



ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้หอบแห้งชนิดท่อเกลียว

Energy Efficiency of Paddy Dehydration Process using Pneumatic Dryer with Spiral-pipe Drying Column

ฉัตรชัย นิมมล¹*

Chatchai Nimmol¹*

¹ภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

*Correspondent author: ccnimmol@gmail.com

Received September 30, 2011

Accepted January 26, 2012

บทคัดย่อ

เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมถือเป็นหนึ่งในเครื่องอบแห้งที่มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงที่เหมาะสมสำหรับการลดความชื้นที่ผิวของวัสดุอนุภาคซึ่งรวมถึงข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวมาใหม่ อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งดังกล่าวยังสามารถเพิ่มขึ้นได้อีก ในงานวิจัยนี้ หอบแห้งชนิดท่อเกลียวได้ถูกติดตั้งแทนหอบแห้งแบบดั้งเดิม (ท่อเรียบ) เพื่อเพิ่มความปั่นป่วนในการไหลของอากาศซึ่งถูกใช้เป็นตัวกลางในการอบแห้ง จากนั้น ผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิของอากาศขาเข้า (อุณหภูมิอบแห้ง) ความเร็วของอากาศและอัตราการป้อนข้าวเปลือก ที่มีต่อความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ของเครื่องอบแห้งได้ถูกศึกษา ผลที่ได้ยังถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลในกรณีใช้หอบแห้งชนิดท่อเรียบ จากการศึกษาพบว่า เครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้ถึง 4.4 ถึง 10.3% (d.b.) ภายในระยะเวลาอันสั้น (น้อยกว่า 5 s) โดยความชื้นต่ำสุดของข้าวเปลือกที่ได้มีค่า 17.7% (d.b.) นอกจากนี้ยังพบว่า SEC ของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่พัฒนาขึ้นมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับ SEC ในกรณีใช้หอบแห้งชนิดท่อเรียบในทุกเงื่อนไขการทดลอง ในงานวิจัยนี้ SEC ต่ำที่สุดมีค่า 1.78 MJ/kg_{water} ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อใช้หอบแห้งชนิดท่อเกลียวที่อุณหภูมิ 100 °C ความเร็วของอากาศ 30 m/s และอัตราการป้อนข้าวเปลือก 150 kg_{dry solid}/h

Abstract

Pneumatic dryer is one of the energy efficient dryers for removing surface moisture of particulate materials including freshly-harvested paddy. However, energy efficiency of dryer can still be improved. In this study, a spiral-pipe drying column was applied to the drying system instead of a conventional drying column (smooth pipe) in order to enhance the turbulence of hot air used as the drying medium. The effects of various operating

parameters, i.e., inlet air temperature, air velocity and paddy feed flow rate, on the final moisture content of paddy and specific energy consumption (SEC) of the dryer were then studied. Comparison was also made with the smooth-pipe drying column results. It was found that the developed pneumatic dryer could reduce the moisture content of paddy by 4.4 to 10.3% (d.b.) within a very short period of time (less than 5 s) and the minimum moisture content of dried paddy was found to be 17.7% (d.b.). In addition, SEC of the developed dryer was lower than that of the conventional dryer at all drying conditions. In this study, the lowest value of SEC was found to be 1.78 MJ/kg_{water} when spiral-pipe drying column was applied at drying temperature of 100 °C, air velocity of 30 m/s and paddy feed flow rate of 150 kg_{dry solid}/h.

คำสำคัญ : ข้าวเปลือก ความชื้นที่ผิว เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม ท่อเกลียว พลังงานจำเพาะ

Keywords : paddy, surface moisture, pneumatic dryer, spiral pipe, specific energy

1. บทนำ

โดยทั่วไป ข้าวเปลือก (paddy) ที่เก็บเกี่ยวมา ส่วนใหญ่มักมีความชื้นค่อนข้างสูงกล่าวคือประมาณ 20 ถึง 24% (w.b.) (หรือ 25 ถึง 32% (d.b.)) ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้ข้าวเกิดความเสียหายจากเชื้อราในระหว่างการเก็บรักษา ดังนั้นจึงจำเป็นต้องลดความชื้นของข้าวเปลือกให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษาซึ่งโดยปกติแล้วต้องลดความชื้นของข้าวเปลือกลงเหลือประมาณ 13 ถึง 15% (w.b.) (หรือ 15 ถึง 18% (d.b.)) การลดความชื้นข้าวเปลือกสามารถทำได้โดยใช้เครื่องอบแห้งหลายชนิด เช่น เครื่องอบแห้งแบบสปาดี้ดเบด (spouted bed dryer) (1-2) เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบด (fluidized bed dryer) (3-5) หรือเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำ (impinging stream dryer) (6) เป็นต้น

ด้วยเหตุที่ข้าวเปลือกเป็นวัสดุที่มีลักษณะเป็นอนุภาค (particulate material) เช่นเดียวกับวัสดุทางการเกษตรอีกหลายชนิด ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (pneumatic dryer) กระบวนการลดความชื้นวัสดุของเครื่องอบแห้งแบบนี้จะเกิดขึ้นภายในท่อแนวตั้งที่เรียกว่าหออบแห้ง (drying column) ซึ่งอากาศร้อนที่ใช้เป็นตัวกลางในลดความชื้นจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงไปพร้อมกับวัสดุที่ต้องการลดความชื้น ส่งผลให้ความชื้นในวัสดุระเหยออกไปยังกระแสอากาศ เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมถือเป็นเครื่องอบแห้งที่มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงชนิดหนึ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อนำ

มาใช้ลดความชื้นวัสดุซึ่งมีความชื้นที่ผิวสูง (7-9) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากกระบวนการลดความชื้นเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอซึ่งเป็นผลมาจากการที่วัสดุกระจายในตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งอย่างทั่วถึง ทำให้มีพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อนมากแม้ว่าเวลาที่วัสดุอยู่ในระบบจะสั้นมากก็ตาม นอกจากนี้เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมยังสามารถนำไปใช้กับกรณีอบแห้งแบบต่อเนื่อง (ป้อนวัสดุเข้าระบบอย่างต่อเนื่อง) ได้อีกด้วยซึ่งถือเป็นข้อดีของการนำเครื่องอบแห้งแบบนี้ไปใช้ในระดับอุตสาหกรรม ด้วยเหตุผลที่กล่าวข้างต้น เครื่องอบแห้งชนิดนี้จึงถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรมากมาย โดย Kaensup และคณะ (10) ได้แสดงให้เห็นว่าเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมมีศักยภาพมากพอที่จะนำมาใช้ในการลดความชื้นข้าวเปลือก ซึ่งจากการศึกษาพบว่าความชื้นของข้าวเปลือกสามารถลงได้ 5 ถึง 6% (เทียบกับความชื้นเริ่มต้น) โดยใช้เวลาเพียง 3 ถึง 4 s เท่านั้น

ถึงแม้ว่าเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมสามารถลดความชื้นของวัสดุลงได้มากเมื่อเทียบกับระยะเวลาที่ใช้ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบนี้มีค่าสูง (10-11) แต่ยังคงมีความเป็นไปได้ที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานดังกล่าวให้สูงขึ้นอีก โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับประสิทธิภาพการใช้พลังงานความร้อนซึ่งถือเป็นแหล่งพลังงานหลักสำหรับเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม หนึ่งในวิธีที่สามารถทำให้บรรลุวัตถุประสงค์ข้างต้นได้คือการเพิ่มความปั่นป่วนในกระโหลกของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งขณะไหลผ่านหออบ

แห่ง การทำเช่นนี้จะเป็นการเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (heat transfer coefficient) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร (mass transfer coefficient) ระหว่างตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้ง (อากาศร้อน) และวัสดุที่นำมวลความชื้น (12-13)

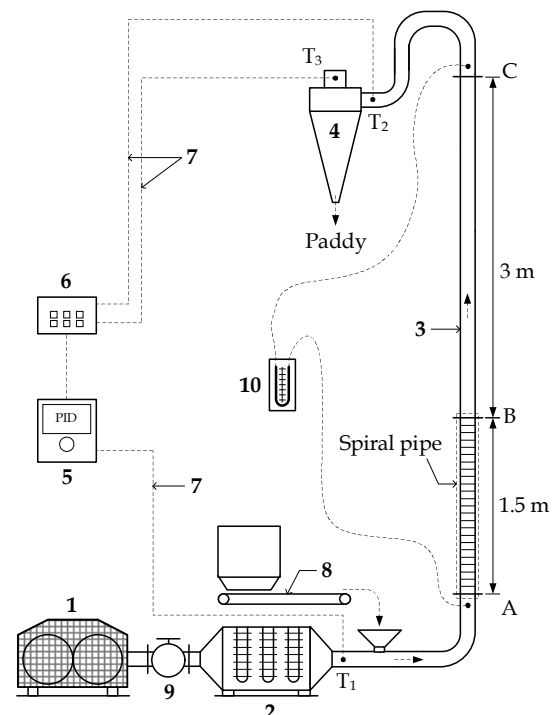
วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการพัฒนากระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือกโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่มีหอบแห้งเป็นท่อเกลียว (spiral pipe) โดยหอบแห้งแบบท่อเกลียวได้ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อเพิ่มความปั่นป่วนของอากาศร้อนภายในหอบแห้ง (เพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน) หลังจากนั้นจะศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ (เช่น อุณหภูมิของอากาศที่ป้อนเข้าเครื่องอบแห้ง ความเร็วของอากาศและอัตราการป้อนวัสดุ) ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกและต่อความสิ้นเปลืองพลังงานในกระบวนการลดความชื้น นอกจากนี้ ความดันลด (pressure drop: P) ของอากาศที่ผ่านหอบแห้งและเวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบ (particle mean residence time) ยังได้ถูกประเมินเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับยืนยันปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น โดยผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมดจะนำไปเปรียบเทียบกับกรณีใช้หอบแห้งชนิดท่อเรียบ

2. วิธีวิจัย

2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 1 แสดงแผนผังเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้ในงานวิจัยซึ่งประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก ดังนี้ 1) พัดลมแรงดันสูง (root blower) (Heywel, RSS-80, Taiwan) ซึ่งสามารถสร้างอัตราการไหลของอากาศได้ $8.4 \text{ m}^3/\text{min}$ ที่ความดัน $4000 \text{ mm.H}_2\text{O}$ โดยทำหน้าที่ป้อนอากาศเข้าสู่ระบบเพื่อเป็นตัวกลางในการอบแห้งและเพื่อพาข้าวเปลือกให้เคลื่อนที่ในระบบ 2) ชุดทำความร้อนด้วยไฟฟ้า (electric heater) ขนาด 15 kW ทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิให้กับตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้ง (ในที่นี้คืออากาศ) 3) หอบแห้ง ซึ่งทำจากท่อสเตนเลส (SUS304) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 mm และยาว 4.5 m โดยหอบแห้งเป็นบริเวณที่การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสาร (ความชื้น) เกิดขึ้น 4) ไซโคลน (cyclone

collector) ทำหน้าที่แยกข้าวเปลือกออกจากกระแสอากาศ 5) ชุดควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller) แบบ PID (Shinko, JSC-33A, Japan) ซึ่งมีความแม่นยำในการควบคุม $\pm 1^\circ\text{C}$ และทำงานโดยอาศัยอุณหภูมิของอากาศที่เข้าสู่ระบบ (T_1) เป็นตัวควบคุมการทำงานของชุดทำความร้อน 6) เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (data logger) (Hioki, 8421-51, Japan) ใช้สำหรับบันทึกอุณหภูมิของอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ 7) เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ซึ่งทำหน้าที่ส่งค่าอุณหภูมิที่วัดได้ไปเก็บไว้ที่เครื่องบันทึกอุณหภูมิ 8) สายพานป้อนวัสดุ (belt feeder) ที่สามารถปรับอัตราการป้อนวัสดุได้ซึ่งทำหน้าที่ป้อนข้าวเปลือกเข้าเครื่องอบแห้ง 9) โกลบวาล์ว (globe valve) ทำหน้าที่ปรับความเร็วของอากาศที่เข้าสู่ระบบ โดยความเร็วของอากาศจะถูกวัดที่ทางออกของชุดทำความร้อนด้วยท่อปีโต (pitot tube) ซึ่งต่ออยู่กับอุปกรณ์ประมวลผล (Testo, 435-4, Germany) และ 10) มานอมิเตอร์ (manometer) ซึ่ง



1) พัดลมแรงดันสูง 2) ชุดทำความร้อนด้วยไฟฟ้า 3) หอบแห้ง 4) ไซโคลน 5) ชุดควบคุมอุณหภูมิ 6) เครื่องบันทึกอุณหภูมิ 7) เทอร์โมคัปเปิล 8) สายพานป้อนวัสดุ 9) โกลบวาล์ว 10) มานอมิเตอร์

รูปที่ 1. แผนผังของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม

ทำหน้าที่วัดความดันแตกต่าง (ความดันลด) ของอากาศที่เข้าและออกจากหอบแห้ง ในที่นี้ได้หุ้มฉนวนความร้อนให้กับอุปกรณ์ของเครื่องอบแห้งไว้ทั้งหมดเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนให้กับอากาศแวดล้อม

จากรูปที่ 1 จะเห็นว่า หอบแห้งมีความสูงรวมทั้งในส่วนของท่อผิวเรียบและท่อเกลียวเท่ากับ 4.5 m (จุด A ถึง C) แต่หอบแห้งในส่วนที่เป็นท่อเกลียว (จุด A ถึง B) ซึ่งผิวภายในมีลักษณะเป็นคลื่นมีความสูง 1.5 m (อากาศที่ไหลผ่านท่อเกลียวในช่วงนี้จะมี ความปั่นป่วนในการไหลสูง) ในกรณีที่ต้องการศึกษาประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งโดยใช้หอบแห้งที่มีลักษณะเป็นท่อผิวเรียบ ท่อเกลียวดังกล่าวจะถูกถอดออก (ท่อช่วง A-B) จากนั้นจึงนำท่อผิวเรียบซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความยาวเท่ากันมาติดตั้งทดแทน

2.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ข้าวเปลือกเป็นวัสดุตัวอย่างในการทดลอง โดยข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 28% (d.b.) ถูกเตรียมโดยการเติมน้ำตามจำนวนที่กำหนดเข้าไปผสมกับข้าวเปลือก จากนั้นจึงนำข้าวเปลือกดังกล่าวไปเก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นระยะเวลา 2 วัน ก่อนเริ่มการทดลอง ข้าวเปลือกจะถูกนำออกจากตู้เย็นเพื่อผึ่งในบรรยากาศเป็นระยะเวลาประมาณ 20 min (ปรับอุณหภูมิของข้าวเปลือกให้เท่ากับอุณหภูมิห้อง) ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงการควบแน่นของไอน้ำที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการทดลอง

2.3 วิธีทดลอง

ในขั้นแรก พัดลมแรงดันสูงและชุดทำความร้อนจะทำงานก่อน เมื่ออุณหภูมิของอากาศที่ทางออกของชุดทำความร้อน (T_1) เพิ่มขึ้นจนถึงค่าที่กำหนด ข้าวเปลือกจะถูกป้อนด้วยสายพานป้อนวัสดุเข้าสู่ระบบในอัตราที่กำหนด การเก็บตัวอย่างข้าวเปลือก (เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือก) ที่ทางออกของไซโคลนจะเริ่มขึ้นเมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงตัว (พิจารณาจากการที่อุณหภูมิของอากาศ T_1 และ T_2 มีค่าคงที่) จากการทดลองในเบื้องต้นพบว่าระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัวหลังจากป้อนข้าวเปลือกเข้าระบบแล้วประมาณ 120 s

(ประมาณ 2 min) ซึ่งในแต่ละเงื่อนไขการทดลองจะเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งจำนวน 3 ครั้งโดยมีช่วงห่างของเวลาในการเก็บตัวอย่างเท่ากัน ค่าความชื้นของตัวอย่างข้าวเปลือกสามารถหาได้โดยการนำข้าวเปลือกดังกล่าวมาอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 h หลังจากนั้นจึงคำนวณค่าความชื้นของข้าวเปลือกจากมวลของข้าวเปลือกทั้งก่อนนำเข้าตู้อบและหลังนำออกจากตู้อบ

การทดลองจะกระทำโดยใช้อุณหภูมิอบแห้ง (drying temperature: T) ซึ่งหมายถึงอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากชุดทำความร้อน (T_1) เท่ากับ 80 90 และ 100 °C อัตราการป้อนข้าวเปลือกเข้าระบบ (W_p) เท่ากับ 150 175 และ 200 $\frac{\text{kg dry solid}}{\text{h}}$ และความเร็วของอากาศที่ใช้ในการพาข้าวเปลือกให้เข้าสู่หอบแห้ง (V) เท่ากับ 20 และ 30 m/s โดยการทดลองในเงื่อนไขข้างต้นจะกระทำทั้งกรณีหอบแห้งมีลักษณะเป็นท่อเกลียวและท่อเรียบ ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ซึ่งผลที่ได้ในแต่ละการทดลองจะแสดงในรูปของค่าเฉลี่ยซึ่งจะนำมาเปรียบเทียบความแตกต่างโดยใช้ Duncan's Test ค่าเฉลี่ยข้างต้นจะพิจารณาให้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อ $p = 0.05$

2.4 เวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบ

เพื่อยืนยันผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกและต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้ง เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอนุภาค (ในที่นี้คือข้าวเปลือก) อยู่ในระบบที่เงื่อนไขการทดลองต่างๆ จะถูกประเมิน โดยในงานวิจัยนี้ เวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบ (ตั้งแต่เข้าสู่ระบบจนกระทั่งออกจากเครื่องอบแห้งที่ทางออกของไซโคลน) สามารถประเมินได้จาก (14)

$$\tau = m_p / W_p \quad (1)$$

โดยที่ τ คือ เวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบ (s) m_p คือ ปริมาณของข้าวเปลือกที่ค้างในระบบ (particle hold-up) (kg) และ W_p คือ อัตราการป้อนข้าวเปลือก (kg/s)

ปริมาณข้าวเปลือกที่ค้างในระบบ (m_p) สามารถหาได้โดยเดินเครื่องอบแห้งให้ได้เงื่อนไขการอบ

แห้งที่กำหนด หลังจากนั้นจึงป้อนข้าวเปลือกเข้าระบบ เมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงตัวแล้ว ให้หยุดการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบฉับพลัน (ทั้งพัดลมแรงดันสูงและสายพานป้อนวัสดุ) ซึ่งจะส่งผลให้ข้าวเปลือกบางส่วนค้างอยู่ในระบบ หลังจากนั้นให้พัดลมแรงดันสูงทำงานอีกครั้ง (โดยไม่ต้องป้อนข้าวเปลือกเข้าระบบเพิ่ม) เพื่อไล่ข้าวเปลือกที่ค้างในระบบออกที่ทางออกของไซโคลนจนหมด สุดท้ายให้นำข้าวเปลือกที่ได้ออกจากระบบมาชั่งซึ่งมวลของข้าวเปลือกที่ชั่งได้ก็คือปริมาณของข้าวเปลือกที่ค้างในระบบนั่นเอง

2.5 ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้ง

พลังงานที่ใช้ในการลดความชื้นข้าวเปลือก ประกอบด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่พัดลมแรงดันสูงเพื่อทำให้อากาศสามารถพาข้าวเปลือกให้ไหลในระบบได้ และพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ชุดทำความร้อนเพื่อสร้างพลังงานความร้อนให้แก่อากาศที่ใช้เป็นตัวกลางในการอบแห้ง

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (specific energy consumption: SEC) เป็นดัชนีแสดงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือก โดยค่า SEC แสดงให้ทราบถึงพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำ (ความชื้น) จำนวน 1 kg ออกจากข้าวเปลือกซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ (6)

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

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้ง ($\text{MJ/kg}_{\text{water}}$) E คือ ผลรวมของพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่พัดลมแรงดันสูงและชุดทำความร้อน (MJ) ซึ่งสามารถวัดได้โดยตรงด้วยมาตรวัดความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า และ m_{water} คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากข้าวเปลือก (kg_{water}) ซึ่งประเมินได้จากความแตกต่างระหว่างความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกตามสมการต่อไปนี้ (6)

$$m_{\text{water}} = W_p (X_i - X_o) t \quad (3)$$

เมื่อ X_i และ X_o คือ ความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือก ตามลำดับ (kg/kg d.b.) และ t คือ เวลาที่

ใช้ในการลดความชื้น (h)

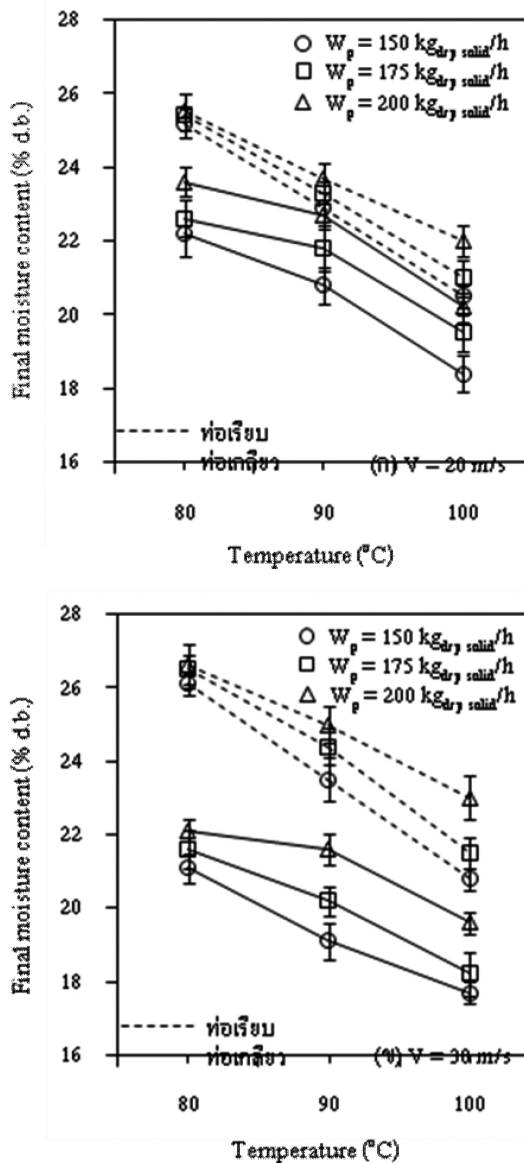
3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือก

รูปที่ 2 และ 3 แสดงอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือก (ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 28% (d.b.)) เมื่อผ่านการลดความชื้นด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมทั้งกรณีใช้หอบแห้งชนิดท่อเรียบและท่อเกลียวซึ่งแสดงในรูปของความชื้นสุดท้าย (final moisture content) ของข้าวเปลือกที่ออกจากเครื่องอบแห้ง (ที่ทางออกของไซโคลน)

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิของอากาศ (อุณหภูมิอบแห้ง) ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกทั้งกรณีใช้หอบแห้งชนิดท่อเรียบและท่อเกลียวจะพบว่าความชื้นของข้าวเปลือกที่ออกจากเครื่องอบแห้งมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอบแห้ง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มสูงขึ้นความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศ (ตัวกลางในการอบแห้ง) และอุณหภูมิผิวของข้าวเปลือกจะเพิ่มสูงขึ้นตาม ส่งผลให้แรงขับเคลื่อนสำหรับการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสาร (ความชื้น) มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ความชื้นที่ผิวของข้าวเปลือกเกิดการระเหยได้มากกว่า ปรากฏการณ์ดังกล่าวมีลักษณะเช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นกับเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมของ Kaensup และคณะ (10) และเครื่องอบแห้งแบบกระแสนซึ่งนิยมใช้ในการลดความชื้นที่ผิวของวัสดุอนุภาค (6,15)

ในกรณีของอัตราการป้อนข้าวเปลือก (รูปที่ 2) พบว่าการใช้อัตราการป้อนข้าวเปลือกน้อยจะทำให้ข้าวเปลือกที่ออกจากเครื่องอบแห้งมีความชื้นต่ำกว่า (ลดความชื้นได้มากกว่า) เมื่อเทียบกับการใช้อัตราการป้อนข้าวเปลือกมาก ทั้งนี้เนื่องจากการใช้อัตราการป้อนข้าวเปลือกน้อย (ข้าวเปลือกจะอยู่ในระบบน้อยกว่า) ข้าวเปลือกสามารถกระจายตัวในกระแสอากาศได้ดีกว่า ซึ่งส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนของอากาศให้กับข้าวเปลือกทำได้ง่ายกว่า นอกจากนี้ยังทำให้ภาระของเครื่องอบแห้งในการลดความชื้นข้าวเปลือกมีน้อยกว่าด้วย โดยผลที่ได้ข้างต้นมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันทั้งกรณีใช้หอบแห้งชนิดท่อเรียบและท่อเกลียว

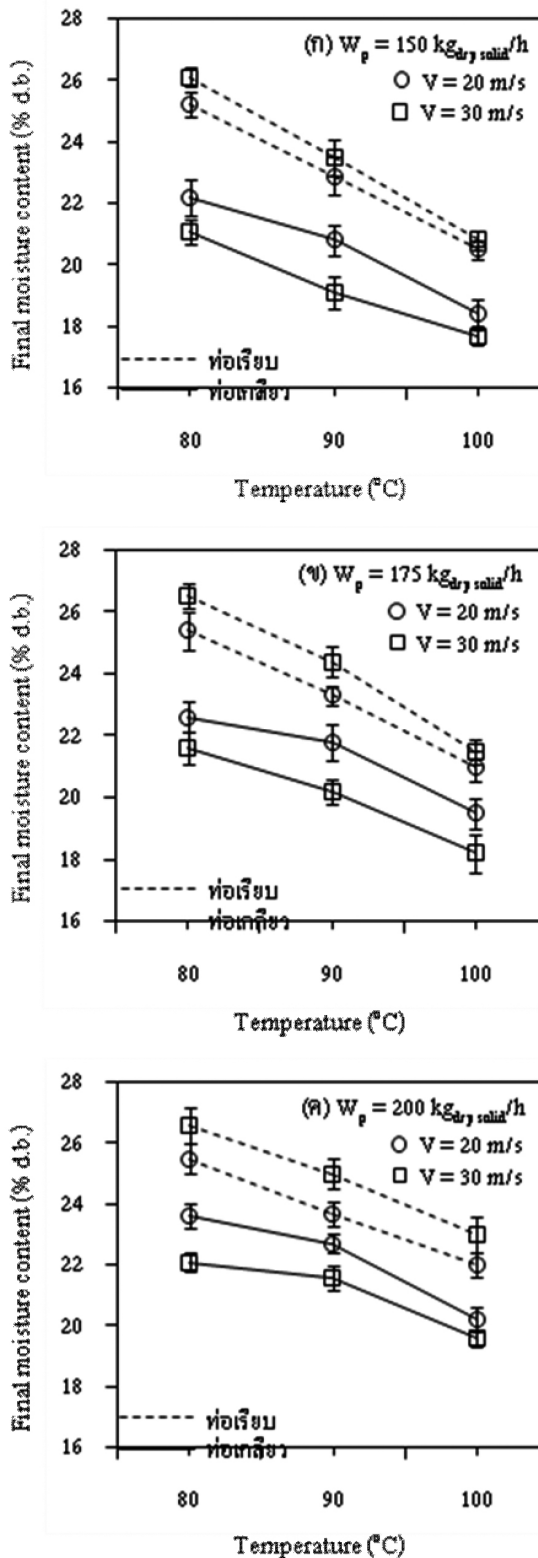


รูปที่ 2. อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งและอัตราการป้อนข้าวเปลือกที่มีต่อความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือก

เมื่อพิจารณาความเร็วของอากาศหรือความเร็วขาเข้าเครื่องอบแห้ง (รูปที่ 3) พบว่า ในกรณีของหอบแห้งชนิดท่อเรียบ การใช้ความเร็วของอากาศต่ำ (20 m/s) จะทำให้ข้าวเปลือกที่ออกจากเครื่องอบแห้งมีความชื้นต่ำกว่า (ความชื้นลดลงมากกว่า) เมื่อเทียบกับการใช้ความเร็วของอากาศสูง (30 m/s) ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อใช้ความเร็วของอากาศต่ำ ข้าวเปลือกมีเวลาอยู่ในระบบ

นานกว่า (ดูตารางที่ 1) ส่งผลให้ข้าวเปลือกมีเวลาแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศได้นานกว่าเช่นกัน ความชื้นจึงระเหยออกจากผิวข้าวเปลือกได้มากกว่า (จะกล่าวรายละเอียดของเวลาที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบภายหลัง) ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kaensup และคณะ (10) อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้จะมีลักษณะตรงข้ามเมื่อใช้หอบแห้งชนิดท่อเกลียว กล่าวคือ ข้าวเปลือกที่ออกจากเครื่องอบแห้งจะมีความชื้นต่ำกว่าหากใช้ความเร็วของอากาศสูง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากในกรณีของหอบแห้งชนิดท่อเกลียว ความปั่นป่วนในการไหล (ซึ่งแปรผันตามความเร็วของอากาศ) ถือเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสาร ส่วนเวลาที่ข้าวเปลือกอยู่ในหอบแห้งเป็นปัจจัยรอง ดังนั้น การใช้ความเร็วของอากาศสูงจะส่งเสริมให้ความปั่นป่วนในการไหลของอากาศสูงขึ้น ความหนาของฟิล์มอากาศที่อยู่รอบผิวของข้าวเปลือกจึงลดลงมากกว่า (เมื่อเทียบกับกรณีใช้ความเร็วของอากาศต่ำ) ส่งผลให้ความต้านทานต่อการถ่ายเทความร้อนและมวลสารที่ผิวข้าวเปลือกลดลง ความชื้นจึงระเหยออกจากผิวของข้าวเปลือกได้มากและเร็วกว่า (6,15)

รูปที่ 2 และ 3 ยังแสดงให้เห็นอิทธิพลของชนิดของหอบแห้งที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือก จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า การใช้หอบแห้งชนิดท่อเกลียวจะทำให้ความชื้นของข้าวเปลือกที่ออกจากเครื่องอบแห้งมีค่าต่ำกว่า (ลดความชื้นได้มากกว่า) เมื่อเทียบกับกรณีใช้หอบแห้งชนิดท่อเรียบในทุกเงื่อนไขการทดลอง อย่างไรก็ตาม ค่าความชื้นของข้าวเปลือกที่ออกจากเครื่องอบแห้งทั้งกรณีใช้หอบแห้งชนิดท่อเรียบและท่อเกลียวจะมีความแตกต่างกันมากเมื่อความเร็วของอากาศที่ใช้มีค่ามาก (30 m/s) ดังแสดงในรูปที่ 2ก และ 2ข ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากในกรณีของหอบแห้งชนิดท่อเกลียว ความเร็วของอากาศที่เพิ่มขึ้นถือเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลอย่างมากต่อความปั่นป่วนของอากาศในหอบแห้ง ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ความชื้นระเหยออกจากผิวของข้าวเปลือกได้มากและเร็วกว่าดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้หอบแห้งชนิดท่อเกลียวที่ความเร็วของอากาศสูงจะช่วยลดความชื้นของข้าวเปลือกลงได้เป็นอย่างมาก



รูปที่ 3. อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งและความเร็วของอากาศที่มีต่อความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือก

เมื่อพิจารณาค่าความชื้นของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้ง จะพบว่า ความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกที่ออกจากเครื่องอบแห้งมีค่าอยู่ในช่วง 26.6 ถึง 20.1% (d.b.) สำหรับหอบแห้งชนิดทอเรียบ และ 23.6 ถึง 17.7% (d.b.) สำหรับหอบแห้งชนิดทอเกลียว นั่นหมายความว่า เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกกลงได้ประมาณ 1.4 ถึง 7.9% (d.b.) สำหรับหอบแห้งชนิดทอเรียบ และประมาณ 4.4 ถึง 10.3% (d.b.) สำหรับหอบแห้งชนิดทอเกลียว (ดูตารางที่ 2) เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมซึ่งใช้หอบแห้งชนิดทอเรียบที่พัฒนาโดย Kaensup และคณะ (10) จะเห็นว่า เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมชนิดทอเกลียวที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกกลงได้มากกว่า

เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งแบบสเปาตัดเบด (16) และฟลูอิดไชเบด (17) ซึ่งสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกกลงได้ 3 ถึง 8% (d.b.) และ 3 ถึง 11% (d.b.) ตามลำดับ จะเห็นว่า ค่าความชื้นของข้าวเปลือกที่ลดลงได้ไม่แตกต่างจากการใช้เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมในงานวิจัยนี้มากนัก อย่างไรก็ตาม เวลาที่ใช้ในการลดความชื้น รวมถึงอุณหภูมิอบแห้งที่ใช้สำหรับการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งทั้งสองชนิดข้างต้นกลับมีค่าสูงกว่ามาก ซึ่งปัจจัยทั้งสองนี้ล้วนส่งผลให้พลังงานที่ใช้ในการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งทั้งสองชนิดข้างต้นมีค่ามากกว่าเช่นกัน นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งแบบกระแสน (6) ซึ่งสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้ 3.4 ถึง 7.7% (d.b.) (ใช้อุณหภูมิอบแห้ง 110 ถึง 150 °C) จะพบว่า เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้หอบแห้งชนิดทอเกลียวสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกกลงได้มากกว่า แต่กลับใช้อุณหภูมิอบแห้งต่ำกว่ามาก

3.2 เวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบ

เวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบ (τ) ที่เงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 1 จะเห็นว่า เวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบสำหรับงานวิจัยนี้มีค่าอยู่ในช่วง 2.01 ถึง 3.04 s สำหรับกรณีหอบแห้งชนิดทอเรียบ และ 2.42 ถึง 4.28 s สำหรับกรณีหอบแห้งชนิดทอเกลียว นอกจากนี้ อุณหภูมิของอากาศ (อุณหภูมิอบ

ตารางที่ 1. เวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบและความดันลดของอากาศที่ผ่านหอบแห้ง

เงื่อนไขการทดลอง				τ (s)	ΔP (mm.H ₂ O)
ชนิดของหอบแห้ง	T (°C)	W _p (kg _{dry solid} /h)	V (m/s)		
ท่อเรียบ	80	150	20	2.35 ± 0.12 ^{de}	60
			30	2.11 ± 0.12 ^b	110
		175	20	2.55 ± 0.03 ^g	60
			30	2.13 ± 0.07 ^b	110
		200	20	3.04 ± 0.03 ^{kl}	61
			30	2.30 ± 0.09 ^{cd}	111
	90	150	20	2.33 ± 0.07 ^{de}	60
			30	2.03 ± 0.10 ^b	110
		175	20	2.57 ± 0.10 ^g	60
			30	2.14 ± 0.17 ^b	110
		200	20	2.94 ± 0.13 ^{kj}	61
			30	2.31 ± 0.17 ^{cd}	111
	100	150	20	2.30 ± 0.19 ^{cd}	58
			30	2.01 ± 0.12 ^a	110
		175	20	2.58 ± 0.13 ^g	60
			30	2.12 ± 0.07 ^b	110
		200	20	2.93 ± 0.13 ^{ij}	61
			30	2.25 ± 0.09 ^c	111
ท่อเกลียว	80	150	20	3.05 ± 0.05 ^l	111
			30	2.45 ± 0.03 ^f	381
		175	20	3.36 ± 0.10 ^o	121
			30	2.96 ± 0.08 ^{jk}	391
		200	20	4.28 ± 0.07 ^t	140
			30	3.88 ± 0.11 ^r	410
	90	150	20	3.05 ± 0.13 ^l	111
			30	2.44 ± 0.03 ^f	381
		175	20	3.26 ± 0.04 ⁿ	121
			30	2.86 ± 0.03 ⁱ	390
		200	20	4.16 ± 0.06 ^s	131
			30	3.77 ± 0.05 ^q	411
	100	150	20	3.05 ± 0.14 ^l	110
			30	2.42 ± 0.06 ^{ef}	380
		175	20	3.15 ± 0.02 ^m	120
			30	2.78 ± 0.06 ^h	390
		200	20	4.13 ± 0.04 ^s	131
			30	3.69 ± 0.07 ^p	410

ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในกลุ่มเดียวกันหมายความว่าค่าดังกล่าวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

($p < 0.05$)

แห้ง) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่ส่งผลกระทบต่อเวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบ อย่างไรก็ตาม ทั้งอัตราการป้อนข้าวเปลือก ความเร็วของอากาศ และลักษณะของหอบแห้งที่ใช้ (ท่อเรียบหรือท่อเกลียว) กลับเป็นตัวแปรหลักที่ส่งผลโดยตรงต่อเวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบ

ในกรณีของอัตราการป้อนข้าวเปลือก พบว่าข้าวเปลือกจะอยู่ในระบบนานขึ้นเมื่ออัตราการป้อนข้าวเปลือกมีค่าเพิ่มขึ้น (ป้อนข้าวเปลือกเข้าระบบมากขึ้น) ทั้งนี้เป็นเพราะปริมาณข้าวเปลือกที่ค้างในระบบ (m) มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราการป้อน โดยผลที่ได้มีแนวโน้มคล้ายคลึงกันทั้งกรณีใช้หอบแห้งชนิดท่อเรียบและท่อเกลียว ถึงแม้ว่าเวลาที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบจะนานกว่า แต่การที่มีข้าวเปลือกในระบบมากกว่าจึงส่งผลให้ภาระของเครื่องอบแห้งในการลดความชื้นข้าวเปลือกเพิ่มมากขึ้นด้วย ความชื้นจึงระเหยออกจากผิวข้าวเปลือกได้น้อย เมื่อเทียบกับกรณีใช้อัตราการป้อนข้าวเปลือกต่ำ ดังนั้นข้าวเปลือกที่ออกจากเครื่องอบแห้งจึงมีความชื้นสูงกว่า (ลดความชื้นได้น้อยกว่า) ดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ นั้นหมายความว่า ในกรณีนี้ อัตราการป้อนข้าวเปลือกเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกมากกว่าเวลาที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบ

ในแง่ของความเร็วของอากาศที่ใช้ พบว่า การใช้ความเร็วของอากาศสูง (30 m/s) ส่งผลให้ข้าวเปลือกมีเวลาอยู่ในระบบน้อยกว่าอย่างชัดเจน (ทั้งกรณีใช้หอบแห้งชนิดท่อเรียบและท่อเกลียว) ทั้งนี้เป็นผลมาจากการใช้ความเร็วของอากาศสูง อากาศจะมีพลังงานจลน์มาก ส่งผลให้สามารถพาข้าวเปลือกให้ไหลผ่านระบบด้วยความเร็วสูงกว่าและไหลออกจากระบบอย่างรวดเร็ว ถึงแม้ว่าเวลาข้าวเปลือกอยู่ในระบบสั้นกว่า แต่การใช้ความเร็วของอากาศที่สูงเมื่อใช้หอบแห้งชนิดท่อเกลียวกลับส่งผลให้ความชื้นสามารถระเหยออกจากผิวข้าวเปลือกได้มากกว่า (ข้าวเปลือกที่ออกจากเครื่องอบแห้งมีความชื้นต่ำกว่า) ดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ นั้นแสดงว่า ในกรณีนี้ ความปั่นป่วนในการไหล (ซึ่งแปรผันตามความเร็วของอากาศ) เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกมากกว่าเวลาที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบ

เมื่อพิจารณาลักษณะของหอบแห้งที่ใช้ พบว่า การใช้หอบแห้งชนิดท่อเกลียวจะช่วยให้เวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบมีค่ามากกว่า (ข้าวเปลือกอยู่ในระบบนาน) เมื่อเทียบกับกรณีใช้ท่อเรียบในทุกเงื่อนไขการทดลอง ทั้งนี้เป็นผลมาจากอากาศที่ไหลผ่านหอบแห้งชนิดท่อเกลียวอยู่ภายใต้แรงต้านทานการไหลที่มากกว่า (จะแสดงให้เห็นภายหลังด้วยค่าความดันลด) ซึ่งถือเป็นเหตุผลหลักที่ทำให้เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมชนิดท่อเกลียวสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้มากกว่า

ตารางที่ 1 ยังแสดงให้เห็นค่าความดันลดของอากาศที่ผ่านหอบแห้ง (ΔP) จะเห็นว่า การใช้หอบแห้งชนิดท่อเกลียวจะส่งผลให้ความดันลด (หรืออีกนัยหนึ่งคือความต้านทานการไหลของอากาศในระบบ) มีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับกรณีท่อเรียบอย่างชัดเจน ปรากฏการณ์นี้ส่งผลให้เวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบสำหรับกรณีท่อเกลียวมีค่ามากกว่า (ข้าวเปลือกอยู่ในระบบนานกว่า) ดังที่ได้กล่าวไว้ตอนต้น นอกจากนี้ ความเร็วของอากาศที่สูงขึ้นยังส่งผลให้ความดันลดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน ทั้งนี้เป็นไปตามหลักทฤษฎีที่ว่าความต้านทานการไหลของอากาศแปรผันโดยตรงกับกำลังสองของความเร็วของอากาศ (18) อย่างไรก็ตาม ความเร็วของอากาศที่เพิ่มขึ้นกลับไม่ส่งผลให้ข้าวเปลือกอยู่ในระบบนานขึ้นนั้นหมายความว่า ในกรณีนี้ ปริมาณข้าวเปลือกที่ค้างในระบบส่งผลต่อเวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบมากกว่าความต้านทานในการไหลของอากาศในหอบแห้ง สำหรับอุณหภูมิของอากาศและอัตราการป้อนข้าวเปลือก พบว่า ตัวแปรทั้งสองไม่ส่งผลอย่างชัดเจนต่อความดันลดของอากาศที่ไหลผ่านหอบแห้ง

3.3 พลังงานที่ใช้ในกระบวนการลดความชื้น

ตารางที่ 2 แสดงค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่เงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ จะเห็นว่า SEC ที่ได้จะมีค่าอยู่ในช่วง 2.66 ถึง 8.69 MJ/kg_{water} สำหรับหอบแห้งชนิดท่อเรียบ และ 1.78 ถึง 3.09 MJ/kg_{water} สำหรับหอบแห้งชนิดท่อเกลียว นอกจากนี้ แนวโน้มของค่า SEC ที่ได้จะคล้ายคลึงกับผลของความชื้นของข้าวเปลือกที่ออกจากเครื่องอบแห้ง กล่าวคือ การลดความชื้นโดยใช้อุณหภูมิ

ตารางที่ 2. การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง

เงื่อนไขการทดลอง				$X_i - X_o$ (% d.b.)	SEC (MJ/kg _{water})
ชนิดของหอบแห้ง	T (°C)	W_p (kg _{dry solid} /h)	V (m/s)		
ท่อเรียบ	80	150	20	2.8	5.12
			30	1.9	8.32
		175	20	2.6	5.40
			30	1.5	8.39
		200	20	2.5	5.81
			30	1.4	8.69
	90	150	20	5.1	3.27
			30	4.5	3.96
		175	20	4.7	3.56
			30	3.2	4.36
		200	20	4.3	3.64
			30	3.0	4.67
	100	150	20	7.9	2.16
			30	7.6	2.22
		175	20	7.8	2.32
			30	7.0	2.53
		200	20	6.0	2.51
			30	5.0	3.00
ท่อเกลียว	80	150	20	5.8	2.81
			30	6.9	2.61
		175	20	5.4	2.92
			30	6.4	2.70
		200	20	4.4	3.09
			30	5.9	2.99
	90	150	20	7.2	2.43
			30	8.9	2.19
		175	20	6.2	2.56
			30	7.8	2.31
		200	20	5.3	2.58
			30	6.4	2.49
	100	150	20	9.6	1.84
			30	10.3	1.78
		175	20	8.5	1.99
			30	9.8	1.93
		200	20	7.8	2.12
			30	8.4	2.02

ของอากาศสูงและใช้อัตราการป้อนข้าวเปลือกมากจะส่งผลให้ SEC มีค่าลดลงทั้งในกรณีใช้หอบแห้งชนิดท่อเรียบและท่อเกลียว ทั้งนี้เป็นผลมาจากที่เงื่อนไขการอบแห้งดังกล่าว ความชื้นสามารถระเหยออกจากข้าวเปลือกได้มาก (ความชื้นเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่า SEC ในกรณีนี้) อย่างไรก็ตาม ความเร็วของอากาศกลับเป็นปัจจัยที่ทำให้แนวโน้มของค่า SEC สำหรับกรณีใช้หอบแห้งชนิดท่อเรียบและท่อเกลียวมีความแตกต่างกัน โดยค่า SEC ในกรณีใช้หอบแห้งชนิดท่อเรียบจะลดลงเมื่อใช้ความเร็วของอากาศต่ำ แต่ในกรณีใช้หอบแห้งชนิดท่อเกลียว ค่า SEC จะลดลงเมื่อใช้ความเร็วของอากาศสูง ทั้งนี้ก็ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับกรณีของความชื้นที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้

เป็นที่น่าสังเกตจากตารางที่ 2 ว่าการใช้หอบแห้งชนิดท่อเกลียวจะทำให้ SEC มีค่าต่ำกว่า (ประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงกว่า) เมื่อเทียบกับการใช้หอบแห้งชนิดท่อเรียบในทุกเงื่อนไขการทดลอง โดยเป็นผลมาจากปริมาณความชื้นที่ระเหยออกจากข้าวเปลือกในกรณีใช้หอบแห้งชนิดท่อเกลียวมีมากกว่านั่นเอง ความแตกต่างของค่า SEC ระหว่างการใช้หอบแห้งชนิดท่อเกลียวและท่อเรียบจะยังมีค่ามากเมื่อใช้ความเร็วของอากาศสูง (30 m/s) ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ความเร็วของอากาศสูงในกรณีหอบแห้งชนิดท่อเกลียวจะทำให้ความปั่นป่วนของอากาศในหอบแห้งมีมาก ความชื้นจึงระเหยออกจากผิวของข้าวเปลือกได้มากและเร็วกว่าดังที่กล่าวตอนต้น ในงานวิจัยนี้พบว่า SEC สำหรับกรณีใช้หอบแห้งชนิดท่อเกลียวมีค่าต่ำกว่า (ประหยัดพลังงานมากกว่า) กรณีใช้หอบแห้งชนิดท่อเรียบอยู่ในช่วง 14.2 ถึง 68.6% โดย SEC ต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ $1.78 \text{ MJ/kg}_{\text{water}}$ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 100°C ความเร็วของอากาศ 30 m/s และอัตราการป้อนข้าวเปลือก $150 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$

4. สรุป

เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมซึ่งใช้หอบแห้งชนิดท่อเกลียวได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการลดความชื้นของข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 28% (d.b.) ผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิของอากาศขาเข้า (อุณหภูมิอบแห้ง) ความเร็วของอากาศ อัตราการป้อนข้าวเปลือกที่มีต่อความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้งได้ถูกศึกษาจากการศึกษาพบว่า เครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้ถึง 4.4 ถึง 10.3% (d.b.) ภายในระยะเวลาอันสั้น (ต่ำกว่า 5 s) และความชื้นต่ำสุดของข้าวเปลือกที่ผ่านการลดความชื้นมีค่าเท่ากับ 17.7% (d.b.) ซึ่งต่ำกว่าความชื้นของข้าวเปลือกที่ผ่านการลดความชื้นด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมแบบดั้งเดิม (ใช้หอบแห้งชนิดท่อเรียบ) นอกจากนี้ยังพบว่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะหรือ SEC ของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้หอบแห้งชนิดท่อเกลียวมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับกรณีใช้หอบแห้งชนิดท่อเรียบในทุกเงื่อนไขการทดลอง โดยค่า SEC ต่ำสุดที่ได้ในงานวิจัยนี้คือ $1.78 \text{ MJ/kg}_{\text{water}}$ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 100°C ความเร็วของอากาศ 30 m/s และอัตราการป้อนข้าวเปลือก $150 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพสูงมากที่จะนำไปใช้ในการลดความชื้นขั้นต้นของข้าวเปลือก (โดยเฉพาะข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวมาใหม่ซึ่งมักมีความชื้นสูง) อย่างไรก็ตาม การศึกษาผลกระทบของปัจจัยข้างต้นที่มีต่อคุณภาพทางกายภาพของข้าวเปลือกที่ผ่านการลดความชื้นด้วยเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นนี้เป็นสิ่งที่ควรดำเนินการในอนาคตเพื่อยืนยันถึงความเป็นไปได้ที่จะนำเครื่องอบแห้งชนิดนี้มาใช้ในเชิงพาณิชย์

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (ทุนงบประมาณแผ่นดิน) และทุนสนับสนุนงานวิจัยของภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์

6. เอกสารอ้างอิง

- (1) Hung-Nguyen L, Driscoll RH, Szrednicki G. Drying of high moisture content paddy in a pilot scale triangular spouted bed dryer. *Drying Technology*. 2001; 19(2): 375–387.
- (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(3): 473–495.
- (3) Soponronnarit S, Yapha M, Prachayawarakorn S. Cross-flow fluidized bed paddy dryer: Prototype and commercialization. *Drying Technology*. 1995; 13(8&9): 2207–2116.
- (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(2): 389–404.
- (5) Tirawanichakul S, Prachayawarakorn S, Waranyanond W, Tungtrakul P, Soponronnarit S. Effect of fluidized bed drying temperature on various quality attributes of paddy. *Drying Technology*. 2004; 22(7): 1731–1754.
- (6) Nimmol C, Devahastin S. Evaluation of performance and energy consumption of an impinging stream dryer for paddy. *Applied Thermal Engineering*. 2010; 30(14&15): 2204–2212.
- (7) Kemp IC. Scale-up of pneumatic conveying dryers. *Drying Technology*. 1994; 12(1&2): 279–297.
- (8) Paixao AEA, Rocha SCS. Pneumatic drying in diluted phase: Parametric analysis of tube diameter and mean particle. *Drying Technology*. 1998; 16(9&10): 1957–1970.
- (9) Brode I, Levy A. Pneumatic and Frash Drying. In Mujumdar AS, Editor. *Handbook of Industrial Drying: Volume 1*, 3rd ed. New York: Marcel Dekker; 2006.
- (10) Kaensup W, Kulwong S, Wongwises S. A small-scale pneumatic conveying dryer of rough rice. *Drying Technology*. 2006; 24: 105–113.
- (11) Kaensup W, Kulwong S, Wongwises S. Comparison of drying kinetics of paddy using a pneumatic conveying dryer with and without a cyclone. *Drying Technology*. 2006; 24: 1039–1045.
- (12) Akpinar EK, Bicer Y, Midilli A. Modeling and experimental study on drying of apple slices in a convective cyclone dryer. *Journal of Food Process Engineering*. 2003; 26(6): 515–541.
- (13) Özbey M, Soylemez MS. Effect of swirling flow on fluidized bed drying of wheat grains. *Energy Conservation and Management*. 2005; 46(9&10): 1495–1512.
- (14) Kitron A, Buchmann R, Luzzatto K, Tamir A. Drying and mixing of solids and particles residence time distribution in four impinging streams and multistage two impinging streams reactor. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 1987; 26: 2454–2461.
- (15) Choicharoen K, Devahastin S, Soponronnarit S. Performance and energy consumption of an impinging stream dryer for high-

- moisture particulate materials. *Drying Technology*. 2010; 28: 20–29.
- (16) Madhiyanon T, Soponronnarit S, Tia W. Industrial-scale prototype of continuous spouted bed paddy dryer. *Drying Technology*. 2001; 19: 207–216.
- (17) Tirawanichakul S, Prachayawarakorn S, Tungtrakul P, Warunyanond W, Soponronnarit, S. Effect of drying temperature on physical property of high and low amylose content paddy. *Proceedings of the International Conference on Innovation in Food Processing Technology and Engineering*; 2002 Dec 11–13; Bangkok, Thailand.
- (18) Klinzing GE, Marcus RD, Rizk F, Leung LS. *Pneumatic Conveying of Solids-A Theoretical and Practical Approach*, 2nd ed. London: Chapman & Hall; 1997.