



การศึกษาสมรรถนะเครื่องอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยลมร้อน แบบไหลผ่านทางเดียว

WHITE NOODLE DRYING MACHINE PERFORMANCE STUDY WITH HOT AIR SINGLE FLOW

วินัย บุญมุณี^{1*}, อภินันต์ นามเขต¹, อำไพศักดิ์ ทีบุญมา¹, เอกภูมิ บุญธรรม²,
กฤษฎา อ้นอ้าย², ประพันธ์พงษ์ สมศิลา¹

Vinai Boonmunas^{1*}, Apinunt Namkhat¹, Umphisak Teeboonma¹, Eakapoom Buntham²,
Kritsada On-ai², Praphanpong Somsila¹

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี ประเทศไทย 34190

²คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

¹Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Warin Chamrap, Ubon Ratchathani, Thailand, 34190

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

*Corresponding author e-mail: vinai2169@gmail.com

วันที่รับระบบ 3 กันยายน 2565

วันที่แก้ไขบทความ 20 ธันวาคม 2565

วันที่ตอบรับบทความ 20 ธันวาคม 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ศึกษาสมรรถนะเครื่องอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยลมร้อนแบบไหลผ่านทางเดียวที่มีการแปรผันอุณหภูมิอบแห้งและความเร็วลมร้อนภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิการอบแห้ง 45, 50 และ 55 °C และความเร็วลมร้อน 1.0, 1.5 และ 2.0 m/s โดยใช้สัดส่วนความชื้น อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ได้รับการทดสอบในการประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง ผลการศึกษาพบว่า กรณีอุณหภูมิอบแห้ง 55 °C และความเร็วลมร้อน 2 m/s จะให้ค่าสัดส่วนความชื้นต่ำที่สุดเท่ากับ 0.162 โดยค่าความชื้นเส้นหมี่ขาวสุดท้ายเท่ากับ 15.83 %d.b. หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอบแห้งเฉลี่ย 10% จะทำให้สัดส่วนความชื้นลดลง 9.83% และการเพิ่มขึ้นของความเร็วลมร้อนเฉลี่ย 40% จะทำให้สัดส่วนความชื้นลดลง 6.76% อัตราการอบแห้งสูงสุดเท่ากับ 0.74 kg/h และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุดเท่ากับ 6.013 MJ/kg นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาจลพลศาสตร์เครื่องอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยลมร้อนแบบไหลผ่านทางเดียวเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองพบว่า สมการ Two term สามารถทำนายผลการอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยลมร้อนแบบไหลผ่านทางเดียวได้ดีที่สุด โดยให้ค่า R² เท่ากับ 0.999023944 ซึ่งเป็นค่าที่มากที่สุด และค่า RMSE เท่ากับ 0.008964633 ซึ่งเป็นค่าน้อยที่สุด โดยเมื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณตามรูปแบบของสมการ Two term มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง พบว่า ผลการเปรียบเทียบดังกล่าวมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี

คำสำคัญ: การอบแห้ง, เครื่องอบแห้งลมร้อน, เส้นหมี่ขาว

Abstract

The objective of this research was to study the performance of white noodle dryers with single-flow hot air with variations in drying temperature and hot air speed under drying temperature conditions of 45, 50 and 55 °C and wind speeds of 1.0, 1.5 and 2.0 m/s. The moisture ratio, drying rates and specific energy consumption were tested to evaluate the performance of the dryers. The study found that in the case of a drying temperature of 55 °C and a hot air speed of 2 m/s, the lowest moisture ratio was 0.162, with the final white noodle moisture value being 15.83 %d.b. In other words, an average drying temperature increase of 10% caused a 9.83% decrease in the moisture ratio, and an increase in the average hot air speed of 40% caused a 6.76% decrease in the moisture ratio. The maximum drying rate was 0.74 kg/h and the lowest specific energy consumption was 6.013 MJ/kg. In addition, a study of the kinetics of white noodle dryers with single-flow hot air was conducted compared with the results of the experiment. The two-term equation could best predict the effect of drying noodles with hot air, with R^2 equal to 0.999023944, which was the largest value, and RMSE of 0.008964633, which was the smallest value. When the calculated value according to the format of the two-term equation was compared with the results obtained from the experiment, the results of these comparisons were found to be very consistent.

Keywords: Drying, Hot air dryer, Noodle

1. บทนำ

“เส้นหมี่ขาว” นับเป็นอาหารอีกชนิดหนึ่งที่น่าสนใจประกอบอาหารในลักษณะแบบเดียวกันกับจำพวกก๋วยเตี๋ยวต่างๆ ที่พบได้ทั่วไปตามร้านอาหารทั่วประเทศและยังเป็นชนิดของอาหารที่ผู้บริโภคนิยมบริโภคครองลงมาจกข้าว เนื่องจากให้พลังงานที่ค่อนข้างสูงและมีราคาถูก ทั้งนี้เส้นหมี่ขาวยังสามารถนำไปปรุงเป็นอาหารอย่างอื่นได้อีกมากมาย เช่น ผัดหมี่ ผัดซีอิ้ว หมี่กะทิ ผัดหมี่ซั่ว และก๋วยเตี๋ยว เป็นต้น โดยเส้นหมี่ขาวสดจะมีลักษณะเส้นสีขาวเนื่องจากส่วนประกอบหลักจะเป็นแป้ง

และน้ำ ทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตได้ดีส่งผลให้เส้นหมี่ขาวสดเกิดการเน่าเสียได้เร็วและเก็บได้ไม่เกิน 3 วัน จึงจำเป็นต้องลดความชื้นผลิตภัณฑ์เส้นหมี่ขาวด้วยกระบวนการอบแห้งเพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และยืดเวลาในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้นานขึ้น การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งจึงถือเป็นแนวทางการแก้ปัญหานี้ได้เป็นอย่างดี สำหรับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งมีด้วยกัน ในหลายวิธีเช่น การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง การอบแห้งด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้า การอบแห้งด้วยสุญญากาศ และการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน เป็นต้น โดยเป็นที่ทราบกันดีว่ากระบวนการอบแห้งมีการใช้พลังงานค่อนข้างสูง (Huelsz & Rechtman, 2013) อย่างไรก็ตามก็ได้มีนักวิจัยทำการศึกษาและทดสอบเทคนิคการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานให้ได้ในระดับสูง สำหรับการศึกษาวิจัยการอบแห้งลมร้อนที่สามารถจำแนกได้ด้วยกัน 2 กลุ่มการศึกษาคือกลุ่มแรกทำการศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มสมรรถนะของเครื่องอบแห้งประกอบด้วย Jeevarathinam *et al.*, (2021) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการอบแห้งขมิ้นชันด้วยการใช้เทคนิคลมร้อนร่วมกับอินฟราเรด ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า ที่ความเร็วลมร้อน 2 m/s อุณหภูมิอบแห้ง 70 °C ในกรณีใช้ลมร้อนร่วมกับอินฟราเรดจะมีอัตราการอบแห้งสูงสุด รองลงมาคือ กรณีของการใช้อินฟราเรดอย่างเดียว และลมร้อนอย่างเดียว มีค่าอัตราการอบแห้งลดลงเท่ากับ 26.98% และ 35.21% ตามลำดับ Wang *et al.*, (2017) ทำการศึกษาระบบการอบแห้งเส้นหมี่ขาวแบบดั้งเดิมโดยใช้ลมร้อนในเครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ที่มีความยาว 60 m และมีการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ใหม่ที่มีความยาวเพิ่มมากขึ้นถึง 130 m ประกอบกับทำการแก้ไขระบบควบคุมอัตโนมัติของอุณหภูมิและความชื้น ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า เครื่องใหม่ใช้พลังงานน้อยกว่าเครื่องเก่าและยังมีสมรรถนะการอบแห้งสูงกว่า Basman & Yalcin, (2011) ทำการศึกษารอบแห้งเส้นบะหมี่ด้วยการเลือกใช้อินฟราเรด ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า ความสามารถในการอบแห้งสามารถลดเวลาการอบแห้งเหลือเท่ากับ 3 ชั่วโมง 30 นาที และสามารถลดเวลาการปรุงอาหารได้มากถึง 50% นอกจากนี้ยังพบอีกว่า การอบแห้งด้วยอินฟราเรดสามารถช่วยเพิ่มคุณสมบัติความเหนียวของเส้นบะหมี่ และแป้งของเส้นบะหมี่มีความสามารถในการทนต่อเอนไซม์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย Yu *et al.*, (2018) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการอบแห้งบะหมี่ในประเทศจีนด้วยเทคนิคการประยุกต์ใช้ Low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า การเลือกใช้เทคนิคดังกล่าวสามารถลดการหดตัว และการเกิดรอยแยกในผลิตภัณฑ์ และยังพบว่า น้ำภายในผลิตภัณฑ์จะลดลงค่อนข้างรวดเร็ว นอกจากนี้ยังพบอีกว่า สำหรับกระบวนการนำน้ำออกจากผลิตภัณฑ์จะเกิดขึ้นที่บริเวณขอบแล้วจะกระจายไปยังตำแหน่งกลางภายในเวลา 90 นาที และสามารถนำน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ทั้งหมดหลังจากเวลา 240 นาที Guo *et al.*, (2020) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งในการเพิ่มคุณสมบัติที่ดีให้กับเส้นบะหมี่ข้าวสาลีกึ่งแห้ง โดยผลจากการศึกษาพบว่า เมื่อเส้นบะหมี่ข้าวสาลีกึ่งแห้งได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยไอน้ำ



ร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 155 – 170 °C จะทำให้บะหมี่มีความเสถียรในการเก็บรักษา นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของจุลินทรีย์มีจำนวนที่ลดลงช่วยลดความเป็นกรด และยับยั้งการก่อตัวของกรดไขมันอิสระ Zeng *et al.*, (2022) ทำการศึกษาการอบแห้งซิงด้วยเทคนิคไมโครเวฟในที่นี้เลือกใช้สัญญาณเรโซแนนซ์แม่เหล็กที่ความถี่ต่ำ (LF-NMR) เพื่อทำการอบแห้งซิง ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่าการเลือกใช้เทคนิคไมโครเวฟจะสามารถทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่พบว่าการใช้ไมโครเวฟส่งผลต่อความเสียหายของโครงสร้างทางจุลภาคและลักษณะของสีของซิงอย่างเห็นได้ชัด Chen & Pan, (2022) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการอบแห้งวอลนัทด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนที่มีลักษณะแบบคอลัมน์ในแนวสูงที่มีวิเคราะหการถ่ายเทความร้อน สมรรถนะการอบแห้ง และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ภายใต้อุณหภูมิที่ทำการศึกษา (43, 55, 65 และ 75 °C) และความเร็วลมที่ 0.7 m/s ผลจากการศึกษาพบว่า ผลของการกระจายอุณหภูมิและความชื้น มีผลต่อความสามารถในการถ่ายโอนความร้อนและการลดความชื้นในวอลนัทอย่างมาก และยังพบอีกว่าระดับความชื้นในแต่ละความสูงของคอลัมน์มีปริมาณที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังพบอีกว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบคอลัมน์ที่ใช้สามารถอธิบายลักษณะของการอบแห้งได้เป็นอย่างดี และสำหรับงานวิจัยกลุ่มที่สองซึ่งทำการศึกษเกี่ยวกับการเพิ่มคุณสมบัติ และคุณภาพของเส้นก๋วยเตี๋ยวในส่วนของการเพิ่มสารสกัดต่างๆ ลงในเส้นบะหมี่ซึ่งประกอบด้วยสารสกัดจากชาเขียว ชาดำ และชาอู่หลง (Xu *et al.*, 2019) การเพิ่มซีฟี่นํ้ามันถั่วเหลืองแคนเดลิลา (Oleogel) ต่อการคืนความชุ่มชื้นของบะหมี่ที่อบแห้งด้วยลมร้อน (Oh & Lee, 2020) การเพิ่มรำข้าวสาลีที่มีต่อคุณสมบัติของเส้นหมี่ขาวจีนชนิดแห้ง (Song *et al.*, 2013) การศึกษาเกี่ยวกับผลของการเติมเกลือในปริมาณที่แตกต่างกันต่อลักษณะการอบแห้งของเส้นหมี่ขาว (Chen *et al.*, 2014) การศึกษาเกี่ยวกับการเลือกใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นวัตถุดิบหลักสำหรับการผลิตเส้นหมี่ขาวชาวจีนชนิดเค็ม และผลของทรานสกลูตามิเนสที่มีต่อเส้น (Weng *et al.*, 2020) และการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของเส้นหมี่ขาวที่ทำจากแป้งสาลีที่มีส่วนผสมของ Bambara protein ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน (Arise *et al.*, 2022) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาในลักษณะของการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของแป้งบัวทิพและคุณภาพของเส้นหมี่ขาวจากบัวทิพ (Liu *et al.*, 2022) การศึกษาเกี่ยวกับการใช้วิธีการของแมชชีนเลิร์นนิ่งในการทำนายคุณสมบัติของการยืดของเส้นหมี่ขาวที่ทำจากแป้งสาลี (Kwon *et al.*, 2022) และการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของแป้งดิบที่อยู่ภายในเตาอบจนถึงได้บิสกิตที่สามารถรับประทานได้ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ (Baldino *et al.*, 2014) จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การศึกษาสมรรถนะและจลนพลศาสตร์เครื่องอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยลมร้อนแบบไหลผ่านทางเดียวยังคงมีน้อย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมรรถนะเครื่องอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยลมร้อนแบบไหลผ่านทางเดียวที่มีการแปรผัน

อุณหภูมิอบแห้งและความเร็วลมร้อน และศึกษาจลพลศาสตร์เครื่องอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยลมร้อนแบบไหลผ่านทางเดียว

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาจลพลศาสตร์การอบแห้งเส้นหมี่ขาวและสมรรถนะเครื่องอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยลมร้อนแบบไหลผ่านทางเดียว

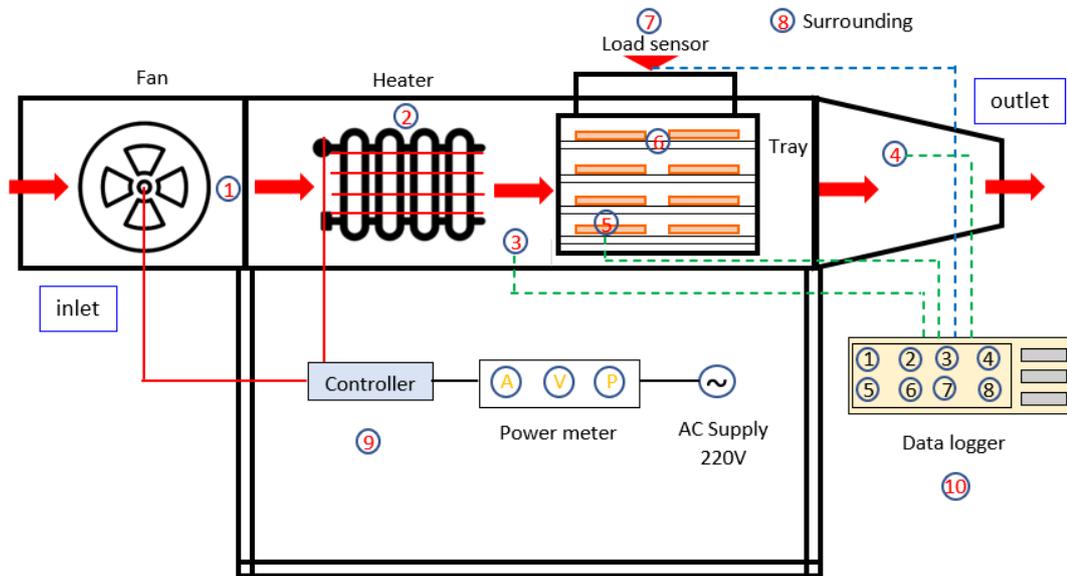
2.2 เพื่อศึกษาสมการอบแห้งชั้นบาง สำหรับการอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบไหลทางเดียว

3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 เครื่องอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยลมร้อนแบบไหลผ่านทางเดียว

ภาพที่ 1 แสดงลักษณะเครื่องอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยลมร้อนแบบไหลผ่านทางเดียว ประกอบด้วย ฮีตเตอร์ขนาด 4.3 kW สำหรับเป็นแหล่งพลังงานความร้อนในการอบแห้ง พัดลมขนาด 0.035 kW สำหรับสร้างการไหลของอากาศร้อนโดยวิธีการพาความร้อนและความชื้นออกจากห้องอบ ชั้นวางผลิตภัณฑ์ อุปกรณ์ชั่งน้ำหนัก และชุดควบคุมการทำงานประกอบด้วย เซนเซอร์ตรวจการรับรู้เพาเวอร์มิเตอร์ ชุดปรับความเร็วรอบพัดลม เบรกเกอร์ แมกเนติก และสัญญาณไฟแสดงสถานะการทำงาน

การทำงานของเครื่องอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยลมร้อนแบบไหลผ่านทางเดียว โดยเริ่มต้นจากอากาศที่ใช้ในการอบแห้งภายนอกจะถูกดูดเข้าไปยังเครื่องอบแห้งด้วยพัดลม ผ่านมายังฮีตเตอร์สำหรับเพิ่มอุณหภูมิอากาศดังกล่าว หลังจากนั้นอากาศร้อนก็จะไหลเข้าสู่ห้องอบแห้งเพื่อถ่ายเทความร้อนให้กับผลิตภัณฑ์ เมื่อผลิตภัณฑ์ได้รับความร้อนก็จะทำให้น้ำที่อยู่ภายในเนื้อผลิตภัณฑ์เส้นหมี่ขาวระเหยออกมาที่ผิวด้านนอกและความชื้นของน้ำที่ระเหยสามารถออกจากเครื่องอบแห้งซึ่งจะไหลออกจากห้องอบแห้งด้วยพัดลม จากที่กล่าวมาในข้างต้นคือกระบวนการทำงานเครื่องอบแห้งลมร้อนจะเป็นในลักษณะเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งความชื้นของผลิตภัณฑ์ได้ตามที่ต้องการ



ภาพที่ 1 ลักษณะการทำงานของเครื่องอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยลมร้อนแบบไหลผ่านทางเดียว และระบบควบคุม

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการทดลอง

ในการศึกษานี้ได้เลือกใช้เส้นหมี่ขาวสำหรับทดลอง ซึ่งมีค่าความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ $100 \pm 3\% \text{d.b.}$ โดยเป็นเส้นหมี่ขาวที่มีจำหน่ายในท้องตลาดที่มีการคัดเลือกยี่ห้อเพียงยี่ห้อเดียวสำหรับการทดลองในครั้งนี้ ประกอบกับมีการคัดเลือกวันเดือนปีที่ผลิตในช่วงเดียวกัน

3.2.2 เงื่อนไขการทดลอง

การศึกษานี้ได้ดำเนินการทดลองเพื่อศึกษาสมรรถนะเครื่องอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยลมร้อนแบบไหลผ่านทางเดียวนั้น ได้มีการควบคุมอุณหภูมิอบแห้ง 3 ระดับ ประกอบด้วย อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 45 , 50 และ 55 °C และความเร็วลมร้อนที่ผ่านห้องอบแห้งเท่ากับ 1.0 , 1.5 และ 2.0 m/s

3.2.3 ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองเริ่มต้นจากการเตรียมเส้นหมี่ขาวและชุดทดลองพร้อมทั้งติดตั้งเครื่องมือวัดแต่ละประเภทดังแสดงในภาพที่ 1 ได้แก่ อุปกรณ์วัดและบันทึกอุณหภูมิ ความเร็วลมร้อน และน้ำหนักผลิตภัณฑ์ ทำการวัดและบันทึกค่าทุก 5 นาที ตลอดระยะเวลาที่เริ่มทำการทดลองจนแล้วเสร็จ และทำการวัดความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับฮีตเตอร์ และพัลลวมของเครื่องอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยลมร้อนแบบไหลผ่านทางเดียว สำหรับการควบคุมอากาศที่ตำแหน่งทางเข้าเพื่อให้มีค่าใกล้เคียง



กันมากที่สุดคือ ดำเนินการทดลองในห้องขนาดใหญ่ที่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในห้องทดลองให้เท่ากันในทุกกรณีที่ได้ทำการทดลอง

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง ได้แก่ สัดส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) และสมการอบแห้งชั้นบาง ดังสมการต่อไปนี้

สัดส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์ คือ ดัชนีบ่งชี้ปริมาณความชื้นที่แต่ละช่วงเวลาต่อความชื้นเริ่มต้น ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการที่ (1)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \quad (1)$$

เมื่อ MR	คือ	สัดส่วนความชื้น, ไร่น้อย
M_{in}	คือ	ความชื้นเริ่มต้น, %d.b.
M_{eq}	คือ	ความชื้นสมดุล, %d.b.
M_t	คือ	ความชื้นที่แต่ละช่วงเวลา, %d.b.

สำหรับการคำนวณสัดส่วนความชื้นในงานวิจัยนี้เป็นการคำนวณค่าโดยประมาณ ซึ่งมีสมมุติฐาน คือ ค่าความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้น ดังนั้นสมการที่ (1) สามารถเขียนความสัมพันธ์ใหม่ได้ดังสมการที่ (2)

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

อัตราการอบแห้ง คือ ปัจจัยสำคัญที่แสดงถึงค่าสมรรถนะการอบแห้ง หรือความสามารถในการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ต่อช่วงเวลาอบแห้ง โดยสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการที่ (3)

$$DR = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (3)$$

เมื่อ DR	คือ	อัตราการอบแห้ง, kg/h
Δm	คือ	มวลผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลง, kg
Δt	คือ	เวลาที่เปลี่ยนแปลง, h



ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ คือ ค่าที่แสดงถึงปริมาณพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ที่อบแห้ง โดยมีความสัมพันธ์ในการวิเคราะห์ดังสมการที่ (4)

$$SEC = \frac{3.6E}{m_w} \quad (4)$$

เมื่อ SEC	คือ	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, MJ/kg evap-water
E	คือ	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง, kWh
m_w	คือ	ปริมาณน้ำระเหย, kg

สำหรับการวิเคราะห์สมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมของด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบไหลผ่านทางเดียว สามารถทำได้โดยการนำอัตราส่วนความชื้นที่เวลาใดๆ ที่ได้จากการทดลองในทั้ง 9 กรณีที่ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทำนาย ในงานวิจัยนี้เลือกใช้สมการอบแห้งที่อยู่ในรูปของสมการกึ่งทฤษฎี (Semi-theoretical model) โดยรูปแบบของสมการพื้นฐานที่ใช้ในการทำนายดังแสดงในตารางที่ 1 สำหรับการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสมการอบแห้งชั้นบางได้ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) ซึ่งมีดัชนีที่ใช้ในการบ่งชี้ความสามารถในการทำนายของสมการอบแห้งชั้นบางประกอบด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) โดยค่า RMSE สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่

5

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{prediction,i} - MR_{experiment,i})^2}{N} \right]^{1/2} \quad (5)$$

เมื่อ N	คือ	จำนวนข้อมูลทั้งหมด
---------	-----	--------------------



ตารางที่ 1 รูปแบบสมการอบแห้งชั้นบาง

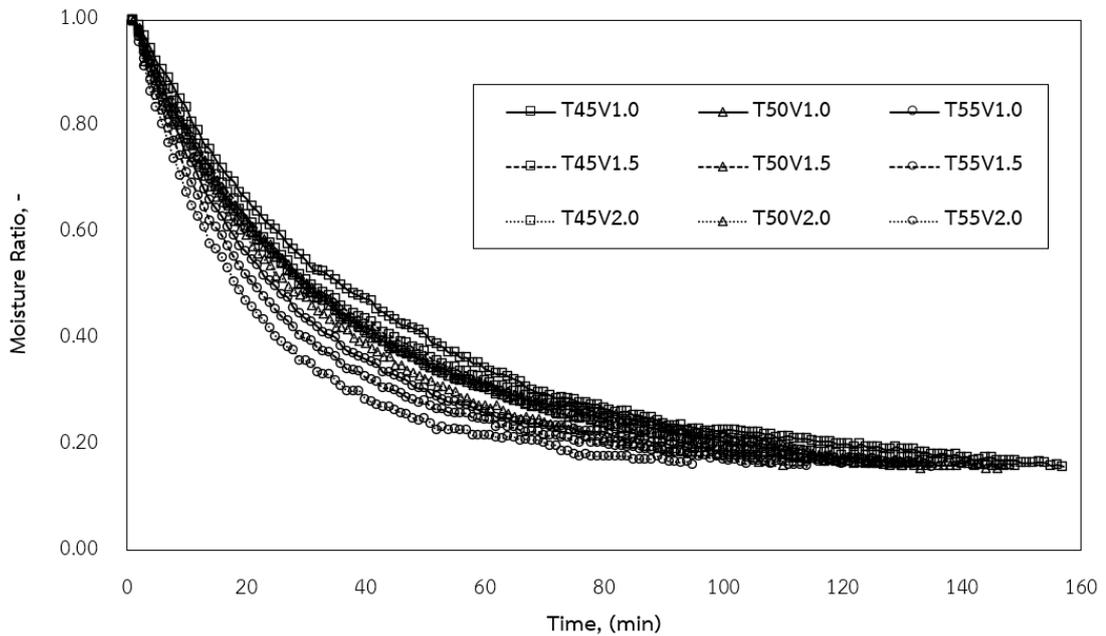
ชื่อสมการ	รูปแบบสมการ	อ้างอิง
Newton	$MR = \exp(-kt)$	(Westerman <i>et al.</i> , 1973)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	(Page, 1949)
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	(Yagcioglu <i>et al.</i> , 1999)
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	(Yaldiz & Ertekin, 2001)
Two term	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	(Rahman <i>et al.</i> , 1998)
Verma <i>et al.</i>	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$	(Verma <i>et al.</i> , 2008)
Midilli <i>et al.</i>	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	(Midilli <i>et al.</i> , 2002)

4. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

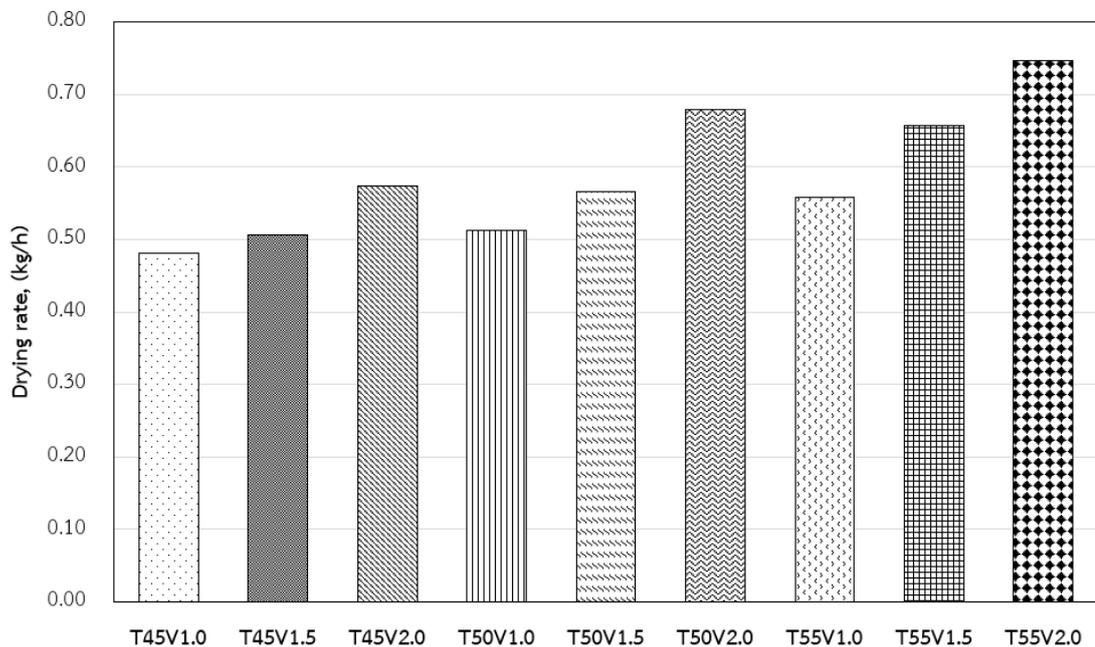
การทดลองอบแห้งเส้นหมี่ขาวโดยใช้เครื่องอบแห้งลมร้อนแบบไหลผ่านทางเดียว ซึ่งทดสอบภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้ง 45, 50 และ 55 °C และความเร็วลมเท่ากับ 1.0, 1.5 และ 2.0 m/s ตามลำดับ มีผลการศึกษาดังนี้

4.1 ผลของการทดลองการอบแห้งของผลิตภัณฑ์เส้นหมี่ขาว

ภาพที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความชื้นตามเวลาอบแห้งที่แต่ละเงื่อนไขการทดลอง จากการศึกษาคพบว่า สัดส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลงตามเวลา และเมื่อสิ้นสุดการทดลองจะพบว่า กรณีอุณหภูมิอบแห้ง 55 °C และความเร็วลมร้อน 2.0 m/s จะให้ค่าสัดส่วนความชื้นต่ำที่สุดเท่ากับ 0.162 โดยค่าความชื้นเส้นหมี่ขาวสุดท้ายเท่ากับ 15.83 %d.b. จากข้อมูลในกรณีอุณหภูมิอบแห้ง 55 °C และความเร็วลมร้อน 2.0 m/s มีความชื้นสุดท้ายต่ำสุดหรือกล่าวในอีกความหมายคือ กรณีดังกล่าวนี้มีความสามารถในการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์มากที่สุดภายในเงื่อนไขเวลาการอบแห้งเท่ากัน นอกจากนี้ยังพบอีกว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอบแห้งเฉลี่ย 10% จะทำให้สัดส่วนความชื้นลดลง 9.83% และการเพิ่มขึ้นของความเร็วลมร้อนเฉลี่ย 40% จะทำให้สัดส่วนความชื้นลดลง 6.76% แสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิอบแห้งมีผลต่อการลดลงของสัดส่วนความชื้นมากกว่าความเร็วลมร้อน เนื่องจากการถ่ายโอนความร้อนของกระบวนการอบแห้งเป็นแบบพาความร้อน กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มมากขึ้นจะให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอบแห้งและอุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น เมื่อผลิตภัณฑ์รับความร้อนเพิ่มมากขึ้นจึงส่งผลต่อการระเหยน้ำในผลิตภัณฑ์เพิ่มมากยิ่งขึ้นจึงส่งผลทำให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ส่วนความเร็วลมร้อนจะมีผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของลมร้อนไปยังผลิตภัณฑ์ในลักษณะของการพาความร้อนที่ทำให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิอบแห้งจะมีค่าน้อยกว่า



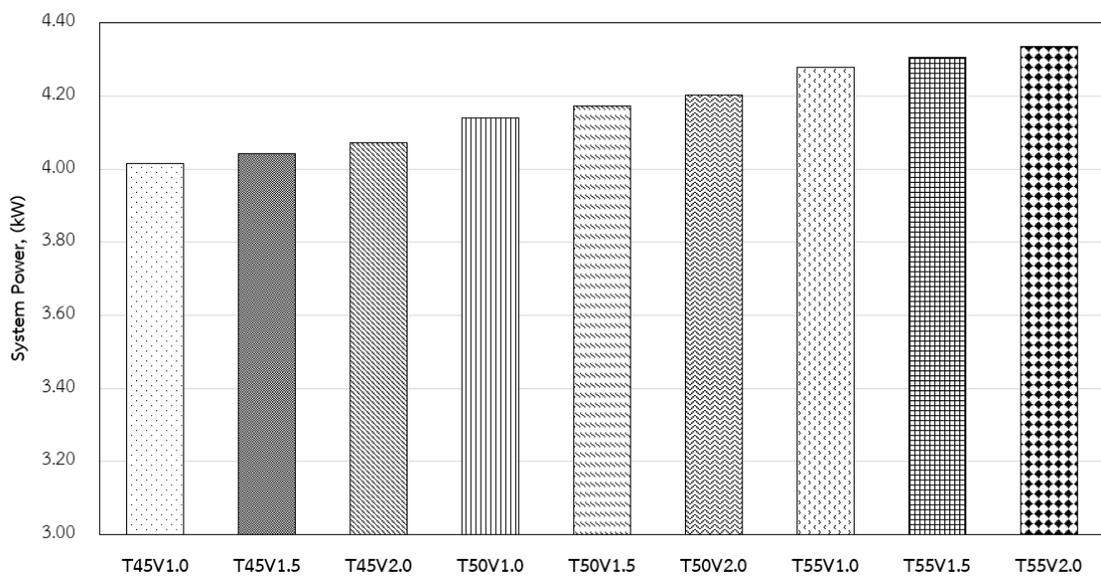
ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความชื้นตามเวลาอบแห้งที่แต่ละเงื่อนไขการทดลอง



ภาพที่ 3 อัตราการอบแห้งที่แต่ละเงื่อนไขการทดลอง

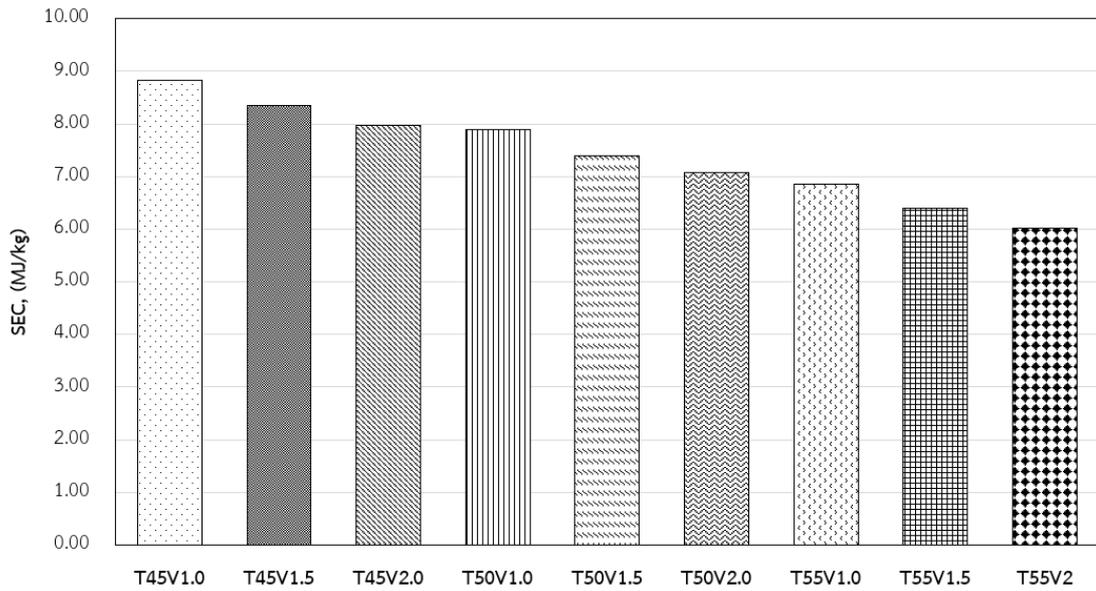
ภาพที่ 3 แสดงอัตราการอบแห้งที่แต่ละเงื่อนไขการทดลอง จากข้อมูลพบว่า อัตราการอบแห้งสูงสุดเท่ากับ 0.74 kg/h เกิดขึ้นในกรณีของอุณหภูมิอบแห้ง 55 °C และความเร็วลมร้อน 2.0 m/s และอัตราการอบแห้งต่ำที่สุดเท่ากับ 0.48 kg/h ซึ่งพบในกรณีของอุณหภูมิอบแห้ง 45 °C และ

ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s นอกจากนั้นยังพบว่าหากพิจารณาภายใต้เงื่อนไขความเร็วลมร้อนคงที่จะพบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอบแห้ง 10% จะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น 37.98% และในทำนองเดียวกันหากพิจารณาภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้งคงที่จะพบว่าการเพิ่มขึ้นของความเร็วลมร้อน 40% จะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น 37.85% จากข้อมูลดังกล่าวสามารถแสดงได้ว่าอุณหภูมิอบแห้งมีผลต่ออัตราการอบแห้งผลิตภัณฑ์มากกว่าความเร็วลมร้อน



ภาพที่ 4 กำลังไฟฟ้าเครื่องอบแห้งลมร้อนที่แต่ละเงื่อนไขการทดลอง

ภาพที่ 4 แสดงกำลังไฟฟ้าเครื่องอบแห้งลมร้อนที่แต่ละเงื่อนไขการทดลองจากข้อมูลดังกล่าวพบว่า กำลังไฟฟ้าเครื่องอบแห้งจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งและความเร็วลมร้อน โดยพิจารณาในแต่ละปัจจัยประกอบด้วยปัจจัยที่ 1 คือการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจะส่งผลทำให้กำลังไฟฟ้าของเครื่องอบแห้งเพิ่มมากขึ้น และปัจจัยที่ 2 คือการเพิ่มความเร็วลมร้อนจะส่งผลทำให้เพิ่มภาระทางความร้อนที่เกิดขึ้นภายในห้องอบแห้งเช่นเดียวกับการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง เป็นผลทำให้ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน จากข้อมูลข้างต้นจะพบว่า กรณีอุณหภูมิอบแห้ง 55 °C และความเร็วลมร้อน 2.0 m/s จะมีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงที่สุดเท่ากับ 4.335 kW



ภาพที่ 5 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

ภาพที่ 5 แสดงความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของแต่ละเงื่อนไขการทดลอง ผลจากการศึกษาพบว่า กรณีอุณหภูมิอบแห้ง 55°C และความเร็วลมร้อน 2.0 m/s จะมีปริมาณความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุดเท่ากับ 6.013 MJ/kg และกรณีอุณหภูมิอบแห้ง 45°C และความเร็วลมร้อน 1.0 m/s จะมีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงที่สุดเท่ากับ 8.833 MJ/kg ซึ่งข้อมูลดังกล่าวตรงกันข้ามกับข้อมูลปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้างแสดงในภาพที่ 4 เนื่องด้วยจากสมการความสัมพันธ์ของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะคืออัตราส่วนของปริมาณพลังงานที่ใช้สำหรับการระเหยน้ำต่อมวลของน้ำที่มีการระเหย ซึ่งหากพิจารณาปริมาณการเปลี่ยนแปลงของปริมาณทั้งสองส่วนตามสมการจะพบว่า งานวิจัยนี้กำหนดให้ค่าขึ้นสุดท้ายเท่ากัน ดังนั้นน้ำที่ระเหยออกในทุกกรณีจะเท่ากันสิ่งที่แตกต่างกันคือ พลังงานที่ใช้ไม่เท่ากันเนื่องจากการใช้เวลาที่ต่างกัน นั่นคือหากอุณหภูมิอบแห้งและความเร็วลมร้อนสูง จะส่งผลทำให้ปริมาณมวลน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์มาก จากความสัมพันธ์ดังกล่าวกรณีอุณหภูมิอบแห้ง 55°C และความเร็วลมร้อน 2.0 m/s จะส่งผลทำให้ปริมาณมวลน้ำระเหยออกจากผลิตภัณฑ์มากที่สุด จะเป็นผลทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุด



4.2 ผลการวิเคราะห์สมการอบแห้งชั้นบาง

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์หาสมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับการทำนาย จลนพลศาสตร์การอบแห้งเส้นหมี่ขาว โดยการนำค่าสัดส่วนความชื้นที่ได้ทำการทดลองทั้ง 9 กรณีที่ ศึกษาเปรียบเทียบกับผลการทำนาย ในการนี้เลือกใช้สมการอบแห้งชั้นบางพื้นฐาน เพื่อหา ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสมการอบแห้งชั้นบางดังแสดงในตารางที่ 1 สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการ พิจารณาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้ง และความเร็วของลมร้อน จึงได้กำหนดค่าคงที่ a, b, c, g, k, k_0, k_1 และ n ในสมการพื้นฐานเดิมให้เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิอบแห้ง และความเร็วของลมร้อน โดย สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 6

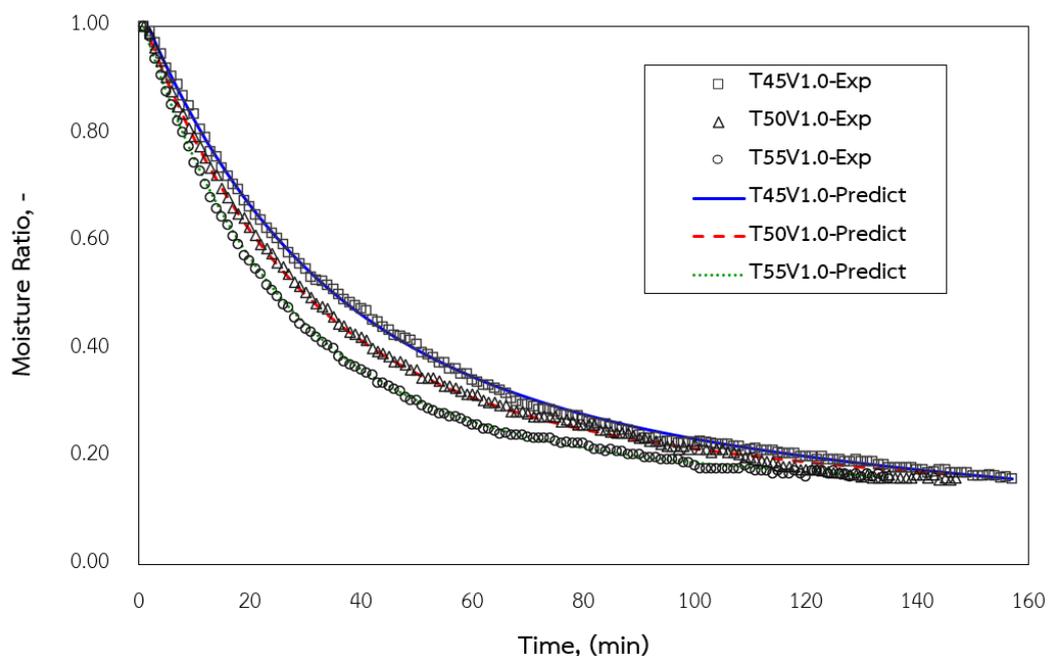
$$K = x_0 + x_1T + x_2V + x_3TV \quad (6)$$

เมื่อ K	คือ	a, b, c, g, k, k_0, k_1 และ n
T	คือ	อุณหภูมิอบแห้ง, °C
V	คือ	ความเร็วลมร้อน, m/s
x_i	คือ	ค่าคงที่ของสมการที่ (6)

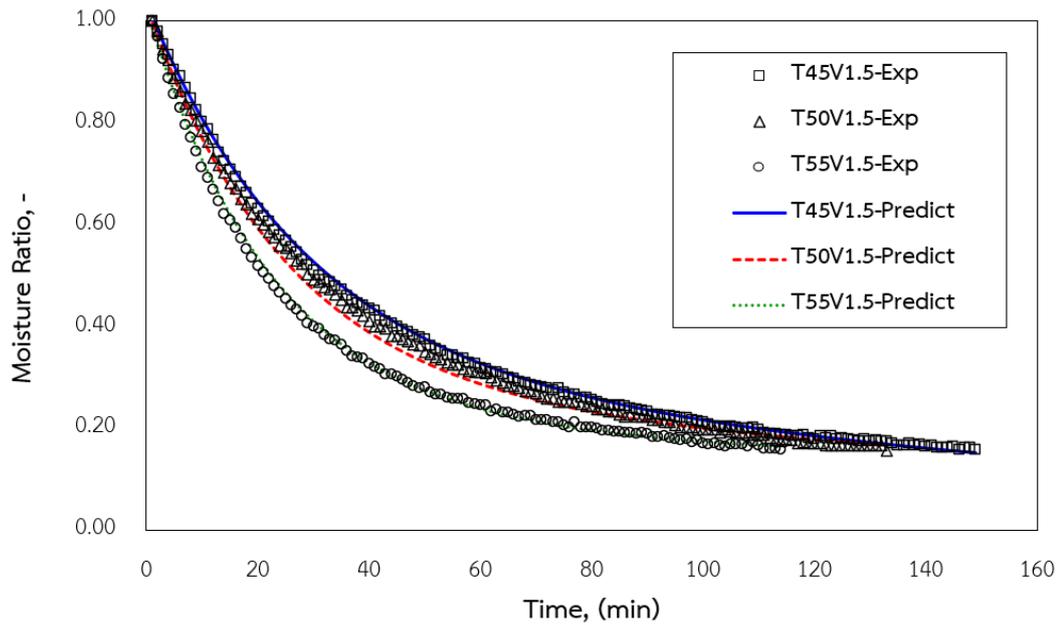
ตารางที่ 2 แสดงค่าคงที่ของสมการอบแห้งชั้นบาง ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่า รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ของการวิเคราะห์สมการทั้ง 7 สมการ ผล การศึกษาพบว่า สมการ Two term สามารถทำนายผลการอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยลมร้อนได้ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.999023944 ซึ่งเป็นค่าที่มากที่สุด และค่า RMSE เท่ากับ 0.008964633 ซึ่งเป็นค่าที่น้อยที่สุด และเมื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณตามรูปแบบของสมการ Two term มา เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง พบว่า ผลการเปรียบเทียบดังกล่าวมีความสอดคล้องกันเป็น อย่างดี ดังข้อมูลนำเสนอในภาพที่ 6 – 8

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ของสมการอบแห้งชั้นบาง

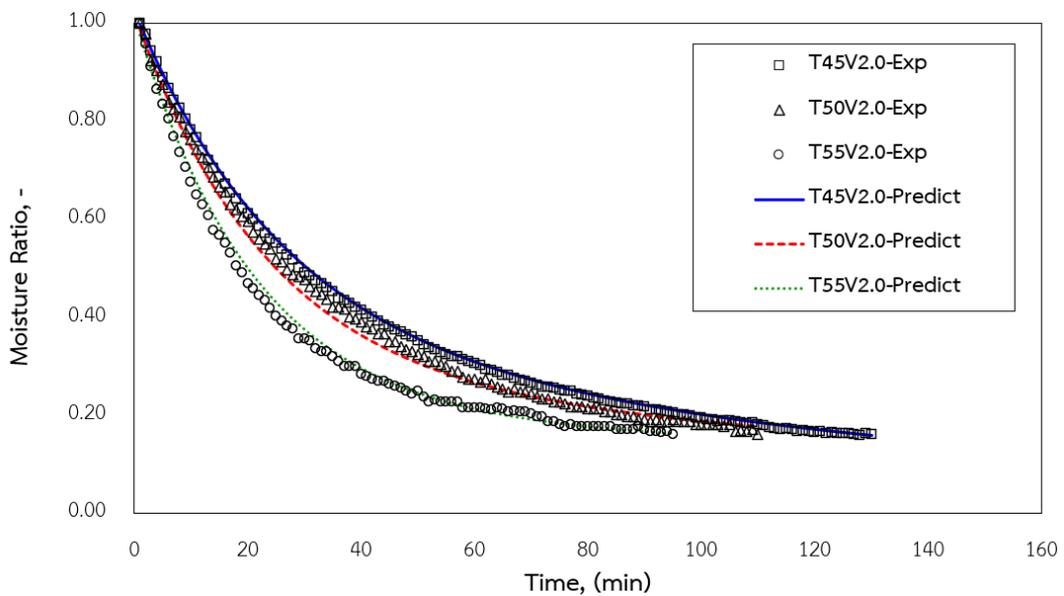
ชื่อสมการ	พารามิเตอร์	X_0	X_1	X_2	X_3	R^2	RMSE
Newton	k	0.004568	0.000194	-0.007297	0.000211	0.934698600	0.072136327
Page	k	-0.055435	0.002092	-0.021247	0.000774	0.985491829	0.035391663
	n	1.050091	-0.006790	-0.045278	0.000348		
Henderson and Pabis	a	1.161851	-0.005547	0.121449	-0.003153	0.958811799	0.057645962
	k	0.006177	0.000130	0.001067	0.000010		
Logarithmic	a	0.946590	-0.001734	0.013439	-0.000363	0.997772756	0.013537642
	k	-0.001678	0.000539	-0.013315	0.000352		
	c	0.162310	0.000136	-0.016586	0.000043		
Two term	a	0.480917	0.004968	-0.275554	0.005713	0.999023944	0.008964633
	k_0	0.003815	0.000573	-0.002088	0.000146		
	b	0.646604	-0.006486	0.249395	-0.005503		
	k_1	0.004925	-0.000018	0.011130	-0.000221		
Verma et al.	a	11.64609	-0.195462	-29.9632	0.543826	0.935547381	0.071681702
	k	0.007343	0.000143	-0.011913	0.000305		
	g	0.012091	0.000037	-0.012498	0.000319		
Midilli et al.	a	1.174544	-0.000933	0.073703	-0.001724	0.998283689	0.012059546
	k	-0.007699	0.001269	0.016340	-0.000116		
	n	0.798370	-0.000911	-0.122449	0.002281		
	b	-0.000262	0.000017	-0.000428	0.000008		



ภาพที่ 6 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของสัดส่วนความชื้นกับเวลาระหว่างผลการทดลองและผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Two term ที่ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s



ภาพที่ 7 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของสัดส่วนความชื้นกับเวลาระหว่างผลการทดลองและผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Two term ที่ความเร็วลมร้อน 1.5 m/s



ภาพที่ 8 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของสัดส่วนความชื้นกับเวลาระหว่างผลการทดลองและผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Two term ที่ความเร็วลมร้อน 2.0 m/s

5. สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งเส้นหมี่ขาวและสมรรถนะเครื่องอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยลมร้อนแบบไหลผ่านทางเดียว และศึกษาสมการอบแห้งชั้นบาง สำหรับการอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบไหลทางเดียว ซึ่งในการศึกษานี้ได้เลือกใช้เส้นหมี่ขาวเป็นตัวอย่างในการทดลอง ผลจากการศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอบแห้งและความเร็วลมจะมีผลทำให้ความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลงและอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกันความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า สมการ Two term สามารถทำนายผลการอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยลมร้อนได้ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.999023944 ซึ่งเป็นค่าที่มากที่สุด และค่า RMSE เท่ากับ 0.008964633 ซึ่งเป็นค่าน้อยที่สุด โดยเมื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณตามรูปแบบของสมการ Two term มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง พบว่า ผลการเปรียบเทียบดังกล่าวมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่สนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- Arise, A.K., Oriade, K.F., Asogwa, T.N., & Nwachukwu, I. (2022). Amino acid profile, physicochemical and sensory properties of noodles produced from wheat-Bambara protein isolate. **Measurement: Food**, 5, 100020. <https://doi.org/10.1016/j.meaf.2021.100020>
- Baldino, N., Gabriele, D., Lupi, F.R., Cindio, B.D., & Cicerelli, L. (2014). Modeling of baking behavior of semi-sweet short dough biscuits. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, 25, 40–52.
- Basman, A., & Yalcin, S. (2011). Quick boiling noodle production by using infrared drying. **Journal of Food Engineering**, 106, 245–252.
- Chen, C., & Pan, Z. (2021). Heat and moisture transfer studies on walnuts during hot air drying in a fixed-bed column dryer. **Applied Thermal Engineering**, 199, 117554. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117554>

- Chen, J.Y., Zhang, H., & Miao, Y. (2014). The Effect of Quantity of Salt on the Drying Characteristics of Fresh Noodles. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, 2, 207–211.
- Guo, X.N., Wu, S.H., & Zhu, K.X. (2020). Effect of superheated steam treatment on quality characteristics of whole wheat flour and storage stability of semi-dried whole wheat noodle. **Food Chemistry**, 322, 126738. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126738>
- Huelsz, G., & Rechtman, R. (2013). Heat transfer due to natural convection in an inclined square cavity using the lattice Boltzmann equation method. **International Journal of Thermal Sciences**, 65, 111-119.
- Jeevarathinam, G., Pandiselvam, R., Pandiarajan, T., Preetha, P., Balakrishnan, M., Thirupathi, V., & Kothakota, A. (2021). Infrared assisted hot air dryer for turmeric slices: Effect on drying rate and quality parameters. **LWT - Food Science and Technology**, 144, 111258. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111258>
- Kwon, H., Yang, G., Jeong, S., Roh, J., & Lee, S. (2022). Establishment of machine learning hyperparameters for predicting the extensional properties of noodles from the thermo-mechanical properties of wheat flour. **Journal of Food Engineering**, 321, 110940. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.110940>
- Liu, D., Song, S., Tao, L., Yu, L., & Wang, J. (2022). Effects of common buckwheat bran on wheat dough properties and noodle quality compared with common buckwheat hull. **LWT - Food Science and Technology**, 155, 112971. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112971>
- Oh, I., & Lee, S. (2020). Rheological, microstructural, and tomographical studies on the rehydration improvement of hot air-dried noodles with oleogel. **Journal of Food Engineering**, 268, 109750. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109750>
- Song, X., Zhu, W., Pei, Y., Ai, Z., & Chen, J. (2013). Effects of wheat bran with different colors on the qualities of dry noodles. **Journal of Cereal Science**, 58, 400-407.
- Wang, Z., Zhang, Y., Zhang, B., Yang, F., Yu, X., Zhao, B., & Wei, Y. (2017). Analysis on energy consumption of drying process for dried Chinese noodles. **Applied Thermal Engineering**, 110, 941–948.



- Weng, Z. J., Wang, B. J., & Weng, Y. M. (2022). Preparation of white salted noodles using rice flour as the principal ingredient and the effects of transglutaminase on noodle qualities. **Food Bioscience**, 33, 100501. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2019.100501>
- Xu, M., Wud, Y., Hou, G. G., & Du, X. (2019). Evaluation of different tea extracts on dough, textural, and functional properties of dry Chinese white salted noodle. **LWT - Food Science and Technology**, 101, 456–462.
- Yu, X., Wang, Z., Zhang, Y., Wadood, S. A., & Wei, Y. (2018) Study on the water state and distribution of Chinese dried noodles during the drying process. **Journal of Food Engineering**, 233, 81-87.
- Zeng, S., Wang, B., Lv, W., Wang, L., & Liao, X. (2022). Dynamic analysis of moisture, dielectric property and microstructure of ginger slices during microwave hot-air flow rolling drying. **Food Control**, 134, 108717. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108717>