

การออกแบบและสร้างระบบพาสเจอร์ไรส์ในเครื่องต้นแบบผลิตโยเกิร์ตชนิดกวน แบบครบวงจรสำหรับอุตสาหกรรมขนาดย่อม

A Pasteurization System of Prototype In-Line-Stirred Yoghurt Machine, Designed and Constructed for Use by SMEs

วันเพ็ญ จิตรเจริญ¹ อาคม สุวัฒน์กิจ² อรทัย บุญทะวงศ์ อภินันท์ จิตรเจริญ⁴

บทคัดย่อ

งานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการออกแบบ สร้างและวิเคราะห์ระบบพาสเจอร์ไรส์สำหรับเครื่องต้นแบบผลิตโยเกิร์ตชนิดกวนแบบครบวงจรเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมขนาดย่อม มีส่วนประกอบสำคัญคือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ ใช้หัวพันไฟแบบอัดอากาศ ให้ความร้อนแก่น้ำนมดิบที่อุณหภูมิ 72-82 °C ควบคุมระยะเวลาการฆ่าเชื้อด้วยขดท่อหนึ่งเวลา มีระยะเวลาฆ่าเชื้อนาน 67 s และอัตราการไหลของน้ำนม 884 ml/min จากนั้นทำการลดอุณหภูมิ น้ำนมด้วยขดท่อแลกเปลี่ยนอุณหภูมิที่อยู่ภายในถังน้ำเย็นให้มีอุณหภูมิที่ 42-45 °C ก่อนเข้าสู่ถังหมักบ่ม ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเครื่องต้นแบบสามารถรักษาระดับอุณหภูมิพาสเจอร์ไรส์ไว้ได้ตามระยะเวลาที่ต้องการ น้ำนมมีกลิ่นรสปกติและไม่พบเอนไซม์ฟอสฟาเทส

คำสำคัญ: โยเกิร์ต, พาสเจอร์ไรส์, เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ, เอนไซม์ฟอสฟาเทส

Abstract

A prototype for an in-line stirred yoghurt production machine was designed and constructed for use in an SME dairy plant. The prototype consisted of a shell and tube heat exchanger, and a forced draft burner for heating milk to 72-82 °C with a milk flow rate of 884 ml/min. During the pasteurization process, this holding temperature was maintained for a period of 67 seconds. Thereafter, the pasteurized milk was cooled to 42-45 °C through the use of cold water, before being transferred to an incubation tank. Results showed that the prototype was consistently able to maintain the pasteurized temperature, whilst still keeping a normal milk taste and smell, the phosphatase enzyme was not found.

Keywords: Yoghurt, Pasteurizer, Shell and tube heat exchanger, Phosphatase enzyme

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์, สาขาอุตสาหกรรมเกษตร, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ลำปาง.

² อาจารย์, สาขาอุตสาหกรรมเกษตร, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ลำปาง.

³ อาจารย์, สาขาอุตสาหกรรมเกษตร, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ลำปาง.

⁴ อาจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ลำปาง.

1. บทนำ

มูลค่าการตลาดของผลิตภัณฑ์นมซึ่งรวมถึงโยเกิร์ตของประเทศไทยได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่ยังมีช่องว่างการตลาดสำหรับผู้ประกอบการรายย่อยได้เข้ามามีส่วนแบ่งการตลาดเพิ่มขึ้น การลงทุนด้านเครื่องจักรการผลิตที่มีราคาสูงก็ยังคงเป็นอุปสรรคสำคัญสำหรับการเริ่มต้นประกอบการของผู้ผลิตทางคณะผู้วิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีได้ทำการออกแบบและทดลองจัดสร้างเครื่องผลิตโยเกิร์ตชนิดกวนแบบครบวงจรขึ้นเพื่อใช้เป็นเครื่องจักรต้นแบบสำหรับ อุตสาหกรรมขนาดย่อม โดยเครื่องผลิตชุดนี้ได้รวมเอากระบวนการผลิตโยเกิร์ตทุกส่วนเข้าไว้ด้วยกัน นับตั้งแต่ระบบการผสมน้ำนม การพาสเจอร์ไรส์ การหมักบ่ม การทำให้เย็น การกวน และการบรรจุ ทำการติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดอยู่ร่วมกันบนฐานติดล้อเลื่อนขนาดพื้นที่ 2.8 m² โดยใช้อุปกรณ์ที่จัดหาได้ภายในประเทศ เพื่อลดต้นทุนการผลิตด้านเครื่องจักรและกระบวนการผลิต

งานวิจัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยการสร้างเครื่องต้นแบบผลิตโยเกิร์ต[1] โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการออกแบบ ทำการผลิตและทดสอบประสิทธิภาพระบบพาสเจอร์ไรส์ของเครื่องต้นแบบผลิตโยเกิร์ต ซึ่งถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากในการผลิตโยเกิร์ต เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพตามมาตรฐาน

2. หลักการออกแบบ

2.1 แนวคิดในการออกแบบ

ระบบการพาสเจอร์ไรส์สำหรับเครื่องต้นแบบผลิตโยเกิร์ตเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมขนาดย่อม(SMEs) ต้องมีขนาดเล็ก ดังนั้นอุปกรณ์ทุกส่วนของระบบนี้จึงต้องมีขนาดกะทัดรัดสามารถตั้งอยู่บนฐานติดล้อพร้อมทั้งระบบอื่นๆเพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้าย และต้องใช้วัสดุที่สามารถจัดสร้างได้ภายในประเทศ เพื่อลดภาระต้นทุนการผลิต

2.2 ทฤษฎีการพาสเจอร์ไรส์

การพาสเจอร์ไรส์มีวัตถุประสงค์เพื่อทำลายเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคแก่มนุษย์ได้ (Pathogenic Microorganism) การพาสเจอร์ไรส์น้ำนมนี้ต้องสามารถทำให้น้ำนมทั้งหมดปราศจากเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคแก่มนุษย์และจุลินทรีย์ที่สามารถทำให้น้ำนมมีกลิ่นรสผิดปกติ (Off-flavor) และยังมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์มีอายุการเก็บรักษาสั้นลง ระดับอุณหภูมิพาสเจอร์ไรส์ของน้ำนมดิบที่เหมาะสมจะมีความสัมพันธ์กับเวลาในการให้ความร้อนที่คงระดับอุณหภูมินั้น (Holding time temperature) ดังตารางที่ 1 นอกจากนี้จะต้องตรวจไม่พบเอนไซม์ฟอสฟาเทสในน้ำนมที่ผ่านการพาสเจอร์ไรส์แล้ว [2]

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการพาสเจอร์ไรส์

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (min)
62.8	30
71.7	0.25
88.4	0.017
95.6	0.0083
100.0	0.0016

2.3 ทฤษฎีการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนพลศาสตร์ของของไหล

ตัวเลขเรย์โนลด์ส รูปแบบของการไหลจะขึ้นกับค่าตัวแปรไร้มิติที่เรียกว่าตัวเลขเรย์โนลด์ส (Re) สำหรับการไหลในท่อกลม ค่าตัวเลขเรย์โนลด์สจะหาได้จากสมการ (2)

$$Re = \frac{\rho u_m d}{\mu} = \frac{u_m d}{\nu} \quad (1)$$

การอนุรักษ์ของมวล (Conservative of mass)

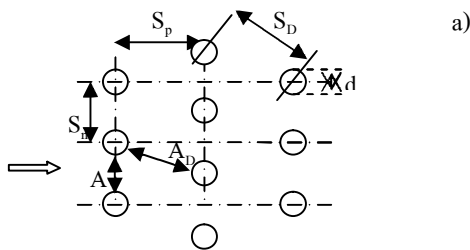
$$\dot{m} = \rho_1 A_1 u_1 = \rho_2 A_2 u_2 = \text{ค่าคงที่} \quad (2)$$

ตัวเลขของพรอนด์ท (Prandtl number)

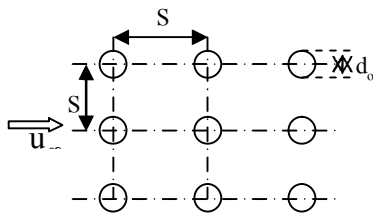
$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu C_p}{k} \quad (3)$$

ตัวเลขนัสเซิลท์ (Nusselt number, Nu) เป็นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนไร้มิติ มีความเกี่ยวข้องกับค่า “สัมประสิทธิ์การพาความร้อน” (heat convection coefficient, h) โดยตรง ดังสมการ

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \quad (4)$$



a)



b)

รูปที่ 1 ลักษณะการจัดเรียงตัวของกลุ่มท่อ

a) แบบเรียงท่อสลับแถว และ

b) แบบเรียงท่อเป็นแนวเดียวกันตลอด

2.4 การถ่ายเทความร้อนแบบการพา กับรูปแบบการไหล

การถ่ายเทความร้อนแบบการพา เป็นไปตามกฎการทำ ความเย็นของนิวตัน (Newton's law of cooling) [4] ดังสมการ

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

2.5 การไหลปกคลุมผิวภายนอกของท่อและกลุ่มท่อ

การไหลแบบตัดกันในท่อเดียว ค่าเฉลี่ยของตัวเลขนัสเซิลท์ อาจจะนำมาแสดงได้ดี ในรูปของความสัมพันธ์ซึ่งได้จากผลการทดลองดังนี้ [5]

$$\frac{hd}{k_f} = C \left(\frac{u_\infty d}{\nu_f} \right)^n Pr_f^{1/3} \quad (6)$$

ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (shell and tube) ซึ่งมีท่อจำนวนมากอยู่ภายในเปลือก มีการจัดวางได้สองแบบ ได้แก่ การเรียงท่อเป็นแนวเดียวกันตลอด (in-line) และการเรียงท่อสลับแถว (staggered) ในทิศทางการไหล (รูปที่ 1)

อัตราเร็วสูงสุดของของไหล u_{max} ที่เกิดขึ้นขณะไหลผ่านกลุ่มท่อจะเป็นตัวกำหนดลักษณะการไหลโดยรวม ซึ่งค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่คำนวณจากอัตราเร็วสูงสุด หาได้จาก

$$Re_d = \frac{\rho u_{max} d}{\mu} = \frac{u_{max} d}{\nu} \quad (7)$$

$$\text{จะได้ in-line: } u_{max} = \frac{S_n}{S_n - d} u_\infty \quad (8)$$

staggered (เมื่อ $S_D < (S_p + d)/2$):

$$u_{max} = \frac{u_\infty (S_n/2)}{[(S_n/2)^2 + S_p^2]^{1/2} - d} \quad (9)$$

2.6 การวิเคราะห์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและสัมประสิทธิ์

การถ่ายเทความร้อนรวม

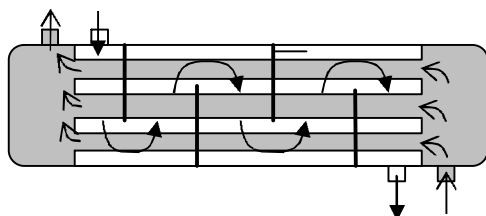
อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนส่วนมากจะออกแบบให้เกิดการถ่ายเทความร้อนออกจากทรงกระบอกในทิศทางที่ตัดกัน และมีตัวให้ความร้อนมีการแลกเปลี่ยนความร้อนในลักษณะที่ของไหลผ่านทรงกระบอกกลมหรือที่มีลักษณะใกล้เคียงและอนุภาคต่างๆ (รูปที่ 2 และ 3)

อัตราการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) [4] ดังนี้

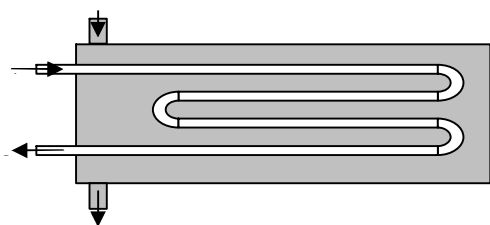
$$\dot{Q} = UA_s \Delta T_{lm} \quad (10)$$

$$\text{โดย} \quad \Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (11)$$

ΔT_{lm} คือ ค่าอุณหภูมิแตกต่างของการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อคู่ ชนิดไหลสวนทางกัน



รูปที่ 2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ



รูปที่ 3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อแบบขดหลายครั้ง

3. วิธีการดำเนินงาน

1) ศึกษาหลักการและกระบวนการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบทำความเย็น ชุดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ถังบ่ม และการใช้หัวเตาให้ความร้อน

2) ออกแบบระบบผลิตโยเกิร์ตหลักซึ่งประกอบด้วยหน่วยผลิตย่อยต่างๆ โดยยึดเอากระบวนการผลิตโยเกิร์ตที่ใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรมเป็นแนวทาง

3) ออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการพาสเจอร์ไรส์โดยใช้ข้อกำหนดเกี่ยวกับอุณหภูมิฆ่าเชื้อ เวลา และอัตราการไหลเป็นตัวกำหนดหลัก และอาศัยพื้นฐาน โมเดลคำนวณที่ได้ศึกษามาแล้ว

4) จัดสร้างอุปกรณ์ต้นแบบ

5) ทดสอบประสิทธิภาพโดยทำการทดลองกับน้ำนมดิบบันทึกระดับอุณหภูมิพาสเจอร์ไรส์ ขณะที่เครื่องทำงาน ณ เวลาต่างๆ เพื่อหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการฆ่าเชื้อสำหรับเครื่องต้นแบบ

6) ทดสอบหาปริมาณเอนไซม์ฟอสฟาเทสเพื่อใช้เป็นเครื่องบ่งชี้ปริมาณจุลินทรีย์ที่รอดชีวิตจากน้ำนมที่ผ่านการพาสเจอร์ไรส์แล้ว

7) ทดสอบหาปริมาณเอนไซม์ฟอสฟาเทสเพื่อใช้เป็นเครื่องบ่งชี้ปริมาณจุลินทรีย์ที่รอดชีวิตจากน้ำนมที่ผ่านการพาสเจอร์ไรส์แล้ว

8) สรุปผลการดำเนินงาน

4. ผลการออกแบบและทดสอบ

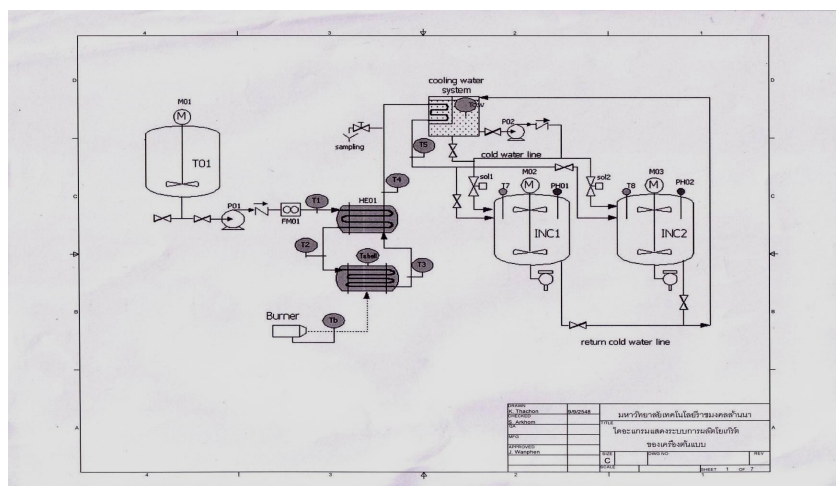
4.1 ผลการออกแบบ

4.1.1 ระบบการผลิตเครื่องต้นแบบโยเกิร์ต

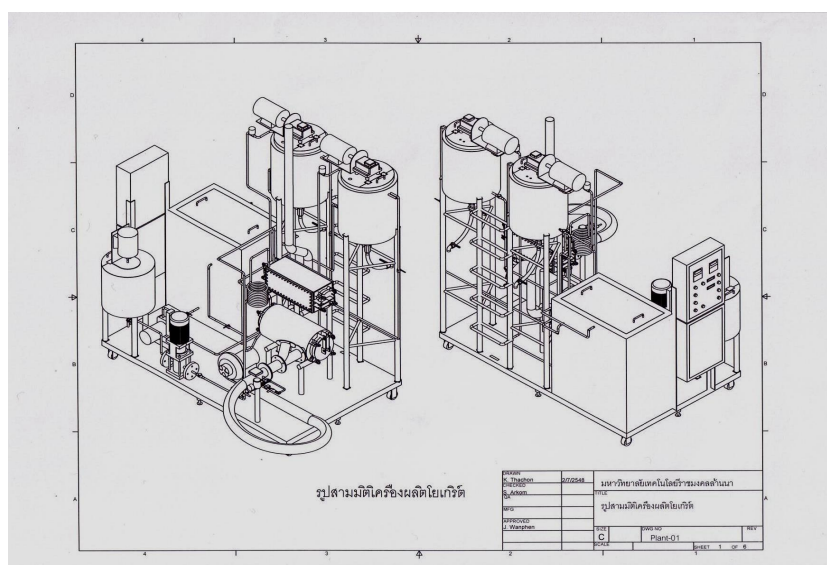
จากการศึกษาหลักการของระบบการผลิตของเครื่องต้นแบบโยเกิร์ตสำหรับอุตสาหกรรมขนาดย่อมเพื่อให้มีกระบวนการทำงานเป็นไปตามมาตรฐานเหมือนระบบผลิตในอุตสาหกรรม(ดัดแปลงจาก [2]) ผลสรุปการออกแบบดังรูปที่ 4 และ 5 โดยกำหนดให้มีอัตราการไหลของน้ำนมอยู่ในช่วง 800-900 ml/min และมีความสามารถในการฆ่าเชื้อที่ช่วงอุณหภูมิ 72-82 °C

4.1.2 ระบบพาสเจอร์ไรส์

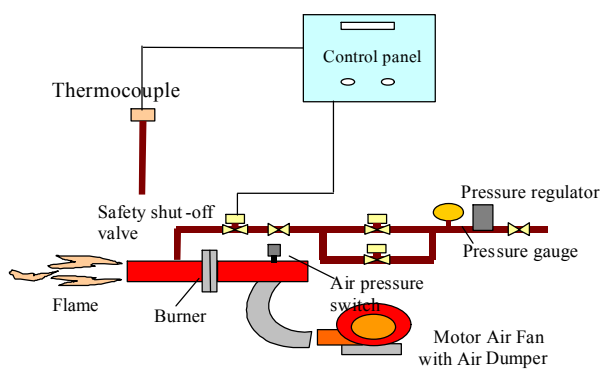
กระบวนการให้ความร้อนแบบพาสเจอร์ไรส์สำหรับเครื่องต้นแบบผลิตโยเกิร์ตนี้ใช้หัวพ่นไฟแบบอัดอากาศ (Forced draft burner) (รูปที่ 6) เป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำนมดิบ โดยได้เลือกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกท่อ จำนวนสองเครื่องมาต่อพ่วงเข้าด้วยกันเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้ถึงจุดฆ่าเชื้อ และใช้น้ำนมร้อนแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำนมดิบเย็นที่ไหลสวนทางกันเพื่อลดอุณหภูมิ น้ำนมร้อนและเพิ่มอุณหภูมิ น้ำนมเย็น โดยมีชุดท่อหน่วงเวลา (Holding tube) เป็นตัวควบคุมระยะเวลาในการฆ่าเชื้อให้เพียงพอและเหมาะสม เพื่อให้มีความมั่นใจว่าการพาสเจอร์ไรส์ได้เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 4 แผนผังการทำงานของเครื่องต้นแบบผลิตไฮเกิร์ต



รูปที่ 5 เครื่องต้นแบบผลิตไฮเกิร์ต



รูปที่ 6 หัวพ่นไฟแบบอัดอากาศ

ระบบการพาสเจอร์ไรส์แบบนี้ มีข้อดีคือใช้เวลาและเนื้อที่ติดตั้งไม่มากนักเนื่องจากเป็นระบบต่อเนื่อง (Continuous Process) และไม่เกิดปัญหาการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มที่ทนต่อความร้อนสูง [2] เพราะสามารถให้อุณหภูมิและเวลาฆ่าเชื้ออย่างเพียงพอ ระบบพาสเจอร์ไรส์ของเครื่องดันแบบ มีส่วนประกอบสำคัญดังนี้

1) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวอุ่นก่อน (Pre-heat exchanger) และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหลัก (Main heat exchanger)

จากรูปที่ 4 ระบบพาสเจอร์ไรส์สำหรับเครื่องดันแบบนี้ เริ่มต้นการทำงานโดยปั๊ม P01 จะส่งน้ำนมที่ได้รับการผสมส่วนผสมต่างๆ เรียบร้อยแล้วจากถังผสม T01 เข้าไปในระบบท่อ ผ่านไปยังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) จำนวน 2 เครื่องที่ทำงานร่วมกันคือ อุ่นนมให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นประมาณ 5-10 °C ด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวอุ่นก่อน (HE01) (รูปที่ 7) และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหลัก (HE02) (รูปที่ 8) ซึ่งแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำนมกับลมร้อนที่ส่งออกมาจากเตาให้ความร้อน (Burner) จนกระทั่งอุณหภูมิสูงขึ้นถึงระดับพาสเจอร์ไรส์ คือ 72-82 °C โดยใช้แก๊สหุงต้มเป็นแหล่งให้ความร้อนส่งไปยังเตาให้ความร้อน และมีอัตราการป้อนแก๊สคือ 0.005 kg/min

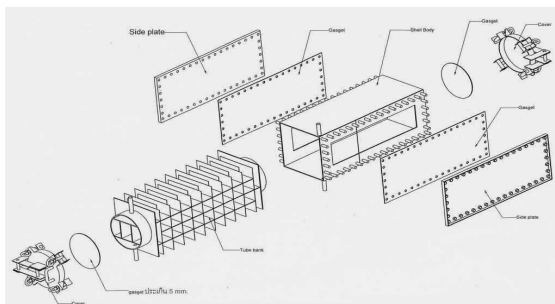
โครงสร้างภายในของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวอุ่นก่อนจะมีลักษณะคล้ายตะแกรงรังผึ้ง อยู่ภายในส่วนที่เรียกว่า เปลือก (Shell) เพื่อให้ให้น้ำนมที่ผ่านการพาสเจอร์ไรส์แล้ว (น้ำนมร้อน) ไหลเข้าและออกโดยมีแผ่นกั้น (Baffles) เป็นตัวกำหนดเส้นทางการไหลและยังมีท่อ (Tube) สอดผ่านตะแกรงนี้เพื่อให้ให้น้ำนมเย็นลงไปและกลับอยู่ใน น้ำนมร้อน และน้ำนมเย็นจะทำการแลกเปลี่ยนความร้อนกันผ่านผนังท่อ ดังรูปที่ 2

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหลัก เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อเรียงแบบแนวเดียวกัน เป็นทรงกระบอก แบบ 1 Shell 10 pass เส้นผ่าศูนย์กลาง 20 cm ความยาว 50 cm วัสดุที่ใช้เป็นสแตนเลส 304 ความหนา 2 mm ส่วนเปลือกใช้อากาศร้อนจากหัวเตาให้ความร้อนไหลผ่านโดยมีแผงกั้น เป็นตัวคอยควบคุมทิศทางการไหลของอากาศร้อน มีท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ½ in ที่อยู่ภายในเปลือกมีจำนวน 10 ท่อ เป็นส่วนที่น้ำนมเย็นไหลไปและกลับเพื่อรับความร้อนถ่ายเทจากอากาศร้อนผ่านผนังท่อ ทำให้อุณหภูมิของน้ำนมสูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงระดับที่ต้องการในการพาสเจอร์ไรส์

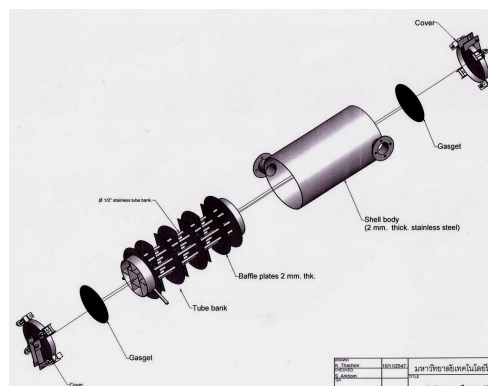
2) ระบบขดท่อหน่วงเวลา

การฆ่าเชื้อที่ถูกต้องนั้นจำเป็นต้องให้น้ำนมรักษาระดับอุณหภูมิพาสเจอร์ไรส์ไว้เป็นระยะเวลาหนึ่งเพื่อให้ฆ่าเชื้อได้สมบูรณ์ เรียกว่า เวลาหน่วง (Holding time) โดยการกำหนดระยะความยาวท่อจากตำแหน่งที่น้ำนมไหลออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหลัก (น้ำนมต้องมีอุณหภูมิถึงจุดฆ่าเชื้อที่กำหนด) ไปจนถึงตำแหน่งที่น้ำนมไหลเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวอุ่นก่อน (เพื่อทำการลดอุณหภูมิของน้ำนม) ให้มีความยาวเพียงพอที่จะให้น้ำนมใช้เวลาเดินทางอย่างน้อยประมาณ 15-30 s ในทางเทคนิคจะการใช้การขดท่อส่งน้ำนมให้เป็นเกลียว (Spiral pattern) ที่มีรัศมีเกลียวประมาณ 20 cm เพื่อประหยัดพื้นที่ เรียกขดท่อนี้ว่า “ขดท่อหน่วงเวลา” (รูปที่ 9) และถือว่าบริเวณดังกล่าวจะไม่มีการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิของน้ำนมแต่อย่างใด หมายความว่า น้ำนมจะรักษาระดับอุณหภูมิอยู่ที่ช่วง 72-82 °C ตลอดช่วงเวลาที่เดินทางอยู่ในขดท่อนี้

จากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าน้ำนมที่ไหลอยู่ในระบบพาสเจอร์ไรส์ของเครื่องดันแบบมีระยะเวลาหน่วงประมาณ 67 s โดยนับจากจุดที่น้ำนมไหลออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหลักจนถึงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวอุ่นก่อน



รูปที่ 7 ลักษณะและชิ้นส่วนภายในของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวอุ่นก่อน



รูปที่ 8 ลักษณะและชิ้นส่วนภายในของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหลัก

ตารางที่ 2 ค่าเวลาที่ของไหลใช้ไปในแต่ละช่วงระยะทาง (Retention time) ระหว่างการไหลจากปั๊มไปยังถังหมัก

ช่วงระยะตำแหน่ง	ระยะทาง (m)	อัตราเร็วของน้ำนม (m/s)	retention time (s)
P01 ---> T1	2.12	0.09	23.56
T1 ---> T2	4.4	0.09	48.89
T2 ---> T3	5.3	0.09	58.89
T₃---> pre-heater	6.0	0.09	66.67 (holding time)
preheater ---> T4	12.15	0.04	303.75
T4 ---> cooling coil	1.2	0.09	13.33
cooling coil ----> T5	6.3	0.09	70.0
T5 ---> incubator 1	1.95	0.09	21.67
T5---> incubator 2	2.65	0.09	29.44

โดย T1 ---> T2 หมายถึง ตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิลที่วัดค่าอุณหภูมิต่างๆ

P01 หมายถึง ปั๊มน้ำนมหลักของระบบ

3) ถังน้ำเย็นและการลดอุณหภูมิให้น้ำให้เหมาะสมก่อนการหมักบ่ม

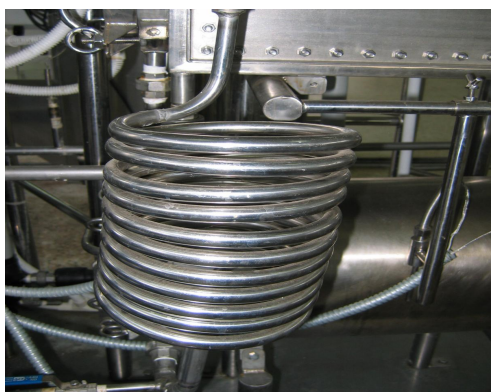
เมื่อผ่านการฆ่าเชื้อด้วยกระบวนการพาสเจอร์ไรส์แล้ว จะต้องลดอุณหภูมิของน้ำนมลงให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการหมักโยเกิร์ต คือที่ 42-45 °C [6] โดยใช้ 2 วิธีร่วมกันได้แก่

- การให้น้ำนมร้อนแลกเปลี่ยนความร้อนแก่น้ำเย็นที่ต้องการอุ่นโดยให้น้ำนมทั้งสองชนิดไหลผ่านกันภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวอุ่นก่อน (HE01) โดยในขั้นตอนนี้จะสามารถลดอุณหภูมิได้ประมาณ 5-15 °C

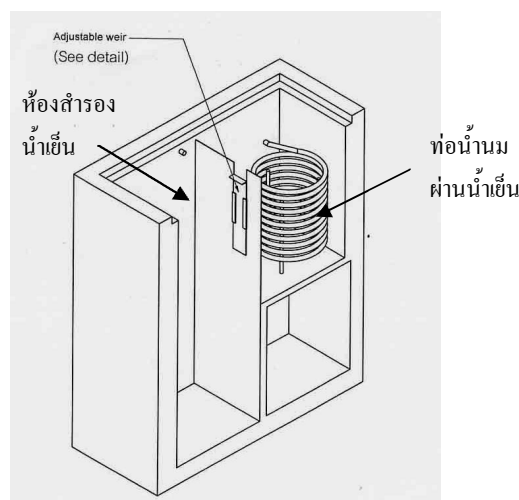
- การให้น้ำนมร้อนแลกเปลี่ยนความร้อนกับแหล่งน้ำเย็น โดยการขดท่อน้ำนมให้เป็นเกลียวอยู่ภายในถังน้ำเย็นที่มีระบบไหลเวียนของน้ำเย็นช่วยให้มีการพาความร้อนได้เร็วและมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น เมื่อน้ำนมผ่านถึงน้ำเย็น (Cooling tank, CT01) แล้วจะมีอุณหภูมิที่พอเหมาะแก่การหมักบ่มคือ 42-45 °C จากนั้นจึงถูกส่งไปยังถังหมักบ่ม (Incubation tank) ต่อไป

ระบบทำน้ำเย็น (รูปที่ 10) ประกอบด้วยถังทรงลูกบาศก์ขนาด 200 L แบ่งเป็น 2 ห้อง คือ ห้องลดอุณหภูมิให้น้ำนมร้อน และห้องสำรองน้ำสำหรับลดอุณหภูมิโยเกิร์ตที่หมักบ่มเสร็จแล้ว ห้องลดอุณหภูมิให้น้ำนมร้อน จะมีท่อสเตนเลสขนาด ½ in ขดโค้งเป็นเกลียวอยู่ภายใน นมที่ผ่านการพาสเจอร์ไรส์แล้วจะวิ่งในท่อผ่านมายังบริเวณนี้เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำเย็นในถัง ความร้อนจะถูกถ่ายเทออกจากน้ำนมสู่น้ำเย็นผ่านทาง

ผนังของท่อสเตนเลสดังกล่าว จากการคำนวณจะได้ อุณหภูมิให้น้ำนมด้านออกจากถังน้ำเย็นประมาณ 42-45 °C



รูปที่ 9 ขดท่อหน่วงเวลา



รูปที่ 10 ถังน้ำเย็น และ โครงสร้างภายในซึ่งให้น้ำนมร้อนไหลผ่านเพื่อลดอุณหภูมิก่อนการหมักบ่ม

4.2 ผลการทดสอบ

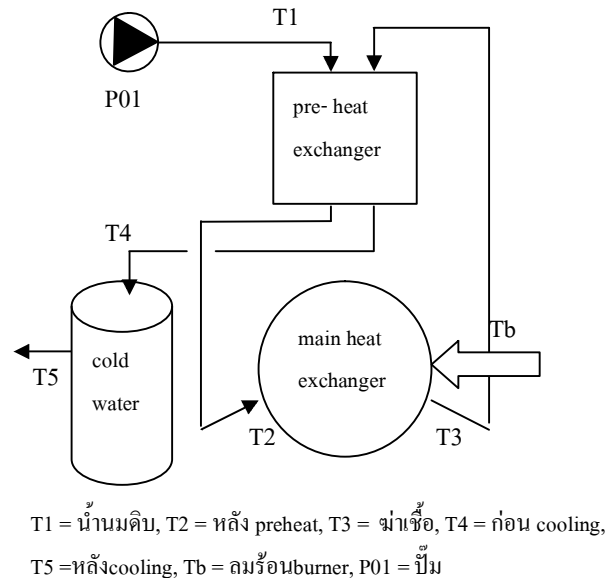
การทดลองส่วนใหญ่ต้องเก็บข้อมูลเกี่ยวกับอุณหภูมิของของไหลที่เกี่ยวข้องในระบบ โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลที่ติดตั้งไว้กับระบบท่อ ตำแหน่งวัดต่างๆมีความสัมพันธ์กัน ดังรูปที่ 11

ผลการทดสอบระบบพาสเจอร์ไรส์ พบว่าสามารถทำการพาสเจอร์ไรส์น้ำนมดิบได้ผลตามต้องการ โดยวิเคราะห์ได้จากการเปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำนมที่เข้าสู่ระบบพาสเจอร์ไรส์ที่ตำแหน่ง และ ณ เวลาต่างๆกัน ดังกราฟรูปที่ 12 แสดงให้เห็นว่าน้ำนมดิบมีการกวัดแกว่งของค่าอุณหภูมิฆ่าเชื้อ (T3) ในช่วง 5 นาทีแรกของการทำงานของปั๊มน้ำนม และค่อยๆปรับตัวลงสู่ค่าสมดุลอย่างต่อเนื่อง (เส้น B) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นชัดเจนว่าน้ำนมดิบทั้งหมด ได้ผ่านการฆ่าเชื้อที่ระดับอุณหภูมิสูงกว่า 72 °C โดยมีอัตราการไหลของน้ำนมเฉลี่ย 884 ml/min

อย่างไรก็ตาม จากการทดสอบ ไม่พบเอนไซม์ฟอสฟาเตส ซึ่งใช้เป็นเครื่องบ่งชี้ว่าน้ำนมที่ผ่านการพาสเจอร์ไรส์จากเครื่องต้นแบบปลอดจากจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดอันตรายแก่มนุษย์

เมื่อนำข้อมูลจากการทดลองมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนรวมภายในอุปกรณ์ต่างๆ ได้แก่ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหลัก เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวช่วยอุ่น และหน่วยลดอุณหภูมิก่อนการหมักบ่ม ดังตารางที่ 3 พบว่าที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหลัก (U_h) เกิดการแลกเปลี่ยน

ความร้อนได้รวดเร็วกว่าที่คำนวณไว้ประมาณร้อยละ 30 หมายความว่าประสิทธิภาพในการทำให้อุณหภูมิน้ำเชื้อสูงขึ้น ในขณะที่อัตราการถ่ายเทความร้อนในช่วงลดอุณหภูมิน้ำมันที่เกิดขึ้นบริเวณเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวช่วยอุ่น (U_p) และหน่วยลดอุณหภูมิก่อนการหมักบ่ม (U_c) จะเกิดขึ้นกว่าที่คำนวณไว้ อันเป็นผลทำให้ต้องเพิ่มพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนให้มากขึ้น เพื่อที่จะควบคุมให้ได้อุณหภูมิหมักบ่มเท่ากับที่ต้องการเดิมคือ 42°C ซึ่งสามารถทำได้โดยการปรับเพิ่มอุณหภูมิในถังน้ำเย็นและให้ชุดท่อน้ำเย็นภายในถังได้สัมผัสกับน้ำเย็นมากขึ้น อย่างไรก็ตามจากกราฟแสดงให้เห็นว่าถึงระดับอุณหภูมิก่อนหมักบ่ม (T_5 หลัง cooling) ที่มีค่าประมาณ 42°C อย่างคงที่ ตลอดระยะเวลาการทำงานของเครื่องนั้นเป็นการบ่งชี้ถึงความแม่นยำในการทำงานของระบบพาสเจอร์ไรส์

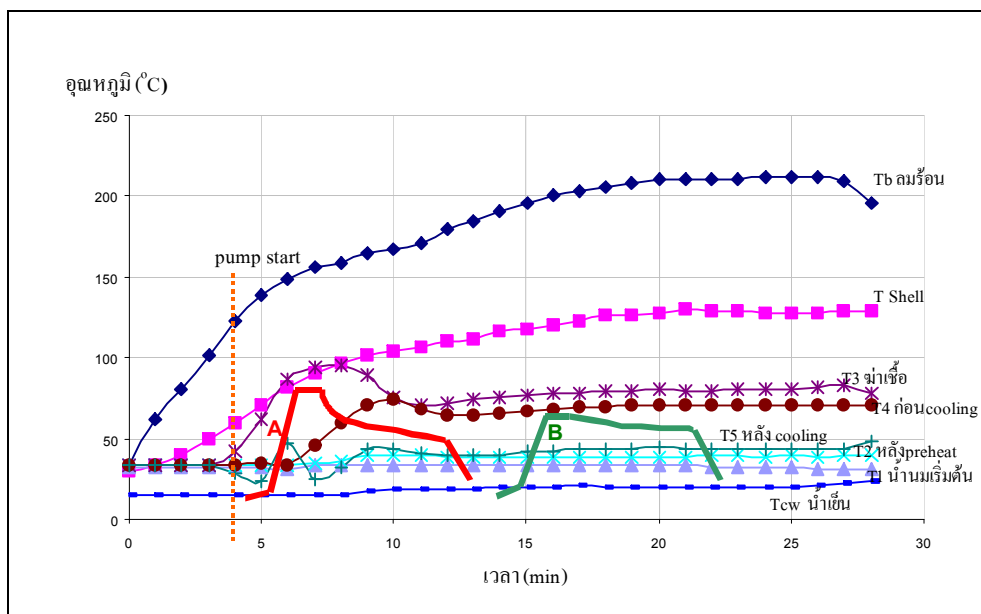


รูปที่ 11 เส้นทางไหลของน้ำในระบบผลิตและตำแหน่งวัดอุณหภูมิ (สัมพันธ์กับรูปที่ 12)

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของอุปกรณ์

อุปกรณ์	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($\text{W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$)	
	จากการทดลอง	จากการออกแบบ
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหลัก (U_h)	127.5	84.17
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวช่วยอุ่น (U_p)	45	65.79
หน่วยลดอุณหภูมิหมักบ่มก่อนการหมักบ่ม (U_c)	449.8	588

โดยค่า U ได้จากการคำนวณสมมูลพลังงาน



รูปที่ 12 อุณหภูมิของน้ำในหม้อทดสอบ สัมพันธ์กับเวลาทำงานของเครื่อง (สัมพันธ์กับรูปที่ 11)

[$T_1=38\text{ }^{\circ}\text{C}$, อัตราการไหล=884 ml/min, $T_b=195\text{ }^{\circ}\text{C}$]

5. สรุป

การพาสเจอร์ไรส์ เป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนในด้านการควบคุมคุณภาพมาก เนื่องจากน้ำนม มีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการฆ่าเชื้ออยู่ในย่าน $72\text{--}82\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยการที่จะควบคุมอุณหภูมิพาสเจอร์ไรส์นั้นต้องพิจารณาให้มีความสัมพันธ์กับการควบคุมอัตราการไหลของน้ำนมดิบ อัตราการไหลของอากาศร้อน อัตราการป้อนแก๊สเชื้อเพลิง ระดับอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำนมดิบ อุณหภูมิของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ตลอดจนอุณหภูมิของอากาศสิ่งแวดล้อมภายนอกของบริเวณโรงผลิตด้วย พบว่า อัตราการไหลของน้ำนมดิบเฉลี่ยควรอยู่ที่ประมาณ 884 ml/min ระยะเวลาที่ทำการฆ่าเชื้อน้ำนมโดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 67 s ถือว่าเป็นเวลานานเพียงพอสำหรับการฆ่าเชื้อให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อการบริโภค และน้ำนมยังมีกลิ่นรสปกติ

การลดอุณหภูมิของน้ำนมหลังการพาสเจอร์ไรส์ ก่อนเข้าสู่ถังหมักบ่ม เป็นกระบวนการหนึ่งที่มีความจำเป็นต้องมีความแม่นยำ เนื่องจากน้ำนมต้องเข้าสู่ถังหมักที่อุณหภูมิ $42\text{--}45\text{ }^{\circ}\text{C}$ เท่านั้น ในขณะที่อุณหภูมิของน้ำเย็นภายในถังน้ำเย็นที่ใช้เป็น

ของไหลเย็นช่วยแลกเปลี่ยนความร้อน มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ อันเนื่องมาจากการสะสมความร้อน การใช้ปั๊มหมุนเวียนน้ำเย็นอย่างเดียวนั้นยังไม่เพียงพอต่อการรักษาอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ต้องการได้ ดังนั้น จึงต้องมีเทคนิคการเติมน้ำแข็งลงไปจนถึงน้ำเย็นเพื่อช่วยควบคุมอุณหภูมิของน้ำเย็นดังกล่าว โดยอัตราการเติมน้ำแข็งเข้าสู่ระบบทำความเย็นขณะพาสเจอร์ไรส์ที่เหมาะสมคือ 230 g/min โดยการเติมน้ำแข็งเป็นการทดแทนพลังงานไฟฟ้าในเครื่องทำความเย็นนั้นถือว่าการลดภาระต้นทุนในการผลิตอีกทางหนึ่งด้วย

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการงานวิจัยเพื่อพัฒนาเครื่องต้นแบบผลิตโยเกิร์ตสำหรับอุตสาหกรรมขนาดย่อม ได้รับสนับสนุนทุนวิจัยจากงบประมาณประจำปี 2546-2547 คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ดร.สมชาย จอมดวงและ รศ.ดร.เสถียร ศรีบุญเรือง จากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ปรึกษาโครงการ อาจารย์อภรณ์ เพอร์รี่แมน กรุณาปรับสำนวนบทคัดย่อภาษาอังกฤษ และสาขาอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัย

เทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ลำปาง ที่ให้การสนับสนุนเจ้าหน้าที่ เครื่องมือและสถานที่ทำการวิจัย ตลอดจนอนุญาตให้ใช้เป็นสถานที่ติดตั้งเพื่อเป็นต้นแบบแก่ผู้สนใจ

เอกสารอ้างอิง

- 1 วันเพ็ญ จิตรเจริญ อาคม สุวัฒน์ภักดิ์ อภินันท์ จิตรเจริญ และอรทัย บุญทะวงศ์. การสร้างเครื่องต้นแบบผลิตโยเกิร์ตแบบครบวงจรควบคุมด้วยระบบไฟฟ้าและระบบคอมพิวเตอร์ สำหรับอุตสาหกรรมขนาดย่อมและการเรียนการสอน , มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ลำปาง, 2548.
- 2 Alfa-Laval Dairy and Food Engineering. Dairy Handbook. Division Sweden, 1980.
- 3 Yunus A.C. Heat Transfer a Practical Approach, 2nded, McGraw-Hill, Singapore, 2003.
- 4 Toledo T. Fundamentals of Food Process Engineering, 2nded, Von Nostrand Reinhold, New York, 1991.
- 5 Holman. J. P. Heat Transfer. 8thed, McGraw-Hill, New York, 1997.
- 6 วันเพ็ญ จิตรเจริญ. หลักการวิเคราะห์และคำนวณผลิตภัณฑ์นม, คณะเทคโนโลยีการอาหาร, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ลำปาง, 2542.