



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การอบแห้งเมล็ดวัสดุทางการเกษตรขณะขนถ่ายด้วยลมร้อนในท่อเกลียวแนวตั้ง

Pneumatic conveyor drying of agricultural seeds by using a Vertical Spiral pipe

รุ่งตะวัน วิวัฒน์ศิริกุล¹⁾* ศักดิ์ชัย ดรรดิ²⁾ พงษ์ภูไท อุดมอริยทรัพย์³⁾

วรเชษฐ์ แสงสีดา⁴⁾ และ กมลรักษ์ แก่งคำ⁵⁾

Rungtawan Wiwattanasirikul¹⁾ Sakchai Dondee²⁾ Pongputhai Udomariyasap³⁾ Worachate Sangsida⁴⁾

and Kamonrak Kangkham⁵⁾

^{1,2,3,4)} สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล โครงการจัดตั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ

167 ถนน ตาดโตน-ชัยภูมิ ตำบลนาฝาย อำเภอเมืองชัยภูมิ จังหวัดชัยภูมิ 36000

⁵⁾ สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต โครงการจัดตั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ

167 ถนน ตาดโตน-ชัยภูมิ ตำบลนาฝาย อำเภอเมืองชัยภูมิ จังหวัดชัยภูมิ 36000

^{1,2,3,4)} Department of Mechanical Engineering, The project to establish

the Faculty of Engineering and Industrial Technology Chaiyaphum Rajabhat University

167 Tat Ton-Chaiyaphum Road, Na Fai Subdistrict, Mueang Chaiyaphum District, Chaiyaphum Province 36000

⁵⁾ Department of Manufacturing Engineering, The project to establish

the Faculty of Engineering and Industrial Technology Chaiyaphum Rajabhat University

167 Tat Ton-Chaiyaphum Road, Na Fai Subdistrict, Mueang Chaiyaphum District, Chaiyaphum Province 36000

Received: 27 December 2019

Revised: 30 January 2021

Accepted: 1 February 2021

Available online: 14 June 2021

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบและศึกษาตัวแปร ได้แก่ ความเร็วของอากาศร้อน อัตราการป้อนวัสดุ อุณหภูมิอบแห้ง และความดันสูญเสียในท่ออบแห้ง ที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของการอบแห้ง ข้าวเปลือก มันสำปะหลังที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ข้าวโพด เมล็ดถั่วลิสง ด้วยเครื่องอบแห้งขณะที่มีการขนถ่ายวัสดุในท่อเกลียวแนวตั้ง ร่วมกับพลังงานความร้อนจากขดลวดความร้อน โดยใช้ลมเป็นพาหะ รวมถึงการใช้พลังงานของการอบแห้งของผลผลิตทางการเกษตรดังกล่าว จากการศึกษาพบว่า ที่ค่าความชื้น 95 % ความดันสูญเสียรวมของการไหลของวัสดุในท่อเกลียวแนวตั้งทั้ง 4 ชนิด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วของลมมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ที่ความเร็วของลมมีค่าคงที่เท่ากันที่อัตราการป้อนวัสดุเพิ่มขึ้นจะมีความดันสูญเสียเพิ่มขึ้น ที่อัตราการป้อนวัสดุคงที่ อุณหภูมิอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้การเปลี่ยนแปลงความชื้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเหมือนกันของวัสดุทั้ง 4 ชนิด จากการศึกษาที่อัตราการป้อนวัสดุต่ำสุดเท่ากับ 0.03 kg/s อุณหภูมิการอบแห้งเท่ากับ 90 °C ความเร็วลมเท่ากับ 20 m/s การเปลี่ยนแปลงความชื้นมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 7.73 % (w.b) และการใช้พลังงานสำหรับการอบแห้งมีค่าเท่ากับ 4.09 MJ/kg_{water} สำหรับข้าวเปลือก และมันสำปะหลัง มีค่าเท่ากับ 13.16 % (w.b) และเท่ากับ 1.39

MJ/kg_{water} สำหรับข้าวโพดและถั่วลิสง ที่อัตราการขนถ่ายวัสดุต่ำสุดเท่ากับ 0.03 kg/s อุณหภูมิอบแห้งสูงสุดเท่ากับ 70 °C ความเร็วลมเท่ากับ 20 m/s มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นสูงสุดเท่ากับ 2.64 % (w.b) และ 2.04 % (w.b) และการใช้พลังงานของการอบแห้งต่ำสุด เท่ากับ 6.94 MJ/kg_{water} และ 8.99 MJ/kg_{water} ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อวัสดุทั้ง 4 ชนิดอยู่ในระบบนาน จะทำให้วัสดุมีการแตกหักมากขึ้น

คำหลัก: ข้าวเปลือก มันสำปะหลัง ข้าวโพด ถั่วลิสง การอบแห้งในท่อเกลียวแนวตั้ง

Abstract

The purpose of this research was to test and study the variables, including hot air velocity, solid mass flow rate, drying temperature, and pressure drop in the drying pipe that influence of moisture content of paddy rice grain, cassava particles, corn and peanut seed with the vertical spiral pipe pneumatic conveyor drying combined with hot air from the electrical heater. Moreover, the energy consumption of each material was also studied. According to studies at the 95 % confidence level, it has been found that the pressure drop in vertical spiral pipe of four materials is similar to increase. Also at the constant air velocity, the solid mass flow rate was increased the pressure drop is increase. For the influence of drying temperature on moisture content of all four materials, it was found that at constant solid mass flow rate, the drying temperature increases, the trend of moisture changes is increase similar for all four materials. From the study of paddy rice grain and cassava particles, the minimum solid mass flow rate of 0.03 kg/s, drying temperature of 90 °C, drying air velocity of 20 m/s the moisture content was highest at 7.73% (w.b) and 13.16 % (w.b) with the minimum energy consumption of 4.09 MJ/kg_{water} and 1.39 MJ/kg_{water}, respectively. For the corn and peanut seed at the minimum solid mass flow rate of 0.03 kg/s, drying temperature of 70 °C, drying air velocity of 20 m/s the moisture content was highest at 2.64% (w.b), and 2.04 % (w.b) with the minimum energy consumption of 6.94 MJ/kg_{water} and 8.99 MJ/kg_{water}, respectively. It is also found that if the materials are in the system too long, the damage of particles is similar increase for all materials.

Keywords: Paddy: Cassava particles: Corn: Peanut seed: Drying in vertical spiral pipe

*ติดต่อ: w_rungtawan@hotmail.com, 061-954-8228, 044-815-146

1. บทนำ

ประเทศไทยจัดเป็นประเทศที่มีความอุดมสมบูรณ์และมีการทำการเกษตรเป็นจำนวนมาก ซึ่งจะมีผลผลิตทางการเกษตรเป็นจำนวนมากตามฤดูกาล โดยส่วนใหญ่ใช้บริโภคและขาย เป็นรายได้หลักของเกษตรกร นอกจากนี้ยังเป็นสินค้าส่งออกที่ทำรายได้เข้าประเทศต่อปีจำนวนมากแต่เนื่องจากผลผลิตทางการเกษตรที่ออกมาจำนวนมากในแต่ฤดูกาล ทำให้มีข้อจำกัดสำหรับระยะเวลาในการจำหน่ายส่งผลถึงคุณภาพและราคาที่ตกต่ำลง [1-2] จึงได้มีแนวคิด

จากภูมิปัญญาท้องถิ่น ศึกษาหลักการต่าง ๆ เพื่อเป็นการยืดระยะเวลาการเก็บรักษาผลผลิตเมล็ดพืชทางการเกษตร และสามารถลดการสูญเสียเวลาในการนำมาตากแดดเพื่อลดความชื้น นอกจากนี้ผลผลิตทางการเกษตร [3-4] ที่เป็นพืชเศรษฐกิจ ที่มีมากในเมืองไทยโดยเฉพาะในจังหวัดชัยภูมิ ได้แก่ ข้าวเปลือก มันสำปะหลัง ถั่วเหลือง ถั่วเขียว ถั่วลิสง ข้าวโพด เป็นต้น ล้วนมีความชื้นหลังการเก็บเกี่ยวสูง โดยเฉพาะข้าวเปลือก (Paddy) ที่เก็บเกี่ยวมาส่วนใหญ่มีความชื้นค่อนข้างสูงประมาณ 20 – 28 % มาตรฐานแห้ง [4-7] ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้เกิดความเสียหายจากเชื้อรา

ในระหว่างการเก็บรักษาได้ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องลดความชื้นของข้าวเปลือกให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษาซึ่งโดยปกติแล้วต้องลดความชื้นของข้าวเปลือกลงเหลือประมาณ 14% (มาตรฐานแห้ง) สำหรับผลผลิตทางการเกษตรอื่นก็เช่นกัน [1-2] ดังนั้นการลดความชื้นข้าวเปลือกและผลผลิตทางการเกษตรที่มีลักษณะเป็นเม็ดสามารถทำได้โดยใช้เครื่องอบแห้งหลายชนิดแทนการลดความชื้นโดยใช้วิธีเดิม คือ การนำผลผลิตตากแดด หรือการนำมาผึ่งลมไว้ในที่ร่ม เช่น เครื่องอบแห้งแบบสปูเบดเดयर (Spouted bed dryer) เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบด (Fluidized bed dryer) เครื่องอบแห้งแบบสายพานเคลื่อน เครื่องอบแห้งแบบถาดอยู่กับที่ เป็นต้น [1,3] เนื่องจากข้าวเปลือก มันสำปะหลังที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ข้าวโพด ถั่วลิสง เป็นวัสดุที่มีลักษณะเป็นอนุภาค (Particulate material) การลดความชื้นข้าวเปลือกและมันสำปะหลังที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ข้าวโพด ถั่วลิสง ด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Pneumatic dryer) จึงมีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพทางด้านพลังงานมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การลดความชื้นด้วยวิธีอื่น [1,3-5] โดยทั่วไปกระบวนการลดความชื้นวัสดุของเครื่องอบแห้งแบบนี้จะเกิดขึ้นภายในห้องอบแห้ง (Drying room) โดยอากาศร้อนที่ใช้เป็นตัวกลางในการลดความชื้นจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง [8-11] แบบไหลตามกันหรือแบบไหลสวนทางกันกับวัสดุที่ต้องการลดความชื้น ส่งผลให้ความชื้นในวัสดุระเหยออกไปยังกระแสอากาศ เนื่องจากกระบวนการลดความชื้นเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอซึ่งเป็นผลมาจากการที่วัสดุกระจายในตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งอย่างทั่วถึง ทำให้มีพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อนมากแม้ว่าเวลาที่วัสดุอยู่ในระบบจะสั้นมากก็ตาม [1,3, 8-13] นอกจากนี้เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมยังสามารถอบแห้งแบบต่อเนื่องได้อีกด้วย ซึ่งถือเป็นข้อดีของการนำเครื่องอบแห้งแบบนี้ไปใช้ในระดับครัวเรือน หรือในระดับอุตสาหกรรมได้ ด้วยเหตุผลที่กล่าวข้างต้น เครื่องอบแห้งชนิดนี้จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรอย่างแพร่หลาย โดยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมมีศักยภาพมากพอที่จะนำมาใช้ในการลดความชื้น ข้าวเปลือก มันสำปะหลังที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ข้าวโพด ถั่วลิสง

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมทั่วไปความชื้นของข้าวเปลือกสามารถลงได้ 5 ถึง 6% (เทียบกับความชื้นเริ่มต้น) โดยใช้เวลาเพียง 4 วินาที [2,4-6] เท่านั้น และเมื่อนำมาใช้กับการอบแห้งมันสำปะหลังที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ข้าวโพด ถั่วลิสง จะสามารถลดความชื้นผลผลิตทางการเกษตรดังกล่าวได้ดีเช่นกัน ถึงแม้ว่าเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมสามารถลดความชื้นของวัสดุลงได้มากเมื่อเทียบกับระยะเวลาที่ใช้ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบนี้มีค่าสูง [7-9] การเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมนี้อย่างยังสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนระหว่างวัสดุและลมร้อนขณะขนถ่ายโดยการเพิ่มการปั่นป่วนของกระแสลมหรือการลดระยะทางของการอบแห้งขณะที่มีการขนถ่ายวัสดุ โดยการเพิ่มพื้นที่การโอนความร้อนให้เหมาะสมกับวัสดุที่จะทำการอบแห้ง [11-14] ซึ่งจะต้องทำการศึกษาค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการทำงานของเครื่องอบแห้งประเภทนี้ให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุด จากข้อดีอีกประการหนึ่งคือเครื่องอบแห้งประเภทนี้ยังสามารถขนถ่ายวัสดุได้ในขณะที่มีการอบแห้งด้วย ซึ่งเป็นข้อดีที่จะประยุกต์ใช้กับรถเก็บเกี่ยวผลผลิตทางการเกษตรต่อไป

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการพัฒนาระบบการลดความชื้น ของข้าวเปลือก มันสำปะหลังที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ข้าวโพด ถั่วลิสง ทำการศึกษาดิถีพลของปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิของอากาศที่ป้อนเข้าเครื่องอบแห้ง ความเร็วของอากาศร้อน อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ และอากาศ ความชื้นของอากาศร้อนและของวัสดุ ความดันสูญเสียในระบบ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง และการใช้พลังงานในกระบวนการลดความชื้นของผลผลิตทางการเกษตรดังกล่าว

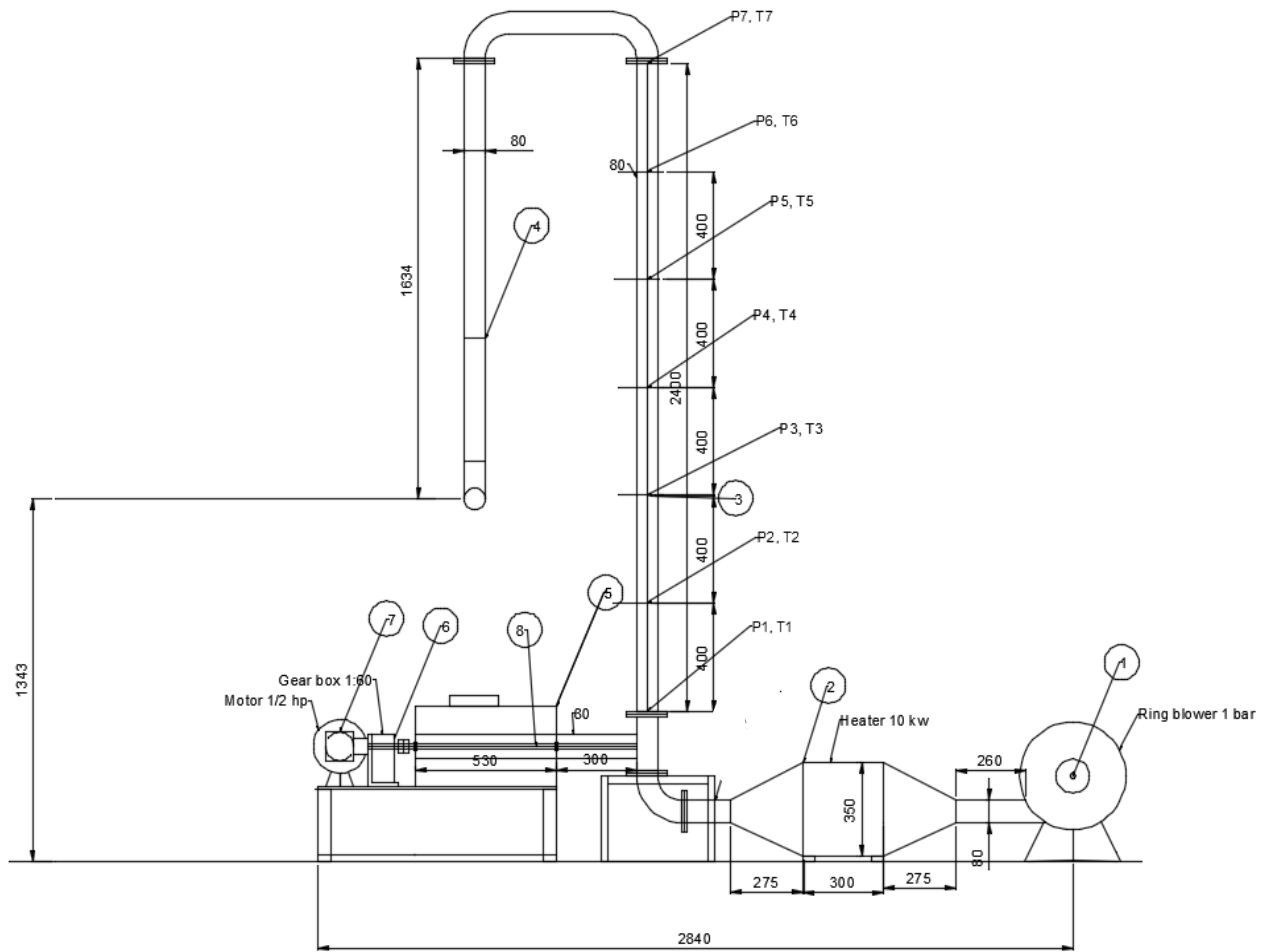
2. วิธีวิจัย

2.1 อุปกรณ์วิจัย

เครื่องขนถ่ายวัสดุด้วยลมร้อนแบบมีเกลียวในท่อแนวตั้งประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้ 1) พัดลมเป่าลม (Blower) ขนาด 200 cm³/min 1 เครื่อง 2) ห้องขดลดความร้อนขนาด 4 kw 3) ห้องอบแห้งแบบมีเกลียว ภายในท่อแนวตั้ง

(Drying chamber) เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm ยาว 2.0 m และ P1,T1-P7,T7 คือจุดที่วัดความดัน (Pressure tap) โดยใช้มานอมิเตอร์และวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K (T_1-T_5)

ตามลำดับ 4) ปล่องระบายอากาศและวัสดุ 5) ห้องพักวัสดุ 6) ชุดเฟืองทด 1:60 7) มอเตอร์กำลังขับชุดเฟืองทดส่งไปยังเครื่องป้อนวัสดุ 8) เกลียวป้อนวัสดุเพื่ออบแห้ง



รูปที่ 1 แผนผังของเครื่องอบแห้งแบบทอเกลียวแนวตั้ง

2.2. วัสดุที่ใช้ทดลอง

การศึกษากการเปลี่ยนแปลงความชื้นของผลผลิตทางการเกษตรที่ไหลผ่านทอเกลียวแนวตั้ง ในระบบที่มีความดันต่ำ (น้อยกว่า 1000 mmH₂O) โดยใช้ข้าวเปลือก มันสำปะหลัง ข้าวโพดและถั่วลิสง ที่มี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ความหนาแน่น รูปร่าง อัตราส่วนความพรุนของวัสดุ ที่ความเร็วของลม และอัตราการขนถ่ายวัสดุเท่ากัน ได้แสดงลักษณะพิเศษของความดันสูญเสียรวมในระบบขนถ่ายด้วยลมที่เกิดจากปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ความเร็วของลม (Air velocity) อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ (Solids mass flow rate)

2.3 วิธีการทดลอง

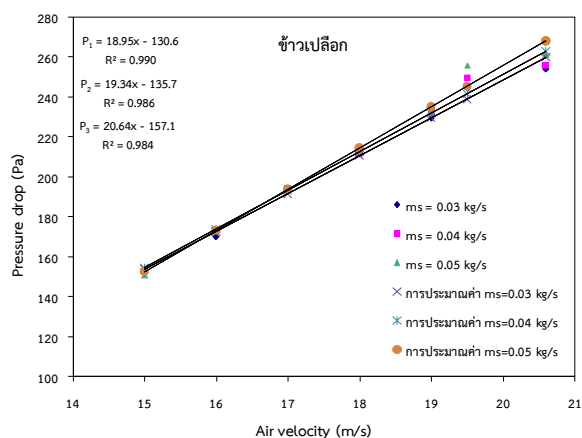
การทดลองได้ใช้เม็ดข้าวเปลือก มันสำปะหลัง ข้าวโพดและถั่วลิสง ที่มีขนาดแตกต่างกัน จึงต้องหาสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุได้แก่ ความหนาแน่นของกองวัสดุ (Bulk Density) ความหนาแน่นของจริงของเม็ดวัสดุ (True Density) ขนาดเฉลี่ยของวัสดุ (Mean diameters) ความเป็นทรงกลมของวัสดุ (Spheresity) จากนั้นทำการทดลองหาความดันสูญเสียและปัจจัยต่าง ๆ ในการขนถ่ายวัสดุ โดยนำวัสดุที่เตรียมไว้ใส่ใน Hopper จนถึงระดับที่ตั้งไว้ เปิด Rotary feeder บันทึกค่าความดันรวม (P_t) และความดันสถิต (P_s) ของ L-Type Pitot Tube บันทึกค่าความดันสถิตแตกต่าง (ΔP_s) ของทอวัดอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ ขณะขนถ่ายโดยการเปิดท่อระบาย

ให้วัสดุไหลมาใส่ในภาชนะที่เตรียมไว้โดยจับเวลาขณะที่เปิด จากนั้นนำวัสดุที่ได้ไปชั่งน้ำหนักและบันทึกผล คำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ (kg/s) วัดอุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออกของลมร้อน นำวัสดุที่ได้ไปชั่งหาค่ามวลก่อนอบและหลังอบ ปรับความถี่ของ Blower เพื่อเพิ่มความเร็วของลมร้อนและบันทึกค่า

3. ผลการวิจัยและการอภิปราย

อิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อค่าความดันสูญเสียรวมของการไหลของวัสดุด้วยลมแบบเบาบางของวัสดุทางการเกษตรทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ ข้าวเปลือก มันสำปะหลัง ข้าวโพดและถั่วลิสงได้อธิบายดังต่อไปนี้

ข้าวเปลือก อิทธิพลของความเร็วลมที่ใช้ขนถ่ายวัสดุด้วยลมในท่อขนาด 50 mm ของวัสดุทั้ง 4 ชนิดดังกล่าว ดังแสดงในรูปที่ 2 ถึงรูปที่ 5 จะเห็นว่าที่อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุคงที่ ความดันสูญเสียของวัสดุทั้ง 4 ชนิด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเร็วของลมและที่อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุเพิ่มขึ้น แนวโน้มของความดันสูญเสียเพิ่มขึ้นเหมือนกันสำหรับวัสดุทั้ง 4 ชนิด

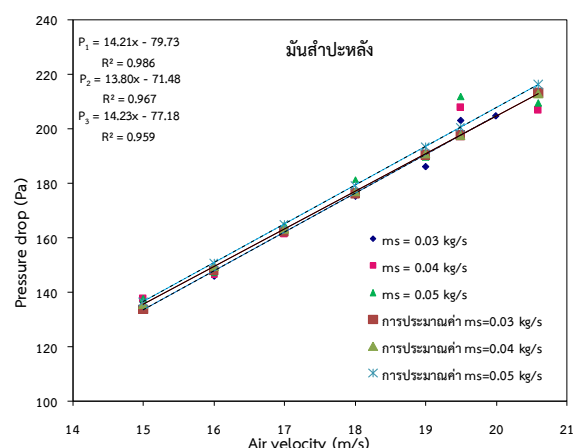


รูปที่ 2 อิทธิพลของความเร็วต่อความดันสูญเสียที่อัตราการไหลเชิงมวลต่าง ๆ ของข้าวเปลือก

รูปที่ 2 เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อขนถ่ายฯ มีค่าคงที่ ความดันสูญเสียรวมมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วของลมที่ใช้ขนถ่าย ที่อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุคงที่ค่าหนึ่ง และพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ค่าความเชื่อมั่น 95% ระหว่างความดันสูญเสีย กับความเร็วลม ในช่วงของการ

เปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ เท่ากับ 16.8% ความดันสูญเสียรวมเพิ่มขึ้นตามความเร็วลมฯ เท่ากับ 96.77% เมื่อเปรียบผลการทดลองกับผลการทำนายด้วยสมการจะพบว่าความดันสูญเสียที่อัตราการไหลเชิงมวลของข้าวเปลือก 0.03 kg/s 0.04 kg/s 0.05 kg/s มีค่า R-Squared เท่ากับ 0.990 0.986 และ 0.984 ตามลำดับ

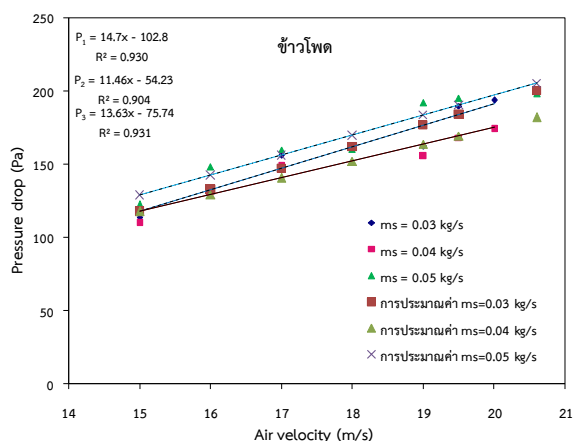
มันสำปะหลัง รูปที่ 3 แสดงการเพิ่มขึ้นของความดันสูญเสียรวมตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น ของการไหลของมันสำปะหลังในช่วงอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุเปลี่ยนแปลงไปนั่นคือ ที่ช่วงของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุเท่ากับ 16.8% ความดันสูญเสียรวมของการไหลของวัสดุเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วของลมที่ใช้ขนถ่ายวัสดุเท่ากับ 89.50% เมื่อเปรียบผลการทดลองกับผลการทำนายด้วยสมการจะพบว่าความดันสูญเสียที่



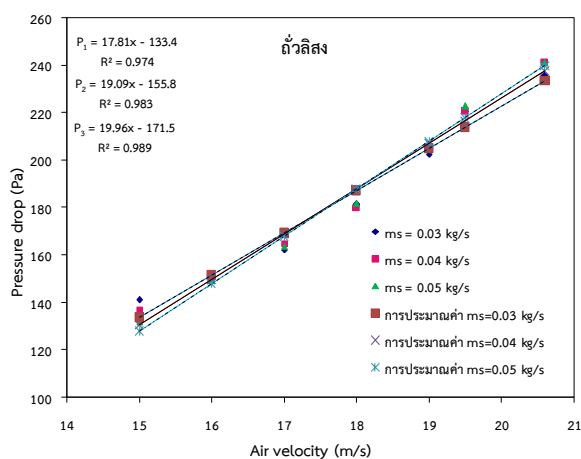
รูปที่ 3 อิทธิพลของความเร็วต่อความดันสูญเสียที่อัตราการไหลเชิงมวลต่าง ๆ ของมันสำปะหลัง

อัตราการไหลเชิงมวลของข้าวมันสำปะหลัง 0.03 kg/s 0.04 kg/s 0.05 kg/s มีค่า R-Squared เท่ากับ 0.986 0.967 และ 0.959 ตามลำดับ

ข้าวโพด รูปที่ 4 แสดงความดันสูญเสียของการขนถ่ายข้าวโพดในช่วงการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุเท่ากับ 16.8% พบว่าความดันสูญเสียรวมเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับความเร็วลมที่ใช้ขนถ่ายเท่ากับ 96.78 % เมื่อเปรียบผลการทดลองกับผลการทำนายด้วยสมการจะพบว่าความดันสูญเสียที่อัตราการไหลเชิงมวลของข้าวโพด 0.03 kg/s 0.04 kg/s 0.05 kg/s มีค่า R-Squared เท่ากับ 0.930 0.904 และ 0.931 ตามลำดับ



รูปที่ 4 อิทธิพลของความเร็วต่อความดันสูญเสีย
ที่อัตราการไหลเชิงมวลต่าง ๆ ของข้าวโพด ถั่วลิสง

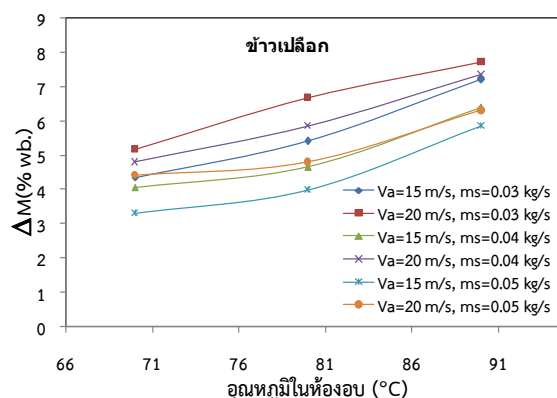


รูปที่ 5 อิทธิพลของความเร็วของลมที่มีผลต่อความดัน
สูญเสียที่อัตราการไหลเชิงมวลต่าง ๆ ของถั่วลิสง

สำหรับถั่วลิสง ดังรูปที่ 5 แสดงอิทธิพลของความเร็วที่ทำให้ความดันสูญเสียเปลี่ยนแปลงไป ที่ช่วงการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุเท่ากับ 16.8% เมื่อความเร็วของลมที่ใช้เพิ่มขึ้นทำให้ความดันสูญเสียรวมของการไหลของวัสดุเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกันเท่ากับ 95.10% เมื่อเปรียบเทียบการทดลองกับการทำนายด้วยสมการจะพบว่าความดันสูญเสียที่อัตราการไหลเชิงมวลของถั่วลิสง 0.03 kg/s 0.04 kg/s 0.05 kg/s มีค่า R-Squared เท่ากับ 0.974 0.983 และ 0.989 ตามลำดับ จากรูปที่ 2 ถึงรูปที่ 5 ที่อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุคงที่ ความดันสูญเสียรวม เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนตามความเร็วของลมที่ใช้ขนถ่ายวัสดุ และ แนวโน้มของเส้นความดันสูญเสียรวมเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุเมื่อพิจารณาความเร็วของลมคงที่ ลักษณะพิเศษของความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นดังกล่าวเหมือนกันสำหรับวัสดุทั้ง 4 ชนิด แต่ความเร็วของลมที่ใช้ขนถ่ายวัสดุเป็นปัจจัย

ที่ทำให้เกิดความดันสูญเสียรวมของการไหลของวัสดุด้วยลมในท่อตรงแนวดิ่ง ปัจจัยหนึ่งเท่านั้น นอกจากนั้นความดันสูญเสียรวมยังเกิดจากปัจจัยอื่นๆ สำหรับการไหลของวัสดุทางการเกษตรในท่อแนวดิ่งย่อมทำให้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นเนื่องจากขณะที่มีลมไหลผ่านท่อไปพร้อมกับวัสดุจะทำให้มีอุณหภูมิของลมร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นการวิจัยนี้ยังได้มีการเพิ่มอุณหภูมิของลมร้อนที่ไหลผ่านท่อด้วยขดลวดความร้อน ที่อุณหภูมิของลมร้อนก่อนเข้าห้องอบแห้งเท่ากับ 70°C 80°C และ 90°C ตามลำดับ เพื่อศึกษาผลของความชื้นที่เกิดขึ้นดังกล่าวต่อไป

อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของผลผลิตทางการเกษตร ได้แก่ ข้าวเปลือก มันสำปะหลัง ข้าวโพด และถั่วลิสง



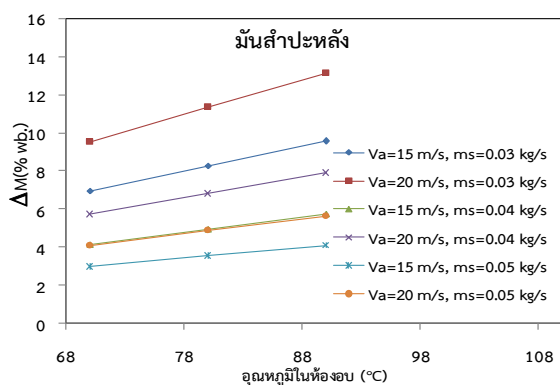
รูปที่ 6 อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีผลต่อการ
เปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกที่อัตราการ
ขนถ่ายวัสดุ 0.03 kg/s 0.4 kg/s 0.5 kg/s

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความชื้นของการไหลของวัสดุด้วยลมในท่อตรงแนวดิ่งแบบเบาบาง ที่เป็นผลจากอิทธิพลของค่าอุณหภูมิ ที่วัสดุไหลในท่อเหล็กขนาด 50 mm สำหรับวัสดุทางการเกษตรทั้ง 4 ชนิด แสดงในรูปที่ 6 ที่อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุคงที่ การเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุเพิ่มขึ้นตามค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเหมือนกันสำหรับวัสดุทั้ง 4 ชนิด

ข้าวเปลือก รูปที่ 6 แสดงการเพิ่มขึ้นของการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกตามค่าอุณหภูมิ ที่อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุคงที่เท่ากับ 0.03 kg/s 0.4 kg/s 0.5 kg/s ความเร็วของลมร้อนเท่ากับ 15 m/s มีค่าสัมประสิทธิ์

สหสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นและค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น เท่ากับ 98.90 % 98.90 % และ 89.20 % ตามลำดับ และที่ความเร็วลมร้อนเท่ากับ 20 m/s ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นและค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น เท่ากับ 97.7 % 92.7 % และ 93.1 % ตามลำดับ

มันสำปะหลัง รูปที่ 7 แสดงการเพิ่มขึ้นของการเปลี่ยนแปลงความชื้นของมันสำปะหลังตามค่าอุณหภูมิที่อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุคงที่เท่ากับ 0.03 kg/s 0.4 kg/s 0.5 kg/s ความเร็วของลมร้อนเท่ากับ 15 m/s มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่าง

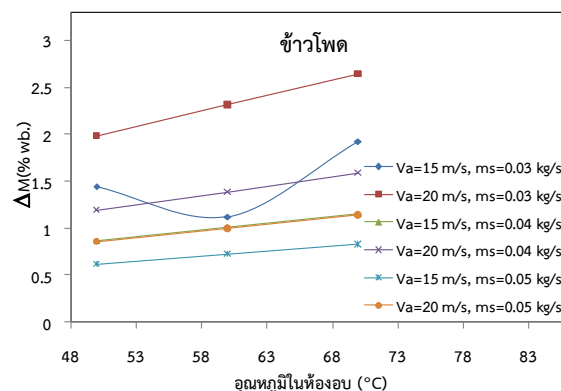


รูปที่ 7 อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของมันสำปะหลังที่อัตราการขนถ่ายวัสดุ 0.03 kg/s

การเปลี่ยนแปลงความชื้นและค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น เท่ากับ 99.90 % 98.90 % และ 98.80% ตามลำดับ และที่ความเร็วของลมร้อนเท่ากับ 20 m/s ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นและค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น เท่ากับ 98.7 % 97.9 % และ 99.5 % ตามลำดับ

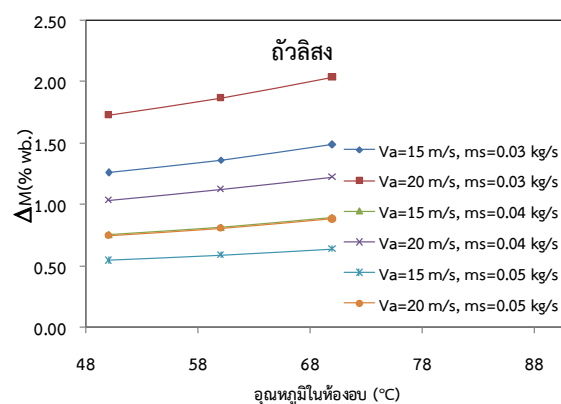
ข้าวโพด รูปที่ 8 แสดงการเพิ่มขึ้นของการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวโพดตามค่าอุณหภูมิที่อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุคงที่เท่ากับ 0.03 kg/s 0.4 kg/s 0.5 kg/s ความเร็วของลมร้อนเท่ากับ 15 m/s มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นและค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น เท่ากับ 95.80% 99.70% และ 99.70% ตามลำดับ และที่ความเร็วของลมร้อนเท่ากับ 20 m/s ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้น

และค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นเท่ากับ 99.67% 99.8% 99.88% ตามลำดับ



รูปที่ 8 อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวโพดที่อัตราการขนถ่ายวัสดุ 0.03 kg/s

ถั่วลิสง รูปที่ 9 แสดงการเพิ่มขึ้นของการเปลี่ยนแปลงความชื้นของถั่วลิสงตามค่าอุณหภูมิที่อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุคงที่เท่ากับ 0.03 kg/s 0.4 kg/s 0.5 kg/s ความเร็วของลมร้อนเท่ากับ 15 m/s โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นและค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น เท่ากับ 99.8% 99.8% และ 97.7% ตามลำดับ และที่ความเร็วของลมร้อนเท่ากับ 20 m/s ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นและค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น เท่ากับ 99.8% 99.8% และ 98.9% ตามลำดับ

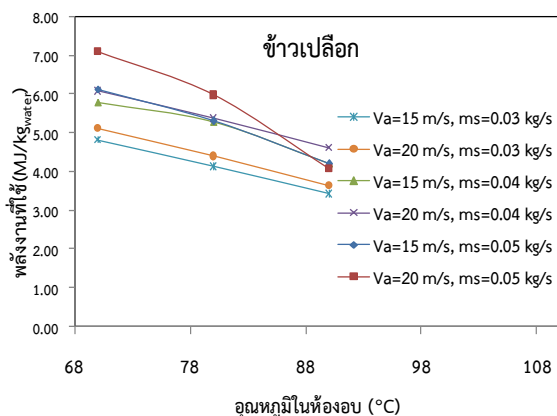


รูปที่ 9 อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของถั่วลิสงที่อัตราการขนถ่ายวัสดุ 0.03 kg/s

อิทธิพลของอุณหภูมิที่อัตราการป้อนค่าต่าง ๆ ที่มีผลต่ออัตราการใช้พลังงานในการอบแห้ง

อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการใช้พลังงานของการอบแห้งสำหรับการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุทางการเกษตรที่อัตราการอบแห้งค่าต่าง ๆ พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นการใช้พลังงานของการอบแห้งจะมีค่าลดลงที่การเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุมีค่าเท่ากัน ซึ่งลักษณะของกราฟจะมีแนวโน้มลดลงเหมือนกันของวัสดุทางการเกษตรทั้ง 4 ชนิด ที่อัตราการป้อนวัสดุ และความเร็วของลมคงที่ เนื่องจากอุณหภูมิของการอบแห้งเพิ่มขึ้น ทำให้การระเหยของน้ำที่ออกจากวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้น

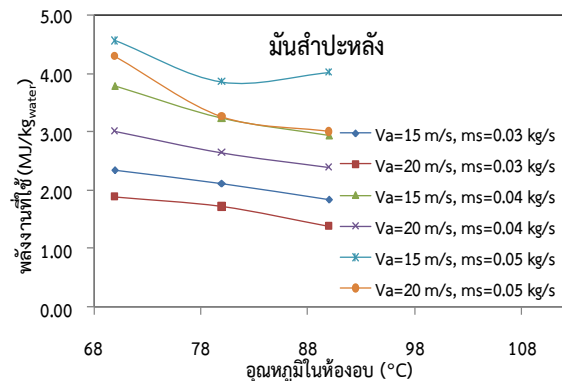
ข้าวเปลือก รูปที่ 10 แสดงการลดลงของการใช้พลังงานเพื่อลดความชื้นของข้าวเปลือกตามค่าอุณหภูมิ ที่อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุคงที่เท่ากับ 0.03 kg/s 0.4 kg/s 0.5 kg/s ความเร็วของลมร้อนเท่ากับ 15 m/s มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างการใช้พลังงานและค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น เท่ากับ 99.9% 99.9% และ 99.9% ตามลำดับ และที่ความเร็วของลมร้อนเท่ากับ 20 m/s ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างการใช้พลังงานและค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นเท่ากับ 98.4% 95.6% และ 99.9% ตามลำดับ



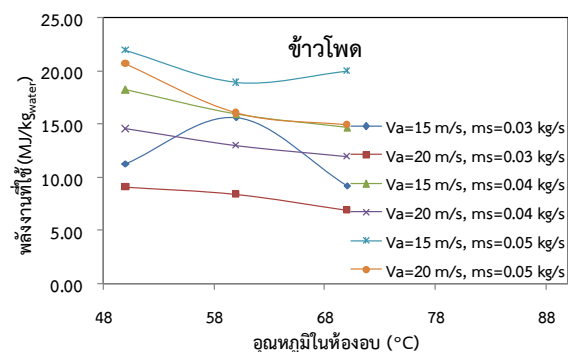
รูปที่ 10 อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีผลต่อการใช้พลังงานของการอบแห้งข้าวเปลือกที่อัตราการขนถ่ายวัสดุ 0.03 kg/s

มันสำปะหลัง รูปที่ 11 แสดงการลดลงของการใช้พลังงานเพื่อลดความชื้นของมันสำปะหลังตามค่าอุณหภูมิ ที่อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุคงที่เท่ากับ 0.03 kg/s 0.03 kg/s 0.4 kg/s 0.5 kg/s ความเร็วของลมร้อนเท่ากับ 15 m/s มีค่าสัมประสิทธิ์

มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างการใช้พลังงานและค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น เท่ากับ 99.7% 97.1% และ 93.1% ตามลำดับ และที่ความเร็วของลมร้อนเท่ากับ 20 m/s ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างการใช้พลังงานและค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นเท่ากับ 96.8% 98.7% และ 98.5% ตามลำดับ



รูปที่ 11 อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีผลต่อการใช้พลังงานของการอบแห้งมันสำปะหลังที่อัตราการขนถ่ายวัสดุ 0.03 kg/s

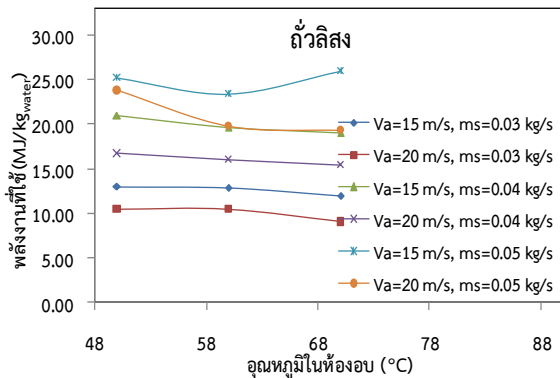


รูปที่ 12 อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีผลต่อการใช้พลังงานของการอบแห้งข้าวโพดที่อัตราการขนถ่ายวัสดุ 0.03 kg/s

ข้าวโพดรูปที่ 12 แสดงการลดลงของการใช้พลังงานเพื่อลดความชื้นของข้าวโพดตามค่าอุณหภูมิ ที่อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุคงที่เท่ากับ 0.03 kg/s 0.03 kg/s 0.4 kg/s 0.5 kg/s ความเร็วของลมร้อนเท่ากับ 15 m/s มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างการใช้พลังงานและค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น เท่ากับ 99.1% 97.0% และ 99.5% ตามลำดับ และที่ความเร็วของลมร้อนเท่ากับ 20 m/s ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างการใช้พลังงานและค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นเท่ากับ 99.1% 97.0% และ 99.5% ตามลำดับ

ที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นเท่ากับ 95.2% 98.8% และ 96.3% ตามลำดับ

ถั่วลิสง รูปที่ 13 แสดงการลดลงของการใช้พลังงานเพื่อลดความชื้นของถั่วลิสงตามค่าอุณหภูมิ ที่อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุคงที่เท่ากับ 0.03 kg/s



รูปที่ 13 อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีผลต่อการ
การใช้พลังงานของการอบแห้งถั่วลิสง
ที่อัตราการขนถ่ายวัสดุ 0.03 kg/s

0.03 kg/s 0.4 kg/s 0.5 kg/s ความเร็วของลมร้อนเท่ากับ 15 m/s มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างการใช้พลังงานและค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น เท่ากับ 83.5% 98.9% และ 78.9% ตามลำดับ และที่ความเร็วของลมร้อนเท่ากับ 20 m/s ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างการใช้พลังงานและค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น เท่ากับ 75.8% 99.9% และ 82.7% ตามลำดับ จากการเปลี่ยนแปลงของความชื้นกับอุณหภูมิ จะพบว่า ที่อัตราการป้อนวัสดุ และความเร็วของลมร้อนมีค่าคงที่ การเปลี่ยนแปลงของความชื้นของวัสดุจะมากที่สุดเมื่ออุณหภูมิมีค่ามากที่สุด เนื่องจากท่อเกลียวมีความต้านทานการไหลจึงทำให้วัสดุสามารถไหลไปตามท่อได้ช้าทำให้น้ำที่อยู่ในวัสดุระเหยออกมาได้มากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ทำนองเดียวกันการใช้พลังงานในการอบแห้งจะลดลงเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งมีค่าสูง เหตุผลเช่นเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงความชื้นดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

4. สรุป

การอบแห้งวัสดุทางการเกษตรทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ ข้าวเปลือก มันสำปะหลัง ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และ เมล็ดถั่วลิสง ในเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้ลมร้อนไหลพาวัสดุไปตามท่อภายในมีลักษณะเป็นเกลียวที่มีระยะห่างของสันเกลียวเท่ากับ 0.3 m ในแนวตั้งความยาวและขนาดของท่อหลักเท่ากับ 2 m และ 0.078 m ตามลำดับ ด้วยอัตราการป้อนที่ 0.03 kg/s 0.04 kg/s และ 0.05 kg/s ความเร็วลมร้อนที่ 15 m/s และ 20 m/s อุณหภูมิการอบแห้งเปลี่ยนจาก 70°C 80°C และ 90°C สำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกและมันสำปะหลัง ส่วนการอบแห้งข้าวโพด และถั่วลิสง มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอบแห้งที่ 50 °C 60 °C และ 70°C เพื่อให้วัสดุมีการคงคุณภาพหลังการอบแห้ง การทดลอง ในครั้งนี้เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการอบแห้ง ได้แก่ ความเร็วลม อุณหภูมิ อัตราการป้อนของวัสดุ นอกจากนี้ยังได้หาค่าพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งที่การเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุทั้ง 4 ชนิดข้างต้น โดยใช้เครื่องอบแห้งวัสดุด้วยลมความดันต่ำ (ต่ำกว่า 1 bar) โดยระบบประกอบด้วยพัดลมเป่าอากาศชนิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ความดันต่ำ ถึงเก็บวัสดุ เกลียวป้อนวัสดุ ท่อภายในเป็นเกลียวแนวตั้ง

การทดลองหาค่าความดันสูญเสียรวมของการไหลของวัสดุด้วยลมร้อนแบบพาบางในท่อเกลียวภายในแนวตั้งที่ค่าความเชื่อมั่น 95% พบว่าเป็นฟังก์ชันของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานรวม ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลของสมบัติต่าง ๆ คือ สมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุ ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลาง รูปทรง ความหนาแน่น สมบัติของท่อขนถ่าย ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ คุณภาพของท่อ ความยาวท่อ สมบัติของแก๊ส ได้แก่ ความหนาแน่น ความเร็ว ความหนืด เรโนลด์ นัมเบอร์ และสมบัติอื่น ได้แก่ อัตราการป้อนของวัสดุ จากการทดลองพบว่า ความดันสูญเสียรวมของการไหลของวัสดุในท่อเกลียวแนวตั้งทั้ง 4 ชนิด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วของลมมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทำนายด้วยสมการที่สร้างขึ้นกับการทดลอง พบว่าความดันสูญเสียที่อัตราการไหลเชิงมวลของข้าวเปลือก มันสำปะหลัง ข้าวโพดและ ถั่วลิสง 0.03 kg/s 0.04 kg/s 0.05 kg/s มีค่า R-Squared เท่ากับ 0.990 0.986 0.984 0.986 0.967 0.959 0.930 0.904

0.931 และ 0.974 0.983 0.989 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความเร็วของลมมีค่าเท่ากันที่อัตราการป้อนวัสดุเพิ่มขึ้นจะมีความดันสูญเสียเพิ่มขึ้นด้วย

อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุทั้ง 4 ชนิด ที่อัตราการป้อนวัสดุคงที่ อุณหภูมิอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงความชื้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเหมือนกันของวัสดุทั้ง 4 ชนิด โดยที่อัตราการป้อนวัสดุต่ำสุดเท่ากับ 0.03 kg/s อุณหภูมิการอบแห้งเท่ากับ 90 °C ความเร็วลมเท่ากับ 20 m/s อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 7.73% (มาตรฐานเปียก) สำหรับข้าวเปลือก และมันสำปะหลัง มีค่าเท่ากับ 13.16% (มาตรฐานเปียก) สำหรับ ข้าวโพดและถั่วลิสง ที่ อัตราการขนถ่ายวัสดุต่ำสุดเท่ากับ 0.03 kg/s อุณหภูมิอบแห้งสูงสุดเท่ากับ 70 °C ความเร็วลมเท่ากับ 20 m/s มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นสูงสุดเท่ากับ 2.64% (มาตรฐานเปียก) และ 2.04% (มาตรฐานเปียก) ตามลำดับ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูง อัตราการป้อนต่ำ และความเร็วลมสูงทำให้การระเหยน้ำที่อยู่ในวัสดุทั้ง 4 ชนิดได้ดี เพราะ อุณหภูมิในห้องอบสูงกว่าอุณหภูมิอิ่มตัวของน้ำที่อยู่ในวัสดุ อัตราการป้อนต่ำทำให้การกระจายตัวของวัสดุในท่อมามากจึงมีพื้นที่ผิวสำหรับการระเหยน้ำได้มาก และความเร็วลมที่สูงทำให้เกิดการพาไอน้ำที่อยู่ผิวของวัสดุได้มาก ซึ่งจะส่งผลต่อการใช้พลังงานของการอบแห้งที่ลดลงด้วย โดยการใช้พลังงานสำหรับการอบแห้งของข้าวเปลือกและมันสำปะหลัง ที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 90 °C อัตราการป้อนวัสดุ เท่ากับ 0.03 kg/s ความเร็วลมร้อนเท่ากับ 20 m/s จะมีค่าเท่ากับ 4.09 MJ/kg_{water} และ 1.39 MJ/kg_{water} ตามลำดับ สำหรับข้าวโพดและถั่วลิสงที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 70 °C อัตราการป้อนวัสดุ เท่ากับ 0.03 kg/s ความเร็วลมร้อนเท่ากับ 20 m/s การใช้พลังงานสำหรับการอบแห้งมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 6.94 MJ/kg_{water} และ 8.99 MJ/kg_{water} ตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการสนับสนุนจากงบประมาณแผ่นดินมหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ ขอขอบคุณคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่ได้ให้โอกาสในการวิจัยครั้งนี้ นอกจากนี้ขอขอบคุณโครงการจัดตั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์

ที่ได้ให้การสนับสนุนอุปกรณ์เครื่องมือต่าง ๆ เพื่ออำนวยความสะดวกในงานวิจัย และขอบคุณผู้ช่วยวิจัยทุกท่านที่สละเวลาทุ่มเททำงานจนแล้วเสร็จอย่างสมบูรณ์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Guner M. Pneumatic conveying characteristics of some agricultural seeds. Food Engineering. 2007; 80(3): 904-13.
- [2] พรชัย จงจิตรไพศาล. ระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลม. สำนักพิมพ์ส่งเสริมเทคโนโลยี: กรุงเทพฯ; 2548.
- [3] Lalit RV, Chung MT. Pneumatic conveying of grains. Louisiana state University. Journal for Hawaiian and Pacific Agriculture. 1993; 4: 1-13.
- [4] Brooker DB, Bakker-Arkema FW, Hall CW. Drying and Storage of Grains and Oilseeds. AVI Book Publishing: New York; 1992.
- [5] Arun S Mujumdar. Drying Technology in Agriculture and Food Sciences. Science Publishers Inc. New Hampshire: United States of America; 2000.
- [6] Bunyawanchakul P, Walker GJ, Sargison JE, Doe PE. Modelling and Simulation of Paddy Grain (Rice) Drying in a Simple Pneumatic Dryer. Biosystems Engineering. 2007; 96(3): 335-44.
- [7] Tanaka F, Uchino T, Hamanaka D, Atungulu GG. Mathematical modeling of pneumatic drying of rice powder. Journal of Food Engineering. 2008; 88(4): 492-8.
- [8] Rajan KS, Srivastava SN, Pitchumani B, Mohanty B. Simulation of gas– solid heat transfer during pneumatic conveying. Use of multiple gas inlets along the duct. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2006; 33(10): 1234-42.

- [9] Rajan KS, Srivastava SN, Pitchuman B, Dhasandhan K. Experimental study of thermal effectiveness in pneumatic conveying heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*. 2008; 28(14-15): 1932–41.
- [10] Rajan KS, Dhasandhan K, Srivastava SN, Pitchumani B. Studies on gas–solid heat transfer during pneumatic conveying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008; 51 (11-12): 2801–13.
- [11] Zheng Y, Pugh JR, McGlinchey D, Ansell RO. Simulation and experimental study of gas- to-particle heat transfer for non-invasive mass flow measurement. *Measurement*. 2008; 41(4) : 446–54.
- [12] ZHOU JS, LUO ZY, Xiang GAO, NI MJ and Cen KF. Effect of particle loading on heat transfer enhancement in a gas-solid suspension cross flow. *Journal of Zhejiang University Science*. 2002; 3(4): 381–6.
- [13] Hidayat M, Rasmuson A. Heat and mass transfer in u- bend of a pneumatic conveying dryer. *Chemical Engineering Research and Design*. 2007; 85(A3): 307–19.
- [14] Rabinovich E, Kalman H. Flow regime diagram for vertical pneumatic conveying and fluidized bed systems. *Powder Technology*. 2011; 207(1-3): 119–33.