

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอบแห้งแบบกระแสน Mathematical model of impinging stream drying system

กิตติ สถาพรประสาธน์¹ สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา² และ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์³

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์ จ.นครนายก 26120
โทร 0-2664-1000 ต่อ 2055 โทรสาร 0-3732-2609 อีเมล kitti@swu.ac.th

²ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ ³สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140
โทร 0-2470-9246 โทรสาร 0-2470-9240 อีเมล sakamon.dev@kmutt.ac.th

Kitti Sathapornprasath¹, Sakamon Devahastin² and Somchart Soponronnarit³

¹Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, Nakhornnayok, 26120, Thailand,
Tel: 0-2664-1000 Ext. 2055, Fax: 0-3732-2609, E-mail: kitti@swu.ac.th

²Department of Food Engineering, ³School of Energy, Environment and Materials,
King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand
Tel: 0-2470-9246, Fax: 0-2470-9240, E-mail: sakamon.dev@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ:

การศึกษานี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอบแห้งแบบกระแสนโดยใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง โดยเครื่องอบแห้งชนิดนี้จะเหมาะกับการลดความชื้นที่อยู่บริเวณผิวออกอย่างรวดเร็ว และจะเกิดขึ้นเฉพาะในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่เท่านั้น โดยพัฒนาขึ้นจากความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง (Empirical correlations) รวมทั้งการทำสมดุลมวลและพลังงานของอุปกรณ์ทั้งหมด ซึ่งจากผลการจำลองระบบการอบแห้งแบบกระแสนพบว่า ความชื้นสุดท้ายของวัสดุที่ทางออกจากห้องอบแห้งที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองมีความแตกต่างสูงสุดประมาณ 5%

คำสำคัญ: การอบแห้งแบบใช้อากาศร้อน / ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง / ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ / ระบบกระแสน

Abstract:

This study was proposed to mathematical model of impinging stream drying system using hot air as the drying medium. This type of dryer is therefore an excellent alternative to flash dryer for removing surface moisture from particles in the unhindered drying rate period. Developing a simple mathematical model from Empirical correlations data and based on the macroscopic energy and mass balances that can

be used to predict the final moisture content of the model material (resin) undergoing drying in the impinging stream dryer. A comparison was made between the values of the moisture content of particles at the exit of the dryer obtained from the experiments and those predicted by the model. The maximum error of prediction was found to be about 5 %.

Keywords: Empirical correlations / impinging streams system / hot air drying / unhindered drying rate period

บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการประกอบอาชีพทางเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมเกษตรเป็นหลัก และมีพืชผลทางการเกษตรที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจหลายชนิด โดยผลผลิตทางการเกษตรส่วนมากมีความจำเป็นที่จะต้องทำให้แห้งก่อนการแปรรูปหรือเก็บรักษา โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุที่มีความชื้นบริเวณผิวสูง การอบแห้งหรือการลดความชื้นของวัสดุออกอย่างรวดเร็วนับว่าเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง ด้วยเหตุนี้จึงเกิดแนวคิดที่จะพัฒนาวิธีการอบแห้งขึ้นมาใหม่โดยอาศัยหลักการของระบบกระแสน (Impinging stream system) เพื่อเป็นการลดการใช้พลังงานและเวลาในการอบแห้ง

หลักการพื้นฐานของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน คือ การให้กระแสการไหลของตัวกลางการอบแห้ง 2 กระแส (หรือมากกว่า) มาชนกัน โดยให้กระแสใดกระแสหนึ่ง (หรือมากกว่า) พาเอาวัสดุ

(โดยทั่วไปอยู่ในรูปของอนุภาค) เข้ามาสู่ระบบด้วย ผลของการชนกันของกระแสการไหลของตัวกลางการอบแห้งดังกล่าว จะทำให้เกิดบริเวณซึ่งเรียกว่าบริเวณการชน (Impingement zone) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทมวลสาร ความร้อน และโมเมนตัมสูงมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของแรงเฉือนและความปั่นป่วนของกระแสการไหลที่มีค่าสูงในบริเวณดังกล่าว นอกจากนี้การเคลื่อนที่ของอนุภาคในเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำยังมีลักษณะพิเศษ นั่นคือการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะเป็นแบบสวนทางกลับไปมา (Oscillatory motion) ภายในบริเวณการชน ทั้งนี้เริ่มมาจากการที่อนุภาคถูกเร่งให้มีความเร็วสูงขึ้นโดยกระแสของไหลของตัวกลางการอบแห้งกระแสน้ำ (คือกระแสที่พาอนุภาคเข้าสู่ระบบ) และวิ่งสวนเข้าไปในกระแสการไหลตรงกันข้าม อันเนื่องมาจากผลของความเฉื่อยของอนุภาคนั้น และในที่สุดอนุภาคก็จะหยุดการเคลื่อนที่เนื่องจากถูกต้านด้วยกระแสการไหลตรงกันข้าม จากนั้นอนุภาคจะถูกเร่งอีกครั้งด้วยกระแสการไหลตรงกันข้าม เคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณการชนอีกครั้ง เป็นลักษณะแบบสวนทางกลับไปมา จนกระทั่งเมื่อความเร็วของอนุภาคลดลงจนถึงค่าหนึ่ง อนุภาคก็จะถูกกระแสของไหลของตัวกลางการอบแห้งพาออกไปจากระบบ การเคลื่อนที่ลักษณะนี้ ทำให้อนุภาคอยู่ในระบบได้นานขึ้น จึงมีเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลสารกับตัวกลางการอบแห้งมากขึ้น ด้วยสมบัติของระบบดังกล่าวทั้งสองข้อ (คือมีบริเวณการชนที่ให้อัตราการถ่ายเทมวลสาร ความร้อน และโมเมนตัมสูง และลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคแบบพิเศษ) ทำให้เครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำมีขนาดเล็กกว่าเครื่องอบแห้งแบบอื่นๆ สำหรับภาระการอบแห้งที่เท่ากัน จึงนับว่าเป็นระบบที่ประหยัดพลังงาน และมีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงกว่าระบบอบแห้งอื่นๆ มาก

การอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำ นับว่าเป็นเทคโนโลยีใหม่สำหรับประเทศไทย การศึกษาและค้นคว้าวิจัยยังไม่เป็นที่แพร่หลาย แต่เนื่องจากเครื่องอบแห้งแบบนี้มีลักษณะเด่นหลายประการดังกล่าวข้างต้น อีกทั้งระบบยังมีการทำงานที่ไม่ซับซ้อน ไม่มีชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนที่ และเหมาะกับการอบแห้งวัสดุที่ต้องการดึงเอาน้ำหรือความชื้นจำนวนมากที่บริเวณรอบๆ ผิวของวัสดุออกอย่างรวดเร็ว จึงเป็นที่น่าสนใจที่จะนำเอาเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำมาประยุกต์ใช้กับการอบแห้งวัสดุต่างๆ ที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงๆ ซึ่งในเบื้องต้นนี้วัสดุที่นำมาใช้ในการทดลองหาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำคือ เรซิน เนื่องจากเรซินจะมีน้ำหรือความชื้นจำนวนมากอยู่ในบริเวณของผิววัสดุ อีกทั้งยังสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ระบบได้ง่ายและไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพและเคมีระหว่างการอบแห้งอีกด้วย

ในช่วงเวลาที่ผ่านมาได้มีนักวิจัยหลายท่านทำการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบการอบแห้งแบบกระแสน้ำชนิดต่างๆ เพื่อให้สามารถทำนายปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนและมวลสาร (การอบแห้ง) ภายในระบบได้

Hosseinalipour and Mujumdar [1] ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายคุณลักษณะการไหล การถ่ายเทความร้อน และการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางในการอบแห้ง โดยได้มีการคำนวณอุณหภูมิและความชื้นตามเส้นทางการเคลื่อนที่ของวัสดุ และได้พัฒนาสมการสำหรับใช้ในการคำนวณโดยรวมผลของค่าสัมประสิทธิ์การชดเชย (Restitution coefficient) และผลของความปั่นป่วน (Turbulence modulation) ของกระแสไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่มีต่อการเคลื่อนที่และปรากฏการณ์ถ่ายเทของวัสดุในเครื่องอบแห้ง ส่วนการกระจายตัวของเวลาที่วัสดุอยู่ในระบบ (Residence time distribution) พบว่าขึ้นอยู่กับระยะทางจากกึ่งกลางของหัวฉีดไปตามความยาวของท่อทางออก และการลดลงของความชื้นของวัสดุเกิดขึ้นตามเส้นทางการเคลื่อนที่ของวัสดุด้วย ต่อมา Mujumdar et al. [2] ได้ศึกษาแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้ในการทำนายสมรรถนะการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางในการอบแห้ง จากผลการคำนวณพบว่า ความชื้นของวัสดุจะมีค่าไม่สม่ำเสมอที่บริเวณทางออกจากห้องอบแห้ง และจากการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่เงื่อนไขการทดลองต่างๆ ซึ่งนำเสนอในรูปแบบของค่าการสะสมจำเพาะ (Specific cumulative functional value, SCFV) ซึ่งหาได้จากความแตกต่างของการกระจายตัวสะสมของความชื้นของวัสดุในสภาวะเริ่มต้นกับสภาวะสุดท้าย (โดยค่า SCFV ที่มากกว่าจะแสดงให้เห็นว่าสมรรถนะของระบบดีกว่า) พบว่าเครื่องอบแห้งที่ทำงานที่ความดันเท่ากับ 202 kPa มีสมรรถนะในการอบแห้งดีกว่าที่ความดันอื่นๆ

Devahastin and Mujumdar [3] ศึกษาผลของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าและขนาดของวัสดุที่ใช้ในการอบแห้ง โดยการใช้คำนวณเชิงตัวเลข พบว่าการอบแห้งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในบริเวณการชน และการระเหยน้ำจากวัสดุที่มีขนาดใหญ่เกิดขึ้นมากกว่าวัสดุที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากวัสดุขนาดใหญ่มีแรงเฉื่อยมากกว่า ทำให้สามารถเคลื่อนที่เข้าไปยังกระแสตรงกันข้ามได้มากขึ้น สามารถเคลื่อนที่กลับไป-กลับมาได้นานขึ้น ทำให้เวลาเฉลี่ยของวัสดุที่อยู่ในระบบมีค่ามากขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังพบอีกว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าสูงขึ้นไม่ทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น เนื่องจาก มีการกำหนดให้ตัวเลขเรย์โนลด์ที่หัวฉีด (inlet jet Reynolds number) มีค่าคงที่ ส่วนค่าความหนืดจลนศาสตร์ (Kinematic viscosity) และ อัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศขาเข้าทำให้เมื่อคำนวณค่าอัตราความเร็วที่ต้องใช้แล้วพบว่ามีการลดลง จึงไม่ทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น

Xu and Zhu [4] คำนวณค่าความเร็วของวัสดุในห้องอบแห้งโดยใช้กฎของนิวตัน (Newton's law) โดยพิจารณาเฉพาะแรงฉุดลาก (Drag force) ในการทำนายการเคลื่อนที่ของวัสดุที่อยู่ภายในบริเวณการชน จากการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองและ

การคำนวณพบว่า สมการดังกล่าวสามารถใช้ในการทำนายความเร็วและตำแหน่งของวัสดุได้ดี

Sathapornprasath et al. [5] ศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการทดลองที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนโดยการคำนวณค่าอัตราการระเหยน้ำจากอนุภาคเดี่ยว (Single particle) ภายใต้ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ สำหรับกรณีอากาศร้อนพบว่า การเพิ่มขึ้นของความเร็วและอุณหภูมิอากาศร้อนเข้าส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศร้อนทำให้อัตราการระเหยน้ำลดลง สำหรับกรณีการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งพบว่า การเพิ่มขึ้นของความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งเข้าส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของความดันไอน้ำร้อนยวดยิ่งกลับส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำมีค่าลดลง และพบว่าค่าอุณหภูมิผกผันของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนที่พิจารณานี้มีค่าประมาณ 212 °C ที่อัตราการระเหยน้ำเท่ากับ 60 kg/m²h

Yao et al. [6] ได้ศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อการทำความเย็นจากการระเหยของอากาศ (evaporative cooling of air) ในระบบกระแสน โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองและการประยุกต์ใช้วิธีของ Buckingham Pi เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องทำความเย็นจากการระเหย โดยสมรรถนะของเครื่องทำความเย็นจากการระเหยนั้น พิจารณาจากการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร ถึงแม้ว่าจะมีจำนวนผลงานที่ดีพิมพ์เผยแพร่เกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนอยู่บ้าง แต่ยังไม่มีความชัดเจนที่ศึกษาแบบจำลองของระบบการอบแห้งแบบกระแสนทั้งระบบที่มีการรวมอุปกรณ์ทั้งหมดได้แก่ พัดลมแรงดันสูง เครื่องทำความร้อน และ ห้องอบแห้งแบบกระแสน โดยเฉพาะอย่างยิ่งแบบที่มีลักษณะคล้ายกับที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ดังนั้นในบทนี้จึงเป็นการนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งพัฒนาขึ้นโดยอาศัยหลักการทำสมดุลมวลและพลังงาน ซึ่งจะนำไปใช้ในการจำลองระบบการอบแห้งแบบกระแสน นอกจากนี้ยังได้มีการเปรียบเทียบความชื้นสุดท้ายของวัสดุที่ทางออกจากห้องอบแห้งที่คำนวณได้กับผลที่ได้จากการทดลองด้วย

อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร (N_v), Tamir [7]:

$$N_v = \frac{W_p (X_i - X_e)}{V_r} \quad (1)$$

ความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

สำหรับการพัฒนาความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นเริ่มต้นโดยการกำหนดตัวแปรอิสระต่างๆ ที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร (N_v) ของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน

$$N_v = f(k_a, c_p, \rho_a, \mu_a, d, L, V_r, U_a, d_p, \rho_p, W_p, g, \Delta T_{lm}) \quad (2)$$

จากนั้นจัดความสัมพันธ์เพื่อให้อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติตามทฤษฎีของ Buckingham Pi, Darby [8], Fox [9]:

$$\frac{N_v C_p d_p^2}{k_a} = A \left(\frac{L}{d_p} \right)^a \left(\frac{V_r}{d_p^3} \right)^b \left(\frac{U_a C_p \rho_a d_p}{k_a} \right)^c \times \left(\frac{C_p \mu_a}{k_a} \right)^d \left(\frac{d}{d_p} \right)^e \left(\frac{\rho_p}{\rho_a} \right)^f \left(\frac{W_p C_p}{k_a d_p} \right)^g \times \left(\frac{g C_p^2 \rho_a^2 d_p^3}{k_a^2} \right)^h \left(\frac{\Delta T_{lm} C_p^3 \rho_a^2 d_p^2}{k_a^2} \right)^i \quad (3)$$

เมื่อ A และยกกำลัง a ถึง i คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดลอง และ สมบัติของอากาศ Pakowski et al., [10] จากนั้นจึงนำความสัมพันธ์ข้างต้นมาวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม SPSS

$$\frac{N_v C_p d_p^2}{k_a} = 9.141 \times 10^{-8} \left(\frac{U_a C_p \rho_a d_p}{k_a} \right)^{0.352} \times \left(\frac{d_p^3 g C_p^2 \rho_a^2}{k_a^2} \right)^{-1.083} \times \left(\frac{W_p C_p}{k_a d_p} \right)^{0.414} \quad (4)$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการทำสมดุลมวลสารและพลังงานนั้นจะใช้แผนผังของระบบการอบแห้งแบบกระแสนแสดงในรูปที่ 1 โดยระบบการอบแห้งแบบกระแสนประกอบไปด้วย พัดลมแรงดันสูง (CV1) เครื่องทำความร้อน (CV2) และห้องอบแห้งแบบกระแสน (CV3) ซึ่งความสัมพันธ์ที่ใช้ในการจำลองห้องอบแห้งแบบกระแสนนั้นได้มาจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในสมการที่ 4 ส่วนสมบัติของอากาศคำนวณโดยใช้สมการประมาณค่าที่รายงานโดย Pakowski et al. [10] ส่วนสมมุติฐานที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองมีดังต่อไปนี้ คือไม่คิดความแตกต่างของอุณหภูมิภายในวัสดุ การกระจายตัวของความชื้นของวัสดุที่สภาวะเริ่มต้นเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ อุณหภูมิผิวของวัสดุมีค่าเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศเข้าห้องอบ

แห้งและวัสดุและอากาศชื้นออกจากห้องอบแห้งทางด้านล่างเพียงด้านเดียว

แบบจำลองของพัดลมแรงดันสูง

ปริมาตรควบคุมที่ 1 คือพัดลมแรงดันสูง โดยในปริมาตรควบคุมนี้จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของอากาศชื้นที่ทางเข้าและออก ดังนั้นจึงพิจารณาสมมูลมวลและพลังงานภายใต้กฎอุณหพลศาสตร์ข้อที่ 1 โดยเทอมด้านซ้ายมือของสมการที่ 5 เป็นการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของอากาศชื้นขาเข้าและออกจากพัดลมแรงดันสูง ส่วนสมการทางด้านขวามือเป็นกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับพัดลมแรงดันสูง

$$m_a(C_a T_4 + C_v W_{in} T_4) - m_a(C_a T_{d,in} + C_v W_{in} T_{d,in}) = P_{fan} \quad (5)$$

เมื่อ

$$P_{fan} = \frac{m_a \Delta P}{\rho_a \eta_{fan}}$$

P_{fan} = กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับพัดลม, kW

m_a = อัตราการไหลของอากาศ, kg/s

C_a = ความร้อนจำเพาะของอากาศ, kJ/kg K

C_v = ความร้อนจำเพาะของไอน้ำในอากาศ, kJ/kg K

T_4 = อุณหภูมิอากาศออกจากพัดลม, K

W_{in} = อัตราส่วนความชื้นของอากาศก่อนเข้าเครื่องทำความร้อน
kg_{water}/kg_{dry air}

$T_{d,in}$ = อากาศภายนอก, K

ΔP = แรงดันสูญเสีย, Pa

ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศ, kg/m³

η_{fan} = ประสิทธิภาพของพัดลม (80%)

แบบจำลองของเครื่องทำความร้อน

ในระบบการอบแห้งนี้ พลังงานที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับตัวกลางในการอบแห้งคือ พลังงานความร้อนที่ได้จากพลังงานไฟฟ้า สำหรับสมการที่ใช้กับปริมาตรควบคุมที่ 2 สามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้

$$Q_{heat} = m_a(C_a + C_v W_{in})(T_3 - T_4) \quad (6)$$

เมื่อ

Q_{heat} = พลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเครื่องทำความร้อน, kW

T_3 = อุณหภูมิอากาศขาเข้าก่อนเข้าห้องอบแห้ง, K

แบบจำลองของห้องอบแห้งแบบกระแสวน

สมการสำหรับใช้ในการทำสมมูลมวลของปริมาตรควบคุมที่ 3 สามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้ ทั้งนี้โดยอาศัยความสัมพันธ์ที่ได้จากสมการที่ 4 มาประกอบ

$$9.141 \times 10^{-8} \left(\frac{U_a C_a \rho_a d_p}{k_a} \right)^{0.352} \times \left(\frac{d_p^3 g C_a^2 \rho_a^2}{k_a^2} \right)^{-1.083} \times \left(\frac{W_p C_a}{k_a d_p} \right)^{0.414} \times \left(\frac{k_a}{C_a d_p^2} \right) = \frac{W_p (X_i - X_e)}{V_r} \quad (7)$$

เมื่อ

d_p = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของวัสดุ, m

k_a = ค่าการนำความร้อนของอากาศ, W/m K

U_a = ความเร็วอากาศขาเข้า, m/s

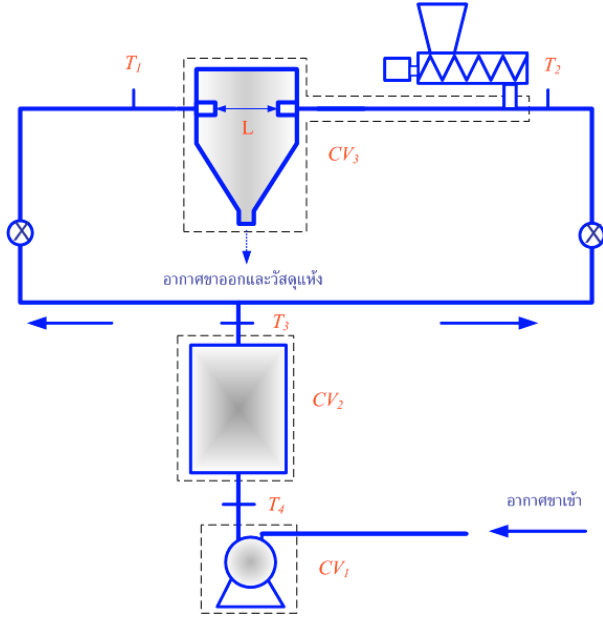
V_r = ปริมาตรห้องอบแห้ง, 0.018 m³

W_p = อัตราการป้อนวัสดุ, kg/h

X_e = ความชื้นสุดท้ายของวัสดุ, kg/kg (d.b.)

X_i = ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ, kg/kg (d.b.)

μ_a = ความหนืดของอากาศ, kg/m s



รูปที่ 1 แผนผังของระบบอบแห้งแบบกระแสขน

สมบัติของอากาศในช่วงอุณหภูมิเท่ากับ -40 to 1000 °C สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้ Pakowski et al., [10]:

$$C_p = 1.00926 \times 10^3 - 4.0403 \times 10^{-2} T + 6.1759 \times 10^{-4} T^2 - 4.097 \times 10^{-7} T^3 \quad : (\text{J/kg K}), T \text{ in } ^\circ\text{C}$$

$$k_p = 2.425 \times 10^{-2} + 7.889 \times 10^{-5} T - 1.790 \times 10^{-8} T^2 - 8.570 \times 10^{-12} T^3 \quad : (\text{W/m K}), T \text{ in } ^\circ\text{C}$$

$$\mu_a = 1.691 \times 10^{-5} + 4.984 \times 10^{-8} T - 3.187 \times 10^{-11} T^2 + 1.319 \times 10^{-14} T^3 \quad : (\text{kg/m}\cdot\text{s}), T \text{ in } ^\circ\text{C}$$

$$\rho_a = PM_a / (RT_{abs}) \quad : (\text{kg/m}^3), T \text{ in Kelvin}$$

$$P = 101325 \quad : \text{Pa}$$

$$M_a = 0.028947 \quad : \text{kg/mol}$$

$$R = 8.314 \quad : \text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{mol K}$$

ขั้นตอนการคำนวณ

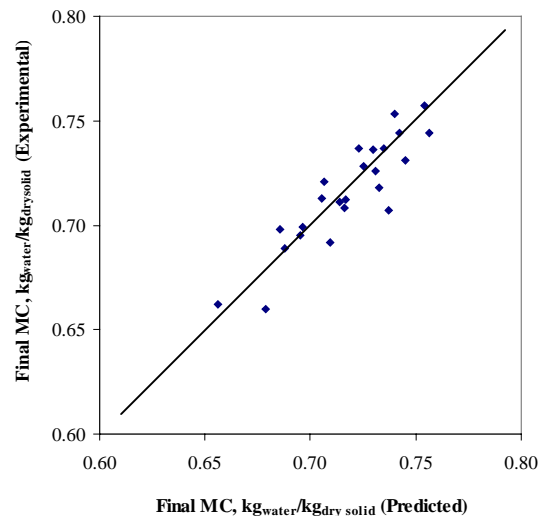
แบบจำลองที่ได้นี้ใช้ในการทำนายความชื้นสุดท้ายของเรซินที่ออกจากเครื่องอบแห้งแบบกระแสขน ซึ่งการคำนวณจะเริ่มต้นโดยการป้อนค่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อม อัตราส่วนความชื้นของอากาศแวดล้อม อุณหภูมิอากาศขาเข้าที่ใช้ในการอบแห้ง ความเร็วอากาศขาเข้า ระยะห่างในการขน ความชื้นเริ่มต้นของเรซิน อัตราการไหลของอากาศ ปริมาตรห้องอบแห้ง สมบัติของอากาศ เส้น

ผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเรซิน อัตราการป้อนวัสดุ และประสิทธิภาพของพัดลม โดยจะกำหนดค่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อมและอัตราส่วนความชื้นของอากาศแวดล้อมที่ปริมาตรควบคุมที่ 1 และคำนวณหาอุณหภูมิขาออกจากพัดลม จากนั้นจึงใช้สมการสมดุลพลังงานของเครื่องทำความร้อน (ปริมาตรควบคุมที่ 2) ในการคำนวณอุณหภูมิขาเข้าห้องอบแห้ง ส่วนความชื้นสุดท้ายของวัสดุที่ออกจากห้องอบแห้ง (ปริมาตรควบคุมที่ 3) หาได้จากความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ได้จากทดลองค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร

ข้อจำกัดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เงื่อนไขการทดลองและการใช้งานแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีดังต่อไปนี้ อุณหภูมิอากาศที่ใช้อยู่ระหว่าง 110 - 150 °C ความเร็วอากาศขาเข้าเท่ากับ 16 และ 45 เมตรต่อวินาที เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อก่อนเข้าห้องอบแห้งเท่ากับ 0.025 เมตร ระยะห่างในการขนเท่ากับ 0.05 และ 0.015 เมตร ปริมาตรห้องอบแห้งเท่ากับ 0.018 ลูกบาศก์เมตร อัตราการป้อนวัสดุเท่ากับ 10 และ 20 กิโลกรัมมวลแห้งต่อชั่วโมง ความหนาแน่นของเรซินเท่ากับ 1250 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเรซินเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร ความชื้นเริ่มต้นของเรซินประมาณ 81 - 85 %d.b. (เรซินถูกเก็บในภาชนะปิดก่อนการทดลอง 24 ชั่วโมงเพื่อให้อยู่ในสภาวะสมดุลก่อนนำไปใช้ในการทดลอง)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถทำนายความชื้นสุดท้ายของวัสดุได้ดีพอใช้ดังในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายและจากการทดลองหาความชื้นสุดท้ายของวัสดุ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Hosseinalipour, S.M., Mujumdar, A.S., 1997. A Model for Superheated Steam Drying of Particles in an Impinging Stream Dryer. *Mathematical Modeling and Numerical Techniques in Drying Technology*, in I. Turner and A.S. Mujumdar (Eds.), Marcel Dekker, New York: pp. 537-574.
- [2] Mujumdar, A.S., Hosseinalipour, S.M., Devahastin, S., 2000. A two-dimensional superheated steam impinging stream dryer: A computational model. *Bulletin of The Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 48: pp. 287-299.
- [3] Devahastin, S., Mujumdar, A.S., 2002. A Numerical Study of Flash Drying Characteristics of a Novel Two-Dimensional Impinging Stream Dryer. *Proceedings of the 13th International Drying Symposium*, Beijing, P.R. China: pp. 817-827.
- [4] Xu, D., Zhu, W., 2002. Hydrokinetic characteristic analysis of a new type of impinging stream dryer. *Proceedings of the 13th International Drying Symposium*, Beijing, P.R. China: pp. 856-860.
- [5] Sathapornprasath, K., Devahastin, S., Soponronnarit, S., 2004. Effects of operating conditions on the overall performance of an- air and superheated steam-operated impinging stream dryer. *Proceedings of the 15th International Symposium on Transport Phenomena*, Bangkok, Thailand: pp. 55-59.
- [6] Yao, B., Berman, Y., Tamir, A., 1995. Evaporative cooling of air in impinging streams. *AIChE Journal*, 41: pp. 1667-1675.
- [7] Tamir, A., 1994. *Impinging-stream reactors*, Elsevier, Amsterdam.
- [8] Darby, R., 2001. *Chemical Engineering Fluid Mechanics*. Marcel Dekker, New York.
- [9] Fox, R.W., McDonald, A.T., 1998. *Introduction of Fluid Mechanics*. John Wiley & Sons, New York.
- [10] Pakowski, Z., Bartczak, Z., Strumitto, C., Stenstrom S., 1991. Evaluation of equations approximating thermodynamic and transport properties of water, steam and air for use in CAD of drying processes. *Drying Technology*, 9: pp. 753-773.