



## การพัฒนาเครื่องเคลือบเมล็ดข้าวสารด้วยกระบวนการฟลูอิดไคซ์เบด

### ปรีดา ปรากฏมาก\*

อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-3435-5310 ต่อ 7507 อีเมล: fengpdpr@ku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2016.02.004  
รับเมื่อ 6 กรกฎาคม 2558 ตอรับเมื่อ 24 กุมภาพันธ์ 2559 เผยแพร่ออนไลน์ 12 กันยายน 2559

© 2016 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

เทคนิคการเคลือบและอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดเป็นวิธีการพ่นเคลือบพร้อมกับการอบแห้งในขณะที่วัสดุกำลังแขวนลอยอยู่ในอากาศ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเครื่องผลิตข้าวเคลือบขนาดเล็กชนิดฉีดพ่นสารเคลือบจากด้านบน มีลักษณะการทำงานแบบวงวด สามารถผลิตข้าวเคลือบได้ครั้งละ 4 kg การทดลองทำโดยเคลือบสารละลายของขมิ้นชันสกัดลงบนผิวของเมล็ดข้าวสารหอมมะลิ 105 สารเคลือบถูกฉีดพ่นออกจากหัวฉีดด้วยอัตรา 30, 35 และ 40 ml/min อากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีดมีแรงดัน 1 และ 1.5 bar ฉีดพ่นสารเคลือบเป็นเวลา 8 และ 10 นาที และหลังจากหยุดฉีดพ่นสารเคลือบทำการอบแห้งต่ออีก 10 วินาที ในขณะที่อากาศไหลเข้าห้องแห้งมีความเร็ว 3.2 m/s และอุณหภูมิ 55, 60 และ 65°C ปริมาณอากาศร้อนที่นำหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ 80% คุณภาพของข้าวที่ผ่านการเคลือบแล้วพิจารณาจากค่าความชื้น ค่าสี ร้อยละการร้าวของเมล็ดข้าวและประเมินประสิทธิภาพการเคลือบ จากการทดลองพบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการผลิตข้าวเคลือบขมิ้นชันสกัดคือ อากาศอบแห้งที่มีอุณหภูมิ 55°C อัตราฉีดพ่นสารเคลือบ 40 ml/min แรงดันของอากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีด 1.5 bar ฉีดพ่นสารเคลือบเป็นเวลา 8 นาที และหลังจากหยุดฉีดพ่นสารเคลือบทำการอบแห้งต่ออีก 10 วินาที ข้าวเคลือบขมิ้นชันสกัดที่ได้มีลักษณะเป็นสีเหลืองอมแดง การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง ระยะเวลาที่อบแห้งหลังหยุดพ่นสารเคลือบและระยะเวลาที่ฉีดพ่นสารเคลือบมีผลทำให้ความชื้นของข้าวเคลือบลดต่ำลง การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งและอัตราฉีดพ่นสารเคลือบไม่มีผลต่อค่าร้อยละการร้าวของเมล็ด ประสิทธิภาพการเคลือบของเครื่องที่สร้างขึ้นมีค่าอยู่ระหว่าง 72–82%

**คำสำคัญ:** ข้าวเคลือบ ขมิ้นชัน ฟลูอิดไคซ์เบด อบแห้ง



## Development of Rice Kernel Coater with Fluidized Bed Process

**Preeda Prakotmak\***

Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering at Khamphengsean, Kasetsart University, Khamphengsean Campus, Nakhon Phanom, Thailand

\* Corresponding Author, Tel. 0-3435-5310 Ext. 7507, E-mail: fengpdpr@ku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2016.02.004

Received 6 July 2015; Accepted 24 February 2016; Published online: 12 September 2016

© 2016 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

Fluidized bed coating and drying process involves suspending the particles in a fluid bed and spraying coating solution onto the fluidized particles followed by drying. The objective of this study was to construct a small scale batch of top-sprayed fluidized bed coating apparatus, which could produce 4 kg of coated rice per batch. In this experiment, turmeric extract solution was sprayed onto Jasmine rice kernels at a rate of 30, 35 and 40 ml/min for 8 and 10 minutes with the atomization air pressure of 1 and 1.5 bars. After that, the drying process was applied for 10 seconds at a temperature of 55, 60 and 65°C with the inlet air velocity of 3.2 m/s, and recycled air of 80%. The coated rice quality was evaluated in terms of the moisture content, color, percentage of fissure kernels and coating efficiency. The results showed that the suitable condition for producing turmeric coated rice was the coating solution spray rate of 40 ml/min for 8 minutes with the atomization pressure of 1.5 bar, and drying temperature of 55°C for 10 seconds. The turmeric extract coated rice was reddish-yellow. The increase of the drying temperature and the length of spraying and drying time decreased the moisture content of turmeric extract coated rice. However, the increase of the drying temperature and the spray rate of coating solution did not affect the percentage of fissure kernels. The coating efficiency of the apparatus was in the range of 72–82%.

**Keywords:** Coated Rice, Turmeric, Fluidized Bed, Drying

## 1. บทนำ

อาหารส่งเสริมสุขภาพที่มีส่วนผสมหรือสารเติมแต่งจากธรรมชาติได้รับความสนใจจากผู้บริโภคมากขึ้น การนำสารสกัดจากพืชและสมุนไพรมาเคลือบบนเมล็ดข้าวสารซึ่งเป็นอาหารหลักของคนไทยและคนต่างชาติอีกหลายประเทศทั่วโลกจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่ช่วยส่งเสริมสุขภาพของผู้บริโภค รวมทั้งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับข้าวสารเพิ่มทางเลือกให้กับผู้บริโภค การเคลือบอาหารเป็นทางเลือกหนึ่งในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์อาหารให้มีคุณภาพที่ดีขึ้น เช่น ปรับปรุงลักษณะทางกายภาพและเพิ่มสารอาหารหรือสารเติมแต่ง การเคลือบสารต่างๆ ลงบนผิวของวัสดุวิธีการเคลือบอยู่หลากหลาย ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของสารที่ใช้เคลือบ ความสม่ำเสมอ ความหนาของชั้นฟิล์ม และวัสดุที่ถูกเคลือบ วิธีการเคลือบที่นิยมใช้เช่นการจุ่มเคลือบ (Dip Coating) การเทเคลือบ (Cast Coating) และการพ่นเคลือบ (Spray Coating) ซึ่งการพ่นเคลือบเป็นวิธีที่ทำให้สารเคลือบสามารถยึดเกาะอยู่บนผิวเมล็ดข้าวสารได้อย่างสม่ำเสมอดีกว่าวิธีอื่นๆ และทำให้ความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากกระบวนการเคลือบและอบแห้งมีความสม่ำเสมอใกล้เคียงกัน

การเคลือบโดยใช้เทคนิคแบบฟลูอิดไรซ์เบดชนิดฉีดพ่นด้านบน (Top-spray Fluidized Bed Coating) เป็นวิธีการเคลือบแบบพ่นเคลือบรูปแบบหนึ่ง โดยใช้หลักการฉีดพ่นสารเคลือบให้กลายเป็นหยดละอองฝอยขนาดเล็กกระจัดกระจายไม่โคจรด้วยหัวฉีดที่ติดตั้งไว้ด้านบนของเบดเพื่อยึดเกาะบนผิวของอนุภาคในขณะที่กำลังแขวนลอยอยู่ในอากาศทำให้สารเคลือบเข้ายึดเกาะบนผิวของอนุภาคได้อย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ อีกทั้งยังเป็นการเคลือบและอบแห้งที่เกิดขึ้นพร้อมๆ กัน ส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสม่ำเสมอ

Saleh *et al.* [1] พบว่าการเคลือบอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะทำให้ประสิทธิภาพการเคลือบของระบบเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่า สามารถเข้ายึดเกาะได้ทั่วถึง นอกจากนี้ Ronsse *et al.* [2] รายงานว่าการเพิ่มแรงดันของอากาศที่ป้อน

เข้าหัวฉีดมีผลทำให้ประสิทธิภาพการเคลือบเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มแรงดันของอากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีดส่งผลให้หยดละอองของสารเคลือบมีขนาดเล็กกลง แต่การที่ทำให้หยดละอองมีขนาดเล็กมากเกินไปจะทำให้หยดละอองฝอยเกิดการระเหยเป็นผงก่อนที่จะเข้ายึดเกาะบนผิวอาหาร ทำให้ประสิทธิภาพลดลงได้เช่นกัน

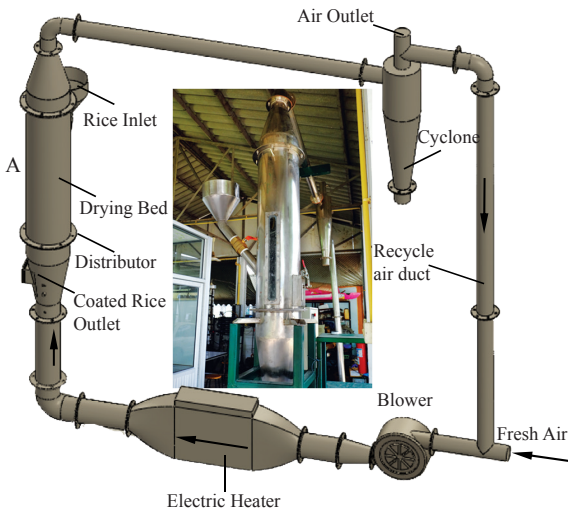
Dewittinck และ Huyghebaert [3] พบว่าอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ป้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งมีผลต่อประสิทธิภาพการเคลือบที่อุณหภูมิสูงโดยอาจทำให้ตัวทำละลายในละอองฝอยของสารเคลือบจะระเหยออกไปก่อนที่จะหยดละอองฝอยเข้ายึดเกาะบนผิวของวัสดุทำให้ประสิทธิภาพการเคลือบลดลง แต่ในทางตรงข้ามถ้าใช้อุณหภูมิอบแห้งต่ำเกินไปจะทำให้ความชื้นของวัสดุภายในเบดเพิ่มขึ้นส่งผลให้วัสดุจับตัวเป็นก้อนและเกิดการลอยตัวแบบฟลูอิดไรซ์ลดลงทำให้ประสิทธิภาพการเคลือบลดลงได้เช่นกัน

จุดเด่นของเทคนิคแบบฟลูอิดไรซ์เบดชนิดฉีดพ่นด้านบน คือชั้นตอนเคลือบและอบแห้งพร้อมกันทำให้ใช้งานได้สะดวกไม่เกิดการฟุ้งกระจายของสารเคลือบใช้ระยะเวลาในการเคลือบสั้นเป็นระบบที่มีการนำอากาศหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ดังนั้นงานศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเครื่องต้นแบบผลิตข้าวเคลือบและทำแห้งด้วยกระบวนการฟลูอิดไรซ์เบดชนิดฉีดพ่นสารเคลือบจากด้านบนมาประยุกต์เข้ากับการเคลือบสมุนไพรลงบนเมล็ดข้าวสารและหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับใช้ผลิตข้าวเคลือบได้แก่ อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ออบแห้ง อัตราฉีดพ่นสารเคลือบแรงดันของอากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีด ความเร็วของอากาศที่ทำให้เกิดฟลูอิดไรซ์ที่มีผลต่อคุณภาพข้าวเคลือบ

## 2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

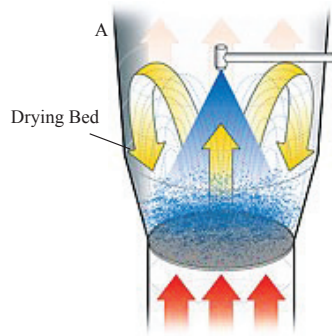
### 2.1 เครื่องเคลือบข้าวและการทดสอบผลิตภัณฑ์

เครื่องเคลือบข้าวขนาดเล็กแบบฟลูอิดไรซ์เบดชนิดฉีดพ่นด้านบนดังแสดงในรูปที่ 1 ประกอบด้วย ฮีตเตอร์ขนาด 12 kW ควบคุมด้วย PID พัดลมแบบใบพัดโค้งหลังขนาดมอเตอร์ 1.5 kW อัตราการไหลจำเพาะของอากาศ



**รูปที่ 1** ส่วนประกอบของระบบเคลือบและอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด

$5.5 \text{ m}^3/\text{s}-\text{m}^3$ -grain ความเร็วอากาศอบแห้งสูงสุด  $1.8 \text{ m/s}$  ในห้องอบแห้ง (Drying Bed) ติดตั้งหัวฉีดบริเวณด้านบนซึ่งอยู่ในบริเวณที่วัสดุถูกเป่าให้ลอยขึ้นด้วยอากาศที่ป้อนเข้าทางด้านล่างของห้องอบแห้ง ส่วนสารเคลือบถูกฉีดพ่นให้เป็นหยดละอองฝอยด้วยหัวฉีดซึ่งหยดละอองฝอยจะไหลต้านกับทิศทางการไหลของอากาศร้อนที่ใช้ออบแห้งก่อนเข้ายึดเกาะบนผิวของวัสดุตั้งรูปที่ 2 หลังจากนั้นวัสดุที่ได้รับสารเคลือบแล้วจะเกิดการหมุนเวียน และตกลงสู่ด้านล่างของห้องอบแห้ง เครื่องที่สร้างขึ้นสามารถผลิตข้าวเคลือบมีลักษณะทำงานเป็นงวด (Batch) ครั้งละ 4 กิโลกรัม การทดลองเริ่มจากการเตรียมสารละลายด้วยการนำผงไขมันชั้นสกัดปริมาณ  $4\% \text{ w/v}$  ผสมกับสารละลายเอทานอลความเข้มข้น  $70\%$  โดยปริมาตร แล้วกรองด้วยผ้าขาวบางลดความเข้มข้นของเอทานอลให้เหลือ  $40\%$  โดยปริมาตร แล้วพ่นเคลือบข้าวขาวหอมมะลิ 105 ที่มีความชื้นเริ่มต้น  $11.9\% \text{ w.b.}$  โดยกำหนดเงื่อนไขการทดลองฉีดพ่นสารเคลือบด้วยอัตรา 30, 35 และ  $40 \text{ ml/min}$  อากาศร้อนป้อนเข้าสู่ห้องอบและเคลือบข้าวที่อุณหภูมิ 55, 60 และ  $65^\circ\text{C}$  อากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีดมีความดัน  $1.5 \text{ bar}$  ระยะเวลาที่ฉีดสารเคลือบ 8 และ  $10 \text{ min}$  หลังจากหยุดพ่นสารเคลือบ



**รูปที่ 2** ลักษณะการพ่นฝอยในห้องอบแห้ง

อบแห้งต่อเป็นเวลา 10 s อากาศที่ออกจากเครื่องนำกลับมาใช้ใหม่  $80\%$  หลังจากที่ได้ผลิตภัณฑ์ข้าวเคลือบจะนำมาเก็บในตู้เย็นอุณหภูมิ  $4^\circ\text{C}$  เพื่อทดสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์

การทดสอบคุณภาพของข้าวเคลือบขมั้นชั้นมีดังนี้

1) การแตกตัวของเมล็ดข้าวทดสอบด้วยการส้อมเมล็ดข้าวเคลือบที่เต็มเมล็ดจำนวน 100 เมล็ด มองด้วยแว่นขยายที่มีการส่องไฟ เพื่อแยกเมล็ดที่มีรอยร้าวออกเปอร์เซ็นต์ของข้าวเต็มเมล็ดทดสอบโดยนำตัวอย่างข้าวเคลือบ  $200 \text{ g}$  คัดแยกด้วยเครื่อง Indent Cylinder รุ่น TRG-05A

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

3) การหาค่าความชื้นด้วยการนำข้าวเคลือบไปเข้าตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ  $103^\circ\text{C}$  เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมงแล้วคำนวณน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง

4) คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของข้าวเคลือบหุงสุกทดสอบด้วยเครื่อง Texture Analyzer รุ่น TA.XT Plus

5) หาประสิทธิภาพการเคลือบของเครื่องผลิตข้าวเคลือบเป็นอัตราส่วนของน้ำหนักผงไขมันชั้นที่เกาะอยู่บนเมล็ดข้าวต่อน้ำหนักผงไขมันชั้นทั้งหมดที่ใช้เคลือบ โดยคำนวณหาจากสมการ



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

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

เมื่อ  $Eff$  คือ ประสิทธิภาพการเคลือบ (%)

$\Delta M$  คือ ผลต่างของมวลข้าวสาร 2000 เมล็ดก่อน

เคลือบและหลังเคลือบ (g, dry matter)

$M_{rt}$  คือ มวลของข้าวสารทั้งหมดที่ใช้เคลือบ (g)

$M_s$  คือ มวลของสารเคลือบทั้งหมดที่ใช้ (g, dry matter)

$M_a$  คือ มวลของผงมันชั้นที่เกาะอยู่บนเมล็ดข้าว (g)

$M_r$  คือ มวลของข้าวสาร 2000 เมล็ด (g)

## 2.2 การคำนวณหาขนาดของอุปกรณ์ให้ความร้อนและขนาดพัดลม

งานวิจัยนี้สร้างห้องอบแห้งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 29 cm คำนวณจากข้าวสารที่ใช้เคลือบในแต่ละวงมีมวล 4 kg ความสูงเบด 8 cm จากรูปที่ 3 พบว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไอเซชัน ( $U_{mf}$ ) เท่ากับ 1.3 m/s ในทางปฏิบัติความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้จริงอาจจะสูงกว่า  $U_{mf}$  ประมาณ 1.4 เท่า ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.82 m/s คำนวณหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศร้อนได้เท่ากับ  $Q_a = 0.1202 \text{ m}^3/\text{s}$  หรือพิจารณาที่ความดันบรรยากาศจะมีค่า  $\dot{m} = 0.1137 \text{ kg/s}$  งานวิจัยนี้ได้ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์เพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศ ความร้อนจากฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ถ่ายเทให้กับอากาศสามารถคำนวณหาได้จากสมการ

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

เมื่อ  $q$  คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้เพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศแวดล้อม (kW)

$\dot{m}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศร้อน (kg/s)

$C_p$  คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะเฉลี่ยของอากาศ (kJ/kg.°C)

$T_{mix}$  คือ อุณหภูมิอากาศที่ใช้เท่ากับ 65°C

$T_a$  คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อมเท่ากับ 32°C  
จะได้

$$q = 0.1137 \times 1.008 \times (65 - 32) = 3.78 \text{ kW}$$

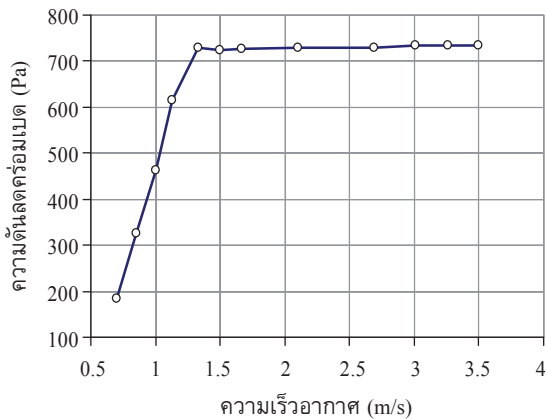
ประมาณค่าการสูญเสียความร้อน 15% และคิดค่า Safety Factor เท่ากับ 1.5 ทำให้ต้องเลือกใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ให้ความร้อนไม่ต่ำกว่า 7 kW

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบระบบที่มีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ 0.1202 m<sup>3</sup>/s เพื่อเลือกใช้พัดลมที่มีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศและความดันสถิตให้เหมาะสมกับระบบที่ออกแบบไว้ การคำนวณความดันสถิตที่เกิดขึ้นในส่วนต่างๆ (ไม่ได้แสดงวิธีการคำนวณไว้เนื่องจากมีรายละเอียดมาก สามารถสืบค้นเพิ่มเติม [4]) มีค่าดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความดันสถิตในอุปกรณ์ต่างๆ [4]

อุปกรณ์	ความดันสถิต (Pa)
ระบบท่อ	282.27
ฮีตเตอร์	9.36
ไซโคลน	755.11
แผ่นกระจายอากาศ	257.43
ห้องอบแห้ง	856.76
รวม	2160.93

กำหนดให้ Safety Factor = 1.2 ดังนั้นความดันสถิตมีค่าเท่ากับ 2593.12 Pa ในงานวิจัยนี้ได้ใช้อากาศที่อุณหภูมิ 65°C และมีความหนาแน่นประมาณ 1.050 kg/m<sup>3</sup> ซึ่งความดันสถิตที่พัดลมสร้างได้จะแปรผันตรงกับความหนาแน่นของไหล ตามกฎของพัดลม (Fan Law) ดังนั้นความดันสถิตที่ต้องการจากพัดลมคือ 2593.12 × (1.2/1.050) = 2963.56 Pa ในงานวิจัยจึงเลือกใช้พัดลมแบบแรงเหวี่ยงใบพัดโค้งหลัง มีมอเตอร์ขนาด 1.5 kW แรงดันสถิตสูงสุดที่พัดลมสร้างได้ 3532 Pa และมีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศสูงสุดที่ 25 m<sup>3</sup>/min



**รูปที่ 3** ความสัมพันธ์ระหว่างความดันสถิตคร่อมเบตและความเร็วของอากาศ (ความสูงเบตเริ่มต้น 8 cm และใช้อากาศที่สภาวะแวดล้อม)

### 3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

ข้าวสารที่ใช้เคลือบในแต่ละงวดมีมวล 4 kg และมีค่าความชื้นเริ่มต้นประมาณ 12% w.b. เบตมีความสูงเริ่มต้น 8 cm การทดสอบหาความเร็วต่ำสุดของอากาศที่ทำให้เมล็ดข้าวสารในห้องอบแห้งเกิดฟลูอิดไรซ์ สามารถทดลองด้วยการเพิ่มความเร็วของอากาศขึ้นเรื่อยๆ ดังแสดงตามรูปที่ 3

เมื่อความเร็วของอากาศมีค่าต่ำๆ ข้าวสารที่อยู่ในห้องอบแห้งจะไม่มีการเคลื่อนที่และความดันสถิตคร่อมเบตมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามความเร็วของอากาศที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้นซึ่งเรียกช่วงนี้ว่าเบตนิ่ง (Fixed Bed) เมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศที่ป้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งจนถึงค่าหนึ่งซึ่งทำให้ข้าวสารที่อยู่ในห้องอบแห้งเริ่มมีการเคลื่อนที่และแยกตัวออกจากกัน เรียกความเร็วค่านี้ว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไรซ์ จากการทดลองนี้พบว่าความเร็วต่ำสุดของอากาศที่ทำให้เมล็ดข้าวสารเกิดฟลูอิดไรซ์มีค่าประมาณ 1.3 m/s

ตารางที่ 2 แสดงผลของอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ออบแห้ง อัตราฉีดพ่นสารเคลือบ ระยะเวลาฉีดพ่นสารเคลือบ แรงดันของอากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีด และระยะเวลาที่อบแห้งหลังหยุดพ่นสารเคลือบต่อค่าความชื้นของ

ข้าวเคลือบ จากตารางที่ 2 พบว่าข้าวที่ผ่านการเคลือบโดยใช้ระยะเวลาฉีดพ่นสารเคลือบ 10 min มีค่าความชื้นสูงกว่าข้าวที่ผ่านการเคลือบโดยใช้ระยะเวลาฉีดพ่นสารเคลือบ 8 min เล็กน้อย เนื่องจากการผลิตข้าวเคลือบโดยใช้เทคนิคการเคลือบแบบฟลูอิดไรซ์เบตจะมีเมล็ดข้าวสารทั้งส่วนที่ถูกเคลือบและเมล็ดข้าวส่วนที่ถูกอบแห้งเกิดขึ้นพร้อมกัน ความชื้นของข้าวที่ถูกเคลือบต้องใช้ระยะเวลาเพื่อระเหยน้ำออกไปมากกว่าข้าวที่ผ่านการเคลือบด้วยระยะเวลาที่สั้นกว่า นอกจากนั้นความชื้นส่วนหนึ่งของข้าวเคลือบถูกระเหยออกไปในช่วงที่อบแห้งหลังจากการหยุดฉีดพ่นสารเคลือบจึงส่งผลทำให้ข้าวสารเคลือบมีความชื้นลดลง นอกจากนี้ความแตกต่างของความชื้นเล็กน้อยอาจเป็นผลมาจากความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty) และจำนวนการทดลองสามซ้ำในแต่ละเงื่อนไข

การใช้อุณหภูมิอบแห้ง 65°C และระยะเวลาที่อบแห้งหลังหยุดฉีดพ่นสารเคลือบ 40 s ทำให้ข้าวเคลือบมีความชื้นค่อนข้างต่ำ เนื่องจากจากการอบแห้งหลังหยุดฉีดพ่นสารเคลือบด้วยเวลาที่มากเกินไป จึงได้ปรับลดระยะเวลาที่อบแห้งหลังหยุดฉีดพ่นสารเคลือบจาก 40 s เป็น 20 s พบว่าข้าวเคลือบมีค่าความชื้นเพิ่มขึ้นแต่ยังต่ำกว่าค่าความชื้นเริ่มต้นของข้าวสารที่ใช้ ดังนั้นจึงได้ปรับลดระยะเวลาอบแห้งหลังหยุดพ่นฉีดสารเคลือบเหลือเพียง 10 s แต่อย่างน้อยกว่าค่าความชื้นเริ่มต้นของข้าวสารอีกประมาณ 0.3% ทำให้ทราบว่าความชื้นส่วนหนึ่งที่หายไปเกิดจากการใช้อุณหภูมิอบแห้งที่สูงเกินไป และนอกจากนั้นยังพบว่าระยะเวลาที่ใช้ออบแห้งหลังหยุดฉีดพ่นสารเคลือบก็มีผลต่อค่าความชื้นของข้าวเคลือบ ดังนั้นการอบแห้งหลังจากหยุดฉีดพ่นสารเคลือบโดยใช้เวลา 10 s จึงเพียงพอที่จะทำให้ความชื้นส่วนสุดท้ายระเหยออกจากเมล็ดข้าวสารอยู่ในระดับความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษา เพื่อให้ข้าวเคลือบมีค่าความชื้นใกล้เคียงกับค่าความชื้นเริ่มต้นของข้าวสาร ต้องปรับลดอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ออบแห้งจาก 65°C เป็น 60°C พบว่าข้าวที่ผ่านการเคลือบโดยใช้อุณหภูมิอบแห้ง 60°C อัตราฉีดพ่นสารเคลือบ 40 ml/min อากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีดมีแรงดัน 1.5 bar ฉีดพ่นสารเคลือบ



ตารางที่ 2 ความชื้นของข้าวเคลือบที่เงื่อนไขการทดลองต่างกัน

อุณหภูมิ (°C)	เงื่อนไข				ความชื้น* (% w.b.)
	อัตราการฉีดพ่น (ml/min)	ระยะเวลาฉีดพ่น (min)	ระยะอบแห้งหลังจาก หยุดพ่น (s)	แรงดันของอากาศป้อน เข้าหัวฉีด (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	11.8
	40	8	10	1.5	11.8
	40	10	10	1.5	11.9
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	11.7
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	40	1.5	11.4	

\*ความชื้นของข้าวสารเริ่มต้น 11.9% w.b.

เป็นเวลา 8 min จากนั้นอบแห้งต่อหลังหยุดพ่นสารเคลือบ 10 s ทำให้ข้าวเคลือบมีค่าความชื้นประมาณ 11.90% w.b. การลดอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ใช้อบแห้งให้ต่ำลงทำให้อัตราการระเหยของความชื้นมีค่าลดลง ส่งผลทำให้ค่าความชื้นของข้าวเคลือบมีค่าใกล้เคียงกับค่าความชื้นเริ่มต้น และเมื่อทดลองผลิตข้าวเคลือบโดยไม่ต้องอบแห้งต่อหลังจากหยุดพ่นสารเคลือบ พบว่าข้าวเคลือบมีค่าความชื้น 12.1% w.b. ทำให้ความชื้นที่อยู่ในสารเคลือบส่วนสุดท้ายจะไม่ถูกระเหยออกจากเมล็ดข้าว ส่งผลทำให้เมล็ดข้าวเกาะกันเป็นก้อน และอาจทำให้เมล็ดข้าวส่วนนี้เกิดการเสียหายได้ระหว่างการเก็บรักษา ส่วนการลดแรงดันของอากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีดจาก 1.5 เป็น 1.0 bar ทำให้ความชื้นในข้าวเคลือบลดลงประมาณ 0.1% w.b. อาจ

เนื่องมาจากขนาดของละอองฝอยที่มีขนาดโตขึ้นทำให้การเคลือบผิวเมล็ดข้าวมีความชื้นสะสมมากขึ้น

ตารางที่ 3 แสดงร้อยละการแตกข้าว ร้อยละของข้าวเต็มเมล็ดและความชื้นในเมล็ด ที่ผ่านการอบแห้งและเคลือบไขมันชั้นสกัดที่เงื่อนไขต่างๆ พบว่าอุณหภูมิมอบแห้งและอัตราการฉีดพ่นสารเคลือบมีอิทธิพลต่อความชื้นของเมล็ดข้าวโดยข้าวสารที่ผ่านการเคลือบมีความชื้นในช่วง 11.3–12.2% w.b. อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) ควรควบคุมและเลือกเงื่อนไขให้ความชื้นสุดท้ายของข้าวเคลือบสูงกว่า 11.9% w.b. เนื่องจากเมื่อความชื้นของข้าวเคลือบต่ำกว่าค่าดังกล่าว จะทำให้เมล็ดข้าวเคลือบเกิดการแตกข้าวมากกว่า 96% [5] จากตารางที่ 3 พบว่าที่อุณหภูมิ 65°C ร้อยละการแตกข้าว ร้อยละของข้าวเต็มเมล็ดและความชื้นในเมล็ด

**ตารางที่ 3** แสดงร้อยละการแตกร้าว ร้อยละของข้าวเต็มเมล็ดและความชื้นในเมล็ด

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

ข้าวอ้างอิงคือข้าวสารที่ยังไม่ผ่านกระบวนการใดๆ ตัวอักษรอังกฤษแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละหลักของตาราง  $p < 0.05$

**ตารางที่ 4** ค่าสีของเมล็ดข้าวที่ผ่านการเคลือบด้วยขมิ้นชัน

เงื่อนไข		L*	a*	b*	Hue angle (°H)
อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณสารเคลือบ (ml/min)				
55	30	72.30 ± 0.10 <sup>d</sup>	12.20 ± 0.20 <sup>b</sup>	73.83 ± 0.50 <sup>a</sup>	80.62 ± 0.12 <sup>c</sup>
	35	71.77 ± 0.21 <sup>b,c</sup>	12.93 ± 0.21 <sup>c,d</sup>	73.20 ± 0.75 <sup>a</sup>	79.98 ± 0.06 <sup>c,d</sup>
	40	71.30 ± 0.36 <sup>a</sup>	14.33 ± 0.21 <sup>f</sup>	73.77 ± 0.55 <sup>a</sup>	79.00 ± 0.20 <sup>a</sup>
60	30	73.27 ± 0.15 <sup>f</sup>	11.77 ± 0.06 <sup>a</sup>	74.10 ± 0.46 <sup>a</sup>	80.98 ± 0.02 <sup>f</sup>
	35	71.73 ± 0.21 <sup>b,c</sup>	13.17 ± 0.25 <sup>d</sup>	73.63 ± 0.50 <sup>a</sup>	79.86 ± 0.26 <sup>c</sup>
	40	71.47 ± 0.12 <sup>a,b</sup>	14.33 ± 0.45 <sup>f</sup>	73.90 ± 0.50 <sup>a</sup>	79.02 ± 0.41 <sup>a</sup>
65	30	73.77 ± 0.15 <sup>g</sup>	11.37 ± 0.15 <sup>a</sup>	73.70 ± 0.56 <sup>a</sup>	81.23 ± 0.18 <sup>f</sup>
	35	72.83 ± 0.31 <sup>e</sup>	12.57 ± 0.32 <sup>b,c</sup>	73.37 ± 0.51 <sup>a</sup>	80.28 ± 0.18 <sup>d,e</sup>
	40	72.00 ± 0.10 <sup>c,d</sup>	13.83 ± 0.15 <sup>e</sup>	73.97 ± 0.35 <sup>a</sup>	79.41 ± 0.07 <sup>b</sup>

ตัวอักษรอังกฤษแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละหลักของตาราง  $p < 0.05$

มีความแตกต่างกับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 55–60°C อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) การแตกร้าวที่เกิดขึ้นนี้มีสาเหตุมาจากเกรเดียนท์ ความชื้น (Moisture Gradient) ระหว่างบริเวณผิวกับความชื้นภายในเมล็ดมีความแตกต่างกันจนทำให้เกิดแรงเค้น (Stress) [6]–[8]

ตารางที่ 4 แสดงค่าสีของข้าวเคลือบขมิ้นชัน พบว่าการเพิ่มอัตราการฉีดพ่นสารเคลือบทำให้ข้าวเคลือบขมิ้นชันมีสีเข้มมากขึ้น ค่า Hue Angle (°H) อยู่ในช่วง 79–81 ซึ่งหมายถึงสีเหลืองอมแดง การเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนทำให้ค่า a\* มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญเป็นผลมาจากการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งทำให้ปริมาณสารเคลือบยึดเกาะบนผิวเมล็ดข้าวลดลง รอยร้าวบนเมล็ดข้าวทำให้เกิดช่องว่างอากาศบริเวณผิวเมล็ดและเกิดสีขุ่นขาวทำให้

เกิดแสงสะท้อนในรูปแบบการกระจายรังสีเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้ค่าความสว่าง (L\*) เพิ่มขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อค่าความเป็นสีแดง (a\*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b\*) อย่างมีนัยสำคัญสังเกตจากตัวอักษรทางสถิติในแต่ละหลักของตารางที่ไม่ต่างกัน ( $p < 0.05$ ) ข้าวที่ผ่านการพ่นเคลือบและอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดภายใต้เงื่อนไขในตารางที่ 4 ค่าสีจะค่อนข้างมีค่าสม่ำเสมอเนื่องจากมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ไม่สูงมากนัก ตารางที่ 5 แสดงผลของอุณหภูมิอากาศและอัตราการฉีดพ่นสารเคลือบที่มีต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของข้าวเคลือบหุงสุกในด้านความแข็ง (Hardness) และความเหนียว (Stickiness) พบว่าความแข็งและความเหนียวของข้าวเคลือบหุงสุกและข้าวสารอ้างอิงหุงสุก (ข้าวที่ยังไม่ผ่านกระบวนการใดๆ) ไม่มีความแตกต่างกัน



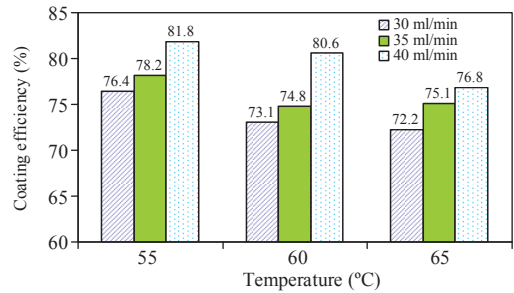
อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) ดังนั้นอุณหภูมิอากาศร้อนและอัตราการฉีดพ่นสารเคลือบไม่มีอิทธิพลต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของข้าวเคลือบขมิ้นชั้น ส่วนที่เงื่อนไข  $65^{\circ}\text{C}$  ไม่ได้แสดงผลการทดลองเนื่องจากเมล็ดข้าวเกิดการแตกร้าวระหว่างการหุงสุก

**ตารางที่ 5** คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของข้าวเคลือบหุงสุก

เงื่อนไข		Hardness (N)	Stickiness (N)
อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	ปริมาณสารเคลือบ (ml/min)		
55	30	$71.23 \pm 3.24^a$	$4.61 \pm 0.54^a$
	35	$71.65 \pm 4.85^a$	$4.82 \pm 0.47^{ab}$
	40	$72.91 \pm 5.28^a$	$5.37 \pm 0.52^{ab}$
60	30	$71.62 \pm 6.52^a$	$4.72 \pm 0.44^{ab}$
	35	$71.87 \pm 5.78^a$	$5.35 \pm 0.42^{ab}$
	40	$72.44 \pm 5.11^a$	$5.68 \pm 0.51^b$
65	30	N/A	N/A
	35	N/A	N/A
	40	N/A	N/A
ข้าวขาว (อ้างอิง)		$71.42 \pm 4.42^a$	$4.82 \pm 0.54^{ab}$

ตัวอักษรอังกฤษแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละหลักของตาราง  $p < 0.05$

เมื่อเพิ่มระยะเวลาที่ฉีดพ่นสารเคลือบจาก 8 เป็น 10 min จากการทดลองพบว่าเมล็ดข้าวมีลักษณะการเกิดฟลูอิดไรต์ลดลง เป็นผลมาจากเมล็ดข้าวมีสารเคลือบยึดเกาะอยู่ที่ผิวเพิ่มขึ้นทำให้เกิดแรงยึดเกาะระหว่างเมล็ดข้าว และได้รับสารเคลือบลดลงส่งผลทำให้เครื่องมีประสิทธิภาพการเคลือบมีค่าลดลงเล็กน้อย โดยปกติการปรับเพิ่มค่าแรงดันของอากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีดมีผลทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดละอองฝอยมีขนาดเล็กลง แต่ในการทดลองปรับเพิ่มแรงดันของอากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีดจาก 1.0 เป็น 1.5 bar ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกันทำให้แรงดันที่ปรับเพิ่มมาอาจยังไม่ส่งผลกระทบต่อขนาดของหยดละอองฝอยที่ถูกพ่นออกจากหัวฉีดทำให้ยังไม่สามารถอธิบายผลในส่วนนี้ได้ชัดเจน ส่วนการปรับลดระยะเวลาที่อบแห้งหลังจากหยุดพ่นสารเคลือบไม่มีผลกระทบต่อค่าประสิทธิภาพการเคลือบ เนื่องการอบแห้งในส่วนนี้



**รูปที่ 4** ประสิทธิภาพการเคลือบที่เงื่อนไขอุณหภูมิและอัตราการฉีดพ่นต่างกัน ที่ระยะเวลาฉีดพ่นสารเคลือบ 8 min ระยะเวลาอบแห้งหลังจากหยุดพ่น 10 sec และแรงดันอากาศป้อนเข้าหัวฉีด 1.5 bar

จะกระทำหลังจากที่หยุดพ่นสารเคลือบแล้ว ในงานวิจัยนี้จึงเลือกเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเคลือบที่เงื่อนไขตัวแปรดังกล่าวคงที่ได้แก่ ระยะเวลาที่ฉีดพ่นสารเคลือบจาก 8 min ระยะเวลาอบแห้งหลังจากหยุดพ่น 10 s และแรงดันอากาศป้อนเข้าหัวฉีด 1.5 bar

รูปที่ 4 แสดงประสิทธิภาพการเคลือบที่เงื่อนไขอุณหภูมิและอัตราการฉีดพ่นต่างกัน ผลการทดลองพบว่าเครื่องมีค่าประสิทธิภาพการเคลือบอยู่ในช่วงระหว่าง 72.2–81.8%

จากรูปที่ 4 พบว่าการเพิ่มอัตราฉีดพ่นสารเคลือบทำให้ประสิทธิภาพการเคลือบของเครื่องเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอัตราฉีดพ่นสารเคลือบทำให้อากาศที่ไหลผ่านห้องอบแห้งมีความชื้นเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ช่วยลดปริมาณหยดละอองฝอยของสารเคลือบที่เกิดการระเหยก่อนเข้ายึดเกาะอยู่บนผิวของเมล็ดข้าว ดังนั้นสารเคลือบที่ยึดเกาะอยู่บนเมล็ดข้าวจึงมีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 55 จนถึง  $65^{\circ}\text{C}$  พบว่าการเคลือบโดยใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงทำให้เครื่องผลิตข้าวเคลือบมีประสิทธิภาพการเคลือบลดลง เนื่องจากการเคลือบโดยใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงมีผลต่อปริมาณของหยดละอองฝอยของสารเคลือบที่ถูกพ่นออกจากหัวฉีดเกิดการระเหยไปบางส่วนจึงทำให้ไม่สามารถเข้ายึดเกาะบนผิวเมล็ดข้าวสารเคลือบที่เกาะอยู่บนผิวเมล็ดจึงมีปริมาณลดลง



#### 4. สรุป

เทคนิคการเคลือบและอบแห้งโดยใช้วิธีการทำให้ข้าวเกิดการแขวนลอยในอากาศด้วยหลักการของฟลูอิดเซชัน ข้าวที่กระจายตัวจากแรงปะทะของลมที่จะถูกพ่นสารเคลือบซึ่งเป็นหยดละอองฝอยเข้ายึดเกาะบนผิวอย่างทั่วถึง เครื่องที่สร้างขึ้นสามารถผลิตข้าวเคลือบขมิ้นชั้นสกัดที่มีผิวเคลือบสม่ำเสมอ ผลิตภัณฑ์ข้าวเคลือบขมิ้นชั้นสกัดที่ได้มีสีเหลืองอมแดงและมีสีที่สม่ำเสมอ ประสิทธิภาพการเคลือบสูงสุดมีค่าเท่ากับ 81.8% (ที่เงื่อนไข อุณหภูมิ 55°C ระยะเวลาฉีดพ่นสารเคลือบ 8 min ระยะเวลาอบแห้งหลังจากหยุดพ่น 10 s และแรงดันอากาศป้อนเข้าหัวฉีด 1.5 bar) การพ่นเคลือบพร้อมกันใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงทำให้ปริมาณสารเคลือบยึดเกาะบนผิวเมล็ดข้าวลดลงส่งผลให้ประสิทธิภาพการเคลือบมีค่าลดลงด้วย การเพิ่มอัตราฉีดพ่นสารเคลือบทำให้ประสิทธิภาพการเคลือบของเครื่องเพิ่มขึ้น อุณหภูมิอากาศร้อนและอัตราการฉีดพ่นสารเคลือบไม่มีอิทธิพลต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของข้าวเคลือบขมิ้นชั้น การเคลือบด้วยเทคนิคนี้ควรควบคุมไม่ให้ความชื้นของผลิตภัณฑ์ต่ำกว่า 11.9% w.b. เนื่องจากการใช้อุณหภูมิอบแห้งที่สูงเกินไปจะเกิดการแตกร้าวเนื่องจากเกรตเตียนท์ความชื้นระหว่างบริเวณผิวกับความชื้นภายในเมล็ดมีความแตกต่างกัน

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และคำปรึกษาจากนายอาคม ปะหลามานิต นักศึกษาปริญญาเอก กลุ่มวิจัยอบแห้งขั้นสูงสำหรับอาหารและวัสดุชีวภาพ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

#### เอกสารอ้างอิง

[1] K. Saleh, D. Steinmetz, and M. Hemati, "Experimental study and modeling of fluidized bed coating and agglomeration," *Powder Technology*, vol. 130,

pp. 116–123, 2003.

- [2] F. Ronsse, J.G. Pieters, and K. Dewettinck, "Modelling side-effect spray drying in top-spray fluidized bed coating processes," *Journal of Food Engineering*, vol. 86, pp. 529–541, 2008.
- [3] K. Dewettinck and A. Huyghebaert, "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," M.S. thesis, Department of Mechanical Engineering, Kasetsart University Kamphangsean Campus, 2014 (in Thai).
- [5] A. Palamanit, S. Soponronarit, S. Prachayawarakom, and P. Tungtrakul, "Qualities of turmeric extract coated rice using top-spray fluidized bed coating technique," *Agricultural Sciences Journal*, 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," in *Proceedings The 28th Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand*, Khon Kaen, 15–17 October, 2014, pp. 720–729 (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).