

## การวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จีในกระบวนการอบแห้ง วัสดุพรุนหลายชั้นโดยใช้ลมร้อน

### Energy and Exergy Analyses in Drying Process of Multilayer Porous Media Using Hot Air

รัฐศักดิ์ พรหมมาศ ไชยณรงค์ จักรธรานนท์ และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช\*

หน่วยวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม (R.C.M.E.)

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

99 หมู่ 18 ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง ปทุมธานี 12120

\*ติดต่อ: โทรศัพท์: (66) 2564-3001-9, E-mail: rtsakprm@yahoo.com, ratphadu@engr.tu.ac.th

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จีในกระบวนการอบแห้งวัสดุพรุนหลายชั้นโดยใช้ลมร้อน โดยทำการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อน ทางเข้าก่อนการอบแห้ง และทางออกหลังการอบแห้งที่มีผลต่อจลนพลศาสตร์ ในการวิเคราะห์อาศัยกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ในการวิเคราะห์พลังงานที่ใช้เป็นประโยชน์ในการอบแห้งแพคเกจวัสดุพรุน F-C และ C-F และประยุกต์ใช้กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ ในการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีที่ไหลเข้า เอ็กเซอร์จีที่ไหลออก เอ็กเซอร์จีที่สูญเสีย และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีของกระบวนการอบแห้ง จากการวิเคราะห์พลังงาน และเอ็กเซอร์จีสามารถนำผลที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงกระบวนการอบแห้งให้มีประสิทธิภาพสูงสุดต่อไป

#### Abstract

This paper is concerned with the energy and exergy analyses in drying process of multilayer 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 for drying porous packed bed F-C and C-F, 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

การอบแห้งเป็นกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์ที่มีเป้าหมายเพื่อถึงความชื้นที่อยู่ภายในวัสดุออกสู่ภายนอกโดยอาศัยหลักการถ่ายเทความร้อนซึ่งต้องใช้พลังงานจากภายนอก ในการอบแห้งนั้นวิธีการและเทคโนโลยีต่าง ๆ มากมายขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของวัสดุที่ต้องการอบแห้ง ได้แก่ การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ การอบแห้งโดยใช้ลมร้อน และการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำ เป็นต้น โดยทั่วไป [1] วัสดุที่นำมาอบแห้งนั้นมักจะพิจารณาให้เป็นวัสดุพรุน โดยที่วัสดุพรุนประกอบด้วยสสารที่มี 3 สถานะ คือ สถานะของแข็ง (Solid Phase) ของเหลว (Liquid Phase) และก๊าซ (Gas Phase) ที่อยู่ในช่องว่าง หรือรูพรุน (Void) ในการวิเคราะห์พลังงานของกระบวนการอบแห้งจะใช้กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ และการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีของกระบวนการอบแห้งจะใช้กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ โดยที่ เอ็กเซอร์จี คือค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ของงาน (Useful of Work) ที่ได้รับจากระบบ ซึ่งค่าสูงสุดของงานนั้น ก็ได้จากระบบที่เป็นกระบวนการย้อนกลับได้ (Reversible Process) โดยอ้างอิงกับสภาวะแวดล้อมนั้น พลังงานและเอ็กเซอร์จีมีความแตกต่างกันตรงที่เอ็กเซอร์จีไม่มีกฎการอนุรักษ์พลังงาน (เป็นกระบวนการทางอุณหพลศาสตร์ และกระบวนการที่ย้อนกลับได้) ในความเป็นจริงส่วนใหญ่เอ็กเซอร์จีที่ใช้จำนวนมากสูญเสียไปเนื่องจากกระบวนการย้อนกลับไม่ได้ เอ็กเซอร์จีที่ใช้ในกระบวนการย้อนกลับไม่ได้จะเป็นสัดส่วนกับเอนโทรปี ที่เกิดขึ้นพร้อมกันในกระบวนการ

จากงานวิจัยที่ผ่านมา วรณิ เอกศิลป์ และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช [2] ได้ศึกษาพลังงานและเอ็กเซอร์จีเพื่อวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งวัสดุชีวภาพ โดยใช้กระบวนการสเปาเด็ตเตอร์ โดยมีไมโครเวฟ และการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลจากการวิเคราะห์พบว่า ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีมีค่าน้อยกว่าประสิทธิภาพพลังงานเนื่องจากการสูญเสียพลังงานจากกระบวนการ ย้อนกลับไม่ได้ ซึ่งไม่สามารถวิเคราะห์ได้ในการศึกษา นี้ ค่าประสิทธิภาพพลังงานและเอ็กเซอร์จี

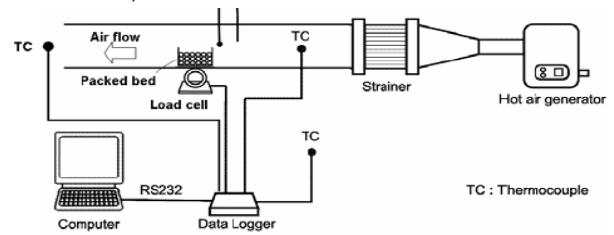
ลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เอ็กเซอร์จีของอากาศที่ไหลออกมีค่ามากกว่าเอ็กเซอร์จีของอากาศที่ทางเข้า เนื่องจากมีพลังงานไม่โครเวฟเป็นแหล่งกำเนิดความร้อน I. Dincer, S. Syahrul and F. Hamdullahpur (2003) [3] ได้ศึกษาแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งข้าวโพดและข้าวสาลี แบบฟูอิดโตเบตโดยหาค่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีจากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงและผลการเปลี่ยนแปลง โดยตัวแปรที่นำมาวิเคราะห์คืออุณหภูมิ การอบแห้ง ความชื้นของวัสดุ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ จากการศึกษาพบว่าอากาศที่มีอัตราการไหลเพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี แต่ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี จะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มมวลของวัสดุ และอุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี จะลดลง I. Dincer and A. Z. Sahin. (2004). [4] ได้ศึกษารูปแบบใหม่ทางอุณหพลศาสตร์ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งเพื่อหาประสิทธิภาพของเอ็กเซอร์จีในกระบวนการอบแห้งที่มีองค์ประกอบของการถ่ายเทความร้อน และการถ่ายเทมวล ที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศ เอ็กเซอร์จีจำเพาะ ความแตกต่างของเอ็กเซอร์จีทางเข้าและทางออก น้ำหนักผลิตภัณฑ์ ความชื้นที่อยู่ในอากาศ และอัตราส่วนความชื้นของอากาศแห้งเพื่อนำผลที่ได้ประเมินสมรรถนะและประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้ง E. Kavak Akpinar (2004) [5] ได้ศึกษากระบวนการอบแห้งพริกหยวกแดงแผ่นบางโดยการใช้อากาศที่หนึ่งของ อุณหพลศาสตร์ในการวิเคราะห์พลังงานเพื่อนำไปสู่การประมาณค่าอัตราส่วนของพลังงานที่ใช้ให้เป็นประโยชน์ และประยุกต์ใช้กฎข้อที่สองของ อุณหพลศาสตร์ในการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จี นอกจากนี้ E. Kavak Akpinar et al. (2005) [6] ได้ศึกษากระบวนการอบแห้งมันฝรั่ง แผ่นด้วยเครื่องอบแห้งแบบไซโคลนโดยการใช้อากาศที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ ในการวิเคราะห์อัตราส่วนสมรรถนะของพลังงาน ที่เป็นประโยชน์ และประยุกต์ใช้กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ ในการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จี ที่ไหลเข้า เอ็กเซอร์จี ที่ไหลออก และ เอ็กเซอร์จีที่สูญเสีย ของ กระบวนการอบแห้งสามารถสรุปได้ว่าเครื่องอบแห้งแบบไซโคลนทำให้สูญเสียเอ็กเซอร์จีไปจำนวนมาก ซึ่งเกิดจากพลังงานที่ยังมีศักยภาพอยู่สูญเสียไป และจากการศึกษาพบว่าสภาวะในการอบแห้งมันฝรั่งแผ่นที่เหมาะสมนั้นต้องใช้อุณหภูมิระหว่าง 60 °C ถึง 80 °C และความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 20 % ถึง 10 % ความเร็วของลมร้อนในการอบแห้ง 1 m/s และ 1.5 m/s ใช้เวลา 10 - 12 ชม. ซึ่งทำให้เอ็กเซอร์จีสูญเสียน้อยที่สุด 0 - 1.796 kJ/s จากงานวิจัยที่ผ่านมาสำหรับการอบแห้งวัสดุด้วยกระบวนการอบแห้งแบบต่างๆ นั้นส่วนใหญ่เป็นการศึกษาเฉพาะพลังงานและเอ็กเซอร์จีที่ใช้ในการไล่ความชื้นออกจากวัสดุเท่านั้น โดยส่วนใหญ่เป็นวัสดุที่ใช้ในการอบแห้งจะเป็นวัสดุชีวภาพ จากการสืบค้นงานวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่ปรากฏว่ามีการศึกษาเพื่อวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จี ในการอบแห้งวัสดุพูน เพราะวัสดุพูนมีโครงสร้างภายในที่ซับซ้อนซึ่งมีผลกระทบโดยตรงกับการใช้พลังงานในการระเหยความชื้นจากภายในออกสู่ภายนอก

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาวิเคราะห์ พลังงาน และเอ็กเซอร์จี ในกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนโดยใช้วัสดุพูนแบบอิ่มตัว (Saturated) ที่ไม่ชื้นมาก (Nonhygroscopic Porous Media) เพื่อทำความเข้าใจและ

เปรียบเทียบผลกระทบทางอุณหพลศาสตร์ และหาค่าผลกระทบที่เกิดขึ้นสูงสุดเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบการอบแห้ง

## 2. เครื่องและอุปกรณ์การทดลอง

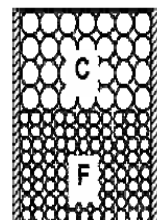
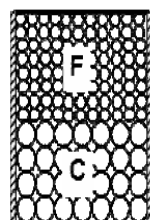
ในการศึกษาเพื่อวิเคราะห์ พลังงาน และเอ็กเซอร์จี ในกระบวนการอบแห้งวัสดุพูนโดยใช้ลมร้อนนี้เป็นการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองด้วยเครื่องมือและอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 1 ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดลมร้อนแบบควบคุมอุณหภูมิและความเร็วของอากาศ (KAKETSUNA, TSK-10, JAPAN) เครื่องอบแห้งทำจากแผ่นโพลีโพรพิลีนรูปทรงสี่เหลี่ยม (กว้างxยาวxสูง) 113x500x112 mm<sup>3</sup>. ในการวัดอุณหภูมิใช้ไฟเบอร์ออปติก ติดกับเครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอลอัตโนมัติ 4 ช่องสัญญาณ (LUXTRON, 790, USA) ในการวัดความเร็วและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ผ่าน กระบวนการอบแห้ง ด้วย (TESTO, JAPAN) ในการหา น้ำหนักก่อนและหลังการอบแห้งด้วย เครื่องชั่งน้ำหนัก (TESCO, CHINA)



รูปที่ 1 ไดอะแกรมของเครื่องอบแห้ง

### 2.1 วิธีการทดลอง

เพดเบตวัสดุพูน (Porous Packed Bed) ที่ใช้ในการทดลองเป็นองค์ประกอบของเม็ดแก้วละเอียด (F) ขนาด 0.15 mm และเม็ดแก้วหยาบ (C) ขนาด 0.4 mm น้ำ และโพรงอากาศ ก่อนการอบแห้งผสมเม็ดแก้วกับน้ำให้อยู่ในสภาวะอิ่มตัว ( $S_0=1$ ) แล้วบรรจุใส่กล่องสี่เหลี่ยม ทำด้วยโพลีโพรพิลีน ขนาด 108 x 53 x 50 mm<sup>3</sup> โดยใช้เม็ดแก้วทั้งสองขนาดในกล่องแยกเป็นสองชั้นคือ เม็ดแก้ว หยาบอยู่ด้านล่าง กับเม็ดแก้วละเอียดอยู่ด้านบน (F-C) และ เม็ดแก้วละเอียดอยู่ด้านล่างกับเม็ดแก้วหยาบอยู่ด้านบน (C-F) ซึ่งหุ้มฉนวนทั้ง 5 ด้านเพื่อให้ความชื้นมีการระเหย เฉพาะบริเวณ ด้านบน ก่อนการทดลองต้องปรับสภาวะภายในห้องอบแห้ง (Drying Chamber) ให้อยู่ในสภาวะคงตัว (Steady State) แล้วจึงนำวัสดุพูนที่บรรจุกล่องสี่เหลี่ยมวางในเครื่องอบแห้งจึงทำการอบแห้งด้วยอากาศที่มีความเร็ว 0.5 m/s โดยที่อุณหภูมิของลมร้อน 50 °C ในการหาค่าความชื้นของก่อนและหลังการอบแห้ง โดยการชั่งน้ำหนัก แล้วทำการอบแห้งต่อเนื่องจำนวน 6 ชั่วโมง ในระหว่างการทดลองทำการบันทึก อุณหภูมิแวดล้อมและความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิของเพดเบตวัสดุพูน อุณหภูมิอากาศทางเข้าและทางออกของเครื่องอบแห้งทุกๆ 15 นาที



(a)

(b)

รูปที่ 2 แพคเกจวัสดุที่ใช้ทดลอง (a) F-C (b) C-F

### 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 (ไม่มีความชื้น) 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

สมการทั่วไปสำหรับการอนุรักษ์พลังงาน สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

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

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

ในการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ของอากาศที่ไหลผ่านพัดลมนั้นจะพิจารณาในขณะที่เป็นพลังงานศักย์ และพลังงานจลน์เท่านั้น โดยจะไม่นำค่านี้ถึงการเปลี่ยนแปลงของพลังงานที่เกิดจากอุปกรณ์อย่างอื่น

สำหรับการวิเคราะห์พลังงานและเอนทาลปีในกระบวนการอบแห้งแพคเกจวัสดุพูนนั้น สามารถคำนวณค่าความชื้นสัมพัทธ์ และค่าเอนทาลปีของลมร้อนได้จากสมการต่อไปนี้

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

โดยที่  $\phi$  คือความชื้นสัมพัทธ์  $w$  คือความชื้นจำเพาะ  $P$  คือความดันบรรยากาศ  $P_{sat@T}$  ความดันไออิ่มตัว ที่อุณหภูมิใดๆ ของลมร้อนที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง

สำหรับการคำนวณ เอนทาลปีของ ลมร้อนที่ไหลเข้าของกระบวนการอบแห้งสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

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

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

#### 3.1 การคำนวณที่สภาวะทางออกของ พัดลมในเครื่องกำเนิดลมร้อน

ในการคำนวณเอนทาลปีที่ไหลออก ของพัดลมสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ [7]

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

โดยที่  $h_{fi}$  คือเอนทาลปีของลมร้อนที่ไหลเข้าของพัดลม  $h_{fo}$  คือเอนทาลปีของลมร้อนที่ไหลออกของพัดลม  $V_{fo}$  คือความเร็วของลมร้อนที่ออกจากพัดลม  $\dot{W}_f$  คือพลังงาน ที่ใช้ขับ พัดลม  $\dot{m}_{da}$  คืออัตรา การไหลของลมร้อน

#### 3.2 การคำนวณที่สภาวะทางเข้าและทางออกของเครื่องกำเนิดลมร้อน

สมมติให้สภาวะ ต่างๆ ที่ทางเข้าเครื่องกำเนิดลมร้อน มีค่าเท่ากับสภาวะที่ทางออกของพัดลมสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

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

โดยที่ ตัวกำกับล่าง  $hi$  คือสภาวะที่ไหลเข้าของเครื่องกำเนิดลมร้อน  $fo$  คือสภาวะที่ทางออกของพัดลม

สำหรับ พลังงาน ความร้อน ( $\dot{Q}_u$ ) ที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการอบแห้งผลิตได้จากเครื่องกำเนิดความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

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

โดยที่  $\dot{m}_{da}$  คืออัตราการไหลเชิงมวลของลมร้อน  $c_{pda}$  คือค่าความร้อนจำเพาะของลมร้อน  $T_{ho}$  คือ อุณหภูมิของลมร้อนที่ออกจากเครื่องกำเนิดความร้อน และ  $T_{hi}$  คือ อุณหภูมิของลมร้อนที่ไหลเข้าของเครื่องกำเนิดความร้อน

สำหรับการคำนวณความชื้นสัมพัทธ์ ( $\phi_{ho}$ ) และเอนทาลปีที่ไหลออกของเครื่องกำเนิดความร้อน ( $h_{ho}$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4) และ (5)

ในที่นี้สภาวะต่างๆ ที่ไหลออกจากเครื่องกำเนิดความร้อนสมมติให้มีค่าเท่ากับสภาวะที่ไหลเข้าของห้องอบแห้งแพคเกจวัสดุพูนดังแสดงในรูปที่ 2

### 3.3 การคำนวณที่สภาวะทางออกของแพคเกจวัสดุพูน

ในการคำนวณ สภาวะทางเข้าของห้องอบแห้ง นั้นพบว่าจะมีค่าแปรตามอุณหภูมิทางเข้า และความชื้นจำเพาะของอากาศ โดยในที่นี้สมมติให้สภาวะที่ ทางเข้าของ ห้องอบแห้งมีค่าเท่ากับสภาวะที่ทางเข้าแพคเกจวัสดุพูน ได้รับ ดังแสดงในรูปที่ 2 หมายความว่าอัตราการไหลเชิงมวลของลมร้อนที่ไหลผ่านผิวหน้าแพคเกจวัสดุพูนมีค่าเท่ากันตลอดช่วงของผิวหน้าแพคเกจ ดังนั้นที่สภาวะทางเข้าของแพคเกจวัสดุพูนทั้งนี้ในการวิเคราะห์นี้ไม่ได้พิจารณาการดูดซับความร้อนของวัสดุพูนสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

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

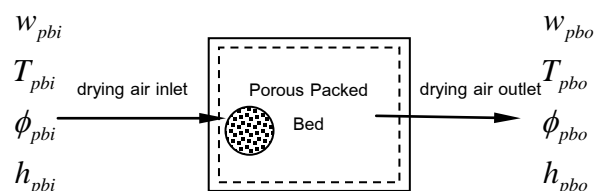
โดยที่ ตัวกำกับล่าง  $dci$  คือ สภาวะของลมร้อนที่ไหลเข้าห้องอบแห้ง  $pbi$  คือ สภาวะของลมร้อนที่ทางเข้าแพคเกจวัสดุพูน และ  $da$  คือ ลมร้อน

การหาความชื้นจำเพาะที่ไหลออกของ แพคเกจวัสดุพูน (รูปที่ 2) สามารถคำนวณได้โดยอาศัยสมการที่ (1) และ (2)

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

โดยที่  $w_{pbi}$  คือค่าความชื้นจำเพาะที่ทางเข้าแพคเกจวัสดุพูน และ  $\dot{m}_{w_{pb}}$  คืออัตราการไหลเชิงมวลของความชื้นที่ออกจากวัสดุพูน

ความชื้นสัมพัทธ์ และเอนทาลปีของ ลมร้อน ที่ออกจาก แพคเกจวัสดุพูนในห้องอบแห้งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4) และสมการที่ (5)



รูปที่ 2 แพคเกจวัสดุพูนในห้องอบแห้ง

ในการคำนวณ พลังงาน ความร้อนที่ใช้ในการระเหยของ ความชื้นภายในแพคเกจวัสดุพูนของกระบวนการอบแห้งสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

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

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

### 3.4 การคำนวณที่สภาวะทางออกของห้องอบแห้ง

ในการคำนวณที่สภาวะทางออกของห้องอบแห้งมีสมมติฐานดังนี้ สภาวะของลมร้อนที่ทางเข้าของแพคเกจวัสดุพูนเท่ากับสภาวะของลมร้อนที่ทางเข้าของห้องอบแห้ง (Drying Chamber) และสมมติให้สภาวะของลมร้อนที่ทางออกของแพคเกจวัสดุพูนเท่ากับสภาวะของลมร้อนที่ทางออกของห้องอบแห้ง ดังนั้นจึงสามารถคำนวณค่าความชื้นจำเพาะและความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง โดยใช้สมการที่ (10) และ (11) ตามลำดับ ส่วนค่าความชื้นสัมพัทธ์ และเอนทาลปีที่ทางออกของห้องอบแห้งสามารถคำนวณได้โดยการประยุกต์ใช้สมการที่ (4) และ (5)

สำหรับอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานที่เป็นประโยชน์ (Energy Utilization Ratio; EUR) ในกระบวนการอบแห้ง สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของพลังงานที่เป็นประโยชน์ (พลังงานความร้อนที่ใช้สำหรับ การระเหยความชื้นภายในวัสดุพูน) ต่อพลังงานความร้อนทั้งหมดที่ป้อนให้กับห้องอบแห้งซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ [8]

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

### 4. การวิเคราะห์เอ็กเซอร์จิจากกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์

ในการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จิจของกระบวนการอบแห้งแพคเกจวัสดุพูนนั้นอยู่บนพื้นฐานของ กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ เพื่อให้ง่ายในการวิเคราะห์จึงจำเป็นต้องกำหนดสภาวะและขอบเขตทางเข้าและทางออกของกระบวนการอบแห้ง ดังรูปที่ 2 เพื่อนำไปคำนวณหาเอ็กเซอร์จิจที่ไหลเข้า (Exergy Intflow) เอ็กเซอร์จิจที่ไหลออก (Exergy Outflow) และเอ็กเซอร์จิจที่สูญเสีย (Exergy Loss) โดยเอ็กเซอร์จิจที่คำนวณได้นั้นจะเป็นเอ็กเซอร์จิจที่พิจารณาให้อยู่ในสภาวะแบบ คงตัว (Steady State) โดยที่ ค่าเอ็กเซอร์จิจ นี้สามารถคำนวณ โดยใช้คุณลักษณะของสารทำงานตัวกลางโดยอาศัยสมการสมดุลพลังงานของกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ [9] ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [10]

$$Ex_{ergy} = (u - u_{\infty}) - T_{\infty}(s - s_{\infty}) + \frac{P_{\infty}}{J}(v - v_{\infty}) + \frac{V^2}{2gJ} + (z - z_{\infty}) \frac{g}{g_c J} \quad (13)$$

*internal energy    entropy    work    momentum    gravity*

$$+ \sum_c (\mu_c - \mu_{\infty}) N_c + E_r A_r F_r (3T^4 - T_{\infty}^4 - 4T_{\infty} T^3) + \dots$$

*chemical    radiation    emission*

โดยที่ ตัวกำกับล่าง  $\infty$  สภาวะอ้างอิง

ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีนั้นเป็นการวิเคราะห์โดยเทียบกับสภาวะแวดล้อมที่ใช้อ้างอิง โดยทั่วไปแล้วในการวิเคราะห์การแปรเปลี่ยน เอนทาลปีของกระบวนการนั้น สามารถลดรูปของสมการลง ดังสมการที่ (13) โดยการตัดเทอมที่มีการแปรเปลี่ยนน้อยออก ซึ่งในการวิเคราะห์ เอนทาลปี จะพิจารณาในเทอมของ พลังงานภายใน และในเทอมของ  $Pv$  ซึ่งใช้สำหรับระบบที่มีการไหลแบบคงตัว (Steady Flow) และในสมการที่ (13) นี้จะตัดอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงและไม่พิจารณาเทอมของโมเมนตัม ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงความดันในระบบที่เพิ่มเข้ามานี้ก็ไม่น่ามาพิจารณาเนื่องจาก  $v \cong v_{\infty}$  โดยสมมติฐานว่าอากาศเป็นก๊าซสมบูรณ์ ดังนั้นสมการที่ (13) จึงลดรูปสมการดังนี้ [11]

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

การประยุกต์ใช้สมการที่ (13) เพื่อวิเคราะห์เอนทาลปีที่ไหลเข้าและทางออก ของกระบวนการอบแห้งนี้ สามารถหาได้จาก อุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้า และทางออก ของห้องอบแห้ง โดยที่ การสูญเสียเอนทาลปี (Exergy Loss) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$Ex_{ergy \text{ loss}} = Ex_{ergy \text{ inflow}} - Ex_{ergy \text{ outflow}} \quad (15)$$

$$\sum Ex_L = \sum Ex_i - \sum Ex_o$$

ในการคำนวณเอนทาลปีที่ไหล เข้าห้องอบแห้งและแพคเบตวัสดุพูนสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

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

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

สำหรับ เอนทาลปีที่ไหลออก จาก ห้องอบแห้ง และแพคเบตวัสดุพูนสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

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

ปริมาณเอนทาลปีสูญเสียสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (15) ถึง (17) ในการหาประสิทธิภาพ เอนทาลปีของกระบวนการอบแห้งนี้สามารถ คำนวณได้จาก อัตราส่วนเอนทาลปีของผลิตภัณฑ์ (หรือเอนทาลปีสูญเสียของห้องอบแห้ง) ต่อเอนทาลปีที่ไหลเข้าห้องอบแห้ง

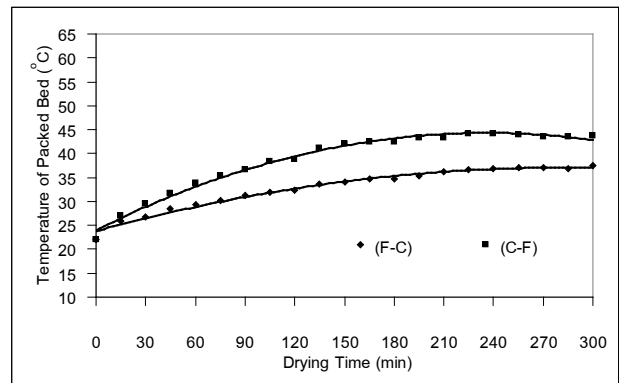
ดังนั้นรูปแบบทั่วไปของประสิทธิภาพ เอนทาลปีของกระบวนการอบแห้งสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$Ex_{ergy \text{ Efficiency}} = \frac{Ex_{ergy \text{ inf low}} - Ex_{ergy \text{ loss}}}{Ex_{ergy \text{ inf low}}}$$

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

## 5. ผลและวิจารณ์

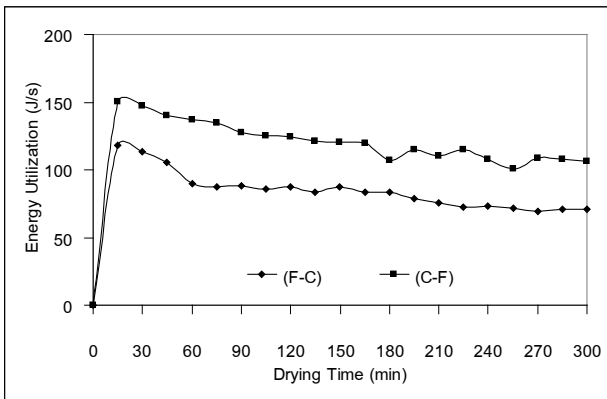
จากการทดลองการอบแห้งวัสดุพูนด้วยลมร้อนเพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์พลังงานและเอนทาลปีของกระบวนการอบแห้งพบว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุพูนกับเวลาในการอบแห้ง โดยใช้อุณหภูมิ ลมร้อนทางเข้าห้องอบแห้งคงที่ 50 °C ความเร็วของลมร้อนเท่ากับ 0.5 m/s จะเห็นว่าเมื่อเวลาในการอบแห้งมากขึ้นทำให้อุณหภูมิของแพคเบตวัสดุพูนมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเนื่องจากในช่วงแรกของการอบแห้งความร้อนถูกใช้ในการระเหยของความชื้นที่อยู่ภายในออกสู่ภายนอกได้ดี (Constance Rate Period) โดยเฉพาะสำหรับอุณหภูมิลมร้อนที่สูงๆ และเมื่อระยะเวลาในการอบแห้งนานขึ้นความชื้นที่อยู่ภายในจะเหลือน้อยลง ทำให้อัตราการระเหยของความชื้นภายในวัสดุเกิดขึ้นอย่างช้าๆ (Falling Rate Period) ทำให้อุณหภูมิเกิดการสะสมภายในแพคเบตวัสดุพูนมากขึ้นตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลาในการอบแห้งวัสดุพูน F-C และ C-F

ในการคำนวณพลังงานความร้อนที่ใช้ประโยชน์ในการอบแห้งแพคเบตวัสดุพูนนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (11) ซึ่งเป็นพลังงานความร้อนที่ใช้ในการระเหยของความชื้นที่อยู่ภายในวัสดุออกสู่ภายนอกจะเห็นว่าในการอบแห้งวัสดุพูน F-C และ C-F นั้น ในช่วงแรกของการอบแห้งพลังงานความร้อนที่ใช้เป็นประโยชน์จะมีค่าสูงเนื่องจากวัสดุมีความชื้นภายในอยู่มากจึงทำให้เกิดการระเหยได้ดี และเมื่อเวลาของกระบวนการอบแห้งมากขึ้นพลังงานความร้อนที่เป็นประโยชน์จะน้อยลงเนื่องจากความชื้นที่อยู่ภายในวัสดุค่อยๆ ลดลงทำให้อัตราการระเหยของความชื้นน้อยลงเป็นผลมาจากความดันภายในวัสดุพูนลดลง เมื่อพิจารณาอุณหภูมิของลมร้อนที่ต่างกันจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิของลมร้อนสูงขึ้นส่งผลให้พลังงานที่เป็นประโยชน์มีค่าสูง เนื่องจากเมื่อลมร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ความชื้นภายในวัสดุพูนสามารถระเหยได้ดี

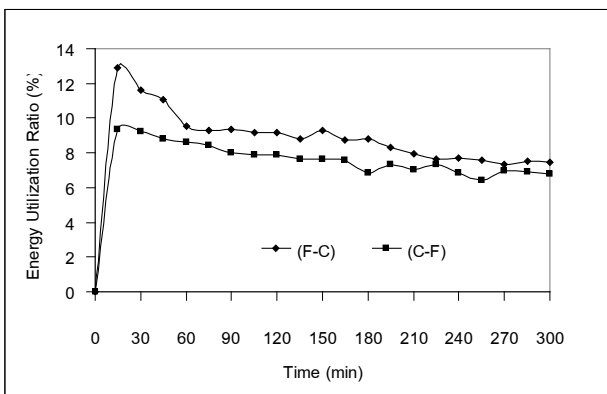




รูปที่ 4 พลังงานที่ใช้ประโยชน์ในกระบวนการอบแห้งวัสดุพรุณ F-C) และ C-F

สำหรับอัตราส่วนพลังงานที่เป็นประโยชน์ (EUR) ของกระบวนการอบแห้งซึ่งเป็นอัตราส่วนของพลังงานที่เป็นประโยชน์ในการระเหยของความชื้นที่อยู่ภายในวัสดุต่อพลังงานความร้อนทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการอบแห้ง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (12)

จากรูปที่ 5 จะเห็นว่าในช่วงแรกของการอบแห้งประสิทธิภาพของอัตราส่วนพลังงานที่เป็นประโยชน์จะมีค่าสูง เนื่องจากพลังงานงานที่เป็นประโยชน์มีค่ามาก เพราะวัสดุมีการระเหยความชื้นได้ดี ในขณะที่เดียวกันพลังงาน เป็นที่น่าสังเกตว่าที่แพคเบตวัสดุพรุณที่มีขนาดเม็ดละเอียดอยู่ด้านบน (F-C) นั้น ประสิทธิภาพของอัตราส่วนพลังงานที่เป็นประโยชน์จะมีค่าสูงกว่าแพคเบตวัสดุพรุณที่มีขนาดเม็ดหยาบอยู่ด้านบน (C-F)

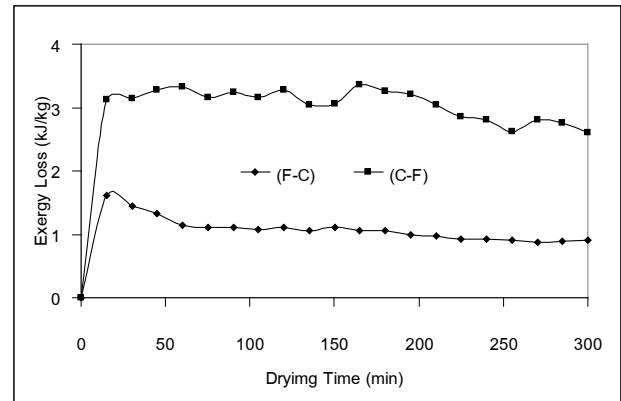


รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนพลังงานที่เป็นประโยชน์กับเวลาในการอบแห้งแพคเบต F-C และ C-F

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

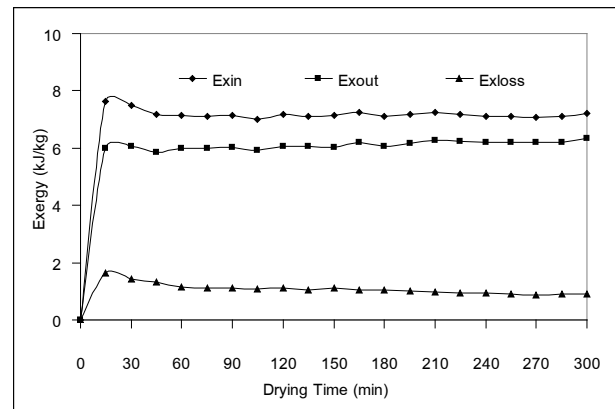
จากรูปที่ 6 เป็นการเปลี่ยนแปลงของเอ็กเซอร์จีที่สูญเสียกับเวลาในการอบแห้งแพคเบตวัสดุพรุณจะเห็นว่าแพคเบตวัสดุพรุณที่มีขนาดเม็ดละเอียดอยู่ด้านบน ( F-C) จะมีเอ็กเซอร์จีที่สูญเสียมีค่าน้อยกว่า

แพคเบตวัสดุพรุณที่มีขนาดเม็ดหยาบอยู่ด้านบน ( C-F) ตลอดช่วงเวลาของการอบแห้ง

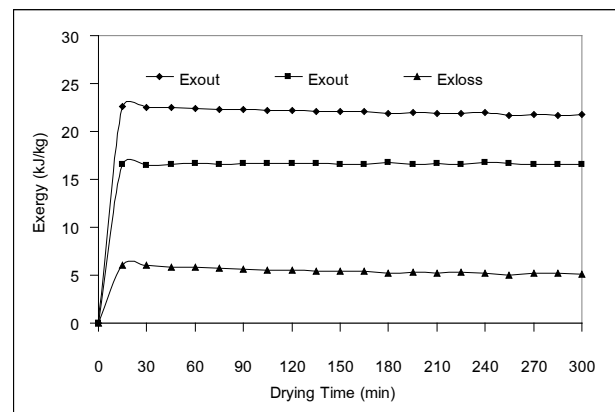


รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงของเอ็กเซอร์จีที่สูญเสียของแพคเบต F-C และ C-F

จากรูปที่ 7 และ 8 เป็นการเปลี่ยนแปลงของเอ็กเซอร์จีทางเข้า ทางออก และเอ็กเซอร์จีที่สูญเสียกับเวลาในการอบแห้งแพคเบต F-C และ C-F ตามลำดับ จะเห็นว่าเอ็กเซอร์จีที่ไหลเข้า กับเอ็กเซอร์จีที่ไหลออกมีความแตกต่างแตกต่างกันซึ่งมีค่าเท่ากับเอ็กเซอร์จีที่สูญเสียดังสมการที่ (15) โดยที่แพคเบต F-C จะมีเอ็กเซอร์จีที่สูญเสียน้อยกว่าแพคเบต C-F



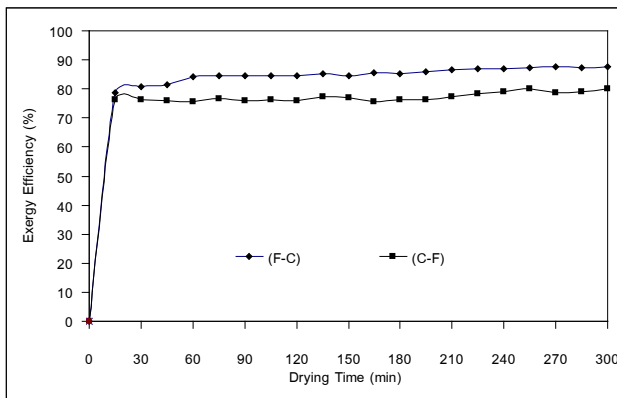
รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงของเอ็กเซอร์จีทางเข้า ทางออก และเอ็กเซอร์จีที่สูญเสียกับเวลาในการอบแห้งแพคเบต F-C



รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงของเอ็กเซอร์จิจทางเข้า ทางออก และเอ็กเซอร์จิจที่สูญเสียกับเวลาในการอบแห้งแพคเบต C-F

ในการหาประสิทธิภาพของเอ็กเซอร์จิจนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (18) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของเอ็กเซอร์จิจที่เป็นประโยชน์ต่อเอ็กเซอร์จิจทั้งหมดที่ไหลเข้าของการอบแห้ง

จากการคำนวณประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จิจดัง รูปที่ 9 จะเห็นว่าในช่วงแรกของการอบแห้งนั้นประสิทธิภาพของเอ็กเซอร์จิจมีค่าต่ำเนื่องจากมีเอ็กเซอร์จิจสูญเสียเล็กน้อย และเมื่อเวลาในการอบแห้งมากขึ้น ประสิทธิภาพของเอ็กเซอร์จิจจะมีค่าสูงขึ้นด้วย เนื่องจากมีเอ็กเซอร์จิจสูญเสียมาก ซึ่งเอ็กเซอร์จิจที่สูญเสียนั้นเป็นผลมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิของลมร้อนที่ไหลออกจากกระบวนการอบแห้งกับอุณหภูมิแวดล้อมมีค่าน้อย โดยที่ประสิทธิภาพของเอ็กเซอร์จิจจะแปรผกผันกับประสิทธิภาพพลังงาน



รูปที่ 9 การเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จิจกับเวลาในการอบแห้งแพคเบต F-C และ C-F

## 6. สรุป

ในการศึกษาการวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จิจของกระบวนการอบแห้งวัสดุพูน หลายชั้นโดยใช้ลมร้อน ในการนำผลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณและวิเคราะห์ผลสามารถสรุปได้ดังนี้

จากการอบแห้งวัสดุพูนมีน้ำหนักลดลงจาก 385 g ถึง 340 g ใช้เวลาในการอบแห้ง 6 ชั่วโมง โดยใช้ประโยชน์จากพลังงานตั้งแต่ 70.610 J/s ถึง 150.117 J/s ซึ่งพลังงานความร้อนที่ใช้เป็นประโยชน์ในการระเหยความชื้นภายในแพคเบตวัสดุพูนจะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีค่ามาก พลังงานความร้อนที่ใช้จึงมีค่ามาก ส่วนเอ็กเซอร์จิจที่สูญเสียที่ไหลเข้าและทางออกก็จะแปรเปลี่ยนไปกับ ชนิดของแพคเบตที่ใช้ในการอบแห้งเช่นกัน โดยที่เอ็กเซอร์จิจที่ไหลเข้าของห้องอบแห้งอยู่ระหว่าง 7.59 kJ/kg ถึง 22.58 kJ/kg เอ็กเซอร์จิจที่ไหลออกมีค่าระหว่าง 5.80 kJ/kg ถึง 16.58 kJ/kg โดยที่เอ็กเซอร์จิจสูญเสียไปมีค่าระหว่าง 1.62 kJ/kg ถึง 6.05 kJ/kg ซึ่งประสิทธิภาพของเอ็กเซอร์จิจของห้องอบแห้งมีค่า 73.26 % ถึง 87.47 % ซึ่งเป็นที่น่าสังเกตว่าพลังงานที่เป็นประโยชน์มีค่าลดลง และประสิทธิภาพของเอ็กเซอร์จิจมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น ในการพิจารณาคุณภาพพลังงานจาก เอ็กเซอร์จิจที่ไหล

เข้า เอ็กเซอร์จิจที่ไหลออก และเอ็กเซอร์จิจที่สูญเสีย มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากวัสดุพูนที่ใช้ในการอบแห้งมีขนาดเล็ก

เนื่องจาก วัสดุพูนมีโครงสร้างภายในที่ซับซ้อนมากในการระเหยของความชื้นซึ่งมีความสำคัญ เป็นอย่างมากกับพลังงานจากภายนอกที่ใช้ในการระเหยของความชื้นซึ่งวัสดุพูนที่มีขนาดเล็กจะสามารถระเหยความชื้นได้ดีกว่าวัสดุพูนที่มีขนาดใหญ่กว่า เนื่องจากผลของความดันคาพิลลารี ดังนั้นจึงเป็นแนวทางในการศึกษาโครงสร้างและองค์ประกอบของวัสดุพูนที่เป็นตัวแปรสำคัญในการออกแบบระบบการอบแห้งในอนาคตด้วยระบบที่ให้ความร้อนโดยตรงและการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ต่อไป

## 7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้

## รายการสัญลักษณ์

$A$	พื้นที่, ( $m^2$ )
$c_p$	ค่าความร้อนจำเพาะ, (kJ/kgK)
$EUR$	อัตราส่วนพลังงานที่เป็นประโยชน์, (%)
$Ex$	เอ็กเซอร์จิจ, (kJ/kg)
$g$	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก, ( $m/s^2$ )
$h$	เอนทาลปี, (kJ/kgK)
$J$	ค่าคงที่ของจูล์น
$\dot{m}$	อัตราการไหลของมวล, (kg/s)
$P$	ความดัน, (kPa)
$\dot{Q}$	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
$h$	เครื่องกำเนิดลมร้อน
$l$	ทางเข้า
$L$	การสูญเสีย
$mp$	ความชื้นของผลิตภัณฑ์
$o$	ทางออก

sat อิมตัว  
pb แพลตฟอร์มวัสดุพูน  
@T ที่อุณหภูมิต่างๆ  
สัญลักษณ์กรีก  
 $\infty$  สิ่งแวดล้อม  
 $\phi$  ความชื้นสัมพัทธ์ , (%)  
 $\eta_{Ex}$  ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี, (%)

#### เอกสารอ้างอิง

- 1 ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช. 2546. การวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งในวัสดุพูน (I หลักการเบื้องต้นของการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในกระบวนการอบแห้งวัสดุพูน). วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. ฉบับที่ 1 ม.ค - เม.ย 47. หน้า 1-11
- 2 วรรณ เอกศิลป์ และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช , การศึกษาพลังงานและเอ็กเซอร์จีของกระบวนการอบแห้งวัสดุชีวภาพโดยใช้สเปาแดดเบตร่วมกับไมโครเวฟ , การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20, นครราชสีมา, 18-20 ตุลาคม 2549, หน้า 297-298
- 3 รัฐศักดิ์ พรหมมาศ พรทิพย์ แก่งอินทร์ และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช , การวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จีใน กระบวนการอบแห้งวัสดุพูน โดยใช้ลม ร้อน , การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22, ปทุมธานี, 15-17 ตุลาคม 2551
- 4 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.
- 5 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.
- 6 Akpınar, 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.
- 7 Akpınar, 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.
- 8 Bejan, A., 1988. "Advance Engineering Thermodynamics", John Wiley and Sons Inc., New York.
- 9 Ahern, J. E., 1980. "The Exergy Method of Energy System Analysis". John Wiley and Sons Inc., New York.
- 10 Bejan, A., 1998, Advance Engineering Thermodynamics, John Wiley and Sons Inc., New York.
- 11 A.E. Ahern, 1980, The Exergy Method of System Analysis, John Wiley and Sons Inc., New York.