วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 29 ฉบับที่ 1 ม.ค.–มี.ค. 2562
The Journal of KMUTNB., Vol. 29, No. 1, Jan.–Mar. 2019

บทความวิจัย

เครื่องเคลือบแบบฟลูอิไดซ์เบดชนิดฉีดพ่นจากด้านล่าง: อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเคลือบเมล็ดข้าวสาร

ปรีดา ปรากฏมาก*
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 3435 1897 ต่อ 3500-6, 7507 อีเมล: fengpdpr@ku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.11.003
รับเมื่อ 6 พฤศจิกายน 2560 แก้ไขเมื่อ 7 สิงหาคม 2561 ตอบรับเมื่อ 20 กันยายน 2561 เผยแพร่ออนไลน์ 19 พฤศจิกายน 2561
© 2019 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเครื่องผลิตข้าวเคลือบแบบฟลูอิไดซ์เบดขนาดเล็กชนิดฉีดพ่นสารเคลือบจากด้านล่าง และศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเคลือบ การทดลองทำโดยเคลือบสารละลายของขมิ้นชันสกัดลงบนผิวของเมล็ดข้าวสารหอมมะลิ 105 สารเคลือบถูกฉีดพ่นออกจากหัวฉีดด้วยอัตรา 30, 35 และ 40 มล./นาที อากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีดมีแรงดัน 1 และ 1.5 บาร์ ฉีดพ่นสารเคลือบเป็นเวลา 8 และ 10 นาที และหลังจากหยุดฉีดพ่นสารเคลือบทำการอบแห้งต่ออีก 30 และ10 วินาที ในขณะที่อากาศไหลเข้าห้องอบแห้งมีความเร็ว 2.5 เมตร/วินาที และอุณหภูมิ 55, 60 และ 65°ซ ปริมาณอากาศร้อนที่นำหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ 80% คุณภาพของข้าวที่ผ่านการเคลือบแล้วพิจารณาจากค่า ความชื้น ค่าสี ร้อยละการร้าวของเมล็ดข้าวและประเมินประสิทธิภาพการเคลือบ จากการทดลองพบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการผลิตข้าวเคลือบขมิ้นชันสกัดคือ อากาศอบแห้งที่มีอุณหภูมิ 55°ซ อัตราฉีดพ่นสารเคลือบ 40 มิลลิลิตร/นาที แรงดันของอากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีด 1.5 บาร์ ฉีดพ่นสารเคลือบเป็นเวลา 8 นาที และหลังจากหยุดฉีดพ่นสารเคลือบทำการอบแห้งต่ออีก 10 วินาที ข้าวเคลือบขมิ้นชันสกัดที่ได้มีลักษณะเป็นสีเหลืองอมแดง การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง ระยะเวลาที่อบแห้งหลังหยุดพ่นสารเคลือบ และระยะเวลาที่ฉีดพ่นสารเคลือบมีผลทำให้ความชื้นของข้าวเคลือบลดต่ำลง การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งและอัตราฉีดพ่นสารเคลือบไม่มีผลต่อค่าร้อยละการร้าวของเมล็ดและประสิทธิภาพการเคลือบของเครื่องมีค่าอยู่ระหว่าง 78.2–82.9%

คำสำคัญ: ข้าวเคลือบ, ขมิ้นชันสกัด, ฟลูอิไดซ์เบด, ด้านล่าง, อบแห้ง

การอ้างอิงบทความ: ปรีดา ปรากฏมาก, "เครื่องเคลือบแบบฟลูอิไดซ์เบดชนิดฉีดพ่นจากด้านล่าง: อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเคลือบเมล็ดข้าวสาร," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 29, ฉบับที่ 1, หน้า 82–92, ม.ค.–มี.ค. 2562.

Research Article

Bottom-spray Fluidized Bed Coating: Effect of Process Variables on Rice Kernel Coating Efficiency

Preeda Prakotmak*
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Khamphengsean Campus, Nakhon Pathom, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 3435 1897 Ext. 3500-6, 7507, E–mail: fengpdpr@ku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.11.003
Received 6 November 2017; Revised 7 August 2018; Accepted 20 September 2018; Published online: 19 November 2018
© 2019 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

The purpose of this study was to construct a small scale batch bottom-spray fluidized bed coating apparatus. The effects of several process variables on the coating efficiency were evaluated. Coating experiments were performed by spraying turmeric extract solution onto Jasmine rice kernels. The experimental conditions were solution spray rates of 30, 35 and 40 mL/min, atomization pressure of 1 and 1.5 bar, spray time of 8 and 10 min, time of drying after spraying of 30 and 10 sec, superficial air velocity of 2.5 m/s, drying temperatures of 55, 60 and 65°C and 80% of recycle air. The coated rice quality was evaluated in terms of the moisture content, color, percentage of fissure kernels and coating efficiency. The experimental results have shown that suitable conditions for producing turmeric extract coated rice were drying temperature of 55°C, the coating solution spray rate of 40 mL/min, atomization pressure of 1.5 bar, spray time of 8 min and time of drying after spraying of 10 sec. The color of turmeric extract coated rice was reddish-yellow. The moisture content of turmeric extract coated rice decreased with increasing the drying temperature, coating solution spray time and time of drying after spraying. The increase of the drying temperature and coating solution spray rate did not affect the percentage of fissure kernels. The coating efficiency of the apparatus was in the range of 78.2–82.9%.

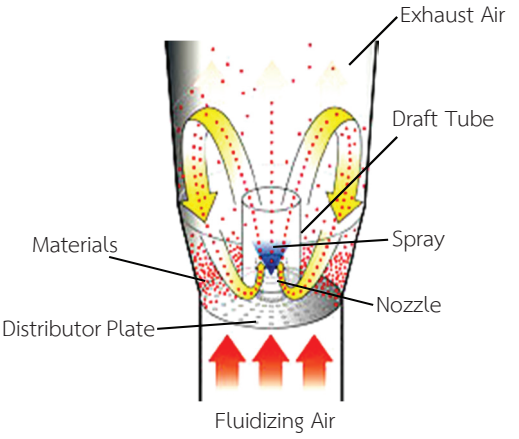
Keywords: Coated Rice, Turmeric, Fluidized-bed, Bottom, Drying

Please cite this article as: P. Prakotmak, "Bottom-spray fluidized bed coating: Effect of process variables on rice kernel coating efficiency," *The Journal of KMUTNB*, vol. 29, no. 1, pp. 82–92, Jan.–Mar. 2019 (in Thai).

1. บทนำ

การเคลือบอาหารเป็นทางเลือกหนึ่งในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์อาหารให้มีคุณภาพที่ดีขึ้น เช่น ปรับปรุงลักษณะทางกายภาพและเพิ่มสารอาหารหรือสารเติมแต่ง การเคลือบสารต่างๆ ลงบนผิวของวัสดุมีวิธีการเคลือบอยู่หลากหลายขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของสารที่ใช้เคลือบ ความสม่ำเสมอความหนาของชั้นฟิล์ม และวัสดุที่ถูกเคลือบ วิธีการเคลือบที่นิยมใช้ เช่น การจุ่มเคลือบ (Dip Coating) การเทเคลือบ (Cast Coating) และการพ่นเคลือบ (Spray Coating) ซึ่งการพ่นเคลือบเป็นวิธีที่ทำให้สารเคลือบสามารถยึดเกาะอยู่บนผิวเมล็ดข้าวสารได้อย่างสม่ำเสมอดีกว่าวิธีอื่นๆ และทำให้ความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังผ่านกระบวนการเคลือบและอบแห้งมีค่าความสม่ำเสมอใกล้เคียงกัน

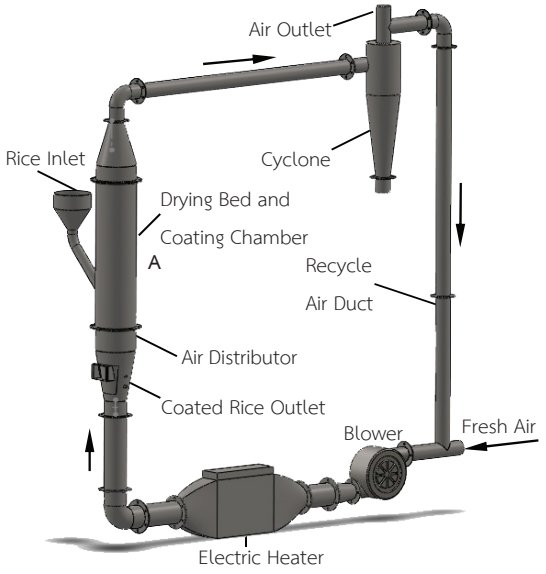
กระบวนการพ่นเคลือบด้วยเครื่องแบบฟลูอิไดซ์เบดได้ถูกใช้อย่างแพร่หลายมายาวนานแล้ว โดยในอดีตนั้นมีการใช้เทคนิคแบบนี้เพื่อการเคลือบยาแบบแคปซูล ต่อมาได้มีการประยุกต์เทคนิคการเคลือบแบบฟลูอิไดซ์เบดเข้ากับกระบวนการทางเทคโนโลยีอาหารเพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการและความหลากหลายให้กับอาหาร หลักการของฟลูอิไดเซชัน (Fluidization) เป็นวิธีการเคลือบโดยการฉีดพ่นสารเคลือบให้เป็นละอองฝอย (Spray Coating) มีหลักการทำงาน คือทำให้วัสดุของแข็งที่มีลักษณะเป็นเม็ดซึ่งสามารถเป่าให้เกิดฟลูอิไดซ์ได้เกิดการแขวนลอยอยู่ในอากาศ โดยอาศัยแรงลมที่ป้อนเข้าห้องอบแห้งทางด้านล่างเพื่อให้วัสดุลอยตัวขึ้น ขณะเดียวกันหัวฉีดจะพ่นสารเคลือบให้เป็นหยดละอองฝอยเข้ายึดเกาะบนผิวของวัสดุที่กระจายตัวอยู่ด้านบนของห้องอบแห้งในขณะที่ลอยตัว หลังจากนั้นวัสดุที่ได้รับสารเคลือบแล้วจะเกิดการหมุนเวียน และตกลงสู่ด้านล่างของห้องอบแห้ง ทำให้ความชื้นที่ผสมอยู่ในสารเคลือบเกิดการระเหยออกจากผิวของวัสดุ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วระบบการเคลือบแบบฟลูอิไดซ์เบดมีอยู่ 3 แบบ [1] คือ 1) เครื่องฟลูอิไดซ์เบดชนิดฉีดพ่นจากด้านล่าง (Bottom-spray Coater Fluidized Bed) 2) เครื่องฟลูอิไดซ์เบดชนิดฉีดพ่นจากด้านบน (Top-spray Fluidized Bed Coater) 3) เครื่องฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุน (Rotary Fluidized Bed Coater)



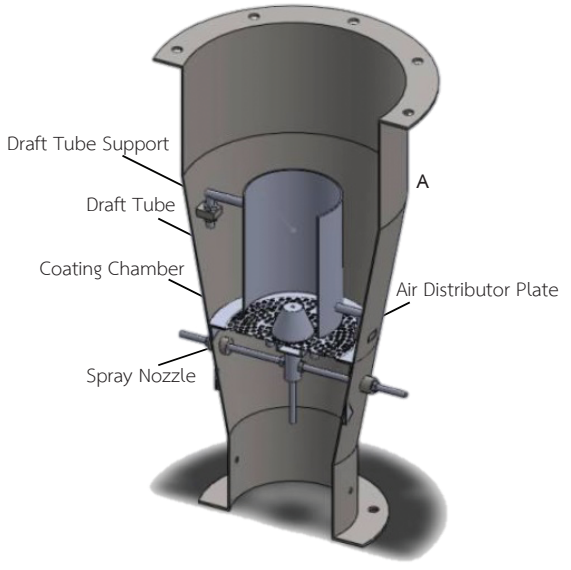
รูปที่ 1 ห้องอบแห้ง Bottom Spray Fluidized Bed [2]

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เครื่องฟลูอิไดซ์เบดชนิดฉีดพ่นจากด้านล่าง เพื่อศึกษาการผลิตข้าวเคลือบสารต้านอนุมูลอิสระโดยใช้ผงขมิ้นชันเป็นสารเคลือบ เครื่องแบบนี้เหมาะสำหรับใช้เคลือบฟิล์มบางลงบนผิวของวัสดุที่มีขนาดเล็กประมาณ 100 ไมโครเมตร ภายในห้องอบแห้งจะติดตั้งอุปกรณ์ที่เรียกว่า Draft Tube ทำหน้าที่เป็นท่อหรือช่องว่างเพื่อให้วัสดุลอยขึ้นสู่ด้านบนช่วยทำให้วัสดุเกิดการหมุนเวียนได้ดี หัวฉีดที่ใช้ถูกติดตั้งอยู่บริเวณตำแหน่งตรงกลางของแผ่นกระจายอากาศดังแสดงตามรูปที่ 1 สารเคลือบถูกฉีดพ่นให้เป็นหยดละอองโดยหัวฉีดและถูกพ่นลงบนผิวของวัสดุในขณะที่กำลังไหลผ่าน Draft Tube ทำให้วัสดุได้รับสารเคลือบเมื่อไหลผ่านในแต่ละครั้ง ซึ่งสารเคลือบสามารถยึดเกาะอยู่บนผิวของวัสดุได้อย่างสม่ำเสมอ

Dewittinck และ Huyghebaert [3] รายงานว่าอุณหภูมิของอากาศร้อนมีผลต่อประสิทธิภาพการเคลือบที่อุณหภูมิสูงโดยอาจทำให้ตัวทำละลายในละอองฝอยของสารเคลือบจะระเหยออกไปก่อนที่หยดละอองฝอยเข้ายึดเกาะบนผิวของวัสดุ ในทางตรงข้ามถ้าใช้อุณหภูมิอบแห้งต่ำจนเกินไปจะทำให้ความชื้นของวัสดุภายในเบดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้วัสดุจับตัวเป็นก้อนการลอยตัวแบบฟลูอิไดซ์จะลดลง ทำให้ประสิทธิภาพการเคลือบลดลงได้เช่นกัน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเครื่องต้นแบบผลิตข้าวเคลือบและทำแห้งด้วยกระบวนการฟลูอิไดซ์เบดชนิดฉีดพ่นสารเคลือบจาก



รูปที่ 2 ระบบเคลือบและอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด



รูปที่ 3 ภาพตัดขวางห้องอบเคลือบของงานวิจัยนี้

ด้านล่างมาประยุกต์เข้ากับการเคลือบสมุนไพรลงบนเมล็ดข้าวสาร และหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับใช้ผลิตข้าวเคลือบ ได้แก่ อุณหภูมิของอากาศที่ใช้อบแห้ง อัตราฉีดพ่นสารเคลือบ แรงดันของอากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีด ความเร็วของอากาศที่ให้เกิดฟลูอิไดซ์ที่มีผลต่อคุณภาพข้าวเคลือบ

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 เครื่องเคลือบข้าวและการทดสอบผลิตภัณฑ์

เครื่องเคลือบข้าวขนาดเล็กแบบฟลูอิไดซ์เบดชนิดฉีดพ่นด้านล่างดังแสดงในรูปที่ 2 ประกอบด้วยฮีตเตอร์ขนาด 12 กิโลวัตต์ ควบคุมด้วย PID พัดลมแบบใบพัดโค้งหลังขนาดมอเตอร์ 1.5 กิโลวัตต์ อัตราการไหลจำเพาะของอากาศ 5.5 ม.^{3}/วินาที-ม.^{3}-เกรน ความเร็วอากาศอบแห้งสูงสุด 2.5 ม./วินาที รูปที่ 3 แสดงห้องอบแห้งและเคลือบวัสดุ เมล็ดข้าวจะถูกเป่าให้ลอยขึ้นด้วยอากาศที่ป้อนเข้าทางด้านล่างผ่านแผ่นกระจายอากาศที่มีรูพรุน (Air Distributor Plate) ส่วนสารเคลือบถูกฉีดพ่นให้เป็นหยดละอองฝอยด้วยหัวฉีด (Spray Nozzle) อยู่ภายใน Draft Tube ซึ่งหยดละอองฝอยจะไหลทิศทางเดียวกับการไหลของอากาศร้อนที่ใช้อบแห้งก่อนเข้ายึดเกาะบนผิวของวัสดุ หลังจากนั้นวัสดุที่ได้รับสารเคลือบแล้วจะเกิดการหมุนเวียนตกลงสู่ด้านล่างของห้องอบแห้งและเคลื่อนที่ผ่าน Draft Tube และถูกพ่นเคลือบอีกครั้ง หมุนเวียนเช่นนี้ไปเรื่อยๆ เครื่องที่สร้างขึ้นสามารถผลิตข้าวเคลือบมีลักษณะทำงานเป็นงวด (Batch) ครั้งละ 4 กก.

ทำการทดลองโดยเตรียมสารละลายผงขมิ้นชันสกัดปริมาณ 4% w/v ผสมกับสารละลายเอทานอลความเข้มข้น 70% โดยปริมาตร แล้วกรองด้วยผ้าขาวบาง ลดความเข้มข้นของเอทานอลด้วยการผสมน้ำกลั่นให้เหลือ 40% โดยปริมาตร แล้วนำไปพ่นเคลือบข้าวหอมมะลิ 105 ที่มีความชื้นเริ่มต้น 11.9% w.b. โดยกำหนดเงื่อนไขการทดลองฉีดพ่นสารเคลือบด้วยอัตรา 35 และ 40 มล./นาที อากาศร้อนป้อนเข้าสู่ห้องอบและเคลือบข้าวที่อุณหภูมิ 55, 60 และ 65°ซ อากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีดมีความดัน 1.5 บาร์ ระยะเวลาที่ฉีดสารเคลือบ 8 และ 10 นาที หลังจากหยุดพ่นสารเคลือบอบแห้งต่อเป็นเวลา 10 วินาที อากาศที่ออกจากเครื่องนำกลับมาใช้ใหม่ 80% หลังจากที่ได้ผลิตภัณฑ์ข้าวเคลือบจะนำมาเก็บในตู้เย็นอุณหภูมิ 4°ซ เพื่อทดสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งการทดสอบคุณภาพของข้าวเคลือบขมิ้นชันมีดังนี้

- การแตกร้าวของเมล็ดข้าวทดสอบด้วยการสุ่มเมล็ดข้าวเคลือบที่เต็มเมล็ดจำนวน 100 เมล็ด มองด้วยแว่นขยาย

ที่มีการส่องไฟ เพื่อแยกเมล็ดที่มีรอยร้าวออก เปอร์เซ็นต์ของข้าวเต็มเมล็ดทดสอบโดยนำตัวอย่างข้าวเคลือบ 200 กรัม คัดแยกด้วยเครื่อง Indent Cylinder รุ่น TRG-05A

• การหาค่าความชื้นด้วยการนำข้าวเคลือบไปเข้าตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 103°ซ เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง แล้วคำนวณน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง

• ทดสอบค่าสี ได้แก่ ค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ด้วยเครื่องวัดสี Hunter Lab ค่าโทนสี (Hue Angle, H^o) ของข้าวเคลือบคำนวณจากสมการ $H^o = \tan^{-1}(b^*/a^*)$ แล้ววิเคราะห์ทางสถิติจากตัวอย่างทำการทดลองซ้ำ 9 ครั้ง

• หาประสิทธิภาพการเคลือบของเครื่องผลิตข้าวเคลือบเป็นอัตราส่วนของน้ำหนักผงขมิ้นชันที่เกาะอยู่บนเมล็ดข้าวต่อน้ำหนักผงขมิ้นชันทั้งหมดที่ใช้เคลือบ โดยคำนวณหาจากสมการ

$$Eff = \frac{M_a}{M_s} \times 100 \quad (1)$$

โดย $$M_a = \Delta M \times \left(\frac{M_{rt}}{M_r} \right) \quad (2)$$

เมื่อ Eff คือ ประสิทธิภาพการเคลือบ (%)

ΔM คือ ผลต่างของมวลข้าวสาร 2000 เมล็ด ก่อนเคลือบและหลังเคลือบ (กรัม, dry matter)

M_{rt} คือ มวลของข้าวสารทั้งหมดที่ใช้เคลือบ (กรัม)

M_s คือ มวลของสารเคลือบทั้งหมดที่ใช้ (กรัม, dry matter)

M_a คือ มวลของผงขมิ้นชันที่เกาะอยู่บนเมล็ดข้าว (กรัม)

M_r คือ มวลของข้าวสาร 2000 เมล็ด (กรัม)

2.2 การคำนวณหาขนาดของอุปกรณ์ให้ความร้อน และขนาดพัดลม

งานวิจัยนี้สร้างห้องอบแห้งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 ซม. คำนวณจากข้าวสารที่ใช้เคลือบในแต่ละงวดมีมวล 4 กก. ความสูงเบด 7 ซม. จากผลการทดลอง พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศที่ป้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งจนถึงค่าหนึ่งซึ่งทำให้ข้าวสารที่อยู่ในห้องอบแห้งเริ่มมีการขยับและแยกตัวออกจากกัน เรียกความเร็วค่านี้ว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิไดซ์ (U_{mf}) จากการทดลองนี้พบว่าความเร็วต่ำสุดของอากาศที่ทำให้เมล็ดข้าวสารเกิดฟลูอิไดซ์มีค่าประมาณ 1.82 ม./วินาที ในทางปฏิบัติความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้จริงอาจจะสูงกว่า U_{mf} ประมาณ 1.4 เท่า เมื่อนำความเร็วนี้ไปคำนวณหาอัตราการไหลเชิงปริมาตร (Q_a) สามารถนำ Q_a ไปคำนวณค่าความร้อนจากฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ถ่ายเทให้กับอากาศสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (3)

$$q = \rho_g Q_a C_a (T_{mix} - T_a) = \dot{m} C_p (T_{mix} - T_a) \quad (3)$$

เมื่อ q คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้เพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศแวดล้อม (กิโลวัตต์)

$\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศร้อน (กก./วินาที)

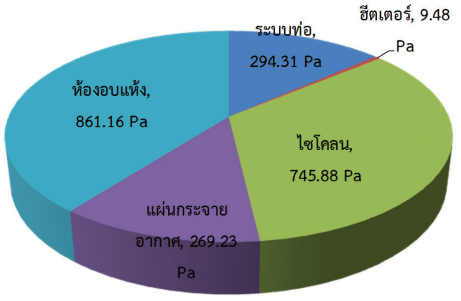
C_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะเฉลี่ยของอากาศ (กิโลจูล/กก. °ซ)

T_{mix} คือ อุณหภูมิอากาศร้อน

T_a คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม ประมาณค่าการสูญเสียความร้อน 15% และคิดค่า Safety Factor เท่ากับ 1.5 ทำให้ต้องเลือกใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ให้ความร้อนไม่ต่ำกว่า 7 กิโลวัตต์

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้พัดลมที่มีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศและความดันสถิตให้เหมาะสมกับระบบที่ออกแบบไว้ การคำนวณความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในส่วนต่างๆ สามารถสืบค้นจากงานวิจัยที่ผ่านมา [4], [5] ซึ่งสามารถคำนวณความดันสูญเสียดังแสดงในรูปที่ 4

กำหนดให้ Safety Factor = 1.2 ความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิ 65°ซ มีค่าเท่ากับ 1.050 กก./ม.^{3} คำนวณความดันสถิตที่ต้องการจากพัดลมคือ 2989.8 ปาสคาล ในงานวิจัยจึงเลือกใช้พัดลมแบบแรงเหวี่ยงใบพัดโค้งหลัง มีมอเตอร์ขนาด 1.5 กิโลวัตต์ แรงดันสถิตสูงสุดที่พัดลมสร้างได้ 3,532 ปาสคาล และมีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศสูงสุดที่ 25 ม.^{3}/นาที



รูปที่ 4 ความดันลดในอุปกรณ์ต่างๆ

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

ข้าวสารที่ใช้เคลือบในแต่ละงวดมีมวล 4 กก. และมีค่าความชื้นเริ่มต้นประมาณ 12% w.b. เบดมีความสูงเริ่มต้น 7 ซม.

ตารางที่ 1 แสดงผลของอุณหภูมิของอากาศที่ใช้อบแห้ง อัตราฉีดพ่นสารเคลือบ ระยะเวลาฉีดพ่นสารเคลือบ แรงดันของอากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีด และระยะเวลาที่อบแห้งหลังหยุดพ่นสารเคลือบต่อค่าความชื้นสุดท้ายของข้าวเคลือบ จากการทดลองพบว่าข้าวที่ผ่านการเคลือบโดยใช้ระยะฉีดพ่นสารเคลือบ 10 นาที มีค่าความชื้นสูงกว่าข้าวที่ผ่านการเคลือบโดยใช้ระยะเวลาฉีดพ่นสารเคลือบ 8 นาที เนื่องจากมีปริมาณสารเคลือบที่ถูกพ่นเข้ายึดเกาะผิวเมล็ดข้าวมากกว่าข้าวที่ผ่านการเคลือบด้วยระยะเวลาที่สั้นกว่า

การใช้อุณหภูมิอบแห้ง 65°ซ และระยะเวลาที่อบแห้งหลังหยุดฉีดพ่นสารเคลือบ 30 วินาที ทำให้ข้าวเคลือบมีความชื้นค่อนข้างต่ำ จากการปรับเปลี่ยนระยะเวลาการอบแห้งหลังหยุดฉีดพ่นสารเคลือบ ทำให้ทราบว่าการอบแห้ง

ตารางที่ 1 ความชื้นของข้าวเคลือบที่เงื่อนไขการทดลองต่างกัน

เงื่อนไข					ความชื้น* (% w.b.)
อุณหภูมิ (°ซ)	อัตราการฉีดพ่น (มล./นาที)	ระยะเวลาฉีดพ่น (นาที)	ระยะอบแห้งหลังจากหยุดพ่น (วินาที)	แรงดันของอากาศป้อนเข้าหัวฉีด (บาร์)	
55	30	8	10	1.5	11.8 ± 0.1
	30	10	10	1.5	11.9 ± 0.0
	35	8	10	1.5	11.9 ± 0.08
	35	10	10	1.5	11.9 ± 0.1
	35	10	10	1.0	11.9 ± 0.07
	40	8	10	1.5	11.8 ± 0.0
	40	10	10	1.5	11.9 ± 0.1
	40	10	0	1.5	12.2 ± 0.1
60	30	8	10	1.5	11.7 ± 0.07
	30	10	10	1.0	11.8 ± 0.1
	35	8	10	1.5	11.7 ± 0.0
	35	10	10	1.5	11.8 ± 0.0
	40	8	10	1.5	11.9 ± 0.0
	40	10	0	1.5	12.1 ± 0.1
	40	10	10	1.0	11.8 ± 0.05
	40	10	10	1.5	11.7 ± 0.1
65	30	8	10	1.5	11.6 ± 0.1
	30	10	10	1.5	11.5 ± 0.0
	35	8	10	1.5	11.6 ± 0.0
	35	10	10	1.5	11.6 ± 0.0
	35	10	30	1.5	11.3 ± 0.1
	40	8	10	1.5	11.6 ± 0.1
	40	10	10	1.5	11.7 ± 0.05
	40	10	0	1.5	12.0 ± 0.1

*ความชื้นของข้าวสารเริ่มต้น 11.9 ± 0.1% w.b.

หลังจากหยุดฉีดพ่นสารเคลือบโดยใช้เวลา 10 วินาที เพียงพอที่จะทำให้ความชื้นส่วนสุดท้ายอยู่ในระดับความชื้นที่เหมาะสำหรับการเก็บรักษา (ประมาณ 11.9% w.b.) เพื่อทำให้ข้าวเคลือบมีค่าความชื้นใกล้เคียงกับค่าความชื้นเริ่มต้นก่อนการเคลือบและลดการแตกร้าวของเมล็ดจากการใช้อุณหภูมิสูง ทำให้ต้องปรับลดอุณหภูมิของอากาศที่ใช้อบแห้งจาก 65°ซ เป็น 60°ซ พบว่าข้าวที่ผ่านการเคลือบโดยใช้อุณหภูมิอบแห้ง 60°ซ อัตราฉีดพ่นสารเคลือบ 40 มล./นาที อากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีดมีแรงดัน 1.5 บาร์ ฉีดพ่นสารเคลือบเป็นเวลา 8 นาที จากนั้นอบแห้งต่อหลังหยุดพ่นสารเคลือบ 10 วินาที ทำให้ข้าวเคลือบมีค่าความชื้นประมาณ 11.9% w.b. และเมื่อทดลองผลิตข้าวเคลือบโดยไม่ต้องอบแห้งต่อหลังจากหยุดพ่นสารเคลือบ พบว่าข้าวเคลือบมีค่าความชื้น 12.2% w.b. ที่ระดับความชื้นนี้ส่งผลทำให้เมล็ดข้าวเกาะกันเป็นก้อน และอาจทำให้เมล็ดข้าวส่วนนี้เกิดการเสียหายได้ระหว่างการเก็บรักษา ส่วนการลดแรงดันของอากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีดจาก 1.5 เป็น 1.0 บาร์ ความชื้นในเมล็ดข้าวเคลือบไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 2 แสดงค่าสีของข้าวเคลือบขมิ้นชัน พบว่าการเพิ่มอัตราการฉีดพ่นสารเคลือบทำให้ข้าวเคลือบขมิ้นชันมีสีเข้มมากขึ้น ค่า Hue Angle (^{o}H) อยู่ในช่วง 79–81 ซึ่งหมายถึงสีเหลืองอมแดง การเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนทำให้ค่าความเป็นสีแดง (a^*) มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญเป็นผลมาจากการระเหยของสารเคลือบทำให้ปริมาณสารเคลือบยึดเกาะบนผิวเมล็ดข้าวลดลง อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดรอยร้าวบนเมล็ดข้าวและเกิดช่องว่างอากาศบริเวณผิวเมล็ดและเกิดสีขุ่นขาวทำให้เกิดแสงสะท้อนในรูปแบบการกระจายรังสีเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้ค่าความสว่าง (L^*) เพิ่มสูงขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อค่าความเป็นสีแดง (a^*) และความเป็นสีเหลือง (b^*) อย่างมีนัยสำคัญสังเกตจากตัวอักษรทางสถิติที่ไม่ต่างกัน ($p < 0.05$)

ตารางที่ 3 แสดงร้อยละการแตกร้าว ร้อยละของข้าวเต็มเมล็ดและความชื้นในเมล็ด ที่เงื่อนไขการทดลองต่างๆ พบว่าอุณหภูมิอบแห้งและอัตราการฉีดพ่นสารเคลือบมีอิทธิพลผลต่อความชื้นของเมล็ดข้าวโดยข้าวสารที่ผ่านการเคลือบมีความชื้นในช่วง 11.3–12.2% w.b. อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 2 ค่าสีของเมล็ดข้าวที่ผ่านการเคลือบด้วยขมิ้นชัน (ที่เงื่อนไขแรงดันหัวฉีด 1.5 บาร์ ระยะเวลาฉีดพ่น 8 นาที)

เงื่อนไข					
อุณหภูมิ (°ซ)	**ปริมาณสารเคลือบ (มล./นาที)**	L^* **(ความสว่าง)**	a^* **(สีแดง)**	b^* **(สีเหลือง)**	**Hue Angle (^{o}H)**
55	30	72.73 ± 0.42^{d}	12.20 ± 0.20^{c}	73.83 ± 0.50^{a}	80.62 ± 0.12^{e}
	35	$71.77 \pm 0.21^{b,c}$	13.00 ± 0.17^{d}	73.20 ± 0.75^{a}	$79.93 \pm 0.06^{c,d}$
	40	71.30 ± 0.36^{a}	14.33 ± 0.25^{f}	73.73 ± 0.50^{a}	79.00 ± 0.25^{a}
60	30	73.27 ± 0.15^{e}	11.77 ± 0.06^{b}	74.07 ± 0.42^{a}	80.97 ± 0.01^{f}
	35	$71.70 \pm 0.17^{a,b,c}$	13.17 ± 0.25^{d}	73.63 ± 0.50^{a}	79.86 ± 0.26^{c}
	40	$71.47 \pm 0.12^{a,b}$	14.33 ± 0.45^{f}	73.90 ± 0.50^{a}	79.02 ± 0.41^{a}
65	30	73.77 ± 0.15^{f}	11.33 ± 0.12^{a}	73.67 ± 0.57^{a}	81.25 ± 0.15^{f}
	35	72.83 ± 0.31^{d}	12.57 ± 0.32^{c}	73.30 ± 0.44^{a}	$80.27 \pm 0.19^{d,e}$
	40	72.00 ± 0.10^{c}	13.80 ± 0.20^{e}	73.97 ± 0.35^{a}	79.43 ± 0.10^{b}

ตัวอักษรอังกฤษแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละหลักของตาราง $p < 0.05$

ตารางที่ 3 ร้อยละการแตกร้าว ร้อยละของข้าวเต็มเมล็ดและความชื้นในเมล็ด (ที่เงื่อนไขแรงดันหัวฉีด 1.5 บาร์ ระยะเวลาฉีดพ่น 8 นาที)

เงื่อนไข		ร้อยละการแตกร้าว	ร้อยละของข้าวเต็มเมล็ด	ความชื้นในเมล็ด (% w.b.)
อุณหภูมิ (°ซ)	ปริมาณสารเคลือบ (มล./นาที)			
55	30	6 ± 2^{a}	94.0 ± 0.2^{de}	11.8 ± 0.1^{cd}
	35	7 ± 1^{a}	93.6 ± 0.2^{c}	12.1 ± 0.0^{e}
	40	5 ± 1^{a}	93.7 ± 0.2^{cd}	12.2 ± 0.1^{e}
60	30	8 ± 3^{a}	93.1 ± 0.3^{b}	11.7 ± 0.1^{bc}
	35	7 ± 2^{a}	93.2 ± 0.3^{b}	11.9 ± 0.0^{d}
	40	4 ± 2^{a}	94.3 ± 0.2^{e}	12.1 ± 0.1^{e}
65	30	97 ± 2^{b}	92.5 ± 0.2^{a}	11.4 ± 0.1^{a}
	35	96 ± 3^{b}	93.2 ± 0.1^{b}	11.6 ± 0.1^{b}
	40	N/A	N/A	N/A
ข้าวขาว (อ้างอิง)		4 ± 2^{a}	93.9 ± 0.3^{cd}	12.4 ± 0.20^{f}

ข้าวอ้างอิงคือข้าวสารที่ยังไม่ผ่านกระบวนการใดๆ ตัวอักษรอังกฤษแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละหลักของตาราง $p < 0.05$

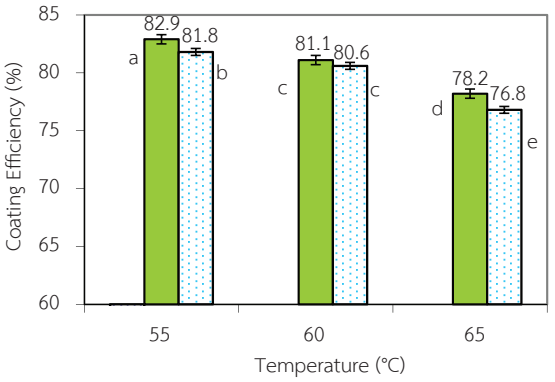
จากตารางที่ 3 ผลการแตกร้าวของเมล็ดข้าวทำให้ทราบว่าควรควบคุมและเลือกเงื่อนไขให้ความชื้นสุดท้ายของข้าวเคลือบสูงกว่า 11.9% w.b. เนื่องจากทำให้เมล็ดข้าวแตกร้าวมากกว่า 96% [6] จากตารางที่ 3 พบว่าที่อุณหภูมิ 65°ซ ร้อยละการแตกร้าว ร้อยละของข้าวเต็มเมล็ดและความชื้นในเมล็ดมีความแตกต่างกับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 และ 60°ซ อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) การแตกร้าวที่เกิดขึ้นนี้มีสาเหตุมาจากเกรเดียนท์ ความชื้น (Moisture Gradient) ระหว่างบริเวณผิวกับความชื้นภายในเมล็ดมีความแตกต่างกันจนทำให้เกิดแรงเค้น (Stress) [7]–[9] จนข้าวสารแตกร้าว

จากผลการทดลองงานวิจัยนี้เลือกเงื่อนไขตัวแปรสำหรับผลิตข้าวเคลือบที่มีค่าคุณภาพของเมล็ดข้าวและประสิทธิภาพการเคลือบดีที่สุดดังนี้ อัตราการฉีดพ่น 40 มล./นาที ระยะเวลาที่ฉีดพ่นสารเคลือบจาก 8 นาที ระยะอบแห้งหลังจากหยุดพ่น 10 วินาที และแรงดันอากาศป้อนเข้าหัวฉีด 1.5 บาร์ ผู้วิจัยได้เคยทำการทดลองและสร้างเครื่องฟลูอิไดซ์เบดชนิดฉีดพ่นจากด้านบน (Top-spray Fluidized Bed Coater) [5], [10] ลักษณะห้องอบแสดงดังรูปที่ 5 โดยเคลือบขมิ้นชันที่เงื่อนไขการทดลองเดียวกันกับงานวิจัยนี้

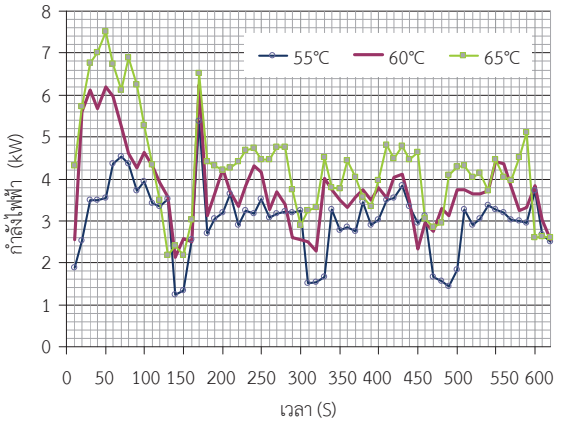
รูปที่ 5 ห้องอบแห้ง Top Spray Fluidized Bed [2]

ดังนั้นเพื่อเปรียบเทียบกับเครื่องฟลูอิไดซ์เบดชนิดฉีดพ่นจากด้านล่าง (Bottom-spray Coater Fluidized Bed) จึงนำผลการทดลองที่เงื่อนไขที่ดีที่สุดมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเคลือบของเครื่องทั้งสองแบบดังรูปที่ 6

รูปที่ 6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการเคลือบระหว่างเครื่องฟลูอิไดซ์เบดชนิดฉีดพ่นจากด้านล่างและด้านบน โดยใช้วิธีการหาประสิทธิภาพการเคลือบด้วยวิธีการเดียวกัน ที่อัตราการฉีดพ่น 40 มล./นาที ที่ระยะเวลาฉีดพ่นสารเคลือบ



รูปที่ 6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการเคลือบระหว่างเครื่องฟลูอิไดซ์เบดชนิดฉีดพ่นจากด้านล่างและเครื่องฟลูอิไดซ์เบดชนิดฉีดพ่นจากด้านบน



รูปที่ 7 การใช้พลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์) ตามระยะเวลาของกระบวนการผลิตเคลือบข้าวเคลือบขมิ้นชัน (วินาที)

8 นาที ระยะอบแห้งหลังจากหยุดพ่น 10 วินาที และแรงดันอากาศป้อนเข้าหัวฉีด 1.5 บาร์

จากรูปที่ 6 พบว่าเครื่องฟลูอิไดซ์เบดชนิดฉีดพ่นจากด้านล่าง (รูปที่ 1) มีค่าประสิทธิภาพการเคลือบที่สูงกว่าเครื่องฟลูอิไดซ์เบดชนิดฉีดพ่นจากด้านบน (รูปที่ 5) โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 82.9% ที่อุณหภูมิ 55°ซ การพ่นเคลือบด้วยเทคนิคฉีดพ่นจากด้านล่าง เป็นการพ่นเคลือบที่ละอองฝอยไหลตามกระแสลมที่เป่าวัสดุให้เกิดสภาวะฟลูอิไดเซชัน แตกต่างจากการฉีดพ่นจากด้านบนที่มีทิศทางการพ่นและการไหลของอากาศสวนทางกัน (รูปที่ 5) ทำให้ละอองฝอยของสารเคลือบเข้ายึดเกาะกับเมล็ดข้าวได้ยากกว่าเพราะละอองฝอยบางส่วนจะถูกอากาศพัดพาออกจากห้องอบแห้ง ซึ่งแตกต่างจากเครื่องฟลูอิไดซ์เบดชนิดฉีดพ่นจากด้านล่าง ภายในห้องอบแห้งมีการติดตั้ง Draft Tube เพื่อช่วยให้เกิดช่องว่างให้วัสดุลอยขึ้นสู่ด้านบน ทำให้วัสดุเกิดการหมุนเวียนได้ดี โดยหัวฉีดจะพ่นสารเคลือบลงบนผิวของวัสดุในขณะที่กำลังไหลผ่าน Draft Tube ในลักษณะแบบไหลตามกัน ข้าวสารได้รับสารเคลือบเมื่อไหลผ่านในแต่ละครั้ง ทำให้สารเคลือบสามารถยึดเกาะอยู่บนผิวของวัสดุได้อย่างสม่ำเสมอกว่าการพ่นเคลือบแบบฉีดพ่นจากด้านบน

จากรูปที่ 6 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 55 จนถึง 65°ซ พบว่าการเคลือบโดยใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงทำให้เครื่องผลิตข้าวเคลือบมีประสิทธิภาพการเคลือบลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการเคลือบโดยใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงมีผลต่อปริมาณของหยดละอองฝอยของสารเคลือบที่ถูกพ่นออกจากหัวฉีดเกิดการระเหยไปบางส่วน เพราะสารละลายมีส่วนผสมของเอทานอลที่มีจุดเดือดประมาณ 78.4°ซ การเพิ่มอุณหภูมิทำให้มีค่าเข้าใกล้จุดเดือดของเอทานอล สารเคลือบที่เกาะอยู่บนผิวเมล็ดจึงมีปริมาณลดลง

การใช้ค่าพลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์) ในการผลิตข้าวเคลือบขมิ้นชันในแต่ละงวด (Batch) งวดละ 4 กก. แสดงในรูปที่ 7 เนื่องจากฮีตเตอร์และโบลเวอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังมากที่สุดในระบบ จึงทำการตรวจวัดการใช้พลังงานรวมของอุปกรณ์ทั้งสองชนิดนี้ โดยทำการเก็บค่าจากไฟฟ้า 3 เฟส ด้วยเครื่องวัดค่ากำลังไฟฟ้า Power Meter รุ่น DIRIS-Ap ส่วนอุปกรณ์การฉีดพ่นใช้ไฟฟ้า 1 เฟส ไม่ได้ทำการตรวจวัดเนื่องจากมีค่าพลังงานไฟฟ้าน้อยเมื่อเทียบกับฮีตเตอร์ จากการทดลองอุณหภูมิที่ต่างกันได้แก่ 55, 60 และ 65°ซ และใช้พารามิเตอร์อื่นๆ เท่ากันคือ ความเร็วอากาศร้อน อัตราการฉีดพ่นสารเคลือบ 40 มล./นาที ระยะเวลาฉีดพ่นสารเคลือบ 10 นาที ระยะเวลาที่อบแห้งหลังหยุดพ่นสารเคลือบ 10 วินาที และแรงดันของอากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีด 1.5 บาร์

จากรูปที่ 7 ค่าพลังไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามเวลา พลังไฟฟ้า

มีค่าสูงในช่วงเวลาประมาณ 0–140 วินาที และมีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 50 วินาที หลังจากเริ่มกระบวนการผลิต ในช่วงแรกฮีตเตอร์ใช้พลังไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง เพื่อทำให้อุณหภูมิอากาศร้อนถึงระดับที่กำหนดไว้ ปั๊มลมทำงานเพื่อให้ค่าแรงดันในถังมีค่า 1.5 บาร์ ส่วนโบลเวอร์จะทำงานตลอดเวลาเพื่อสร้างความเร็วลมเป่าให้เมล็ดข้าวสารลอยตัวแบบฟลูอิไดซ์เบดและหมุนเวียนอากาศภายในระบบจนกว่าเสร็จกระบวนการเคลือบข้าว ส่วนที่ช่วงเวลา 50–140 วินาที พลังไฟฟ้าลดลงเนื่องจากเทอร์โมสตัทหยุดการทำงานของฮีตเตอร์ เพราะอุณหภูมิอากาศร้อนเริ่มคงที่ ฮีตเตอร์จะทำงานอีกครั้ง เมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่าที่กำหนด เครื่องเคลือบข้าวจะมีการทำงานในรูปแบบนี้ไปเรื่อยๆ จนเสร็จกระบวนการผลิต

เมื่อคำนวณพื้นที่ใต้กราฟพลังไฟฟ้าในรูปที่ 7 ตลอดช่วงการผลิตและหาเฉลี่ย 3 ครั้ง พบว่าอุณหภูมิการอบแห้งที่ 55, 60 และ 65°ซ ใช้พลังงานไฟฟ้า 0.52, 0.65 และ 0.74 กิโลวัตต์ชั่วโมง ตามลำดับ เมื่อทราบพลังงานไฟฟ้าสามารถนำไปคำนวณต้นทุนการผลิตและหาจุดคุ้มทุนต่อไป

เครื่องผลิตข้าวเคลือบและทำแห้งด้วยกระบวนการฟลูอิไดซ์เบดชนิดฉีดพ่นสารเคลือบจากด้านล่างที่สร้างในงานวิจัยนี้สามารถผลิตข้าวเคลือบขมิ้นชันสกัดที่มีผิวเคลือบสม่ำเสมอ แต่ยังมีข้อจำกัดที่ทำงานได้เป็นงวด (Batch) ครั้งละ 4 กก. หากขยายขนาดเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมควรออกแบบให้สามารถทำงานในลักษณะฟลูอิไดซ์เบดแบบต่อเนื่อง (Continuous Fluidized Bed) ซึ่งสามารถใช้ข้อมูลในเงื่อนไขการทดลองที่มีประสิทธิภาพการเคลือบสูงสุดจากงานวิจัยนี้ ไปช่วยออกแบบระบบต่อไป

4. สรุป

เทคนิคการเคลือบและอบแห้งด้วยหลักการของฟลูอิไดเซชันชนิดฉีดพ่นจากด้านล่าง สามารถผลิตข้าวเคลือบขมิ้นชันสกัดที่มีผิวเคลือบสม่ำเสมอมากกว่าการเคลือบด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันชนิดฉีดพ่นจากด้านบน ผลิตภัณฑ์ข้าวเคลือบขมิ้นชันสกัดที่ได้มีสีเหลืองอมแดงและมีสีที่สม่ำเสมอ ประสิทธิภาพการเคลือบสูงสุดมีค่าเท่ากับ 82.9% ที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 55°ซ อัตราการฉีดพ่น 40 มล./นาที ระยะเวลาฉีดพ่นสารเคลือบ 8 นาที ระยะอบแห้งหลังจากหยุดพ่น 10 วินาที และแรงดันอากาศป้อนเข้าหัวฉีด 1.5 บาร์

การพ่นเคลือบพร้อมกับใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงทำให้ปริมาณสารเคลือบยึดเกาะบนผิวเมล็ดข้าวลดลง การเคลือบด้วยเทคนิคนี้ควรควบคุมไม่ให้ความชื้นของผลิตภัณฑ์ต่ำกว่า 11.9% w.b. เนื่องจากการใช้อุณหภูมิอบแห้งที่สูงเกินไปจะเกิดการแตกร้าวของเมล็ดข้าว

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

เอกสารอ้างอิง

[1] R. Torton and X. X. Cheng, “The scale-up of spray coating processes for granular solids and tablets,” *Powder Technology*, vol. 150, no. 2, pp. 78–85, 2005.

[2] Glatt Technology. (2017, November). Fluid Bed Coating. Chungjin Tech Korea. Korea. [Online]. Available: http://www.cjtech.co.kr/Technical%20Process%20Fluid%20Bed%20Coating.htm

[3] K. Dewettinck and A. Huyghebaert, “Top-spray fluidized bed coating: Effect of process variable on coating efficiency,” *Lebensmittel Wissenschaft and Technologie - Food Science and Technology*, vol. 31, pp. 568–575, 1998.

[4] A. Noykanchana, K. Sinsakul, C. Chansomboon, C. Moonkhum, and T. Teepaibool, “Development of herbal-coated rice using bottom spray fluidized bed coaters,” M.S. thesis, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Kamphangsean Campus, 2014 (in Thai).

[5] P. Prakotmak, “Development of rice kernel

coater with fluidized bed process," *The Journal of KMUTNB*, vol. 26, no. 3, pp. 385–394, 2016 (in Thai).

[6] A. Palamanit, S. Soponronnarit, S. Prachayawarakorn, and P. Tungtrakul, "Qualities of turmeric extract coated rice using top-spay fluidized bed coating technique," *Agricultural Science Journal*, vol. 42, pp. 513–516, 2011 (in Thai).

[7] A. Igauz, M. Rodriguez, and P. Virseda, "Influence of handling and processing of rough rice on fissure and head rice yields," *Journal of Food Engineering*, vol. 77, no. 4, pp. 803–809, 2006.

[8] P. Prakotmak, "Modeling coupled transport phenomena and mechanical deformation of rice during drying in fluidized-bed dryer," in *Proceedings The 28th Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand*, 2014, pp. 720–729 (in Thai).

[9] P. Prakotmak, "Modeling heat and mass transfer in drying of single-kernel brown rice," *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, vol. 24, no. 3, pp. 634–643, 2014 (in Thai).

[10] P. Prakotmak, "Development of rice kernel coater with fluidized bed process," in *Proceedings The 29th Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand*, 2015, pp. 976–984 (in Thai).