



การอบแห้งมะม่วงสุกด้วยเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์แบบพีวีไฮบริดจ์

Ripe mango drying using solar-PV hybrid dryer

อดิศักดิ์ นาถกรณกุล¹ นริส ประทีนทอง¹ กฤษณ์ อภิญญาวิศิษฐ์^{2*} และ สุวิทย์ แผงกันยา²

¹คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

²คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

Adisak Nathakaranakule¹ Naris Pratinthong¹ Krit Apinyawisit^{2*} and Suwit Pangkanya²

¹School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thung Khru, Bangkok, 10140 Thailand

²Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bang Sue, Bangkok, 10800 Thailand

*Corresponding Author, Email: krit.a@rmutp.ac.th

Received: 13 March 2020 | Revised: 27 May 2020 | Accepted: 11 June 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์แบบพีวีไฮบริดจ์สำหรับวิสาหกิจขนาดย่อมที่ใช้หลักการอนุรักษ์พลังงานด้วยการนำอากาศร้อนที่ออกจากเครื่องอบแห้งนำกลับมาใช้ใหม่สำหรับอบแห้งชิ้นมะม่วงน้ำดอกไม้สุกที่ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 439.9-442.7% ฐานแห้ง และเปรียบเทียบเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์แบบพีวีไฮบริดจ์กับเครื่องอบแห้งแบบกล่องที่ใช้กันทั่วไป โดยอบแห้งจนได้ความชื้นสุดท้ายของมะม่วงประมาณ 14% ฐานแห้ง จากการทดลองพบว่า การนำอากาศร้อนที่ออกจากห้องอบแห้งกลับมาใช้ใหม่ 80% ตั้งแต่เริ่มต้นของการอบแห้งจะทำให้การอบแห้งช้าลง การปล่อยอากาศร้อนที่ออกจากห้องอบแห้งออกไปโดยไม่นำกลับมาใช้ใหม่ในวันแรกของการอบแห้งและนำกลับมาใช้ใหม่ในการอบแห้งวันถัดไปจะทำให้การอบแห้งเร็วขึ้น การอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สุกด้วยเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์แบบพีวีไฮบริดจ์สามารถอบแห้งได้เร็วกว่าเครื่องอบแห้งแบบกล่อง 19 ชั่วโมง มะม่วงน้ำดอกไม้สุกที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์แบบพีวีไฮบริดจ์จะมีการเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวมน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับมะม่วงน้ำดอกไม้สุกก่อนการอบแห้ง และมีค่าความแข็งและค่าการยืดหดต่ำกว่ามะม่วงน้ำดอกไม้สุกที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบกล่อง มะม่วงน้ำดอกไม้สุกที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งทั้งสองแบบมีค่าวอเตอร์แอคทิวิตีต่ำกว่า 0.6 ซึ่งปลอดภัยต่อการเก็บรักษา

ABSTRACT

This research proposed pv-hybrid solar dryer for small community enterprise that includes the principle of energy conservation using hot air recycle. The dryer was used to dry slices of mangos varieties "Nam Dok Mai" with initial moisture contents of 439.9-442.7% dry basis (d.b.). The proposed dryer was compared with traditional solar dryer. The final moisture content of both varieties of mango's slides was set at 14 %d.b. The experimental results showed that recycling 80% hot air from the beginning of drying process delayed drying time, while recycling 80% hot air after the first day of drying shortened drying time. The pv-hybrid solar dryer dried "Nam Dok Mai" mango's slides faster than the traditional dryer approximately 19 hours. The total color change (compared with fresh mango),

hardness and adhesiveness of the mango dried by the pv-hybrid solar dryer were less than those dried by the traditional dryer. The water activity of dried mangoes from both dryers was less than 0.6 and safe for storage.

คำสำคัญ: อบแห้งแสงอาทิตย์ พีวีไฮบริดจ์ มะม่วงสุก

Keywords: Solar drying, PV hybrid, Ripe mango

บทนำ

การอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรด้วยแสงอาทิตย์ในครัวเรือนหรือในวิสาหกิจขนาดย่อมมักใช้วิธีตากบนลานตากหรือตะแกรง ซึ่งเป็นวิธีอบแห้งแบบเปิดเป็นที่นิยมใช้กันทั่วไปเนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย และประหยัด อย่างไรก็ตามวิธีการอบแห้งแบบนี้ไม่สามารถควบคุมความร้อนที่ให้กับผลิตภัณฑ์ได้ ซึ่งส่งผลให้ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของผลิตภัณฑ์ รวมไปถึงอัตราการไหลของอากาศผ่านผลิตภัณฑ์ที่กำลังอบแห้งได้ ทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าต่ำและต้องใช้เวลาการอบแห้งนาน นอกจากนี้วิธีการอบแห้งแบบนี้ยังไม่ถูกหลักอนามัยเนื่องจากผลิตภัณฑ์มีการปนเปื้อนของเชื้อโรคที่มาจากแมลง สัตว์ ฝุ่นละออง รวมทั้งฝน ทำให้ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ได้มีคุณภาพลดลง (Midilli, 2001) ไม่สามารถแข่งขันได้ในตลาด

การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สามารถนำมาแก้ปัญหานี้ได้เนื่องจากเป็นวิธีที่ประหยัดปลอดภัยมีประสิทธิภาพ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยทั่วไปเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในครัวเรือนหรือวิสาหกิจขนาดย่อมจะเป็นเครื่องอบแห้งที่ผลิตภัณฑ์ในเครื่องอบแห้งได้รับแสงแดดโดยตรง (direct solar dryer) เครื่องอบแห้งแบบนี้มีลักษณะเป็นกล่องหุ้มฉนวนด้านบนปิดด้วยกระจกหรือแผ่นพลาสติก และมีช่องให้อากาศไหลเข้าและออกจากเครื่องอบแห้ง (Ghazanfari et al., 2003; Seveda and Jhajharia, 2012) อากาศในเครื่องอบแห้งจะถูกทำให้ร้อนเมื่อได้รับพลังงานจากรังสีอาทิตย์แล้วไหลผ่านผลิตภัณฑ์ที่จะอบแห้งแบบธรรมชาติเกิดการถ่ายเทความร้อนทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์สูงขึ้น ส่งผลให้น้ำระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ไปรวมกับอากาศร้อนที่ไหลผ่านก่อนไหลออกจากเครื่องอบแห้ง (Sharma et al., 2009) ข้อดีของเครื่องอบแห้งแบบนี้คือราคาถูก สามารถป้องกันฝน ฝุ่นละออง แมลงต่างๆ ได้ อบแห้งได้เร็วกว่าการตาก (Sreekumar et al., 2008; Kamble et al., 2011; Seveda and Jhajharia, 2012) แต่มีข้อเสียคืออบแห้งผลิตภัณฑ์ได้น้อย ผลิตภัณฑ์อาจเสียหาย

จากการที่ได้รับความร้อนมากเกินไป (Hii et al., 2012) หรืออบแห้งได้ช้าในกรณีที่มีแสงแดดไม่เพียงพอ

การแก้ปัญหาของเครื่องอบแห้งแบบ direct solar dryer สามารถทำได้โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบผสมผสานเพื่อให้สามารถอบแห้งได้อย่างต่อเนื่อง เครื่องอบแห้งแบบนี้จะใช้ความร้อนจากแหล่งอื่นช่วยในการอบแห้งได้อย่างต่อเนื่อง หรือช่วยเปลี่ยนการถ่ายเทความร้อนภายในเครื่องอบแห้งจากแบบธรรมชาติเป็นแบบบังคับ หรืออาจผสม (mixed mode) ระหว่าง direct solar dryer กับ flat plate solar collector (Simate, 2003; Bolaji and Olalusi, 2008; Basunia and Abe, 2001) จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าความร้อนเสริมเพื่อช่วยในการอบแห้งอาจได้มาจาก LPG (Soponronnarit et al., 1997; Lopez-Vidaria et al., 2013) ชีวมวล (Sonthikun et al., 2016; Yassen and Al-Kayiem, 2016) เครื่องอบแห้งแบบผสมผสานนี้มีประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งดีกว่าแบบ direct solar dryer โดยมีความอยู่ในช่วง 13-70% ขึ้นกับชนิดของผลิตภัณฑ์ สถานที่สภาวะแวดล้อม และวิธีการผสมผสาน ในการเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งโดยการเปลี่ยนการถ่ายเทความร้อนจากแบบธรรมชาติเป็นแบบบังคับ Elkhadraoui et al. (2015) พบว่าสามารถลดเวลาในการอบแห้งพริกไทยและองุ่นได้ถึง 7 และ 17 ชั่วโมงตามลำดับ Juraev and Akhatov (2009) ได้ใช้แผงโซลาร์เซลล์ในการผลิตไฟฟ้าเพื่อป้อนให้กับพัดลมที่ติดตั้งในระบบแต่พบว่าต้นทุนของการอบแห้งสูงเนื่องจากแผงโซลาร์เซลล์มีราคาแพง Mumba (1995) ใช้แผงโซลาร์เซลล์ในการผลิตไฟฟ้าเพื่อป้อนให้พัดลมที่ติดตั้งในเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์สำหรับอบแห้งข้าวโพดโดยไม่ใช้แบตเตอรี่ในการกักเก็บพลังงาน จากการวิจัยพบว่าข้าวโพดที่อบแห้งด้วยวิธีนี้สามารถลดเวลาการอบแห้งลงได้ถึง 70% เมื่อเทียบกับการตาก แต่ยังมีปัญหาเกี่ยวกับต้นทุนของโซลาร์เซลล์เช่นกัน Janjai et al. (2009) ใช้โซลาร์เซลล์ช่วยในการไหลเวียนอากาศในโรงเรือนอบแห้ง พบว่าสามารถลดเวลาการอบแห้งลำไยได้ 40-50% และลดเวลาการอบแห้งกล้วยได้

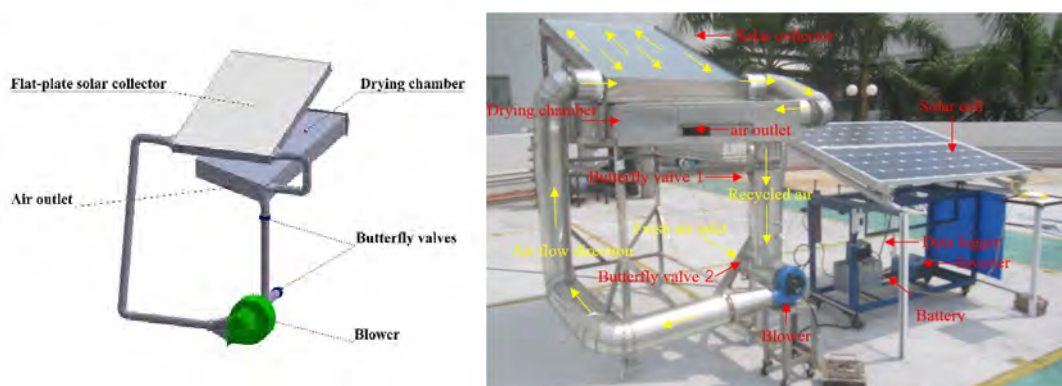
20-30% เมื่อเทียบกับวิธีการไหลเวียนอากาศแบบธรรมชาติในโรงเรือน

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเครื่องอบแห้งแบบ direct solar dryer ที่ใช้ในครัวเรือนหรือวิสาหกิจขนาดย่อมส่วนใหญ่จะไม่นำอากาศที่ผ่านเครื่องอบแห้งกลับมาใช้งานใหม่ และการถ่ายเทความร้อนในเครื่องอบแห้งเป็นแบบธรรมชาติ การเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งแบบนี้ให้สูงขึ้นกว่าเดิมโดยเปลี่ยนวิธีการถ่ายเทความร้อนมาเป็นแบบบังคับโดยผสมผสานกับการนำพลังงานจากแผงโซลาร์เซลล์มาใช้งานซึ่งปัจจุบันมีราคาถูกลงมาก และร่วมกับเทคนิคการอนุรักษ์พลังงานจากการนำอากาศหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่จะมีความเป็นไปได้เป็นอย่างมากที่จะผลิตเครื่องอบแห้งแบบไฮบริดประสิทธิภาพสูง และจะเป็นประโยชน์กับวิสาหกิจขนาดย่อมในการเพิ่มผลผลิตของผลิตภัณฑ์อบแห้ง

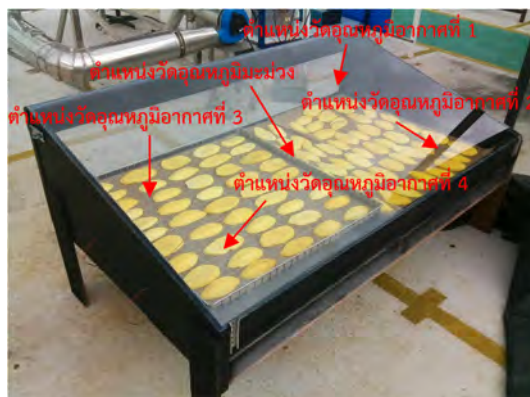
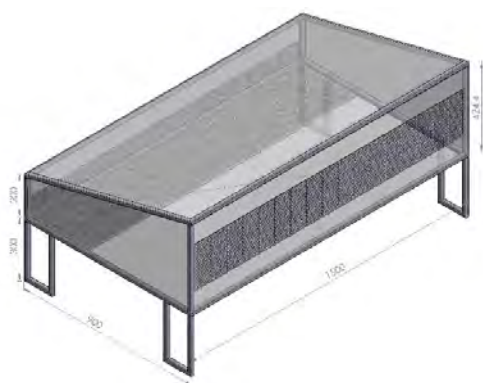
วิธีการทดลอง

นำมะม่วงสุกสดพันธุ์น้ำดอกไม้จากตลาดที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ $16-18 \pm 0.2$ °Brix วัดด้วยเครื่อง ATC-1E hand-held refractometer (ATAGO, Tokyo, Japan) แขนในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 47 องศาเซลเซียส ในอ่างน้ำร้อน (LWB-106D, Labtech) มีความถูกต้อง ± 0.1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 35 นาที (ณพวีร์, 2560) หลังจากนั้นนำมะม่วงน้ำดอกไม้มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 439.9-442.7% ฐานแห้งหั่นตามแนวยาวของผลขนานกับระนาบทางกว้างของเมล็ดจะได้ 4 ชิ้น/ผล (หั่นแบ่งครึ่งตามแนวยาวของผล และหั่นแบ่งครึ่งอีกรอบจะได้ด้านละ 2 ชิ้น) จะให้ความหนาเริ่มต้นขึ้นละประมาณ 10 มิลลิเมตร นำขึ้นมะม่วงที่เตรียมไว้ประมาณ 10 กิโลกรัม วาง

เรียงบนตะแกรงเทพลอนไม่ให้ซ้อนทับกันแล้วนำตะแกรงเทพลอนวางบนถาดที่ใส่ถาดแล้วนำไปใส่ในห้องอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบพีวีไฮบริดจดังรูปที่ 1 ดำเนินการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่เงื่อนไข อัตราการไหลของลมร้อนในห้องอบแห้งประมาณ 0.02 kg/s โดยไม่หมุนเวียนอากาศกลับมาใช้ใหม่ในช่วง 8 ชั่วโมงแรกของการอบแห้ง หลังจากนั้นจึงหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ 80% โดยจากงานวิจัยของ อรอนงค์ และคณะ (2537) พบว่า การนำอากาศหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ 80% ทำให้ระบบการอบแห้งมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุด โดยระหว่างการอบแห้งจะใช้น้ำหนักมะม่วงทุกชั่วโมงเพื่อหาน้ำหนักมะม่วงที่เปลี่ยนไประหว่างการอบแห้งซึ่งเริ่มต้นดำเนินการตั้งแต่วันที่ 8.00 น. – 16.30 น. ทุกวัน เนื่องจากหลังจากเวลา 16.30 น. ไปแล้วรังสีอาทิตย์มีค่าน้อยทำให้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์สามารถเก็บรังสีอาทิตย์ได้น้อยและอุณหภูมิในห้องอบแห้งลดลง ทำการอบมะม่วงจนได้ความชื้นสุดท้าย 14% d.b. แล้วจะบรรจุในถุงอลูมิเนียมพอลิเอทิลีนภายใต้สภาวะสุญญากาศ และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 2-5 องศาเซลเซียส เพื่อรอการวัดคุณภาพทางด้านสี ความแข็ง ค่าความยืดหด และค่าวอเตอร์แอกทิวิตี โดยการอบแห้งแต่ละครั้งใช้มะม่วงสุกน้ำหนักประมาณ 10 กิโลกรัม หรือเท่ากับมะม่วงสุกก่อนปอกเปลือกประมาณ 25 กิโลกรัมสด ในการวิจัยจะเปรียบเทียบเครื่องอบแห้งแบบพีวีไฮบริดกับเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์แบบกล่องดังแสดงในรูปที่ 2 ที่ใช้กันทั่วไปที่ปริมาณมะม่วงสุกในการอบแห้งเท่ากันทางด้านจลนพลศาสตร์ในการอบแห้ง และคุณภาพของมะม่วงหลังการอบแห้ง โดยการทดลองเริ่มดำเนินการตั้งแต่วันที่ 19 พฤษภาคม 2562 ถึง 18 สิงหาคม 2562 ที่คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์แบบพีวีไฮบริด



รูปที่ 2 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกล่อง

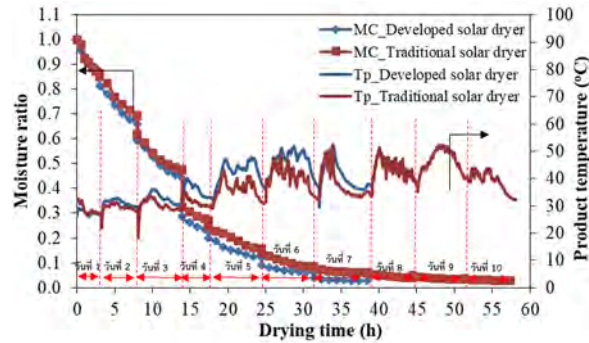
ผลการทดลอง

จลนพลศาสตร์ของการอบแห้งมะม่วง

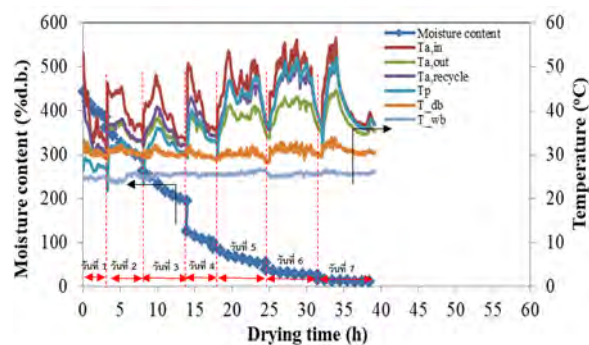
จลนพลศาสตร์ของการอบแห้งมะม่วงด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพีวีไฮบริดจ์และเครื่องอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบกล่องแสดงในรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าการอบแห้งมะม่วงด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพีวีไฮบริดจ์มีอัตราการอบแห้งสูงกว่ามะม่วงอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบกล่อง เนื่องจากอุณหภูมิของวัสดุในขณะอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่พัฒนาสูงกว่าและความเร็วลมของอากาศอบแห้งสูงกว่ากรณีอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกล่อง (Yaldyz and Ertekyn, 2001) ส่งผลให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้น กล่าวคือ ใช้เวลาอบแห้งประมาณ 38.4 ชั่วโมง (7 วัน) ขณะที่เครื่องอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบกล่องใช้เวลาอบแห้งประมาณ 57.4 ชั่วโมง (10 วัน) อุณหภูมิของมะม่วงในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพีวีไฮบริดจ์ที่สูงกว่าเกิดจากมะม่วงได้รับความร้อนที่ถ่ายโอนมาจากอุณหภูมิอากาศร้อนในเครื่องอบแห้งแบบพีวีไฮบริดจ์ที่สูงกว่า เนื่องจากอากาศร้อนที่ไหลออกจากตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบของเครื่องอบแห้งผสมผสานมีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศร้อนในเครื่องอบแห้งแบบกล่อง ซึ่งเป็นผลมาจากการที่อากาศได้รับความร้อนจากรังสีอาทิตย์ในตัวรับรังสีอาทิตย์มากขึ้นจากการไหลเวียนกลับไปกลับมาในตัวรับรังสีอาทิตย์ และผลจากการที่นำอากาศร้อนที่ออกจากห้องอบแห้งไหลเวียนกลับมาใช้ใหม่ จะเห็นได้จากรูปที่ 4-5 อุณหภูมิของอากาศร้อนที่ไหลเวียนกลับมาใช้ใหม่มีค่าสูงขึ้นตามความชื้นของ

มะม่วงที่ลดลงในวันถัดมา ของการอบแห้ง การนำอากาศร้อนที่ออกจากห้องอบแห้งส่วนนี้กลับมาใช้ใหม่จึงเป็นการประหยัดพลังงานในการทำให้อากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยผลการทดลองที่ได้ดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lakshmi et al. (2018) และ Ssemwanga et al. (2020)

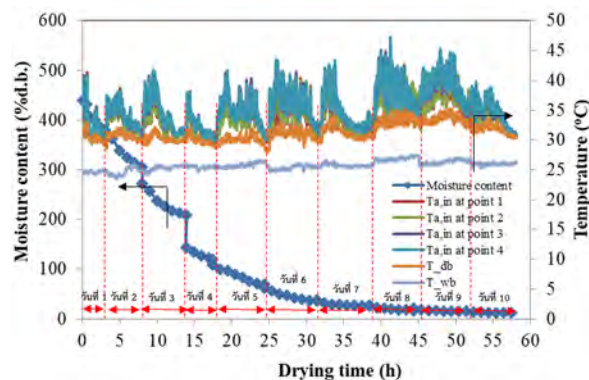
แต่อย่างไรก็ตามการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งสองชนิดดังกล่าวนี้ยังถือว่าใช้เวลาในการอบแห้งค่อนข้างนาน ซึ่งอาจเกิดจากสาเหตุของช่วงเวลาในการอบแห้งในแต่ละวันไม่สามารถอบแห้งได้นาน เนื่องจากเป็นช่วงฤดูฝน โดยบางวันมีฝนตกทำให้สามารถอบแห้งได้เพียง 3-4 ชั่วโมง เท่านั้น โดยเฉพาะในช่วงวันที่ 1-4 ของการอบแห้ง และบางวันมีเมฆมาบดบังแสงอาทิตย์เป็นจำนวนมาก ทำให้รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบริเวณพื้นที่อบแห้งในปริมาณต่ำดังแสดงในรูปที่ 6 ส่งผลให้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สามารถกักเก็บความร้อนได้น้อย โดยปริมาณรังสีที่ตกกระทบบริเวณพื้นที่ในการทดลองแต่ละวันมีปริมาณสูงในช่วงของการทดลองวันที่ 6 ถึงวันที่ 9 ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิของวัสดุสูงขึ้นตามไปด้วยในช่วงเวลาดังกล่าว นอกจากนี้ยังพบว่าหลังจากดำเนินการอบแห้งมะม่วงในวันที่ 3 เสร็จแล้ว ไม่สามารถดำเนินการอบแห้งได้ต่อเนื่องในวันที่ 4 ได้ เนื่องจากมีฝนตกตลอดทั้งวัน จึงจำเป็นต้องหยุดอบแห้งประมาณ 2 วัน โดยในขณะที่หยุดอบแห้งได้นำตัวอย่างมะม่วงเก็บไว้ในห้องเย็น ส่งผลให้ความชื้นในวัสดุระเหยออกในระหว่างการเก็บในห้องเย็น ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณความชื้นของมะม่วงอบแห้งทั้งสองวิธีลดลงมากเมื่อเปรียบเทียบกับการลดลงของปริมาณความชื้นของมะม่วงอบแห้งในช่วงวันอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 4 และ 5



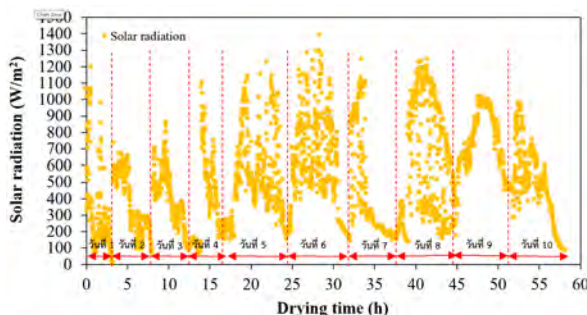
รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นและอุณหภูมิของมะม่วงน้ำดอกไม้ในขณะอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพิวไฮบริดจ์และเครื่องอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบกล่อง (MC คือ ปริมาณความชื้น; Developed solar dryer คือ เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพิวไฮบริดจ์; Traditional solar dryer คือ เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกล่อง; Tp คือ อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์)



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิอากาศและวัสดุในขณะอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยเครื่องอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบพิวไฮบริดจ์ (Ta, in คือ อุณหภูมิอากาศขาเข้าห้องอบแห้งเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์; Ta, out คือ อุณหภูมิอากาศขาออกห้องอบแห้งเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์; Ta, recycle คือ อุณหภูมิอากาศหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่; Tp คือ อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์; T_db คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศแวดล้อม; T_wb คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศแวดล้อม)



รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงความความชื้นและอุณหภูมิอากาศและวัสดุในขณะอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยเครื่องอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบกล่อง (Ta, in at point 1 คือ อุณหภูมิอากาศภายในห้องอบแห้งของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ตำแหน่งที่ 1; T_db คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศแวดล้อม; T_wb คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศแวดล้อม)



รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีอาทิตย์ในขณะอบแห้งม่วงน้ำดอกไม้ด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพีวีไฮบริดจ์และเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกล่อง

คุณภาพทางด้านสี

คุณภาพทางด้านสีของมะม่วงน้ำดอกไม้ก่อนและหลังผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพีวีไฮบริดจ์เปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกล่องแสดงในตารางที่ 1 พบว่ามะม่วงที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพีวีไฮบริดจ์มีค่าความสว่างของสี (L^*) ต่ำกว่า แต่มีค่าความเป็นสีแดง ($+a^*$) และค่าความเป็นสีเหลือง ($+b^*$) สูงกว่ามะม่วงอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกล่อง เนื่องจากอุณหภูมิของวัสดุในขณะที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพีวีไฮบริดจ์สูงกว่า ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีสีเข้มขึ้น เนื่องจากผลของการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์มาเกี่ยวข้องในระหว่างการอบแห้ง (Lakshmi et al., 2018) โดยลักษณะสีของมะม่วงน้ำดอกไม้ก่อนและหลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งสองชนิดแสดงในตารางที่ 1 เมื่อพิจารณาค่าความแตกต่างของค่าสี (ΔE) ของวิธีการอบแห้งทั้งสองชนิด พบว่าค่าความแตกต่างของค่าสีของมะม่วงอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกล่องมีค่าสูงกว่ามะม่วงอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพีวีไฮบริดจ์ เนื่องจากมะม่วงอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกล่องมีค่าความเป็นสีเหลืองต่ำกว่ามะม่วงก่อนอบแห้งมาก ซึ่งอาจเกิดจากอุณหภูมิของวัสดุต่ำมาก การเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์มาเกี่ยวข้องเกิดขึ้นได้น้อย ผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้หลังการอบแห้งจึงมีสีชาดั่งแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งลักษณะสีของมะม่วงอบแห้งดังกล่าวไม่เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค โดยสี

ของมะม่วงอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกล่องเริ่มเปลี่ยนเป็นสีโทนขาวเมื่ออบแห้งผ่านไปวันที่ 6 โดยสีชาดที่เพิ่มขึ้นกับผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นในแต่ละวัน โดยมะม่วงหลังการอบแห้งจะมีสีชาดดังแสดงในตารางที่ 2

คุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัสและวอเตอร์แอกทิวิตี

คุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัสและวอเตอร์แอกทิวิตีของมะม่วงน้ำดอกไม้ที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพีวีไฮบริดจ์และอบแห้งเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกล่องแสดงในตารางที่ 3 โดยใช้การวิเคราะห์ทางสถิติแบบ T-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % โดยนำค่าเนื้อสัมผัสของมะม่วงอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพีวีไฮบริดจ์เปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกล่อง พบว่า มะม่วงที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบพีวีไฮบริดจ์มีค่าความแข็ง (Hardness) และค่าความยึดติด (Adhesiveness) ต่ำกว่ามะม่วงอบแห้งจากเครื่องอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบกล่อง ซึ่งอาจเกิดจากผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งเกิดการหดตัวต่ำกว่า ส่งผลให้เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์มีความแน่นเนื้อต่ำกว่า เนื่องจากมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพีวีไฮบริดจ์ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่า ในขณะที่การอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกล่องใช้เวลานานประมาณ 57.4 ชั่วโมง ความชื้นที่ระเหยออกจากวัสดุเป็นไปอย่างช้าๆ ส่งผลให้การหดตัวของมะม่วงมากขึ้น

ตารางที่ 1 ค่าสีของมะม่วงน้ำดอกไม้ก่อนและหลังผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

เงื่อนไขการอบแห้ง	L*	a*	b*	ΔE	เวลาอบแห้ง (ชั่วโมง)
มะม่วงน้ำดอกไม้สด	78.95±1.08 ^c	5.93±1.33 ^a	52.87±1.68 ^b	-	-
เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกล่อง	77.64±1.35 ^b	6.17±0.66 ^a	37.22±2.70 ^a	15.89±2.75 ^b	57.4
เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพีวีไฮบริดจ์	75.54±1.35 ^a	7.19±0.70 ^b	55.90±1.67 ^c	4.96±2.41 ^a	38.4

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p < 0.05)

ตารางที่ 2 ลักษณะสีของมะม่วงน้ำดอกไม้ก่อนและหลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบต่างๆ

เงื่อนไข	วิธีการอบแห้ง	
	มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบกล่อง	มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบพีวีไฮบริดจ์
สด		
หลังการอบแห้ง		

ตารางที่ 3 ค่าเนื้อสัมผัสและวอเตอร์แอกทิวิตีของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบต่างๆ

วิธีการอบแห้ง	ความแข็ง (N)	ความยึดติด (Adhesiveness) (N-s)	วอเตอร์แอกทิวิตี	เวลาอบแห้ง (ชั่วโมง)
เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกล่อง	149.59±12.34 ^b	-18.57±3.58 ^b	0.538±0.006 ^a	57.4
เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพีวีไฮบริดจ์	64.54±7.88 ^a	-8.03±3.52 ^a	0.547±0.012 ^a	38.4

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p < 0.05)

นอกจากนี้ยังพบว่าค่าวอเตอร์แอกทิวิตีของผลิตภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้ที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งสองชนิดมีค่าวอเตอร์แอกทิวิตีอยู่ในช่วง 0.538-0.547 ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนผักและผลไม้แห้ง มพช.136/2558 ซึ่งกำหนดให้ผลไม้แห้งต้องมีค่าวอเตอร์แอกทิวิตีไม่เกิน 0.6 แสดงให้เห็นว่ามะม่วงอบแห้งทุกเงื่อนไขการทดลองมีความปลอดภัยจากจุลินทรีย์ในการเก็บรักษา

สรุปผลการทดลอง

ในการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้และมะม่วงมหาชนกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพีวีไฮบริดจ์ด้วยเทคนิคการอนุรักษ์พลังงาน โดยใช้การหมุนเวียนอากาศหลังการอบแห้งกลับมาใช้ใหม่ด้วยพัดลมที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงให้เห็นว่าเครื่องอบแห้งแบบพีวีไฮบริดจ์สามารถอบแห้งได้เร็วกว่า

และมีประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งมากกว่าการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบกล่องที่มีการไหลเวียนของอากาศในเครื่องอบแห้งแบบธรรมชาติและไม่มีการนำอากาศหลังการอบแห้งกลับมาใช้ใหม่ มะม่วงที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพีวีไฮบริดจ์จะมีการเปลี่ยนแปลงของสีน้อยกว่า มีค่าการแข็งตัวและค่าความยึดติดต่ำกว่าเมื่อเทียบกับมะม่วงก่อนการอบแห้งน้อยกว่ามะม่วงที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบกล่อง โดยมะม่วงที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งทั้งสองแบบมีค่าวอเตอร์แอกทิวิตีไม่เกิน 0.6 มีความปลอดภัยจากจุลินทรีย์ในการเก็บรักษา

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย และคณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้การสนับสนุน

สถานที่ในการทำวิจัย และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
พระนคร ที่ให้การสนับสนุนบุคลากรในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- ณพวีร์ หวังใจชื่น. (2560). การพัฒนามะม่วงอบแห้งธรรมชาติโดยใช้ลมร้อน
ร่วมกับการปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟ. ใน: โครงการ
ศึกษาวิจัย. คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ. มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ. 69.
- อรอนงค์ ศรีพาทกุล สมเกียรติ ปรัชญาวรรการ และสมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์.
(2537). การอบแห้งข้าวเปลือกโดยวิธีฟลูอิดไดซ์แบบด้อย่าง
ต่อเนื่อง : แนวทางการอบแห้งที่เหมาะสม. วารสาร สจธ. 17(2):
1-20.
- Bolaji, B. and Olalusi, A. (2008). Performance evaluation of a
mixed mode solar dryer. Technical Report 11: 225-231.
- Basunia, M. and Abe, T. (2001). Thin layer solar drying
characteristics of rough rice under natural convection.
Journal of Food Engineering 47: 295-301.
- Elkhadraoui, A., Kooli, S., Hamdi, I. and Farhat, A. (2015).
Experimental investigation and economic evaluation of
a new mixed-mode solar greenhouse dryer for drying
of red pepper and grape. Renewable Energy 77: 1-8.
- Ghazanfari, A., Tabil, I. and Sokhansanj, S. (2003). Evaluating a
solar dryer for shell drying of split pistachio nuts. Drying
Technology 21: 1357-1368.
- Hii, C., Jangnam, S., Ong, S. and Mujumdar, A. (2012). Solar Drying:
Fundamental Application and Innovation. 1-50.
- Janjai, S., Lamlert, N., Intawee, P., Mahayothee, B., Bala, B. k.,
Nagle, M. and Muller, J. (2009). Experimental and
simulated performance of a PV- ventilated solar
greenhouse dryer for drying of peeled longan and
banana. Solar Energy 83(9): 1550-1565.
- Juraev, E. and Akhatov, J. (2009). Study of mixed-mode forced
convection solar dryer. Applied Solar Energy 45(1): 61-
64.
- Kamble, A., Kalbande, S., Deshmukh, M. and Gadge, S. (2011).
Solar drying system for energy conservation. Applied
Solar Energy 47: 124-133.
- Lakshmi, D. V. N., Muthukumar, P., Layek, A. and Nayak, P. K.
(2018). Drying kinetics and quality analysis of black
turmeric (*Curcuma caesia*) drying in mixed mode forced
convection solar dryer integrated with thermal energy
storage. Renewable Energy 120: 23-34.
- Lopez-Vidaria, E. C., Mendez-Lagunas, L. L. and Rodriguez-
Ramirez, J (2013). Efficiency of a hybrid solar-gas dryer.
Solar Energy 93: 23-31.
- Midilli, A. (2001). Determination of pistachio drying behavior and
conditions in a solar drying system. International
Journal of Energy Research 25: 715-725.
- Mumba, J. (1995). Development of a photovoltaic powered
forced circulation grain dryer for use in the tropics.
Renewable Energy 6(7): 855-862.
- Seveda, M. and Jhajharia, D. (2012). Design and performance
evaluation of solar dryer for drying of large cardamom
(*Amomum subulatum*). Journal of Renewable and
Sustainable Energy 4.
- Sharma, A., Chen, C. and Lan, N. (2009). Solar energy drying
systems: a review. Renewable and Sustainable Energy
Reviews 13: 1185-1210.
- Sreekumar, A., Manikantan, P. E. and Vijaykumar, K. P. (2008).
Performance of indirect solar cabinet dryer. Energy
Conversion Management 49(6): 1388-1395.
- Simate, I. (2003). Optimization of mixed-mode and indirect-mode
natural convection solar dryers. Renewable Energy 28:
435-453.
- Sonthikun, S., Chairat, P., Fardsin, K., Kirirat, P., Kumar, A. and
Tekasakul, P. (2016). Computational fluid dynamic
analysis of innovative design of solar-biomass hybrid
dryer: An experimental validation. Renewable Energy
92: 185-191.
- Soponronnarit, S., Nathakaranakule, A., Limtrakool, W.,
Rungjiwaruk, W., Nathakaranakule, S. and Rakwichien,
W. (1997). Banana fruit drying. RERIC International
Energy Journal 19(2): 5.
- Ssemwanga, M., Makule, E. and Kayondo, S. I. (2020). Performance
analysis of an improved solar dryer integrated with
multiple metallic solar concentrators for drying fruits.
Solar Energy 204: 419-428.
- Yaldyz, O. and Ertekyn, C. (2001). Thin layer solar drying of some
vegetables. Drying Technology 19(3&4): 583-597.
- Yassen, T. A. and Al-Kayiem, H. H. (2016). Solar-biomass hybrid
dryer enhanced by the Co- Gen technique. Drying
Technology 34(3): 287-295.