การปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้งานของสารทำความเย็นเอทิลีนไกลคอล ในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่ง

Improvement of a Cooling Performance of Ethylene Glycol in an Ice-cream Bar Production Process

เปมิกา แซ่เตียว

Paemika Saetiaw

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาการจัดการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Science in Agro-Industrial Technology Management
Prince of Songkla University
2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้งานของสารทำความเย็นเอทิลีนไกลคอล ในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่ง

ผู้เขียน นางสาวเปมิกา แซ่เตียว

สาขาวิชา การจัดการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร

ปีการศึกษา 2554

บทคัดย่อ

เอทิลีนไกลคอลเป็นสารทำความเย็นทุติยภูมิหรือสารตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างไอศกรีมผสมและสารทำความเย็นปฐมภูมิ (ฟรีออน R-22) จากการศึกษากระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งของบริษัทกรณีศึกษา ซึ่งใช้สารเอทิลีนไกลคอลเป็นสารทำความเย็นในระบบทำความเย็นทางอ้อม (Indirect Refrigeration System) สำหรับกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 พบว่าในรอบเวลาการใช้งานสารทำความเย็นเอทิลีนไกลคอลเฉลี่ย 72.89 ชั่วโมง ค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอล เฉลี่ยลดลงจาก 1.085 เป็น 1.074 ที่อุณหภูมิ 15°C จากนั้นจะมีการเปลี่ยนถ่ายสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ใช้งานแล้วออกจากระบบทำความเย็นและเติมสารเอทิลีนไกลคอลใหม่ความเข้มข้น 99.9% ในปริมาตร 21% ของสารละลายทั้งหมด เข้าสู่ระบบทำความเย็นทางอ้อม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำความเย็นในระบบอีกครั้ง การเปลี่ยนถ่ายสารละลายเอทิลีนไกลคอลบ่อยครั้ง ส่งผลให้ต้นทุนการใช้เอทิลีนไกลคอลเพิ่มขึ้น ทำให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้นเช่นกัน ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการวิเคราะห์ ทำไม-ทำไม (Why-Why Analysis Method) มาวิเคราะห์หาสาเหตุรากเหง้าที่แท้จริงของปัญหา เพื่อกำหนดแนวทางการแก้ไขปรับปรุงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลจากการวิเคราะห์ พบว่าการปนเปื้อนของน้ำเข้าสู่ระบบทำความเย็นทางอ้อม เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานของสารทำความเย็นเอทิลีนไกลคอลลดลง จากการประเมินและคัดเลือกแนวทางร่วมกับทีมผู้บริหารของบริษัทกรณีศึกษาได้แบ่งแนวทางในการแก้ไขปรับปรุงเป็น 2 แนวทาง คือ (1) การปรับปรุงอุปกรณ์และวิธีการล้างทำความสะอาดเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 และ (2) การนำสารเอทิลีนไกลคอลใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่โดยกระบวนการระเหย ผลจากการปรับปรุง จะได้ว่า รอบเวลาการใช้งานสารทำความเย็นเอทิลีนไกลคอล เฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 78.23 ชั่วโมง คิดเป็นร้อยละ 7.33 และต้นทุนการผลิตลดลง 45,645 บาทต่อเดือน คิดเป็นร้อยละ 32.21

Thesis Title	Improvement of a Cooling Performance of Ethylene Glycol in an Ice-cream Bar Production Process
Author	Miss Paemika Saetiaw
Major Program	Agro-Industrial Technology Management
Academic Year	2011

ABSTRACT

Ethylene glycol is used as a secondary refrigerant to transfer heat from the ice-cream mixed to a heat exchanger where the heat is absorbed by a primary refrigerant (R22) in automatic ice-cream bar machine (Fremark1100). By observing an ice-cream bar production in this case study, it was found that the specific gravity of ethylene glycol decreased from 1.085 to 1.074 at 15°C for every 72.89 hours production time. At this period, 21% of ethylene glycol was replaced with new one resulting in the high production cost. The why-why analysis method was used as the problem analysis tool in order to examine the root cause of the investigated problem and determine the appropriate plan for efficiency improvement. From the analysis, it was shown that the contamination of water into the brine system was the major factor reducing concentration of ethylene glycol. Two improvement approaches which were (1) developing equipments and cleaning method for preventing water contamination into the brine system, and (2) evaporation of used ethylene glycol to recover it for reuse. The results showed that the water contamination was decreased and the cycle time was increased up to 78.23 hours. In conclusion, the efficiency of ethylene glycol was increased 7.33% leading to the reducing of ethylene glycol cost 45,645 Baht/month, which equals to 32.21% cost reduction.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี โดยได้รับความอนุเคราะห์สนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ภายใต้โครงการทักษะนักอุตสาหกรรมเกษตร (Practice School) คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล วุฒิจำนงค์ และที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ดร.กันยา อัครอารีย์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ความรู้ และแนะนำแนวทางในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนการตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ ยูรวงศ์ และ ดร.ณวรา จันทรัตน์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้สละเวลาในการสอบ เสนอแนะ และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์และถูกต้องมากขึ้น

ขอขอบพระคุณ คุณณัฐวุฒิ พลายด้วง ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลในการศึกษาวิจัยอย่างดียิ่งจนกระทั่งการศึกษาวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และสุดท้ายนี้ขอขอบคุณบิดามารดา พี่ๆ เพื่อนๆ บัณฑิตศึกษาทุกคนที่สนับสนุนทั้งกำลังกายและกำลังใจ ช่วยเหลือในด้านต่างๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

เปมิกา แซ่เตียว

สารบัญ

		หน้า
สารบัญ		(6)
LIST OF TABLES		(7)
LIST OF FIGURES		(8)
ตัวย่อและสัญลักษณ์		(10)
บทที่		
1	บทนำ	1
	บทนำต้นเรื่อง	1
	การตรวจเอกสาร	2
	วัตถุประสงค์	33
2	วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ	34
3	ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	39
4	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	90
	บทสรุป	90
	ข้อเสนอแนะ	92
เอกสารอ้างอิง		93
ภาคผนวก		99
ประวัติผู้เขียน		121

LIST OF TABLES

Table		Page
1.	Type of ice-cream bar products.....	39
2.	Average usability of ethylene glycol solution per cycle for hardening the ice-cream bars production process from January to July 2009 (Before improvement)	50
3.	Analysis of relationship between the working time and the reducing of specific gravity of ethylene glycol solution.....	53
4.	Analysis of relationship between type of products and the reducing of specific gravity of ethylene glycol solution (Average per cycle).....	55
5.	Results of specific gravity at different concentration of ethylene glycol solutions (Laboratory).....	57
6.	Amount of water contamination from the gutter and the cooling coil on center of Fremark1100 machine (Before improvement).....	67
7.	Evaluation of improvement options.....	74
8.	Specific gravity of ethylene glycol solution from evaporation (Laboratory)……..	76
9.	Average amount of water contamination from the gutter and the cooling coil on center of Fremark1100 machine before and after improvement.....	81
10.	Evaporation rate of water from used ethylene glycol solution.....	83
11.	Comparison of ethylene glycol cost and amount of ethylene glycol before and after improvement (Average per month).....	91

LIST OF FIGURES

Figure		Page
1.	Ice-cream production process.....	7
2.	The direct refrigeration system.....	15
3.	The indirect refrigeration system.....	16
4.	Freezing point as function of the additive concentration.....	24
5.	Density at 20°C as function of the additive concentration.....	25
6.	5 Why Analysis.....	33
7.	Ice-cream bar production process in this case study.....	40
8.	Indirect refrigeration system of the ice-cream bar production process in the case study.....	45
9.	Total cost of ice-cream production process of case study (Not including raw material cost and packaging cost) (January - March 2009).....	48
10.	The specific gravity (at 15°C) at different concentration of ethylene glycol solution (%by volume) (Laboratory).....	57
11.	The cycle time and specific gravity (at 15°C) of ethylene glycol solution used in the ice-cream bars production process (Before improvement)….....	58
12.	Cause and effect diagram in this case study.....	60
13.	The why-why analysis in this case study.....	64
14.	Example of water contamination from several sources.....	66
15.	The example of reuse ethylene glycol from evaporation and commercial ethylene glycol (Laboratory).....	77
16.	Cleaning method improvement (Example for cleaning in stick feeding station)....	79
17.	Equipments for protecting water contamination at stick feeding station and the ice-cream mixed filling station.....	80

LIST OF FIGURES (Cont.)

Figure		Page
18.	Adjust the angle of gutter (undering the direct refrigerant tube) above Fremark1100 machine for protecting water contamination.....	81
19.	Equipment of pasteurizer tank for evaporation of water from ethylene glycol solution.....	83
20.	Comparison of specific gravity of the commercial and reused ethylene glycol solutions.....	84
21.	Comparison of the cycle time of the ethylene glycol solution before and after improvement.....	88
22.	Comparison of ethylene glycol cost before and after improvement.....	89

ตัวย่อและสัญลักษณ์

S.G. = Specific Gravity

EG = Ethylene Glycol

บทที่ 1

บทนำ

บทนำต้นเรื่อง

ปัจจุบันสารเอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol) นิยมใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น ในอุตสาหกรรมพลาสติก ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตโพลีเอสเทอร์ เรซิน และเส้นใย ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตขวดพลาสติกสำหรับบรรจุน้ำดื่ม ในอุตสาหกรรมอากาศยาน ใช้เป็นสารให้ความเย็นในหม้อน้ำเครื่องยนต์ หรือสารป้องกันการเป็นน้ำแข็ง และในอุตสาหกรรมอาหาร สารเอทิลีนไกลคอลทำหน้าที่เป็นสารตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นปฐมภูมิกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทำความเย็นในระบบการทำความเย็นแบบอ้อม (Indirect Refrigeration System) อาจเรียกสารตัวกลางนี้ว่า สารทำความเย็นทุติยภูมิ หรือสารหล่อเย็น หรือสารป้องกันการเป็นน้ำแข็ง หรือน้ำเกลือ เป็นต้น (Robert *et al.,* 2002)

บริษัทกรณีศึกษา เป็นบริษัทที่ดำเนินกิจกรรมด้านการผลิต และจัดจำหน่ายไอศกรีม ผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่ทางบริษัทผลิตได้ มีหลายประเภท เช่น ไอศกรีมแท่ง ไอศกรีมถ้วย ไอศกรีมโคน และไอศกรีมแซนวิช เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ไอศกรีมประเภทแท่ง เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีกำลังการผลิตสูงที่สุดของบริษัท ซึ่งขั้นตอนการขึ้นรูป หรือแช่เยือกแข็งไอศกรีมแท่ง เป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญมากในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่ง และเครื่องจักรที่ถือว่าเป็นหัวใจสำคัญของขั้นตอนนี้ คือ เครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ซึ่งเป็นเครื่องจักรที่ต้องทำงานร่วมกับระบบการทำความเย็น โดยเรียกระบบการทำความเย็นของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 นี้ว่า ระบบการทำความเย็นแบบอ้อม (Indirect Refrigeration System) ซึ่งระบบการทำความเย็นแบบนี้ แบ่งการทำงานออกเป็น 2 ระบบย่อย คือ ระบบแบบตรง (Direct System) ใช้สารฟรีออน R-22 เป็นสารทำความเย็นปฐมภูมิ และระบบแบบอ้อม (Indirect System) มีสารละลายเอทิลีนไกลคอลเป็นสารทำความเย็นทุติยภูมิ ซึ่งจะบรรจุอยู่ในบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 โดยสารทำความเย็นทั้ง 2 ชนิด จะไม่สัมผัสกัน

เนื่องจาก กระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 เป็นการทำงานแบบต่อเนื่องและเป็นระบบเปิด ทำให้สารเอทิลีนไกลคอล ซึ่งละลายน้ำได้ดี มีโอกาสสัมผัสกับสภาวะแวดล้อมต่างๆ รอบบริเวณการทำงานได้โดยตรงและง่ายต่อการปนเปื้อน

ของน้ำจากแหล่งต่างๆ ระหว่างกระบวนการผลิตเข้าสู่ระบบการทำความเย็น ส่งผลให้คุณสมบัติเริ่มต้นของสารละลายเอทิลีนไกลคอล เช่น อุณหภูมิจุดหลอมเหลว ความถ่วงจำเพาะ และความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงไป เป็นผลให้ประสิทธิภาพการใช้งานของสารทำความเย็นเอทิลีนไกลคอลลดลง และจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนถ่ายสารเอทิลีนไกลคอลบ่อยครั้ง ในการเปลี่ยนถ่ายสารละลายเอทิลีนไกลคอลแต่ละครั้ง จะใช้วิธีการเติมสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) เข้าไป และถ่ายสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ใช้งานแล้วออกจากระบบทำความเย็นในปริมาณที่เท่ากัน ซึ่งปริมาณสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ที่ต้องเติมเข้าไปในระบบทำความเย็นนั้น ขึ้นอยู่กับค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอลในระบบทำความเย็นที่วัดได้ ในขณะนั้น ปริมาณการเปลี่ยนถ่ายสารละลายสามารถคำนวณได้จากกราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอลวัดค่าที่ 15 องศาเซลเซียส ปริมาณสารที่ใช้เติมในแต่ละครั้ง จะส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตไอศกรีมแท่งได้ แม้ว่าปริมาณสารเอทิลีนไกลคอล บริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ที่ใช้เติมในแต่ละครั้งจะไม่มากนัก

นอกจากนี้ สารเอทิลีนไกลคอลยังเป็นสารมีพิษ ไม่สามารถปล่อยทิ้งสู่แหล่งน้ำสาธารณะได้โดยตรง จำเป็นต้องผ่านกระบวนการบำบัดก่อนปล่อยออกจากโรงงาน ซึ่งในทางอุตสาหกรรมทั่วไป นิยมใช้วิธีการแยกเอาน้ำออกจากสารละลาย เพื่อที่จะได้สารเอทิลีนไกลคอลหมุนเวียนนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก (Rincon *et al*., 1999) เป็นการลดต้นทุนสารเอทิลีนไกลคอล และเป็นการบำบัดน้ำในเวลาเดียวกัน

ดังนั้น งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้งานสารทำความเย็นเอทิลีนไกลคอลในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น เพื่อยืดอายุการใช้งานสารละลายเอทิลีนไกลคอล และลดต้นทุนการผลิตของบริษัทกรณีศึกษา โดยดำเนินการวิจัยทั้งในส่วนการปรับปรุงวิธีการทำงานในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่ง และการศึกษาการนำสารเอทิลีนไกลคอลใช้แล้วหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่

การตรวจเอกสาร

1. ไอศกรีม (Ice-cream)

ไอศกรีม หมายถึง ผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งที่ประกอบด้วยองค์ประกอบต่างๆ เช่น อากาศ น้ำ ไขมันนม ส่วนของของแข็งในนมที่ไม่ใช่ไขมัน (Nonfat Milk Solid; NMS) สารให้ความหวาน (Sweeteners) สารให้ความคงตัว (Stabilizers) อิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifiers) และสาร

ให้กลิ่นรส (Flavoring) ในขณะที่ส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม หรือไอศกรีมผสม (Ice-cream Mix) หมายถึง ส่วนผสมทั้งหมดของไอศกรีม ยกเว้นอากาศ และสารให้กลิ่นรสที่ยังไม่ผ่านการแช่เยือกแข็ง (Marshall *et al.,* 2003)

1.1 ประเภทของไอศกรีม

กระทรวงสาธารณสุข (2542) ได้สรุปประเภทของไอศกรีมที่มีจำหน่ายในท้องตลาดทั่วไปเป็น 4 ชนิด ดังต่อไปนี้

(1) ไอศกรีมนม เป็นไอศกรีมที่ผลิตขึ้นโดยใช้นม หรือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากนม

(2) ไอศกรีมดัดแปลง เป็นไอศกรีมที่ทำขึ้นโดยใช้ผลิตภัณฑ์ที่มีไขมัน และไม่ได้มาจากผลิตภัณฑ์นม เช่น ไอศกรีมวานิลลา สตรอเบอรี่ ช็อกโกแลต เป็นต้น

(3) ไอศกรีมผสม หมายถึง ไอศกรีมนม หรือไอศกรีมดัดแปลงซึ่งมีเนื้อผลไม้หรือวัตถุดิบอื่นๆ ผสมลงไปในไอศกรีมด้วย เช่น ช็อกโกแลตชิป ไอศกรีมลูกเกด เป็นต้น

(4) ไอศกรีมหวานเย็น เป็นไอศกรีมที่ทำขึ้นโดยใช้น้ำและน้ำตาล หรืออาจมีวัตถุดิบอื่น ที่เป็นอาหารเป็นส่วนผสมอยู่ด้วย ไอศกรีมดังกล่าวอาจใส่วัตถุแต่งกลิ่น รส และสีด้วยก็ได้ เช่น ไอศกรีมแท่งมีไส้สาคู หรือถั่วดำ

1.2 ส่วนผสมในไอศกรีม

อรพิน ชัยประสพ (2544) กล่าวว่า วัตถุดิบที่ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตไอศกรีมแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ได้ดังนี้ คือ

1.2.1 วัตถุดิบที่มาจากส่วนประกอบของน้ำนม หรือผลิตภัณฑ์นม

โดยทั่วไปแล้ววัตถุดิบที่มาจากผลิตภัณฑ์นมเป็นส่วนประกอบที่มีความสำคัญและเป็นส่วนประกอบพื้นฐานในผลิตภัณฑ์ไอศกรีม ได้แก่ ไขมันนม ส่วนของแข็งในนมที่ไม่ใช่ไขมัน ซึ่งได้มาจากนมสด นมผง หางนมผง

1.2.2 วัตถุดิบที่ไม่ใช่ส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์นม

วัตถุดิบที่ไม่ใช่ส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์นม ได้แก่ น้ำ น้ำตาล สารให้ความคงตัว สารให้กลิ่น สี และอิมัลซิไฟเออร์

ปริมาณส่วนผสมต่างๆ ที่ทำให้ไอศกรีมมีลักษณะที่ดี คือ ไขมัน ร้อยละ 12 ธาตุน้ำนมไม่รวมมันเนย ร้อยละ 11 น้ำตาล ร้อยละ 15 สารให้ความคงตัว อิมัลซิไฟเออร์ ร้อยละ 0.3 และปริมาณของแข็งทั้งหมด ร้อยละ 38.3

1.3 บทบาทของส่วนผสมในไอศกรีม

1.3.1 ไขมัน (Fat)

Adapa และคณะ (2000) กล่าวว่า ไขมัน เป็นส่วนประกอบที่มีความสำคัญในไอศกรีม การใช้ไขมันในปริมาณที่เหมาะสม ไม่เพียงแต่จะเป็นการสมดุลสูตรของส่วนผสมในไอศกรีมเท่านั้น แต่ยังเกี่ยวข้องกับมาตรฐานที่กฎหมายกำหนดอีกด้วย ไขมันในส่วนผสมจะช่วยให้ไอศกรีมมีลักษณะเนื้อโครงสร้างของไอศกรีม และเนื้อสัมผัสที่เนียน นุ่มลิ้น รวมถึงการเพิ่มกลิ่นรส และลักษณะการละลายที่ดีให้กับไอศกรีม

1.3.2 ของแข็งในนมที่ไม่ใช่ไขมัน (Nonfat Milk Solid; NMS)

Marshall และคณะ (2003) อธิบายว่า ของแข็งในนมที่ไม่ใช่ไขมัน หรือธาตุน้ำนมไม่รวมมันเนย ประกอบด้วย น้ำตาลแล็กโทส เคซีน เวย์โปรตีน วิตามิน เกลือแร่ กรด เอนไซม์ ซึ่งจะช่วยเพิ่มเนื้อ และเนื้อสัมผัส (Texture) เพิ่มค่าการขึ้นโฟมให้กับผลิตภัณฑ์ไอศกรีม เนื่องจากโปรตีนนมในส่วนของของแข็งที่ไม่ใช่ไขมันมีคุณสมบัติเป็นอิมัลซิไฟเออร์ มีความสามารถในการเกิดโฟม (Whipping Ability) และความสามารถในการจับตัวกับน้ำได้ดี (Water Holding Capacity)

1.3.3 สารให้ความหวาน (Sweeteners)

สารให้ความหวานที่เติมในส่วนผสมไอศกรีม เป็นปัจจัยที่ช่วยให้เกิดการยอมรับต่อผลิตภัณฑ์ไอศกรีมของผู้บริโภคเพิ่มขึ้น โดยสารให้ความหวานจะช่วยเพิ่มกลิ่นรส และความกลมกล่อมให้กับผลิตภัณฑ์ และยังช่วยเพิ่มความหนืด และปริมาณของของแข็งทั้งหมด (Total Solid) ในส่วนผสมไอศกรีม ซึ่งจะช่วยเพิ่มปริมาณเนื้อ และเนื้อสัมผัสที่ดีให้กับผลิตภัณฑ์ไอศกรีม (Marshall *et al.,* 2003) โดยทั่วไปแล้ว สารให้ความหวานจะทำให้จุดเยือกแข็งของไอศกรีมลดต่ำลง ซึ่งจะทำให้ไอศกรีมมีคุณลักษณะที่อ่อนนุ่ม น้ำตาลซูโครสเป็นสารให้ความหวานที่ใช้กันมากเพราะมีราคาถูก อาจใช้เพียงอย่างเดียว หรือใช้ผสมกับคาร์โบไฮเดรตชนิดอื่น เช่น กลูโคสซีรับ (Glucose Syrup) และน้ำเชื่อมข้าวโพด (Corn Syrup) เป็นต้น

1.3.4 อิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifiers)

Bear และคณะ (1997) อธิบายว่า อิมัลซิไฟเออร์เป็นสารที่ทำให้เกิดอิมัลชัน เนื่องจาก มีความสามารถในการลดแรงตึงผิวของของเหลว 2 ชนิด ที่ไม่ละลายซึ่งกันและกัน และเพิ่มความคงตัวให้กับอิมัลชันไม่ให้เกิดการแยกชั้นของของเหลว นอกจากนี้ อิมัลซิไฟเออร์ยังเป็นตัวเหนี่ยวนำให้อิมัลชันของไขมันเสียความคงตัวระหว่างการแช่แข็งของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีม

Koxholt, Eisenmann และ Hinrichst (2001) กล่าวถึงบทบาท และหน้าที่ของอิมัลซิไฟเออร์ในไอศกรีม ไว้ดังนี้

- เพิ่มค่าการขึ้นโฟมของส่วนผสมของไอศกรีมผสม
- ทำให้ไอศกรีมมีเนื้อสัมผัสที่เนียน แห้ง และง่ายต่อการขึ้นรูป
- ลดอัตราการหลอมละลาย
- ลดอัตราการเกิดผลึกน้ำแข็งใหม่ และทำให้ผลึกน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์มีขนาดเล็กลง

1.3.5 สารให้ความคงตัว (Stabilizers)

การเติมสารให้ความคงตัวลงในส่วนผสมของไอศกรีมผสม เพื่อช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัส และความคงตัวของไอศกรีมระหว่างการเก็บรักษา โดยชะลอการเกิดผลึกน้ำแข็งใหม่ (Hagiwara และ Hartel, 1996) สารให้ความคงตัวทุกชนิดมีสมบัติในการอุ้มน้ำสูง มีผลทำให้เนื้อสัมผัสเรียบเนียนให้รูปร่างต่อไอศกรีม และช่วยให้ไอศกรีมละลายช้าลง แต่ไม่มีผลต่อจุดเยือกแข็ง นอกจากนี้ สารให้ความคงตัวยังทำให้ร้อยละการขึ้นฟูของไอศกรีมลดลง การใช้สารให้ความคงตัวมากเกินไป ทำให้ได้ไอศกรีมที่มีสมบัติการละลายไม่ดี ไอศกรีมเหนียวแฉะ มีเนื้อหยาบ และหลอมละลายยาก ปริมาณและชนิดของสารให้ความคงตัวที่ใช้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ หรือชนิดของไอศกรีมผสม เวลาในการแปรรูป ความดัน อุณหภูมิ และระยะเวลาในการเก็บรักษา (Marshall *et al.,* 1996)

1.3.6 สารให้กลิ่นรสและสี (Flavors and colors)

Marshall และคณะ (2003) อธิบายว่า สารให้กลิ่นรส และสีที่เติมลงในไอศกรีมผสม มีผลอย่างมากต่อความรู้สึก และการตัดสินใจเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภค สารให้กลิ่นรสแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ สารให้กลิ่นรสที่ละลายในไขมัน (Fat-soluble Flavors) และสารให้กลิ่น

รสที่ละลายในน้ำ (Water-soluble Flavors) ซึ่งสารให้กลิ่นรสแต่ละชนิดจะมีผลต่อความรู้สึกของผู้บริโภคแตกต่างกัน คือ สารให้กลิ่นรสที่ละลายในน้ำจะสลายตัวเร็วเมื่อรับประทาน แต่สารให้กลิ่นรสที่ละลายในไขมันจะสลายตัวช้ากว่า

สีของผลิตภัณฑ์ไอศกรีมมีผลต่อความรู้สึก และการยอมรับของผู้บริโภคเป็นอย่างมาก เช่น ไอศกรีมกลิ่นรสวานิลลา ควรมีสีเหลืองเล็กน้อย ไอศกรีมช็อกโกแลต ควรมีสีน้ำตาล และไอศกรีมกลิ่นรสผลไม้ ควรมีสีและกลิ่นตามรสของผลไม้ชนิดนั้น เพื่อเพิ่มความรู้สึกและการยอมรับในการรับประทาน

1.3.7 น้ำ (Water)

จุฑาทิพย์ ลีนานุนารถ (2546) กล่าวว่า น้ำเป็นองค์ประกอบที่มีมากที่สุดในไอศกรีม ไอศกรีมส่วนใหญ่ประกอบด้วยน้ำอย่างน้อย ร้อยละ 60-70 โดยน้ำหนัก โดยอยู่ในสภาพผลึกน้ำแข็งเกือบทั้งหมด ณ อุณหภูมิที่รับประทาน น้ำในรูปของผลึกน้ำแข็งทำให้ไอศกรีมสร้างความรู้สึกสดชื่น ซึ่งแตกต่างไปจากผลิตภัณฑ์อาหารพร้อมบริโภคชนิดไม่แช่แข็งชนิดอื่น ความสมดุลระหว่างผลึกน้ำแข็งกับส่วนที่เป็นของเหลว และขนาดของผลึกน้ำแข็งมีบทบาทสำคัญต่อการรับประทานไอศกรีม โดยปกติน้ำจะไม่ใช่องค์ประกอบที่เติมลงในส่วนผสมไอศกรีม แต่น้ำจะมาจากส่วนผสมต่างๆ ได้แก่ น้ำนม ไข่เหลว น้ำเชื่อม และผลไม้ ซึ่งส่วนผสมต่างๆ จะกระจาย หรือแขวนลอยอยู่ในส่วนของน้ำไอศกรีม

1.4 กระบวนการผลิตไอศกรีม

โดยทั่วไปกระบวนการผลิตไอศกรีม ไม่ว่าจะเป็นไอศกรีมประเภทแท่ง ถ้วย หรือโคน จะมีขั้นตอนการผลิตหลักที่เหมือนกัน แต่มีรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับประเภทของไอศกรีมที่ต้องการผลิต และเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต ดังแสดงใน Figure 1

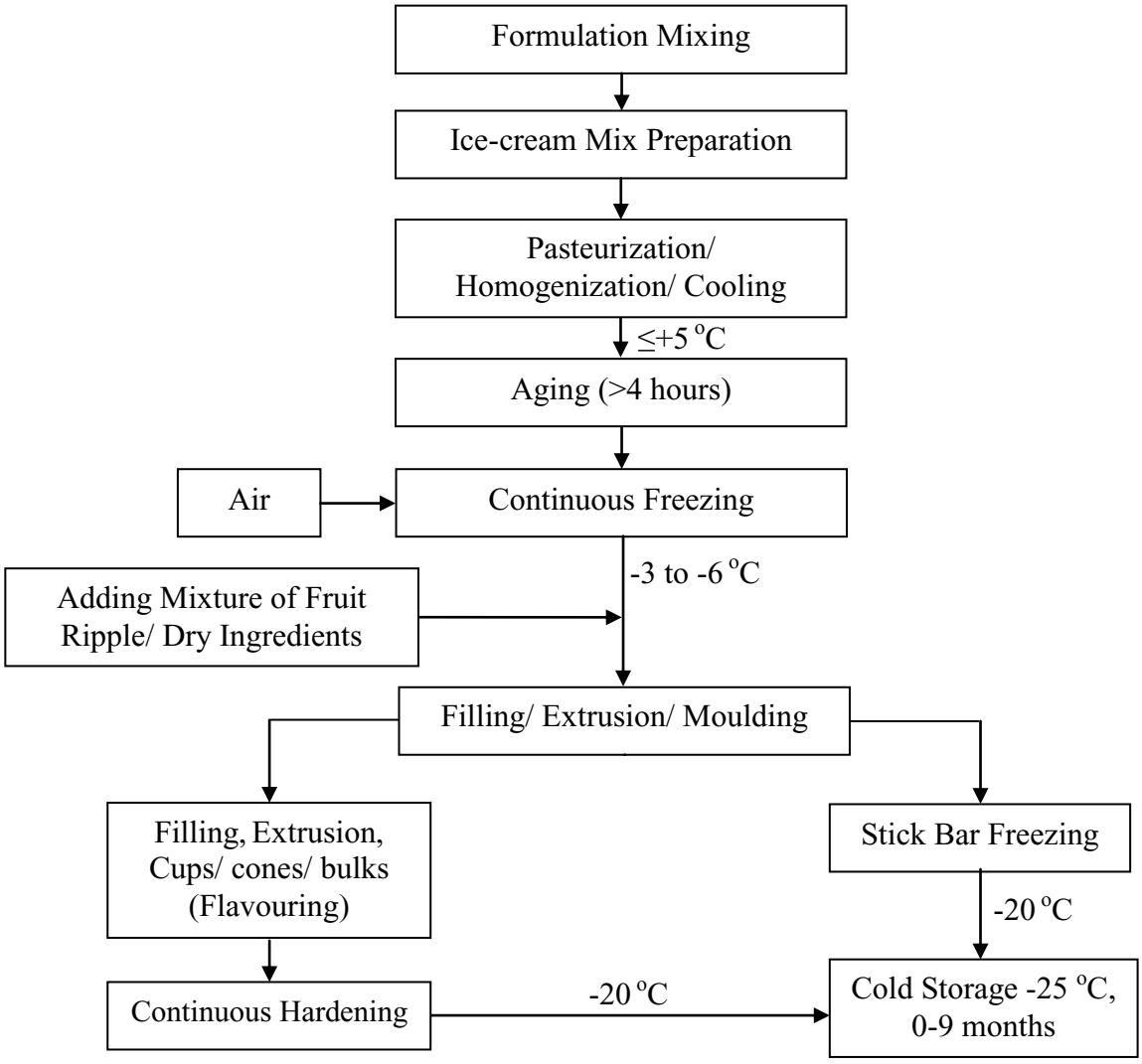


Figure 1. Ice-cream production process

ที่มา: Dairy Processing Handbook (2003)

จาก Figure 1 สามารถอธิบายขั้นตอนการผลิตไอศกรีมโดยทั่วไปได้ดังนี้

1.4.1 การคำนวณส่วนผสมของไอศกรีม (Formulation Mixing)

Marshall และคณะ (1996) กล่าวว่า การคำนวณส่วนผสมของไอศกรีมถือว่ามีความสำคัญ เนื่องจากเนื้อไอศกรีม รูปร่าง รสชาติ ความอร่อย ตลอดจนราคา มีผลโดยตรงต่อส่วนผสม การคำนวณส่วนผสมของไอศกรีม นอกจากเพื่อให้ได้สูตรไอศกรีมที่สมดุลแล้ว ยังใช้ควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้มีความสม่ำเสมอ และได้ไอศกรีมที่เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด

ขึ้นได้ การคำนวณส่วนผสมของไอศกรีมนั้น จะต้องกำหนดสูตรไอศกรีมที่ต้องการขึ้นมา โดยกำหนดองค์ประกอบของไอศกรีม ปริมาณที่ต้องการผลิต วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต องค์ประกอบของสารอาหารในวัตถุดิบ แล้วจึงคำนวณหาน้ำหนักของส่วนผสมต่างๆ ในไอศกรีม

1.4.2 การเตรียมส่วนผสมไอศกรีม (Ice-cream Mix Preparation)

เมื่อคำนวณหาน้ำหนักของส่วนผสมต่างๆ ที่จะใช้ได้แล้ว พนักงานเตรียมวัตถุดิบจะชั่งวัตถุดิบแต่ละชนิดตามกำหนด และนำส่วนผสมมาผสมเข้าด้วยกันในถังผสม

1.4.3 การปั่นส่วนผสม (Blending)

จุฑาทิพย์ ลีนานุนารถ (2546); Marshall และคณะ (1996) ได้อธิบายขั้นตอนการผสม และลำดับการใส่ส่วนผสมไว้ว่า การปั่นส่วนผสมไอศกรีมด้วยเครื่องปั่นโดยใช้แรงเฉือน มีผลให้ของแข็งกระจายในส่วนผสมที่เป็นของเหลว โดยจะใส่ส่วนผสมที่เป็นของเหลวก่อน เช่น ครีม นม นมข้น น้ำเชื่อม และอื่นๆ จากนั้นจึงค่อยๆ ให้ความร้อน พร้อมทั้งกวนส่วนผสมไปเรื่อยๆ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึง 50 องศาเซลเซียส จึงเติมวัตถุดิบที่เป็นของแห้ง เช่น ธาตุน้ำนมไม่รวมมันเนย น้ำตาล และสารให้ความคงตัว ในขั้นตอนนี้อาจเกิดปัญหาเรื่องการจับตัวเป็นก้อนของสารให้ความคงตัว ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการแบ่งน้ำและน้ำตาลที่ใช้มาเตรียมน้ำเชื่อมที่มีความเข้มข้นของน้ำตาล ร้อยละ 66-68 อัตราส่วนปริมาณน้ำเชื่อมต่อสารให้ความคงตัว คือ 11.26 กิโลกรัมต่อ 0.45 กิโลกรัม แล้วจึงเติมสารให้ความคงตัวลงไป กวนส่วนผสมให้เข้ากันภายในเวลา 1 นาที ไม่ควรเติมสี และกลิ่นในขั้นตอนนี้ เพราะเมื่อนำส่วนผสมไปผ่านการให้ความร้อนอาจเกิดการสลายตัวได้

1.4.4 การพาสเจอไรซ์ และการทำให้เย็น (Pasteurization and Cooling)

การพาสเจอไรซ์ส่วนผสมของไอศกรีม มีวัตถุประสงค์เพื่อทำลายจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค การพาสเจอไรซ์ที่เหมาะสมนั้น ควรให้ความร้อนถึงอุณหภูมิที่กำหนดอย่างรวดเร็วและคงที่ ณ อุณหภูมิตามเวลาที่กำหนดด้วยเครื่อง HTST 1200 แล้วทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิต่ำกว่า 5 องศาเซลเซียส (จุฑาทิพย์ ลีนานุนารถ, 2546)

1.4.5 การโฮโมจีไนซ์ (Homogenization)

จุฑาทิพย์ ลีนานุนารถ (2546); Bylund และคณะ (1995) อธิบายว่า การโฮโมจีไนซ์เป็นกระบวนการที่ทำให้เม็ดไขมันแตกตัวเป็นเม็ดขนาดเล็กลง โดยเม็ดไขมันมีขนาดประมาณ 1-2 ไมครอน ซึ่งจะป้องกันการแยกชั้นของครีม ช่วยให้ไอศกรีมมีเนื้อนุ่ม การปั่นส่วนผสมเป็นไปได้ง่าย และรวดเร็ว ใช้เวลาในการบ่มส่วนผสมไม่นานมาก การเพิ่มปริมาณไขมันมีผลทำให้ประสิทธิภาพการโฮโมจีไนซ์ลดลง และทำให้เม็ดไขมันมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยทั่วไปการโฮโมจีไนซ์แบ่งเป็น 2 ครั้ง ซึ่งมีข้อดี คือ ช่วยให้ไขมันกระจายตัวได้ดี เพราะการเกาะตัวของไขมันทำให้ความหนืดของส่วนผสมสูงขึ้น มีผลทำให้ส่วนผสมเย็นช้าลง และทำให้การปั๊มของเครื่องโฮโมจีไนซ์เป็นไปได้ยาก เนื่องจากน้ำไอศกรีมผสมที่มีปริมาณไขมันเป็นองค์ประกอบอยู่มากกว่าร้อยละ 6-10 หรือมีโปรตีนเป็นองค์ประกอบอยู่สูง ความร้อนจากการพาสเจอไรซ์จะทำให้ไขมัน และโปรตีนเกิดการรวมตัวกัน จึงต้องโฮโมจีไนซ์หลังจากการพาสเจอไรซ์

1.4.6 การบ่มส่วนผสม (Aging)

Marshall และคณะ (1996) กล่าวว่า การบ่มส่วนผสม เป็นวิธีการเก็บรักษาอิมัลชันที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 2-4 องศาเซลเซียส เวลาในการบ่มขึ้นอยู่กับสารให้ความคงตัว และอิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้ การบ่มต้องใช้ระยะเวลาหนึ่ง เพื่อทำให้ไขมันละลายจับตัวเป็นของแข็ง เกิดการดูดซับของโปรตีน และอิมัลซิไฟเออร์ล้อมรอบที่ผิวเม็ดไขมัน รวมทั้งเกิดการอุ้มน้ำของโปรตีนและสารให้ความคงตัว ต้องใช้เวลา 2-3 ชั่วโมง การบ่มส่วนผสมส่งผลให้ความหนืดของไอศกรีมผสมเพิ่มขึ้น

1.4.7 การปั่นแข็งไอศกรีม (Freezing)

ขั้นตอนการปั่นแข็งน้ำไอศกรีมผสมนี้ ถือว่ามีความสำคัญมากขั้นตอนหนึ่งของกระบวนการผลิตไอศกรีม เพราะจะส่งผลถึงคุณภาพ และความอร่อยของผลิตภัณฑ์ที่ได้ Marshall และคณะ (1996) ได้แบ่งการปั่นแข็งไอศกรีมออกเป็น 2 ส่วน คือ

(1) การเติมสีและกลิ่นตามต้องการ ผสมลงในไอศกรีมผสมที่ผ่านการบ่มและลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็ว เพื่อทำให้ไอศกรีมผสมกลายเป็นผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดเล็กและสม่ำเสมอ ซึ่งส่งผลให้ไอศกรีมมีเนื้อสัมผัสที่เรียบเนียน สามารถอุ้มอากาศได้ดี ขณะเดียวกันก็มีการกวนไอศกรีมผสมตลอดเวลาอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้ความหนืดลดลง

(2) เมื่อไอศกรีมผสมถูกทำให้แข็งตัว มีปริมาณน้ำบางส่วนเท่านั้นที่เป็นผลึกน้ำแข็ง เมื่อไอศกรีมมีความข้นหนืดเพิ่มขึ้น หรือมีปริมาณอากาศตามต้องการ แต่ปริมาณผลึกน้ำแข็งยังไม่เพียงพอ จึงต้องนำไปแช่แข็งเพื่อทำให้น้ำเกือบทั้งหมดแข็งตัว โดยไม่ต้องมีการกวนอีก

1.4.8 การแช่แข็ง (Hardening)

จุฑาทิพย์ ลีนานุนารถ (2546) ได้อธิบายการแช่แข็งว่า เป็นการแช่แข็ง หรือขึ้นรูปไอศกรีมที่ผ่านขั้นตอนการปั่นแล้ว โดยไม่มีการเติมอากาศเข้าไปอีก เนื่องจากไอศกรีมที่ออกจากถังปั่นจะมีลักษณะกึ่งแข็งกึ่งเหลว ไม่สามารถคงรูปร่างได้ การแช่แข็งควรทำอย่างรวดเร็ว เพื่อป้องกันการเกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ ทำให้ได้ไอศกรีมที่มีเนื้อสัมผัสเรียบเนียน เวลาที่ใช้ในการแช่แข็งโดยทั่วไปจะใช้เวลาที่อุณหภูมิ ณ จุดกึ่งกลางของไอศกรีมในภาชนะบรรจุลดลงเหลือ -18 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่า นิยมแช่แข็งที่อุณหภูมิ -25 ถึง -30 องศาเซลเซียส ในขั้นตอนการแช่แข็งนี้ จะทำให้ไอศกรีมมีปริมาณน้ำที่แข็งตัวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเข้มข้นของสารละลายในน้ำเพิ่มขึ้น จุดเยือกแข็งของไอศกรีมผสมจึงลดลงอีกจนถึงจุดที่ไม่มีผลึกน้ำแข็งเกิดขึ้นอีก ดังนั้น น้ำในไอศกรีมจึงไม่สามารถแข็งตัวได้หมด

1.4.9 การเก็บรักษา

ไอศกรีมที่ผ่านการแช่แข็งแล้ว อาจจำหน่ายทันที หรือเก็บรักษาไว้ในห้องแช่แข็ง โดยมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง -18 ถึง -25 องศาเซลเซียส (จุฑาทิพย์ ลีนานุนารถ, 2546)

2. การทำความเย็น (Refrigeration)

สุรพล พฤกพานิช (2531) ได้ให้ความหมายของการทำความเย็นว่า เป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนออกจากพื้นที่ หรือวัตถุที่ต้องการทำความเย็น หรือเป็นกระบวนการลดอุณหภูมิ และรักษาอุณหภูมิของพื้นที่ หรือวัตถุที่ต้องการทำความเย็นให้ต่ำกว่าอุณหภูมิรอบๆ เช่น การทำความเย็นในตู้เย็น ตู้น้ำเย็น ตู้แช่ ห้องเย็น โรงน้ำแข็ง เป็นต้น อุปกรณ์ที่ใช้ผลิตความเย็นเรียกว่า เครื่องทำความเย็น (Refrigerator) และวัฏจักรที่ใช้พิจารณา เรียกว่า วัฏจักรการทำความเย็น (Refrigeration Cycle) การทำความเย็นมีหลักการ และวิธีการทำความเย็นแตกต่างกัน โดยพิจารณาจากการใช้พลังงานและการไม่ใช้พลังงานเป็นเกณฑ์ในการพิจารณาแต่ละหลักการ และวิธีการ ได้ดังนี้

2.1 หลักการทำความเย็น

วีรศักดิ์ บุญทน (2550) ได้อธิบายหลักการทำความเย็นว่า เป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายพลังงานความร้อนที่อยู่ในสสารหรือวัตถุ ออกจากสสารหรือวัตถุนั้นๆ Young และ Freedman (2004); Hecht (2000) ได้จำแนกหลักการทำความเย็นดังต่อไปนี้

2.1.1 หลักการธรรมชาติ

หลักการธรรมชาติ เป็นหลักการที่สอดคล้องกับกฎข้อที่ 2 ของอุณหพลศาสตร์ ซึ่งสรุปได้ว่า พลังงานความร้อนเคลื่อนที่จากที่อุณหภูมิสูงไปที่อุณหภูมิต่ำกว่า แต่ไม่อาจกลับทางได้ ในวัตถุระดับความร้อนสูง หรืออุณหภูมิสูงกว่าน้ำแข็ง พลังงานความร้อนเคลื่อนที่จากอากาศในวัตถุไปสู่น้ำแข็ง จะเห็นว่าเป็นหลักการทำความเย็นที่ไม่ซับซ้อนและเป็นจริงในธรรมชาติ

2.1.2 หลักการฝืนธรรมชาติ

หลักการฝืนธรรมชาติ เป็นหลักการสอดคล้องกับกฎข้อที่ 2 ของอุณหพลศาสตร์เช่นเดียวกัน แต่เป็นหลักการในทัศนะตรงข้าม ซึ่งสรุปได้ว่า เป็นไปไม่ได้ที่พลังงานความร้อนจะเคลื่อนที่จากที่อุณหภูมิต่ำกว่าไปสู่ที่อุณหภูมิสูงกว่า นอกจากจะใช้พลังงานจากภายนอกเข้าไปในระบบ โดยหลักการนี้ต้องใช้พลังงานไปทำให้พลังงานความร้อนเคลื่อนที่สวนทางกับหลักการแรก ซึ่งเป็นหลักการทำความเย็นที่นำมาใช้ในปัจจุบัน

สุพัฒน์ อรุณวรดิลก (2550) ได้ศึกษาระบบทำความเย็น พบว่า ส่วนมากจะใช้ระบบทำความเย็นในการปรับอากาศ เพื่อควบคุมอุณหภูมิ ความชื้น การไหลเวียน คุณภาพ และความสะอาดของอากาศ รวมถึงการควบคุมเสียงรบกวน เพื่อให้เกิดความสบาย และเป็นผลดีต่อสุขภาพของผู้ที่ต้องทำงานในพื้นที่นั้นๆ นอกจากนี้ ระบบทำความเย็นยังเข้ามามีความสำคัญในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมอาหารแช่แข็งที่ต้องการความเย็นสำหรับเก็บรักษาอาหาร ให้มีความสดเป็นเวลานาน การทำงานของระบบทำความเย็นจะใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นหลัก และในส่วนของภาคอุตสาหกรรมนั้น ก็มีการใช้ระบบทำความเย็นในกระบวนการผลิตต่างๆ เช่นเดียวกัน

สมศักดิ์ สุโมตยกุล (2542) ได้อธิบายว่า ในปัจจุบันหลักการทำความเย็นมีการมาประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ มากมาย ซึ่งจะยกตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานการทำความเย็นดังต่อไปนี้

(1) การผลิตอาหาร (Food Processing) เช่น การผลิตนม ไอศกรีม ต้องอาศัยการทำความเย็น โดยการให้ความร้อนแก่นมที่อุณหภูมิประมาณ 70 ถึง 80 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำมาทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็ว เรียกว่า การพาสเจอไรซ์ (Pasteurization) และเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 2 ถึง 4 องศาเซลเซียส เพื่อรักษาคุณภาพของนม ก่อนส่งไปจำหน่าย การผลิตไอศกรีม ก็จะต้องผ่านการพาสเจอไรซ์ และนำไปผ่านการแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20 ถึง -28 องศาเซลเซียส การผลิตไวน์และเบียร์ ในกระบวนการหมัก (Fermentation) กระบวนการบ่ม (Mellowing) จำเป็นต้องทำภายใต้อุณหภูมิต่ำประมาณ 5 ถึง 15 องศาเซลเซียส เป็นต้น

(2) การเก็บรักษาอาหาร (Food Storage) ในการเก็บรักษา หรือถนอมอาหาร เช่น ผัก ผลไม้ เนื้อสัตว์ ให้มีอายุในการเก็บรักษานานขึ้น เพื่อการบริโภคหรือเพื่อการจำหน่าย สามารถทำได้โดยการลดอุณหภูมิให้ต่ำลง ซึ่งเป็นการลดอัตราการแพร่ขยายของแบคทีเรียต่างๆ ซึ่งเป็นเหตุให้อาหารเน่าเสีย เช่น อาจจะเก็บผัก ผลไม้ หรือเนื้อสัตว์ไว้ในสภาพอาหารสด (Fresh Food) จะต้องเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำ แต่ต้องสูงกว่าจุดเยือกแข็ง (Freezing Point) ซึ่งจะมีช่วงเวลาในการเก็บรักษาสั้นกว่าการเก็บในสภาพอาหารแช่แข็ง (Frozen Food) ซึ่งจะต้องนำผัก ผลไม้ หรือเนื้อสัตว์มาทำการแช่แข็ง และเก็บรักษาในห้องเย็นที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง

(3) การผลิตในงานอุตสาหกรรม (Industrial Process) งานอุตสาหกรรมหลายประเภทที่ต้องอาศัยการทำความเย็นช่วยในกระบวนการผลิต เช่น อุตสาหกรรมเคมี ปิโตรเคมี โรงกลั่นน้ำมัน โรงแยกแก๊ส โรงงานผลิตสบู่ เป็นต้น

(4) การทำความเย็นเพื่อการขนส่ง (Transportation Refrigeration) เช่น ห้องเย็นที่ใช้ในเรือประมง ห้องเย็นที่ใช้ในเรือเดินทะเลซึ่งใช้ขนส่งอาหารแช่แข็งไปจำหน่ายยังต่างประเทศ หรือรถห้องเย็นที่ใช้ขนส่งผลิตภัณฑ์อาหารแช่แข็งระหว่างโรงงานผลิตไปยังจังหวัดที่อยู่ห่างไกล ซึ่งทั้งหมดนี้จะทำงานโดยอาศัยหลักการของระบบทำความเย็น

(5) การปรับอากาศ (Air Conditioning) เป็นสาขางานหนึ่งซึ่งอาศัยการทำความเย็นมาประยุกต์ใช้มากที่สุด โดยจะทำงานร่วมกับระบบควบคุมความชื้น การกรองอากาศ การทำให้อากาศหมุนเวียน การระบายอากาศ เพื่อความสุขสบายของคน เช่น ใช้ในเครื่องปรับอากาศทั่วไป หรืองานปรับอากาศที่ใช้ในกระบวนการผลิตต่างๆ ในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงงานทอผ้า โรงพิมพ์ โรงงานผลิตกระดาษ โรงงานผลิตยา เป็นต้น

การสร้างระบบทำความเย็นต้องอาศัยหลักการ 2 อย่าง คือ การเดือดกลายเป็นไอของของเหลว และการถ่ายเทความร้อนออกจากไอของของเหลว ซึ่งของเหลวที่รับความร้อนแล้วเดือดกลายเป็นไอ และถ่ายเทความร้อนออกจากไอให้กลายเป็นของเหลว ของเหลวกลุ่มนี้ เรียกว่า สารทำความเย็น (Refrigerant) สารทำความเย็นได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเป็นลำดับ ในปัจจุบันมีหลายชนิดให้เลือกใช้ตามความเหมาะสม

2.2 ระบบทำความเย็น (Refrigeration System)

วีรศักดิ์ บุญทน (2550) กล่าวว่า ระบบทำความเย็นส่วนใหญ่ได้รับการขับเคลื่อนโดยเครื่องจักร ซึ่งจะดูดและอัดไอสารทำความเย็นไปตามวงจรที่ซีลไว้ ความร้อนถูกส่งถ่าย และปล่อยทิ้ง โดยอาศัยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ระบบเหล่านี้ทำงานด้วยวัฏจักรที่เรียกว่า วัฏจักรอัดไอ (Vapor-compression Cycle) และยังมีระบบทำความเย็นแบบอื่นๆ ที่สามารถใช้ในการทำให้เกิดการทำความเย็นได้ เช่น ระบบดูดซึม (Absorption System) ระบบนี้เหมาะสมกับอุตสาหกรรมที่มีความร้อนเหลือใช้ หรือมีน้ำร้อนเหลือจากกระบวนการผลิต เป็นระบบที่ช่วยประหยัดไฟฟ้า และค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาต่ำ

วัฏจักรการทำความเย็นโดยการอัดไอ มีอุปกรณ์พื้นฐานในการทำความเย็นประกอบด้วย เครื่องอัด หรือคอมเพรสเซอร์ (Compressor) เครื่องควบแน่น หรือคอนเดนเซอร์ (Condenser) วาล์วขยายตัว (Expansion Valve) และเครื่องระเหย หรืออีวาพอเรเตอร์ (Evaporator) เมื่อสารทำความเย็นออกจากเครื่องระเหย สารทำความเย็นจะมีสภาวะเป็นไออิ่มตัว (Saturated Vapor) มีความดันต่ำ และอุณหภูมิต่ำ สารทำความเย็นที่สภาวะไออิ่มตัว จะถูกอัดด้วยเครื่องอัดจนมีสภาวะเป็นไอร้อนยิ่งยวด (Superheated Vapor) มีความดันสูง และอุณหภูมิสูง สารทำความเย็นจะผ่านเข้าไปในเครื่องควบแน่นเพื่อถ่ายเทความร้อนออก โดยที่สารทำความเย็นจะเริ่มเปลี่ยนสภาพกลายเป็นของเหลวที่มีความดันคงที่ สารทำความเย็นที่ออกจากเครื่องควบแน่น จะมีสภาวะเป็นของเหลวที่มีความดันสูง เมื่อสารทำความเย็นผ่านวาล์วขยายตัวแล้ว สารทำความเย็นจะมีความดันต่ำ อุณหภูมิต่ำ และจะผ่านเข้าไปในเครื่องระเหย ที่เครื่องระเหยสารทำความเย็นจะรับความร้อนและกลายสภาพเป็นไออิ่มตัว วัฏจักรการทำความเย็นจะดำเนินเช่นนี้ซ้ำต่อไป

2.2.1 ส่วนประกอบหลักของวัฏจักรการทำความเย็น

กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน (2546) ได้อธิบายส่วนประกอบหลัก และบทบาทการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ของวัฏจักรอัดไอ ไว้ดังนี้

(1) เครื่องระเหย หรืออีวาพอเรเตอร์ (Evaporator)

เครื่องระเหย คือ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยดึงความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์ หรือพื้นที่ที่ต้องการทำความเย็น การดึงความร้อนออกโดยตรงระหว่างผลิตภัณฑ์กับเครื่องระเหย โดยปกติไม่สามารถทำได้ จึงมักต้องมีของไหลอื่นที่เหมาะสม เช่น อากาศ หรือสารทำความเย็นทุติยภูมิเป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อน เช่น ในห้องเย็น หรือชั้นโชว์อาหารในซูเปอร์มาเก็ตนั้น อากาศถูกทำให้เย็นลงที่เครื่องระเหยแล้วถูกจ่ายให้หมุนเวียนไปรอบๆ ผลิตภัณฑ์

(2) เครื่องอัด หรือคอมเพรสเซอร์ (Compressor)

เครื่องอัด เป็นอุปกรณ์หลักที่ใช้ไฟฟ้าป้อนให้แก่ระบบทำความเย็น ทำหน้าที่ ดูดไอสารทำความเย็นความดันต่ำจากเครื่องระเหยแล้วอัดให้มีความดันสูงขึ้น จะช่วยให้ไอสารทำความเย็นควบแน่นกลับคืนเป็นของเหลว โดยการใช้วิธีการระบายความร้อนที่สะดวกและราคาถูก

(3) เครื่องควบแน่น หรือคอนเดนเซอร์ (Condenser)

เครื่องควบแน่น เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดหนึ่ง มีโครงสร้างคล้ายกับเครื่องระเหย การระบายความร้อนจากสารทำความเย็นจะใช้อากาศหรือน้ำก็ได้ หน้าที่หลัก คือ ระบายความร้อนออกจากระบบทำความเย็น ความร้อนที่ได้มาจากเครื่องระเหย เครื่องอัด และภาระเสริมต่างๆ

(4) อุปกรณ์ขยายตัว (Expansion Device)

อุปกรณ์ขยายตัว เป็นอุปกรณ์ลดความดัน ทำหน้าที่ลดความดันของสารทำความเย็นที่เป็นของเหลวจากคอนเดนเซอร์ไปเป็นความดันระเหย ควบคุมการไหลของสารทำความเย็นเหลวเข้าสู่เครื่องระเหย เพื่อรักษาระดับสารทำความเย็นในเครื่องระเหยให้เพียงพอสามารถทำความเย็นได้สูงสุด โดยมีเฉพาะไอร้อนยวดยิ่งเท่านั้นที่เข้าสู่เครื่องอัด

(5) ฉนวน

การหุ้มฉนวนที่ดีของระบบท่อ และอุปกรณ์ มีความสำคัญต่อการประหยัดพลังงาน ฉนวนมีความสำคัญเป็นพิเศษสำหรับระบบที่มีอุณหภูมิการระเหยต่ำ ดังนั้น การวางท่อ

ทางดูดผ่านพื้นที่ที่ไม่ได้มีการทำความเย็นจะทำให้อุณหภูมิไอสารทำความเย็นที่เข้าสู่เครื่องอัดสูงขึ้น มีผลทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องอัดต่ำลง

(6) สารทำความเย็น (Refrigerants)

สารทำความเย็น คือ สารใดๆ ที่ใช้ในการทำความเย็นแล้วได้รับผลของความเย็น เรียกว่า “สารทำความเย็น” ทำหน้าที่เป็นสารตัวกลางสำหรับถ่ายเทความร้อน โดยการดูดซึมความร้อนเข้าสู่ตัวเอง หรือดูดกลืนความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ ในขณะที่อุณหภูมิต่ำ และความดันต่ำ และสามารถถ่ายเทความร้อนออกจากตัวเอง หรือคายความร้อนแฝง เพื่อให้เกิดการควบแน่นเป็นของเหลวในขณะที่อุณหภูมิสูงและความดันสูง ในการเลือกสารตัวใดเป็นสารทำความเย็นนั้นควรจะพิจารณาคุณสมบัติทางเคมี ฟิสิกส์ และเทอร์โมไดนามิกส์ ให้เหมาะสมกับวงจรที่ใช้งาน

2.2.2 ประเภทของระบบทำความเย็น

ชูชัย ต.ศิริวัฒนา (2547); พิชัย กฤชไมตรี (2551) กล่าวว่า ระบบทำความเย็นแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ระบบทำความเย็นแบบตรง และระบบทำความเย็นแบบอ้อม อธิบายได้ดังนี้

(1) ระบบทำความเย็นแบบตรง (Direct Refrigeration System)

ระบบทำความเย็นแบบตรง หมายถึง การทำความเย็นที่สารทำความเย็นในเครื่องระเหย หรืออีวาพอเรเตอร์สัมผัสโดยตรงกับวัสดุ หรือบริเวณที่ต้องการทำความเย็น หรือตั้งอยู่ในบริเวณที่อากาศไหลเวียนผ่านบริเวณที่ต้องการทำความเย็น เช่น ระบบที่ใช้ในตู้เย็น และเครื่องปรับอากาศทั่วไป ระบบทำความเย็นแบบตรงแสดงใน Figure 2

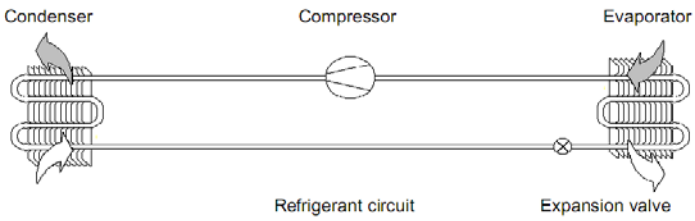


Figure 2. The direct refrigeration system

ที่มา : Melinder (2010)

จาก Figure2 จะเห็นว่าระบบทำความเย็นส่วนใหญ่มีโครงสร้างแบบทางตรง โดยใช้สารทำความเย็นปฐมภูมิ (ฟรีออน หรือแอมโมเนีย) แลกเปลี่ยนความร้อนโดยตรงกับวัสดุ หรือบริเวณที่ต้องการทำความเย็น ซึ่งองค์ประกอบหลักของระบบทำความเย็นแบบตรง ประกอบด้วย เครื่องระเหย (Evaporator) เครื่องอัดไอ (Compressor) เครื่องควบแน่น (Condenser) และวาล์วขยายตัว (Expansion Valve)

(2) ระบบทำความเย็นแบบอ้อม (Indirect Refrigeration System)

ระบบทำความเย็นแบบอ้อม หมายถึง ระบบที่ของเหลว เช่น น้ำ หรือน้ำเกลือถูกทำให้เย็นโดยสารทำความเย็นในระบบทำความเย็นแบบตรง แล้วไหลเวียนไปทำความเย็นให้กับวัสดุ หรือบริเวณที่ต้องการทำความเย็น หรือไปทำความเย็นให้อากาศที่ไหลเวียนผ่านบริเวณที่ต้องการทำความเย็น (ดัง Figure 3)

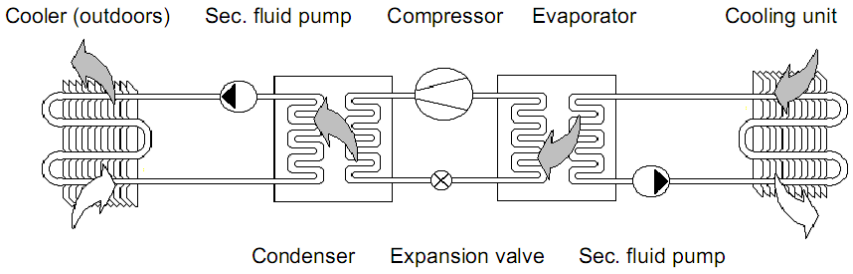


Figure 3. The indirect refrigeration system
ที่มา : Melinder (2010)

ใน Figure 3 แสดงระบบทำความเย็นแบบอ้อม ประกอบด้วย 2 ระบบย่อย คือ ระบบแบบตรง และระบบแบบอ้อม ระบบแบบตรงจะมีองค์ประกอบ และการทำงานที่คล้ายกับระบบทำความเย็นแบบตรงดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ส่วนระบบแบบอ้อมจะมีความแตกต่างกับระบบแบบตรง คือ ระบบแบบอ้อมจะใช้สารทำความเย็นทุติยภูมิ หรือสารทำความเย็นขั้นที่ 2 ซึ่งอาจจะเป็นของผสมระหว่างน้ำและโพรพิลีนไกลคอล (Propylene Glycol) หรือเอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol) เป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนจากบริเวณเครื่องระเหย ไปยังวัสดุหรือบริเวณที่ต้องการทำความเย็น การใช้งานระบบทำความเย็นแบบอ้อมนี้ เพื่อให้มีความเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้

2.3 สารทำความเย็น (Refrigerants)

สมภพ ปัญญาสมพรรค์ และคณะ (2551) ได้ให้ความหมายสารทำความเย็นว่า เป็นวัตถุ หรือสารที่จะเป็นตัวรับความร้อนจากวัตถุ หรือสารอื่นสำหรับในระบบวงจรอัดไอ (Vapor-compressor Cycle) สารทำความเย็นจะเป็นสารตัวงานในรูปของไหล (Working Fluid) ซึ่งจะดูดความร้อนในช่วงของการเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ และคายความร้อนในช่วงเปลี่ยนสถานะจากไอควบแน่นเป็นของเหลว ในการที่จะเลือกสารตัวใดเป็นสารทำความเย็นนั้น ควรพิจารณาคุณสมบัติทางเคมี ฟิสิกส์ และเทอร์โมไดนามิกส์ ให้เหมาะสมกับวงจรที่ใช้งาน เพื่อจะได้เป็นการประหยัด และปลอดภัยที่สุดในสภาพความเป็นจริง

2.3.1 ประเภทของสารทำความเย็น

สมภพ ปัญญาสมพรรค์ และคณะ (2551) ได้แบ่งประเภทของสารทำความเย็นออกเป็น 2 ประเภท และให้ความหมายไว้ดังนี้

2.3.1.1 สารทำความเย็นปฐมภูมิหรือสารทำความเย็นขั้นที่ 1 (Primary Refrigerants)

สารทำความเย็นปฐมภูมิหรือสารทำความเย็นขั้นที่ 1 หมายถึง สารทำความเย็นที่รับความร้อนจากวัตถุที่ต้องการทำความเย็นในเครื่องระเหย และถ่ายเทความร้อนออกให้แก่สารหล่อเย็น หรือสารทำความเย็นทุติยภูมิโดยตรงในเครื่องควบแน่น

2.3.1.2 สารทำความเย็นทุติยภูมิหรือสารทำความเย็นขั้นที่ 2 (Secondary Refrigerants)

สารทำความเย็นทุติยภูมิหรือสารทำความเย็นขั้นที่ 2 หมายถึง สารทำความเย็นที่ไม่ได้ผ่านเข้าสู่ระบบการทำความเย็นโดยตรง แต่จะรับความร้อน และถ่ายเทให้กับสารทำความเย็นปฐมภูมิ ซึ่งเป็นสารทำความเย็นของระบบแบบตรง ระบบการใช้สารทำความเย็นทุติยภูมิเป็นระบบที่มักนำมาใช้ในกรณีที่สารทำความเย็นปฐมภูมิของระบบทำความเย็นเป็นสารที่มีพิษไม่สามารถให้สัมผัสกับผลิตภัณฑ์อาหารได้โดย ดังนั้น เพื่อป้องกันการเกิดอันตรายจึงใช้สารทำความเย็นทุติยภูมิหรือสารทำความเย็นขั้นที่ 2 นี้มารับช่วงการทำงานต่อจากสารทำความเย็นปฐมภูมิ เพื่อถ่ายเทความร้อนจากบริเวณทำความเย็นให้แก่สารทำความเย็นขั้นที่ 1 ซึ่งตัวอย่างของสารทำความเย็นทุติยภูมิ

ได้แก่ น้ำ น้ำเกลือ และน้ำยาป้องกันการแข็งตัว ที่นิยมใช้ ได้แก่ สารละลายระหว่างน้ำกับเอทิลีนไกลคอล หรือน้ำกับโพรพิลีนไกลคอล หรือน้ำกับแคลเซียมคลอไรด์ เป็นต้น

สมภพ ปัญญาสมพรรค์ และคณะ (2551) ได้อธิบายว่า น้ำ น้ำเกลือ (Brines) สารหล่อเย็น (Coolant) และน้ำยาป้องกันการแข็งตัว (Antifreeze Solutions) ถือว่าเป็นสารทำความเย็นทุติยภูมิทั้งสิ้น ซึ่งน้ำเป็นได้ทั้งสารทำความเย็นปฐมภูมิ และทุติยภูมิ ใช้สำหรับระบบปรับอากาศขนาดใหญ่ และระบบทำความเย็นในอุตสาหกรรมที่ต้องการอุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ น้ำมีคุณสมบัติเหมาะสมที่จะใช้เป็นสารทำความเย็นทุติยภูมิ คือ สามารถไหลได้ดี มีค่าความร้อนจำเพาะสูง และมีค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนของฟิล์มสูง มีราคาถูก และไม่กัดกร่อนโลหะด้วย น้ำเกลือที่นิยมใช้กันแพร่หลาย คือ แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium Chloride) และโซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride) ส่วนน้ำยาป้องกันการแข็งตัว เช่น เอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol) โพรพิลีนไกลคอล (Propylene Glycol) โพแทสเซียมฟอร์เมท (Potassium Formate) เป็นต้น ความเข้มข้นของน้ำเกลือ และน้ำยาป้องกันการแข็งตัว มีผลต่ออุณหภูมิของการทำงานมาก น้ำยาป้องกันการแข็งตัวของน้ำเหล่านี้ มีคุณสมบัติแตกต่างจากน้ำเกลือ คือ ไม่กัดกร่อนโลหะ และไม่เกิดปฏิกิริยาแยกด้วยไฟฟ้า ดังนั้น จึงสามารถใช้กับระบบที่ประกอบด้วยโลหะต่างชนิดกันได้ นอกจากนี้ น้ำยาป้องกันการแข็งตัวยังมีการคงตัวอยู่ในสภาพเดิมได้ และไม่เกิดการระเหยในสภาวะของการทำงานปกติ เนื่องจากข้อดีดังกล่าวข้างต้น จึงมีการนำเอาระบบการใช้น้ำยาป้องกันการแข็งตัวนี้ มาใช้งานแทนระบบที่ใช้น้ำเกลือมากขึ้นเรื่อยๆ

คุณสมบัติของน้ำเกลือที่เหมาะสำหรับใช้เป็นสารทำความเย็นทุติยภูมิ ซึ่งสมภพ ปัญญาสมพรรค์ และคณะ (2551) ได้สรุปไว้ ดังนี้

ก. คงตัวเป็นของเหลวอยู่ได้ในอุณหภูมิที่ต้องการใช้งาน

ข. ไม่ทำให้โลหะเป็นสนิม หรือผุกร่อนง่าย (Non-corrosive)

ค. ความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) สูง เพื่อจะได้ลดจำนวนที่จะต้องใช้ลง

ง. ความหนืดต่ำ เพื่อให้น้ำเกลือที่ถูกปั๊มไหลวนเวียนได้ดี และทำให้การถ่ายเทความร้อนดี

จ. มีค่าการนำความร้อน (Conductivity) สูง เพื่อให้การถ่ายเทความร้อนเร็ว

ฉ. คงตัว และไม่ทำปฏิกิริยากับสารทำความเย็นที่อาจรั่วออกมาได้

อัครเดช สินธุภัค (2533) กล่าวว่า โดยส่วนใหญ่แล้ว มักจะใช้น้ำเป็นสารทำความเย็นทุติยภูมิสำหรับระบบปรับอากาศชิลเลอร์ขนาดใหญ่ๆ และระบบทำความเย็นในอุตสาหกรรม ซึ่งจุดแข็งตัวอยู่ต่ำกว่าอุณหภูมิใช้งานมากๆ ทั้งนี้เพื่อป้องกันการแข็งตัวของน้ำ เหตุผลที่เลือกใช้น้ำ

เป็นสารทำความเย็นทุติยภูมิ เพราะน้ำมีคุณสมบัติที่ดีในการเป็นสารทำความเย็นทุติยภูมิ คือ สามารถไหลได้ดี มีค่าความจุความร้อนจำเพาะสูง ค่าสัมประสิทธิ์ของฟิล์มสูง หาได้ง่าย ราคาถูก ไม่กัดกร่อนโลหะและมีความปลอดภัยในการใช้งานสูง แต่เนื่องจาก น้ำไม่สามารถทำความเย็นในอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำได้ ซึ่งในบางกรณีมีความจำเป็นต้องทำให้อุณหภูมิต่ำกว่านั้น ดังนั้น จึงมีการใช้สารประเภทน้ำเกลือ หรือสารป้องกันการแข็งตัว เป็นสารทำความเย็นทุติยภูมิ เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในแต่ละอุตสาหกรรม อัครเดช สินธุภัค (2533) ได้สรุปข้อดี และข้อเสียของการใช้สารทำความเย็นทุติยภูมิ หรือสารทำความเย็นขั้นที่ 2 ไว้ดังนี้

ก. ข้อดีของการใช้สารทำความเย็นทุติยภูมิ คือ
- สามารถจำกัดสารทำความเย็นขั้นแรกให้อยู่ในที่เดียวกัน
- ลดภัยที่อาจจะเกิดขึ้นได้จากสารทำความเย็นที่ใช้เป็นพิษ
- ลดโอกาสที่สารทำความเย็นจะรั่ว และทำให้ความดันลดน้อยลง
- ง่ายสำหรับการควบคุม
- หารอยรั่วได้ง่าย

ข. ข้อเสียของการใช้สารทำความเย็นทุติยภูมิ คือ
- ทำให้ประสิทธิภาพการทำความเย็น (C.O.P) น้อยลง
- ต้องใช้เครื่องมือเพิ่มขึ้น เช่น ปั๊มสำหรับหมุนเวียนน้ำเกลือ และถังน้ำเกลือ
- ต้องบำรุงรักษาน้ำเกลือให้มีคุณสมบัติคงที่
- เกิดการดูดความร้อนในขณะไหลผ่านในท่อ

ตัวอย่างสารทำความเย็นทุติยภูมิ หรือสารทำความเย็นขั้นที่ 2 ที่นิยมใช้

(1) เอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol)

เอทิลีนไกลคอล ($C_2H_6O_2$) มีจุดเดือดสูงกว่าน้ำถึงสองเท่า เป็นสารที่มีอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต หากดื่มกินเข้าไปแม้ปริมาณเพียงเล็กน้อยจะไปออกฤทธิ์ต่อไตทำให้เกิดอาการไตวาย และอาจเสียชีวิตได้ แต่เพราะคุณสมบัติหลักๆ คือ ไม่ทำให้เกิดสนิม และการกัดกร่อน ใช้ในเครื่องทำความเย็น เครื่องปรับอากาศ เครื่องยนต์ เป็นต้น ปัจจุบันกำลังพัฒนาสารอีกชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเอทิลีนไกลคอล เพื่อที่จะนำมาใช้ทดแทนเอทิลีนไกลคอล นั่นคือ โพรพิลีนไกลคอล เนื่องจากมีความอันตรายน้อยกว่า

กรมควบคุมมลพิษ (2544) ได้อธิบายเกี่ยวกับข้อมูลวัตถุอันตราย และเคมีภัณฑ์ของสารเอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol) ไว้ดังนี้ คือ

ก. คุณสมบัติทางเคมี และกายภาพ

ชื่อทางเคมี: Ethylene Glycol

ชื่อทางการค้า: เอทิลีนไกลคอล, 1, 2-Dihydroxyethane, 1, 2-Ethanediol

สูตรทางเคมี: $HOCH_2CH_2OH$ หรือ $C_2H_6O_2$

น้ำหนักโมเลกุล: 62.07 กรัมต่อโมล

ลักษณะ: เป็นของเหลวใส เหนียวข้นคล้ายน้ำเชื่อม และดูดความชื้น

สีและกลิ่น: ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น

จุดเดือด: 197.6 องศาเซลเซียส

จุดเยือกแข็ง: -13 องศาเซลเซียส

ความดันไอ: 0.05 มิลลิเมตรปรอท ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

ความหนาแน่นไอ: 2.14 (เมื่อเทียบกับอากาศ; อากาศ = 1)

การละลายน้ำ: ละลายได้ดีในน้ำ แอลกอฮอล์ ไกลคอลอีเทอร์

ความถ่วงจำเพาะ: 1.1135 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

ความเป็นกรดด่าง: มีความเป็นกลาง

ความหนืด: 21 mPa.sec

ข. อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect)

- สัมผัสทางหายใจ การหายใจเอาไอระเหยของสารเข้าไป โดยทั่วไปจะไม่เกิดอันตรายจนกว่าจะถูกทำให้ร้อน การได้รับไอระเหยเข้าไปเป็นเวลานาน ทำให้เกิดการระคายเคืองต่อคอ และทำให้ปวดศีรษะได้ อาจเกิดอาการคลื่นไส้ เวียนศีรษะและง่วง เกิดอาการบวมน้ำของปอด และระบบประสาทส่วนกลางทำงานลดลง

- สัมผัสทางผิวหนัง จะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนังเล็กน้อย แต่อาจเกิดการซึมผ่านเข้าสู่ผิวหนังได้

- กิน หรือกลืนเข้าไป อาการเริ่มแรกถ้าได้รับในปริมาณมาก ทำให้เกิดอาการมึนเมา และจะทำให้ระบบประสาทส่วนกลางมีการทำงานลดลง อาเจียน ปวดศีรษะ หายใจถี่ๆ อัตราการเต้นของหัวใจลดลง ความดันโลหิตต่ำลง หมดสติและชักกระตุกอย่างรุนแรง การหายใจเอาไอระเหยเข้ามากเกินไป ก่อให้เกิดความตายได้ หรือเป็นสาเหตุของโรคหัวใจตามมา ปริมาณที่พอจะทำให้ตายได้ในมนุษย์ คือ 100 มิลลิลิตร

- สัมผัสถูกตา อาจทำให้เกิดการระคายเคือง เจ็บปวด เป็นอันตรายต่อตา

- การก่อมะเร็ง ความผิดปกติอื่นๆ การสัมผัสเรื้อรัง การได้รับสารซ้ำๆ ในทุกทางอาจก่อให้ปัญหารุนแรงต่อตับ ไต และก่อให้เกิดอันตรายต่อสมองด้วย ผิวหนังเกิดการแพ้ตามมา ก่อให้เกิดอันตรายต่อทารกในครรภ์ได้

ค. การเก็บรักษา/ สถานที่เก็บ/ เคลื่อนย้าย/ ขนส่ง (Storage and Handling)

- การเก็บรักษาควรเก็บในภาชนะที่ปิดสนิทและแห้ง มีการระบายอากาศที่ดี ควรแยกเก็บออกจากกรด ด่าง และโลหะออกซิไดซ์ เพื่อป้องกันการเสียหายทางกายภาพ และภาชนะบรรจุของสารนี้จะเป็นอันตรายเมื่อเป็นถังเปล่า มีกากสารเคมีหลงเหลืออยู่ เช่น ไอระเหยของเหลว ควรสังเกตคำเตือนทั้งหมด และข้อควรระมัดระวังที่ระบุไว้

(2) แคลเซียมคลอไรด์ หรือน้ำเกลือ (Calcium Chloride/ Brine)

แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) สามารถใช้งานได้หลากหลาย เช่น เป็นสารดูดความชื้น ใช้ในเครื่องทำความเย็นในอุตสาหกรรมห้องเย็น ใช้ทำฝนเทียม อุตสาหกรรมถุงมือยาง อุตสาหกรรมอาหาร และเครื่องดื่ม เป็นต้น สำหรับกระบวนการทำความเย็นในอุตสาหกรรม ใช้แคลเซียมคลอไรด์ เพื่อการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์และแช่แข็ง อุณหภูมิต่ำที่สุดที่แคลเซียมคลอไรด์สามารถทำได้ประมาณ -55 องศาเซลเซียส ซึ่งมีความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก แต่ข้อเสียหลักของแคลเซียมคลอไรด์ คือ การกัดกร่อนโลหะ การคายน้ำของตัวแคลเซียมคลอไรด์เอง และแนวโน้มที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่สัมผัสกับแคลเซียมคลอไรด์มีรสเสื่อมลงได้ (อัครเดช สินธุภัค, 2533)

กรมควบคุมมลพิษ (2544) ได้อธิบายเกี่ยวกับข้อมูลวัตถุอันตราย และเคมีภัณฑ์ของสารแคลเซียมคลอไรด์ไว้ดังต่อไปนี้

ก. คุณสมบัติทางเคมี และกายภาพ

ชื่อทางเคมี: Calcium Chloride

สูตรเคมี: $CaCl_2$

ลักษณะ: เม็ดของแข็ง เป็นเกลือเกล็ดขาว

สี: สีขาว หรือเทา-ขาว

กลิ่น: ไม่มีกลิ่น

น้ำหนักโมเลกุล: 110.90 กรัมต่อโมล

จุดเดือด: มากกว่า 1600 องศาเซลเซียส

จุดหลอมเหลว: 772 องศาเซลเซียส

ความถ่วงจำเพาะ: 2.150 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

ข. อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect)

- สัมผัสทางหายใจ เนื่องจากสารนี้ มีลักษณะเป็นเม็ด จะไม่เป็นอันตรายเมื่อหายใจเข้าไป แต่ถ้าหายใจเอาฝุ่นเข้าไป จะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ ทำให้มีอาการไอ และหายใจถี่

- สัมผัสทางผิวหนัง การสัมผัสกับสารที่เป็นของแข็งต่อผิวหนังที่แห้งจะทำให้เกิดการระคายเคืองเล็กน้อย แต่ถ้าหากสัมผัสกับสารละลายเข้มข้น หรือของแข็งสัมผัสกับผิวหนังที่ชื้น จะทำให้เกิดการระคายเคืองอย่างรุนแรง และอาจเกิดผิวหนังไหม้ได้

- กิน หรือกลืนเข้าไป สารนี้เป็นสารที่มีความเป็นพิษต่ำ แต่การกินหรือกลืนเข้าไป จะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อเยื่อเมือกในจมูกอย่างรุนแรง เนื่องจากความร้อนจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซีส ถ้ารับในปริมาณมากจะทำให้กระเพาะและลำไส้อักเสบ อาเจียนและปวดท้องได้

- สัมผัสถูกตา ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซีส จะทำให้เกิดการระคายเคืองตาจากส่วนประกอบซึ่งเป็นคลอไรด์ในสารทำให้ตาแดง และปวดตาได้

ค. การเก็บรักษา/ สถานที่เก็บ/ เคลื่อนย้าย/ ขนส่ง (Storage and Handling)

- ควรเก็บในภาชนะที่ปิดสนิทและแห้ง มีการระบายอากาศที่ดี ควรแยกเก็บออกจากกรด ด่าง และโลหะออกซิไดซ์ เพื่อป้องกันการเสียหายทางกายภาพ และภาชนะบรรจุของสารนี้จะเป็นอันตรายเมื่อเป็นถังเปล่า มีกากสารเคมีหลงเหลืออยู่ เช่น ไอระเหย ของเหลว ควรสังเกตคำเตือนทั้งหมด และข้อควรระมัดระวังที่ระบุไว้

(3) โพรพิลีนไกลคอล (Propylene Glycol)

อัครเดช สินธุภัค (2533) กล่าวว่า โพรพิลีนไกลคอล เป็นสารที่ใช้มากที่สุดในการป้องกันการแข็งตัวของน้ำในระบบทำความเย็น ซึ่งคุณสมบัติของโพรพิลีนไกลคอลจะแตกต่างจากน้ำเกลือ คือ ไม่กัดกร่อนโลหะ และไม่นำไฟฟ้า ดังนั้น จึงสามารถนำไปใช้กับโลหะต่างๆ ได้ดี นอกจากนี้ โพรพิลีนไกลคอลยังมีการคงตัวในสภาพเดิมได้ดี หรือมีความเสถียรมาก และไม่เกิดการระเหยกลายเป็นไอในสภาวะของการทำงานปกติ แต่มีข้อเสียของโพรพิลีนไกลคอล คือ เมื่อความเข้มข้นของสารเพิ่มมากขึ้น จะทำให้สารละลายมีความหนืดมาก และส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องจักรได้ง่าย

International Programme on Chemical Safety (2005) ได้อธิบายเกี่ยวกับข้อมูลวัตถุอันตราย และเคมีภัณฑ์ ของสาร โพรพิลีนไกลคอลไว้ดังนี้ คือ

ก. คุณสมบัติทางเคมี และกายภาพ

ชื่อทางเคมี: Propylene Glycol

สูตรเคมี: $CH_3CHOHCH_2OH$ หรือ $C_3H_8O_2$

น้ำหนักโมเลกุล: 76.09 กรัมต่อโมล

ลักษณะ: เป็นของเหลวใส

สีและกลิ่น: ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น

จุดเดือด: 188.20 องศาเซลเซียส

จุดเยือกแข็ง: -59 องศาเซลเซียส

การละลายน้ำ: ละลายได้ดีในน้ำ

ความถ่วงจำเพาะ: 1.0361 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

2.3.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติบางประการของสารทำความเย็นทุติยภูมิ

Melinder (2010) ได้อธิบาย และเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นทุติยภูมิแต่ละชนิดไว้ว่า การเลือกสารที่จะใช้เป็นสารทำความเย็นทุติยภูมิในระบบทำความเย็นแบบทางอ้อมนั้น สิ่งสำคัญที่ควรทราบ คือ ความเข้มข้นของสารละลาย อุณหภูมิจุดเยือกแข็ง ความหนืด ความจุความร้อนจำเพาะ และค่าการนำความร้อน

2.3.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิจุดเยือกแข็ง กับความเข้มข้นของสารละลาย

จุดเยือกแข็ง (Freezing Point) คือ อุณหภูมิที่เกิดภาวะสมดุลระหว่างของแข็งกับของเหลว หรืออุณหภูมิที่ของเหลวเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง ที่ความดัน 1 บรรยากาศ ในการเลือกสารที่จะใช้เป็นสารทำความเย็นทุติยภูมินั้น ควรเลือกที่อุณหภูมิจุดเยือกแข็งใกล้เคียงกับอุณหภูมิขณะปฏิบัติการ ไม่จำเป็นต้องเลือกที่อุณหภูมิจุดเยือกแข็งต่ำกว่าที่ต้องการมาก ซึ่งพิจารณาได้จากความเข้มข้นของสารละลายควบคู่กับอุณหภูมิจุดเยือกแข็ง คุณสมบัติจุดเยือกแข็งของสารทำความเย็นทุติยภูมิชนิดต่างๆ ดังแสดงใน Figure 4

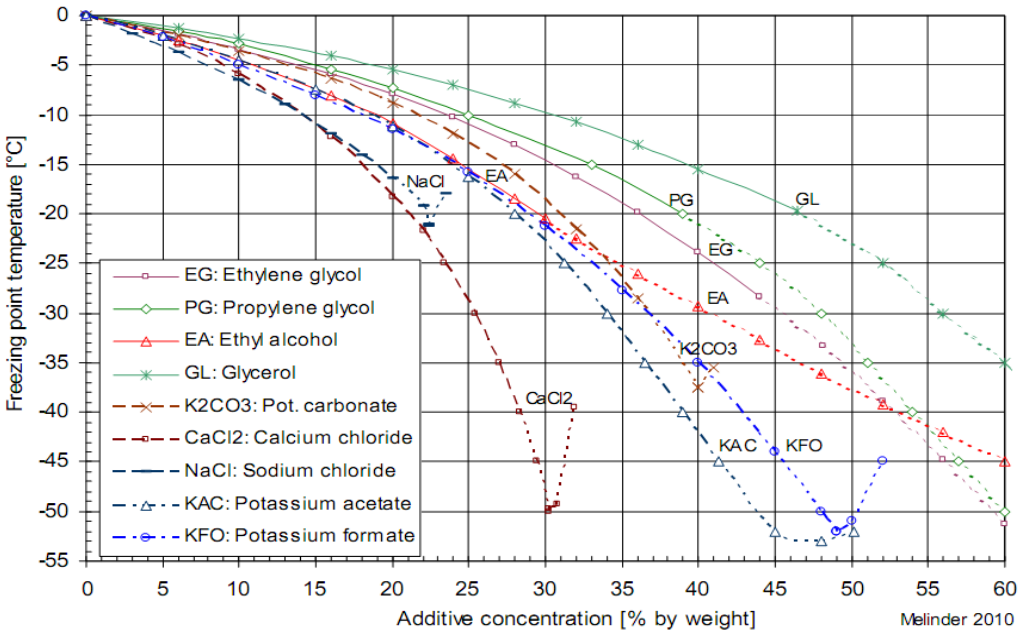


Figure 4. Freezing point as function of the additive concentration

ที่มา: Melinder (2010)

ใน Figure 4 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างจุดเยือกแข็ง กับความเข้มข้นของสารทำความเย็นทุติยภูมิชนิดต่างๆ จากแนวโน้มของเส้นกราฟ พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl: Sodium Chloride) และแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$: Calcium Chloride) มากกว่าจุดยูเทคติก (Eutectic) ทำให้อุณหภูมิจุดเยือกแข็งของสารละลายดังกล่าวเพิ่มขึ้น และเกิดผลึกของเกลือขึ้นได้ ถือว่าเป็นความเข้มข้นที่มากเกินไป และไม่เหมาะสมกับกระบวนการที่ต้องการอุณหภูมิต่ำกว่า -22 องศาเซลเซียส และ -50 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนสารละลายเอทิลีนไกลคอล (EG: Ethylene Glycol) และสารละลายโพรพิลีนไกลคอล (PG: Propylene Glycol) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้เป็นสารทำความเย็นทุติยภูมิ สามารถลดอุณหภูมิได้ต่ำกว่า -50 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นร้อยละ 60 และร้อยละ 58 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ แต่ไม่มีสารทำความเย็นทุติยภูมิชนิดใดที่เสี่ยงต่อการใช้งานที่อุณหภูมิปฏิบัติการต่ำกว่า -40 องศาเซลเซียส ยกเว้นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ซึ่งมีอุณหภูมิจุดเยือกแข็งของสารละลายที่ -22 องศาเซลเซียส (ASHRAE, 2009)

2.3.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น กับความเข้มข้นของสารละลาย

ความเข้มข้นของสารละลาย สามารถบ่งชี้ได้ด้วยค่าความหนาแน่น ซึ่งใน Figure 5 จะแสดงค่าความหนาแน่นของสารละลาย ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ โดยอ่านค่าความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

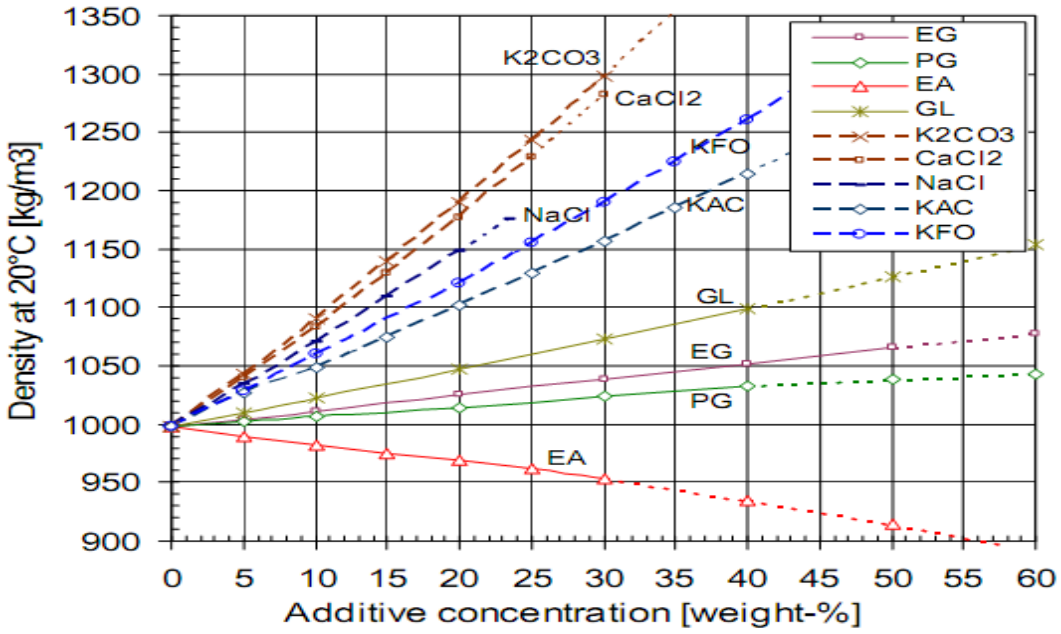


Figure 5. Density at 20°C as function of the additive concentration

ที่มา: Melinder (2010)

จาก Figure 5 พบว่า สารละลายที่เหมาะสำหรับใช้เป็นสารทำความเย็นทุติยภูมิจะต้องมีค่าความหนาแน่นมากกว่าน้ำจึงถือว่าเหมาะสม และสารละลายที่มีค่าความหนาแน่นมากที่สุด คือ สารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3: Potassium Carbonate) รองลงมา คือ แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$: Calcium Chloride) และโซเดียมคลอไรด์ (NaCl: Sodium Chloride) และที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ สารละลายเอทิลีนไกลคอล (EG: Ethylene Glycol) และสารละลายโพรพิลีนไกลคอล (PG: Propylene Glycol) ตามลำดับ ซึ่งค่าความหนาแน่นของสารละลายแต่ละชนิดจะมีค่ามากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายนั้นเพิ่มขึ้น แต่มีเพียงสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ (EA: Ethyl Alcohol) ที่มีค่าความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นสารทำความเย็นทุติยภูมิ สำหรับกระบวนการที่ต้องการทำความเย็นต่ำมากๆ

3. การนำสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ โดยวิธีการระเหย (Evaporation)

Fellows และคณะ (2000) กล่าวว่า การถ่ายโอนความร้อนไปยังของเหลวที่กำลังเดือด จนของเหลวเปลี่ยนสถานะเป็นไอ กระบวนการแบบนี้จะเรียกว่า การระเหย (Evaporation) ซึ่งวัตถุประสงค์ของการระเหยในอุตสาหกรรมเคมี คือ ต้องการทำให้สารละลายมีความเข้มข้นสูงขึ้น ในสารละลายจะประกอบด้วยตัวทำละลาย (Solvent) และตัวละลาย (Solute) ตัวทำละลายส่วนใหญ่ คือ น้ำ เมื่อสารละลายมีตัวทำละลายมาก ทำให้สารละลายมีความเข้มข้นต่ำ การระเหยตัวทำละลายออกจะได้สารละลายที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น

3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการระเหย

3.1.1 อุณหภูมิ

- ที่อุณหภูมิสูง ของเหลวจะระเหยได้มาก
- ที่อุณหภูมิต่ำ ของเหลวจะระเหยได้น้อย

3.1.2 ชนิดของของเหลว

- ของเหลวที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลมาก จะระเหยได้ยาก จึงระเหยได้น้อย
- ของเหลวที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลน้อย จะระเหยได้ง่าย จึงระเหยได้มาก

3.1.3 พื้นที่ผิวของของเหลว

- ของเหลวที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก จะระเหยได้มาก
- ของเหลวที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อย จะระเหยได้น้อย

3.1.4 ความดันบรรยากาศ

- ที่ความดันบรรยากาศสูง ของเหลวจะระเหยได้ยาก จึงระเหยได้น้อย
- ที่ความดันบรรยากาศต่ำ ของเหลวจะระเหยได้ง่าย จึงระเหยได้มาก

3.1.5 อากาศเหนือของเหลว

- บริเวณที่มีอากาศถ่ายเทหรือมีลมพัดตลอดเวลา ของเหลวจะระเหยได้มาก
- บริเวณที่ไม่มีอากาศถ่ายเทหรือไม่มีลมพัดตลอดเวลา ของเหลวจะระเหยได้น้อย

3.1.6 การคนหรือกวน จะช่วยทำให้ของเหลวนั้นระเหยได้เร็วขึ้น

- พื้นที่ผิวของของเหลวนั้นเพิ่มขึ้น
- ของเหลวนั้นมีอุณหภูมิสูงขึ้น
- ความดันของบรรยากาศเหนือของเหลวลดลง

- อากาศเหนือของเหลวมีการถ่ายเทตลอดเวลา เพื่อป้องกันการอิ่มตัวของไอ
- เมื่อมีการคนหรือกวนของเหลวนั้น

3.2 เครื่องระเหย (Evaporator)

Foust และคณะ (1980) ได้อธิบายว่า เครื่องระเหยเป็นเครื่องแยกน้ำออกจากสารละลาย ทำให้สารละลายมีความเข้มข้นสูงขึ้น เครื่องมือนี้จึงมีประโยชน์มากในอุตสาหกรรมเคมี หลักการของเครื่องระเหย คือ การให้ความร้อนแก่ของเหลว หรือที่เรียกว่า ลิเกอร์ (Liquors) ในเครื่องระเหย เพื่อให้ตัวทำละลายระเหยกลายเป็นไอ ดังนั้น จึงต้องคำนึงถึงอัตราการถ่ายเทความร้อนเป็นเรื่องสำคัญ และของเหลวที่เหมาะสำหรับใช้กับเครื่องระเหยควรเป็นของเหลวซึ่งเมื่ออุณหภูมิสูงจะไม่สลายตัว หรือของเหลวซึ่งสามารถตกผลึกได้ เมื่อมีความเข้มข้นสูงจนเป็นสารละลายที่อิ่มตัวยวดยิ่ง หรือของเหลวซึ่งเมื่อความดันเปลี่ยนไป จุดเดือดจะประมาณคงเดิม เช่น น้ำ เป็นต้น

การระเหยของเหลวในเครื่องระเหย สมบัติของเหลวมีผลต่อการระเหยเป็นอย่างมาก เนื่องจากของเหลวมีสมบัติที่แตกต่างกัน ดังนั้น การออกแบบเครื่องระเหยจึงต้องนำสมบัติของเหลวที่ระเหยมาพิจารณาด้วย ความเข้มข้นของของเหลวที่ป้อนเข้าสู่เครื่องระเหยอาจมีค่าน้อย หรือมีความเจือจางมากจนมีสมบัติทางกายภาพคล้ายน้ำ เมื่อของเหลวมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น สารละลายเริ่มมีลักษณะเฉพาะตัว ความหนาแน่น และความหนืดเพิ่มขึ้น เนื่องจาก มีปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้น จนสารละลายเริ่มอิ่มตัว หรือของเหลวเริ่มมีความหนืดมากเกินไป สำหรับการถ่ายโอนความร้อนถ้ายังคงดำเนินการต้มสารละลายที่อิ่มตัวต่อไป ทำให้สารละลายมีการสร้างผลึกขึ้น ซึ่งต้องกำจัดผลึกที่เกิดขึ้นออกเพื่อป้องกันการอุดตันในท่อ จุดเดือดของสารละลายอาจเพิ่มขึ้นมากเมื่อปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้น ดังนั้น อุณหภูมิจุดเดือดของสารละลายที่เข้มข้นจะสูงกว่าอุณหภูมิจุดเดือดของน้ำที่ความดันเดียวกัน

แบบของเครื่องระเหย ส่วนใหญ่ได้รับความร้อนจากไอน้ำ และกลั่นตัวบนท่อเหล็ก ยกเว้นในเครื่องระเหยที่ท่อวางตัวในแนวระนาบ วัสดุที่ต้องการระเหยจะไหลอยู่ภายในท่อ โดยปกติไอน้ำมีความดันต่ำ ซึ่งมีความดันต่ำกว่า 3 บรรยากาศ บ่อยครั้งที่ของเหลวเดือดอยู่ภายใต้ภาวะความดันสุญญากาศปานกลาง ที่ความดันลดต่ำประมาณ 0.05 บรรยากาศสัมบูรณ์ การลดลงของอุณหภูมิจุดเดือดของของเหลว จะเพิ่มความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างไอน้ำ และของเหลวที่กำลังเดือด ซึ่งจะเป็นการไปเพิ่มอัตราการถ่ายโอนความร้อนในเครื่องระเหย (Foust *et al.,* 1980)

จุไรวัลย์ รัตนะพิสิฐ (2546) อธิบายว่า การระเหยเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องทั้งมวลและความร้อน ซึ่งมีการถ่ายโอนไปพร้อมกัน สำหรับปริมาณความร้อนหรืออัตราความร้อนที่ถ่ายโอนในเครื่องระเหยเครื่องเดี่ยว สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$q = UA \div T$$
$$= UA\,(T_s - T_l)$$

โดยที่ q = ปริมาณการถ่ายโอนความร้อน
U = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวม
A = พื้นที่ที่ใช้ในการถ่ายโอนความร้อน
T_S = อุณหภูมิของไอน้ำที่ป้อนเข้าสู่เครื่องระเหย
T_l = อุณหภูมิเดือดของสารละลาย
$\div T$ = ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างไอน้ำและอุณหภูมิเดือดของสารละลาย

ในกระบวนการระเหยนั้น พบว่า เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นมักส่งผลให้อุณหภูมิเดือดของสารละลายสูงขึ้น และสูงกว่าอุณหภูมิเดือดของตัวทำละลายบริสุทธิ์ที่ความดันนั้นๆ ปรากฏการณ์เช่นนี้ เรียกว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเดือดหรือการเกิดระดับของอุณหภูมิเดือด BPE (Boiling-point Elevation) แสดงถึงความแตกต่างของอุณหภูมิเดือดของสารละลายกับตัวทำละลายบริสุทธิ์ สำหรับไอที่ระเหยออกจากสารละลายนั้นมักอยู่ในสภาวะไอร้อนยวดยิ่ง โดยดีกรีความร้อนยวดยิ่งเทียบเท่าค่า BPE

ดังนั้น $BPE = T_B - T$

โดยที่ T_B = อุณหภูมิเดือดของสารละลาย
T = อุณหภูมิเดือดของตัวทำละลายบริสุทธิ์

4. เทคนิคการแก้ปัญหาและตัดสินใจ (Problem Solving and Decision Making Techniques)

เกษมพัฒน์ พานิชลือชาชัย (2552) อธิบายว่า เทคนิคการแก้ปัญหา และการตัดสินใจ เป็นทักษะที่สำคัญอย่างหนึ่งในการบริหารงาน เพราะในการปฏิบัติงานไม่ว่าในตำแหน่งหน้าที่ใดจะต้องเผชิญกับปัญหา และสภาวการณ์ที่ต้องตัดสินใจอยู่ตลอดเวลา การแก้ปัญหาและการตัดสินใจ จำเป็นต้องมีหลักเกณฑ์ และวิธีการที่เป็นระบบ เริ่มตั้งแต่การกำหนดปัญหา การ

แยกแยะและค้นหาสาเหตุ การตั้งเป้าหมายเพื่อดำเนินการแก้ไข โดยใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์แก้ปัญหารูปแบบต่างๆ รวมทั้งวิธีการวัดผลหลังการแก้ไข และการตั้งมาตรฐาน เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาซ้ำเดิมขึ้นอีก โดยเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ และแก้ไขปัญหาที่มีความนิยมแพร่หลายอย่างหนึ่ง คือ เทคนิคการวิเคราะห์ทำไม-ทำไม (Why-Why Analysis) ดังนั้น การวิเคราะห์สาเหตุที่แท้จริงของปัญหา เพื่อหามาตรการแก้ไข้ปัญหา และไม่ให้กลับมาเกิดซ้ำอีกในภายหลังจึงเป็นเทคนิคที่มีความจำเป็น

กระบวนการแก้ไขปัญหา ประกอบด้วย การเข้าใจสถานการณ์ กำหนดปัญหา การวิเคราะห์สาเหตุ การค้นหาวิธีแก้ที่อาจเป็นไปได้ การเลือกวิธีแก้ที่ดีที่สุด การวางแผนปฏิบัติ และการติดตามและประเมินผล ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ จำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือคุณภาพทางการจัดการเข้ามาช่วยในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นได้

4.1 เครื่องมือคุณภาพ 7 อย่าง (7QC Tools)

เครื่องมือคุณภาพ คือ เครื่องมือสำหรับ “นักคิด” ที่ใช้ในการแก้ปัญหาทางด้านคุณภาพ ในกระบวนการทำงาน หรือการเรียน โดยสามารถช่วยศึกษาสภาพทั่วไปของปัญหา การเลือกปัญหา การสำรวจสภาพปัจจุบันของปัญหา การค้นหา และวิเคราะห์สาเหตุแห่งปัญหาที่แท้จริง เพื่อให้สามารถแก้ไขได้อย่างถูกต้อง ตลอดจนช่วยในการจัดทำมาตรฐาน และการควบคุมติดตามผลการดำเนินการต่างๆ เครื่องมือคุณภาพสำหรับนักคิดมีอยู่หลายชนิด แต่จะยกตัวอย่างบางชนิด ที่จะช่วยให้เกิดความสามารถในการคิดวิเคราะห์ การวางแผน และการประเมินผล เพื่อให้เกิดการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง สถาบันเพิ่มผลผลิตแห่งชาติ (2550) ได้สรุปไว้ดังนี้

(1) แผ่นตรวจสอบ (Check Sheet) คือ แบบฟอร์มที่มีการออกแบบช่องว่างต่างๆ ไว้เรียบร้อย เพื่อจะใช้ในการบันทึกข้อมูลได้ง่ายและสะดวก ถูกต้อง ไม่ยุ่งยาก และในการออกแบบแผ่นตรวจสอบทุกครั้งต้องมีวัตถุประสงค์ที่ชัดเจน

(2) กราฟ (Graph) คือ แผนภาพที่แสดงถึงตัวเลขหรือข้อมูลทางสถิติที่ใช้ เมื่อต้องการนำเสนอข้อมูล และวิเคราะห์ผลของข้อมูลดังกล่าว เพื่อทำให้ง่ายและรวดเร็วต่อการทำความเข้าใจ

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

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

(5) แผนผังการกระจาย (Scatter Diagram) คือ แผนผังที่ใช้แสดงค่าของข้อมูลที่เกิดจากความสัมพันธ์ของตัวแปร 2 ตัว ว่ามีแนวโน้มไปในทางใด เพื่อที่จะใช้หาความสัมพันธ์ที่แท้จริง

(6) แผนภูมิควบคุม (Control Chart) คือ แผนภูมิที่มีการเขียนขอบเขตที่ยอมรับได้ เพื่อนำไปเป็นแนวทางในการควบคุมกระบวนการโดยการติดตามและตรวจจับข้อมูลที่อยู่นอกขอบเขต

(7) ฮีสโตแกรม (Histogram) เป็นกราฟแท่งที่ใช้สรุปการอนุมาน (Inference) ข้อมูลเพื่อที่จะใช้สรุปสถานภาพของกลุ่มข้อมูลนั้น

4.2 การวิเคราะห์ทำไม-ทำไม (Why-why Analysis)

การวิเคราะห์ทำไม-ทำไม (Why-Why Analysis) คือ เป็นเทคนิคการวิเคราะห์หาปัจจัยที่เป็นต้นเหตุให้เกิดปรากฏการณ์อย่างเป็นระบบ มีขั้นมีตอนไม่เกิดการตกหล่น

สมชัย อัครทิวา (2549 อ้างโดย Hitoshi, 2549) ได้อธิบายว่า การวิเคราะห์ทำไม-ทำไม เป็นเครื่องมือที่นิยมใช้กันมากในการวิเคราะห์หาสาเหตุรากเหง้าของปัญหา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่เป็นต้นเหตุของปรากฏการณ์ หรือปัญหาที่เกิดขึ้น ทำให้ได้พบต้นตอของปัญหา หรือรากเหง้าที่แท้จริง เพื่อนำไปสู่การแก้ไข และป้องกันการเกิดซ้ำต่อไป หากเราสามารถค้นพบสาเหตุรากเหง้า และกำจัดได้แล้ว ปัญหาเดิมจะไม่เกิดซ้ำอีก แต่หากปัญหาเดิมเกิดซ้ำ แสดงว่า การวิเคราะห์ของเรานั้นมาผิดทาง หรืออาจมีบางสาเหตุตกหล่นไป อาจจะต้องมาทำการวิเคราะห์ใหม่

จากประสบการณ์ของ Hitoshi (2549) พบว่า โดยส่วนใหญ่ การใช้หลักการวิเคราะห์ทำไม-ทำไมนั้น เพื่อนำเสนอต่อลูกค้าเมื่อเกิดปัญหาจากลูกค้าเท่านั้น แต่ปัญหาเดิมยังคงเกิดซ้ำอยู่เรื่อยๆ อาศัยเพียงการตรวจสอบที่ถี่ขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดความสูญเปล่าตามมา การวิเคราะห์ทำไม-ทำไม เป็นเพียงเครื่องมือในการวิเคราะห์หาสาเหตุรากเหง้าเท่านั้น การจะทำให้ปัญหานั้นหมดไป จึงจำเป็นจะต้องประยุกต์หลักการอื่นๆ เข้ามาช่วย เช่น เทคนิค Poka-Yoke หรือ Triz เป็นต้น ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับสภาพปัญหาที่กำลังวิเคราะห์อยู่

สมหวัง วิทยาปัญญานนท์ (2549) กล่าวว่า การวิเคราะห์ทำไม-ทำไม ต้องอาศัยหลักการของ 5 จริง (5 Gen) ซึ่งประกอบด้วย สถานที่จริง (Genba) สภาพของจริง (Genbutsu)

สถานการณ์จริง (Genjitsu) หลักการทางทฤษฎี (Genri) และกฎเกณฑ์ (Gensoku) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ เพราะว่าหลักการของ 5 Gen จะทำให้การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาผ่านการวิเคราะห์ทำไม-ทำไมได้ถูกจุด ลักษณะการใช้งานของแต่ละ Gen เพื่อให้เข้าใจถึงการแก้ไขปัญหาหรือการปรับปรุง หากเป็นการแก้ไขปัญหา จะใช้เพียง 3 Gen แรก คือ สัมผัสพื้นที่จริง สภาพของจริง และสถานการณ์จริง ซึ่ง 3 Gen นี้ เป็นการตรวจหาความผิดปกติของการทำงาน ส่วนการปรับปรุงนั้น จะเป็นการค้นหาสาเหตุรากเหง้าของปัญหา ให้ใช้ 2 Gen ที่เหลือ คือ หลักการทางทฤษฎี และกฎเกณฑ์ มาทำการอธิบายถึงสาเหตุที่อาจเป็นไปได้ของปัญหา และจะต้องทำการพิสูจน์สาเหตุอีกครั้ง เพื่อยืนยันว่า สาเหตุนั้นคือสาเหตุรากเหง้าจริงๆ อาจจะได้จากการใช้สถิติในข้อมูลที่ดูแล้วไม่แน่ใจ หรือการดูผลจากการปฏิบัติโดยตรงที่เห็นชัดเจน เป็นต้น จึงกล่าวได้ว่า หากสาเหตุรากเหง้าที่แท้จริงถูกกำจัดหมดแล้ว ปัญหาเดิมจะไม่เกิดซ้ำ

- ขั้นตอนการวิเคราะห์ทำไม-ทำไม (Why-why Analysis)

วันรัตน์ จันทกิจ (2547) ได้สรุปขั้นตอนการวิเคราะห์ทำไม-ทำไมไว้ดังต่อไปนี้

(1) จัดลำดับความสำคัญหัวข้อที่จะทำการปรับปรุง ผ่านแผนภาพพาเรโต (Pareto) ซึ่งในขั้นตอนนี้เป็นการเลือกสาเหตุใหญ่ๆ มาทำการปรับปรุง โดยการเลือกปัญหาจาก KPI เพราะว่า การปรับปรุงใดก็ตาม หากไม่สอดคล้องกับกลยุทธ์หลักขององค์กรแล้ว จะทำให้การเติบโตขององค์กรเป็นไปอย่างล่าช้า

(2) เลือกหัวข้อที่จะทำการปรับปรุงหรือแก้ไข หลังจากได้สาเหตุหลักที่จะนำมาแก้ไขแล้ว ให้เขียนปัญหาที่มีความกระชับและเข้าใจง่าย

(3) จัดตั้งทีมงานที่เกี่ยวข้องในส่วนนี้ อาจจะเป็นผู้ที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงโดยตรง มาทำการวิเคราะห์หาสาเหตุ หรือรวมพนักงานระดับปฏิบัติงานด้วยก็ได้ เนื่องจากพนักงานระดับปฏิบัติงานเป็นผู้ที่เข้าใจสถานการณ์ดีที่สุด

(4) สอบถามสถานการณ์เบื้องต้น (ตรวจหาความผิดปกติ) ในขั้นตอนนี้มีความสำคัญมาก ในการตรวจหาความผิดปกติของสถานการณ์ ตัวอย่างเช่น “ห้องประชุมเครื่องปรับอากาศไม่เย็น (อุณหภูมิมากกว่า 28 องศาเซลเซียส ตลอดการใช้งาน) หากทำการวิเคราะห์ทันที โดยไม่มีการสอบถามสถานการณ์ก่อนหน้า จะทำให้มุ่งประเด็นไปที่เครื่องทำความเย็นทันที ทั้งๆ ที่เครื่องทำความเย็นอาจจะไม่ได้เสียก็ได้ หากไม่ทำความเข้าใจกับสถานการณ์ก่อนก็จะเป็นทำการคาดคะเนทันที ในกรณีนี้ ผู้ที่จะต้องสอบถามก่อน คือ พนักงานควบคุมดูแลห้องประชุม โดยสอบถามว่า เมื่อวานเครื่องปรับอากาศเย็นหรือไม่ หรือวันก่อนหน้านี้เครื่องปรับอากาศเย็นหรือไม่ และวันนี้กับวันก่อนหน้านี้มีอะไรเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมหรือไม่ หลังจากสอบถาม

แล้ว พนักงานควบคุมห้องแจ้งว่า วันก่อนยังเย็นอยู่ เมื่อวานก็เย็นอยู่ แต่วันนี้มีคนเข้าห้องประชุมจำนวนมาก และยังเปิดม่านกระจกอีกด้วย เพราะว่าแสงสว่างในห้องไม่เพียงพอ ซึ่งจากข้อความข้างต้น จะเห็นได้ว่า ขั้นตอนนี้จะละเลยไม่ได้ เพราะอาจจะทำให้การวิเคราะห์ผิดประเด็นได้

(5) การระดมสมอง (Brainstorming) เป็นการระดมความคิดเห็นของทีมงานที่เกี่ยวข้อง และควรมีผู้นำที่ทำหน้าที่ในการควบคุมการระดมสมองให้อยู่ในแนวทางการแก้ไขปัญหา

(6) ตรวจสอบความถูกต้องผ่าน 5 Gen หลังจากการระดมสมอง และกระจายคำถามว่า ทำไม ออกมาได้แล้ว ในเบื้องต้นให้ทีมงานไปดูสถานการณ์จริง และวิเคราะห์ผ่าน 3 Gen แรกก่อน เพื่อตรวจสอบความผิดปกติโดยเปรียบเทียบกับมาตรฐาน หากพบว่า ทุกโอกาสที่เป็นไปได้อยู่ในมาตรฐานให้ใช้อีก 2 Gen ที่เหลือ หมายความว่า การแก้ไขนั้นไม่เพียงพอ จำเป็นจะต้องปรับปรุง

(7) จัดทำมาตรการโต้ตอบ หลังจากที่พบสาเหตุรากเหง้าแล้ว ให้หามาตรการโต้ตอบ โดยเน้นให้อยู่ในรูปแบบ Visual Control ซึ่งประกอบไปด้วย ผู้รับผิดชอบ ระยะเวลา การปรับปรุงใดก็ตาม ให้ใช้วิธีการที่ง่าย ค่าใช้จ่ายต่ำ และประสิทธิภาพสูง

(8) ตรวจสอบความสำเร็จของงาน เมื่อทำการแก้ไขหรือปรับปรุงแล้ว หลังจากนั้นให้ติดตามผลว่า ปัญหาดังกล่าวได้เกิดขึ้นซ้ำหรือไม่ หรือลดน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ ผ่านรูปแบบของกราฟ หรือการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ หากพบว่า ปัญหาไม่ได้ลดลง ให้กลับไปวิเคราะห์ใหม่ทันที แสดงว่า มีสาเหตุที่ตกหล่นในการวิเคราะห์ครั้งแรก

(9) จัดทำมาตรฐาน หากพบว่า มาตรการโต้ตอบนั้นได้ผล ให้จัดทำมาตรฐานขึ้นเพื่อรักษาระดับคุณภาพไว้ต่อไป

การเขียนโครงสร้างการวิเคราะห์ทำไม-ทำไม ในด้านซ้ายสุดจะเป็นปรากฏการณ์หรือส่วนของปัญหาที่จะแก้ไข จากนั้นเริ่มตั้งคำถามว่า “ทำไม” ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งพบสาเหตุรากเหง้าของปัญหา โดยทั่วไปแล้ว หากถามคำถามว่า ทำไม ประมาณ 3 - 5 ครั้ง ก็จะได้คำตอบของคำถามนั้น และหากต้องการทราบว่าคำตอบนั้นคือสาเหตุรากเหง้าหรือไม่ ให้ตั้งคำถามกลับว่า ถ้าสาเหตุนี้ถูกแก้ไขแล้ว ปัญหานี้จะไม่เกิดขึ้นอีกใช่หรือไม่ หรือว่าไม่สามารถถามคำถามว่า ทำไม ได้อีกแล้ว จากนั้นในส่วนสุดท้ายจะเป็นการหามาตรการโต้ตอบ เพื่อแก้ไขปัญหาโดยรูปแบบการเขียนจะเป็นลักษณะ ดังแสดงใน Figure 6

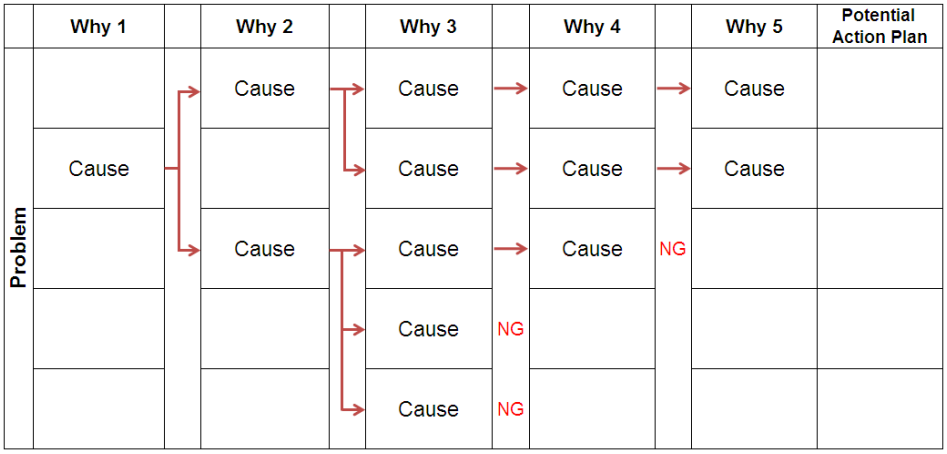


Figure 6. 5 Why Analysis

ที่มา : วันรัตน์ จันทกิจ (2547)

จาก Figure 6 จะเห็นได้ว่า มีเครื่องหมาย NG (No Good) ซึ่งในส่วนนี้จะหมายถึง เมื่อใช้หลักการ 5 Gen แล้วพบว่า สาเหตุนั้นไม่ตรงกับความเป็นจริงผ่าน 5 Gen ก็จะเขียนเครื่องหมาย NG ไว้ หรือจะตัดส่วนนี้ออกก็ได้

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานของสารทำความเย็นเอทิลีนไกลคอลในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่ง ด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100
2. เพื่อลดต้นทุนการใช้งานสารเอทิลีนไกลคอลเป็นสารทำความเย็นขั้นที่ 2 ในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่ง ด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100

บทที่ 2

วิธีการวิจัย

1. ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งของบริษัทกรณีศึกษา

สำรวจสภาพปัจจุบัน และเข้าสังเกตการณ์ในสถานประกอบการจริง ควบคู่กับการศึกษาจากคู่มือการปฏิบัติงานของพนักงานแผนกผลิต พร้อมทั้งซักถามและสัมภาษณ์พนักงานและเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งของบริษัทกรณีศึกษา ตั้งแต่เดือนมกราคม - กรกฎาคม พ.ศ. 2552 โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.1 ศึกษาข้อมูลการผลิตไอศกรีมแท่งของบริษัทกรณีศึกษา

ศึกษาและบันทึกข้อมูลการผลิตจริงของแผนกผลิตไอศกรีมของบริษัทกรณีศึกษา ได้แก่ จำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ไอศกรีมแท่งที่ผลิต ต้นทุนของกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่ง และการปฏิบัติงานของพนักงาน

1.2 ศึกษากระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งของบริษัทกรณีศึกษา

ศึกษากระบวนการผลิตจากคู่มือการปฏิบัติงานของพนักงาน ร่วมกับการเข้าสังเกตในสายการผลิตจริง พร้อมการสัมภาษณ์พนักงานและเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงส่วนผสมของไอศกรีมแท่ง การเตรียมวัตถุดิบ ขั้นตอนการผลิตไอศกรีมแท่ง เครื่องจักรและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่ง รวมทั้งวิธีการปฏิบัติงานจริงของพนักงานในสายการผลิตจริง

1.3 ศึกษาระบบการทำงานของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 สำหรับขึ้นรูปไอศกรีมแท่ง

ศึกษาบทบาทและหน้าที่การทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ของชุดทำความเย็นหลักและเครื่องจักรสำหรับขึ้นรูปไอศกรีมแท่ง และศึกษาระบบการทำงานหรือกลไกการทำงานของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ของบริษัทกรณีศึกษานี้ จากคู่มือการปฏิบัติงานของเครื่องจักรสำหรับขึ้นรูปไอศกรีมแท่ง ยี่ห้อ Tetra Hoyer รุ่น FM1100 หรือเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100

และการสังเกตการใช้งานจริงในกระบวนการผลิต และรวบรวมสาเหตุที่คาดว่าจะมีผลกระทบต้นทุนการผลิตไอศกรีมแท่งของบริษัทกรณีศึกษา พร้อมจดบันทึกข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

- สารทำความเย็นทุติยภูมิ หรือสารทำความเย็นขั้นที่ 2 โดยมีรายละเอียดการศึกษา ดังนี้

(1) ศึกษาค้นคว้าข้อมูลทางทฤษฎีจากแหล่งข้อมูลต่างๆ ทั้งสมบัติทางกายภาพ เคมี และอุณหพลศาสตร์ของสารทำความเย็นชนิดนั้น และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสารเคมีที่ใช้เป็นสารทำความเย็นขั้นที่ 2 ซึ่งในกรณีศึกษานี้ใช้สารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) เป็นสารทำความเย็นทุติยภูมิหรือสารทำความเย็นขั้นที่ 2

(2) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ (ร้อยละ 0 - 100 โดยปริมาตร) ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยเตรียมสารละลายเอทิลีนไกลคอลจากสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ที่ใช้งานจริงในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งของบริษัทกรณีศึกษา ทดลองและวัดค่าความถ่วงจำเพาะด้วยไฮโดรมิเตอร์ สเกล 1.000 - 1.100 (วัดค่าที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส) และสเกล 1.000 - 1.200 (วัดค่าที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส) จดบันทึกผลการทดลอง

(3) ศึกษาการเตรียมสารละลายเอทิลีนไกลคอลสำหรับใช้งานในขั้นตอนการขึ้นรูปไอศกรีมแท่งด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 เป็นครั้งแรก (หรือทุกๆ 6 เดือน) โดยข้อมูลที่ศึกษา คือ ค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่เหมาะสมกับการใช้งานในกรณีศึกษานี้ อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำและสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) และวิธีการคำนวณปริมาณส่วนผสม และวิธีการเตรียมสารละลายเอทิลีนไกลคอล (แสดงในภาคผนวก ค)

(4) ศึกษาการเตรียมสารละลายเอทิลีนไกลคอลบางส่วน หรือวิธีการเปลี่ยนถ่ายสารละลายบางส่วนออกจากบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 และเติมสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ลงไปแทนที่สารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ถูกเปลี่ยนถ่ายออกในปริมาณที่เท่ากัน ตลอดช่วงเวลาภายใน 6 เดือน (แสดงวิธีการเตรียมสารละลายในภาคผนวก ค) โดยข้อมูลที่ศึกษา คือ การเปลี่ยนแปลงค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอลขณะใช้งานในกระบวนการผลิต ปริมาณสารละลายที่เปลี่ยนถ่ายออกในแต่ละครั้ง และความถี่ในการเปลี่ยนถ่ายสารละลาย

(5) ศึกษาวิธีการใช้งานสารละลายเอทิลีนไกลคอลในขั้นตอนการขึ้นรูปไอศกรีมแท่งของกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ในแต่ละรอบการใช้

งาน โดยศึกษาและสังเกตการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสารละลายเอทิลีนไกลคอลจากจุดเริ่มต้นจนกระทั่ง มีการเปลี่ยนถ่ายสารละลายเอทิลีนไกลคอลในแต่ละครั้ง

2. เก็บรวบรวมข้อมูลด้านการใช้งานของสารละลายเอทิลีนไกลคอล ในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100

เก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการใช้งานของสารละลายเอทิลีนไกลคอล ในขั้นตอนการขึ้นรูปไอศกรีมแท่งด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ของกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่ง ช่วงเวลาตั้งแต่เดือนมกราคม - กรกฎาคม พ.ศ. 2552 โดยเก็บรวบรวมข้อมูลการใช้งานของสารละลายเอทิลีนไกลคอล ตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งครบ 1 รอบการใช้งานในแต่ละครั้ง ซึ่งการนับเวลาการใช้งานสารละลายเอทิลีนไกลคอลครบ 1 รอบ หรือ 1 วัฏจักร จะเริ่มต้นหลังจากสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ใช้งานแล้วถูกเปลี่ยนถ่ายออกจากบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 และเริ่มต้นใช้งานในการขึ้นรูปไอศกรีมแท่งชนิดแรกของรอบนั้นๆ แล้วถูกใช้งานไปเรื่อยๆ จนกระทั่ง คุณสมบัติของสารละลายเอทิลีนไกลคอลเปลี่ยนแปลงไปหรือไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของการเป็นสารทำความเย็นที่เหมาะสำหรับขึ้นรูปไอศกรีมแท่งของบริษัทศึกษานี้อีกต่อไป และนับเวลาสิ้นสุดในการผลิตไอศกรีมแท่งชนิดสุดท้ายของรอบการใช้งานนั้น เป็นการใช้งานสารละลายเอทิลีนไกลคอลครบ 1 รอบ และทำการจดบันทึกข้อมูล ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

(1) จำนวนชนิดผลิตภัณฑ์ไอศกรีมแท่งที่ผลิตได้ เฉลี่ยต่อรอบ

(2) เวลาการใช้งานของสารละลายเอทิลีนไกลคอล เฉลี่ยต่อรอบ

(3) วัดค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอล ก่อนและหลังการผลิตไอศกรีมแท่งแต่ละชนิด โดยวัดค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอลด้วยเครื่องมือไฮโดรมิเตอร์ สเกล 1.000 - 1.100 และอ่านค่าที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส

(4) ความเข้มข้นของสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ที่ใช้ในการเปลี่ยนถ่ายแต่ละครั้ง ซึ่งคำนวณได้จากกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นที่ระดับต่างๆ (ร้อยละ 0 - 100 โดยปริมาตร) กับค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอล อ่านค่าที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส จากการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ

(5) ปริมาณสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ที่ใช้ในแต่ละเดือน โดยการจดบันทึกข้อมูลปริมาณจริงที่ใช้เติมลงไปในระบบทำความเย็นทางอ้อมแต่ละครั้ง

(6) ต้นทุนสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ที่ใช้จริงแต่ละรอบ โดยการวิเคราะห์ต้นทุนทั้งหมดในการผลิตไอศกรีมของบริษัทกรณีศึกษา (ไม่รวมต้นทุน

วัตถุดิบและบรรจุภัณฑ์) ช่วงเวลาตั้งแต่ เดือนมกราคม - มีนาคม พ.ศ. 2552 และสรุปรายงานเป็นแผนภูมิแท่ง เพื่อพิจารณาว่าต้นทุนการใช้งานสารเอทิลีนไกลคอลอยู่ในอันดับที่ควรแก้ไขปรับปรุงอย่างเร่งด่วนหรือไม่ และสามารถแก้ไขได้ง่ายกว่าอันดับที่สูงกว่าหรือไม่ (โดยอ้างอิงข้อมูลราคาสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ในปี พ.ศ. 2551 ซึ่งราคาต่อหน่วย เท่ากับ 14,791.50 บาท ; 1 ถัง มีปริมาณเท่ากับ 200 ลิตร หรือ 225 กิโลกรัม)

วิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้จากกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่ง และหาความสัมพันธ์ระหว่าง ข้อมูลต่างๆ ข้างต้น กับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสารละลายเอทิลีนไกลคอล โดยใช้การวิเคราะห์สถิติเบื้องต้น

3. วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการใช้งานของสารละลายเอทิลีนไกลคอล และกำหนดแนวทางการแก้ไขปรับปรุง

3.1 วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการใช้งานของสารละลายเอทิลีนไกลคอล ในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 โดยมีขั้นตอน ดังนี้

(1) วิเคราะห์ปัจจัยต่างๆ ด้วยการระดมสมองร่วมกันกับผู้บริหารและผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทั้งหมด โดยใช้แผนผังก้างปลา (Cause and Effect Diagram) ซึ่งกำหนดหัวข้อหลักของปัญหาที่หัวปลา และรวบรวมกลุ่มสาเหตุที่มีผลกระทบต่อปัญหา โดยแบ่งเป็น 4 สาเหตุหลัก คือ พนักงาน เครื่องจักร วัตถุดิบ และวิธีการ จากนั้นสรุปสาเหตุหลักที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแผนผังก้างปลา

(2) การวิเคราะห์หาสาเหตุรากเหง้าของปัญหา และคิดค้นหาแนวทางและมาตรการในการแก้ไขปรับปรุง จากสาเหตุหลักที่ได้ โดยใช้การวิเคราะห์ทำไม - ทำไม (Why-why Analysis) พร้อมกำหนดมาตรการแก้ไข หลังจากได้สาเหตุที่แท้จริง และสรุปข้อมูลการวิเคราะห์ที่ได้

3.2 กำหนดแนวทางการแก้ไขปรับปรุงการใช้งานสารละลายเอทิลีนไกลคอล ในขั้นตอนการขึ้นรูปไอศกรีมแท่งด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100

คิดค้นหาแนวทางที่เหมาะสำหรับการแก้ไขปัญหาจากสาเหตุแต่ละข้อได้จากการวิเคราะห์ทำไม - ทำไม เพื่อกำหนดมาตรการแก้ไข และนำเสนอทางเลือกที่มีความเป็นไปได้ในการปรับปรุงให้แก่ผู้บริหารและผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการปฏิบัติงาน

4. ประเมิน และคัดเลือกแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้งานของสารละลายเอทิลีนไกลคอลในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่ง

นำเสนอแนวทางแก้ไขปรับปรุงที่ได้คิดค้นและกำหนดขึ้น ให้แก่ผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องของบริษัทกรณีศึกษา และทำการระดมสมองร่วมกันระหว่างผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทั้งหมดและผู้วิจัย เพื่อประเมินและคัดเลือกแนวทางที่มีความเหมาะสมทั้งทางด้านการลงทุน การจัดการผลตอบรับที่ได้ ผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการปรับปรุง และความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงสำหรับบริษัทกรณีศึกษานี้ จากนั้น สรุปแนวทางการแก้ไขปรับปรุงที่ผ่านการประเมิน และคัดเลือกร่วมกัน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ของบริษัทกรณีศึกษา

5. ดำเนินการแก้ไขปรับปรุงตามแนวทางที่ได้คัดเลือก

ดำเนินการแก้ไขปรับปรุงตามแนวทางที่คัดเลือกร่วมกันระหว่างผู้วิจัยและผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องของบริษัทกรณีศึกษานี้ โดยนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งของบริษัทกรณีศึกษา

6. ประเมินผลหลังการแก้ไขปรับปรุงตามแนวทางที่ได้คัดเลือก

ประเมินผลหลังจากการดำเนินงานแก้ไขปรับปรุงตามแนวทางที่ได้คัดเลือกโดยเปรียบเทียบผลระหว่าง ก่อนการปรับปรุง และหลังการปรับปรุง ในด้านต่างๆ ดังนี้

(1) เวลาการใช้งานของสารละลายเอทิลีนไกลคอล

(2) ปริมาณสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ที่ใช้งานต่อเดือน

(3) ต้นทุนสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ที่ใช้งานต่อเดือน

(4) ประสิทธิภาพการใช้งานของสารทำความเย็นเอทิลีนไกลคอล

(5) การวิเคราะห์ความประหยัดจากการแก้ไขปรับปรุง

7. สรุปผลการศึกษา และวิจารณ์ผลการทดลอง ปัญหา อุปสรรค และข้อเสนอแนะในการปฏิบัติงาน

บทที่ 3

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ข้อมูลเบื้องต้นของกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งของบริษัทกรณีศึกษา

จากการศึกษาคู่มือการปฏิบัติงานของพนักงานแผนกผลิต การเข้าสังเกตการณ์ในสายการผลิตจริงของผู้วิจัย และการสัมภาษณ์พนักงาน และเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่ง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.1 จำนวนชนิด หรือประเภทของไอศกรีมแท่งที่บริษัทกรณีศึกษาผลิตได้

จากการเข้าไปศึกษากระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งในบริษัทกรณีศึกษา ช่วงเดือนมกราคม - กรกฎาคม พ.ศ. 2552 พบว่า ผลิตภัณฑ์ไอศกรีมแท่งที่บริษัทกรณีศึกษาผลิตได้ในช่วงเวลาดังกล่าว มีจำนวนทั้งหมด 17 ชนิด และสามารถจัดกลุ่มตามประเภทของผลิตภัณฑ์ได้เป็น 3 กลุ่ม คือ ไอศกรีมแท่งหวานเย็น ไอศกรีมแท่งโอเรียนทอล หรือไอศกรีมแท่งดัดแปลงผสมเนื้อผลไม้ และไอศกรีมแท่งนมสอดไส้ หรือมีตัวเคลือบ ซึ่งรายละเอียดแต่ละกลุ่มผลิตภัณฑ์แสดงดัง Table 1

Table 1. Type of ice-cream bar products

No.	Type of products	Product Name
1	Water ice	Cola Jubb
		China Buai
		Fruit Punch
		Lam Yai
		Makarm
		O-Leang
		Chao Gouy
		Gummy Yelly

Table 1. (Cont.)

No.	Type of products	Product Name
2	Modified ice-cream with fruit mixture (Oriental)	Oriental Corn Oriental Black Bean Oriental Green Bean Oriental Black Sticky Rice
3	Milk ice-cream with jelly stuffed or with coat	Chocomilk Tea Pop Som Paen Pinky Ice Dip & Chip

1.2 กระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งของบริษัทกรณีศึกษา

ในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งของบริษัทกรณีศึกษา มีขั้นตอนการผลิต แสดงดัง Figure 7

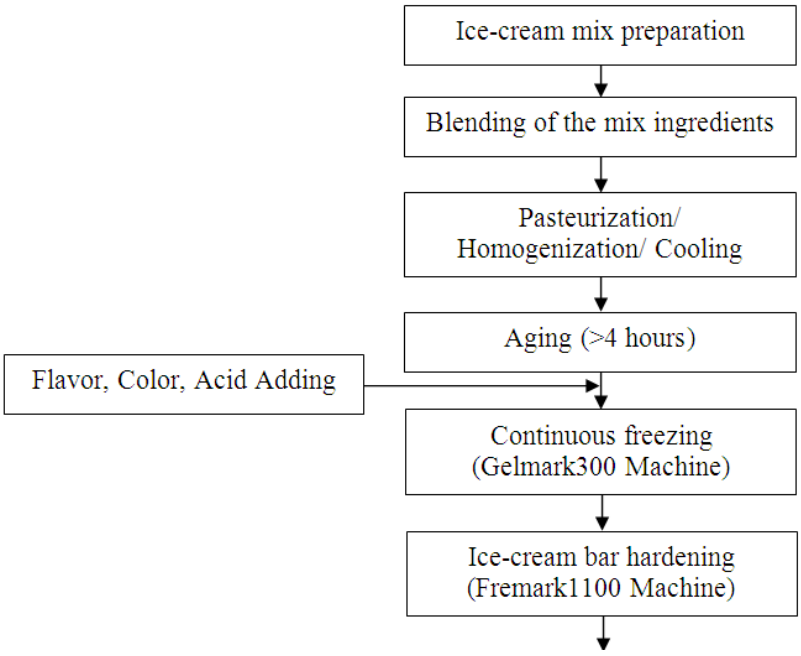


Figure 7. Ice-cream bar production process in this case study

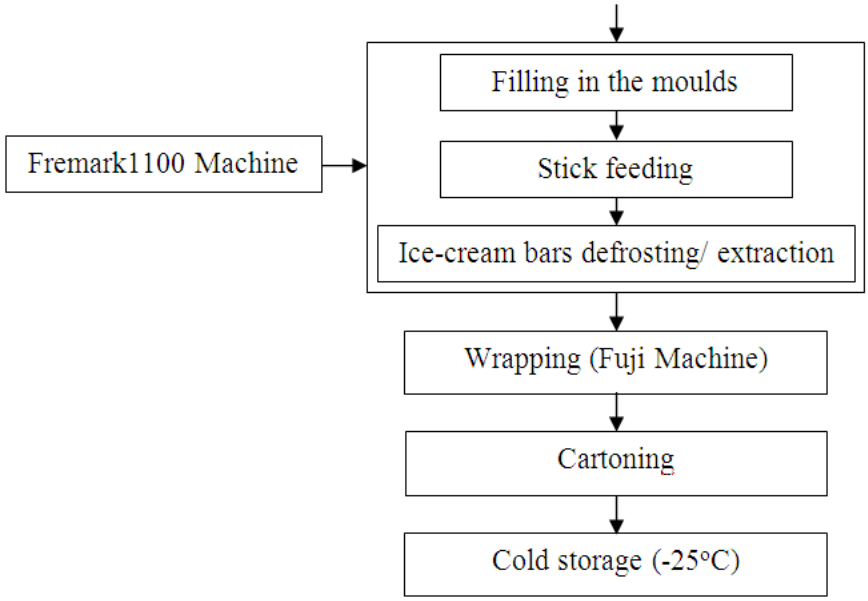


Figure 7. (Cont.)

จาก Figure 7 อธิบายขั้นตอนการผลิตไอศกรีมแท่งของบริษัทกรณีศึกษา ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 9 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

(1) การคำนวณ และเตรียมส่วนผสมของไอศกรีมแท่งที่ต้องการ

ในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งของบริษัท แบ่งส่วนผสมเป็น 3 ส่วนหลัก คือ วัตถุดิบหลัก วัตถุดิบรอง และส่วนปรุงแต่งต่างๆ การคำนวณและเตรียมส่วนผสมของไอศกรีมดังกล่าว จากสูตรไอศกรีมแท่งแต่ละชนิดของบริษัท ซึ่งวัตถุดิบหลัก ได้แก่ น้ำ นมผง ผงโกโก้ เวย์ (Whey) ไขมัน น้ำตาลทราย เป็นต้น วัตถุดิบรอง ได้แก่ ข้าวโพด เผือก ถั่วดำ ถั่วเขียว บ๊วย ชาผง เป็นต้น และส่วนปรุงแต่ง ได้แก่ สี กลิ่น และกรด หลังจากคำนวณส่วนผสมของไอศกรีมแท่งที่ต้องการผลิตได้แล้ว พนักงานผลิตในจุดเตรียมวัตถุดิบจะชั่งวัตถุดิบต่างๆ ดังกล่าวตามที่กำหนด

(2) การปั่นส่วนผสม

พนักงานผลิตในจุดเตรียมวัตถุดิบ จะเปิดน้ำสะอาดในปริมาณที่ต้องการตามสูตรลงในถังผสม และให้ความร้อนจนน้ำมีอุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส จึงเติมส่วนผสมต่างๆ ลงในถังผสมตามลำดับ ดังนี้ โดยค่อยๆ เทนมผง ผงโกโก้และเวย์ ผสมสลับกับไขมันพืชในอัตรา 2 ต่อ 1 จนหมด จากนั้น ใส่น้ำตาลทราย ผงฟู และเกลือลงไป ในกรณีที่สูตรการผลิตไม่มีเกลือเป็นส่วนผสม ให้ผสมผงฟูกับน้ำตาลให้เข้ากัน โดยนำผงฟูเทใส่กระชอน และบีบผงฟูให้ละเอียดผ่านรูกระชอนให้ตกลงในกระสอบน้ำตาลที่ทำการชั่งแล้ว แต่ถ้าสูตรการผลิตมีเกลือเป็นส่วนผสม ให้ใส่เกลือพร้อมผงฟูและผสมให้เข้ากันด้วยวิธีการเดียวกัน เติมแป้งมันกวนสุก แบะแซ

น้ำต้มวัตถุดิบรอง เช่น น้ำชาต้ม น้ำต้มถั่วชนิดต่างๆ ตามสูตร จากนั้น รอจนอุณหภูมิของส่วนผสมถึง 60 องศาเซลเซียส จึงเติมน้ำกะทิตามสูตรลงในถังผสม และผสมให้เข้ากันจนเป็นเนื้อเดียวกัน

(3) การพาสเจอไรซ์ และการทำให้เย็น

กระบวนการพาสเจอไรซ์ไอศกรีมผสม ด้วยเครื่องพาสเจอไรซ์ HTST1200 ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 วินาที หลังจากนั้น ไอศกรีมผสมจะถูกทำให้เย็นลงที่อุณหภูมิ 2 - 4 องศาเซลเซียส

(4) การบ่มส่วนผสม

เมื่อไอศกรีมผสมถูกทำให้เย็นลงตามอุณหภูมิที่กำหนด พนักงานผลิตในจุดเตรียมวัตถุดิบจะปั๊มไอศกรีมผสมไปเก็บไว้ในถังบ่ม และทำการบ่มน้ำไอศกรีมผสม ที่อุณหภูมิ 0 - 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 - 12 ชั่วโมง หลังจากไอศกรีมผสมผ่านการบ่มตามเวลาดังกล่าวแล้ว พนักงานตรวจสอบคุณภาพจะเติมสี กลิ่น และกรด ลงไปในไอศกรีมผสมก่อนนำไปปั่นแข็ง เป็นเวลาอย่างน้อย 30 นาที และตรวจสอบซ้ำอีกครั้งก่อนส่งเข้าสู่กระบวนการถัดไป

(5) การปั่นแข็งไอศกรีมผสม

การปั่นแข็งไอศกรีมผสม ด้วยเครื่องปั่นแข็ง Gelmark300 หรือ Gelmark750 (ยี่ห้อ Tetra Hoyer รุ่น GM300 หรือ GM750) เพื่อทำให้เนื้อไอศกรีมมีรูพรุน หรือช่องว่างอากาศ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวของผลิตภัณฑ์ไอศกรีม โดยไอศกรีมผสมที่พร้อมใช้งานแล้ว จะถูกปั๊มเข้าสู่เครื่องปั่นแข็ง Gelmark300 หรือ Gelmark750 ทำการปั่นแข็งให้ได้ตามมาตรฐาน และปรับแต่งค่าต่างๆ ของเครื่องปั่นแข็งตามความเหมาะสม เพื่อรักษาอุณหภูมิ และน้ำหนักของไอศกรีมผสมให้ได้ตามมาตรฐานตลอดเวลา

(6) การขึ้นรูปหรือการแช่เยือกแข็งไอศกรีมแท่ง

การขึ้นรูปหรือการแช่เยือกแข็งไอศกรีมแท่งด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 (ยี่ห้อ Tetra Hoyer รุ่น FM1100) ซึ่งใช้สารละลายเอทิลีนไกลคอลเป็นสารทำความเย็นทุติยภูมิ หรือสารทำความเย็นขั้นที่ 2 และทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นปฐมภูมิ หรือสารทำความเย็นขั้นที่ 1 กับไอศกรีมผสมที่ต้องการขึ้นรูปแท่ง โดยกระบวนการขึ้นรูปแท่งจะเริ่มต้นขึ้นหลังจากพนักงานผลิตเตรียมความพร้อมของระบบทำความเย็น ทำความสะอาดเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 พร้อมประกอบอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ สถานีหยอดไอศกรีม (เป็นชุดอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับหยอดไอศกรีมผสมลงในแม่พิมพ์) สถานีดูดไอศกรีม (เป็นชุดอุปกรณ์สำหรับดูดไอศกรีมผสมที่ใช้เป็นตัวเคลือบผิวด้านนอกสุดของไอศกรีมแท่งออกจากบริเวณกึ่งกลางแท่งไอศกรีมของแม่พิมพ์ หลังจากนั้น จึงหยอดไอศกรีมผสมลงไปกึ่งกลางแท่ง เพื่อเป็นเนื้อไอศกรีมชั้นในสุดของไอศกรีมแท่งประเภทที่มีตัวเคลือบ) สถานีปัก

ไม้ และสถานีดึงไม้ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 พร้อมปรับตั้งค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของกลไกการทำงานของเครื่องจักร หรือจังหวะในการเคลื่อนที่ (Stroke) ของเครื่องจักร และอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ใช้ในการฉีดแม่พิมพ์ เพื่อดึงแท่งไอศกรีมออกตามมาตรฐานการผลิตไอศกรีมชนิดนั้นๆ และสิ่งที่สำคัญอีกประการหนึ่ง คือ พนักงานตรวจสอบคุณภาพ ต้องตรวจเช็คคุณสมบัติของสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่บรรจุในบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 โดยคุณสมบัติที่จำเป็นต้องตรวจสอบ ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะของสารละลาย อุณหภูมิจริงที่บริเวณผิวหน้าด้านบนของสารละลายเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่หน้าจอของแผงควบคุมของเครื่องจักร ระดับความสูงของสารละลายในบ่อน้ำเกลือ เป็นต้น เมื่อเตรียมความพร้อมทุกอย่างเรียบร้อยแล้ว ไอศกรีมผสมที่ผ่านขั้นตอนการปั่นแข็ง ซึ่งมีลักษณะกึ่งแข็งกึ่งเหลว จะถูกป้อนเข้าสู่สถานีต่างๆ ของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ซึ่งได้แก่ สถานีหยอดไอศกรีม 1 สถานีดูดไอศกรีม สถานีหยอดไอศกรีม 2 สถานีปักไม้ และสถานีดึงไม้ ตามลำดับ โดยมีรายละเอียดการผลิตดังต่อไปนี้ คือ

ไอศกรีมผสมที่ผ่านการปั่นแข็งแล้ว จะถูกหยอดลงในแม่พิมพ์ที่สถานีหยอด ในขั้นตอนนี้จะมีการเติมส่วนประกอบอื่นๆ เช่น เนื้อผลไม้เชื่อม ถั่วเชื่อม เนื้อเฉาก๊วย น้ำต้มชา เป็นต้น ขึ้นอยู่กับส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ชนิดนั้นๆ ที่ต้องการผลิต จากนั้น แม่พิมพ์จะเคลื่อนที่ผ่านสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่บรรจุอยู่ภายในบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ซึ่งมีอุณหภูมิของสารทำความเย็นอยู่ระหว่าง -30 ถึง -40 องศาเซลเซียส หลังจากนั้น แม่พิมพ์ที่บรรจุน้ำไอศกรีมผสมจะถูกขับเคลื่อนด้วยกลไกการทำงานของเครื่องจักรให้เคลื่อนที่เข้าสู่สถานีปักไม้ ไอศกรีมแต่ละแท่งในแม่พิมพ์จะถูกปักไม้เข้าไป และทิ้งไว้ให้แข็งตัวอย่างรวดเร็ว จนอุณหภูมิกึ่งกลางของไอศกรีมแท่งลดลงถึง -16 องศาเซลเซียส จากนั้น ไอศกรีมแท่งจะถูกหนีบไม้ และดึงออกจากแม่พิมพ์ที่สถานีดึงไม้ โดยใช้น้ำร้อนที่มีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 38 ถึง 40 องศาเซลเซียส เป็นตัวช่วยให้ไอศกรีมหลุดออกจากแม่พิมพ์ ไอศกรีมแท่งจะถูกลำเลียงบนสายพานต่อไปยังเครื่องบรรจุซอง และบรรจุกล่อง ต่อไป

(7) การบรรจุซอง

ผลิตภัณฑ์ไอศกรีมแท่งที่ผ่านการขึ้นรูปเรียบร้อยแล้วจะถูกลำเลียงบนสายพาน ซึ่งมีพนักงานผลิตตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ตลอดสายพาน จากนั้น ไอศกรีมแท่งจะเข้าสู่การบรรจุซอง ด้วยเครื่องบรรจุ (ยี่ห้อ Fuji รุ่น FW3700) โดยสามารถปรับตั้งค่าต่างๆ เช่น ความยาวซอง ความร้อนในการปิดผนึก และความเร็วในการบรรจุ ได้ที่แผงควบคุมโปรแกรมการทำงานของเครื่องจักร เนื่องจาก ผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดมีค่ามาตรฐานในการบรรจุที่แตกต่างกัน จึงควรปรับตั้งค่าต่างๆ ให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ชนิดนั้น

(8) การบรรจุกล่อง

ผลิตภัณฑ์ไอศกรีมแท่งที่บรรจุซองเรียบร้อยแล้ว จะถูกลำเลียงบนสายพาน เพื่อให้พนักงานผลิตบรรจุผลิตภัณฑ์ไอศกรีมแท่งลงกล่องตามจำนวนชิ้นที่กำหนดของผลิตภัณฑ์ชนิดนั้นๆ และปิดผนึกกล่องด้วยเครื่องรีดกล่องแบบเทปกาว

(9) การเก็บรักษา

ผลิตภัณฑ์ไอศกรีมแท่งที่บรรจุกล่อง และปิดผนึกเรียบร้อยแล้ว จะถูกลำเลียงบนสายพานไปยังห้องแช่แข็ง ที่ควบคุมอุณหภูมิอยู่ระหว่าง -18 ถึง -25 องศาเซลเซียส เพื่อเก็บรักษาและรอการจำหน่ายต่อไป

1.3 ระบบการทำงานของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 สำหรับขึ้นรูปไอศกรีมแท่ง

ผลจากการศึกษาระบบการทำงานของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ของบริษัทกรณีศึกษานี้ จะเห็นได้ว่า เครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 (ยี่ห้อ Tetra Hoyer รุ่น FM1100) ซึ่งเป็นเครื่องจักรที่ใช้สำหรับขึ้นรูปและแช่เยือกแข็งไอศกรีมแท่ง เป็นเครื่องจักรที่ต้องทำงานร่วมกับระบบทำความเย็น โดยเรียกระบบการทำความเย็นในขั้นตอนการขึ้นรูปไอศกรีมแท่งด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 นี้ว่า ระบบการทำความเย็นแบบทางอ้อม (Indirect Refrigeration System) ระบบการทำความเย็นแบบนี้ จะแบ่งการทำงานเป็น 2 ระบบย่อย คือ ระบบทางตรง (Direct System) มีสารฟรีออน R-22 เป็นสารทำความเย็นปฐมภูมิ หรือสารทำความเย็นขั้นที่ 1 และระบบทางอ้อม (Indirect System) ซึ่งบริษัทกรณีศึกษานี้ได้เลือกใช้สารละลายเอทิลีนไกลคอล เป็นสารทำความเย็นทุติยภูมิ หรือสารทำความเย็นขั้นที่ 2 แสดงดัง Figure 8

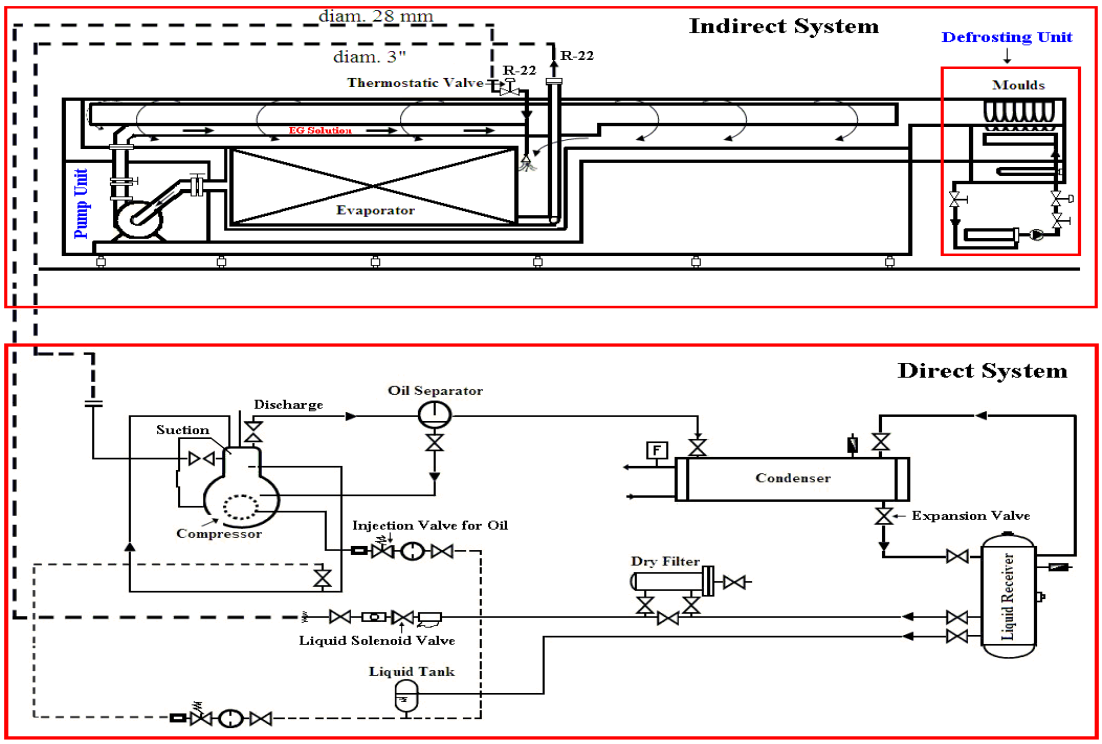


Figure 8. Indirect refrigeration system of the ice-cream bar production process in the case study

ที่มา : The manual of Fremark1100/ 1800 machine by Hoyer

จาก Figure 8 อธิบายได้ว่า การทำงานของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 นี้จะเริ่มต้นจากการทำความเย็นของระบบทางตรง (Direct System) ก่อน โดยเครื่องอัดไอ (Compressor ยี่ห้อ SABROE รุ่น TSMC 108s) ทำหน้าที่ดูดและอัดสารทำความเย็นปฐมภูมิ (ฟรีออน R-22) จากเครื่องระเหย (Evaporator) ซึ่งมีสถานะเป็นไอที่มีความดันต่ำและอุณหภูมิต่ำเข้าทางด้านดูด แล้วอัดออกทางด้านส่งของเครื่องอัดไอ เพื่อเพิ่มความดันและอุณหภูมิของสารทำความเย็นฟรีออน R-22 แล้วส่งต่อให้กับเครื่องควบแน่น (Condenser) เพื่อระบายความร้อนออกจากสารทำความเย็นฟรีออน R-22 จนถึงจุดควบแน่นเป็นของเหลวและเข้าสู่อุปกรณ์ลดแรงดัน (Expansion Valve) ซึ่งทำหน้าที่ลดแรงดันของสารทำความเย็นฟรีออน R-22 เหลว ให้มีความดันต่ำลงจนสามารถเดือดกลายเป็นไอได้ในเครื่องระเหย โดยเครื่องระเหยทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นฟรีออน R-22 กับสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่บรรจุอยู่ภายในบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 เมื่อบริเวณรอบๆ ของเครื่องระเหยสูญเสียความร้อนไปก็จะเย็น จากนั้น เครื่องอัดไอจะดูดสารทำความเย็นฟรีออน R-22 กลับจากเครื่องระเหย เพื่อที่จะอัดไอสารทำความเย็นฟรีออน R-22 ตามกระบวนการต่อไปและจะมีการไหลเวียนอย่างนี้ตลอดช่วงการทำงาน

ระบบทางอ้อม (Indirect System) เริ่มต้นขึ้น เมื่อสารทำความเย็นทุติยภูมิ (สารละลายเอทิลีนไกลคอล) ที่ได้รับความเย็นจากสารทำความเย็นฟรีออน R-22 แล้วเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนกับไอศกรีมผสมที่บรรจุอยู่ในแม่พิมพ์ ทำให้ไอศกรีมแท่งเกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วและสารละลายเอทิลีนไกลคอลจะหมุนเวียนอย่างนี้ตลอดช่วงการทำงานเช่นเดียวกัน

ในปี พ.ศ. 2551 บริษัทกรณีศึกษาได้ทำการทดลอง และเก็บข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับการใช้งานสารละลายเอทิลีนไกลคอล ในขั้นตอนการขึ้นรูปไอศกรีมแท่งด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 และใช้เป็นข้อกำหนดในการตัดสินใจเปลี่ยนถ่ายสารละลายเอทิลีนไกลคอลออกจากระบบทำความเย็น หรือบ่อน้ำเกลือ เพื่อป้องกันการเกิดความเสียหายแก่เครื่องอัดไอ (Compressor) ปั๊มดูดสารละลายเอทิลีนไกลคอล และอุปกรณ์อื่นๆ ของระบบทำความเย็น ซึ่งถือว่าเป็นระบบที่มีความสำคัญมากในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่ง และอาจส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตไอศกรีมแท่งด้วย โดยข้อกำหนดในการตัดสินใจเปลี่ยนถ่ายสารละลายเอทิลีนไกลคอล ดังกล่าว คือ สารละลายเอทิลีนไกลคอลก่อนการใช้งานควรมีคุณสมบัติ ดังนี้ คือ ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ของสารละลายเท่ากับ 1.085 ± 0.002 ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของสารละลายขณะปฏิบัติงาน อยู่ระหว่าง -30 ถึง -40 องศาเซลเซียส และความเร็วในการเคลื่อนที่ของกลไกการทำงานของเครื่องจักร หรือจังหวะในการเคลื่อนที่ (Stroke) ของเครื่องจักร อยู่ระหว่าง 15 - 21 ครั้งต่อนาที และเมื่อสารละลายเอทิลีนไกลคอลมีค่าความถ่วงจำเพาะลดลง เท่ากับ 1.074 ± 0.002 ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของสารละลายขณะปฏิบัติงานสูงกว่า -30 องศาเซลเซียส และความเร็วในการเคลื่อนที่ของกลไกการทำงานของเครื่องจักร หรือจังหวะในการเคลื่อนที่ (Stroke) ของเครื่องจักรต่ำกว่า 15 ครั้งต่อนาที เจ้าหน้าที่แผนกผลิตและวิศวกรรมของบริษัทกรณีศึกษาได้ประเมินว่า สารละลายเอทิลีนไกลคอลนั้นมีคุณสมบัติที่ไม่เหมาะสมต่อการใช้งานเป็นสารทำความเย็นทุติยภูมิหรือสารทำความเย็นขั้นที่ 2 ในขั้นตอนการขึ้นรูปไอศกรีมแท่งด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ของบริษัทกรณีศึกษาอีกต่อไป นอกจากจะทำให้ต้นทุนการผลิตไอศกรีมแท่งสูงขึ้นแล้ว ยังเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายต่อเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบทำความเย็นอีกด้วย

ดังนั้น เพื่อลดการสูญเสียสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.1166 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส โดยวัดค่าด้วยไฮโดรมิเตอร์ (Specific Gravity Hydrometer) สเกล 1.0000 - 1.2000 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ในปริมาณมากฉะนั้น ทางบริษัทจึงใช้วิธีการเปลี่ยนถ่ายสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ใช้งานแล้วออกจากบ่อน้ำเกลือเพียงบางส่วน และเติมสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ลงไปแทนที่ในปริมาณเท่ากับสารละลายที่ถ่ายออกจากบ่อน้ำเกลือ เพื่อเพิ่มความเข้มข้นและค่าความถ่วงจำเพาะ

ให้กับสารละลายเอทิลีนไกลคอลในระบบ และเพื่อให้มีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนดที่บริษัทวางไว้

หมายเหตุ

ในการวัดและอ่านค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอล ด้วยไฮโดรมิเตอร์ สเกล 1.000 - 1.100 จะวัดค่าที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส และสเกล 1.000 - 1.200 จะวัดค่าที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เนื่องจาก เครื่องมือวัดความถ่วงจำเพาะของสารละลาย (Specific Gravity Hydrometer) ทั้ง 2 ชนิด มีข้อจำกัดในการอ่านค่าที่อุณหภูมิดังกล่าว ตามลำดับ

2. การเก็บรวบรวมข้อมูลด้านการใช้งานของสารละลายเอทิลีนไกลคอล ในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100

การเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการใช้งานของสารละลายเอทิลีนไกลคอล ในขั้นตอนการขึ้นรูปไอศกรีมแท่งด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ของกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งของบริษัทกรณีศึกษา จากบันทึกข้อมูลย้อนหลังใน ปี พ.ศ. 2551 ของบริษัทกรณีศึกษา และทำการทดลองเพื่อเก็บข้อมูลเพิ่มเติมโดยผู้วิจัย ซึ่งข้อมูลที่เก็บรวบรวม มีดังนี้

2.1 ต้นทุนการผลิตไอศกรีมทั้งหมดของบริษัทกรณีศึกษา

จากการวิเคราะห์ต้นทุนทั้งหมดในการผลิตไอศกรีม (แผนกผลิต) ของบริษัทกรณีศึกษา ซึ่งไม่รวมต้นทุนวัตถุดิบในการผลิตและบรรจุภัณฑ์ โดยเก็บรวบรวมข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคม - มีนาคม พ.ศ. 2552 พบว่า ต้นทุนอันดับที่ 1 และ 2 ของกระบวนการผลิตไอศกรีม คือ ค่าแรงพนักงาน และค่าใช้จ่ายอื่นๆ เฉลี่ยร้อยละ 53.08 ต่อเดือน และค่าไฟฟ้าเฉลี่ยร้อยละ 17.87 ต่อเดือน ตามลำดับ ส่วนต้นทุนสารเอทิลีนไกลคอลที่ถูกใช้งานในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งจัดเป็นต้นทุนอันดับที่ 3 มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 14.36 ต่อเดือน แสดงดัง Figure 9

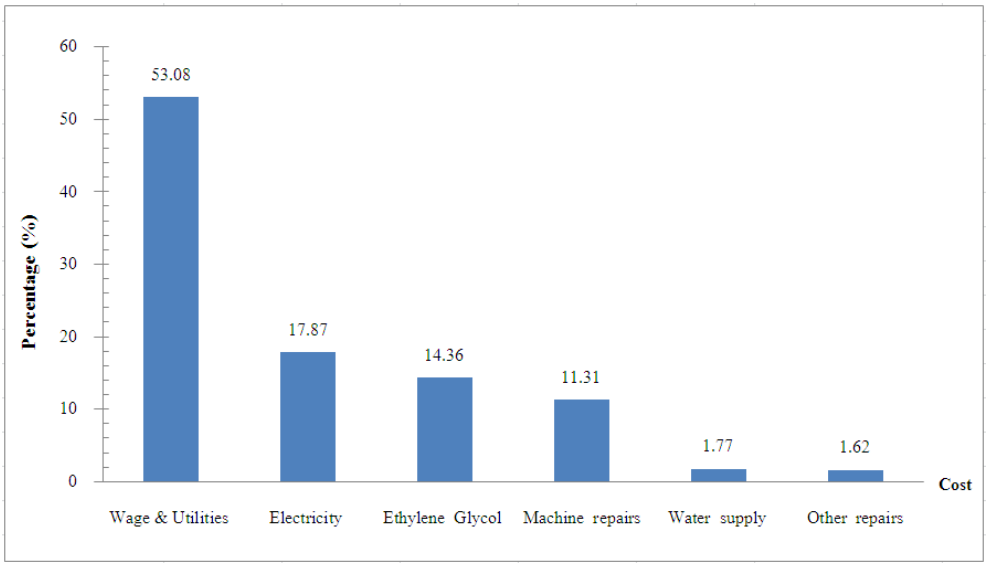


Figure 9. Total cost of ice-cream production process of case study (not including raw material cost and packaging cost) (January - March 2009)

หมายเหตุ

Wage & Utilities

- Wage หมายถึง ค่าแรงงานพนักงานรายวัน, พนักงานรายเดือน และค่าล่วงเวลา
- Utilities หมายถึง ค่าใช้จ่ายอุปกรณ์สำนักงาน, ค่าทดลองตัวอย่าง, ค่าขึ้นทะเบียนตำหรับอาหาร, ค่าส่งตรวจสอบตัวอย่าง และค่าวัสดุสิ้นเปลืองอื่นๆ

Electricity หมายถึง ค่าไฟฟ้า เฉพาะฝ่ายผลิต

Ethylene Glycol หมายถึง ค่าสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9

Machine Repairs หมายถึง ค่าซ่อมแซมเครื่องจักร

Water Supply หมายถึง ค่าน้ำประปา เฉพาะฝ่ายผลิต

Other Repairs หมายถึง ค่าซ่อมแซมอาคารและอุปกรณ์โรงงาน

จาก Figure 9 แสดงให้เห็นว่า ต้นทุนการผลิตไอศกรีมแต่ละประเภทมีสัดส่วนที่แตกต่างกัน เพื่อพิจารณาหาปัญหาที่มีความเป็นไปได้ในการแก้ไขปรับปรุงมากที่สุด และเพื่อต้องการลดต้นทุนการผลิตไอศกรีมของบริษัทกรณีศึกษาลง จากการประเมินสัดส่วนต่างๆ ร่วมกับผู้จัดการทั่วไป ผู้จัดการโรงงานและผู้จัดการแผนกผลิต ผู้ช่วยผู้จัดการแผนกผลิต และเจ้าหน้าที่แผนกผลิตประจำหน่วยเครื่องจักร จะได้ว่า ต้นทุนแรงงานและต้นทุนค่าไฟฟ้า มีสัดส่วนมากเป็นอันดับที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งเป็นต้นทุนที่มีความจำเป็นมากในกระบวนการผลิต หากลดต้นทุน

ในส่วนนี้ลงจะส่งผลกระทบที่รุนแรงต่อกระบวนการผลิตมากกว่าการลดต้นทุนด้านการใช้งานสารเอทิลีนไกลคอล ซึ่งเป็นต้นทุนอับดับที่ 3 อีกทั้งในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งของบริษัทกรณีศึกษา มีการใช้เครื่องจักรเป็นหลักในกระบวนการผลิต จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการผลิตและการเก็บรักษา เพราะฉะนั้น จึงเป็นการยากที่จะลดต้นทุนค่าไฟฟ้าและค่าแรงพนักงานลงโดยที่ไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานส่วนอื่น

ดังนั้น เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลกระทบต่อต้นทุนอื่นๆ และความเป็นไปได้ในการแก้ไขปรับปรุง ระหว่างต้นทุนค่าแรงพนักงาน ค่าไฟฟ้า และค่าสารเอทิลีนไกลคอลแล้ว บริษัทกรณีศึกษาและผู้วิจัย จึงตัดสินใจเลือกปรับปรุงการใช้งานสาร ทำความเย็นเอทิลีนไกลคอล ในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่ง โดยการปรับปรุงให้การใช้งานสารละลายเอทิลีนไกลคอลมีประสิทธิภาพมากที่สุด หรือมีระยะเวลาการใช้งานเพิ่มมากขึ้น ภายใต้มาตรฐานที่บริษัทกรณีศึกษากำหนด และภายใต้ความสามารถในการทำงานของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 และระบบทำความเย็น เพื่อลดต้นทุนการใช้งานสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ลง และทำให้ต้นทุนการผลิตไอศกรีมของบริษัทกรณีศึกษาลดลงด้วย อีกทั้งสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) จัดอยู่ในกลุ่มวัสดุสิ้นเปลือง หากมีระบบการจัดการที่ดีและการใช้งานที่เหมาะสม ก็อาจจะลดต้นทุนการผลิตลงได้เช่นกัน

2.2 การใช้งานของสารละลายเอทิลีนไกลคอลก่อนปรับปรุง ในขั้นตอนการขึ้นรูปไอศกรีมแท่ง

จากการสำรวจและเก็บรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับการใช้งานสารละลายเอทิลีนไกลคอล ในขั้นตอนการขึ้นรูปไอศกรีมแท่งด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งของบริษัทกรณีศึกษา ตั้งแต่เดือนมกราคม - กรกฎาคม พ.ศ. 2552 ซึ่งผลที่ได้จากการเข้าสังเกตการณ์ และบันทึกวิธีการทำงานของพนักงานประจำจุดต่างๆ ของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 มีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

สำหรับบริษัทกรณีศึกษา รอบเวลาการใช้งานหรือวัฏจักรการใช้งานของสารละลาย เอทิลีนไกลคอล (Cycle Time) หมายถึง ช่วงเวลาตั้งแต่ เริ่มต้นใช้งานสารละลายเอทิลีนไกลคอลในการขึ้นรูปไอศกรีมแท่ง หลังจากที่มีการเปลี่ยนถ่ายสารละลายเอทิลีนไกลคอลเรียบร้อยแล้ว และวัดค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอลเริ่มต้นได้เท่ากับ 1.085 ± 0.002 ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส จนกระทั่งสารละลายเอทิลีนไกลคอลถูกใช้งานมาเป็นระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งวัดค่าความถ่วงจำเพาะสุดท้ายของสารละลายหลังจากผลิตไอศกรีมแท่งได้เท่ากับ 1.074 ± 0.002 ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส เรียกว่า เวลาการใช้งานสารละลายเอทิลีนไกลคอลครบ 1 รอบ หรือเวลาที่สารละลายเอทิลีนไกลคอลหมุนเวียนอยู่ในบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติครบ 1 รอบ

จุดเปลี่ยนถ่ายสารละลายเอทิลีนไกลคอล หมายถึง จุดที่มีการวัดค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอลได้เท่ากับ 1.074 ± 0.002 (ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส) จึงทำการเปลี่ยนถ่ายสารละลายเอทิลีนไกลคอลออกจากบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 บางส่วน ตามวิธีการเตรียมสารละลายเอทิลีนไกลคอลบางส่วน (ดังแสดงในภาคผนวก ค)

เวลาการใช้งานจริง (Working Time) ของสารละลายเอทิลีนไกลคอลใน 1 รอบ หมายถึง เวลาที่สารละลายเอทิลีนไกลคอลถูกใช้งานจริงในการขึ้นรูปไอศกรีมแท่งเท่านั้น โดยไม่รวมเวลาหยุดผลิต

ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นที่ได้จากการเก็บรวบรวมข้อมูล ตั้งแต่เดือนมกราคม - กรกฎาคม พ.ศ. 2552 เกี่ยวกับการใช้งานสารละลายเอทิลีนไกลคอลในการขึ้นรูปไอศกรีมแท่งเฉลี่ยแต่ละรอบ จากจำนวนข้อมูลทั้งหมด 20 รอบการใช้งานของสารละลายเอทิลีนไกลคอล ดังแสดงใน Table 2

Table 2. Average usability of ethylene glycol solution per cycle for hardening the ice-cream bars production process from January to July 2009 (Before improvement)

Usability of EG solution	Average value (per cycle)
Working time of EG solution (hr.)	72.89
Cycle time of EG solution (hr.)	132.23
Reducing of specific gravity of EG solution	0.011
Specific gravity of EG solution (at 15^{o}C)	
- Start	1.085
- Finish	1.074
Product types	8
Amount of finish products (kg.)	18,527.15
Amount of pure EG replaced in the system (kg.)	663.75
Cost of pure EG (Baht)	43,634.93

จาก Table 2 อธิบายได้ว่า การใช้งานของสารละลายเอทิลีนไกลคอลเฉลี่ยต่อรอบในช่วงเวลาดังกล่าว มีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

- เวลาการใช้งานจริง (Working Time) ของสารละลายเอทิลีนไกลคอลใน 1 รอบ เฉลี่ย 72.89 ชั่วโมงต่อรอบ

- เวลารวมทั้งหมดที่สารละลายเอทิลีนไกลคอลถูกหมุนเวียนอยู่ในบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติตลอดทั้ง 1 วัฏจักร (Cycle time) เฉลี่ย 132.23 ชั่วโมงต่อรอบ

- ค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอล ลดลงจากค่าเริ่มต้นจนสิ้นสุดการใช้งานสารละลายในรอบนั้น มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.011 ต่อรอบ โดยที่ค่าความถ่วงจำเพาะลดลงจากการใช้งานจริง เฉลี่ยเท่ากับ 0.010 และค่าความถ่วงจำเพาะที่ลดลงจากการหยุดเครื่องจักรและหยุดผลิต มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.001 ต่อรอบ

- ค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอลเริ่มต้น เฉลี่ยเท่ากับ 1.085 และสุดท้าย เฉลี่ยเท่ากับ 1.074 ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส ในแต่ละรอบการใช้งาน

- จำนวนชนิดผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ เฉลี่ย 8 ชนิดต่อรอบ

- ปริมาณผลิตภัณฑ์ไอศกรีมแท่งที่ผลิตได้ เฉลี่ย 18,527.15 กิโลกรัมต่อรอบ

- ปริมาณสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 ที่ใช้เติมลงในบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 และปริมาณสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ถูกเปลี่ยนถ่ายออกของจากระบบ แต่ละครั้งจะมีปริมาณเฉลี่ย 663.75 กิโลกรัมต่อรอบ

- ต้นทุนการใช้สารเอทิลีนไกลคอลในการขึ้นรูปไอศกรีมแท่งด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 เฉลี่ย 43,634.93 บาทต่อรอบ

ในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่ง 1 ชนิด จำเป็นต้องมีการล้างทำความสะอาดเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 และอุปกรณ์ต่างๆ ในสายการผลิต จำนวน 2 ครั้ง คือ ก่อนกระบวนการผลิต และหลังกระบวนการผลิต ซึ่งในการล้างทำความสะอาดแต่ละครั้ง จะทำให้น้ำจากการล้างทำความสะอาดเครื่องจักร และอุปกรณ์ต่างๆ ปนเปื้อนเข้าสู่สารละลายเอทิลีนไกลคอลในระบบทำความเย็นได้ง่าย เนื่องจาก เครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 มีระบบการทำงานแบบเปิด ทำให้สารละลายเอทิลีนไกลคอลในบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรมีโอกาสสัมผัสกับความชื้นในบรรยากาศได้โดยตรง และในขั้นตอนการล้างทำความสะอาดอุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องจักร พนักงานแผนกผลิตประจำจุดต่างๆ ของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 จะใช้สายยางในการฉีดล้างทำความสะอาดอุปกรณ์ และบริเวณรอบๆ บ่อน้ำเกลือของเครื่องจักร ซึ่งทำให้น้ำจากการฉีดล้างเครื่องจักรนี้ปนเปื้อนเข้าสู่สารละลายเอทิลีนไกลคอลในบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรได้โดยตรงเช่นเดียวกัน ดังนั้น การปนเปื้อนของน้ำจึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ความเข้มข้นของสารละลายเอทิลีนไกลคอลลดลง และส่งผลต่อการลดลงของค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอลด้วย

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า ในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่ง 1 ชนิด ต้องมีการล้างทำความสะอาดเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 จำนวน 2 ครั้ง เมื่อจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์ไอศกรีมแท่งที่ผลิตในแต่ละรอบการใช้งานของสารละลายเอทิลีนไกลคอลเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ปริมาณการปนเปื้อนจากน้ำเพิ่มขึ้นด้วย และจะทำให้ระยะเวลาในการใช้งานของสารละลายเอทิลีนไกลคอลลดลง เนื่องจาก ความเข้มข้นและความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอลลดลง

2.3 การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อการลดลงของค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอล

จากการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น สามารถรวบรวมปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อการลดลงของค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอลในขั้นตอนการขึ้นรูปไอศกรีมแท่งด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ของบริษัทกรณีศึกษา ได้ดังต่อไปนี้

- เวลาการใช้งานของสารละลายเอทิลีนไกลคอล
- ชนิดผลิตภัณฑ์
- ความเข้มข้นของสารละลายเอทิลีนไกลคอล
- การปนเปื้อนของสารละลายจากน้ำ และองค์ประกอบอื่นๆ

2.3.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการใช้งาน กับการลดลงของค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอล

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลเบื้องต้น ตั้งแต่เดือนมกราคม - กรกฎาคม พ.ศ. 2552 จำนวน 20 รอบการใช้งานของสารละลายเอทิลีนไกลคอล สามารถนำมาคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์เพียร์สัน เพื่อต้องการทราบว่า เวลาการใช้งานมีความสัมพันธ์กับการลดลงของค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอลหรือไม่ ดังแสดงใน Table 3

Table 3. Analysis of relationship between the working time and the reducing of specific gravity of ethylene glycol solution

No.	Working time (hr.) X	Reducing of S.G. of EG Y	X^2	Y^2	XY
1	80.50	0.011	6480.25	0.0001	0.8855
2	68.60	0.009	4705.96	0.0001	0.6174
3	84.50	0.010	7140.25	0.0001	0.8450
4	62.12	0.008	3858.48	0.0001	0.4969
5	55.50	0.008	3080.25	0.0001	0.4440
6	88.67	0.013	7861.78	0.0002	1.1527
7	57.40	0.010	3294.76	0.0001	0.5740
8	58.33	0.008	3402.78	0.0001	0.4667
9	80.37	0.012	6458.80	0.0001	0.9644
10	66.17	0.008	4378.03	0.0001	0.5293
11	69.93	0.012	4890.67	0.0001	0.8392
12	81.17	0.015	6588.03	0.0002	1.2175
13	65.50	0.011	4290.25	0.0001	0.7205
14	71.25	0.012	5076.56	0.0001	0.8550
15	50.50	0.008	2550.25	0.0001	0.4040
16	106.00	0.011	11236.00	0.0001	1.1660
17	50.62	0.007	2562.38	0.0001	0.3543
18	72.50	0.011	5256.25	0.0001	0.7975
19	94.00	0.014	8836.00	0.0002	1.3160
20	94.25	0.014	8883.06	0.0002	1.3195
Total	1457.87	0.212	110830.79	0.0024	15.9654

- วิธีการคำนวณสหสัมพันธ์เพียร์สัน

(1) ตั้งสมมติฐานทางสถิติได้ว่า "เวลาการใช้งานมีความสัมพันธ์กับการลดลงของค่าความถ่วงจำเพาะของสารทำความเย็นเอทิลีนไกลคอลหรือไม่"

H_0 : ψ = 0 เวลาการใช้งานไม่มีความสัมพันธ์กับการลดลงของค่าความถ่วงจำเพาะ

H_1 : $\psi \neq 0$ เวลาในการใช้งานมีความสัมพันธ์กับการลดลงของค่าความถ่วงจำเพาะ

(2) กำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติ (ζ) = 0.05

(3) คำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน หรือค่า r

$$r = \frac{n\sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{\left[n\sum X^2 - \left(\sum X\right)^2\right]\left[n\sum Y^2 - \left(\sum Y\right)^2\right]}}$$

$$= \frac{20(15.9654) - (1{,}457.87)(0.212)}{\sqrt{\left[20(110{,}830.79) - (2{,}125{,}384.94)\right]\left[20(0.0024) - (0.0449)\right]}}$$

$$\alpha r = 0.7405$$

(4) ทดสอบนัยสำคัญทางสถิติ โดยคำนวณค่าสถิติทดสอบที (t-test)

$$t = r\sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}}$$

$$= \frac{0.7405\sqrt{20-2}}{\sqrt{1-0.7405}}$$

$$= \frac{0.7405\sqrt{18}}{\sqrt{0.2595}}$$

$$= \frac{(0.7405)(4.2426)}{0.5094}$$

$$= \frac{3.1416}{0.5094}$$

$$\alpha t = 6.1672$$

นำค่า t ที่ได้จากการคำนวณมาเทียบกับค่า t ที่ได้จากการเปิดตารางการแจกแจงแบบ t ที่ ζ = 0.05 และ df = n-2 = 20-2 = 18 พบว่า $t_{\frac{0.05}{2},\ 18}$ = 2.101 จะเห็นว่า $t_{\text{คำนวณ}} > t_{\text{ตาราง}}$ จึงปฏิเสธ H_0 และยอมรับ H_1

เนื่องจาก ค่า r ที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 0.7405 แสดงว่า เวลาการใช้งานของสารละลายเอทิลีนไกลคอลแปรผันโดยตรงกับการลดลงของค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอล โดยมีระดับความสัมพันธ์ร้อยละ 74 และผลจากการทดสอบสมมติฐาน แสดงว่า

เวลาการใช้งานของสารละลายเอทิลีนไกลคอลมีความสัมพันธ์กับการลดลงของค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอล อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

2.3.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดผลิตภัณฑ์ กับการลดลงของค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอล

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลเบื้องต้น จำนวน 7 รอบการใช้งานของสารละลายเอทิลีนไกลคอล เพื่อต้องการทราบว่าชนิดผลิตภัณฑ์ไอศกรีมแท่งมีความสัมพันธ์กับการลดลงของค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอลหรือไม่ ดังแสดงใน Table 4

Table 4. Analysis of relationship between type of products and the reducing of specific gravity of ethylene glycol solution (Average per cycle)

No.	Products name (Types)	Average production time (hr.)	Average reducing of	
			S.G. of EG	S.G. of EG (per 8 hr.)
1	Cola Jubb	9.76	0.001	0.001
2	China Buai	9.20	0.001	0.001
3	Fruit Punch	8.75	0.001	0.001
4	O-Leang	8.12	0.001	0.001
5	Gummy Yelly	8.92	0.001	0.001
6	Oriental Corn	6.35	0.001	0.001
7	Oriental Black Bean	9.31	0.001	0.001
8	Oriental Green Bean	8.02	0.001	0.001
9	Oriental Black Sticky Rice	6.95	0.001	0.001
10	Chocomilk	8.21	0.001	0.001
11	Tea Pop	7.62	0.001	0.001
12	Som Paen	6.99	0.001	0.001
13	Pinky Ice	9.57	0.001	0.001
14	Dip & Chip	6.44	0.001	0.001

จาก Table 4 จะเห็นได้ว่า ผลิตภัณฑ์ไอศกรีมแท่งทุกชนิดที่ผลิต มีการลดลงของค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอล เฉลี่ยเท่ากัน คือ 0.001 แม้ว่าผลิตภัณฑ์ไอศกรีมแท่งจะมีชนิดที่แตกต่างกัน และใช้เวลาในการผลิตที่แตกต่างกันหรือเท่ากัน (เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการผลิต 8 ชั่วโมงเท่ากัน) ก็ไม่มีผลต่อการลดลงของค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอล ดังนั้น ปัจจัยด้านชนิดผลิตภัณฑ์จึงไม่มีความสัมพันธ์กับการลดลงของค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอล

2.3.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น กับการลดลงของค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอล

จากการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ (0 - 100%) โดยปริมาตร โดยใช้การวางแผนและออกแบบการทดลอง ดังนี้

เตรียมสารละลายผสมระหว่างน้ำและสารเอทิลีนไกลคอลที่ระดับความเข้มข้นตั้งแต่ 0 - 100 โดยปริมาตร จำนวน 500 มิลลิลิตร ทำการปรับอุณหภูมิของสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่เตรียมไว้ด้วยสารละลายเอทิลีนไกลคอลอุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส และวัดค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส ทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง ได้ผลการทดลองแสดงดัง Table 5 และ Figure 10

Table 5. Results of specific gravity at different concentration of ethylene glycol solutions (Laboratory)

Concentration of EG (%by volume)	Volume (ml.)		Specific gravity of ethylene glycol at 15°C					Average
	EG	H_2O	1	2	3	4	5	
0	0	500	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.000
10	50	450	1.0100	1.0100	1.0110	1.0110	1.0110	1.011
20	100	400	1.0240	1.0230	1.0240	1.0240	1.0240	1.024
30	150	350	1.0370	1.0370	1.0370	1.0360	1.0370	1.037
40	200	300	1.0500	1.0500	1.0480	1.0500	1.0490	1.049
50	250	250	1.0620	1.0620	1.0620	1.0620	1.0620	1.062
60	300	200	1.0780	1.0780	1.0780	1.0770	1.0780	1.078
70	350	150	1.0880	1.0880	1.0880	1.0890	1.0880	1.088
80	400	100	1.1000	1.1000	1.1000	1.1000	1.1000	1.1000
90	450	50	1.1083	1.1083	1.1083	1.1083	1.1083	1.1083
99.9	500	0	1.1166	1.1166	1.1166	1.1166	1.1166	1.1166

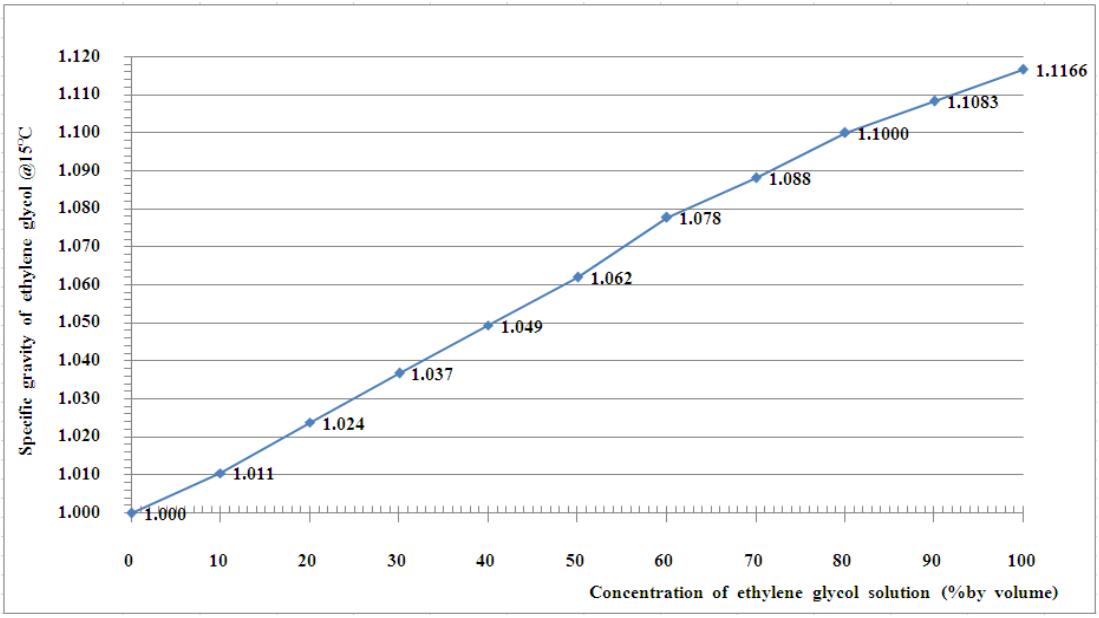


Figure 10. The specific gravity (at 15°C) at different concentration of ethylene glycol solution (%by volume) (Laboratory)

จาก Table 5 และ Figure 10 แสดงให้เห็นว่า เมื่อระดับความเข้มข้นของสารละลายเอทิลีนไกลคอลเพิ่มขึ้น ค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอลจะเพิ่มขึ้นในทิศทางเดียวกัน นอกจากนี้ จากผลการทดลอง สามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาปริมาณสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ที่ต้องเติมกลับเข้าสู่ระบบทำความเย็น เพื่อปรับความเข้มข้นของสารละลายเอทิลีนไกลคอลในระบบทำความเย็นให้เป็นไปตามมาตรฐานความถ่วงจำเพาะที่ทางบริษัทกำหนดขึ้นได้

ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูล ที่เก็บรวบรวมได้จากกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งของบริษัทกรณีศึกษา ใน Figure 11 จะแสดงตัวอย่างการใช้งานสารละลายเอทิลีนไกลคอลในขั้นตอนการขึ้นรูปไอศกรีมแท่ง 1 รอบการใช้งาน เพื่อพิจารณาแนวโน้ม และความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเอทิลีนไกลคอล เมื่อระยะเวลาการใช้งานเพิ่มขึ้น

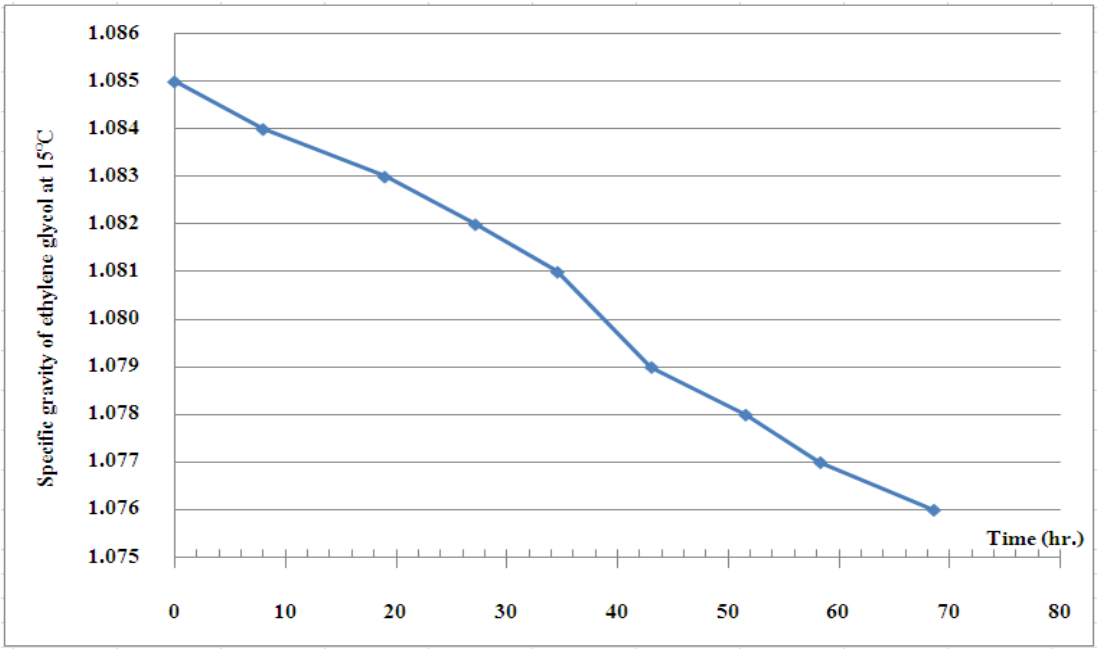


Figure 11. The cycle time and specific gravity (at 15°C) of ethylene glycol solution used in the ice-cream bars production process (Before improvement)

จาก Figure 11 อธิบายได้ว่า เมื่อการใช้งานสารละลายเอทิลีนไกลคอลในขั้นตอนการขึ้นรูปไอศกรีมแท่งด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ของบริษัทกรณีศึกษาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอลลดลง นั่นหมายถึง ความเข้มข้นของสารละลายเอทิลีนไกลคอลจะลดลงเช่นเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะและความเข้มข้นของสารละลายเอทิลีนไกลคอล ดังแสดงใน Figure 10

เพราะฉะนั้น แสดงว่าขณะที่มีการใช้งานสารละลายเอทิลีนไกลคอลเกิดการปนเปื้อนขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ความเข้มข้นของสารละลายนั้นลดลง ส่งผลต่อการขึ้นรูปไอศกรีมแท่งด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติของกรณีศึกษานี้

3. การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการใช้งานของสารละลายเอทิลีนเอทิลีนไกลคอล และการกำหนดแนวทางการแก้ไขปรับปรุง

3.1 การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการใช้งานของสารละลายเอทิลีนไกลคอล ในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100

จากการสำรวจ และสังเกตกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งในบริษัทกรณีศึกษา เพื่อค้นหาสาเหตุที่ทำให้มีการใช้งานสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) จำนวนมาก ซึ่งส่งผลกระทบต่อต้นทุนการใช้งานของสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) สูง โดยใช้แผนผังก้างปลา (Cause and Effect Diagram) ดังแสดงใน Figure 12 และนำสาเหตุหลักที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแผนผังก้างปลานี้ มาคิดค้นหาแนวทางแก้ไขปรับปรุงด้วยการวิเคราะห์ทำไม - ทำไม (Why-why Analysis) ผลจากการวิเคราะห์สาเหตุต่างๆ แสดงใน Figure 13

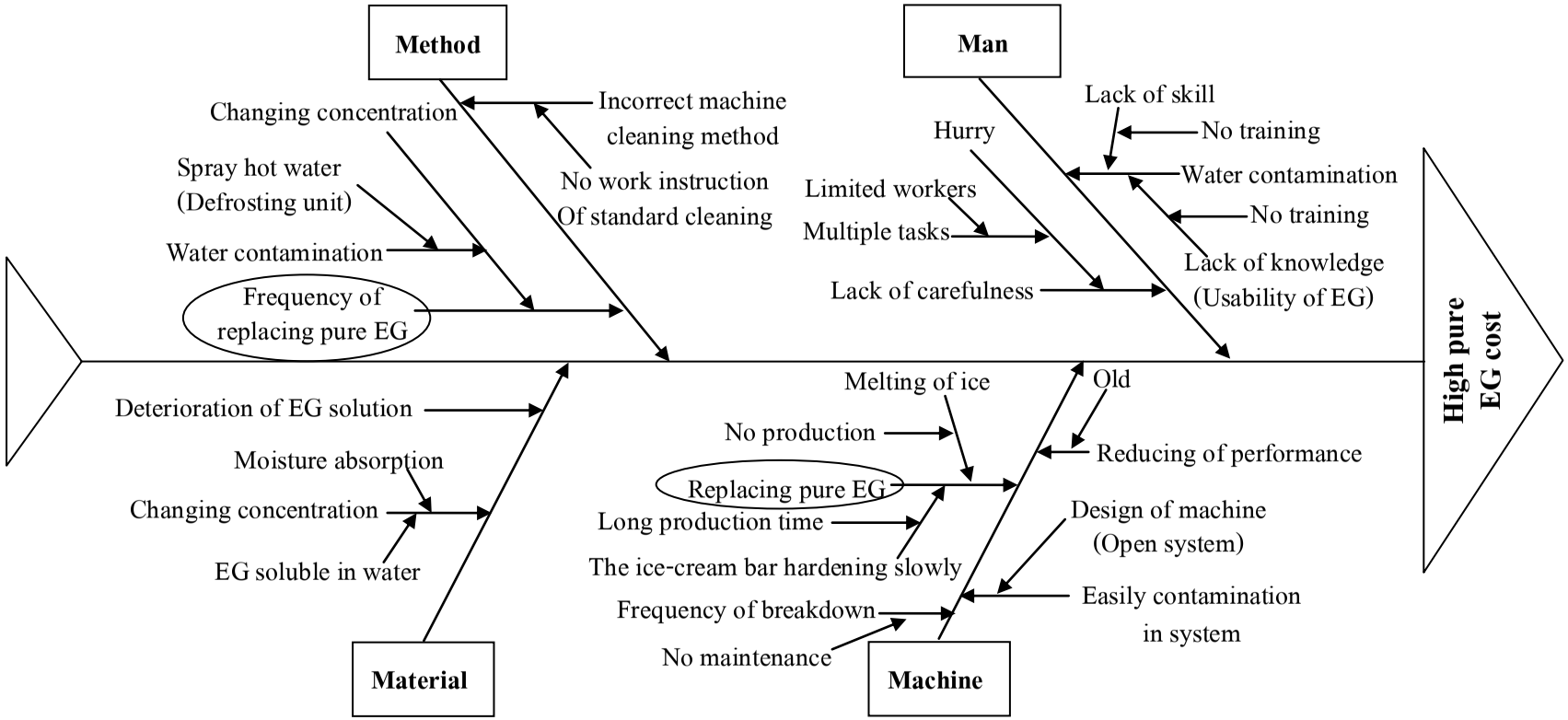


Figure 12. Cause and effect diagram in this case study

จาก Figure 12 อธิบายรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

(1) พนักงาน (Man)

เนื่องจาก พนักงานขาดความรู้และทักษะการใช้งานสารละลายเอทิลีนไกลคอลให้เกิดประโยชน์สูงสุด จึงเป็นสาเหตุทำให้สารละลายเอทิลีนไกลคอลที่บรรจุอยู่ในบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 มีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปจากจุดเริ่มต้น สืบเนื่องมาจาก การขาดความรู้ของพนักงาน จึงทำให้พนักงานไม่ใส่ใจ ขาดความระมัดระวังและตระหนักถึงความสำคัญเกี่ยวกับกับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่มีสาเหตุมาจากการปฏิบัติงานของพนักงาน ทั้งในขณะล้างทำความสะอาดเครื่องจักร และขณะเครื่องจักรกำลังทำงาน เพราะว่าไม่มีการจัดฝึกอบรมให้ความรู้และปลูกจิตสำนึกให้แก่พนักงานผลิต ทั้งพนักงานเก่าและพนักงานใหม่ จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนถ่ายสารละลายเอทิลีนไกลคอลออกจากบ่อน้ำเกลือและเติมสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ลงไปแทนที่บ่อยครั้ง ซึ่งส่งผลให้ต้นทุนการใช้สารเอทิลีนไกลคอลสูงขึ้น

นอกจากนี้ เนื่องจากกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งมีการทำงานเป็นแบบต่อเนื่อง พนักงานผลิตต้องทำงานร่วมกันภายใต้การผลิตที่กำหนด หากพนักงานคนใดมีความล่าช้าในการทำงาน จะส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตและทำให้ขั้นตอนอื่นๆ เกิดการรอคอย และพบว่าจำนวนพนักงานในสายการผลิตมีจำนวนน้อย พนักงานแต่ละคนจะต้องทำงานหลายอย่าง จึงต้องการความสะดวกและรวดเร็วในการทำงาน จึงขาดความระมัดระวังเกี่ยวกับการใช้งานสารละลายเอทิลีนไกลคอลมากขึ้น

(2) วิธีการ (Method)

เนื่องจาก วิธีการล้างที่ใช้ในการทำความสะอาดเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 และอุปกรณ์ต่างๆ บริเวณรอบเครื่องจักร คือ พนักงานจะใช้สายยางฉีดล้างทำความสะอาดบริเวณต่างๆ ของเครื่องจักรด้วยความรวดเร็ว โดยที่ไม่ได้คำนึงถึงปริมาณน้ำที่อาจจะปนเปื้อนลงไปในบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักร การใช้สายยางในการล้างทำความสะอาดเป็นวิธีการล้างที่ง่าย สะดวก และให้ความรวดเร็ว แต่ด้วยความสะดวกและรวดเร็วนั้น ทำให้พนักงานขาดความระมัดระวังในการใช้น้ำ นอกจากจะเป็นการสิ้นเปลืองน้ำแล้ว ยังส่งผลให้น้ำกระเด็นหรือเข้าปนเปื้อนสารละลายเอทิลีนไกลคอลในบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ได้ง่ายอีกด้วย ทำให้สารละลายเอทิลีนไกลคอลในบ่อน้ำเกลือมีความเข้มข้นลดลงและเป็นสาเหตุให้ต้องมีการเปลี่ยนถ่ายสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ใช้งานแล้วออกจากบ่อน้ำเกลือและเติมสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ลงไปแทนที่ ซึ่งทำให้ต้นทุนการใช้สารเอทิลีนไกลคอลสูงขึ้น

(3) เครื่องจักร (Machine)

จากการออกแบบเครื่องจักรให้มีระบบการทำงานแบบต่อเนื่องและเป็นระบบเปิด ทำให้สารละลายเอทิลีนไกลคอลที่อยู่ในบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 มีโอกาสสัมผัสกับความชื้นในบรรยากาศและสามารถปนเปื้อนจากสิ่งต่างๆ ได้ง่าย อีกทั้งสารเอทิลีนไกลคอลเป็นสารที่ดูดความชื้นและละลายได้ดีในน้ำ จึงเป็นสาเหตุให้สารละลายเอทิลีนไกลคอลมีความเข้มข้นลดลงจากจุดเริ่มต้น ส่งผลให้ต้องมีการเปลี่ยนถ่ายสารละลายเอทิลีนไกลคอลบ่อยครั้ง จึงทำให้ต้นทุนการใช้สารเอทิลีนไกลคอลสูงขึ้นได้เช่นเดียวกัน

นอกจากนี้ เครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ของบริษัทกรณีศึกษา เป็นเครื่องจักรที่มีอายุการใช้งานนาน และขาดการบำรุงรักษาอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักรลดลงตามระยะเวลาการใช้งาน เครื่องจักรเสียบ่อย เมื่อต้องหยุดเครื่องจักรเพื่อซ่อมแซม ทำให้น้ำแข็งที่เกาะอยู่บริเวณด้านในของเครื่องจักรละลาย และผสมเข้ากับสารละลายเอทิลีนไกลคอลในบ่อน้ำเกลือ ทำให้ความเข้มข้นของสารละลายลดลง จึงต้องมีการเปลี่ยนถ่ายสารละลายและเติมสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ลงไปแทนที่

(4) วัตถุดิบ (Material)

จากคุณสมบัติด้านการละลายของสารเอทิลีนไกลคอล ได้บ่งชี้ไว้ว่า สารเอทิลีนไกลคอลสามารถละลายได้อย่างสมบูรณ์ในน้ำและดูดซับความชื้นได้ดี เพราะฉะนั้น เมื่อสารเอทิลีนไกลคอลเกิดการรวมตัวกับน้ำ ก็จะผสมเป็นเนื้อเดียวกัน และที่ระดับความเข้มข้นต่างกันคุณสมบัติของสารละลายเอทิลีนไกลคอลจะมีความแตกต่างกัน และเนื่องจาก กระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 เป็นระบบการทำงานแบบเปิด สารละลายเอทิลีนไกลคอลในบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรจึงสามารถปนเปื้อนน้ำได้ตลอดเวลา ส่งผลให้ความเข้มข้นของสารละลายเอทิลีนไกลคอลลดลงได้อย่างต่อเนื่อง ดังนั้น เมื่อถึงจุดหนึ่งที่สารละลายเอทิลีนไกลคอลมีความสามารถในการทำความเย็นในระดับที่ต่ำกว่าที่ทางบริษัทกรณีศึกษากำหนดไว้ จึงจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนถ่ายสารละลายเอทิลีนไกลคอลเช่นเดียวกัน

ผลจากการวิเคราะห์แผนผังก้างปลา พบว่า สาเหตุหลักที่ทำให้ต้นทุนการใช้งานสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) สูง เกิดจากการเปลี่ยนถ่ายละลายเอทิลีนไกลคอลบ่อยครั้ง ทำให้ต้องเติมสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ลงไปแทนที่สารละลายเอทิลีนไกลคอลในบ่อน้ำเกลือที่ถูกเปลี่ยนถ่ายออก เพื่อเพิ่มความเข้มข้นให้แก่สารละลายในบ่อน้ำเกลืออีกครั้ง ดังนั้น ผู้วิจัยจึงนำสาเหตุหลักที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแผนผังก้างปลานี้ไปวิเคราะห์หาสาเหตุรากเหง้าที่แท้งจริงของการเปลี่ยนถ่ายสารละลายเอทิลีนไกลคอลบ่อย และคิดค้นหามาตรการในการแก้ไขปรับปรุงสาเหตุรากเหง้า โดยการใช้เครื่องมือการวิเคราะห์ทำไม-ทำไม (Why-why Analysis) ได้ผลการวิเคราะห์แสดงดัง Figure 13

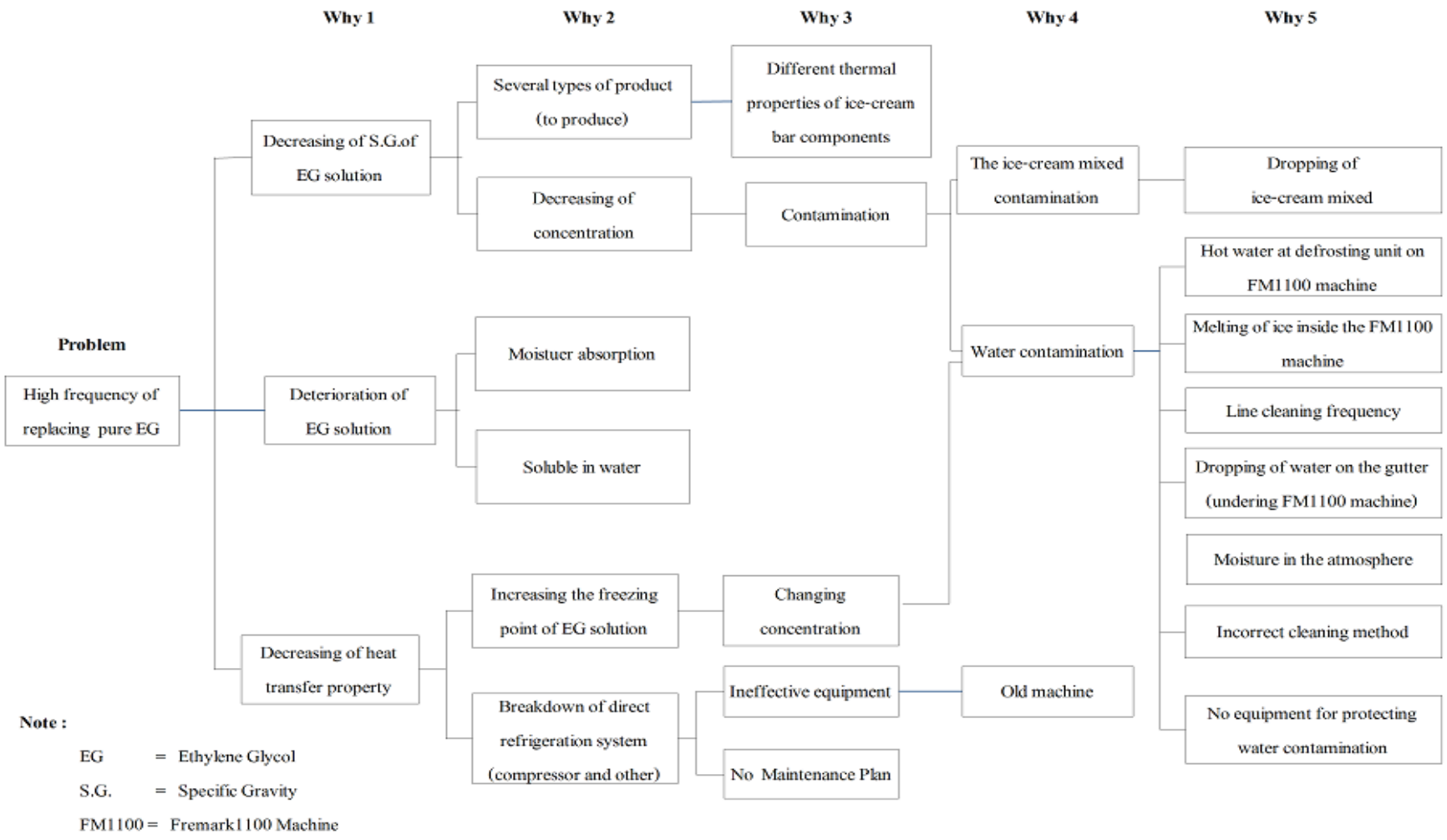


Figure 13. The why-why analysis in this case study

Figure 13 แสดงผลการวิเคราะห์ปัจจัยทุกปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการใช้งานสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ในการขึ้นรูปไอศกรีมแท่งด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ของกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่ง สรุปสาเหตุหลักของปัญหานี้ คือ การปนเปื้อนจากน้ำ และไอศกรีมผสมจากแหล่งต่างๆ ในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่ง ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้สารละลายเอทิลีนไกลคอลในระบบทำความเย็นทางอ้อม มีความเข้มข้นของลดลง ส่งผลต่อการลดลงของค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอล อุณหภูมิจุดหลอมเหลวของสารละลายเอทิลีนไกลคอลเพิ่มขึ้น และทำให้เวลาในการขึ้นรูปไอศกรีมแท่งเพิ่มขึ้น เนื่องจากไอศกรีมไม่แข็งตัวหรือแข็งตัวได้อย่างช้าๆ จากการสำรวจที่มาของการปนเปื้อนดังกล่าว พบว่าแหล่งน้ำที่สามารถปนเปื้อนเข้าสู่สารละลายเอทิลีนไกลคอลในระบบทำความเย็นมาจากหลายๆ แหล่ง (ดัง Figure 14) ได้แก่

- น้ำจากการล้างทำความสะอาดเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 และอุปกรณ์ต่างๆ ทั้งการเตรียมสายการผลิต และการเปลี่ยนชนิดผลิตภัณฑ์

- น้ำร้อนจากการฉีดบริเวณใต้แม่พิมพ์ เพื่อละลายน้ำแข็งและช่วยให้ตัวหนีบดึงแท่งไอศกรีมออกจากแม่พิมพ์ได้ง่าย

- น้ำที่เกาะบริเวณรางรับน้ำเสตนเลสใต้ท่อส่งความเย็นเหนือเครื่องจักรอัตโนมัติ

- น้ำจากการละลายของน้ำแข็งภายในเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ขณะเครื่องจักรหยุดทำงาน หรือไม่มีการผลิต

- น้ำจากไอศกรีมผสมหรือวัตถุดิบอื่นๆ ที่ตกลงไปในบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ระหว่างสถานีหยอดน้ำไอศกรีม และสถานีดึงไม้ของกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่ง

- น้ำจากความชื้นในบรรยากาศ

Defrosting unit

The ice inside brine tank

Dropping of water on the gutter

The ice inside brine tank

Moisture in the atmosphere contaminated into the open system

The ice on cooling coil

Figure 14. Example of water contamination from several sources

เพราะฉะนั้น จึงเกิดการเปลี่ยนถ่ายสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ใช้งานแล้วออกจากบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 บางส่วน และเติมสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ลงไปแทนที่ เพื่อเพิ่มความเข้มข้นและความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอลในระบบทำความเย็นทางอ้อม ระยะเวลาทั้งหมดที่สารละลายเอทิลีนไกลคอลหมุนเวียนอยู่ในบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักร เฉลี่ยต่อรอบ 132.23 ชั่วโมง ดังนั้น ความถี่ในการเติมสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ที่เพิ่มขึ้น จึงเกิดต้นทุนที่เพิ่มขึ้นด้วย

ใน Table 6 แสดงปริมาณน้ำที่หยดจากรางรับน้ำเสตนเลสบริเวณใต้ท่อส่งความเย็นเหนือเครื่องจักรและน้ำจากการละลายของน้ำแข็งบางส่วนที่เกาะบริเวณคอยล์ที่เชื่อมต่อกับท่อส่งความเย็นที่จุดกึ่งกลางเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 โดยเก็บรวบรวมข้อมูลจำนวน 7 ครั้ง เวลาที่เก็บข้อมูลแต่ละครั้ง 24 ชั่วโมง และในการเก็บข้อมูลแต่ละครั้งต้องมีเวลาในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งเฉลี่ยประมาณ 8 ชั่วโมงต่อวัน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

Table 6. Amount of water contamination from the gutter and the cooling coil on center of Fremark1100 machine (Before improvement)

No.	Amount of water from melting of ice (kg. per day)
1	1.230
2	0.997
3	1.032
4	1.257
5	1.104
6	0.961
7	1.545
Average	1.160

จาก Table 6 อธิบายได้ว่า ปริมาณน้ำที่อาจจะปนเปื้อนเข้าสู่สารละลายเอทิลีนไกลคอลในระบบทำความเย็นทางอ้อม ซึ่งเกิดจากน้ำที่หยดจากท่อส่งความเย็นบริเวณเหนือเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 และน้ำจากการละลายของน้ำแข็งที่เกาะบริเวณคอยล์เย็นกึ่งกลางเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 เฉลี่ยต่อวันเท่ากับ 1.160 กิโลกรัม แสดงให้เห็นว่า สารละลายเอทิลีนไกลคอลในระบบทำความเย็นทางอ้อม จะมีน้ำปนเปื้อนจาก 2 แหล่งดังกล่าว อย่างน้อยวันละ 1.160 กิโลกรัม ซึ่งเป็นข้อมูลเพียงบางส่วนเท่านั้นที่สามารถบันทึกข้อมูลได้ และนอกจากนี้ยังคงมีน้ำปนเปื้อนจากแหล่งอื่นๆ ที่ไม่สามารถทำการเก็บรวบรวมข้อมูลได้ เช่น น้ำจากสายยางที่ใช้ฉีดล้างทำความสะอาดเครื่องจักร น้ำจากการละลายน้ำแข็งบริเวณใต้แม่พิมพ์เพื่อหนีบดึงไอศกรีมแท่งออกจากแม่พิมพ์ น้ำจากการละลายของน้ำแข็งที่เกาะภายในเครื่องจักร ความชื้นใน

บรรยากาศ และอื่นๆ แต่สามารถคำนวณปริมาณน้ำที่ปนเปื้อนได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ความเข้มข้นต่างๆ (Figure 10) จะได้ว่า ในแต่ละรอบการใช้งานของสารละลายเอทิลีนไกลคอลมีปริมาณน้ำปนเปื้อนเข้าสู่บ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ร้อยละ 9 โดยปริมาตร คิดเป็นปริมาณ 252 ลิตร หรือ 251.77 กิโลกรัม (วิธีการคำนวณแสดงใน ภาคผนวก จ.)

ก่อนการปรับปรุง พบว่า เวลาที่สารละลายเอทิลีนไกลคอลถูกหมุนเวียนอยู่ในบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 จนครบ 1 รอบ และจึงทำการเปลี่ยนถ่ายสารละลายออกจากบ่อน้ำเกลือ ใช้เวลาทั้งหมด 132.23 ชั่วโมง และมีน้ำปนเปื้อนเฉลี่ยต่อรอบ เท่ากับ 251.77 กิโลกรัม คิดเป็นปริมาณน้ำปนเปื้อนเฉลี่ยต่อวัน เท่ากับ 45.70 กิโลกรัม (วิธีการคำนวณแสดงในภาคผนวก จ.)

จากข้อมูลใน Table 6 จะเห็นว่า มีปริมาณน้ำปนเปื้อนที่สามารถเก็บรวบรวมได้เฉลี่ยต่อวัน เท่ากับ 1.1608 กิโลกรัม ซึ่งมาจากน้ำที่หยดจากรางรับน้ำเสตนเลสใต้ท่อส่งความเย็นบริเวณเหนือเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 และน้ำจากการละลายของน้ำแข็งที่เกาะบริเวณคอยล์เย็นกึ่งกลางเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 เพราะฉะนั้น จะมีน้ำปนเปื้อนจากแหล่งอื่นๆ อีกวันละ 45.70 -1.1608 = 44.54 กิโลกรัม

3.2 การกำหนดแนวทางการแก้ไขปรับปรุงการใช้งานสารละลายเอทิลีนไกลคอล ในขั้นตอนการขึ้นรูปไอศกรีมแท่งด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100

จากสาเหตุรากเหง้าที่ทำให้กระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งของบริษัทกรณีศึกษา มีต้นทุนด้านการใช้งานสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) สูงถึงร้อยละ 14.36 ของต้นทุนทั้งหมดในการผลิตไอศกรีม สาเหตุหลักมาจากการปนเปื้อนของน้ำ จากแหล่งต่างๆ (ดังแสดงในหัวข้อ 3.1) เข้าสู่สารละลายเอทิลีนไกลคอลในบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ซึ่งเป็นผลให้คุณสมบัติในการเป็นสารทำความเย็นขั้นที่ 2 ของสารละลายเอทิลีนไกลคอลลดลง

ดังนั้น จากสาเหตุดังกล่าว ผู้วิจัยจึงได้คิดค้นแนวทางในการแก้ไขปรับปรุง และนำเสนอแนวทางให้แก่บริษัทกรณีศึกษา เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้งานจริงในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งของบริษัท ซึ่งแนวทางในการแก้ไขปรับปรุงที่นำเสนอทั้งหมด มีดังต่อไปนี้

3.2.1 การปรับปรุงการวางแผนการผลิตไอศกรีมแท่งให้เหลือ 1 ชนิดต่อวัน

จากสภาพปัจจุบันของบริษัทกรณีศึกษา ช่วงเวลาตั้งแต่เดือนมกราคม - กรกฎาคม พ.ศ. 2552 แผนกผลิตแบ่งการทำงานเป็น 2 กะต่อวัน โดยทำงานกะละ 8 ชั่วโมง และมีการวางแผนการผลิตไอศกรีมแท่ง เฉลี่ยวันละ 2 ชนิด แต่ในปัจจุบัน บริษัทกรณีศึกษาลดเวลาการทำงานเหลือเพียง 1 กะต่อวัน และมีการวางแผนการผลิตไอศกรีมแท่ง เฉลี่ยวันละ 2 ชนิดเช่นเดิม ซึ่งในการผลิตไอศกรีมแท่งจำนวน 1 ชนิด จำเป็นต้องมีการล้างทำความสะอาดสายการผลิตจำนวน 2 ครั้ง คือ ก่อน และหลังการผลิต ทำให้เกิดโอกาสในการปนเปื้อนของน้ำจากการล้างทำความสะอาดสายการผลิต เข้าสู่สารละลายเอทิลีนไกลคอลในบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ได้มากขึ้น

วิธีการแก้ไข คือ การวางแผนการผลิตไอศกรีมแท่งให้เหลือ 1 ชนิดต่อวัน เพื่อลดปริมาณการปนเปื้อนของน้ำจากการล้างทำความสะอาดสายการผลิตสำหรับเปลี่ยนชนิดผลิตภัณฑ์ โดยการปรึกษากับเจ้าหน้าที่วางแผนการผลิตไอศกรีมแท่งของแผนกผลิต

3.2.2 การปรับปรุงวิธีการล้างทำความสะอาดเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 และอุปกรณ์ต่างๆ บริเวณรอบเครื่องจักร

วิธีการล้างทำความสะอาดเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 และอุปกรณ์ต่างๆ บริเวณรอบเครื่องจักรในสภาพปัจจุบันนั้น พนักงานผลิตที่ประจำในจุดต่างๆ ของเครื่องจักร จะใช้สายยางในการฉีดล้างทำความสะอาดเครื่องจักรและอุปกรณ์ โดยที่ไม่ได้ระมัดระวังในการฉีดน้ำด้วยสายยางเพื่อทำความสะอาด ทำให้น้ำจากการฉีดด้วยสายยางนี้สามารถปนเปื้อนเข้าสู่สารละลายเอทิลีนไกลคอลในบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรได้โดยตรง เนื่องจาก บริเวณด้านบนของเครื่องจักรมีลักษณะเปิดโล่ง สารละลายเอทิลีนไกลคอลในระบบสามารถเกิดการปนเปื้อนได้ง่าย

วิธีการแก้ไข คือ ปรับเปลี่ยนวิธีการล้างทำความสะอาดเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 และอุปกรณ์ต่างๆ บริเวณรอบเครื่องจักร จากวิธีเดิมที่ใช้สายยางฉีดล้างทำความสะอาดเครื่องจักรทุกจุด เปลี่ยนเป็นวิธีการเช็ดทำความสะอาดด้วยฟองน้ำ หรือผ้าชุบน้ำแทนการฉีดล้างด้วยสายยางบริเวณทุกจุดที่มีความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนจากน้ำ และในบริเวณนั้นๆ ของเครื่องจักรต้องสามารถใช้วิธีการเช็ดทำความสะอาดได้ง่ายด้วย เช่น บริเวณขอบด้านบนรอบๆ เครื่องจักร Fremark1100 ทั้งหมด ฝาปิดบริเวณกึ่งกลางเครื่องจักร ท่อส่งความเย็นที่ถูกเชื่อมต่อลงในเครื่องจักร หรือบริเวณคอยล์ เป็นต้น แต่สำหรับบริเวณที่ยากต่อการทำความสะอาดด้วยวิธีการ

เช็ดด้วยฟองน้ำ หรือผ้าชุบน้ำ เช่น สถานีหยอดทุกสถานี และสถานีปักไม้ ให้พนักงานผลิตประจำจุดดังกล่าวปรับชุดอุปกรณ์ของเครื่องจักรออกห่างจากบริเวณบ่อน้ำเกลือในลักษณะตั้งฉากกับเครื่องจักร หรือให้ห่างจากบริเวณปากบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรมากที่สุดเท่าที่อุปกรณ์ชุดนั้นๆ สามารถปรับได้ จากนั้น จึงใช้สายยางฉีด หรือตักน้ำราดทำความสะอาดอุปกรณ์ดังกล่าวตามปกติ แต่ควรเพิ่มความระมัดระวังในการฉีดล้างทำความสะอาดมากขึ้น และจัดการฝึกอบรมให้กับพนักงานผลิตในส่วนนี้ เพื่อให้พนักงานผลิตสามารถปฏิบัติงานได้อย่างถูกวิธี ปลูกจิตสำนึกให้แก่พนักงาน ให้มีความรู้ และมีความระมัดระวังในการใช้งานสารละลายเอทิลีนไกลคอลมากขึ้น

3.2.3 การจัดทำอุปกรณ์ป้องกันน้ำจากการล้างทำความสะอาดเครื่องจักร Fremark1100

โดยปกติ พนักงานแผนกผลิตไอศกรีมแท่ง จะใช้สายยางในการฉีดล้างทำความสะอาดเครื่องจักร และอุปกรณ์ต่างๆ บริเวณรอบเครื่องจักร เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการทำงาน ทำให้น้ำที่ถูกฉีดด้วยสายยางนี้มีโอกาสกระเด็นเข้ารวมกับสารละลายเอทิลีนไกลคอลในบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติได้ง่าย

วิธีการแก้ไข คือ จัดทำแผ่นป้องกันการปนเปื้อนจากน้ำ ขณะล้างทำความสะอาดเครื่องจักร และอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของน้ำจากการล้างสายการผลิต

3.2.4 การปรับปรุงชุดทำละลายน้ำแข็งในการดึงแท่งไอศกรีมออกจากแม่พิมพ์

เนื่องจากเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 มีกลไกการทำงาน 2 ส่วน คือ การขึ้นรูป หรือแช่เยือกแข็งไอศกรีมแท่ง และการทำละลายน้ำแข็ง (Defrosting Unit) เพื่อหนีบดึงแท่งไอศกรีมออกจากแม่พิมพ์ ซึ่งชุดทำละลายน้ำแข็งนี้มีลักษณะการทำงาน คือ น้ำสะอาดถูกบรรจุอยู่ในถังเก็บขนาด 60 ลิตร บริเวณใต้เครื่องจักร โดยภายในถังเก็บน้ำจะมีขดลวดนำความร้อนทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่น้ำที่อยู่ภายใน ให้มีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 38 - 40 องศาเซลเซียส หลังจากที่กระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 เริ่มต้นขึ้น ไอศกรีมแท่งที่ถูกขึ้นรูปเรียบร้อยแล้ว จะถูกเคลื่อนที่ไปยังชุดทำละลายน้ำแข็ง และน้ำร้อนที่อยู่ภายในชุดทำละลายน้ำแข็งนี้ จะถูกฉีดพ่นใส่บริเวณด้านล่างของแม่พิมพ์ เพื่อละลายน้ำแข็งที่เกาะอยู่ภายในระหว่างแม่พิมพ์และแท่งไอศกรีมออก และช่วยให้ชุดตัวหนีบสามารถดึงแท่งไอศกรีมออกจากแม่พิมพ์ได้ง่ายขึ้น แม่พิมพ์ที่ถูกดึงแท่งไอศกรีมออกทั้งหมดจะเคลื่อนที่ไปยังสถานีหยอดไอศกรีม สถานีดูดน้ำไอศกรีม และสถานีปักไม้ไอศกรีม ซึ่งหมุนเวียนอยู่ในสารละลายเอทิลีนไกลคอลจนกว่าจะเสร็จสิ้นกระบวนการผลิต ทำให้น้ำที่ใช้ฉีดพ่นในชุดทำละลายน้ำแข็งนี้ จะชะล้างเอา

สารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ติดมากับแม่พิมพ์ออกบางส่วน และน้ำจะติดไปกับแม่พิมพ์ปนเปื้อนกับสารละลายเอทิลีนไกลคอลในบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรได้ ถึงแม้จะเป็นปริมาณที่น้อยมากก็ตาม แต่เครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 มีจำนวนแม่พิมพ์ทั้งหมด 50 แม่พิมพ์ต่อการเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ ทำให้ปริมาณน้ำที่ปนเปื้อนเพิ่มขึ้นได้

วิธีการแก้ไข คือ นำสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ใช้งานแล้วใส่ในถังของบ่อน้ำละลายเก็บขนาด 60 ลิตร ของชุดทำละลายน้ำแข็ง แทนการใช้น้ำร้อนฉีดพ่นใต้แม่พิมพ์ เพื่อลดการปนเปื้อนจากน้ำเข้าสู่สารละลายเอทิลีนไกลคอลในระบบได้ พร้อมทั้งปรับปรุงหัวฉีดน้ำของชุดทำละลายน้ำแข็ง ให้มีความแรงในการฉีดพ่นลดลง และลดจำนวนหัวฉีดบริเวณขอบด้านนอกทั้งสองด้านของแม่พิมพ์ลง เพื่อป้องกันไม่ให้สารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ใช้แทนน้ำร้อนปนเปื้อนกับผลิตภัณฑ์ได้โดยเด็ดขาด และผลพลอยได้จากวิธีการแก้ไขนี้ คือ เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ใช้งานแล้ว ในชุดทำละลายน้ำแข็งที่อุณหภูมิ 38 - 40 องศาเซลเซียส ทำให้น้ำระเหยออกจากสารละลายเอทิลีนไกลคอลได้ และได้สารเอทิลีนไกลคอลที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นกลับมาใช้ใหม่ได้อีกด้วย

3.2.5 การปรับปรุงอุปกรณ์รองรับน้ำจากรางรับน้ำเสตนเลสใต้ท่อส่งความเย็นบริเวณเหนือเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100

ที่บริเวณท่อส่งความเย็นเหนือเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 มีรางรับน้ำเสตนเลสสำหรับรองรับน้ำที่หยดจากท่อส่งความเย็นแขวนติดอยู่ในแนวขนานกัน เมื่อน้ำจากท่อส่งความเย็นถูกกักเก็บไว้ในรางรับน้ำใต้ท่อมากขึ้นจนสามารถไหลออกจากรางรับน้ำทางช่องระบายบริเวณปลายด้านหนึ่งของรางรับน้ำเสตนเลสที่เชื่อมต่อไว้ด้วยท่อพีวีซี และถูกระบายออกไปอย่างช้าๆ ส่วนน้ำที่ไม่สามารถไหลออกจากรางรับน้ำได้จะถูกขังอยู่ในรางเสตนเลสต่อไป นอกจากนี้ น้ำที่หยดจากท่อส่งความเย็น ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำสามารถหยดจากรางเสตนเลสลงสู่บ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรได้เช่นเดียวกัน ทำให้เกิดการปนเปื้อนของน้ำได้ และยังก่อให้เกิดเชื้อราขึ้นบริเวณใต้รางรับน้ำเสตนเลสอีกด้วย

วิธีการแก้ไข คือ การปรับมุม หรือองศาความลาดเอียงของรางรับน้ำเสตนเลสใต้ท่อส่งความเย็นบริเวณเหนือเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ด้วยการเพิ่มความยาวของสกรูยึดรางรับน้ำเสตนเลส กับท่อส่งความเย็นที่ปลายด้านหนึ่งของรางรับน้ำ ทำให้น้ำสามารถไหลออกจากรางรับน้ำได้ด้วยแรงโน้มถ่วง เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำขังอยู่ภายในรางรับน้ำนานจนสามารถเกิดหยดน้ำขึ้นบริเวณใต้รางรับเสตนเลส และปนเปื้อนลงสู่สารละลายเอทิลีนไกลคอลในระบบได้

3.2.6 การลดการปนเปื้อนจากการละลายของน้ำแข็งภายในบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100

บริเวณภายในบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 จะมีน้ำที่เกิดจากการปนเปื้อนต่างๆ และไม่ผสมเข้ากันกับสารละลายเอทิลีนไกลคอลในระบบ ซึ่งจะจับตัวกันเป็นก้อนน้ำแข็งอยู่ภายใน เมื่อมีการหยุดการทำงานของเครื่องจักรเป็นเวลานานจะทำให้น้ำแข็งละลายและผสมกับสารละลายเอทิลีนไกลคอล ทำให้เกิดการสูญเสียค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอลโดยไร้ประโยชน์ได้

วิธีการแก้ไข คือ ถ้าในระหว่างรอบการใช้งานสารละลายเอทิลีนไกลคอล หากมีแผนต้องหยุดการทำงานของเครื่องจักรเป็นเวลามากกว่า 24 ชั่วโมง ให้พนักงานแผนกวิศวกรรมใช้ปั๊มดูดสารละลายเอทิลีนไกลคอลออกจากบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 หลังจากผลิตไอศกรีมแท่งรอบนั้นเสร็จทันที และย้ายไปเก็บไว้ยังถังพักขนาด 3,000 ลิตร ที่เตรียมไว้ หลังจากย้ายสารละลายเอทิลีนไกลคอลไปเก็บไว้ในถังพักเรียบร้อยแล้ว ให้พนักงานแผนกวิศวกรรมเปิดวาล์วบริเวณที่ใต้เครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ทิ้งไว้เพื่อให้น้ำที่เกิดจากการละลายของน้ำแข็งออกจากเครื่องจักรให้หมด และเมื่อถึงกำหนดวันที่ต้องเริ่มใช้งานสารละลายเอทิลีนไกลคอลอีกครั้ง ให้พนักงานแผนกวิศวกรรมปั๊มสารละลายเอทิลีนไกลคอลกลับเข้าบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 เป็นเวลาอย่างน้อย 2 ชั่วโมง เพื่อต้องการให้อุณหภูมิของสารละลายเอทิลีนไกลคอลลดลงถึง -40 องศาเซลเซียส ก่อนกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งจะเริ่มต้นขึ้น

3.2.7 การป้องกันการปนเปื้อนจากความชื้นในบรรยากาศ

เนื่องจาก เครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 มีลักษณะด้านบนเปิดโล่ง ทำให้สารละลายเอทิลีนไกลคอลสัมผัสกับความชื้นในบรรยากาศบริเวณกระบวนการผลิตได้โดยตรง ส่งผลให้ความสามารถในการทำความเย็นของสารละลายเอทิลีนไกลคอลลดลงอย่างช้าๆ

วิธีการแก้ไข คือ การจัดทำอุปกรณ์ปิดบริเวณด้านบนของเครื่องจักร อัตโนมัติ Fremark1100 ขณะที่ไม่มีการผลิต หรือการใช้งานสารละลายเอทิลีนไกลคอล โดยออกแบบให้อุปกรณ์มีขนาดพอดีกับเครื่องจักร มีน้ำหนักเบา สามารถหยิบใช้ได้ง่ายและไม่สิ้นเปลืองพื้นที่ในการจัดเก็บ

3.2.8 การนำสารเอทิลีนไกลคอลใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่

ปัจจุบัน บริษัทกรณีศึกษาใช้สารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ในการเปลี่ยนถ่ายสารละลายเอทิลีนไกลคอลแต่ละครั้ง ปริมาณเฉลี่ย 663.75 กิโลกรัม โดยวิธีการถ่ายสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ใช้แล้วออกจากบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักร และเติมสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ลงไปแทนที่ในปริมาณที่เท่ากัน ซึ่งสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ถูกใช้งานแล้ว มีบางส่วนจะถูกนำไปเติมในระบบหล่อเย็นของโรงงาน สำหรับส่วนที่เหลือจะถูกเททิ้งไป ทำให้เกิดการสูญเสียสารเอทิลีนไกลคอลโดยไร้ประโยชน์

วิธีการแก้ไข คือ หาวิธีการทำสารละลายเอทิลีนไกลคอลให้มีความบริสุทธิ์ และเลือกใช้วิธีการที่เหมาะกับบริษัทกรณีศึกษา ซึ่งจากการสำรวจความพร้อมด้านวัสดุอุปกรณ์และความสามารถในการลงทุนของบริษัทกรณีศึกษา จะได้ว่า วิธีที่เหมาะสำหรับบริษัทกรณีศึกษานี้ คือ กระบวนการระเหยน้ำออกจากสารละลายเอทิลีนไกลคอลใช้แล้ว เนื่องจาก กระบวนการระเหยจะใช้วัสดุอุปกรณ์ที่ไม่ซับซ้อน ด้วยวิธีการที่ทำได้ง่าย การลงทุนต่ำ และได้สารที่มีความบริสุทธิ์ค่อนข้างสูง อีกทั้ง บริษัทยังมีการใช้งานไอน้ำร้อนจากหม้อผลิตไอน้ำ (Boiler) ขนาด 1 ตัน ที่ไม่เต็มประสิทธิภาพการผลิตอีกด้วย จึงสามารถนำไอน้ำจากส่วนนี้มาใช้เป็นพลังงานในการระเหยน้ำออกจากสารละลายเอทิลีนไกลคอลได้

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงทำการทดลองเบื้องต้นในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการทดลองในการเพิ่มปริมาณการระเหย ซึ่งการทดลองเบื้องต้นมีวัตถุประสงค์ เพื่อให้ทราบว่า วิธีการระเหยสามารถใช้ได้จริงกับสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ใช้งานแล้วจากกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งของบริษัทกรณีศึกษา และคุณสมบัติของสารเอทิลีนไกลคอลที่ได้จากการระเหย เช่น สี และกลิ่น ค่าความเป็นกรด - ด่าง ค่าความถ่วงจำเพาะที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ อุณหภูมิจุดหลอมเหลวของสารเอทิลีนไกลคอล มีความแตกต่างกับสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) หรือไม่ ซึ่งผลจากการทดลองเบื้องต้น พบว่า ค่าความเป็นกรด - ด่าง ค่าความถ่วงจำเพาะที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ และอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของสารเอทิลีนไกลคอลทั้ง 2 ชนิด ไม่มีความแตกต่างกัน มีเพียงสีของสารละลายเท่านั้นที่มีความแตกต่างกัน คือ สีของสารเอทิลีนไกลคอลที่ได้จากการระเหยมีสีน้ำตาลอ่อน ส่วนสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ใสไม่มีสี แต่เนื่องจาก สีของสารละลายไม่ได้มีผลต่อคุณสมบัติอื่นๆ ในการทำความเย็นของสารละลายเอทิลีนไกลคอล เพราะฉะนั้น สารเอทิลีนไกลคอลที่ได้จากการ

ระเหย (Reuse Ethylene Glycol) สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในขั้นตอนการขึ้นรูปไอศกรีมแท่งด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งได้จริง

4. การประเมิน และคัดเลือกแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้งานของสารละลายเอทิลีนไกลคอลในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่ง

จากแนวทางแก้ไขปรับปรุงที่ได้นำเสนอให้แก่ผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องของบริษัทกรณีศึกษา (ดังแสดงในหัวข้อ 3.2) ในขั้นตอนนี้จะทำการประเมินและคัดเลือกแนวทางการแก้ไขปรับปรุง โดยการระดมสมองร่วมกันระหว่างผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบด้วย ผู้จัดการโรงงาน และผู้จัดการแผนกผลิต ผู้ช่วยผู้จัดการแผนกผลิต เจ้าหน้าที่แผนกผลิตประจำหน่วยเครื่องจักร และหัวหน้าช่างแผนกวิศวกรรมและผู้วิจัย ซึ่งจะพิจารณาคัดเลือกแนวทางที่เหมาะสำหรับบริษัทกรณีศึกษานี้เท่านั้น และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง ในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งของบริษัท สรุปการคัดเลือกแนวทางการแก้ไขปรับปรุงทั้งหมด แสดงดัง Table 7

Table 7. Evaluation of improvement options

No.	Improvement options	Evaluation results	
		Select	Not select
1	Adjusting the production plan to produce one product type per day		✓
2	Improving the cleaning method for the Fremark1100 machine	✓	
3	Constructing the equipment for protecting water contamination from cleaning the Fremark1100 machine	✓	
4	Improving the defrosting unit of Fremark1100 machine		✓
5	Adjusting the angle of gutter under the direct refrigerant tube above the Fremark1100 machine	✓	
6	Reducing water contamination from melting of ice inside the Fremark1100 machine		✓
7	Protecting moisture in the atmosphere		✓
8	Dewatering used ethylene glycol solution by the evaporation technique	✓	

จาก Table 7 มีแนวทางที่ถูกคัดเลือกจากการประเมินแนวทางร่วมกับผู้มีส่วนร่วมเกี่ยวข้องกับการใช้งานสารเอทิลีนไกลคอลของบริษัทกรณีศึกษา ทั้งหมด 4 แนวทาง ซึ่งสามารถจัดกลุ่มแนวทางได้เป็น 2 กลุ่ม ดังต่อไปนี้

(1) การป้องกัน และลดการปนเปื้อนของน้ำเข้าสู่สารละลายเอทิลีนไกลคอลในระบบทำความเย็นของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ซึ่งประกอบด้วย 3 แนวทาง ได้แก่

ก. การปรับปรุงวิธีการล้างทำความสะอาดเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่างๆ บริเวณรอบเครื่องจักร

ข. การจัดทำอุปกรณ์ป้องกันน้ำขณะล้างทำความสะอาดเครื่องจักร

ค. การปรับปรุงรางรับน้ำเสตนเลสใต้ท่อส่งความเย็นบริเวณเหนือเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ให้มีมุมหรือองศาความลาดเอียงเพิ่มขึ้น

จากการประเมินและคัดเลือกแนวทางแก้ไขปรับปรุงทั้ง 3 แนวทาง โดยพิจารณาจากผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการปนเปื้อนของน้ำ ความสามารถในการแก้ไขปรับปรุง และการลงทุน ซึ่งแนวทางแก้ไขปรับปรุงทั้ง 3 แนวทางนั้น มีความเป็นไปได้ในการปรับปรุง สามารถแก้ไขได้ง่าย มีวิธีการปรับปรุงที่ไม่ซับซ้อน และไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่ง อีกทั้งการลงทุนต่ำ จึงทำให้แนวทางดังกล่าวถูกคัดเลือกให้แก้ไขปรับปรุงเป็นอันดับแรก

(2) การนำสารเอทิลีนไกลคอลใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่โดยกระบวนการระเหย

จากประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (2539) เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม กล่าวว่า คุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม จะต้องได้มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งตามข้อกำหนดต่างๆ ที่กำหนดไว้ เพราะฉะนั้น จากมาตรฐานการควบคุมน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมจึงสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การลดต้นทุนการใช้งานสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่ง ด้วยแนวทางแก้ไขปรับปรุงที่ได้คัดเลือกนี้ กล่าวคือ การนำสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ใช้งานแล้วกลับมาใช้ใหม่ด้วยกระบวนการระเหย

Muhammad และคณะ (2005) ได้ศึกษาการระเหยของน้ำจากสารละลายผสมระหว่างสารเอทิลีนไกลคอลและน้ำ พบว่า อัตราการระเหยของน้ำขึ้นอยู่กับเศษส่วนโมลที่แตกต่างกันของสารละลายผสม และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ทำให้อัตราการระเหยแตกต่างกัน

Jehle และคณะ (1994) อธิบายว่า การนำสารละลายไกลคอลกลับมาใช้ใหม่ มีหลายวิธี เช่น กระบวนการระเหย (Evaporation) กระบวนการแยกสารละลายผ่านเมมเบรน

(Pervaporation) การกรองโดยใช้เยื่อกรองชนิดพิเศษ หรือกระบวนการออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis) และการกลั่น (Distillation) เป็นต้น ซึ่งกระบวนการสำหรับนำสารไกลคอลกลับมาใช้ใหม่ในงานวิจัยนี้ คือ การกลั่นแบบหลายขั้นตอน ที่ความดันบรรยากาศ หรือลดความดัน ในช่วงแรกจะทำให้ปริมาณน้ำในสารละลายลดลง ร้อยละ 60 - 80 ด้วยกระบวนการระเหยแบบฟิล์มบาง (Thin Film Evaporation) จนกระทั่งได้สารไกลคอลที่มีความบริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 99.50 และวัตถุประสงค์โดยรวมของกระบวนการทำสารให้บริสุทธิ์ทั้งหมด คือ เพื่อให้ได้สารไกลคอลที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น หรือมีความบริสุทธิ์สูงขึ้น และน้ำบริสุทธิ์ หรือน้ำทิ้งที่อาจจะมีสารไกลคอลตกค้างอยู่ในปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 0.05 และสามารถปล่อยสู่แหล่งน้ำสาธารณะได้

จากการทดลองระเหยน้ำออกจากสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ใช้งานแล้ว ในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งวัตถุประสงค์ของการทดลอง เพื่อให้ทราบว่า วิธีการระเหย สามารถใช้ได้กับสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ใช้งานแล้วจากกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งของบริษัทกรณีศึกษา และสารเอทิลีนไกลคอลที่ได้จากการระเหย (Reuse Ethylene Glycol) ที่ได้ มีค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายที่ความเข้มข้นต่างๆ ใกล้เคียงกับทฤษฎีหรือไม่ และเวลาที่ใช้ในการระเหยที่อุณหภูมิ 100 และ 110 องศาเซลเซียส มีอัตราการระเหยของน้ำเท่าไร

วิธีการทดลองเป็นดังนี้ คือ โดยเตรียมสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ใช้งานแล้วจำนวน 800 มิลลิลิตร วัดค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเริ่มต้นได้เท่ากับ 1.073 ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส จากนั้น ให้ความร้อนแก่สารละลาย และควบคุมอุณหภูมิการระเหยที่ 100 และ 110 องศาเซลเซียส จดบันทึกเวลาการระเหย และวัดปริมาณสารละลายที่เหลืออยู่ทุกๆ 1 ชั่วโมง ทำการระเหยสารละลาย จนกระทั่งได้สารเอทิลีนไกลคอลที่มีความเข้มข้นสูงเท่ากับสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) จากการวัดค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอลสุดท้ายที่ได้ ทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ผลการทดลองแสดงดัง Table 8

Table 8. Specific gravity of ethylene glycol solution from evaporation (Laboratory)

Temperature (°C)	Specific gravity of ethylene glycol solution at time (min.)						
	0	60	120	180	240	300	360
100	1.073	1.079	1.087	1.094	1.1083	1.1166	1.1166
110	1.073	1.091	1.1083	1.1166	1.1166		

จาก Table 8 พบว่า ในการระเหยน้ำออกจากสารละลายเอทิลีนไกลคอล ปริมาตร 800 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการระเหย 300 นาที และที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการระเหย 180 นาที จึงจะได้สารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 99 หรือในงานวิจัยนี้จะเรียกว่า สารเอทิลีนไกลคอลที่ได้จากการระเหย (Reuse Ethylene Glycol) วัดค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายได้ เท่ากับ 1.1166 (ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส) ค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) เท่ากับ 7.31 อุณหภูมิจุดหลอมเหลว เท่ากับ -15 องศาเซลเซียส สารละลายมีสีเหลืองอ่อน ไม่มีกลิ่น และมีตะกอนเกิดขึ้นเล็กน้อย ส่วนค่าความถ่วงจำเพาะของสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) วัดค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายได้ เท่ากับ 1.1166 (ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส) ค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) เท่ากับ 7.36 อุณหภูมิจุดหลอมเหลว เท่ากับ -13 องศาเซลเซียส ใสไม่มีสี และไม่มีกลิ่น (Figure 15)

Figure 15. The example of reuse ethylene glycol from evaporation and commercial ethylene glycol (Laboratory)

จากคุณสมบัติดังกล่าวระหว่างสารเอทิลีนไกลคอลที่ได้จากการระเหย และสารเอทิลีนไกลคอล บริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) จะเห็นได้ว่า มีความแตกต่างกันด้านลักษณะทางกายภาพ คือ สี และความใส เท่านั้น แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติอื่น ได้แก่ ค่าความถ่วงจำเพาะ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิจุดหลอมเหลว (Melting Point) ของสารเอทิลีนไกลคอล ดังนั้น กระบวนการระเหยสามารถใช้แยกน้ำออกจากสารละลายเอทิลีนไกลคอลได้ และให้สารเอทิลีนไกลคอลที่มีคุณสมบัติไม่แตกต่างจากสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า)

5. การดำเนินการแก้ไขปรับปรุงตามแนวทางที่ได้คัดเลือก

5.1 การป้องกัน และลดการปนเปื้อนของน้ำเข้าสู่ระบบทำความเย็นทางอ้อมของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ประกอบด้วย 3 วิธี ได้แก่

(1) การปรับเปลี่ยนวิธีการล้างทำความสะอาด เครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 และอุปกรณ์ต่างๆ บริเวณรอบเครื่องจักร

เนื่องจาก เครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 มีระบบการทำงานแบบต่อเนื่องและเป็นระบบเปิด ในการล้างทำความสะอาดเครื่องจักร และอุปกรณ์ต่างๆ มีโอกาสปนเปื้อนจากน้ำที่ใช้ล้างทำความสะอาดสูง ก่อนการปรับปรุงนั้น พนักงานผลิตประจำจุดนั้นๆ จะใช้สายยางในการฉีดล้างทำความสะอาดบริเวณต่างๆ ของเครื่องจักร ตามขั้นตอนการล้างทำความสะอาด 4 ขั้นตอน ได้แก่

ก. ล้างด้วยน้ำเปล่า พนักงานผลิตประจำจุดต่างๆ ใช้สายยางฉีดล้างเครื่องจักรและอุปกรณ์ประจำจุดของตัวเองให้ทั่ว

ข. ล้างด้วยน้ำยาทำความสะอาด พนักงานผลิตแต่ละจุดจะตวงสารทำความสะอาด ที่เตรียมไว้ใส่ในถังน้ำ และใช้วิธีการตักราดทำความสะอาดเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่างๆ

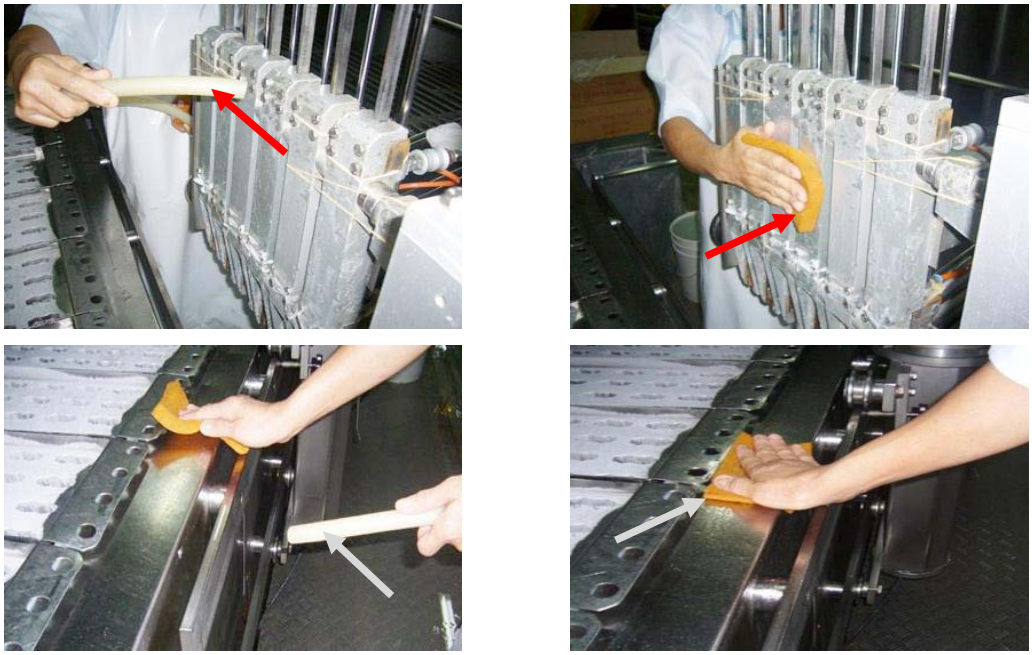
ค. ล้างด้วยน้ำเปล่า พนักงานผลิตประจำจุดต่างๆ ใช้สายยางฉีดล้างเครื่องจักรและอุปกรณ์ประจำจุดของตัวเองให้ทั่ว

ง. ล้างด้วยคลอรีน 200 ppm พนักงานผลิตแต่ละจุดจะตวงคลอรีนที่เตรียมไว้ และใช้วิธีการตักราดเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่างๆ เช่นเดียวกับการล้างน้ำยาทำความสะอาด

จากขั้นตอนการล้างทำความสะอาดทั้ง 4 ขั้นตอน ทำให้เกิดการปนเปื้อนของน้ำเข้าสู่สารละลายเอทิลีนไกลคอลในบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรในปริมาณมาก นอกจากนี้ พนักงานผลิตยังขาดความรู้และความเข้าใจ เกี่ยวกับการปนเปื้อนของน้ำที่มีผลต่อประสิทธิภาพการใช้งานของสารละลายเอทิลีนไกลคอลลดลง

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้ปรับเปลี่ยนวิธีการล้างทำความสะอาดเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 และอุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องจักร เพื่อลดการปนเปื้อนของน้ำเข้าสู่สารละลายในระบบทำความเย็นทางอ้อม โดยการปรับเปลี่ยนวิธีที่ใช้ล้างเครื่องจักรและอุปกรณ์ จากการใช้สายยางฉีดน้ำ เป็นการให้พนักงานใช้ฟองน้ำเช็ดทำความสะอาดเครื่องจักรแทน แสดงดัง Figure 16 นอกจากนี้ ยังมีการจัดฝึกอบรมวิธีการปฏิบัติงาน ให้ความรู้แก่พนักงาน และปลูกจิตสำนึกให้พนักงานตระหนักถึงการใช้งานสารทำความเย็นเอทิลีนไกลคอลให้มีประสิทธิภาพการใช้งานสูงสุด

โดยจัดฝึกอบรม ณ ห้องประชุมของบริษัทกรณีศึกษา เมื่อวันที่ 19 เมษายน พ.ศ. 2553 และเริ่มใช้วิธีการล้างทำความสะอาดแบบปรับปรุงใหม่ ตั้งแต่ วันที่ 20 เมษายน พ.ศ. 2553

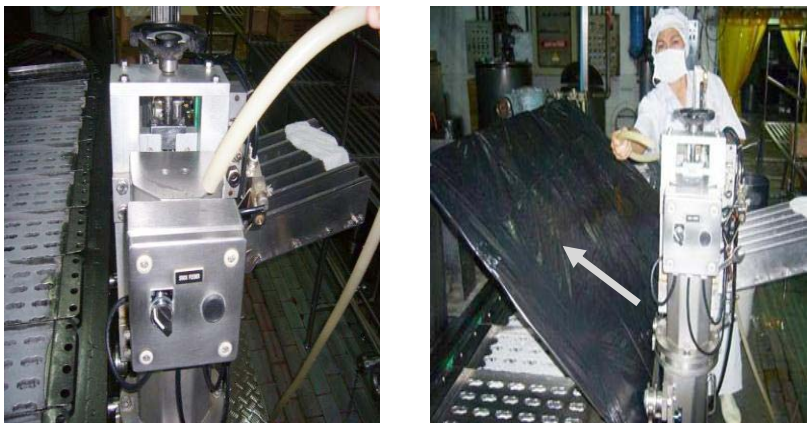


Before After

Figure 16. Cleaning method improvement (the example for cleaning in stick feeding station)

(2) การจัดทำอุปกรณ์ทดลอง สำหรับป้องกันการปนเปื้อนของน้ำ ขณะล้างทำความสะอาด

การใช้อุปกรณ์ป้องกันขณะล้างทำความสะอาดควบคู่กับการปรับเปลี่ยนวิธีการล้างทำความสะอาดเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในบางจุดของเครื่องจักรหรืออุปกรณ์บางชิ้นที่ประกอบติดอยู่กับเครื่องจักร ซึ่งยากต่อการเช็ดทำความสะอาดด้วยฟองน้ำหรือผ้าชุบน้ำ จึงจำเป็นต้องใช้สายยางฉีดล้างทำความสะอาดแบบวิธีเดิม ผู้วิจัยได้จัดทำอุปกรณ์ทดลองสำหรับป้องกันน้ำจากการล้างเครื่องจักรขึ้น 2 แผ่น ซึ่งจะถูกใช้งานโดยพนักงานผลิตประจำสถานีหยอดทุกสถานี และพนักงานผลิตประจำสถานีปักไม้ เพื่อใช้สำหรับจุดที่จำเป็นต้องใช้สายยางในการฉีดล้างทำความสะอาดเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 โดยดำเนินการปรับปรุงด้วยการทำอุปกรณ์ทดลองป้องกันการปนเปื้อนของน้ำเข้าสู่สารละลายเอทิลีนไกลคอลในระบบทำความเย็นขณะล้างทำความสะอาดเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 แสดงดัง Figure 17



Before After

(a) Stick feeding station

Before After

(b) The ice-cream mixed filling station

Figure 17. Equipments for protecting water contamination at stick feeding station (a) and the ice-cream mix filling station (b)

(3) การปรับปรุงอุปกรณ์ในการรองรับน้ำจากรางรับน้ำใต้ท่อส่งความเย็น บริเวณเหนือเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100

ก่อนการปรับปรุง พบว่า รางรับน้ำเสตนเลสใต้ท่อส่งความเย็น บริเวณเหนือเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ถูกติดตั้งอยู่ในแนวระนาบเดียวกับท่อส่งความเย็น ขณะที่ระบบทำความเย็นทางตรงกำลังทำงาน จะมีหยดน้ำเกิดขึ้นบริเวณท่อส่งความเย็น และถูกสะสมอยู่ในรางรับน้ำเสตนเลสเป็นปริมาณมาก ทำให้น้ำปนเปื้อนลงสู่สารละลายเอทิลีนไกลคอลในระบบทำความเย็นของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ได้

ในการแก้ไขปรับปรุง จะดำเนินการปรับปรุงด้วยการเพิ่มความยาวของสกรูยึดรางรับน้ำเสตนเลสกับท่อส่งความเย็น เพื่อให้รางรับน้ำมีมุม หรือองศาความลาดเอียงเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ลดการขังของน้ำภายในรางรับน้ำลง ได้แสดงดัง Figure 18

Figure 18. Adjust the angle of gutter (undering the direct refrigerant tube) above Fremark1100 machine for protecting water contamination

หลังจากทำการแก้ไขปรับปรุงเพื่อป้องกันและลดปริมาณการปนเปื้อนของน้ำจากแหล่งต่างๆ และบันทึกปริมาณน้ำที่ได้หลังทำการปรับปรุงมุม หรือ องศาของรางรองรับน้ำเสตนเลส โดยทำการเก็บข้อมูลเช่นเดียวกับก่อนแก้ไขปรับปรุง สรุปได้ดัง Table 9

Table 9. Average amount of water contamination from the gutter and the cooling coil on center of Fremark1100 machine before and after improvement

No.	Water contamination	Average amount of water (kg. per day)	
		Before	After
1	Dropping from the gutter and melting of the ice at cooling coil	1.1608	0.9214
2	Other source (Show in the appendix)	44.54	41.41
	Total	45.70	42.33

จาก Table 9 สรุปได้ว่า เมื่อมีการแก้ไขปรับปรุงรางรับน้ำเสตนเลส ตามวิธีการที่กำหนด พบว่า ปริมาณน้ำที่ปนเปื้อนเข้าสู่สารละลายเอทิลีนไกลคอลในระบบทำความเย็นทางอ้อมจากการละลายของน้ำแข็งที่เกาะบริเวณคอยล์เย็นกึ่งกลางเครื่องจักร และน้ำที่หยดลงมาจากรางรับน้ำเหนือเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 มีค่าเฉลี่ยลดลงต่อวัน จาก 1.160 กิโลกรัม เป็น 0.9214 กิโลกรัม เนื่องจาก น้ำที่ไหลออกจากรางรับน้ำเสตนเลสมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นกว่าก่อนทำการแก้ไขปรับปรุง

5.2 การนำสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ใช้งานแล้วกลับมาใช้ใหม่ ด้วยกระบวนการระเหย (โดยการเพิ่มปริมาณสารละลายในการทดลองเป็น 300 ลิตร)

5.2.1 การทดลองระเหยน้ำออกจากสารละลายเอทิลีนไกลคอล ปริมาณ 300 ลิตร

จากการออกแบบการทดลอง การระเหยน้ำออกจากสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ใช้งานแล้ว ปริมาณ 300 ลิตรต่อครั้ง โดยทำการระเหยในถังพาสเจอไรซ์ขนาด 300 ลิตร และให้ความร้อนด้วยไอน้ำร้อนจากหม้อต้มไอน้ำ ควบคุมอุณหภูมิของสารละลายเอทิลีนไกลคอลระหว่างกระบวนการระเหยให้อยู่ในช่วง 85 - 95 องศาเซลเซียส (ชุดทดลองการระเหย แสดงดัง Figure 19) วัดค่าความถ่วงจำเพาะเริ่มต้นของสารละลายที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส และวัดปริมาณสารละลายเอทิลีนไกลคอลเริ่มต้น หลังจากนั้น ให้ความร้อนแก่สารละลาย และเปิดใบพัดกวนสารละลายอย่างสม่ำเสมอ จับเวลาเริ่มต้นของกระบวนการระเหย และวัดปริมาณสารละลายที่เหลืออยู่ ความถ่วงจำเพาะของสารละลาย และอุณหภูมิของสารละลายทุกๆ 1 ชั่วโมง พร้อมทั้งจดบันทึกเวลาที่ใช้ในการระเหย กระบวนการระเหยจะดำเนินจนกระทั่งได้สารเอทิลีนไกลคอลที่มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.1166 อ่านค่าที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ด้วยไฮโดรมิเตอร์ สเกล 1.000 - 1.200 จึงหยุดกระบวนการระเหย ซึ่งผลการทดลองการระเหยน้ำออกจากสารละลายเอทิลีนไกลคอลใช้แล้ว แสดงดัง Table 10

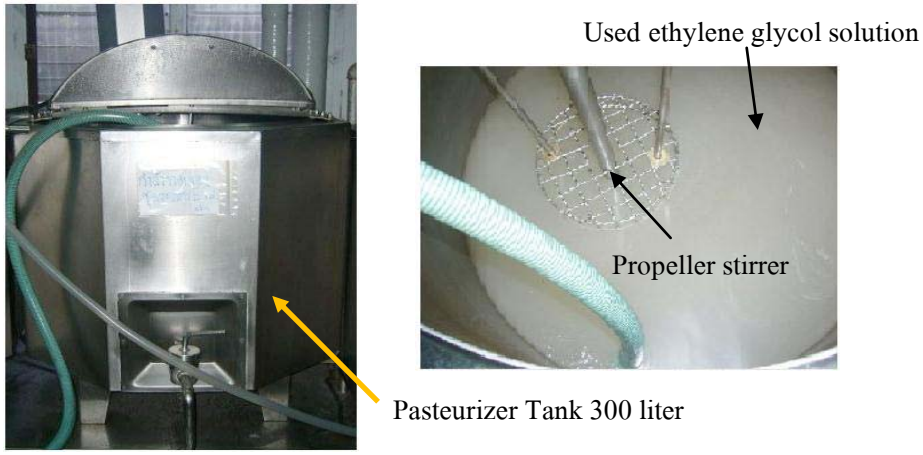


Figure 19. Equipment of pasteurizer tank for evaporation of water from ethylene glycol solution

Table 10. Evaporation rate of water from used ethylene glycol solution

Hours.	Volume of EG solution (liter)		Specific gravity of	Evaporation rate
	Begin	End	EG solution	(liter/hr.)
1	300	290	1.0740	3.17
3	290	276	1.0800	4.76
6	276	262	1.0820	4.76
9	262	247	1.0840	4.76
12	247	238	1.0850	3.17
15	238	228	1.0880	3.17
18	228	219	1.0930	3.17
21	219	209	1.0940	3.17
24	209	201	1.1083	2.76
27	195	189	1.1166	1.89
30	189	188	1.1166	0.45
31	188	187	1.1166	0.33

จาก Table 10 อธิบายได้ว่า ช่วงต้นของกระบวนการระเหย พบว่า อัตราการระเหยของน้ำต่อชั่วโมง เท่ากับ 4.76 ลิตร เป็นเวลานาน 11 ชั่วโมง และค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่วัดค่าด้วยไฮโดรมิเตอร์ สเกล 1.000 - 1.100 เพิ่มขึ้นจาก 1.074 เป็น 1.085 (ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส) และที่เวลาการระเหยเพิ่มมากขึ้น อัตราการระเหยของน้ำจะลดลงจนกระทั่ง ชั่วโมงการระเหยที่ 27 พบว่า ค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่วัดค่าด้วยไฮโดรมิเตอร์ สเกล 1.000 - 1.200 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ได้ค่าเท่ากับ 1.1166 จากนั้นจึงดำเนินการระเหยจนถึงชั่วโมงที่ 31 พบว่า อัตราการระเหยต่ำมาก และค่าความถ่วงจำเพาะที่วัดได้เริ่มคงที่ จึงหยุดกระบวนการระเหย

หลังจากนั้น นำสารเอทิลีนไกลคอลที่ได้จากการระเหย (Reuse Ethylene Glycol) มาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะกับความเข้มข้นของสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ (ร้อยละ 0 - 100 โดยปริมาตร) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) และสารเอทิลีนไกลคอลที่ได้จากการระเหย ดังแสดงใน Figure 20

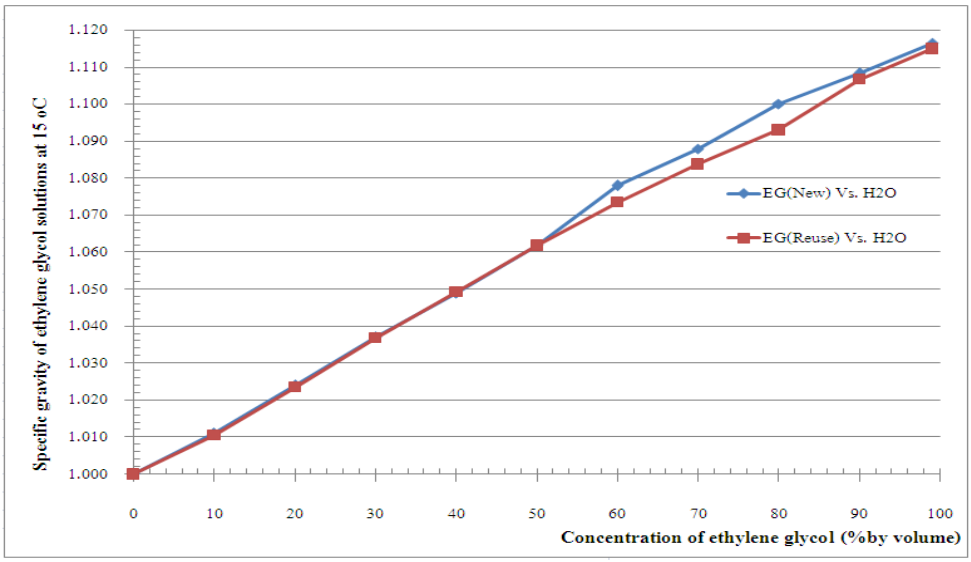


Figure 20. Comparison of specific gravity of the commercial and reused ethylene glycol solutions

จาก Figure 20 พบว่า สารเอทิลีนไกลคอลที่ได้จากการระเหย มีค่าความถ่วงจำเพาะที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ (ร้อยละ 0 - 100 โดยปริมาตร) ไม่แตกต่างกันกับสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า)

ดังนั้น สารเอทิลีนไกลคอลที่ได้จากการระเหย สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ของบริษัทกรณีศึกษาได้ โดยการเติมสารเอทิลีนไกลคอลที่ได้จากการระเหย สามารถใช้ทดแทนการเติมสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ในการเปลี่ยนถ่ายสารละลายเอทิลีนไกลคอลออกจากบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติแต่ละครั้งได้

5.2.2 การคำนวณหาปริมาณความร้อน และต้นทุนที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ใช้งานแล้ว

5.2.2.1 การคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ในกระบวนการระเหยน้ำ

เตรียมสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ใช้งานแล้ว จำนวน 300 ลิตร อุณหภูมิเริ่มต้นของสารละลาย เท่ากับ 25 องศาเซลเซียส วัดค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายด้วยไฮโดรมิเตอร์ สเกล 1.000 - 1.100 (ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส) ได้เท่ากับ 1.074 หลังจากนั้น ให้ความร้อนด้วยไอน้ำร้อนแก่สารละลายจนกระทั่ง น้ำกลายเป็นไอน้ำเดือดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และวัดค่าความถ่วงจำเพาะของสารเอทิลีนไกลคอลด้วยไฮโดรมิเตอร์ สเกล 1.000 - 1.200 ได้เท่ากับ 1.1166 (ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส)

จาก Figure 20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ความเข้มข้นต่างๆ (0 - 100 โดยปริมาตร) พิจารณาที่เส้นกราฟของสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) จะเห็นได้ว่า สารละลายผสมระหว่างน้ำและสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ที่ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.074 (วัดค่าที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส) มีค่าความเข้มข้นของสารเอทิลีนไกลคอลร้อยละ 58 โดยปริมาตร จะได้ว่า ถ้าสารละลายจำนวน 300 ลิตร คิดเป็นน้ำหนัก เท่ากับ 321.91 กิโลกรัม มีสารเอทิลีนไกลคอลอยู่ 174 ลิตร หรือ 186.71 กิโลกรัม และมีน้ำอยู่ 126 ลิตร หรือ 135.20 กิโลกรัม

เพราะฉะนั้น ถ้าต้องการระเหยน้ำออกจากสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ถูกใช้งานแล้วจากกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่ง จำนวน 126 ลิตร หรือ 135.20 กิโลกรัม จากปริมาณสารละลายเอทิลีนไกลคอล 300 ลิตร หรือ 321.91 กิโลกรัม จะต้องใช้ปริมาณความร้อนที่ทำให้น้ำระเหยกลายเป็นไอทั้งหมด เท่ากับ 348,390.12 กิโลจูล (ดังแสดงวิธีการคำนวณใน ภาคผนวก จ.2)

5.2.2.2 การคำนวณต้นทุนที่ใช้ในกระบวนการระเหย

(1) ค่าไฟฟ้าจากมอเตอร์ และค่าจ้างพนักงาน

ค่าไฟฟ้าจากการใช้มอเตอร์ติดกับใบพัดกวนสารละลายเอทิลีนไกลคอลในการระเหย ซึ่งใช้มอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ เปิดใช้งานวันละ 8 ชั่วโมง และอัตราค่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อหน่วย (โรงงานขนาดกลาง) 3 บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง คิดเป็นค่าพลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้เท่ากับ 17.60 กิโลวัตต์-ชั่วโมง คิดเป็นเงินค่าไฟฟ้าจากการใช้มอเตอร์ (8 ชั่วโมงต่อวัน) เท่ากับ 52.80 บาท และอัตราค่าจ้างพนักงาน 1 คนต่อวัน เท่ากับ 200 บาท ดังนั้น รวมต้นทุนค่าไฟฟ้าและค่าจ้างพนักงานในการระเหยคิดเป็นเงิน เท่ากับ 252.80 บาทต่อวัน

เพราะฉะนั้น ในการระเหยน้ำ จำนวน 126 ลิตร ออกจากสารละลายเอทิลีนไกลคอล จำนวน 300 ลิตร เพื่อให้ได้สารเอทิลีนไกลคอลที่ได้จากการระเหยที่มีความเข้มข้นสูงเทียบเท่ากับสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) จำนวน 174 ลิตร จะต้องใช้เวลาในการระเหย 4 วันโดยประมาณ และทำการระเหยวันละ 8 ชั่วโมง คิดเป็นต้นทุนทั้งหมดเท่ากับ 1,011.20 บาท และถ้าต้องการสารเอทิลีนไกลคอลที่ได้จากการระเหย จำนวน 200 ลิตร หรือ 1 ถัง จะต้องใช้ต้นทุนทั้งหมดต่อถัง เท่ากับ 1,162.30 บาท

(2) ค่าไม้ยางพารา (เชื้อเพลิง)

บริษัทกรณีศึกษานี้ใช้ไม้ยางพาราเป็นเชื้อเพลิงในการต้มน้ำของหม้อต้มไอน้ำร้อนขนาด 1 ตัน ผลิตไอน้ำร้อนได้เฉลี่ยวันละ 8,000 กิโลกรัม ใช้งานวันละ 10 ชั่วโมง ต้องใช้ไม้ฟืน 2,909.09 กิโลกรัม และราคาไม้ยางพารา กิโลกรัมละ 1.1 บาท เมื่อต้องการไอน้ำร้อน 135.30 กิโลกรัม ในกระบวนการระเหย จะต้องใช้ไม้ฟืนเฉลี่ย $(2{,}909.09 \times 135.20) \div 8{,}000 = 49.16$ กิโลกรัม คิดเป็นเงิน เท่ากับ $49.16 \times 1.1 = 54.08$ บาทต่อการระเหย 1 ครั้ง ซึ่งจะได้สารเอทิลีนไกลคอลจากกระบวนการระเหย จำนวน 174 ลิตร โดยราคาสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) 1 ลิตร เท่ากับ 73.96 บาท (ข้อมูล ปี พ.ศ.2551) ดังนั้น ในการระเหยน้ำออกจากสารละลายเอทิลีนไกลคอล เพื่อให้ได้สารเอทิลีนไกลคอลจากการระเหย จำนวน 200 ลิตร หรือ 1 ถัง ต้องใช้ต้นทุนเชื้อเพลิง (ไม่ยางพารา) เท่ากับ 0.31 บาทต่อลิตร และต้นทุนเชื้อเพลิงที่ต้องใช้ในการระเหย เพื่อต้องการสารเอทิลีนไกลคอลจากการระเหย 1 ถัง เป็นเงิน $(200 \times 0.31) = 62$ บาท

6. การประเมินผลหลังการแก้ไขปรับปรุงตามแนวทางที่ได้คัดเลือก

การประเมินผลหลังจากการดำเนินงานแก้ไขปรับปรุงตามแนวทางที่ได้คัดเลือก โดยเปรียบเทียบผลระหว่าง ก่อนการปรับปรุง และหลังการปรับปรุง ในด้านต่างๆ ดังนี้

6.1 เวลาการใช้งานของสารละลายเอทิลีนไกลคอล

จากการเปรียบเทียบรอบเวลาการใช้งานของสารละลายเอทิลีนไกลคอลในการทำความเย็น ก่อนและหลังการปรับปรุง พบว่า ที่สภาวะการใช้งานเดียวกัน รอบเวลาการใช้งานจริงของสารละลายเอทิลีนไกลคอลเพิ่มขึ้นจาก 72.89 ชั่วโมง เป็น 78.23 ชั่วโมง แสดงดัง Figure 21 ซึ่งเวลาการใช้งานจริงที่เพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากการแก้ไขปรับปรุงทั้ง 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการป้องกัน และลดการปนเปื้อนของน้ำเข้าสู่สารละลายเอทิลีนไกลคอลในระบบทำความเย็นทางอ้อมของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 โดยการปรับเปลี่ยนวิธีปฏิบัติงานของพนักงานผลิตในการป้องกันการปนเปื้อนของน้ำจากการล้างทำความสะอาด การปรับปรุงอุปกรณ์เพื่อลดการปนเปื้อนจากน้ำเข้าสู่ระบบ และการจัดทำอุปกรณ์เสริมสำหรับป้องกันการปนเปื้อนจากน้ำขณะล้างทำความสะอาดสายการผลิต ซึ่งทั้ง 3 วิธี ในส่วนแรกนี้ พบว่า สามารถลดปริมาณน้ำที่ปนเปื้อนเข้าสู่สารละลายเอทิลีนไกลคอลในบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ได้เฉลี่ยวันละ 3.37 กิโลกรัม คิดเป็นปริมาณน้ำปนเปื้อนต่อรอบการใช้งานสารละลายเอทิลีนไกลคอล ลดลงเฉลี่ย 20.22 กิโลกรัมต่อรอบ และสำหรับส่วนที่สอง คือ การนำสารละลายเอทิลีนไกลคอลใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่โดยกระบวนการระเหย ซึ่งจะส่งผลให้เห็นอย่างชัดเจนในหัวข้อถัดไป มากกว่าการเพิ่มขึ้นของเวลาใช้งานของสารละลายเอทิลีนไกลคอล

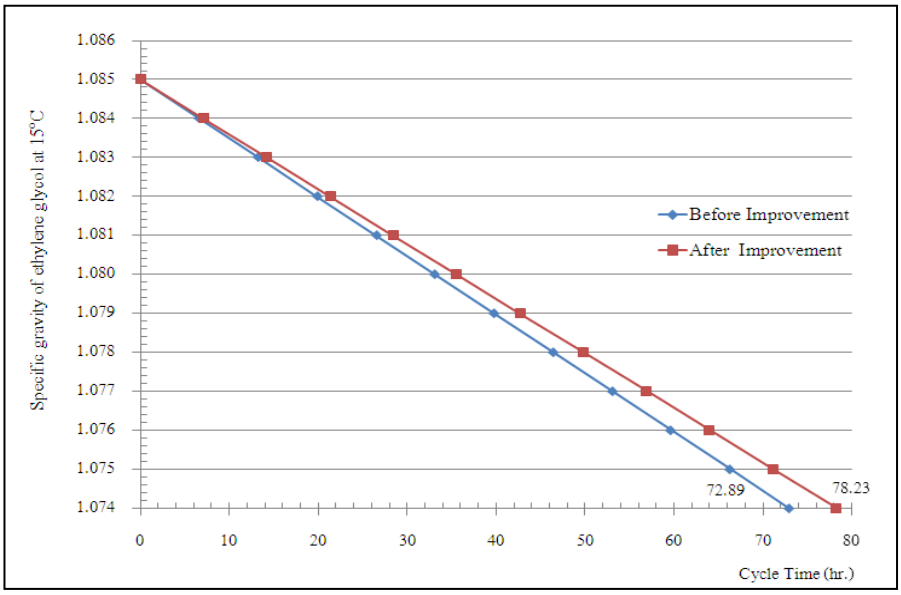


Figure 21. Comparison of the cycle time of the ethylene glycol solution before and after improvement

6.2 ต้นทุนสารเอทิลีนไกลคอล และปริมาณสารเอทิลีนไกลคอลที่ใช้ต่อเดือน

หลังจากนำแนวทางแก้ไขปรับปรุงมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ของบริษัทกรณีศึกษา จะได้ว่า เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนและปริมาณของสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ที่ใช้งานเฉลี่ยต่อเดือนระหว่างก่อนและหลังการปรับปรุง พบว่า ต้นทุนการใช้สารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) เฉลี่ยลดลงจาก 141,705 บาท เป็น 92,388 บาท หรือคิดเป็นร้อยละ 34.80 และปริมาณสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ที่ใช้เฉลี่ยลดลงจาก 10 ถัง เป็น 7 ถัง หรือลดลงคิดเป็นร้อยละ 30 ซึ่งรายละเอียดแสดงใน Table 11 และ Figure 22

Table 11. Comparison of ethylene glycol cost and amount of ethylene glycol before and after improvement (Average per month)

Improvement (Year)	Ethylene glycol cost (Baht)	Amount of EG (Tank)	Percentage (%)
Before (2009)	141,705	10	100.00
After (2010)	92,388	7	65.20
Difference value	49,318	3	34.80

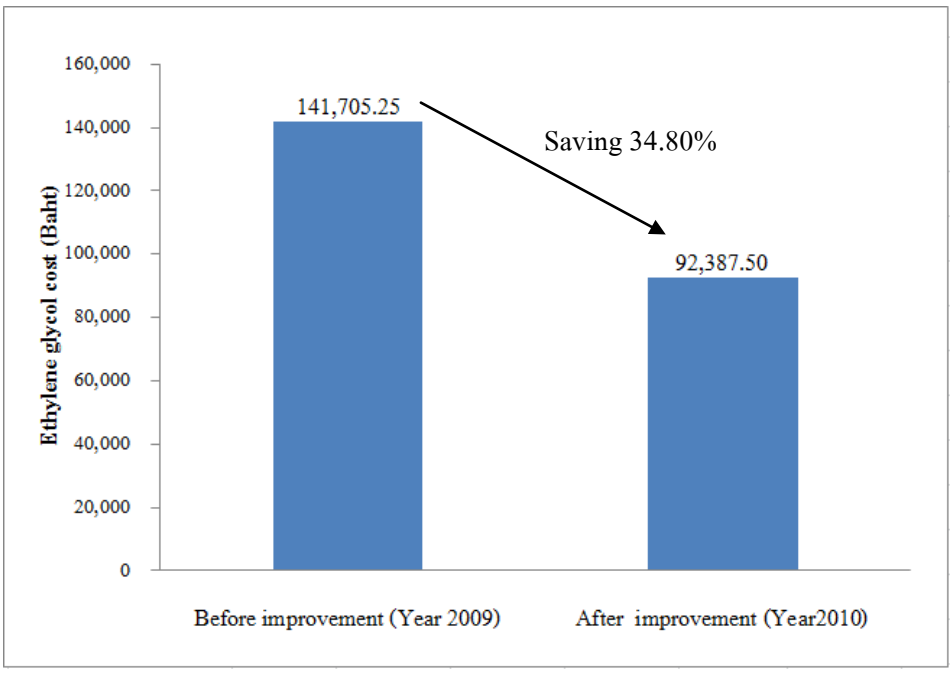


Figure 22. Comparison of ethylene glycol cost before and after improvement

จาก Table 14 พบว่า ปริมาณการใช้สารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ลดลงจำนวน 3 ถัง หรือปริมาณ 600 ลิตร คิดเป็นเงิน 49,318 บาทต่อเดือน แต่เนื่องจากต้นทุนที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ใช้งานแล้ว เพื่อให้ได้สารเอทิลีนไกลคอลที่ได้จากการระเหย จำนวน 200 ลิตร หรือ 1 ถัง จะต้องใช้ต้นทุนทั้งหมด (ไม่รวมต้นทุนด้านการบำรุงรักษาหม้อต้มไอน้ำร้อนและพลังงานความร้อนสูญเสีย) เท่ากับ 1,224.30 บาทต่อถัง เพราะฉะนั้น ต้นทุนที่ใช้ในการระเหยน้ำออก เพื่อให้ได้สารเอทิลีนไกลคอลที่มีความเข้มข้นสูงเทียบเท่ากับสารเอทิลีนไกลคอล บริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) จำนวน 600 ลิตร หรือ 3 ถัง คิดเป็นเงินเท่ากับ $1,224.30 \times 3 = 3,672.90$ บาท

ดังนั้น หลังจากหักลบค่าใช้จ่ายในการระเหยแล้ว จะได้ว่า ผลประหยัดที่ได้จากการปรับปรุงเฉลี่ยต่อเดือน เท่ากับ 49,318 - 3,672.90 = 45,645.10 บาทต่อเดือน หรือคิดเป็นร้อยละ 32.21

บทที่ 4

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

1. บทสรุป

การปรับปรุงประสิทธิภาพด้านการใช้งานของสารละลายเอทิลีนไกลคอลในการเป็นสารทำความเย็นทุติยภูมิหรือสารทำความเย็นขั้นที่ 2 สำหรับขั้นตอนการขึ้นรูปไอศกรีมแท่งด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งของบริษัทกรณีศึกษานี้ ประกอบด้วย การเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับการใช้งานสารละลายเอทิลีนไกลคอล การสังเกตการปฏิบัติงานของพนักงานแผนกผลิตประจำจุดต่างๆ ของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 การวิเคราะห์ปัจจัยต่างๆ ด้วยแผนผังก้างปลา และนำสาเหตุที่ได้มาทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีเคราะห์ทำไม - ทำไม เพื่อคิดค้นหาแนวทางและมาตรการในการแก้ไขปรับปรุงสาเหตุรากเหง้านั้น โดยการเก็บข้อมูลเบื้องต้นทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานของสารละลายเอทิลีนไกลคอล ตั้งแต่เดือนมกราคม ถึง กรกฎาคม พ.ศ. 2552 เพื่อหาสาเหตุที่ทำให้ต้นทุนการใช้สารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งสูง ซึ่งส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตไอศกรีมแท่งของบริษัทกรณีศึกษา

จากการศึกษาพฤติกรรมการใช้งานของสารละลายเอทิลีนไกลคอลเบื้องต้น พบว่าเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่ง โดยส่วนใหญ่มีอายุการใช้งานนาน และขาดการบำรุงรักษาอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องจักรลดลง และส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของสารทำความเย็นที่ใช้ในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ ลักษณะการทำงานของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ซึ่งเป็นเครื่องจักรที่บริษัทกรณีศึกษาใช้สำหรับขึ้นรูปไอศกรีมแท่งนั้น มีการทำงานเป็นแบบต่อเนื่องและเป็นระบบเปิดโล่งด้านบน ทำให้สารละลายเอทิลีนไกลคอลที่บรรจุอยู่ในบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักร สามารถสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมภายนอกบริเวณการผลิตได้โดยตรง และยังเกิดโอกาสในการปนเปื้อนจากน้ำและความชื้นได้ง่ายอีกด้วย เพราะฉะนั้น สาเหตุดังกล่าว จึงเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้สารละลายเอทิลีนไกลคอล เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติบางประการในการทำความเย็น จึงต้องมีการเปลี่ยนถ่ายสารละลายเอทิลีนไกลคอลบ่อยครั้ง โดยเปลี่ยนถ่ายสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ใช้งานแล้วออกจากบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติ และเติมสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ลงไปแทนที่ในปริมาณที่เท่ากัน ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการใช้สารเอทิลีน

ไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) และต้นทุนการผลิตไอศกรีมแท่งของบริษัทกรณีศึกษา อีกทั้ง เวลาในการใช้งานสารละลายเอทิลีนไกลคอลจะลดลงตามปริมาณการปนเปื้อนของน้ำที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

หลังจาก ระบุสาเหตุรากเหง้าและที่มาของสาเหตุนั้นได้แล้ว จึงกำหนดแนวทางในการแก้ไขปรับปรุง และประเมินคัดเลือกแนวทางที่เหมาะสมกับกรณีศึกษานี้ ร่วมกับผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้อง ประกอบด้วย ผู้จัดการโรงงานและผู้จัดการแผนกผลิต ผู้ช่วยผู้จัดการแผนกผลิต เจ้าหน้าที่แผนกผลิตประจำหน่วยเครื่องจักร และหัวหน้าพนักงานแผนกวิศวกรรม ของบริษัท จากการประเมินและคัดเลือกแนวทางในการแก้ไขปรับปรุง โดยพิจารณาจากความสามารถในการนำมาประยุกต์ใช้ได้จริงกับกรณีศึกษานี้ ซึ่งสามารถสรุปแนวทางที่ได้คัดเลือก 2 แนวทาง ได้แก่

(1) การป้องกัน และลดการปนเปื้อนของน้ำเข้าสู่สารละลายเอทิลีนไกลคอลในระบบทำความเย็นของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100

(2) การนำสารละลายเอทิลีนไกลคอลใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่โดยกระบวนการระเหย

จากการปรับปรุงแนวทางการป้องกันและลดการปนเปื้อนของน้ำ โดยการปรับเปลี่ยนวิธีปฏิบัติงานของพนักงานผลิตในการล้างทำความสะอาดเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 การปรับปรุงอุปกรณ์รองรับน้ำเสตนเลส และจัดทำอุปกรณ์ป้องกันการปนเปื้อนจากน้ำขณะล้างทำความสะอาดเครื่องจักร มาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งของกรณีศึกษานี้ พบว่า ปริมาณน้ำที่ปนเปื้อนเข้าสู่สารละลายเอทิลีนไกลคอลในบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 เฉลี่ยต่อวันลดลงจาก 45.70 กิโลกรัม เป็น 42.33 กิโลกรัม หรือลดลงวันละ 3.37 กิโลกรัม และเวลาการใช้งานของสารละลายเอทิลีนไกลคอล เฉลี่ยต่อรอบเพิ่มขึ้นจาก 72.89 ชั่วโมง เป็น 78.23 ชั่วโมง หรือคิดเป็นร้อยละ 7.33 ที่สภาวะการใช้งานเดียวกัน

การใช้กระบวนการระเหยน้ำออกจากสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ใช้งานแล้ว เพื่อต้องการให้ได้สารเอทิลีนไกลคอลที่มีความเข้มข้นสูงเทียบเท่ากับสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) หรือเรียกว่า สารเอทิลีนไกลคอลที่ได้จากการระเหย (Reuse Ethylene Glycol) โดยปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ใช้ในการระเหยน้ำ ปริมาณ 126 ลิตรหรือ 135.20 กิโลกรัม ออกจากสารละลายเอทิลีนไกลคอลใช้แล้ว เท่ากับ 348,390.12 กิโลจูล นอกจากนี้ ต้นทุนค่าไฟฟ้าจากมอเตอร์และค่าจ้างพนักงานที่ใช้ในกระบวนการระเหย เพื่อให้ได้สารเอทิลีนไกลคอลจากการระเหย (Reuse Ethylene Glycol) ปริมาณ 200 ลิตร หรือ 1 ถัง คิดเป็นเงิน 1,224.30 บาท

จากนั้น นำสารเอทิลีนไกลคอลที่ได้จากการระเหย กลับมาใช้งานใหม่ในขั้นตอนการขึ้นรูปไอศกรีมแท่งของกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งของบริษัท โดยใช้สารเอทิลีนไกลคอลที่

ได้จากการระเหยเติมลงในบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ทดแทนสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ที่ต้องใช้เติมสำหรับการเปลี่ยนถ่ายสารละลายในแต่ละครั้ง เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิตไอศกรีมแท่งลง นอกจากนี้ ผลพลอยได้จากการนำสารละลายเอทิลีนไกลคอลใช้แล้วมาระเหยแยกน้ำออกนั้น ถือเป็นการบำบัดน้ำที่มีสารเอทิลีนไกลคอลปนเปื้อนอยู่ในขั้นตอนเดียวกัน หลังจากนั้น นำสารเอทิลีนไกลคอลที่ได้จากการระเหยมาประยุกต์ใช้ในการขึ้นรูปไอศกรีมแท่งด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ต่อไป

ผลจากการป้องกันและลดการปนเปื้อนจากน้ำ และการนำสารเอทิลีนไกลคอลที่ได้จากการระเหย มาใช้ทดแทนสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) เพื่อใช้ในการขึ้นรูปไอศกรีมแท่งของบริษัทกรณีศึกษา พบว่า ปริมาณการใช้สารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) เฉลี่ยต่อเดือนลดลงจาก 10 ถัง หรือ 2,250 กิโลกรัม เป็น 7 ถัง หรือ 1,575 กิโลกรัม หรือลดลงคิดเป็นร้อยละ 30 ต่อเดือน และต้นทุนการใช้สารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) เฉลี่ยต่อเดือนลดลงจาก 141,705 บาท เป็น 92,388 บาท คิดเป็นร้อยละ 34.80 และเมื่อหักลบต้นทุนที่ใช้ในกระบวนการระเหย เพื่อให้ได้สารเอทิลีนไกลคอลจากการระเหย จำนวน 3 ถัง คิดเป็นเงิน 3,672.90 บาท ทำให้ผลประหยัดที่ได้จากการนำสารละลายเอทิลีนไกลคอลใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ด้วยกระบวนการระเหย คิดเป็นเงินเฉลี่ย 45,645.10 บาทต่อเดือน หรือลดลงร้อยละ 32.21

2. ข้อเสนอแนะ

(1) ควรนำแนวทางการแก้ไขปรับปรุงอื่นๆ ที่ไม่ได้คัดเลือกไปประยุกต์ใช้ในโอกาสต่อไป เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานของสารละลายเอทิลีนไกลคอลให้สามารถใช้งานได้นานขึ้น และลดต้นทุนได้มากขึ้นอีกด้วย

(2) ควรนำกระบวนการระเหยน้ำออกจากสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ใช้แล้วไปใช้งานให้เกิดประโยชน์อย่างต่อเนื่อง และจัดทำห้องสำหรับการระเหยน้ำโดยเฉพาะ ซึ่งจะช่วยลดเวลาในการเคลื่อนย้ายสารละลาย และลดความยุ่งยากในการทำงานของพนักงานที่รับผิดชอบ นอกจากนี้ ควรเลือกใช้เครื่องระเหยสำหรับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมจริง เพื่อให้ได้สารเอทิลีนไกลคอลที่มีความบริสุทธิ์มากขึ้น และมีอัตราการระเหยที่คงที่มากยิ่งขึ้น

(3) ควรศึกษาวิธีการนำสารเอทิลีนไกลคอลที่ผ่านการใช้งานแล้วกลับมาใช้ใหม่โดยการทำสารให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีอื่นๆ เช่น กระบวนการเพอเวปพอเรชัน กระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับ เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

เกษมพัฒน์ พานิชลือชาชัย. 2552. เทคนิคการแก้ปัญหาและตัดสินใจ. สถาบันเพิ่มผลผลิตแห่งชาติ. (ออนไลน์). สืบค้นจาก : http://www.thaitrainingzone.com/TrainingDetail.asp?id=180 (13 มีนาคม 2554)

กิติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. 2545. สถิติสำหรับงานวิศวกรรม เล่ม 2 (ประมวลผลด้วย Minitab). พิมพ์ครั้งที่ 5. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). กรุงเทพฯ.

กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. ประกาศฉบับที่ 3. เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม. ราชกิจจานุเบกษา. เล่มที่ 113 ตอนที่ 13ง.

กระทรวงสาธารณสุข. 2544. ประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 222) พ.ศ. 2544 เรื่องไอศกรีม. ราชกิจจานุเบกษาฉบับประกาศทั่วไป เล่มที่ 118 ตอนพิเศษ 70ง. (ออนไลน์). สืบค้นจาก : http://law.longdo.com/law/686/sub45870 (10 กันยายน 2551)

กรมควบคุมมลพิษ. 2544. เอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์ (MSDS), ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์. (ออนไลน์). สืบค้นจาก : http://msds.pcd.go.th/name.asp (25 พฤศจิกายน 2551)

กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน. 2546. การประหยัดพลังงานในระบบทำความเย็น. คู่มือการใช้เชื้อเพลิงอย่างมีประสิทธิภาพหมายเลข 10. กระทรวงพลังงาน.

จุฑาทิพย์ ลีนานุนารถ. 2546. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (ออนไลน์). สืบค้นจาก : http://www.icecreamfanclub.com/index.php?name=News&file=article&sid=4 (10 กันยายน 2551)

จุไรวัลย์ รัตนะพิสิฐ. 2546. การถ่ายโอนมวลและหลักปฏิบัติการเฉพาะหน่วยพื้นฐาน. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สงขลา.

ชูชัย ต. ศิริวัฒนา. 2547. การทำความเย็นและการปรับอากาศ. พิมพ์ครั้งที่ 4. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). กรุงเทพฯ.

พิชัย กฤชไมตรี. 2551. ระบบทำความเย็นแบบดูดซึม อดีต ปัจจุบัน และอนาคต. บทความวิชาการสมาคมวิศวกรรมปรับอากาศ. ฉบับที่ 27, หน้า 18-23.

รัชต์วรรณ กาญจนปัญญาคม. 2550. การศึกษางานอุตสาหกรรม. สำนักพิมพ์ท้อป จำกัด, กรุงเทพฯ.

วิจิตร ตัณฑสุทธิ์, วันชัย ริจิรวนิช, จรูญ มหิทธาฟองกุล และชูเวช ชาญสง่าเวช. 2537. การศึกษาการทำงาน. พิมพ์ครั้งที่ 4. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วีรศักดิ์ บุญทน. 2550. การทำความเย็น. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.

วันรัตน์ จันทกิจ. 2547. 17 เครื่องมือนักคิด. สถาบันเพิ่มผลผลิตแห่งชาติ. กรุงเทพฯ.

ศิรินันต์ สุวรรณโมลี. 2547. การวัดความหนาแน่นของของเหลวด้วย Hydrometer. Lab Today วารสารเพื่อห้องปฏิบัติการ (ออนไลน์). สืบค้นจาก: http://www.thaiscience.com/lab_vol/p27/Hydrometer.asp (25 พฤศจิกายน 2551)

สถาบันเพิ่มผลผลิตแห่งชาติ. 2550. เครื่องมือคุณภาพ 7 ชนิด (7QC Tools). (ออนไลน์). สืบค้นจาก : http://youth.ftpi.or.th/index.php?option=com_content&task=view&id=35&Itemid=42 (5 พฤษภาคม 2551)

สมชัย อัครทิวา. 2549. แบบฝึกหัดการวิเคราะห์ Why-Why เจาะลึกเพื่อเอาชนะอย่างมุ่งมั่น. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). (ออนไลน์). สืบค้นจาก : http://leanmanufacturing-tawatchai.blogspot.com/2009/12/why-why-analysis-5-gen.html (5 พฤษภาคม 2551)

สมภพ ปัญญาสมพรรค์, ชัยณุกุล ทาแกง, เชิดพงศ์ องอาจ, ประทีป ศุภมงคล และพัสวี โฉมอินทรีย์. 2551. บทเรียนจำลองสถานการณ์ออนไลน์เรื่องการทำความเย็น. ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพฯ. (ออนไลน์). สืบค้นจาก : http://mte.kmutt.ac.th/mte_learning

/Refrigeration/Website/units.htm (20 มิถุนายน 2552)

สมศักดิ์ สุโมตยกุล. 2542. เครื่องทำความเย็นและเครื่องปรับอากาศ. ซีเอ็ดยูเคชั่น. กรุงเทพฯ.

สมหวัง วิทยาปัญญานนท์. 2549. การวิเคราะห์ตามหลักทำไม (Why -Why Analysis). (ออนไลน์). สืบค้นจาก : http://www.budmgt.com/topics/top01/why-why-analysis.html

สุรพล พฤกพานิช. 2531. การทำความเย็นและการปรับอากาศ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

อัครเดช สินธุภัค. 2532. การทำความเย็น. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ.

อรพิน ชัยประสพ. 2544. เทคโนโลยีผลิตภัณฑ์นม. ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง. กรุงเทพฯ.

อรพิน ชัยประสพ. 2548. การผลิตไอศกรีมชนิดเนื้อนุ่มรูปลักษณ์แบบไทย. รายงานการวิจัย ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง. กรุงเทพฯ.

Adapa, S., Dingeldein, H. and Schmidt, K. A. 2000. Rheological properties of ice cream mixes and frozen ice creams. Journal of Dairy Science. 83: 2224-2229.

American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE), 1998. Handbook-Refrigeration, Atlanta, Chapter4: Secondary Coolants in Refrigeration Systems.1-6

American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE), 2009. ASHRAE Handbook - Fundamentals (I-P Edition).

Bear, R. J., Wolkow, M.D., and Kasperson, K.M. 1997. Effect of emulsifiers on the body and texture of low fat ice cream. Journal of Dairy Science. 80: 3123-3132.

Bolliger, S., Goff, H. D., and Tharp, B.W. 2000. Correlation between colloidal properties of ice cream mixes and ice cream. Journal of International Dairy. 10: 303-309.

Bylund, G. 1995. Dairy Processing Handbook. Tetra pak processing systems : Ethylene glycol heat-transfer fluid. Lund, Sweden.

Fellows, P. 2000. Evaporation. In Food Processing Technology : Principles and Practices, 2nd Ed., pp. 250–251, Woodhead Publishing Limited, Boca Raton.

Foust, A. S., Wenzel, L. A., Clump, C. W., Maus, L., and Anderson, L. B. 1980. Principles of Unit Operations, 2nd Ed. John Wiley & Sons : New York.

Gillbert R. Malone. 2004. Buffered Heat transfer Fluid For Secondary Refrigeration Systems Comprising a Formate Salt. The Lubrizol Corpation. Wickliffe, OH (US).

Hagiwara, T. and Hartel, R. W. 1996. Effect of sweetener, stabilizer, and storage temperature on ice recrystallization in ice cream. Journal of Dairy Science. 79: 735-744.

Hoechst, A.G., 1994. Glykole im Kreislauf, Hoechst High Chemistry. Magazine. Frankfurt, Germany, 15: 30-33.

International Programme on Chemical Safety. 2005. Ethylene Glycol. IPSC, Geneva, World Health Organization (Online). Available: http://www.who.int/ipcs/en/ (19 October 2008)

Jehle, W., Staneff, Th., Wagner, B., Steinwandel D. G. 1994. Applied research, Chemical engineering and process development, D-88039. Friedrichshafen, Germany.

John A. Behr, John M. Roche, Doron Shapiro. 1998. Fluid Defrost System and Method for Secondary Refrigeration Systems. Hussmann Corporation, Bridgeton.

Koxholt, M. M. R., Eisenmann, B. and Hinrichst, J. 2001. Effect of the fat globule size on the meltdown of ice cream. Journal of Dairy Science. 84:31-37.

Marshall, R.T., and Arbuckle, W.S. 1996. Ice cream. 5th Ed. New York : Chapman Hall.

Marshall, R.T., Goff, H.D., and Hartel, R.W. 2003. Ice cream. 6th Ed. New York : Chapman Hall.

Melinder, Å. 2006. Update on secondary refrigerants for indirect systems. 7th Gustav Lorenzen Conference on Natural Working Fluids, IIF/IIR, Trondheim.

Melinder, Å. 2007. Thermophysical properties of aqueous solutions used as secondary working fluids, Doctoral Thesis, KTH, Stockholm.

Melinder, Å. 2010. Handbook on indirect refrigeration and heat pump systems. Dept. of Energy Technology. KTH. Sweden.

Miller-Livney, T. and Hartel, R.W. 1997. Ice recrystallization in ice cream: interaction between sweeteners and stabilizers. Journal of Dairy Science. 80: 447-456.

Muhammad, R., Yoshikiyo, M. and Osamu, S. 2005. Evaporation from water-ethylene glycol liquid mixture. American Chemical Society. 21(16), 7308-7310.

North Dakota Department of Health. 2009. Management of used antifreeze (Online). Available: http://www.ndhealth.gov/wm (23 January 2010)

Perry, H. and Green, W. 1973. Chemical Engineering Handbooks. McGraw-Hill, New York, U.S.A., pp.22-67.

Rincon, C., Ortiz D. Z., and Mengual, J.I. 1999. Separation of water and glycols by direct contact membrane distillation. Journal of Membrane Science. 158, 155-165.

Robert, C. 1972. Handbook of Chemistry and Physics, 53rd Ed., CRC Press, OH, USA.

Robert, D. and Pharm, D. 2002. Treatment of ethylene glycol poisoning. American Family Physician. 66(5), 807-812.

Sassi, U. 1998. Caracteristiche dei Fluidi Secondari per Basse Temperature. Zero Setto Zero Magazine, October, Italy.

Singh, S.K. 2009. Density, Viscosity and pH Measurements. Industrial Instrumentation and Control. 3rd Ed., McGraw-Hill Book Company, New Delhi. pp. 265-268

Texas Natural Resource Conservation Commission. 1997. Used Antifreeze (Used Coolant). TNRCC, Regulatory Guidance. PO Box 13087, Austin, Texas.

Zafer, U.M., MCIBSE, MASHRAE, and M. Inst. R. 2003. Secondary Refrigeration European Experiences. ASHRAE Winter Meeting, Chicago, U.S.A.

ภาคผนวก ก
ตัวอย่างการคำนวณ

ก1. ตัวอย่างการเตรียมสารผสมระหว่างสารเอทิลีนไกลคอลกับน้ำ

ต้องการเตรียมสารละลายเอทิลีนไกลคอล ($C_2H_6O_2$) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 95 โดยปริมาตร จำนวน 500 cm^3 จากสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 โดยปริมาตร

ตัวอย่างการคำนวณ

สารละลายเอทิลีนไกลคอล ($C_2H_6O_2$) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 95 โดยปริมาตร หมายถึง สารละลาย 100 cm^3 มีองค์ประกอบของสารเอทิลีนไกลคอล 95 cm^3 และน้ำ 5 cm^3

ถ้าต้องการเตรียมสารละลายเอทิลีนไกลคอลให้มีปริมาตร 500 cm^3 แสดงว่า

$$\text{ต้องใช้ สารเอทิลีนไกลคอล } (C_2H_6O_2) \text{ เข้มข้น} = \frac{95\times500}{100} = 475 \ cm^3$$

$$\text{และน้ำกลั่น } (H_2O) = \frac{5\times500}{100} = 25 \ cm^3$$

เนื่องจาก สารเอทิลีนไกลคอล ($C_2H_6O_2$) มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 โดยปริมาตร หมายความว่า

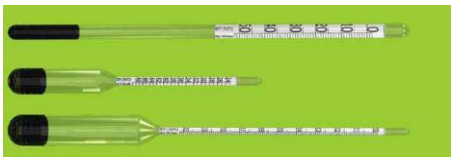
สารละลายเอทิลีนไกลคอลปริมาตร 100 cm^3 มีสารเอทิลีนไกลคอล 99.9 cm^3
ถ้าต้องการสารละลายเอทิลีนไกลคอล 500 cm^3 ต้องใช้สารเอทิลีนไกลคอล 475 cm^3
และน้ำกลั่น เท่ากับ 25 cm^3

ภาคผนวก ข
การตรวจสอบค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายด้วยไฮโดรมิเตอร์

ข1. การวัดค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายด้วยไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer)

ศิรินันต์ สุวรรณโมลี (2547) กล่าวว่า ไฮโดรมิเตอร์ เป็นอุปกรณ์วัดความหนาแน่นของของเหลว ที่มีลักษณะเป็นกระเปาะกลวงยาว ปิดทุกด้าน ส่วนปลายด้านล่างมีน้ำหนักถ่วงไว้ เพื่อให้ลอยตั้งตรง ด้านบนมีลักษณะเป็นหลอดยาวแคบๆ มีขีดบอกระดับที่จม หลักการของไฮโดรมิเตอร์มีอยู่ว่า ระดับความลึกที่จมจะแปรผกผันกับความหนาแน่นของของเหลว อุปกรณ์นี้จึงสามารถใช้วัดความหนาแน่นของของเหลวได้ โดยการเทียบค่าการจมในของเหลวที่ทราบความหนาแน่นแล้วอ่านค่าที่ได้เปรียบเทียบกับค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำที่อุณหภูมิมาตรฐาน เช่น หากเราใช้ไฮโดรมิเตอร์ที่เป็นบูเม่สเกล (Baume') ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำที่อุณหภูมิ 15.56 องศาเซลเซียส เป็น 1.000 ถ้าของเหลวชนิดใดมีความหนาแน่นมากกว่า “น้ำที่อุณหภูมิ 15.56 องศาเซลเซียส” ความถ่วงจำเพาะที่วัดได้ก็จะมากกว่า 1.000 และถ้าของเหลวชนิดใดมีความหนาแน่นน้อยกว่า “น้ำที่อุณหภูมิ 15.56 องศาเซลเซียส” ก็จะวัดค่าความถ่วงจำเพาะได้น้อยกว่า 1.000 ส่วนประกอบของไฮโดรมิเตอร์ ส่วนมากมักทำจากแก้วที่ถ่วงด้วยตะกั่ว วัสดุตะกั่วที่เห็นอยู่คือ ขี้ผึ้ง ส่วนประกอบของไฮโดรมิเตอร์ ประกอบด้วย (ภาพที่ ข1)

- ก้าน (Stem) เป็นส่วนที่ใช้จับเมื่อจุ่มไฮโดรมิเตอร์ลงไปในสารละลายตัวอย่าง
- สเกล (Scale) เป็นส่วนที่บอกค่าความหนาแน่น ความถ่วงจำเพาะ หรือร้อยละของสาร



ภาพที่ ข1. Baume Hydrometer
ที่มา : Stevenson Reeves Ltd (2006)

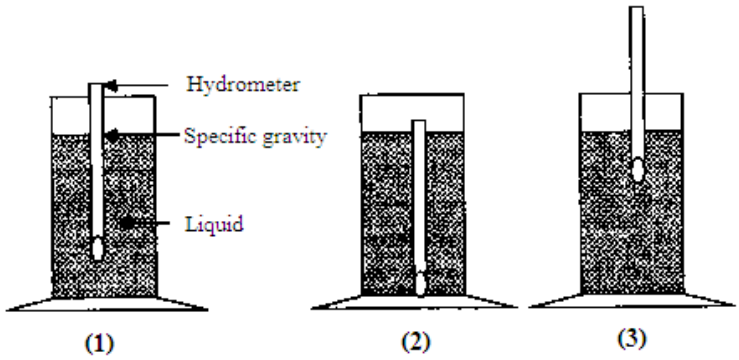
ไฮโดรมิเตอร์แบบ Baume' Scale สเกลนี้ได้รับการสร้างขึ้นในปี 1768 โดย Antoine Baume นักเคมีชาวฝรั่งเศส สเกลชนิดนี้ได้รับการใช้งานอย่างกว้างขวาง เพราะมีการแสดงค่าของความถ่วงจำเพาะเป็นสเกลตัวเลขที่อ่านได้ง่าย สเกลนี้จะวัดที่ได้ค่าเป็นองศาบูเม่ (Degrees Baume) มีสัญลักษณ์เป็น ^{o}Be หรือ ^{o}B สเกลของไฮโดรมิเตอร์แต่ละชนิดจะต่างกันไปตามช่วงที่ใช้วัดความหนาแน่น ศิรินันต์ สุวรรณโมลี (2547) ได้กล่าวไว้ 2 แบบ ดังนี้

(1) แบบที่ใช้วัดของเหลวที่มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ เช่น น้ำเชื่อม โดยเทียบมาตรฐานที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส ระดับในน้ำบริสุทธิ์ไฮโดรมิเตอร์จะลอยตัดกับผิวหน้าของน้ำที่เลข 0 ซึ่งเป็นระดับบนสุดของสเกล และเมื่ออยู่ในสารละลายที่มีเกลือ 15 ส่วนต่อน้ำหนักของ

น้ำไฮโดรมิเตอร์จะลอยอยู่ในจุดหนึ่ง จุดนี้จะเป็นขีดแบ่งช่วงของไฮโดรมิเตอร์ทั้งหมด 15 ช่วง ระหว่างแต่ละช่วงจะเป็นถูกแบ่งเป็นช่วงย่อยอีก 0-15 จุด

(2) แบบที่ใช้วัดของเหลวที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ เช่น แอลกอฮอล์ ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส ระดับที่ไฮโดรมิเตอร์ลอยตัดกับผิวน้ำจะอยู่ที่ 0 ซึ่งเป็นระดับล่างสุดของสเกล และเมื่ออยู่ในสารละลายเกลือ 10 ส่วนในน้ำ 90 ส่วนต่อน้ำหนัก ระดับการจมจะอยู่ที่ขีด 10 ของไฮโดรมิเตอร์ สเกลชนิดนี้จึงมีขีดพักแบ่งเป็น 1-10 ห่างกันระหว่างขีด 0-10 หน่วยของสเกล

ศิรินันต์ สุวรรณโมลี (2547) ได้อธิบายการใช้งานไฮโดรมิเตอร์ไว้ว่า จุ่มไฮโดรมิเตอร์ลงในของเหลวที่ต้องการวัดค่าความหนาแน่น ปล่อยให้ไฮโดรมิเตอร์จมลงในของเหลวจนกระทั่งหยุดนิ่ง จึงอ่านค่าความหนาแน่นจากระดับตัวเลขบนแท่งไฮโดรมิเตอร์บริเวณผิวของของเหลว ดังแสดงในภาพที่ ข2(1) กรณีที่แท่งไฮโดรมิเตอร์จมทั้งหมด ใน ภาพที่ ข2(2) แสดงว่าต้องใช้ไฮโดรมิเตอร์ใหม่ที่มีระดับค่าการวัดความหนาแน่นต่ำกว่าเดิม เนื่องจาก ของเหลวมีค่าความหนาแน่นต่ำกว่าระดับความหนาแน่นของไฮโดรมิเตอร์ที่ใช้อยู่ ในทางตรงข้าม กรณีที่ไฮโดรมิเตอร์ลอยอยู่เหนือของเหลว หรือจมเพียงเล็กน้อยไม่อยู่ในระดับ ที่จะอ่านค่าความหนาแน่นได้ แสดงในภาพที่ ข2(3) หมายถึง ค่าความหนาแน่นของของเหลวสูงกว่าที่จะใช้ไฮโดรมิเตอร์เครื่องดังกล่าววัด หรืออาจจะ หมายถึง ของเหลวมีความหนืดสูงแรงตึงผิวสูง ไฮโดรมิเตอร์จึงไม่สามารถจมตัวลงได้



ภาพที่ ข2. Specific gravity hydrometer measurement

ที่มา : ภาควิชาวิศวกรรมเซรามิกส์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (2549)

การอ่านค่าความถ่วงจำเพาะบนสเกลของไฮโดรมิเตอร์ ถ้าลอยไฮโดรมิเตอร์ในน้ำบริสุทธิ์แล้วอ่านค่าสเกลความถ่วงจำเพาะ สเกลของไฮโดรมิเตอรจะตัดกับผิวหน้าของเหลวที่ 1.000 ซึ่งเป็นด้านบนสุดของสเกล ไฮโดรมิเตอร์ส่วนใหญ่จะตั้งค่าเทียบมาตรฐานไว้ที่

15.56 องศาเซลเซียส ดังนั้น ถ้าน้ำอุ่น หรือเย็นเกินไปค่าที่อ่านได้ก็จะเปลี่ยน หากเติมน้ำตาลลงไปในน้ำ หรือน้ำผลไม้แล้วใช้ไฮโดรมิเตอร์จุ่มลงไป จะพบว่าไฮโดรมิเตอร์ลอยสูงขึ้น เพราะของเหลวในเวลานี้มีน้ำหนักมากกว่าน้ำในตอนแรก เช่น ถ้ามีน้ำตาล 2 ปอนด์ที่ละลายน้ำได้หมด ในน้ำ 1 แกลลอน จะได้อ่านความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.068 โดยสเกลความถ่วงจำเพาะลดลงจาก 1.000 ไปอยู่ระหว่าง 60 ถึง 70 และขีดบนสเกลแต่ละขีดจะมีค่าเท่ากับ 0.002 ดังนั้น 4 ขีดก็จะมีค่าเป็น 0.008 ค่าที่อ่านได้จึงมีค่าเป็น 1.068 (ศิรินันต์ สุวรรณโมลี, 2547)

ภาคผนวก ค
วิธีการเตรียมสารละลายเอทิลีนไกลคอล
สำหรับใช้งานในเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100

ค1. การเตรียมสารละลายเอทิลีนไกลคอล สำหรับใช้งานในเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ของบริษัทกรณีศึกษา

อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำและสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ที่บริษัทกรณีศึกษากำหนดขึ้นจากประสบการณ์ในการใช้งาน คือ ปริมาณน้ำต่อสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) (40 : 60 โดยปริมาตร) โดยมีรายละเอียดการเตรียมสารละลายเอทิลีนไกลคอล และวิธีการวัดค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายด้วยไฮโดรมิเตอร์ดังต่อไปนี้

1. การเตรียมสารละลายเอทิลีนไกลคอล

การเตรียมสารละลายเอทิลีนไกลคอลสำหรับใช้งานในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งของบริษัทกรณีศึกษา แบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

1.1 วิธีการเตรียมสารละลายเอทิลีนไกลคอลใหม่ทั้งระบบ ในบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 (ขนาด 2,800 ลิตร)

การเตรียมสารละลายเอทิลีนไกลคอลวิธีนี้ ใช้ในกรณีที่เริ่มต้นการใช้งานเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 เป็นครั้งแรก หรือสารละลายเอทิลีนไกลคอลนั้นถูกใช้งานมาเป็นเวลาประมาณ 6 เดือน และจะมีการเปลี่ยนถ่ายสารละลายเอทิลีนไกลคอลทั้งหมด ออกจากบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักร มีขั้นตอนการเตรียม ดังต่อไปนี้

(1) ล้างทำความสะอาดภายในบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 เพื่อชะล้างเอาน้ำแข็ง และสิ่งสกปรกออกให้หมด จากนั้น เติมน้ำสะอาดลงไปในบ่อจนเต็ม และเปิดสวิทช์เครื่องจักรให้ทำงานเป็นเวลาประมาณ 30 นาที เพื่อให้น้ำหมุนเวียนอยู่ภายในระบบ และทำความสะอาดได้อย่างทั่วถึง พร้อมทั้งใช้ตะแกรงสำหรับกรองสิ่งสกปรกออกจากบ่อน้ำเกลือด้วย

(2) เมื่อเครื่องจักรทำงานจนครบ 30 นาที เรียบร้อยแล้ว ให้ปิดสวิทช์เครื่องจักร Fremark1100 และเปิดวาล์วบริเวณใต้เครื่องจักร เพื่อปล่อยน้ำออกจากบ่อน้ำเกลือจนหมด จากนั้นปิดวาล์วและเติมน้ำลงไปในบ่อน้ำเกลือใหม่ เพื่อทำความสะอาดซ้ำอีกครั้งจนกว่าจะสะอาด

(3) เมื่อเตรียมบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรเรียบร้อยแล้ว ให้เติมน้ำสะอาดและสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 โดยปริมาตร (ทางการค้า) ในอัตราส่วน 40 : 60 (การคำนวณใน ภาคผนวก ก) ลงในบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักร โดยเติมส่วนผสมทั้ง 2 อย่าง พร้อมกัน และเติมในขณะที่เครื่องจักรกำลังทำงานอยู่ เพื่อให้ส่วนผสมเข้ากันได้ดี และป้องกันการแข็งตัวของน้ำ เมื่อ

เติมส่วนผสมครบตามปริมาณที่กำหนดแล้ว ให้เครื่องจักรผสมสารละลายให้เข้ากัน เป็นเวลาอย่างน้อย 15 นาที

(4) ตวงสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ผสมเข้ากันแล้ว จากบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติ มาวัดค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายด้วยไฮโดรมิเตอร์ สเกล 1.000 - 1.100 (วัดที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส) และค่าความถ่วงจำเพาะเริ่มต้นที่อ่านได้จากไฮโดรมิเตอร์ควรวัดค่าได้เท่ากับ 1.085± 0.002 หากไม่ได้ตามกำหนดให้เติมสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) เพิ่มครั้งละ 50 ลิตร จนได้ค่าความถ่วงจำเพาะเริ่มต้นตามที่กำหนดแล้วจดบันทึกข้อมูล

(5) หลังจากนั้น เปิดระบบทำความเย็น และเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ให้ทำงานไว้ จนกว่าอุณหภูมิของสารละลายเอทิลีนไกลคอลภายในบ่อน้ำเกลือจะลดลงถึง -40 องศาเซลเซียส จึงหยุดการทำงานของเครื่องจักร และระบบทำความเย็น

1.2 วิธีการเตรียมสารละลายเอทิลีนไกลคอลบางส่วน

การเตรียมสารละลายเอทิลีนไกลคอลวิธีนี้ จะใช้ในกรณีที่สารละลายเอทิลีนไกลคอลในบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 มีคุณสมบัติไม่เป็นไปตามข้อกำหนด ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น คือ วัดค่าความถ่วงจำเพาะได้เท่ากับ 1.074 ± 0.002 (ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส) นับว่าถึงจุดเปลี่ยนถ่ายสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ใช้แล้วออกจากบ่อน้ำเกลือของระบบ และเติมสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ลงไปแทนที่ หรือเรียกว่าสารละลายเอทิลีนไกลคอลถูกหมุนเวียนอยู่ในบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ครบ 1 รอบ หรือ 1 วัฏจักร จำเป็นต้องมีการเปลี่ยนถ่ายสารละลายบางส่วน เพื่อเพิ่มความเข้มข้นและค่าความถ่วงจำเพาะให้กับสารละลายเอทิลีนไกลคอลในระบบ ซึ่งมีขั้นตอนการเตรียมสารละลาย ดังนี้

(1) ตวงสารละลายเอทิลีนไกลคอล จากบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 มาปริมาณ 1,000 มิลลิลิตร ใส่ในกระบอกตวง และวัดค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอลด้วยไฮโดรมิเตอร์ (อ่านค่าที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส) เมื่อวัดค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอลได้เท่ากับ 1.074 ± 0.002 หลังจากผลิตไอศกรีมแท่งของรอบนั้นๆ เสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงจะเปลี่ยนถ่ายสารละลายออกจากบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักร

(2) พนักงานแผนกวิศวกรรมเปิดวาล์วบริเวณใต้เครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 เพื่อถ่ายสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ถูกใช้งานแล้วออกจากบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักร ใส่ในภาชนะเสตนเลสที่เตรียมไว้ ปริมาณ 600 ลิตร หรือ 675 กิโลกรัม เมื่อถ่ายสารละลายออกครบตามปริมาณที่ต้องการแล้ว ให้พนักงานแผนกวิศวกรรมปิดวาล์วดังกล่าว และ

เติมสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) โดยใช้ชุดปั๊มดูดสารจากถังเข้าสู่บ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรปริมาณ 600 ลิตร เช่นเดียวกัน และในขณะที่กำลังเปลี่ยนถ่ายสารละลายเอทิลีนไกลคอลออกจากระบบทำความเย็นนั้น เครื่องจักรต้องหยุดทำงาน

(3) เมื่อเปลี่ยนถ่ายสารละลายเรียบร้อยแล้ว พนักงานแผนกวิศวกรรมจะเปิดเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 เป็นเวลาอย่างน้อย 15 นาที เพื่อคนผสมสารละลายเอทิลีนไกลคอลทั้งที่ใช้งานแล้ว และสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ที่เติมลงไปใหม่ให้เข้ากันในบ่อน้ำเกลือ จากนั้น พนักงานตรวจสอบคุณภาพจึงตรวจวัดค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอลเริ่มต้น สำหรับกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่งในครั้งถัดไป

2. วิธีการวัดค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอลด้วยไฮโดรมิเตอร์

2.1 วัสดุและอุปกรณ์

- เครื่องวัดความถ่วงจำเพาะของสารละลาย (Specific Gravity Hydrometer) สเกล 1.000 - 1.1000
- เครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล (Digital Thermometer) ช่วงอุณหภูมิ -50 ถึง +150 องศาเซลเซียส
- เครื่องให้ความร้อน (Hot Plate) รุ่น HTS-1003 ยี่ห้อ LMS
- เครื่องวัดค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH Meter)
- บีกเกอร์ ขนาด 100 และ 1,000 มิลลิลิตร
- กระบอกตวง ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร
- ภาชนะเสตนเลสทรงกระบอก ขนาด 1,000 ลิตร
- ภาชนะพลาสติก ขนาด 1,000 ลิตร และไม้พายพลาสติก

2.2 วิธีการตรวจวัดค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลาย

(1) สุ่มเก็บตัวอย่างสารละลายเอทิลีนไกลคอลจากบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 ขณะที่เครื่องจักรกำลังทำงาน มาจำนวน 1,000 มิลลิลิตร

(2) วัดอุณหภูมิสารละลายเอทิลีนไกลคอลในบ่อน้ำเกลือ และจดบันทึกอุณหภูมิที่อ่านได้จากหน้าจอควบคุมของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100

(3) นำตัวอย่างสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่สุ่มเก็บมาได้ ปรับอุณหภูมิด้วยน้ำร้อนจนสารละลายเอทิลีนไกลคอลมีอุณหภูมิเท่ากับ 12 องศาเซลเซียส จากนั้น จึงรินสารละลายเอทิลีนไกลคอลใส่ในกระบอกตวงอย่างรวดเร็ว

(4) หย่อนเครื่องมือวัดค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลาย สเกล 1.000 - 1.1000 ลงในกระบอกตวงที่มีสารละลายเอทิลีนไกลคอลบรรจุอยู่ จากนั้น วัดอุณหภูมิของสารละลายด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล เมื่ออุณหภูมิของสารละลายเอทิลีนไกลคอลเท่ากับ 15 องศาเซลเซียส จึงอ่านค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอลจากสเกลของไฮโดรมิเตอร์ พร้อมจดบันทึกข้อมูล

พร้อมทั้งสังเกตการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ใช้งานในขั้นตอนการขึ้นรูปไอศกรีมแท่งด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 และจดบันทึกการใช้งานต่อรอบหรือวัฏจักร

ภาคผนวก ง
วิธีการนำสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ใช้งานแล้ว กลับมาใช้ใหม่ด้วยกระบวนการระเหย

ง1. วิธีการนำสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ใช้งานแล้ว กลับมาใช้ใหม่ ด้วยกระบวนการระเหย

การทำสารให้บริสุทธิ์มีหลายวิธี แต่ในงานวิจัยนี้เลือกวิธีการระเหยมาใช้ในการแยกน้ำออกจากสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ใช้งานแล้ว โดยการใช้ไอน้ำร้อนเป็นพลังงานความร้อนในการระเหยน้ำออกจากสารละลายเอทิลีนไกลคอล ซึ่งพิจารณาจากความแตกต่างระหว่างจุดเดือดของน้ำและสารเอทิลีนไกลคอล ความไม่ซับซ้อนของวิธีการทดลอง ความพร้อมทางด้านเครื่องมือ วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และค่าใช้จ่ายในการลงทุน มาเป็นเกณฑ์ในการพิจารณาเลือกวิธีการระเหยสำหรับกรณีศึกษานี้

1. วัสดุและอุปกรณ์

-	สารละลายเอทิลีนไกลคอลเก่าหรือใช้งานแล้วประมาณ	300	ลิตร
-	สารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า)	3,000	มิลลิลิตร
-	น้ำกลั่น	3,000	มิลลิลิตร
-	เครื่องให้ความร้อน (Hot Plate) รุ่น HTP-1002 ยี่ห้อ LMS	1	เครื่อง
-	เครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล (Digital Thermometer)	1	เครื่อง
-	ผ้าขาวบาง หรือถุงผ้ากรองสารละลาย	1	ผืน/ถุง
-	เครื่องวัดความถ่วงจำเพาะของสารละลาย		
	Specific Gravity Hydrometer สเกล 1.000 - 1.100	1	อัน
	สเกล 1.000 - 1.200	1	อัน
-	เหล็กสเกลสำหรับวัดปริมาตรสารละลาย	1	อัน
-	ตู้แช่แข็ง (อุณหภูมิต่ำกว่า -25 องศาเซลเซียส)	1	ตู้
-	ถังเก็บสารเอทิลีนไกลคอลจากการระเหย ขนาด 3,000 ลิตร	1	ถัง
-	ชุดปั๊มดูดสารละลายเอทิลีนไกลคอล พร้อมสายยาง	1	ชุด
-	ชุดทดลองทำการระเหย (ใช้ไอน้ำร้อนเป็นแหล่งพลังงาน)	1	ชุด
	ซึ่งประกอบด้วย ถังพาสเจอไรซ์ ขนาด 300 ลิตร		
	พร้อมใบพัดกวนสารละลายในถัง		
-	กรวยกรอง และกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1		
-	กระบอกตวง ขนาด 250 และ 1,000 มิลลิลิตร		
-	บีกเกอร์ ขนาด 100 และ 800 มิลลิลิตร		

- ภาชนะทรงกระบอกเสตนเลส ขนาด 1,000 ลิตร
- ปิเปต ขนาด 10 และ 25 มิลลิลิตร
- ขวดวัดปริมาตร ขนาด 500 มิลลิลิตร
- ขวดพลาสติกพร้อมฝาปิด ขนาด 600 มิลลิลิตร
- กระบอกพลาสติกพร้อมฝาปิด ขนาด 800 มิลลิลิตร
- ถาดเสตนเลสขอบสูง หรือกะบะเสตนเลส

2. วิธีการระเหยน้ำออกจากสารละลาย

ตอนที่ 1 การเตรียมสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ความเข้มข้นต่างๆ (ร้อยละ 0 - 100 โดยปริมาตร) จากสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ($C_2H_6O_2$) และกราฟมาตรฐาน

(1) คำนวณปริมาตรสารเอทิลีนไกลคอลที่ต้องการเตรียม ที่ความเข้มข้น 0 - 100 โดยปริมาตร จำนวน 500 มิลลิลิตร ดังแสดงในตารางที่ 1 (ตัวอย่างการคำนวณ ในภาคผนวก ก)

จากสูตร

$$M_1V_1 = M_2V_2$$

เมื่อ M_1 = ความเข้มข้นของสารละลายที่มีอยู่ (ร้อยละโดยปริมาตร)

V_1 = ปริมาตรของสารละลายที่มีอยู่ซึ่งต้องตวงมา (มิลลิลิตร)

M_2 = ความเข้มข้นของสารละลายที่ต้องการ (ร้อยละโดยปริมาตร)

V_2 = ปริมาตรของสารละลายที่ต้องการ (มิลลิลิตร)

ตารางที่ 1 การเตรียมสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ความเข้มข้นต่างๆ (ร้อยละ 0 - 100 โดยปริมาตร)

ความเข้มข้นของสารเอทิลีนไกลคอล	ปริมาตร (ml.)	
(%โดยปริมาตร)	$EG_{(99.9\%)}$	น้ำกลั่น
0	0	500
10	50	450
20	100	400
30	150	350
40	200	300
50	250	250
60	300	200
70	350	150
80	400	100
90	450	50
99.9	500	0

(2) ตวงสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ตามปริมาตรที่คำนวณได้จากตารางที่ 1 ใส่ในขวดวัดปริมาตร ขนาด 500 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นลงในขวดวัดปริมาตรจนถึงขีดบอกปริมาตร ปิดจุกขวดและเขย่าให้สารละลายผสมเป็นเนื้อเดียว จะได้สารละลายที่มีความเข้มข้นและปริมาตรตามที่ต้องการ

(3) เก็บสารละลายที่ได้ใส่ขวดพลาสติกที่เหมาะสม ปิดฝาขวดและปิดฉลากบอกชื่อสาร สูตรของสาร ความเข้มข้นและวันที่เตรียมสาร และพักสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่เตรียมได้ ไว้ในตู้แช่แข็ง อุณหภูมิ -25 องศาเซลเซียส

(4) นำสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ความเข้มข้นต่างๆ มาปรับอุณหภูมิด้วยน้ำร้อนหรือสารเอทิลีนไกลคอลเย็น โดยใช้แท่งแก้วคนสารละลายและวัดอุณหภูมิของสารละลายจนกระทั่งสารละลายมีอุณหภูมิประมาณ 12 องศาเซลเซียส จึงเทสารละลายใส่ในกระบอกตวงขนาด 500 มิลลิลิตร และหย่อนไฮโดรมิเตอร์ลงในสารละลายอย่างรวดเร็ว วัดอุณหภูมิของสารละลายในกระบอกตวง อ่านค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอล ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส จากสเกลของไฮโดรมิเตอร์ 1.000 - 1.100 หรือที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส จากสเกลของไฮโดรมิเตอร์ 1.000-1.2000 และวัดค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอล จนครบทุกความเข้มข้น และจดบันทึกผลการทดลอง

(5) ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-4 จำนวน 3 ครั้ง และเขียนกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเอทิลีนไกลคอลกับค่าความถ่วงจำเพาะสารละลายเอทิลีนไกลคอล

ตอนที่ 2 การระเหยน้ำออกจากสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ใช้งานแล้ว

(1) ดูดตัวอย่างสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ใช้งานแล้ว โดยใช้ชุดปั๊มดูดสารละลายปริมาตร 300 ลิตร ใส่ในถังพาสเจอไรซ์ ขนาด 300 ลิตร ให้พลังงานความร้อนแก่สารละลาย ด้วยระบบไอน้ำร้อน และวัดค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลาย ปริมาตรสารละลาย อุณหภูมิ และเวลาเริ่มต้นของการระเหย และทำการจดบันทึกข้อมูล

(2) เปิดวาล์วไอน้ำร้อนให้เข้าสู่ถังชั้นนอกของถังพาสเจอไรซ์ และเปิดใบพัดกวนสารละลาย ควบคุมอุณหภูมิของสารละลายเอทิลีนไกลคอลระหว่างกระบวนการระเหยให้อยู่ในช่วง 85 - 95 องศาเซลเซียส และวัดค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอล ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส วัดปริมาตรสารละลายที่เหลืออยู่ในถังพาสเจอไรซ์ และอุณหภูมิของสารละลายเอทิลีนไกลคอลทุกๆ 1 ชั่วโมง พร้อมทั้งจดบันทึกเวลาที่ใช้ในการระเหย

(3) กระบวนการระเหยจะดำเนินไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้สารเอทิลีนไกลคอลจากการระเหย ที่วัดค่าความถ่วงจำเพาะได้เท่ากับ 1.1166 (อ่านค่าที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส) และเริ่มคงที่ จึงหยุดกระบวนการระเหย และพักสารไว้จนอุณหภูมิของสารละลายเอทิลีนไกลคอลลดลง จึงปั๊มดูดสารเอทิลีนไกลคอลที่ได้ไปเก็บในถังพักสารละลาย ขนาด 3,000 ลิตร ที่จัดเตรียมไว้

(4) เก็บตัวอย่างสารเอทิลีนไกลคอลที่ได้จากการระเหย จำนวน 3,000 มิลลิลิตร มาทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะกับความเข้มข้นของสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ความเข้มข้นต่างๆ (ร้อยละ 0 - 100 โดยปริมาตร) ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยการเตรียมสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ความเข้มข้นต่างๆ จากสารเอทิลีนไกลคอลที่ได้จากการระเหย ร้อยละ 99.9 โดยปริมาตร (การเตรียมตัวอย่างสารละลายเอทิลีนไกลคอล คำนวณเช่นเดียวกับ ตอนที่ 1)

ภาคผนวก จ
วิธีการคำนวณปริมาณน้ำปนเปื้อน ปริมาณความร้อนที่ใช้ในกระบวนการระเหยน้ำ และต้นทุนค่าใช้จ่ายในกระบวนการระเหย

จ1. การคำนวณปริมาณน้ำปนเปื้อนเข้าสู่สารละลายเอทิลีนไกลคอลในบ่อน้ำเกลือ

จากกราฟ (Figure 10) จะเห็นได้ว่า ที่ค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอลเริ่มต้น เท่ากับ 1.085 ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส มีความเข้มข้นของสารเอทิลีนไกลคอลอยู่ร้อยละ 67 โดยปริมาตร และที่ค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอลสุดท้าย เท่ากับ 1.074 ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส มีความเข้มข้นของสารเอทิลีนไกลคอลอยู่ร้อยละ 58 โดยปริมาตร แสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของสารเอทิลีนไกลคอลลดลงจากจุดเริ่มต้นร้อยละ 67 เป็นร้อยละ 58 โดยปริมาตร หรือลดลงร้อยละ 9 โดยปริมาตร นั่นคือ สารละลายเอทิลีนไกลคอลในบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติมีน้ำปนเปื้อนเพิ่มขึ้นร้อยละ 9 โดยปริมาตร หมายความว่า

ในสารละลายเอทิลีนไกลคอล 100 ลิตร มีน้ำอยู่ 9 ลิตร

ถ้าในสารละลายเอทิลีนไกลคอล 2,800 ลิตร จะมีน้ำอยู่ $\frac{9 \times 2,800}{100} = 252$ ลิตร

จากตารางสมบัติของน้ำ (Robert, 1972) ความหนาแน่นของน้ำ เท่ากับ 999.10 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (ที่ 15 องศาเซลเซียส) คำนวณหาน้ำหนักของน้ำ

จากสูตร

$$\text{ความหนาแน่น} = \frac{\text{มวล}}{\text{ปริมาตร}}$$

แทนค่าในสูตร จะได้ว่า

$$\text{มีน้ำอยู่} = \frac{1,000 \times 252}{999.10} = 251.77 \text{ กิโลกรัม}$$

ดังนั้น การใช้งานสารละลายเอทิลีนไกลคอลแต่ละรอบ จะมีน้ำปนเปื้อน 252 ลิตร หรือ 251.77 กิโลกรัม

จะเห็นได้ว่า ก่อนการปรับปรุง เวลาที่สารละลายเอทิลีนไกลคอลถูกหมุนเวียนอยู่ในบ่อน้ำเกลือของเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 จนครบ 1 รอบ และจึงทำการเปลี่ยนถ่ายสารละลายออกจากบ่อน้ำเกลือ ใช้เวลาทั้งหมด 132.23 ชั่วโมง และมีน้ำปนเปื้อนเฉลี่ยต่อรอบเท่ากับ 251.77 กิโลกรัม

เวลาใช้งาน 132.23 ชั่วโมง มีน้ำปนเปื้อน 251.77 กิโลกรัม

ถ้าในเวลา 24 ชั่วโมง จะมีน้ำปนเปื้อน $\frac{251.77 \times 24}{132.23} = 45.70$ กิโลกรัม

จากข้อมูลใน Table 6 จะเห็นว่า มีปริมาณน้ำปนเปื้อนที่สามารถเก็บรวบรวมได้เฉลี่ยต่อวัน เท่ากับ 1.1608 กิโลกรัม ซึ่งมาจากน้ำที่หยดจากรางรับน้ำเสตนเลสใต้ท่อส่งความเย็นบริเวณเหนือเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 และน้ำจากการละลายของน้ำแข็งที่เกาะบริเวณคอยล์เย็นกึ่งกลางเครื่องจักรอัตโนมัติ Fremark1100 เพราะฉะนั้น จะมีน้ำปนเปื้อนจากแหล่งอื่นๆ อีกวันละ 45.70 -1.1608 = 44.54 กิโลกรัม

จ2. การคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ในกระบวนการระเหยน้ำ

เตรียมสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ใช้งานแล้ว จำนวน 300 ลิตร อุณหภูมิเริ่มต้นของสารละลาย เท่ากับ 25 องศาเซลเซียส วัดค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายด้วยไฮโดรมิเตอร์ สเกล 1.000 - 1.100 (ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส) ได้เท่ากับ 1.074 หลังจากนั้น ให้ความร้อนด้วยไอน้ำร้อนแก่สารละลายจนกระทั่ง น้ำกลายเป็นไอน้ำเดือดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และวัดค่าความถ่วงจำเพาะของสารเอทิลีนไกลคอลด้วยไฮโดรมิเตอร์ สเกล 1.000 - 1.200 (ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส) ได้เท่ากับ 1.1166 จะต้องใช้ปริมาณความร้อนเท่าไร แสดงวิธีคำนวณ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณหาความหนาแน่นของสารละลายเอทิลีนไกลคอล ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส

จากค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอล เท่ากับ 1.074 (ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส) เปิดตารางความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ (Robert, 1972) จะได้ค่าความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส เท่ากับ 999.10 kg/m^3 นำไปใช้ในการคำนวณหาค่าความหนาแน่นของสารเอทิลีนไกลคอลที่อุณหภูมิเดียวกันได้

จากสูตร

$$\text{ความถ่วงจำเพาะของสารละลาย} = \frac{\text{ความหนาแน่นของสารนั้น}}{\text{ความหนาแน่นของน้ำ}}$$

แทนค่าในสูตร

$$\text{ความหนาแน่นของสารเอทิลีนไกลคอล} = 1.074 \times 999.10 \quad kg/m^3$$

$$= 1,073.03 \quad kg/m^3$$

เพราะฉะนั้น ความหนาแน่นของสารเอทิลีนไกลคอล (ที่ 15 องศาเซลเซียส) เท่ากับ 1,073.03 kg/m^3 หมายความว่า

ในสารละลาย	1,000	ลิตร	มีน้ำหนัก	1,073.03		กิโลกรัม
ถ้าสารละลาย	300	ลิตร	จะมีน้ำหนัก	$\frac{1,073.03 \times 300}{1,000}$	= 321.91	กิโลกรัม

ดังนั้น สารละลายเอทิลีนไกลคอล 300 ลิตร มีน้ำหนัก เท่ากับ 321.91 กิโลกรัม

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณหาปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ในการระเหยน้ำออกจากสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ใช้แล้ว

จาก Figure 20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ความเข้มข้นต่างๆ (0 - 100 โดยปริมาตร) พิจารณาที่เส้นกราฟของสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) จะเห็นได้ว่า สารละลายผสมระหว่างน้ำและสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) ที่ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.074 (วัดค่าที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส) มีค่าความเข้มข้นของสารเอทิลีนไกลคอลร้อยละ 58 โดยปริมาตร หมายความว่า

ในสารละลาย 100 ลิตร มีสารเอทิลีนไกลคอลอยู่ 58 ลิตร และมีน้ำอยู่ 42 ลิตร
ถ้าสารละลาย 300 ลิตร มีสารเอทิลีนไกลคอลอยู่ 174 ลิตร และมีน้ำอยู่ 126 ลิตร

จะได้ว่า

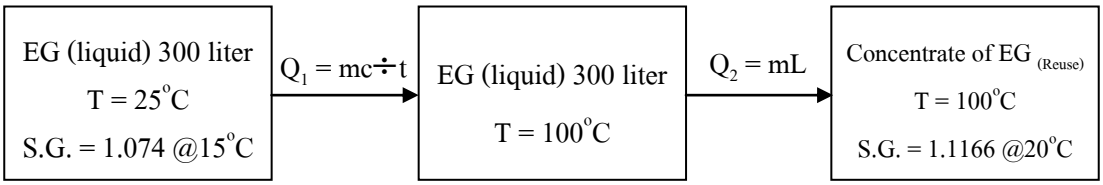
ในสารละลาย 321.91 กิโลกรัม มีสารเอทิลีนไกลคอลอยู่ $\frac{174 \times 321.91}{300}$ = 186.71 กิโลกรัม

มีน้ำอยู่ $\frac{126 \times 321.91}{300}$ = 135.20 กิโลกรัม

ดังนั้น สารละลายเอทิลีนไกลคอล 321.91 กิโลกรัม มีสารเอทิลีนไกลคอลอยู่ 186.71 กิโลกรัม และมีน้ำอยู่ 135.20 กิโลกรัม

เพราะฉะนั้น ถ้าต้องการระเหยน้ำออกจากสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่ถูกใช้งานแล้วจากกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่ง จำนวน 126 ลิตร หรือ 135.20 กิโลกรัม จากปริมาณสารละลายเอทิลีนไกลคอล 300 ลิตร หรือ 321.91 กิโลกรัม จะต้องใช้ปริมาณความร้อนที่ทำให้น้ำระเหยกลายเป็นไอทั้งหมด (ดังแผนภาพประกอบการคำนวณ) แสดงวิธีคำนวณดังต่อไปนี้

กำหนดให้ Q คือ ปริมาณความร้อนที่สารได้รับ (cal)
m คือ มวลของสาร (g)
c คือ ความจุจำเพาะของน้ำ เท่ากับ 4.19 kJ/kg. K หรือ 1 cal/g ^{o}C
$\div$t คือ อุณหภูมิของน้ำที่เปลี่ยนไป (^{o}C)
L คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ เท่ากับ 540 cal/g



จากสูตร

ปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ทั้งหมด = $Q_1 + Q_2$

กรณีที่ 1 ปริมาณความร้อนที่ทำให้สารละลายเอทิลีนไกลคอล มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 25 เป็น 100 องศาเซลเซียส โดยที่สถานะของสารไม่เปลี่ยนแปลง

จากสูตร

Q_1 = $mc \div t$

= 135.20 kg × 4.19 kJ/kg K × 75 K

= 42,486.60 kJ

$\alpha\ Q_1$ = 42,486.60 kJ

เพราะฉะนั้น ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก 25 เป็น 100 องศาเซลเซียส เท่ากับ 42,486.60 กิโลจูล

กรณีที่ 2 ปริมาณความร้อนที่ทำให้น้ำในสารละลายเอทิลีนไกลคอล เปลี่ยนสถานะจากขอองเหลวกลายเป็นไอจนหมด โดยที่อุณหภูมิคงที่

จากสูตร

Q_2 = mL

= 135.20 kg × 540 cal/g

= 135,200 g × 540 cal/g

= 73,008 kcal × 4.19 J

= 305,903.52 kJ

$\alpha\ Q_2$ = 305,903.52 kJ

ดังนั้น ปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ต้องใช้ในการระเหยน้ำออกจากสารละลายเอทิลีนไกลคอล

ปริมาณความร้อนทั้งหมด = $Q_1 + Q_2$

= 42,486.60 kJ + 305,903.52 kJ

= 348,390.12 kJ

ดังนั้น ต้องใช้ปริมาณความร้อนทั้งหมด เท่ากับ 348,390.12 กิโลจูล จึงจะทำให้น้ำ 135.20 กิโลกรัม ระเหยกลายเป็นไอหมด

จ3. การคำนวณต้นทุนที่ใช้ในกระบวนการระเหย (ค่าไฟฟ้าจากมอเตอร์ และค่าจ้างพนักงาน)

ค่าไฟฟ้าจากการใช้มอเตอร์ติดกับใบพัดกวนสารละลายเอทิลีนไกลคอลในการระเหย ซึ่งใช้มอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ เปิดใช้งานวันละ 8 ชั่วโมง อัตราค่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อหน่วย (โรงงานขนาดกลาง) 3 บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง และอัตราค่าจ้างพนักงาน เท่ากับ 200 บาทต่อวัน

จากสูตร

ค่าพลังงานไฟฟ้า = ค่ากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ (กิโลวัตต์) × จำนวนชั่วโมงใช้งาน (ชั่วโมง)

= 2.20 กิโลวัตต์ × 8 ชั่วโมง

α ค่าพลังงานไฟฟ้า = 17.60 กิโลวัตต์-ชั่วโมง

อัตราค่าไฟฟ้า = 3 บาทต่อหน่วย

คิดเป็นค่าไฟฟ้า = 17.60 × 3 = 52.80 บาท

α ต้นทุนรวม = ค่าไฟฟ้า + ค่าจ้างพนักงาน

= 200 + 52.80 บาท

= 252.80 บาท

ดังนั้น ต้นทุนรวมทั้งหมด (ไม่รวมต้นทุนพลังงาน) เท่ากับ 252.80 บาทต่อวัน

ในการระเหยน้ำ จำนวน 126 ลิตร ออกจากสารละลายเอทิลีนไกลคอล จำนวน 300 ลิตร เพื่อให้ได้สารเอทิลีนไกลคอลที่ได้จากการระเหยที่มีความเข้มข้นสูงเทียบเท่ากับสารเอทิลีนไกลคอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 (ทางการค้า) จำนวน 174 ลิตร จะต้องใช้เวลาในการระเหย 4 วันโดยประมาณ และทำการระเหยวันละ 8 ชั่วโมง คิดเป็นต้นทุนทั้งหมด เท่ากับ 252.80 × 4 = 1,011.20 บาท และถ้าต้องการสารเอทิลีนไกลคอลที่ได้จากการระเหย จำนวน 200 ลิตร หรือ 1 ถัง จะต้องใช้ต้นทุนทั้งหมดต่อถัง เท่ากับ (1,011.20 × 200)÷174 = 1,162.30 บาท

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นางสาวเปมิกา แซ่เตียว

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5111020012

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตรบัณฑิต	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์	2549

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนทักษะนักอุตสาหกรรมเกษตร จากคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

เปมิกา แซ่เตียว, ไพศาล วุฒิจำนงค์ และกันยา อัครอารีย์. 2553. การปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้งานสารทำความเย็นเอทิลีนไกลคอลในกระบวนการผลิตไอศกรีมแท่ง. การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัย ระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 19 มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ จังหวัดฉะเชิงเทรา. 23-24 ธันวาคม 2553. หน้า 1368-1377.