



การจำลองทางคณิตศาสตร์ของสภาวะการไหลที่เหมาะสมเพื่อลดการเกิดตะกักรันในอุตสาหกรรมนม

ณัฐพล จุลวุก และ แคทลียา ปัทมพรหม*

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2564-3001 อีเมล: cattalee@engr.tu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2017.06.004

รับเมื่อ 2 พฤศจิกายน 2558 ตอรับเมื่อ 19 พฤษภาคม 2559 เผยแพร่ออนไลน์ 16 มิถุนายน 2560

© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาแนวทางในการลดการเกิดตะกักรันในช่องทางการไหลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ ซึ่งทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิแก่น้ำนมดิบเบื้องต้น โดยพิจารณาการก่อตัวของตะกักรันจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความดันลดที่ได้ทำการทดลองในชุดทดสอบการเกิดตะกักรันของน้ำนมขนาด 2 เมตร โดยศึกษาผลของอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นจาก 4,000 ลิตร/ชั่วโมง 9,000 ลิตร/ชั่วโมง และ 12,000 ลิตร/ชั่วโมง (ที่อุณหภูมิน้ำร้อน 80°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง) พบว่าความดันลด (Pressure Drop) มีค่าลดลงและความหนาของชั้นตะกักรัน (จากการคำนวณ) มีค่าลดลงจาก 1.42 เซนติเมตร ไปเป็น 0.53 เซนติเมตร และ 0.17 เซนติเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องจากอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นทำให้โปรตีน β -Lactoglobulin เกาะตัวบนพื้นผิวของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ยากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้นเป็นผลให้มีการใช้พลังงานลดน้อยลงและสามารถเพิ่มระยะเวลาในการผลิตมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังได้นำเสนอแบบจำลองในกระบวนการเพื่อเชื่อมโยงระหว่างความหนาของชั้นตะกักรัน (จากการคำนวณ) และการลดลงของอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อน โมเดลนี้ได้ถูกทดสอบโดยการเปรียบเทียบกับการผลิตจริงในโรงงาน พบว่าสามารถเชื่อมโยงกันได้ดีและสามารถนำมาใช้ประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการปรับปรุงกระบวนการได้ โดยพบว่าการเพิ่มอัตราการไหลจาก 9,000 ลิตร/ชั่วโมง ไปเป็น 12,000 ลิตร/ชั่วโมง สามารถยืดวงจรการตัดล้างได้จากทุก ๆ 8 ชั่วโมงไปเป็นทุก ๆ 17 ชั่วโมง ทำให้สามารถประหยัดต้นทุนการผลิตได้เป็นอย่างมาก

คำสำคัญ: เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ, ความดันตกคร่อม, ตะกักรัน, แบบจำลอง

Simulation of Suitable Flow Conditions for Reducing Milk Fouling in the Dairy Industry

Nattapon Junlawog and Cattaleeya Pattamaprom*

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Rangsit Campus, Pathum-Thani, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0-2564-3001, E-mail: cattalee@engr.tu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2017.06.004

Received 2 November 2015; Accepted 19 May 2016; Published online: 16 June 2017

© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research proposed to study milk fouling in the flow channels of shell and tube heat exchangers used in the raw milk preheating process. The formation of fouling was classified through changes in the pressure drop across a 2-meter long milk fouling test unit. The effects of flow rates (4,000 l/h, 9,000 l/h and 12,000 l/h) were studied at a controlled hot water temperature (80°C) at a fixed experimental period of 2 hours. It was found that, at higher flow rate, the pressure drop was lower with thinner calculated scale layer thickness ranging from 1.42 cm to 0.53 cm and 0.17 cm, respectively. This might be because the protein β -Lactoglobulin could not attach and spread out easily on the heat exchanger surface at high flow rates. As a result, the efficiency of the heat exchanger was increased, leading to lower energy consumption and longer production time. In addition, this research proposed to use a theoretical model to link between the calculated scale layer thickness and the reduction of heat transfer. This model was proved by comparing with the actual plant operation and seems to be suitable for economic evaluations regarding process assessment. It was found that by increasing the flow rate from 9,000 l/h to 12,000 l/h, the cleaning cycle could be delayed from every 8 h to every 17 h, leading to significant savings in the dairy industry.

Keywords: Shell and Tube Heat Exchanger, Pressure Drop, Fouling, Model

1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (Shell and Tube Heat Exchanger) ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ หลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมปิโตรเลียม เป็นต้น คุณสมบัติของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนต่ำกว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นโครง (Plate Heat Exchanger) เนื่องจากช่องทางไหลที่มีลักษณะกว้าง จึงมีพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม ช่องทางไหลที่กว้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อช่วยให้อัตราการก่อตัวและยึดเกาะของตะกรันบริเวณผิวสัมผัสของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนน้อยลง ส่งผลให้ค่าความดันลด (Pressure Drop) มีค่าน้อยลงและประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มมากขึ้นและค่าความดันลดมีค่าน้อยลงทำให้อุตสาหกรรมอาหารประเภทต่างๆ เลือกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ รวมถึงในอุตสาหกรรมการผลิตนม อย่างไรก็ตามเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ ยังคงพบการเกิดตะกรันที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อของผลิตภัณฑ์นม และต้องทำความสะอาดบ่อยครั้ง ทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปอย่างไม่ต่อเนื่อง และเสียค่าใช้จ่ายในการล้างทำความสะอาด เนื่องจากในกระบวนการผลิตนมมีข้อจำกัดทางความปลอดภัยในการเติมสารลดการเกิดตะกรัน จึงจำเป็นต้องหาวิธีการปฏิบัติที่หลีกเลี่ยงการเกิดตะกรันโดยไม่ใช้สารเคมีเข้ามาเกี่ยวข้องซึ่งการปรับอัตราการไหลมีแนวโน้มที่จะลดการเกิดตะกรันและเพิ่มอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ แต่ก็ต้องใช้พลังงานในการปั๊มและมีอัตราการใช้น้ำที่เพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้การทดลองจริงเพื่อปรับเปลี่ยนอัตราการไหลในโรงงานนมมีความเสี่ยงต่อความเสียหายมูลค่ามหาศาลเนื่องจากวัตถุดิบมีราคาแพง ที่ผ่านมายังไม่มีงานวิจัยใดเสนอแนวทางการเชื่อมโยงผลการทดลองในชุดทดลองขนาดเล็กๆ กับสภาวะที่เกิดขึ้นจริงในโรงงานและยังไม่มีงานวิจัยที่กล่าวถึงการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ดังนั้น

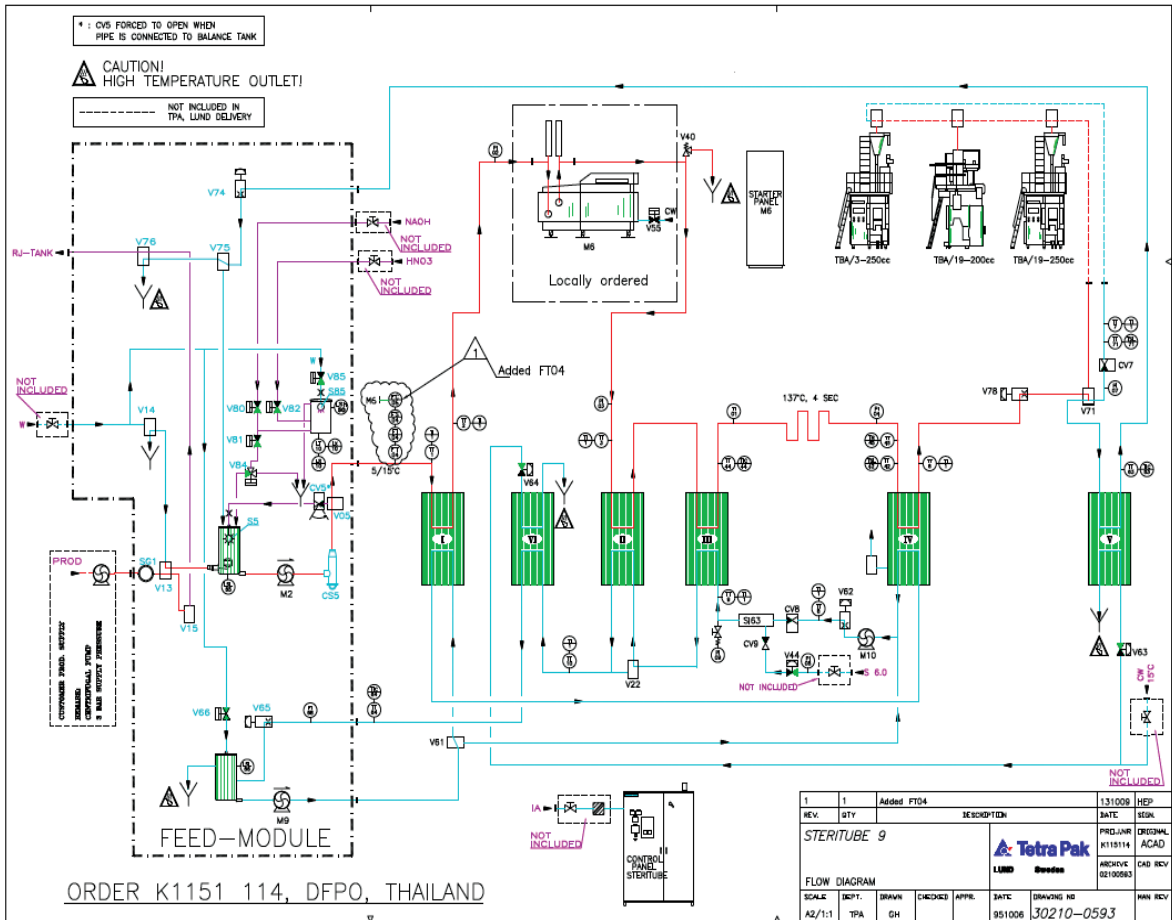
วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือสร้างแบบจำลองเพื่อเชื่อมโยงระหว่างความดันลดที่เปลี่ยนแปลงไปอันเนื่องมาจากตะกรันในชุดทดลองขนาดเล็กต่อความหนาของชั้นตะกรัน ซึ่งส่งผลต่อเนื่องไปสู่การเปลี่ยนแปลงของการถ่ายเทความร้อนโดยข้อมูลที่สามารถนำไปประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระยะเวลาในการตัดล้างและศึกษาผลอัตราการไหลของน้ำนมที่เหมาะสม เพื่อเสนอแนะแนวทางในการลดการเกิดตะกรัน และยืดระยะเวลาในกระบวนการ ผลิตให้มากขึ้น เพื่อความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

2. วิธีการทดลองและการสร้างแบบจำลอง

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาสภาวะการไหลที่ส่งผลให้เกิดการสะสมตัวของตะกรันในช่วงการแลกเปลี่ยนความร้อนเบื้องต้นของน้ำนมและน้ำร้อน ก่อนเข้าขั้นตอนโฮโมจีไนเซอร์โดยแสดงขั้นตอนในกระบวนการผลิตดังรูปที่ 1 การคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์พิจารณาจากการใช้พลังงานที่นำไปใช้ในการผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นเพื่อเอาชนะความต้านทานการแลกเปลี่ยนความร้อนในท่อน้ำนมจากการสะสมตัวของตะกรันที่เพิ่มมากขึ้น การพิจารณาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ดูจากความสามารถลดจำนวนครั้งในการตัดล้างและเพิ่มระยะเวลาในกระบวนการผลิตเพิ่มมากขึ้น โดยแบ่งวิธีการวิจัยออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

2.1 ขั้นตอนวิธีการทดลอง

เพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลต่อความดันลดที่เปลี่ยนแปลงไปอันเนื่องมาจากตะกรันในกระบวนการหมักนมดิบในโรงงานผลิตจริงใช้ท่อที่มีความยาว 30 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนมเท่ากับ 0.0409 เมตร และท่อน้ำร้อนเท่ากับ 0.0779 เมตร เป็นวัสดุสแตนเลสเกรด 316L ที่อัตราการไหลของน้ำนม 4,000 ลิตร/ชั่วโมง ดังนั้นในชุดทดลองศึกษาการเกิดตะกรันนี้จะใช้อัตราการไหล วัสดุผิวท่อและขนาดท่อเดียวกันกับกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนจริง โดยชุดทดลองนี้มีความยาวท่อเพียง 2 เมตร วิธีการทดลองเป็นดังนี้

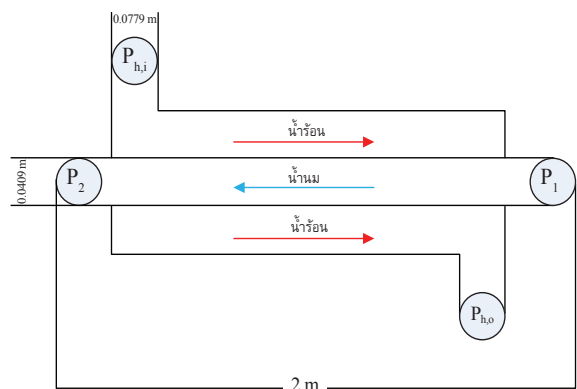


รูปที่ 1 กระบวนการผลิตนม ยูเอช.ที และกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำร้อนและน้ำนม

1. เตรียมน้ำนมดิบชนิดจืดปริมาณ 500 ลิตร ไหลวนในท่อผ่านชุดทดลองศึกษาการเกิดตะกั้นที่อัตราการไหลของน้ำนม 4,000 ลิตร/ชั่วโมง เป็นระยะเวลา 120 นาที ดึงแผนภาพแสดงการไหลดังรูปที่ 2 โดยอุณหภูมิของน้ำนมดิบที่ไหลผ่านชุดทดลองถูกควบคุมไว้ที่ 77°C โดยการแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำร้อนที่อยู่ด้านเปลือก

2. จัดบันทึกค่าความดันขาเข้า และขาออก ของชุดทดลองศึกษาการเกิดตะกั้นทุกๆ 30 นาที

3. ทำตามวิธีการที่ 1 ถึง 2 โดยการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำนมที่ 9,000 ลิตร/ชั่วโมงและ 12,000 ลิตร/ชั่วโมงตามลำดับ



รูปที่ 2 ชุดทดลองศึกษาการเกิดตะกั้นที่มีความยาว 2 เมตร

2.2 การสร้างแบบจำลองเพื่อเชื่อมโยงผลของความดันตกกับประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

การคำนวณเพื่อสร้างแบบจำลองภายใต้สมมติฐานคือ

1. เป็นการดำเนินการที่สภาวะคงตัว โดยค่า Friction Factor (f) และค่า Surface Roughness (ϵ) ไม่ขึ้นอยู่กับความยาวท่อ

2. ทำการหยุดล้างเครื่องเมื่อค่า f ใกล้เคียงกับ 0.27 เนื่องจากต้องการให้ f มีค่าเท่ากับการหยุดล้างเครื่องในกระบวนการผลิตจริง

3. ค่า ϵ เป็นตัวแทนความหนาของชั้นตะกรัน

4. เนื่องจากท่อในโรงงานผลิตจริงมีความยาวมาก ข้อ U -bend จึงมีผลต่อค่าความดันตกในท่อน้อยเมื่อเทียบกับส่วนท่อตรง

5. ความหนาตะกรันมีความสม่ำเสมอเท่ากันตลอดทั้งความยาวของท่อ สมมติฐานนี้มีความเป็นไปได้เนื่องจากแรงเค้นที่กระทำที่ผิวท่ออย่างทั่วถึงในระหว่างการไหลทำให้ความหนาของชั้นตะกรัน มีค่าใกล้เคียงกันตลอดทั้งท่อ

6. วิธีการ ปริมาณของสารเคมี และพลังงานที่ใช้ในการล้างตะกรันมีค่าเท่ากันในกรณีที่มีความหนาของชั้นตะกรันเปลี่ยนไป หรืออัตราการไหลเปลี่ยนไป

โดยจะทำการศึกษิตตามวิธีการตามขั้นตอนดังรูปที่ 3

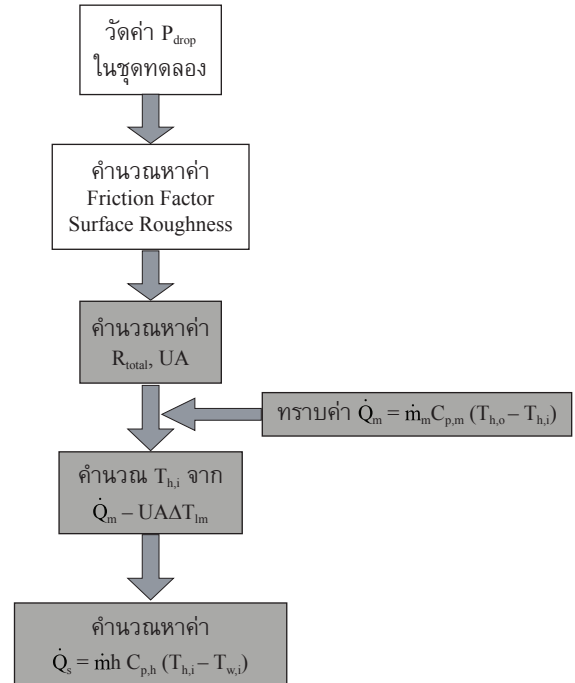
โดยที่เมื่อได้ค่าความดันขาเข้าและขาออกที่ได้จากการทดลอง สามารถคำนวณค่าความดันตกของผลการทดลอง โดยคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$P_{drop} = P_1 - P_2 \quad (1)$$

เมื่อ P_1 คือความดันขาเข้า (kPa)

P_2 คือความดันขาออก (kPa)

จากนั้นนำค่าความดันตกที่ได้จากการทดลองของอัตราการไหล ณ ความเร็วต่างๆ นำไปคำนวณหาค่า Friction Factor (f) ใช้สมการของ Mechanical Energy Balance ดังสมการที่ (2) โดยค่าความดันตกขึ้นอยู่กับ 2 ส่วนคือค่า f และค่าความเร็ว (V) ซึ่งผลของความเร็วยังอย่างเดียว



รูปที่ 3 ขั้นตอนการศึกษาการสร้างแบบจำลองเพื่อเชื่อมโยงผลของความดันตกกับประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

(ไม่เกี่ยวข้องกับค่า f ที่เปลี่ยนแปลงตามความเร็ว) ได้ถูกพิจารณาแล้วในเทอม V^2 ในสมการที่ (2)

$$P_{drop} = \frac{f L \rho V^2}{2D} \quad (2)$$

เมื่อ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ (m)

L คือความยาวของท่อ (m)

ρ คือความหนาแน่นของน้ำนม (kg/m^3)

ส่วนค่า Friction Factor (f) ก็เปลี่ยนแปลงตาม 2 ตัวแปรเช่นกันคือ ค่าความเร็วในรูปแบบของ Reynolds Number และค่า Surface Roughness (ϵ) ดังสมการที่ (3) ของ [5]

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\epsilon / D_{if}}{3.7} + \frac{2.51}{R_e \sqrt{f}} \right) \quad (3)$$

เมื่อ ε คือ Surface Roughness (m)

R_e คือ Reynolds number

D_{if} คือเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่เกิดตะกัน (m)

$$= D_i - 2\varepsilon$$

ดังนั้นเมื่อทราบค่า f จาก P_{drop} แล้วก็สามารถนำมาคำนวณค่า ε ได้จากสมการที่ (3) เช่นกัน

ซึ่งค่า ε นี้สามารถนำไปเชื่อมโยงกับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เปลี่ยนไปเนื่องจากตะกัน ซึ่งในการคำนวณค่า Overall Resistance (R_{total}) พิจารณามีตะกันในฝั่งน้ำนม (Tube Side) แต่ไม่มีตะกันในฝั่งน้ำร้อน (Shell Side) เนื่องจากน้ำร้อนได้ถูกบำบัดเพื่อลดสารก่อตะกันเรียบร้อยแล้ว ดังนั้นค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนรวม (R_{total}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$R_{total} = R_{conv,i} + R_{fouling,i} + R_{cond} + R_{conv,o} \quad (4)$$

โดย R_{total} ประกอบด้วยผลรวมของค่าความต้านทานความร้อนแบบการพาความร้อนภายในท่อ ($R_{conv,i}$) ค่าความต้านทานความร้อนแบบนำความร้อนของตะกัน ($R_{fouling}$) ค่าความต้านทานความร้อนแบบนำความร้อนของท่อ (R_{cond}) และค่าความต้านทานความร้อนแบบการพาความร้อนภายนอกท่อ ($R_{conv,o}$) โดยสมมติให้การถ่ายเทความร้อนผ่านชั้นตะกันเป็นการถ่ายเทแบบนำความร้อน ดังนั้นสมการการคำนวณค่า $R_{fouling}$ จากค่า Surface Roughness (ε) จึงใช้สมการการนำความร้อนผ่านชั้นตะกันที่มีความหนา ε ทำให้สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อนรวมได้ ดังสมการที่ (5)

$$R_{total} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(D_i/D_{if})}{2\pi L K_m} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi L K_s} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (5)$$

เมื่อ h_i คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในท่อ ($W/m^2 \cdot K$)

h_o คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายนอกท่อ ($W/m^2 \cdot K$)

A_i คือพื้นที่ผิวภายในท่อ (m^2)

A_o คือพื้นที่ผิวภายนอกท่อ (m^2)

D_o คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อ (m)

D_i คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ (m)

K_m คือค่าการนำความร้อนของนมมีค่าเท่ากับ 0.58 ($W/m \cdot K$)

K_s คือค่าการนำความร้อนของสแตนเลสมีค่าเท่ากับ 15 ($W/m \cdot K$)

จากนั้นสามารถคำนวณหาค่าอุณหภูมิขาเข้าของน้ำร้อน ($T_{h,i}$) ดังสมการที่ (6)

$$\begin{aligned} \dot{Q}_m &= UA\Delta T_{lm} \\ &= UA \times \left(\frac{(T_{h,i} - T_{c,o}) - ((T_{h,i} - B) - T_{c,i})}{\ln \left(\frac{T_{h,i} - T_{c,o}}{(T_{h,i} - B) - T_{c,i}} \right)} \right) \quad (6) \end{aligned}$$

เมื่อ \dot{Q}_m คืออัตราการไหลของน้ำนม (kW)

UA คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{R_{total}}$ ($\frac{W}{^\circ C}$)

$T_{c,i}$ คืออุณหภูมิน้ำนมขาเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับ $10^\circ C$

$T_{c,o}$ คืออุณหภูมิน้ำนมขาออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับ $77^\circ C$

B คือค่าคงที่มีค่าเท่ากับ $\frac{\dot{m}_m C_{pm} \Delta T_m}{\dot{m}_{ph} C_h}$ ($^\circ C$)

$T_{h,o}$ คืออุณหภูมิน้ำร้อนขาออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าเท่ากับ $T_{h,o} = T_{h,i} - B$ ($^\circ C$)

เมื่อทราบค่าอุณหภูมิขาเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ($T_{h,i}$) ที่ต้องการที่อัตราการไหลต่าง ๆ จะสามารถคำนวณหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจากไอน้ำ (\dot{Q}) ที่ต้องใช้ในการผลิตน้ำร้อนให้มีอุณหภูมิขาเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ($T_{h,i}$) ตามที่ต้องการดังสมการที่ (6) ซึ่งกระบวนการจะเริ่มต้นจากการนำน้ำที่อุณหภูมิ $75^\circ C$ จากถังเก็บน้ำเข้าสู่กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างไอน้ำและน้ำร้อน จากนั้นจะเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อทำการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำร้อนและน้ำนมเพื่อรักษาอุณหภูมิน้ำนมขาออกให้ได้ $77^\circ C$



จากนั้นนำค่า \dot{Q}_s ไปพล็อตกราฟเพื่อหาค่า Q_s ตามสมการที่ (7)

$$Q_s = \sum_0^{t_f} (\dot{Q}_s \Delta t) \quad (7)$$

2.3 คำหนดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

เมื่อทราบค่าการถ่ายเทความร้อนของไอน้ำที่แลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำร้อนในแต่ละอัตราการไหลแล้ว จึงนำค่าที่ได้ไปคำนวณผลของการเปลี่ยนอัตราการไหลต่อการประหยัดพลังงานที่ต้องเพิ่มอุณหภูมิของน้ำร้อนให้สูงขึ้น เพื่อรักษาอุณหภูมิขาออกของน้ำมันให้คงที่ โดยจะสามารถคำนวณได้จาก 2 ส่วนคือ

2.3.1 การคำนวณค่าประหยัดจากการลดพลังงานในการให้ความร้อนกับน้ำร้อน

สามารถหาได้โดยการคำนวณปริมาณน้ำมันเตาที่ใช้ในการให้พลังงานความร้อนกับไอน้ำที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำร้อน ดังสมการที่ (8) ซึ่งค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้คือ ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานในรูปแบบของน้ำมันเตาไปเป็นพลังงานของไอน้ำอ้อมตัวที่ความดัน 6 barg โดยไม่มีความร้อนสูญเสียระหว่างทางจากเครื่องกำเนิดไอน้ำไปถึงจุดผลิตน้ำร้อน โดยในที่นี้มีค่าเท่ากับ 80% แล้วนำไปคำนวณค่าใช้จ่ายจากการใช้ปริมาณของน้ำมันเตาที่เกิดขึ้น

ปริมาณน้ำมันเตาที่ใช้ (ลิตร) =

$$\frac{\text{ค่าพลังงานความร้อนที่ได้รับ (kcal)}}{\text{ค่าพลังงานของน้ำมันเตา } \left(\frac{\text{kcal}}{\text{l}}\right) \times \text{ประสิทธิภาพการเผาไหม้}} \quad (8)$$

จากนั้นนำปริมาณน้ำมันเตาที่ได้ไปคำนวณหาค่า น้ำมันเตาที่ต้องใช้ในการให้พลังงานความร้อน (บาทต่อลิตร) รวมกับการคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าที่ปั๊มใช้ที่อัตราการไหลต่างๆ โดยใช้ Pump Affinity Law ดังสมการที่ (9) และ (10) แล้วนำค่ากำลังไฟฟ้า (kWh) ที่ได้จากการคำนวณไปหาค่าใช้จ่ายทางด้านไฟฟ้าต่อน้ำมัน 1 ลิตร และเปรียบ

เทียบค่าใช้จ่ายของอัตราการไหล 9,000 ลิตร/ชั่วโมง และ 12,000 ลิตร/ชั่วโมง

$$\frac{q_1}{q_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right) \left(\frac{d_1}{d_2}\right) \quad (9)$$

เมื่อ q_1 คืออัตราการไหลที่ 9,000 ลิตร/ชั่วโมง

q_2 คืออัตราการไหลที่ 12,000 ลิตร/ชั่วโมง

n_1 คือความเร็วรอบของปั๊มที่อัตราการไหล 9,000 ลิตร/ชั่วโมง (rpm)

n_2 คือความเร็วรอบของปั๊มที่อัตราการไหล 12,000 ลิตร/ชั่วโมง (rpm)

d_1 คือเส้นผ่านศูนย์กลางของปั๊มที่อัตราการไหล 9,000 ลิตร/ชั่วโมง (m)

d_2 คือเส้นผ่านศูนย์กลางของปั๊มที่อัตราการไหล 12,000 ลิตร/ชั่วโมง (m) ซึ่งมีค่าเท่ากับ d_1

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^3 \quad (10)$$

เมื่อ p_1 คือกำลังไฟฟ้าที่ใช้ปั๊มของอัตราการไหล 9,000 ลิตร/ชั่วโมง (kW)

p_2 คือกำลังไฟฟ้าที่ใช้ปั๊มของอัตราการไหล 12,000 ลิตร/ชั่วโมง (kW)

โดยสมการที่ (9) ใช้ในการคำนวณค่า (n_1/n_2) เมื่อมีการเปลี่ยนอัตราการไหล และนำค่าความสัมพันธ์ (n_1/n_2) ที่ได้ไปคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่อัตราการไหลอื่น (p_2) ต่อไป

2.3.2 การคำนวณค่าประหยัดจากค่าใช้จ่ายในการล้างที่ลดลง เนื่องจากความถี่ในการล้างที่ลดลงหรืออีกในหนึ่งคือการยืดระยะเวลาการเดินเครื่องก่อนหยุดทำความสะอาด

เมื่อทราบค่า f ที่สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ (2) ที่เพิ่มมากขึ้นของอัตราการไหลต่างๆ จึงนำมาเปรียบเทียบกับผลการดำเนินงานจริง และทำนายผลการทดลองที่อัตราการไหล 4,000 ลิตร/ชั่วโมง และ 12,000 ลิตร/ชั่วโมง เพื่อคำนวณหาระยะเวลาของการดำเนินการผลิตที่อัตราการไหลดังกล่าว โดยนำมาเปรียบเทียบกับค่า f ให้มีค่า

ใกล้เคียงกับผลการดำเนินงานจริง จะทำให้ทราบสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมที่สามารถลดจำนวนครั้งของการล้างในแต่ละวันได้ จากนั้นนำผลการดำเนินงานที่อัตราการไหลต่างๆ เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายที่สามารถประหยัดได้ โดยคำนวณค่าใช้จ่ายได้ดังนี้

1. ปริมาณการสูญเสียน้ำนมในการดำเนินการผลิตจริง 1 วัน เมื่อดำเนินการผลิตจริงทุก ๆ 8 ชั่วโมง จะต้องทำการหยุดล้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนส่งผลให้มีการสูญเสียน้ำนมที่เหลือค้างในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนจำนวน 40 ลิตรโดยระหว่างการดำเนินงานผลิตจะต้องหยุดล้างจำนวน 2 ครั้งต่อวัน

2. ในการหยุดเครื่องเพื่อทำความสะอาดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะทำให้เกิดค่าเสียโอกาสจากการดำเนินงานผลิต โดยสามารถคำนวณจากกำไรที่ได้ต่อน้ำนม 1 กล่องเท่ากับ 1.5 บาท (อ้างอิงจากกำไรเฉลี่ยต่อน้ำนม 1 กล่องขององค์กรส่งเสริมกิจการโคนมแห่งประเทศไทย)

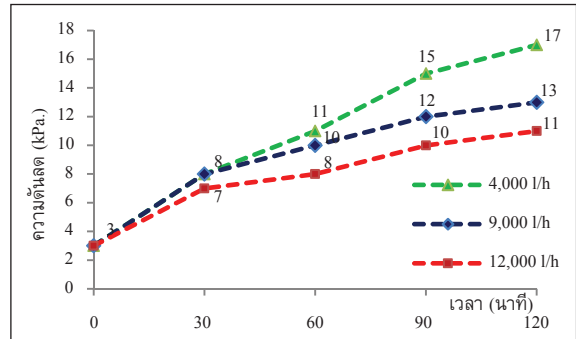
3. ค่าปริมาณน้ำมันเตาที่ใช้ในการให้พลังงานความร้อนกับไอน้ำ เพื่อรักษาอุณหภูมิขาออกของน้ำนมให้คงที่ที่ 77°C โดยคิดค่าพลังงานความร้อนของไอน้ำจากการใช้น้ำมันเตา ได้ดังสมการที่ (8)

4. ค่าใช้จ่ายค่าพลังงานไฟฟ้าที่ปั๊มใช้ในการดำเนินงานที่อัตราการไหล 9,000 ลิตร/ชั่วโมง และ 12,000 ลิตร/ชั่วโมง สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ (9) และ (10)

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ผลของอัตราการไหลของน้ำนมต่อค่าความดันลดที่เปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากตะกัน

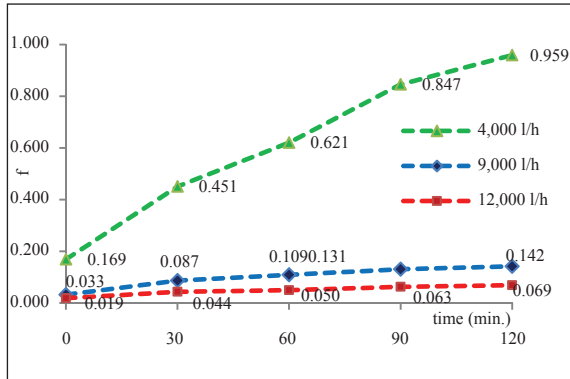
ผลการศึกษาค่าความดันลดจากการทดลอง การแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อโดยทำการบันทึกค่าความดันขาเข้าและขาออกทุกๆ 30 นาที ของชุดการทดลองแลกเปลี่ยนความร้อนยาว 2 เมตร ที่มีการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำนม 3 สภาวะ คือ 4,000 ลิตร/ชั่วโมง ($Re = 17,678$), 9,000 ลิตร/ชั่วโมง ($Re = 40,178$) และ 12,000 ลิตร/ชั่วโมง ($Re = 53,035$) เป็นระยะเวลา 120 นาที จะเห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของ



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงค่าความดันลดและเวลาของชุดการทดลอง ที่อัตราการไหลต่างๆ โดยที่ค่าความดันลดเป็นค่าจากการเฉลี่ยในการทดลอง 3 ครั้ง ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำมาก

ค่าความดันลดที่แตกต่างกัน โดยที่อัตราการไหล 4,000 ลิตร/ชั่วโมง มีค่าความดันลดมากที่สุดเท่ากับ 17 kPa ที่อัตราการไหล 9,000 ลิตร/ชั่วโมง ซึ่งเป็นอัตราการไหลเท่ากับอัตราการไหลในการดำเนินงานจริง มีค่าความดันลดเท่ากับ 13 kPa และที่อัตราการไหล 12,000 ลิตร/ชั่วโมง มีค่าความดันลดน้อยที่สุดเท่ากับ 11 kPa ดังรูปที่ 4 พบว่าช่วงเวลาเริ่มต้น 30 นาทีแรกมีค่าความดันลดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเป็นช่วงเริ่มต้นของการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จะเริ่มมีอนุภาคก่อตัวของตะกัน (Nucleation) บริเวณพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเกิดขึ้นจะเป็นช่วงที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพสูงสุดหลังจาก 30 นาที ค่าความดันลดจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เนื่องจากเป็นช่วงที่ตะกันน้ำนมยึดเกาะกับชั้นตะกันน้ำนมด้วยกัน สังเกตว่าที่เวลา 0 นาที ค่าความดันลดที่วัดได้ทั้ง 3 อัตราการไหลมีค่าไม่เท่ากัน ศูนย์เนื่องจากเริ่มจับเวลาหลังจากที่อุณหภูมิน้ำนมสูงถึง 77°C แต่กลับมีค่าใกล้เคียงกันแม้ว่าความเร็วของเหลวต่างกัน ทั้งนี้อาจเกิดจากผลที่หักล้างกันระหว่างการเกิดตะกันน้อยลงซึ่งส่งผลให้ความดันลดน้อยลงด้วย

ในการนำข้อมูลความดันลดในท่อ 2 เมตร ไปประเมินระยะเวลาในการผลิตก่อนหยุดล้างและอัตราการถ่ายเท

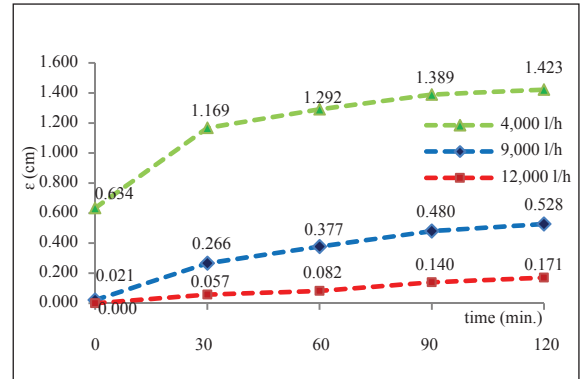


รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงค่า Friction Factor และเวลาของชุดการทดลอง ที่อัตราการไหลต่างๆ

ความร้อนในท่อจริงขนาด 30 เมตร นั้นไม่สามารถใช้ค่าความดันลดได้โดยตรงเนื่องจากความดันลดขึ้นกับทั้งความเร็ว และความยาวท่อ ดังนั้นตัวแปรที่เหมาะสมกว่าในการเปรียบเทียบคือ เปรียบเทียบจากค่า Friction Factor (f) ดังนั้น เมื่อทราบค่าความดันลดจากผลการทดลอง จากนั้นนำไปคำนวณหาค่า Friction Factor (f) โดยใช้ข้อมูลความเร็วของน้ำนมที่อัตราการไหลต่างๆ ไปคำนวณตามสมการที่ (2) ซึ่งพบว่าค่า f จะแปรผันตามค่าความดันลดที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะเวลาผ่านไป 120 นาที พบว่าค่า f ที่อัตราการไหล 4,000 ลิตร/ชั่วโมง จะมีค่าเท่ากับ 0.959 ที่อัตราการไหล 9,000 ลิตร/ชั่วโมง จะมีค่าเท่ากับ 0.142 และที่อัตราการไหล 12,000 ลิตร/ชั่วโมง จะมีค่าเท่ากับ 0.069 ดังรูปที่ 5

เมื่อนำค่า Friction Factor จากผลการทดลองมาคำนวณหาค่า Surface Roughness (ϵ) ด้วยสมการที่ (3) โดยค่า ϵ ที่คำนวณได้เป็นตัวแทนของความหนาของชั้นตะกอนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน จะได้รับการเปลี่ยนแปลงของ ϵ เป็นดังรูปที่ 6 ซึ่งแสดงความสอดคล้องของการเพิ่มขึ้นของ ϵ กับค่าความดันลดที่เพิ่มมากขึ้น

เนื่องจากมีปริมาณของตะกอนน้ำนมที่เกาะยึดในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนมากขึ้น เมื่อระยะเวลาผ่านไป 120 นาที ที่อัตราการไหลที่ 4,000 ลิตร/ชั่วโมง มีอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า ϵ ซึ่งแสดงถึงความหนาของชั้นตะกอน

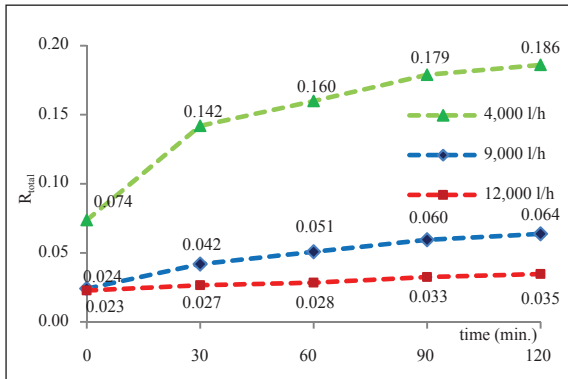


รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงค่า และเวลาของชุดการทดลอง ที่อัตราการไหลต่างๆ

มากที่สุดเท่ากับ 1.423 เซนติเมตร ที่ 9,000 ลิตร/ชั่วโมง เท่ากับ 0.528 เซนติเมตร และที่ 12,000 ลิตร/ชั่วโมง มีความหนาชั้นตะกอนน้อยที่สุดเท่ากับ 0.171 เซนติเมตร ซึ่งที่เวลา 0 นาที ค่า ϵ จากตะกอนมีค่าไม่เท่ากับ 0 เลยทีเดียวเนื่องจากมีตะกอนเกิดขึ้นเล็กน้อย ในช่วงเริ่มต้นที่รอเวลาให้น้ำนมมีอุณหภูมิถึง 77°C ดังรูปที่ 6

เมื่อทราบค่าความหนาของตะกอนน้ำนม ดังรูปที่ 6 จากนั้นนำมาคำนวณหาค่า R_{total} ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในช่วงเริ่มต้นจะมีค่าความต้านทานความร้อนต่ำ เนื่องจากมีตะกอนเกิดขึ้นน้อย หลังจากเวลาผ่านไป 30 นาที พบว่าค่าความต้านทานความร้อนรวมจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากความหนาของชั้นตะกอนที่เพิ่มขึ้นสูง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนลดต่ำลง และเมื่อเวลาผ่านไป 120 นาที ค่าความต้านทานความร้อนรวมที่อัตราการไหล 4,000 ลิตร/ชั่วโมง จะมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.186°C/W ที่อัตราการไหล 9,000 ลิตร/ชั่วโมง เท่ากับ 0.064°C/W และอัตราการไหล 12,000 ลิตร/ชั่วโมง จะมีค่าความต้านทานความร้อนต่ำที่สุดเท่ากับ 0.035°C/W ดังรูปที่ 7

จากนั้นคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อของน้ำนมที่อัตราการไหลต่างกัน โดยเริ่มต้นจากการนำ



รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงค่า R_{total} และเวลาของชุดการทดลอง ที่อัตราการไหลต่างๆ

ค่า R_{total} มาคำนวณหาค่า UA แล้วนำไปคำนวณหาค่า อุณหภูมิขาเข้าของน้ำร้อน ($T_{h,i}$) ที่เข้าเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน ตามสมการที่ (6) และนำไปคำนวณหาค่า อัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำร้อน (\dot{Q}_s) ในระยะเวลา 2 ชั่วโมง ที่ไอน้ำแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำร้อน เพื่อรักษาอุณหภูมิขาออกของน้ำนมให้คงที่ที่ 77°C ตามสมการที่ (7) จะได้ค่า \dot{Q}_s แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการคำนวณค่า $T_{h,i}$ ($^{\circ}\text{C}$) และค่า \dot{Q}_s (kW) ที่ อัตราการไหลต่างๆ เป็นระยะเวลา 120 นาที

เวลา นาที	4,000 ลิตร/ชั่วโมง $\dot{Q}_m = 297.12\text{kW}$			9,000 ลิตร/ชั่วโมง $\dot{Q}_m = 671.12\text{kW}$			12,000 ลิตร/ชั่วโมง $\dot{Q}_m = 893.96\text{kW}$		
	UA	$T_{h,i}$	\dot{Q}_s	UA	$T_{h,i}$	\dot{Q}_s	UA	$T_{h,i}$	\dot{Q}_s
0	13.57	83.5	118.06	41.32	89.w	147.82	43.86	90.0	209.15
30	7.05	100.4	353.2	23.85	96.8	303.22	37.45	99.5	341.14
60	6.25	105.3	421.52	19.69	102.6	383.60	35.21	101.0	362.27
90	5.59	110.6	494.14	16.81	108.3	463.14	30.77	104.7	413.24
120	5.37	112.6	522.8	15.76	111.1	502.63	28.74	106.7	441.84

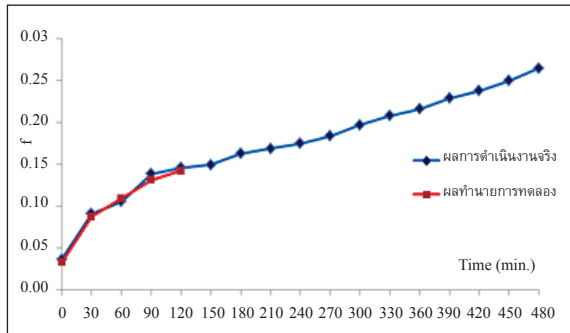
เมื่อนำค่า \dot{Q}_s ของแต่ละอัตราการไหลมาอินทิเกรต เพื่อหาพื้นที่ใต้กราฟในแต่ละช่วงเวลาซึ่งจะทราบค่าการถ่ายเทความร้อน (Q_s) ในแต่ละช่วงเวลาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการคำนวณค่า Q_s (kJ) ที่อัตราการไหลต่างๆ เมื่อเวลาผ่านไป 120 นาที

เวลา (นาที)	4,000 ลิตร/ชั่วโมง	9,000 ลิตร/ชั่วโมง	12,000 ลิตร/ชั่วโมง
0–30	424,134	405,939	495,261
30–60	697,248	618,138	633,069
60–90	824,796	762,066	697,959
90–120	916,020	869,193	769,572
Sum	2,862,198	2,655,336	2,595,861

ซึ่งการถ่ายเทความร้อนของไอน้ำกับน้ำร้อนมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น และอัตราการไหลที่สูงขึ้นอันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของตะกันน้ำนม ส่งผลให้จำเป็นต้องใช้พลังงานให้สูงขึ้น เพื่อรักษาอุณหภูมิขาออกของน้ำนมที่ 77°C ซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณการถ่ายเทความร้อนของไอน้ำและน้ำร้อน ดังตารางที่ 2 ที่อัตราการไหล 12,000 ลิตร/ชั่วโมง จะมีค่าเท่ากับ 2,595,861 จูล ที่อัตราการไหล 9,000 ลิตร/ชั่วโมง จะมีค่าเท่ากับ 2,655,336 จูล และที่อัตราการไหล 4,000 ลิตร/ชั่วโมง จะมีค่าเท่ากับ 2,862,198 จูล จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่า Friction Factor และค่าอุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ($T_{h,i}$) จากแบบจำลองกับผลการดำเนินงานจริงเพื่อเป็นการยืนยันว่าแบบจำลองสามารถเป็นตัวแทนของผลการดำเนินงานจริงได้ โดยการเปรียบเทียบอยู่ภายใต้สมมุติฐานที่ว่า ช่องอประเภท U-bend มีผลกระทบต่อค่าความดันลดในท่อน้อยเมื่อเทียบกับส่วนของท่อตรง จากนั้นนำค่า f จากการทดลองที่ความยาวท่อ 2 เมตร นำไปเปรียบเทียบกับค่า f ที่คำนวณได้จากท่อที่ใช้จริงในโรงงานที่มีความยาวท่อ 30 เมตร ที่อัตราการไหล 9,000 ลิตร/ชั่วโมง โดยใช้สมการที่ (2) ในการคำนวณแสดงได้ดังรูปที่ 8

ซึ่งจากรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่า ผลการทดลองของชุดการทดลองการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อระยะเวลา 2 ชั่วโมง มีค่า Friction Factor ใกล้เคียงกับช่วงเวลา 2 ชั่วโมงแรกของผลกระบวนการผลิตจริงที่ดำเนินงานเป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง จึงสามารถตั้งสมมุติฐานได้ว่า

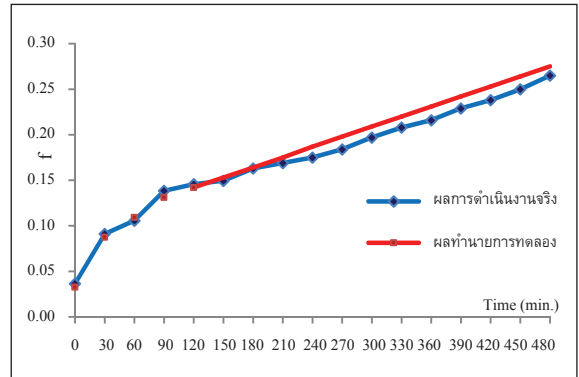


รูปที่ 8 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า f ของการทดลอง และการผลิตจริงที่อัตราการไหล 9,000 ลิตร/ชั่วโมง

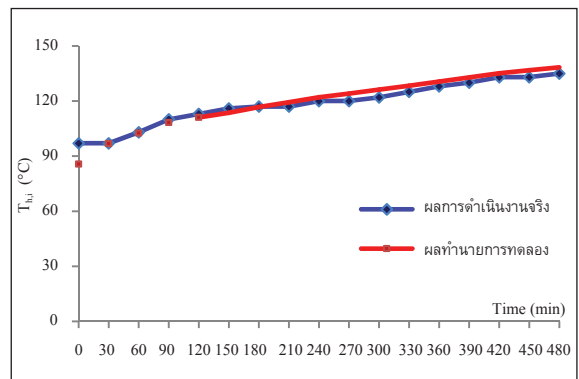
ชุดทดลองการแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถใช้เป็นตัวแทนในการศึกษาการเกิดตะกอนน้ำนมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในอุตสาหกรรมได้ จากนั้นทำนายผลของการเปลี่ยนแปลงค่า Friction Factor และอุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้า ($T_{h,i}$) ซึ่งเมื่อทราบค่า f ของชุดทดลองที่ความยาวท่อ 2 เมตร เมื่อเวลาผ่านไป 2 ชั่วโมง ดังรูปที่ 5 แล้วนำไปทำนายค่า f ที่ช่วงเวลานานขึ้นโดยสมมุติให้อัตราการเพิ่มขึ้นของ f ในช่วงเวลานานกว่า 120 นาทีที่มีอัตราการเพิ่มขึ้นในช่วง 90–120 นาที จะได้สมการเชิงเส้นในการคำนวณค่า f ที่เวลาต่างๆ นานกว่า 120 นาที ขึ้นไปเป็นดังสมการเชิงเส้น $Y = 0.00037X + 0.0977$ เพื่อหาแนวโน้มของค่า f เมื่อเวลาผ่านไป 8 ชั่วโมงดังแสดงเป็นเส้นประในรูปที่ 9 จะพบว่า ผลการทำนายมีค่าใกล้เคียงกับผลการดำเนินงานผลิตจริง โดยกระบวนการผลิตจำเป็นต้องตัดล้างเมื่อค่า f ค่าใกล้เคียงกับ 0.27 จากนั้นนำค่า f ไปคำนวณหาค่า $T_{h,i}$ ของชุดการทดลองเป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมงมาเปรียบเทียบกับผลการดำเนินงานจริงดังรูปที่ 10 เพื่อเป็นการยืนยันว่าผลจากการทำนายแนวโน้มเพื่อขยายเวลาออกไปเป็น 8 ชั่วโมงสามารถใช้เป็นตัวแทนของชุดการดำเนินการผลิตจริงได้

3.2 ผลการคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

จากนั้นคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลต่อการประหยัดพลังงาน



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า Friction Factor ของผลการดำเนินงานจริงและผลการทำนายการทดลองกับเวลาที่อัตราการไหล 9,000 ลิตร/ชั่วโมง



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิขาเข้าของน้ำร้อนที่เข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของผลการดำเนินงานจริงและผลการทำนายการทดลอง ที่อัตราการไหล 9,000 ลิตร/ชั่วโมง

สามารถพิจารณาได้ใน 2 กรณี คือ 1) ผลประหยัดจากการลดพลังงานในการให้ความร้อนกับน้ำร้อน เนื่องจากการปรับอัตราการไหลของน้ำนมที่ระยะเวลา 8 ชั่วโมง เท่ากัน 2) ผลประหยัดจากค่าใช้จ่ายในการล้างที่ลดลง เนื่องจากความถี่ในการล้างน้อยลง โดยในการเพิ่มอัตราการไหลจาก 9,000 ลิตร/ชั่วโมง ไปเป็น 12,000 ลิตร/

ชั่วโมง ต้องมีการใช้พลังงานในการปั้มนมเพิ่มขึ้นจาก 3.64 kW ไปเป็น 8.63 kW โดยค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการคำนวณทาง เศรษฐศาสตร์ยึดตามค่าเฉลี่ยไฟฟ้าต่อหน่วยที่เกิดขึ้นจริง ในโรงงานผลิตนม ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.96 บาทต่อหน่วย ซึ่งมีการคำนวณดังนี้

กรณีที่ 1 ผลประหยัดจากการลดพลังงานในการให้ความร้อนกับน้ำร้อนโดยคิดจากการถ่ายเทความร้อนระหว่าง น้ำร้อนกับไอน้ำที่ได้จากการทำนายผลการทดลองเป็น ระยะเวลา 8 ชั่วโมง ที่อัตราการไหล 9,000 ลิตร/ชั่วโมง จะสามารถผลิตน้ำนมได้จำนวน 72,000 ลิตร และอัตราการไหล 12,000 ลิตร/ชั่วโมง สามารถผลิตน้ำนมได้จำนวน 96,000 ลิตร เพื่อนำไปคำนวณหาค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนจะพบว่า ที่อัตราการไหล 9,000 ลิตร/ชั่วโมง จะใช้พลังงานที่ระยะเวลา 8 ชั่วโมง เท่ากับ 249.37 กิโลจูล หรือ 59.57 กิโลแคลอรี ต่อน้ำนม 1 ลิตร และอัตราการไหล 12,000 ลิตร/ชั่วโมง จะใช้พลังงาน เท่ากับ 165.54 กิโลจูล หรือ 39.55 กิโลแคลอรี ต่อน้ำนม 1 ลิตร จากนั้นคำนวณหาค่าปริมาณน้ำมันเตาที่ใช้ของ อัตราการไหล 9,000 ลิตร/ชั่วโมง จะใช้ปริมาณน้ำมันเตา เท่ากับ 0.008 ลิตร คิดเป็นจำนวนเงิน 0.1262 บาทต่อ น้ำนม 1 ลิตร และอัตราการไหล 12,000 ลิตร/ชั่วโมง จะใช้ ปริมาณน้ำมันเตาเท่ากับ 0.005 ลิตร คิดเป็นจำนวนเงิน 0.0838 บาทต่อ น้ำนม 1 ลิตร จากนั้นคำนวณค่าพลังงาน ไฟฟ้าที่ปั้มนใช้ในการดำเนินงานผลิตที่ 9,000 ลิตร/ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 0.0016 บาทต่อ น้ำนม 1 ลิตร และ 12,000 ลิตร/ ชั่วโมง เท่ากับ 0.0028 บาทต่อ น้ำนม 1 ลิตร รวมค่าใช้จ่าย ที่อัตราการไหล 9,000 ลิตร/ชั่วโมง เท่ากับ 0.1278 บาทต่อ น้ำนม 1 ลิตร และที่อัตราการไหลที่ 12,000 ลิตร/ชั่วโมง เท่ากับ 0.0866 บาทต่อ น้ำนม 1 ลิตร ดังนั้นเมื่อมีกำลัง การผลิตน้ำนมเท่ากับ 189 ตันต่อวัน โดยมีการตัดล้าง ทุกๆ 8 ชั่วโมงเท่ากันที่อัตราการไหล 9,000 ลิตร/ชั่วโมง จะมีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 24,154.2 บาท/วัน และ 12,000 ลิตร/ ชั่วโมง จะมีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 16,367.4 บาท/วัน ซึ่งจะสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายจากการปรับอัตราการไหลได้ เท่ากับ 7,786.8 บาท/วัน หรือ 2,803,248 บาท/ปี (360 วัน)

กรณีที่ 2 ผลประหยัดจากค่าใช้จ่ายในการล้างที่ลดลง จากการคำนวณค่า Friction Factor (f) ของนมที่เพิ่มขึ้น ระหว่างกระบวนการผลิตจนถึงหยุดกระบวนการผลิต ใน งานวิจัยนี้ได้ตั้งสมมุติฐานว่าการผลิตจะไม่สามารถดำเนิน ต่อไป เมื่อค่า f มีค่าสูงกว่า 0.27 กระบวนการผลิตจริงจำเป็นต้องมีการหยุดเครื่องเพื่อทำการล้างเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อนในระหว่างกระบวนการผลิตทุกๆ 8 ชั่วโมง หรือวันละ 2 ครั้ง ซึ่งในการหยุดล้างเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อนจะทำให้เกิดการสูญเสียน้ำมันในท่อแลกเปลี่ยน ความร้อนครั้งละ 40 ลิตร จากผลการทำนายการทดลอง พบว่า ที่อัตราการไหล 12,000 ลิตร/ชั่วโมง จะสามารถ ดำเนินงานได้อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 17 ชั่วโมง จึง จะมีค่า f เท่ากับ 0.26 ซึ่งจะคำนวณค่าใช้จ่ายรวมได้ดังนี้ 1) ค่าใช้จ่ายที่เกิดจากค่าพลังงานในการแลกเปลี่ยน ความร้อน 2) ค่าใช้จ่ายของน้ำมันที่สูญเสียจากการ ตัดล้าง 3) ค่าใช้จ่ายจากค่าเสียโอกาสในกระบวนการผลิต 4) ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ปั้มนใช้ในการดำเนินงาน โดย คำนวณภายใต้สมมุติฐานดังนี้ 1) การผลิตและการล้างเป็น กระบวนการต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง 2) การล้างครั้งใหญ่ (C.I.P.) และการล้างย่อย (A.I.C.) ใช้เวลา 1 ชั่วโมงเท่ากัน ซึ่งจะพบว่าที่อัตราการไหล 9,000 ลิตร/ชั่วโมง มีค่าใช้จ่าย ที่ใช้ในกระบวนการผลิตต่อ น้ำนมที่ผลิตได้ 1 ลิตรต่ำที่สุด อยู่ที่ระยะเวลา 480 นาที (8 ชั่วโมง) ซึ่งเป็นระยะเวลา เท่ากับการดำเนินการผลิตจริงมีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 1.10 บาท ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าถ้าดำเนินการผลิตที่อัตรา การไหล 9,000 ลิตร/ชั่วโมง จุดที่เหมาะสมที่สุดใน กระบวนการผลิตจะอยู่ที่ระยะเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้น คำนวณค่าใช้จ่ายที่ใช้ในกระบวนการผลิตที่อัตราการไหล 12,000 ลิตร/ชั่วโมง ซึ่งจะพบว่า มีค่าใช้จ่ายที่ใช้ใน กระบวนการผลิตต่อ น้ำนมที่ผลิตได้ 1 ลิตรต่ำที่สุดอยู่ที่ ระยะเวลา 1,020 นาที (17 ชั่วโมง) มีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 0.56 บาท ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าถ้าดำเนินการผลิต ที่อัตราการไหล 12,000 ลิตร/ชั่วโมง จุดที่เหมาะสมที่สุดใน กระบวนการผลิตอยู่ที่ระยะเวลา 17 ชั่วโมง และเมื่อ นำมาเปรียบเทียบกับที่อัตราการไหล 9,000 ลิตร/ชั่วโมง

จะสามารถสรุปได้ว่าจุดคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการผลิตนี้อยู่ที่อัตราการไหล 12,000 ลิตร/ชั่วโมง ที่ระยะเวลา 17 ชั่วโมง ค่าใช้จ่ายเท่ากับ 0.56 บาทต่อ น้ำนม 1 ลิตร ดังนั้นจะสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายจากการปรับอัตราการไหลได้เท่ากับ 102,060 บาท/วัน หรือ 36,741,600 บาท/ปี (360 วัน)

4. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและหาวิธีในการตรวจสอบการเกิดตะกรันในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อในช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้น (Preheating) ที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตนม ยู.เอช.ที. อย่างง่ายโดยการวัดความดันลดที่เปลี่ยนแปลงเพื่อศึกษาการเกิดตะกรันโดยวิธีทางความร้อน เช่น การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ณ เวลาต่างๆ และค่าความต้านทานความร้อนจากการเกิดตะกรัน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากการทดลองโดยใช้ชุดทดลองการแลกเปลี่ยนความร้อนที่สภาวะการไหลของน้ำนมที่ 4,000 ลิตร/ชั่วโมง ($Re = 17,678$) ที่ 9,000 ลิตร/ชั่วโมง ($Re = 40,178$) และที่ 12,000 ลิตร/ชั่วโมง ($Re = 53,035$) เป็นระยะเวลา 120 นาที พบว่าที่อัตราการไหล 12,000 ลิตร/ชั่วโมง มีค่าความดันลดน้อยที่สุดเท่ากับ 11 kPa และที่อัตราการไหล 4,000 ลิตร/ชั่วโมง มีค่าความดันลดมากที่สุดเท่ากับ 17 kPa ซึ่งความดันลดนี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่า Friction Factor และ Surface Roughness ของชั้นตะกรัน

2. การสร้างแบบจำลองเพื่อคำนวณความหนาของชั้นตะกรันและอุณหภูมิน้ำร้อน พบว่าค่า Surface Roughness (ϵ) ที่คำนวณจากค่า Friction Factor (f) นั้นสามารถใช้เป็นตัวแทนความหนาของชั้นตะกรันที่เกิดการสะสมตัวขึ้น โดยความหนาของชั้นตะกรันนี้สามารถใช้เป็นตัวแทนของ Thermal Resistance ที่เพิ่มขึ้นจากตะกรันและใช้ทำนายค่าอุณหภูมิของน้ำร้อนขาเข้า ($T_{h,i}$) ได้เป็นอย่างดี

3. จากการทดลองในการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของชุดทดลองการแลกเปลี่ยนความร้อนพบว่าหากใช้ระยะเวลาในการผลิตก่อนการตัดล้างเป็น 8 ชั่วโมงเท่ากับ

ซึ่งเท่ากับระยะเวลาในกระบวนการผลิตจริง พบว่าที่อัตราการไหล 9,000 ลิตร/ชั่วโมงมีค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตเท่ากับ 24,154.2 บาท/วัน และที่อัตราการไหล 12,000 ลิตร/ชั่วโมง มีค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตเท่ากับ 16,367.4 บาท/วัน ซึ่งจะสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายจากการปรับอัตราการไหลได้เท่ากับ 7,786.8 บาท/วัน หรือ 2,803,248 บาท/ปี (360 วัน)

4. จากการคำนวณพบว่าการเพิ่มอัตราการไหลจาก 9,000 ลิตร/ชั่วโมง ไปเป็น 12,000 ลิตร/ชั่วโมงสามารถยืดระยะเวลาการผลิตได้จาก 8 ชั่วโมง ไปเป็น 17 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามจากการคำนวณทางเศรษฐศาสตร์โดยประเมินจากค่าเชื้อเพลิงน้ำมันเตาที่เพิ่มขึ้นในการแลกเปลี่ยนความร้อนของไอน้ำและน้ำร้อน (เพื่อรักษาอุณหภูมิขาออกของน้ำนมให้เท่ากับ 77°C) และค่าพลังงานไฟฟ้าที่ปั๊มใช้ในกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำนม พบว่าระยะเวลาก่อนการตัดล้างที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอัตราการไหล 12,000 ลิตร/ชั่วโมงอยู่ที่ 17 ชั่วโมง โดยจะสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายโดยรวมได้เท่ากับ 102,060 บาท/วัน หรือ 36,741,600 บาท/ปี (360 วัน)

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณาจารย์ในสาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษา และขอขอบคุณองค์การส่งเสริมกิจการโคนมแห่งประเทศไทยที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. D. Changani, M. T. Belmar-Beiny, and P. J. Fryer, "Engineering and chemical factors associated with fouling and cleaning in milk processing," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 14, no. 4, pp. 392–406, May 1997.
- [2] H. Burton, "Deposition from whole milk in

- heat treatment plant: A review and discussion,” *Journal of Dairy Research*, vol. 35, pp. 317–330, 1968.
- [3] G. Bylund, *Dairy Processing hand book*, Process design considerations, Lund, Sweden, 1995.
- [4] P. D. Jong. “Impact and control of fouling in milk processing,” *Trends in Food Science & Technology*, vol. 8, no. 12, pp. 401–405, December 1997.
- [5] L. F. Moody, “Friction factors for pipe flow,” *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, vol. 66, no. 8, pp. 671–684, 1994.
- [6] A. M. Hoffmann, P. F. M. Roefs, M. Verheul, J. J. M. van Mil, and K. G. De Kruif, “Aggregation of β -lactoglobulin studied by in situ light scattering,” *Journal of Dairy Research*, vol. 63, no. 3, pp. 423–440, August 1996.
- [7] J. Vissel and T. J. M. Jeurink, “Fouling of heat exchanger in the dairy industry,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 14, no. 4, pp. 407–424, May 1997.