

การประยุกต์ใช้เทคนิคเจ็ตสเปาต์เต็ดเบดร่วมกับคลื่นอัลตราซาวด์สำหรับอบแห้ง

ผลผลิตทางการเกษตร

Application of a Combined Jet Spouted Bed and Ultrasound Waves for
Drying of Agricultural Products

โพธิ์ทอง ปรานีดีพลกรัง* กิตติ สถาพรประสาธน์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์

*Corresponding author: Email: pttmbj@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทบทวนผลงานวิจัยและความเป็นไปได้ของการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร โดยการประยุกต์ใช้เทคนิคเจ็ตสเปาต์เต็ดเบดร่วมกับคลื่นอัลตราซาวด์ อันดับแรกนำเสนอทฤษฎีเจ็ตสเปาต์เต็ดเบด คลื่นอัลตราซาวด์และทฤษฎีการอบแห้งความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมเบดกับความเร็วมวลอากาศ ความเร็วอากาศต่ำสุดในการเกิดสเปาต์ปรากฏการณ์แควิตีชัน ต่อมาศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งประสิทธิภาพการใช้พลังงาน การประยุกต์ใช้งานเทคนิคเจ็ตสเปาต์เต็ดเบดและคลื่นอัลตราซาวด์ในกระบวนการอบแห้งต่อมานำเสนอการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งพัฒนามาจากกฎของฟิค(Fick's law) และกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law) สำหรับวิเคราะห์กระบวนการถ่ายโอนความร้อนและควบคุมกระบวนการอบแห้ง ช่วยให้ผู้อ่านสนใจนำไปประยุกต์ใช้หรือนำไปผสมผสานกับเทคนิคการอบแห้งแบบอื่นๆต่อไป

คำสำคัญ: เจ็ตสเปาต์เต็ดเบด ,คลื่นอัลตราซาวด์,จลนพลศาสตร์การอบแห้ง

ABSTRACT

The purpose of this study was to review the research find and possibility of drying agricultural products via a combine Jet spouted bed and Ultrasound. First, the survey began to study theorem of Jet spouted bed with Ultrasound waves and theorem of drying, the relationship between pressure drop and air velocity, Minimum spouting velocity and Cavitations' phenomenon. Subsequently, studied the impact of the variable on the drying kinetics, the energy efficiency and application techniques jet spouted bed and ultrasound waves in the drying process. Then, mathematical modeling based on Fick's law and Newton's law of cooling was developed and analyzed for the heat transfer and drying process control. The article is expected to be beneficial for those who are interested so that they can apply this hybrid drying or combine it with other drying methods.

Keyword: Jet spouted bed, Ultrasound waves, Drying kinetics

1. บทนำ

กระบวนการอบแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้นในวัสดุ เพื่อยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ช่วยเก็บรักษาวัสดุไว้ได้นาน[1,2] ซึ่งกระบวนการอบแห้งจะมีการถ่าย

โอนความร้อนและมวลสารเกิดขึ้นพร้อมกัน กระบวนการที่ซับซ้อนกันนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่ต่างกัน เช่น อุณหภูมิและความเร็วลมร้อน อัตราการไหลของอากาศ ลักษณะทางกายภาพและความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ พื้นที่และ

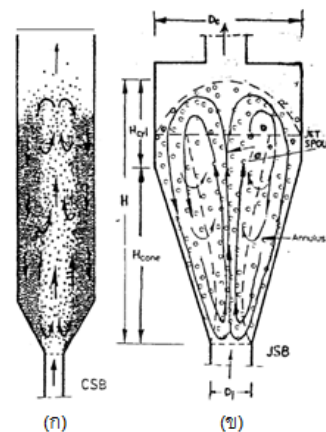
ความดัน[2] การอบแห้งการอบแห้งเมล็ดพืชด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดมีข้อดีในด้านการอบแห้งที่รวดเร็ว เกิดการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพ และอบความร้อนได้ทั่วถึง เมล็ดพืชได้รับความร้อนสม่ำเสมอ[1-4] ข้อจำกัดของการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดคือเหมาะสมกับวัสดุที่ขนาดเล็ก ถ้าวัสดุที่มีขนาดใหญ่มากหรือมีชั้นเบดหนาเกินไปจะไปทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมมาก หรือเกิดช่องว่างภายในเบดลักษณะต่างๆ ประสิทธิภาพในการทำให้ของไหลและของแข็งสัมผัสกันของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดจะน้อยลง[5-7] เพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าว เทคนิคสเปาต์เต็ดแบบมาตรฐานได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในเครื่องอบแห้งจะเป็นลักษณะการเคลื่อนที่หมุนวนอย่างมีระเบียบ สามารถอบแห้งวัสดุหรืออนุภาคที่มีขนาดใหญ่(มากกว่า 1,000 ไมครอน) และมีรูปทรงไม่เป็นเรขาคณิตได้ดี [6-7] อย่างไรก็ตาม เครื่องอบแห้งแบบสเปาต์เต็ดแบบมาตรฐานนั้นยังมีข้อจำกัดต่างๆ เช่น ความหนาแน่นของเบดสูงทำให้การกระจายตัวและการสัมผัสของอนุภาคกับอากาศร้อนไม่ดีเท่าที่ควร สัดส่วนช่องว่างระหว่างบริเวณวงแหวนและบริเวณสเปาต์เต็ดแตกต่างกันมาก มีอัตราการหมุนเวียนของอนุภาคต่ำ [6-7]

เครื่องอบแห้งแบบเจตสเปาต์เต็ดเบด(Jet spouted bed)เป็นเครื่องอบแห้งชนิดหนึ่งที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ไขข้อจำกัดของเครื่องอบแห้งแบบสเปาต์เต็ดเบดแบบดั้งเดิม [6-11] และได้นำไปประยุกต์ใช้กับการอบแห้งผลิตภัณฑ์อาหารและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรหลายชนิด ซึ่งผลการอบแห้งที่ได้ก็อยู่ในระดับที่น่าพอใจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อพิจารณาในแง่คุณภาพของผลิตภัณฑ์ [8-11] อย่างไรก็ตามหากพิจารณาในแง่ของประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้งแล้ว การอบแห้งด้วยเจตสเปาต์เต็ดเบดยังถือเป็นระบบการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานอยู่ในเกณฑ์ต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากพัดลมแรงดันสูงและชุดทำความร้อนซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของระบบการอบแห้งดังกล่าวต้องทำงานอย่างต่อเนื่อง [8,11-12] การลดปริมาณการใช้พลังงานของระบบการอบแห้งในข้างต้นจึงเรื่องที่น่าสนใจอย่างยิ่งได้มีการประยุกต์นำเทคนิคคลื่นอัลตราซาวด์มาประยุกต์ใช้ร่วมกับกระบวนการอบแห้ง มีการศึกษาหลากหลายเกี่ยวกับการนำคลื่นอัลตราซาวด์

มาใช้ร่วมกับกระบวนการอบแห้งในการผลิตอาหารประเภทต่างๆ และมีการสภาวะที่แตกต่างกันออกไป ข้อดีของการนำเทคนิคคลื่นอัลตราซาวด์มาใช้ในการอบแห้งคือ ช่วยลดเวลาในการอบแห้งและลดอุณหภูมิการอบแห้งลง ทำให้สามารถประหยัดพลังงานลงได้ ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของการเกิดแควิเทชัน (Cavitation) ทำให้โครงสร้างของวัตถุดิบถูกทำลาย ทำให้การถ่ายโอนความร้อนเพิ่มสูงขึ้นถึงประมาณ30-60% และทำให้ปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันหรือการสลายตัวของสารลดลง [13-15]

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทบทวนผลงานวิจัยและศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์การอบแห้งด้วยเทคนิคเจตสเปาต์เต็ดเบดร่วมกับคลื่นอัลตราซาวด์ นำเสนอหลักการและทฤษฎี ศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งและประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการอบแห้ง รวมถึงคุณภาพบางอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งและศึกษาแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อทำนายจลนพลศาสตร์กระบวนการอบแห้ง

2. คุณลักษณะการอบแห้งแบบเทคนิคเจตสเปาต์เต็ดเบด



รูปที่1 เปรียบเทียบเครื่องอบแห้ง(ก)แบบสเปาต์เต็ดเบดมาตรฐานกับ (ข)แบบเจตสเปาต์เต็ดเบด [16]

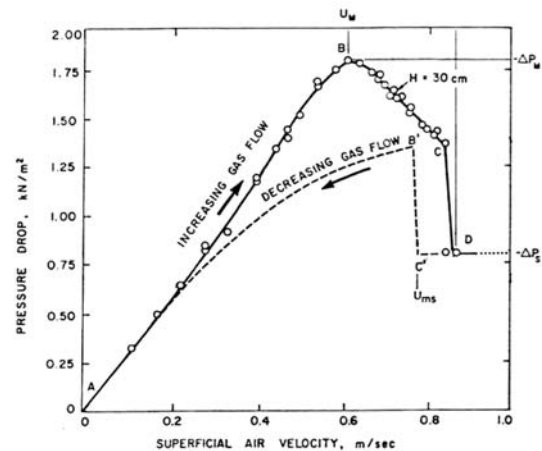
มีการพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบสเปาต์เต็ดเบดแบบใหม่ๆขึ้นหลายแบบ เครื่องทำแห้งแบบเจตสเปาต์เต็ดเบดก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งซึ่งสามารถแก้ไขปัญหาเหล่านี้ได้ เช่น อัตราการหมุนเวียนของอนุภาคมีค่าสูงขึ้น รวมทั้งการขยายตัวของเบดมีค่าสูง ส่งผลให้

ความหนาแน่นของเบตมีค่าลดลงและสัดส่วนช่องว่างของบริเวณแอนนูลัสมีค่าใกล้เคียงกับบริเวณสเปาต์ ทำให้สามารถสเปาต์อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ มีรูปทรงไม่เป็นเรขาคณิตได้ดีอัตราการถ่ายโอนความร้อนและมวลมีค่าสูง ทำให้การอบแห้งเป็นไปอย่างรวดเร็วขึ้นด้วย [6-7] ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น การอบแห้ง การเคลือบผิวของแข็ง การผสมของแข็ง เป็นต้น

2.1 คุณลักษณะทางการไหลของสเปาต์เตตเบต

โดยทั่วไปคุณลักษณะทางการไหลจะแสดงอยู่ในลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมเบตกับความเร็วก๊าซเข้าเบต เป็นการแสดงถึงความต้านทานของอนุภาคของแข็งที่มีต่อของไหลที่เป็นตัวกลางในการสเปาต์ การเปลี่ยนแปลงของเบตจะเริ่มจากเบตหนึ่งจนกระทั่งเกิดเป็นสเปาต์เตตเบตเมื่อความเร็วก๊าซมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์ที่ได้นี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและการเดินเครื่องทำแห้งในกระบวนการผลิต โดยผลิตภัณฑ์ต่างชนิดกันจะมีคุณลักษณะทางการไหลที่แตกต่างกัน [6-7] สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมเบตและความเร็วก๊าซเข้าเบต เริ่มต้นจากการปล่อยอากาศที่ความเร็วต่ำเข้าไปในห้องอบแห้ง ในช่วงแรกเบตยังคงอยู่นิ่ง แต่ความดันตกคร่อมเบตจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อความเร็วก๊าซมีเพิ่มสูงขึ้น ความสัมพันธ์ของปริมาณดังกล่าวในช่วงนี้จะเกือบเป็นเส้นตรงตามเส้น AB ในรูปที่ 2 สำหรับค่าความดันตกคร่อมเบตที่จุด B นี้จะมีค่ามากที่สุดเรียกว่าความดันตกคร่อมเบตสูงสุด(Maximum pressure drop, P_{max}) ถัดจากจุด B ความดันจะลดลงตามเส้น BC เมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นเพราะบริเวณส่วนล่างของเบตเกิดการขยายตัวขึ้น เกิดเป็นช่องว่างเล็กๆ หรือเกิดเป็นสเปาต์เล็กๆขึ้น เมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นอีก ความสูงของสเปาต์ก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ความดันตกคร่อมเบตจะลดต่ำลงเรื่อยๆ จนถึงจุด D ซึ่งเป็นจุดที่เริ่มเกิดการเป็นสเปาต์เตตเบต ค่าความดันตกคร่อมเบตที่จุดนี้เรียกว่าความดันตกคร่อมเบตขณะที่เบตมีเสถียรภาพ(Steady spouting pressure drop, P_s) เบตทั้งหมดจะมีการเคลื่อนที่และมีความคง

ตัว ถ้าเพิ่มความเร็วอากาศให้สูงกว่าจุด D ความดันตกคร่อมเบตจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อความเร็วก๊าซมีค่าลดลง ค่าความดันตกคร่อมเบตจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเส้น CB ค่าความเร็วก๊าซที่จุด B นี้ คือ ค่าความเร็วก๊าซต่ำสุดในการเกิดสเปาต์ (Minimum spouting velocity, U_{ms}) และเมื่อความเร็วก๊าซลดลงจนกระทั่งเป็นศูนย์ ความดันตกคร่อมเบตจะมีค่าต่ำลงเรื่อยๆ โดยที่เบตจะค่อยๆยุบตัวลงจนมีลักษณะเป็นเบตหนึ่ง [5,6]



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมเบตและความเร็วก๊าซเข้าเบต[6]

2.2 ความเร็วต่ำสุดในการเกิดสเปาต์ (Minimum spouting velocity)

ความเร็วของของไหลต่ำสุดที่ทำให้เกิดสเปาต์จะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของเบต ขนาดและรูปร่างของอนุภาค โดยแสดงผลอยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติดังนี้[5-6]

$$U_{ms} = \left(\frac{d_p}{D_c} \right) \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{1/3} \left(\frac{2gH_o(\rho_p - \rho_g)}{\rho_g} \right)^{1/2} \quad (1)$$

เมื่อ U_{ms} คือความเร็วต่ำสุดของอากาศที่ทำให้เกิดสเปาต์(m/s), g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก(m/s²), d_p คือเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (m), D_c คือเส้นผ่านศูนย์กลางของหอบแห้ง(m), D_i คือเส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางเข้าของอากาศเข้า(m), H_o คือความสูงเบตหนึ่ง(m), ρ_g คือ ความหนาแน่นของอากาศ(kg/m³), ρ_p คือความหนาแน่นของอนุภาค(kg/m³)

ค่าความดันลดที่เกิดสเปาต์ครั้งแรกจะมีความมากกว่าความดันลด สำหรับรักษาความเสถียรของลำสเปาต์ เพราะต้องใช้แรงดันลมร้อนสูงเพื่อเอาชนะแรงเสียดทานของวัสดุที่อยู่หนึ่งในเบด [6]

[17] สร้างสมการสำหรับคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วต่ำสุดในการเกิดสเปาต์กับรูปร่างอนุภาคในกรณีของสเปาต์เต็ดเบดรูปทรงกรวยดังนี้

$$(Re_0)_{ms} = 0.126 \times Ar^{0.5} \times \left(\frac{D_b}{D_i}\right)^{1.68} \times \left(\tan \frac{\gamma}{2}\right)^{-0.57} \quad (2)$$

เมื่อ $\tan \gamma$ คือสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานภายใน, $(Re_0)_{ms}$ คือเรย์โนลด์ส นัมเบอร์เวลาเกิดเป็นสเปาต์สมบูรณ์, Ar คือตัวเลขอาคิมิตีส

สมการสำหรับคำนวณความดันตกคร่อมเบดสูงสุด

$$\frac{\Delta P_{max}}{\Delta P_s} = 1 + 0.116 \times Ar^{0.0125} \times \left(\frac{H_o}{D_o}\right)^{1.8} \times \left(\tan \frac{\gamma}{2}\right)^{-0.8} \quad (3)$$

ΔP_{max} คือความดันตกคร่อมเบดสูงสุด(kPa), ΔP_s คือความดันตกคร่อมเบดขณะที่เบดเสถียร(kPa)

สมการสำหรับคำนวณความดันตกคร่อมของสเปาต์ขณะเสถียร

$$\frac{\Delta P_s}{H_o \rho_p g} = 0.04 \times Ar^{0.125} \times \left(\frac{H_o}{D_i}\right)^{1.1} \times \left(\tan \frac{\gamma}{2}\right)^{-0.11} \times (Re_0)_{ms}^{0.2} \quad (4)$$

[18] นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศต่ำสุดในการเกิดสเปาต์ในท่อมตัวแปรไร้มิติ ดังนี้

$$Re_{msn} = 2.8 \times 10^{-2} Ar^{0.57} \left(\frac{H_o}{D_o}\right)^{0.78} \left(\frac{D_c}{D_o}\right)^{1.27} \quad (5)$$

$$Re_{msn} = \frac{\rho_g d_p U_{ms}}{\mu_g} \quad (6)$$

$$Ar = \frac{g d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g)}{\mu_g^2} \quad (7)$$

Re_{msn} คือเรย์โนลด์ส นัมเบอร์เวลาความเร็วอากาศต่ำสุดในการเกิดสเปาต์, μ_g คือ ความหนืดของอากาศ (kg/m.s), H_o คือความสูงของเบดหนึ่ง, D_o คือเส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางเข้าของอากาศขาเข้า(m)

สมการสำหรับคำนวณความดันตกคร่อมสูงสุด

$$\frac{\Delta P_{max}}{H_o \rho_g} = 6.65 \times Ar^{-0.2} \times \left(\frac{H_o}{D_o}\right)^{1.2} \times \left(\tan \frac{\gamma}{2}\right)^{-0.5} + 1 \quad (8)$$

สมการสำหรับคำนวณสัดส่วนช่องว่างเฉลี่ย (Average bed voidage)

$$\frac{(\varepsilon - \varepsilon_o)}{(1 - \varepsilon)} = 39.7 \left(\frac{F_D}{F_G}\right)^{1.23} \left(\frac{D_c}{D_o}\right)^{3.91} \left(\frac{D_o}{H_o}\right)^{1.44} \quad (9)$$

เมื่อ F_G คือ แรงขับจากแรงโน้มถ่วง(N), F_D คือแรงขับ(Drag force, N), ε_o คือ สัดส่วนช่องว่างในเบดหนึ่ง, ε คือสัดส่วนช่องว่างในเบดเฉลี่ย

[19] นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศต่ำสุดในการเกิดสเปาต์กับท่อมตัวแปรไร้มิติในสเปาต์เต็ดเบดดังนี้

$$U_{ms} = 7.73 (\tan \gamma)^{0.72} \left(\frac{d_p}{D_c}\right)^{0.62} \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{0.155} (H_o U_{ms} g)^{1/3} \quad (10)$$

โดยที่

$$1.75 \rho_f d_p U_m^2 + 150 \mu (1 - \varepsilon_o) U_m \quad (11)$$

$$-d_p^2 \varepsilon_o^3 (\rho_s - \rho_f) g = 0$$

, ρ_f ความหนาแน่นของไหล(kg/m²) U_m คือ คือสมการที่อ้างอิงจากสมการ Ergun's packed bed

[19] ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมสูงสุด เพื่อเอาชนะแรงเสียดทานระหว่างวัสดุด้วยกัน โดยแสดงในรูปท่อมของตัวแปรไร้มิติดังนี้

$$\frac{\Delta P_m}{H_o \rho_p g} = \left[\frac{6.8}{\tan \gamma} \times \left(\frac{D_i}{d_p}\right) + 0.8 \right] - 34.4 \times \left(\frac{d_p}{H_o}\right) \quad (12)$$

เมื่อ ΔP_m คือ ความดันลดสูงสุดของสเปาต์(kPa)

และความดันตกคร่อมของสเปาต์ขณะเสถียร เป็นค่าความดันต่ำสุดเพื่อให้วัสดุในเบดยังคงรักษาสภาพการเกิดลำสเปาต์ไว้ได้มีรูปสมการดังนี้

$$\frac{\Delta P_s}{H_o \rho_p g} = \frac{1}{1 + \left(\frac{0.81 \times (\tan \gamma)^{1.5}}{\phi^2}\right) \times \left(\frac{D_c \times d_p}{D_i}\right)^{0.78} \times \left(\frac{D_c}{H_o}\right)} \quad (13)$$

เมื่อ ΔP_s ความดันตกคร่อมเบดขณะที่เบดมีเสถียรภาพ(kPa), ϕ คือ ความเป็นทรงกลมของอนุภาค

ประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของระบบแสดงได้ด้วยความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะปริมาณพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุอบแห้งโดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่(14)

[11]

$$S_{EC} = \frac{E_{fan} + E_{heater}}{M_{water}} \quad (14)$$

เมื่อ S_{EC} คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ(kWh/kg), E_{fan} คือ ปริมาณพลังงานที่ใช้ในพัดลมแรงดันสูง(kWh), E_{heater} คือ ปริมาณ พลังงาน ที่ ใช้ ใน

หลอดอินฟราเรด(kWh), M_{water} คือ ปริมาณน้ำที่ระเหย
ออกจากเนื้อวัสดุ(kg)

2.3 การประยุกต์ใช้เทคนิคเจตสเปาต์เตดเบตในการอบแห้ง

[6] ศึกษาความเป็นไปได้ในการอบแห้งกึ่งด้วย
เครื่องอบแห้งเจตสเปาต์เตดเบตตลอดจนศึกษาตัวแปร
ที่มีผลต่อปัจจัยการผลิตต่างๆ และคุณภาพของ
ผลิตภัณฑ์ได้แก่ ขนาดกึ่ง ความชื้นของกึ่ง ความสูงเบต
เริ่มต้น เป็นต้น จากการศึกษาพบว่าเมื่อกึ่งภายในเบตมี
ความชื้นลดลง จะทำให้ค่าที่บ่งบอกถึงคุณลักษณะ
ทางการไหลต่างๆ มีค่าลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าขนาด
เส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออากาศขาเข้าเบตมีผลอย่าง
มากต่อความเร็วอากาศต่ำสุดที่ต้องใช้ในการเกิดสเปาต์
และความดันลดคร่อมเบตขณะที่เบตมีเสถียรภาพ ส่วน
ความสูงเบตจะมีผลต่อความดันลดคร่อมเบตสูงที่สุดมาก
ที่สุดเมื่อเทียบกับตัวแปรอื่นๆขนาดกึ่งและอุณหภูมิใน
การอบแห้งมีผลต่อเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งและการ
ลดลงของความชื้นในตัวกึ่ง โดยสภาวะที่เหมาะสมใน
การอบแห้งกึ่งให้ได้คุณภาพที่ดี คือการใช้อุณหภูมิของ
อากาศร้อนขาเข้าคงที่ 100°C ตลอดการอบแห้ง
เนื่องจากให้ค่าร้อยละการหดตัวของกึ่งต่ำ ค่าร้อยละ
การคืนตัวสูง ค่าแรงเหวี่ยงสูงสุดมีค่าต่ำ และค่าความ
เป็นสีแดงสูง

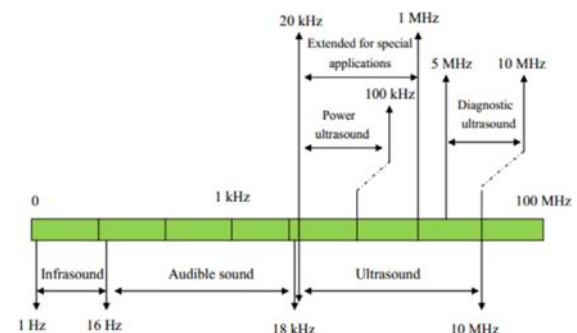
[8] ได้ประยุกต์การอบแห้งแบบเป็นจังหวะกับ
เครื่องอบแห้งแบบเจตสเปาต์เตดเบตด้วยการจ่าย
อากาศเข้าสู่ระบบเป็นเป็นช่วงและการอบแห้งต่อเนื่อง
ต่อด้วยการจ่ายอากาศเข้าสู่ระบบเป็นช่วง พร้อมกับ
ประยุกต์รังสีอินฟราเรดระยะไกลเข้ากับระบบในช่วงที่
ระบบหยุดพักการทำงาน (หรือ SV-FIR และ CSV-FIR)
ที่อุณหภูมิอบแห้ง 70 °C ซึ่งช่วยลดการใช้พลังงานใน
การอบแห้งลงได้ 31 ถึง 36%

[11] ได้ประยุกต์การอบแห้งแบบเป็นจังหวะกับ
เครื่องอบแห้งแบบเจตสเปาต์เตดเบตเพื่อประหยัด
พลังงาน ศึกษาผลกระทบตัวแปรที่มีต่อจลนพลศาสตร์
การอบแห้งพริกไทย พบว่าการอบแห้งแบบเป็นจังหวะ
และต่อเนื่องสามารถลดการใช้พลังงานได้สูงสุดถึง
30 % และการอบแห้งแบบเป็นจังหวะโดยการจ่ายอากาศ

เข้าเป็นช่วง ทำให้เมล็ดพริกไทยแตกหักน้อยที่สุดและ
การเปลี่ยนแปลงสีน้อยที่สุด

3. คลื่นอัลตราซาวด์(Ultrasound Waves)

คลื่นอัลตราซาวด์คือ พลังงานที่เกิดจากคลื่นเสียง
ที่มีการสั่นของคลื่นประมาณ 20,000 ครั้งต่อวินาทีหรือ
สูงกว่า ในช่วงความถี่ดังกล่าวมนุษย์ไม่สามารถได้ยิน
โดยทั่วไปแล้วคลื่นเสียงที่มนุษย์ได้ยินนั้นมีความถี่อยู่
ในช่วง 20-20,000Hz คลื่นเสียงผ่านเข้าสู่ตัวกลางที่
ยืดหยุ่นในลักษณะที่เป็นคลื่นตามยาว แต่คลื่นเสียงที่
ผ่านเข้าไปภายในวัตถุที่เป็นของแข็ง อาจอยู่ใน
ลักษณะที่เป็นคลื่นตามยาวหรือคลื่นตามขวาง[13]
คลื่นความถี่ของอัลตราซาวด์ในช่วงต่างๆ แสดงดังรูป
ที่ 3



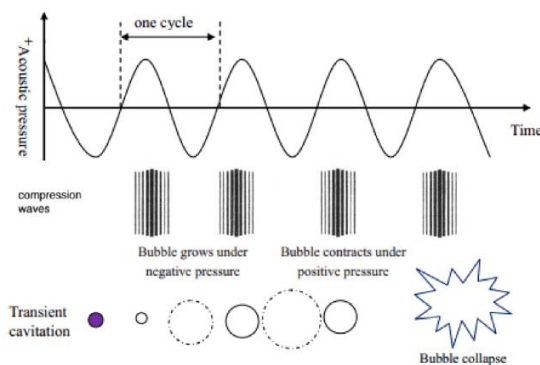
รูปที่ 3 แสดงคลื่นความถี่ของอัลตราซาวด์ที่อยู่ใน
ในช่วงต่างๆ [20]

มีการนำอัลตราซาวด์มาประยุกต์ใช้ในกระบวนการ
แปรรูปอาหาร โดยแบ่งออกได้เป็น2ประเภทได้แก่
คลื่นอัลตราซาวด์กำลังต่ำความถี่สูงใช้ในด้าน
การวิเคราะห์และการใช้คลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูงความถี่
ต่ำนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการแปรรูปอาหาร [13]
ในกระบวนการแปรรูปอาหารพบว่าได้นำคลื่นอัลตรา
ซาวด์มาช่วยในการพรีทรีตเมนต์ [21] และอบแห้งลด
ความชื้นผลผลิตทางการเกษตรต่างๆ เช่น แอปเปิ้ล
[14,22] เนื้อวัวและเนื้อไก่ [15] แครอท เปลือกมะนาว
[23] ราสเบอร์รี่ [24] สตรอว์เบอร์รี่ [25] เป็นต้น

3.1 ปรากฏการณ์แควิตีชัน (Cavitation)

ปรากฏการณ์แควิตีชันเป็นกระบวนการที่
เกิดขึ้นในตัวกลางที่ได้รับคลื่นเสียงอัลตราซาวด์โดย
ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมีและทาง

กายภาพ เนื่องมาจากฟองอากาศที่เกิดขึ้น ซึ่งการที่ฟองอากาศเกิดขึ้นได้นั้นเนื่องมาจากโครงสร้างของของเหลวที่ได้รับคลื่นอัลตราซาวด์จะถูกบีบอัดและคลายตัวซ้ำไปมาเป็นจำนวนหลายพันรอบ ทำให้เกิดฟองอากาศขึ้น [26] แสดงดังรูปที่ 4 และฟองอากาศที่เกิดขึ้นภายในของเหลวนี้จะสัมพันธ์กับแรงสั่นที่เกิดจากคลื่นอัลตราซาวด์เป็นระยะ และเกิดการแลกเปลี่ยนแก๊สระหว่างกันเป็นผลให้ฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นไปเรื่อยๆ จนกระทั่งแตกออกในที่สุด [26] แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การเกิดฟองก๊าซในตัวกลางจากคลื่นอัลตราซาวด์ [20]

ในสภาวะที่ฟองอากาศแตกนั้นพบว่าทำให้เกิดอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 5,000K และความดันสูงถึง 2,000 atm ในบริเวณ จุดที่เกิดคลื่นกระแทก [26] ทั้งนี้เนื่องมาจากในระหว่างการเกิดการขยายและหดตัวของฟองแก๊สนั้น จะเกิดสมดุลขึ้นระหว่างความดันไฮโดรเจนและภายนอกฟองแก๊สและพื้นที่ผิวของฟองแก๊สขณะขยายตัวจะมีมากกว่าพื้นที่ผิวของฟองแก๊สขณะหดตัว จึงเป็นผลให้การซึมผ่านของแก๊สในขณะที่ขยายตัวเกิดขึ้นได้มากกว่าและฟองแก๊สนี้จะขยายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนรอบความถี่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งฟองแก๊สมีขนาดเรโซแนนซ์ ซึ่งทำให้ช่องว่างภายในฟองแก๊สมีขนาดโตขึ้นอย่างรวดเร็วภายในหนึ่งรอบของการสั่น และเนื่องจากพลังงานที่ได้รับจากคลื่นอัลตราซาวด์ไม่เพียงพอในการคงสภาวะของแก๊สหรือไอ จึงทำให้เกิดการควบแน่นขึ้นทันทีทันใด โดยโมเลกุลที่ควบแน่นนั้นจะชนซึ่งกันและกันอย่างรุนแรง ทำให้เกิด

คลื่นกระแทกขึ้นและเกิดจุดหรือบริเวณเล็กๆ ที่มีอุณหภูมิและความดันที่สูงมาก [26]

3.2 การประยุกต์คลื่นอัลตราซาวด์สำหรับอบแห้ง

ได้มีการประยุกต์คลื่นอัลตราซาวด์ร่วมกับเทคนิคการอบแห้งอื่นๆ เช่น สุญญากาศ [15], แซ่แซ็ง [20], ฟลูอิดไดเบด [23], ไมโครเวฟ [24] ซึ่งผลการประยุกต์คลื่นอัลตราซาวด์ร่วมในกระบวนการอบแห้งพบว่าช่วยลดเวลาในการอบแห้ง ช่วยลดการใช้พลังงาน และลดผลกระทบต่อด้านคุณภาพผลิตภัณฑ์เนื่องจากความร้อน

[15] ประยุกต์นำคลื่นอัลตราซาวด์มาใช้ร่วมกับเครื่องอบแห้งสุญญากาศสำหรับอบแห้งเนื้อวัว และเนื้อไก่ที่อุณหภูมิ 55, 65, 75°C ผลการวิจัยพบว่า การประยุกต์นำคลื่นอัลตราซาวด์มาใช้ร่วมการอบแห้งสุญญากาศช่วยลดเวลาในการอบแห้งและลดการใช้พลังงานลง

[22] ประยุกต์นำคลื่นอัลตราซาวด์มาใช้ร่วมกับเครื่องอบแห้งลมร้อนสำหรับอบแห้งแอปเปิ้ล ที่อุณหภูมิต่ำ (10°C และ -10°C) ที่กำลังคลื่นอัลตราซาวด์ 25, 50, 75W ผลการนำคลื่นอัลตราซาวด์มาใช้ร่วมการอบแห้งพบว่า ช่วยลดเวลาในการอบแห้งได้สูงสุดถึง 80% และคุณภาพเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

[23] ประยุกต์นำเทคนิคลมร้อนร่วมกับคลื่นอัลตราซาวด์สำหรับเพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง เปลือกมะนาวและแครอทหั่นสี่เหลี่ยมลูกเต๋า สภาวะการทดลองที่อุณหภูมิลมร้อน 40°C ความเร็วลมร้อน 0.6 และ 10 m/s กำลังคลื่นอัลตราซาวด์ 25, 50 และ 75W ความถี่ของคลื่นคงที่ 21.8 kHz ซึ่งพบว่าความเร็วลมร้อน กำลังคลื่นอัลตราซาวด์และอัตราการบรรจุวัสดุมีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง เปลือกมะนาวและแครอท

4. กระบวนการอบแห้ง

กระบวนการอบแห้งโดยทั่วไปจะเกิดจากการถ่ายโอนพลังงาน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพลังงานความร้อนจากสิ่งแวดล้อมนำในวัตถุดิบ แล้วจึงเกิดการระเหยบริเวณพื้นผิว ในขณะที่เดียวกันก็จะเกิดการถ่ายโอนความร้อนจากภายในวัตถุไปยังพื้นผิวของวัตถุดิบนั้น การถ่ายโอน

พลังงานความร้อนจากสิ่งแวดล้อมไปยังวัตถุติดมีหลายรูปแบบ ทั้งการนำความร้อน การพาความร้อนหรือการแผ่รังสีความร้อน หรือเกิดร่วมกัน โดยส่วนใหญ่จะเกิดการถ่ายโอนความร้อนจากพื้นผิววัตถุติดเข้าไปภายในผิวของวัตถุติดนั้น การอบแห้งทั่วไปจะเกิดกระบวนการใหญ่ ๆ 2 กระบวนการคือ [1-2,27-28]

1. เกิดการระเหยของน้ำจากพื้นผิววัตถุออกไปยังสิ่งแวดล้อม โดยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของสภาวะภายนอก ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ อัตราการไหลเวียนของอากาศ พื้นผิวสัมผัสสิ่งแวดล้อม และความดัน เป็นช่วงการอบแห้งเริ่มต้นที่สำคัญเนื่องจากมีผลต่อการหดตัวของพื้นผิว ที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์

2. เกิดการเคลื่อนที่น้ำภายในวัตถุติด ซึ่งการเคลื่อนที่ของน้ำขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของวัตถุติด อุณหภูมิ และปริมาณความชื้น การเคลื่อนที่ของน้ำภายในของวัตถุติดจะเกิดขึ้นเมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิของวัตถุติด เมื่อได้รับความร้อน การเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นหลายรูปแบบ เช่น เกิดจากการแพร่ การไหลเนื่องจากแรงแคปิลารี หรือเกิดจากความแตกต่างของความดันภายในเนื่องจากการหดตัวเมื่ออบแห้ง

4.1 อัตราการอบแห้ง

การอบแห้งจะแบ่งได้เป็น 2 ช่วงคือ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ความชื้นภายในโครงสร้างของวัสดุสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วพอที่จะทำให้ผิวหน้าของวัสดุยังคงอ้อมตัวด้วยน้ำวัสดุมีอุณหภูมิกว่าที่ ความชื้นลดลงอย่างรวดเร็ว[1-2,27-28] ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง อัตราการเคลื่อนที่ของน้ำภายในโครงสร้างวัสดุมีค่าน้อยกว่าอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าวัสดุ การอบแห้งจะสิ้นสุดเมื่ออัตราการอบแห้งมีค่าลดลงเข้าใกล้ศูนย์ ความชื้นของอากาศที่อบแห้งสมดุลกับความชื้นของวัสดุ การแพร่ของความชื้นจากภายในวัสดุจะเป็นปัจจัยควบคุมอัตราการอบแห้ง การแพร่เป็นการถ่ายโอนมวลส่วนหนึ่งของระบบไปสู่อีกส่วนหนึ่งของระบบ เป็นไปตามกฎข้อแรกของฟิค(Fick's first law) สำหรับการแพร่ของสสารแสดงดังสมการนี้ [29]

$$J = -D_{eff} \left(\frac{dC}{dz} \right) \quad (15)$$

โดยที่ J คืออัตราการถ่ายโอนต่อหน่วยพื้นที่เวลา, C คือค่าความเข้มข้นต่อหน่วยปริมาตร, D_{eff} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น, z คือ ระยะทางการแพร่ของสาร

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (Moisture diffusivity, D_{eff}) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการดึงความชื้นออกมาจากวัสดุ ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อค่า D_{eff} สามารถใช้สมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) อธิบายความสัมพันธ์ดังสมการ (16)[29]

$$D_{eff} = D_o \exp \left(\frac{-E_a}{RT} \right) \quad (16)$$

เมื่อ E_a คือค่าพลังงานกระตุ้น(kJ/mol), D_o คือค่าคงที่ของการแพร่, R คือค่าคงที่ของแก๊ส(8.314kJ/kmol K), T คือ อุณหภูมิ(K)

4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการอบแห้ง

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง มีจุดประสงค์เพื่อช่วยในการออกแบบ เพิ่มประสิทธิภาพ วิเคราะห์กระบวนการการถ่ายโอนในระหว่างอบแห้ง และควบคุมกระบวนการอบแห้ง[33] การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ สมการอบแห้งชั้นบางแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ[28-29]

4.2.1 สมการอบแห้งทางทฤษฎี (Theoretical Drying Kinetic Equation)

การเคลื่อนที่ของความชื้นในวัสดุทาง การเกษตรส่วนใหญ่อยู่ในรูปของเหลว เป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น ซึ่งสมการการอบแห้งทางทฤษฎีตามกฎข้อที่สองของฟิคแสดงดังต่อไปนี้[28-29]

$$\frac{\partial M}{\partial t}(r,t) = -D_{eff} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{\eta}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right) \quad (17)$$

โดยเงื่อนไขสภาวะเริ่มต้นและขอบเขต

$$\begin{aligned} t=0, \quad 0 \leq r \leq R_p, \quad M &= M_i \\ t > 0, \quad r = R_p, \quad M &= M_e \\ t > 0, \quad r = 0, \quad \frac{\partial M}{\partial r} &= 0 \end{aligned}$$

เมื่อ M_i คือปริมาณความชื้นเริ่มต้น, M_e คือปริมาณความชื้นที่สภาวะสมดุล, η คือค่าคงที่รูปทรงวัสดุ, $\eta = 0$ สำหรับ วัสดุแบบแบน, $\eta = 1$ สำหรับ วัสดุทรงกระบอก, $\eta = 2$ สำหรับ วัสดุทรงกลม, r คือ ระยะจากเส้นผ่าศูนย์กลางไปจนถึงรัศมีวงนอกของวัสดุ, R_p คือ รัศมีของวัสดุ, M คือ ค่าความชื้น, t คือ เวลา

สำหรับวัสดุทรงกลมทำการแก้สมการที่สอดคล้องกับเงื่อนไขสภาวะเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต ได้ตั้งสมการ [29]

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left[-\frac{\pi^2 n^2 D_{eff} t}{r^2}\right] \quad (18)$$

สำหรับวัสดุทรงกระบอกยาวไม่จำกัด เขียนได้ตั้งสมการดังนี้

$$MR = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{r^2 \alpha_n^2} \exp\left[-D_{eff} \alpha_n^2 t\right] \quad (19)$$

สำหรับวัสดุทรงแบนยาวไม่จำกัด เขียนได้ตั้งสมการดังนี้

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{(2n+1)^2 D_{eff} \pi^2 t}{4L^2}\right] \quad (20)$$

4.2.2 สมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี (Semi-Theoretical Drying Kinetic Equation)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งทางทฤษฎีทำได้ยากและผลลัพธ์ที่ได้ที่ความคลาดเคลื่อนสูง เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กึ่งทฤษฎีที่ได้จากผลการทดลอง แบบจำลองกึ่งทฤษฎีพัฒนามา

จากสองกฎพื้นฐานคือ กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิกและกฎการเย็นตัวของนิวตัน [28-29]

4.2.3 สมการอบแห้งเอมพิริกัล (Empirical Drying Kinetic Equation)

สมการเอมพิริกัลคือสมการที่สร้างจากแนวโน้มข้อมูลการทดลองสำหรับวัสดุที่ซับซ้อนในช่วงอุณหภูมิ ความเร็วลมและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้งหนึ่งๆ ซึ่งพบว่าทำนายอัตราอบแห้งได้ดีแต่ข้อจำกัดที่เงื่อนไขการอบแห้งที่ต้องตรงกับสภาวะการทดลอง [28-29]

ตารางที่ 1 แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [31-34]

No	Model name	Model
1	Newton	MR=exp(-kt)
2	Page	MR=exp(-kt ⁿ)
3	Henderson and Pabis	MR=aexp(-kt)
4	Logarithmic	MR=aexp(-kt)+b
5	Modified Page	MR=exp(-kt) ⁿ
6	Two Term	MR=aexp(-k ₀ t)+baexp(-k ₁ t)
7	TwoTerm Exponential	MR=aexp(-kt)+(1-a)aexp(-kat)
8	Wang and Singh	MR=1+at+bt ²
9	Midilli et al.	MR=aexp(-kt ⁿ)+bt
10	Verma et al.	MR=aexp(-kt)+(1-a)exp(-gt)

ผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนในรูปของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพื่อความเชื่อมั่นว่าแบบจำลองที่สร้างมานั้นจะมีค่าความแม่นยำและใกล้เคียงกับผลการทดลอง ซึ่งจะพิจารณาค่าRoot mean square error(RMSE) และ Reduce chi square(χ^2)แสดงตั้งสมการ [28,31]

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (MR_{pred,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

$$\chi^2 = \frac{1}{n-p} \sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2 \quad (22)$$

เมื่อ $MR_{exp,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง, $MR_{pred,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลอง, n คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมดของกลุ่มที่ใช้วิเคราะห์, คือ ค่าคงที่ในแบบจำลอง

4.3 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

มีงานวิจัยที่ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบางผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เช่น แครอท [30], ไบมินท์ [31], สตอร์เบอร์รี่ [32], พริก [33], พริกไทย [34], แอปเปิ้ล [35], มะม่วง [36], หัวหอม [37], พริกขี้หนู [38] เป็นต้น ซึ่งแบบจำลองที่ได้จะสามารถอธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งวัสดุนั้นๆ

[39] ศึกษาจลนพลศาสตร์และพัฒนาแบบจำลองชั้นบางสำหรับเนื้อมะพร้าวด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเบต สมการของการทดลองคือความเร็วลมร้อนคงที่ 2.5 m/s อุณหภูมิอบแห้งอยู่ระหว่าง 60-120 °C ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองของ Modified Henderson and Pabis model สามารถอธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งที่ดีที่สุด $R^2 = 0.99524$ และ ค่า Effective diffusivity อยู่ระหว่าง $5.9902 \times 10^{-8} - 2.6616 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

[40] สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับอบแห้งแอปเปิ้ลด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบต ซึ่งสมการ The Page model อธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งที่ดีที่สุด โดยมีค่า $RMSE = 0.0094-0.0167$, $\chi^2 = 0.0001-0.0002$

[41] สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับอบแห้งเปลือกมะกอกด้วยเทคนิคอบแห้งอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 80, 100, 120, 140 °C พบว่าสมการ Midilli's model เป็นแบบจำลองที่อธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งเปลือกมะกอกที่ดีที่สุด $R^2 = 0.9999$ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าระหว่าง $5.958 \times 10^{-9} - 1.589 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$

4.4 คุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้งหลังการประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราซาวด์ร่วมกับกระบวนการอบแห้งอื่นๆ

การประยุกต์นำคลื่นอัลตราซาวด์มาใช้ร่วมกับกระบวนการอบแห้งส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทั้ง

ทางกายภาพและเคมี จากรายงานวิจัยพบว่าการนำคลื่นอัลตราซาวด์มาประยุกต์ใช้กับแห้งผลแอปเปิ้ลร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 10 °C ช่วยลดค่าวอเตอร์แอคทิวิตี (Water activity) ลง และช่วยลดความแข็ง (Hardness) ของแอปเปิ้ลหลังการอบแห้งลงเมื่อเปรียบกับการใช้ลมร้อนอย่างเดียว [22] เช่นเดียวกับปลาเค็ม (Salted cod) การประยุกต์คลื่นอัลตราซาวด์มาใช้ร่วมกับลมร้อนในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 10 °C ช่วยเพิ่มความแข็งของเนื้อปลาเค็มลดลงทั้งหลังการอบแห้งและหลังการคืนรูป (rehydration) [41] สำหรับแครอทมีรายงานว่า การนำคลื่นอัลตราซาวด์มาประยุกต์ร่วมกับการอบแห้งสามารถช่วยเพิ่มอัตราการคืนรูปของแครอท [42]

สำหรับคุณภาพเคมี เช่น สี ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากในการตัดสินว่าผลิตภัณฑ์อบแห้งมีคุณภาพหรือเป็นที่ยอมรับของลูกค้านั้นหรือไม่ มีรายงานว่า การนำคลื่นอัลตราซาวด์มาประยุกต์ร่วมกับการอบแห้ง ช่วยลดการเปลี่ยนแปลงสีของแครอทลง [42] เช่นเดียวกับพริกไทย [43] อีกด้านหนึ่งการใช้คลื่นอัลตราซาวด์ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของถั่วเขียว [44]

จากรายงานวิจัยจะพบว่าการประยุกต์นำคลื่นอัลตราซาวด์มาประยุกต์ใช้ร่วมกับการอบแห้งอื่นๆ นอกจากช่วยลดอุณหภูมิการอบแห้งลง ลดเวลาในการอบแห้ง ช่วยประหยัดพลังงาน และทำให้ปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันหรือการสลายตัวของสารลดลงแล้ว [13-15] ยังส่งผลดีต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทั้งทางกายภาพและเคมี ลดผลกระทบทางความร้อนต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์

5. การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการของการอบแห้งโดยการประยุกต์ใช้เทคนิคเจ็ตสเปาต์เต็ดเบตร่วมกับคลื่นอัลตราซาวด์

เครื่องอบแห้งแบบเจ็ตสเปาต์เต็ดเบต ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อลดข้อจำกัดของเครื่องอบแห้งแบบสเปาต์เต็ดเบตแบบเก่า และได้นำไปประยุกต์ใช้กับการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรหลายชนิดในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งผลการอบแห้งที่ได้ก็เป็นที่น่าพอใจ เมื่อพิจารณาในด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ แต่หากพิจารณาในแง่ของประสิทธิภาพการใช้พลังงานแล้ว การอบแห้งด้วยเครื่อง

เจตสเปาต์เต็ดเบดมีประสิทธิภาพอยู่ในเกณฑ์ต่ำ การหาแนวทางในการลดปริมาณการใช้พลังงานของระบบการอบแห้งในข้างต้นจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจ การประยุกต์นำเทคนิคคลื่นอัลตราซาวด์มาประยุกต์ใช้ร่วมกับกระบวนการอบแห้ง ก็เป็นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจ ข้อดีของการนำเทคนิคคลื่นอัลตราซาวด์มาใช้ในกระบวนการอบแห้งคือ ช่วยลดเวลาในการอบแห้งและลดอุณหภูมิการอบแห้งลง ทำให้สามารถประหยัดพลังงานลงได้ ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของการเกิดแควิเตชัน ทำให้โครงสร้างของวัตถุถูกทำลาย ทำให้การถ่ายโอนความร้อนเพิ่มสูงขึ้นถึงประมาณ 30-60% และทำให้ปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันหรือการสลายตัวของสารลดลง จึงเป็นเรื่องน่าสนใจหากมีการประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราซาวด์ร่วมกับเทคนิคเจตสเปาต์เต็ดเบดในการอบแห้ง น่าจะส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทั้งทางกายภาพและเคมี ลดผลกระทบทางความร้อนต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ ลดเวลาในการอบแห้ง ช่วยประหยัดพลังงาน

6. สรุป

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทบทวนผลงานวิจัยและศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์การอบแห้งด้วยเทคนิคเจตสเปาต์เต็ดเบดร่วมกับคลื่นอัลตราซาวด์ ซึ่งข้อดีการนำคลื่นอัลตราซาวด์มาใช้ในกระบวนการอบแห้งคือช่วยลดเวลาในการอบแห้งและลดอุณหภูมิการอบแห้งลง ทำให้สามารถประหยัดพลังงานเพิ่มขึ้น ลดผลกระทบทางความร้อนต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ และนำเสนอหลักการและทฤษฎี ศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งและประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการอบแห้ง รวมถึงคุณภาพบางอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งและศึกษาแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อทำนายจลนพลศาสตร์กระบวนการอบแห้งช่วยให้ผู้สนใจนำไปประยุกต์ใช้และต่อยอดผลงานวิจัย หรือนำไปผสมผสานกับเทคนิคการอบแห้งแบบอื่นๆต่อไป

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้เขียนบทความวิชาการและบทความวิจัย ที่ได้ใช้อ้างอิงในบทความนี้

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Soponronnarit, "Drying seeds and certain foods," *King Mongkut's University of Technology Thonburi Press*, Bangkok, 7th Ed, 1997.
- [2] S. Suthicharoenpanich, "Paddy Drying by Two-Dimensional Spouted Bed Technique", Master of Engineering Thesis, Food Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, (1998).
- [3] A.S. Mujumdar, S. Devahastin, "Applications for fluidized bed drying," In W. C. Yang (Ed.), *Handbook of fluidization and fluid particle systems*, New York, *Marcel Dekker.*, pp. 469-484, 2003.
- [4] C. Nimmol and S. Devahastin, "Drying kinetics and quality of coconut dried in a fluidized bed dryer," *Journal of Food Engineering*, vol. 66, pp. 267–271, 2005.
- [5] K.B. Mathur and N. Epstein, "Spouted Beds", *Academic Press*, New York, pp.1-93, 1974
- [6] R. Tapaneyasin, "Study of Hydrodynamics and Drying Characteristics of a Jet Spouted Bed of Shrimp", Master of Engineering Thesis, Food Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, (2003)
- [7] S. Wachiraphansakul, "Drying of Soy Residue Using Sorbent Particles in a Jet Spouted Bed", Master of Engineering Thesis, Food Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, (2005)
- [8] K. Sathapomprasath, C. Nimmol, "Influences of Far-Infrared Radiation on the Energy Efficiency of Stepwise Jet Spouted Bed Drying

- System,” *KKU Res. J.*, vol.18(2), pp.325-343,2013.
- [9] S. Wachiraphansakul and S. Devahastin, “Drying kinetics and quality of soy residue(okara) dried in a jet spouted bed dryer,” *Drying Technology*, vol. 23, pp.1229-1242, 2005.
- [10] S. Wachiraphansakul and S. Devahastin, “Drying kinetics and quality of okara dried in a jet spouted bed of sorbent particles,” *LWT-Food Science and Technology*, vol. 40, pp. 207–219, 2007.
- [11] C. Nimmol, “Study of Stepwise Jet Spouted Bed Drying of an Agricultural Materials,” *The Journal of KMUTNB.*, vol. 20, no. 3, pp.443-456, 2010.
- [12] K. Sathapornprasath, “Intermittent batch drying for agricultural products in jet spouted bed drying,” *Srinakharinwirot University Engineering Journal*, vol. 5, no. 1, pp.50-64, 2010.
- [13] T.J. Mason, “Power ultrasound in food processing - the way forward,” in “Ultrasound in Food Processing”. Povey, M. J. W. and Mason, T. J.(eds.). *Blackie Academic & Professional*, London, pp. 105-126, 1998.
- [14] S.J. Kowalski, A. Pawlowski, “Intensification of apple drying due to ultrasound enhancement,” *J. of Food Eng.*, vol. 156, pp.1-9, 2015.
- [15] M. Başlar, M. Kılıçlı, O. S. Toker, O. Sağdıç, and M. Arici, “Ultrasonic vacuum drying technique as a novel process for shortening the drying period for beef and chicken meats,” *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, vol. 26, pp.182-190, 2014.
- [16] S. Patipamprechawut, “*Heat and Mass Transfer in Jet Spouted Bed*”, Master of Engineering Thesis, Food Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi,1995.
- [17] M. Olazar, M.J. San Jose, R. LLamosas, and J. Bilbao, “Hydrodynamics of sawdust and mixtures of wood residues in conical spouted beds,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 33, pp. 993-1000, 1994.
- [18] A. Markowski and W. Kaminski, “Hydrodynamic Characteristics of Jet Spouted Beds,” *Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 61, pp. 377-381,1983.
- [19] F. Manurang, “*Studies in the Spouted bed Technique with Particular Reference to Low Temperature Coal Carbonization*”, Ph.D. thesis, University of New South Wales, Kensington, Australia, (1964).
- [20] X. Cheng, M.Zhang ,B. Xu, B. Adhikari, J. Sun, “The principles of ultrasound and its application in freezing related processes of food materials: A review,” *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 27, pp. 576–585, 2015.
- [21] Carlos, A., Romero, J., Byron, D., Yépez, V., “Ultrasound as pretreatment to convective drying of Andean blackberry,” *Ultrasonics Sonochemistry*, vol.22, pp. 205–210, 2015.
- [22] J.V. Santacatalina, M. Contreras, S. Simal ,J.A. Cercel, and J.V. Garcia-Perez, “Impact of applied ultrasonic power on the low temperature drying of apple,” *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 28, pp.100-109, 2016.
- [23] J.V. García-Pérez, J.A. C´arcel, S. de la Fuente-Blanco, and E. Riera-Franco de Sarabia, “Ultrasonic drying of foodstuff in a fluidized bed: Parametric study,” *Ultrasonics*, vol. 44, pp.539-543, 2006.

- [24] S.J. Kowalski, A. Pawlowski, J. Szadzinska, J. Lechtanska, and M. Stasiak, "High power airborne ultrasound assist in combined drying of raspberries," *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, vol.34, pp. 225-233, 2016.
- [25] J. Gamboa-Santos, , A. Montilla, , J. A. Carcel, , M. Villamiel, and J. V. García-Perez, "Air-borne ultrasound application in the convective drying of strawberry," *Journal of Food Engineering*, vol. 128, pp.132-139, 2014.
- [26] K.S. Suslick, "Homogeneous sonochemistry," In " *Ultrasounds, its chemical, physical and biological effects*". K. S. Suslick (ed.). VCH Publishers, Inc. New York, pp.121-164, 1988.
- [27] H. Jindawattanapoom, " *Modeling of Microwave Vacuum Rotary Drum Drying of Pepper*", Master of Engineering Thesis, Food Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, (2002)
- [28] A. Boonloi, " *Cyclic drying characteristics of moist particles in a fluidized wavy walled bed*", Ph.D. Thesis, Mechanical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, (2011)
- [29] J. Srikiatden, J.S. Robert, "Moister transfer in solid food materials: a review of mechanism ,model , and measurements," *International journal of food properties*, vol.10 , pp. 69-77, 2007.
- [30] I. Doymaz, "Convective air drying characteristics of thin layer carrot," *J. Food Eng.*, vol. 61, pp. 359-364, 2004.
- [31] I. Doymaz, "Thin-layer drying behavior of mint leaves," *J. Food Eng.*, vol.74, pp.370-375, 2006.
- [32] I. Doymaz, "Convective drying kinetics of strawberry," *Chem. Eng. Process*, vol. 47, pp. 914–919, 2008.
- [33] E.K. Akpınar, Y. Bicer, C. Yildiz, "Thin layer drying of red pepper," *J. of Food Eng.*, vol. 59, pp. 99-104, 2003.
- [34] A. K. Akpınar, Y. Bicer, "Mathematical modeling of thin layer drying process of long green pepper in solar dryer and under open sun," *Energy Conversion and Management*, vol. 49, pp.1367-1375, 2008.
- [35] K. Sacilik and A.K. Elicin, "The thin layer drying characteristics of organic apple slices," *J. Food Eng.*, vol. 73, pp. 281-289, 2006.
- [36] R.K. Goyal, A.R.P. Kingsly, M.R. Manikantan, and S.M. Ilyas, "Thin-layer drying kinetics of raw mango slices," *Bio sys. Eng.*, vol. 95, no. 1, pp.43-49, 2006.
- [37] P.S. Madamba, R.H. Driscoll, and K.A. Buckle, "The thin-layer drying characteristics of garlic slices," *J. Food Eng.*, vol.29, pp.75–97, 1996.
- [38] S.M. Tasirin, S.K. Kamarudin, K. Jaafar, and K.F. Lee, "The drying kinetics of bird's chillies in a fluidized bed dryer," *J. of Food Eng.*, vol. 79, pp. 695-705, 2007.
- [39] T. Madhiyanon, A. Phila, and S. Soponronnarit, "Models of fluidized bed drying for thin-layer chopped coconut," *Applied Thermal Engineering*, vol.29, pp. 2849-2854, 2009.
- [40] K. Agnieszka, G. Krzysztof, W. Radoslaw, and C. Aneta, "Evaluation of drying models of apple (var. Ligol) dried in a fluidized bed dryer," *Energy Conversion and Management*, vol. 67, pp. 179-185, 2013.
- [41] C. Ozuna, J. A. Carcel, P. M. Walde, and J. V. García-Perez, "Low-temperature drying of salted cod (*Gadus morhua*) assisted by high

- power ultrasound: Kinetics and physical properties,” *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, vol. 23, pp.146-155, 2014.
- [42] J. Kroehnke, G. Musielak, A. Boratynska, “Convective drying of potato assisted by ultrasound,” *PhD Interdisciplinary Journal*, vol. 1, pp. 57-65, 2014.
- [43] J. Szadzinska, J. Lechtanska, S. J. Kowalski, “Microwave and ultrasonic assisted convective drying of green Pepper: Drying kinetics and quality,” *Proceedings of the 5th european drying conference Eurodrying’2015*, Budapest Hungary, pp.391-398, (2015).
- [44] M. Bantle and T. M. Eikevik, “Parametric study of high-intensity ultrasound in the atmospheric freeze drying of peas,” *Drying Technology*, vol.29, no. 10, pp. 1230-1239, 2011.