แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร ในกระบวนการลดอุณหภูมิไก่

เปี๋ยมสุข สุวรรณกูฏ ¹ สุวิช ศิริวัฒนโยธิน ² มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140 ศักรินทร์ ภูมิรัตน ³

ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ ถนนศรีอยุธยา กรุงเทพฯ 10400

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและอุณหภูมิไก่ ในกระบวนการ ลดอุณหภูมิไก่ แบบจุ่มไก่ทั้งดัวในน้ำเย็นพร้อมกับการใช้อากาศช่วยในการหมุนเวียนน้ำและพลิก กลับตัวไก่ โดยสมมติให้ตัวไก่ทั้งดัวมีลักษณะเป็นทรงกลมกลวง หรืออกไก่มีลักษณะเป็นแผ่นระนาบ ซึ่งจากการศึกษาพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนเพียงอย่างเดียว และ แบบจำลองของการถ่ายเทความร้อนและมวลในขณะเดียวกัน มีความแม่นยำในการทำนายอุณหภูมิ ใกล้เคียงกัน ดังนั้นแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนภายใต้สภาวะเงื่อนไข ที่ผิวมีอุณหภูมิเท่ากับน้ำเย็นจึงเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมในการใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และในการทำนายการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักพบว่า แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวล ขณะ เดียวกันไม่เหมาะสมในการทำนาย เนื่องจากการแพร่น้ำเข้าไปในตัวไก่ ไม่ได้แพร่ผ่านทุกชั้นของ เนื้อเยื่ออย่างสม่ำเสมอ เพราะน้ำส่วนใหญ่จะเข้าไปอยู่ระหว่างหนังและเนื้อไก่ และพบว่าการเพิ่มอากาศ ที่ใช้หมูนเวียนน้ำจะทำให้ไก่ดูดซับน้ำได้เร็วขึ้น

นอกจากนี้เมื่อต้องการให้ไก่มีน้ำหนักเพิ่มขึ้นไม่เกินร้อยละ 8 ต้องใช้เวลาในการลดอุณหภูมิ ไม่เกิน 30 นาที และในกระบวนการนี้ควรใช้น้ำเย็นจัดในช่วงแรกเพื่อลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว โดยมีการ เดิมอากาศอย่างดีเพื่อช่วยในการกลับตัวไก่และหมุนเวียนน้ำ

นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร
 อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร
 รองศาสตราจารย์

Heat and Mass Transfer Models in Chilling Process of Chicken

Peamsuk Suvarnakuta¹ Suwit Siriwatanayotin²

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140 Sakarindr Bhumiratana³

National Center for Genetic Engineering and Biotechnology, Sri-Ayudhya Rd., Bangkok 10400

Abstract

The objective of this research is to study the mathematical model for prediction of simultaneous heat and mass transfer in the chilling process of fresh whole chicken. The model predicts both the temperature and the weight uptake of eviscerated broiler in counter current chilling process. The rotary chilling tank is partially filled with slush ice and aerated by compressed air and the birds move though by a rotating screw.

The mathematical models based on the analytical method using 2 geometric forms i.e. hollow sphere and flat slab with two kinds of boundary conditions are proposed. The simultaneous heat and mass transfer model in the slab with any kind of boundary conditions predicts the temperature closed to that obtained from the heat conduction model. However, the simultaneous model could not explain the change in weight uptake since the water does not equally diffuse though all tissue layers. Most part of the water is trapped in the connective tissue between the skin and the muscle. So the heat conduction in slab with the first kind of boundary condition is suitable for predicting temperature histories in this commercial chilling. Since, the weight gain must not exceed 8 percent; the time spent in chilling process must not exceed 30 minutes. In the commercial immersion chilling process, the water supplied in the first stage should be as cold as possible in order to rapidly decrease the temperature. The aeration should be applied for promotion of heat transfer.

¹ Graduate Student, Department of Food Engineering.

² Lecturer, Department of Food Engineering.

³ Associate Professor.

บทนำ

ในอุตสาหกรรมการผลิตไก่ต้องมีกระบวนการลดอุณหภูมิ (cooling) หลังจากที่ไก่ผ่าน กระบวนการลวก ถอนขน และล้วงไส้ออก โดยต้องทำให้อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางอกไก่มีอุณหภูมิลดลงถึง 4°C อย่างรวดเร็ว เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ก่อนนำไปชำแหละเป็นชิ้นส่วนต่าง ๆ โดยโรงงานส่วนใหญ่จะใช้การลดอุณหภูมิไก่แบบต่อเนื่อง ด้วยการผ่านไก่ไปในน้ำเย็นผสมน้ำแข็ง และใช้อากาศช่วยในการหมุนเวียนน้ำและพลิกกลับตัวไก่ ซึ่งจากการลดอุณหภูมิตัวไก่ในรูปแบบนี้ จะมีน้ำส่วนหนึ่งถูกดูดซึมเข้าตัวไก่ทำให้น้ำหนักไก่เพิ่มขึ้น ดังนั้นในกระบวนการผลิตจึงต้องทำการ แขวนไก่ (dripping) ไว้ช่วงหนึ่งเพื่อลดปริมาณน้ำที่เข้าไป

กระบวนการลดอุณหภูมินี้ยังเป็นจุดวิกฤตในระบบ HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Point) และยังพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักไก่ หรืออุณหภูมิดัวไก่ตลอดเวลา ดังนั้น ความเข้าใจในปรากฏการณ์การถ่ายเทที่เกิดขึ้นในกระบวนการนี้ จะช่วยให้สามารถควบคุมกระบวน การผลิตได้ดีขึ้น เนื่องจากน้ำที่เข้าไปในดัวไก่อาจมีส่วนช่วยให้การถ่ายเทความร้อนเร็วขึ้น

การที่จะอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ในกระบวนการลดอุณหภูมิไก้ได้ดี ต้องใช้วิธีหาคำตอบ โดยการวิเคราะห์ (analytical solution) จากสมการรูปทั่วไปของการถ่ายเทมวลและความร้อน (general equation for heat and mass transfer) แต่เนื่องจากลักษณะตัวไก่มีรูปร่างไม่แน่นอน จึงทำให้ การคำนวณโดยทางทฤษฏีทำได้ยาก จึงยังไม่เข้าใจลักษณะปรากฏการณ์การถ่ายเทอย่างแท้จริง [1]

การลดอุณหภูมิไก่สดแบบจุ่มน้ำเย็นจะทำให้ปริมาณความชื้นในไก่ทั้งตัวเพิ่มขึ้นร้อยละ 12 และ สูญเสียปริมาณของแข็ง,โปรตีน, เถ้า, เกลือแร่ กับสารกลิ่นรสจำพวกที่ระเหยง่ายไปบางส่วน [2] ซึ่ง ข้อกำหนดของ USDA บันทึกว่า ไก่ที่มีน้ำหนักน้อยกว่า 2.4 กิโลกรัม ต้องมีน้ำหนักไก่ที่เพิ่มขึ้นจากการ ดูดชับน้ำไม่เกินร้อยละ 8 จากกระบวนการผลิต [3]

Ang และ Hamm [4] เปรียบเทียบเนื้ออกไก่ก่อนและหลังจากการลดอุณหภูมิแบบจุ่ม ในน้ำเย็นผสมน้ำแข็งนาน 24 ชั่วโมง พบว่ามีเพียงปริมาณความชื้นเท่านั้นที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ยิ่ง ส่วนปริมาณโปรตีน,ไขมัน, ไรโบฟลาวิน, ไนอาชิน, วิตามินบี 6, แมกนีเซียม และแคลเซียม ไม่มี ความแตกต่างกันทางสถิติและ ASHRAE [5] บันทึกไว้ว่าน้ำที่ถูกดูดซับจะพบในส่วนของเนื้อเยื่อ เกี่ยวพัน (connective tissue) ที่อยู่บริเวณหนัง และจะพบน้อยมากในกล้ามเนื้อไก่

Stadelman [2] กล่าวถึงปริมาณการดูดซับน้ำว่าขึ้นกับรอยแผล และรอยตัดที่เกิดขณะ เอาเครื่องในออก ถ้ามีการใช้ใบพัดทำให้น้ำหมุนเวียนในการลดอุณหภูมิไก่จะเป็นการเพิ่มอัตรา การทำเย็นและเพิ่มปริมาณการดูดซับน้ำ แต่จะไม่มีผลต่ออัตราการนุ่มเนื้อ ซึ่ง Mead [1] บันทึกไว้ อีกว่าการถ่ายเทมวลน้ำในระดับที่เหมาะสมจะทำให้การถ่ายเทความร้อนมีประสิทธิภาพดีขึ้นและเสนอว่า ยังไม่มีแบบจำลองหรือสมการใดที่อธิบายกระบวนการดูดซับน้ำในตัวไก่ได้ Lunko และ Malkki [6] ทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและน้ำหนักไก่หลังผ่านกระบวนการ ลดอุณหภูมิแบบจุ่มน้ำเย็น โดยใช้คำนวณปริมาณความร้อนที่ออกจากตัวไก่ เปรียบเทียบกับการลด อุณหภูมิแบบลมเย็น และกล่าวว่าปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่อการดูดซับน้ำของไก่ คือการเสียดสีกัน ของไก่ในขณะลดอุณหภูมิ และกล่าวว่ายังไม่มีแบบจำลองภายใต้สมมุติฐานให้ไก่เป็นรูปทรงเรขาคณิด ง่าย ๆ ที่สามารถใช้ทำนายการถ่ายเทความร้อนและน้ำหนักได้พร้อม ๆ กัน

ปรากฏการณ์การถ่ายเทที่เกิดขึ้นมีทั้งการถ่ายเทมวลและความร้อนระหว่างไก่กับน้ำเย็น พร้อมกัน (simultaneous of heat and mass transfer) ขณะเดียวกันตัวไก่ยังมีรูปร่างเป็น irregular shape และโครงสร้างที่กลวงด้านใน ทำให้ปรากฏการณ์การถ่ายเทสลับซับซ้อนมากกว่าการนำ ความร้อนเพียงอย่างเดียว และยังไม่มีข้อมูลใดที่ได้รวมถึงปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้น พร้อม ๆ กันด้วย เนื่องจากข้อกำหนดของกระบวนการลดอุณหภูมินี้ไก่จะต้องมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นไม่เกิน ร้อยละ 8 จากการดูดซับน้ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์ในการจำลองกระบวนการการถ่ายเทมวล และความร้อนที่เกิดขึ้นพร้อม ๆ กันของไก่ทั้งตัวขณะลดอุณหภูมิ และศึกษาบทบาทของการถ่ายเทมวล ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการลดอุณหภูมิไก่

ทฤษฎี

Bird, Stewart และ Lightfoot [7] แสดงสมดุลพลังงานในระบบหลายองค์ประกอบ (multi component system) ดังนี้

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = -\nabla \cdot q - (\tau : \nabla \overline{\nu}) + \sum_{i=1}^n \overline{j}_i \overline{g}_i + \left(\frac{\partial \ln \hat{V}}{\partial \ln T}\right)_{p,x_i} \frac{Dp}{Dt} + \sum_{i=1}^n \overline{H}_i \left[\nabla \cdot J_i - R_i\right]$$
(1)

โดยที่ ρ = ความเข้มข้นของสารผสม (kg/m³), Cp = ความร้อนจำเพาะ (kJ/kg.℃) T = อุณหภูมิ (°C), = เวลา (s.) t q = ฟลักซ์การนำความร้อน (W/ m³), = แรงเฉือน (kg/m.s²) τ = ฟลักซ์เชิงมวล (kg/s.m²) v̄ = ความเร็ว (m/s), \overline{i} = ปริมาตรจำเพาะ (m³/kg) g, = ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก, \hat{V} \overline{H}_{i} = เอ็นทาลปีย่อยเชิงโมล (J/mol) p = ความดัน (kg/m.s²), J. = ฟลักซ์เชิงโมล (mol/s.m²), R = อัตราการเกิดปฏิกิริยาเชิงโมล $(mol/s.m^3)$

และสมดุลมวลของสารหลายองค์ประกอบ ดังนี้

$$\frac{D\rho}{Dt} = -(\nabla \cdot \overline{\nu}) - (\nabla \cdot \overline{j}) + r_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$
(2)

โดยที่ r_i = อัตราการเกิดปฏิกิริยาเชิงโมล (mol/s.m³)

ด้วยสมมุติฐานว่าเมื่อระบบไม่มีความเร็ว แรงโน้มถ่วง รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงความดันและ ปริมาตรน้อยมาก และไม่มีอิทธิพลของ Dufour effect และ Soret effect เมื่อตั้งสมมุดิฐานเพิ่มเดิมอีกว่าระบบมีปริมาตรคงที่และไม่มีปฏิกิริยาเคมี การถ่ายเทมวล มีเฉพาะการแพร่มวลน้ำอย่างสม่ำเสมอเท่านั้น และการถ่ายเทความร้อนเป็นผลเนื่องมาจากการนำ ความร้อนและอัตราการแพร่ของน้ำ สมการที่ 1 และ 2 จะลดรูปเป็นสมการที่ 3 และ 4 ดังนี้

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T - \frac{H}{C_p} \frac{\partial W}{\partial t}$$
(3)

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \mathcal{D} \nabla^2 W$$

โดยที่ α = สัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนประสิทธิผล (m²/s)

D = สัมประสิทธิ์การแพร่มวลน้ำประสิทธิผล (m²/s)

W = สัดส่วนของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้น

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในกระบวนการลดอุณหภูมิไก่จะยึดเอาจุดกึ่งกลางหน้าอกไก่เป็นจุดวิกฤตในการวัดอุณหภูมิ และเนื่องจากไก่มีลักษณะคล้ายทรงรีกลวงหรือทรงกลมกลวง ดังนั้นการตั้งสมมุติฐานจึงกำหนดตาม ลักษณะที่เด่นที่สุดในการทำนายอุณหภูมิ คือ ทรงแผ่นระนาบและทรงกลมกลวง ซึ่งมีความหนา บริเวณหน้าอกเป็นความกว้างที่สุดของแผ่นระนาบและขนาดของวงแหวนทรงกลม ตามลำดับ

ในการวิจัยนี้ใช้วิธีหาคำตอบของสมการคณิตศาสตร์ด้วยวิธีวิเคราะห์ (analytical solution) โดยได้แบ่งการคำนวณภายใต้สมมุติฐานในรูปแบบต่างๆ ไว้ 5 แบบ คือ

1. แบบจำลองของการถ่ายเทมวลและความร้อนในขณะเดียวกันในแผ่นระนาบ เมื่อใช้เงื่อนไข ขอบเขตชนิดที่ 3

 แบบจำลองของการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนในแผ่นระนาบ และใช้เงื่อนไข ขอบเขตชนิดที่ 3

 แบบจำลองของการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนในแผ่นระนาบ และใช้เงื่อนไข ขอบเขตชนิดที่ 1

4. แบบจำลองของการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนในทรงกลมกลวง และใช้เงื่อนไข ขอบเขตชนิดที่ 3

5. แบบจำลองของการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนในทรงกลมกลวง และใช้เงื่อนไข ขอบเขตชนิดที่ 1

คำตอบของสมการภายใต้สมมุติฐานข้างต้นแสดงในตารางที่ 1 ในที่นี้จะกล่าวถึงคำตอบของ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทมวลและความร้อนในขณะเดียวกัน หรือแบบจำลองที่ 1 เท่านั้น ซึ่งคำตอบของสมการ (3) และ (4) หาได้โดยวิธีแปลงลาปาส (Laplace transform) [8] ได้ดังนี้

(4)

$$\begin{aligned} \frac{T-T_{i}}{T_{w}-T_{i}} &= 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \left(C_{n2} \cos v_{1} \mu_{n} \frac{x}{L} - C_{n1} \cos v_{2} \mu_{n} \frac{x}{L} \right) \times \exp\left(-\mu_{n}^{2} F_{0}\right) \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} \frac{W_{i} - W_{w}}{W_{i} - W_{w}} &= 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \left(C_{n1}^{*} (1-v_{2}^{2}) \cos v_{2} \mu_{n} \frac{x}{L} - C_{n2}^{*} (1-v_{1}^{2}) \cos v_{1} \mu_{n} \frac{x}{L} \right) \times \exp\left(-\mu_{n}^{2} F_{0}\right) \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} \text{Inumatrix} C_{nj} &= 2 \frac{P_{nj} + K_{o} \left(Q_{nj} - K_{1} P_{nj} \right)}{\mu_{n} \varphi_{n}}, \qquad C_{nj}^{*} &= \frac{1}{K_{o}} C_{nj} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Introp} Q_{nj} &= 2 \frac{P_{nj} + K_{o} \left(Q_{nj} - K_{1} P_{nj} \right)}{\mu_{n} \varphi_{n}}, \qquad C_{nj}^{*} &= \frac{1}{K_{o}} C_{nj} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Introp} Q_{nj} &= 2 \frac{P_{nj} + K_{o} \left(Q_{nj} - K_{1} P_{nj} \right)}{\mu_{n} \varphi_{n}}, \qquad C_{nj}^{*} &= \frac{1}{K_{o}} C_{nj} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Introp} Q_{nj} &= 2 \frac{P_{nj} + K_{o} \left(Q_{nj} - V_{1} P_{nj} \right)}{\mu_{n} \varphi_{n}}, \qquad C_{nj}^{*} &= \frac{1}{K_{o}} C_{nj} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Introp} Q_{nj} &= 2 \frac{P_{nj} + K_{o} \left(Q_{nj} - K_{1} P_{nj} \right)}{\mu_{n} \varphi_{n}}, \qquad C_{nj}^{*} &= \frac{1}{K_{o}} C_{nj} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Introp} Q_{nj} &= 2 \frac{P_{nj} + K_{o} \left(Q_{nj} - K_{1} P_{nj} \right)}{\mu_{n} \varphi_{n}}, \qquad C_{nj}^{*} &= \frac{1}{K_{o}} C_{nj} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Introp} Q_{nj} &= 2 \frac{P_{nj} + K_{o} \left(Q_{nj} - K_{1} P_{nj} \right)}{\mu_{n} \varphi_{n}}, \qquad C_{nj}^{*} &= \frac{1}{K_{o}} C_{nj} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Introp} Q_{nj} &= 2 \frac{P_{nj} + K_{o} \left(Q_{nj} - K_{1} P_{nj} \right)}{\mu_{n} \varphi_{n}}, \qquad C_{nj}^{*} &= \frac{1}{K_{o}} C_{nj} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Introp} Q_{nj} &= 2 \frac{P_{nj} + K_{o} \left(Q_{nj} - V_{2} A_{n2} P_{n1} - v_{1} B_{n1} Q}{\mu_{n} \varphi_{n}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{nj} &= -\left(1 - v_{j}^{2} \right) \cos v_{j} \mu_{n} + \left[1 + \left(1 - v_{j}^{2} \right) \frac{V_{j} \mu_{n}}{B_{n}} \sin v_{j} \mu_{n}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_{nj} &= -\left(1 - v_{j}^{2} \right) \sin v_{j} \mu_{n} - \left[\left(1 - v_{j}^{2} \right) \frac{V_{j} \mu_{n}}{B_{n}} \right] \cos v_{j} \mu_{n} - \left(\frac{\left(1 - v_{j}^{2} \right)}{B_{n}} \right] \sin v_{j} \mu_{n} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_{j}^{2} &= \frac{1}{2} \left[\left(1 + Le \right) + \left(-1 \right)^{j} \sqrt{\left(1 + Le \right)^{2} - 4Le} \right], \quad (j = 1, 2 \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Le &= \frac{\alpha}{g}, \quad K_{1} = -k_{s} C_{p} / h, \quad Bi = hL/k, \quad Bi_{m} = k_{s} L / \mathcal{D}, \quad K_{o} = \frac{H}{C_{p}} \frac{\left(W_{i} - W_{w} \right)}{\left(T_{w} - T_{i} \right)} \end{aligned}$$

$$\end{aligned}$$

การทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและน้ำหนักไก่ที่คำนวณจากแบบจำลองกับผลการ ทดลองวัดอุณหภูมิและน้ำหนักไก่ในห้องปฏิบัติการและโดยใช้ค่าทางสถิติ R², σ (ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน) และ Residue (Res)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \left(T_{mi}(t) - T_{exp_i}(t) \right)}{n}}, Res = T_{exp}(t) - T_m(t)$$

เนื่องจากแบบจำลองที่ 1 เป็นแบบจำลองที่ศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและน้ำหนัก พร้อมกันในแผ่นระนาบ จึงเปรียบเทียบความแม่นยำกับแบบจำลองที่ 2 หรือแบบจำลองการถ่ายเท ความร้อนในแผ่นระนาบที่เงื่อนไขขอบเขตชนิดที่ 3 และเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก กับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ. ปีที่ 23 ฉบับที่ 3 กันยายน-ธันวาคม 2543



99



แบบจำลองที่ 3

วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ. ปีที่ 23 ฉบับที่ 3 กันยายน-ธันวาคม 2543

100

แบบจำลองที่ 2

แบบจำลอง	ด้าษณะของแบบจำลอง	
<u>แบบจำลองที่ 4</u> การถ่ายเทศวามร้อน	ສາເກາະເຮັ່ມທັນ $\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[\frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (rT) \right]$	
โดยการนำความร้อนในทรงกลมกลวง เมื่อใช้เงื่อนไชขอบเขตชนิดที่ 3	เงื่อนไขขอบเซต $-krac{\partial T}{\partial r}+hT=0$ ที่ $r=a,t>0$	
	$k \frac{\partial T}{\partial r} + hT = 0 \vec{n} \ r = b, \ t > 0$ isəuluisian $T = T_j$ idə $t = 0$	
	$T = \frac{2}{r} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ e^{-\alpha \beta_{1}^{2}} \frac{\beta_{m} \cos\beta_{m}(r-a) + K_{1} \sin\beta_{m}(r-a)}{\left(\beta_{m}^{2} + K_{1}^{2}\right)\left[\left(b-a\right) + K_{2}/\left(\beta_{m}^{2} + K_{2}^{2}\right)\right] + K_{1}} \times \left[T = \frac{2}{r} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{T_{1}\left[\beta_{m}\left(\frac{\cos\beta_{m}(b-a)}{\beta_{n}^{2}} + \frac{b}{\beta_{m}}\sin\beta_{m}(b-a)\right) + K_{1}\left(\frac{\sin\beta_{m}(b-a)}{\beta_{m}^{2}} - \frac{b}{\beta_{m}}\cos\beta_{m}(b-a) + \frac{a}{\beta_{m}}\right)\right] \right\}$	
	$\text{Intrivial tan } \beta_m(b-a) = \frac{\beta_m(K_1 + K_2)}{\beta_m^2 - K_1 K_2} \text{ way } K_1 = \frac{h}{k} + \frac{1}{a}, \ K_2 = \frac{h}{k} - \frac{1}{b}$	
<u>แนบบจำสองที่ 5</u> การกำแหลวกปร้อง	aumsisum $\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[\frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (rT) \right]$	
โดยการนำความร้อนในทรงกลมกลวง 2 อ.ศ.ช.	เงื่อนไขขอบเชด $T=0$ ที่ $r=a, b$ $t>0$	
เมื่อใช้เงือนไซขอบเซตชนิดที่ 1	เรือนไซเริ่มต้น $T=T_j$ เมื่อ $t=0, a \leq r \leq b$	
	азлотяйляви $T = \frac{2T_i}{r(b-a)} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \frac{e^{-a\beta_i^2} \sin\beta_m(r-a) \times}{\left[\frac{\sin\beta_m(b-a)}{\beta_i^2} - \frac{(r-a)\cos\beta_m(b-a)}{\beta_m} - \frac{a\cos\beta_m(b-a)}{(b-a)} + \frac{a}{(b-a)} \right] \right\}$	
	$\log \sin \beta_m (b-a) = 0$	

วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ. ปีที่ 23 ฉบับที่ 3 กันยายน-ธันวาคม 2543

101

วิธีการทดลอง

คัดเลือกไก่กระทงพันธุ์ Abor acres อายุ 38 วัน น้ำหนัก 1.7-1.8 กิโลกรัม ซึ่งหลังจากล้วง เครื่องในออกมีน้ำหนักประมาณ 1.45-1.6 กิโลกรัม ให้มีน้ำหนักใกล้เคียงกัน จำนวน 3 คู่ ในไก่ 1 คู่ ใช้วัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง 1 ตัว และน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง 1 ตัว การวัดอุณหภูมิทำโดยเสียบ เทอร์โมคัปเปิลที่บริเวณกลางอกไก่ที่หนาที่สุด และบริเวณหนังไก่

นำไก่ทั้ง 3 คู่จุ่มลงน้ำเย็นที่ผสมน้ำแข็งพร้อม ๆ กัน ในถังน้ำมีอุณหภูมิ 0°C และ มีการเป่าลม โดยใช้ลมจาก air compressor บันทึกอุณหภูมิไก่ทุกดำแหน่ง ทุก ๆ 5 วินาที ด้วย data logger และชั่ง น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงโดยเครื่องชั่งความละเอียด 0.01 กรัม โดยที่ก่อนนำไปชั่งจะแขวนไก่ให้ น้ำหยดเป็นเวลา 1 นาที ทำการทดลองจนกระทั่งอุณหภูมิไก่ค่อนข้างคงที่ ที่ประมาณ 4°C

หลังจากทำการวัดอุณหภูมิและน้ำหนักให้ถึงจุดที่ต้องการแล้วจะผ่าอกไก่เพื่อตรวจสอบ ดำแหน่งเทอร์โมคัปเปิลที่ถูกต้องอีกครั้ง

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองและคำนวณในแบบจำลองต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2

พารามิเตอร์	การทคลอง ครั้งที่ 1	การทคลอง กรั้งที่ 2	การทดลอง ครั้งที่ 3	ที่มา
1. ความหนาของอกไก่; <i>L</i> (mm.)	31.5	34.8	36.9	ขนาคไก่
2. ความหนาของหนังไก่ (mm.)	1.75	1.85	1.85	ขนาคไก่
 ระยะวัดอุณหภูมิซึ่งห่างจากผิวหรือ ตำแหน่งในการกำนวณในแบบจำลอง ที่ 2 และ 3 ; x (mm.) 	9.1, 10.4	12.6, 15.2	18.4	การทคลอง
4. ตำแหน่งในการกำนวณแบบ จำลองที่ 1 วัดจากกึ่งกลาง; x (mm.)	6.6, 5.3	4.8, 2.2	0.05	การทคลอง
 รัศมีภายในที่ใช้คำนวณใน แบบจำลองที่ 4 และ 5; a (mm.) 	32	33.1	33.6	การทคลอง
 รัศมีภาขนอกที่ใช้คำนวณใน แบบจำลองที่ 4และ 5; b (mm.) 	63.5	67.9	70.5	การทคลอง
 คำแหน่งที่ใช้ในแบบจำลองที่ 4 และ 5; r (mm.) 	54.4, 53.1	63.1, 65.6	55.7	การทดลอง
8. น้ำหนักไก่เริ่มต้น; (kg.)	1.380	1.556	1.716	น้ำหนักใก่
9. เวลาในการลดอุณหภูมิ; <i>เ</i> (s)	2400	2400	2400	การทคลอง

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองและการคำนวณอุณหภูมิและน้ำหนักไก่ในแบบจำลองคณิตศาสตร์

พารามิเตอร์	การทคลอง ครั้งที่ เ	การทคลอง กรั้งที่ 2	การทคลัอง กรั้งที่ 3	ที่มา
10. ก่าการนำความร้อน; <i>k</i> (W/m°C)	0.366	0.366	0.366	[9]
11. ความหนาแน่น; ρ (kg/m³)	1070	1070	1070_	[9]
12. ความร้อนจำเพาะ; C_{μ} (J/kg°C)	3.31x10 ³	3.31x10 ³	3.31x10 ³	[10]
 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิว; h (W/m²°C) 	2470	2600	2600	การทดลอง
14. สัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน; α (m/s)	1.03x10 ⁻⁷	1.03x10 ^{'7}	1.03×10 ⁻⁷	[10]
 ส้มประสิทธิ์การแพร่มวล; D (m²/s) 	4.16x10 ⁻⁹	4.16x10 ⁻⁹	4.16x10 ⁻⁹	การทุดลอง
 สมประสิทธิการพามวลน้ำ: k_i (m/s) 	8.19x10 ^{**}	18.99x10 ⁻⁵	6.57x10 ⁻⁵	การทคลอง
17. อุณหภูมิอกไก่เริ่มต้น; <i>T</i> , (°C)	26.3, 26.3	20.4, 27.9	38.0	การทคลอง
8. อุณหภูมิหนังไก่เริ่มต้น; (°C)	25.6	20.8	34.0	การทุดลอง
9. อุณหภูมิน้ำเข็นเฉลี่ย; <i>T</i> " (°C)	0	0.5	0.5	การทดลอง

ตารางที่ 2 (ต่อ) พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองและการคำนวณอุณหภูมิและน้ำหนักไก่ในแบบจำลองคณิตศาสตร์

ผลการทดลองและวิจารณ์

 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ทำนายโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อน และมวล แบบจำลองการถ่ายเทความร้อน และผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 1 การเปรียบเทียบการคำนวณอุณหภูมิจากแบบจำลองและผลที่วัดได้ในไก่ขนาด 1556 g.

จากรูปที่ 1 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อคำนวณด้วยแบบจำลองการถ่ายเทมวล และความร้อนขณะเดียวกัน แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนในแผ่นระนาบและจากข้อมูลในห้อง ปฏิบัติการพบว่า แบบจำลองที่ 1 มีความแม่นยำต่อการทำนายอุณหภูมิที่จุดต่างๆ บริเวณอกไก่ ใกล้เคียงกับแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนในแผ่นระนาบ โดยที่ค่า *R*² และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 3 แต่ที่หนังไก่แบบจำลองทั้งสองทำนายอุณหภูมิได้สูงกว่าห้อง ปฏิบัติการเล็กน้อย

แบบจำลองที่ 1 ทำนายอุณหภูมิได้แม่นยำใกล้เคียงกับแบบจำลองการถ่ายเทความร้อน ในรูปทรงต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 1 และพบว่าการทำนายอุณหภูมิของการถ่ายเทความร้อนในรูปทรง แผ่นระนาบและทรงกลมกลวงไม่มีความแตกต่างกัน เนื่องจากไก่มีลักษณะที่มีขนาดของวงแหวน หรือความหนาของอกไก่เล็ก และอุณหภูมิของน้ำเย็นและอกไก่ไม่แตกต่างกันมาก ดังนั้นจึงทำให้ ลักษณะของทรงกลมกลวงคล้ายกับแผ่นระนาบ การถ่ายเทความร้อนในรูปแบบทรงกลมตามแนวรัศมี จึงไม่มีอิทธิพลมากนัก

การทำนายอณหภมิไก่ขณะลดอณหภมิโดยแบบจำลองภายใต้เงื่อนไขขอบเขตชนิดที่ 1 และ ที่ 3 พบว่าเงื่อนไขขอบเขตไม่มีอิทธิพลมากนัก เนื่องจากในกระบวนการลดอุณหภูมิไก่สดนี้ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวมีค่าสูง (จากการวัดก่อนทดลอง มีค่าประมาณ 2500 W/m²°C) จึงทำให้กลุ่มตัวแปรไร้หน่วย Bi = hL/k ของระบบมีค่าเท่ากับ 107 หรือความต้านทานที่ผิวมีค่าต่ำ หมายถึง ปัจจัยภายในเป็นตัวควบคุมการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ซึ่งในลักษณะนี้ทำให้อุณหภูมิที่ผิวมีค่า ใกล้อุณหภูมิน้ำเย็นอย่างรวดเร็ว และเนื่องจากมีน้ำปริมาณมากอยู่ที่บริเวณใต้หนังไก่ รวมทั้ง หนังไก่บางเมื่อเทียบกับเนื้ออกไก่ เป็นสาเหตุหนึ่งทำให้อุณหภูมิผิวเริ่มต้นมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิ น้ำเย็นอย่างรวดเร็ว ทำให้แบบจำลองที่ใช้เงื่อนไขขอบเขตชนิดที่ 1 สามารถทำนายอุณหภูมิได้ใกล้เดียง กับเงื่อนไขขอบเขตชนิดที่ 3

	R ²		ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		Residue	
การทดลอง	แบบ จำลองที่ 1	แบบ จำลองที่ 2	แบบ จำลองที่ 1	แบบ จำลองที่ 2	แบบ จำลองที่ 1	แบบ จำลองที่ 2
ครั้งที่ 1 (L=31.5 mm.)						
- $x = 9.1 \text{ mm}$,	0.9987	0.9978	0.503	0.521	-0.11	-0.21
- x = 10.4 mm.	0.9975	0.9965	0.669	0.664	-0.05	-0.16
- ที่ผิว $x = 1.75 \text{ mm}$ ครั้งที่ 2 ($L = 34.8 \text{ mm.}$)	0.9917	0.9911	0.598	0.629	0.29	0.34
- <i>x</i> = 12.6 mm.	0.9971	0.9961	0.563	0.644	-0.48	-0.57
- $x = 15.25$ mm.	0.9981	0.9975	0.624	0.714	-0.56	-0.65
- ที่ผิว $x = 1.85$ mm. ครั้งที่ 3 (L=36.9 mm.)	0.9241	0.9231	1.352	1.394	0.9	0.9
- $x = 18.4$ mm.	0.9986	0.9984	0.701	0.668	-0.09	-0.09
 ที่ผิว x = 1.85 mm. 	0.9403	0.9453	1.084	1.097	0.31	0.31

ตารางที่ 3 แสดงการทำนายอุณหภูมิในแบบจำลองต่าง ๆ

ในการทำนายอุณหภูมิโดยแบบจำลองทั้งหมดให้ผลใกล้เคียงกันเป็นเพราะลักษณะของไก่ยังคง สมบูรณ์อยู่มาก ทำให้กลไกการเคลื่อนที่ของความร้อนเป็นลักษณะการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว โดยที่กลไกการเคลื่อนที่ของความร้อนเนื่องจากการแพร่ของมวลน้ำนั้นไม่มีผลเพราะน้ำไม่สามารถ แพร่ผ่านเซลล์เข้าไปได้



2. เปรียบเทียบน้ำหนักที่ทำนายโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลอง

รูปที่ 2 การเปรียบเทียบน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจากห้องปฏิบัติการกับแบบจำลอง

เมื่อศึกษาน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นขณะลดอุณหภูมิ และน้ำหนักที่ทำนายจากแบบจำลองที่ 1 เมื่อใช้ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเนื้อได้แก่ 1.0x10⁻¹¹ m²/s [11], 5.8x10⁻¹⁰ m²/s [12] ตามลำดับ ดังแสดง ในรูปที่ 2 พบว่า แบบจำลองที่ 1.ไม่สามารถทำนายน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของไก่ทั้งตัวได้เมื่อใช้ค่าสัมประสิทธิ์ การแพร่ต่าง ๆ เนื่องจากน้ำที่แพร่เข้าไปในตัวไก่ ไม่ซึมผ่านทุกชั้นเนื้อไก่ แต่เข้าไปเฉพาะที่บริเวณ พังผืด (muscle sheath) ส่วนระหว่างหนังกับเนื้อ และเนื้อเยื่อไขมันใต้ผิวหนัง (subcutaneous) เท่านั้น [5] เนื่องจากเซลล์ของไก่ส่วนใหญ่ยังสมบูรณ์ ซึ่งสอดคล้องกับการวัดปริมาณความชื้นหลังจาก การลดอุณหภูมิ (โดยทำการทดลองเพิ่มเติมด้วยการวัดความชื้นบริเวณส่วนหนังกับเนื้อและส่วนที่เป็น เนื้อไก่) จึงทำให้แบบจำลองไม่เหมาะกับการทำนายการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักไก่ในกระบวนการ ลดอุณหภูมิ การศึกษาปริมาณน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นในขณะลดอุณหภูมิ



รูปที่ 3 น้ำหนักไก่ที่เพิ่มขึ้นขณะลดอุณหภูมิในน้ำเย็นที่ไม่มีอากาศเป่าหมุนเวียน

จากผลการทดลองหาปริมาณความชื้นไก่หลังจากกระบวนการลดอุณหภูมิซึ่งใช้อากาศหมุนเวียน พบว่าปริมาณความชิ้นเพิ่มขึ้นในลักษณะเช่นเดียวกันกับการแซ่ไก่ในน้ำเย็นที่ไม่มีอากาศหมุนเวียน กล่าวคือ ชิ้นส่วนไก่ที่ปริมาณความชิ้นเพิ่มขึ้นมากที่สุดคือ บริเวณพังผืดระหว่างหนังและเนื้อไก่ โดยมีความชื้นเพิ่มขึ้นร้อยละ 6 ขณะที่ในส่วนของเนื้ออกไก่มีความชื้นเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 1 เท่านั้น และพบว่าปริมาณความชื้นไก่ที่เพิ่มขึ้นนี้สูงกว่าปริมาณความชื้นหลังการแช่น้ำเย็นที่ไม่มีอากาศ หมุนเวียนนาน 20 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 3 ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าการใช้อากาศเพื่อช่วยในกระบวนการ ลดอุณหภูมิ มีส่วนทำให้น้ำหนักไก่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งยังไม่เข้าใจปรากฏการณ์นี้ชัดเจนนัก

แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนในแผ่นระนาบที่ใช้เงื่อนไขขอบเขตชนิดที่ 1 สอดคล้อง กับข้อมูลจากการทดลองเป็นอย่างดี เนื่องจากน้ำเย็นเข้าไปในเนื้อไก่โดยเข้าไปอยู่ระหว่างหนังกับเนื้อ ทำให้ลักษณะดังกล่าวใกล้เคียงกับเงื่อนไขขอบเขตชนิดที่ 1

ดังนั้นในช่วงแรกของกระบวนการควรจะใช้น้ำเย็นที่มีอุณหภูมิต่ำมาก เพื่อทำให้น้ำที่เข้าไป ระหว่างหนังกับเนื้อไก่นั้นมีอุณหภูมิด่ำ ซึ่งจะทำให้กระบวนการลดอุณหภูมิไก่นี้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- 1. Mead, G.C., 1989, *Processing of Poultry*, Elsevier Applied Science, Landford, pp. 103-125.
- 2. Stadelman, W.J., 1988, Egg and Proultry-Meat Processing, HillissHorwood Ltd., Chichester, pp. 98, 103-104.
- Mountney, G.L., 1989, Poultry Product Technology, Food Product Press, New York, pp. 67–87.
- Ang, X.Y.W. and Hamm, D., 1983, "Comparison of Commercial Processing Method vs. Hot-deboning of Fresh Broilers on Nutrient Content of Breast Meat," Journal of *Food Science*, Vol. 48, No. 5, pp. 1543-1544.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineering, 1986, *ASHRAE handbook : Refrigeration Systems and Application, ASHRAE*, Atlanta, pp. 13.1–13.10.
- 6. Lunko, P. and Malkki, Y., 1979, Food Process Engineering, Vol. 1, Pergamon Press, London, pp. 390-398.
- Bird, R.B., Stewart, W.E. and Lightfoot, E.N., 1960, Transport *Phenomena*, John Wiley & Sons, New York, pp. 554-566.
- 8. Luikov, A.V. and Mikhailov, Y.A., 1965, *Theory of Energy* and Mass *Transfer*, Pergamon Press, Oxford, pp. 49-61.
- Walters, R.E. and May, K.N., 1963, "Thermal Conductivity and Density of Chicken Breast Muscle and Skin," *Food Technology*, Vol. 17, No. 6, pp. 130–133.
- Geankoplis, C.J., 1993, Transport Process and Unit Operation, 3rd ed., PTR Prentice Hall, New Jersey, pp. 365.
- Mallikarjunan, P. and Mittal, G.S., 1994, "Heat and Mass Transfer during Beef Carcass Chilling-Modeling and Simulation," *Journal of Food Engineering*, Vol. 23, No. 5, pp. 277-292.
- Zogzas, N.P., Maroulis, Z.B. and Kouris, D.M., 1996, "Moisture Diffusivity Data Compilation in Foodstuffs," *Drying Technology*, Vol. 14, No. 10, pp. 2225-2253.