การประเมินประสิทธิภาพและแนวทางการลดการใช้พลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์

Performance Evaluation and Approach to Reduce Energy Consumption of Tunnel Freezer

ธีรยุทธ ห่อทอง

Teerayut Horthong

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of

Master of Science in Agro-Industry Technology Management

Prince of Songkla University

2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การประเมินประสิทธิภาพและแนวทางการลดการใช้พลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็ง แบบอุโมงค์

ผู้เขียน นายธีรยุทธ ห่อทอง

สาขาวิชา การจัดการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

....

ไพรัตน์.รองศาสตราจารย์ ดร) โสภโณดร(

คณะกรรมการสอบ

ประธานกรรมการ...

)ดร(กิตติ เจิดรังษี .

....กรรมการ

(ชัยรัตน์ ศิริพัธนะ.ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร)

กรรมการ...

(ไพรัตน์ โสภโณดร.รองศาสตราจารย์ ดร)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร

....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่าผลงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการศึกษาของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ..
(รองศาสตราจารย์ ดร.ไพรัตน์ โสภโณดร)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.......................
(นายธีรยุทธ ห่อทอง)
นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.......................
(นายธีรยุทธ ห่อทอง)
นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ การประเมินประสิทธิภาพและแนวทางการลดการใช้พลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์

ผู้เขียน นายธีรยุทธ ห่อทอง

สาขาวิชา การจัดการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร

ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

ประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นประเมินได้จากค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพ (Coefficient of performance : COP) โดยระบบทำความเย็นที่มีกำลังการผลิตความเย็นสูงและใช้พลังงานน้อยจะส่งผลให้มีค่า COP สูง สำหรับเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์กรณีศึกษาประกอบด้วยเครื่องคอมเพรสเซอร์ 8 เครื่อง (4 เครื่องสำหรับคอมเพรสเซอร์ด้านความดันสูงและ 4 เครื่องสำหรับคอมเพรสเซอร์ด้านความดันต่ำ) ผลการประเมินค่า COP ของเครื่องคอมเพรสเซอร์ด้านความดันสูงมีค่าเท่ากับ 2.76, 3.07, 2.80 และ 2.84 และคอมเพรสเซอร์ด้านความดันต่ำมีค่าเท่ากับ 3.32, 3.35, 3.08 และ 3.20 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าอยู่ในระดับค่ามาตรฐานที่โรงงานกำหนด แต่เมื่อเวลาการทำงานเพิ่มขึ้นค่า COP ของระบบมีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตามค่า COP ไม่สามารถใช้วัดประสิทธิภาพของการดำเนินงานในการแช่เยือกแข็งได้

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาในโรงงานผลิตผลิตภัณฑ์แปรรูปจากซูริมิ ซึ่งมีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์สูงกว่าค่าดัชนีการใช้พลังงานที่โรงงานกำหนด (500 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ตันผลิตภัณฑ์) ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาแนวทางการจัดการที่เป็นไปได้ในการลดการใช้พลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็งโดยเน้นการจัดการกับปัญหาด้านการดำเนินงาน ซึ่งในการทำงานวันละ 10 ชั่วโมงของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์ พบว่า ใช้เวลาในการลดอุณหภูมิภายในอุโมงค์ก่อนแช่เยือกแข็ง (set up) 1.01 ชั่วโมง (ร้อยละ 10.1) ใช้ในการแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์ 7.77 ชั่วโมง (ร้อยละ 77.7) ใช้ระหว่างเกิดการทำงานของเครื่องเปล่า 0.89 ชั่วโมง (ร้อยละ 8.9) และใช้ในการละลายน้ำแข็ง 0.33 ชั่วโมง (ร้อยละ 3.33) ดังนั้นจึงศึกษาการลดเวลาการทำงานของเครื่องแช่เยือกแข็งเพื่อลดปริมาณการใช้พลังงานในแต่ละวัน ดังนี้ (1) ปรับปรุงเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาการลดอุณหภูมิภายในอุโมงค์ก่อนแช่เยือกแข็ง โดยกำหนดให้เครื่อง

คอมเพรสเซอร์เฉพาะชุดที่ 1,2 และ 3 ต้องมีอุณหภูมิต่ำกว่า -40 องศาเซลเซียสก่อนเริ่มแช่เยือกแข็งแทนการพิจารณาอุณหภูมิของคอมเพรสเซอร์ทั้ง 4 ชุด ทำให้สามารถลดเวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิของการเปิดเครื่องครั้งแรกและการเปิดเครื่องหลังพักจากค่าเฉลี่ยเดิม 41.14 และ 19.58 นาที เป็น 32.00 และ 12.50 นาที ตามลำดับ สามารถลดการใช้พลังงานจาก 212.52 กิโลวัตต์-ชั่วโมงเป็น 155.75 กิโลวัตต์-ชั่วโมง (2) ลดการสูญเสียพลังงานในระหว่างการทำงานของเครื่องเปล่าโดยการปิดการทำงานของคอมเพรสเซอร์ ซึ่งในขั้นตอนการแช่เยือกแข็งพบการทำงานของเครื่องเปล่าเฉลี่ย 28 นาที/ครั้ง การปิดการทำงานดังกล่าวสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ประมาณ 93.33 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ครั้ง และ (3) จัดลำดับการปิดเครื่องคอมเพรสเซอร์อย่างเหมาะสมสามารถลดการใช้พลังงานจาก 133.32 กิโลวัตต์-ชั่วโมง เป็น 88.32 กิโลวัตต์-ชั่วโมง อย่างไรก็ตามเพื่อควบคุมการใช้พลังงานให้อยู่ในระดับมาตรฐาน จึงได้ปรับปรุงการคำนวณกำลังการผลิต ซึ่งวิธีการคำนวณกำลังการผลิตแบบใหม่พิจารณาจากปริมาณผลิตภัณฑ์ (กิโลกรัม) เปรียบเทียบกับเวลาทั้งหมดที่เครื่องแช่เยือกแข็งทำงาน (ชั่วโมง) ประกอบด้วยช่วงเวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิก่อนแช่เยือกแข็งและช่วงเวลาขณะแช่เยือกแข็ง ทำให้สามารถควบคุมต้นทุนการผลิตได้อย่างถูกต้องเมื่อเทียบกับกำลังการผลิตแบบเดิม จากนั้นจึงกำหนดค่ากำลังการผลิตเป้าหมายใหม่ที่ 400 กิโลกรัม/ชั่วโมง เพื่อให้การควบคุมการใช้พลังงานสอดคล้องกับค่าดัชนีการใช้พลังงาน สุดท้ายจึงเสนอแนะให้มีการปรับปรุงช่วงเวลาการทำงานของพนักงานและขั้นตอนการทำงาน โดยการจัดลำดับขั้นตอนการทำงานใหม่ (Rearrange) ซึ่งเป็นทางเลือกในการลดเวลาการทำงานรวมของเครื่องแช่เยือกแข็ง 0.5 – 1 ชั่วโมงต่อวันโดยไม่กระทบกับปริมาณการแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์

Thesis Title Performance Evaluation and Approach to Reduce Energy Consumption of Tunnel Freezer

Author Mr. Teerayut Horthong

Major Program Agro-Industry Technology Management

Academic Year 2013

ABSTRACT

The refrigeration performance of the freezer could be evaluated from the value of coefficient of performance (COP). The refrigeration system with high refrigeration capacity and low input power showed high COP value and vice versa. A tunnel freezer of case study factory was composed of 8 compressors (4 for high stage and 4 for low stage). The evaluated COP values of each compressor were 2.76, 3.07, 2.80 and 2.84 for high stage and 3.32, 3.35, 3.08 and 3.20 for low stage, respectively and all in the limit of the standard level. But the COP value trends to decrease when compressors were run for longer time. However, COP value could not indicate the performance of operation.

This research was carried out at the surimi base product factory. It showed that the energy consumption was greater than the energy use index (EUI) (500 kWh/ton products). Therefore, the aim of this study is to find out any possible management to reduce energy consumption of the freezer with the emphasis of the operation problem. During freezing processes (10 h/day), it found that the period of set up, freezing, free running and defrosting were 1.01 h (10.1%), 7.77 h (77.7%), 0.89 h (8.9%), and 0.33 h (3.33%), respectively. Due to the highest energy consumption of the freezing period, some improvements were proposed i.e. establish new criteria for set up freezer which only temperature of compressor unit 1, 2 and 3 (not include unit 4) should be lower than -40°C before freezing. It could reduce the set up time from 41.14 to 32.00 min (morning) and 19.58 to 12.50 min (afternoon) resulting in the reduction of the energy consumption from 212.52 kWh to 155.75 kWh. The second approach was to reduce the energy

lost during free running (free running at average 28 min/time) by turning-off the compressors which could save energy around 93.33 kWh for each time. The third approach to reduce energy consumption during freezing by turning-off the compressor at an appropriate sequence resulted in saving energy from 133.32 kWh to 88.32 kWh. However, if the energy consumption was controlled at the standard level, the new method for the calculation of the production capacity was proposed based on the quantity of the frozen product and total freezer running time (h) (included set up and freezing period). The results from the new calculation method could be used to control the real production cost. As a result, the new target capacity was established at 400 kg/h. Finally, it is recommended to improve the working period of employee and rearrange freezing step so that the total freezer running period could be reduced 0.5-1 h/day without affecting to the production capacity.

สารบัญ

หน้า

สารบัญ........ (10)
รายการตาราง........ (11)
รายการภาพประกอบ........ (12)
บทที่
1 บทนำ........ 1
บทนำต้นเรื่อง........ 1
การตรวจเอกสาร........ 3
วัตถุประสงค์การวิจัย........ 32
2 วิธีวิจัย........ 33
3 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง........ 37
4 บทสรุปและข้อเสนอแนะ........ 73
เอกสารอ้างอิง........ 78
ประวัติผู้เขียน........ 82

รายการตาราง

ตารางที่ **หน้า**

ตารางที่		หน้า
1	ดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าและปริมาณผลิตภัณฑ์จากเครื่องแช่เยือกแข็งในปี พ.ศ. 2554	38
2	กำลังการผลิตปัจจุบันและกำลังการผลิตที่เหมาะสมของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์	42
3	อัตราการใช้พลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์	45
4	ผลการประเมินค่า COP ของเครื่องคอมเพรสเซอร์	49
5	เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการลดอุณหภูมิภายในอุโมงค์ก่อนแช่เยือกแข็ง	58
6	เวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิภายในอุโมงค์ของเครื่องแช่เยือกแข็งแบ่งตามชุดของเครื่องคอมเพรสเซอร์	59
7	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในอุโมงค์ของเครื่องแช่เยือกแข็ง	60
8	ค่าเฉลี่ยการหยุดสายพานของเครื่องแช่เยือกแข็งเพื่อรอบรรจุ	62
9	การปิดระบบทำความเย็นแต่ละชุดตามเวลาแช่เยือกแข็ง	64
10	เปรียบเทียบเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการลดอุณหภูมิภายในอุโมงค์ ก่อนและหลังปรับปรุง	67
11	เปรียบเทียบการใช้พลังงานในการทำงานของเครื่องเปล่า ก่อนและหลังปรับปรุง	68
12	ผลการลดการใช้พลังงานจากการปิดระบบทำความเย็นเป็นลำดับ ก่อนและหลังปรับปรุง	69
13	ผลการปรับปรุงช่วงเวลาการทำงานของพนักงานประจำเครื่องแช่เยือกแข็ง	71

รายการภาพประกอบ

ภาพที่		หน้า
1	ผลิตภัณฑ์คามาโบะโกะ	4
2	ผลิตภัณฑ์ชิกูวา	4
3	ผลิตภัณฑ์เทนปุระ	5
4	ผลิตภัณฑ์ลูกชิ้นปลา	5
5	ผลิตภัณฑ์ปูเทียม	5
6	เครื่องแช่เยือกแข็งแบบโลหะแผ่นสัมผัส	7
7	เครื่องแช่เยือกแข็งแบบสายพานเกลียว	8
8	เครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์	8
9	เครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเย็นจัด	9
10	เครื่องแช่เยือกแข็งแบบใช้สารไครโอเจน	10
11	แผนภาพความดันเอนทาลปี-	12
12	รูปแบบอย่างง่ายของระบบทำความเย็นแบบดูดซึม	15
13	แผนภูมิความดัน เอนทาลปีของสารทำความเย็นชนิด-R134a	18
14	อุปกรณ์และจุดต่างๆในแผนภูมิความดันเอนทาลปี-	19
15	ลำดับการทำงานในการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบสายพานเกลียว แบบอุโมงค์ และแบบลมเป่า	39
16	โครงสร้างและส่วนประกอบหลักภายในอุโมงค์แช่เยือกแข็งของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์	43
17	จอแสดงผลและปุ่มควบคุมสำหรับเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์	44
18	ระบบทำความเย็นแบบอัดไอ 2 ขั้น	47
19	ตัวอย่างการหาค่าเอนทาลปี ณ จุดต่างๆของระบบทำความเย็น	48
20	ค่า COP ของเครื่องอัดอุณหภูมิสูง เมื่อเวลา (ข) และเครื่องอัดอุณหภูมิต่ำ (ก) ผ่านไป	50
21	ดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์ปี พ .ศ.2554	51
22	สาเหตุการสูงขึ้นของค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องแช่เยือกแข็ง	52

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
23	สาเหตุของการทำงานของเครื่องเปล่าโดยการใช้แผนผังทำไมทำไม-	54
24	เปรียบเทียบลำดับการทำงานในขั้นตอนการแช่เยือกแข็ง ก่อนและหลังปรับปรุง	72

บทที่ 1

บทนำ

บทนำต้นเรื่อง

ประเทศไทยจัดเป็นผู้ผลิตและผู้ส่งออกอาหารรูปแบบต่างๆทั่วโลก ทั้งรูปของอาหารสดและอาหารแปรรูปแช่เยือกแข็งเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค จากพฤติกรรมของผู้บริโภคยุคใหม่ที่ให้ความสำคัญกับคุณค่าทางโภชนาการเป็นหลัก เน้นอาหารที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย ทำให้อาหารที่ผลิตจากปลาได้รับความนิยมเป็นพิเศษเพราะโปรตีนที่ได้จากเนื้อปลาเป็นโปรตีนย่อยง่าย ไขมันน้อย อาหารที่ผลิตจากเนื้อปลาที่นิยมบริโภคชนิดหนึ่ง คือ ซูริมิและผลิตภัณฑ์แปรรูปจากซูริมิ ซูริมิเป็นแหล่งโปรตีนที่สำคัญและมีคอเลสเตอรอลต่ำองค์ประกอบที่ไม่ต้องการจะถูกกำจัดออกจากเนื้อปลา เช่น ไขมัน เลือดและเอนไซม์ต่างๆเหลือเพียงโปรตีนไมโอไฟบริลและน้ำ (สุทธวัฒน์ เบญจกุล, 2549) ซูริมิสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปได้หลายประเภท เช่น เต้าหู้ปลา ปูเทียม ลูกชิ้นปลา และอื่นๆ เป็นต้น

อุตสาหกรรมการผลิตซูริมิในประเทศไทยปัจจุบันมีกำลังการผลิตประมาณ 150,000 ตันต่อปี และมีแนวโน้มในการขยายกำลังการผลิตได้อีก ปีพ.ศ. 2554 ปริมาณการส่งออกซูริมิของไทยไปประเทศหลักที่สำคัญได้แก่ ญี่ปุ่น และแคนาดา รองลงมาคือ เกาหลีใต้ และฮ่องกง มีส่วนแบ่งการตลาดร้อยละ 35.18, 8.51, 8.36 และ 7.95 ตามลำดับ (กรมส่งเสริมการส่งออก กระทรวงพาณิชย์, 2555) เนื่องจากการลงทุนในอุตสาหกรรมการผลิตและแปรรูปซูริมิไม่สูงมาก รวมทั้งลูกค้าไม่ยึดติดในตราสินค้าจึงทำให้ไม่มีการผูกขาดในตลาดของสินค้ากลุ่มดังกล่าว ส่งผลให้เกิดผู้ประกอบการรายใหม่ขึ้นได้ง่าย ซึ่งเป็นแรงกดดันให้กับผู้ประกอบการรายเดิม (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2548) โดยรายงานการส่งออกซูริมิของสมาคมอาหารแช่เยือกแข็งไทยรายงานว่า เดือนมกราคม-มิถุนายนปีพ.ศ. 2556 ไทยมีปริมาณการส่งออกซูริมิประมาณ 7 พันตัน ลดลงจากช่วงเวลาเดียวกันของปีพ.ศ. 2555 การลดลงดังกล่าวเกิดจากสภาวะเศรษฐกิจโลกถดถอยและเกิดผู้ผลิตซูริมิรายใหม่ในตลาดโลกทำให้มีการแข่งขันสูงขึ้น (สมาคมอาหารแช่เยือกแข็งไทย, 2556) ผู้ประกอบการแต่ละรายจึงได้พยายามสร้างมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ให้มีคุณภาพและความหลากหลายเพื่อเพิ่มความสามารถในการแข่งขัน ทางเลือกที่สำคัญในการแข่งขัน คือ การลดและควบคุมต้นทุนการผลิตให้อยู่ในระดับต่ำที่สุด โดยตลอดห่วงโซ่อุปทานของอาหารแช่เยือกแข็งจำเป็นต้องใช้การควบคุมอุณหภูมิ เริ่มตั้งแต่การแช่เยือกแข็งเพื่อลดอุณหภูมิของอาหารให้ต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง การขนส่งและการกระจายสินค้า การเก็บรักษาที่คลังสินค้าและร้านค้าปลีก จนกระทั่งถึง

มือผู้บริโภคต้องใช้พลังงานในการควบคุมอุณหภูมิทุกขั้นตอน แต่มีรายงานว่าขั้นตอนการแช่เยือกแข็งใช้พลังงานสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 50 ของทั้งห่วงโซ่อุปทาน (Huan, 2003a) ประสิทธิภาพของเครื่องแช่เยือกแข็งจึงจัดเป็นเงื่อนไขสำคัญในกระบวนการผลิตเพราะมีการใช้พลังงานในระดับสูง การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องแช่เยือกแข็งจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพ (Coefficient of performance: COP) ซึ่งเป็นการประเมินระบบการทำงานของเครื่องจักร อย่างไรก็ตามการประเมินค่า COP ดังกล่าวไม่ครอบคลุมประสิทธิภาพการดำเนินงาน ซึ่ง Huan (2003b) ได้เสนอแนวทางที่เหมาะสมยิ่งขึ้นโดยการประเมินค่าประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (Energy utilization efficiency: ηe) ของเครื่องแช่เยือกแข็ง ซึ่งครอบคลุมทั้งประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักรและประสิทธิภาพการดำเนินงานด้วย

ปัจจุบันโรงงานกรณีศึกษาเป็นบริษัทผู้ผลิตและจำหน่ายผลิตภัณฑ์แปรรูปจากซูริมิแช่เยือกแข็ง ผลิตภัณฑ์หลัก ได้แก่ ปูเทียม เต้าหู้ปลา หมึกหลอด ลูกชิ้นปลา และปลาม้วน เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ทั้งหมดจำหน่ายในลักษณะของอาหารแช่เยือกแข็ง โดยกระบวนการแช่เยือกแข็งใช้เครื่องแช่เยือกแข็งทั้งหมด 3 แบบ ได้แก่ เครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเย็นจัด (Air Blast Freezer) เครื่องแช่เยือกแข็งแบบสายพานเกลียว (Spiral Freezer) และเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์ (Tunnel Freezer) ซึ่งมีดัชนีการใช้พลังงานเฉลี่ยในปี พ.ศ. 2554 เท่ากับ 142.14, 198.12 และ 548.88 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ตัน ตามลำดับ โดยดัชนีการใช้พลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าค่าเป้าหมายที่โรงงานกำหนดไว้ที่ 500 กิโลวัตต์–ชั่วโมง/ตันผลิตภัณฑ์ งานวิจัยนี้จึงกำหนดกรอบการศึกษาเพื่อลดและควบคุมการใช้พลังงานในการแช่เยือกแข็งของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์เท่านั้น เมื่อวิเคราะห์ปัญหาในการแช่เยือกแข็งโดยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์เบื้องต้นพบปัญหาความสูญเปล่าในระหว่างการดำเนินงานของขั้นตอนการแช่เยือกแข็งซึ่งเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ ได้แก่ การหยุดสายพานการแช่เยือกแข็งเพื่อรอบรรจุภัณฑ์ รอผลิตภัณฑ์ และรอชั่ง/บรรจุ ซึ่งเป็นปัญหาด้านการบริหารการผลิตและส่งผลต่อต้นทุนการแช่เยือกแข็งโดยพบการทำงานของเครื่องเปล่าสูงถึงร้อยละ 12.6 ดังนั้นจึงใช้เครื่องมือด้านการจัดการการผลิตรวมถึงการประยุกต์ใช้เทคนิคการประหยัดพลังงานในระบบทำความเย็นของกรมโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อลดความสูญเปล่าที่เกิดขึ้น ส่งเสริมและควบคุมการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

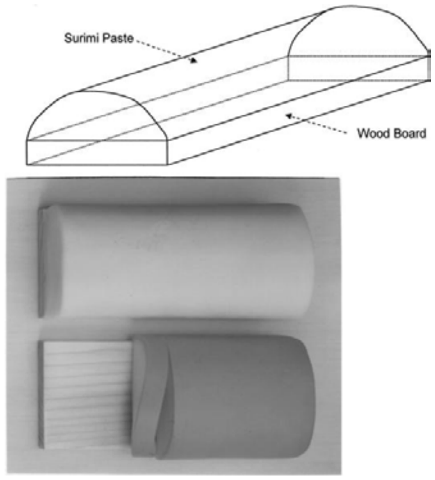
ตรวจเอกสาร

1. ซูริมิและผลิตภัณฑ์แปรรูปจากซูริมิ

ซูริมิ (Surimi) เป็นภาษาญี่ปุ่นที่ใช้เรียกเนื้อปลาบดที่ผ่านการแยกก้างออกแล้วล้างด้วยน้ำเพื่อขจัดเลือด ไขมัน และเอ็นไซม์ต่างๆแล้วเติมสารที่ช่วยป้องกันการสูญเสียสภาพตามธรรมชาติของโปรตีน เช่น น้ำตาล หรือซอร์บิทอล นอกจากนี้อาจมีการเติมสารประกอบฟอสเฟตก่อนนำไปแช่แข็ง ซูริมิสามารถใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเป็นผลิตภัณฑ์หลายชนิด ผลิตภัณฑ์จาก ซูริมิ (Surimi base products) ได้จากการนำซูริมิแช่เยือกแข็งที่ผ่านการทำละลายอย่างไม่สมบูรณ์ หรือซูริมิสดผสมกับเกลือในปริมาณที่เหมาะสมและผ่านความร้อนจะเกิดเจล (สุทธวัฒน์ เบญจกุล, 2549) จากนั้นขึ้นรูปด้วยการใช้ความดัน (Extruded) การทำให้เกิดลักษณะเส้นใย (Fiberized) หรือขึ้นรูปด้วยการใช้เบ้าประกอบ (Composite-molded) ผลิตภัณฑ์แปรรูปจากซูริมิเกิดขึ้นครั้งแรกประมาณศตวรรษที่ 8 ในประเทศญี่ปุ่นในรูปแบบของหมึกหลอด (Chikuwa) และขยายเพิ่มขึ้น จนถึงปี ค.ศ. 1970 จึงเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ในกลุ่ม Crabstick หรือปูเทียมก่อนเป็นที่นิยมเพิ่มขึ้นและขยายเข้าสู่ตลาดอเมริกาเหนือ การผลิตใช้วัตถุดิบจากปลาทะเลที่มีเนื้อขาว เช่น ปลาทรายแดง ปลาตาโต ปลาดาบลาว ปลาตาหวานและปลาข้างเหลือง เป็นต้น (Park, 2005) สำหรับปริมาณการผลิต ซูริมิและผลิตภัณฑ์ของโลกเฉลี่ยประมาณ 550,000 – 600,000 ตันต่อปี แบ่งเกรดคุณภาพตามปลาที่ใช้เป็นวัตถุดิบ ประเทศญี่ปุ่นบริโภคซูริมิและผลิตภัณฑ์มากที่สุดในโลกประมาณ 400,000 ตันต่อปี (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2552) ทั้งนี้สามารถจำแนกผลิตภัณฑ์จากซูริมิตามรูปแบบผลิตภัณฑ์ดั้งเดิมของประเทศญี่ปุ่นและกลุ่มประเทศในทวีปเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ออกเป็น 5 ชนิดหลัก (Park, 2005) คือ

1.1 คามาโบโกะ (Kamaboko)

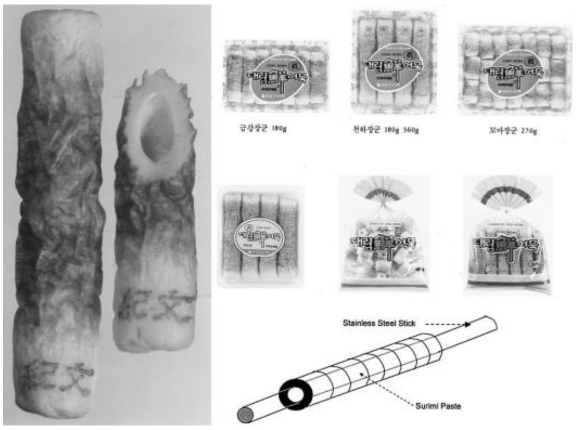
คามาโบโกะ เป็นอาหารพื้นเมืองของประเทศญี่ปุ่นซึ่งแปรรูปจากซูริมิและมีการบริโภคอย่างแพร่หลายในประเทศญี่ปุ่น ลักษณะโดยทั่วไปของคามาโบโกะจะเป็นลักษณะครึ่งวงกลมวางบนแผ่นไม้ (ภาพที่ 1) บางครั้งมีการเคลือบด้วยสีก่อนให้ความร้อนด้วยวิธีการอบ หรือนึ่งด้วยไอน้ำ ทั้งนี้คามาโบโกะอาจมีหลายลักษณะขึ้นกับแหล่งผลิต



ภาพที่ 1 ผลิตภัณฑ์คามาโบะโกะ
ที่มา: Park (2005)

1.2 ชิกูวา (Chikuwa)

ชิกูวาหรือหมึกหลอด เป็นอาหารดั้งเดิมของประเทศญี่ปุ่นมีรายงานการบริโภคครั้งแรกในราวศตวรรษที่ 8 หมึกหลอดมีลักษณะเป็นหลอดหรือท่อ ซึ่งกระบวนการผลิตจะเริ่มจากการขึ้นรูปซูริมิที่เติมส่วนผสมต่างๆแล้วพันรอบก้านทองเหลือง ซูริมิที่ขึ้นรูปด้วยก้านทองเหลืองจะถูกลำเลียงด้วยสายพานเข้าเตาอบ โดยก้านทองเหลืองหมุนตลอดเวลาเพื่อให้ซูริมิได้รับความร้อนทั่วถึง เริ่มจากการใช้ไฟปานกลางในช่วงแรก ไฟแรงในช่วงกลางและใช้ไฟอ่อนในตอนปลายตัวอย่างผลิตภัณฑ์ชิกูวาแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ผลิตภัณฑ์ชิกูวา
ที่มา: Park (2005)

1.3 เทนปุระ (Tenpura)

เทนปุระหรือคามาโบโกะทอดในน้ำมัน มีหลายลักษณะและชื่อเรียกแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ของประเทศญี่ปุ่น ส่วนผสมของเทนปุระเกิดจากการนำซูริมิผสมกับผัก เช่น แครอท เนื้อกุ้ง ปลาหมึก หรือ เนื้อปลาสับ เมื่อผสมเสร็จจะนำมาขึ้นรูปซึ่งมีหลายลักษณะ เช่น สี่เหลี่ยม วงกลม สามเหลี่ยมหรือแบบชิ้นนักเก็ต (ภาพที่ 3) ก่อนนำไปทอดเมื่อสุกผลิตภัณฑ์จะลอยบนผิวหน้าของน้ำมัน

ภาพที่ 3 ผลิตภัณฑ์เทนปุระ
ที่มา: Park (2005)

1.4 ลูกชิ้นปลา (Fish ball)

ลูกชิ้นปลา จัดเป็นผลิตภัณฑ์จากซูริมิที่นิยมบริโภคในกลุ่มประเทศแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (ภาพที่ 4) ส่วนผสมหลักของลูกชิ้นปลา ได้แก่ ซูริมิ เกลือ น้ำตาล โมโนโซเดียม กลูตาเมต แป้ง และน้ำ จากนั้นจึงนำมาขึ้นรูปในลักษณะทรงกลม (ball shape)

ภาพที่ 4 ผลิตภัณฑ์ลูกชิ้นปลา
ที่มา: Park (2005)

1.5 ผลิตภัณฑ์เลียนแบบจากซูริมิ (Analog simulated seafood product)

ผลิตภัณฑ์จากซูริมิหลายประเภทไม่เป็นที่นิยมของชาวตะวันตก ดังนั้นจึงมีการพัฒนาปรับปรุงรูปแบบของผลิตภัณฑ์ จนได้กลุ่มผลิตภัณฑ์เลียนแบบจากซูริมิ ผลิตขึ้นในหลากหลายรูปแบบแต่เน้นไปที่กลุ่มผลิตภัณฑ์ปูเทียมซึ่งเน้นลักษณะสี กลิ่น และรสชาติ คล้ายเนื้อปู การผลิตผลิตภัณฑ์เลียนแบบให้มีลักษณะคล้ายของจริงจำเป็นต้องอาศัยเทคนิคที่ซับซ้อน ผลิตภัณฑ์กลุ่มนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลัก ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ลักษณะเป็นเส้นใย (Filament meat style) และกลุ่มที่มีลักษณะเป็นชิ้น (Solid meat style) ซึ่งต่างกันตามลักษณะการขึ้นรูปและรูปแบบของผลิตภัณฑ์สุดท้าย ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ปูเทียมขึ้นรูปในลักษณะเส้นใยแสดงดังภาพที่ 5

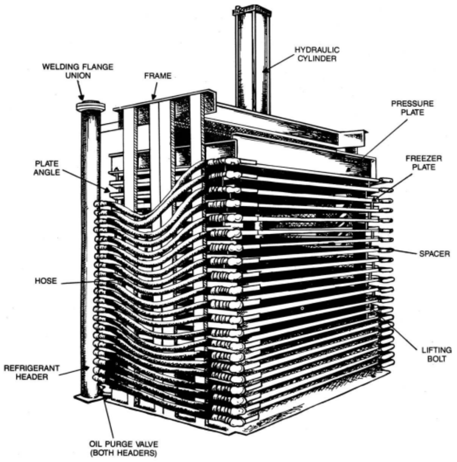
ภาพที่ 5 ผลิตภัณฑ์ปูเทียม
ที่มา: ศูนย์เครือข่ายอาหารครบวงจร (2556)

2. เทคโนโลยีการแช่เยือกแข็ง

การแช่เยือกแข็งเป็นกระบวนการลดอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ให้ต่ำกว่าจุดเยือกแข็งปริมาณความร้อน (Heat load) และเวลาการแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์เป็นองค์ประกอบสำคัญในการกำหนดขนาดของเครื่องจักรทั้งระบบ โดยหลักการสำคัญของการแช่เยือกแข็งคือการเปลี่ยนสภาวะของน้ำในอาหารจากของเหลวให้เป็นของแข็ง เนื่องจากน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมีทำให้อาหารเกิดการเน่าเสีย และสามารถลดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในอาหาร (สายสนม ประดิษฐดวง, 2546) เนื่องจากความหลากหลายของผลิตภัณฑ์แปรรูปจากซูริมิทั้งขนาดรูปร่าง รวมถึงลักษะการบรรจุ ทำให้ปัจจุบันมีระบบการแช่เยือกแข็งหลายชนิดเพื่อรองรับกับความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ โดยสามารถแบ่งประเภทของเครื่องแช่เยือกแข็งตามลักษณะตัวกลางที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน (Kolbe, 2005) ได้แก่

2.1 เครื่องแช่เยือกแข็งแผ่นโลหะสัมผัส (Contact Plate Freezer)

เครื่องแช่เยือกแข็งแบบแผ่นโลหะสัมผัสใช้หลักการสัมผัสกันระหว่างผิวอาหารกับแผ่นโลหะเพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนโดยใช้แผ่นโลหะกลวงเรียงอยู่ในแนวตั้งหรือแนวนอนซึ่งมีสารทำความเย็นไหลอยู่ภายใน (ภาพที่ 6) อัดความดันเล็กน้อยด้วยเครื่องอัดไฮโดรลิคเพื่อให้แผ่นโลหะแนบชิดชิ้นผลิตภัณฑ์ทำให้การลดอุณหภูมิของอาหารมีประสิทธิภาพดีขึ้น เครื่องแช่เยือกชนิดนี้นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตซูริมิ เพราะเหมาะสำหรับการแช่เยือกแข็งแท่งซูริมิที่มีขนาดแน่นอน เป็นชิ้นสี่เหลี่ยมมุมฉาก แบนและกว้าง ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกว้าง ง่ายต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างแผ่นโลหะกับผิวของผลิตภัณฑ์

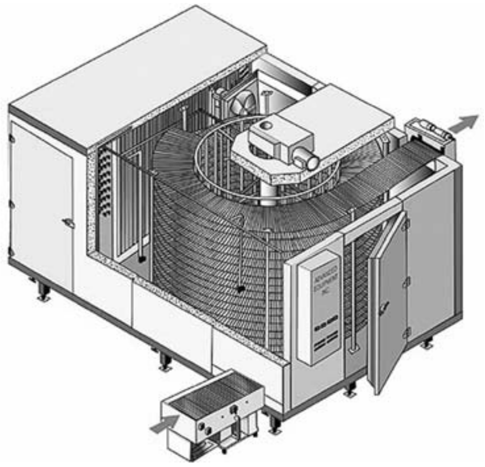


ภาพที่ 6 เครื่องแช่เยือกแข็งแบบแผ่นโลหะสัมผัส
ที่มา: Kolbe (2005)

2.2 เครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า (Airflow Freezer)

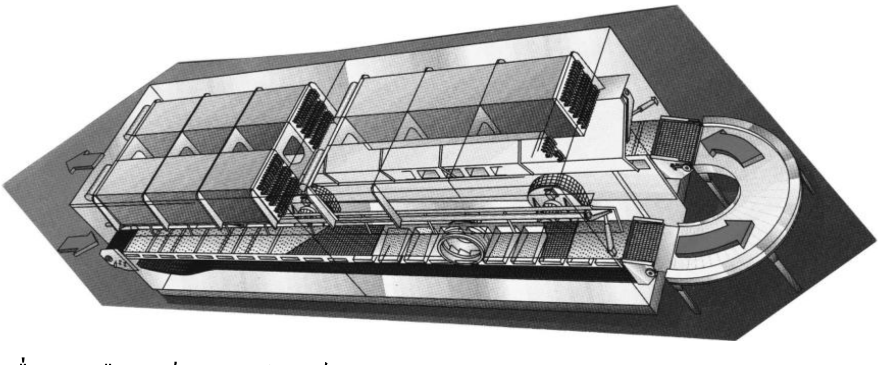
เครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าใช้การหมุนเวียนอากาศหรือลมเย็นเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยอาศัยใบพัดในการบังคับทิศทางการไหลรวมถึงความเร็วลมภายในเครื่อง ทั้งนี้ลมเย็นจะไหลผ่านเครื่องระเหย (Evaporator) ที่ภายในมีสารทำความเย็นไหลอยู่สารทำความเย็นจะทำหน้าที่ในการดูดกลืนความร้อนจากอากาศที่พัดผ่านทำให้อากาศมีอุณหภูมิต่ำลงก่อนสัมผัสกับผิวของอาหาร เนื่องจากผลิตภัณฑ์แปรรูปจากซูริมิมีความหลากหลายของขนาดและรูปร่าง ทำให้นิยมใช้เครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าในการแช่เยือกแข็งเพราะสามารถใช้ได้กับผลิตภัณฑ์ที่มีความหลากหลายไม่มีข้อจำกัดในด้านขนาดและรูปร่างของผลิตภัณฑ์ โดยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบตามลักษณะการไหลของอากาศภายในตู้แช่เยือกแข็ง ได้แก่

2.2.1 เครื่องแช่เยือกแข็งแบบสายพานเกลียว (Spiral Freezer) ใช้ระบบสายพานลำเลียงแบบวนเกลียวโค้ง ผลิตภัณฑ์จะเคลื่อนที่บนสายพานซึ่งทิศทางการไหลของอากาศเย็นภายในเครื่องแตกต่างกันขึ้นกับการออกแบบของผู้ผลิต (ภาพที่ 7) การควบคุมให้เกิดการแช่เยือกแข็งอย่างสมบูรณ์อาศัยการควบคุมความเร็วสายพานและความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ขณะนำเข้า ข้อดีของเครื่องแช่เยือกแข็งระบบนี้ คือ ใช้พื้นที่ในการดำเนินงานน้อย ให้กำลังการผลิตสูง



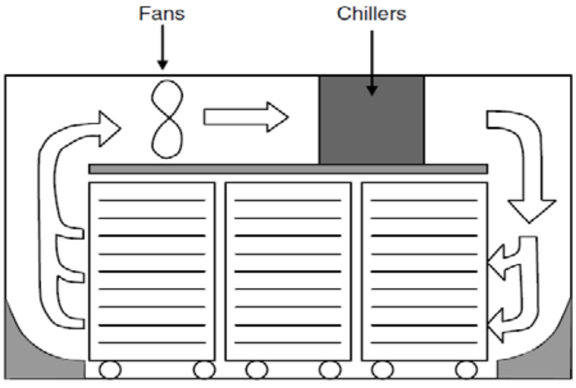
ภาพที่ 7 เครื่องแช่เยือกแข็งแบบสายพานเกลียว
ที่มา: North และ Lovatt (2005)

2.2.2 เครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์ (Tunnel Freezer) มีลักษณะเด่นคือใช้สายพานตรงในการลำเลียงผลิตภัณฑ์เข้าเครื่อง ภายในเครื่องผลิตภัณฑ์จะสัมผัสกับอากาศเย็นที่มีความเร็วลมสูงจากเครื่องระเหยหรือพัดลม (ภาพที่ 8) เป็นการแช่เยือกแข็งที่ใช้เวลาสั้นและเกิดการแช่เยือกแข็งอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กจำนวนมากกระจายทั่วทั้งชิ้นผลิตภัณฑ์ เกิดการสูญเสียน้ำหนักของผลิตภัณฑ์น้อยเนื่องจากการลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว (Delgado and Sun, 2001)



ภาพที่ 8 เครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์
ที่มา: Kolbe (2005)

2.2.3 เครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเย็นจัด (Blast Freezer) ลักษณะการทำงาน คือการนำผลิตภัณฑ์เข้าไปวางในห้องหรือตู้ ภายในมีการออกแบบระบบการทำความเย็นเพื่อลดอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์โดยการออกแบบทิศทางการไหลของอากาศเย็นภายในให้มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ (ภาพที่ 9) การแช่เยือกแข็งแบบนี้บางครั้งอาจเรียกการแช่เยือกแข็งแบบ batch ซึ่งเป็นเครื่องแช่เยือกแข็งแบบช้าใช้เวลาในการแช่เยือกแข็งอยู่ในช่วง 3 – 72 ชั่วโมงวิธีการแช่เยือกแข็งแบบช้าทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่บริเวณภายนอกเซลล์ เมื่อใช้เวลาแช่เยือกแข็งนานขึ้นจะทำให้ผลิตภัณฑ์สูญเสียน้ำหนักจากการระเหยของน้ำรวมถึงผลิตภัณฑ์เกิดการบวมและขยายออก ซึ่งส่งผลต่อลักษณะและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (Delgado and Sun, 2001)



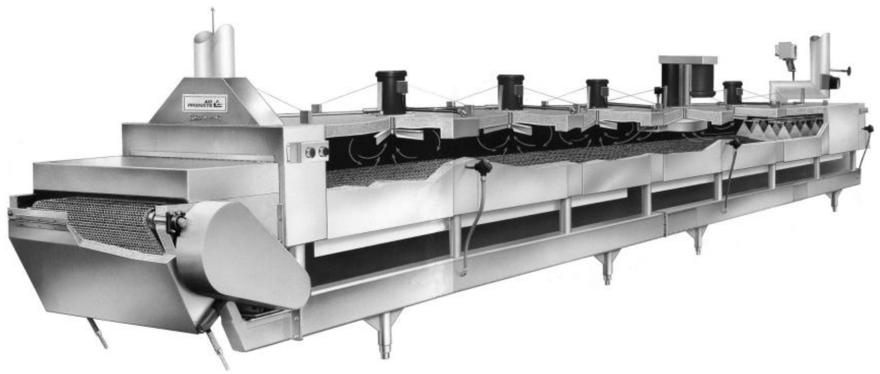
ภาพที่ 9 เครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเย็นจัด
ที่มา: Kolbe (2005)

2.3 เครื่องแช่เยือกแข็งแบบจุ่มในของเหลวเย็นจัด (Brine Freezer)

เครื่องแช่เยือกแข็งประเภทนี้ใช้สารละลายเกลือ (Brine) เป็นสารทำความเย็น โดยนำผลิตภัณฑ์แช่หรือจุ่มในสารละลายเกลือเพื่อลดอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างผลิตภัณฑ์กับสารละลายเกลือ โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์จะบรรจุในภาชนะปิดสนิทเพื่อป้องกันการสัมผัสกันโดยตรงของสารละลายเกลือกับผลิตภัณฑ์ การแช่เยือกแข็งด้วยวิธีการนี้มีข้อดีกว่าเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า คือ มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงหรือใช้พลังงานในการเดินเครื่องต่ำ โดยที่มีอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงกว่าการแช่เยือกแบบลมเป่า สารละลายเกลือที่ใช้ เช่น โซเดียมคลอไรด์ แคลเซียมคลอไรด์ เป็นต้น

2.4 เครื่องแช่เยือกแข็งแบบใช้สารไครโอเจน (Cryogenic Freezer)

เครื่องแช่เยือกแข็งแบบใช้สารไครโอเจนเป็นสารทำความเย็น โดยสารกลุ่มไครโอเจน หมายถึงกลุ่มสารที่มีจุดเดือดต่ำหรือในทางเทคโนโลยีการแช่เยือกแข็ง ได้แก่ สารไนโตรเจนเหลว (จุดเดือด -196 องศาเซลเซียส) และคาร์บอนไดออกไซด์เหลว (จุดเดือด -78 องศาเซลเซียส) เครื่องแช่เยือกแข็งแบบใช้สารไครโอเจนมีต้นทุนในการดำเนินงานสูงแต่มีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงเช่นกัน ลักษณะการทำงานคล้ายกับเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์ โดยผลิตภัณฑ์จะวางบนสายพานและเคลื่อนที่เข้าตู้แช่เยือกแข็ง (ภาพที่ 10) แต่การแช่เยือกแข็งแบบใช้สารไครโอเจนนี้ ระบบจะพ่นสารทำความเย็นเหลวลงมาสัมผัสกับผลิตภัณฑ์แทนการใช้ลมเป่า ผิวด้านนอกของผลิตภัณฑ์จะแข็งตัวอย่างรวดเร็วบางครั้งอาจมีการแตกร้าวของผิวผลิตภัณฑ์ได้ง่าย วิธีนี้ไม่เหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่มีความหนามาก เพราะทำให้สิ้นเปลืองสารทำความเย็นมากขึ้น



ภาพที่ 10 เครื่องแช่เยือกแข็งแบบใช้สารไครโอเจน
ที่มา: Kolbe (2005)

3. ระบบทำความเย็น (Refrigeration System)

การทำความเย็นเป็นการดูดความร้อนออกจากวัตถุหรืออากาศ เพื่อรักษาให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าสภาพแวดล้อมภายนอก อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่นี้ เรียกว่า เครื่องทำความเย็น (Refrigerator) (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2553) กระบวนการผลิตความเย็นในเครื่องทำความเย็นแบ่งออกเป็น

ก) ระบบทำความเย็นแบบอัดไอ (Vapor Compression System)

ข) ระบบทำความเย็นแบบดูดซึม (Absorption System)

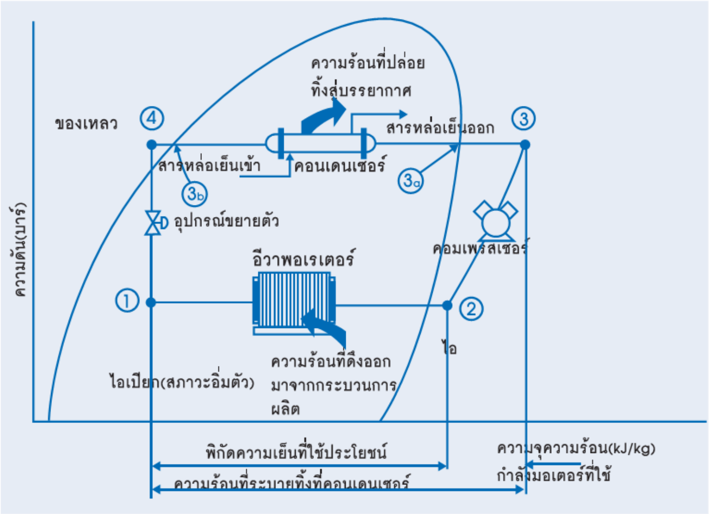
ในเครื่องทำความเย็นจะมีสารตัวกลางที่ทำหน้าที่ในการขนถ่ายความร้อน เรียกว่า สารทำความเย็น (Refrigerant) โดยส่วนใหญ่เครื่องทำความเย็นแบบอัดไอจะใช้แอมโมเนียและสารกลุ่มฟรีออนเป็นสารทำความเย็น ส่วนในเครื่องทำความเย็นแบบดูดซึมจะใช้น้ำเป็นสารทำความเย็นร่วมกับการใช้สารในกลุ่มน้ำเกลือ เช่น ลิเทียมโบรไมด์ เป็นสารดูดซับ (Absorbent)

3.1 ระบบทำความเย็นแบบอัดไอ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2544)

ระบบทำความเย็นแบบอัดไอจะขับเคลื่อนระบบด้วยพลังงานจลน์ ซึ่งทำการดูดและอัดไอสารทำความเย็นไปตามวงจร ความร้อนจะถูกส่งถ่ายและปล่อยทิ้งโดยอาศัยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งความร้อนจะถ่ายเทจากที่ที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ที่ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ในระบบทำความเย็นนั้นจะต้องทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนในทางตรงกันข้ามโดยใช้สารตัวกลางที่เรียกว่า สารทำความเย็น ซึ่งทำการดูดกลืนความร้อนและเกิดการเดือดหรือระเหยที่อุณหภูมิต่ำทำให้เปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอ ต่อจากนั้นไอดังกล่าวจะถูกอัดให้มีความดันและอุณหภูมิสูงขึ้นและถ่ายเทความร้อนที่ได้รับมาให้แก่อากาศรอบข้างพร้อมกับควบแน่นกลับมาเป็นของเหลวอีกครั้งเป็นผลให้เกิดการดูดกลืนหรือดึงความร้อนจากแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำและถ่ายเทความร้อนไปสู่แหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงกว่า โดยอุณหภูมิที่สารทำความเย็นเกิดการระเหยจะแปรผันตามความดัน ความดันยิ่งสูงจุดเดือดจะยิ่งสูงตามไปด้วย เมื่อสารทำความเย็นที่เป็นของเหลวเกิดการระเหยกลายเป็นไอจะดูดความร้อนจากบริเวณโดยรอบ สารทำความเย็นสามารถเปลี่ยนจากไอกลับคืนเป็นของเหลวอีกครั้งด้วยการทำให้เย็นลงหรือโดยปกติจะใช้น้ำหรืออากาศเป็นตัวระบายความร้อนออกจากสารทำความเย็น เพื่อช่วยให้สารทำความเย็นสามารถควบแน่นได้สารทำความเย็นจะถูกอัดให้มีความดันสูงขึ้น ซึ่งเป็นส่วนที่ต้องใช้พลังงานในการขับเคลื่อน เครื่องจักรที่ใช้ในการขับเคลื่อนสารทำความเย็นเรียกว่า คอมเพรสเซอร์ (Compressor)

การทำงานของระบบทำความเย็นอย่างง่ายแสดงในภาพที่ 11 ซึ่งแสดงความดันสารทำความเย็น (บาร์) และค่าความจุความร้อน (กิโลจูลต่อกิโลกรัม) วัฏจักรการทำความเย็นสามารถแบ่งการทำงานออกเป็นขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

เริ่มต้นจากสารทำความเย็น ณ จุดที่ ① ไหลไปยังจุดที่ ② หรือสารทำความเย็นสถานะของผสมระหว่างของเหลวความดันต่ำและแก๊สไหลผ่านภายในท่อของอีวาพอเรเตอร์ ทำให้เกิดการดูดซับความร้อนจากอากาศที่หมุนเวียนอยู่ระหว่างท่อของอีวาพอเรเตอร์หรือบริเวณโดยรอบอีวาพอเรเตอร์ กระบวนการดังกล่าวสารทำความเย็นเกิดการเดือดและเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอ เมื่อสารทำความเย็นออกจากอีวาพอเรเตอร์จะมีสภาวะเป็นไออิ่มตัว (Saturated Vapor)



ภาพที่ 11 แผนภาพความดัน - เอนทาลปี
ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2544)

สารทำความเย็นจากจุดที่ ② ไหลไปยังจุดที่ ③ ไอของสารทำความเย็นที่ออกจากอีวาพอเรเตอร์จะถูกอัดด้วยเครื่องอัดหรือเครื่องคอมเพรสเซอร์เพื่ออัดความดันให้สูงขึ้นจนมีสภาวะเป็นไอร้อนยิ่งยวด (Superheated Vapor) ขณะเดียวกันอุณหภูมิสารทำความเย็นจะเพิ่มขึ้นด้วย

สารทำความเย็นจากจุดที่ ③ ไหลไปยังจุดที่ ④ ไอร้อนยิ่งยวดของสารทำความเย็นจะถูกส่งต่อจากทางออกของคอมเพรสเซอร์ไปสู่คอนเดนเซอร์เพื่อระบายความร้อนออกจากสารทำความเย็น ในช่วงแรกของกระบวนการระบายความร้อนเป็นการลดสภาพไอร้อนยิ่งยวด จากนั้นช่วงถัดไปเป็นการเปลี่ยนสถานะของสารทำความเย็นจากไอเป็นของเหลว การระบายความร้อนในขั้นตอนนี้มักใช้น้ำหรืออากาศเป็นตัวพาความร้อนออกจากสารทำความเย็น การลดลงของอุณหภูมิต่อจากนี้จะเกิดขึ้นในท่อและถังพักสารทำความเย็นเหลว ทำให้สารทำความเย็นมีสภาพเป็นของเหลวเย็นยิ่งในขณะที่เข้าสู่อุปกรณ์ขยายตัว

สารทำความเย็นจากจุดที่ ④ ไหลไปยังจุดที่ ① ซึ่งเป็นการไหลครบวัฏจักร สารทำความเย็นในสภาวะของเหลวเย็นยิ่งความดันสูงจะไหลผ่านอุปกรณ์ขยายตัวซึ่งมีหน้าที่ลดความดันและควบคุมการไหลของสารทำความเย็นก่อนเข้าสู่อีวาพอเรเตอร์อีกครั้งเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นกับสิ่งแวดล้อม วัฏจักรการทำความเย็นจะเป็นเช่นนี้ซ้ำต่อไป

ดังนั้นคอนเดนเซอร์ต้องมีความสามารถในการระบายความร้อนจากอีวาพอเรเตอร์และคอมเพรสเซอร์รวมกัน กล่าวคือ พลังงานในช่วง (จุดที่ ① ไปจุดที่ ②) + (จุดที่ ② ไปจุดที่ ③) จะต้องเท่ากับช่วง (จุดที่ ③ ไปจุดที่ ④) เมื่อไม่มีการสูญเสียหรือรับความร้อนที่อุปกรณ์ขยายตัว

ส่วนประกอบหลักของวัฏจักรอัดไอ

1. เครื่องระเหยหรืออีวาพอเรเตอร์ (Evaporator) คือ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งได้รับการออกแบบให้ทำการดึงความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์หรือพื้นที่ที่ต้องการทำความเย็น การดึงความร้อนออกโดยตรงระหว่างผลิตภัณฑ์กับอีวาพอเรเตอร์โดยปกติไม่สามารถทำได้ จึงต้องมีของไหลอื่นที่เหมาะสม เช่น อากาศหรือสารทำความเย็นทุติยภูมิเป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อน ความจุของอีวาพอเรเตอร์ขึ้นกับ 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่ ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างสิ่งที่ถูกทำให้เย็นลงกับสารทำความเย็น อัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างสารทำความเย็นกับตัวกลางที่ถูกทำให้เย็นลง และปริมาณสารทำความเย็นที่ไหลผ่านอีวาพอเรเตอร์ ปัจจัยเหล่านี้จะควบคุมโดยวัสดุที่ใช้ในการผลิตอีวาพอเรเตอร์และขนาดทางกายภาพ อีวาพอเรเตอร์ยิ่งมีขนาดใหญ่ก็ยิ่งมีความสามารถในการทำความเย็นสูงและมีประสิทธิภาพของระบบสูงด้วย อย่างไรก็ตามขนาดจะมีผลต่อราคาของอีวาพอเรเตอร์ด้วย

2. เครื่องอัดหรือคอมเพรสเซอร์ (Compressor) เป็นอุปกรณ์หลักที่ใช้ไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ระบบทำความเย็น ดังนั้น การเลือกใช้คอมเพรสเซอร์อย่างถูกต้องจึงมีผลกระทบสูงต่อการประหยัดพลังงานของระบบ สิ่งสำคัญอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นอยู่ที่การเลือกใช้คอมเพรสเซอร์ให้เหมาะสมกับภาระการทำความเย็นและในกรณีที่ภาระการทำความเย็นเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก ความจุคอมเพรสเซอร์จะต้องสามารถปรับเปลี่ยนให้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้

3. เครื่องควบแน่นหรือคอนเดนเซอร์ (Condenser) คือ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดหนึ่งซึ่งมักจะมีโครงสร้างคล้ายกับอีวาพอเรเตอร์ การระบายความร้อนจากสารทำความเย็นจะใช้อากาศหรือน้ำก็ได้ ปัจจัยที่ควรพิจารณาในการเลือกคอนเดนเซอร์จะคล้ายกับการเลือกอีวาพอเรเตอร์ คอนเดนเซอร์ที่มีขนาดใหญ่จะสามารถลดความดันควบแน่นให้ต่ำลงได้มากซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้น อย่างไรก็ตามราคาของคอนเดนเซอร์จะสูงขึ้นเมื่อมีขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งนี้ในการเลือกคอนเดนเซอร์จะต้องคำนึงถึงระบบท่อและการระบายความร้อนโดยอุปกรณ์เก็บคืนความร้อนจะมีการสูญเสียความร้อนอยู่บ้างเล็กน้อย แต่มีคอนเดนเซอร์เป็นอุปกรณ์หลักที่ทำหน้าที่ระบายความร้อนออกจากระบบทำความเย็น ซึ่งเป็นความร้อนที่มาจากอีวาพอเรเตอร์ คอมเพรสเซอร์และภาระเสริมต่างๆ เช่น แสงสว่าง ปั๊ม พัดลม เป็นต้น

4. อุปกรณ์ขยายตัว (Expansion Device) มีหน้าที่ลดความดันของสารทำความเย็นก่อนไหลเข้าเครื่องอีวาพอเรเตอร์และควบคุมการไหลของสารทำความเย็นเพื่อรักษาระดับสารทำ

ความเย็นในเครื่องระเหยให้สามารถทำความเย็นได้สูงสุด โดยเฉพาะให้มีไอร้อนยิ่งยวดเท่านั้นที่เข้าสู่คอมเพรสเซอร์ ชนิดของอุปกรณ์ขยายตัวที่ใช้ขึ้นกับการออกแบบอีวาพอเรเตอร์ เช่น อาจเป็นวาล์วขยายตัว (Expansion Valve) ซึ่งควบคุมอุณหภูมิของสารทำความเย็นให้เหมาะสมที่สุดภายในอีวาพอเรเตอร์ที่มีสารทำความเย็นแบบท่วมขัง เป็นต้น

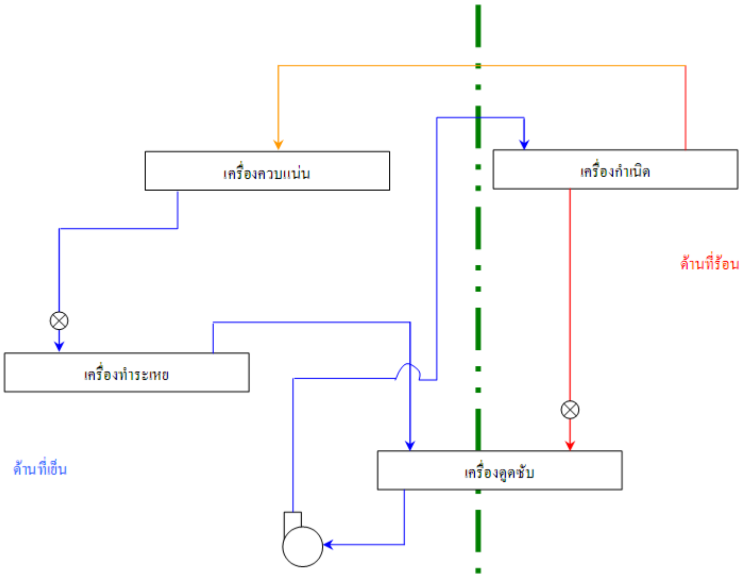
5. สารทำความเย็น (Refrigerant) การเลือกสารทำความเย็นถูกกำหนดโดยความต้องการของอุณหภูมิในกระบวนการผลิตหรืออุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ซึ่งมีผลกระทบอย่างมากต่อการออกแบบและการทำงานของระบบทำความเย็น มีสารทำความเย็นอยู่หลายชนิดที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวาง เป็นสารเคมีในกลุ่มที่เรียกว่า CFCs (Chlorofluorocarbons) ซึ่งมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงได้มีการเปลี่ยนแปลงและพัฒนาการใช้สารทำความเย็น ปัจจุบันสารทำความเย็นในกลุ่ม CFCs และ HCFC (Hydro chlorofluorocarbons) เช่น R11 R12 R502 และ R22 กำลังเลิกใช้ตามข้อตงลง Montreal เกี่ยวกับสารที่ทำลายโอโซนได้รับความเห็นชอบครั้งแรกในปี พ.ศ. 2531 ประกอบประเทศสมาชิกมากกว่า 90 ประเทศทั่วโลก ข้อตกลงดังกล่าวได้กำหนดให้มีการยกเลิกการใช้สารกลุ่ม CFC ลงในวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2539 เป็นต้นไป ส่วนสารกลุ่ม HCFC เช่น R22 ที่นิยมใช้ในปัจจุบันจะถูกยกเลิกและห้ามใช้ในปี พ.ศ. 2573 ทั้งนี้ปัจจุบันได้มีการพัฒนาสารทำความเย็นตัวใหม่ที่ไม่ทำลายชั้นโอโซนขึ้นมาทดแทน เช่น สาร R134a ซึ่งเริ่มมีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมแล้ว

6. ฉนวน ใช้สำหรับป้องกันการแลกเปลี่ยนความร้อนของสารทำความเย็นกับสิ่งแวดล้อมการหุ้มฉนวนที่ดีของระบบท่อและอุปกรณ์ มีความสำคัญต่อการประหยัดพลังงานและความน่าเชื่อถือของระบบทำความเย็น ฉนวนมีความสำคัญเป็นพิเศษสำหรับระบบที่มีอุณหภูมิการระเหยต่ำ ดังนั้นการวางท่อทางดูดที่ผ่านพื้นที่ที่ไม่มีการทำความเย็นจะทำให้อุณหภูมิสารทำความเย็นที่เข้าสู่คอมเพรสเซอร์สูงขึ้น ซึ่งมีผลทำให้ประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์ต่ำลง ดังนั้นฉนวนที่ชำรุดเสียหายหรือการหุ้มฉนวนที่ไม่หนาพอในโครงสร้างของห้องเย็นจะทำให้มีการรับความร้อนผ่านผนังมากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มภาระทางความร้อนต่อระบบทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมากขึ้นด้วย

3.2 ระบบทำความเย็นแบบดูดซึม (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2553)

ระบบทำความเย็นแบบดูดซึมเป็นระบบทำความเย็นที่อาศัยพลังงานความร้อนในการขับเครื่องทำความเย็นให้ทำงาน โดยความร้อนที่ป้อนให้กับระบบมักอยู่ในรูปของไอน้ำ น้ำร้อนหรือแก๊สร้อนซึ่งเป็นพลังงานคุณภาพต่ำ ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบดูดซึมจะต่ำกว่าระบบทำความเย็นแบบอัดไอ แต่หากพลังงานความร้อนที่ป้อนให้กับระบบมาจากพลังงาน

ความร้อนเหลือทิ้ง เช่น ไอเสีย หรือมาจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่นแสงอาทิตย์หรือชีวมวล ระบบทำความเย็นแบบดูดซึมจะประหยัดค่าใช้จ่ายมากกว่า ระบบทำความเย็นแบบดูดซึมมีส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ เครื่องกำเนิด (Generator) เครื่องควบแน่น (Condenser) เครื่องระเหย (Evaporator) เครื่องดูดซึม (Absorber) และวาล์วลดความดัน (Expansion Valve) ส่วนสารทำงานจะเป็นลักษณะของสารคู่ผสมระหว่างสารทำความเย็น (เช่น น้ำ) กับสารดูดซึม (เช่น ลิเทียมโบรไมด์) ดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 รูปแบบอย่างง่ายของระบบทำความเย็นแบบดูดซึม
ที่มา: องค์การสิ่งแวดล้อมแห่งสหประชาชาติ (2549)

หลักการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดซึมเริ่มต้นจากเครื่องกำเนิดรับความร้อนจากแหล่งความร้อนภายนอกทำให้สารทำความเย็นเดือดกลายเป็นไอและแยกตัวจากสารดูดซึม ไอของสารทำความเย็นจะถูกทำให้ควบแน่นที่เครื่องควบแน่นที่อุณหภูมิ 40-50 องศาเซลเซียส และเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวแล้วไหลผ่านวาล์วลดความดันไปสู่เครื่องระเหย ที่เครื่องระเหยสารทำความเย็นจะรับความร้อนจากสิ่งแวดล้อมเพื่อระเหยกลายเป็นไอที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความดัน 6 มิลลิเมตรปรอท จากนั้นไอของสารทำความเย็นจะถูกดูดซึมด้วยสารดูดซึมที่ไหลผ่านวาล์วลดความดันอีกชิ้นที่ต่อมาจากเครื่องกำเนิดและกลายเป็นของเหลวในเครื่องดูดซึม ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน จากนั้นของเหลวผสมจะถูกสูบโดยปั๊มให้มีความดันสูงขึ้นเป็น 75 มิลลิเมตรปรอท และส่งไปยังเครื่องกำเนิดเพื่อรับความร้อนจากแหล่งกำเนิดต่อไป ซึ่งถือเป็นการทำงานครบรอบวัฏจักร

4. การประเมินประสิทธิภาพของระบบทำความเย็น

Herrison และคณะ (1985, อ้างโดย Huan, 2003a) กล่าวว่า การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องแช่เยือกแข็งยังไม่มีวิธีการที่สมบูรณ์ แต่วิธีที่นิยมใช้ คือการพิจารณาจากค่า COP (Coefficient of Performance) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้บอกสมรรถนะของเครื่องทำความเย็นที่สำคัญ โดยพิจารณาจากปริมาณความเย็นที่ระบบผลิตได้เทียบกับพลังงานที่คอมเพรสเซอร์ใช้ เครื่องทำความเย็นที่ประหยัดพลังงานจะมีค่า COP สูงและแปรเปลี่ยนตามสภาวะการออกแบบ สภาวะการทำงาน และสภาวะการใช้งานของเครื่อง ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพเครื่องแช่เยือกแข็งหรือประสิทธิภาพการทำความเย็น พิจารณาจากค่า COP หากเครื่องแช่เยือกแข็งที่มีความสามารถในการทำความเย็นสูงและใช้พลังงานต่ำจะมีค่า COP สูง สมการการคำนวณค่า COP เพื่อใช้ประเมินประสิทธิภาพเครื่องแช่เยือกแข็งแสดงได้ดังสมการ

$$\mathrm{COP} = \frac{Q}{W} \qquad (1)$$

COP = ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพของเครื่องแช่เยือกแข็ง

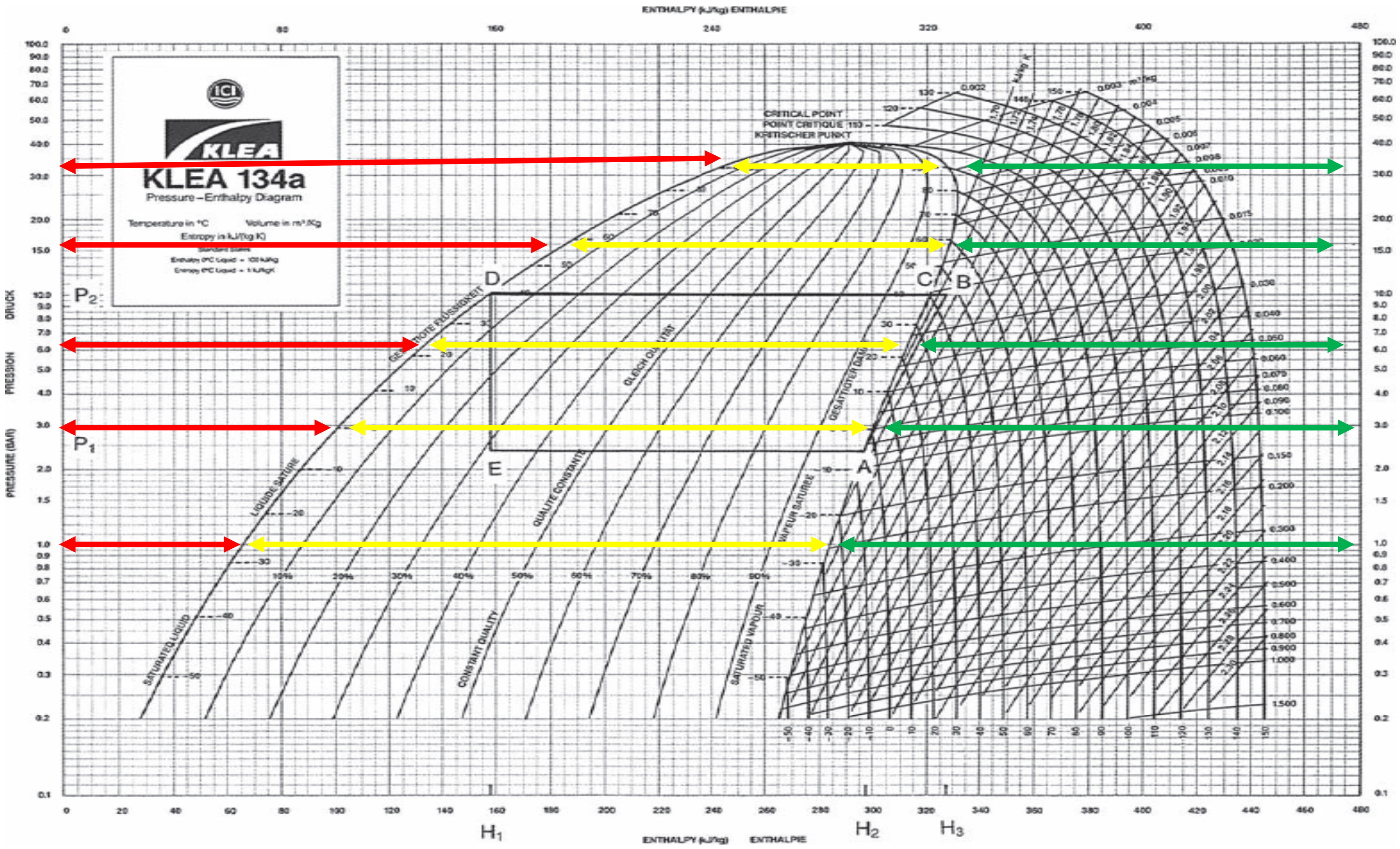
Q = ปริมาณความเย็นที่ระบบผลิตได้ (kj)

W = พลังงานที่ใช้ในระบบทำความเย็น (kj)

การประเมินค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพการทำความเย็น (COP) เป็นการนำปริมาณความเย็นที่เครื่องแช่เยือกแข็งผลิตได้ (Q) เทียบกับพลังงานที่ใช้ขับคอมเพรสเซอร์ (W) โดยการประเมินค่าความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบซึ่งเกี่ยวข้องกับแผนภูมิความดัน-เอนทาลปีของสารทำความเย็น (Pressure-enthalpy Diagram) แผนภูมิความดัน-เอนทาลปีของสารทำความเย็นแต่ละชนิด เช่น R-12, R-22, R-502 หรือ R-717 จะคล้ายกันแต่ไม่สามารถใช้แทนกันได้ การคำนวณค่า COP ของระบบจะใช้ข้อมูลต่างๆในการพิจารณา ได้แก่ ชนิดของสารทำความเย็น ความดันของเครื่องคอมเพรสเซอร์ (ทางดูดและทางอัด) และกำลังไฟฟ้าที่เครื่องคอมเพรสเซอร์ใช้

แผนภูมิความดัน – เอนทาลปี คือแผนภูมิทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่แสดงให้เห็นว่าสมบัติของสารในสถานะของเหลวและแก๊ส มีความสัมพันธ์กับความดันและความร้อนค่าหนึ่งๆเสมอ เป็นแผนภูมิที่ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบระบบการทำความเย็น เริ่มตั้งแต่การหาขนาดกำลังงานเชิงกลที่จำเป็นในการทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนให้ได้ปริมาณตามที่ต้องการ พื้นที่แสดงสถานะของความเย็นในแผนภูมิ คือบริเวณที่ใช้บอกสถานะของสารทำความเย็นว่ามีสถานะเป็นของเหลว

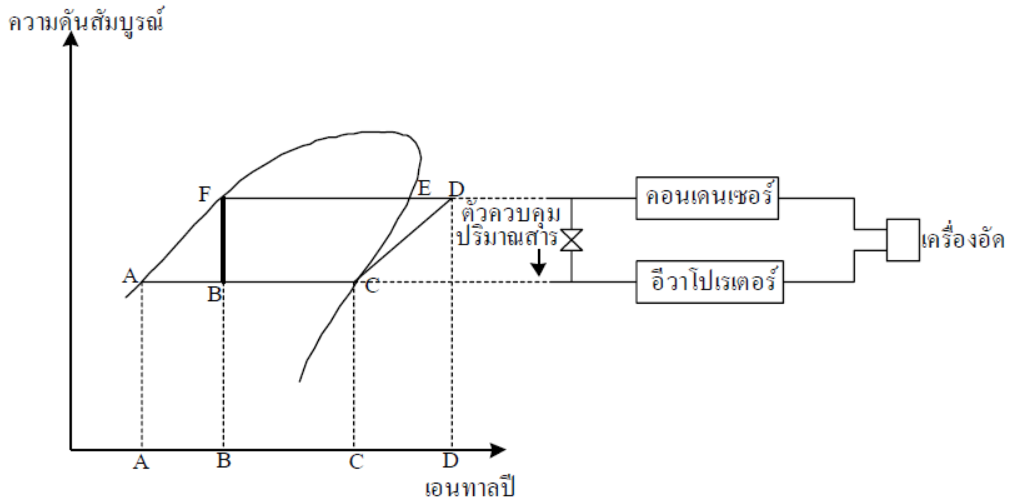
อิ่มตัว ของผสมระหว่างของเหลวกับไอ ไออิ่มตัว หรือไอร้อนยิ่งยวด ซึ่งสามารถแบ่งพื้นที่ของแผนภูมิออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ พื้นที่ซ้ายมือ พื้นที่บริเวณตรงกลาง และพื้นที่ขวามือ โดยมีเส้นแบ่ง 2 เส้น เส้นแบ่งซ้ายมือเรียกว่าเส้นของเหลวอิ่มตัว เส้นแบ่งขวามือเรียกว่าเส้นไออิ่มตัว ดังนั้นพื้นที่ด้านซ้ายมือของเส้นของเหลวอิ่มตัวหรือบริเวณเส้นตรงสีแดงสารทำความเย็นจึงมีสภาพเป็นของเหลวทั้งหมด พื้นที่ด้านขวามือของเส้นไออิ่มตัวหรือบริเวณเส้นตรงสีเขียวสารทำความเย็นจะมีสภาพเป็นไอทั้งหมดและพื้นที่บริเวณตรงกลางระหว่างของเหลวอิ่มตัวและไออิ่มตัวหรือบริเวณเส้นตรงสีเหลือง สารทำความเย็นจะมีสภาพเป็นของผสมระหว่างของเหลวกับไอ แผนภูมิความดัน – เอนทาลปีของสารทำความเย็นแต่ละชนิดมีลักษณะใกล้เคียงกันแต่ไม่สามารถใช้แทนกันได้ ภาพที่ 13 แสดงตัวอย่างของแผนภูมิความดัน – เอนทาลปีของสารทำความเย็นชนิด R134a



ภาพที่ 13 แผนภูมิความดัน – เอนทาลปีของสารทำความเย็นชนิด R134a

ที่มา: Pual และ Heldman (2009)

การใช้งานแผนภูมิความดัน – เอนทาลปีดังกล่าวจะสมมติให้กระบวนการนี้เป็นกระบวนการแอเดียแบติกชนิดไอเซนโทรปิกหรือเรียกว่ากระบวนการแอเดียแบติกที่ไม่มีแรงเสียดทาน (Frictionless – adiabatic process) หรือกระบวนการอัดแบบเอนโทรปีคงที่ (Constant entrophy compression) การหาค่าต่างๆด้วยแผนภูมิความดัน – เอนทาลปีแสดงในภาพที่ 14 จากภาพแสดงแผนภาพความดัน – เอนทาลปีอย่างย่อของสารทำความเย็น โดยเส้นตามแนวแกน y แสดงค่าความดันสัมบูรณ์และแกน x แสดงค่าเอนทาลปี



ภาพที่ 14 อุปกรณ์และจุดต่างๆในแผนภูมิความดัน - เอนทาลปี
ที่มา: สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย (2554)

ในการพิจารณาค่า COP ของระบบจำเป็นจะต้องทราบค่าเอนทาลปีของสารที่จุดต่างๆ ซึ่งวิธีการหาค่าเอนทาลปีมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1. ทำการวัดความดันสัมบูรณ์ของสารทำความเย็น ซึ่งเป็นผลรวมของค่าความดันที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดความดัน (เกจมิเตอร์) บวกด้วยค่าความดันบรรยากาศ (1.013 บาร์) เมื่อทราบค่าความดันด้านสูง (FE) และความดันด้านต่ำ (BC) แล้วทำการลากเส้นตรงขนานกับแนวแกน x ที่ค่าความดันที่อ่านได้ จากตัวอย่างเส้นความดันด้านสูง FE และความดันด้านต่ำ AC

ขั้นตอนที่ 2. จากจุด F ที่สารทำความเย็นมีสถานะเป็นของเหลวอิ่มตัว ทำการลากเส้นตรงขนานกับแกน y (ตามเส้นอุณหภูมิคงที่) ตัดกับเส้นตรง AC ที่จุด B ที่จุด B ซึ่งสามารถอ่านค่าเอนทาลปีของสารทำความเย็น (h_4) บนแกน x ได้

ขั้นตอนที่ 3. จากจุด C สารทำความเย็นที่สถานะเป็นไออิ่มตัวสามารถอ่านค่าเอนทาลปีของสารทำความเย็น (h_1) จากนั้นที่เส้นความดันด้านต่ำจากจุด C ลากเส้นตรงขนานกับเส้นเอนโทรปีคงที่ตัดกับเส้นความดันด้านสูง FE ที่จุด D อ่านค่าเอนทาลปี (h_2)

จากนั้นทำการวิเคราะห์ระบบทำความเย็นโดยใช้แผนภูมิความดัน-เอนทาลปีหาค่าเอนทาลปี (h) ซึ่งเป็นค่าความร้อนที่ใช้งานในแต่ละอุปกรณ์ของระบบทำความเย็น เมื่อทราบค่าเอนทาลปี ณ จุดต่างๆทั้ง 3 ค่าแล้วทำการหาค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพหรือค่า COP โดยการแทนค่าลงในสมการที่ 2 จากสมการผลต่างของค่าเอนทาลปีที่จุด C และจุด B แสดงปริมาณความเย็นที่ระบบผลิตได้ (Q) และผลต่างของค่าเอนทาลปีที่จุด D และจุด C แสดงกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ (W)

$$\mathrm{COP} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = \frac{\text{ความเย็นที่ระบบทำได้}(Q)}{\text{กำลังไฟฟ้าที่ใช้}(w)} \qquad (2)$$

เครื่องทำความเย็นที่ประหยัดพลังงานจะต้องมีค่า COP สูง แปรเปลี่ยนตามสภาวะการออกแบบ สภาวะการทำงานและสภาวะการใช้งานของเครื่อง ผู้ออกแบบเครื่องสร้างเครื่อง ทำการบำรุงรักษาและใช้เครื่องจึงเกี่ยวข้องกับค่า COP ปัจจัยทางปฏิบัติที่มีผลต่อ COP มีดังนี้

1. อุณหภูมิ ควรปรับตั้งอุณหภูมิทำความเย็นให้สูงเท่าที่ทำได้แต่อุณหภูมิยังคงต่ำพอที่ใช้งานนั้นๆและไม่มีผลต่อความสามารถในการถ่ายเทความร้อน การรักษาระดับความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของเครื่องระเหยให้สูงตลอดเวลาทำได้โดยการล้างทำความสะอาด หวีครีบ (Fin) ที่ล้มให้เป็นระเบียบ ป้องกันลมรั่วหรือลัดวงจร และถ่ายน้ำมันหล่อลื่นที่สะสมในอีวาพอเรเตอร์ เป็นต้น

2. การระบายอากาศ รักษาระดับสภาพการระบายความร้อนที่คอนเดนเซอร์ให้สูงตลอดเวลาโดยล้างทำความสะอาดคอนเดนเซอร์ ป้องกันลมรั่วหรือลัดวงจร บำรุงรักษาหอทำน้ำเย็นให้มีความสามารถในการระบายความร้อนสูงอยู่เสมอ เป็นต้น

3. ปริมาณของสารทำความเย็นในระบบ กล่าวคือหากมีสารทำความเย็นในระบบน้อยกว่าปกติจะส่งผลให้คอมเพรสเซอร์ทำงานหนักขึ้นเพื่อหมุนเวียนสารทำความเย็นดังกล่าว

4. การถ่ายอากาศในระบบ (Air Bleed) เพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยาระหว่างสารทำความเย็นกับอากาศเกิดเป็นกรดเกลือ (HCl) ซึ่งจะส่งผลทำให้ท่อทางเดินของสารทำความเย็นสึกกร่อน อีกทั้งยังทำให้ความดันในระบบสูงผิดปกติกระทบต่อการประเมินประสิทธิภาพระบบทำความเย็น เป็นต้น

วันชัย ลีลากวีวงศ์ และคณะ (2550) ได้ทำการศึกษาการประหยัดพลังงานไฟฟ้าและเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องแช่เยือกแข็งในอุตสาหกรรมการผลิตไอศกรีม ซึ่งพบปัญหาเครื่องแช่เยือกแข็งทำงานไม่เต็มประสิทธิภาพ มีสาเหตุหลักจากฉนวนหุ้มท่อส่งสารทำความเย็นเสียหายและเครื่องแช่เยือกแข็งผ่านการใช้งานมาเป็นเวลานาน จึงทำการปรับปรุงค่าประสิทธิภาพการทำความเย็น (COP) ของระบบและลดค่าไฟฟ้าของเครื่องแช่เยือกแข็ง โดยมีแนวทาง 2 วิธี คือ 1) ทำการถอดขดท่อคอยล์ร้อนจากเครื่องคอนเดนเซอร์เพื่อทำการล้างตะกรันที่ติดอยู่ออก 2) ทำการหุ้มฉนวนกันความเย็นใหม่ของท่อส่งสารทำความเย็นจากคอนเดนเซอร์ไปอีวาพอเรเตอร์ ผลการปรับปรุง พบว่าสามารถลดค่าไฟฟ้าลงร้อยละ 7 คิดเป็นเงิน 17,606.8 บาท/ปี และเพิ่มประสิทธิภาพการทำความเย็น (COP) คิดเป็นร้อยละ 5 – 10 สามารถลดค่าไฟฟ้าลง 3,737.36 บาท/ปี

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2553) ได้ทำการศึกษาการอนุรักษ์พลังงานของระบบทำความเย็นในโรงงานผลิตน้ำแข็ง เพื่อให้การผลิตเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและอนุรักษ์พลังงานโดยคำนึงถึงต้นทุนและค่าใช้จ่ายที่เหมาะสม แนวทางที่ใช้ในการดำเนินการคือการลดความดันสารทำความเย็นที่ชุดระบายความร้อน (คอนเดนเซอร์) ให้มีอุณหภูมิต่ำสุด เนื่องจากหากความดันของสารทำความเย็นที่ชุดระบายความร้อนมีอุณหภูมิสูงระยะเวลาในการผลิตน้ำแข็งจะนานขึ้น เพื่อให้การใช้พลังงานไฟฟ้าอยู่ในระดับต่ำจึงต้องควบคุมความดันของชุดระบายความร้อนให้ต่ำที่สุด โดยกรณีศึกษาใช้การทำความสะอาดครีบระบายความร้อนที่ชุดระบายความร้อน ผลที่ได้สามารถเพิ่มผลผลิตขึ้นร้อยละ 6 – 8 และการใช้พลังงานไฟฟ้าลดลงร้อยละ 4

นอกจากการบำรุงรักษาเครื่องมือเครื่องจักรเป็นประจำเพื่อรักษาค่า COP ให้สูงอยู่เสมอแล้ว การปรับปรุงค่า COP ของระบบทำความเย็นยังมีอีกหลายแนวทางรวมถึงการยกระดับประสิทธิภาพของระบบแช่เยือกแข็งด้วย โดยโชคดี จูดิษฐ์ประเสริฐ และคณะ (2551) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิและความเร็วอากาศของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าชนิดสายพานเกลียว (Spiral Freezer) ซึ่งเครื่องแช่เยือกแข็งดังกล่าวมักพบความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิและการกระจายความเร็วลม ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิและความเร็วลมต่อเวลาการแช่เยือกแข็งของอาหารโดยการจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า ปัญหาที่พบในเครื่องแช่เยือกแข็งแบบสายพานเกลียว คือการกระจายอุณหภูมิของอากาศและความเร็วลมที่ไม่สม่ำเสมอเนื่องจากการเคลื่อนที่ของลมเย็นจากบนลงล่างสวนทางกับการเคลื่อนที่ของอาหาร ความเร็วลมบริเวณทางเข้าเครื่องมักมีค่าต่ำการถ่ายโอนความร้อนจึงเป็นไปได้ช้าทำให้เวลาที่ใช้ลดอุณหภูมิในช่วง pre-cooling phase นานขึ้น ผลการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการแช่เยือกแข็งอาหาร พบว่า เมื่ออุณหภูมิอากาศลดต่ำลงและ/หรือความเร็วลมเพิ่มขึ้น จะทำให้เวลาในการแช่เยือกแข็งลดลง ความเร็วลมที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดอัตราการแช่เยือก

แข็งในระดับปานกลางสำหรับอาหารที่มีความหนาไม่เกิน 2 ซ.ม. คือ 1.6 – 1.8, 2.0 – 2.2 และ 2.0 – 2.1 เมตร/วินาที โดยใช้เวลาแช่เยือกแข็งประมาณ 38, 21 และ 12 นาที สำหรับอาหารรูปทรงแบนราบ ทรงกระบอก และทรงกลม ตามลำดับ ดังนั้นการพิจารณาอุณหภูมิที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งให้เหมาะสมจัดเป็นการลดภาระการทำงานของเครื่องคอมเพรสเซอร์ส่งผลให้ค่า COP เพิ่มสูงขึ้น

นอกจากการใช้อุณหภูมิและความเร็วลมให้เหมาะสมกับขนาดและรูปร่างของอาหารแล้ว ปัจจุบันมีการพัฒนาระบบควบคุมความเร็วใบพัดที่ทำหน้าที่หมุนเวียนอากาศภายในเครื่องแช่เยือกแข็ง โดย Kolbe และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษาการลดการใช้พลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเย็นจัด (Blast Freezer) โดยใช้เครื่องควบคุมความถี่ของมอเตอร์ (Variable Frequency Drive: VFD) ซึ่งได้ทำการศึกษาในการแช่เยือกแข็งปลาซาร์ดีนของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเย็นจัดเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพและประหยัดพลังงาน การทดลองเริ่มจากการปรับปรุงการไหลของอากาศภายในเครื่องด้วยการติดตั้งแผ่นกั้นอากาศเพื่อบังคับทิศทางการไหลของอากาศภายในทำให้สามารถลดระยะเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งอาหารลงจาก 12.6 ชม.เป็น 10 ชม. และลดการใช้พลังงานลงคิดเป็นร้อยละ 12 จากนั้นทำการติดตั้งเครื่อง VFD เพื่อควบคุมความเร็วรอบของพัดลมที่เครื่องอีวาพอเรเตอร์ในระหว่างทำการแช่เยือกแข็ง ผลการทดลองพบว่า เมื่อพัดลมหมุนช้าลงจนได้ระดับที่ร้อยละ 75 ระยะเวลาที่ใช้แช่เยือกแข็งจะเพิ่มขึ้น 1 ชม. แต่สามารถลดการใช้พลังงานลงได้ร้อยละ 10 โดยการใช้เครื่อง VFD สามารถลดการใช้พลังงานคิดเป็นมูลค่าเท่ากับ 0.05 ดอลลาร์/กิโลวัตต์-ชั่วโมง

ค่า COP เป็นค่าที่ยอมรับในการประเมินประสิทธิภาพเครื่องแช่เยือกแข็ง แต่ยังไม่สามารถอธิบายหรือแสดงประสิทธิภาพเครื่องแช่เยือกแข็งทั้งระบบได้ เนื่องจากยังมีปัจจัยอื่นๆที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแช่เยือกแข็ง เช่น ประสิทธิภาพของฉนวนกันความร้อน ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ค่าพลังงานที่ถูกใช้โดยระบบสายพานลำเลียง ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากการทำงานของมอเตอร์พัดลม และระบบการไหลของอากาศ เป็นต้น Huan (2003a) ได้ทำการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบสายพานเกลียว (Spiral Freezer) โดยใช้ดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพ 3 ด้าน ได้แก่ ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็ง (η_e) ประสิทธิภาพระบบการไหลของอากาศ (η_f) และค่าสัมประสิทธิ์ของระบบการไหลของอากาศ (k) โดยเฉพาะการประเมินค่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็ง (η_e) เป็นการเปรียบเทียบสัดส่วนระหว่างการดูดกลืนความเย็นของผลิตภัณฑ์ต่อพลังงานทั้งหมดที่เครื่องแช่เยือกแข็งใช้ โดยการใช้พลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็งมาจาก 2 ส่วนด้วยกัน คือ การใช้พลังงานของเครื่องคอมเพรสเซอร์ และ การใช้พลังงานของมอเตอร์พัดลมในระบบทำความเย็นเพื่อลดอุณหภูมิ

ของผลิตภัณฑ์จากอุณหภูมิก่อนเข้าแช่เยือกแข็งจนถึงอุณหภูมิสุดท้ายหลังออกจากเครื่อง ซึ่งหมายถึงความแตกต่างของเอนทาลปีของอาหาร สามารถคำนวณได้ ดังสมการ

$$\eta_e = \frac{G \cdot (H_i - H_o)}{W_c + W_f} \qquad (3)$$

η_e คือ ค่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็ง

G คือ กำลังการผลิตของเครื่อง (kg/h)

H_i คือ เอนทาลปีของอาหารก่อนเข้าเครื่อง (kJ/kg)

H_o คือ เอนทาลปีของอาหารหลังออกจากเครื่อง (kJ/kg)

W_c คือ การใช้พลังงานของคอมเพรสเซอร์ (kW)

W_f คือ การใช้พลังงานของมอเตอร์พัดลม (kW)

จากสมการที่ 3 ชี้ให้เห็นว่าการประเมินความสามารถการใช้พลังงานนั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงกำลังการผลิต (ปริมาณผลิตภัณฑ์) ควบคู่ไปกับการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องจักร เพราะแม้ว่าประสิทธิภาพของเครื่องจักรจะมีค่าสูง (COP สูง) แต่ประสิทธิภาพการใช้พลังงานหรือความเย็นที่เครื่องจักรผลิตได้อาจมีค่าต่ำเมื่อกำลังการผลิตอยู่ในระดับต่ำ ผลที่ได้จะแสดงเป็นค่าร้อยละของค่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็ง ค่า η_e ที่ได้ยิ่งสูงแสดงว่าการใช้พลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็งนั้นมีประสิทธิภาพสูงตามไปด้วย ซึ่งค่านี้สามารถใช้เป็นตัวชี้วัดหรือเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็งต่างชนิดกันได้ สอดคล้องกับการพิจารณาต้นทุนการแช่เยือกแข็งของ Chourot และคณะ (2003) ซึ่งเสนอรายละเอียดการประเมินและการเปรียบเทียบผลกระทบด้านเทคนิคและด้านเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการแช่เยือกแข็งที่แตกต่างกัน 3 แบบ ได้แก่ การแช่เยือกแข็งแบบ Immersion แบบ Air Blast และแบบ Cryomechanical พบว่า การพิจารณาต้นทุนด้านพลังงานของกระบวนการแช่เยือกแข็งประกอบด้วย 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่ 1) ราคาพลังงาน 2) ปริมาณการแช่เยือกแข็งต่อปี 3) ปริมาณพลังงานที่ใช้ไปโดยเครื่องแช่เยือกแข็ง เช่น การใช้พลังงานของคอมเพรสเซอร์ ปั๊ม อุปกรณ์สนับสนุนอื่นๆ ขึ้นกับประเภทของเครื่องแช่เยือกแข็ง และการใช้พลังงานในระยะเริ่มเดินเครื่อง (Starting up) อาจรวมถึงการใช้พลังงานในขณะละลายน้ำแข็ง (Defrost) สำหรับเครื่องแช่เยือกแข็งบางประเภท ทั้งนี้การประเมินการใช้พลังงานของเครื่องคอมเพรสเซอร์จะขึ้นอยู่กับค่า COP ของเครื่องแช่เยือกแข็งนั้นๆ ยิ่งค่า COP มีค่าสูงประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงเมื่อเทียบความสามารถในการทำความเย็นของ

ระบบไหลเวียนสารทำความเย็น ส่วนการใช้พลังงานในขณะเริ่มเดินเครื่อง (Starting up) นั้นจะพิจารณาการใช้พลังงานเพื่อลดอุณหภูมิของเครื่องแช่เยือกแข็งก่อนเริ่มทำการผลิตจริง อย่างไรก็ตามต้นทุนการใช้พลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็งจะเกี่ยวข้องกับกำลังการผลิตที่ทำได้เป็นสำคัญ ส่วนการใช้พลังงานในขณะละลายน้ำแข็ง (Defrost) นั้น Guilpart (1991 อ้างโดย Chourot และคณะ, 2003) รายงานว่ามีค่าการใช้พลังงานอยู่ระหว่างร้อยละ 20 – 25 เมื่อเทียบกับการใช้พลังงานของทั้งระบบ

5. หลักการอนุรักษ์พลังงาน

ความหมายของการอนุรักษ์พลังงานตามพระราชบัญญัติการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2527 หมายถึง การผลิตและการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและประหยัด ทำได้โดยการใช้พลังงานในอุปกรณ์ต่างๆอย่างคุ้มค่าโดยไม่ให้มีผลเสียต่อกิจกรรมการผลิต วัชระ มั่งวิทิตกุล (2548) ได้ให้คำนิยามการประหยัดพลังงาน หมายถึง การลดค่าใช้จ่ายพลังงานมากกว่าที่จะลดระดับการใช้พลังงาน เนื่องจากการลดค่าใช้จ่ายพลังงาน บางครั้งอาจจะไม่ได้ลดปริมาณการใช้พลังงาน ทั้งนี้ต้องไม่ทำให้ผลผลิตเสียหายและยังคงรักษาความสะดวกสบายของผู้ใช้ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม (Energy Optimization) เช่น การเปลี่ยนชนิดเชื้อเพลิงจากชนิดที่มีราคาแพงเป็นชนิดเชื้อเพลิงที่มีราคาถูก หรือการจัดการโหลดเพื่อหลีกเลี่ยงช่วงเวลาที่มีอัตราค่าไฟฟ้าแพง จะช่วยลดค่าใช้จ่ายพลังงาน แต่ยังคงใช้พลังงานเท่าเดิม การประหยัดพลังงานจะสัมฤทธิ์ผลหรือไม่ขึ้นกับสิ่งสำคัญ 2 ประการคือ เทคนิคการประหยัดพลังงานและกระบวนการประหยัดพลังงาน

ก) เทคนิคการประหยัดพลังงาน ได้แก่การนำอุปกรณ์ ระบบและวิธีการที่ช่วยในการประหยัดพลังงานมาใช้ในการดำเนินกิจกรรม

(1) อุปกรณ์ที่ช่วยในการประหยัดพลังงาน คือ อุปกรณ์หรือเครื่องจักรประสิทธิภาพสูงและอุปกรณ์ที่ติดตั้งเพื่อควบคุมการใช้พลังงาน เช่น อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์

(2) ระบบที่ช่วยในการประหยัดพลังงาน คือ ระบบควบคุมการใช้พลังงาน เช่น ระบบควบคุมอัตโนมัติ ระบบกักเก็บความเย็น เป็นต้น

(3) วิธีการช่วยในการประหยัดพลังงาน คือ การใช้อุปกรณ์อย่างมีประสิทธิภาพและการออกแบบเพื่อการประหยัดพลังงาน เช่น การปิดอุปกรณ์และเครื่องจักรเมื่อเลิกใช้งาน

ข) กระบวนการประหยัดพลังงาน คือขั้นตอนในการนำเทคนิคการประหยัดพลังงานไปใช้ กระบวนการประหยัดพลังงานประกอบด้วย

(1) วิเคราะห์ค่าใช้จ่ายพลังงาน

(2) ตรวจสอบการใช้พลังงาน ตรวจสอบลักษณะการใช้พลังงานของอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับใช้วิเคราะห์ศักยภาพในการประหยัดพลังงาน

(3) วิเคราะห์ศักยภาพในการประหยัดพลังงาน เป็นการเลือกใช้เทคนิคการประหยัดพลังงานที่เหมาะสม

(4) วิเคราะห์การเงิน ประเมินว่าเทคนิคประหยัดพลังงานมีผลตอบแทนทางการเงินคุ้มค่าต่อการลงทุนหรือไม่

(5) กำหนดเป้าหมาย แผนและการลงทุน นำศักยภาพในการประหยัดของเทคนิคการประหยัดพลังงานว่าได้ตามเป้าหมาย หลังจากนั้นนำเป้าหมายมาจัดทำแผนและเลือกวิธีการลงทุนให้เหมาะสมต่อองค์กร แล้วจึงดำเนินการประหยัดพลังงาน

(6) ติดตามและประเมินผลหลังจากดำเนินการประหยัดพลังงาน ทำการติดตามและประเมินผลประหยัดว่าได้ตามเป้าหมายหรือไม่ และยังใช้สำหรับเป็นข้อมูลในการแก้ไขปรับปรุงกระบวนการประหยัดพลังงานให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นในอนาคต

6. พลังงานไฟฟ้า

พลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญอย่างยิ่งต่อการดำเนินชีวิตและการดำเนินกิจกรรมต่างๆ การผลิตพลังงานไฟฟ้าให้เพียงพอกับความต้องการเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง ในแต่ละปีประเทศไทยสูญเสียเงินตราให้กับต่างประเทศเป็นจำนวนมากในการจัดหาเชื้อเพลิงและพลังงานมาใช้ในการผลิตไฟฟ้า ดังนั้นการประหยัดพลังงานยังคงเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นที่ทุกฝ่ายควรให้ความร่วมมือ ศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับพลังงานไฟฟ้า มีดังนี้

พลังงานไฟฟ้า (Energy) หมายถึง กำลังการผลิตควบคู่กับระยะเวลาที่ทำการผลิต หรือในแง่ของการใช้ไฟฟ้า หมายถึง ผลของกำลังไฟฟ้าที่ทำงานไปเป็นระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งคือความสิ้นเปลืองไฟฟ้าควบคู่กับระยะเวลาในการทำงาน มีหน่วยเป็นกิโลวัตต์ – ชั่วโมง (kilowatt – hour: kWh)

กำลังไฟฟ้าหรือพลังไฟฟ้า (Power or Demand) หมายถึง ความสามารถของไฟฟ้าที่จะทำงานได้หรือขนาดของกำลังไฟฟ้าหรือความสิ้นเปลืองไฟฟ้าที่เครื่องใช้ไฟฟ้าใช้ในการ

ทำงานในช่วงเวลาเท่ากัน มีหน่วยเป็นวัตต์ (Watt: W) เครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีวัตต์สูงจะสิ้นเปลืองไฟฟ้ามากกว่าเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีวัตต์ต่ำ

พลังงานไฟฟ้าปรากฏ หมายถึง พลังงานไฟฟ้าที่ระบบไฟฟ้าจ่ายให้แก่อุปกรณ์ไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโวลท์แอมป์ (VA) หรือกิโลโวลท์แอมป์ (kVA)

พลังงานไฟฟ้าเสมือน หมายถึง พลังงานไฟฟ้าที่อุปกรณ์หรือเครื่องจักรชนิดเหนี่ยวนำ (Inductive load) ไม่ได้ใช้ในการให้กำลังงานแต่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็ก เช่น พลังไฟฟ้าไหลผ่านแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า หรือผ่านช่องว่างอากาศ (Air gap) ของมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ เป็นต้น มีหน่วยเป็น วาร์ (VAR) หรือกิโลวาร์ (kVAR)

แรงดันไฟฟ้า หมายถึง ความสามารถในการส่งผ่านกระแสไฟฟ้าโดยสายส่งมีหน่วยเป็นโวลต์ (Volt: V)

ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานไฟฟ้าและพลังไฟฟ้าสามารถแสดงด้วยสมการดังต่อไปนี้

พลังงานไฟฟ้า = กำลังไฟฟ้า x จำนวนชั่วโมงที่อุปกรณ์ไฟฟ้าทำงาน

ดังนั้น กิโลวัตต์ – ชั่วโมง หมายถึง พลังงานไฟฟ้าที่อุปกรณ์ไฟฟ้าใช้ไปในการทำงานได้ 1 กิโลวัตต์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

7. ดัชนีการใช้พลังงาน

ดัชนีการใช้พลังงาน (Energy Use Index: EUI) หมายถึง อัตราส่วนของพลังงานที่ใช้กับปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการใช้พลังงาน เป็นการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายพลังงาน บอกให้ทราบถึงลักษณะการใช้พลังงานในแต่ละเดือนหรือปีว่ามีการใช้พลังงานที่มีความสูงหรือต่ำจนผิดปกติหรือไม่ ปริมาณการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นอาจมีสาเหตุจากปริมาณการผลิตที่เพิ่มขึ้นหรือเครื่องจักรทำงานผิดพลาด โดยสามารถใช้เปรียบเทียบการใช้พลังงานในอดีตกับปัจจุบัน เปรียบเทียบการใช้พลังงานเบื้องต้นกับกิจกรรมประเภทเดียวกัน และใช้ประเมินศักยภาพการประหยัดพลังงานอีกทางหนึ่งด้วย ดัชนีการใช้พลังงานสามารถคำนวณได้จากสมการ

ดัชนีการใช้พลังงาน = พลังงานที่ใช้ (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)/ปริมาณผลผลิตที่ได้ (ตันหรือชิ้น)

ในการบริหารและดำเนินธุรกิจสิ่งที่เป็นหัวใจสำคัญคือ การรักษาความสมดุลของกระบวนการผลิตทั้งหมด การบริหารจัดการให้กิจกรรมการผลิตดำเนินไปได้สะดวก มีคุณภาพสม่ำเสมอ และมีการพัฒนาอยู่ตลอดเวลา สภาพการทำงานภายในโรงงานที่ดีหรือไม่ดีจะเห็นได้จากสภาพการใช้พลังงาน หากมีการเปลี่ยนแปลงดัชนีการใช้พลังงานจะชี้ให้เห็นถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานในโรงงาน รวมถึงประสิทธิภาพการบริหารกิจการทางด้านการประหยัดพลังงาน จึงจำเป็นที่ต้องมีการตรวจวัดสภาพการใช้พลังงาน โดยมีมาตรการหรือแนวทางในการปรับปรุงดังต่อไปนี้ คือ ปรับปรุงการทำงานหรืออัตราการเดินเครื่องจักรในแต่ละกระบวนการผลิต ลดต้นทุนพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยผลิตลง เพิ่มโหลดแฟกเตอร์ให้ดีขึ้น ใช้อุปกรณ์เครื่องจักรอย่างมีประสิทธิภาพ กำหนดมาตรฐานการทำงาน ประเมินผลที่ได้จากการปรับปรุง วางมาตรฐานบำรุงรักษาด้วยการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิ ลดการสูญเปล่าโดยการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า และทำการวัดความสว่างและอุณหภูมิเพื่อปรับปรุงสภาพแวดล้อมในการทำงาน (โมะโตะกิ มัทซึโอะ, 2525)

8. เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน

จากการประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็ง Huan (2003a) เน้นให้มีการพิจารณากำลังการผลิตหรือปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เครื่องแช่เยือกแข็งทำได้ควบคู่กับการใช้พลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็ง จึงมีความเป็นไปได้ที่การใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นในขั้นตอนการแช่เยือกแข็งจะมีสาเหตุมาจากการสูญเสียในระหว่างการดำเนินงาน สอดคล้องกับหลักการอนุรักษ์พลังงานของ วัชระ มั่งวิทิตกุล (2548) ซึ่งให้ความสำคัญกับเทคนิคการประหยัดพลังงานควบคู่กับกระบวนการประหยัดพลังงาน หรือเป็นการให้ความสำคัญกับการไปประยุกต์ใช้เทียบเท่ากับเทคนิคที่จะนำไปใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด ทั้งนี้การใช้หลักการเปรียบเทียบการใช้พลังงานในอดีตกับปัจจุบันหรือการประเมินดัชนีการใช้พลังงานเพื่อหาความผิดปกติที่เกิดขึ้น ซึ่งความผิดปกติอาจมาจากการใช้พลังงานที่ผิดปกติไปจากเดิมของเครื่องจักรหรืออาจมาจากการบริหารการผลิตที่ผิดพลาดทำให้ต้นทุนแช่เยือกแข็งเพิ่มสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่านอกจากปัญหาจะเกิดมาจากตัวเครื่องจักรแล้วยังสามารถเกิดจากการดำเนินงานของผู้ปฏิบัติงานได้เช่นเดียวกันกรณีดังกล่าวจึงจัดเป็นปัญหาด้านการจัดการการผลิต เกษฒพัฒน์ พานิชลือชาชัย (2552) ให้เหตุผลว่าการปฏิบัติงานไม่ว่าในตำแหน่งหน้าที่ใดจะต้องเผชิญกับปัญหาและสภาวการณ์ที่ต้องตัดสินใจอยู่ตลอดเวลา การแก้ไขปัญหาและการตัดสินใจจำเป็นต้องมีหลักเกณฑ์และวิธีการที่เป็นระบบ เริ่มตั้งแต่การกำหนดปัญหา การแยกแยะและค้นหาสาเหตุ การตั้งเป้าหมายเพื่อดำเนินการแก้ไขโดยใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์แก้ไขหารูปแบบต่างๆ รวมทั้งวิธีการวัดผลหลังแก้ไขและการตั้งมาตรฐาน

เพื่อป้องกันการเกิดปัญหาซ้ำเติมขึ้นอีก เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาที่มีความนิยมแพร่หลายอย่างหนึ่ง คือเทคนิคการวิเคราะห์ทำไม – ทำไม (why – why analysis) ดังนั้นการวิเคราะห์สาเหตุที่แท้จริงของปัญหาเพื่อหามาตรการแก้ไขและไม่ให้กลับมาเกิดซ้ำอีกในภายหลังจึงเป็นเทคนิคที่มีความจำเป็น

8.1 การวิเคราะห์ทำไม – ทำไม (why – why analysis)

การวิเคราะห์ทำไม – ทำไม เป็นเทคนิคการวิเคราะห์หาปัจจัยที่เป็นต้นเหตุให้เกิดปรากฏการณ์อย่างเป็นระบบ มีขั้นตอนไม่ให้เกิดการตกหล่น เป็นเครื่องมือที่นิยมใช้กันมากในการวิเคราะห์หาสาเหตุรากเหง้าของปัญหา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่เป็นต้นเหตุของปรากฏการณ์หรือปัญหาที่เกิดขึ้น ทำให้พบต้นตอของปัญหาหรือรากเหง้าที่แท้จริง เพื่อนำไปสู่การแก้ไขและป้องกันการเกิดซ้ำต่อไป หากสามารถค้นพบสาเหตุรากเหง้าและกำจัดได้แล้ว ปัญหาเดิมจะไม่เกิดซ้ำอีก แต่หากปัญหาเดิมเกิดซ้ำ แสดงว่าการวิเคราะห์ก่อนหน้าเป็นการวิเคราะห์ผิดหรืออาจมีบางสาเหตุที่ตกหล่นไป อาจจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์ใหม่ (สมชัย อัครทิวา, 2549) ทั้งนี้การวิเคราะห์ทำไม – ทำไม ต้องอาศัยหลักการของ 5 จริง (5 Gen) ซึ่งประกอบด้วย สถานที่จริง (Genba) สภาพของจริง (Genbutsu) สถานการณ์จริง (Genjitsu) หลักการทางทฤษฎี (Genri) และกฎเกณฑ์ (Gensoku) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ เพราะหลักการของ 5 Gen ทำให้การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาผ่านการวิเคราะห์ทำไม – ทำไมได้ถูกจุด ลักษณะการใช้งานของแต่ละ Gen เพื่อให้เข้าถึงการแก้ไขปัญหาและการปรับปรุง หากเป็นการแก้ไขปัญหาจะใช้เพียง 3 Gen แรก คือสัมผัสพื้นที่จริง สภาพของจริง และสถานการณ์จริง ซึ่ง 3 Gen นี้เป็นการตรวจหาความผิดปกติของการทำงาน ส่วนการปรับปรุงนั้นจะใช้ 2 Gen ที่เหลือ คือหลักการทางทฤษฎี และกฎเกณฑ์ มาอธิบายถึงสาเหตุที่เป็นไปได้ของปัญหาและต้องทำการพิสูจน์อีกครั้งเพื่อยืนยันว่าเป็นสาเหตุของปัญหาที่แท้จริง ขั้นตอนการวิเคราะห์ทำไม – ทำไม โดย วันรัตน์ จันทกิจ (2547) ได้สรุปขั้นตอนไว้ดังนี้

(1) จัดลำดับความสำคัญของหัวข้อที่ต้องการปรับปรุง ผ่านแผนภาพพาเรโต (Pareto) ในขั้นตอนนี้เป็นการเลือกสาเหตุใหญ่ๆมาทำการปรับปรุง โดยการเลือกปัญหาจากค่าเป้าหมายขององค์กร

(2) เลือกหัวข้อที่จะทำการปรับปรุงหรือแก้ไข หลังจากได้สาเหตุหลักที่จะนำมาแก้ไขแล้วโดยให้เขียนปัญหาให้กระชับและเข้าใจง่าย

(3) จัดตั้งทีมงานที่เกี่ยวข้องในส่วนนี้ อาจเป็นผู้เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงโดยตรง มาทำการวิเคราะห์หาสาเหตุหรือรวมเอาพนักงานระดับปฏิบัติการร่วมด้วย เนื่องจากพนักงานระดับปฏิบัติการเป็นผู้ที่เข้าใจสถานการณ์ดีที่สุด

(4) สอบถามสถานการณ์เบื้องต้น (ตรวจหาความผิดปกติ) เป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญมาก หากไม่มีการสอบถามสถานการณ์ก่อนหน้าจะทำให้การระบุประเด็นปัญหาเกิดความผิดพลาด ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องสอบถามผู้เกี่ยวข้องเพื่อทราบสถานการณ์ก่อน

(5) การระดมสมอง เป็นการระดมความคิดของทีมงานที่เกี่ยวข้อง และควรมีผู้นำที่ทำหน้าที่ในการควบคุมการระดมสมองให้อยู่ในแนวทางการแก้ไขปัญหา

(6) ตรวจสอบความถูกต้องผ่าน 5 Gen หลังจากระดมสมองและกระจายคำถามว่า ทำไม ออกมาได้แล้ว ในเบื้องต้นให้ทีมงานไปดูสถานการณ์จริงและวิเคราะห์ผ่าน 3 Gen แรกก่อน เพื่อตรวจสอบความผิดปกติโดยเปรียบเทียบกับมาตรฐาน หากพบว่า ทุกโอกาสที่เป็นไปได้อยู่ในมาตรฐานให้ใช้อีก 2 Gen ที่เหลือ หมายความว่าการแก้ไขนั้นไม่เพียงพอ จำเป็นต้องได้รับการปรับปรุง

(7) จัดทำมาตรการตอบโต้ หลังจากพบสาเหตุรากเหง้าแล้ว ให้หามาตรการตอบโต้โดยเน้นให้อยู่ในรูปแบบ Visual Control ซึ่งประกอบไปด้วย ผู้รับผิดชอบ ระยะเวลา การปรับปรุงใดก็ตามให้ใช้วิธีที่ง่าย ค่าใช้จ่ายต่ำ และประสิทธิภาพสูง

(8) ตรวจสอบความสำเร็จของงาน เมื่อทำการแก้ไขหรือปรับปรุงแล้ว หลังจากนั้นให้ทำการติดตามผลว่าปัญหาดังกล่าวได้เกิดซ้ำหรือไม่ หรือลดน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ผ่านรูปแบบของกราฟ หรือการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ หากพบว่า ปัญหาไม่ได้ลดน้อยลงให้กลับไปทำการวิเคราะห์ใหม่

(9) จัดทำมาตรฐาน หากพบว่ามาตรการตอบโต้นั้นได้ผลให้จัดทำมาตรฐานขึ้นเพื่อรักษาระดับคุณภาพไว้

การเขียนโครงสร้างการวิเคราะห์ทำไม – ทำไม ในด้านซ้ายสุดจะเป็นปรากฏการณ์หรือส่วนของปัญหาที่จะทำการแก้ไข จากนั้นเริ่มตั้งคำถามว่า “ทำไม” ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งพบสาเหตุรากเหง้าของปัญหา โดยทั่วไปแล้วหากถามคำถามว่าทำไมประมาณ 3 – 5 ครั้ง ก็จะได้คำตอบของคำถามนั้น

8.2 เครื่องมือคุณภาพ 7 อย่าง (7 QC Tools)

เครื่องมือคุณภาพ คือเครื่องมือสำหรับนักคิดที่ใช้ในการแก้ปัญหาทางด้านคุณภาพ ในกระบวนการทำงาน โดยสามารถช่วยศึกษาสภาพทั่วไปของปัญหา การเลือกปัญหา การสำรวจ

สภาพปัจจุบันของปัญหา การค้นหา และการวิเคราะห์สาเหตุแห่งปัญหาที่แท้จริง เพื่อให้สามารถแก้ไขได้อย่างถูกต้อง ตลอดจนช่วยในการจัดทำมาตรฐานและควบคุมติดตามผลการดำเนินการต่างๆ เครื่องมือคุณภาพสำหรับนักคิดมีอยู่หลายชนิดแต่จะยกตัวอย่างบางชนิดที่ช่วยให้เกิดความสามารถในการคิดวิเคราะห์ การวางแผน และการประเมินผล เพื่อให้เกิดการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง สถาบันเพิ่มผลผลิตแห่งชาติ (2550) ได้สรุปไว้ดังนี้

(1) แผ่นตรวจสอบ (Check Sheet) คือ แบบฟอร์มที่มีการออกแบบช่องว่างต่างๆไว้เรียบร้อย เพื่อใช้ในการบันทึกข้อมูลได้ง่ายและสะดวก ถูกต้อง ไม่ยุ่งยาก และในการออกแบบแผ่นตรวจสอบทุกครั้งต้องมีวัตถุประสงค์ที่ชัดเจน

(2) กราฟ (Graph) คือ แผนภาพที่แสดงถึงตัวเลขหรือข้อมูลทางสถิติที่ใช้เมื่อต้องการนำเสนอข้อมูล และวิเคราะห์ผลของข้อมูลดังกล่าว เพื่อทำให้ง่ายและรวดเร็วต่อการทำความเข้าใจ

(3) แผนผังพาเรโต (Pareto Diagram) เป็นแผนภูมิที่ใช้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุของความบกพร่องกับปริมาณที่เกิดขึ้น โดยมีที่มาจาก พาเรโต นักเศรษฐศาสตร์ชาวอิตาเลียน ผู้ค้นพบหลักการ 80-20 ที่สรุปได้ว่า “ข้อมูลที่มีความสำคัญมากจะมีจำนวนเพียงเล็กน้อย และข้อมูลที่มีความสำคัญเพียงเล็กน้อยจะมีจำนวนมาก”

(4) แผนผังสาเหตุและผลหรือแผนผังก้างปลา (Cause and Effect Diagram) คือ แผนผังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะของปัญหา (ผล) กับปัจจัยต่างๆ (สาเหตุ) ที่เกี่ยวข้อง

(5) แผนผังการกระจาย (Scatter Diagram) คือ แผนผังที่ใช้แสดงค่าของข้อมูลที่เกิดจากความสัมพันธ์ของ 2 ตัวแปร ว่ามีแนวโน้มไปในทางใด เพื่อใช้หาความสัมพันธ์ที่แท้จริง

(6) แผนภูมิควบคุม (Control Chart) คือ แผนภูมิที่มีการเขียนขอบเขตที่ยอมรับได้เพื่อนำไปเป็นแนวทางในการควบคุมกระบวนการโดยการติดตามและตรวจจับข้อมูลที่อยู่นอกขอบเขต

(7) ฮีสโตแกรม (Histogram) เป็นกราฟแท่งที่ใช้สรุปการอนุมาน (Inference) ข้อมูลเพื่อใช้สรุปสถานภาพของกลุ่มข้อมูลนั้น

8.3 การพัฒนาการทำงานที่ดีกว่า (รัชต์วรรณ กาญจนปัญญาคม, 2552)

การพัฒนาการทำงานที่ดีกว่าอาศัย 4 หลักการเรียกสั้นๆ ว่า ECRS เป็นหลักการที่ใช้เพื่อพัฒนาวิธีการทำงานให้เหมาะสมที่สุดในเชิงปฏิบัติ เพื่อให้เกิดความประหยัดและมีประสิทธิภาพในการทำงาน โดยพิจารณาสิ่งแวดล้อมทั้งหมดที่มีอยู่ ซึ่งประกอบด้วยหลักการต่อไปนี้

(1) กำจัดขั้นตอนการทำงานบางส่วนที่ไม่จำเป็น (Eliminate) เพื่อลดการสูญเปล่าของแรงงาน เวลา วัสดุ หรือต้นทุนในการทำงานนั้นๆ เช่น หาเครื่องมือมาช่วยลดขั้นตอนการทำงานนั้น หรือตัดขั้นตอนการทำงานที่ไม่จำเป็นออกไป

(2) รวมขั้นตอนการทำงานที่ใกล้เคียงกันเป็นขั้นตอนเดียว (Combine) ทำหลังจากที่กำจัดขั้นตอนการทำงานที่ไม่จำเป็นออกไปแล้ว เช่น การรวมขั้นตอนการทำงานให้เป็นขั้นตอนเดียวกัน โดยปรับลดขั้นตอนการทำงานย่อยที่ไม่จำเป็นออกไป

(3) จัดลำดับขั้นตอนของงานใหม่ (Rearrange) เมื่อมีการปรับเปลี่ยนขั้นตอนการทำงานเพื่อรองรับการผลิตที่เพิ่มขึ้นหรือสิ่งแวดล้อมในการทำงานที่เปลี่ยนไป ลำดับการทำงานปัจจุบันอาจไม่เหมาะสมที่สุดอีกต่อไป จึงจำเป็นต้องมีการปรับเปลี่ยนลำดับการทำงานใหม่ให้เมาะสม เช่น จัดคนให้ทำงานตามความถนัด จัดลำดับงานให้ถูกต้องตามเหตุผล

(4) ปรับปรุงขั้นตอนการทำงานให้ง่ายขึ้น (Simplify) เมื่อมีการกำจัดขั้นตอนที่ไม่จำเป็นออกไป รวมขั้นตอนบางขั้นตอนเข้าด้วยกันรวมถึงการจัดลำดับการทำงานใหม่ สุดท้ายจึงเหลือขั้นตอนที่จำเป็นต้องทำ ดังนั้นการปรับปรุงในช่วงท้ายจึงเป็นการหาแนวทางปฏิบัติที่ง่ายขึ้น เร็วขึ้น หรือประหยัดเวลา

ปิยะบุตร วานิชพงษ์พันธุ์ และคณะ (2551) ได้ทำการปรับปรุงสายการผลิตท่อแอร์รถยนต์ โดยศึกษาการทำงานและการปรับปรุงการทำงานด้วยเทคนิค ECRS จากนั้นจึงทำการออกแบบผังโรงงาน โดยภายหลังการวิเคราะห์ปัญหาด้วยแผนผังก้างปลา พบว่า เกิดปัญหาในด้านระยะทางการขนส่งที่ยาวเกินไปและสายการผลิตมีการทำงานไม่ต่อเนื่อง จึงได้เสนอวิธีการปรับปรุงการทำงานเพื่อให้มีการเคลื่อนย้ายน้อยที่สุดและมีการเคลื่อนย้ายวัสดุทางเดียวโดยการ 1) รวมแผนกตัดของแผนก Ware House เข้ากับแผนกตัดของแผนก Store จัดเป็นการกำจัดขั้นตอนการทำงานที่ไม่จำเป็น (Eliminate) และรวมขั้นตอนการทำงานที่ใกล้เคียงกันเป็นขั้นตอนเดียว (Combine) 2) เปลี่ยนตำแหน่งแผนกดัด แผนกเชื่อม แผนกทดสอบรอยรั่ว และแผนกบรรจุใหม่ เป็นการจัดลำดับการทำงานใหม่ (Rearrange) ตามหลักการ ECRS หลังจากทำการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาแล้ว พบว่า เวลา ระยะทาง ผลผลิต และงานรอผลิต มีการเพิ่มขึ้นและลดลงจากวิธีก่อนและหลังการปรับปรุง คือ สามารถลดเวลาในการผลิตลงได้ร้อยละ 53 ระยะทางในสายการผลิตลดลงร้อยละ 72 ผลผลิตเพิ่มขึ้นร้อยละ 20.84 และงานรอผลิตลดลงคิดเป็นร้อยละ 41.43

วัตถุประสงค์

(1) เพื่อวิเคราะห์วิธีการทำงานในขั้นตอนการแช่เยือกแข็งและประเมินประสิทธิภาพของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์ (Tunnel Freezer) ของโรงงานกรณีศึกษา

(2) เพื่อวิเคราะห์ดัชนีการใช้พลังงานและลดปริมาณการใช้พลังงานในขั้นตอนการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์กรณีศึกษา

บทที่ 2

วิธีการวิจัย

1. รวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นของการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์แปรรูปจากซูริมิของโรงงานกรณีศึกษาจากบันทึกการตรวจสอบการใช้พลังงานในปี 2554 เพื่อกำหนดเป้าหมายในการดำเนินงานวิจัย

2. สำรวจข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับสภาพการทำงานปัจจุบันในขั้นตอนการแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์ของโรงงานกรณีศึกษาโดยการสังเกตและบันทึกข้อมูล ในช่วงเดือนกันยายน 2554 – ตุลาคม 2554 ประกอบด้วย

2.1 สำรวจขั้นตอนการทำงานในการแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์ เริ่มตั้งแต่การตัดสินใจเลือกผลิตภัณฑ์เพื่อทำการแช่เยือกแข็งจนถึงการชั่งและการบรรจุด้วยเครื่องชั่งอัตโนมัติก่อนนำเข้าเก็บในคลังสินค้า

2.2 วัดกำลังการผลิตโดยบันทึกปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งเปรียบเทียบกับเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็ง ทั้งนี้ได้กำหนดชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่ผ่านการบรรจุ (Individual products) 5 ชนิด ได้แก่ เต้าหู้ปลา หมึกหลอด (ชิกูวา) ปลาม้วน (โอโบโร่) ลูกชิ้นปลาไส้ไข่ ลูกชิ้นปลา และผลิตภัณฑ์ที่บรรจุสุญญากาศ (Vacuum packed products) ได้แก่ เต้าหู้ปลา ลูกชิ้นปลา ซาลาเปาไส้หมึก ซึ่งมีขนาดบรรจุ 200, 300 และ1,000 กรัม จำนวนการเก็บข้อมูลแยกตามชนิดของแต่ผลิตภัณฑ์ชนิดละ 10 ซ้ำ

2.3 สำรวจและระบุส่วนประกอบหลักและรูปร่างของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์รวมถึงการพิจารณาอัตราการใช้พลังงานโดยบันทึกการใช้พลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็งทุกชั่วโมงจำนวน 15 ซ้ำ ทั้งนี้แบ่งการใช้พลังงานออกเป็น 3 ส่วนตามวัตถุประสงค์การใช้งาน คือ การใช้พลังงานในระหว่างการลดอุณหภูมิก่อนเริ่มแช่เยือกแข็ง การใช้พลังงานในระหว่างการแช่เยือกแข็ง (รวมช่วงเวลาที่มีการทำงานของเครื่องเปล่า) และการใช้พลังงานในระหว่างละลายน้ำแข็ง เครื่องมือที่ใช้ในการวัดอัตราการใช้พลังงานคือวัตต์ฮาวมิเตอร์ (Watt-hour meter) ที่ติดตั้งไว้เพื่อวัดการใช้พลังงานเฉพาะเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์

2.4 ประเมินค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพ (COP) ของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์ โดยการบันทึกค่าความดันของระบบขณะเดินเครื่องซึ่งสามารถวัดได้โดยใช้อุปกรณ์วัดความดัน (เกจ

มิเตอร์) ทำการตรวจวัดทุกหนึ่งชั่วโมงจนครบ 5 ชั่วโมงจำนวน 3 ซ้ำ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของค่า COP และทำการตรวจวัดซ้ำอีกเดือนละครั้งเพื่อดูความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเป็นระยะเวลา 3 เดือน เมื่อทราบค่าความดันที่วัดได้แล้วนำมาหาค่าเอนทาลปี ณ จุดต่างๆของระบบโดยใช้แผนภูมิความดัน-เอนทาลปีของสารทำความเย็นชนิด R22 จากนั้นนำค่าเอนทาลปีที่ได้ไปคำนวณหาค่า COP ของระบบโดยใช้สมการ

$$\mathrm{COP} = \frac{\mathrm{Q}}{W}$$

เมื่อ COP = ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพของเครื่องแช่เยือกแข็ง

Q = ปริมาณความเย็นที่ระบบผลิตได้ (kj)

W = พลังงานที่ใช้ในระบบทำความเย็น (kj)

2.5 ประเมินค่าดัชนีการใช้พลังงาน (EUI) ของการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์ โดยการตรวจสอบบันทึกปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและปริมาณผลผลิตที่ผลิตได้ในแต่ละเดือนของปี พ.ศ. 2554 ของฝ่ายอนุรักษ์พลังงาน จากนั้นนำมาคำนวณค่า EUI จากพลังงานที่ใช้เทียบกับปริมาณผลผลิตที่ได้ ตามสมการ

ดัชนีการใช้พลังงาน = พลังงานที่ใช้ (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)/ปริมาณผลผลิตที่ได้ (ตันหรือชิ้น)

3. วิเคราะห์ข้อมูลการใช้พลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็ง

วิเคราะห์สาเหตุของปัญหาการใช้พลังงานในขั้นตอนการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์ที่มีค่าสูงกว่าค่า KPI ที่โรงงานกำหนด โดยใช้แผนงานทำไม-ทำไม (why-why analysis) และศึกษาการทำงานเพื่อหาแนวทางการปรับปรุงขั้นตอนการทำงานและควบคุมการใช้พลังงานให้คุ้มค่าไม่เกิดการสูญเปล่า

4. เสนอแนวทางการปรับปรุงขั้นตอนการแช่เยือกแข็งเพื่อการประหยัดพลังงาน ซึ่งประกอบด้วยวิธีการต่างๆ ดังนี้

4.1 การลดปริมาณการใช้พลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็ง

จากการวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้แผนงานทำไม – ทำไม พบว่า สาเหตุหลักที่ทำให้เครื่องแช่เยือกแข็งใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเกิดจากความสูญเปล่าในการทำงาน จึงได้นำเสนอแนวทางการประหยัดพลังงานและการประยุกต์ใช้ ดังนี้

(1) ปรับปรุงเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาอุณหภูมิภายในอุโมงค์ก่อนเริ่มแช่เยือกแข็ง เพื่อลดระยะเวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิภายในอุโมงค์แช่เยือกแข็ง โดยการบันทึกการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในอุโมงค์จากจอแสดงผลของระบบทำความเย็นทั้ง 4 ชุดเมื่อผลิตภัณฑ์เข้าและออกจากอุโมงค์เพื่อใช้พิจารณากำหนดค่าอุณหภูมิเป้าหมายใหม่

(2) ปิดการทำงานของระบบทำความเย็นในขณะเกิดการทำงานของเครื่องเปล่า และการใช้พลังงานในระหว่างหยุดสายพานเครื่องในขณะที่ผลิตภัณฑ์ค้างอยู่ภายในเครื่อง โดยบันทึกการทำงานประจำวันเพื่อระบุค่าเฉลี่ยของการทำงานของเครื่องเปล่า จากนั้นใช้การพยากรณ์การทำงานของเครื่องเปล่าล่วงหน้าและกำหนดให้มีการปิดระบบทำความเย็นเมื่อเครื่องแช่เยือกแข็งต้องหยุดสายพานการผลิต

(3) ปรับปรุงลำดับการปิดการทำงานของเครื่องคอมเพรสเซอร์ เพื่อลดการใช้พลังงานในขณะแช่เยือกแข็ง โดยกำหนดให้การปิดระบบทำความเย็นเป็นลำดับก่อนทำการแช่เยือกแข็งเสร็จ โดยลำดับการปิดการทำงานจะพยากรณ์จากระยะเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์ จากนั้นทำการวัดผลการประหยัดพลังงานที่ได้จากการประยุกต์ใช้

4.2 ควบคุมการใช้พลังงาน

เพื่อให้แนวทางการควบคุมการใช้พลังงานในข้อ 4.1 มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น จึงได้นำเสนอแนวทางการควบคุมการใช้พลังงานให้สอดคล้องกับการลดใช้พลังงานและสามารถดำเนินการได้อย่างยั่งยืน ดังนี้

(1) ปรับปรุงวิธีการบันทึกข้อมูลการแช่เยือกแข็งและการคำนวณกำลังการผลิต โดยการเพิ่มรายละเอียดการบันทึกลงในแบบฟอร์มบันทึกการแช่เยือกแข็งประจำวันให้มีการบันทึกช่วงเวลาที่มีการเปิดเครื่องแช่เยือกแข็งและเวลาปิดเครื่องลงในแบบฟอร์ม พร้อมทั้งกำหนดให้นำช่วงเวลาทั้งหมดที่เครื่องแช่เยือกแข็งทำงานมาคำนวณกำลังการผลิต จากนั้นจึงทำการกำหนดค่าเป้าหมายกำลังการผลิตใหม่โดยอ้างอิงจากเป้าหมายของดัชนีการใช้พลังงานที่โรงงานกำหนดขึ้น

(2) ปรับปรุงช่วงเวลาการทำงานของพนักงานประจำเครื่องแช่เยือกแข็ง เพื่อลดชั่วโมงการทำงานรวมของเครื่องแช่เยือกแข็ง โดยการบันทึกช่วงเวลาที่เครื่องแช่เยือกแข็งทำงานเปรียบเทียบกับช่วงเวลาที่พนักงานทำงาน พบความไม่สอดคล้องกัน จึงใช้แนวทางการเปิดเครื่องให้ช้าตามแนวทางการประหยัดพลังงานในระบบทำความเย็นของสถาบันสิ่งแวดล้อมไทย

(3) ปรับปรุงขั้นตอนการทำงาน โดยใช้การจัดลำดับการทำงานใหม่ (Rearrange) ตามเทคนิค ECRS (Eliminate, Combine, Rearrange, Simplify) เพื่อป้องกันการทำงานของเครื่องเปล่าและป้องกันการเปิดเครื่องแช่เยือกแข็งเร็วเกินไป

5. ประยุกต์ใช้ตามแนวทางการประหยัดพลังงานในข้อ 4 โดยการเปรียบเทียบผลก่อนและหลังปรับปรุง

6. สรุปผลการศึกษา ปัญหา อุปสรรค และข้อเสนอแนะในการปฏิบัติงาน

บทที่ 3

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ข้อมูลเบื้องต้นการใช้พลังงานไฟฟ้าของโรงงานกรณีศึกษา

โรงงานกรณีศึกษาเป็นบริษัทผู้ผลิตและจำหน่ายผลิตภัณฑ์แปรรูปจากซูริมิในรูปแบบของอาหารแช่เยือกแข็ง โดยในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการผลิตใช้เครื่องจักรเป็นหลัก ตั้งแต่ขั้นตอนการผสม การขึ้นรูป จนกระทั่งขั้นตอนการแช่เยือกแข็งและการบรรจุ ทำให้ต้องใช้ไฟฟ้าปริมาณสูงในการเดินเครื่องจักรเพื่อทำการผลิต ในปี พ.ศ. 2554 มีการใช้พลังงานไฟฟ้ามากกว่า 1.5 ล้านกิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อเดือน ซึ่งการใช้พลังงานของโรงงานแบ่งตามการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องจักรหลายชนิด สำหรับเดือนมกราคม พ.ศ. 2554 พบว่า เครื่องจักรที่ใช้พลังงานไฟฟ้ามากที่สุด 3 อันดับแรกได้แก่ เครื่องทำความเย็นของห้องเก็บวัตถุดิบคิดเป็นร้อยละ 16 เครื่องทำความเย็นของคลังสินค้าคิดเป็นร้อยละ 13 และเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์และเครื่องแช่เยือกแข็งแบบสายพานเกลียวมีค่าเท่ากันคิดเป็นร้อยละ 10 การใช้พลังงานในระบบทำความเย็นของห้องเก็บวัตถุดิบและคลังสินค้าเป็นไปอย่างสม่ำเสมอตามความจำเป็นที่ต้องเดินเครื่องเพื่อรักษาอุณหภูมิภายในห้องตลอดเวลา ไม่ขึ้นกับปริมาณการผลิตและชนิดของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการใช้วิธีการควบคุมการใช้พลังงาน การบำรุงรักษาเครื่องทำความเย็น รวมถึงการละลายน้ำแข็งบริเวณอีวาพอเรเตอร์อย่างสม่ำเสมอก็สามารถกำหนดเป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการประหยัดพลังงาน

เมื่อพิจารณาดัชนีการใช้พลังงานเฉลี่ยประจำปี พ.ศ. 2554 เครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์มีดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากเดือนมกราคมถึงธันวาคมเฉลี่ยเท่ากับ 548.88 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตันผลิตภัณฑ์ และเครื่องแช่เยือกแข็งแบบสายพานเกลียวมีดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 198.12 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตันผลิตภัณฑ์ เมื่อพิจารณาปริมาณผลิตภัณฑ์ที่แช่เยือกแข็งได้ทั้งหมด พบว่า เครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์มีปริมาณการผลิตเท่ากับ 1,901.98 ตัน ซึ่งน้อยกว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบสายพานเกลียวประมาณ 5 เท่า ซึ่งมีปริมาณการผลิตเท่ากับ 10,491.41 ตัน (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 ดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าและปริมาณผลิตภัณฑ์จากเครื่องแช่เยือกแข็งในปี พ.ศ. 2554

เครื่องแช่เยือกแข็ง	ดัชนีการใช้พลังงาน (กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ตันผลิตภัณฑ์)	ปริมาณผลิตภัณฑ์ (ตัน)
อุโมงค์	548.88	1,901.98
สายพานเกลียว	198.12	10,491.41

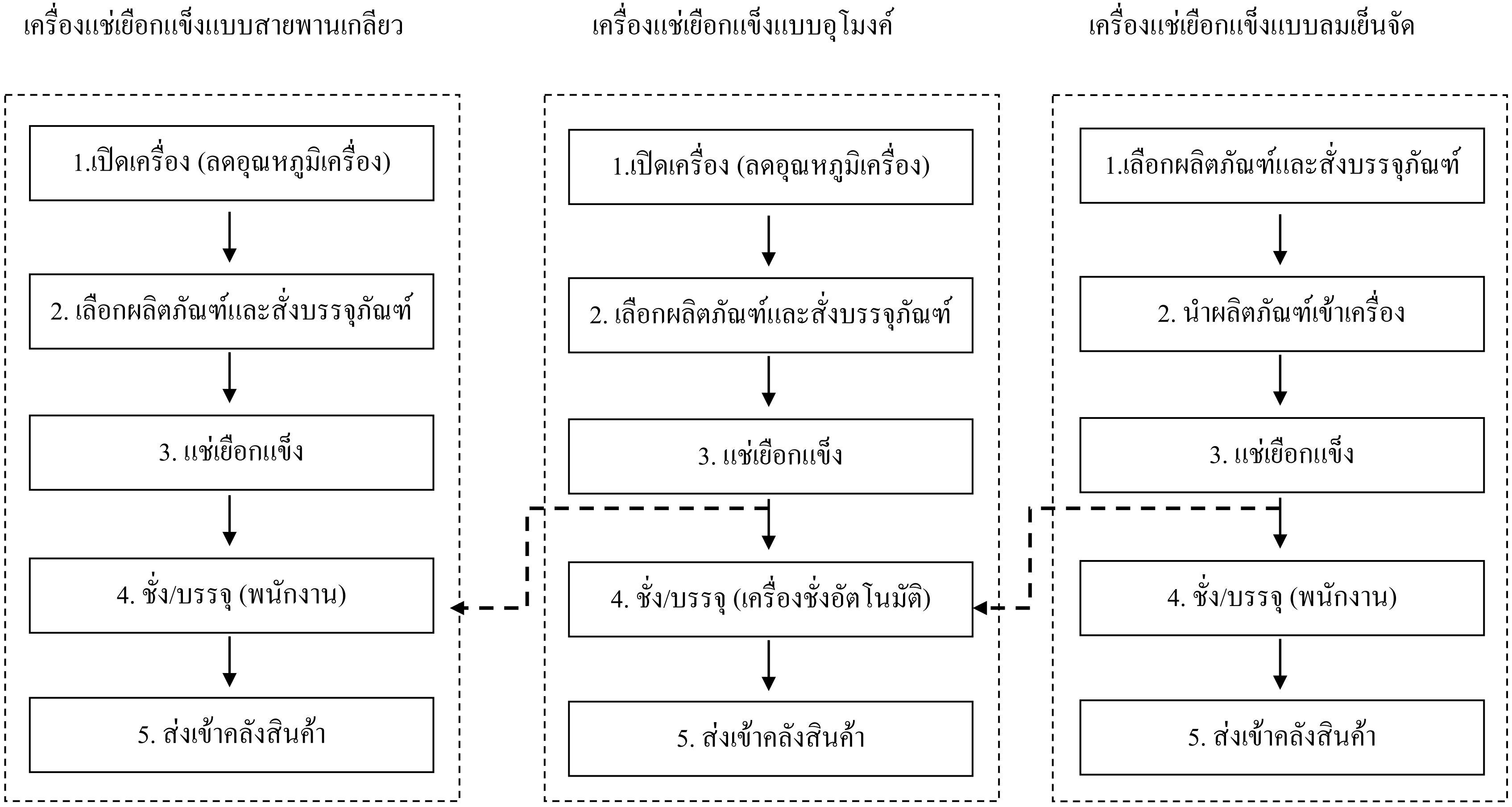
เนื่องจากเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์มีดัชนีการใช้พลังงานสูงกว่าค่าเป้าหมายที่กำหนดไว้ คือ 500 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตันผลิตภัณฑ์ ทำให้มีต้นทุนการใช้พลังงานสูงกว่าเครื่องแช่เยือกแข็งแบบสายพานเกลียว จึงจำเป็นอย่างยิ่งในการหาวิธีการเพื่อควบคุมการใช้พลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์ให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์และนำเสนอแนวทางการลดการใช้พลังงานในกระบวนการแช่เยือกแข็งโดยใช้เทคนิคด้านการจัดการการผลิตและเทคนิคการอนุรักษ์พลังงานสำหรับเครื่องทำความเย็นเป็นสำคัญ

2. สภาพปัจจุบันในการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์ของโรงงานกรณีศึกษา

การศึกษาสภาพปัจจุบันของโรงงานกรณีศึกษาได้กำหนดขอบเขตไว้เฉพาะขั้นตอนการแช่เยือกแข็งไม่ครอบคลุมกระบวนการผลิต ซึ่งโรงงานกรณีศึกษาใช้เครื่องแช่เยือกแข็ง 3 แบบในการแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์ ได้แก่ เครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์ เครื่องแช่เยือกแข็งแบบสายพานเกลียว และเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเย็นจัด ซึ่งมีลำดับการทำงานดังแสดงในภาพที่ 15

2.1 ขั้นตอนการทำงานในการแช่เยือกแข็ง

ขั้นตอนการแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบ่งผลิตภัณฑ์ออกเป็น 2 กลุ่มหลัก ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการบรรจุแบบสุญญากาศ (Vacuum packed products) และผลิตภัณฑ์เป็นชิ้นยังไม่ผ่านการบรรจุ (Individual products) โดยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบสายพานเกลียวจะแช่เยือกแข็งเฉพาะผลิตภัณฑ์บรรจุสุญญากาศ เครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเย็นจัดจะแช่เยือกแข็งเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่บรรจุ และเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์สามารถแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์ได้ทั้งสองกลุ่ม ประกอบด้วยขั้นตอนย่อยดังนี้



ภาพที่ 15 ลำดับการทำงานในการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบสายพานเกลียว แบบอุโมงค์และแบบลมเย็นจัด

(1) การเปิดเครื่อง เป็นการเริ่มระบบการทำงานเพื่อให้เกิดความเย็นของเครื่องแช่เยือกแข็งโดยก่อนเริ่มแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์ จำเป็นต้องลดอุณหภูมิภายในของเครื่องแช่เยือกแข็งก่อน ซึ่งเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์ใช้เวลาในการลดอุณหภูมิภายในเครื่องจนถึงอุณหภูมิเป้าหมายใช้เวลาประมาณ 30 – 40 นาที เครื่องแช่เยือกแข็งแบบสายพานเกลียวใช้เวลาประมาณ 70 – 90 นาที ส่วนเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเย็นจัดไม่ต้องทำการลดอุณหภูมิภายในเครื่อง การเปิดการทำงานของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเย็นจัดคือการเริ่มต้นการแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์

(2) การเลือกผลิตภัณฑ์และสั่งบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากโรงงานกรณีศึกษามีความหลากหลายของผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตไม่เป็นไปในลักษณะของสายการผลิตแบบต่อเนื่องทั้งกระบวนการ ผลิตภัณฑ์ต่างชนิดกันผลิตขึ้นด้วยกระบวนการที่แตกต่างกัน แต่ทุกผลิตภัณฑ์ต้องผ่านขั้นตอนการแช่เยือกแข็งทำให้มีผลิตภัณฑ์หลายชนิดที่รอเข้าสู่ขั้นตอนการแช่เยือกแข็ง จึงจำเป็นต้องมีการเลือกผลิตภัณฑ์หรือเรียงลำดับการเข้าแช่เยือกแข็งก่อนหลังตามระยะเวลาการส่งแช่เยือกแข็งและตามความเหมาะสมของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด โดยมีข้อกำหนดสำหรับผลิตภัณฑ์ที่รอแช่เยือกแข็งคือต้องรอไม่นานเกินกว่า 4 ชั่วโมง เมื่อสามารถระบุผลิตภัณฑ์ที่จะแช่เยือกแข็งได้แล้วพนักงานจะทำการสั่งบรรจุภัณฑ์ (ถุงและกล่อง) กับแผนกเตรียมบรรจุภัณฑ์เพื่อให้แผนกเตรียมบรรจุภัณฑ์ระบุข้อมูลสำคัญลงบนบรรจุภัณฑ์ เช่น วันที่ผลิต วันหมดอายุ ล็อตการผลิตและชื่อลูกค้า เป็นต้น

(3) การแช่เยือกแข็ง/การนำผลิตภัณฑ์เข้าเครื่อง เมื่ออุณหภูมิภายในเครื่องแช่เยือกแข็งลดต่ำจนได้ที่ระดับเป้าหมาย (เครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์อุณหภูมิเป้าหมายที่ -40 องศาเซลเซียส เครื่องแช่เยือกแข็งแบบสายพานเกลียวอุณหภูมิเป้าหมายที่ -30 องศาเซลเซียส) เครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์และแบบสายพานเกลียวใช้สายพานลำเลียงผลิตภัณฑ์เข้าเครื่องแช่เยือกแข็ง ส่วนการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเย็นจัดใช้รถเข็นในการลำเลียงผลิตภัณฑ์ ซึ่งต้องรอให้ผลิตภัณฑ์เต็มก่อนจึงเปิดเครื่องและเริ่มต้นการแช่เยือกแข็ง เวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งจะแตกต่างกันตามเครื่องแช่เยือกแข็งที่ใช้ รวมถึงชนิดและลักษณะการบรรจุของผลิตภัณฑ์ก็ส่งผลต่อระยะเวลาในการแช่เยือกแข็งเช่นกัน

(4) การชั่งและการบรรจุ เมื่อผลิตภัณฑ์ผ่านการแช่เยือกแข็งจนกระทั่งอุณหภูมิกึ่งกลางต่ำกว่า -20 องศาเซลเซียส จะเข้าสู่ขั้นตอนการชั่งและการบรรจุ อาจเป็นการชั่งและบรรจุโดยเครื่องชั่งอัตโนมัติหรือโดยพนักงาน เมื่อบรรจุลงถุง ปิดผนึกแล้วจึงบรรจุลงกล่องตามลำดับ ผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งแบบ IQF ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเย็นจัดนอกจากบรรจุโดยพนักงานแล้วบางส่วนใช้การบรรจุด้วยเครื่องชั่งอัตโนมัติ และผลิตภัณฑ์บรรจุ

สุญญากาศที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์ทั้งหมดจะส่งไปบรรจุลงกล่องโดยพนักงาน

(5) การเก็บในคลังสินค้า ผลิตภัณฑ์ที่บรรจุลงกล่องเรียบร้อยแล้วจะถูกลำเลียงบนสายพานเพื่อผ่านเครื่องตรวจจับโลหะก่อนการชั่งน้ำหนักรวมและรัดสายจากนั้นจึงส่งเข้าเก็บในคลังสินค้าที่ควบคุมอุณหภูมิให้ต่ำกว่า -18 องศาเซลเซียส

2.2 กำลังการผลิตการแช่เยือกแข็งของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์

เนื่องจากดัชนีการใช้พลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์มีค่าสูงกว่าค่าเป้าหมายที่โรงงานกำหนด จึงทำการศึกษาเฉพาะการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์เท่านั้น โดยโรงงานกรณีศึกษาเป็นผู้ผลิตผลิตภัณฑ์แปรรูปจากซูริมิที่มีความหลากหลาย เพื่อให้งานวิจัยมีความกระชับขึ้นจึงได้กำหนดผลิตภัณฑ์เป้าหมายขึ้น 2 กลุ่มชนิดเพื่อทำการศึกษากำลังการผลิต โดยพิจารณาจากผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์อย่างสม่ำเสมอ ได้แก่ กลุ่ม Individual products และ กลุ่ม Vacuum packed products โดยผลิตภัณฑ์กลุ่ม Individual products ประกอบผลิตภัณฑ์ 5 ชนิด ได้แก่ เต้าหู้ปลา หมึกหลอด ปลาม้วน ลูกชิ้นปลาไส้ไข่ และลูกชิ้นปลา ผลิตภัณฑ์กลุ่ม Vacuum packed products ประกอบด้วยเต้าหู้ปลาขนาดบรรจุ 200 300 และ 1,000 กรัมเป็นกลุ่มตัวอย่าง การคำนวณกำลังการผลิตสูงสุดของเครื่องแช่เยือกแข็งจะพิจารณาจากปริมาณผลิตภัณฑ์และเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งโดยไม่รวมช่วงเวลาที่มีการหยุดสายพาน

กำลังการผลิตของเครื่องแช่เยือกแข็ง = ปริมาณผลิตภัณฑ์ (กก.)/(เวลาที่ใช้แช่เยือกแข็ง – เวลาหยุดสายพาน (ชม.)) (4)

แต่เนื่องจากในระหว่างการดำเนินงานมีการหยุดสายพานลำเลียง ซึ่งเครื่องแช่เยือกแข็งยังมีการใช้พลังงานอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นการคำนวณกำลังการผลิตจึงควรพิจารณาจากปริมาณผลิตภัณฑ์และเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งโดยรวมเวลาหยุดสายพานด้วย เพื่อเป็นค่ากำลังการผลิตของการดำเนินงาน ซึ่งพิจารณากำลังการผลิตจาก

กำลังการผลิตของการดำเนินงาน = ปริมาณผลิตภัณฑ์ (กก.)/ เวลาทั้งหมดที่ใช้แช่เยือกแข็ง (ชม.) (5)

การนำเวลาทั้งหมดที่เครื่องแช่เยือกแข็งทำงานมาคำนวณกำลังการผลิต จะส่งผลให้การควบคุมต้นทุนพลังงานในการแช่เยือกมีความถูกต้องยิ่งขึ้น ผลการวัดกำลังการผลิตของของกลุ่ม Individual products และกลุ่ม Vacuum packed products แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 กำลังการผลิตของเครื่องแช่เยือกแข็งและกำลังการผลิตของการดำเนินงานด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์

ผลิตภัณฑ์	กำลังการผลิตของเครื่องแช่เยือกแข็ง* (กิโลกรัม/ชั่วโมง)	กำลังการผลิตของการดำเนินงาน* (กิโลกรัม/ชั่วโมง)
Individual products		
เต้าหู้ปลา	511.41±47.49	442.97±85.08
ลูกชิ้นปลาใส่ไข่	517.79±40.26	437.89±68.66
หมึกหลอด	649.99±60.47	515.33±90.76
ปลาม้วน	536.26±30.25	498.37±80.45
ลูกชิ้นปลา	545.47±35.41	437.25±50.86
Vacuum packed products	200-400	200-400

*ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากจำนวน 10 ซ้ำ

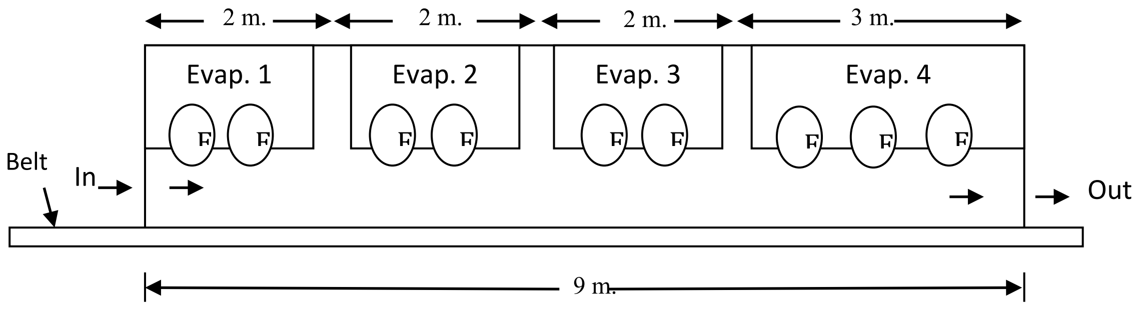
ผลจากการคำนวณกำลังการผลิตของเครื่องแช่เยือกแข็ง พบว่า ผลิตภัณฑ์กลุ่ม Individual products ทั้ง 5 ชนิดมีกำลังการผลิตสูงกว่าค่าเป้าหมายที่ 500 กิโลกรัมต่อชั่งโมงซึ่งเป็นระดับที่โรงงานยอมรับ แต่จากการบันทึกผลในปัจจุบันพนักงานไม่ได้นำเวลารวมทั้งหมดที่เครื่องทำงานมาคำนวณกำลังการผลิตส่งผลให้ค่าที่ได้มีค่าสูงกว่าค่าเป้าหมาย โดยเมื่อทำการคำนวณกำลังการผลิตของการดำเนินงาน ซึ่งจะพิจารณาเวลารวมทั้งหมดที่เครื่องแช่เยือกแข็งทำงาน พบว่า มีเพียงผลิตภัณฑ์หมึกหลอดเท่านั้นที่มีกำลังการผลิตสูงกว่าค่าเป้าหมาย ความแตกต่างของกำลังการผลิตของเครื่องแช่เยือกแข็งและกำลังการผลิตของการดำเนินงาน เกิดจากการหยุดสายพานในระหว่างแช่เยือกแข็ง ทำให้การพิจารณากำลังการผลิตไม่สะท้อนต้นทุนด้านพลังงานของการผลิตจริง

ทั้งนี้เมื่อพิจารณาผลิตภัณฑ์กลุ่ม Vacuum packed products ซึ่งประกอบด้วย เต้าหู้ปลา ลูกชิ้นปลาและซาลาเปาไส้หมึก ซึ่งมีขนาดบรรจุ 200, 300 และ 1,000 กรัม เป็นต้น พบว่า มี

กำลังการผลิตต่ำกว่าค่าเป้าหมาย โดยมีกำลังการผลิตอยู่ในช่วง 200 – 400 กิโลกรัมต่อชั่วโมง สาเหตุที่มีกำลังการผลิตต่ำเนื่องจากความแตกต่างของชนิดผลิตภัณฑ์และขนาดบรรจุ ซึ่งใช้เวลาแช่เยือกแข็งนานกว่าผลิตภัณฑ์กลุ่ม Individual products นอกจากนี้อาจเป็นเพราะถุงพลาสติกที่ใช้บรรจุผลิตภัณฑ์จะเป็นตัวขัดขวางการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างผลิตภัณฑ์กับอากาศเย็นที่เข้าปะทะ ทำให้ต้องใช้เวลาในการแช่เยือกแข็งนานขึ้น

2.3 ระบบการแช่เยือกแข็งของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์

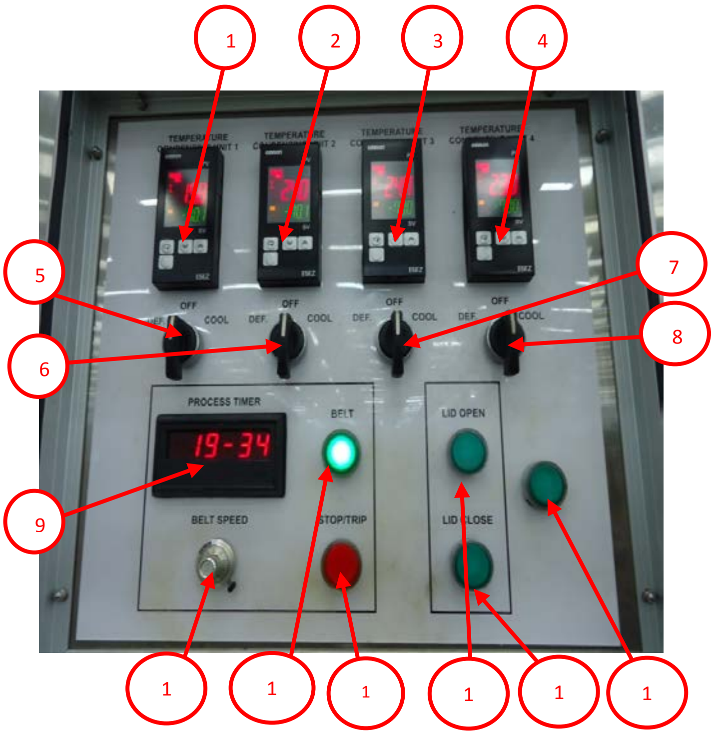
เครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์ของโรงงานกรณีศึกษาเป็นลักษณะการทำความเย็นในระบบอัดไอ ใช้คอมเพรสเซอร์ในการขับสารทำความเย็น กระบวนการทำความเย็นของเครื่องแช่เยือกแข็งเป็นกระบวนการทำความเย็นแบบ 2 ขั้น (2 stage system) เนื่องจากการแช่เยือกแข็งดังกล่าวต้องการความเย็นที่อุณหภูมิต่ำมาก มีผลให้ช่วงความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างเครื่องควบแน่นและเครื่องระเหยมีค่ากว้างมาก จึงใช้วัฏจักรการทำความเย็นมากกว่าหนึ่งวัฏจักร หรือเรียกว่า วัฏจักรทำความเย็นแบบหลั่น (Cascade Refrigeration Cycles) (Singh and Heldman, 2009) ทำให้เครื่องแช่เยือกแข็งใช้พลังงานลดลงและปริมาณความร้อนที่ดูดออกจากผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีการใช้สารทำความเย็นฟรีออนชนิด R22 และใช้พัดลมเป็นเครื่องหมุนเวียนอากาศเย็น ส่วนประกอบหลักของเครื่องประกอบด้วย เครื่องคอมเพรสเซอร์ชนิดลูกสูบ 8 เครื่อง พัดลม (F) 9 เครื่อง เครื่องระเหย (Evap.) 4 เครื่อง และใช้สายพานในการลำเลียงผลิตภัณฑ์ (ภาพที่ 16)



ภาพที่ 16 โครงสร้างและส่วนประกอบหลักภายในอุโมงค์แช่เยือกแข็งของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์

จากภาพที่ 16 พัดลมมีการติดตั้งกระจายตามแนวยาวของอุโมงค์แช่เยือกแข็งซึ่งมีความยาว 9 เมตร เครื่องระเหย 1 เครื่องต่อพัดลม 2 เครื่อง ยกเว้นเครื่องระเหยเครื่องที่ 4 ซึ่งมีขนาดใหญ่ที่สุดใช้พัดลม 3 เครื่องในการหมุนเวียนอากาศ โดยมีการติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์กระจายตามเครื่องระเหย

การลำเลียงผลิตภัณฑ์เข้าเครื่องแช่เยือกแข็งโดยพนักงานเทผลิตภัณฑ์ลงบนสายพานแล้วเกลี่ยให้เรียบ เพื่อไม่ให้ผลิตภัณฑ์ซ้อนทับกันบนสายพาน เมื่อผลิตภัณฑ์ไหลเข้าไปภายในอุโมงค์แช่เยือกแข็งจะปะทะกับลมเย็นที่มาจาก 2 ทิศทาง คือด้านบนและด้านล่างของสายพานซึ่งเป็นการออกแบบทิศทางการไหลของอากาศโดยวิศวกรผู้ออกแบบเครื่องจักร การควบคุมการทำงานของเครื่อง เช่น การเปิด – ปิด เครื่องคอมเพรสเซอร์ การปรับความเร็วสายพาน รวมถึงการแสดงผลอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆภายในอุโมงค์แช่เยือกแข็ง จะใช้ตู้ควบคุมในการสั่งการ จอภาพแสดงผลและปุ่มควบคุมการทำงานดังกล่าวแสดงดังภาพที่ 17



1,2,3,4 = จอแสดงผลอุณหภูมิ
5,6,7,8 = สวิตช์เปิด – ปิด คอมเพรสเซอร์
9 = จอแสดงเวลาแช่เยือกแข็ง
10 = ปุ่มปรับความเร็วสายพาน
11 = ปุ่มเดินสายพาน
12 = ปุ่มหยุดสายพาน
13 = ปุ่มเปิดฝาข้าง
14 = ปุ่มปิดฝาข้าง
15 = ปุ่มรีเซ็ตสัญญาณเตือน

ภาพที่ 17 จอแสดงผลและปุ่มควบคุมสำหรับเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์

การเปิดใช้งานเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์นั้นเริ่มจากการเปิดสวิตช์เครื่องทำความเย็น (หมายเลข 5 - 8) ก่อนเริ่มแช่เยือกแข็งหรือก่อนนำผลิตภัณฑ์เข้าเครื่อง รอให้อุณหภูมิภายในอุโมงค์แช่เยือกแข็งลดต่ำลงไปที่อุณหภูมิเป้าหมายที่ -40 องศาเซลเซียส (แสดงที่จอแสดงผลอุณหภูมิ 1 - 4) ทำให้สามารถแบ่งการใช้พลังงานตามกิจกรรมการใช้งานของเครื่องแช่เยือกแข็งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ การใช้พลังงานในช่วงเปิดเครื่องจนถึงอุณหภูมิเป้าหมาย (set up period) ช่วงเวลาแช่เยือกแข็ง (freezing period) และช่วงเวลาละลายน้ำแข็ง (defrosting period) สอดคล้องกับการประเมินผลทางด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าของ Chourot

และคณะ (2003) ซึ่งพิจารณาการใช้พลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็งจากการใช้พลังงานโดยตรงของอุปกรณ์ต่างๆ ได้แก่ การใช้พลังงานโดยคอมเพรสเซอร์ มอเตอร์พัดลม มอเตอร์สายพาน และอุปกรณ์สนับสนุนอื่นๆ หรือแบ่งตามกิจกรรมการใช้พลังงาน คือ ขณะเปิดเครื่อง ขณะแช่เยือกแข็ง และขณะละลายน้ำแข็ง เป็นต้น อัตราการใช้พลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์กรณีศึกษา แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 อัตราการใช้พลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์

กิจกรรม	ปริมาณไฟฟ้าเฉลี่ย* (kW)
เปิดเครื่อง (set up period)	209.78 ± 4.68
แช่เยือกแข็ง (freezing period)	199.33 ± 6.87
ละลายน้ำแข็ง (defrosting period)	20.73± 3.16

*ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจาก 15 ซ้ำ

เนื่องจากการใช้พลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็งนั้นมีความแตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลาของการทำงาน เพื่อยืนยันความแตกต่างดังกล่าวจึงได้ทำการบันทึกการใช้พลังงานในทุก 1 ชั่วโมงของการทำงาน พบว่า ชั่วโมงที่ 1 หรือชั่วโมงแรกของการเปิดเครื่อง เครื่องแช่เยือกแข็งมีการใช้พลังงานสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 209.78 กิโลวัตต์ เป็นผลตามปกติของเครื่องจักรจะใช้พลังงานสูงในช่วงเริ่มต้นของการทำงาน ซึ่งเป็นการเริ่มต้นการหมุนของมอเตอร์จากสภาพหยุดนิ่ง ช่วงเริ่มต้นดังกล่าวมอเตอร์ต้องใช้พลังงานในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจึงมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นจากช่วงปกติ (Jakobsen *et al.*, 2006) การใช้พลังงานในระหว่างการทำงานของเครื่องเพื่อแช่เยือกแข็งมีการใช้พลังงานเฉลี่ยเท่ากับ 199.33 กิโลวัตต์ ต่ำกว่าช่วงเปิดเครื่องเล็กน้อยส่วนช่วงการทำละลายน้ำแข็งภายในเครื่องมีการใช้พลังงานเฉลี่ยเท่ากับ 20.73 กิโลวัตต์ ระบบการละลายน้ำแข็งของเครื่องแช่เยือกแข็งกรณีศึกษาใช้พัดลมหมุนเวียนอากาศภายในอุโมงค์และหยุดการทำงานของคอมเพรสเซอร์ ทำให้การใช้พลังงานในช่วงดังกล่าวเป็นการใช้พลังงานโดยมอเตอร์พัดลมเป็นหลัก ซึ่งเมื่อเทียบเป็นสัดส่วนมีค่าร้อยละ 10.40 ของปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ในขณะแช่เยือกแข็ง ทั้งนี้ Guilpart (1991 อ้างโดย Chourot และคณะ, 2003) รายงานว่าการใช้พลังงานในการละลายน้ำแข็งมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 20 – 25 เมื่อเทียบกับการใช้พลังงานของทั้งระบบ ซึ่งผลที่ได้จากเครื่องแช่เยือกแข็งกรณีศึกษามีค่าการใช้พลังงานต่ำกว่าค่าที่เคยมีรายงานไว้ อย่างไรก็ตามระบบการละลายน้ำแข็งของเครื่องแช่เยือก

แข็งมีหลายระบบแตกต่างกัน เช่น การละลายน้ำแข็งด้วยฮีทเตอร์ไฟฟ้า การละลายน้ำแข็งด้วยแก๊สร้อน การละลายน้ำแข็งด้วยน้ำ และการละลายน้ำแข็งด้วยการหมุนเวียนอากาศ โดยเครื่องแช่เยือกแข็งกรณีศึกษาใช้ระบบการหมุนเวียนอากาศดังกล่าว

เมื่อพิจารณาการใช้พลังงานรวมในการทำงานของเครื่องเพื่อแช่เยือกแข็งโดยเฉลี่ยการดำเนินงานแต่ละกะของการทำงานอยู่ที่ 10 ชั่วโมงต่อวัน มีการหยุดพักเครื่องในระหว่างวัน 1 ครั้ง ดังนั้นเมื่อพิจารณาอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า (ตารางที่ 3) ซึ่งมีการใช้พลังงานไฟฟ้าในระหว่างแช่เยือกแข็งประมาณ 200 กิโลวัตต์ และมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นประมาณ 10 กิโลวัตต์ในช่วงแรกของการเปิดเครื่อง ทำให้สามารถประมาณการใช้พลังงานรวมต่อวัน (10 ชั่วโมง) ของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์ได้ โดยมีค่าประมาณ 2,000 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อวัน

2.4 ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพของเครื่องแช่เยือกแข็ง (Coefficient of performance: COP)

ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพของเครื่องแช่เยือกแข็ง (COP) เป็นอัตราส่วนระหว่างความร้อนที่สารทำความเย็นได้รับขณะที่ผ่านเครื่องระเหยต่อความร้อนเทียบเท่าของพลังงานที่ให้แก่คอมเพรสเซอร์ ค่าความร้อนหรือค่าเอนทาลปีของระบบสามารถหาได้จากแผนภูมิความดัน – เอนทาลปี การหาค่า COP ของระบบทำความเย็นสามารถคำนวณได้จากปริมาณความเย็นที่ระบบผลิตได้ (Q) เทียบกับพลังงานที่คอมเพรสเซอร์ใช้ (W) ดังสมการ

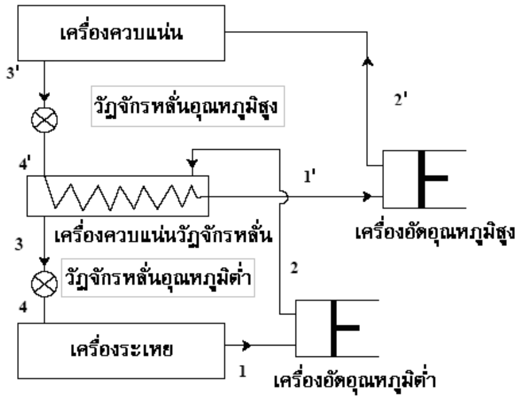
$$\mathrm{COP} = \frac{\mathrm{Q}}{W}$$

เมื่อ COP = ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพของเครื่องแช่เยือกแข็ง

Q = ปริมาณความเย็นที่ระบบผลิตได้ (kj)

W = พลังงานที่ใช้ในระบบทำความเย็น (kj)

โรงงานกรณีศึกษาใช้ระบบทำความเย็นแบบอัดไอ 2 ขั้น (2 stage system) สามารถแบ่งการทำงานของคอมเพรสเซอร์ออกเป็นสองระดับ คือ เครื่องอัดอุณหภูมิสูง (high stage) หรือคอมเพรสเซอร์ที่ทำหน้าที่อัดสารทำความเย็นเข้าเครื่องควบแน่น และเครื่องอัดอุณหภูมิต่ำ (low stage) หรือคอมเพรสเซอร์ที่อัดสารทำความเย็นออกจากเครื่องระเหยไปยังเครื่องควบแน่นของวัฏจักรหลั่นก่อนถูกอัดด้วยคอมเพรสเซอร์อุณหภูมิสูง แสดงในภาพที่ 18 ซึ่งประกอบด้วยวัฏจักรหลั่นอุณหภูมิต่ำ (1-4) และวัฏจักรหลั่นอุณหภูมิสูง (1’-4’) รวมเป็น 1 ระบบของการทำงาน



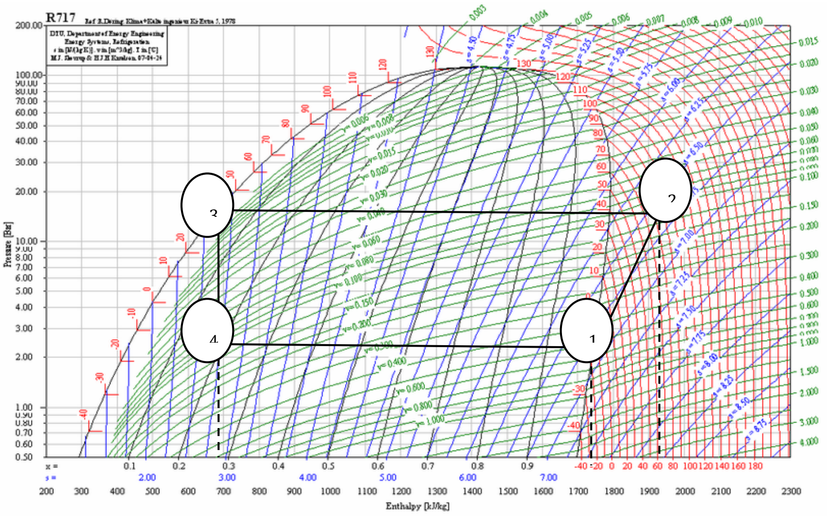
ภาพที่ 18 ระบบการทำความเย็นแบบอัดไอ 2 ขั้น
ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2553)

โดยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์กรณีศึกษาประกอบด้วยระบบทำความเย็นแบบอัดไอ 2 ขั้นทั้งหมด 4 ชุด แต่ละชุดประกอบด้วยเครื่องคอมเพรสเซอร์ 2 เครื่อง ทำให้มีเครื่องคอมเพรสเซอร์ทั้งหมด 8 เครื่องแบ่งเป็นคอมเพรสเซอร์อุณหภูมิสูง 4 เครื่องและคอมเพรสเซอร์อุณหภูมิต่ำ 4 เครื่องทำงานร่วมกันเป็นคู่แบบอนุกรม

การหาค่า COP ของเครื่องแช่เยือกแข็งทำได้โดยการบันทึกค่าความดันด้านสูงและความดันด้านต่ำของเครื่องอัดอุณหภูมิสูง (high stage) และเครื่องอัดอุณหภูมิต่ำ (low stage) จากเกจวัดความดัน (pressure gauge) แล้วนำมาหาค่าเอนทาลปีโดยใช้แผนภูมิความดัน – เอนทาลปีของสารทำความเย็นชนิด R22 (ตัวอย่างในหน้า 18-19) เพื่อแทนค่าและคำนวณหาค่า COP ของระบบทำความเย็นแต่ละชุด

ตัวอย่างข้อมูลการตรวจวัดและการหาค่า COP

ชนิดสารทำความเย็น	= R717
ความดันบรรยากาศ	= 1.013 บาร์
ความดันเกจด้านต่ำ	= 1 บาร์
ความดันเกจด้านสูง	= 12 บาร์



ภาพที่ 19 ตัวอย่างการหาค่าเอนทาลปี ณ จุดต่างๆของระบบทำความเย็น

เมื่อ

ความดันสัมบูรณ์ = ความดันเกจ + ความดันบรรยากาศ

ดังนั้น

ความดันสัมบูรณ์ด้านต่ำ = 1 + 1.013 = 2.013 บาร์

ความดันสัมบูรณ์ด้านสูง = 12 + 1.013 = 13.013 บาร์

เมื่อทราบค่าความดันสัมบูรณ์ทั้ง 2 ค่าแล้ว จึงนำมาหาค่าเอนทาลปี ณ จุดต่างๆ โดยใช้แผนภูมิความดัน-เอนทาลปี (ภาพที่ 19)

ตำแหน่งที่ 1 เป็นตำแหน่งไออิ่มตัวที่ความดัน 2.013 บาร์ ซึ่งอ่านค่าเอนทาลปี (h_1) มีค่าเท่ากับ 240 kj/kg

ตำแหน่งที่ 2 เป็นตำแหน่งไอยิ่งยวด หาค่าเอนทาลปี (h_2) โดยลากเส้นเอนโทรปีที่ตำแหน่งที่ 1 ไปตัดเส้นความดันสัมบูรณ์ด้านสูงที่ 13.013 บาร์ จะได้ค่าเอนทาลปีเท่ากับ 288 kj/kg

ตำแหน่งที่ 3 เป็นตำแหน่งของเหลวอิ่มตัว ที่ความดันสัมบูรณ์ 13.013 บาร์ อ่านค่าเอนทาลปี (h_3) มีค่าเท่ากับ 86 kj/kg

ตำแหน่งที่ 4 เป็นกระบวนการเอนทาลปีคงที่ ซึ่งอ่านค่าเอนทาลปี (h_4)ได้เท่ากับ 86 kj/kg

ดังนั้น $COP = (h_1-h_4) / (h_2-h_1) = (240 – 86) / (288 – 240)$

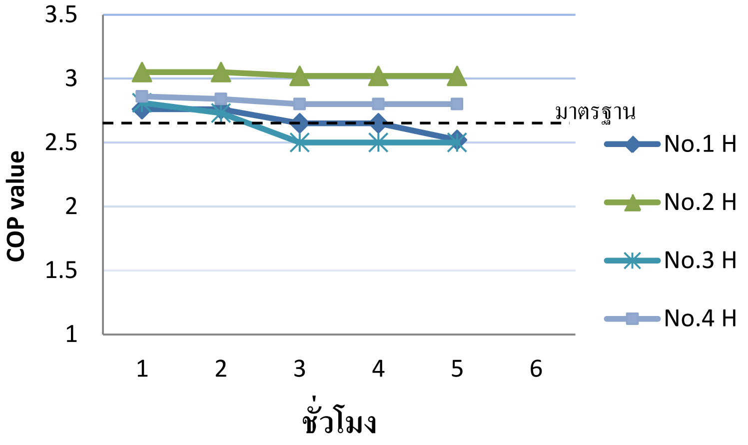
$= 3.20$

จากตัวอย่างการคำนวณดังกล่าวจึงสามารถประเมินค่า COP ของระบบทำความเย็นทั้ง 4 ชุด แสดงในตารางที่ 4

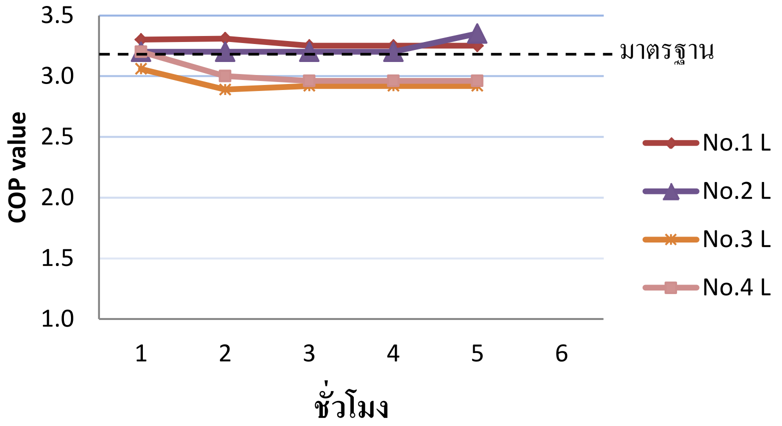
ตารางที่ 4 ผลการประเมินค่า COP ของเครื่องคอมเพรสเซอร์

คอมเพรสเซอร์	COP	
	เครื่องอัดอุณหภูมิสูง	เครื่องอัดอุณหภูมิต่ำ
คอมเพรสเซอร์ ชุดที่ 1	2.76	3.30
คอมเพรสเซอร์ ชุดที่ 2	3.05	3.42
คอมเพรสเซอร์ ชุดที่ 3	2.81	3.08
คอมเพรสเซอร์ ชุดที่ 4	2.86	3.20
ค่าเป้าหมาย	2.57	3.20

โดยวิศวกรผู้ติดตั้งเครื่องแช่เยือกแข็งได้กำหนดมาตรฐานค่า COP ของระบบ 2 ค่า คือ 2.57 สำหรับเครื่องอัดอุณหภูมิสูงและ 3.20 สำหรับเครื่องอัดอุณหภูมิต่ำ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่า COP ที่ได้จากการคำนวณ พบว่า คอมเพรสเซอร์ชุดที่ 3 ของเครื่องอัดอุณหภูมิต่ำมีค่าน้อยกว่าค่ามาตรฐาน ซึ่งหมายถึงระบบทำความเย็นชุดดังกล่าวมีประสิทธิภาพการทำความเย็นต่ำที่สุด อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่า COP ของระบบเมื่อเวลาผ่านไป โดยการพิจารณาค่า COP ในแต่ละชั่วโมงของการทำงานของเครื่องติดต่อกัน 5 ชั่วโมง ผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 20



(ก)



(ข)

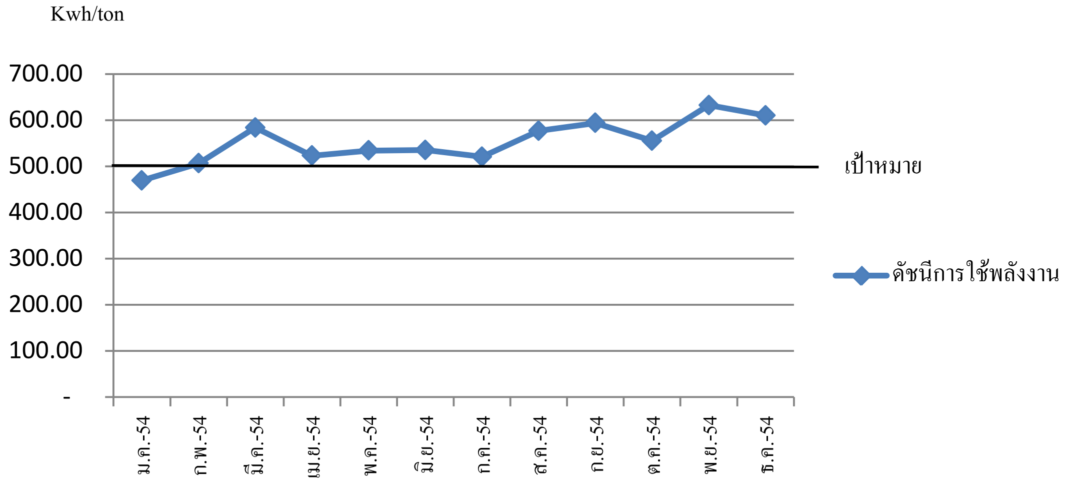
ภาพที่ 20 ค่า COP ของเครื่องอัดอุณหภูมิสูง (ก) และเครื่องอัดอุณหภูมิต่ำ (ข) เมื่อเวลาผ่านไป

จากภาพที่ 20 (ก) และ (ข) แสดงค่า COP เมื่อเวลาทำงานของเครื่องผ่านไป พบว่าค่า COP ของระบบทำความเย็นมีแนวโน้มลดต่ำลงเมื่อเวลาทำงานของเครื่องเพิ่มขึ้น และอาจลดต่ำลงจนต่ำกว่าค่ามาตรฐานได้ การลดต่ำลงของค่า COP เกิดจากหลายปัจจัย เช่น การเกิดน้ำแข็งที่เครื่องระเหยทำให้สารทำความเย็นที่ไหลผ่านเครื่องระเหยได้รับความร้อนไม่เพียงพอจึงเกิดการระเหยไม่สมบูรณ์ ทั้งนี้ พบว่า ระบบทำความเย็นชุดที่ 3 ทั้งของเครื่องอัด (compressor) ด้านอุณหภูมิสูงและด้านอุณหภูมิต่ำมีค่า COP ต่ำที่สุดหรือมีประสิทธิภาพต่ำที่สุดเมื่อเวลาการทำงานเพิ่มขึ้น เนื่องจากพบการสะสมของน้ำมันทอดจากผลิตภัณฑ์เกาะติดกับคอยล์เย็น การสะสมของน้ำมันดังกล่าวส่งผลให้เกิดการขัดขวางการถ่ายเทความร้อนของเครื่องระเหยทำให้ค่า COP ของระบบทำความเย็นลดลง อย่างไรก็ตามค่า COP ของเครื่องแช่เยือกแข็งกรณีศึกษามีแนวโน้มลดต่ำลงเล็กน้อยซึ่งไม่กระทบกับการใช้พลังงาน เนื่องจากเมื่อพิจารณาอัตราการใช้พลังงานในแต่ละชั่วโมงของการทำงานของเครื่องมีค่าอยู่ในช่วงของค่าเฉลี่ย ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพ

ระบบทำความเย็นของเครื่องแช่เยือกแข็งกรณีศึกษาอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ และไม่กระทบต่ออัตราการใช้พลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็งเมื่อมีระยะเวลาการทำงานติดต่อกันไม่เกิน 5 ชั่วโมง

2.5 ดัชนีการใช้พลังงาน (Energy Use Index: EUI)

ดัชนีการใช้พลังงานพิจารณาจากปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) เปรียบเทียบกับปริมาณผลผลิต (ตัน) ที่สามารถผลิตได้ ในปี พ.ศ. 2554 โรงงานกรณีศึกษามีดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์แสดงดังภาพที่ 21



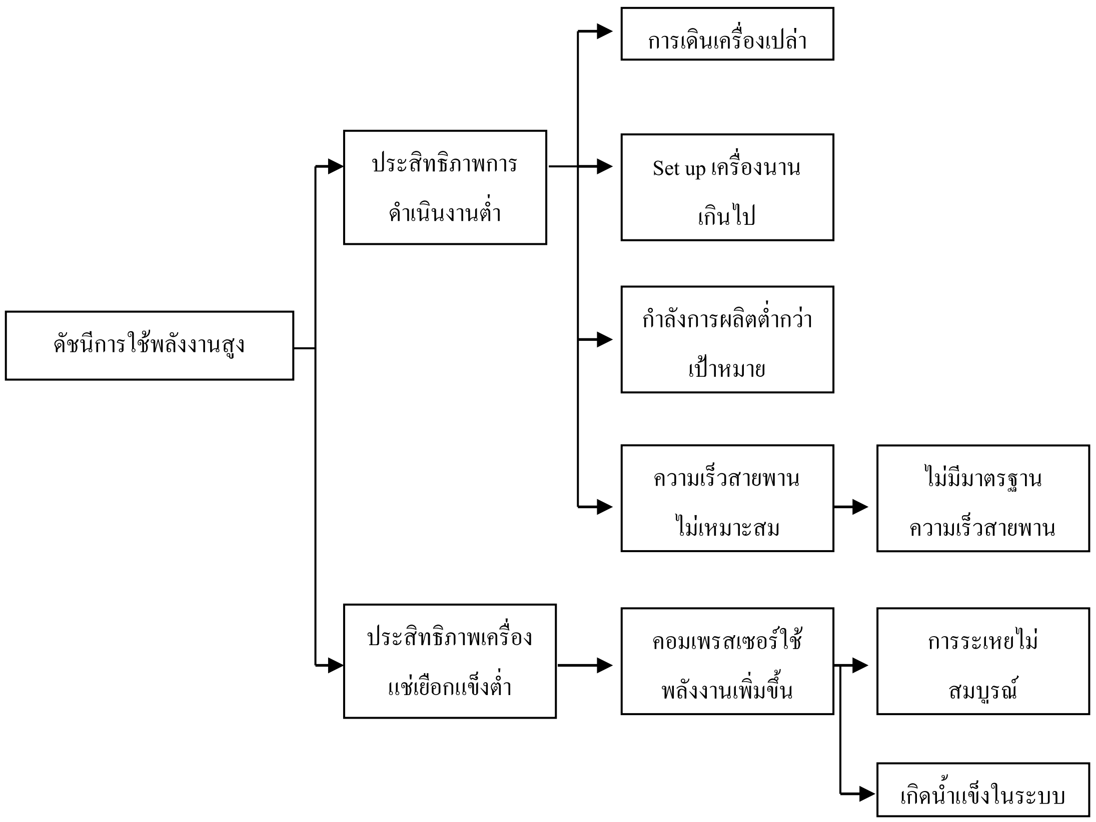
ภาพที่ 21 ดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์ปี พ.ศ. 2554

ดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์เดือนมกราคม – ธันวาคม พ.ศ. 2554 มีค่าเฉลี่ย 548.88 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตันผลิตภัณฑ์ โดยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น และมีค่าสูงสุดที่เดือนพฤศจิกายน มีค่าเท่ากับ 632.15 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตันผลิตภัณฑ์ โดยจากภาพที่ 21 ค่าดัชนีการใช้พลังงานเริ่มมีค่าสูงขึ้นตั้งแต่เดือนสิงหาคมถึงเดือนธันวาคม จากการตรวจสอบบันทึกการแช่เยือกแข็ง พบว่า ในช่วงเวลาดังกล่าวมีการใช้เครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์ในการแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์กลุ่มที่ผ่านการบรรจุสุญญากาศเป็นหลัก ซึ่งมีกำลังการผลิตต่ำทำให้ดัชนีการใช้พลังงานสูงขึ้น ทั้งนี้ดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยมีค่าสูงกว่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่โรงงานกำหนดไว้ที่ 500 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตันผลิตภัณฑ์ การเพิ่มขึ้นของดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าเกิดจากกำลังการผลิตต่ำกว่าค่าเป้าหมายมีสาเหตุ 2 ประการ ได้แก่ การแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์กลุ่ม Vacuum packed products ซึ่งมีกำลังการผลิตต่ำและมีการทำงานของเครื่องเปล่าใน

ระหว่างการแช่เยือกแข็ง ส่งผลต่อกำลังการผลิตโดยตรงเมื่อกำลังการผลิตลดต่ำลง ดัชนีการใช้พลังงานจึงเพิ่มสูงขึ้นทำให้ต้นทุนการแช่เยือกแข็งสูงขึ้นด้วย

3. วิเคราะห์ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องแช่เยือกแข็ง

ปัจจุบันการดำเนินงานในขั้นตอนการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์มีการใช้พลังงานในระดับสูงคิดเป็นร้อยละ 10 ของพลังงานทั้งหมดที่ใช้ มีค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการแช่เยือกแข็งของเครื่องอยู่ที่ 548.88 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตันผลิตภัณฑ์ ซึ่งสูงกว่าค่าเป้าหมายที่ 500 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตันผลิตภัณฑ์ ผลการวิเคราะห์สาเหตุที่ทำให้ดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงขึ้นด้วยแผนผังทำไม – ทำไม (ภาพที่ 22) แบ่งสาเหตุหลักออกเป็นสองกลุ่มตามแนวทางการวิเคราะห์การใช้พลังงานในการแช่เยือกแข็งของ Huan (2003a) ได้แก่ ประสิทธิภาพของเครื่องต่ำ (COP ต่ำ) และประสิทธิภาพการดำเนินงานต่ำ



ภาพที่ 22 สาเหตุการสูงขึ้นของค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าของการแช่เยือกแข็ง

(1) ประสิทธิภาพของเครื่องแช่เยือกแข็งต่ำ พิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพของเครื่องแช่เยือกแข็งหรือค่า COP พบว่า ค่า COP ของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบ

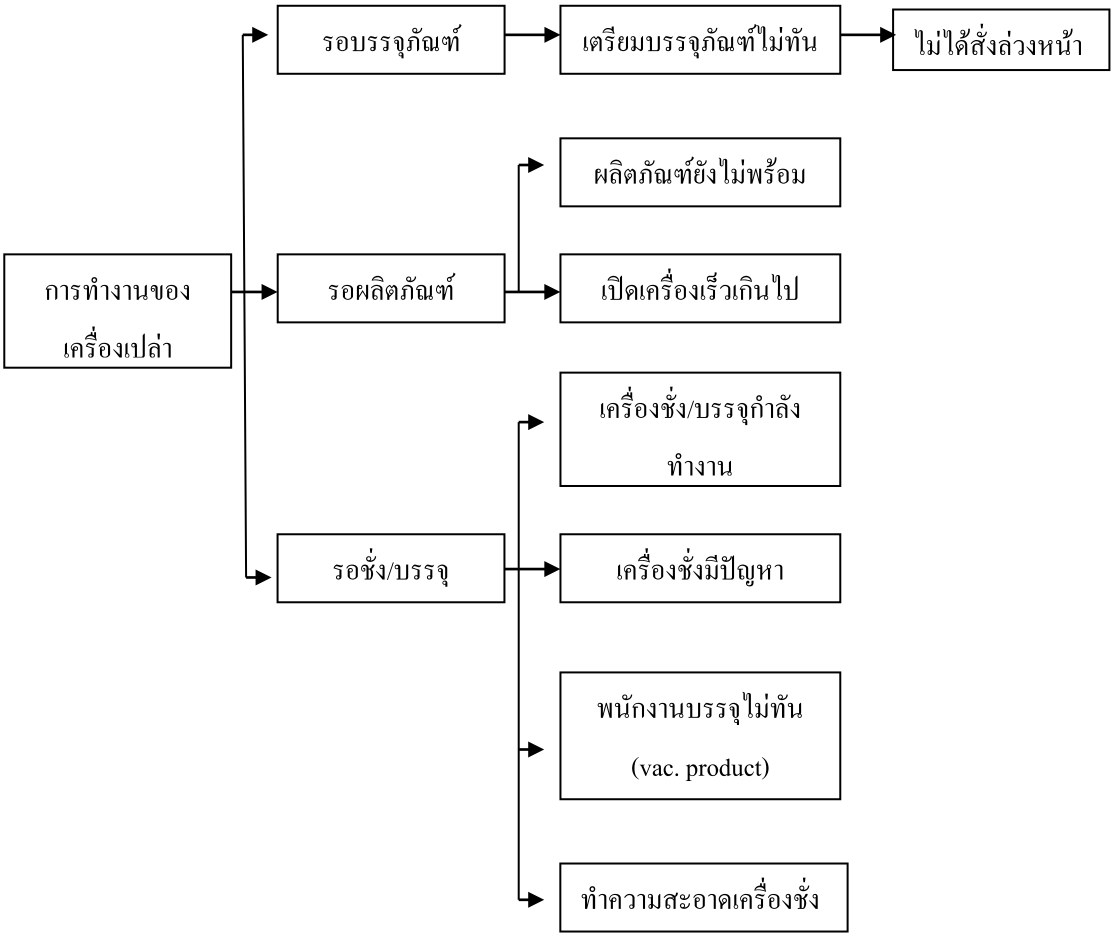
อุโมงค์มีค่าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ แต่พบว่า เมื่อเวลาเดินเครื่องนานขึ้นมีผลให้ค่า COP ลดต่ำลงซึ่งอาจกระทบกับอัตราการใช้พลังงานของระบบ อย่างไรก็ตาม การพิจารณาอัตราการใช้พลังงานควบคู่กับค่า COP ที่เปลี่ยนแปลงไป พบว่า ค่า COP ที่ลดลงไม่กระทบกับอัตราการใช้พลังงานภายใต้เงื่อนไขการเดินเครื่องติดต่อกันไม่เกิน 5 ชั่วโมง ทั้งนี้สาเหตุที่ทำให้เครื่องแช่เยือกแข็งมีค่า COP ลดต่ำลงเนื่องจากการเกิดน้ำแข็งขึ้นในระบบซึ่งส่งผลต่ออัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างเครื่องระเหยกับผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการเดินเครื่องติดต่อกันในระยะเวลาที่นานขึ้นโดยไม่มีการหยุดพักเพื่อละลายน้ำแข็งอาจส่งผลให้เครื่องคอมเพรสเซอร์ภายในระบบทำความเย็นใช้พลังงานสูงขึ้น และอีกกรณีที่อาจส่งผลให้เครื่องแช่เยือกแข็งใช้พลังงานเพิ่มขึ้นคือการระเหยไม่สมบูรณ์ของสารทำความเย็นซึ่งมีสาเหตุเกี่ยวเนื่องกับการเดินเครื่องเปล่าในระหว่างการดำเนินงานทำให้คอมเพรสเซอร์ต้องใช้พลังงานเพิ่มขึ้นในการขับสารทำความเย็นภายในระบบ

(2) ประสิทธิภาพการดำเนินงานต่ำ พิจารณาจากการใช้ประโยชน์ของเครื่องแช่เยือกแข็งในการลดอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ การใช้งานเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์เริ่มตั้งแต่เปิดเครื่องจนถึงปิดเครื่องเมื่อแช่เยือกแข็งเสร็จ พบว่า สาเหตุที่ทำให้ดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าของการแช่เยือกแข็งสูงขึ้นนั้นเกิดจากในระหว่างการดำเนินงานมีการใช้เครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่เกิดประโยชน์ ได้แก่ การทำงานของเครื่องเปล่า การลดอุณหภูมิภายในอุโมงค์ (set up) ก่อนเริ่มแช่เยือกแข็งนานเกินไปทำให้สูญเสียพลังงานไปโดยไม่ก่อให้เกิดผลผลิต และการแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการบรรจุสุญญากาศ (vacuum packed products) ซึ่งมีกำลังการผลิตต่ำกว่ากำลังการผลิตเป้าหมายทำให้ต้นทุนการแช่เยือกแข็งสูงขึ้น อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ในกลุ่มที่บรรจุแบบสุญญากาศจัดเป็นสินค้าคุณภาพสูง (premium grade) โรงงานจึงยอมรับได้แม้ว่าจะทำให้ต้นทุนการแช่เยือกแข็งสูงขึ้น ทั้งนี้การใช้ความเร็วสายพานไม่เหมาะสมกับชนิดของผลิตภัณฑ์มีส่วนทำให้กำลังการผลิตลดลงได้ในกรณีที่ใช้เวลาแช่เยือกแข็งนานเกินไป

เมื่อพิจารณาการใช้ประโยชน์ของเครื่องแช่เยือกแข็งในแต่ละวันเฉพาะการเดินเครื่องในเวลากลางวัน (10 ชั่วโมง/วัน) พบว่า การใช้เวลาทำงานของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ (1) การใช้เวลาในการลดอุณหภูมิภายในอุโมงค์ก่อนแช่เยือกแข็ง (Set up period) เท่ากับ1.01 ชั่วโมง (ร้อยละ10.1) (2) การใช้เวลาในระหว่างการแช่เยือกแข็ง (Freezing period) ซึ่งประกอบด้วยช่วงเวลาแช่เยือกแข็งปกติเท่ากับ 7.77 ชั่วโมง (ร้อยละ 77.7) และช่วงเวลาการทำงานของเครื่องเปล่า 0.89 ชั่วโมง (ร้อยละ 8.9) และ (3) การใช้เวลาในระหว่างละลายน้ำแข็ง (Defrosting period) เท่ากับ 0.33 ชั่วโมง (ร้อยละ 3.33) แต่เนื่องจากการใช้เวลาในการละลายน้ำแข็งใช้เวลาสูงสุดไม่เกิน 20 นาทีต่อวันจากเวลาการทำงานของเครื่องแช่เยือกแข็งเฉลี่ย 10

ชั่วโมงต่อวัน ทำให้มีการใช้พลังงานในการละลายน้ำแข็งน้อยมาก จึงไม่นำช่วงเวลาดังกล่าวมาพิจารณาในแง่ของการใช้พลังงานโดยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์

การทำงานของเครื่องแช่เยือกแข็งเพื่อทำการแช่เยือกแข็ง 10 ชั่วโมงต่อวัน พบว่าในระหว่างแช่เยือกแข็งเกิดความผิดปกติในการดำเนินงานทำให้เกิดการทำงานของเครื่องเปล่าคิดเป็นร้อยละ 8.9 ซึ่งการทำงานของเครื่องเปล่าที่เกิดขึ้นนั้นเป็นกิจกรรมที่ไม่พึงประสงค์แต่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงการทำงานของเครื่องเปล่าได้ ดังนั้นเพื่อลดหรือกำจัดการทำงานของเครื่องเปล่าให้ได้มากที่สุดจึงทำการวิเคราะห์หาสาเหตุของการทำงานของเครื่องเปล่าโดยใช้แผนผัง ทำไม – ทำไม ผลการวิเคราะห์สาเหตุการทำงานของเครื่องเปล่าด้วยแผนผังทำไม – ทำไม โดยมีรายละเอียดดังแสดงในภาพที่ 23



ภาพที่ 23 สาเหตุของการทำงานของเครื่องเปล่าโดยการใช้แผนผัง ทำไม – ทำไม

การทำงานของเครื่องเปล่า คือ การเปิดระบบทำความเย็นของเครื่องแช่เยือกแข็งแต่ไม่มีการแช่เยือกแข็งหรือไม่มีผลิตภัณฑ์อยู่บนสายพานลำเลียงภายในอุโมงค์แช่เยือกแข็ง ทั้งนี้การทำงานของเครื่องเปล่ายังรวมถึงการหยุดสายพานลำเลียงขณะทำการแช่เยือกแข็ง โดยผลิตภัณฑ์ค้างอยู่บนสายพานไม่สามารถนำออกจากเครื่องแช่เยือกแข็งได้ ทำให้อุณหภูมิกึ่งกลางผลิตภัณฑ์ลดต่ำลงกว่าค่าเป้าหมายที่ -20 องศาเซลเซียส จัดเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน จึงพิจารณาให้รวมเป็นลักษณะการทำงานของเครื่องเปล่า ผลการวิเคราะห์สาเหตุของการทำงานของเครื่องเปล่าสามารถสรุปเป็นสาเหตุหลักได้ 3 ลักษณะ ได้แก่

(1) การรอบรรจุภัณฑ์ คือ การหยุดสายพานเครื่องแช่เยือกแข็งเพื่อหยุดการไหลของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแล้ว เนื่องจากการเตรียมบรรจุภัณฑ์ที่ใช้บรรจุยังไม่เสร็จ โดยปกติผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแล้วจะทำการบรรจุลงบรรจุภัณฑ์ (ถุงพลาสติกและกล่องกระดาษ) ทันที โดยการเตรียมบรรจุภัณฑ์ต้องผ่านขั้นตอนต่างๆ เช่น การระบุวันที่ผลิต วันหมดอายุ ชื่อลูกค้า เป็นต้น ซึ่งต้องมีระยะเวลาในการเตรียมโดยเฉพาะถุงพลาสติกสำหรับบรรจุผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบ IQF ต้องใช้เวลาในการเตรียมไม่น้อยกว่า 30 นาทีทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแล้วยังไม่สามารถเข้าสู่การบรรจุได้ทันที จำเป็นต้องมีการหยุดสายพานของเครื่องแช่เยือกแข็ง กรณีนี้เนื่องจากมีผลิตภัณฑ์ค้างอยู่ภายในเครื่องแช่เยือกแข็ง มีการใช้พลังงานเพื่อผลิตความเย็นตลอดเวลา ซึ่งเป็นการทำงานของเครื่องทำความเย็นโดยไม่เกิดมูลค่าจึงกำหนดให้เป็นลักษณะของการทำงานของเครื่องเปล่า

(2) การรอผลิตภัณฑ์ คือ การเปิดระบบทำความเย็นของเครื่องแช่เยือกแข็งจนมีอุณหภูมิลดต่ำลงที่ระดับค่าเป้าหมายแต่ยังไม่มีผลิตภัณฑ์ที่พร้อมจะแช่เยือกแข็ง การเดินเครื่องเปล่าลักษณะนี้ทำให้อุณหภูมิภายในเครื่องแช่เยือกแข็งลดต่ำลงมากอาจต่ำกว่า -60 องศาเซลเซียส ซึ่งจะกระทบต่อประสิทธิภาพของเครื่องแช่เยือกแข็งโดยตรงทำให้เครื่องคอมเพรสเซอร์ต้องใช้แรงอัดเพิ่มขึ้นในการอัดสารทำความเย็น กรณีนี้เครื่องแช่เยือกแข็งอาจมีอัตราการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นกว่าปกติ อย่างไรก็ตามสาเหตุที่แท้จริงของการทำงานของเครื่องเปล่าจากการรอผลิตภัณฑ์นั้นสามารถพิจารณาได้ในสองลักษณะ ได้แก่ กรณีที่ผลิตภัณฑ์ยังอยู่ในขั้นตอนการผลิต ซึ่งปัญหาดังกล่าวเป็นปัญหาในขั้นตอนการผลิต เช่น การเกิดจุดคอขวดในขั้นตอนการผลิต ทำให้มีการส่งมอบผลิตภัณฑ์เพื่อทำการแช่เยือกแข็งช้ากว่าแผนผลิตเดิม หรืออาจเกิดจากพนักงานเปิดระบบทำความเย็นเร็วเกินไปอาจมีโอกาสที่อุณหภูมิภายในอุโมงค์แช่เยือกแข็งจะลดต่ำลงมากกว่าระดับเป้าหมายก่อนที่ผลิตภัณฑ์จะพร้อมสำหรับการแช่เยือกแข็ง ทำให้เกิดการทำงานของเครื่องเปล่าในระหว่างรอผลิตภัณฑ์

(3) การรอชั่งหรือรอบรรจุ มีลักษณะของปัญหาแบบเดียวกับการทำงานของเครื่องเปล่าเพื่อรอบรรจุภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแล้วไม่สามารถบรรจุได้ แต่มีสาเหตุแตกต่างกัน โดยการทำงานของเครื่องเปล่าจากการรอชั่งหรือรอบรรจุมี 4 สาเหตุหลัก ได้แก่ (1) ข้อจำกัดของเครื่องชั่งอัตโนมัติ ซึ่งสามารถบรรจุผลิตภัณฑ์ได้ครั้งละหนึ่งชนิดเท่านั้น แต่การดำเนินงานจริงอาจมีผลิตภัณฑ์จาก 2 ไลน์การแช่เยือกแข็งที่พร้อมบรรจุ คือ ไลน์เครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์และแบบลมเป่า ดังนั้นเมื่อมีผลิตภัณฑ์พร้อมบรรจุจาก 2 ไลน์ในเวลาเดียวกันต้องมีการหยุดสายพานเครื่องแช่เยือกแข็งเพื่อบรรจุผลิตภัณฑ์ก่อนหน้าให้เสร็จก่อนจึงค่อยบรรจุผลิตภัณฑ์ถัดไป (2) พนักงานบรรจุทำงานไม่ทัน ซึ่งเกิดจากจำนวนพนักงานกับปริมาณผลิตภัณฑ์ไม่สมดุลกัน คือ มีปริมาณผลิตภัณฑ์พร้อมบรรจุสูงกว่าความสามารถในการบรรจุของพนักงานทำให้เกิดการรอคอย (3) เครื่องชั่งอัตโนมัติชำรุด และ (4) การทำความสะอาดเครื่องชั่งอัตโนมัติ ซึ่งเมื่อมีการบรรจุผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดเสร็จ ต้องมีการทำความสะอาดเครื่องชั่งทุกครั้งก่อนบรรจุผลิตภัณฑ์ถัดไป ซึ่งใช้เวลาในการทำความสะอาด 5 – 10 นาที ทำให้เกิดการรอคอยในช่วงดังกล่าว

การทำงานของเครื่องเปล่าโดยที่ระบบทำความเย็นของเครื่องแช่เยือกแข็งยังคงผลิตความเย็นออกมาอย่างต่อเนื่องทำให้มีการใช้พลังงานอยู่ตลอดเวลา ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ คือ ผลิตภัณฑ์สูญเสียความชื้นไปอย่างต่อเนื่องส่งผลกระทบต่อน้ำหนักและลักษณะผิวสัมผัสของผลิตภัณฑ์ รวมถึงยังมีโอกาสทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการบรรจุแล้วเกิดความเสียหายจากอุณหภูมิที่ต่ำมากทำให้ถุงพลาสติกที่ใช้บรรจุกรอบและแตก ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์นั้นไม่ผ่านเกณฑ์การตรวจสอบ นอกจากผลกระทบด้านคุณภาพแล้วยังมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเครื่องแช่เยือกแข็งและระบบทำความเย็น เนื่องจากเมื่อสารทำความเย็นไม่ได้รับความร้อนเพียงพอจนเกิดการระเหยไม่สมบูรณ์ เครื่องคอมเพรสเซอร์จะใช้พลังงานมากขึ้นในการอัดไอของสารทำความเย็นที่ระเหยไม่สมบูรณ์นั้น รวมถึงเกิดน้ำแข็งขึ้นในอุโมงค์แช่เยือกแข็งซึ่งขัดขวางการไหลของอากาศส่งผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็ง การเกิดน้ำแข็งดังกล่าวอาจทำให้ใบพัดหยุดทำงานหรือสายพานลำเลียงโดนน้ำแข็งเกาะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้

เพื่อป้องกันผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อผลิตภัณฑ์และระบบทำความเย็นจากการทำงานของเครื่องเปล่า งานวิจัยนี้จึงเน้นการลดหรือกำจัดการใช้พลังงานในระหว่างการทำงานของเครื่องเปล่าหรือหยุดสายพานเครื่องแช่เยือกแข็งเพื่อรอชั่ง/บรรจุ แนวทางที่ดีที่สุดในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น คือ การวางแผนการผลิตที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการเกิดการหยุดสายพานเครื่องแช่เยือกแข็งเพื่อรอบรรจุ แต่เมื่อพิจารณาโดยผู้เกี่ยวข้อง พบว่า ไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโรงงานกรณีศึกษา เนื่องจากโรงงานมีความหลากหลายของผลิตภัณฑ์เป็นการยากที่จะวางแผนการผลิตให้

สอดคล้องกับการแช่เยือกแข็ง การชั่งและการบรรจุ เพื่อให้การแช่เยือกแข็งและการชั่ง/บรรจุไม่เกิดเวลารอคอย ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงแก้ปัญหาโดยการลดชั่วโมงการทำงานของเครื่องแช่เยือกแข็งลงเพื่อลดการใช้พลังงานในระหว่างการทำงานของเครื่องเปล่า แต่ช่วงเวลาการหยุดรอชั่ง/บรรจุยังเกิดขึ้นในขั้นตอนการผลิต

4. แนวทางการประหยัดพลังงานในขั้นตอนการแช่เยือกแข็งของโรงงานกรณีศึกษา

แนวทางการประหยัดพลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์กรณีศึกษาเน้นการลดระดับการใช้พลังงานหรือการลดชั่วโมงการทำงานของเครื่องแช่เยือกแข็งลง ตามแนวทางประเมินการใช้พลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็งของ Huan (2003a) ซึ่งประเมินการใช้พลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็งออกเป็นสองรูปแบบหลัก ได้แก่ 1) การประเมินประสิทธิภาพของการผลิตความเย็น (Refrigeration production) ของระบบซึ่งพิจารณาค่า COP ของระบบทำความเย็นเป็นหลักและ 2) การประเมินการใช้ประโยชน์ของความเย็นที่ระบบผลิตได้ (Refrigeration utilization)โดยเน้นปรับปรุงการดำเนินงานหรือกำลังการผลิตเป็นหลัก เนื่องจากเครื่องแช่เยือกแข็งกรณีศึกษามีอัตราการใช้พลังงานคงที่และอยู่ในระดับที่โรงงานยอมรับ การศึกษาการประหยัดพลังงานเริ่มจากการตรวจสอบการใช้พลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็งแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งแสดงการใช้พลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็งในแต่ละกิจกรรมโดยการใช้พลังงานในช่วงการแช่เยือกแข็ง (freezing period) เครื่องแช่เยือกแข็งใช้พลังงานเฉลี่ยที่ 199.33 กิโลวัตต์-ชั่วโมง เมื่อพิจารณาภาพที่ 23 แสดงสัดส่วนการใช้พลังงาน พบว่า มีการใช้พลังงานในการทำงานของเครื่องเปล่าซึ่งทำให้ต้นทุนการแช่เยือกแข็งเพิ่มขึ้น เพื่อแก้ไขปัญหาและลดการใช้พลังงานดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงเสนอแนวทางการประหยัดพลังงาน 2 รูปแบบ ได้แก่ 1) การลดการใช้พลังงานด้วยวิธีการลดชั่วโมงการทำงานของเครื่องแช่เยือกแข็งโดยไม่กระทบกับปริมาณการผลิตและ 2) การควบคุมการใช้พลังงานด้วยวิธีการปรับปรุงการพิจารณาดัชนีการใช้พลังงานให้สอดคล้องกับการดำเนินงานจริง ทั้งนี้การลดการใช้พลังงานจะลดการใช้พลังงานในการลดอุณหภูมิภายในอุโมงค์ก่อนแช่เยือกแข็ง ลดการทำงานของเครื่องเปล่า และลดการใช้พลังงานในขณะทำการแช่เยือกแข็ง ส่วนการควบคุมการใช้พลังงานจะทำการปรับปรุงเกณฑ์การพิจารณากำลังการผลิตและขั้นตอนการใช้งานเครื่องแช่เยือกแข็งให้เป็นมาตรฐานเพื่อลดชั่วโมงการทำงานที่ไม่จำเป็นลง ซึ่งรายละเอียดการปรับปรุงมีดังนี้

4.1 การลดการใช้พลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็ง

(1) การปรับปรุงเกณฑ์การลดอุณหภูมิภายในอุโมงค์ก่อนแช่เยือกแข็ง

การใช้งานเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์ต้องเปิดระบบทำความเย็นเพื่อลดอุณหภูมิภายในอุโมงค์แช่เยือกแข็งให้ลดต่ำลงจนได้ระดับที่กำหนดก่อนนำผลิตภัณฑ์เข้าเครื่อง ซึ่งกำหนดเกณฑ์การลดอุณหภูมิภายในอุโมงค์ก่อนเริ่มแช่เยือกแข็ง ต้องมีอุณหภูมิต่ำกว่า – 40 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นที่จอควบคุมการทำงานของเครื่อง (ภาพที่ 17) ค่าอุณหภูมิภายในอุโมงค์จะแสดงออกมา 4 ค่าตามจำนวนของเครื่องระเหยภายในอุโมงค์ซึ่งติดตั้งกระจายภายในอุโมงค์แช่เยือกแข็ง การเปิดเครื่องแช่เยือกแข็งในแต่ละกะของการทำงานจะมีการเปิดเครื่อง 2 ช่วงเวลา คือ การเปิดเครื่องครั้งแรกของวันและการเปิดเครื่องครั้งที่สองหลังหยุดพัก (หลังละลายน้ำแข็ง) เวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการลดอุณหภูมิภายในอุโมงค์ก่อนแช่เยือกแข็ง

กิจกรรม	เวลาเฉลี่ย (นาที)*
เปิดเครื่องครั้งแรก	41.14±7.06
เปิดเครื่องครั้งที่สอง(หลังพัก)	19.58±5.42

*ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากจำนวน 15 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยของเวลาในการลดอุณหภูมิภายในอุโมงค์เท่ากับ 41.14 นาทีสำหรับการเปิดเครื่องครั้งแรกของวัน และใช้เวลา 19.58 นาที_การใช้เวลาในการลดอุณหภูมิภายในอุโมงค์มีค่าที่แตกต่างกันสำหรับการเปิดเครื่องครั้งที่สองของวัน เนื่องจากการเปิดเครื่องครั้งแรกอุณหภูมิเริ่มต้นภายในอุโมงค์ (ambient temperature) มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิของอากาศโดยรอบหรืออยู่ในช่วง 20 ถึง 23 องศาเซลเซียส จึงใช้เวลานานกว่าการเปิดเครื่องครั้งที่สองที่อุณหภูมิเริ่มต้นภายในอุโมงค์อยู่ในช่วง -5 ถึง 0 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาระยะเวลาที่ใช้ในการในการลดอุณหภูมิโดยแบ่งตามขนาดของเครื่องคอมเพรสเซอร์ออกเป็นสองกลุ่ม แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 เวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิภายในอุโมงค์ของเครื่องแช่เยือกแข็งแบ่งตามชุดของเครื่องคอมเพรสเซอร์

คอมเพรสเซอร์	เวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิภายในอุโมงค์ (นาที)	
	เปิดเครื่องครั้งแรก	เปิดเครื่องหลังพัก
คอมเพรสเซอร์ชุดที่ 1, 2 และ 3	32.00 ± 2.45	12.50 ± 2.50
คอมเพรสเซอร์ชุดที่ 4	41.14 ± 7.06	19.58 ± 5.42

เนื่องจากขนาดของเครื่องระเหยของคอมเพรสเซอร์ชุดที่ 1, 2 และ 3 มีขนาดเท่ากัน ทำให้เวลาที่ใช้สำหรับการลดอุณหภูมิมีแนวโน้มใกล้เคียงกันทั้ง 3 ชุดจึงพิจารณาเวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิร่วมกัน ยกเว้นเครื่องคอมเพรสเซอร์ชุดที่ 4 ใช้เวลาในการลดอุณหภูมิภายในอุโมงค์มากกว่าคอมเพรสเซอร์ชุดที่ 1, 2 และ 3 ประมาณ 7 – 10 นาที เนื่องจากมีพื้นที่ทำความเย็นกว้างกว่าคอมเพรสเซอร์ชุดที่ 1,2 และ 3 ลักษณะการเคลื่อนที่ของผลิตภัณฑ์ภายในอุโมงค์แช่เยือกแข็งนั้นจะเคลื่อนที่จากเครื่องคอมเพรสเซอร์ชุดที่ 1 ไปยังชุดที่ 4 โดยความเร็วในการเคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์ จากลักษณะดังกล่าวจึงมีความเป็นไปได้ในการพิจารณาปรับค่าอุณหภูมิเป้าหมายภายในอุโมงค์ก่อนเริ่มแช่เยือกแข็งใหม่ โดยไม่กระทบกับอุณหภูมิกึ่งกลางของผลิตภัณฑ์ จึงได้ทำการทดลองกับผลิตภัณฑ์ตัวอย่างที่ระยะเวลาแช่เยือกแข็งแตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ เวลาแช่เยือกแข็ง 20 นาทีใช้เต้าหู้ปลาแช่เยือกแข็งแบบ IQF เป็นผลิตภัณฑ์ทดลอง เวลาแช่เยือกแข็ง 25 นาทีใช้ลูกชิ้นปลาบรรจุสุญญากาศปริมาณบรรจุ 200 กรัม และเวลาแช่เยือกแข็ง 30 นาทีใช้เต้าหู้ปลาบรรจุสุญญากาศปริมาณบรรจุ 300 กรัม จากนั้นทำการบันทึกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเครื่องแช่เยือกแข็งในขณะที่ผลิตภัณฑ์เคลื่อนที่เข้าจนกระทั่งเคลื่อนที่ออกจากเครื่อง โดยบันทึกค่าอุณหภูมิเมื่อผลิตภัณฑ์เริ่มเข้าอุโมงค์เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นและบันทึกอุณหภูมิสุดท้ายเมื่อผลิตภัณฑ์ชิ้นแรกออกจากอุโมงค์ ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในอุโมงค์ของเครื่องแช่เยือกแข็ง

เครื่องคอมเพรสเซอร์	อุณหภูมิเริ่มต้น (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิสุดท้าย (องศาเซลเซียส)
เวลาแช่เยือกแข็ง 20 นาที		
เครื่องคอมเพรสเซอร์ชุดที่ 1	-51.6	-41.0
เครื่องคอมเพรสเซอร์ชุดที่ 2	-52.5	-40.7
เครื่องคอมเพรสเซอร์ชุดที่ 3	-50.5	-45.3
เครื่องคอมเพรสเซอร์ชุดที่ 4	-47.2	-46.9
เวลาแช่เยือกแข็ง 25 นาที		
เครื่องคอมเพรสเซอร์ชุดที่ 1	-54.7	-54.7
เครื่องคอมเพรสเซอร์ชุดที่ 2	-51.0	-53.4
เครื่องคอมเพรสเซอร์ชุดที่ 3	-44.5	-47.7
เครื่องคอมเพรสเซอร์ชุดที่ 4	-32.7	-38.3
เวลาแช่เยือกแข็ง 30 นาที		
เครื่องคอมเพรสเซอร์ชุดที่ 1	-55.4	-56.6
เครื่องคอมเพรสเซอร์ชุดที่ 2	-51.4	-53.4
เครื่องคอมเพรสเซอร์ชุดที่ 3	-36.8	-42.4
เครื่องคอมเพรสเซอร์ชุดที่ 4	-26.3	-35.3

จากตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในอุโมงค์แช่เยือกแข็ง พบว่า ที่ระยะเวลาแช่เยือกแข็ง 20 นาที อุณหภูมิภายในอุโมงค์แช่เยือกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อผลิตภัณฑ์เคลื่อนที่เข้าและออกจากอุโมงค์ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในอุโมงค์ดังกล่าวเกิดจากผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง (เต้าหู้ปลา) ซึ่งเป็นการแช่เยือกแข็งแบบ IQF อุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์สูง (20-25 องศาเซลเซียส) และมีกำลังการผลิตสูง ส่งผลให้ความร้อนไหลเข้าระบบมากกว่าความเย็นที่ระบบผลิตได้ หรือมีอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนสูง อย่างไรก็ตามอุณหภูมิภายในอุโมงค์ที่เพิ่มขึ้นไม่กระทบต่ออุณหภูมิกึ่งกลางของผลิตภัณฑ์หลังแช่เยือกแข็งซึ่งยังอยู่ในระดับที่โรงงานกำหนด คือต่ำ

กว่าหรือเท่ากับ -20 องศาเซลเซียส แม้ว่าอุณหภูมิภายในอุโมงค์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาผ่านไป แต่ไม่สามารถทำการทดลองต่อได้เนื่องจากจำเป็นต้องหยุดสานพานเครื่องแช่เยือกแข็งเพื่อรอบรรจุด้วยเครื่องชั่งอัตโนมัติ การหยุดสานพานดังกล่าวมีผลโดยตรงต่ออุณหภูมิภายในอุโมงค์โดยอุณหภูมิจะลดต่ำลงเพราะระบบทำความเย็นยังคงผลิตความเย็นอย่างต่อเนื่องในขณะที่ไม่มีความร้อนใหม่เข้าสู่ระบบ

ที่ระยะเวลาแช่เยือกแข็ง 25 และ 30 นาทีใช้ผลิตภัณฑ์ที่บรรจุสุญญากาศเป็นกลุ่มตัวอย่าง อุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ 18-20 องศาเซลเซียส กำลังการผลิตต่ำกว่าเป้าหมายที่ 500 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยมีกำลังการผลิตอยู่ในช่วง 200 – 250 กิโลกรัมต่อชั่วโมงเท่านั้น เมื่อผลิตภัณฑ์เคลื่อนที่เข้าและออกจากอุโมงค์แช่เยือกแข็ง พบว่า อุณหภูมิภายในอุโมงค์ลดต่ำลงเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งแตกต่างกับการแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์กลุ่ม IQF เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการบรรจุแล้วจะมีถุงพลาสติกเป็นตัวขัดขวางการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างผิวของผลิตภัณฑ์กับอากาศเย็นภายในอุโมงค์ ทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนเกิดขึ้นช้ากว่าการแช่เยือกแข็งแบบ IQF ทำให้ปริมาณความเย็นที่ระบบผลิตได้สูงกว่าปริมาณความร้อนที่ไหลเข้าระบบ อุณหภูมิภายในอุโมงค์จึงลดต่ำลงอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่า ไม่จำเป็นต้องรอให้อุณหภูมิภายในอุโมงค์ลดต่ำลงกว่า -40 องศาเซลเซียส ทุกชุดของเครื่องคอมเพรสเซอร์ แต่สามารถเริ่มแช่เยือกแข็งได้ทันทีที่อุณหภูมิของคอมเพรสเซอร์ชุดที่ 1 และ 2 ต่ำกว่า – 40 องศาเซลเซียส จะเป็นการลดการใช้พลังงานในช่วงดังกล่าวลง

จากผลการบันทึกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในอุโมงค์ สามารถสรุปได้ว่าเกณฑ์การลดอุณหภูมิภายในอุโมงค์ก่อนเริ่มแช่เยือกแข็งเดิมสามารถปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมยิ่งขึ้นได้ โดยกำหนดให้พิจารณาอุณหภูมิภายในอุโมงค์เฉพาะอุณหภูมิของเครื่องคอมเพรสเซอร์ชุดที่ 1 และ 2 เท่านั้น ซึ่งจะต้องต่ำกว่า -40 องศาเซลเซียสก่อนเริ่มแช่เยือกแข็ง แทนการพิจารณาอุณหภูมิของคอมเพรสเซอร์ทั้ง 4 ชุด เกณฑ์ใหม่ที่กำหนดขึ้นจะช่วยลดระยะเวลาในการลดอุณหภูมิก่อนแช่เยือกแข็งลง 7-10 นาที

(2) การปิดการทำงานของระบบทำความเย็นในระหว่างการรอคอย

การทำงานของเครื่องเปล่าหรือการทำงานของเครื่องเพื่อผลิตความเย็นแต่ไม่ได้ทำการแช่เยือกแข็งประกอบด้วย 3 กรณีหลัก ได้แก่ การทำงานของเครื่องเปล่าเพื่อรอชั่ง/บรรจุ รอผลิตภัณฑ์ และรอบรรจุภัณฑ์ ทั้ง 3 กรณีมีลักษณะคล้ายกัน คือมีการหยุดสายพานลำเลียงของเครื่องแช่เยือกแข็งแต่เครื่องคอมเพรสเซอร์ยังคงทำงานและผลิตความเย็นอย่างต่อเนื่อง เพื่อประเมิน

ช่วงเวลาการหยุดเครื่องดังกล่าว ผู้วิจัยจึงทำการบันทึกการใช้งานเครื่องแช่เยือกแข็งตั้งแต่การเปิดเครื่องครั้งแรกจนถึงการปิดเครื่องครั้งสุดท้าย (10 ชั่วโมง/วัน) พบว่า มีการทำงานของเครื่องเปล่าคิดเป็นร้อยละ 12.6 ของการทำงานของเครื่องทั้งวัน เมื่อพิจารณาการทำงานของเครื่องเปล่าในแต่ละวัน พบว่า มีการทำงานของเครื่องเปล่าเฉลี่ย 2 ครั้ง/วัน โดยมีค่าเฉลี่ยการทำงานของเครื่องเปล่าเท่ากับ 53.41 นาที และมีค่าเฉลี่ยการทำงานของเครื่องเปล่าต่อครั้งเท่ากับ 28.66 นาที ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ค่าเฉลี่ยการหยุดสายพานของเครื่องแช่เยือกแข็งเพื่อรอบรรจุ

	ค่าเฉลี่ย* (นาที)	สูงสุด (นาที)	ต่ำสุด (นาที)
ค่าเฉลี่ยต่อวัน (10 ชม.)	53.41±42.10	200	10
ค่าเฉลี่ยต่อครั้ง	28.66±15.21	60	10

*ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากจำนวน 22 ซ้ำ

จากตารางที่ 7 พบว่า ระยะเวลาที่มีการทำงานของเครื่องเปล่าอาจสูงถึง 200 นาที/วัน ในกรณีที่มีการหยุดเครื่องมากกว่า 2 ครั้งขึ้นไป ช่วงเวลาส่วนใหญ่ที่มีการหยุดสายพาน (การทำงานของเครื่องเปล่า) จะเริ่มหยุดตั้งแต่นาทีที่ 40, 60 หรือนาทีที่ 70 หลังเปิดเครื่องเป็นต้นไป หรือในนาทีที่ผลิตภัณฑ์ชิ้นแรกเคลื่อนที่ออกจากอุโมงค์แช่เยือกแข็งและจำเป็นต้องหยุดสายพานเครื่องแช่เยือกแข็งเพื่อรอชั่ง/บรรจุ เนื่องจากเครื่องชั่งอัตโนมัติมีกำลังการผลิตสูงและเป็นกำลังการผลิตหลักทำให้มีการทำงานอยู่ตลอดเวลา โดยเครื่องชั่งอัตโนมัติสามารถชั่ง/บรรจุผลิตภัณฑ์จากทั้งเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์และแบบลมเย็นจัด ดังนั้นเมื่อมีผลิตภัณฑ์พร้อมบรรจุจากเครื่องแช่เยือกแข็งทั้ง 2 ประเภท จึงต้องมีการหยุดรอเพื่อให้การชั่งผลิตภัณฑ์ก่อนหน้าเสร็จสิ้นก่อน ด้วยลักษณะการดำเนินงานดังกล่าวจึงไม่สามารถหลีกเลี่ยงการทำงานของเครื่องเปล่าได้ ซึ่งขัดแย้งกับนโยบายการประหยัดพลังงาน อย่างไรก็ตามแม้ว่าการชั่ง/บรรจุผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องชั่งอัตโนมัตินั้นสามารถเปลี่ยนผลิตภัณฑ์ที่ต้องการบรรจุได้ตลอดเวลา แต่การชั่ง/บรรจุผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเย็นจัดมีกำลังการผลิตสูงกว่าการชั่ง/บรรจุผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์ เช่น การชั่ง/บรรจุผลิตภัณฑ์ขนาด 500 กรัม การชั่ง/บรรจุผลิตภัณฑ์ชนิดเดียวกันจากเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเย็นจัดอาจมีกำลังการผลิตสูงถึง 1,050 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ในขณะที่การชั่ง/บรรจุผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์มีกำลังการผลิตสูงสุดไม่เกิน 900 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ด้วยเหตุผลด้านความแตกต่างของกำลังการผลิตซึ่งโรงงานกรณีศึกษาให้ความสำคัญต่อเป้าหมายการผลิตต่อวันเป็นสำคัญ จึงทำให้เกิดการทำงานของเครื่องเปล่าของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์ ดังนั้นเพื่อลดการใช้พลังงานในช่วงเวลาดังกล่าวจึงกำหนดให้มีการปิดระบบการทำความเย็น หรือการหยุดการทำงานของเครื่องคอมเพรสเซอร์เมื่อมีการหยุดสายพานลำเลียงในระหว่างการรอชั่ง/บรรจุ โดยกำหนดให้หยุดระบบการทำความเย็นทุกครั้งที่มีการหยุดสายพานลำเลียงเกิน 20 นาที โดยสามารถพยากรณ์ระยะเวลาที่จะมีการหยุดสายพานลำเลียงล่วงหน้าได้จากปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ต้องการบรรจุกับความเร็วในการชั่ง/บรรจุของเครื่องชั่งอัตโนมัติ

อย่างไรก็ตามการปิดการทำงานของคอมเพรสเซอร์และเปิดทำงานใหม่อีกครั้ง ในช่วงแรกของการเปิดการทำงาน เครื่องคอมเพรสเซอร์จะใช้พลังงานสูงกว่าในช่วงปกติประมาณ 10 กิโลวัตต์ หรือเท่ากับการใช้พลังงานในการทำงานของเครื่องประมาณ 3 นาที ดังนั้นการปิดคอมเพรสเซอร์เมื่อเกิดการทำงานของเครื่องเปล่าเกิน 3 นาทีสามารถประหยัดพลังงานได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับการใช้พลังงานในขณะที่มีการทำงานของเครื่องเปล่า แต่จากลักษณะการดำเนินงานปัจจุบันมีโอกาสเกิดการหยุดสานพานในระยะเวลาสั้นๆ (ต่ำกว่า 10 นาที) หลายครั้งต่อวันการกำหนดให้มีการปิดเครื่องคอมเพรสเซอร์ทุกครั้งที่มีการหยุดสายพานอาจกระทบกับอายุการใช้งานของเครื่องคอมเพรสเซอร์ เพื่อลดผลกระทบดังกล่าวจึงกำหนดให้มีการปิดเครื่องคอมเพรสเซอร์เมื่อมีการหยุดสายพานนานเกิน 20 นาทีขึ้นไปเท่านั้น

(3) การปรับปรุงลำดับการปิดการทำงานของเครื่องคอมเพรสเซอร์

จากแนวคิดการประหยัดพลังงานสำหรับเครื่องแช่เยือกแข็งของสถาบันสิ่งแวดล้อมไทย การประหยัดพลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็งอย่างง่ายโดยการลดชั่วโมงการทำงานได้แก่ การเปิดเครื่องให้ช้าและปิดเครื่องให้เร็ว การเปิดเครื่องให้ช้า คือการควบคุมระยะเวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิภายในอุโมงค์แช่เยือกแข็ง (Set up period) ให้เหมาะสม และการปิดเครื่องให้เร็ว คือการปิดเครื่องทันทีเมื่อแช่เยือกแข็งเสร็จ เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 16 โครงสร้างของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์ประกอบด้วยเครื่องระเหย 4 ชุด แต่ละชุดทำงานเป็นอิสระต่อกันและวางกระจายตามความยาวของเครื่องทำให้สามารถปิดการทำงานในแต่ละชุดได้เมื่อผลิตภัณฑ์เคลื่อนที่ผ่านเครื่องระเหยเครื่องนั้นไปแล้ว ทั้งนี้ความยาวของสายพานภายในอุโมงค์แช่เยือกแข็งเท่ากับ 9 เมตร ทำให้สามารถพยากรณ์ตำแหน่งของผลิตภัณฑ์บนสายพานจากเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็ง ส่งผลให้สามารถกำหนดระยะเวลาปิดได้ถูกต้องแสดงตามตารางที่ 9

ตารางที่ 9 การปิดระบบทำความเย็นแต่ละชุดตามเวลาแช่เยือกแข็ง

เวลาแช่เยือกแข็ง (นาที)	การปิดระบบทำความเย็น	เวลาการทำงานของเครื่องคอมเพรสเซอร์ที่ลดลง (นาที)		
		ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3
15	ปิดทุก 5นาที	10	5	-
20	ปิดทุก 5 นาที	15	10	5
25	ปิดทุก 10 นาที	15	5	-
30	ปิดทุก 10 นาที	20	10	-

4.2 การควบคุมการใช้พลังงานในขั้นตอนการแช่เยือกแข็ง

(1) การปรับปรุงวิธีการบันทึกข้อมูลและการคำนวณกำลังการผลิต

การบันทึกข้อมูลการใช้เครื่องแช่เยือกแข็งของแผนกบรรจุจะบันทึกรายการการแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์ในแต่ละวัน เฉพาะช่วงเวลาที่ทำการแช่เยือกแข็งเท่านั้นจะนำมาใช้ในการคำนวณกำลังการผลิต บันทึกดังกล่าวไม่ระบุช่วงเวลาเปิดเครื่อง รวมถึงการคำนวณกำลังการผลิตจะไม่นำเอาช่วงเวลาที่มีการหยุดสายพานลำเลียงขณะทำการแช่เยือกแข็งมาพิจารณาร่วมด้วย ทำให้ค่ากำลังการผลิตที่ได้ไม่สะท้อนต้นทุนการแช่เยือกแข็งที่แท้จริง และส่งผลให้ปัญหาการหยุดสานพานลำเลียงในระหว่างการแช่เยือกแข็งไม่ได้รับการแก้ไข ทั้งนี้เมื่อนำข้อมูลการบันทึกปริมาณการแช่เยือกแข็งในแต่ละวันของแผนกบรรจุเปรียบเทียบกับชั่วโมงที่มีการทำงานของเครื่องคอมเพรสเซอร์ทั้งหมดในแต่ละวันของแผนกอนุรักษ์พลังงาน พบว่า ข้อมูลที่ได้ไม่สอดคล้องกัน ตัวอย่างเช่น ผลการดำเนินงานการแช่เยือกแข็งในเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2554 ซึ่งมีการทำงานของเครื่องแช่เยือกแข็งทั้งหมด 18 วัน แผนกบรรจุมีการบันทึกเวลาที่ใช้แช่เยือกแข็งไว้เท่ากับ 172.12 ชั่วโมง แต่แผนกอนุรักษ์พลังงานสามารถบันทึกเวลาการทำงานของเครื่องคอมเพรสเซอร์ได้สูงถึง 252.77 ชั่วโมง ซึ่งมีความแตกต่างกันสูงถึง 80.65 ชั่วโมง ส่วนต่างดังกล่าวที่เกิดขึ้นเนื่องจากแผนกบรรจุบันทึกช่วงเวลาที่มีการแช่เยือกแข็งเท่านั้นไม่บันทึกช่วงเวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิภายในอุโมงค์ก่อนแช่

เยือกแข็งรวมถึงการไม่นำเอาช่วงเวลาที่มีการหยุดสายพานลำเลียงมาพิจารณา จากลักษณะดังกล่าว จำเป็นอย่างยิ่งต้องทำการปรับปรุงการบันทึกข้อมูลและการคำนวณกำลังการผลิตใหม่

เพื่อควบคุมการใช้พลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็งให้มีความสอดคล้องกันทั้งสองแผนกจึงได้ทำการพิจารณาดัชนีการใช้พลังงานที่โรงงานกำหนดไว้ที่ 500 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตันผลิตภัณฑ์ หรือเท่ากับ 2 กิโลกรัมต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง ทั้งนี้จากการประเมินอัตราการใช้พลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็งซึ่งมีการใช้พลังงานในระดับคงที่หรือประมาณ 2,000 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อวัน ทำให้สามารถกำหนดเป้าหมายกำลังการผลิตใหม่ที่ 400 กิโลกรัมต่อชั่วโมงซึ่งสอดคล้องกับค่าดัชนีการใช้พลังงาน โดยการปรับปรุงดังกล่าวยังคงใช้แบบฟอร์มการบันทึกเดิมของโรงงานแต่ให้บันทึกช่วงเวลาทั้งหมดตั้งแต่เปิดเครื่องจนกระทั่งปิดเครื่องแช่เยือกแข็ง

(2) การปรับปรุงช่วงเวลาการทำงานของพนักงานประจำเครื่องแช่เยือกแข็ง

ช่วงเวลาของการทำงานสำหรับการแช่เยือกแข็งแบบแบ่งเป็น 2 กะ คือกลางวันและกลางคืน โดยกะกลางวันจะเริ่มตั้งแต่เวลา 08.00 น. ถึง 20.00 น. ประกอบด้วยเวลาพัก 2 ช่วง คือ เวลา 12.00 น. ถึง 13.00 น. และ 19.00 น. ถึง 20.00 น. ดังนั้นเวลาที่ใช้เดินเครื่องจริงจึงประมาณ 10 ชั่วโมงต่อวัน ใช้พนักงาน 1 คนเป็นพนักงานประจำเครื่องมีหน้าที่นำผลิตภัณฑ์เข้าอุโมงค์แช่เยือกแข็งและบันทึกการแช่เยือกแข็งในแต่ละวัน รวมถึงการทำความสะอาดเครื่องหลังแช่เยือกแข็งเสร็จ แต่เมื่อพิจารณาช่วงเวลาการทำงานของพนักงานประจำเครื่อง พนักงานคนดังกล่าวจะหยุดพักก่อนเครื่องแช่เยือกแข็งจะหยุดทำงานประมาณ 30 นาที คือพนักงานจะเริ่มงานช่วงเช้าเวลา 08.00 น. ถึงเวลา 11.30 น. และกลับเข้าทำงานเวลา 12.30 น. เพื่อเปิดเครื่องและเริ่มการแช่เยือกแข็งในช่วงบ่าย ลักษณะดังกล่าวจะทำให้ชั่วโมงในการทำงานของเครื่องแช่เยือกแข็งเพิ่มขึ้น 30 นาทีทุกวัน ซึ่งเป้าหมายของการจัดช่วงเวลาพักดังกล่าวเพื่อให้สามารถเริ่มขั้นตอนการชั่ง/บรรจุได้ทันทีในช่วงเวลา 13.00 น.หรือทันทีที่เครื่องชั่งอัตโนมัติพร้อม แต่จากการบันทึกช่วงเวลาที่มีการหยุดสานพานลำเลียงดังแสดงในตารางที่ 7 พบว่า การหยุดสายพานจะเริ่มหยุดเมื่อผลิตภัณฑ์ชิ้นแรกออกจากอุโมงค์แช่เยือกแข็งซึ่งมีสาเหตุหลายประการ เช่น หยุดสายพานรอบรรจุในกรณีที่เครื่องชั่งยังคงบรรจุผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นอยู่ หรือหยุดสายพานเพื่อรอบรรจุภัณฑ์ เป็นต้น ทำให้ไม่สามารถแช่เยือกแข็งได้ทันทีตามที่ตั้งเป้าหมายไว้ การเปิดเครื่องเร็วเกินไปจึงเป็นภาระทำให้มีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นจากชั่วโมงการทำงานของเครื่องแช่เยือกแข็งที่เพิ่มขึ้นแต่ไม่เพิ่มปริมาณผลิตภัณฑ์ที่บรรจุได้ในแต่ละวัน

ตามแนวทางการประหยัดพลังงานในระบบทำความเย็นของสถาบันสิ่งแวดล้อมไทยการเปิดเครื่องให้ช้าเป็นแนวทางหนึ่งที่มีความเหมาะสมในการลดการใช้พลังงาน การเปิดเครื่องให้ช้าลงจะทำให้สามารถลดชั่วโมงการทำงานต่อวันของเครื่องแช่เยือกแข็งลงได้ โดยการปรับเปลี่ยนช่วงเวลาการทำงานของพนักงานประจำเครื่องแช่เยือกแข็ง โดยการให้พนักงานทำงานควบคู่ไปกับเครื่องแช่เยือกแข็งและหยุดพักเครื่องเป็นเวลา 1 ชั่วโมงและต้องตรวจสอบผลิตภัณฑ์ที่จะเข้าแช่เยือกแข็งในช่วงบ่ายป้องกันกรณีผลิตภัณฑ์รอแช่เยือกแข็งนานเกิน 4 ชั่วโมง

(3) การปรับปรุงขั้นตอนการทำงาน

จากลำดับการทำงานในการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์ (ภาพที่ 15) เริ่มจาก 1) เปิดเครื่องเพื่อลดอุณหภูมิภายในอุโมงค์ก่อนแช่เยือกแข็ง 2) เลือกผลิตภัณฑ์และสั่งบรรจุภัณฑ์ 3) แช่เยือกแข็ง 4) ชั่ง/บรรจุ 5) ส่งเข้าคลังสินค้า จากลำดับการทำงานดังกล่าว พบว่าการเปิดเครื่องแช่เยือกแข็ง (ขั้นตอนที่ 1) ก่อนเลือกผลิตภัณฑ์และสั่งบรรจุภัณฑ์ (ขั้นตอนที่ 2) ทำให้มีโอกาสเกิดการทำงานของเครื่องเปล่าในการรอคอยผลิตภัณฑ์ในกรณีที่ไม่มีผลิตภัณฑ์ที่พร้อมแช่เยือกแข็ง หรือทำให้เกิดการหยุดสายพานเครื่องแช่เยือกแข็งนานขึ้นในการรอชั่ง/บรรจุในกรณีที่บรรจุภัณฑ์อยู่ในระหว่างการเตรียม เพื่อป้องกันการทำงานของเครื่องเปล่าและควบคุมการใช้พลังงานในกรณีที่เกิดจากการเปิดเครื่องเร็วเกินไป จึงได้ทำการจัดลำดับขั้นตอนการทำงานขึ้นใหม่ (Rearrange) ตามเทคนิค ECRS โดยการสลับลำดับการทำงานให้มีการเลือกผลิตภัณฑ์และสั่งบรรจุภัณฑ์ก่อนมีการเปิดเครื่อง ลำดับการทำงานใหม่จะกำหนดให้ผู้ปฏิบัติงานต้องกำหนดชนิดของผลิตภัณฑ์รวมถึงการสั่งบรรจุภัณฑ์ก่อนเปิดเครื่อง เพื่อป้องกันการรอคอยบรรจุภัณฑ์ในขั้นตอนการบรรจุและเพื่อเป็นการควบคุมระยะเวลาที่ใช้ลดอุณหภูมิก่อนแช่เยือกแข็ง

5. ผลการประยุกต์ใช้แนวทางการประหยัดพลังงานในการแช่เยือกแข็ง

การประเมินผลหลังการดำเนินงานตามแนวทางการประหยัดพลังงานที่ได้นำเสนอ โดยเปรียบเทียบผลระหว่าง ก่อนปรับปรุง และหลังการปรับปรุง ในด้านต่างๆ ดังนี้

5.1 ผลการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องแช่เยือกแข็ง

(1) การลดการใช้พลังงานในช่วงการลดอุณหภูมิภายในอุโมงค์ก่อนแช่เยือกแข็ง

จากการกำหนดเกณฑ์การลดอุณหภูมิภายในอุโมงค์แช่เยือกแข็งขึ้นใหม่โดยเกณฑ์ดังกล่าวยังคงอยู่บนพื้นฐานเกณฑ์เดิม คือ กำหนดอุณหภูมิเป้าหมายที่ -40 องศาเซลเซียส แต่

กำหนดเฉพาะอุณหภูมิที่ชุดของเครื่องควบแน่นชุดที่ 1, 2 และ 3 เท่านั้น ด้วยเกณฑ์ดังกล่าวทำให้สามารถลดระยะเวลาการลดอุณหภูมิภายในอุโมงค์ก่อนแช่เยือกแข็งลงได้ดังแสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 เปรียบเทียบเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการลดอุณหภูมิภายในอุโมงค์ ก่อนและหลังปรับปรุง

กิจกรรม	เวลาเฉลี่ย* (นาที)	
	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
เปิดเครื่องครั้งแรก	41.14±7.06	32.00±2.45
เปิดเครื่องครั้งที่สอง(หลังพัก)	19.58±5.42	12.50±2.50

*ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจำนวน 10 ซ้ำ

จากผลการประยุกต์ใช้เกณฑ์การลดอุณหภูมิภายในอุโมงค์ก่อนแช่เยือกแข็งสามารถลดระยะเวลาที่ใช้ลดอุณหภูมิในการเปิดเครื่องครั้งแรก 9.14 นาที และครั้งที่สอง (หลังพัก) เท่ากับ 7.08 นาที ทำให้สามารถลดระยะเวลาการทำงานของเครื่องประมาณ 16.22นาที/วัน ลดการใช้พลังงานจาก 212.52 กิโลวัตต์เป็น 155.75 กิโลวัตต์ เมื่อพิจารณาร่วมกันทั้ง 2 กะของการทำงาน (20 ชั่วโมง) ซึ่งมีการเปิดเครื่องทั้งหมด 4 ครั้ง ทำให้สามารถลดเวลาการทำงานของเครื่องประมาณ 32.44 นาที/วัน ซึ่งผลการวัดการใช้พลังงานสามารถลดปริมาณการใช้พลังงานลงได้ 113.54 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อวัน หรือประมาณ 34,062 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อปี (300 วัน/ปี) รวมถึงหากพิจารณาในด้านต้นทุนการบำรุงรักษาเครื่องตามระยะเวลาการทำงานของเครื่องที่เพิ่มขึ้น วิธีการดังกล่าวสามารถลดเวลาการเดินเครื่องลงได้เท่ากับ 162.20 ชั่วโมงต่อปี อย่างไรก็ตามวิธีการนี้เป็นเพียงการหาความเป็นได้ในการลดระยะเวลาในช่วงดังกล่าวไม่ใช่การหาระยะเวลาที่ดีที่สุด (optimization) ในการลดอุณหภูมิก่อนแช่เยือกแข็งของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์ เพราะโรงงานกรณีศึกษามีความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ ซึ่งแต่ละผลิตภัณฑ์ใช้ระยะเวลาในการแช่เยือกแข็งแตกต่างกัน อีกทั้งการพิจารณาระยะเวลาการลดอุณหภูมินั้นยังมีปัญหาเกี่ยวกับปัจจัยรบกวน เช่น อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ก่อนแช่เยือกแข็งและอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ซึ่งผู้วิจัยไม่สามารถควบคุมตัวแปรดังกล่าวได้ ดังนั้น เพื่อสะดวกต่อการใช้งานจริงและกระทบกับลักษณะการดำเนินงานเดิมของพนักงานให้น้อยที่สุดวิธีการดังกล่าวจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมต่อการใช้งานจริง

(2) การลดการใช้พลังงานในระหว่างการทำงานของเครื่องเปล่า

การประยุกต์ใช้การปิดเครื่องคอมเพรสเซอร์เพื่อลดการใช้พลังงานในระหว่างการทำงานของเครื่องเปล่าทั้งหมด 10 วันทำงาน พบว่า มีการหยุดสายพานลำเลียงทั้งหมด 17 ครั้ง เฉลี่ย 2 ครั้ง/วัน โดยมีค่าเฉลี่ยการหยุดสายพานประมาณ 28 นาที/ครั้ง สามารถแบ่งการหยุดสายพานเป็น 2 ช่วงเวลาคือ 10-20 นาทีและมากกว่า 20 นาที โดยทำการปิดระบบทำความเย็นทุกครั้งที่มีการทำงานของเครื่องเปล่ามากกว่า 20 นาทีและใช้การพยากรณ์ระยะเวลาที่มีการหยุดสายพานล่วงหน้าทำให้สามารถตัดสินใจปิดระบบทำความเย็นได้ถูกต้อง ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในการทำงานของเครื่องเปล่า ก่อนและหลังปรับปรุง

ช่วงเวลา	จำนวนครั้งการหยุดสายพาน	เวลารวม (นาที)	การใช้พลังงาน (kW)	
			ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
10 -20 นาที	5	75	250	250*
มากกว่า 20 นาที	12	395	1,316.66	-

*ไม่มีการปิดการทำงานของคอมเพรสเซอร์

ผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อมีระยะเวลาการปิดระบบทำความเย็นนานส่งผลให้อุณหภูมิภายในอุโมงค์แช่เยือกแข็งเพิ่มขึ้น โดยเมื่อปิดระบบทำความเย็นนาน 1 ชั่วโมงอุณหภูมิภายในอุโมงค์แช่เยือกแข็งจะเพิ่มขึ้น 10 องศาเซลเซียสโดยประมาณ ดังนั้นหากมีการปิดระบบทำความเย็นนานเกินไปเมื่อเปิดระบบทำความเย็นอีกครั้งจึงต้องใช้เวลาในการลดอุณหภูมิภายในอุโมงค์ก่อนแช่เยือกแข็ง อย่างไรก็ตามในระหว่างการประยุกต์ใช้แนวทางนี้ระยะเวลาที่มีการปิดระบบทำความเย็นจะถูกควบคุมด้วยผลิตภัณฑ์ที่รอแช่เยือกแข็งทำให้ไม่สามารถปิดระบบทำความเย็นเป็นระยะเวลานานได้ ผลการดำเนินการทำให้สามารถลดการใช้พลังงานในช่วงเวลาดังกล่าว ซึ่งระยะเวลาที่มีการปิดระบบทำความเย็นเฉลี่ยประมาณ 28 นาทีต่อครั้ง ลดการใช้พลังงานไฟฟ้าครั้งละประมาณ 93.33 กิโลวัตต์

(3) การลดการใช้พลังงานในขณะแช่เยือกแข็ง

จากการปิดระบบทำความเย็นแต่ละชุดตามลำดับตามระยะเวลาที่ใช้แช่เยือกแข็ง เมื่อผลิตภัณฑ์เคลื่อนที่ผ่านจุดที่ระบบทำความเย็นทำงาน (ตารางที่ 9) ทำให้สามารถลดการใช้พลังงานในแต่ละชุดของระบบทำความเย็นได้แสดงดังในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ผลการลดการใช้พลังงานจากการปิดระบบทำความเย็นเป็นลำดับ ก่อนและหลังปรับปรุง

เวลาแช่เยือกแข็ง (นาที)	การใช้พลังงาน (kWh)	
	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
20	66.66	44.16
25	83.33	68.33

โดยในระหว่างประยุกต์ใช้ผลิตภัณฑ์หลักที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง ได้แก่ กลุ่มผลิตภัณฑ์ Individual products ซึ่งใช้เวลาแช่เยือกแข็ง 20 นาทีเมื่อใช้การปิดระบบทำความเย็นเป็นลำดับสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ประมาณ 22.5 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ครั้ง โดยมีการปิดระบบทั้งหมด 4 ครั้งต่อวัน(2 กะ) หรือสามารลดการใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 90 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/วัน เท่ากับ 2,250 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/เดือน หรือประมาณ 27,000 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี และวิธีการนี้ยังสามารถป้องกันการลืมปิดเครื่องหลังแช่เยือกแข็งเสร็จ

5.2 ผลการควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้าในขั้นตอนการแช่เยือกแข็ง

(1) ผลการปรับปรุงวิธีการบันทึกข้อมูลการใช้งานเครื่องแช่เยือกแข็ง

การบันทึกข้อมูลการใช้งานเครื่องแช่เยือกแข็งโดยใช้แบบฟอร์มการบันทึกที่โรงงานใช้อยู่ในปัจจุบัน ซึ่งโดยปกติมีการบันทึกปริมาณผลิตภัณฑ์ที่แช่เยือกแข็ง เวลาเริ่มแช่เยือกแข็ง อุณหภูมิผลิตภัณฑ์ก่อนและหลังแช่เยือกแข็ง และกำลังการผลิต ทำการปรับปรุงโดยกำหนดให้มีการบันทึกเวลาเปิดเครื่องและเวลาปิดเครื่องเพิ่มขึ้นเพื่อใช้ในการพิจารณาต้นทุนการแช่เยือกแข็ง การประยุกต์ใช้การบันทึกดังกล่าวเป็นเวลา 10 วัน พบว่า มีการบันทึกเวลาเปิดเครื่องหลังพักทุกครั้ง

ที่มีการแช่เยือกแข็ง แต่การบันทึกเวลาเปิดเครื่องครั้งแรกของการทำงานมีการบันทึกเพียง 3 ครั้ง จากทั้งหมด 10 ครั้ง เนื่องจากการเปิดเครื่องในครั้งแรกเป็นการเปิดโดยพนักงานในกะที่เข้าทำงานก่อนหน้าเพื่อเตรียมเครื่องแช่เยือกแข็งให้พร้อมเริ่มแช่เยือกแข็งทันทีที่พนักงานในกะต่อไปเข้าทำงาน ดังนั้นพนักงานในกะที่เข้าทำงานต่อมาจึงไม่ทราบเวลาเปิดเครื่องจริง ซึ่งปัญหาดังกล่าวเกิดจากการติดต่อสื่อสารระหว่างกะของการทำงาน ซึ่งการเตรียมเครื่องให้พร้อมก่อนอาจส่งผลให้สามารถเริ่มแช่เยือกแข็งได้เร็วขึ้น เกิดผลดีเมื่อมีปริมาณผลิตภัณฑ์รอแช่เยือกแข็งสูง แต่จะเกิดผลเสียเมื่อไม่มีผลิตภัณฑ์รอแช่เยือกแข็ง การดำเนินงานดังกล่าวจึงขึ้นกับการตัดสินใจของหัวหน้างานตามลักษณะที่เกิดขึ้นในอนาคต

(2) ผลการปรับปรุงช่วงเวลาการทำงานของพนักงานประจำเครื่องแช่เยือกแข็ง

จากช่วงเวลาการหยุดพักการทำงาน (พักเที่ยง) ของพนักงานประจำเครื่องแช่เยือกแข็ง ซึ่งเดิมหยุดพักเวลา 11.30 น.- 12.30 น. และกลับเข้าทำงานพร้อมเปิดเครื่องแช่เยือกแข็งเวลา 12.30 น. เป็นต้นไป ทำให้เครื่องแช่เยือกแข็งหยุดทำงานเพียง 0.5 ชั่วโมงต่อวัน การกำหนดช่วงเวลาพักดังกล่าวมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มปริมาณการผลิตหรือมีผลิตภัณฑ์เร่งด่วนในการแช่เยือกแข็ง แต่จากลักษณะการดำเนินงานในปัจจุบัน พบว่า อาจมีบางวันที่ไม่มีผลิตภัณฑ์เร่งด่วนต้องแช่เยือกแข็ง การเปิดเครื่องเร็วเกินไปจะเป็นการเพิ่มชั่วโมงการทำงานรวมของเครื่องแช่เยือกแข็งในแต่ละวันโดยไม่เพิ่มปริมาณการผลิต เนื่องพบการหยุดสายพานเครื่องแช่เยือกแข็งเพื่อรอชั่ง/บรรจุ การปรับปรุงจึงได้นำทางเลือกสำหรับช่วงเลาการหยุดพักของพนักงานออกเป็น 2 ทางเลือก ได้แก่ (1) ให้พนักงานพักเวลา 11.30 น. ในกรณีที่ตรวจพบว่ามีผลิตรอแช่เยือกแข็งใกล้เกินกำหนด 4 ชั่วโมงจำเป็นต้องแช่เยือกแข็งเร่งด่วน กรณีนี้จะทำให้เครื่องแช่เยือแข็งหยุดพักเพียง 0.5 ชั่วโมง/วัน (2) .ให้พนักงานพักเวลา 12.00 น.หรือปิดเครื่องแช่เยือกแข็งก่อนหยุดพัก ในกรณีนี้ใช้เมื่อไม่มีผลิตภัณฑ์รอแช่เยือกแข็ง ทางเลือกนี้จะทำให้เครื่องแช่เยือกแข็งหยุดพักเป็นเวลา 1 ชั่วโมง/วัน ซึ่งทำให้เวลาการทำงานรวมต่อวันของเครื่องแช่เยือกแข็งลดลงเมื่อเทียบกับทางเลือกที่ 1 เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมงต่อวัน ผลการประยุกต์ใช้ทั้งหมด 10 วันได้ผลดังแสดงในตารางที่ 13

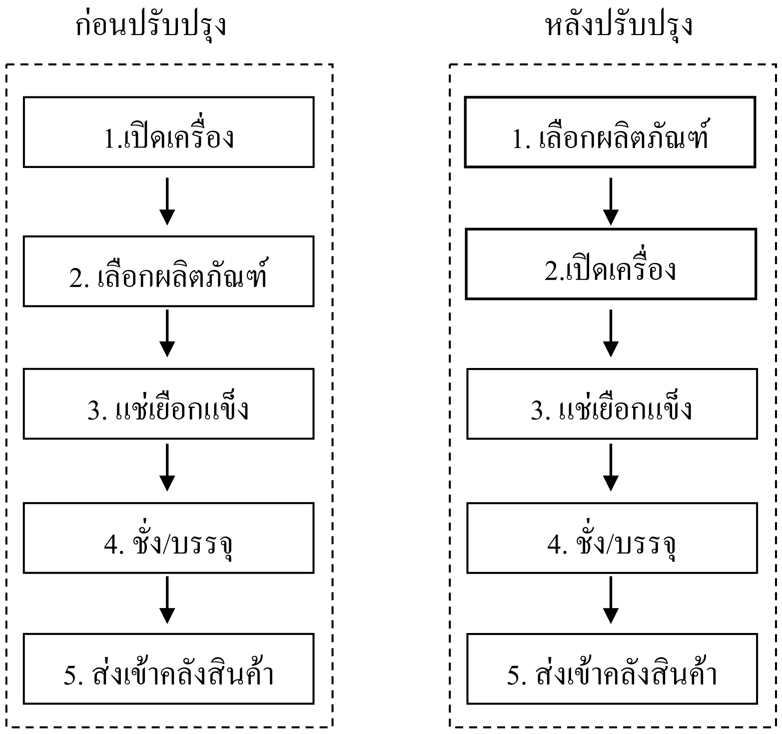
ตารางที่ 13 ผลการปรับปรุงช่วงเวลาการทำงานของพนักงานประจำเครื่องแช่เยือกแข็ง

การปรับปรุง	จำนวนครั้งการพักเครื่อง	
	ทางเลือกที่ 1 พัก 30 นาที/วัน	ทางเลือกที่ 2 พัก 1 ชั่วโมง/วัน
ก่อนปรับปรุง	10	-
หลังปรับปรุง	7	3

การกำหนดช่วงเวลาพักสำหรับพนักงานประจำเครื่องแช่เยือกแข็งออกเป็น 2 ทางเลือก โดยใช้การตรวจสอบการรอแช่เยือกแข็งของผลิตภัณฑ์ พบว่า ในระหว่างประยุกต์ใช้สามารถใช้ทางเลือกที่ 1 จำนวน 7 ครั้ง และใช้ทางเลือกที่ 2 จำนวน 3 ครั้ง ทำให้สามารถลดระยะเวลาทำงานของเครื่องรวม 90 นาทีจากการพักเครื่อง 1 ชั่วโมงแทนการพัก 0.5 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับก่อนปรับปรุงที่มีการใช้ทางเลือกที่ 1 เพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากในระหว่างประยุกต์ใช้โรงงานมีปริมาณการผลิตมาก และเมื่อมีโอกาสที่ผลิตภัณฑ์จะรอแช่เยือกแข็งรอแช่เยือกแข็งนานเกิน 4 ชั่วโมง ทำให้หยุดพักเครื่องได้เพียง 30 นาทีต่อวันเท่านั้น สรุปได้ว่าการพักเครื่อง 1 ชั่วโมงเหมาะสำหรับช่วงที่ไม่มีผลิตภัณฑ์รอแช่เยือกแข็งเท่านั้น แต่ไม่เหมาะสำหรับช่วงที่โรงงานมีปริมาณการผลิตมาก

(3.) ผลการปรับปรุงขั้นตอนการทำงาน

การปรับปรุงขั้นตอนการทำงานตามหลัก ECRS โดยการสลับขั้นตอนการทำงาน (Rearrange) โดยกำหนดให้มีการเลือกผลิตภัณฑ์และสั่งบรรจุภัณฑ์ก่อนมีการเปิดเครื่อง ขั้นตอนการทำงานก่อนและหลังปรับปรุงแสดงดังภาพที่ 24



ภาพที่ 24 เปรียบเทียบลำดับการทำงานในขั้นตอนการแช่เยือกแข็ง ก่อนและหลังปรับปรุง

การสลับขั้นตอนใหม่ทำได้ดีในการเริ่มงานในช่วงบ่าย แต่ในกรณีช่วงเช้ายังพบปัญหาการเปิดเครื่องของพนักงานในช่วงต่อกะ กล่าวคือ การที่พนักงานในกะก่อนหน้าเป็นผู้เปิดเครื่องให้พนักงานกะถัดไป วิธีการดังกล่าวเหมาะสมในช่วงที่โรงงานมีปริมาณการผลิตมาก แต่ในช่วงปริมาณการผลิตน้อยอาจส่งผลให้เกิดการทำงานของเครื่องเปล่าได้ การสลับขั้นตอนการทำงานใหม่ช่วยลดเวลาการทำงานรวมของเครื่องแช่เยือกแข็ง ซึ่งเหมาะสมกับช่วงที่ไม่มีผลิตรอแช่เยือกแข็งนานเกิน 4 ชั่วโมง

บทที่ 4

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องแช่เยือกแข็งและเสนอแนวทางการประหยัดพลังงานในขั้นตอนการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์ของโรงงานกรณีศึกษาประกอบด้วย การรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นของโรงงานกรณีศึกษา วิเคราะห์อัตราการใช้พลังงานและดัชนีการใช้พลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็ง ซึ่งพบความสูญเปล่าในระหว่างการแช่เยือกแข็งจากหลายสาเหตุ จากนั้นทำการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาที่ทำให้ดัชนีการใช้พลังงานสูงขึ้นด้วยแผนผังทำไม-ทำไม และเสนอแนวทางการปรับปรุงการใช้พลังงานตามแนวทางการอนุรักษ์พลังงานของสถาบันสิ่งแวดล้อมไทย โดยสามารถสรุปผลการศึกษาได้ ดังนี้

1. การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องแช่เยือกแข็งด้วยการประเมินค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพ (COP) ของระบบทำความเย็น พบว่า ระบบทำความเย็นด้านความดันสูงชุดที่ 1-4 มีค่า COP เท่ากับ 2.76, 3.05, 2.81 และ 2.86 ตามลำดับ ระบบทำความเย็นด้านความดันต่ำชุดที่ 1-4 มีค่า COP เท่ากับ 3.30, 3.42, 3.08 และ 3.20 ตามลำดับ ซึ่งค่า COP ที่ได้จากการประเมินมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานจึงสรุปว่าเครื่องแช่เยือกแข็งมีประสิทธิภาพตามที่โรงงานกำหนด

2. การวิเคราะห์การใช้พลังงานในขั้นตอนการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอุโมงค์ สามารถแบ่งการใช้พลังงานตามกิจกรรมเป็น 3 กิจกรรม ได้แก่ การใช้พลังงานในการลดอุณหภูมิภายในอุโมงค์ก่อนเริ่มแช่เยือกแข็ง (set up period) การแช่เยือกแข็ง (freezing period) และการละลายน้ำแข็ง (defrosting period) มีอัตราการใช้พลังงานเท่ากับ 209.78, 199.33 และ 20.73 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ตามลำดับ แต่ผลการประเมินสัดส่วนการใช้งานเครื่องแช่เยือกแข็งในแต่ละวัน (10 ชั่วโมง) พบการทำงานของเครื่องเปล่าประมาณร้อยละ 8.9 ของชั่วโมงการทำงานทั้งหมด จึงได้เสนอแนวทางการลดและควบคุมการใช้พลังงานในระหว่างการแช่เยือกแข็ง

3. การลดปริมาณการใช้พลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็งโดย 1) การลดระยะเวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิภายในอุโมงค์ (set up period) ด้วยการกำหนดค่าอุณหภูมิเป้าหมายใหม่สามารถลดระยะเวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิภายในอุโมงค์วันละ 32.44 นาที (20 ชั่วโมง)หรือ

เท่ากับ 162.20 ชั่วโมงต่อปี สามารถลดการใช้พลังงานได้ประมาณ 34,062 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อปี 2) การลดการใช้พลังงานในขณะเกิดการทำงานของเครื่องเปล่าด้วยการปิดการทำงานของเครื่องคอมเพรสเซอร์ในขณะหยุดสายพานเครื่องแช่เยือกแข็งเพื่อรอบรรจุหรือในระหว่างเกิดการทำงานของเครื่องเปล่า ซึ่งพบการทำงานของเครื่องเปล่าเฉลี่ยวันละ 53 นาทีหรือมีการทำงานของเครื่องเปล่าประมาณ 28 นาทีต่อครั้ง เมื่อกำหนดให้มีการปิดคอมเพรสเซอร์ทำให้สามารถลดการใช้พลังงานประมาณ 93.33 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อครั้งที่มีการทำงานของเครื่องเปล่า และ 3) การลดการใช้พลังงานในขณะแช่เยือกแข็งด้วยการปิดระบบทำความเย็นแต่ละชุดตามลำดับเมื่อแช่เยือกแข็งเสร็จ สามารถลดการใช้พลังงานได้ประมาณ 22.5 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อครั้ง หรือประมาณ 27,000 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อปี

4. การควบคุมการใช้พลังงานในขั้นตอนการแช่เยือกแข็งโดย 1) การปรับปรุงการบันทึกข้อมูลและการคำนวณกำลังการผลิต เพื่อให้ข้อมูลที่ได้มีความสอดคล้องกันระหว่างแผนกบรรจุและแผนกอนุรักษ์พลังงาน จึงกำหนดให้มีการบันทึกการใช้งานเครื่องแช่เยือกแข็งตั้งแต่เปิดเครื่องจนปิดเครื่อง และนำช่วงเวลาที่เครื่องแช่เยือกแข็งทำงานทั้งหมดมาคำนวณกำลังการผลิต ทำให้การลดเวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิภายในอุโมงค์เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้เนื่องจากการคำนวณกำลังการผลิตมีการเปลี่ยนแปลงจึงได้กำหนดค่ากำลังการผลิตเป้าหมายขึ้นใหม่ให้สอดคล้องกับดัชนีการใช้พลังงานของแผนกอนุรักษ์พลังงาน โดยกำหนดกำลังการผลิตเป้าหมายไว้ที่ 400 กิโลกรัมต่อชั่วโมง 2) การปรับปรุงเวลาการทำงานของพนักงานประจำเครื่องแช่เยือกแข็งให้สอดคล้องกับการทำงานของเครื่อง สามารถลดเวลาการทำงานของเครื่อง 30 นาทีต่อวัน (ในกรณีที่ไม่มีผลิตภัณฑ์ที่ต้องแช่เยือกแข็งเร่งด่วน) และ 3) การปรับปรุงขั้นตอนการทำงานโดยการสลับขั้นตอนการทำงานให้มีการเลือกผลิตภัณฑ์และสั่งบรรจุภัณฑ์ก่อนเปิดเครื่อง เป็นการป้องกันการเกิดการทำงานของเครื่องเปล่าและป้องกันการเปิดเครื่องแช่เยือกแข็งเร็วเกินไปจนทำให้มีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น

ข้อเสนอแนะ

1. การประเมินค่า COP เป็นการประเมินประสิทธิภาพการทำงานของระบบทำความเย็น แต่ไม่สามารถบ่งชี้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบได้ทั้งหมด ซึ่งอาจเกิดปัญหาข้อบกพร่องในการทำงานของอุปกรณ์ที่ประกอบภายในเครื่องแช่เยือกแข็งได้ เช่น พัดลมเสีย มอเตอร์ไม่ทำงาน เป็นต้น

2. เนื่องจากผลการตรวจวัดอุณหภูมิภายในอุโมงค์ของเครื่องแช่เยือกแข็งสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการบรรจุสุญญากาศ พบว่า อุณหภูมิมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง อาจเป็นเพราะระบบทำความเย็นผลิตความเย็นได้มากกว่าความต้องการ ดังนั้นหากต้องการแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์ดังกล่าว ควรลดปริมาณการผลิตความเย็นของระบบโดยปรับตั้งอุณหภูมิของเครื่องระเหยให้สูงขึ้นเพื่อให้ความดันของสารทำความเย็นด้านต่ำเพิ่มขึ้น

3. การเปิดการทำงานของเครื่องแช่เยือกแข็งแต่ละเครื่องควรเว้นระยะอย่างน้อย 15 นาที เนื่องจากเครื่องแช่เยือกแข็งใช้พลังงานสูงการเปิดเครื่องพร้อมกันจะทำให้ค่าความต้องการไฟฟ้าในช่วงเวลาดังกล่าวสูงขึ้น ซึ่งจะต้องเสียค่าปรับเพิ่มตามที่การไฟฟ้ากำหนด ทั้งนี้การบริหารการผลิตด้วยการใช้การจัดการพลังงาน (Energy Management) อย่างมีประสิทธิภาพ ควรหลีกเลี่ยงการเปิดเครื่องในช่วงที่มีความความต้องการไฟฟ้าสูง (peak load) และควรหลีกเลี่ยงการใช้งานเครื่องในช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูง (peak hours)

4. ในวิเคราะห์การใช้พลังงานควรกำหนดดัชนีชี้วัดการใช้พลังงานที่เหมาะสม เช่น ค่า EUI (Energy Use Index) เพื่อควบคุมการใช้พลังงานให้สอดคล้องกันระหว่างผู้ดูแลเครื่องจักร (ฝ่ายวิศวกรรม) กับผู้ใช้งานเครื่องจักร (ฝ่ายผลิต) จากนั้นจึงกำหนดช่วงเวลาการเปิด-ปิดเครื่องแช่เยือกแข็งรวมถึงการจัดทำแผนบำรุงรักษาเครื่องจักรตามระยะเวลาที่เหมาะสมอีกด้วย

5. แนวทางการลดต้นทุนด้านพลังงานของเครื่องแช่เยือกแข็ง สามารถแบ่งออกเป็น 2 แนวทางหลัก ได้แก่ (1) การลดต้นทุนด้วยการปรับเครื่องจักร และ (2) การลดต้นทุนด้วยการจัดการกระบวนการผลิต

(1) การลดต้นทุนหรือลดการใช้พลังงานโดยการปรับเครื่องจักร (เครื่องแช่เยือกแข็ง) สิ่งที่ต้องประเมินเป็นลำดับแรกคือ ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพ (COP) ซึ่งใช้บอกความสามารถของเครื่องแช่เยือกแข็ง ค่า COP ยิ่งสูงประสิทธิภาพของเครื่องจะมีค่าสูงด้วย แนวทางการปรับปรุงค่า COP ให้มีค่าสูงขึ้น เช่น การเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนหรือเพิ่มความดันของสารทำความเย็นด้านความดันต่ำ ทำได้โดย การทำความสะอาดพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องระเหย เพิ่มความเร็วลมให้กับเครื่องระเหย ละลายน้ำแข็งที่เกาะตามเครื่องระเหย เพิ่มขนาดของเครื่องระเหย และหรือปรับตั้งอุณหภูมิใช้งานให้สูงขึ้นหรือให้เหมาะสมกับชนิดของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น นอกจากนี้การลดความดันสารทำความเย็นด้านความดันสูง โดยการลดภาระการถ่ายเทความร้อน เช่น การทำความสะอาดเครื่องควบแน่นโดยผลต่างของอุณหภูมิสารทำความเย็นที่ออกจากเครื่องควบแน่นกับอุณหภูมิของอากาศหรือน้ำที่ใช้ระบายความร้อนที่ออกจากเครื่องควบแน่น ต้องไม่เกิน 2-3 องศาเซลเซียส การล้างทำความสะอาดจะส่งผลให้ค่า COP ของระบบเพิ่มสูงขึ้น

(2) การลดต้นทุนการใช้พลังงานด้วยการจัดการกระบวนการผลิต สามารถแบ่งออกเป็น 2 แนวทางหลัก คือ การลดความสูญเปล่า โดยการลดเวลาการทำงานของเครื่องที่ไม่เกิดมูลค่า เช่นการทำงานของเครื่องเปล่า ซึ่งสามารถใช้เครื่องมือการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหา ได้แก่ แผนผังทำไม-ทำไม เครื่องมือคุณภาพ หรือการพัฒนาการทำงานที่ดีกว่า เป็นต้น อีกแนวทางหนึ่ง คือ การเพิ่มผลผลิตสำหรับการแช่เยือกแข็งโดยการเพิ่มอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็ง ได้แก่

- การลดอุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ (initial temperature) ยิ่งอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์มีค่าต่ำเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งจะยิ่งสั้นลง

- การเพิ่มอัตราการป้อนผลิตภัณฑ์ (load) ต่อรอบให้สูงขึ้นหรือการลดอัตราการป้อนผลิตภัณฑ์จะส่งผลให้ระยะเวลาแช่เยือกแข็งสั้นลง ส่งผลให้มีกำลังการผลิตเพิ่มขึ้นต้นทุนการใช้พลังงานต่อหน่วยของผลิตภัณฑ์ต่ำลง

- การเลือกขนาดและรูปร่างของผลิตภัณฑ์ให้เหมาะสมกับชนิดของเครื่องแช่เยือกแข็ง

- การเรียงผลิตภัณฑ์บนสายพานเครื่องแช่เยือกแข็ง ควรให้มีการซ้อนทับกันของผลิตภัณฑ์น้อยที่สุดเพื่อให้อากาศเย็นสามารถเข้าปะทะชิ้นผลิตภัณฑ์โดยตรง หากมีการซ้อนทับกันของผลิตภัณฑ์จะทำให้ใช้เวลาในการแช่เยือกแข็งนานขึ้น

- การปรับความเร็วลมภายในอุโมงค์โดยการปรับความเร็วใบพัด ความเร็วลมยิ่งสูงเวลาที่ใช้แช่เยือกแข็งจะสั้น แต่การปรับความเร็วใบพัดนั้นยิ่งความเร็วรอบสูงมอเตอร์ใบพัดจะใช้พลังงานสูงขึ้นด้วย ดังนั้นจึงควรปรับให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมกับชนิดของผลิตภัณฑ์

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทกแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2553. คู่มือผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน (ออนไลน์). สืบค้นจาก: http://www2.dede.go.th/bhrd/old/Dowload/file_handbook /Pre_ Build/Build_15.pdf (20 พฤศจิกายน 2555)

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2544. การประหยัดพลังงานในระบบทำความเย็น (ออนไลน์). http://www.enconlab.com/ve/Dowload/energy/The%20Economic%20use %20 of%20 Refrigeration%20Plant.PDF (20 พฤศจิกายน 2555)

กรมส่งเสริมการส่งออก กระทรวงพาณิชย์. 2555. การส่งออกของประเทศไทยแยกตามหมวดสินค้า มกราคม – มกราคม 2012 (ออนไลน์). สืบค้นจากhttp://www.ops3.moc.go.th/infor/HS/ export/export_commodity/report.asp (20 มีนาคม 2555)

เกษมพัฒน์ พานิชลือชาชัย. 2552. เทคนิคการแก้ปัญหาและการตัดสินใจ (ออนไลน์). สืบค้นจาก: http://www.thaitrainingzone.com/TrainingDetail.asp?id=180 (8 พฤษภาคม 2554)

โชคดี จูดิษฐ์ประเสรฐ, ชัยรัตน์ ตั้งดวงดี และ สุวิช ศิริวัฒนโยธิน. 2551. การจำลองกระบวนการแช่แข็ง: ผลของอุณหภูมิและความเร็วอากาศ. ว.วิจัยและพัฒนา 31: 811-821

ปิยะบุตร วานิชพงษ์พันธุ์, บัญชา เกิดมณี, พิริยนันทน์ เหง่าไชสง, มนตรี ศรีสวรรค์ และกฤษฎา ขำสุวรรณ. 2551. การปรับปรุงสายการผลิตท่อแอร์รถยนต์. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยธนบุรี. 2:7-18.

มาลินี อัศวดิษฐเลิศ และนิธิกานต์ อินทร. 2551. ซูริมิและผลิตภัณฑ์(ออนไลน์). สืบค้นจาก http://www.biotech.or.th/Guru(20 ธันวามคม 2554)

โมโตกิ มัสตุโอะ. 2543. เทคนิคการประหยัดพลังงานไฟฟ้าในอุตสาหกรรม แปลและเรียบเรียงโดย บัณฑิต โรจน์อารยานนท์. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). กรุงเทพฯ

รัชต์วรรณ กาญจนปัญญาคม. 2552. การศึกษางานอุตสาหกรรม. หน้า 85 – 88. สำนักพิมพ์ท้อป. กรุงเทพฯ

วัชระ มั่งวิทิตกุล. 2548. การลดค่าใช้จ่ายพลังงานสำหรับอาคารและโรงงานอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 2 . สำนักพิมพ์ รำไทย เพรส. กรุงเทพฯ

วันชัย ลีลากวีวงศ์, สุวัฒน์ เณรโต และ สุขุม โฆษิตชัยมงคล. 2550. ประหยัดพลังงานไฟฟ้าและเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่อง Freezer. การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ครั้งที่ 16. ณ โรงแรม Royal Phuket City จ. ภูเก็ต. 24-26 ตุลาคม. หน้า 281-285

วันรัตน์ จันทกิจ. 2547. 17 เครื่องมือนักคิด. สถาบันเพิ่มผลผลิตแห่งชาติ. กรุงเทพฯ

ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร. 2556. ปูอัด (Crab stick) (ออนไลน์). สืบค้นจาก: http://www.foodnetworksolution.com/processing.process/0352/ปูอัด-crab-stick (17 ธันวาคม 2556)

สถาบันเพิ่มผลผลิตแห่งชาติ. 2550. เครื่องมือคุณภาพ 7 ชนิด (7QC Tools) (ออนไลน์). http://youth.ftpi.or.th/index.php?option=com_content&task=view&id=35&itemid=42 (10 สิงหาคม 2553)

สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย. 2554. ระบบทำความเย็น (ออนไลน์). สืบค้นจาก http://teenet.tei.or.th /Knowledge /Paper/012_EEH.pdf (20 ธันวาคม 2554)

สมโภชน์ โกมลมณี. 2555. การแช่เย็นและแช่เยือกแข็งอาหาร (ออนไลน์). สืบค้นจาก http://coursewares .mju.ac.th:81/e-learning47/section2/ft446/lass0523.html (1 พฤษภาคม 2555)

สมาคมอาหารแช่เยือกแข็งไทย, 2556. สถานการณ์นำเข้า-ส่งออก (ออนไลน์). สืบค้นจาก http://www.thai-frozen.or.th/pdf/newsletter/Newsletter_jan-jun2013.pdf (20 มกราคม 2557)

สายสนม ประดิษฐดวง. 2546. กระบวนการแช่เยือกแข็งอาหาร. *ใน* วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 4. หน้า 154 – 186. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2552. สถานการณ์ส่งออกผลิตภัณฑ์ซูริมิของไทยในตลาดญี่ปุ่น (ออนไลน์). สืบค้นจากhttp://www.oae.go.th/ewtadmin/ewt/oae_baer/ewt_news.php?nid =378&filename=index (3 มกราคม 2555)

สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. 2548. โครงการจัดทำข้อมูลอุตสาหกรรมเชิงเปรียบเทียบเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขัน (สาขาอาหาร) กรณีอุตสาหกรรมกุ้ง และซูริมิ(ออนไลน์). สืบค้นจาก http://www.oie.go.th/benchmark/Food/chapter4.3_4.4.pdf (5 มกราคม 2555)

สุทธวัฒน์ เบญจกุล. 2549. ซูริมิ:วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเนื้อปลาบด. โอเดียนสโตร์. กรุงเทพฯ

องค์การสิ่งแวดล้อมแห่งสหประชาชาติ. 2006. เครื่องทำความเย็นและระบบเครื่องปรับอากาศ (ออนไลน์). สืบค้นจาก http://www.energyefficiencyasia.org/docs/ee_modules/thai/Chapter%20%20Air%20Conditioning%20and%20Refrigeration%20(Thai).pdf (3 มกราคม 2555)

Ogura, H. 2006. แบบฝึกหัดการวิเคราะห์ why-why เจาะลึกเพื่อเอาชนะอย่างมุ่งมั่น แปลและเรียบเรียงโดย สมชัย อัครทิวา. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). กรุงเทพฯ

Chourot, J.M., Macchi, H., Fournaison, L. and Guilpart, J. 2003. Technical and economical model for the freezing cost comparison of immersion, cryomechanical and air blast freezing processes. Energy Conversion and Management. 44: 559-571.

Delgado, A. E. and Sun, D. E. 2001. Heat and mass transfer models for predicting freezing process – a review. Journal of Food Engineering. 47: 157 – 174.

Huan, Z. 2003a. Performance evaluation indexes for quick-freezers. International Journal of Refrigeration. 26: 817–822

Huan, Z. 2003b. Energy saving opportunities in food cold chain (online). Available:http://active.cput.ac.za/energy/web/ICUE/DOCS/337/Paper%20-%20Huan%20Z.pdf (6 February 2012)

Kolbe, E. 2005. Freezing Technology. *In* Surimi and Surimi Seafood. 2nd Ed. p. 325-344. Taylor & Francis Group. USA

Kolbe, E., Ling, Q. and Wheeler, G. 2004. Conserving Energy in Blast Freezers Using Variable Frequency Drives. Proceeding from The Twenty-Sixth Industrial Energy Technology Conference. Houston TX. 20-23 April.

Park, W. J. 2005. Surimi Seafood: Products, Market and Mamufacturing. *In* Surimi and Surimi Seafood. 2nd Ed. p. 376-418. Taylor & Francis Group. USA.

Pual, S.R. and Heldman, D.R. 2009. Refrigeration. *In* Introduction to Food Engineering. 4th Ed. p.455-496. Elsevier. USA