



อิทธิพลของการแผ่รังสีอินฟราเรดไกลที่มีต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบการอบแห้งด้วยเจตสเปาเต็ดเบดเป็นจังหวะ

Influences of Far-Infrared Radiation on the Energy Efficiency of Stepwise Jet Spouted Bed Drying System

กิตติ สถาพรประสาธน์^{1*} และ ฉัตรชัย นิยมมล²

Kitti Sathapornprasath^{1*} and Chatchai Nimmol²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

²ภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

*Correspondent author: kittipom@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาระบบการอบแห้งด้วยเจตสเปาเต็ดเบดเป็นจังหวะร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดไกล (FIR) ซึ่งใช้สำหรับการอบแห้งวัสดุทางการเกษตร โดยระบบการอบแห้งแบบเจตสเปาเต็ดเบดรวมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดไกลในระดับห้องปฏิบัติการจะถูกพัฒนาและทดสอบ จากนั้นได้ศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิอบแห้ง (70 80 และ 90 °C) และรูปแบบการอบแห้งเป็นจังหวะที่มีต่ออุณหภูมิการอบแห้งวัสดุทางการเกษตรซึ่งในที่นี้ได้แก่เมล็ดพริกไทยและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง รวมถึงที่มีต่อคุณภาพบางอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้ง โดยรูปแบบการอบแห้งเป็นจังหวะที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่การจ่ายอากาศ (จากพัดลมแรงดันสูง) เข้าสู่ระบบเป็นช่วง และอบแห้งต่อเนื่องต่อการจ่ายอากาศเข้าสู่ระบบเป็นช่วง ผลจากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใช้แนวคิดของการอบแห้งเป็นจังหวะร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดไกลกับการอบแห้งด้วยเจตสเปาเต็ดเบดในช่วงที่ระบบหยุดพักการทำงานสามารถลดการใช้พลังงานในการอบแห้งลงได้มาก โดยการอบแห้งแบบเป็นจังหวะด้วยการจ่ายอากาศเข้าสู่ระบบเป็นช่วงและการอบแห้งต่อเนื่องต่อการจ่ายอากาศเข้าสู่ระบบเป็นช่วง พร้อมกับประยุกต์ FIR เข้ากับระบบในช่วงที่ระบบหยุดพักการทำงาน (หรือ SV-FIR และ CSV-FIR ตามลำดับ) ที่อุณหภูมิอบแห้ง 70 °C จะช่วยลดการใช้พลังงานในการอบแห้งลงได้ 31 ถึง 36% เมื่อเทียบกับการอบแห้งต่อเนื่อง ในแง่ของคุณภาพของพริกไทย พบว่า อุณหภูมิอบแห้งถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของพริกไทย โดยพริกไทยที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงกว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงสีมากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าการแตกของเมล็ดพริกไทยระหว่างการอบแห้งเป็นจังหวะกับการอบแห้งต่อเนื่องมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

Abstract

The objective of this research was to investigate the use of drying concept combining the stepwise jet spouted bed and FIR for drying of an agricultural product. A laboratory-scale of a combined stepwise jet spouted bed and FIR drying system is developed and tested. The effects of various operating parameters, i.e., drying

temperatures (70, 80 and 90 °C), and stepwise drying patterns on the drying kinetics of a selected agricultural product (pepper grain) and energy consumption of the process as well as qualities of dried product are then investigated. In this work, stepwise supply of air velocity to the system (SV) and combination of continuous drying with stepwise drying (CSV) at different on:off periods were selected as the stepwise drying schemes. It was found from the experiments that combination of stepwise drying and FIR could reduce the energy consumption during the drying process expressed in terms of specific energy consumption (SEC). Based on the results obtained in this work it was found that energy saving in the case of combining SV drying scheme with FIR, at the drying temperature of 70 °C, was found to be around 31 to 36% compared to that of continuous drying. In terms of the dried product quality it was observed that drying temperature was the main factor influencing the color changes of the dried product. Drying at higher temperatures yielded redder and darker pepper than drying at lower temperatures. In addition, the value of broken-grain percentage of dried pepper in the case of continuous drying and stepwise drying was not significantly different.

คำสำคัญ: การอบแห้งเป็นจังหวะ การแผ่รังสีอินฟราเรดไกล ความสิ้นเปลืองพลังงาน เจตสเปาเต็ดเบด

Keywords: Stepwise drying, Far-infrared radiation, Energy consumption, Jet spouted bed

1. บทนำ

เครื่องอบแห้งแบบเจตสเปาเต็ดเบด (jet spouted bed dryer) ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ไขข้อจำกัดของเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบดแบบดั้งเดิม และได้นำไปประยุกต์ใช้กับการอบแห้งผลิตภัณฑ์อาหารและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรหลายชนิดซึ่งผลการอบแห้งที่ได้ก็อยู่ในระดับที่น่าพอใจโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อพิจารณาในแง่คุณภาพของผลิตภัณฑ์ (1, 2) อย่างไรก็ตามหากพิจารณาในแง่ของประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้งแล้ว ระบบการอบแห้งด้วยเจตสเปาเต็ดเบดยังถือเป็นระบบการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานอยู่ในเกณฑ์ต่ำ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากพัดลมแรงดันสูงและชุดทำความร้อนซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของระบบการอบแห้งดังกล่าวต้องทำงานอย่างต่อเนื่อง การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบการอบแห้งในขั้นต้น (หรืออีกนัยหนึ่งคือการลดพลังงานที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง) จึงได้มีการพัฒนารูปแบบของการอบแห้งแบบเป็นจังหวะ (stepwise drying) ซึ่งผลที่ได้จากการนำแนวคิดของการอบแห้งเป็นจังหวะไปประยุกต์ใช้กับระบบการอบแห้งต่างๆ ล้วนแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้ง

เพิ่มสูงขึ้น รวมถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งยังอยู่ในระดับที่ยอมรับได้อีกด้วย (3, 4)

การนำแนวคิดของการอบแห้งเป็นจังหวะมาประยุกต์ใช้กับระบบการอบแห้งแบบเจตสเปาเต็ดเบดเพื่อลดความชื้นวัสดุทางการเกษตรได้ถูกพัฒนาขึ้นเมื่อไม่นานมานี้ (5, 6) โดยรูปแบบการอบแห้งเป็นจังหวะที่ใช้ได้แก่การจ่ายพลังงานความร้อน (จากการทำงานของชุดทำความร้อน) และการจ่ายอากาศ (หรือความเร็วของอากาศ) เข้าสู่ระบบ (จากการทำงานของพัดลมแรงดันสูง) เป็นช่วง กล่าวคือระบบจะทำงาน (on period) และหยุดพัก (off period) สลับกันไป ผลจากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การใช้แนวคิดการอบแห้งเป็นจังหวะที่เหมาะสมกับเครื่องอบแห้งแบบเจตสเปาเต็ดเบดสามารถลดการใช้พลังงานในการอบแห้งลงสูงสุดถึง 30% เมื่อเทียบกับกรณีอบแห้งต่อเนื่อง นอกจากนี้ การอบแห้งเป็นจังหวะโดยการจ่ายอากาศเข้าสู่ระบบเป็นช่วงสามารถลดการใช้พลังงานในการอบแห้งได้มากกว่าการอบแห้งเป็นจังหวะโดยการจ่ายพลังงานความร้อนเข้าสู่ระบบเป็นช่วง อย่างไรก็ตาม ระบบการอบแห้งข้างต้นยังคงมีศักยภาพในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานได้อีก (ลดพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง) ซึ่งทำได้โดยการเพิ่มระยะเวลาที่ระบบ

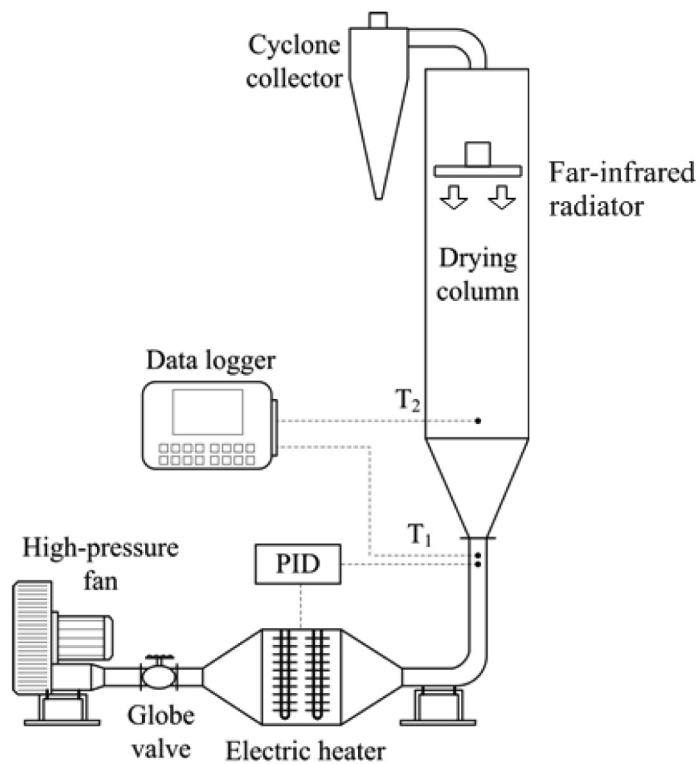
หยุดพักการทำงานให้นานขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเวลาที่ระบบทำงานจะส่งผลโดยตรงต่อการใช้พลังงานของอุปกรณ์หลักของระบบ (พัดลมแรงดันสูงและชุดทำความร้อน) แต่การที่ระบบหยุดพักการทำงานเป็นเวลานานอาจส่งผลให้ความชื้นในระบบเพิ่มขึ้นอันเนื่องจากการควบแน่นของไอน้ำในหอบแห้งซึ่งเป็นผลมาจากพลังงานความร้อนที่สะสมในผลิตภัณฑ์ที่นำมาอบแห้งลดลงในช่วงดังกล่าว ด้วยเหตุนี้ หากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานด้วยแนวคิดข้างต้นก็จำเป็นต้องรักษาระดับพลังงานสะสมในผลิตภัณฑ์ (รวมถึงในหอบแห้ง) ไม่ให้ต่ำเกินไปจนเกิดปัญหาดังกล่าว โดยแหล่งความร้อนที่ใช้เพื่อรักษาระดับพลังงานสะสมในผลิตภัณฑ์ควรเป็นแหล่งความร้อนที่ใช้พลังงานต่ำเมื่อเทียบกับการใช้พลังงานของพัดลมแรงดันสูงและชุดทำความร้อนซึ่งเป็นอุปกรณ์ใช้พลังงานหลักในระบบ หนึ่งในพลังงานที่สามารถนำมาใช้เพื่อวัตถุประสงค์ข้างต้นได้ก็คือความร้อนจากการแผ่รังสีอินฟราเรดไกล (far-infrared radiation) หรือ FIR ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากพลังงานที่ได้จากการแผ่รังสีอินฟราเรดจะถูกดูดกลืนไว้ภายในวัสดุที่นำมาอบแห้งโดยตรงโดยไม่เกิดการสูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อมดังเช่นที่เกิดกับการอบแห้งด้วยลมร้อน (7-9)

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาระบบการอบแห้งด้วยเจตสเปาเต็ดเบดเป็นจังหวะร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดไกลในระดับห้องปฏิบัติการ และได้ศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ (เช่น อุณหภูมิอบแห้ง รูปแบบการอบแห้งเป็นจังหวะ หรือการประยุกต์การแผ่รังสีอินฟราเรดไกล) ที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง (drying kinetics) และประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการอบแห้ง รวมถึงคุณภาพบางอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้ง ผลการศึกษาทั้งหมดจะนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการอบแห้งต่อเนื่องซึ่งไม่มีการประยุกต์การแผ่รังสีอินฟราเรดไกลเข้ากับระบบการอบแห้ง

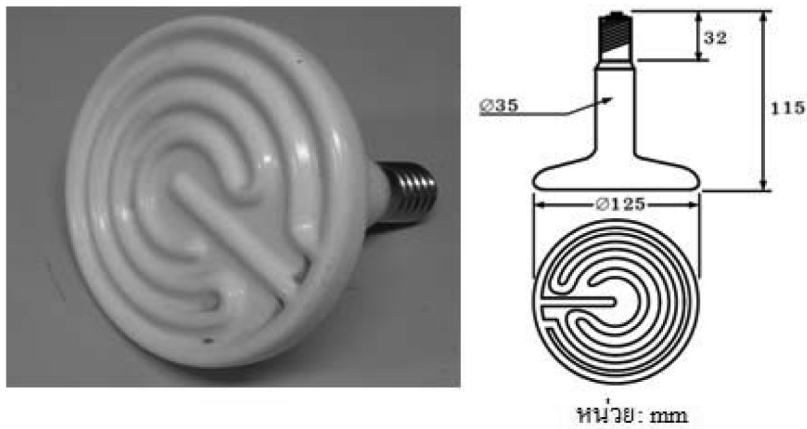
2. วิธีวิจัย

2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ระบบการอบแห้งแบบเจตสเปาเต็ดเบดเป็นจังหวะร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดไกลซึ่งแสดงดังรูปที่ 1 ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้ 1) พัดลมแรงดันสูง (high-pressure fan) (CRELEC, HB-329, Taiwan) ขนาด 2.2 kW ซึ่งทำหน้าที่ป้อนอากาศเข้าสู่ระบบ 2) โกลบวาล์ว (globe valve) ซึ่งทำหน้าที่ปรับความเร็วของอากาศที่เข้าสู่ระบบให้ได้ค่าที่เหมาะสมโดยความเร็วของอากาศจะวัดด้วยท่อปีโดท (Pitot tube) ซึ่งต่อกับอุปกรณ์ประมวลผล (TESTO, 435-4, Germany) 3) ชุดทำความร้อนด้วยไฟฟ้า (electric heater) ขนาด 15 kW ซึ่งทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศที่ใช้เป็นตัวกลางในการอบแห้ง 4) หอบแห้ง (drying column) ซึ่งทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 125 mm โดยอากาศร้อนที่ผ่านชุดทำความร้อนจะไหลเข้าหอบแห้งที่ด้านล่างผ่านช่องทางเข้าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 63 mm 5) ไซโคลนดักฝุ่น (cyclone collector) ซึ่งทำหน้าที่แยกผลิตภัณฑ์ออกจากอากาศร้อน 6) ชุดควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller) แบบ PID (SHINKO, JCS-33A, Japan) ซึ่งมีความแม่นยำในการควบคุม $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ชุดควบคุมนี้จะทำงานโดยอาศัยอุณหภูมิของอากาศที่เข้าหอบแห้ง (T_1) เป็นตัวควบคุมการทำงานของชุดทำความร้อน 7) เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (data logger) (HIOKI, 8421-52, Japan) ซึ่งใช้เพื่อบันทึกค่าอุณหภูมิของอากาศในตำแหน่งต่าง ๆ 8) เทอร์โมคัปเปิลชนิด K (type-K thermocouples) ซึ่งทำหน้าที่ส่งค่าอุณหภูมิที่วัดได้ไปเก็บไว้ที่เครื่องบันทึกอุณหภูมิ และ 9) หลอดกำเนิดรังสีอินฟราเรดไกล (far-infrared radiator) ขนาด 500 W ซึ่งทำหน้าที่ป้อนพลังงานความร้อนให้แก่วัสดุที่นำมาอบแห้งในช่วงที่ระบบหยุดพักการทำงาน (off-period) ลักษณะของหลอดกำเนิดรังสีอินฟราเรดไกลแสดงดังรูปที่ 2 ในที่นี้ได้หุ้มนวนความร้อนให้กับอุปกรณ์ของเครื่องอบแห้งแบบเจตสเปาเต็ดเบดไว้ทั้งหมดเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนให้กับอากาศแวดล้อม



รูปที่ 1. ระบบการอบแห้งด้วยเจตสเปาเต็ดเบดเป็นจังหวะร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดไกล



รูปที่ 2. ลักษณะและขนาดของหลอดกำเนิดรังสีอินฟราเรดไกล

2.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เมล็ดพริกไทยสดซึ่งมีความชื้นเริ่มต้น (initial moisture content) ประมาณ 2.56 ± 0.23 kg/kg (d.b.) (10) เป็นวัสดุตัวอย่างในการทดลองอบแห้ง และจะถูกเก็บที่อุณหภูมิ 4°C ก่อนการทดลองอบแห้งแต่ละครั้ง พริกไทยสดจะถูกนำมาผึ่งลมทิ้งไว้จนกระทั่งมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้องเพื่อหลีกเลี่ยงการควบแน่นของไอน้ำในช่วงแรกของการอบแห้ง

2.3 วิธีการทดลอง

จากการทดลองอบแห้งเป็นจังหวะโดยการจ่ายความร้อนเข้าระบบเป็นช่วงและจ่ายอากาศเข้าระบบเป็นช่วงในเบื้องต้น พบว่าการอบแห้งเป็นจังหวะโดยการจ่ายอากาศเข้าระบบเป็นช่วงจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบให้มีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับกรณีจ่ายความร้อนเข้าระบบเป็นช่วง (5) ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงใช้การอบแห้งเป็นจังหวะโดยการจ่ายอากาศเข้าระบบเป็นช่วงเท่านั้น (รวมถึงกรณีอบแห้งเป็นจังหวะร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดไกลด้วย) โดยการทดลองจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกเน้นไปที่จลนพลศาสตร์การอบแห้งพริกไทยและความเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งที่เงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ ส่วนที่สองเน้นไปที่คุณภาพทางกายภาพของพริกไทยที่ได้จากการอบแห้ง นอกจากนี้ยังนำผลที่ได้จากทั้งสองส่วนมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้กับกรณีอบแห้งต่อเนื่อง ในที่นี้จะทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิอบแห้ง (drying temperature) และรูปแบบการอบแห้งที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งเมล็ดพริกไทยและประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้ง

ในกรณีอบแห้งต่อเนื่อง (continuous) อุณหภูมิและความเร็วของอากาศที่จ่ายเข้าสู่ระบบจะมีลักษณะคงที่ (ชุดทำความร้อนและพัดลมแรงดันสูงทำงานต่อเนื่อง) ส่วนกรณีอบแห้งเป็นจังหวะ การจ่ายพลังงานความร้อน (จากการทำงานของชุดทำความร้อน) และการจ่ายอากาศ (หรือความเร็วของอากาศ) เข้าสู่ระบบ (จากการทำงานของพัดลมแรงดันสูง) จะกระทำเป็นช่วงกล่าวคือ ระบบจะทำงานและหยุดพักสลับกันไป โดยรูปแบบการอบแห้งเป็นจังหวะที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่

- อบแห้งโดยการจ่ายอากาศเข้าสู่ระบบเป็นช่วง (stepwise air velocity: SV)

- อบแห้งโดยการจ่ายอากาศเข้าสู่ระบบเป็นช่วงและในช่วงที่ระบบหยุดทำงานจะทำการจ่ายรังสีอินฟราเรดไกลเข้าระบบ (stepwise air velocity and far-infrared radiation: SV-FIR)

- อบแห้งต่อเนื่องเป็นเวลา 100 นาที จากนั้นจึงอบแห้งเป็นจังหวะโดยการจ่ายอากาศเข้าสู่ระบบเป็นช่วง (continuous-stepwise air velocity: CSV)

- อบแห้งต่อเนื่องเป็นเวลา 100 นาที จากนั้นจึงอบแห้งเป็นจังหวะโดยการจ่ายอากาศเข้าสู่ระบบเป็นช่วง และในช่วงที่ระบบหยุดทำงานจะทำการจ่ายรังสีอินฟราเรดไกลเข้าระบบ (continuous-stepwise air velocity and far-infrared radiation: CSV-FIR)

ในกรณี CSV และ CSV-FIR ซึ่งการอบแห้งเป็นไปในลักษณะต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 100 นาที นั้นเป็นผลมาจากการทดลองอบแห้งในเบื้องต้นที่พบว่า ช่วง 100 นาทีแรกของการอบแห้ง (ในทุก ๆ อุณหภูมิอบแห้งที่ใช้ในงานวิจัยนี้) ความชื้นของเมล็ดพริกไทยจะลดลงอย่างต่อเนื่อง (ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่) หมายความว่า พลังงานที่ป้อนเข้าสู่ระบบการอบแห้งถูกใช้เพื่อระเหยน้ำที่อยู่ในเมล็ดพริกไทย แต่หลังจาก 100 นาทีผ่านไป อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดพริกไทยเริ่มลดลง (เริ่มเข้าสู่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง) การป้อนพลังงานเข้าสู่ระบบการอบแห้งอย่างต่อเนื่องจึงไม่เกิดประโยชน์อีกต่อไป ดังนั้น เพื่อลดการใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้ง การอบแห้งเป็นจังหวะในกรณีนี้จึงเริ่มหลังจากการอบแห้งต่อเนื่องผ่านไปแล้ว 100 นาที

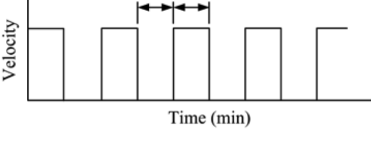
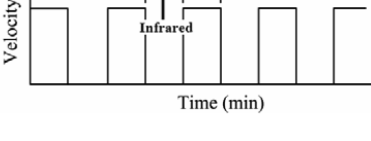
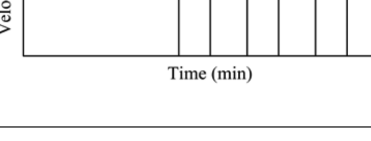
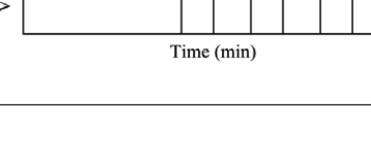
ในแต่ละรูปแบบของการอบแห้งเป็นจังหวะข้างต้นจะกำหนดให้มีอัตราส่วนระหว่างช่วงเวลาที่ระบบ (พัดลมแรงดันสูงหรือชุดทำความร้อน) ทำงานและหยุดพัก (on:off period) เท่ากับ 20:10 (ทำงาน 20 นาทีและหยุดพัก 10 นาทีสลับกันไป) และ 20:20 (ทำงาน 20 นาทีและหยุดพัก 20 นาทีสลับกันไป) ในขณะที่อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าหอบแห้งที่ใช้ (อุณหภูมิอบแห้ง) ได้แก่ 70°C 80°C และ 90°C การทดลองทั้งหมดจะกระทำโดยใช้ความสูงเบดของเมล็ดพริกไทย 250 mm ซึ่งที่ระดับความ

สูงเบดดังกล่าวจะต้องใช้ความเร็วต่ำสุดของอากาศในท่อทางเข้าหอบแห้งประมาณ 20 m/s เพื่อให้ใบของพริกไทยกระเพื่อมอย่างสม่ำเสมอ ในระหว่างการทดลองจะทำการวัดมวลของพริกไทยอย่างต่อเนื่องทุก 10 นาที ซึ่งทำได้โดยการหยุดการทำงานของระบบอบแห้งและนำเมล็ดพริกไทยที่อยู่ภายในหอบแห้งออกมาชั่งเพื่อหามวลของเมล็ดพริกไทยในแต่ละช่วงเวลา

การทดลองการอบแห้งในทุกเงื่อนไขที่กล่าวข้างต้นได้กระทำภายใต้สภาวะแวดล้อมควบคุม กล่าว

คือ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม 25 °C และ 60% ตามลำดับ ดังนั้นการทดลองจึงไม่ได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม สำหรับรูปแบบการอบแห้งที่ใช้ทั้งกรณีอบแห้งต่อเนื่องและกรณีอบแห้งเป็นจังหวะได้แสดงในตารางที่ 1 ในขณะที่การทำงานของอุปกรณ์สำหรับการอบแห้งรูปแบบต่างๆ สามารถดูได้จากตารางที่ 2

ตารางที่ 1. รูปแบบและเงื่อนไขการอบแห้งที่ใช้ในงานวิจัย

รูปแบบการอบแห้ง		เงื่อนไขการอบแห้ง	
		Temperature (°C)	on:off period (min:min)
continuous		70	-
		80	-
		90	-
SV		70	20:10
			20:20
		80	20:10
			20:20
		90	20:10
			20:20
SV-FIR		70	20:10
			20:20
		80	20:10
			20:20
		90	20:10
			20:20
CSV		70	20:10
			20:20
		80	20:10
			20:20
		90	20:10
			20:20
CSV-FIR		70	20:10
			20:20
		80	20:10
			20:20
		90	20:10
			20:20

ตารางที่ 2. การทำงานของอุปกรณ์ในระบบสำหรับการอบแห้งรูปแบบต่าง ๆ

รูปแบบการอบแห้ง	อุปกรณ์	การทำงานของอุปกรณ์	
		On period	Off period
continuous	high-pressure fan	ทำงาน	ทำงาน
	electric heater	ทำงาน	ทำงาน
	far-infrared radiator	ไม่ทำงาน	ไม่ทำงาน
SV	high-pressure fan	ทำงาน	ไม่ทำงาน
	electric heater	ทำงาน	ไม่ทำงาน
	far-infrared radiator	ไม่ทำงาน	ไม่ทำงาน
SV-FIR	high-pressure fan	ทำงาน	ทำงาน
	electric heater	ทำงาน	ไม่ทำงาน
	far-infrared radiator	ไม่ทำงาน	ทำงาน
CSV	high-pressure fan	ทำงาน	ไม่ทำงาน
	electric heater	ทำงาน	ไม่ทำงาน
	far-infrared radiator	ไม่ทำงาน	ไม่ทำงาน
CSV-FIR	high-pressure fan	ทำงาน	ไม่ทำงาน
	electric heater	ทำงาน	ไม่ทำงาน
	far-infrared radiator	ไม่ทำงาน	ทำงาน

2.4 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกไทย ระหว่างการอบแห้ง

เนื่องจากความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดพริกไทยมีความแตกต่างกันในแต่ละครั้งของการทดลอง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกไทยในระหว่างการอบแห้งจึงถูกแสดงในรูปของอัตราส่วนความชื้น (moisture ratio) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{Moisture ratio} = (M - M_0) / (M_0 - M_e) \quad (1)$$

เมื่อ M คือ ความชื้นของพริกไทยที่เวลาใด ๆ (kg/kg (d.b.)) M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้นของพริกไทย (kg/kg (d.b.)) และ M_e คือ ความชื้นสมดุลของพริกไทยในแต่ละเงื่อนไขการอบแห้ง (kg/kg (d.b.)) ซึ่งเป็นความชื้นของ

พริกไทยในสถานะที่มวลของพริกไทยไม่เปลี่ยนแปลง สำหรับการอบแห้งที่เงื่อนไขนั้น ๆ

2.5 ดัชนีวัดประสิทธิภาพการใช้พลังงานของ กระบวนการอบแห้ง

ความสิ้นเปลืองพลังงานของกระบวนการอบแห้งประกอบไปด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่พัดลมแรงดันสูงเพื่อทำให้เบดของพริกไทยกระเพื่อม พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ชุดทำความร้อนเพื่อสร้างพลังงานความร้อนให้แก่อากาศซึ่งใช้เป็นตัวกลางในการอบแห้ง และพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่หลอดกำเนิดรังสีอินฟราเรดไกล โดยความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าดังกล่าวสามารถวัดได้โดยตรงด้วยมาตรวัดหน่วยไฟฟ้า (kilowatt-hour meter)

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (specific energy consumption: SEC) ถูกใช้เป็นดัชนีบ่งชี้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้ง ค่า SEC จะแสดงให้เห็นถึงพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำ (ความชื้น) จำนวน 1 kg ออกจากผลิตภัณฑ์ที่นำมาอบแห้ง โดยค่า SEC ของกระบวนการอบแห้งสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$SEC = (E_{fan} + E_{heater} + E_{FIR}) / m_{water} \quad (2)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง (kWh/kg_{water}) E คือ พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้ง (kWh) ซึ่งประกอบด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่พัดลมแรงดันสูง ชุดทำความร้อน และหลอดกำเนิดรังสีอินฟราเรดไกล และ m_{water} คือ ปริมาณน้ำ (ความชื้น) ที่ถูกนำออกจากผลิตภัณฑ์ที่นำมาอบแห้ง (kg_{water}) ซึ่งประเมินได้จากความแตกต่างระหว่างความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ที่นำมาอบแห้ง

2.6 คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้ง

2.6.1 การเปลี่ยนแปลงสี

สีของผลิตภัณฑ์ที่นำมาอบแห้งสามารถวัดได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สีอาหาร (JUKI, JP710, Japan) ก่อนการวัดสีในแต่ละครั้ง เครื่องวิเคราะห์สีจะได้รับการสอบเทียบด้วยแผ่นสอบเทียบมาตรฐานสีขาว การวัดสีจะกระทำ 5 ตำแหน่งที่แตกต่างกันสำหรับแต่ละตัวอย่าง ในแต่ละเงื่อนไขการทดลองจะทำการวัดสีกับตัวอย่างพริกไทยจำนวน 20 ตัวอย่าง ผลที่ได้ข้างต้นจะนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากตัวอย่างผลิตภัณฑ์ก่อนอบแห้ง การเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์ทั้งกรณีความสว่าง (lightness) และความเป็นสีแดง (redness) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\Delta L/L_0 = (L - L_0)/L_0 \text{ และ } \Delta a/a_0 = (a - a_0)/a_0 \quad (3)$$

โดยที่ L และ a คือ ความสว่าง และความเป็นสีแดงของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้ง (พริกไทยแห้ง) ตามลำดับ ในขณะที่ L_0 และ a_0 คือ ความสว่าง และความเป็นสีแดงของผลิตภัณฑ์ก่อนการอบแห้ง (พริกไทยสด) ตามลำดับ

2.6.2 การแตกของเมล็ด

การวัดปริมาณการแตกของเมล็ดของพริกไทยที่ผ่านการอบแห้งด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ ทำโดยการสุ่มตัวอย่างพริกไทยที่ผ่านการอบแห้งในแต่ละเงื่อนไขจำนวนครั้งละ 30 g เพื่อมาคัดเลือกหามาเมล็ดที่แตก จากนั้นจึงนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การแตกของเมล็ดจากสมการต่อไปนี้

$$\text{การแตกหักของเมล็ด} = (m_b/m) \times 100 \quad (4)$$

โดยที่ m_b คือ มวลของเมล็ดพริกไทยที่แตก (g) และ m คือ มวลของเมล็ดพริกไทยทั้งหมด (g)

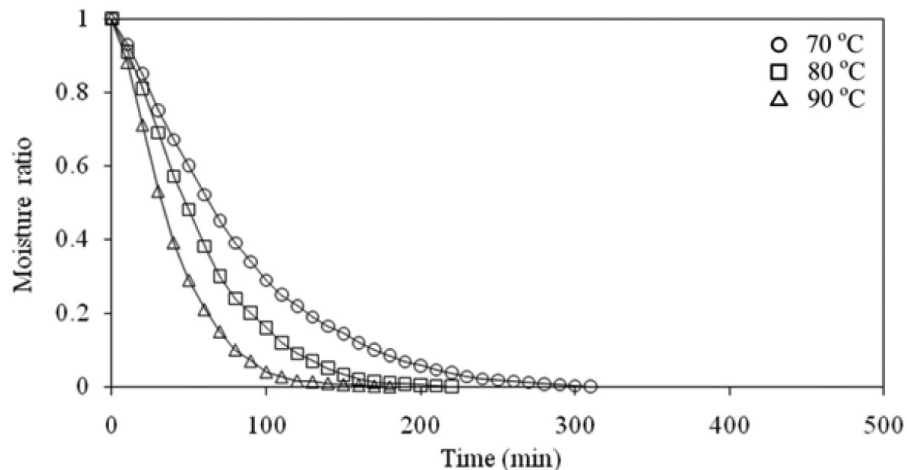
2.7 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดจะนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) โดยผลที่ได้ในแต่ละการทดลองจะแสดงในรูปของค่าเฉลี่ยซึ่งจะนำมาเปรียบเทียบความแตกต่างโดยใช้ Duncan's Test ค่าเฉลี่ยจะพิจารณาให้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อ $p = 0.05$ การทดสอบทางสถิตินี้กระทำโดยใช้โปรแกรม SPSS

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 จลนพลศาสตร์การอบแห้ง

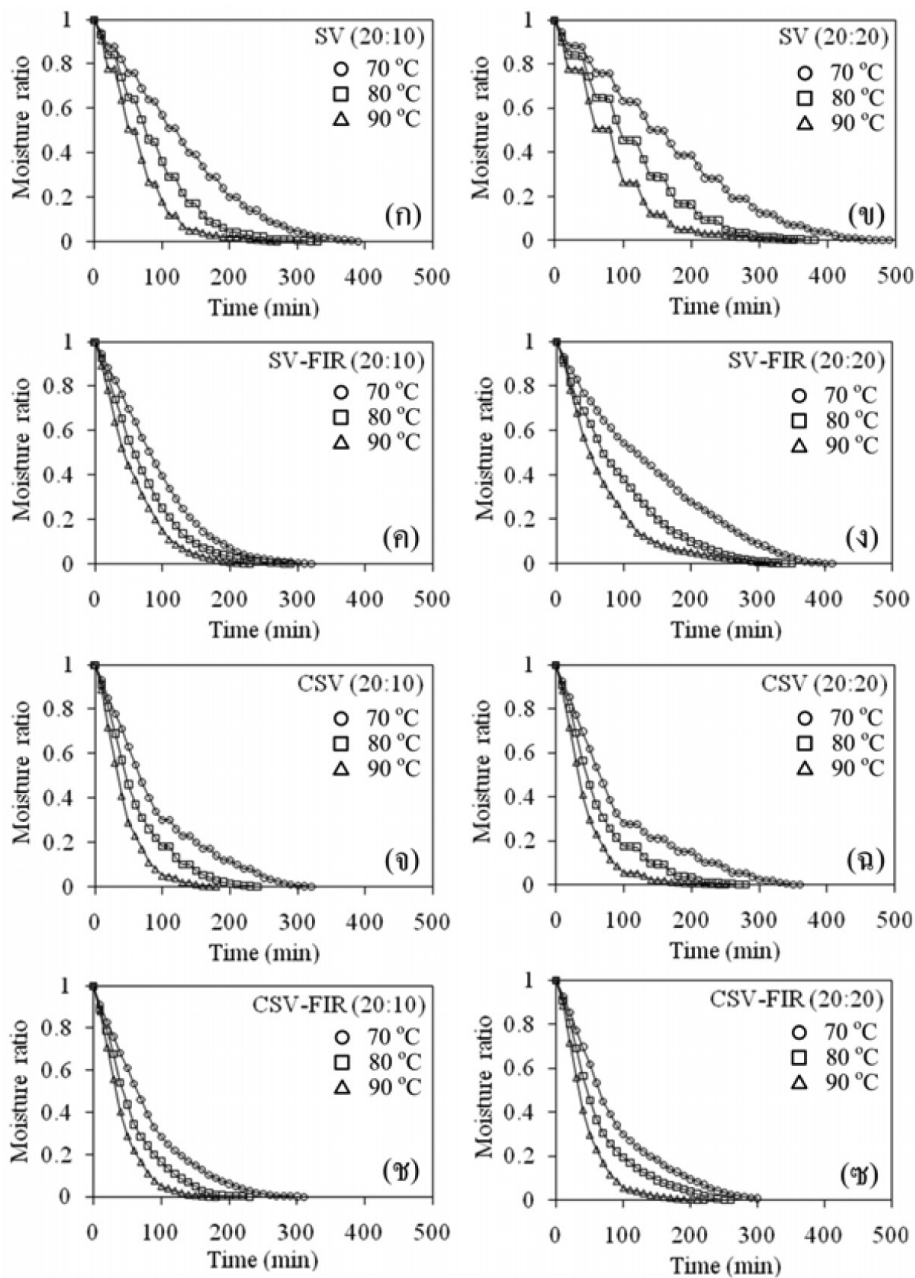
ผลกระทบของอุณหภูมิอบแห้งที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกไทยสำหรับการอบแห้งต่อเนื่องและการอบแห้งเป็นจังหวะซึ่งแสดงในเทอมของอัตราส่วนความชื้นแสดงในรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ จะเห็นว่า ในกรณีของการอบแห้งต่อเนื่อง (รูปที่ 3) การอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิสูงจะทำให้ความชื้นของพริกไทยลดลงเร็วกว่าเมื่อเทียบกับการใช้อุณหภูมิต่ำ นั่นหมายความว่าเวลารวมที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าน้อยกว่าด้วย (ดูตารางที่ 3 ประกอบ) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงจะทำให้แรงขับเคลื่อนสำหรับการถ่ายเทความร้อนมีค่ามากซึ่งส่งผลให้อัตราการถ่ายเทมวล (ความชื้น) มีค่ามากเช่นกัน (10) แนวโน้มเช่นนี้สามารถสังเกตพบได้ในกรณีอบแห้งเป็นจังหวะเช่นกัน จุดที่น่าสังเกตก็คือ อุณหภูมิอบแห้งมีอิทธิพลเป็นอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกไทยในทุกรูปแบบการอบแห้ง



รูปที่ 3. ผลกระทบของอุณหภูมิอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกไทยสำหรับการอบแห้งต่อเนื่อง

รูปที่ 4 แสดงผลกระทบของรูปแบบการอบแห้งเป็นจังหวะที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกไทย จะเห็นว่า ความชื้นของพริกไทยที่อบแห้งต่อเนื่องลดลงเร็วกว่าเมื่อเทียบกับกรณีอบแห้งเป็นจังหวะในทุกอุณหภูมิอบแห้งที่ใช้ ทั้งนี้เนื่องจากพลังงานความร้อนถูกถ่ายเทให้พริกไทยอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาอบแห้ง ลักษณะเช่นนี้จะต่างจากกรณีอบแห้งเป็นจังหวะซึ่งพลังงานความร้อนที่พริกไทยได้รับในระหว่างอบแห้งเกิดขึ้นเป็นช่วง สำหรับกรณีอบแห้งเป็นจังหวะแบบ SV (รูปที่ 4 ก ถึง 4 ง) พบว่า การเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกไทยไม่เป็นไปอย่างต่อเนื่อง แต่จะปรากฏให้เห็นช่วง

ที่ความชื้นของพริกไทยเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหรือมีค่าเกือบคงที่ซึ่งช่วงดังกล่าวสอดคล้องกับช่วงเวลาที่ระบบหยุดพักการทำงาน (พัลส์แรงดันสูงและชุดทำความร้อนไม่ทำงาน) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากพลังงานความร้อนที่สะสมในพริกไทยมีปริมาณลดลงมากในช่วงที่ไม่มีการจ่ายอากาศเข้าสู่ระบบ (อากาศเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนให้แก่พริกไทย) ส่งผลให้อุณหภูมิที่ผิวของพริกไทยลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลาดังกล่าวจนมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิอิมิตตัวของไอน้ำในอากาศขณะนั้น การควบแน่นของไอน้ำในระบบ (หอบแห้ง) จึงเกิดขึ้นซึ่งทำให้ความชื้นของพริกไทยในช่วงดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4. ผลกระทบของอุณหภูมิอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกไทยสำหรับการอบแห้งเป็นจังหวะ

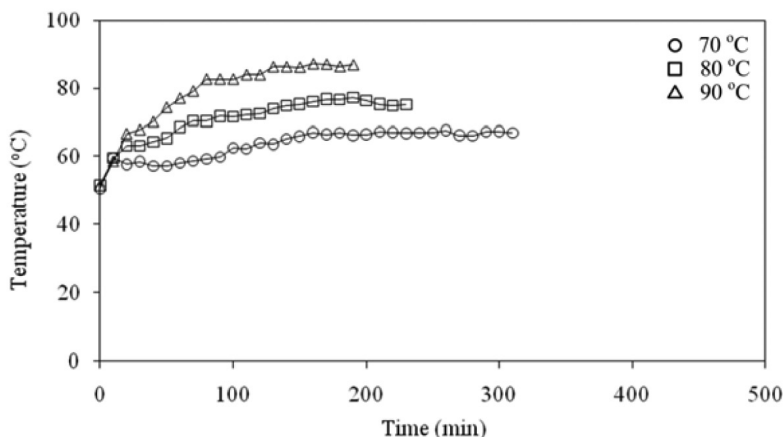
ในการฉีกรอบแห้งเป็นจังหวะแบบ CSV (รูปที่ 4จ ถึง 4ข) พบว่าการเปลี่ยนแปลงความชื้นในช่วง 100 นาทีแรกของพริกไทยมีลักษณะคล้ายกับกรณีอบแห้งต่อเนื่อง (อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นใกล้เคียงกัน) ทั้งนี้เป็นผลจากในช่วงเวลาดังกล่าว พริกไทยที่อบแห้งเป็นจังหวะแบบ CSV อยู่ภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งเหมือนกับการอบแห้งต่อเนื่อง แต่หลังจาก 100 นาทีผ่านไป ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความชื้นเริ่มแตกต่างกัน กล่าวคือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกไทยในกรณีนี้จะต่ำกว่ากรณีอบแห้งต่อเนื่อง โดยการเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกไทยในช่วงเวลาดังกล่าวมีลักษณะเช่นเดียวกับกรณีอบแห้งเป็นจังหวะแบบ SV

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนระหว่างช่วงเวลาทำงานและหยุดพัก (on:off period) ที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกไทย พบว่า การอบแห้งเป็นจังหวะ (ทั้งกรณีของ SV และ CSV) โดยให้ระบบทำงาน 20 นาทีและหยุดพัก 10 นาที (on:off period เท่ากับ 20:10) จะทำให้ความชื้นของพริกไทยลดลงได้เร็วกว่ากรณีที่ระบบทำงาน 20 นาทีและหยุดพัก 20 นาที (on:off period เท่ากับ 20:20) ทั้งนี้เป็นผลมาจากพลังงานความร้อนที่สะสมในพริกไทยสำหรับกรณี on:off period เท่ากับ 20:10 มีปริมาณมากกว่า (มีเวลาให้ความร้อนแก่พริกไทยนานกว่า) โดยผลกระทบของอัตราส่วนระหว่างช่วงเวลาทำงานและหยุดพักต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกไทยจะเด่นชัดมากในกรณีอบแห้งเป็นจังหวะแบบ SV ที่อุณหภูมิอบแห้งต่ำ (70 °C) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะพลังงานความร้อนที่จ่ายให้กับพริกไทยในกรณีดังกล่าวมีปริมาณค่อนข้างน้อย ดังนั้นระยะเวลาในการถ่ายเทความร้อนให้แก่พริกไทยจึงเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนของพริกไทย

เมื่อพิจารณาผลกระทบของการนำการแผ่รังสีอินฟราเรดไกลหรือ FIR มาใช้ในช่วงที่ระบบหยุดพักการทำงานสำหรับการอบแห้งเป็นจังหวะ (กรณี SV-FIR และ CSV-FIR) ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกไทย พบว่า ความร้อนที่ระบบ (พริกไทย) ได้รับจาก FIR ช่วยให้พลังงานความร้อนที่สะสมในระบบยังคงมีค่าสูง ส่งผลให้เกิดแรงขับเคลื่อนสำหรับการถ่ายเทความร้อนอย่าง

ต่อเนื่อง ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนออกจากพริกไทยยังสามารถดำเนินต่อไปได้ สังเกตได้จากกราฟการเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกไทยในช่วงดังกล่าวลดลง (ต่างจากกรณี SV และ CSV ที่ไม่มีการใช้ FIR ซึ่งความชื้นของพริกไทยเกือบไม่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงที่ระบบหยุดพักการทำงาน) สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่า FIR มีศักยภาพมากพอที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในครั้งนี้โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออบแห้งโดยใช้อุณหภูมิต่ำหรือใช้การอบแห้งเป็นจังหวะแบบ SV หรือมีช่วงเวลาที่ระบบหยุดพักการทำงาน (off period) นาน

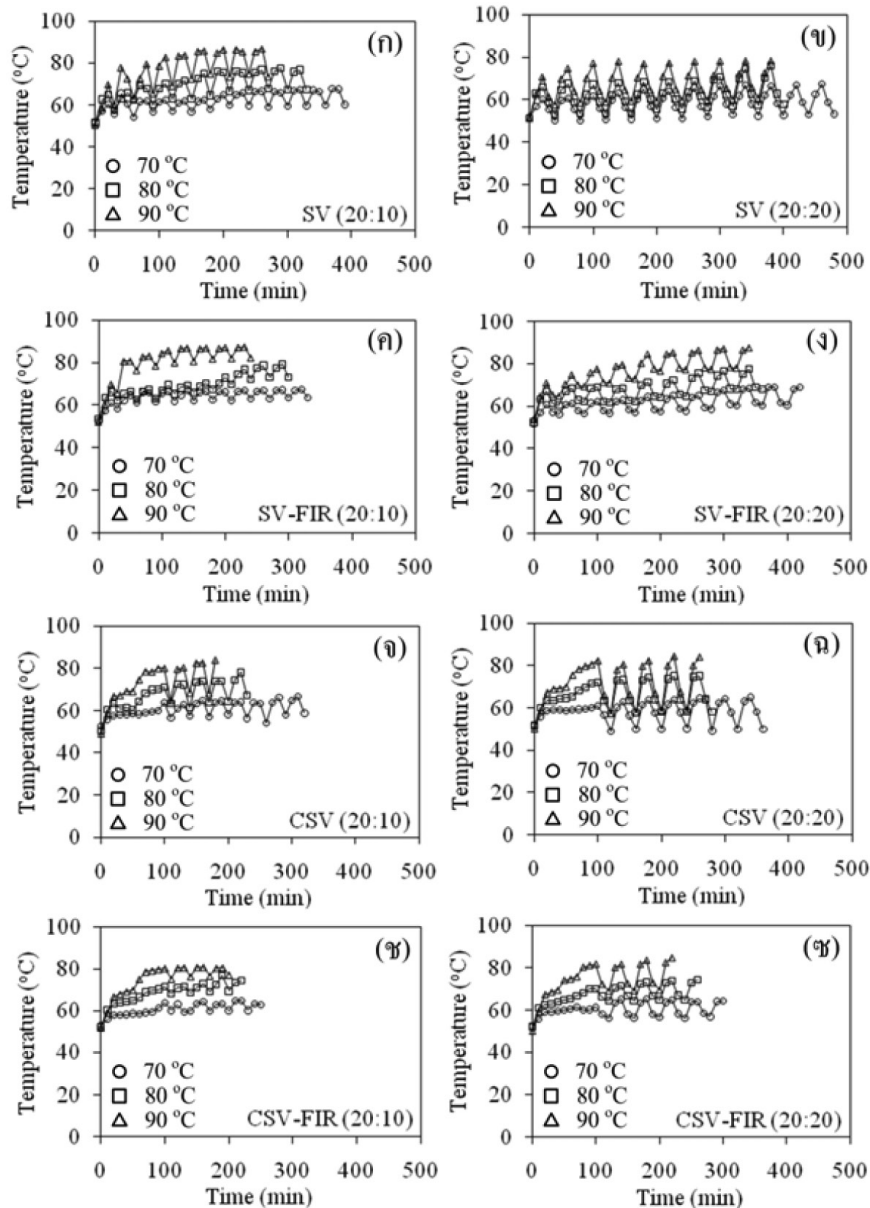
การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศภายในเบด (วัดที่ตำแหน่ง T_2 ในรูปที่ 1) สำหรับการอบแห้งต่อเนื่องและการอบแห้งเป็นจังหวะแสดงให้เห็นในรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ ในกรณีอบแห้งต่อเนื่อง (รูปที่ 5) อุณหภูมิของอากาศภายในเบดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากค่าเริ่มต้นซึ่งเป็นผลมาจากพลังงานความร้อนจากชุดทำความร้อนถูกจ่ายเข้าระบบอย่างต่อเนื่อง แต่ในกรณีการอบแห้งแบบเป็นจังหวะ (รูปที่ 6) พบว่า อุณหภูมิของอากาศภายในเบดมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดในช่วงที่ระบบหยุดการทำงาน (ช่วง off period) ปรากฏการณ์เช่นนี้เกิดขึ้นตลอดช่วงการอบแห้ง ยกเว้นการอบแห้งเป็นจังหวะแบบ CSV ที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศภายในเบดในช่วง 100 นาทีแรกของการอบแห้งมีลักษณะคล้ายกรณีการอบแห้งต่อเนื่อง (รูปที่ 6จ ถึง 6ข) ซึ่งอุณหภูมิของอากาศภายในเบดเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจากตอนเริ่มต้นของกระบวนการอบแห้ง ด้วยเหตุที่อุณหภูมิของอากาศภายในเบดเป็นตัวกำหนดระดับพลังงานความร้อนในระบบ ดังนั้นพลังงานความร้อนภายในเบดสำหรับกรณีอบแห้งต่อเนื่องจึงมีค่าสูงกว่ากรณีอบแห้งเป็นจังหวะ ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับลักษณะการเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกไทยระหว่างการอบแห้งที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ สังเกตว่า รูปแบบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศภายในเบดสำหรับการอบแห้งแบบ CSV หลังจากผ่านการอบแห้งต่อเนื่อง 100 นาทีไปแล้วจะคล้ายคลึงกับกรณี SV โดยผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดังกล่าวสอดคล้องกับลักษณะการเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกไทยระหว่างการอบแห้งที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้เช่นกัน



รูปที่ 5. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศภายในเบดสำหรับการอบแห้งต่อเนื่อง

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิของอากาศภายในเบดสำหรับกรณีอบแห้งเป็น จังหวะแบบ SV และ CSV (เฉพาะหลังจาก 100 นาที แรกผ่านไป) ซึ่งแสดงในรูปที่ 6 พบว่า ในช่วงที่ระบบ หยุดทำงาน อุณหภูมิของอากาศภายในเบดลดลงอย่าง เห็นได้ชัดซึ่งเป็นผลจากการที่พัดลมและชุดทำความร้อน หยุดทำงานพร้อมกัน โดยระดับของอุณหภูมิดังกล่าว จะลดลงมากเมื่อระยะเวลาที่ระบบหยุดทำงานเพิ่มขึ้น (20 นาที) เนื่องจากพลังงานความร้อนที่สะสมในระบบ (หรือในเมล็ดพริกไทย) ลดลงมาก เป็นผลเนื่องมาจากการสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม (แม้ว่าระบบจะถูกหุ้มด้วยฉนวนความร้อนแล้วก็ตาม) การลดลงของ

อุณหภูมิของอากาศภายในเบดระหว่างที่ระบบหยุดพัก การทำงานมีแนวโน้มลดลงหากมีการนำ FIR มาใช้ (กรณี SV-FIR และ CSV-FIR) ทั้งนี้เป็นผลมาจากพลังงานความร้อนที่ได้จาก FIR ถ่ายเทให้กับระบบ (อากาศภายในเบด และเมล็ดพริกไทย) แม้ว่าโดยทฤษฎีแล้ว อากาศมีความสามารถในการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดต่ำ (11, 12) แต่ ปรากฏการณ์ที่อุณหภูมิของอากาศภายในเบดยังมีค่า สูงอยู่เมื่อเทียบกับกรณี SV และ CSV (ไม่ใช่ FIR) อาจ เกิดจากรังสีอินฟราเรดซึ่งถูกถ่ายออกมาจากหลอดกำเนิด รังสีอินฟราเรดไกลถูกดูดกลืนโดยผนังด้านในของหอบแห้งและโดยเมล็ดพริกไทยเอง จากนั้นความร้อนดังกล่าว จึงถ่ายเทให้กับอากาศภายในเบด



รูปที่ 6. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศภายในเบดสำหรับการอบแห้งเป็นจังหวะ

3.2 ประสิทธิภาพการใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้ง

ก่อนที่จะกล่าวถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้ง ขอกล่าวถึงเวลาที่ใช้ในการอบแห้งก่อน ทั้งนี้เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการอบแห้งส่งผล

โดยตรงต่อความสิ้นเปลืองพลังงานของระบบ ตารางที่ 3 แสดงเวลาที่ใช้ในการอบแห้งซึ่งแสดงในรูปของเวลารวมที่ใช้ในการอบแห้ง (total drying time) และเวลาสุทธิที่ใช้ในการอบแห้ง (net drying time)

ตารางที่ 3. เวลาและพลังงานที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง

รูปแบบการอบแห้ง	Temperature (°C)	on:off period (min:min)	Drying time (min)		SEC (kWh/kg water)	Energy saving (%)	
			Total	Net ^a			
Continuous	70	-	310	310	20.74	-	
	80	-	230	230	15.38	-	
	90	-	180	180	12.51	-	
SV	70	20:10	390	260	18.15	12.49 ^b	
		20:20	490	250	17.84	13.98 ^b	
	80	20:10	330	220	15.44	-0.39 ^c	
		20:20	380	200	15.18	1.30 ^b	
	90	20:10	270	180	14.85	-18.71 ^c	
		20:20	350	180	14.88	-18.94 ^c	
	SV-FIR	70	20:10	320	220	13.21	36.31 ^b
			20:20	410	210	13.13	36.69 ^b
80		20:10	290	200	13.66	11.18 ^b	
		20:20	350	180	13.44	12.61 ^b	
90		20:10	230	160	12.45	0.48 ^b	
		20:20	320	160	12.48	0.24 ^b	
CSV		70	20:10	320	240	14.42	30.47 ^b
			20:20	370	230	14.97	27.82 ^b
	80	20:10	240	190	12.16	20.94 ^b	
		20:20	280	180	12.34	19.77 ^b	
	90	20:10	180	150	10.53	15.83 ^b	
		20:20	250	170	11.03	11.83 ^b	
CSV-FIR	70	20:10	310	240	14.28	31.15 ^b	
		20:20	330	240	14.11	31.97 ^b	
	80	20:10	230	190	12.10	21.33 ^b	
		20:20	260	180	12.21	20.61 ^b	
	90	20:10	180	150	10.34	17.35 ^b	
		20:20	220	160	10.35	17.27 ^b	

^a Net drying time ของทุกรูปแบบการอบแห้ง (ยกเว้นกรณีการอบแห้งต่อเนื่อง) พิจารณาจากช่วงเวลาที่พัดลมแรงดันสูงทำงาน

^b ใช้พลังงานน้อยกว่าเทียบกับกรณีอบแห้งต่อเนื่อง ^c ใช้พลังงานมากกว่าเทียบกับกรณีอบแห้งต่อเนื่อง

เมื่อพิจารณาเวลารวมที่ใช้ในการอบแห้ง พบว่าการอบแห้งต่อเนื่องใช้เวลาน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการอบแห้งเป็นจังหวะในทุกรูปแบบด้วยเหตุผลที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ เมื่อเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการอบแห้งสำหรับกรณีอบแห้งเป็นจังหวะ พบว่าการอบแห้งแบบ CSV ใช้เวลารวมน้อยกว่ากรณี SV ในทุกช่วงอุณหภูมิอบแห้งที่ใช้ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความชื้นส่วนใหญ่ได้ถ่ายเทออกจากพริกไทยไปแล้วในช่วง 100 นาทีแรกของการอบแห้งโดยการถ่ายเทพลังงานความร้อนให้แก่พริกไทยในช่วงดังกล่าวเป็นไปอย่างต่อเนื่อง (เหมือนกรณีอบแห้งต่อเนื่อง) นอกจากนี้ยังสังเกตพบว่า ความแตกต่างของเวลารวมที่ใช้สำหรับกรณี CSV ที่อบแห้งด้วยอัตราส่วนระหว่างช่วงเวลาที่ระบบทำงานและหยุดพักแตกต่างกัน (20:10 และ 20:20) มีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีอบแห้งแบบ SV โดยผลที่ได้อาจมีสาเหตุมาจากความชื้นของพริกไทยมีค่าน้อยลงมากหลังผ่านการอบแห้งต่อเนื่องเป็นเวลา 100 นาที จนกระทั่งช่วงเวลาที่ระบบหยุดพักการทำงาน (10 และ 20 นาที) ไม่ส่งผลกระทบต่ออย่างชัดเจนต่อพลังงานสะสมในพริกไทย สังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกไทยในช่วงดังกล่าวไม่แตกต่างกันมากนักโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออบแห้งด้วยอุณหภูมิสูง การใช้ช่วงเวลาที่ระบบหยุดพักการทำงานมากกว่า (20 นาที) ก็ส่งผลให้ต้องใช้เวลารวมในการอบแห้งเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีระบบหยุดพักการทำงานด้วยระยะเวลาที่สั้นกว่า (10 นาที) เมื่อทำการประยุกต์ FIR เข้ากับระบบการอบแห้งในช่วงที่ระบบหยุดพักการทำงาน (SV-FIR และ CSV-FIR) พบว่า เวลารวมที่ใช้ในการอบแห้งมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ FIR (กรณี SV และ CSV) ประเด็นนี้จะกล่าวในรายละเอียดภายหลัง

ถึงแม้ว่าเวลารวมที่ใช้ในการอบแห้งสำหรับกรณีอบแห้งต่อเนื่องน้อยกว่ากรณีอบแห้งเป็นจังหวะ แต่เวลาสุทธิที่ใช้ในการอบแห้งสำหรับกรณีอบแห้งต่อเนื่องกลับมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับกรณีอบแห้งเป็นจังหวะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้งต่ำ (70°C) ที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากรูปแบบการอบแห้งมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกไทยมากกว่าอุณหภูมิอบแห้ง การลดลงของเวลาสุทธิที่ใช้ในการอบแห้งที่กล่าว

ข้างต้นจะส่งผลโดยตรงต่อพลังงานที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง (จะกล่าวภายหลัง) การประยุกต์ FIR เข้ากับระบบในช่วงหยุดพักการทำงานมีแนวโน้มทำให้เวลาสุทธิที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าลดลงอย่างชัดเจนในกรณี SV (เปรียบเทียบระหว่างกรณี SV และ SV-FIR) ซึ่งต่างจากกรณี CSV (เปรียบเทียบระหว่างกรณี CSV และ CSV-FIR) ทั้งนี้เนื่องจากกรณี SV นั้น พลังงานความร้อนที่สะสมในระบบ (เบตของพริกไทย) ลดลงมากในระหว่างที่ระบบหยุดพักการทำงานตลอดช่วงการอบแห้งโดยสังเกตได้จากอุณหภูมิของอากาศภายในเบตซึ่งลดลงมากกว่า ส่งผลให้พลังงานความร้อนที่ได้จาก FIR ในกรณีนี้มีบทบาทมากต่อการลดลงของความชื้นของพริกไทย ลักษณะเช่นนี้ต่างจากกรณีของการอบแห้งแบบ CSV ซึ่งความชื้นของพริกไทยหลัง 100 นาทีแรกของการอบแห้งเหลือไม่มากนัก ดังนั้น อิทธิพลของ FIR ต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกไทย (ซึ่งสัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง) ในกรณีนี้จึงไม่เด่นชัด

เมื่อพิจารณาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง (SEC) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้ง (ประกอบด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่พัดลมแรงดันสูง พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ชุดทำความร้อน และพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่หลอดกำเนิดรังสีอินฟราเรดไกล และปริมาณน้ำ (ความชื้น) ที่ถูกนำออกจากพริกไทยที่นำมาอบแห้ง ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่า การอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิอบแห้งต่ำจะทำให้ SEC มีค่าสูง ซึ่งเป็นผลจากการอบแห้งด้วยเงื่อนไขดังกล่าวต้องใช้เวลาในการอบแห้งนาน ในแง่ของรูปแบบการอบแห้ง พบว่า SEC สำหรับกรณีอบแห้งเป็นจังหวะมีค่าอยู่ในช่วง 10.34 ถึง $18.15 \text{ kWh/kg}_{\text{water}}$ ซึ่งต่ำกว่าเมื่อเทียบกับกรณีอบแห้งต่อเนื่องในทุกเงื่อนไขการทดลอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ (70°C) ซึ่งต้องใช้เวลาในการอบแห้งมาก ยกเว้นกรณี SV ที่อุณหภูมิ 80 และ 90°C ที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากในการอบแห้งที่เงื่อนไขข้างต้น พลังงานความร้อนที่สะสมในพริกไทยในช่วงที่ระบบหยุดพักการทำงานจะลดลงมาก ชุดทำความร้อนจึงต้องทำงานนานขึ้น (ใช้พลังงานมากขึ้น) ในช่วงที่ระบบทำงานหรือ

on period (เมื่อเทียบกับที่ 70 °C) เพื่อให้อุณหภูมิของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้ง (อากาศร้อน) มีค่าเพิ่มขึ้นตามที่กำหนด (พลังงานความร้อนสะสมและอุณหภูมิของพริกไทยก็เพิ่มขึ้นด้วย) ผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าการอบแห้งแบบ SV ที่อุณหภูมิสูง (80 และ 90 °C) ยังคงมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานในเกณฑ์ต่ำ

เมื่อเปรียบเทียบค่า SEC ในกรณี SV และ CSV พบว่า SEC ในกรณี CSV มีค่าต่ำกว่าอย่างชัดเจนในทุกเงื่อนไขการอบแห้ง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากในกรณี CSV นั้น เวลาสุทธิตั้งใช้ในการอบแห้งมีค่าน้อยกว่าซึ่งก็ทำให้พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่พัดลมแรงดันสูงมีค่าน้อยกว่าด้วย ประกอบกับความถี่ของการหยุดพักการทำงานของระบบที่น้อยกว่า (อบแห้งต่อเนื่อง 100 นาทีไปก่อนแล้ว) การลดลงของอุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าหอบแห้งจึงน้อยกว่า ส่งผลให้พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ชุดทำความร้อนเมื่อระบบเริ่มทำงานใหม่ (เพื่อรักษาระดับอุณหภูมิของอากาศร้อนที่เข้าหอบแห้ง) มีค่าน้อยกว่าด้วยเช่นกัน นั่นหมายความว่า การอบแห้งแบบ CSV มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงกว่าการอบแห้งต่อเนื่อง รวมไปถึงการอบแห้งแบบ SV เหตุผลดังกล่าวสามารถใช้อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นสำหรับกรณีการอบแห้งเป็นจังหวะแบบ SV และ CSV ซึ่งมีการประยุกต์ใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดไกลในช่วงที่ระบบหยุดพักการทำงานด้วย

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนระหว่างช่วงเวลาที่ระบบทำงานและหยุดพักที่มีต่อค่า SEC สำหรับการอบแห้งเป็นจังหวะในทุกรูปแบบ พบว่า ค่า SEC ที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนัก ถึงแม้ว่าเวลารวมที่ใช้ในการอบแห้งจะต่างกันโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ (70 °C) แต่เมื่อเวลาสุทธิตั้งใช้ในการอบแห้งก็มีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณพลังงานที่ใช้

ดังที่กล่าวก่อนหน้านี้ว่า การประยุกต์ FIR เข้ากับระบบการอบแห้งในช่วงที่ระบบหยุดพักการทำงานช่วยให้เวลารวมที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าลดลงซึ่งส่งผล

ให้พลังงานที่ลดลงด้วยเช่นกัน โดยจากตารางที่ 3 พบว่า SEC สำหรับกรณี SV-FIR และ CSV-FIR มีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับกรณี SV และ CSV ตามลำดับ ผลกระทบของการใช้ FIR ต่อค่า SEC จะเด่นชัดมากในกรณี SV โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้งต่ำ เนื่องจาก FIR ช่วยรักษาระดับอุณหภูมิของอากาศภายในเบด (หรืออีกนัยหนึ่งคือพลังงานสะสมในระบบ) ไม่ให้ลดต่ำลงมากในช่วงที่ระบบหยุดพักการทำงาน พลังงานความร้อนที่ชุดทำความร้อนต้องจ่ายให้ระบบเมื่อระบบเริ่มต้นทำงานอีกครั้งจึงปริมาณลดลง เมื่อเทียบกับการอบแห้งต่อเนื่องแล้ว พบว่า การอบแห้งแบบ SV-FIR และ CSV-FIR โดยใช้อุณหภูมิอบแห้ง 70 °C ทั้งกรณีที่จะระบบหยุดพักการทำงาน 10 และ 20 นาที จะลดการใช้พลังงานในการอบแห้งลงได้ 31 ถึง 36% เมื่อเทียบกับกรณีอบแห้งแบบต่อเนื่อง ด้วยเหตุที่พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่หลอดกำเนิดรังสีอินฟราเรดไกลเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิของอากาศภายในเบด (พลังงานสะสมในระบบ) และจากการตรวจวัดค่าพลังงานไฟฟ้าของหลอดกำเนิดรังสีอินฟราเรดไกลในช่วงที่ระบบหยุดพักการทำงานพบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 0.4 ถึง 0.7 kWh ซึ่งถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับพลังงานความร้อนที่ระบบได้รับจากชุดทำความร้อนและพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่พัดลมแรงดันสูง (สำหรับในงานวิจัยนี้) ดังนั้นการประยุกต์ใช้ FIR ในลักษณะนี้จึงมีความเป็นไปได้และเหมาะสมแต่อย่างไรก็ตาม การพิจารณาผลกระทบของ FIR ที่มีต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งก็มีความจำเป็นอย่างยิ่ง

3.3 คุณภาพของพริกไทยที่ได้จากการอบแห้ง

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีของพริกไทยซึ่งแสดงในเทอมของ $\Delta L/L_0$ และ $\Delta a/a_0$ ภายใต้วิธีการอบแห้งและเงื่อนไขการอบแห้งต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4 ในงานวิจัยนี้ ใช้พริกไทยสดที่มีค่าความสว่างและค่าความเป็นสีแดงอยู่ในช่วง 28.61 ถึง 30.97 และ -4.55 ถึง -3.75 ตามลำดับ ผลจากการทดลองพบว่า สีของพริกไทยที่ได้จากการอบแห้งในงานวิจัยนี้คล้ำกว่าและแดงน้อยกว่าพริกไทยสด

ตารางที่ 4. การเปลี่ยนแปลงสีและการแตกของเมล็ดพริกไทยที่อบแห้งด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ

รูปแบบการอบแห้ง	Temperature (°C)	on:off period (min:min)	การเปลี่ยนแปลงสี		การแตกของเมล็ด (%)
			$\Delta L/L_0$	$\Delta a/a_0$	
Continuous	70	-	-0.123±0.003 ^b	-1.441±0.018 ^{abc}	4.69±0.11 ^c
	80	-	-0.138±0.003 ^{bc}	-1.459±0.034 ^{abcd}	4.53±0.13 ^{bc}
	90	-	-0.149±0.007 ^d	-1.628±0.080 ^d	4.33±0.12 ^b
SV	70	20:10	-0.113±0.006 ^{ab}	-1.371±0.006 ^a	2.67±0.11 ^a
		20:20	-0.114±0.004 ^a	-1.369±0.005 ^a	2.64±0.19 ^a
	80	20:10	-0.130±0.002 ^b	-1.381±0.023 ^{abc}	2.58±0.22 ^a
		20:20	-0.133±0.006 ^{bc}	-1.383±0.011 ^{ab}	2.47±0.24 ^a
	90	20:10	-0.144±0.007 ^{bc}	-1.537±0.024 ^{bcd}	2.60±0.16 ^a
		20:20	-0.149±0.012 ^{cd}	-1.544±0.012 ^{bc}	2.63±0.21 ^a
	70	20:10	-0.116±0.005 ^{ab}	-1.374±0.006 ^a	2.69±0.23 ^a
		20:20	-0.112±0.011 ^{ab}	-1.372±0.007 ^a	2.61±0.14 ^a
SV-FIR	80	20:10	-0.132±0.004 ^{bc}	-1.380±0.013 ^a	2.59±0.19 ^a
		20:20	-0.129±0.007 ^{bc}	-1.377±0.010 ^a	2.57±0.21 ^a
	90	20:10	-0.145±0.008 ^{cd}	-1.540±0.011 ^{bcd}	2.61±0.17 ^a
		20:20	-0.147±0.009 ^{cd}	-1.545±0.008 ^c	2.62±0.15 ^a
CSV	70	20:10	-0.125±0.001 ^b	-1.457±0.028 ^{bcd}	4.33±0.10 ^b
		20:20	-0.123±0.004 ^{ab}	-1.460±0.011 ^{bc}	4.37±0.18 ^b
	80	20:10	-0.140±0.003 ^{bc}	-1.482±0.036 ^{abcd}	4.58±0.18 ^{bc}
		20:20	-0.143±0.007 ^{bc}	-1.459±0.008 ^{bc}	4.61±0.21 ^{bc}
	90	20:10	-0.151±0.001 ^d	-1.641±0.018 ^d	4.21±0.03 ^b
		20:20	-0.153±0.004 ^d	-1.649±0.011 ^d	4.33±0.22 ^b
CSV-FIR	70	20:10	-0.124±0.002 ^b	-1.452±0.008 ^b	4.36±0.18 ^b
		20:20	-0.125±0.003 ^{ab}	-1.459±0.012 ^{bc}	4.39±0.22 ^b
	80	20:10	-0.142±0.008 ^{bcd}	-1.464±0.013 ^{bc}	4.54±0.10 ^{bc}
		20:20	-0.146±0.011 ^{cd}	-1.458±0.012 ^b	4.59±0.19 ^{bc}
	90	20:10	-0.153±0.004 ^{cd}	-1.644±0.008 ^d	4.31±0.14 ^b
		20:20	-0.156±0.009 ^{cd}	-1.643±0.009 ^d	4.38±0.24 ^b

ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในคอลัมน์เดียวกันหมายความว่าค่าดังกล่าวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ในกรณีของความสว่าง พบว่า ฟริกไทยที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะมีสีคล้ำกว่ากรณีอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำในทุกรูปแบบการอบแห้ง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลถูกเร่งด้วยอุณหภูมิอบแห้งที่สูง (13, 14) นอกจากนี้ ความสว่างของฟริกไทยที่อบแห้งต่อเนื่องใกล้เคียงกับความสว่างของฟริกไทยที่ได้จากการอบแห้งแบบเป็นจังหวะ นอกจากนี้ อัตราส่วนระหว่างช่วงเวลาที่ยุ่ระบบทำงานและหยุดพักการทำงาน (on:off period) ไม่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงสีของฟริกไทยในทุกรูปแบบการอบแห้ง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะระยะเวลาที่ระบบหยุดพักการทำงานที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าแตกต่างกันไม่มากพอ ในกรณีของความชื้นสีแดง แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงสีที่พบมีลักษณะเช่นเดียวกับการสีความสว่าง ตารางที่ 4 ยังแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้ FIR ในช่วงที่ระบบหยุดพักการทำงานไม่ส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงสีของฟริกไทยอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับกรณีไม่ใช้ FIR ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากความเข้มข้นในการแผ่รังสีจากหลอดกำเนิดรังสีอินฟราเรดไกลที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าไม่สูงมากนัก

ผลการวิเคราะห์การแตกของเมล็ดฟริกไทยภายใต้การอบแห้งด้วยวิธีการและเงื่อนไขต่าง ๆ สามารถดูได้จากตารางที่ 4 เช่นกัน จะเห็นว่า การแตกของเมล็ดฟริกไทยที่ได้จากการอบแห้งในงานวิจัยนี้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 2.5 ถึง 5% เมื่อเปรียบเทียบการแตกของเมล็ดฟริกไทยจากการอบแห้งทุกรูปแบบ พบว่าการอบแห้งแบบ SV จะทำให้การแตกของเมล็ดฟริกไทยน้อยกว่าการอบแห้งต่อเนื่องและการอบแห้งแบบ CSV กล่าวคือแตกหักไม่เกิน 3% ทั้งนี้เนื่องจากระยะเวลาของการกระทบกันระหว่างเมล็ดฟริกไทยระหว่างการอบแห้งแบบ SV ซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างที่เบดเกิดการกระเพื่อม (เป็นผลมาจากความเร็วของอากาศที่ถูกจ่ายเข้ามายังหอบแห้ง) มีน้อย (พัลลมหยุดทำงานในช่วง off period) ลักษณะเช่นนี้แตกต่างจากการอบแห้งต่อเนื่องหรือการอบแห้งแบบ CSV ที่มีช่วงเวลาที่เบดของฟริกไทยเกิดการกระเพื่อมยาวนานกว่า นอกจากนี้ยังพบอีกว่าการแตกของเมล็ดฟริกไทยสำหรับกรณีอบแห้งต่อเนื่องและการอบแห้งแบบ CSV มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อประยุกต์ใช้ FIR ในช่วง

ที่ระบบหยุดพักการทำงาน จะพบว่า การแตกของเมล็ดฟริกไทยมีค่าไม่ต่างจากกรณีไม่ใช้ FIR ถึงแม้ว่าอุณหภูมิอบแห้งที่ใช้จะส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงสีของเมล็ดฟริกไทยดังที่กล่าวก่อนหน้านี้ แต่กลับไม่ส่งผลต่อการแตกหักของเมล็ด ซึ่งอาจเป็นผลมาจากช่วงอุณหภูมิอบแห้งที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาและทดสอบระบบการอบแห้งวัสดุทางการเกษตรด้วยเจตสเปาเต็ดเบดเป็นจังหวะร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดไกล โดยเมล็ดฟริกไทยได้ถูกใช้เป็นตัวแทนของวัสดุทางการเกษตรในงานวิจัยนี้ ผลที่ได้จากการทดลองซึ่งประกอบไปด้วย จุลพลศาสตร์การอบแห้ง ความชื้นเปลี่ยนแปลงงานที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง รวมไปถึงคุณภาพเชิงกายภาพบางอย่างของฟริกไทยที่ผ่านการอบแห้งจะนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการอบแห้งต่อเนื่อง ผลจากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใช้แนวคิดการอบแห้งเป็นจังหวะร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดไกลกับการอบแห้งด้วยเจตสเปาเต็ดเบดอย่างเหมาะสม สามารถลดการใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้งลงได้มาก โดยการอบแห้งแบบเป็นจังหวะด้วยการจ่ายอากาศเข้าสู่ระบบเป็นเป็นช่วงและการอบแห้งต่อเนื่องด้วยการจ่ายอากาศเข้าสู่ระบบเป็นช่วง พร้อมกับประยุกต์ FIR เข้ากับระบบในช่วงที่ระบบหยุดพักการทำงาน (หรือ SV-FIR และ CSV-FIR ตามลำดับ) ที่อุณหภูมิอบแห้ง 70 °C จะช่วยลดการใช้พลังงานในการอบแห้งลงได้ 31 ถึง 36% เมื่อเทียบกับการอบแห้งต่อเนื่อง ในแง่ของคุณภาพของฟริกไทย พบว่า อุณหภูมิอบแห้งถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของฟริกไทย โดยฟริกไทยที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงกว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงสีมากกว่า สำหรับการแตกของเมล็ดฟริกไทยพบว่าเมล็ดฟริกไทยที่ได้จากการอบแห้งในงานวิจัยนี้จะมีการแตกหักอยู่ในช่วง 2.5 ถึง 5% โดยการอบแห้งแบบ SV จะทำให้การแตกของเมล็ดฟริกไทยน้อยกว่าการอบแห้งต่อเนื่องและการอบแห้งแบบ CSV กล่าวคือแตกหักไม่เกิน 3% นั้นหมายความว่า การอบแห้งเป็น

จังหวัดแบบ SV ถือเป็นวิธีการอบแห้งที่มีศักยภาพในการลดความเสียหายของพริกไทย (หรือวัสดุทางการเกษตรอื่น ๆ) อันเกิดจากการแตกหักระหว่างอบแห้งด้วยเจตสเปาเต็คเบด (7)

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และ ภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้การสนับสนุนการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- (1) Wachiraphansakul S, Devahastin S. Drying kinetics and quality of soy residue (okara) dried in a jet spouted bed dryer. *Drying Technology*. 2005; 23:1229–1242.
- (2) Wachiraphansakul S, Devahastin S. Drying kinetics and quality of okara dried in a jet spouted bed of sorbent particles. *LWT—Food Science and Technology*. 2007; 40: 207–219.
- (3) Chua KJ, Mujumdar AS, Hawlader MNA, Chou SK, Ho JC. Batch drying of banana pieces—Effect of stepwise change in drying air temperature on drying kinetics and product colour. *Food Research International*. 2001; 34: 721–731.
- (4) Thomkapanich O, Suvarnakuta P, Devahastin S. Study of intermittent low-pressure superheated steam and vacuum drying of a heat-sensitive material. *Drying Technology*. 2007; 25: 205–233.
- (5) Nimmol C. Study of stepwise jet spouted bed drying of an agricultural materials. *The Journal of KMUTNB*. 2010; 20(3): 443–456. Thai.
- (6) Sathapornprasath K. Intermittent batch drying for agricultural products in jet spouted bed drying. *Srinakharinwirot University Engineering Journal*. 2010; 5(1): 50–64. Thai.
- (7) Ginzburg AS. Application of infrared radiation in food processing. In: *Chemical and Process Engineering Series*. London: Leonard Hill; 1969.
- (8) Sandu C. Infrared radiative drying in food engineering: A process analysis. *Biotechnology Progress*. 1986; 2: 109–119.
- (9) Ratti C, Mujumdar AS. Infrared drying. In: Mujumdar AS, editor. *Handbook of Industrial Drying: Volume 1*. 2nd ed. New York: Marcel Dekker; 1995. p. 567–588.
- (10) AOAC (Association of Official Analytical Chemists). *Official Methods of Analysis*. 17th ed. Association of Official Analytical Chemists. Maryland: Gaithersburg; 2000.
- (11) Nimmol C, Devahastin S, Swasdisevi T, Soponronnarit S. Drying and heat transfer behavior of banana undergoing combined low-pressure superheated steam and far-infrared radiation drying. *Applied Thermal Engineering*. 2007; 27: 2483–2494.
- (12) Mills AF. *Basic Heat and Mass Transfer*. 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall; 1999.
- (13) Krokida MK, Maroulis ZB, Saravacos GD. The effect of the method of drying on the colour of dehydrated products. *International Journal of Food Science and Technology*. 2001; 36: 53–59.
- (14) Chua KJ, Hawlader MNA, Chou SK, Ho JC. On the study of time-varying temperature drying - Effect on drying kinetics and product quality. *Drying Technology*. 2002; 20: 1559–1577.