http://journal.rmutp.ac.th/

ผลของการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อน ฮีตเตอร์ไฟฟ้าและปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าต่อคุณภาพของใบมะกรูดและความสิ้นเปลืองพลังงาน

ปุณยาพร แสนแปง[1] หยาดฝน ทนงการกิจ[1]* และ ปริญ คงกระพันธ์[2]

[1] คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

[2] วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

[1,2] 63 หมู่ 4 ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

รับบทความ 26 ตุลาคม 2564 แก้ไขบทความ 10 พฤษภาคม 2565 ตอบรับบทความ 28 มิถุนายน 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อน ระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้า และระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 45, 55 และ 65 องศาเซลเซียส ต่อสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของใบมะกรูดรวมทั้งค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง โดยผลการศึกษาพบว่า อัตราการอบแห้งใบมะกรูดมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาผลการอบแห้งของทั้งสามระบบที่อุณหภูมิเดียวกัน พบว่าการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้ามีอัตราการอบแห้งเฉลี่ยสูงที่สุดจึงส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งสั้นกว่าระบบปั๊มความร้อนและฮีตเตอร์ไฟฟ้า ส่วนผลการศึกษาค่าสีของใบมะกรูดหลังการอบแห้งพบว่า การใช้ระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าและระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 45 และ 55 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ใบมะกรูดอบแห้งมีค่าสีดีที่สุด นอกจากนี้ผลการศึกษาของปริมาณของสารและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระพบว่า ใบมะกรูดที่อบแห้งด้วยระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าและระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส มีปริมาณเบต้าแคโรทีน ปริมาณฟีนอลิกและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระมากที่สุด แต่อย่างไรก็ตามจากผลการศึกษาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะนั้นพบว่า การอบแห้งด้วยระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าใช้พลังงานมากที่สุด ดังนั้นหากพิจารณาจากผลการศึกษาโดยรวมทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 330 นาที ส่งผลให้ใบมะกรูดอบแห้งมีสมบัติทางเคมีและทางกายภาพดีที่สุดโดยที่ใช้พลังงานในการอบแห้งน้อยที่สุด

คำสำคัญ : ความสิ้นเปลืองพลังงาน; ปั๊มความร้อน; ผสมผสาน; สารต้านอนุมูลอิสระ; ฮีตเตอร์ไฟฟ้า

** ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +669 1698 9993, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: yardfon@mju.ac.th*

http://journal.rmutp.ac.th/

Effects of Drying with Heat Pump, Heater and Heat Pump in Combination with Heater on Quality of Kaffir Lime Leaves and Energy Consumption

Poonyaporn Sanpang[1], Yardfon Tanongkankit[1]* and Parin Khongkrapan[2]

[1] Faculty of Engineering and Agro-industry, Maejo University

[2] School of Renewable Energy, Maejo University

[1,2] 63 Moo 4, Nongharn, Sansai, Chiang Mai 50290

Received 26 October 2021; Revised 10 May 2022; Accepted 28 June 2022

Abstract

The objectives of this research were to study the effects of drying kaffir lime leaves using heat pump, heater and heat pump in combination with heater at temperatures of 45, 55 and 65℃ on physical and chemical properties of kaffir lime leaves and specific energy consumption. The results showed that the drying rate increased with an increase of drying temperature. When considering among three drying systems at the same drying temperature, it was also observed that an average drying rate of heat pump-heater drying exhibited the highest value resulting in shorter drying time than heat pump and heater system. For the result of color of kaffir lime leaves after drying, it was found that dried kaffir lime leaves with heater and heat pump in combination with heater system at 45 and 55℃ provided the best color value. Moreover, the results of the antioxidant content and activity showed that dried kaffir lime leaves with heater and heat pump in combination with heater system at 55℃ contained the highest content of beta-carotene and phenolic compounds and antioxidant activity. However, the result of energy usage revealed that heater had the highest specific energy consumption. Therefore, overall results indicated that drying with heat pump in combination with heater system at 55℃ for 330 min led to dried kaffir lime leaves with the best of physical and chemical properties and the lowest energy consumption.

Keywords : Antioxidants; Combination; Energy Consumption; Heater; Heat Pump

** Corresponding Author. Tel.: +669 1698 9993, E-mail Address: yardfon@mju.ac.th*

1. บทนำ

ใบมะกรูด (*Citrus hystrix* D.C.) เป็นพืชสมุนไพรที่ถูกนำไปใช้เป็นส่วนประกอบอย่างแพร่หลายในอาหารเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เนื่องจากมีกลิ่นหอมเฉพาะตัวและให้รสชาติที่โดดเด่นแก่อาหาร นอกจากนี้ยังมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญเช่น สารเบต้าแคโรทีนและสารประกอบฟีนอลิก ซึ่งมีฤทธิ์ในการป้องกันโรคต่างๆ เช่น โรคมะเร็ง โรคหัวใจ และโรคหลอดเลือด [1], [2] แต่อย่างไรก็ตามใบมะกรูดนั้นเป็นพืชที่เน่าเสียได้ง่าย เมื่อพิจารณาจากสีและสารสำคัญที่เปลี่ยนแปลงไปใบมะกรูดจะมีอายุการเก็บรักษาเพียง 3 วัน ที่อุณหภูมิห้องและ 18 วัน ที่อุณหภูมิ 8 องศาเซลเซียส [2], [3] ซึ่งอายุการเก็บรักษาที่สั้นนี้อาจเป็นข้อจำกัดหากจะนำใบมะกรูดมาใช้ประโยชน์ในระดับอุตสาหกรรมหรือเพื่อการส่งออก ดังนั้นจึงมีแนวคิดในการยืดอายุการเก็บรักษาใบมะกรูดโดยการอบแห้ง เนื่องจากมีงานวิจัยของ Pongsirikul [3] ที่รายงานว่า ใบมะกรูดแห้งที่เก็บไว้ในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์ที่อุณหภูมิห้อง มีอายุการเก็บรักษาประมาณ 133 วัน เมื่อพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของสีและสารสำคัญ

การอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นกระบวนการที่ใช้กันทั่วไปในการลดความชื้นของวัสดุลงจนถึงระดับที่สามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการเน่าเสียได้ [4] อากาศร้อนในเครื่องอบแห้งเกิดขึ้นได้จากแหล่งความร้อนหลายชนิด เช่น ฮีตเตอร์ไฟฟ้า เชื้อเพลิงชีวมวล และก๊าซ เป็นต้น โดยฮีตเตอร์ไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ทำความร้อนที่นิยมใช้กันมากที่สุด สามารถทำให้เกิดความร้อนโดยการให้ไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดตัวนำที่มีค่าความต้านทานสูงจนเกิดความร้อนขึ้น ซึ่งระบบนี้มีข้อดีคือ สามารถควบคุมอุณหภูมิได้สม่ำเสมอตามต้องการและมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ค่อนข้างเร็ว แต่อย่างไรก็ตามระบบนี้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สูง ดังนั้นจึงมีการนำระบบปั๊มความร้อนซึ่งใช้หลักการแลกเปลี่ยนความร้อนจากการเปลี่ยนสถานะของสารทำความเย็นในการทำให้อากาศร้อน [5] ซึ่งต่างจากฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนโดยตรง จึงทำให้ช่วยประหยัดพลังงานในการอบแห้ง [6] โดยมีงานวิจัยที่ผ่านมาของ Taseria et al. [7] ได้รายงานว่ากากองุ่นที่ทำให้แห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนใช้พลังงานในการอบแห้งลดลงประมาณร้อยละ 51 เมื่อเทียบกับระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตามระบบนี้มีข้อจำกัดคืออัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิลมร้อนจะช้ากว่าการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าจึงทำให้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งนานกว่า เมื่อพิจารณาจากข้อดีและข้อจำกัดของการให้ความร้อนทั้งสองระบบจะเห็นได้ว่า หากนำระบบให้ความร้อนทั้งสองแบบมาผสมผสานกันก็อาจจะช่วยทำให้อัตราการอบแห้งและการใช้พลังงานมีประสิทธิภาพมากขึ้น และจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมายังไม่มีรายงานเกี่ยวกับการใช้ระบบผสมผสานของปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการอบแห้งใบมะกรูด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาผลของการอบแห้งใบมะกรูดที่มีแหล่งความร้อนเป็นฮีตเตอร์ไฟฟ้า ปั๊มความร้อนและระบบผสมผสานของปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าต่ออัตราการอบแห้งเฉลี่ย สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของใบมะกรูดและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง

2. ระเบียบวิธีวิจัย

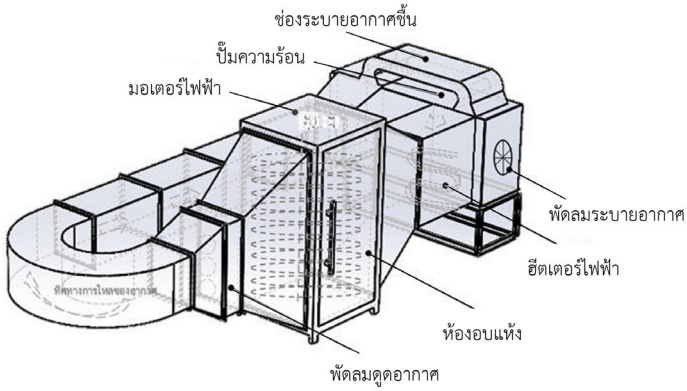
2.1 การเตรียมตัวอย่าง

นำใบมะกรูดสดที่มาจากแหล่งปลูกในอำเภอพร้าว จังหวัดเชียงใหม่ มาคัดคุณภาพโดยใบมะกรูดจะต้องไม่มีจุดสีดำหรือมีแมลงเจาะ มีขนาดความกว้าง 3-4 เซนติเมตร ความยาว 8-10 เซนติเมตร และความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 65.28±1.02 ฐานเปียก จากนั้นนำไปล้างน้ำให้สะอาดและผึ่งให้สะเด็ดน้ำ

2.2 เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการศึกษา

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงดังรูปที่ 1 สามารถควบคุมการทำงานของแหล่งความร้อนแต่ละชนิดอย่างอิสระ โดยในระหว่างการศึกษาการอบแห้ง

ด้วยระบบปั๊มความร้อนที่มีขนาด 10.5 กิโลวัตต์ ซึ่งใช้สารทำความเย็น R-134a คอมเพรสเซอร์ขนาด 4 กิโลวัตต์ อัตราการไหลของอากาศ 0.3 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และสัดส่วนของอากาศที่ไหลข้ามเครื่องระเหยร้อยละ 75 แหล่งความร้อนฮีตเตอร์ไฟฟ้าจะถูกปิดการทำงาน และเมื่อทำการอบแห้งด้วยระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าซึ่งมีขนาด 18 กิโลวัตต์ ระบบปั๊มความร้อนก็จะถูกปิดการทำงาน ในส่วนของการอบแห้งด้วยระบบผสมผสานในช่วงแรกของการอบแห้ง ระบบปั๊มความร้อนและฮีตเตอร์ไฟฟ้าจะถูกเปิดให้ทำงานพร้อมกันจนถึงอุณหภูมิที่กำหนดไว้ จากนั้นจะทำการปิดระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าเหลือเพียงแต่การทำงานของระบบปั๊มความร้อนสำหรับควบคุมอุณหภูมิที่กำหนดไว้ ในระว่างการอบแห้งความเร็วลมจะถูกควบคุมไว้ที่ 1.5 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลอง

2.3 การศึกษาการอบแห้ง

ในการศึกษาการอบแห้ง นำใบมะกรูดสดที่เตรียมไว้มาวางลงบนถาด ถาดละ 1 กิโลกรัม จำนวน 10 ถาด จากนั้นทำการอบแห้งด้วยระบบอบแห้งต่างๆ ที่อุณหภูมิ 45 55 และ 65 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิการอบแห้งที่ไม่ส่งผลการเปลี่ยนแปลงของกลิ่นใบมะกรูดอย่างมีนัยสำคัญ [8] ทำการสุ่มเก็บตัวอย่างใบมะกรูดสดจากตู้อบแห้งทุก 30 นาที เพื่อนำมาวัดความชื้นจนกระทั่งความชื้นของใบมะกรูดคงที่ แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปหาเวลาที่ใช้ในการอบแห้งโดยพิจารณาจากเวลาที่ใช้อบแห้งจนกระทั่งใบมะกรูดมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 12 ฐานเปียก ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนผักและผลไม้อบแห้ง (มผช.136/2558) หลังจากนั้นทำการอบแห้งใบมะกรูดตามเวลาอบแห้งที่ได้ในแต่ละอุณหภูมิ และเก็บตัวอย่างในถุงอะลูมิเนียมฟอยด์ปิดสนิท ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จนกระทั่งนำไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมี

2.4 ความชื้นและอัตราการอบแห้งเฉลี่ย

การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นทำตามวิธีของ AOAC [9] โดยนำตัวอย่างประมาณ 3 กรัม ใส่ลงในกระป๋องอะลูมิเนียมที่ผ่านการอบเพื่อไล่ความชื้นออกแล้วนำไปอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักหลังอบแห้ง และคำนวณตามสมการที่ (1)

$$M_{\text{wb.}} = \frac{(W\text{-}d)}{W} \times 100 \qquad (1)$$

โดยที่

$M_{\text{wb.}}$ คือ ความชื้นฐานเปียก (ร้อยละ)

W คือ มวลเปียกของวัสดุ (กรัม)

d คือ มวลแห้งของวัสดุ (กรัม)

การวิเคราะห์อัตราการอบแห้งเฉลี่ยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$DR_{\text{average}} = \frac{\left(M_{\text{i}} - M_0\right)}{t} \quad (2)$$

โดยที่

DR_{average} คือ อัตราการอบแห้งเฉลี่ย (กิโลกรัม$_{\text{น้ำที่ระเหย}}$ ต่อชั่วโมง)

M_0 คือ มวลของวัสดุที่เวลาการอบแห้ง (กิโลกรัม)

M_{i} คือ มวลของวัสดุที่เวลาเริ่มต้น (กิโลกรัม)

t คือ เวลาในการอบแห้ง (ชั่วโมง)

2.5 ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ (a_w)

นำใบมะกรูดอบแห้งในแต่ละสภาวะการทดลอง จำนวน 3 กรัม ใส่ในเครื่อง a_w meter (Aqua Lab รุ่น Series 3TE, สหรัฐอเมริกา) จากนั้นเครื่องจะแสดงผลบนหน้าจอพร้อมบันทึกค่า

2.6 ค่าสี

การวิเคราะห์สีของใบมะกรูดด้วยเครื่องวัดสี (Hunter Lab รุ่น Mini Scan XE Plus, สหรัฐอเมริกา) ด้วยระบบ CIE ซึ่งแสดงผลในเทอมของค่าความสว่าง (L^*) ค่าสีแดงและสีเขียว ($+a^*$, $-a^*$) และค่าสีเหลืองและสีน้ำเงิน ($+b^*$, $-b^*$) และค่าความแตกต่างสีโดยรวม (ΔE) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$\Delta E = \sqrt{\left(L^* - L_0^*\right)^2 + \left(a^* - a_0^*\right)^2 + \left(b^* - b_0^*\right)^2} \quad (3)$$

โดยที่

L^* a^* และ b^* คือ ค่าพารามิเตอร์สีของใบมะกรูดแห้ง

L_0^* a_0^* และ b_0^* คือ ค่าพารามิเตอร์สีของใบมะกรูดสด

2.7 ปริมาณเบต้าแคโรทีน

การวิเคราะห์ปริมาณเบต้าแคโรทีน ตามวิธีที่ดัดแปลงจากวิธีการของ Hornero-Mendez and Minguez-Mosquera [10] โดยนำตัวอย่างใบมะกรูดอบแห้งประมาณ 0.5 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมอะซิโตน 75 มิลลิลิตรลงไป คนผสมให้เข้ากัน จากนั้นทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำมากรองด้วยกระดาษกรอง Whatman No.1 จากนั้นนำส่วนใส่ที่กรองได้มาทำการปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยอะซิโตน นำสารละลายที่ได้มาวิเคราะห์ปริมาณเบต้าแคโรทีนโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ UV-vis ที่ความยาวคลื่น 453 นาโนเมตร คำนวณจากการเปรียบเทียบกราฟสารละลายมาตรฐานของเบต้าแคโรทีน และวิเคราะห์ผลเป็นมิลลิกรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่างแห้ง

2.8 การวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ

การวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระตามวิธีของ Kunvana et al. [11] โดยนำตัวอย่างใบมะกรูดอบแห้งที่บดเป็นผงแล้วมาชั่งน้ำหนัก 5 กรัม และใส่ลงในบีกเกอร์ จากนั้นนำเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 75 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร และคนผสมให้เข้ากัน ทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที นำสารสกัดที่ได้ไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำมากรองด้วยกระดาษกรอง Whatman No.1 เก็บตัวอย่างสกัดส่วนใสไว้ในขวดปิดสนิท ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส จนกว่าจะนำมาใช้วิเคราะห์

การวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกทำได้โดยนำสารสกัดใบมะกรูดที่เตรียมไว้ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ใส่หลอดทดลอง เติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยมวลต่อปริมาตร ปริมาตร 2 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลาย Folin-Ciocalteu Phenol Reagent ลงไป 0.1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันและทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ UV-vis ที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร คำนวณค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมทั้งหมดเทียบกับกราฟมาตรฐานกรดแกลลิค รายงานผลเป็นมิลลิกรัม$_{\text{GAE}}$ต่อกรัมตัวอย่างแห้ง

การวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระทำได้โดยชั่งสาร 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) 0.1972 กรัม จากนั้นปรับปริมาตรด้วยเมทานอลเป็น 100 มิลลิลิตร ปิเปตสารละลาย DPPH นี้มา 2 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยเมทานอล 100 มิลลิลิตร จะได้สารละลาย DPPH เข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์จากนั้นปิเปตสารสกัดตัวอย่างที่เตรียมไว้ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง เติมสารละลาย DPPH ปริมาตร 2.9 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันแล้วตั้งไว้ในที่มืดนาน 30 นาที พร้อมกับตัวอย่างควบคุม (Control) ซึ่งเป็นสารละลาย DPPH ที่ไม่มีตัวอย่างสารสกัด จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร และรายงานผลเป็นค่า ร้อยละ Inhibition ซึ่งคำนวณตามสมการที่ (4)

$$Inhibition = \frac{\left(A_{\text{control}} - A_{\text{sample}}\right)}{A_{\text{control}}} \times 100 \qquad (4)$$

โดยที่

$Inhibition$ คือ ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ (ร้อยละ)

A_{sample} คือ ค่าการดูดกลืนแสงของชุดทดสอบ

A_{control} คือ ค่าการดูดกลืนแสงของชุดควบคุม

2.9 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง

การวิเคราะห์ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะทำได้โดยการวัดพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งในแต่ละสภาวะการทดลองด้วยเครื่องวัดพลังงานยี่ห้อ Kepler Series Current Transformer 3 phase รุ่น KCT-60-400/5A จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณดังสมการที่ (5)

$$SEC = \frac{\left(P_{\text{e}} \times 3600\right)}{\left(W_{\text{i}} - W_{\text{f}}\right)} \qquad (5)$$

โดยที่

SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (เมกะจูล/กิโลกรัม$_{\text{น้ำที่ระเหย}}$)

P_{e} คือ ปริมาณพลังงานที่ใช้ (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)

W_{i} คือ มวลใบมะกรูดก่อนอบแห้ง (กิโลกรัม)

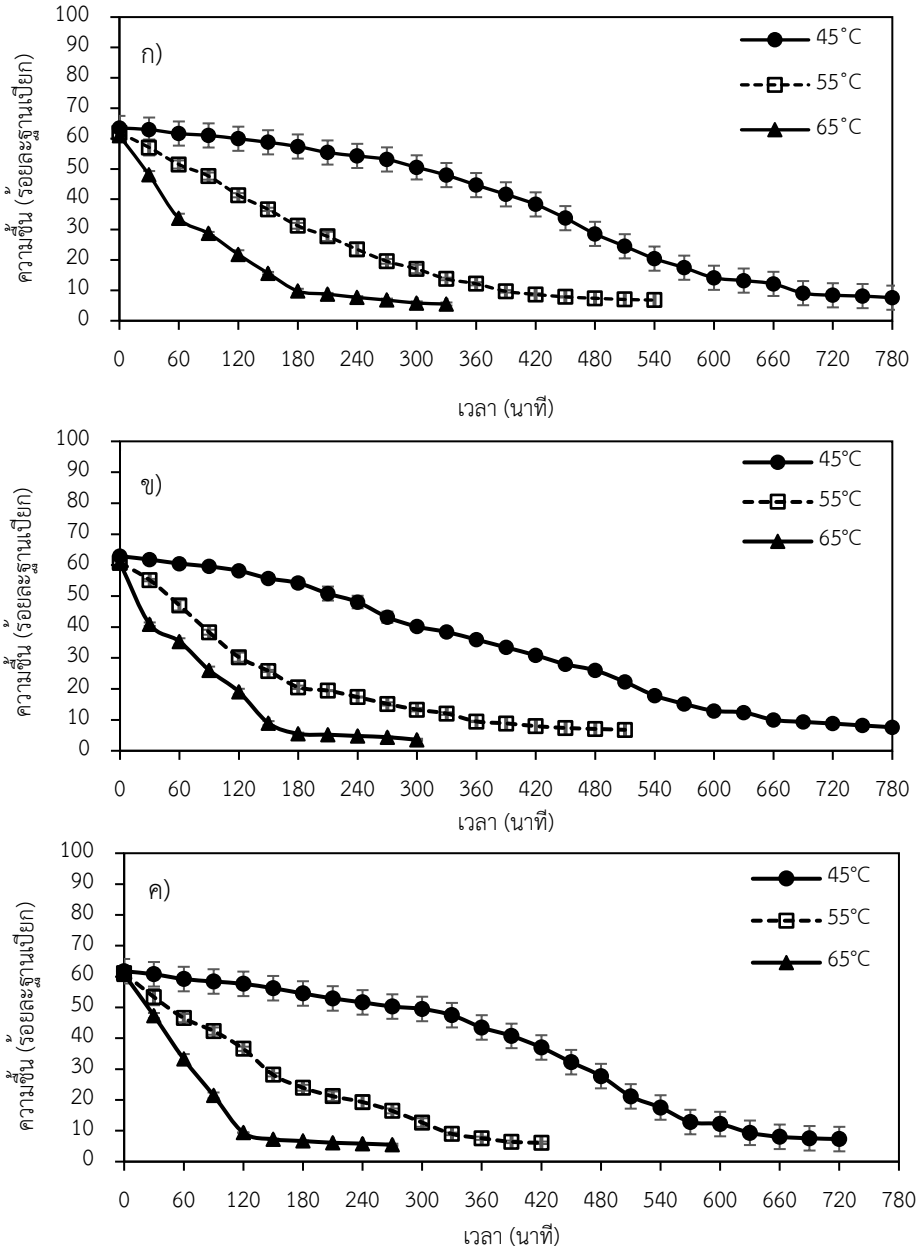
W_{f} คือ มวลใบมะกรูดหลังอบแห้ง (กิโลกรัม)

2.10 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลโดยวิธี ANOVA ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป SPSS เวอร์ชั่น 17.0 (SPSS Inc., สหรัฐอเมริกา) และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างชุดการทดลองโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ผลการทดลองแสดงในรูปค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

การเปลี่ยนแปลงความชื้นของใบมะกรูดที่อบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อน ฮีตเตอร์ไฟฟ้า และระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 45 55 และ 65 องศาเซลเซียสในรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่าความชื้นของใบมะกรูดในทุกสภาวะการทดลองลดลงเมื่อเวลาการอบแห้งนานขึ้น โดยอุณหภูมิการอบแห้งที่สูงขึ้นส่งผลให้อัตราการลดลงของความชื้นมากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราการลดลงความชื้นที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสจะช้ากว่าที่อุณหภูมิ 55 และ 65 องศาเซลเซียสอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นก็จะเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างลมร้อนและใบมะกรูดมากขึ้น จึงส่งผลให้มีความแตกต่างของความดันไอน้ำในเซลล์วัสดุก็สูงขึ้นตาม ทำให้เกิดการแพร่ของมวลไอน้ำออกจากวัสดุมาสู่ลมร้อนได้เร็วขึ้น [12] ดังนั้นในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสมีความแตกต่างของความดันไอระหว่างน้ำในวัสดุกับอากาศน้อยมากจึงทำให้เกิดการแพร่ของมวลไอน้ำออกจากวัสดุช้ากว่าที่อุณหภูมิ 55 และ 65 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2 ความชื้นของใบมะกรูดที่อบแห้งด้วยระบบ ก) ปั๊มความร้อน ข) ฮีตเตอร์ไฟฟ้า และ ค) ปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า

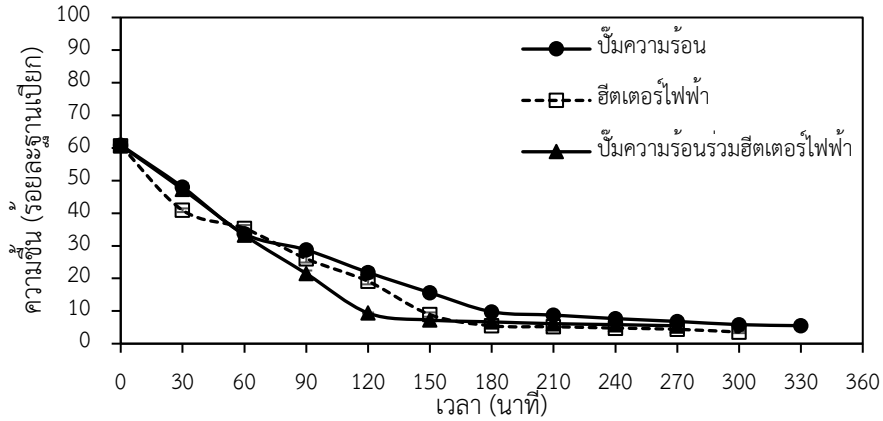
นอกจากนี้ หากพิจารณาผลการอบแห้งที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียสโดยใช้ระบบความร้อนแตกต่างกัน ซึ่งแสดงในรูปที่ 3 พบว่า อัตราการลดลงของความชื้นของใบมะกรูดที่อบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนต่ำกว่าระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าและระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า และสามารถพิจารณาได้จากค่าอัตราการอบแห้งเฉลี่ยซึ่งแสดงในตารางที่ 1 ของระบบปั๊มความร้อนมีค่าน้อยที่สุด ในขณะที่อัตราการอบแห้งเฉลี่ยของระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้ามีค่ามากที่สุดที่อุณหภูมิการอบแห้งเดียวกัน จึงส่งผลให้เวลา

ที่ใช้ในการอบแห้งซึ่งพิจารณาจากเวลาที่ความชื้นของใบมะกรูดมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 12 ฐานเปียก ด้วยระบบปั๊มความร้อนนานกว่าระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าและระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า ทั้งนี้มีสาเหตุเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิลมร้อนในระบบปั๊มความร้อนต้องอาศัยหลักการแลกเปลี่ยนความร้อนของสารทำความเย็นในการทำให้อากาศร้อน ในขณะที่ฮีตเตอร์ไฟฟ้าอาศัยหลักการสร้างความร้อนจากการเกิดความต้านทานไฟฟ้าจึงสามารถทำอุณหภูมิได้อย่างรวดเร็ว ส่วนระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าซึ่งมีการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าช่วยในการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศในช่วงแรกของการอบแห้ง ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศร้อนด้วยระบบปั๊มความร้อนที่ช้ากว่าจึงทำให้อัตราการอบแห้งเฉลี่ยใบมะกรูดมีค่าน้อยกว่าและเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจึงนานกว่าระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าและระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า นอกจากนี้ผลการศึกษาค่า a_w ของใบมะกรูดที่อบแห้งด้วยสภาวะต่างๆ นั้นพบว่าทุกตัวอย่างมีค่า a_w ต่ำกว่า 0.6 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนสำหรับอาหารแห้งที่ทำให้ยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้

ตารางที่ 1 เวลาอบแห้ง ความชื้นสุดท้าย และค่า a_w ของใบมะกรูดอบแห้งที่ผ่านการอบแห้งด้วยสภาวะการอบแห้งที่แตกต่างกัน

ระบบความร้อน	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการอบแห้งเฉลี่ย (กิโลกรัม$_{น้ำที่ระเหย}$ต่อชั่วโมง)	เวลาอบแห้ง (นาที)	ความชื้นสุดท้าย (ร้อยละฐานเปียก)	ค่า a_w
ปั๊มความร้อน	45	0.42±0.03^{g}	690	9.09±0.24^{a}	0.54±0.01^{a}
	55	0.77±0.03f	390	9.68±0.40^{a}	0.36±0.01^{c}
	65	1.67±0.09^{c}	180	9.78±0.75^{a}	0.30±0.02^{d}
ฮีตเตอร์ไฟฟ้า	45	0.45±0.02^{g}	660	9.98±0.24^{a}	0.53±0.02^{ab}
	55	0.83±0.03^{e}	360	9.48±0.21^{a}	0.37±0.01^{c}
	65	2.00±0.10^{b}	150	8.92±0.67^{a}	0.30±0.02^{d}
ปั๊มความร้อน	45	0.48±0.03^{g}	630	9.35±0.83^{a}	0.52±0.01^{b}
ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า	55	0.91±0.02^{d}	330	9.00±0.70^{a}	0.36±0.01^{c}
	65	2.50±0.13^{a}	120	9.40±0.15^{a}	0.28±0.01^{d}

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่ต่างกันในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)



รูปที่ 3 ความชื้นของใบมะกรูดที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียสด้วยระบบปั๊มความร้อน ฮีตเตอร์ไฟฟ้าและ ปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า

ผลการศึกษาค่าสีของใบมะกรูดแสดงในตารางที่ 2 พบว่า การอบแห้งใบมะกรูดในทุกระบบความร้อนที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ส่งผลให้มีค่าความสว่าง (L^*) และค่าความเป็นสีเหลือง ($+b^*$) มากที่สุด แต่มีค่าความเป็นสีเขียว ($-a^*$) น้อยที่สุด นั้นมีสาเหตุจากการที่เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้งจะทำให้คลอโรฟิลล์ซึ่งเป็นรงควัตถุสีเขียวสลายตัวไปรวมทั้งความร้อนที่สูงขึ้นสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลในระหว่างการอบแห้งจึงทำให้ใบมะกรูดมีสีเขียวลดลงค่าสีเหลืองและสีสว่างมากขึ้น [11] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Weemaes et al. [12] ที่รายงานว่าการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ในบล็อคเคอรี่จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 60 องศาเซลเซียส นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากค่าความแตกต่างของสี (ΔE) ของใบมะกรูดอบแห้งเมื่อเทียบกับใบมะกรูดสดแล้วพบว่า สีใบมะกรูดอบแห้งที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างจากใบมะกรูดสดมากที่สุด โดยที่ใบมะกรูดอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 และ 55 องศาเซลเซียส มีค่า ΔE ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลของระบบความร้อนต่อค่า ΔE นั้นจะเห็นได้ว่าการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนส่งผลใบมะกรูดให้มีค่า ΔE มากที่สุด เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนยาวนานกว่าระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าและระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า ดังนั้นจึงเกิดการสลายตัวของคลอโรฟิลล์และเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลได้มากกว่า สีของใบมะกรูดอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนจึงมีสีที่เปลี่ยนแปลงจากใบมะกรูดสดมากที่สุด ดังนั้นหากพิจารณาจากค่าสีของตัวอย่างทั้งหมด จะเห็นได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งใบมะกรูด คือการใช้ระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าหรือระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 45 หรือ 55 องศาเซลเซียส เนื่องจากสีของใบมะกรูดอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกับใบสดมากกว่าการอบแห้งด้วยระบบฮีตปั๊มหรือการอบแห้งที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 2 ค่าสีของใบมะกรูดสดและที่ผ่านการอบแห้งด้วยสภาวะการอบแห้งที่แตกต่างกัน

ระบบความร้อน	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าสี			
		L^*	a^*	b^*	ΔE
-	สด	39.36±0.98^{d}	-9.53±0.20^{e}	15.39±0.26^{d}	-
ปั๊มความร้อน	45	44.67±0.41^{a}	-6.98±0.14^{b}	29.68±0.85^{bc}	15.46±0.91^{c}
	55	42.08±0.74^{c}	-8.27±0.17^{d}	30.20±0.07^{b}	15.12±0.14^{c}
	65	43.80±1.05^{ab}	-6.42±0.18^{a}	34.51±0.47^{a}	19.90±0.40^{a}
ฮีตเตอร์ไฟฟ้า	45	43.33±0.03^{b}	-7.76±0.07^{c}	28.59±0.86^{c}	13.90±0.82^{d}
	55	41.63±0.10^{c}	-6.80±0.09^{b}	28.84±0.63^{c}	13.91±0.62^{d}
	65	44.12±0.05^{ab}	-6.49±0.09^{a}	34.31±0.18^{a}	19.74±0.17^{a}
ปั๊มความร้อน ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า	45	41.32±0.25^{c}	-6.41±0.29^{a}	28.68±0.39^{c}	13.80±0.34^{d}
	55	41.46±0.35^{c}	-7.53±0.15^{c}	27.98±0.45^{c}	12.92±0.48^{d}
	65	43.34±0.31^{b}	-6.20±0.13^{a}	33.33±0.72^{a}	18.68±0.71^{b}

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่ต่างกันในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ในตารางที่ 3 แสดงผลการศึกษาของปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระซึ่งได้แก่ เบต้าแคโรทีนและสารประกอบฟีนอลิกรวมและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระในใบมะกรูดสดและใบมะกรูดที่ผ่านการอบแห้งด้วยสภาวะการอบแห้งที่แตกต่างกัน ซึ่งพบว่า ปริมาณสารเบต้าแคโรทีน สารประกอบฟีนอลิกรวมและฤทธิ์การ

ต้านอนุมูลอิสระในใบมะกรูดอบแห้งมีค่าน้อยกว่าใบสดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ของทุกระบบความร้อนส่งผลให้ค่าปริมาณเบต้าแคโรทีน ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระมากกว่าอุณหภูมิ 45 และ 65 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องจากการสลายตัวของสารต้านอนุมูลอิสระเกิดได้จากความร้อน โดยสารเบต้าแคโรทีนและฟีนอลิกจะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 80 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ [13,14] และการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน [4] ดังนั้นในระหว่างการอบแห้งการลดลงของสารต้านอนุมูลอิสระจึงเกิดจากผลร่วมของทั้งอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง เมื่อพิจารณาการอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ถึงแม้ว่าจะเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 55 องศาเซลเซียส แต่ใช้เวลาการอบแห้งนานกว่า การลดลงของสารต้านอนุมูลอิสระจึงเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันได้มากกว่า ในขณะที่การอบแห้งที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส นั้นแม้ว่าจะใช้เวลาการอบแห้งสั้นกว่าที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส แต่การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจึงเป็นการทำลายสารต้านอนุมูลอิสระได้มากกกว่า โดยผลศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wanyo et al. [15] ที่รายงานว่า การอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงมีค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อพิจารณาผลของระบบความร้อนต่อปริมาณและฤทธิ์ของสารต้านอนุมูลอิสระจะเห็นได้ว่า ปริมาณเบต้าแคโรทีน ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระในใบมะกรูดที่อบแห้งด้วยระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าและระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้ามีค่ามากว่าระบบปั๊มความร้อน ดังนั้นหากพิจารณาปริมาณและฤทธิ์ของสารต้านอนุมูลอิสระ สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งคือการใช้ระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าหรือระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3 ปริมาณเบต้าแคโรทีน ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ

ระบบความร้อน	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เบต้าแคโรทีน (มิลลิกรัมต่อน้ำหนักแห้ง)	สารประกอบฟีนอลิกรวม (มิลลิกรัม$_{GAE}$ ต่อน้ำหนักแห้ง)	ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ (ร้อยละ)
	สด	2.93±0.02^{a}	43.03±1.01^{a}	62.23±0.49^{a}
ปั๊มความร้อน	45	1.70±0.06^{e}	9.90±0.19^{g}	52.13±0.73^{de}
	55	1.83±0.01^{de}	14.52±0.33^{cd}	54.69±1.70^{bcd}
	65	1.80±0.03^{de}	14.02±0.88^{d}	51.98±1.79^{de}
ฮีตเตอร์ไฟฟ้า	45	1.91±0.01^{cd}	12.47±0.34^{e}	52.37±0.71^{de}
	55	2.08±0.09^{bc}	15.53±0.10^{bc}	56.67±0.25^{b}
	65	1.80±0.24^{de}	14.39±0.27^{d}	53.24±1.30^{cde}
ปั๊มความร้อน	45	1.83±0.01^{de}	11.06±1.52^{f}	51.29±3.26^{e}
ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า	55	2.13±0.11^{b}	15.63±0.13^{b}	55.56±0.74^{bc}
	65	1.93±0.02^{cd}	14.32±0.07^{d}	52.66±0.68^{de}

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่ต่างกันในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ผลของการใช้พลังงานในการอบแห้งใบมะกรูดที่สภาวะต่างๆ แสดงในตารางที่ 4 โดยผลการศึกษาพบว่าการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนมีค่าพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะที่น้อยที่สุดและระบบฮีตเตอร์มีค่า

พลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะมากที่สุด โดยมีสาเหตุดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้นว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิลมร้อนในระบบปั๊มความร้อนอาศัยหลักการแลกเปลี่ยนความร้อนของสารทำความเย็นในการทำให้อากาศร้อนจึงมีการใช้พลังงานเฉพาะในส่วนของพัดลมและระบบควบคุม แต่ฮีตเตอร์ไฟฟ้าต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในการสร้างความร้อนด้วย จึงมีการค่าการใช้พลังงานสิ้นเปลืองสูง ในขณะที่ระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าจะมีการใช้พลังงานทั้งสองระบบพร้อมกันเพื่อทำให้อุณหภูมิถึงอุณหภูมิที่กำหนดจากนั้นจะเหลือเพียงระบบปั๊มความร้อนที่ทำงาน ดังนั้นจะมีการใช้พลังงานสูงในช่วงแรก ค่าพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะจึงน้อยกว่าระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าแต่มากกว่าระบบปั๊มความร้อน นอกจากนี้ยังพบว่าการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ค่าพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะที่ใช้การอบแห้งนั้นมีค่าลดลง แต่กลับมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออบแห้งด้วยระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้า ในขณะที่ค่าพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะในการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส มีค่าน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 และ 65 องศาเซลเซียส มีสาเหตุจากเวลาที่ใช้ในการอบแห้งลดลงเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้น ดังนั้นพลังงานที่ใช้ในระบบปั๊มความร้อนซึ่งส่วนใหญ่เป็นพัดลมและระบบควบคุมจึงลดลงเมื่อเวลาอบแห้งสั้นลง แต่อย่างไรก็ตามค่าการใช้พลังงานสิ้นเปลืองกลับมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออบแห้งด้วยระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้า ทั้งนี้เนื่องจากในการเพิ่มอุณหภูมิด้วยฮีตเตอร์ต้องเพิ่มความต้านทานของไฟฟ้าจึงทำให้ใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบที่สูงขึ้น ในขณะที่ค่าพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะในการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส มีค่าน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 และ 65 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส นั้น ความร้อนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มากจากระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้า ค่าพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะจึงสูงกว่า 45 และ 55 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4 พลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง

ระบบความร้อน	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)	พลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะ (เมกะจูล/กิโลกรัม$_{น้ำที่ระเหย}$)
ปั๊มความร้อน	45	12.4±0.6^{e}	8.93±0.42^{e}
	55	11.7±0.4^{e}	8.42±0.64^{e}
	65	10.5±0.5^{f}	7.56±0.36^{f}
ฮีตเตอร์ไฟฟ้า	45	16.2±0.6^{c}	11.66±0.38^{c}
	55	17.4±0.4^{b}	12.53±0.47^{b}
	65	19.3±0.4^{a}	13.90±0.40^{a}
ปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า	45	15.1±0.6^{c}	10.87±0.39^{c}
	55	13.8±0.5^{d}	9.94±0.41^{d}
	65	18.7±0.7^{a}	13.46±0.34^{a}

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่ต่างกันในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

4. สรุป

ผลการศึกษาการใช้ระบบปั๊มความร้อน ระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าและระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 45 55 และ 65 องศาเซลเซียสในการอบแห้งใบมะกรูดพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้นและการใช้ระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าส่งผลให้มีอัตราการอบแห้งเฉลี่ยมากที่สุด เวลาในการอบแห้งจึงสั้นที่สุด นอกจากนี้การอบแห้งด้วยระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าและระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส นั้นส่งผลให้ค่าสี ปริมาณเบต้าแคโรทีนและสารประกอบฟีนอลิกรวมและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระมีค่าดีที่สุด ส่วนผลของค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะนั้นพบว่า การอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุดแต่ระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้ามีค่ามากที่สุด ดังนั้นหากพิจารณาผลการศึกษาโดยรวมทั้งทางด้านสมบัติทางกายภาพและเคมีของใบมะกรูดอบแห้งรวมทั้งความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจะเห็นได้ว่า การอบแห้งใบมะกรูดด้วยระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ 55 องศาเซลเซียสเป็นสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ทำการวิจัยขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) ที่ให้สนับสนุนทุนวิจัยบัณฑิตศึกษาด้านการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร ประจำปีงบประมาณ 2563

6. เอกสารอ้างอิง

[1] K. Venkatachalam, “Changes in phytochemicals and antioxidant properties of kaffir lime leaves under chilling storage,” *Khon Kaen Agriculture Journal*, vol. 47, pp. 531-536, Feb. 2019.

[2] S. M. Tasirin, I. Puspasari, A. W. Lun, P. V. Chai, W. T. Lee, “Drying of kaffir lime leaves in a fluidized bed dryer with inert particles: Kinetics and quality determination,” *Industrial Crops Products*, vol. 61, pp. 193–201, Nov. 2014.

[3] I. Pongsirikul, “Shelf life of dried kaffir lime leaves using solar dryer, hot air tray dryer and vacuum microwave dryer,” M.S. thesis, Dept. Postharvest. Technol., Chiang Mai Univ., Chiang Mai, Thailand, 2010.

[4] C. Phungamgnoen, P. Detchewa, Y. Tanongkankit and J. Moongngram, “Physicochemical properties of dried guizhou as affected by pretreatments, drying techniques and storage period,” *Journal of Sustainability Science and Management*, vol. 16, no. 5, pp. 1-21, Jul. 2021.

[5] P. Chunkaew, “Development and evaluation of mini heat pump dryer for slice banana,” *RMUTP Research Journal,* vol. 15, no. 1, pp. 179-192, Jan. 2021.

[6] C. Tnckal and I. Doymaz, “Performance analysis and mathematical modelling of banana slices in a heat pump drying system,” *Renewable Energy*, vol. 150, pp. 918-923, May 2020.

[7] L. Taseria, M. Aktasb, S. Sevikc, M. Gülcüa, G. U. Seçkina and B. Aktekelid, “Determination of drying kinetics and quality parameters of grape pomace dried with a heat pump dryer,” *Food Chemistry*, vol. 260, pp. 152–159, Sep. 2018.

[8] W. Jirapakkul, P. Tinchan and S. Chaiseri, “Effect of drying temperature on key odourants in kaffir lime (Citrus hystrix D.C., Rutaceae) leaves,” *International Journal of Food Science and Technology*, vol. 48, no. 1, pp. 143-149, Sep. 2012.

[9] AOAC. *Official Method of Analysis of AOAC International*, 17th ed. Washington DC: The Association of Official Analytical Chemists, 2000.

[10] D. Hornero-Mendez and M. I. Minguez-Mosquera, “Rapid spectrophotometric determination of red and yellow isochromic carotenoid fractions in paprika and red pepper oleoresins,” *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 49, no. 8, pp. 3584-3588, Aug. 2001.

[11] S. Kunvana, Y. Tanongkankit and P. Khongkrapan, “Development of production

process of dried mulberry leaf for infusion using a combined infrared and hot air drying," *Journal of Science and Technology YRU*, vol. 6, no. 2, pp. 162-170, Jul. 2021.

[12] C. Weemaes, V. Ooms, Indrawati, L. Ludikhuyze, I. Van den Broeck, A. Van Loey and M. Hendrickx, "Pressure-temperature degradation of green color in broccoli juice," *Journal of Food Science*, vol. 64, no.3, pp. 504-508, Jul. 2006**.**

[13] S. Jirasatid, P. Chaikham, and M. Nopharatana, "Thermal degradation kinetics of total carotenoids and antioxidant activity in banana-pumpkin puree using Arrhenius, Eyring-Polanyi and Ball models," *International Food Research Journal*, vol. 25, pp. 1912-1919, Oct. 2018.

[14] J. Larrauri, P. Ruperez and F. Saura-Calizto, "Effect of drying temperature on the stability of polyphenols and antioxidant activity of red grape pomace peel," *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 45, pp. 1390-1393, Apr. 1997.

[15] P. Wanyo, K. Huaisan and T. Chamsai, "Phenolic compounds and antioxidant properties of Thai rice paddy herb as affected by different drying temperature," *International Journal of Agricultural Technology*, vol. 14, no. 3, pp. 423-440, May 2018.