

การพัฒนาระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยอินฟราเรด

บุญทริกา ศิลา¹ กระวี ตรีอำรรค^{2*} และ เทวรัตน์ ตรีอำรรค¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

^{1, 2}111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รับบทความ 29 พฤศจิกายน 2565 แก้ไขบทความ 7 กุมภาพันธ์ 2566 ตอรับบทความ 1 มีนาคม 2566

บทคัดย่อ

การพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบต่างๆ ขึ้นเพื่อช่วยลดความชื้นข้าวเปลือกยังคงประสบปัญหาสำคัญเรื่องความสิ้นเปลืองพลังงานที่ยังคงสูงอยู่ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยอินฟราเรดขึ้นและศึกษาความเป็นไปได้ในการลดปัญหาดังกล่าว ทำการศึกษาเงื่อนไขการอบแห้งข้าวเปลือก 3 เงื่อนไข คือ 1) การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อน 60°C 2) การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อน 60°C ร่วมกับรังสีอินฟราเรด 50 วัตต์ 3) การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรด 800 วัตต์ ประเมินสมรรถนะการอบแห้งจากพฤติกรรมการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ของเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้น โดยกำหนดให้ความเร็วลมและอัตราการป้อนข้าวเปลือกคงที่ ที่ 6 m/s และ 8.4 kg/min ตามลำดับ ทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ความชื้นเริ่มต้น 23% w.b. ครึ่งละ 20 kg จนถึงความชื้นสุดท้าย 14% w.b. ผลการทดสอบพบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดใช้เวลาเร็วที่สุดคือ 220 นาที อัตราการอบแห้งของวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนและวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับอินฟราเรดไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อน 60°C ให้ค่า SEC ต่ำที่สุดคือ 14.24 ± 0.88 MJ/kg water และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่า SEC ผลลัพธ์จากวิธีการอบแห้งทั้ง 3 เงื่อนไข ยังไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

คำสำคัญ : ข้าวเปลือก; ข้าวขาวดอกมะลิ 105; เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม; รังสีอินฟราเรด

Development of an Infrared-assisted Pneumatic Paddy Drying System

Boontarika Sila¹ Krawee Treeamnuk^{2*} and Tawarat Treeamnuk¹

¹School of Agricultural engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

²School of Mechanical engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

^{1, 2}111 University Avenue Muang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

Received 29 November 2022; Revised 7 February 2023; Accepted 1 March 2023

Abstract

The development of various dryers to dry paddy still faces a significant problem of high energy consumption. Therefore, this research objective was to develop an infrared-assisted pneumatic paddy drying system and study the possibility of reducing the problem. The study consists of 3 methods of drying paddy, namely: 1) drying paddy by hot air 60°C; 2) drying paddy by hot air 60°C with 50 W infrared radiation; and 3) Drying paddy with 800 W infrared radiation. In this study, 20 kg of Thai jasmine 105 paddy with initial moisture content 23%w.b. was dried until 14%w.b. at drying air velocity and paddy feed of 6 m/s and 8.4 kg/min respectively. The performance of drying was evaluated based on the drying characteristic curve, drying rate and the specific energy consumption (SEC) of the developed drying system. The results showed that hot air combined with infrared radiation in drying had fastest time 220 min in drying. Drying rate of hot air drying and hot air drying combined with infrared radiation was no statistical difference ($p < 0.05$). The lowest SEC was 14.24 ± 0.88 MJ/kg_{water} and it was not significantly different ($p < 0.05$) when comparing within all experiment methods.

Keywords: Paddy; Thai jasmine 105 rice; Pneumatic dryer; Infrared

* Corresponding Author. Tel.: +664 4224 766, E-mail Address: krawee@sut.ac.th

1. บทนำ

ข้าว นับเป็นหนึ่งในพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย ทั้งในด้านการบริโภคและการเป็นสินค้าเกษตรส่งออกของประเทศ มีพื้นที่เพาะปลูกครอบคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศ ในปีการผลิต 2563 ไทยเป็นผู้ส่งออกข้าวอันดับ 3 ของโลก โดยมีปริมาณการส่งออกถึง 5.72 ล้านตัน [1] อย่างไรก็ตามในการรักษาคุณภาพข้าวให้ได้ตามมาตรฐานนั้นยังคงเป็นสิ่งสำคัญ ชาวนาไทยยังคงประสบกับปัญหาคุณภาพข้าวที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐานหลังการเก็บเกี่ยว ซึ่งปัจจัยหลักที่ทำให้ข้าวมีคุณภาพต่ำลงนั้นคือความชื้นที่สะสมในข้าวโดยข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยวมีความชื้นสูงถึง 24 – 28%w.b. [2] ส่งผลให้ผลผลิตข้าวที่ได้เกิดการเน่าเสียระหว่างการเก็บรักษา อีกทั้งความชื้นที่สูงยังส่งผลต่อการแตกหักที่เด่นชัดระหว่างการสี [3] ซึ่งปัญหาความชื้นสูงในข้าวนั้นทำให้ข้าวเปลือกไม่มีคุณภาพที่ดีพอที่จะขายได้ราคาตามมาตรฐาน ส่งผลให้เกษตรกรขายข้าวเปลือกได้ในราคาต่ำและมีผลผลิตคุณภาพสูงออกสู่ตลาดน้อย ดังนั้นการควบคุมความชื้นข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยวจึงเป็นสิ่งสำคัญ ความชื้นที่เหมาะสมในการเก็บรักษามะลิข้าวเปลือกคือ 14%w.b. จะช่วยยืดอายุการเก็บรักษาให้นานขึ้นและคุณภาพการสีสูงขึ้น [4], [5]

ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้เครื่องจักรและเทคโนโลยีการอบแห้งมาทดแทนการลดความชื้นแบบดั้งเดิม เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกที่นิยมใช้แพร่หลายที่สุดคือเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน เนื่องจากมีความสะดวกในการทำงาน เครื่องอบแห้งชนิดนี้ได้แก่ เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดไหลคลุกเคล้า (Louisiana State University หรือ LSU) อุณหภูมิลมร้อนสามารถใช้ได้สูงถึง 60°C [6] เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์-เบด สามารถใช้อุณหภูมิอบแห้งได้สูงถึง 140 - 150°C [7] เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมซึ่งอาศัยลมร้อนใช้อุณหภูมิสูงถึง 80°C [8], [9] ซึ่งหลักการทำงานคือข้าวที่มีความชื้นสูงถูกป้อนเข้ามาในห้องอบแห้งและถูกลมที่เป่าเข้ามาในห้องอบแห้งพัดลอยขึ้นไปพร้อมกัน ทั้งนี้ปัญหาหลักของ

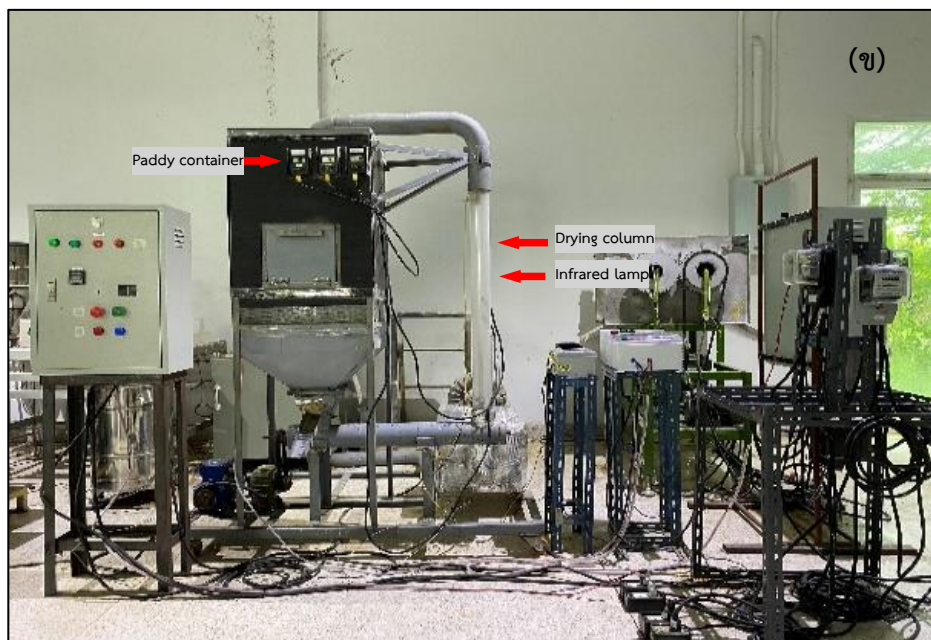
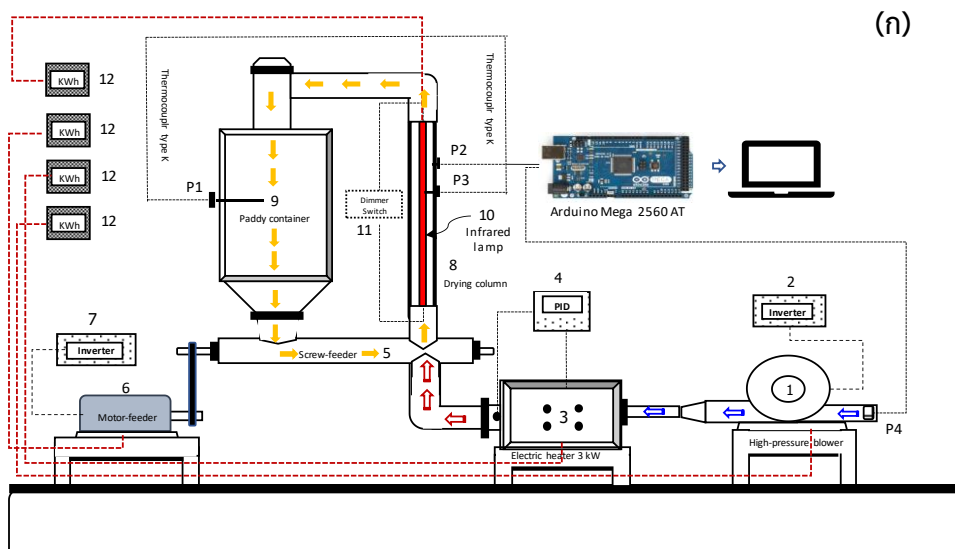
การอบแห้งโดยใช้ลมร้อนคือการใช้พลังงานในการอบแห้งที่สูงมาก [10] จากการให้ความร้อนกับอากาศอบแห้ง ดังนั้นจึงต้องมีการประยุกต์ใช้พลังงานจากแหล่งอื่นๆ เข้ามาใช้ร่วมกันเพื่อลดการใช้พลังงานของอากาศอบแห้งและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องอบแห้งให้สูงขึ้น

รังสีอินฟราเรดเป็นทางเลือกหนึ่งของการใช้พลังงานร่วมในระบบอบแห้ง เนื่องจากมีคุณสมบัติสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในเนื้อวัสดุได้โดยตรงโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง จึงมีการสูญเสียพลังงานให้กับสิ่งแวดล้อมน้อยมาก ส่งผลให้เกิดการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า [11], [12], [13] และพบว่าการใช้รังสีอินฟราเรดในการอบแห้งสามารถลดการใช้เวลาในการอบแห้งลดลงเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อน [14] มีการใช้พลังงานจากรังสีอินฟราเรดในการอบแห้งวัสดุหลายชนิด ซึ่งพบว่าวัสดุที่ผ่านการอบแห้งมีคุณภาพที่สูงเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อน [15] ทั้งนี้จากข้อดีดังกล่าวจึงมีการประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับการอบแห้งหลายประเภท เช่น มีการพัฒนาเทคนิคการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ฟลูอิดเซชันร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น [16] การอบแห้งข้าวเปลือกโดยรังสีอินฟราเรด ลมร้อนและการเทมเปอร์ริง [17] การใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนในการอบแห้งขมิ้น [18] มันเทศ [19] ถั่วลิสง [20] หัวหอม [21] แอปเปิ้ล [22] สาหร่ายเตา [23] แครอท [24] พุทรา [25] ผัก [26] และเมล็ดถั่วพิสตาชิโอ [27] เป็นต้น

เพื่อเป็นการพัฒนาการอบแห้งแบบพาหะลมด้วยอากาศร้อนให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาด้านแบบระบบอบแห้งแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยรังสีอินฟราเรดในการอบแห้งข้าวเปลือกซึ่งมีความแตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมาคือวัสดุอบแห้งไม่ได้วางอยู่กับที่ โดยวัสดุมีการลอยตัวไหลไปกับลมร้อนเกิดกระบวนการการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นขณะที่วัสดุลอยตัวในหอบแห้งซึ่งมี 2

แหล่งความร้อนคือลมร้อนและหลอดรังสีอินฟราเรดที่ถูกติดตั้งภายในหอบแห้ง และมีการทดสอบอบแห้งทั้งหมด 3 เงื่อนไข คือ 1) การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อน 2) การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อนร่วมกับ

รังสีอินฟราเรด 3) การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรด เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ



รูปที่ 1 (ก) แผนภาพเครื่องอบแห้งที่ใช้ทดสอบ

(ข) เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยอินฟราเรดที่พัฒนาขึ้น

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบ

พาหะลมเสริมการทำงานด้วยอินฟราเรด

เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยอินฟราเรดที่แสดงดังรูปที่ 1ก โดยได้แสดงหมายเลขกำกับแต่ละอุปกรณ์ซึ่งประกอบไปด้วยหมายเลข 1) พัดลมความดันสูง (Blower) ยี่ห้อ HITACHI รุ่น VORTEX ขนาด 1.5 kW 2) อินเวอร์เตอร์ควบคุมพัดลมความดันสูงยี่ห้อ MITSUBISHI รุ่น E700 3) ฮีตเตอร์ไฟฟ้า ขนาด 3 kW 4) เครื่องควบคุมอุณหภูมิฮีตเตอร์ (Temperature control) ยี่ห้อ BERM รุ่น REX-C100 5) สกรูลำเลียงข้าว 6) มอเตอร์ขับเคลื่อนสกรูขนาด 0.75 kW 7) อินเวอร์เตอร์ควบคุมมอเตอร์ยี่ห้อ HATTEC-GR 8) หอบแห้งที่ทำจากท่ออะคริลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 74 mm ยาว 1 เมตร 9) ถังเก็บข้าวขนาด $0.40 \times 0.50 \times 0.80 \text{ m}^3$ 10) หลอดอินฟราเรดชนิดควอทซ์ขนาด 1 kW โดยวัสดุที่นิยมนำมาทำหลอดอินฟราเรด คือ วัสดุประเภท เซรามิกที่มีคุณสมบัติทนความร้อนสูง เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า หลอดแก้วควอทซ์ ซึ่งจะปล่อยคลื่นอินฟราเรดระยะกลางออกมา [28] มีการนำมาใช้งานแพร่หลายเนื่องจากง่ายในการควบคุม ให้ความร้อนค่อนข้างเร็วและเป็นพลังงานที่สะอาด 11) สวิตช์ควบคุมกระแสไฟฟ้า (Dimmer Switch) ขนาด 1.6 kW และ 12) มิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า (ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น MF – 37E) การทำงานของเครื่องต้นแบบ (รูปที่ 1ข) เริ่มจากเมื่อเปิดพัดลมความดันสูง (หมายเลข 1) อากาศแวดล้อมจากภายนอกจะถูกดูดเข้าไปเพิ่มอุณหภูมิที่ฮีตเตอร์ (หมายเลข 3) จนได้อุณหภูมิ 60°C จากนั้น อากาศอุณหภูมิสูงจะถูกลำเลียงเข้าสู่หอบแห้ง (หมายเลข 8) ทางด้านล่างซึ่งภายในมีหลอดอินฟราเรด (หมายเลข 10) ติดตั้งอยู่ตรงกลางหอบเพื่อเป็นแหล่งให้ความร้อนแหล่งที่สอง ขั้นตอนการอบแห้งเริ่มจากข้าวเปลือกในถังเก็บ (หมายเลข 9) จะถูกสกรูลำเลียง (หมายเลข 5) ไปยังหอบ

อบแห้งเพื่อสัมผัสกับลมร้อนที่เป่าขึ้นมา จากนั้นข้าวจะถูกเป่าลอยขึ้นไปในหอบแห้ง (หมายเลข 8) พร้อมกับลมร้อน และสัมผัสกับความร้อนที่แผ่ออกมาจากหลอดอินฟราเรดไปพร้อมกัน เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนขึ้นในหอบแห้ง หลังจากนั้นเมล็ดข้าวจะถูกลำเลียงออกจากหอบแห้งมาเก็บไว้ที่ถังเก็บ (หมายเลข 9) และจะถูกลำเลียงหมุนวนในระบบไปเรื่อย ๆ จนถึงความชื้นสุดท้ายจึงสิ้นสุดกระบวนการอบแห้ง

2.2 วิธีการทดสอบ

เมื่อทำการประกอบเครื่องอบแห้งเรียบร้อยแล้ว จากนั้นทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิอากาศโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล Type K จำนวน 4 ตำแหน่ง (P1 – P4) แสดงดังรูปที่ 1ก โดยเชื่อมต่อเข้ากับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 AT และเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล เพื่อรับค่าและแสดงผล

ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ใช้ความเร็วลมอากาศคงที่ที่ 6 m/s (ความถี่อินเวอร์เตอร์ 60 Hz) ซึ่งเป็นความเร็วลมที่ทำให้เมล็ดข้าวสามารถลอยขึ้นไปยังหอบแห้งได้จากการทดสอบระบบเบื้องต้น และอัตราการป้อนคงที่ที่ 0.14 kg/s (ความถี่อินเวอร์เตอร์ 16 Hz) ซึ่งเป็นอัตราป้อนที่เหมาะสมในการป้อนข้าวไหลไปสัมผัสกับลมแล้วสามารถลอยขึ้นไปได้ ควบคุมอุณหภูมิของข้าวเปลือกในถังไม่ให้สูงเกินกว่า 60°C เพื่อควบคุมอุณหภูมิของเมล็ดข้าวในถังเก็บ หลังการอบแห้งให้ไม่เกิน 45°C ซึ่งช่วยให้ควบคุมคุณภาพของข้าวเปลือกหลังการอบแห้งได้ [29], [30], [31], [32], [33] ในทุกเงื่อนไขการทดสอบ แบ่งการทดสอบออกเป็น 3 เงื่อนไข คือ 1) อบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อนอุณหภูมิ 60°C 2) อบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อนอุณหภูมิ 60°C ร่วมกับเปิดหลอดอินฟราเรด 50 วัตต์ (อุณหภูมิเฉลี่ยของหลอดอยู่ที่ 70°C) 3) อบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้หลอดอินฟราเรด 800 วัตต์ (อุณหภูมิเฉลี่ยของหลอดอยู่ที่ 345°C) ร่วมกับการใช้อากาศอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม โดยใช้

ข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่มีความชื้นเริ่มต้น 23%w.b. ทดสอบครั้งละ 20 kg อบจนถึงความชื้นสุดท้าย 14%w.b. และทำซ้ำเงื่อนไขละ 3 ซ้ำ ตลอดการทดลอง

2.3 การประเมินสมรรถนะการอบแห้ง

2.3.1 พฤติกรรมการอบแห้ง

การประเมินพฤติกรรมการอบแห้งจะประเมินจากปริมาณความชื้น (Moisture content) ในเมล็ดข้าวที่ลดลงจากความชื้นเริ่มต้นไปจนถึงความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ โดยในขั้นตอนการหาความชื้นในเมล็ดข้าวสามารถหาได้จากการนำตัวอย่างเมล็ดข้าว 10 กรัมไปชั่งน้ำหนักก่อนนำไปอบหามวลแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [34] จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักหลังอบแห้ง และนำค่าน้ำหนักก่อน - หลังมาคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานเปียก (Wet basis, %w.b.) ตามสมการที่ (1)

$$M_w = \frac{W_i - W_d}{W_i} \quad (1)$$

โดยที่ M_w = ความชื้น ณ เวลาใดๆ (เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก, %w.b.)

W_i = น้ำหนักข้าวเปลือกเริ่มต้น (g)

W_d = น้ำหนักข้าวเปลือกแห้ง (g)

2.3.2 อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR)

อัตราการอบแห้งข้าวเปลือกคือความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำในเมล็ดข้าวที่ลดลงต่อระยะเวลาการอบแห้ง ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2

$$DR = \frac{W_i - W_f}{t} \quad (2)$$

โดยที่ DR = อัตราการอบแห้ง (kg_{water}/h)

W_i = น้ำหนักข้าวเปลือกเริ่มต้น (g)

W_f = น้ำหนักข้าวเปลือกหลังอบแห้ง (g)

2.3.3 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC)

วัดค่าการใช้พลังงานจากมิเตอร์ไฟฟ้า (ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น MF – 37E) ที่ต่อเข้ากับพัดลมความดันสูง Blower) ฮีตเตอร์ไฟฟ้า มอเตอร์ และหลอดอินฟราเรด ตามลำดับ คำนวณหา SEC ได้จากสมการที่ 3 [35]

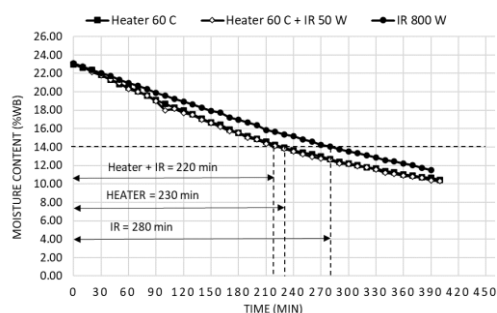
$$SEC = \frac{3.6E}{W_i - W_f} \quad (3)$$

โดยที่ SEC = ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg_{water})

E = พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดในกระบวนการอบแห้ง (kWh)

3. ผลการศึกษา/อภิปรายผล

3.1 พฤติกรรมการอบแห้ง



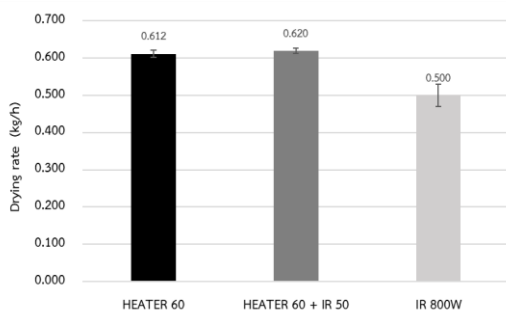
รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นเทียบกับเวลาที่อุณหภูมิอบแห้ง 60°C

พฤติกรรมการอบแห้งแสดงด้วยค่าปริมาณความชื้น (Moisture content) ในเมล็ดข้าวที่ลดลงจากความชื้นเริ่มต้นไปจนถึงความชื้นสุดท้ายที่ต้องการดังรูปที่ 2 จากผลการทดลองพบว่า การอบแห้งช่วงแรกความชื้นลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีสาเหตุมาจากในช่วงแรกนั้นเมล็ดข้าวมีความชื้นที่บริเวณผิวเมล็ดแตกต่างกับภายในแกนกลางของเมล็ดมาก กล่าวคือเกิด

Moisture gradient สูง จึงทำให้เกิดการระเหยของน้ำที่ผิวอย่างรวดเร็ว [16], [36] และเมื่อเปรียบเทียบเวลาในการอบแห้งพบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C ร่วมกับรังสีอินฟราเรด 50 วัตต์ มีอัตราการลดลงของความชื้นถึงความชื้นสุดท้าย $14\% \text{w.b.}$ เร็วที่สุดคือ 220 นาที รองลงมาคือ การอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 800 วัตต์ ที่เวลา 230 และ 280 นาที ตามลำดับ ซึ่งจากผลดังกล่าวพบว่ามีผลสอดคล้องกับ Afzal และคณะ [37] ซึ่งได้ศึกษาการอบแห้งข้าวบาร์เลย์โดยใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน พบว่าสามารถร่นระยะเวลาในการอบแห้งได้เนื่องจากวิธีการดังกล่าวสามารถให้ความร้อนผ่านเข้าไปยังภายในเมล็ดข้าวเปลือกทำให้เมล็ดได้รับความร้อนพร้อมๆ กันทั้งภายในและนอกเมล็ดส่งผลให้การถ่ายเทมวลน้ำภายในเมล็ดมีอัตราการถ่ายเทที่เร็วขึ้น [38]

3.2 อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR)

จากการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกทั้ง 3 เงื่อนไข เมื่อพิจารณาอัตราการอบแห้งที่แสดงดังรูปที่ 3 พบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวมีอัตราการอบแห้ง $0.612 \pm 0.009 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{h}$ การอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับอินฟราเรดมีอัตราการอบแห้ง $0.620 \pm 0.007 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{h}$ และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีอัตราการอบแห้ง $0.501 \pm 0.007 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{h}$



รูปที่ 3 อัตราการอบแห้งของข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยวิธีการที่ต่างกัน

ตารางที่ 1 ค่าอัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR)

Methods	DR (kg _{water} /h)
HEATER 60	0.612 ± 0.009 ^b
HEATER 60 + IR 50 W	0.620 ± 0.007 ^b
IR 800 W	0.501 ± 0.007 ^{ab}

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน หมายถึงค่าดังกล่าวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$).

ซึ่งสังเกตได้ว่าการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดมีอัตราการอบแห้งสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งอีก 2 เงื่อนไข แต่อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยทางสถิติ ที่แสดงดังตารางที่ 1 พบว่า อัตราการอบแห้งของวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนและวิธีอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับอินฟราเรด ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งมีสาเหตุมาจากพลังงานไฟฟ้าจากรังสีอินฟราเรดที่ใช้ร่วมกับลมร้อนถูกใช้เพียง 50 วัตต์ ทั้งนี้เนื่องจากไม่ต้องการให้ข้าวเปลือกในถังเก็บมีอุณหภูมิสูงกว่า 60°C จึงทำให้หลอดอินฟราเรดไม่เกิดการแผ่รังสีอย่างเต็มที่ เพราะอุณหภูมิผิวหลอดอาจต่ำเกินไป ส่งผลให้อัตราการอบแห้งยังไม่แตกต่างอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อน และเมื่อพิจารณาการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียวพบว่าอัตราการอบแห้งต่ำที่สุด คือ $0.501 \pm 0.007 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{h}$ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะข้าวเปลือกมีเวลาสัมผัสกับรังสีสั้นเกินไปในขณะที่แขวนลอยกับอากาศอยู่ในหอบแห้งประกอบกับเมล็ดข้าวเปลือกมีขนาดเล็กเมื่อแขวนลอยในอากาศทำให้มีพื้นที่รับรังสีน้อยเกินไป ความร้อนจากการแผ่รังสีจึงเข้าสู่เมล็ดข้าวเปลือกได้น้อย

การใช้รังสีอินฟราเรดในการอบแห้งร่วมกับการพาความร้อนทั้งสองเงื่อนไข ยังไม่ส่งผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นอย่างนัยสำคัญ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุมาจากการใช้ความเร็วลมร้อนที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากต้องใช้ในการพาให้ข้าวเปลือกแขวนลอยไปกับอากาศและเคลื่อนที่ไปในหอบขณะอบแห้ง อากาศนี้จะพัดผ่านหลอดอินฟราเรดตลอดเวลาและอาจส่งผลให้ความร้อน

บนผิวหลอดซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของลมร้อนสูญเสียไปด้วย รังสีความร้อนที่แผ่ออกมาจากหลอดจึงส่งไปไม่ถึงเมล็ดข้าวได้อย่างสมบูรณ์ ผลดังกล่าวสอดคล้องกับ Sharma และคณะ [38] ที่ได้ทำการประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรดคลื่นยาวร่วมกับการพาอากาศร้อนซึ่งพบว่าการใช้ความเร็วลมร้อนที่มากกว่า 2.6 m/s ส่งผลทำให้เกิดการระบายความร้อน (Cooling effect) ที่บริเวณผิวของแท่งเซรามิกของหลอดอินฟราเรด

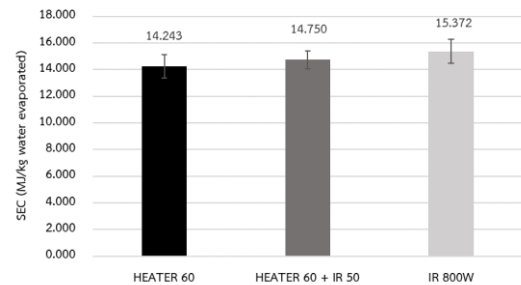
3.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

(Specific energy consumption, SEC)

เมื่อพิจารณาในส่วนของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ในการทดลองทั้ง 3 เงื่อนไข ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4 พบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวมีค่า SEC 14.24 ± 0.88 MJ/kg_{water} การอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับอินฟราเรดมีค่า SEC 14.75 ± 0.67 MJ/kg_{water} และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีค่า SEC 15.37 ± 0.91 MJ/kg_{water}

จากผลการทดลองจะสังเกตได้ว่าค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) จะสูงที่สุดเมื่ออบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียว ซึ่งมีอัตราการอบแห้งที่ต่ำที่สุด เนื่องจากใช้ระยะเวลาการอบแห้งที่ยาวนาน ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดความสิ้นเปลืองพลังงานที่สูง รองลงมาคือ การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด อันเนื่องมาจากมีแหล่งความร้อนเสริมที่เพิ่มเข้ามาทำให้ช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้งข้าวเปลือกและส่งผลกระทบต่อระยะเวลาการอบแห้งลดลงเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียว และสุดท้ายคือ การอบแห้งด้วยลมร้อนมีค่า SEC ต่ำที่สุดคือ 14.24 ± 0.88 MJ/kg_{water} แต่การอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับอินฟราเรด ยังไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% อันเนื่องมาจากพลังงานไฟฟ้าจากรังสีอินฟราเรดที่ใช้ร่วมกับลมร้อนถูกใช้เพียง 50 วัตต์ ซึ่งยังเป็นพลังงานที่น้อยและอาจไม่

ส่งผลมากนักในการเพิ่มอุณหภูมิการอบแห้งภายในหอบแห้ง



รูปที่ 4 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยวิธีการที่ต่างกัน

ตารางที่ 2 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC)

Methods	SEC (MJ/kg _{water})
HEATER 60	14.24 ± 0.88^a
HEATER 60 + IR 50 W	14.75 ± 0.67^a
IR 800 W	15.37 ± 0.91^a

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน หมายถึงค่าดังกล่าวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$)

ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ผลในหัวข้ออัตราการอบแห้ง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยทางสถิติ ที่แสดงดังตารางที่ 2 พบว่า วิธีอบแห้งทั้ง 3 เงื่อนไข ยังไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4. สรุป

การพัฒนาต้นแบบระบบอบแห้งแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยรังสีอินฟราเรดในการอบแห้งข้าวเปลือกและทดสอบอบแห้งทั้ง 3 เงื่อนไขพบว่า

พฤติกรรมการอบแห้งช่วงแรกความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วทั้ง 3 เงื่อนไขมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบเวลาในการอบแห้งพบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด มีอัตราการลดลงของ

ความชื้นถึงความชื้นสุดท้าย 14%w.b เร็วที่สุดคือ 220 นาที อัตราการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับอินฟราเรดมีอัตราการอบแห้งดีที่สุดคือ $0.620 \pm 0.007 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{h}$ แต่การอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับอินฟราเรด ยังไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สำหรับค่า SEC พบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนมีค่า SEC ต่ำที่สุดคือ $14.24 \pm 0.88 \text{ MJ/kg}_{\text{water}}$ และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยทางสถิติพบว่าวิธีการอบแห้งทั้ง 3 เงื่อนไข ยังไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

5. ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองพบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับอินฟราเรด ยังไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งในงานวิจัยต่อไปจะมีแนวทางการปรับปรุงระดับของรังสีอินฟราเรดที่เสริมร่วมกับลมร้อนให้มีระดับที่เหมาะสมและมีความสำคัญยิ่งขึ้น และเพิ่มการประเมินคุณภาพข้าวหลังการอบแห้ง เพื่อศึกษาความแตกต่างของวิธีการอบแห้งทั้งสองวิธีต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับการสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Pakdeekaew, K. Treeamnuak and T. Treeamnuak, "Study of Relationship Between Electrical Property and Moisture Content of KHAO DAWK MALI 105 Paddy," 13th Conference of Electrical Engineering Network 2021 (EENET 2021), Rajamongala University of Technology Ianna, Thailand, 2021.
- [2] B.D. De Padua. "Requirements for drying high moisture content grain in Southeast Asia, preserving grain quality by aeration and in-store drying," Proceedings of International Seminar, Kuala Lumpur, Malaysia, pp 45–49, 1985.
- [3] M. M. Banaszek, T. J. Siebenmorgen, "HEAD RICE YIELD REDUCTION RATES CAUSED BY MOISTURE ADSORPTION," American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE), vol. 33, no. 3, pp 1263-1269, 1990.
- [4] O. R. Kunze and D. L. Calderwood, Systems for Drying Rice, Drying and Storage of Agricultural Crops. Published by AVI Publishing company Inc., Westport, Connecticut, USA pp.381 pp., 1980.
- [5] Ministry of agriculture and Cooperatives, "Thai agricultural standard TAS 4004-2017 (THAI RICE)," Bangkok: The Agricultural Co-operative Federation of Thailand (ACFT).
- [6] P. Tuaynak, M. Chuchonak, M. Yapha, and P. Bunyawanichakul, "Review of Development of Paddy Dried in Industry," SWU Engineering Journal (2014), vol. 9(1), pp. 68-74, 2557.
- [7] S. Soponronnarit, "Fluidized- Bed Paddy Drying," (Science Asia) vol. 25: pp. 51-56, (1999).
- [8] J. Jekkew, "Performance evaluation of paddy rice pneumatic dryer," A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Engineering in Energy management Engineering Suranaree University of Technology. 2016.

- [9] N. Wongbubpa, K. Treeamnuak and T. Treeamnuak, "Influence of Drying Air Velocity Characteristics on Paddy Drying," RMUTP Research Journal, vol. 16, no. 1, January-June 2022.
- [10] S.D.F. Mihindukulasuriya, H.P.W. Jayasuriya, Mathematical modeling of drying characteristics of chilli in hot air oven and fluidized bed dryers. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, vol. 15, pp. 154 – 166, 2013.
- [11] A.S. Ginzburg, "Application of infrared radiation in food processing," Chemical and Process Engineering Series, Leonard Hill, London. 1969.
- [12] C. Sandu, Infrared radiative drying in food engineering: A process analysis. Biotechnology Progress, vol. 2, pp. 109 – 119, (1986).
- [13] C. Ratti, and A.S. Mujumdar, Infrared drying. Handbook of Industrial Drying: Volume 1, 2nd ed., Mujumdar, A.S. (Ed.), Marcel Dekker, New York, pp. 567–588, 1995.
- [14] T. Abe, and T.M. Afzal, "Thin-layer infrared radiation drying of rough rice," Journal of Agricultural Engineering Research, vol. 67, pp. 289–297, 1997.
- [15] F. Niibori, and S. Motoi, "Evaporation of vegetables used by infrared rays," Food Processing, vol. 23, pp. 38 – 42, (1988).
- [16] N. Meeso, "Development of Paddy Drying Technique Using Combination of Fluidization and Near-infrared Radiation," full paper, Thailand Science Research and Innovation (TSRI), 2012.
- [17] J. Laohavanich, "Drying of paddy by Infrared ray, hot air and tempering," full paper, Thailand Science Research and Innovation (TSRI), 2016.
- [18] G. Jeevarathinam a,b, R. Pandiselvam c, T. Pandiarajan d, P. Preetha, M. Balakrishnan, V. Thirupathi and A. Kothakota, "Infrared assisted hot air dryer for turmeric slices:Effect on drying rate and quality parameters," LWT (Food Science and Technology), vol. 144, 2021.
- [19] D.I. Onwude, N. Hashim, K. Abdan, R. Janius and G. Chen, "The effectiveness of combined infrared and hot-air drying strategies for sweet potato," Journal of Food Engineering, vol. 241, pp. 75–87, 2019.
- [20] C. Chen, I. Wongso, D. Putnam, R. Khir and Z. Pam, "Effect of hot air and infrared drying on the retention of cannabidiol and terpenes in industrial hemp (Cannabis sativa L.)," Industrial Crops & Products, vol. 172, 2021.
- [21] D.G. Praveen Kumar, H. Umesh Hebbar and M.N. Ramesh, "Suitability of thin layer models for infrared-hot air-drying of onion slices," LWT (Food Science and Technology), vol. 39, pp. 700-705, 2006.
- [22] H. S. EL-Mesery, R. M. Kamel and R.Z. Emara, "Influence of infrared intensity and air temperature on energy consumption and physical quality of dried apple using hybrid dryer," Case Studies in Thermal Engineering, vol. 27, 2021.

- [23] N. Pothisri, S. Jaturonglamlert, C. Nitatwichit and C. Warit, "Combined convective and infrared radiation drying kinetics of *Spirogyra* sp.," The 40th National Graduate Research Conference, Thailand, 2016, pp. 325-334.
- [24] Z. Geng, M. Torki, M. Kaveh, M. Beigi and X. Yang, "Characteristics and multi-objective optimization of carrot dehydration in a hybrid infrared /hot air dryer," *LWT - Food Science and Technology*, vol. 172, 2022.
- [25] Q. Chen, J. Bi, X. Wu, J. Yi, L. Zhou and Y. Zhou, "Drying kinetics and quality attributes of jujube (*Zizyphus jujuba* Miller) slices dried by hot-air and short- and medium-wave infrared radiation," *LWT - Food Science and Technology*, vol. 64, pp. 759 – 766, 2015.
- [26] H. Umesh Hebbar, K.H. Vishwanathan and M.N. Ramesh, "Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables," *Journal of Food Engineering*, vol. 65, pp. 557 – 563, 2004.
- [27] G. Jeevarathinam, R. Pandiselvam, T. Pandiarajan, P. Preetha, M. Balakrishnan, V. Thirupathi and Anjineyulu Kothakota, "Infrared assisted hot air dryer for turmeric slices:Effect on drying rate and quality parameters," *LWT - Food Science and Technology*, vol. 144, 2021.
- [28] S. A. Aboud, A.B. Altemimi, A. R. S. Al-Hilphy, L. Yi-Chen and F. Cacciola, "A Comprehensive Review on Infrared Heating Applications in Food Processing," *MDPI Journals*, vol. 24, no. 22, pp. 4125, 2019.
- [29] A. MÜLLER, M. T. NUNES, V. MALDANER, P. C. CORADI, R. S. de MORAES, S. MARTENS, A. F. LEAL, V. F. PEREIRA and C. K. MARIN, "Rice Drying, Storage and Processing: Effects of Post-Harvest Operations on Grain Quality," *Rice Science*, vol. 29, no. 1, pp. 16 – 30, 2022.
- [30] S. Khomkaew, "Temperature of Recirculation batch drying the paddy had an effect on aroma (2AP)," *Srinakharinwirot University Engineering Journal*, vol. 16, no. 3, pp. 1 – 9, 2021.
- [31] X. Zheng and Y. Lan, "Effects of Drying Temperature and Moisture Content on Rice Taste Quality," *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*, vol. 10, 2007.
- [32] X. Z. Zheng and X. D. Zhao, "Calculation of taste value and study on drying quality of rice," *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, vol. 30, pp. 54 – 60, 2000.
- [33] C. N. Nguyen and O. R. Kunze, "Fissures Related to Post-Drying Treatments in Rough Rice," *Cereal chemistry*, vol. 61, no. 1, pp. 63 – 68, 1984.
- [34] AOAC, *Official Method of Analysis of AOAC International*. Virginia: Association of Official Analytical Chemists, 1995.
- [35] N. Saelim, T. Treeamnuak and K. Treeamnuak, "Development of a Continuous Flow Paddy Dryer with Infrared Radial Radiation Technique," *RMUTP Research Journal*, vol. 12, no. 2, Jul.-Dec. 2018.

- [36] J. Chu, A. Lane, and D. Conklin, "Evaporation of liquids into their superheated vapors," Ind Eng Chem, vol. 53(3), pp. 275 – 280, 1953.
- [37] T.M. Afzal, T. Abe, and Y. Hiikida, "Energy and Quality Aspects during Combined FIR-Convection Drying of Barley," International Journal of Food Engineering, Vol. 42, pp. 177-782, 1999.
- [38] G. P. Sharma, R.C Verma, and P. Pathare, "Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices," Journal of Food Engineering; 17(3): 282-286, 2006.