แบบจำลองคอมพิวเตอร์ของการถ่ายโอนความร้อนในการฆ่าเชื้อแบบปาสเตอร์ของน้ำนมโดยใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น

Computer Model for Heat Transfer in the Pasteurization of Milk Using Plate Heat Exchanger

สิงหนาท พวงจันทน์แดง (Singhanat Phoungchandang)[1]

วีระ สุวรรณศร (Weera Suwannasorn)[2]

บทคัดย่อ

การพัฒนาแบบจำลองคอมพิวเตอร์โดยใช้ทฤษฎีของการถ่ายโอนความร้อนของการไหลของของเหลวแบบปั่นป่วน เพื่อใช้ทำนายสภาวะในการทดลอง ได้แก่ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของการไหลสัมประสิทธิ์ การถ่ายโอนความร้อนรวม พื้นที่ในถ่ายโอนความร้อนทั้งหมด ความเร็วของการไหลของน้ำนม และจำนวนแผ่นให้ความร้อน ผลการทดลองพบว่าแบบจำลองการฆ่าเชื้อแบบปาสเตอร์สามารถทำนายสภาวะดังกล่าวได้ดีเมื่อทำการทวนสอบ สภาวะที่ใช้ในการทดลองกับสภาวะที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลอง ได้แก่ พื้นที่ในการถ่ายโอนความร้อนทั้งหมดและจำนวนแผ่นของแผ่นให้ความร้อนพบว่า มีความผิดพลาด 0.107% และ 0.125% ตามลำดับ

ABSTRACT

A computer model based on heat transfer theory of turbulent flow was developed. The model was able to predict conditions in the experiment, such as heat transfer coefficient, overall heat transfer coefficient, total area of heat transfer, velocity of flow and number of plate heat exchangers. The results revealed that the Pasteurization Model could predict the conditions of experimentation well. The verification of experimental and predicted conditions was in good agreement, in terms of total area of heat transfer and number of plate heat exchangers. The errors in these conditions were only 0.107% and 0.125% respectively.

คำสำคัญ: การฆ่าเชื้อแบบปาสเตอร์, การถ่ายโอนความร้อน, แบบจำลองคอมพิวเตอร์

Keywords: Pasteurization, Heat transfer, Computer model

[1] *รองศาสตราจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น*

[2] *นายช่างเทคนิค ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น*

บทนำ

การฆ่าเชื้อแบบปาสเตอร์ เป็นการใช้ความร้อนเพียงเล็กน้อยให้ความร้อนแก่อาหารโดยใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส สำหรับอาหารที่มีความเป็นกรดต่ำ โดยมีความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) สูงกว่า 4.5 ได้แก่ น้ำนม เพื่อทำให้น้ำนมปราศจากเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค และเป็นการยืดอายุการเก็บของน้ำนม สำหรับอาหารที่มีความเป็นกรดสูงซึ่งมี pH น้อยกว่าหรือเท่ากับ 4.5 เช่นน้ำผลไม้บรรจุขวด สามารถยืดอายุการเก็บของอาหารได้นานหลายเดือน เนื่องจากวิธีการดังกล่าวสามารถทำลายเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเสีย เช่น ยีสต์ และรา ตลอดจนสามารถทำลายเอ็นไซม์ในภาวะดังกล่าวได้ด้วย

การฆ่าเชื้อแบบปาสเตอร์สามารถรักษาคุณค่าทางอาหารและรสชาติไว้ได้มาก โดยการใช้อุณหภูมิสูงและเวลาสั้น (High-temperature short-time, HTST) การฆ่าเชื้อน้ำนมโดยใช้อุณหภูมิต่ำเวลานาน (Low-temperature long-time, LTLT) โดยทำการฆ่าเชื้อน้ำนมที่อุณหภูมิ 63 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งอาจทำให้เสื่อมเสียคุณค่าทางอาหาร เช่น วิตามิน และกลิ่นรส มากกว่าวิธี HTST ซึ่งใช้อุณหภูมิ 71.8 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 วินาที (Fellows, 2000)

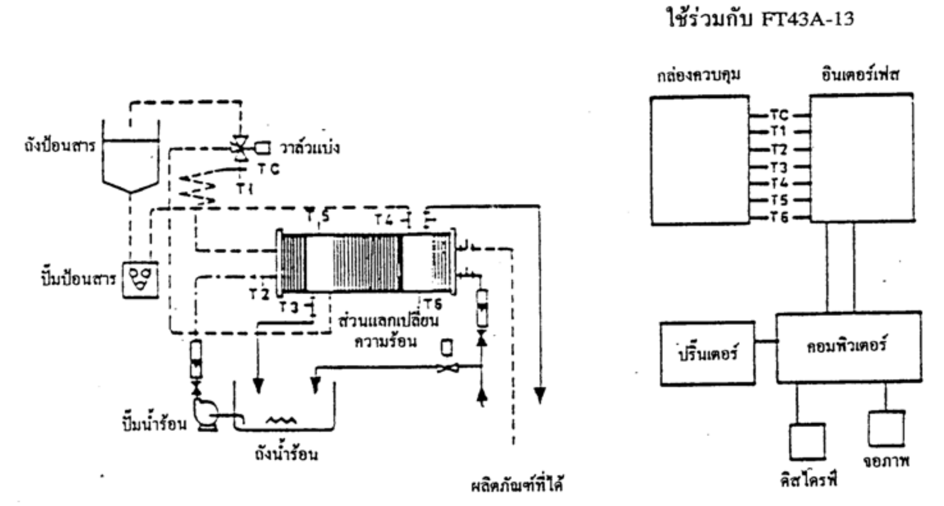
ในงานวิจัยนี้มีการพัฒนาแบบจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการทำนายสภาวะในการทดลอง เปรียบเทียบกับสภาวะที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งข้อมูลที่ได้รับจะเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบเครื่องฆ่าเชื้อแบบปาสเตอร์ และช่วยลดการนำเข้าอุปกรณ์ดังกล่าว

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

เครื่องฆ่าเชื้อแบบปาสเตอร์ รุ่น FT43 Pasteurizer ประเทศอังกฤษ สามารถวัดอุณหภูมิบนจุดต่าง ๆ ได้ 9 จุด และสามารถบันทึกอุณหภูมิได้ 6 จุดอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสามารถปรับตั้งเครื่องตามรูปที่ 1 น้ำนมในถังป้อน (Feed Tank) ต้องมีปริมาณอย่างน้อย 3 ลิตร สภาวะในการทำงานของเครื่องฆ่าเชื้อแบบปาสเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1. แสดงสภาวะในการทำงานของเครื่องฆ่าเชื้อปาสเตอร์

รายการ	ปริมาณ
1. อัตราการไหลของน้ำนม	0.01 กก./วินาที
2. จำนวนแผ่นของแผ่นให้ความร้อน	8 แผ่น
3. พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนแผ่นละ	5.676x10^{-3} ตารางเมตร
4. ความร้อนจำเพาะ (specific heat)	3.90 กิโลจูลล์/กก.องศาเคลวิน
5. ค่าประสิทธิผล (Effectiveness)	0.80
6. ระยะห่างระหว่างแผ่นให้ความร้อน	0.0014 เมตร
7. สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแผ่นให้ความร้อน (Earle, 1983 ; Holman, 1990)	20 วัตต์/เมตร องศาเคลวิน



รูปที่ 1. แผนภูมิการตั้งเครื่องฆ่าเชื้อแบบปาสเตอร์น้ำนม

เปิดสวิทช์ส่วนกลางบนกล่องควบคุมโดยตั้งการควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 71.8 องศาเซลเซียส ตั้งวาล์วแบ่งจุดเตือน (Flow diversion valve) ที่อุณหภูมิต่ำกว่าคือ 69.0 องศาเซลเซียส เพื่อให้น้ำนมไหลกลับไปที่ถังป้อนผ่านวาล์วแบ่งจนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 69.0 องศาเซลเซียส จึงจะป้อนน้ำนมเข้าสู่กระบวนการ หลังจากนั้นเปิดสวิทช์ของเครื่องสูบและเปิดน้ำนมให้ไหลด้วยอัตราการไหล 100 มล./นาที หรือ 0.10 กก./วินาที

เปิดสวิทช์เครื่องทำความร้อน การอ่านระดับความร้อนของระบบอาจสังเกตจากเครื่องบันทึก (Chart Recorder) และอ่านจากตัวเลขแสดงอุณหภูมิแบบดิจิตอล โดยแสดงอุณหภูมิทางออกของน้ำนมบนตัวควบคุมอุณหภูมิขั้นสุดท้าย เมื่อถึงจุดที่ตั้งของวาล์วแบ่งจะเกิดเสียงเตือนที่อุณหภูมิ 69.0 องศาเซลเซียส วาล์วแบ่งจะเปลี่ยนไปอยู่ตำแหน่งเปิดและนำน้ำนมไหลกลับเข้าไปในตัวป้อนอีกครั้ง แล้วผ่านเข้าส่วนทำความร้อนซ้ำ (heating) หลังจากผ่านเข้าส่วนทำความร้อนซ้ำแล้วจะไหลเข้าส่วนทำความเย็น (cooling) และไหลออกในส่วนล่างภายหลังแลกเปลี่ยนความร้อนแล้ว อุณหภูมิที่ออกมาจะเป็นอุณหภูมิสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ซึ่งมีการต่อสายเพื่อระบายผลิตภัณฑ์ไปเก็บในภาชนะ

อุณหภูมิของน้ำนมที่ออกจากส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนจะสูงขึ้นจนกระทั่งถึงจุดควบคุมอุณหภูมิบนกล่องควบคุมมีน้ำร้อนไหลผ่านไปที่ท่อบรรจุพัก (holding tube) ที่อุณหภูมิ 71.8 องศาเซลเซียส ได้ตามต้องการ

ทำการบันทึกอุณหภูมิของน้ำนมและน้ำร้อนที่ไหลเข้าและออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

การคำนวณการถ่ายโอนความร้อนของเครื่องฆ่าเชื้อแบบปาสเตอร์

เนื่องจากงานวิจัยนี้ศึกษาการใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์ในการทำนายสภาวะในการทดลองโดยใช้เครื่องฆ่าเชื้อแบบปาสเตอร์ซึ่งประกอบด้วย เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นที่มีการไหลสวนทางกัน (Counter current flow) ของน้ำนมและน้ำร้อน คุณสมบัติของน้ำนมดังแสดงในตารางที่ 2 โดยมีการไหลของน้ำนมและน้ำร้อนแบบสมดุลกล่าวคือสมดุลของความจุความร้อน (thermal capacity) สามารถเขียนสมการได้ดังนี้ (Eastop and McConkey, 1993; Woods, 1995)

ตารางที่ 2. คุณสมบัติของน้ำนม

รายการ	ปริมาณ
1. ความหนาแน่น (m)	1,030 กก./ลูกบาศก์เมตร
2. ความหนืด (cpm)	3.90 กิโลจูลล์/กก.องศาเคลวิน
3. ความหนืดจลน์ (m)	9.9 x10-7 ตารางเมตร/วินาที
4. สภาพนำความร้อน (km)	0.52 วัตต์/เมตร องศาเคลวิน
5. เลขแพลงค์ (Prm)	0.73

ที่มา : Woods (1995)

$$Q = m^{\bullet} c_p \Delta T \qquad (1)$$

$$m^{\circ}{}_h\, c_{ph} = m^{\bullet}{}_c\, c_{pc} = m^{\bullet}\, c_p \qquad (2)$$

ค่าประสิทธิผล (Effectiveness) (Eastop and McConkey, 1993) ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$\varepsilon = \frac{NTU}{1+NTU} \qquad (3)$$

จากสมการที่ 3

$$NTU = \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \qquad (4)$$

และ

$$NTU = \frac{UA}{m^{\bullet}\, c_p} \qquad (5)$$

โดยที่

Q คือ อัตราการถ่ายโอนความร้อน (วัตต์)

T คือ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

$m^{\bullet}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวล (กก./วินาที)

cp คือ ความร้อนจำเพาะ (จูล/กก.องศาเคลวิน)

NTU คือ จำนวนหน่วยถ่ายโอน (Number of Transfer Unit)

ε คือ ประสิทธิผล (Effectiveness)

UA คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมพื้นที่ (วัตต์/องศาเคลวิน)

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ในท่อสำหรับสภาวะที่ไม่มีมิติ (dimensionless condition) (Wong, 1977)

$$Nu = 0.023\, Re^{0.8} Pr^{0.4} \qquad (6)$$

สำหรับเส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิกส์ (hydraulics diameter, d_h)

$$d_h = \frac{4x\ \text{พื้นที่ภาคตัดขวาง}}{\text{เส้นรอบรูป}} \qquad (7)$$

$$= \frac{4\, x\, B.S}{2(B+S)} \qquad (8)$$

ถ้า B >> S

$$d_h = 2S$$

เนื่องจากงานวิจัยนี้จะรักษาเลขเรย์โนลด์ (Reynold number) ของการไหลในแผ่นให้ความร้อนแต่ละแผ่นให้คงที่โดยมีค่าประมาณ 5,000 ซึ่งจากเลขเรย์โนด์ดังกล่าวจะอยู่ในช่วงของการไหลแบบปั่นป่วน ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน (h) ของการไหลภายในแผ่นให้ความร้อนคำนวณได้จาก

$$NU = \frac{h\, d_h}{k_m} \qquad (9)$$

สำหรับในอุตสาหกรรมอาหารแผ่นให้ความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำด้วยโลหะปลอดสนิม (stainless steel) ซึ่งจัดเป็นโลหะที่มีส่วนผสมของโครเมียมในปริมาณสูง จึงพิจารณาการถ่ายโอนความร้อน 3 ระยะดังนี้ (Wong, 1977)

$$\frac{I}{U} = \frac{2}{h} + \frac{t_s}{k_s} \qquad (10)$$

โดยที่

Nu = เลขนัสเซลท์ (Nusselt Number)

Re = เลขเรย์โนด์ (Reynold Number)

Pr = เลขแพลนด์ (Prandtl Number)

d_h = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิกส์ของแผ่นให้ความร้อน (เมตร)

B = ความยาวของแผ่นให้ความร้อน (เมตร)

S = ระยะห่างระหว่างแผ่นให้ความร้อน (เมตร)

h = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของการไหล (วัตต์/ตารางเมตร องศาเคลวิน)

k_m = สภาพการนำความร้อนของน้ำนม (วัตต์/เมตร องศาเคลวิน)

k_s = สภาพการนำความร้อนของแผ่นให้ความร้อน (วัตต์/เมตร องศาเคลวิน)

U = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวม (วัตต์/ตารางเมตร องศาเคลวิน)

t_s = ความหนาของแผ่นให้ความร้อน (เมตร)

ความเร็วในการไหลสามารถคำนวณได้จากเลขเรย์โนล์

$$R_e = \frac{v.d_h}{v_m} \qquad (11)$$

โดย

v คือ ความเร็วของการไหล (เมตร/วินาที)

v_m คือ ความหนืดจลน์ (kinematic viscosity) ของน้ำนม (ตารางเมตร/วินาที)

จากสมการที่กล่าวมาข้างต้นทำให้สามารถนำไปสร้างแบบจำลอง โดยใช้โปรแกรม BASIC ในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของการไหล สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวม พื้นที่ของแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน ความเร็วของการไหลของน้ำนม และจำนวนแผ่นให้ความร้อน ร้อยละของความผิดพลาด (% Error) ของค่าที่ได้จากการทดลอง (Experimentation, E) กับค่าที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลอง (Prediction, P) สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{\% ความผิดพลาด (Error)} = \frac{(E-P)}{E} x100 \qquad (12)$$

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ผลการให้ความร้อนแก่น้ำนมโดยใช้น้ำร้อนดังแสดงในตารางที่ 3 โดยอุณหภูมิเฉลี่ยล๊อกของน้ำนมสามารถหาได้จากสมการที่ 13

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \dfrac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \qquad (13)$$

โดย ΔT_{lm} = อุณหภูมิเฉลี่ยล๊อก

พบว่า ΔT_{lm} มีค่า 14.33 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำนมก่อนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่า 65.66°C และอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำนมที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่า 73.32°C (ตารางที่ 3)

แบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ยังสามารถทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของการไหล (h) สัมประสิทธิ์การถ่ายความร้อนรวม (U) พื้นที่ในการถ่ายโอนความร้อนทั้งหมด (A) ความเร็วของการไหลของน้ำนม (v) และจำนวนแผ่นของแผ่นให้ความร้อน (n) ดังแสดงในตารางที่ 4 เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณและแบบจำลองพบว่า การทำนายโดยใช้แบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ (ตารางที่ 4) เมื่อทำการทวนสอบ (verification) ของสภาวะที่ใช้ในการทดลอง (Experimentation) กับค่าสภาวะที่ได้

ตารางที่ 3. ผลการให้ความร้อนแก่น้ำนมโดยใช้น้ำร้อน

อุณหภูมิน้ำนมไหลเข้า (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิน้ำนมไหลออก (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิน้ำร้อนไหลเข้า (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิน้ำร้อนไหลออก (องศาเซลเซียส)
66.1	69.7	86.5	79.6
66.5	71.4	86.6	79.7
66.2	72.5	86.7	80.3
66.3	72.2	86.9	80.2
65.6	73.87	86.9	81.1
66.3	73.7	87.0	81.0
65.8	74.5	86.7	81.3
65.6	74.7	86.9	81.5
65.1	74.7	87.0	81.6
64.7	74.7	86.9	81.6
64.1	74.6	87.0	81.5
เฉลี่ย 65.66	**73.32**	**83.83**	**80.85**

ตารางที่ 4. สภาวะที่ได้จากการคำนวณและสภาวะที่ได้จากแบบจำลอง Pasteurization Model เปรียบเทียบกับสภาวะต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง[1]

สภาวะของการทดลอง	ค่าที่ได้จากการคำนวณ	ค่าที่ได้จากการทำนายโดยแบบจำลอง	ค่าที่ใช้ในการทดลอง [1]	%ความผิดพลาด (Error)
1. สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของการไหล (h)	3,543.01 วัตต์/ตารางเมตร องศาเคลวิน	3,542.99 วัตต์/ตารางเมตร องศาเคลวิน	-	-
2. สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวม (U)	8,611.57 วัตต์/ตารางเมตร องศาเคลวิน	8,611.49 วัตต์/ตารางเมตร องศาเคลวิน	-	-
3. พื้นที่ในการถ่ายโอนความร้อนทั้งหมด (A)	4.535×10^{-2} ตารางเมตร	4.535158×10^{-2} ตารางเมตร	4.54×10^{-2} ตารางเมตร	0.107%
4. ความเร็วของการไหลของน้ำนม (V)	1.767857 เมตร/วินาที	1.767857 เมตร/วินาที	-	-
5. จำนวนของแผ่นให้ความร้อน (n)	7.99 แผ่น	7.99 แผ่น	8	0.125%

จากการทำนายโดยใช้แบบจำลอง (Predicted by P asteurization Model) ได้แก่ พื้นที่ในการถ่ายโอนความร้อนทั้งหมด และจำนวนแผ่นให้ความร้อน พบว่า มีความผิดพลาด (% Error) น้อยมากเพียง 0.107% และ 0.125% ตามลำดับ แสดงว่า การทำนายโดยแบบจำลอง Pasteurization Model มีความถูกต้องใกล้เคียงกับค่าที่ใช้ในการทดลอง

สรุปผลการวิจัย

จากการทดสอบการฆ่าเชื้อแบบปาสเตอร์ในน้ำนม พบว่า แบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ทำนายพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของการไหล สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวม พื้นที่ในการถ่ายโอนความร้อนทั้งหมด ความเร็วของการไหลของน้ำนม และจำนวนแผ่นของแผ่นให้ความร้อน ได้อย่างถูกต้อง เมื่อทำการทวนสอบสภาวะที่ใช้ในการทดลองกับสภาวะที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลอง ได้แก่ พื้นที่ในการถ่ายโอนความร้อนทั้งหมด และจำนวนแผ่นของแผ่นให้ความร้อนมีความผิดพลาดเพียง 0.107% และ 0%.125 ตามลำดับ

เอกสารอ้างอิง

Earle, R.L. 1983. Unit Operations in Food Processing. 2^{nd} ed. Pergamon Press, Oxford.

Eastop, T.D. and McConkey, A. 1993. Applied Thermodynamics for Engineering Technology. SI units. 5^{th} ed., Longman Scientific and Technical, New York.

Fellows, P.J. 2000. Food Processing Technology : Principles and practice, 2^{nd} ed., Wood head Publ. Ltd.,England,

Holman, J.P. 1990. Heat Transfer. 7^{th} ed. McGraw-Hill Inc., New York.

Wong, H.Y. 1977. Handbook of Essential Formulae and Data on Heat Transfer for Engineers. Longman, London.

Woods, J.L. 1995. Food Process Engineering. University of Newcastle Upon Tyne, U.K.