

การพัฒนาเครื่องเคลือบเมล็ดข้าวสารด้วยกระบวนการฟลูอิดไรซ์เบด Development of Rice Kernel Coater with Fluidized Bed Process

ปรีดา 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

เทคนิคการเคลือบและอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดเป็นวิธีการพ่นเคลือบพร้อมกับการอบแห้งในขณะที่ยังสดกำลังแขวนลอยอยู่ในอากาศ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเครื่องผลิตข้าวเคลือบขนาดเล็กชนิดฉีดพ่นสารเคลือบจากด้านบน มีลักษณะการทำงานแบบงวด (Batch) ซึ่งสามารถผลิตข้าวเคลือบได้ครั้งละ 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% คุณภาพของข้าวที่ผ่านการเคลือบแล้วพิจารณาจากค่า ความชื้น 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%

คำหลัก: ข้าวเคลือบ; อบแห้ง; ฟลูอิดไรซ์เบด; ขมิ้นชันสกัด

Abstract

Spray fluidized bed coating and drying technique involves the suspension of the particles in a fluid bed with the coating solution sprayed onto the fluidized particles followed by drying. The objective of this study was to construct a small scale batch top-spray fluidized bed coating apparatus, which could produce 4 kg of coated rice per batch. 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 10 sec, superficial air velocity of 3.2 m/s, drying temperatures of 55, 60 and 65 °C and recycle air 80%. 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

ETM-10

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 72-82°C

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

1. บทนำ

อาหารส่งเสริมสุขภาพที่มีส่วนผสมหรือสารเติมแต่งจากธรรมชาติได้รับความสนใจจากผู้บริโภคมากขึ้น การนำสารสกัดจากพืชและสมุนไพรมาเคลือบบนเมล็ดข้าวสารซึ่งเป็นอาหารหลักของคนไทยและคนต่างชาติอีกหลายประเทศทั่วโลกจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยส่งเสริมสุขภาพของผู้บริโภค รวมทั้งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับข้าวสารเพิ่มทางเลือกให้กับผู้บริโภค การเคลือบอาหารเป็นทางเลือกหนึ่งในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์อาหารให้มีคุณภาพที่ดีขึ้น เช่น ปรับปรุงลักษณะทางกายภาพและเพิ่มสารอาหารหรือสารเติมแต่ง การเคลือบโดยใช้เทคนิคแบบฟลูอิดไรซ์เบดชนิดฉีดพ่นด้านบน (Top-spray fluidized bed coating) เป็นวิธีการเคลือบแบบพ่นเคลือบรูปแบบหนึ่ง โดยใช้หลักการฉีดพ่นสารเคลือบให้กลายเป็นหยดละอองฝอยขนาดเล็กกระจัดไม่โครเมตรด้วยหัวฉีดที่ติดตั้งไว้ด้านบนของเบดเพื่อเข้ายึดเกาะบนผิวของอนุภาคในขณะที่กำลังแขวนลอยอยู่ในอากาศทำให้สารเคลือบเข้ายึดเกาะบนผิวของอนุภาคได้อย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ อีกทั้งยังเป็นการเคลือบและอบแห้งที่เกิดขึ้นพร้อมๆ กัน ส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความชื้นสม่ำเสมอ

Saleh และคณะ [1] พบว่าการเคลือบอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะทำให้ประสิทธิภาพการเคลือบของระบบเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่า สามารถเข้ายึดเกาะได้ทั่วถึง นอกจากนี้ **Ronsse และคณะ [2]** พบว่าการเพิ่มแรงดันของอากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีดมีผลทำให้ประสิทธิภาพการเคลือบเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มแรงดันของอากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีดส่งผลให้หยดละอองของสารเคลือบมีขนาดเล็กลง แต่การที่ทำให้หยดละอองมีขนาดเล็กมากเกินไปจะทำให้หยดละอองฝอยเกิดการระเหยเป็นผงก่อนที่จะเข้ายึดเกาะบนผิวอาหาร ทำให้ประสิทธิภาพลดลงได้เช่นกัน

Dewittinck และ Huyghebaert [3] พบว่าอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ป้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งมีผลต่อประสิทธิภาพการเคลือบที่อุณหภูมิสูงโดยอาจทำให้ตัวทำละลายในละอองฝอยของสารเคลือบจะระเหยออกไป

ก่อนที่จะหยดละอองฝอยเข้ายึดเกาะบนผิวของวัสดุทำให้ประสิทธิภาพการเคลือบลดลง แต่ในทางตรงข้ามถ้าใช้อุณหภูมิอบแห้งต่ำเกินไปจะทำให้ความชื้นของวัสดุภายในเบดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้วัสดุจับตัวเป็นก้อนและเกิดการลอยตัวแบบฟลูอิดไรซ์ลดลงทำให้ประสิทธิภาพการเคลือบลดลงได้เช่นกัน

จุดเด่นของเทคนิคแบบฟลูอิดไรซ์เบดชนิดฉีดพ่นด้านบน คือขั้นตอนเคลือบและอบแห้งพร้อมกันทำให้ใช้งานได้สะดวกไม่เกิดการฟุ้งกระจายของสารเคลือบ ใช้ระยะเวลาในการเคลือบสั้นเป็นระบบที่มีการนำอากาศหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ ดังนั้นงานศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเครื่องต้นแบบผลิตข้าวเคลือบและทำแห้งด้วยกระบวนการฟลูอิดไรซ์เบดชนิดฉีดพ่นสารเคลือบจากด้านบน มาประยุกต์เข้ากับการเคลือบสมุนไพรลงบนเมล็ดข้าวสาร และหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับใช้ผลิตข้าวเคลือบได้แก่ อุณหภูมิของอากาศที่ใช้อบแห้ง อัตราฉีดพ่นสารเคลือบ แรงดันของอากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีด ความเร็วของอากาศที่ทำให้เกิดฟลูอิดไรซ์ที่มีผลต่อคุณภาพข้าวเคลือบ

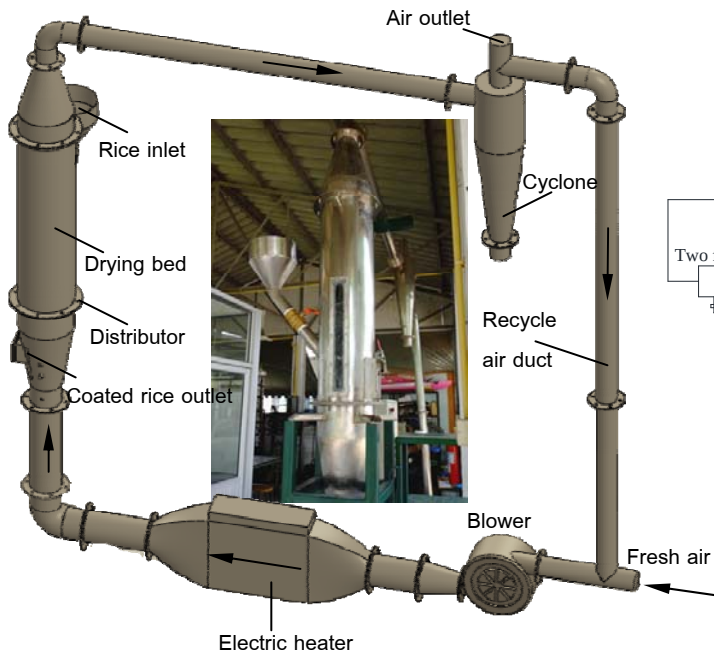
2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

เครื่องเคลือบข้าวขนาดเล็กแบบฟลูอิดไรซ์เบดชนิดฉีดพ่นด้านบนดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2 ประกอบด้วยฮีตเตอร์ขนาด 12 kW ควบคุมด้วย PID พัดลมแบบใบพัดโค้งหลังขนาดมอเตอร์ 1.5 kW อัตราการไหลเฉพาะของอากาศ 5.5 m³/s-m³-grain ความเร็วอากาศอบแห้งสูงสุด 3.2 m/s เครื่องผลิตข้าวเคลือบมีลักษณะทำงานเป็นงวด (Batch) ผลิตข้าวเคลือบครั้งละ 4 กิโลกรัม เตรียมสารละลายด้วยการนำผงขมิ้นชันสกัดปริมาณ 4% w/v ผสมกับสารละลายเอทานอลความเข้มข้น 70% โดยปริมาตร แล้วกรองด้วยผ้าขาวบาง ลดความเข้มข้นของเอทานอลให้เหลือ 40 % โดยปริมาตร แล้วพ่นเคลือบข้าวหอมมะลิ 105 ที่มีความชื้นเริ่มต้น 11.9 % w.b. โดยกำหนดเงื่อนไขการทดลองฉีดพ่นสารเคลือบด้วยอัตรา 30, 35 และ 40 ml/min อากาศร้อนป้อนเข้าสู่ห้องอบและ

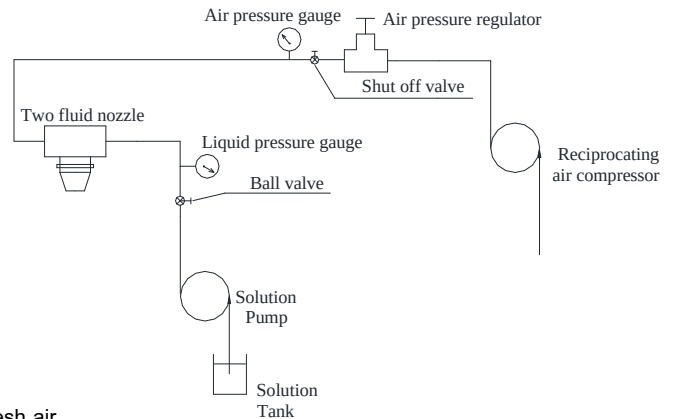
ETM-10

เคลือบข้าวที่อุณหภูมิ 55, 60 และ 65°C อากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีดมีความดัน 1.5 bar ระยะเวลาที่ฉีดสารเคลือบ 8 และ 10 min หลังจากหยุดพ่นสารเคลือบอบแห้งต่อเป็น

เวลา 10 s อากาศที่ออกจากเครื่องนำกลับมาใช้ใหม่ 80 % หลังจากที่ได้ผลิตผลิตภัณฑ์ข้าวเคลือบจะนำมาเก็บในตู้เย็นอุณหภูมิ 4°C เพื่อทดสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของระบบเคลือบและอบแห้งแบบฟลูอิดไรเซชัน



รูปที่ 2 ส่วนประกอบของระบบฟลูอิด

การทดสอบคุณภาพของข้าวเคลือบขม้นชั้นมีดังนี้

- 1) การแตกตัวของเมล็ดข้าวทดสอบด้วยการสุมเมล็ดข้าวเคลือบที่เติมเมล็ดจำนวน 100 เมล็ด มองด้วยแว่นขยายที่มีการส่องไฟ เพื่อแยกเมล็ดที่มีรอยร้าวออก เปอร์เซ็นต์ของข้าวเติมเมล็ดทดสอบโดยนำตัวอย่างข้าวเคลือบ 200 g คัดแยกด้วยเครื่อง Indent cylinder รุ่น TRG-05A
- 2) ทดสอบค่าสี ได้แก่ ค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ด้วยเครื่องวัดสี Hunter Lab ค่าโทนัส (Hue angle, H°) ของข้าวเคลือบ คำนวณจากสมการ $H^\circ = \tan^{-1}(b^*/a^*)$
- 3) การหาค่าความชื้นด้วยการนำข้าวเคลือบไปเข้าตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง แล้วคำนวณน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง
- 4) คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของข้าวเคลือบหุงสุกทดสอบด้วยเครื่อง Texture analyzer รุ่น TA.XT Plus
- 5) หาประสิทธิภาพการเคลือบของเครื่องผลิตข้าวเคลือบเป็นอัตราส่วนของน้ำหนักผงขม้นชั้นที่เกาะอยู่บนเมล็ดข้าวต่อน้ำหนักผงขม้นชั้นทั้งหมดที่ใช้เคลือบ 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 คือประสิทธิภาพการเคลือบ (%), ΔM คือผลต่างของมวลข้าวสาร 2000 เมล็ดก่อนเคลือบและหลังเคลือบ, (g, dry matter), M_{rt} คือมวลของข้าวสารทั้งหมดที่ใช้เคลือบ (g) M_s คือมวลของสารเคลือบทั้งหมดที่ใช้ (g, dry matter), M_a คือมวลของผงขม้นชั้นที่เกาะอยู่บนเมล็ดข้าว (g) และ M_r คือมวลของข้าวสาร 2000 เมล็ด (g)

2.1 การคำนวณหาขนาดของอุปกรณ์ให้ความร้อนและขนาดพัดลม

งานวิจัยนี้สร้างห้องอบแห้งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 29 cm จากรูปที่ 3 พบว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไรเซชัน (U_{mf}) เท่ากับ 1.3 m/s ในทางปฏิบัติความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้จริงอาจจะสูงกว่า U_{mf} ประมาณ 1.4 เท่า ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.82 m/s คำนวณหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศร้อนได้เท่ากับ $Q_a = 0.1202 \text{ m}^3/\text{s}$ หรือพิจารณาที่ความดันบรรยากาศ

ETM-10

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

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบระบบที่มีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ $Q_a = 0.1202 \text{ m}^3/\text{s}$ เพื่อเลือกใช้พัดลมที่มีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศและความดันสถิตให้เหมาะสมกับระบบที่ออกแบบไว้ การคำนวณความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในส่วนต่างๆ (ไม่ได้แสดงวิธีการคำนวณไว้เนื่องจากมีรายละเอียดมาก) มีค่าดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความดันสถิตในอุปกรณ์ต่างๆ

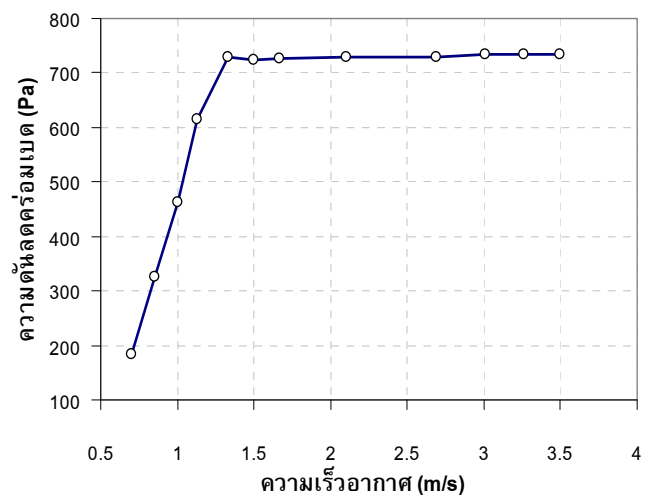
อุปกรณ์	ความดันสถิต (Pa)
ระบบท่อ	282.27
ฮีตเตอร์	9.36
ไซโคลน	755.11
แผ่นกระจายอากาศ	257.43
ห้องอบแห้ง	856.76
รวม	2160.93

กำหนดให้ Safety factor = 1.2 ดังนั้นความดันสถิตมีค่าเท่ากับ 2593.12 Pa ในงานวิจัยนี้ได้ใช้อากาศที่อุณหภูมิ 65°C และมีความหนาแน่นประมาณ 1.050 kg/m³ ซึ่งความดันสถิตที่พัดลมสร้างได้จะแปรผันตรงกับความหนาแน่นของไหลตามกฎของพัดลม (Fan law) ดังนั้นความดันสถิตที่ต้องการจากพัดลมคือ $2593.12 \times (1.2/1.050) = 2963.56 \text{ Pa}$ ในงานวิจัยจึงเลือกใช้พัดลมแบบแรงเหวี่ยงใบพัดโค้งหลัง มีมอเตอร์ขนาด 1.5 kW แรงดันสถิตสูงสุดที่พัดลมสร้างได้ 3532

Pa และมีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศสูงสุดที่ 25 m³/min

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

ข้าวสารที่ใช้เคลือบในแต่ละงวดมีมวล 4 kg และมีค่าความชื้นเริ่มต้นประมาณ 12% w.b. เบดมีความสูงเริ่มต้น 8 cm การทดสอบหาความเร็วต่ำสุดของอากาศที่ทำให้เมล็ดข้าวสารในห้องอบแห้งเกิดฟลูอิดไรส์ สามารถทดลองด้วยการเพิ่มความเร็วของอากาศขึ้นเรื่อยๆ ดังแสดงตามรูปที่ 3 เมื่อความเร็วของอากาศร้อนมีค่าต่ำๆ ข้าวสารที่อยู่ในห้องอบแห้งจะไม่มีการเคลื่อนที่และความดันลดคร่อมเบดมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามความเร็วของอากาศร้อนที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้นซึ่งเรียกช่วงนี้ว่าเบดนิ่ง (Fixed bed) เมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศที่ป้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งจนถึงค่าหนึ่งซึ่งทำให้ข้าวสารที่อยู่ในห้องอบแห้งเริ่มมีการเคลื่อนที่และแยกตัวออกจากกัน เรียกความเร็วค่านี้ว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไรส์ จากการทดลองนี้พบว่าความเร็วต่ำสุดของอากาศที่ทำให้เมล็ดข้าวสารเกิดฟลูอิดไรส์มีค่าประมาณ 1.3 m/s



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดคร่อมเบดและความเร็วของอากาศ (ความสูงเบดเริ่มต้น 8 cm และใช้อากาศที่สภาวะแวลลุ่ม)

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดลองผลิตข้าวเคลือบโดยใช้ผงมันชันเป็นสารเคลือบเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิของอากาศที่ใช้อบแห้ง อัตราฉีดพ่นสารเคลือบระยะเวลาฉีดพ่นสารเคลือบ แรงดันของอากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีด และระยะเวลาที่อบแห้งหลังหยุดพ่นสารเคลือบต่อ

ETM-10

ค่าความชื้นของข้าวเปลือก พบว่าข้าวที่ผ่านการเคลือบโดยใช้ระยะเวลาฉีดพ่นสารเคลือบ 10 min มีค่าความชื้นสูงกว่าข้าวที่ผ่านการเคลือบโดยใช้ระยะเวลาฉีดพ่นสารเคลือบ 8 min เล็กน้อย เนื่องจากการผลิตข้าวเปลือกโดยใช้เทคนิคการเคลือบแบบฟลูอิดไชน์เบตจะมีเมล็ดข้าวสารทั้งส่วนที่ถูกเคลือบและเมล็ดข้าวส่วนที่ถูกอบแห้งเกิดขึ้น

พร้อมกัน ความชื้นของข้าวที่ถูกเคลือบต้องใช้ระยะเวลาเพื่อระเหยนํ้าออกไป มากกว่าข้าวที่ผ่านการเคลือบด้วยระยะเวลาที่สั้นกว่า นอกจากนั้นความชื้นส่วนหนึ่งของข้าวเปลือกถูกระเหยนํ้าออกไปในช่วงที่อบแห้ง หลังจากการหยุดฉีดพ่นสารเคลือบจึงส่งผลทำให้ข้าวสารเคลือบมีความชื้นลดลง

ตารางที่ 2 ความชื้นของข้าวเปลือกที่เงื่อนไขการทดลองต่างกัน

อุณหภูมิ (°C)	เงื่อนไข				ความชื้น* (% w.b.)
	อัตราการฉีดพ่น (ml/min)	ระยะเวลาฉีดพ่น (min)	ระยะอบแห้ง หลังจากหยุดพ่น (s)	แรงดันของ อากาศป้อนเข้า หัวฉีด (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
	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	11.7
	40	10	10	1.5	11.8
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.

ETM-10

การใช้อุณหภูมิอบแห้ง 65 °C และระยะเวลาที่อบแห้ง หลังหยุดฉีดพ่นสารเคลือบ 40 s ทำให้ข้าวเคลือบมีความชื้นค่อนข้างต่ำ เนื่องจากจากการอบแห้งหลังหยุดฉีดพ่นสารเคลือบด้วยเวลาที่มากเกินไป จึงได้ปรับลดระยะเวลาที่อบแห้งหลังหยุดฉีดพ่นสารเคลือบจาก 40 s เป็น 20 s พบว่าข้าวเคลือบมีค่าความชื้นเพิ่มขึ้น แต่ยังไม่ต่ำกว่าค่าความชื้นเริ่มต้นของข้าวสารที่ใช้ ดังนั้นจึงได้ปรับลดระยะเวลาอบแห้งหลังหยุดพ่นฉีดสารเคลือบเหลือเพียง 10 s แต่ยังไม่ต่ำกว่าค่าความชื้นเริ่มต้นของข้าวสารอีกประมาณ 0.3% ทำให้ทราบว่าความชื้นส่วนหนึ่งที่ยาหายไปเกิดจากการใช้อุณหภูมิอบแห้งที่สูงเกินไป และนอกจากนั้นยังพบว่าระยะเวลาที่ใช้ออบแห้งหลังหยุดฉีดพ่นสารเคลือบก็มีผลต่อค่าความชื้นของข้าวเคลือบ ดังนั้นการอบแห้งหลังจากหยุดฉีดพ่นสารเคลือบโดยใช้เวลา 10 s จึงเพียงพอที่จะทำให้ความชื้นส่วนสุดท้ายระเหยออกจากเมล็ดข้าวสารอยู่ในระดับความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษา

เพื่อให้ข้าวเคลือบมีค่าความชื้นใกล้เคียงกับค่าความชื้นเริ่มต้นของข้าวสาร ต้องปรับลดอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ออบแห้งจาก 65 °C เป็น 60 °C พบว่าข้าวที่ผ่านการเคลือบโดยใช้อุณหภูมิอบแห้ง 60 °C อัตราฉีดพ่นสารเคลือบ 40 ml/min อากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีดมีแรงดัน 1.5 bar ฉีดพ่นสารเคลือบเป็นเวลา 8 min

จากนั้นอบแห้งต่อหลังหยุดพ่นสารเคลือบ 10 s ทำให้ข้าวเคลือบมีค่าความชื้นประมาณ 11.90% w.b. การลดอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ใช้ออบแห้งให้ต่ำลงทำให้อัตราการระเหยของความชื้นมีค่าลดลง ส่งผลทำให้ค่าความชื้นของข้าวเคลือบมีค่าใกล้เคียงกับค่าความชื้นเริ่มต้น และเมื่อทดลองผลิตข้าวเคลือบโดยไม่ต้องอบแห้งต่อหลังจากหยุดพ่นสารเคลือบ พบว่าข้าวเคลือบมีค่าความชื้น 12.1% w.b. ทำให้ความชื้นที่อยู่ในสารเคลือบส่วนสุดท้ายจะไม่ถูกระเหยออกจากเมล็ดข้าว ส่งผลทำให้เมล็ดข้าวเกาะกันเป็นก้อน และอาจทำให้เมล็ดข้าวส่วนนี้เกิดการเสียหายได้ระหว่างการเก็บรักษา ส่วนการลดแรงดันของอากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีดจาก 1.5 เป็น 1.0 bar ทำให้ความชื้นในข้าวเคลือบลดลงประมาณ 0.1 % w.b. อาจเนื่องมาจากขนาดของละอองฝอยที่มีขนาดโตขึ้นทำให้การเคลือบผิวเมล็ดข้าวมีความชื้นสะสมมากขึ้น

ตารางที่ 3 แสดงร้อยละการแตกร้าว ร้อยละของข้าวเต็มเมล็ดและความชื้นในเมล็ด ที่ผ่านการอบแห้งและเคลือบขมิ้นชันสกัดที่เงื่อนไขต่างๆ พบว่าอุณหภูมิอบแห้งและอัตราการฉีดพ่นสารเคลือบมีผลต่อความชื้นของเมล็ดข้าวโดยข้าวสารที่ผ่านการเคลือบมีความชื้นในช่วง 11.3-12.2 % w.b. ควรควบคุมและเลือกเงื่อนไขให้ความชื้นสุดท้ายของข้าวเคลือบสูงกว่า 11.9% w.b.

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 ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละหลักของตาราง p<0.05

ETM-10

เนื่องจากเมื่อความชื้นของข้าวเคลือบต่ำกว่าค่าดังกล่าว จะทำให้เมล็ดข้าวเคลือบเกิดการแตกร้าวมากกว่า 96 % [4] การแตกร้าวที่เกิดขึ้นนี้มีสาเหตุมาจากเกรเดียนต์ ความชื้น (Moisture gradient) ระหว่างบริเวณผิวกับความชื้นภายในเมล็ดมีความแตกต่างกันจนทำให้เกิดแรงเค้น (Stress) [5],[6]

ตารางที่ 4 แสดงค่าสีของข้าวเคลือบขม้นชั้น พบว่าการเพิ่มอัตราการฉีดพ่นสารเคลือบทำให้ข้าวเคลือบขม้นชั้นมีสีเข้มมากขึ้น ค่า Hue angle ($^{\circ}$ H) อยู่ในช่วง

79-81 ซึ่งหมายถึงสีเหลืองอมแดง การเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนทำให้ค่า a^* มีแนวโน้มลดลงเนื่องจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งทำให้ปริมาณสารเคลือบยึดเกาะบนผิวเมล็ดข้าวลดลง รอยร้าวบนเมล็ดข้าวทำให้เกิดช่องว่างอากาศบริเวณผิวเมล็ด และเกิดสีขุนขาวทำให้เกิดแสงสะท้อนในรูปแบบการกระจายรังสีเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้ค่า L^* เพิ่มขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อค่า a^* และ b^* อย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4 ค่าสีของเมล็ดข้าวที่ผ่านการเคลือบด้วยขม้นชั้น

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

ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละหลักของตาราง $p < 0.05$

ข้าวที่ผ่านการพ่นเคลือบและอบแห้งแบบฟลูอิดไธร์เบตภายใต้เงื่อนไขในตารางที่ 4 ค่าสีจะค่อนข้างมีค่าสม่ำเสมอเนื่องจากมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ไม่สูงมากนัก ตารางที่ 5 แสดงผลของอุณหภูมิอากาศและอัตราการฉีดพ่นสารเคลือบที่มีต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของข้าวเคลือบหุงสุกในด้านความแข็ง (Hardness) และความเหนียว (Stickiness) พบว่าความแข็งและความเหนียวของข้าวเคลือบหุงสุกและข้าวสารอ้างอิงหุงสุก (ข้าวที่ยังไม่ผ่านกระบวนการใดๆ) ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ดังนั้นอุณหภูมิอากาศร้อนและอัตราการฉีดพ่นสารเคลือบไม่มีอิทธิพลต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของข้าวเคลือบขม้นชั้น ส่วนที่เงื่อนไข

65 $^{\circ}$ C ไม่ได้แสดงผลการทดลองเนื่องจากเมล็ดข้าวเกิดการแตกร้าวระหว่างการหุงสุก

เมื่อเพิ่มระยะเวลาที่ฉีดพ่นสารเคลือบจาก 8 เป็น 10 min จากการทดลองพบว่าเมล็ดข้าวมีลักษณะการเกิดฟลูอิดไธร์ลดลง เป็นผลมาจากเมล็ดข้าวมีสารเคลือบยึดเกาะอยู่ที่ผิวเพิ่มขึ้นทำให้มีปริมาณของตัวประสานที่ผิวเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้นทำให้เกิดแรงยึดเกาะระหว่างเมล็ดข้าวทำให้ได้รับสารเคลือบลดลงส่งผลทำให้เครื่องมีประสิทธิภาพการเคลือบมีค่าลดลงเล็กน้อย โดยปกติการปรับเพิ่มค่าแรงดันของอากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีดมีผลทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดละอองฝอยมีขนาดเล็กลง แต่ในการทดลองปรับเพิ่มแรงดันของอากาศที่ป้อนเข้าหัวฉีดจาก 1.0 เป็น 1.5 bar ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกันทำให้แรงดันที่ปรับเพิ่มอาจยังไม่ส่งผล

ETM-10

กระทบต่อขนาดของหยดละอองฝอยที่ถูกพ่นออกจากหัวฉีดทำให้ยังไม่สามารถอธิบายผลในส่วนนี้ได้ชัดเจน ส่วนการปรับลดระยะเวลาที่อบแห้งหลังจากหยุดพ่นสารเคลือบไม่มีผลกระทบต่อค่าประสิทธิภาพการเคลือบเนื่องการอบแห้งในส่วนนี้จะกระทำหลังจากที่หยุดพ่น

สารเคลือบแล้ว ในงานวิจัยนี้จึงเลือกเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเคลือบที่เงื่อนไขตัวแปรดังกล่าวคงที่ได้แก่ ระยะเวลาที่ฉีดพ่นสารเคลือบจาก 8 min ระยะเวลาอบแห้งหลังจากหยุดพ่น 10 s และแรงดันอากาศป้อนเข้าหัวฉีด 1.5 bar

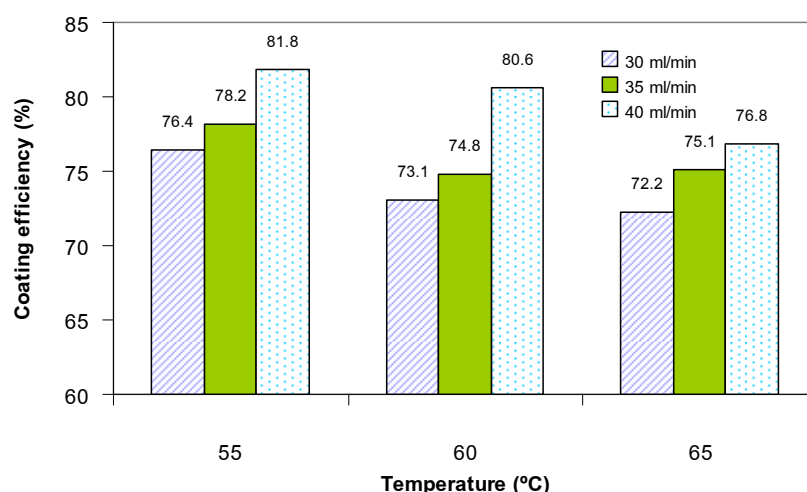
ตารางที่ 5 คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของข้าวเคลือบหุงสุก

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

ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละหลักของตาราง p<0.05

รูปที่ 4 แสดงประสิทธิภาพการเคลือบที่เงื่อนไขอุณหภูมิและอัตราการฉีดพ่นต่างกัน ผลการทดลองพบว่าเครื่องมี

ค่าประสิทธิภาพการเคลือบอยู่ในช่วงระหว่าง 72.2–81.8%



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

ETM-10

จากรูปที่ 4 พบว่าการเพิ่มอัตราฉีดพ่นสารเคลือบทำให้ประสิทธิภาพการเคลือบของเครื่องเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอัตราฉีดพ่นสารเคลือบทำให้อากาศที่ไหลผ่านห้องอบแห้งมีความชื้นเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ช่วยลดปริมาณหยดละอองฝอยของสารเคลือบที่เกิดการการระเหยก่อนเข้ายึดเกาะอยู่บนผิวของเมล็ดข้าว ดังนั้นสารเคลือบที่ยึดเกาะอยู่บนเมล็ดข้าวจึงมีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 55 จนถึง 65 °C พบว่าการเคลือบโดยใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงทำให้เครื่องผลิตข้าวเคลือบมีประสิทธิภาพการเคลือบลดลง เนื่องจากการเคลือบโดยใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงมีผลต่อปริมาณของหยดละอองฝอยของสารเคลือบที่ถูกพ่นออกจากหัวฉีดเกิดการระเหยไปบางส่วนจึงทำให้ไม่สามารถเข้ายึดเกาะบนผิวเมล็ดข้าวสาร สารเคลือบที่เกาะอยู่บนผิวเมล็ดจึงมีปริมาณลดลง

4. สรุป

เทคนิคการเคลือบและอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดชนิดฉีดพ่นด้านบน สามารถผลิตข้าวเคลือบขม้นชั้นสกัดที่มีผิวเคลือบสม่ำเสมอ ผลิตภัณฑ์ข้าวเคลือบขม้นชั้นสกัดมีสีเหลืองอมแดงและมีสีที่สม่ำเสมอ ประสิทธิภาพการเคลือบสูงสุดมีค่าเท่ากับ 81.8% (ที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 55 °C ระยะเวลาฉีดพ่นสารเคลือบ 8 min ระยะอบแห้งหลังจากหยุดพ่น 10 s และแรงดันอากาศป้อนเข้าหัวฉีด 1.5 bar) การพ่นเคลือบพร้อมกับใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงทำให้ปริมาณสารเคลือบยึดเกาะบนผิวเมล็ดข้าวลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการเคลือบมีค่าลดลงด้วย การเพิ่มอัตราฉีดพ่นสารเคลือบทำให้ประสิทธิภาพการเคลือบของเครื่องเพิ่มขึ้น อุณหภูมิอากาศร้อนและอัตราการฉีดพ่นสารเคลือบไม่มีอิทธิพลต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของข้าวเคลือบขม้นชั้น การเคลือบด้วยเทคนิคนี้ควรควบคุมไม่ให้ความชื้นของผลิตภัณฑ์ต่ำกว่า 11.9 %w.b. เนื่องจากการใช้อุณหภูมิอบแห้งที่สูงเกินไปจะเกิดการแตกร้าวเนื่องจากเกรตดิยน์ที่ความชื้นระหว่างบริเวณผิวกับความชื้นภายในเมล็ดมีความแตกต่างกัน

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสนมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และคำปรึกษาจากนาย

อาคม ปะหลามานิต นักศึกษาปริญญาเอก กลุ่มวิจัยอบแห้งขั้นสูงสำหรับอาหารและวัสดุชีวภาพ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Saleh, K., Steinmetz, D. and Hemati, M. (2003). Experimental Study and Modeling of Fluidized Bed Coating and Agglomeration, *Powder Technology*, vol. 130, pp. 116-123.
- [2] Ronsse, F., Pieters, J.G. and Dewettinck, K. (2008). Modelling side-effect spray drying in top-spray fluidized bed coating processes, *Journal of Food Engineering*, vol. 86, pp. 529-541.
- [3] Dewettinck, K. and Huyghebaert, A. (1998). Top-Spray Fluidized Bed Coating: Effect of Process Variable on Coating Efficiency. *Lebensmittel Wissenschaft and Technologie*, vol. 31, pp. 568-575.
- [4] อาคม ปะหลามานิต สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ สมเกียรติ ปรัชญาวรรการ และพัชรดี ตั้งตระกูล(2554). คุณภาพของข้าวเคลือบขม้นชั้นสกัดโดยเทคนิคการเคลือบแบบฟลูอิดไรซ์เบดชนิดฉีดพ่นด้านบน, *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร*, 42(3 พิเศษ), หน้า 513-516.
- [5] 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.
- [6] ปรีดา ปรากฏมาก (2557). แบบจำลองการถ่ายเทมวลสารและการเปลี่ยนแปลงทางกลของเมล็ดข้าวในระหว่างการอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบด, *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28*, ขอนแก่น