

การจำลองการอบแห้งลำไยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งร่วมกับลมร้อน

Simulation of Longan Dried by Two-Stage Superheated Steam and Hot Air Dryer

ยุวนารี นามสงวน* ธนัญญ์ศ สมใจ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่ 50200

โทร 0-66053-944146 โทรสาร 0-66053-944145 *อีเมลล์ yuvanaree@yahoo.com

Yuvanaree Namsanguan^{*}, Thanutyot Somjai

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai, 50200,
Thailand, Tel: 0-66053-944146, Fax: 0-66053-944145, *E-mail: yuvanaree@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความเสนอการจำลองการอบแห้งลำไยแบบคว้านเมล็ดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งตามด้วยลมร้อน เพื่อทำนายสภาพการอบแห้งและตรวจ

สอบความถูกต้องโดยเปรียบเทียบกับผลการทดลอง โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะประกอบด้วย แบบจำลองการอบแห้งลำไยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในช่วงแรก และตามด้วยแบบจำลองการอบแห้งด้วยลมร้อน การจำลองสภาวะการอบแห้งนั้นจะประกอบด้วย การจำลองการอบแห้งและการจำลองความเปลี่ยนแปลงพลังงาน โดยแบบจำลองทั้งหมดใช้วิธีแก้สมการแบบแทนค่าต่อเนื่อง เงื่อนไขของสภาวะการอบแห้งที่ทำการจำลองคือ ใช้ช่วงอุณหภูมิอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 120-180 °C และช่วงอุณหภูมิอบแห้งด้วยลมร้อนที่ 60-70 °C ความเร็วคงที่และความชื้นของลำไยหลังอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งคงที่ จากการวิเคราะห์ผลที่ได้จากแบบจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดลองอบแห้งลำไย พบว่าผลที่ได้สอดคล้องกัน แบบจำลองที่ได้พัฒนาสามารถทำนายการลดลงของความชื้นของลำไย อุณหภูมิของตัวกลางที่ไหลผ่านชั้นลำไย และสมรรถนะการอบแห้งในเทอมของเวลาการอบแห้ง อัตราการอบแห้งและค่าความเปลี่ยนแปลงพลังงานได้ดี

Abstract

This paper presents the simulation of longan without stone drying using two-stage superheated steam and hot air dryers. The objectives are to develop a model to simulate the drying characteristics and performance and to verified by comparing with experimental results. The model comprises two sub-models, i.e., a first-stage superheated steam drying model and then a second-

stage hot air drying model. Each sub-model mainly consists of each drying model and energy consumption model. All models uses successive substitution method to solve the equations. The experimental and simulated drying temperatures used were in the range of 120-180 °C in the first-stage superheated steam and in the range of 60-70 °C in the second-stage hot air drying. The moisture content of longan at the end of superheated steam drying stage is fixed. It is found that the simulated results are relatively close to the experimental results; the model is found to predict the moisture content of longan, the drying medium temperatures throughout the dryer, and the drying performance in terms of drying time, drying rate and specific energy consumption relatively well.

1. บทนำ

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งวัสดุนั้นมีประโยชน์ในการศึกษาวิจัยการอบแห้ง โดยสามารถทำนายสภาพการอบแห้งโดยการจำลองสภาวะการอบแห้งตามเงื่อนไขต่างๆ แบบจำลอง

การอบแห้งได้ถูกพัฒนาขึ้นในหลายรูปแบบโดยนักวิจัยหลายท่าน โดยเฉพาะการอบแห้งลำไย เช่น Achariyaviriya et al.[1] ได้ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งด้วยลมร้อน ซึ่งเป็นวิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิม โดยจำลองสภาพการอบแห้งลำไยทั้งลูกและเฉพาะเนื้อลำไยด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบใกล้เคียงผล พบว่าผลของการจำลองสภาพการอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการทดลอง วิธีการอบแห้งแบบใหม่ได้ถูกพัฒนาขึ้น เช่น การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อน

ยวดยิ่ง Namsanguan et al. [2] ทำการศึกษาเปรียบเทียบการจำลองสภาพกับการทดลองอบแห้งกุ้งด้วยเครื่องอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งแบบตู้ ซึ่งใช้น้ำจากวัสดุเป็นตัวกลางในการอบแห้งพบว่า การจำลองสภาพการอบแห้งด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำนายการลดลงของความชื้นของกุ้ง อุณหภูมิของตัวกลางที่ออกจากห้องอบแห้ง และค่าสมรรถนะการอบแห้งต่างๆ ได้ดี

ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งลำไยแบบความเมลิตด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งร่วมกับลมร้อน โดยพัฒนาแบบจำลองให้สามารถทำนายการลดลงของความชื้น อุณหภูมิของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งที่ออกจากห้องอบแห้งและสมรรถนะการอบแห้ง โดยในส่วนของแบบจำลองจะแบ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง และแบบจำลองการอบแห้งด้วยลมร้อน

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

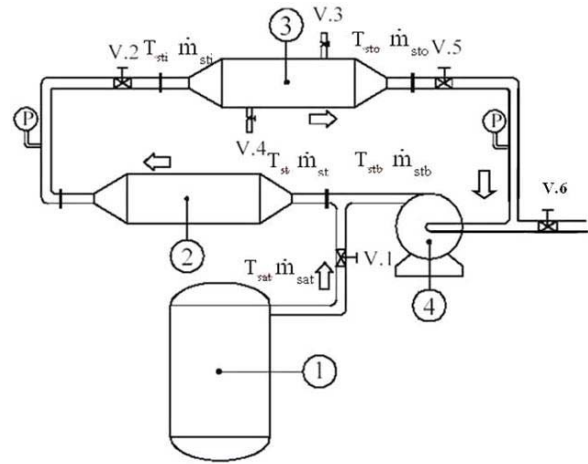
ในส่วนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งลำไยแบบความเมลิตออกนี้จะทำการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งประกอบด้วย เครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งโดยทำการพิจารณาระบบอันประกอบด้วย อุปกรณ์

ให้ความร้อนขนาด 15 kW พัดลมขนาด 3.3 kW สร้างความเร็วคงที่ 2.8 m/s ห้องอบแห้งขนาด 0.3x0.3x0.1 m³ และเครื่องอบแห้งด้วยลมร้อน โดยพิจารณาทั้งระบบอันประกอบด้วยอุปกรณ์ให้ความร้อนขนาด 4 kW พัดลมขนาด 2.36 kW สร้างความเร็วคงที่ 0.7 m/s และห้องอบแห้งรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.16 m และความยาว 0.2 m โดยระบบทั้งสองมีการหุ้มฉนวนด้วยใยแก้ว การจำลองสภาวะการอบแห้งเพื่อหาความชื้นของลำไย อุณหภูมิของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งที่ไหลออกจากห้องอบ อัตราการอบแห้ง และการสิ้นเปลืองพลังงาน โดยแบบจำลองจะแยกเป็น 2 ส่วนคือ

2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของห้องอบแห้ง มีสมมติฐาน ดังนี้

1. ความดันไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ใช้ในการอบแห้งที่ค่าคงที่
2. วัสดุที่ใช้ออบแห้งมีอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง
3. ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นก๊าซอุดมคติ
4. สภาวะของไอน้ำร้อนยวดยิ่งเปลี่ยนแปลงตามแนวการไหล ไม่เปลี่ยนแปลงตามแนวตั้งฉากของแนวการไหล
5. ระบบมีการหุ้มฉนวนอย่างดี



รูปที่ 1 ระบบอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

- (1) เครื่องกำเนิดไอน้ำ (2) อุปกรณ์ให้ความร้อน (3) ห้องอบแห้ง (4) พัดลม (V) วาล์ว (P) มาตรวัดความดัน

จากรูปที่ 1 แสดงระบบอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นการนำไอน้ำจากเครื่องกำเนิดไอน้ำเข้าสู่ระบบผ่านวาล์วตัวที่ 1 (V.1) เดินพัดลมเพื่อใช้ในการหมุนเวียนไอน้ำร้อนยวดยิ่งในระบบ และทำการเพิ่มอุณหภูมิของไอน้ำให้เป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่งโดยผ่านอุปกรณ์ให้ความร้อน จากนั้นความร้อนจะถ่ายเทจากไอน้ำร้อนยวดยิ่งไปสู่วัสดุเพื่อใช้ในการระเหยน้ำออกจากวัสดุ จนกว่าความชื้นเฉลี่ยของวัสดุมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความชื้นที่ต้องการ ในกรณีที่ระบบมีความดันเพิ่มสูงขึ้นจะทำการปล่อยไอน้ำร้อนยวดยิ่งบางส่วนออกนอกระบบจากวาล์วตัวที่ 6 (V.6) เพื่อรักษาความดันภายในระบบ (ในส่วนของแบบจำลองไม่พิจารณาเครื่องกำเนิดไอน้ำ ดูคำอธิบายในหัวข้อ 2.1 ในส่วนแบบจำลองความสิ้นเปลืองพลังงาน)

ในส่วนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งลำไยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง แบ่งเป็นแบบจำลองย่อย คือ แบบจำลองห้องอบแห้ง และ แบบจำลองความสิ้นเปลืองพลังงาน ซึ่งได้แสดงรายละเอียดดังนี้

ในการพิจารณาส่วนของแบบจำลองห้องอบแห้งจะหาสมดุลมวล และสมดุลพลังงาน โดยสมดุลมวลที่ห้องอบแห้ง จะได้ว่ามวลของไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่เพิ่มขึ้นเท่ากับมวลของน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\dot{m}_{sto} = \dot{m}_{sti} + \Delta \dot{m} \quad (1)$$

$$\Delta \dot{m} = m_p (M_t - M_{(t+\Delta t)}) / \Delta t \quad (2)$$

หาสมดุลพลังงานดังสมการ (3) โดยพิจารณา ผลรวมของการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของไอน้ำมีค่าเป็นศูนย์

$$\dot{m}_{sti} C_{ps} T_{sti} = \dot{m}_{sto} C_{ps} T_{sto} + \Delta \dot{m} h_{fg} \quad (3)$$

การคำนวณความชื้นเฉลี่ยของลำไยอบแห้งที่เวลาใด ๆ หากจากการจลนศาสตร์ของการอบแห้งสำหรับวัสดุทรงกลมกลวง โดยทำการ

หาอนุพันธ์เทียบกับเวลา และใช้วิธี Finite Difference ได้ความชันเฉลี่ยของลำไยทั้งเบตหลังการอบแห้งที่เวลาใดๆ สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$M_{t+\Delta t} = M_t + (M_{in}) \left(\frac{6}{(r_{x1}^2 + r_{x1} r_{x2} + r_{x2}^2)} \right) \left(\frac{-D_{eff}}{(r_{x2} - r_{x1})^2} \right) \left(\sum_{n=1}^{\infty} (r_{x2} \cos n\pi - r_{x1})^2 \exp \left(\frac{-D_{eff} n^2 \pi^2 t}{(r_{x2} - r_{x1})^2} \right) \right) \quad (4)$$

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (D_{eff}) ของลำไยแบบคว้านเมล็ดออกที่ทำารอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นสมการที่พัฒนาขึ้นจากสมการ Arrhenius เป็นแบบจำลองโพลีโนเมียลกำลังสองที่สัมพันธ์กับความชื้นของวัสดุ โดยผู้วิจัยได้ทำการทดลองอบแห้งลำไยแบบคว้านเมล็ดออกด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง แล้วนำผลการทดลองมาสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นกับอุณหภูมิอบแห้ง โดยความชื้นของลำไยที่ใช้อยู่ในช่วง 350-200% d.b. ได้ความสัมพันธ์ดังสมการ (5)

$$\text{ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง} : D_{eff} = 0.008367819 \exp \left(\frac{-26925.77744}{RT_{obs}} \right) \quad (5)$$

แบบจำลองความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงาน

เนื่องจากเครื่องอบแห้งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นแหล่งให้พลังงานแก่พัดลม และพลังงานความร้อนจากอุปกรณ์ให้ความร้อน ส่วนเครื่องกำเนิดไอน้ำเป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานค่อนข้างสูงและมีหน้าที่ในการต้มน้ำและจ่ายไอน้ำร้อนให้แก่ระบบอบแห้งเฉพาะในช่วงแรก ในแบบจำลองนี้จึงทำการจำลองค่าความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงานของระบบการอบแห้งโดยไม่พิจารณาค่าความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ใช้ในเครื่องกำเนิดไอน้ำ ดังนั้นในแบบจำลองความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงานนี้จึงประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ แบบจำลองความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าและแบบจำลองความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อน โดยมีรายละเอียดดังนี้

• แบบจำลองความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อน

เมื่อพิจารณาอัตราความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าที่อุปกรณ์ให้ความร้อน (2) แล้วทำสมดุลมวลและสมดุลพลังงาน จะได้ว่า

$$Q_h + (\dot{m}_{st} C_{pst} T_{st}) = (\dot{m}_{st} C_{pst} T_{sti}) \quad (6)$$

• แบบจำลองความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้า

พิจารณาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่พัดลม (4) จะได้

$$W_s = \Delta P [\dot{m}_{sto} / (\rho_{sto} \eta_f)] \quad (7)$$

พิจารณาอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ไหลผ่านพัดลมโดยใช้หลักสมดุลมวลและสมดุลพลังงานดังสมการ

$$\dot{m}_{sto} = \dot{m}_{stb} \quad (8)$$

$$W_s + (\dot{m}_{sto} C_{pst} T_{sto}) = (\dot{m}_{stb} C_{pst} T_{stb}) \quad (9)$$

สำหรับความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าจากมอเตอร์ของพัดลมคำนวณได้จากสมการ

$$E_{blower} = \frac{W_s}{\eta_m} \quad (10)$$

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ที่เวลาใดๆ ซึ่งเป็นปริมาณของพลังงานที่ใช้ต่อหนึ่งหน่วยมวลของน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุหาได้จากสมการ

$$SEC = \frac{(2.6 E_{blower} + Q_h) t_{total}}{(M_{in} - M_f) m_p} \quad (11)$$

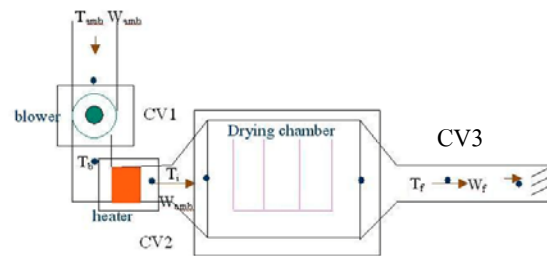
โดยความชื้นสุดท้าย (M_f) ในสมการที่ (11) จะแทนด้วยความชื้นค่ากลาง (M_{IMC}) ซึ่งเป็นความชื้นสุดท้ายของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในช่วงแรก

2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งด้วยลมร้อน

แบบจำลองของการอบแห้งลำไยที่จะพัฒนานี้ ประกอบด้วยแบบจำลองเป็นแบบจำลองย่อยคือ แบบจำลองการอบแห้ง และ แบบจำลองความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงาน เช่นเดียวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง มีสมมติฐาน ดังนี้

1. อุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์และเครื่องอบแห้งเท่ากับอุณหภูมิอบแห้ง
2. อากาศเป็นก๊าซอุดมคติ
3. ไม่มีการอัดอากาศเข้าที่ห้องอบแห้ง ทำให้ไม่มีการยุบตัวของอากาศ
4. ระบบมีการหุ้มฉนวนอย่างดี

โดยแผนภาพของเครื่องอบแห้งที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ระบบอบแห้งด้วยลมร้อน

จากรูปที่ 2 เครื่องอบแห้งแบบตู้ มีลักษณะการทำงานของอากาศชื้นที่ไหลในเครื่องอบแห้ง ที่เวลาเริ่มต้นอากาศสิ่งแวดล้อมจะไหลเข้าเครื่องอบแห้ง หลังจากอากาศจะไหลผ่านพัดลมซึ่งทำให้อากาศมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปตามค่าอัตราส่วนความชื้นคงที่ ต่อจากนั้นอากาศจะไหลผ่านอุปกรณ์ให้ความร้อน ทำให้อากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการนำมาใช้อบแห้ง (T_h) จากนั้นอากาศจะไหลเข้าสู่อ่างอบแห้ง โดยกำหนดให้การอบแห้งลำไยนี้เป็นแบบหวดโดยมีค่าอุณหภูมิของอากาศร้อนขาเข้าห้องอบแห้งมีค่าเท่ากับอุณหภูมิอบแห้งที่กำหนด และอัตราส่วนความชื้นเท่ากับอัตราส่วนความชื้นแวดล้อม (W_{amb}) และความชื้นเริ่มต้นของวัสดุเท่ากับความชื้นเริ่มต้นที่กำหนดไว้ หลังจากนั้นอากาศที่ออกจากห้องอบแห้งจะมีอัตราส่วนความชื้นเพิ่มขึ้น ความชื้นของลำไยจะลดลงซึ่งพิจารณาเป็นความชื้นเฉลี่ยของลำไย

ซึ่งหากความชื้นเฉลี่ยของลำไยมีค่ามากกว่าความชื้นที่ต้องการก็ให้ทำการอบต่อไป โดยอากาศแวดล้อมก็ไหลผ่านเข้าพัดลม อุปกรณ์ให้ความร้อนและห้องอบแห้งไปเรื่อยๆ จนกว่าค่าความชื้นเฉลี่ยของลำไยจะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความชื้นที่ต้องการของลำไย

แบบจำลองการอบแห้ง

พิจารณาปริมาตรควบคุม CV 3 ของห้องอบแห้งใดๆ แล้วใช้สมมูลมวลที่ปริมาตรควบคุมของห้องอบแห้ง จะได้ว่ามวลของน้ำที่เพิ่มขึ้นในอากาศชื้นเท่ากับมวลของน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\Delta t \dot{m}_{amb} (W_f - W_{amb}) = m_p (M_t - M_{t+\Delta t}) \quad (12)$$

ในทำนองเดียวกัน ทำสมมูลพลังงานที่ปริมาตรควบคุม CV 3 ของห้องอบแห้ง โดยผลรวมของการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของลมร้อนแห้งและการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของไอน้ำในลมร้อนมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังสมการ

$$(\dot{m}_{amb} C_{pa} T_i) + (\dot{m}_{amb} W_{amb} h_{fg}) + (\dot{m}_{amb} W_{amb} C_{pv} T_i) = (\dot{m}_{amb} C_{pa} T_f) + (\dot{m}_{amb} W_f h_{fg}) + (\dot{m}_{amb} W_f C_{pv} T_f) \quad (13)$$

การคำนวณความชื้นเฉลี่ยของลำไยอบแห้งที่เวลาใดๆ หากจากสมการจลนศาสตร์ของการอบแห้งสำหรับวัสดุทรงกลมกลวงโดยทำการหาอนุพันธ์เทียบกับเวลา และใช้วิธี Finite Difference ได้ความชื้นเฉลี่ยของลำไยทั้งเบตหลังการอบแห้งที่เวลาใดๆ สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$M_{t+\Delta t} = M_t + (M_{in} - M_{eq})(\Delta t) \left(\frac{6}{(r_{x_1}^2 + r_{x_1} r_{x_2} + r_{x_2}^2)} \right) \left(\frac{-D}{(r_{x_2} - r_{x_1})^2} \right) \left(\sum_{n=1}^{\infty} \left(r_{x_2} \cos n\pi - r_{x_1} \right)^2 \exp \left(\frac{-D n^2 \pi^2 t}{(r_{x_2} - r_{x_1})^2} \right) \right) \quad (14)$$

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของลำไยแบบคว้านเมล็ดออกที่ทำการอบแห้งด้วยลมร้อนในงานวิจัยนี้เป็นสมการที่พัฒนาขึ้นจากสมการ Arrhenius เป็นแบบจำลองโพลีโนเมียลกำลังสองที่สัมพันธ์กับความชื้นของวัสดุเช่นกัน โดยนำผลการทดลองอบแห้งลำไยแบบคว้านเมล็ดออกด้วยลมร้อน ของ ทศวรรณ [5] มาสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นกับอุณหภูมิอบแห้งโดยความชื้นของลำไยที่ใช้อยู่ในช่วง 200-18% d.b. ดังสมการ

$$\text{ลมร้อน: } D_{eff} = 0.0718 \exp\left(\frac{-32886.7814}{RT_{obs}}\right) \quad (15)$$

ในส่วนค่าความชื้นสมมูลของลำไยแบบคว้านเมล็ดออก ได้เลือกใช้สมการความชื้นสมมูลของเนื้อลำไย ของ Acharyaviriya et al.[1] ซึ่งได้ศึกษาหาความชื้นสมมูลของเนื้อ เปลือก และเมล็ดของลำไย พบว่าความชื้นสมมูลของเนื้อและเปลือกมีค่าใกล้เคียงกัน รูปแบบของสมการความชื้นสมมูลที่ใช้ มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์

ของอากาศดังสมการ

$$M_{eq} = 0.2208 \left[\frac{RH}{1-RH} \right]^{(0.7052-0.001 \cdot T)} \quad (16)$$

แบบจำลองความสิ้นเปลืองพลังงาน

- แบบจำลองความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า
พิจารณาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่พัดลม (CV1) จะได้

$$W_s = \Delta P [\dot{m}_{amb} / (\rho_o \eta_f)] \quad (17)$$

พิจารณาอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านพัดลมโดยใช้หลักสมมูลพลังงานที่ CV 1 จะได้

$$W_s + (\dot{m}_{amb} C_{pa} T_{amb}) + (\dot{m}_{amb} W_{amb} h_{fg}) + (\dot{m}_{amb} W_{amb} C_{pv} T_{amb}) = (\dot{m}_{amb} C_{pa} T_i) + (\dot{m}_{amb} W_i h_{fg}) + (\dot{m}_{amb} W_i C_{pv} T_i) \quad (18)$$

สำหรับความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจากมอเตอร์ของพัดลมคำนวณได้จากสมการ (10)

แบบจำลองความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อน

เมื่อพิจารณาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่อุปกรณ์ให้ความร้อน (CV 2) แล้วทำสมมูลพลังงานที่ CV 2 จะได้ว่า

$$Q_h + (\dot{m}_{amb} C_{pa} T_b) + (\dot{m}_{amb} W_{amb} h_{fg}) + (\dot{m}_{amb} W_{amb} C_{pv} T_b) = (\dot{m}_{amb} C_{pa} T_i) + (\dot{m}_{amb} W_i h_{fg}) + (\dot{m}_{amb} W_i C_{pv} T_i) \quad (19)$$

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ที่เวลาใดๆ ซึ่งเป็นปริมาณของพลังงานที่ใช้ต่อหนึ่งหน่วยมวลของน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ หาได้จากสมการ (11) โดยความชื้นเริ่มต้น (M_{in}) ในสมการจะแทนด้วยความชื้นค่ากลางซึ่งเป็นความชื้นเริ่มต้นของการอบแห้งด้วยลมร้อน

2.3. การจำลองสภาพการอบแห้ง

ทำการจำลองสภาพการอบแห้งลำไยแบบคว้านเมล็ดออกด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งตามด้วยลมร้อน โดยกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งคือ ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 h ,อุณหภูมิ 140°C เป็นเวลา 0.5 h ,อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 0.4 h ,อุณหภูมิ 180°C เป็นเวลา 0.25 h ,ความเร็วคงที่ 2.08±0.2 m/s ทำการอบแห้งจนถึงเวลาที่กำหนด จากนั้นจะทำการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60 และ 70°C ความชื้นเริ่มต้นของลำไย 270-300% d.b. ความชื้นสุดท้าย 16-20% d.b. และน้ำหนักเริ่มต้นของลำไย 40 g กรณีการจำลองการอบแห้ง และน้ำหนักเริ่มต้นของลำไย 3 kg กรณีการจำลองค่าความสิ้นเปลืองพลังงาน

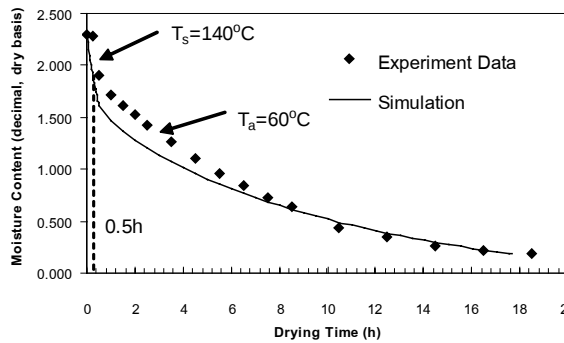
3. ผลและวิจารณ์

ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ผลของแบบจำลองได้นำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง คือ การลดลงของความชื้น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งที่ออกจากห้องอบแห้งและอัตราการอบแห้ง ของค่าความสิ้นเปลือง

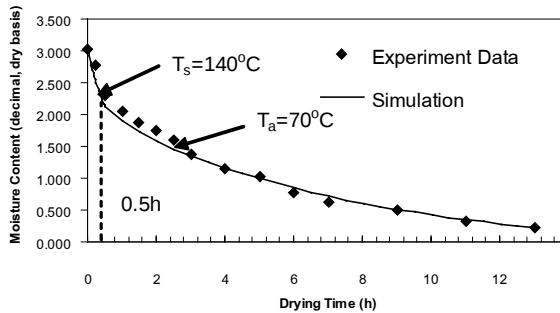
พลังงานได้แสดงเฉพาะผลของแบบจำลอง เนื่องจากการเก็บข้อมูลด้านความชื้นเปลี่ยนพลังงาน ในส่วนแบบจำลองค่าความชื้นเปลี่ยนพลังงานที่พัฒนาขึ้นเป็นเพียงการศึกษาแนวโน้มด้านการพลังงานในเบื้องต้น

การลดลงของความชื้น

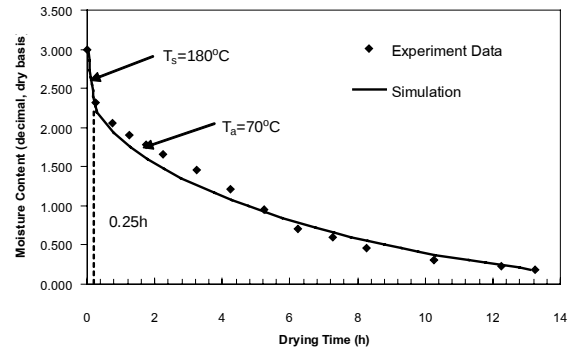
รูปที่ 3, 4 และ 5 แสดงการเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นกับเวลาที่ได้จากผลการจำลองสภาวะอบแห้งกับผลการทดลอง พบว่าลักษณะของเส้นกราฟจากการจำลองสภาพกับผลการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแบบจำลองสามารถทำนายได้ดีเมื่ออุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอุณหภูมิลมร้อนมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 3 เปรียบเทียบการลดลงของความชื้นเฉลี่ยจากการคำนวณกับการทดลอง (เงื่อนไขการอบแห้ง : ที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 140°C เป็นเวลา 0.5 h อุณหภูมิลมร้อน 60°C ความชื้นเริ่มต้น 299.5% d.b. ความชื้นค่ากลาง 190% d.b. ความชื้นสุดท้าย 18.4% d.b.)



รูปที่ 4 เปรียบเทียบการลดลงของความชื้นเฉลี่ยจากการคำนวณกับการทดลอง (เงื่อนไขการอบแห้ง : ที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 140°C เป็นเวลา 0.5 h อุณหภูมิลมร้อน 70°C ความชื้นเริ่มต้น 301.9% d.b. ความชื้นค่ากลาง 229.9% d.b. ความชื้นสุดท้าย 22.6% d.b.)

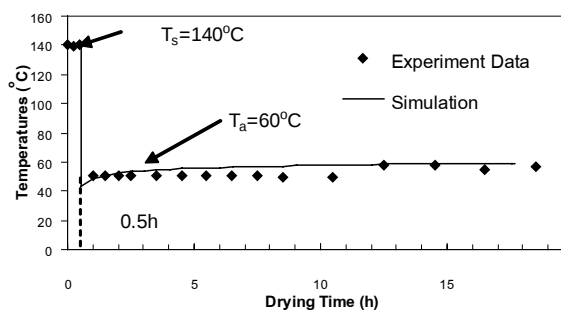


รูปที่ 5 เปรียบเทียบการลดลงของความชื้นเฉลี่ยจากการคำนวณกับการทดลอง (เงื่อนไขการอบแห้ง : ที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 180°C เป็นเวลา 0.25 h อุณหภูมิลมร้อน 70°C ความชื้นเริ่มต้น 299.6% d.b. ความชื้นค่ากลาง 231.1% d.b. ความชื้นสุดท้าย 19% d.b.)

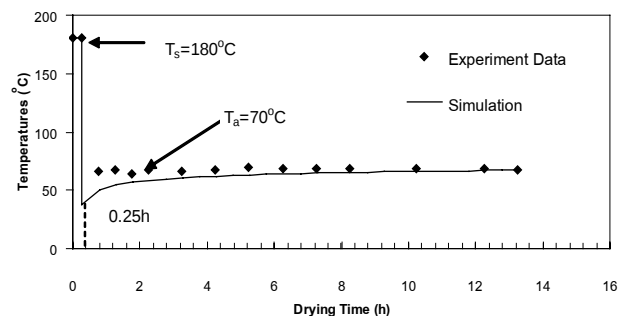
ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองและผลที่ได้จากการคำนวณที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอุณหภูมิลมร้อนต่างกัน ที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงขึ้นเวลาที่ใช้ในการอบแห้งช่วงแรกจะสั้นลง แต่เมื่ออบแห้งต่อด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิเท่ากัน พบว่าไม่มีผลต่อเวลาการอบแห้งทั้งหมด (total drying time) และเมื่ออบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นลงในช่วงหลังที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งเท่ากัน ซึ่งพบว่าไม่มีผลต่อเวลาการอบแห้งทั้งหมด ในส่วนของแบบจำลองก็ให้ผลที่สอดคล้องกัน และเมื่อศึกษาอัตราการอบแห้งแล้วพบว่าเมื่อเวลาในการอบแห้งน้อย มีผลให้อัตราการอบแห้งมีค่าสูง

อุณหภูมิอบแห้ง

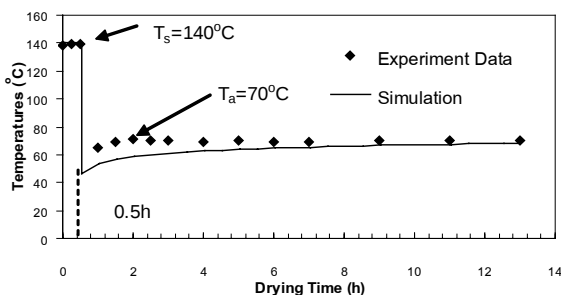
จากการเปรียบเทียบอุณหภูมิของตัวกลางที่ออกจากห้องอบแห้งกับเวลาการอบแห้งที่ได้จากแบบจำลองกับผลการทดลองอบแห้งลำไย ดังรูปที่ 6, 7 และ 8 จะเห็นว่าลักษณะของเส้นกราฟจากการจำลองสภาพกับผลการทดลองมีแนวโน้มเดียวกัน อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ออกจากห้องอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิอบแห้งที่กำหนด ในส่วนการอบแห้งด้วยลมร้อน อุณหภูมิลมร้อนที่ออกจากห้องอบแห้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนเท่ากับอุณหภูมิลมร้อนที่ได้กำหนดไว้ซึ่งเป็นแนวโน้มที่สอดคล้องกับผลการทดลอง เนื่องจากการทดลองอบแห้งนั้นได้ทำการเปลี่ยนเครื่องอบแห้งจากการอบด้วยเครื่องอบแห้งไอน้ำร้อนยวดยิ่งมาเป็นเครื่องอบแห้งลมร้อนเป็นผลให้อุณหภูมิของวัสดุลดลงและเมื่อทำการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนอุณหภูมิที่ออกจากห้องอบแห้งมีค่าต่ำในช่วงแรก โดยพบว่าแบบจำลองทำนายผลของอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งได้ดีทุกช่วงอุณหภูมิและทำนายอุณหภูมิอบแห้งลมร้อนได้ดีเมื่ออุณหภูมิลมร้อนมีค่าต่ำ



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งจากการทดลองและการคำนวณที่ออกจากห้องอบแห้งกับเวลาการอบแห้ง (เงื่อนไขการอบแห้ง : ตามรูปที่ 3)



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งจากการทดลองและการคำนวณที่ออกจากห้องอบแห้งกับเวลาการอบแห้ง (เงื่อนไขการอบแห้ง : ตามรูปที่ 4)



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งจากการทดลองและการคำนวณที่ออกจากห้องอบแห้งกับเวลาการอบแห้ง (เงื่อนไขการอบแห้ง : ตามรูปที่ 4)

ค่าความสิ้นเปลืองพลังงาน

ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ได้จากการจำลองสภาพการอบแห้งลำไยแบบคว้านเมล็ดออกด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งตามด้วยลมร้อนแสดงดังตารางที่ 2 โดยกำหนดเงื่อนไขของการศึกษาที่ความชื้นเริ่มต้น 350% d.b. ความชื้นสุดท้าย 18% d.b. น้ำหนักเริ่มต้นของลำไย 3 kg และขนาดห้องอบแห้ง 0.3x0.3x0.1 m³ โดยแยกพิจารณา เป็นค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจากการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจากการอบแห้งด้วยลมร้อน พบว่าระบบมีการใช้พลังงานโดยรวมค่อนข้างสูงอยู่ในช่วง 29.5-33.7 MJ/kg_{water evap} โดยค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจากการอบแห้งด้วยลมร้อนมีค่าสูงซึ่ง คิดเป็น 96% ของการใช้พลังงานทั้งหมด เนื่องจากการอบแห้งที่ไม่มี การนำอากาศร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ เป็นผลให้ระบบต้องมีการทำ อากาศร้อนตลอดเวลา เนื่องจากอากาศที่เข้าระบบเป็นอากาศที่มี อุณหภูมิต่ำ

ส่วนการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งแม้จะใช้อุณหภูมิสูง แต่ระยะเวลาการอบแห้งไม่นาน ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจึงน้อยกว่ากรณีการอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นระบบที่มี

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองกับการคำนวณการอบแห้งลำไยแบบคว้านเมล็ดออกด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งตามด้วยลมร้อน

	Test no.											
	1		2		3		4		5		6	
สภาวะการอบแห้ง	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.	Ex.p.	Sim.	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.
ความชื้นเริ่มต้น (decimal, d.b.)	2.69	2.69	2.8	2.8	2.3	2.3	3.02	3.02	2.66	2.66	2.99	2.99
ความชื้นค่ากลาง (decimal, d.b.)	1.94	1.66	2.09	1.73	1.90	1.47	2.3	2.15	1.82	1.94	2.31	2.26
ความชื้นสุดท้าย (decimal, d.b.)	0.17	0.17	0.16	0.16	0.18	0.18	0.22	0.22	0.17	0.17	0.19	0.19
อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (°C)	120	120	120	120	140	140	140	140	160	160	180	180
เวลาการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (h)	1	1	1	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.25	0.25
อุณหภูมิลมร้อน (°C)	60	60	70	70	60	60	70	70	70	70	70	70
เวลาการอบแห้งด้วยลมร้อน (°C)	18	19.27	13	12.01	18	17.19	12.5	12.51	13	12.82	13	12.88
เวลาการอบแห้งทั้งหมด (h)	19	20.27	14	13.01	18.5	17.69	13	13.01	13.4	13.22	13.25	13.13
อัตราการอบแห้ง (kg _{water} /h)	1.44	1.35	2.00	2.16	1.22	1.278	2.17	2.17	2.05	2.08	2.102	2.122

การนำไอน้ำร้อนกลับมาใช้ใหม่ โดยจะปล่อยทิ้งเมื่อมีปริมาณไอน้ำร้อนเพิ่มขึ้นเพื่อรักษาแรงดันในระบบเท่านั้น สาเหตุอีกประการหนึ่งที่ทำให้ผลของค่าความสิ้นเปลืองพลังงานสูง คือ เนื่องจากการทดลองนั้นใช้ลำไยในปริมาณที่น้อยเมื่อเทียบกับขนาดของอุปกรณ์ที่ใช้

ตารางที่ 2 แสดงค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่คำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

อุณหภูมิตัวกลาง (°C)	เวลาการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (h)	ความชื้นค่ากลาง (decimal, d.b.)	เวลาการอบแห้งด้วยลมร้อน (h)	เวลาการอบแห้งทั้งหมด (h)	ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg _{water evap})		
					ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง	ลมร้อน	รวม
120-60	1	2.16	15.29	16.29	1.1	31.3	32.4
120-70			12.57	13.57	1.1	32.5	33.7
140-60	0.5	2.49	17.58	18.08	1.2	31.2	32.5
140-70			14.01	14.51	1.2	31.5	32.7
160-60	0.4	2.56	17.35	17.75	1.3	30.4	31.7
160-70			13.68	14.08	1.3	30.3	31.6
180-60	0.25	2.65	17.17	17.42	1.3	29.0	30.3
180-70			13.22	13.47	1.3	28.2	29.5

4. สรุปผลการทดลอง

ผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งลำไยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งตามด้วยลมร้อน พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใช้ในการทำนายการลดลงของความชื้นของลำไย อุณหภูมิของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งและสมรรถนะการอบแห้งได้ดี โดยสามารถทำนายได้ใกล้เคียงกับผลการทดลอง ในส่วนของอัตราการอบแห้งและค่าความสิ้นเปลืองพลังงาน พบว่าอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่เปลี่ยนแปลงมีผลต่อเวลาการอบแห้งในช่วงแรกแต่ไม่มีผลต่อเวลาการอบแห้งทั้งหมด ขณะที่อุณหภูมิลมร้อนที่เปลี่ยนแปลงมีผลต่อเวลาการอบแห้งทั้งหมด เวลาในการอบแห้งน้อยมีผลให้อัตราการอบแห้งมีค่าสูง และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะค่อนข้างสูงอยู่ในช่วง 29.5-33.7 MJ/kg_{water evap} คิดเป็นการใช้พลังงานการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 4 % และอบแห้งด้วยลมร้อน 96 %

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอแสดงความขอบคุณต่อมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่สนับสนุนโครงการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Achariyaviriya, A., 2001. Simulation and Optimization of the Drying Strategy for Longan Drying. Thesis of doctor of engineering. School of Energy and Materials King Mongkut's University of Technology Thonburi, 140 P.
- [2] Namsanguan, Y., Tichangtong, S., Tia, W., and Soponronnarit, S., 2005. Simulation of a Mixed Air and Superheated Steam Drying System. Drying Technology. Vol. 23, No.1&2, pp. 225-248.
- [3] Oswin, GR., 1946. The Kinetics of Package Life. III. The isotherm. J Chem. Ind. (London), Vol.64, p. 419.
- [4] Prachayawarakorn, S., Soponronnarit, S., Wetchacama, S. and Jaisut, D., 2002. Desorption Isotherms and Drying Characteristics of Shrimp in Superheated Steam and Hot Air, Drying Technology., Vol.22, No3, pp. 669-684.
- [5] ทศวรรณ ปัญญาบุตร. 2546. การอบแห้งลำไยแบบคว้านเมล็ดออก. ปริญญาพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

รายการสัญลักษณ์

M	=	ความชื้น,เศษส่วนมาตรฐานแห้ง หรือ % d.b.
$\dot{m}$	=	อัตราการระเหยออกจากวัสดุ, kg/h
D_{eff}	=	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น, m^2/h
R	=	ค่าคงที่ของก๊าซ มีค่าเท่ากับ 8.314, kJ/kmol.K
T_{abs}	=	อุณหภูมิสัมบูรณ์, K
W	=	อัตราส่วนความชื้น, $kg_{water}/kg_{dry air}$
Q_h	=	ความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนที่อุปกรณ์ให้ความร้อน, kJ/h
W_s	=	งานทางไฟฟ้าที่ให้ที่เพลลาของพัดลม, kJ/h
ρ	=	ความหนาแน่น, $kg_{dry air}/m^3$
η	=	ประสิทธิภาพ, เศษส่วน
ΔP	=	ความดันลดของระบบอบแห้ง, kPa
E_{blower}	=	ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่มอเตอร์ของพัดลม, kJ / h
SEC	=	ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, kJ/kg $_{water\ evap}$
m	=	มวล, kg
C_p	=	ค่าความร้อนจำเพาะ, kJ/kg °C
h_{fg}	=	ความร้อนแฝงของการระเหย, kJ/kg
t	=	เวลาอบแห้ง , h
r	=	รัศมีของวัสดุทรงกลมกลวง, m

สัญลักษณ์กำกับล่าง

x_1	=	ภายใน
x_2	=	ภายนอก
f	=	พัดลม, ความชื้นขาออก
m	=	มอเตอร์ไฟฟ้า
sti	=	ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่เข้าห้องอบแห้ง
sto	=	ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ออกจากห้องอบแห้ง
st	=	ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่เข้าอุปกรณ์ให้ความร้อน
stb	=	ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ออกจากพัดลม
p	=	วัสดุแห้ง
in	=	ค่าเริ่มต้น
amb	=	สิ่งแวดล้อม
b	=	ออกจากพัดลม

i	=	เข้าห้องอบแห้ง
v	=	ไอน้ำ
a	=	อากาศแห้ง