

แบบจำลองการทำแห้งของน้ำนมข้าวในเครื่องทำ แห้งแบบพ่นฝอยแนวตั้ง *

สืบสกุล จินดาพล¹⁾ และ อนรรักษ์ ปิติรักษ์สกุล²⁾

¹⁾ นักศึกษาปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จังหวัดกรุงเทพฯ 10800

²⁾ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จังหวัดกรุงเทพฯ 10800

Email: arp@kmitnb.ac.th

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การศึกษาแบบจำลองการทำแห้งของการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของน้ำนมข้าวระหว่างการทำแห้งในเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยแนวตั้งขนาดเล็ก แบบจำลองที่ทำการศึกษาในช่วงเวลาการทำแห้งลดลงได้แก่ แบบจำลองตามทฤษฎีการแพร่ และ แบบจำลองของ Ranz&Marshall โดยใช้ทำนายปริมาณความชื้นเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่สภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้ง (อุณหภูมิอากาศร้อน 193 °C อัตราไหลอากาศ 35 m³/h และอัตราการป้อนน้ำนมข้าว 738 ml/h) สมประสิทธิ์การแพร่ประมาณค่าจากแผ่นบางตามทฤษฎีการแพร่มีค่าเท่ากับ 3.36×10^{-12} m²/s แบบจำลองทฤษฎีการแพร่ให้ผลการทำนายที่ดีกว่าแบบจำลองของ Ranz&Marshall แต่ทั้งนี้ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ทำนายจากแบบจำลองทฤษฎีการแพร่ยังคงมีค่าต่ำกว่าผลการทดลอง 45 %

คำสำคัญ : เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย, การแพร่สมประสิทธิ์การแพร่

Drying models of rice milk in a verticle spray dryer^{*}

Soupsakun Chindapon¹⁾ and Anurak Petiraksakul²⁾

¹⁾ Graduated Student, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Bangkok, 10800

²⁾ Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Bangkok, 10800

Email: arp@kmitnb.ac.th

Abstract

The objective of this research is to study on drying models of rice-milk powder produced by using a verticle spray dryer. Two mathematical models, diffusion theory and Ranz&Marshall models, were used to determine the moisture content of rice-milk powder in falling-rate drying period and to compare with experimental results. Rice-milk powder was produced by using the small spray dryer at process optimum condition i.e. drying air temperature of 193 °C, volumetric air flow rate of 35 m³/h and rice-milk feed rate of 738 ml/h. Effective diffusivity was estimated from diffusion theory based on a thin slab and its value was 3.36×10^{-12} m²/s. The diffusion model showed better results than Ranz&Marshall model. However, product moisture content predicted from the diffusion model gave a lower value of 45 % when it was compared to the experimental result.

Keywords: Rice, Drying model, Spray drying, Diffusion, effective diffusivity

บทนำ

แบบจำลองการทำแห้ง (drying model) เป็นการอธิบายปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการทำแห้ง โดยอาศัยทฤษฎีการถ่ายเทมวลสาร พลังงานและโมเมนตัม (momentum) เป็นพื้นฐาน ในการทำแห้งอาหาร ปริมาณความชื้นเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ แบบจำลองการทำแห้งมีประโยชน์ต่อการหาสภาวะที่เหมาะสม โดยสามารถแปรค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีอยู่ในแบบจำลอง เพื่อหาค่าปริมาณความชื้นที่ทำนายได้ เปรียบเทียบกับค่าที่ต้องการ ซึ่งจะช่วยในการกำหนดขอบเขตในการออกแบบการทดลองได้ นอกจากนั้นในการออกแบบเครื่องทำแห้ง ยังสามารถใช้แบบจำลองช่วยในการกำหนดขนาดห้องทำแห้งและการขยายขนาด (scale up) สำหรับการผลิตในเชิงอุตสาหกรรม

งานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแบบจำลองการทำแห้ง โดยแสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของหยดน้ำนมข้าวระหว่างการทำแห้ง ในเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยแนวตั้งขนาดเล็ก

แบบจำลองการทำแห้ง

ข้อสมมุติฐานในแบบจำลอง

1. หยดของเหลวเคลื่อนที่ในทิศทาง และความเร็วเท่ากับอากาศร้อน
2. ไม่มีการชนกันระหว่างหยดของเหลวหรืออนุภาค
3. เมื่อการทำแห้งเข้าสู่ช่วงอัตราการทำแห้งลดลง ขนาดของอนุภาคมีค่าเท่ากับขนาดอนุภาค ณ จุดวิกฤต
4. หยดของเหลวและอนุภาคพิจารณาเป็นทรงกลม

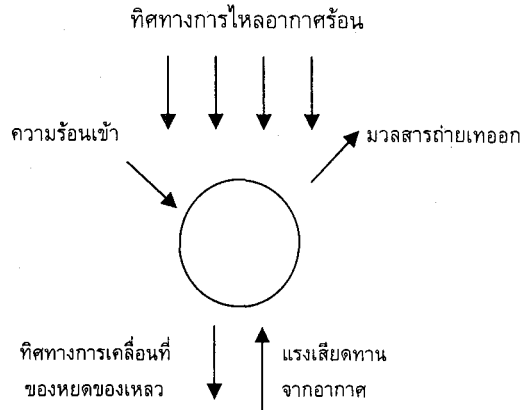
ในการทำแห้งสามารถแบ่งช่วงการทำแห้งออกได้ 2 ช่วง คือ ช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ (constant rate drying period) และช่วงอัตราการทำแห้งลดลง (falling rate drying period) แบบจำลองที่แสดงการถ่ายเทความชื้นในแต่ละช่วงการทำแห้งมีดังนี้

ช่วงอัตราการทำแห้งคงที่

เมื่อของเหลวที่เคลื่อนที่ผ่านอะตอมไมเซอร์ (atomizer) จะเกิดการแตกตัวออก กลายสภาพเป็นหยดของเหลวซึ่งมีขนาดต่างกัน กระบวนการถ่ายเทมวล พลังงานและโมเมนตัมระหว่างหยดของเหลวและอากาศ จะเกิดขึ้นพร้อมๆ กันดังแสดงใน รูปที่ 1 ในสภาวะที่ความร้อนถ่ายเทจากอากาศร้อนเข้าสู่หยดของเหลวสมดุลกับการเปลี่ยนแปลงเฟสของน้ำในหยดของเหลว จะทำให้เกิดสภาวะสมดุลแบบพลวัตขึ้น การถ่ายเทมวลจะเป็นไปตามสมการ (1) ซึ่งอธิบายได้ว่า อัตราการถ่ายเทน้ำออกจากหยดของเหลว จะขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอน้ำในอากาศ พื้นที่ผิว และ ความแตกต่างของความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวของหยดของเหลวกับอากาศ

$$M_A = h'_D A (C_{AS} - C_A) \quad (1)$$

โดย M_A คืออัตราการถ่ายเทมวลสาร h'_D คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร A คือพื้นที่ผิวของหยดของเหลว C_{AS} คือความเข้มข้นของสาร A ที่อิมตัวและ C_A คือความเข้มข้นของสาร A



รูปที่ 1 หยดของเหลวเคลื่อนที่ผ่านกระแสก๊าซร้อน

จากสมการ (1) สามารถเขียนอัตราการถ่ายเทที่ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความชื้นในอากาศได้ดังนี้

$$M_A = h'_D \rho_a A (H_w - H_A) \quad (2)$$

โดย H_w คือปริมาณความชื้นในอากาศที่ผิวหยดของเหลว ρ_a คือปริมาณความชื้นต่อมวลอากาศแห้ง และ H_A คือปริมาณความชื้นในกระแสอากาศร้อน

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร สามารถแสดงในเทอมของเลขเชอร์วูด (Sherwood number, $Sh = \frac{h'_D D_P}{D_{AB}}$)

โดย D_P คือขนาดหยดของเหลว และ D_{AB} คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอน้ำในอากาศ จากการศึกษาโดยการวิเคราะห์เทอมไร้หน่วย ได้รูปแบบความสัมพันธ์กับเลขเรย์โนลด์ (Reynold number, Re) และเลขชมิต (Schmid number, Sc) ดังนี้ (สมชาติ, 2540)

$$Sh = Sh_0 + a Re^{m_0} Sc^{n_0} \quad (3)$$

โดย Sh_0 คือค่าของเลขเชอร์วูดที่เกิดจากการถ่ายเทแบบการแพร่กระจายของโมเลกุลอย่างเดียว สำหรับการถ่ายเทมวลสารของวัตถุทรงกลม ค่า $Sh_0 = 2$ (Masters, 1991)

จากข้อสมมุติฐานที่ให้หยดของเหลวที่ออกจากอะตอมไมเซอร์มีความเร็วเท่ากับความเร็วของอากาศและขนาดกัน ทำให้ความเร็วสัมพัทธ์ของหยดของเหลวเทียบกับอากาศมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นค่า Re จึงมีค่าเป็นศูนย์ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร (h'_D) จึงมีค่าตามสมการ

$$h'_D = \frac{2 D_{AB}}{D_P} \quad (4)$$

ถ้าพื้นที่ผิวของหยดของเหลว (A) มีค่าดังสมการ

$$A = \pi D_P^2 \quad (5)$$

แทนค่าสมการ (4) และ (5) ลงใน (2) แล้วแทน ρ_a ด้วยปริมาตรจำเพาะของอากาศชื้น (V) จะได้

$$M_A = \frac{2\pi D_{AB} D_P (H_W - H_A)}{V} \quad (6)$$

นิยามค่าปริมาณความชื้นฐานแห้ง (X)

$$X = \frac{m_{wi} - m_A}{m_s} \quad (7)$$

โดย m_{wi} คือมวลของน้ำในหยดของเหลวเริ่มต้น m_s คือมวลของของแข็งแห้งในหยดของเหลวและ m_A คือมวลของน้ำที่ระเหยออกสู่อากาศ

เมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ด้านขวาของ สมการ (6) จะพบว่า สามารถพิจารณาให้มีค่าคงที่ได้ ยกเว้น D_P ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงกับเวลา เนื่องจากผลของการถ่ายเทน้ำออกจากหยดของเหลว

กำหนดให้ D_P มีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยของความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดของเหลวเริ่มต้นและที่จุดวิกฤต ตามสมการ

$$D_P = D_{P-avg} = \frac{(D_i + D_{cri})}{2} \quad (8)$$

โดยเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดของเหลวที่จุดวิกฤต (D_{cri}) เป็นค่าที่ได้จากการทดลอง มีค่าเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของผลิตภัณฑ์ ตามข้อสมมุติฐานข้อที่ 3

สำหรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดของเหลวเริ่มต้น (D_i) สามารถคำนวณได้ตามสมการ (Master, 1991)

$$D_i = \left(\frac{\rho_w (1 + X_{cri})}{\rho_s (1 + X_i)} \right)^{-0.33} D_{cri} \quad (9)$$

โดย ρ_w คือความหนาแน่นของหยดของเหลว ρ_s คือความหนาแน่นของอนุภาค X_{cri} คือปริมาณความชื้นฐานแห้งวิกฤต และ X_i คือปริมาณความชื้นฐานแห้งเริ่มต้น

แทนค่า D_{P-avg} จากสมการ (8) ลงในสมการ (6) จะได้

$$\frac{dm_A}{dt} = M_A = \frac{2\pi D_{AB} D_{P-avg} (H_W - H_A)}{V} \quad (10)$$

หาอนุพันธ์ค่า X เทียบกับเวลา (t) จะได้

$$\frac{dX}{dt} = \frac{d\left(\frac{m_{wi} - m_A}{m_s}\right)}{dt} \quad (11)$$

เนื่องจากเทอม $\left(\frac{m_{wi}}{m_s}\right)$ เป็นค่าคงที่ ทำให้ $\frac{d(m_{wi}/m_s)}{dt}$ มีค่าเท่ากับศูนย์ สมการ (11) จึงลด

รูปเป็นดังสมการ

$$\frac{dX}{dt} = -\frac{d(m_A/m_s)}{dt} \quad (12)$$

$$\frac{dX}{dt} = \left(-\frac{1}{m_s}\right)\left(\frac{dm_A}{dt}\right) \quad (13)$$

แทนค่า $M_A = \frac{dm_A}{dt}$ ลงในสมการ (13) จะได้

$$\frac{dX}{dt} = -\frac{2\pi D_{AB} D_{P-avg} (H_W - H_A)}{m_s V} \quad (14)$$

ทำการอินทิเกรตสมการ (14) กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นที่เวลา $t=0: X = X_i$ จะได้แบบจำลองในช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ ตามสมการ (15)

$$X = X_i - \frac{2\pi D_{AB} D_{P-avg} (H_W - H_A) t}{m_s V} \quad (15)$$

จากสมการ (15) พบว่า ในช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ ปริมาณความชื้นของหยดของเหลวจะเปลี่ยนแปลงกับเวลาในรูปแบบเชิงเส้น จนกระทั่งปริมาณความชื้นของหยดของเหลวมีค่าเท่ากับค่าวิกฤต การถ่ายเทมวลสารจะเข้าสู่ช่วงอัตราการทำแห้งลดลง

ช่วงอัตราการทำแห้งลดลง

สำหรับช่วงอัตราการทำแห้งลดลง ในที่นี้ทำการศึกษาแบบจำลอง 2 แบบจำลองดังนี้

1. ทฤษฎีการแพร่ (diffusion theory) (สมชาติ, 2540)

กฎของฟิค (Fick) สามารถอธิบายกระบวนการแพร่ของความชื้นในวัสดุทรงกลมได้ดังสมการ

$$\frac{\partial X(r,t)}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 X(r,t)}{\partial r^2} \quad (16)$$

โดย X คือปริมาณความชื้นฐานแห้ง ณ จุดใดๆ ในวัสดุ r คือแนวรัศมีและ D_{eff} คือสัมประสิทธิ์การแพร่เอฟเฟกทีฟของน้ำ (effective diffusivity)

การถ่ายเทความชื้นในช่วงอัตราการทำแห้งลดลงเป็นแบบไม่คงตัว (transient) โดยที่ขึ้นกับรัศมีและเวลา

สมมติให้ อนุภาคเป็นทรงกลมขนาดคงที่และมีสภาพเหมือนกันทุกทิศทาง (isotropic) จะได้คำตอบของสมการ (16) ดังนี้

$$\frac{X - X_s}{X_0 - X_s} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[-n^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{r^2} \right] \quad (17)$$

โดย X_s คือปริมาณความชื้นฐานแห้งที่ผิว สามารถสมมุติให้มีค่าเท่ากับปริมาณความชื้นสมดุล X_0 คือปริมาณความชื้นฐานแห้งเริ่มต้น ให้มีค่าเท่ากับปริมาณความชื้นวิกฤตและ r_0 คือรัศมีของทรงกลม

จากสมการ (17) พบว่า พารามิเตอร์สำคัญที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น คือสัมประสิทธิ์การแพร่เอฟเฟกทีฟและขนาดอนุภาค

เนื่องจากข้อสมมุติข้างต้น ขนาดอนุภาคไม่เปลี่ยนแปลงตลอดช่วงอัตราการทำแห้งลดลง ดังนั้นจะเหลือเพียงสัมประสิทธิ์การแพร่เอฟเฟกทีฟที่มีผลต่อการทำแห้ง

โดยทั่วไป สัมประสิทธิ์การแพร่เอฟเฟกทีฟจะเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นและอุณหภูมิ แต่สำหรับวัสดุที่มีปริมาณความชื้นเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงที่ไม่กว้างจนเกินไป สามารถสมมุติให้มีค่าคงที่ได้ (McCabe, 1993) สำหรับอุณหภูมิซึ่งมีอิทธิพลต่อสัมประสิทธิ์การแพร่เอฟเฟกทีฟ ในแบบของสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius) ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาใช้อุณหภูมิเฉลี่ยแทน

เนื่องจากสมการ (17) อยู่ในรูปของอนุกรม ซึ่งเทอมแรกๆจะมีค่ามากและจะลดลงไปเรื่อยๆ ในที่นี้เลือกใช้เฉพาะเทอมแรก ในการอธิบายปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงในช่วงอัตราการทำแห้งลดลง ดังสมการ (18)

$$\frac{X - X_s}{X_0 - X_s} = \frac{6}{\pi^2} \exp \left[-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{r^2} \right] \quad (18)$$

สมการ (18) เป็น สมการที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นภายในช่วงอัตราการทำแห้งลดลง จากสมการสังเกตได้ว่าปริมาณความชื้นลดลงแบบเอกซ์โปเนนเชียล ซึ่งจะลดลงมากในระยะแรกแล้วค่อยๆเข้าสู่ค่าสมดุล

ในกรณีวัสดุที่เป็นแผ่นบาง (thin slab) ที่มีการถ่ายเทมวลสารด้านเดียว (one face) คำตอบของสมการการแพร่ จะเป็นดังนี้ (Heldman, 1992)

$$\frac{X - X_s}{X_0 - X_s} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right] \quad (19)$$

หากคิดเฉพาะเทอมแรกของสมการ (19) จะได้

$$\frac{X - X_s}{X_0 - X_s} = \frac{8}{\pi^2} \exp \left[-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right] \quad (20)$$

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เอฟเฟกทีฟจะทำโดยการใส่ล็อกฐานธรรมชาติทั้งสองข้างของสมการ (20) จากนั้นคูณด้วย -1 จะได้สมการดังนี้

$$-\ln \left[\frac{X - X_s}{X_0 - X_s} \right] = -\ln \left[\frac{8}{\pi^2} \right] + \left[\frac{D_{eff} \pi^2}{4L^2} \right] t \quad (21)$$

จะพบว่า สมการ (21) เป็นสมการเส้นตรง ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เอฟเฟกที่พหุคูณสามารถคำนวณได้จากสมการ (22)

$$D_{eff} = \frac{4L^2 m}{\pi^2} \quad (22)$$

โดย m คือความชันของสมการ (21) และ L คือความหนาของแผ่นบาง

ในที่นี้จะใช้สมการ (21) และ (22) ประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เอฟเฟกที่พหุคูณในนมข้าว (สภาวะของแข็ง) หลังจากนั้นจะนำค่าที่ได้ไปใช้ในแบบจำลองตามทฤษฎีการแพร่

2. แบบจำลองของ Ranz&Marshall (1964) (Masters, 1991)

สมชาติ (2540) ได้อธิบายแนวคิดนี้ไว้ว่า ในช่วงอัตราการทำแห้งลดลง หยตอาหารจะแห้งลงโดยที่ขนาดไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ในช่วงนี้อุณหภูมิของหยตอาหารจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากสมการสมดุลพลังงานจะได้ว่า

$$h' A(T - \Theta) = \rho_s V_P c_P \frac{d\Theta}{dt} + \rho_s V_P \lambda \left[-\frac{dX}{dt} \right] \quad (23)$$

โดย h' คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน T คืออุณหภูมิของอากาศ Θ คืออุณหภูมิของอนุภาค V_P คือปริมาตรของอนุภาค c_P คือความร้อนจำเพาะของอนุภาคและ λ คือความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำ

สมการ (23) อธิบายได้ว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาจากอากาศมายังผลิตภัณฑ์ จะเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปีของผลิตภัณฑ์ บวกกับอัตราการใช้ความร้อนแฝงในการระเหยน้ำ

$$\begin{aligned} \text{แต่เนื่องจาก } \rho_s V_P c_P \frac{d\Theta}{dt} \ll \rho_s V_P \lambda \left[-\frac{dX}{dt} \right] \text{ จะได้} \\ -\frac{dX}{dt} = \frac{h' A(T - \Theta)}{\rho_s V_P \lambda} \end{aligned} \quad (24)$$

สมมติให้ $(T - \Theta)$ มีค่าคงที่โดยใช้ค่าเฉลี่ย ΔT_{avg} และ $Nu = \frac{h' D_P}{k} = 2$ (จากข้อสมมุติฐานที่ให้ความเร็วสัมพัทธ์ของหยตของเหลวเทียบกับอากาศมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นค่า Re จึงมีค่าเป็นศูนย์ สมชาติ (2540)) จะได้คำตอบของสมการ (24) ดังนี้

$$X = X_{cri} - \left(\frac{12 K_d \Delta T_{avg}}{\lambda D_{cri}^2 \rho_s} \right) t \quad (25)$$

โดย K_d คือการนำความร้อนของอากาศ และ ΔT_{avg} คือความแตกต่างเฉลี่ยของอุณหภูมิของอากาศและอนุภาค

จะพบว่า แบบจำลองของ Ranz&Marshall ตามสมการ (25) อธิบายการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในแบบเชิงเส้นซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงจะถูกควบคุมโดยเทอมต่างๆที่อยู่ภายในวงเล็บ

การคำนวณปริมาณความชื้นเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์ผงในงานวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือการคำนวณปริมาณความชื้นในช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ตามสมการ (15) โดยเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดของเหลวเริ่มต้นหาค่าจากสมการ (9) จากนั้นปริมาณความชื้นที่จุดวิกฤติจะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ ความชื้นเริ่มของคำนวณปริมาณความชื้นในช่วงอัตราการทำแห้งลดลงตามสมการ (21) หรือ สมการ (25) สำหรับแบบจำลองการแพร่ หรือ แบบจำลองของ Ranz&Marshall ตามลำดับ

วิธีการทดลอง

การทดลองหาความชื้นวิกฤต

ปริมาณความชื้นวิกฤตของนมข้าว คือ ปริมาณความชื้นขณะที่อัตราการทำแห้งเริ่มลดลง สามารถหาได้จากจุดเปลี่ยนโค้งของกราฟการทำแห้ง การหาปริมาณความชื้นวิกฤตของนมข้าว ทำการทดลองโดยการอบน้ำมันข้าวปริมาณ 2 กรัมในจานโลหะ ที่อุณหภูมิอากาศที่ออกจากห้องทำแห้ง (110°C) นำตัวอย่างออกจากตู้อบทุกๆ 30 วินาที บันทึกค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง กระทำซ้ำ จนกระทั่งน้ำหนักเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 2-3 มิลลิกรัม วัดความหนาของนมข้าวที่เหลือ (ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4)

โดยอัตราการทำแห้ง (R_D) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$R_D = \frac{Wt_i - Wt_{i+1}}{t_i - t_{i+1}} \quad (26)$$

โดย Wt คือน้ำหนักของตัวอย่างและจานโลหะ t คือเวลาและ i คือรอบของการวัดค่า

ปริมาณความชื้นฐานแห้ง (X) คำนวณจากสมการ (27) ดังนี้

$$X = \frac{Wt_i - Wt_{dish} - Wt_{dry-solid}}{Wt_{dry-solid}} \quad (27)$$

โดย $Wt_{dry-solid}$ คือน้ำหนักของของแข็งแห้ง

การทดลองหาสัมประสิทธิ์การแพร่

สัมประสิทธิ์การแพร่เอฟเฟกทีฟ ประมาณค่าจากความชื้นของกราฟเส้นตรงตามสมการ (21) ที่

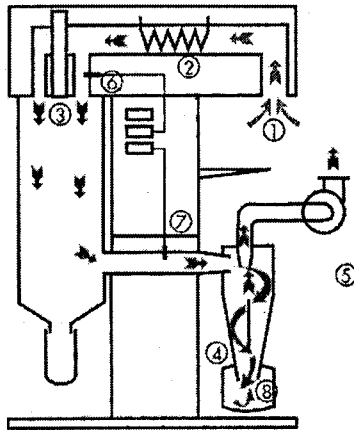
พล็อตระหว่างเทอม $-\ln \left[\frac{X - X_s}{X_0 - X_s} \right]$ และเวลา โดยใช้เฉพาะข้อมูลในช่วงอัตราการทำแห้งลดลง ตาม

ข้อมูลการทดลองในข้อ 3.1 โดยสมมติให้ X_s มีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจากทำการทดลองที่อุณหภูมิ 110°C ความดันบรรยากาศ สัมประสิทธิ์การแพร่เอฟเฟกทีฟประมาณค่าโดยแทนค่าความชื้นและความหนาของนมข้าวหลังจากอบแห้งลงในสมการ (22)

สัมประสิทธิ์การแพร่ของไอน้ำในอากาศ ใช้วิธีของ Hirschfelder-Bird-Spotz (1949) (Treybal, 1981) โดยที่อุณหภูมิสัมบูรณ์ประมาณค่าตามกฎเศษหนึ่งส่วนสาม (one-third rule) (Hewitt, 1982)

การทดลองการทำแห้ง

การทดลองทำแห้งน้ำมันข้าว ใช้เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย Buchi B-191 แสดงการทำงานตามรูปที่ 2 โดยทดลองที่อุณหภูมิอากาศร้อน 193°C อัตราไหล่อากาศร้อน $35.0\text{ m}^3/\text{h}$ และอัตราป้อนสาร 738 ml/h ความดันและอัตราไหล่อากาศสำหรับสร้างละออง (atomizing air) มีค่า 6 บาร์และ $600 \pm 20\text{ l/h}$ ตามลำดับ อุณหภูมิที่ป้อนสาร 30°C ภายในห้องทดลอง อุณหภูมิอากาศกระเปาะเปียกและกระเปาะแห้งเท่ากับ 26 และ 31°C ตามลำดับ



รูปที่ 2 การไหลเข้าของอากาศผ่านเครื่องอบแห้ง (1) คือ ช่องทางเข้า (2) คือเครื่องให้ความร้อน (3) คือหัวพ่นฝอย (4) ไซโคลน (5) พัดลมดูดอากาศ (6) จุดวัดอุณหภูมิอากาศเข้า (7) จุดวัดอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าไซโคลน และ (8) โถเก็บผลิตภัณฑ์

อัตราการไหล่อากาศ ทดลองโดยใช้ท่อปีโตต์ (pitot tube) ต่อที่ด้านปลายของเครื่องอบแห้ง วัดผลต่างความดันโดยใช้มาโนมิเตอร์ดิจิตอล Dwyer series 475 MARK III เพื่อหาเวลาที่อนุภาคอยู่ในเครื่องทำแห้ง

การวัดสมบัติของผลิตภัณฑ์

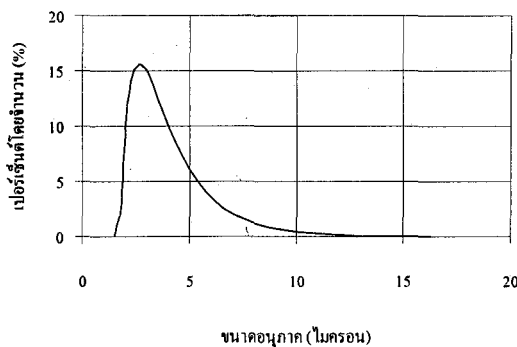
ผลิตภัณฑ์ที่ได้ ถูกนำมาวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น โดยการอบที่อุณหภูมิ $60 - 70^{\circ}\text{C}$ ความดันไม่เกิน 100 มม.ปรอท (AOAC, 1984) ขนาดอนุภาค ทำการทดลองโดยใช้เครื่องวัดขนาดอนุภาคผง Mulvern Mastersizer 2000 หน่วยป้อนสาร Scirocco 2000A (ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 3) ความหนาแน่นจริงของผลิตภัณฑ์ทำการวัดด้วยเครื่องวัดความหนาแน่นอนุภาคผง Multi Pycnometer Quanta chrome

ผลการทดลอง

จากการวัดขนาดอนุภาคผงของผลิตภัณฑ์ พบว่า มีขนาดอยู่ระหว่าง 1 – 15 ไมครอน ดังแสดงใน **รูปที่ 3** โดยมีค่า surface weighted mean diameter เท่ากับ 8.67 ไมครอน

พิจารณาเส้นโค้งการทำแห้งของน้ำมันข้าวใน **รูปที่ 4** (ทดลองจากการทดลองที่ 3.1) พบว่า ปริมาณความชื้นวิกฤตของนมข้าวเท่ากับ 0.79 ก.ก.น้ำตอก.ก.ของแข็งแห้ง

จากสมการที่ (8) และ (9) คำนวณหาขนาดของหยดของเหลวได้ผลตาม **รูปที่ 5** และคำนวณการกระจายมวลของของแข็งแสดงตาม **รูปที่ 6**

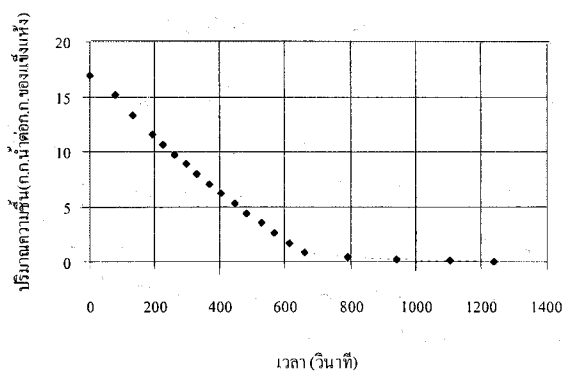


รูปที่ 3 การกระจายของขนาดอนุภาคนมข้าวผง (วัดจากเครื่องวัดขนาดอนุภาคผง Mulvern Mastersizer 2000 หน่วยบ่อนสาร Scirocco 2000A)

ช่วงอัตราการทำแห้งคงที่

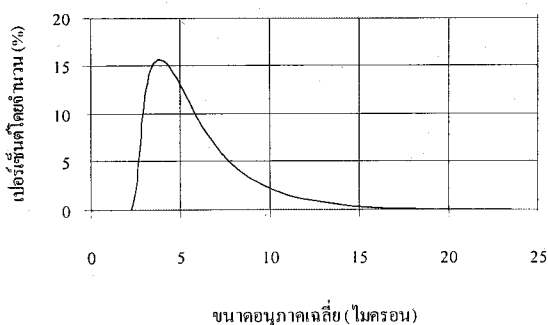
ตารางที่ 1 แสดงค่าพารามิเตอร์ในสมการ (15) โดยที่ ผลการทำนายปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาของหยดนมข้าวขนาด 3.86 และ 26.69 ไมครอน ในช่วงอัตราการทำแห้งคงที่แสดงใน **รูปที่ 7** และ **รูปที่ 8** ตามลำดับ พบว่า เวลาที่ใช้ในช่วงอัตราการทำแห้งคงที่สั้นมาก

รูปที่ 9 แสดงเวลาที่ใช้ในการทำแห้งในช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ของหยดของเหลวเริ่มต้นที่ขนาดต่างๆ พบว่า เวลาที่ใช้ในการทำแห้งในช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ และมีความสัมพันธ์กับขนาดหยดของเหลวเริ่มต้นในแบบกำลังสอง ซึ่งในบางครั้งเรียกความสัมพันธ์นี้ว่า กฎของเส้นผ่านศูนย์กลางกำลังสอง (D^2 law) (Lefebvre, 1989)

รูปที่ 4 เส้นโค้งการทำแห้งของนมข้าว ที่อุณหภูมิ 110°C

พารามิเตอร์	ผลการทดลอง หรือประมาณค่า
X_i (kg water / kg dry solid)	16.9
D_{AB} (m^2/s)	3.5×10^{-5}
D_{P-avg} (micron)	รูปที่ 5
H_w (kg water / kg dry air)	0.078
H_A (kg water / kg dry air)	0.02
V ($\text{m}^3/\text{kg dry air}$)	1.08
m_s (kg dry solid)	รูปที่ 6

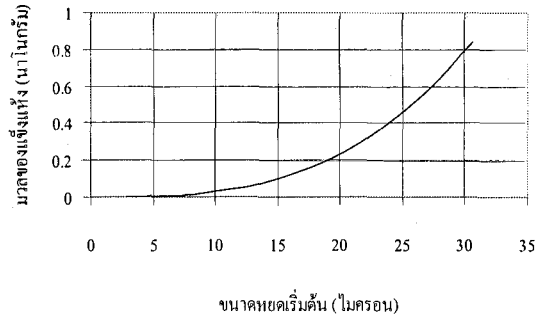
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ในสมการ (15)



รูปที่ 5 กราฟการกระจายของหยดของเหลว (คำนวณจากสมการ (9))

ในช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ การใช้สมการ (15) ทำนายปริมาณความชื้น จะมีความแตกต่างจากสภาพความเป็นจริงเล็กน้อย เนื่องจากการใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดของเหลวเฉลี่ยแทนใน

สมการ รวมถึงแบบจำลองการทำแห้งนี้ ยังไม่พิจารณาถึงช่วงเพิ่มอุณหภูมิ (heat-up period) ของหยดของเหลวเนื่องจากมีช่วงเวลาน้อยมากเมื่อเทียบกับเวลาที่ใช้ในการทำแห้งในช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ (Lefebvre, 1989)

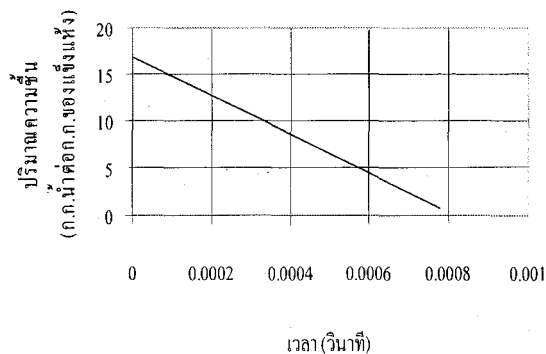


รูปที่ 6 กราฟการกระจายของมวลของแข็งแห้งในหยดของเหลว คำนวณจาก

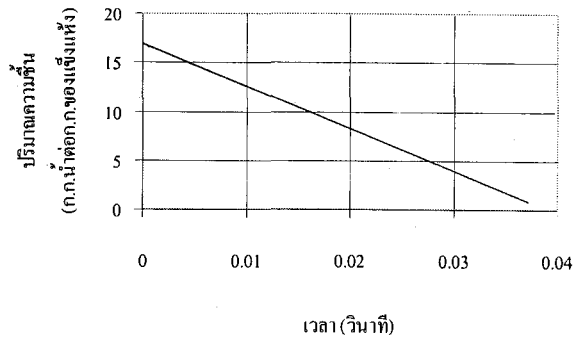
$$m_s = \left[\frac{\rho_w \pi D_i^3}{6(1 + X_i)} \right] \text{ โดย } \rho_w = 996 \text{ kg/m}^3$$

ช่วงอัตราการทำแห้งลดลง

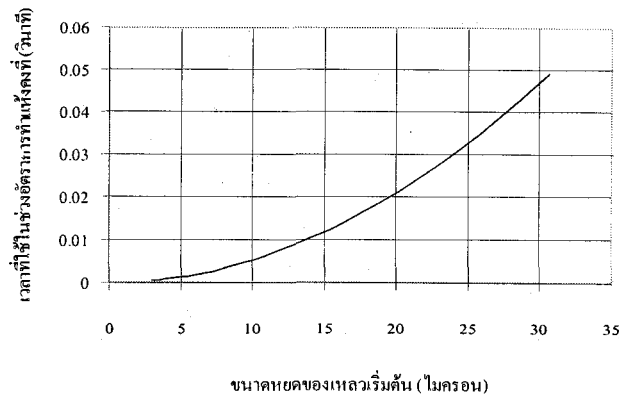
จากผลการทดลองพบว่า สัมประสิทธิ์การแพร่เอฟเฟกทีฟของน้ำในนมข้าวเท่ากับ $3.36 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์จากธัญพืช $5.50 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ (Tutuncu, 1996) และแป้ง $3.86 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ (Heldman, 1992) พบว่า มีค่าอยู่ในเลขยกกำลังเดียวกัน (same order of magnitude)



รูปที่ 7 ผลการทำนายปริมาณความชื้นของหยดนมข้าว ขนาด 3.86 ไมครอน



รูปที่ 8 ผลการทำนายปริมาณความชื้นของหยดนมข้าว ขนาด 26.69 ไมครอน



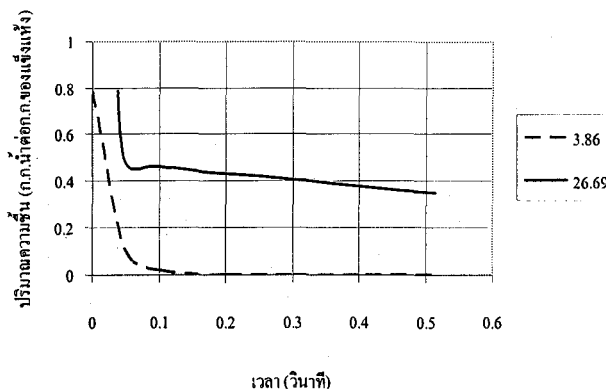
รูปที่ 9 แสดงเวลาที่ใช้ในการทำแห้งในช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ของหยดของเหลวที่มีขนาดเริ่มต้นต่างๆ

สำหรับเวลาที่ใช้ในเครื่องทำแห้งมีค่าเท่ากับ 0.516 วินาที เนื่องจากเป็นเครื่องทำแห้งขนาดเล็ก (สืบสกุล, 2547)

การทำนายความชื้นในนมข้าวผง

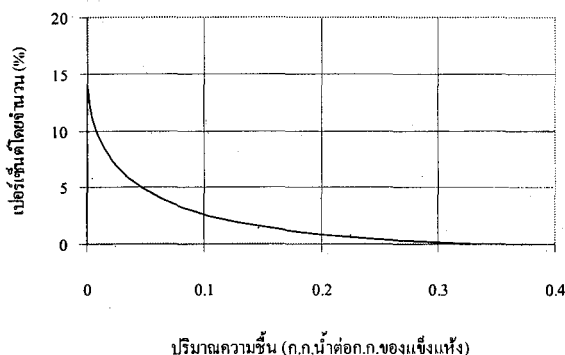
ผลการทำนายตามแบบจำลองทฤษฎีการแพร่

ผลการทำนายปริมาณความชื้นในช่วงนี้ ตามสมการ (18) ที่ขนาดหยดนมข้าวเริ่มต้น 3.86 และ 26.69 ไมครอน แสดงใน รูปที่ 10 พบว่า อนุภาคนมข้าวที่มีขนาดเล็กปริมาณความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็วแล้วค่อยๆเข้าสู่ศูนย์ สำหรับอนุภาคนมข้าวที่มีขนาดใหญ่ปริมาณความชื้นจะลดลงในอัตราที่ช้ากว่า ทำให้เมื่อออกจากห้องทำแห้งอนุภาคนมข้าวที่มีขนาดใหญ่จะมีปริมาณความชื้นสูงกว่า เนื่องจากละอองหยดของเหลวที่ออกจากอะตอมไมเซอร์มีขนาดแตกต่างกัน ปริมาณความชื้นของอนุภาคนมข้าวขนาดต่างๆที่ออกจากห้องทำแห้งจึงต่างกัน



รูปที่ 10 ผลการทำนายปริมาณความชื้นในช่วงอัตราการทำแห้งลดลงตามทฤษฎีการแพร่

รูปที่ 11 แสดงปริมาณความชื้นของอนุภาคนมข้าวผงจากการคำนวณ หลังออกจากเครื่องทำแห้ง พบว่า อนุภาคนมข้าวผงมีความชื้นอยู่ระหว่าง 0 – 0.32 ก.ก.น้ำตอก.ก.ของแข็งแห้ง โดยส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่า 0.1 ก.ก.น้ำตอก.ก.ของแข็งแห้ง การคำนวณปริมาณความชื้นของนมข้าวผง ทำโดยการหาค่าเฉลี่ยของปริมาณความชื้นของอนุภาคนมข้าวขนาดต่างๆ ซึ่งทำได้โดยหาพื้นที่ใต้กราฟใน รูปที่ 11 ได้ค่าเท่ากับ 0.015 ก.ก.น้ำตอก.ก.ของแข็งแห้ง เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.027 ก.ก.น้ำตอก.ก.ของแข็งแห้ง (ได้จากการทดลองในข้อ 3.3) พบว่า ค่าที่ได้จากแบบจำลองการทำแห้งมีค่าน้อยกว่า 44.65 %



รูปที่ 11 กราฟการกระจายของปริมาณความชื้นของอนุภาคนมข้าวเมื่อออกจากห้องทำแห้ง ได้จากการคำนวณตามแบบจำลองทฤษฎีการแพร่

สาเหตุที่ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองมีค่ามากกว่า อาจเนื่องมาจากเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ออกจากห้องทำแห้งผ่านท่อต่อ เข้าสู่ไซโคลน อุณหภูมิอากาศจะลดต่ำลง ทำให้ที่ผิวอนุภาคมีความชื้นสมดุลเพิ่มขึ้นมากกว่าเดิม และเกิดการดูดความชื้นกลับของผลิตภัณฑ์โดยเฉพาะอาหารผง ที่มีคุณสมบัติดูดความชื้นได้ดี (Fennema, 1985 ; Masters, 1991)

ในช่วงอัตราการทำแห้งลดลง ปัจจัยหลักที่มีผลต่อปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ปริมาณความชื้นสมดุล เวลาที่ใช้และขนาดของอนุภาค

ปริมาณความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์ เป็นค่าที่จะแสดงถึงค่าขอบเขตของปริมาณความชื้นผลิตภัณฑ์ที่สามารถเป็นไปได้ที่สภาวะการทำแห้งนั้นๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอากาศและคุณลักษณะของสาร เนื่องจากในการวิจัยนี้อุณหภูมิอากาศที่ทางออกมีค่าสูงกว่า 100°C ทำให้ปริมาณความชื้นสมดุลเท่ากับศูนย์ จึงทำให้สามารถลดปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ให้มีค่าต่ำๆได้ โดยใช้เวลาเพียงไม่กี่วินาที แต่ในการผลิตในเชิงพาณิชย์ซึ่งจำเป็นที่จะต้องทำการผลิตคราวละมากๆ เครื่องทำแห้งที่ใช้จะมีขนาดใหญ่กว่าที่ทำการทดลอง การควบคุมให้อากาศร้อนที่ทางออกมีอุณหภูมิสูงอาจทำได้ยากหรือต้องใช้ต้นทุนสูง อีกทั้งยังอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์อาหาร การเพิ่มเวลาที่อนุภาคอยู่ในเครื่องทำแห้งให้มากขึ้นหรือลดขนาดหยดของเหลวจึงเป็นทางเลือกที่จะทำให้ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลงได้อีกทางหนึ่ง

สำหรับเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยชนิดไหลตามกัน เวลาที่อนุภาคอยู่ในห้องทำแห้งจะแปรผกผันกับอัตราการไหลอากาศ ดังนั้นการเพิ่มเวลาที่อนุภาคอยู่ในห้องทำแห้ง จึงทำได้โดยลดอัตราการไหลอากาศ ส่วนการลดขนาดหยดของเหลว สามารถทำได้โดยการเพิ่มพลังงานที่ใช้ในการสร้างละอองหยดของเหลวของอะตอมไมเซอร์ แต่ทั้งนี้อาจส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ได้

ผลการทำนายจากแบบจำลองของ Ranz&Marshall

จากการทดลองพบว่า ความหนาแน่นอนุภาคเท่ากับ 680.6 kg/m^3 การนำความร้อนอากาศและความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอของน้ำประมาณค่าได้เท่ากับ 0.031 W/m-K (Singh, 1993) และ $2,235.9\text{ kJ/kg}$ (Masters, 1991) ตามลำดับ ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยคิดเฉพาะอากาศ ได้เท่ากับ 82.55°C

เมื่อทำการคำนวณปริมาณความชื้นของอนุภาคนมข้าวผงตามสมการ (25) พบว่า ผลที่ได้จากแบบจำลองของ Ranz&Marshall ให้ผลลัพธ์เป็นศูนย์ สามารถอธิบายได้ว่า ตามแนวคิดนี้ พิจารณาให้พลังงานที่อนุภาคได้รับถูกใช้ไปในการเปลี่ยนสถานะของน้ำ โดยความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอที่ใช้ในแบบจำลองมีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง เนื่องจากน้ำในอาหารอยู่ในสภาพผูกพัน ทำให้ต้องใช้พลังงานในการเปลี่ยนสถานะมากกว่าน้ำอิสระ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ผลการทำนายจากสมการ (25) มีความแตกต่างจากผลการทดลองมาก

สรุปผลการทดลอง

แบบจำลองการทำแห้งตามทฤษฎีการแพร่ ให้ผลการทำนาย ค่าปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์นมข้าวผงน้อยกว่า จากผลการทดลอง ($0.027\text{ ก.ก.น้ำตอก.ก.ของแข็งแห้ง}$) ประมาณ 45% สำหรับแบบจำลองของ Ranz&Marshall ให้ผลการทำนายที่มีค่าต่ำมาก สาเหตุคาดว่าเนื่องจากความร้อนแฝงในการระเหยของน้ำในแบบจำลองมีค่าต่ำกว่าสภาพจริง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาเทคโนโลยีขนถ่ายวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้ความอนุเคราะห์ ในการใช้เครื่องมือวัดขนาดอนุภาคผง

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ ในการใช้เครื่องมือวัดความหนาแน่นอนุภาคผง

ขอขอบคุณ คุณอรชуда ชันดีกุล ที่ให้คำแนะนำในการวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคผงของผลิตภัณฑ์

เอกสารอ้างอิง

- สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2540. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- A. O. A. C.. 1984. **Official Methods of Analysis**. 14th ed. Washington, D.C : Association of Official Chemists.
- Fennema, O. R. 1985. **Food Chemistry**. New York : Marcel Dekker Inc.
- Heldman, D. R. 1992. **Handbook of Food Engineering**. New York : Marcel Dekker Inc.
- Hewitt, G. F. 1982. **Multiphase Science and Technology : Vol 1**. New York : Hemisphere Publishing Corp.
- Lefebvre, A. H. 1989. **Atomization and Sprays**. New York : Hemisphere Publishing Corp.
- Masters, K. 1991. **Spray Drying Handbook**. London : Longman Scientific & Technical.
- McCabe, W. L. et al., 1993. **Unit operations of chemical engineering**. Singapore : McGraw-Hill.
- Singh, R. P. 1993. **Introduction to Food Engineering**. New York : Academic Press Inc.
- Treybal, R. E. 1980. **Mass-Transfer Operations**. Singapore : McGraw-Hill Inc.
- Tutuncu, M. A. and Labuza. T. P. 1996 .Effect of geometry on the effective moisture transfer diffusion coefficient. **Journal of Food Engineering**. 30 : 433 - 447.