



# การศึกษากระบวนการอบแห้งโพรไบโอติกในโยเกิร์ตโดยใช้เครื่องอบแห้งด้วยการแช่แข็งสำหรับใช้ในครัวเรือน

วสันต์ เอียรสุวรรณ<sup>1</sup> สานนท์ ว่องมงคลฤทธิ์<sup>1</sup> สุรัชชัย เหมหิรัญ<sup>1</sup> และ ภาวิณี ตักดีสุนทรศิริ<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

<sup>2</sup> ภาควิชาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา

\* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author) อีเมล: pawinee@eng.buu.ac.th

วันที่รับบทความ: 10 เมษายน 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 13 มิถุนายน 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 4 กรกฎาคม 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 26 สิงหาคม 2567

**บทคัดย่อ:** การอบแห้งด้วยการแช่แข็งเป็นกระบวนการลดความชื้นในผลิตภัณฑ์ลงโดยกระบวนการเทอร์โมไดนามิกส์ที่ทำให้น้ำหรือสารละลายในอาหารถูกแช่แข็งแล้วทำให้ระเหิด ผลผลิตจากการการอบแห้งด้วยการแช่แข็งยังคงมีคุณภาพที่สูงเนื่องจากสามารถลดการเสื่อมสภาพและปฏิกิริยาทางจุลชีววิทยาของผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลผลิตที่ได้จากการอบแห้งด้วยเทคโนโลยีแบบอื่น ในการศึกษาเป็นการศึกษากระบวนการอบแห้งแบบแช่แข็งของโพรไบโอติกจากโยเกิร์ตในกระบวนการต่อเนื่องในเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งขนาดครัวเรือนที่การออกแบบและสร้างขึ้นสำหรับการแช่แข็งและอบแห้งในภาวะสุญญากาศ ใช้สารทำความเย็น R-410A เป็นสารทำความเย็นในกระบวนการทำความเย็นเพื่อแช่แข็ง มีวิสัยสามารถทำความเย็น 3 kW ในกระบวนการอบแห้งโพรไบโอติกจากโยเกิร์ตมีอุณหภูมิกับตกความเย็น  $-40^{\circ}\text{C}$  และอุณหภูมิผลิตภัณฑ์แช่แข็ง  $-20^{\circ}\text{C}$  ในการทดลองได้วัตถุดิบโพรไบโอติกเหลวจากโยเกิร์ต 3000 g มาจัดวางบนถาดขนาด 250 mm × 400 mm × 20 mm จำนวน 6 ถาดบรรจุในห้องอบแห้งแบบแช่แข็ง ทำการวัดค่าอุณหภูมิ ความดัน วิเคราะห์วัฏจักรการทำความเย็น หาค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะทำความเย็น หาระยะเวลาในการแช่แข็งและเวลาในการแห้ง อัตราการอบแห้ง และค่าพลังงานไฟฟ้า รวมทั้งตรวจสอบเชื้อจุลินทรีย์จากการทดลองเพื่อพิจารณาผลของการรักษาคุณภาพของโพรไบโอติกก่อนและหลังการอบแห้งแบบแช่แข็งซึ่งพบว่าเชื้อจุลินทรีย์โพรไบโอติกหลังการอบแห้งแบบแช่แข็งยังมีมากเพียงพอต่อการบริโภคเพื่อดำเนินประโยชน์ต่อร่างกายมนุษย์

**คำสำคัญ:** โพรไบโอติกจากโยเกิร์ต; การอบแห้งแบบแช่แข็ง; เครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งขนาดครัวเรือน

# A Study of the Freeze-Drying Process for Probiotics in Yogurt Produced from a Typical Household Freeze Dryer

Wasan Theansuwan<sup>1</sup>, Sanon Wongmongkolrit<sup>1</sup>, Surachai Hemhirun<sup>1</sup> and Pawinee Suksuntornsiri<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University

\* Corresponding Author, E-mail: pawinee@eng.buu.ac.th

Received: 10 April 2024; Revised: 13 June 2024; Accepted: 4 July 2024

Online Published: 26 August 2024

**Abstract:** The freeze-drying process is a method to reduce moisture in products through a thermodynamics stage that involves freezing the water or solution in food, followed by sublimation. This process results in high-quality products as it effectively minimizes degradation and microbiological reactions compared to other drying technologies. The study focuses on the freeze-drying process of probiotics from yogurt in a continuous operation using an in-house, household-scale, freeze-dryer designed for vacuum freeze-drying. The refrigerant used is R-410A, with a cooling capacity of 3 kW, achieving a condenser temperature of  $-40^{\circ}\text{C}$  and a product temperature of  $-20^{\circ}\text{C}$ . In the experiment, 3000 g of liquid probiotic from yogurt was spread across six trays measuring 250 mm  $\times$  400 mm  $\times$  20 mm and dried in the freeze dryer. The study measured temperature, pressure, analyzed the refrigeration cycle, determined the coefficient of performance for cooling, freezing and drying times, drying rates, and electrical energy consumption. It also examined the microbiological content to assess the effect of freeze-drying on probiotic quality before and after drying. It found that the probiotic microorganisms remained sufficiently abundant post-drying for consumption with health benefits.

**Keywords:** Probiotics from yoghurt; Freeze drying; In-house freeze-drying



## 1. บทนำ

การอบแห้งด้วยการแช่แข็ง (Freeze Drying) เป็นกระบวนการที่ทำให้น้ำหรือสารละลายในผลิตภัณฑ์ถูกแช่ให้เป็นของแข็งจากนั้นทำให้ระเหิด (Sublimation) เป็นก๊าซโดยไม่ผ่านสถานะของเหลว กระบวนการนี้ช่วยให้สินค้าเก็บรักษาได้นาน ทำให้สามารถรักษาคุณภาพ กลิ่น สี และรสชาติของผลิตภัณฑ์ได้ดี

ขั้นตอนกระบวนการ เริ่มจากการแช่แข็งผลิตภัณฑ์ไว้ในห้องเย็น จากนั้นนำผลิตภัณฑ์มาลดความชื้นด้วยการระเหิดเป็นไอในสภาวะสูญญากาศ ความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ระเหิดเป็นไอจะเคลื่อนตัวไปควบแน่นที่อุปกรณ์ควบแน่น ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลงที่อุณหภูมิต่ำ

ในปัจจุบันผู้บริโภคอาหารมีความต้องการบริโภคอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อสุขภาพมากยิ่งขึ้น เนื่องจากอาหารเหล่านี้ไม่ได้มีวัตถุประสงค์เพียงเพื่อตอบสนองความหิวโหยและให้สารอาหารที่จำเป็นแก่มนุษย์เท่านั้น แต่ยังเพื่อป้องกันโรคที่เกี่ยวข้องกับโภชนาการ รวมถึงจุลินทรีย์ และเพิ่มความเป็นอยู่ที่ดีทางร่างกายและจิตใจของผู้บริโภค [1, 2]

โพรไบโอติกเป็นชนิดหนึ่งของแบคทีเรียที่มีชีวิตซึ่งมีประโยชน์ต่อร่างกายเนื่องจากทำหน้าที่ต่อสู้กับแบคทีเรียที่เป็นอันตราย ลดอาการท้องร่วง ท้องเสีย และโรคเกี่ยวกับลำไส้ เมื่อรับประทานโพรไบโอติกในปริมาณที่เหมาะสมจะก่อให้เกิดประโยชน์ต่อร่างกาย โพรไบโอติกจึงมักบรรจุในผลิตภัณฑ์นมหมัก เช่น โยเกิร์ต [3, 4] โดย *Bifidobacterium spp.* และ *Lactobacillus acidophilus* เป็นโพรไบโอติกที่สำคัญที่สุดที่เติมลงในนมหมัก [5] ในบรรดาผลิตภัณฑ์หมัก

จากนม การบริโภคผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกสูงสุดนั้นสัมพันธ์กับโยเกิร์ตโพรไบโอติก [6]

หนึ่งในขอบเขตที่มีความสำคัญมากที่สุดสำหรับการพัฒนาอาหารเพื่อสุขภาพคือการปรับเปลี่ยนกิจกรรมของระบบทางเดินอาหารโดยใช้โพรไบโอติก พรีไบโอติก และซินไบโอติก นอกจากนี้โพรไบโอติกยังถูกนำมาใช้ในการศึกษาวิจัยด้านการรักษาทางการแพทย์ เช่น ความผิดปกติของระบบทางเดินอาหาร ท้องเสียรุนแรง ท้องเสียในทารก ความผิดปกติของระบบทางเดินอาหาร และการเสียชีวิตของทารกที่คลอดก่อนกำหนด และกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันในร่างกายได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย [7, 8]

เนื่องจากโพรไบโอติกเป็นแบคทีเรียที่มีชีวิตในโยเกิร์ตซึ่งได้รับความนิยมสูงขึ้นจากผู้บริโภค ในการผลิตจะต้องทำการคัดเลือกสายพันธุ์ที่เหมาะสมทำการเพาะเชื้อและหมักเพื่อเพิ่มจำนวนเชื้อโพรไบโอติก ทำการเก็บเกี่ยวและเก็บรักษาเชื้อโพรไบโอติกให้เสถียร

การอบแห้งแบบแช่แข็งเป็นหนึ่งในการพัฒนาเทคโนโลยีล่าสุดในการเก็บรักษาจำนวนเชื้อโพรไบโอติก [9, 10] แต่อุตสาหกรรมการผลิตจะใช้เงินลงทุนเริ่มแรกที่สูงมากในการลงทุนเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็ง [11, 12] จึงมีเพียงอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีอัตราการผลิตขนาดใหญ่จึงสามารถลงทุนในธุรกิจนี้ โดยการอบแห้งด้วยการแช่แข็งเชิงพาณิชย์มีค่าใช้จ่ายสูงกว่าถึง 85%

สำหรับผู้ผลิตที่มีปริมาณของการผลิตขนาดเล็กหรือผู้เริ่มต้นธุรกิจการผลิตโยเกิร์ตเพื่อสุขภาพของผู้ผลิตในประเทศไทยนั้น การลงทุนในอุปกรณ์การ



อบแห้งด้วยการแช่แข็งจึงถือเป็นความท้าทายอย่างยิ่งในการศึกษาที่มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการลดเวลาในการอบแห้งด้วยการแช่แข็งโพรไบโอติกในโยเกิร์ตด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งขนาดครัวเรือนที่การออกแบบและสร้างขึ้นสำหรับการแช่แข็งและอบแห้งในภาวะสูญญากาศ ทำการทดสอบแช่แข็งและอบแห้งโพรไบโอติกในโยเกิร์ต โดยการปรับปรุงกระบวนการถ่ายเทความร้อนเพื่อให้แน่ใจว่าอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ยังคงต่ำกว่าอุณหภูมิเหมาะสมต่อการเก็บรักษา ทำการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องทำแห้งแช่แข็งขนาดครัวเรือนอย่างเป็นทางการผลิตโพรไบโอติกจากโยเกิร์ต เพื่อให้คำแนะนำและข้อมูลเชิงลึกที่ชัดเจนสำหรับผู้มีโอกาสเป็นผู้ผลิตอาหารอบแห้งด้วยการแช่แข็งเพื่อสุขภาพภาคอุตสาหกรรมอาหารในประเทศไทย

## 2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

### 2.1 โพรไบโอติกในโยเกิร์ต (Probiotics in Yogurt)

โยเกิร์ตได้มาจากการหมักนมด้วยแบคทีเรียกรดแลคติก (Lactic Acid Bacteria: LAB) โดยการทำให้จุลินทรีย์ในนมด้วยความร้อน การพาสเจอร์ไรส์สามารถทำได้ 2 วิธี คือ ใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $62.8^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 30 นาที หรือใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $77^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 15 วินาที เพื่อฆ่าเชื้อแล้วลดอุณหภูมิลงเหลือ  $45^{\circ}\text{C}$  จากนั้นเติมเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นโดยใช้แบคทีเรีย LAB สองตัวคือ แลคโตบาซิลลัส บัลการิคัส (*Lactobacillus bulgaricus*) และสเตรปโตคอคคัส เทอร์โมฟิลัส (*Streptococcus thermophilus*)

แบคทีเรียหลักที่ใช้ในการผลิตโพรไบโอติกคือแลคโตบาซิลลัส บัลการิคัส คุณสมบัติทางความร้อนของโพรไบโอติกจากโยเกิร์ต คุณสมบัตินี้ใช้เพื่อกำหนดภาวะของผลิตภัณฑ์ระหว่างการอบแห้งด้วยการแช่แข็ง

การเตรียมโพรไบโอติกเหลวเพื่อใช้ในการทดลองโดยผสมนมวัวกับไลโอโพรเทคแทนต์ (กาแลคโตส (Galactose) นมผงพร่องมันเนย และซูโครส (Sucrose) บ่มที่อุณหภูมิ  $37^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลาประมาณ 20 ชั่วโมง จะได้โพรไบโอติก จากนั้นเก็บในขวดแก้วที่มีสารปรับปรุงคุณสมบัติ (Deoxidant) และสารดูดความชื้นที่อุณหภูมิ  $4^{\circ}\text{C}$  [1-2, 6] โดยโพรไบโอติกเหลวเพื่อใช้ในการทดลองจัดเตรียมโดย Welltech, Biotechnology Company Limited (รูปที่ 1)

### 2.2 เครื่องอบแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze Dryer)

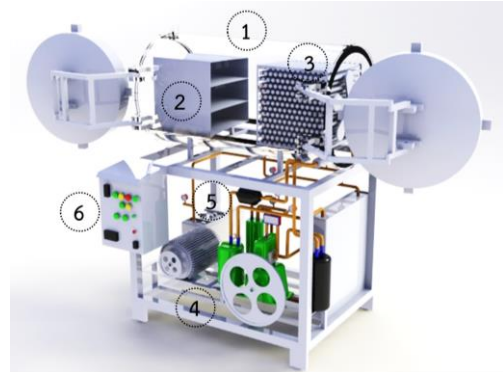
เครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งซึ่งออกแบบและพัฒนาขึ้นโดยนักวิจัย [13-14] โดยสรุปส่วนประกอบต่างๆของเครื่องอบแห้งมีดังนี้คือ ห้องอบแห้ง (Drying Chamber (1)) จะมีรูปทรงทรงกระบอก ภายในประกอบด้วย ชั้นความร้อน (Heating Shell (2)) จำนวน 3 ชั้นเพื่อวางถาดสี่เหลี่ยมขนาด  $250\text{mm}\times 400\text{mm}\times 20\text{mm}$  บรรจุวัสดุการทดลอง ชั้นละ 2 ถาด รวมเป็นจำนวน 6 ถาด และตัวควบแน่นหรือกักดักความเย็น (Evaporator or Cold Trap (3)) ของระบบทำความเย็นโดยมีพัดลมหมุนเวียนอากาศภายในห้องอบแห้งติดอยู่ด้านท้าย นอกจากนั้นแล้ว ส่วนประกอบอื่นที่สำคัญคือ ระบบทำความเย็น (Refrigeration System (4)) ระบบทำสุญญากาศ (Vacuum System (5)) และตู้ควบคุม (Control Box (6)) ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยมีคุณลักษณะของเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งในตารางที่ 2



รูปที่ 1 โพรไบโอติกเหลวถูกบรรจุในขวดเพื่อ  
การขนส่งสำหรับการใช้ในการทดลอง

## ตารางที่ 2 คุณลักษณะของเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็ง

Component	Details/specifications
ระบบทำความเย็น	สารทำความเย็น R-404A
คอมเพรสเซอร์	3.5 kW of cooling capacity on $-40^{\circ}\text{C}$ evaporator unit and $40^{\circ}\text{C}$ condenser unit, three phase (open reciprocating)
คอนเดนเซอร์	4.82 kW of heat rejection (water cooling)
วาล์วระเหยสารทำความเย็น	3.5 kW (Sportan, Model CG-032) thermostatic, thermostatic charges available $-18^{\circ}\text{C}$ to $-40^{\circ}\text{C}$
เครื่องระเหย	Cooling capacity 3.75 kW, $\varnothing$ 15 mm of tubing (50 × 50 mm aligned parallel), 10-mm fin spacing, 10 m <sup>2</sup>
พัดลมทำความเย็น	1/3 hp, single phase, 1450 rpm
ถาดอบแห้ง	250 × 400 × 20 mm <sup>3</sup> (SS-304)
Receiver tank	3.5 kW, $\varnothing$ 10 mm of tubing
ปั๊มสุญญากาศ	$2.0 \times 10^{-2}$ mbar ( $1.5 \times 10^{-2}$ mmHg) of ultimate pressure (total), 3.3 m <sup>3</sup> /h of peak pumping speed (EDWARDS Model RV3 rotary vane pumps)



รูปที่ 2 เครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งนี้มีข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งที่ใช้งานโดยทั่วไปสามารถทำงานได้ทั้งสองกระบวนการอย่างต่อเนื่องคือกระบวนการแช่แข็งโดยเปิดพัดลมหมุนเวียนอากาศภายในห้องอบแห้งทำหน้าที่เป็นเครื่องแช่แข็งแบบเป่าลมเย็น (Air Blast Freezer) และกระบวนการอบแห้งแบบแช่แข็ง เมื่อเปิดพัดลมหมุนเวียนอากาศและเปิดปั๊มสุญญากาศ ทำหน้าที่เครื่องอบแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze Dryer) โดยทั้งสองกระบวนการจะทำงานต่อเนื่องกันจนเสร็จสิ้นการอบแห้งผลิตภัณฑ์

## 2.3 วิธีการทดลอง (Experimental Method)

### 2.3.1 เตรียมโพรไบโอติกเหลวสำหรับการทดลอง

นำโพรไบโอติกเหลวในขวดที่ถูกเตรียมโดย Welltech, Biotechnology Company Limited จำนวน 3,000 g เติลงในถาดจำนวน 6 ถาด เท่าๆกัน (ถาดละ 500 g) และวางบนชั้นความร้อน ชั้นละ 2 ถาด จำนวนสามชั้นที่อยู่ในห้องอบแห้งแบบแช่แข็ง พร้อมติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ (Thermo Couple Type T) ที่ถาดทั้งหมดและตัวควบคุมแรงดัน เพื่อเตรียมความพร้อมในการทดลองการอบแห้งแบบแช่แข็ง



### 2.3.2 ขั้นตอนการทดลองอบแห้งแบบแช่แข็ง

กระบวนการแช่แข็ง โดยกระทำตามขั้นตอน ดังนี้ ปิดประตูห้องอบแห้ง เปิดระบบทำความเย็น เปิดพัดลมหมุนเวียนอากาศในห้องอบแห้ง ตรวจวัด อุณหภูมิของการทดลองด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิ แบบบันทึกค่า (Data Logger) Yokogawa MV2000 และวัดความดันของระบบทำความเย็นด้วย (Dry Pressure Gauge) โดยกระบวนการแช่แข็งเริ่มต้น จากอุณหภูมิโพรไบโอติกที่  $5^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  และดำเนิน ต่อไปจนถึงอุณหภูมิโพรไบโอติกสุดท้ายที่  $-20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$

### 2.3.3 ขั้นตอนการอบแห้งแบบแช่แข็ง

กระบวนการอบแห้งแบบแช่แข็งเริ่มต้นด้วยการปิดพัดลมเวียนอากาศในห้องอบแห้ง เปิดปั๊มสุญญากาศเพื่อลดความชื้นและปรับสภาวะแวดล้อมภายในห้องอบแห้งให้เป็นความดันสุญญากาศเข้าใกล้  $-760 \text{ mmHg}$  เมื่อความดันสุญญากาศในห้องอบแห้งคงที่จึงเปิดระบบควบคุมทำความร้อนที่ชั้นความชื้น โดยควบคุมอุณหภูมิของโพรไบโอติกให้เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ที่อัตราการอบแห้ง (Drying Rate)  $0.3^{\circ}\text{C} / \text{min}$  โดยขั้นตอนการอบแห้งแบบแช่แข็งแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนย่อยคือ ขั้นตอนอบแห้งขั้นต้น (Primary drying) มีอุณหภูมิสุดท้ายของขั้นตอนนี้คือ  $0^{\circ}\text{C}$  และขั้นตอนอบแห้งขั้นสุดท้าย (Secondary Drying) ซึ่งจะดำเนินการอบแห้งต่อไปจนถึงอุณหภูมิสุดท้ายที่  $40^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  ก็จะได้โพรไบโอติกที่แห้งเป็นอันสิ้นสุดกระบวนการอบแห้งแบบแช่แข็ง

## 2.4 การประเมินผลการทดลอง (Evaluation of Experiments)

### 2.4.1 สัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of Performance: COP) ของเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็ง

ตรวจสอบ COP ของระบบทำความเย็นของเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็ง โดยการวัดค่าความดันและอุณหภูมิของระบบทำความเย็น และวิเคราะห์โดยใช้แผนภาพแสดงความดันและเอนทาลปี (P-H Diagram Chart) ของวัฏจักรอัดไอในระบบทำความเย็นของสารทำความเย็น R-404A  $COP_C$  สำหรับการทำความเย็น และ  $COP_H$  สำหรับการทำความร้อนสามารถหาค่าได้ตามสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ [15-16]

$$COP_C = \frac{\dot{Q}_E}{\dot{W}} \quad (1)$$

$$COP_H = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{W}} \quad (2)$$

โดยที่  $\dot{Q}_C$  และ  $\dot{Q}_H$  คือ ความร้อนที่ถูกดึงออกและถูกทิ้งจากระบบทำความเย็นตามลำดับ สามารถได้จากสมการที่ (3) และสมการที่ (4) ดังนี้

$$\dot{Q}_C = \dot{m}_R (h_1 - h_4) \quad (3)$$

$$\dot{Q}_H = \dot{m}_R (h_2 - h_3) \quad (4)$$

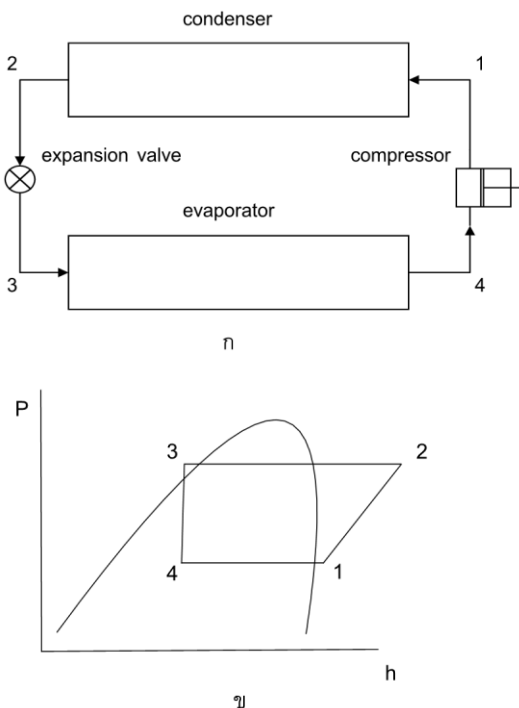
โดย  $\dot{m}_R$  คือ อัตราการไหลของสารทำความเย็น ส่วนค่า  $h_1$   $h_2$   $h_3$  และ  $h_4$  หาได้จากข้อมูลการวัดค่าอุณหภูมิและความดันของสารทำความเย็น ณ ตำแหน่ง ที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามที่แสดงในแผนภาพวัฏจักรทำความเย็นดังในรูปที่ 3 ก. อ่านค่าสมบัติเอนทาลปีโมโนไมกส์ของสารทำความเย็น R-410A จากสมบัติสารทำความเย็น (ASHRAE fundamentals, 2021)



มาพล็อตแผนภูมิความดันเอนทัลปีจำเพาะ (P-h Diagram) แสดงได้ในรูปที่ 3

### 2.4.2 ตรวจสอบเชื้อจุลินทรีย์ของโพรไบโอติก

โพรไบโอติกเหล่านี้จะถูกตรวจสอบปริมาณเชื้อจุลินทรีย์จากการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ Welltech, Biotechnology Company Limited ก่อนการส่งมาทำการอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งที่สร้างขึ้น และภายหลังจากผลิตภัณฑ์ได้ผ่านการอบแห้งเสร็จสิ้นแล้วจะถูกนำส่งไปตรวจสอบเชื้อจุลินทรีย์อีกครั้งหนึ่งในห้องปฏิบัติการเดิม เพื่อเปรียบเทียบปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ระหว่างโพรไบโอติกก่อนและหลังการอบแห้งแบบแช่แข็ง



รูปที่ 3 (ก) วัฏจักรทำความเย็นของระบบทำความเย็น และ (ข) แผนภาพความดันและเอนทัลปีจำเพาะ

## 3. ผลการทดลอง (Results)

### 3.1 กระบวนการอบแห้งโพรไบโอติก

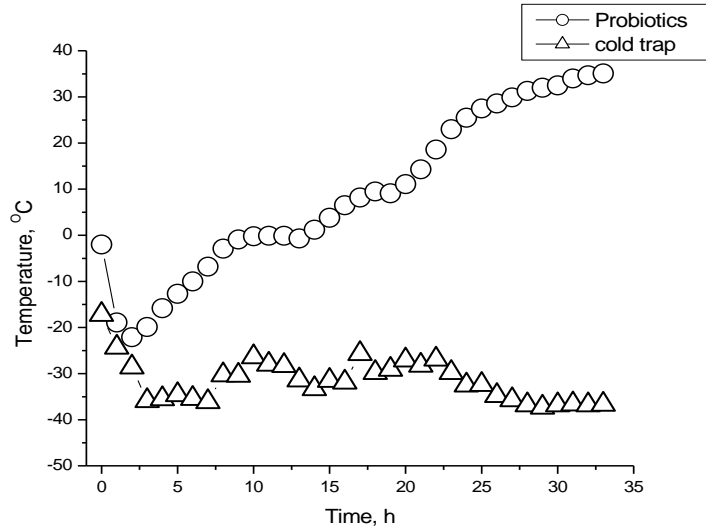
ผลการวัดค่าอุณหภูมิของโพรไบโอติกในช่วงเวลาต่าง ๆ ตลอดกระบวนการแช่แข็งและเวลาในการแห้ง นำมาพล็อตกราฟ ตามที่แสดงในรูปที่ 4 พบว่ากระบวนการอบแห้งโพรไบโอติกในเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็ง มี 2 กระบวนการที่สำคัญ คือ

(1) กระบวนการแช่แข็ง ตั้งแต่เริ่มกระบวนการดำเนินไปจนถึงอุณหภูมิโพรไบโอติกสุดท้ายที่  $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$

(2) กระบวนการอบแห้งแบบแช่แข็ง เป็นกระบวนการต่อเนื่องจาก (1) จนไปถึงอุณหภูมิสุดท้าย  $40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยโพรไบโอติกที่สภาวะสุดท้ายจะมีผลิตภัณฑ์ที่เป็นสภาพแห้งเป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการทดลอง

ภาพของผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกที่สภาวะแช่แข็งจากขั้นตอนที่ (1) แสดงในรูปที่ 5 สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการอบแห้งเสร็จสิ้นจากขั้นตอนที่ (2) ที่พบในภาคทดลองและเมื่อนำมาใส่ถุงซิปล็อคเพื่อเตรียมนำส่งไปทดสอบปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ แสดงในรูปที่ 6

สัมประสิทธิ์สมรรถนะสำหรับการทำความเย็น ( $COP_c$ ) และสัมประสิทธิ์สมรรถนะสำหรับการทำความร้อน ( $COP_h$ ) ของเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็ง อัตราการอบแห้ง ( $^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$ ) ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (Electrical Load) ในกระบวนการย่อยของกระบวนการอบแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze Drying Process) ประกอบด้วย 3 กระบวนการย่อย คือ กระบวนการแช่แข็ง (Freezing) กระบวนการอบแห้งขั้นต้น (Primary Drying) และกระบวนการทำแห้งขั้นที่สอง (Secondary Drying) แสดงในตารางที่ 3



รูปที่ 4 อุณหภูมิและเวลาในกระบวนการอบแห้งโพรไบโอติกในเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็ง



รูปที่ 5 โพรไบโอติกสภาวะแช่แข็ง  
ที่อุณหภูมิ -20°C



รูปที่ 6 โพรไบโอติกสภาวะอบแห้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 40°C  
ในถาดทดลองและนำไปใส่ถุงซิปล็อคเพื่อเตรียมนำส่งทดสอบ

ตารางที่ 3 สัมประสิทธิ์สมรรถนะและการใช้พลังงานในการอบแห้งแบบแช่แข็ง

กระบวนการอบแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze Drying Process)	COP		อัตราการอบแห้ง (Drying Rate) (°C/นาที)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (Electrical Load) (kWh)
	COP <sub>C</sub>	COP <sub>H</sub>		
กระบวนการ แช่แข็ง (Freezing)	4.22	5.01	0.321	0.18
กระบวนการอบแห้งขั้นต้น (Primary Drying)	4.31	5.12	0.027	2.87
กระบวนการทำแห้งขั้นที่สอง	4.18	5.08	0.034	4.14





ก่อนการอบแห้งแบบแช่แข็งโพรไบโอติกเหลวมีน้ำหนัก 3,000 กรัม หลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งที่นำมาทดสอบพบว่าน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ลดลงเหลือเพียง 530 กรัม คิดเป็น 17.67% ของน้ำหนักเริ่มต้น ตามที่แสดงในตารางที่ 4

ผลการตรวจสอบปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ของโพรไบโอติก ก่อนและหลังการอบแห้งแบบแช่แข็งพบว่าก่อนทำการอบแห้งปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่มีชีวิตอยู่ประมาณ  $1.03 \times 10^{13}$  CFU/กรัม ภายหลังการอบแห้งปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่มีชีวิตอยู่ในผลิตภัณฑ์มีปริมาณลดลงเหลือ  $9.20 \times 10^{11}$  CFU/กรัม

#### 4. อภิปรายผลและสรุปผล (Discussion and Conclusion)

การทดลองอบแห้งแบบแช่แข็งโพรไบโอติกได้จากโยเกิร์ตจำนวน 3000 กรัม จากเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นมาใช้สำหรับครัวเรือนนี้ ได้ผลลัพธ์โดยมีค่าร้อยละของการผลิต 17.67% ผลการตรวจสอบเชื้อจุลินทรีย์ของโพรไบโอติก ก่อนและหลัง  $1.03 \times 10^{11}$  และ  $9.20 \times 10^9$  CFU/g ซึ่งเป็นปริมาณที่ในโยเกิร์ตโพรไบโอติกยังคงเหลือเชื้อจุลินทรีย์ที่ยังคงประโยชน์มากพอในการบริโภคเมื่อเทียบกับปริมาณจุลินทรีย์โพรไบโอติกที่มีชีวิตอยู่แต่ละชนิด ต้องคงเหลือไม่น้อยกว่า  $10^6$  CFU/g [17-19] ส่วนสัมประสิทธิ์สมรรถนะสำหรับการทำความเย็น ( $COP_c$ ) และสัมประสิทธิ์สมรรถนะสำหรับการทำความร้อน ( $COP_H$ ) เฉลี่ยอยู่ที่ 4.18 – 4.31 และ 5.01-5.12 ตามลำดับ เนื่องจากพลังงานของคอมเพรสเซอร์ (W) จะถูกใช้เป็นหลักในระบบทำความเย็น ปริมาณการทำ

**ตารางที่ 4** น้ำหนักผลิตภัณฑ์และผลการตรวจสอบเชื้อจุลินทรีย์ของโพรไบโอติก ก่อนและหลังการอบแห้งแบบแช่แข็ง

รายการ	ก่อนการอบแห้ง	หลังการอบแห้ง	% (Yield)
น้ำหนักโพรไบโอติกในโยเกิร์ต (กรัม)	3,000	530	17.67
ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ (Bacteriological Analytical in Probiotic) (CFU/กรัม)	$1.03 \times 10^{13}$	$9.20 \times 10^{11}$	

ความเย็น ( $\dot{Q}_c$ ) เพิ่มมากขึ้นนั้นเป็นผลมาจากการระบายปริมาณความร้อนที่มากขึ้น ( $\dot{Q}_H$ ) เป็นไปตามกฎข้อแรกของอุณหพลศาสตร์ ( $\dot{Q}_H = \dot{Q}_c + \dot{W}$ ) [15,16]

การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ในการทดสอบอบแห้งแบบแช่แข็งโพรไบโอติกด้วยเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งที่ได้พัฒนาขึ้นมาใช้สำหรับครัวเรือนเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการผลิตโพรไบโอติก ยาและสมุนไพร และวัตถุดิบอื่น ๆ ที่ต้องการผลิตภัณฑ์ที่ยังคงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีใกล้เคียงเดิม และผลการศึกษาในครั้งนี้จะเป็นข้อมูลสำหรับการดำเนินการวิจัยในลำดับต่อไปในด้านการศึกษาค่าตัวแปรของผลิตภัณฑ์ต่างๆที่มีผลต่อไปอบแห้งแบบแช่แข็งเพื่อพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบแช่แข็งในอนาคต

#### 5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล และอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ และ Welltech, Biotechnology Company Limited ในการสนับสนุนสถานที่และห้องปฏิบัติการตรวจสอบคุณภาพ



## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] H. McGee et al., Fresh fermented milks and creams, in *Food and Cooking: The Science and Lore of the Kitchen*. New York, NY, USA: Scribner, 2004, 44-51.
- [2] W.A.D.V. Weerathilake, D.M.D. Rasika, J.K.U Ruwanmali and M.A.D.D Munasinghe, The evolution, processing, varieties and health benefits of yogurt, *International Journal of Scientific and Research Publication*, 2014, 4(4), 1-10.
- [3] Y. Karagül-Yüceer, J.C. Wilson and C. H. White, Formulations and processing of yogurt affect the microbial quality of carbonated yogurt, *Journal of Dairy Science*, 2001, 84(3), 543-550.
- [4] H. Korbekandi, A.M. Mortazavian and S. Iravani, Technology and stability of probiotic in fermented milks, in *probiotic and prebiotic foods: Technology, Stability and Benefits to the human health*, N.P. Shah, Ed., Nova Science Publishing Ltd, NY, USA, 2011, 121-146.
- [5] A.M. Mortazavian, R. Khosrokhavar, H. Rrastegar, and G.R. Mortazaei, Effects of dry matter standardization order on biochemical and microbiological characteristics of freshly made probiotic Doogh (Iranian fermented milk drink), *Italian Journal of Food Science*, 2010, 1(2), 98-104.
- [6] A. Lourens-Hattingh and C.B. Viljoen, Yoghurt as a probiotic carrier food, *International Dairy Journal*, 2001, 11(1-2), 1-17.
- [7] G. Perdigon, S. Alvarez, M. Rachid, G. Agüero, and N. Gobbato, Immune system stimulation by probiotics, *Journal of Dairy Science*, 1995, 78(7), 1597-1606.
- [8] C.M. Galdeano and G. Perdigon, The probiotic bacterium *Lactobacillus casei* induces activation of the gut mucosal immune system through innate immunity, *Clinical and Vaccine Immunology*, 2006, 13(2), 219-226.
- [9] J. Kieps and R. Dembczyński, Current trends in the production of probiotic formulations, *Foods*, 2022, 11(15), 2330.
- [10] N. Tyagi, Z. Gidlöf, D.T. Osanlóo, E.S. Collier, S. Kadekar, L. Ringstad, A.M. Fureby and S. Roos, The Impact of formulation and freeze drying on the properties and performance of freeze-dried *limosilactobacillus reuteri* R2LC, *Applied Microbiology*, 2023, 3(4), 1370-1387.
- [11] L.-G. Ooi and M.-T. Liong, Cholesterol-lowering effects of probiotics and prebiotics: A review of in vivo and in vitro findings, *International of Journal Molecular Sciences*, 2010, 11(6), 2499-2522.
- [12] L. Stratta, L.C. Capozzi, S. Franzino and R. Pisano, Economic analysis of a freeze-drying cycle, *Processes*, 2020, 8(11), 1399.



- [13] T. Wasan, K. Triratanasirichai and K. Tangchaichit, Continuous production of lime juice by vacuum freeze drying, *American Journal of Applied Sciences*, 2008, 5(8), 959-962.
- [14] T. Wasan, and K. Triratanasirichai, W., Air blast freezing of lime juice: Effect of processing parameters, *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2008, 1(1), 33-39.
- [15] I. Dinçer and M. Kanoglu, *Refrigeration Systems and Applications*, 2nd ED. Chichester, West Sussex, John Wiley & Sons, Ltd, UK, 2010.
- [16] L.O.S. Buzelin, S.C. Amico, J.V.C. Vargas, and J.A.R. Parise, Experimental development of an intelligent refrigeration system, *International Journal Refrigeration*, 2005, 28(2), 165-175.
- [17] R. Fuller, Probiotics in man and animals, *Journal of Applied Bacteriology*, 1989, 66(5), 365-378.
- [18] Ministry of Public Health, The use of probiotic microorganisms, *Royal Thai Government Gazette*, 128(346), Special Section 86N, 2011. (in Thai)
- [19] Ministry of Public Health, The use of probiotic microorganisms, 2Ed, *Royal Thai Government Gazette*, 129(346), Special Section 189N, 2012. (in Thai)