

อิทธิพลของขนาดหอบแห้งที่มีต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงาน
ของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม
Influence of Drying Column Dimension on the Energy Efficiency
of Pneumatic Dryer

ปิยะพล ฟุ้งพงศ์พันธุ์¹ ศุภณัฐ ไผทโสภณ¹ อานันท์ ตันภูมิ¹ ฉัตรชัย นิยมมล¹ กิตติ สถาพรประสารณ์^{2*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุและโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องค์กรักษ์

*Corresponding author: kittipom@gmail.com

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ เช่น ขนาดของหอบแห้ง อุณหภูมิอบแห้ง อัตราการป้อนวัสดุ ที่มีต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (ซึ่งแสดงในเทอมของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ หรือ SEC) ของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่มีการป้อนวัสดุเข้าระบบหลายรอบ โดยใช้ข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 30 % (d.b.) เป็นวัสดุในการทดสอบ การทดลองอบแห้งจะแบ่งออกเป็นสองส่วน กล่าวคือ การอบแห้ง 1 รอบและการอบแห้ง 2 รอบ จากการศึกษา พบว่า การเพิ่มทั้งอุณหภูมิอบแห้ง อัตราการป้อนข้าวเปลือก และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอบแห้ง มีผลทำให้ SEC ของกระบวนการอบแห้งมีค่าลดลง โดยค่า SEC ต่ำสุดที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ $1.6 \text{ MJ/kg}_{\text{water}}$ ซึ่งเกิดขึ้นในการอบแห้งรอบที่ 1 และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอบแห้ง 50 mm ที่อุณหภูมิอบแห้ง $130 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และอัตราการป้อนข้าวเปลือก 20 kg/h ในขณะที่ความชื้นต่ำสุดของข้าวเปลือกที่ได้หลังการอบแห้งมีค่า 19.3 % (d.b.) ซึ่งเกิดขึ้นหลังการอบแห้งรอบที่ 2 โดยใช้หอบแห้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm ที่อุณหภูมิ $130 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และอัตราการป้อน 20 kg/h เช่นเดียวกัน

คำสำคัญ: การอบแห้งหลายรอบ ข้าวเปลือก ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม หอบแห้ง

ABSTRACT

The objective of this research was to study the effects of operating parameters, i.e., drying column dimension, drying temperature and material feed rate, on the energy efficiency, expressed in term of specific energy consumption or SEC, of pneumatic dryer with multi-pass drying. Paddy with an initial moisture content of around 30 % (d.b.) was used as the test material. Drying experiments were divided into two parts: namely, one-pass and two-pass drying. It was found that SEC decreased with an increase in the drying temperature, material feed rate and drying column diameter. During one-pass drying and drying column diameter of 50 mm, the lowest value of SEC, $1.6 \text{ MJ/kg}_{\text{water}}$, was found at the drying temperature of $130 \text{ }^{\circ}\text{C}$ and material feed rate of 20 kg/h . The lowest final moisture content of paddy, 19.3 % (d.b.), was also found at this condition.

Keyword: drying column, multi-pass drying, paddy, pneumatic dryer, specific energy consumption

1. บทนำ

การอบแห้งวัสดุอนุภาค (particulate material) ที่มีความชื้นสูงสามารถทำได้ด้วยเครื่องอบแห้งหลายรูปแบบ ได้แก่ เครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบด (spouted-bed dryer) [1,2] หรือ เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบด (fluidized-bed dryer) [3-5] อย่างไรก็ตาม กระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้างต้นยังคงใช้เวลานาน ด้วยเหตุนี้ เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (pneumatic dryer) [6-8] จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้อบแห้งวัสดุอนุภาค โดยมีเหตุผลหลักคือใช้เวลาในการอบแห้งสั้นมาก รวมถึงยังมีข้อดีอีกหลายประการ เช่น มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน ไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหว รวมถึงมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูง ดังนั้น เครื่องอบแห้งแบบนี้จึงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายโดยเฉพาะกับวัสดุทางการเกษตรที่มีความชื้นสูง ที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากกระบวนการลดความชื้นเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอซึ่งเป็นผลมาจากการที่วัสดุกระจายในตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งอย่างทั่วถึง ทำให้มีพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อนมากแม้ว่าเวลาที่วัสดุอยู่ในระบบจะน้อยก็ตาม นอกจากนี้ เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมยังสามารถนำไปใช้กับกรณีอบแห้งแบบต่อเนื่อง (ป้อนวัสดุเข้าระบบอย่างต่อเนื่อง) ได้อีกด้วยซึ่งถือเป็นข้อดีของการนำเครื่องอบแห้งแบบนี้ไปใช้ในระดับอุตสาหกรรม

กระบวนการลดความชื้นวัสดุอนุภาคด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมเกิดขึ้นภายในท่อแนวตั้งที่เรียกว่าหอบแห้ง (drying column) ซึ่งอากาศร้อนที่ใช้เป็นตัวกลางในลดความชื้นจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงไปพร้อมกับวัสดุที่ต้องการลดความชื้น ส่งผลให้ความชื้นในวัสดุระเหยออกไปยังกระแสอากาศ ถึงแม้ว่าเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมสามารถลดความชื้นของวัสดุลงได้มากเมื่อเทียบกับระยะเวลาที่ใช้ ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบนี้มีค่าสูง [9,10] แต่ยังคงมีความเป็นไปได้ที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานดังกล่าวให้สูงขึ้นอีก โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับประสิทธิภาพการใช้พลังงานความร้อนซึ่งถือเป็นพลังงานหลักสำหรับเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม หนึ่งในวิธีที่สามารถทำให้

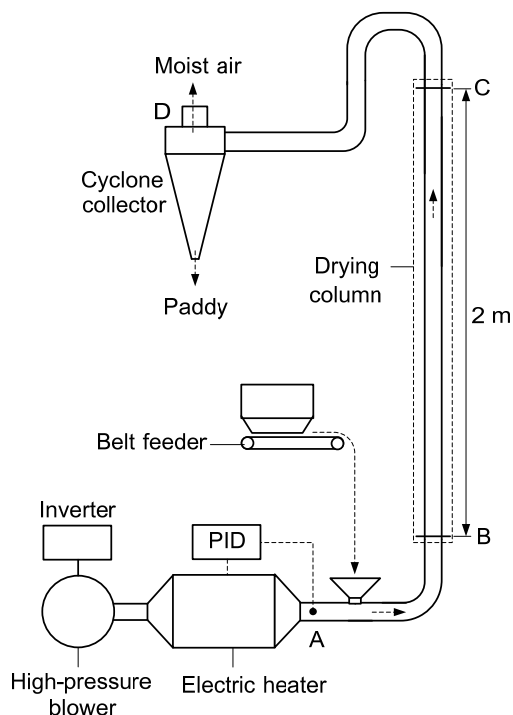
บรรลุนิวตฤประสงค์ข้างต้นได้คือการเพิ่มระยะเวลาแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งและวัสดุอนุภาค โดยหลักการแล้ว การเพิ่มระยะเวลาแลกเปลี่ยนความร้อนข้างต้นอาจทำได้โดยการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอบแห้ง ส่งผลให้ความเร็วของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้ง (อากาศร้อน) ลดลง ซึ่งมีผลทำให้วัสดุอนุภาคที่เคลื่อนที่ในหอบแห้งมีความเร็วลดลงด้วย วัสดุอนุภาคจึงอยู่ในระบบอบแห้งนานขึ้น นอกจากนี้ หากนำแนวคิดของการป้อนวัสดุอนุภาคเข้าระบบอบแห้งหลายรอบ (multi-pass drying) มาใช้จะสามารถลดความชื้นของวัสดุอนุภาคลงได้มากขึ้น จากที่กล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอบแห้ง รวมถึงตัวแปรอื่นๆ ที่มีต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม

2. วิธีวิจัย

2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 1 แสดงแผนผังเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้ในงานวิจัยซึ่งประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลักดังนี้ 1) พัดลมแรงดันสูง (high-pressure blower) (LDL, RT-4019, Taiwan) ซึ่งสามารถสร้างอัตราการไหลของอากาศได้ 3.6 m³/min ที่ความดัน 210 mbar โดยทำหน้าที่ป้อนอากาศเข้าสู่ระบบและเพื่อทำให้วัสดุที่ต้องการอบแห้งให้เคลื่อนที่ในระบบ 2) ชุดทำความร้อนด้วยไฟฟ้า (electric heater) ขนาด 9 kW ทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศ 3) หอบแห้ง ซึ่งทำจากท่อสแตนเลส (SUS304) ยาว 2 m (จุด B ถึง C) โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอบแห้งที่ใช้จะมี 2 ขนาด กล่าวคือ 38 และ 50 mm 4) ไซโคลน (cyclone collector) ทำหน้าที่แยกวัสดุที่นำมารอบแห้งออกจากกระแสอากาศ 5) ชุดควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller) แบบ PID (Maxthermo, MC-2838, China) ซึ่งมีความแม่นยำในการควบคุม ± 1 °C ทำงานโดยอาศัยอุณหภูมิของอากาศที่เข้าสู่ระบบ (จุด A) เป็นตัวควบคุมการทำงานของชุดทำความร้อน 6) สายพานป้อนวัสดุ (belt feeder) ที่สามารถปรับอัตราการป้อนวัสดุได้ซึ่งทำหน้าที่ป้อนข้าวเปลือกเข้าเครื่องอบแห้ง

7) อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบของพัดลมแรงดันสูงหรืออินเวอร์เตอร์ (inverter) ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่เข้าสู่ระบบ โดยความเร็วของอากาศจะถูกวัดที่ทางออกของชุดทำความร้อนด้วยท่อปีโตท์ (pitot tube) ซึ่งต่ออยู่กับอุปกรณ์ประมวลผล (Testo, 435-4, Germany) ในที่นี้ได้หุ้มฉนวนความร้อนให้กับอุปกรณ์ของเครื่องอบแห้งไว้ทั้งหมดเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนให้กับอากาศแวดล้อม



รูปที่ 1 แผนผังเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม

2.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ข้าวเปลือก (paddy) พันธุ์ปทุมธานี 1 ซึ่งถูกทำให้มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 30% (d.b.) เป็นวัสดุตัวอย่างในการทดลอง โดยข้าวเปลือกที่มีความชื้นข้างต้นถูกเตรียมโดยการเติมน้ำตามจำนวนที่กำหนดเข้าไปผสมกับข้าวเปลือกที่ได้จากการเก็บเกี่ยว จากนั้นจึงนำข้าวเปลือกดังกล่าวไปเก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นระยะเวลา 2 วัน ก่อนเริ่มการทดลอง ข้าวเปลือกจะถูกนำออกจากตู้เย็นเพื่อผึ่งในบรรยากาศเป็นระยะเวลาประมาณ 20 min ทั้งนี้

เพื่อหลีกเลี่ยงการควบแน่นของไอน้ำที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการทดลอง

2.3 วิธีทดลอง

ในขั้นแรก พัดลมแรงดันสูงและชุดทำความร้อนจะทำงานก่อน เมื่ออุณหภูมิของอากาศที่ทางออกของชุดทำความร้อน (จุด A) เพิ่มขึ้นจนถึงค่าที่กำหนด ข้าวเปลือกในอัตราการป้อนที่กำหนดจะถูกป้อนด้วยสายพานป้อนวัสดุเข้าสู่ระบบ การเก็บตัวอย่างข้าวเปลือก (เพื่อทำการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือก) ที่ทางออกของไซโคลนจะเริ่มเมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงตัว (steady state) โดยสภาวะดังกล่าวจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิของอากาศที่ทางออกของระบบ (จุด D) มีค่าคงที่ จากการทดลองในเบื้องต้นพบว่าระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัวหลังจากป้อนข้าวเปลือกเข้าระบบแล้วประมาณ 15 min ซึ่งในแต่ละเงื่อนไขการทดลองจะเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งจำนวน 3 ครั้ง โดยมีช่วงห่างของเวลาในการเก็บตัวอย่างเท่ากัน ความชื้นของตัวอย่างข้าวเปลือกหาได้โดยการนำข้าวเปลือกมาอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 h [11] หลังจากนั้นจึงคำนวณค่าความชื้นของข้าวเปลือกจากมวลของข้าวเปลือกทั้งก่อนนำเข้าตู้อบและหลังนำออกจากตู้อบ

การทดลองจะกระทำโดยใช้อุณหภูมิอบแห้ง (drying temperature, T) ซึ่งเป็นอุณหภูมิของอากาศที่จุด A เท่ากับ 90, 110 และ 130 °C อัตราการป้อนข้าวเปลือกเข้าระบบ (W_p) 12, 16 และ 20 kg/h ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอบแห้ง (D) 38 และ 50 mm โดยงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกทำการทดลองโดยการป้อนข้าวเปลือกผ่านเครื่องอบแห้ง 1 รอบ (อบแห้ง 1 รอบ) ส่วนที่สองทำการทดลองโดยป้อนข้าวเปลือกผ่านเครื่องอบแห้ง 2 รอบ (อบแห้ง 2 รอบ) โดยนำข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งรอบที่ 1 ป้อนกลับเข้าห้องอบแห้งซ้ำ ความเร็วของอากาศที่ใช้ในการพาข้าวเปลือกให้เข้าสู่หอบแห้งกำหนดให้มีค่าคงที่เท่ากับ 15 m/s

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ซึ่งผลที่ได้ในแต่ละการ

ทดลองแสดงด้วยค่าเฉลี่ยซึ่งจะนำมาเปรียบเทียบความแตกต่างโดยใช้ Duncan's Test ค่าเฉลี่ยข้างต้นจะพิจารณาให้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

2.4 เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ

เวลาเฉลี่ยที่วัสดุ (ในที่นี้คือข้าวเปลือก) อยู่ในระบบ (ตั้งแต่เข้าสู่ระบบจนกระทั่งออกจากเครื่องอบแห้งที่ทางออกของไซโคลน) ที่เงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ สามารถประเมินได้จาก [12]

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

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

ปริมาณข้าวเปลือกที่ค้างในระบบ (m_p) หาได้โดยเดินเครื่องอบแห้งให้ได้เงื่อนไขการอบแห้งที่กำหนด จากนั้นจึงป้อนข้าวเปลือกเข้าระบบ เมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงตัวแล้วให้หยุดการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบฉับพลัน (ทั้งพัดลมแรงดันสูงและสายพานป้อนวัสดุ) ส่งผลให้มีข้าวเปลือกค้างอยู่ในระบบ หลังจากนั้นให้พัดลมแรงดันสูงทำงานอีกครั้ง (โดยไม่ต้องป้อนข้าวเปลือกเข้าระบบเพิ่ม) เพื่อไล่ข้าวเปลือกที่ค้างในระบบออกที่ทางออกของไซโคลนจนหมด จากนั้นให้หามวลของข้าวเปลือกที่ไล่ออกจากระบบโดยการชั่ง

2.5 ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่อง

อบแห้ง

พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือกประกอบด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่พัดลมแรงดันสูงเพื่อทำให้อากาศสามารถพาข้าวเปลือกให้ไหลในระบบได้ และพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ชุดทำความร้อนเพื่อสร้างพลังงานความร้อนให้แก่อากาศที่ใช้เป็นตัวกลางในการอบแห้ง

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (specific energy consumption: SEC) ถูกใช้เป็นดัชนีแสดงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือกในงานวิจัยนี้ ค่า SEC แสดงให้ทราบถึงพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำ (ความชื้น)

จำนวน 1 kg ออกจากข้าวเปลือกซึ่งสามารถคำนวณได้จาก [13]

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

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg_{water}) E คือ ผลรวมของพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่พัดลมแรงดันสูงและชุดทำความร้อน (MJ) ซึ่งสามารถวัดได้ด้วยมาตรวัดความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า และ m_{water} คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากข้าวเปลือก (kg_{water}) ซึ่งประเมินได้จากความแตกต่างระหว่างความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกตามสมการต่อไปนี้ [14]

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

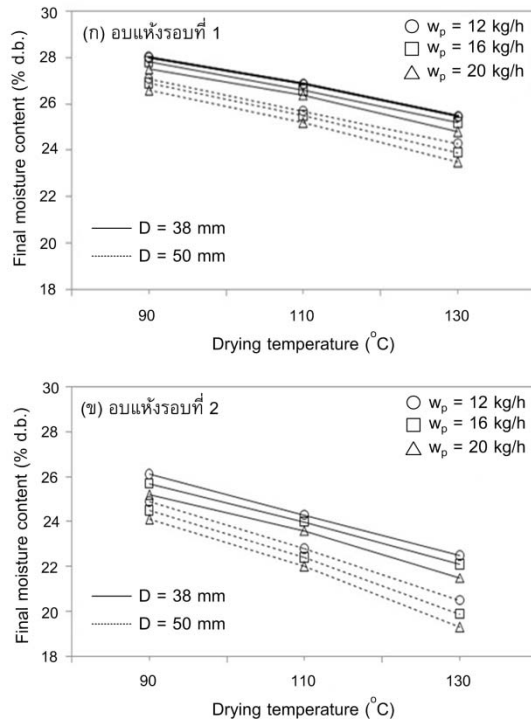
เมื่อ X_i และ X_o คือ ความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือก ตามลำดับ (kg/kg d.b.) และ t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือก

รูปที่ 2 และตารางที่ 1 แสดงความชื้นของข้าวเปลือกหลังผ่านการอบแห้งที่เงื่อนไขต่าง ๆ โดยแสดงในเทอมของความชื้นสุดท้าย (final moisture content) ของข้าวเปลือกที่ออกจากเครื่องอบแห้ง

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิอบแห้ง ทั้งกรณีเส้นผ่านศูนย์กลางของหอบแห้ง (D) 38 และ 50 mm พบว่า ความชื้นของข้าวเปลือกที่ออกจากเครื่องอบแห้งลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอบแห้ง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มสูงขึ้นความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศ (ตัวกลางในการอบแห้ง) และอุณหภูมิผิวของข้าวเปลือกเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้แรงขับเคลื่อนสำหรับการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสาร (ความชื้น) มีค่าเพิ่มขึ้น ความชื้นที่ผิวของข้าวเปลือกจึงระเหยได้มากกว่า ปรากฏการณ์ดังกล่าวมีลักษณะเช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นกับเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมของ Kaensup et al. [9,10] และเครื่องอบแห้งแบบกระแสนของ Nimmol and Devahastin [14] แนวโน้มของผลที่ได้จะมีลักษณะเหมือนกันทั้งกรณีอบแห้งรอบที่ 1 (รูปที่ 2ก) และอบแห้งรอบที่ 2 (รูปที่ 2ข)



รูปที่ 2 ความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือก
ที่ผ่านการอบแห้ง

เมื่อพิจารณาอัตราการป้อนข้าวเปลือก ทั้งกรณีเส้นผ่านศูนย์กลางของหอบแห้ง (D) 38 และ 50 mm พบว่า ความชื้นของข้าวเปลือกที่ออกจากเครื่องอบแห้งลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการป้อน ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออัตราการป้อนข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น เวลาที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบจะมากกว่ากรณีลดอัตราการป้อน (จะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อถัดไป) ระยะเวลาแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้ง (อากาศร้อน) กับข้าวเปลือกจึงมากกว่า ส่งผลให้ความร้อนสามารถถ่ายเทให้แก่ข้าวเปลือกได้มากกว่าซึ่งส่งผลให้ความชื้นระเหยออกจากข้าวเปลือกได้มากกว่าด้วย ถึงแม้ว่าโดยทั่วไป อัตราการป้อนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ภาระการระเหยความชื้นของเครื่องอบแห้งเพิ่มขึ้นก็ตาม (ระเหยความชื้นได้น้อยลง) แต่ในกรณีนี้ เวลาที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบมีอิทธิพลต่อ

ปริมาณข้าวเปลือกในระบบ จึงทำให้การเพิ่มอัตราการป้อนไม่ส่งผลให้ความสามารถในการอบแห้งของเครื่องอบแห้งลดลง แนวโน้มของผลที่ได้จะมีลักษณะเหมือนกันทั้งกรณีอบแห้งรอบที่ 1 (รูปที่ 2ก) และอบแห้งรอบที่ 2 (รูปที่ 2ข) อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์ทางสถิติที่แสดงดังตารางที่ 1 กลับแสดงให้เห็นว่า อัตราการป้อนไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกในกรณีใช้หอบแห้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 mm

เมื่อพิจารณาความแตกต่างระหว่างความชื้นของข้าวเปลือกหลังผ่านการอบแห้งรอบที่ 1 และรอบที่ 2 ดังตารางที่ 1 พบว่า ความชื้นของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งรอบที่ 2 มีค่าต่ำกว่า (แห้งมากกว่า) ความชื้นของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งรอบที่ 1 ซึ่งเป็นไปตามที่คาดการณ์ไว้ โดยเป็นผลมาจากข้าวเปลือกได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นในระหว่างการอบแห้งรอบที่ 2 ปรากฏการณ์ดังกล่าวจะมีลักษณะคล้ายคลึงกันในทุกเงื่อนไขการอบแห้ง

สำหรับอิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอบแห้งที่มีต่อความชื้นของข้าวเปลือกหลังผ่านการอบแห้ง พบว่า การใช้หอบแห้งที่มีขนาดใหญ่กว่า (เส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า) ส่งผลให้ความชื้นของข้าวเปลือกที่ได้หลังการอบแห้งมีค่าต่ำกว่า (หรือความชื้นลดลงมากกว่า) เมื่อเทียบกับการใช้หอบแห้งที่มีขนาดเล็กกว่า (เส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า) ในทุกเงื่อนไขการอบแห้ง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก เมื่อหอบแห้งมีขนาดใหญ่ ความเร็วของอากาศร้อนที่ไหลผ่านหอบแห้งจะลดลง ส่งผลให้ความเร็วของข้าวเปลือกที่ไหลผ่านหอบแห้งจึงลดลงด้วย ดังนั้นข้าวเปลือกจึงมีเวลาอยู่ในระบบนานขึ้น การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งและข้าวเปลือกจึงเกิดขึ้นในระยะเวลาที่นานกว่า ส่งผลให้ความชื้นระเหยออกจากข้าวเปลือกได้มากกว่าดังที่กล่าวข้างต้น

ตารางที่ 1 ความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกและเวลาเฉลี่ยที่ของข้าวเปลือกอยู่ในระบบ

D (mm)	T (°C)	W _p (kg/h)	M (% d.b.)		τ (s)	
			อบแห้งรอบที่ 1	อบแห้งรอบที่ 2	อบแห้งรอบที่ 1	อบแห้งรอบที่ 2
38	90	12	28.0 ± 0.4 ^h	26.1 ± 0.4 ^l	3.13 ± 0.25 ^a	3.05 ± 0.23 ^a
		16	27.8 ± 0.3 ^h	25.7 ± 0.3 ^{kl}	3.27 ± 0.26 ^{ab}	3.19 ± 0.24 ^{ab}
		20	27.5 ± 0.3 ^{gh}	25.2 ± 0.3 ^{jk}	3.38 ± 0.22 ^{abc}	3.30 ± 0.20 ^{abc}
	110	12	26.9 ± 0.4 ^{fg}	24.3 ± 0.3 ^h	3.14 ± 0.21 ^a	3.07 ± 0.21 ^a
		16	26.6 ± 0.3 ^f	24.0 ± 0.4 ^{gh}	3.30 ± 0.32 ^{ab}	3.20 ± 0.31 ^{ab}
		20	26.4 ± 0.4 ^f	23.6 ± 0.3 ^g	3.40 ± 0.35 ^{abc}	3.29 ± 0.33 ^{abc}
	130	12	25.5 ± 0.5 ^{de}	22.5 ± 0.4 ^{ef}	3.12 ± 0.30 ^a	3.06 ± 0.28 ^a
		16	25.2 ± 0.4 ^{de}	22.1 ± 0.3 ^e	3.29 ± 0.27 ^{ab}	3.22 ± 0.26 ^{ab}
		20	24.8 ± 0.5 ^{cd}	21.5 ± 0.3 ^d	3.39 ± 0.22 ^{abc}	3.30 ± 0.22 ^{abc}
50	90	12	27.1 ± 0.3 ^{fg}	24.9 ± 0.4 ^{ij}	3.67 ± 0.31 ^{abc}	3.59 ± 0.30 ^{abc}
		16	26.9 ± 0.6 ^{fg}	24.5 ± 0.3 ^{hi}	3.79 ± 0.34 ^{bc}	3.70 ± 0.32 ^{bc}
		20	26.6 ± 0.3 ^f	24.1 ± 0.4 ^{gh}	3.92 ± 0.26 ^c	3.83 ± 0.25 ^c
	110	12	25.7 ± 0.4 ^e	22.8 ± 0.3 ^f	3.64 ± 0.35 ^{abc}	3.56 ± 0.34 ^{abc}
		16	25.5 ± 0.5 ^{de}	22.4 ± 0.3 ^{ef}	3.76 ± 0.28 ^{bc}	3.68 ± 0.26 ^{bc}
		20	25.2 ± 0.5 ^{de}	22.0 ± 0.3 ^{de}	3.89 ± 0.23 ^c	3.81 ± 0.23 ^{abc}
	130	12	24.3 ± 0.4 ^{bc}	20.5 ± 0.3 ^c	3.65 ± 0.30 ^{abc}	3.57 ± 0.28 ^{abc}
		16	23.9 ± 0.3 ^{ab}	19.9 ± 0.3 ^b	3.74 ± 0.35 ^{bc}	3.65 ± 0.33 ^{bc}
		20	23.5 ± 0.3 ^a	19.3 ± 0.3 ^a	3.90 ± 0.39 ^c	3.82 ± 0.29 ^c

ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกัน หมายถึงค่าดังกล่าวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เมื่อพิจารณาค่าความชื้นของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งดังตารางที่ 1 จะพบว่า ความชื้นของข้าวเปลือกมีค่าอยู่ในช่วง 23.5 ถึง 28.0% (d.b.) สำหรับการอบแห้งรอบที่ 1 และ 19.3 ถึง 26.1% (d.b.) สำหรับการอบแห้งรอบที่ 2 นั้นหมายความว่า เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกลงได้ประมาณ 2.0 ถึง 6.5 % (d.b.) หลังผ่านการอบแห้งรอบที่ 1 และ 3.9 ถึง 11.1% (d.b.) หลังผ่านการอบแห้งรอบที่ 2 หากพิจารณาจากขนาดของหอบแห้งที่ใช้ พบว่า การใช้หอบแห้งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 38 mm จะทำให้ความชื้นของข้าวเปลือกที่ได้จากการอบแห้งมีค่าอยู่ในช่วง 21.5 ถึง 28.0% (d.b.) ในขณะที่การใช้หอบแห้งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 38 mm จะทำให้ความชื้นของข้าวเปลือกที่ได้จากการอบแห้งมีค่าอยู่ในช่วง 19.3 ถึง 27.1% (d.b.) โดยความชื้นต่ำสุดของข้าวเปลือกที่ได้หลังการอบแห้ง (19.3 % d.b.) เกิดขึ้นเมื่ออบแห้งโดยใช้หอบแห้งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง

50 mm ที่อุณหภูมิ 130 °C และอัตราการป้อน 20 kg/h โดยความชื้นต่ำสุดของข้าวเปลือกที่ได้หลังการอบแห้งข้างต้นมีค่าใกล้เคียงกับผลการศึกษการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้หอบแห้งชนิดท่อเกลียวของ ฉัตรชัย [15] อย่างไรก็ตาม งานวิจัยดังกล่าวได้ทำการอบแห้งข้าวเปลือกเพียง 1 รอบ เท่านั้น

3.2 เวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบ

ตารางที่ 1 แสดงเวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบ (τ) ที่เงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ จะเห็นว่า อุณหภูมิอบแห้งไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อเวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบ ในขณะที่การเพิ่มอัตราการป้อนมีแนวโน้มทำให้เวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบมีค่ามากขึ้น (ข้าวเปลือกอยู่ในระบบนานขึ้น) ทั้งกรณีเส้นผ่านศูนย์กลางของหอบแห้ง 38 และ 50 mm ทั้งนี้เป็นผลมาจากปริมาณข้าวเปลือกที่ค้างในระบบ (mp) มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราการป้อน ลักษณะเช่นนี้จึงส่งผลให้ความชื้นระเหยออกจากข้าวเปลือกได้

มากขึ้นดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์ทางสถิติที่แสดงดังตารางที่ 1 กลับแสดงให้เห็นว่าอัตราการป้อนไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อเวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะอัตราการป้อนที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก นอกจากนี้ การเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอบแห้งมีแนวโน้มทำให้เวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบมีค่ามากขึ้น ซึ่งเป็นเหตุสำคัญที่ทำให้ความชื้นระเหยออกจากข้าวเปลือกได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติในตารางที่ 1 กลับพบว่าเวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอบแห้งทั้งสองขนาดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้อาจเนื่องจากเส้นผ่าศูนย์กลางของหอบแห้งทั้งสองขนาดที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความแตกต่างกันไม่มากนัก นอกจากนี้ยังพบอีกว่า แนวโน้มพฤติกรรมของเวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบสำหรับการอบแห้งรอบที่ 1 และรอบที่ 2 มีลักษณะคล้ายกัน แต่เวลาเฉลี่ยที่ข้าวเปลือกอยู่ในระบบสำหรับการอบแห้งรอบที่ 2 จะมีค่าน้อยกว่า เนื่องจากข้าวเปลือกที่เข้าสู่ระบบสำหรับการอบแห้งรอบที่ 2 มีความชื้นต่ำกว่า มวลของข้าวที่ค้างในระบบจึงมีค่าน้อยกว่า

3.3 ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้ง

ตารางที่ 2 แสดงค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่เงื่อนไขการทดลองต่างๆ จะเห็นว่าทั้งกรณีการอบแห้งรอบที่ 1 และรอบที่ 2 การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งส่งผลให้

SEC มีค่าลดลงแม้ว่าพลังงานที่ใช้ (E) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นก็ตาม ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นที่ระเหยออกจากข้าวเปลือก (m_{water}) มีอิทธิพลต่อค่า SEC ซึ่งคำนวณตามสมการที่ (2) มากกว่าการเพิ่มขึ้นของพลังงานที่ใช้ แนวโน้มของผลที่ได้นี้คล้ายคลึงกับกรณีของการเพิ่มอัตราการป้อนข้าวเปลือก ในส่วนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอบแห้ง พบว่า การเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอบแห้งส่งผลให้พลังงานที่ใช้มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากความต้านทานต่อการไหลของอากาศในระบบลดลง พลังงานที่ใช้สำหรับพัดลมแรงดันสูงจึงมีค่าลดลงด้วย ประกอบกับปริมาณความชื้นที่ระเหยออกจากข้าวเปลือกในกรณีนี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (จากที่กล่าวในหัวข้อ 3.1) จึงส่งผลให้ SEC ที่ได้มีค่าลดลงด้วย และเมื่อเปรียบเทียบค่า SEC ของการอบแห้งรอบที่ 1 และรอบที่ 2 พบว่า SEC ของการอบแห้งรอบที่ 1 จะมีค่าต่ำกว่าถึงแม้ว่าปริมาณพลังงานที่ใช้มีแนวโน้มสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณความชื้นที่ระเหยออกจากข้าวเปลือกในกรณีนี้มีค่ามากกว่าซึ่งเป็นผลจากข้าวเปลือกที่อบแห้งในรอบที่ 1 ยังมีความชื้นสูงอยู่ โดยค่า SEC ต่ำสุดที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ $1.6 \text{ MJ/kg}_{water}$ ซึ่งเกิดขึ้นในการอบแห้งรอบที่ 1 และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอบแห้ง 50 mm ที่อุณหภูมิอบแห้ง $130 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และอัตราการป้อนข้าวเปลือก 20 kg/h

ตารางที่ 2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งที่เงื่อนไขต่าง ๆ

D (mm)	T (°C)	W _p (kg/h)	อบแห้งรอบที่ 1		อบแห้งรอบที่ 2	
			E (MJ)	SEC (MJ/kg _{water})	E (MJ)	SEC (MJ/kg _{water})
38	90	12	5.4	5.0	5.4	5.3
		16	6.1	3.9	6.1	4.1
		20	6.1	2.8	6.5	3.2
	110	12	7.2	4.5	7.2	5.2
		16	7.2	3.0	7.2	3.9
		20	7.9	2.5	7.6	3.0
	130	12	9.0	3.7	7.9	4.9
		16	9.4	2.7	7.9	3.6
		20	10.4	2.3	8.3	2.8
50	90	12	5.0	3.3	4.9	4.1
		16	5.8	2.6	5.4	3.2
		20	5.8	1.9	5.4	2.4
	110	12	6.8	3.0	6.1	4.0
		16	6.8	2.1	6.5	2.9
		20	7.6	1.8	6.7	2.3
	130	12	8.6	2.8	6.8	3.4
		16	9.0	2.1	7.2	2.5
		20	9.5	1.6	7.7	2.1

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ เช่น ขนาดของหอบแห้ง อุณหภูมิอบแห้ง อัตราการป้อนวัสดุ และจำนวนรอบของการป้อนวัสดุเข้าระบบ ที่มีต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมซึ่งแสดงในเทอมของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะหรือ SEC โดยใช้ข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 30 % (d.b.) เป็นวัสดุในการทดสอบจากการศึกษา พบว่า การเพิ่มทั้งอุณหภูมิอบแห้ง อัตราการป้อนข้าวเปลือก และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอบแห้ง มีผลทำให้ SEC ของกระบวนการอบแห้งมีค่าลดลง นอกจากนี้ SEC ของการอบแห้งรอบที่ 1 ยังมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการอบแห้งรอบที่ 2 โดยค่า SEC ต่ำสุดที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 1.6 MJ/kg_{water} ซึ่งเกิดขึ้นในการอบแห้งรอบที่ 1 และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหอบแห้ง 50 mm ที่อุณหภูมิอบแห้ง 130 °C และอัตราการป้อนข้าวเปลือก 20 kg/h ในขณะที่ความชื้นต่ำสุดของข้าวเปลือกที่ได้หลังการ

อบแห้งมีค่า 19.3 % (d.b.) ซึ่งเกิดขึ้นหลังการอบแห้งรอบที่ 2 โดยใช้หอบแห้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm ที่อุณหภูมิ 130 °C และอัตราการป้อน 20 kg/h เช่นเดียวกัน ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพสูงมากพอที่จะนำไปใช้ในการลดความชื้นขั้นต้นของข้าวเปลือกโดยเฉพาะข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวมาใหม่ซึ่งมักมีความชื้นสูง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุ และโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยบางส่วน และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์ ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และสถานที่ในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Hung-Nguyen, R.H. Driscoll and G. Szrednicki, "Drying of high moisture content paddy in a pilot scale triangular spouted bed dryer," *Drying Technology*, vol. 19, pp. 375–387, 2001.
- [2] T. Madhiyanon and S. Soponronnarit, "High temperature spouted bed paddy drying with varied downcomer air flows and moisture contents: Effects on drying kinetics, critical moisture content, and milling quality," *Drying Technology*, vol. 23, pp. 473–495, 2005.
- [3] S. Soponronnarit, M. Yapha and S. Prachayawarakorn, "Cross-flow fluidized bed paddy dryer: Prototype & commercialization," *Drying Technology*, vol. 13, pp. 2207–2116, 1995.
- [4] C. Inprasit and A. Noomhorm, "Effect of drying air temperature and grain temperature of different types of dryer and operation on rice quality," *Drying Technology*, vol. 19, pp. 389–404, 2001.
- [5] S. Tirawanichakul, S. Prachayawarakorn, . Waranyanond, P. Tungtrakul and S. Soponronnarit, "Effect of fluidized bed drying temperature on various quality attributes of paddy," *Drying Technology*, vol. 22, pp. 1731–1754, 2004.
- [6] I.C. Kemp, "Scale-up of pneumatic conveying dryers," *Drying Technology*, vol. 12, pp. 279–297, 1994.
- [7] A.E.A. Paixao and S.C.S. Rocha, "Pneumatic drying in diluted phase: Parametric analysis of tube diameter and mean particle," *Drying Technology*, vol. 16, pp. 1957–1970, 1998.
- [8] I. Brode and A. Levy, "Pneumatic and Flash Drying," In A.S. Mujumdar Ed., *Handbook of Industrial Drying: Volume 1*, 3rd ed., New York, Marcel Dekker, 2006.
- [9] W. Kaensup, S. Kulwong and S. Wongwises, "A small-scale pneumatic conveying dryer of rough rice," *Drying Technology*, vol. 24, pp.105–113, 2006.
- [10] W. Kaensup, S. Kulwong and S. Wongwises, "Comparison of drying kinetics of paddy using a pneumatic conveying dryer with and without a cyclone," *Drying Technology*, vol. 24, pp. 1039–1045, 2006.
- [11] AOAC, "Official Methods of Analysis 17th edition," Maryland, Gaithersburg, 2000.
- [12] A. Kitron, R. Buchmann, K. Luzzatto and A. Tamir, "Drying and mixing of solids and particles residence time distribution in four impinging streams and multistage two impinging streams reactor," *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 26, pp. 2454–2461, 1987.
- [13] C. Nimmol, S. Devahastin, T. Swasdisevi, and S. Soponronnarit, "Drying and heat transfer behavior of banana undergoing combined low-pressure superheated steam and far-infrared radiation drying," *Applied Thermal Engineering*, vol.27, pp.2483–2494, 2007.
- [14] C. Nimmol and S. Devahastin, "Evaluation of performance and energy efficiency of an impinging stream dryer for paddy," *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, pp.2204–2212, 2010.
- [15] จัตรชัย นิยมมล. "ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้หอบแห้งชนิดท่อเกลียว". วารสารวิจัย มช. ปี 17 (ฉบับที่ 1): หน้า 97–109, 2555.