

# แบบจำลองการถ่ายเทมวลสารและการเปลี่ยนแปลงทางกล ของเมล็ดข้าวในระหว่างการอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด

## Modeling Coupled Transport Phenomena and Mechanical Deformation of Rice During Drying in Fluidized-Bed Dryer

ปรีดา ปราบภูมาก

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของเทคนิคการอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดที่มีต่อจลนพลศาสตร์และการแตกร้าวของเมล็ดข้าวสายพันธุ์สุพรรณบุรี 1 ในช่วงอุณหภูมิอากาศร้อน 85-130°C แบบจำลองคณิตศาสตร์สามมิติถูกพัฒนาขึ้นเพื่อทำนายความชื้น อุณหภูมิและความเค้นของเมล็ดข้าวกล้องงอกในระหว่างการอบแห้ง จากผลการทดลองพบว่าจลนพลศาสตร์ความชื้นและอุณหภูมิของเมล็ดข้าวสอดคล้องกับผลการทดลองได้ดี แบบจำลองที่สร้างขึ้นทำให้ทราบว่าเกรเดียนต์ความชื้นและอุณหภูมิภายในเมล็ดมีค่าสูงสุดที่เวลาการอบแห้ง 35 และ 6 วินาทีตามลำดับ เกรเดียนต์ความชื้นและอุณหภูมิจะลดลงตามระยะเวลาการอบแห้ง โดยเกรเดียนต์ความชื้นมีอิทธิพลต่อการแตกร้าวมากกว่าเกรเดียนต์ของอุณหภูมิเนื่องจากมีค่าสูงและเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความเค้นภายในเมล็ดข้าวซึ่งบริเวณแกนกลางเมล็ดข้าวมีความเค้นสูงสุดและมีค่าประมาณ 118 MPa

คำสำคัญ : ข้าวกล้อง, อบแห้ง, ตั้มประสิทธิภาพแพร่, ไฟไนต์อีลิเมนต์, แตกร้าว

### Abstract

The research studied the effect of the fluidized bed drying technique on drying kinetics and fissure of rice kernel (Suphan Buri 1) using hot air at drying temperature range of 85-130°C. The three-dimensional mathematical model was developed to simulate the evolutions of the moisture content, temperature and stresses within rice kernel during drying. The simulated moisture content and temperature of rice gain were favorably in agreement with experimental results. The simulation results showed that the maximum moisture and temperature gradients within rice kernel occurred at the drying times of 35 and 6 s, respectively. The moisture and temperature gradients were found to decrease with increase in drying time. The magnitude of moisture gradient was remarkably higher than the temperature gradient and thus the moisture gradient was a main cause of fissures in rice grains. The maximum stress was found near the middle region of kernel and had the value of stresses about 118 MPa.

**Keywords :** Brown rice, Drying, Effective Diffusivity, Finite Element, Cracking

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. บทนำ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถนำไปใช้ในการจำลองกระบวนการอบแห้งทั้งในแง่การจำลองการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิ ตลอดจนการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆ ของอาหารและวัสดุชีวภาพ ระหว่างการอบแห้ง การจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยแบบจำลองที่เหมาะสมจะช่วยให้ได้ข้อมูลจำนวนมากซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบกระบวนการหรือหาสภาวะเหมาะสมที่สุดในการอบแห้งวัสดุที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมยังอาจช่วยให้เกิดการเรียนรู้และเข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างการอบแห้งได้ดียิ่งขึ้น

Niamnuy และคณะ[1] ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร ตลอดจนการเปลี่ยนรูปของกึ่งในระหว่างการอบแห้งทำให้สามารถทำนายการกระจายความชื้นในกึ่ง ซึ่งนำไปสู่การเกิดความเค้นในกึ่งอันเนื่องจากการอบแห้ง (Drying-induced Stress) จากการกระจายความชื้นที่ไม่สม่ำเสมอและการเปลี่ยนรูปที่ไม่เป็นอิสระของกึ่งระหว่างการอบแห้ง Srisang และคณะ[2] ศึกษาการแตกร้าวของเมล็ดข้าวในระหว่างการอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดด้วยอากาศร้อนอุณหภูมิ 90-150°C ด้วยการพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ 3 มิติ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความเค้นจะเพิ่มขึ้นและกระจายครอบคลุมเมล็ดข้าวโดยความเค้นเกิดสูงสุดที่ตอนกลางเมล็ดเนื่องมีค่าสูงกว่าค่าความแข็งแรงวิบัติ

การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไรซ์เบดที่อุณหภูมิสูงแม้จะให้อัตราการอบแห้งที่สูง แต่ทำให้เมล็ดข้าวเกิดการแตกร้าว ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก และเป็นสมบัติที่ไม่พึงประสงค์สำหรับผู้บริโภค การศึกษาปัจจัยของการแตกร้าวที่เกิดขึ้นจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจึงอาจช่วยลดปัญหาดังกล่าว

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งข้าวกล้องด้วยเทคนิคฟลูอิดไรซ์เบดเพื่อทำนายความชื้นและอุณหภูมิของเมล็ดข้าวและทำนาย

ความเค้นที่เกิดขึ้นภายในเมล็ดข้าวในระหว่างกระบวนการอบแห้ง

## 2. อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

นำข้าวสายพันธุ์สุพรรณบุรี 1 ที่มีความชื้นประมาณ 11 %dry basis เก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4°C ก่อนนำไปทดลอง นำข้าวมากระเทาะเปลือกให้เป็นข้าวกล้อง แล้วแช่น้ำอุณหภูมิ 35-37°C เปลี่ยนน้ำทุก 4 ชั่วโมงจนกระทั่งครบ 36 ชั่วโมง จะเกิดข้าวกล้องงอกหลังจากกระบวนการนี้ข้าวจะมีความชื้น 52 %dry basis จากนั้นนำข้าวกล้องงอกมาอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 85, 100 และ 130°C ที่ความสูงเบด 8 cm ความเร็วของอากาศอบแห้ง 3.5 m/s

นำข้าวออกจากเครื่องอบแห้งที่เวลาต่างๆ แบ่งไปหาปริมาณความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดโดยการใส่ตัวอย่างเข้าไปในภาชนะปิดที่หุ้มฉนวนและสอดสายเทอร์โมคัปเปิลเข้าไปภายในเพื่อวัดอุณหภูมิ หลังจากความชื้นลดลงถึงระดับ 19-20 % dry basis นำข้าวกล้องงอกเก็บในขวดโหล 30 นาที เพื่อลดความแตกต่างความชื้น และเป่าด้วยอากาศแวดล้อมอีก 30 นาที จนความชื้นลดลงถึงระดับ 13-15 %dry basis

## 3. แบบจำลองคณิตศาสตร์

เมล็ดข้าวในแบบจำลองเป็นรูปทรงรี (Prolate spheroid) เมล็ดข้าวมีขนาดความยาว กว้าง และหนา เท่ากับ 7.58, 2.21 และ 1.71 mm ตามลำดับ โดยตำแหน่งจุดศูนย์กลางเมล็ดพิกัด x, y และ z มีค่าเท่ากับศูนย์ จำนวนเอลิเมนต์ของเมล็ดข้าวมีค่าเท่ากับ 9057 โดยจำนวนเอลิเมนต์เหล่านี้พิจารณาจากวิธี Mesh independent test กำหนดให้พื้นผิวของ mesh เป็น Triangular และปริมาตร mesh เป็นแบบ Tetrahedral

### 3.1 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร

สมการการถ่ายเทมวลของเมล็ดข้าวกล้องงอกสามารถแสดงได้ดังสมการกฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ (Fourier's law of conduction)

$$\rho_r C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

เมื่อ  $T$  คืออุณหภูมิของเมล็ดข้าว (K),  $k$  การนำความร้อนของเมล็ดข้าว (W/mK),  $\rho_r$  ความหนาแน่นของเมล็ดข้าว ( $\text{kg/m}^3$ ),  $C_p$  ค่าความร้อนจำเพาะ (kJ/kgK),  $t$  เวลา (s) สมการถ่ายเทมวลสารของเมล็ดข้าวแบบสามมิติสามารถอธิบายจากกฎข้อสองของฟิค (Fick's second law)

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{eff} \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{eff} \frac{\partial M}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{eff} \frac{\partial M}{\partial z} \right) \quad (2)$$

เมื่อ  $D_{eff}$  คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) และ  $M$  ความชื้น (dry basis) ในสภาวะเริ่มต้น (Initial condition) จะกำหนดให้อุณหภูมิและความชื้นภายในเมล็ดข้าวมีค่าคงที่ ซึ่งเขียนได้ดังนี้

$$t = 0, T = T_i = 25^\circ\text{C} \quad (3)$$

$$M = M_i = 0.52 \text{ kg.kg}^{-1} \text{ (dry basis)} \quad (4)$$

จากการสมดุลพลังงานพบว่า การพาความร้อนไปยังผิวเมล็ดจะเท่ากับการนำความร้อนเข้าสู่เมล็ดรวมกับการเปลี่ยนแปลงความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ สามารถเขียนสมดุลสมการเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) ได้ดังนี้

$$-k\nabla T = h_t(T_s - T_\infty) - \rho_d \lambda h_m(M_s - M_e) \quad (5)$$

เมื่อ  $\nabla$  คือ divergence operator,  $h_t$  สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$ ),  $T_s$  อุณหภูมิของผิวเมล็ด ( $^\circ\text{C}$ ),  $T_\infty$  อุณหภูมิอากาศแวดล้อม ( $^\circ\text{C}$ ),  $\rho_d$  ความหนาแน่นของเมล็ดข้าวแห้ง ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\lambda$  ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ (J/kg),  $h_m$  สัมประสิทธิ์การพามวล (m/s),  $M_s$  ความชื้นที่ผิววัสดุ ( $\text{kg/kg d.b.}$ ),  $M_e$  ความชื้นสมดุล ( $\text{kg/kg d.b.}$ ) เงื่อนไขขอบเขตสำหรับวิเคราะห์ฟลักซ์ของความชื้นที่เคลื่อนออกจากผิวเมล็ดไปยังอากาศแวดล้อมด้วยการพาความชื้นเขียนได้ดังนี้

$$-D_{eff}\nabla M = h_m(M_s - M_e) \quad (6)$$

### 3.2 การคำนวณความเค้นภายในเมล็ดข้าว

การกระจัดรวม (Total Displacement) หรือการเคลื่อนที่โดยรวมของจุดใดจุดหนึ่งในชิ้นอาหารระหว่างขึ้นเวลาของการคำนวณแสดงได้ดังสมการที่ (7)

$$\{dU\} = \begin{Bmatrix} dU_x \\ dU_y \\ dU_z \end{Bmatrix} \quad (7)$$

ในขณะที่ความเครียดรวม (Total Strain) เป็นฟังก์ชันของความเครียดเชิงกล (Mechanical Strain) อันเป็นผลมาจากความยืดหยุ่นของเมล็ดข้าว และความเครียดเนื่องจากการหดตัวที่ตำแหน่งใดๆ แสดงได้ดังสมการ (8) [3]

$$\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon^p\} + \{d\varepsilon^d\} \quad (8)$$

เมื่อ  $d\varepsilon$  คือ Total strain,  $d\varepsilon^p$  คือ Mechanical strain และ  $d\varepsilon^d$  คือ Non-mechanical strain ความเครียดรวมมีความสัมพันธ์กับการกระจัดรวมดังสมการที่ (9)

$$\{d\varepsilon\} = [A][\Lambda]\{dn\} = [B]\{dn\} \quad (9)$$

โดยที่  $[B] = [A][\Lambda]$ ,  $[A]$  คือเมทริกซ์ความเครียดเปลี่ยนรูป  $\{dn\}$  คือผลรวมของการกระจัดของแต่ละโหนด  $[\Lambda]$  คือเมทริกซ์ฟังก์ชันรูปร่างของแต่ละโหนด ใช้สมการที่ (10) เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้น (Stress;  $\sigma$ ) ในเมล็ดข้าว

$$d\sigma_{ij} = \frac{E_y}{1+\nu} \left[ d\varepsilon_{ij}^p + \frac{\nu}{1-2\nu} (d\varepsilon_{xx}^p + d\varepsilon_{yy}^p + d\varepsilon_{zz}^p) \delta_{ij} \right] \quad (10)$$

$$i, j = x, y, z$$

โดย  $\nu$  คืออัตราส่วนปัวซอง (Poisson Ratio) นอกจากนี้ยังอาจแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\{d\varepsilon^d\}$  กับค่าสัมประสิทธิ์การหดตัวเชิงเส้นได้ดังต่อไปนี้ [3]

$$\{d\varepsilon^d\} = \begin{Bmatrix} d\varepsilon^d \\ d\varepsilon^d \\ d\varepsilon^d \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}, d\varepsilon^d = S_V^{1/3} \quad (11)$$

โดยที่  $S_V$  คือค่าสัมประสิทธิ์การหดตัวเชิงเส้น (Linear Shrinkage Coefficient) ซึ่งหาได้จากการทดลอง และมีความสัมพันธ์กับปริมาตรของชิ้นอาหารที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาในการอบแห้ง ดังสมการ (12)

$$S_V = \frac{V_t}{V_0} \quad (12)$$

โดย  $V_t$  คือปริมาตรของวัสดุอบแห้งที่เวลาใดๆ ( $\text{m}^3$ ) และ  $V_0$  คือปริมาตรของวัสดุอบแห้งที่เวลาเริ่มต้น ( $\text{m}^3$ ) สำหรับการประมาณค่าความเครียดเชิงกลนั้น ใช้หลักการงาน

เสมือน (Virtual Work Principle) อาจคำนวณหา  $\{d\varepsilon^P\}$  ได้จากสมการ

$$\int_V \delta \{d\varepsilon^P\}^T \{d\sigma\} dV = 0 \quad (13)$$

หรือสมการ

$$\int_V [B]^T [D][B] dV \{dn\} = \int_V [B]^T [D] \{d\varepsilon^d\} dV \quad (14)$$

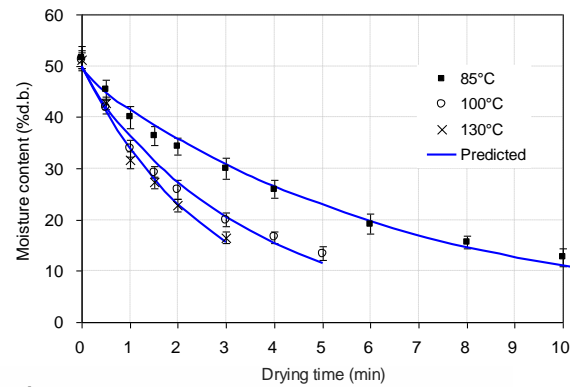
โดยที่  $[D]$  คือเมทริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของวัสดุยืดหยุ่น (Elastic Stress-Strain Matrix) ในการคำนวณจะเริ่มโดยการแก้สมการ (14) เพื่อคำนวณหา  $\{dn\}$  จากนั้นจึงใช้สมการที่ (9) ในการหา  $\{d\varepsilon\}$  แล้วจึงใช้สมการที่ (8) ในการหา  $\{d\varepsilon^P\}$  เพื่อนำไปใช้ในสมการที่ (10) สำหรับการคำนวณหาสนามความเค้นในเมล็ดข้าว ส่วนการคำนวณหาการกระจายตัวของจุดใดจุดหนึ่งในชิ้นอาหารนั้นใช้การแก้สมการ  $\{dU\} = [\Delta]\{dn\}$  งานวิจัยนี้หาคำตอบสมการโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ส่วนตัวแปรค่าสมบัติทางความร้อนของอากาศและค่าสมบัติทางความร้อนและทางกายภาพของข้าวที่ใช้ในแบบจำลองสามารถสืบค้นจากงานวิจัยของ Prakotmak [4]

### 3.3 สมมติฐานของแบบจำลองคณิตศาสตร์

1. เมล็ดข้าวเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous material) และมีสมบัติเป็น Isotropic material
2. ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดในเมล็ดข้าวเป็นแบบเชิงเส้น (Hook's equation) และเป็นวัสดุอีลาสติก (Elastic material)
3. การแตกร้าวของเมล็ดข้าวเกิดขึ้นเมื่อความเค้นภายในมีค่าสูงกว่าความแข็งแรงดึงวิบัติ (Failure tensile strength)
4. การถ่ายเทมวลภายในเมล็ดข้าวเกิดจากการแพร่ของน้ำและการพาความร้อนที่เกิดขึ้นที่ผิวของเมล็ดข้าว

### 4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

รูปที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบจลนศาสตร์การอบแห้งข้าวที่อุณหภูมิ 85, 100 และ 130°C พบว่าอัตราการอบแห้งมีค่าแปรผันตามระดับอุณหภูมิในการอบแห้ง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความชื้นภายในเมล็ดข้าวจะลดลงเร็วขึ้น ค่าของความชื้นเฉลี่ยที่อุณหภูมิต่างๆ มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ )



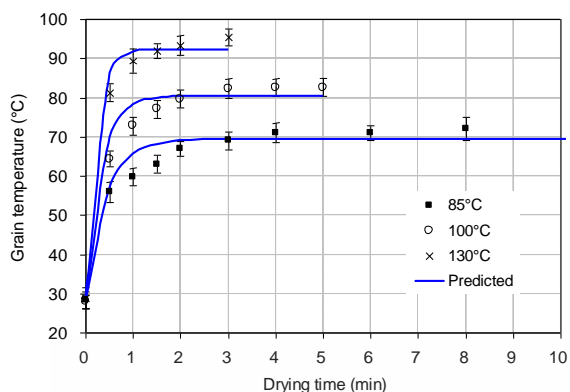
รูปที่ 1 จลนศาสตร์การอบแห้งข้าวกล้องที่อุณหภูมิต่างกัน เส้นทึบแทนการทำนายจากแบบจำลอง

จากรูปที่ 1 พบว่าในช่วง 1-3 นาทีแรก การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ การถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างข้าวและอากาศเกิดขึ้นเฉพาะที่รอบๆ ผิวเท่านั้น หลังจากนั้นเมื่อความชื้นลดลงน้อยกว่า 20% d.b. ซึ่งเป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง การถ่ายเทความร้อนและมวลเกิดภายในเมล็ดข้าว การเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในวัสดุมายังผิวช้ากว่าการพาความร้อนขึ้นจากผิวไปยังอากาศ ทำให้การลดลงของความชื้นจะช้าลงกว่าช่วงแรก [4] ต่อจากนั้นความชื้นยังคงลดลงเรื่อยๆ จนถึงถึงความชื้นสมดุล

รูปที่ 2 พบว่า อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 1 นาทีแรก จากการทดลองอุณหภูมิอากาศร้อน 130°C, 100°C และ 85°C ใช้ระยะเวลาประมาณ 3, 5 และ 8 นาที อุณหภูมิเมล็ดข้าวจะเริ่มคงที่ โดยอุณหภูมิเมล็ดจะมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งประมาณ 15-35°C เนื่องจากความร้อนสูญเสียในรูปแบบต่างๆ จากรูปที่ 1 และ 2 พบว่าการทำนายเส้นแนวโน้มของความชื้นและอุณหภูมิมีความใกล้เคียงกับผลการทดลอง ( $R^2 = 0.98$ )

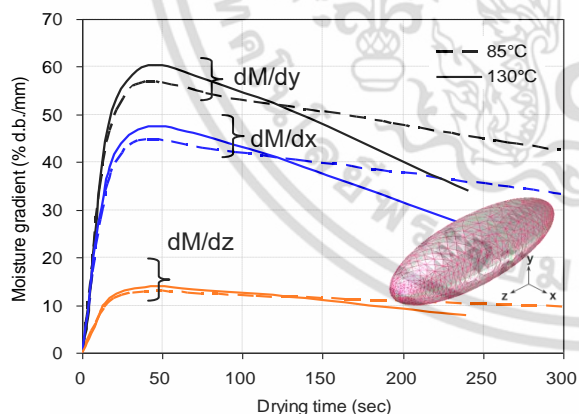
รูปที่ 3 แสดงเกรเดียนต์ความชื้นตามแกน x, y และ z พบว่าเกรเดียนต์ความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นการอบแห้งโดยเพิ่มจนมีค่าสูงสุดที่เวลาประมาณ 35 วินาทีเนื่องจากช่วงเริ่มต้นอบแห้งมีความแตกต่างของความชื้นระหว่างภายในและผิวเมล็ด เมื่ออบแห้งต่อไปน้ำระเหยออกจากเมล็ดข้าวมากขึ้นทำให้ค่าความแตกต่างของความชื้นจะลดลง ทำให้เกรเดียนต์ความชื้นลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 85 เป็น 130°C ค่าเกรเดียนต์ ความชื้นจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอบแห้งที่เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 อุณหภูมิเฉลี่ยของเมล็ดข้าวกล้อง เส้นทึบทำนาย ด้วยแบบจำลอง

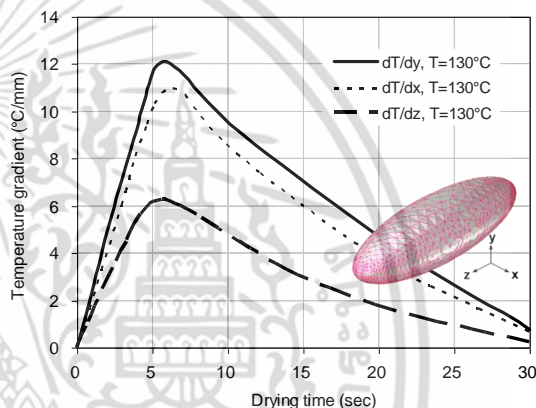
ค่าเกรเดียนต์ความชื้นตามแนวแกน x และ y ( $dM/dx$  และ  $dM/dy$ ) มีค่าสูงกว่าแกน z ( $dM/dz$ ) เนื่องจากระยะในแกน x และ y สั้นกว่าระยะในแกน z ทำให้เกรเดียนต์ความชื้นตามแกน x และ y มีค่ามากกว่าเกรเดียนต์ความชื้นตามแกน z สอดคล้องกับการทดลองของ Yang และคณะ [5] และ Srisang และคณะ [2] ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบสองมิติเพื่อศึกษาเกรเดียนต์ความชื้นในแนวแกนยาวและแนวขวางของเมล็ด พบว่าเกรเดียนต์ความชื้นตามแนวแกนยาวมีค่าน้อยกว่าเกรเดียนต์ความชื้นตามแนวแกนขวางของเมล็ด



รูปที่ 3 เกรเดียนต์ความชื้นตามแกน x, y และ z ( $dM/dx$ ,  $dM/dy$  และ  $dM/dz$  ตามลำดับ) ที่อุณหภูมิ 85 และ 130°C

รูปที่ 4 พบว่า เกรเดียนต์อุณหภูมิมีค่าสูงสุดที่เวลา 6 วินาที เนื่องจากในช่วงแรกอุณหภูมิมิเมล็ดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากการสัมผัสอากาศร้อน ซึ่งความร้อนยังไม่แพร่ไม่ถึงแกนกลางเมล็ดทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิตามระยะการแพร่จากภายนอกสู่ภายในเมล็ด โดย

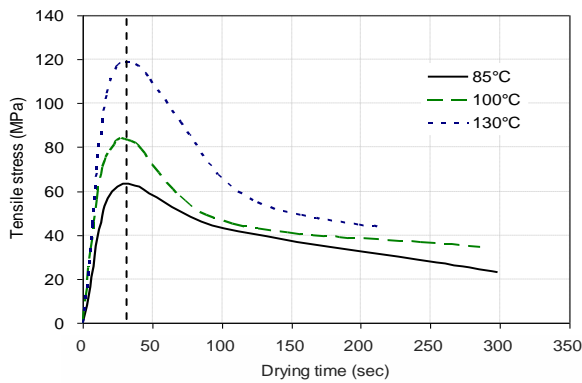
แกน y เป็นแกนที่สั้นที่สุดจะเกิดเกรเดียนต์ของอุณหภูมิมากที่สุด เมื่ออบแห้งไปต่อไปจนถึง 30 วินาที เกรเดียนต์อุณหภูมิมิมีค่าต่ำเพียง 1.5°C/mm แต่เกรเดียนต์ความชื้นยังคงมีค่าสูงมากกว่า 10-48% d.b./mm หลังจากอบแห้งไป 200 วินาที (รูปที่ 3) ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าเกรเดียนต์ความชื้นภายในเมล็ดข้าวน่าจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความเค้นในเมล็ด และเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เมล็ดข้าวแตกร้าว การแตกร้าวของเมล็ดข้าวเกิดขึ้นเมื่อความเค้นดึงมีค่ามากกว่าความแข็งแรงดึงวิบัติซึ่งมีค่าเท่ากับ 51 MPa [6] ช่วงเริ่มต้นการอบแห้งความเค้นภายในเมล็ดข้าวมีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องจากค่าความชื้นภายในเมล็ดที่เท่ากัน



รูปที่ 4 เกรเดียนต์อุณหภูมิในแกน x, y, และ z ของเมล็ดที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาการอบแห้งที่  $T=130^\circ\text{C}$

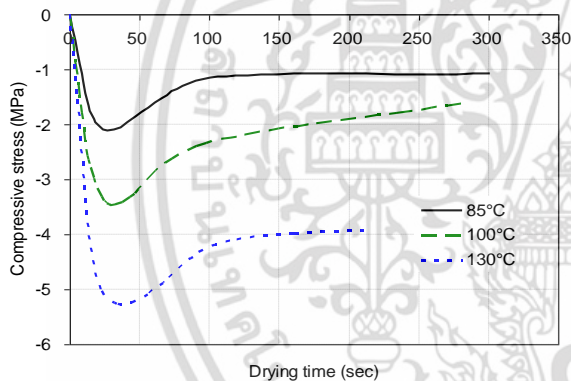
รูปที่ 5 พบว่าความเค้นภายในเมล็ดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการอบแห้งและมีค่าความเค้นสูงสุดที่เวลา 35 วินาที แล้วค่อยๆ ลดลงตามเวลาการอบแห้ง ค่าความเค้นภายในเมล็ดเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิมอบแห้งที่สูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิมิที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้เกรเดียนต์ความชื้นภายในเมล็ดเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณารูปที่ 5 และ 6 ซึ่งแสดงค่าความเค้นดึงและความเค้นอัดที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาการอบแห้ง พบว่าที่อุณหภูมิมอบแห้ง 130°C เวลาอบแห้ง 35 วินาทีที่มีค่าความเค้นดึงและความเค้นอัดต่ำสุดเท่ากับ 118 และ -5.2 MPa ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิมอบแห้งลดลงเป็น 85°C ที่เวลาอบแห้งเดียวกัน มีค่าความเค้นดึงและความเค้นอัดลดลงเหลือ 63 และ -2.1 MPa ตามลำดับ



รูปที่ 5 ความเค้นดึงภายในเมล็ดข้าวที่อุณหภูมิต่างๆ

Jia และคณะ [7] อธิบายการเปลี่ยนแปลงความเค้นในการอบแห้งข้าวว่าความเค้นดึงที่เกิดบริเวณผิวเมล็ดและความเค้นอัดบริเวณแกนกลางเมล็ด เกิดขึ้นมากที่สุดในช่วงเริ่มต้นการอบแห้ง หลังจากนั้นความเค้นลดลงตามระยะเวลาการอบแห้ง



รูปที่ 6 ความเค้นอัดภายในเมล็ดข้าวที่อุณหภูมิต่างๆ

จากผลการจำลองที่อุณหภูมิ 130°C ที่เวลา 35 วินาที ทำให้ทราบว่าบริเวณที่มีปริมาณความเค้นดึงมากกว่าความแข็งแรงดึงวิบัติของเมล็ดข้าวเกิดขึ้นเป็นส่วนใหญ่ที่บริเวณกลางเมล็ดซึ่งความเค้นดึงที่เกิดขึ้นมีค่าอยู่ในช่วง 100-118 MPa ส่งผลให้มีแนวโน้มที่จะเกิดการแตกร้าวบริเวณกลางเมล็ดมากกว่าบริเวณอื่นสำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 85, 100 และ 130°C เกิดความเค้นกระจายครอบคลุมเกือบทั้งเมล็ดในช่วง 35 วินาทีแรกของการอบแห้งโดยขนาดความเค้นมีค่าสูงกว่า 51 MPa ทำให้น่าจะเกิดการแตกร้าวครอบคลุมเกือบทั้งเมล็ดเช่นกัน

## 5. สรุป

แบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถทำนายความชื้นและอุณหภูมิภายในเมล็ดข้าวกล้องได้ดี ( $R^2 > 0.98$ ) ผลการจำลองทำให้ทราบว่าในระหว่างการอบแห้ง เกรเดียนต์ของอุณหภูมิมีค่าสูงสุดที่เวลา 6 วินาทีและเกรเดียนต์ของความชื้นภายในเมล็ดมีค่าสูงสุดที่ 35 วินาที เกรเดียนต์ความชื้นเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดความเค้นบริเวณกลางเมล็ดซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าความแข็งแรงวิบัติ ทำให้มีผลกระทบต่อการแตกร้าวของเมล็ดข้าวมากกว่าเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกลุ่มวิจัยอบแห้งขั้นสูงสำหรับอาหารและวัสดุชีวภาพ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มจร. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Niamnuy, S. Devahastin, S. Soponronnarit, and G.S. Raghavan, "Modeling Coupled Transport Phenomena and Mechanical Deformation of Shrimp during Drying in a Jet Spouted Bed Dryer," *Chemical Engineering Science*, vol. 63, pp. 5503-5512, 2008.
- [2] N. Srisang, S. Soponronnarit and S. Prachayawarakorn, "Drying of Germinated Brown Rice by Fluidized Bed Technique," Thesis, KMUTT, 2011.
- [3] T. Tsukada, N. Sakai and K. Hayakawa, "Computerized Model for Strain-stress Analysis of Food Undergoing Simultaneous Heat and Mass Transfer," *Journal of Food Science*, vol. 56, pp. 1438-1445, 1991.
- [4] P. Prakotmak, "Modeling Coupled Transport Phenomena and Mechanical Deformation of Rice during Drying in Fluidized-bed Dryer," in *Proceeding of MENETT'28*, 2014.
- [5] W. Yang, C.C. Jia, T.J. Siebenmorgen, T.A. Howell and A.G. Cnossen, "Intra-kernel Moisture and Temperature Response of Rice to Drying and Tempering Treatments by Finite Element Simulation," *Transactions of the American Society*

- of Agricultural Engineers, vol. 45, pp. 1037-1044, 2002.
- [6] K.W. Lee and O.R. Kunze, "Temperature and Moisture Effects on Mechanical Properties of rice," The American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, MI., Paper No. 72-338, 1972.
- [7] C.C. Jia, W. Yang, T.J. Siebenmorgen, R.C. Bautisa and A.G. Clossen, "A Study of Rice Fissuring by Finite-element Simulation of Internal Stresses Combined with High-speed Microscopy Imaging of Fissure Appearance," Transaction of the American Society of Agricultural Engineers, vol. 45(3), pp. 741-749, 2002.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้