

การออกแบบระบบทำความเย็นสำหรับถังบรรจุและขนถ่ายน้ำนมดิบ Design of Cooling System for a Movable Raw Milk Container

ชัยวัฒน์ อยู่หนู¹ ภาวนี นรัตถรักษา² สุริยันต์ เทียมเพ็ชร³ และ อโนทัย สุขแสงพนมรุ่ง⁴
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถ.พิบูลสงคราม เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

โทร. 0-2913-2500 ต่อ 8236 โทรสาร 0-2587-0024 E-mail: mch48003@kmitnb.ac.th¹, phn@kmitnb.ac.th²

Chaiwat Yoonoo^{*}, Phavane Narataruksa, Suriyan Tiempet and Anothai Suksangphanomrung

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok

1518 Piboonsongkram Rd, Bangsue Bangkok 10800 Thailand

Tel: 0-2913-2500 Ext.8236 Fax: 0-2587-0024 E-mail: mch48003@kmitnb.ac.th¹, phn@kmitnb.ac.th²

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการทำความเย็นของน้ำนมดิบภายในถังบรรจุและขนถ่ายน้ำนมดิบขนาดมาตรฐาน 40 ลิตร โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดอุณหภูมิของน้ำนมดิบจากอุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส ให้มีอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 45 นาที โดยระบบการทำความเย็นที่ทำการศึกษามีลักษณะเป็นตู้กระจายความเย็นรูปทรงกระบอกที่สามารถจุ่มลงไปในถังนมในแนวตั้ง เพื่อดึงความร้อนออกจากน้ำนมดิบ โดยขั้นตอนการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นการศึกษาถึงการหาพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนของตู้กระจายความเย็น ซึ่งมีสมมติฐานคือเป็นการพาความร้อนแบบธรรมชาติ และสมการที่ใช้ในการคำนวณเป็นสมการสหสัมพันธ์ของทรงกระบอกในแนวตั้ง สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำนมดิบภายในถังกับเวลาในการศึกษากำหนดให้ตู้กระจายความเย็นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 18 เซนติเมตร จากการคำนวณเชิงตัวเลข เมื่ออุณหภูมิผิวของทรงกระบอกเป็น 1 องศาเซลเซียส พื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนที่ต้องการจะเท่ากับ 0.1866 ตารางเมตร ที่ความสูงของทรงกระบอกเท่ากับ 33 เซนติเมตร ส่วนที่สองเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการกระจายตัวของอุณหภูมิของน้ำนมดิบภายในถังตามแนวรัศมี เพื่อยืนยันว่าการทำความเย็นสามารถลดอุณหภูมิของน้ำนมดิบให้เป็น 4 องศาเซลเซียส ได้ทั่วทั้งถัง โดยการศึกษาใช้สมการอนุพันธ์พหุคูณที่สภาวะไม่คงตัวและสมการการถ่ายเทความร้อนใน 1 มิติในการคำนวณ และมีสมมติฐานคือ อุณหภูมิผิวของตู้กระจายความเย็นคงที่และไม่มีการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังถังสู่บรรยากาศ ความเร็วของน้ำนมดิบเกิดขึ้นในแนวรัศมีของถังเท่านั้นและเป็นค่าคงที่ จากการคำนวณโดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำนมดิบตามระยะต่างๆ ในแนวรัศมีของถังที่เวลาต่างๆ ในการทำความเย็น จากการศึกษาพบว่า การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนเพียงอย่างเดียวไม่สามารถลดอุณหภูมิของน้ำนมดิบให้เป็น 4 องศาเซลเซียส ได้ภายในเวลา 45 นาที ดังนั้นต้องมีกลไกการพาความร้อน

ร่อนทางกลเพื่อเพิ่มความเร็วของน้ำนมดิบในแนวรัศมีให้ได้น้อยกว่า 6×10^{-5} เมตร/วินาที จึงจะสามารถทำความเย็นได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด ซึ่งค่านี้สามารถใช้ในการทดลองหาความเร็วต่ำสุดของการกวนน้ำนมในถังได้

Abstract

This paper is to study a cooling system for a movable raw milk container. A standard size container of 40 liters was the case study, and the main objective was to lower the milk temperature from 39°C to approximately 4°C within 45 minutes. The study can be divided into two parts. The first part was the design of heat transfer area of the cooling coil. A mathematical model of natural convective heat transfer was constructed for transient state of cooling. It was found that the model found non-linear and can be solved by numerical integration. However, there were some design parameters to be specified which were the tube length (33 cm.) and the surface temperature of cooling coil (1°C). The heat transfer area obtained by the model was 0.1866 m² at 33 cm. of height. The second part was a study of temperature profiles of milk in the radial direction of the container to confirm that the milk temperature can be decreased thoroughly. A mathematical model by the conservation of heat at unsteady-state operation and one dimension heat transfer was introduced. The assumptions for the model were a constant temperature at the cooling coil surface, no heat transfer to the container wall, and milk stream velocity occurring only in the radial direction. By solving the model with finite difference method, the results were relationships between milk temperature and time along with distance in the radius direction for several value of stream velocity. From the model study, it can be found

* Corresponding author

that only natural convective heat transfer will not lead us to the target temperature of 4°C within 45 minutes. At least 6×10^{-5} m/s of the radius velocity has to be introduced via an agitator in order to achieve the target. Finally, the obtained velocity can be used to design the optimum operating condition for milk stirring.

1. บทนำ

เป็นที่ทราบกันดีว่า ผลิตภัณฑ์นมเป็นอาหารที่มีคุณค่าต่อมนุษย์เป็นอย่างยิ่ง แต่ในปัจจุบันการผลิตน้ำนมวัวพร้อมดื่มในประเทศไทยประสบปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพของน้ำนมดิบในหลายพื้นที่ ซึ่งสาเหตุที่สำคัญสาเหตุหนึ่งคือ การปนเปื้อนของจุลินทรีย์ปริมาณมากในน้ำนมดิบก่อนเข้าสู่กระบวนการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์นมพร้อมดื่ม เนื่องจากภายหลังจากการรีดนม น้ำนมดิบถูกบรรจุลงในถังนมขนาดมาตรฐาน 40 ลิตร ซึ่งน้ำนมดิบมีอุณหภูมิประมาณ 39 องศาเซลเซียส และมีจุลินทรีย์ปนเปื้อนอยู่ปริมาณหนึ่ง โดยไม่ได้มีการทำความเย็นภายหลังจากการรีด อีกทั้งขณะทำการขนส่งจากฟาร์มของเกษตรกรไปยังโรงงานแปรรูปไม่ได้มีการเก็บรักษาน้ำนมดิบไว้ที่อุณหภูมิที่ต่ำ น้ำนมดิบจึงอยู่ในสภาวะบรรยากาศเป็นเวลานานแสดงตามรูปที่ 1 ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วของจุลินทรีย์ จากสาเหตุที่น้ำนมดิบมีคุณภาพต่ำ ทำให้ผลิตภัณฑ์นมมีคุณภาพต่ำด้วย และยังส่งผลกระทบต่อผู้บริโภคโดยตรง นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการตรวจพบการรับซื้อน้ำนมดิบจากเกษตรกรอีกด้วย



รูปที่ 1 การขนส่งนมที่สภาวะบรรยากาศ

จากการที่น้ำนมดิบมีการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์อย่างรวดเร็วในช่วงเวลาภายหลังจากการรีดจนกระทั่งส่งถึงโรงงานนั้น วิธีการที่สามารถยับยั้งการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์คือ การลดอุณหภูมิของน้ำนมดิบภายหลังจากการรีดให้อยู่ที่ประมาณ 4 องศาเซลเซียส อย่างรวดเร็ว และเก็บน้ำนมดิบไว้ที่อุณหภูมิที่ต่ำนี้จนกระทั่งส่งถึงโรงงาน[1] ดังนั้นในบทความนี้จึงได้ทำการศึกษาถึงการทำความเย็นของน้ำนมดิบภายหลังจากการรีดในถังบรรจุและขนถ่ายขนาดบรรจุ 40 ลิตร อุณหภูมิของน้ำนมดิบ 39 องศาเซลเซียส ให้มีอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 45 นาที การทำความเย็นใช้ระบบทำความเย็นเป็นแบบอัดไอ ซึ่งสามารถทำได้โดยการจุ่มคอยล์เย็นของระบบทำความเย็นลงในถังนมเพื่อดึงความร้อนออกจากน้ำนมดิบ และมีใบกวนทำหน้าที่ปั่นกวนน้ำนมดิบเพื่อให้มีการกระจายตัวของอุณหภูมิให้ทั่วถึงตลอดถังแสดงดังรูปที่ 2

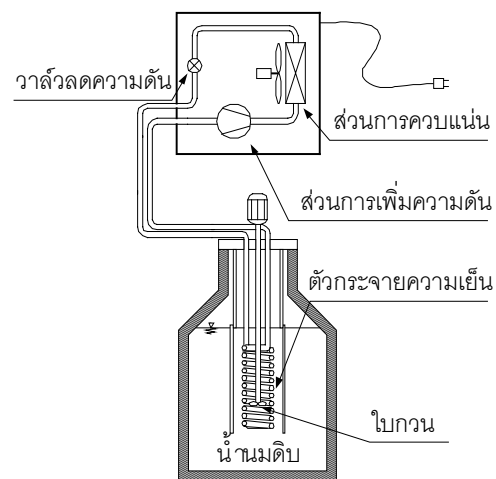
น้ำนมดิบเป็นของเหลวที่มีคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางความร้อนใกล้เคียงกับน้ำ เพราะในน้ำนมดิบนั้นมีองค์ประกอบหลักเป็นน้ำ ซึ่งสามารถแสดงองค์ประกอบของน้ำนมดิบได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของน้ำนมดิบ [2]

องค์ประกอบ	ปริมาณเฉลี่ย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
น้ำ (Water)	87.0
ของแข็งทั้งหมด	13.0
- ไขมัน (Fat)	4.0
- โปรตีน (Proteins)	3.4
- แลคโตส (Lactose)	4.8
- แร่ธาตุ (Minerals)	0.8

ดังนั้นในบทความนี้จึงได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ

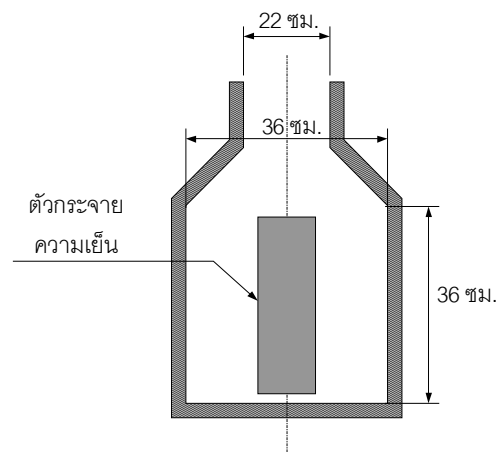
- (1) การหาพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนของตัวกระจายความเย็น
- (2) การศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิของน้ำนมดิบภายในถังตามแนวรัศมี



รูปที่ 2 แสดงระบบทำความเย็น

2. การหาพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อน

การออกแบบระบบทำความเย็นนั้น ส่วนของตัวกระจายความเย็นมีความสำคัญในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำนมดิบภายในถังกับสารทำความเย็นภายในระบบทำความเย็น ซึ่งพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนนี้ถูกกำหนดโดยขนาดของถัง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงขนาดของถังนมและตัวกระจายความเย็น

ในการศึกษามีข้อสมมติฐานสำหรับการออกแบบคือ ตัวกระจายความเย็นเป็นทรงกระบอกตันในแนวตั้ง การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างตัวกระจายความเย็นกับน้ำนมดิบเป็นการพาความร้อนแบบธรรมชาติ ไม่มีการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมและคุณสมบัติของน้ำนมดิบเป็นค่าคงที่ที่อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 21.5 องศาเซลเซียส

ทั้งนี้ในการศึกษาโดยใช้สมมติฐานการถ่ายเทความร้อนเป็นการพาความร้อนแบบธรรมชาตินั้น เพราะในการปฏิบัติงานจริงต้องการให้ระบบทำความเย็นสามารถลดอุณหภูมิของน้ำนมดิบได้ตามเป้าหมายภายในเวลาที่กำหนดแม้ไม่มีการปั่นกวน ในกรณีที่อุปกรณ์ในการกวนไม่สามารถทำงานได้

จากสมการสหสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยไนส์เซลน์มเบอร์ในการพาความร้อนแบบธรรมชาติของทรงกระบอกตันในแนวตั้งดังสมการที่ 1 [3]

$$Nu = \frac{h\delta}{k} \quad (1)$$

ซึ่งไนส์เซลน์มเบอร์สามารถเขียนอยู่ในรูปความสัมพันธ์กับตัวเลขพรีน့်นัมเบอร์และกราชอฟนัมเบอร์ ตามสมการที่ 2 [3]

$$Nu = C(Gr Pr)^n \quad (2)$$

โดยที่ Gr แสดงดังสมการที่ 3 [3]

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)\delta^3}{\nu^2} \quad (3)$$

จากสมมติฐานที่ว่า ตัวกระจายความเย็นเป็นทรงกระบอกในแนวตั้ง ไนส์เซลน์มเบอร์สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 4 [3]

$$Nu = 0.1(Gr Pr)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

เมื่อ $10^9 < Gr Pr < 10^{13}$ ในกรณีนี้ความยาวเฉพาะ (δ) ในสมการที่ 1 และ 3 เป็นความยาวของทรงกระบอก (L) และอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาแบบธรรมชาติสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการของนิวตันดังสมการที่ 5 [3]

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_s - T_\infty) \quad (5)$$

เมื่อ $A = \pi DL$ รวมสมการที่ 1 ถึงสมการที่ 5 ได้สมการที่ 6 ซึ่งเป็นสมการของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ

$$h = 0.1(Gr Pr)^{\frac{1}{3}} \frac{k}{L} = \frac{\dot{Q}_{conv}}{\pi DL(T_s - T_\infty)} \quad (6)$$

หากไม่มีการสูญเสียพลังงานความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม ปริมาณความร้อนที่เกิดจากการถ่ายเทความร้อนโดยการพาแบบธรรมชาติจาก

น้ำนมดิบไปยังตัวกระจายความเย็นจะเท่ากับปริมาณความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำนมดิบ ดังสมการที่ 7

$$\dot{Q}_{conv} = \frac{dQ_{milk}}{dt} = m_{milk} C_{p,milk} \frac{d(T_i - T_\infty)}{dt} \quad (7)$$

แทนสมการที่ 3 และสมการที่ 7 ลงในสมการที่ 6 จัดรูปสมการจะได้สมการที่ 8 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำนมดิบภายในถังที่เวลาใด ๆ

$$\frac{dT_\infty}{dt} = \frac{0.1kDL(T_s - T_\infty)^{\frac{4}{3}}}{-m_{milk} C_{p,milk}} \left(\frac{g\beta}{\nu^2} Pr \right)^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

โดยที่ ที่ $t = 0$, $T_\infty = 39$ องศาเซลเซียส
ที่ $t = 2700$ วินาที, $T_\infty = 4$ องศาเซลเซียส

ในการคำนวณได้กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอกให้มีขนาดเหมาะสมกับความเป็นไปได้ในการใช้งาน และความยาวของทรงกระบอกที่ทำให้พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เพียงพอสำหรับลดอุณหภูมิให้ได้อุณหภูมิเป้าหมายภายในเวลาที่กำหนดจะได้จากการคำนวณ อุณหภูมิที่ผิวจะถูกกำหนดให้สามารถมีแรงขับเคลื่อนเพียงพอในการแลกเปลี่ยนความร้อน และไม่ทำให้น้ำนมดิบเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ จากสมการที่ 8 สามารถนำไปคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำนมดิบภายในถังกับเวลาโดยมีเงื่อนไขในการคำนวณดังนี้

- (1) น้ำหนักของน้ำนมดิบเป็น 40 กิโลกรัม
- (2) เวลาในการลดอุณหภูมิของน้ำนมดิบจาก 39 เป็น 4 องศาเซลเซียส คือ 45 นาที
- (3) เส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอกเป็น 18 เซนติเมตร
- (4) ความสูงของทรงกระบอกอยู่ระหว่าง 13-33 เซนติเมตร
- (5) อุณหภูมิที่ผนังทรงกระบอกเป็น 1-3 องศาเซลเซียส
- (6) กำหนดให้คุณสมบัติของน้ำนมดิบมีค่าคงที่ที่อุณหภูมิ 21.5 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าดังนี้ [4]

- Cp =	4,180	จูล/กิโลกรัม·เคลวิน
- k =	0.592	วัตต์/เมตร·เคลวิน
- ρ =	1005	กิโลกรัม/เมตร ³
- μ =	9.5x10 ⁻⁴	กิโลกรัม/เมตร·วินาที

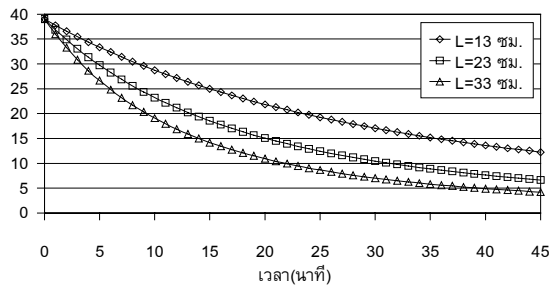
จากการคำนวณโดยใช้สมการที่ 8 และเงื่อนไขที่กำหนด ได้ผลการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 4 ถึงรูปที่ 6

จากการฟรุ๊ปที่ 4 รูปที่ 5 และรูปที่ 6 ซึ่งมีอุณหภูมิที่ผิวของทรงกระบอกเป็น 1 2 และ 3 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในการลดอุณหภูมิของน้ำนมดิบที่มีอุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที ที่ความสูง ของทรงกระบอกเป็น 33 เซนติเมตร สามารถลดอุณหภูมิของน้ำนมดิบลงได้ต่ำสุด 4 5 และ 6 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งในกรณีที่

สามารถลดอุณหภูมิน้ำมันดิบให้มีอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าเท่ากับ 0.1866 ตารางเมตร

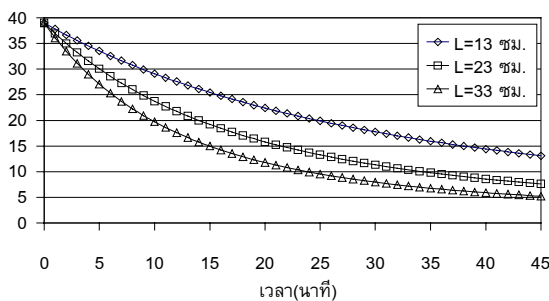
จากกราฟที่แสดงในรูปที่ 4-6 นั้น พบว่าเมื่อพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนของตัวกระจายความเย็นเพิ่มขึ้น อุณหภูมิของน้ำมันดิบจะลดลงเร็วขึ้น ดังนั้นในการสร้างตัวกระจายความเย็นของระบบทำความเย็นสำหรับลดอุณหภูมิน้ำมันดิบนั้น สามารถสร้างให้มีพื้นที่เท่ากับค่าที่ได้จากการคำนวณ หรือสร้างให้มีพื้นที่มากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณเพื่อให้อุณหภูมิน้ำมันดิบลดลงเป็น 4 องศาเซลเซียส ได้เร็วขึ้น

อุณหภูมิน้ำมันดิบ
(องศาเซลเซียส)



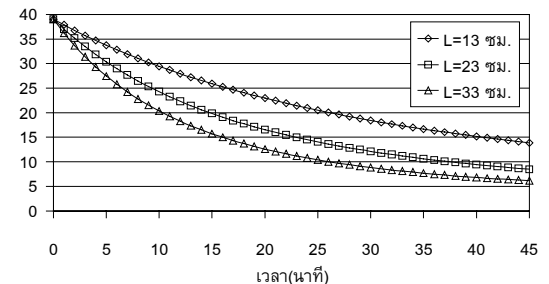
รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำมันดิบกับเวลา โดยอุณหภูมิที่ผนังทรงกระบอกเป็น 1 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิน้ำมันดิบ
(องศาเซลเซียส)



รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำมันดิบกับเวลา โดยอุณหภูมิที่ผนังทรงกระบอกเป็น 2 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิน้ำมันดิบ
(องศาเซลเซียส)



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำมันดิบกับเวลา โดยอุณหภูมิที่ผนังทรงกระบอกเป็น 3 องศาเซลเซียส

3. การหาการกระจายตัวของอุณหภูมิน้ำมันดิบ

ในการทำความเย็นน้ำมันดิบภายในถังบรรจุและขนถ่ายน้ำมันดิบให้มีอุณหภูมิเป็น 4 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 45 นาที นั้น มีความจำเป็นที่น้ำมันดิบจะต้องมีอุณหภูมิเท่ากันตลอดทั่วทั้งถัง ดังนั้นการหาการกระจายตัวของอุณหภูมิจึงมีความจำเป็น โดยในการศึกษานี้เป็นการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิใน 1 มิติ คือในแนวรัศมีของถัง

จากสมการการอนุรักษ์พลังงาน [5]

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + 2\mu \left[\left(\frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right] + 2\mu \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\theta}{r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right]^2 + 2\mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right]^2 + 2\mu \left[\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right]^2 - 2\mu \frac{2}{3} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right]^2 \quad (9)$$

จากสมมติฐาน คุณสมบัติของน้ำมันดิบไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ อุณหภูมิของน้ำมันดิบเปลี่ยนแปลงเฉพาะในแนวรัศมีเท่านั้น ความเร็วที่เกิดขึ้นมีเฉพาะในแนวรัศมีและเป็นค่าคงที่ จากสมมติฐานข้างต้นสมการที่ 9 สามารถลดรูปได้ดังสมการที่ 10

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = k \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] + 2\mu \left(\frac{v_r}{r} \right)^2 \quad (10)$$

$$\text{กำหนดให้} \quad \alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad \text{และ} \quad \gamma = \frac{2\mu}{\rho C_p}$$

แทน α และ γ ในสมการที่ 10 และจัดรูปสมการได้สมการที่ 11 ซึ่งเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายตัวของอุณหภูมิ น้ำมันดิบตามแนวรัศมีที่เวลาต่างๆ

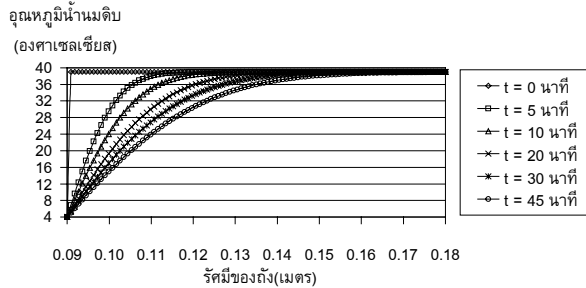
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \left(\frac{\alpha}{r} - v_r \right) \frac{\partial T}{\partial r} + \gamma \left(\frac{v_r}{r} \right)^2 \quad (11)$$

จากสมการที่ 11 สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายตัวของอุณหภูมิ น้ำมันดิบตามแนวรัศมีที่เวลาต่างๆ ด้วยระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องได้ โดยมีสภาวะในการคำนวณดังนี้

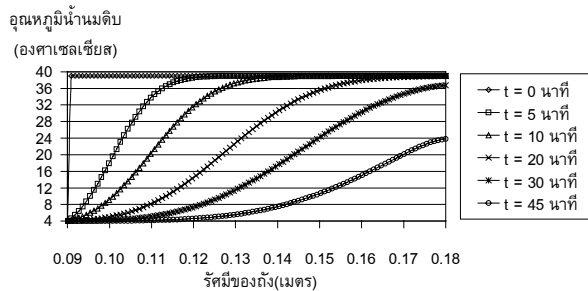
- (1) สภาวะเริ่มต้น ที่เวลาเริ่มต้นอุณหภูมิของน้ำมันดิบที่ติดกับพื้นผิวของตัวกระจายความเย็นเป็น 4 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่ระยะใดๆ ตามแนวรัศมีของถังถึงเป็น 39 องศาเซลเซียส

(2) สภาวะขอบเขตที่เวลาใดๆ อุณหภูมิของน้ำนมดิบที่ติดกับพื้นผิวตัวกระจายความร้อนเป็น 4 องศาเซลเซียส และไม่มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำนมดิบผ่านผนังของถังกับบรรยากาศ

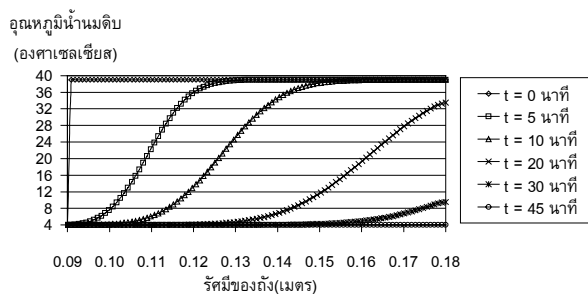
โดยในการคำนวณกำหนดให้คุณสมบัติของน้ำนมดิบมีค่าคงที่ที่อุณหภูมิ 21.5 องศาเซลเซียส และเป็นการหาค่าความเร็วในแนวนอนซึ่งกำหนดให้เป็นค่าคงที่ที่ทำให้อุณหภูมิของน้ำนมดิบภายในถังเป็น 4 องศาเซลเซียสทั่วทั้งถัง จากการคำนวณได้ผลแสดงตามรูปที่ 7 ถึงรูปที่ 9 ดังนี้



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำนมดิบกับระยะของถังที่ความเร็วในแนวนอนเป็น 0 เมตร/วินาที



รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำนมดิบกับระยะของถังที่ความเร็วในแนวนอนเป็น 3×10^{-5} เมตร/วินาที



รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำนมดิบกับระยะของถังที่ความเร็วในแนวนอนเป็น 6×10^{-5} เมตร/วินาที

จากการพารูปที่ 7 รูปที่ 8 และรูปที่ 9 ซึ่งเป็นกราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิของน้ำนมดิบตามแนวรัศมีถึงภายในถังนมในการลดอุณหภูมิของน้ำนมดิบจาก 39 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 45 นาที ในกราฟรูปที่ 7 ซึ่งไม่มีความเร็วในแนวนอนที่เวลา 45 นาที มีเพียงน้ำนมดิบบริเวณใกล้กับตัวกระจายความร้อนเท่านั้นที่อุณหภูมิลดลง ส่วนบริเวณผนังของถังนมอุณหภูมิยังคงเป็น 39 องศาเซลเซียสจากการพารูปที่ 8 เมื่อเพิ่มความเร็วเป็น 3×10^{-5} เมตร/วินาที ที่เวลา 45

นาที อุณหภูมิของน้ำนมดิบที่ติดกับผนังของถังนมเป็น 24 องศาเซลเซียส และเมื่อเพิ่มความเร็วในแนวนอนเป็น 6×10^{-5} เมตร/วินาทีที่เวลา 45 นาที อุณหภูมิของน้ำนมดิบเป็น 4 องศาเซลเซียส ตลอดแนวรัศมีของถังนม

ในการลดอุณหภูมิของน้ำนมดิบโดยใช้การจุ่มคอยล์ทำความเย็นนั้นพบว่ากลไกการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนเพียงอย่างเดียวไม่สามารถทำให้อุณหภูมิของน้ำนมดิบเท่ากับ 4 องศาเซลเซียส ได้ทั่วถึงตลอดทั้งถัง ดังนั้นจึงต้องมีการใช้แรงผลักดันทางกลด้วยการกวนเพื่อให้เกิดความเร็วของน้ำนมดิบในแนวนอนขึ้น จึงจะสามารถทำให้น้ำนมดิบมีอุณหภูมิเท่ากันทั่วทั้งถัง

4. สรุปและวิจารณ์ผล

จากการหาพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อน ที่ทำให้การลดอุณหภูมิของน้ำนมดิบจาก 39 องศาเซลเซียสเป็น 4 องศาเซลเซียสภายในเวลา 45 นาที โดยกำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกระจายความร้อนเป็น 18 เซนติเมตร และอุณหภูมิที่ผิวเท่ากับ 1 องศาเซลเซียส ความยาวที่คำนวณได้เท่ากับ 33 เซนติเมตร ทำให้มีพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อน 0.1866 ตารางเมตร ในการปฏิบัติงานจริงสามารถนำพื้นที่ที่คำนวณได้ ไปออกแบบตัวกระจายความร้อนในลักษณะที่มีความเหมาะสมกับการใช้งาน

จากการหาการกระจายตัวของอุณหภูมิพบว่า การคำนวณโดยไม่มีความเร็วในแนวนอนหรือเป็นการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว ไม่สามารถทำให้น้ำนมดิบภายในถังมีอุณหภูมิเป้าหมายตามที่กำหนดภายในเวลา 45 นาทีทั่วทั้งถัง แต่เมื่อเพิ่มความเร็วในแนวนอนขึ้นเป็น 3×10^{-5} เมตร/วินาที อุณหภูมิของน้ำนมดิบที่บริเวณใกล้ผนังถังลดลงเป็น 24 องศาเซลเซียส และเมื่อความเร็วเป็น 6×10^{-5} เมตร/วินาที อุณหภูมิของน้ำนมดิบจึงเป็น 4 องศาเซลเซียสทั่วทั้งถัง จากผลดังกล่าวพบว่าเมื่อความเร็วในแนวนอนเพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิของน้ำนมดิบลดลงเร็วขึ้น ซึ่งสามารถนำผลจากการคำนวณไปประยุกต์ใช้งานจริงได้ โดยการปั่นกวนน้ำนมดิบให้มีความเร็วในแนวนอนอย่างน้อยเท่ากับ 6×10^{-5} เมตร/วินาที

ในการใช้คอยล์ทำความเย็นลดอุณหภูมิของน้ำนมดิบนั้น ปัจจัยที่อาจส่งผลทำให้เวลาในการลดอุณหภูมียาวนานมากขึ้นได้แก่ การสูญเสียความร้อนสู่บรรยากาศ ซึ่งในการใช้ชุดคอยล์ทำความเย็นในสภาวะการทำงานจริงต้องมีการป้องกันการสูญเสียความร้อนด้วยการหุ้มฉนวนให้กับถังนม ดังนั้นพลังงานความร้อนที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างบรรยากาศกับน้ำนมดิบผ่านผนังถังจึงเป็นปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับภาระในการทำความเย็นหลัก อันได้แก่ พลังงานความร้อนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำนมดิบ

5. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัย การสร้างและทดสอบระบบทำความเย็นสำหรับถังบรรจุและขนถ่ายน้ำนมดิบ ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) และได้รับความร่วมมือในด้านข้อมูลการวิจัยจากสหกรณ์โคนมหนองโพราชบุรี จำกัด(ในพระบรมราชูปถัมภ์) จังหวัด

ราชบุรี โครงการส่วนพระองค์ สวนจิตรลดา สถาบันเทคโนโลยีพระ-
จอมเกล้าพระนครเหนือ ขอขอบคุณหน่วยงานดังกล่าว มา ณ โอกาสนี้

z ตามแนวแกน z
 θ เชิงมุม
 ∞ นานมดืบที่เวลาใดๆ

เอกสารอ้างอิง

- [1] ม.ร.ว.ชนิศนดากร วรวรรณ, “การเลี้ยงโคนม”, พิมพ์ครั้งที่ 3, ไทยวัฒนาพานิช, 2530
- [2] Tetra Pak. Dairy processing handbook. Sweden : Tetra Pak Processing Systems, 1995.
- [3] J. P. Holman, “Heat Transfer”, 8th ed., McGraw-Hill, 1997
- [4] Pual J. R. Schreier, “Monitoring and Modelling of Heat Exchanger Fouling” Ph.D Thesis, Univ. Cambridge
- [5] R. Byron Bird, Warren E. Stewart and Edwin N. Lightfoot, “Transport Phenomena”, 2nd ed., John Wiley&son, 2002

คำอธิบายสัญลักษณ์

ตัวแปร

- A พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อน (เมตร²)
- Cp ค่าความร้อนจำเพาะ (จูล/กิโลกรัม·เคลวิน)
- D เส้นผ่านศูนย์กลาง (เมตร)
- Gr กราซอฟฟ์นัมเบอร์
- g ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (เมตร/วินาที²)
- h สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (วัตต์/เมตร²·เคลวิน)
- k สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (วัตต์/เมตร·เคลวิน)
- L ความยาว (เมตร)
- m มวล (กิโลกรัม)
- Nu นัสเซิลนัมเบอร์
- Pr พรันด์นัมเบอร์
- Q อัตราการถ่ายเทพลังงานความร้อน (วัตต์)
- r รัศมี (เมตร)
- T อุณหภูมิ (วัตต์)
- t เวลา (วินาที)
- v ความเร็ว (เมตร/วินาที)

อักษรกรีก

- β สัมประสิทธิ์การขยายตัวของเหลว (1/เคลวิน)
- δ ความยาวเฉพา (เมตร)
- μ ความหนืด (กิโลกรัม·เมตร/วินาที)
- ν ความหนืดไคเนติก (เมตร²/วินาที)
- ρ ความหนาแน่น (กิโลกรัม/เมตร³)

ตัวห้อย

- conv การพาความร้อน
- milk น้ํานมดืบ
- r ตามแนวรัศมี
- s ที่ผนัง