



การอบแห้งใบบัวบกเพื่อผลิตใบบัวบกแห้งขงต้มด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด: จลนพลศาสตร์ ความสิ้นเปลืองพลังงานและคุณภาพ

Pennywort Drying using Infrared Radiation: Drying Kinetics, Energy Consumption and Quality Aspect

ศุภวรรณ ฐิระวนิชย์กุล¹, สลิลลา ชาญชัยวิ และยุธนา ฐิระวนิชย์กุล³ *

Supawan Tirawanichakul¹*, Salinla Chanchiew² and Yutthana Tirawanichakul³*

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ. หาดใหญ่ จ. สงขลา 90112

² โรงเรียนบ้านดอนเงิน อำเภอปง สำนักงานเขตพื้นที่การศึกษาพะเยา เขต 2 จังหวัดพะเยา 56140

³ หน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีพลาสมาและพลังงาน ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ. หาดใหญ่ จ. สงขลา 90112

* Correspondent author: yutthana.t@psu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการอบแห้งใบบัวบกเพื่อผลิตเป็นใบบัวบกแห้งขงต้ม และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งใบบัวบกด้วยการแผ่รังสีได้แดง และในส่วนสุดท้ายการทดสอบทางประสาทสัมผัสและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ ช่วงอุณหภูมิอบแห้งที่เลือกใช้ในการทดสอบอยู่ระหว่าง 50-70°C กำลังของรังสีอินฟราเรดเท่ากับ 500-1,500 W ขณะที่ใบบัวบกอ้างอิงอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์ เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง การทดลองเริ่มจากใบบัวบกสดที่มีความชื้นเริ่มต้น 600 % มาตรฐานแห้ง อบแห้งจนกระทั่งใบบัวบกแห้งมีความชื้นสุดท้ายที่ 20.0 % มาตรฐานแห้ง จากผลการทดลองพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Midilli และคณะ สามารถอธิบายจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งใบบัวบกได้ดีที่สุดทุกเงื่อนไขการทดลอง เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยของแนวทางการอบแห้งต่าง ๆ ที่มีผลต่อจลนพลศาสตร์คุณภาพและความสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งใบบัวบก ผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิอบแห้ง และกำลังของรังสีอินฟราเรด ส่งผลต่อการอบแห้ง ทั้งในเรื่องของอัตราการอบแห้ง คุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง โดยพบว่า การอบแห้งใบบัวบกด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 1,500 W อุณหภูมิอบแห้ง 70°C ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด (30 นาที) และมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุด (0.31 MJ/kg of water evaporated) นอกจากนี้ในการศึกษาได้ทำการวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ใบบัวบกแห้งในรูปของชาขงต้ม โดยการประเมินทางประสาทสัมผัส พบว่า อุณหภูมิอบแห้งและกำลังรังสีอินฟราเรดมีผลต่อคุณลักษณะด้าน สี กลิ่น รสชาติ และรูปลักษณะ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) อย่างไรก็ดีใบบัวบกแห้งที่อบด้วยรังสีอินฟราเรด ที่เงื่อนไขต่าง ๆ ต่อการยอมรับทางประสาทสัมผัสโดยรวม พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

Abstract

The objectives of this research were to feasibility study of Pennywort drying for producing herbal tea and to develop of mathematical model for prediction drying kinetics of pennywort dried with infrared (IR) radiation and finally, the sensory evaluation and energy consumption were determined. The IR drying experiments were carried out at drying temperatures of 50-70°C and infrared powers of 500-1,500 W while the reference pennywort sample was dried by solar drying. To study of drying kinetic of pennywort, the initial moisture content of fresh pennywort sample was about of 600% dry-basis until the final moisture content of sample reached to 20% dry-basis. The experimental results showed that the simulated data using the Midilli et al' model was the best fitting to experimental data for all drying conditions. To determine effect of drying strategies on drying kinetics and quality of pennywort, the conclusion stated that infrared power and drying temperature relatively affected to drying pennywort such as drying kinetics, drying time, quality and specific energy consumption. The results showed that IR drying with power of 1,500 W and drying temperature of 70°C had low drying time (30 min) correlated to low specific energy consumption (0.31 MJ/kg of water evaporated). Additionally, the sensory evaluation results showed that drying temperatures and infrared power values in each drying conditions significantly affected to color, aroma, flavor and visual appearance ($p < 0.05$). However, pennywort drying with infrared radiation for all drying conditions had no significant effect to overall sensory acceptability ($p > 0.05$).

คำสำคัญ: การอบแห้ง ค่าความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงาน อัตราส่วนความชื้น คุณภาพ การแผ่รังสีอินฟราเรด

Keywords: drying, energy consumption, humidity ratio, quality, infrared radiation

1. บทนำ

ใบบัวบก (*Centella asiatica* (Linn.) Urban) หรือมีอีกชื่อที่เรียกว่า Gotu kola เป็นพืชไม้ล้มลุก มีลำต้นงอกบนผิวดิน มีราก และใบงอกตามข้อของลำต้น เป็นใบเดี่ยวรูปทรงกลม ขอบใบมีรอยหยัก ก้านใบค่อนข้างยาวเมื่อเทียบกับลำต้น สามารถพบได้ตามพื้นที่ทั่วไปในเอเชีย ถิ่นกำเนิดเดิมพบในอินโดนีเซีย อินเดีย ศรีลังกา ในประเทศไทยพบได้ทุกภาค นิยมรับประทานสด ใช้เป็นผักทานแกล้มกับอาหาร เช่น ลาบ ผักไทยและแกงเผ็ดของทางใต้ เป็นต้น ใบบัวบกประกอบไปด้วยสารสำคัญหลายชนิด เช่น สารมาดิแคสโซไซด์ซึ่งเป็นไกลโคไซด์ (Glycosides) ทำหน้าที่เป็นสารต่อต้านอนุมูลอิสระลดอัตราการเสื่อมของเซลล์และกระตุ้นการสร้างคอลลาเจน ช่วยฟาดเสมานแผล และลดการอักเสบ (1) นอกจากนี้ ใบบัวบก ยังอุดมไปด้วย วิตามินและแร่ธาตุมากมาย เช่น ไตรเทอปีนอยด์ (อะซิเอติโคไซด์) บราโมไซ บรามิโนไซ

กรดมาดิแคสซิก วิตามินเอ วิตามินบี 1 วิตามินบี 2 วิตามินบี 6 ซึ่งมีส่วนช่วย บำรุงระบบประสาท บำรุงสายตา และการทำงานของสมองได้เป็นอย่างดี และยังมีโปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน เส้นใย ฟอสฟอรัส เหล็ก และวิตามินหลายอย่าง (2) น้ำคั้นใบสด จัดเป็นเครื่องดื่มแก้กระหายน้ำ บำรุงกำลัง นอกจากนี้ยังมีประวัติการมีสรรพคุณทางยา โดยส่วนสำคัญที่ของต้นใบบัวบก คือ ใบและราก มีสรรพคุณบำรุงกำลัง บำรุงหัวใจ ช่วยลดอาการอ่อนเพลียเมื่อยล้า ขับปัสสาวะ โดยเฉพาะแก้จ้ำในอันเนื่องมาจากโดนกระแทกหรือตกจากที่สูง มีอาการเจ็บภายในลำตัว เชื่อว่าใบบัวบกช่วยบรรเทาอาการเหล่านี้ได้ทำให้เลือดมีการไหลเวียนได้มากขึ้น (1) ปัจจุบันใบบัวบกเป็นพืชสมุนไพร (Medicinal plant หรือ Herb) ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจท้องถิ่นในประเทศไทย ประกอบกับเป็นพืชที่ปลูกได้ง่ายในทุกท้องถิ่น มีราคาต่ำ และเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าและสร้างทางเลือกในการพัฒนาผลิตภัณฑ์สมุนไพร โดยเฉพาะนำมาผลิตเป็นน้ำใบบัวบกพร้อมดื่ม ใบบัวบก

แห้งและแบบชนิดผง มีการกำหนดมาตรฐานคุณภาพของผลิตภัณฑ์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.) สำหรับบับวกผงขงคิมและน้ำไปบับวก หมายเลข มผช.167/2546 และ มผช.163/2546 ตามลำดับ สำหรับไปบับวกผงขงคิมตามความหมายของ มผช. หมายถึง เครื่องคิมชนิดผง ทำจากการใช้น้ำสกัดไปบับวกแห้งหรือสด แล้วนำไปทำให้เข้มข้นผสมกับน้ำตาลทำให้แห้ง หรือทำจากไปบับวกแห้งที่คบเป็นผงบรรจุในซองเยื่อกระดาษ ในปัจจุบันมีงานวิจัยศึกษาผลของการให้ความร้อนต่อการเสื่อมสลายของสารประกอบทางเคมีที่สำคัญในไปบับวก (3-4) และการใช้ความดันสูงยิ่ง (Ultrahigh pressure) ต่อคุณภาพทางกายภาพ เคมีและจุลชีววิทยาของน้ำไปบับวก (3) และมีงานวิจัยด้านการแปรรูปน้ำไปบับวกในรูปแบบอื่น ๆ ก่อนทำผงหรือทำเป็นเจล ดังงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เรื่องการแปรรูปจากน้ำไปบับวก ด้วยวิธีป้อนความร้อนภายใต้รังสีอัลตราไวโอเลตเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดภายใต้สุญญากาศ โดยใช้อุณหภูมิอบแห้งระหว่าง 40-60°C จากนั้นทำการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด ปริมาณแคโรทีนอยด์ ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและสมบัติทางกายภาพได้แก่ค่าสี ซึ่งพบว่า การทำแห้งเจลแห้งจากน้ำไปบับวกที่อุณหภูมิ 50°C ได้ปริมาณสารแคโรทีนอยด์ในปริมาณสูงสุด (4) ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้แสดงให้เห็นว่าการลดความชื้นหรือการอบแห้งภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญต่อการคงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไว้ไม่ให้เสื่อมสภาพ (Degradation) และการเลือกใช้เทคโนโลยีอบแห้งขั้นสูง มีราคาแพง อาจไม่เหมาะต่อการขยายงานไปสู่ชุมชนระดับสหกรณ์หรืออุตสาหกรรมครัวเรือน

การอบแห้ง เป็นกระบวนการหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ถนอม และเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โดยผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการอบแห้งจะมีความชื้นลดลง ทำให้จุลินทรีย์ที่อยู่ในผลิตภัณฑ์มีอัตราการเจริญเติบโตช้าลง ผลิตภัณฑ์ไม่เน่าเสียง่าย การลดความชื้นของผลิตภัณฑ์สามารถนำเอาเทคนิคการอบแห้งด้วยพลังงานจากแหล่งต่างๆ เช่น พลังงานความร้อนจากชีวมวล คลื่นไมโครเวฟ รังสีอินฟราเรดและพลังงานลมร้อน เป็นต้น ปัจจุบันมีการนำเอารังสีอินฟราเรดมาใช้เป็นแหล่งพลังงานในการอบแห้งมากขึ้น และนำไปใช้กับวัสดุที่

แตกต่างกันไปเช่น การนำไปใช้กับการอบแห้งลำไย (5) และข้าว (6, 7) เป็นต้น เนื่องจากการใช้รังสีอินฟราเรดในการอบแห้งไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค ไม่ทำให้สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์เสียไป สามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งได้เร็วขึ้น เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้หาได้ง่าย อย่างไรก็ตาม วัสดุอาหารและเมล็ดพืชแต่ละชนิดมีลักษณะโครงสร้างทางกายภาพและลักษณะเฉพาะทางชีวภาพที่แตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อให้ได้สภาวะการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่เหมาะสมกับไปบับวกสำหรับทำไปบับวกแห้งเพื่อขงคิม และสมการทำนายจลนพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงความชื้นของไปบับวกภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งต่าง ๆ ประกอบกับการนำรังสีอินฟราเรดมาใช้เป็นแหล่งพลังงานในการลดความชื้นพืชสมุนไพร ยังมีข้อมูลค่อนข้างน้อย จึงมีความน่าสนใจศึกษา

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อทดลองการอบแห้งไปบับวกด้วยรังสีอินฟราเรด โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งได้แก่ อุณหภูมิอบแห้ง และกำลังของการแผ่รังสีอินฟราเรด ที่มีต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้งแบบเอ็มไพริคัลที่เหมาะสมขึ้นมาเพื่อใช้ทำนายจลนพลศาสตร์ดังกล่าว และวัตถุประสงค์ต่อมาเพื่อศึกษาคุณภาพของไปบับวกแห้งภายใต้เงื่อนไขอบแห้งต่าง ๆ เปรียบเทียบกันโดยพิจารณาทั้งความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้ง และคุณภาพของไปบับวกโดยการทดสอบทางประสาทสัมผัส ได้แก่ ค่าสี กลิ่น รสชาติ และรูปลักษณะ

2. วิธีวิจัย

2.1 การเตรียมตัวอย่างไปบับวก

ไปบับวกสด จัดซื้อจากตลาดสด อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา และนำมาล้างทำความสะอาดทิ้งไว้ให้สะเด็ดน้ำ ตัดให้เหลือส่วนก้านและใบ และนำตัวอย่างไปบับวกสดที่ได้ไปหาความชื้นตามมาตรฐาน AOAC (1995) (8) โดยค่าความชื้นแสดงในรูปของค่าร้อยละหรือเศษส่วนมาตรฐานแห้ง ซึ่งเป็นหน่วยที่นิยมใช้กัน ดังรายละเอียดของงานวิจัยที่ผ่านมา (7, 9, 10)

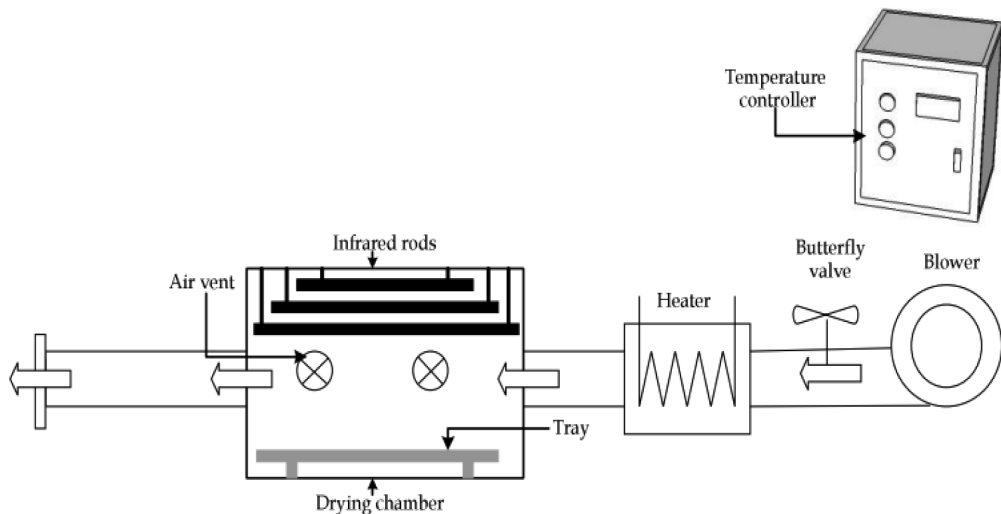
2.2 การทดลองอบแห้ง

ขั้นตอนการวิจัยดำเนินการทดลองโดยแสดงรายละเอียดเป็นขั้นตอนดังนี้

2.2.1 นำใบบัวบกที่เตรียมไว้ใส่ถาดอบแห้งขนาด $41.5 \times 4.7 \times 2 \text{ cm}^3$ จำนวน 1,000 g เกลี่ยกระจายให้ทั่วถาดในลักษณะการอบแห้งชั้นบาง (10) จากนั้นนำถาดเข้าเครื่องอบแห้งแบบถาดรายละเอียดแสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งเครื่องอบแห้งแบบถาดนี้เป็นเครื่องอบแห้งที่สามารถใช้แหล่งพลังงานความร้อนได้ 2 แหล่ง หรือใช้แหล่งพลังงานความร้อนร่วมกันจากหลอดรังสีอินฟราเรดและลมร้อนจากขดลวดไฟฟ้า ภายในตู้อบแห้งประกอบด้วยหลอดอินฟราเรดขนาด 500 W จำนวน 3 หลอด แขนงไว้ด้านบนห่างจากเนื้อวัสดุประมาณ 15 cm มีการควบคุมอุณหภูมิแบบ PID (Proportional-Integral-Derivative Controller) ค่าความถูกต้อง $\pm 0.5^\circ\text{C}$ โดยมีเทอร์โมสแตทเป็นตัวเซนเซอร์ต่อกับกล่องควบคุมอุณหภูมิ ขนาดของห้องอบแห้งเท่ากับ $48 \times 61 \times 53 \text{ cm}^3$

2.2.2 ทำการอบแห้งใบบัวบกที่ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 60% มาตรฐานแห้งอบแห้งจนกระทั่งความชื้นสุดท้ายเฉลี่ยเท่ากับ 20% มาตรฐานแห้ง โดยเงื่อนไขในการทดลองอบแห้งแบ่งเป็น 2 สภาวะคือ สภาวะที่ 1 อบแห้งใบบัวบกโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ และ สภาวะที่ 2 อบแห้งใบบัวบกโดยใช้รังสีอินฟราเรด ที่อุณหภูมิอบแห้ง 50, 60 และ 70°C กำลังรังสีอินฟราเรด 500, 1,000 และ 1,500 W ตามลำดับ รวมสองสภาวะการอบแห้งทั้งสิ้นเป็น 10 เงื่อนไขการทดลอง

2.2.3 ในระหว่างทำการทดลองจดบันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและอุณหภูมิอบแห้งทุก 5 นาที เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นบันทึกค่าทุก 10 นาที โดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักยี่ห้อ Sartorius (Model B342025 Japan) ค่าความละเอียด $\pm 0.01 \text{ g}$ และใช้เครื่องบันทึกสัญญาณยี่ห้อ Supcon (Model MX100 China) ความละเอียด $\pm 0.01^\circ\text{C}$ ต่อกับเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ในการวัดอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งหลายตำแหน่ง อุณหภูมิแวดล้อมในรูปอุณหภูมิกะเปาะเปียกและอุณหภูมิกะเปาะเปียก



รูปที่ 1. เครื่องอบแห้งแบบถาดพลังงานความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรด และขดลวดความร้อนไฟฟ้า

2.3 การวิเคราะห์ผล

ในงานวิจัยนี้ทำการทดลองอบแห้งใบบัวบก ที่ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 600% มาตรฐานแห้ง และอบแห้งจนมีความชื้นสุดท้าย 20.0±2% มาตรฐานแห้ง โดยความชื้นของผลิตภัณฑ์คำนวณตามสมการข้างล่างเมื่อนำตัวอย่างไปอบแห้งหาความชื้นตามมาตรฐานของ AOAC (8)

$$MC = \frac{W_t - W_d}{W_d} \times 100 \tag{1}$$

โดย MC คือ ความชื้นมีหน่วยเป็น % มาตรฐานแห้ง (dry-basis, d.b.)

W_t, W_d คือน้ำหนักตัวอย่างที่เวลาใด ๆ และน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง ตามลำดับ มีหน่วยเป็นกรัม (g)

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งใบบัวบกหรือการเปลี่ยนแปลงความชื้นในใบบัวบก จะอยู่ในรูปของอัตราส่วนความชื้น (moisture ratio, MR) โดยนิยามดังสมการ

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \tag{2}$$

และสามารถหาอัตราส่วนความชื้นได้ในรูปสมการ

$$MR = \frac{M_t}{M_{in}} \tag{3}$$

โดย M_{in}, M_t และ M_{eq} คือ ความชื้นเริ่มต้น ความชื้นที่เวลาใด ๆ และความชื้นสมดุล ตามลำดับ เป็น % มาตรฐานแห้ง (d.b.)

การคำนวณค่าอัตราส่วนความชื้นในงานวิจัยนี้เลือกใช้สมการอัตราส่วนความชื้นในรูปแบบสมการที่ (3) หลังเนื่องจากค่า ความชื้นสมดุลยังไม่ได้มีปรากฏในรายงานวิจัยใด และโดยปกติค่าความชื้นสมดุลจะมีค่า

น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้น การหาอัตราส่วนความชื้นในสมการที่ (3) จึงมีการนำมาใช้ในหลาย ๆ งานวิจัยที่ผ่านมา (10)

2.4 จลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง

วิเคราะห์สมการอบแห้งชั้นบางของใบบัวบก โดยนำอัตราส่วนความชื้นที่เวลาใด ๆ จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับสมการอบแห้งชั้นบางที่ใช้สำหรับทำนายค่าความชื้น 5 สมการ คือ สมการ Newton (9) สมการPage (10) สมการHenderson และ Pabis (11) สมการ Logarithmic (12) และสมการ Midilli และคณะ (13) โดยมีรูปแบบสมการอบแห้งชั้นบางเป็นฟังก์ชันกับเวลา แสดงดังตารางที่ 1 ผลการทดลองค่าความชื้นที่เวลาใด ๆ ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น(nonlinear regression analysis) และหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสมการการอบแห้งชั้นบางโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งมีดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายของสมการ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R²) และ ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (root mean square: RMSE)โดยที่ R² และRMSE มีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i})^2 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i})^2}{(N - n)}} \tag{4}$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \tag{5}$$

โดย $MR_{exp,i}$ และ $MR_{pre,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง และ จากแบบจำลอง ตามลำดับ N คือ จำนวนข้อมูล

ตารางที่ 1. รูปแบบสมการรอบแห้งชั้นบาง

Model No.	Model name	Model equation	
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$	(6)
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	(7)
3	Henderson & Pabis	$MR = a(\exp(-kt))$	(8)
4	Logarithmic	$MR = a(\exp(-kt)) + b$	(9)
5	Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	(10)

หมายเหตุ MR คือ ค่าอัตราส่วนความชื้น หากจากสมการ $MR = \frac{M_t}{M_{in}}$ เป็นเทอมไม่มีหน่วย

t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง มีหน่วยเป็นนาที

k, n, a และ b คือ ค่าคงที่ใด ๆ ซึ่งสามารถหาได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear regression analysis)

2.5 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง (specific energy consumption, SEC) คือ อัตราส่วนระหว่างในปริมาณพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุอบแห้ง สำหรับการทดลองทุกเงื่อนไขการทดลองอบแห้งในบับบกนี้ จะบันทึกปริมาณการใช้พลังงานตลอดกระบวนการทดลองหารด้วยปริมาณน้ำที่ระเหยออกไปจากปริมาณความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้าย จากนั้นนำมาคำนวณหาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ที่ใช้ในการอบแห้งตามสมการ

$$SEC = \frac{3.6E_p}{(m_{in} - m_f)} \quad (11)$$

โดย m_{in} และ m_f คือ มวลของวัสดุก่อนอบแห้งและมวลของวัสดุหลังอบแห้ง ตามลำดับ เป็นกิโลกรัม (kg)

E_p คือ ปริมาณพลังงานที่ใช้เป็นกิโลวัตต์-ชั่วโมง (kW-h) และค่าคงที่ 3.6 คือ แฟกเตอร์การแปลงหน่วยจาก kW-h เป็น MJ/kg of water evaporated

2.6 การทดสอบคุณภาพใบบับบกโดยการทดสอบทางประสาทสัมผัส

การประเมินคุณภาพของใบบับบกอบแห้งเพื่อใช้ผลิตใบบับบกแห้งชงดื่ม นั้น จะทดสอบในรูปแบบของการบริโภคขาบับบกชงดื่มด้วยการวิเคราะห์ทางประสาทสัมผัส โดยกำหนดวิธีการให้คะแนนความชอบตามสเกลฮีโดนิค (Hedonic scale) ตั้งแต่ค่า 1-9 คะแนน (1=ไม่ชอบมากที่สุด และ 9 =ชอบมากที่สุด) และเลือกให้ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 25 คน ลักษณะการวิเคราะห์ที่ทดสอบคือ คำสี กลิ่น รสชาติ รูปลักษณะ และการยอมรับโดยรวม เปรียบเทียบกับใบบับบกที่ตากแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ จากนั้นนำข้อมูลทั้งหมดมาหาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะต่าง ๆ และทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยวิธี Analysis of variance (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 จลนพลศาสตร์การอบแห้งใบบับบก

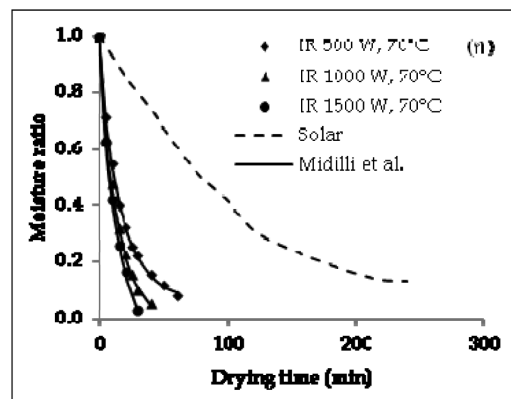
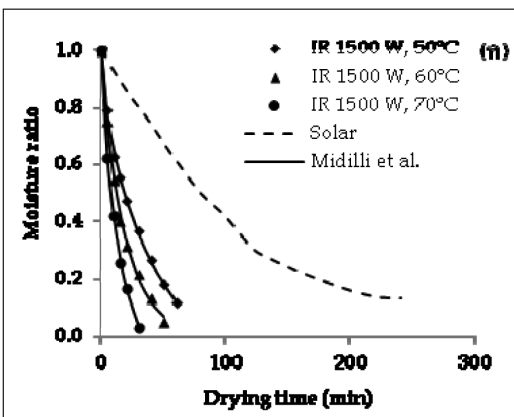
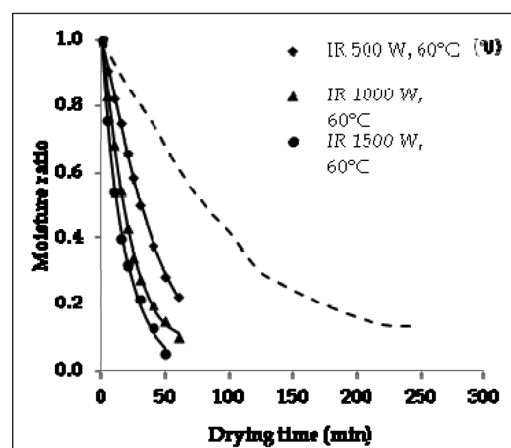
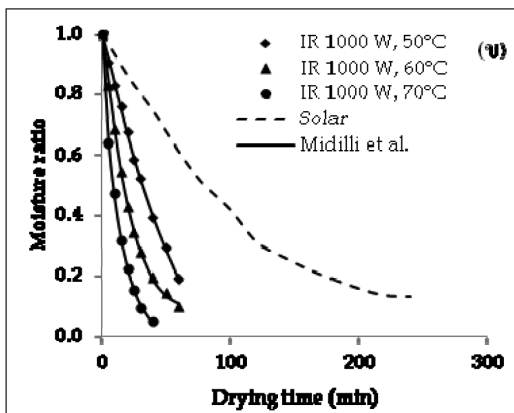
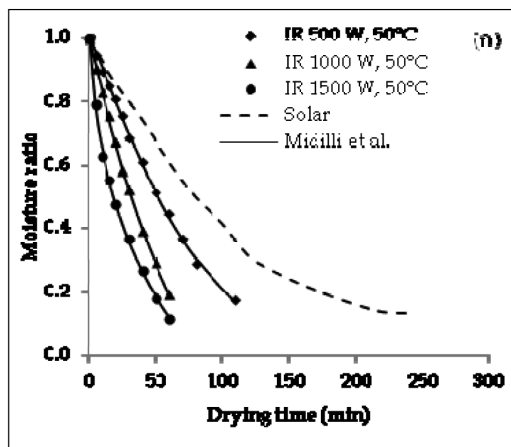
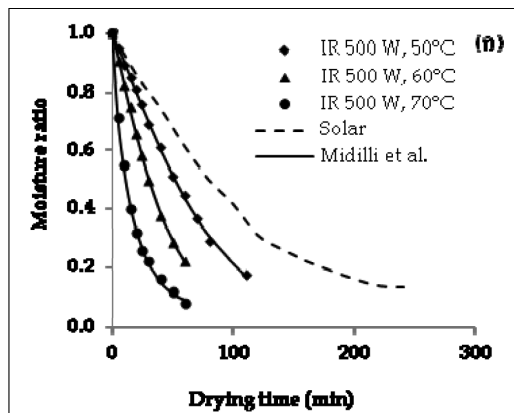
ผลการอบแห้งใบบับบกด้วยรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 50-70°C ที่รังสีอินฟราเรด 500 1,000 และ 1,500 W แสดงรายละเอียดแต่ละเงื่อนไขการทดลองดัง

รูปที่ 2 และ 3 ผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นมีการลดลงตามระยะเวลาอบแห้งที่เพิ่มขึ้น และปัจจัยของอุณหภูมิอบแห้งและกำลังของรังสีอินฟราเรดมีผลโดยตรงต่อการอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของใบบวบก รูปที่ 2 แสดงผลการทดลองที่ศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิอบแห้งต่ออัตราการอบแห้งใบบวบกที่กำลังรังสีอินฟราเรดคงที่ พบว่าที่ทุกกำลังของรังสีอินฟราเรดที่พิจารณาให้ผลการทดลองที่เหมือนกันคือ อุณหภูมิอบแห้งสูงใช้เวลานานการอบแห้งน้อยกว่าที่อุณหภูมิอบแห้งต่ำ โดยที่ในรูปที่ 2(ก) พิจารณาที่กำลังรังสีอินฟราเรด 500 W พบว่าที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 60 และ 70°C ใช้เวลาในการอบแห้ง 120 100 และ 80 นาที ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่กำลังรังสีอินฟราเรด 1,000 W ดังรูปที่ 2(ข) พบว่าที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 60 และ 70°C ใช้เวลาในการอบแห้ง 110 60 และ 30 นาที ตามลำดับ ขณะที่เมื่อพิจารณาที่กำลังรังสีอินฟราเรด 1,500 W ที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 60 และ 70°C ใช้เวลาในการอบแห้ง 60 50 และ 30 นาที ตามลำดับ

พิจารณาปัจจัยของกำลังรังสีอินฟราเรดต่ออัตราการอบแห้งใบบวบกที่ อุณหภูมิอบแห้งคงที่ แสดงดังรูปที่ 3 พบว่าให้ผลการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกันสำหรับทุกอุณหภูมิอบแห้งที่ทำารทดลอง คือ กำลังรังสีอินฟราเรดสูงสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งได้มากกว่าที่กำลังรังสีอินฟราเรดต่ำ ที่อุณหภูมิอบแห้ง 50°C (รูปที่ 3(ก)) พบว่าเมื่อใช้กำลังรังสีอินฟราเรด 500 1,000 และ 1,500 W ใช้เวลาในการอบแห้ง 110 60 และ 60 นาที ตามลำดับ ขณะที่อุณหภูมิอบแห้ง 50°C พบว่าเมื่อใช้กำลังรังสีอินฟราเรด 500 1,000 และ 1,500 W ใช้เวลาในการอบแห้ง 60 60 และ 50 นาที ตามลำดับ

แสดงดังรูปที่ 3(ข) และเมื่อพิจารณารูปที่ 3(ค) อุณหภูมิอบแห้ง 70°C พบว่าเมื่อใช้กำลังรังสีอินฟราเรด 500 1,000 และ 1,500 W ใช้เวลาในการอบแห้ง 60 40 และ 30 นาที ตามลำดับ

อย่างไรก็ดีหากพิจารณาผลการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50°C ด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000 และ 1,500 W นั้นในรูปที่ 3(ก) แม้ว่าจะทดลองและหยุดการอบแห้งในช่วงเวลาเท่ากัน คือ 60 นาที แต่ค่าอัตราส่วนความชื้นที่กำลังรังสีอินฟราเรดสูง (1,500 W) จะมีค่าต่ำกว่าการอบแห้งที่กำลังรังสีอินฟราเรดต่ำกว่า (1,000 W) และปรากฏการณ์นี้ก็เกิดขึ้นเช่นเดียวกันกับกรณีรูปที่ 3(ข) ที่ทำการอบแห้งใบบวบกด้วยอุณหภูมิ 60°C อัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งใบบวบกด้วยกำลังรังสีอินฟราเรดที่ 500 และ 1,000 W ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ระยะเวลาอบแห้งสำหรับการทดลองแม้ว่ามีค่าเท่ากัน (60 นาที) แต่ค่าอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งของใบบวบกที่กำลังรังสีอินฟราเรดสูง (1,000 W) จะมีค่าต่ำกว่าการอบแห้งด้วยกำลังรังสีอินฟราเรดที่ต่ำ (500 W) ซึ่งในหัวข้อต่อไปในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์พลังงาน จึงวิเคราะห์ในรูปของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ กล่าวคือ เป็นการเปรียบเทียบความสิ้นเปลืองพลังงานต่อหน่วยมวลน้ำที่ระเหย (MJ/kg of water evaporated) โดยไม่มีผลกระทบต่อระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง และสามารถวิเคราะห์ได้ว่าในการทดลองทั้งหมดนั้น เงื่อนไขการอบแห้งใดจะมีความสิ้นเปลืองพลังงานน้อยที่สุดโดยยังคงคุณภาพทางประสาทสัมผัสไว้ได้ในเกณฑ์ความชอบรวมสูง



รูปที่ 2. ผลการทดลองอัตราส่วนความชื้นของใบบัวบก กับระยะเวลาการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดขนาด (ก) 500 W (ข) 1,000W และ (ค) 1,500 W อุณหภูมิอบแห้ง 50-70°C เปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Midilli et al.

รูปที่ 3. ผลการทดลองอัตราส่วนความชื้นของใบบัวบก กับระยะเวลาการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดขนาด 500 -1,500 W อุณหภูมิอบแห้ง (ก) 50°C (ข) 60°C และ (ค) 70°C

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

การวิเคราะห์หาค่าสมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งใบบัวบก คำนวณการโดยนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์เปรียบเทียบ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์หรือค่าคงที่ของสมการอบแห้งชั้นบางแสดงดังตารางที่ 2 พิจารณาเลือกสมการอบแห้งที่สามารถทำนายลักษณะการอบแห้งของใบบัวบกได้เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาสมการที่ให้ค่า R² สูงที่สุด และ RMSE ต่ำที่สุด จากการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทั้ง 5 สมการ พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Midilli และคณะ ให้ค่า R² สูงที่สุด และให้ค่า RMSE ต่ำที่สุด แสดงว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Midilli และคณะ สามารถใช้อธิบายจลนพลศาสตร์การอบแห้งใบบัวบกได้ดีทุกสภาวะการทดลอง ซึ่งเมื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณตามรูปแบบของสมการ Midilli และคณะ มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่ามีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี แสดงดังรูปที่ 2-3

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการทดลองอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดที่กำลัง และอุณหภูมิอบแห้งแตกต่างกัน ได้แก่ อุณหภูมิอบแห้ง 3 ค่า คือ 50 60 และ 70°C และค่า

กำลังจากรังสีอินฟราเรด 3 ค่า คือ 500 1,000 และ 1,500 W รวมทั้งสิ้น 9 เงื่อนไขการทดลอง และแต่ละเงื่อนไขการทดลองทำการเก็บข้อมูลผลการทดลอง 2 ซ้ำและจากการทดลอง พบว่าตัวแปรทั้งสองส่งผลต่ออัตราการอบแห้งใบบัวบกโดยตรง ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์สมการอบแห้งต่างๆ ในตารางที่ 1 ของแต่ละสมการตามเงื่อนไขการทดลอง (9 เงื่อนไข) จะทำให้ได้ค่าคงที่ a b k และ n ในสมการอบแห้งแต่ละสมการถึง 9 ค่า จากผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สรุปได้ว่า ผลการคำนวณโดยใช้สมการอบแห้งตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Midilli และคณะ สามารถทำนายผลการทดลองได้ดีที่สุด ดังนั้นจึงได้นำค่าคงที่ a b k และ n ทั้ง 9 ค่า มาหาความสัมพันธ์กับตัวแปรอุณหภูมิและกำลังของรังสีอินฟราเรดโดยการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้นโดยอาศัยโปรแกรม SPSS^o ในการหาค่าคงที่และรูปแบบความสัมพันธ์ของค่าคงที่ a b k และ n กับค่าอุณหภูมิ (T) และกำลังของรังสีอินฟราเรดที่ใช้ (I) ซึ่งผลการวิเคราะห์ให้ความสัมพันธ์ของค่า a b k และ n เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิอบแห้งและกำลังของรังสีอินฟราเรดตามสมการข้างล่างที่ (12)-(15) จากสมการที่ (10) ในตารางที่ (1)

$$\text{Midilli et al. model } MR = a \exp(-(kt)^n) + bt \tag{10}$$

เมื่อค่า a b k และ n เขียนความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันอุณหภูมิและกำลังของรังสีอินฟราเรด ได้ดังสมการ

$$a = [0.99 + (1.07 \cdot 10^{-5})I + (1.68 \cdot 10^{-7})T] [\exp(-10750.1/T) \exp(2104.318/I)] \tag{12} \quad R^2 = 0.778$$

$$b = (-2 \cdot 10^{-5}) T^2 + 0.0101T - 1.6891 \tag{13} \quad R^2 = 0.999$$

$$k = [-0.06 + (7.57 \cdot 10^{-5})I + (2.49 \cdot 10^{-9})T] [\exp(-10459.4/T) \exp(401.691/I)] \tag{14} \quad R^2 = 0.913$$

$$n = [1.54 - 0.00045I - (1.90 \cdot 10^{-10})T] \exp[(-10545.9/T) \exp(1371.075/I)] \tag{15} \quad R^2 = 0.784$$

โดย MR คือ อัตราส่วนความชื้นเป็น % มาตรฐานแห้ง (d.b.)

T คือ อุณหภูมิอบแห้ง เป็นเคลวิน (K)

t คือ เวลาในการอบแห้ง เป็นนาที (min)

I คือ กำลังรังสีอินฟราเรด เป็นวัตต์ (W)

a, b, k และ n คือค่าคงที่ในสมการของ Midilli และคณะ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและกำลังของหลอดรังสีอินฟราเรด

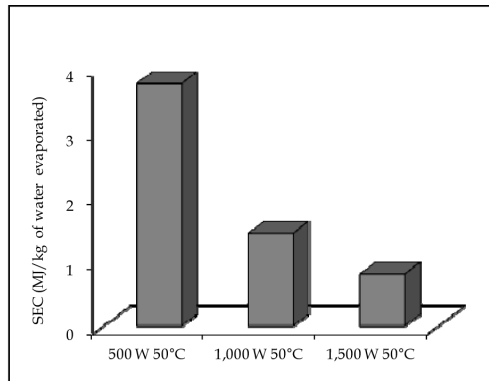
จากผลของการสร้างความสัมพันธ์ของค่าคงที่ a b k และ n ต่าง ๆ ที่ปรากฏในรูปฟังก์ชันของอุณหภูมิอบแห้งและกำลังของรังสีอินฟราเรดตามสมการที่ (12)-(15) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า เมื่ออุณหภูมิอบแห้งและกำลังของรังสีอินฟราเรดเพิ่มขึ้น ทำให้ได้ค่า a b k และ n ที่แทนในสมการการอบแห้งตามแบบจำลองของ Midilli และคณะมีค่าเปลี่ยนแปลงลดลงเร็วขึ้น หรือกล่าวได้ในทางภาพภาพว่าอัตราการอบแห้งใบบัวบกก็จะสูงขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน ซึ่งในเชิงฟิสิกส์ด้านอุณหพลศาสตร์ กล่าวได้ว่า การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง และการเพิ่มความเข้มรังสีอินฟราเรดที่ตกกระทบผิวใบบัวบกสูงขึ้น การถ่ายเทพลังงานในรูปแบบการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (ในที่นี้ก็คือ รังสีอินฟราเรด) ก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน ดังจะเห็นได้จากผลการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Midilli และคณะสามารถทำนายผลการทดลองได้เป็นอย่างดี

3.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง

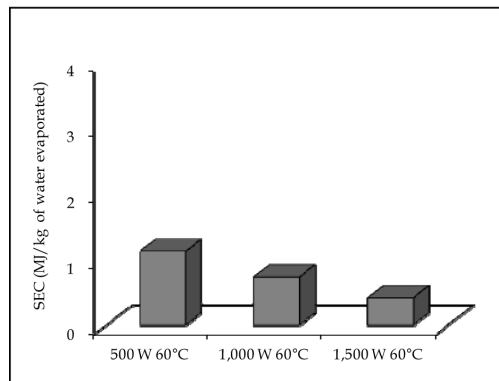
จากการทดลองอบแห้งใบบัวบกด้วยรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิอบแห้ง 50-70°C กำลังรังสีอินฟราเรดในช่วง 500-1,500 W ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะแสดงดังรูปที่ 4 พบว่า อุณหภูมิอบแห้งและกำลังของรังสีอินฟราเรดมีผลต่อค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งอย่างชัดเจน กล่าวคือ ที่เงื่อนไขกำลังของอินฟราเรดเท่ากัน ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 และ 50°C ดังรูปที่ 4(ก)-4(ค) โดยการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดด้วยอุณหภูมิอบแห้ง 70°C มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงาน

จำเพาะอยู่ในช่วง 0.31-0.61 MJ/kg of water evaporated โดยที่รังสีอินฟราเรดกำลังสูงที่ 1,500 W มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำสุด (0.31 MJ/kg of water evaporated) เมื่อเทียบกับกำลังของรังสีอินฟราเรดที่ต่ำกว่า ซึ่งผลการทดลองในเงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้ง 50 และ 60°C ก็ให้ผลสอดคล้องกันดังแสดงผลในกราฟรูปที่ 4(ก) และ 4(ข) ตามลำดับ กรณีการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจะเพิ่มอัตราการส่งผ่านความชื้นของใบบัวบกเพิ่มขึ้น กล่าวในทางกายภาพได้ว่า อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิอบแห้งเดียวกัน ยังพบอีกว่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งที่กำลังรังสีอินฟราเรด 1,500 W มีค่าน้อยกว่าการอบแห้งที่กำลังรังสีอินฟราเรด 1,000 W และ 500 W ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากที่กำลังของรังสีอินฟราเรดสูงน้ำในผลิตภัณฑ์สามารถระเหยได้ง่ายและรวดเร็วกว่าที่กำลังรังสีอินฟราเรดต่ำทำให้ใช้เวลาอบแห้งน้อยลง ทั้งนี้เพราะรังสีอินฟราเรดที่ค่าความเข้มรังสีตกกระทบต่อใบบัวบกสูง พลังงานจากการแผ่รังสีให้กับใบบัวบกก็มีสูง ทำให้อัตราการระเหยน้ำสูงขึ้นและใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง

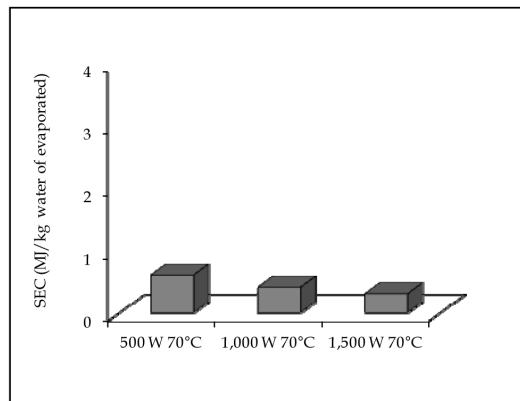
จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ปัจจัยของกำลังของรังสีอินฟราเรดและอุณหภูมิอบแห้งมีผลต่อความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งโดยตรง โดยค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจะลดลงเมื่อเพิ่มกำลังรังสีอินฟราเรดและอุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งที่สั้นลงและมีการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าการอบแห้งที่อาศัยการพาความร้อนโดยพลังงานแสงอาทิตย์หรือการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนโดยอาศัยการพาเพียงอย่างเดียว ผลการทดลองของงานวิจัยนี้สอดคล้องกับผลงานวิจัยที่ผ่านมา (14-16)



(ก) ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ของการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 500-1,500 W อุณหภูมิอบแห้ง 50°C



(ข) ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ของการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 500-1,500 W อุณหภูมิอบแห้ง 60°C



(ค) ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ของการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 500-1,500 W อุณหภูมิอบแห้ง 70°C

รูปที่ 4. ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งใบบัวบกด้วยรังสีอินฟราเรด กำลัง 500 1,000 และ 1,500 W อุณหภูมิอบแห้ง 50°C (ก) 60°C (ข) และ 70°C (ค)

3.4 คุณภาพของใบบวบก

ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส

ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางประสาทสัมผัสของใบบวบกอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 3 พบว่า ค่าสี กลิ่น รสชาติ และรูปลักษณะ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยที่ค่าสี กลิ่น รสชาติ และรูปลักษณะมีค่าอยู่ในช่วง 6.72-8.12, 5.98-8.53, 7.18-7.92 และ 5.16-5.76 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับกรอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิอบแห้งเดียวกัน (50°C) พบว่า กรอบอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์ให้ค่าสีต่ำกว่ากรอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด และค่าสีจะลดลงเมื่อกำลังของรังสีอินฟราเรด

เพิ่มขึ้น เมื่ออบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 500 W ให้ค่ากลิ่น และรูปลักษณะสูงกว่าอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์ แต่ที่ กำลังรังสีอินฟราเรด 1,000 และ 1,500 W ให้ค่ากลิ่น และรูปลักษณะต่ำกว่ากรอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์

อย่างไรก็ดี เมื่อพิจารณาที่คุณลักษณะด้านการยอมรับโดยรวม พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยมีค่าอยู่ในช่วง 7.12-7.56 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับกรอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์ พบว่าการยอมรับโดยรวมของกรอบแห้งใบบวบกด้วยรังสีอินฟราเรดมีค่าสูงกว่าบวบกที่อบแห้งด้วยแสงอาทิตย์

ตารางที่ 2. ค่าคงที่ของสมการอบแห้ง

Model name	Parameter	IR 500 W			IR 1,000 W			IR 1,500 W		
		50°C	60°C	70°C	50°C	60°C	70°C	50°C	60°C	70°C
Newton	k	0.0135	0.0229	0.0549	0.0228	0.0408	0.0770	0.0368	0.0567	0.0916
	R ²	0.9845	0.9906	0.9831	0.9836	0.9974	0.9970	0.9859	0.9956	0.9972
	RMSE	0.0313	0.0245	0.0360	0.0323	0.0144	0.0166	0.0325	0.0204	0.0166
Page	k	0.0057	0.0129	0.0998	0.0106	0.0395	0.0959	0.0605	0.0694	0.0861
	n	1.2169	1.1667	0.7986	1.2210	1.0107	0.9194	0.8469	0.9302	1.0245
	R ²	0.9986	0.9994	0.9979	0.9977	0.9975	0.9987	0.9962	0.9971	0.9973
	RMSE	0.0092	0.0070	0.0136	0.0112	0.0143	0.0111	0.0168	0.0171	0.0161
Henderson & Pabis	k	0.0144	0.024	0.0521	0.0240	0.0412	0.0757	0.0347	0.0560	0.0916
	a	1.0389	1.0305	0.9579	1.0344	1.0083	0.9837	0.9576	0.9891	0.9996
	R ²	0.9899	0.9938	0.9862	0.9875	0.9976	0.9975	0.9904	0.9958	0.9972
Logarithmic	RMSE	0.0251	0.0200	0.0327	0.0279	0.0141	0.0153	0.0268	0.0201	0.0166
	k	0.0087	0.0163	0.0679	0.0118	0.0442	0.0793	0.0407	0.0605	0.0816
	a	1.3996	1.2851	0.9009	1.6095	0.9857	0.9707	0.9087	0.9665	1.0437
	b	-0.3858	-0.2748	0.0876	-0.6073	0.0294	0.0172	0.0639	0.0303	-0.0518
	R ²	0.9975	0.9983	0.9978	0.9988	0.9981	0.9977	0.9922	0.9966	0.9987
Midilli et al.	RMSE	0.0128	0.0113	0.0121	0.0080	0.0124	0.0143	0.0242	0.0177	0.0111
	k	0.0055	0.0119	0.0874	0.0123	0.0312	0.1046	0.0790	0.0734	0.1089
	a	0.9920	0.9949	1.0013	0.9949	1.0002	0.9988	1.0025	1.0044	0.9995
	b	-0.0002	0.0002	0.0007	-0.0020	0.0010	-0.0008	-0.0019	-0.0002	-0.0029
	n	1.2160	1.1897	0.8631	1.1103	1.1164	0.8703	0.7114	0.9063	0.8778
	R ²	0.9989	0.9994	0.9989	0.9990	0.9993	0.9991	0.9984	0.9972	0.9998
RMSE	0.0083	0.0068	0.0093	0.0070	0.0075	0.0098	0.0110	0.0171	0.0052	

ตารางที่ 3. ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางประสาทสัมผัสของแห้งขงดืมใบบัวบก

สถานะในการอบแห้ง	สี	กลิ่น	รสชาติ	รูปลักษณะ	การยอมรับโดยรวม
Solar (50°C)	6.72 ^{bc}	6.87 ^b	7.61 ^{ab}	5.41 ^{ab}	7.19 ^a
IR 500 W					
50°C	8.12 ^c	8.53 ^d	7.23 ^a	5.76 ^b	7.56 ^a
60°C	7.23 ^{ab}	7.16 ^c	7.37 ^{ab}	5.16 ^a	7.12 ^a
70°C	7.29 ^{ab}	7.24 ^c	7.31 ^a	5.19 ^a	7.31 ^a
IR 1,000 W					
50°C	7.46 ^b	6.25 ^{ab}	7.44 ^{ab}	5.37 ^{ab}	7.42 ^a
60°C	7.69 ^{bc}	6.17 ^{ab}	7.26 ^a	5.21 ^a	7.29 ^a
70°C	7.48 ^b	6.32 ^{ab}	7.37 ^{ab}	5.40 ^{ab}	7.34 ^a
IR 1,500 W					
50°C	7.23 ^{ab}	6.74 ^{bc}	7.92 ^c	5.31 ^{ab}	7.51 ^a
60°C	7.45 ^b	6.12 ^{ab}	7.18 ^a	5.62 ^{ab}	7.14 ^a
70°C	6.81 ^a	5.98 ^a	7.82 ^{bc}	5.74 ^b	7.21 ^a

หมายเหตุ 1 ไม่ชอบมากที่สุด 2 ไม่ชอบมาก 3 ไม่ชอบปานกลาง 4 ไม่ชอบเล็กน้อย 5 เฉยๆ 6 ชอบน้อย

7 ชอบปานกลาง 8 ชอบมาก 9 ชอบมากที่สุด

ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่เหมือนกันในสดมภ์เดียวกัน แสดงว่าผลการทดลองไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ขึ้นไป

4. สรุป

การศึกษาการอบแห้งใบบัวบกด้วยรังสีอินฟราเรดเปรียบเทียบกับอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ผลจากการศึกษาพบว่า กำลังของรังสีอินฟราเรดและอุณหภูมิอบแห้งมีผลต่อजनพลศาสตร์ของการอบแห้งใบบัวบก โดยระยะเวลาในการอบแห้งจะลดลงเมื่อเพิ่มกำลังของรังสีอินฟราเรดและอุณหภูมิในการอบแห้ง ในขณะที่ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งมีค่าลดลง นอกจากนี้ พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Midilli และคณะ สามารถทำนายผลการอบแห้งใบบัวบกด้วยรังสีอินฟราเรดได้ดีที่สุด โดยให้ค่า R² มากที่สุด และค่า RMSE น้อยที่สุด สรุปได้ว่าการอบแห้งใบบัวบกด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 1,500 W

อุณหภูมิอบแห้ง 70°C ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด (30 นาที) และมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุด (0.31 MJ/kg of water evaporated) สำหรับกรณีสมบัติทางกายภาพของใบบัวบกที่ใช้การทดสอบแบบประสาทสัมผัสโดยวิเคราะห์ในรูปแบบของสี กลิ่น รสชาติ ลักษณะรูปร่าง และความชอบโดยรวมเปรียบเทียบกับใบบัวบกที่ตากแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์สรุปได้ว่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p>0.05) แสดงว่า มีความเป็นไปได้ที่จะนำรังสีอินฟราเรดมาประยุกต์ใช้เป็นแหล่งพลังงานในการอบแห้งใบบัวบกเพื่อผลิตเป็นใบบัวบกแห้งขงดืม ด้วยรังสีอินฟราเรดกำลัง 1,500 W อุณหภูมิอบแห้ง 70°C เนื่องจากการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดใช้ระยะเวลาอบแห้งสั้น มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุด

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ โครงการครุวิจัยพลังงาน ของสำนักงานกองทุนวิจัย ที่ดำเนินการโดยสถานวิจัย เทคโนโลยีพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ให้ทุนสนับสนุนในการเข้าฝึกอบรมการทำงานวิจัยด้านพลังงาน นอกจากนี้คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ และภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ วัสดุอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับทำโครงการนี้ และสุดท้าย คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ความช่วยเหลือจากคุณจุฑารัตน์ ทะสระระ อดีตนักศึกษาระดับปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ให้ข้อเสนอแนะและวิเคราะห์ข้อผิดพลาด

6. เอกสารอ้างอิง

- (1) http://www.ibio.co.th/th/healthy-corner/item/162-centella_extract search on 2/08/2012. Thai.
- (2) Khongdet J, Laohakunjit N, Kerdchoechuen O. Antioxidant activities and tyrosinase inhibitory of five plant extracts. *Agricultural Sci. J.* 2009;40 Suppl1: 83-86.
- (3) Apichartsrangkoon A, Wongfhun P, Gordon MC. Flavor Characterisation of sugar-added pennywort (*Centella asiatica L.*) juices treated with ultra-high pressure and thermal processes. *J. of Food Sci.* 2009;9: 643-646.
- (4) Sangkam J, Processing of Dried Jelly from Pennywort Juice by Heat Pump Under Ultra-Violet Compared with Infrared Vacuum Drying. [MSc. (Science and food technology) Thesis]. Faculty of Food Science; Chaingmai University; Thailand; 2010. Thai.
- (5) Nuthong P, Achariyaviriya A, Namsanguan K, Achariyaviriya S. Kinetics and modeling of whole longan with combined infrared and hot air. *J. of Food Eng.* 2011;102(3): 233-239.
- (6) Das I, Das SK, Bal S. Drying kinetics of high moisture paddy undergoing vibration-assisted infrared (IR) drying. *J. of Food Eng.* 2009;95(1): 166-171.
- (7) Das S, Satish B. Specific Energy and Quality of Infrared (IR) Dried Parboiled Rice. *J. of Food Eng.* 2004;62: 9-14.
- (8) AOAC, The Association of Official Analytical Chemists. Inc. Arlington. Virginia, USA., 1995.
- (9) Mujumdar AS. *Handbook of Industrial Drying.* New York: Marcel-Dekker Inc; 1987.
- (10) Soponronarit S. *Drying Grains and Some Types of Foods.* 7th ed., King Mongkut's University of Technology Thonburi; Bangkok: KMUTT publishing; 1997. Thai.
- (11) Henderson SM, Pabis S. Grain drying theory I. Temperature effect on drying coefficients. *J. of Agr. Eng. Res.* 1961;6: 169-174.
- (12) Tirawanichakul S, Tirawanichakul Y, Sniso E. Paddy dehydration by adsorption: Thermo-physical properties and diffusion model of agriculture residues. *Biosys. Eng.* 2008;9: 249-255.
- (13) Midilli A, Kucuk H, Yapar Z. A new model for single layer drying of some vegetables. *Drying Tech.* 2002;20: 1503-1513.
- (14) Kavak AE, Bicer Y, Midilli A. Modeling and experimental study on drying of apple slices in a convective cyclone dryer. *J. of Food Proc. Eng.* 2003;26(6): 515-541.
- (15) Namsanguan Y, Tia W, Devahastin S, Soponronarit S. Drying kinetics and quality of shrimp undergoing different two-stage drying processes. *Drying Tech.* 2004;22: 759-778.
- (16) Tirawanichakul S, Tirawanichakul Y. Thin layer grain dryer : Parameters of thin layer drying for cashew nut, Songklanakarin J. *Sci. Tech.* 1994;16(4): 381-392. Thai.