

การถ่ายเทความร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกสำหรับอบแห้งดีปลี

Heat transfer modelling of a greenhouse solar dryer for drying long pepper

จักรพรรณ์ ผิวสอาด* ชัยพัทธ์ ภูสำเภา

Jagravan Piwsaoad*, Chayapat Phusampao

สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย เลข 42000 ประเทศไทย

Physics Program, Faculty of Science and Technology, Loei Rajabhat University, 42000 Thailand

* Corresponding Author: jagravan25@gmail.com

Received: 20 July 2016; Revised: 26 October 2016; Accepted: 28 October 2016; Available online: XXX

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกสำหรับอบแห้งดีปลี ที่วิสาหกิจชุมชนบ้านโคกขมิ้น จังหวัดเลย (17.48°N, 101.72°E) ประเทศไทย ทำการอบแห้งดีปลีทั้งหมด 10 ชุดการทดลอง แต่ละชุดการทดลองใช้ดีปลี 10.0 กิโลกรัม ตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองคือ ความเข้มรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิของอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ อัตราการไหลของอากาศ และปริมาณความชื้นสมมูลจากแบบจำลองกระบวนการอบแห้งแบบชั้นบาง หาผลเฉลี่ยเชิงตัวเลขดังกล่าวโดยใช้โปรแกรมภาษา Compaq Visual FORTRAN version 6.5 ผลการทดลองพบว่าปริมาณความชื้นของดีปลีคำนวณจากแบบจำลองสอดคล้องกับผลการวัด มีค่า RMSE เท่ากับ 0.417333 และ R^2 เท่ากับ 0.9605

Abstract

This paper presents heat transfer of a greenhouse solar dryer for drying long peppers at Ban Khokamin Community Enterprise, Loei Province (17.48°N, 101.72°E), Thailand. Ten batches of long peppers drying, for each batch used 10.0 kilograms of long peppers. The parameter used in the heat transfer model is the solar radiation, air temperature, relative humidity, airflow rate and equilibrium moisture content form thin layer drying process. The numerical solution was programmed in Compaq Visual FORTRAN version 6.5. The results showed that the moisture content, calculated from the model corresponding to the measured values RMSE 0.417333 and $R^2=0.9605$.

Keywords: Heat transfers; Solar dryer; Long peppers

1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม เป็นแหล่งผลิตอาหารที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลก ดังคำกล่าวที่ว่า เป็นอู่ข้าวอู่น้ำมาตั้งแต่โบราณกาล และไม่ใช่เฉพาะในหมู่คนไทยเท่านั้นที่มีความเห็นเช่นนี้ แม้แต่ชาวต่างประเทศที่มีโอกาสได้มาเที่ยวตามสถานที่ต่างๆ ในแต่ละภาคของประเทศก็มีความเห็นไปในทางเดียวกัน สิ่งหนึ่งที่มีความเห็นตรงกันก็คือ ประเทศไทย มีข้าว ปลา อาหารอุดมสมบูรณ์ มีอาหารประเภท ผัก และผลไม้ หลากหลายชนิดที่มีรสชาติอร่อย มีให้เลือกรับประทานได้ตลอดทั้งปี นอกจากนี้ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีผลิตผลทางการเกษตรค่อนข้างหลากหลาย ที่เด่นๆ ได้แก่ ข้าว ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ มันสำปะหลัง อ้อย ผลไม้ตามฤดูกาล และพืชสมุนไพร ในปี พ.ศ. 2557 ประเทศไทยมีการส่งออก ข้าวสาร 10.97 ล้านตัน มูลค่า 174,853 ล้านบาท ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ปริมาณ 0.631 ล้านตัน มูลค่า 5,154.83 ล้านบาท ส่งออกยางพารา 3.80 ล้านตัน มูลค่า 193,749.21 ล้านบาท เป็นต้น [1]

ในปัจจุบันพืชที่เกษตรกรนิยมนำมาปลูกคือ สมุนไพร โดยเฉพาะดีปลี มีทั้งการปลูกเป็นพืชหลัก และการปลูกในสวนผลไม้เป็นพืชเสริม เริ่มตั้งแต่ปี พ.ศ. 2540 เป็นต้นมา เกษตรกรมีความสนใจปลูกดีปลีมากขึ้น สรรพคุณของดีปลีคือ ผลดีปลี รสเผ็ดร้อนขม ใช้เป็นเครื่องเทศมีกลิ่นหอมให้ความอบอุ่นกับร่างกาย บำรุงธาตุ ขับลมในลำไส้ ขับระดู เถาดีปลี รสเผ็ดร้อน แก้ปวดท้อง จุกเสียด แก้กิดสีดวง ทวาร เถาและกิ่ง ฝนกับน้ำทาแก้ฟกบวม รากสดและใบสดดีปลี แก้ฟกช้ำ แก้หิดไธ้ แก้ลมวิงเวียน แก้เสมหะ เกษตรกรปลูกไว้ใช้เป็นยาในครัวเรือนเพียงอย่างเดียว แต่ในปัจจุบันเกษตรกรนอกจากปลูกเพื่อใช้ในครัวเรือนแล้วยังปลูกในเชิงพาณิชย์อีกด้วย แหล่งผลิตสำคัญที่มีดีปลีได้แก่ ตำบลบ้านใหม่ และตำบลพังตรุ อำเภอนาทม อำเภอเมือง และอำเภอนาทม จังหวัดน่าน นอกจากนี้แหล่งผลิตอื่นๆ ได้แก่ จังหวัดจันทบุรี นครปฐมและนครศรีธรรมราช เป็นต้น [2]

จังหวัดเลยเป็นจังหวัดที่มีภูมิประเทศ ที่ประกอบด้วยภูเขาและพื้นที่ราบ ในบริเวณที่เป็นพื้นที่ราบเกษตรกรรมส่วนใหญ่ประกอบอาชีพทำไร่ทำสวนเนื่องจากในบริเวณดังกล่าวมีน้ำเพียงพอในการทำเกษตร แต่บริเวณที่เป็นภูเขาเกษตรกรรมปลูกพืชที่ใช้น้ำในปริมาณน้อย เช่น ยางพารา ฝ้าย ถั่ว และสับปะรด โดยเฉพาะในเขตพื้นที่ บ้านไร่ม่วง ตำบลน้ำหมาน อำเภอเมืองเลย จังหวัดเลย ได้มีการปลูกสับปะรดเป็นส่วนใหญ่ มีพื้นที่ปลูกประมาณ 900 ไร่ และมีกลุ่มเกษตรกร บ้านโคกขมิ้น ตำบลโคกขมิ้น อำเภอวังสะพุง มีความสนใจในการปลูกสมุนไพร โดยเฉพาะดีปลี มีพื้นที่การเพาะปลูกที่อยู่ในฐานข้อมูลของเกษตรอำเภอโดยประมาณ 600 ไร่ และกำลังขยายพื้นที่ในการปลูกไปยังอำเภออื่นๆ [3]

การผลิตอาหารแห้งหรือผลิตผลทางการเกษตรอบแห้งนั้น ที่นิยมใช้กันในอดีต คือการตากแดดตามธรรมชาติ ซึ่งวิธีการที่ตากแห้งดังกล่าวทำให้ผลิตผลทางการเกษตรแห้งไม่สม่ำเสมอ เกิดเชื้อรา และไม่สะอาดเนื่องจากแมลงและฝุ่นละอองทำให้ไม่เป็นที่ต้องการของตลาด ส่งผลกระทบต่อความเป็นอยู่ของเกษตรกร และเนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่ในพื้นที่เขตร้อนได้รับรังสีอาทิตย์ในปริมาณมาก [4] ซึ่งมีความเหมาะสมใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ในช่วง 40 ปีที่ผ่านมา มีนักวิจัยได้ทำการพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์หลายประเภท แต่พบว่าเครื่องอบแห้งส่วนใหญ่มีขนาดใหญ่ [5-7]

ผู้วิจัยได้ทำการทดลองอบแห้งดีปลีด้วยเครื่องอบแห้งแบบเรือนกระจกขนาดใหญ่ ที่บ้านผาอินทร์แปลง ตำบลผาอินทร์แปลง อำเภอเอราวัณ จังหวัดเลย ได้รับทุนสนับสนุนจากกรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน ปี พ.ศ. 2555 ผลของการอบแห้งพบว่าดีปลีอบแห้งมีคุณภาพดี และเป็นที่ต้องการของตลาด แต่เนื่องจากขนาดเครื่องอบแห้งมีขนาดใหญ่ต้นทุนในการก่อสร้างสูงซึ่งไม่เหมาะกับกลุ่มเกษตรกรที่มีผลิตผลทางการเกษตรในปริมาณน้อยๆ ในครัวเรือน ด้วยเหตุนี้เครื่องอบแห้งแบบเรือนกระจกขนาดใหญ่จึงไม่สามารถตอบสนองความต้องการในการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรในปริมาณน้อยๆ ได้ เป็นเหตุให้ผู้วิจัยออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกขนาดเล็กเพื่ออบแห้งดีปลี (Long peppers) ขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงเสนอการทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกขนาดเล็ก เพื่ออบแห้งดีปลีในพื้นที่ บ้านโคกขมิ้น ตำบลโคกขมิ้น อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย นอกจากนี้ยังพัฒนาแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนของเครื่องอบแห้ง เพื่อหาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งและศึกษาปัจจัยที่มีผลในการอบแห้ง ได้แก่ ความเข้มรังสีอาทิตย์ (Solar radiation) อุณหภูมิของอากาศ (Air temperature)

ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (Relative humidity) อัตราการไหลของอากาศ (Airflow rate) และความชื้นของผลิตภัณฑ์ (Moisture content) เป็นต้น

2. วิธีดำเนินการวิจัย

การติดตั้งเครื่องมือการทดลอง

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกติดตั้งที่จังหวัดเลย (17.48°N, 101.72°E) ตัวเครื่องอบแห้งมีลักษณะเป็นหลังคารูปโค้งซึ่งปิดคลุมด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนต และติดตั้งบนพื้นเหล็ก เครื่องอบแห้งดังกล่าวมีความกว้าง 4.0 เมตร ยาว 1.0 เมตร และสูง 2.0 เมตร โดยติดตั้งพัดลมขนาด 15 วัตต์ จำนวน 4 ตัว ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากแผงโซลาร์เซลล์ขนาด 40 วัตต์ 2 ตัว สำหรับใช้ระบายอากาศ ติดตั้งอยู่บริเวณด้านบนของเครื่องอบแห้ง เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก ตีปลีในเครื่องอบแห้ง และตีปลีตัวอย่างที่ตากแดดตามธรรมชาติ แสดงในภาพที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ



ภาพที่ 1 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก



ภาพที่ 2 ตีปลีวางบนถาดในเครื่องอบแห้ง



ภาพที่ 3 ตัวอย่างตีปลีตากแดดตามธรรมชาติ

เมื่อรังสีอาทิตย์ที่เป็นรังสีคลื่นสั้นส่งผ่านแผ่นโพลีคาร์บอเนตทำให้ความยาวคลื่นเป็นรังสีคลื่นยาว รังสีอาทิตย์ดังกล่าวทำให้อุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งสูงขึ้น โดยแผ่นเหล็กที่อยู่ด้านล่างของเครื่องอบแห้งที่ทำด้วยสแตนเลสดูดรังสีอาทิตย์ไว้แล้วถ่ายเทออกมาในเครื่องอบแห้งในรูปของความร้อน รังสีอีกส่วนหนึ่งส่องไปยังตีปลีที่อยู่ในเครื่องอบแห้งโดยตรงแล้วทำให้น้ำในตีปลีเกิดการระเหย และอีกส่วนประกอบหนึ่งของเครื่องอบแห้งคือตัวรับรังสีอาทิตย์ที่ต่ออยู่ด้านหน้าของเครื่องอบแห้ง 2 ตัว รับรังสีอาทิตย์โดยแผ่นเหล็กที่ทำด้วยสแตนเลสแล้วถ่ายเทความร้อนเข้าไปในเครื่องอบแห้ง ในขณะที่อากาศในเครื่องอบแห้งมีอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้น้ำที่อยู่ในตีปลีระเหยแล้วลอยขึ้น ความชื้นถูกดูดออกจากเครื่องอบแห้งโดยพัดลมดูดอากาศที่อยู่ด้านหลังของเครื่องอบแห้ง อากาศเย็นที่อยู่ด้านนอกก็ไหลเข้ามาแทนตรงด้านหน้าของเครื่องอบแห้งทั้ง 2 ช่อง

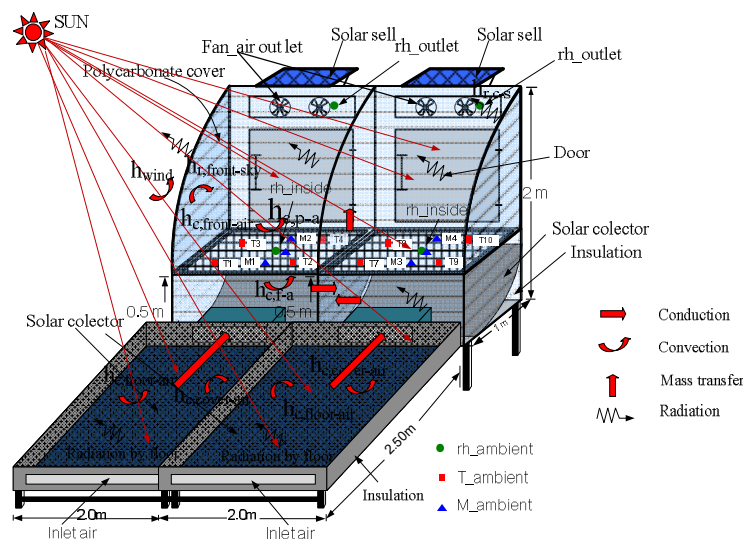
การทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งใช้อุปกรณ์ต่างๆ ดังต่อไปนี้ สายเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (K-type thermocouple) (ยี่ห้อ APPA รุ่น APPA 55, ประเทศไต้หวัน) มีความถูกต้อง (accuracy) $\pm 0.5\%$ สำหรับวัดอุณหภูมิอากาศในเครื่องอบแห้ง, เครื่องวัด

ความชื้นสัมพัทธ์ (hygrometer) (ยี่ห้อ Testo, รุ่น 635, ประเทศเยอรมนี) มีความถูกต้อง (accuracy) $\pm 2\%$ สำหรับวัดความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ เครื่องวัดความเร็วลมแบบฮีตไวร์ (hot wire anemometer) (ยี่ห้อ Airflow รุ่น TA5, ประเทศจีน) มีความถูกต้อง (accuracy) $\pm 1\%$, เครื่องวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ (pyranometer) แบบเทอร์โมโพล (thermopile) (ยี่ห้อ Kipp & Zonen รุ่น CMP3, ประเทศสหรัฐอเมริกา) มีความถูกต้อง (accuracy) $\pm 0.5\%$ เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล (ยี่ห้อ TANITA รุ่น KD-200, ประเทศญี่ปุ่น) มีความถูกต้อง (accuracy) $\pm 1\%$, ตู้อบไฟฟ้า (ยี่ห้อ Memmert GMBH, รุ่น ULE500, ประเทศญี่ปุ่น) มีความถูกต้อง (accuracy) $\pm 0.5\%$ สำหรับหามวลแห้งของดีปลี

การทดลองเริ่มจาก ชั่งมวลเริ่มต้นของดีปลีที่ต้องการอบแห้ง และมวลของดีปลีตัวอย่าง (sample) เตรียมเข้าเครื่องอบแห้ง 6 ตะกร้า ละ 100 กรัม นำไปวางบนตะแกรงในเครื่องอบแห้ง เครื่องอบแห้งประกอบด้วยห้องอบแห้ง 2 ห้อง แต่ละห้องมีถาด 1 ถาด แต่ละถาดวางตะกร้าตัวอย่าง 3 อัน ดังแสดงในภาพที่ 2 ส่วนดีปลีตัวอย่างที่ตากแดดตามธรรมชาติมี 6 ตะกร้า ละ 100 กรัม นำไปวางด้านนอกเครื่องอบแห้ง ดังแสดงในภาพที่ 3 จากนั้นทำการชั่งมวลของตัวอย่างทั้งที่อยู่ในเครื่องอบแห้งและที่อยู่ด้านนอกเครื่องอบแห้ง ทุกๆ 1 ชั่วโมง ส่วนความเข้มรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิของอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ความเร็วลม ทำการวัดทุกๆ 10 นาที ทำการวัดจนกว่าปริมาณความชื้นของดีปลีจะลดลงจนคงที่ จากนั้นนำดีปลีตัวอย่างทั้ง 12 ตะกร้าไปอบในตู้อบ (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อหามวลแห้ง ในงานวิจัยนี้ทำการอบแห้งดีปลีทั้งหมด 10 ชุดการทดลอง แต่ละชุดการทดลองทำการทดลอง 6 ซ้ำ ใช้ดีปลีชุดการทดลองละ 10.0 กิโลกรัม ดีปลีที่ใช้ในการทดลองมีขนาดโดยเฉลี่ย มีความยาวประมาณ 3.0-5.0 เซนติเมตร แบบจำลองการถ่ายเทความร้อน

การศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกโดยแบบจำลองการถ่ายเทความร้อน มีสมมติฐานดังนี้

1) อุณหภูมิภายในระบบอบแห้งเท่ากันทั้งระบบ 2) การอบแห้งเป็นแบบชั้นบาง 3) ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ แผ่นโพลีคาร์บอนเนต แผ่นเหล็ก และดีปลีมีค่าคงที่ 4) อัตราการรั่วของอากาศมีน้อยมากเมื่อเทียบกับพัดลมระบายอากาศของเครื่องอบแห้งการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นกับองค์ประกอบต่างๆ ของระบบอบแห้งแสดงไว้ในภาพที่ 4 โดยสมการสมดุลทางความร้อนขององค์ประกอบต่างๆ เขียนได้ดังนี้



ภาพที่ 4 การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก

สมการสมดุลพลังงานของ solar collector

1) สมการสมดุลพลังงานของ solar collector cover

อัตราการถ่ายเทความร้อนของ solar collector cover ที่เปลี่ยนไปตามเวลา มีค่าเท่ากับผลรวมของความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพาความร้อนระหว่าง solar collector cover กับอากาศภายใน solar collector, ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการแผ่รังสีความร้อนจาก

solar collector cover ไปยังท้องฟ้า, ความร้อนที่ถ่ายเทความร้อนโดยลมจาก solar collector cover ไปยังอากาศแวดล้อม และรังสีอาทิตย์ที่ดูดกลืนโดย solar collector cover เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$m_{cover,s} C_{p,cover,s} \frac{dT_{cover,s}}{dt} = (h_{c,cover,s_air} (T_{air} - T_{cover,s}) A_{cover,s} + h_{r,cover,s_sky} (T_{sky} - T_{cover,s}) A_{cover,s} + h_{wind,cover,s_ambient} (T_{ambient} - T_{cover,s}) A_{cover,s} + (\alpha_{cover,s} I_t A_{cover,s})) \quad (1)$$

เมื่อ $m_{cover,s}$ คือมวลของ solar collector cover [kg], $C_{p,cover,s}$ คือค่าความจุความร้อนของ solar collector cover [$J/kg \cdot ^\circ C^{-1}$], $T_{cover,s}$ คืออุณหภูมิของ solar collector cover [K], T_{air} คืออุณหภูมิของอากาศ [K], $h_{r,cover,s_air}$ คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนจาก solar collector cover ไปยังอากาศภายใน solar collector [$W/m^2 \cdot K$], $h_{c,cover,s_air}$ คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนจาก solar collector cover ไปยังอากาศภายใน solar collector [$W/m^2 \cdot K^{-1}$], T_{sky} คืออุณหภูมิท้องฟ้า [K], $h_{wind,cover,s_ambient}$ คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยลมจาก solar collector cover ไปยังอากาศแวดล้อม [$W/m^2 \cdot K$], $\alpha_{cover,s}$ คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีของ solar collector cover (decimal) และ $A_{cover,s}$ คือพื้นที่ของ solar collector cover [m^2]

2) สมการสมดุลพลังงานของพื้น solar collector

อัตราการถ่ายเทความร้อนของพื้น solar collector ที่เปลี่ยนไปตามเวลา มีค่าเท่ากับผลรวมความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพาความร้อนระหว่างพื้นของ solar collector กับอากาศภายใน solar collector, ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการแผ่รังสีความร้อนจากพื้นของ solar collector ไปยังอากาศใน solar collector และรังสีอาทิตย์ที่ดูดกลืนโดยพื้นของ solar collector เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$m_{floor,s} C_{p,floor,s} \frac{dT_{floor,s}}{dt} = (h_{c,floor,s_air} (T_{air} - T_{floor,s}) A_{floor,s} + h_{r,floor,s_air} (T_{air} - T_{floor,s}) A_{floor,s} + \alpha_{floor,s} I_t A_{floor,s}) \quad (2)$$

เมื่อ $m_{floor,s}$ คือมวลของพื้นของ solar collector [kg], $C_{p,floor,s}$ คือค่าความจุความร้อนของพื้นของ solar collector [$J/kg \cdot ^\circ C$], $T_{floor,s}$ คืออุณหภูมิของพื้นของ solar collector [K], $h_{c,floor,s_air}$ คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนจากพื้นไปยังอากาศภายในเครื่องอบแห้ง [$W/m^2 \cdot K$], $A_{floor,s}$ คือพื้นที่ของพื้นของ solar collector [m^2], $h_{r,floor,s_air}$ คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนจากพื้นไปยังอากาศภายในเครื่องอบแห้ง [$W/m^2 \cdot K$], $\alpha_{floor,s}$ คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีของพื้นของ solar collector [decimal]

สมการสมดุลพลังงานของห้องอบแห้ง

1) สมการสมดุลพลังงานของแผ่นโพลีคาร์บอเนต (ด้านหน้า)

อัตราการถ่ายเทความร้อนของแผ่นโพลีคาร์บอเนตด้านหน้าที่เปลี่ยนไปตามเวลา มีค่าเท่ากับผลรวมของความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพาระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับอากาศภายในเครื่องอบแห้ง, ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการแผ่รังสีความร้อนจากแผ่นโพลีคาร์บอเนตไป

ยังท้องฟ้า, ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพาความร้อนโดยลมระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับอากาศแวดล้อม, รังสีอาทิตย์ที่ดูดกลืนโดยแผ่นโพลีคาร์บอเนต เขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [8-13]

$$\begin{aligned}
 m_{front} C_{p,front} \frac{dT_{front}}{dt} = & (h_{c,front_air} (T_{air} - T_{front}) A_{front} \\
 & + h_{r,front_sky} (T_{sky} - T_{front}) A_{front} \\
 & + h_{wind} (T_{ambient} - T_{front}) A_{front} \\
 & + \alpha_{front} I_t A_{front})
 \end{aligned} \quad (3)$$

เมื่อ m_{front} คือมวลของแผ่นโพลีคาร์บอเนตด้านหน้า [kg], $C_{p,front}$ คือค่าความจุความร้อนของแผ่นโพลีคาร์บอเนตด้านหน้า [J/kg-°C], T_{front} คืออุณหภูมิของแผ่นโพลีคาร์บอเนตด้านหน้า [K], $h_{r,front_air}$ คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนจากแผ่นโพลีคาร์บอเนตด้านหน้าไปยังอากาศภายในเครื่องอบแห้ง [W/m²-K], A_{front} คือพื้นที่ของแผ่นโพลีคาร์บอเนตด้านหน้า [m²], $h_{c,front_air}$ คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนจากแผ่นโพลีคาร์บอเนตด้านหน้าไปยังอากาศภายในเครื่องอบแห้ง [W/m²-K] และ α_{front} คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีของแผ่นโพลีคาร์บอเนตด้านหน้า [decimal]

2) สมการสมดุลพลังงานของผนังด้านทิศเหนือของเครื่องอบแห้ง

อัตราการถ่ายเทความร้อนของผนังด้านทิศเหนือของเครื่องอบแห้งที่เปลี่ยนไปตามเวลา มีค่าเท่ากับผลรวมของความร้อนที่ถ่ายเทโดยการแผ่รังสีความร้อนระหว่างผนังด้านทิศเหนือของเครื่องอบแห้งกับอากาศภายในเครื่องอบแห้ง, ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพาความร้อนระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับอากาศภายในเครื่องอบแห้ง, รังสีอาทิตย์ที่ดูดกลืนโดยผนังด้านทิศเหนือของเครื่องอบแห้ง ไม่คิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างผนังด้านนอกกับสิ่งแวดล้อมโดยการพาเนื่องจากผู้วิจัยได้ใส่ฉนวนกันความร้อนที่ผนังด้านในจึงไม่มีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น เขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [8-13]

$$\begin{aligned}
 m_{north} C_{p,north} \frac{dT_{north}}{dt} = & (h_{r,north_air} (T_{air} - T_{north}) A_{north} \\
 & + h_{c,north_air} (T_{air} - T_{north}) A_{north} \\
 & + [\alpha_{north} (1 - r) I_t A_{north} + \alpha_{north} I_t A_{north}])
 \end{aligned} \quad (4)$$

เมื่อ m_{north} คือมวลของผนังด้านทิศเหนือ [kg], $C_{p,north}$ คือค่าความจุความร้อนของผนังด้านทิศเหนือ [J/kg-°C], T_{north} คืออุณหภูมิของผนังด้านทิศเหนือ [K], $h_{r,north_air}$ คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนจากผนังด้านทิศเหนือไปยังอากาศภายในเครื่องอบแห้ง [W/m²-K], A_{north} คือพื้นที่ของผนังด้านทิศเหนือ [m²], $h_{c,north_air}$ คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนจากผนังด้านทิศเหนือไปยังอากาศภายในเครื่องอบแห้ง [W/m²-K] และ α_{north} คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีของผนังด้านทิศเหนือ [decimal]

3) สมการสมดุลพลังงานของผนังด้านทิศตะวันออกของเครื่องอบแห้ง

อัตราการถ่ายเทความร้อนของผนังด้านทิศตะวันออกของเครื่องอบแห้งที่เปลี่ยนไปตามเวลา มีค่าเท่ากับผลรวมของความร้อนที่ถ่ายเทโดยการแผ่รังสีความร้อนระหว่างผนังด้านทิศตะวันออกของเครื่องอบแห้งไปยังท้องฟ้า, ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพาความร้อนระหว่างผนังด้านทิศตะวันออกของเครื่องอบแห้งกับอากาศภายในเครื่องอบแห้ง, ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพาความร้อนโดยลมระหว่างผนังด้านทิศตะวันออกของเครื่องอบแห้งกับอากาศแวดล้อม และรังสีอาทิตย์ที่ดูดกลืนโดยผนังด้านทิศตะวันออกของเครื่องอบแห้ง [8-13]

$$\begin{aligned}
m_{east} C_{p,east} \frac{dT_{east}}{dt} = & (h_{r,east_sky} (T_{sky} - T_{east}) A_{east} \\
& + h_{c,east_air} (T_{air} - T_{east}) A_{east} \\
& + h_{wind,east_air} (T_{ambient} - T_{east}) A_{east} \\
& + \alpha_{east} (1-r) I_t A_{east})
\end{aligned} \quad (5)$$

เมื่อ m_{east} คือมวลของผนังด้านทิศตะวันออก [kg], $C_{p,east}$ คือค่าความจุความร้อนของผนังด้านทิศตะวันออก [J/kg-°C], T_{east} คืออุณหภูมิด้านทิศตะวันออก [K], $h_{r,east_air}$ คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนจากผนังด้านทิศตะวันออกไปยังอากาศภายในเครื่องอบแห้ง [W/m²-K], A_{east} คือพื้นที่ของผนังด้านทิศตะวันออก [m²], $h_{c,east_air}$ คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนจากผนังด้านทิศตะวันออกไปยังอากาศภายในเครื่องอบแห้ง [W/m²-K] และ α_{east} คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีของผนังด้านทิศตะวันออก [decimal]

4) สมการสมดุลพลังงานของผนังด้านทิศตะวันตกของเครื่องอบแห้ง

อัตราการถ่ายเทความร้อนของผนังด้านทิศตะวันตกของเครื่องอบแห้งที่เปลี่ยนไปตามเวลา มีค่าเท่ากับผลรวมของความร้อนที่ถ่ายเทโดยการแผ่รังสีความร้อนระหว่างผนังด้านทิศตะวันตกของเครื่องอบแห้งไปยังท้องฟ้า, ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพาความร้อนระหว่างผนังด้านทิศตะวันตกของเครื่องอบแห้งกับอากาศภายในเครื่องอบแห้ง, ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพาความร้อนโดยลมระหว่างผนังด้านทิศตะวันตกของเครื่องอบแห้งกับอากาศแวดล้อม และรังสีอาทิตย์ที่ดูดกลืนโดยผนังด้านทิศตะวันตกของเครื่องอบแห้ง [8-13]

$$\begin{aligned}
m_{west} C_{p,west} \frac{dT_{west}}{dt} = & (h_{r,west_sky} (T_{sky} - T_{west}) A_{west} \\
& + h_{c,west_air} (T_{air} - T_{west}) A_{west} \\
& + h_{wind,west_ambient} (T_{ambient} - T_{west}) A_{west} \\
& + \alpha_{west} (1-r) I_t A_{west})
\end{aligned} \quad (6)$$

เมื่อ m_{west} มวลของผนังด้านทิศตะวันตก [kg], $C_{p,west}$ คือค่าความจุความร้อนของผนังด้านทิศตะวันตก [J/kg-°C], T_{west} คืออุณหภูมิด้านทิศตะวันตก [K], A_{west} คือพื้นที่ของผนังด้านทิศตะวันตก [m²], $h_{r,west_air}$ คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนจากผนังด้านทิศตะวันตกไปยังอากาศภายในเครื่องอบแห้ง [W/m²-K], $h_{w,west_air}$ คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนจากผนังด้านทิศตะวันตกไปยังอากาศภายในเครื่องอบแห้ง [W/m²-K], α_{west} คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีของผนังด้านทิศตะวันตก [decimal]

5) สมการสมดุลพลังงานของอากาศภายในเครื่องอบแห้ง

อัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศที่เปลี่ยนไปตามเวลา มีค่าเท่ากับผลรวมของความร้อนที่ถูกถ่ายเทโดยการพาความร้อนระหว่างตีปัดกับอากาศ, ความร้อนที่ถูกถ่ายเทโดยการพาความร้อนระหว่างพื้นแผ่นเหล็กกับอากาศ, ความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำจากตีปัด, ผลต่างของค่าเอนทาลปีเนื่องจากอากาศไหลเข้าและออกจากเครื่องอบแห้ง, การสูญเสียความร้อนของอากาศของเครื่องอบแห้งไปยังอากาศแวดล้อม และรังสีอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืนโดยอากาศและตีปัด เขียนสมการสมดุลพลังงานของอากาศได้ดังนี้ [8-13]

$$\begin{aligned}
m_{air} C_{pa} \frac{dT_{air}}{dt} = & (h_{c,product_air} (T_{air} - T_{product}) A_{product} \\
& + h_{c,floor_air} (T_{air} - T_{floor}) A_{floor} \\
& + D_{floor} C_{pv} \alpha_{product} (T_{product} - T_{air}) \frac{dM_{product}}{dt} A_{product} \\
& + (\rho_{air} V_{out} C_{pa} T_{out} - \rho_{air} V_{in} C_{p,air} T_{in}) \\
& + U_{front} (T_{ambient} - T_{air}) A_{front} + [(1 - F_{product})(1 - \alpha_{floor}) \\
& + (1 - \alpha_{product}) F_{product}] I_t \tau_{front} A_{front}]
\end{aligned} \quad (7)$$

เมื่อ A_{front} คือพื้นที่ของแผ่นโพลีคาร์บอเนต [m^2], A_{floor} คือพื้นที่ของพื้น [m^2], $A_{product}$ คือพื้นที่ของติปลี่ [m^2], C_{pa} คือความจุความร้อนจำเพาะของอากาศในติปลี่ [$J/kg \cdot K$], C_{pv} คือความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำในติปลี่ [$J/kg \cdot K$], $D_{product}$ คือความหนาของติปลี่ [m], $F_{product}$ คือส่วนการรับพลังงานรังสีอาทิตย์ของติปลี่ [decimal], $h_{c,floor_air}$ คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างพื้นกับอากาศอบแห้ง [$W/m^2 \cdot K$], $h_{c,product_air}$ คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างติปลี่กับอากาศอบแห้ง [$W/m^2 \cdot K$], I_t คือความเข้มรังสีอาทิตย์ที่เวลาใดๆ [W/m^2], m_{air} คือมวลของอากาศแห้งในเครื่องอบแห้ง [kg], $M_{product}$ คือความชื้นของติปลี่ [% db.], t คือเวลา [s], T_{air} คืออุณหภูมิอากาศอบแห้ง [K], T_{floor} คือ อุณหภูมิของพื้น [K], T_{in} คืออุณหภูมิของอากาศขาเข้า [K], $T_{product}$ คืออุณหภูมิของติปลี่ [K], T_{water} คืออุณหภูมิของน้ำ [K], v_{in} คือความเร็วลมไหลเข้าระบบอบแห้ง [m/s], v_{out} คือความเร็วลมไหลออกจากระบบอบแห้ง [m/s], U_{front} คือสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของแผ่นโพลีคาร์บอเนต [$W/m^2 \cdot ^\circ C$], ρ_{air} คือความหนาแน่นของอากาศแห้ง [kg/m^3], $\rho_{product}$ คือความหนาแน่นของติปลี่ [kg/m^3], α_{floor} คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของพื้นแผ่นเหล็ก [decimal], $\alpha_{product}$ คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของติปลี่ [decimal], τ_{front} คือสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของโพลีคาร์บอเนตด้านหน้า [decimal]

6) สมการสมดุลพลังงานของติปลี่

อัตราการถ่ายเทความร้อนของติปลี่ที่เปลี่ยนไปตามเวลา มีค่าเท่ากับผลรวมของความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพาความร้อนระหว่างอากาศกับติปลี่, ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการแผ่รังสีความร้อนระหว่างติปลี่กับผนังด้านหน้าเครื่องอบแห้ง, ความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำในติปลี่ และรังสีอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืนโดยติปลี่ แทนค่าในแต่ละเทอมได้สมการดังนี้ [8-13]

$$\begin{aligned}
m_{product} (C_{pp} + C_{pl} M_{product}) \frac{dT_{product}}{dt} = & (h_{c,product_air} (T_{air} - T_{product}) A_{product} \\
& + h_{r,product_front} (T_{front} - T_{product}) A_{product} \\
& + D_{product} \rho_{product} [L_{product} + C_{pv} (T_{air} - T_{product})] \\
& \frac{dM_{product}}{dt} A_{product} + F_{product} \alpha_{product} I_t \tau_{front} A_{front})
\end{aligned} \quad (8)$$

เมื่อ A_{front} คือพื้นที่ของแผ่นโพลีคาร์บอเนต [m^2], $A_{product}$ คือพื้นที่ของติปลี่ที่ได้รับรังสีอาทิตย์ [m^2], C_{pp} คือความร้อนจำเพาะของอากาศภายในเครื่องอบแห้ง [$J/kg \cdot K$], C_{pl} คือความร้อนจำเพาะของของเหลวในติปลี่ [$J/kg \cdot K$], C_{pv} คือความจุความร้อนจำเพาะ

ของไอน้ำในดีปลี [J/kg-K], $D_{product}$ คือความหนาของดีปลี [m], $F_{product}$ คือสัดส่วนการรับพลังงานรังสีอาทิตย์ของดีปลี [decimal], $h_{c,product_air}$ คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างดีปลีกับอากาศอบแห้ง [W/m²-K], I_t คือความเข้มรังสีอาทิตย์ที่เวลาใดๆ [W/m²], $L_{product}$ คือความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำในดีปลี [J/kg], $M_{product}$ คือมวลของดีปลีที่ได้รับรังสีอาทิตย์ [kg], M_{front} คือมวลของผนังด้านหน้าของเครื่องอบแห้งที่ได้รับรังสีอาทิตย์ [kg], t คือเวลา [s], T_{air} คืออุณหภูมิอากาศภายในระบบอบแห้ง [K], T_{front} คืออุณหภูมิของโพลีคาร์บอเนตด้านหน้าเครื่องอบแห้ง [K], $T_{product}$ คืออุณหภูมิของดีปลีที่ได้รับรังสีอาทิตย์ [K], $\rho_{product}$ คือความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของดีปลี [kg/m²], τ_{front} คือสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแผ่นโพลีคาร์บอเนตด้านหน้าเครื่องอบแห้ง [decimal], $\alpha_{product}$ คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของผลิตภัณฑ์ [decimal], $h_{r,product_front}$ คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนจากดีปลีไปยังด้านหน้าของเครื่องอบแห้ง [W/m²-K]

7) สมการสมดุลพลังงานของพื้น

อัตราการถ่ายเทความร้อนของพื้นเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา มีค่าเท่ากับผลรวมของการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างอากาศกับพื้นแผ่นเหล็ก, การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนระหว่างพื้นแผ่นเหล็กกับอากาศภายในเครื่องอบแห้ง, การสูญเสียความร้อนโดยการพาความร้อนโดยลมจากพื้นแผ่นเหล็กไปยังอากาศแวดล้อม และการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของพื้นแผ่นเหล็ก เนื่องจากผู้วิจัยได้ใส่นวนกันความร้อนที่ผนังของพื้นจึงทำให้ไม่เกิดการถ่ายเทความร้อนที่พื้นกับอากาศแวดล้อมภายนอกเครื่องอบแห้ง เขียนสมการได้เป็น [8-13]

$$m_{floor} C_{p,floor} \frac{dT_{floor}}{dt} = (h_{c,floor_air} (T_{air} - T_{floor}) A_{floor} + h_{r,floor_air} (T_{air} - T_{floor}) A_{floor} + h_{wind,floor_air} (T_{air} - T_{floor}) A_{floor} + (1 - F_g) \alpha_{floor} I_t \tau_{front} A_{floor}) \quad (9)$$

เมื่อ m_{floor} มวลของพื้นแผ่นเหล็ก [kg], $C_{p,floor}$ คือค่าความจุความร้อนของพื้นแผ่นเหล็ก, [J/kg-°C], T_{floor} คืออุณหภูมิพื้นแผ่นเหล็ก [K], A_{floor} คือพื้นที่ของพื้นแผ่นเหล็ก [m²], $h_{c,floor_air}$ คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนจากพื้นแผ่นเหล็กไปยังอากาศภายในเครื่องอบแห้ง [W/m²-K], $h_{r,floor_air}$ คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนจากพื้นแผ่นเหล็กไปยังอากาศภายในเครื่องอบแห้ง [W/m²-K], $h_{wind,floor_air}$ คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยลมจากพื้นแผ่นเหล็กไปยังอากาศแวดล้อม [W/m²-K] และ α_{floor} คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีของพื้นแผ่นเหล็ก [decimal]

8) สมการสมดุลมวลของอากาศ

เมื่อความชื้นของดีปลีมีค่าลดลงทำให้ความชื้นของอากาศมีค่าเพิ่มมากขึ้นซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [8-13]

$$\rho_{air} V \frac{dH}{dt} = \rho_{air} H_{in} v_{in} A_{in} - \rho_{air} H_{out} v_{out} A_{out} + D_{product} \rho_{product} \frac{dM}{dt} A_{product} \quad (10)$$

เมื่อ A_{in} คือพื้นที่หน้าตัดของช่องอากาศขาเข้า [m²], $A_{product}$ คือพื้นที่หน้าตัดของดีปลีที่ได้รับรังสีอาทิตย์ [m²], A_{out} คือพื้นที่หน้าตัดของช่องอากาศขาออก [m²], $D_{product}$ คือความหนาของดีปลี [m], H คืออัตราส่วนความชื้น (moisture ratio) ของอากาศอบแห้ง [kg/kg], H_{in} คืออัตราส่วนความชื้น (moisture ratio) ของอากาศขาเข้า [kg/kg], H_{out} คืออัตราส่วนความชื้น (moisture ratio) ของอากาศขาออก [kg/kg], $M_{product}$ คือความชื้นของดีปลี [decimal], t คือเวลา [s], V คือปริมาตรของระบบ

อบแห้ง $[m^3]$, v_{in} คือความเร็วลมขาเข้า $[m/s]$, v_{out} คือความเร็วลมขาออก $[m/s]$, ρ_{air} คือความหนาแน่นของอากาศ $[kg/m^3]$ และ $\rho_{product}$ คือความหนาแน่นของติปลี $[kg/m^3]$

9) สมการอบแห้งชั้นบางของติปลี

ผู้วิจัยได้ทำการทดลองเพื่อหาสมการการอบแห้งชั้นบางของติปลี การทดลองหาสมการอบแห้งชั้นบางเป็นการทดลองอบแห้งติปลีที่วางเป็นชั้นเดียวในเครื่องอบแห้งจนกว่าความชื้นของติปลีจะไม่เปลี่ยนแปลง โดยตั้งค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้งภายในเครื่องอบแห้งไว้ที่ค่าหนึ่งๆ เพื่อหาอัตราการลดลงของความชื้นของติปลีที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์นั้นๆ สมการอบแห้งชั้นบางที่ได้นำไปใช้ในการทำนายความชื้นของติปลีในเครื่องอบแห้งที่เวลาใดๆ ภายใต้สภาวะแวดล้อมต่างๆ จากแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนของเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้น เพื่อให้ได้ผลการทำนายความชื้นของติปลีที่แม่นยำ ผู้วิจัยจึงเลือกที่จะทำการทดลองที่ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้งในช่วงเดียวกันกับผลการทดลองที่ได้จริง จากการทดสอบสมรรถนะของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งค่าอุณหภูมิที่ $40^{\circ}C$, $50^{\circ}C$ และ $60^{\circ}C$ และค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 10%, 20% และ 30% โดยเป่าอากาศร้อนไหลขนานกับแผ่นชั้นบางของติปลี (over-flow and under-flow drying) ที่อัตราเร็วเท่ากับอัตราเร็วอากาศสูงสุดในเครื่องอบแห้งคือประมาณ 1 m s^{-1}

จากผลการทดลองพบว่า แบบจำลองที่มีความสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองคือแบบจำลอง Modified Handerson and Pabis ซึ่งเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-pt) \quad (11)$$

เมื่อ M คือความชื้นของติปลีที่เวลาใดๆ [% , d.b.] M_0 คือความชื้นเริ่มต้นของติปลี [% , d.b.] M_e คือความชื้นสมดุลของติปลี [% , d.b.] , k , a , b , c , g และ p คือพารามิเตอร์ในการอบแห้งชั้นบางซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ตามสมการต่อไปนี้

$$k = 0.044537 + 0.003107T - 0.012874rh - 0.000719Trh + 0.000142T^2 + 0.001124rh^2 \quad (12)$$

$$a = 1.772997 - 0.062426T + 0.000872rh - 0.000887Trh + 0.000708T^2 + 0.000605rh^2 \quad (13)$$

$$b = -0.743219 + 0.044116T + 0.001201rh + 0.000260Trh - 0.000519T^2 - 0.000306rh^2 \quad (14)$$

$$c = 0.627224 + 0.628124T - 0.847092rh + 0.000611Trh - 0.000126T^2 - 0.000620rh^2 \quad (15)$$

$$g = 29.05792 - 1.91797T - 1.58619rh - 0.00706Trh + 0.02293T^2 - 0.03211rh^2 \quad (16)$$

$$p = -0.873137 + 0.041880T + 0.023505rh + 0.000245Trh - 0.000318T^2 - 0.001113rh^2 \quad (17)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิ $[^{\circ}C]$ และ rh คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ [%]

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน อันได้แก่สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีจากผลิตภัณฑ์ไปยังท้องฟ้า $h_{r,product_sky}$, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากแผ่นโพลีคาร์บอเนตด้านหน้าไปยังอากาศแวดล้อมเนื่องจากลม h_{wind} , สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างอากาศในห้องอบแห้งกับพื้น $h_{c,floor_air}$, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างอากาศในห้องอบแห้งกับแผ่นโพลีคาร์บอเนต $h_{c,front_air}$ และสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของแผ่นโพลีคาร์บอเนต U_{front} ตามรายละเอียดดังนี้

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

1) สัมประสิทธิ์การแผ่รังสี

สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีจากผลิตภัณฑ์ไปยังท้องฟ้า $h_{r,product_sky}$ หาได้จากสมการดังต่อไปนี้ [8-13]

$$h_{r,product_sky} = \varepsilon_{product} \sigma (T_{product}^2 + T_{front}^2) (T_{product} - T_{front}) \quad (18)$$

โดยที่อุณหภูมิห้องฟ้าสามารถหาได้จากสมการ

$$T_{sky} = 0.552T_{air}^{1.5} \quad (19)$$

2) สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากแผ่นโพลีคาร์บอเนตไปยังอากาศแวดล้อมเนื่องจากลม h_{wind} ใช้แบบจำลอง หาได้จากสมการ

$$h_{wind} = 2.8 + 3.0v_{wind} \quad (20)$$

เมื่อ v_{wind} คือความเร็วลม [m/s]

สำหรับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างอากาศในห้องอบกับพื้นและสำหรับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างอากาศในห้องอบกับแผ่นโพลีคาร์บอเนตด้านหน้า สัมประสิทธิ์ทั้งสองมีค่าเท่ากันหาได้จากสมการ

$$h_{c, floor_air} = h_{c, front_air} = \frac{N_u k}{D_h} \quad (21)$$

เมื่อ h_c คือค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน [W/m²-K], Nu คือค่า Nusselt number, k คือค่าสภาพการนำความร้อนของอากาศ [W/m-K], D_h คือค่า hydraulic diameter [m] ซึ่งหาได้จาก

$$D_h = \frac{4WD}{2(W + D)} \quad (22)$$

เมื่อ W คือความกว้างของห้องอบ [m], D คือระยะเฉลี่ยระหว่างพื้นกับแผ่นโพลีคาร์บอเนต [m]

โดย Nu จะหาได้จากสมการ

$$Nu = 0.0158Re^{0.8} \quad (23)$$

เมื่อ Re คือค่า Reynolds number ซึ่งหาได้จากสมการ

$$Re = \frac{D_h v \rho}{\mu} \quad (24)$$

เมื่อ v คืออัตราเร็วของอากาศภายในเครื่องอบแห้ง [m/s], ρ คือความหนาแน่นของอากาศ [kg/m³], μ คือ viscosity ของอากาศ [m²/s]

3) สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของแผ่นโพลีคาร์บอเนต

สำหรับสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของแผ่นโพลีคาร์บอเนตด้านหน้า U_{front} จะหาได้จากสมการ

$$U_{front} = \frac{k_{front}}{L_{front}} \quad (25)$$

เมื่อ k_{front} คือค่าสภาพการนำความร้อนของแผ่นโพลีคาร์บอเนตด้านหน้า [W/m-K], L_{front} คือความหนาของโพลีคาร์บอเนตด้านหน้า [m]

การหาผลเฉลยของแบบจำลองการถ่ายเทความร้อน

คำนวณอุณหภูมิของแผ่นโพลีคาร์บอเนตด้านหน้า T_{front} อากาศ T_{air} ผลิตภัณฑ์ $T_{product}$ และพื้น T_{floor} ที่เวลา $t + \Delta t$ คำนวณค่าอุณหภูมิของอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เวลา $t + \Delta t$ ซึ่งได้จากขั้นตอนแรกและนำมาทำการคำนวณ

พารามิเตอร์ของสมการอบแห้งชั้นบาง (k, a, b, c, g, p และ M_0) นำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวแทนค่าในสมการอบแห้งชั้นบาง เพื่อคำนวณหาความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่เวลา $t + \Delta t (M_{t+\Delta t})$ และใช้ค่าดังกล่าวไปคำนวณความชื้นของอากาศที่เวลา $t + \Delta t (H_{t+\Delta t})$ คำนวณอุณหภูมิของแผ่นโพลีคาร์บอเนต T_{front} อากาศ T_{air} ผลิตภัณฑ์ $T_{product}$ และพื้น T_{floor} ที่เวลา $t + \Delta 2t$ และดำเนินการซ้ำกระบวนการเดิมจนได้ความชื้นของผลิตภัณฑ์สุดท้ายตามต้องการ เนื่องจากการคำนวณต้องทำซ้ำกระบวนการเดิมทุกช่วงเวลา Δt ดังนั้นผู้วิจัยจึงเขียนโปรแกรมเป็นภาษา Fortran สมการของระบบเป็นระบบสมการอนุพันธ์ที่ไม่สามารถหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ (analytical solution) ได้ ดังนั้นในการหาผลเฉลยของระบบสมการดังกล่าวจำเป็นต้องใช้วิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) ในงานวิจัยนี้หาผลเฉลยของระบบสมการดังกล่าวโดยใช้วิธีผลต่างสลับเนื่อง (finite difference method) หลักการโดยทั่วไปคือวิธีผลต่างสลับเนื่องคือ แทนค่าตัวอนุพันธ์ด้วยผลต่างในช่วงเล็กๆ แล้วทำการคำนวณหาผลเฉลยที่ต้องการโดยผลที่ได้เป็นตัวเลข ระบบสมการขององค์ประกอบต่างๆ ดังกล่าวก็ใช้เทคนิคเดียวกัน [8-13]

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{front} \\ T_{product} \\ T_{air} \\ T_{floor} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} \quad (26)$$

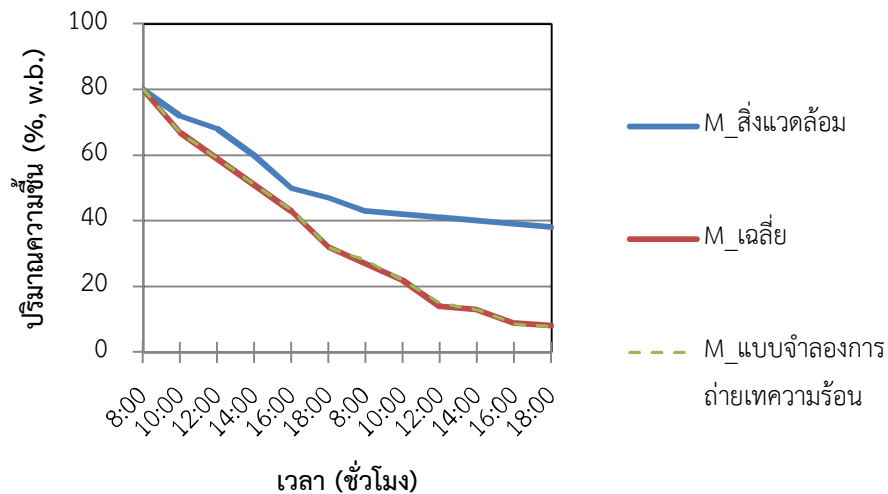
จากนั้นวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณของความชื้นที่ได้จากการทดลองกับข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกใช้สถิติ 2 ตัว คือ RMSE และ R^2 โดยมีสมการเป็นดังนี้

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{n}} \quad (27)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\text{Residual sum of squares}}{\text{Corrected total sum of squares}} \quad (28)$$

3. ผลและการอภิปรายผลการวิจัย

ในการทดสอบแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นนั้น ผู้วิจัยทำการจำลองแบบการทำงานของเครื่องอบแห้ง แล้วนำผลมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง สำหรับค่าตัวแปรต่างๆ ในแบบจำลอง กรณีตัวแปรทางเรขาคณิต เช่นขนาดขององค์ประกอบของส่วนอบแห้งใช้ขนาดที่เป็นจริงสำหรับสมบัติทางความร้อน เช่น สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่างๆ คำนวณตามสูตรที่กล่าวไปแล้ว โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ในสูตรจากเอกสารอ้างอิงต่างๆ [8-13] และข้อมูลความเข้มข้นสีอาทิตย์ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมใช้ค่าที่ได้จากการวัดจริงที่ทำการทดลอง โดยการ simulation ทุกๆ 10 นาทีเท่ากับช่วงเวลากการเก็บข้อมูล ผลการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้ง และผลการเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นของดีปัสแสดงไว้ในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ผลการคำนวณความชื้นของดีปัสที่อบแห้ง โดยอาศัยแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัด

ปริมาณความชื้นของดีปัสมีค่าประมาณ 80% [w.b.] เมื่อทำการอบแห้งจากเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก มีค่าประมาณ 8.0-9.0% [w.b.] ใช้เวลาในการอบแห้ง 2 วัน แต่ดีปัสที่ตากแดดตามธรรมชาติใช้เวลา 5 วันเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 38.0% [w.b.] จากผลการจำลองการอบแห้งแบบขั้นบันไดพบว่า แบบจำลองที่สามารถทำนายค่าความชื้นของดีปัสได้ดีที่สุดคือแบบจำลองของ Modified Handerson and Pabis มีความแตกต่างจากค่าที่ได้จากการวัดในรูปของ RMSE เท่ากับ 0.5377 และ R^2 เท่ากับ 0.9993 ผลการจำลองการถ่ายเทความร้อนของเครื่องอบแห้งพบว่า ค่าความแตกต่างของค่าความชื้นของดีปัสจากแบบจำลอง มีความแตกต่างจากค่าที่ได้จากการวัดในรูปของ RMSE เท่ากับ 0.417333 และ R^2 เท่ากับ 0.9605

4. สรุปผลการวิจัย

อัตราการลดลงของปริมาณความชื้นของดีปัสค่อยๆ ลดลง ใช้เวลาในการอบแห้ง 2 วัน ความชื้นสุดท้ายของความชื้นผลิตภัณฑ์ มีค่า 8.0-9.0% (w.b.) ใช้เวลาน้อยกว่าการตากแดดตามธรรมชาติ 3 วัน จากเส้นกราฟการลดลงของความชื้นของดีปัสที่ตำแหน่งต่างๆ ในช่วงสุดท้ายได้ค่าความชื้นเกือบเท่ากัน แสดงว่าอัตราการแห้งของความชื้นของดีปัสที่ตำแหน่งต่างๆ ก่อนข้างสม่ำเสมอ เมื่อเปรียบเทียบกับตากแดดธรรมชาติ ค่าความชื้นลดลงช้ากว่า ผลการจำลองการถ่ายเทความร้อนของเครื่องอบแห้งพบว่า ค่าความแตกต่างของค่าความชื้นของดีปัสแบบจำลองสามารถทำนายค่าความชื้นได้ดี แสดงว่าค่าปริมาณความชื้นที่ได้จากการวัดมีความสอดคล้องกับค่าที่ได้จากแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนที่สร้างขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องนี้ ผู้วิจัยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย จากมหาวิทยาลัยราชภัฏเลย ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้เป็นอย่างสูง ผู้วิจัยขอขอบคุณศาสตราจารย์ ดร.เสริม จันทน์ฉาย อาจารย์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ซึ่งให้คำปรึกษาและให้คำแนะนำในด้านวิชาการ ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.วีระศักดิ์ ซอมขุนทด ที่ให้คำแนะนำในการตีพิมพ์ผลงานวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณสาขาวิชาฟิสิกส์ และศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเลยที่สนับสนุนเครื่องมือในการวิจัย

6. References

- [1] Agricultural Statistics of Thailand, Ministry of Agriculture&Co-Operatives, Bangkok, Thailand. 2016.
- [2] Agricultural Statistics of Thailand, Ministry of Agriculture&Co-Operatives, Bangkok, Thailand. 2012.
- [3] Director of Loei Provincial Agricultural Extension of Office, Loei, Thailand, 2016.

- [4] S. Janjai, J. Laksanaboonsong, M. Nunes, A. Thongsathitya, Development of a method for generating operational solar radiation maps from satellite data for a tropical environmental, SOL ENERGY. 78 (2005) 739-751.
- [5] S. Janjai, B. K. Bala, Solar drying technology, Food Eng Rev. 4 (2012) 16-54.
- [6] A. Sharma, C. R. Chem, N. V. Lan, Solar-energy drying systems: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 13 (2009) 1185-1210.
- [7] M. V. Murthy, A review of new technologies, models and experimental investigation of solar dryer, Renewable Energy Reviews. 13 (2009) 835-844.
- [8] J.A. Duffie, W.A. Beckman, Solar Engineering of thermal Processes. John Wiley and sons, New York, 1991.
- [9] Kays, W.M. and Crawford, M.E. Convective heat and mass Transfer, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 1993.
- [10] S. Janjai, N. Lamlert, P. Intawee, B. Mahayothee, B.K. Bala, M. Nagle, J. Müller, Experimental and simulated performance of a PV-ventilated solar greenhouse dryer for drying of peeled longan and banana, SOL ENERGY. 83 (2009) 1550-1565.
- [11] S. Janjai, V. Khamvongsa, B.K. Bala, Development, Design, and Performance of a PV- Ventilated Greenhouse Dryer, IEJ. 8 (2007) 249-258.
- [12] S. Janjai, N. Lamlert, P. Intawee, B. Mahayothee, Y. Boonrod, M. Haewsungcharern, B.K. Bala, M. Nagle, J. Müller, Solar drying of peeled longan using a side loading type solar tunnel dryer: Experimental and simulated performance, Drying Technology. 27 (2009) 595–605.
- [13] S. Janjai, N. Lamlert, P. Intawee, B. Mahayothee, B.K. Bala, M. Nagle, J. Müller, Experimental and simulated performance of a PV-ventilated solar greenhouse dryer for drying of peeled longan and banana, SOL ENERGY. 83 (2009) 1550-1565.