

การวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จีในกระบวนการอบแห้งวัสดุพรุนโดยใช้ลมร้อน

Energy and Exergy Analysis in Drying Process of Porous Media Using Hot Air

รัฐศักดิ์ พรหมมาศ พรทิพย์ แก่งอินทร์ และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช *

หน่วยวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม (R.C.M.E.)

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

99 หมู่ 18 ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง ปทุมธานี 12120

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จีในกระบวนการอบแห้งวัสดุพรุนโดยใช้ลมร้อน โดยได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ ทางเข้าก่อนการอบแห้ง และทางออกหลังการอบแห้งที่มีผลต่อจลนพลศาสตร์ ในการวิเคราะห์อาศัยกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ในการวิเคราะห์พลังงานที่ใช้ให้เป็นประโยชน์ในการอบแห้ง และประยุกต์ใช้กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ ในการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีที่ไหลเข้า เอ็กเซอร์จีที่ไหลออก เอ็กเซอร์จีที่สูญเสีย และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี ของกระบวนการอบแห้ง จากการวิเคราะห์พลังงาน และเอ็กเซอร์จีสามารถนำผลที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงกระบวนการอบแห้งให้มีประสิทธิภาพสูงสุดต่อไป

Abstract

This paper is concerned with the energy and exergy analysis in drying process of porous media using hot air are investigated. Drying experiments were conducted effect of kinetic and thermodynamics conditions such as temperature of the air inlet and the air outlet of drying process. Using the first law of thermodynamics, an energy analysis was performed to estimate of energy utilization. An exergy analysis was accomplished to determine the exergy inlet, exergy outlet, exergy losses and efficiency during the drying process by applying the second law of thermodynamics. Furthermore the result of energy and exergy analysis can develop the higher efficiency of drying process.

1. บทนำ

การอบแห้งเป็นกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์ที่มีเป้าหมายเพื่อเพิ่มความชื้นที่อยู่ภายในวัสดุออกสู่ภายนอกโดยอาศัยหลักการถ่ายเทความร้อนซึ่งต้องใช้พลังงานจากภายนอก ในการอบแห้งนั้นวิธีการและเทคโนโลยีต่าง ๆ มากมายขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของวัสดุที่ต้องการอบแห้ง ได้แก่ การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ การอบแห้งโดยใช้ลมร้อน และการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำ เป็นต้น โดยทั่วไป [1] วัสดุที่นำมา

อบแห้งนั้นมักจะพิจารณาให้เป็นวัสดุพรุน โดยที่วัสดุพรุนประกอบด้วยสสารที่มี 3 สถานะ คือ สถานะของแข็ง (Solid Phase) ของเหลว (Liquid Phase) และก๊าซ (Gas Phase) ที่อยู่ในช่องว่าง หรือรูพรุน (Void) ในการวิเคราะห์พลังงานของกระบวนการอบแห้งจะใช้กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ และการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีของกระบวนการอบแห้งจะใช้กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ โดยที่เอ็กเซอร์จี คือ ค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ของงาน (Useful of Work) ที่ได้รับจากระบบ ซึ่งค่าสูงสุดของงานนั้น ก็จะได้จากระบบที่เป็นกระบวนการย้อนกลับได้ (Reversible Process) โดยอ้างอิงกับสถานะแวดล้อมนั้น พลังงานและเอ็กเซอร์จีมีความแตกต่างกันตรงที่เอ็กเซอร์จีไม่มีกฎการอนุรักษ์พลังงาน (เป็นกระบวนการทางอุณหพลศาสตร์ และกระบวนการที่ย้อนกลับได้) ในความเป็นจริงส่วนใหญ่เอ็กเซอร์จีที่ใช้จำนวนมากสูญเสียไปเนื่องจากกระบวนการย้อนกลับไม่ได้ เอ็กเซอร์จีที่ใช้ในกระบวนการย้อนกลับไม่ได้จะเป็นสัดส่วนกับเอนโทรปี ที่เกิดขึ้นพร้อมกันในกระบวนการ

จากงานวิจัยที่ผ่านมา วรณิ เอกศิลป์ และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช [2] ได้ศึกษาพลังงานและเอ็กเซอร์จีเพื่อวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งวัสดุชีวภาพ โดยใช้กระบวนการสเปาเต็ดเบตรวมกับไมโครเวฟ และการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลจากวิเคราะห์พบว่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีมีค่าน้อยกว่าประสิทธิภาพพลังงานเนื่องจากการสูญเสียพลังงานจากกระบวนการย้อนกลับไม่ได้ซึ่งไม่สามารถวิเคราะห์ได้ในการศึกษาครั้งนี้ คาประสิทธิภาพพลังงานและเอ็กเซอร์จีลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เอ็กเซอร์จีของอากาศที่ไหลออกมีค่ามากกว่าเอ็กเซอร์จีของอากาศที่ทางเข้าเนื่องจากมีพลังงานไมโครเวฟเป็นแหล่งกำเนิดความร้อน I. Dincer, S. Syahrul and F. Hamdullahpur (2003) [3] ได้ศึกษาแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งข้าวโพดและข้าวสาลีแบบฟลูอิดไอบดโดยหาประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีจากการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน และการถ่ายเทมวล โดยตัวแปรที่นำมาวิเคราะห์คืออุณหภูมิการอบแห้ง ความชื้นของวัสดุ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ จากการศึกษาพบว่าอากาศที่มีอัตราการไหลเพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี แต่

ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มมวลของวัสดุ และอุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้นค่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีจะลดลง I. Dincer and A. Z. Sahin. (2004). [4] ได้ศึกษารูปแบบใหม่ทางอุณหพลศาสตร์ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งเพื่อหาประสิทธิภาพของเอ็กเซอร์จีในกระบวนการอบแห้งที่มีองค์ประกอบของการถ่ายเทความร้อน และการถ่ายเทมวล ที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศ เอ็กเซอร์จีจำเพาะ ความแตกต่างของเอ็กเซอร์จีทางเข้าและทางออก น้ำหนักผลิตภัณฑ์ ความชื้นที่อยู่ในอากาศ และอัตราส่วนความชื้นของอากาศแห้งเพื่อนำผลที่ได้ประเมินสมรรถนะและประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้ง E. Kavak Akpinar (2004) [5] ได้ศึกษากระบวนการอบแห้งพริกหยวกแดงแผ่นบางโดยการใช้อากาศที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ในการวิเคราะห์พลังงานเพื่อนำไปสู่การประมาณค่าอัตราส่วนของพลังงานที่ใช้ให้เป็นประโยชน์ และประยุกต์ใช้กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ในการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จี นอกจากนี้ E. Kavak Akpinar et.al. (2005) [6] ได้ศึกษากระบวนการอบแห้งมันฝรั่งแผ่นด้วยเครื่องอบแห้งแบบไซโคลนโดยการใช้อากาศที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ในการวิเคราะห์อัตราส่วนสมรรถนะของพลังงานที่เป็นประโยชน์ และประยุกต์ใช้กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ ในการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีที่ไหลเข้า เอ็กเซอร์จีที่ไหลออก และเอ็กเซอร์จีที่สูญเสียของกระบวนการอบแห้ง สามารถสรุปได้ว่าเครื่องอบแห้งแบบไซโคลนทำให้สูญเสียเอ็กเซอร์จีไปจำนวนมากซึ่งเกิดจากพลังงานที่ยังมีศักยภาพอยู่สูญเสียไป และจากการศึกษาพบว่าสภาวะในการอบแห้งมันฝรั่งแผ่นที่เหมาะสมนั้นต้องใช้อุณหภูมิระหว่าง 60 °C ถึง 80 °C และความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 20 % ถึง 10 % ความเร็วของลมร้อนในการอบแห้ง 1 m/s และ 1.5 m/s ใช้เวลา 10 - 12 ชม. ซึ่งทำให้เอ็กเซอร์จีสูญเสียอย่างน้อยที่สุด 0 - 1.796 kJ/s

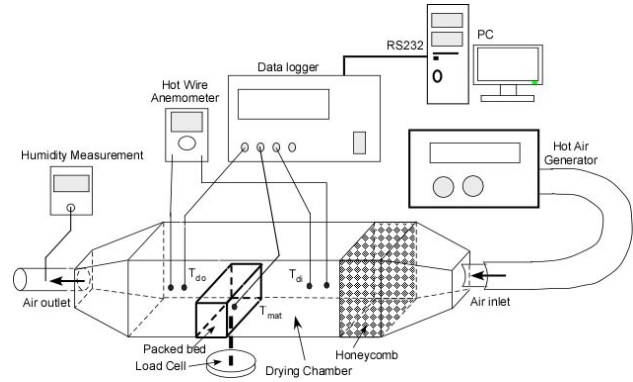
จากงานวิจัยที่ผ่านมาสำหรับการอบแห้งวัสดุด้วยกระบวนการอบแห้งแบบต่าง ๆ นั้นส่วนใหญ่เป็นการศึกษาเฉพาะพลังงานและเอ็กเซอร์จีที่ใช้ในการไล่ความชื้นออกจากวัสดุเท่านั้น โดยส่วนใหญ่เป็นวัสดุที่ใช้ในการอบแห้งจะเป็นวัสดุชีวภาพ จากการสืบค้นงานวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่ปรากฏว่ามีการศึกษาเพื่อวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จี ในการอบแห้งวัสดุพูน เพราะวัสดุพูนมีโครงสร้างภายในที่ซับซ้อนซึ่งมีผลกระทบโดยตรงกับการใช้พลังงานในการระเหยความชื้นจากภายในออกสู่ภายนอก

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาวิเคราะห์พลังงาน และเอ็กเซอร์จีในกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนโดยใช้วัสดุพูนแบบอิ่มตัว (Saturated) ที่ไม่ชื้นมาก (Nonhygroscopic Porous Media) เพื่อทำความเข้าใจและเปรียบเทียบผลกระทบทางอุณหพลศาสตร์ และหาค่าผลกระทบที่เกิดขึ้นสูงสุดเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการอบแห้ง

2. เครื่องและอุปกรณ์การทดลอง

ในการศึกษาเพื่อวิเคราะห์พลังงาน และเอ็กเซอร์จีในกระบวนการอบแห้งวัสดุพูนโดยใช้ลมร้อนนี้เป็นการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองด้วยเครื่องมือและอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 1 ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดลมร้อนแบบควบคุมอุณหภูมิและความเร็วของอากาศ (KAKETSUNA, TSK-10, JAPAN) เครื่องอบแห้งทำจากแผ่นโพลีโพรพิลีนรูปทรงสี่เหลี่ยม (กว้างxยาวxสูง) 113x500x112 mm³. ในการวัดอุณหภูมิใช้

ไฟเบอร์ออฟติก ต่อกับเครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอลอัตโนมัติ 4 ช่องสัญญาณ (LUXTRON, 790, USA) ในการวัดความเร็วและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วย (TESTO, JAPAN) ในการหาน้ำหนักก่อนและหลังการอบแห้งด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก (TESCO, CHINA)



รูปที่ 1 ไดอะแกรมของเครื่องอบแห้ง

2.1 วิธีการทดลอง

เพคเบตวัสดุพูน (Porous Packed Bed) ที่ใช้ในการทดลองเป็นองค์ประกอบของเม็ดแก้วขนาด 1 mm น้ำ และโพรงอากาศ ก่อนการอบแห้งผสมเม็ดแก้วกับน้ำให้อยู่ในสภาวะอิ่มตัว ($S_0=1$) แล้วบรรจุใส่กล่องสี่เหลี่ยมทำด้วยโพลีโพรพิลีน ขนาด 108 x 53 x 50 mm³ ที่หุ้มฉนวนทั้ง 5 ด้านเพื่อให้ความชื้นมีการระเหยเฉพาะบริเวณด้านบน ก่อนการทดลองต้องปรับสภาวะภายในห้องอบแห้ง (Drying Chamber) ให้อยู่ในสภาวะคงตัว (Steady State) แล้วจึงนำวัสดุพูนที่บรรจุกล่องสี่เหลี่ยมวางในเครื่องอบแห้งจึงทำการอบแห้งด้วยอากาศที่มีความเร็ว 2.5 m/s โดยที่อุณหภูมิของลมร้อน 50 °C 60 °C และ 70 °C ในการหาค่าความชื้นของก่อนและหลังการอบแห้ง โดยการชั่งน้ำหนัก แล้วทำการอบแห้งต่อเนื่องจำนวน 6 ชั่วโมง ในระหว่างการทดลองทำการบันทึกอุณหภูมิแวดล้อมและความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิของเพคเบตวัสดุพูน อุณหภูมิอากาศทางเข้าและทางออกของเครื่องอบแห้งทุกๆ 15 นาที

3. การวิเคราะห์พลังงานจากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์

ในการปรับสภาวะอากาศภายในกระบวนการอบแห้งเกี่ยวข้องกับกระบวนการทำความร้อน กระบวนการทำความเย็น และกระบวนการลดความชื้น ซึ่งในกระบวนการเหล่านี้สามารถพิจารณาให้เป็นกระบวนการไหลแบบสภาวะคงตัว และทำการวิเคราะห์โดยการประยุกต์ใช้กฎการอนุรักษ์มวล (สำหรับอากาศแห้งและความชื้น) และหลักการอนุรักษ์พลังงาน สมการทั่วไปของการอนุรักษ์มวลของอากาศแห้ง (ไม่มีความชื้น) ดังสมการต่อไปนี้

$$\sum \dot{m}_{ai} = \sum \dot{m}_{ao} \quad (1)$$

โดยที่ $\dot{m}_{ai}$ คืออัตราการไหลของมวลอากาศทางเข้า และ $\dot{m}_{ao}$ คืออัตราการไหลของมวลอากาศทางออกของกระบวนการอบแห้ง

จากสมการที่ (1) สำหรับอากาศที่แห้ง (ไม่มีไอน้ำ) แต่สำหรับในกระบวนการอบแห้งด้วยกระบวนการพาความร้อนโดยทั่วไปนั้นจะมีความชื้นภายในวัสดุระเหยผสมกับลมร้อนที่ไหลผ่านกระบวนการอบแห้ง ดังนั้นสามารถอธิบายได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \sum (\dot{m}_{wi} + \dot{m}_{mp}) &= \sum \dot{m}_{wo} \\ \sum (\dot{m}_{ai} w_i + \dot{m}_{mp}) &= \sum \dot{m}_{ao} w_o \end{aligned} \quad \text{หรือ} \quad (2)$$

โดยที่ $\dot{m}_{wi}$ และ $\dot{m}_{wo}$ คืออัตราการไหลมวลความชื้นของอากาศทางเข้า และทางออกของกระบวนการอบแห้ง ตามลำดับ $\dot{m}_{mp}$ คืออัตราการไหลของมวลความชื้นที่ระเหยออกจากแพคเกจวัสดุพูน w_i และ w_o คือความชื้นจำเพาะที่ไหลเข้าและทางออกของกระบวนการอบแห้ง โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของพลังงานจลน์เนื่องจากพัดลมและไม่พิจารณาพลังงานศักย์และพลังงานจลน์ ของกระบวนการอบแห้งตามลำดับ

สมการทั่วไปสำหรับการอนุรักษ์พลังงานสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_o \left(h_o + \frac{V_o^2}{2} \right) - \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} \right) \quad (3)$$

โดยที่ $\dot{Q}$ คือความร้อน $\dot{W}$ คืองาน h คือเอนทาลปี และ V คือความเร็ว ตัวกำกับล่าง i คือ ทางเข้า o คือทางออก

ในการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ของอากาศที่ไหลผ่านพัดลมนั้นจะพิจารณาในขณะที่เป็นพลังงานศักย์ และพลังงานจลน์เท่านั้น โดยจะไม่นำถึงการเปลี่ยนแปลงของพลังงานที่เกิดจากอุปกรณ์อย่างอื่น

สำหรับการวิเคราะห์พลังงานและเอนทาลปีในกระบวนการอบแห้งแพคเกจวัสดุพูนนั้น สามารถคำนวณค่าความชื้นสัมพัทธ์ และค่าเอนทาลปีของลมร้อนได้จากสมการต่อไปนี้

$$\phi = \frac{wP}{(0.622 + w)P_{sat@T}} \quad (4)$$

โดยที่ ϕ คือความชื้นสัมพัทธ์ w คือความชื้นจำเพาะ P คือความดันบรรยากาศ $P_{sat@T}$ ความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิใดๆ ของลมร้อนที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง

สำหรับการคำนวณเอนทาลปีของลมร้อนที่ไหลเข้าของกระบวนการอบแห้งสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$h = c_{pda} T + w h_{sat@T} \quad (5)$$

โดยที่ c_{pda} คือความร้อนจำเพาะของลมร้อน T คืออุณหภูมิของลมร้อน และ $h_{sat@T}$ คือเอนทาลปีของไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิใดๆ

3.1 การคำนวณที่สภาวะทางออกของพัดลมในเครื่องกำเนิดลมร้อน

ในการคำนวณเอนทาลปีที่ไหลออกของพัดลม [5] สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$h_{fo} = \left[\left(\dot{W}_f - \frac{V_{fo}^2}{2 * 1000} \right) \left(\frac{1}{\dot{m}_{da}} \right) \right] + h_{fi} \quad (6)$$

โดยที่ h_{fi} คือเอนทาลปีของลมร้อนที่ไหลเข้าของพัดลม h_{fo} คือเอนทาลปีของลมร้อนที่ไหลออกของพัดลม V_{fo} คือความเร็วของลมร้อนที่ออกจากพัดลม $\dot{W}_f$ คือพลังงานที่ใช้ขับพัดลม $\dot{m}_{da}$ คืออัตราการไหลของลมร้อน

3.2 การคำนวณที่สภาวะทางเข้าและทางออกของเครื่องกำเนิดลมร้อน

สมมติให้สภาวะต่างๆ ที่ทางเข้าเครื่องกำเนิดลมร้อนมีค่าเท่ากับสภาวะที่ทางออกของพัดลมสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} w_{hi} &= w_{fo}, & T_{hi} &= T_{fo}, \\ \phi_{hi} &= \phi_{fo}, & h_{hi} &= h_{fo} \end{aligned} \quad (7)$$

โดยที่ ตัวกำกับล่าง hi คือสภาวะที่ไหลเข้าของเครื่องกำเนิดลมร้อน fo คือสภาวะที่ทางออกของพัดลม

สำหรับพลังงานความร้อน ($\dot{Q}_u$) ที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการอบแห้งผลิตได้จากเครื่องกำเนิดลมร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\dot{Q}_u = \dot{m}_{da} c_{pda} (T_{ho} - T_{hi}) \quad (8)$$

โดยที่ $\dot{m}_{da}$ คืออัตราการไหลเชิงมวลของลมร้อน c_{pda} (คือค่าความร้อนจำเพาะของลมร้อน T_{ho} คือ อุณหภูมิของลมร้อนที่ออกจากเครื่องกำเนิดลมร้อน และ T_{hi} คือ อุณหภูมิของลมร้อนที่ไหลเข้าของเครื่องกำเนิดลมร้อน

สำหรับการคำนวณความชื้นสัมพัทธ์ (ϕ_{ho}) และเอนทาลปีที่ไหลออกของเครื่องกำเนิดลมร้อน (h_{ho}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4) และ (5)

ในที่นี้สภาวะต่างๆ ที่ไหลออกจากเครื่องกำเนิดลมร้อนสมมติให้มีค่าเท่ากับสภาวะที่ไหลเข้าของห้องอบแห้งแพคเกจวัสดุพูนดังแสดงในรูปที่ 2

3.3 การคำนวณที่สภาวะทางออกของแพคเบตวัสดุพูน

ในการคำนวณสภาวะทางเข้าของห้องอบแห้งนั้นพบว่าจะมีค่าแปรตามอุณหภูมิทางเข้า และความชื้นจำเพาะของอากาศ โดยในที่นี้สมมติให้สภาวะที่ทางเข้าของห้องอบแห้งมีค่าเท่ากับสภาวะที่ทางเข้าแพคเบตวัสดุพูน ได้รับ ดังแสดงในรูปที่ 2 หมายความว่าอัตราการไหลเชิงมวลของลมร้อนที่ไหลผ่านผิวหน้าแพคเบตวัสดุพูนมีค่าเท่ากันตลอดช่วงของผิวหน้าแพคเบต ดังนั้นที่สภาวะทางเข้าของแพคเบตวัสดุพูนสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} w_{dci} &= w_{pbi}, T_{dci} = T_{pbi}, \phi_{dci} = \phi_{pbi}, \\ h_{dci} &= h_{pbi} \text{ and } \dot{m}_{da} = \dot{m}_{dapbi} \end{aligned} \quad (9)$$

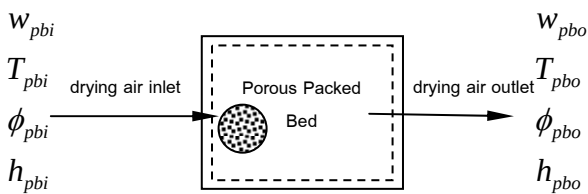
โดยที่ ตัวกำกับล่าง dci คือ สภาวะของลมร้อนที่ไหลเข้าห้องอบแห้ง pbi คือ สภาวะของลมร้อนที่ทางเข้าแพคเบตวัสดุพูน และ da คือ ลมร้อน

การหาความชื้นจำเพาะที่ไหลออกของแพคเบตวัสดุพูน (รูปที่ 2) สามารถคำนวณได้โดยอาศัยสมการที่ (1) และ (2)

$$w_{pbo} = w_{pbi} + \frac{\dot{m}_{wpb}}{\dot{m}_{da}} \quad (10)$$

โดยที่ w_{pbi} คือค่าความชื้นจำเพาะที่ทางเข้าแพคเบตวัสดุพูน และ $\dot{m}_{wpb}$ คืออัตราการไหลเชิงมวลของความชื้นที่ออกจากวัสดุพูน

ความชื้นสัมพัทธ์ และเอนทาลปีของลมร้อนที่ออกจากแพคเบตวัสดุพูนในห้องอบแห้งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4) และสมการที่ (5)



รูปที่ 2 แพคเบตวัสดุพูนในห้องอบแห้ง

ในการคำนวณพลังงานความร้อนที่ใช้ในการระเหยของความชื้นภายในแพคเบตวัสดุพูนของกระบวนการอบแห้งสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\dot{Q}_{pb} = \dot{m}_{da} (h_{pbi@T} - h_{pbo@T}) \quad (11)$$

โดยที่ $h_{pbi@T}$ และ $h_{pbo@T}$ คือเอนทาลปีที่ไหลเข้าและทางออกของแพคเบตวัสดุพูนที่อุณหภูมิใดๆ ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (5)

3.4 การคำนวณที่สภาวะทางออกของห้องอบแห้ง

ในการคำนวณที่สภาวะทางออกของห้องอบแห้งมีสมมติฐานดังนี้ สภาวะของลมร้อนที่ทางเข้าของแพคเบตวัสดุพูนเท่ากับสภาวะของลมร้อนที่ทางเข้าของห้องอบแห้ง (Drying Chamber) และสมมติให้สภาวะของลมร้อนที่ทางออกของแพคเบตวัสดุพูนเท่ากับสภาวะของลมร้อนที่ทางออกของห้องอบแห้ง ดังนั้นจึงสามารถคำนวณค่าความชื้นจำเพาะและความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง โดยใช้สมการที่ (10) และ (11) ตามลำดับ ส่วนค่าความชื้นสัมพัทธ์ และเอนทาลปีที่ทางออกของห้องอบแห้งสามารถคำนวณได้โดยการประยุกต์ใช้สมการที่ (4) และ (5)

สำหรับอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานที่เป็นประโยชน์ (Energy Utilization Ratio; EUR) ในกระบวนการอบแห้งสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของพลังงานที่เป็นประโยชน์ (พลังงานความร้อนที่ใช้สำหรับการระเหยความชื้นภายในวัสดุพูน) ต่อพลังงานความร้อนทั้งหมดที่ป้อนให้กับห้องอบแห้งซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$EUR_{dc} = \frac{\dot{m}_{da} (h_{dci@T} - h_{dco@T})}{\dot{m}_{da} C_{pds} (T_{ho} - T_{hi})} \quad (12)$$

4. การวิเคราะห์เอ็กเซอร์จี้จากกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์

ในการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จี้ของกระบวนการอบแห้งแพคเบตวัสดุพูนนั้นอยู่บนพื้นฐานของกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ เพื่อให้ง่ายในการวิเคราะห์จึงจำเป็นต้องกำหนดสภาวะและขอบเขตทางเข้าและทางออกของกระบวนการอบแห้ง ดังรูปที่ 2 เพื่อนำไปคำนวณหาเอ็กเซอร์จี้ที่ไหลเข้า (Exergy Intflow) เอ็กเซอร์จี้ที่ไหลออก (Exergy Outflow) และเอ็กเซอร์จี้ที่สูญเสีย (Exergy Loss) โดยเอ็กเซอร์จี้ที่คำนวณได้นั้นจะเป็นเอ็กเซอร์จี้ที่พิจารณาให้อยู่ในสภาวะแบบคงตัว (Steady State) โดยที่ค่าเอ็กเซอร์จี้สามารถคำนวณโดยใช้คุณลักษณะของสารทำงานตัวกลางโดยอาศัยสมการสมดุลพลังงานของกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ [9] ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการ [10] ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} Exergy = & (u - u_{\infty}) - T_{\infty} (s - s_{\infty}) + \frac{P_{\infty}}{J} (v - v_{\infty}) + \frac{V^2}{2gJ} + (z - z_{\infty}) \frac{g}{g_c J} \\ & + \sum_c (\mu_c - \mu_{\infty}) N_c + E_r A F_r (3T^4 - T_{\infty}^4 - 4T_{\infty} T^3) + \dots \end{aligned} \quad (13)$$

internal entropy work momentum gravity
energy

chemical radiation emission

โดยที่ ตัวกำกับล่าง ∞ สภาวะอ้างอิง

ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเอ็กเซอร์จี้เป็นการวิเคราะห์โดยเทียบกับสภาวะแวดล้อมที่ใช้อ้างอิง โดยทั่วไปแล้วในการวิเคราะห์การแปรเปลี่ยนเอ็กเซอร์จี้ของกระบวนการนั้น สามารถลดรูปของสมการลง ดังสมการที่ (13) โดยการตัดทอนที่มีการแปรเปลี่ยนน้อยออก ซึ่งในการวิเคราะห์เอนทาลปีจะพิจารณาในทอมของพลังงานภายใน และในทอมของ Pv ซึ่งใช้สำหรับระบบที่มีการไหลแบบคงตัว (Steady Flow) และในสมการที่ (13) นี้จะตัดอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงและไม่พิจารณาทอมของโมเมนตัม ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงความ

ตันในระบบที่เพิ่มเข้ามานี้ก็จะไม่นำมาพิจารณาเนื่องจาก $v \cong v_\infty$ ดังนั้นสมการที่ (13) จึงลดรูปเหลือดังนี้

$$Exergy = \bar{c}_p \left[(T - T_\infty) - T_\infty \ln \frac{T}{T_\infty} \right] \quad (14)$$

การประยุกต์ใช้สมการที่ (13) เพื่อวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีที่ไหลเข้าและทางออกของกระบวนการอบแห้งนี้สามารถหาได้จากอุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าและทางออกของห้องอบแห้ง โดยที่การสูญเสียเอ็กเซอร์จี (Exergy Loss) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$Exergy\ loss = Exergy\ inflow - Exergy\ outflow$$

$$\sum Ex_L = \sum Ex_i - \sum Ex_o \quad (15)$$

ในการคำนวณเอ็กเซอร์จีที่ไหลเข้าห้องอบแห้งและแพคเบตวัสดุพูนสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$Ex_{dci} = Ex_{pbi} = \bar{c}_{pda} \left[(T_{dci} - T_\infty) - T_\infty \ln \frac{T_{dci}}{T_\infty} \right] \quad (16)$$

โดยที่ $\bar{c}_{pda}$ ความร้อนจำเพาะเฉลี่ยของลมร้อน สำหรับเอ็กเซอร์จีที่ไหลออกจากห้องอบแห้งและแพคเบตวัสดุพูนสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$Ex_{dco} = Ex_{pbo} = \bar{c}_{pda} \left[(T_{dco} - T_\infty) - T_\infty \ln \frac{T_{dco}}{T_\infty} \right] \quad (17)$$

ปริมาณเอ็กเซอร์จีที่สูญเสียสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (15) ถึง (17) ในการหาประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีของกระบวนการอบแห้งนี้สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนเอ็กเซอร์จีของผลิตภัณฑ์ (หรือเอ็กเซอร์จีที่สูญเสียของห้องอบแห้ง) ต่อเอ็กเซอร์จีที่ไหลเข้าห้องอบแห้ง

ดังนั้นรูปแบบทั่วไปของประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีของกระบวนการอบแห้งสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

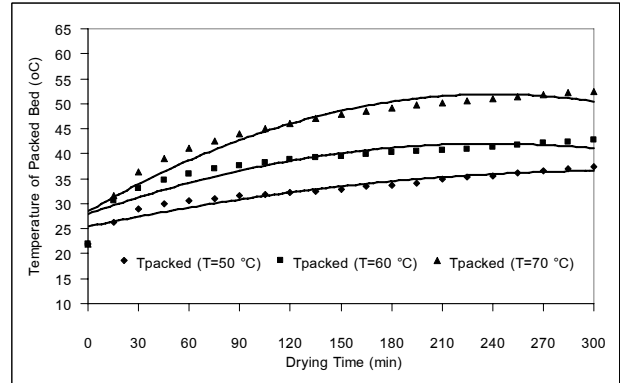
$$Exergy\ Efficiency = \frac{Exergy\ inf\ low - Exergy\ loss}{Exergy\ inf\ low}$$

$$\eta_{Ex} = 1 - \frac{Ex_L}{Ex_i} \quad (18)$$

5. ผลและวิจารณ์

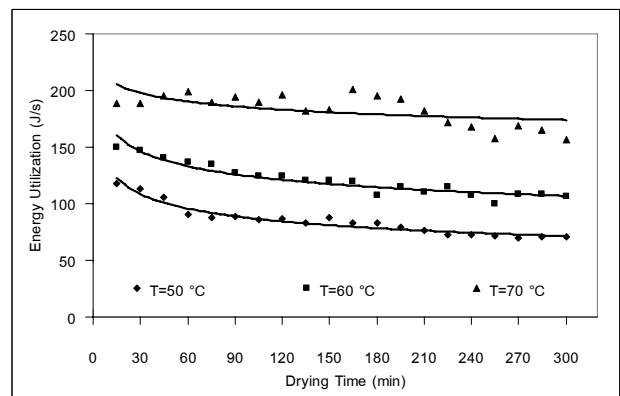
จากการทดลองการอบแห้งวัสดุพูนด้วยลมร้อนเพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จีของกระบวนการอบแห้งพบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุพูนกับเวลาในการอบแห้ง โดยมีอุณหภูมิลมร้อนทางเข้าห้องอบแห้งคงที่ 3 ระดับคือ 50 °C 60 °C และ 70 °C ความเร็วของลมร้อนเท่ากับ 2.5 m/s จะเห็นว่าเมื่อเวลาในการอบแห้งมากขึ้นทำให้อุณหภูมิของแพคเบตวัสดุพูนมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

เนื่องจากในช่วงแรกของการอบแห้งความร้อนถูกใช้ในการระเหยของความชื้นที่อยู่ภายในออกสู่ภายนอกได้ดี (Constance Rate Period) โดยเฉพาะสำหรับอุณหภูมิลมร้อนที่สูงๆ และเมื่อระยะเวลาในการอบแห้งนานขึ้นความชื้นที่อยู่ภายในจะเหลือน้อยลง ทำให้อัตราการระเหยของความชื้นที่อยู่ภายในวัสดุเกิดขึ้นอย่างช้าๆ (Falling Rate Period) ทำให้ความร้อนเกิดการสะสมภายในแพคเบตวัสดุพูนมากขึ้นตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุพูนกับเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อน 50 °C 60 °C และ 70 °C

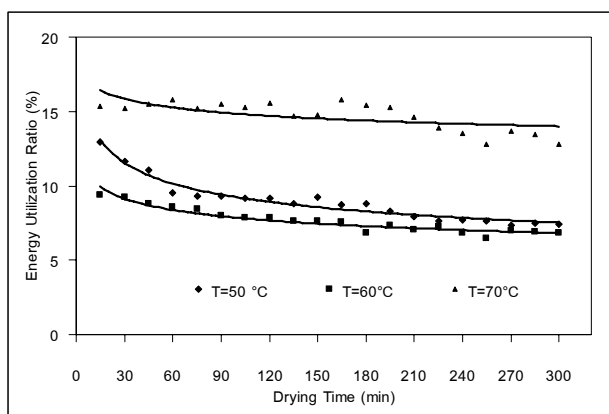
ในการคำนวณพลังงานความร้อนที่ใช้ประโยชน์ในการอบแห้งแพคเบตวัสดุพูนนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (11) ซึ่งเป็นพลังงานความร้อนที่ใช้ในการระเหยของความชื้นที่อยู่ภายในวัสดุออกสู่ภายนอก จะเห็นว่าในการอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อน 50 °C 60 °C และ 70 °C นั้นในช่วงแรกของการอบแห้งพลังงานความร้อนที่ใช้เป็นประโยชน์จะมีค่าสูงเนื่องจากวัสดุมีความชื้นภายในอยู่มากจึงทำให้เกิดการระเหยได้ดี และเมื่อเวลาของกระบวนการอบแห้งมากขึ้นพลังงานความร้อนที่เป็นประโยชน์จะน้อยลงเนื่องจากความชื้นที่อยู่ภายในวัสดุน้อยลงทำให้อัตราการระเหยของความชื้นน้อยลงเป็นผลมาจากความดันภายในวัสดุพูนลดลง เมื่อพิจารณาอุณหภูมิของลมร้อนที่ต่างกันจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิของลมร้อนสูงขึ้นส่งผลให้พลังงานที่เป็นประโยชน์มีค่าสูงเนื่องจากเมื่อลมร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ความชื้นภายในวัสดุพูนสามารถระเหยได้ดี



รูปที่ 4 พลังงานที่ใช้ประโยชน์ในกระบวนการอบแห้งวัสดุพรุณ
ที่อุณหภูมิ 50 °C 60 °C และ 70 °C

สำหรับอัตราส่วนพลังงานที่เป็นประโยชน์ (EUR) ของกระบวนการอบแห้งซึ่งเป็นอัตราส่วนของพลังงานที่เป็นประโยชน์ในการระเหยของความชื้นที่อยู่ภายในวัสดุต่อพลังงานความร้อนทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการอบแห้ง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (12)

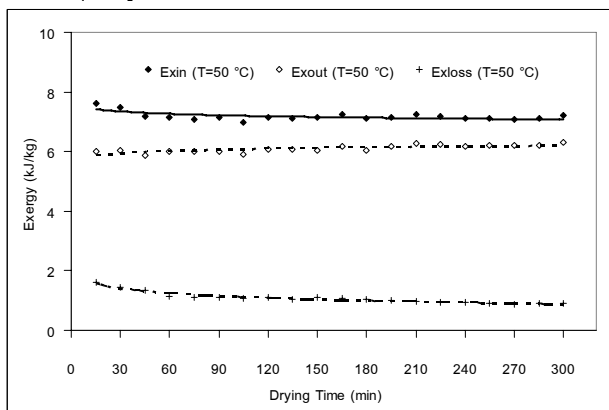
จากรูปที่ 5 จะเห็นว่าในช่วงแรกของการอบแห้งประสิทธิภาพของอัตราส่วนพลังงานที่เป็นประโยชน์จะมีค่าสูง เนื่องจากพลังงานงานที่เป็นประโยชน์มีค่ามาก เพราะวัสดุมีการระเหยความชื้นได้ดี ในขณะเดียวกันพลังงาน เป็นที่นาสังเกตว่าที่อุณหภูมิ 50 °C นั้นประสิทธิภาพของอัตราส่วนพลังงานที่เป็นประโยชน์จะมีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิ 60 °C และต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 70 °C



รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนพลังงานที่เป็นประโยชน์กับเวลา
ในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C 60 °C และ 70 °C

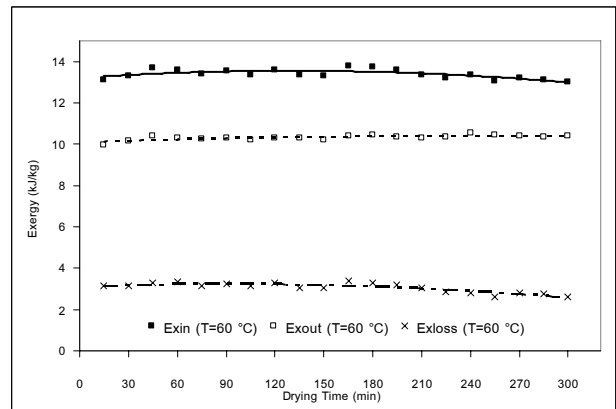
ในการหาเอ็กเซอร์จีทางเข้า ทางออก และเอ็กเซอร์จีที่สูญเสียของกระบวนการอบแห้งนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (14) ถึง (17) ซึ่งค่าของเอ็กเซอร์จินั้นจะแปรเปลี่ยนไปกับอุณหภูมิของลมร้อนที่ไหลเข้าของกระบวนการอบแห้งดังรูปที่ 6 ถึง 8

จากรูปที่ 6 เป็นการเปลี่ยนแปลงของเอ็กเซอร์จีทางเข้า ทางออก และเอ็กเซอร์จีที่สูญเสียกับเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C จะเห็นว่าเอ็กเซอร์จีที่ไหลเข้ามีค่าใกล้เคียงกับเอ็กเซอร์จีที่ไหลออกจึงทำให้เอ็กเซอร์จีที่สูญเสียมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงเอ็กเซอร์จีที่อุณหภูมิ 60 °C และ 70 °C ตามลำดับ



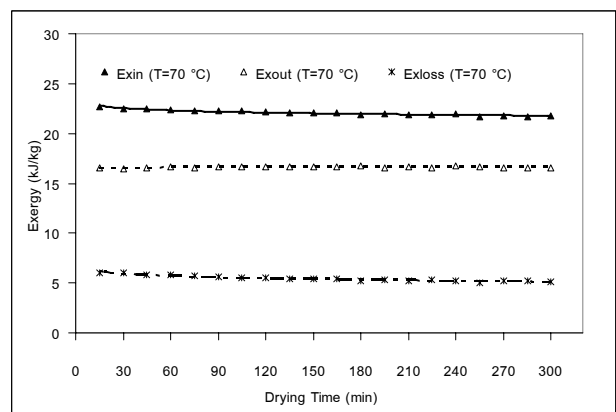
รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงของเอ็กเซอร์จีทางเข้า ทางออก และเอ็กเซอร์จี
ที่สูญเสียกับเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C

จากรูปที่ 7 เป็นการเปลี่ยนแปลงของเอ็กเซอร์จีทางเข้า ทางออก และเอ็กเซอร์จีที่สูญเสียกับเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C จะเห็นว่าความแตกต่างของเอ็กเซอร์จีที่ไหลเข้า กับเอ็กเซอร์จีที่ไหลออกมีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับเอ็กเซอร์จีที่อุณหภูมิ 50 °C จึงทำให้เอ็กเซอร์จีที่สูญเสียมีค่ามากขึ้นด้วย แต่มีค่าต่ำกว่าการเปลี่ยนแปลงเอ็กเซอร์จีที่อุณหภูมิ 70 °C



รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงของเอ็กเซอร์จีทางเข้า ทางออก และเอ็กเซอร์จี
ที่สูญเสียกับเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C

จากรูปที่ 7 จะเห็นว่า การเปลี่ยนแปลงของเอ็กเซอร์จีทางเข้า ทางออก และเอ็กเซอร์จีที่สูญเสียมีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 °C และ 60 °C ตามลำดับ

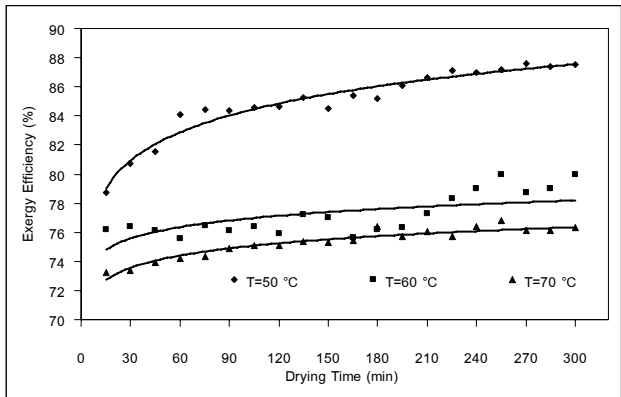


รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงของเอ็กเซอร์จีทางเข้า ทางออก และเอ็กเซอร์จี
ที่สูญเสียกับเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C

ในการหาประสิทธิภาพของเอ็กเซอร์จินั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (18) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของเอ็กเซอร์จีที่เป็นประโยชน์ต่อเอ็กเซอร์จีทั้งหมดที่ไหลเข้าของการอบแห้ง

จากการคำนวณประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีดังรูปที่ 9 จะเห็นว่าในช่วงแรกของการอบแห้งนั้นประสิทธิภาพของเอ็กเซอร์จีมีค่าต่ำเนื่องจากมีเอ็กเซอร์จีสูญเสียมาก และเมื่อเวลาในการอบแห้งมากขึ้นประสิทธิภาพของเอ็กเซอร์จีจะมีค่าสูงขึ้นด้วย เนื่องจากมีเอ็กเซอร์จี

สูญเสียมาก ซึ่งเอ็กเซอร์จีที่สูญเสียนั้นเป็นผลมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิของลมร้อนที่ไหลออกจากกระบวนการอบแห้งกับอุณหภูมิแวดล้อมมีค่าน้อย โดยที่ประสิทธิภาพของเอ็กเซอร์จีจะแปรผกผันกับประสิทธิภาพพลังงาน



รูปที่ 9 การเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีกับเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อน 50 °C 60 °C และ 70 °C

ตารางที่ 1 ผลจากการคำนวณค่าพลังงาน

Time (min)	T _{in} (°C)	E (J/s)	EUR (%)	T _{in} (°C)	E (J/s)	EUR (%)	T _{in} (°C)	E (J/s)	EUR (%)
T=50 °C				T=60 °C			T=70 °C		
15	24.6	117.80	12.93	24.9	150.21	9.36	25.3	188.69	15.35
30	24.6	113.47	11.65	24.9	147.35	9.22	25.3	188.81	15.24
45	24.6	105.35	11.08	24.9	140.54	8.80	25.3	195.50	15.48
60	24.6	90.11	9.52	24.9	137.00	8.59	25.3	198.81	15.80
75	24.6	87.54	9.28	24.9	134.49	8.46	25.3	189.50	15.19
90	24.6	88.29	9.33	24.9	127.53	8.03	25.3	194.14	15.46
105	24.6	85.87	9.18	24.9	124.95	7.88	25.3	189.61	15.24
120	24.6	87.14	9.19	24.9	124.43	7.86	25.3	195.86	15.59
135	24.6	83.22	8.80	24.9	120.98	7.66	25.3	182.43	14.66
150	24.6	87.74	9.27	24.9	120.85	7.66	25.3	183.37	14.80
165	24.6	83.27	8.72	24.9	119.42	7.58	25.3	200.56	15.81
180	24.6	83.34	8.83	24.9	107.28	6.83	25.3	194.83	15.40
195	24.6	78.79	8.30	24.9	114.93	7.32	25.3	192.14	15.28
210	24.6	75.97	7.96	24.9	110.44	7.04	25.3	182.27	14.65
225	24.6	72.82	7.67	24.9	114.69	7.31	25.3	171.66	13.91
240	24.6	73.05	7.73	24.9	107.52	6.84	25.3	167.90	13.49
255	24.6	71.80	7.61	24.9	100.47	6.44	25.3	157.44	12.83
270	24.6	69.35	7.37	24.9	108.77	6.95	25.3	168.88	13.67
285	24.6	70.90	7.51	24.9	108.04	6.92	25.3	165.41	13.46
300	24.6	70.95	7.44	24.9	108.43	6.81	25.3	156.92	12.81

ตารางที่ 2 ผลจากการคำนวณค่าเอ็กเซอร์จี

Time	E_{in}	$E_{exhaust}$	E_{loss}	η_{ex}	E_{in}	$E_{exhaust}$	E_{loss}	η_{ex}	E_{in}	$E_{exhaust}$	E_{loss}	η_{ex}
(min)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(%)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(%)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(%)
	T=60°C				T=70°C				T=50°C			
15	7.62	1.62	6.00	78.71	13.11	9.98	3.12	76.17	22.63	16.58	6.05	73.29
30	7.50	1.45	6.05	80.72	13.28	10.14	3.14	76.38	22.49	16.50	5.99	73.36
45	7.19	1.33	5.87	81.56	13.70	10.42	3.28	76.09	22.46	16.60	5.85	73.93
60	7.14	1.14	6.00	84.07	13.62	10.29	3.32	75.60	22.40	16.62	5.78	74.19
75	7.09	1.10	5.99	84.45	13.43	10.27	3.16	76.47	22.32	16.59	5.73	74.33
90	7.14	1.11	6.02	84.38	13.57	10.33	3.24	76.09	22.26	16.67	5.59	74.89
105	6.99	1.08	5.91	84.59	13.37	10.21	3.16	76.39	22.24	16.70	5.54	75.10
120	7.16	1.10	6.06	84.62	13.58	10.31	3.27	75.90	22.19	16.66	5.52	75.10
135	7.12	1.05	6.07	85.24	13.37	10.33	3.04	77.25	22.11	16.65	5.45	75.33
150	7.13	1.11	6.03	84.48	13.28	10.23	3.05	77.03	22.06	16.61	5.45	75.30
165	7.24	1.06	6.19	85.40	13.79	10.43	3.36	75.61	22.03	16.61	5.42	75.40
180	7.10	1.05	6.05	85.19	13.74	10.47	3.27	76.21	21.92	16.74	5.17	76.39
195	7.16	1.00	6.16	86.06	13.59	10.38	3.21	76.36	21.93	16.60	5.33	75.70
210	7.24	0.97	6.27	86.64	13.37	10.33	3.04	77.26	21.88	16.64	5.24	76.06
225	7.17	0.93	6.25	87.10	13.20	10.34	2.86	78.35	21.90	16.57	5.32	75.69
240	7.12	0.93	6.19	87.00	13.37	10.57	2.81	79.00	21.94	16.76	5.18	76.39
255	7.10	0.91	6.19	87.19	13.08	10.46	2.62	79.96	21.68	16.65	5.03	76.79
270	7.07	0.88	6.19	87.58	13.22	10.40	2.81	78.71	21.79	16.59	5.20	76.13
285	7.11	0.90	6.21	87.36	13.10	10.35	2.75	79.00	21.71	16.53	5.18	76.12
300	7.23	0.90	6.33	87.49	13.03	10.42	2.61	79.97	21.75	16.60	5.15	76.31

6. สรุป

ในการศึกษาการวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จีของกระบวนการอบแห้งวัสดุพืชน้ำด้วยลมร้อน ในการนำผลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณและวิเคราะห์ผลสามารถสรุปได้ดังนี้

จากการอบแห้งวัสดุพืชน้ำน้ำหนักลดลงจาก 384 g ถึง 343 g ใช้เวลาในการอบแห้ง 6 ชั่วโมง โดยใช้ประโยชน์จากพลังงานตั้งแต่ 70.590 J/s ถึง 150.207 J/s ซึ่งพลังงานความร้อนที่ใช้เป็นประโยชน์ในการระเหยความชื้นภายในแพคเบตวัสดุพืชน้ำจะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีค่ามาก พลังงานความร้อนที่ใช้จึงมีค่ามาก ส่วนเอ็กเซอร์จีที่สูญเสียที่ไหลเข้าและทางออกก็จะแปรเปลี่ยนไปกับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งเช่นกัน โดยที่เอ็กเซอร์จีที่ไหลเข้าของห้องอบแห้งอยู่ระหว่าง 7.62 kJ/kg ถึง 22.63 kJ/kg เอ็กเซอร์จีที่ไหลออกมีค่าระหว่าง 6.00 kJ/kg ถึง 16.58 kJ/kg โดยที่เอ็กเซอร์จีสูญเสียไม่มีค่าระหว่าง 1.62 kJ/kg ถึง 6.05 kJ/kg ซึ่งประสิทธิภาพของเอ็กเซอร์จีของห้องอบแห้งมีค่า 73.26 % ถึง 87.47 % ซึ่งเป็นที่น่าสังเกตว่าพลังงานที่เป็นประโยชน์มีค่าลดลง และประสิทธิภาพของเอ็กเซอร์จีมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น ในการพิจารณาพลังงานที่เป็นประโยชน์ เอ็กเซอร์จีที่ไหลเข้าเอ็กเซอร์จีที่ไหลออก และเอ็กเซอร์จีที่สูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งเพิ่มขึ้น

เนื่องจากวัสดุพืชน้ำโครงสร้างภายในที่ซับซ้อนมากในการระเหยของความชื้นซึ่งมีความสำคัญ เป็นอย่างมากกับพลังงานจากภายนอกที่ใช้ในการระเหยของความชื้น ดังนั้นจึงเป็นแนวทางในการศึกษาโครงสร้างและองค์ประกอบของวัสดุพืชน้ำที่เป็นตัวแปรสำคัญในการออกแบบระบบการอบแห้งในอนาคตด้วยระบบที่ให้ความร้อนโดยตรงและการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้

รายการสัญลักษณ์

- A พื้นที่, (m²)
- C_p ค่าความร้อนจำเพาะ, (kJ/kgK)
- EUR อัตราส่วนพลังงานที่เป็นประโยชน์, (%)
- Ex เอ็กเซอร์จี, (kJ/kg)
- g ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก, (m/s²)
- h เอนทาลปี, (kJ/kgK)
- J ค่าคงที่ของจูล
- m อัตราการไหลของมวล, (kg/s)
- P ความดัน, (kPa)
- Q̇ ค่าความร้อนสุทธิ, (kJ/s)
- S เอนโทรปีจำเพาะ, (kg/kgK)
- T อุณหภูมิ, (K)

u	พลังงานภายในจำเพาะ, (kJ/kg)
v	ปริมาตรจำเพาะ, (m^3/kg)
V	ความเร็ว, (m/s)
w	ความชื้นจำเพาะ, (g/g)
$\dot{W}$	พลังงานที่เป็นประโยชน์, (J/s)
Z	ขนาดของฟักัด, (m)

ตัวกำกับล่าง

a	อากาศ
da	อากาศแห้ง
dc	ห้องอบแห้ง
f	พัดลม
h	เครื่องกำเนิดความร้อน
I	ทางเข้า
L	การสูญเสีย
mp	ความชื้นของผลิตภัณฑ์
o	ทางออก
sat	อิ่มตัว
pb	แพคเกจวัสดุพูน
@T	ที่อุณหภูมิใดๆ

สัญลักษณ์กรีก

∞	สิ่งแวดล้อม
ϕ	ความชื้นสัมพัทธ์, (%)
η_{Ex}	ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี, (%)

เอกสารอ้างอิง

- 1 ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช. 2546. การวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งในวัสดุพูน (หลักการเบื้องต้นของการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในกระบวนการอบแห้งวัสดุพูน). วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. ฉบับที่ 1 ม.ค - เม.ย 47. หน้า 1-11
- 2 วรณิ เอกศิลป์ และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, การศึกษาพลังงานและเอ็กเซอร์จีของกระบวนการอบแห้งวัสดุชีวภาพโดยใช้สเปาแดดเบตร่วมกับไมโครเวฟ, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20, นครราชสีมา, 18-20 ตุลาคม 2549, หน้า 297-298
- 3 Dincer, I., Syahrul, S. and Hamdullahpur, F., 2003. "Thermodynamic Modeling of Fluidized Bed Drying of Moist Particles". International Journal of Thermal Sciences, Vol. 42, pp. 691-701.
- 4 Dincer, I., and Sahin, A. Z., 2004. "A New Model for Thermodynamics Analysis of a Drying Process". Int. Heat and Mass transfer, Vol. 47, pp. 645-652.

- 5 Akpinar, E. K., 2004. "Energy and Exergy of Drying of Red Pepper Slices in a Convective Type Dryer". Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol. 31, pp. 1165-1176.
- 6 Akpinar, E. K. AMidilli and Bicer, Y., 2005. "Energy and Exergy of Potato Drying Process via Cyclone Type Dryer". Energy Conversion and Management. Vol. 46, pp. 2530-2552.
- 7 Bejan, A., 1988. "Advance Engineering Thermodynamics", John Wiley and Sons Inc., New York.
- 8 Ahern, J. E., 1980. "The Exergy Method of Energy System Analysis". John Wiley. New York.
- 9 Bejan, A., 1998, Advance Engineering Thermodynamics, John Wiley and Sons Inc., New York.
- 10 A.E. Ahern, 1980, The Exergy Method of System Analysis, John Wiley and Sons Inc., New York.