

เครื่องเคลือบแบบฟลูอิดไซ์เบตชนิดฉีดพ่นจากด้านล่าง: อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อ

ประสิทธิภาพการเคลือบเมล็ดข้าวสาร

Bottom-Spray Fluidized Bed Coating: Effect of Process Variables on Rice Kernel
Coating Efficiencyปรีดา ปรากฏมาก^{1,*}¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

ตำบลกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

*ติดต่อ: fengpdpr@ku.ac.th, 0-3435-5310 ext. 7507, fax 0-3435-5310

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเครื่องผลิตข้าวเคลือบแบบฟลูอิดไซ์เบตขนาดเล็กชนิดฉีดพ่นสารเคลือบจากด้านล่างและศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเคลือบ การทดลองทำโดยเคลือบสารละลายของขมิ้นชันสกัดลงบนผิวของเมล็ดข้าวสารหอมมะลิ 105 สารเคลือบถูกฉีดพ่นออกจากหัวฉีดด้วยอัตรา 35 และ 40 ml/min อากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีดมีแรงดัน 1 และ 1.5 bar ฉีดพ่นสารเคลือบเป็นเวลา 8 และ 12 min และหลังจากหยุดฉีดพ่นสารเคลือบทำการอบแห้งต่ออีก 40, 20 และ 10 วินาที ในขณะที่อากาศไหลเข้าห้องแห้งมีความเร็ว 1.82 m/s และอุณหภูมิ 55, 60 และ 65°C ปริมาณอากาศร้อนที่นำหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ 80% คุณภาพของข้าวที่ผ่านการเคลือบแล้วพิจารณาจากค่า ความชื้น ค่าสี ร้อยละการร้าวของเมล็ดข้าวและประเมินประสิทธิภาพการเคลือบ จากการทดลองพบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการผลิตข้าวเคลือบขมิ้นชันสกัดคือ อากาศอบแห้งที่มีอุณหภูมิ 55°C อัตราฉีดพ่นสารเคลือบ 40 ml/min แรงดันของอากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีด 1.5 bar ฉีดพ่นสารเคลือบเป็นเวลา 8 นาที และหลังจากหยุดฉีดพ่นสารเคลือบทำการอบแห้งต่ออีก 10 วินาที ข้าวเคลือบขมิ้นชันสกัดที่ได้มีลักษณะเป็นสีเหลืองอมแดง การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งระยะเวลาที่อบแห้งหลังหยุดพ่นสารเคลือบและระยะเวลาที่ฉีดพ่นสารเคลือบมีผลทำให้ความชื้นของข้าวเคลือบลดต่ำลง การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งและอัตราฉีดพ่นสารเคลือบไม่มีผลต่อค่าร้อยละการร้าวของเมล็ดและประสิทธิภาพการเคลือบของเครื่องมีค่าอยู่ระหว่าง 78.2-82.9%

คำหลัก: ข้าวเคลือบ; อบแห้ง; ฟลูอิดไซ์เบต; ขมิ้นชันสกัด

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 35 and 40 ml/min, atomization pressure of 1 and 1.5 bar, spray time of 8 and 12 min, time of drying after spraying of 40, 20 and 10 sec, superficial air velocity of 1.82 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. 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; Drying; Fluidized Bed; Turmeric Extract

1. บทนำ

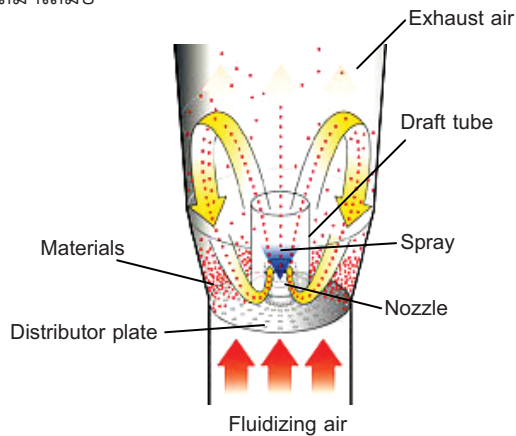
การเคลือบอาหารเป็นทางเลือกหนึ่งในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์อาหารให้มีคุณภาพที่ดีขึ้นเช่น ปรับปรุงลักษณะทางกายภาพและเพิ่มสารอาหารหรือสารเติมแต่ง การเคลือบสารต่างๆ ลงบนผิวของวัสดุมีวิธีการเคลือบอยู่หลากหลาย ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของสารที่ใช้เคลือบ ความสม่ำเสมอ ความหนาของชั้นฟิล์ม และวัสดุที่ถูกเคลือบ วิธีการเคลือบที่นิยมใช้เช่นการจุ่มเคลือบ (Dip Coating) การเทเคลือบ (Cast Coating) และการพ่นเคลือบ (Spray Coating) ซึ่งการพ่นเคลือบเป็นวิธีที่ทำให้สารเคลือบสามารถยึดเกาะอยู่บนผิวเมล็ดข้าวสารได้อย่างสม่ำเสมอดีกว่าวิธีอื่นๆ และทำให้ความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังผ่านกระบวนการเคลือบและอบแห้งมีค่าความสม่ำเสมอใกล้เคียงกัน

กระบวนการพ่นเคลือบด้วยเครื่องแบบฟลูอิดไรซ์เบดได้ถูกใช้อย่างแพร่หลายมายาวนานแล้ว โดยในอดีตนั้นมีการใช้เทคนิคแบบนี้เพื่อการเคลือบยาแบบแคปซูล ต่อมาได้มีการประยุกต์เทคนิคการเคลือบแบบฟลูอิดไรซ์เบดเข้ากับกระบวนการทางเทคโนโลยีอาหารเพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการและความหลากหลายให้กับอาหาร หลักการของฟลูอิดไรเซชัน (Fluidization) เป็นวิธีการเคลือบโดยการฉีดพ่นสารเคลือบให้เป็นละอองฝอย (Spray coating) มีหลักการทำงาน คือทำให้วัสดุของแข็งที่มีลักษณะเป็นเม็ดซึ่งสามารถเป่าให้เกิดฟลูอิดไรซ์ได้เกิดการ

แขวนลอยอยู่ในอากาศ โดยอาศัยแรงลมที่ป้อนเข้าห้องอบแห้งทางด้านล่างเพื่อให้วัสดุลอยตัวขึ้น ขณะเดียวกันหัวฉีดจะพ่นสารเคลือบให้เป็นหยดละอองฝอยเข้ายึดเกาะบนผิวของวัสดุที่กระจายตัวอยู่ด้านบนของห้องอบแห้งในขณะที่ยังลอยตัวอยู่ หลังจากนั้นวัสดุที่ได้รับสารเคลือบแล้วจะเกิดการหมุนเวียน และตกลงสู่ด้านล่างของห้องอบแห้งซึ่งทำให้ความชื้นที่ผสมอยู่ในสารเคลือบเกิดการระเหยออกจากผิวของวัสดุ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วระบบการเคลือบแบบฟลูอิดไรซ์เบดมีอยู่ 3 แบบ [1] คือ 1.เครื่องฟลูอิดไรซ์เบดชนิดฉีดพ่นจากด้านล่าง (Bottom-Spray Coater Fluidized Bed) 2.เครื่องฟลูอิดไรซ์เบดชนิดฉีดพ่นจากด้านบน (Top-Spray Fluidized Bed Coater) 3. เครื่องฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุน (Rotary Fluidized Bed Coater)

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เครื่องฟลูอิดไรซ์เบดชนิดฉีดพ่นจากด้านล่างเพื่อศึกษาการผลิตข้าวเคลือบสารต้านอนุมูลอิสระโดยใช้ผงขมิ้นชันเป็นสารเคลือบ เครื่องแบบนี้เหมาะสำหรับใช้เคลือบฟิล์มบางลงบนผิวของวัสดุที่มีขนาดเล็กประมาณ 100 μm ภายในห้องอบแห้งจะติดตั้งอุปกรณ์ที่เรียกว่า Draft tube ทำหน้าที่เป็นท่อหรือช่องว่างเพื่อให้วัสดุลอยขึ้นสู่ด้านบนช่วยทำให้วัสดุเกิดการหมุนเวียนได้ดี หัวฉีดที่ใช้ถูกติดตั้งอยู่บริเวณตำแหน่งตรงกลางของแผ่นกระจายอากาศดังแสดงตามรูปที่ 1 สารเคลือบถูกฉีดพ่นให้เป็นหยดละอองโดยหัวฉีดและถูกพ่น

ลงบนผิวของวัสดุในขณะที่กำลังไหลผ่าน Draft tube ทำให้วัสดุได้รับสารเคลือบเมื่อไหลผ่านในแต่ละครั้ง ซึ่งสารเคลือบสามารถยึดเกาะอยู่บนผิวของวัสดุได้อย่างสม่ำเสมอ



รูปที่ 1 ห้องอบแห้ง Bottom spray fluidized bed [2]

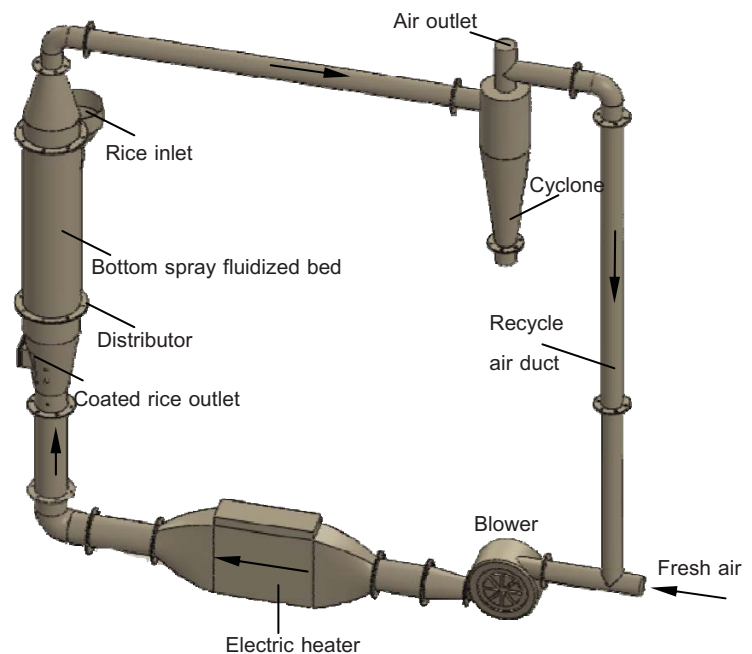
Dewittinck และ Huyghebaert [3] พบว่าอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ป้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งมีผลต่อประสิทธิภาพการเคลือบที่อุณหภูมิสูงโดยอาจทำให้ตัวทำละลายในละอองฝอยของสารเคลือบจะระเหยออกไปก่อนที่จะหยดลงและเข้ายึดเกาะบนผิวของวัสดุทำให้ประสิทธิภาพการเคลือบลดลง แต่ในทางตรงข้ามถ้าใช้อุณหภูมิอบแห้งต่ำเกินไปจะทำให้ความชื้นของวัสดุภายในเบตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้วัสดุจับตัวเป็นก้อนและเกิดการลอยตัวแบบฟลูอิด์ลดลงทำให้ประสิทธิภาพการเคลือบลดลงได้เช่นกัน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเครื่องต้นแบบผลิตข้าวเคลือบและทำแห้งด้วยกระบวนการฟลูอิด์เบตชนิดฉีดพ่นสารเคลือบจากด้านล่างมาประยุกต์เข้ากับการเคลือบสมุนไพรลงบนเมล็ดข้าวสาร และหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับใช้ผลิตข้าวเคลือบได้แก่ อุณหภูมิของอากาศที่ใช้อบแห้ง อัตราฉีดพ่นสารเคลือบ แรงดันของอากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีด ความเร็วของอากาศที่ทำให้เกิดฟลูอิด์ที่มีผลต่อคุณภาพข้าวเคลือบ

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 อุปกรณ์และการทดสอบผลิตภัณฑ์

เครื่องเคลือบข้าวขนาดเล็กแบบฟลูอิด์เบตชนิดฉีดพ่นด้านล่างดังแสดงในรูปที่ 2 ประกอบด้วย ฮีตเตอร์

ขนาด 12 kW ควบคุมด้วย PID พัดลมแบบใบพัดโค้งหลัง ขนาดมอเตอร์ 1.5 kW อัตราการไหลเฉพาะของอากาศ $5.5 \text{ m}^3/\text{s-m}^3\text{-grain}$ ความเร็วอากาศอบแห้งสูงสุด 1.8 m/s ในห้องอบแห้งติดตั้งหัวฉีดบริเวณด้านล่างซึ่งอยู่ในบริเวณที่วัสดุถูกเป่าให้ลอยขึ้นด้วยอากาศที่ป้อนเข้าทางด้านล่างของห้องอบแห้ง ส่วนสารเคลือบถูกฉีดพ่นให้เป็นหยดละอองฝอยด้วยหัวฉีด ซึ่งหยดละอองฝอยจะไหลทิศทางเดียวกับการไหลของอากาศร้อนที่ใช้ออบแห้งก่อนเข้ายึดเกาะบนผิวของวัสดุ หลังจากนั้นวัสดุที่ได้รับสารเคลือบแล้วจะเกิดการหมุนเวียน และตกลงสู่ด้านล่างของห้องอบแห้ง เครื่องที่สร้างขึ้นสามารถผลิตข้าวเคลือบมีลักษณะทำงานเป็นงวด (Batch) ครั้งละ 4 กิโลกรัม



รูปที่ 2 เครื่องเคลือบแบบฟลูอิด์เบตที่ออกแบบ

การทดลองเริ่มจากการเตรียมสารละลายด้วยการนำผงขมิ้นชันสกัดปริมาณ 4% w/v ผสมกับสารละลายเอทานอลความเข้มข้น 70% โดยปริมาตร แล้วกรองด้วยผ้าขาวบาง ลดความเข้มข้นของเอทานอลให้เหลือ 40 % โดยปริมาตร แล้วพ่นเคลือบข้าวขาวหอมมะลิ 105 ที่มีความชื้นเริ่มต้น 11.9 % w.b. โดยกำหนดเงื่อนไขการทดลองฉีดพ่นสารเคลือบด้วยอัตรา 35 และ 40 ml/min อากาศร้อนป้อนเข้าสู่ห้องอบและเคลือบข้าวที่อุณหภูมิ

55, 60 และ 65°C อากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีดมีความดัน 1.5 bar ระยะเวลาที่ฉีดสารเคลือบ 8 และ 10 min หลังจากหยุดพ่นสารเคลือบอบแห้งต่อเป็นเวลา 10 s อากาศที่ออกจากเครื่องนำกลับมาใช้ใหม่ 80 % หลังจากที่ได้ผลิตภัณฑ์ข้าวเคลือบจะนำมาเก็บในตู้เย็นอุณหภูมิ 4°C เพื่อทดสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์

การทดสอบคุณภาพของข้าวเคลือบขม้นชั้นมีดังนี้

1) การหาค่าความชื้นด้วยการนำข้าวเคลือบไปเข้าตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง แล้วคำนวณน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง

2) คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของข้าวเคลือบหุงสุกทดสอบด้วยเครื่อง Texture analyzer รุ่น TA.XT Plus

3) การแตกตัวของเมล็ดข้าวทดสอบด้วยการสุมเมล็ดข้าวเคลือบที่เต็มเมล็ดจำนวน 100 เมล็ด มองด้วยแว่นขยายที่มีการส่องไฟ เพื่อแยกเมล็ดที่มีรอยร้าวออก เปอร์เซ็นต์ของข้าวเต็มเมล็ดทดสอบโดยนำตัวอย่างข้าวเคลือบ 200 g คัดแยกด้วยเครื่อง Indent cylinder รุ่น TRG-05A

4) ทดสอบค่าสี ได้แก่ ค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ด้วยเครื่องวัดสี Hunter Lab ค่าโทนสี (Hue angle, H°) ของข้าวเคลือบ คำนวณจากสมการ $H^\circ = \tan^{-1}(b^*/a^*)$ แล้ววิเคราะห์ทางสถิติจากตัวอย่างทำการทดลองซ้ำ 9 ครั้ง

5) หาประสิทธิภาพการเคลือบของเครื่องผลิตข้าวเคลือบ เป็นอัตราส่วนของน้ำหนักผงขม้นชั้นที่เกาะอยู่บนเมล็ดข้าวต่อน้ำหนักผงขม้นชั้นทั้งหมดที่ใช้เคลือบ โดยคำนวณจากสมการ

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

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

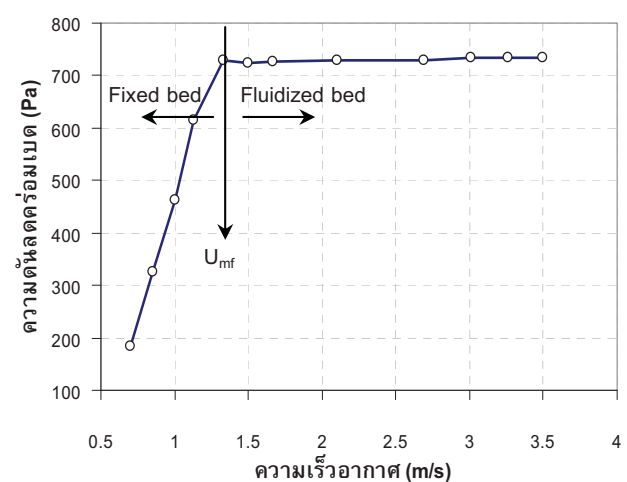
เมื่อ Eff คือประสิทธิภาพการเคลือบ (%), ΔM คือผลต่างของมวลข้าวสาร 2000 เมล็ดก่อนเคลือบและหลังเคลือบ, (g, dry matter), M_{rt} คือมวลของข้าวสารทั้งหมดที่ใช้เคลือบ (g) M_s คือมวลของสารเคลือบทั้งหมดที่ใช้ (g, dry matter), M_a คือมวลของผงขม้นชั้น

ที่เกาะอยู่บนเมล็ดข้าว (g) และ M_r คือมวลของข้าวสาร 2000 เมล็ด (g)

2.2 การคำนวณหาขนาดของอุปกรณ์ให้ความร้อน

และขนาดพัดลม

งานวิจัยนี้สร้างห้องอบแห้งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 29 cm คำนวณจากข้าวสารที่ใช้เคลือบในแต่ละงวดมีมวล 4 kg ความสูงเบด 9 cm จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่าความดันลดคร่อมเบดมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามความเร็วของอากาศร้อนที่เพิ่มขึ้นซึ่งเรียกช่วงนี้ว่าเบดนิ่ง (Fixed bed) เมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศที่ป้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งจนถึงค่าหนึ่งซึ่งทำให้ข้าวสารที่อยู่ในห้องอบแห้งเริ่มมีการเคลื่อนที่และแยกตัวออกจากกัน เรียกความเร็วค่านี้ว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไอส์ (U_{mf}) จากการทดลองนี้พบว่าความเร็วต่ำสุดของอากาศที่ทำให้เมล็ดข้าวสารเกิดฟลูอิดไอส์มีค่าประมาณ 1.3 m/s ในทางปฏิบัติความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้จริงอาจจะสูงกว่า U_{mf} ประมาณ 1.4 เท่า ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.82 m/s คำนวณหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศร้อนได้เท่ากับ 0.1202 m³/s หรือพิจารณาที่ความดันบรรยากาศจะมีค่า 0.1137 kg/s



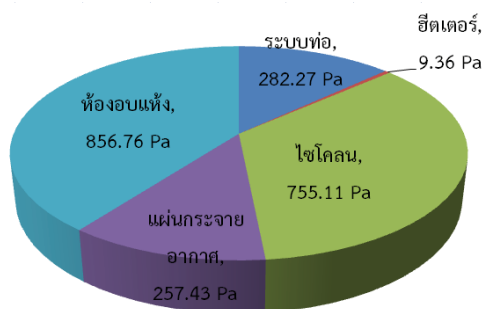
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดคร่อมเบดและความเร็วของอากาศ (ความสูงเบด 8 cm)

ความร้อนจากฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ถ่ายเทให้กับอากาศสามารถคำนวณได้จากสมการ (3)

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

เมื่อ q คือปริมาณความร้อนที่ใช้เพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศแวดล้อม (kW) $\dot{m}$ คืออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศร้อน (kg/s) C_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะเฉลี่ยของอากาศ (kJ/kg. °C) T_{mix} คืออุณหภูมิอากาศที่ใช้เท่ากับ 65 °C T_a คืออุณหภูมิอากาศแวดล้อมเท่ากับ 32 °C จะได้ $q = 0.1137 \times 1.008 \times (65 - 32) = 3.78$ kW ประเมินค่าการสูญเสียความร้อน 15% และคิดค่า Safety factor เท่ากับ 1.5 ทำให้ต้องเลือกใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าให้ความร้อนไม่ต่ำกว่า 7 kW

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบระบบที่มีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ $Q_a = 0.1202$ m³/s เพื่อเลือกใช้พัดลมที่มีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศและความดันสถิตให้เหมาะสมกับระบบที่ออกแบบไว้ การคำนวณความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในส่วนต่างๆ [4] มีค่าดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ความดันลดในอุปกรณ์ต่างๆ

กำหนดให้ Safety factor = 1.2 ดังนั้นความดันลดมีค่าเท่ากับ 2593.12 Pa ในงานวิจัยนี้ได้ใช้อากาศที่อุณหภูมิ 65 °C และมีความหนาแน่นประมาณ 1.050 kg/m³ ซึ่งความดันสถิตที่พัดลมสร้างได้จะแปรผันตรงกับความหนาแน่นของไหลตามกฎของพัดลม (Fan law) ดังนั้นความดันสถิตที่ต้องการจากพัดลมคือ 2593.12 (1.2/1.050) = 2963.56 Pa ในงานวิจัยจึงเลือกใช้พัดลมแบบแรงเหวี่ยงใบพัดโค้งหลัง มีมอเตอร์ขนาด 1.5 kW แรงดันสถิตสูงสุดที่พัดลมสร้างได้ 3532 Pa และมีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศสูงสุดที่ 25 m³/min

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

ข้าวสารที่ใช้เคลือบในแต่ละงวดมีมวล 4 kg และมีค่าความชื้นเริ่มต้นประมาณ 12% w.b. เบตมีความสูงเริ่มต้น 9 cm ตารางที่ 1 แสดงผลของอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ออบแห้ง อัตราฉีดพ่นสารเคลือบ ระยะเวลาฉีดพ่นสารเคลือบ แรงดันของอากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีด และระยะเวลาที่อบแห้งหลังหยุดพ่นสารเคลือบต่อค่าความชื้นของข้าวเคลือบ พบว่าข้าวที่ผ่านการเคลือบโดยใช้ระยะเวลาฉีดพ่นสารเคลือบ 10 min มีค่าความชื้นสูงกว่าข้าวที่ผ่านการเคลือบโดยใช้ระยะเวลาฉีดพ่นสารเคลือบ 8 min เนื่องจากมีปริมาณสารเคลือบที่ถูกพ่นมากกว่าข้าวที่ผ่านการเคลือบด้วยระยะเวลาที่สั้นกว่า นอกจากนี้ความแตกต่างของความชื้นเล็กน้อยอาจเป็นผลมาจากความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty) และจำนวนการทดลองสามซ้ำในแต่ละเงื่อนไข

การใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 65 °C และระยะเวลาที่อบแห้งหลังหยุดพ่นสารเคลือบ 40 s ทำให้ข้าวเคลือบมีความชื้นค่อนข้างต่ำ เนื่องจากจากการอบแห้งหลังหยุดพ่นสารเคลือบด้วยเวลาที่มากเกินไป จากการปรับเปลี่ยนระยะเวลาทำให้ทราบว่า การอบแห้งหลังจากหยุดพ่นสารเคลือบโดยใช้เวลา 10 s เพียงพอที่จะทำให้ความชื้นส่วนสุดท้ายระเหยออกจากเมล็ดข้าวสารอยู่ในระดับความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษา (ประมาณ 11.9% w.b.) เพื่อทำให้ข้าวเคลือบมีค่าความชื้นใกล้เคียงกับค่าความชื้นเริ่มต้นของข้าวสารและลดการแตกตัวของเมล็ดจากการใช้อุณหภูมิสูง ต้องปรับลดอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ออบแห้งจาก 65 °C เป็น 60 °C พบว่าข้าวที่ผ่านการเคลือบโดยใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 60 °C อัตราฉีดพ่นสารเคลือบ 40 ml/min อากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีดมีแรงดัน 1.5 bar ฉีดพ่นสารเคลือบเป็นเวลา 8 min จากนั้นอบแห้งต่อหลังหยุดพ่นสารเคลือบ 10 s ทำให้ข้าวเคลือบมีความชื้นประมาณ 11.9% w.b. และเมื่อทดลองผลิตข้าวเคลือบโดยไม่ต้องอบแห้งต่อหลังจากหยุดพ่นสารเคลือบพบว่าข้าวเคลือบมีค่าความชื้น 12.2% w.b. ทำให้ความชื้นสะสมและไม่ถูกระเหยออกจากเมล็ดข้าว ส่งผล

ทำให้เมล็ดข้าวเกาะกันเป็นก้อน และอาจทำให้เมล็ดข้าว
ส่วนนี้เกิดการเสียหายได้ระหว่างการเก็บรักษา ส่วนการ
ลดแรงดันของอากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีดจาก 1.5 เป็น 1.0
bar ทำให้ความชื้นในข้าวเปลือกลดลงประมาณ 0.1 %

w.b. อาจเนื่องมาจากขนาดของละอองฝอยที่มีขนาดโต
ขึ้น (ตามคู่มือหัวฉีดมีค่ามากกว่า 100 ไมครอน) ทำให้
การเคลือบผิวเมล็ดข้าวมีความชื้นสะสมมากขึ้น

ตารางที่ 1 ความชื้นของข้าวเปลือกที่เงื่อนไขการทดลองต่างกัน

เงื่อนไข					ความชื้น* (% w.b.)
อุณหภูมิ (°C)	อัตราการฉีดพ่น (mL/min)	ระยะเวลาฉีดพ่น (min)	ระยะอบแห้ง หลังจากหยุดพ่น (s)	แรงดันของอากาศ ป้อนเข้าหัวฉีด (bar)	
55	30	8	10	1.5	11.8
	30	10	10	1.5	11.9
	35	8	10	1.5	11.9
	35	10	10	1.5	11.9
	35	10	10	1.0	11.9
	40	8	10	1.5	11.8
	40	10	10	1.5	11.9
	40	10	0	1.5	12.2
60	30	8	10	1.5	11.7
	30	10	10	1.0	11.8
	35	8	10	1.5	11.7
	35	10	10	1.5	11.8
	40	8	10	1.5	11.9
	40	10	0	1.5	12.1
	40	10	10	1.0	11.8
	40	10	10	1.5	11.7
65	30	8	10	1.5	11.6
	30	10	10	1.5	11.5
	35	8	10	1.5	11.6
	35	10	10	1.5	11.6
	35	10	40	1.5	11.3
	40	8	10	1.5	11.6
	40	10	10	1.5	11.7
	40	10	0	1.5	12.0

*ความชื้นของข้าวสารเริ่มต้น 11.9 % w.b.

ตารางที่ 2 แสดงค่าสีของข้าวเคลือบขมิ้นชั้น พบว่า การเพิ่มอัตราการฉีดพ่นสารเคลือบทำให้ข้าวเคลือบขมิ้นชั้นมีสีเข้มมากขึ้น ค่า Hue angle ($^{\circ}H$) อยู่ในช่วง 79-81 ซึ่งหมายถึงสีเหลืองอมแดง การเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนทำให้ค่าความเป็นสีแดง (a^*) มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญเป็นผลมาจากการการระเหยของสารเคลือบทำให้ปริมาณสารเคลือบยึดเกาะบนผิวเมล็ดข้าว

ลดลง อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดรอยร้าวบนเมล็ดข้าว และเกิดช่องว่างอากาศบริเวณผิวเมล็ดและเกิดสีขุ่นขาว ทำให้เกิดแสงสะท้อนในรูปแบบการกระจายรังสีเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้ค่าความสว่าง (L^*) เพิ่มขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) อย่างมีนัยสำคัญสังเกตจากตัวอักษรทางสถิติที่ต่างกัน ($p < 0.05$)

ตารางที่ 2 ค่าสีของเมล็ดข้าวที่ผ่านการเคลือบด้วยขมิ้นชั้น

เงื่อนไข		L^*	a^*	b^*	Hue angle ($^{\circ}H$)
อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)	ปริมาณสารเคลือบ (ml/min)				
55	30	72.30 ± 0.10^d	12.20 ± 0.20^b	73.83 ± 0.50^a	80.62 ± 0.12^e
	35	$71.77 \pm 0.21^{b,c}$	$12.93 \pm 0.21^{c,d}$	73.20 ± 0.75^a	$79.98 \pm 0.06^{c,d}$
	40	71.30 ± 0.36^a	14.33 ± 0.21^f	73.77 ± 0.55^a	79.00 ± 0.20^a
60	30	73.27 ± 0.15^f	11.77 ± 0.06^a	74.10 ± 0.46^a	80.98 ± 0.02^f
	35	$71.73 \pm 0.21^{b,c}$	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^g	11.37 ± 0.15^a	73.70 ± 0.56^a	81.23 ± 0.18^f
	35	72.83 ± 0.31^e	$12.57 \pm 0.32^{b,c}$	73.37 ± 0.51^a	$80.28 \pm 0.18^{d,e}$
	40	$72.00 \pm 0.10^{c,d}$	13.83 ± 0.15^e	73.97 ± 0.35^a	79.41 ± 0.07^b

ตัวอักษรอังกฤษแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละหลักของตาราง $p < 0.05$

ตารางที่ 3 แสดงร้อยละการแตกร้าว ร้อยละของข้าวเต็มเมล็ดและความชื้นในเมล็ด ที่เงื่อนไขการทดลองต่างๆ พบว่าอุณหภูมิอบแห้งและอัตราการฉีดพ่นสารเคลือบมีอิทธิพลต่อความชื้นของเมล็ดข้าว โดยข้าวสารที่ผ่านการเคลือบมีความชื้นในช่วง 11.3-12.2 % w.b. อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) จากผลการแตกร้าวของเมล็ดข้าว ทำให้ทราบว่าควรควบคุมและเลือกเงื่อนไขให้ความชื้นสุดท้ายของข้าวเคลือบสูงกว่า 11.9% w.b. เนื่องจากทำให้เมล็ดข้าวแตกร้าวมากกว่า 96 % [5] จากตารางที่ 3 พบว่าที่อุณหภูมิ 65 $^{\circ}C$ ร้อยละการแตกร้าว ร้อยละของข้าวเต็มเมล็ดและความชื้นในเมล็ดมีความแตกต่างกับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 55

และ 60 $^{\circ}C$ อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) การแตกร้าวที่เกิดขึ้นนี้มีสาเหตุมาจากเกรเดียนต์ ความชื้น (Moisture gradient) ระหว่างบริเวณผิวกับความชื้นภายในเมล็ดมีความแตกต่างกันจนทำให้เกิดแรงเค้น (Stress) [6]-[8] จนข้าวแตกร้าว

ตารางที่ 4 แสดงผลของอุณหภูมิอากาศและอัตราการฉีดพ่นสารเคลือบที่มีต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของข้าวเคลือบหุงสุกในด้านความแข็ง (Hardness) และความเหนียว (Stickiness) พบว่าความแข็งและความเหนียวของข้าวเคลือบหุงสุกและข้าวสารอ้างอิงหุงสุก (ข้าวที่ไม่ผ่านกระบวนการเคลือบ) ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ดังนั้นอุณหภูมิอากาศร้อนและอัตราการฉีดพ่นสารเคลือบไม่มีอิทธิพลต่อ

คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของข้าวเคลือบขมื่นชั้น ส่วนที่ ข้าวเกิดการแตกร้าวซึ่งไม่เหมาะสมกับการผลิตข้าว
เงื่อนไข 65 °C ไม่ได้แสดงผลการทดลองเนื่องจากเมล็ด เคลือบด้วยเทคนิคนี้

ตารางที่ 3 แสดงร้อยละการแตกร้าว ร้อยละของข้าวเต็มเมล็ดและความชื้นในเมล็ด

เงื่อนไข		ร้อยละการแตกร้าว	ร้อยละของข้าวเต็มเมล็ด	ความชื้นในเมล็ด (% w.b.)
อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณสารเคลือบ (ml/min)			
55	30	6 ± 2^{ab}	93.0 ± 0.2^{ab}	11.9 ± 0.1^{bc}
	35	8 ± 1^{ab}	93.2 ± 0.2^b	12.0 ± 0.0^c
	40	5 ± 2^{ab}	93.4 ± 0.2^{bc}	12.2 ± 0.1^d
60	30	9 ± 4^b	93.0 ± 0.3^{ab}	11.8 ± 0.1^b
	35	8 ± 3^{ab}	93.2 ± 0.3^b	11.9 ± 0.0^{bc}
	40	4 ± 1^a	94.2 ± 0.1^d	12.0 ± 0.1^c
65	30	98 ± 2^c	92.7 ± 0.2^a	11.5 ± 0.0^a
	35	96 ± 3^c	93.1 ± 0.2^{ab}	11.6 ± 0.1^a
	40	N/A	N/A	N/A
ข้าวขาว (อ้างอิง)		4 ± 2^a	93.7 ± 0.3^c	12.5 ± 0.20^e

ข้าวอ้างอิงคือข้าวสารที่ยังไม่ผ่านกระบวนการใดๆ ตัวอักษรอังกฤษแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละหลักของตาราง $p < 0.05$

ตารางที่ 4 คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของข้าวเคลือบหุงสุก

เงื่อนไข		Hardness (N)	Stickiness (N)
อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณสารเคลือบ (ml/min)		
55	30	71.22 ± 3.23^a	4.62 ± 0.53^a
	35	71.64 ± 4.86^a	4.81 ± 0.46^{ab}
	40	72.91 ± 5.27^a	5.38 ± 0.51^{ab}
60	30	71.63 ± 6.53^a	4.71 ± 0.45^{ab}
	35	71.88 ± 5.79^a	5.36 ± 0.43^{ab}
	40	72.43 ± 5.12^a	5.67 ± 0.52^b
65	30	N/A	N/A
	35	N/A	N/A
	40	N/A	N/A
ข้าวที่ไม่ผ่านการเคลือบ (อ้างอิง)		71.42 ± 4.42^a	4.82 ± 0.54^{ab}

ตัวอักษรอังกฤษแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละหลักของตาราง $p < 0.05$

เมื่อเพิ่มระยะเวลาที่ฉีดพ่นสารเคลือบจาก 8 เป็น 10 min จากการทดลองพบว่าเมล็ดข้าวมีลักษณะการเกิดฟลูอิดไลซ์ลดลง เป็นผลมาจากเมล็ดข้าวมีสารเคลือบยึดเกาะอยู่ที่ผิวเพิ่มขึ้นทำให้เกิดแรงยึดเกาะระหว่างเมล็ดข้าว ส่งผลทำให้เครื่องมีประสิทธิภาพการเคลือบมีค่าลดลง

การทดลองปรับเพิ่มแรงดันของอากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีดจาก 1.0 เป็น 1.5 bar แรงดันที่ปรับเพิ่มมีผลกระทบต่อขนาดของหยดละอองฝอยที่ถูกพ่นออกจากหัวฉีด แต่ในการทดลองยังไม่สามารถอธิบายผลในส่วนนี้ได้อย่างชัดเจนเนื่องจากค่าแรงดันมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนการปรับลดระยะเวลาที่อบแห้งหลังจากหยุดพ่นสารเคลือบไม่มีผลกระทบต่อค่าประสิทธิภาพการเคลือบ เนื่องการอบแห้งในส่วนนี้จะกระทำหลังจากที่หยุดพ่นสารเคลือบแล้ว

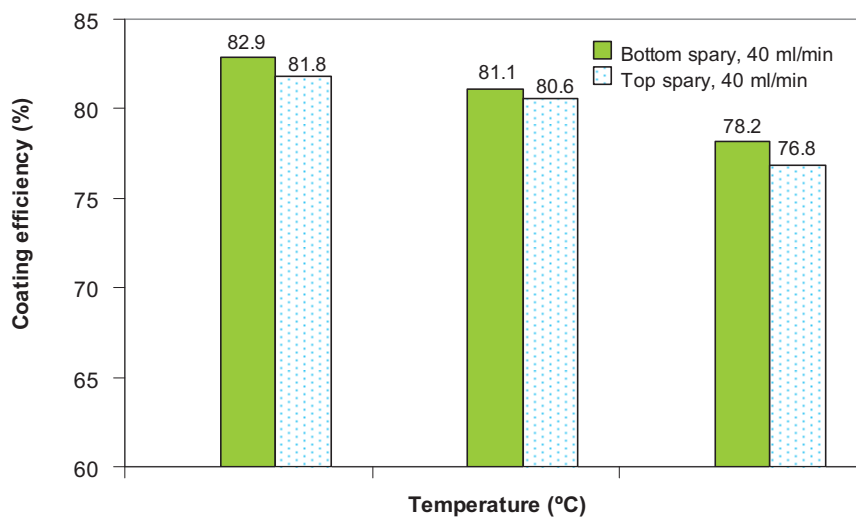
จากผลการทดลองงานวิจัยนี้เลือกเงื่อนไขตัวแปรสำหรับผลิตข้าวเคลือบที่มีค่าคุณภาพของเมล็ดข้าวและประสิทธิภาพการเคลือบที่ดีที่สุดดังนี้ อัตราการฉีดพ่น 40 ml/min ระยะเวลาที่ฉีดพ่นสารเคลือบจาก 8 min ระยะเวลาอบแห้งหลังจากหยุดพ่น 10 s และแรงดันอากาศป้อนเข้าหัวฉีด 1.5 bar ผู้วิจัยได้เคยทำการทดลองและสร้างเครื่องฟลูอิดไลซ์เบดชนิดฉีดพ่นจากด้านบน (Top-Spray Fluidized Bed Coater) [9] ลักษณะห้องอบแสดงดังรูปที่ 5 โดยเคลือบชั้นที่เงื่อนไขการทดลองเดียวกันกับงานวิจัยนี้ ดังนั้นเพื่อเปรียบเทียบกับเครื่องฟลูอิดไลซ์เบดชนิดฉีดพ่นจากด้านล่าง (Bottom-Spray Coater Fluidized Bed) จึงนำผลการทดลองที่เงื่อนไขที่ดีที่สุดมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเคลือบของเครื่องทั้งสองแบบดังรูปที่ 6

รูปที่ 6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการเคลือบระหว่างเครื่องฟลูอิดไลซ์เบดชนิดฉีดพ่นจากด้านล่างและเครื่องฟลูอิดไลซ์เบดชนิดฉีดพ่นจากด้านบน ที่อัตรา

การฉีดพ่น 40 ml/min และเงื่อนไขอุณหภูมิต่างกัน ผลการทดลองพบว่าเครื่องมีค่าประสิทธิภาพการเคลือบอยู่ในช่วงระหว่าง 78.2–82.9% พบว่าเครื่องฟลูอิดไลซ์เบดชนิดฉีดพ่นจากด้านล่างมีค่าประสิทธิภาพการเคลือบที่สูงกว่าเครื่องฟลูอิดไลซ์เบดชนิดฉีดพ่นจากด้านบนในทุกเงื่อนไขอุณหภูมิการอบแห้งโดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 82.9% ที่อุณหภูมิ 55°C การพ่นเคลือบด้วยเทคนิคฉีดพ่นจากด้านล่าง (รูปที่ 1) เป็นการพ่นเคลือบที่ละอองฝอยไหลตามกระแสลมที่เป่าวัสดุให้เกิดสภาวะฟลูอิดไลซ์ขึ้น แตกต่างจากการฉีดพ่นจากด้านบนที่มีทิศทางการพ่นและการไหลของอากาศสวนทางกัน (รูปที่ 5) ทำให้ละอองฝอยของสารเคลือบเข้ายึดเกาะกับเมล็ดข้าวได้ยากกว่าเพราะละอองฝอยบางส่วนจะถูกอากาศพัดพาออกจากห้องอบแห้ง ซึ่งแตกต่างจากเครื่องฟลูอิดไลซ์เบดชนิดฉีดพ่นจากด้านล่าง ภายในห้องอบแห้งมีการติดตั้ง Draft tube เพื่อช่วยให้เกิดช่องว่างให้วัสดุลอยขึ้นสู่ด้านบน ทำให้วัสดุเกิดการหมุนเวียนได้ดี โดยหัวฉีดจะพ่นสารเคลือบลงบนผิวของวัสดุในขณะที่กำลังไหลผ่าน Draft tube ในลักษณะแบบไหลตามกัน ข้าวสารได้รับสารเคลือบเมื่อไหลผ่านในแต่ละครั้ง ทำให้สารเคลือบสามารถยึดเกาะอยู่บนผิวของวัสดุได้อย่างสม่ำเสมอว่าการพ่นเคลือบแบบฉีดพ่นจากด้านบน



รูปที่ 5 ห้องอบแห้ง Top spray fluidized bed [2]



รูปที่ 6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการเคลือบระหว่างเครื่องฟลูอิดเบตชนิดฉีดพ่นจากด้านล่างและเครื่องฟลูอิดเบตชนิดฉีดพ่นจากด้านบน ที่อัตราการฉีดพ่น 40 ml/min ที่ระยะเวลาฉีดพ่นสารเคลือบ 8 min ระยะอบแห้งหลังจากหยุดพ่น 10 sec และแรงดันอากาศป้อนเข้าหัวฉีด 1.5 bar

จากรูปที่ 6 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 55 จนถึง 65 °C พบว่าการเคลือบโดยใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงทำให้เครื่องผลิตข้าวเคลือบมีประสิทธิภาพการเคลือบลดลง เนื่องจากการเคลือบโดยใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงมีผลต่อปริมาณของหยดละอองฝอยของสารเคลือบที่ถูกพ่นออกจากหัวฉีดเกิดการระเหยไปบางส่วนจึงทำให้ไม่สามารถเข้ายึดเกาะบนผิวเมล็ดข้าวสาร สารเคลือบที่เกาะอยู่บนผิวเมล็ดจึงมีปริมาณลดลง

4. สรุป

เทคนิคการเคลือบและอบแห้งด้วยหลักการของฟลูอิดเซชันชนิดฉีดพ่นจากด้านล่าง สามารถผลิตข้าวเคลือบชั้นมันส์กักที่มีผิวเคลือบสม่ำเสมอมากกว่าการเคลือบด้วยเทคนิคฟลูอิดเซชันชนิดฉีดพ่นจากด้านบน ผลผลิตข้าวเคลือบชั้นมันส์กักที่ได้มีสีเหลืองอมแดงและมีสีที่สม่ำเสมอ ประสิทธิภาพการเคลือบสูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 82.9% ที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 55 °C อัตราการฉีดพ่น 40 ml/min ระยะเวลาฉีดพ่นสารเคลือบ 8 min ระยะอบแห้งหลังจากหยุดพ่น 10 s และแรงดันอากาศป้อนเข้าหัวฉีด 1.5 bar การพ่นเคลือบพร้อม

กับใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงทำให้ปริมาณสารเคลือบยึดเกาะบนผิวเมล็ดข้าวลดลง อุณหภูมิอากาศร้อนและอัตราการฉีดพ่นสารเคลือบไม่มีอิทธิพลต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของข้าวเคลือบชั้นมันส์กัก การเคลือบด้วยเทคนิคนี้ควรควบคุมไม่ให้ความชื้นของผลิตภัณฑ์ต่ำกว่า 11.9 %w.b. เนื่องจากการใช้อุณหภูมิอบแห้งที่สูงเกินไปจะเกิดการแตกร้าวของเมล็ดข้าว

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่ง มก. คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และคำปรึกษาจากนายอาคม ปะหลามานิต

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Torton, R. and Cheng, X.X., 2005, "The Scale-Up of Spray Coating Processes for Granular Solids and Tablets", Powder Technology, Vol. 150, No. 2, pp. 78-85.

- [2] Glatt Technology, Fluid Bed Coating, [Online], Available : http://www.glatt.com/e/01_technologien/01_04_08.htm.
- [3] K. Dewettinck and A. Huyghebaert, A. "Top-spray fluidized bed coating: Effect of process variable on coating efficiency. *Lebensmittel Wissenschaft and Technologie*, 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," Dissertation, Department of Mechanical Engineering, Kasetsart University Kamphangsean Campus, 2014 (in Thai).
- [5] A. Palamanit, S. Soponronnarit, S. Prachayawarakorn, and P. Tungtrakul, "Qualities of turmeric extract coated rice using top-spray fluidized bed coating technique," *Agricultural Sci. J.*, vol.42, pp. 513-516, 2011 (in Thai).
- [6] 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, pp. 803-809, 2006.
- [7] P. Prakotmak, "Modeling coupled transport phenomena and mechanical deformation of rice during drying in fluidized-bed dryer," *The 28th Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand*, 15-17 October, Khon Kaen, pp. 720-729, 2014 (in Thai).
- [8] 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).
- [9] P. Prakotmak, "Development of rice kernel coater with fluidized bed process," *The 29th Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand*, 1-3 July, Nakhon RatchasimaKhon Kaen, pp. 976-984, 2015 (in Thai).