



การพัฒนาเครื่องเคลือบข้าวสารด้วยกระบวนการฟลูอิดซ์เบดแบบหมุน Development of Rice kernel Coater by Rotary Fluidized Bed Process

ปรีดา ปรากฏภูมิก^{1,*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

ตำบลกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

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

บทคัดย่อ

เครื่องเคลือบข้าวฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเป็นอีกเทคโนโลยีที่ช่วยให้อนุภาคเกิดสภาวะฟลูอิดซ์เซชันโดยการปรับสมดุลแรงต้านการเคลื่อนที่และแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางช่วยให้การเคลือบผิวอนุภาคสม่ำเสมอและการถ่ายเทมวลที่ดียิ่งขึ้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเครื่องผลิตข้าวเคลือบแบบฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนขนาดเล็ก และศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเคลือบ การทดลองทำโดยเคลือบสารละลายของขมิ้นชันลงบนผิวของเมล็ดข้าวสารหอมมะลิ 105 สารเคลือบถูกฉีดพ่นออกจากหัวฉีดด้วยอัตรา 35 และ 40 ml/min อากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีดมีแรงดัน 1.5 bar ฉีดพ่นสารเคลือบเป็นเวลา 6 และ 8 นาที และหลังจากหยุดฉีดพ่นสารเคลือบทำการอบแห้งต่ออีก 10 วินาที ในขณะที่อากาศไหลเข้าห้องแห้งมีความเร็ว 2.9 m/s อุณหภูมิอากาศร้อน 55 และ 60°C ปริมาณอากาศที่นำหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ 85% อัตราการหมุนของแผ่นกระจายอากาศในห้องอบแห้งที่ค่า 20, 70 และ 120 rpm ตามลำดับ คุณภาพของข้าวที่ผ่านการเคลือบแล้วพิจารณาจากค่า ความชื้น ค่าสี ร้อยละการรั่วของเมล็ดข้าวและประเมินประสิทธิภาพการเคลือบ จากการทดลองพบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการผลิตข้าวเคลือบขมิ้นชันคือ อากาศอบแห้งที่มีอุณหภูมิ 55°C อัตราฉีดพ่นสารเคลือบ 35 ml/min ฉีดพ่นสารเคลือบเป็นเวลา 6 นาที อัตราการหมุนของแผ่นกระจายอากาศ 70 rpm และหลังจากหยุดฉีดพ่นสารเคลือบทำการอบแห้งต่ออีก 10 วินาที ข้าวเคลือบขมิ้นชันสกัดที่ได้มีลักษณะเป็นสีเหลืองอมแดง การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง ระยะเวลาที่อบแห้งหลังหยุดพ่นสารเคลือบและระยะเวลาที่ฉีดพ่นสารเคลือบมีผลทำให้ความชื้นของข้าวเคลือบลดต่ำลง การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งและอัตราฉีดพ่นสารเคลือบมีผลต่อค่าร้อยละการรั่วของเมล็ดและประสิทธิภาพการเคลือบของเครื่องมีค่าระหว่าง 66-84%

คำหลัก: ข้าวเคลือบ; อบแห้ง; ฟลูอิดซ์เบด; ขมิ้นชันสกัด; หมุน

Abstract

Rotating fluidized bed coater offer an alternative technology where the particles are fluidized by balancing the radially acting drag and centrifugal forces, improved coating homogeneity and mass transfer. The objective of this study was to construct a small scale batch rotating fluidized bed coating equipment. 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 1.5

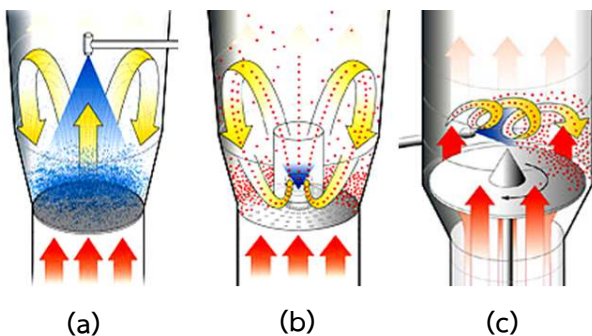
bar, spray time of 6 and 8 min, time of drying after spraying of 10 sec, superficial air velocity of 2.9 m/s, drying temperatures of 55 and 60°C and 85% of recycle air. The rotational speed of air distributor rates of 20, 70 and 120 rpm, respectively. The coated rice quality was evaluated in terms of 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 35 ml/min, spray time of 6 min, rotational speed of air distributor of 70 rpm 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 can affect the percentage of fissure kernels. The coating efficiency of the apparatus was in the range of 66-84%

Keywords: Coated Rice; Drying; Fluidized Bed; Turmeric Extract; Rotating

1. บทนำ

การเคลือบอาหารเป็นทางเลือกหนึ่งในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์อาหารให้มีคุณภาพที่ดีขึ้น เช่น ปรับปรุงลักษณะทางกายภาพและเพิ่มสารอาหารหรือสารเติมแต่ง การเคลือบโดยใช้เทคนิคแบบฟลูอิดิซ์เบด (Spray fluidized bed coating) เป็นวิธีการเคลือบแบบพ่นเคลือบรูปแบบหนึ่ง โดยใช้หลักการฉีดพ่นสารเคลือบให้กลายเป็นหยดละอองฝอยขนาดเล็กกระจัดไม่โครเมตรเพื่อเข้ายึดเกาะบนผิวของอนุภาคในขณะที่กำลังแขวนลอยอยู่ในอากาศทำให้สารเคลือบเข้ายึดเกาะบนผิวของอนุภาคได้อย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอทั้งยังเป็นการเคลือบและอบแห้งที่เกิดขึ้นพร้อมๆ กัน ส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสม่ำเสมอ โดยทั่วไประบบการเคลือบแบบฟลูอิดิซ์เบดมีอยู่ 3 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การเคลือบแบบฟลูอิดิซ์เบด (a) Top spray fluidized Bed (b) Bottom spray fluidized bed (c) Rotating fluidized bed [1]

รูปที่ 1(a) ระบบ Top spray หัวฉีดติดตั้งอยู่บริเวณด้านบนของห้องอบแห้งหยดละอองฝอยจะไหลต้านกับทิศทางการไหลของอากาศร้อนที่ไซ้อบแห้งก่อนเข้ายึดเกาะบนผิวของวัสดุ รูปที่ 1(b) Bottom spray หัวฉีดถูกติดตั้งอยู่บริเวณด้านล่างตำแหน่งตรงกลางของแผ่นกระจายอากาศ สารเคลือบถูกฉีดพ่นลงบนผิวของวัสดุในขณะที่กำลังไหลผ่าน Draft tubes ทำให้วัสดุได้รับสารเคลือบเมื่อไหลผ่านในแต่ละครั้ง รูปที่ 1(c) ระบบ Rotating fluidized bed อากาศจะไหลเข้าเบดทางช่องว่างระหว่างแผ่นหมุนกับผนัง เป็นการนำระบบฟลูอิดิซ์เบดมาผสมผสานกับการหมุนแผ่นรองวัสดุ ทำให้วัสดุภายในเบดเกิดการหมุนวนเป็นเกลียว โดยหัวฉีดที่ติดตั้งอยู่บริเวณด้านข้างของห้องอบแห้ง เครื่องแบบนี้เหมาะสำหรับใช้เคลือบฟิล์มบางๆ ลงบนผิวของวัสดุที่มีลักษณะเป็นทรงกลมและมีความหนาแน่นสูง [2] ผู้วิจัยได้ศึกษาและรายงานผลวิจัยการเคลือบข้าวสารแบบฟลูอิดิซ์เบด Top spray fluidized Bed [3-5] และ Bottom spray

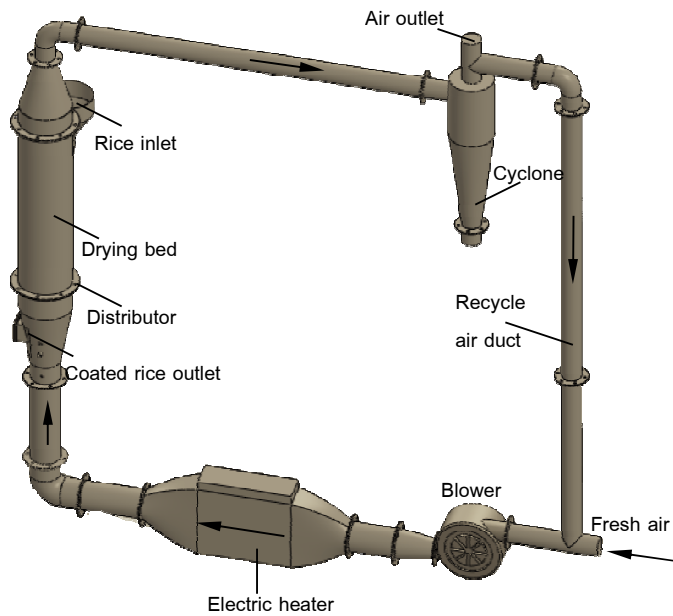
fluidized bed [6] ซึ่งมีประสิทธิภาพการเคลือบไม่เกิน 83% ภายใต้ระยะเวลาการอบแห้ง 8-10 นาที ในงานวิจัยนี้ต้องการพัฒนาเครื่องเคลือบฟลูอิดซ์เบดแบบหมุน (Rotating fluidized bed) ที่สามารถสร้างสภาพการหมุนวนแบบปั่นป่วนของเมล็ดข้าวในห้องอบเพื่อลดระยะเวลาอบแห้งและการเคลือบให้สั้นลง เครื่องเคลือบฟลูอิดซ์เบดแบบหมุน มีการศึกษาในงานวิจัยอย่างแพร่หลาย [7,8]

จุดเด่นของเทคนิคฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนคืออากาศในห้องอบเกิดความปั่นป่วนวัสดุหมุนวนในห้องอบแห้งอย่างทั่วถึงเนื่องจากแผ่นกระจายอากาศสามารถปรับความเร็วในการหมุนให้เหมาะสมกับชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ทำการเคลือบได้ ขั้นตอนเคลือบและอบแห้งพร้อมกันทำให้ใช้พลังงานได้สะดวกไม่เกิดการฟุ้งกระจายของสารเคลือบใช้ระยะเวลาในการเคลือบสั้นเป็นระบบที่มีการนำอากาศหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ ดังนั้นงานศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเครื่องต้นแบบผลิตข้าวเคลือบและอบแห้งด้วยกระบวนการฟลูอิดซ์เบดแบบหมุน มาประยุกต์เข้ากับการเคลือบสมุนไพรลงบนเมล็ดข้าวสารและหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับใช้ผลิตข้าวเคลือบได้แก่ความเร็วรอบการหมุนของแผ่นกระจายอากาศ อุณหภูมิของอากาศที่ใช้อบแห้ง อัตราฉีดพ่นสารเคลือบ ที่มีผลต่อคุณภาพข้าวเคลือบ

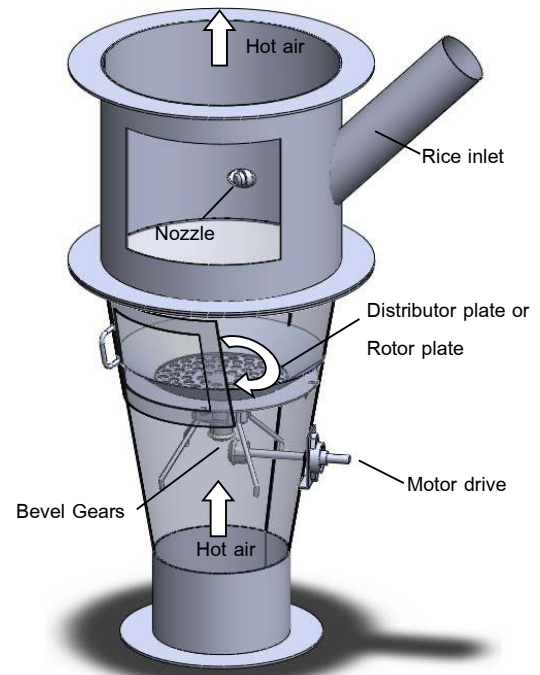
2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

เครื่องเคลือบข้าวฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนขนาดเล็กแสดงในรูปที่ 2 ประกอบด้วยฮีตเตอร์ขนาด 12 kW ควบคุมด้วย PID พัดลมแบบใบพัดโค้งหลังขนาดมอเตอร์ 1.5 kW อัตราการไหลจำเพาะของอากาศ $5.5 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}^3\text{-grain}$ ความเร็วอากาศอบแห้งสูงสุด 3.6 m/s เครื่องผลิตข้าวเคลือบมีลักษณะทำงานเป็นงวด (Batch) ผลิตข้าวเคลือบครั้งละ 4 กิโลกรัม รูปที่ 3 คือห้องอบแห้งและเคลือบข้าวสารที่ออกแบบ ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการเปลี่ยนแปลงจานหมุนที่ที่อากาศไหลผ่านระหว่างช่องว่างของผนังห้องอบดังรูปที่ 1(c) เป็นแผ่นกระจายอากาศที่มีรูขนาดเล็กให้อากาศร้อนทั้งหมดไหลผ่านเข้าสู่

เบดผ่านรูเหล่านี้ และสามารถปรับความเร็วรอบแผ่นกระจายอากาศด้วยเทคนิค Pulse Width Modulation (PWM) ห้องอบชนิดนี้จะติดตั้งหัวฉีดที่ผนังด้านข้างโดยเอียงทำมุม 45° กับแกนกลางห้องอบติดตั้งสูงจากเบด 19 cm ส่วนประกอบของระบบฟอยสารละลายสามารถสืบค้นจาก [4] การทดลองเริ่มจากเตรียมสารละลายด้วยการนำผงขี้ผึ้งชั้นสกัดปริมาณ 4% w/v ผสมกับสารละลายเอทานอลความเข้มข้น 70% โดยปริมาตร แล้วกรองด้วยผ้าขาวบาง ลดความเข้มข้นของเอทานอลให้เหลือ 40 % โดยปริมาตร แล้วพ่นเคลือบข้าวหอมมะลิ 105 ที่มีความชื้นเริ่มต้น 11.9 % w.b. โดยกำหนดเงื่อนไขการทดลองฉีดพ่นสารเคลือบด้วยอัตรา 35 และ 40 ml/min อากาศร้อนป้อนเข้าสู่ห้องอบและเคลือบข้าวที่อุณหภูมิ 55 และ 60°C อากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีดมีความดัน 1.5 bar อัตราการหมุนของแผ่นกระจายอากาศในห้องอบแห้งที่ค่า 20, 70 และ 120 rpm ตามลำดับ ระยะเวลาที่ฉีดสารเคลือบ 6 และ 8 min หลังจากหยุดพ่นสารเคลือบอบแห้งต่อเป็นเวลา 10 s อากาศที่ออกจากเครื่องนำกลับมาใช้ใหม่ 85 % หลังจากที่ได้ผลิตภัณฑ์ข้าวเคลือบจะนำมาเก็บในตู้เย็นอุณหภูมิ 4°C เพื่อทดสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์



รูปที่ 2 ส่วนประกอบของระบบเคลือบและอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด



รูปที่ 3 ห้องอบแห้งและเคลือบข้าวสารที่ออกแบบในงานวิจัยนี้

การทดสอบคุณภาพของข้าวเคลือบไขมันชนิดนี้

- 1) การตรวจวัดของเมล็ดข้าวทดสอบด้วยการสุ่มเมล็ดข้าวเคลือบที่เติมเมล็ดจำนวน 100 เมล็ด มองด้วยแว่นขยายที่มีการส่องไฟ เพื่อแยกเมล็ดที่มีรอยร้าวออกเปอร์เซ็นต์ของข้าวเติมเมล็ดทดสอบโดยนำตัวอย่างข้าวเคลือบ 200 g คัดแยกด้วยเครื่อง Indent cylinder รุ่น TRG-05A
- 2) ทดสอบค่าสี ได้แก่ ค่าความสว่าง (L*) ค่าความเป็นสีแดง (a*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) ด้วยเครื่องวัดสี Hunter Lab ค่าโท นสี (Hue angle, H°) ของข้าวเคลือบคำนวณจากสมการ $H^\circ = \tan^{-1}(b^*/a^*)$
- 3) การหาค่าความชื้นด้วยการนำข้าวเคลือบไปเข้าตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 103°C เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง แล้วคำนวณน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง
- 4) หาประสิทธิภาพการเคลือบของเครื่องผลิตข้าวเคลือบเป็นอัตราส่วนของน้ำหนักไขมันชั้นที่เกาะอยู่บนเมล็ดข้าวต่อน้ำหนักไขมันชั้นทั้งหมดที่ใช้เคลือบ โดยคำนวณหาจากสมการ

$$Eff = \frac{M_a}{M_s} \times 100 \tag{1}$$

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

เมื่อ *Eff* คือประสิทธิภาพการเคลือบ (%), ΔM คือผลต่างของมวลข้าวสาร 2000 เมล็ดก่อนเคลือบและหลังเคลือบ, (g, dry matter), M_{rt} คือมวลของข้าวสารทั้งหมดที่ใช้เคลือบ (g) M_s คือมวลของสารเคลือบทั้งหมดที่ใช้ (g, dry matter), M_a คือมวลของไขมันชั้นที่เกาะอยู่บนเมล็ดข้าว (g) และ M_r คือมวลของข้าวสาร 2000 เมล็ด (g)

2.1 การคำนวณหาขนาดของฮีตเตอร์และโบลเวอร์

ข้าวสารที่ใช้เคลือบในแต่ละงวดมีมวล 4 kg และมีค่าความชื้นเริ่มต้นประมาณ 11.9% w.b. เบดมีความสูงเริ่มต้น 8 cm การทดสอบหาความเร็วต่ำสุดของอากาศที่ทำให้เมล็ดข้าวสารในห้องอบแห้งเกิดฟลูอิดซ์สามารถทดลองด้วยการเพิ่มความเร็วของอากาศขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศที่ป้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งจนถึงค่าหนึ่งซึ่งทำให้ข้าวสารที่อยู่ในห้องอบแห้ง

เริ่มมีการเคลื่อนที่และแยกตัวออกจากกัน เรียกความเร็ว
ค่านี้ว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดซ์ จากการ
ทดลองนี้พบว่าความเร็วต่ำสุดของอากาศที่ทำให้เมล็ด
ข้าวสารเกิดฟลูอิดซ์ (U_{mf}) มีค่าประมาณ 2.1 m/s (ที่
ความเร็วแผ่นกระจายอากาศ 120 rpm) ซึ่ง U_{mf} จะมี
ค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบของแผ่นกระจายอากาศ
เนื่องจากเกิดความดันตกคร่อมที่เพิ่มขึ้น ในทางปฏิบัติ
ความเร็วของอากาศร่อนที่ใช้ อาจจะสูงกว่า U_{mf}
ประมาณ 1.4 เท่า ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.94 m/s คำนวณหา
อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศร่อนได้เท่ากับ
 $Q_a = 0.1695 \text{ m}^3/\text{s}$ หรือ พิจารณาที่ ความดัน
บรรยากาศจะมีค่า $m = 0.1604 \text{ kg/s}$ ความร้อนจากฮีต
เตอร์ไฟฟ้าที่ถ่ายเทให้กับอากาศสามารถคำนวณหาได้
จากสมการ

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

เมื่อ q คือปริมาณความร้อนที่ใช้เพิ่มอุณหภูมิให้กับ
อากาศแวดล้อม(kW) m คืออัตราการไหลเชิงมวลของ
อากาศร่อน (kg/s) C_{pa} คือค่าความจุความร้อนจำเพาะ
เฉลี่ยของอากาศ (kJ/kg. °C) T_{mix} คืออุณหภูมิอากาศที่
ใช้เท่ากับ 60°C T_a คืออุณหภูมิอากาศแวดล้อมเท่ากับ
32 °C จะได้ $q = 0.1604 \times 1.008 \times (60 - 32) = 4.52 \text{ kW}$
ประมาณค่าการสูญเสียความร้อน 15% และคิดค่า
Safety factor เท่ากับ 1.5 ทำให้ต้องเลือกใช้ฮีตเตอร์
ไฟฟ้าที่ให้ความร้อนไม่ต่ำกว่า 8 kW

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบระบบที่มีอัตราการไหลเชิง
ปริมาตรของอากาศ $Q_a = 0.1695 \text{ m}^3/\text{s}$ เพื่อเลือกใช้
พัดลมที่มีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศและ
ความดันสถิตให้เหมาะสมกับระบบที่ออกแบบไว้ การ
คำนวณความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในส่วนต่างๆ (วิธีการ
คำนวณสามารถสืบค้นจาก [9]) มีค่าดังแสดงในตารางที่
1

ตารางที่ 1 ความดันสถิตในอุปกรณ์ต่างๆ

อุปกรณ์	ความดันสถิต (Pa)
ระบบท่อ	296.35
ฮีตเตอร์	9.36
ไซโคลน	755.11
แผ่นกระจายอากาศ	487.23 (120 rpm)
ห้องอบแห้ง	866.42
รวม	2414.46

กำหนดให้ Safety factor = 1.2 ดังนั้นความดัน
สถิตมีค่าเท่ากับ 2897.35 Pa ในงานวิจัยนี้ได้ใช้อากาศที่
อุณหภูมิ 60°C และมีความหนาแน่นประมาณ 1.060
kg/m³ ซึ่งความดันสถิตที่พัดลมสร้างได้จะแปรผันตรง
กับความหนาแน่นของไหลตามกฎของพัดลม (Fan law)
ดังนั้นความดันสถิตที่ต้องการจากพัดลมคือ 2897.35
 $\times (1.2/1.060) = 3280.01 \text{ Pa}$ ในงานวิจัยจึงเลือกใช้พัด
ลมแบบแรงเหวี่ยงใบพัดโค้งหลัง มีมอเตอร์ขนาด 1.5
kW แรงดันสถิตสูงสุดที่พัดลมสร้างได้ 3532 Pa และมี
อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศสูงสุดที่ 25
m³/min

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดลองผลิตข้าวเคลือบโดย
ใช้ผงขมิ้นชันเป็นสารเคลือบเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิ
ของอากาศที่ใช้อบแห้ง ความเร็วรอบการหมุนของแผ่น
กระจายอากาศ อัตราฉีดพ่นสารเคลือบ ระยะเวลาฉีด
พ่นสารเคลือบ และระยะเวลาที่อบแห้งหลังหยุดพ่นสาร
เคลือบที่มีผลต่อค่าความชื้นของข้าวเคลือบ พบว่าข้าวที่
ผ่านการเคลือบโดยใช้ระยะเวลาฉีดพ่นสารเคลือบ 8 min มี
ค่าความชื้นสูงกว่าข้าวที่ผ่านการเคลือบโดยใช้ระยะเวลา
ฉีดพ่นสารเคลือบ 6 min เล็กน้อย เนื่องจากต้องใช้
ระยะเวลานานเพื่อระเหยน้ำออกไป มากกว่าข้าวที่ผ่าน
การเคลือบด้วยระยะเวลาที่สั้นกว่า

ตารางที่ 2 ความชื้นของข้าวเคลือบที่เงื่อนไขการทดลองต่างกัน



เงื่อนไข					ความชื้น* (% w.b.)
อุณหภูมิ (°C)	ความเร็วรอบแผ่น กระจายอากาศ (rpm)	อัตราการฉีดพ่น (ml/min)	ระยะเวลาฉีดพ่น (min)	ระยะอบแห้ง หลังจากหยุดพ่น (s)	
55	20	35	6	10	11.9
			8	10	11.9
		40	6	10	12.0
			8	10	11.9
			8	0	12.2
			8	0	12.2
	70	35	6	10	11.8
			8	10	11.9
		40	6	10	11.9
			8	10	12.1
			8	0	12.2
			8	0	12.2
120	35	6	10	11.7	
		8	10	11.8	
	40	6	10	11.7	
		8	10	12.0	
		8	0	12.1	
		8	0	12.1	
60	20	35	6	10	11.7
			8	10	11.8
		40	6	10	11.8
			8	10	12.1
			8	0	12.2
			8	0	12.2
	70	35	6	10	11.6
			8	10	11.7
		40	6	10	11.8
			8	10	12.0
			8	0	12.1
			8	0	12.1
120	35	6	10	11.6	
		8	10	11.5	
	40	6	10	11.7	
		8	10	11.7	
		8	0	11.9	
		8	0	11.9	

*ความชื้นของข้าวสารเริ่มต้น 11.9 % w.b.

เมื่อทดลองผลิตข้าวเคลือบโดยไม่ต้องอบแห้งต่อ
หลังจากหยุดพ่นสารเคลือบ พบว่าข้าวเคลือบมีค่า

ความชื้น 12.2%w.b. กรณีนี้ความชื้นที่อยู่ในสารเคลือบ
ส่วนสุดท้ายจะไม่ถูกกระเหยออกจากเมล็ดข้าว ส่งผลให้

เมล็ดข้าวเกาะกันเป็นก้อน และอาจทำให้เมล็ดข้าวส่วนนี้เกิดการเสียหายได้ระหว่างการเก็บรักษา

จากตารางที่ 2 ข้าวที่ผ่านการเคลือบโดยใช้อุณหภูมิตอบแห้ง 60°C มีความชื้นต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 55°C อยู่ในช่วงประมาณ 0.1-0.2 %w.b. เนื่องจากที่อุณหภูมิอบแห้ง 60°C มีอัตราการการอบแห้งที่สูงกว่า ถึงแม้การใช้อุณหภูมิสูงทำให้ลดความชื้นในเมล็ดข้าวได้ไว แต่อาจส่งผลต่อการแตกตัวของเมล็ดข้าวได้ [10] การเพิ่มอัตราการฉีดพ่นจาก 35 เป็น 40 ml/min ทำให้ความชื้นในข้าวเคลือบเพิ่มขึ้นประมาณ 0.2 % w.b. เนื่องมาจากปริมาณละอองฝอยที่เพิ่มขึ้นความชื้นในห้องอบมีค่าสูงทำให้การเคลือบผิวเมล็ดข้าวมีความชื้นสะสมมากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบการทดลองกับกรณีไม่หมุนแผ่นกระจายอากาศ (0 rpm) ภายใต้เงื่อนไขอัตราการฉีดพ่น 35 ml/min ระยะเวลาฉีดพ่น 8 นาที ระยะเวลาอบแห้งหลังจากหยุดพ่น 10 วินาที พบว่าความชื้นสุดท้ายของเมล็ดข้าวมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก หรือเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเทคนิคการเคลือบแบบติดตั้งหัวฉีดไว้ด้านล่าง (Bottom spray fluidized bed) ความชื้นก็มีค่าใกล้เคียงกัน [6] ซึ่งความแตกต่างของความชื้นเล็กน้อยอาจเป็นผลมาจากความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty) และจำนวนสามซ้ำในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

เมื่อเพิ่มความเร็วรอบการหมุนแผ่นกระจายอากาศพบว่า อากาศในห้องอบมีความปั่นป่วนสูงกว่า ช่วยให้อัตราการถ่ายเทมวลสารและการระเหยน้ำที่ผิวข้าวมีค่าสูง ทำให้เมล็ดข้าวมีความชื้นต่ำกว่าค่าความชื้นเริ่มต้นของข้าวสารที่ไม่ผ่านการกระบวนการเคลือบ ประกอบกับความชื้นส่วนหนึ่งที่หายไปเกิดจากการใช้อุณหภูมิอบแห้งที่สูงขึ้น ถ้าเมล็ดข้าวมีความชื้นต่ำเกินไป อาจทำให้เกิดการแตกข้าว [10] นอกจากนี้พบว่าความชื้นส่วนหนึ่งของข้าวเคลือบถูกระเหยออกไปในช่วงที่อบแห้งหลังจากการหยุดฉีดพ่นสารเคลือบ จึงส่งผลทำให้ข้าวสารเคลือบมีความชื้นลดลงที่ระยะเวลาที่อบแห้ง

หลังหยุดฉีดพ่นสารเคลือบ 10 s ซึ่งมีความชื้นต่ำกว่าการไม่อบแห้งข้าวหลังจากหยุดพ่นสารเคลือบ

เพื่อให้ข้าวเคลือบมีค่าความชื้นปลอดภัยสำหรับการเก็บรักษา จากตารางที่ 2 พบว่าข้าวที่ผ่านการเคลือบโดยใช้ความเร็วรอบการหมุน 70 rpm อุณหภูมิอบแห้ง 55°C อัตราฉีดพ่นสารเคลือบ 35 ml/min ฉีดพ่นสารเคลือบเป็นเวลา 6 นาที อบแห้งต่อหลังหยุดพ่นสารเคลือบอีก 10 s ทำให้ข้าวเคลือบมีค่าความชื้นประมาณ 11.9% w.b. ความชื้นค่านี้นเพียงพอต่อการเก็บรักษาเมล็ดข้าวโดยไม่ทำให้ข้าวเสียหายจากเชื้อรา ที่เงื่อนไขนี้ใช้ระยะเวลาการอบแห้งและเคลือบ 6 นาที ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่ากรณีการอบแห้งแบบติดตั้งหัวฉีดไว้ด้านบน [4] และติดตั้งหัวฉีดไว้ด้านล่าง [6] อยู่ 2 นาที เนื่องจากสภาพความปั่นป่วนของอากาศในห้องอบอาจทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น

ตารางที่ 3 แสดงร้อยละการแตกข้าว ร้อยละของข้าวเต็มเมล็ดและความชื้นในเมล็ด ที่ผ่านการอบแห้งและเคลือบขม้นชั้นสกัดที่เงื่อนไขต่างๆ พบว่าอุณหภูมิตอบแห้งและอัตราการฉีดพ่นสารเคลือบมีผลต่อความชื้นของเมล็ดข้าว ควรควบคุมและเลือกเงื่อนไขให้ความชื้นสุดท้ายของข้าวเคลือบสูงกว่า 11.7% w.b. ถ้าความชื้นของข้าวเคลือบต่ำกว่าค่าดังกล่าว จะทำให้เมล็ดข้าวเคลือบเกิดการแตกข้าวมากกว่า 10% การแตกข้าวที่เกิดขึ้นนี้มีสาเหตุมาจากเกรเดียนท์ ความชื้น (Moisture gradient) ระหว่างบริเวณผิวกับความชื้นภายในเมล็ดมีความแตกต่างกันจนทำให้เกิดแรงเค้น (Stress) [10,11] นอกจากนี้พบว่าที่ความเร็วรอบการหมุน 120 rpm เมล็ดข้าวมีการแตกข้าวสูงถึง 12-15% ซึ่งแตกต่างจากความเร็วยรอบ 20 และ 70 rpm อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) อาจเป็นผลมาจากเมล็ดข้าวหมุนวนแบบปั่นป่วนและเกิดชนกันเองสูงกว่าที่ความเร็วรอบต่ำ จากผลการทดลองดังกล่าวทำให้ทราบว่า การใช้ความเร็วรอบสูงอาจช่วยให้อัตราการอบแห้งดี แต่กลับทำให้เมล็ดข้าวแตกข้าวเพิ่มขึ้น ดังนั้นไม่ควรใช้ความเร็วรอบของการหมุนที่สูงกว่า 70 rpm ผู้วิจัยทำการทดลอง



ความเร็วรอบของการหมุนแผ่นกระจายอากาศแค่สามค่า ซึ่งอาจไม่เพียงพอต่อการหาความเร็วรอบที่เหมาะสมที่สุด จากการทดลองพบว่าความเร็วรอบที่ 20 และ 70 rpm มีค่าร้อยละการแตกร้าวที่ไม่สูงและมีค่าไม่แตกต่าง

กันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) การเลือกความเร็วรอบการหมุนที่เหมาะสมยังคงต้องอาศัยผลการทดสอบสีของเมล็ดข้าวหลังการเคลือบและใช้ข้อมูลประสิทธิภาพการเคลือบช่วยเลือกความเร็วรอบที่เหมาะสมอีกด้วย

ตารางที่ 3 แสดงร้อยละการแตกร้าว ร้อยละของข้าวเต็มเมล็ดและความชื้นในเมล็ด

เงื่อนไข			ร้อยละการแตกร้าว	ร้อยละของข้าวเต็มเมล็ด	ความชื้นในเมล็ด (% w.b.)
อุณหภูมิ (°C)	ความเร็วรอบแผ่นกระจายอากาศ (rpm)	ปริมาณสารเคลือบ (ml/min)			
55	20	35	6 ± 2^{ab}	93.0 ± 0.2^c	11.9 ± 0.1^c
		40	7 ± 1^{ab}	93.3 ± 0.3^c	12.0 ± 0.0^d
	70	35	8 ± 2^{abc}	93.4 ± 0.2^{cde}	11.8 ± 0.1^b
		40	7 ± 3^{ab}	93.1 ± 0.3^c	11.9 ± 0.1^{cd}
	120	35	12 ± 1^{cdef}	93.2 ± 0.3^c	11.7 ± 0.0^{ab}
		40	13 ± 2^{def}	94.2 ± 0.2^g	11.8 ± 0.1^{bc}
60	20	35	9 ± 3^{bcd}	94.0 ± 0.3^{fg}	11.7 ± 0.1^{ab}
		40	8 ± 3^{abc}	93.8 ± 0.2^{efg}	11.8 ± 0.0^{bc}
	70	35	10 ± 2^{bcde}	93.7 ± 0.2^{def}	11.6 ± 0.1^a
		40	9 ± 2^{bcd}	93.1 ± 0.2^c	11.8 ± 0.0^{bc}
	120	35	15 ± 3^f	92.3 ± 0.2^b	11.6 ± 0.1^a
		40	14 ± 3^{ef}	91.6 ± 0.1^a	11.7 ± 0.1^{ab}
ข้าวขาว (อ้างอิง)			4 ± 2^a	93.7 ± 0.3^{def}	12.5 ± 0.20^e

ข้าวอ้างอิงคือข้าวสารที่ยังไม่ผ่านกระบวนการใดๆ ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละหลักของตาราง $p < 0.05$

ตารางที่ 4 ค่าสีของเมล็ดข้าวที่ผ่านการเคลือบด้วยขมิ้นชัน

เงื่อนไข			L*	a*	b*	Hue angle (°H)
อุณหภูมิ (°C)	ความเร็วรอบแผ่นกระจายอากาศ (rpm)	ปริมาณสารเคลือบ (ml/min)				
55	20	35	72.30 ± 0.10^c	$12.13 \pm 0.12^{a,b}$	73.83 ± 0.50^a	$80.67 \pm 0.04^{c,d}$
		40	73.27 ± 0.15^d	11.77 ± 0.06^a	74.10 ± 0.46^a	80.98 ± 0.02^d
	70	35	71.77 ± 0.21^b	12.97 ± 0.15^c	73.20 ± 0.75^a	79.95 ± 0.02^b
		40	$71.63 \pm 0.15^{a,b}$	13.17 ± 0.25^c	73.63 ± 0.50^a	79.86 ± 0.26^b

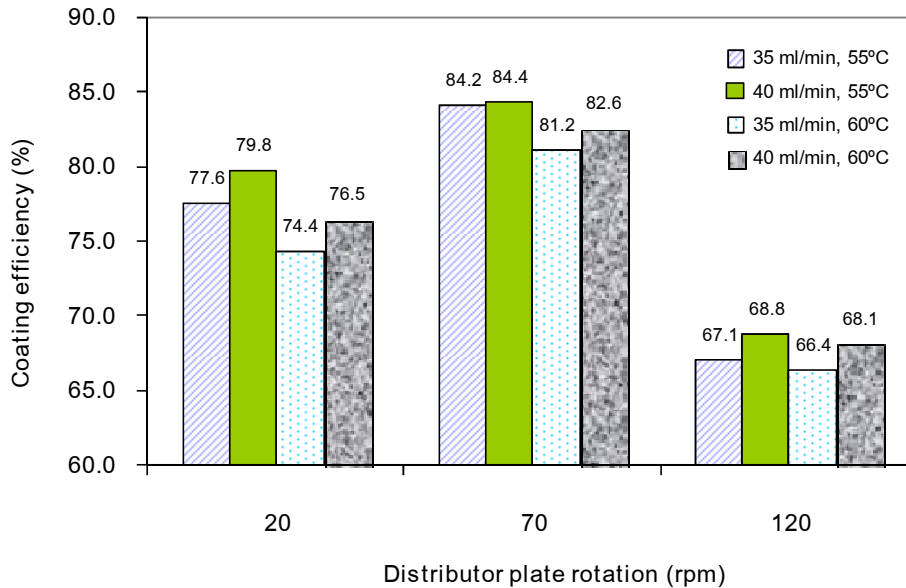
	120	35	N/A	N/A	N/A	N/A
		40	N/A	N/A	N/A	N/A
60	20	35	72.23 ± 0.06 ^c	12.20 ± 0.20 ^b	73.83 ± 0.50 ^a	80.62 ± 0.12 ^c
		40	73.27 ± 0.15 ^d	11.77 ± 0.06 ^a	74.10 ± 0.46 ^a	80.98 ± 0.02 ^d
	70	35	71.77 ± 0.21 ^b	12.93 ± 0.21 ^c	73.20 ± 0.75 ^a	79.98 ± 0.06 ^b
		40	71.67 ± 0.15 ^{a,b}	13.17 ± 0.25 ^c	73.63 ± 0.50 ^a	79.86 ± 0.26 ^b
	120	35	N/A	N/A	N/A	N/A
		40	N/A	N/A	N/A	N/A

ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละหลักของตาราง $p < 0.05$

ตารางที่ 4 แสดงค่าสีของข้าวเคลือบขม้นชั้น พบว่าการเพิ่มอัตราการฉีดพ่นสารเคลือบทำให้ข้าวเคลือบขม้นชั้นมีสีเข้มมากขึ้น ค่า Hue angle (°H) อยู่ในช่วง 79-81 ซึ่งหมายถึงสีเหลืองอมแดง การเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนทำให้ค่าสีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยเฉพาะค่า b^* ซึ่งแสดงถึงความเป็นสีเหลืองของเมล็ดข้าว ภายใต้เงื่อนไขในตารางที่ 4 ค่าสีจะค่อนข้างมีค่าสม่ำเสมอเนื่องจากมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ไม่สูงมากนัก

สำหรับความเร็วรอบการหมุนของแผ่นกระจายอากาศที่ 120 rpm พบเมล็ดข้าวที่ไม่ผ่านการเคลือบและเมล็ดข้าวที่มีสารเคลือบติดที่ผิวอย่างเงาจางปะปนอยู่กับข้าวที่ถูกเคลือบกระจายทั่วห้องอบ ทำให้ไม่สามารถรายงานค่าสีในตารางที่ 4 ได้ เนื่องจากที่ความเร็วรอบการหมุนที่สูงสุดค่านี้ เมล็ดข้าวส่วนใหญ่ถูกเหวี่ยงไปชิดผนังห้องอบจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ในขณะที่เกิดฟลูอิดไอซ์ข้าวที่อยู่บริเวณช่วงกลางห้องอบเคลื่อนที่ขึ้น-ลงตลอดเวลา ทำให้คั้งข้าวที่อยู่บริเวณผนังห้องอบที่ถูกเหวี่ยงจากแรงหนีศูนย์กลาง เมล็ดข้าวสารประมาณ 15-25% ภายในเบต จึงไม่ถูกเคลือบจากข้อมูลในตารางที่ 4 ทำให้ทราบว่าที่ความเร็วรอบการหมุน มากกว่า 70 rpm สำหรับการอบและเคลือบด้วยเทคนิคนี้ไม่เหมาะสม เนื่องจากทำให้เมล็ดข้าวถูกเคลือบไม่ทั่วถึง ซึ่งสอดคล้องกับค่าประสิทธิภาพการเคลือบดังแสดงในรูปที่ 4

รูปที่ 4 แสดงประสิทธิภาพการเคลือบที่เงื่อนไขอุณหภูมิ อัตราการฉีดพ่นและความเร็วรอบการหมุนแผ่นกระจายอากาศที่ต่างกัน ผลการทดลองพบว่าเครื่องมีค่าประสิทธิภาพการเคลือบอยู่ในช่วงระหว่าง 66.4–84.4% การปรับลดระยะเวลาที่อบแห้งหลังจากหยุดพ่นสารเคลือบไม่มีผลกระทบต่อค่าประสิทธิภาพการเคลือบเนื่องการอบแห้งในส่วนนี้จะกระทำหลังจากที่หยุดพ่นสารเคลือบไปแล้ว ในงานวิจัยนี้จึงเลือกเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเคลือบที่เงื่อนไขตัวแปรดังกล่าวคงที่ได้แก่ ระยะเวลาที่ฉีดพ่นสารเคลือบจาก 6 min ระยะเวลาอบแห้งหลังจากหยุดพ่น 10 s และแรงดันอากาศป้อนเข้าหัวฉีด 1.5 bar



รูปที่ 4 ประสิทธิภาพการเคลือบที่เงื่อนไขอุณหภูมิและอัตราการฉีดพ่นต่างกัน ที่ระยะเวลาฉีดพ่นสารเคลือบ 6 min ระยะเวลาแห้งหลังจากหยุดพ่น 10 sec และแรงดันอากาศป้อนเข้าหัวฉีด 1.5 bar

จากรูปที่ 4 พบว่าการเพิ่มอัตราการฉีดพ่นสารเคลือบทำให้ประสิทธิภาพการเคลือบของเครื่องเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอัตราการฉีดพ่นสารเคลือบทำให้อากาศที่ไหลผ่านห้องอบแห้งมีความชื้นเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ช่วย

ลดปริมาณหยดละอองฝอยของสารเคลือบที่เกิดการการระเหยก่อนเข้ายึดเกาะอยู่บนผิวของเมล็ดข้าว ดังนั้นสารเคลือบที่ยึดเกาะอยู่บนเมล็ดข้าวจึงมีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 55 จนถึง 60°C พบว่าการเคลือบโดยใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงทำให้เครื่องผลิตข้าวเคลือบมีประสิทธิภาพการเคลือบลดลง เนื่องจากการเคลือบโดยใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงมีผลต่อปริมาณของหยดละอองฝอยของสารเคลือบที่ถูกพ่นออกจากหัวฉีดเกิดการระเหยไปบางส่วนจึงทำให้ไม่สามารถเข้ายึดเกาะบนผิวเมล็ดข้าวสาร สารเคลือบที่เกาะอยู่บนผิวเมล็ดจึงมีปริมาณลดลงด้วย

ถ้าความเร็วรอบการหมุนของแผ่นกระจายอากาศให้มีค่า 120 rpm จากการทดลองพบว่าเมล็ดข้าวมี

ลักษณะการเกิดฟลูอิดไชน์ลดลง เป็นผลมาจากขาดสมดุลแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและแรงลอยตัวของเมล็ดข้าว เมล็ดข้าวส่วนหนึ่งจะถูกเหวี่ยงไปอยู่บริเวณผนังห้องอบความสามารถในการหมุนเวียนเมล็ดข้าวในห้องอบจะลดลง สารเคลือบไม่สามารถยึดเกาะอยู่ที่ผิวข้าวได้อย่างทั่วถึง ส่งผลทำให้เครื่องมีประสิทธิภาพการเคลือบมีค่าลดลง

จากรูปที่ 4 ที่ความเร็วรอบของการหมุนของแผ่นกระจายอากาศ 70 rpm จะมีค่าประสิทธิภาพการเคลือบสูงกว่าความเร็วรอบค่าอื่นๆ กรณีนี้อาจเกิดสภาพปั่นป่วนและเกิดหมุนเวียนของเมล็ดข้าวที่เหมาะสมความเร็วรอบที่ 70 rpm เป็นเพียงข้อมูลเบื้องต้นเท่านั้น เพราะช่วงการทดลองหาความเร็วรอบที่ดีที่สุดของงานวิจัยนี้ยังมีแค่สามค่า โดยความเร็วรอบที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตข้าวเคลือบขมั้นชั้นอาจต่ำกว่าหรือสูงกว่าค่า 70 rpm เล็กน้อย ซึ่งผู้วิจัยจะทำการทดลองเพิ่มเติมในงานวิจัยต่อไป

เมื่อเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการเคลือบที่ดีที่สุดกับงานวิจัยที่ผ่านมา คือกรณีการอบแห้งแบบติดตั้ง

หัวฉีดไว้ด้านบน [4] (81.8%) และติดตั้งหัวฉีดไว้ด้านล่าง [6] (82.9%) พบว่าเครื่องเคลือบข้าวฟลูอิดิซ์แบบหมุนมีประสิทธิภาพการเคลือบสูงกว่า (มีค่าเท่ากับ 84.2%) โดยเทคนิคการเคลือบข้าวฟลูอิดิซ์แบบหมุนใช้ อัตราการฉีดพ่นสารเคลือบต่ำกว่า และใช้ระยะเวลาในกระบวนการอบแห้งสั้นกว่าประมาณ 2 นาที อาจทำให้ช่วยประหยัดสารเคลือบและพลังงานไฟฟ้าในระยะยาว

4. สรุป

ข้าวที่ผ่านการเคลือบด้วยเทคนิคฟลูอิดิซ์แบบหมุนที่เงื่อนไขความเร็วรอบการหมุน 70 rpm อุณหภูมิอบแห้ง 55°C อัตราฉีดพ่นสารเคลือบ 35 ml/min ฉีดพ่นสารเคลือบเป็นเวลา 6 นาที อบแห้งต่อหลังหยุดพ่นสารเคลือบอีก 10 s อากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีดมีแรงดัน 1.5 bar เป็นเงื่อนไขที่ให้มีความชื้นที่เหมาะสมในการเก็บรักษา และให้ประสิทธิภาพการเคลือบเท่ากับ 84.2% การเคลือบด้วยเทคนิคฟลูอิดิซ์แบบหมุนสามารถผลิตข้าวเคลือบขม้นชั้นสกัดที่มีผิวเคลือบสม่ำเสมอ ผลิตภัณฑ์ข้าวเคลือบขม้นชั้นสกัดมีสีเหลืองอมแดง นอกจากนี้พบว่าอุณหภูมิอบแห้งและอัตราการฉีดพ่นสารเคลือบมีผลต่อความชื้นของเมล็ดข้าว หากความชื้นสุดท้ายของเมล็ดข้าวเคลือบต่ำกว่า 11.7% w.b. จะเกิดการแตกข้าว

เมื่อความเร็วรอบการหมุนของแผ่นกระจายอากาศมีค่าสูง เมล็ดข้าวภายในห้องอบแห้งจะเกิดฟลูอิดิซ์ลดลงเป็นผลมาจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและแรงลอยตัวของเมล็ดข้าวที่ไม่เหมาะสม ทำให้สารเคลือบไม่สามารถเข้ายึดเกาะผิวข้าวได้อย่างทั่วถึง ประสิทธิภาพการเคลือบจึงลดลง

จากค่าประสิทธิภาพการเคลือบที่สูงที่สุดของการเคลือบแบบฟลูอิดิซ์เบดทั้งสามแบบพบว่าเทคนิคการเคลือบข้าวฟลูอิดิซ์เบดแบบหมุน (Rotating fluidized bed) ใช้อัตราการฉีดพ่นสารเคลือบและระยะเวลาในกระบวนการอบแห้งสั้นกว่าการเคลือบด้วยเทคนิคแบบ

ติดตั้งหัวฉีดไว้ด้านบน (Top spray fluidized Bed) [4] และติดตั้งหัวฉีดไว้ด้านล่าง Bottom spray fluidized bed [6]

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Glatt Technology, Fluid Bed Coating, [Online], Available :http://www.glatt.com/e/01_technologien/01_04_08.htm.
- [2] 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.
- [3] 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).
- [4] 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).
- [5] P. Prakotmak, "Development of rice kernel coater with fluidized bed process," The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok, vol. 26, no. 3, pp. 385-394, 2016 (in Thai).
- [6] P. Prakotmak, "Bottom-spray fluidized bed coating: effect of process variables on rice kernel coating efficiency," The 30th Conference



of The Mechanical Engineering Network of Thailand, 5-8 July, Songkhla, pp. 1-11, 2016 (in Thai).

[7] J. Neuwirth, S. Antonyuk, S. Heinrich and M. Jacob, “CFD-DEM study and direct measurement of the granular flow in a rotor granulator,” Chemical Engineering Science, vol. 86, pp.151-163, 2013.

[8] L. Fries, S. Antonyuk, S. Heinrich and S. Palzer, “DEM-CFD modeling of a fluidized bed spray granulator,” Chemical Engineering Science, vol. 66, pp.2340-2355, 2011.

[9] A. Noykanchana, K. Sinsakul, C. Chansomboon, C. Moonkhum and T. Teepailboon, "Development of Herbal-Coated Rice Using Bottom Spray Fluidized Bed Coaters," Dissertation, Department of Mechanical Engineering, Kasetsart University Kamphangsean Campus, 2014 (in Thai).

[10] 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).

[11] Igauz, A., Rodriguez, M. and Virseda, P. (2006). Influence of handling and processing of rough rice on fissure and head rice yields, Journal of Food Engineering, vol.77, pp. 803-809.