

การประเมินการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการผลิตนม

Energy recovery assessment in dairy production process

ชัยฤทธิ์ สีเสมอ¹ และ ไชยณรงค์ จักรธรานนท์^{1*}

Chairit Sisamoe¹ and Chainarong Chaktranond^{1*}

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการนำความร้อนที่ได้จากการกระบวนการเปลี่ยนไนโตรเจนเหลวให้กลายเป็นไอในโรงงานผลิตนมแห่งหนึ่ง มาลดการใช้พลังงานในระบบทำความเย็น ในการวิจัยได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลต่าง ๆ ของการใช้ไนโตรเจนเหลว เช่น ปริมาณการใช้ แรงดัน และอุณหภูมิ ที่ใช้ในแต่ละวันของโรงงาน เพื่อนำมาวิเคราะห์หาความร้อนที่ต้องใช้ในการเปลี่ยนสถานะจากไนโตรเจนเหลว ให้เป็นสถานะไอ นอกจากนี้ยังได้คำนวณหาภาระการทำความเย็นที่ต้องใช้ในการหล่อเย็นนมก่อนส่งให้แก่ผู้จัดจำหน่าย ซึ่งต้อง รักษาอุณหภูมิของนมไม่เกิน 8 องศาเซลเซียส จากการวิเคราะห์พบว่าที่อัตราการใช้น้ำไนโตรเจนเหลว 100 m³/h และความดัน 7 bar ความร้อนที่ต้องใช้สำหรับกระบวนการทำให้ไนโตรเจนเหลวกลายเป็นไอ มีความสามารถในการทำความเย็นประมาณ 13.35 kW ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอ 3 แนวทางในการนำความสามารถการทำความเย็นจากกระบวนการทำให้ไนโตรเจนเป็นไอไปลดการใช้ พลังงานในระบบทำความเย็นโดยผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในลักษณะต่าง ๆ (1) การลดอุณหภูมิของน้ำเย็นก่อนไหลกลับ เข้าเครื่องทำน้ำเย็นทำให้การใช้พลังงานเครื่องทำน้ำเย็นลดลง 7.39 kW หรือคิดเป็นผลประหยัด 638.45 บาทต่อวัน (2) การลด อุณหภูมิของน้ำเย็นก่อนจ่ายสู่กระบวนการผลิต โดยน้ำเย็นที่ไหลออกจากเครื่องทำน้ำเย็นสามารถถูกตั้งค่าให้มีอุณหภูมิ 4.06 องศาเซลเซียส ทำให้สามารถลดการใช้พลังงานเครื่องทำน้ำเย็นได้ 0.68 kW หรือคิดเป็นผลประหยัด 75.07 บาทต่อวัน และ (3) การลดอุณหภูมิของนมไปที่ 8 องศาเซลเซียส โดยใช้ถังกักเก็บน้ำแข็ง จากการวิเคราะห์พบว่าสามารถลดการใช้พลังงานของเครื่อง ทำน้ำเย็นได้มากที่สุด สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ถึง 792.20 kWh/day หรือคิดเป็นเงิน 2,851.92 บาทต่อวัน

คำสำคัญ: ไนโตรเจนเหลว การทำให้เป็นก๊าซ การกักเก็บความร้อน การประหยัดพลังงาน

Abstract

This research aimed to study utilizing the energy from regasifying the liquid nitrogen in a dairy factory for reducing the energy consumption in a refrigeration system. In the study, the daily usage of liquid nitrogen, such as volume flow rate, pressure, and temperature, was applied for evaluating the heat of vaporization of liquid nitrogen. Moreover, cooling load of decreasing the temperature of milk to 8 °C before transporting to distributors was computed. It was found from analysis that at the liquid nitrogen 100 m³/h and pressure 7 bar, the heat of vaporization provided the refrigeration capacity of 13.35 kW. This study proposed three methods of energy saving in refrigeration system with various heat exchangers: (1) Decrease of temperature of chilled water before returning into the water chiller, resulting in reducing the chiller power of

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

¹ Faculty of Engineering, Thammasat University, Rangsit Campus

* Corresponding author. E-mail: cchainar@engr.tu.ac.th

7.39 kW or saving of 815.85 Baht/day. (2) Decrease of the temperature of chilled water before supplying to manufacturing process. Therefore, the chilled-water temperature leaving from the chiller can be set higher. This leads chiller power to reduce of 0.68 kW or saving of 75.07 Baht/day. (3) Decrease the temperature of milk to 8 °C with ice thermal storage. This provides the maximum energy saving. It can save the energy of 792.20 kWh/day or 2,851.92 Baht/day.

Keywords: liquid nitrogen, gasification, cold thermal storage, energy saving

บทนำ

ก๊าซไนโตรเจนจัดอยู่ในกลุ่มก๊าซเฉื่อยพบอยู่มากในบรรยากาศประมาณ 79 เปอร์เซ็นต์ การผลิตก๊าซไนโตรเจนจะต้องผ่านกระบวนการแยกอากาศเพื่อให้ได้ไนโตรเจนบริสุทธิ์ปราศจากสิ่งเจือปน เช่น ความชื้นและออกซิเจน (น้อยกว่า 3 ppm) ถูกเก็บในรูปของเหลว ไนโตรเจนมีอุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส ที่แรงดันบรรยากาศ (Munsch-Alatossava, Gursoy, & Alatossava, 2010) มีความหนาแน่นจำเพาะเท่ากับ 0.97 ไนโตรเจนถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ อย่างแพร่หลายในประเทศไทย เช่น อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ อุตสาหกรรมแปรรูปเหล็ก อุตสาหกรรมทางการแพทย์ อุตสาหกรรมผลิตยาและโดยเฉพาะในอุตสาหกรรมผลิตอาหารและเครื่องดื่ม (Marshall, 1976) ก๊าซไนโตรเจนถูกนำมาใช้ไล่อากาศในขั้นตอนการผลิตและการบรรจุภัณฑ์ไม่ให้สัมผัสกับนม เนื่องจากปฏิกิริยาของออกซิเจนจะทำให้แบคทีเรียและจุลินทรีย์มีการเจริญเติบโต ส่งผลทำให้นมมีการเน่าเสียอย่างรวดเร็ว (Coles, & Kirwan, 2007) นอกจากนี้การบรรจุไนโตรเจนที่อุณหภูมิประมาณ 6-12 องศาเซลเซียส ให้ปกคลุมพื้นที่บริเวณส่วนด้านบนภายในถังเก็บนมสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและยืดอายุของนมได้ด้วยเหตุผลของความคุ้มค่าทางด้านต้นทุน ไนโตรเจน

จึงถูกกักเก็บและขนส่งไปยังที่ต่าง ๆ ในรูปของไนโตรเจนเหลวที่มีความดันสูงแต่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นก่อนนำไปใช้งานจำเป็นต้องเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลับเป็นสถานะก๊าซ (regasification) โดยการผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เรียกว่า “เครื่องระเหยของเหลว (liquid vaporizer)” ดัง (Figure 1) เมื่ออากาศซึ่งเป็นแหล่งความร้อน (heat source) ถ่ายเทความร้อนให้กับไนโตรเจนเหลวที่ไหลในเครื่องระเหยของเหลวแล้ว อากาศจะมีอุณหภูมิต่ำลงจนทำให้ความชื้นในอากาศบริเวณนั้นกลั่นตัวและกลายเป็นน้ำแข็งเกาะอยู่รอบเครื่องระเหยของเหลวนี้

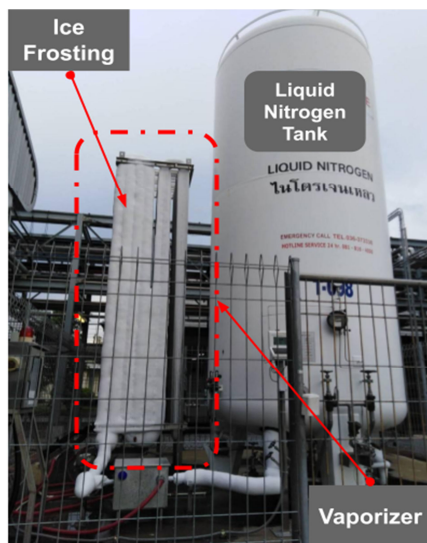


Figure 1 Nitrogen vaporization system.

จากปัญหาวิกฤตด้านพลังงานและปัญหาโลกร้อนการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าหรือนำกลับมาใช้ใหม่เป็นสิ่งที่ถูกให้ความสนใจเป็นอย่างมากในเวลานี้ ด้วยเหตุนี้ถ้าหากเราสามารถนำพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของไนโตรเจนให้เป็นก๊าซซึ่งปกติจะเป็นความเย็นที่ถูกปล่อยทิ้งไปโดยเปล่าประโยชน์ (waste cold energy) กลับมาใช้ในการทำความเย็น (refrigeration) จะทำให้ประหยัดพลังงานไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็น (water chiller)

กลุ่มของ Agarwal et al. (2017) ได้ศึกษาการแปรสภาพของก๊าซธรรมชาติเหลวให้เป็นก๊าซโดยใช้ น้ำทะเลเป็นแหล่งให้ความร้อนและใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยอากาศ (air ambient vaporizer, AAV) พบว่า ผลของภูมิศาสตร์และภูมิอากาศเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อประสิทธิภาพของวิธีการเปลี่ยนก๊าซธรรมชาติเหลวให้เป็นก๊าซ Dorosz, Wojcieszak, & Malecha (2018) ได้นำความเย็นที่ได้จากการเปลี่ยนสถานะก๊าซธรรมชาติเหลวให้เป็นไอ (liquefied natural gas, LNG) มาทำความเย็นใช้ภายในยานพาหนะได้ และให้ข้อแนะนำว่าควรพิจารณาความเย็นที่ได้ควบคู่กับการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ เช่น ขนาดภาระความเย็นที่รถยนต์ต้องการ (cooling load) เปรียบเทียบกับขนาดความเย็นที่ได้จาก (cooling capacity) LNG เป็นต้น La Rocca (2010) นำความเย็นที่ปล่อยทิ้งจากการกระบวนการแปรสภาพของก๊าซธรรมชาติจากของเหลวให้กลายเป็นก๊าซมาใช้สำหรับแช่แข็งสินค้าในอุตสาหกรรมเกษตรและอาหาร รวมถึงการนำมาใช้ทำความเย็นในพื้นที่ปรับอากาศสำหรับซูเปอร์มาร์เก็ตและไฮเปอร์มาร์เก็ต ซึ่งสามารถเลือกช่วงอุณหภูมิได้อย่างเหมาะสมกับการใช้งานและมีศักยภาพที่เพียงพอที่จะนำกลับมาใช้ใหม่ได้

La Rocca (2011) การใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสื่อในการถ่ายโอนความร้อนจากการกระบวนการแปรสภาพก๊าซธรรมชาติเหลวไปยังผู้ใช้ปลายทาง โดยปริมาณความเย็นที่ได้จะขึ้นอยู่กับปริมาณการใช้งานของก๊าซเป็นหลัก ซึ่งโดยส่วนมากจะไม่คงที่ ดังนั้นการกักเก็บความเย็นเอาไว้เพื่อใช้ในเวลาที่จำเป็น เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ที่ช่วยให้กลุ่มของอุตสาหกรรมที่มีการใช้งานปริมาณน้อยและไม่ต่อเนื่องสามารถใช้งานระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพและยืดหยุ่นมากขึ้น Yang et al. (2021) ได้นำเสนอบทความบททบทวนงานวิจัยของเทคโนโลยีการกักเก็บความเย็น (cold thermal energy storage, CTES) ครอบคลุมความเย็นที่ต่ำกว่าศูนย์องศาเซลเซียส (-270 ถึง 0 องศาเซลเซียส) และวัสดุที่ใช้ในการกักเก็บ พบว่าเทคโนโลยีการกักเก็บความเย็นนั้น ได้ถูกนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์แล้ว เช่น ระบบทำความเย็น การกักเก็บไฟฟ้า และการนำความเย็นเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ แต่ยังต้องปรับปรุงเรื่องการออกแบบทางกลพร้อมทั้งประเมินประสิทธิภาพโดยรวมและวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ Tan, Li, Tuo, Zhou, & Tian (2010) ได้ทำการทดลองห่อหุ้มกักเก็บความเย็นและการเปลี่ยนสถานะของน้ำจากการนำความเย็นกลับมาใช้ใหม่ในรถห้องเย็นที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเหลวเป็นเชื้อเพลิง พบว่าปริมาณความเย็นที่สามารถนำกลับมาใช้นั้นมีไม่เพียงพอที่จะนำมาใช้ทำความเย็นได้ทั้งหมด เนื่องจากเงื่อนไขของปริมาณการใช้ที่ไม่คงที่ต่อเนื่อง ซึ่งขึ้นอยู่กับภาระเคลื่อนที่ของรถด้วย แต่ก็สามารถช่วยลดภาระการทำความเย็นของรถห้องเย็นโดยรวมลงได้ นอกจากนี้ยังได้ทำแบบจำลองโดยให้ไนโตรเจนเหลวไหลในท่อและนำไอลอยรอบนอก พบว่าน้ำมีขอบเขตของการ

กระจายตัวของอุณหภูมิในลักษณะเป็นชั้น ๆ อย่างชัดเจนและความต้านทานความร้อนรวมถูกพิจารณาจากผนังท่อด้านในผ่านความหนาท่อและความหนาของชั้นน้ำแข็งที่เพิ่มขึ้นในแนวรัศมีตามเวลาที่เพิ่มขึ้นและความหนาของน้ำแข็งจะมีการกระจายตัวเป็นแนวยาวแบบพาราโบลาไปตามแนวท่อ

นอกจากนี้ความเย็นยังสามารถกักเก็บไว้ใช้งานในรูปแบบของน้ำเย็นหรือน้ำแข็ง (ice thermal storage) และสามารถนำมาใช้ในช่วงที่จำเป็นตัวอย่างเช่น ในระบบปรับอากาศมีการทำความเย็นในช่วงเวลาความต้องการไฟฟ้าต่ำ (off peak) กักเก็บพลังงานอยู่ในรูปของน้ำแข็งหรือน้ำเย็นและนำพลังงานที่กักเก็บนี้มาใช้ในช่วงเวลาที่ความต้องการไฟฟ้าสูง (on peak) การออกแบบระบบกักเก็บพลังงานจะต้องมีขนาดที่เหมาะสม ซึ่งมีหลากหลายเทคโนโลยี เช่น ระบบ chilled water storage ระบบ ice harvesting ระบบ external melt ice-on-coil storage ระบบ internal melt ice-on-coil storage ระบบ encapsulated ice และระบบ eutectic salt phase-change materials (Dorgan, & Elleson, 1993) กรณีศึกษาการใช้ระบบแหล่งกักเก็บพลังงานแบบเก็บโดยน้ำแข็งในอาคารพาณิชย์ในประเทศไทยพบว่า การเก็บพลังงานในช่วงความต้องการไฟฟ้าสูงสุดเหมาะสมที่สุด และเทคโนโลยีในการจัดเก็บก็ส่งผลต่อระยะเวลาคืนทุนที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังได้ศึกษาอาคารสำนักงานตัวอย่าง เช่น ศูนย์การค้า โรงพยาบาลและโรงแรม ซึ่งจะมีระยะเวลาในการคืนทุนที่ยาวกว่าอาคารพาณิชย์ (Wattana, 1996) นอกจากการกักเก็บพลังงานแบบเก็บโดยน้ำแข็งจะช่วยในเรื่องการประหยัดค่าไฟฟ้าแล้วยังสามารถลดอุณหภูมิของลมเย็นในระบบปรับอากาศลง ทำให้

ค่าความชื้นของลมเย็นมีค่าต่ำลง ทำให้ผู้อยู่อาศัยภายในอาคารรู้สึกสบายตัวมากขึ้น (Wu, & Tsai, 2015) และปัจจุบันได้มีเทคโนโลยีใหม่ที่ใช้วัสดุจัดเก็บพลังงาน (phase change material, PCM) ซึ่งพบว่ามีประสิทธิภาพในการช่วยลดการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศลงได้ดี เช่นเดียวกัน รวมถึงลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลดีต่อชั้นบรรยากาศโดยรวม (Rahdar, Emamzadeh, & Ataei, 2016) การใช้ระบบกักเก็บความเย็นร่วมในระบบปรับอากาศช่วยลดขนาดของอุปกรณ์ในระบบทำความเย็นลงได้และยังทำให้สามารถมีช่วงการทำงานที่ยาวนานขึ้น เช่น เครื่องอัดไอ (compressor) และปั๊ม (pump) เป็นต้น (Mongibello, Bianco, Caliano, & Graditi, 2017)

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการนำความเย็นที่ได้จากการเปลี่ยนสถานะไนโตรเจนเหลวให้เป็นไอมาใช้ประโยชน์เพื่อลดการใช้พลังงานในระบบทำความเย็นผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 3 วิธี คือ (1) ลดอุณหภูมิของน้ำเย็นก่อนไหลกลับเข้าเครื่องทำน้ำเย็น (2) ลดอุณหภูมิของน้ำเย็นก่อนจ่ายสู่กระบวนการผลิต และ (3) การลดอุณหภูมิของนมก่อนขนส่งไปยังผู้จำหน่าย โดยที่ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์จะอ้างอิงจากข้อมูลจริงของการใช้ไนโตรเจนเหลวของโรงงานตัวอย่าง

วิธีการศึกษา

การคำนวณความเย็นจากไนโตรเจนเหลว

จาก (Figure 2) แสดงแผนภาพกระบวนการผลิตนมของโรงงานแห่งหนึ่งซึ่งตั้งอยู่ในนิคมอุตสาหกรรมโรจนะ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ซึ่งมีกำลังการผลิตนม 167,000 L/day มีระบบทำ

ความเย็นซึ่งประกอบไปด้วยเครื่องทำน้ำเย็น (water chiller) ขนาดความสามารถทำความเย็นรวม $1,916.2 \text{ TON}_R$ มีทั้งหมดจำนวน 4 เครื่อง ซึ่งมีขนาด 562 TON_R จำนวน 2 เครื่อง และขนาด 396.1 TON_R จำนวน 2 เครื่อง ทำหน้าที่จ่ายน้ำเย็น (chilled water supply, CHS) อุณหภูมิ 4-6 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล $285 \text{ m}^3/\text{h}$ ($1,254.82 \text{ U.S GPM}$) แก่กระบวนการผลิตซึ่งประกอบไปด้วยกระบวนการเทอร์โมไลซ์ กระบวนการพาสเจอไรซ์ และกระบวนการสเตอริไรซ์ โดยเมื่อแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วน้ำเย็นที่ไหลออก (chilled water return, CHR) จากกระบวนการดังกล่าว

จะมีอุณหภูมิ 8-12 องศาเซลเซียส ดังนั้นอัตราการทำความเย็นสำหรับกระบวนการฆ่าเชื้อโรคมีค่าประมาณ 918 TON_R หรือ $3,228.46 \text{ kW}$ และประสิทธิภาพการทำความเย็นของเครื่องทำน้ำเย็นมีค่า 0.96 kW/TON_R ที่ภาระ 98.1 เปอร์เซ็นต์ และใช้แอมโมเนียเป็นสารทำความเย็นสำหรับรับความร้อนจากน้ำเย็นกลับ (chilled water return, CHR) ในกระบวนการผลิต ไนโตรเจนเหลวถูกเปลี่ยนให้เป็นก๊าซที่สภาวะความดัน 7 bar และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ก่อนที่จะปรับลดแรงดันลงที่ 4 bar เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการบรรจุหีบห่อ (packaging)

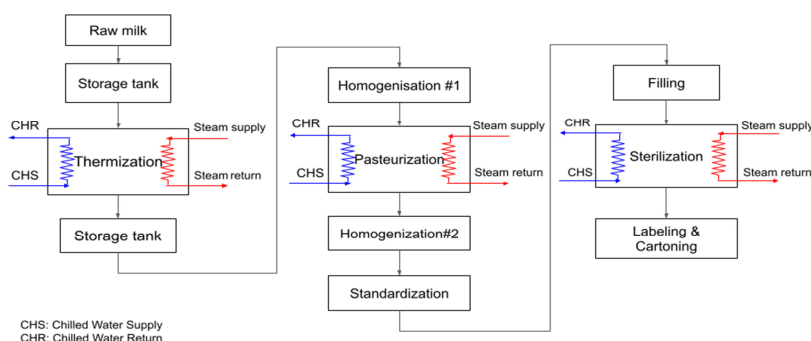


Figure 2 Schematic diagram of the dairy production process.

จากการเก็บข้อมูลพบว่าปริมาณการใช้ไนโตรเจนเหลวในแต่ละวันของโรงงานมีค่าเฉลี่ยประมาณ $100 \text{ m}^3/\text{h}$ หรือ ประมาณ $2,400 \text{ m}^3/\text{day}$ และจาก (Figure 3) แสดงแผนภาพกระบวนการเปลี่ยนสถานะของไนโตรเจนเหลวเมื่อผ่านเครื่องระเหยของเหลว (liquid vaporizer) โดยที่ความร้อนจากบรรยากาศผ่านเครื่องระเหยของเหลวประกอบด้วย (1) → (2) กระบวนการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ของเหลวในสถานะของเหลวอัดตัว (compressed liquid) (2) → (3)

กระบวนการเปลี่ยนสถานะจากของผสมอิมิตัว (liquid vapor mixture) เปลี่ยนเป็นไอร้อนอิมิตัว (saturated vapor) และ (3) → (4) กระบวนการเพิ่มอุณหภูมิในสถานะไอร้อนยิ่งยวด (superheated vapor) ดังนั้นค่าพลังงานที่ไนโตรเจนต้องการถูกจำแนกเป็น 2 ช่วง คือ ความร้อนแฝงที่ใช้ในการกลายเป็นไอ (latent heat of vaporization) กระบวนการที่ (2) → (3) และความร้อนที่ใช้ในการทำให้เป็นไอร้อนยิ่งยวด (superheat) กระบวนการที่ (3) → (4)

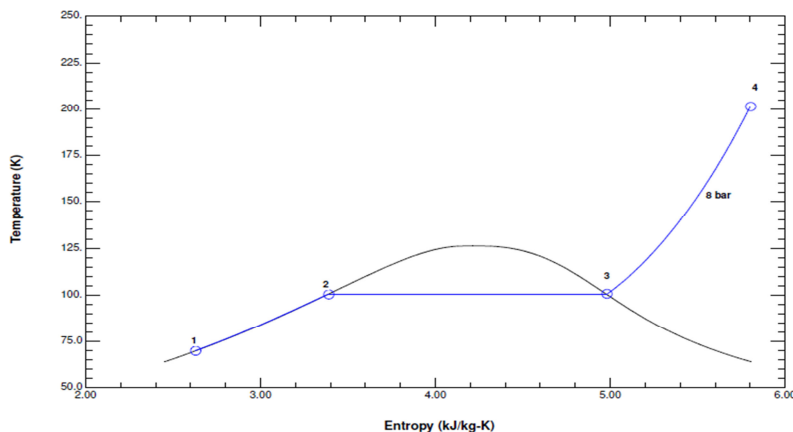


Figure 3 Nitrogen phase diagram.

การประยุกต์ใช้กับเครื่องระเหยของเหลว และจากการสมดุลมวลและพลังงานโดยพิจารณาที่ control volume และไนโตรเจนเหลวที่สภาวะ

ทางเข้าและก๊าซไนโตรเจนที่สภาวะทางออกมีค่าความดันคงที่ ดัง (Figure 4)

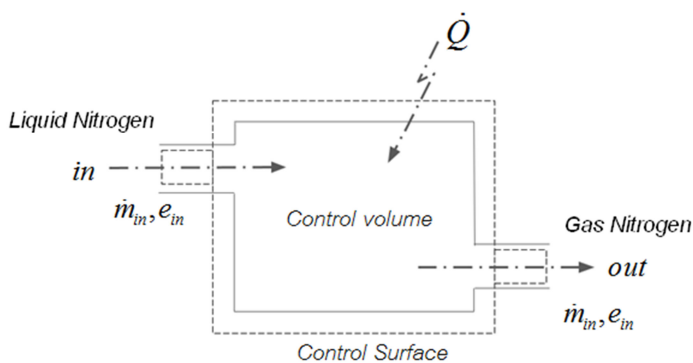


Figure 4 Schematic diagram of nitrogen vaporizer.

จากสมการอนุรักษ์พลังงาน ดังแสดงใน สมการที่ (1) และพิจารณาที่สภาวะคงตัว (steady state condition, $\Delta \dot{E}_{sys} = 0$) และพิจารณาให้งาน ($\dot{W}$) มีค่าเป็นศูนย์ ($\dot{W}_{in} = \dot{W}_{out} = 0$) ไม่มีการสูญเสียความร้อน ($\dot{Q}_{out} = 0$) การเปลี่ยนแปลงของ

พลังงานศักย์และพลังงานจลน์มีค่าเป็นศูนย์ ($\Delta KE = \Delta PE = 0$) ดังนั้นอัตราความร้อนที่ให้แก่น ไนโตรเจนเพื่อใช้ในการเปลี่ยนสถานะเป็นไอคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$\Sigma \dot{E}_{in} - \Sigma \dot{E}_{out} = \Delta \dot{E}_{sys} \quad (1)$$

$$\Sigma (\dot{Q} + \dot{W} + \dot{E}_{mass})_{in} - \Sigma (\dot{Q} + \dot{W} + \dot{E}_{mass})_{out} = 0 \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{in} = \dot{E}_{mass,out} - \dot{E}_{mass,in} \quad (3)$$

$$= \dot{m}_N (h_{out} - h_{in}) \quad (4)$$

$$= \dot{m}_N (h_{1 \rightarrow 2} + h_{2 \rightarrow 3} + h_{3 \rightarrow 4}) \quad (5)$$

ที่ซึ่ง $\dot{Q}$ คือ อัตราความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะไนโตรเจน; $\dot{m}_N = \dot{m}_{out} = \dot{m}_{in}$ คือ อัตราการไหลโดยมวลของไนโตรเจน; h_{23} คือ ค่าเอนทาลปีของไนโตรเจนที่สถานะของผสมอิ่มตัว (saturated liquid-vapor mixture); h_g คือ ค่าเอนทาลปีของไนโตรเจนที่สถานะไอร้อนอิ่มตัว (saturated vapor); h_4 คือ ค่าเอนทาลปีของไนโตรเจนที่สภาวะไอร้อนยิ่งยวด (superheated vapor)

การประเมินขนาดถังกักเก็บน้ำแข็ง

ถังกักเก็บน้ำแข็ง (ice thermal storage tank) ถูกนำมาใช้เพื่อสะสมความเย็นจากไนโตรเจนทำให้โรงงานสามารถใช้ความเย็นได้อย่างต่อเนื่องและเพียงพอ โดยขนาดของถังกักเก็บถูกประเมินจากอัตราความเย็นหรือความสามารถทำความเย็น (refrigeration capacity) ที่ผลิตได้จากสมการที่ (5) ซึ่งพิจารณาน้ำในถังกักเก็บที่อุณหภูมิ 8 องศาเซลเซียส ถ่ายความร้อนให้แก่กระบวนการทำให้ไนโตรเจนเหลวกลายเป็นไอแล้ว น้ำจะถูกทำให้เย็นลงจนมีอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส และเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็ง ดังนั้นปริมาณความเย็นที่ถูกกักเก็บโดยถังกักเก็บความเย็นประเมินจากสมการที่ (6)

$$\dot{Q}\Delta t = m_w \{ c_{p,w} \Delta T_w + h_{fg,w} \} \quad (6)$$

ที่ซึ่ง $\dot{Q}$ คือ อัตราความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะไนโตรเจน; m_w คือ มวลของน้ำ; Δt คือ ช่วงเวลาในการผลิตน้ำเย็น $c_{p,w}$ คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ; ΔT_w คือ ผลต่างของอุณหภูมิน้ำที่เปลี่ยนไป และ $h_{fg,w}$ คือ ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นน้ำแข็งต่อหนึ่งหน่วยมวล

ภาระการทำความเย็นสำหรับลดอุณหภูมิหมักก่อนขนส่ง

ในบทความนี้นำเสนอการนำความเย็นที่ปล่อยทิ้งจากกระบวนการเปลี่ยนสถานะไนโตรเจนนำไปใช้ลดอุณหภูมิหมักก่อนการขนถ่ายสู่รถขนส่งนม โดยภาระการทำความเย็นที่ต้องใช้ในการลดอุณหภูมิหมักคำนวณได้จาก

$$\dot{Q}_{milk} = \dot{m}_{milk} c_{p,milk} \Delta T_{milk} \quad (7)$$

ที่ซึ่ง $\dot{Q}_{milk}$ คือ ภาระทำความเย็นที่ต้องใช้ในการลดอุณหภูมิหมัก; $\dot{m}_{milk}$ คืออัตราการไหลโดยมวลของน้ำนม; $c_{p,milk}$ คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำนม; ΔT_{milk} คือ ผลต่างของอุณหภูมิของนม

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

อัตราความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะไนโตรเจนเหลวหรือ “ความสามารถของการทำความเย็นที่ได้จากไนโตรเจน” คำนวณจากสมการที่ (5) ซึ่งจะแปรเปลี่ยนตามอัตราการใช้งาน และความดันในถังเก็บไนโตรเจนเหลว นอกจากนี้ความสามารถของการทำความเย็นที่ได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการทำความเย็นของนมได้ 3 รูปแบบ

ผลของอัตราการใช้ในโตรเจนเหลว

จากข้อมูลโรงงานตัวอย่างความดันและอุณหภูมิของไนโตรเจนเหลวในถังเก็บมีค่า 7 bar และ -173

องศาเซลเซียส ตามลำดับ และอัตราการใช้ในโตรเจนมีค่าอยู่ระหว่าง 70-100 m³/h ส่วนอุณหภูมิหลังจากได้รับความร้อนและเปลี่ยนเป็นไอ (ก่อนผ่านวาล์วลดความดัน) มีค่า 25 องศาเซลเซียส จาก (Figure 5) แสดงให้เห็นว่าค่าความร้อนส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้เพื่อเพิ่มอุณหภูมิในช่วงไอร้อนยิ่งยวด (superheated vapor) คิดเป็น 76.03 เปอร์เซ็นต์ของความร้อนทั้งหมดที่ต้องใช้ ดังนั้นความสามารถในการทำความเย็น (refrigeration capacity) ที่ได้จากไนโตรเจนมีค่า 3.79 TON_R (13.35 kW การทำความเย็น) ที่อัตราการไหลของไนโตรเจน 100 m³/h

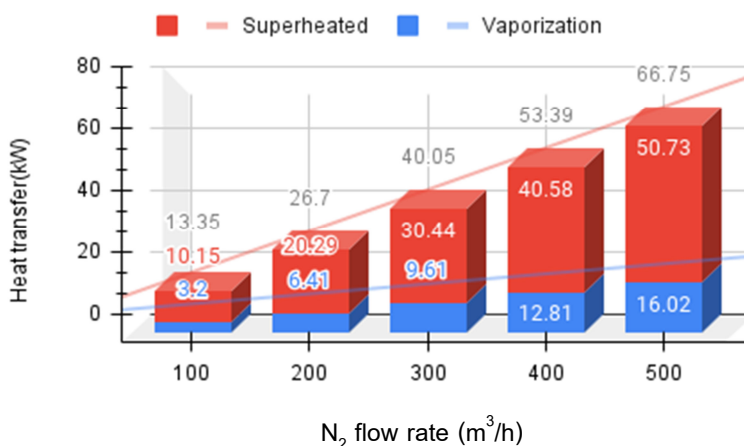


Figure 5 Heat transfer for nitrogen gasification in various volume flow rates.

ผลของความดันในถังเก็บไนโตรเจนเหลว

จาก (Figure 6) เมื่อความดันในถังเก็บไนโตรเจนเหลวเปลี่ยนแปลงไปจะมีผลต่อพลังงานที่ใช้เปลี่ยนไนโตรเจนเหลวเป็นไอและความสามารถในการทำความเย็นที่ได้จากไนโตรเจนดังแสดงในสมการที่ (5) โดยที่ให้อัตราการไหลของไนโตรเจน

คงที่ 100 m³/h จากการวิเคราะห์พบว่าความสามารถของการทำความเย็นมีค่าลดลงเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความดันที่เพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิอิ่มตัว (saturation temperature) ของไนโตรเจนมีค่าสูงขึ้น ส่งผลทำให้ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอมีค่าลดลง

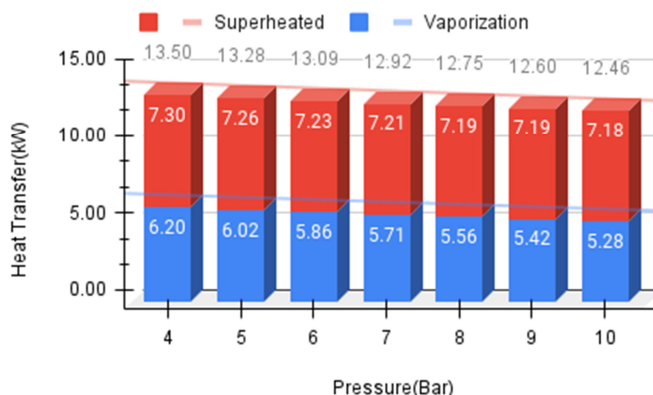


Figure 6 Heat transfer for nitrogen in various pressures.

การนำความเย็นไปใช้ในกระบวนการผลิต

งานวิจัยนี้นำเสนอการนำความสามารถของการทำความเย็นที่ได้จากการเปลี่ยนไนโตรเจนให้เป็นไอที่เวลาหนึ่ง ๆ ไปใช้ประโยชน์ใน 3 รูปแบบ เพื่อลดการใช้พลังงานของเครื่องทำน้ำเย็น ดังนี้

วิธีที่ 1 การลดอุณหภูมิน้ำเย็นก่อนไหลกลับเข้าสู่เครื่องทำน้ำเย็น

เนื่องจากความสามารถของการทำความเย็นที่ได้จากไนโตรเจนมีค่าน้อยกว่าภาระการทำความเย็น (cooling load) ที่กระบวนการผลิตต้องการ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเสนอการนำความสามารถของการความเย็น

จากเปลี่ยนไนโตรเจนให้เป็นไอไปใช้ลดอุณหภูมิของน้ำเย็นที่ไหลกลับ (chilled water return temperature) ก่อนเข้าเครื่องทำน้ำเย็น เพื่อลดการใช้กำลังไฟฟ้าของเครื่องทำเย็น ดังแสดงใน (Figure 7)

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิของน้ำเย็นจ่ายมีค่าคงที่ที่ 8-12 องศาเซลเซียส ความสามารถในการทำความเย็นที่ได้จากไนโตรเจนมีค่า 3.84 TON_R (13.50 kW ของการทำความเย็น) ที่อัตราการไหลของไนโตรเจน 100 m³/h ดังนั้นกำลังไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็นจะมีค่าลดลงประมาณ 3.77 kW (ลดลง 0.42 เปอร์เซ็นต์)

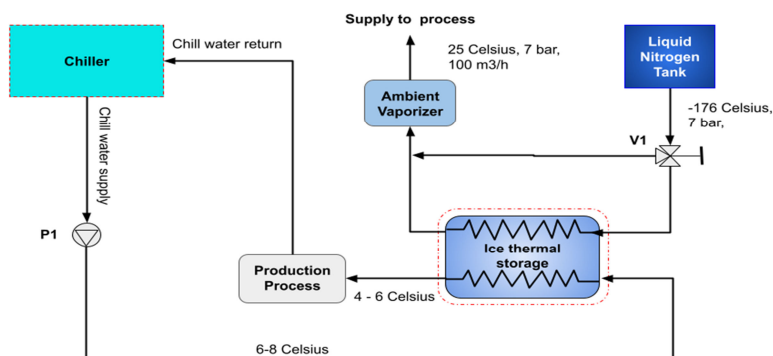


Figure 7 Chilled water system with a heat exchanger.

วิธีที่ 2 การลดอุณหภูมิน้ำเย็นก่อนจ่ายสู่กระบวนการผลิต

จาก (Figure 8) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนถูกติดตั้งที่ทางออกของเครื่องทำน้ำเย็นในท่อน้ำเย็นที่

จ่ายไปสู่กระบวนการผลิต ด้วยวิธีนี้ทำให้การตั้งค่าอุณหภูมิน้ำเย็น (setpoint temperature) ของเครื่องทำน้ำเย็นสามารถตั้งให้มีค่าสูงขึ้น ส่งผลทำให้กำลังงานของคอมเพรสเซอร์มีค่าลดลง

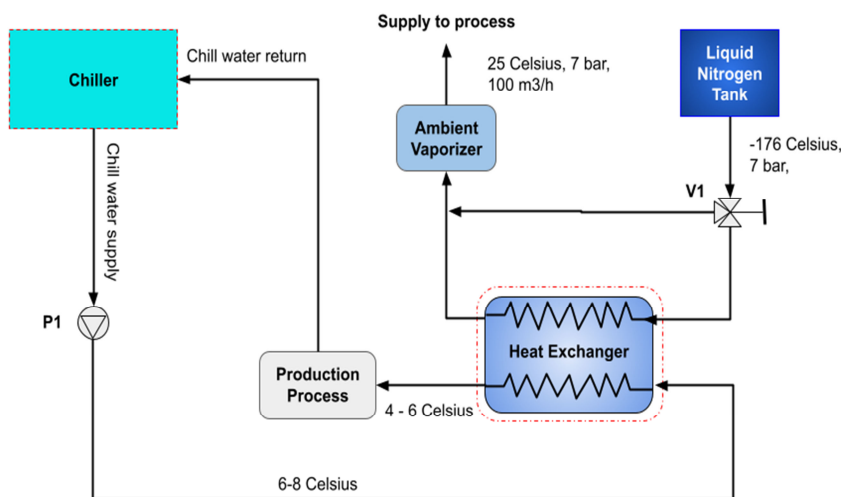


Figure 8 Chilled water system with a heat exchanger in water supply pipe.

และจาก (Figure 9) แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิของการระเหย (evaporating temperature) ของสารทำความเย็นในเครื่องทำความเย็นมีค่าสูงขึ้นจากเดิม โดยที่สถานะที่ 1 (4 องศาเซลเซียส) เปลี่ยนเป็นสถานะที่ 1a (4.06 องศาเซลเซียส) และสถานะที่ 2 เปลี่ยนเป็นสถานะที่ 2a ที่ความดันเดียวกันทำให้พลังงานที่ใช้ของเครื่องคอมเพรสเซอร์สำหรับการอัดสารทำความเย็นมีค่า $(h_{2a} - h_{1a})$ น้อยกว่าที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส $(h_2 - h_1)$ มีค่า กำลังงานของเครื่องคอมเพรสเซอร์ลดลง 0.68 kW (ลดลง 0.04 เปอร์เซ็นต์)

วิธีที่ 3 การลดอุณหภูมิของนมก่อนขนส่ง

(Figure 10) แสดงแผนภาพการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อลดอุณหภูมิของนมก่อนขนส่งเข้าสู่รถขนส่งนม ข้อมูลจากโรงงานตัวอย่างพบว่าเนื่องด้วยเวลาและระยะทางในการขนส่งนมค่อนข้างนาน ดังนั้นก่อนการขนถ่ายนมลงสู่รถขนส่งนม นมจะถูกลดอุณหภูมิให้มีค่าต่ำกว่าจาก 10 องศาเซลเซียส ให้มีค่าน้อยกว่า 8 องศาเซลเซียส ปริมาณนมที่ขนถ่ายสู่รถด้วยอัตราประมาณ 20,000 kg/day จาก สมการที่ (6) พบว่าภาระการทำความเย็นสำหรับนมมีค่า 12.51 TON_R (หรือ 44 kW ของการทำความเย็น) ซึ่งมีค่าสูงกว่าความสามารถการทำความเย็นที่ได้จากไนโตรเจน

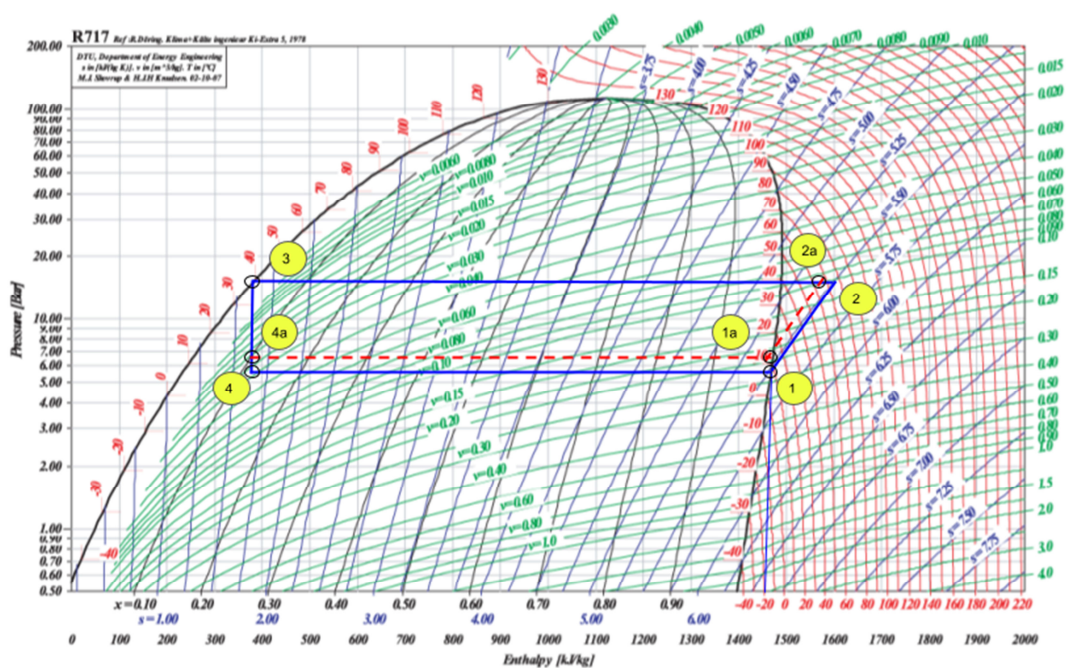


Figure 9 Pressure – enthalpy diagram of refrigerant.

จากการคำนวณโดยใช้สมการอุณหภูมิ
โดยกำหนดให้อัตราความเย็นจากสมการที่ (5)
เท่ากับสมการที่ (6) พบว่านมที่ปริมาณเฉลี่ย 6,068.18
kg/h สามารถลดอุณหภูมิไปที่ 8 องศาเซลเซียส

และจาก (Figure 11) แสดงให้เห็นว่าหากต้องการ
ลดอุณหภูมิของนมลงก่อนการขนส่งในแต่ละครั้ง
ต้องมีปริมาณการใช้ไนโตรเจนเหลวอย่างน้อยเท่ากับ
327.95 m³/h

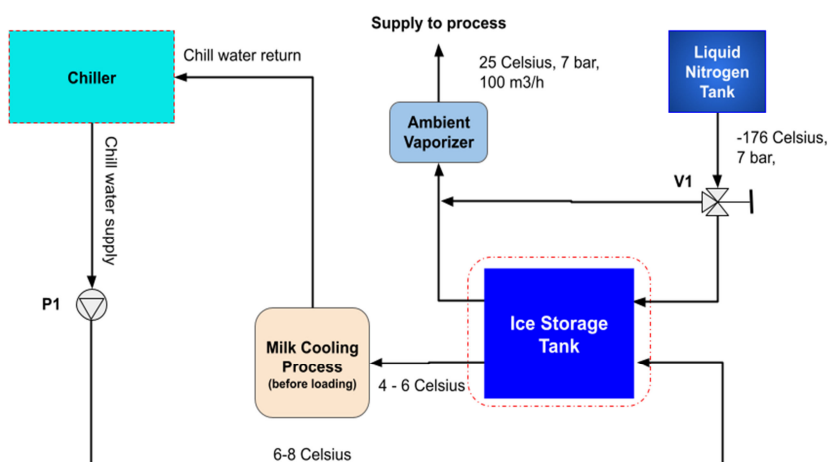


Figure 10 Ice storage tank for cooling milk.

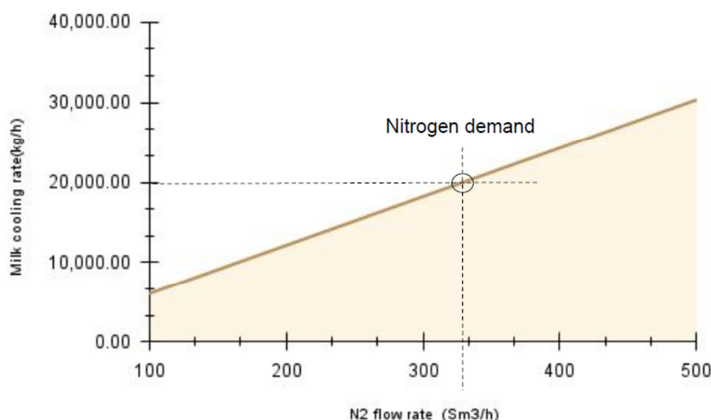


Figure 11 Rate of milk cooled by nitrogen gasification.

การใช้ความเย็นจากถังกักเก็บน้ำแข็ง

จากที่กล่าวมาข้างต้นความสามารถของ การทำความเย็น (refrigeration capacity) ที่ได้จากระบบการของการเปลี่ยนสถานะของไนโตรเจนมีค่าน้อยกว่าภาระการทำความเย็นที่ต้องการ ดังนั้นเพื่อให้ได้ภาระการทำความเย็นตามที่ต้องการ การใช้ถังกักเก็บน้ำแข็ง (ice storage tank) ได้ถูกเลือกมาพิจารณาในงานวิจัยนี้

ในแต่ละวันมีการขนถ่ายนม 1 ครั้งต่อวัน และใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง ดังนั้นในแต่ละวันจึงมีเวลา 21 ชั่วโมงในการสร้างและกักเก็บน้ำแข็งเพื่อใช้ทำความเย็น จากสมการที่ (5) ถังกักเก็บจะมีขนาดความจุเท่ากับ 10.62 m^3 ซึ่งสามารถลดอุณหภูมินมก่อนการขนส่งและช่วยลดภาระของเครื่องผลิตน้ำเย็นลงได้

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการนำความเย็นที่ได้จากการเปลี่ยนไนโตรเจนเหลวให้เป็นไอของโรงงานผลิต

นมแห่งหนึ่ง มาใช้ประโยชน์ โดยพิจารณาความดันในถังเก็บและอัตราการใช้ในโตรเจนเหลวมีค่าเท่ากับ 7 bar และ $100 \text{ m}^3/\text{h}$ ตามลำดับจากการวิเคราะห์พบว่าความสามารถการทำความเย็นที่ได้จากไนโตรเจนมีค่า 3.84 TON_R (หรือ 13.50 kW ความเย็น) ในระบบทำความเย็นและงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการนำความเย็นที่ได้นี้มาใช้ประโยชน์ใน 3 รูปแบบ เพื่อการประหยัดพลังงานดังนี้

1. การลดอุณหภูมิของน้ำเย็นก่อนไหลกลับเข้าสู่เครื่องทำน้ำเย็น (chiller) จากการวิเคราะห์พบว่าสามารถลดกำลังไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็นลดลงได้ประมาณ 7.39 kW (ลดลง 0.83 เปอร์เซ็นต์) หรือประหยัดพลังงานลงได้ 177.35 kWh/day
2. การลดอุณหภูมิของน้ำเย็นก่อนจ่ายสู่กระบวนการผลิต สามารถลดกำลังงานของคอมเพรสเซอร์ลง 0.68 kW (ลดลง 0.04 เปอร์เซ็นต์) หรือคิดเป็นผลประหยัด 16.32 kWh/day
3. การทำความเย็นนมก่อนการขนส่งโดยใช้ถังกักเก็บความเย็น (ice storage tank) ขนาดความจุ

10.62 m³ สามารถลดอุณหภูมิของนมจาก 10 องศาเซลเซียส ไปเป็น 8 องศาเซลเซียส ซึ่งคิดเป็น ภาระการทำความร้อน 12.51 TON_R (หรือ 44 kW ความเย็น) สามารถประหยัดพลังงานของเครื่องทำน้ำเย็นลงได้ 792.20 kWh/day หรือเป็นผลประหยัด 2,851.92 บาทต่อวัน

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณ คุณสมบัติ มณีพรหม โรงงานผลิตนมจังหวัดพระนครศรีอยุธยาที่สนับสนุนข้อมูล และอำนวยความสะดวกโดยตลอดการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- Agarwal, R., Rainey, T. J., Rahman, S. M. A., Steinberg, T., Perrons, R. K., & Brown, R. J. (2017). LNG Regasification terminals: The role of geography and meteorology on technology choices. *Energies*, 10(1), 2152.
- Coles, R., & Kirwan, M. (2007). *Food and beverage packaging technology*. West Sussex, UK: John Wiley & Sons.
- Dorgan, C. E., & Elleson, J. S. (1993). *Design guide for cool thermal storage*. Georgia: ASHRAE.
- Dorosz, P., Wojcieszak, P., & Malecha, Z. (2018). Exergetic analysis, optimization and comparison of LNG cold exergy recovery systems for transportation. *Entropy*, 20(1), 59.
- La Rocca, V. (2010). Cold recovery during regasification of LNG part one: Cold utilization far from the regasification facility. *Energy*, 35(5), 2049-2058.
- La Rocca, V. (2011). Cold recovery during regasification of LNG part two: Applications in an agro food industry and a hypermarket. *Energy*, 36(8), 4897-4908.
- Marshall, N. (1976). *Gas encyclopedia*. New York: Elsevier.
- Mongibello, L., Bianco, N., Caliano, M., & Graditi, G. (2017). A new approach for the dimensioning of an air conditioning system with cold thermal energy storage. *Energy Procedia*, 105, 4295-4304.
- Munsch-Alatossava, P., Gursoy, P., & Alatossava, T. (2010). Potential of nitrogen gas (N₂) to control psychrotrophs and mesophiles in raw milk. *Microbiological Research*, 165(2), 122-132.
- Rahdar, M. H., Emamzadeh, A., & Ataei, A. (2016). A comparative study on PCM and ice thermal energy storage tank for air-conditioning systems in office buildings. *Applied Thermal Engineering*, 96, 391-399.
- Tan, H., Li, Y., Tuo, H., Zhou, M., & Tian, B. (2010). Experimental study on liquid/solid phase change for cold energy storage of Liquefied Natural Gas (LNG) refrigerated vehicle. *Energy*, 35(5), 1927-1935.
- Yang, L., Villalobos, U., Akhmetov, B., Gil, A., Khor, J. O., Palacios, A., Li, Y., Ding, Y., Cabeza, L. F., Tan, W. L., & Romagnoli, A. (2021). A comprehensive review on sub-zero temperature cold thermal energy storage materials, technologies, and applications: State of the art and recent developments. *Applied Energy*, 188, 116555.
- Wattana, S. (1996). *A feasibility study on using the ice storage system for commercial buildings* (Master's thesis). Chulalongkorn University, Bangkok.
- Wu, C., & Tsai, Y. (2015). Design of an ice thermal energy storage system for a building of hospitality. *International Journal of Hospitality Management*, 46, 46-54.