เทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอยสำหรับอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร

Spray Drying Technique for Drying of Agricultural Product

โพธิ์ทอง ปราณีตพลกรัง *

Pothong Praneetpolkrang *

Received: 23 February 2018 , Revised: 27 May 2019 , Accepted: 15 January 2020

บทคัดย่อ

ในแต่ละปีประเทศไทยมีการผลิตสินค้าทางการเกษตรออกเป็นจำนวนมากทั้งในรูปผลิตภัณฑ์สดและผลิตภัณฑ์แห้ง การแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรถือเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญอีกวิธีหนึ่ง เพราะเป็นการเพิ่มมูลค่าผลผลิตทางการเกษตรให้สูงขึ้น การแปรรูปพืชผักผลไม้เป็นผลิตภัณฑ์แบบผงสำหรับชงดื่มนับเป็นการแปรรูปผลผลิตที่น่าสนใจแบบหนึ่ง บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรโดยการใช้เทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอย อันดับแรกนำเสนอหลักการอบแห้งแบบพ่นฝอย การถ่ายเทความร้อนและมวลของการอบแห้งแบบพ่นฝอย สำหรับวิเคราะห์กระบวนการการถ่ายโอนความร้อนและควบคุมกระบวนการอบแห้งต่อมาศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารผง สุดท้ายการประยุกต์ใช้เทคนิคอบแห้งพ่นฝอยผสมผสานกับเทคนิคการอบแห้งแบบอื่นๆ

คำสำคัญ: การอบแห้ง, เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย, การถ่ายเทความร้อน

ABSTRACT

Each year Thailand produces a large number of fresh and dry agricultural products. Post-harvest processing is an important process because it increases the value of agricultural products. Fruit and vegetables are often processed into powder products for beverages and this is an interesting form of product processing. The objective of this article is to study the drying of agricultural products using spray drying techniques. First, the study introduces the spray drying principle, and the heat and mass transfer of spray drying to analyze the heat transfer process, and how the drying process is controlled. The study then continues to investigate the factors that

---

สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี อำเภอเมือง จังหวัดจันทบุรี 22000

Department of Industrial Technology, Faculty of Industrial Technology, RambhaiBarni Rajabhat University, Muang, Chanthaburi 22000, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author E-mail): pothong.p@rbru.ac.th Tel: 08 8080 8859

affect the quality of powder food products. Finally, the paper concludes with an application of the spray drying technique combined with other drying techniques.

Key words: drying, spray dryer, heat transfer

บทนำ

ประเทศไทยนั้นเป็นประเทศที่มีการส่งออกสินค้าทางการเกษตร เช่น ข้าว พืชผลไม้และเนื้อสัตว์ต่างๆ ในแต่ละปีเป็นจำนวนมากทั้งในรูปผลิตภัณฑ์สดและแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆการอบแห้งเป็นกระบวนการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรที่มีความสำคัญอีกวิธีหนึ่ง และยังเป็นการเพิ่มมูลค่าผลผลิตทางการเกษตรของประเทศให้สูงขึ้นและเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของเกษตรกรและผู้ประกอบการได้เป็นอย่างดี (อาทิตยา และ อมรชัย, 2557) เทคโนโลยีการอบแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้นในวัสดุ เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ผลผลิตทางการเกษตรที่อบแห้งด้วยวิธีการและสภาวะที่เหมาะสมจะสามารถเก็บรักษาไว้ได้นานสามารถรักษาคุณสมบัติต่างๆ ที่ต้องการไว้ได้ดี (สมชาติ, 2540) นอกจากนี้ยังทำให้สะดวกในการขนส่ง หรือการนำไปเป็นวัตถุดิบในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆและยังเป็นการสร้างผลิตภัณฑ์ใหม่ที่เป็นทางเลือกของผู้บริโภคมากขึ้นอีกด้วย วัตถุดิบทางการเกษตรที่นำมาทำแห้งอาจมีสถานะเป็นของเหลวของกึ่งแข็งหรือของแข็ง ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จะมีสถานะเป็นของแข็ง ซึ่งอาจเป็นแผ่น หรือเป็นผง ที่มีลักษณะและคุณภาพแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับกระบวนการอบแห้งที่เลือกใช้ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์แห้งที่พบทั่วไป ได้แก่ ผักผลไม้ กาแฟน้ำตาล สัตว์น้ำ อาหารทะเล สมุนไพร เครื่องเทศ เป็นต้น (อาทิตยา และ อมรชัย, 2557) ซึ่งกระบวนการอบแห้งจะมีการถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลสารที่เกิดขึ้นพร้อมกัน กระบวนการที่ซับซ้อนกันนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่ต่างกัน เช่น อุณหภูมิและความเร็วลมร้อน อัตราการไหลของอากาศ ลักษณะทางกายภาพและความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ พื้นที่และความดัน (สมชาติ, 2540) นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงคุณภาพของอาหารที่ได้หลังจากการทำแห้ง เช่น คุณค่าทางโภชนาการสี กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส เป็นต้น ที่สำคัญต้องคำนึงถึงการประหยัดพลังงานอีกด้วย (อาทิตยา และ อมรชัย, 2557)

การอบแห้งผลผลิตเกษตรแบบผงเป็นการอบแห้งอีกวิธีที่นิยมกันในปัจจุบัน ซึ่งการทำแห้งแบบผงมีหลายวิธี เช่น การทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง (Roller drying) เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray drying) และการทำแห้งแบบโฟม-แมท (Foam mat drying) เป็นต้น (อาทิตยา และ อมรชัย, 2557) ซึ่งการอบแห้งแต่ละวิธีมีจุดเด่นและจุดด้อยแตกต่างกัน เช่น วิธีการทำแห้งโฟม-แมทนั้นมีต้นทุนในการผลิตต่ำแต่กำลังการผลิตต่ำและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไม่สม่ำเสมอส่วนวิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งให้คุณภาพที่ดีมากแต่ต้นทุนการผลิตสูง (ดวงพร, 2554) และอีกวิธีหนึ่งคือการอบแห้งแบบพ่นฝอยซึ่งเป็นการอบแห้งที่เวลาที่หยดอนุภาคผงอยู่ในห้องอบแห้งสั้น ข้อดีคือมีต้นทุนการผลิตน้อยมีอัตรากำลังการผลิตสูงสามารถผลิตแบบต่อเนื่องได้ใช้งานง่าย สามารถควบคุมและปรับสภาวะการผลิตตามผลิตภัณฑ์ที่ผู้ผลิตต้องการเช่นขนาดอนุภาคปริมาณความชื้นคุณภาพของอนุภาคผงที่ได้สม่ำเสมอตลอดกระบวนการผลิตแต่วิธีนี้ไม่เหมาะสมกับสารให้กลิ่นรสที่ไม่ทนต่อความร้อนที่สูงมากได้มีการประยุกต์เทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอยกับผลผลิตทางการเกษตรเช่นน้ำผึ้งผง (อนุสรา, 2552; อุษา, 2549) ลำไยผง

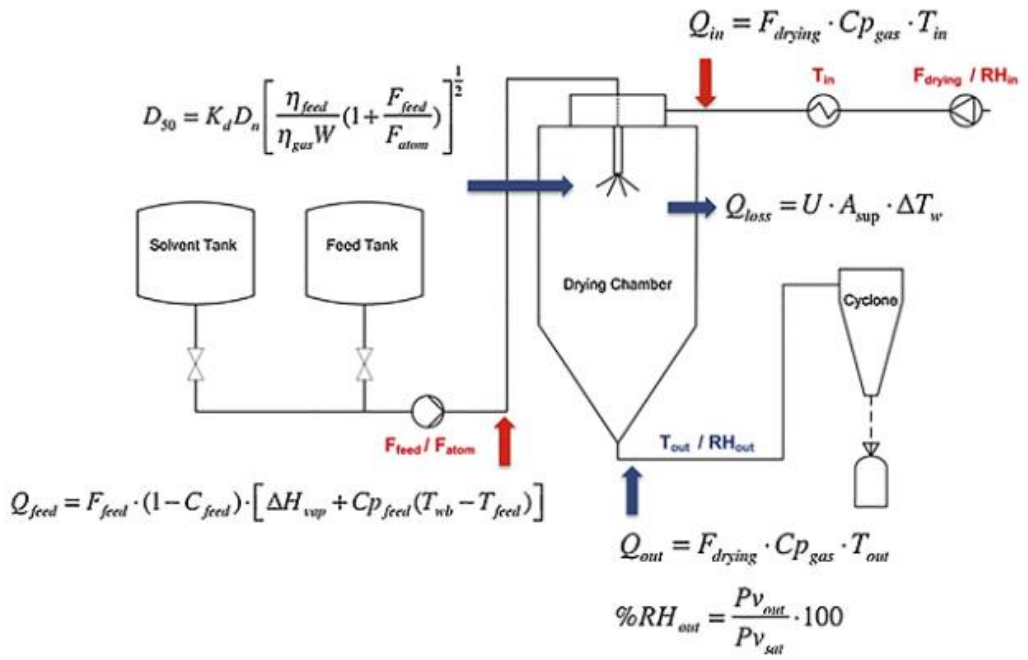
(ธัญนิชา, 2552) น้ำผลไม้รวมผง (ดวงพร และ สุเทพ, 2543) กระเจี๊ยบผง (วสันต์, 2546) เป็นต้น โดยเทคนิคนี้นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและอุตสาหกรรมทางยา เพื่อให้ส่วนผสมที่เป็นของแข็งหรือของเหลวมีประสิทธิภาพในการป้องกันสารสำคัญจากสิ่งแวดล้อมเช่นความร้อนแสงอากาศและอื่นๆ (Ahmed *et al*., 2010) ประโยชน์ของเทคนิคนี้สามารถช่วยรักษากลิ่นรสลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันการระเหยและอัตราการถ่ายเทมวลของสารภายในสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกและสามารถเพิ่มอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ได้ (โยษิตา, 2552) บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเกี่ยวกับการอบแห้งพ่นฝอยผลผลิตทางการเกษตร เพื่อเป็นแนวทางสำหรับนำไปประยุกต์ใช้และต่อยอดผลงานวิจัย หรือนำไปพัฒนาผสมผสานกับเทคนิคการอบแห้งแบบอื่นๆ ต่อไป

1. หลักการอบแห้งแบบพ่นฝอย

การอบแห้งแบบพ่นฝอยนั้นเป็นการอบแห้งที่ใช้การพ่นสารละลายของเหลวเป็นละอองเข้าไปสัมผัสกับสารตัวกลางคืออากาศที่มีความร้อนสูงในห้องอบแห้ง ทำให้น้ำถูกดึงออกจากสารละลายอย่างรวดเร็วจนเริ่มเปลี่ยนเป็นสารละลายเข้มข้นแล้วเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ผง (Kuriakose and Anandharamakrishnan, 2010) โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารละลายของเหลวให้กลายเป็นอนุภาคผงขนาดเล็กประมาณ 10-50 ไมโครเมตรหรืออาจมีขนาดใหญ่ประมาณ 2-3 มิลลิเมตร ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการทำแห้งจะอยู่ในรูปของอนุภาคผงหรือเป็นก้อนขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุการออกแบบเครื่องอบแห้งและคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ (Shishir and Chen, 2017; คณิตนันท์, 2557) วัตถุดิบที่นำมาอบแห้งได้ต้องเป็นของเหลว หรืออาจอยู่ในสภาพของสารละลายน้ำทั้งหมด สามารถมีเนื้ออาหารที่เป็นของแข็งอยู่สูงกว่า 20 % แต่ไม่เกิน 50 % และของเหลวนั้นต้องไหลได้ (สมบัติ, 2529) การอบแห้งแบบพ่นฝอยเป็นกระบวนการอบแห้งที่ใช้กับวัสดุสารละลายของเหลว ลักษณะเฉพาะของการอบแห้งแบบพ่นฝอย คือ เวลาที่ผลิตภัณฑ์อยู่ในห้องอบแห้งสั้นและผลิตภัณฑ์สุดท้ายพร้อมที่จะบรรจุทันทีที่ออกจากเครื่องอบแห้ง (Shishir and Chen, 2017) อนุภาคของเหลวของอาหารจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศร้อนที่ใช้ในเครื่องอบแห้งจนกว่าน้ำจะระเหยออกไปเกือบหมด เนื่องจากมีการระเหยอย่างรวดเร็ว ดังนั้นสารสำคัญต่าง ๆ จึงถูกทำลายด้วยความร้อนน้อยมากผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีคุณภาพดี มีลักษณะเป็นผงไม่เกาะติดกัน ข้อจำกัดของเครื่องอบแห้งชนิดนี้คือใช้ได้กับอาหารที่มีลักษณะเป็นของเหลวได้เท่านั้นโดยไม่สามารถนำมาใช้กับของแข็งได้ (Ozmen and Langrish, 2002)

2. การถ่ายเทความร้อนและมวลของการอบแห้งแบบพ่นฝอย

กระบวนการอบแห้งโดยทั่วไปจะเกิดจากการถ่ายเทพลังงาน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพลังงานความร้อนจากสิ่งแวดล้อมมายังน้ำในวัตถุดิบแล้วจึงเกิดการระเหยบริเวณพื้นผิว ในขณะเดียวกันก็จะเกิดการถ่ายเทความชื้นจากภายในวัตถุไปยังพื้นผิวของวัตถุดิบนั้น โดย Lisboa *et al*. (2018) ได้สร้างสมการเพื่อหาการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยเพื่อช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์กระบวนการการถ่ายโอนในระหว่างอบแห้ง ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 การถ่ายเทความร้อนในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Lisboa *et al*., 2018)

โดยพัฒนาจากกฎการอนุรักษ์พลังงาน สามารถหาค่าพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยได้จากสมการ

$$Q_{in} = Q_{feed} + Q_{out} + Q_{loss} \quad (1)$$

ค่าพลังงานความร้อนทางเข้า (Q_{in}) ได้จากสมการ

$$Q_{in} = F_{drying} . Cp_{gas} . T_{in} \quad (2)$$

ค่าพลังงานความร้อน (Q_{feed}) ได้จากสมการ

$$Q_{feed} = F_{feed}\left(1\text{-}C_{feed}\right) . \Delta H_{vap} + F_{feed}\left(1\text{-}C_{feed}\right) . Cp_{feed}\left(T_{wb} - T_{feed}\right) \quad (3)$$

ค่าพลังงานความร้อนทางเข้า (Q_{out}) ได้จากสมการ

$$Q_{out} = F_{drying} . Cp_{gas} . T_{out} \quad (4)$$

ค่าพลังงานความร้อนสูญเสีย (Q_{loss}) ได้จากสมการ

$$Q_{loss} = U . A_{sup} . \Delta T_w \quad (5)$$

การถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นคำนวณได้จากสมการ

$$F_{drying} . H_{in} + F_{feed}\left(1 - C_{feed}\right) = F_{drying} . H_{out} \quad (6)$$

เมื่อ Q_{in} คือ พลังงานความร้อนทางเข้า, Q_{feed} คือ พลังงานความร้อนที่จ่ายให้กับสารละลาย

Q_{loss} คือ พลังงานความร้อนสูญเสีย, Q_{out} คือ พลังงานความร้อนทางออกห้องอบแห้ง

F_{drying} คือ อัตราการไหลลมร้อน, F_{feed} คือ อัตราการไหลสารละลาย

Cp_{gas} คือความจุความร้อนอากาศ, ΔH_{vap} คือ ค่าเอนทัลปีจำเพาะการระเหย

T_{in} คือ อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า, T_{out} คือ อุณหภูมิลมร้อนขาออก

T_{feed} คือ อุณหภูมิเริ่มต้นสารละลาย, T_{wb} คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียก
H_{in} คือ อัตราส่วนความชื้นขาเข้า, H_{out} คือ อัตราส่วนความชื้นขาออก
A_{sup} คือ พื้นที่ผิวสัมผัสอุปกรณ์ห้องอบแห้ง

การคำนวณหาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางหยดอนุภาคในกรณีเป็นหัวฉีดแบบจานหมุน (Rotating nozzles) หาได้จากสมการที่ (7) (Masters, 1991)

$$D_{50} = 0.008 \times F_{feed}^{0.15} \times D^{-0.18} \times N^{-0.05} \times \omega^{-0.75} \times \mu_{feed}^{0.07} \quad (7)$$

กรณีที่เป็นหัวฉีดแบบแรงดัน (Pressure nozzles) (Lefebvre, 1988)

$$D_{50} = 4.0 \times F_{feed}^{0.25} \times \left(\sigma_{feed} \times \mu_{feed}\right)^{-0.25} \times \rho_{feed}^{0.07} \times \Delta P_{feed}^{-0.5} \quad (8)$$

กรณีหัวฉีดแบบนิวแมติกส์ (Pneumatic nozzle) (Lubanska, 1970)

$$D_{50} = K_d D_n \left[\frac{\eta_{feed}}{\eta_{gass} \times We} \left(1 + \frac{F_{feed}}{F_{atom}} \right) \right]^{0.5} \quad (9)$$

เมื่อ D_{50} คือ เส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดพ่นฝอย, N คือ จำนวนใบมีดหัวฉีดแบบจานหมุน
η_{feed} คือ ความหนืดจลน์ของวัตถุดิบ, η_{gass} คือ ความหนืดจลน์ของอากาศ
μ_{feed} คือ ความหนืดวัตถุดิบ, σ_{feed} คือ ความเค้นพื้นผิววัตถุดิบ
ρ_{feed} คือ ความหนาแน่นวัตถุดิบ, ρ_{gas} คือ ค่าความหนาแน่นของก๊าซ
ω คือ ความเร็วใบมีดหัวฉีดแบบจานหมุน

การถ่ายโอนความร้อนระหว่างหยดอนุภาคเหลวกับก๊าซคำนวณได้จากสมการที่ (10) (Kuriakose and Anandharamakrishnan, 2010)

$$m_p c_p \frac{dT_p}{d_t} = hA_p \left(T_g - T_p \right) + \frac{dm_p}{dt} h_{fg} \quad (10)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) นั้นสามารถคำนวณได้จากสมการของ Ranz-Marshall (Kuriakose and Anandharamakrishnan, 2010)

$$Nu = \frac{hd_p}{k_{td}} = 2 + 0.6\left(Re\right)^{1/2}\left(Pr\right)^{1/3} \quad (11)$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k_{td}} \quad (12)$$

อัตราการถ่ายเทมวล (สำหรับการระเหย) ระหว่างอนุภาคและลมร้อนหาได้จากสมการที่ (13)

$$\frac{dm_p}{dt} = -k_c A_p \left(Y_s - Y_g \right) \quad (13)$$

โดย k_c จะอยู่ในรูปสมการหาค่าตัวเลขของเชอร์วูด (Sherwood number) สมการที่ (14)

$$Sh = \frac{k_c d_p}{D_{i,m}} = 2 + 0.6\left(Re_d\right)^{1/2}(Sc)^{1/3} \quad (14)$$

$$Sc = \frac{\mu}{\rho_g D_{i,m}} \quad (15)$$

เมื่อหยดอนุภาคของเหลวอุณหภูมิถึงจุดเดือด หยดของเหลวจะระเหยค่อยๆ เหลือเฉพาะอนุภาคแข็งประมาณค่าได้ดังสมการที่ (16)

$$\frac{d(d_p)}{dt} = \frac{4k_{ta}}{\rho_p C_g d_p}\left(1 + 0.23\sqrt{Re}\right) \times \ln\left[1 + \frac{C_g\left(T_g - T_p\right)}{h_{fg}}\right] \quad (16)$$

เมื่อ C_p คือ ค่าความจุความร้อนอนุภาค, h_{fg} คือ ความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ

k_{td} คือ ค่าการนำความร้อนของไหล, k_{ta} คือ ค่าการนำความร้อนของก๊าซ

A_p คือ พื้นที่ผิวอนุภาค, W_e คือ ตัวเลขเวบเบอร์

K_d คือ ค่าคงที่, m_p คือ มวลอนุภาค

T_p คือ อุณหภูมิอนุภาค, T_g คือ อุณหภูมิก๊าซ

Pr คือ ค่าตัวเลขพรันด์เทิล, Y_s คือ ค่าความชื้นอิ่มตัว

Re_d คือ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์, Sh คือ ค่าตัวเลขของเชอร์วูด

k_c คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล, γ คือ แรงตึงผิวของวัตถุดิบ

μ คือ ค่าความหนืดของไหล, U คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

$D_{i,m}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอน้ำสถานะก๊าซ

3. อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature)

ผลผลิตทางการเกษตรหรืออาหารส่วนใหญ่ที่มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบอยู่สูงเนื่องจากน้ำตาลเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งมีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่ำเมื่อทำการอบแห้งแบบพ่นฝอยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากสถานะคล้ายแก้วไปเป็นสถานะของเหลวหนืดคล้ายยาง อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วถือเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อลักษณะของอาหารผง การเกิดผลึกของน้ำตาลไร้รูปร่างก่อให้เกิดการสูญเสียคุณภาพทางด้านกายภาพและเคมีของอาหารผง (อุษา, 2549; คณิตนันท์, 2557) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากสถานะคล้ายแก้วไปเป็นของเหลวหนืดคล้ายยางและเริ่มแสดงพฤติกรรมการเกาะติดเมื่ออุณหภูมิที่ผิวสูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของประมาณ 10 ^{o}C และเมื่อมีผลต่างของอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 20 ^{o}C สารละลายจะเหนียวเกาะติดกับผนังเครื่องอบแห้ง (พิไลรัก และ ธนกิจ, 2557; คณิตนันท์, 2557) อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วคำนวณได้จากสมการที่ (17) (Miao and Roos, 2004)

$$Tg = \frac{\Delta Cp_1 X_1 T_{g1} + \Delta Cp_2 X_2 T_{g2}}{\Delta Cp_1 X_1 + \Delta Cp_2 X_2} \quad (17)$$

เมื่อ X_1 คือ สัดส่วนตัวทำละลาย, X_2 คือ สัดส่วนของน้ำในสารละลาย

T_{g1} คือ อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของสารละลาย

T_{g2} คือ อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของน้ำ

ΔCp คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว

วิธีดำเนินการวิจัย

ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยหาความสัมพันธ์ของปัจจัยตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการทำงานที่เหมาะสมในการแปรรูปผลิตภัณฑ์และมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์โดยวิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอยดังนี้อุณหภูมิของอากาศร้อน การไหลของอากาศร้อนขาเข้าหออบแห้ง การทำให้เกิดหยดของเหลว คุณสมบัติของสารละลายเริ่มต้นอัตราการป้อนสารละลายเริ่มต้นชนิดหัวฉีดและสารช่วยอบแห้ง รวมไปถึงการประยุกต์ใช้เทคนิคอื่นๆ ร่วมการอบแห้งแบบพ่นฝอยเดิม เพื่อพัฒนาคุณภาพผลิตภัณฑ์หรือประสิทธิภาพการทำงานการอบแห้งแบบพ่นฝอยให้ดียิ่งขึ้น

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

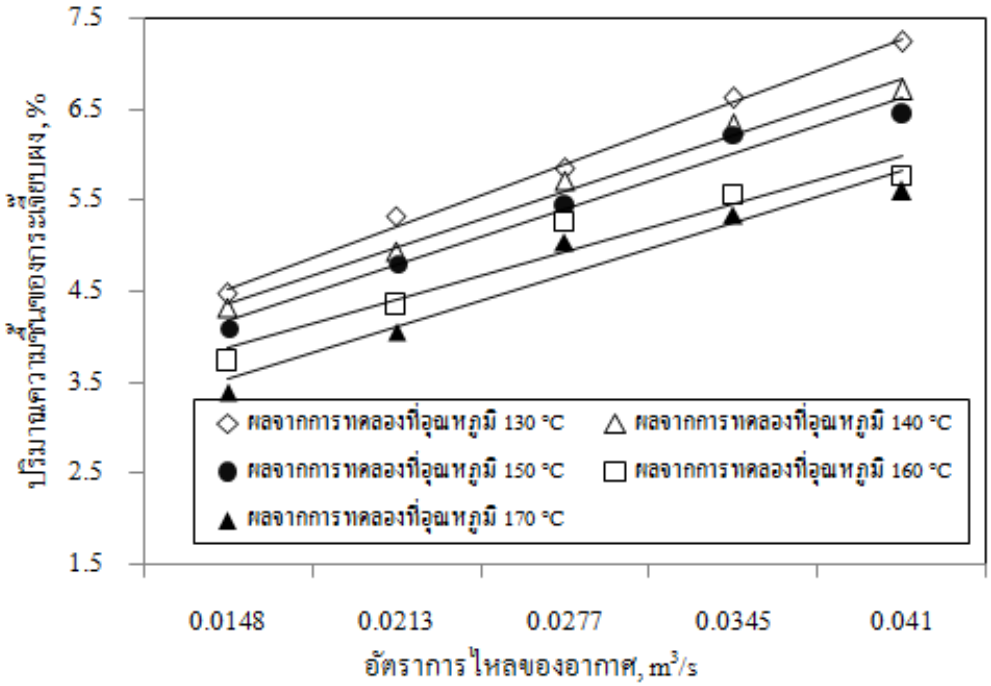
ผลจากการศึกษาพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยหาความสัมพันธ์ของปัจจัยตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการทำงานที่เหมาะสมในการแปรรูปผลิตภัณฑ์และมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์โดยวิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอย รวมไปถึงการพัฒนาการอบแห้งแบบพ่นฝอยเดิมร่วมเทคนิคอื่นๆ เพื่อพัฒนาคุณภาพผลิตภัณฑ์หรือประสิทธิภาพการทำงานการอบแห้งแบบพ่นฝอยให้ดียิ่งขึ้น แสดงดังต่อไปนี้

1. ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารผง

1.1 อุณหภูมิอบแห้ง

ในการอบแห้งที่สภาวะอัตราการไหลของอากาศร้อนคงที่ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าจะเป็นการเพิ่มแรงขับเคลื่อนน้ำในผลิตภัณฑ์อาหารผงให้ระเหยออกไป ทำให้ความสามารถในการระเหยน้ำของเครื่องอบแห้งเพิ่มขึ้นและเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้งหรืออีกนัยหนึ่งความสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์อาหารผงมีค่าลดลง (คณิตนันท์, 2557) ดังภาพที่ 2 จะพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าจะทำให้ปริมาณความชื้นของกระเจี๊ยบผงมีค่าลดลง เนื่องมาจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศจะทำให้ความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำมีค่ามากขึ้น (วสันต์, 2546) สอดคล้องกับรายงานของ ดวงพร (2554) พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนขาเข้าจาก 165 ^{o}C เป็น 185 ^{o}C ประสิทธิภาพเชิงความร้อนรวมจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 66.06±0.89 เป็นร้อยละ 68.75±0.73 ของการผลิตเครื่องดื่มลำไยผงด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยสโรบล และ ชัยรัตน์ (2554) ได้รายงานผลการศึกษาผลของอุณหภูมิลมร้อนและปริมาณมอลโตเดกซ์ตริน (DE10) ซึ่งใช้เป็นสารช่วยอบแห้งสับปะรดผงด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนทำให้ความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลง ทำให้ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ลดลง ช่วยให้

การละลายดีขึ้นแต่กลับทำให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตลดลงและอุณหภูมิที่สูงเกินไป (170 °C) ทำให้ปริมาณสารฟีนอลิกลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ดังนั้นหากพิจารณาเปอร์เซ็นต์ผลผลิตและปริมาณของสารฟีนอลิกเป็นเกณฑ์ สภาวะอบแห้งที่เหมาะสมคืออุณหภูมิลมร้อนควรอยู่ในช่วง 130-150 °C และปริมาณมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 37-40 มาตรฐานแห้ง



ภาพที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าและอัตราการไหลของอากาศกับปริมาณความชื้นที่ความเข้มข้นของสารละลาย 10 % (วสันต์, 2546)

1.2 อัตราการไหลของอากาศร้อน

การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศร้อนมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้งโดยตรง ถ้าลดอัตราการไหลของอากาศร้อนลงจะทำให้เวลาที่ผลิตภัณฑ์อาหารผงอยู่ในห้องอบแห้งเพิ่มขึ้นและทำให้ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ผงลดลง นอกจากนี้อัตราการไหลของอากาศร้อนต่ำ ยังช่วยทำให้การแยกผลิตภัณฑ์อาหารผงหลังการอบแห้งได้มีประสิทธิภาพดีขึ้น (คณิตนันท์, 2557) ดังรายงานผลการศึกษาของ วสันต์ (2546) ที่พบว่าเมื่อลดอัตราการไหลของอากาศจะทำให้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งมีค่ามากขึ้นให้ปริมาณความชื้นของกระเจี๊ยบผงลดลง แสดงดังภาพที่2

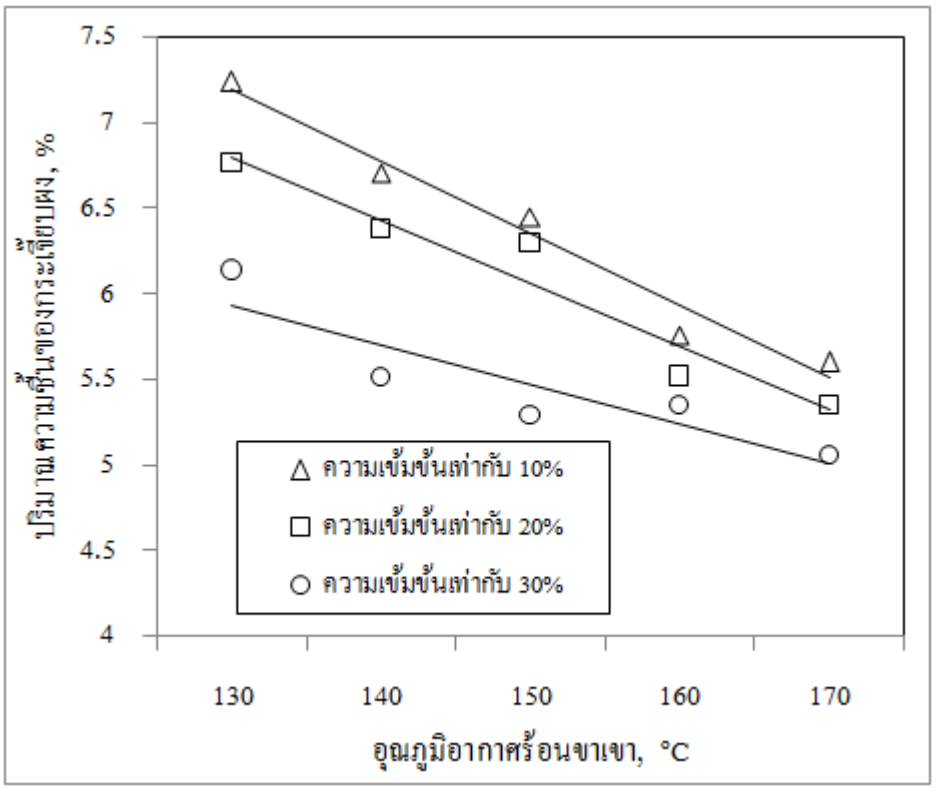
1.3 การทำให้เกิดหยดของเหลว

การทำให้สารละลายเริ่มต้นมีขนาดเล็กลงเมื่ออัตราการป้อนคงที่สามารถทำได้โดยการเพิ่มความเร็วรอบของหัวฉีด หรือเพิ่มความดันของอากาศ หรือเพิ่มอัตราส่วนการไหลระหว่างอากาศกับของเหลวในหัวฉีด ซึ่งถ้าผลิตภัณฑ์อาหารผงมีขนาดเล็กละเอียดมากๆ ก็จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นปรากฏสูง เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กทำให้เกิดช่องว่างน้อยกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ (คณิตนันท์, 2557)

1.4 คุณสมบัติของสารละลายเริ่มต้น

มีผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์อาหารผง ในกรณีที่สารละลายเริ่มต้นมีปริมาณของแข็งน้อย

ผลที่ได้ก็คือทำให้ได้ผลิตภัณฑ์อาหารผงมีความชื้นลดลง ของแข็งที่ป้อนต้องมีปริมาณที่เหมาะสม ถ้ามากเกินไปก็อาจจะไม่สามารถพ่นฝอยได้ อาจจะทำให้เกิดการเกาะติดที่ผนังห้องอบแห้งและคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารผงเกิดการเสื่อมสภาพได้ สภาวะการทำงานของหัวฉีดคงที่แต่ปริมาณของแข็งในสารละลายที่ป้อนเพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าความชื้นของอาหารผงที่ลดลง เมื่อปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้นในขณะที่อัตราการระเหยของน้ำคงที่ทำให้อัตราส่วนของความชื้นต่อมวลของแข็งที่เหลืออยู่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับสารละลายที่มีปริมาณของแข็งน้อย ผลที่ได้คืออาหารผงมีความชื้นลดลง อย่างไรก็ตามปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในสารละลายที่ป้อนต้องอยู่ในระดับที่เหมาะสม ถ้าสารละลายมีความหนืดสูง เมื่อนำไปอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะเดียวกันส่งผลให้ขนาดของอนุภาคใหญ่ขึ้น ถ้ามากเกินไปจะไม่สามารถพ่นฝอยได้หรือไม่สามารถดูดผ่านเครื่องป้อนสารละลายได้ ทำให้เกิดการเกาะติดที่ผนังห้องอบแห้งหรือส่งผลให้ของเหลวที่ฉีดออกมามีลักษณะเหมือนเส้นด้ายทำให้ตัวอย่างไม่แห้งเป็นผง ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายป้อนช่วยลดปริมาณความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งอาหารผงลงได้ (คณิตนันท์, 2557) ดังรายงานของวสันต์ (2546) ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นให้กับสารละลายกระเจี๊ยบและอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าจะส่งผลให้ปริมาณความชื้นของกระเจี๊ยบผงมีค่าลดลง แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้ากับปริมาณความชื้นที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายต่างๆ ที่อัตราการไหลของอากาศ 0.0410 m^3/s (วสันต์, 2546)

1.5 อัตราการป้อนสารละลายเริ่มต้น

การเพิ่มอัตราการป้อนสารละลายเริ่มต้นในขณะที่สภาวะของหัวฉีดคงที่ มีผลทำให้อนุภาคที่พ่นฝอยมีขนาดใหญ่เพิ่มขึ้น ดังนั้นผลิตภัณฑ์อาหารผงที่ได้มีขนาดอนุภาคใหญ่และมีความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ต่ำ ในขณะเดียวกันการเพิ่มอัตราการป้อนสารละลายเริ่มต้นในขณะที่อัตราการไหลของอากาศร้อนขาเข้าและปริมาณความร้อนที่ให้ระบบคงที่ มีผลทำให้ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์อาหารผงเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากปริมาณน้ำที่ต้องการระเหยออกจากตัวอย่างเพิ่มขึ้นในขณะที่ระบบสามารถระเหยน้ำออกไปได้ในอัตราคงเดิม (คณิตนันท์, 2557)

1.6 ชนิดหัวฉีด

ซึ่งหัวฉีดแต่ละแบบจะทำให้ได้ลักษณะอนุภาคของผลิตภัณฑ์อาหารผงที่แตกต่างกัน การเลือกหัวฉีดขึ้นอยู่กับการออกแบบและลักษณะเฉพาะของการใช้งาน เช่น หัวฉีดชนิดจานสามารถผลิตอนุภาคผงที่มีขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ และยังมีความสามารถในการผลิตได้สูงมากกว่า 5,000 $kg_{dry\ solid}/h$ ใช้กับของเหลวได้ทุกชนิด ทั้งของเหลวที่มีความหนืดสูงหรือสารแขวนลอย ซึ่งตะกอนของอนุภาคของแข็งเหล่านี้ทำให้หัวฉีดแบบอื่นอุดตันส่วนหัวฉีดชนิดใช้ความดันสามารถผลิตอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ได้ หัวฉีดแบบนิวเมติกส์สามารถใช้กับของเหลวที่มีความหนืดสูงได้ นอกจากนี้ในหัวฉีดแต่ละชนิดจะมีอุปกรณ์หลายส่วนที่สามารถออกแบบให้ใช้งานได้แตกต่างกันไป (คณิตนันท์, 2557)

1.7 สารช่วยอบแห้ง

การอบแห้งแบบพ่นฝอยในพืชผักผลไม้หรืออาหารที่มีองค์ประกอบของน้ำตาลสูงในระหว่างการผลิตมักเกิดการเกาะติดของสารที่ผนังเครื่องอบแห้งเนื่องจากน้ำตาลเป็นสารที่มีความสามารถในการดูดความชื้นทำให้แห้งยาก (สุธรรมา, 2547) นอกจากนั้นยังมีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่ำเมื่อนำมาแปรรูปด้วยการอบแห้งแบบพ่นฝอยซึ่งเป็นกระบวนการผลิตที่ใช้อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วผลิตภัณฑ์เหล่านี้จึงเกิดการเหนียวและจับตัวกัน ทำให้ไม่สามารถทำแห้งเป็นลักษณะผงหรือได้ปริมาณของผลิตภัณฑ์สุดท้ายน้อยลง ดังนั้นจึงต้องมีการเติมสารช่วยอบแห้งในการผลิตเพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์และเพิ่มปริมาณผลผลิตให้สูงขึ้น (โยษิตา, 2552)

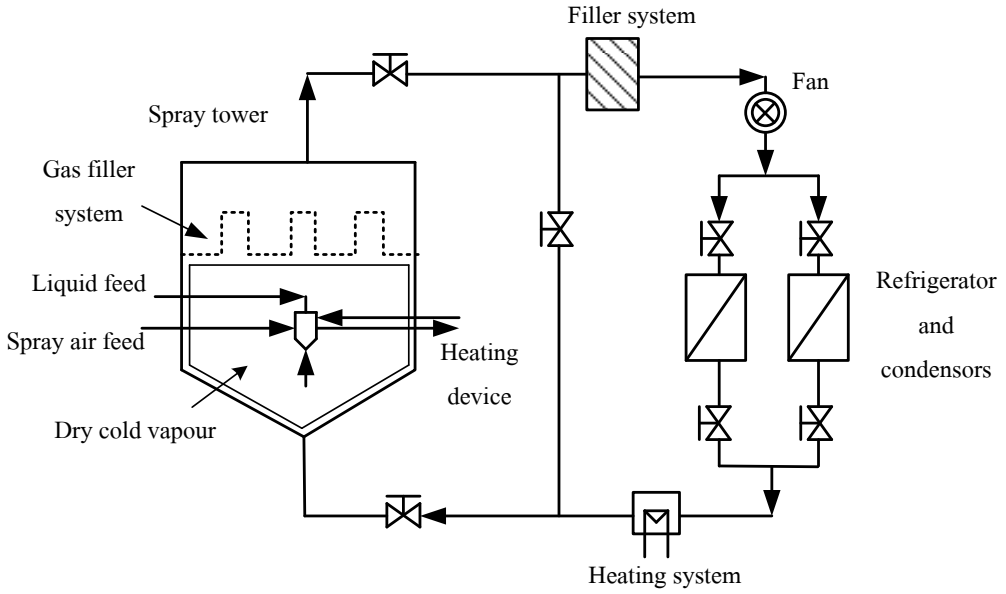
2. การเพิ่มคุณภาพผลิตภัณฑ์อาหารผงด้วยการประยุกต์การอบแห้งแบบพ่นฝอยร่วมกับเทคนิคอื่นๆ

ลักษณะเด่นเฉพาะของการอบแห้งแบบพ่นฝอย คือ เวลาที่ผลิตภัณฑ์อยู่ในห้องอบแห้งสั้น มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง สามารถผลิตได้ต่อเนื่อง แต่วิธีนี้ไม่เหมาะสมกับสารให้กลิ่นรสที่ไม่ทนต่อความร้อนที่ระดับสูง รวมทั้งยังให้ขนาดอนุภาคผงที่ได้ที่ไม่สม่ำเสมอ ไม่สามารถสร้างชั้นของสารที่ถูกเคลือบได้หลายชั้น สารให้กลิ่นรสที่มีมวลโมเลกุลต่ำสามารถระเหยได้ง่ายหรืออาจเสียสภาพหรือเกิดการย่อยสลายบางส่วนเมื่อมีการให้ความร้อนสูง(ดวงพร, 2554; อมรรัตน์, 2550) ได้มีการพัฒนาการอบแห้งแบบพ่นฝอยร่วมกับเทคนิคอื่นๆ เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว ได้แก่

2.1 การประยุกต์เครื่องอบแห้งพ่นฝอยร่วมกับแช่เยือกแข็ง

เครื่องอบแห้งพ่นฝอยร่วมกับแช่เยือกเป็นการนำเทคนิคอบแห้งพ่นฝอยร่วมกับแช่เยือกแข็ง (Spray Freezing Dryer) หลักการทำงานคือทำให้อาหารเย็นจนแข็งก่อน แล้วจึงทำให้น้ำที่อยู่ในสถานะของแข็งระเหิดหรือกลายเป็นไอโดยไม่ได้ผ่านการกลายสภาพเป็นน้ำก่อนระหว่างการอบแห้ง มีการลดความดันในห้องอบแห้งลง และใช้ความร้อนเข้าช่วยทำให้เกิดการระเหิด ผลิตภัณฑ์หรืออาหารที่ผ่านการทำ

ให้แห้งด้วยวิธีนี้จะคงลักษณะโครงสร้างและคุณภาพและการเก็บรักษาของสารระเหยและออกฤทธิ์ทางชีวภาพได้เหมือนเดิม แต่เนื่องจากราคาและค่าใช้จ่ายสำหรับเทคนิคการอบแห้งแบบนี้ยังค่อนข้างสูง จึงเหมาะในการใช้งานในผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูง เช่น การผลิตอาหารเสริมสุขภาพชนิดผงหรือผลิตภัณฑ์ทางยา (Anandharamakrishnanan, 2008; Padma *et al*., 2015)



ภาพที่ 4 เครื่องอบแห้งพ่นฝอยร่วมกับแช่เยือกแข็ง (Leuenberger, 2002)

2.2 การประยุกต์เครื่องอบแห้งพ่นฝอยร่วมกับสุญญากาศ

เป็นการประยุกต์การอบแห้งพ่นฝอยร่วมกับสุญญากาศ (Vacuum spray drying) ซึ่งข้อดีของการอบแห้งแบบสุญญากาศคือ ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ (40-60 ^{o}C) อาศัยหลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์ ใช้หลักการลดจุดระเหยของน้ำให้ต่ำลงเมื่อความดันบรรยากาศต่ำลง อากาศภายในห้องอบแห้งจะถูกดูดออกไปจนภายในห้องอบแห้งต่ำจนเกิดเป็นสุญญากาศ เมื่อการลดความดันอากาศภายในห้องอบแห้งให้ต่ำลงการระเหยของน้ำภายในวัสดุเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ การอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำจะช่วยรักษาคุณค่าทางอาหารและสารระเหยบางชนิดในอาหารให้คงไว้ ช่วยลดการสูญเสียสารอาหารที่ไวต่อความร้อน (Padma *et al*., 2015) จากรายงานวิจัยพบว่าการประยุกต์ใช้เทคนิคอบแห้งพ่นฝอยร่วมกับสุญญากาศในผลิตภัณฑ์ส้มผงทำให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและสารประกอบอื่นๆ รวมทั้งวิตามินซีคงเหลืออยู่มากกว่าแบบอบแห้งพ่นฝอยอย่างเดียว (Padma *et al*., 2015; Islam *et al*., 2017) ข้อเสียของเครื่องอบแห้งแบบนี้คือมีราคาและต้นทุนประกอบการค่อนข้างสูง

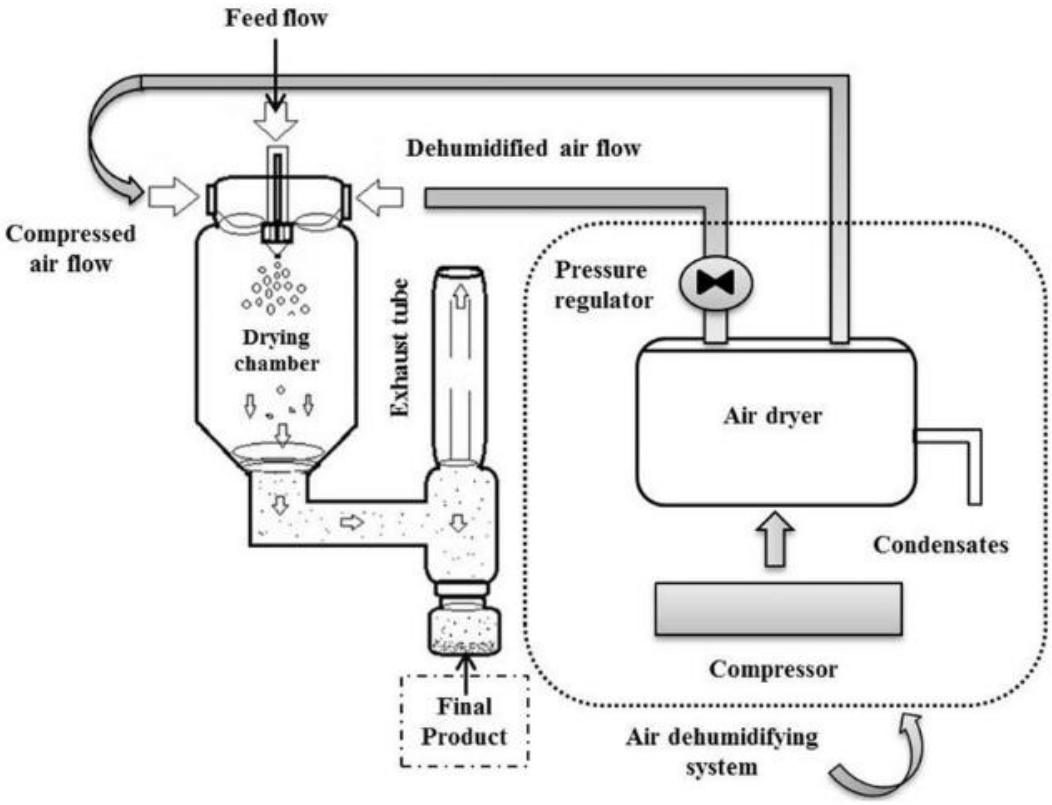
2.3 การประยุกต์ใช้หัวฉีดอัลตราโซนิคร่วมกับเครื่องอบแห้ง

การประยุกต์ใช้หัวฉีดอัลตราโซนิคร่วมกับเครื่องอบแห้งพ่นฝอย (Ultrasonic atomization in spray dryer) ได้ถูกพัฒนาขึ้น เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในตัวกลางที่ได้รับคลื่นอัลตราโซนิค หยดของเหลวนี้จะสัมผัสกับแรงสั่นที่เกิดจากคลื่นอัลตราโซนิคผ่านผิวหน้าหัวทรานดิวเซอร์ ทำให้หยดสารละลายเกิดการสั่นสะเทือนเกิดละอองอนุภาคของเหลวที่ขนาดเล็ก

อย่างสม่ำเสมอผิวหน้าหัวฉีด Turan *et al*. (2016) ได้ประยุกต์หัวฉีดอัลตราโซนิคในเครื่องอบแห้งพ่นฝอยในการผลิตบลูเบอรีผง ผลที่ได้พบว่าคลื่นอัลตราโซนิคทำให้เกิดคลื่นสม่ำเสมอ ทำให้อนุภาคผงมีรูปร่างและขนาดที่แน่นอนกว่า และยังรักษาสารประกอบฟีนอลิคและสารสำคัญอื่นๆได้ดีกว่าเครื่องอบแห้งพ่นฝอยแบบเดิม โดยคลื่นความถี่ที่เหมาะอยู่ในช่วง 20-180 kHz เป็นความถี่ที่เหมาะสมในการสร้างอนุภาคผงขนาดเล็ก (Shishir and Chen, 2017) นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้หัวฉีดอัลตราโซนิคกับเครื่องอบแห้งพ่นฝอยร่วมสุญญากาศเป็นการประยุกต์นำข้อเด่นของเทคนิคทั้งสามอย่างมารวมกันเป็นผลให้เวลาการอบแห้งสั้นลง และลดอุณหภูมิในการอบแห้งลง (Freitas *et al*., 2004)

2.4 การประยุกต์เครื่องอบแห้งพ่นฝอยร่วมกับลดความชื้น

การประยุกต์ใช้ระบบลดความชื้นร่วมกับเทคนิคอบแห้งพ่นฝอย (Dehumidified air spray dryer) แบบเดิม แสดงดังภาพที่ 5 ซึ่งข้อดีของระบบลดความชื้นคือให้ประสิทธิภาพดีกว่าโดยจะลดปัญหาการเหนียวเกาะติดกัน ความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่ำกว่าและค่าความหนาแน่นรวม (Bulk density) สูงกว่าการอบแห้งพ่นฝอยแบบเดิม (Goula and Adamopoulos, 2005; Goula *et al*., 2004) ยังช่วยลดอุณหภูมิขาออกและความชื้นของลมร้อนลดลง ทำให้พื้นผิวของอนุภาคราบเรียบขึ้น (Goula and Adamopoulos, 2005)



ภาพที่ 5 เครื่องอบแห้งพ่นฝอยร่วมกับลดความชื้น (Leuenberger, 2002)

การประยุกต์นำเทคนิคต่างๆ มาใช้ร่วมกับเทคนิคการอบแห้งแบบเดิม ทำให้ประสิทธิภาพของระบบและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ทดลองดีกว่าใช้เทคนิคอบแห้งพ่นฝอยอย่างเดียว แต่อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ประยุกต์ใช้เทคนิคอบแห้งแบบพ่นฝอยเดิมร่วมกับเทคนิคอื่นๆยังมีจำกัด และส่วนใหญ่ยังมีเฉพาะในห้องทดลองเท่านั้น จึงมีความจำเป็นต้องมีการวิจัยเกี่ยวกับเทคนิคใหม่เพิ่มมากยิ่งขึ้น ไม่ว่าจะเป็นผลที่เกิดจาการอบแห้งพ่นฝอยกับผลผลิตทางการเกษตรอื่นๆ คุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ได้ ปริมาณการใช้พลังงาน และข้อมูลอื่นๆ ที่จำเป็น เพื่อพัฒนานำไปสู่การผลิตในเชิงพาณิชย์ต่อไป

สรุป

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการส่งออกสินค้าทางการเกษตรในแต่ละปีเป็นจำนวนมาก ทั้งในรูปผลิตภัณฑ์สดและแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ กระบวนการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรที่มีความสำคัญอีกวิธีหนึ่ง เป็นการเพิ่มมูลค่าผลผลิตทางการเกษตรของประเทศให้สูงขึ้นและเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของเกษตรกรและผู้ประกอบการได้เป็นอย่างดี การแปรรูปพืชผักผลไม้เป็นผลิตภัณฑ์แบบผงเพื่อเป็นเครื่องดื่มด้วยการอบแห้งอบพ่นฝอยนับเป็นการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรที่น่าสนใจแบบหนึ่ง ซึ่งข้อดีของการอบแห้งแบบพ่นฝอยนั้นคือมากมีต้นทุนการผลิตน้อย มีอัตรากำลังการผลิตสูง สามารถผลิตแบบต่อเนื่องได้ ใช้งานง่ายสามารถควบคุมและปรับสภาวะการผลิตตามผลิตภัณฑ์ที่ผู้ผลิตต้องการคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้สม่ำเสมอตลอดกระบวนการมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงทำให้น้ำระเหยออกจากหยดสารละลายของเหลวได้เร็วเวลาที่ใช้ในการทำแห้งสั้นแต่ข้อเสียของการอบแห้งพ่นฝอยคือ ไม่เหมาะสมกับสารให้กลิ่นรสที่ไม่ทนต่อความร้อนที่สูงมาก พืชผักผลไม้หรืออาหารที่มีองค์ประกอบของน้ำตาลสูงที่อบแห้งมักมีคุณสมบัติการกระจายตัวและการละลายไม่ดี และในระหว่างการผลิตมักเกิดการเกาะติดของสารที่ผนังเครื่องอบแห้งซึ่งจำเป็นต้องมีการเติมสารช่วยอบแห้งในการผลิตเพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์และเพิ่มปริมาณผลผลิตให้สูงขึ้น บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรโดยการใช้เทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยนำเสนอหลักการอบแห้งแบบพ่นฝอย การถ่ายเทความร้อนและมวลของการอบแห้งแบพ่นฝอย ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารผง การประยุกต์ใช้งานการประยุกต์ใช้เทคนิคอื่นร่วมกับเทคนิคอบแห้งพ่นฝอย เพื่อช่วยให้ผู้สนใจนำไปประยุกต์ใช้หรือนำไปผสมผสานกับเทคนิคการอบแห้งแบบอื่นๆ เพื่อพัฒนาไปสู่การค้าเชิงพาณิชย์ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้เขียนบทความวิชาการและบทความวิจัย ที่ได้ใช้อ้างอิงในบทความนี้

เอกสารอ้างอิง

คณิตนันท์ เอซัน. 2557. การศึกษาผลของสภาวะการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่มีต่อคุณภาพและลักษณะทางกายภาพของน้ำตาลมะพร้าวผง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ดวงพร คุณาพรสุจริต. 2554. การผลิตเครื่องดื่มลำไยผงโดยการอบแห้งแบบพ่นฝอย. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ดวงพร ตั้งบำรุงพงษ์ และ สุเทพ อภินันท์จารุพงศ์. 2543. กระบวนการผลิตน้ำผักผลไม้รวมผงโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบพ่นกระจายและ

ไมโครเวฟสุญญากาศ. ปริญญานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ธัญนิชา ไร่นากิจ. 2552. ซอร์ปชันไอโซเทอมคุณภาพทางเคมี กายภาพและอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของน้ำลำไยผง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

พิไลรัก อินธิปัญญา และ ธนกิจ ถาหมี. 2557. ผลของกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยต่อคุณภาพของน้ำหม่อนผสมน้ำผึ้งชนิดผง. **วารสารวิชาการเกษตร** 32(2): 140-153.

โยษิตา โตเสาวลักษณ์. 2552. การห่อหุ้มร่วมของสารสีธรรมชาติกับผลึกน้ำผึ้งด้วยวิธีการอบแห้ง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

วสันต์ ด้วงคำจันทร์. 2546. ปัจจัยในการทำงานที่สำคัญสำหรับการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย: กรณีศึกษากระเจี๊ยบผง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2540. **การอบแห้งเมล็ดธัญพืช.** พิมพ์ครั้งที่ 7. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สมบัติ ขอทวีวัฒนา. 2529. **กรรมวิธีการอบแห้ง.** ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์คณะอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สโรบล สโรชวิกสิต และ ชัยรัตน์ ตั้งดวงดี. 2554. ผลของอุณหภูมิการอบแห้งและสารช่วยอบแห้งต่อคุณภาพของน้ำสับปะรดผงโดยวิธีอบแห้งแบบพ่นฝอย. **วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ** 34: 203-215.

สุธรรมา พิสุทธิโสภณ. 2547. สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำตาลสดผงโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยนเรศวร.

อนุสรา เมืองมา. 2552. การลดการเกาะติดของน้ำผึ้งผงระหว่างการอบแห้งแบบพ่นฝอย. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

อุษา สิทธารถ. 2549. การพัฒนาการแปรรูปน้ำผึ้งผงและการประเมินอายุการเก็บรักษา. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อมรรัตน์ ตั้งสกุล. 2550. การผลิตสารปรุงแต่งกลิ่นรสจากโอลีโอเรซินหอมหัวใหญ่ชนิดผงโดยการเอนแคปซูเลชั่น.วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

อาทิตยา พัฒนิบูลย์ และ อมรชัย อาภรณ์วิชานพ. 2557. เทคโนโลยีการอบแห้ง. **Technology Promotion** 41(234): 64-67.

Ahmed, M., Sorifa, A.M., Lee, J.C. and Eun, B.J. 2010. Encapsulation by spray drying of bioactive components, physicochemical and morphological properties from purple sweet potato. **Food Science and Technology** 43: 1307-1312.

Anandharamakrishnanan, C. 2008. Experimental and computational fluid dynamics studies on spray-freeze-drying and spray-drying of proteins. Doctoral dissertation, Department of Chemical Engineering, Loughborough University.

Freitas, S., Merkle, H.P. and Gander, B. 2004. Ultrasonic atomization into reduced pressure atmosphere-envisaging aseptic spray-drying for microencapsulation.

Journal of Controlled Release 95: 185-195.

Goula, M.A., Adamopoulos, K.G. and Kazakis, N.A. 2004. Influence of spray drying conditions on tomato powder properties. **Drying Technology** 22: 1129-1151.

Goula, A.M. and Adamopoulos, K.G. 2005. Spray drying of tomato pulp in dehumidified air: II. The effect on the powder properties. **Journal of Food Engineering** 66: 35-42.

Islam, M.Z., Kitamura, Y., Kokawa, M., onalisa, K., Tsai, F.H. and Miyamura, S. 2017. Effects of micro wet milling and vacuum spray drying on the physicochemical and antioxidant properties of orange (*Citrus unshiu*) juice with pulp powder. **Food and Bioproducts Processing** 101: 132-144.

Kuriakose, R. and Anandharamakrishnan, C. 2010. Computational fluid dynamics (CFD) applications in spray drying of food products. **Trends in Food Science & Technology** 21: 383-398.

Leuenberger, H. 2002. Spray-Freeze-drying - the process of choice for low water soluble drugs. **Journal of Nanoparticle Research** 4: 111-119.

Lefebvre, A. 1988. **Atomization and Sprays: vol. 1040.** CRC press, New York.

Lisboa, H.M., Duarte, M.E., Cavalcanti-Mata, M.E. and Mario, E. 2018. Modeling of food drying processes in industrial spray dryers. **Food and Bioproducts Processing** 107: 49-60.

Lubanska, H. 1970. Correlation of spray ring data for gas atomization of liquid metals. **JOM** 22(2): 45-49.

Masters, K. 1991. **Spray Drying Handbook (5thed.).** Longman Scientific and Technical, New York.

Miao, S. and Roos, Y.H. 2004. Nonenymatic browning kinetics of carbohydrate-based low moisture food system at temperatures applicable to spray drying. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 52: 5250-5257.

Ozmen, L. and Langrish, T.A.G. 2002. Comparison of glass transition temperature and sticky point temperature for skim milk powder. **Drying Technology** 20: 1177-1192.

Padma, I.S., Anandharamakrishnan, C. and Andrew, G.F. Stapley. 2015. Spray freeze drying: A novel process for the drying of foods and bioproducts. **Trends in Food Science & Technology** 41: 161-181.

Shishir, M.R.I. and Chen, W. 2017. Trends of spray drying: A critical review on drying of fruit and vegetable juices. **Trends in Food Science & Technology** 65: 49-67.

Turan, F.T., Cengiz, A., Sandıkçı, D., Dervisoglu, M., and Kahyaoglu, T. 2016. Influence of an ultrasonic nozzle in spray drying and storage on the properties of blueberry powder and microcapsules. **Journal of the Science of Food and Agriculture** 96: 4062-4076.