

การคำนวณเวลาสำหรับแผนอพยพ กรณีสารทำความเย็นประเภทแอมโมเนียรั่วไหล ในห้องเย็น

A Calculation of Evacuation Time for Indoor Ammonia Coolant Leakage in Cold Storage

คำนำ

เมื่อพิจารณาถึงนวัตกรรมรูปแบบของอาหารสำเร็จรูปที่มีจำหน่าย ตามร้านสะดวกซื้อ ซุปเปอร์มาร์เก็ต หรือห้างสรรพสินค้าที่ให้ผู้คน ในปัจจุบันเลือก ซื้อหามาเพื่อการบริโภคนั้น เราจะพบว่าอาหารแช่แข็งเป็นรูปแบบทางเลือกหนึ่งที่กำลังนิยมนอกเหนือจากอาหารสด ซึ่งปัจจัยที่ทำให้ อาหารแช่แข็งเป็นที่นิยมเลือกซื้อมาเพื่อการบริโภคนั้น มีอยู่หลายประการ คือ ชีวิตที่เร่งรีบขึ้นทำให้ มีเวลาในการประกอบอาหารลดลง ความสะดวกในการบริโภคของอาหารแช่แข็ง ความหลากหลาย ของอาหารแช่แข็งที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการนำเทคโนโลยีความเย็นเข้ามาช่วยในการแปรรูป เก็บถนอม อาหาร ประกอบกับนโยบายการผลักดันผู้ประกอบการผลิตอาหารจากภาครัฐ ในเรื่องการส่งเสริม อาหารไทยสู่ต่างประเทศ (ครัวไทยสู่ครัวโลก) จึงไม่น่าประหลาดใจเลยว่าจำนวนห้องเย็นในประเทศไทย ตามฐานข้อมูลของกรมโรงงานอุตสาหกรรมจึงเพิ่มจำนวนถึงจาก 549 โรงงาน ในปี พ.ศ. 2547 เป็น 597 โรงงาน ภายในปี พ.ศ. 2548 ซึ่งคิดเป็นการเติบโตเพิ่มขึ้นถึง 8.7% (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548)

จากนโยบายที่มุ่งสู่การเป็นผู้ผลิตอาหารเพื่อการส่งออกอุตสาหกรรมอาหารแช่แข็ง จึงจำเป็นต้องใช้ระบบหนึ่งที่สำคัญ สำหรับการดำเนินการผลิตสินค้าแช่แข็ง คือ ระบบและอุปกรณ์ให้ความเย็น แก่สินค้าและวัตถุดิบ รวมถึงระบบห้องเย็นเพื่อเก็บรักษาสินค้าที่ผลิตขึ้นไว้รอการจำหน่าย ประกอบกับ ในอุตสาหกรรมอาหารแช่แข็งนั้น ปัจจัยที่สำคัญที่ต้องดำเนินการควบคุมนอกเหนือจากความเย็น หรืออุณหภูมิของการผลิตแล้ว ก็คือ ระบบจัดการด้านความสะอาด เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของ สิ่งสกปรกจากภายนอกเข้ามาสู่ภายในพื้นที่อาคารผลิต ซึ่งเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ต้องมีการจำกัด เส้นทางเข้าออกของพนักงานในอุตสาหกรรมดังกล่าว สำหรับส่วนประกอบหลักที่สำคัญของระบบ ให้ความเย็นนอกเหนือจากอุปกรณ์ต่างๆ แล้ว ยังมีสารทำความเย็น ซึ่งมีคุณสมบัติที่เป็นพิษต่อ ผู้ปฏิบัติงาน เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สแอมโมเนีย เป็นต้น หากสารเคมีดังกล่าวเกิดการรั่วไหล ออกมานอกระบบทำความเย็น ไม่ว่าจะเป็นสาเหตุเนื่องจากความบกพร่องของผู้ควบคุมอุปกรณ์นั้นๆ

การใช้งานอุปกรณ์ที่ผิดวิธี หรือเกิดจากความบกพร่องของอุปกรณ์ที่ขาดการดูแล ซึ่งเรามักพบข่าวของอุบัติเหตุร้ายแรงของสารทำความเย็นดังกล่าวข้างต้น ที่ส่งผลให้เกิดอันตรายต่อชีวิตของผู้ที่ปฏิบัติงาน และทรัพย์สินขององค์กรที่มีการใช้งานอุปกรณ์ทำความเย็นดังกล่าวเป็นระยะ

สืบเนื่องจากอันตรายของอุบัติเหตุจากการรั่วไหลของสารทำความเย็นประเภทก๊าซแอมโมเนีย ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับระบบห้องเย็นของอุตสาหกรรมผลิตอาหารของประเทศ กรมโรงงานอุตสาหกรรมภายใต้กระทรวงอุตสาหกรรมได้ดำเนินการป้องกัน โดยออกเป็นประกาศของกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 3 เรื่อง “มาตรการคุ้มครองความปลอดภัยในการดำเนินงาน” ในข้อ 4.2 ที่กำหนดให้ผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมทั้ง 12 ประเภท ตามประกาศแนบท้าย ต้องจัดทำเอกสารรายงานการวิเคราะห์ความเสี่ยงที่อาจเกิดจากการประกอบกิจการในโรงงานและแผนงานบริหารจัดการความเสี่ยงที่ครอบคลุมถึงแผนฉุกเฉินและการฝึกซ้อมเพื่อตอบสนองต่อเหตุฉุกเฉินที่เป็นอันตรายดังกล่าวใช้บังคับกับโรงงานห้องเย็นทั่วประเทศ ซึ่งโรงงานห้องเย็นทั่วประเทศได้ดำเนินการจัดทำแผนงานดังกล่าวและส่งแก่กรมโรงงานอุตสาหกรรมแล้ว แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นคือยังไม่มีแนวทางในการชี้วัดว่าประสิทธิภาพของระยะเวลาทั้งหมดที่สถานประกอบการใช้สำหรับการฝึกซ้อมเพื่อตอบสนองต่อเหตุฉุกเฉินตามแผนฉุกเฉิน ที่เป็นอันตรายต่อพนักงานสำหรับกรณีตอบโต้อุบัติเหตุจากเครื่องจักรรั่วไหลของแอมโมเนียที่ใช้เพื่อเป็นสารทำความเย็นแก่ธุรกิจดังกล่าว ว่ามีความเหมาะสมเพียงไร และสามารถปกป้องชีวิตของพนักงานที่ปฏิบัติงานอยู่ใกล้ชิดกับสารทำความเย็นที่เป็นอันตรายดังกล่าวได้หรือไม่

ดังนั้น การหาวิธีประเมินประสิทธิภาพว่าระยะเวลาควรเป็นเท่าใดสำหรับใช้ในการฝึกซ้อมแผนอพยพฉุกเฉินกรณีสารทำความเย็นรั่วไหลภายในอาคารของอุตสาหกรรมห้องเย็น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งผลที่ได้รับจากการศึกษานี้จะช่วยเป็นแนวทางในการชี้วัดประสิทธิภาพของแผนฉุกเฉิน รวมทั้งการเสนอแนะแนวทางในการปรับปรุงแก้ไขในแง่มุมต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแผนฉุกเฉิน เช่น ความกว้างของช่องประตูทางเข้าออก การเลือกปรับใช้ความดันของแอมโมเนียในระบบทำความเย็น เป็นต้น เพื่อให้แผนฉุกเฉินสามารถใช้งานได้จริงอย่างมีประสิทธิภาพ รวมทั้งลดการสูญเสียในชีวิต และทรัพย์สินของผู้ที่อยู่ในโรงงานห้องเย็น รวมทั้งเป็นเครื่องมือให้การดำเนินงานด้านความปลอดภัยในอุตสาหกรรมนี้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อคำนวณเวลาสำหรับแผนอพยพกรณีสารทำความเย็นประเภทแอมโมเนียรั่วไหลภายในโรงงานห้องเย็น
2. เพื่อคำนวณขนาดของประตูห้องแช่แข็ง ภายในอาคารปัจจุบันว่ามีความเหมาะสมกับแผนอพยพกรณีแอมโมเนียรั่วไหล

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สร้างตารางเวลามาตรฐานสำหรับการประเมินประสิทธิภาพในการฝึกซ้อมอพยพออกจากอาคารโรงงานห้องเย็น กรณีเมื่อเกิดเหตุการณ์สารทำความเย็นประเภทแอมโมเนียรั่วไหลจากระบบทำความเย็นที่การใช้งานระบบทำความเย็นในระดับความดันต่างๆ
2. วิเคราะห์ช่วงระยะเวลาที่เหมาะสมเพื่อใช้กับแผนการฝึกซ้อมอพยพฉุกเฉินออกจากอาคารโรงงานห้องเย็น กรณีเมื่อเกิดเหตุการณ์สารทำความเย็นประเภทแอมโมเนียรั่วไหลภายในโรงงานอุตสาหกรรมประเภทห้องเย็น
3. ใช้เป็นแนวทางอ้างอิงเพื่อเพิ่มความมั่นใจให้กับผู้รับผิดชอบความปลอดภัยของโรงงานห้องเย็นในการตัดสินใจปรับปรุงแผนอพยพฉุกเฉินเพื่อออกจากอาคาร ในกรณีเกิดเหตุการณ์รั่วไหลของสารทำความเย็นประเภทแอมโมเนียรั่วไหลภายในอาคารโรงงานห้องเย็น
4. นำข้อมูลที่ได้ไปปรับปรุงโครงสร้าง หรือส่วนประกอบอื่นที่เกี่ยวข้อง หรือมีผลกระทบต่อแผนอพยพฉุกเฉินขององค์กรประเภทโรงงานห้องเย็น เช่น ขนาดของประตูเข้า-ออก ความดันของสารทำความเย็นที่ใช้ในระบบทำความเย็น เป็นต้น
5. เพิ่มแนวความคิดด้านการปรับปรุงแผนอพยพฉุกเฉินเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในเหตุการณ์ฉุกเฉินกรณีอื่นๆ

ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยมีขอบเขตการทำงานดังนี้

1. ศึกษาปริมาณการรั่วไหลภายใน 1 นาที ของสารทำความเย็นประเภทแอมโมเนีย ที่รั่วออกจากระบบทำความเย็น จนมีความเข้มข้นในระดับที่เริ่มรับรู้กลิ่นของแอมโมเนีย คือ ที่ 25 พีพีเอ็ม และในระดับที่เริ่มเป็นอันตรายต่อมนุษย์ คือ ที่ 75 พีพีเอ็ม
2. ศึกษาความสัมพันธ์ของระดับความดันสารทำความเย็นประเภทแอมโมเนียกับขนาดของรอยรั่ว ด้วยการประยุกต์ใช้หลักการของการคำนวณหาปริมาณก๊าซที่ปลดปล่อยออกมาทางรอยแตก และหลักอุณหพลศาสตร์
3. ศึกษาอัตราปริมาณการสะสมต่อหน่วยเวลาของสารแอมโมเนียที่รั่วไหลออกจากระบบทำความเย็นชนิด Air Blast freezer เข้าสู่ห้องภายในอาคารที่มีลักษณะปิดหรือมีเพียงประตูทางออกไม่เกิน 1 เส้นทาง
4. ศึกษาเวลาของการสะสมของแอมโมเนียที่รั่วไหลเข้าสู่ห้องภายในอาคารที่มีลักษณะปิด ปริมาตรขนาด 30, 75, 120, 300, 500, 5,000 และ 10,000 ลูกบาศก์เมตร
5. งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลของอุณหภูมิห้องแช่แข็งของบริษัทห้องเย็น ชัน ไซน์ อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด ตั้งแต่วันที่ 13 สิงหาคม พ.ศ. 2547 ถึง 19 กันยายน พ.ศ. 2547

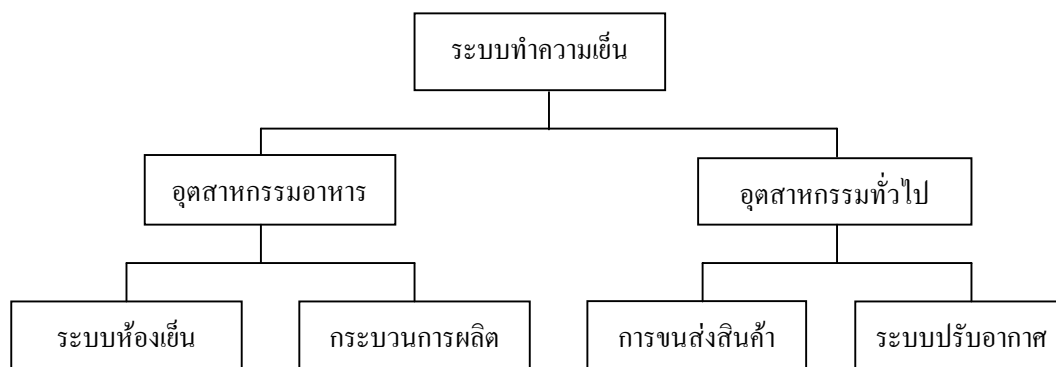
การตรวจเอกสาร

หลักการของระบบทำความเย็น และประเภทห้องเย็น

หลักการของระบบทำความเย็น

ระบบทำความเย็นถูกคิดค้นขึ้นเพื่อใช้ถนอมรักษาอาหาร ยืดอายุการเก็บรักษา หรือชะลอการเสื่อมเสียของอาหารให้ยาวนานขึ้น โดยการอาศัยหลักการถ่ายเทความร้อนออกจากสิ่งที่ต้องการลดอุณหภูมิ เช่น อาหารประเภทเนื้อสัตว์ ผัก และผลไม้ ให้มีอุณหภูมิลดลงด้วยกระบวนการเปลี่ยนเฟสของสารทำความเย็น (Refrigerant) จากของเหลวไปเป็นไอ และนำไอของสารทำความเย็นดังกล่าวกลับไปบีบอัดให้กลับเป็นของเหลวใหม่เพื่อนำมาใช้หมุนเวียนต่อไป

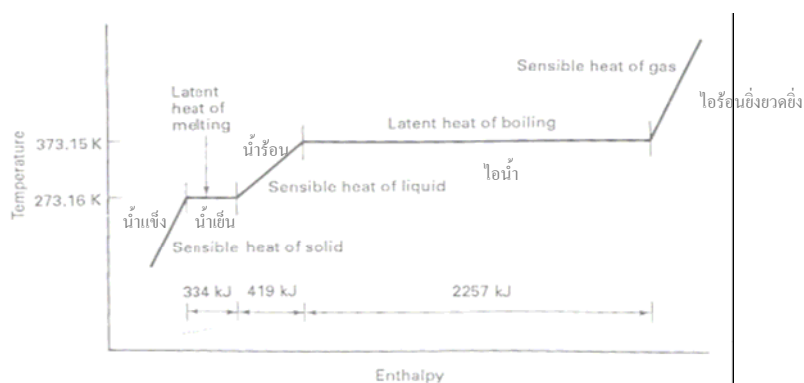
สำหรับในประเทศสหรัฐอเมริกานั้นมีการนำระบบทำความเย็นเข้ามาประยุกต์ใช้ รวมทั้งนำไปพัฒนาระบบอุตสาหกรรมอาหารและห้องเย็น รวมถึงการขยายไปเป็นหลักการของระบบปรับอากาศซึ่งประยุกต์ใช้ระบายความร้อนจากอาคาร (Anonymous, 2000a) ดังสรุปให้เห็นภาพความสำคัญของการประยุกต์ใช้ระบบทำความเย็นที่มีบทบาทในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้ตามภาพที่ 1



ภาพที่ 1 การประยุกต์ใช้ระบบทำความเย็นในอุตสาหกรรมต่างๆ

ที่มา: Anonymous (2000a)

สำหรับการทำความเข้าใจในหลักการเบื้องต้นของปรากฏการณ์ในกระบวนการเปลี่ยนเฟสของสารทำความเย็น (Refrigerant) เพื่อถ่ายเทความร้อน จะใช้กระบวนการเปลี่ยนแปลงเฟสของน้ำแข็ง 1 กิโลกรัม เป็นตัวแทนตามที่ Corinchock (1997) ได้อธิบายไว้ตามภาพที่ 2 ดังนี้



ภาพที่ 2 การเปลี่ยนอุณหภูมิ เฟส และเอนทาลปี

ที่มา: Corinchock (1997)

Corinchock (1997) พิจารณากราฟของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และเอนทาลปีของการให้ความร้อนของน้ำแข็ง 1 กก. ที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ 273.16 เคลวิน หรือ 0°C นำมาเริ่มต้นให้ความร้อนแก่น้ำแข็ง ในช่วงเริ่มต้นน้ำแข็งจะละลาย เปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวที่อุณหภูมิเดิม ซึ่งเรียกค่าของความร้อนที่ให้น้ำแข็ง เพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสจากน้ำแข็งเป็นน้ำที่อุณหภูมิเดิม โดยยังไม่มี การเปลี่ยนอุณหภูมินี้ว่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (Latent heat of melting) มีค่าเท่ากับ 334 กิโลจูล/ กิโลกรัม

จากนั้นหากยังคงให้ความร้อนแก่น้ำที่มีอุณหภูมิ 0°C ต่อไป น้ำจะเริ่มมีอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ และมีอุณหภูมิสูงถึงจุดเดือดในที่สุด ความร้อนที่ให้น้ำในช่วงนี้และทำให้น้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิไป 1 หน่วยของศา เราจะเรียกว่า ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity) มีค่าเท่ากับ 4.19 กิโลจูล/กิโลกรัม/ $^{\circ}\text{C}$ ความร้อนดังกล่าวจะเรียกว่า ความร้อนสัมผัส (Sensible heat of liquid)

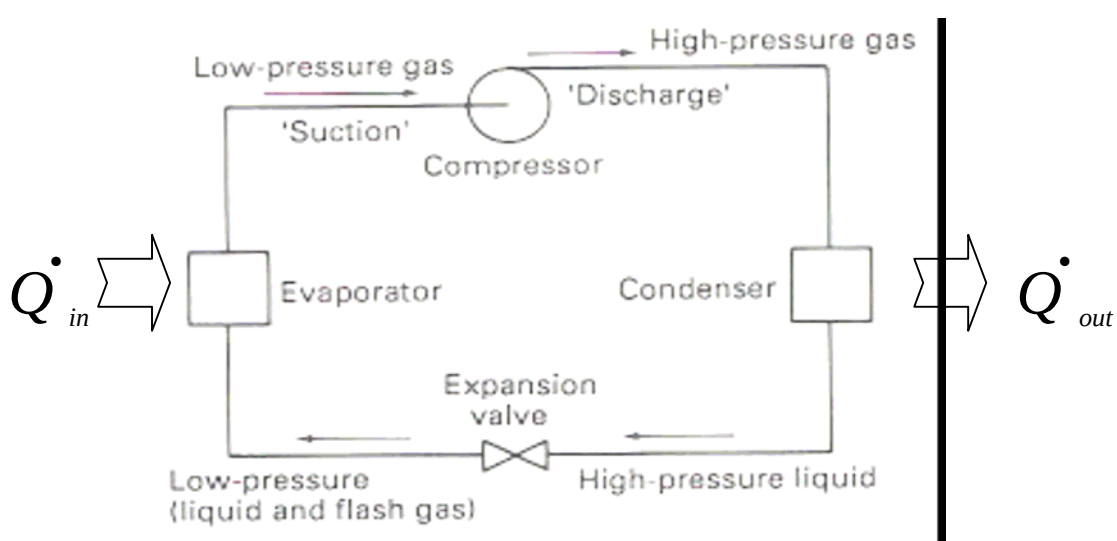
ถ้าเรายังคงให้ความร้อนต่อไปเรื่อยๆ กับน้ำเดือด 100°C ขนาด 1 กิโลกรัม ต่อไปจะเกิดเหตุการณ์ของการเปลี่ยนเฟสจากของเหลวกลายเป็นไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°C โดยไม่มีการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำเดือด ซึ่งความร้อนที่ใช้สำหรับการเปลี่ยนสถานะดังกล่าว จะเรียกว่า ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (Latent heat of boiling) มีค่าเท่ากับ 2,257 กิโลจูล/กิโลกรัม และหากยังคงให้ความร้อนต่อไปอีก เฟสของไอน้ำจะได้รับความร้อนสัมผัสมากขึ้นจนกลายเป็นไอร้อนยิ่งยวด (superheated vapor) ซึ่งเป็นการดูดซับความร้อนเข้าสู่ตัวของเฟสไอน้ำมากขึ้น ซึ่งจะต้องใช้พลังงานกลที่มากขึ้นสำหรับการดึงความร้อนกลับออกมาจากไอร้อนยิ่งยวดดังกล่าว ซึ่งจากคำอธิบายดังกล่าวและภาพที่ 2

ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนอุณหภูมิ เฟส และเอนทัลปีของน้ำ สามารถนำมาอธิบายปรากฏการณ์ของกระบวนการเปลี่ยนเฟสของสารทำความเย็น (Refrigerant) เพื่อพาความร้อนออกจากระบบทำความเย็น โดยสารทำความเย็นแต่ละชนิดก็จะมีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ จุดเดือด และคุณสมบัติทางกายภาพในด้านอื่นๆ ไม่เท่ากันดังแสดงไว้ในภาพที่ 3

กรณีที่เราต้องการเพิ่มอุณหภูมิการเดือดของน้ำให้สูงขึ้น เราสามารถดำเนินการโดยการเพิ่มความดันให้แก่ระบบที่เป็นระบบปิด ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากขณะที่ให้ความร้อนแก่น้ำ จนน้ำกลายเป็นน้ำเดือดที่ความดันบรรยากาศปกติ โมเลกุลของน้ำที่สะสมพลังงานความร้อนไว้ จะเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานจลน์เพื่อเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำที่อยู่ในเฟสของเหลวที่ความดันของบรรยากาศ จนหลุดออกจากผิวหน้าของน้ำ และเปลี่ยนเฟสกลายเป็นไอ และเมื่อโมเลกุลของน้ำที่สามารถสะสมพลังงานความร้อนจนเพียงพอต่อการเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำได้นั้น มีมากขึ้น และสร้างความดันจนเท่ากับความดันบรรยากาศปกติขณะนั้น ก็จะเกิดปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำ หรือการเปลี่ยนเฟสของน้ำจากของเหลวเป็นไอน้ำที่อุณหภูมิเดียวกัน แต่เมื่อเราเพิ่มความดันที่สูงกว่าความดันบรรยากาศให้แก่ระบบปิด ทำให้ต้องมีการสะสมปริมาณของไอน้ำที่อยู่เหนือผิวหน้าของน้ำ ในเฟสของเหลวมากขึ้น เมื่อเทียบกับที่ความดันบรรยากาศปกติ จึงจะทำให้ความดันของไอน้ำที่อยู่ภายในระบบปิดสูงพอที่จะเกิดปรากฏการณ์ของการเดือดได้ ต้องมีความดันสูงขึ้นเท่ากับความดันที่สูงกว่าที่ระดับความดันบรรยากาศปกติ น้ำที่อยู่ภายในระบบปิดจึงสามารถเดือดได้ หรือกล่าวได้ว่าความดันที่สูงขึ้นจะทำให้โมเลกุลของน้ำ ในเฟสของเหลวที่ถูกให้ความร้อนอยู่นั้นต้องสะสมพลังงานมากขึ้นเพื่อ เอาชนะแรงยึดเหนี่ยว และความดันไอรวมที่ให้เพิ่มขึ้นจากความดันบรรยากาศ (Oliver, 1990) ดังนั้นจากหลักการดังกล่าวทำให้เรานำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างหม้อไอน้ำ (Boiler) ที่ให้ไอน้ำที่มีสภาพเป็นไอร้อนยิ่งยวด ซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือด หรือกำหนดให้สารทำความเย็นเปลี่ยนเฟสกลายเป็นไอได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดปกติได้

จากปรากฏการณ์การเปลี่ยนเฟสตามที่กล่าวมา เป็นหลักการพื้นฐานในการเปลี่ยนเฟสของสารทำความเย็น และเป็นพื้นฐานเบื้องต้น สำหรับการเลือกสารเคมีที่มีค่าความร้อนแฝงของการกลาย เป็นไอสูงมาบรรจุในระบบทำความเย็น เพื่อให้สามารถถ่ายเทความร้อนออกจากอาหารที่นำมาบรรจุ อยู่ในห้องเย็นได้มาก

ระบบทำความเย็นนั้นเป็นระบบปิดที่อาศัยการเปลี่ยนเฟสของสารเคมีที่เป็นตัวกลางในการ ถ่ายเทความร้อน ด้วยการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อขับเคลื่อนสารเคมีให้ไหลหมุนเวียน อยู่ใน ระบบทำความเย็น ซึ่งระบบดังกล่าวประกอบไปด้วย ชุดอุปกรณ์เครื่องต้มระเหย (Evaporator), ชุดอุปกรณ์คอมเพรสเซอร์ (Compressor), ชุดอุปกรณ์คอนเดนเซอร์ (Condenser) และชุดอุปกรณ์ วาล์วลดความดันสารทำความเย็น (Expansion valve) โดยชุดอุปกรณ์ที่กล่าวมาจะเชื่อมโยงต่อกัน เป็นวงจรตามภาพที่ 4 เพื่อทำหน้าที่ผลิตความเย็นให้แก่ระบบทำความเย็น โดยชุดอุปกรณ์แต่ละชุด ทำหน้าที่ต่างกันดังนี้



ภาพที่ 4 วงจรและอุปกรณ์ในระบบทำความเย็น

ที่มา: Trott (1989)

1. ชุดอุปกรณ์เครื่องต้มระเหย

ติดตั้งอยู่ภายในห้องเย็น โดยประกอบด้วยพัดลมที่ทำหน้าที่พัดให้อากาศภายในห้องเย็น ไหลผ่านชุดท่อขดลวด ซึ่งภายในชุดท่อขดลวดเป็นเส้นทางไหลผ่านของสารทำความเย็นที่มีเฟส

เป็นของเหลว เมื่อสารทำความเย็นได้รับความร้อนจากการนำหรือพาความร้อนจากอากาศในบริเวณห้องเย็นที่มีอุณหภูมิสูงกว่าสารทำความเย็น มาถ่ายเทให้แก่สารทำความเย็น สารทำความเย็นดังกล่าวจะเริ่มเดือดกลายเป็นไออยู่ภายในท่อของชุดเครื่องอัดรีดระเหย ซึ่งเป็นระบบปิดโดย ขั้นตอนการเปลี่ยนเฟสนี้ เป็นการใช้ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ ไปทำการเปลี่ยนสถานะของสารทำความเย็นจากของเหลวให้กลายเป็นไอ

2. ชุดอุปกรณ์คอมเพรสเซอร์

ชุดคอมเพรสเซอร์จะทำหน้าที่ดูดสารทำความเย็นที่ได้รับความร้อนจนเดือดกลายเป็นไอจากชุดอุปกรณ์เครื่องอัดรีดมาบีบอัดให้อิของสารทำความเย็นดังกล่าวมีความดันสูงและอุณหภูมิสูงมากขึ้น ก่อนส่งต่อไปยังชุดอุปกรณ์คอนเดนเซอร์ โดยชุดคอมเพรสเซอร์จะอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากภายนอกมาทำการขับเคลื่อนชุดมอเตอร์เพื่อใช้ในการดูด และอัดสารทำความเย็นให้มีความดันสูงขึ้น

3. ชุดอุปกรณ์คอนเดนเซอร์

ทำหน้าที่ควบแน่นสารทำความเย็นที่มีความดันสูงและอุณหภูมิสูงให้เป็นของเหลวด้วยการถ่ายเทความร้อนออกจากไอของสารทำความเย็นให้สารทำความเย็นกลายเป็นของเหลวทั้งหมด ก่อนส่งเข้าสู่ชุดอุปกรณ์วาล์วลดความดัน โดยกระบวนการถ่ายเทความร้อนของชุดอุปกรณ์คอนเดนเซอร์ดังกล่าวจะอาศัยตัวกลาง เช่น น้ำ หรืออากาศช่วยทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนกับสารทำความเย็นดังกล่าว

4. ชุดอุปกรณ์วาล์วลดความดันสารทำความเย็น

จะเป็นตัวแบ่งความดันด้านภาคต่ำและภาคความดันด้านสูงของสารทำความเย็นภายในระบบทำความเย็น โดยชุดอุปกรณ์วาล์วลดความดันทำหน้าที่ควบคุมความดันด้านภาคต่ำ และอุณหภูมิความเย็นของระบบทำความเย็น จากอัตราการไหลของสารทำความเย็นที่จ่ายออกมาจากชุดอุปกรณ์คอนเดนเซอร์ซึ่งอยู่ในเฟสของเหลวที่พร้อมจะเปลี่ยนเป็นไอเมื่อได้รับความร้อนจากอากาศในบริเวณห้องเย็นที่มีอุณหภูมิสูงกว่าสารทำความเย็น และขณะเดียวกันชุดอุปกรณ์ดังกล่าวจะทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลกลับ และสร้างแรงดูดไอของของสารทำความเย็นที่อยู่ในเฟสไอที่ไหลออกจากชุดอุปกรณ์เครื่องอัดรีดระเหย เพื่อกลับเข้าไปควบแน่นที่ชุดอุปกรณ์คอมเพรสเซอร์ที่จัดเป็นภาค

ความดันด้านสูงของระบบทำความเย็นไม่ให้มากเกินไป การลดความดันของสารทำความเย็นเหลวลงด้วยการควบคุมอัตราการไหลของสารทำความเย็น จะทำให้สารทำความเย็นที่อยู่ในเฟสของเหลวมียะเวลายอยู่ในชุดอุปกรณ์เครื่องทำความเย็นนานขึ้น เพื่อให้กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนจากอากาศในบริเวณห้องเย็นที่มีอุณหภูมิสูงนานขึ้น จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนจากอากาศในบริเวณห้องเย็นกับชุดอุปกรณ์เครื่องทำความเย็นให้ดีขึ้น

สารทำความเย็นและความเป็นพิษ

จากการอธิบายการเปลี่ยนอุณหภูมิ เฟส และเอนทัลปีในภาพที่ 2 และระบบการสร้าง ความเย็นตามหน้าที่ของชุดอุปกรณ์ที่เป็นส่วนประกอบต่างๆ ทำให้เห็นความสำคัญของสารทำความเย็น ที่ใช้ทำหน้าที่เป็นตัวนำพาความร้อนออกจากบริเวณดังกล่าว สารทำความเย็นที่เหมาะสมนี้ควรมีคุณสมบัติทางด้านกายภาพ คุณสมบัติด้านเคมี และคุณสมบัติอื่นๆ ที่จำเป็นดังนี้ (วิจิตร, 2533; ชูชัย, 2546)

คุณสมบัติทางกายภาพที่จำเป็นได้แก่

1. ควรมีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอต่อหน่วยน้ำหนักสูง เพื่อช่วยลดอัตราการไหลหมุนเวียนของน้ำยาในระบบ ทำให้ขนาดของอุปกรณ์มีขนาดเล็กลง น้ำหนักเบาเนื่องจากอุปกรณ์ไม่ต้องทนทานต่อความดันในระบบสูง และช่วยประหยัดพลังงาน
2. ความหนาแน่นควรมีค่าน้อย เพื่อสะดวกต่อการควบคุมปริมาณการใช้งาน หรือมีความหนาแน่นสูง เพื่อช่วยลดขนาดและน้ำหนักของอุปกรณ์ในระบบ
3. สามารถเปลี่ยนเฟสจากของเหลวเป็นไอได้ที่อุณหภูมิต่ำและมีจุดแข็งตัวต่ำ เพื่อไม่ให้ น้ำยาแข็งตัวขณะทำงาน
3. สามารถอัดเป็นของเหลวได้ เมื่อเป็นของเหลวต้องไหลง่าย และรวมตัวกับน้ำมันหล่อลื่นได้ดีเพื่อ สามารถพาน้ำมันหล่อลื่นกลับมาหล่อลื่น ที่ชุดลูกสูบของคอมเพรสเซอร์ได้
4. มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าสูง เพื่อป้องกันการลัดวงจรผ่านน้ำยาขณะทำงาน

5. ค่าความดันเพื่อการควบแน่นต่ำ ทำให้ขนาดและน้ำหนักของอุปกรณ์ลดลง และลดโอกาสการรั่วของน้ำยาออกจากระบบ รวมทั้งลดอันตรายที่เกิดจากการใช้ความดันสูงในระบบลง

6. หากมีการรั่วสามารถตรวจหาตำแหน่งของการรั่วได้ง่าย

คุณสมบัติทางเคมีได้แก่

1. มีโครงสร้างทางเคมีที่เสถียร เมื่อทำงานภายใต้อุณหภูมิและความดันที่ใช้งานของระบบ ทำความเย็น

2. ไม่เป็นพิษ

3. ไม่เป็นวัตถุระเบิด หรือติดไฟ ทั้งในภาวะที่เป็นของเหลวเป็นไอ หรือเมื่อมีการผสมกับน้ำมันหล่อลื่น

4. ไม่กัดกร่อนโลหะ หรืออุปกรณ์ในระบบทำความเย็น เช่น พวกลูกยาง พลาสติก เหล็ก ทองเหลือง ทองแดง และอลูมิเนียม เป็นต้น

5. ไม่เป็นพิษ หรือเป็นอันตรายกับระบบหายใจและผิวหนังของมนุษย์

6. เมื่อเกิดการรั่ว ต้องไม่รวมตัว หรือทำให้สี รส กลิ่นของอาหาร และน้ำดื่มเปลี่ยนแปลง หรือเป็นอันตราย

คุณสมบัติอื่นๆ ที่จำเป็น

1. ราคาถูก

2. ค่าการบำรุงรักษาอุปกรณ์เครื่องจักรที่ใช้ในระบบต่ำ

3. ง่ายต่อการควบคุมด้านความปลอดภัย และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย

Corinchock (1997) ได้แบ่งชนิดของสารทำความเย็นที่มีการนำมาใช้กับระบบทำความเย็นเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1: Hydrochlorofluorocarbon (HCFC) และ Chlorofluorocarbon (CFC) refrigerants

CFC เป็นสารทำความเย็นกลุ่มแรกที่ถูกนำมาใช้ในระบบทำความเย็น ในโมเลกุลของ CFC ประกอบด้วยธาตุคาร์บอน ฟลูออรีน และคลอรีน ส่วน HCFC นั้นจะมีธาตุไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นในโมเลกุลอีกหนึ่งธาตุ สารทำความเย็นในกลุ่มนี้เมื่อปนเปื้อนสู่ชั้นบรรยากาศจะไปทำลายโอโซนในชั้นของบรรยากาศโดยอะตอมของคลอรีนจะไปจับกับอะตอมของออกซิเจน 1 โมเลกุล จากโมเลกุลของออกซิเจนในโอโซนที่มี 3 โมเลกุล เกิดเป็นสารคลอรีนมอนอกไซด์และก๊าซออกซิเจน ด้วยสาเหตุดังกล่าวจึงมีการพยายามยกเลิก หรือเปลี่ยนไปใช้สารทำความเย็นในกลุ่มอื่นทดแทน (สำหรับ CFC ภายในเดือนมกราคมของปี ค.ศ. 1996 และ HCFC ภายใน ค.ศ. 2030 ตามสนธิสัญญา Montreal Protocol)

กลุ่มที่ 2: Hydrofluorocarbon (HFC) refrigerants

เป็นสารทำความเย็นที่ไม่มีโมเลกุลของคลอรีนเป็นองค์ประกอบอยู่ในโมเลกุลจึงไม่ทำลายโอโซนในชั้นบรรยากาศของโลก

กลุ่มที่ 3: กลุ่มของสารทำความเย็นประเภทอื่นๆ (Other refrigerants)

ได้แก่ สารทำความเย็นพวกแอมโมเนียและเมทิลคลอไรด์ ซึ่งมีความเป็นพิษ ระบายความร้อนต่อระบบทางเดินหายใจของมนุษย์

เราสามารถเขียนกลุ่มรายชื่อของสารทำความเย็นในกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 ได้ดังตารางที่ 1 และแสดงชื่อทางเคมี และสูตรทางเคมีได้ดังตารางที่ 2 ดังนี้

ตารางที่ 1 กลุ่มรายชื่อสารทำความเย็นที่มีการใช้งาน

CFC refrigerants	HCFC refrigerants	HFC refrigerants
R-11	R-22	R-32, R-143a
R-12	R-123	R-125, R-152a
R-115 (51% in 502 with 49% 22)	R-124	R-134a, R-C318
	R-142b	

ที่มา: Corinchock (1997)

ด้วยเหตุที่สารทำความเย็นในบางครั้งอาจมีเพียงชนิดเดียว หรือเป็นสารผสมจากสารหลายชนิด การเรียกชื่อจึงถูกกำหนดจากสมาคมวิศวกรการทำความร้อน การทำความเย็น และการปรับอากาศ (The American Society of Heating, Refrigerating and Air Condition Engineers; ASHRAE) ไว้ว่าให้นำอักษร R (Refrigerant) มาแทนความหมายของสารทำความเย็น และตามด้วยตัวเลขซึ่งใช้แทนชนิดของสารทำความเย็นดังนี้ (Corinchock, 1997)

R – 1 3 4 a

R หมายถึง Refrigerants

1 หมายถึง Number of Carbon atom, -1

3 หมายถึง Number of Hydrogen atom, +1

4 หมายถึง Number of Fluorine atoms

a หมายถึง Given base on structure to indicate the atomic structure of the compound

ตารางที่ 2 กลุ่มรายชื่อสารทำความเย็นที่มีการใช้งาน

หมายเลขสาร ทำความเย็น	ชื่อ และสูตรทางเคมี
R-11	Trichloromonofluoromethane CCl_3F
R-12	Dichlorodifluoromethane CCl_2F_2
R-22	Monochlorodifluoromethane CHClF_2
R-500	Azeotropic mixture of 78.3% of (R-12) and 26.2% of (R-152a)
R-502	Azeotropic mixture of 48.8% of (R-22) and 51.2% of (R-115)
R-503	Azeotropic mixture of 40.1% of (R-23) and 59.9% of (R-13)
R-504	Azeotropic mixture of 48.2% of (R-32) and 51.8% of (R-115)
R-717	Ammonia NH_3

ที่มา: วิจิตร (2533)

รายละเอียดของคุณสมบัติทางด้านกายภาพ และความเป็นพิษของไอแอมโมเนีย (ศูนย์ข้อมูล
วัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์, 2545 และ Anonymous, 1997) ตามเอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์
(Material Safety Data Sheet; MSDS) มีดังนี้

1. ชื่อเคมี: แอมโมเนีย
2. สูตรโมเลกุล: NH_3 น้ำหนักโมเลกุล: 17.031
3. ค่ามาตรฐาน และความเป็นพิษ
 - LC_{50} (มิลลิกรัม/ลบ.ม.) = 4000/4 ชั่วโมง (หนู)
 - IDLH (พีพีเอ็ม) = 300
 - TLV-STEL (พีพีเอ็ม) = 35 TLV—TWA (พีพีเอ็ม) = 25
 - จัดเป็นสารเคมีอันตราย ตาม พระราชบัญญัติคุ้มครองแรงงาน พ.ศ. 2541
 - จัดเป็นวัตถุอันตรายประเภทที่ 3 ตาม พระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535

4. คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

สถานะ: ไอ ไม่มีสี กลิ่นจุน

จุดเดือด: -33.35°C

จุดหลอมเหลว/ จุดเยือกแข็ง: -77.7°C

ความถ่วงจำเพาะ (น้ำ = 1): 0.6819

ความหนาแน่นไอ (อากาศ = 1): 0.579

ความสามารถในการละลายน้ำ: ละลายน้ำได้ดี พีเอช: 11.7

การกัดกร่อน: กัดกร่อนทองแดง, ทองเหลือง, สังกะสี และอัลลอยด์

แต่ไม่กัดกร่อนเหล็ก

แฟกเตอร์แปลงหน่วย: 1 พีพีเอ็ม = 0.7 มก./ลบ.ม. หรือ 1 มก./ลบ.ม. = 1.428

พีพีเอ็มที่ 25°C

5. อันตรายต่อสุขภาพอนามัย

สัมผัสกับทางเดินหายใจ

ที่ความเข้มข้น 5-25 พีพีเอ็ม จะร่างกายจะเริ่มรับรู้กลิ่นของแอมโมเนียได้

ที่ความเข้มข้น 50-100 พีพีเอ็ม จะเริ่มรู้สึกแสบ ระคายเคืองจมูก

ที่ความเข้มข้น 400-700 พีพีเอ็ม ส่วนของระบบทางเดินหายใจช่วงต้น ตา จมูก

และคอจะระคายเคือง แสบ

ที่ความเข้มข้น มากกว่า 1,000 พีพีเอ็ม เมื่อเริ่มสัมผัสจะมีการแสบตา จมูก คอ

และส่วนของระบบทางเดินหายใจช่วงต้นทันที

ที่ความเข้มข้น สูงกว่า 2,000 พีพีเอ็ม ถ้าได้สัมผัสเป็นเวลานานจะหายใจติดขัด

เจ็บหน้าอก หอบคลมบีบเกร็ง มีเสมหะและการทำงานของปอดล้มเหลวจากการเกิดน้ำท่วมปอด

สัมผัสทางผิวหนัง

การสัมผัสถูกผิวหนังจะเป็นผื่นแดง บวม เป็นแผล ทำให้ผิวหนังแสบไหม้ถ้าได้รับ

ปริมาณมากๆ

การกิน หรือกลืนเข้าไปในร่างกาย

การกิน หรือกลืนเข้าไป จะทำให้แสบไหม้ตามทางเดินอาหาร ตั้งแต่บริเวณปาก คอ

หลอดอาหาร และท้อง

สัมผัสถูกตา

การสัมผัสถูกตาจะทำให้เจ็บตา เป็นผื่นแดง ตาบวม น้ำตาไหล ทำลายเนื้อเยื่อของดวงตา

การก่อมะเร็ง และความผิดปกติอื่น

แอมโมเนียจัดเป็นสารก่อมะเร็ง และทำลายไต ตับ ปอด ระบบประสาทส่วนกลาง และจัดเป็นสารที่มีฤทธิ์กัดกร่อน

การระเบิด และติดไฟ

ไอของแอมโมเนียบริสุทธิ์ที่มีความเข้มข้น 16-25% โดยปริมาตร เมื่อได้รับความร้อนสามารถเกิดการระเบิดอย่างรุนแรงได้ในที่อับอากาศ

ปริมาณของก๊าซแอมโมเนียที่มีการผลิต และแจ้งข้อมูลต่อหน่วยงานของ United States Environmental Protection Agency นั้น 80% ของปริมาณการผลิตจะนำไปใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตปุ๋ยยูเรีย 2% นำมาใช้สำหรับอุตสาหกรรมทำความเย็น และใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไปอื่นๆ แต่สำหรับประโยชน์ของก๊าซแอมโมเนียในประเทศไทยนั้น นอกจากนิยมนำไปใช้เพื่อทำความเย็นในระบบทำความเย็นของโรงงานห้องเย็นเนื่องจากมีราคาถูกแล้ว สารดังกล่าวยังถูกนำมาเป็นวัตถุดิบหลักสำหรับอุตสาหกรรมอื่นๆ อีก เช่น การผลิตปุ๋ยยูเรีย หรือแอมโมเนียมไนเตรท, นำไปเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับอุตสาหกรรมผลิตเม็ดพลาสติก, ใช้ในการล้างฤทธิ์กรดของน้ำมันดิบสำหรับอุตสาหกรรมปิโตรเลียม, ใช้ป้องกันไม่ให้ น้ำยางแข็งตัวในระหว่างการเก็บและขนส่ง น้ำยางดิบที่กรีดยากต้นยาง เป็นต้น นอกจากนี้ก๊าซแอมโมเนียมีการลักลอบขนถ่าย เพื่อนำไปเป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตสารเสพติดชื่อ Methamphetamine ที่มีการลักลอบผลิตในสหรัฐฯ ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของอุบัติเหตุร้ายแรงของก๊าซดังกล่าวในสหรัฐฯ (Anonymous, 2000a and Anonymous 2000b)

และแม้ว่าแอมโมเนียจะถูกจัดให้มีระดับความปลอดภัยในการใช้งานต่ำกว่าสารทำความเย็นกลุ่ม HFC, HCFC และสารทำความเย็นกลุ่ม CFC แต่แอมโมเนียก็ยังมีความปลอดภัยสูงกว่าสารทำความเย็นประเภทไวโนล คลอไรด์ ดังตารางที่ 3 ซึ่งจัดระดับความปลอดภัยกลุ่มของสารทำความเย็น

ตารางที่ 3 การจัดกลุ่มของสารทำความเย็นตามระดับความปลอดภัย

Increasing Flammability ↑	3 Higher Flammability	A3 R-600a (Isobutane) R-290 (Propane)	B3 R-1140 (Vinyl chloride)
	2 Lower Flammability	A2 HFC-32 HFC-143a HFC-152a	B2 R-717 (Ammonia)
	1 No Flame Propagation	A1 CFC-11 CFC-12 HCFC-22 HFC-125 HFC-134a	B1 HCFC-123
		A Lower Toxicity	B Higher Toxicity
Increasing Toxicity →			

ที่มา: ชูชัย (2546)

ชนิดของเครื่องทำความเย็น และห้องเย็น

จากคำอธิบายรูปแบบการทำงานของวงจรและชุดอุปกรณ์ในระบบทำความเย็นที่แสดงในภาพที่ 4 วงจร และชุดอุปกรณ์ดังกล่าวนี้เป็นอุปกรณ์พื้นฐานของระบบทำความเย็นซึ่งต้องนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ เกิดเป็นระบบเครื่องทำความเย็นชนิดต่างๆ ขึ้น เช่น Air Blast freezer, Tunnel freezer, Spiral Belt freezer เป็นต้น

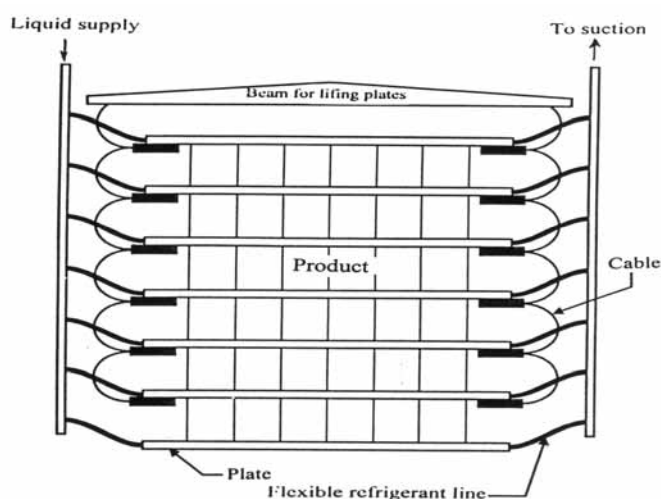
เราสามารถจัดแบ่งลักษณะของระบบเครื่องจักรที่ใช้ในกรรมวิธีการแช่เยือกแข็ง หรือกรรมวิธีการให้ความเย็นกับผลิตภัณฑ์อาหารสามารถแบ่งเป็น 4 กลุ่ม โดยอาศัยหลักการนำ และการพาความร้อนออกจากชิ้นของอาหารดังนี้ (มยุรี, 2527; Stoecker, 1998 และ Dossat, 1997)

1. กลุ่ม Sharp freezing

เป็นการให้ความเย็นโดยการนำชิ้นวัสดุ หรืออาหารไปวางบนชั้นของชุดทำความเย็น เพื่อให้เกิดการนำความร้อนออกจากชิ้นอาหาร ดังนั้น ด้านที่สัมผัสชุดทำความเย็นที่มีสารทำความเย็นอยู่ภายในจะแข็ง หรือเย็นเร็วกว่าอีกด้านหนึ่ง วิธีนี้เป็นการแช่แข็งอย่างง่าย เหมาะสำหรับชิ้นอาหารที่มีรูปร่างไม่แน่นอน และมีปริมาณมาก ระบบทำความเย็นไม่ซับซ้อน ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาระบบทำความเย็นไม่มากเท่าวิธีอื่น แต่ใช้เวลาในการทำให้ชิ้นอาหารแข็งตามที่ต้องการค่อนข้างนาน ซึ่งอาจใช้เวลาตั้งแต่ 3 ชั่วโมง ถึง 3 วัน ขึ้นกับปริมาณ และขนาดของชิ้นอาหาร

2. กลุ่ม Contact freezing or plate freezing

เป็นการนำความร้อนออกจากชิ้นอาหาร โดยให้แผ่นโลหะที่มีสารทำความเย็นไหลอยู่ภายในมาสัมผัสด้านทั้งสองของผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนออกจากชิ้นอาหาร และลดเวลาในการแช่แข็งลง แต่ชิ้นอาหารต้องมีขนาด รูปร่างที่สม่ำเสมอ ซึ่งอาจนำชิ้นอาหารมาใส่ภาชนะบรรจุเช่น กล่องโลหะก่อนที่นำไปแช่แข็งเพื่อให้ชิ้นอาหารมีความสม่ำเสมอ เวลาที่ใช้ในการแช่แข็งมักไม่เกิน 4 ชั่วโมง โดยมักนิยมทำเป็นตู้มากกว่าจะทำเป็นห้องเย็นขนาดใหญ่ดังภาพที่ 5



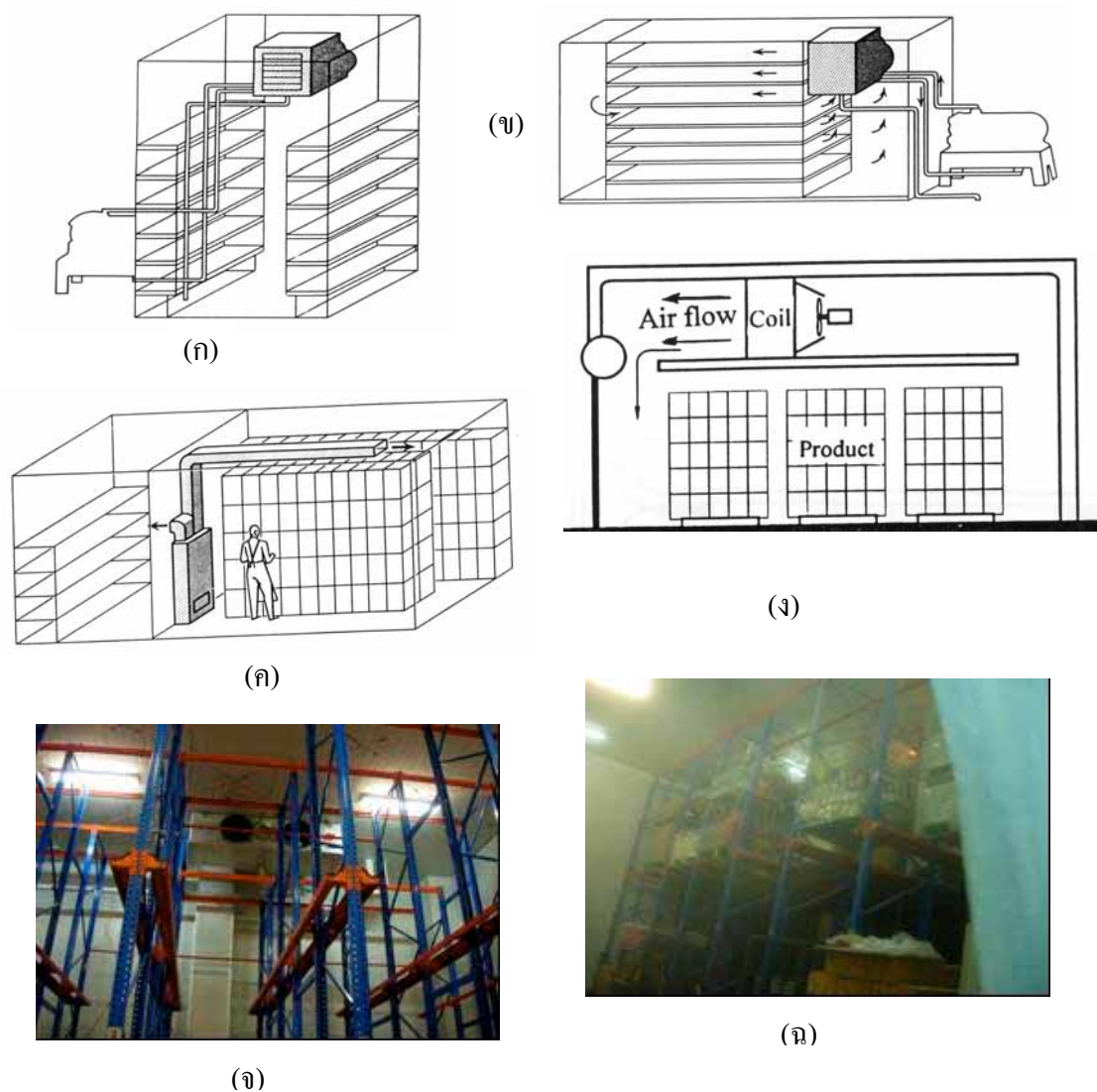
ภาพที่ 5 Contact plate freezer ชนิด Horizontal plate freezer

ที่มา: Stoecker (1998)

ลักษณะการวางแผ่นโลหะของ Contact plate freezer สามารถออกแบบให้สัมผัสกับชิ้นอาหารได้ 2 แบบ คือ แบบสัมผัสในแนวนอน (Horizontal plate freezer) แผ่นโลหะจะวางในแนวนานกับพื้นราบ เมื่อวางชิ้นอาหารลงบนแผ่นโลหะแล้ว จะสามารถเลื่อนแผ่นโลหะลงประกบกับชิ้นอาหารด้วยระบบไฮดรอลิก เพื่อจัดช่องความหนาให้เหมาะสมกับความหนาของผลิตภัณฑ์และจะเปิด-ปิดคู่เพื่อนำชิ้นอาหารที่แช่แข็งแล้วออกมาเท่านั้น แบบสัมผัสในแนวตั้ง (Vertical plate freezer) ใช้กับการแช่แข็งปลาในเรือประมง ประตูเปิด-ปิดอาจอยู่ด้านเดียวกันหรือด้านตรงข้าม เพื่ออาศัยแรงโน้มถ่วงในการจัดเรียงชิ้นอาหาร และขนถ่าย

2. กลุ่ม Air blast system

ระบบของเครื่องทำความเย็นในกลุ่มนี้จะใช้หลักการของการพาความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์อาหารแช่แข็งโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของลมเย็นพาความร้อนผ่านชุดขดลวดทำความเย็นที่มีสารทำความเย็นอยู่ภายใน (Tressler and Evers, 1957) ซึ่งเป็นชุดขดลวดที่อยู่ภายในของชุดอุปกรณ์หม้อต้มระเหยของระบบทำความเย็น การเคลื่อนที่ของลมเย็นภายในห้องจะเกิดจากพัดลมขนาดใหญ่ที่ติดตั้งอยู่ ซึ่งมีหน้าที่สร้าง ลมเย็นมีความเร็วสูงตั้งแต่ประมาณ 100 ฟุตต่อวินาที จนถึง 3,500 ฟุตต่อวินาที ใช้อุณหภูมิของลมประมาณ -30°C ถึง -40°C ผ่านผลิตภัณฑ์อาหารที่ต้องการแช่แข็ง ซึ่งมีผู้ศึกษาความเร็วลมที่เหมาะสมนั้นอยู่ที่ประมาณ 2,500 ฟุตต่อวินาทีที่ -20°F และอาจเพิ่มความเร็วได้ถึง 3,200 ฟุตต่อวินาทีที่ -20°F เพื่อลดเวลาแช่แข็งลงให้ไม่เกิน 4 ชั่วโมง หรือ (Duiven and Binard, 2002) อาจเลือกใช้สภาวะที่ความเร็วลมประมาณ 4 เมตรต่อวินาทีที่ -40°C ที่ระยะห่างระหว่างผลิตภัณฑ์อาหารแช่แข็งที่บรรจุอยู่ในบรรจุภัณฑ์แล้วไม่เกิน 70 มิลลิเมตร จะใช้เวลาในการแช่แข็งประมาณ 16 ถึง 30 ชั่วโมง ในยุคเริ่มต้นของระบบ Air blast จะเป็นการนำผลิตภัณฑ์อาหารมาแขวนอยู่กลางอากาศ หรือวางอยู่บนชั้นที่ติดตั้งอยู่ภายในห้องปิด จากนั้นจึงปิดประตู และเปิดให้พัดลมที่อยู่ภายในห้องเริ่มทำงาน ในบางกรณีก็มีการนำระบบ Air blast มาใช้เก็บผลิตภัณฑ์อาหารที่ผ่านการแช่แข็งแล้วได้เช่นกัน ดังภาพที่ 6 ซึ่งแสดงโครงร่างการออกแบบเพื่อใช้งานระบบ Air blast freezer ในแบบต่างๆ



- (ก) Air blast freezer ขนาดเล็กเพื่อประหยัคพื้นที่ติดตั้งห้องเย็น
- (ข) Air blast freezer ขนาดใหญ่มีการออกแบบให้ลมเย็นไหลผ่านชั้นในระดับต่างๆ
- (ค) ห้อง Air blast freezer สำหรับแช่แข็งทางด้านซ้าย และห้องเย็นเก็บสินค้าทางด้านขวา
- (ง) ห้อง Air blast ขนาดใหญ่ออกแบบสำหรับแช่แข็ง และเป็นห้องเย็นเก็บสินค้า
- (จ) ชั้นเก็บผลิตภัณฑ์อาหารที่ผ่านกระบวนการแช่แข็ง และชุดอุปกรณ์เครื่องดัมระเหย
- (ฉ) การใช้ห้องเย็นประเภท Air blast freezer เก็บผลิตภัณฑ์อาหารแช่แข็ง

ภาพที่ 6 รูปแบบของห้องเย็นที่ใช้ระบบ Air Blast freezer ขนาดต่างๆ

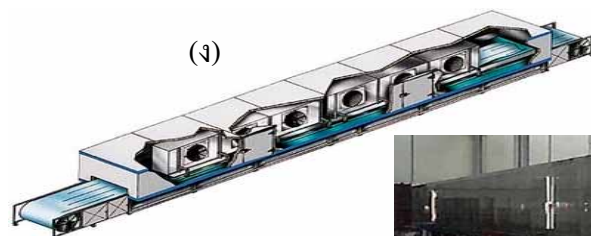
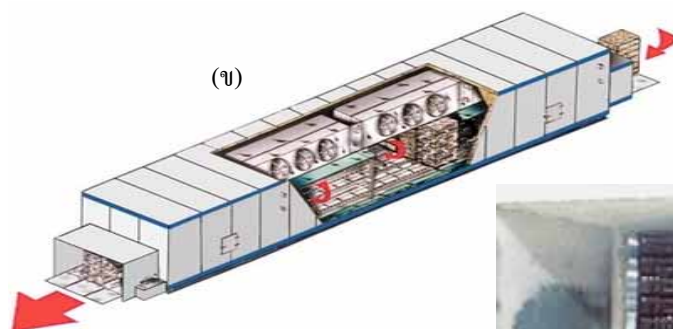
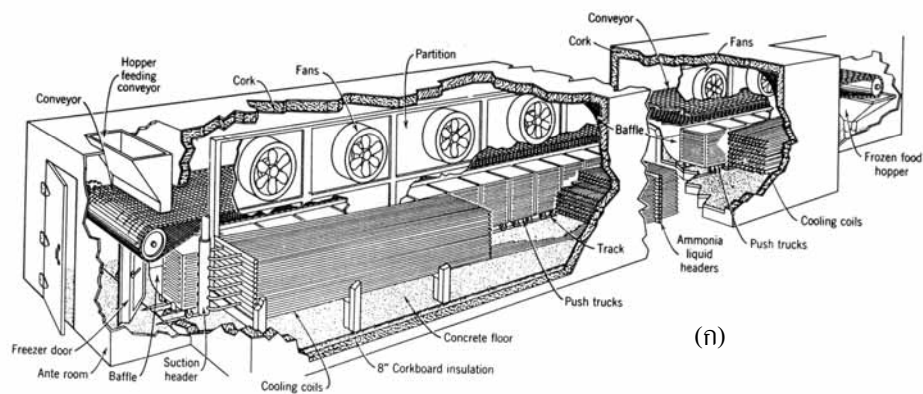
ที่มา: Dossat (1997) (ก), (ข) และ (ค), Stoecker (1998) (ง) และ บริษัท ชันชาชน อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด (2005) (จ) และ (ฉ)

Tressler and Evers (1957) กล่าวถึงระบบ Air blast freezer ว่ามีข้อเสียคือ ถ้าใช้ความเร็วของลมเย็นมากเกินไปเพื่อแช่แข็งผลิตภัณฑ์อาหาร จะทำให้ความชื้นบนชั้นผิวของผลิตภัณฑ์อาหารที่ต้องการแช่แข็งระเหยออกไปมาก เมื่อนำผลิตภัณฑ์อาหารแช่แข็งมาละลายความเย็นกลับคืนสภาพเดิม ผิวของผลิตภัณฑ์อาหารแช่แข็งนั้นจะมีลักษณะแห้ง หรือที่เรียกว่า Freezer burn ซึ่งระบบ Air blast freezer นี้เหมาะที่สุด ที่จะนำมาใช้กับระบบห้องเย็นเพื่อเก็บรักษาความเย็นกับผลิตภัณฑ์อาหารที่แช่แข็งแล้ว

ต่อมาได้มีการพัฒนานำระบบ Air blast มาใช้ร่วมกับสายพานลำเลียง หรือใช้แรงของลมเย็นที่พัดยกขึ้นอาหารให้ลอยขึ้นจากสายพานเล็กน้อย เพื่อลดระยะเวลาของการแช่แข็งทำให้สามารถแบ่งลักษณะการประยุกต์ใช้รูปแบบของเครื่องจักรในกลุ่มนี้ออกได้เป็น 3 ลักษณะ คือ Tunnel freezer, Belt freezer และ Spiral freezer

- Tunnel freezer

นิยมนำมาใช้เพื่อจุดประสงค์ในการแช่แข็งผลิตภัณฑ์อาหาร โดยอาจออกแบบให้วางผลิตภัณฑ์อาหารที่ต้องการแช่แข็งลงบนสายพานชนิดทึบ หรือถาด และวางถาดลงบนชั้น หรือชั้นภายในรถเข็นเพื่อจะเข็น หรือลากผลิตภัณฑ์อาหารที่ต้องการแช่แข็งผ่านไปตามช่องอุโมงค์จากด้านต้นทางไปออกปลายอีกด้านของอุโมงค์ โดยมีกระแสนลมเย็นที่สร้างจากพัดลมขนาดใหญ่ที่ติดตั้งอยู่ภายในช่องอุโมงค์เป็นตัวพาความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์อาหาร โดยระยะเวลาการแช่แข็งจะขึ้นกับ ความเร็วของสายพาน หรือรถเข็น อุณหภูมิ ขนาดของผลิตภัณฑ์อาหารที่ต้องการจะแช่แข็ง ซึ่งโดยมากมักมีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอ และความเร็วของลมในอุโมงค์ที่กำหนดไว้ตั้งแต่ 100-120 ฟุตต่อนาทีที่อุณหภูมิ 0° ฟ ถึง -30° ฟ (Tressler and Evers, 1957) ซึ่งรูปแบบการบรรจุผลิตภัณฑ์ที่ต้องการแช่แข็งกับ freezer ชนิดนี้จะมีการใช้งานในรูปแบบต่างๆ ตามภาพที่ 7 ซึ่งมีทั้งแบบบรรจุผลิตภัณฑ์ลงในรถเข็น และสายพาน



- (ก) และ (ข) ภาพตัดขวางแสดงโครงสร้างของ Drag-thru-dolly tunnel freezer ที่ใช้รถเข็น
- (ค) แสดงการทำงานของ Dolly-thru tunnel freezer
- (ง) ภาพตัดขวางแสดงโครงสร้างของ Belt tunnel freezer ที่ใช้สายพานชนิดที่บีบเป็นตัวพาผลิตภัณฑ์อาหารแช่แข็ง
- (จ) Belt tunnel freezer

ภาพที่ 7 ภาพ Tunnel freezer แบบต่างๆ

ที่มา: Donald and Clifford (1957) (ก) และ anonymous (2000c) (ข), (ค), (ง) และ (จ)

- Belt freezer

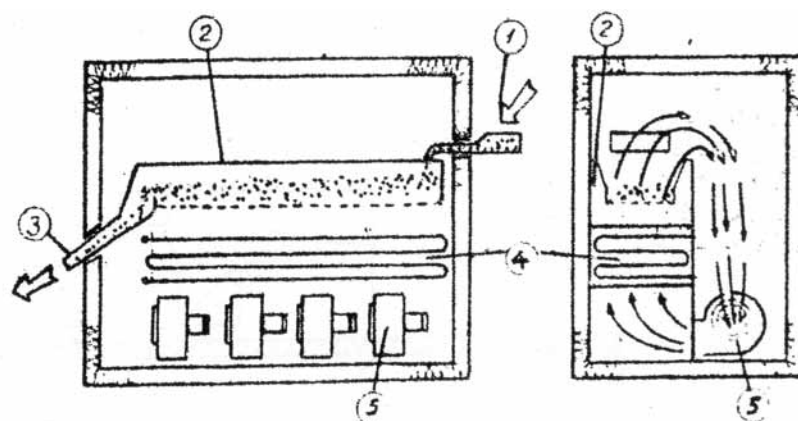
เครื่องแช่แข็งชนิดนี้ดัดแปลงขึ้นเพื่อจุดประสงค์ในการขนถ่ายผลิตภัณฑ์จากพื้นที่การผลิตหนึ่งไปยังอีกพื้นที่หนึ่ง โดยนำหลักการของเครื่อง Tunnel freezer มาประยุกต์ใช้ร่วมกัน โดยความแตกต่างจะอยู่ที่ตัวของสายพานซึ่งออกแบบให้มีรู หรือช่องที่ให้ลมเย็นพัดผ่านผลิตภัณฑ์ที่ต้องการแช่แข็ง ซึ่งผลิตภัณฑ์จะเคลื่อนตัวไปบนสายพานตามความเร็วที่กำหนด และไปออกยังอีกข้างหนึ่งเพื่อทำการบรรจุหีบห่อ

เครื่องแช่แข็งชนิด Belt freezer อาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า IQF (Individual Quick Frozen) เนื่องจากการออกแบบลักษณะการไหลของลมเย็นให้พัดขึ้นมาจากด้านล่างของสายพาน ทำให้เกิดแรงยกผลิตภัณฑ์ไม่ให้ติดกับสายพาน และในบางครั้งอาจมีการให้แรงสั่นสะเทือนกับสายพานร่วมกับแรงลมด้วย (เรียกเครื่องแช่แข็งชนิดนี้ว่า Fluidised bed freezer) เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ไม่แข็งตัวติดสายพาน และถูกแช่แข็งสม่ำเสมอทั้งชิ้น ซึ่งวิธีนี้เหมาะสำหรับชิ้นอาหารที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา แต่ปริมาณมาก เช่น พวกลูกไม้ พืชจำพวกถั่ว ข้าวโพด เป็นต้น

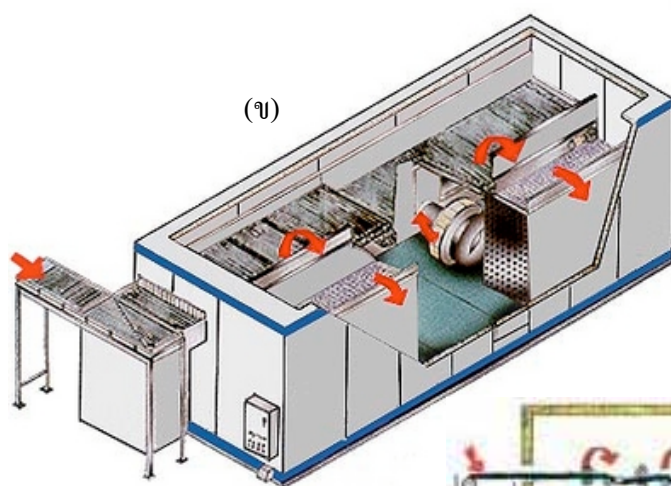
Fluidised bed freezer มีการทำงานโดยใช้อุปกรณ์ต่างๆ ตามภาพที่ 8 (ก) คือ

1. สายพานรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการแช่แข็ง เช่น พวกลูกไม้พืช
2. สายพานแบบสั่นสะเทือน และมีลมเย็นพัดผ่าน
3. ทางออกของผลิตภัณฑ์ที่แข็งตัวแล้วจากเครื่อง Fluidised bed Freezer
4. ชุดอุปกรณ์หม้อต้มระเหยของระบบทำความเย็น ที่มีชุดขดลวดทำความเย็นซึ่งมีสารทำความเย็นอยู่ภายใน
5. พัดลมบังคับทิศทางของลมเย็นภายในเครื่อง Fluidised bed Freezer

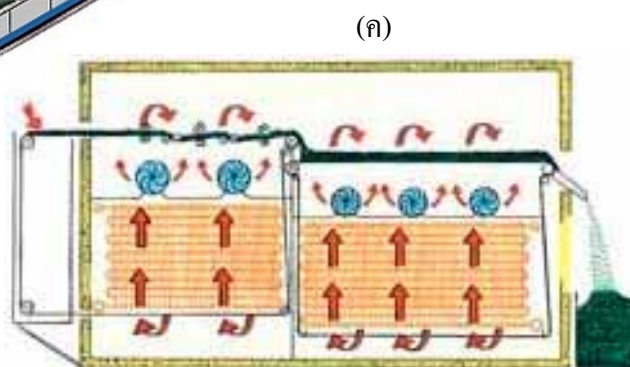
และแสดงการเคลื่อนที่ของผลิตภัณฑ์ผ่านเครื่อง freezer ขณะแช่แข็งตามภาพตัดขวางในภาพที่ 8 (ข) และแสดงทิศทางการเคลื่อนที่หมุนเวียนของลมเย็นภายในเครื่องตามทิศทางลูกศรในภาพที่ 8 (ค)



(ก) Fluidised bed freezer



(ข)



(ค)

(ก) แสดงการทำงานของระบบ Fluidised bed freezer

(ข) แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของผลิตภัณฑ์ขณะดำเนินการแช่แข็งของระบบ Belt freezer

และ

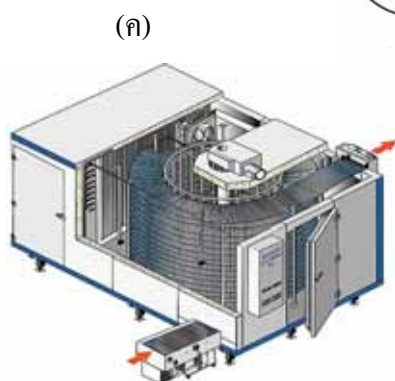
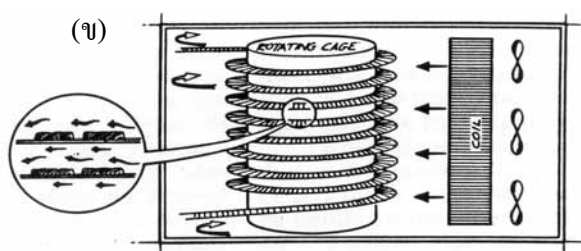
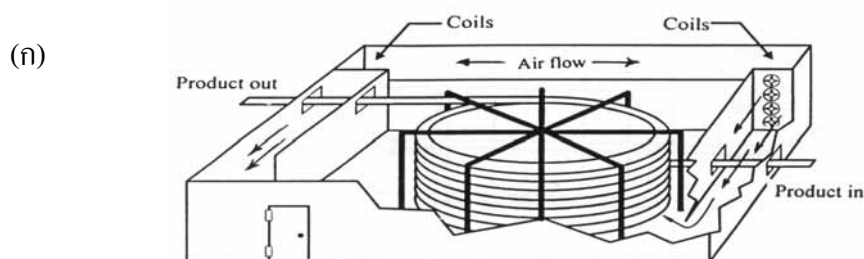
(ค) จำลองเส้นทางการเคลื่อนที่ของลมเย็นภายในเครื่อง Belt freezer

ภาพที่ 8 การทำงานของ Fluidised bed freezer และทิศทางการเคลื่อนที่ของผลิตภัณฑ์ และลมเย็น

ที่มา: มยุรี (2527) (ก) และ anonymous (2000c) (ข) และ (ค)

- Spiral freezer

เป็นเครื่องแช่แข็งผลิตภัณฑ์อาหารที่อาศัยหลักการพาความร้อนออกจากชิ้นอาหารทั้งด้านบนและด้านล่าง ด้วยลมเย็นที่มีความเร็วประมาณ 1,000 ฟุตต่อวินาทีดังภาพที่ 9 (ข) โดยอาจปรับความเร็วของลมให้มาก หรือน้อยกว่านี้ก็ได้ตามน้ำหนัก และขนาดของชิ้นอาหาร แต่เส้นทางการเคลื่อนที่ของผลิตภัณฑ์อาหารจะเคลื่อนที่ไปบนสายพานที่หมุนวนรอบแกนของเครื่องเป็นวงกลม ตามที่ออกแบบแทนการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงเหมือนระบบ Belt freezer ดังภาพที่ 9 (ก) และ (ค)



(ก) แสดงการไหลของอากาศและการเคลื่อนที่ของผลิตภัณฑ์ภายในเครื่อง Spiral freezer

(ข) แสดงลักษณะการไหลของลมเย็นผ่านชิ้นอาหาร

(ค) ภาพตัดขวางของเครื่อง Spiral freezer

ภาพที่ 9 แบบจำลองการทำงานของ Spiral freezer และทิศทางการเคลื่อนที่ของผลิตภัณฑ์และลมเย็น

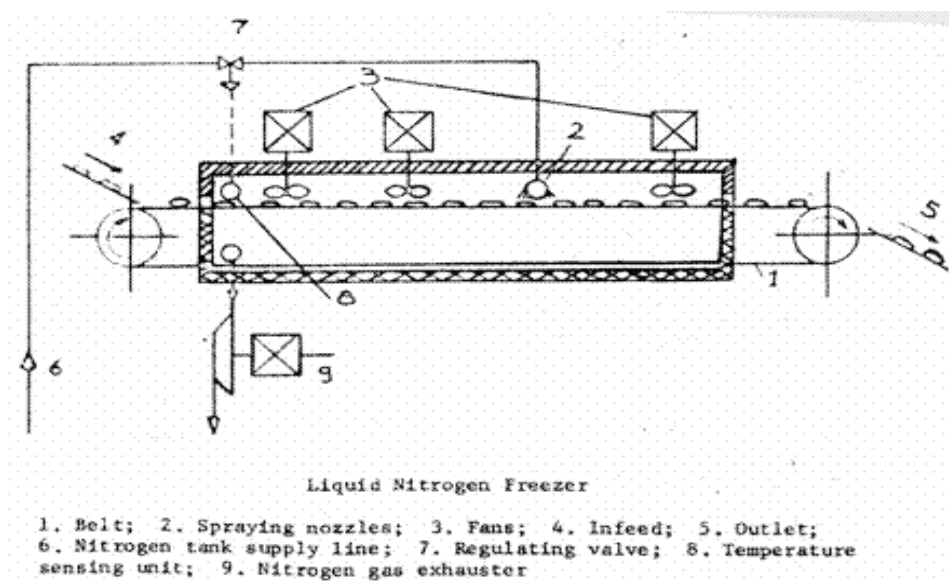
ที่มา: Stoecker (1998) (ก), Dossat (1997) (ข) และ anonymous (2000c) (ค)

4. กลุ่ม Evaporation liquid freezing

เครื่องจักรที่ใช้แช่แข็งผลิตภัณฑ์อาหาร จะมีลักษณะคล้ายกับเครื่อง Belt freezer และ Tunnel freezer ดังภาพที่ 10 ซึ่งเป็นภาพตัดขวางของเครื่อง Liquid nitrogen freezer การแช่แข็งลักษณะนี้จัดเป็นการแช่แข็งผลิตภัณฑ์โดยการพาความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์ที่ต้องการแช่แข็งอีกเช่นกัน แต่จะใช้ไอของสารทำความเย็นที่ฉีดพ่นออกจากเครื่องในระหว่างที่ผลิตภัณฑ์เคลื่อนที่ผ่านอุโมงค์เป็นตัวกลาง แทนอากาศเย็น ซึ่งการแช่แข็งลักษณะนี้สารที่ใช้ฉีดพ่นจะต้องมีจุดเดือดที่ต่ำ จึงมักใช้สารพวกไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen freezer) และ สารประกอบฟรืออนเหลว (Liquid fluorocarbon freezant system)

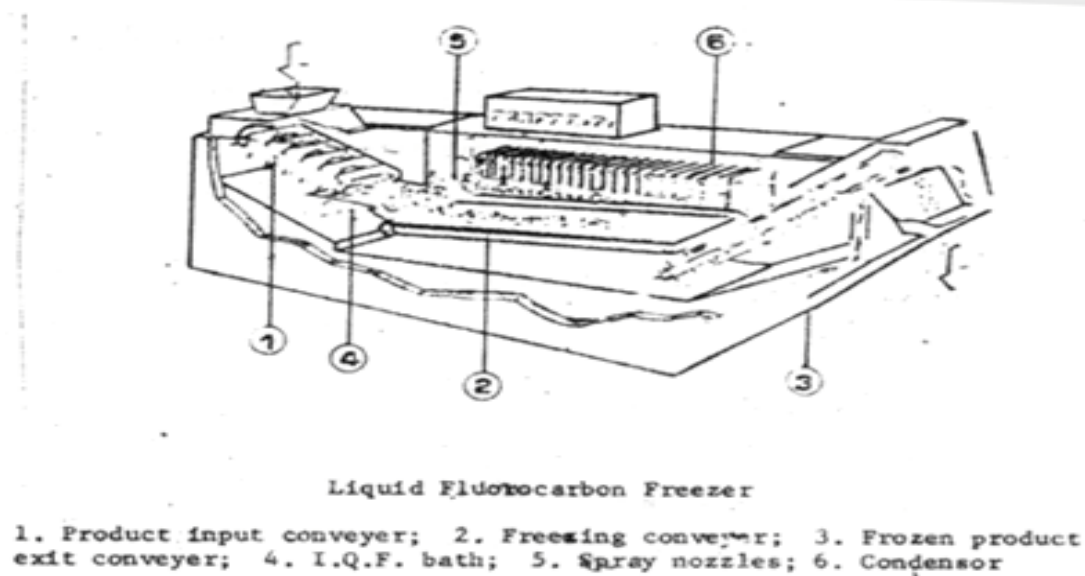
Liquid nitrogen freezer เครื่องจักรจะมีลักษณะคล้ายกับเครื่อง Belt freezer โดยจะพ่นไนโตรเจนเหลวที่มีอุณหภูมิ -196°C ลงมา และใช้พัดลมเป่าเพื่อกระจายความเย็นให้ทั่วถึง วิธีนี้จะไม่เหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นสูง เนื่องจากจะสิ้นเปลืองไนโตรเจนเหลวสูง และผลิตภัณฑ์อาจแตกร้าวได้จากความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวกับอุณหภูมิไอของไนโตรเจนเหลวมีมาก

Liquid fluorocarbon freezer นิยมใช้ R-12 ที่มีอุณหภูมิประมาณ -30°C ฉีดพ่นบนผลิตภัณฑ์อาหารที่อยู่บนสายพานดังภาพตัดขวางแสดงรายละเอียดของเครื่องแช่แข็งชนิดนี้ในภาพที่ 11 โดยปกติการตกค้างของฟรืออนบนผลิตภัณฑ์ทั่วไปนั้นมีน้อยมาก ยกเว้นถ้าผลิตภัณฑ์ประกอบด้วยไขมันอยู่มากเท่านั้น



ภาพที่ 10 ภาพตัดภายในเครื่อง Liquid nitrogen freezer และส่วนประกอบต่างๆ
ของเครื่อง

ที่มา: มยุรี (2547)



ภาพที่ 11 ภาพตัดภายในเครื่อง Liquid Fluorocarbon freezer และส่วนประกอบต่างๆ
ของเครื่อง

ที่มา: มยุรี (2547)

โรงงานห้องเย็นกับกฎหมายที่เกี่ยวข้อง

จากข้อมูลความปลอดภัยของก๊าซแอมโมเนีย นั้น แม้ว่าก๊าซชนิดนี้จะมีน้ำหนักเบาที่อากาศถึง 0.579 เท่า (อากาศมีค่าเท่ากับ 1) (anonymous, 2000a) แต่มักพบว่าการรายงานลักษณะการรั่วของก๊าซแอมโมเนีย นั้น มักเกิดเป็นลักษณะกลุ่มหมอกสีขาว (Vapor clouds) ลอยอยู่ระดับพื้นดิน ซึ่งเป็นลักษณะดังกล่าวเป็นลักษณะพฤติกรรมของก๊าซที่มีน้ำหนักมากกว่าอากาศ (Dense gas) ที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากในกลุ่มของไอก๊าซแอมโมเนียที่รั่วไหลออกมานั้นมีการควบแน่นเปลี่ยนแปลงสถานะของไอลงมาสู่ของเหลวแขวนลอยอยู่ภายในกลุ่มของไอก๊าซที่รั่วไหลออกมา จึงทำให้กลุ่มของไอก๊าซแอมโมเนียที่รั่วไหลออกมามีน้ำหนักมากขึ้นและลอยอยู่ในระดับพื้นดิน และเป็นอันตรายต่อผู้ที่สูดดมกลุ่มของไอก๊าซแอมโมเนียที่รั่วไหลออกมา

อุบัติเหตุรั่วไหลของสารทำความเย็น

สำหรับจำนวนโรงงานในประเทศไทยซึ่งเป็นผู้ผลิตอาหารแช่แข็งส่งออกในอันดับต้นๆ ของโลก ระบบการผลิตสินค้าแช่แข็งและอุปกรณ์ให้ความเย็นแก่สินค้าและวัตถุดิบ รวมถึงระบบห้องเย็นเพื่อเก็บรักษาสินค้าที่ผลิตขึ้นไว้รอการจำหน่าย สารเคมีที่เป็นส่วนสำคัญของระบบดังกล่าว นั้น มักมีส่วนประกอบของสารเคมีที่มีอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานกับเครื่องจักรดังกล่าว เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซแอมโมเนีย เป็นต้น เมื่อสารเคมีที่กล่าวมานั้นเกิดการรั่วไหลออกมานอกระบบทำความเย็น ไม่ว่าจะเป็นสาเหตุเนื่องจากความบกพร่องของผู้ควบคุมอุปกรณ์นั้นๆ การใช้งานอุปกรณ์ที่ผิดวิธี หรือเกิดจากความบกพร่องของอุปกรณ์ที่ขาดการดูแล ซึ่งเหตุดังกล่าวเมื่อเกิดขึ้นแล้วนั้นจะทำให้เกิดอันตรายต่อชีวิตของผู้ที่ปฏิบัติงาน และทรัพย์สินขององค์กรที่มีการใช้งานอุปกรณ์ดังกล่าว ดังเหตุการณ์ข้อมูลสรุปรายละเอียดของอุบัติเหตุ ความเสียหายที่เป็นผลเนื่องจากอุบัติเหตุของการรั่วไหลของก๊าซแอมโมเนียที่ใช้ในระบบทำความเย็นที่เกิดขึ้นกับโรงงานห้องเย็นของประเทศไทยดังต่อไปนี้

เกิดเหตุรั่วของท่อส่งก๊าซแอมโมเนียเข้าสู่ระบบการผลิตของถังก๊าซแอมโมเนียขนาด 200 ลิตร ภายในโรงงานทำน้ำแข็งกิติ ที่ตั้งอยู่ที่อำเภอเมือง จังหวัดระยอง รั่วไหลเป็นเวลาประมาณครึ่งชั่วโมง ส่งผลให้นักเรียนโรงเรียนบวรรัตนศาสตร์ 1,300 คน และคณะครูเกิดอาการแสบหู แสบตา แน่นหน้าอก หายใจไม่ออกต้องหยุดการเรียนการสอน (เดลินิวส์, 2540)

เกิดเหตุแอมโมเนียรั่วที่ บริษัทยูเนี่ยน โพรเซ่น โปรดักส์ จำกัด ตำบลมหาชัย อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรสาคร มีผู้ถูกนำส่งโรงพยาบาล 21 คน สาเหตุการรั่วเกิดมาจากน็อตที่ข้อต่อชุดท่อลดแรงดันการจ่ายน้ำยาแอมโมเนียขาด ทำให้น้ำยาแอมโมเนียที่ส่งไปตามท่อเพื่อทำความเย็นในห้องเย็นรั่วออกมา (เดลินิวส์, 2541)

ก๊าซแอมโมเนียรั่วจากสาเหตุท่อส่งก๊าซกลับเข้าสู่อุปกรณ์คอมเพรสเซอร์ของถังบรรจุก๊าซแอมโมเนียแตกภายในโรงงานผลิตน้ำแข็ง ที่จังหวัดอำนาจเจริญ ส่งผลให้ก๊าซแอมโมเนียกระจายไปทั่วทิศทาง เกิดขึ้นเมื่อเช้าของวันที่ 25 มกราคม 2543 โดยชาวบ้านที่อาศัยอยู่รอบๆ โรงน้ำแข็งเกียรติอำนาจ หลังศาลากลางจังหวัดได้โทรศัพท์แจ้งไปยังสถานีตำรวจภูธร อำเภอเมืองอำนาจเจริญ เนื่องจากทนสภาพกลิ่นเหม็นของแอมโมเนียที่ถูกปล่อยออกมาจากโรงน้ำแข็งเกียรติอำนาจไม่ไหว ทำให้ชาวบ้านเกิดอาการแสบจมูก ระคายเคืองดวงตาและมีน้ำมูกไหลอยู่ตลอดเวลา (สยามรัฐ, 2543)

แก๊สแอมโมเนียในห้องเย็นของบริษัท ลานนาเกษตรอุตสาหกรรมเชียงใหม่ จำกัด รั่ว พนักงานจำนวน 20 คนได้รับบาดเจ็บ สาเหตุเกิดจากมีแก๊สตกค้างอยู่ในระบบท่อทำความเย็นที่พนักงานเข้าไปซ่อมแซมบำรุงรักษาตามปกติ (แนวหน้า, 2543)

เกิดอุบัติเหตุก๊าซแอมโมเนียรั่วใน บริษัท อุตสาหกรรมห้องเย็นกันดั๋ง จำกัด อำเภอกันดั๋ง จังหวัดตรัง ซึ่งดำเนินการผลิตปลาหมึกแช่แข็ง มีพนักงานได้รับก๊าซดังกล่าวจนหมดสติกว่า 100 คน สาเหตุเกิดจากสายยางที่สวมท่อโดยมี เข็มฉีดยาเพื่อใช้เชื่อมถ่ายเครื่องแยกน้ำมัน (Oil separator) ของชุดคอมเพรสเซอร์หลุดในบริเวณห้องเครื่องทำความเย็นซึ่งอยู่ภายในอาคารผลิตข้างๆ ห้องบรรจุ จึงทำให้ก๊าซรั่วเข้าพื้นที่ผลิต ประกอบกับประตูลูกเงินถูกล็อกจึงทำให้ยอดจำนวนพนักงานที่ประสบอุบัติเหตุดังกล่าวมีสูงกว่า 100 คน (เดลินิวส์, 2543)

เกิดก๊าซแอมโมเนียรั่ว ที่โรงงานบริษัทเอเซียชีฟู้ดสุราษฎร์ธานีโปรดักส์ จำกัด ที่ตั้งอยู่ริมถนนสายเอเชีย อำเภอพุนพิน จังหวัดสุราษฎร์ธานี ซึ่งเป็นโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องเพื่อส่งออก มีคนงานที่สูดดมก๊าซแอมโมเนียเข้าไปเป็นลมหมดสติทั้งหมด 23 คนใช้เวลากว่า 30 นาทีจึงสามารถระงับเหตุ และทำให้ก๊าซเจือจางลงสาเหตุของการรั่วไหลเกิดจากวาล์วปิด-เปิด ของถังเก็บก๊าซแอมโมเนียเพื่อทำน้ำแข็ง แข็งแข็งสนัค่า รั่วขณะขนถ่ายก๊าซแอมโมเนียเข้าเก็บในถัง (เดลินิวส์, 2543)

เกิดสารแอมโมเนียรั่วจากประเก็นวาล์ว ปิด-เปิดเครื่องทำน้ำเย็นของบริษัท เอเชียนซีฟู้ดส์ จำกัด (มหาชน) แต่ช่างควบคุมเครื่องที่อยู่ในที่เกิดเหตุสามารถปิดวาล์วได้ทันทั่วทั้ง จึงทำให้กลิ่นไม่สามารถระเหยออกมาภายนอกโรงงานได้ และไม่มีผู้ใดได้รับอันตรายหรือบาดเจ็บ ภายหลังการตรวจสอบของนายพิจิต รัตกุล ผู้ว่าฯ กรุงเทพฯ ได้สั่งการให้โรงงานดังกล่าวหยุดดำเนินการ 5 วัน จนกว่าจะเปลี่ยนหัววาล์วที่เสียหายให้เรียบร้อยและได้รับการตรวจสอบรับรองจาก กรุงเทพฯ ก่อนจึงจะเปิดดำเนินการได้ตามปกติ (สยามรัฐ, 2543)

เกิดสารแอมโมเนียรั่วขึ้นภายในโรงงานผลิตน้ำแข็งหลอดเจอาร์ ที่ตั้งอยู่ในเขตชุมชนดอนตะโก อำเภอเมือง จังหวัดราชบุรี มีพนักงานของโรงงาน จำนวน 2 คน ถูกสารแอมโมเนียที่รั่วพุ่งรดใส่เต็มตัวจนผิวหนัง บริเวณลำตัวและใบหน้าไหม้เกรียมเป็นผลให้เสียชีวิตในเวลาต่อมา รวมทั้งมีผู้ได้รับบาดเจ็บอีกนับ 10 ราย ส่วนด้านหน้าโรงงานฝั่งตรงข้ามที่มีคันหิ้วขึ้นปกคลุมอยู่ ได้ถูกก๊าซแอมโมเนียที่พุ่งออกมาจากโรงงาน เผาไหม้เกรียมเห็นเป็นทางยาว สาเหตุของการรั่วไหลในครั้งนี้เกิดเนื่องจากโรงงานผลิตน้ำแข็งหลอดเจอาร์ ได้ไปซื้อเครื่องจักรเก่าที่เคยเกิดเหตุการณ์ สารแอมโมเนียรั่วไหลต่อจากโรงงานผลิตน้ำแข็งหลอดจตุ ซึ่งอยู่ในจังหวัดเดียวกันมาดำเนินการผลิตต่อ (สยามรัฐ, 2545)

เกิดเหตุการณ์ท่อส่งก๊าซแอมโมเนียภายในโรงงานแช่แข็งของบริษัท อันดามันซีฟู้ด จังหวัดระนองรั่ว ขณะที่คนงานจำนวน 150 คน ที่ทำหน้าที่ผสมแป้งเพื่อใช้คลุกกับกุ้งสด เพื่อจะนำไปแช่แข็ง กำลังทำงานอยู่ภายในห้องผลิต ท่อก๊าซแอมโมเนียเกิดรั่ว เป็นเหตุให้คนงานกว่า 100 คน แดกตื่นวิ่งหนีเอาตัวรอด เหยียบกันเจ็บกว่า 60 ราย กว่าจะหนีออกมาได้ทั้งหมดต้องใช้เวลากว่า 2 ชั่วโมง สันนิษฐานว่าสาเหตุที่คนงานได้รับบาดเจ็บจำนวนมากในครั้งนี้ คาดว่าทางโรงงานไม่เปิดประตูฉุกเฉิน ด้านหลังห้องทำงานให้คนงานออก จึงเป็นเหตุให้คนงานจำนวนกว่า 100 คน ที่อยู่ภายในห้องแย่งกันวิ่งหนีออกทางประตูหน้าซึ่งมีลักษณะแคบมาก เป็นเหตุให้เกิดการชุลมุน และหกล้มเหยียบกันบาดเจ็บระบุนโรงงานแห่งนี้เคยเกิดเหตุก๊าซรั่วมาแล้วเมื่อปี 2545 มีผู้บาดเจ็บ 10 ราย (คม ชัด ลึก, 2547)

สถิติจำนวนโรงงานห้องเย็น และกฎหมายที่เกี่ยวข้อง

ฐานข้อมูลของกรมโรงงานกระทรวงอุตสาหกรรมปี พ.ศ. 2547 ได้จัดแบ่งประเภทของโรงงานตามประเภทของอุตสาหกรรมออกเป็น 107 ประเภท ตามลำดับที่ของรหัสที่ให้กับอุตสาหกรรมแต่ละประเภท โดยอุตสาหกรรมโรงงานประเภทห้องเย็น ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมอาหารของ

ประเทศนั้น จัดอยู่ในอุตสาหกรรมลำดับที่ 92 และถูกกำหนดให้ต้องจัดทำเอกสาร “รายงานการวิเคราะห์ความเสี่ยงที่อาจเกิดจากการประกอบกิจการในโรงงาน และแผนงานบริหารจัดการความเสี่ยงที่ครอบคลุมถึงแผนฉุกเฉิน และการฝึกซ้อมเพื่อตอบสนองต่อเหตุฉุกเฉินที่เป็นอันตราย” ตามบัญชีแนบท้ายประกาศของ กระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 3 เรื่อง “มาตรการคุ้มครองความปลอดภัยในการดำเนินงาน” ที่กำหนดให้ผู้ประกอบการใน อุตสาหกรรมทั้ง 12 ประเภท รวมทั้งอุตสาหกรรมห้องเย็นที่จัดอยู่ในลำดับที่ 11 จากอุตสาหกรรมทั้ง 12 ประเภท ดังแสดงรายการประเภทอุตสาหกรรมไว้ในตารางที่ 4 ซึ่งอุตสาหกรรมตามตามประกาศแนบท้ายดังกล่าว ที่กำหนดให้ต้องจัดทำ เอกสารรายงานการวิเคราะห์ความเสี่ยงดังกล่าว ซึ่งอุบัติเหตุที่รุนแรง และเกิดบ่อยสำหรับโรงงานดังกล่าวนี้ พบว่าคือเรื่องการรั่วไหลของก๊าซแอมโมเนียที่ใช้เพื่อเป็นสารทำความเย็นในอุปกรณ์ทำความเย็นของธุรกิจดังกล่าว

จากคุณลักษณะของสารทำความเย็นของก๊าซแอมโมเนียที่มีราคาถูก และส่งถ่ายความเย็นได้ดี แม้ว่าข้อมูลจากเอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์ของกรมควบคุมมลพิษนั้น จะบ่งชี้ว่าเป็นสารเคมีที่จัดเป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้สูดดม แต่ระบบทำความเย็นใหญ่ๆ ที่ต้องมีการให้ความเย็นตลอดเวลา ยังคงเลือกใช้ก๊าซแอมโมเนียดังกล่าว เนื่องจากเหตุผลในเรื่องของต้นทุนของการบำรุงรักษาระบบอุปกรณ์ต่ำ และราคาของสารทำความเย็นมีราคาถูกกว่า

เมื่อมีการสำรวจจำนวนของอุตสาหกรรมห้องเย็น จากฐานข้อมูลของกรมโรงงานกระทรวงอุตสาหกรรมปี พ.ศ. 2548 ซึ่งได้ทำการสำรวจอุตสาหกรรมแต่ละประเภทไว้ พบว่า มีจำนวนโรงงานห้องเย็นทั่วประเทศถึง 597 โรงงาน จากข้อมูลในตารางที่ 5 ได้แบ่งโรงงานห้องเย็นตามประเภท และภาค/พื้นที่ทั่วประเทศในเขตจังหวัดใหญ่ๆ ที่เป็นศูนย์กลางของวัตถุดิบการประมง เพื่อการแปรรูปและการผลิต การขนส่ง กระจายสินค้า การค้าขาย และเศรษฐกิจจะพบว่ามีจำนวนของโรงงานห้องเย็นสูงมาก ซึ่งโอกาสในการเกิดอุบัติเหตุดังกล่าวในเบื้องต้นก็จะเพิ่มสูงตามไปด้วยดังข้อมูลอุบัติเหตุรั่วไหลของสารทำความเย็นในเบื้องต้น ดังนั้น หากเราสามารถทราบเวลาของการสะสมของสารทำความเย็นชนิดก๊าซแอมโมเนียที่เกิดการรั่วไหลออกจากระบบเครื่องจักรทำความเย็น เข้าสู่ภายในอาคารของโรงงานห้องเย็นจนถึงระดับที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของพนักงานที่ปฏิบัติงานอยู่ภายในโรงงานห้องเย็นที่เกิดการรั่วไหลก็จะเป็นประโยชน์ต่อการจัดการระบบความปลอดภัยของโรงงานห้องเย็นนั้นๆ

ตารางที่ 4 บัญชีท้ายประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2542) เรื่อง มาตรการคุ้มครองความปลอดภัยในการดำเนินงาน

รายการที่	ลำดับที่	ประเภทหรือชนิดของโรงงานตามบัญชีท้ายกฎกระทรวง (พ.ศ. 2535) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535
1	7 (1) (4)	โรงงานสกัดน้ำมันจากพืช สัตว์ หรือไขมันสัตว์ เฉพาะที่ใช้สารทำลายในการสกัด
2	42 (1) (2)	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับ เคมีภัณฑ์ สารเคมีหรือวัตถุอันตราย
3	43 (1) (2)	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับปุ๋ย หรือสารป้องกัน หรือกำจัดศัตรูพืช หรือสัตว์
4	44	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับการผลิตยางเรซินสังเคราะห์ ยางอีลาสโตเมอร์ พลาสติก หรือเส้นใยสังเคราะห์ซึ่งมีใยแก้ว
5	45 (1) (2)	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับสี น้ำมันชักเงา เซลล์เล็ก แล็กเกอร์ หรือผลิตภัณฑ์สำหรับใช้ยาหรืออุด
6	48 (4)	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับการทำไม้ขีดไฟ วัตถุระเบิด หรือดอกไม้ไฟ
7	49	โรงงานกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม
8	50 (4)	โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียม ถ่านหิน หรือลิกไนต์
9	89	โรงงานผลิตก๊าซ ซึ่งมีก๊าซธรรมชาติ ส่งหรือจำหน่ายก๊าซ
10	91 (2)	โรงงานบรรจุก๊าซ
11	92	โรงงานห้องเย็น
12	99	โรงงานผลิต ซ่อมแซม คัดแปลง เครื่องบรรจุกระสุนปืน วัตถุระเบิด หรือสิ่งอื่นใดที่มีอำนาจในการประหาร ทำลายหรือทำให้หมดสมรรถภาพ ในทำนองเดียวกับอาวุธปืน เครื่องกระสุนปืน หรือวัตถุระเบิด และรวมถึงสิ่งประกอบของสิ่งดังกล่าว

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (2542)

ตารางที่ 5 จำนวนโรงงานห้องเย็นแบ่งตามประเภท และภาค/พื้นที่ทั่วประเทศ

ภาค / พื้นที่	ประเภทโรงงาน			รวม
	ประเภท 3*	ประเภท 2**	ประเภท 1***	
ภาคตะวันตก				12
- สมุทรสงคราม	6	1	-	7
- เพชรบุรี	2	-	-	2
- ราชบุรี	2	-	-	2
- กาญจนบุรี	1	-	-	1
ภาคใต้				82
- ประจวบคีรีขันธ์	7	2	1	10
- นครศรีธรรมราช	3	-	1	4
- ภูเก็ต	4	-	-	4
- สุราษฎร์ธานี	6	3	-	9
- ระนอง	4	-	-	4
- ชุมพร	6	-	-	6
- สงขลา	22	4	1	27
- จังหวัดอื่นๆ ⁴	13	5	-	18
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (อีสาน)				104
- นครราชสีมา	11	7	5	23
- อุบลราชธานี	-	7	1	8
- ขอนแก่น	11	4	2	17
- อุดรธานี	2	11	-	13
- จังหวัดอื่นๆ ¹	14	25	4	43
ภาคเหนือ				88
ภาคเหนือตอนบน				70
- เชียงใหม่	37	8	-	452
- เชียงราย	4	3	1	8
- จังหวัดอื่นๆ ²	6	5	6	17

ตารางที่ 5 (ต่อ)

ภาค / พื้นที่	ประเภทโรงงาน			
	ประเภท 3*	ประเภท 2**	ประเภท 1***	รวม
ภาคเหนือตอนล่าง				18
- พิชณุโลก	2	-	1	3
- นครสวรรค์	1	4	1	6
- เพชรบูรณ์	3	3	-	6
- จังหวัดอื่นๆ ³	-	2	1	3
ภาคตะวันตก				12
- สมุทรสงคราม	6	1	-	7
- เพชรบุรี	2	-	-	2
- ราชบุรี	2	-	-	2
- กาญจนบุรี	1	-	-	1
ภาคใต้				82
- ประจวบคีรีขันธ์	7	2	1	10
- นครศรีธรรมราช	3	-	1	4
- ภูเก็ต	4	-	-	4
- สุราษฎร์ธานี	6	3	-	9
- จังหวัดอื่นๆ ⁴	13	5	-	18
ภาคกลาง				7
- ลพบุรี	3	1	-	4
- สุพรรณบุรี	1	-	-	1
- สระบุรี	2	-	-	2

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2548)

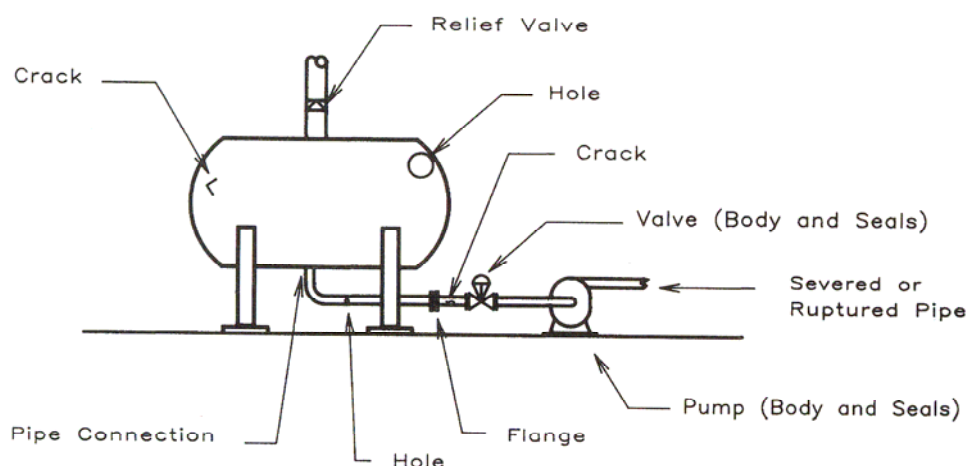
ตารางที่ 5 (ต่อ)

- หมายเหตุ** ¹ จังหวัดอื่นๆ หมายถึง บุรีรัมย์, สุรินทร์, ศรีสะเกษ, ยโสธร, ชัยภูมิ, อำนาจเจริญ,หนองบัวลำภู, เลย, หนองคาย, มหาสารคาม, ร้อยเอ็ด, กาฬสินธุ์, สกลนคร, นครพนม และมุกดาหาร
- ² จังหวัดอื่นๆ หมายถึง ลำพูน, ลำปาง, แพร่, น่าน, อุตรดิตถ์ และพะเยา
- ³ จังหวัดอื่นๆ หมายถึง ตาก, กำแพงเพชร, สุโขทัย และพิจิตร
- ⁴ จังหวัดอื่นๆ หมายถึง กระบี่, พังงา, สตูล, ตรัง, ปัตตานี และยะลา
- * หมายถึง ห้องเย็นที่มีเครื่องจักรเกิน 50 แรงม้า หรือคนงานเกิน 50 คน หรือโรงงานทุกขนาดซึ่งมีการแกะ ล้าง หรือแปรรูปสัตว์ดิบก
- ** หมายถึง ห้องเย็นที่มีเครื่องจักรไม่เกิน 50 แรงม้า และคนงานไม่เกิน 50 คนซึ่งไม่มีการแกะ ล้าง หรือแปรรูปสัตว์ดิบก และไม่จัดอยู่ในจำพวกประเภทที่ 1
- *** หมายถึง ห้องเย็นที่มีเครื่องจักรไม่เกิน 20 แรงม้า และคนงานไม่เกิน 20 คนซึ่งไม่มีการแกะ ล้าง หรือแปรรูปสัตว์ดิบก

ทฤษฎี Source model และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Source model

การรั่วไหลของสารเคมีออกจากระบบสู่ภายนอกนั้น มีสาเหตุมาจากหลายปัจจัย เช่น อาจมาจากรูรั่วหรือรอยแตกของถังเก็บ หรือท่อที่มีสารเคมีดังกล่าวไหลผ่าน การปลดปล่อยไอน้ำจากความดันไอส่วนเกินโดยวาล์วรักษาความดัน (Relief valve) การรั่วซึมออกจากข้อต่อตามปั๊ม หรือตามประเก็นเชื่อมต่อกันของท่อที่ใช้ในกระบวนการผลิต ดังภาพที่ 12 ที่แสดงจุดต่างๆ ในระบบที่สามารถเกิดเหตุการณ์รั่วไหลของสารเคมีออกจากระบบการเก็บรักษา หรือใช้การงาน



ภาพที่ 12 จุดต่างๆ ในระบบการเก็บสารเคมีที่มีโอกาสเกิดการรั่วไหลของสารเคมี
ออกสู่ระบบภายนอก

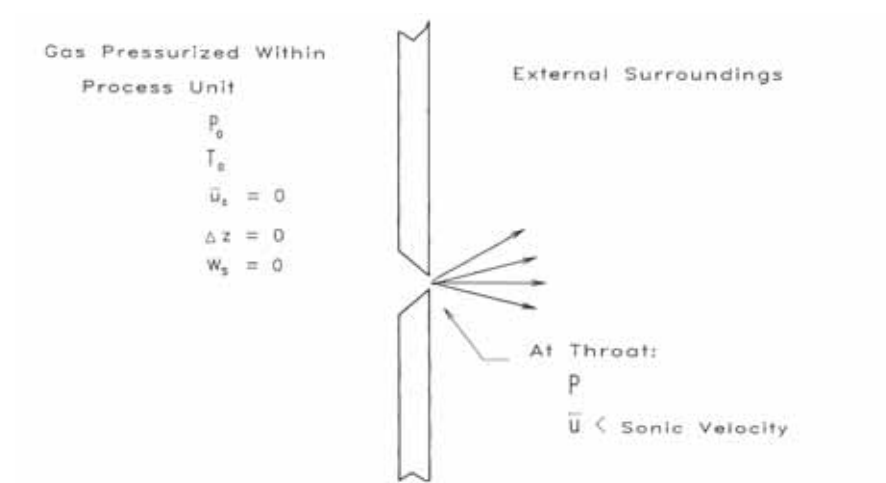
ที่มา: Crowl and Louvar (2001)

สำหรับ Source Model เพื่องานวิจัยฉบับนี้จะอยู่บนสมมุติฐานของเหตุการณ์รั่วของไอของสารแอมโมเนียจากเครื่องทำความเย็นรั่วไหลออกทางรูตู้ห้องปิดภายในอาคาร ภายใต้เงื่อนไขความดันของแอมโมเนีย ในระบบทำความเย็นมีค่าคงที่ตลอดระยะเวลาของการรั่วไหล ซึ่งจะนำหลักการของการคำนวณหาปริมาณก๊าซที่ปลดปล่อยออกมาทางรอยแตก (Flow of vapor through holes) และหลักดุลมวลสาร (Mass balance) มาใช้ในการคำนวณ

การคำนวณหาปริมาณก๊าซที่ปลดปล่อยออกมาทางรอยแตก (Flow of vapor through holes)

การคำนวณหาปริมาณก๊าซที่ปลดปล่อยออกมาทางรอยแตก (Flow of vapor through holes) เป็นการพิจารณาการไหลของก๊าซที่ออกจากรูรั่ว ตามรูปแบบจำลองในภาพที่ 13 ภายใต้เงื่อนไขว่า

1. ความเร็วของการรั่วน้อยกว่า 0.3 เท่าของความเร็วเสียง
2. ขณะที่ก๊าซถูกดันออกมาจากรูรั่ว มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้าน ความหนาแน่น ความดัน อุณหภูมิ และมีการเปลี่ยนแปลงของความเร็วระหว่างการรั่ว
3. ความดันของก๊าซในท่อมมีค่าเท่าเดิมตลอดระยะเวลาของการรั่วไหล
4. การรั่วของก๊าซกระจายตัวแบบอิสระ โดยถูกควบคุมการปลดปล่อยจากขนาดของรูรั่ว



ภาพที่ 13 การร่วแบบอิสระของก๊าซ จากรู่ว และการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้าน
ความหนาแน่น ความดัน อุณหภูมิ และการเปลี่ยนแปลงของความเร็ว
ระหว่างการร่ว

ที่มา: Crowl and Louvar (2001)

เราสามารถคำนวณหาอัตราการปลดปล่อยของก๊าซที่ออกจากกระบวนการได้ดังสมการ

$$Q_m = \rho u A_\phi \quad (1)$$

เมื่อ

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{P}{P_0} \right)^{1/\gamma} \quad (2)$$

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{2g_c C_0^2 R_g T_0}{M} \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\left(\frac{\gamma+1}{\gamma} \right)} \right]} \quad (3)$$

และ

$$\rho_0 = \frac{P_0 M}{R_g T_0} \quad (4)$$

จะได้สมการสำหรับการใช้งานในการคำนวณหาอัตราการปลดปล่อยของก๊าซที่ออกจากกระบวนการ ณ เวลาใดๆ ของการรั่ว ดังนี้

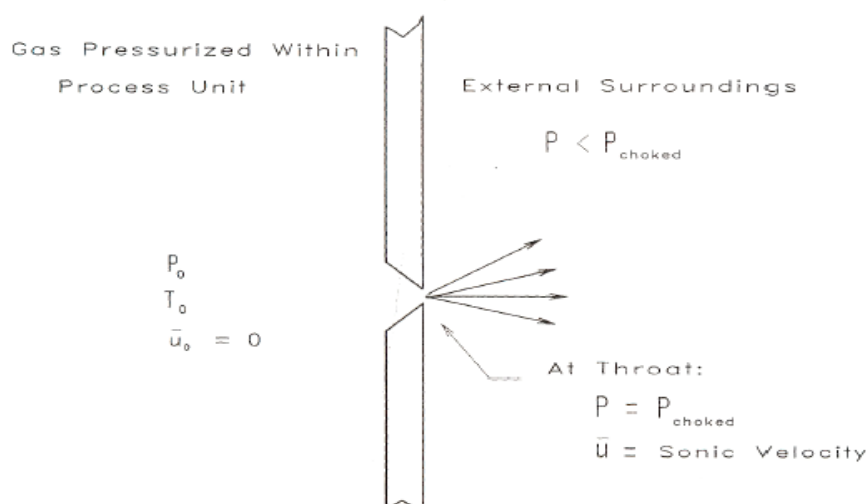
$$Q_m = C_0 A_\phi P_0 \sqrt{\frac{2g_c M}{R_g T_0} \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{P}{P_0} \right)^{2/\gamma} - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{(\gamma+1)/\gamma} \right]} \quad (5)$$

ซึ่งในกรณีที่ P_{chock} เป็นค่าความดันสูงสุด ที่อัตราการรั่วไหลของก๊าซที่ออกจากรูรั่ว ตามภาพที่ 14 จะได้ความสัมพันธ์ของความดันภายในระบบต่อความดันสูงสุด ดังนี้

$$\frac{P_{chock}}{P_0} = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{(\gamma-1)}} \quad (6)$$

โดยมีเงื่อนไขว่า

1. ความเร็วของก๊าซขณะที่ออกจากรูรั่วเท่ากับความเร็วเสียง
2. ความเร็วและอัตราการปลดปล่อยไม่สามารถเพิ่มขึ้นจากความดันภายนอกที่ลดลง



ภาพที่ 14 การรั่วแบบอิสระของก๊าซ จากรูรั่ว ที่ความดัน P_{chock} และมีความเร็วของการรั่วเท่ากับความเร็วเสียง

ที่มา: Crowl and Louvar (2001)

ดังนั้น อัตราการไหลออกจากรูรั่วจะมีค่าสูงสุดเมื่อ P_{chock} มีค่าสูงกว่า 27.8 ปอนด์ (แรง) ต่อตารางนิ้ว (psia) หรือ 13.1 ปอนด์ (แรง) ต่อตารางนิ้วความดันเกจ (psig) สำหรับกรณีการรั่วไหลของก๊าซออกจากรูรั่ว หรือช่องเปิดสู่บรรยากาศภายนอก และสามารถเขียนสมการการคำนวณหาอัตราการปลดปล่อยของก๊าซสูงสุดได้ดังนี้

$$Q_{m(chock)} = C_0 A_\phi P_0 \sqrt{\frac{\gamma g_c M}{R_g T_0} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}} \quad (7)$$

เมื่อ

$Q_{m(chock)}$ = อัตราการปลดปล่อยก๊าซสู่บรรยากาศภายนอก มีหน่วยเป็น ปอนด์ (มวล) ต่อนาที

C_0 = สัมประสิทธิ์ของการปลดปล่อย (Discharge coefficient) ไม่มีหน่วย มีค่าเป็น 1

A_ϕ = พื้นที่หน้าตัดของรูรั่ว มีหน่วยเป็น ตร.ฟุต

P_0 = ความดันของก๊าซในท่อ มีหน่วยเป็น ปอนด์ (แรง) ต่อตารางนิ้ว

γ = สัดส่วนของค่าความจุความร้อนจำเพาะ ไม่มีหน่วย

M = มวลโมเลกุลของก๊าซที่รั่วออกจากท่อ

g_c = ค่าคงที่ของแรงโน้มถ่วงจำเพาะ มีค่าเท่ากับ 32.174 ฟุตปอนด์ (มวล) ต่อปอนด์ (แรง) วินาที²

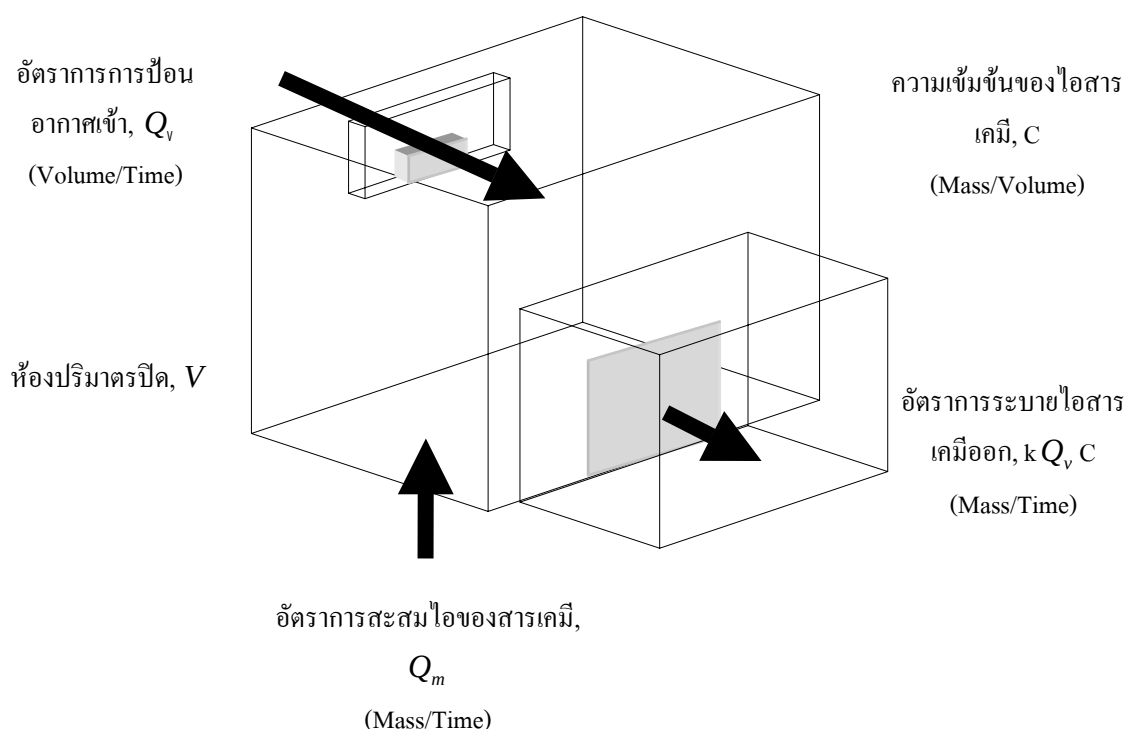
R_g = ค่าคงที่ของแก๊สในอุดมคติ มีค่าเท่ากับ 1,545.3 ฟุตปอนด์ (แรง) ต่อปอนด์ (โมล) องศาแรงกินส์

T_0 = อุณหภูมิสัมบูรณ์ของก๊าซในท่อ มีหน่วยเป็น องศาแรงกินส์

หลักสมดุลมวลสาร (Mass balance)

หลักสมดุลมวลสารในส่วนของการวิจัยฉบับนี้ จะนำมาประยุกต์ใช้เพื่อคำนวณหาความเร็วในการแพร่ของก๊าซแอมโมเนีย หรืออีกนัยคือความเร็วของอากาศที่ไหลออกจากพื้นที่ที่เกิดเหตุการณ์รั่วไหล ของก๊าซแอมโมเนียซึ่งรั่วออกจากระบบทำความเย็น และอยู่ภายในห้องปิดของอาคารผลิต โดยใช้ค่าของความเข้มข้นในระดับที่ทำให้เกิดอันตราย (ความเข้มข้นวิกฤติ) ต่อผู้ปฏิบัติงานในพื้นที่

ดังกล่าวตั้งโมเดลจำลองสถานการณ์ในภาพที่ 15 ที่จำลองรูปห้องแซ่แข็งทางขวาซึ่งภายในห้อง มีชุดอุปกรณ์เครื่องทำความเย็นติดตั้งอยู่ และเกิดเหตุการณ์รั่วไหลของก๊าซแอมโมเนียจากห้องทางขวาสู่ห้องทางซ้ายมือ โดยก๊าซแอมโมเนียจะเคลื่อนที่ผ่านทางช่องเปิด คือ ประตูทางเข้า-ออกของห้องแซ่แข็งทางขวา



ภาพที่ 15 โมเดลภาพจำลองสถานการณ์เกิดเหตุการณ์รั่วไหลของไอแอมโมเนีย โดยดัดแปลงตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับไอระเหยในปริมาตรของระบบปิด

ที่มา: Crawl and Louvar (2001)

ดังนั้น สูตรคำนวณหาความเข้มข้นของสารเคมีในปริมาตรปิดตาม Crawl and Louvar (2001) คือ

$$C_{ppm} = \frac{Q_m R_g T}{k Q_v P M} \times 10^6 \quad (8)$$

เมื่อ

- C_{ppm} = ค่าความเข้มข้นของก๊าซแอมโมเนียในอากาศในห้องปิด ปริมาตร V มีหน่วยเป็น พีพีเอ็ม
- Q_m = อัตราการรั่วของแอมโมเนียเข้าสู่ในห้องปิด มีหน่วยเป็น ปอนด์ (มวล) ต่อวินาที
- kQ_v = อัตราความเข้มข้นสะสมของไอแอมโมเนีย หรืออัตราการระบายไอของสารเคมี ออกจากห้อง มีหน่วยเป็น ลบ.ฟุตต่อวินาที
- k = สัมประสิทธิ์ของการผสม ไม่มีหน่วย มีค่าอยู่ในช่วง 0.1-0.5
- R_g = ค่าคงที่ของแก๊สในอุดมคติ มีค่าเท่ากับ 1,545.3 ฟุตปอนด์ (แรง) ต่อปอนด์ (โมล) องศาแรงกินส์
- T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ มีหน่วยเป็นองศาแรงกินส์
- P = ความดันสัมบูรณ์ของห้องแช่แข็ง มีหน่วยเป็นความดันบรรยากาศ
- M = มวลโมเลกุลของสารเคมีที่แพร่อยู่ในปริมาตรปิด
- V = ปริมาตรของห้องปิด มีหน่วยเป็น ลบ.ฟุต

ถ้าห้องปิดมีอัตราการระบายอากาศออก โดยอาศัยช่องดูดอากาศและช่องเปิดของประตู หรือ หน้าต่างดังนั้นเราสามารถเขียนอัตราการระบายไอของสารเคมีออกจากห้องใหม่ได้เป็น

$$Q_v = v \times \sum A \quad (9)$$

เมื่อ

- A = พื้นที่ของช่องเปิดต่างๆ ที่มีในปริมาตรห้องปิด มีหน่วยเป็น ลบ.ฟุต หรือ ลบ.ม.
- v = อัตราความเร็วของลมที่พัดออกสู่ภายนอกปริมาตรห้องปิด มีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที หรือ ฟุตต่อวินาที

ดังนั้น สามารถเขียนสมการที่ (8) ใหม่ได้เป็น

$$C_{ppm} = \frac{Q_m R_g T}{k v \sum A P M} \times 10^6 \quad (10)$$

โดยที่ C_{ppm} ใช้ค่าความเข้มข้นตามที่ระบุไว้ในฐานข้อมูลของกรมควบคุมมลพิษ $LC_{50} = 2000$ มิลลิกรัมต่อลบ.ม. ที่ 4 ชั่วโมง ดังนั้น สามารถเขียนสมการ (10) ใหม่ได้ดังนี้

$$kv \Sigma A = \frac{Q_m R_g T}{C_{ppm} PM} \times 10^6 \quad (11)$$

และเมื่อค่า $Q_m = Q_{m(chock)}$ สามารถคำนวณได้จากการรั่วไหลของก๊าซออกจากรูรั่วผู้บรรจุก๊าซภายนอก ตามสมการที่ (7) จะเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$v = \frac{10^6 C_0 A_\phi P_0 T \sqrt{\frac{\gamma_c R_g}{T_0 M} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}}}{k \Sigma APC_{ppm}} \quad (12)$$

เมื่อ

- ΣA = พื้นที่ของช่องเปิดต่างๆ ที่มีในปริมาตรห้องปิดโดยรวม มีหน่วยเป็น ลบ.ม. หรือ ลบ.ฟุต
- v = อัตราความเร็วของการแพร่ของลมที่ออกสู่ภายนอกปริมาตรห้องปิด มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที หรือฟุตต่อวินาที
- k = สัมประสิทธิ์ของการผสม ไม่มีหน่วยมีค่าอยู่ในช่วง 0.1-0.5
- C_0 = สัมประสิทธิ์ของการปลดปล่อย (Discharge coefficient) ไม่มีหน่วยมีค่าเป็น 1
- A_ϕ = พื้นที่หน้าตัดของรูรั่ว มีหน่วยเป็น ตร.ฟุต หรือ ตร.ม.
- P_0 = ความดันของก๊าซในท่อ มีหน่วยเป็นปอนด์ (แรง) ต่อตารางนิ้ว
- T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ มีหน่วยเป็นองศาแรงกินส์
- T_0 = อุณหภูมิสัมบูรณ์ของก๊าซในท่อ มีหน่วยเป็นองศาแรงกินส์
- γ = สัดส่วนของค่าความจุความร้อนจำเพาะ ไม่มีหน่วย
- γ_c = ค่าคงที่ของแรงโน้มถ่วงจำเพาะ มีค่าเท่ากับ 32.174 ฟุตปอนด์ (มวล) ต่อปอนด์ (แรง) วินาที²
- R_g = ค่าคงที่ของแก๊สในอุดมคติ มีค่าเท่ากับ 1,545.3 ฟุตปอนด์ (แรง) ต่อปอนด์ (โมล) องศาแรงกินส์

- M = มวลโมเลกุลของสารเคมีที่แพร่อยู่ในปริมาตรปิด
 P = ความดันสัมบูรณ์ มีหน่วยเป็น ความดันบรรยากาศ
 C_{ppm} = ค่าความเข้มข้นของก๊าซแอมโมเนียวิกฤติในห้องปิด ปริมาตร V มีหน่วยเป็น ฟीฟี่เอ็ม

สมการที่ (12) สามารถนำมาเป็นสมการที่ใช้เพื่อคำนวณหาความเร็วในการแพร่ของก๊าซแอมโมเนีย ที่สัมพันธ์กับการผสมระดับต่างๆ เพื่อนำมาเป็นข้อมูลสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของแผนอพยพฉุกเฉิน ในส่วนของเวลาที่ใช้สำหรับการอพยพ พนักงานหรือผู้ปฏิบัติงานที่มีกิจกรรมทำงานอยู่ภายในอาคารผลิต ที่มีการใช้ก๊าซแอมโมเนียเป็นสารทำความเย็น

งานวิจัยด้าน Source model

อำพันธ์ (2546) ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลการคาดการณ์การกระจายของมลพิษทางอากาศโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กับผลการตรวจวัดจริงในภาคสนามของ บริษัทปูนซิเมนต์ลำปาง และปูนซิเมนต์ทุ่งสง ของบริษัทปูนซิเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) โดยเลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ISCST (Industrial Source Complex Short Term Model) ซึ่งอาศัยการป้อนข้อมูลด้านแหล่งกำเนิด ข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา และข้อมูลผู้รับสารมลพิษ แล้วโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังกล่าวจะแสดงผล ค่าความเข้มข้นของสารมลพิษทางอากาศที่จุดรับต่างๆ เป็นค่าเฉลี่ยรายชั่วโมง รายวัน รายปี ค่าสูงสุดรายชั่วโมง รายวัน รายปี หรือค่าเฉลี่ยในช่วงเวลาต่างๆ ที่สนใจ มาศึกษาปริมาณความเข้มข้นของฝุ่น (Total Suspended Solid, TSS)

อำพันธ์ (2546) พบว่าเมื่อนำความเข้มข้นของฝุ่น ในบรรยากาศที่ได้จากการประเมินของ ISCST ไปเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดจริง แล้วจะให้ค่ามากกว่า ค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริงประมาณ 40-60% และมีค่าน้อยกว่าการประเมินของ EIA ที่ได้ทำนายไว้ก่อนการก่อสร้างโรงงานทั้งสองแห่งประมาณ 40-60% เช่นกัน

สมจินต์ (2534) ทำการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ISCST มาคำนวณการแพร่กระจายของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งของสารมลพิษจากโรงจักรไฟฟ้าพลังไอน้ำของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่จังหวัดกระบี่ โดยใช้ข้อมูลด้านอุตุนิยมวิทยาจากสถานีตรวจอากาศเกาะลันตา ที่ตั้งอยู่ในตำแหน่งใกล้เคียง พบว่า ปริมาณความเข้มข้นสูงสุดในคาบ 24

ชั่วโมง จากการตรวจวัดบริเวณรอบๆ โรงจักรไฟฟ้ากระบี่ เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของสำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ และค่าที่ได้จากการคำนวณ พบว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณให้ค่าสูงสุดในคาบ 24 ชั่วโมงเกินกว่าค่ามาตรฐานทุกเดือน และปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยในคาบ 24 ชั่วโมงของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือน ในเดือนมิถุนายน สิงหาคม กันยายน ตุลาคม และธันวาคมมีค่าเกินมาตรฐาน