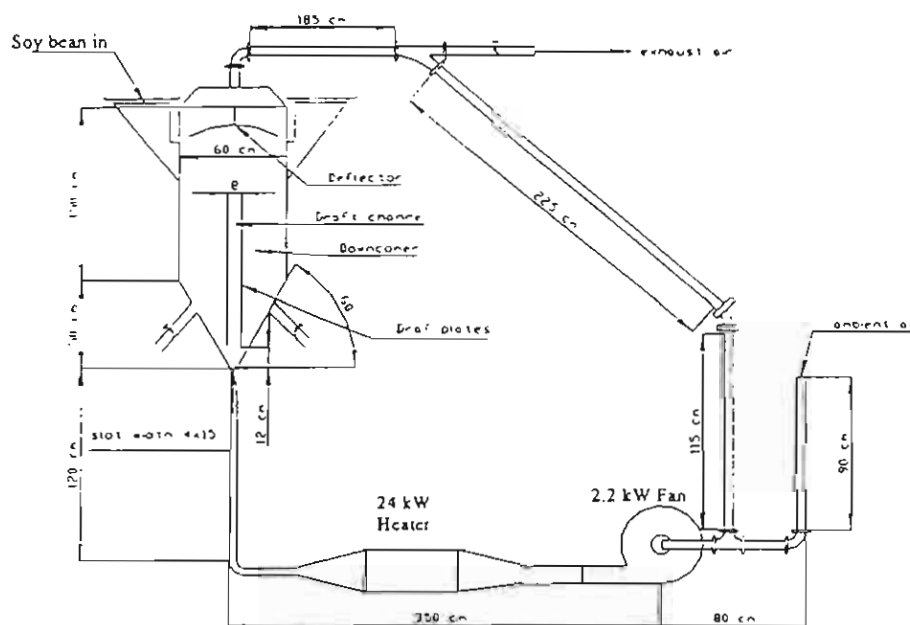


บ่งชี้ถึงระดับปริมาณสาร Trypsin inhibitor ในรูปของการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช (ΔpH) จากผลการศึกษาพบว่า ค่า ΔpH ลดลง เมื่อค่าความชื้นสุดท้ายลดลง และค่าอบแห้งที่ความชื้นเริ่มต้น 32-33% dry basis (d.b.) จนเหลือความชื้น 12.2-14.4% d.b. ด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชเบด อุณหภูมิของอากาศร้อนต้องสูงถึง 120°C ระดับการเปลี่ยนแปลงค่า pH จึงจะต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ (ΔpH ต่ำกว่า 0.3) และระดับโปรตีนที่ละลายได้ในสารละลาย 0.2 % KOH อยู่ระหว่าง 70-85 %

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ในการอบแห้งถั่วเหลืองที่พิจารณาถึงคุณภาพของเมล็ดถั่วเหลืองหลังการอบแห้งมีเพียงเทคนิคฟลูอิดไชเบด โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง $120-150^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสุดท้ายไม่ต่ำกว่า 18-19 % w.b. เพื่อให้เมล็ดมีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการอบแห้งถั่วเหลืองโดยเทคนิคสเปาเจ็คเบดสองมิติโดยพิจารณาถึงอัตราการอบแห้งและคุณภาพของเมล็ดถั่วเหลืองหลังอบแห้ง

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

เครื่องอบแห้งสเปาเจ็คเบดสองมิติชนิด draft plate (สุชาติ, 2538) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยห้องอบแห้งรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 60 cm สูง 150 cm หน้า 15 cm อุปกรณ์ให้ความร้อนขนาด 15 kW พร้อมชุดควบคุมอุณหภูมิชนิดเปิด-ปิด (on/off temperature controller) พัดลมแบบเหวี่ยงใบโค้งหลัง (backward curve blade) ขับด้วยมอเตอร์ขนาด 2.2 kW พร้อมชุดควบคุมความเร็วรอบของพัดลมสามารถปรับอัตราการไหลของอากาศได้



รูปที่ 1 ไดอะแกรมแสดงเครื่องอบแห้งสเปาเจ็คเบดสองมิติชนิดแผ่นกัน (draft plate)

เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิอากาศโดยต่อเข้ากับเครื่องเก็บข้อมูล (data logger) ค่าความถูกต้อง $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ความดันลดคร่อมเบ็ดวัดด้วย U-tube manometer ความเร็วของอากาศวัดด้วยเครื่องวัดความเร็วลมแบบขดลวดร้อน (hot - wire anemometer) ค่าความถูกต้อง $\pm 4\%$ Pilot static tube และ U-tube manometer ใช้วัดความเร็วของอากาศภายในสเปาและทางเข้าห้องอบแห้ง

การเตรียมความชื้นของเมล็ดถั่วเหลือง ให้พรมน้ำลงในถังที่บรรจุถั่วเหลือง 25 กิโลกรัม คลุกเคล้าให้ความชื้นกระจายให้ทั่ว ปิดฝาดังให้สนิท แล้วเก็บไว้ในห้องเย็นอุณหภูมิ $8-10^{\circ}\text{C}$ จนกระทั่งได้ความชื้นของเมล็ดถั่ว

เหลือง 28% และ 32% d.b. จากนั้นเตรียมสภาพห้องอบโดยปรับความเร็วรอบพัดลมจนได้ความเร็วที่ทำให้เกิดสภาวะสเปาที่เหมาะสม และปรับอุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าห้องอบเป็น 120, 130, 140, 150°C แล้วจึงป้อนเมล็ดถั่วเหลืองที่เตรียมไว้เข้าห้องอบแห้ง เก็บตัวอย่างเมล็ดถั่วเหลืองก่อนทำการอบแห้ง และตัวอย่างขณะทำการอบแห้งทุก 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที โดยเก็บตัวอย่างครั้งละ 250 กรัม เพื่อหาปริมาณความชื้น และคุณภาพเมล็ดถั่วเหลืองในด้านร้อยละของการแตก ร้อยละของการร้าว Urease Activity และ Protein Solubility ใน 0.2% KOH นำถั่วเหลืองที่อบแห้งเสร็จแล้วมาปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้องประมาณ 20-30 นาที แล้วนำไปเป่าด้วยอากาศแวดล้อมภายในเครื่องอบแห้งแบบถาดจนถั่วเหลืองได้ความชื้นประมาณ 14% w.b. เพื่อป้องกันการเกิดเชื้อราบนเมล็ดถั่วเหลืองก่อนนำไปวิเคราะห์หาความชื้นและวิเคราะห์คุณภาพ

การวิเคราะห์หาความชื้นของถั่วเหลืองใช้ตู้อบไฟฟ้าอบตัวอย่างถั่วเหลืองที่สุ่มมา 80 กรัม ที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ตามมาตรฐานของ Association of Official Agricultural Chemists (Anon, 1960) การวิเคราะห์หา Urease Activity เพื่อบ่งชี้การลดลงของสาร Trypsin inhibitor ในรูปของการเปลี่ยนแปลงค่า pH ตามวิธีมาตรฐานของ AACC Method (1976) และการวิเคราะห์หา Protein Solubility ใน 0.2% KOH โดยคิดเป็นปริมาณโปรตีนในเมล็ดถั่วเหลืองที่ละลายในสารละลาย KOH เทียบกับปริมาณโปรตีนที่มีอยู่ในถั่วเหลืองก่อนละลายในสารละลาย KOH เพื่อตรวจสอบว่าถั่วเหลืองได้รับความร้อนมากเกินไปจนทำให้โปรตีนในถั่วเหลืองอาจเสื่อมคุณค่าตามวิธีของ Kjeldahl มาตรฐาน AOAC ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจน รุ่น VAPODEST 12 semiautomatic model ยี่ห้อ Gerhardt

ร้อยละของการร้าวและการแตกหาได้โดยนำเมล็ดถั่วเหลืองจำนวน 200 g มาส่องไฟเพื่อตรวจเลือกจำนวนของเมล็ดถั่วเหลืองที่เกิดการร้าวและการแตกแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก เพื่อกำหนดร้อยละของการร้าวและการแตกของเมล็ดถั่วเหลืองโดยน้ำหนัก ดังสมการต่อไปนี้

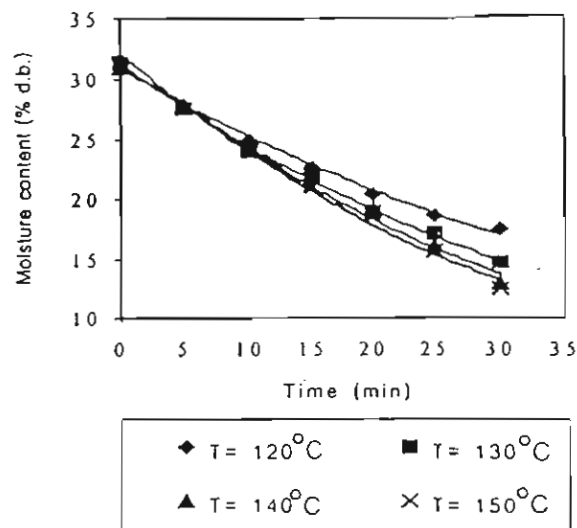
$$\text{ร้อยละของการร้าว (\% โดยน้ำหนัก)} = \frac{\text{น้ำหนักเมล็ดที่ร้าว} \times 100}{200 \text{ g}} \quad (2)$$

$$\text{ร้อยละของการแตก (\% โดยน้ำหนัก)} = \frac{\text{น้ำหนักเมล็ดที่แตก} \times 100}{200 \text{ g}} \quad (3)$$

3. ผลและวิจารณ์

3.1 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อการอบแห้งในสเปาเค็ดเบดสองมิติ

จากการทดลองอบแห้งถั่วเหลืองด้วยอุณหภูมิอากาศร้อน 120-150°C ความชื้นเริ่มต้น 28-32% d.b. ความสูงเบด 65 cm และความเร็วของอากาศ 20.2-20.5 m/s รูปที่ 2 และ 3 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อการอบแห้งพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิสูง ทำให้การลดลงของความชื้นเร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นของถั่วเหลืองสูงขึ้น ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำจากภายในเนื้อวัสดุมายังผิวเร็วขึ้น ดังนั้นอัตราการอบแห้งจึงสูงขึ้น



รูปที่ 2 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อการอบแห้งที่ความชื้นเริ่มต้น 31-32% d.b.

3.2 คุณภาพของผลิตภัณฑ์

งานวิจัยนี้แบ่งการพิจารณาคุณภาพของผลิตภัณฑ์เป็น 2 ส่วน คือ ร้อยละของการร้าว และร้อยละของการแตก กับค่า Urease Activity และค่า Protein Solubility

3.2.1 ร้อยละของการร้าวและร้อยละของการแตก

การอบแห้งถั่วเหลืองโดยเทคนิคสเปาเต็คเบดของงานวิจัยนี้ ใช้อุณหภูมิในการอบแห้งสูงกว่า 120°C ทำให้เปลือกเมล็ดแตกเป็นรูปตัววี ซึ่งการแตกของเปลือกในลักษณะนี้ เป็นการแตกในลักษณะเดียวกับงานวิจัยของ วิวัฒน์ (2541) และ Overhults *et al.* (1973)

ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ ในรูปของการร้าวและการแตก รูปที่ 3 ถึงรูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการร้าวและร้อยละของการแตกกับค่าความชื้นสุดท้าย ที่ความชื้นเริ่มต้นต่างกัน พบว่าเมื่ออุณหภูมิของอากาศสูงขึ้น ร้อยละของการร้าวและร้อยละของการแตกจะมากขึ้น เนื่องจากอัตราการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศ เมื่ออุณหภูมิสูงจึงส่งผลให้อัตราการอบแห้งสูงตามด้วย ทำให้บริเวณผิวของเมล็ดถั่วเหลืองสูญเสียความชื้นไปรวดเร็วกว่าถั่วเหลืองที่อบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ แต่การเคลื่อนที่ของน้ำภายในเนื้อวัสดุถูกจำกัดด้วยการแพร่ภายในเนื้อวัสดุ ทำให้โมเลกุลน้ำเคลื่อนที่มาที่ผิวไม่ทัน ผิวนอกจึงแข็งตัวและอุณหภูมิที่ผิวของถั่วเหลืองจะสูงขึ้น ดังนั้นความชื้นที่ผิวเมล็ดจึงสูงขึ้น ส่งผลให้เมล็ดร้าวและแตกในลักษณะเป็นรูปตัววีมากขึ้น และเมื่อใช้เวลาในการอบแห้งนานขึ้น ความชื้นสุดท้ายก็จะต่ำลง ซึ่งทำให้การร้าวและการแตกเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

4. สรุปและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุป

จากการทดลองศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการอบแห้งถั่วเหลืองโดยเทคนิคสเปาเด็ดเบด พบว่าอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องอบสูงขึ้น อัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้น

ผลการวิเคราะห์ร้อยละการร้าวและการแตกของถั่วเหลืองหลังการอบแห้งพบว่า การร้าวและการแตกเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิอากาศร้อนก่อนเข้าห้องอบเพิ่มขึ้น ช่วงอุณหภูมิที่ทดลอง 120-150°C ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 28-32% d.b. ร้อยละการร้าวสูงถึง 50-60% และร้อยละการแตกสูงเกินกว่ามาตรฐานการรับซื้อของอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ การแตกมีลักษณะเป็นรูปตัววี ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้ง และอีกประการหนึ่งคาดว่า อาจเกิดมาจากการที่ถั่วเหลืองลอยตัวขึ้นไปกระทบกับ deflector ด้านบนห้องอบแห้ง ทำให้เกิดการแตกร้าวของเมล็ดได้

ผลการวิเคราะห์ค่า Urease Activity และ Protein Solubility ของเมล็ดถั่วเหลืองพบว่า ที่อุณหภูมิอบแห้ง 130-150°C สามารถลดค่า Urease Activity ได้ตามเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด และคุณภาพโปรตีนที่ใช้ประโยชน์ได้ ทั้งก่อนและหลังการอบแห้งมีค่าไม่แตกต่างกัน นั่นคือมีความเป็นไปได้ที่จะใช้เครื่องอบแห้งแบบสเปาเด็ดเบดสองมิติเป็นกระบวนการให้ความร้อนแก่เมล็ดถั่วเหลือง เพื่อลดปริมาณสารขัดขวางคุณค่าทางโภชนาการ โดยไม่สูญเสียคุณภาพในด้านโปรตีนที่ใช้ประโยชน์ได้หลังการอบแห้ง แต่อย่างไรก็ตามร้อยละของการแตกยังเกินเกณฑ์มาตรฐานการรับซื้อของอุตสาหกรรมอาหารสัตว์อยู่

4.2 ข้อเสนอแนะ

ควรศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการอบแห้งเพื่อพิสูจน์การแตกของเมล็ดถั่วเหลืองว่ามีสาเหตุหลักมาจากอุณหภูมิอบแห้งหรือการกระทบกับ deflector สำหรับเครื่องอบแห้งแบบสเปาเด็ดเบดสองมิติ

คำขอบคุณ

ผู้เขียนใคร่ขอแสดงความขอบคุณบริษัท สหฟาร์ม จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ค่า Urease Activity และค่า Protein Solubility และขอขอบพระคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- Kalwar, M.I. and Ranghavan, G.S.V., 1993, "Batch Drying of Shelled Corn in Two-Dimensional Spouted Beds with Draft Plates, " *Drying Technology*, Vol. 11, No.2, pp. 339-354.
- Kalwar, M.I., Kudra, T., Raghavan, G.S.V. and Mujumdar, A.S., 1991, "Drying of Grains in Drafted Two Dimensional Spouted Bed, " *Journal of Food Process Engineering*, Vol. 13, pp. 321-332.
- White, C.L., Greene, D.E., Waldroup, P.W. and Stephenson, E.L., 1967, "The Use of Unextracted Soybeans for Chicks," *Poultry Science*, 46 :1180-1185.
- Faber, J.L. and Zimmerman, D.R., 1973, "Evaluation of Infrared-Roasted and Extruder-Processed Soybeans In Baby Pig Diets, " *Journal of Animal Science*, Vol. 36, No.5, pp.902-907.

- วิวัฒน์ วุฒิวิวัฒน์ชัย, 2541, แนวทางที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งถั่วเหลืองโดยเทคนิคฟลูอิดไอเซชัน, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 13-15.
- สุชาติ สุทธิเจริญพานิชย์, 2538, การอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคสเปาเต็ดเบดสองมิติ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 24 หน้า.
- Overhults, D.G., White, G.M., Hamilton, H.E. and Ross, I.J., 1973, "Drying Soybean With Heated Air, " *Trans. of the ASAE*, Vol. 16, No. 1, pp. 112-113.
- Page, G.E., 1949, Factors Influencing the Maximum Rate of Drying Shell Corn in Layers, Unpublished Master of Science Thesis, Purdue University.
- Anon, 1960. Official and Tentative Methods of Analysis of the Association of Official Agricultural Chemists, 9th ed. Published by the Association of Official Agricultural Chemists, P.O. Box 540, Benjamin Franklin Station, Washington, D.C.
- A.O.A.C. 1965. Official Methods of Analysis (10th Ed.). Association of Official Agricultural Chemists, Washington, D.C.

รายงานการประชุมวิชาการวิชาการประจำปี 2544
สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, ขอนแก่น, 25-26 มกราคม 2544

อิทธิพลของการเก็บในที่อับอากาศต่อคุณภาพเมล็ดข้าวโพดหลังอบแห้ง แบบฟลูอิดไชเบด

Effect of Tempering on Quality of Corn after Fluidized Bed Drying

คงศักดิ์ ชินนาบุญ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และ สมบูรณ์ เวชกามา
คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
91 ถนนประชาอุทิศ บางมด กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบศึกษานาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเก็บเมล็ดข้าวโพดในที่อับอากาศ (tempering) หลังอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไชเบด โดยเมล็ดข้าวโพดมีความชื้นเริ่มต้น 27 และ 30% w.b. การอบแห้งแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ ตอนแรกอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไชเบดแบบงวดที่อุณหภูมิอากาศ 150°C จากนั้นนำไป tempering และขั้นตอนสุดท้าย นำเมล็ดข้าวโพดไปเป่าด้วยอากาศแวดล้อม

จากผลการทดลองพบว่า การ tempering เมล็ดข้าวโพดจะช่วยลดความชื้นในช่วงการอบแห้งครั้งที่สองได้เร็วขึ้น เมื่อใช้ระยะเวลาการ tempering นานมากขึ้นจะทำให้เมล็ดคั่วมากขึ้น แต่ยังไม่สามารถสรุปได้ว่า การเก็บในที่อับอากาศมีส่วนช่วยทำให้เมล็ดมีการร้าวน้อยลง จากกระบวนการเป่าด้วยอากาศแวดล้อม พบว่า ความเร็วของอากาศไม่มีผลต่อคุณภาพเมล็ดข้าวโพด (ได้แก่ปริมาณการร้าว และ คุณภาพทางด้านสี) ดังนั้นการเลือกความเร็วที่เหมาะสม (0.075-0.375 m/s) จึงขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นเมล็ดข้าวโพด ถ้าหนามากควรใช้ความเร็วลมต่ำ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดที่อุณหภูมิสูงแบบสองขั้นตอนโดยมีการ tempering สามารถทำนายค่าความชื้นที่ลดลงในช่วงของการอบแห้งครั้งแรกและครั้งที่สองได้ดีพอสมควร จากผลการจำลองและการทดลองทำให้ทราบว่าระยะเวลาที่เหมาะสมในการ tempering คือ 40 นาที โดยที่คุณภาพของเมล็ดข้าวโพดอยู่ในระดับที่ยอมรับได้
คำสำคัญ: การเก็บในที่อับอากาศ / การเป่าด้วยอากาศแวดล้อม / คุณภาพ / แบบจำลองการแพร่ / ฟลูอิดไชเบด

Abstract

The objective of this work is to investigate the influence of tempering period on the corn quality. Drying process was divided into two stages. Corn with initial moisture content of 27 and 30% wet basis was dried initially with a batch fluidized bed dryer using 150°C inlet air temperature and then followed with tempering period. At the final stage, corn was dried again with the ambient air.

The drying process including the tempering period between stages provides the moisture reduction remarkably faster than that with no tempering whereas the deterioration of corn quality due to stress crack is insignificantly improved. The corn colour is relatively darker with longer tempering time. The suitable velocity of ambient air for final drying stage varies between 0.075 and 0.375 m/s, depending on the bed depth. The ambient air ventilation does not affect the corn qualities, both stress crack and colour. The theoretical diffusion model for sphere has been used to quantify qualitatively the appropriate tempering period. The model can predict satisfactorily the evolution of moisture content throughout. Both

the experimental results and the simulation indicate consistently that the appropriate tempering period for corn, together with the acceptable com, the drying process, quality, is approximately 40 minutes.

Key words: Ambient Air Ventilation / Diffusion Model / Fluidized Bed / Quality / Tempering

1. บทนำ

การอบแห้งเมล็ดข้าวโพดโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชด์เบดเป็นวิธีการอบแห้งอย่างรวดเร็ว ทำให้ความชื้นที่ผิวของเมล็ดถูกพาออกไปพร้อมกับลมร้อนด้วยอัตราที่มากกว่าการแพร่จากภายในใจกลางเมล็ดมายังผิวของเมล็ด ทำให้ความชื้นที่ผิวของเมล็ดมีค่าต่ำกว่าความชื้นภายในเมล็ดมาก เกิดเกรเดียนต์ความชื้น (moisture gradient) ภายในเมล็ด เมื่อนำไปอบแห้งครั้งที่สองหรือเป่าด้วยอากาศแวดล้อมทันที ความชื้นจะลดลงได้ช้า

การเก็บเมล็ดข้าวโพดในที่อับอากาศหลังจากอบแห้งแบบฟลูอิดไชด์เบด มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ความชื้นจากภายในเมล็ดแพร่มายังผิวของเมล็ด ทำให้การอบแห้งครั้งที่สองหรือการเป่าด้วยอากาศแวดล้อมมีอัตราการลดความชื้นมากขึ้น ซึ่งระยะเวลาที่ใช้ในการเก็บในที่อับอากาศ (tempering period) เป็นตัวแปรสำคัญที่จะทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ เนื่องจากในการ tempering ไม่จำเป็นที่จะต้องทำจนสมบูรณ์ (ความชื้นภายในเมล็ดมีค่าเท่ากันตลอดทั้งเมล็ด) เพราะจะใช้เวลานานเกินไปและทำให้เมล็ดคั่ว คุณภาพของเมล็ดลดลง ดังนั้นจึงได้ศึกษาถึงระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำ tempering เมล็ดข้าวโพด

Soponronnarit, Pongtornkulpanich and Prachayawarakorn [1] ศึกษาถึงคุณภาพของเมล็ดข้าวโพดหลังอบแห้งโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไชด์ที่อุณหภูมิสูง โดยใช้อุณหภูมิอากาศสูงถึง 170°C พบว่า ไม่ได้ทำให้คุณภาพของเมล็ดข้าวโพดสูญเสียไปมากนัก จากการวิเคราะห์พบว่า เปอร์เซ็นต์การร้าวของเมล็ดข้าวโพดขึ้นอยู่กับค่าความชื้นสุดท้ายของเมล็ดข้าวโพดและอุณหภูมิของอากาศเข้า ที่อุณหภูมิของอากาศอบแห้ง 150 และ 170°C ไม่พบการแตกของเมล็ด แต่ที่อุณหภูมิของอากาศอบแห้ง 200°C การร้าวและแตกจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออบแห้งไปแล้ว 2-4 นาที หลังจาก 4 นาทีผ่านไปเมล็ดข้าวโพดจะแตกทุกเมล็ดและเริ่มมีการแตกบานคล้ายกับข้าวโพด pop com และจะกลายเป็นเมล็ดแตกบานทุกเมล็ดหลังจากอบแห้งไปแล้ว 15 นาที สีของเมล็ดข้าวโพดจะคล้ำมากขึ้นเมื่ออบแห้งนานขึ้น

พงศ์เทพ โชติจักรดิกุล [2] ศึกษาถึงแนวทางการจัดการข้าวโพดชื้นที่ประกอบด้วยการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไชด์ การเก็บเมล็ดข้าวโพดในที่อับอากาศ และการเป่าด้วยอากาศแวดล้อม จากการทดลองพบว่า การร้าวหลายแนวของเมล็ดข้าวโพดหลังการอบแห้งขึ้นอยู่กับค่าความชื้นสุดท้ายของเมล็ดข้าวโพด และไม่ควรมีค่าต่ำกว่า 18.0% w.b. การเก็บเมล็ดข้าวโพดหลังการอบแห้งในที่อับอากาศมีระยะเวลาที่เหมาะสมประมาณ 40 นาที และการเป่าอากาศแวดล้อมผ่านกองเมล็ดข้าวโพด พบว่า ความเร็วอากาศแวดล้อมที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 0.150 m/s โดยมีค่าการปริแตกและการร้าวของเมล็ดข้าวโพดไม่เกิน 2 และ 5 % wt ตามลำดับ และสีของเมล็ดข้าวโพดไม่เปลี่ยนแปลงไปจากปกติมากนัก

ได้มีการวิจัยมาบ้างแล้ว แต่จะเป็นการอบแห้งในช่วงอุณหภูมิไม่สูงมากนัก ดังนั้นจึงทำให้อุณหภูมิที่ใช้ในการ tempering มีค่าไม่สูงตามไปด้วย แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการ tempering เมล็ดข้าวโพดหลังจากอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไชด์เบด เป็นการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงทำให้อุณหภูมิที่ใช้ในการ tempering มีค่าค่อนข้างสูงตามไปด้วย (มากกว่า 100°C) และยังได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายระยะเวลาที่เหมาะสมในการ tempering โดยเน้นพิจารณาถึงคุณภาพเมล็ดข้าวโพดและความสามารถในการลดความชื้นในช่วงการอบแห้งครั้งที่สองเป็นสำคัญ

2. การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งและการเก็บในที่อับอากาศ

ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งโดยใช้สมการอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎี (Semi-empirical mathematical model) ดังการศึกษาของ Satayaprasert and Vanishsrivatana [3] ซึ่งสามารถทำนายได้เฉพาะความชื้นสุดท้ายหลังการอบแห้งเท่านั้น ไม่สามารถทำนายการกระจายความชื้นภายในเมล็ดข้าวโพดได้ Steffe and Singh [4] ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกที่มีการ tempering ประกอบไปด้วย โดยสร้างแบบจำลองเพื่อหาระยะเวลา tempering ที่เหมาะสม พบว่า แบบจำลองที่ใช้ในการทำนายการ tempering ควรใช้รูปแบบของ liquid diffusion model สมมติฐานที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง คือการให้เมล็ดข้าวโพดมีลักษณะเป็นทรงกลมทั้งในส่วนของการอบแห้งและการ tempering ดังการศึกษาของ Steffe and Singh [4] และ Tolaba *et al.* [5] สมมติฐานอื่นๆ ได้แก่ เนื้อภายในเมล็ดเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) ความชื้นก่อนการอบแห้งมีลักษณะสม่ำเสมอตลอดเมล็ด ไม่มีการสูญเสียความชื้นในระหว่างการ tempering ไม่มีการหดตัวของเมล็ดในขณะที่มีการอบแห้งและการ tempering จากกฎของ Fick จะได้สมการการแพร่ความชื้นภายในวัสดุทรงกลม ดังนี้

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right] \quad (1)$$

เมื่อ D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของเมล็ดข้าวโพด, m^2/s

M คือ ความชื้นของเมล็ดข้าวโพด, d.b.

r คือ รัศมีใด ๆ ภายในเมล็ดข้าวโพด, m

t คือ เวลา, s

เพื่อให้การวิเคราะห์สะดวกมากยิ่งขึ้น ทำได้โดยการกำหนดให้

$$R = \frac{r}{a} \quad (2)$$

และ

$$T = \frac{Dt}{a^2} \quad (3)$$

เมื่อ a คือรัศมีของทรงกลม ดังนั้นจากสมการ (1) จะได้ว่า

$$\frac{\partial M}{\partial T} = \frac{\partial^2 M}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial M}{\partial R} \quad (4)$$

เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตในการวิเคราะห์การอบแห้งมีดังนี้

$$T = 0, \quad 0 \leq R \leq 1, \quad M = M_{in}$$

$$T > 0, \quad R = 0, \quad \frac{\partial M}{\partial R} = 0$$

$$T > 0, \quad R = 1, \quad M = M_{eq}$$

หลังจากที่ได้วิเคราะห์ในช่วงของการอบแห้งแล้ว จะทำให้สามารถทราบถึงลักษณะการกระจายความชื้นภายในเมล็ด ซึ่งจะใช้เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นในการ tempering ต่อไป โดยมีเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต ดังนี้

$$T=0, 0 \leq R \leq 1, M=M(R)$$

$$T > 0, \quad R=0, \quad \frac{\partial M}{\partial R} = 0$$

$$T > 0, \quad R=1, \quad \frac{\partial M}{\partial R} = 0$$

จากสมการ (4) สามารถหาผลเฉลยทั้งในช่วงของการอบแห้งและการ tempering ได้โดยใช้ระเบียบวิธีของ แกรงก์-นิโคลสัน (Crank-Nicolson method) ซึ่งเป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบปริยาย (implicit numerical method) วิธีหนึ่ง ถ้าแบ่งให้ช่วงการคำนวณของ R มีทั้งหมด N ช่อง ดังนั้น i จะมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง $N+1$ โดยที่ $i = 1$ คือตำแหน่งจุดศูนย์กลางของเมล็ด ($R=0$) และ $i = N+1$ คือตำแหน่งที่ผิวของเมล็ด ($R=1$) ผลเฉลยที่ได้จะอยู่ในรูปของระบบสมการแบบสามแนวทแยง (tridiagonal system) ดังนี้

ช่วงการอบแห้ง

$$\begin{bmatrix} 1+\alpha & -\alpha & 0 & \cdots & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1+2\alpha & -\alpha(2) & & & & 0 \\ \vdots & -\alpha\left(\frac{1}{2}\right) & 1+2\alpha & -\alpha\left(\frac{3}{2}\right) & & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \ddots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & & & & -\alpha\left(\frac{N-2}{N-1}\right) & 1+2\alpha & -\alpha\left(\frac{N}{N-1}\right) \\ 0 & 0 & \cdots & \cdots & 0 & \alpha\left(\frac{2}{N}\right) & 1-\frac{2\alpha}{N} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ M_N \\ M_{N+1} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} (1-6\alpha)M_1 + (6\alpha)M_2 \\ (1-2\alpha)M_2 + \alpha(2)M_3 \\ \alpha\left(\frac{1}{2}\right)M_2 + (1-2\alpha)M_3 + \alpha\left(\frac{3}{2}\right)M_4 \\ \vdots \\ \alpha\left(\frac{N-2}{N-1}\right)M_{N-1} + (1-2\alpha)M_N + \alpha\left(\frac{N}{N-1}\right)M_{N+1} \\ \alpha\left(-\frac{2}{N}\right)M_N + \left(1+\frac{2\alpha}{N}\right)M_{N+1} \end{Bmatrix}$$

(5)

ช่วงการทำเทมเปอร์

$$\begin{bmatrix}
 1+6\alpha & -6\alpha & 0 & \cdots & \cdots & 0 & 0 \\
 0 & 1+2\alpha & -\alpha(2) & & & & 0 \\
 \vdots & -\alpha\left(\frac{1}{2}\right) & 1+2\alpha & -\alpha\left(\frac{3}{2}\right) & & & \vdots \\
 \vdots & & \ddots & \ddots & \ddots & & \vdots \\
 \vdots & & & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\
 0 & & & & -\alpha\left(\frac{N-2}{N-1}\right) & 1+2\alpha & -\alpha\left(\frac{N}{N-1}\right) \\
 0 & 0 & \cdots & \cdots & 0 & -2\alpha & 1+2\alpha
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 M_1 \\
 M_2 \\
 M_3 \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 M_N \\
 M_{N+1}
 \end{bmatrix}^{t+1}$$

$$\begin{bmatrix}
 (1-6\alpha)M_1 + (6\alpha)M_2 \\
 (1-2\alpha)M_2 + \alpha(2)M_3 \\
 \alpha\left(\frac{1}{2}\right)M_2 + (1-2\alpha)M_3 + \alpha\left(\frac{3}{2}\right)M_4 \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \alpha\left(\frac{N-2}{N-1}\right)M_{N-1} + (1-2\alpha)M_N + \alpha\left(\frac{N}{N-1}\right)M_{N+1} \\
 (2\alpha)M_N + (1-2\alpha)M_{N+1}
 \end{bmatrix}^t$$

(6)

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมล็ดข้าวโพด (D) สามารถหาได้จากกราฟทดลองอบแห้ง โดยนำข้อมูลมาวิเคราะห์เข้ากับผลเฉลยทางทฤษฎีของสมการ (1) ดังแสดงในสมการ (7)

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \sum_{p=1}^{\infty} \left(\frac{1}{p^2} \right) \exp \left[- p^2 \pi^2 \left(\frac{D}{r^2} \right) t \right] \quad (7)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น, ไร้นิยาม

จากสมการ (7) ในเทอมของ $\frac{D}{r^2}$ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของสมการ Arrhenius ได้ โดยจะเป็น

ฟังก์ชันของอุณหภูมิอากาศอบแห้ง (T) อย่างเดียว หรืออุณหภูมิอากาศอบแห้งและความชื้นเฉลี่ยของเมล็ดข้าวโพด (M) ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของเมล็ดข้าวโพด (Model 1 ถึง 4) ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของเมล็ดข้าวโพด

Model	รูปแบบ
1	$\frac{D}{r^2} = A_1 \exp\left[-B_1/(273 + T)\right]$
2	$\frac{D}{r^2} = A_2 \exp(B_2 \cdot M) \exp\left[-C_2/(273 + T)\right]$
3	$\frac{D}{r^2} = A_3 \exp\left\{[B_3(273 + T) + C_3] \cdot M\right\} \exp\left[-D_3/(273 + T)\right]$
4	$\frac{D}{r^2} = A_4 \exp(B_4 M + C_4 M^2) \exp\left[-D_4/(273 + T)\right]$

3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

เครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบดที่ใช้ในการทดลองเป็นเครื่องอบแห้งแบบเป็นวงวนซึ่งพัฒนาโดย Soponronnarit and Prachayawarakorn [6] สภาวะที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้ ความสูงของชั้นเมล็ดข้าวโพด 2 cm ความเร็วอากาศในห้องอบแห้ง 3 m/s ความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดข้าวโพด 27 และ 30% w.b. ในการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 90, 110, 130, 150 และ 170°C ระยะเวลาในการอบแห้ง 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที รวมข้อมูลที่จะใช้ในการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ 150 ข้อมูล

ในการทดลองหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการ tempering และเปรียบเทียบกับผลการทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้น เมล็ดข้าวโพดความชื้นเริ่มต้น 27 และ 30% w.b. อบแห้งที่อุณหภูมิอากาศ 150°C ใช้เวลาอบแห้งครั้งแรก 4 และ 6 นาที ตามลำดับ จากนั้นนำเมล็ดไปทำเหมเปอริง โดยทำการเก็บเมล็ดข้าวโพดที่ผ่านการอบแห้งจากเครื่องฟลูอิดไชน์เบดในขนาดแก้วทนความดัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 cm สูง 10 cm นำขวดแก้วมาเก็บไว้ในตู้อบที่ควบคุมอุณหภูมิของอากาศให้มีค่าเท่ากับอุณหภูมิของเมล็ดข้าวโพดหลังอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไชน์เบด โดยใช้เวลา 10, 20, 30, 40 และ 50 นาที ตามลำดับ และอบแห้งครั้งที่สอง 5 นาที โดยใช้อุณหภูมิอบแห้ง 150°C เท่าเดิม

ในการทดลองหาความเร็วที่เหมาะสมในกระบวนการเป่าด้วยอากาศแวดล้อม เมล็ดข้าวโพดความชื้นเริ่มต้น 27 และ 30% w.b. อบแห้งที่อุณหภูมิอากาศ 150°C ใช้เวลาอบแห้งครั้งแรก 4 และ 6 นาที ตามลำดับ จากนั้นนำเมล็ดไป tempering โดยใช้เวลา 40 นาที ขั้นตอนสุดท้ายคือการเป่าด้วยอากาศแวดล้อมที่ความเร็ว 0.075, 0.150, 0.225, 0.300 และ 0.375 m/s วิเคราะห์คุณภาพของเมล็ดข้าวโพดหลังอบแห้ง

เมล็ดข้าวโพดที่ใช้ในการทดลองถูกสุ่มเพื่อหารัศมีสมมูล โดยการแทนที่ปริมาตรด้วย Toluene พบว่า รัศมีสมมูลมีค่าเฉลี่ย 4.0 mm และนำไปใช้คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นภายในเมล็ดข้าวโพด

4. ผลการทดลองและวิจารณ์

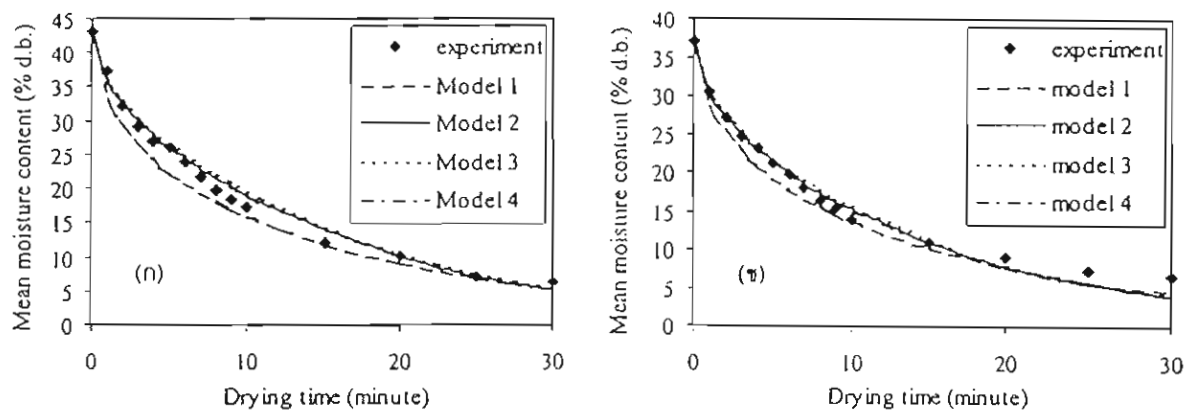
4.1 การศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมล็ดข้าวโพด

ผลจากการนำ Model 1 ถึง 4 ไปแทนลงในสมการ (3) แล้วใช้โปรแกรม STATISTICA ช่วยในการวิเคราะห์โดยใช้วิธีการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear regression) จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ของ แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่ทั้ง 4 รูปแบบ

Model	A	B	C	D	R^2
1	12.45172	4983.278	-	-	95.68
2	2.935665	-2.971230	4171.267	-	97.34
3	322.511	-0.0590156	21.6134	6145.43	97.74
4	2.923734	-2.488338	-1.268766	4185.298	97.34

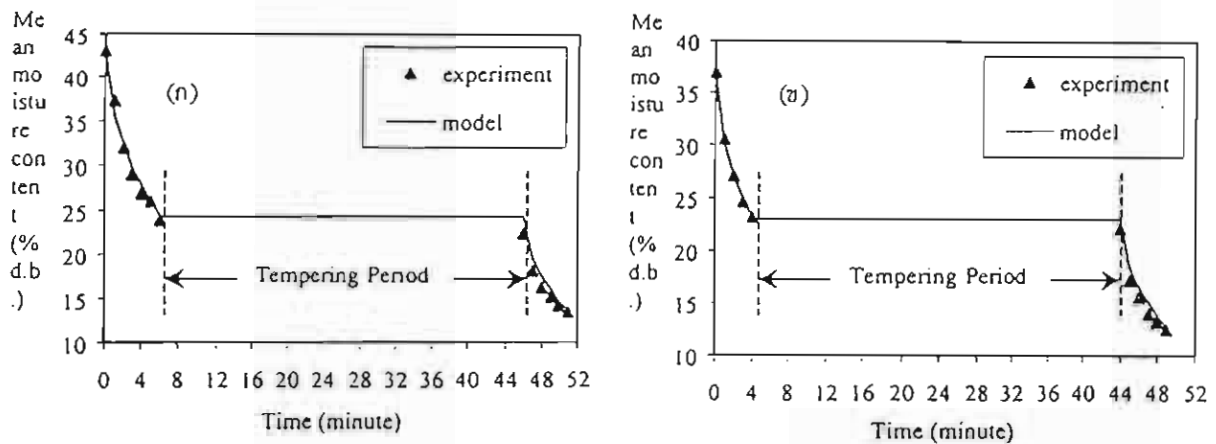
จากการนำค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้จาก Model 1 ถึง 4 ไปแทนในสมการ (3) แล้วหาผลเฉลยของระบบสมการ (5) ซึ่งเป็นผลเฉลยในช่วงของการอบแห้ง แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 1-2 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้จาก Model 2 และ Model 4 มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด แต่รูปแบบของ Model 2 เป็นรูปแบบที่สั้นและกระชับมากกว่า ดังนั้นจึงเลือกค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้จาก Model 2 เป็นค่าที่ใช้ในแบบจำลองทั้งในส่วนของการอบแห้งและการทำเหมเปอริง ต่อไป



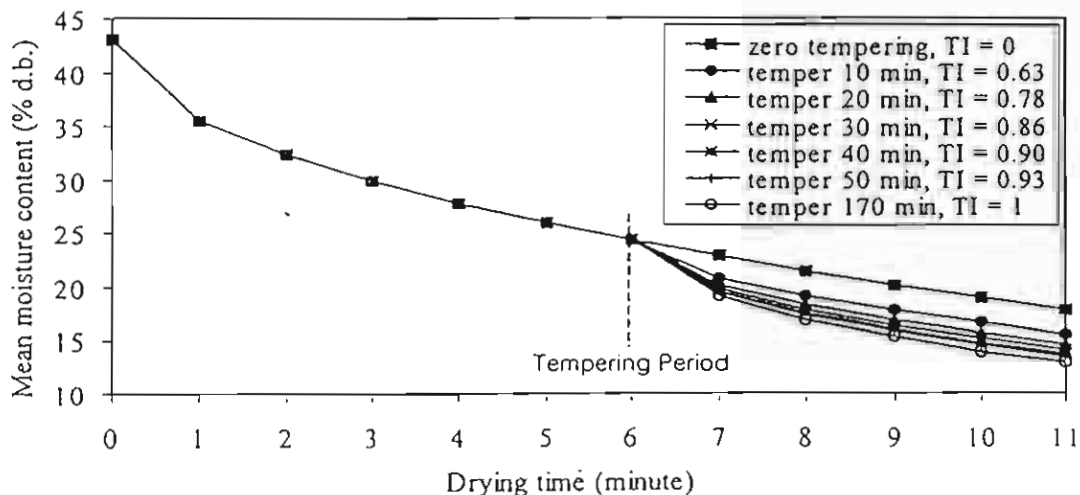
รูปที่ 1 เปรียบเทียบผลการทำนายความชื้นเมล็ดข้าวโพดที่ได้จากการทดลองกับผลจากการแทนค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ใน Model 1 ถึง 4 ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150°C (ก. ความชื้นเริ่มต้น 43% d.b. และ ข. ความชื้นเริ่มต้น 37% d.b.)

4.2 ผลของระยะเวลาการ tempering ต่อการลดความชื้นเมล็ดข้าวโพดในช่วงการอบแห้งครั้งที่สอง

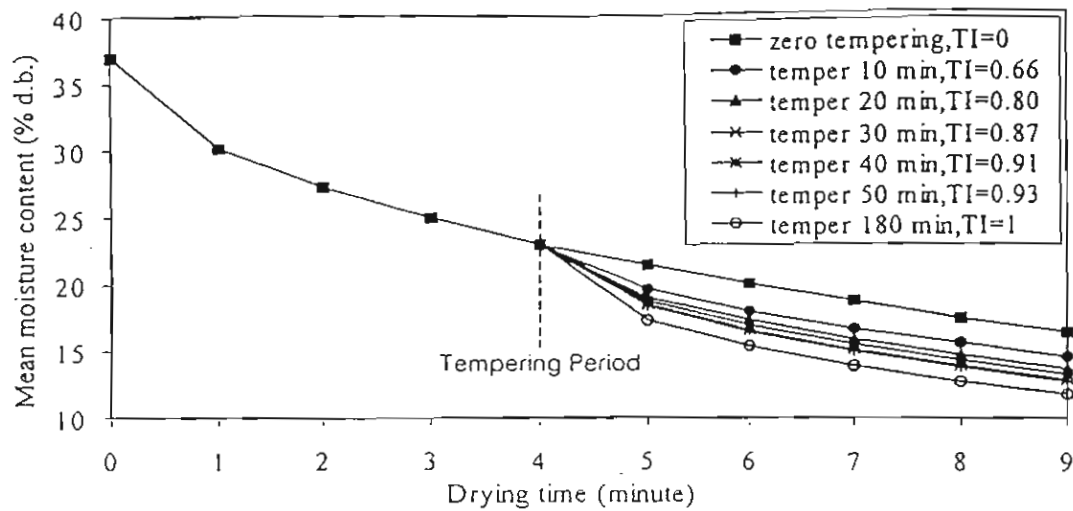
จากการเปรียบเทียบผลการทำนายระยะเวลาการ tempering ระหว่างที่ได้จากการทดลองกับผลจากการจำลองให้ผลสอดคล้องกันดี คือ การ tempering มีส่วนช่วยลดระยะเวลาการอบแห้งครั้งที่สองให้สั้นลงเมื่อเปรียบเทียบที่ค่าความชื้นสุดท้ายค่าเดียวกัน จากแบบจำลองของการอบแห้งแบบสองขั้นตอน (two-passes drying with tempering) ดังแสดงในรูปที่ 2 เมื่อนำมาพลอตเฉพาะเวลาอบแห้ง (drying time) โดยละเว้นในส่วนของการระยะเวลาการ tempering (tempering period) ดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 พบว่า การลดลงของความชื้นในการอบแห้งครั้งที่สองที่ tempering period 40 และ 50 นาที แทบจะไม่แตกต่างกันแล้ว ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมในการทำเหมเปอริงเมื่อพิจารณาในส่วนของการลดลงของความชื้นในการอบแห้งครั้งที่สอง ก็คือ 40 นาที



รูปที่ 2 เปรียบเทียบการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอนระหว่างแบบจำลองกับผลการทดลองโดยใช้ tempering period 40 นาที อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150°C (ก. ความชื้นเริ่มต้น 43% d.b. และ ข. ความชื้นเริ่มต้น 37% d.b.)



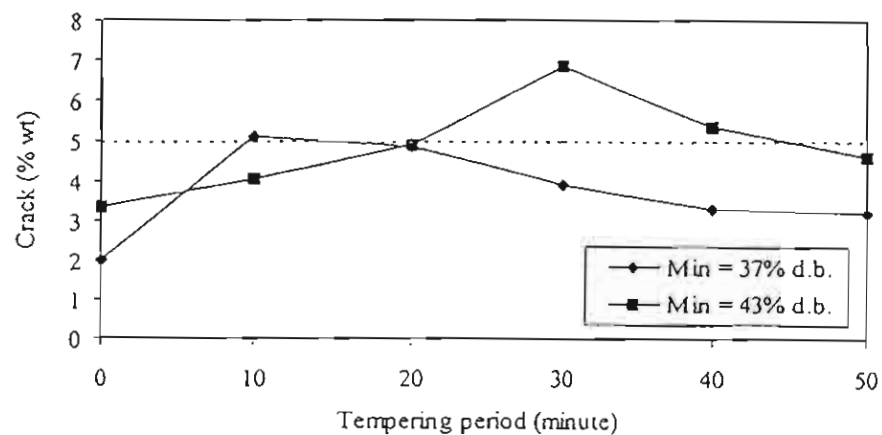
รูปที่ 3 เปรียบเทียบผลการจำลองการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดแบบ 2 ขั้นตอนที่มี tempering period ต่างกัน อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150°C และความชื้นเริ่มต้น 43% d.b.



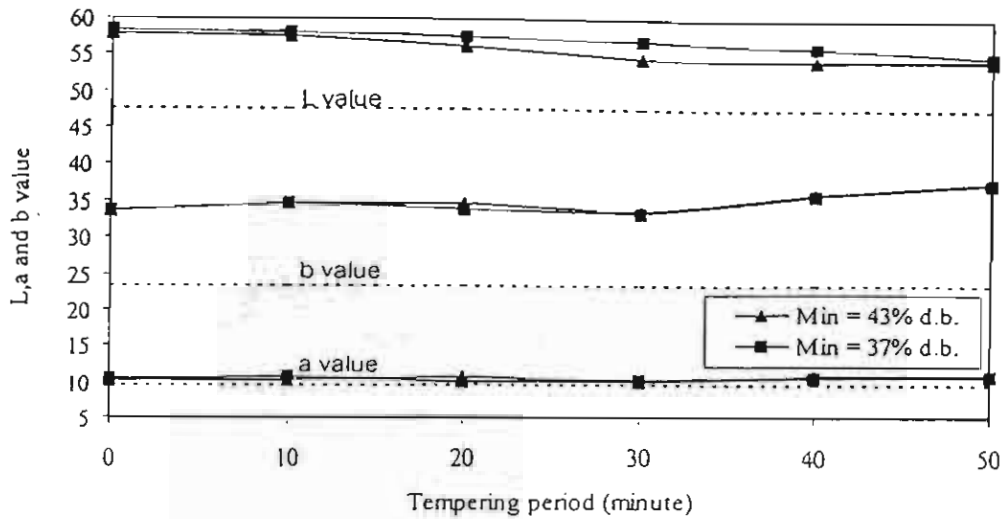
รูปที่ 4 เปรียบเทียบผลการจำลองการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดแบบ 2 ขั้นตอนที่มี tempering period แตกต่างกัน อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150°C และความชื้นเริ่มต้น 37% d.b.

4.3 ผลของการเก็บในที่อับอากาศที่มีต่อคุณภาพเมล็ดข้าวโพด

ผลของการ tempering ที่มีต่อคุณภาพของเมล็ดข้าวโพดหลังอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด พบว่า การ tempering ไม่ส่งผลให้การร้าวของเมล็ดมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 5 ส่วนการเปลี่ยนแปลงสีของเมล็ดข้าวโพดหลังการ tempering พบว่า เมล็ดข้าวโพดจะมีสีคล้ำมากขึ้นเมื่อใช้เวลาในการ tempering นานขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6



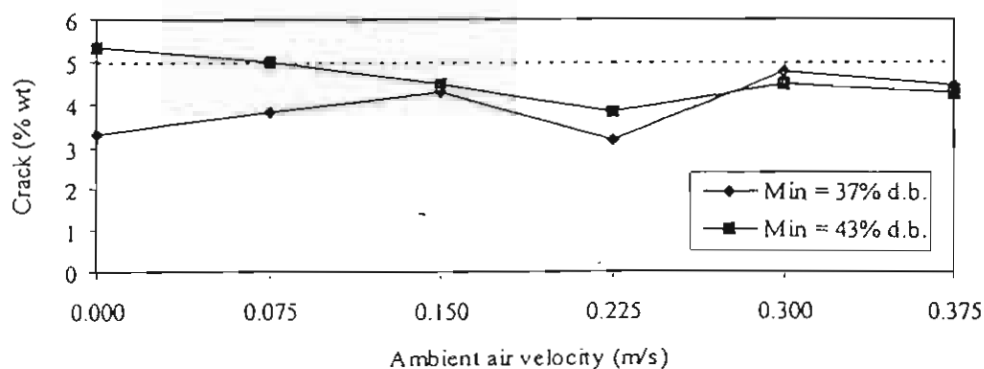
รูปที่ 5 เปอร์เซนต์การร้าวโดยน้ำหนักของเมล็ดข้าวโพดที่เวลาการ tempering ต่าง ๆ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150°C , ความชื้นเริ่มต้น 43 และ 37% d.b.)



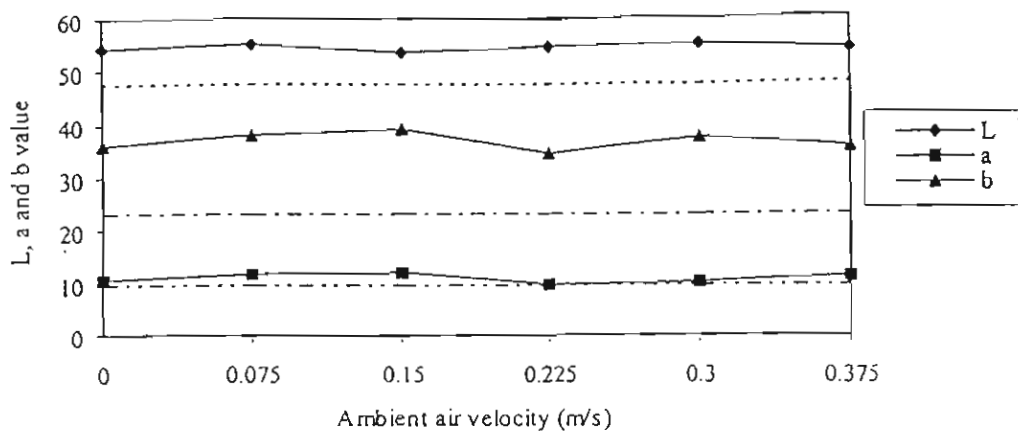
รูปที่ 6 คุณภาพทางด้านสีของเมล็ดข้าวโพดที่เวลาการ tempering ต่าง ๆ
(อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150°C, ความชื้นเริ่มต้น 43 และ 37% d.b.)

4.4 ความเร็วอากาศแวดล้อมที่เหมาะสมในการเป่าเมล็ดข้าวโพดหลังการอบแห้งและการทำเหมเปอริง

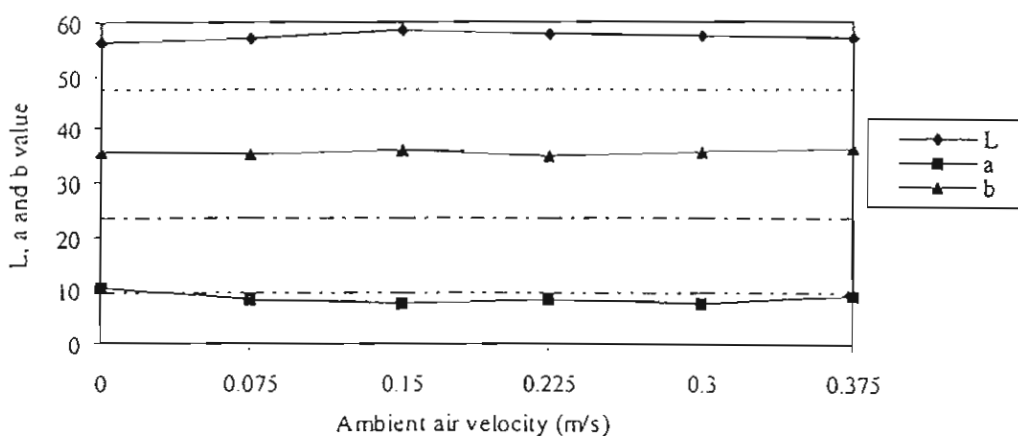
เมื่อเมล็ดข้าวโพดผ่านการอบแห้งด้วยฟลูอิดไเบดและการ tempering แล้ว กระบวนการต่อมาจะทำการลดอุณหภูมิของเมล็ดข้าวโพดโดยการเป่าด้วยอากาศแวดล้อม ซึ่งจะสามารถช่วยลดความชื้นของเมล็ดข้าวโพดลงได้อีกด้วย ผลของความเร็วอากาศแวดล้อมในกระบวนการเป่าลมเย็นที่มีต่อคุณภาพของเมล็ดข้าวโพดหลังอบแห้งแบบฟลูอิดไเบดและการ tempering พบว่า การร้าวของเมล็ดข้าวโพดและคุณภาพทางด้านสีไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเร็วของอากาศแวดล้อม ดังแสดงในรูปที่ 7-9 ดังนั้นความเร็วที่เหมาะสมในกระบวนการเป่าลมเย็น ก็คือ 0.075-0.375 m/s ซึ่งการที่จะเลือกใช้ความเร็วค่าใดให้เหมาะสมนั้นจะขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นเมล็ดข้าวโพดที่ใช้ในกระบวนการเป่าลมเย็น ถ้าชั้นเมล็ดข้าวโพดมีความหนามากควรใช้ความเร็วลมต่ำ เพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียความดันหรือมีความดันตกคร่อมเบด (pressure drop) มากเกินไป



รูปที่ 7 เปอร์เซ็นต์การร้าวของเมล็ดข้าวโพดหลังการเป่าด้วยอากาศแวดล้อมที่ความเร็วต่าง ๆ เป็นระยะเวลา 40 นาที (ความชื้นเริ่มต้น 43 และ 37% d.b., อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150°C และ tempering period 40 min)



รูปที่ 8 คุณภาพทางด้านสีของเมล็ดข้าวโพดหลังการเป่าด้วยอากาศแวดล้อมที่ความเร็วต่าง ๆ เป็นระยะเวลา 40 นาที (ความชื้นเริ่มต้น 43% d.b., อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150°C, เวลาอบแห้ง 6 นาที, tempering temp. 114°C และ tempering period 40 min)



รูปที่ 9 คุณภาพทางด้านสีของเมล็ดข้าวโพดหลังการเป่าด้วยอากาศแวดล้อมที่ความเร็วต่าง ๆ เป็นระยะเวลา 40 นาที (ความชื้นเริ่มต้น 37% d.b., อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150°C, เวลาอบแห้ง 4 นาที, tempering temp. 110°C และ tempering period 40 min)

5. สรุป

1. จากการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดที่อุณหภูมิสูงแบบ 2 ขั้นตอน โดยมีการ tempering กันกลางระหว่างขั้นตอน (high temperature two-passes drying with tempering) เพื่อศึกษาถึง moisture profile ภายในเมล็ดในระหว่างกระบวนการอบแห้ง และกระบวนการ tempering โดยการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (ภาษาปาสคาล) เพื่อใช้ในการหาผลเฉลย ผลที่ได้จากการศึกษามีดังต่อไปนี้

1.1 สามารถทำนายค่าความชื้นที่ลดลงในระหว่างช่วงการอบแห้งครั้งแรก และครั้งที่สอง (ที่อุณหภูมิอบแห้ง 150°C) ได้ดีพอสมควร

1.2 จากผลการทำนายระยะเวลาในการ tempering เมล็ดข้าวโพดเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่า ระยะเวลาที่เหมาะสม คือ 40 นาที

2. จากการศึกษาถึงผลของการ tempering ต่อคุณภาพเมล็ดข้าวโพดหลังอบแห้ง พบว่า มีส่วนช่วยลดความชื้นในระหว่างการอบแห้งครั้งที่สอง ทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง จึงช่วยลดความสิ้นเปลืองพลังงานในกา

รอบแห้ง ส่วนผลทางด้านคุณภาพยังไม่สามารถสรุปได้ว่า การ tempering มีส่วนช่วยทำให้เมล็ดมีการร้าวน้อยลง และถ้าใช้เวลาในการ tempering นานขึ้นจะทำให้เมล็ดข้าวโพดกล่ำมากขึ้น เมื่อพิจารณาคุณภาพเมล็ดข้าวโพดและความสามารถในการลดความชื้นในช่วงการอบแห้งครั้งที่สองจะได้ว่า ระยะเวลาในการทำเทมเปอริงที่เหมาะสม คือ 40 นาที

3. จากการทดลองหาความเร็วอากาศที่เหมาะสมในการเป่าเมล็ดข้าวโพด พบว่า การเพิ่มความเร็วทำให้การลดลงของความชื้นมีค่ามากขึ้น แต่ไม่ได้มีผลต่อคุณภาพของเมล็ดข้าวโพด (ได้แก่ปริมาณการร้าว และคุณภาพทางด้านสี) ความเร็วที่เหมาะสมในกระบวนการเป่าลมเย็น คือ 0.075-0.375 m/s ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นเมล็ดข้าวโพด ถ้าชั้นเมล็ดข้าวโพดมีความหนามากควรใช้ความเร็วลมต่ำ เพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียความชื้นมากเกินไป

คำขอบคุณ

ผู้ทำวิจัยใคร่ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

1. Soponronnarit, S., Pongtomkulpanich, A. and Prachayawarakorn, S., 1997, " Corn Quality after Drying by Fluidization Technique at High Temperature, " *Drying Technology*, Vol. 15, No. 10, pp. 2577-2586.
2. พงศ์เทพ โชติจักรดิกุล, 2540, การจัดการข้าวโพดชื้นโดยการอบแห้งแบบฟลูอิดเซชัน, การเทมเปอ์ และการเป่าอากาศแวดล้อม, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 41-88.
3. Satayaprasert, C. and Vanishsrivatana, V., 1992, " Drying Corn in Fluidized Bed, " *Thailand Engineering Journal*, Vol. 44, No. 12, pp. 76-79.
4. Steffe, J.F. and Singh, R.P., 1980, " Theoretical and Practical Aspects of Rough Rice Tempering, " *Transaction of the American Society of Agricultural Engineers*, Vol. 23, No. 3, pp. 775-782.
5. Tolaba, M.P., Aguerre, R.J. and Suarez, C., 1999, " Drying Simulation of Corn with Tempering, " *Drying Technology*, Vol. 17, No. 6, pp. 1081-1093.
6. Soponronnarit, S. and Prachayawarakorn, S., 1992, " Maintaining quality maximizing throughput and minimizing energy consumption in Fluidized bed paddy drying, " *Proceedings of the 15th ASEAN Seminar on Grain Post-Harvest Technology*, pp. 1-4.

รายงานการประชุมวิชาการวิชาการประจำปี 2544
สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, ขอนแก่น, 25-26 มกราคม 2544

การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนในระดับอุตสาหกรรม
Performance Evaluation of Industrial-scale Heat Pump Dryer

อาทิตย์โคตรสาร สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ และ วารุณี เดีย
คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
91 ถนนประชาอุทิศ บางมด กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนในระดับอุตสาหกรรม 2 เครื่องขณะใช้งานจริง และได้พิจารณาคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งและปัญหาในการใช้งานด้วย เครื่องอบแห้งเครื่องแรกเป็นแบบระบบเปิดใช้สำหรับอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวขนาด 8 ตัน อัตราการไหลเวียนเมล็ดพันธุ์ข้าวสูงสุด 6 ตันต่อชั่วโมง ผลการประเมินสมรรถนะพบว่าค่าเฉลี่ยสูงสุดของอัตราการอบแห้งเท่ากับ 25 kg water evap./h อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะ (SMER) 1.9 kg water evap./kWh สัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน (COP_h) 7 และอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (EER_s) 3.9 kW_{in}/kW_{elec} ส่วนค่าเฉลี่ยความต้องการพลังงานจำเพาะต่ำที่สุด (SEC) เท่ากับ 1.9 MJ/ kg water evap. ปัญหาส่วนใหญ่ที่พบ คืออุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้งต่ำ มีการสะสมของฝุ่นที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และมีน้ำแข็งเกาะที่เครื่องทำระเหยเมื่ออุณหภูมิอากาศแวดล้อมต่ำ ส่วนเครื่องอบแห้งที่ 2 เป็นแบบระบบปิดใช้อบผลิตภัณฑ์ทางเกษตรทั้งแบบสดและแปรรูป ห้องอบแห้งบรรจุรถเข็นได้ 4 คัน แต่ละคันมี 17 ถาด การใช้งานส่วนใหญ่จะใส่ผลิตภัณฑ์ไม่เต็มพิกัดและใส่หลายชนิด ผลจากการประเมินสมรรถนะพบว่ามีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วงดังนี้ อัตราการอบแห้ง 6 – 11.6 kg water evap./hr ค่า SEC 4.2 – 7.8 MJ/ kg water evap. ค่า SMER 0.5 – 0.9 kg water evap./kWh ค่า COP_h อยู่ในช่วง 3.8 – 4.7 และ ค่า EER_s อยู่ในช่วง 1.7 – 2.1 kW_{in}/kW_{elec} ปัญหาส่วนใหญ่ที่พบ คือ ในช่วงผลิตภัณฑ์ใกล้แห้งอุณหภูมิลมร้อนมีค่าสูงกว่าค่าที่ตั้งไว้ไม่สามารถควบคุมได้ มีลมรั่วออกจากห้องอบแห้งที่บริเวณขอบประตู และการลำเลียงรถเข็นเข้าห้องอบแห้งค่อนข้างลำบาก คุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งทั้ง 2 เครื่องอยู่ในเกณฑ์ดีเป็นที่ยอมรับได้
คำสำคัญ : การอบแห้ง / เมล็ดพันธุ์ข้าว / ผลผลิตทางเกษตร

Abstract

The performance of two industrial-scale heat pump dryers under actual operating conditions in the sites was studied. The product quality and operating problem were considered. First dryer is the open loop system for rice seeds drying, which has capacity of 8 tons of rice seeds per batch and maximum batchwise seed circulation of 6 tons per hours. The maximum average value obtained of drying rate, SMER, COP_h and EER_s were 25 kg water evap./h, 1.9 kg water evap./kWh, 7 and 3.9 kW_{in}/kW_{elec} , respectively. For the average specific energy consumption, the minimum value was 1.9 MJ/kg water evap. Too low drying air temperature, the dust collection on the heat exchanger and frost forming at evaporator when the ambient temperature is too low were the main operating problems. The second dryer is closed loop system for various kinds of both fresh and processed agricultural products. The dryer chamber can accommodate 4 mobiles with 17 tlers each. The dryer is usually operated at part load with various kinds of product. The evaluation results were shown that the average value of drying rate, SEC, SMER, COP_h and EER_s were 6 -11.6 kg water evap./h, 4.2 - 7.8 MJ/kg water evap., 0.5 - 0.9 kg water evap./kWh, 3.8 - 4.7 and 1.7 – 2.1 kW_{in}/kW_{elec} , respectively. The problems that were found during operation drying were the higher drying air temperature than set point while the product is

nearly dry, air leakage at the edge of drying chamber and relatively difficult loading of mobiles. The product qualities obtained from both dryers are satisfactory.

Key words: Drying / Rice Seeds / Agricultural Products

บทนำ

เทคโนโลยีการอบแห้งสำหรับผลผลิตการเกษตรปัจจุบันนับว่าเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งในอดีตเครื่องอบแห้งจะมีขนาดเล็ก แต่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเป็นระดับอุตสาหกรรม เครื่องอบแห้งส่วนใหญ่จะใช้ลมร้อนในการอบแห้ง โดยใช้แหล่งความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งพวกถ่าน (เช่น แก๊สปิโตรเลียม) วัสดุเหลือทิ้งจากทางเกษตร (เช่น แกลบ) ความร้อนที่เหลือจากกระบวนการผลิต (เช่น ไอน้ำความดันต่ำ) ความร้อนจากแสงอาทิตย์ และไฟฟ้า เป็นต้น

เนื่องจากการอบแห้งเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานมาก และผลิตภัณฑ์มักจะมีคุณภาพลดลงในช่วงเวลาอบแห้ง ดังนั้นการใช้เครื่องอบแห้งที่มีประสิทธิภาพดีจะช่วยลดต้นทุนด้านพลังงานได้ เครื่องอบแห้งแบบบีบความร้อนจัดว่าเป็นเครื่องอบแห้งแบบหนึ่งที่มีประสิทธิภาพเนื่องจากสามารถนำความร้อนกลับมาใช้งานได้ เช่น จากลมร้อนที่ออกจากห้องอบแห้ง และสามารถลดความชื้นอากาศสำหรับอบแห้ง นอกจากนี้จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งบีบความร้อนมีคุณภาพดี [1, 2, 3] และจากการศึกษาของ Chou et al.[4] พบว่าเครื่องอบแห้งบีบความร้อนมีประสิทธิภาพดีกว่าเครื่องอบแห้งที่ใช้ก๊าซเชื้อเพลิง หรือน้ำมันเชื้อเพลิงให้ความร้อน และ Prasertsan et al. [5] พบว่าการใช้เครื่องอบแห้งบีบความร้อนมีต้นทุนทางด้านค่าเงินต่ำกว่าเครื่องอบแห้งที่ใช้ไฟฟ้าให้ความร้อนโดยตรง และเครื่องอบแห้งที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงให้ความร้อนแก่อากาศร้อน อีกด้วย

ปัจจุบันการใช้งานเครื่องอบแห้งบีบความร้อนในประเทศไทยยังไม่แพร่หลาย เริ่มมีการสร้างและใช้งานเครื่องอบแห้งบีบความร้อนขนาดใหญ่ ซึ่งยังไม่มีการศึกษาสมรรถนะในขณะใช้งานจริง ดังนั้นในการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่ประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งบีบความร้อนขนาดใหญ่ รวมถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์และปัญหาที่เกิดขึ้นขณะใช้งานจริง เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องอบแห้งบีบความร้อนต่อไป

อุปกรณ์และวิธีดำเนินการ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเครื่องอบแห้งแบบบีบความร้อนจำนวน 2 เครื่อง ได้แก่ เครื่องอบแห้งสำหรับอบเมล็ดพันธุ์ ซึ่งมีการทำงานแบบวงจรอากาศเปิด ใช้อบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ตั้งอยู่ที่ศูนย์ขยายพันธุ์พืชที่ 16 จังหวัดสุรินทร์ อบแห้งได้ครั้งละ 8 ตันโดยมีอัตราการหมุนเวียนเมล็ดพันธุ์สูงสุด 6 ตันต่อชั่วโมง ใช้งานมาแล้วประมาณ 3 เดือน โดยใช้อบแห้งประมาณปีละ 3 เดือน วันละ 10 - 12 ชั่วโมง ในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงมกราคมใช้อบแห้งเฉพาะข้าวนาปีเท่านั้น ลักษณะและส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องอบแห้งแสดงดังรูปที่ 1 ระบบบีบความร้อนใช้ R-22 เป็นสารทำความเย็นซึ่งประกอบด้วย เครื่องอัดไอแบบ Hermetic ชนิดลูกสูบพิกัดมอเตอร์ 3.7 kW จำนวน 2 ชุด เครื่องควบแน่นขนาด 20 kW สำหรับภายในจำนวน 2 ชุด และภายนอก 1 ชุด เครื่องทำระเหยขนาด 18 kW จำนวน 2 ชุด วาล์วขยายตัว จำนวน 2 ชุด พัดลมสำหรับเครื่องควบแน่นภายนอกขนาดพิกัดมอเตอร์ 200 W จำนวน 2 ชุด

สำหรับเครื่องอบแห้งที่ 2 เป็นเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางเกษตร มีการทำงานเป็นวงจรอากาศแบบระบบปิด นอกจากใช้อบผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรแล้วยังใช้อบแห้งอาหารแปรรูปอีกด้วย ตั้งใช้งานอยู่ที่พุทธสถานศิระโสโลก จังหวัดศรีสะเกษ ใช้งานมาแล้ว 2 ปี โดยใช้งานวันละ 15 - 20 ชั่วโมง ลักษณะการใช้งานมีทั้งอบแห้งผลิตภัณฑ์หลาย

ชนิดพร้อมกัน และผลิตภัณฑ์ชนิดเดียว ลักษณะและส่วนประกอบสำคัญของเครื่องอบแห้งแสดงดังรูปที่ 2 ประกอบด้วย ห้องอบแห้งขนาด กว้าง 1 m ยาว 3.9 m และสูง 1.5 m ภายในบรรจุรถเข็น 4 คัน จำนวนถาดรวม 68 ถาด.แต่ละคัน บรรจุถาดได้จำนวน 17 ถาด ใช้พัดลมขนาด 5.5 kW และระบบปั๊มความร้อนใช้ R-22 เป็นสารทำความเย็นซึ่งประกอบด้วย เครื่องอัดไอบแบบ Hermetic ชนิดลูกสูบพิกัดมอเตอร์ 6.7 kW เครื่องควบแน่นสำหรับภายในขนาด 25 kW และสำหรับภายนอกขนาด 10.5 kW เครื่องทำระเหยขนาด 25 kW วาล์วขยายตัว พัดลมสำหรับเครื่องควบแน่นภายนอก พิกัดมอเตอร์ 200 W จำนวน 2 ชุด bypass air ข้าม evaporator อยู่ในช่วง 77-82%

ตำแหน่งวัดอุณหภูมิอากาศ อุณหภูมิและความดันสารทำความเย็นของเครื่องอบแห้งทั้ง 2 เครื่อง แสดงดังรูปที่ 3 และ รูปที่ 4 ตามลำดับ การวัดอุณหภูมิอากาศและสารทำความเย็นใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ต่อเข้ากับ data logger การวัดความดันสารทำความเย็นใช้เกจวัดความดัน การวัดความเร็วลมของอากาศใช้ hot wire anemometer การวัดพลังงานไฟฟ้าใช้ kilowatt hour meter

วิธีดำเนินการทดลองและเก็บข้อมูลของเครื่องอบแห้งเมล็ดพันธุ์มีวิธีการดังนี้ ตั้งอัตราการหมุนเวียนของเมล็ดพันธุ์ 6 ครั้งต่อชั่วโมง และอุณหภูมิควบคุมอากาศที่ใช้ในการอบแห้งไว้ที่ 43°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ออบแห้งเมล็ดพันธุ์ นำเมล็ดพันธุ์ที่ผ่านเครื่องทำความสะอาดแล้วปล่อยลงในตู้ ทำการเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปหาความชื้นเริ่มต้น และเริ่มการอบแห้ง บันทึกน้ำหนักของน้ำที่ควบแน่นจากเครื่องทำระเหย ค่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้ง และค่าอุณหภูมิ และความดันทุก ๆ ชั่วโมง วัดความชื้นของข้าวเป็นระยะ ๆ เมื่อความชื้นลดลงได้ตามต้องการแล้ว จึงหยุดการเดินเครื่องอบแห้ง การเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปหาความชื้นสุดท้ายและตรวจสอบคุณภาพ ได้แก่ ความงอก และความแข็งแรง ส่วนเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางเกษตรมีวิธีการดังนี้ ตั้งอุณหภูมิควบคุมอากาศสำหรับอบแห้งไว้ที่ 55°C นำผลิตภัณฑ์วางลงในถาดและจัดให้มีความหนาสม่ำเสมอ ใส่ลงบนรถเข็นแล้วลำเลียงรถเข็นเข้าห้องอบแห้ง เริ่มอบแห้ง บันทึกข้อมูล เวลา ชนิด และน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ และจำนวนถาดที่ใส่เข้าและออกจากห้องอบแห้ง อุณหภูมิ มวลของน้ำที่ควบแน่นจากเครื่องทำระเหย ค่าความดันของสารทำความเย็น และไฟฟ้าที่ใช้ทุก ๆ ชั่วโมง เนื่องจากมีการอบแห้งผลิตภัณฑ์หลายอย่างพร้อม ๆ กัน ผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจึงแห้งไม่พร้อมกัน ดังนั้นในช่วงระหว่างการอบแห้งแต่วันจึงมีการนำบางผลิตภัณฑ์ที่แห้งแล้วออกจากห้องอบแห้งก่อน และมีการใส่ผลิตภัณฑ์ใหม่เข้าห้องอบแห้ง บันทึกข้อมูลเมื่อมีการเปลี่ยนผลิตภัณฑ์ในห้องอบ รวมทั้งเก็บตัวอย่างเพื่อนำมาตรวจสอบคุณภาพทางด้าน สี โดยใช้ R.H.S colour chart และด้านปริมาณเชื้อจุลินทรีย์โดยจะส่งตรวจที่กระทรวงสาธารณสุข (เฉพาะสมุนไพร) สำหรับอัตราการอบแห้งจะพิจารณาจากผลรวมของปริมาณน้ำระเหยจากวัสดุอบแห้งในช่วงเวลาหนึ่ง เช่น 3 วัน 7 วัน ในการศึกษาถึงปัญหาการใช้เครื่องอบแห้งได้ทำการสอบถามจากผู้ใช้งาน และจากการสังเกตในระหว่างการทดลอง

การประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งจะประเมินจากอัตราการอบแห้ง ในหน่วย kg water evap./h ค่าความต้องการพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) ในหน่วย MJ/kg water evap. และ อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะ (Specific moisture extraction rate, SMER) ในหน่วย $\text{kg water evap./kWh}$ ด้านระบบปั๊มความร้อนจะหาค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบปั๊มความร้อน (Coefficient of performance of heat pump, COP_h) ซึ่งหาจากอัตราความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องควบแน่นทั้งหมดต่อกำลังงานที่ให้เครื่องอัดไอบ อัตราส่วนทางพลังงาน (Energy efficiency ratio of dryer system, EER_d) ซึ่งหาได้จากอัตราความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องควบแน่นภายในต่อไฟฟ้าทั้งหมดที่ให้เครื่องอบแห้งหน่วย $\text{kW}_{\text{in}}/\text{kW}_{\text{elec}}$ และร้อยละของความร้อนที่ใช้ประโยชน์จากปั๊มความร้อน (Useful heat, %) ซึ่งประมาณจากอัตราความร้อนที่ระบายจากเครื่องควบแน่นภายในต่ออัตราความร้อนที่ระบายจากเครื่องควบแน่นทั้งหมด

ผลและวิจารณ์

1. เครื่องอบแห้งเมล็ดพันธุ์แบบบีบความร้อน

ผลการอบแห้งและประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวแสดงในตารางที่ 1 พบว่าจากการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวปริมาณ 4,922 – 8,250 kg/batch ที่ความชื้นในช่วง 15.4-13.5 % w.b. ถึง 12.7-11.2 % w.b. ได้อัตราการอบแห้งเฉลี่ยมีค่าระหว่าง 13.7-25 kg water evap./h ค่า SEC_{avg} มีค่าระหว่าง 1.93–3.60 MJ/kg water evap. ค่า SMER มีค่าระหว่าง 1-1.9 kg water evap./kWh ระบบบีบความร้อนทั้งสองเครื่องมีสมรรถนะใกล้เคียงกันโดยมีค่า COP_n ประมาณ 5.5 – 7 ค่า EER_n มีค่าระหว่าง 2.75–3.92 kW_{tr}/kW_{elec} และค่า Useful heat มีค่าอยู่ระหว่าง 91.5–100% จะเห็นได้ว่าการทดลองที่ 2 มีศักยภาพการอบแห้งสูงสุด เนื่องจากความชื้นเริ่มและปริมาณเมล็ดพันธุ์สูงและอุณหภูมิอากาศแวดล้อมสูง เนื่องจากเป็นระบบอบแห้งแบบวงจรอากาศเปิดดังนั้นสภาวะอากาศแวดล้อมจึงมีอิทธิพลต่อการเพิ่มอุณหภูมิและการลดความชื้นของลมร้อนสำหรับอบแห้ง ด้านคุณภาพของเมล็ดพันธุ์หลังการอบแห้งอยู่ในเกณฑ์ดี โดยมีค่าความงอกเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 91-97% และค่าความแข็งแรงเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 73–87% ซึ่งค่าความงอกและความแข็งแรงที่ทดสอบได้มีค่ามากกว่าค่ามาตรฐานของเมล็ดพันธุ์ คือค่ามาตรฐานความงอกต้องมากกว่า 85% และค่ามาตรฐานความแข็งแรงต้องมากกว่า 70%

ปัญหาที่พบจากการใช้เครื่องอบแห้ง ได้แก่ อุณหภูมิลมร้อนก่อนเข้าห้องอบแห้งต่ำ มีฝุ่นและเศษผงสะสมที่เครื่องทำระเหย และมีน้ำแข็งเกาะที่เครื่องทำระเหย เนื่องจากการออกแบบเครื่องอบแห้งบีบความร้อนแบบใช้อากาศแวดล้อมเป็นแหล่งความร้อน ได้ใช้ค่าสภาวะอากาศแวดล้อมที่อุณหภูมิ 30°C ความชื้นสัมพัทธ์ 70% ในการออกแบบ แต่สถานที่ใช้งานจริงมีอุณหภูมิอากาศแวดล้อมต่ำกว่าค่าที่ออกแบบ อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้งที่ได้จึงต่ำกว่า อุณหภูมิควบคุมที่ตั้งไว้มาก นอกจากนี้สถานที่ใช้เครื่องอบแห้งนี้มีฝุ่นมาก จึงทำให้มีสิ่งสกปรกเข้าไปสะสมเป็นจำนวนมากที่เครื่องทำระเหย มีผลทำให้ COP_n ค่อย ๆ ลดลง

แนวทางการแก้ไขปัญหาที่สามารถทำได้โดย ติดตั้งขดลวดความร้อนเสริมเพื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้งให้ถึง 43°C หรือ ออกแบบระบบบีบความร้อนใหม่โดยใช้อุณหภูมิอากาศแวดล้อมต่ำสุดในช่วงที่ใช้เครื่องอบแห้ง โดยไม่ต้องใช้ขดลวดความร้อน ติดตั้งแผ่นกรองอากาศบริเวณด้านหน้าเครื่องทำระเหยเพื่อกันฝุ่นและต้องติดตั้งในตำแหน่งที่สามารถถอดทำความสะอาดได้ง่ายเนื่องจากบริเวณใช้งานมีฝุ่นมากแผ่นกรองอากาศจะตันเร็ว และมันทำความสะอาดเครื่องทำระเหยและเครื่องควบแน่น จะทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดี

2. เครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางเกษตร

ผลการวิเคราะห์สรุปได้ดังตารางที่ 2 พบว่า อัตราการอบแห้งเฉลี่ย มีค่าระหว่าง 6–11.6 kg water evap./h อัตราการควบแน่นน้ำ (MER) เฉลี่ยมีค่าระหว่าง 5.4–10 kg water condensed/h ค่า SEC เฉลี่ย มีค่าระหว่าง 4.2–7.8 MJ/kg water evap. ค่า SMER เฉลี่ย มีค่าระหว่าง 0.5–0.9 kg water evap./kWh ค่า COP_n เฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.8–4.7 ค่า EER_n เฉลี่ยมีค่าระหว่าง 1.7–2.1 kW_{tr}/kW_{elec} และค่า Useful heat เฉลี่ยมีค่าอยู่ระหว่าง 64–97 % เนื่องจากมีการอบแห้งผลิตภัณฑ์หลายชนิดพร้อมกันและใส่ผลิตภัณฑ์ไม่เต็มพิกัด ดังนั้นสมรรถนะของเครื่องอบแห้งจึงขึ้นอยู่กับ ชนิด ปริมาณ และความชื้นของผลิตภัณฑ์กล่าวคือ เครื่องอบแห้งจะแสดงสมรรถนะที่ดีเมื่อมีการใส่ผลิตภัณฑ์ในห้องอบมาก ใกล้พิกัด และวัสดุอบแห้งมีความชื้นสูงและระเหยได้ง่าย สำหรับคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งแสดงดังตารางที่ 3 และจากการสอบถามผู้ใช้เครื่องและผู้บริโภคผลิตภัณฑ์พบว่ามีความพอใจมากโดยเฉพาะด้านสี เช่น กลัวย่นน้ำว่าจะมีสีค่อนข้างเหลืองอมส้ม ขณะออกจากห้องอบแห้งใหม่ ๆ และ สมุนไพรมีสีเข้มกว่าผลิตภัณฑ์ก่อนอบแห้งเล็กน้อย และจาก

การนำตัวอย่างสมุนไพร มาตรวจวิเคราะห์เพื่อหาการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ (Microbial limits) ที่กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ ตามมาตรฐาน TP 1997 Category 6 ผลการตรวจวิเคราะห์พบว่าไม่มีค่าปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ไม่เกินเกณฑ์มาตรฐาน

ปัญหาจากการใช้เครื่องอบแห้งที่พบได้แก่ 1) มีลมรั่วออกจากห้องอบแห้งบริเวณขอบประตู โดยมีการรั่วเฉลี่ยประมาณ 11% ของปริมาณลมทั้งหมด แนวทางแก้ไขปัญหาคือ การออกแบบการซีลใหม่ที่ขอบประตูโดยเฉพาะบริเวณขอบด้านล่างซึ่งมีการรั่วค่อนข้างมากกว่าจุดอื่น 2) ควบคุมอุณหภูมิอากาศในช่วงผลิตภัณฑ์ใกล้จะแห้งไม่ได้ อุณหภูมิสูงเกินค่าที่ตั้งไว้ เนื่องจากในช่วงเวลาดังกล่าวภาวะความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งค่อนข้างต่ำ ทำให้อุณหภูมิอากาศที่เข้าห้องอบแห้งสูง แต่เครื่องควบคุมแรงดันตัวนอกระบายความร้อนออกไม่ทัน แนวทางแก้ไขปัญหานี้ทำได้โดยการเพิ่มขนาดเครื่องควบคุมแรงดันตัวนอกซึ่งเดิมใช้ขนาดประมาณ 2/5 เท่าของเครื่องควบคุมแรงดันตัวใน เปลี่ยนเป็นขนาดประมาณ 1/2 เท่าของเครื่องควบคุมแรงดันตัวใน 3) การลำเลียงรถเข็นเข้าห้องอบค่อนข้างลำบาก เพราะวาล์วที่ใส่ผลิตภัณฑ์เต็มทุกถาด รถจะมีน้ำหนักค่อนข้างมาก เวลาที่นำรถเข็นเข้าตู้อบจะต้องเข็นขึ้นทางลาดที่หน้าตู้อบ และล้อรถเข็นจะไปติดที่กั้นขึ้นทางลาด ทำให้ต้องใช้ผู้ปฏิบัติงานช่วยกันยก ซึ่งทำให้ไม่สะดวกอย่างยิ่ง แนวทางการแก้ไขปัญหานี้ทำได้โดยออกแบบทำทางลาดใหม่

สรุป

การประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งบีบความร้อนขณะใช้งานจริง 2 เครื่อง ได้แก่ เครื่องอบแห้งเมล็ดพันธุ์บีบความร้อนแบบวงจรอากาศเปิด และ เครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางเกษตรเป็นแบบวงจรอากาศปิด พบว่าเครื่องอบแห้งเมล็ดพันธุ์บีบความร้อนแบบวงจรอากาศเปิด มีการใช้งานในช่วงมากกว่าครึ่งถึงเต็มพิกัด สมรรถนะสูงสุดของเครื่องอบแห้งที่พบมีค่าดังนี้ อัตราการอบแห้งเฉลี่ย 25 kg water evap./h SEC เฉลี่ย 1.9 MJ/kg water evap. SMER เฉลี่ย 1.9 kg water evap./kWh EER_h เฉลี่ย 3.9 kW_{in}/kW_{cool} ค่า COP_h เฉลี่ย 7 และนำความร้อนจากบีบความร้อนมาใช้ประโยชน์ได้มากกว่า 90 % อุณหภูมิความร้อนที่ได้ค่อนข้างต่ำอยู่ในช่วง 23-33 °C เนื่องจากอุณหภูมิอากาศแวดล้อมในสถานที่ใช้งานต่ำกว่าค่าที่ออกแบบ และมีฝุ่นละอองมาก ดังนั้นในการออกแบบสำหรับเครื่องอบแห้งแบบวงจรอากาศเปิด ควรคำนึงถึงสภาพอากาศแวดล้อมของสถานที่ใช้งานด้วย ส่วนเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางเกษตรเป็นแบบวงจรอากาศปิด อุณหภูมิความร้อนที่ได้อยู่ในช่วง 52-57°C เนื่องจากขณะใช้งานจริงมีการใส่ผลิตภัณฑ์หลายชนิดพร้อมกันและใส่ผลิตภัณฑ์ไม่เต็มพิกัด ดังนั้น ชนิด ปริมาณ และความชื้นของผลิตภัณฑ์จึงมีผลต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง ความร้อนที่นำมาใช้ประโยชน์ได้จากบีบความร้อนอยู่ในช่วง 64-97% อย่างไรก็ตามถ้ามีการจัดการวางแผนการใส่ผลิตภัณฑ์ที่ดีก็จะทำให้สมรรถนะดีขึ้นได้ เนื่องจากอุณหภูมิการอบแห้งต่ำดังนั้นคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องอบแห้งทั้งสองอยู่ในเกณฑ์ดีเป็นที่พอใจของผู้ใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยนี้ บริษัทไร่ชัย เอนจิเนียริง ซัพพลาย จำกัด ที่ให้ความร่วมมือเรื่องข้อมูลเครื่องอบแห้งและการแนะนำสถานที่เก็บข้อมูล ศูนย์ขยายพันธุ์พืชที่ 16 จังหวัดสุรินทร์ และพุทธสถานศิระโศโค จังหวัดศีระเกษ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่เก็บข้อมูลและที่พักตลอดจนการตรวจสอบคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ และกองยา กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตรวจหาการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ของสมุนไพรหลังการอบแห้ง

เอกสารอ้างอิง

1. Tia, W., Soponronarit, S., and Kaewassadom, W., Heat Pump Fruit Dryer for Small-Scale Industry, Proceedings of The First Regional Conference on Energy Technology Towards a Clean Environment, Chiang Mai, Thailand, December (2000), The Joint Graduate School of Energy and Environment. pp.67-69.
2. ชานินทร์ การภักดี, 2540, การอบแห้งเมล็ดพันธุ์ด้วยปั๊มความร้อน, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 124 หน้า.
3. ฐานิตย์ เมธิยานนท์, 2541, การอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนในระดับอุตสาหกรรม, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 263 หน้า.
4. Chou, S.K., Hawlader, M.N.A., Ho, J.C., Wijesundera, N.E., and Rajasekar, S., Heat Pump in the Drying of Food Products, International Journal of Energy Research, Vol.14, pp. 397-406.
5. Prasertsan, S. and Saen-saby, P., 1998, "Heat pump drying of agricultural materials," Drying Technology, Vol.16, pp.235-250.

ภาคผนวก

ตารางที่ 1 ผลการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าว

Description	Test nos.					
	1	2	3	4	5	6
Ambient condition						
Average temperature ($^{\circ}\text{C}$)	25	26	26	26	24	20
Average relative humidity (%)	59	62	57	55	51	44
Condition of paddy seed						
Average moisture content before drying (% w.b.)	15.4	15.4	14.0	14.7	13.5	13.8
Average moisture content after drying (% w.b.)	11.8	12.7	11.5	11.2	12.2	11.2
Initial weight (kg)	4,922	8,250	6,505	7,140	7,378	6,637
Drying air condition						
Average temperature ($^{\circ}\text{C}$)	31	33	32	32	30	23
Average relative humidity (%)	29	30	28	28	25	24
Specific air flow rate ($\text{m}^3 \text{ air}/\text{min} \cdot \text{m}^3 \text{ paddy}$)	13.62	8.13	10.17	8.79	8.39	9.32
Drying time (h)	10	10	12	14	8	5
Performance of heat pump dryer						
Average drying rate (kg water evap./h)	20.0	25.0	15.0	20.0	13.8	13.7
Average SMER (kg water evap./kWh)	1.55	1.87	1.14	1.49	1.04	1.00
Average COP_{h1}	6.87	6.65	6.94	6.93	6.99	5.47
Average COP_{h2}	6.96	6.46	6.54	6.37	6.85	5.46
Average EER_s ($\text{kW}_{\text{dr}}/\text{kW}_{\text{elec}}$)	3.92	3.71	3.76	3.61	3.73	2.75
Average useful heat (%)	99.8	100	100	98.1	98.0	91.5
Average SEC (MJ/ kg water evap.)	2.33	1.93	3.16	2.42	3.46	3.60
Seed quality						
Average germination test (%) (Standard >85%)	97	92	95	94	91	96
Average vigor test (%) (Standard >70%)	78	78	87	87	78	73

ตารางที่ 2 ผลการอบแห้งผลิตภัณฑ์เกษตร

Description	Test 1						Accumulated value	Test 2				Accumulated value	Test 3			Accumulated Value
	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5	Day 6		Day 1	Day 2	Day 3	Day 4		Day 1	Day 2	Day 3	
	53	55	54	52	52	52		53	54	55	54		57	57	56	
Average drying air temperature ($^{\circ}\text{C}$)	28.4	17.2	57	79	81	111.2	-	103.7	134	30	84.5	342.2	114.2	144.2	62	320.4
Moisture condensed (kg water condensed)	-	-	-	-	-	-	417.1	-	-	-	-	377.1	-	-	-	371.1
Moisture evaporated (kg water evap.)	12	8	9	15.5	12	13	69.5	14	20.75	2	10	46.75	11	14	7	32
Operation time (h)																
Performance of heat pump dryer																
Average Drying rate (kg water evap./h)	2.6	2.4	7.0	5.7	7.5	9.5	6	8.2	6.6	16.7	9.4	8.1	11.5	11.4	9.8	11.6
Average MER (kg water condensed/h)	2.37	2.15	6.33	5.1	6.75	8.55	5.38	7.41	5.98	15	8.45	7.32	10.38	10.3	8.86	10.01
Average SMER (kg water evap./kWh)	0.2	0.19	0.54	0.43	0.58	0.73	0.46	0.63	0.51	1.28	0.72	0.62	0.89	0.88	0.75	0.85
Average SEC (MJ/kg water evap.)	17.81	19.61	6.55	8.27	6.24	4.93	7.84	5.59	7.05	2.81	5	5.8	4.06	4.09	4.76	4.23
Average COP _a	4.24	3.83	3.91	3.96	3.76	3.88	-	4.02	4.04	4.74	4.1	-	4.27	4.74	4.74	-
Average EER _a (kW/kW _{cool})	2.03	1.72	2	1.86	1.75	1.73	-	1.74	1.84	1.86	1.8	-	1.88	1.95	2.06	-
Average useful heat (%)	92	84	93	86	87	80	-	76	86	64	85	-	76	84	97	-

ตารางที่ 3 คุณภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์	กล้วยน้ำว้า	สมุนไพรหัวหนวดแมว	สมุนไพรขมิ้นชัน	เห็ดฉีก	ใบมะขาม	ใบเตย	ผักชี	ข้าวเกรียบเห็ด
R.H.S. chart colour code	Grayed-Orange 167 A	Green 137 C	Grayed-Orange 169 C	Grayed-Orange 177 A	Green 132 A	Green 132 D	Green 132 B	Black 202B
ลักษณะสี	เหลืองทอง	เขียวอ่อน	ส้มอมเหลือง	น้ำตาลเข้ม	เขียวเข้มมาก	เขียวอ่อน	เขียวเข้ม	เทา

รายงานการประชุมวิชาการประจำปี 2544
สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, ขอนแก่น, 25-26 มกราคม 2544

A Non-EQUILIBRIUM MATHEMATICAL MODEL FOR BATCH GRAIN DRYING IN TWO-DIMENSIONAL SPOUTED BED

T. Madhyanon, S. Soponronnarit and W. Tia

School of Energy and Materials King Mongkut's University of Technology Thonburi

Suksawat 48 Road, Bangkok 10140, Thailand

Abstract

Two-region, non-equilibrium model of two-dimensional spouted bed dryer has been developed. The model, based on heat and mass transfer interactions between the spout and the downcomer, predicts the air and grain temperature and moisture content throughout each thin layer of grain at unsteady state. The model consists of a set of four differential equations, applied for each layer. Validation of the model was made by comparing predicted and experimental data for batch corn drying. Simulation clarify the physics of drying and lead to the simplification assumptions reasonably used for the downcomer. Drying and heating process are shown to occur mainly in both of the spout and the downcomer regions. Overall, the errors between experiment and simulation were considered acceptable.

Key Words: corn, drying, equilibrium model, isothermal bed

Introduction

To simulate model for spouted bed, macroscopic drying of the overall bed incorporating mass balance, energy balance and drying rate equation, which mechanism of drying for spout and downcomer regions are not assessed separately, is generally developed. Thermal equilibrium between the grain and the air leaving the bed and well mixed isothermal bed are usually assumed for simplifying model and thus the model does not deal with heat transfer equation (Becker and Sallans, 1960; Zurith and Singh, 1982; Zahed and Epstein, 1992; and Ngygen, 2000). Zurith and Singh (1982) developed a model for batch drying using a semi-theoretical of the heat desorption-vaporization as a function of temperature and moisture content. To predict the moisture content, they applied constant coefficient to the diffusion drying equation. Unlike Zurith and Singh (1982), Zahed and Epstein (1992) used an empirical equation relating the diffusion coefficient to temperature and moisture content. For continuous drying, Becker and Sallans (1960) and Zahed and Epstein (1992) incorporated a residence time distribution function into the drying equation. In a recent study, Jumah and Mujumdar (1996) developed a model for batch drying of corn in a novel rotating jet spouted bed under condition of constant and intermittent drying. Unlike prior related works as above-mentioned the thermal equilibrium and no temperature gradient inside the kernels assumptions were not employed in their model.

This paper presents the non-equilibrium and non-isothermal bed model that is validated by comparing to the experimental results of corn batch drying in two-dimensional spouted bed dryer

(proposed by Mujumdar (1984)). Unlike the previous studies, modeling for spout and downcomer regions are to be considered separately in order to better understanding the physics of drying.

MODEL DEVELOPMENT

Assumptions:

1. The following assumptions are made in the development of the mathematical model
2. The corn kernels are uniform in size and internally homogeneous, and can be approximated as isotropic spheres.
3. Internal moisture diffusion dominates the drying process, so that the external convective mass transfer resistance can be neglected and the surface moisture content of grains is assumed to reach instantaneous equilibrium with the drying air.
4. Moisture migration within the grain kernel is controlled by liquid diffusion.
5. Temperature gradients within the grain kernel are negligible.
6. The effects of heat conduction and moisture transfer between grains, heat losses and grain shrinkage are not accounted.
7. The accumulation rate of the thermal energy and water vapor of the air in the bed is negligible.
8. The airflow and grain flow are plug type in both regions and the co-currentflow and counterflow are assumed for spout and downcomer regions, respectively.

To simulated drying in the spout and the downcomer regions, the bed is assumed to be divided into a series of elementary layers (Figure 1) with differential thickness (Δy) and unit cross section area. The basic knowledge of mass and energy conservation with accounting for convective heat transfer (air-grain interface) and diffusion mass transfer within the kernel are employed to each thin layer drying which leads to the development of a set of differential equations.

Mass (moisture) balance:

Hence, assuming plug flow for both regions and by employing assumption (6), that accumulation rate of water vapor of the air within the elementary bed is not accounted, the physical meaning of mass conservation law can be written as:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Mass of moisture evaporated} \\ \text{from grain} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Change in mass of moisture in air} \\ \text{flowing through an element bed} \end{array} \right]$$

Which is mathematically expressed as follows:

$$G, \frac{dM}{dy} = \pm G, \frac{dW}{dy} \quad (1)$$

Eq.(1) is applied with the minus sign for the spout region with co-currentflow and with the positive sign for the downcomer with counterflow.

Energy (heat) balance of grain:

Energy balances employed for grain flowing into and exit an elemental bed of each region yield the relations that can be worded as explained below:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Heat transfer from} \\ \text{air to grain} \\ \text{by convection} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Enthalpy change} \\ \text{of grain} \\ \text{across element} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Energy used for} \\ \text{evaporation of} \\ \text{moisture leaving grain} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Energy to increase} \\ \text{temperature of moisture} \\ \text{leaving grain to} \\ \text{air temperature} \end{array} \right]$$

Which is mathematically expressed as:

$$\delta Q = (G_g c_p + G_g M_{\infty}) \frac{dT_g}{dy} - G_g \lambda \frac{dM}{dy} - G_g c_v (T_a - T_g) \frac{dM}{dy} \quad (2)$$

Eq.(2) is applied for both regions of spout and downcomer.

Energy (heat) balance of air:

With the assumption (6) that accumulation rate of thermal energy of the air in bed can be negligible. Thus change in energy of air across an element and heat transfer rate gives a relationship as follows:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Heat transfer from} \\ \text{air to grain} \\ \text{by convection} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Enthalpy change} \\ \text{of air} \\ \text{across element} \end{array} \right]$$

Which is mathematically expressed as:

$$\delta Q = \pm (G_a c_a + G_a W c_v) \frac{dT_a}{dy} \quad (3)$$

Where the minus sign is applied for spout region and the positive sign is for downcomer.

Heat transfer rate equation:

Air-to-grain heat transfer rate by convection is:

$$\delta Q = h a_p (T_a - T_g) \quad (4)$$

which, when substituted into Eqs. (2) and (3) give the air and grain temperatures gradient with respect to depth of layer:

$$\frac{dT_g}{dy} = \frac{h a_p (T_a - T_g)}{G_g c_p + G_g M_{\infty}} + \frac{\lambda + c_v (T_a - T_g)}{c_p + M c_{\infty}} \frac{dM}{dy} \quad (5)$$

$$\text{and} \quad \frac{dT_a}{dy} = \pm \frac{h a_p (T - \theta)}{G_a c_a + G_a W c_v} \quad (6)$$

Eq.(5) is applied for both of spout and downcomer region. The minus and plus signs presented in Eq.(6) are employed to the spout and the downcomer region, respectively.

To set the boundary conditions of Eqs.(5) and (6), we assume that the outlet conditions of grain for each region are the inlet conditions of the subsequent region and thus we obtain:

For spout region,

$$\begin{aligned} y = 0, \quad t = 0 & \quad T_p = T_{p,in} & \quad M = M_{in} \\ & \quad t > 0 & \quad T_p = T_p \text{ (ending of downcomer period)} \\ & & \quad M = M \text{ (ending of downcomer period)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y = 0, \quad t = 0 & \quad T = T_{a,in} & \quad W = W_{amb} \\ & \quad t > 0 & \quad T = T_{a,in} & \quad W = W_{mix} \end{aligned}$$

where W_{mix} is the humidity of recirculation air mixing to ambient air.

For downcomer region,

$$\begin{aligned} y = 0 & \quad T_p = T_p \text{ (ending of spouting period)} \\ & \quad M = M \text{ (ending of spouting period)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y = L, \quad t = 0 & \quad T_a = T_{a,in} & \quad W = W_{amb} \\ & \quad t > 0 & \quad T_a = T_{a,in} & \quad W = W_{mix} \end{aligned}$$

To develop two-region model as in this study, the rate of circulation of grain has to be determined in order to estimate the value of mass flux of corn (G_p) by dividing the grain circulation rate by the relative cross section area of an element bed. Katwar *et al.* (1993) have recently reported grain circulation rates in two-dimensional spouted bed which is employed for this study. The convective air-grain heat transfer coefficient is given by the correlation of Janevitsakul (2000) who has studied batch corn drying in two-dimensional spouted bed:

$$Nu = \frac{h_i D_p}{k_a} = 0.0220 H_b^{-0.1217} Re^{0.6278} Pr^{1/3} \quad (7)$$

An empirical overall bed heat transfer coefficient for two-dimensional spouted bed by Kundra *et al.* (1989) is used to estimate the convective heat transfer coefficient for the downcomer region.

Drying rate equation:

Assuming a constant diffusion coefficient, the equation of one-dimensional diffusion for spherical with initial and boundary conditions to describe the moisture transfer are:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \left(\frac{2}{r} \right) \frac{\partial M}{\partial r} \right] \quad (8)$$

$$\begin{aligned} t = 0, \quad 0 \leq r \leq r_0 & \quad M = M_{in} \\ t > 0, \quad r = r_0 & \quad M = M_{eq} \\ & \quad r = 0 & \quad \frac{\partial M}{\partial r} = 0 \end{aligned}$$

which assumption (2) is applied for above boundary condition at the grain surface. D is effective diffusion coefficient, which has been determined by Chinnaboon (2000):

$$D = 2.82995(R_p)^y \exp(-4338.695 / T) \exp(-1.83838M) \quad (9)$$

The air leak-off rates into the downcomer region are obtained from the experimental results according to Janevijitsakul (2000).

The average moisture content $\bar{M}(t)$ of corn is obtained by integrating over the entire sphere volume.

$$\bar{M}(t) = \frac{4\pi}{V_p} \int_0^{r_p} r^2 M(r, t) dr \quad (10)$$

The heat transfer area for each region was obtained by:

$$A_p = 6(1 - \varepsilon)/D_p \quad (11)$$

Where the value of ε for the spout region was 0.93 and 0.40 for the downcomer region.

From knowing grain circulation rate ($\dot{M}_g$), the grain velocity could be determined by the equation:

$$V_g = \dot{m}_g / (\rho_s (1 - \varepsilon) A) \quad (12)$$

Drying time in the spout region was calculate as follow:

$$t_s = H_s / V_{g,s} \quad (13)$$

Where H_s and $V_{g,s}$ are spout height and grain velocity in the spout, respectively.

Similar to Eq. (12), the time accompanied by the grain in the downcomer could be determined corresponding to the bed height and grain velocity of the downcomer. The exit air temperature and humidity ratio are the mixed conditions of the air leaving the spout and the downcomer regions.

Properties equations:

Expressions for properties of product obtained from literature for corn are list in Table 1.

SOLUTION ALGORITHM

For modeling drying mechanism accompanied by two regions, it is considered that drying procedure consists of a series of drying in spout and downcomer regions. The grain drying alternates between drying in spout and downcomer regions until reaching the end of drying period. Thus, the grains leaving one region are used as input grains to another region. The procedure of solving involves the following:

For spout region:

1. The spout region is considered to consist of a group of thin layers stacked one upon another. For a given depth of thin layer, then for a fixed velocity of grain one can automatically determine a required time step. By applying diffusion drying equation (Eq.8), moisture profile inside the kernel and change in average moisture content respect to a given time step are determined. The equation is solved numerically using Crank-Nicholson implicit method.

2. Knowing the inlet air and grain conditions of any given layer, final conditions are calculated at the end of a required time step by solving Eqs.(5) and (6) using the 4th Runge-katta method. The outlet air

humidity can be determined with mass balance equation (Eq.(1)). The entire procedure is repeated for subsequent layers until reaching the top layer of spout height.

For downcomer:

1. The end grain conditions of the spout region are assumed as the inlet conditions for the downcomer region. The calculation starts at the top layer of downcomer bed, but only the inlet grain conditions are known. Under such as this problem, the initial conditions of air need to be guessed in order to determine the leaving conditions of air and grain for a given layer. Consider first iteration, the conditions of inlet air (at the entrance of dryer) are used as initial guess conditions and applied to each layer. In the manner analogous to that for the spout region, four differential equations i.e., Eqs.(8), (5) and (1) are sequentially solved by numerical method. Then, the final conditions of air for each layer are obtained and employed as initial conditions of a subsequent iteration. The entire procedure is repeated until the solution is converged.

2. Return to step 1 for next grain movement. The final grain conditions for a bottom layer of downcomer region are used as the initial conditions of the spout region for a subsequent cycle. The calculations are repeated until reaching the end of drying period.

RESULTS AND DISCUSSION

The simulation results are validated with experimental data for batch corn drying in two-dimensional spouted bed unit studied by Janevijitsakul (2000). The operating conditions and the fixed bed dimensions used to validate the model are presented in Tables 2 and 3, respectively. The model was simulated with layers having thickness of 0.01m for both regions.

Variation of moisture content:

Figure 2 presents the experimental and simulated moisture content for inlet temperature of 130, 140, and 150°C, corresponding to the operating conditions of the tests shown in Tables 2 and 3. In all these tests there was a close agreement between experimental and predicted values during drying period. Differences in computed and experimental moisture content were less than 1.5 percentage points and may be considered insignificant based on practical considerations. Data in Figure 3 also showed that the relationship of change in moisture content with time could be considered as near-to-linear trend. These results appeared to be supported by the works of Wetchakama *et al.* (1999) and Ngugen (2000).

Moisture profile and moisture distribution in the downcomer:

Figure 3 presents change in moisture profile inside the kernel with drying time corresponding to four of bed height. No moisture relaxation but gentle drying was observed during the grain movement from top to bottom of downcomer indicated by shifts in moisture profile which resulted in moisture reduction of 0.1-0.2 percentage point for each downcomer period (≈ 0.5 min). Integrating by volume of the moisture profiles at the end of downcomer period, we obtain the simulated average moisture content changed with drying time and consequently used for plotting moisture content curves of Figure 2.

Temperature distribution in the downcomer:

Figure 4 shows the temperature evolution inside the downcomer that the deepest bed is 0.75m in height for test no. 3. The experimental results were compared to the computed temperatures of air and grain for the given bed height of 0.15, 0.40 and 0.60m. It should be noted that the measured values of bed temperature presented temperature somewhere between air and grain temperatures. Data of Figure 4 exhibited a reasonable agreement with the experimental data by visual comparison of the plotted data. The deviations were normally less than 10%. The simulation and experimental results demonstrated that the grain temperature increased rapidly during the first of 10 minutes and there after the increasing rate was gradually decreased. Because there were large temperature differences between air and grains at the start of drying with a consequent enhancing heat transfer rate.

It is worth to point out that the predicted temperature curves of either air on grain for various bed heights almost coincide. This is in line with the experimental results of bed temperature. In addition, the predicted results showed that the grain temperature at any layers above 0.15m in height came very close to the air temperatures at a relative layer during drying duration caused by low air to dry matter ratio of the downcomer. Similar results were found for all experiments. Therefore, once the layers accompanied by 0.15m of bed height are not account, thermal equilibrium and isothermal bed could be reasonably made to develop the simplification model for the downcomer region.

Evolution of exit air and grain temperatures:

Figure 5 presents predicted and experimental exit air temperatures (measured at the outlet of dryer) according to test no. 3. It is clear that the model produced results that conform to experimental results. The errors between experiment and simulation were less than 10%. The predicted curves of exit air and grain temperatures showed that the grains did not approach to thermal equilibrium with the air especially for the first half of the drying period. Similar phenomena also appeared for other tests. This means that it may not really proper to predict the grain temperature by employing thermal equilibrium assumption to the model considered the interaction in the spout and the downcomer as a whole bed. These results were confirmed by the previous study of Zurith and Singh (1982) and the recent work of Ngugen (2000).

The discrepancies between the predicted and the experimental results as appeared in Figures 4 and 5 were attributed to the simplifying assumptions made in the development of the model e.g., plug flow type, neglecting heat losses.

Conclusions

In this study, two-region model of spouted bed was developed to predict changes in the air and grain temperature and moisture content. Validation of the model was performed in two-dimensional spouted bed dryer for batch corn drying. Analysis of the solution was based on treating air-grain interaction in the spout and the downcomer separately. In general, the results of the simulation compared well with the data from the experiments. The simulation results indicate that the exit air and grain have never approached thermal equilibrium condition. However, thermal equilibrium and isothermal bed assumptions could be reasonably made to simplify the model for the downcomer having a sufficient bed

height. Moreover, it is important to mention that the drying and heating process occur mainly in both of the spout and the downcomer under a certain leak-off air to the downcomer.

Nomenclature

Symbols

A_p	surface area of a single particle, m^2	$\dot{m}$	mass flow rate, kg dry/s
A	cross section area of bed, m^2	Q	heat transfer by convection, W
c_p	specific heat, $J/kg\ ^\circ C$	P_{vs}	saturated vapor pressure, Pa
D	effective diffusion coefficient, m^2/s	r	radial distance from center of sphere, m
D_p	equivalent particle diameter, m	R_p	equivalent particle radius, m
G	mass flux, $kg\ dry/m^2\ s$	RH	relative humidity, decimal
H	convective heat transfer coefficient, $J/m^2\ ^\circ C$	t	time, s
H_b	bed height, m	T	temperature, $^\circ C$
H_s	spout height, m	V	velocity, m/s
k_a	thermal conductivity of dry air, $W/m\ ^\circ C$	V_p	volume of a single particle, m^3
M	moisture content, decimal d.b.	W	air humidity, kg water vapor/kg dry air
$\bar{M}$	average moisture content, decimal d.b.		

Subscripts

a	dry air
abs	absolute
amb	ambient
d	downcomer region
eq	equilibrium
in	Initial

mix	mixing
p	dry particle
s	spout region
v	vapor
w	water

Greek letters

ε	bed porosity, -
μ	viscosity, $kg/m.s$
ρ_a	density of dry air, kg/m^3
ρ_p	bulk density of particle, kg/m^3
λ	heat of evaporation, J/kg

Dimensionless groups

Nu	Nusselt number, $h\ D_p / k_a$
Pr	Prandtl number, $c_p\ \mu_a / k_a$
Re	Reynolds number, $D_p\ V_s\ \rho_a / \mu_a$

Acknowledgments

The authors would like to thank the Thailand Research Fund for financial support.

References

- Becker, H.A. and Sallans, H.R., 1960, Drying Wheat in a Spouted Bed, *Chem. Eng. Sci.*, 13: 97-112.
- Brooker, D.B., Bakker, F.W. and Hall, C.W., 1992, *Drying and Storage of Grain and Oilseed*, AVI, New York, p. 427.
- Chinnaboon, K., 2000, Effect of Tempering on Quality of Corn after Fluidized Bed Drying, M. Eng. Thesis, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand.
- Janevijitsakul, K., 2000, Two-Dimensional Spouted Bed Corn Drying, M. Eng. Thesis, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand.
- Jumah, R.Y., Mujumdar, A.S. and Raghavan, G.S.V., 1996, Batch Drying Kinetics of Corn in a Novel Rotating Jet Spouted Bed, *Can. J. Chem. Eng.*, 74: 479-486.
- Kalwar, M.I. and Raghavan, G.S.V., 1993, Circulation of Particles in Two-Dimensional Spouted Beds with draft plates, *Powder Tech.*, 77: 233-242.
- Kudra, T., Mujumdar, A.S. and Raghavan, G.S.V., 1989, Gas-to-Particle Heat Transfer in Two-Dimensional Spouted Beds, *Int. Comm. Heat and Mass Transfer*, 16(5): 731-741.
- Mujumdar, A.S., 1984, Spouted Bed Technology: A brief review. *Drying'84*, Hemisphere, Washington, pp.151-157.
- Nguyen, L.H., 2000, Evaluation of a Modified Spouted Bed Dryer for High Moisture Grain Drying, Ph.D. Thesis, University of New South Wales, Australia.
- Pudpong, A., 1988, Study of Important parameters for Analysis and Design of Corn Drying, M. Sci. Thesis, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand.
- Thompson, T.L., Peart, R.M. and Foster, G.H., 1968, Mathematical Simulation of Corn Drying: A New Model, *trans. ASAE* 11(4): 582-586.
- Welchacama, S., Soponronnarit, S., Swasdisevi, T., Panich-ing-orn, J. and Suthicharoenpanich, S., 1999, Drying of High Moisture Paddy by Two-Dimensional Spouted Bed Technique, *Proceedings of the First Asian-Australian Drying Conference (ADC '99)*, Bali, Indonesia, 24-27 October 1999, pp. 300-307.
- Zahed, A.H. and Epstein, N., 1992, Batch and Continuous Spouted Bed Drying of Cereal Grains: The Thermal Equilibrium Model, *Can. J. Chem. Eng.*, 70: 945-953.
- Zuritz, C.A. and Singh, R.P., 1982, Simulation of Rough Rice Drying in a Spouted Bed, *Drying'82*, A.S. Mujumdar (ed.), McGraw-Hill Hemisphere, New York, pp. 239-247.

APPENDIX

TABLE 1 Properties used for simulation

Eqn.#	Property	Expression	Reference
14	λ	$(2502 - 2.386T)(1 + 4.35 \exp(-28.25M)) \times 10^3$	12
15	M_{eq}	$\left[n(1 - RH)/(c_1 T_{sat})^{c_2} \right] / 100$ $c_1 = -3.074 \times 10^{-5}, c_2 = 1.8156$	11
16	C_{pg}	$1.465 \times 10^3 + 3.55 \times 10^3 (M / (1+M))$	2
17	ρ_b	$698 + 110.5M$	11

TABLE 2 Operating conditions for model validation

Parameter	Test no.		
	1	2	3
Inlet air temperature ($^{\circ}\text{C}$)	130	140	150
Ambient temperature, db/wb ($^{\circ}\text{C}$)	27/25	30/26	29/26
Initial grain temperature ($^{\circ}\text{C}$)	24	27	27
Initial moisture content (%d.b.)	38.5	36.9	37.0
Hold-up (kg)	30	30	30
Grain diameter (m)	0.008	0.008	0.008
Total air flow rate (kg dry/s)	0.28	0.29	0.25
Air leak-off rate into the downcomer (%)	17	20	17
Recirculation air ratio (%)	72	69	71

TABLE 3 Bed and other related dimensions

Bed dimensions	value
Spout height (m)	1.45
Entrance height (m)	0.125
Spout width (m)	0.08
Bed width (m)	0.54
Bed height (m)	0.75
Width of air inlet (m)	0.04
Slant angle (degree)	60

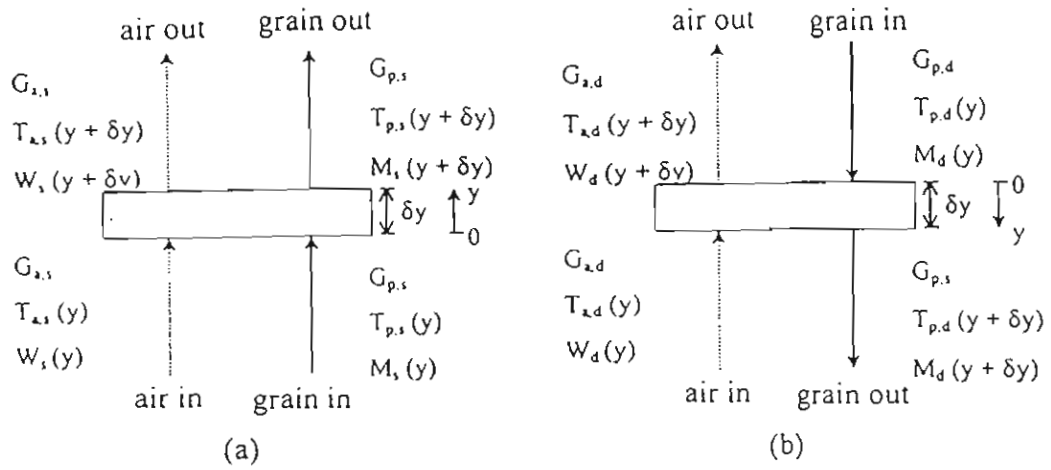


FIGURE 1 Elementary thin layer of grain (a) spout region (b) downcomer region

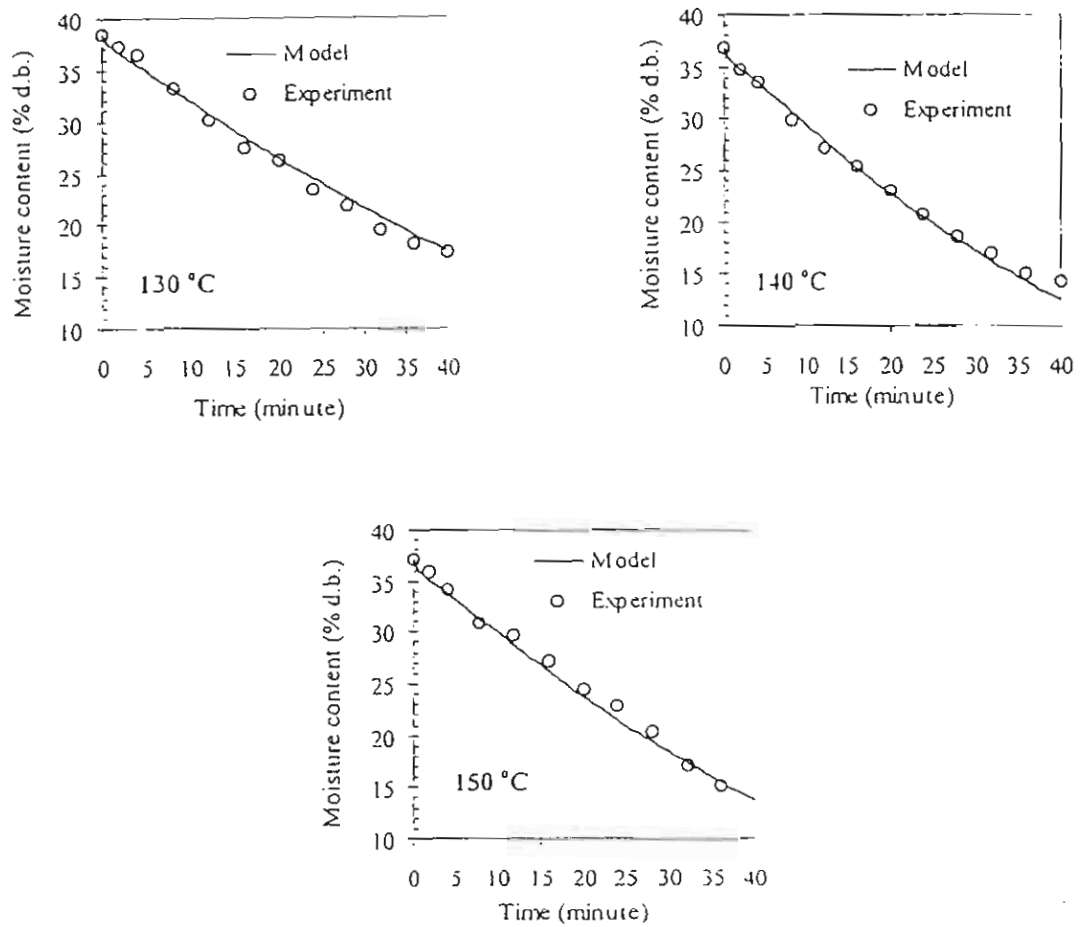


FIGURE 2 Comparison between model and experimental of moisture content with time (inlet air temp., 130, 140, 150 °C; hold-up 30 kg).

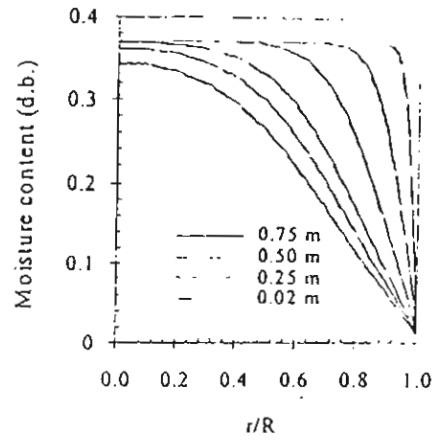


Figure 3 Predicted transient moisture profile inside the corn kernel at difference bed height (inlet air temp., 150 °C; hold-up 30 kg).

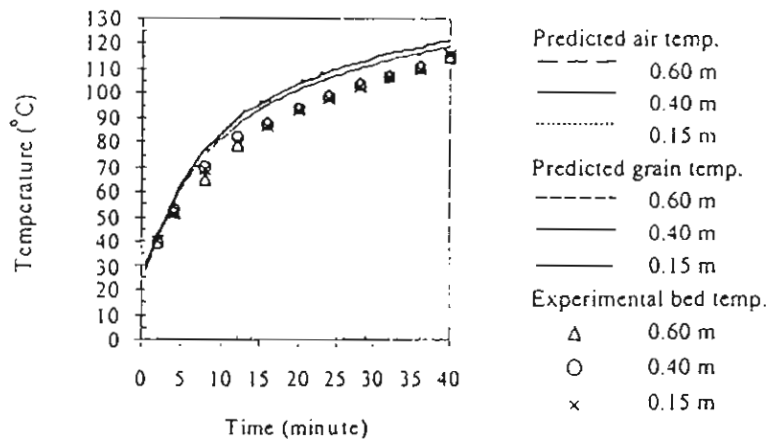


FIGURE 4 Temperature distribution inside the bed of downcomer (inlet air temp., 150 °C; hold-up 30 kg).

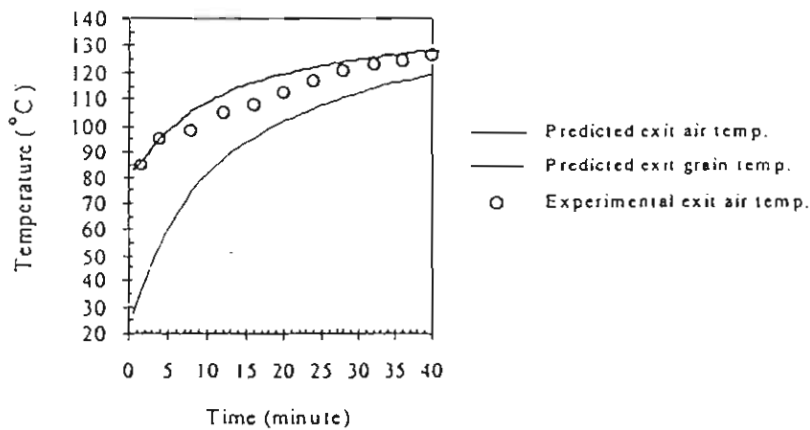


FIGURE 5 Evaluation of exit air temperature (inlet air temp., 150 °C; hold-up 30 kg).

รายงานการประชุมวิชาการวิชาการประจำปี 2544
สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, ขอนแก่น, 25-26 มกราคม 2544

การอบแห้งข้าวกล้อง
Brown Rice Drying

กริช เจียมจิโรจน์¹, สมชาติ โสภณธนฤทธิ์² และ สมบูรณ์ เวชกามา¹
Krit Jiamjirorn¹, Somchart Soponronmarit², Somboon Watchacama¹

1. นักศึกษาปริญญาโท คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
Master student, School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT).
2. อาจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
Lecturer, School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอแนวทางในการแปรรูปข้าวโดยใช้กระบวนการอบแห้งข้าวกล้อง ซึ่งทำการทดลองอบแห้งข้าวกล้องเปรียบเทียบกับกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือก สภาวะของอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง 45, 55 และ 65 °C อัตราการไหลอากาศจำเพาะของอากาศ 12 m³/m³-min ในการลดความชื้นข้าวเปลือกที่ 22% wet basis (w.b.) เทียบกับการลดความชื้นข้าวกล้องที่ได้จากการเตรียมข้าวเปลือกที่สภาวะเดียวกัน ให้เหลือ 14% w.b. จากการทดลองพบว่า ระยะเวลาการอบแห้งลดความชื้นของข้าวกล้องมีค่าน้อยกว่าระยะเวลาการอบแห้งเปลือกตามปกติประมาณ 50-55% จากผลการทดสอบคุณภาพข้าวสารที่ได้จากการอบแห้งข้าวกล้องในรูปของปริมาณต้นข้าวและความขาวพบว่า ปริมาณต้นข้าวที่ได้มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้น ความขาวของข้าวสารที่ได้จากกระบวนการอบแห้งข้าวกล้องมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย
คำสำคัญ: ข้าวกล้อง / คุณภาพ / จลนศาสตร์การอบแห้ง / เมล็ดพืช

Abstract

Dryings of Brown rice and Paddy have been studied at inlet temperatures of 45, 55 and 65 °C by using specific air flow rate of 12 m³/m³-min. In reducing the moisture content from 22% w.b. to 14% w.b., drying time for the brown rice is 50 – 55% shorter than that for the paddy under the identical condition. For the grain quality, head rice yield of brown rice is relatively reduced with the increased temperature whilst the whiteness is insignificantly change.

Key words: Brown rice / Drying Kinetic / Grain / Quality

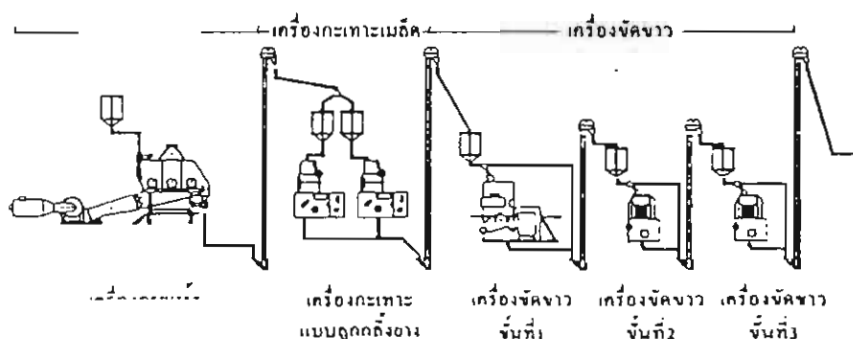
1. บทนำ

การอบแห้งเป็นกระบวนการที่มีบทบาทสำคัญต่อการจัดการข้าวเปลือกขึ้น ทั้งนี้การหาเทคนิคการ อบแห้งที่เหมาะสมนั้นนับได้ว่ามีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการจัดการข้าวเปลือกขึ้น เนื่องจากกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกเป็นขั้นตอนที่ใช้พลังงานค่อนข้างสูงและส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของข้าว ซึ่งถ้ามีการควบคุมและจัดการแล้ว จะทำให้คุณภาพในรูปของต้นข้าวที่สูงและค่าดัชนีความขาวมากกว่า 43

ข้าวเปลือกที่ได้จากการเก็บเกี่ยวนั้นโดยทั่วไปมีความชื้นอยู่ที่ประมาณ 18 – 26% w.b. ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับช่วงระยะเวลา สภาพพื้นที่ และเทคนิคการเก็บเกี่ยว โดยทั่วไปแล้วข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงกว่า 26% w.b. ไม่สามารถเก็บไว้ได้เกินกว่า 2 วัน เนื่องจากคุณภาพของข้าวจะสูญเสียลงไปเรื่อย ๆ ข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงจะถูกนำมาผ่านกระบวนการอบแห้งเพื่อให้ความชื้นของข้าวอยู่ในระดับที่สามารถนำไปเก็บรักษาได้อย่างปลอดภัย สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอรูปแบบของการปรับเปลี่ยนวิธีการแปรรูป โดยใช้การอบแห้งข้าวกล้องที่เตรียมจากข้าวเปลือกในขณะที่มีความชื้นสูงประมาณ 22% w.b. เพื่อทำการอบแห้งให้ความชื้นลดลงจนเหลือ 14% w.b. ซึ่งระดับที่ใช้เป็นมาตรฐานในการเก็บรักษาข้าวได้ปลอดภัยตามแนวทางที่นำเสนอโดย Yamashita[1] เพื่อทดสอบความเป็นไปได้ที่จะนำแนวทางการจัดการข้าวเปลือกขึ้นด้วยวิธีดังกล่าวมาใช้ในอนาคต

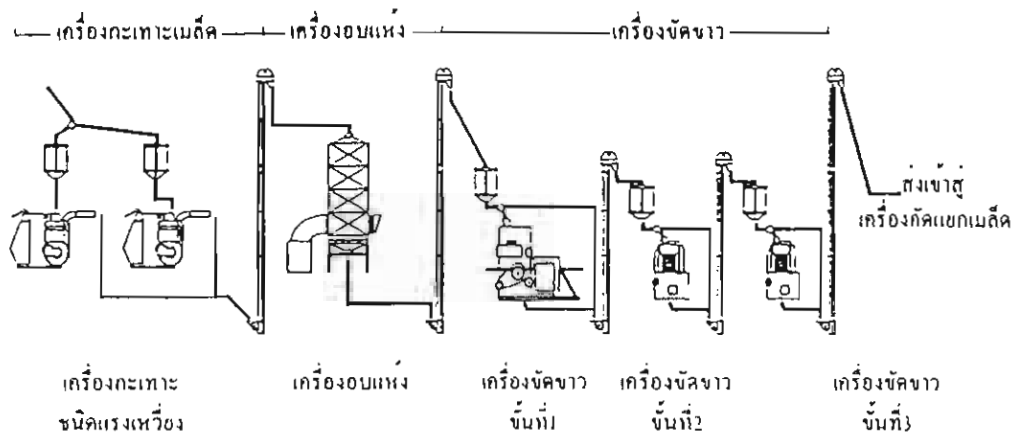
ในกระบวนการแปรรูปข้าวเปลือกส่วนใหญ่จะทำให้การอบแห้งให้ข้าวเปลือกมีความชื้นประมาณ 14% w.b สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแปรรูปข้าวในขณะที่มีความชื้นสูงดังเช่นงานวิจัยของ Schroeder and Rosberg [2], Wratten and Faulkner [3], Biswas *et al.*[4], และ Kester *et al.*[5], เป็นงานวิจัยที่นำเสนอการแปรรูปข้าวเปลือกขึ้นในขั้นตอนเดียว โดยใช้หลักการการเพิ่มอุณหภูมิของเมล็ดพืชก่อนที่จะทำการอบแห้ง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเร่งให้อัตราการอบแห้งสูงและสามารถแปรรูปข้าวไปพร้อม ๆ กับการอบแห้ง ซึ่งเป็นพื้นฐานของการพัฒนาการอบแห้งและการขัดสีในขั้นตอนเดียว (Flash drying and Milling Technique) ที่พัฒนาขึ้นโดย Eiji and Kunze[6] โดยได้ทำการทดลองอบแห้งทั้งข้าวกล้องและข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงแต่จากผลการทดลองพบว่า คุณภาพของข้าวหลังการอบแห้งมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน Henderson [7] ได้ทำการศึกษ้อัตราการอบแห้งของข้าวกล้องโดย พบว่า อัตราการอบแห้งมีค่าสองเท่าของอัตราการอบแห้งข้าวเปลือก ที่อุณหภูมิเดียวกัน เช่นเดียวกับผลที่ได้จากการทดลองของ Stipe *et al.* [8] ที่ทำการอบแห้งเปรียบเทียบที่อุณหภูมิการอบแห้งเท่ากับ 52°C และ 93°C

ในรูปที่ 1 แสดงไคอะแกรมกระบวนการแปรรูปข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงก่อนนำเข้ากระบวนการขัดสี ข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูง เมื่ออบแห้งจนมีความชื้นลดลงอยู่ในระดับที่ปลอดภัยในการเก็บรักษาแล้วนำไปเข้าเครื่องกะเทาะเปลือกเพื่อแยกส่วนที่เป็นแกลบออกได้เป็นข้าวกล้อง หลังจากนั้นจึงส่งเข้าสู่เครื่องขัดขาวเพื่อแยกส่วนที่เป็นรำออกได้เป็นข้าวสาร



Yamashita [1] เสนอรูปแบบการแปรรูปข้าวที่มีขั้นตอนที่แตกต่างการแปรรูปข้าวเปลือกโดยทั่วไป โดยทำการกะเทาะข้าวเปลือกในขณะที่ข้าวเปลือกยังมีความชื้นสูงจากเครื่องกะเทาะชนิดแรงเหวี่ยง ซึ่งมีข้อดีที่แตกต่างจากเครื่องกะเทาะแบบลูกกลิ้งคือ ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อส่วนที่เป็นรำของข้าวกล้องซึ่งทำให้สามารถเก็บรักษาข้าวกล้องสามารถทำได้นานกว่าการใช้เครื่องกะเทาะลูกกลิ้ง ทั้งนี้ Ito [9] ยังได้นำเสนอการนำเอาเครื่องกะเทาะเปลือกข้าวแบบแรงเหวี่ยงติดตั้งเข้ากับรถเกี่ยวนวดซึ่งยังอยู่ในขั้นตอนของการพัฒนาระบบการกะเทาะอยู่ หลังจากที่ได้ข้าวกล้องแล้วจึงนำไปทำการอบการอบแห้ง จากนั้นจึงนำเอาข้าวกล้องที่แห้งแล้วมาทำการขัดสีเป็นข้าวสาร อาจกล่าวได้ว่าขั้นตอนการแปรรูปโดยรูปแบบการอบแห้งข้าวกล้องทำได้โดยการสลับขั้นตอนในการอบแห้งกับขั้นตอนในการกะเทาะเปลือกที่ใช้ในการแปรรูปข้าวเปลือกตามปกติ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2 จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า สามารถลดค่าใช้จ่ายในการอบแห้งลงได้ 55 % จากการอบแห้งข้าวเปลือก

กระบวนการอบแห้งข้าวกล้อง



รูปที่ 2 กระบวนการแปรรูปข้าวเปลือกโดยใช้การอบแห้งข้าวกล้อง

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

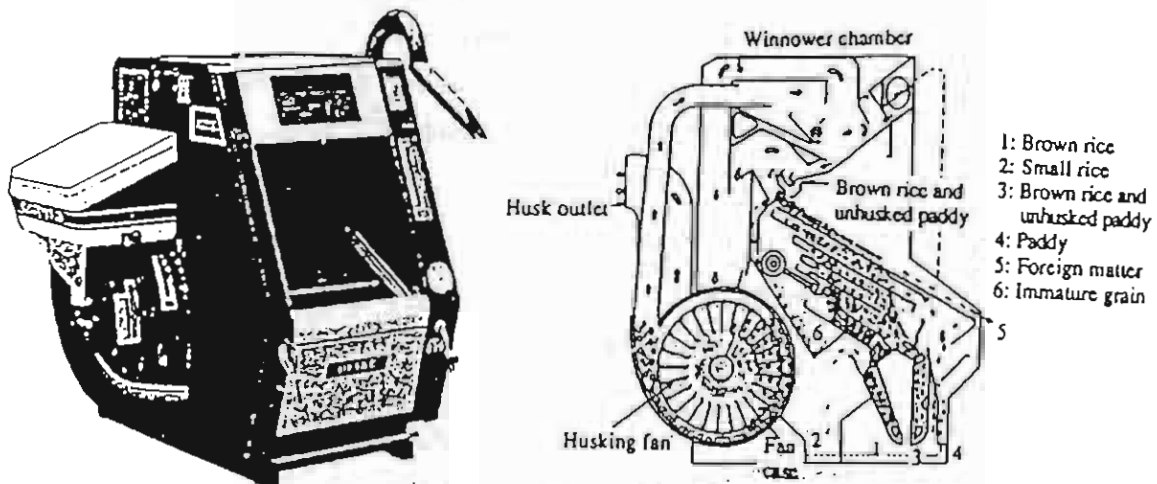
ตัวอย่างข้าวกล้องที่ใช้ในการทดลองเตรียมได้จากข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงมากกว่า 20% w.b. ทำการกะเทาะด้วยเครื่องกะเทาะแรงเหวี่ยง (OTAKE FK32) ข้าวกล้องที่ได้บรรจุไว้ในภาชนะอับอากาศ ที่เก็บไว้ในห้องเย็น 4°C สำหรับเครื่องอบแห้งที่ใช้เป็นเครื่องอบแห้งแบบถาด ติดตั้ง Heater ขนาด 1 kW จำนวน 3 ชุด ถาดบรรจุข้าวมีขนาด 52 x 52 x 1 cm วัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลเป็นชนิด K ติดตั้งต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล (data logger) มีความถูกต้อง $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$

ในการศึกษาเงื่อนไขการอบแห้งทำได้โดยการสุ่มเก็บตัวอย่างข้าวกล้อง โดยใช้เตาอบในการหาความชื้น ทำการอบที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

การวิเคราะห์คุณภาพข้าวเปลือก ทำได้โดยการตวงข้าวเปลือกจำนวน 125 กรัม เติลงในเครื่องกะเทาะเปลือกข้าว (Satake THU 35A) และนำไปชั่งน้ำหนัก บันทึกไว้ที่ชั่ง นำข้าวกล้องที่ได้ไปทำการขัดขาวด้วยเครื่องขัดขาวชนิดแรงเสียดทาน บันทึกน้ำหนักไว้ที่ชั่ง นำข้าวสารที่ได้ไปแยกกันข้าวด้วยเครื่องคัดแยกแบบหลุมทรงกระบอก (Indent cylinder) บันทึกปริมาณต้นข้าว และทำการหา เปอร์เซ็นต์ต้นข้าว* เปอร์เซ็นต์กลบ และ เปอร์เซ็นต์รำ ค่าความขาวของข้าวสารใช้เครื่อง Kett-C300 โดยที่ค่าดัชนีอ้างอิงเท่ากับ 81.6

* เปอร์เซ็นต์ต้นข้าว = (น้ำหนักต้นข้าว x 100) / (น้ำหนักของข้าวเปลือก)

การวิเคราะห์คุณภาพข้าวกล้อง ทำได้โดยนำข้าวเปลือกซึ่งให้น้ำหนัก 30 Kg ทำการกะเทาะเปลือกด้วยเครื่อง OTAKE FK32 บันทึกน้ำหนักข้าวกล้องที่ได้ เพื่อหาเปอร์เซ็นต์แกลบ แล้วทำการสุ่มเก็บตัวอย่างจำนวน 400 g เพื่อนำมาหาเปอร์เซ็นต์การแตกหักก่อนทำการอบแห้ง นำตัวอย่างบรรจุในภาชนะแห้ง และทำการอบแห้งตามสภาวะเงื่อนไขการอบแห้งจนความชื้นของข้าวกล้องลดลงเหลือ 14% w.b. นำตัวอย่างที่ได้ไปตรวจสอบหาเปอร์เซ็นต์การแตกหักหลังทำการอบแห้ง และนำไปจัดสีเพื่อหาน้ำหนักของต้นข้าว



รูปที่ 3 เครื่องกะเทาะชนิดแรงเหวี่ยงที่ใช้ในการทดลอง

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

ความชื้นของข้าวกล้องที่ได้จากการกะเทาะเปลือกข้าวเปลือกที่ระดับความชื้น 21% w.b. ด้วยเครื่องกะเทาะชนิดแรงเหวี่ยงนั้นลดลงประมาณ 0.8-1% w.b. ความชื้นส่วนที่หายไปนั้นเกิดจากการใช้ลมเป็นพาหะในการเคลื่อนย้ายข้าวภายในเครื่องกะเทาะมีความเร็วที่สูง ลมจึงทำหน้าที่เป็นตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งไปพร้อมกันด้วย ผลจากการหาอุณหภูมิการอบแห้งของข้าวกล้องและข้าวเปลือกที่ระดับอุณหภูมิอากาศอบแห้งเท่ากับ 45, 55 และ 65°C แสดงดังรูปที่ 4 และสามารถใช้อย่างจำลองแบบเอมไพริคัลในรูปแบบของสมการ Page(1949) ทำนายผลได้ดี ดังแสดงในสมการที่ 1

$$MR = \exp(-kt^n) \quad (1)$$

เมื่อ

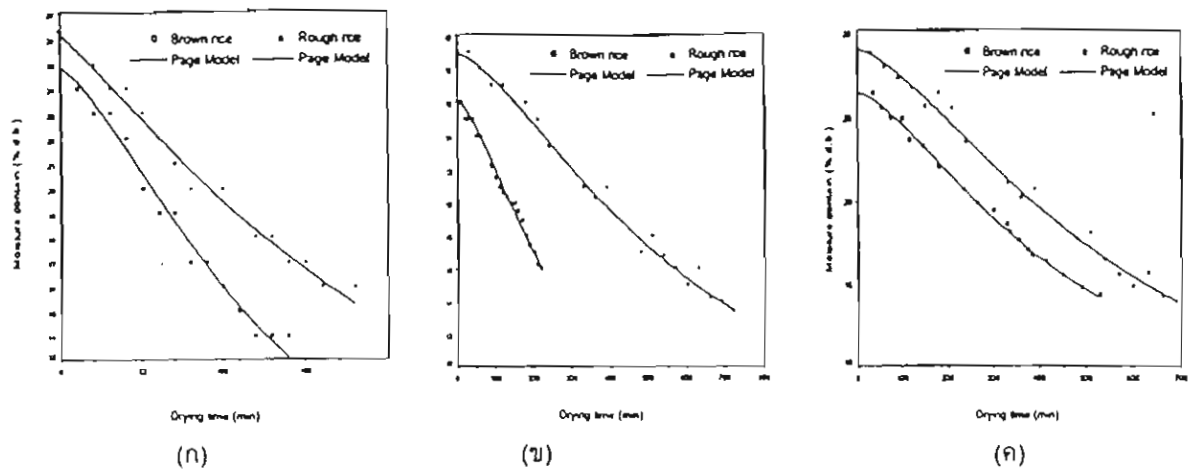
- MR คืออัตราส่วนความชื้น, decimal
t คือเวลาอบแห้ง, min
k, n คือค่าคงที่ใดที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

โดยที่

$$k = k_0 \exp(-C/T) \quad (2)$$

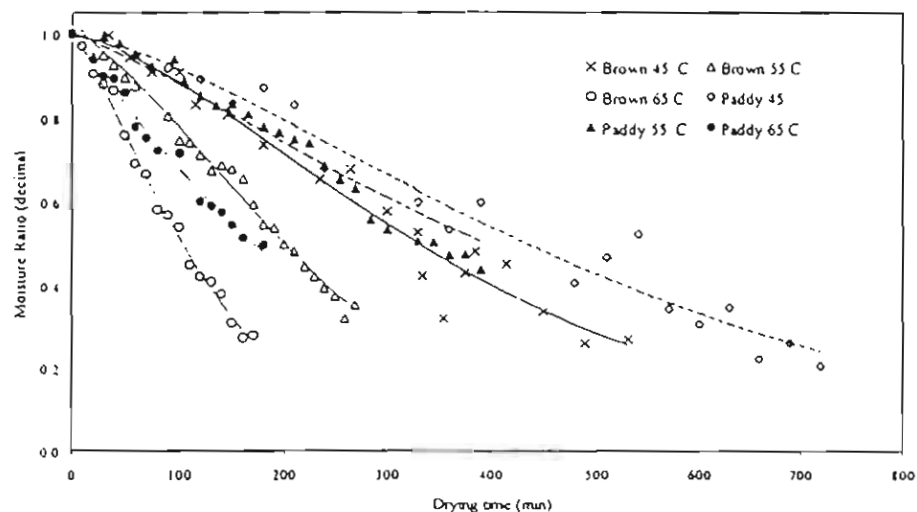
สำหรับข้าวกล้อง $C=7.006$ และ $k_0 = 546.53$

สำหรับข้าวกล้อง $C=21.423$ และ $k_0 = 589.65$



รูปที่ 4 เปรียบเทียบจลนศาสตร์การอบแห้งระหว่างการอบแห้งข้าวเปลือกเทียบกับการอบแห้งข้าวกล้อง
 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (ก) อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 65°C (ข) อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 55°C
 (ค) อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 45°C

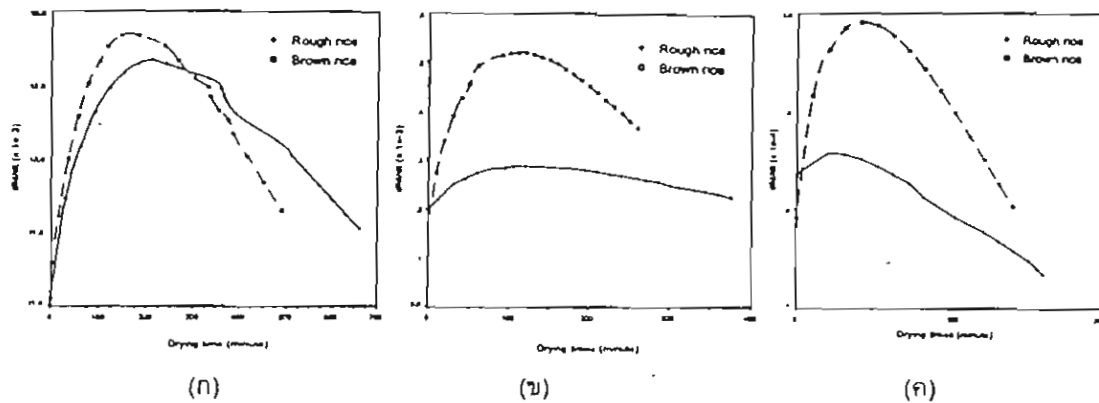
เนื่องจากการทดลองได้ใช้ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกและข้าวกล้องแตกต่างกัน ดังนั้นในการเปรียบเทียบการลดความชื้นข้าวเปลือกและข้าวกล้อง ทำได้โดยแสดงในเทอมของ อัตราส่วนความชื้น(MR)ต่อเวลา ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งพบว่า อัตราการอบแห้งข้าวกล้องนั้นมีค่าสูงกว่าของข้าวเปลือก สำหรับการอบแห้งข้าวกล้อง อัตราส่วนการลดความชื้นจะรวดเร็วขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้งมากกว่า 45°C สำหรับข้าวเปลือกจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการลดความชื้นที่ค่ามากกว่า 55°C



รูปที่ 5 เปรียบเทียบอัตราการลดความชื้นระหว่างการอบแห้งข้าวเปลือก
 เทียบกับการอบแห้งของข้าวกล้อง

รูปที่ 6 แสดงผลการเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งที่ระดับอุณหภูมิอากาศอบแห้งเท่ากับ 45, 55 และ 65°C พบว่า ในช่วงแรกของการอบแห้งข้าวกล้องให้อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นต่อเวลาที่สูงกว่าการอบแห้งข้าวเปลือก ในขณะที่เมื่อเข้าสู่ช่วงการอบแห้งลดลงข้าวกล้องกลับมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน อาจเนื่องมา

จากความชื้นสมดุลของข้าวกล้องมีค่าสูงกว่าของข้าวเปลือกที่สภาวะแวดล้อมเดียวกัน เมื่ออัตราการอบแห้งของข้าวกล้องเข้าอยู่ในช่วงการอบแห้งลดลงอัตราการอบแห้งของข้าวกล้องจึงมีค่าน้อยกว่าของข้าวเปลือก



รูปที่ 6 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งระหว่างการอบแห้งข้าวเปลือกกับการอบแห้งข้าวกล้องที่อุณหภูมิต่างๆ
(ก) อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 65°C (ข) อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 55°C (ค) อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 45°C
(ข)

ตารางที่ 1 แสดงผลของคุณภาพของข้าวเปลือกและข้าวกล้องหลังผ่านการอบแห้ง โดยใช้อุณหภูมิตั้ง 45, 55 และ 65°C พบว่า ปริมาณต้นข้าวที่ได้จากการอบแห้งข้าวกล้องลดลงเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณต้นข้าวจากการอบแห้งข้าวเปลือกสามารถใช้อุณหภูมิการอบแห้งได้ถึง 55°C โดยที่เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวไม่ลดลง สำหรับค่าความขาวของกลุ่มตัวอย่างทดสอบทั้งในกลุ่มของข้าวเปลือกและข้าวกล้องนั้นมีค่าที่ได้สูงกว่าค่าความขาวอ้างอิง (43)

ตารางที่ 1 คุณภาพของข้าวสารที่ได้จากการอบแห้งข้าวกล้องและข้าวเปลือก

	Paddy			Brown rice		
	Drying air temperature (°C)			Drying air temperature (°C)		
	45	55	65	45	55	65
Time (min)	640	360	155	470	215	101
HRV(%)	54.4	54.5	37.4	43.4	37.8	26.6
BRP(%)	14.9	15.3	31.8	27.9	34.4	45.3
BP(%)	9.2	9.0	8.92	8.71	9.3	9.1
WH	45.1	45.2	45.3	46.1	46.3	46.7

Remarks:

HRV = Head Rice Yield, BRP = Broken rice, BP = Bran

Reference HRV= 54.8%

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองเปรียบเทียบผลจลนศาสตร์การอบแห้งและคุณภาพการอบแห้งระหว่างข้าวกล้องและข้าวเปลือกด้วยเทคนิคลมร้อน สามารถสรุปผลได้ดังนี้ ลดความชื้นของข้าวกล้องลดลงได้รวดเร็วกว่าข้าวเปลือกประมาณ 50-55% อันเป็นผลมาจากความชื้นที่ลดลงจากการกะเทาะแยกแกลบด้วยกะเทาะแรงกะเทาะแรงเหวี่ยง และอัตราการอบแห้งข้าวกล้องในช่วงต้นของการอบแห้งมีค่าสูงกว่าอัตราการอบแห้งข้าวเปลือก ส่วนทางด้านคุณภาพของข้าวสารที่ได้จากการอบแห้งพบว่า ปริมาณข้าวตันที่ได้จากการการอบแห้งข้าวกล้องโดยใช้พาหะลมร้อนมีค่าลดลงมากเมื่อเทียบกับการอบแห้งข้าวเปลือกตามปกติ อย่างไรก็ตามมีความเป็นไปได้ที่สามารถลดอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งลง เพื่อที่รักษาคุณภาพของข้าวโดยเฉพาะอย่างยิ่งในรูปของค่าน้ำ สำหรับคุณภาพของสีพบว่า การอบแห้งทั้งสองวิธีให้ดัชนีความขาวสูงกว่ามาตรฐาน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนอุดหนุนงานวิจัย และขอขอบคุณบริษัทไรซ์เอ็นจิเนียริง ซัพพลาย จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือที่ใช้ในการทำงานวิจัย ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- 1.Yamashita, R., 1993, New technology in grain post harvesting, Frist edition., Kyoto, 207 p.
2. Schroeder, W. and Rosberg, D.,1960., Infrared drying of rough rice, Rice Journal, Vol. 63, No.4, pp.23,27
3. Wratten, F. and Faulkner M., 1968, A New System for Rice Drying. Paper presented at Southwest Region Meeting of the ASAE., Little Rock., 25 p.
4. Biswas, D. Wratten F., Faulkner, M. and Miller, M., 1969., Effects of high temperature and moisture for pre-conditioning rice for milling, Paper presented at the southwest region meeting of the ASAE. Tyler, TX.
- 5.Kester, E. B., and et al., 1963., Influence of maturity on properties of western rice, Cereal chemistry.,Vol. 40, No.(4), New york, pp.323-336.
- 6.Eiji, B and Kunze, O., 1988, Flash drying and milling technique for high moisture brown rice, Transaction of American Society Agricultural Engineers, Vol. 31, No. 6, pp.1828-1834.
- 7.Henderson, M., 1972, Combine hulling of rice. Potential and evaluation, Rice J., Vol 57, No 5, pp. 16-18.8.Ito, N., 1985, Development of the combine harvester equipped with husking function, Journal of JSAM Kansai Branch, Vol 58, 1985, pp. 105-106.

รายงานการประชุมวิชาการวิชาการประจำปี 2544
สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, ขอนแก่น, 25-26 มกราคม 2544

การเปรียบเทียบสมรรถนะการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนที่ใช้ R-134a
และ R-22 เป็นสารทำงาน

The Comparison of Performance of Heat Pump Dryer
using R-134a and R-22 as Working Fluids

อำไพศักดิ์ ทิบุญมา¹ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์¹ และ จิรวรรณ เคียรต์สุวรรณ¹
Umphisak Teeboonma¹, Somchart Soponronnark¹ and Jirawan Tiansuwan¹

นักศึกษาระดับปริญญาเอก คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
Ph.D. student, School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology
อาจารย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (มจธ.) 91 ถนนประชาอุทิศ แขวงทุ่งครุ กรุงเทพฯ
Lecturer, King Mongkut's University of Technology (KMUTT), Pracha-Utit Rd., Tungkrui, Bangkok

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมรรถนะระบบอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน โดยเปรียบเทียบสมรรถนะทางด้านทฤษฎีในกรณีที่ใช้ R-134a และ R-22 เป็นสารทำงาน สภาวะเงื่อนไขที่ใช้มีดังนี้ อุณหภูมิเครื่องระเหยอยู่ในช่วง 0-30°C และ อุณหภูมิเครื่องควบแน่นอยู่ในช่วง 40-70°C จากการจำลองสภาวะการทำงานพบว่า ความสามารถในการทำความร้อน และสัมประสิทธิ์สมรรถนะระบบปั๊มความร้อน กรณีที่ใช้สาร R-22 สูงกว่ากรณีที่ใช้สาร R-134a โดยมีค่าเฉลี่ย 7.8 และ 1% ตามลำดับ นอกจากนั้นกำลังคอมเพรสเซอร์ที่ใช้ทำความร้อนปริมาณ 1 kW น้อยกว่าประมาณ 1% แต่เนื่องจาก R-134a ไม่มีศักยภาพในการทำลายโอโซนในชั้นบรรยากาศของโลก ดังนั้นจึงเลือกทดสอบเฉพาะระบบที่ใช้สาร R-134a ซึ่งมีสัดส่วนอากาศไม่ผ่านเครื่องระเหย 52% และอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ 1839 kg/h สรุปได้ว่า การอบแห้งถั่วอกที่น้ำหนักเริ่มต้น 30 kg ความชื้นเริ่มต้น 1630% dry basis (d.b) เหลือความชื้น 24% d.b ใช้เวลา 11 ชั่วโมง สำหรับกะหล่ำปลีน้ำหนักเริ่มต้น 18.6 kg ใช้เวลา 13 ชั่วโมง ในการอบแห้งจากความชื้นเริ่มต้น 1650% d.b ให้เหลือความชื้น 18.6% d.b และอบแห้งกล้วยซึ่งมีน้ำหนักเริ่มต้น 72.7 kg อบแห้งจากความชื้นเริ่มต้น 251% d.b ให้เหลือ 28.7% d.b ใช้เวลา 42 ชั่วโมง อัตราการอบแห้งและอัตราการใช้พลังงานเฉพาะสูงสุดเท่ากับ 25.3 kg water evap./h และ 1.52 kg water evap./kWh ตามลำดับ โดยที่อัตราการใช้พลังงานเฉพาะต่ำสุดเท่ากับ 2.37 MJ/kg water evap.

คำสำคัญ: การอบแห้ง / ปั๊มความร้อน / สารทำงาน

Abstract

The objective of this work is to quantitatively quantify the performance of heat pump dryer, principally based on theory, by using R-134a and R-22 as working fluids. Temperature ranges between 0 and 30°C at the evaporator and between 40 and 70°C at the condenser have been considered as the operating parameters. The simulation results show that the performance of heat pump in terms of heating effects, and COP operating on R-22 are 7.8%, and 1%, respectively, relatively higher than that operating on R-134a. In addition, the power of the compressor per 1 kW used for generating heat is less than approximately 1%. In the experimental part, bean sprouts, cabbages and bananas were dried by heat pump drying operating on R-134a because of R-134a has not ozone depletion potential. The by pass air ratio and the air mass flow rate are 52% and 1839 kg/h, respectively. The experimental results were as follows: the bean sprout of 30 kg was dried from 1630 % to 24 % dry basis in 11 hours; the cabbage of 18.6 kg was dried from 1650 % to 18.6 % dry basis in 13 hours and the banana of 72.7 kg was dried from 251 % to 28.7 % dry basis in 42 hours. The maximum values of the drying rate (DR) and the specific moisture extraction rate (SMER) are 2.53 kg water evap./h and 1.52 kg water evap./kWh, respectively, whereas the lowest value of the specific energy consumption (SEC) is 2.37 MJ/kg water evap.

Keyword: drying / heat pump / working fluid

1. บทนำ

การอบแห้งผลไม้ด้วยปั๊มความร้อนเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถลดความชื้นและยังคงสภาพของผลไม้ได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะของระบบปั๊มความร้อน คือ สามารถอบแห้งผลไม้ด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิต่ำเนื่องจากอากาศที่ใช้ในการอบแห้งถูกลดความชื้นด้วยเครื่องระเหยก่อนที่จะรับความร้อนจากเครื่องควบแน่น ดังนั้นลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้งจึงมีความชื้นต่ำ จุดเด่นตรงนี้ สามารถลดปัญหาของสีผลไม้ที่คล้ำและการเหี่ยวแห้ง และสามารถควบคุมสภาวะของการอบแห้ง เช่น อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศได้ง่าย ดังนั้นผลไม้ที่อบแห้งด้วยปั๊มความร้อนจึงมีคุณภาพสูง งานวิจัยที่ผ่านมาสารทำงานที่ใช้ในระบบอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนส่วนใหญ่จะเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม Pendyala et al., (1990) ทดลองอบแห้งโดยใช้ R-11 และ R-12 เป็นสารทำงานในระบบอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน ซึ่งจากการศึกษาพบว่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนในระบบที่ใช้ R-11 จะสูงกว่าระบบที่ใช้ R-12 Clement et al., (1993) ทดลองอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้ R-12 เป็นสารทำงาน และในระยะหลัง การทดลองศึกษาอิทธิพลความเร็วของอากาศ ขนาดของผลิตภัณฑ์ ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอบแห้ง หรือแม้กระทั่งเพื่อตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะใช้ R-22 เป็นสารทำงานในระบบอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน (Gordon et al., 1994 ; Chou et al., 1994 ; Prasertsan et al., 1997 and Soponronnarit et al., 1999) R-22 เป็นสารทำงานที่มีผลกระทบต่อชั้นบรรยากาศของโลก และส่งผลต่อเนื่องกับสิ่งแวดล้อมอีกหลายด้าน ในขณะที่ปัจจุบัน R-134a เป็นสารทำงานอีกชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ในตู้เย็นและเครื่องปรับอากาศในรถยนต์และมิยาภายในประเทศ แต่ R-134a เป็นสารที่ไม่มีศักยภาพในการทำลายชั้นบรรยากาศของโลก (Havelsky, 2000)

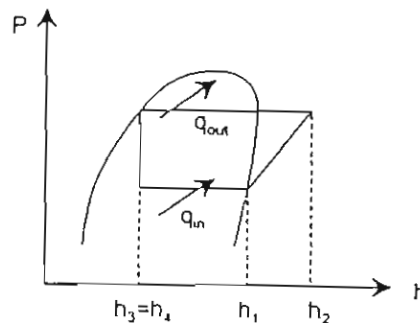
ดังนั้นเพื่อส่งเสริมการพัฒนาเทคโนโลยีการอบแห้งควบคู่กับการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบสารทำงานที่ใช้ในระบบอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนระหว่าง R-22 และ R-134a เนื่องจากอุปกรณ์ของสารทำงานทั้งสองมีจำหน่ายและหาซื้อได้ง่ายภายในประเทศ

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

สำหรับการดำเนินงานวิจัยได้แบ่งออกเป็นสองส่วน โดยในส่วนแรกจะเปรียบเทียบสารทำงานระหว่าง R-134a และ R-22 ในทางทฤษฎี ดัชนีที่ใช้ในการเปรียบเทียบ คือ ความสามารถในการทำความร้อน อัตราส่วนการอัดสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อน และกำลังงานคอมเพรสเซอร์สำหรับทำความร้อน 1 กิโลวัตต์ ในส่วนที่สอง เป็นการทดสอบการอบแห้ง ถังออก กะหล่ำปลี และกล้วย โดยเครื่องอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำงาน R-134a เพื่อศึกษาถึงสมรรถนะของระบบอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน โดยมีดัชนีบ่งชี้ คือ อัตราการอบแห้ง อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อน

2.1 การวิเคราะห์ทางทฤษฎี

ในการวิเคราะห์จะใช้วัฏจักรมาตรฐาน ดังแสดงในรูปที่ 1 เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบสารทำงาน



รูปที่ 1 The standard cycle of heat pump

ความสามารถในการทำความร้อน (Heating effect, q_H)	$q_H = h_2 - h_3$ kJ/kg
งานคอมเพรสเซอร์ (Compressor work, w_{comp})	$w_{comp} = h_2 - h_1$ kJ/kg
อัตราส่วนการอัด (Pressure ratio, PR)	$PR = P_{\infty} / P_{av}$
สัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อน (Coefficient of performance of heat pump, COP_h)	

$$COP_h = (h_2 - h_3) / (h_2 - h_1)$$

- เมื่อ h_1 คือ เอนทัลปีทางเข้าคอมเพรสเซอร์หรือออกจากเครื่องระเหย
 h_2 คือ เอนทัลปีทางออกคอมเพรสเซอร์หรือเข้าเครื่องควบแน่น
 h_3 คือ เอนทัลปีทางออกเครื่องควบแน่น
 P_{∞} คือ ความดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิเครื่องควบแน่น
 P_{av} คือ ความดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิเครื่องระเหย
 กำลังงานคอมเพรสเซอร์เพื่อทำความร้อน 1 กิโลวัตต์ หาได้จากรูป

$$m_r q_H = 1 \text{ kW}$$

$$m_r = 1 / (h_2 - h_3) \text{ kg/s}$$

$$W_{comp} = m_r (h_2 - h_1) = (h_2 - h_1) / (h_2 - h_3) \text{ kW}$$

เมื่อ η_c คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน

W_{comp} คือ กำลังงานของคอมเพรสเซอร์

นั่นคือ เมื่อคิดเทียบกับความสามารถในการทำความร้อน 1 kW จะได้ว่า กำลังงานของคอมเพรสเซอร์เป็นส่วนกลับของสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อน

2.1.1 ผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี

เงื่อนไขที่ใช้ศึกษาในทางทฤษฎี ได้แก่ อุณหภูมิเครื่องระเหยอยู่ระหว่าง $0-30^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิเครื่องควบแน่นอยู่ระหว่าง $40-70^{\circ}\text{C}$

ความดันไออิ่มตัว

ที่สภาวะการทำงานของเครื่องระเหย ($0-30^{\circ}\text{C}$) จากการวิเคราะห์พบว่าความดันไออิ่มตัวของสารทำงาน R-22 สูงกว่าสารทำงาน R-134a โดยเฉลี่ยประมาณ 38% ดังแสดงในรูปที่ 3 และที่สภาวะการทำงานของเครื่องควบแน่น (40 ถึง 70 องศาเซลเซียส) จากการวิเคราะห์พบว่าความดันไออิ่มตัวของสารทำงาน R-22 สูงกว่าสารทำงาน R-134a โดยเฉลี่ยประมาณ 31% ดังแสดงในรูปที่ 4

ความสามารถในการทำความร้อน

ความสามารถในการทำความร้อน (heating effect) ของสารทำงาน R-22 สูงกว่าสารทำงาน R-134a โดยเฉลี่ยประมาณ 7.8% ดังรูปที่ 5

อัตราส่วนการอัด

ที่สภาวะการทำงานเดียวกันนั้น อัตราส่วนการอัด (pressure ratio, PR) ของสารทำงาน R-134a สูงกว่าสารทำงาน R-22 โดยเฉลี่ยประมาณ 7% ดังรูปที่ 6

กำลังงานของคอมเพรสเซอร์

กำลังงานของคอมเพรสเซอร์ที่ใช้เพื่อทำความร้อน (Heating Effect) ในปริมาณ 1 kW ของสารทำงาน R-134a สูงกว่า R-22 เล็กน้อย คือโดยเฉลี่ยแล้วประมาณ 1% ดังแสดงในรูปที่ 7

สัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อน

สัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำงาน R-22 สูงกว่าระบบปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำงาน R-134a โดยเฉลี่ยประมาณ 1% ดังรูปที่ 8

ข้อดีและข้อเสีย

R-134a มีข้อดี คือ มีความดันไออิ่มตัวต่ำ ไม่ทำลายชั้นบรรยากาศ และมีอุณหภูมิวิกฤตสูง ในส่วนของข้อเสีย คือ สารทำงานราคาแพง มีความสามารถในการกัดกร่อนวัสดุสูง ไม่รวมตัวกับน้ำมันหล่อลื่นธรรมชาติ

R-22 มีข้อดี คือ สัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนสูง สารทำงานราคาถูก มีความสามารถในการกัดกร่อนวัสดุต่ำ และสามารถรวมตัวกับน้ำมันหล่อลื่นธรรมชาติ ในส่วนของข้อเสีย คือ มีความดันไออิ่มตัวสูง และทำลายชั้นบรรยากาศโลก

จากการศึกษาและเปรียบเทียบทั้งข้อดีและข้อเสีย รวมทั้งสมรรถนะต่างๆของสารทำงานทั้งสอง ในงานวิจัยนี้จึงเลือกทดสอบเครื่องอบแห้งที่ใช้ R-134a เป็นสารทำงาน เพราะเป็นสารที่ไม่ทำลายโอโซนในชั้นบรรยากาศของโลก และเนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการทดสอบเครื่องอบแห้งที่ใช้ R-22 มามากแล้ว ในขณะนี้ยังไม่มีผลการทดสอบเครื่องอบแห้งที่ใช้สารทำงาน R-134a

2.2.2 อุปกรณ์การทดลอง

ระบบอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนที่ใช้ศึกษาเป็นแบบระบบปิด ซึ่งประกอบด้วยวงจรของสารทำงาน 2 ระบบ โดยมีหลักการคือ ในช่วงเริ่มต้น จะทำงานทั้งสองวงจร จนกระทั่งอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้งมีอุณหภูมิสูงถึงค่าที่ตั้งไว้ sensor ตรวจวัดอุณหภูมิ จะส่งสัญญาณเพื่อตัดวงจรสารทำงานที่ 2 ให้เหลือการทำงานเพียงหนึ่งวงจร และ solenoid valve ก็จะทำให้สารทำงานสามารถไหลผ่าน external condenser (external condenser มีเฉพาะวงจรที่ 1) เพื่อระบายความร้อนส่วนเกินทิ้งไป ซึ่งอุปกรณ์ของทั้งสองระบบจะวางเรียงติดกัน ดังแสดงในรูปที่ 2 สำหรับเหตุผลที่ต้องระบายความร้อนทิ้งเนื่องจากระบบอบแห้งเป็นระบบปิด ดังนั้นจึงมีการสะสมพลังงานความร้อนขึ้นเรื่อยๆ และหากปล่อยให้อุณหภูมิสูงเกินไปก็จะทำให้ มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่อบแห้ง สำหรับรายละเอียดของอุปกรณ์มีดังนี้ คอมเพรสเซอร์ขนาด 505 วัตต์ เครื่องระเหย มีจำนวนครีบ 6 ครีบต่อหนึ่งนิ้ว ท่อมีจำนวน 1 แถว เครื่องควบแน่นตัวใน มีจำนวนครีบ 9 ครีบต่อหนึ่งนิ้ว ท่อมีจำนวน 3 แถว และเครื่องควบแน่นตัวนอก มีจำนวนครีบ 9 ครีบต่อหนึ่งนิ้ว ท่อมีจำนวน 2 แถว

ข้อมูลที่วิเคราะห์สมรรถนะของระบบอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน ได้แก่ การอัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน ซึ่งบันทึกจากกิโลวัตต์เออร์ ปริมาณน้ำที่ควบแน่น ซึ่งใช้เครื่องชั่งน้ำหนัก อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าและออกจากเครื่องระเหย และเครื่องควบแน่น วัดด้วย Thermocouple type K ต่อเข้ากับ data logger เพื่อบันทึกข้อมูลทุกๆ ชั่วโมง และความชื้นของผลิตภัณฑ์ทั้งก่อนและหลังอบแห้ง ซึ่งหาได้จากการนำเอาตัวอย่างของผลิตภัณฑ์มาชั่งน้ำหนักก่อนอบแห้ง และนำไปอบแห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำเอาตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักอีกครั้งหนึ่ง แล้วจึงคำนวณหาความชื้น

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 ผลการทดลอง

ในการศึกษาได้ทดลองอบแห้ง ถั่วอก กะหล่ำปลี และกล้วยน้ำว้า โดยใช้ระบบอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำงาน R-134a ซึ่งผลการทดลองได้สรุปในตารางที่ 2 สำหรับผลต่างการวิเคราะห์ระหว่างเชิงทฤษฎีและการทดลอง สรุปในตารางที่ 3

3.2 วิจารณ์

ผลที่ได้จากการจำลองสภาวะการทำงานจะเห็นว่าทั้งสองสารทำงานมีผลต่างในด้านกำลังงานคอมเพรสเซอร์ และสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนเพียงเล็กน้อย ในเบื้องต้นสามารถสรุปได้ว่า ถ้าต้องการสร้างระบบอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนโดยที่สามารถลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ควรสร้างระบบที่ใช้สารทำงาน R-134a ซึ่งผลจากการทดลองก็พบว่าระบบที่ใช้ R-134a มีสมรรถนะค่อนข้างสูง แต่การสร้างเครื่องอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนสำหรับระบบที่ใช้สารทำงาน R-134a พบว่ามีต้นทุนที่สูงกว่าอีกระบบ เนื่องจากอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้กับสารทำงาน R-134a มีราคาแพงกว่าอุปกรณ์ของสารทำงาน R-22 นอกจากนั้นขนาดอุปกรณ์ที่ใช้กับ R-134a ที่มีวางขายในท้องตลาดยังมีขนาดเล็ก ดังนั้นถ้าหากต้องการระบบที่มีความจุในการอบแห้งมากต้องใช้อุปกรณ์ถึงสองชุดเพื่อให้สามารถทำความร้อนและลดความชื้นของอากาศได้ตามที่ต้องการ จากการทดลองไม่สามารถบอกสภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งได้ เนื่องจากได้ทดลองเพียงหนึ่งสภาวะ ในส่วนของผลต่างที่เกิดขึ้นระหว่างการวิเคราะห์ในเชิงทฤษฎีและการทดลอง ซึ่งเป็นผลมาจาก ความดันที่เครื่องควบแน่นและเครื่องระเหยไม่คงที่ สภาวะ ณ ทางเข้าคอมเพรสเซอร์เป็นไอร้อนยิ่งยวด และขบวนการอัดไอก่ไม่ใชขบวนการเอนโทรปีคงที่ เหมือนที่พิจารณาในเชิงทฤษฎี นอกจากนั้นความผิดพลาดบางส่วนอาจจะมาจากความแม่นยำของเครื่องมือที่ใช้ด้วย

4. สรุป

ในการเปรียบเทียบสารทำงานระหว่าง R-134a และ R-22 โดยอาศัยทฤษฎีพื้นฐานของระบบปั๊มความร้อน พบว่าผลต่างของสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนทั้งสองระบบน้อยมาก ในด้านการลงทุนสำหรับระบบอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนกรณีที่ใช้ R-134a จะสูงกว่ากรณีที่ใช้ R-22 แต่ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจะมีน้อยกว่า จากการทดลองระบบอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนที่ใช้ R-134a เป็นสารทำงาน พบว่าสมรรถนะของระบบอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งด้วย เช่น ความชื้นเริ่มต้น สัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน สำหรับผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

1. ถังวอก น้ำหนักเริ่มต้น 30 kg ใช้เวลา 11 ชั่วโมง เพื่อลดความชื้นจาก 1630 %มาตรฐานแห้ง ให้เหลือ 24 %มาตรฐานแห้ง โดยที่ อัตราการอบแห้ง อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะ และสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 2.53 kg water evap./h, 1.52 kg water evap./kWh และ 3.9 ตามลำดับ

2. กะหล่ำปลี น้ำหนักเริ่มต้น 18.6 kg เพื่อลดความชื้นจาก 1650 ให้เหลือ 18.6 % d.b ใช้เวลา 13 ชั่วโมง โดยที่ อัตราการอบแห้ง อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะ และสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 1.33 kg water evap./h, 0.82 kg water evap./kWh และ 3.38 ตามลำดับ

3. กกล้วย น้ำหนักเริ่มต้น 72.7 kg ใช้เวลา 42 ชั่วโมง เพื่อลดความชื้นจาก 251 % d.b ให้เหลือ 28.7 % d.b โดยที่ อัตราการอบแห้ง อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะ และสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 1.11 kg water evap./h, 0.72 kg water evap./kWh และ 3.44 ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

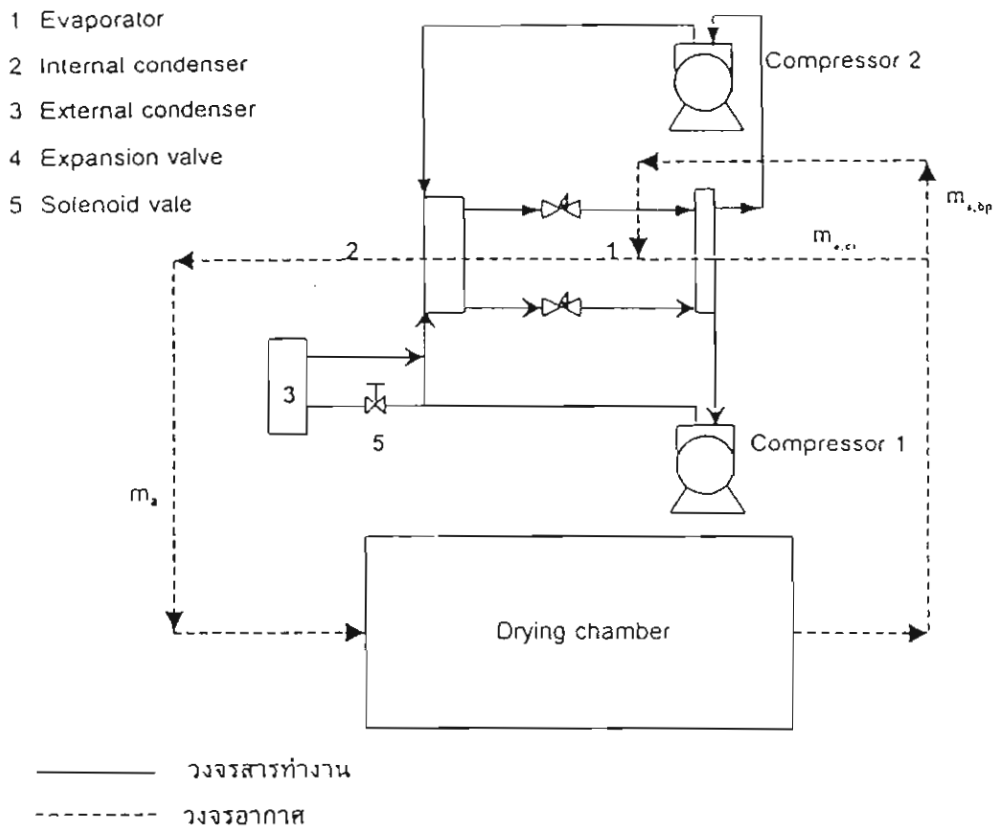
ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ได้ให้เงินทุนสนับสนุนโครงการวิจัยนี้ และขอขอบคุณ General Food & Fruit Co.,Ltd. ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

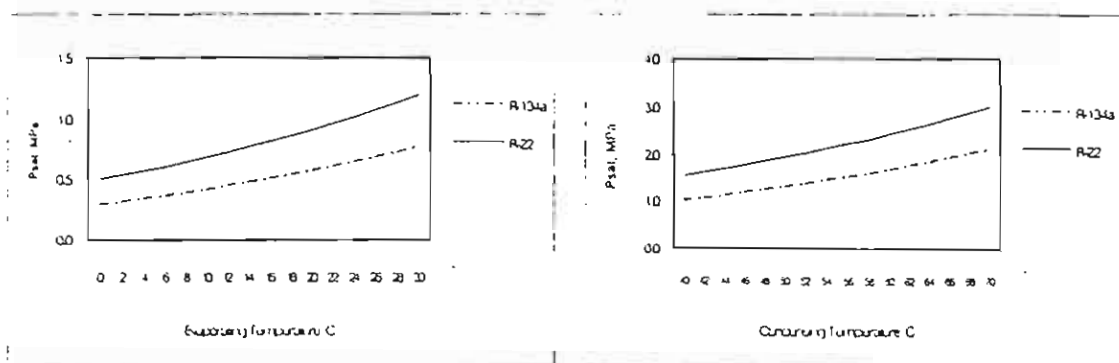
1. Chou, S.K., Hawlader, M.N.A., Ho, J.C., Wijesunder, N.E. and Chua, K.J., 1995, "Heat pump drying system", The 4th ASEAN Science and Technology Week " Science and Technology: The Future of ASEAN". Bangkok, Thailand, 21 August – 1 September.
2. Clement, S., Jia, X., and Jolly, P., 1993, "Experimental verification of a heat pump assisted continuous dryer simulation model". International Journal of Energy Research , Vol. 17, pp. 19-28.
3. Gordon, Y., Scott, B. and Richard, M., 1995, "heat pump drying of food products – prediction of performance and energy efficiency". The 4th ASEAN Science and Technology Week " Science and Technology: The Future of ASEAN". Bangkok, Thailand, 21 August – 1 September.
4. Havelsky, V., 2000, "Investigation of Refrigerating System with R-12 Refrigerant Replacements". Applied Thermal Engineering, Vol. 20, pp. 133-140.
5. Pendyala, V.R., Devotta, S. and Patwardhan, V.S., 1990, "Heat-Pump-Assisted Dryer Part 2: Experimental Study". International Journal of Energy Research, Vol. 14 , pp. 493-507.
6. Prasertsan, S., Saen-Saby, P., Ngamsitrakul, P. and Prateepchaikul, G., 1997, "Heat pump dryer ,Part 3: Experimental verification of the simulation". International Journal of Energy Research, Vol. 21, pp. 707-722.

7. Soponronnarit, S., Swasdisevi, T. and Rattanongpisat, W., 1999, "Development of Mathematical Model for Heat Pump Fruit Drying". RERIC International Energy Journal., Vol. 21, pp. 93-104.

ภาคผนวก

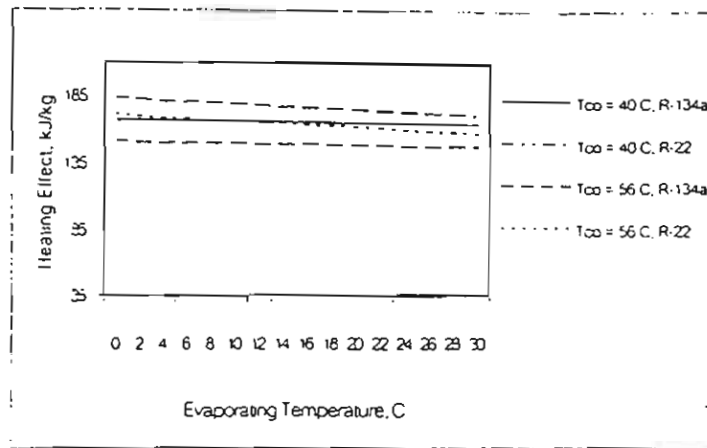


รูปที่ 2 The functional circuit of heat pump dryer

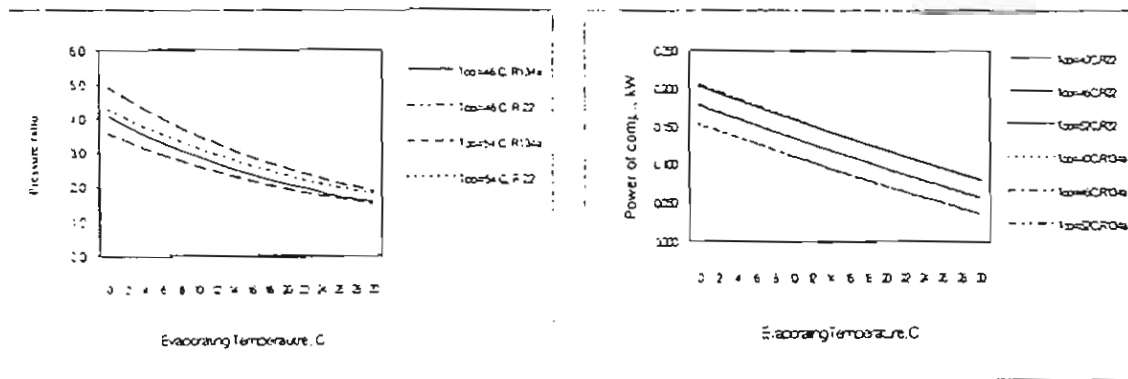


รูปที่ 3 The difference of saturated pressure at evaporating temperature

รูปที่ 4 The difference of saturated pressure at condensing temperature

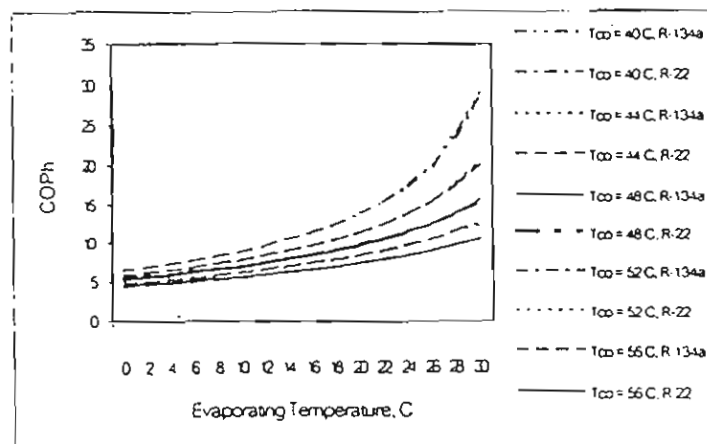


រូបទី 5. The difference of heating effect



រូបទី 6. The difference of pressure ratio

រូបទី 7 The difference of compressor power per 1 kW of heating effect



រូបទី 8 The difference of coefficient of performance of heat pump

ตารางที่ 1 The properties of working fluid (R-134a and R-22)

Properties	HCFCs – 22	HFCs – 134a
Chemical Formula	CHClF_2	CH_2FCF_3
Critical Temperature , $^{\circ}\text{C}$	96.2	101.2
Normal Boiling Point , $^{\circ}\text{C}$	-40.76	-26.2
Critical Pressure , Mpa (abs)	4.99	4.055
Molecular Weight , kg/kmol	86.5	102.0
Ozone Depletion Potential	0.05	0
Global Warming Potential	0.34	0.27
Atmospheric Lifetime, years	15.8	15.5
Toxicity	Low	Low
Flammability	None	None

(Havelsky, 2000)

** หมายถึง ค่า ODP และ GWP คิดเทียบกับ CFCs-11

ตารางที่ 2 The experimental results

Description	Bean sprout	Cabbage	Banana
Air flow rate, kg / h	1839	1839	1839
Evaporator by pass air, %	52	52	52
Average moisture before drying, % d.b	1630	1650	251
Average moisture after drying, % d.b	24	18.60	28.7
Initial weight, kg	30	18.60	72.7
Final weight, kg	2.15	1.35	26.2
Moisture removed, kg	27.85	17.25	46.8
Water condense, kg	23.15	14.78	36.8
Average temperature, $^{\circ}\text{C}$	47	51	53.5
Average compressor work, kW	1.13	1.05	0.94
Energy consumption, kWh	18.05	20.98	65.09
Drying time, h	11	13	42
Drying rate _{avg} , kg water evap. / h	2.53	1.33	1.11
MER _{avg} , kg water cond. / h	2.1	1.14	0.88
SMER _{avg} , kg water evap. / kWh	1.52	0.82	0.72
SEC _{avg} , MJ / kg water evap.	2.37	4.38	5.00

ตารางที่ 3 Comparison between theoretical and experimental results

Description	Bean sprout	Cabbage	Banana
Condensing Temperature, °C	52	56	57
Evaporating Temperature, °C	19	20	20
PR, (Theory)	2.49	2.67	2.73
PR, (Experiment)	2.64	2.83	2.87
COPh, (Theory)	8.1	7.33	7.13
COPh, (Experiment)	4.4	4.0	4.3

รายงานการประชุมวิชาการวิชาการประจำปี 2544
สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, ขอนแก่น, 25-26 มกราคม 2544

การอบแห้งข้าวโพดโดยเทคนิคสเปาเด็ดเบดสองมิติ
Corn Drying by Two-dimension Spouted Bed Technique

เกษมา เจนวิจิตรสกุล¹ สมชาติ โสภณธนฤทธิ² สมบูรณ์ เวชกามา¹ และสมเกียรติ ปรัชญาภากร¹

1. อาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ. วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี
Lecturer, Faculty of Engineering Ubon Ratchathani University (UBU), Ubon Ratchathani Province

2. อาจารย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 91 ถนนประชาอุทิศ ทungkru กรุงเทพฯ
Lecturer, King Mongkut's University of Technology (KMUTT), Pracha-ut Rd., Tungkr, Bangkok.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาแนวทางที่เหมาะสมในการอบแห้งข้าวโพดโดยเทคนิคสเปาเด็ดเบดสองมิติ พิจารณาตัวแปรที่ส่งผลต่อคุณภาพของเมล็ดข้าวโพดหลังการอบแห้ง พัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายการอบแห้งข้าวโพด โดยการทดลองอบแห้งเมล็ดข้าวโพดที่ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 38% d.b. อุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าห้องอบแห้ง 130, 140 และ 150°C ปริมาณข้าวโพด (hold-up) 20, 25 และ 30 kg จากผลการทดลองพบว่า ตัวแปรหลักที่มีอิทธิพลต่ออัตราส่วนความชื้นคืออุณหภูมิอากาศอบแห้งและปริมาณข้าวโพดในห้องอบแห้ง (hold-up) สมการของ Lewis มีความเหมาะสมและสะดวกในการทำนายอัตราส่วนความชื้น ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพเมล็ดข้าวโพดหลังการอบแห้ง ในด้านการร้าว การแตก และสีของเมล็ด คือ ความชื้นสุดท้ายของเมล็ดข้าวโพด ซึ่งไม่ควรมีค่าต่ำกว่า 22% d.b. เพราะจะทำให้เกิดการร้าวและแตกเพิ่มขึ้นมาก

คำสำคัญ: การอบแห้ง / เมล็ดพืช / สเปาเด็ดเบด

Abstract

The objectives of this work are to investigate the suitable corn drying condition for obtaining a superior quality and to develop mathematical model. The experimental conditions have been conducted at initial moisture content of 38% d.b., air inlet temperatures of 130, 140 and 150°C and hold-ups of corn 20, 25 and 30 kg. The experimental result indicates that the inlet temperature and the hold-up of corn affect strongly the removal of moisture. A Lewis model is the most appropriate for predicting the drying rate. The corn qualities due to stress crack, breakage and colour are depended on the final moisture content of corn. If the moisture content of corn is decreased lower than 22% d.b., the stress crack and the breakage increase significantly.

Key words: drying / grain / spouted bed

2.2 เครื่องมือวัดข้อมูลในการทดลอง

1. วัดอุณหภูมิอากาศและเมล็ดข้าวโพดโดยใช้สายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ต่อเข้ากับเครื่องเก็บข้อมูล (data logger) ค่าความถูกต้อง $\pm 1^{\circ}\text{C}$
2. ใช้ U- tube manometer วัดความดันลดคร่อมเบด
3. ความเร็วของอากาศวัดด้วยเครื่องมือวัดความเร็วลมแบบขดลวดร้อน (hot-wire anemometer) ค่าความถูกต้อง $\pm 4\%$ และ Pitot- tube วัดความเร็วลมภายในสเปคต์และทางเข้าห้องอบ
4. วัดความชื้นข้าวโพดโดยตูบไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 103°C อบไว้นานเป็นเวลา 72 ชั่วโมง
5. เครื่องวัดสีข้าวโพด ใช้เครื่องวัดสีอาหารยี่ห้อ JUKI JP100P

3. การทดลองและผลการทดลอง

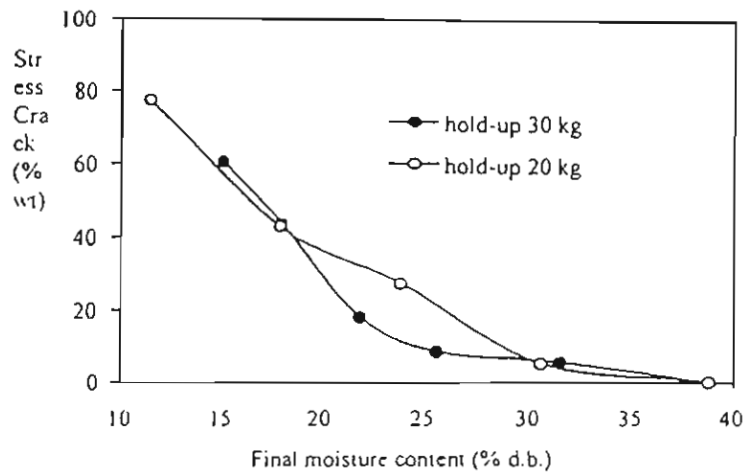
3.1 คุณภาพเมล็ดข้าวโพด

จากการทดลองอบแห้งข้าวโพดที่ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 38% d.b. ความเร็วอากาศ 17 m/s ปริมาณ hold-up 20 และ 30 kg ใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150°C และ 170°C ทำการลุ่มตัวอย่างข้าวโพดจำนวนหนึ่งออกมาที่เวลาต่าง ๆ เพื่อใช้ในการตรวจสอบคุณภาพในด้าน เปอร์เซ็นต์การร้าว เปอร์เซ็นต์การแตก และสีของเมล็ด พร้อมทั้งได้เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การร้าวของเมล็ดหลังการอบแห้งกับการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดาเซชัน ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150°C จากการตรวจสอบคุณภาพในแต่ละด้าน ได้ผลดังต่อไปนี้

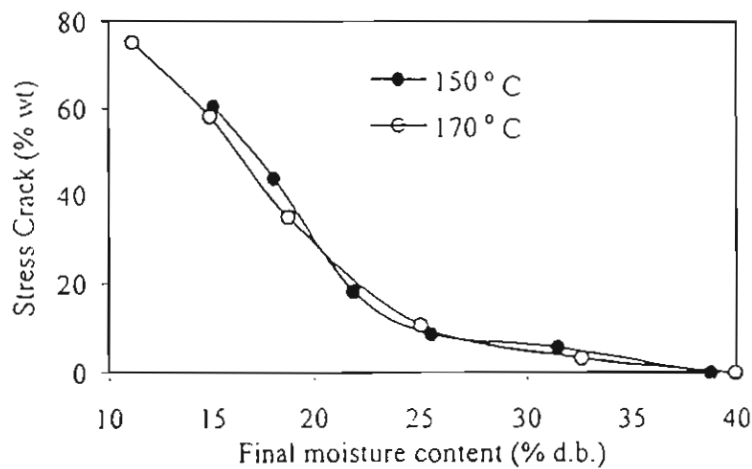
3.1.1 เปอร์เซ็นต์การร้าว

เมื่อพิจารณาผลของ hold-up ต่อเปอร์เซ็นต์การร้าวของเมล็ดข้าวโพด โดยทำการทดลองอบแห้งที่ hold-up 20 และ 30 kg อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150°C พบว่า การร้าวของเมล็ดขึ้นอยู่กับความชื้นสุดท้ายของเมล็ด ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยเปอร์เซ็นต์การร้าวของเมล็ดเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นสุดท้ายลดลง และเมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่อการร้าว ของเมล็ด โดยเพิ่มอุณหภูมิจาก 150°C เป็น 170°C ที่ hold-up 30 kg พบว่า ไม่มีผลทำให้ปริมาณการร้าวของเมล็ดเพิ่มขึ้นที่ความชื้นสุดท้ายเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 3

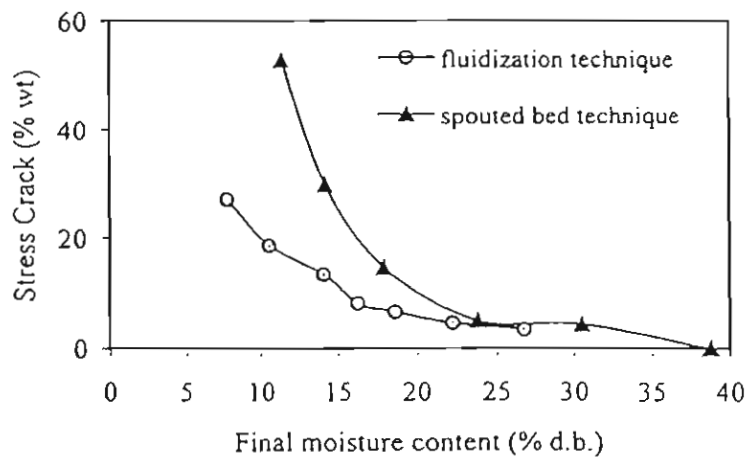
จากการพิจารณาเปอร์เซ็นต์การร้าวของเมล็ดข้าวโพดหลังการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศ 150°C โดยเทคนิค สเปคเตดเบดเปรียบเทียบกับเทคนิคฟลูอิดาเซชันจากงานวิจัยของอนันต์ [1] ดังในรูปที่ 4 พบว่า เทคนิคสเปคเตดเบดทำให้เกิดการร้าวของเมล็ดข้าวโพดสูงกว่าการร้าวของเมล็ดโดยเทคนิคฟลูอิดาเซชันมากที่ความชื้นสุดท้ายเดียวกัน เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนานกว่าเทคนิคฟลูอิดาเซชันในการลดความชื้นให้เหลือเท่ากัน และอาจเป็นผลจากเมล็ดข้าวโพดซึ่งมีความเร็วสูงพุ่งชนกับแผ่น deflector ที่อยู่บริเวณด้านบนช่องสเปคต์ ส่งผลให้เกิดการร้าวของเมล็ดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การร้าวกับความชื้นสุดท้าย กรณีใช้ hold-up ต่างกัน อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150°C ความเร็วอากาศอบแห้ง 17 m/s ความชื้นเริ่มต้น 38% d.b.



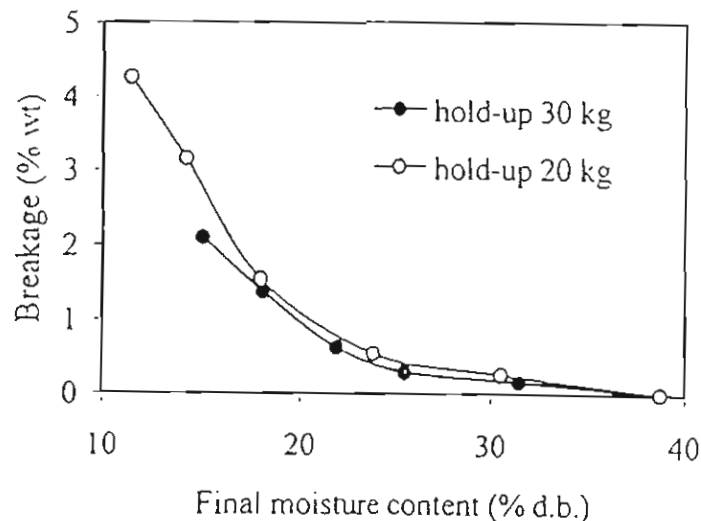
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การร้าวกับความชื้นสุดท้าย กรณีใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งต่างกัน hold-up 30 kg ความเร็วอากาศอบแห้ง 17 m/s ความชื้นเริ่มต้น 38% d.b.



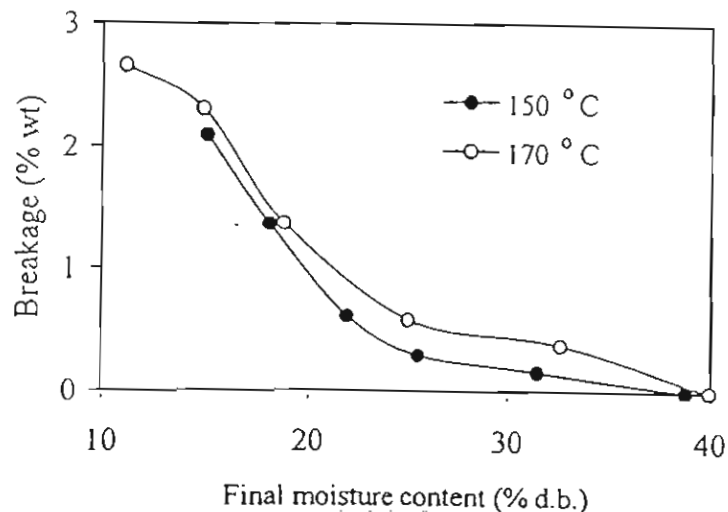
รูปที่ 4 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การร้าวกับความชื้นสุดท้าย กรณีอบแห้งด้วยเทคนิคสเปาต์เบด และเทคนิคฟลูอิดไอเซชัน ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150°C

3.1.2 เปอร์เซ็นต์การแตก

เมื่อพิจารณาผลของ hold-up ต่อเปอร์เซ็นต์การแตกของข้าวโพด จากทดลองอบแห้งที่ปริมาณ hold-up 20 และ 30 kg อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150°C พบว่า การแตกของเมล็ดเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นสุดท้ายลดลง โดยที่ปริมาณ hold-up 20 kg เปอร์เซ็นต์แตกมีแนวโน้มสูงกว่าเล็กน้อยที่ความชื้นสุดท้ายเดียวกัน เมื่อความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 22% d.b. ปริมาณแตกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 0.5% wt เป็น 2% wt ที่ความชื้นสุดท้าย 16% d.b. ดังแสดงในรูปที่ 5 และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งจาก 150°C เป็น 170°C พบว่า เปอร์เซ็นต์การแตกของเมล็ดจะเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นสุดท้ายลดลงใกล้เคียงกันทั้ง 2 ช่วงอุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 170°C เปอร์เซ็นต์แตกมีแนวโน้มสูงกว่าเล็กน้อยที่ความชื้นสุดท้ายเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งทั้งในกรณี hold-up 20 kg และกรณีใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 170°C มีอัตราการอบแห้งสูงกว่า จึงส่งผลให้เกิดการแตกของเมล็ดที่มีการร้าวอยู่ก่อนแล้วเพิ่มขึ้น



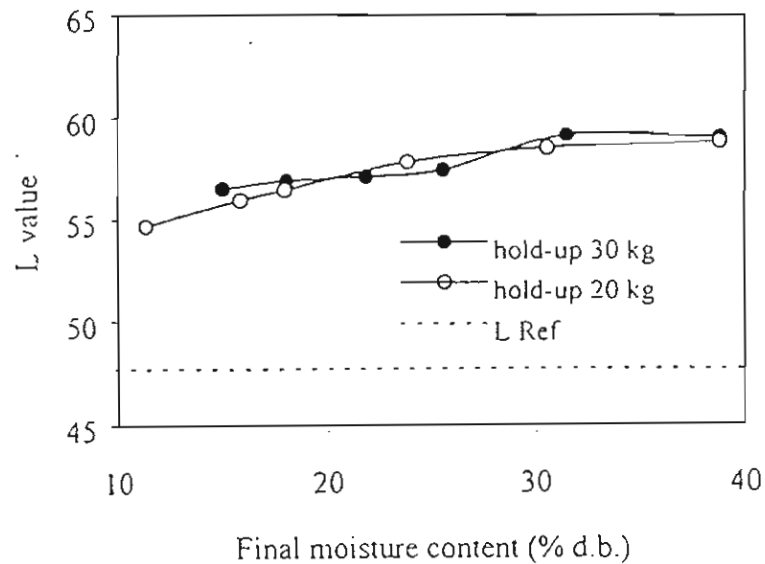
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การแตกกับความชื้นสุดท้าย กรณีใช้ hold-up ต่างกัน อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150°C ความเร็วอากาศอบแห้ง 17 m/s และความชื้นเริ่มต้น 38% d.b.



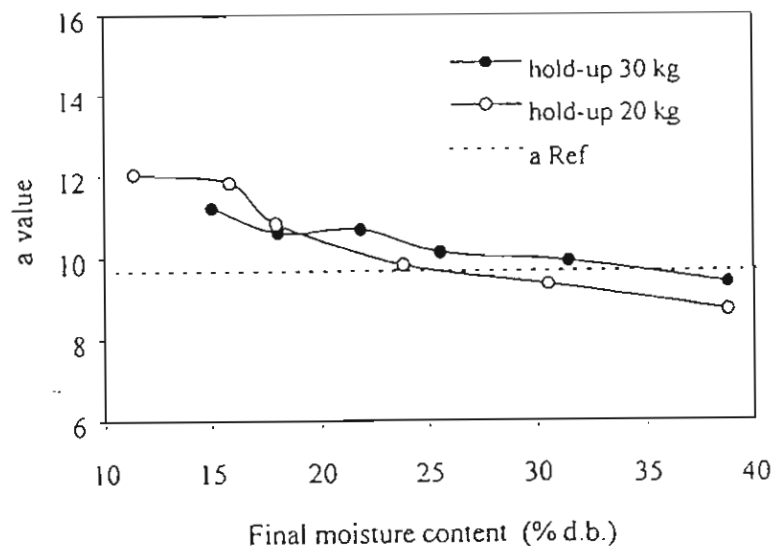
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การแตกกับความชื้นสุดท้ายของเมล็ดข้าวโพด กรณีใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งต่างกัน hold-up 30 kg ความเร็วอากาศอบแห้ง 17 m/s และความชื้นเริ่มต้น 38% d.b.

3.1.3 สีของเมล็ดของเมล็ดข้าวโพด

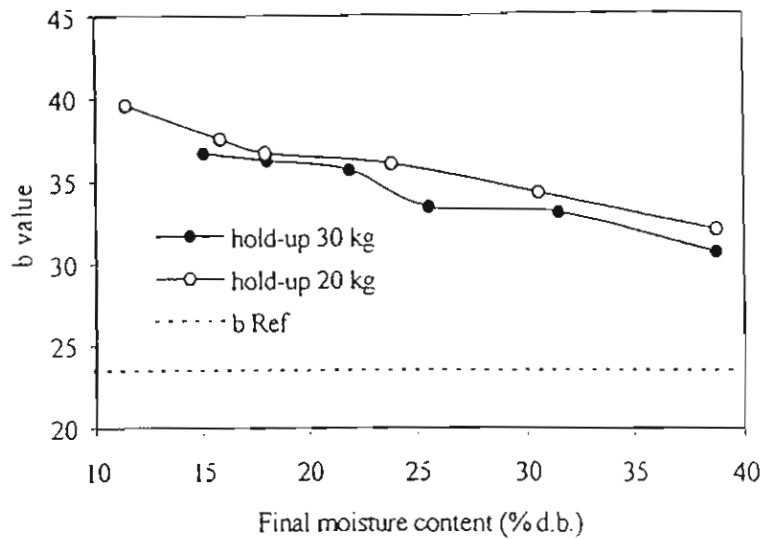
จากการตรวจสอบสีของเมล็ดข้าวโพดที่ผ่านการอบแห้งจากชุดเครื่องวัดสีอาหาร โดยพิจารณา ค่าความสว่างของเมล็ดข้าวโพด (L value) ค่าสีแดง (a value) และค่าสีเหลือง (b value) พบว่า เมื่อทำการอบแห้งด้วยเทคนิคสเปาแดดเบดที่ปริมาณ hold-up 30 และ 20 kg ค่าความสว่างของเมล็ดลดลงตามการลดลงของความชื้น ขณะที่ส่วนสีเหลืองและแดงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 20% d.b. โดยที่ hold-up 20 kg จะมีค่าความสว่างลดลงและมีค่าสีแดงเพิ่มขึ้นสูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 7 ถึง 9



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสว่าง (L value) กับความชื้นสุดท้ายของเมล็ดข้าวโพด
กรณีใช้ hold-up ต่างกัน อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150°C



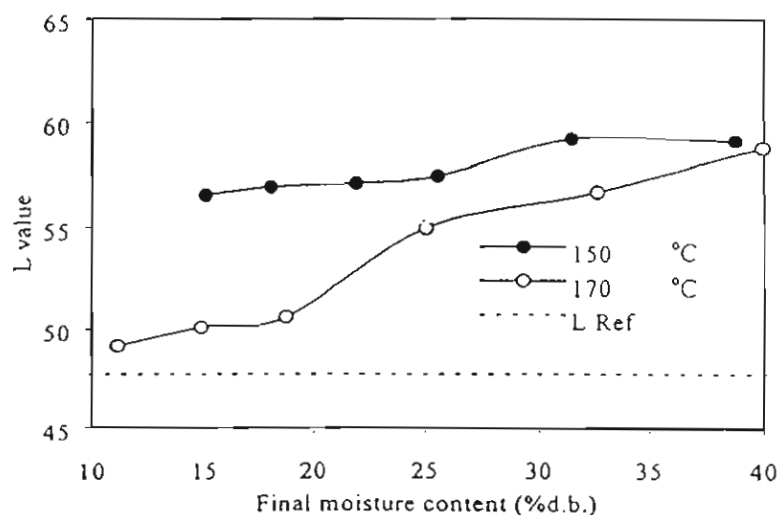
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีแดง (a value) กับความชื้นสุดท้ายของเมล็ดข้าวโพด
กรณีใช้ hold-up ต่างกัน อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150°C



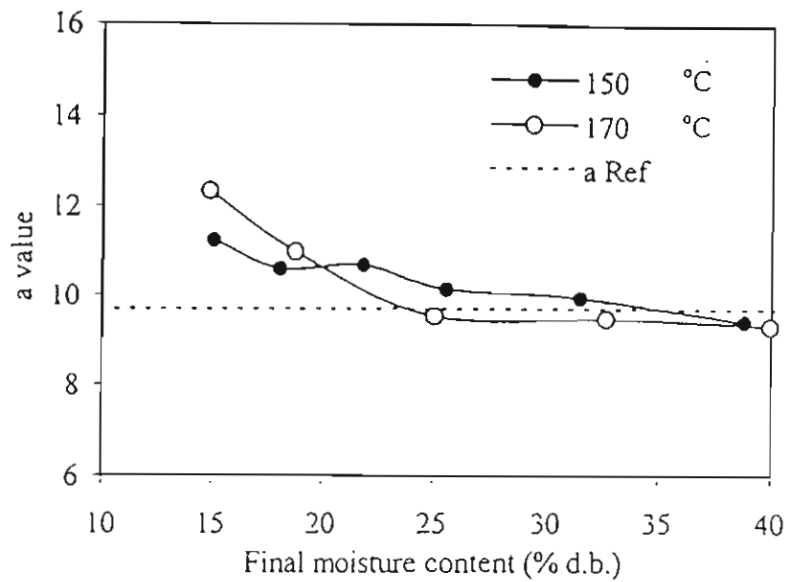
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีเหลือง (b value) กับความชื้นสุดท้ายของเมล็ดข้าวโพด
กรณีใช้ hold-up ต่างกัน อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150°C

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่อสีของเมล็ดข้าวโพด ดังแสดงในรูปที่ 10 ถึง 12 พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 150 เป็น 170°C ค่าความสว่างของเมล็ดข้าวโพดลดลงอย่างชัดเจนเมื่อความชื้นสุดท้ายลดลง ส่วนค่าสีแดงและสีเหลืองเพิ่มขึ้น โดยมีแนวโน้มใกล้เคียงกันทั้งสองอุณหภูมิ เมล็ดข้าวโพดที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิ 170°C มีสีคล้ำกว่า

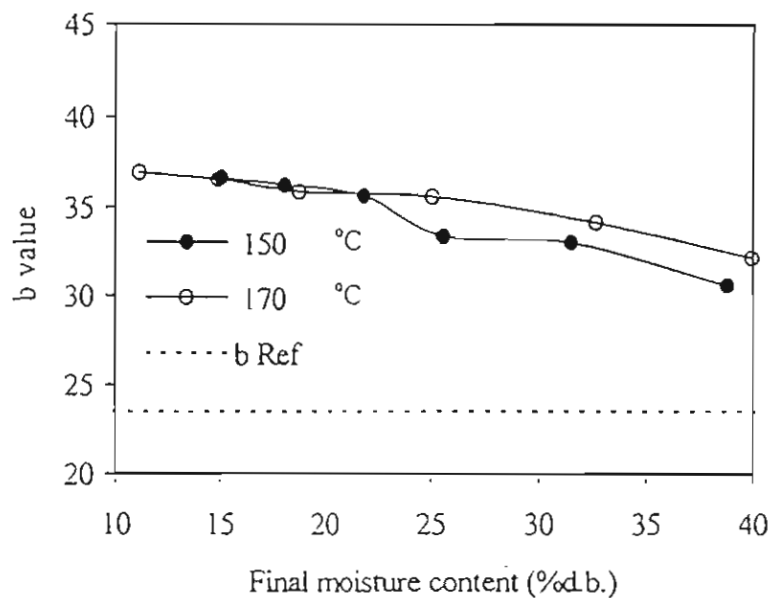
สีเมล็ดข้าวโพดในการกำเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานของ Hunter คือ ค่าความสว่าง (L) ไม่ควรต่ำกว่า 47.7 ค่าสีแดง (a) ไม่ควรสูงกว่า 9.7 และค่าสีเหลือง (b) ไม่ควรต่ำกว่า 23.5



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสว่าง (L value) กับความชื้นสุดท้ายของเมล็ดข้าวโพด
กรณีใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งต่างกัน และ hold-up 30 kg



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีแดง (a value) กับความชื้นสุดท้ายของเมล็ดข้าวโพด
กรณีใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งต่างกัน และ hold-up 30 kg



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีเหลือง (b value) กับความชื้นสุดท้ายของเมล็ดข้าวโพด
กรณีใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งต่างกัน และ hold-up 30 kg

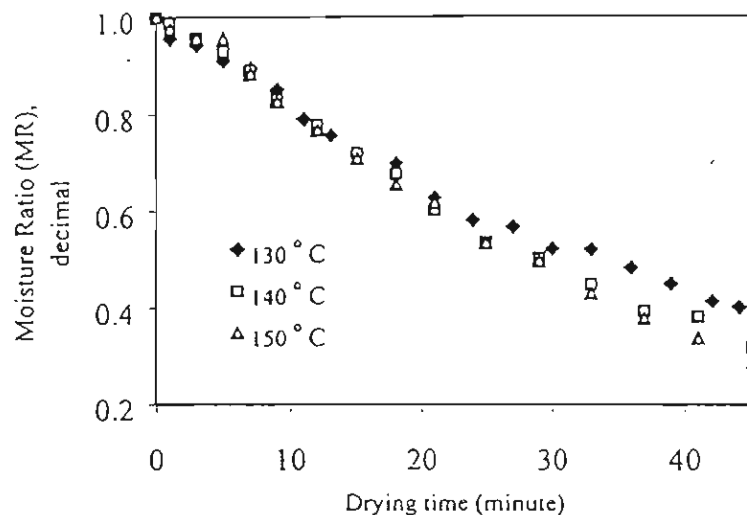
3.2 การทดลองศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ต่อการอบแห้ง

ทำการทดลองศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและปริมาณ hold-up ที่มีต่อการอบแห้งข้าวโพด ที่สภาวะการทดลองอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 130, 140 และ 150 °C, hold-up 20, 25 และ 30 kg ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 38% d.b. ความเร็วอากาศอบแห้ง 17 m/s และทดลองศึกษาอิทธิพลของความเร็วอากาศต่อการอบแห้ง โดยทำการทดลองที่สภาวะ ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 38% d.b. อุณหภูมิอบแห้ง 130 °C ความเร็วอากาศอบแห้ง 17, 19 และ 21 m/s, hold-up 30 kg

จากการทดลองศึกษาแต่ละกรณีได้ผลดังนี้

3.2.1 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่ออัตราส่วนความชื้น

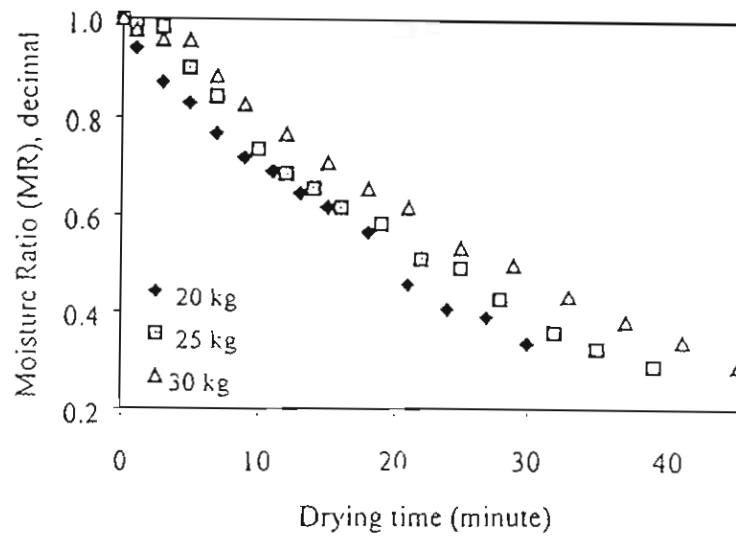
รูปที่ 13 แสดงเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่ออัตราส่วนความชื้นของเมล็ดข้าวโพด พบว่า เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาในการอบแห้งและ hold-up เดียวกัน กรณีอบแห้งที่อุณหภูมิ 150°C ความชื้นของเมล็ดข้าวโพดจะลดลงมากกว่ากรณีอบแห้งที่อุณหภูมิ 130 และ 140°C เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นสัมประสิทธิ์การแพร่ ความชื้นเมล็ดข้าวโพดจะสูงขึ้น ทำให้โมเลกุลน้ำเคลื่อนที่จากภายในเมล็ดมายังผิวได้เร็วขึ้น



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับระยะเวลาในการอบแห้ง กรณีใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งต่างกัน hold-up 30 kg ความชื้นเริ่มต้น 38% d.b. และความเร็วอากาศอบแห้ง 17 m/s

3.2.2 อิทธิพลของปริมาณ hold-up ต่ออัตราส่วนความชื้น

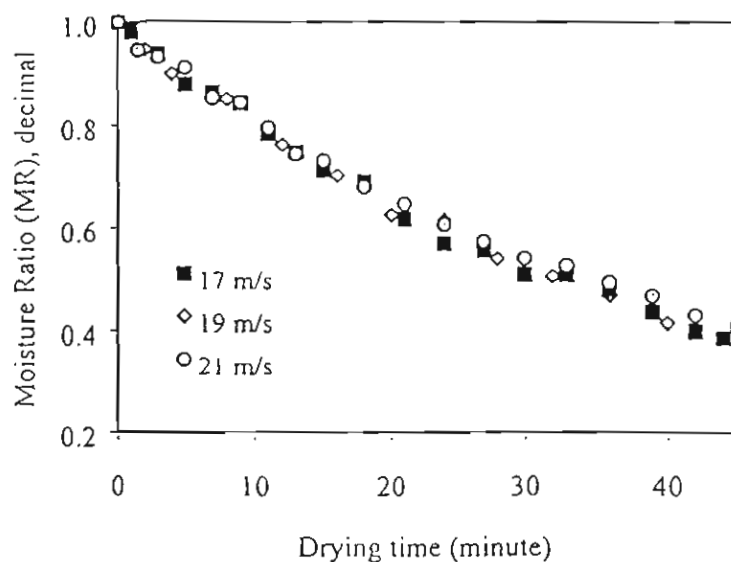
จากการทดลองที่ hold-up 3 ค่าคือ 20, 25 และ 30 kg พบว่า ที่ปริมาณ hold-up 20 kg สามารถลดความชื้นได้เร็วที่สุด ดังในรูปที่ 14 เนื่องจากที่ปริมาณ hold-up ต่ำ เมล็ดข้าวโพดใช้เวลาในการเคลื่อนตัวใน downcomer น้อยกว่า (cycle time ที่สั้นกว่า) หรือมีจำนวนรอบที่วนเข้าในช่องสเปคหลายครั้งในช่วงระยะเวลาในการอบแห้งเดียวกัน ซึ่งจะได้รับการถ่ายเทความร้อนจากอากาศอบแห้งหลายครั้งกว่า ที่ hold-up สูง



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับระยะเวลาในการอบแห้ง กรณีใช้ hold-up ต่างกัน
อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 150°C ความชื้นเริ่มต้น 38% d.b. ความเร็วอากาศ 17 m/s

3.2.3 อิทธิพลความเร็วอากาศอบแห้งต่ออัตราส่วนความชื้น

ดังแสดงในรูปที่ 15 พบว่า การเปลี่ยนแปลงความเร็วอากาศที่สูงขึ้นในช่วง 17-21 m/s มีผลไม่ชัดเจนต่ออัตราส่วนความชื้น อาจเนื่องมาจาก การไหลของอนุภาคเป็นไปในลักษณะของ Pneumatic Conveyor ซึ่งการเพิ่มความเร็วกาศขึ้นอีกเล็กน้อย จึงไม่มีผลต่อการลดความหนาของชั้นฟิล์มบางที่ผิวเมล็ดพืช และอัตราส่วนความชื้น



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับระยะเวลาในการอบแห้ง กรณีใช้ความเร็วอากาศต่างกัน
อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 130°C ความชื้นเริ่มต้น 38% d.b. และ hold-up 30 kg

3.2.4 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

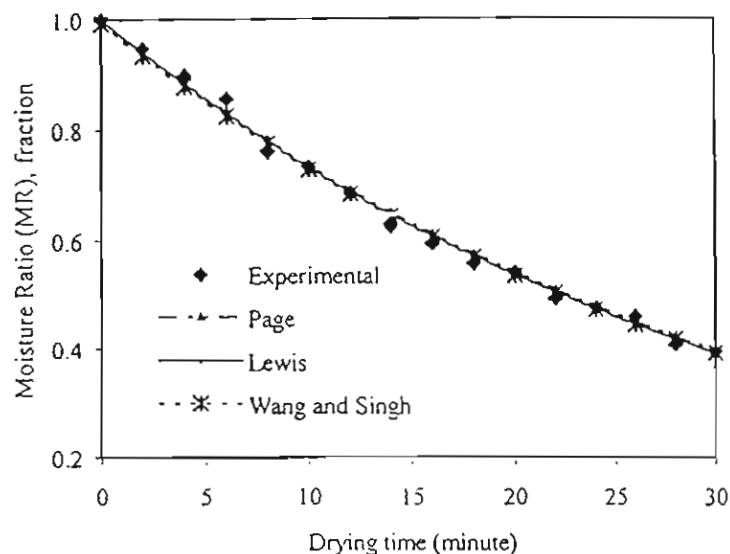
จากผลการทดลองอบแห้งเมล็ดข้าวโพดที่สภาวะ ความชื้นเริ่มประมาณ 38% d.b. ความสูงเบด 0.55, 0.65 และ 0.75 m อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 130, 140 และ 150°C และความเร็วอากาศอบแห้ง 17 m/s นำมาใช้

ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายอัตราส่วนความชื้น (MR) โดยเป็นฟังก์ชันของระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (t, minute) อุณหภูมิอากาศอบแห้ง (T , $^{\circ}\text{C}$) และ ความสูงเบด (H_b , m) ทำการพัฒนาจากสมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี 3 สมการ คือ สมการของ Page [3], Lewis [4] และ Wang and Singh [5] พบว่า สมการทั้ง 3 สามารถทำนายอัตราส่วนความชื้นได้ใกล้เคียงกันและสอดคล้องกับผลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 16 โดยในงานวิจัยนี้ขอเสนอให้เลือกใช้สมการ Lewis มาใช้ในการทำนายอัตราส่วนความชื้นเมล็ดข้าวโพด เนื่องจากมีตัวพารามิเตอร์ในสมการเพียงตัวเดียว เหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้ โดยสมการ Lewis มีรูปแบบดังนี้

$$MR = \exp(-kt)$$

เมื่อ $k = 0.0001835T - 0.05007H_b + 0.03490$

โดยที่ $R^2 = 0.9908$, $ASPE = 4.183\text{E-}4$



รูปที่ 16 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นกับระยะเวลาการอบแห้ง ระหว่างที่ได้จากแบบจำลองกับผลการทดลอง ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 130°C , hold-up 20 kg ความเร็วอากาศ 17 m/s ความชื้นเริ่มต้น 38% d.b.

4. สรุป

จากการทดลองศึกษาการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดโดยเทคนิคสเปาเต็ดเบดสองมิติชนิดมีแผ่นกั้นและพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายอัตราส่วนการอบแห้ง สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่ออัตราส่วนการอบแห้งข้าวโพดอย่างชัดเจนคืออุณหภูมิอากาศอบแห้งและปริมาณ hold-up

2. จากการตรวจสอบคุณภาพเมล็ดข้าวโพดหลังการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150 และ 170°C , hold-up 20 และ 30 kg พบว่า ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อคุณภาพคือความชื้นสุดท้าย ขณะที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งและ hold-up ส่งผลกระทบน้อย

3. ไม่ควรอบแห้งเมล็ดข้าวโพดที่อุณหภูมิสูงกว่า 170°C เพราะจะทำให้สีของเมล็ดคล้ำลงมาก และความชื้นสุดท้ายไม่ควรต่ำกว่า 22% d.b. เนื่องจากจะทำให้เมล็ดเกิดการร้าวและการแตกเพิ่มขึ้นมาก