



การพัฒนาเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง DEVELOPMENT OF A DRYER USING BIOMASS AS FUEL

ประพันธ์พงษ์ สมศิลา¹, เอกภูมิ บุญธรรม², ธนกร หอมจำปา^{1*}

Prapphanpong Somsila¹, Eakpoom Buntham², Thanakorn Homjumpa^{1*}

¹คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์

อ.เมือง จ.สุรินทร์ ประเทศไทย 32000

²คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

¹Faculty of Agriculture and Technology, Rajamangala University of Technology Isan Surin Campus,

Muang, Surin, Thailand, 32000

²Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

*Corresponding author e-mail: tanagorn.ho@rmuti.ac.th

วันที่ได้รับ 18 เมษายน 2565

วันที่แก้ไขบทความ 28 เมษายน 2565

วันที่ตอบรับบทความ 29 เมษายน 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีแนวคิดจากปัญหาประชากรของประเทศไทยที่มีอัตราการเป็นโรคมะเร็งเพิ่มขึ้นมากอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะมะเร็งตับ มะเร็งกระเพาะอาหาร และมะเร็งลำไส้ใหญ่ ซึ่งมีสาเหตุจากการบริโภคอาหารประเภทแป้ง ย่าง ร่มควัน และทอดด้วยน้ำมันซ้ำ ที่ทำให้เกิดสารก่อมะเร็งจำพวกสารเฮเทอโรไซคลิกเอมีน และสารโพลีไคลโอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน และปัญหาการทำแห้งด้วยกระบวนการตากแดดจะประสบปัญหาสำคัญที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้นั้นคือ ช่วงของฤดูฝน และช่วงของการไม่มีแสงแดดจากพระอาทิตย์จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพที่ไม่ดีของผลิตภัณฑ์อย่างชัดเจน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงด้วยเทคนิคการนำความร้อนจากเปลวไฟไม่ให้สัมผัสกับอาหารโดยตรงผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยได้ออกแบบห้องอบแห้งความจุ 10 กิโลกรัม และสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากเปลวไฟ โดยใช้เศษกิ่งไม้ที่หาได้ในพื้นที่เป็นเชื้อเพลิง สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงคือเนื้อหมูที่ใช้สำหรับการแปรรูปเป็นเนื้อหมูแดดเดียว โดยมีปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วยอุณหภูมิอบแห้ง 55, 60 และ 65 °C และความเร็วลมภายในห้องอบแห้ง 1.0, 3.0 และ 6.0 m/s โดยมีพารามิเตอร์ที่เป็นเกณฑ์ในการศึกษา คือ อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งหรือความเร็วลมส่งผลให้อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้น โดยพบว่าอัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.12 – 0.29 kg/hr และ 0.05 – 0.08 MJ/kg ตามลำดับ และสุดท้าย เครื่องอบแห้งที่

พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้เคลื่อนย้ายได้สะดวกและสามารถผลิตหมูแดดเดียวได้ในทุกเวลา อย่างไรก็ตาม
จะต้องดำเนินการในที่ร่มสำหรับช่วงฤดูฝน

คำสำคัญ: การอบแห้ง, เชื้อเพลิงชีวมวล, สมรรถนะเครื่องอบแห้ง

Abstract

This research aims to develop biomass dryers with flame thermal conductivity techniques and smoke does not come into direct contact with food through heat exchangers. There is an increasing trend in cancer cases in Thailand, particularly stomach and colon cancer. Most of these cases are caused by the consumption of toasted, grilled, smoked, and fried foods. Frying specifically use oil repeatedly, that produce carcinogenic substances such as Heterocyclic Amines and Polycyclic Aromatic Hydrocarbon. The rainy season is also a problem in food preparation. Lack of sunshine and the wet weather result to poor quality food products. The dryer will allow use of healthier cooking and food preparation methods. The drying chamber has a capacity of 10 kg. It is has a heat exchanger between the combustion and drying zones, which allow for conduction, convection, and radiation heating techniques. Tree branches are used as fuel. Pork meat is used to test the biomass dryer performance. Drying is done at temperatures of 55, 60 and 65 °C and the air velocity inside the drying chamber varies at 1.0, 3.0 and 6.0 m/s. The studies showed that increasing drying temperature or air velocity result in an increase in the specific energy consumption (ranging of 0.12 – 0.29 kg of tree branches/hr), resulting to higher drying rate of between 0.05 – 0.08 MJ/kg. The dryer developed in this research can easily be moved allowing production of sun-dried pork anywhere at any time. However, it is still necessary to operate the dryer indoors for rainy season

Keywords: Drying, Biomass fuel, Dryer performance

1. บทนำ

หมู (Pork) ถือเป็นสัตว์เศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย มีการเลี้ยงและการบริโภคอย่างกว้างขวางและแพร่หลายในทุกภูมิภาค เนื่องจากหมูเป็นสัตว์ที่เลี้ยงง่ายในทุกพื้นที่ และมีระยะเวลาที่สามารถบริโภคได้ในระยะสั้น การบริโภคและการแปรรูปหมูสามารถทำได้ในหลายรูปแบบ ทั้งในการบริโภคในรูปแบบเนื้อสดเพื่อการประกอบอาหาร และการบริโภคในลักษณะของการแปรรูปเป็น

ผลิตภัณฑ์ เช่น หมูแผ่น หมูสวรรค์ หมูหยอง และหมูแดดเดียว เป็นต้น หมูแดดเดียว ถือเป็นผลิตภัณฑ์แปรรูปจากหมูที่มีมูลค่าด้านการตลาดในระดับที่สูง เนื่องจากรสชาติที่มีความอร่อยสามารถเก็บรักษาในเป็นเวลาค่อนข้างนาน ประกอบกับสามารถนำมาปรุงรสได้หลากหลายเมนูเช่นเดียวกัน นอกจากนั้นคนไทยส่วนมากจะนิยมรับประทานอาหารประเภทปิ้งย่างเป็นอย่างมาก ผลที่ตามมาคือการบริโภคอาหารประเภทปิ้งย่าง ร่มควัน และทอดด้วยน้ำมันซ้ำ ที่ทำให้เกิดสารก่อมะเร็งจำพวกสารเฮทเทอโรซัยคลิกเอมีน และสารโพลีไคลโอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน เป็นสาเหตุของการเกิดมะเร็งตับ มะเร็งกระเพาะอาหาร และมะเร็งลำไส้ใหญ่ ในบุคคลดังกล่าวเป็นจำนวนมาก ประกอบกับอีกหนึ่งปัญหาที่พบมากสำหรับกระบวนการตากแห้งหรือผลิตหมูแดดเดียวของวิธีการตากแดดนั้นคือ ช่วงของฤดูฝน และช่วงของการไม่มีแสงแดดจากพระอาทิตย์จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพที่ไม่ดีของผลิตภัณฑ์อย่างเห็นได้ชัด จากปัญหาดังกล่าวจึงเป็นที่มาสำหรับการศึกษาในครั้งนี้ เพื่อให้สามารถสร้างงานวิจัยที่มีคุณภาพ ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา โดยสามารถจำแนกออกเป็นสองกลุ่ม โดยที่กลุ่มแรกเป็นงานวิจัยเกี่ยวข้องกับการศึกษาและพัฒนาชุดทดลองเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง ประกอบด้วย Rabha (2021) ศึกษาเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงต้นที่มีการประยุกต์ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนพบว่า สามารถลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ได้มาก โดยชนิดของฟืนที่ใช้เป็นไม้มะม่วงซึ่งพบว่าความกว้างของไม้ฟืนเป็นปัจจัยหนึ่งที่ใช้ในการพัฒนาเครื่องอบแห้งและยังสามารถแสดงจุดเด่นเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่สามารถใช้ได้ในทุกพื้นที่แม้ในพื้นที่ที่ไม่มีไฟฟ้าก็ตาม Ndukwu *et al.* (2020) ศึกษาเครื่องอบแห้งแบบผสมระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวลประกอบกับการใช้ท่อทองแดงในการทำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จากการศึกษาพบว่า เครื่องอบแห้งที่ทำการออกแบบสามารถลดระยะเวลาการอบแห้งลงได้ ที่ นอกจากนั้นยังพบว่า การวิเคราะห์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในระดับที่ลดลง Bosomtwe *et al.* (2019) ศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งแบบผสมระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์และชีวมวลสำหรับการอบแห้ง และการฆ่าเชื้อในข้าวโพด จากการศึกษาพบว่า เครื่องอบแห้งสามารถลดความชื้นและอบแห้งผลิตภัณฑ์ได้เป็นที่น่าพอใจ นอกจากนั้นยังพบว่าเครื่องอบแห้งที่มีการใช้งานแบบผสมระหว่างแสงอาทิตย์และชีวมวลจะสามารถลดการรอดชีวิตของเชื้อโรคได้ดีกว่ากรณีการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งที่มีการใช้งานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว Hamdani *et al.* (2018) ได้ทำการออกแบบ สร้างและทำการทดสอบเครื่องอบแห้งแบบผสมระหว่างแสงอาทิตย์ร่วมกับเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับการอบปลา จากการศึกษาพบว่า เครื่องอบแห้งที่ได้จากการออกแบบสามารถอบแห้งปลาได้เป็นอย่างดี แต่พบปัญหาที่เกิดขึ้นในการบวนการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลในช่วงเวลากลางคืนของการอบแห้งจะส่งผลกระทบต่อน้ำหนักปลาที่มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย Nawshad & Michael (2013) ทำการศึกษาการประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะสามารถทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลงแต่มีการใช้พลังงานและต้นทุนที่

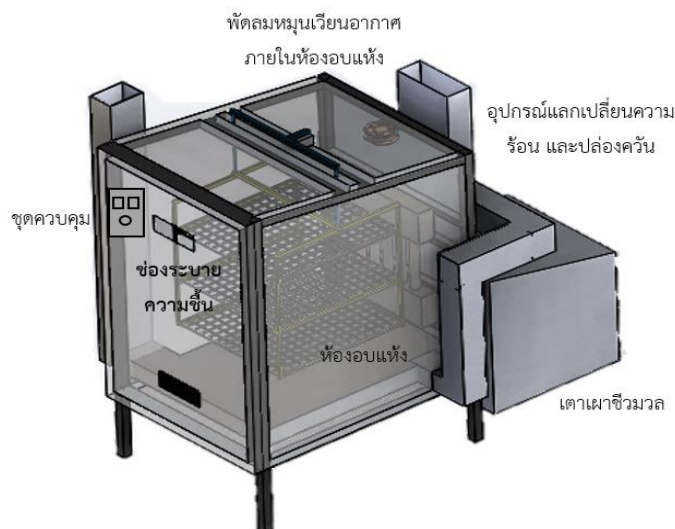
ค่อนข้างสูง นอกจากนั้นยังพบอีกว่าการใช้งานเชื้อเพลิงชีวมวลจะสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่ากรณีการใช้ถ่านหิน Henrik *et al.* (20014) ศึกษาการลดต้นทุนในกระบวนการอบแห้งแบบต่อเนื่องด้วยเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับโรงงานผลิตสารเคมีและกระดาษ จากการศึกษาพบว่า ในทางปฏิบัติการใช้อุณหภูมิอบแห้งที่ต่ำจะสามารถช่วยลดต้นทุนการอบแห้งได้อย่างมาก นอกจากนั้นยังพบว่า กระบวนการใช้น้ำสำหรับการอบแห้งจะมีเหตุผลประกอบที่ดีกว่าของการใช้ความร้อนจากประเภทอื่นที่ส่งผลต่อต้นทุนในระดับที่ค่อนข้างมาก Patipat *et al.* (2017) ทำการศึกษาการใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับการอบแห้งข้าวเกรียบที่ทำจากข้าวเหนียว ผลจากการศึกษาพบว่า การอบแห้งข้าวแต๋นที่ใช้เครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงจะสามารถลดต้นทุนการผลิตได้เป็นอย่างดี ประกอบกับมีประสิทธิภาพการอบแห้งเป็นที่น่าพอใจ นอกจากนั้นยังส่งผลต่อคุณภาพของสี อัตราส่วนการหดตัว และความแข็งของข้าวแต๋นในระดับที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งที่ใช้ก๊าซแอลพีจี Yahya *et al.* (2017) ศึกษาการวิเคราะห์การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งชนิดฟลูอิดไดซ์เบดที่มีการใช้ความร้อนร่วมระหว่างแสงอาทิตย์และชีวมวล จากการศึกษาพบว่า การอบแห้งกรณีของการใช้แสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวจะมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและเวลาที่ใช้ในการอบแห้งมากกว่ากรณีของการใช้พลังงานร่วมกันระหว่างแสงอาทิตย์และชีวมวล Ida *et al.* (2020) ศึกษาการใช้ประโยชน์จากกลบในการอบแห้งข้าวโพดด้วยเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่มีการประยุกต์ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อ ผลจากการศึกษาพบว่า กระบวนการอบแห้งข้าวโพดที่ใช้เครื่องอบแห้งจากกลบให้ผลเป็นที่น่าพอใจ ทั้งในคุณภาพของข้าวโพดและประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง Gowtham *et al.* (2012) ศึกษาการออกแบบและทำการวิเคราะห์เครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่มีการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่และมีชุดเก็บความร้อนด้วยวัสดุเปลี่ยนเฟส จากการศึกษาพบว่า การศึกษานำความร้อนขึ้นออกจากเชื้อเพลิงชีวมวลก่อนที่จะนำไปเป็นเชื้อเพลิงให้หม้อต้มน้ำในกระบวนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าด้วยความร้อนจากความร้อนทิ้งและวัสดุเปลี่ยนเฟส สามารถลดความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวลดังกล่าวได้เป็นอย่างดีและกลุ่มที่สองเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ประกอบด้วย Ndukwua *et al.* (2020) ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบผสมระหว่างแสงอาทิตย์และชีวมวลโดยพบว่า จากการศึกษาสามารถพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบผสมที่สามารถลดการใช้พลังงานได้ค่อนข้างมาก นอกจากนั้นยังพบอีกว่าประสิทธิภาพการอบแห้งจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการใช้งานร่วมกันกับเชื้อเพลิงชีวมวล Sumeet *et al.* (2020) พัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลของเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงผลจากการศึกษาพบว่า ค่าการถ่ายโอนความร้อนและความดันตกคร่อมจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นวางผลิตภัณฑ์ โดยขนาดของชั้นวาง จำนวนชั้นวาง ช่องว่างของชั้นวางมีผลต่อประสิทธิภาพการอบแห้งและผลของการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ด้วยเช่นกัน Fabrice & Yvette (2017) งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่อง

อบแห้งแบบผสมระหว่างเชื้อเพลิงชีวมวลกับพลังงานแสงอาทิตย์ และทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองที่ใช้ฟริกเชียวเป็นผลิตภัณฑ์ในการทดลอง โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบผสมให้มีสมรรถนะสูงสำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า การพัฒนาแบบจำลองดังกล่าวสามารถออกแบบเครื่องอบแห้งได้ในระดับที่พึงพอใจและสามารถจำแนกการใช้ชนิดของพลังงานในแต่ละช่วงได้ด้วย Elieser (2018) พัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีชุดเก็บความร้อน จากการศึกษพบว่า การมีกระจุกรอบด้านผลส่งต่อการเพิ่มอุณหภูมิของชุดเก็บความร้อน แต่การเพิ่มจำนวนชั้นของกระจุจกจากหนึ่งชั้นไปเป็นสองชั้นไม่มีผลต่ออุณหภูมิในชุดเก็บความร้อน และยังพบอีกว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งที่ด้านบนสุดของห้องอบแห้งที่มีอุณหภูมิที่สูงมากกว่าตำแหน่งอื่นอย่างเห็นได้ชัด Sonthawi *et al.* (2016) ศึกษาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยการเปรียบเทียบผลกับการทดลอง จากการศึกษพบว่า ผลที่ได้จากการนำแผ่นยางเข้าอบแห้งในเครื่องอบแห้งดังกล่าวจะสามารถลดความชื้นของแผ่นยางพาราได้แต่ไม่สามารถลดระยะเวลาการอบแห้งลง นอกจากนั้นยังพบว่าการอบแห้งแผ่นยางพาราด้วยเครื่องอบแห้งมีคุณภาพดีกว่ากรณีของการอบแห้งแบบรมควันที่มีการทำกันโดยทั่วไปของชาวสวนยาง Dhanushkodia *et al.* (2017) ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับใช้ในกระบวนการอบแห้งเม็ดมะม่วงหิมพานต์ จากการศึกษพบว่า โมเดลของ two terms และ Midilli มีความสามารถในการทำงานการอบแห้งที่มีการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ได้เป็นอย่างดี ส่วนโมเดลของ Page เป็นโมเดลที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งเม็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงและแบบผสมได้เป็นอย่างดี Sumeet *et al.* (2020) งานวิจัยนี้ทำการจำลองพลศาสตร์ของไหลด้วยการใช้โปรแกรม Fluent 17 ที่ทำการศึกษาผลของจำนวน ความยาว การจัดเรียง และการจัดเรียงรูของชั้นวางผลิตภัณฑ์ ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า การถ่ายโอนความร้อนและความดันตกคร่อมมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มจำนวนของชั้นวางผลิตภัณฑ์ ซึ่งปัจจัยดังกล่าวถือเป็นสิ่งที่ส่งผลมากที่สุด สำหรับการการจัดเรียงชั้นวางผลิตภัณฑ์ที่ส่งผลสมรรถนะมากที่สุดคือ กรณีการจัดเรียงแบบใส่ด้านข้างและผนังด้านหลัง-ด้านหน้า นอกจากนั้นปัจจัยการจัดเรียงรูของชั้นวางผลิตภัณฑ์พบว่า การจัดเรียงแบบตรงจะส่งผลต่อสมรรถนะเครื่องอบแห้งมากกว่ากรณีการจัดเรียงแบบสลับกัน อย่างไรก็ตามจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า การพัฒนาเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่มีการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในการถ่ายเทความร้อนให้กับห้องอบแห้งสำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่ปราศจากการรมควันยังคงมีไม่มากนัก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในพัฒนาเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงด้วยเทคนิคการนำความร้อนจากเปลวไฟไม่ให้สัมผัสกับเนื้อหุ้มแดดเดียวโดยตรงผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

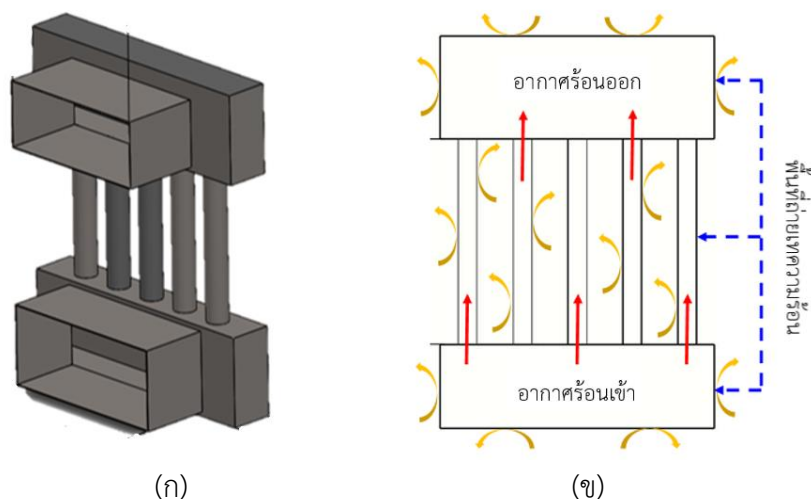
2. วิธีวิจัย

2.1 ชุดทดลอง

ภาพที่ 1 แสดงลักษณะเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงเพื่อใช้สำหรับการทดสอบสมรรถนะ โดยเครื่องแห้งชีวมวลประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก คือ 1) เตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวล โครงสร้างทำจากเหล็ก ผนังด้านในทุกด้านทำจากแผ่นเหล็กหนา 5 มิลลิเมตร และหุ้มฉนวนทุกด้านด้วยเซรามิกซีโฟเบอร์หนา 1 นิ้ว และห่อหุ้มด้วยแผ่นเมทัลชีสความหนา 1 มิลลิเมตรรอบด้านเช่นกัน โดยทำประตูด้านหน้าสำหรับนำเชื้อเพลิงชีวมวลเข้าเตาเผา และสร้างช่องอากาศขนาด 10×20 เซนติเมตรที่ผนังของประตู เพื่อให้อากาศจากภายนอกเข้าไปในห้องเผาไหม้เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ภายในจะมีตะแกรงที่สร้างด้วยเหล็กสำหรับเป็นพื้นที่ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีเชื่อมต่อกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 2) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและปล่องระบายควัน โครงสร้างทำมาจากเหล็กแผ่นหนา 1.5 มิลลิเมตร ประกอบด้วยส่วนที่เป็นกล่องรวมควันและความร้อนด้านล่าง ต่อเข้ากับท่อกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว กล่องรวมควันและความร้อนด้านบน และต่อเชื่อมกับปล่องควันเพื่อทำการปล่อยควันออกสู่ภายนอก ดังแสดงในภาพที่ 2 โดยหลักการทำงานของเตาเผาและเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เชื่อมต่อกัน จะเริ่มจากความร้อนและควันร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ตำแหน่งเตาเผาจะไหลผ่านมายังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนจากการเผาไหม้กับอากาศที่ไหลเวียนภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีสัมผัสกันแต่อย่างใด เพื่อป้องกันกลิ่นควันที่จะติดอยู่กับผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการอบแห้งซึ่งเป็นกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์สำหรับผู้บริโภค 3) ห้องอบแห้ง เป็นส่วนที่รับความร้อนจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยผ่านอากาศภายในห้องอบแห้ง เพื่ออบและลดความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ โดยผนังทุกด้านหุ้มด้วยแผ่นสังกะสีความหนา 1 มิลลิเมตรประกบด้วยฉนวนกันความร้อนความหนา 10 มิลลิเมตร สำหรับห้องอบแห้งทำการติดตั้งพัดลมเพื่อสร้างการไหลเวียนอากาศขนาด 0.5 แรงม้าจำนวน 1 เครื่อง และยังมีการติดตั้งชั้นวางผลิตภัณฑ์ที่ใช้เป็นตะแกรงสเตนเลสขนาดความกว้างช่องตะแกรงเท่ากับ 10 มิลลิเมตร นอกจากนั้นยังมีช่องเปิดจำนวน 2 ช่อง ขนาด 5×10 เซนติเมตรเท่ากัน ในตำแหน่งผนังด้านหน้าของประตูที่ด้านล่างและด้านบน เพื่อการนำพาอากาศจากภายนอกเข้าช่องด้านล่างและระบายความชื้นผลิตภัณฑ์ที่ช่องด้านบน 4) ชุดควบคุมการทำงานของพัดลมไหลเวียนอากาศ สำหรับสร้างการกระจายลมร้อนให้ทั่วทุกพื้นที่ของห้องอบแห้ง และชุดควบคุมความเร็วรอบของพัดลมไหลเวียนอากาศที่มีการต่อพ่วงกับวัดคีมเตอร์ที่ใช้ในการวัดและบันทึกค่าการใช้พลังงาน



ภาพที่ 1 แบบจำลองเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง



ภาพที่ 2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

(ก) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (ข) แผนผังของการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

2.2 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง

การพัฒนาเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งลักษณะเด่นของเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงคือ มีระบบแลกเปลี่ยนความร้อนที่สามารถแยกความร้อนและควันไฟไม่ให้สัมผัสกับอาหารโดยตรงส่งผลให้มีความปลอดภัย ถูกสุขลักษณะ โดยการรับประทานอาหารที่มีการปิ้งย่างเพื่อลดสารก่อมะเร็ง ซึ่งการอบแห้งในลักษณะดังกล่าวส่งผลทำให้การอบแห้งมีประสิทธิภาพสูง การทำงานของเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง เริ่มต้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนหลักที่ใช้ในการอบแห้งและขั้นตอนการเติมเชื้อเพลิงจะเติมไม้ฟืนเมื่อ

ความร้อนภายในห้องอบลดลงต่ำกว่าที่กำหนดของการศึกษา จากนั้นเมื่อความร้อนที่เกิดขึ้นมีปริมาณที่มากเพียงพอทำให้อากาศร้อนก็ไหลขึ้นผ่านชุดอุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนดังแสดงในภาพที่ 3 ซึ่งในขณะที่อากาศร้อนไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนี้เองจะเป็นขั้นตอนของการถ่ายเทความร้อนออกสู่ด้านนอก ส่งผลทำให้ความร้อนภายในห้องอบแห้งเพิ่มสูงขึ้นและเหมาะสมสำหรับใช้ในการอบแห้งเนื้อหมูสด ซึ่งค่าความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นจะทำให้ น้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ระเหยตัวออกมายังด้านนอกเพื่อลดความชื้น จากนั้นความร้อนที่ไหลออกมาจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะไหลไปทางด้านบนและออกไปสู่ด้านนอกผ่านปล่องควัน ซึ่งการทำงานของเครื่องอบแห้งจะเป็นเช่นนี้จนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์ในแต่ละครั้ง นอกจากนั้นยังมีการติดตั้งพัดลมไหลเวียนอากาศเพื่อช่วยในการกระจายความร้อนในห้องได้อย่างทั่วถึงกันในทุกพื้นที่อย่างสม่ำเสมอเพื่อการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

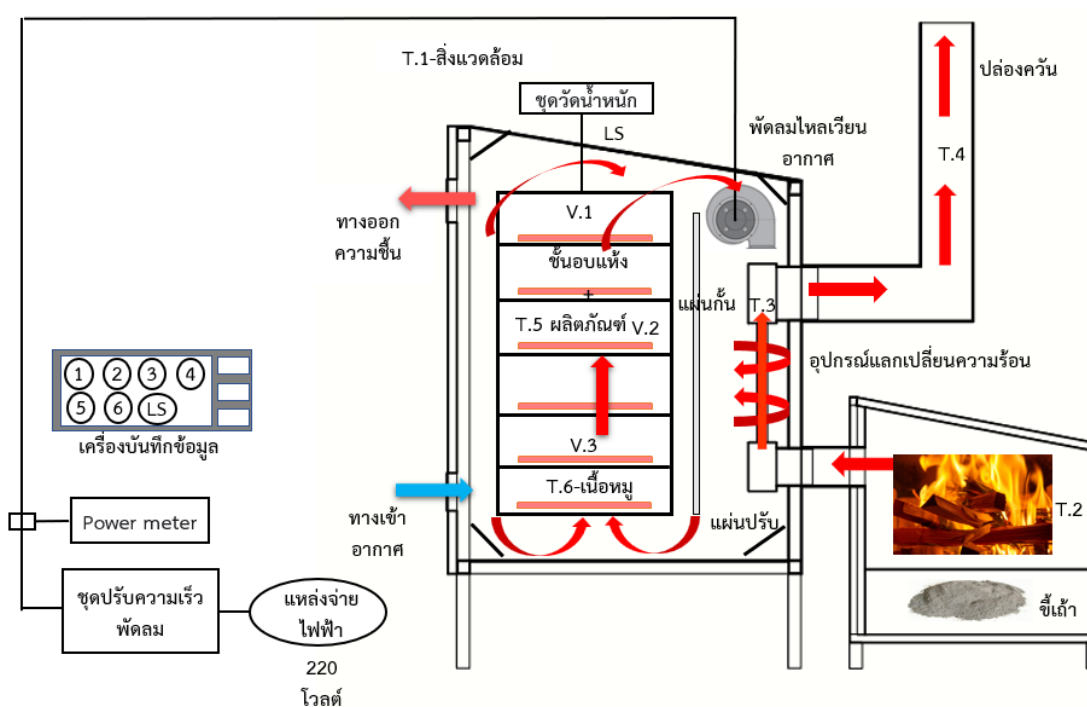
2.3 วิธีการทดลอง

2.3.1 ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการทดลอง

สำหรับการศึกษาสมรรถนะเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงนี้ ได้เลือกใช้เนื้อหมูสำหรับทดลองในทุกเงื่อนไขที่ได้ทำการศึกษา โดยชิ้นของเนื้อหมูที่ได้ทำเตรียมสำหรับการอบแห้งจะมีขนาดเท่ากับ $1 \times 10 \times 1$ เซนติเมตร เท่ากันในทุกชิ้น เนื่องด้วยขนาดดังกล่าวเป็นขนาดที่เท่ากับขนาดของเนื้อหมูแดดเดียวที่มีจำหน่ายในท้องตลาดทั่วไป ดังนั้นผลผลิตของเนื้อหมูแดดเดียวที่ได้จากการทดลองในครั้งนี้สามารถนำมาวิเคราะห์ เปรียบเทียบผลที่ได้กับผลของเนื้อหมูแดดเดียวที่วางจำหน่ายในตลาดด้วยเช่นกัน

2.3.2 เงื่อนไขในการทดลอง

สำหรับการศึกษาสมรรถนะเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงในครั้งนี้ จะเป็นศึกษาภายใต้เงื่อนไขการแปรผันอุณหภูมิอบแห้ง (อุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง) 55, 60 และ 60 °C และปรับเปลี่ยนความเร็วของอากาศภายในห้องอบแห้งเท่ากับ 1.0, 3.0 และ 6.0 m/s ตามลำดับ โดยในแต่ละเงื่อนไขของการศึกษาจะทำการอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่ระยะเวลาเท่ากับ 240 นาที สำหรับวิธีการควบคุมอุณหภูมิอบแห้งดำเนินการโดยติดตั้งชุดแสดงผลอุณหภูมิชนิดตัวเลขที่ตำแหน่งด้านหน้าเครื่องอบแห้งเพื่อให้สามารถมองเห็นชัดเจน เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงในระดับที่ต่ำกว่ากำหนดจะเติมเชื้อเพลิงเข้าไปในเตาเผา และหากอุณหภูมิเกินกว่ากำหนดจะมีการเปิดช่องทางระบายความชื้นเพิ่มมากขึ้น ส่วนการควบคุมความเร็วของอากาศภายในห้องอบแห้งทำได้โดยการใช้อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบการหมุนของพัดลมไหลเวียนอากาศภายในห้องอบแห้ง เพื่อปรับความเร็วของอากาศภายในห้องอบแห้งให้ได้ตามที่ต้องการ



2.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบด้วย ความชื้นผลิตภัณฑ์ อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ซึ่งมีรายละเอียดการวิเคราะห์ได้ดังต่อไปนี้

ความชื้นมาตรฐานเปียก คือ อัตราส่วนของน้ำต่อมวลเปียก ซึ่งสามารถวิเคราะห์โดยใช้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (1)

$$M_w = \frac{w-d}{w} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่	M_w	คือ	ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)
	W	คือ	มวลเปียกของวัสดุ (kg)
	d	คือ	มวลแห้งของวัสดุ (kg)

สัดส่วนความชื้น คือ ตัวแปรไร้หน่วยที่เปรียบเทียบความชื้นที่เวลาใดๆ กับความชื้นเริ่มต้น ซึ่งสามารถวิเคราะห์โดยใช้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2)

$$MR = \frac{M_t}{M_{in}} \quad (2)$$

โดย	MR	คือ	สัดส่วนความชื้น
	M_{in}	คือ	ความชื้นเริ่มต้น (% w.b.)
	M_t	คือ	ความชื้นที่เวลาใด ๆ (% w.b.)

อัตราการอบแห้ง คือ ปริมาณการระเหยของน้ำจากวัสดุต่อเวลาที่กำหนด ซึ่งสามารถวิเคราะห์โดยใช้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (3)

$$DR = \frac{m_i - m_t}{T} \quad (3)$$

โดย	DR	คือ	อัตราการอบแห้ง (kg/h)
	m_i	คือ	น้ำหนักเริ่มต้นในวัสดุ (kg)
	m_t	คือ	น้ำหนักวัสดุที่เวลาใดๆ (kg)
	T	คือ	เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

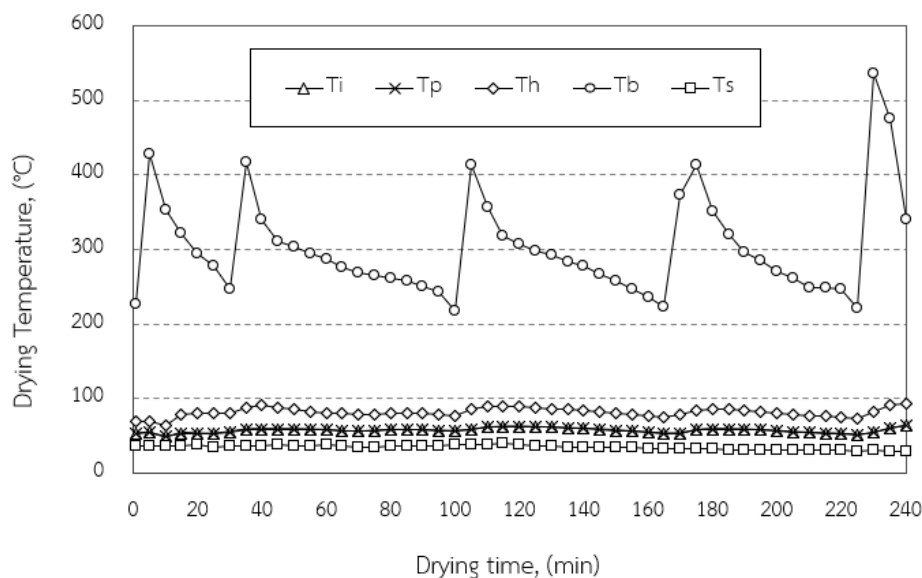
ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ คือ ค่าดัชนีที่ใช้บ่งชี้การใช้พลังงานของระบบ ซึ่งสามารถวิเคราะห์โดยใช้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (4)

$$SEC = \frac{E_{power} + E_{firewood}}{m_w} \quad (4)$$

โดย	SEC	คือ	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg)
	E_{power}	คือ	ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)
	$E_{firewood}$	คือ	ปริมาณเชื้อเพลิงฟืนที่ใช้ (kg)
	m_w	คือ	ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากเนื้อวัสดุ (kg)

3. ผลการวิจัยและการอภิปราย

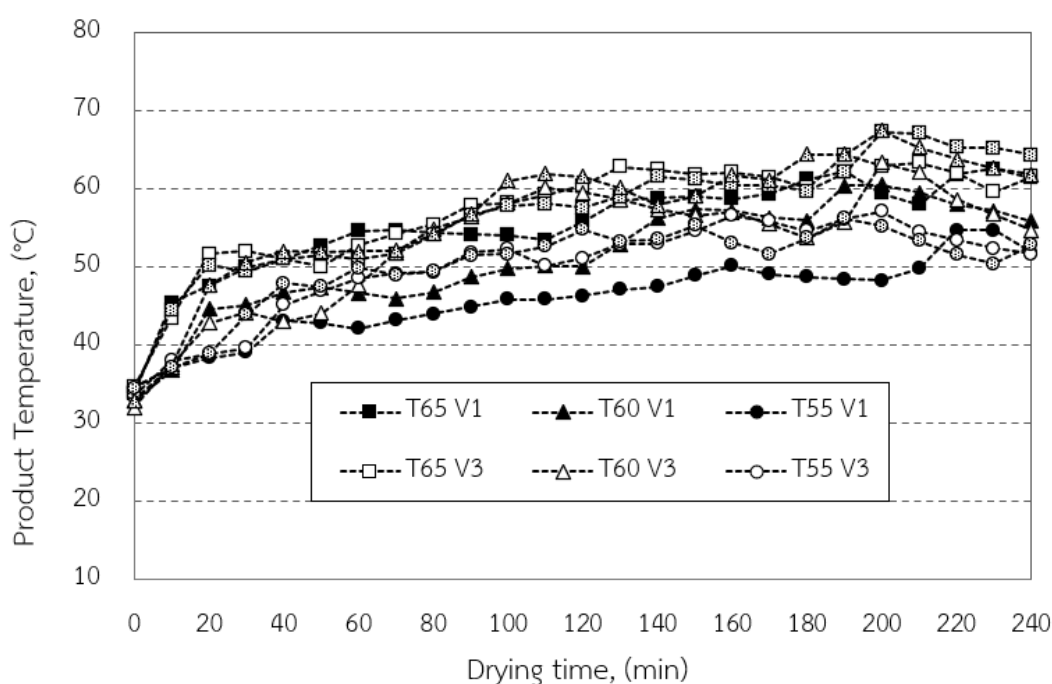
ผลการทดลองที่ได้นำเสนอประกอบด้วยอุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ ของการทดลองเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง อุณหภูมิผลิตภัณฑ์ ความชื้นมาตรฐานเปียก อัตราส่วนความชื้น อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ซึ่งได้ทำการแสดงรายละเอียดในภาพที่ 4 – 9



ภาพที่ 4 ผลของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ
เทียบกับเวลาในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

ภาพที่ 4 แสดงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของการทดสอบเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง ประกอบด้วย อุณหภูมิห้องอบแห้ง (Ti) อุณหภูมิผลิตภัณฑ์ (Tp) อุณหภูมิเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

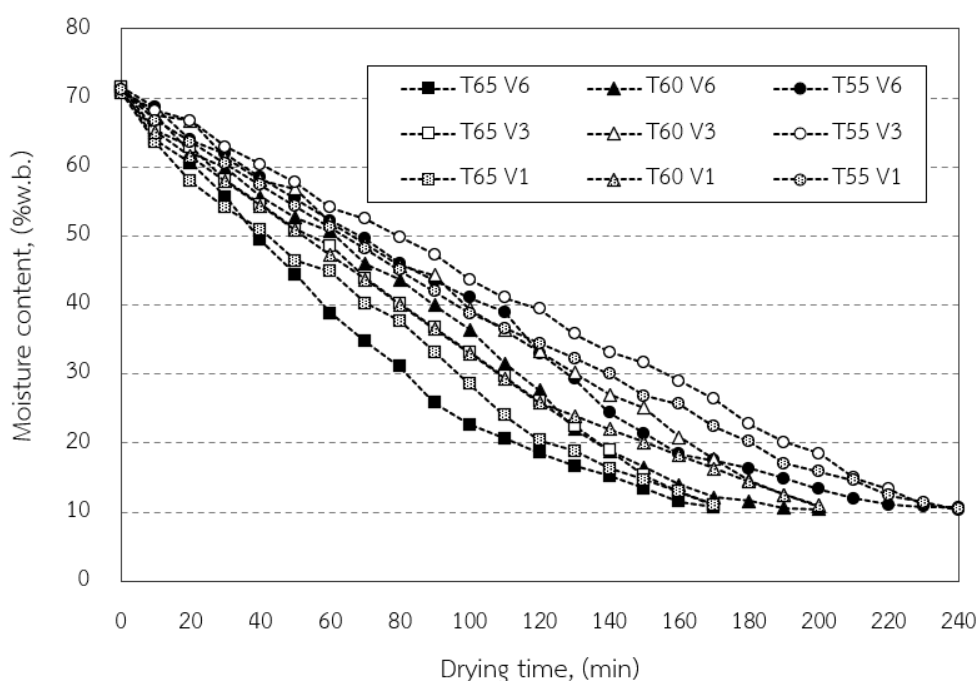
(T_h) อุณหภูมิห้องเผาไหม้ (T_b) และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_s) จากข้อมูลจะพบว่า อุณหภูมิห้องเผาไหม้เฉลี่ย 300°C และถ่ายเทความร้อนไปยังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำให้มีอุณหภูมิเฉลี่ย 80°C โดยที่อุณหภูมิที่ตำแหน่งห้องเผาไหม้จะมีค่าความร้อนที่สูงขึ้นและลดลง ซึ่งเกิดจากการเติมเชื้อเพลิงเข้าไปในห้องเผาไหม้ส่งผลทำให้เกิดการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอย่างรวดเร็วเป็นผลให้พลังงานความร้อนในช่วงของการเติมเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิในห้องเผาไหม้จึงเพิ่มขึ้น และเมื่อเวลาผ่านไปความร้อนจะค่อยๆ ลดลง และในทำนองเดียวกันเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อได้รับความร้อนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น และผลที่ตามมาคืออุณหภูมิภายในห้องอบแห้งเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน เป็นผลทำให้การเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงในเวลานั้นๆ นอกจากนี้ความเร็วลมที่เกิดขึ้นภายในห้องอบแห้งยังส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์
เทียบกับเวลาในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

ภาพที่ 5 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง จากข้อมูลพบว่า การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง ดังภาพที่ 4 มีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ภายในห้องอบแห้งอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากเมื่อเวลาผ่านไปความร้อนภายในห้องอบแห้งจะมีค่าที่เพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ ซึ่งเกิดจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้รับความร้อนโดยตรงจากห้องเผาไหม้จึงส่งผลให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีการสะสมความร้อนและ

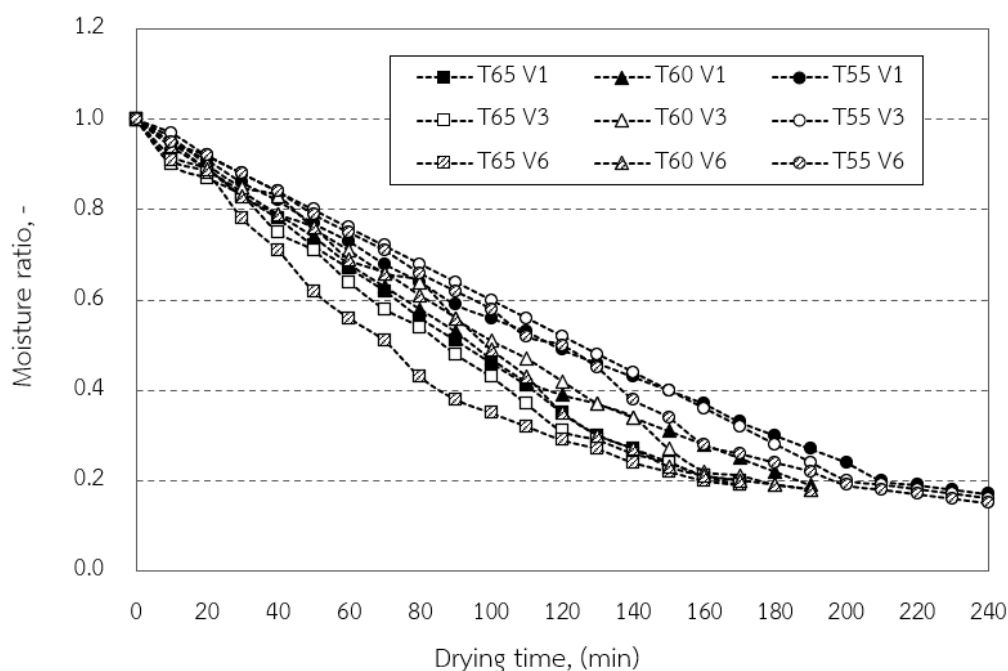
ถ่ายเทความร้อนออกด้านข้างเพื่อแลกเปลี่ยนกับอากาศที่อยู่ในบริเวณดังกล่าวเป็นผลทำให้มีค่าความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งประกอบกับการถ่ายเทความร้อนอยู่ในรูปแบบของการพาความร้อนโดยธรรมชาติ ส่งผลให้การไหลของอากาศร้อนเคลื่อนตัวอย่างช้าๆ และมีเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่สูง เป็นผลทำให้ผลิตภัณฑ์ได้รับความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นจึงส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในห้องอบแห้งเป็นอย่างมาก



ภาพที่ 6 การเปลี่ยนแปลงความชื้น
เทียบกับเวลาในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ของความชื้นเทียบกับเวลาในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง จากข้อมูลพบว่าความชื้นจะมีค่าลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โดยค่าความชื้นมีค่าอยู่ระหว่าง 10 – 75 % w.b. เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิในห้องอบแห้งเพิ่มมากขึ้นอัตราการอบแห้งจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นผลดังกล่าวจะทำให้ความชื้นที่อยู่ในผลผลิตภัณฑ์ลดลงมากด้วยเช่นกัน

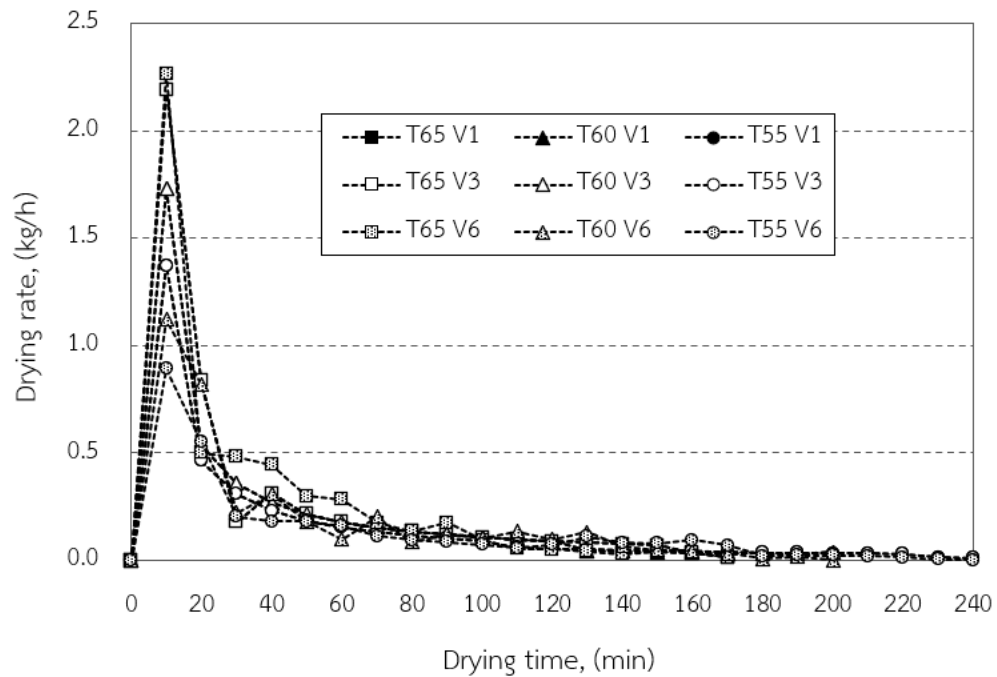
ภาพที่ 7 แสดงการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความชื้นเทียบกับเวลาในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง จากข้อมูลการทดลองพบว่า เมื่อพิจารณาอุณหภูมิอบแห้งเท่ากันแต่ความเร็วลมต่างกันจะทำให้อัตราการลดลงของความชื้นเฉลี่ย 3.94 % และในทางตรงกันข้ามเมื่อพิจารณาความเร็วลมเท่ากันแต่อุณหภูมิอบแห้งต่างกันจะทำให้อัตราการลดลงของความชื้นเฉลี่ย 5.0 % และการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความชื้นจะเริ่มคงที่เมื่อมีค่าเท่ากับ 0.2



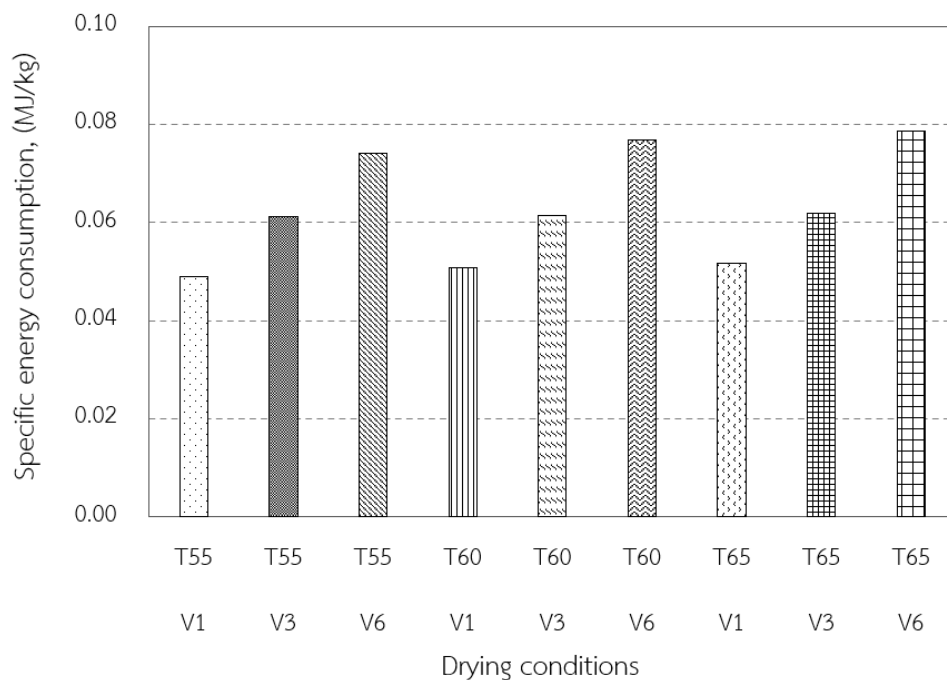
ภาพที่ 7 การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความชื้น
เทียบกับเวลาในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

ภาพที่ 8 แสดงการเปลี่ยนแปลงอัตราการอบแห้งเทียบกับเวลาในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง จากข้อมูลพบว่าเงื่อนไขการทดลองอุณหภูมิอบแห้ง 65°C ความเร็วลม 6 m/s จะมีอัตราการอบแห้งสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงความชื้นของผลิตภัณฑ์ นอกจากนั้นยังพบว่า ทุกเงื่อนไขการทดลองมีอัตราการอบแห้งสูงในช่วง 30 นาทีแรก โดยอุณหภูมิอบแห้ง 65°C ความเร็วลม 6 m/s มีค่าสูงสุด 0.8 kg/h เป็นต้น และหลังจากนั้นจะลดลง โดยมีแนวโน้มในลักษณะเดียวกันในทุกเงื่อนไขการทดลอง โดยปัจจัยที่ทำให้เกิดเช่นนี้ คือ เมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากผลต่างอุณหภูมิของอากาศร้อนและผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น เมื่อผลิตภัณฑ์รับความร้อนมากยิ่งขึ้นผลที่เกิดขึ้นตามมาคือการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ก็จะเพิ่มขึ้นตามเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น

ภาพที่ 9 แสดงอัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง จากข้อมูลเมื่อพิจารณาอุณหภูมิอบแห้งเท่ากันแต่ความเร็วลมต่างกันพบว่า ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้น 20% และเมื่อพิจารณาความเร็วลมเท่ากันแต่อุณหภูมิอบแห้งต่างกันพบว่า ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้น 2% แสดงให้เห็นว่าความเร็วลมมีผลต่อความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมากกว่าอุณหภูมิอบแห้ง



ภาพที่ 8 การเปลี่ยนแปลงอัตราการอบแห้ง
เทียบกับเวลาในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง



ภาพที่ 9 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

5 สรุปการวิจัย

ผลที่ได้จากการศึกษาการอบแห้งเห็ดด้วยเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่มี การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งภายในห้องอบแห้งเพื่อป้องกันการรั่วซึม และการ สัมผัสโดยตรงระหว่างเห็ดกับเปลวไฟ พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งหรือความเร็วลมส่งผลทำให้ อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถแสดงให้เห็นว่า เครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงสามารถผลิตเห็ดอบแห้งได้ในทุกช่วงเวลาของการทำงาน

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะกรรมการศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยา เขตสุรินทร์ ที่สนับสนุนทุนและอุปกรณ์ในการวิจัยในครั้งนี้

7.เอกสารอ้างอิง

- Bosomtwe, A., Danso, J.K., Osekre, E.A., Opit, G.P., Mbata, G., & Armstrong, P. (2019). Effectiveness of the solar biomass hybrid dryer for drying and disinfestation of maize. **Journal of Stored Products Research**, 83(9), 66-72. Doi: 10.1016/j.jspr.2019.05.011
- Dhanushkodia, S., Vincent, H., Wilsonb, & Sudhakarc, K. (2017). Mathematical modeling of drying behavior of cashew in a solar biomass hybrid dryer. **Resource-Efficient Technologies**, 3(4), 359-364. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.reffit.2016.12.002>
- Elieser, T. (2018). Mathematical modeling and simulation of a solar agricultural dryer with back-up biomass burner and thermal storage. **Case Studies in Thermal Engineering**, 12, 149-165. Doi: [10.1016/j.csite.2018.04.012](https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.04.012)
- Fabrice, A.N., & Yvette, J.N. (2017). Modeling and simulated design: A novel model and software of a solar-biomass hybrid dryer. **Computers & Chemical Engineering**, 104, 28–140. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.04.002>
- Gowtham, M., Amrit, O.N., Manoj, T., & Ram, K.G. (2012). Design and analysis of biomass drying unit with waste heat. **Procedia Engineering**, 38, 1161–1165.
- Hamdani, Rizal, T.A., & Zulfri, M. (2018). Fabrication and testing of hybrid solar-biomass dryer for drying fish. **Case Studies in Thermal Engineering**, 12, 489-496. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.06.008>

- Henrik, H., Johan, I., & Risto, L. (2014). Minimization of total drying costs for a continuous packed-bed biomass dryer operating at an integrated chemical pulp and paper mill. **Biomass and Energy**, 71, 431-442.
- Ida, B.A., Gede, B.S., & Made, M.I. (2020). Utilization of rice husk biomass in the conventional corn dryer based on the heat exchanger pipes diameter. **Case Studies in Thermal Engineering**, 22, 100764. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100764>
- Nawshad, H., & Michael, S. (2013). Techno-economic and environmental evaluation of biomass dryer. **Procedia Engineering**, 56, 650-655. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.173>
- Ndukwua, M.C., Diemuodeke, E.O., Abamc, F.I., Abada, U.C., Nnanna, E., & Simo, T.M. (2020). Development and modelling of heat and mass transfer analysis of a low-cost solar dryer integrated with biomass heater. **Application for West African Region Scientific African**. 10, 1-12. Doi: [10.1016/j.sciaf.2020.e00615](https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00615)
- Ndukwu, M.C., Simo, T.M., Abam, F.I., Onwuka, O.S., Prince, S., & Bennamoun, L. (2020). Exergetic sustainability and economic analysis of hybrid solar-biomass dryer integrated with copper tubing as heat exchanger. **Heliyon**, 6(2), 1-12. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03401>
- Pathipat, T., Pakamon, P., & Kajorndaj, P. (2017). Utilization of biomass energy in drying of glutinous rice crackers. **Energy Procedia**, 138, 331-336. Doi: [10.1016/j.egypro.2017.10.131](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.131)
- Rabha, D.K. (2021). Performance investigation of a passive-cum-active dryer with a biomass-fired heater integrated with a plate heat exchanger. **Renewable Energy**, 169, 598-607. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.126>
- Sonthawi, S., Phaochinnawat, C., Kitti, F., Pairoj, K., Anil, K., & Perapong, T. (2016). Computational fluid dynamic analysis of innovative design of solar biomass hybrid dryer: An experimental validation. **Renewable Energy**, 92, 185-191. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.095>
- Sumeet, A., Dipti, P.M., & Shailesh, K.S. (2020). CFD supported performance analysis of an innovative biomass dryer. **Renewable Energy**, 159, 860-872. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.039>



Yahya, M., Ahmad, F., & Kamaruzzaman, S. (2017). Energy and exergy analyses of solar-assisted fluidized bed drying integrated with biomass furnace. **Renewable Energy**, 105, 22-29. Doi: [10.1016/j.renene.2016.12.049](https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.049)