



การประยุกต์ใช้ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนสำหรับกระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือก

Application of Thermosyphon Heat Pipes for Paddy Dehydration Process

ฉัตรชัย นิมมล¹* และวิโรจน์ ฤทธิทอง²

Chatchai Nimmol¹* and Wirote Ritthong²

¹ภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

*Correspondent author: ccnimmol@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R-134a เป็นสารทำงาน หลังจากนั้นได้ศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ เช่น ชนิดของแหล่งพลังงานที่ใช้ (น้ำร้อนและอากาศร้อน) อุณหภูมิของแหล่งพลังงาน (60 °C และ 80 °C) และรูปแบบของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน (มีครีและไม่มีครี) ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นและคุณภาพของข้าวเปลือก โดยข้าวเปลือกที่นำมาเป็นวัสดุทดสอบมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 26% (d.b.) การทดลองในแต่ละเงื่อนไขจะกระทำจนกระทั่งความชื้นของข้าวเปลือกลดลงเหลือ 14% (d.b.) จากการศึกษาพบว่า การใช้ น้ำร้อนเป็นแหล่งพลังงานและการใช้ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีครีจะทำให้ความชื้นของข้าวเปลือกลดลงได้เร็วกว่าการใช้ อากาศร้อนเป็นแหล่งพลังงานและใช้ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ไม่มีครีตามลำดับ ในขณะที่การใช้อุณหภูมิของแหล่งพลังงานที่สูงกว่าจะทำให้ความชื้นของข้าวเปลือกลดลงได้เร็วกว่าเมื่อเทียบกับการใช้อุณหภูมิของแหล่งพลังงานที่ต่ำกว่าการใช้ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีครีสามารถลดเวลาที่ใช้ในลดความชื้นของข้าวเปลือกไปสู่ระดับที่ต้องการได้เป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับกรณีใช้เทอร์โมไซฟอนที่ไม่มีครี ในแง่ของคุณภาพของข้าวเปลือก พบว่า ร้อยละต้นข้าวและความขาวที่ผ่านการอบแห้งในงานวิจัยนี้มีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวอ้างอิง

Abstract

The objective of this research was to develop a paddy drying system using thermosyphon heat pipes (THPs). In this study, R-134a was used as the working fluid. The effects of various operating and geometric parameters, i.e., energy sources (hot water and hot air), temperature of energy sources (60, 70 and 80 °C) and characteristics of themosyphon heat pipes (finned and unfinned thermosyphon heat pipes), on the change in moisture content and quality of paddy were then investigated and discussed. Paddy with an initial moisture content of around 26%

(d.b.) was used as a test material. The experiments were performed until the paddy moisture content of 14% (d.b.) was obtained at each drying condition. The results obtained from the experiments showed that, comparing with hot air and unfinned thermosyphon heat pipes, the rate of moisture reduction of paddy was higher when hot water and finned thermosyphon heat pipes were employed. It was also found that the rate of moisture reduction of paddy increased with an increase in the temperature of the energy source. With the use of finned thermosyphon heat pipes, the time required to attain the desired final moisture content of paddy could be considerably reduced compared with unfinned thermosyphon heat pipes. In terms of paddy quality, it was found that the head rice yield and whiteness of paddy obtained in this work decreased only slightly when compared with the reference paddy.

คำสำคัญ: การอบแห้ง ข้าวเปลือก คุณภาพ ความชื้น ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

Keywords: drying, paddy, quality, moisture, thermosyphon heat pipes

1. บทนำ

โดยทั่วไป ข้าวเปลือก (paddy) ที่ได้หลังการเก็บเกี่ยวมักมีความชื้นค่อนข้างสูงซึ่งความชื้นดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่ออายุการเก็บรักษาข้าวเปลือก ด้วยเหตุนี้ จึงมีความจำเป็นต้องลดความชื้นของข้าวเปลือกให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษาโดยปราศจากการทำลายของแมลงและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ซึ่งกรรมวิธีที่นำมาใช้ในการลดความชื้นข้าวเปลือกก็คือ การอบแห้ง (drying) การอบแห้งข้าวเปลือกสามารถทำได้ด้วยเครื่องอบแห้งหลายชนิด เช่น เครื่องอบแห้งแบบสปาด์เบด (spouted-bed dryer) (1,2) เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรเซด (fluidized-bed dryer) (3-5) เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (pneumatic dryer) (6) หรือแม้กระทั่งเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำ (impinging stream dryer) (7) เป็นต้น ซึ่งข้าวเปลือกที่นำมาอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งดังกล่าวต้องเคลื่อนที่อยู่ในระบบตลอดเวลา

ถึงแม้ว่าเครื่องอบแห้งที่กล่าวข้างต้นจะมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานอยู่ในระดับสูง แต่มีความเป็นไปได้ที่ข้าวเปลือกจะได้รับความเสียหาย (แตกหรือหัก) ในระหว่างการเคลื่อนที่ในระบบ ด้วยเหตุนี้ การอบแห้งข้าวเปลือกโดยที่ข้าวไม่เกิดการเคลื่อนที่จึงเป็นแนวคิดที่น่าสนใจ แนวทางหนึ่งที่มีความเป็นไปได้ในการอบแห้งข้าวเปลือกโดยที่ข้าวเปลือกไม่ต้องเคลื่อนที่ในระบบคือ การใช้ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน (thermosyphon heat pipes: THPs) เป็นอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนให้แก่ข้าว

เปลือก ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนถือเป็นอุปกรณ์ประเภทหนึ่งซึ่งนิยมใช้ในกระบวนการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถสร้างได้ง่าย มีต้นทุนการสร้างและต้นทุนดำเนินงานต่ำ ทำงานได้โดยไม่ต้องมีแหล่งให้พลังงาน และให้สมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนสูง โดยท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนมีลักษณะเป็นท่อปลายปิดที่ภายในบรรจุด้วยสารทำงาน (working fluid) เช่น น้ำ เมธานอล เอทานอล หรือสารทำความเย็น (refrigerant) อื่นๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาวะการใช้งาน ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนทำระเหย (evaporator section) ส่วนอะเดียบาติก (adiabatic section) และส่วนควบแน่น (condenser section) ในกรณีที่ของไหลร้อนไหลผ่านส่วนทำระเหย สารทำงานซึ่งบรรจุอยู่ภายในจะเดือดและกลายเป็นไอ แล้วไหลขึ้นด้านบนผ่านส่วนอะเดียบาติกซึ่งไม่มีการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ส่วนควบแน่น โดยผิวด้านนอกของส่วนควบแน่นจะสัมผัสกับของไหลหรือวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ลักษณะเช่นนี้จะทำให้ไอของสารทำงานเกิดการควบแน่นและไหลลงมายังส่วนทำระเหยโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลกเพื่อรับความร้อนจากของไหลร้อนอีกครั้ง การไหลของสารทำงานจะมีลักษณะเป็นวัฏจักรเช่นนี้ตลอดเวลา ด้วยเหตุที่ความร้อนแฝงของการกลายเปลี่ยนเป็นไอของสารทำงานมีค่าสูงมาก สารทำงานจึงสามารถถ่ายเทความร้อนจากปลายด้านหนึ่งไปสู่อีกด้านหนึ่งของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนได้โดยที่อุณหภูมิระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นแตกต่างกัน

เพียงเล็กน้อย จากหลักการทำงานข้างต้น จึงสามารถนำ
ท่อนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนมาประยุกต์ใช้ได้ทั้งใน
กระบวนการทำความเย็นและกระบวนการทำความร้อน

ที่ผ่านมาได้มีการประยุกต์ใช้ท่อนความร้อนแบบ
เทอร์โมไซฟอนในหลายลักษณะ เช่น การดึงความร้อน
จากใต้ดินขึ้นมาเพื่อสร้างความอบอุ่นในฤดูหนาว (8) การ
ทำน้ำร้อนโดยใช้แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงาน (9,10)
หรือการประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของ
ระบบทำความเย็นและปรับอากาศ (11,12) เป็นต้น
สำหรับการนำท่อนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนมา
ประยุกต์ใช้กับข้าวเปลือกในลักษณะต่าง ๆ มีปรากฏอยู่
บ้าง โดย Dussadee และ Kiatsiriroat (13) และ Dussadee
และคณะ (14) ได้พัฒนาระบบเก็บรักษาข้าวเปลือกโดย
ใช้ท่อนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนในระดับห้องปฏิบัติ
การเพื่อควบคุมอุณหภูมิของข้าวเปลือกระหว่างการเก็บ
รักษา โดยใช้ส่วนที่ระเหยของท่อนความร้อนแบบเทอร์
โมไซฟอนเป็นตัวดึงความร้อนออกจากกองข้าวเปลือก
ผลที่ได้จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ท่อนความร้อนแบบ
เทอร์โมไซฟอนสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุม
อุณหภูมิของข้าวเปลือกให้อยู่ในระดับที่ต้องการได้เป็น
อย่างดี อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ประยุกต์ใช้ท่อนความร้อน
แบบเทอร์โมไซฟอนในการลดความชื้นของข้าวเปลือก
โดยตรงยังไม่ปรากฏให้เห็น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้
ความร้อนเหลือทิ้งรูปแบบต่าง ๆ มาเป็นแหล่งพลังงาน
(heat source) ในการขับเคลื่อนให้สารทำงานภายในท่อน
ความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนทำงานตามวัฏจักรของ
ระบบ

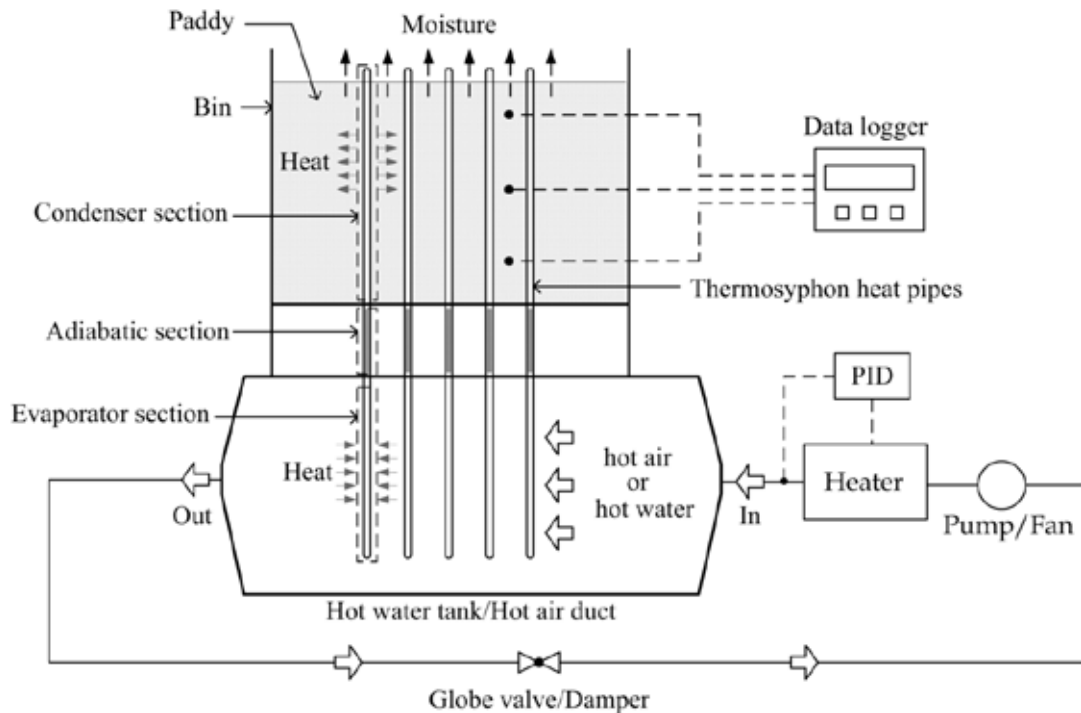
ด้วยเหตุที่กล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้
ท่อนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนเป็นอุปกรณ์ช่วยในการ
ถ่ายเทความร้อนสำหรับกระบวนการลดความชื้นของ
ข้าวเปลือก โดยพัฒนาระบบการอบแห้งข้าวเปลือกด้วย
ท่อนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนในระดับห้องปฏิบัติ

การ ซึ่งระบบดังกล่าวใช้น้ำร้อน (hot water) และอากาศ
ร้อน (hot air) เป็นแหล่งพลังงาน จากนั้นจะศึกษาอิทธิพล
ของปัจจัยต่าง ๆ เช่น ชนิดของแหล่งพลังงาน รูปแบบของ
ท่อนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ และอุณหภูมิของ
แหล่งพลังงาน ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นและ
คุณภาพของข้าวเปลือก โดยข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะ
ใช้เป็นพื้นฐานในการพัฒนาระบบการอบแห้งข้าวเปลือก
ด้วยท่อนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนให้มีประสิทธิภาพ
สูงขึ้นในอนาคต

2. วิธีวิจัย

2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

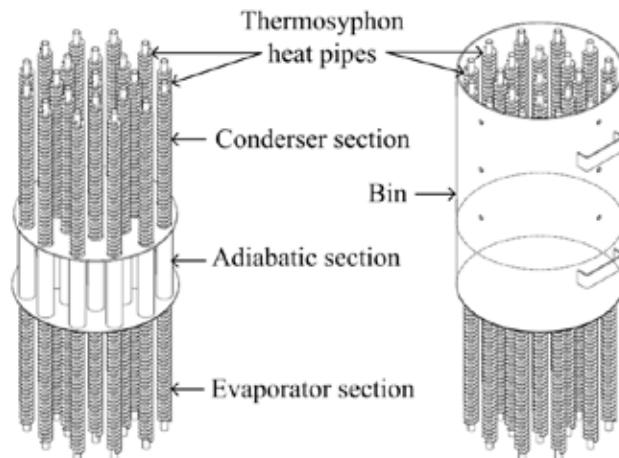
รูปที่ 1 แสดงแผนผังของเครื่องอบแห้งข้าว
เปลือกด้วยท่อนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ในงาน
วิจัยนี้ เครื่องอบแห้งมีส่วนประกอบหลัก คือ ถังบรรจุ
ข้าวเปลือก (bin) ซึ่งทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเส้น
ผ่านศูนย์กลาง 310 mm สูง 490 mm ที่หุ้มภายนอกด้วย
ฉนวนความร้อน และท่อนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน
จำนวน 21 ท่อ (เพื่อให้ความร้อนจากท่อนความร้อนแบบ
เทอร์โมไซฟอนกระจายเข้าสู่กองข้าวเปลือกอย่างทั่วถึง)
ซึ่งทำจากท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 mm
ยาว 800 mm ภายในบรรจุสารทำความเย็นในปริมาณ
60% โดยปริมาตรของส่วนที่ระเหย โดยในที่นี่ได้ใช้สาร
ทำความเย็น R-134a เป็นสารทำงาน โดย R-134a เป็น
สารทำความเย็นที่มีคุณสมบัติไม่ทำลายชั้นบรรยากาศ
ของโลก นอกจากนี้ยังเป็นสารทำความเย็นที่มีจุดเดือด
ต่ำจึงสามารถเดือดได้ง่าย ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความ
ร้อนจากส่วนที่ระเหยไปยังส่วนควบแน่นมีค่าสูง รายละเอียดของท่อนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ในงาน
วิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 1



รูปที่ 1. แผนผังของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกด้วยท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ติดตั้งอยู่ในถังบรรจุข้าวเปลือกจะมี 2 ส่วน คือ ส่วนควบแน่นและส่วนอะเดียบติก ซึ่งส่วนควบแน่นเป็นส่วนที่สัมผัสกับข้าวเปลือก (ข้าวเปลือกได้รับความร้อนจากส่วนควบแน่น) ในขณะที่ส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนจะยื่นออกนอกถังทางด้านล่าง (ก้นถัง)

โดยไม่สัมผัสกับข้าวเปลือก (ดูลักษณะการติดตั้งท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนเข้ากับถังบรรจุข้าวเปลือกได้จากรูปที่ 2) ทั้งนี้เพื่อรับความร้อนจากแหล่งพลังงานซึ่งในที่นี้คือน้ำร้อนและอากาศร้อน โดยน้ำร้อนและอากาศร้อนได้มาจากระบบผลิตน้ำร้อนและระบบผลิตอากาศร้อน ตามลำดับ



รูปที่ 2. ลักษณะการติดตั้งท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนเข้ากับถังบรรจุข้าวเปลือก

ระบบผลิตน้ำร้อนประกอบด้วยถังน้ำร้อน (hot water tank) ซึ่งหุ้มภายนอกด้วยฉนวนความร้อน และอุปกรณ์ทำความร้อนแบบจุ่ม (immersion heater) ขนาด 3 kW จำนวน 2 ชุด ทั้งนี้ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ทำความร้อนด้วยอุณหภูมิของน้ำร้อนภายในถังโดยอาศัยชุดควบคุมแบบ PID (Shinko, JSC-33A, Japan) ที่มีความแม่นยำ $\pm 1^{\circ}\text{C}$ การไหลของน้ำร้อนที่เข้าและออกจากถังเกิดขึ้นโดยใช้ปั๊มน้ำหมุนเวียน (Grundfos, UPS 25-50 180, Germany) ซึ่งความเร็วหรืออัตราการไหลของน้ำภายในถังน้ำร้อนสามารถปรับได้โดยใช้โกลบวาล์ว (globe valve) ส่วนระบบผลิตอากาศร้อนประกอบด้วยท่อลำเลียงอากาศร้อน (hot air duct) ซึ่งหุ้มผิวภายนอกด้วยฉนวนความร้อนเช่นเดียวกัน ความร้อนที่ป้อนให้แก่อากาศได้จากอุปกรณ์ทำความร้อนแบบขด (coiled heater) ขนาด 2.8 kW จำนวน 2 ชุด การทำงานของอุปกรณ์ทำความร้อนได้รับการควบคุมด้วยอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ทางเข้าของท่อลำเลียงอากาศร้อน โดยอาศัยชุดควบคุมแบบ PID เช่นเดียวกับกรณีระบบผลิตน้ำร้อน การไหลของอากาศร้อนที่เข้าและออกจากท่อลำเลียงอากาศร้อนเกิดขึ้นโดยใช้พัดลม (Hatari, HA-II8M1, Thailand) ซึ่งความเร็วหรืออัตราการไหลของอากาศภายในท่อลำเลียงอากาศร้อนปรับได้โดยใช้แดมเปอร์ (damper)

ก่อนการทดลอง ถังบรรจุข้าวเปลือกจะถูกนำมาวางบนถังน้ำร้อน (กรณีใช้น้ำร้อนเป็นแหล่งพลังงาน) หรือท่อลำเลียงอากาศร้อน (กรณีใช้อากาศร้อนเป็นแหล่งพลังงาน) โดยให้ส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนยื่นเข้าไปภายในถังน้ำร้อนหรือท่อลำเลียงอากาศร้อนเพื่อรับพลังงานความร้อน โดยในงานวิจัยนี้กำหนดให้ความเร็วของอากาศร้อนและน้ำร้อนไหลผ่านส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนมีค่าประมาณ 2.6 m/s

2.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

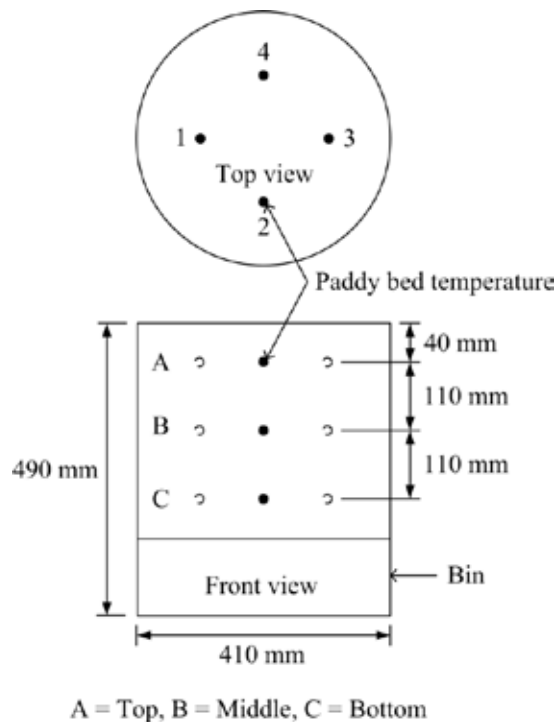
งานวิจัยนี้ได้ใช้ข้าวเปลือก (พันธุ์ชัยนาท-1) ที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 26%(d.b.) หรือ 0.26 kg/kg (d.b.) เป็นวัสดุทดสอบ โดยความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกเตรียมได้โดยการเติมน้ำตามจำนวนที่กำหนดเข้าไปผสมกับข้าวเปลือก จากนั้นจึงนำข้าวเปลือกดังกล่าวไปเก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4°C เป็นระยะเวลา 2 วัน หลังจากนั้นจึงนำข้าวเปลือกออกจากตู้เย็นเพื่อสิ่งในบรรยากาศก่อนเริ่มการทดลอง ทั้งนี้เพื่อปรับอุณหภูมิของข้าวเปลือกให้เท่ากับอุณหภูมิห้อง

2.3 วิธีทดลอง

การทดลองจะเริ่มจากการนำข้าวเปลือกที่เตรียมไว้จำนวนประมาณ 12 kg มาใส่ในถังที่ติดตั้งชุดท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนไว้ จากนั้นทำการเปิดระบบผลิตน้ำร้อนหรือระบบผลิตอากาศร้อน (ขึ้นอยู่กับ

กับแหล่งพลังงานที่เลือกใช้) เมื่ออุณหภูมิของน้ำร้อนหรืออากาศร้อนเพิ่มขึ้นถึงค่าที่ต้องการให้นำถังบรรจุข้าวเปลือกดังกล่าวมาวางบนถังน้ำร้อน (กรณีใช้น้ำร้อนเป็นแหล่งพลังงาน) หรือท่อลำเลียงอากาศร้อน (กรณีใช้อากาศร้อนเป็นแหล่งพลังงาน) โดยให้ส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนสัมผัสกับน้ำร้อนหรืออากาศร้อน ในระหว่างการทดลองตรวจวัดมวลของข้าวเปลือกทุก 1 ชั่วโมงโดยการยกถังบรรจุข้าวเปลือกออกมา

ชั่งที่เครื่องชั่งดิจิตอล (Tscale, PEW, Taiwan) ซึ่งมีความละเอียด ± 2 g จากนั้นจึงนำมวลของข้าวเปลือกที่ชั่งได้มาคำนวณค่าความชื้น ในขณะที่อุณหภูมิภายในกองข้าวเปลือกที่ตำแหน่งต่าง ๆ จะได้รับการตรวจวัดอย่างต่อเนื่องด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K และบันทึกด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล (Yokogawa, MW100, Tokyo, Japan) โดยตำแหน่งการตรวจวัดอุณหภูมิภายในกองข้าวเปลือกได้แสดงไว้ในรูปที่ 3



รูปที่ 3. ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิภายในกองข้าวเปลือก

การทดลองจะกระทำที่เงื่อนไขดังต่อไปนี้ 1) ชนิดของแหล่งพลังงาน 2 ชนิด ได้แก่ น้ำร้อนและอากาศร้อน 2) อุณหภูมิของแหล่งพลังงาน 3 ระดับ ได้แก่ 60, 70 และ 80 °C และ 3) รูปแบบของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ 2 รูปแบบ ได้แก่ ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีครีป (finned thermosyphon heat pipes:

FTHPs) และท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ไม่มีครีป (unfinned thermosyphon heat pipes: UFTHPs) โดยการทดลองจะดำเนินไปจนกระทั่งความชื้นของข้าวเปลือกลดลงเหลือ 14% (d.b.) หรือ 0.14 kg/kg (d.b.) เงื่อนไขการทดลองทั้งหมดสรุปให้เห็นในตารางที่ 1

ตารางที่ 1. รายละเอียดของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนและเงื่อนไขการทดลองที่ใช้ในงานวิจัย

ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน	
วัสดุ	ทองแดง
จำนวน	21 ท่อ
ขนาด	เส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 mm และยาว 800 mm (ส่วนทำระเหย 320 mm ส่วนควบแน่น 320 mm และส่วนอะเดียบติก 160 mm)
ชนิดของครีป/วัสดุ	Circular type/ทองแดง
ขนาดของครีป	ระยะพิตช์ 7 fin/inch, หน้า 0.4 mm และยาว 7 mm
สารทำงาน	R-134a
ปริมาณการเติมสารทำงาน	60% โดยปริมาตรของส่วนทำระเหย
เงื่อนไขการทดลอง	
แหล่งพลังงาน	น้ำร้อน และ อากาศร้อน
รูปแบบของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน	ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีครีป (FTHPs) และท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ไม่มีครีป (UFTHPs)
อุณหภูมิของแหล่งพลังงาน	60 70 และ 80 °C
อุณหภูมิของอากาศแวดล้อม	25 °C
ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก	26% (d.b.)
ความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือก	14% (d.b.)
ความเร็วของน้ำร้อนและอากาศร้อน	2.6 m/s

ตารางที่ 2. ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งที่เงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ

Thermosyphon heat pipes	Energy source		Drying time (h)	SEC (MJ/kg _{water})
	Type	Temperature (°C)		
FTHPs	Hot water	60	52	40.0
		70	28	22.3
		80	20	17.2
	Hot air	60	60	40.5
		70	40	28.0
		80	28	21.3
UFTHPs	Hot water	60	104	79.0
		70	60	47.5
		80	40	33.9
	Hot air	60	128	87.4
		70	76	53.9
		80	48	36.8

2.4 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกระหว่างการอบแห้ง

ในงานวิจัยนี้ การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกในระหว่างการอบแห้งแสดงในรูปของอัตราส่วนความชื้น (moisture ratio) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้ (15)

$$\text{Moisture ratio} = (M - M_0) / (M_0 - M_e) \quad (1)$$

เมื่อ M คือ ความชื้นของข้าวเปลือกที่เวลาใด ๆ (kg/kg (d.b.)) M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก (kg/kg (d.b.)) และ M_e คือ ความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) ของข้าวเปลือกในแต่ละเงื่อนไขการอบแห้ง (kg/kg (d.b.)) ซึ่งเป็นค่าความชื้นของข้าวเปลือกในสภาวะที่มวลของข้าวเปลือกไม่เปลี่ยนแปลงสำหรับการอบแห้งที่เงื่อนไขนั้น ๆ

2.5 ความสิ้นเปลืองพลังงานของกระบวนการอบแห้ง

งานวิจัยนี้ใช้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (specific energy consumption: SEC) เป็นดัชนีชี้วัด

ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้ง โดยค่า SEC แสดงถึงพลังงานที่ใช้เพื่อระเหยน้ำ จำนวน 1 kg ออกจากข้าวเปลือกที่นำมาอบแห้งซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{SEC} = E / m_{\text{water}} \quad (2)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง (MJ/kg_{water}) E คือ พลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง (MJ) ซึ่งวัดได้โดยตรงด้วยมาตรวัดความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า (kilowatt-hour meter) และ m_{water} คือ ปริมาณน้ำที่ถูกนำออกจากผลิตภัณฑ์ที่นำมาอบแห้ง (kg_{water}) ซึ่งประเมินได้จากความแตกต่างระหว่างความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกที่นำมาอบแห้ง

2.6 คุณภาพของข้าวเปลือก

ในงานวิจัยนี้ คุณภาพของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งแสดงในเทอมของร้อยละต้นข้าว (head rice yield) และความขาว (whiteness) โดยร้อยละต้นข้าวเป็นอัตราส่วนระหว่างมวลของต้นข้าว (เมล็ดข้าวหัก

ที่มีความขาวมากกว่า 80% ของเมล็ดข้าว) ต่อมวลของข้าวเปลือกทั้งหมด โดยต้นข้าวสามารถหาได้โดยการนำข้าวเปลือกที่ทำความสะอาดแล้วจำนวน 125 g มากะเทาะเปลือกด้วยเครื่องกะเทาะซึ่งจะทำให้ได้ข้าวกล้อง จากนั้นนำข้าวกล้องที่ได้มาขัดขาวจนกระทั่งได้เป็นข้าวสารสุดท้ายจึงทำการคัดแยกต้นข้าว (ตามลักษณะของต้นข้าวที่กล่าวข้างต้น) ออกจากข้าวหัก สำหรับค่าความขาวของข้าวสารที่ได้จากการสีสามารถทำได้ด้วยเครื่องวัดความขาว (digital whiteness meter) (Kett, model C300, Japan) ข้อมูลที่ได้จากการหาคุณภาพของข้าวเปลือกจะนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) โดยผลที่ได้ในแต่ละการทดลองจะแสดงในรูปของค่าเฉลี่ยซึ่งจะนำมาเปรียบเทียบความแตกต่างโดยใช้ Duncan's Test ค่าเฉลี่ยจะพิจารณาให้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อ $p = 0.05$ การทดสอบทางสถิตินี้กระทำโดยใช้โปรแกรม SPSS (Version 16)

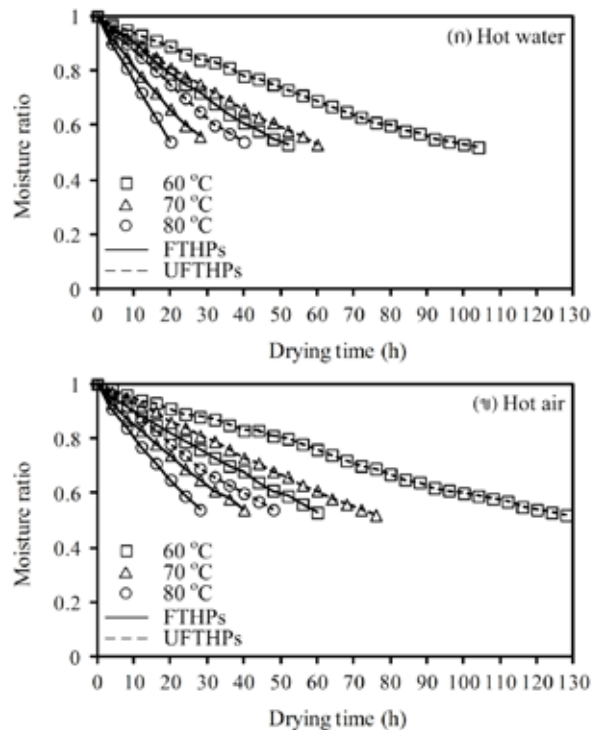
3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือก

รูปที่ 4 แสดงผลกระทบของอุณหภูมิของแหล่งพลังงานที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือก โดยในที่นี้จะแสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกในรูปของอัตราส่วนความชื้น จะเห็นว่า การอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิของแหล่งพลังงานที่สูงกว่าจะทำให้ความชื้นของข้าวเปลือกลดลงได้เร็วกว่า (แห้งเร็วกว่า) เมื่อเทียบกับการใช้อุณหภูมิของแหล่งพลังงานที่ต่ำกว่า ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่ออุณหภูมิของแหล่งพลังงานมีค่ามากกว่า อุณหภูมิของสารทำงานในส่วนทำระเหยจะเพิ่มขึ้นเร็วกว่าและเกิดการเดือด อัตราการถ่ายเทความร้อน (heat transfer rate) จึงมีค่ามากกว่า ส่งผลให้อุณหภูมิผิวของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนในส่วนควบแน่นมีค่าสูงขึ้น (16) อัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากส่วนควบแน่นของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนไปยังกองข้าวเปลือกจึงมากตามไปด้วย ลักษณะเช่นนี้จึง

ทำให้อุณหภูมิภายในกองข้าวเปลือกมีค่าสูงขึ้นเช่นกัน ดังนั้นความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่ข้าวเปลือกจึงมีค่ามากกว่า ส่งผลให้ความชื้นถ่ายเทออกจากข้าวเปลือกได้มากกว่า (อัตราการถ่ายเทความร้อนมากกว่า) แนวโน้มเช่นนี้สามารถสังเกตพบได้ทั้งกรณีใช้น้ำร้อนและอากาศร้อนเป็นแหล่งพลังงาน

รูปที่ 4 ยังแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของรูปแบบของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนซึ่งได้แก่ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีครีป (FTHPs) และท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ไม่มีครีป (UFTHPs) ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือก จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า การใช้ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีครีปช่วยให้ความชื้นของข้าวเปลือกลดลงได้เร็วกว่าการใช้ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ไม่มีครีป ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการติดตั้งครีบบนผิวนอกของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อนซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนจากท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนในส่วนควบแน่นไปยังข้าวเปลือก (รวมถึงจากแหล่งพลังงานไปยังสารทำงานภายในท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนในส่วนทำระเหย) ขอให้สังเกตว่า การใช้ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีครีปจะลดเวลาที่ใช้ในการลดความชื้นข้าวเปลือก (drying time) ลงได้มากเมื่อเทียบกับกรณีไม่มีครีป (ดูตารางที่ 2 ประกอบ) นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อใช้ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีครีป ความแตกต่างของเวลาที่ใช้ในการลดความชื้นของข้าวเปลือก (ใช้อุณหภูมิของแหล่งพลังงานเท่ากัน) ทั้งกรณีใช้น้ำร้อนและอากาศร้อนเป็นแหล่งพลังงานมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ไม่มีครีป ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากครีปซึ่งติดตั้งบนผิวนอกของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับข้าวเปลือก (ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือก) ในขณะที่ชนิดของแหล่งพลังงานที่ใช้ถือเป็นปัจจัยรอง



รูปที่ 4. ผลกระทบของอุณหภูมิของแหล่งพลังงานและรูปแบบของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือก

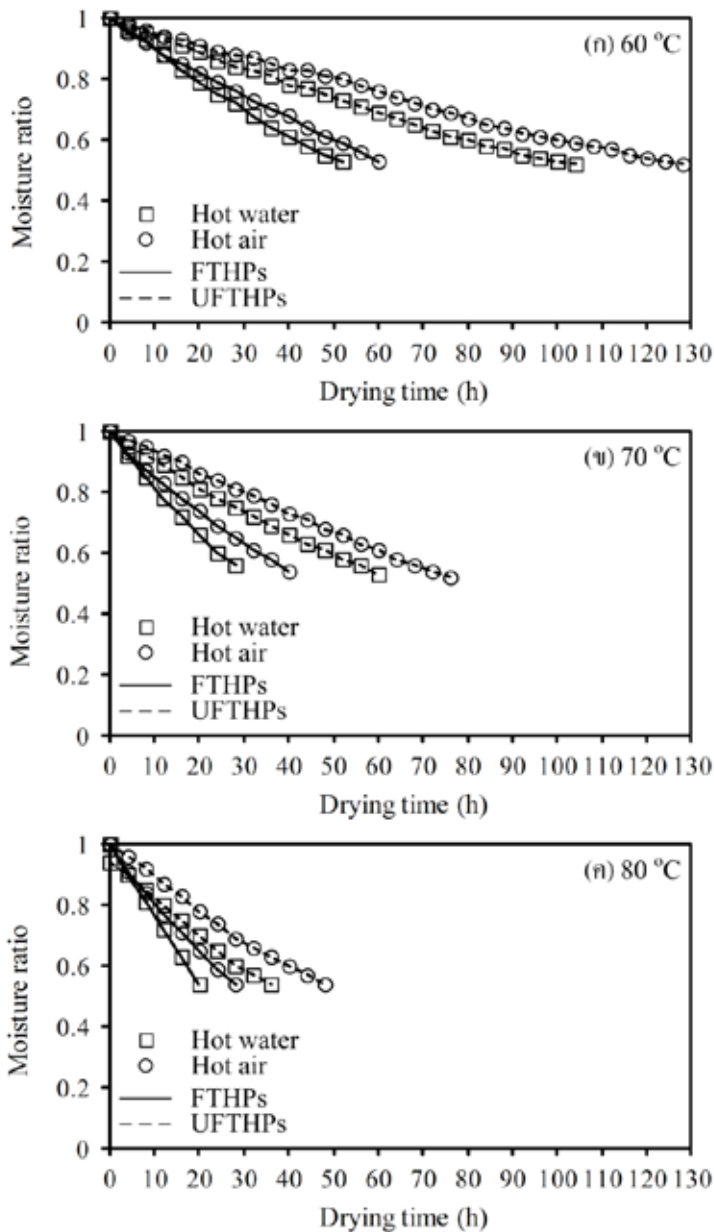
ผลกระทบของชนิดของแหล่งพลังงานและรูปแบบของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกแสดงดังรูปที่ 5 เนื่องจากความเร็วของน้ำร้อนและอากาศร้อนที่ไหลผ่านส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน (ซึ่งสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน) มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้น อัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่สารทำความเย็นจึงขึ้นอยู่กับสมบัติทางความร้อนของแหล่งพลังงานเป็นหลัก จะเห็นว่า การใช้น้ำร้อนเป็นแหล่งพลังงานจะทำให้ความชื้นของข้าวเปลือกลดลงได้เร็วกว่าเมื่อเทียบกับการใช้อากาศร้อนเป็นแหล่งพลังงาน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากน้ำมีค่าความร้อนจำเพาะ (specific heat) มากกว่าอากาศ (17) จึงส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่สารทำความเย็นในส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนมีค่ามากกว่าอย่างใดก็ตาม ความแตกต่างของเวลาที่ใช้ในการลดความชื้นของข้าวเปลือกเมื่อใช้น้ำร้อนและอากาศร้อนเป็นแหล่งพลังงานกลับมีค่าไม่มากนัก (เมื่อเทียบกับกรณีของการใช้ท่อความ

ร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีครีบริบและไม่มีครีบริบ) ซึ่งความแตกต่างของเวลาที่ใช้ในการลดความชื้นของข้าวเปลือกข้างต้นจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของแหล่งพลังงานที่ใช้มีค่าสูง (80 °C) และเมื่อใช้ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีครีบริบ (ดูตารางที่ 2) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการที่อุณหภูมิของแหล่งพลังงานมีค่าสูง อิทธิพลของความร้อนจำเพาะของน้ำหรือของอากาศที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนจะลดลง ในขณะที่ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของแหล่งพลังงานและของสารทำงานภายในส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนกลับมีอิทธิพลเพิ่มขึ้น

ผลการทดลองที่ได้ข้างต้นแสดงให้เห็นว่าครีบริบที่ติดตั้งบนผิวนอกของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนมีอิทธิพลต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือกมากกว่าชนิดของแหล่งพลังงานที่ใช้ สิ่งนี้ถือเป็นข้อดีในการประยุกต์ใช้ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนสำหรับกระบวนการอบแห้ง เนื่องจากระบบดังกล่าวมีความยืดหยุ่นในการเลือกใช้แหล่งพลังงาน ในงานวิจัยนี้ ระยะ

เวลาที่ใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือกมีค่าระหว่าง 20 ถึง 128 ชั่วโมง โดยระยะเวลาอบแห้งต่ำที่สุด (20 ชั่วโมง) เกิดขึ้นเมื่อใช้ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีครีปและใช้น้ำร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นแหล่งพลังงาน เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ได้ข้างต้นกับกรณีอบแห้งข้าว

เปลือกในถังเก็บ (in-store drying) ที่มีการเป่าอากาศเข้าในถังเก็บของ Tirawanichakul และคณะ (18) จะพบว่า การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนใช้เวลาสั้นกว่ามาก ซึ่งเป็นผลจากอุณหภูมิภายในกองข้าวเปลือกในกรณีที่ใช้ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนมีค่าสูงกว่า



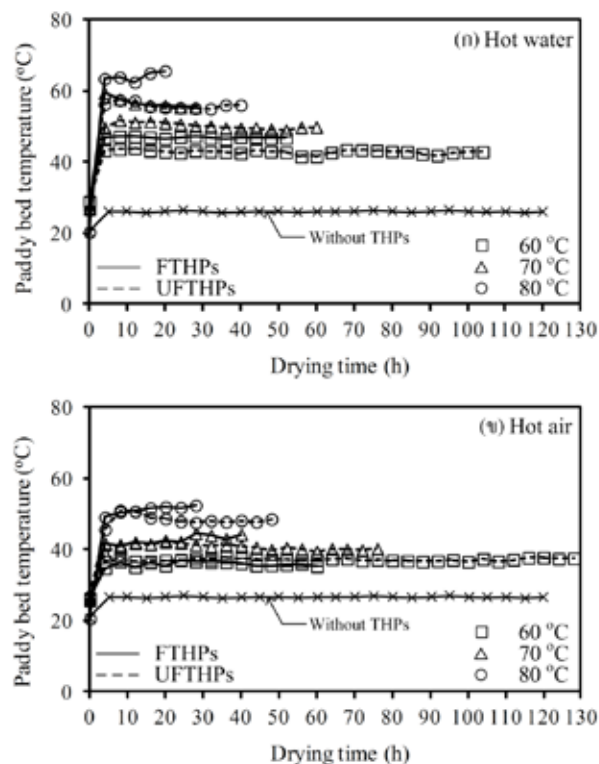
รูปที่ 5. ผลกระทบของชนิดของแหล่งพลังงานและรูปแบบของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือก

3.2 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในกองข้าวเปลือก

รูปที่ 6 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในกองข้าวเปลือกที่เงื่อนไขการทดลองต่างๆ ในที่นี้ได้แสดงค่าอุณหภูมิภายในกองข้าวเปลือกในรูปของค่าเฉลี่ยจากอุณหภูมิที่ตรวจวัดทั้งหมด 12 จุด (ดูรูปที่ 3) จะเห็นว่าอุณหภูมิภายในกองข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 5 ชั่วโมงแรกของการทดลอง หลังจากนั้นอุณหภูมิภายในกองข้าวเปลือกจะเริ่มมีค่าคงที่ นั่นหมายความว่า ในช่วงดังกล่าว ความร้อนที่ถ่ายเทจากท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนในส่วนควบแน่นถูกใช้ในการระเหยน้ำ (หรือความชื้น) ในข้าวเปลือกทั้งหมด ในแง่มุมของระดับอุณหภูมิพบว่า ผลที่ได้มีความสอดคล้องกับลักษณะการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกดังแสดงในรูปที่ 4 และ 5 กล่าวคือ การเพิ่มอุณหภูมิของแหล่งพลังงาน (ทั้งกรณีใช้น้ำร้อนและอากาศร้อนเป็นแหล่งพลังงาน) จะทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยภายในกองข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ข้าวเปลือกมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ความชื้นของข้าวเปลือกจึงลดลงได้เร็วกว่า

ดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ นอกจากนี้ยังพบอีกว่า อุณหภูมิภายในกองข้าวเปลือกในกรณีที่ใช้ น้ำร้อนเป็นแหล่งพลังงานมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่ใช้ อากาศร้อนเป็นแหล่งพลังงานในทุกเงื่อนไขการทดลอง ซึ่งสาเหตุของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเป็นผลจากอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มากกว่าเมื่อใช้น้ำร้อนเป็นแหล่งพลังงานดังที่กล่าวข้างต้นเช่นกัน

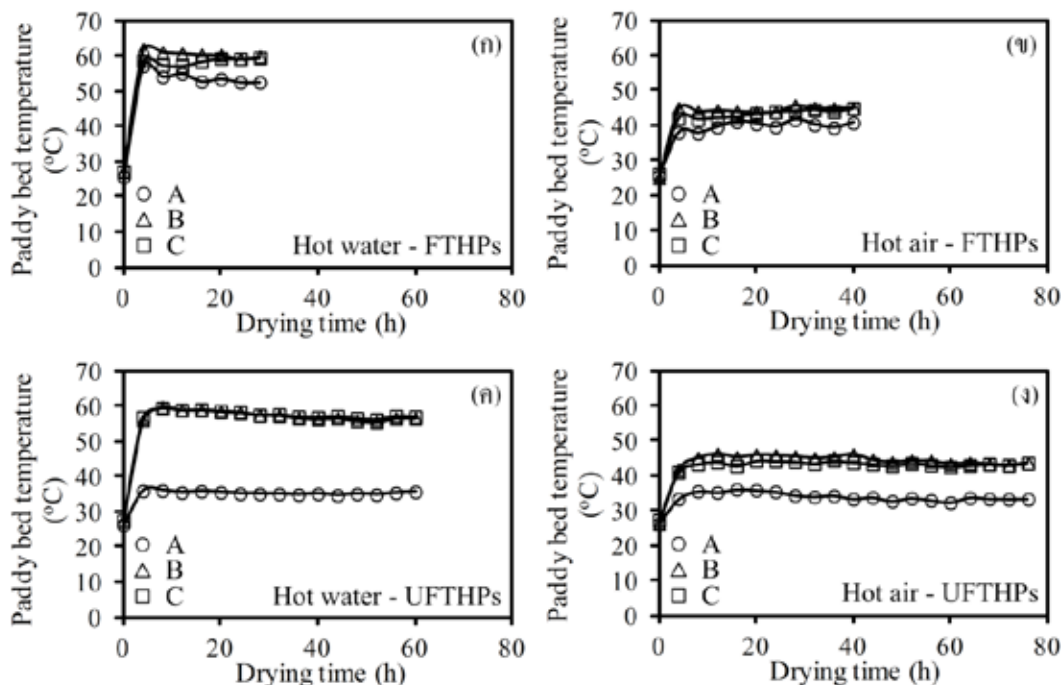
เมื่อพิจารณาอุณหภูมิเฉลี่ยภายในกองข้าวเปลือกในกรณีที่ไม่มีท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน ซึ่งแสดงในรูปที่ 6 จะพบว่า อุณหภูมิภายในกองข้าวเปลือกในกรณีดังกล่าวมีค่าประมาณ 25 °C ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยในกรณีที่มีท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนติดตั้งอยู่จะพบว่า การติดตั้งท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนจะทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยภายในกองข้าวเปลือกมีค่าสูงกว่าอย่างชัดเจน สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่า ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่นำมาติดตั้งมีอิทธิพลต่อการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศภายในกองข้าวเปลือกเป็นอย่างมาก



รูปที่ 6. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยภายในกองข้าวเปลือกที่เงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ

ด้วยเหตุที่ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในกองข้าวเปลือกที่ระดับความลึกหรือที่ระนาบเดียวกัน (จุดที่ 1 ถึง 4 ในรูปที่ 3) ภายในถังมีค่าไม่ต่างกันมากนัก ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในกองข้าวเปลือกจึงแสดงเฉพาะที่ความลึกต่าง ๆ เท่านั้น รูปที่ 7 แสดงความแตกต่างของระดับอุณหภูมิเฉลี่ยภายในกองข้าวเปลือก (สำหรับจุดที่ 1 ถึง 4) ที่ระดับความลึกต่าง ๆ เมื่อใช้อุณหภูมิของแหล่งพลังงาน 70°C ซึ่งระดับความลึกที่พิจารณาได้แก่ระดับบน (ระดับ A) ระดับกึ่งกลาง (ระดับ B) และระดับล่าง (ระดับ C) ซึ่งวัดที่ระยะ 40 150 และ 260 mm จากผิวบนของกองข้าวเปลือก ตามลำดับ (ดูรูปที่ 3) จะเห็นว่าอุณหภูมิภายในกองข้าวเปลือกที่ระดับล่าง (ระดับ C) และระดับกึ่งกลาง (ระดับ B) ของถังมีค่า

ไม่แตกต่างกันมากนัก นั่นหมายความว่าที่ระดับความลึกดังกล่าว การกระจายของอุณหภูมิภายในกองข้าวเปลือกมีลักษณะสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิภายในกองข้าวเปลือกที่ระดับบนของถัง (ระดับ A) กลับมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับอุณหภูมิภายในกองข้าวเปลือกที่อยู่ในระดับลึกกว่า (ระดับ B และ C) ที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากความร้อนภายในกองข้าวเปลือกที่ใกล้กับผิวด้านบนสามารถถ่ายเทออกสู่อากาศแวดล้อมซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าได้ง่าย ส่งผลให้พลังงานความร้อนที่สะสมในกองข้าวเปลือก (ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับอุณหภูมิภายในกองข้าวเปลือก) มีค่าลดลง อุณหภูมิซึ่งวัดได้ที่ระดับความลึกดังกล่าวจึงมีค่าต่ำกว่า



รูปที่ 7. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในกองข้าวเปลือกที่ความลึกต่าง ๆ ภายในถัง
เมื่อใช้อุณหภูมิของแหล่งพลังงาน 70°C

เมื่อพิจารณาถึงรูปแบบของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ พบว่า ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในกองข้าวเปลือกที่ระดับบนของถังและอีกสองระดับที่เหลือ (ระดับกึ่งกลางและระดับล่างของถัง) ลดลงอย่างชัดเจนเมื่อใช้ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีครีป ทั้งนี้เป็นผลมาจากความร้อนที่ถ่ายเทให้ข้าวเปลือกในกรณีใช้ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีครีปมีปริมาณมากกว่าซึ่งสามารถชดเชยกับความร้อนบางส่วนที่สูญเสียไปสู่อากาศแวดล้อม เมื่อพิจารณาถึงชนิดของแหล่งพลังงานที่ใช้ พบว่า อุณหภูมิภายในกองข้าวเปลือกในกรณีใช้น้ำร้อนเป็นแหล่งพลังงานมีค่าสูงกว่าอย่างชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ระดับกึ่งกลางและระดับล่างของถัง สำหรับการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิของแหล่งพลังงาน 60 และ 80 °C ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะคล้ายคลึงกับกรณีใช้อุณหภูมิของแหล่งพลังงาน 70 °C ดังที่ได้อธิบายอย่างไรก็ตาม ค่าของอุณหภูมิที่ระดับความลึกต่าง ๆ จะมีค่าน้อยกว่าและมากกว่าตามลำดับ

3.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง

ตารางที่ 2 แสดงความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ของกระบวนการอบแห้งที่เงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 17.2 ถึง 87.4 MJ/kg_{water} ด้วยเหตุที่ปริมาณน้ำ (หรือความชื้น) ที่ระเหยออกจากข้าวเปลือกในแต่ละเงื่อนไขการทดลองมีค่าไม่ต่างกัน (เนื่องจากความชื้นของข้าวเปลือกลดลงจาก 26% (d.b.) ไปยัง 14% (d.b.) เหมือนกันในแต่ละเงื่อนไข) พลังงานที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง (ซึ่งสัมพันธ์กับระยะเวลาที่ใช้การอบแห้ง) จึงเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่า SEC ทั้งนี้พลังงานไฟฟ้าส่วนใหญ่ที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งถูกใช้ไปกับการเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำร้อนและอากาศร้อน (พิกัดกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ทำความร้อนมีค่าสูงกว่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของปั๊มน้ำหมุนเวียนและพัดลมมาก) ผลที่ได้ในตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่า แนวโน้มของค่า SEC ที่ได้มีความสอดคล้องกับผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือก กล่าวคือ การใช้อุณหภูมิของแหล่งพลังงานที่สูงกว่าจะทำให้ SEC มีค่าต่ำกว่า ทั้งนี้เป็นเพราะระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่เงื่อนไขดังกล่าวสั้นกว่า ถึงแม้ว่า

การใช้อุณหภูมิของแหล่งพลังงานที่สูงกว่าจะต้องใช้พลังงานไฟฟ้ามากกว่าก็ตาม (เนื่องจากอุปกรณ์ทำความร้อนต้องทำงานมากกว่า) นอกจากนี้ SEC เมื่อใช้น้ำร้อนเป็นแหล่งพลังงานและใช้ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีครีปจะมีค่าต่ำกว่ากรณีที่ใช้อากาศร้อนเป็นแหล่งพลังงานและใช้ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ไม่มีครีป ตามลำดับ ข้อมูลที่ได้ในตารางที่ 2 ยังแสดงให้เห็นว่า การใช้ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีครีปจะทำให้ SEC ของกระบวนการอบแห้งลดลงประมาณ 42.1 ถึง 53.7% เมื่อเทียบกับกรณีใช้ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ไม่มีครีป ในขณะที่การใช้แหล่งพลังงานความร้อนต่างกันมีผลทำให้ SEC ของกระบวนการอบแห้งต่างกันอยู่ในช่วง 1.2 ถึง 20.3% โดย SEC ในกรณีใช้น้ำร้อนเป็นแหล่งพลังงานจะมีค่าต่ำกว่าดังกล่าวข้างต้น จะเห็นว่า การใช้ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีครีปจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้งได้เป็นอย่างมาก หรือกล่าวได้ว่าครีปซึ่งติดตั้งที่ผิวนอกของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้งมากกว่าชนิดของแหล่งพลังงานที่ใช้

เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกในถังเก็บระดับอุตสาหกรรม (19) ซึ่งมีค่า SEC อยู่ระหว่าง 0.43 ถึง 0.97 MJ/kg_{water} และกับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกในถังเก็บระดับห้องปฏิบัติการ (20) ซึ่งมีค่า SEC เท่ากับ 2.88 MJ/kg_{water} พบว่า SEC ของกระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนมีค่าสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณน้ำ (ความชื้น) ที่ระเหยออกจากข้าวเปลือกมีค่าน้อยกว่าอย่างมากซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณข้าวเปลือกที่นำมาลดความชื้นมีปริมาณน้อยกว่า อย่างไรก็ตาม หากนำความร้อนเหลือทิ้งจากกระบวนการทางอุตสาหกรรมมาใช้เป็นแหล่งพลังงานรวมถึงและเพิ่มปริมาณของข้าวเปลือกที่ใช้ในการลดความชื้น (เพิ่มขนาดของถังเก็บ) ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนจะมีค่าเพิ่มขึ้น (ปริมาณน้ำที่ระเหยเพิ่มมากขึ้น)

3.4 คุณภาพของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้ง

ตารางที่ 3 แสดงผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อคุณภาพของข้าวเปลือกซึ่งแสดงในเทอมของร้อยละต้นข้าวและความขาว โดยค่าของร้อยละต้นข้าวและความขาวของข้าวอ้างอิง (ได้จากข้าวเปลือกที่แห้งโดยธรรมชาติ) มีค่าประมาณ 44% และ 46 ตามลำดับ

ในกรณีของร้อยละต้นข้าว พบว่า ข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งในงานวิจัยนี้มีค่าของร้อยละต้นข้าวอยู่ในช่วง 41.0 ถึง 43.2% ซึ่งต่ำกว่าร้อยละต้นข้าวของข้าวอ้างอิงเล็กน้อยผลที่ได้ในตารางที่ 3 ยังแสดงให้เห็นว่า รูปแบบของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน ชนิดของแหล่งพลังงาน รวมถึงอุณหภูมิของแหล่งพลังงาน

ไม่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าของร้อยละต้นข้าว ยกเว้นกรณีที่อบแห้งโดยใช้อุณหภูมิของแหล่งพลังงานสูง (80 °C) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีใช้น้ำเป็นแหล่งพลังงานและใช้ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีครีบ ซึ่งร้อยละต้นข้าวที่ได้มีค่าต่ำกว่าที่เงื่อนไขอื่นอย่างชัดเจนที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากที่เงื่อนไขการอบแห้งดังกล่าว ความชื้นภายในข้าวเปลือกกระเหยออกจากข้าวเปลือกได้เร็วกว่าอันเนื่องจากอุณหภูมิภายในกองข้าวเปลือกที่สูงกว่า ส่งผลให้เกิดความเค้นภายในเมล็ดข้าวมากกว่า การแตกร้าวและการแตกหักของข้าวจึงเกิดขึ้นมากกว่าในระหว่างกระบวนการสีข้าว (21)

ตารางที่ 3. คุณภาพของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งที่เงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ

Thermosyphon heat pipes	Energy source		Head rice yield (%)	Whiteness
	Type	Temperature (°C)		
FTHPs	Hot water	60	42.1 ± 0.4 ^{abcd}	43.6 ± 1.1 ^{cd}
		70	41.4 ± 0.5 ^{abc}	44.8 ± 0.7 ^d
		80	41.0 ± 1.0 ^a	45.1 ± 0.7 ^d
	Hot air	60	41.4 ± 0.4 ^{bc}	42.7 ± 0.9 ^{bc}
		70	42.7 ± 0.3 ^{cd}	44.4 ± 0.9 ^d
		80	41.3 ± 0.8 ^{ab}	44.9 ± 0.6 ^d
UFTHPs	Hot water	60	42.3 ± 0.7 ^{abcd}	41.3 ± 0.7 ^a
		70	42.0 ± 0.6 ^{abcd}	42.5 ± 0.9 ^{abc}
		80	41.5 ± 1.2 ^{abc}	43.9 ± 0.8 ^{cd}
	Hot air	60	43.2 ± 0.2 ^d	41.6 ± 0.4 ^a
		70	42.9 ± 0.9 ^d	42.1 ± 0.6 ^{ab}
		80	42.5 ± 0.7 ^{bcd}	43.7 ± 1.0 ^{abc}

ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในคอลัมน์เดียวกันหมายความว่าค่าดังกล่าวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ในกรณีของความขาว พบว่า ข้าวที่ได้จากการทดลองมีค่าความขาวอยู่ในช่วง 41.1 ถึง 45.1 ซึ่งต่ำกว่าความขาวของข้าวอ้างอิงเล็กน้อยเช่นกัน ถึงแม้ว่าอุณหภูมิจะเป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของข้าวเปลือกโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการลดลงของค่าความ

ขาว กล่าวคือ การอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิสูงเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ข้าวมีความขาวลดลง (สีคล้ำมากขึ้น) แต่ผลที่ได้ในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า ความขาวของข้าวมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้อุณหภูมิของแหล่งพลังงานต่ำ (อุณหภูมิของข้าวเปลือกมีค่าต่ำด้วยเช่นกัน) ที่เป็นเช่น

นี้เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีใช้อุณหภูมิของแหล่งพลังงานสูง ข้าวเปลือกต้องใช้เวลาอบแห้งนานหากใช้อุณหภูมิของแหล่งพลังงานต่ำ ส่งผลให้ข้าวเปลือกต้องอยู่ภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำหรือต่อเนื่อง (ถึงแม้ระดับอุณหภูมิภายในกองข้าวเปลือกจะมีค่าต่ำกว่ากรณีใช้อุณหภูมิของแหล่งพลังงานสูงก็ตาม) ระยะเวลาที่ยาวนานกว่ารวมถึงอุณหภูมิที่สูง (สูงกว่าอุณหภูมิห้อง) จึงทำผลของปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (non-enzymatic browning reaction) มีความรุนแรงมากกว่า (22) ในกรณีเช่นนี้ ระยะเวลาการอบแห้งจึงเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อความขาวของข้าวมากกว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือก อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของแหล่งพลังงานรวมถึงชนิดของแหล่งพลังงานที่ใช้ไม่ผลกระทบต่อความขาวของข้าวอย่างมีนัยสำคัญ ผลที่ได้ในตารางที่ 3 ยังแสดงให้เห็นว่า การใช้ต่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีครีบบจะส่งผลให้ความขาวของข้าวมีแนวโน้มลดลงน้อยกว่าการใช้การใช้ต่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีครีบบโดยเฉพาะในกรณีของการใช้อากาศร้อนเป็นแหล่งพลังงาน โดยสาเหตุของปรากฏการณ์ดังกล่าวมีลักษณะเช่นเดียวกับกรณีของอุณหภูมิของแหล่งพลังงานดังกล่าวข้างต้น

เมื่อเปรียบเทียบกับร้อยละต้นข้าวและความขาวของข้าวที่ได้จากการอบแห้งข้าวเปลือกในถังเก็บของ Tirawanichakul และคณะ (18) ซึ่งมีร้อยละต้นข้าวสัมพัทธ์ (relative head rice yield) และความขาวสัมพัทธ์ (relative whiteness) อยู่ในช่วง 0.93 ถึง 0.98 และ 0.91 ถึง 0.97 ตามลำดับ พบว่า การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของข้าวที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของข้าวที่ได้จากงานวิจัยนี้ ถึงแม้ว่าระดับอุณหภูมิภายในกองข้าวเปลือก (ซึ่งมีอิทธิพลต่อคุณภาพของข้าวที่ได้หลังการอบแห้ง) ในกรณีอบแห้งด้วยต่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนจะสูงกว่าก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็คเบคของ Madhiyanon และ Soponronnarit (2) จะพบว่า การเปลี่ยนแปลงความขาวของข้าวมีค่าไม่ต่างจากข้าวที่ได้จากงานวิจัยนี้เช่นกัน อย่างไรก็ตาม ร้อยละต้นข้าวที่ได้จากงานวิจัยนี้ก็กลับมีการ

เปลี่ยนแปลงน้อยกว่า (เมื่อพิจารณาจากข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายใกล้เคียงกัน) ทั้งนี้ อาจเป็นผลมาจากระดับอุณหภูมิของเมล็ดข้าวในงานวิจัยนี้มีค่าต่ำกว่ามากรวมถึงข้าวเปลือกไม่เกิดการเคลื่อนที่ระหว่างการอบแห้ง

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาระบบการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยต่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนและได้ศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ เช่น ชนิดของแหล่งพลังงาน (น้ำร้อนและอากาศร้อน) อุณหภูมิของแหล่งพลังงาน และรูปแบบของต่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน (มีครีบบและไม่มีครีบบ) ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นและคุณภาพของข้าวเปลือก ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใช้น้ำร้อนเป็นแหล่งพลังงานและการใช้ต่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีครีบบทำให้ความชื้นของข้าวเปลือกลดลงได้เร็วกว่าเมื่อเทียบกับกรณีใช้อากาศร้อนเป็นแหล่งพลังงานและใช้ต่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ไม่มีครีบบตามลำดับ นอกจากนี้ การใช้แหล่งพลังงานที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจะทำให้ความชื้นของข้าวเปลือกลดลงได้เร็วกว่าเช่นกันเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิต่ำ ถึงแม้ว่าเวลาที่ใช้ในการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยระบบการอบแห้งที่พัฒนาขึ้นมีค่าค่อนข้างมาก ซึ่งส่งผลให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการมีค่าสูง แต่หากนำพลังงานความร้อนที่เหลือทิ้งจากกระบวนการทางอุตสาหกรรมมาใช้เป็นแหล่งพลังงาน ระบบการอบแห้งด้วยต่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนก็ถือเป็นระบบการอบแห้งที่ใช้พลังงานน้อยมาก ในแง่ของคุณภาพข้าวเปลือก พบว่า ร้อยละต้นข้าวและความขาวมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อผ่านการอบแห้ง เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้งและคุณภาพของข้าวเปลือก การอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 °C โดยใช้ต่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีครีบบและใช้น้ำร้อนเป็นแหล่งพลังงานถือเป็นเงื่อนไขการอบแห้งที่มีความเหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่สนับสนุนงบประมาณในการดำเนินงานวิจัย และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์บางส่วนในการดำเนินงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- (1) Hung-Nguyen L, Driscoll RH, Srzednicki G. Drying of high moisture content paddy in a pilot scale triangular spouted bed dryer. *Drying Technology*. 2001; 19: 375–87.
- (2) Madhiyanon T, Soponronnarit S. High temperature spouted bed paddy drying with varied downcomer air flows and moisture contents: Effects on drying kinetics, critical moisture content, and milling quality. *Drying Technology*. 2005; 23: 473–95.
- (3) Soponronnarit S, Yapha M, Prachayawarakorn S. Cross-flow fluidized bed paddy dryer: Prototype and commercialization. *Drying Technology*. 1995; 13: 2116–207.
- (4) Inprasit C, Noomhorm A. Effect of drying air temperature and grain temperature of different types of dryer and operation on rice quality. *Drying Technology*. 2001; 19: 389–404.
- (5) Tirawanichakul S, Prachayawarakorn S, Warayanond W, Tungtrakul P, Soponronnarit S. Effect of fluidized bed drying temperature on various quality attributes of paddy. *Drying Technology*. 2004; 22: 1731–54.
- (6) Kaensup W, Kulwong S, Wongwises S. A small-scale pneumatic conveying dryer of rough rice. *Drying Technology*. 2006; 24: 105–13.
- (7) Nimmol C, Devahastin S. Evaluation of performance and energy consumption of an impinging stream dryer for paddy. *Applied Thermal Engineering*. 2010; 30: 2204–12.
- (8) Fukuda M, Tsuchiya F, Ryokai K, Mochizuki M, Mashiko K. Development of an artificial permafrost storage using heat pipes. *Proceedings of 7th International Heat Pipe Conference*; 1990 May 21–25, Minsk, USSR.
- (9) Lee WS, Chen BR, Chen SL. Latent heat storage in a two-phase thermosyphon solar water heater. *Journal of Solar Energy Engineering*. 2006; 128: 69–76.
- (10) Chen BR, Chang YW, Lee WS, Chen SL. Long-term thermal performance of a two-phase thermosyphon solar water heater. *Solar Energy*. 2009; 83: 1048–55.
- (11) Ritthong W, Jansatidpaiboon P, Aim-eiam T, Wongsuwan W, Nuntaphan A, Kiatsiriroat T. Performance analysis of thermosyphon assisted adsorption cooling system. *The 3rd International Conference on “Sustainable Energy and Environment (SEE 2009)”*; 2009 May 18–23, Bangkok, Thailand.
- (12) Wongsuwan W, Ritthong W, Nuntaphan A, Kiatsiriroat T. Performance analysis of a modular adsorption cooling system having sonic vibration at evaporator. *Journal of Energy Engineering*. 2011; 137: 99–107.
- (13) Dussadee N, Kiatsiriroat T. Performance analysis and economic evaluation of thermosyphon paddy bulk storage. *Applied Thermal Engineering*. 2004; 24: 401–14.
- (14) Dussadee N, Punsasensri T, Kiatsiriroat T. Temperature control of paddy bulk storage with aeration-thermosyphon heat pipe. *Energy Conservation and Management*. 2007; 48: 138–45.

- (15) Nimmol C, Devahastin S, Swasdisevi T, Soponronnarit S. Drying and heat transfer behavior of banana undergoing combined low-pressure superheated steam and far-infrared radiation drying. *Applied Thermal Engineering*. 2007; 27: 2483–94.
- (16) Ong KS, Haider-E-Alahi Md. Performance of a R-134a-filled thermosyphon. *Applied Thermal Engineering*. 2003; 23: 2373–81.
- (17) Sonntag RE, Borgnakke C, Wylen GL. *Fundamentals of Thermodynamics*, 5th ed. John Wiley & son; 1998.
- (18) Tirawanichakul Y, Prachayawarakorn S, Varayanond W, Soponronnarit S. Simulation and grain quality for in-store drying of paddy. *Journal of Food Engineering*. 2004; 64: 405–415.
- (19) Srzednicki GS, Hou R, Driscoll RH. Development of a control system for in-store drying of paddy in Northeast China. *Journal of Food Engineering*. 2006; 77: 368–77.
- (20) Soponronnarit S, Chinsakoltanakorn S. Energy consumption patterns in drying paddy by various drying strategies. *Proceedings of a Regional Seminar on Alternative Energy Applications in Agriculture*; 1986 October 27–29, Chiangmai, Thailand.
- (21) Poomsa-ad N, Terdyothin A, Prachayawarakorn S, Soponronnarit S. Investigations on head rice yield and operating time in the fluidized-bed drying process: Experiment and simulation. *Journal of Stored Products Research*. 2005; 41: 387–400.
- (22) Krokida MK, Maroulis ZB, Saravacos GD. The effect of the method of drying on the colour of dehydrated products. *International Journal of Food Science and Technology*. 2001; 36: 53–9.