

การศึกษาเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของการอบแห้งข้าวโพด

Comparative Study of Mathematical Models of Corn Drying

อดิศักดิ์ นาทกรณกุล¹ และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์¹

Adisak Nothakoranakule¹ and Somchart Soponronnarit¹

ABSTRACT

The comparison among the results obtained from two corn drying mathematical models: non-equilibrium model and near-equilibrium model and the one obtained from the experiments was studied. The experiments comprised three strategies: 1) Low air flow rate, high temperature, LFHT (5.5-26.0 m³/min-m³ of corn, 60-90°C) 2) Low air flow rate, low temperature, LFLT (5.5-26.0 m³/min-m³ of corn, 45-55°C) 3) High air flow rate, low temperature, HFLT (30.0-45.0 m³/min-m³ of corn, 45-55°C). Results are described.

The simulated moisture contents obtained from the non-equilibrium model were close to those of experiments in case of LFLT but they were not agreeable very well in cases of LFHT and HFLT. The simulated moisture contents obtained from the near-equilibrium model were a little bit lower than those obtained from the non-equilibrium model in cases of LFHT and LFLT and were nearly the same in case of HFLT. The temperatures calculated from both models were nearly the same but were higher than those of experiments for all drying strategies. The near equilibrium model was more interest to use than the non-equilibrium model because of small difference of results and much less computer time spending about 5 times.

บทคัดย่อ

จากการเปรียบเทียบอุณหภูมิและความชื้นของเมล็ดข้าวโพด ที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบไม่สมดุล แบบจำลองแบบใกล้สมดุล และจากการทดลองโดยใช้อัตราการไหลของอากาศต่ำ, อุณหภูมิสูง, LFHT (5.5-26.0 m³/min-m³, 60-90 °C) อัตราการไหลของอากาศต่ำ, อุณหภูมิต่ำ, LFLT (5.5-26.0 m³/min-m³, 45-55 °C) และและอัตราการไหลของอากาศสูง, อุณหภูมิต่ำ, HFLT (30.0-45.0 m³/min-m³, 45-55 °C) สรุปได้ว่า

แบบจำลองแบบไม่สมดุลทำนายความชื้นของเมล็ดข้าวโพดได้ใกล้เคียงกับผลการทดลอง เมื่อใช้

การอบแห้งแบบ LFLT แต่ไม่ค่อยถูกต้องนักสำหรับการอบแห้งแบบ LFHT และ HFLT ความชื้นที่คำนวณได้จากแบบจำลองแบบใกล้สมดุลมีค่าต่ำกว่าความชื้นที่คำนวณได้จากแบบจำลองแบบไม่สมดุลเล็กน้อยในการอบแห้งแบบ LFHT และ LFLT และแบบจำลองทั้งสองให้ผลใกล้เคียงกันมากเมื่ออัตราการไหลของอากาศสูง อุณหภูมิของเมล็ดข้าวโพดที่คำนวณได้จากแบบจำลองทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง แบบจำลองทั้งสองแบบทำนายอุณหภูมิของเมล็ดข้าวโพดได้ไม่ถูกต้อง โดยเฉพาะในชั้นบน ๆ มีค่าสูงกว่าของการทดลอง แบบจำลองแบบใกล้สมดุลเหมาะสม

¹ คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

School of Energy and Materials, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi.

ที่จะใช้มากกว่าแบบจำลองแบบไม่สมดุลในทุกกรณีของการอบแห้ง เพราะผลที่ได้แตกต่างกันเล็กน้อย แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณโดยคอมพิวเตอร์แตกต่างกันประมาณ 5 เท่า

คำนำ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งเมล็ดพืชเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นของอากาศและของเมล็ดพืชระหว่างการอบแห้ง และช่วยกำหนดเงื่อนไขการอบแห้งที่เหมาะสม แบบจำลองที่ดีจะต้องทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นทั้งของอากาศและเมล็ดพืชได้ใกล้เคียงกับผลการทดลอง และใช้เวลาในการคำนวณโดยเครื่องคอมพิวเตอร์ต่ำ Hukill (1947) ได้สร้างแบบจำลองลอการิทึมมิก (Logarithmic model) และพัฒนาต่อโดย Barre *et al.* (1971) โดยสมมติว่า ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำในเมล็ดพืชในชั้นบางที่ตำแหน่งใด ๆ ในเครื่องอบแห้งมีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงของความร้อนสัมผัสของอากาศที่ไหลผ่านเมล็ดพืชในชั้นบางนั้น แบบจำลองนี้มีความยุ่งยากน้อย และทำนายการอบแห้งได้ถูกต้องพอควร แต่ไม่ได้คำนึงถึงผลของอุณหภูมิของเมล็ดพืชขณะเริ่มอบแห้งซึ่งอาจสูงหรือต่ำกว่าอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านเครื่องอบแห้ง นอกจากนี้สภาวะอากาศอบแห้งที่ใช้ต้องคงที่และความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดพืชในแต่ละชั้นต้องเท่ากัน Brooker *et al.* (1974) ได้สร้างแบบจำลองแบบไม่สมดุล คือไม่มีสมดุลทางความร้อนและความชื้นระหว่างอากาศอบแห้งและเมล็ดพืช ซึ่งค่อนข้างยุ่งยาก และเวลาที่ใช้ในการคำนวณโดยคอมพิวเตอร์จะสูงมาก ต่อมา Bakker-Arkema *et al.* (1978) ได้พัฒนาแบบจำลองแบบไม่สมดุลของ Brooker *et al.* (1974) ให้ง่ายขึ้นโดยสมมติว่าเกิดสมดุลทางความร้อนระหว่างอากาศอบแห้งและเมล็ดพืช เรียกว่าแบบจำลองแบบใกล้เคียงสมดุล เวลาที่ใช้ในการคำนวณโดยคอมพิวเตอร์

น้อยกว่าเดิมมาก Soponronnarit (1988) ได้สร้างแบบจำลองแบบใกล้เคียงสมดุล ซึ่งดัดแปลงจากแบบจำลองของ Thompson *et al.* (1968) เล็กน้อย แบบจำลองนี้ใช้ได้เมื่อใช้อุณหภูมิและอัตราการไหลของอากาศอบแห้งต่ำ Thompson *et al.* (1968) เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งทางทฤษฎีโดยคำนวณจากแบบจำลองแบบใกล้เคียงสมดุล และอัตราการอบแห้งจากผลการทดลองที่ได้จากเครื่องอบแห้งขนาดเล็กแบบไหลขวาง ไหลตาม และไหลสวนทาง พบว่าผลการทดลองและผลทางทฤษฎีมีค่าใกล้เคียงกัน Soponronnarit and Peyre (1982) จำลองแบบการอบแห้งข้าวฟ่างแบบถังเก็บที่อุณหภูมิและอัตราการไหลของอากาศต่ำ โดยใช้แบบจำลองของ Barre *et al.* (1971), Bakker-Arkema *et al.* (1978) และ Thompson *et al.* (1968) เปรียบเทียบกับการทดลอง พบว่า แบบจำลองทั้งสามให้ผลใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับผลการทดลอง โดยที่อัตราการอบแห้งเฉลี่ยของแบบจำลองทั้งสามสูงกว่าอัตราการอบแห้งจากผลการทดลองเล็กน้อย Bowden *et al.* (1983) จำลองแบบการอบแห้งข้าวบาร์เลย์ในถังเก็บซึ่งใช้อัตราการไหลและอุณหภูมิอากาศต่ำ โดยใช้แบบจำลองของแบบไม่สมดุลซึ่งคล้ายกับแบบจำลองแบบใกล้เคียงสมดุลของ Brooker *et al.* (1974), แบบจำลองแบบใกล้เคียงสมดุลซึ่งคล้ายกับของ Soponronnarit (1988), แบบจำลองลอการิทึมมิก และแบบจำลองแบบสมดุลของ Bowden *et al.* (1983) แล้วนำผลที่ได้จากแบบจำลองต่าง ๆ เปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบว่า แบบจำลองแบบไม่สมดุล แบบใกล้เคียงสมดุล และแบบลอการิทึมมิก สามารถทำนายผลการอบแห้งได้ดีพอๆกัน แต่โซนการอบแห้งของแบบจำลองแบบใกล้เคียงสมดุลและแบบลอการิทึมมิกแคบกว่าของแบบจำลองแบบไม่สมดุล ซึ่งเป็นผลจากการอบแห้งที่มากเกินไปในชั้นล่างทำให้ความสามารถในการอบแห้งชั้นบนเกิดขึ้นน้อย ส่วนแบบจำลองแบบสมดุลไม่สามารถทำนายการอบแห้งได้ดีนัก

วิธีการ

1. การทดลอง

การทดลองอบแห้งข้าวโพดแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ การอบแห้งแบบใช้อัตราการไหลของอากาศต่ำ อุณหภูมิสูง, LFHT (5.5-26.0 m³/min-m³, 60-90 °C), การอบแห้งแบบใช้อัตราการไหลของอากาศต่ำ อุณหภูมิต่ำ, LFLT (5.5-26.0 m³/min-m³ 45-55 °C) การอบแห้งแบบใช้อัตราการไหลของอากาศสูง อุณหภูมิต่ำ, HFLT (30.0-45.0 m³/min-m³, 45-55 °C) รายละเอียดแสดงอยู่ในอนุรักษ์ (2532)

ความชื้นของข้าวโพดหาได้โดยวิธีการใช้เตาอบ คือ อบในตู้ที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง อุณหภูมิวัดโดยเทอร์โมคัปเปิลซึ่งต่อเข้ากับ data

$$\partial T / \partial x = [h' a / (G_a c_a + G_a c_w W)] (T - \theta) \quad (1)$$

ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพาจากอากาศไปยังเมล็ดพืช มีค่าเท่ากับ ผลบวกของเอนทัลปีที่ใช้ในการทำให้เมล็ดพืชร้อน, เอนทัลปีที่ใช้ระเหยน้ำจาก

$$\partial \theta / \partial t = [h' a / (p_p c_p + p_p c_w M)] (T - \theta) - [h'_{fg} + c_v (T - \theta) / (p_p c_p + p_p c_w M)] G_a \partial W / \partial x \quad (2)$$

ความแตกต่างของน้ำที่พาไปโดยอากาศที่เข้าและออกจากปริมาตรบังคับ มีค่าเท่ากับ ความชื้น

$$\partial W / \partial x = -(p_p / G_a) \partial M / \partial t \quad (3)$$

ความชื้นที่เมล็ดพืชสูญเสียเป็นไปตามสมการ

$$\partial M / \partial t = (M_{in} - M_{eq}) * (6D / r_0^2) * [\exp(-\pi^2 Dt / r_0^2) + (\exp(-4\pi^2 Dt / r_0^2) + \exp(-9\pi^2 Dt / r_0^2))] \quad (4)$$

$$\text{เมื่อ } D = 0.1423 \exp[-4496 / (T + 273)]$$

ภาวะค่าขอบและภาวะเริ่มต้นมีดังนี้

$$T(0, t) = T(\text{inlet}) \quad T(x, 0) = T(\text{initial})$$

$$W(0, t) = W(\text{inlet}) \quad M(x, 0) = M(\text{initial})$$

เมื่อ

a = พื้นที่ของเมล็ดพืชที่สัมผัสกับอากาศ
ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของเมล็ดพืช
มีหน่วยเป็น m²/m³

logger มีความละเอียดในการวัด ± 1 °C ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหาจากอุณหภูมิกะเปาะแห้งและกะเปาะเปียก อัตราการไหลของอากาศวัดโดย hot wire anemometer ซึ่งวัดเทียบกับ pitot static tube แล้ว

2. แบบจำลองแบบไม่สมดุล

แบบจำลองแบบไม่สมดุลของ Brooker *et al.* (1974) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ไม่มีสมดุลทางความร้อนและความชื้นระหว่างเมล็ดพืชและอากาศที่ใช้ออบแห้งประกอบด้วยสมการ 4 สมการ ดังนี้

ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพาจากอากาศไปยังเมล็ดพืช เท่ากับ ความแตกต่างของเอนทัลปีของอากาศขณะเข้าและออกจากปริมาตรบังคับ เขียนเป็นสมการได้ว่า

เมล็ดพืช และเอนทัลปีที่ใช้ในการทำให้ไอน้ำที่ระเหยร้อนขึ้นในปริมาตรบังคับ เขียนเป็นสมการได้ว่า

ที่สูญเสียโดยเมล็ดพืชในปริมาตรบังคับ เขียนเป็นสมการได้ว่า

อบแห้งชั้นบางของ อรุณี และคณะ (2532)

c = ความร้อนจำเพาะ มีหน่วยเป็น kJ/kg °C

h' = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนในชั้นเมล็ดข้าวโพด มีหน่วยเป็น kJ/m² °C·h

h'_{fg} = ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำในเมล็ดพืช มีหน่วยเป็น kJ/kg

r₀ = รัศมี มีหน่วยเป็น m

t = เวลา มีหน่วยเป็น h
 x = ระยะ มีหน่วยเป็น m
 A = พื้นที่ มีหน่วยเป็น m^2
 D = สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น มีหน่วยเป็น m^2/h
 G = ฟลักซ์มวลปรากฏ มีหน่วยเป็น $kg/h \cdot m^2$
 $M(t)$ = ความชื้นเมล็ดพืชเฉลี่ย มีหน่วยเป็น decimal dry-basis
 $W(x)$ = อัตราส่วนความชื้น มีหน่วยเป็น kg น้ำ / kg อากาศแห้ง
 ρ = ความหนาแน่น มีหน่วยเป็น kg/m^3
 $T(x)$ = อุณหภูมิของอากาศ มีหน่วยเป็น $^{\circ}C$

$\theta(t)$ = อุณหภูมิของเมล็ดพืช มีหน่วยเป็น $^{\circ}C$
 สัญลักษณ์กำกับล่าง
 a = อากาศแห้ง, v = ไอน้ำ
 p = เมล็ดพืชแห้ง, w = น้ำ
 eq = สมดุล, in = เริ่มต้น

3. การหาคำตอบของแบบจำลองแบบไม่สมดุล

การแก้สมการของแบบจำลองแบบไม่สมดุลใช้วิธีเชิงเลขแบบ finite-difference quotients โดยแทนค่าอนุพันธ์ในสมการ (1), (2), (3) และ (4) ด้วย forward-difference approximation ได้สมการสำหรับหาอุณหภูมิอากาศ, อุณหภูมิเมล็ดข้าวโพด, อัตราส่วนความชื้นของอากาศ และความชื้นของเมล็ดข้าวโพด ที่เวลา $t+dt$ ในรูป

$$T[x+dx, t+dt] = [T[x, t+dt](2G_a c_a + 2G_a c_v W[x+1/2dx, t+dt] - h' adx) + \theta[x+1/2dx, t+dt](2h' adx)] / (2G_a c_a + 2G_a c_v W[x+1/2dx, t+dt] - h' adx) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \theta[x+1/2dx, t+dt] = & \theta[x+1/2dx, t] + \{h' adt \frac{(T[x+dx, t] + T[x, t])}{2} - \theta[x+1/2dx, t]\} \\ & + [h'_{fg} + c_v \frac{(T[x+dx, t] + T[x, t])}{2} - \theta[x+1/2dx, t]] \\ & * G_a dt \frac{(W[x+dx, t] - W[x, t])}{dx} / (p_p c_p + p_p c_w M[x+1/2dx, t]) \end{aligned} \quad (6)$$

$$W[x+dx, t+dt] = W[x, t+dt] - \frac{\rho_p dx}{G_a dt} (M[x+1/2dx, t+dt] - M[x+1/2dx, t]) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} M[x+1/2dx, t+dt] = & M[x+1/2dx, t] + dt(M_{in} - M_{eq}) * dif \\ dif = & (6D/r_0^2) * [\exp(-\pi^2 Dt/r_0^2) + \exp(-4\pi^2 Dt/r_0^2) + \exp(-9\pi^2 Dt/r_0^2)] \end{aligned} \quad (8)$$

ค่าของ dx และ dt จะมีผลกระทบต่อการแก้สมการ (5), (6), (7) และ (8) กล่าวคือ ถ้ามีค่ามากเกินไปจะหาคำตอบของสมการไม่ได้ เนื่องจากเกิด divergence หรือคำตอบที่ได้ผิดไปจากคำตอบที่แท้จริง แต่ถ้ากำหนดให้มีขนาดเล็กเกินไป

จะเสียเวลาในการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์มาก ดังนั้นก่อนคำนวณในแต่ละครั้งจะต้องหาค่า dx และ dt ที่เหมาะสม Bakker-Arkema *et al.* (1974) ได้หาไว้ดังนี้

$$dx < \frac{2G_a c_a + 2G_a c_v W[x+1/2dx]}{2h' a} \quad (9)$$

และ $dt < dx \frac{(\rho_p c_p + \rho_p c_w M[x+1/2dx, t])}{(G_a c_a + G_a c_v W[x+1/2dx, t])} \quad (10)$

วิธีการตรวจสอบการควบแน่นของไอน้ำ

ภายหลังจากการคำนวณค่าอุณหภูมิ (T) และอัตราส่วนความชื้น (W) ของอากาศอบแห้งในแต่ละชั้นบาง จะต้องตรวจสอบดูว่าค่าที่คำนวณได้เป็นไปได้หรือไม่ โดยคำนวณหาค่า RH จากค่า T และ W ที่คำนวณได้ ด้วยสมการคุณสมบัติของอากาศชื้น ถ้า $RH > 1$ จะต้องปรับค่า T และ W ใหม่ โดยใช้หลักการทรงมวลและหลักการทรงพลังงาน ดังรายละเอียดใน Soponronnarit (1986)

ขั้นตอนการคำนวณ

1. กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นก่อนการคำนวณ
2. กำหนดให้ $\theta[1,1] = (T_{inlet} + \theta_{initial})/2$ เพื่อให้เกิดเสถียรภาพ
3. กำหนดค่า dx จากสมการ (9)
4. กำหนดค่า dt จากสมการ (10)
5. เพิ่มเวลาในการคำนวณ $t = t + dt$
6. หาค่าความชื้นสมดุลจากสมการของ ออร์นี (2531)

$$M_{eq} = 1/100[\ln(1 - RH)/(-3.074 \cdot 10^{-5} \cdot (T + 273.16))]^{1/1.816} \quad (11)$$

โดยใช้อุณหภูมิ (T) และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้ง (RH) ที่เข้าสู่ชั้นบาง

7. แก่สมการ (8) เพื่อหาค่า $M[x + 1/2 dx, t + dt]$ โดยใช้ค่า M_{eq} ที่ได้จากข้อ 6

8. ใช้ค่า M ที่เวลา $t + dt$ จากข้อ 7 ในการแก้สมการ (7) เพื่อหาค่าอัตราส่วนความชื้นของอากาศอบแห้งที่ออกจากชั้นบางที่เวลา $t + dt$, $W[x + dx, t + dt]$

9. แก่สมการ (6) เพื่อหาค่าอุณหภูมิเมล็ดข้าวโพดที่เวลา $t + dt$, $\theta[x + 1/2 dx, t + dt]$ โดยใช้ค่า W ที่เวลา t

10. แก่สมการ (5) เพื่อหาค่า $T[x + dx, t + dt]$ โดยใช้ค่า θ ที่เวลา $t + dt$ จากข้อ 9

11. นำค่า $T[x + dx, t + dt]$ และ $W[x + dx, t + dt]$ ที่คำนวณได้จากข้อ 8 และ 10 ไปตรวจสอบการควบแน่นของไอน้ำ ค่า $T[x + dx, t + dt]$ และ $W[x + dx, t + dt]$ ที่ตรวจสอบแล้วจะเป็นค่า T และ W ที่เข้าสู่ชั้นบางถัดไป

12. เพิ่มค่าความหนาของชั้นเมล็ดข้าวโพด (x) ขึ้นอีกเป็นระยะ dx แล้วคำนวณซ้ำในหัวข้อ 6-11 จนถึงชั้นบนสุดของชั้นเมล็ดข้าวโพด

13. กลับไปเริ่มคำนวณใหม่ในหัวข้อ 4 จนเวลาอบแห้งเท่ากับเวลาอบแห้งที่ต้องการหรือความชื้นเมล็ดข้าวโพดเท่ากับค่าที่ต้องการ

4. แบบจำลองแบบใกล้สมดุล

แบบจำลองการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดแบบใกล้สมดุลที่ใช้ในการศึกษาเปรียบเทียบกับแบบจำลองแบบไม่สมดุล เป็นของ Soponronnarit (1988) การคำนวณการอบแห้งชั้นบางที่ตำแหน่งใด ๆ ในเครื่องอบแห้งที่ช่วงเวลาหนึ่ง มีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

1. คำนวณหาอุณหภูมิและความชื้นของเมล็ดข้าวโพดภายหลังสมดุลความร้อน

สมมติว่าอากาศชื้นตรงทางเข้าของชั้นบางจะสมดุลทางความร้อนกับเมล็ดข้าวโพดในชั้นนั้น จากกฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์ จะได้ว่า

$$c_a T_o + W_o(2502 + c_v T_o) + R c_p \theta_o = c_a T_{bd} + W_{bd}(2502 + c_v T_{bd}) + R c_p T_{bd} \quad (12)$$

โดยที่

T = อุณหภูมิของอากาศ, °C

θ = อุณหภูมิของเมล็ดข้าวโพด, °C

W = อัตราส่วนความชื้นของอากาศ, kg H_2O /kg dry air

R = อัตราส่วนของมวลของเมล็ดข้าวโพดแห้งต่อมวลของอากาศแห้ง, kg dry matter/kg dry air
($\rho_p dx$)/ $G_a dt$

ρ_p = ความหนาแน่นของเมล็ดข้าวโพด

dt = ช่วงเวลา, h

dx = ระยะทาง, m

G_a = ฟลักซ์มวลปรากฏ, $m^3/min \cdot m^3$ of corn

สัญลักษณ์กำกับล่าง

bd = ภาวะหลังสมดุลความร้อน

o = ภาวะก่อนอบแห้ง

จากสมการ (12) จะสามารถหาค่า T_{bd} ได้เมื่อรู้ค่าตัวแปรอื่น จากนั้นต้องนำค่า T_{bd} และ W_{bd}

$$M_f = (M_{in} - M_{eq}) \cdot d \cdot dt + M_{bd} \quad (13)$$

โดยที่
$$d = (6D/r_0^2) \cdot [\exp(-\pi^2 Dt/r_0^2) + \exp(-4\pi^2 Dt/r_0^2) + \exp(-9\pi^2 Dt/r_0^2)]$$

สัญลักษณ์กำกับล่าง f = ภาวะหลังการอบแห้ง

3. คำนวณสภาวะอากาศภายหลังการอบแห้งหรือดูดซับความชื้น

$$W_f - W_{bd} = (M_{bd} - M_f)R \quad (14)$$

$$c_a T_{bd} + W_{bd}(2502 + c_v T_{bd}) = c_a T_f + W_f(2502 + c_v T_f) + R c_{pw} T_f \quad (15)$$

จากนั้นตรวจสอบการควบแน่นของไอน้ำ แล้วดำเนินการคล้าย ๆ กับกรณีของแบบจำลองแบบไม่สมดุล ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

ผลและวิจารณ์

พิจารณาการอบแห้งแบบ LFLT เมื่อเปรียบเทียบความชื้นของเมล็ดข้าวโพดระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวโพดแบบไม่สมดุล กับผลการทดลอง ในช่วงการอบแห้ง ดังแสดงใน Figures 1-2 พบว่า ความชื้นจากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองแบบไม่สมดุลใกล้เคียงกับผลการทดลองในชั้นล่างของชั้นข้าวโพด (0-0.1 m) เมื่อความชื้นชั้นล่างสูงกว่า 14%wb เนื่องจากสมการอบแห้งชั้นบางที่ใช้มีความเหมาะสม แต่ในช่วงความชื้นที่ต่ำกว่า 14%wb ความชื้นที่ได้จากการทดลองจะต่ำกว่าแบบจำลองแบบไม่สมดุลประมาณ 1-2%wb ทั้งนี้เพราะสมการอบแห้งชั้นบางไม่เหมาะสมใน

ที่ได้ไปตรวจสอบการควบแน่นของไอน้ำ แล้วคำนวณความชื้นสมดุลโดยใช้สมการของอรุณี (2531) ซึ่งได้แสดงไว้แล้วในสมการ (11)

2. คำนวณหาความชื้นของเมล็ดข้าวโพดภายหลังการอบแห้ง

การคำนวณอัตราการอบแห้งชั้นบางจะใช้สมการอบแห้งชั้นบางของอรุณี และคณะ (2532) ดังแสดงไว้แล้วในสมการ (4) ซึ่งเขียนในรูป finite differences ได้ว่า

คุณสมบัติของอากาศภายหลังการอบแห้งหรือดูดซับความชื้น สามารถคำนวณได้โดยใช้หลักการทรงมวล และหลักการทรงพลังงาน ดังนี้

ช่วงนี้ (เป็นช่วงความชื้นที่ไม่มีการทดสอบ) ความชื้นจะแตกต่างกันมากขึ้นในชั้นกลาง (0.1-0.3 m) และชั้นบน (0.3-0.4) ในช่วงเป่าอากาศเย็น พบว่าความชื้นของเมล็ดข้าวโพดของการทดลองและของแบบจำลองยังคงลดลงอย่างช้า ๆ

เมื่อเปรียบเทียบความชื้นระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวโพดแบบไม่สมดุล กับแบบจำลองแบบใกล้เคียงสมดุล พบว่า ความชื้นที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองแบบใกล้เคียงสมดุลจะมีค่าต่ำกว่าแบบจำลองแบบไม่สมดุลเล็กน้อยเมื่อความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดข้าวโพดมีค่าต่ำและมากขึ้นเมื่อความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดข้าวโพดมีค่ามากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการอบแห้งที่ต่ำลงเมื่อเมล็ดข้าวโพดมีความชื้นต่ำ (เป็นการเปรียบเทียบของการทดลองครั้งอื่น ๆ ที่ไม่แสดงกราฟในที่นี้) เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิของเมล็ดข้าวโพดระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอบแห้งข้าวโพด

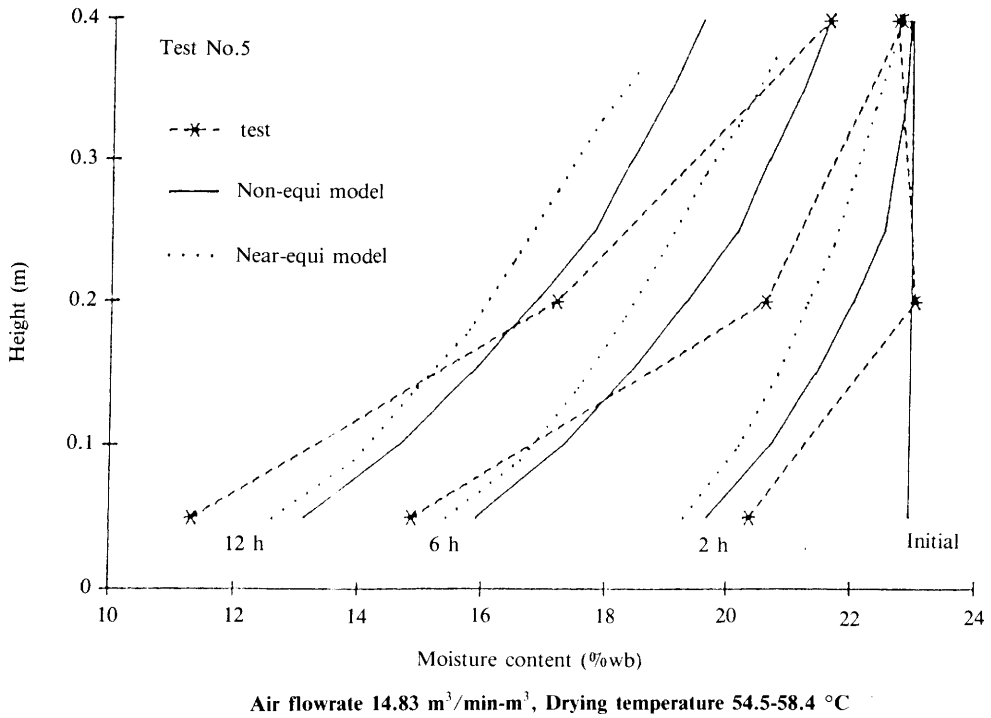


Figure 1 Corn moisture content at different height (2h, 6h, 12h) : Test No.5.

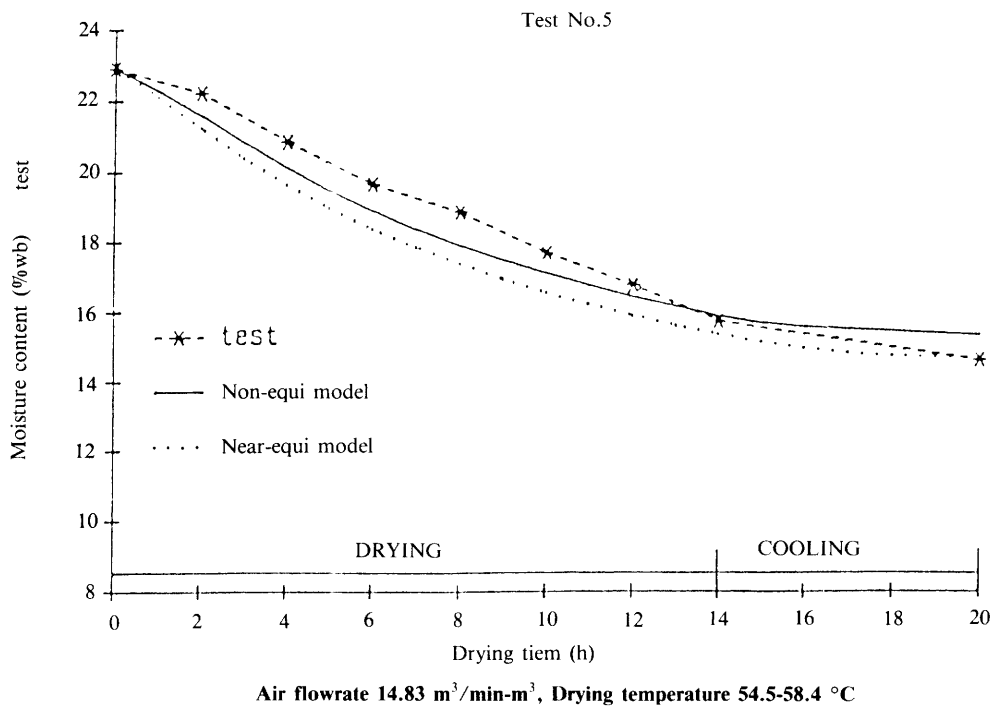
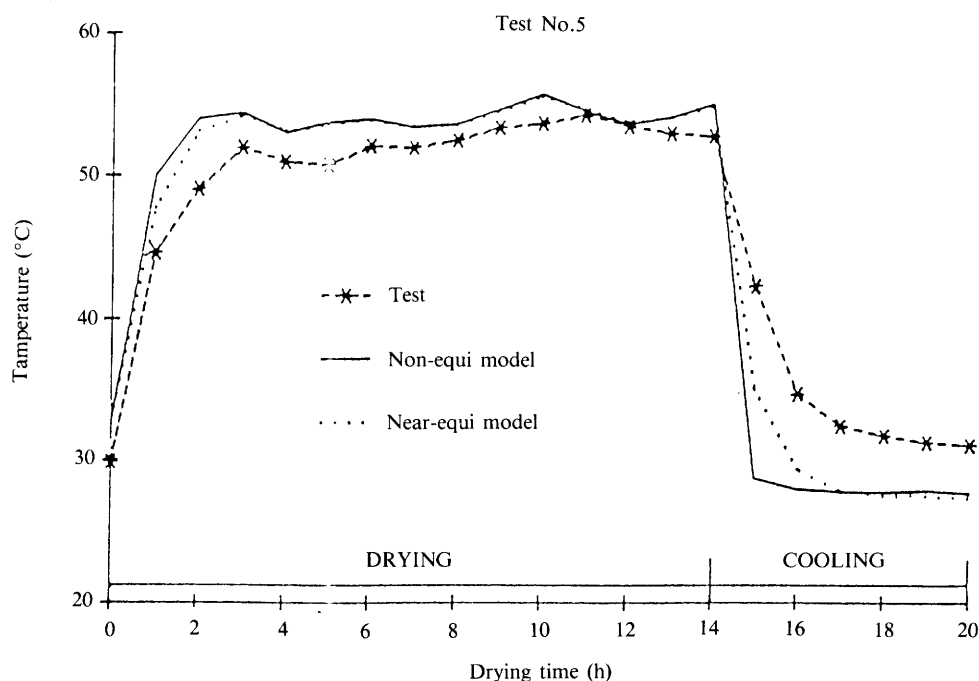


Figure 2 Evolution of mean moisture content of corn : Test No.5

แบบไม่สมดุลกับแบบจำลองแบบใกล้เคียงสมดุล และผลการทดลองในช่วงการอบแห้งดังแสดงใน Figures 3-5 พบว่า อุณหภูมิของเมล็ดข้าวโพดที่ได้จากการคำนวณโดยแบบจำลองแบบไม่สมดุลและใกล้เคียงสมดุลมีค่าใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับการทดลองในชั้นล่างของชั้นข้าวโพดและแตกต่างกันมากขึ้นในชั้นกลางและชั้นบนของชั้นข้าวโพด ซึ่งมีสาเหตุใหญ่จากการทำนายความชื้นผิดพลาด ในช่วงเป่าอากาศเย็น ในแต่ละชั้นของเมล็ดข้าวโพด พบว่า อุณหภูมิของเมล็ดข้าวโพดจากการทดลองมีอัตราการลดลงช้ากว่าแบบจำลองทั้งสอง

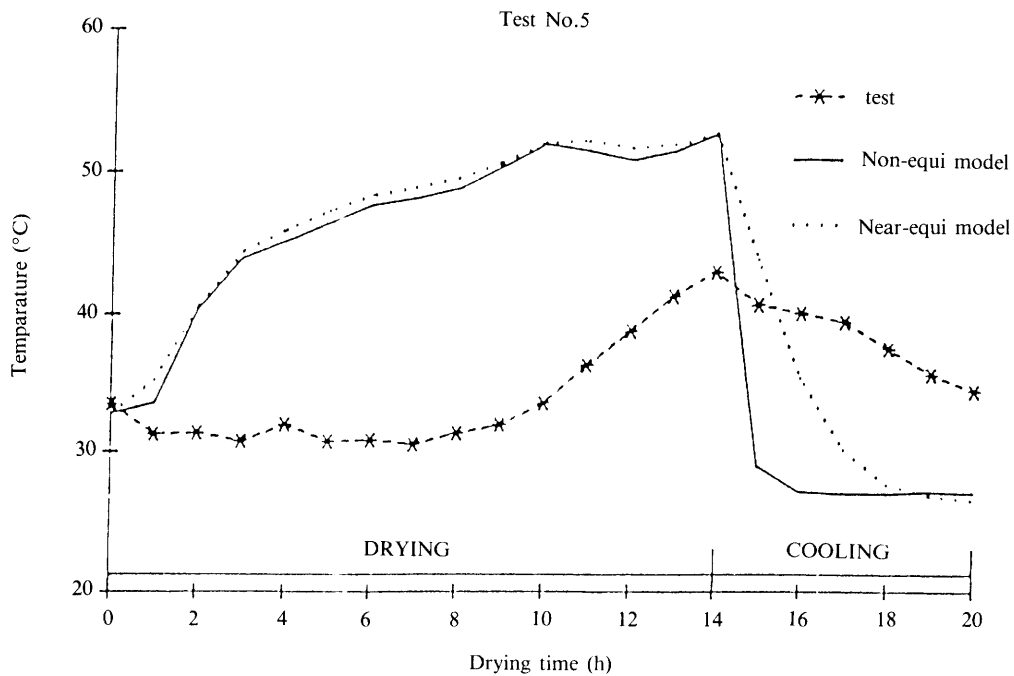
พิจารณาการอบแห้งแบบ LFHT จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของเมล็ดข้าวโพดกับความสูงของชั้นข้าวโพด ที่ชั่วโมงการอบแห้งต่าง ๆ ในช่วงอบแห้ง ดังแสดงใน Figures 6-7 แสดงให้เห็นว่า ความชื้นที่ได้จากแบบจำลองแบบไม่สมดุลมีค่าต่ำกว่าการทดลองในชั้นล่างของชั้นข้าวโพด ทั้งนี้เนื่องจากสมการอบแห้งชั้นบางที่ใช้สามารถ

ทำนายได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 45-70 °C และความชื้นหลังอบแห้งประมาณ 14%wb เท่านั้น (เป็นช่วงอุณหภูมิและความชื้นที่ทำการทดสอบการอบแห้งชั้นบาง) การอบแห้งส่วนใหญ่ ทั้งจากการทดลองและแบบจำลองแบบไม่สมดุลเกิดขึ้นเฉพาะชั้นล่างของชั้นเมล็ดข้าวโพด ในชั้นกลางและชั้นบนของชั้นเมล็ดข้าวโพดความชื้นจะมีค่าสูงกว่าความชื้นเริ่มต้นในช่วงโมงแรก ๆ ของการอบแห้ง ซึ่งเป็นผลจากการควบแน่นของไอน้ำ ทำให้แบบจำลองแบบไม่สมดุลทำนายความชื้นได้ต่ำกว่าการทดลอง เพราะทำการการเกิดการควบแน่นได้น้อยกว่าการทดลอง (เนื่องจากอุณหภูมิกาศอบแห้งที่ใช้มีค่าสูงมาก อัตราการการอบแห้งของชั้นบางจึงมีค่าสูงมากด้วย ทำให้การอบแห้งในชั้นล่างเกิดขึ้นมาก อากาศอบแห้งที่ผ่านชั้นล่างขึ้นมาจึงมีความชื้นเพิ่มขึ้น และอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็ว จนมีศักยภาพไม่พอเพียงพอที่จะอบแห้งเมล็ดข้าวโพดในชั้นกลางและชั้นบนได้ และยังมีการควบแน่นของความชื้น



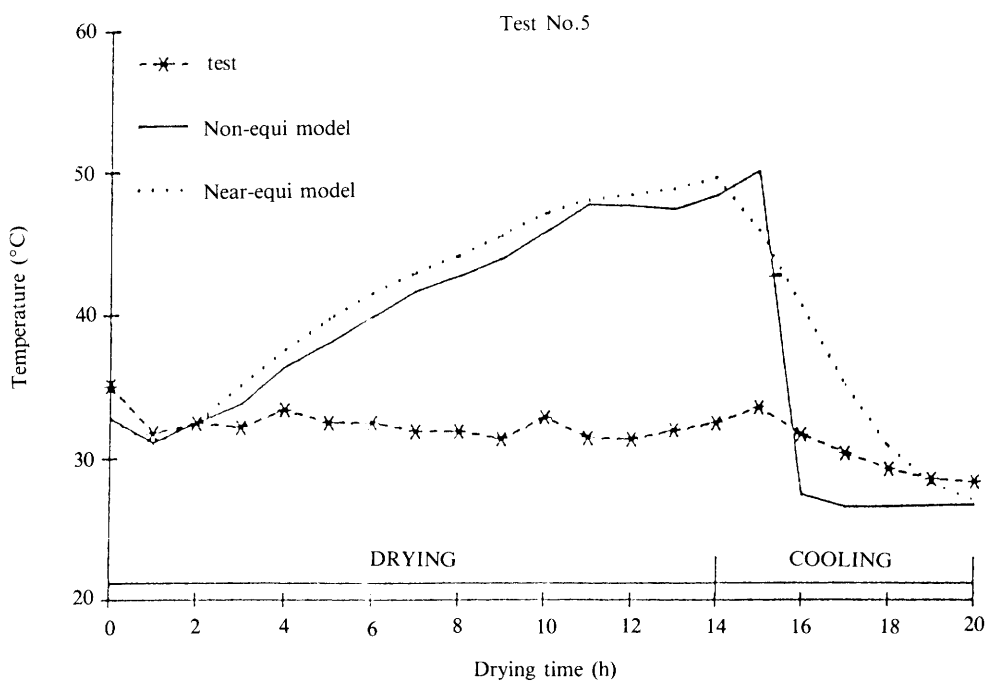
Air flowrate 14.83 m³/min-m³, Drying temperature 54.5-58.4 °C

Figure 3 Evolution of corn temperature at a height of 0.05 m : Test No.5



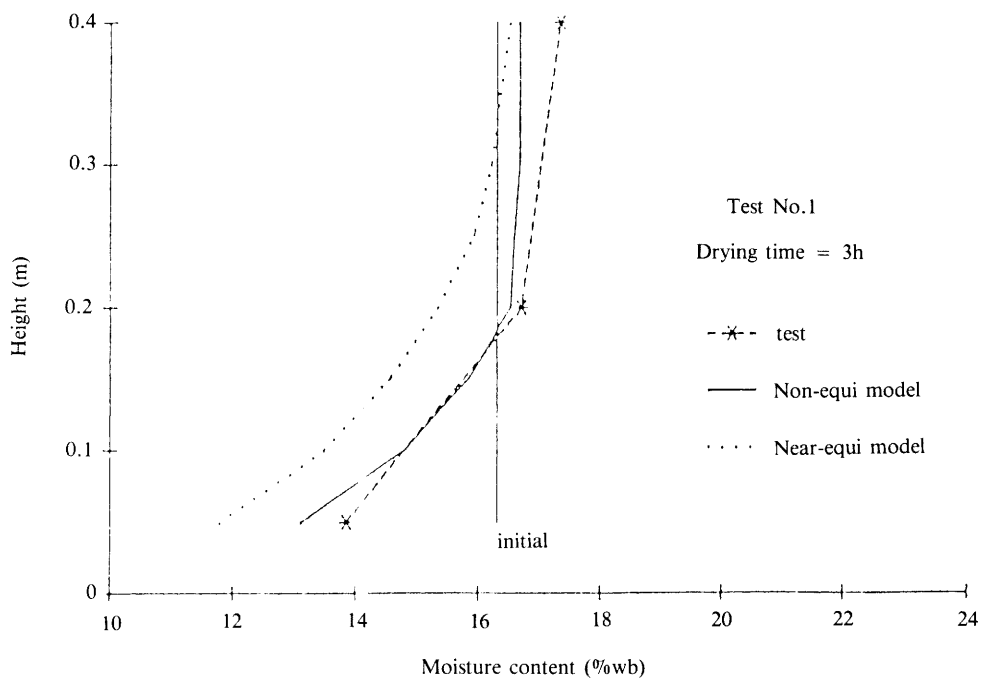
Air flowrate $14.83 \text{ m}^3/\text{min-m}^3$, Drying temperature $54.5\text{-}58.4 \text{ }^\circ\text{C}$

Figure 4 Evolution of corn temperature at a height of 0.20 m : Test No.5



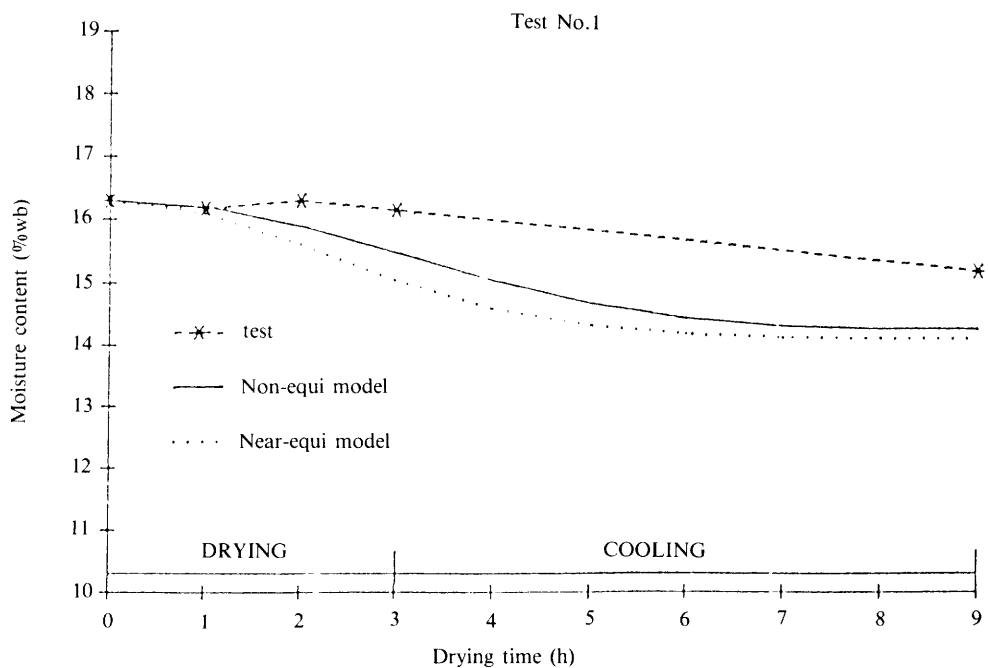
Air flowrate $14.83 \text{ m}^3/\text{min-m}^3$, Drying temperature $54.5\text{-}58.4 \text{ }^\circ\text{C}$

Figure 5 Evolution of corn temperature at a height of 0.40 m : Test No.5



Air flowrate $5.5 \text{ m}^3/\text{min-m}^3$, Drying temperature $80-90^\circ\text{C}$

Figure 6 Corn moisture content at different height (3h) : Test No.1



Air flowrate $5.5 \text{ m}^3/\text{min-m}^3$, Drying temperature $80-90^\circ\text{C}$

Figure 7 Evolution of mean moisture content of corn : Test No.1

เกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้น ๆ ของการอบแห้งด้วย) ในช่วงเป่าอากาศเย็น พบว่า ความชื้นของเมล็ดข้าวโพดของการทดลอง และของแบบจำลองยังคงลดลงอย่างช้า ๆ

สำหรับการเปรียบเทียบความชื้นระหว่างแบบจำลองการอบแห้งข้าวโพดแบบไม่สมดุลกับแบบจำลองแบบใกล้เคียง พบว่า ความชื้นจากผลการคำนวณของแบบจำลองใกล้เคียงต่ำกว่าแบบจำลองแบบไม่สมดุลประมาณ 1%wb โดยจะใกล้เคียงกันในชั้นล่างของชั้นข้าวโพด ทั้งนี้เนื่องจากแบบจำลองใกล้เคียงมีข้อสมมติฐานที่ว่า $\partial\theta/\partial t = \partial T/\partial t$ ซึ่งหมายความว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงมาก และการระเหยน้ำเป็นไปแบบจำกัด ซึ่งแตกต่างจากกรณีของแบบจำลองแบบไม่สมดุล ที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในชั้นเมล็ดข้าวโพดที่คำนวณจากสมการเอนโทรปีของ Barker (1965) ในการเปรียบเทียบอุณหภูมิของเมล็ดข้าวโพดระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอบแห้งข้าวโพดแบบไม่สมดุลกับแบบจำลองแบบใกล้เคียง

และผลการทดลอง พบว่า คล้าย ๆ กับการอบแห้งแบบ LET

ในการอบแห้งแบบ HFLT เมื่อเปรียบเทียบความชื้นระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวโพดแบบไม่สมดุลกับผลการทดลอง ดังแสดงใน Figures 8-9 พบว่า ในการทดลองการอบแห้งเกิดขึ้นในชั้นล่างมากกว่าในชั้นกลางและชั้นบน ส่วนแบบจำลองแบบไม่สมดุลการอบแห้งจะเกิดขึ้นตลอดทั้งชั้นหนาและความชื้นมีค่าต่ำกว่าการทดลอง โดยมีค่าแตกต่างกันมากขึ้นจากชั้นล่างไปยังชั้นบนของชั้นเมล็ดข้าวโพด ซึ่งสันนิษฐานว่าเกิดจากการวัดค่าอัตราการไหลได้สูงกว่าความเป็นจริง สำหรับการเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวโพดแบบไม่สมดุลกับแบบจำลองแบบใกล้เคียง พบว่า ความชื้นที่คำนวณได้จากแบบจำลองทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันมาก ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออัตราการไหลของอากาศสูงมาก สัมประสิทธิ์การพาความร้อนในชั้นเมล็ดข้าวโพดที่คำนวณโดยแบบจำลองแบบไม่สมดุล มีค่าใกล้เคียง

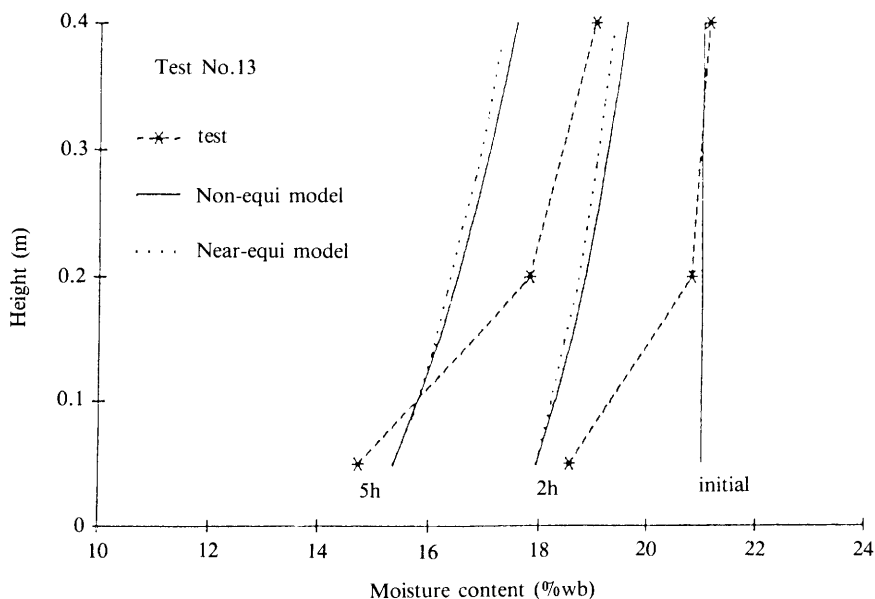


Figure 8 Corn moisture content at different height (2h, 5h) : Test No.13

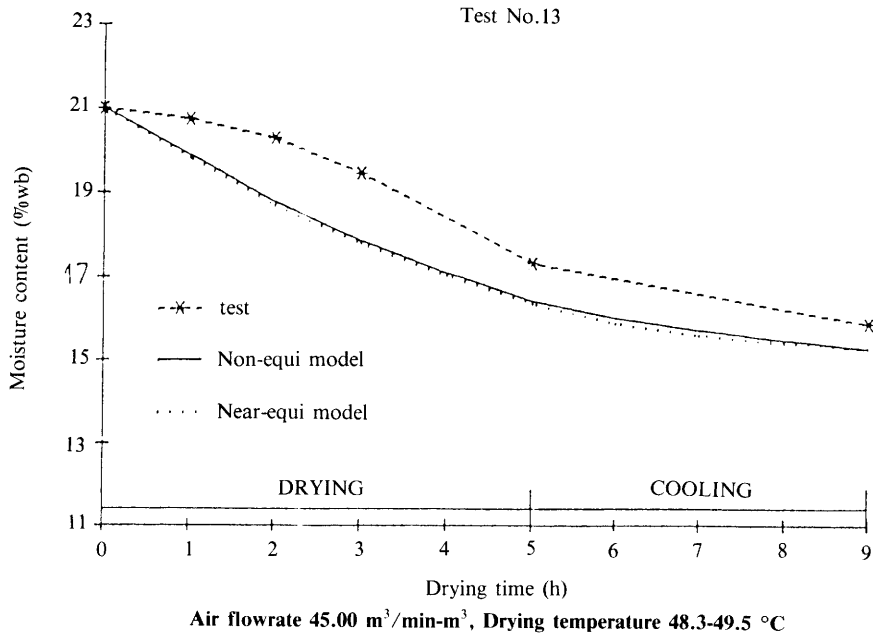


Figure 9 Evolution of mean moisture content of corn : Test No.13

กับแบบจำลองแบบใกล้เคียงสมดุล การอบแห้งในแต่ละชั้นจึงเกิดขึ้นในอัตราที่ใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิของเมล็ดข้าวโพดระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการอบแห้งข้าวโพดแบบไม่สมดุลกับแบบจำลองแบบใกล้เคียงสมดุลและผลการทดลอง พบว่า เป็นไปในลักษณะเดียวกันกับการอบแห้งแบบ LFLT แต่อุณหภูมิเมล็ดข้าวโพดของทั้งสองแบบจำลอง ในช่วงที่ใช้อากาศร้อนอบแห้งนั้น จะใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในชั้นเมล็ดข้าวโพดมีค่าใกล้เคียงกัน

เมื่อเปรียบเทียบเวลาในการคำนวณระหว่างแบบจำลองแบบไม่สมดุลกับแบบจำลองแบบใกล้เคียงสมดุล พบว่า เวลาที่ใช้ในการคำนวณของแบบจำลองแบบไม่สมดุลสูงกว่าแบบจำลองแบบใกล้เคียงสมดุลมาก ประมาณ 5 เท่า แม้ว่าจะใช้ความหนาของชั้นบางของชั้นข้าวโพด (dx) ในการคำนวณเท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจาก แบบจำลองแบบไม่สมดุลต้องคำนึงถึง stability มาก ช่วงเวลาที่ใช้การคำนวณ (dt) จึงมีค่าน้อยกว่าแบบจำลองแบบใกล้เคียงสมดุล

ซึ่งมี stability สูง

สรุป

แบบจำลองแบบไม่สมดุลทำนายความชื้นของเมล็ดข้าวโพดได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองเมื่อใช้การอบแห้งแบบ LFLT แต่ไม่ค่อยเหมาะสมนักกับการอบแห้งแบบ LFHT และแบบ HFLT ความชื้นที่คำนวณได้จากแบบจำลองแบบใกล้เคียงสมดุลจะมีค่าต่ำกว่าความชื้นที่คำนวณได้จากแบบจำลองแบบไม่สมดุลเล็กน้อยในการอบแห้งแบบ LFHT และแบบ LFLT และแบบจำลองทั้งสองให้ผลใกล้เคียงกันมากเมื่ออบแห้งแบบ HFLT อุณหภูมิของเมล็ดข้าวโพดที่ได้จากแบบจำลองแบบใกล้เคียงสมดุลมีค่ามากกว่าแบบจำลองแบบไม่สมดุลเล็กน้อย และมีค่าเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อยจากชั้นล่างไปยังชั้นบนของชั้นข้าวโพด เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง แบบจำลองทั้งสองแบบทำนายอุณหภูมิของเมล็ดข้าวโพดได้ไม่ถูกต้อง โดยเฉพาะในชั้นบน ๆ ซึ่งมีค่าสูงกว่าของ

การทดลอง อันสืบเนื่องมาจากการทำนายความชื้น ผิดพลาด

แบบจำลองใกล้เคียงสมดุลเหมาะสมที่จะใช้มากกว่าแบบจำลองแบบไม่สมดุลในทุกกรณีของการอบแห้ง เพราะผลที่ได้แตกต่างกันเล็กน้อย แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณโดยคอมพิวเตอร์แตกต่างกันประมาณ 5 เท่า ที่ความหนาของชั้นบางที่ใช้ในการคำนวณเท่ากัน เวลาในการคำนวณอาจต่างกันมากกว่านี้อีก 2-3 เท่า ถ้าใช้ความหนาของชั้นบางของแบบจำลองแบบใกล้เคียงสมดุลมากขึ้น ซึ่งก็ยังคงมีเสถียรภาพระหว่างการคำนวณ

คำขอบคุณ

ผู้เขียนขอแสดงความขอบคุณต่อ Australian Centre for International Agricultural Research ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

อนุรักษ์ ครองทรัพย์, 2532, การศึกษาแนวทางการอบแห้งข้าวโพดแบบเป็นงวดที่เหมาะสม, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน, คณะพลังงานและวัสดุ, สจร.

อรุณี ผุดผ่อง, 2531, การศึกษาคุณสมบัติทางฟิสิกส์ ความร้อนของเมล็ดข้าวโพด, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน, คณะพลังงานและวัสดุ, สจร.

อรุณ ผุดผ่อง, สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์, วารุณี เดีย, 2533, การศึกษาพารามิเตอร์สำหรับวิเคราะห์การอบแห้งเมล็ดข้าวโพด, วิศวกรรมสาร 43(4), 95-101.

Bakker-Arkema, F.W., L.E.Lerew, S.F.De Boer, and M.G.Roth, 1974, Grain dryer simulation, Research report from Michigan State University, 1-23.

Bakker-Arkema, F.W., M.G.Roth, and D.B.

Brooker, 1978, Required weather data for simulation of solar grain drying, Presented at the 8th International Conference of the IV Section of C.I.G.R., Paris, France.

Barker, J.J., 1965, Heat transfer in packed bed, Ind.Engng. Chemy, 57(4), 43.

Barre, H.J., G.R.Baughman, and M.Y.Hamdy, 1971, Application of the logarithmic model to cross-flow deep-bed drying, Trans. ASAE, 14(6), 1061-1064.

Bowden, P.J., W.J.Lamon, and E.A.Smith, 1983, Simulation of near-ambient grain drying, J.Agric. Engng. Res.28, 279-300.

Brooker, D.B., F.W.Bakker-Arkema, and C.W. Hall, 1974, Drying cereal grains, AVI publishing Co., Westport, Connecticut.

Hukill, W.V., 1974, Basic principles in drying corn and grain sorghum, Agr. Eng. 28, 335-338.

Soponronnarit, S., 1986, Drying in bulk storage of high moisture grain in the kingdom of Thailand, Final report submitted to Australian Centre for International Agricultural Research.

Soponronnarit, S., 1988, Energy model of grain drying systems, ASEAN Journal on Science and Technology for Development, 5 (2), 43-68.

Soponronnarit, S. and A.Peyre, 1982, Low temperature sorghum drying in the South of France, Proceedings of the 3th International Drying Symposium, Volume 1, Edited by J.C. Ashworth, Birmingham.

Thompson, T.L., R.M.Pert, and G.H.Foster, 1968, Mathematical simulation of corn drying - a new model, Trans.ASAE, 4, 582.