

## การออกแบบ ทดสอบ และหา แนวทางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการ อบแห้งข้าวเปลือก โดยเทคนิคการ ทำไหลบนฐานสั้น

สมชาติ โสภณธนฤกษ์\*†  
สมบูรณ์ เวชกามา†  
สุวัฒน์ ตรุทศวินนท์#  
วุฒิกรณ์ จริยตันติเวทย์#

\*ราชบัณฑิต สำนักวิทยาศาสตร์

ราชบัณฑิตยสถาน

† คณะพลังงานและวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

# อดีตนักศึกษาปริญญาโท

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ สร้าง และทดสอบเครื่องต้นแบบอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลบนฐานสั้น ขนาดกำลังผลิต ๒.๕-๕.๐ ตันต่อชั่วโมง และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับหาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุด.

สภาวะเงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบเครื่องมีดังนี้ : อัตราการไหลของอากาศอบแห้ง ๑.๗ ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที, ความเร็วอากาศอบแห้ง ๑.๕ เมตรต่อวินาที, อุณหภูมิอากาศอบแห้งเฉลี่ย ๑๒๕-๑๔๐ องศาเซลเซียส, ระยะเวลาที่ข้าวเปลือกอยู่ในห้องอบแห้งประมาณ ๑ นาที, ความสูงชั้นข้าวเปลือก ๑๑.๕ เซนติเมตร, สัดส่วนอากาศเวียนกลับ ๐.๘๕ และค่าความชื้นการสั่นประมาณ ๑ (ความถี่ ๗.๓ เฮิรตซ์ และแอมพลิจูดในแนวตั้ง ๕ มิลลิเมตร).

ผลการทดสอบ พบว่า เมื่ออัตราการป้อนข้าวเปลือกเท่ากับ ๔,๘๒๑ กิโลกรัมต่อชั่วโมง สามารถลดความชื้นข้าวเปลือกจากร้อยละ ๒๘ เหลือร้อยละ ๒๓ ของฐานแห้ง โดยสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าและน้ำมันดีเซล ๙,๖๔๖ วัตต์ และ ๑๗.๖ ลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ, สิ้นเปลืองพลังงานปฏุมภูมิจำเพาะ ๖.๑๕ เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย, กำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์พัดลมและมอเตอร์สั่นสะเทือนมีค่าประมาณร้อยละ ๕๕ ของมอเตอร์พัดลมกรณีอบแห้งด้วยเทคนิคการทำไหลที่ไม่มีการสั่น. กรณีที่มีการอบแห้ง ๑๒ ชั่วโมงต่อวัน และ ๙๐ วันต่อปี จะมีค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้งข้าวเปลือก ๑.๕ บาทต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย แบ่งเป็นค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้ง ๐.๕ บาทต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการอบแห้ง ๑ บาทต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย. เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น พบว่าสามารถทำนายการอบแห้งข้าวเปลือกในระดับพอยอมรับได้ สำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลที่ขนาดกำลังผลิต ๕ ตันต่อชั่วโมง ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๓๐ ของฐานแห้ง และความเร็วอากาศอบแห้ง ๒.๓ เมตรต่อวินาที. สภาวะเงื่อนไขการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลที่เหมาะสมที่สุดมีดังนี้ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง ๑๔๙ องศาเซลเซียส, สัดส่วนอากาศเวียนกลับ ๐.๙๓ และความสูงชั้นข้าวเปลือก ๑๑.๙ เซนติเมตร, มีความสิ้นเปลืองพลังงานปฏุมภูมิจำเพาะ ๕.๗๔ เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย และความชื้นสุดท้ายร้อยละ ๒๔.๙ ของฐานแห้ง. สำหรับการอบแห้งโดยเทคนิคการทำไหลบนฐานสั้นที่กำลังการผลิตและความชื้นเริ่มต้นเท่ากัน แต่ใช้ความเร็วอากาศอบแห้ง ๑.๕ เมตรต่อวินาที สภาวะเงื่อนไขการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุดมีดังนี้ : อุณหภูมิอากาศอบแห้ง ๑๔๓ องศาเซลเซียส, สัดส่วนอากาศเวียนกลับ ๐.๘๓, ความสูงชั้นข้าวเปลือก ๙.๙ เซนติเมตร, ความถี่การสั่นสะเทือน ๕ เฮิรตซ์ และความชื้นการสั่นสะเทือน ๒.๕, มีความสิ้นเปลืองพลังงานปฏุมภูมิจำเพาะ ๕.๓๖ เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย และความชื้นสุดท้ายร้อยละ ๒๖.๐ ของฐานแห้ง.

สรุป การอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลบนฐานสั้นมีความสิ้นเปลืองพลังงานปฏุมภูมิจำเพาะน้อยกว่าเทคนิคการทำไหลที่ไม่สั่นประมาณร้อยละ ๗. การอบแห้งโดยเทคนิคการทำไหลบนฐานสั้นใช้กำลังไฟฟารวมและน้ำมันดีเซลเฉลี่ยเท่ากับ ๕.๙ กิโลวัตต์ และ ๒๑.๑ ลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ, โดยมีค่ากำลังไฟฟารวมประมาณร้อยละ ๓๐ ของกำลังไฟฟารวมกรณีอบแห้งโดยเทคนิคการทำไหลที่ไม่มีการสั่น.

คำสำคัญ : การอบแห้งข้าวเปลือก, การทำไหลบนฐานสั้น, การทำไหล



## บทนำ

สมชาติ โสภณธรณฤทธิ์ และคณะ<sup>๑</sup> ได้ศึกษาสภาวะการอบแห้งข้าวเปลือก ความชื้นสูงด้วยเทคนิคการทำไหลแบบต่อเนื่อง โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ควบคู่ไปกับการทดลอง เมื่อพิจารณาให้มีอัตราการผลิตสูง มีความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำ และข้าวมีคุณภาพดี พบว่า ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง ๑๑๕ องศาเซลเซียส ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกร้อยละ ๓๐ ของฐานแห้ง ความชื้นสุดท้ายร้อยละ ๒๔ ของฐานแห้ง ความสูงชั้นข้าวเปลือก ๑๐ เซนติเมตร อัตราการไหลจำเพาะของอากาศ ๐.๐๔๓ กิโลกรัมต่อวินาที-กิโลกรัมวัสดุแห้ง สัดส่วนอากาศเวียนกลับ ๐.๘๐ มีอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ใช้ระเหยน้ำต่ออัตราการผลิตต่ำสุด โดยสิ้นเปลืองพลังงานปรมาณูมีจำเพาะ ๗.๙ เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย มีค่าใช้จ่ายในการอบแห้ง ๒.๐๕ บาทต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย. จากการศึกษาเพิ่มเติม<sup>๒</sup> พบว่า ถ้าต้องการให้ข้าวเปลือกมีปริมาณข้าวต้นสูง (ปริมาณข้าวหักต่ำ) ไม่ควรอบแห้งให้ความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกต่ำกว่าร้อยละ ๒๓ ของฐานแห้ง และร้อยละ ๑๙ ของฐานแห้ง สำหรับกรณีที่ไม่มีการเทมเปอร์และกรณีที่มีการเทมเปอร์ ตามลำดับ และอุณหภูมิอากาศอบแห้งไม่ควรสูงกว่า ๑๕๐ องศาเซลเซียส.

Rysin<sup>๓</sup> ศึกษาการอบแห้งอาหารโดยเทคนิคการทำไหลและสั่น พบว่าความเข้มข้นไม่ควรเกิน ๓.๓

โดยค่าความเข้มข้นและแอมพลิจูดที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง ๑.๕-๒.๐ และ ๕-๑๐ มิลลิเมตร ตามลำดับ. Ringer และ Mujumdar<sup>๔</sup> สร้างแผนภูมิสำหรับการเลือกพารามิเตอร์การทำงานสำหรับการอบแห้งโดยใช้เทคนิคการทำไหลบนฐานสั่น พบว่าอัตราส่วนความเร็วอากาศต่อความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดการทำไหล และความเข้มข้นมีค่าไม่เกิน ๑.๑ และ ๓.๓ ตามลำดับ. ฮาน และคณะ<sup>๕</sup> ศึกษาการกระจายระยะเวลาที่อยู่ในห้องอบแห้งของวัสดุ (residence time distribution) และลักษณะเฉพาะของการอบแห้งในเครื่องอบแห้งโดยเทคนิคการทำไหลบนฐานสั่นอย่างต่อเนื่องขนาดโรงงานนาร่อง. วัสดุที่ใช้ในการทดลองคือข้าวสาลี และ Biyanning<sup>®</sup> (ชื่อทางการค้าของยารักษาโรคเยื่อจมูกอักเสบชนิดเม็ด). ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ความเข้มข้น, อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, อัตราการป้อนวัสดุ อุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าห้องอบแห้ง และขนาดของวัสดุ, โดยพิจารณาการไหลของวัสดุในเครื่องอบแห้งเป็นการไหลแบบลูกสูบ (plug flow). จากการทดลองพบว่าความเข้มข้นเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อระยะเวลาเฉลี่ยของวัสดุในห้องอบแห้ง และการกระจายของวัสดุ. เมื่อความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้นทำให้ระยะเวลาเฉลี่ยของวัสดุในห้องอบแห้งลดลง และอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น. จากงานวิจัยด้านการอบแห้งโดยเทคนิคการทำไหลบนฐานสั่นที่ผ่านมาข้างต้น สรุปได้ว่าความเข้มข้น

การสั่นควรมีค่า ๑.๕-๒.๐ และความถี่ของการสั่นควรมีค่า ๕-๒๕ เฮิรตซ์ โดยควรใช้ความถี่ต่ำ เพื่อลดการสึกหรอ และประหยัดพลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์สั่น และเพิ่มค่าแอมพลิจูดเพื่อเพิ่มความเข้มข้นแทน.

จากการที่มีการผลิตและใช้งานเครื่องอบแห้งโดยเทคนิคการทำไหลอย่างแพร่หลายทั้งในประเทศและต่างประเทศ และความต้องการลดกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์พัดลม ซึ่งคาดว่าน่าจะลดได้ถ้ามีการสั่นร่วมด้วย. ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ สร้าง ทดสอบเครื่องต้นแบบอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลบนฐานสั่น ขนาดกำลังการผลิต ๒.๕-๕.๐ ตันต่อชั่วโมง และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับหาสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลบนฐานสั่น.

## วิธีดำเนินการ

### การพัฒนาเครื่องต้นแบบและวิธีการทดลอง

ดำเนินการสร้างเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลบนฐานสั่น ขนาดกำลังผลิต ๕.๐ ตันต่อชั่วโมง ที่บริษัทไรซ์เอ็นจิเนียริง ซัพพลาย จำกัด ออกแบบตามหลักการเช่นเดียวกับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหล แต่ใช้ความเร็วอากาศอบแห้งลดลง ทำให้ใช้มอเตอร์ขนาดเล็กลงจาก ๑๕ กิโลวัตต์ เหลือ ๗.๕ กิโลวัตต์. ได้ทำการทดลองที่

โรงสีข้าวชัยภูมิการวังตาเพชร อำเภอ  
บางปลาม้า จังหวัดสุพรรณบุรี. ส่วน  
ประกอบเครื่องอบแห้งมีดังนี้

ห้องเผาไหม้และหัวพ่นไฟ

พัดลมแบบหอยโข่งใบพัดโค้ง  
หลัง ใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนขนาด ๗.๕ กิโลวัตต์

ห้องอบแห้งขนาด ๐.๖ × ๒.๑ ×  
๑.๒ เมตร

และแผ่นตะแกรงกระจายลม  
ขนาด ๐.๖ × ๒.๑ เมตรหนา ๐.๕  
มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูป  
๑.๑ มิลลิเมตร

ระบบการสั่นประกอบด้วย ชุด  
ลูกเบี้ยว ชุดสปริงชด และชุดสปริงลาน  
มอเตอร์ขับเคลื่อนระบบสั่น ขนาด ๑.๕ กิโล  
วัตต์ (ความถี่ ๗.๓ เฮิรตซ์, ความ  
เข้มการสั่น ๑ และแอมพลิจูดในแนวตั้ง  
๕ มิลลิเมตร)

ถังพักข้าวเปลือก

โรตารีป้อนและปล่อยข้าวเปลือก  
เสาะกะพ้อ

ตู้ควบคุมระบบไฟฟ้า

ระบบท่ออากาศเวียนกลับ

และไซโคลน รายละเอียดแสดงไว้  
ในรูปที่ ๑.

ในการทดลองได้เก็บตัวอย่างข้าว  
เปลือกก่อนและหลังการอบแห้งทุก ๒๐  
นาที เพื่อนำมาหาความชื้นและทดสอบ  
คุณภาพ. ก่อนการทดสอบคุณภาพ  
ตัวอย่างข้าวเปลือกถูกเป่าด้วยอากาศ  
แวดล้อมจนความชื้นลดลงเหลือ  
ประมาณร้อยละ ๑๔ ของฐานเปียก.  
วัดอุณหภูมิโดยใช้สายเทอร์มอคัปเปิล  
(thermocouple) ชนิดเค ต่อเข้ากับ  
ตัวบันทึกข้อมูล (data logger) ค่า  
ความถูกต้อง ± ๑ องศาเซลเซียส. วัด

ความเร็วลมโดย hot wire anemo-  
meter ค่าความถูกต้อง ± ร้อยละ ๔  
ที่ตำแหน่งต่างๆ ของเครื่องอบแห้ง  
ดังแสดงในรูปที่ ๑ และวัดกำลัง  
ไฟฟ้าโดยใช้ clamp-on meter ค่า  
ความถูกต้อง ± ร้อยละ ๐.๕.

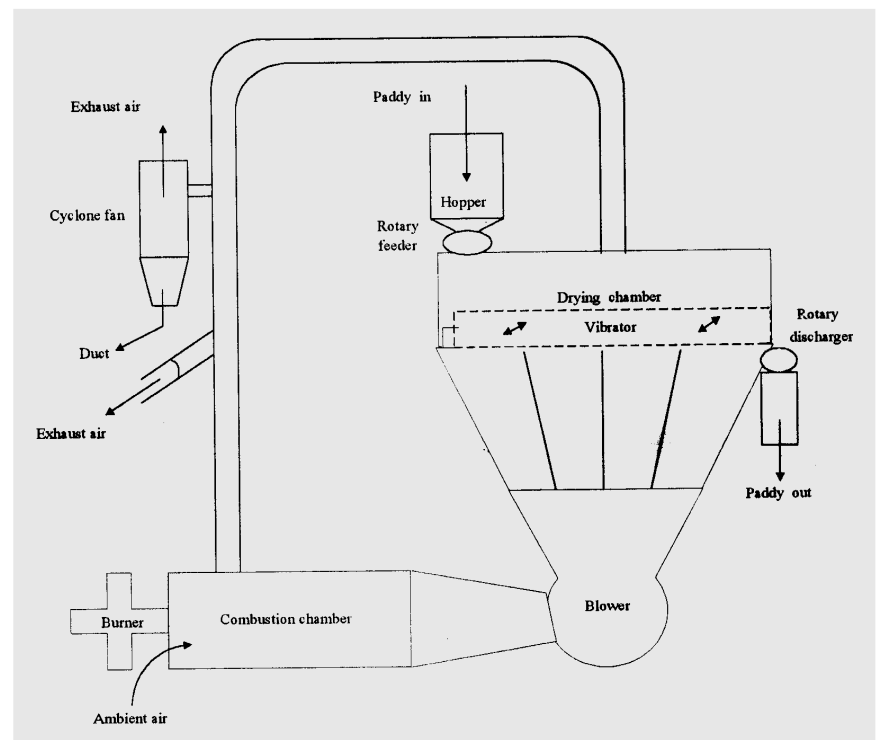
### การพัฒนาแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ และ  
สมเกียรติ ปรัชญาวรรการ<sup>๖</sup> และ สมชาติ  
โสภณธนฤทธิ์และคณะ<sup>๑</sup> ได้พัฒนา  
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และ  
สมการอัตราการอบแห้งข้าวเปลือก  
โดยเทคนิคการทำไหล โดยศึกษาใน

ช่วงอัตราการไหลจำเพาะของอากาศ  
๐.๑๓-๐.๓๓ กิโลกรัมต่อวินาที-  
กิโลกรัมวัสดุแห้ง และ ๐.๐๓-๐.๑๖  
กิโลกรัมต่อวินาที-กิโลกรัมวัสดุแห้ง  
ตามลำดับ, ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์  
ใช้กับการพัฒนาแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์การอบแห้งข้าวเปลือก  
โดยเทคนิคการทำไหลและสั่นได้ โดย  
ตั้งสมมุติฐานดังนี้

๑. เกิดสมดุลความร้อนระหว่าง  
ข้าวเปลือกกับอากาศอบแห้ง
๒. การไหลของข้าวเปลือกใน  
ห้องอบแห้งเป็นการไหลแบบลูกสูบ
๓. ข้าวเปลือกเกิดการไหลอย่าง  
สมบูรณ์ในห้องอบแห้ง

รูปที่ ๑  
ผังแสดงเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลและสั่น



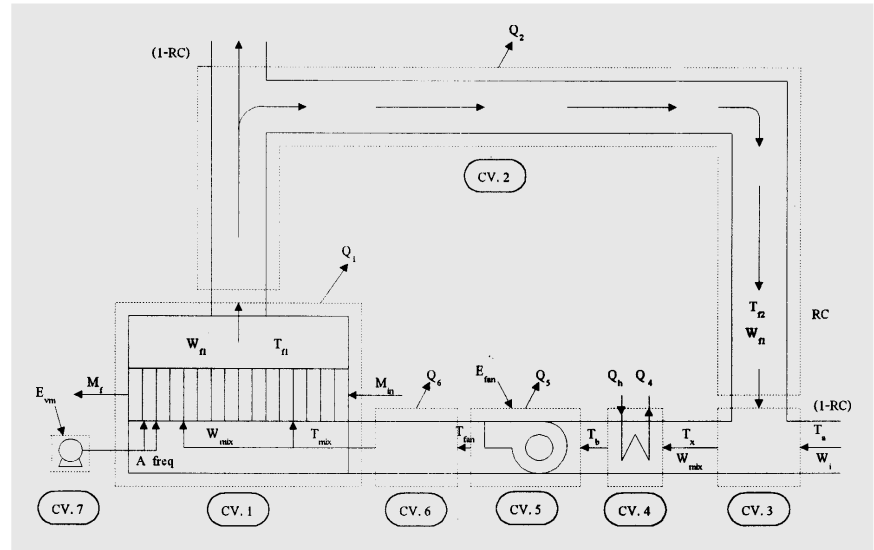


๔. อากาศไหลผ่านเมล็ดข้าวเปลือกอย่างสม่ำเสมอ และ

๕. แรงลัพท์ของการสั่นสะเทือนมีทิศทางเดียวกับทิศทางของอากาศอบแห้ง. รูปที่ ๒ เป็นแผนภาพแสดงระบบอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลและสั่น และปริมาณควบคุมในแต่ละส่วนของระบบ จากกฎอนุรักษ์พลังงานและมวล, ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์เขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลบนฐานสั่นได้ดังนี้

รูปที่ ๒

ผังแสดงปริมาณควบคุมของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลและสั่น



การคำนวณเป็นแบบลองผิด

$$W_{fl,i} = \frac{hp_i(M_i - M_{i+1})}{m_{mix,i} t_i} + W_{mix}$$

$$T_{fl,i} = \frac{Q_1/m_{mix} + c_a T_{mix} + W_{mix} (h_{fg} + c_v T_{mix})}{c_a + W_{fl,i} c_v} - \frac{W_{fl,i} h_{fg} + \Delta U_{p,i}}{c_a + W_{fl,i} c_v}$$

$$W_{mix} = (1 - RC)W_i + RCW_{fl}$$

$$T_x = \frac{RCm_{mix} c_a T_{f2} + RCm_{mix} W_{fl} (h_{fg} + c_v T_{f2}) - m_{mix} W_{mix} h_{fg}}{m_{mix} (c_a - W_{mix} c_v)} + \frac{m_i c_a T_a + m_i W_i (h_{fg} + c_v T_a)}{m_{mix} (c_a - W_{mix} c_v)}$$

$$P_t = P_L + P_{bv}$$

$$P_{bv} = P_b \Gamma^n \text{ where } n \text{ depends on density and size of particle}$$

$$T_b = T_{fan} - \left( \frac{P_t m_{mix}}{\rho_a h_f} + Q_5 \right) / m_{mix} (c_a + c_v W_{mix})$$

$$Q_h = m_{mix} (c_a + c_v W_{mix}) (T_b - T_x) - Q_4$$

$$E_{fm} = \frac{P_t (m_{mix} / \rho_a)}{\eta_f \eta_{fm}}$$

$$E_{vm} = \frac{F_f [2 \pi r (\text{freq})]}{1000 \eta_{vm}} \text{ where } F_f = \mu \rho_{pc} A_b H \cdot g$$

$$MER = \frac{1000F(M_{in} - M_f)}{(1 + M_{in})}$$

- (๑) ลองถูก โดยสมมุติค่า  $W_{fl}$  แล้วทำการตรวจสอบภายหลัง พิจารณาปริมาณควบคุมที่ ๑ ในรูปที่ ๒ ซึ่งเป็นห้องอบแห้งข้าวเปลือก จากสมการการอบแห้งข้าวเปลือกของ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ และ สมเกียรติ ปรัชญาวารการ<sup>๖</sup> และสมชาติ โสภณธนฤทธิ์ และคณะ<sup>๗</sup>, คำนวณการอบแห้งข้าวเปลือกโดยแบ่งข้าวเปลือกเป็น  $n$  ชั้น
- (๒) ตามแนวยาวของเครื่องอบแห้ง และใช้สมการที่ (๑) และ (๒) คำนวณหาสัดส่วนความชื้นของอากาศและอุณหภูมิของอากาศหลังการอบแห้งของแต่ละชั้นได้ โดยอุณหภูมิของอากาศหลังอบแห้งและสัดส่วนความชื้นของอากาศหลังการอบแห้งเท่ากับค่าเฉลี่ยเลขคณิตของอุณหภูมิอากาศหลังการอบแห้งและสัดส่วนความชื้นของอากาศหลังการอบแห้งตั้งแต่ชั้นที่ ๑ ถึง  $n$ . สำหรับการคำนวณค่าอื่นๆ เช่น อุณหภูมิของ



อากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง, อุณหภูมิของอากาศเวียนกลับ, อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าหัวเผา, น้ำมันดีเซล, อุณหภูมิของอากาศหลังออกจากพัดลม, อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อน, อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์พัดลม, อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์สั่น และอัตราการระเหยน้ำของข้าวเปลือก, สามารถคำนวณได้จากสมการที่ ๑-๑๑.

### การหาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุด

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และวิธีหาแนวทางที่เหมาะสมที่สุด โดย grid search method สามารถคำนวณหาค่าความชื้นสุดท้ายต่ำที่สุด และความสิ้นเปลืองพลังงานปฏุมภูมิจำเพาะต่ำที่สุด ซึ่งเป็นฟังก์ชันจุดประสงค์ (objective functions) โดยการหาแนวทางที่เหมาะสมที่สุดในครั้งแรกกำหนดให้ฟังก์ชันจุดประสงค์คือ ค่าความชื้นสุดท้ายต่ำที่สุด ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสัดส่วนอากาศเวียนกลับ (RC), ความสูงชั้นข้าวเปลือก (H), อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง ( $T_{mix}$ ), ความเข้มข้นการสั่น ( $\Gamma$ ) และความถี่การสั่น (freq), โดยมีความสัมพันธ์ดังได้อธิบายไว้แล้วตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และสามารถเขียนรูปแบบสมการฟังก์ชันจุดประสงค์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } y_1 \\ & = M_f(RC, H, T_{mix}, \Gamma, \text{freq}) \quad (๑๒) \end{aligned}$$

คำตอบของฟังก์ชันจุดประสงค์

ที่เป็นไปได้ คือ ความชื้นสุดท้ายต่ำที่สุดต้องมีค่าไม่ต่ำกว่าร้อยละ ๑๙ ของฐานแห้ง เพื่อให้ได้ข้าวเปลือกมีปริมาณข้าวต้นสูง และหลังการอบแห้งข้าวเปลือกควรลดความชื้นได้ไม่ต่ำกว่าร้อยละ ๔ ของฐานแห้ง และมีอัตราการป้อนข้าวเปลือก ๒.๕-๕.๐ ตันต่อชั่วโมง ตามขนาดกำลังผลิตของเครื่องอบแห้ง ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ ดังนี้

$$19 \leq M_f \leq M_m - 4\% \text{ d.b.} \quad (๑๓)$$

$$2.5 \leq F \leq 5.0 \text{ tons/h} \quad (๑๔)$$

เงื่อนไขที่กำหนด คือการอบแห้งเพื่อให้ได้ข้าวเปลือกคุณภาพดีซึ่งต้องมีเงื่อนไขการอบแห้งดังนี้ : อุณหภูมิ อากาศอบแห้ง ๑๐๐-๑๕๐ องศาเซลเซียส และเพื่อให้ระบบของเครื่องอบแห้งโดยเทคนิคการไหลบนฐานสั่นสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพภายในขอบเขตความสามารถของเครื่องอบแห้ง ได้กำหนดสภาวะเงื่อนไขข้อดังนี้ : ความสูงชั้นข้าวเปลือกภายในห้องอบแห้งระหว่าง ๕-๒๐ เซนติเมตร, สัดส่วนอากาศเวียนกลับระหว่าง ๐-๐.๙๗, ความเข้มข้นการสั่นระหว่าง ๑.๐-๒.๕ และความถี่การสั่นระหว่าง ๕-๒๕ เฮิรตซ์ และกำหนดให้ความเร็วอากาศอบแห้งมีค่าคงที่เท่ากับ ๒.๓ เมตรต่อนาที่ และ ๑.๕ เมตรต่อนาที่ สำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลและเทคนิคการทำไหลและสั่นตามลำดับ. สาเหตุที่กำหนดให้ความเร็วอากาศอบแห้งมีค่าคงที่เนื่องจากที่ความเร็วอากาศอบแห้งต่ำกว่าค่าดังกล่าว ข้าวเปลือกอาจเกิดสภาพการไหลไม่

สมบูรณ์ได้ ซึ่งสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$0 \leq RC \leq 0.97 \quad (๑๖)$$

$$0.05 \leq H \leq 0.20 \text{ m} \quad (๑๗)$$

$$100 \leq T_{mix} \leq 150^\circ\text{C} \quad (๑๘)$$

$$1.0 \leq \Gamma \leq 2.5 \quad (๑๙)$$

$$5 \leq \text{freq} \leq 25 \text{ Hz} \quad (๒๐)$$

ในการหาแนวทางที่เหมาะสมที่สุดครั้งที่ ๒ กำหนดให้ฟังก์ชันจุดประสงค์คือ ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานปฏุมภูมิจำเพาะต่ำที่สุด ซึ่งคำนวณหาได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่กล่าวข้างต้น โดยเขียนรูปแบบสมการฟังก์ชันจุดประสงค์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } y_2 \\ & = \text{SPEC}(RC, H, T_{mix}, \Gamma, \text{freq}) \quad (๒๑) \end{aligned}$$

$$\text{โดยที่ SPEC} = \text{SHC} + \text{SPC} \quad (๒๒)$$

$$\text{SHC} = \frac{Qh}{\text{MER}} \quad (๒๓)$$

$$\text{SPC} = \frac{Et}{\text{MER}} \quad \text{เมื่อ } Et = E_{fm} + E_{vm} \quad (๒๔)$$

คำตอบของฟังก์ชันจุดประสงค์ที่เป็นไปได้คือ ค่าความชื้นสุดท้ายแปรผันได้ไม่เกินร้อยละ ๐.๕ ของฐานแห้ง จากค่าความชื้นสุดท้ายต่ำที่สุดที่ได้จากการหาแนวทางที่เหมาะสมที่สุดครั้งแรก โดยมีเงื่อนไขที่กำหนดของการอบแห้งข้าวเปลือกตามสมการที่ ๑๖ ถึง ๒๐ สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ของคำตอบของฟังก์ชันจุดประสงค์ที่เป็นไปได้ ดังนี้

$$(M_f - y_1) \leq 0.5\% \text{ d.b.} \quad (๒๕)$$

จากการหาแนวทางที่เหมาะสมที่สุดทั้ง ๒ ครั้งดังกล่าว จะทำให้สามารถหาสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด





ของการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลและการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลและสันได้

## ผลและวิจารณ์

### ผลการทดลอง

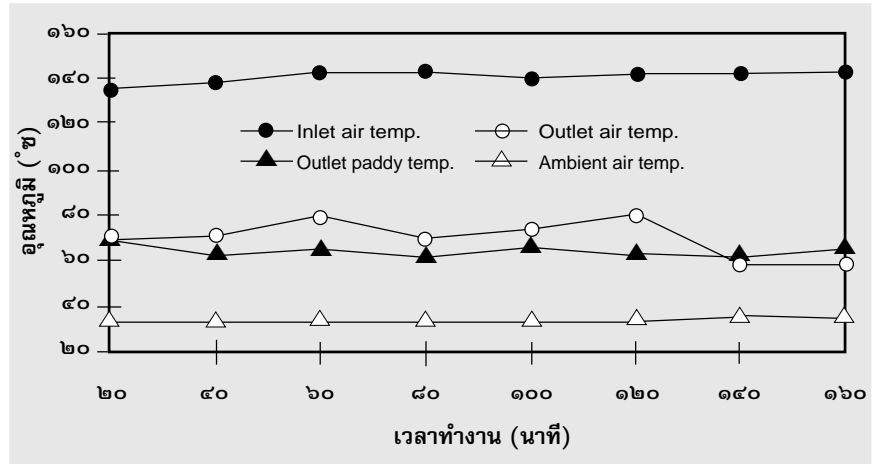
จากการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกที่กำลังผลิต ๔.๘๒ ตันต่อชั่วโมง, อัตราการไหลของอากาศอบแห้ง ๑.๗ ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที (ความเร็วอากาศอบแห้ง ๑.๔ เมตรต่อวินาที), สัดส่วนอากาศเวียนกลับ ๐.๘๕, อุณหภูมิอากาศอบแห้งเฉลี่ยในช่วง ๑๒๕-๑๔๐ องศาเซลเซียส และความชื้นการสัน ๑ (ความถี่ ๗.๓ เฮิร์ตซ์ และแอมพลิจูดในแนวตั้ง ๕ มิลลิเมตร) ได้ ผลการทดลองสรุปไว้ในตารางที่ ๑.

### ความชื้นข้าวเปลือกและอุณหภูมิในเครื่องอบแห้ง

รูปที่ ๓ แสดงอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆ ของเครื่องอบแห้ง. กรณีที่อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้งเฉลี่ยเท่ากับ ๑๔๐ องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมมีค่าประมาณ ๓๕ องศาเซลเซียส และร้อยละ ๖๖ ตามลำดับ พบว่า อุณหภูมิข้าวเปลือกหลังจากออกจากห้องอบแห้งเฉลี่ยเท่ากับ ๖๔ องศาเซลเซียส. รูปที่ ๔ แสดงความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกมีค่าเฉลี่ยร้อยละ ๒๘ ของฐานแห้ง และความชื้นหลังการอบแห้งเฉลี่ยร้อยละ ๒๓ ของฐานแห้ง ซึ่งพบว่าความชื้นค่อนข้างสม่ำเสมอ.

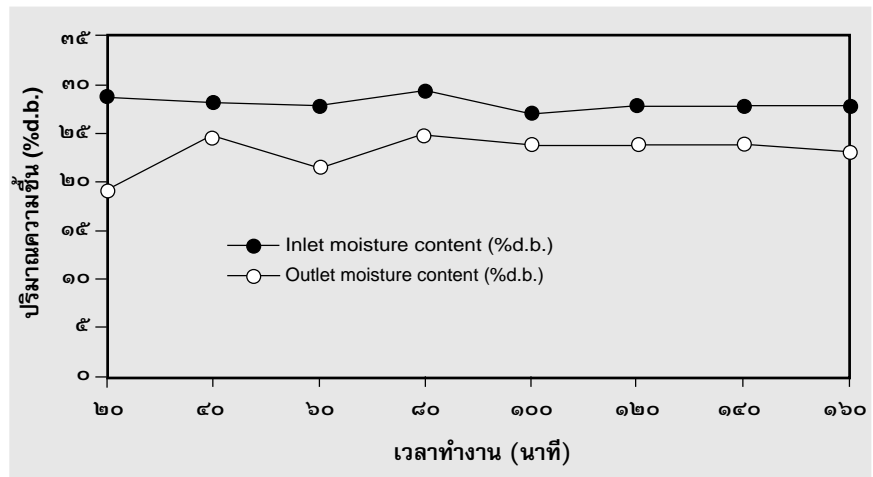
รูปที่ ๓

อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆของเครื่องอบแห้ง (อุณหภูมิอากาศเข้าเฉลี่ย = ๑๔๐°ซ., ความชื้นของการสัน = ๑, อัตราการไหลตัวอย่าง = ๑.๓๔ กก./วินาที, ปริมาณความชื้นขาเข้า = ๒๔% d.b., ความสูงของตัวอย่างมาตรฐาน = ๑๑.๕ ซม., ความเร็วของฐาน = ๑.๔ ม./วินาที, ปริมาณความชื้นขาออก = ๒๓% d.b.)



รูปที่ ๔

แสดงความชื้นของข้าวเปลือกก่อนและหลังการอบแห้ง (อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยขาเข้า = ๑๔๐°ซ., ความชื้นของการสัน = ๑, อัตราการไหลตัวอย่าง = ๑.๓๔ กก./วินาที, ความสูงของตัวอย่างมาตรฐาน = ๑๑.๕ ซม., ความเร็วของฐาน = ๑.๔ ม./วินาที)



### คุณภาพข้าวเปลือก

ในการทดสอบหาข้าวตันได้เก็บตัวอย่างข้าวเปลือกก่อนและหลังการอบแห้งทุก ๒๐ นาที พบว่าตัวอย่าง

ข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยอากาศแวดล้อมและเครื่องอบแห้งโดยเทคนิคการทำไหลและสัน (กรณีอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้งเฉลี่ย ๑๔๐ องศา

เซลเซียส) มีข้าวต้นเฉลี่ยร้อยละ ๓๒.๐ และ ๓๗.๐ ตามลำดับ ซึ่งข้าวต้นที่ได้จากเครื่องอบแห้งโดยเทคนิคการทำไหลและสั่นมากกว่าประมาณร้อยละ ๕ ดังรายละเอียดในรูปที่ ๕ ทั้งนี้ เป็นผลเนื่องมาจากการใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งที่เหมาะสม (๑๔๐ องศาเซลเซียส) และใช้เวลาในการอบแห้งสั้นประมาณ ๑ นาที เชื่อว่ามีการเกิดสภาพวุ้น (เจลลิกไนเซชัน) ในเมล็ดข้าวเปลือก โดยเฉพาะที่ผิวซึ่งเหมือนกับผลที่ได้จากการทดลองศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้เทคนิคการทำไหลของ อติเทพ ทวีรัตนพานิช และคณะ<sup>๖</sup>.

ในการทดสอบสีของข้าวสารจากตัวอย่างข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยอากาศแวดล้อมและเครื่องอบแห้งโดยเทคนิคการทำไหลและสั่น พบว่ามีความขาวเฉลี่ยประมาณ ๔๒.๕ และ ๔๑.๒ ตามลำดับ (ตามสเกลของเครื่องวัดความขาวยี่ห้อ Kett C-300) ซึ่งมีค่าต่างกันประมาณ ๑.๓ ดังรายละเอียดในรูปที่ ๖.

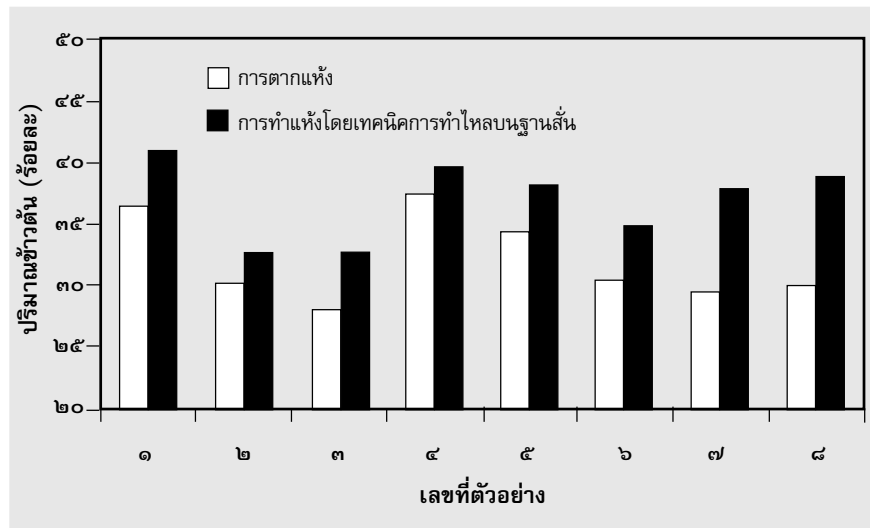
**ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (specific energy consumption)**

ระบบใช้กำลังไฟฟารวมเท่ากับ ๙,๖๔๖ วัตต์ แยกเป็นการใช้กำลังไฟฟ้าของแต่ละอุปกรณ์ดังนี้

- ๑. blower ร้อยละ ๕๕.๐
- ๒. vibrator ร้อยละ ๑๐.๔
- ๓. rotary feeder ร้อยละ ๖.๔
- ๔. rotary discharger ร้อยละ ๗.๑
- ๕. elevator ร้อยละ ๑๓.๐

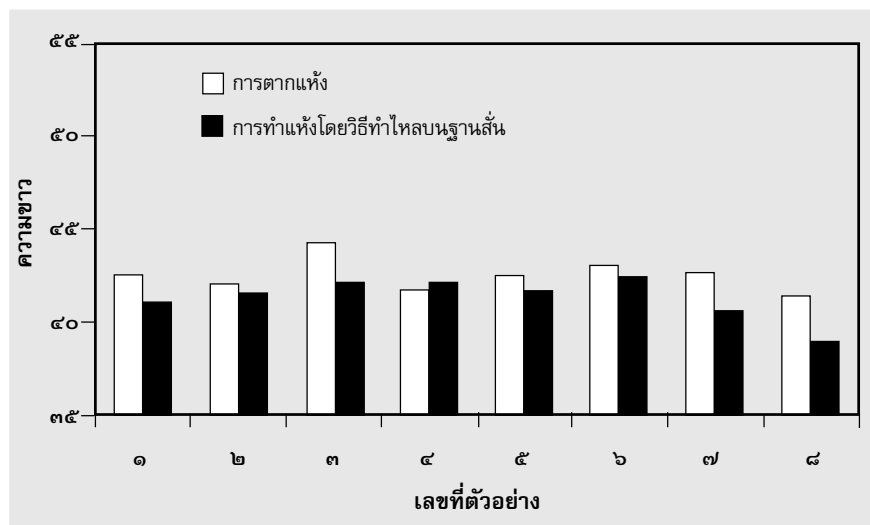
รูปที่ ๕

เปรียบเทียบข้าวต้นที่ได้โดยการทำไหลบนฐานสั่นกับการตากแห้ง (อุณหภูมิอากาศเข้าเฉลี่ย = ๑๔๐°ซ., ความชื้นของการสั่น = ๑, อัตราใส่ตัวอย่าง = ๑.๓๔ กก./วินาที, ปริมาณความชื้นขาเข้า = ๒๔% d.b., ความสูงของตัวอย่างบนฐาน = ๑๑.๕ ซม., ความเร็วของฐาน = ๑.๔ ม./วินาที, ปริมาณความชื้นขาออก = ๒๓% d.b.)



รูปที่ ๖

ความขาวของข้าวเปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งโดยการทำไหลบนฐานสั่นกับการตากแห้ง (อุณหภูมิอากาศเข้าเฉลี่ย = ๑๔๐°ซ., ความชื้นของการสั่น = ๑, อัตราใส่ตัวอย่าง = ๑.๓๔ กก./วินาที, ปริมาณความชื้นขาเข้า = ๒๔% d.b., ความสูงของตัวอย่างบนฐาน = ๑๑.๕ ซม., ความเร็วของฐาน = ๑.๔ ม./วินาที, ปริมาณความชื้นขาออก = ๒๓% d.b.)





๖. burner ร้อยละ ๘.๑

จากการทดสอบเครื่องพบว่า สิ้นเปลืองพลังงานปฏิกิริยาเคมี ๗๒๓.๑ เมกะจูลต่อชั่วโมง แบ่งเป็นกำลังไฟฟ้าในรูปพลังงานปฏิกิริยาเคมี ๘๗.๖ เมกะจูลต่อชั่วโมง (ใช้ค่า conversion factor = ๒.๖) และความร้อนเฉลี่ย ๖๓๕.๕ เมกะจูลต่อชั่วโมง สามารถระเหยน้ำได้ ๑๑๗.๖ กิโลกรัมต่อชั่วโมง สิ้นเปลืองพลังงานปฏิกิริยาเคมีจำเพาะรวมเฉลี่ย ๖.๑๕ เมกะจูลต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับของการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหมที่ไม่มีกลิ่น แต่เมื่อพิจารณาเฉพาะกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในมอเตอร์พัดลมและมอเตอร์สั่น พบว่าใช้กำลังไฟฟ้าประมาณร้อยละ ๕๕ ของกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในมอเตอร์พัดลมของการอบแห้งโดยใช้เทคนิคการทำไหมที่ไม่มีกลิ่น

ค่าใช้จ่าย

ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้งโดยเทคนิคการทำไหมและสั่น

เท่ากับ ๔๕๐,๐๐๐ บาท (คิดรวมค่าแรงงานและติดตั้ง) กำหนดให้มูลค่าซากเครื่องเท่ากับร้อยละ ๑๐ ของค่าสร้างเครื่องอบแห้ง สำหรับค่าใช้จ่ายในส่วนอื่นๆ นั้น ได้อ้างอิงถึงผลที่ได้จากการทดสอบเครื่องตั้งนี้ กำลังผลิต ๔.๘๒ ตันต่อชั่วโมง ความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ ๒๘ ของฐานแห้ง และร้อยละ ๒๓ ของฐานแห้ง ตามลำดับ สามารถระเหยน้ำได้เฉลี่ย ๑๘๘.๔ กิโลกรัมต่อชั่วโมง และกำหนดให้เครื่องทำงาน ๙๐ วันต่อปี. การวิเคราะห์แยกเป็น ๒ กรณี คือ

๑. กรณีเครื่องทำงาน ๑๒ ชั่วโมงต่อวัน และ
  ๒. กรณีเครื่องทำงาน ๒๔ ชั่วโมงต่อวัน ซึ่งผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในแต่ละกรณีมีดังนี้
- กรณีเครื่องทำงาน ๑๒ ชั่วโมงต่อวัน สามารถอบแห้งข้าวเปลือกได้ ๕,๑๘๔ ตันต่อปี ค่าใช้จ่ายรวมในการอบแห้ง ๓๐๕,๐๑๕ บาทต่อปี แบ่งเป็นค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้ง

๑๐๐,๑๓๑ บาทต่อปี ค่าน้ำมันดีเซล ๑๗๐,๗๒๖ บาทต่อปี ค่ากำลังไฟฟ้า ๑๖,๐๗๐ บาทต่อปี ค่าบำรุงรักษาเครื่องอบแห้ง ๒๐,๐๐๐ บาทต่อปี และมูลค่าซากเครื่องอบแห้งเท่ากับ ๑,๙๑๓ บาทต่อปี ดังนั้น จะได้ค่าใช้จ่ายรวมในการอบแห้ง ๕๙ บาทต่อตันข้าวเปลือก (๑.๕๐ บาทต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย) แบ่งเป็นค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้ง ๑๙ บาทต่อตันข้าวเปลือก (๐.๕๐ บาทต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย) และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการอบแห้ง ๔๐ บาทต่อตันข้าวเปลือก (๑ บาทต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย)

กรณีเครื่องทำงาน ๒๔ ชั่วโมงต่อวัน ค่าใช้จ่ายรวมในการอบแห้ง ๔๙.๕๐ บาทต่อตันข้าวเปลือก (๑.๒๕ บาทต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย) แบ่งเป็นค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้ง ๙.๕๐ บาทต่อตันข้าวเปลือก (๐.๒๕ บาทต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย) และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการอบแห้ง ๔๐ บาทต่อตันข้าวเปลือก (๑ บาทต่อ

ตารางที่ ๑ การทดสอบสมรรถภาพของการอบแห้งโดยวิธีทำไหมบนฐานสั่น (ความสูงของตัวอย่างบนฐาน = ๑๑.๕ ซม., ความเร็วของฐาน = ๑.๔ เมตร/วินาที, ความชื้นของการสั่น = ๑, สัดส่วนอากาศเวียนกลับ = ๐.๘๕, อัตราการใส่ตัวอย่าง = ๔๘๒๑ กก./ชม.)

T <sub>mix</sub>	M <sub>In</sub>	M <sub>f</sub>	อัตราอุณหภูมิของข้าวเปลือกขาเข้า	ข้าวตันที่ได้จากการตากแห้ง	ข้าวตันที่ได้จากเทคนิคการทำไหม	ความยาวของข้าวจากการตาก	ความยาวของข้าวโดยวิธีเทคนิคการทำไหม	SPC (เมกะจูลต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย)	SHC (เมกะจูลต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย)
(°ซ.)	(% d.b.)	(% d.b.)	(°ซ.)	(%)	(%)				
๑๒๕	๒๖.๘	๒๓.๗	๖๒	๓๓.๐	๓๒.๕	๔๒.๔	๔๒.๙	๐.๗๗	๕.๔๗
๑๓๓	๒๔.๑	๒๐.๗	๖๓	๓๕.๒	๓๗.๕	๔๑.๕	๔๑.๐	๐.๖๖	๔.๖๙
๑๔๐	๒๘.๐	๒๓.๐	๖๔	๓๒.๐	๓๗.๐	๔๒.๕	๔๑.๒	๐.๔๘	๓.๘๐





กิโลกรัมน้ำที่ระเหย)

### ความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การเปรียบเทียบค่าความชื้นสูงสุดท้าย ความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนจำเพาะ ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า และความสิ้นเปลืองพลังงานประจุไฟฟ้าจำเพาะ ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แสดงไว้ในตารางที่ ๒ พบว่า ความถูกต้องของการทำนายอุณหภูมิอากาศก่อนและหลังการอบแห้ง มีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ ๓.๓ และร้อยละ ๓๗.๕ ตามลำดับสาเหตุที่ทำให้ผลการทำนายอุณหภูมิอากาศหลังการอบแห้งคลาดเคลื่อนจากค่าที่ได้จากผลการทดลองมากอาจเนื่องมาจากการอบแห้งจริงมีการรั่วของอากาศอบแห้งบริเวณรอยเชื่อมระหว่างระบบสันกับห้องอบแห้ง

แต่ในแบบจำลองไม่ได้คิดถึงการรั่วของอากาศอบแห้ง ทำให้อุณหภูมิของอากาศอบแห้งที่ได้จากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากผลการทดลอง สำหรับความคลาดเคลื่อนของการทำนายความชื้นสูงสุดท้ายของข้าวเปลือกมีค่าน้อยกว่าร้อยละ ๖.๖ ความคลาดเคลื่อนของความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าประจุไฟฟ้าจำเพาะมีค่าน้อยกว่าร้อยละ ๒๐.๘ และความคลาดเคลื่อนของความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนจำเพาะมีค่าน้อยกว่าร้อยละ ๓๕.๓ ประสิทธิภาพมอเตอร์พัดลมและมอเตอร์สันเท่ากับร้อยละ ๘๘ และ ๘๕ ตามลำดับ และประสิทธิภาพหัวเข้าน้ำมันดีเซลเท่ากับร้อยละ ๙๓

### การหาแนวทางที่เหมาะสมที่สุด

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิธีการหาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุด พบว่าในการให้ระบบ

สามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกภายหลังการอบแห้งให้คลาดเคลื่อนจากค่าความชื้นสุดท้ายที่ต่ำที่สุดไม่เกินร้อยละ ๐.๕ ของฐานแห้ง และมีความสิ้นเปลืองพลังงานประจุไฟฟ้าจำเพาะต่ำที่สุดด้วย สภาวะเงื่อนไขการอบแห้งข้าวเปลือกที่เหมาะสมที่สุดแสดงสรุปไว้ในตารางที่ ๓ และ ตารางที่ ๔ สำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกที่ขนาดกำลังผลิต ๕ ตันต่อชั่วโมง ความชื้นเริ่มต้นเท่ากับร้อยละ ๓๐ ของฐานแห้ง และความเร็วอากาศอบแห้ง ๒.๓ เมตรต่อวินาที สภาวะเงื่อนไขการอบแห้งข้าวเปลือกที่เหมาะสมที่สุดโดยเทคนิคการทำไหลมีดังนี้ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง ๑๔๙ องศาเซลเซียส สัดส่วนอากาศเวียนกลับ ๐.๙๓ และความสูงชั้นข้าวเปลือก ๑๑.๙ เซนติเมตร มีความสิ้นเปลืองพลังงานประจุไฟฟ้าจำเพาะเท่ากับ ๕.๗๔ เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย และความชื้นสูงสุด

ตารางที่ ๒ การเปรียบเทียบผลการอบแห้งระหว่างผลการทดลองกับผลจากเทคนิคการทำไหล

T <sub>fan</sub> (°C)	F (t/h)	H (m)	M <sub>in</sub> (% d.b.)	T <sub>mix</sub> (°C)		Error (%)	M <sub>f</sub> (% d.b.)		Error (%)	T <sub>ff</sub> (°C)		Error (%)	SHC (MJ/kg-water evaporated)		Error (%)	SPC (MJ/kg-water evaporated)		Error (%)
				Exp.	Sim.		Exp.	Sim.		Exp.	Sim.		Exp.	Sim.		Exp.	Sim.	
130	3.12	0.115	25.9	120	124	3.3	22.5	22.6	0.4	65.2	76.2	16.9	6.45	5.88	-8.8	0.90	0.90	0
140	4.72	0.147	26.7	130	133	3.0	23.3	23.9	2.5	65.8	77.5	17.8	4.83	5.46	13.0	0.73	0.82	12.3
150	6.42	0.119	25.9	140	143	1.7	23.3	23.4	0.2	59.4	75.5	27.1	4.93	5.13	4.1	0.70	0.57	-18.6
150	6.09	0.150	25.9	140	142	1.5	23.7	23.4	-1.1	56.1	77.1	37.5	6.70	5.49	-18.1	0.85	0.70	-17.6
150	5.10	0.150	26.1	139	142	2.2	23.4	23.3	-0.3	62.2	80.9	30.0	6.01	5.47	-9.0	0.79	0.73	-7.6
130	4.82	0.115	26.8	125	124	-0.5	23.7	24.1	1.7	56.0	71.7	27.9	5.47	5.16	-5.7	0.77	0.76	-1.3
140	4.82	0.115	24.1	132	133	0.4	20.7	21.5	3.9	57.3	77.6	35.4	4.69	5.72	22.0	0.66	0.76	15.2
150	4.82	0.115	28.0	140	143	1.9	23.0	24.5	6.6	63.7	77.6	21.7	3.80	5.14	35.3	0.48	0.58	20.8

Note: Exp. = experimental results, Sim. = simulation results



ตารางที่ ๓ สภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกบนฐานไหล (สภาวะการทำงานที่เหมาะสม  $T_a = 30^\circ\text{C}$ ,  $T_{wb} = 25^\circ\text{C}$ ,  $M_{in} = 30\% \text{ d.b.}$ ,  $V = 2.3 \text{ m/s}$ )

F	$T_{fan}$	$T_{mix}$	RC	H	$M_f$	Total electricity consumption	Average fuel consumption	SPEC
(tons/h)	( $^\circ\text{C}$ )	( $^\circ\text{C}$ )	(%)	(m)	(% d.b.)	(kW)	(l/h)	(MJ/kg-water evaporated)
3	154	150	94	0.164	23.0	22.6	22.8	6.48
4	154	150	93	0.135	24.1	20.6	24.7	6.03
5	153	149	93	0.119	24.9	19.6	26.2	5.74

ตารางที่ ๔ สภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกโดยการทำให้ลมบนฐานสั้น (สภาวะการทำงานที่เหมาะสม  $T_a = 30^\circ\text{C}$ ,  $T_{wb} = 25^\circ\text{C}$ ,  $M_{in} = 30\% \text{ d.b.}$ ,  $V = 1.5 \text{ m/s}$ )

F	$T_{fan}$	$T_{mix}$	RC	H	freq	$\Gamma$	$M_f$	Total electricity consumption	Average fuel consumption	SPEC
(tons/h)	( $^\circ\text{C}$ )	( $^\circ\text{C}$ )	(%)	(m)	(Hz)		(% d.b.)	(kW)	(l/h)	(MJ/kg-water evaporated)
3	152	145	89	0.110	5	2.5	24.6	5.4	19.2	5.98
4	150	144	86	0.103	5	2.5	25.5	5.6	20.1	5.61
5	150	143	83	0.099	5	2.5	26.0	5.9	21.1	5.36

ท้ายเท่ากับร้อยละ ๒๔.๙ ของฐานแห้ง และสำหรับการอบแห้งโดยเทคนิค การทำให้ลมบนฐานสั้นที่กำลังการผลิต และความชื้นเริ่มต้นเท่ากัน แต่ความเร็วอากาศอบแห้งเท่ากับ ๑.๕ เมตรต่อวินาที สภาวะเงื่อนไขการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุด มีดังนี้ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง ๑๔๓ องศาเซลเซียส สัดส่วนอากาศเวียนกลับ ๐.๘๓ ความสูงชั้นข้าวเปลือก ๙.๙ เซนติเมตร ความถี่การสั้น ๕ เฮิร์ตซ์ และความชื้นการสั้น ๒.๕ มีความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงานปฏิกิริยาจำเพาะเท่ากับ ๕.๓๖ เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย และ

ความชื้นสุดท้ายเท่ากับร้อยละ ๒๖.๐ ของฐานแห้ง

## สรุป

๑. จากการทดสอบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลบนฐานสั้น โดยมีสภาวะเงื่อนไขการอบแห้งดังนี้ กำลังผลิต ๔.๘๒ ตันต่อชั่วโมง ความสูงของตัวอย่างบนฐาน ๑๑.๕ เซนติเมตร อัตราการไหลอากาศอบแห้ง ๑.๗ ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ความเร็ว อากาศอบแห้ง ๑.๔ เมตรต่อวินาที สัดส่วนอากาศเวียนกลับ

๐.๘๕ และความชื้นการสั้นประมาณ ๑ (ความถี่ ๗.๓ เฮิร์ตซ์ และแอมพลิจูดในแนวตั้ง ๕ มิลลิเมตร) ในกรณีที่ใช้ อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้งเฉลี่ย ๑๔๐ องศาเซลเซียส สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

๑.๑ เครื่องอบแห้งโดยเทคนิคการทำไหลบนฐานสั้น สามารถลดความชื้นข้าวเปลือกโดยเฉลี่ยจากร้อยละ ๒๘ ของฐานแห้ง เหลือร้อยละ ๒๓ ของฐานแห้ง ความชื้นก่อนข้างสม่ำเสมอตลอดช่วงการทดลอง อุณหภูมิข้าวเปลือกที่ออกจากห้องอบแห้งเฉลี่ย ๖๔ องศาเซลเซียส.



๑.๒ ตัวอย่างข้าวเปลือกที่ผ่านการอบด้วยอากาศแวดล้อม มีข้าวตันเฉลี่ยร้อยละ ๓๒ และจากตัวอย่างข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งโดยเทคนิคการทำไหลบนฐานสั้น มีข้าวตันเฉลี่ยร้อยละ ๓๗ ซึ่งสูงกว่าประมาณร้อยละ ๕.

๑.๓ ตัวอย่างข้าวเปลือกที่ผ่านการอบด้วยอากาศแวดล้อมและที่ผ่านการอบแห้งโดยเทคนิคการทำไหลบนฐานสั้นมีความขาวของข้าวสารประมาณ ๔๒ และ ๔๑ ตามลำดับ (ตามสเกลเครื่องวัดความขาวยี่ห้อ Kett C-300).

๑.๔ การอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลบนฐานสั้นมีความสิ้นเปลืองพลังงานปฏุมภูมิจำเพาะรวมเฉลี่ย ๖.๑๕ เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย โดยกำลังไฟฟารวมที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์และมอเตอร์สั้น มีค่าประมาณร้อยละ ๕๕ ของกรณีการอบแห้งโดยเทคนิคการทำไหลที่ไม่มีการสั้น.

๒. ค่าใช้จ่ายในการอบแห้ง กรณีที่ดำเนินการอบแห้งข้าวเปลือก ๑๒ ชั่วโมงต่อวัน ๙๐ วันต่อปี ค่าใช้จ่ายรวมในการอบแห้ง ๕๙ บาทต่อตันข้าวเปลือก (๑.๕๐ บาทต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย) โดยแบ่งเป็นค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้ง ๑๙ บาทต่อตันข้าวเปลือก (๐.๕๐ บาทต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย) และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการอบแห้ง ๔๐ บาทต่อตันข้าวเปลือก (๑ บาทต่อกิโลกรัม น้ำที่ระเหย).

๓. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ของการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลบนฐานสั้นสามารถทำนายการอบแห้งข้าวเปลือกพอยอมรับได้.

๔. จากการจำลองแบบปัญหาทางคณิตศาสตร์ที่สภาวะเงื่อนไขการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุด สำหรับขนาดกำลังผลิต ๕ ตันต่อชั่วโมง และความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกร้อยละ ๓๐ ของฐานแห้ง พบว่าการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลบนฐานสั้นมีความสิ้นเปลืองพลังงานปฏุมภูมิจำเพาะน้อยกว่าการอบแห้งโดยเทคนิคการทำไหลประมาณร้อยละ ๗ โดยมีค่าความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกร้อยละ ๒๖ ของฐานแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานปฏุมภูมิจำเพาะเท่ากับ ๕.๓๖ เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย.

๕. การอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคการทำไหลบนฐานสั้น ที่ขนาดกำลังผลิตข้าวเปลือก ๕ ตันต่อชั่วโมง สิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าและน้ำมันดีเซลเฉลี่ยเท่ากับ ๕.๙ กิโลวัตต์ และ ๒๑.๑ ลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ โดยกำลังไฟฟารวมทั้งหมดมีค่าประมาณร้อยละ ๓๐.๑ ของกำลังไฟฟารวมทั้งหมดสำหรับกรณีอบแห้งโดยเทคนิคการทำไหลที่ไม่มีการสั้น.

### กิตติกรรมประกาศ

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และ Australian Centre for International Agricultural Research ให้การสนับสนุนโครงการวิจัยนี้. บริษัท ไรซ์เอ็นจิเนียริง ซัพพลาย จำกัด ได้

อำนวยความสะดวกและช่วยสร้างเครื่องอบแห้ง.

### เอกสารอ้างอิง

๑. สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, สมเกียรติ ปรัชญารากร, อรอนงค์ ศรีพาทกุล. Development of cross-flow fluidized bed paddy dryer. *Drying Technology* 1996; 14: 2397-410.
๒. สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, สมบูรณ์ เวชกามา, ชนิดย์ สวัสดิ์เสวี, ณัฐพล ภูมิสะอาด. Managing moist paddy by drying, tempering and ambient air ventilation. *Drying Technology*, 1999; 17(1&2): 335-44.
๓. Rysin AP. Theory and technology of food product drying in fluidized vibration bed. *Drying of Solids*, New York, International Science Publisher and Oxford & IBH publishing Co. Ltd., 1992: 86-99.
๔. Ringer D, Mujumdar AS. Flow and immersed surface heat transfer in a vibro-fluidized bed. *Proceedings of Third International Symposium on Drying at McGill University*, 1982; 1: 67-73.
๕. Han W, Mai B, Gu T. Residence time distribution and drying characteristics of a continuous vibro-fluidized bed. *Drying Technology* 1991; 9(1): 159-81.
๖. สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, สมเกียรติ ปรัชญารากร. Optimum strategy for fluidized bed paddy drying. *Drying Technology* 1994; 12: 1667-86.
๗. อติเทพ ทวีรัตนพานิช, สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, สมบูรณ์ เวชกามา, งามชื่น คงเสรี, สุรินทร์ วงศ์ปิยะชน. Effect of drying on head rice yield using fluidization technique. *Drying Technology* 1999; 17(1&2): 345-54.
๘. สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, วัฑฒณู รอดประพัฒน์, สมบูรณ์ เวชกามา. Mobile fluidized bed paddy dryer. *Drying Technology*, 1998; 16: 1501-13.



## สัญลักษณ์

A	คือ แอมพลิจูดการสั่น, มิลลิเมตร
$A_b$	คือ พื้นที่ฐาน, ตารางเมตร
$c_a$	คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง, กิโลจูลต่อกิโลกรัม-องศาเซลเซียส
$c_v$	คือ ความร้อนจำเพาะของไอน้ำในอากาศ, กิโลจูลต่อกิโลกรัม-องศาเซลเซียส
$E_{fm}$	คือ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์พัดลม, กิโลวัตต์
$E_t$	คือ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าในรูปพลังงานปฏิกิริยา, กิโลวัตต์
$E_{vm}$	คือ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์สั่น, กิโลวัตต์
F	คือ อัตราการป้อนข้าวเปลือก, ต้นต่อชั่วโมง
$F_f$	คือ แรงต้านทานการหมุนของระบบสั่น, นิวตัน
freq	คือ ความถี่การสั่น, เฮิรตซ์
g	คือ ความเร่งจากแรงโน้มถ่วง, ตารางเมตรต่อวินาที
H	คือ ความสูงชั้นข้าวเปลือก, เมตร
$h_{pi}$	คือ มวลแห้งของข้าวเปลือกที่ชั้นที่ i, กิโลกรัม
$h_{fg}$	คือ ความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำ, กิโลจูลต่อกิโลกรัม
$M_i$	คือ ความชื้นของข้าวเปลือกเมื่อไหลเข้าชั้นที่ i, ร้อยละ
$M_{i+1}$	คือ ความชื้นของข้าวเปลือกเมื่อไหลเข้าชั้นที่ i+1, ร้อยละ
MER	คือ อัตราการระเหยน้ำของข้าวเปลือก, กิโลกรัมน้ำต่อชั่วโมง
$m_1$	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแวดล้อม, กิโลกรัมต่อวินาที
$M_{in}$	คือ ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก, ร้อยละ
$M_f$	คือ ความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือก, ร้อยละ
$m_{mix}$	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศอบแห้ง, กิโลกรัมต่อวินาที
$m_{mix,i}$	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศอบแห้งเมื่อไหลเข้าชั้นที่ i, กิโลกรัมต่อวินาที
$P_b$	คือ ความดันลดคร่อมฐานข้าวเปลือก, กิโลพาสคัล
$P_{bv}$	คือ ความดันลดคร่อมฐานข้าวเปลือกสั่น, กิโลพาสคัล
$P_L$	คือ ความดันลดของระบบไม่รวมความดันลดคร่อมฐานข้าวเปลือกสั่น, กิโลพาสคัล
$P_t$	คือ ความดันลดของระบบ, กิโลพาสคัล
$Q_1$	คือ อัตราการสูญเสียความร้อนของห้องอบแห้งให้กับสิ่งแวดล้อม, กิโลวัตต์
$Q_2$	คือ อัตราการสูญเสียความร้อนต่ออากาศเวียนกลับให้กับสิ่งแวดล้อม, กิโลวัตต์
$Q_4$	คือ อัตราการสูญเสียความร้อนของหัวเผา น้ำมันดีเซลให้กับสิ่งแวดล้อม, กิโลวัตต์
$Q_5$	คือ อัตราการสูญเสียความร้อนของพัดลมให้กับสิ่งแวดล้อม, กิโลวัตต์
$Q_6$	คือ อัตราการสูญเสียความร้อนของท่ออากาศหลังออกจากพัดลมให้กับสิ่งแวดล้อม, กิโลวัตต์
$Q_h$	คือ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อน, กิโลวัตต์
r	คือ รัศมีของเพลาลูกเบี้ยวของมอเตอร์สั่น, เมตร



RC	คือ	สัดส่วนอากาศเวียนกลับ, เศษส่วน
SHC	คือ	ความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนจำเพาะ, เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย
SPC	คือ	ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าปฏุมภูมิจำเพาะ, เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย
SPEC	คือ	ความสิ้นเปลืองพลังงานปฏุมภูมิจำเพาะ, เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย
$T_a$	คือ	อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศแวดล้อม, องศาเซลเซียส
$T_b$	คือ	อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าพัดลม, องศาเซลเซียส
$T_{fan}$	คือ	อุณหภูมิอากาศหลังออกจากพัดลม, องศาเซลเซียส
$T_{f1}$	คือ	อุณหภูมิอากาศหลังการอบแห้ง, องศาเซลเซียส
$T_{f1,i}$	คือ	อุณหภูมิอากาศหลังการอบแห้งที่ชั้นที่ $i$ , องศาเซลเซียส
$T_{f2}$	คือ	อุณหภูมิอากาศเวียนกลับ, องศาเซลเซียส
$T_{mix}$	คือ	อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง, องศาเซลเซียส
$T_{wb}$	คือ	อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศแวดล้อม, องศาเซลเซียส
$T_x$	คือ	อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าหัวเผา น้ำมันดีเซล, องศาเซลเซียส
$t_i$	คือ	ระยะเวลาที่ข้าวเปลือกเคลื่อนที่จากชั้นที่ $i$ ไปยังชั้นที่ $i+1$ , วินาที
$\Delta U_{p,i}$	คือ	การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของเมล็ดข้าวเปลือกต่อหนึ่งหน่วยมวลอากาศแห้งที่ชั้นที่ $i$ , กิโลจูลต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง
$W_i$	คือ	สัดส่วนความชื้นของอากาศใหม่, กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง
$W_{mix}$	คือ	สัดส่วนความชื้นของอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง, กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง
$W_{f1}$	คือ	สัดส่วนความชื้นของอากาศหลังอบแห้ง, กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง
$W_{f1,i}$	คือ	สัดส่วนความชื้นของอากาศหลังอบแห้งที่ชั้นที่ $i$ , กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง
$\rho_a$	คือ	ความหนาแน่นของอากาศแวดล้อม, กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
$\rho_{pc}$	คือ	ความหนาแน่นของข้าวเปลือก, กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
$\eta_f$	คือ	ประสิทธิภาพของพัดลม, ไร้หน่วย
$\eta_{fm}$	คือ	ประสิทธิภาพของมอเตอร์พัดลม, ไร้หน่วย
$\eta_{vm}$	คือ	ประสิทธิภาพของมอเตอร์สัน, ไร้หน่วย
$\mu$	คือ	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของข้าวเปลือก, กิโลกรัมต่อเมตร-วินาที
$\Gamma$	คือ	ความเข้มข้นการสัน, ไร้หน่วย

**Abstract****Design, Testing and Optimization of Vibro-fluidized Bed Paddy Drying***Somchart Soponronnarit\**, *Somboon Wetchacama<sup>†</sup>*, *Suwat Trutassanawin<sup>†</sup>*, *Wuttikon Jariyatontivait<sup>#</sup>**\*Fellow, the Academy of Science, the Royal Institute, Thailand, <sup>†</sup>School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, <sup>#</sup>Former master students.*

The objectives of this research were to design, construct and test a prototype of a vibro-fluidized bed paddy dryer with a capacity of 2.5-5.0 tons/h, and to develop a mathematical model that determines optimum operating parameters. Experimental conditions were: air flow rate, 1.7 m<sup>3</sup>/sec; bed velocity, 1.4 m/sec and average drying air temperature, 125-140°C. Residence time of paddy was approximately one minute; fraction of air recycled, 0.85 and bed height, 11.5 cm. With a feed rate of 4,821 kg/h, the moisture content of paddy was reduced from 28 to 23 per cent dry bed (d.b.). Vibration intensity was 1 (frequency 7.3 Hz and amplitude 5 mm). Electrical power consumption and average diesel oil consumption were 9,646 W and 17.6 L/h, respectively. Specific primary energy consumption (SPEC) was 6.15 MJ/kg of water evaporated. Electrical power of the blower motor and vibrator motor was 55 per cent as compared with the electrical power of the blower motor used in fluidized bed drying without vibration. For operation 12 hours/day and 90 days/year, the cost of paddy drying was 1.50 baht/kg of water evaporated, of which 0.50 baht was fixed cost and 1.00 baht was operating cost (US\$ 1 = 40 baht). Comparison between the experimental and simulated results showed that the mathematical model could predict with fairly accuracy. For fluidized bed paddy drying with a capacity of 5 tons/h, initial moisture of paddy of 30 per cent d.b. and drying air velocity was 2.3 m/sec, the optimum operating parameters were: drying air temperature, 149°C; fraction of air recycled, 0.93 and bed height, 11.9 cm. SPEC and final moisture content were 5.74 MJ/kg of water evaporated and 24.9 per cent d.b., respectively. For vibro-fluidized bed paddy drying with the same capacity and initial moisture content and drying air velocity of 1.5 m/sec, the optimum operating parameters were: drying air temperature, 143°C; fraction of air recycled, 0.83; bed height, 9.9 cm; frequency, 5 Hz and vibration intensity, 2.5. SPEC and final moisture content were 5.36 MJ/kg of water evaporated and 26.0 per cent d.b., respectively. Paddy drying with vibro-fluidization technique consumed 7 per cent less primary energy compared with fluidized bed drying without vibration. Total electrical power and average diesel oil consumption of vibro-fluidized bed drying were 5.9 kW and 21.1 L/h, respectively. Total electrical power consumption was 30.1 per cent as compared with total electrical power consumption used in fluidized bed drying without vibration.

**Key words :** vibro-fluidized bed, paddy drying, fluidization