เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ: รวดเร็วและประหยัดพลังงาน

Free-Fall-Paddy Rice Dryer: A Fast and Energy Efficient Dryer

ทวิช จิตรสมบูรณ์[*] , โศรฎา แข็งการ และ เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000, โทร 0-4422-4410 โทรสาร 0-4422-4413, E-Mail: tabon@ccs.sut.ac.th
[*] ผู้แต่งหลัก

Tawit Chiitsomboon [*] , Sorada khaengkarn and Krienggrai Pechnumkheaw
School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology
Muang District, Nakorn Ratchasima 30000 Thailand Tel: 0-4422-4410 Fax: 0-4422-4413, E-mail: tabon@ccs.sut.ac.th
[*] corresponding author

บทคัดย่อ

การอบแห้งข้าวเปลือกเป็นกระบวนการสำคัญในอุตสาหกรรมข้าว ซึ่งใช้พลังงานและเวลามาก จึงได้คิดค้นวิธีการอบแห้งแบบใหม่ ที่รวดเร็วและประหยัดพลังงานกว่าเดิม ทั้งนี้โดยไม่เกิดผลเสียต่อคุณภาพเมล็ดข้าวสารที่ได้จากการขัดสี วิธีการนี้มีหลักการคือ เป่าอากาศร้อนเข้าทางด้านล่างของท่ออบแห้งที่ตั้งอยู่ในแนวดิ่งและออกทางด้านบน ซึ่งสวนทางกับข้าวเปลือกชื้นที่ตกลงมาโดยอิสระจากถังพักด้านบนด้วยแรงโน้มถ่วง ผลการทดลองเบื้องต้นของเครื่องอบแห้งนี้แสดงให้เห็นว่าลดความชื้นได้อย่างรวดเร็วโดยใช้เวลาในการอบแห้งเพียงประมาณ 30 วินาที แต่สามารถลดความชื้นข้าวเปลือกจำนวน 1.5 กก. จาก 23.75% d.b. ถึง 15.5% d.b. ได้ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100 °C ใช้พลังงานปฐมภูมิจำเพาะในการอบแห้งเท่ากับ 1.4 MJ/kgน้ำระเหย ซึ่งนับว่ารวดเร็วและประหยัดพลังงานมากเมื่อเทียบกับวิธีการอบแห้งแบบที่นิยมในปัจจุบัน

Abstract

Drying of paddy is an important process in rice industry which consumes a lot of time and energy. A new drying method is thus invented that is fast and energy efficient without adversely affecting the quality of milled rice. The working principle of this method is by blowing hot air underneath a vertical drying column within which the moist paddy is free falling from its top under gravity. Initial tests have shown very rapid drying rate. By using a resident time of about 30 seconds, 1.5 kg of paddy could be dried from 23.75% db. to 15.5% db. at air temperature of 100 C. The specific primary energy consumption was only 1.4 MJ/kg which is very efficient comparing to the current drying technology.

1. บทนำ

การอบแห้งข้าวเปลือกเป็นกระบวนการสำคัญในการผลิตข้าวสาร ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดที่จะได้ และคุณภาพข้าวสารขึ้นอยู่กับกระบวนการอบแห้งค่อนข้างมาก โดยทั่วไปหากอบแห้งอย่างรวดเร็วด้วยอุณหภูมิอากาศที่สูง จะทำให้เกิดการแตกหักมากและได้สีของข้าวที่หมองคล้ำลงไป [1, 2] และโดยทั่วไปแล้วหากอบแห้งอย่างรวดเร็วก็มักจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมากขึ้นเป็นเงาตามตัวด้วย วิธีการอบแห้งอันหลากหลายในปัจจุบันนี้จะมีการใช้พลังงานจำเพาะในการอบแห้ง (specific energy consumption) อยู่ในช่วง 4 – 15 MJ/kgน้ำระเหย [3] ในปัจจุบันเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด [4] กำลังเป็นที่นิยม และแบบสเปาเท็ดเบด [5] ก็แสดงศักยภาพที่ดี เนื่องจากสามารถอบแห้งข้าวเปลือกได้รวดเร็วและคุณภาพของข้าวที่อบแห้งก็เป็นที่ยอมรับได้ แต่ยังจำกัดอยู่เฉพาะใน การอบแห้งของช่วงที่มีความชื้นสูง โดยจะต้องนำไปเข้าเครื่องอบแห้งแบบความชื้นต่ำที่มีอัตราการอบแห้งช้าต่อไป ที่นิยมมากอีกประเภทคือเครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชมีการไหล (moving-bed) เช่น เครื่องแบบข้าวไหลในแนวดิ่งผ่านอากาศที่ไหลในแนวขวาง [6] และเครื่องแบบที่ข้าวและอากาศไหลสวนทางกันในแนวดิ่งโดยเมล็ดพืชไหลคลุกเคล้ากับอากาศผ่านแผ่นกั้นการไหล (เครื่องแบบ LSU) [6] เครื่องอบแห้งเหล่านี้มักจะใช้อุณหภูมิสูงในการอบแห้งเพื่อให้อบแห้งได้เร็วขึ้น แต่อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานก็สูงเช่นกัน สมชาติและคณะ (2545) [4] ได้ทดลองทำการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่เพิ่มเทคนิคการทำฐานสั่น เพื่อลดอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ พบว่ามีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ 5.36 MJ/kg น้ำที่ระเหย และความชื้นสุดท้าย 26% d.b. ซึ่งประหยัดพลังงานกว่าแบบไม่มีการสั่นประมาณ 7% ฐานิตและสมชาติ (2546) [5] พบว่า การใช้พลังงานในการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบสเปาเท็ดเบดที่

สามารถปรับอัตราการไหลอากาศเข้าดาวน์คัมเมอร์ มีค่าประมาณ 5.5 MJ/kg น้ำที่ระเหย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดลองการอบแห้งข้าวเปลือกแบบใหม่ที่ได้คิดค้น และเพื่อเปรียบเทียบความเร็วในการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งแบบใหม่นี้กับวิธีการอบแห้งที่เป็นที่นิยมในปัจจุบัน

2. เครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ

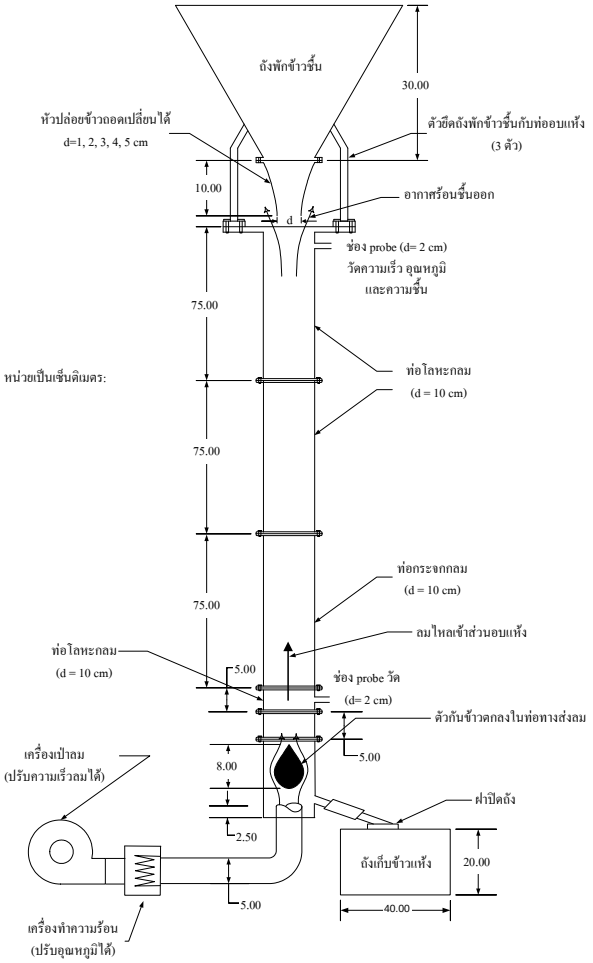
เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระนี้ ได้ถูกคิดค้นขึ้นโดยคาดหวังว่าจะสามารถอบแห้งได้อย่างรวดเร็ว ประหยัดพลังงาน และไม่เกิดผลเสียหายต่อเมล็ดข้าว ซึ่งจะทำให้ได้ข้าวเต็มเมล็ด (ข้าวต้น) เป็นปริมาณที่มาก อีกทั้งต้องได้คุณภาพที่ดีด้วยทั้งในด้านของกลิ่นและสีของข้าวสารด้วย

รูปที่ 1 แสดงให้เห็นถึงหลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบใหม่นี้คือ พัดลมจะเป่าอากาศผ่านขดลวดความร้อนเพื่อสร้างลมร้อนเข้าสู่ด้านล่างของท่ออบแห้งที่ตั้งอยู่ในแนวดิ่ง แล้วออกทางด้านบนที่ช่องทางออก ลมร้อนจะคลุกเคล้ากับข้าวเปลือกชั้นที่ตกลงมาโดยอิสระ (ไม่มีการกีดขวางใดๆ) จากถังพักด้านบนด้วยแรงโน้มถ่วง ในขณะที่ข้าวเปลือกชั้นอยู่ในท่ออบแห้งนั้นจะเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนและความชื้นกับข้าวเปลือกอย่างรวดเร็ว ทำให้ข้าวเปลือกแห้งลงอย่างรวดเร็ว แต่ข้าวเปลือกจะอยู่ในท่ออบแห้งเป็นระยะเวลาสั้นๆ เพียงประมาณ 1 วินาทีในแต่ละรอบ จากนั้นข้าวเปลือกจะออกจากท่ออบแห้งเข้าสู่ถังพักทางด้านล่าง

สำหรับเครื่องที่ใช้ในการทดลองนี้ถือเป็นเครื่องขนาดเล็กโดยมีท่ออบแห้งขนาด 10 cm. ความยาวท่อ 225 cm ขดลวดความร้อนขนาด 48 kW มอเตอร์พัดลมขนาด 0.86 kW ซึ่งสามารถปรับแต่งความร้อนและจำนวนรอบพัดลมได้อย่างต่อเนื่อง

วิธีการอบแห้งนี้เป็นการถ่ายเทความร้อนและความชื้นในท่ออบแห้งระหว่างเมล็ดข้าวเปลือกและอากาศแห้งโดยวิธีการพาแบบบังคับ (forced convection) โดยที่เมล็ดข้าวเปลือกมีความเร็วสูงเนื่องจากหล่นแบบอิสระด้วยแรงโน้มถ่วง (gravitational free fall) ซึ่งแตกต่างจากเครื่องอบแห้งอื่นๆ ที่ถึงแม้จะมีการไหลของเมล็ดพืชในแนวดิ่งสวนทางกับอากาศแต่มักจะมีตัวควบคุมการไหลให้เมล็ดพืชไหลอย่างช้าๆ เสมอ โดยเมล็ดพืชจะอยู่อย่างหนาแน่นภายในท่ออบแห้ง แล้วอากาศจะค่อยๆ ซึมผ่านขึ้นไป แต่เครื่องอบแห้งแบบใหม่นี้เมล็ดพืชจะไหลลงมาอย่างหลวมๆ ด้วยความเร็วสูง มีความพรุนสูง ทำให้พื้นที่สัมผัสในการถ่ายเทความร้อนและความชื้นเกิดมากขึ้น ที่สำคัญคือความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างอากาศกับเมล็ดพืชในเครื่องอบแห้งนี้จะมีค่ามาก ซึ่งทำให้มีอัตราการถ่ายเทมวลความชื้นที่สูงเป็นสัดส่วนกัน

ในการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด ถือได้โดยประมาณว่าลมร้อนวิ่งผ่านเมล็ดข้าวที่ลอยนิ่งอยู่ ก่อให้เกิดความเร็วสัมพัทธ์เท่ากับความเร็วลม (ประมาณ 2-4 m/s) ส่วนในการอบแบบสเปาเท็ดเบดนั้นเมล็ดข้าววิ่งไปตามกระแสลมซึ่งน่าจะก่อให้เกิดความเร็วสัมพัทธ์ประมาณเท่ากับแบบฟลูอิดไดซ์เบด สำหรับวิธีการอบแบบใหม่นี้จะได้ความเร็วสัมพัทธ์สูงมากเนื่องจากเป็นการไหลสวนทางกันในท่อที่มีความยาวพอสมควร พบว่าความเร็วลมที่ได้จะสูงกว่าความเร็วลมสุดท้ายที่สร้างการลอยตัวของเมล็ดข้าวมาก (terminal velocity) ทั้งนี้เป็นเพราะชั้นข้าวด้านบนหล่นลงมายังชั้นด้านล่างซึ่งเกิดแรงกระแทกลงสู่ด้านล่างสวนทางกับแรงฉุดของลม (drag) พบว่าสามารถสร้างความเร็วสัมพัทธ์ได้ถึงประมาณ 10 m/s



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระที่ใช้ในการทดลอง [7]

ความเร็วสัมพัทธ์ที่สูงและเวลาในการสัมผัสอากาศร้อนของเมล็ดพืชมีน้อย ย่อมทำให้อุณหภูมิที่ผิวเมล็ดข้าวมีค่าต่ำ และมีการทะลวงของความร้อนต่ำอีกด้วย ส่งผลให้มีการแตกร้าวน้อยและมีการหมองคล้ำเนื่องจากความร้อนน้อย

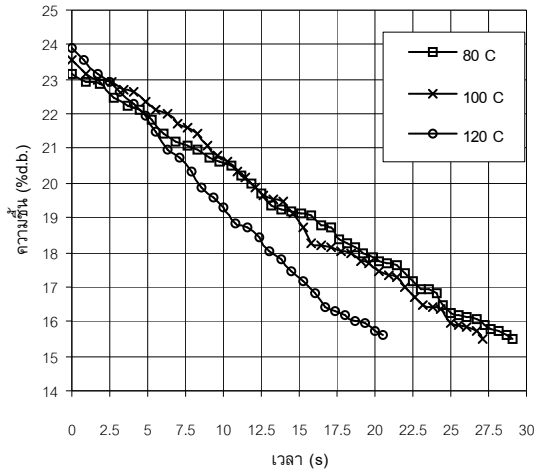
3. วิธีการทดลอง

ในการทดลอง ได้ใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 3 ระดับ คือ 80, 100 และ 120^{o}C ความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ย 6.642 m/s (เป็นการเฉลี่ยแบบ mass average) ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก 23.75% d.b. ทำการทดลองโดยเทข้าวเปลือกชื้น 600 g ใส่ถังพักด้านบน จากนั้นปล่อยให้ข้าวไหลผ่านท่ออบแห้งสู่ถังพักด้านล่างอย่างต่อเนื่องจนหมดถังพัก พร้อมจับเวลาที่ใช้ในการปล่อยข้าว เวลาที่เริ่มปล่อยข้าวเปลือกจนข้าวเปลือกตกถึงด้านล่างเริ่มแรก และเวลาที่เริ่มปล่อยข้าวเปลือกจนข้าวเปลือกตกหมดถังพัก แล้วนำมาเฉลี่ยหาค่าเวลาที่ข้าวเปลือกอยู่ในท่ออบแห้ง จากนั้นเก็บกลุ่มตัวอย่างในแต่ละรอบของการไหลผ่านท่อ

อบแห้งในปริมาณ 5 g บรรจุในถุงพลาสติกปิดปากถุงสนิท แล้วนำไปวัดความชื้นโดยนำข้าวเปลือกไปบดให้ละเอียดแล้วนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 130°C เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง จากนั้นปล่อยให้ข้าวมีระยะเวลาพักตัว 6 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปสีและตรวจสอบคุณภาพของข้าวต่อไป กล่าวคือ ปริมาณข้าวต้น และ ความขาวของข้าวสาร

4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์วิจารณ์

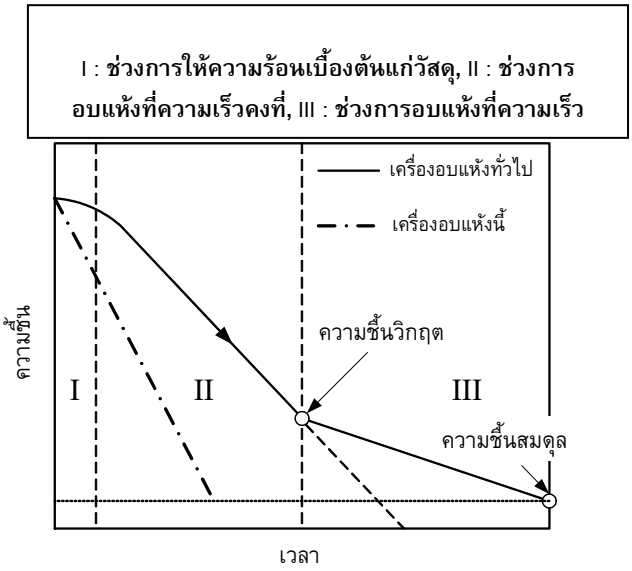
ผลทดลองการอบแห้งแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งเป็นผลของการใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 3 ระดับคือ 80, 100 และ 120 °C เวลาที่ข้าวอยู่ในเครื่องอบประมาณ 25 วินาที ซึ่งเวลาที่ข้าวอยู่ในท่ออบแห้งแต่ละรอบมีค่าประมาณเพียง 1 วินาที ดังนั้นจึงเป็นการอบประมาณ 20 รอบ จะเห็นว่าการใช้อุณหภูมิสูงจะอบแห้งได้เร็วกว่าอุณหภูมิต่ำ แต่ไม่มากนัก



รูปที่ 2 ความชื้นของข้าวเปลือกเทียบต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

ปรากฏการณ์สำคัญที่สุดในรูปนี้คือเส้นกราฟการอบแห้งเกือบเป็นเส้นตรง ซึ่งหมายความว่าไม่เกิดช่วงอัตราอบแห้งถดถอยเหมือนดังเช่นกรณีการอบแห้งโดยวิธีอื่นๆ (รูปที่ 3)

เหตุผลที่วิธีอบแห้งนี้ไม่เกิดอัตราถดถอยในช่วงความชื้นต่ำนั้น สันนิษฐานว่าเกิดจากการที่ความเร็วสัมพัทธ์สูงมากนั่นเองซึ่งทำให้เกิดสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความชื้นแบบการพาที่ผิวเมล็ดข้าวสูงตลอดเวลา ซึ่งสูงกว่าอัตราการแพร่ความชื้นภายในของเมล็ดข้าวที่แพร่ออกมายังผิวข้าว อีกทั้งอัตราการแพร่ความชื้นของเมล็ดข้าวก็สูงตลอดเวลาด้วย เนื่องจากเกิดความชันของความชื้นที่ผิวสูง (moisture gradient) อันเป็นผลมาจากอัตราการพาที่สูงนั่นเอง



รูปที่ 3 อัตราการอบแห้งวิธีใหม่เทียบกับวิธีทั่วไป

อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ หาได้จากพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือก

$$Q = \dot{m}_a \left(\left(1 - M_v\right) c_a + c_v W_a \right) \left(T_{out} - T_{in} \right) \Delta t \qquad (1)$$

ซึ่งการคำนวณหาอัตราไหลมวลนั้นหาจากสูตร $\dot{m}_a = \rho A \overline{V}$ โดย $\overline{V}$ เป็นความเร็วเฉลี่ยที่ได้จากการวัดและการเฉลี่ยแบบถ่วงด้วยปริมาณมวล (ซึ่งในที่นี้มีค่า 6.64 m/s) สำหรับกรณีอุณหภูมิอบแห้ง 120 °C คำนวณได้ $Q = 115.16$ kJ เมื่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้งคือ 20.57 s ส่วนอัตราการระเหยน้ำออกในการอบแห้งหาได้จาก

$$w_1 - w_2 = d\left(M_1 - M_2\right) \qquad (2)$$

ด้วยเหตุที่ว่าเริ่มต้นอบแห้งด้วยข้าวจำนวน **600 g** และได้นำตัวอย่างข้าวออกไปชั่งวัดความชื้นทุก **5 g** ต่อครั้งดังนั้นจึงต้องใช้สูตรจากสมการ **(2)** นี้ในทุกรอบการอบเนื่องจากค่า d ลดลงทุกรอบ แล้วนำค่ามารวมกัน เป็นจำนวนน้ำที่ระเหยออกทั้งหมด ซึ่งในกรณีนี้ได้ค่า **38 g** ดังนั้นพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำออกหรืออัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะของเครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลองคือ

$$E = \frac{115.16}{0.038} = 3.03 \qquad \text{MJ/kg น้ำระเหย}$$

สำหรับการอบที่อุณหภูมิ 100 และ 80 °C จะได้การสิ้นเปลืองพลังงานเป็น 3.14 และ 2.4 MJ/kg ตามลำดับ การเปรียบเทียบเครื่องอบแห้งนี้กับเครื่องแบบฟลูอิดไดซ์เบด [4] และแบบสเปาเท็ดเบด [5] แสดงอยู่ในตารางที่ 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเครื่องแบบข้าวหล่นอิสระมีความสิ้นเปลืองพลังงานน้อยกว่าทั้งสองแบบ ทั้งนี้พึงตระหนักในเงื่อนไขในการทดลองต่างๆดังนี้

1. การทดลองนี้กระทำในย่านความชื้นต่ำซึ่งโดยทั่วไปแล้วเป็นย่านที่สิ้นเปลืองพลังงานมากกว่าย่านความชื้นสูง
2. ด้วยข้อจำกัดของงบประมาณจึงยังไม่สามารถสร้างเครื่องทดลองอบแห้งแบบต่อเนื่องได้ จึงเป็นการอบแบบเป็นขยักโดยแต่ละรอบการเทข้าวห่างกันประมาณ 1 นาที
3. ปริมาณข้าว 600 g ที่ใช้นั้นถือว่าน้อยมาก ทำให้อากาศตรงทางออกยังไม่ชื้นมากนัก ซึ่งส่งผลให้ข้าวเปลือกตรงด้านท้ายแห้งเร็วกว่าปกติ และอากาศก็ยังมีศักยภาพในการอบแห้งเหลืออยู่มาก จึงสามารถสันนิษฐานได้ว่าถ้าเป็นการอบแห้งแบบต่อเนื่องจะใช้เวลาในการอบแห้งมากกว่านี้ในขณะที่จะประหยัดพลังงานมากกว่านี้
4. ในการทดลองครั้งหลังได้ลองใช้ข้าวมากขึ้นเป็น 1.5 kg อบด้วยอุณหภูมิ 100 °C ใช้เวลาอบ 32 วินาที ซึ่งคำนวณพลังงานจำเพาะที่ใช้เพียง 1.43 MJ/kg เท่านั้น

ตารางที่ 2 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานของเครื่องอบแห้งแบบต่างๆ

ชนิดของเครื่องอบ	Drying Temp. (°C)	Initial moisture content (% db)	Final moisture content (% db)	primary energy consumption (MJ/kg)
หล่นอิสระ (การทดลองนี้)	80	23	15.5	2.4
	100			3.14
	120			3.03
	100 (1.5 กก)			1.43
ฟลูอิดไดซ์เบดฐานสั่น [4]	125	26.8	23.7	5.47
	133	24.1	20.7	4.69
	140	28	23	3.8
สเปาเท็ดเบด [5]	110	33.5	19	12.2
		33.5	20	11.7
		33.5	17.5	11
		33.5	17.5	10.3
	130	33.5	16.5	12.7
		33.5	15	12.0
		33.5	14.5	11.1
		33.5	12.5	10.7
	150	33.5	15	13.9
		33.5	13	13.3
		33.5	13	13.1
		33.5	12	12.2

ในการทดลองยังได้นำข้าวไปสีเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณข้าวต้นและสีของข้าว เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างมาตรฐาน ผลปรากฏว่าได้ปริมาณข้าวต้นและสีขาวเทียบเท่าตัวอย่างมาตรฐาน [7] จึงสรุปได้ว่าการอบแห้งนี้จะไม่ทำให้ข้าวแตกหักมากขึ้นหรือมีสีหมองคล้ำลงไปแต่ประการใด ซึ่งในการอบจริงระดับอุตสาหกรรมนั้นข้าวจะไหลผ่านท่ออบที่ร้อนเพียงประมาณ 2 วินาทีเป็นอย่างมาก จากนั้นก็จะรอพักในถังพักขนาดใหญ่เพื่อรอเข้าสู่การอบในรอบต่อไป ซึ่งการรอพักนี้ข้าวน่าจะเย็นตัวลงเท่าอุณหภูมิห้อง เพราะเป็นการพักนาน (อาจประมาณ 20 นาที ขึ้นอยู่กับปริมาณข้าว) ประกอบกับความร้อนที่เกิดขึ้นก็จะเกิดเฉพาะที่บริเวณผิวข้าวเป็นชั้นบางๆเท่านั้น เนื่องจากข้าวสัมผัสอากาศร้อนเพียง 2 วินาที และ ยังมีความเร็วสัมพัทธ์สูงอีกด้วย

5. สรุป

ผลการทดลองบ่งให้เห็นถึงศักยภาพของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระว่ามีความรวดเร็วในการอบแห้งและประหยัดพลังงาน โดยสามารถอบแห้งได้ตั้งแต่ในช่วงปริมาณความชื้นที่สูงจนถึงย่านความชื้นกักเก็บ (15% db.) โดยไม่เกิดความช้าลงของการอบ (อัตราถดถอย) และยังไม่ทำให้ข้าวสารที่ได้จากการสีมีการแตกหักเพิ่มเติมหรือมีสีหมองคล้ำอีกด้วย ในงานทดลองขั้นต่อไปจะทดสอบการอบแห้งแบบต่อเนื่องเพื่อหาจุดออกแบบที่เหมาะสมของเครื่องอัตราการอบแห้ง และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานของเครื่องต่อไป

6. เอกสารอ้างอิง

1. นิรชรา ศรีสุบัติ, สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และทิพาพร อยู่วิทยา, “ของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่มีต่ออัตราการเหลืองของข้าวเปลือกชื้น,” วารสารเกษตรศาสตร์ (วิทย.), ปีที่ 32, หน้า 309-318, 2541
2. ไมตรี แนวพนิช, (ม.ป.ป.), “คุณภาพของข้าวเปลือก,” กลุ่มงานวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยว กองการเกษตรวิศวกรรมกรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
3. Marier, D. E., “Grain Drying System,” 2002 Facility Design Conference of the Grain Elevator & Processing Society, USA, 2002
4. สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, สมบูรณ์ เวชกามา, สุวัฒน์ ตรูทัศนวินท์ และวุฒิกรณ์ จริยตันติเวทย์, “การออบแบบ ทดสอบ และหาแนวทางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลบนฐานสั่น,” วารสารราชบัณฑิตยสถาน ปีที่ 27 ฉบับที่ 1, ม.ค.-มี.ค. 2545
5. ฐานิตย์ เมธิยานนท์ และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์, “การอบแห้งเมล็ดพืชที่อุณหภูมิสูงโดยเทคนิคสเปาเท็ดเบดที่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราการไหลอากาศเข้าดาวน์คัมเมอร์ได้,” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17, ต.ค. 2547
6. D.B. Brooker, F.W. Bakker-Arkema, C.W. Hall, *Drying and Storage of Grains and Oilseeds*, Van Nostrand Reinhold, Newyork, 1992

7. จุฑาทิพย์ ทองเดชาสามารถ, “การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันแบบใหม่" วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2545

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

<u>สัญลักษณ์</u>

Q = พลังงานความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้อากาศ kJ

E = อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ MJ/Kg

w = มวลข้าวเปียก kg

d = มวลข้าวแห้ง kg

M = อัตราส่วนความชื้นข้าวเปลือก มาตรฐานแห้ง kg/kg

M_v = ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศ kg/kg

$\dot{m}_a$ = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้ง kg/s

V = ความเร็วกระแสอากาศ m/s

A = พื้นที่หน้าตัดของท่อออบ m^2

ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศ kg/m^2

c_a = ความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง kJ/kg-K

c_v = ความร้อนจำเพาะของไอน้ำในอากาศ kJ/kg-K

W_a = อัตราส่วนความชื้นของอากาศอบแห้ง kJ/kg-dry air

t = เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

T_{out} = อุณหภูมิออกจากขดลวดความร้อน °C

T_{in} =อุณหภูมิก่อนเข้าขดลวดความร้อน °Cบทคัดย่อ