บทความวิจัย (Research Article)

การศึกษาสมรรถนะเชิงความร้อนและประสิทธิภาพการอบแห้งของเครื่องคั่วพริกแบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

Thermal Performance and Drying Efficiency of a Temperature- and Humidity-Controlled Chili Roasting Machine Equipped with a Thermosyphon Heat Exchanger

อมร ดอนเมือง[1] สัณหวัจน์ ทองแดง[1] จรัญ มงคลวัย[1] อรปรียา เวียงอินทร์[1] และ บัญชา ล้ำเลิศ[1*]
Amorn Donmuang[1], Sanhawat Thongdaeng[1], Jaran Mongkolvai[1], Onpreeya Veang-in[1] and Bancha Lamlerd[1*]
[1]สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
[1]Mechanical engineering department, Faculty of Industry and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Sakon Nakhon Campus
[*]Corresponding author; email: bancha.la@rmuti.ac.th

วันที่รับบทความ (Received)	วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised)	วันที่ตอบรับบทความ (Accepted)
22 กรกฎาคม 25669	25 สิงหาคม 2569	28 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องคั่วพริกแบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน เพื่อศึกษาผลของชนิดสารทำงาน และอัตราการเติมสารทำงานต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน และคุณภาพของผลิตภัณฑ์พริก โดยใช้สารทำงาน 3 ชนิด ได้แก่ น้ำ เอทานอล และ R134a ที่อัตราการเติมสารทำงานร้อยละ 40, 50 และ 60 ของปริมาตรส่วนทำระเหย ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิ ชนิดสารทำงาน และอัตราการเติมสารมีผลต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน โดยสารทำงานชนิดสารทำความเย็น R134a, เอทานอล และน้ำ ให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเท่ากับ 160.33, 154.02 และ 135.02 วัตต์ ตามลำดับ ซึ่งสามารถนำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ ส่งผลให้ความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ต่ำกว่ากรณีที่ไม่ติดตั้งในทุกสภาวะ โดยที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และอัตราการเติมสารทำงานร้อยละ 50 ให้ค่าความชื้นสุดท้ายต่ำสุดประมาณร้อยละ 13 (wb) ขณะที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และอัตราการเติมสารทำงานร้อยละ 50 สามารถรักษาคุณภาพทางกายภาพของพริกได้ดีที่สุด

ผลการวิจัยสรุปได้ว่า การประยุกต์ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนร่วมกับเครื่องคั่วพริกแบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน นำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ ลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ และช่วยรักษาคุณภาพทางกายภาพของพริกแห้งได้ ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้กับกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์ในระดับอุตสาหกรรม

คำสำคัญ: เครื่องคั่วพริก, เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน, สมรรถนะเชิงความร้อน, การอบแห้งพริก

Abstract

This research aimed study investigated the thermal performance of a temperature- and humidity-controlled chili roasting machine equipped with a thermosyphon heat exchanger and to examine the effects of working fluid type and filling ratio on the heat transfer rate and product quality. Three working fluids, namely water, ethanol, and R134a refrigerant, were tested at filling ratios of 40%, 50%, and 60% of the evaporator volume under drying temperatures of 60, 80, and 100 °C. The results showed that the temperature, working fluid type, and filling ratio affected the heat transfer performance of the thermosyphon heat exchanger. The maximum heat transfer rates obtained using R134a refrigerant, ethanol, and water were 160.33, 154.02, and 135.02 W, respectively. The thermosyphon heat exchanger enabled waste heat to be recovered and reused in the process, resulting in a lower final moisture content of the product than that obtained without the heat exchanger under all experimental conditions. The lowest final moisture content, approximately 13% wet basis (wb), was obtained at a drying temperature of 100 °C and a filling ratio of 50%. In contrast, a drying temperature of 80 °C and a filling ratio of 50% provided the best preservation of the physical quality of the chili.

The results demonstrate that integrating a thermosyphon heat exchanger with a temperature- and humidity-controlled chili roasting machine can improve heat transfer performance, recover and reuse waste heat, reduce the final moisture content of the product, and maintain the physical quality of dried chili. This approach provides a potential basis for the application of thermosyphon heat exchanger technology in industrial-scale food processing.

Keywords: Chili roasting, Thermosyphon heat exchanger, Thermal performance, Chili drying

บทนำ

พริกเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมอาหารของประเทศไทยและได้รับความนิยมในการบริโภคอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวัตถุดิบหลักในการประกอบอาหารและไม่สามารถหาวัตถุดิบชนิดอื่นมาทดแทนได้อย่างสมบูรณ์ ปัจจุบันพริกถูกนำมาใช้ประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรมอย่างหลากหลาย ทั้งการผลิตพริกแห้ง น้ำพริก ซอสพริก และผลิตภัณฑ์แปรรูปอื่น ๆ รวมถึงการสกัดสารแคปไซซิน (Capsaicin) เพื่อนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ทางเภสัชกรรม เวชสำอาง อาหารเสริม (Nutraceutical Products) เครื่องสำอาง ผลิตภัณฑ์ป้องกันสัตว์และแมลง ตลอดจนสารเติมแต่งในอาหารสัตว์ (Feed Additives) ส่งผลให้พริกเป็นพืชที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจและเป็นแหล่งรายได้สำคัญของเกษตรกรและผู้ประกอบการด้านการแปรรูป [1] สำหรับภาคตะวันออกเฉียงเหนือ พริกขี้หนูผลใหญ่พันธุ์ "หัวเรือ" เป็นสายพันธุ์ที่ได้รับความนิยม เนื่องจากมีผลขนาดใหญ่ ความยาวประมาณ 7–8 เซนติเมตร เมื่อสุกมีสีแดงสด มีกลิ่นหอม และมีความเผ็ดในระดับปานกลาง จึงเหมาะทั้งสำหรับการบริโภคสดและการแปรรูปเป็นพริกแห้ง อย่างไรก็ตาม พริกสดมีความชื้นเริ่มต้นสูงประมาณร้อยละ 80 (wb) จึงจำเป็นต้องลดความชื้นให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมเพื่อยืดอายุการเก็บรักษา ลดการเสื่อมคุณภาพ และอำนวยความสะดวกในการขนส่ง โดยวิธีที่เกษตรกรนิยมใช้คือการตากแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งใช้เวลาประมาณ 12–15 วัน จึงสามารถลดความชื้นลงเหลือร้อยละ 4–13 (wb) [2]

แม้ว่าการตากแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จะมีต้นทุนต่ำ แต่กระบวนการดังกล่าวยังมีข้อจำกัดหลายประการ ได้แก่ การพึ่งพาสภาพอากาศ ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนาน และไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นได้อย่างเหมาะสม ส่งผลให้คุณภาพของพริกแห้ง เช่น สี กลิ่น และลักษณะทางกายภาพ มีความไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้ ผู้ประกอบการส่วนใหญ่ยังใช้การคั่วพริกด้วยกระทะหรือเครื่องคั่วแบบปิดอย่างง่าย โดยใช้ฟืนหรือถ่านเป็นแหล่งพลังงานหลัก แม้ว่าจะมีต้นทุนด้านเชื้อเพลิงต่ำ แต่ยังประสบปัญหาการสูญเสียความร้อนผ่านปล่องไอเสีย การสะสมของไอน้ำภายในห้องคั่วซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลง การควบคุมอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอซึ่งทำให้ต้องคั่วพริกอย่างต่อเนื่อง รวมทั้งการเกิดควันและกลิ่นจากการเผาไหม้ที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน อีกทั้งความร้อนที่ระบายออกทางปล่องไอเสียยังไม่ได้รับการนำกลับมาใช้ประโยชน์ ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานต่ำและมีต้นทุนการผลิตสูงกว่า

งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการประยุกต์ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน [12-13] และเทคโนโลยีการอบแห้งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการแปรรูปผลิตผลทางการเกษตรอย่างต่อเนื่อง ตัวอย่างเช่น พิศาล และคณะ (2560) [1] ได้ศึกษาและพัฒนาการอบแห้งพริกด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากเตาชีวมวลทรงกระบอกเพื่อลดต้นทุนและเพิ่มผลผลิตให้กับเกษตรกรและวิสาหกิจชุมชน ซึ่งสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งพริกเหลือ 3-5 วัน ทำให้ความชื้นของพริกลดลงจนเหลือความชื้นสุดท้ายร้อยละ 8.13-10.17 (wb) ขณะที่ ยงยุทธ และคณะ (2564) [3] ได้ศึกษาการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 50–70 องศาเซลเซียส และความเร็วลม 1.0–2.0 เมตรต่อวินาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการควบคุมอุณหภูมิและความเร็วลมที่เหมาะสมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งและรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ นอกจากนี้ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon Heat Exchanger) เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากอาศัยการเปลี่ยนสถานะของสารทำงานร่วมกับการไหลเวียนตามธรรมชาติภายในระบบ ทำให้สามารถถ่ายเทความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ต้องใช้พลังงานในการขับเคลื่อนเพิ่มเติม อีกทั้งยังสามารถนำความร้อนเหลือทิ้งจากปล่องไอเสียกลับมาใช้ในการอุ่นอากาศก่อนเข้าสู่กระบวนการอบแห้ง [4] ส่งผลให้ลดการใช้พลังงาน เพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบ และลดต้นทุนด้านพลังงานในการผลิตได้

จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่างานวิจัยด้านการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการอบแห้งและแปรรูปผลิตผลทางการเกษตรมีการประยุกต์ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและควบคุมสภาวะการอบแห้งอย่างต่อเนื่อง [6], [12] โดย Jengsooksawat et al. (2018) [11] ได้ศึกษาการติดตั้ง Loop Thermosyphon ร่วมกับ Vapor

Chamber ในเตาคั่วพริก เพื่อศึกษาการกระจายอุณหภูมิ สมรรถนะทางความร้อน และการประหยัดพลังงาน โดยใช้น้ำเป็นสารทำงานที่อัตราการเติมร้อยละ 40 ขณะที่ พชร ว่องไพศาลกิจ และคณะ (2563) [15] ได้พัฒนาเครื่องอุ่นอากาศแบบเทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับเครื่องอบแห้งพริก เพื่อเพิ่มอุณหภูมิและลดความชื้นของอากาศก่อนเข้าสู่ระบบอบแห้ง ผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงการนำความร้อนกลับมาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการแปรรูปพริก อย่างไรก็ตาม งานวิจัยดังกล่าวมีรูปแบบการประยุกต์ใช้และเงื่อนไขการทำงานแตกต่างจากงานวิจัยนี้ โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการนำความร้อนเหลือทิ้งจากก๊าซร้อนบริเวณปล่องไอเสียของเครื่องคั่วกลับมาใช้ประโยชน์ผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน และบูรณาการร่วมกับระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของกระบวนการอบและคั่วพริก นอกจากนี้ยังศึกษาผลของ ชนิดสารทำงาน และอัตราการเติมสารทำงาน ที่มีผลต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนและการลดความชื้นของพริก ซึ่งช่วยให้สามารถกำหนดสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับระบบดังกล่าวได้ ซึ่งองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการกำหนดสภาวะการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนและการออกแบบระบบคั่วและอบแห้งพริกที่มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถต่อยอดสู่การขยายขนาดเครื่องเพื่อรองรับกำลังการผลิตในระดับวิสาหกิจชุมชนและอุตสาหกรรมขนาดย่อม รวมถึงประยุกต์ใช้หลักการ นำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ (Waste Heat Recovery) กับกระบวนการอบแห้งและแปรรูปผลิตผลทางการเกษตรชนิดอื่นที่มีลักษณะการให้ความร้อนและมีแหล่งความร้อนเหลือทิ้งในลักษณะใกล้เคียงกัน

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการศึกษาสมรรถนะเชิงความร้อนและประสิทธิภาพการอบแห้งของเครื่องคั่วพริกแบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน
2. เพื่อศึกษาผลของสารทำงาน และอัตราการเติมสารที่มีต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาพฤติกรรมการคั่วพริกแบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนภายในตู้อบแห้งแบบถังหมุน ประกอบด้วยห้องอบแห้งรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 20.7 เซนติเมตร ความยาวของถังเท่ากับ 36.8 เซนติเมตร ด้านนอกของถังมีการหุ้มฉนวนความร้อนป้องการความร้อนสูญเสียจากระบบ เครื่องคั่วพริกแบบถังทรงกระบอกนี้ถูกติดตั้งบนฐานหมุน ที่ความเร็วรอบในการอบ 15 รอบต่อนาที โดยอาศัยมอเตอร์ขนาด 150 วัตต์ เป็นต้นกำลังในการขับให้ห้องอบแห้งเกิดการหมุน ดังแสดงในภาพที่ 2 ส่วนของถังเครื่องคั่วพริกให้ความร้อนโดยใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเป็นแหล่งความร้อน 5,000 w และความเร็วของพัดลมที่ใช้ในกระบวนการ ซึ่งอ่านค่าผ่านเครื่องมือวัดความเร็วลมยี่ห้อ Testo รุ่น 416 ที่ค่าความแม่นยำ ±0.05 เปอร์เซ็นต์

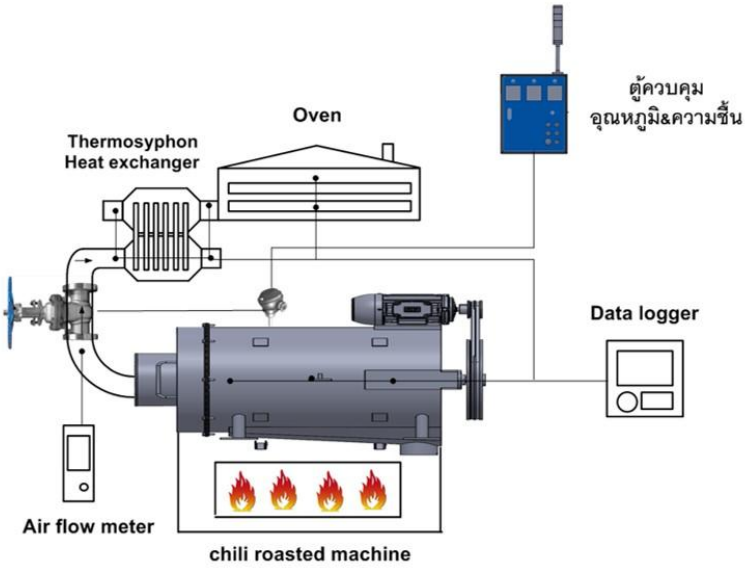


Figure 1 Schematic diagram of experimental set up

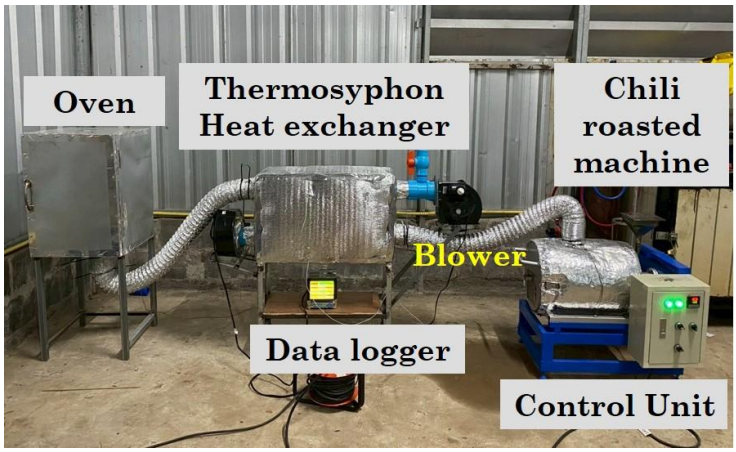


Figure 2 Experimental test rig of the temperature- and humidity-controlled chili roasting machine equipped with a thermosyphon heat exchanger, comprising an oven, blower, thermosyphon heat exchanger, chili roasting machine, data logger, and control unit.

Figure 1-2 แสดงไดอะแกรมการทดลอง ประกอบด้วย ตู้อบพริก เครื่องคั่วพริก และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน เริ่มต้นให้ความร้อนที่เครื่องคั่วพริก ไอเสียและความร้อนที่เกิดขึ้นจะผ่านส่วนทำระเหยของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและความร้อนจะทำให้สารทำงานที่ใช้ในการทดลองคือ สารทำความเย็น R134a, น้ำ และเอทานอล ที่อัตราส่วนการเติมสารทำงานร้อยละ 40, 50 และ 60 ของปริมาตรส่วนทำระเหย โดยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้รับความร้อนจากก๊าซร้อนจากปล่องไอเสียของเครื่องคั่วพริก เมื่อสารทำงานที่อยู่ภายในเดือดกลายเป็นไอเคลื่อนที่จากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่นและถ่ายโอนความร้อนไปยังตู้อบพริกเพื่อลดความชื้น โดยการทดลองเตรียมพริกพันธุ์จินดา เลือกพริกที่มีสีแดงสดทั้งผลไม่มีรอยแผล ไม่มีร่อยรอยสัตว์กัด หรือแทะ และพริกไม่เน่าเสีย จากนั้นล้างด้วยน้ำประปาที่อุณหภูมิห้องให้สะอาดสองครั้ง แล้วผึ่งให้สะเด็ดน้ำ 15 นาที แล้วนำไปลวกในน้ำในที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราส่วนพริกพันธุ์จินดาแดงสด 500 กรัม ต่อน้ำ 2 ลิตร เป็นเวลา 3 นาที สำหรับการเพิ่มทุก ๆ 1 กิโลกรัม เพิ่มเวลาอีก 1-2 นาที นำขึ้นมาจาก

น้ำร้อนทิ้งให้สะเด็ดน้ำ 15 นาที ที่อุณหภูมิห้อง ก่อนนำเข้าเครื่องอบแห้งให้ชั่งน้ำหนักก่อนและชั่งหลังหลังการอบแห้ง ทำเช่นนี้ตลอดการทดลองเพื่อหาอัตราการอบแห้ง

การทดสอบการอบแห้งพริกจากเครื่องอบแห้งพริกจินดาที่ใช้ทดสอบ 1,000 กรัม ทดสอบที่ความเร็วรอบ 15 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 3 ระดับ คือ 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมของเครื่องอบแห้ง ที่ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 77.63 (wb) ซึ่งอุณหภูมิจุดต่าง ๆ ถูกวัดโดยใช้เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data Logger) เป็นเครื่องมือที่ใช้อ่านอุณหภูมิจากสายเทอร์โมคัปเปิ้ล ยี่ห้อ CHINO รุ่น KR200 มีช่วงการวัดอุณหภูมิ -200 ถึง 1370 องศาเซลเซียส ค่าความคลาดเคลื่อน ±1 องศาเซลเซียส และสายเทอร์โมคัปเปิ้ล (Thermocouple) ที่ใช้ในการทดลองเป็นชนิด type K จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปใช้สำหรับหาค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนและผลของการอบแห้ง

- วิเคราะห์ผลค่าการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน การถ่ายเทความร้อน (Q_{exp}) หาได้จาก

$$Q_{exp} = \dot{m} C_p (T_{hot} - T_{cool}) \quad (1)$$

เมื่อ Q_{exp} คือ ค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อน (W)

$\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารรับความร้อน (kg/s)

Cp คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของสารรับความร้อน (J/kg-°C)

T_{hot} คือ คือ อุณหภูมิขาออกของส่วนควบแน่น (°C)

T_{cool} คือ อุณหภูมิขาเข้าของส่วนควบแน่น (°C)

- วิเคราะห์ค่าความชื้นของพริกที่อัตราส่วนความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis) คืออัตราส่วนน้ำหนักของน้ำในผลิตภัณฑ์ต่อน้ำหนักผลิตภัณฑ์ชื้น ซึ่งเมื่อคูณด้วย 100 จะมีค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ ดังนี้

$$W_b = \left(\frac{w_1 - w_2}{w_1} \right) x100 \quad (2)$$

เมื่อ W_b = เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก

w_1 = น้ำหนักเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ชื้น

w_2 = น้ำหนักของผลิตภัณฑ์แห้ง

- การวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อน [10] เพื่อประเมินความน่าเชื่อถือและความสามารถในการทำซ้ำของผลการทดลอง ได้ดำเนินการทดลองซ้ำในแต่ละสภาวะการทดลองจำนวน N_e ครั้ง แล้วนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาค่าเฉลี่ยของผลการวัด ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$a_m = \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{Ne} a_i \quad (3)$$

โดยที่ a_m คือ ค่าเฉลี่ยของผลการวัด, a_i คือ ค่าที่วัดได้จากการทดลองครั้งที่ i และ N_e คือ จำนวนครั้งของการทดลองซ้ำ

จากนั้นคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของผลการวัดแต่ละครั้ง โดยพิจารณาความแตกต่างระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าเฉลี่ยของผลการทดลอง ดังแสดงในสมการที่ (4)

$$\Delta a_i = \left| a_m - a_i \right| \quad (4)$$

โดยที่ Δa_i คือ ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของผลการทดลองครั้งที่ i และคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยจากสมการ (5)

$$\overline{\Delta a} = \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{Ne} \Delta a_i \quad (5)$$

ดังนั้นเปอร์เซ็นต์ข้อผิดพลาดถูกกำหนดจากสมการ (6)

$$\%\text{Error} = \frac{\overline{\Delta a}}{a_m} x100 \qquad t \qquad (6)$$

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การประยุกต์ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนสำหรับประหยัดพลังงานของเครื่องคั่วพริก โดยสารทำงานภายในท่อเทอร์โมไซฟอน คือ น้ำ เอทานอล และ R134a โดยมีความมุ่งหมายเพื่อศึกษาเพื่อศึกษาผลของสารทำงานและอัตราการเติมสารที่มีต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และผลของการอบแห้ง ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

1. ผลของอุณหภูมิก๊าซร้อนต่อสภาวะการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

จาก Figure 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิก๊าซร้อนที่ป้อนเข้าสู่ส่วนทำระเหยของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน กำหนดอุณหภูมิก๊าซร้อนที่ 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และอัตราการเติมสารทำงานร้อยละ 50 ของปริมาตรส่วนทำระเหย โดยพิจารณาสารทำงาน 3 ชนิด ได้แก่ น้ำ (Water), เอทานอล (Ethanol) และ สารทำความเย็น R134a ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้น และหลังจากนั้นมีแนวโน้มเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยเมื่ออุณหภูมิก๊าซร้อนเพิ่มจาก 60 เป็น 80 และ 100 °C อุณหภูมิของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเป็นปัจจัยสำคัญต่อระดับอุณหภูมิและการทำงานของเทอร์โมไซฟอน โดยที่อุณหภูมิก๊าซร้อน 60 °C อุณหภูมิของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของสารทำงานทั้งสามชนิดมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 45–60 °C ขณะที่อุณหภูมิก๊าซร้อน 80 °C อุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้นมาอยู่ในช่วงประมาณ 80–90 °C และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิก๊าซร้อนเป็น 100 °C อุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 90–110 °C ทั้งนี้อุณหภูมิของสารทำงานทั้งสามชนิดมีแนวโน้มใกล้เคียงกันในแต่ละระดับอุณหภูมิ แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมอุณหภูมิสามารถกำหนดและรักษาอุณหภูมิของแหล่งความร้อนก่อนเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้อย่างเหมาะสม

เมื่อพิจารณาร่วมกับสารทำงาน ได้แก่ น้ำ เอทานอล และ สารทำความเย็น R134a พบว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก๊าซร้อนมีลักษณะไปในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากการทดลองทุกเงื่อนไขใช้แหล่งความร้อนและสภาวะการควบคุมเดียวกัน ดังนั้น ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่พบในแต่ละสารทำงานจึงสามารถนำไปใช้วิเคราะห์อิทธิพลของคุณสมบัติของสารทำงานได้โดยลดผลกระทบจากความแตกต่างของอุณหภูมิแหล่งความร้อน [11]

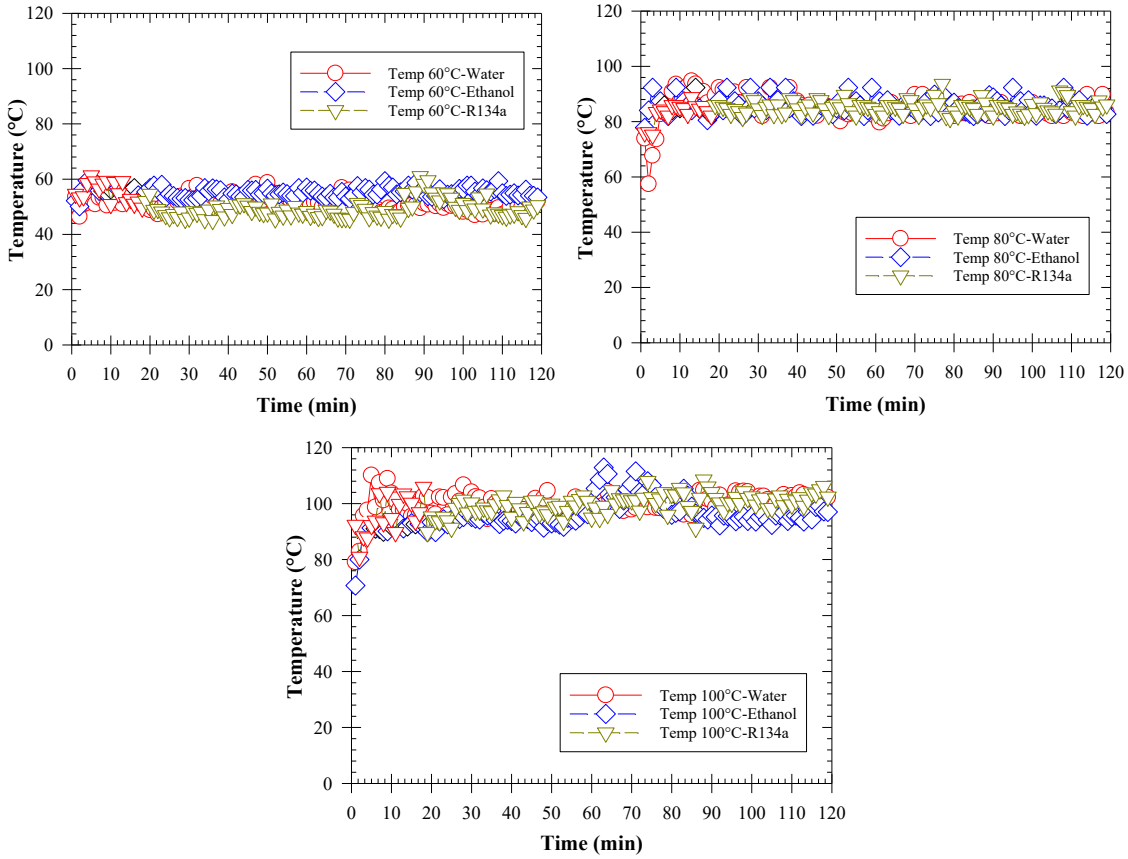


Figure 3 The relationship between the heating temperature used in the chili roaster and the temperature settings of the temperature control system at 60, 80, and 100 °C

2. อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

จาก Figure 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดสารทำงานและอัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่อัตราการเติมสารทำงานร้อยละ 40, 50 และ 60 ของปริมาตรส่วนทำระเหย พบว่า เมื่ออุณหภูมิก๊าซร้อนเพิ่มขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุกชนิดสารทำงานและทุกอัตราการเติมสาร ทั้งนี้ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิบริเวณส่วนทำระเหยทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดแรงขับเคลื่อนในการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น และส่งเสริมการระเหยของสารทำงานและการหมุนเวียนภายในเทอร์โมไซฟอน ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น [16] เมื่อพิจารณาผลของชนิดสารทำงาน ที่อัตราการเติมสารทำงานร้อยละ 40, 50 และ 60 ของปริมาตรส่วนทำระเหย พบว่า น้ำมีอัตราการถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 123.73, 135.02 และ 125.64 วัตต์ ขณะที่เอทานอลมีค่าเท่ากับ 129.37, 154.02 และ 142.00 วัตต์ และ สารทำความเย็น R134a มีค่าเท่ากับ 141.71, 160.33 และ 155.35 วัตต์ ตามลำดับ โดยสารทำความเย็น R134a ที่อัตราการเติมร้อยละ 50 ให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเท่ากับ 160.33 วัตต์ เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำและเอทานอลที่อัตราการเติมเดียวกัน พบว่าสูงกว่า 18.75% และ 4.10% ตามลำดับ เนื่องจาก R134a จะมีจุดเดือดและอุณหภูมิการระเหยต่ำกว่าน้ำและเอทานอล ทำให้สามารถเกิดการเปลี่ยนสถานะภายใต้สภาวะการทำงานของระบบได้ง่าย และการหมุนเวียนของไอและของเหลวภายในเทอร์โมไซฟอน ส่งผลให้สามารถถ่ายเทความร้อนได้ในอัตราที่สูงขึ้น ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับ Siriporn Setwong et al. (2014) [8] , [16] ที่พบว่า สารทำงาน R134a สามารถให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าน้ำและเอทานอลภายใต้เงื่อนไขการทดลองที่กำหนด

นอกจากนี้ผลกระทบจากอัตราการเติมสารทำงาน พบว่าอัตราการเติมร้อยละ 50 ให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด รองลงมาคือร้อยละ 60 และ 40 ตามลำดับ โดยอัตราการเติมสารร้อยละ 40 ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนต่ำที่สุดในทุกสภาวะการทดลอง เนื่องจากปริมาณสารทำงานที่น้อยเกินไปอาจไม่เพียงพอสำหรับการสร้างการไหลเวียนของสารทำงานระหว่างกระบวนการระเหยและการควบแน่นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ความสามารถในการรับและส่งผ่านความร้อนลดลง ในทางตรงกันข้าม การเพิ่มปริมาณสารทำงานจนถึงร้อยละ 50 ทำให้มีปริมาณสารเพียงพอสำหรับการเกิดวัฏจักรการระเหย–ควบแน่นและการไหลเวียนภายในเทอร์โมไซฟอนอย่างเหมาะสม จึงให้การถ่ายเทความร้อนสูงสุด อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มอัตราการเติมเป็นร้อยละ 60 อัตราการถ่ายเทความร้อนกลับลดลง ซึ่งอาจเกิดจากปริมาณของเหลวที่มากเกินไปทำให้พื้นที่ว่างภายในท่อสำหรับการเคลื่อนที่ของไอและการไหลกลับของของเหลวลดลง และอาจเพิ่มโอกาสการเกิดภาวะ flooding ส่งผลให้การหมุนเวียนของสารทำงานและการถ่ายเทความร้อนถูกจำกัด

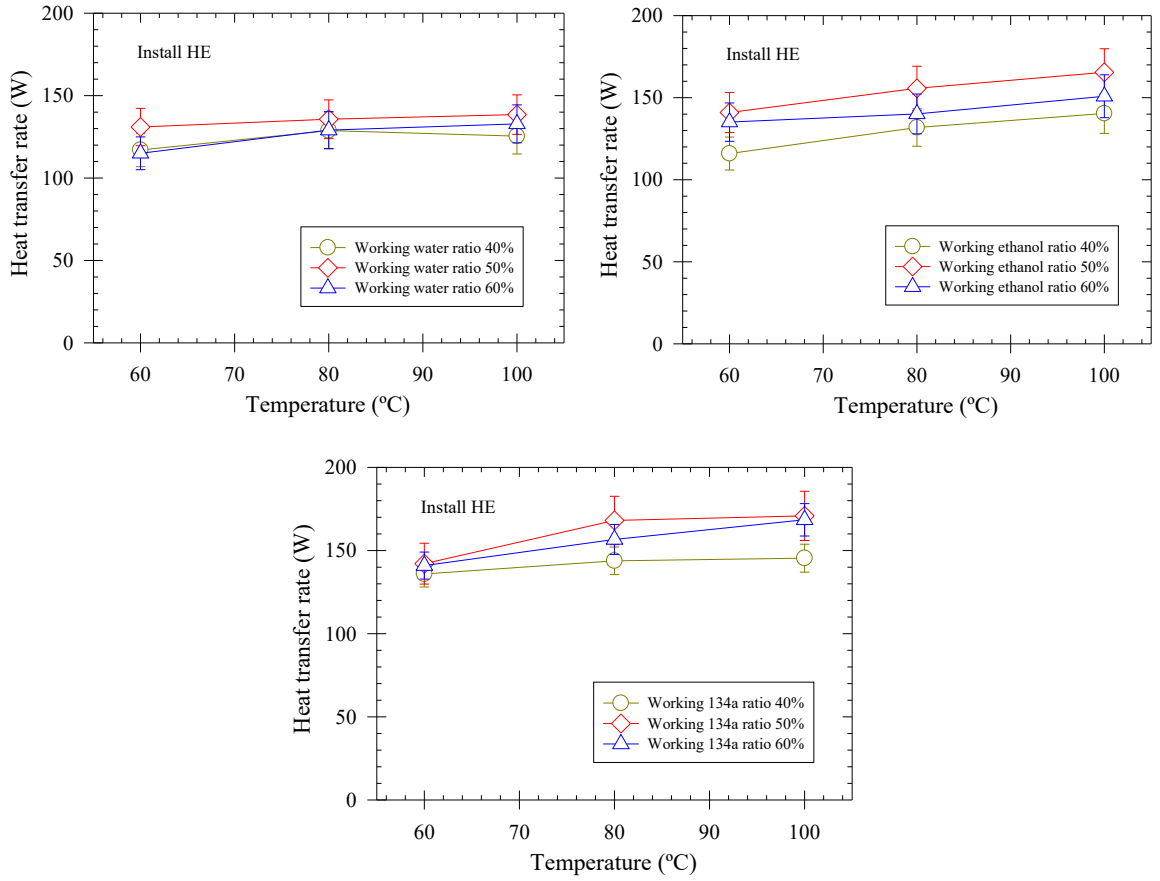


Figure 4 The relationship between the working fluid and the heat transfer rate of a heat exchanger at fluid ratio of 40%, 50%, and 60%

3. ผลกระทบของอุณหภูมิและสารทำงานที่มีผลต่อความชื้นสุดท้าย

Figure 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และค่าความชื้นโดยเปรียบเทียบผลกระทบของอุณหภูมิและสารทำงานที่มีผลต่อความชื้น โดยกรณีไม่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อควบคุมความชื้นและอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อค่าการถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งส่งผลต่อค่าความชื้นของการอบแห้งและคั่วพริกตามไปด้วยเช่นกัน เมื่อพิจารณาที่อัตราการเติมสารที่ส่งผลต่อค่าความชื้นสุดท้าย ที่อัตราการเติมสารทำงานร้อยละ 40, 50 และ 60 ของปริมาตรส่วนทำระเหย ตามลำดับ พบว่ากรณีที่ไม่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่สารทำงาน คือ น้ำ มีค่าของความชื้นเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 23.46-58.54, 15.17-54.92 และ 16.13-57.92 (wb) ตามลำดับ กรณีที่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน มีค่าของความชื้นเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 23.46-57.41, 13.46-54.29 และ 18.87-54.50 (wb) ตามลำดับ กรณีที่ไม่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่สารทำงาน คือ เอทานอล มีค่าของความชื้นเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 29.93-59.63, 14.03-57.43 และ 15.98-56.26 (wb) ตามลำดับ กรณีที่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน มีค่าของความชื้นเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 25.65-54.23, 10.57-49.00 และ 16.76-50.05 (wb) ตามลำดับ กรณีที่ไม่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่สารทำงาน คือ น้ำ มีค่าของความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ ร้อยละ 13.22-54.79, 10.48-50.60 และ 15.98-53.81 (wb) ตามลำดับ กรณีที่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน มีค่าของความชื้นเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 14.93-54.23, 11.32-52.49 และ 14.93-55.92 (wb) ตามลำดับ

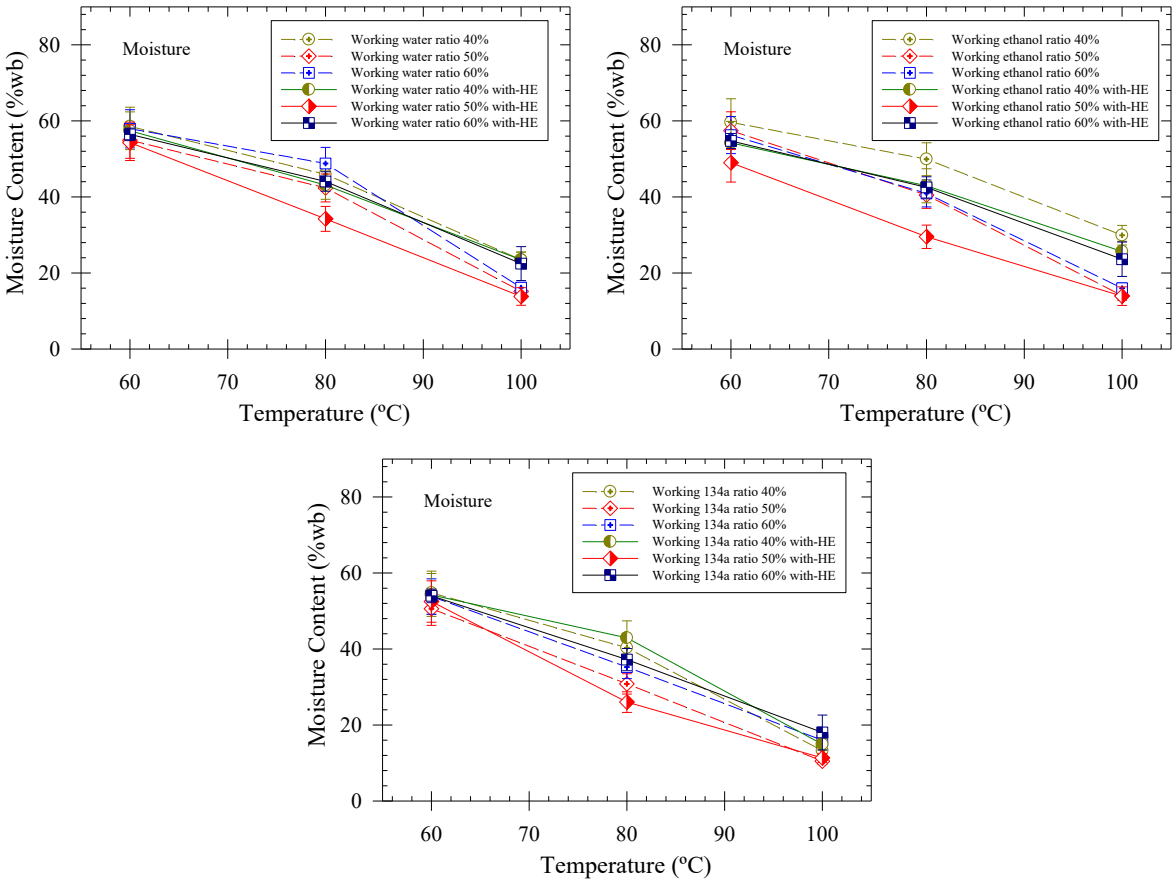


Figure 5 shows the trend in average moisture content during drying and roasting of chili peppers at different temperatures

เมื่อพิจารณาผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิอบแห้ง การติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และอัตราการเติมสารทำงาน มีผลโดยตรงต่อการลดความชื้นสุดท้ายของพริก โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 60 องศาเซลเซียส เป็น 100 องศาเซลเซียส ค่าความชื้นสุดท้าย (%wb) จะลดลงอย่างต่อเนื่องในทุกสภาวะเนื่องจากอัตราการระเหยของน้ำที่สูงขึ้น ซึ่งการทดลองในกรณีที่มีการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน (Install-HE) สามารถลดความชื้นสุดท้ายได้ดีกว่ากรณีที่ไม่ติดตั้ง (Non-HE) ในทุกกรณี และเมื่อพิจารณาอัตราการเติมสารทำงานพบว่า อัตราการเติมสารทำงานร้อยละ 50 เป็นจุดที่เหมาะสมที่สุด (Optimum Filling Ratio) ที่ช่วยให้ระบบเกิดวัฏจักรการระเหยและการควบแน่นภายในท่อได้อย่างสมดุล ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด [7] และสามารถลดความชื้นสุดท้ายลงได้ต่ำที่สุด เหลือประมาณร้อยละ 13 (wb) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ในขณะที่อัตราการเติมสารทำงานร้อยละ 40 ปริมาณสารทำงานน้อยเกินไปจะทำให้เกิดสภาวะแห้งขอด (Dry-out) และปริมาณสารทำงานมากเกินไปที่อัตราการเติมสารทำงานร้อยละ 60 จะเพิ่มความต้านทานความร้อนภายในท่อ ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการลดความชื้นลดลงตามลำดับ [9]

Table 1 The effect of moisture content and color quality of chili peppers when a heat exchanger is Install using additives at a 50% ratio

Type of working	Temperature (°C)	Moisture rate (%wb)		Chili color quality	
		Moisture Begin	Moisture Final	After leaving chili oven	After leaving chili roaster
Water	60	77.63	54.29		
	80	77.63	35.56		
	100	77.63	13.46		

Table 1 The effect of moisture content and color quality of chili peppers when a heat exchanger is Install using additives at a 50% ratio (ต่อ)

ype of working	Temperature (°C)	Moisture rate (%wb)		Chili color quality	
		Moisture Begin	Moisture Final	After leaving chili oven	After leaving chili roaster
Ethanol	60	77.63	49.00		
	80	77.63	29.53		
	100	77.63	10.57		
R134a	60	77.63	52.49		
	80	77.63	26.03		
	100	77.63	11.32		

เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการอบแห้งและคั่วพริกที่อุณหภูมิ 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส ร่วมกับอัตราการเติมสารทำงาน พบว่าอุณหภูมิและชนิดของสารทำงานมีผลต่อการลดความชื้นและคุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ โดยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และอัตราการเติมสารทำงานร้อยละ 50 เป็นสภาวะที่เหมาะสม (Optimum

condition) เนื่องจากสามารถลดความชื้นได้ในระดับเหมาะสม ขณะเดียวกันประเมินคุณภาพพริกจากการสังเกตลักษณะปรากฏ ยังคงรักษาสีแดงตามธรรมชาติและลักษณะโครงสร้างของพริกได้ดี โดยไม่เกิดการแปรเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้มจากการไหม้ (Browning and Scorching) และรักษาโครงสร้างเนื้อเยื่อส่งผลให้อัตราการแตกหักของเมล็ดพริกต่ำที่สุด [2] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย สุห์ดี นิเซ็ง และคณะ (2562) [5] จาก Table 1 พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 60 เป็น 80 และ 100 องศาเซลเซียส ความชื้นสุดท้ายของพริกลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยที่อัตราการเติมสารทำงานร้อยละ 50 สารทำงาน น้ำ จะให้ค่าความชื้นสุดท้ายร้อยละ 54.29, 35.56 และ 13.46 (wb) ขณะที่เอทานอล จะให้ค่าความชื้นสุดท้ายร้อยละ 49.00, 29.53 และ 10.57 (wb) และ R134a จะให้ค่าความชื้นสุดท้ายร้อยละ 52.49, 26.03 และ 11.32 (wb) ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนและการระเหยของน้ำออกจากพริก ส่งผลให้ความชื้นสุดท้ายลดลง ขณะที่ชนิดของสารทำงานส่งผลต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอน จึงทำให้ระดับการลดความชื้นแตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม การใช้อุณหภูมิสูงแม้ช่วยเร่งการลดความชื้น แต่มีแนวโน้มส่งผลต่อคุณภาพทางกายภาพของพริก โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงสีและการแตกหักของโครงสร้าง ดังนั้น การกำหนดสภาวะการอบแห้งและคั่วจึงควรพิจารณาควบคู่กันทั้งประสิทธิภาพการลดความชื้นและการรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งผลการทดลองนี้ชี้ว่าอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ที่อัตราการเติมสารทำงานร้อยละ 50 ให้ความสมดุลที่เหมาะสมระหว่างการลดความชื้นและการคงไว้ซึ่งคุณภาพทางกายภาพของพริก

สรุปผล

จากการศึกษาสมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องคั่วพริกแบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน โดยทำการทดสอบแปรเปลี่ยนชนิดสารทำงาน คือ น้ำ, เอทานอล และ สารทำความเย็น R134a ที่อัตราการเติมสารทำงานร้อยละ 40, 50 และ 60 ของปริมาตรส่วนทำระเหย และอุณหภูมิอบแห้งที่ 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1) สมรรถนะเชิงความร้อนและอัตราการถ่ายเทความร้อน อุณหภูมิของก๊าซร้อนจากเครื่องคั่วพริกส่งผลโดยตรงต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะเพิ่มผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ย (Temperature Difference) ซึ่งเป็นแรงขับเคลื่อนหลักในการถ่ายเทความร้อน ทั้งนี้อัตราการเติมสารทำงานที่ร้อยละ 50 เป็นอัตราการเติมที่เหมาะสมที่สุด (Optimum Filling Ratio) ที่ช่วยให้ระบบเกิดวัฏจักรการระเหยและการควบแน่นภายในท่อได้อย่างสมดุลที่สุด ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงในทุกช่วงอุณหภูมิ โดยสารทำงานชนิดสารทำความเย็น R134a ให้ค่าการถ่ายโอนความร้อนสูงที่สุดเท่ากับ 160.33 วัตต์ รองลงมาคือ เอทานอล 154.02 วัตต์ และน้ำ 135.02 วัตต์ ตามลำดับ ในขณะที่การเติมสารทำงานน้อยเกินไปที่ 40 เปอร์เซ็นต์ จะเกิดสภาวะแห้งขอด (Dry-out) และการเติมมากเกินไปที่อัตราการเติมสารร้อยละ 60 จะเพิ่มความต้านทานความร้อนภายในท่อและลดระยะเวลาพำนัก (Residence time) ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลง

2) การอบแห้งและการลดความชื้น การติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน (Install-HE) สามารถลดความชื้นสุดท้ายได้ดีกว่ากรณีไม่ติดตั้ง (Non-HE) ในทุกเงื่อนไขการทดลอง เนื่องจากมีการนำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ โดยสภาวะที่ให้อัตราการอบแห้งและลดความชื้นสุดท้ายได้ต่ำที่สุด ประมาณร้อยละ 13 (wb) คือ การอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่อัตราการเติมสารทำงานร้อยละ 50

3) การรักษาคุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์จากการประเมินคุณภาพพริกจากการสังเกตลักษณะปรากฏ เมื่อพิจารณาคุณภาพของพริกหลังผ่านกระบวนการคั่วและอบแห้ง พบว่าสภาวะที่เหมาะสม (Optimum condition) ในการรักษาคุณภาพทางกายภาพ คือ การอบแห้งและคั่วพริกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ที่อัตราการเติมสารทำงานร้อยละ 50 ซึ่งช่วยรักษาเสถียรภาพของค่าสีผิวสัมผัสให้คงโทนสีแดงสว่างตามธรรมชาติ โดยไม่แปรเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้มจากการไหม้ (Browning and Scorching) และรักษาโครงสร้างเนื้อเยื่อส่งผลให้อัตราการแตกหักของเมล็ดพริกต่ำที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนจากการวิจัย จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน งบประมาณเพื่อสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund; FF) จัดสรรงบประมาณจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ปีงบประมาณ 2568 และหน่วยวิจัยระบบของไหลและวิศวกรรมทางความร้อน (TEF) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร สำหรับสถานที่และอุกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

1. พิศาล สมบัติวงค์, จักรพันธ์ โสมะเกษตริน, อรทัย จำปาใด, ประภัสวรรณ สวัสดิ์วงษ์, กนกกาญจน์ จิรศิริเลิศ. การศึกษาและพัฒนาการอบแห้งพริกด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อมจากเตาชีวมวลทรงกระบอกเพื่อลดต้นทุนและเพิ่มผลผลิตให้กับเกษตรกรและวิสาหกิจชุมชนในจังหวัดศรีสะเกษ. สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว); .2560. https://elibrary.tsri.or.th/fullP/RDG60T0104/RDG60T0104_full.pdf
2. ศิรินุช จินดารักษ์, กลยุทธ ทะกอง. เครื่องอบแห้งและคั่วพริกแบบถังหมุน. ในการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7 ประจำปี 2557, 12-14 พฤศจิกายน 2557 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล, ประจวบคีรีขันต์; หน้า 361-367. http://repository.rmutr.ac.th/123456789/150
3. ยงยุทธ ใต้เงาสน. การพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร (ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน, มหาวิทยาลัยแม่โจ้; 2564. http://mdc.library.mju.ac.th/thesis/2565/yongyoot_taingaoson/fulltext.pdf
4. สัณหวัจน์ ทองแดง, สมพร หงษ์กง, สุริยา โชคเพิ่มพูน, สุรเชรษฐ์ สีชำนาญ. เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบเทอร์โมไซฟอนที่ใช้รางพาราโบลิคร่วมกับท่อแก้วสุญกาศ. ในการประชุมวิชาการระดับชาตินนทรีอีสาน ครั้งที่ 10 ประจำปี 2565, 26 พฤศจิกายน 2565 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ, จังหวัดสกลนคร; หน้า 465-473. https://kukr.lib.ku.ac.th/PNEC/Detail/20018146
5. สุห์ดี นิเซ็ง, ภาณุมาศ สุยบางดำ, กฤษณพงศ์ สังขวาสี, สุพัตรา เพ็งเกลี้ยง. การศึกษาผลของขนาดช่องระบายความชื้นสำหรับการอบแห้งพริกด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานผสมผสาน. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย. 2562, 11(1). 158-168. https://li01.tci-thaijo.org/index.php/rmutsvrj/article/view/182221
6. Zhen Tong, Zekun Han, Chunxue Fang, Xinran Wen. Two-phase thermosyphon loop with different working fluids used in data centers. Int. J. Heat Mass Transf. 2023; 214. 124393. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124393
7. Siyu Qin, Yijia Liu, Guoqiang Huang, Huile Duan, Junwei Su, Zhaolin Gu, Chun Yang, Liwen Jin. Experimental study of boiling heat transfer enhancement in compact thermosyphon with surface modification. Appl. Therm. Eng. 2026; 302. 131909. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2026.131909

8. Shaowei Yang, Xiangji Guo a, Zhangchi Liu, Hengxuan Xu, Bo Zhang, Shibo Tian. Experimental research on the heat transfer and flow characteristics of the flat plate loop thermosyphon under high heat flux density and wide filling ratio. Int. J. Heat Mass Transf. 2026; 269. 129161. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2026.129161
9. Yichuan He, Taipu Hao, Mamookho Elizabeth Makhatha, Yanhui Feng, Lin Qiu. Heat transfer and instability characteristics of a two-phase thermosiphon loop with wide range of filling ratios. Int. Commun. 2026; 174. 110938. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2026.110938
10. S. Chokphoemphun, S. Eiamsa-ard, P. Promvonge, S. Thongdaeng, S. Hongkong. Heat transfer of a coil-tube heat exchanger in the freeboard zone of a rice husk fluidized-bed combustor, Int. Comm. Heat Mass Tran. 2021, 127. 105462. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105462
11. S. Jengsooksawat, S. Rittidech, K. Booddachan. Loop Thermosyphon with Vapor Chamber Installation for Energy Thrift in a Chilli Oven. J. Eng. Thermophys. 2018, 27(1). 119-135. https://link.springer.com/article/10.1134/S1810232818010125
12. V.M. Aguiar, G.A. Bartmeyer, L. Krambeck, P.H.D. Santos, T. Antonini Alves. Thermal Analysis of a Finned Thermosyphon for Heat Exchanger Applications. IRJAES. 2018, 5(1). 18-21. https://dx.doi.org/10.22161/ijaers.5.1.4
13. Chen, J., Cen, J., Huang, W., Jiang, F. Multiphase flow and heat transfer characteristics of an extra-long gravity-assisted heat pipe: an experimental study. Int. J. Heat Mass Transf. 2021, 164. 120564. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120564
14. Omer Bilgic, Hakan Çelebi, V. Erbil Karakus, Mustafa Ozdemir. Experimental investigation of a header-integrated thermosyphon heat exchanger for sealed enclosure cooling. Appl. Therm. Eng. 2026, 295. 130608. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2026.130608
15. พชร ว่องไพศาลกิจ, กระวี ตรีอำนรรค, เทวรัตน์ ตรีอำนรรค. การอบแห้งพริกด้วยเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำร่วมกับเครื่องอุ่นอากาศแบบเทอร์โมอิเล็กทริก. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร. 2563, 14(1). 82-96. https://doi.org/10.14456/jrmutp.2020.8
16. Siriporn Setwong, Teerapat Chompookham, Pattanapol Meena. Experimental study of working fluids in thermosyphon heat exchanger with annular fins for thermal performance enhancement. Journal of Science and Technology Mahasarakham University. 2014, 33(2), 185-190. https://li01.tci-thaijo.org/index.php/scimsujournal/article/view/19588?utm_source=chatgpt.com