ให้ค่าความชื้นเริ่มต้นของวัสดุชีวภาพอัตราการไหลของอากาศและพลังงานจากไมโครเวฟมีค่าคงที่ ผลจากวิเคราะห์พบว่าประสิทธิภาพเอ็กเซอยี่มีค่าน้อยกว่าประสิทธิภาพพลังงาน เนื่องจากการสูญเสียพลังงานจากกระบวนการย้อยกลับไม่ได้ซึ่งไม่สามารถวิเคราะห์ได้จากการศึกษาพลังงาน ค่าประสิทธิภาพพลังงานและเอ็กเซอยี่ลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เอ็กเซอยี่ของอากาศที่ทางออกมีค่ามากกว่าเอ็กเซอยี่ของอากาศที่ทางเข้าเนื่องจากพลังงานของไมโครเวฟ พร้อมทั้งได้จัดทำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ

คำสำคัญ : พลังงาน เอ็กเซอยี่ ไมโครเวฟ สเปาเต็ดเบด

Abstract

Energy and exergy analyses are conducted for the microwave spouted bed drying of biomaterials to optimize the operating conditions and the quality of the products. In this regard, energy and exergy models are developed to evaluate energy and exergy efficiencies, and are then verified with experimental data. The effects of inlet air temperature, constant initial moisture content, mass flow rate and microwave energy on both energy and exergy efficiencies are studied. The results show that exergy efficiencies are less than energy efficiencies due to irreversibilities which are not taken into consideration in energy analysis, and that both energy and exergy efficiencies decrease with increasing during time. The exergy of drying air entering are less than exiting the drying column due to effect of microwave. Computer program for screening purposes is also included.

Keywords : energy exergy microwave spouted bed

1. บทนำ

การอบแห้งเป็นหนึ่งในกระบวนการของการแปรรูปแบบใช้ความร้อนที่ได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมการแปรรูปอย่างแพร่หลาย กรรมวิธีในการอบแห้งนั้นจึงมีหลากหลายวิธี เช่น การอบแห้งโดยพลังงานแสงอาทิตย์ การอบแห้งโดยใช้ลมร้อน และการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำ และได้มีการพัฒนาเทคนิคการอบแห้งหลากหลายรูปแบบ เพื่อเป็นทางเลือกในการอบแห้งผลผลิตเกษตรเชิงอนุภาค (Particulate agricultural products) ที่สำคัญได้แก่ การอบแห้งด้วยลมร้อนในสุญญากาศ การอบแห้งด้วยลมร้อน ฟูอิดไดเบด สเปาเต็ดเบด และการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ การอบแห้งโดยใช้สเปาเต็ดเบด เข้ามาร่วมกับลมร้อนนั้น สามารถลดระยะเวลาการอบแห้งได้อย่างมาก เนื่องจากการปั่นป่วนของพาหะลมจะช่วยเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างพาหะและวัสดุที่อบแห้งได้ดีกว่าการอบด้วยลมร้อนปกติ ทั้งนี้อัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของอากาศ นอกจากนี้การใช้ความร้อนจากไมโครเวฟมาอบแห้งสำหรับผลผลิตทางการเกษตรมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากหลักการที่ได้กล่าวมานั้นคลื่นไมโครเวฟ

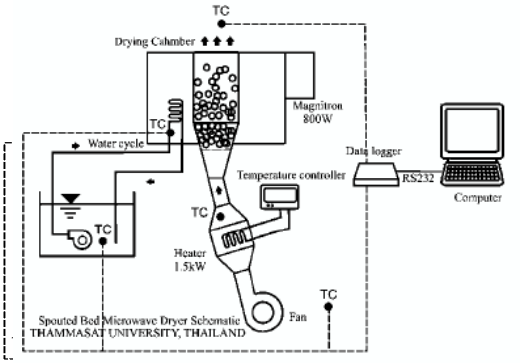
นั้นจะถูกส่งตรงผ่านเข้าไปสั่นโมเลกุลในเนื้อวัสดุโดยตรงจึงไม่มีการสูญเสียพลังงาน และกระแสของอากาศจะพาให้วัสดุชีวภาพลอยตัวซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีส่วนที่รับพลังงานไมโครเวฟอย่างทั่วถึง เป็นผลทำให้การกระจายของความชื้นในโครงสร้างเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้คุณลักษณะภายนอกของวัตถุดิบเช่น สีของวัตถุดิบยังคงสภาพเดิมหรือใกล้เคียงสีเดิม ซึ่งทั้งหมดแสดงถึงคุณภาพของวัตถุดิบที่ดีกว่าวิธีการให้ความร้อนธรรมดาโดยทั่วไป เมื่อรวมเอาเทคนิคไมโครเวฟเข้าร่วมกับสเปาเต็ดเบด จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งผลผลิตเกษตรได้ โดยหลักการทำความร้อนของคลื่นไมโครเวฟนั้นจะเปลี่ยนพลังงานของคลื่นถูกดูดซับสู่วัสดุเป็นความร้อน ทำให้วัสดุร้อนขึ้นทั้งก้อน (Volumetric Heating) ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิภายในวัสดุค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่มีวัสดุบางประเภทที่ไม่เป็นแบบนี้อย่างเช่นน้ำ ความร้อนจะเกิดขึ้นที่ผิวหน้าเท่านั้น (Surface Heating) และเกิดการไหลวนขึ้นมารับความร้อนใหม่ การที่จะรู้ว่าเป็นการให้ความร้อนแบบไหนนั้นดูได้จาก คุณสมบัติการเป็นฉนวน หรือคุณสมบัติการดูดกลืนคลื่น (Dielectric property) ถ้าเป็นวัสดุดูดกลืนคลื่นได้ดี Dielectric property สูง เช่น น้ำ จะเป็นการให้ความร้อนที่ผิวหน้า แต่ถ้าเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติการดูดกลืนคลื่นต่ำ เช่น ไข่ อาหาร เป็นการให้ความร้อนตลอดเนื้อวัสดุ

ผลงานวิจัยที่ผ่านมา Ratanadecho et al. [1] ทำการศึกษาเชิงคณิตศาสตร์และทำการทดลองอบแห้งโดยใช้ระบบไมโครเวฟกับวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัว โดยศึกษาเน้นในเรื่องของกระจายตัวของความชื้นและอุณหภูมิ กลไกที่สัมพันธ์ในการถ่ายเทความร้อน การแพร่ของไอน้ำ และ capillary flow ได้มีการศึกษาอบแห้งวัสดุแบบ Fluidize Bed โดย Emel et.al. [2] ได้ทำการทดลองพบว่าอุณหภูมิ และ Microwave power มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการอบแห้งโดยทำการทดลองอบแห้ง macroni beads และใช้ระบบ Microwave - Fluidize Bed (MWFD) ทำการอบ macroni beads ในปริมาณ 200 กรัมต่อการอบหนึ่งครั้ง จากที่ความชื้น 20% เหลือความชื้น 12% ใช้อากาศร้อนที่ความเร็วลม 2.3 ms^{-1} ที่ power levels 2.1 และ 3.5 W/G dry solid มีการวิจัยหาวิธีการอบแห้งโดยใช้ระบบ Microwave-Spouted Bed (MWSB) โดย Feng and Tang. [3] ทำการอบแห้งแอปเปิ้ลทรงเหลี่ยมในการอบแห้ง พบว่าการกระจายตัวของความร้อนของแอปเปิ้ลในตู้อบ Microwave Spouted Bed มีความสม่ำเสมอดี ทำให้ผลผลิตแอปเปิ้ลแห้ง (ความชื้นประมาณ 5 %) และมีความสม่ำเสมอในด้านสีของผลิตภัณฑ์ ในขณะที่ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งลดลงอย่างมาก โดยอัตราการดูดกลืนพลังงานไมโครเวฟยังสมมติให้มีการกระจายสม่ำเสมอ ได้มีการศึกษาประสิทธิภาพของระบบโดย I.Dincer และ A.Z.Sahin [4]ได้ศึกษาแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดเบดโดยหาค่าของ Exergy efficiency วิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวล ค่าตัวแปรที่นำมาวิเคราะห์คือ อุณหภูมิอบแห้ง ความชื้นวัสดุ ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ พบว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของอากาศไม่มีผลต่อ Exergy efficiency แต่ Exergy efficiency จะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มมวลของวัสดุ และถ้าอุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้นค่า Exergy efficiency จะลดลง นอกจากนี้ A.Midilli et.al [5] ทำการอบแห้ง Pistachio โดยใช้พลังแสงอาทิตย์วางวัสดุอบแห้งเป็นชั้นๆ 8 ชั้น มี 16 ถาด ชั้นละ 2 ถาด อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง 40 ^{o}C และ 60 ^{o}C ความเข้มแสงอาทิตย์ 200 และ 808 Wm^{-2} ความเร็วของอากาศ 1.23 ms^{-1} ความชื้นสัมพัทธ์ 37 และ 62% ใช้เวลา 6 ชั่วโมง ใช้วิธีการวิเคราะห์พลังงานจากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ พลังงานจาก solar air collectors และอัตราส่วนพลังงานที่ใช้ และ เอ็กเซอยี่ที่สูญเสียจากกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ 0.15-3.08 kJ kg^{-1}

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยแรกในระดับนานาชาติที่ศึกษาค่าประสิทธิภาพพลังงานและเอ็กเซอยี่ของเทคนิคการใช้ไมโครเวฟร่วมกับสเปาเต็ดเบด ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้นที่สุดในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั่วไป ความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 3 - 30 cm (ความถี่ 1,000 – 10,000 Hz) และสร้างสมการคณิตศาสตร์เปรียบเทียบค่าพลังงานกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ และค่าเอ็กเซอยี่กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นของกระบวนการอบแห้งวัสดุชีวภาพ การทดลองเป็นการอบแบบงวด 200 กรัมต่อการอบหนึ่งครั้ง ให้กำลังของไมโครเวฟ และความชื้นคงที่ พารามิเตอร์ที่ศึกษาคืออุณหภูมิและเวลาที่เพิ่มขึ้น พร้อมทั้งได้จัดทำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ

2. การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ พลังงาน และ เอ็กเซอยีของการอบแห้งโดยใช้สเปาเต็ดเบดร่วมกับไมโครเวฟ

ในการอบแห้งด้วยวิธีนี้ได้ใช้วัสดุชีวภาพ(เมล็ดกาแฟ)ที่มีความชื้นเริ่มต้น 41 % มาตรฐานแห้ง ค่าความจุร้อนของเมล็ดกาแฟ 2.63 $kJ.kg^{-1}.K^{-1}$ ระบบอบแห้งประกอบด้วยภาชนะทรงกรวยที่ไม่ดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟทำจากวัสดุ Poly propyrene บรรจุในตู้อบไมโครเวฟแบบที่ใช้ประกอบอาหาร มีระบบน้ำหมุนวนและระบายความร้อนทำหน้าที่ดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ เพื่อป้องกันคลื่นไมโครเวฟย้อนกลับไปทำลายแมกนีตรอนและไม่ให้วัสดุได้รับความร้อนที่มากเกินไปในช่วงปลายของการอบแห้ง โดยใช้ระบบน้ำหมุนวนเป็นตัวดูดกลืนไมโครเวฟ และนำไประบายความร้อนที่ถังพักน้ำด้านนอกตู้อบไมโครเวฟ ระบบนี้จะประกอบไปด้วยชุดเครื่องอบแห้ง ในการศึกษานี้ออกแบบการทดลอง โดยกำหนดให้ลมร้อนมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 50-80^{o}C โดยอุปกรณ์การทดลองจะใช้ลมให้ไหลผ่านขดลวดความร้อนทำให้เกิดเป็นลมร้อน จากนั้นจะใช้คลื่นไมโครเวฟอบร่วมด้วยซึ่งจะมีน้ำไหลผ่านห้องอบด้วยเพื่อซับคลื่นไมโครเวฟที่เหลือภายในห้องอบ โดยจะกำหนดให้ค่าความเร็วของลมที่ใช้ในการอบแห้งมีค่า 12 m/s โดยชุดการทดลองมีโครงสร้างไดอะแกรมตามรูปที่ 1 ตั้งสมมุติฐานว่าวัสดุชีวภาพมีรูปทรงขนาดเท่ากัน มีความชื้นเริ่มต้นกระจ่ายตัวเท่ากัน เมื่อเป่าลมร้อนเข้าไปทำให้วัสดุชีวภาพลอยตัวขึ้นแบบสเปาเต็ดเบดและปล่อยคลื่นไมโครเวฟขนาด 800 วัตต์ ในอัตราคงที่ทางด้านบน ตามรูปที่ 1



รูปที่1. โครงสร้างไดอะแกรมของชุดอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบด

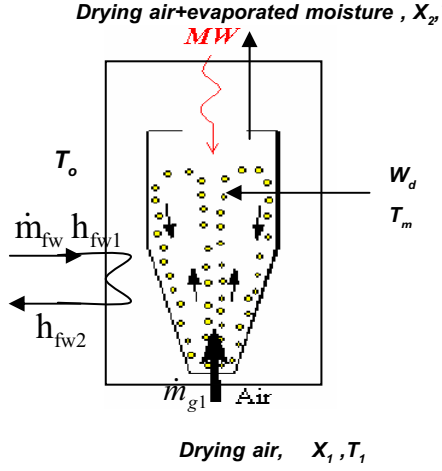
2.1 สมการสมดุลมวลของกระบวนการอบแห้ง

จากกฎการอนุรักษ์มวลของปริมาณควบคุมตามรูปที่ 2 การทำสมดุลมวลเมื่อ $\dot{m}_{g1}$ ที่จุด 1 และที่ $\dot{m}_{g2}$ ที่จุด 2 เป็นอัตราการไหลของมวลเข้าและออก W_d เป็นมวลของวัสดุชีวภาพ X_1 และ X_2 เป็นค่าอัตราส่วนความชื้นของอากาศเข้าและออกสมการดังนี้

$$\frac{dm_{cv}}{dt} = \dot{m}_{g1} - \dot{m}_{g2} \quad (1)$$

$$W_d \frac{dM_p}{dt} = \dot{m}_a (X_1 - X_2) \quad (2)$$

$$\dot{m}_w = \dot{m}_a (X_2 - X_1) \quad (3)$$



รูปที่ 2 แบบจำลองทางกายภาพสำหรับวิเคราะห์ระบบ

สำหรับการวิจัยกระบวนการอบแห้งนี้จะใช้สมดุลพลังงานตามกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ หรือกฎการอนุรักษ์พลังงานของระบบควบคุม ระบบตามรูปที่ 2 เกิดการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากลมร้อนและความร้อนที่เกิดขึ้นภายในโมเลกุลของน้ำในวัสดุชีวภาพ ทำให้เกิดการระเหยของน้ำหรือความชื้นที่อยู่ในวัสดุชีวภาพและความร้อนส่วนหนึ่งจะสูญเสียออกนอกระบบไปสู่สิ่งแวดล้อม การทำสมดุลอัตราพลังงานจะไม่นำพลังงานศักย์และพลังงานจลน์มาคิดในสมการสมดุลพลังงาน ดังนั้นสมการสมดุลพลังงานจึงเขียนได้ดังนี้

$$\frac{W_d (h_{m2} - h_{m1})}{\Delta t} = \dot{Q}_{evap} + \dot{m}_a (h_1 - h_2) - \dot{Q}_{loss} + \dot{Q}_{microwave} + \dot{m}_{fw} (h_{fw1} - h_{fw2}) \quad (4)$$

$$h_{m1} - h_o = c_m (T_{m1} - T_o) \quad (5)$$

$$h_{m2} - h_o = c_m (T_{m2} - T_o) \quad (6)$$

$$h_{m2} - h_{m1} = c_m (T_{m2} - T_{m1}) \quad (7)$$

คำนวณค่า enthalpy ของอากาศและน้ำ [7]

$$h_{fw} = 0.1163+4.1861T \quad (8)$$

$$h_a = 272.86 + 1.0091T \quad (9)$$

$$h_{fg} = 2493.6 - 0.0034T^2 - 2.0268T \quad (10)$$

$$S_a = 1.6351 + 0.0028T \quad (11)$$

$$S_{fw} = 0.0418 + 0.0129T \quad (12)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากน้ำในวัสดุ ซึ่งเกิดเนื่องจากความร้อนจากลมร้อน และความร้อนที่เกิดขึ้นภายในโมเลกุลของน้ำในวัสดุหาได้จากสมการ (13)

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_w h_{fg} \quad (13)$$

สมการสมดุลของเอนโทรปีของกระบวนการอบแห้งดังนี้

$$\frac{W_d (s_{m2} - s_{m1})}{\Delta t} = \frac{\dot{Q}_{evap}}{T_m} + \dot{m}_a (s_{a1} - s_{a2}) - \frac{\dot{Q}_{loss}}{T_b} + \dot{S}_{gen} + Q_{microwave} + m_{fw} (s_{fw1} - s_{fw2}) \quad (14)$$

ค่าเอนโทรปีจำเพาะของวัสดุหาได้จากสมการดังนี้

$$S_{m1} - S_0 = C_m \ln (T_{m1} / T_o) \quad (15)$$

$$S_{m2} - S_0 = C_m \ln (T_{m2} / T_o) \quad (16)$$

$$S_{m2} - S_{m1} = C_m \ln (T_{m2} / T_{m1}) \quad (17)$$

สมการเอ็กเซอยีของกระบวนการอบแห้ง การทำสมดุลเอ็กเซอยีของการอบแห้งนี้ได้พัฒนาจากสมการ (4) และสมการ (14)

$$\frac{W_d (E_{m2} - E_{m1})}{\Delta t} = \dot{m}_a (h_1 - h_2) + \left(1 - \frac{T_o}{T_m}\right) \dot{Q}_{evap}$$

$$-\left(1 - \frac{T_o}{T_b}\right)\dot{Q}_{loss} - T_o\dot{m}_a\,(s_1 - s_2) - T_o\dot{S}_{gen}$$

$$+\dot{Q}_{microwave} + \dot{m}_{fw}\,(h_{fw1} - h_{fw2}) - T_o\dot{m}_{fw}\,(S_{fw1} - S_{fw2}) \quad (18)$$

$$\dot{E}_{m2} - \dot{E}_{m1} = \dot{E}_{da1} - \dot{E}_{da2} + \dot{E}_{evap} - \dot{E}_{loss} - \dot{E}_D$$

$$+\dot{E}_{microwave} + \dot{E}_{fw1} - \dot{E}_{fw2} \quad (19)$$

เอ็กเซอยีจำเพาะ (e_{m1}) ที่ทางเข้าและทางออก (e_{m2}) ของวัสดุอบแห้ง สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$e_{m1} = (h_{m1} - h_o) - T_o\,(s_{m1} - s_o) \quad (20)$$

$$e_{m2} = (h_{m2} - h_o) - T_o\,(s_{m2} - s_o) \quad (21)$$

$$e_{da1} = (h_1 - h_o) - T_o\,(s_1 - s_o) \quad (22)$$

$$e_{da2} = (h_2 - h_o) - T_o\,(s_2 - s_o) \quad (23)$$

$$W_1 = (h_{W1} - h_{Wo}) - T_o\,(s_{W1} - s_{Wo}) \quad (24)$$

$$W_2 = (h_{W2} - h_{Wo}) - T_o\,(s_{W2} - s_{Wo}) \quad (25)$$

อัตราการถ่ายเทเอ็กเซอยี เนื่องจากการระเหยในกระบวนการอบแห้ง

$$\dot{E}_{evap} = \left[1 - \frac{T_o}{T_m}\right]\dot{m}_w h_{fg} \quad (26)$$

อัตราเอ็กเซอยี ที่สูญเสียไปกับสิ่งแวดล้อมเมื่อ T_b เป็นอุณหภูมิของขอบเขต

$$\dot{E}_{loss} = \left(1 - \frac{T_o}{T_b}\right)\dot{Q}_{loss} \quad (27)$$

2.2 ประสิทธิภาพพลังงาน และเอ็กเซอยีของกระบวนการอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบดร่วมกับไมโครเวฟ

ศักยภาพการอบแห้งโดยใช้สเปาเต็ดเบดร่วมกับไมโครเวฟพิจารณาได้จากประสิทธิภาพของระบบ ในที่นี้จะใช้ประสิทธิภาพทางพลังงานและเอ็กเซอยีเป็นเครื่องชี้วัดศักยภาพของระบบ การหาประสิทธิภาพทางความร้อนของกระบวนการอบแห้งใช้กฎข้อที่หนึ่งทางอุณหพลศาสตร์หาได้จากสมการที่ (28) และใช้สมการ (29)ตามกฎข้อที่สองทางอุณหพลศาสตร์หาประสิทธิภาพเอ็กเซอยีของการอบแห้ง

$$\eta_e = \frac{W_d\left[h_{fg}\,(M_{p1} - M_{p2}) + c_m\,(T_{m2} - T_{m1})\right] + \dot{m}_{fw}\,(h_{fw2} - h_{fw1})}{\dot{m}_{da}\left(h_1 - h_o\right)\Delta t + \dot{Q}_{microwave}} \quad (28)$$

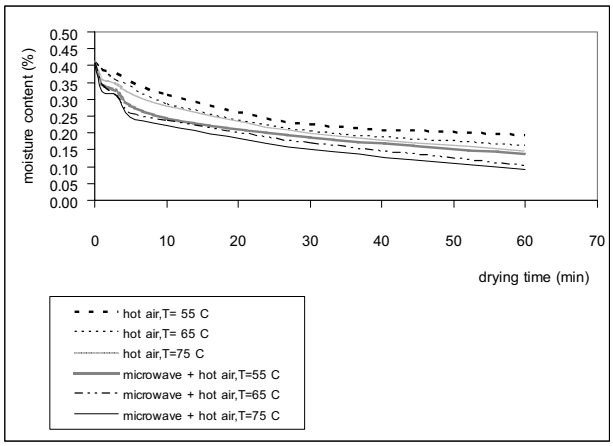
$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}_{evap} + \dot{E}_w}{\dot{E}_{dal} + \dot{E}_{microwave}} \quad (29)$$

3. ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์ค่าความชื้นที่เวลาอบแห้งต่าง ๆ ภายใต้เงื่อนไขที่อุณหภูมิต่างกันมีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยความชื้นจะลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น การอบแต่ละครั้งใช้วัสดุชีวภาพ(เมล็ดกาแฟ) 200 กรัม ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 41 % มาตรฐานแห้ง ในช่วงแรกประมาณ 0 –15 นาทีแรก นั้นความชื้นของวัสดุชีวภาพ จะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความชื้นในวัสดุชีวภาพมีมาก เมื่อพิจารณารูปที่ 3 วัสดุชีวภาพที่ใช้ลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ (800 วัตต์ คงที่) ความชื้นของวัสดุชีวภาพ จะลดลงอย่างรวดเร็วและจะลดลงตามความร้อนของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากในตอนเริ่มต้นวัสดุมีค่าความชื้นสูง จึงทำให้ความสามารถในการดูดกลืนพลังงานสูง ความร้อนจึงสูงตามไปด้วย ประกอบกับวัสดุนั้นมีลักษณะเป็นขั้วทางไฟฟ้า ซึ่งอันตรกิริยาระหว่างขั้วทางไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งผลทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในวัสดุโดยวัสดุจะเริ่มร้อนขึ้นทั้งก้อน (Volumetric Heating) ทำให้น้ำระเหยออกจากวัสดุได้เร็ว และเมื่อเวลาผ่านไปวัสดุมีความชื้นลดลงทำให้ความสามารถในการดูดกลืนพลังงานมีค่าลดลง ความร้อนจึงลดลงตามด้วย นั่นแสดงให้เห็นว่าวัสดุ มีค่า Dielectric properties ต่ำ จึงทำให้ค่า Dielectric loss tangent coefficient น้อย ลมร้อนที่อุณหภูมิสูงจะสามารถลดความชื้นได้รวดเร็วกว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า เมื่อเทียบกับระยะเวลาการอบที่ใช้เท่ากัน ส่วนกรณีที่ใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียวจะมีลักษณะในการลดความชื้นที่คล้ายคลึงกัน แต่จะลดลงได้น้อยกว่ากรณีที่ใช้ลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟเมื่อเทียบกับระยะเวลาการอบที่ใช้เท่ากัน ในช่วงที่สองประมาณ 15 – 40 นาที ช่วงนี้ความชื้นค่อยๆลดลงในปริมาณที่น้อยกว่าในช่วงแรก เนื่องจากความชื้นที่มีอยู่ในวัสดุชีวภาพลดน้อยลง และลมร้อนประมาณ 55° C ร่วมกับไมโครเวฟจะลดความชื้นได้ดีกว่าอบวัสดุชีวภาพ ที่ใช้ลมร้อนประมาณ 75° C เพียงอย่างเดียว จากรูปที่ 3 ใช้ลมร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น คือ 65 °C และ 75° C ร่วมกับไมโครเวฟ ความชื้นของวัสดุชีวภาพจะลดลงตามอุณหภูมิของลมร้อนที่สูงกว่าตามลำดับ

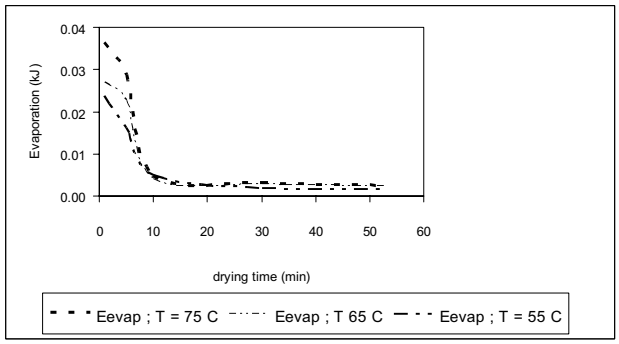
ในทำนองเดียวกันจากการวิเคราะห์พบว่าเอ็กเซอยี่ของการระเหยของน้ำ(รูปที่4) การระเหยของน้ำเกิดจากพลังงานไมโครเวฟทำให้เกิดพลังงานภายในวัสดุชีวภาพเกิดความร้อนขึ้น ทำให้ความชื้นระเหยกลายเป็นไอน้ำ ค่าเอ็กเซอยี่การระเหยของน้ำในช่วงแรกมีค่าสูง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเกิดจากปริมาณน้ำเริ่มต้นในวัสดุชีวภาพมีอยู่มาก จากนั้นค่าเอ็กเซอยี่การระเหยค่อยๆ ลดลง เนื่องจากปริมาณน้ำ

ที่อยู่ในวัสดุชีวภาพลดลงและเกือบคงที่ เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 15 นาที ดังนั้นการใส่พลังงานไมโครเวฟในช่วงหลังจึงไม่ทำให้ประสิทธิภาพของระบบเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองที่ทำการเปลี่ยนอุณหภูมิของอากาศร้อนจะได้ ค่าเอ็กเซอยี่ของการระเหยของความชื้นในวัสดุชีวภาพ(รูปที่ 4) เมื่อเวลาอบแห้งมากกว่า 20 นาที จะมีค่าใกล้เคียงกัน



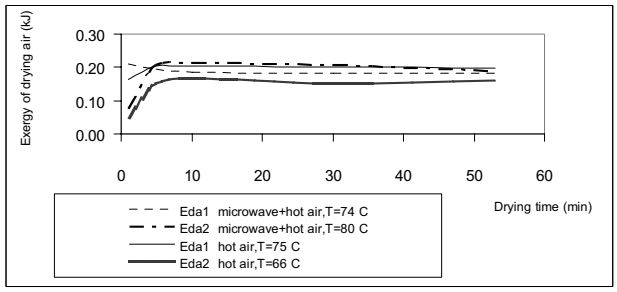
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นที่ลดลงกับเวลา
*ในกรณีใส่อากาศร้อนที่อุณหภมิต่างๆ
**ในกรณีใส่พลังงานไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนที่อุณหภมิต่างๆ

รูปที่ 5 แสดงอัตราเอ็กเซอยีการระเหยของน้ำในวัสดุชีวภาพกับเวลากำหนดให้อุณหภูมิลมร้อนที่ทางเข้าระบบอบแห้งให้มีค่าคงที่เฉลี่ยประมาณ 75°C อุณหภูมิวัสดุเฉลี่ยประมาณ 24°C ความชื้นเริ่มต้น 41% มาตรฐานแห้ง ความชื้นสุดท้าย 9 % มาตรฐานแห้ง มวลวัสดุ 200 กรัมต่อการอบหนึ่งครั้ง ระบบอบแห้งใส่พลังงานจากไมโครเวฟเข้าไปด้วย จากวิเคราะพบว่าค่าเอ็กเซอยี่ของอากาศที่ทางเข้า (E_{da1}) ของระบบ ตอบเริ่มต้นมีค่าน้อยกว่าที่เอ็กเซอยี่ของอากาศที่ทางออก(E_{da2}) ต่อมาเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 5 นาที ค่า E_{da2}จะมีค่ามากกว่า E_{da1} เนื่องจากพลังงานจากไมโครเวฟทำให้เกิดพลังงานภายในวัสดุชีวภาพ มีการระเหยของน้ำหรือความชื้นในวัสดุชีวภาพ ออกมาอย่างรวดเร็ว ทำให้อุณหภูมิอากาศที่ทางออกมีอุณภูมิสูงขึ้นมากกว่าอุณหภูมิที่ทางเข้า แต่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 15 นาที อุณหภูมิที่ทางออกเริ่มลดลง เนื่องจากปริมาณความชื้นที่อยู่ในวัสดุชีวภาพเหลือน้อยลง ดังนั้นค่าเอ็กเซอยีของอากาศที่ทางเข้า (E_{da1}) และทางออก (E_{da2}) จะมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อปริมาณความชื้นที่อยู่ในวัสดุชีวภาพเหลือน้อย ในกรณีที่ระบบอบแห้งไม่ได้ใส่พลังงานจากไมโครเวฟ อุณหภูมิที่ทางออกระบบมีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิที่ทางเข้าระบบ จึงทำให้เอ็กเซอยีของอากาศที่ทางเข้า (E_{da1}) มากกว่าทางออก



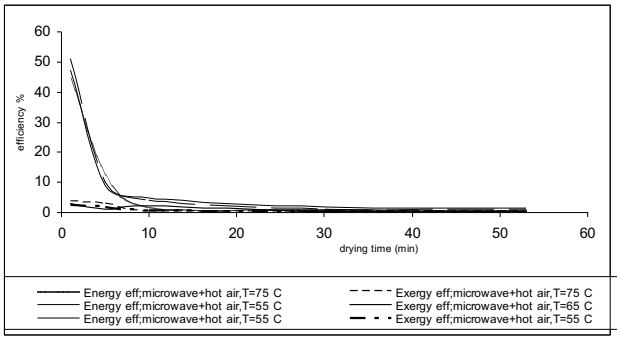
รูปที่ 4 อัตราเอ็กเซอยีการระเหยของน้ำในวัสดุชีวภาพกับเวลา

(E_{da2}) ของระบบ เนื่องจากความร้อนของอากาศที่ทางเข้าถ่ายเทให้วัสดุชีวภาพส่วนหนึ่งเพื่อไประเหยน้ำภายในวัสดุจึงทำให้อุณหภูมิที่ทางออกมีอุณหภูมิต่ำกว่าทางเข้า



รูปที่ 5 ค่าเอ็กเซอยีของอากาศกับเวลา
*ในกรณีใส่อากาศร้อนที่อุณหภมิต่างๆ
**ในกรณีใส่พลังงานไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนที่อุณหภมิต่างๆ

จากรูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพพลังงานและเอ็กเซอยีกับเวลา ใช้ความชื้นวัสดุเริ่มต้นประมาณ 41% มาตรฐานแห้ง ที่อุณหภูมิอากาศร้อนประมาณ 75 °C ค่าประสิทธิภาพพลังงานและเอ็กเซอยี จะมีค่าสูงเมื่อเริ่มต้นอบแห้ง เนื่องจากค่าความชื้นเริ่มต้นของวัสดุชีวภาพสูง เมื่อใส่พลังงานไมโครเวฟเข้าไปทำให้เกิด capillary pressure เกิดการขับเคลื่อนและการแพร่น้ำภายในวัสดุชีวภาพออกไปอย่างรวดเร็ว เมื่อเวลาผ่านไปวัสดุมีความชื้นลดลงทำให้ความสามารถในการดูดกลืนพลังงานมีค่าลดลงด้วย นั่นแสดงให้เห็นว่าวัสดุ มีค่า Dielectric properties ต่ำ จึงทำให้ค่า Dielectric loss tangent coefficient น้อย เมื่ออบแห้งประมาณ 5 นาที ค่าประสิทธิภาพพลังงานและเอ็กเซอยีลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากปริมาณความชื้นในวัสดุชีวภาพเหลือน้อย และเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 10 นาที ค่าประสิทธิภาพทั้งสองจะค่อยข้างคงที่ เพราะปริมาณความชื้นในวัสดุชีวภาพเหลือน้อยทำให้อัตราการระเหยของน้ำลดน้อยลงด้วย



รูปที่ 6 ค่าประสิทธิภาพพลังงานและเอ็กเซอยี่กับเวลา
*ในกรณีใส่อากาศร้อนที่อุณหภมิต่างๆ
**ในกรณีใส่พลังงานไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนที่อุณหภมิต่างๆ

4.สรุป

การวิเคราะห์การอบแห้งโดยใช้สเปาเต็ดเบดร่วมกับไมโครเวฟว่ามีศักยภาพดีแค่ไหน พิจารณาได้จากค่าพลังงานและเอ็กเซอยี่ของกระบวนการอบแห้งวัสดุชีวภาพมาเป็นเครื่องชี้วัด งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ ค่าประสิทธิภาพพลังงานและเอ็กเซอยี่ของระบบดังกล่าว ใช้พารามิเตอร์เป็นอุณหภูมิอากาศที่ทางเข้า ให้ค่าความชื้นเริ่มต้นของวัสดุชีวภาพและพลังงานจากไมโครเวฟมีค่าคงที่ มวลวัสดุชีวภาพในการอบแต่ละครั้งมีค่าคงที่ ผลจากการวิเคราะห์พบว่าประสิทธิภาพเอ็กเซอยี่มีค่าน้อยกว่าประสิทธิภาพพลังงาน เนื่องจากการสูญเสียพลังงานจากกระบวนการย้อยกลับไม่ได้ และอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม และค่าพบประสิทธิภาพพลังงานและเอ็กเซอยี่มีค่าลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากในตอนเริ่มต้นวัสดุมีความชื้นสูง จึงทำให้ความสามารถในการดูดกลืนพลังงานสูงประกอบกับวัสดุนั้นมีลักษณะเป็นขั้วทางไฟฟ้า ซึ่งอันตรกิริยาระหว่างขั้วทางไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งผลทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในวัสดุ โดยวัสดุจะเริ่มร้อนขึ้นทั้งก้อน (Volumetric Heating) ทำให้น้ำระเหยออกจากวัสดุได้เร็ว และเมื่อเวลาผ่านไปวัสดุมีความชื้นลดลงทำให้ความสามารถในการดูดกลืนพลังงานมีค่าลดลง นั่นแสดงให้เห็นว่าวัสดุ มีค่า Dielectric properties ต่ำ จึงทำให้ค่า Dielectric loss tangent coefficient น้อย นอกจากนี้ยังพบว่าการใส่พลังงานไมโครเวฟในช่วงแรกของการอบแห้งประมาณ 15 นาที จะให้ค่าประสิทธิภาพสูง หลังจากนั้นค่าประสิทธิภาพในการอบแห้งจะมีค่าลดลงอย่างมากและค่อนข้างคงที่ ถึงแม้ว่าการใช้สเปาเต็ดเบดร่วมกับไมโครเวฟหลังจาก 15 นาทีไปแล้ว ค่าประสิทธิภาพจะลดลงก็ตาม แต่เวลาในการอบแห้งวัสดุก็สั้นกว่าในลมร้อนอบอย่างเดียวจึงประหยัดเวลามากกว่า ในการทดลองครั้งนี้ในมวลวัสดุ 200 กรัมต่อการอบหนึ่งครั้ง จึงทำให้ค่าประสิทธิภาพระบบ ในกรณีใส่พลังงานไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนมีค่าน้อยกว่าในกรณีใส่อากาศร้อนเพียงอย่างเดียว ส่วนอุณหภูมิอากาศร้อนที่ศึกษามีผลต่อประสิทธิภาพระบบในช่วงเริ่มต้นของการอบแห้ง เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 15-20 นาที ประสิทธิภาพจะลดลงใกล้เคียงกันอากาศร้อนอุณหภูมิสูงจะดึงความชื้นได้เร็วกว่าอุณหภูมิต่ำ ดังนั้นการวิเคราะห์โดยใช้ค่าประสิทธิภาพพลังงานและเอ็กเซอยี่ของระบบดังกล่าวจะช่วยในการหาค่าความเหมาะสมของอุณหภูมิ มวลวัสดุชีวภาพ หรือขนาดระบบที่เหมาะสมได้ และได้สร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพพลังงานและเอ็กเซอยี่ของระบบซึ่งใช้ได้กับทุกระบบของการอบแห้ง

บรรณานุกรม

[1] Ratanadecho,.P.,Aoki,K. and Akahori,M.(2004).“ Experimental Numerical Study of Microwave Drying in Unsaturated Porous Material ”.Int.Commun Heat Mass Transfer.28: pp 605-616.

[2] Emel Iraz Goksu, Gulum Sumnu*,Ali.Esi.(2004). “ Effect of microwave on fludized bed drying of macaroni beads”.Journal of Food Engineering.

[3] Feng,H.,& Tang,.J.(1998). “ Microwave finish drying of diced apple slices in a spouted bed. ” Journal of Food Science.47: pp 1499-1512.

[4] I.Dincer&A.Z.Sahin (2004). “ A new model for thermodynamic analysis of a drying process ”.Internation Journal of Heat and Mass Transfer.47(2004).pp 645-652.

[6] I.Dincer&S.Syahrul (2002). “ Exergy analysis of fluidized bed drying of moist particles ”.Exergy,an International Journal 2 pp. 87-98.

[5] Muthur, K.B. and Gishler, P.E., (1974). “ spouted Beds”, New York, Academic Press, pp.33- 46.

[6] Kalwar, M.I., Raghavan, G.S.V. and Mujumdar, A.S., (1992). “Spouting of Two Dimensional Beds with Draft Plates,” Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol.70, pp.887-894.

[7] Yunus A.Cengel and Michael A.Boles., (1998). “Thermodynamics an Engineering Approach “ third edition.

สัญญาลักษณ์

C_m = ค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุชีวภาพ (specific heat of the material) (kJ.kg^{-1}K^{-1})

C_p = ค่าความจุความร้อนของน้ำ (kJ.kg^{-1}.K^{-1})

$\dot{E}_D$ = อัตราเอ็กเซอยีที่ถูกทำลายระหว่างกระบวรการอบแห้ง (kJ.s^{-1})

$\dot{E}_{da}$ = อัตราเอ็กเซอยีของอากาศแห้ง (kJ.s^{-1})

$\dot{E}_{evap}$ = อัตราเอ็กเซอยีของการระเหยในกระบวนการอบแห้ง (kJ.s^{-1})

$\dot{E}_{fw}$ = อัตราเอ็กเซอยีของน้ำ (kJ.s^{-1})

$\dot{E}_{loss}$ = อัตราการสูญเสียเอ็กเซอยีให้กับสิ่งแวดล้อม (kJ.s^{-1})

$\dot{E}_m$ = อัตราเอ็กเซอยีของวัสดุอบแห้ง (kJ.s^{-1})

$\dot{E}_w$ = อัตราเอ็กเซอยีของน้ำ (kJ.s^{-1})

h_a = เอนทาลปีของอากาศ (kJ kg^{-1})

h_{fw1} = ค่าเอนทาลปีจำเพาะของน้ำเข้าระบบ (kJ.kg^{-1})

h_{fw2} = ค่าเอนทาลปีจำเพาะของน้ำออกระบบ (kJ.kg^{-1}

h_{fg} = เอนทาลปีการระเหยของน้ำ (kJ kg^{-1})

H_{cv} = ความร้อนของวัสดุชีวภาพ (kJ)

h_1 = ค่าเอนทาลปีจำเพาะของอากาศแห้งเข้าระบบ (kJ.kg^{-1})

h_2 = ค่าเอนทาลปีจำเพาะของอากาศแห้งทางออก (kJ.kg^{-1})

$\dot{m}_a$ = อัตราการไหลของอากาศแห้ง (kJ.s^{-1})

$\dot{m}_{fw}$ = อัตราการไหลของน้ำ (kg.s^{-1})

M_p = ปริมาณความชื้นของวัสดุอบแห้ง (kg water).(kg solid^{-1})

$\dot{m}_w$ = อัตราการไหลของน้ำออกจากวัสดุอบแห้ง (kg water.s^{-1})

$\dot{Q}_{evap}$ = อัตราการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากการระเหยของน้ำ (kJ.s^{-1})

$\dot{Q}_{loss}$ = อัตราการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากสิ่งแวดล้อม (kJ.s^{-1})

$\dot{Q}_{microwave}$ = อัตราพลังงานจากไมโครเวฟ (kJ.s^{-1})

S_a = เอนโทปีของอากาศ (kJ kg^{-1} s^{-1})

S_{fw} = เอนโทปีของน้ำ (kJ kg^{-1} s^{-1})

$\dot{S}_{gen}$ = ค่าเอนโทปีรวมของระบบอบแห้ง (kJ.K^{-1})

T_b = อุณหภูมิของของเขต (K)

T_m = อุณหภูมิเฉลี่ยของวัสดุอบแห้ง (K)

W_d = มวลของวัสดุอบแห้ง (kg.)

$X_{1,2}$ = อัตราส่วนความชื้นในอากาศ (kg water).(kg dry air $^{-1}$)