

การประยุกต์ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนกับหวดนึ่งข้าวเหนียว
Enhancing Glutinous Rice Steaming Efficiency Using a Thermosyphon Heat Exchanger

นำพน พิพัฒน์ไพบูลย์^{1,2}, สมพร หงษ์กง^{1,2}, เรืองชัย ตาแสง², สยาม ประจูดทะศรี²
ธวัช กองสี^{1,2}, เขตพงศ์ อินทรชัยศรี¹, ไพโรทูล ไชยวงศา¹, นีรุต อ่อนสลุง^{1,2}, สัมพันธ์ ทองแดง^{1,2}
กฤษฎากร บุคตาจันทร์³, ธีญา ปรเมษฐานูวัฒน์³, ศรัณย์ บุญโน¹, สุรเชษฐ สีชำนาญ^{1,2*}

Namphon Pipatpaiboon^{1,2}, Somporn Hongkong^{1,2}, Ruangchai Tasang², Siam Prajudthasri²
Thawach Kongsee^{1,2}, Khetpong Inchairi¹, Praitoon Chaiwongsa¹, Nirut Onsalung¹
Sanhawat Thongdaeng^{1,2}, Khridsadakhon Booddachan³, Thanya Parametthanuwat³
Saran boonno¹, Surachet Sichamnan^{1,2*}

¹สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
199 หมู่ 3 ตำบลพังโคน อำเภอพังโคน จังหวัดสกลนคร 47160

²หน่วยวิจัยวิศวกรรมพลังงานความร้อนและการกลั่น (ในกระบวนการและอุปกรณ์ที่ออกแบบ)
คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
199 หมู่ 3 ตำบลพังโคน อำเภอพังโคน จังหวัดสกลนคร 47160

³ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรเพื่ออุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีและการจัดการอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตปทุมธานี
129 หมู่ 21 ตำบลเนินหอม อำเภอเมือง จังหวัดปทุมธานี 25230

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Industry and Technology
Rajamangala University of Technology Isan, Sakonnakhon Campus,

199 Village No. 3, Phang Khon Subdistrict, Phang Khon District, Sakon Nakhon Province 47160

²Thermal Energy and Distillation Engineering Research Unit (in the process and equipment designed)
Faculty of Industry and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Sakonnakhon Campus
199 Village No. 3, Phang Khon Subdistrict, Phang Khon District, Sakon Nakhon Province 47160

³Department of Agricultural Engineering for Industry, Faculty of Industrial Technology and Management
King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Prachinburi Campus
129 Village No. 21, Noen Hom Subdistrict, Mueang District, Prachinburi Province 25230

*¹Corresponding author: Tel.: 096-8092531. E-mail address: surachet.si@muti.ac.th

Received: 26 July 2024, Revised: 3 October 2024, Accepted: 10 November 2024, Published online: 30 December 2024

Abstract

This research focuses on the application of a thermosyphon (TPCT) system integrated with a steamer designed for steaming glutinous rice. The study investigated the effects of various factors, including

fuel consumption rates of liquefied petroleum gas (LPG) at 0.50, 1.00, and 1.50 kg/h, and steaming durations of 5.00, 10.00, 15.00, and 20.00 minutes, using the RD6 variety of glutinous rice. The TPCT system installed on the steamer consisted of six pipes made from grade 304 stainless steel, each with a diameter of 21.34 mm and a total length of 200.00 mm. These pipes were divided into an evaporation section and a condensing section, each measuring 100.00 mm in length. Water was used as the working fluid, filled to 50% of the evaporation section's volume. The study found that at a fuel consumption rate of 1.50 kg/h and a steaming time of 15.00 minutes, the use of the TPCT system resulted in an average condensate pipe surface temperature of 130.00 °C, the highest observed in all test conditions. This facilitated effective heat transfer to the glutinous rice, achieving efficiency of 76.61%, which was 15.52% higher than the steamer without TPCT integration. The TPCT system also reduced the steaming time by 2.50 minutes, leading to a decrease in LPG fuel costs of 0.71 baht per use. If used twice daily, this translates to an annual cost saving of 518.30 THB. The texture of the steamed glutinous rice was evaluated using a Texture Analyzer to simulate chewing. The glutinous rice steamed with the TPCT system at a fuel consumption rate of 1.50 kg/h and a steaming time of 15.00 minutes had an average chewing force of 379.00 N, compared to 329.00 N without the TPCT system. The standard deviations were 9.91% and 8.39%, respectively. An economic analysis of the system revealed a payback period of 2.60 years, demonstrating the feasibility and cost-effectiveness of the TPCT-enhanced steaming system.

Keywords: Thermosyphon, Sticky Rice, Sticky Rice Steaming Basket, Heat transfer

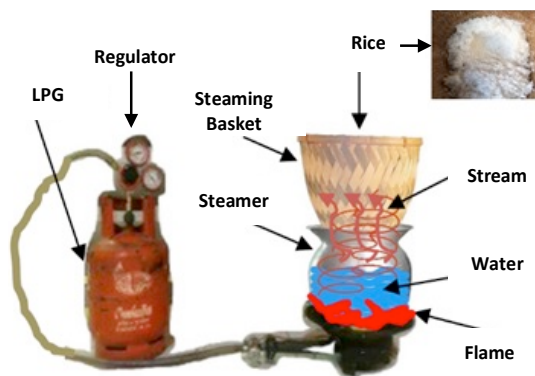
บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้เทอร์โมไซฟอน (TPCT) กับหวด ซึ่งถือเป็นอุปกรณ์เพื่อใช้กับกระบวนการนึ่งข้าวเหนียวสำหรับตัวแปรทดสอบในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย อัตราการป้อนสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (LPG) 0.50, 1.00 และ 1.50 kg/hr เวลาในการนึ่งข้าวเหนียว 5.00, 10.00, 15.00 และ 20.00 minutes ใช้ข้าวเหนียวพันธุ์ กข.6 และ TPCT ที่ติดตั้งเข้ากับหวดทำจากท่อสแตนเลสเกรด 304 เส้นผ่านศูนย์กลาง 21.34 mm จำนวน 6 ท่อ ความยาวรวมของแต่ละท่อ 200.00 mm แบ่งออกเป็นส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นอย่างละ 100.00 mm ใช้น้ำเป็นสารทำงานที่อัตราการเติม 50% ของปริมาตรส่วนทำระเหย จากการทดสอบพบว่า อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 1.50 kg/h ที่เวลาในการนึ่ง 15.00 minutes ที่กรณีประยุกต์ใช้เทอร์โมไซฟอนกับหวดนึ่งข้าวเหนียว มีอุณหภูมิที่ผิวท่อส่วนควบแน่นเฉลี่ยตลอดการทดสอบ 130.00 °C ซึ่งมีค่าที่สูงกว่าในทุก ๆ กรณีทดสอบ นำมาซึ่งการถ่ายเทความร้อนสู่ข้าวเหนียวในหวดขณะนึ่งได้ดี โดยมีประสิทธิผลเท่ากับ 76.61% สูงกว่ากรณีที่ไม่มีการประยุกต์ใช้ TPCT ถึง 15.52% สามารถลดระยะเวลาความสุกของข้าวเหนียวลงได้ 2.50 minutes นำมาซึ่งการลดค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG ต่อครั้ง 0.71 bath ถ้านึ่งวันละ 2 ครั้ง จะลดค่าใช้จ่าย 518.30 bath/year นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของข้าวเหนียวด้วยวิธี Texture analyzer ด้วยการจำลองการเคี้ยวสำหรับข้าวเหนียวที่นึ่งจากการประยุกต์ใช้ TPCT ที่อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 1.5 kg/hr ที่เวลาในการนึ่ง 15 minutes และที่ไม่มีการติดตั้ง TPCT ซึ่งจะมีค่าเฉลี่ยของแรงเคี้ยวเท่ากับ 379.00 N, 329.00 N และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 9.91%, 8.39% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ในกรณีทดสอบดังกล่าวนี้จะมีจุดคืนทุนเท่ากับ 2.60 years

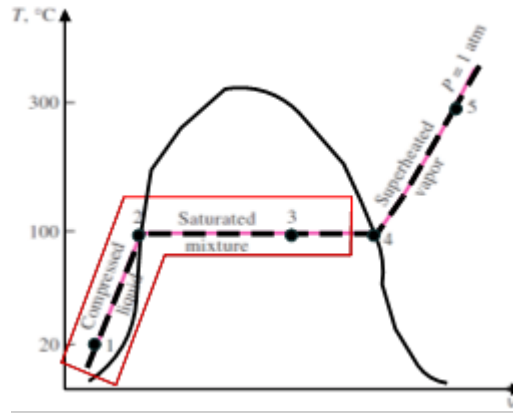
คำสำคัญ: เทอร์โมไซฟอน ข้าวเหนียว หวดนึ่งข้าวเหนียว การถ่ายเทความร้อน

บทนำ

ข้าวถือเป็นแหล่งอาหารที่ให้พลังงานด้านคาร์โบไฮเดรตเป็นหลักหรือเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการแปรรูปไปสู่รูปแบบของอาหารต่าง ๆ ที่ทั่วโลกให้ความสำคัญ ยิ่งโดยเฉพาะภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้รวมถึงประเทศไทยนั้น ถือเป็นแหล่งปลูกข้าวรายใหญ่ที่มีความสำคัญต่อการเป็นแหล่งอาหารของประชากรทั่วโลก ซึ่งในส่วนของประเทศไทยนั้นโดยเฉพาะภาคอีสานหรือภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย มีการบริโภคข้าวเหนียวเป็นอาหารหลัก และอาชีพส่วนใหญ่ของประชากรในแถบนี้มีอาชีพเป็นเกษตรกร ทำนาทำสวน ปลูกผัก และเลี้ยงสัตว์ เป็นต้น ข้าวเหนียวถือเป็นอาหารที่ต้องบริโภคและมีตลอดสามมื้อของการรับประทานอาหาร ซึ่งในกระบวนการและขั้นตอนของการนึ่งข้าวเหนียว ต้องมีการใช้เชื้อเพลิง พลังงานเข้ามาสำหรับกระบวนการ เพื่อทำให้น้ำที่บรรจุอยู่ในหม้อหนึ่งมีการเดือดและกลายเป็นไอน้ำ ไอน้ำจะลอยขึ้น เคลื่อนที่ผ่านข้าวเหนียวที่บรรจุอยู่ในหวดจนข้าวเหนียวสุก สำหรับขั้นตอนและอุปกรณ์ที่ใช้ในการนึ่งข้าวเหนียวดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งแสดงขั้นตอนและอุปกรณ์ที่ใช้ในการนึ่งข้าวเหนียว จะเห็นว่าแหล่งให้พลังงานนั้นคือการใช้แก๊สหุงต้ม ให้พลังงานความร้อนผ่านเปลวไฟและไปต้มน้ำที่บรรจุอยู่ภายในหม้อหนึ่งจนน้ำเดือดกลายเป็นไอน้ำ ไอน้ำก็จะเคลื่อนที่และลอยตัวผ่านข้าวเหนียวที่บรรจุอยู่ในหวดจนข้าวเหนียวสุกพร้อมรับประทาน ข้าวเหนียวสุกจะมีลักษณะของเม็ดข้าวที่ใสขึ้นเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า ซึ่งจะเห็นได้ว่านอกจากมีแหล่งให้พลังงานความร้อนแล้วนั้น ยังพบว่ามีแหล่งรับพลังงานความร้อนนั้นคือข้าวเหนียวที่จะนึ่งในหวด ด้วยลักษณะของกระบวนการในการนึ่งข้าวเหนียวจะมีความแตกต่างของอุณหภูมิจากสองแหล่งพลังงาน เพราะฉะนั้นถ้าสามารถนำความร้อนจากน้ำร้อนและไอน้ำที่อยู่ในหม้อหนึ่งที่สถานะของเหลวไม่อึดตัวไปจนถึงสถานะของผสมระหว่างของเหลวและไอน้ำในเส้นกรอบสีแดงดังแสดงในรูปที่ 2 ที่แสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะและสถานะของน้ำที่มีความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตร (v) กับอุณหภูมิ (T) เพราะฉะนั้นถ้ามีการถ่ายเทความร้อนไปสู่ข้าวเหนียวที่อยู่ในหวดได้เร็วขึ้นเท่าไร ย่อมส่งผลต่อการใช้ระยะเวลาที่สั้นลงในการทำให้ข้าวเหนียวสุก นำมาซึ่งการใช้พลังงานที่น้อยลงและค่าใช้จ่ายในการซื้อแก๊สหุงต้ม ประกอบกับทางผู้วิจัยได้มีการศึกษาเกี่ยวกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดหนึ่งที่เรียกว่า เทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ (Two Phase Closed Thermosyphon, (TPCT) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า “เทอร์โมไซฟอน” โดยมีแนวคิดที่นำอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน [1-3] ดังกล่าวไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการหรืออุปกรณ์ของการนึ่งข้าวเหนียวที่เรียกว่า “หวด”



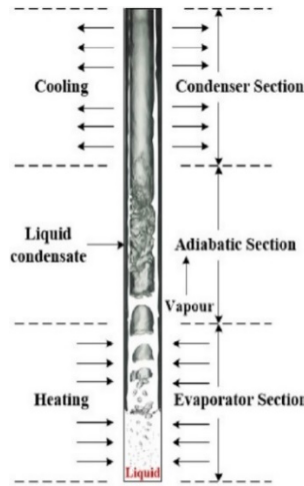
รูปที่ 1 การติดตั้งอุปกรณ์และขั้นตอนในการนึ่งข้าวเหนียว



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงสถานะและสถานะของน้ำที่ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตร (v) กับอุณหภูมิ (T) [4-5]

เทอร์โมไซฟอน (TPCT) คืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดหนึ่ง มีลักษณะที่แบ่งออกเป็น 3 ส่วนประกอบด้วย ส่วนทำระเหย (Evaporation section) ส่วนกั้นความร้อน (Adiabatic section) และส่วนควบแน่น (Condenser section) ตามลำดับ วัสดุที่ใช้ในการทำเทอร์โมไซฟอนมีหลายประเภท เช่น ท่อทองแดง ท่อสแตนเลส และท่อเหล็ก เป็นต้น มีการเชื่อมปิดหัวท้ายของท่อดังกล่าว โดยภายในท่อถูกทำให้เป็นสุญญากาศพร้อมๆ กับการบรรจุสารทำงาน (Working fluids) เข้าไปภายในท่อดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งแสดงลักษณะและหลักการทำงานของเทอร์โมไซฟอน (TPCT) เมื่อส่วนทำระเหยได้รับความร้อน (Heating) จากแหล่งให้ความร้อน (Heat source) ความร้อนจะถ่ายเทสู่ผนังท่อและซึมผ่านผนังท่อสู่สารทำงานที่บรรจุอยู่ภายในส่วนทำระเหย ส่งผลให้สารทำงานที่อยู่ในสถานะของเหลวอิ่มตัว เกิดการเดือดโดยเริ่มเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอ ไอจะลอยผ่านส่วนกั้นความร้อนและเข้าสู่ส่วนควบแน่นตามลำดับ เกิดการระบายความร้อนให้กับแหล่งรับความร้อน (Heat sink) ที่บริเวณส่วนควบแน่น และสารทำงานที่อยู่ในสถานะไอจะเกิดการควบแน่นกลายเป็นของเหลวไหลลงตามขอบด้านในของผนังท่อด้วยน้ำหนักที่มีมากขึ้นจากสถานะที่เป็นของเหลว ก็จะไหลลงสู่ส่วนทำระเหยด้วยอาศัยหลักการของแรงโน้มถ่วงของโลก [1-3]

ด้วยวัตถุประสงค์และความต้องการที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้น นำมาซึ่งแนวคิดที่จะนำความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนที่สะสมในน้ำร้อนและไอน้ำที่อยู่ในหม้อหนึ่ง ให้สามารถถ่ายเทความร้อนไปสู่ข้าวสารที่อยู่ในหวดได้เร็วขึ้น จะลดการใช้พลังงานในขั้นตอนของการนึ่งข้าวเหนียวที่จะนำมาซึ่งข้อดีหลายๆ อย่าง เช่น ค่าใช้จ่ายในการซื้อแก๊สหุงต้มที่ลดลง, มีเงินเก็บสะสมที่มากขึ้นและรายจ่ายที่ลดลงสำหรับครอบครัว, การใช้ระยะเวลาในการนึ่งข้าวเหนียวที่ลดลง รวมถึงการกระจายความร้อนที่ทั่วถึงในทุกส่วนพื้นที่ของข้าวสารที่สัมผัสกันที่บรรจุอยู่ในหวด เพราะฉะนั้นจึงเป็นที่มาของการศึกษาการประยุกต์ใช้งานเทอร์โมไซฟอน (TPCT) กับหวดนึ่งข้าวเหนียว โดยเป็นในลักษณะของการออกแบบและสร้างเทอร์โมไซฟอนที่ติดตั้งเข้ากับหวดนึ่งข้าว เพื่อทดสอบหาสถานะที่เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งาน รวมถึงการได้ผลลัพธ์การสุกของข้าวเหนียวที่มีความเหมาะสมกับการรับประทานด้วยการวิเคราะห์ด้วยรูปแบบ Texture analyzer พร้อม ๆ กับเปรียบเทียบการสุกของข้าวเหนียวด้วยการสุ่มซื้อข้าวเหนียวจากร้านอาหารทั่ว ๆ ไปและนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีของ Texture analyzer เช่นเดียวกับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบในครั้งนี้



รูปที่ 3 ลักษณะและหลักการทำงานของเทอร์โมไซฟอน (TPCT) [1]

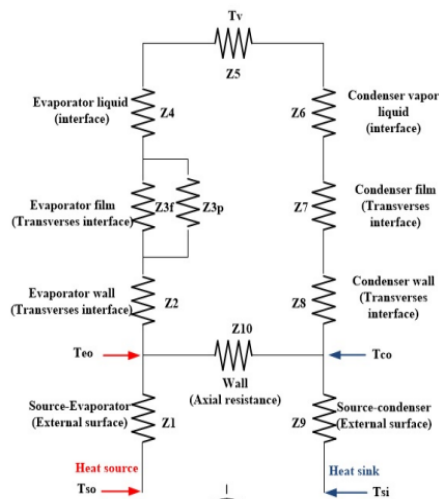
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอน (TPCT) ตามทฤษฎี ($Q_{\text{Theoretical}}$, (W)) จะสามารถคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนได้จากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างเครื่องส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น (ΔT , (°C)) เทียบกับความต้านทานความร้อนรวม (Z_{total} , (°C/W)) ดังแสดงในสมการ (1) และ (2) [6]

$$Q_{\text{Theoretical}} = \Delta T / Z_{\text{total}} \quad (1)$$

$$\Delta T = (T_{h,\text{in}} - T_{c,\text{out}}) - (T_{h,\text{out}} - T_{c,\text{in}}) / \ln \frac{(T_{h,\text{in}} - T_{c,\text{out}})}{(T_{h,\text{out}} - T_{c,\text{in}})} \quad (2)$$

กำหนดให้ Z_{total} คือความต้านทานความร้อนรวมที่ส่วนต่างๆ ของเทอร์โมไซฟอน (°C/W) แบ่งได้เป็น 3 ส่วนดังต่อไปนี้ Z_1, Z_9 เป็นความต้านทานความร้อนระหว่างแหล่งทำความร้อนและพื้นผิวท่อภายนอกที่ส่วนทำระเหยและความต้านทานความร้อนระหว่างแหล่งตัวรับความร้อนและพื้นผิวท่อด้านนอกของส่วนควบแน่น (°C/W) ตามลำดับ Z_2, Z_8 เป็นความต้านทานการนำความร้อนที่ไหลผ่านผนังท่อบริเวณส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น (°C/W) ตามลำดับ $Z_3, Z_4, Z_5, Z_6, Z_{10}$ เป็นความต้านทานความร้อนของชิ้นงานของเหลวภายในท่อของสหรน้ำเดือดและฟิล์ม (°C/W) ซึ่งสามารถพิจารณาจากแบบจำลองความต้านทานความร้อนรวมของเทอร์โมไซฟอนดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แบบจำลองความต้านทานความร้อนรวมเทอร์โมไซฟอน (TPCT) [7, 8]

สำหรับการถ่ายเทความร้อนจากการประยุกต์ใช้งานเทอร์โมไซฟอน (TPCT) กับหวดหนึ่งข้าวเหนียวนั้น จะคำนวณได้ด้วยลักษณะของการพาความร้อนและการนำความร้อนดังแสดงในสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ ซึ่งการนำความร้อนนั้นจะพิจารณาที่ส่วนควบแน่นของเทอร์โมไซฟอนสู่เมล็ดข้าวเหนียว ซึ่งถูกวางและเรียงตัวแบบแนบแน่นและติดกัน พร้อม ๆ กันกับการนำความร้อนระหว่างตัวเมล็ดข้าวสู่เมล็ดข้าว

$$Q_{\text{sticky rice}} = m_{\text{sticky rice}} c_{p,\text{sticky rice}} (T_{\text{paddy,intial}} - T_{\text{paddy,final}}) \quad (3)$$

โดยที่ $Q_{\text{sticky rice}}$ คือพลังงานความร้อนที่ใช้ทำให้ข้าวเหนียวสุก (kJ)
 $m_{\text{sticky rice}}$ คือมวลของข้าวเหนียว (kg)
 $c_{p,\text{sticky rice}}$ คือค่าความจุความร้อนของข้าวเหนียว (kJ/kg · °C)
 $T_{\text{paddy,intial}}, T_{\text{paddy,final}}$ คืออุณหภูมิข้าวเหนียวก่อนนึ่งสุกและหลังนึ่งสุก (°C)
 สำหรับพลังงานความร้อนที่ต้องใช้ในการทำให้น้ำเดือด ที่บรรจุในส่วนของหม้อหนึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$Q_{\text{boiling water}} = m_{\text{water}} L_{\text{water}} \quad (4)$$

โดยที่ $Q_{\text{boiling water}}$ คือปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ในการทำให้น้ำเดือด (kJ)
 m_{water} คือมวลของน้ำที่บรรจุในหม้อหนึ่ง (kg)
 L_{water} คือความร้อนแฝงจำเพาะของน้ำที่กลายเป็นไอ (kJ/kg)

ประสิทธิภาพของเทอร์โมไซฟอน (TPCT) ที่ติดตั้งเข้าไปในหวดหนึ่งข้าวสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5) และ (6)

$$\varepsilon = \frac{Q_{\text{sticky rice}}}{Q_{\text{boiling water}}} \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{Q_{\text{sticky rice}}}{C_{\min} (T_{\text{evaporation section}} - T_{\text{condenser section}})}$$

$$C_{\min} = (\dot{m}C_p)_{\min} \quad (6)$$

กำหนด ε คือประสิทธิภาพของเทอร์โมไซฟอนที่ติดตั้งเข้าไปในหวดหนึ่งข้าว
 C_{\min} คือ การคำนวณระหว่าง $C_c = \dot{m}_c C_{p,c}$ และ $C_h = \dot{m}_h C_{p,h}$
 $Q_{\text{sticky rice}}$ คือปริมาณความร้อนที่ใช้ทำให้ข้าวเหนียวสุก (kJ)
 $Q_{\text{boiling water}}$ คือปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ในการทำให้น้ำเดือด (kJ)
 $\dot{m}_c = \dot{m}_{\text{sticky rice}}$ คือมวลของข้าวเหนียวต่อระยะเวลาที่ใช้ในการนึ่งที่ส่วนของหวด (kg/s)
 $C_{p,c}$ คือความจุความร้อนจำเพาะของข้าวเหนียวที่นึ่งบริเวณหวด (kJ/kg · °C)
 $\dot{m}_h = \dot{m}_{\text{water}}$ คือมวลของน้ำต่อระยะเวลาที่ใช้ในการทำให้น้ำเดือดที่ส่วนของหม้อหนึ่ง (kg/s)
 $C_{p,h}$ คือความจุความร้อนจำเพาะของน้ำที่บริเวณหม้อหนึ่ง (kJ/kg · °C)

สำหรับการวิเคราะห์หาค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงหรือพลังงาน (แก๊สหุงต้ม (LPG)) เป็นถึงขนาดคำนวณได้จากสมการที่ (7) และ (8) ตามลำดับ

$$\text{Fuel consumption/minute} = \frac{\text{Fuel consumption}}{\text{Test time in each case}} \quad (7)$$

$$\text{Energy consumption when rice is cooked} = \text{Rice cooking time} \times \frac{\text{Fuel consumption}}{\text{(minute)}} \quad (8)$$

โดยที่ Fuel consumption/minute คือ การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่อนาที, (kg/min)
 Fuel consumption คือ การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง, (kg)
 Test time in each case คือ เวลาทดสอบในแต่ละกรณีทดสอบ, (min)
 Energy consumption when rice is cooked คือ การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงตอนที่ข้าวสุก, (kg)
 Rice cooking time คือ เวลาที่ข้าวสุก, (min)

สำหรับกรณีการออกแบบดังแสดงในรูปที่ 5 แสดงลักษณะและโครงสร้างของเทอร์โมไซฟอนกับหวดหนึ่งข้าวเหนียว ซึ่งการติดตั้งและจัดเรียงท่อดังแสดงในรูปที่ 5 ในส่วนของรูป (A) และ (B) ตามลำดับ โดยที่ระยะของ S_D, A_i, A_o สามารถคำนวณได้จากสมการ (9) – (11) ตามลำดับ [8]

$$S_D = \left[S_L^2 + \left(\frac{S_T}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

$$A_i = S_T L \quad (10)$$

$$A_o = (S_o - D_o) L \quad (11)$$

โดยที่ S_T คือระยะตามขวาง (m)
 S_L คือระยะพตามยาว (m)
 S_D คือระยะพิทช์แนวทแยง (m)
 L คือความยาวของท่อ (m)

การติดตั้งชุดทดสอบและขั้นตอนการทดสอบ

จากรูปที่ 5 แสดงลักษณะและโครงสร้างของเทอร์โมไซฟอนกับหวดหนึ่งข้าวเหนียวโดยใช้เทอร์โมไซฟอน TPCT จำนวน 6 ท่อประกอบขึ้นเป็นชุด ซึ่ง TPCT ทำจากสแตนเลสสตีล (SS304) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12.70 mm มีความยาวรวมของท่อ 200.00 mm แบ่งเป็นส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นอย่างละ 100.00 mm โดยแต่ละท่อนั้นมีการเชื่อมปิดหัวท้าย และที่ส่วนปลายอีกด้านเชื่อมต่อเข้ากับท่อเติมสารทำงาน ดังแสดงรูปที่ 5 ของรูป (A) สำหรับลักษณะของแผ่นพื้น (PLATE) ที่จะติดตั้งเข้ากับ TPCT ทำมาจาก SS304 มีความหนา 1.00 mm มีขนาดรูที่เป็นลักษณะของตาข่ายขนาดรูละ 3.00 mm เส้นผ่าศูนย์กลาง 170.00 mm มีระยะของ S_L, S_T, A_i, S_D และ A_D เท่ากับ 42.50, 42.50, 42.50, 34.66 และ 34.66 mm ตามลำดับ

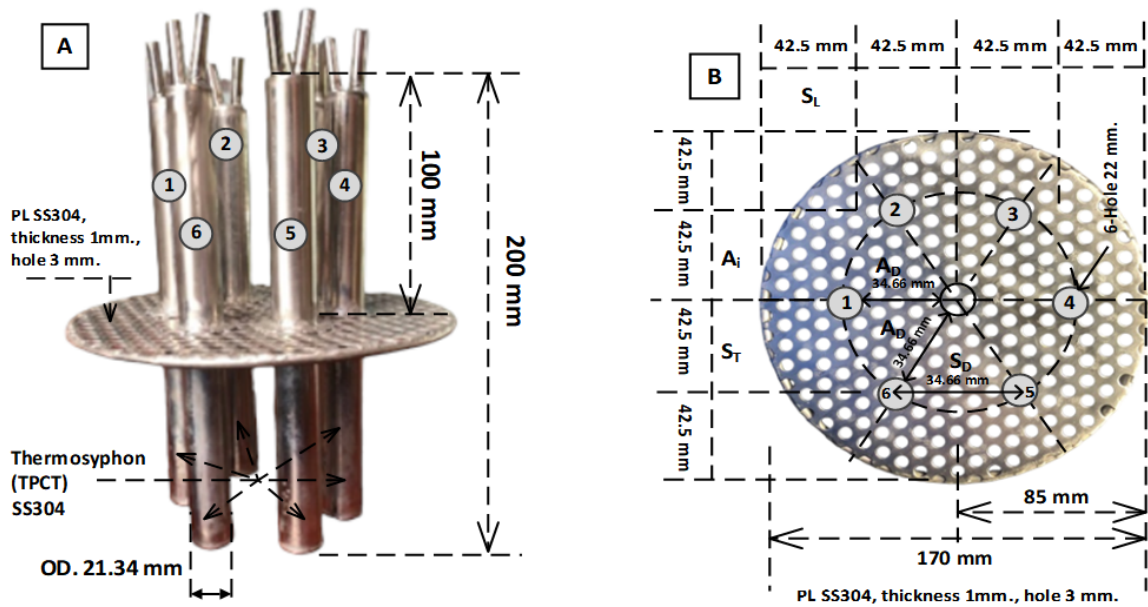
ในส่วนของการติดตั้งและประกอบชุดเทอร์โมไซฟอนกับหวดหนึ่งข้าวเหนียวดังแสดงในรูปที่ 6 เริ่มด้วยการทำสุญญากาศภายในชุดเทอร์โมไซฟอนดังแสดงในรูปที่ 6 ในส่วนของรูป (A) โดยต่อร่วมเข้ากับชุดเติมสารทำงานและปั๊มทำสุญญากาศ หลังจากทำสุญญากาศภายในท่อเสร็จ ก็เติมสารทำงานผ่านชุดเติมสารทำงานผ่านท่อแก้ว สารทำงานเติม 50% ของปริมาตรส่วนทำระเหย โดยใช้สารทำงานที่เป็นน้ำ ด้วยคุณสมบัติของสารทำงานที่เป็นน้ำนั้น จะมีอุณหภูมิของสารทำงาน

อยู่ในช่วงอุณหภูมิต่ำ (Low temperature range) อยู่ในช่วง 200.00 ถึง 550.00 (K, Kelvin) ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิของสารทำงานการใช้งานเทอร์โมไซฟอนจะอยู่ในช่วงนี้เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งน้ำเป็นสารทำงานที่มีความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอและความตึงผิวสูงตลอดจนมีความปลอดภัยขณะใช้งาน [6]

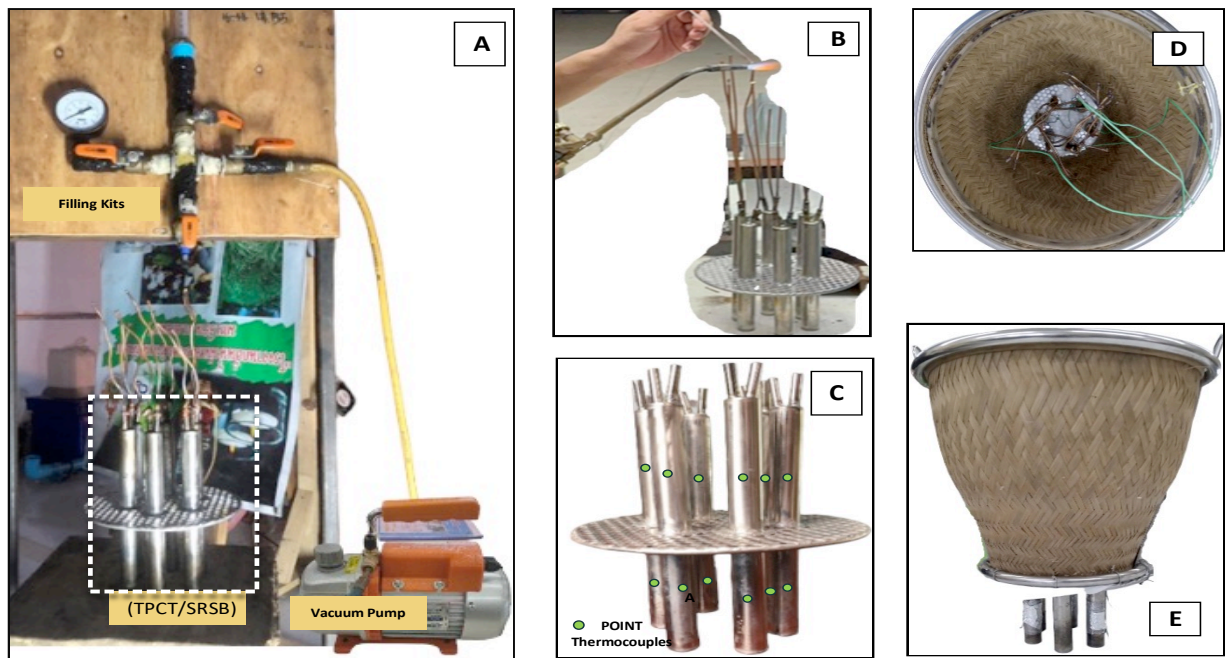
และทำการเชื่อมปิดดังแสดงในรูปที่ 6 ในส่วนของรูป (B) โดยมีการติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด K เซ็นเซอร์สำหรับวัดอุณหภูมิ สามารถวัดได้ - 200.00 °C -1372.00 °C ความคลาดเคลื่อน ± 1.50 °C ที่ส่วนควมแน่นบริเวณผิวท่อ 6 จุด ส่วนทำระเหยบริเวณส่วนทำระเหยผิวท่อ 6 จุด น้ำในส่วนของหม้อหนึ่ง 1 จุด และที่บริเวณเนื้อข้าวเหนียวในหวด 6 จุด และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 1 จุด ต่อเข้ากับเครื่องวัดอุณหภูมิหรือ Datalogger ยี่ห้อ Lutron BTM-4208SD สำหรับใช้แสดงผลอุณหภูมิตามจุดที่ต้องการ และบันทึกค่าอุณหภูมิ และทำการประกอบชุดเทอร์โมไซฟอนเข้ากับหวดดังแสดงในรูปที่ 6 ในส่วนของรูป (C), (D) และ (E) ตามลำดับ

ขั้นตอนการทดสอบงานวิจัยนี้มีการประยุกต์ใช้งานเทอร์โมไซฟอนกับหวดหนึ่งข้าวเหนียว ซึ่งในแต่ละกรณีทดสอบจะทำการเปรียบเทียบกับหวดหนึ่งข้าวที่ไม่มีการติดตั้งเทอร์โมไซฟอน สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบสำหรับงานวิจัยนี้ดังแสดงในตารางที่ 1 สำหรับขั้นตอนการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 7

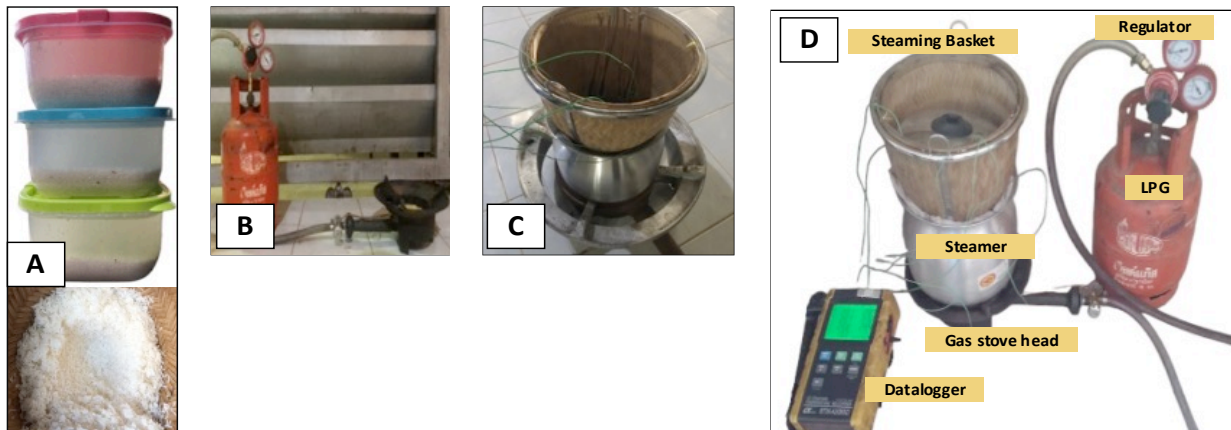
- 1) นำข้าวเหนียวปริมาณ 1 kg มาแช่น้ำด้วยปริมาณน้ำที่เท่ากัน และระยะเวลาที่เท่า ๆ กันในทุกกรณีทดสอบ ทั้งในกรณีที่ตั้งและไม่ได้ติดตั้งชุดเทอร์โมไซฟอน (TPCT) ดังแสดงในรูปที่ 7
- 2) นำข้าวที่ได้จากการแช่น้ำ ยกออกจากน้ำและนำไปใส่ในหวด ทั้งในกรณีที่ตั้งและไม่ได้ติดตั้งชุดเทอร์โมไซฟอน (TPCT) ดังแสดงในรูปที่ 7 ในส่วนของรูป (A)
- 3) นำหวดที่บรรจุข้าวเหนียวพร้อมวางบนหม้อ โดยมีการใส่น้ำในหม้อหนึ่งปริมาณที่เท่ากันในทุก ๆ กรณีทดสอบ หลังจากนั้นนำไปวางบนหัวเตาแก๊สที่มีการต่อสายแก๊สเข้ากับถังเชื้อเพลิงแก๊ส ดังแสดงในรูปที่ 7 ในส่วนของรูป (B) และ (C) ทั้งในกรณีที่ตั้งและไม่ได้ติดตั้งชุดเทอร์โมไซฟอน (TPCT)
- 4) ต่อสายเทอร์โมคัปเปิ้ลเข้ากับดาต้าล็อกเกอร์ ทำการปิดฝาหวด หลังจากนั้นทำการเปิดแก๊ส จุดไฟ ปรับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง โดยต้องทำการชั่งถังแก๊สก่อนและหลังการทดสอบในทุก ๆ กรณี และทดสอบตามระยะระยะเวลาในการนึ่งข้าวเหนียวให้ครบ ตามขอบเขตและตัวแปรที่ทดสอบดังแสดงในตารางที่ 1 พร้อม ๆ กับบันทึกข้อมูลของอุณหภูมิผ่านดาต้าล็อกเกอร์ตั้งแต่แรกเริ่มของการทดสอบ รวมถึงการใช้อุปกรณ์การยิง Thermal Scanned วัดค่าสิ้นความร้อนทั้งในกรณีที่ตั้งและไม่ได้ติดตั้งชุด TPCT ดังแสดงในรูปที่ 7 ในส่วนของรูป (D) สำหรับข้าวสารที่ใช้ในการทดสอบสำหรับงานวิจัยนี้คือข้าวเหนียวสายพันธุ์ กข6 เป็นพันธุ์ข้าวเหนียวหอม ที่ไว ต่อช่วงแสงดังแสดงในรูปที่ 8 เป็นพันธุ์ข้าวเหนียวที่ได้รับการปรับปรุงจากพันธุ์จากข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่มีการคัดเลือกทั้งข้าวสายพันธุ์ดีทั้งสายพันธุ์ของข้าวเจ้าและข้าวเหนียว มีการปลูกทดสอบผลผลิตระหว่างสถานีและในนาของเกษตรกรในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือระหว่างปี พ.ศ. 2514-2519 ผล ปรากฏว่า สายพันธุ์ KDML 105'65-G3U-68-254 ซึ่งเป็นสายพันธุ์ข้าวเหนียว นุ่ม มีกลิ่นหอม ทนแล้ง และมีคุณภาพการหุงต้มรับประทานดี ให้ผลผลิตเฉลี่ยสูงสุด กรมวิชาการเกษตรจึงพิจารณาให้เป็นพันธุ์รับรองและแนะนำให้เกษตรกรปลูก [9, 10]



รูปที่ 5 ลักษณะและโครงสร้างของเทอร์โมไซฟอนกับหวดหนึ่งข้าวเหนียว
 (A) การติดตั้ง TPCT เข้ากับแผ่น PLATE (B) และ (B) ลักษณะ PLATE ที่จะติดตั้งเข้ากับ TPCT



รูปที่ 6 แสดงการติดตั้งและประกอบชุดเทอร์โมไซฟอนกับหวดหนึ่งข้าวเหนียว



รูปที่ 7 การติดตั้งชุดทดสอบและการทดสอบ

ตารางที่ 1 ขอบเขตงานวิจัยและตัวแปรที่ทดสอบ

ประเภท	รายละเอียด
ตัวแปรต้น	-ระยะเวลาในการนึ่งข้าวเหนียว (minutes) 5.00, 10.00, 15.00 และ 20.00 -อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง LPG (kg/hr) 0.50, 1.00 และ 1.50 -กรณีติดตั้งและไม่ติดตั้งชุดเทอร์โมไซฟอน (TPCT)
ตัวแปรตาม	-การลดลงของพลังงานเชื้อเพลิง LPG -การกระจายอุณหภูมิความร้อน -ค่าใช้จ่ายการนึ่งข้าวที่ลดลงต่อปี -เนื้อสัมผัสของข้าวเหนียว (Texture analyzer) -ประสิทธิภาพของชุดเทอร์โมไซฟอนที่ติดตั้งเข้าไปในหวดนึ่งข้าว
ตัวแปรควบคุม	-ระยะเวลาในการแช่ข้าวเหนียวก่อนนึ่งที่เท่ากัน -ปริมาณน้ำในการแช่ข้าวเหนียวที่เท่ากัน -ปริมาณของข้าวเหนียวที่เท่ากัน 1.00 kg -แหล่งที่มาของข้าวเหนียวเดียวกัน -ข้าวเหนียวพันธุ์ กข6 -หวดนึ่งข้าวมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้านบนและด้านล่าง 240.00 mm และ 150.00 mm ตามลำดับ และมีความสูง 280.00 mm

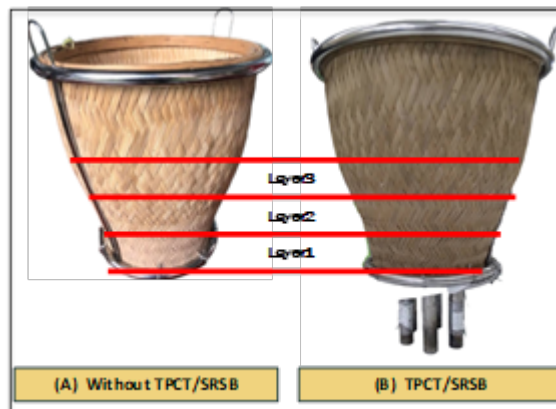


รูปที่ 8 ข้าวเหนียวสายพันธุ์ กข6

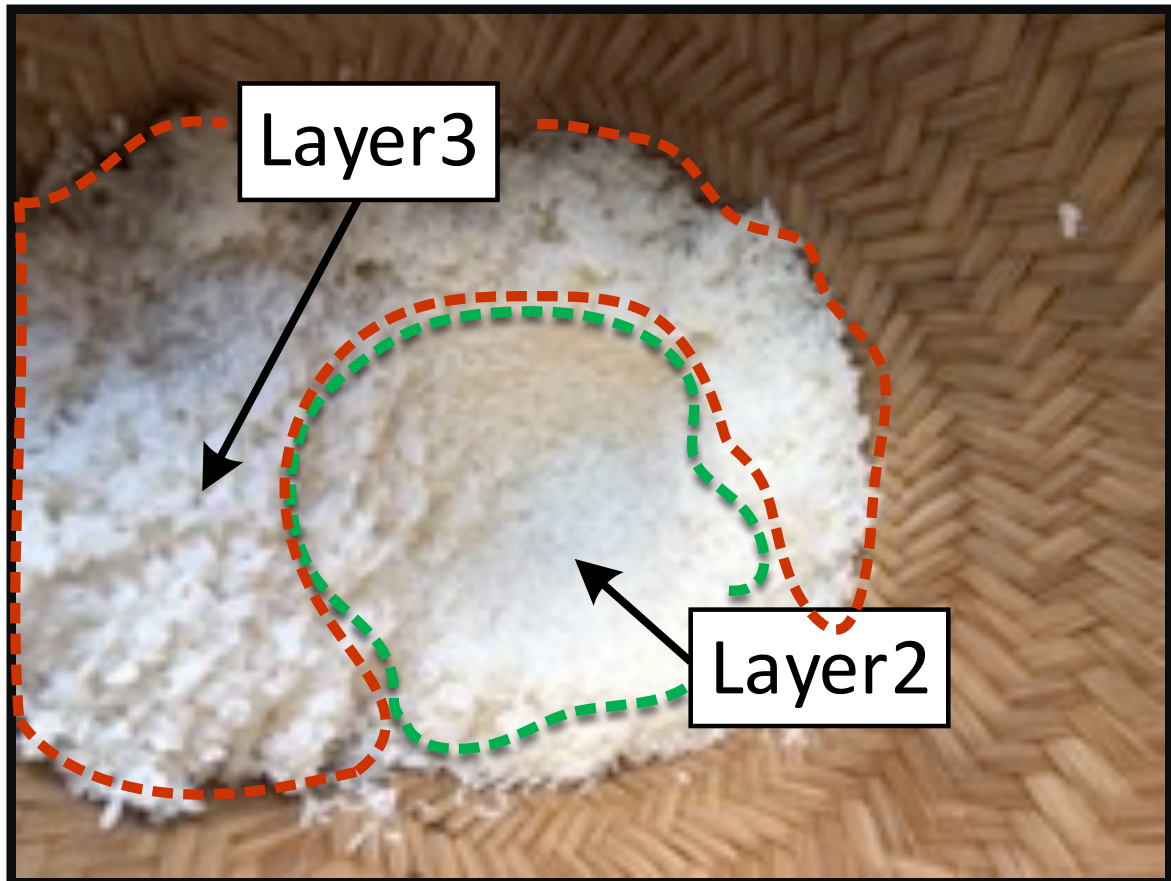
การวิเคราะห์ข้อมูล

สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจะแบ่งการวิเคราะห์ข้อมูลออกได้ตามขั้นตอนดังนี้

- 1). ในการพิจารณาความสุกของข้าวเหนียวตามระดับของชั้นหวดที่ชั้นที่1 ชั้นที่2 และชั้นที่3 ดังแสดงในรูปที่ 9 โดยพิจารณาความสุกของข้าวเหนียวตามตัวแปรต้นที่ทดสอบดังแสดงในตารางที่ 1
- 2). ด้วยกรณีทดสอบทั้งที่มีการติดท่อและไม่มีการติดท่อเทอร์โมไซฟอน (TPCT) ที่มีการทดสอบตามตัวแปรต้น ในการวิเคราะห์ความสุกของข้าวเหนียว การวิเคราะห์แรกเริ่มแบบการใช้ประสาทสัมผัส เช่น กลิ่นความหอมของข้าวที่สุก รสชาติจากการชิมที่สุก การเตะสัมผัสด้วยมือ สีของเมล็ดข้าวที่สุกจะสีใสจากการมองเห็น ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ความสุกแต่ละชั้นข้าวในหวดตั้งแต่ชั้นที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ทั้งในกรณีที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งท่อเทอร์โมไซฟอน (TPCT) เพื่อนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความสุกของข้าวเหนียวในขั้นตอนนี้ไปวิเคราะห์ด้วยรูปแบบและเครื่องมือที่ละเอียดต่อไปในขั้นตอนถัดไป
- 3). สำหรับกรณีที่ทดสอบแล้วข้าวเหนียวไม่สุก ไม่เหมาะที่จะการนำมารับประทาน เช่น ข้าวมีการแฉะ หรือข้าวมีความแข็งดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 9 ลำดับชั้นข้าวที่ใช้พิจารณาความสุกของข้าวเหนียว



รูปที่ 10 ลักษณะของข้าวและบริเวณชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 ที่พิจารณาเปรียบเทียบหลังการทดสอบ

4) จากการวิเคราะห์ข้อมูลและขั้นตอนการทดสอบ พิจารณาเฉพาะข้าวที่สุกในทุก ๆ ชั้นข้าวดังแสดงในรูปที่ 9 การสุกของข้าวเหนียวที่สุกจากการทดสอบทั้งกรณีที่มีและไม่มีการติดตั้งชุดเทอร์โมไซฟอน (TPCT)

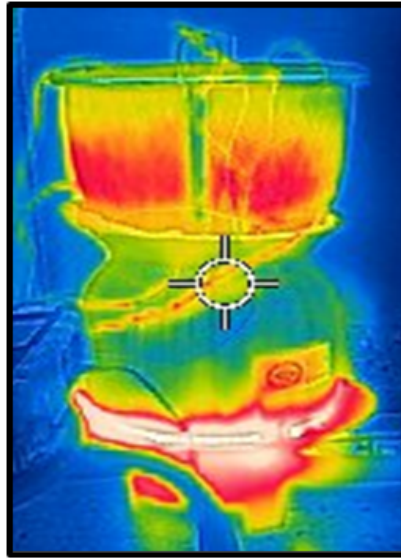
ที่มีกรณีทดสอบร่วมกับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 0.50, 1.00 และ 1.50 kg/hr. ระยะเวลาในการนึ่งข้าวเหนียว 20.00, 15.00 และ 15.00 minutes

5) วิเคราะห์หาผลที่ได้จากการทดสอบในข้อที่ 4 โดยวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิดเคที่ติดอยู่กับเทอร์โมไซฟอนทั้ง 20 จุด ควบคุมกับภาพของคลื่นความร้อนที่ได้จากอุปกรณ์ Thermal Scan ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 11

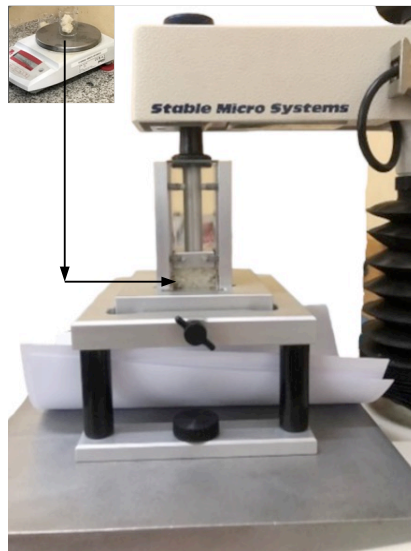
6) วิเคราะห์หาประสิทธิภาพชุดเทอร์โมไซฟอนที่ติดตั้งเข้าไปในหวดนึ่งข้าว คำนวณจากสมการที่ (5) และ (6)

7) วิเคราะห์หาค่าการลดลงของการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่อนาที การสิ้นเปลืองพลังงานตอนข้าวสุก รวมถึงค่าใช้จ่ายการนึ่งข้าวที่ลดลงต่อปี คำนวณจากสมการที่ (7) และ (8)

8) นำข้าวที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลข้อที่ 4 ไปเข้าเครื่องทดสอบ Texture analyzer ที่ใช้ทดสอบเนื้อสัมผัสของข้าว ที่มีความจุ 50.00 kg. f (500N) ช่วงความเร็ว 0.01-40.00 mm/second ความละเอียดระยะทาง 0.001 mm รูรับแสงกว้างสุด 370/590 mm. อัตราข้อมูลสูงสุด 2000 pps



รูปที่ 11 คลื่นความร้อนในระหว่างกระบวนการนึ่งข้าวเหนียว



รูปที่ 12 เครื่องทดสอบ Texture analyzer

9) สำหรับการวิเคราะห์หาความคลาดเคลื่อน พิจารณาการวัดปริมาณ x เป็นจำนวน n_s โดยในครั้งที่ s วัดค่าได้ \bar{x} ค่าเฉลี่ยของปริมาณนี้หาได้จากสมการที่ (15) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวัดหาได้จากสมการที่ (16)

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n_s} \quad (15)$$

$$SD = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n_s - 1}} \quad (16)$$

โดยพิจารณาและแบ่งการคำนวณเป็น 2 ประเภทดังนี้ ประเภท A แทนค่า $u_{i,typeA}$ โดยความไม่แน่นอนเนื่องจากข้อมูลได้มาแบบสุ่มจากแหล่งประเมินทางสถิติดังแสดงในสมการที่ (17)

$$u_{i,typeA} = \sqrt{\frac{SD}{n_s}} \quad (17)$$

สำหรับประเภท A นั้นพิจารณาเป็นแบบความไม่แน่นอนเนื่องจากข้อมูลได้มาแบบสุ่มจากแหล่งประเมินทางสถิติ และประเภท B คือความไม่แน่นอนเนื่องจากข้อผิดพลาดของระบบสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (18)

$$u_{i,typeB} = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (18)$$

ซึ่งกำหนดว่า a เป็นช่วงกึ่งระหว่างขีดจำกัดบนและล่าง ผลรวมของประเภท A และ B หาได้จากสมการ (19)

$$u_c = \sqrt{(u_{i,typeA})^2 + (u_{i,typeB})^2 + \dots etc} \quad (19)$$

และจะมีการขยายความไม่แน่นอนดังแสดงในสมการที่ (20)

$$U = k u_c \quad (20)$$

ในงานวิจัยนี้ ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวมในการแจกแจงแบบปกติคือ $K = 2$ ซึ่งมีระดับความเชื่อมั่นอยู่ที่ประมาณ 0.95 หรือ 95% [11] ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนที่ได้จากการวิจัยนี้แสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน

Type A	Type B	Type B	Type B
Uncertainty means Reading (°C)	Thermocouple type K (°C) - 200.00-1372.00	Data logger (°C) - 200.00-1100.00	Texture analyzer 0.01-0.40
Standard uncertainty (ui) 0.002	Standard uncertainty (ui) 0.86	Standard uncertainty (ui) 0.57	Standard uncertainty (ui) 0.11
Sensitivity coefficient (ci) 1	Sensitivity coefficient (ci) 0.99	Sensitivity coefficient (ci) 0.99	Sensitivity coefficient (ci) 0.01
Uncertainty (ui ci) 0.002	Uncertainty (ui ci) 0.86	Uncertainty (ui ci) 0.57	Uncertainty (ui ci) 0.01
Combined uncertainty component 0.51			
Expanded uncertainty (u) 1.03			

ระยะเวลาคืนทุน

สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลระยะเวลาคืนทุนสำหรับการประยุกต์ใช้งานเทอร์โมไซฟอนกับหวดหนึ่งข้าวเหนียวสามารถหาได้จากสมการที่ (21)

$$\text{Simple Payback period (SPP)} = \frac{\text{First Coast}}{\text{Coast Saving}} \quad (21)$$

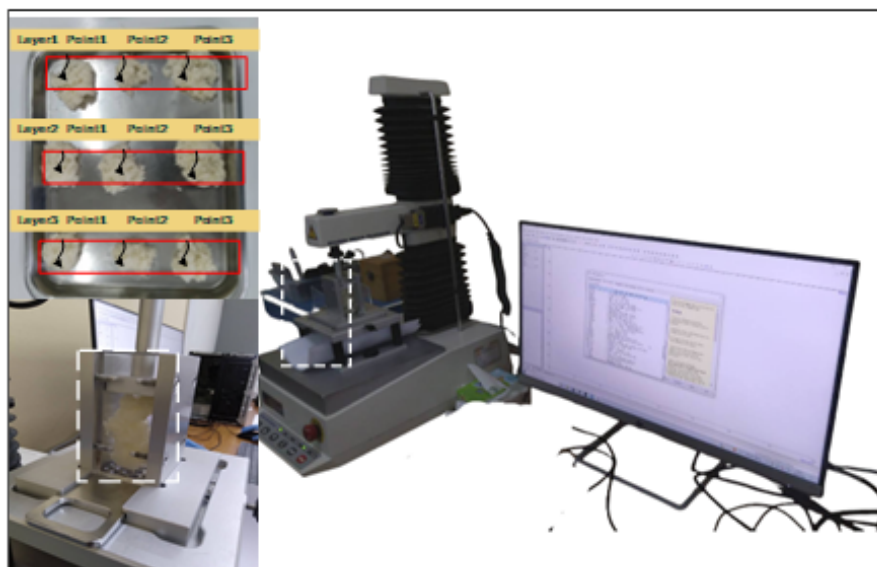
กำหนดให้ Simple Payback period (SPP) คือ ระยะเวลาคืนทุน (year), First Cost คือ เงินลงทุนซึ่งพิจารณาผลรวมของต้นทุนวัสดุก่อสร้าง (baht), Cost Saving คือ ค่าใช้จ่ายที่สามารถประหยัดได้จริงในแต่ละปี (baht/year) [12] สำหรับโดยงานวิจัยนี้ใช้เงินลงทุน 1347.58 baht แบ่งออกเป็นค่าวัสดุที่ใช้ทำท่อเทอร์โมไซฟอน 1050.00 baht ค่าหวดและหม้อหนึ่ง 200.00 baht และอุปกรณ์อื่น ๆ อีก 97.58 baht

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

เพื่อให้เกิดความเข้าใจในส่วนนี้ สำหรับงานวิจัยนี้จึงได้มีการนำเสนอผลลัพธ์และการอภิปราย โดยแบ่งออกได้ทั้งแบบประยุกต์ใช้เทอร์โมไซฟอน (TPCT) และแบบไม่ประยุกต์ใช้เทอร์โมไซฟอน โดยพิจารณาที่การทดสอบแล้วได้ข้าวเหนียวที่สุกในทุก ๆ กรณีทดสอบ เมื่อพิจารณาแล้วนั้นจะได้ข้อมูลที่น่ามาพิจารณาดังนี้

- 1). อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 0.50 kg/hr. ที่เวลาการนึ่ง 20.00 minuets
- 2). อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 1.00 kg/hr. ที่เวลาการนึ่ง 15.00 minuets
- 3). อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 1.50 kg/hrs. ที่เวลาการนึ่ง 15.00 minuets

โดยพิจารณาเป็นตำแหน่งชั้นของหวดที่ข้าวสุกเป็นชั้นที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ โดยในแต่ละชั้นจะทำการตรวจสอบความสุกของข้าวสามจุดด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบ Texture analyzer ดังแสดงในรูปที่ 13 โดยในส่วนของผลลัพธ์และการอภิปรายนั้นเลือกพิจารณาที่อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 1.50 kg/hrs. ที่เวลาการนึ่ง 15.00 minutes เนื่องจากมีค่าการลดลงของเวลาและเงินค่าใช้จ่ายที่ลดลงมากที่สุดกว่าในทุกๆ กรณีทดสอบประกอบด้วยผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบจากสองกรณีข้างต้นที่อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 0.50 และ 1.00 kg/hr ที่เวลาการนึ่ง 20.00 และ 15.00 minutes ตามลำดับ มีลักษณะของข้อมูลและทิศทางของแนวโน้มที่เป็นไปในลักษณะเดียวกัน

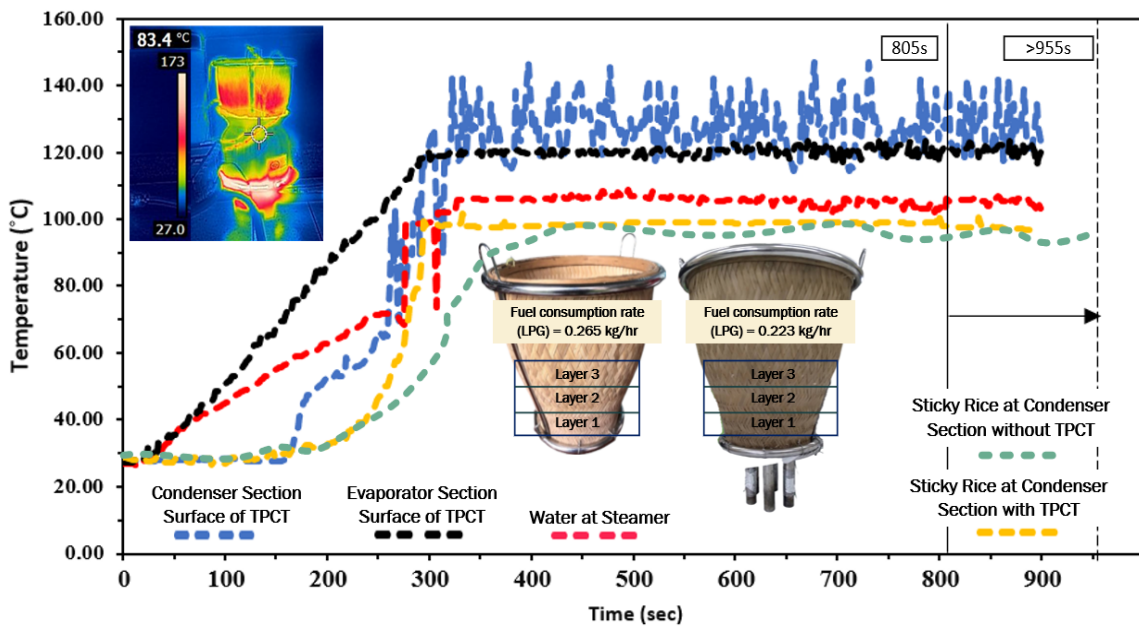


รูปที่ 13 ตำแหน่งและรูปแบบการวัดค่าความสุกของข้าวเหนียว

พิจารณาที่อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 1.5 kg/hrs. ที่เวลาการนึ่ง 15.00 minutes

ร่วมกับกรณีทดสอบทั้งในส่วนของการประยุกต์ใช้งานและไม่ประยุกต์ใช้งานกับเทอร์โมไซฟอน (TPCT)

จากการพิจารณาข้าวเหนียวที่นึ่งทั้งสามชั้นในหอดที่มีการประยุกต์ใช้งานกับเทอร์โมไซฟอน TPCT พบว่าทุกจุดบนชั้นที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับดังแสดงรูปที่ 9 เพื่อให้เห็นรูปแบบการแบ่งชั้น ข้าวเหนียวที่นึ่งนั้นมีความสุกในทุกตำแหน่งของทั้งสามชั้น โดยใช้เวลาในการนึ่งที่เวลา 13.41 min หรือ 805.00 sec อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ใช้คือ 0.22 kg/hr ในส่วนของหอดที่ไม่มีการประยุกต์ใช้ TPCT ที่ตำแหน่งบนชั้นที่ 1 และ 2 ตามลำดับ พบว่าข้าวเหนียวที่นึ่งนั้นมีความสุกในทุกจุดที่นำไปตรวจสอบด้วยตัวการวิเคราะห์แบบ Texture analyzer แต่ที่ชั้นที่ 3 พบว่าข้าวไม่สุก โดยใช้เวลาในการนึ่งที่มากกว่าเวลา 16.58 min หรือ 955.00 sec การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ใช้คือ 0.265 kg/hr ดังแสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ของเวลาและอุณหภูมิ ที่การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 1.50 kg/hr เวลานึ่ง 15.00 minutes

จากรูปที่ 14 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการนึ่งแบบมีการประยุกต์ใช้เทอร์โมไซฟอน (TPCT) กับไม่มีการประยุกต์ใช้เทอร์โมไซฟอน (Without-TPCT) ที่ใช้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 1.50 kg/hr ใช้เวลา 15.00 min พบว่าการนึ่งข้าวแบบประยุกต์ใช้เทอร์โมไซฟอน (TPCT) มีการใช้เวลาน้อยกว่าการนึ่งแบบไม่มีการประยุกต์ใช้เทอร์โมไซฟอนที่เร็วกว่าถึง 2.50 min คิดเป็นร้อยละ 15.71 ทำให้สามารถลดพลังงานเชื้อเพลิงได้ 41.60 g ลดค่าใช้จ่ายจากการนึ่งปกติได้ครั้งละ 0.71 baht ถ้านึ่งวันละ 2 ครั้ง ลดค่าใช้จ่ายต่อปี 518.30 baht เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการประยุกต์ใช้เทอร์โมไซฟอน (TPCT) สืบเนื่องจากติดตั้งชุดเทอร์โมไซฟอนนั้น เมื่อพิจารณาที่เวลาทดสอบ 160.00 sec โดยที่ส่วนทำระเหยของเทอร์โมไซฟอน จะสามารถนำความร้อนจากน้ำหรือไอน้ำในส่วนของหม้อนึ่งขึ้นไประบายความร้อนหรือถ่ายเทความร้อนให้กับข้าวเหนียวที่นึ่งอยู่ในหอด โดยการถ่ายเทความร้อนผ่านส่วนควบแน่นของเทอร์โมไซฟอน ด้วยการสังเกตเห็นว่าอุณหภูมิผิวท่อส่วนควบแน่นของ TPCT ส่งผลให้การกระจายความร้อนสู่ข้าวในช่วงเวลาเดียวกัน ๆ ก็ค่อยเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย เมื่อพิจารณาอุณหภูมิข้าวเหนียวมีการเพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกันที่ช่วงเวลา 160.00 sec

ดังที่กล่าวข้างต้น โดยที่เวลาเดียวกันกับพบว่าอุณหภูมิของน้ำร้อนที่อยู่ในหม้อนึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 55.00 °C ซึ่งเทอร์โมไซฟอนนั้นมีส่วนสำคัญในการที่จะช่วยนำและพาความร้อนจากน้ำร้อนในหม้อนึ่งที่ไม่สูงพอที่จะทำให้น้ำเดือดได้นั้น โดยไม่รอเวลาที่อุณหภูมิของน้ำจะสูงมากเกินไป เพื่อขึ้นไประบายความร้อนให้กับข้าวเหนียวที่จะนึ่งในหอดได้ หรืออธิบาย

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาและออกแบบถึงการประยุกต์งานเทอร์โมไซฟอนกับหอดึงข้าวเหนียวจากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ และ ผลลัพธ์ตลอดจนการอภิปราย ทางผู้วิจัยสรุปออกมาได้ดังนี้ จากการพิจารณาที่กรณีที่ใช้เทอร์โมไซฟอน (TPCT) และแบบไม่ประยุกต์ใช้เทอร์โมไซฟอน โดยพิจารณาที่อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 0.50, 1.00 และ 1.50 kg/hr ที่เวลาการนึ่ง 20.00, 15.00 และ 15.00 min ตามลำดับ โดยทั้งสามข้อมูลดังกล่าวนั้นมีลักษณะของข้อมูลจากการทดสอบมีแนวโน้มและทิศทางเหมือนกันเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการประยุกต์ใช้งานเทอร์โมไซฟอน (TPCT) เพราะฉะนั้นเพื่อให้เห็นลักษณะของ ข้อมูลการสรุปที่ชัดเจนจึงเลือกพิจารณาที่อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 1.50 kg/hr ที่เวลาการนึ่ง 15.00 min ร่วมกับกรณี ทดสอบทั้งในส่วนของการประยุกต์ใช้งานและไม่ประยุกต์ใช้งานเทอร์โมไซฟอน (TPCT) พบว่า การประยุกต์ใช้งาน TPCT จะ ใช้เวลาในการนึ่งข้าวเหนียวเร็วกว่าถึง 2.50 min คิดเป็นร้อยละ 15.71 ทำให้สามารถลดพลังงานเชื้อเพลิงได้ 41.60 g และลด ค่าใช้จ่ายจากการนึ่งปกติได้ครั้งละ 0.71 baht ถ้าวันละ 2 ครั้งลดค่าใช้จ่ายต่อปี 518.30 baht เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการ ประยุกต์ใช้ TPCT นอกจากนี้ยังแสดงการจำลองการเคี้ยวข้าวเหนียวเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบกับเครื่องทดสอบ Texture analyzer เท่ากับ 379.00 N มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานร้อยละ 9.91 เมื่อพิจารณา ร่วมกับการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ในกรณี ทดสอบดังกล่าวนี้มีจุดคืนทุนเท่ากับ 2.60 years

นอกจากนี้ยังยืนยันด้วยการทำงานของเทอร์โมไซฟอนที่ทำงานได้เมื่อติดตั้งเข้าไปหอดึงข้าวเหนียว ด้วยผลและ ลักษณะตลอดการทดสอบของกระจายอุณหภูมิที่แสดงตลอดทั้งการทดสอบพร้อม ๆ กับภาพแสดงของคลื่นความร้อนในขณะที่ ทำการทดสอบอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 1.50 kg/hr ที่เวลาการนึ่ง 15.00 min โดยที่เวลาประมาณ 160.00 sec จะพบว่า อุณหภูมิของน้ำร้อนที่อยู่ในหม้อนั้นก็มียุณหภูมิประมาณ 55.00 °C ซึ่งเทอร์โมไซฟอน (TPCT) นั้นมีส่วนสำคัญในการที่จะช่วย นำและพาความร้อนจากน้ำร้อนที่อุณหภูมิดังกล่าวนี้ที่สูงพอที่จะทำให้ให้น้ำเดือดได้ โดยพบว่าอุณหภูมิของข้าวเหนียวที่เวลา 160.00 sec จนถึง 280.00 sec โดยประมาณสำหรับกรณีประยุกต์ใช้งานกับ TPCT มีการเริ่มยกตัวที่สูงขึ้นของอุณหภูมิข้าว ในหอดึงที่นึ่งที่สูงกว่ากรณีที่ไม่มีการประยุกต์ใช้งานประมาณ 35.00-40.00 °C พร้อม ๆ กับการแสดงการกระจายคลื่นความร้อน นี่จึงเป็นอีกเหตุผลที่ทำให้การประยุกต์ใช้งานเทอร์โมไซฟอนกับหอดึงข้าวเหนียวช่วยลดทั้งเวลา ทั้งค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงลง ได้ โดยถือว่าการศึกษาและออกแบบในครั้งนี้สามารถประยุกต์ใช้งานได้ตรงตามวัตถุประสงค์

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณสาขาวิศวกรรมเครื่องกล และหน่วยวิจัยวิศวกรรมพลังงานความร้อนและการกลั่น (ในกระบวนการ และอุปกรณ์ที่ออกแบบ) คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร ตลอดจนผู้บริหารและคณาจารย์ทุก ๆ ท่านที่ให้อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัยรวมถึงอำนวยความสะดวกในการทำวิจัย ครั้งนี้นั้นสำเร็จตามเป้าหมาย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Sichamnan, S., Chompookham, T. and Parametthanuwat, T. (2020). A case study on internal flow patterns of the two-phase closed thermosyphon (TPCT). Case Stud. Therm.Eng. 18, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100586>
- [2] Liu, Y., Yan, Z., Jiang, Z., Li, N., Yang, B. and Wu, Y. (2023). Experimental Study on the Small Two-Phase Thermosyphon Loop with Minichannel Evaporator. ASME. J. Thermal Sci. Eng. Appl. 16(2), <https://doi.org/10.1115/1.4063913>
- [3] Xiao, B. (2023). "Thermal Analysis of Thermosyphon for Waste Heat Recovery From Auto Exhaust

- Using Limited Fluid Charge”. Proceedings of the ASME 2023 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Heat Transfer and Thermal Engineering. 10, ASME. <https://doi.org/10.1115/IMECE2023-109452>.
- [4] Yunus A, Cengel. (2002). Heat Transfer: A Practical Approach. 2th Edition.
- [5] Richard, S.E, Claus, B. and VW Gordon, J. (2003). Fundamentals of Thermodynamics. 6th Edition.
- [6] Reay, D., Kew, P. (2006). Heat Pipe, Theory, Design and Application. 5ed., Butterworth-Heinemann.
- [7] Sichamnan, S., Rodbumrung, A. (2021). Effects of parameters on heat transfer characteristics of a rectangular cross section heat pipe with mesh wick. Applied Science and Engineering Progress. <https://doi.org/10.14416/j.asep.2021.11.010>.
- [8] Pipatpaiboon, N., Rittidech, S. and Meena, P. (2012). Experimental study of a thermosyphon heat exchanger (TPHE) in a bio-diesel factory in Thailand. Arabian J. Sci. Eng. 37, 2047–2060. <https://doi.org/10.1007/s13369-012-0310-6>.
- [9] อนุชา เมฆอรุณ. (2556). การพัฒนาสายพันธุ์ข้าวร่วมกับการฉายรังสีแกมมาเพื่อผลิตข้าวลูกผสมระบบสามสายพันธุ์. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิตสาขาวิชาพืชไร่. : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [10] ชัยธัช จันทร์สมุด อัครพล ภูมิ พิชรี แสงกล้า และวัลลิกา ชมภูคำ (2560). คุณสมบัติของดินที่ปลูกข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 ระหว่างพื้นที่อำเภอเขาวงและอำเภอนามนจังหวัดกาฬสินธุ์. วารสารวิชาการเฉลิมกาญจนา. 4(2), กรกฎาคม-ธันวาคม 2560.
- [11] Parametthanuwat, T., Pipatpaiboon, N., Bhuwaketkumjohn, N. and Sichamnan S. (2022). Heat transfer characteristics of closed-end thermosyphon (CE-TPCT). Engineering Science and Technology, Int. J. 27, <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.05.024>.
- [12] Sichamnan, S., Chompookham, T. and Rittidech, S. (2016). Efficiency enhancement of solar panels using copper mesh wick heat pipe. Journal of Engineering and Innovation. 9, 17–28.