



## วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

**การศึกษาพฤติกรรมการรั่วไหลและการลดความเข้มข้นจากการรั่วไหลของแอมโมเนียโดยใช้การระบายอากาศเชิงกลในห้องเครื่องระบบทำความเย็นที่ใช้สารแอมโมเนียเป็นสารทำความเย็นในโรงงานผลิตน้ำแข็งหลอด**

**Study on the leakage behavior and concentration reduction of ammonia leakage using mechanical ventilation in the ammonia refrigeration machine room for tube ice factory**

พงศธร บุรณโสภณ<sup>1</sup> ประkob สุรวัฒนาวรรณ<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมความปลอดภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร 10900

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร 10900

Pongsatorn Buranasophon<sup>1</sup> Prakob Surawattanawan<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Safety Engineering Program, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

\* Corresponding author.

E-mail: fengpsw@ku.ac.th; Telephone: 0 2797 0999 ต่อ 1825

วันที่รับบทความ 8 กรกฎาคม 2568; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 29 สิงหาคม 2568; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 18 กันยายน 2568

วันที่ตอบรับบทความ 18 ตุลาคม 2568

### บทคัดย่อ

ระบบทำความเย็นในโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้สารทำความเย็นแบบแอมโมเนียมีการรั่วไหลบ่อยครั้ง อุบัติเหตุจากรั่วสร้างปัญหาความเป็นพิษต่อระบบการหายใจและก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนจำนวนมาก กฎหมายของกระทรวงอุตสาหกรรมมีข้อกำหนดเรื่องการระบายอากาศสำหรับสถานะฉุกเฉินไว้ แต่ข้อกำหนดเมื่อเปรียบเทียบกับ มอก. หรือ มาตรฐาน IIAR แล้ว พบว่ามีความแตกต่างกัน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาวิธีการในการประเมินความเหมาะสมของการระบายอากาศในสถานะฉุกเฉินของห้องเครื่องระบบทำความเย็นที่ใช้แอมโมเนียเป็นสารทำความเย็นโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แบบจำลองนี้ สามารถวิเคราะห์อัตราการรั่วไหลในสภาวะพลศาสตร์ (Transient state) ตามหลักการระบายอากาศแบบ ACGIH ผลการวิเคราะห์พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอแอมโมเนีย มีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงแบบ Exponential เนื่องจากพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงที่วิเคราะห์มาจาก Natural logarithm function ในการ buildup ค่าความเข้มข้นของไอแอมโมเนีย เมื่อพิจารณาปัจจัยร่วมระหว่างความดันของระบบและขนาดรูรั่ว พบว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ความแตกต่างของขนาดรูรั่ว ก็จะส่งผลต่ออัตราการรั่วไหลที่ต่างกันมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ Buildup stage ส่งผลอย่างมากต่อความเร็วในการตอบสนองของ ammonia detector และ Purging stage มีความสำคัญในช่วงการระบายแอมโมเนียแบบฉุกเฉิน เพื่อทำให้คนมีเวลาหนีออกจากพื้นที่ได้นานมากขึ้น มีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น การวิเคราะห์ สภาวะพลศาสตร์ (Transient state) และการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ ช่วยทำให้ประเมินเวลาที่ใช้สำหรับการ purging และตรวจสอบสภาพการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของไอแอมโมเนียได้ ความเข้มข้นเริ่มต้นและสภาพการผสมของอากาศในห้องเครื่อง ส่งผลต่อระยะเวลาในการ purging ถ้าความเข้มข้นเริ่มต้นสูง หรือสภาพการผสมของอากาศในห้องเครื่องไม่ดี ส่งผลทำให้ต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้น ปริมาณการหมุนเวียนอากาศ (air change) สำหรับสถานะฉุกเฉิน ส่งผลต่อระยะเวลาในการ purging ถ้าปริมาณการหมุนเวียนอากาศสูง ทำให้ลดเวลาในการ purging ได้อย่างมีนัยสำคัญ และเทคนิคในการทำ dynamic simulation ของงานวิจัยนี้จะเป็นเครื่องมือช่วยที่สำคัญในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอแอมโมเนียต่อเวลา และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับขนาดห้องเครื่องที่มีขนาดแตกต่างกันต่อไปได้ กรณีศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นห้องเครื่องขนาดปริมาตร 2,475 ลูกบาศก์เมตร และ

พิจารณาในช่วงความเข้มข้นในช่วง 0 เป็น 50 ส่วนในล้านส่วนเป็นหลัก โดยพบว่า 1) ในสภาวะการระบายอากาศแบบ Buildup กรณีเมื่อขนาดรูรั่วไหลเพิ่มขึ้นจาก 1 มิลลิเมตรเป็น 4 มิลลิเมตร อัตราการรั่วไหลจะเพิ่มขึ้นเป็น 16 เท่า, กรณีความดันในระบบทำความเย็นสูงขึ้นจาก 1,400 กิโลปาสคาล เป็น 1,600 กิโลปาสคาล ที่ขนาดรูรั่วไหลคงที่ จะทำให้อัตราการรั่วไหลจะเพิ่มขึ้นเป็น 35%, กรณีค่าความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจาก 0 – 50 ส่วนในล้านส่วน ที่รูรั่วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2, 3, 4 มิลลิเมตร ต้องใช้เวลา 15.25, 6.77, 3.81 วินาที ตามลำดับ และพบว่า 2) ในสภาวะการระบายอากาศแบบ Purging กรณีความเข้มข้นเริ่มต้น 35, 40, 45, 50 ส่วนในล้านส่วน และต้องการลดความเข้มข้นลงมาเท่ากับ 25 ส่วนในล้านส่วน ต้องใช้เวลา 1.68, 2.35, 2.94, 3.47 นาที ตามลำดับ, กรณีใช้การระบายอากาศแบบฉุกเฉิน 30 ACH เพื่อลดความเข้มข้นจากระดับ 35 ส่วนในล้านส่วนสู่ 25 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้ค่า  $K = 1, 1.5, 2.5$  ต้องใช้เวลา 0.67, 1.01, 1.68 นาที ตามลำดับ, กรณีลดความเข้มข้นเริ่มต้นจาก 35 ส่วนในล้านส่วนสู่ 25 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้ค่าการระบายอากาศแบบฉุกเฉิน 3 (กฎกระทรวงฯ), 10.8 (มอก.), 20, 25, 30, 35, 40 ACH ต้องใช้เวลา 16.82, 4.67, 2.52, 2.02, 1.68, 1.44, 1.26 นาที ตามลำดับ

### คำสำคัญ

การระบายอากาศในโรงงานอุตสาหกรรม ความปลอดภัยในระบบทำความเย็นที่ใช้แอมโมเนีย การวิเคราะห์การรั่วไหล การระบายอากาศที่เหมาะสม การวิเคราะห์ผลกระทบที่แปรเปลี่ยนตามเวลา

### Abstract

Frequent leakage is observed in industrial refrigeration systems that use ammonia refrigerant. Respiratory toxicity and adverse health effects among large populations are caused by leakage accidents. Ventilation in emergency situations is prescribed by the Ministry of Industry's regulations. Differences were identified when the requirements were compared with TIS and IIR standards. The suitability of emergency ventilation for machine rooms in ammonia refrigeration systems was evaluated using a mathematical model. Leakage rates under transient conditions can be analyzed by the model in accordance with ACGIH ventilation principles. From the transient analysis, it was shown that the buildup of ammonia vapor concentration follows a characteristic time-dependent function. When the interplay between system pressure and leak size was examined, increasing system pressure was found to amplify the effect of a given increase in orifice size on the leak rate. The response speed of ammonia detectors is significantly affected by the buildup stage. During an emergency ammonia release, the purging stage is important so that hazardous concentrations are reduced more rapidly to allow a longer evacuation period and safety is improved. Purging time can be estimated and changes in ammonia concentration can be monitored through transient-state analysis and parameter adjustments. The purging time is affected by the initial concentration and by air-mixing conditions in the machine room. A longer purging time is required if the initial concentration is high or if air mixing in the machine room is poor. The purging time is affected by the air-change rate required for the emergency situation. If the air-circulation volume is high, the purging time can be significantly reduced. The dynamic simulation technique developed in this research is expected to serve as an efficient tool for analyzing time-varying ammonia concentrations and can be applied to machine rooms of different sizes. A machine room with a volume of 2,475 m<sup>3</sup> was considered as the case study, under normal operating conditions and typical outdoor weather in Thailand. The time evolution of concentration from 0 to 50 ppm was primarily examined. (1) Buildup: When the leak-orifice diameter was increased from 1 mm to 4 mm, the leak rate was increased by a factor of 16. When the refrigeration-system pressure was increased from 1,400 kPa to 1,600 kPa at a fixed orifice size, the leak rate was increased by 35%. For the rise from 0 to 50 ppm, required times of 15.25, 6.77, and 3.81 s were obtained for orifice diameters of 2, 3, and 4 mm, respectively. (2) Purging: For initial concentrations of 35, 40, 45, and 50 ppm, the time required to reach 25 ppm was 1.68, 2.35, 2.94, and 3.47 min, respectively, when  $K = 2.5$ . When emergency ventilation of 30 ACH was applied to reduce the concentration from 35 to 25 ppm, times of 0.67, 1.01, and 1.68 min were obtained for  $K = 1, 1.5, \text{ and } 2.5$ , respectively. For reductions from 35 to 25 ppm with emergency-ventilation rates of 3 (ministerial regulation), 10.8 (TIS), 20, 25, 30, 35, and 40 ACH, the required times were 16.82, 4.67, 2.52, 2.02, 1.68, 1.44, and 1.26 min, respectively.

## Keywords

industrial ventilation; safety in ammonia refrigeration; leakage analysis; optimum ventilation; transient response analysis

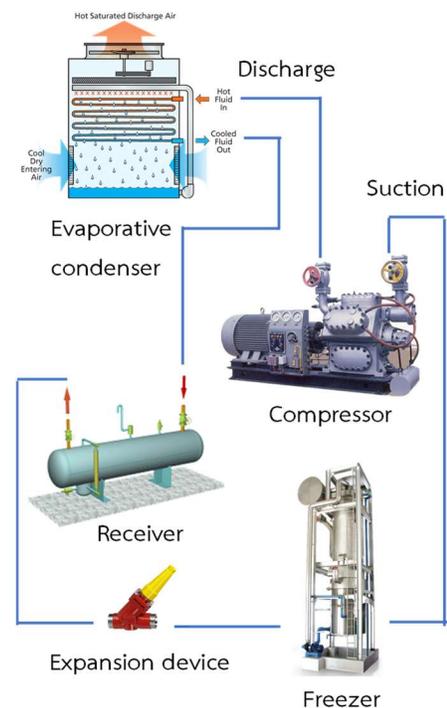
## 1. บทนำ (Introduction)

แอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) หรือที่รู้จักกันในชื่อ R-717 เป็นสารทำความเย็นที่ได้รับความนิยมอย่างมากสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เช่น โรงงานแปรรูปอาหาร คลังสินค้า ห้องเย็น โรงเปียร์ และโรงงานผลิตน้ำแข็ง ซึ่งต้องการระบบทำความเย็นที่มีประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือสูง สารทำความเย็นนี้เป็นก๊าซไม่มีสี แต่มีกลิ่นฉุนเฉพาะตัวที่สามารถตรวจจับได้ง่าย ในบริบทของโรงงานผลิตน้ำแข็งตลอด ระบบทำความเย็นแอมโมเนียถือเป็นหัวใจสำคัญของการผลิตน้ำแข็ง โดยสารทำความเย็นจะหมุนเวียนอยู่ในระบบวงปิด เพื่อดูดซับความร้อนและทำให้น้ำเย็นลงจนกลายเป็นน้ำแข็ง [1], [2]

แอมโมเนียมีข้อดีหลายด้าน ประกอบไปด้วย 1) ประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Efficiency) แอมโมเนียมีคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ยอดเยี่ยม ทำให้ระบบทำความเย็นมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูง [3], [4] โดยมีประสิทธิภาพดีกว่าสารทำความเย็นประเภท CFCs/HCFCs ถึง 3-10% ซึ่งส่งผลให้ลดต้นทุนการดำเนินงานได้อย่างมาก นอกจากนี้ ความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอ (latent heat) ที่สูงของแอมโมเนียยังช่วยให้สามารถใช้ท่อส่งของเหลวที่มีขนาดเล็กลงได้ ซึ่งช่วยลดปริมาณสารทำความเย็นที่ต้องการในระบบ 2) เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Friendliness) แอมโมเนียมีศักยภาพในการทำลายชั้นโอโซน (Ozone Depletion Potential, ODP) เป็นศูนย์ และมีศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming Potential, GWP) เป็นศูนย์ คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้แอมโมเนียเป็นทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอย่างยิ่ง เมื่อเทียบกับสารทำความเย็นสังเคราะห์หลายชนิด เช่น CFCs และ HCFCs ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มทั่วโลกในการเลิกใช้สารทำความเย็นสังเคราะห์ 3) ต้นทุน (Cost-Effectiveness) แอมโมเนียมีราคาถูกกว่าสารทำความเย็นประเภท HFCs/HCFCs อย่างมาก (ประมาณ 90% ของราคาต่อκιโลกรัม) ทำให้มีต้นทุนในการจัดหาและใช้งานที่คุ้มค่า นอกจากนี้ ระบบทำความเย็นที่ใช้แอมโมเนียยังมีต้นทุนการ

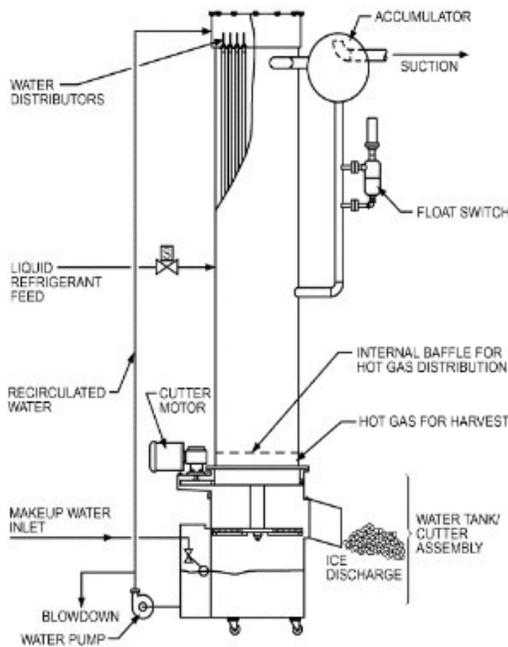
ติดตั้งที่ต่ำกว่า 10-20% เมื่อเทียบกับระบบที่ใช้ CFCs เนื่องจากสามารถใช้ท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางแคบกว่าได้ [5], [6]

แม้จะมีข้อดีหลายประการ แต่แอมโมเนียก็มีข้อจำกัดที่สำคัญหลายข้อ ประกอบไปด้วย 1) ความเป็นพิษ (Toxicity) แอมโมเนียเป็นสารพิษเมื่อมีความเข้มข้นสูง การสัมผัสกับความเข้มข้นที่มากกว่า 25 ppm อาจทำให้เกิดการระคายเคือง ไอ เจ็บคอ และหายใจลำบาก ในขณะที่ความเข้มข้นสูง (เช่น 300 ppm) ถือเป็นอันตรายต่อชีวิตและสุขภาพทันที 2) ความไวไฟ (Flammability) แอมโมเนียสามารถติดไฟได้ที่ความเข้มข้นประมาณ 15% ถึง 28% โดยปริมาตรในอากาศ ช่วงความไวไฟจะเพิ่มขึ้นเมื่อผสมกับน้ำมันหล่อลื่น และอาจเกิดการระเบิดได้หากรั่วไหลในพื้นที่ปิดที่มีแหล่งกำเนิดประกายไฟ หรือหากภาชนะบรรจุแอมโมเนียปราศจากน้ำสัมผัสกับไฟ 3) ข้อจำกัดด้านวัสดุ (Material Compatibility) แอมโมเนียไม่เข้ากันกับทองแดง ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้ในระบบที่มีท่อทองแดงได้ ทำให้จำเป็นต้องใช้วัสดุอื่นที่เข้ากันได้ เช่น เหล็ก ซึ่งส่งผลต่อการออกแบบและการติดตั้งระบบ [7], [8]



รูปที่ 1 ระบบทำความเย็นของเครื่องผลิตน้ำแข็งตลอด

หลักการพื้นฐานของระบบทำความเย็นแอมโมเนียคือการเปลี่ยนแปลงสถานะของแอมโมเนีย (จากของเหลวเป็นก๊าซและกลับเป็นของเหลว) เพื่อดูดซับและปลดปล่อยความร้อน วัฏจักรนี้เริ่มต้นด้วยแอมโมเนียเหลวที่ดูดซับความร้อนในเครื่องระเหย (Evaporator) ซึ่งทำให้อุณหภูมิลดลงและเปลี่ยนสถานะเป็นก๊าซความดันต่ำ ก๊าซความดันต่ำนี้จะถูกดูดเข้าสู่คอมเพรสเซอร์ (Compressor) ซึ่งทำหน้าที่อัดก๊าซให้มีความดันและอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างมาก จากนั้น ก๊าซแอมโมเนียความดันสูงและอุณหภูมิสูงจะเคลื่อนที่ไปยังคอนเดนเซอร์ (Condenser) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ระบายความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยปกติจะใช้น้ำเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้ก๊าซแอมโมเนียเย็นตัวลงและควบแน่นกลับเป็นของเหลวความดันสูง รูปแบบการระบายความร้อนอาจเป็น 1) ใช้คอนเดนเซอร์จะทำงานร่วมกับหอระบายความร้อน (Cooling Tower) หรือ 2) ใช้ evaporative condenser เพื่อช่วยระบายความร้อนออกจากน้ำ สุดท้าย แอมโมเนียเหลวความดันสูงจะไหลผ่านวาล์วลดความดัน (Expansion Valve) ซึ่งทำหน้าที่ลดความดันและอุณหภูมิของแอมโมเนียลงอย่างกะทันหัน ทำให้แอมโมเนียพร้อมที่จะดูดซับความร้อนอีกครั้งในเครื่องระเหย เป็นการครบรอบวัฏจักรการทำความเย็น [9], [10]



รูปที่ 2 แสดงส่วนประกอบของเครื่องผลิตน้ำแข็งหลอด

ระบบน้ำแข็งหลอด หรือ Tube Ice เป็นน้ำแข็งที่นิยมบริโภคมากที่สุดเนื่องจากมีความสะอาดมากกว่าน้ำแข็งของในกระบวนการผลิต มีส่วนประกอบคือ 1) เครื่องผลิตน้ำแข็งหลอด หรือฟรีเซอร์ (Freezer) – ทำหน้าที่ ถ่ายเทความร้อนจากน้ำออกโดยใช้สารทำความเย็นเป็นตัวกลางเพื่อให้น้ำกลายเป็นน้ำแข็ง 2) คอมเพรสเซอร์ (Compressor) – ทำหน้าที่ ดูดแก๊สเย็นและอัดให้เป็นแก๊สร้อน ความดันสูงคอมเพรสเซอร์ ที่นิยมใช้ส่วนใหญ่เป็นแบบลูกสูบ (Reciprocating Compressor) และ แบบสกรู (Screw Compressor) 3) คอนเดนเซอร์แบบระเหย (Evaporative Condenser) – ทำหน้าที่ ระบายความร้อนและควบแน่นแก๊สร้อนให้เปลี่ยนเป็นสารทำความเย็นเหลว 4) ถังเก็บสารทำความเย็น (Receiver) – ทำหน้าที่ เก็บสารทำความเย็นเหลวของระบบ 5) Expansion device เครื่องผลิตน้ำแข็งหลอด ทำงานโดยการใช้ปั๊มน้ำหมุนเวียนน้ำจากถังน้ำด้านล่างส่งขึ้นไปถังน้ำด้านบน ผ่านหัวฉีดน้ำแล้วไหลตามผิวท่อลงสู่ถังน้ำด้านล่างอย่างรวดเร็ว โดยมีน้ำยาทำความเย็นอยู่รอบภายนอกท่อ น้ำจะค่อยๆ แข็งตัวเป็นน้ำแข็งหนาขึ้นเรื่อย ๆ และขณะที่น้ำกลายเป็นน้ำแข็งนั้น สารละลายในน้ำจะถูกแยกตัวออกมาทำให้ได้น้ำแข็งที่ใสสะอาด ระบบน้ำยาท่วมคอยล์เย็น Flooded System โดยคอยล์เย็น Freezer เป็นแบบ Vertical Shell and Tube น้ำที่ผลิตน้ำแข็งวิ่งในท่อสแตนเลสตามแนวตั้ง โดยมีถังน้ำบนและถังน้ำล่างสำหรับเก็บน้ำ มีปั๊มน้ำที่ดูดน้ำจากถังน้ำล่างขึ้นสู่ถังน้ำบน เพื่อให้น้ำแลกเปลี่ยนกับน้ำยาทำความเย็นที่อุณหภูมิ -12 องศาเซลเซียสอยู่ในฟรีเซอร์ ปั๊มน้ำจะดูดน้ำไปเรื่อย ๆ ตลอดเวลา จนกระทั่งน้ำจะค่อยๆ กลายเป็นน้ำแข็งรอบๆ แนวท่อสแตนเลสเป็นหลอดที่มีรูตรงกลางเพื่อให้ น้ำไหลผ่านไปนั่นเอง เมื่อน้ำแข็งหนาตามขนาดที่ต้องการแล้วระบบควบคุมอัตโนมัติจะสั่งให้น้ำยาร้อน (Hot gas) เข้ามาทำการละลายน้ำแข็ง ให้หลุดจากผิวท่อด้านใน เรียกขั้นตอนนี้ว่า ดีฟรอส (Defrost) จากนั้นน้ำแข็งจะไหลตกลงไปในเครื่องตัดน้ำแข็ง ตัดให้เป็นก้อนเล็ก ๆ ก่อนส่งไปยังกระบะรับน้ำแข็ง ซึ่งมีสกรูลำเลียงใส่ภาชนะบรรจุน้ำแข็งต่อไป เครื่องผลิตน้ำแข็งหลอดจะทำงานเป็นรอบ 1 รอบสามารถให้น้ำแข็งได้ตามกำลังของเครื่อง โดยปกติเราจะเรียกขนาดเครื่องทำน้ำแข็งหลอดตามความสามารถการผลิตได้ต่อวัน เช่น เครื่องทำน้ำแข็ง

ตลอด 50 ต้นต่อวัน ความหมายคือ เดินเครื่อง 24 ชั่วโมง สามารถผลิตน้ำแข็งหลอดได้ 50,000 กิโลกรัมนั่นเอง

การออกแบบและการติดตั้งอุปกรณ์ต้องคำนึงถึงความปลอดภัยเป็นอันดับแรก คอมเพรสเซอร์ทุกตัวจะต้องติดตั้ง วาล์วสกัดทางดูด วาล์วสกัดทางส่ง และวาล์วกันกลับทางส่ง ถึง พักน้ำยาแอมโมเนียต้องมีการติดตั้งวาล์วเฉพาะและมีแผ่นกันที่ แข็งแรงสำหรับอุปกรณ์วัดระดับของเหลว ท่อและภาชนะรับ ความดันทั้งหมดต้องได้รับการออกแบบ คำนวณ และสร้างตาม หลักวิศวกรรมที่ถูกต้อง โดยมีวิศวกรรับรอง ควรติดตั้งอุปกรณ์ ระบายความดันและวาล์วนิรภัยที่มีขนาดเหมาะสมและอยู่ใน สภาพพร้อมใช้งาน อุปกรณ์ที่ได้รับการออกแบบมาอย่างดีจะ รวมคุณสมบัติด้านความปลอดภัย เช่น วาล์วระบายความดัน

ระบบทำความเย็นแอมโมเนียสามารถแบ่งของวงจรรบบ ทำความเย็นออกได้เป็น 2 ด้านการทำงาน ได้แก่ ด้านแรงดัน สูง (High Side) และ ด้านแรงดันต่ำ (Low Side) โดยแบ่งจาก เครื่องอัดไอ (Compressor) และวาล์วขยายตัว (Expansion Valve) โดยทั่วไปของการผลิตน้ำแข็งจะใช้ค่าความดันและ อุณหภูมิในการใช้งานด้านระเหย (Low side evaporator) อยู่ ในช่วง 103–207 กิโลปาสกาล อุณหภูมิประมาณ -20 องศา เซลเซียส ถึง -10 องศาเซลเซียส และด้านควบแน่น (High side condenser) ความดันอยู่ในช่วง 0.75–1.24 เมกะ ปาสกาลและอุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส ถึง 40 องศาเซลเซียส

## 2. ขอบเขตการวิจัย (Research scope) และวัตถุประสงค์ (Research objective)

การรั่วไหลของแอมโมเนีย ส่วนใหญ่มีสาเหตุหลักจาก ความบกพร่อง ความชำรุดของอุปกรณ์ เช่น รอยรั่วของท่อ ขนส่ง ข้อต่อ วาล์ว หรือเกิดระหว่างการบำรุงรักษาระบบแต่ละ ครั้งของอุบัติเหตุก็ได้สร้างปัญหาและผลกระทบต่อประชาชน โดยรอบเป็นอย่างมาก [13] ก๊าซแอมโมเนียจะมีความเป็นพิษ ต่อระบบการหายใจของประชาชนทั้งที่ปฏิบัติงานอยู่ในบริเวณ ที่มีการรั่วไหลและที่พักอาศัยบริเวณใกล้เคียง ประกอบกับส่วน ใหญ่อุตสาหกรรมที่ใช้แอมโมเนียเป็นสารทำความเย็นเป็น กิจการเก่าแก่ และมักตั้งอยู่ในชุมชน การรั่วไหลของก๊าซ แอมโมเนียซึ่งมีความเป็นพิษต่อระบบการหายใจจึงก่อให้เกิด

ผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนจำนวนมาก [11], [12]

การระบายอากาศของห้องเครื่องแอมโมเนีย มี 2 รูปแบบ คือ 1) การระบายอากาศในช่วงเวลาปกติ 2) การระบายอากาศ ในช่วงเวลาฉุกเฉิน โดยในรูปแบบที่ 1 การระบายอากาศใน ช่วงเวลาปกติ ใช้ในการระบายความร้อนจากระบบ compressor และ ระบบท่อ discharge ที่มีอุณหภูมิสูงมาก 100 - 130 องศาเซลเซียส การระบายอากาศที่เหมาะสมจะทำให้สภาวะอุณหภูมิในห้องเครื่องอยู่ในสภาวะที่เหมาะสม ไม่ สร้างปัญหาให้กับคนที่ทำงานในอาคารและตู้ไฟฟ้าควบคุมที่อยู่ใน พื้นที่ใกล้เคียง โดยหลักการออกแบบแล้ว ปริมาณการไหลที่ เพียงพอ จะต้องรักษาระดับอุณหภูมิสูงสุดภายในห้องเครื่องให้ มีค่าไม่สูงกว่าอุณหภูมิภายนอก 10 องศาเซลเซียส โดยตั้งอยู่ บนพื้นฐานที่ว่าเครื่องจักรทั้งหมดภายในห้องเครื่องถ่ายเท ความร้อนออกมา สำหรับรูปแบบที่ 2 เป็นการทำงานเมื่อเกิด สภาวะการรั่วของระบบแอมโมเนีย เมื่อเกิดการรั่วจากสภาพ อุปกรณ์ หรือการซ่อมบำรุงที่ผิดวิธี ความเข้มข้นของ แอมโมเนียจะสูงขึ้น อุปกรณ์ตรวจวัดแอมโมเนียที่ติดตั้งอยู่ใน พื้นที่ห้องเครื่องจะรับรู้ความเข้มข้นดังกล่าวและ alarm แจ้ง เตือนให้ช่างเทคนิคที่ดูแลห้องเครื่องให้รับทราบ โดยทั่วไป อุปกรณ์ตรวจวัดแอมโมเนียจะสามารถตรวจสอบได้ในช่วงค่า ความเข้มข้น 0-100 ส่วนในล้านส่วน (parts per million) เมื่อ ช่างเทคนิคที่ดูแลห้องเครื่องรับทราบสภาวะการรั่วแล้ว จะต้อง รีบเข้าไปปิด main valve หรือ king valve ของระบบ ซึ่ง วาล์วนี้เป็นวาล์วหลัก (critical shut-off valve) ใช้ในการ ควบคุมการไหลของแอมโมเนียเหลวไปหาทั้งระบบ วาล์วจะ ติดตั้งไว้ที่ด้านขาออกของ high-pressure receiver วาล์วนี้มี ประโยชน์สำหรับการปิดแยกระบบในกรณีที่มีการซ่อมบำรุง หรือเกิดสภาวะฉุกเฉิน เมื่อปิดวาล์วแล้วจะต้องมีเปิดระบบ ระบายอากาศสำหรับกรณีฉุกเฉิน ระบบระบายในรูปแบบที่ 2 นี้ มีอัตราการไหลที่มากกว่ารูปแบบที่ 1

กฎกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดมาตรการความ ปลอดภัยเกี่ยวกับระบบทำความเย็นที่ใช้แอมโมเนียเป็นสารทำ ความเย็นในโรงงาน พ.ศ. 2554 กำหนดให้ติดตั้งพัดลมระบาย อากาศที่สามารถเปลี่ยนอากาศในห้องได้อย่างสมบูรณ์ภายใน ยี่สิบนาที ซึ่งไม่ได้แบ่งแยกไว้ว่าเป็นสำหรับกรณีปกติ หรือกรณี ฉุกเฉิน [14] ซึ่งถ้านำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐาน

ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 3023-2563 ซึ่งมีการแบ่งแยกอย่างชัดเจนระหว่าง สภาวะปกติและสภาวะฉุกเฉิน [15] ประกอบกับตัวเลข (กฎกระทรวงฯ 3 ACH) และวิธีการประเมินที่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นจึงทำให้เกิดคำถามเป็นประเด็นของปัญหาในการวิจัยครั้งนี้ว่า ตัวเลขการระบายอากาศในทางกฎหมายหรือตัวเลขการระบายอากาศที่อ้างอิงมาจาก มอก. มีประสิทธิภาพเพียงพอในการจัดการกับความชื้นของแอมโมเนียอย่างเพียงพอหรือไม่ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาวิธีการในการประเมินความเหมาะสมของการระบายอากาศในสภาวะฉุกเฉินของห้องเครื่องระบบทำความเย็นที่ใช้แอมโมเนียเป็นสารทำความเย็น โดยพิจารณาจากประสิทธิภาพในการควบคุมความชื้นของแอมโมเนียอยู่ในระดับปลอดภัย ขอบเขตของงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาค่าอัตราการระบายอากาศที่เหมาะสมสำหรับห้องเครื่องระบบทำความเย็นที่ใช้แอมโมเนีย เป็นสารทำความเย็นสำหรับโรงงานผลิตน้ำแข็งหลอด โดยใช้กรณีศึกษาจากโรงงานน้ำแข็งหลอดขนาด 70 ตันน้ำแข็งต่อ 24 ชั่วโมง จำนวน 2 เครื่องติดตั้งอยู่ในห้องเครื่องขนาด 15 เมตร x 15 เมตร สูง 11 เมตร

### 3. วิธีการวิจัย (Research Methods)

วิธีการวิจัยประกอบไปด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ศึกษาการระบายอากาศ ความเข้มข้นของแอมโมเนียในอากาศ และมาตรการความปลอดภัยที่ใช้งานจริงในอุตสาหกรรม
- 2) เปรียบเทียบการรั่วจากสภาวะของเหลว และการรั่วจากสภาวะก๊าซในระบบทำความเย็น
- 3) พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายรูปแบบการรั่วไหล โดยแบบจำลองทาง Steady state และ Transient state
- 4) ปรับเปลี่ยนสถานการณ์ของตัวแปรต่าง ๆ ประกอบไปด้วยขนาดรอยรั่วและอัตราการรั่วไหล
- 5) วิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กรณี ammonia concentration buildup จากสภาวะการเริ่มรั่วจนถึงการเริ่มตรวจจับได้ของ ammonia sensor โดยใช้การระบายอากาศแบบ normal ventilation

6) วิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กรณี ammonia purging จากสภาวะการเริ่มปิดระบบจนถึงสภาวะที่ปลอดภัยตามเกณฑ์มาตรฐานสากล โดยใช้การระบายอากาศแบบ emergency ที่เหมาะสมที่สุด

### 3. การระบายอากาศ ความเข้มข้นของแอมโมเนียในอากาศ และมาตรการความปลอดภัยที่ใช้งานจริงในอุตสาหกรรม

ข้อบังคับตามกฎหมายและมาตรฐานติดตั้ง จะต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับไอแก๊สแอมโมเนียในห้องเครื่องและพื้นที่ปฏิบัติงานของพนักงาน อย่างน้อยห้องละหนึ่งจุด ผู้ควบคุมระบบทำความเย็นต้องมีความรู้ความชำนาญเฉพาะทาง และสามารถควบคุมหรือแก้ไขสถานการณ์การรั่วไหลของแอมโมเนียได้ บุคลากรทุกคนต้องได้รับการฝึกอบรมที่เพียงพอเกี่ยวกับการทำงานของระบบ อันตรายของแอมโมเนีย การป้องกันและตอบสนองต่อการรั่วไหล การจัดการเหตุฉุกเฉิน และการใช้อุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล (PPE) ที่เหมาะสม การซ้อมแผนความปลอดภัยอย่างสม่ำเสมอ เฉพาะบุคคลที่ได้รับการฝึกอบรมและรับรองเท่านั้นที่ควรได้รับอนุญาตให้ทำการซ่อมบำรุงหรือซ่อมแซมอุปกรณ์ทำความเย็นแอมโมเนีย แผนรับมือเหตุฉุกเฉินเป็นสิ่งจำเป็น และบุคลากรต้องได้รับการฝึกอบรมเกี่ยวกับขั้นตอนการตอบสนองและการอพยพ การประสานงานกับหน่วยงานจัดการเหตุฉุกเฉินในห้องถิ่นจะช่วยให้การตอบสนองรวดเร็วและมีประสิทธิภาพในกรณีที่เกิดการรั่วไหลของแอมโมเนียในวงกว้าง ในสภาวะการทำงานปกติในห้องเครื่องจะมีการติดตั้งระบบระบายอากาศพื้นฐานสำหรับการระบายความร้อนออกจากห้องเครื่อง เนื่องจากในห้องเครื่องจะมีความร้อนจากระบบ compressor และ motor และความร้อนด้าน discharge ของระบบท่อแอมโมเนีย จากตัวอย่างสภาวะระบบทำความเย็นแอมโมเนีย มีความดันด้าน evaporator 150 กิโลปาสกาล (ความดันเกจ) อุณหภูมิทำน้ำแข็ง -13.67 องศาเซลเซียส ค่า entropy 5.5190 กิโลจูลต่อกิโลกรัมต่อเคลวิน มีความดันด้าน condenser 1,500 กิโลปาสกาล (ความดันเกจ) อุณหภูมิระบายความร้อน 41.03 องศาเซลเซียส อุณหภูมิ discharge จะอยู่ที่ 123 องศาเซลเซียส ความร้อนเหล่านี้จะถูกปล่อยทิ้งในห้องเครื่อง ทำให้จำเป็นต้องมีระบบระบายอากาศพื้นฐานเพื่อควบคุมอุณหภูมิให้มีความเหมาะสม

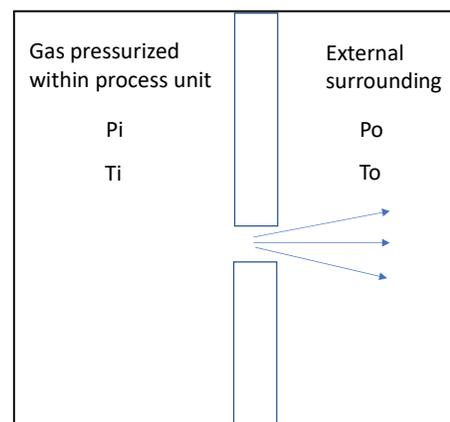
เมื่อเกิดอุบัติเหตุการรั่ว ก๊าซแอมโมเนียเริ่มเกิดการฟุ้งกระจาย โดยความเข้มข้น (concentration) ของ ammonia จะเพิ่มขึ้น เรียกว่าสภาวะ concentration buildup เป็นสภาวะ transient หรือ dynamic state ในขณะที่ระบบระบายอากาศพื้นฐานยังคงทำงานอยู่ ความเข้มข้นของก๊าซแอมโมเนียจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนอุปกรณ์ตรวจจับไอก๊าซแอมโมเนีย ตรวจจับได้และส่งสัญญาณแจ้งเตือน เมื่อเจ้าหน้าที่ควบคุมห้องเครื่องรับทราบปัญหา ก็จะมีแจ้งให้คนในพื้นที่อพยพออกจากพื้นที่ที่การรั่วไหลและแอมโมเนียกระจายไปถึง โดยให้ทุกคนไปรวมกันในที่ปลอดภัยและจุดรวมพลด้านทิศเหนือลม เจ้าหน้าที่จะต้องเข้าระงับเหตุ โดยต้องใส่ชุดป้องกันสารเคมีพร้อมอุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจชนิดถังบรรจุอากาศแบบพกพา (SCBA) เพื่อพยายามหยุดการรั่วไหลหรือปิดวาล์ว/แหล่งที่เป็นต้นเหตุของการรั่วไหล และเปิดม่านน้ำเพื่อป้องกันไม่ให้ก๊าซแอมโมเนียฟุ้งกระจาย การเข้าระงับเหตุดังกล่าว ระบบระบายอากาศจะต้องปรับเปลี่ยนจากรูปแบบการระบายอากาศพื้นฐานมาเป็นการระบายอากาศแบบฉุกเฉิน (emergency) เพื่อความปลอดภัยของเจ้าหน้าที่ผู้เข้าระงับเหตุ

ข้อกำหนดจากกฎหมายหรือมาตรฐานสากล เช่น ASHRAE (The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) หรือ ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) สำหรับการระบายอากาศ จะใช้หน่วยทางวิศวกรรมที่เรียกว่า Air change (ACH) ซึ่งหมายถึงจำนวนครั้งที่อากาศภายในห้องถูกเปลี่ยนใหม่ในหนึ่งชั่วโมง ใช้เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพของระบบระบายอากาศและคุณภาพอากาศภายในอาคาร โดยเฉพาะในโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้แอมโมเนียเป็นสารทำความเย็น โดยการออกแบบระบบระบายอากาศที่มีค่า ACH เหมาะสมสามารถช่วยเจือจางความเข้มข้นของแอมโมเนียให้อยู่ในระดับปลอดภัยได้ กรณีของการระบายสารพิษในอุตสาหกรรม เช่น ห้องเครื่องของโรงงานผลิตน้ำแข็งหลอดที่ใช้ระบบทำความเย็นแอมโมเนียในงานวิจัยนี้ ACGIH มีการระบุถึงข้อกำหนดความปลอดภัยในการรับสัมผัสตามค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของสารที่สามารถสัมผัสได้ตลอดระยะเวลา 8 ชั่วโมงต่อวัน และ 40 ชั่วโมงต่อสัปดาห์ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพในระยะยาว (Threshold Limit Value - Time-

Weighted Average: TLV-TWA) เท่ากับ 25 ส่วนในล้านส่วน (parts per million) และค่าความเข้มข้นสูงสุดที่ต้องไม่เกินในเวลาใด ๆ ระหว่างการทำงาน เนื่องจากอาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพทันที (Ceiling Limit: TLV-C) เท่ากับ 50 ส่วนในล้านส่วน (36 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

#### 4. เปรียบเทียบการรั่วจากสภาวะของเหลว และการรั่วจากสภาวะก๊าซในระบบทำความเย็น

ระบบทำความเย็นมีอุปกรณ์หลายส่วนทำงานร่วมกัน ตั้งแต่ compressor, accumulator, condenser, receiver, expansion device, และ evaporator ซึ่งเริ่มตั้งแต่ สภาวะ discharge น้ำยาจะมีสภาวะเป็น hot gas ความดันสูง อุณหภูมิสูง ไปจนถึงสภาวะที่เปลี่ยนเฟสจากก๊าซร้อนไปเป็นของเหลว ภายใน evaporative condenser และใน receiver โดยเฉพาะใน receiver น้ำยาจะมีสภาวะ 2 เฟสอยู่ในถัง receiver ร่วมกันโดยจะมีปริมาณน้ำยาที่เป็นของเหลวมากกว่า ก๊าซ การประเมินการรั่วไหลที่เลวร้ายที่สุด (worst case scenario) จึงจะเกิดขึ้นจากด้าน high side pressure โดยหลักการแล้วการรั่วในด้าน high side pressure จึงมีโอกาสในการรั่วทั้งจากสภาวะก๊าซ และสภาวะของเหลว ซึ่งมีรูปแบบการวิเคราะห์ที่ต่างกัน ดังนั้น การวิเคราะห์การรั่วจึงได้พิจารณาเป็น 2 กรณี คือการรั่วจากสภาวะก๊าซ และการรั่วจากสภาวะของเหลว



รูปที่ 3 การรั่วไหลของน้ำยาทำความเย็นสภาวะก๊าซผ่านรูรั่ว

การรั่วไหลของน้ำยาสภาวะก๊าซผ่านรูรั่วพิจารณาได้จากสมการที่ (1)

$$Q_m = C_0 \times A \times P_i \times \sqrt{\left(\frac{\gamma \times g_c \times M}{R_g \times T_0}\right) \times \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}} \quad (1)$$

โดยที่

$Q_m$  คืออัตราการรั่วไหล (กิโลกรัมต่อวินาที)

$C_0$  คือค่าสัมประสิทธิ์การไหล = 1 (กรณี worst case)

$A$  คือพื้นที่หน้าตัดของรูรั่ว (ตารางเมตร)

$\gamma$  คืออัตราส่วนความร้อนจำเพาะ ( $C_p / C_v$ ) = 1.32

$g_c$  คือตัวแปลงหน่วยแรงโน้มถ่วง (เท่ากับ 1 ในระบบ SI

unit)  $M$  คือมวลโมเลกุลของก๊าซ = 17 กรัมต่อโมล

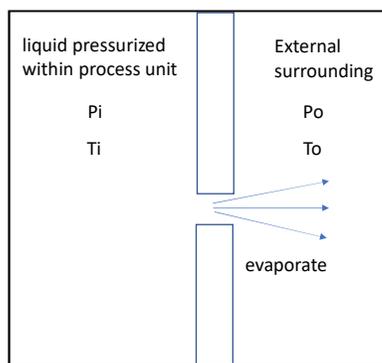
$R_g$  คือค่าคงที่สากลของแก๊ส = 8,314 ปาสคาลลูกบาศก์เมตรต่อกิโลโมลเคลวิน

$P_i$  คือความดันภายในระบบ = 1,500 กิโลปาสคาล (สัมบูรณ์)

$P_o$  คือความดันบรรยากาศ = 100 กิโลปาสคาล (สัมบูรณ์)

$T_i$  คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ภายในระบบ = อุณหภูมิอิ่มตัวของ ammonia เหลว ณ ความดัน 1,500 กิโลปาสคาล (สัมบูรณ์) = 38.65 องศาเซลเซียส = 311.80 เคลวิน

$T_0$  คืออุณหภูมิบรรยากาศ = 30 องศาเซลเซียส = 303.15 เคลวิน



รูปที่ 4 การรั่วไหลของน้ำยาทำความเย็นสถานะของเหลวผ่านรูรั่ว

การรั่วไหลของน้ำยาเหลวผ่านรูรั่วพิจารณาได้จากสมการที่ (2)

$$Q_m = C_o \times A \times \sqrt{2 \times \rho_f \times g_c \times (P_i - P_{sat})} \quad (2)$$

โดยที่

$\rho_f$  คือความหนาแน่นของ ammonia เหลว ณ ความดัน 1,500 กิโลปาสคาล (สัมบูรณ์) = 581.63 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

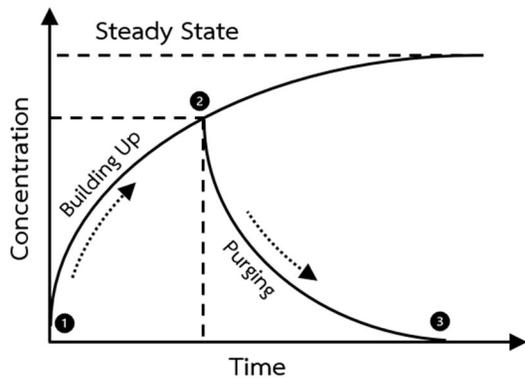
$P_{sat}$  คือความดันไออิ่มตัวของ flashing ammonia ภายใต้สภาวะบรรยากาศ ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส = 1,167 กิโลปาสคาล (สัมบูรณ์)

รอยรั่วของทั้ง 2 กรณี กำหนดให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเท่ากันเท่ากับ 1 มิลลิเมตร พื้นที่หน้าตัดการรั่วเป็นวงกลมเท่ากับ  $7.85 \times 10^{-7}$  ตารางเมตร จากกรณีของสภาวะก๊าซ พบว่าก๊าซแอมโมเนียมีอัตราการรั่วไหลเท่ากับ 0.0020 กิโลกรัมต่อวินาที และจากกรณีของสภาวะของเหลว พบว่าก๊าซแอมโมเนียมีอัตราการรั่วไหลเท่ากับ 0.0155 กิโลกรัมต่อวินาที เมื่อเปรียบเทียบจากทั้ง 2 สภาวะพบว่า การรั่วจากสภาวะของเหลวจะมากกว่าการรั่วจากสภาวะก๊าซ 7.75 เท่า การรั่วจากสภาวะของเหลวจะเลวร้ายมากกว่าการรั่วจากสภาวะก๊าซ ทำให้งานวิจัยได้ให้ความสำคัญกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการรั่วจากระบบในสภาวะของเหลวมากกว่า โดยการรั่วไหลนี้เมื่อของเหลวไหลผ่านรูรั่วออกมาแล้วจะเกิดการเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอกระจายอยู่ในห้องเครื่องต่อไป

## 5. ผลการวิจัย (Results)

ต่อเนื่องจากผลการวิเคราะห์ปริมาณการรั่วไหลผ่านรูรั่วในหัวข้อที่ผ่านมา สามารถแบ่งการวิเคราะห์ได้เป็น 2 ช่วง โดยช่วงที่ 1 เรียกว่า Contaminant Concentration Buildup stage เป็นสภาวะที่แอมโมเนียรั่วและระเหยเป็นก๊าซ เกิดการผสมกับอากาศในห้องเครื่อง ซึ่งทำให้ความเข้มข้น (Concentration) ของก๊าซแอมโมเนียสูงขึ้นเรื่อย ๆ ก่อนที่ความเข้มข้นจะมากพอที่จะกระตุ้นให้อุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซแอมโมเนีย (ammonia detector) เกิดการรับรู้ ทำให้ผู้ควบคุมต้องเข้าไปดำเนินการปิดวาล์วหลัก/หยุดการทำงานของระบบทำความเย็น และไปสั่งการให้เปิดการระบายอากาศแบบฉุกเฉิน ทำให้เกิดช่วงที่ 2 เรียกว่า Purging stage ความเข้มข้นของ ammonia จะไม่สูงเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการปิดวาล์วหลัก/หยุดการทำงานของระบบทำความเย็น ส่งผลให้การรั่วไหลจากระบบหยุดลง ระบบระบายอากาศแบบฉุกเฉินเริ่มทำงานก็จะ

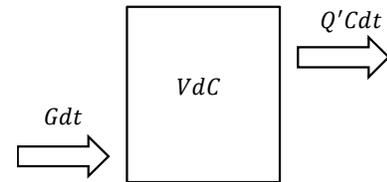
ดึงอากาศที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียสูงออกจากห้องทำให้  
อากาศใหม่ไหลเข้ามาแทนที่ ส่งผลให้ความเข้มข้นของ  
แอมโมเนียลดลง การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นทั้งสองช่วงนี้  
เป็นการเปลี่ยนแปลงต่อเวลาเรียกว่า transient response  
หรือ dynamic response ซึ่งมีความซับซ้อน การวิเคราะห์  
การเปลี่ยนแปลงในช่วงนี้จำเป็นต้องเทคนิคทางคณิตศาสตร์  
เข้ามาช่วยในการดำเนินการ



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น - เวลา ในสถานการณ์การ  
ระบายอากาศแบบ Contaminant Concentration Buildup และ  
Rate of Purging ของห้องเครื่อง

## 6. การพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ ความเข้มข้นของไอแอมโมเนีย

การพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์  
ความเข้มข้นของไอแอมโมเนียสำหรับสถานะความเข้มข้นของ  
ไอแอมโมเนียสะสมเพิ่มมากขึ้น นี้เรียกว่าสถานะ  
Contaminant Concentration Buildup ห้องเครื่องระบบทำ  
ความเย็นมีปริมาตรห้อง (volume of room)  $V$  มีอัตราการ  
รั่วของไอแอมโมเนีย (rate of generation)  $G$  มีอัตราการ  
ระบายอากาศออกจากห้อง (effective volumetric flow  
rate)  $Q'$  โดยที่ความเข้มข้นของไอระเหยในห้อง  
(Concentration) ใช้ตัวย่อว่า  $C$  ผลต่างระหว่างมวลของไอ  
ระเหยที่เกิดจากแหล่งกำเนิด  $Gdt$  และมวลของไอระเหยที่  
เกิดจากการระบายอากาศออกจากห้อง  $Q'Cdt$  เท่ากับ มวล  
ของไอระเหยที่สะสมในห้อง  $Vdc$  ผลต่างนี้ สามารถอธิบายได้  
ด้วยสมการ mass balance คือ



รูปที่ 6 Schematic diagram for Buildup stage

Rate of accumulation = Rate of generation – Rate  
of removal ดังสมการที่ (3)

$$VdC = Gdt - Q'Cdt \quad (3)$$

โดยที่

$V$  คือปริมาตรของห้อง (ลูกบาศก์เมตร)

$G$  คืออัตราการรั่วของแอมโมเนีย (ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที)

ทั้งนี้  $G = Q_m \times \rho_{@atm}$

$Q'$  คือการระบายอากาศแบบฉุกฉิน (ลูกบาศก์เมตรต่อ  
วินาที)

$C$  คือความเข้มข้นของก๊าซแอมโมเนีย (ส่วนในล้านส่วน)

$t$  คือเวลา (นาที)

จัดรูปสมการที่ (3) จะได้ดังสมการที่ (4)

$$\frac{dC}{G - Q'C} = \frac{dt}{V} \quad (4)$$

Integrate ทั้ง 2 ด้านของสมการที่ (5)

$$\int_{C_1}^{C_2} \frac{dC}{G - Q'C} = \int_{t_1}^{t_2} \frac{dt}{V} \quad (5)$$

จะได้การสมมูลมวลเชิงเวลาในห้องผสมสมบูรณ์ดังสมการที่ (6)

$$\ln\left(\frac{G - Q'C_2}{G - Q'C_1}\right) = -\frac{Q'(t_2 - t_1)}{V} \quad (6)$$

เมื่อ 1 หมายถึงสภาวะเริ่มต้น และ 2 หมายถึงสภาวะสุดท้ายที่พิจารณา เมื่อต้องการวิเคราะห์หาช่วงเวลาเปลี่ยนแปลง ( $t_2-t_1$ ) หรือ  $\Delta T$  ความเข้มข้นของไอระเหยในห้อง (Concentration) จาก  $C_1$  มาเป็น  $C_2$  ดังสมการที่ (7)

$$\Delta T = -\frac{V}{Q'} \left( \ln \left( \frac{G-Q'C_2}{G-Q'C_1} \right) \right) \quad (7)$$

ความเข้มข้นของไอระเหยในห้อง (Concentration) มีหน่วยเป็น ส่วนในล้านส่วน (part per million) หรือ parts/ $10^6$  ตัวอย่างเช่น ถ้า  $C_2 = 200$  ส่วนในล้านส่วน ให้ระบุค่าในสมการว่า  $C_2 = 200/10^6$  โดยสมการในรูปของความเข้มข้นของไอระเหยในห้อง (Concentration)  $C_2$  แสดงดังสมการที่ (8)

$$C_2 = \frac{\left\{ (Q'C_1 - G) e^{-\frac{Q'(t_2-t_1)}{V}} \right\} + G}{Q'} \quad (8)$$

ความเข้มข้นของไอระเหยในห้อง (Concentration) ที่คำนวณได้จากสมการนี้ ถ้าต้องการแปลงหน่วยให้เป็น ppm จะต้องคูณด้วย  $10^6$  เนื่องจากในสภาพของห้องที่มีการผสมอากาศและไอระเหยที่ไม่สมบูรณ์ ACGIH มีการกำหนดค่า factor K สำหรับสภาพการหมุนเวียนระบายอากาศแบบต่างๆ ดังสมการที่ (9)

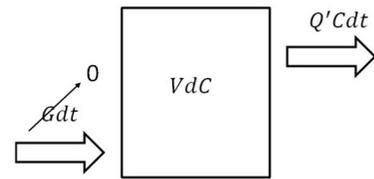
$$Q' = \frac{Q}{K} \quad (9)$$

โดยที่

$Q$  = การระบายอากาศแบบฉุกฉินที่รวมค่าเพื่อแล้ว (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)

$K$  = ค่าเพื่อ factor สำหรับการผสมของก๊าซและอากาศแบบไม่สมบูรณ์ ซึ่งสะท้อนถึงความไม่มีประสิทธิภาพของการผสมหรือการไหลเวียนจากตำแหน่งจ่ายถึงตำแหน่งดูดอากาศในห้อง โดยกรณีมีค่าสูง จะต้องการระบายอากาศมากขึ้น

สำหรับช่วงที่ 2 เรียกว่า Purging stage ความเข้มข้นของ ammonia จะไม่สูงเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการปิดวาล์วหลัก/หยุดการทำงานของระบบทำความเย็น ส่งผลให้การรั่วไหลจากระบบหยุดลง ระบบระบายอากาศแบบฉุกฉินเริ่มทำงานก็จะดึงอากาศที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียสูงออกจากห้องทำให้อากาศใหม่ไหลเข้ามาแทนที่ ส่งผลให้ความเข้มข้นของแอมโมเนียลดลงในห้องเครื่องระบบทำความเย็น  $G$  ในกรณีนี้มีค่าเป็นศูนย์ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ mass balance คือ



รูปที่ 7 Schematic diagram for Purging stage

Rate of accumulation = Rate of generation – Rate of removal ดังสมการที่ (10)

$$VdC = -Q'Cdt \quad (10)$$

จัดรูปสมการที่ (10) แล้ว Integrate ทั้ง 2 ด้านของสมการ ดังสมการที่ (11) จะได้ดังสมการที่ (12)

$$\int_{C_1}^{C_2} \frac{dC}{C} = -\frac{Q'}{V} \int_{t_1}^{t_2} dt \quad (11)$$

$$\ln \left( \frac{C_2}{C_1} \right) = -\frac{Q'(t_2-t_1)}{V} \quad (12)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Q'$  กับ ACH จะเป็นดังสมการที่ (13) มีหน่วยเป็นต่อชั่วโมง

$$ACH = \frac{Q'}{V} 3,600 \quad (13)$$

และจากสมการที่ (12) จะได้การสมมูลมวลเชิงเวลาในห้องผสมสมบูรณ์ดังสมการที่ (14)

$$\Delta T = -\frac{V}{Q'} \ln \left( \frac{C_2}{C_1} \right) \quad (14)$$

เมื่อต้องการวิเคราะห์หาความเข้มข้น  $C_2$  โดยการแก้สมการที่ (14) จาก Natural logarithm function แล้วจะได้สมการที่ (15)

$$C_2 = C_1 e^{-\left\{\frac{Q(t_2-t_1)}{V}\right\}} \quad (15)$$

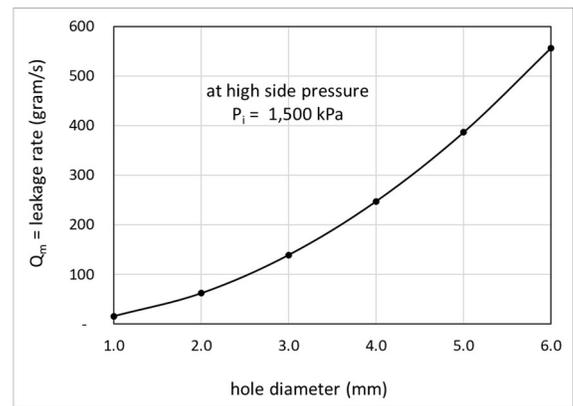
## 7. วิจารณ์ผล (Discussion)

กรณีศึกษาในโรงงานผลิตน้ำแข็งหลอดแห่งหนึ่ง มีการติดตั้ง ammonia detector สามารถทำงานในช่วงความเข้มข้น 0 - 100 ส่วนในล้านส่วน และมีตัวแปรควบคุมดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงตัวแปรควบคุมของกรณีศึกษา

สัญลักษณ์ตัวแปร	คำอธิบาย	ค่าของตัวแปร
$L$	ความยาวห้อง	15 เมตร
$W$	ความกว้างห้อง	15 เมตร
$H$	ความสูงห้อง	11 เมตร.
$A_{room}$	พื้นที่ห้อง ( $L \times W$ )	225 ตารางเมตร
$V$	ปริมาตรห้อง ( $A_{room} \times H$ )	2,475 ลูกบาศก์เมตร
$T_0$	อุณหภูมิบรรยากาศ	30 องศาเซลเซียส หรือ 303.15 เคลวิน
$P_{sat}$	ความดันไออิ่มตัวของ flashing ammonia ภายใต้สภาวะบรรยากาศ	1,167 กิโลปาสกาล (สัมบูรณ์)
$P_i$	ความดันภายในระบบ (ด้าน high side pressure)	1,500 กิโลปาสกาล (สัมบูรณ์)
$T_i$	อุณหภูมิสัมบูรณ์ภายในระบบ	38.65 องศาเซลเซียส หรือ 311.80 เคลวิน
$\rho_f$	ความหนาแน่นของ แอมโมเนียเหลว ณ สภาวะ 1,500 กิโลปาสกาล (สัมบูรณ์)	581.63 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
$C_0$	ค่าสัมประสิทธิ์การไหล (กรณี worst case)	1

จากแบบจำลองคณิตศาสตร์การรั่วไหลออกจาก pressure vessel ของน้ำยาแอมโมเนียเหลวภายใต้ความดัน high side pressure ออกสู่สภาวะบรรยากาศ สามารถวิเคราะห์อัตราการรั่วไหลได้ดังแสดงในกราฟรูปที่ 8 จากกราฟจะเห็นได้ว่า ณ ขนาดรูรั่ว 1 มิลลิเมตร มีอัตราการรั่วไหลเท่ากับ 15.45 กรัมต่อวินาที เมื่อขนาดรูรั่วที่มากขึ้นเป็น 3 มิลลิเมตร มีอัตราการรั่วไหลเท่ากับ 139.08 กรัมต่อวินาที หรือเพิ่มขึ้นมากกว่าเดิม 9 เท่า หรือเมื่อขนาดรูรั่วที่มากขึ้นเป็น 4 มิลลิเมตร มีอัตราการรั่วไหลเท่ากับ 247.25 กรัมต่อวินาที หรือเพิ่มขึ้นมากกว่าเดิม 16 เท่า และการวิเคราะห์อัตราการรั่วไหลของระบบทำความเย็นแบบแอมโมเนียด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถดำเนินการได้



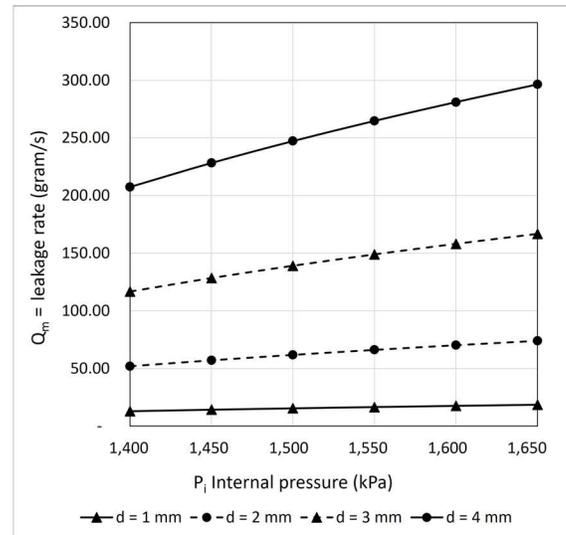
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Leakage Rate และ Hole Diameter ในสภาวะของเหลวผ่านรูรั่ว

ในการทำงานจริงของระบบทำความเย็นแบบแอมโมเนีย อาจมีความดันด้าน high side pressure ที่เปลี่ยนไปตามสภาพการทำงาน และการดูแลรักษา (maintenance) ของเครื่องจักร เช่น ไม่ได้ดูแลรักษาความสะอาดของอุปกรณ์และระบายความร้อนได้เพียงพอ เกิดตะกรันเกาะตามผิวท่อของ condenser ความสามารถในการระบายความร้อนต่อพื้นที่ลดลง ทำให้ compressor ต้องอัดเพิ่มความดันให้มากขึ้นเพื่อให้อุณหภูมิด้าน high side สูงขึ้นและสามารถระบายความร้อนออกได้อย่างเพียงพอตาม cooling load ที่ดูดซับมาจาก evaporator ด้วยเหตุผลต่าง ๆ เหล่านี้ ทำให้ความดันด้าน high side pressure มีโอกาสสูงขึ้นจากสภาวะที่ได้ออกแบบการทำงานไว้ การวิจัยในที่นี้ จึงได้วิเคราะห์ปัจจัยร่วมระหว่าง

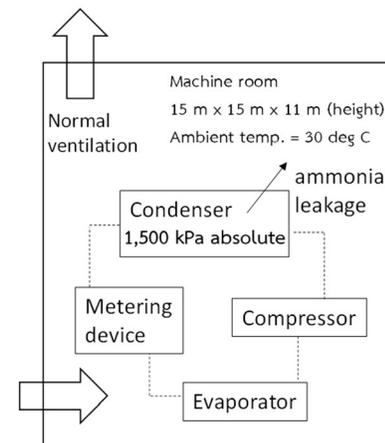
high side pressure หรือ ความดันภายในระบบ (internal pressure) ร่วมกับขนาดรูรั่ว ว่าถ้ามีทั้งสองปัจจัยนี้เกิดขึ้นพร้อม ๆ กันแล้ว อัตราการรั่วไหลจะเป็นอย่างไร จากกรณีศึกษาในโรงงานผลิตน้ำแข็งหลอดเดิม ความดันภายในระบบ (internal pressure) vary ระหว่าง 1,400 - 1,600 กิโลปาสกาล (สัมบูรณ์) หรือ 1,300 - 1,500 กิโลปาสกาล (ความดันเกจ) ใช้สมมุติฐานว่ารูรั่วเป็นวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง vary ระหว่าง 1 - 4 มิลลิเมตร จากแบบจำลองคณิตศาสตร์การรั่วไหลออกจาก pressure vessel ของน้ำยาแอมโมเนียเหลวภายใต้ความดัน high side pressure ออกสู่สภาวะบรรยากาศ สามารถวิเคราะห์อัตราการรั่วไหลได้ดังแสดงในกราฟรูปที่ 9 จากกราฟจะเห็นได้ว่า ณ ความดันระบบ = 1,400 กิโลปาสกาล (สัมบูรณ์) ขนาดรูรั่ว 1 - 4 มิลลิเมตร ส่งผลให้มีอัตราการรั่วไหลเท่ากับ 12.97 - 207.48 กรัมต่อวินาที มีผลต่าง = 194.51 กรัมต่อวินาที เมื่อความดันระบบเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น = 1,500 กิโลปาสกาล (สัมบูรณ์) ขนาดรูรั่ว 1 - 4 mm ส่งผลให้มีอัตราการรั่วไหลเท่ากับ 15.45 - 247.25 กรัมต่อวินาที มีผลต่าง = 231.80 กรัมต่อวินาที (ผลต่างเพิ่มขึ้น 19% เมื่อเทียบกับสภาวะความดันระบบ 1,400 กิโลปาสกาล) เมื่อความดันระบบเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น = 1,600 กิโลปาสกาล ขนาดรูรั่ว 1 - 4 มิลลิเมตร ส่งผลให้มีอัตราการรั่วไหลเท่ากับ 17.57 - 281.04 กรัมต่อวินาที มีผลต่าง = 263.48 กรัมต่อวินาที (ผลต่างเพิ่มขึ้น 35% เมื่อเทียบกับสภาวะความดันระบบ 1,400 กิโลปาสกาล) ซึ่งจากผลการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่า เมื่อความดันเพิ่มขึ้น ความแตกต่างของขนาดรูรั่ว ก็จะส่งผลต่ออัตราการรั่วไหลที่แตกต่างกันมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

กรณีศึกษาต่อมา เมื่อวิเคราะห์อัตราการรั่วไหลได้แล้ว แอมโมเนียที่รั่วออกจากรูรั่ว จะเกิดการระเหยกลายเป็นไอแอมโมเนีย ภายใต้สภาวะบรรยากาศ และผสมกับอากาศโดยรอบมีสภาพกลายเป็นสารผสมระหว่างอากาศและแอมโมเนีย (air - ammonia mixture) ความเข้มข้น (concentration) ของแอมโมเนียในอากาศจะถูกนิยามเป็นส่วนในล้านส่วน สภาวะความเข้มข้นจะมีการเปลี่ยนแปลงแบบ transient state โดยเริ่มต้นจาก 0 และ ค่าความเข้มข้นจะปรับตัวสูงขึ้น จนกระทั่งความเข้มข้นถึงจุดที่เครื่องตรวจจับแอมโมเนีย (ammonia detector) สามารถตรวจสอบและส่ง

สัญญาณแจ้งเตือนได้ งานวิจัยนี้ให้ความสนใจกับ ระยะเวลาที่ใช้ในการสะสมความเข้มข้นเพิ่มขึ้น จากจุดเริ่มต้น 0 ส่วนในล้านส่วน จนถึง 50 ส่วนในล้านส่วน ที่ ammonia detector เริ่มทำงาน แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอแอมโมเนียสำหรับสภาวะสะสมเพิ่มมากขึ้น เรียกว่าสภาวะ Contaminant Concentration Buildup

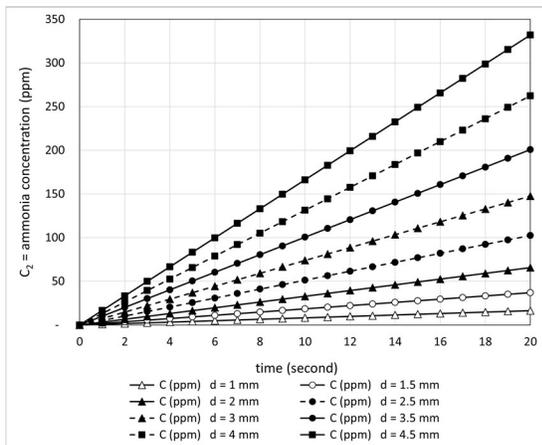


รูปที่ 9 ปัจจัยร่วมระหว่าง Internal pressure, ขนาดรูรั่ว ที่ส่งผลต่ออัตราการรั่ว ในสภาวะของเหลวผ่านรูรั่ว



รูปที่ 10 แบบจำลองการรั่ว ร่วมกับแบบจำลองวิเคราะห์ dynamic model ของ ventilation (Contaminant Concentration Buildup)

ใช้สมมุติฐานว่ารูรั่วเป็นวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง vary ระหว่าง 1 - 4.5 มิลลิเมตร, สภาวะก่อนไหลผ่านรูรั่วแอมโมเนียอยู่ในสภาพของเหลวที่อุณหภูมิ  $T_i$  และ  $\rho_f$  เมื่อรูรั่วไหลผ่านรูรั่วออกมาแล้วเกิดการระเหยเปลี่ยนสภาพเป็นไอพิจารณาได้ว่าเป็นสภาวะ superheat ที่ความดันบรรยากาศ (100 กิโลปาสกาล (สัมบูรณ์)) อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส, ในขณะที่มีการรั่วนี้ ในห้องเครื่องจะมีการระบายอากาศพื้นฐานตามข้อกำหนด มอก.3023-2563 และกฎหมาย เพื่อการระบายความร้อนจากห้องเครื่อง โดยในประเทศไทยกำหนดให้ต้องมีการระบายอากาศพื้นฐาน อยู่ที่ 0.003 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ต่อ 1 ตารางเมตร พื้นที่ห้องเครื่อง ในกรณีห้องเครื่องมีพื้นที่ 225 ตารางเมตร ก็จะมีการระบายอากาศพื้นฐานอยู่ที่ 0.675 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที การผสมกันระหว่างอากาศที่หมุนเวียนและไอแอมโมเนียที่รั่วออกมาสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เสนอไว้ในสมการที่ (7) ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอแอมโมเนีย  $C_2$  ต่อเวลา แสดงได้ดังกราฟรูปที่ 11



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Concentration และ Time จากสมการสภาวะ Contaminant Concentration Buildup เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจาก 0 ส่วนในล้านส่วน ในเวลา 20 วินาที

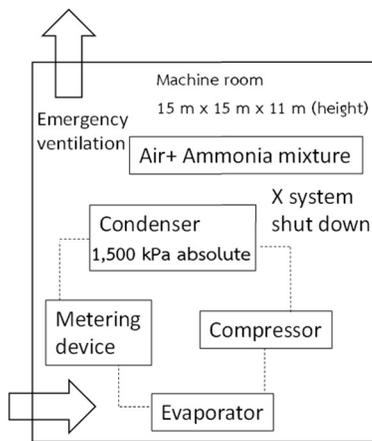
ผลการวิเคราะห์ simulation ด้วยระยะเวลาที่ยาวนานเป็นนาที จะเห็นรูปแบบการเปลี่ยนแปลงแบบ exponential เนื่องจากพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงที่วิเคราะห์มาจาก Natural logarithm function แต่ในงานวิจัยนี้ จะสนใจในช่วงเวลาเป็นวินาที ที่ความเข้มข้นจะขึ้นไปถึง 50 ส่วนในล้านส่วน เพื่อ

กระตุ้นให้ ammonia detector เริ่มทำงานและแจ้งเตือน เป็นช่วงเวลาที่สั้นจึงทำให้ไม่เห็น profile ที่แสดงความโค้งหรือการเปลี่ยนแปลงแบบ exponential (ในกราฟผลการวิเคราะห์จะเห็นผลการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างเป็นเส้นตรงเนื่องจากเป็นส่วนหนึ่งของ exponential curve เท่านั้น) แต่เวลาเป็นวินาที ก่อนการตรวจจับของ ammonia detector ก็ส่งผลต่อความปลอดภัยในชีวิตของบุคลากรในโรงงานและพื้นที่โดยรอบ ammonia detector ตรวจสอบได้เร็วมาก ก็จะทำให้เกิดการรับรู้เพื่อเข้าทำดำเนินการแก้ไข ระวังเหตุ รวมถึงการอพยพคนออกจากพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากการรั่วของ ammonia จะเห็นได้ว่าขนาดของรูรั่วส่งผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นอย่างชัดเจน ในการ buildup ค่าความเข้มข้นจาก 0 ส่วนในล้านส่วน ไปสู่ 50 ส่วนในล้านส่วน กรณีรูรั่วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2, 3, 4 มิลลิเมตร ต้องใช้เวลา 15.25, 6.77, 3.81 วินาที ตามลำดับ

กรณีศึกษาต่อมา เมื่อ ammonia detector ทำงานและแจ้งเตือน ก็จะทำให้เกิดการรับรู้เพื่อเข้าทำดำเนินการแก้ไข ระวังเหตุ รวมถึงการอพยพคนออกจากพื้นที่ หนึ่งในวิธีการที่ส่งผลต่อความปลอดภัยในชีวิตของบุคลากรในโรงงานและพื้นที่โดยรอบ ก็คือการระบายอากาศแบบฉุกเฉิน (Emergency) ซึ่งมีความแตกต่างไปจากการระบายอากาศพื้นฐาน โดยที่แบบพื้นฐานมีอัตราการไหลที่ต่ำและต้องการเพียงการระบายความร้อนในขณะที่เครื่องจักรทำงานเท่านั้น แต่การระบายอากาศแบบฉุกเฉิน (Emergency) ต้องการอัตราการไหลของอากาศที่สูงกว่ามาก เพื่อทำให้ความเข้มข้นของไอแอมโมเนียลดลง เข้าสู่ระดับที่ปลอดภัยในเวลาที่ยากัด ในขั้นตอนนี้ เมื่อเจ้าหน้าที่ผู้ดูแลเครื่องรับรูการรั่ว จะต้องหยุดเครื่องและใช้ชุดป้องกันที่เหมาะสมและเข้ามาปิดวาล์วประธาน หรือวาล์วหลักของระบบ ทำให้การรั่วไหลหยุดลง และ start เริ่มต้นระบบระบายอากาศแบบฉุกเฉินเพื่อลดความเข้มข้นของไอแอมโมเนียลง ให้เข้าสู่ระดับที่ปลอดภัย โดยใช้เวลาที่สั้นที่สุด แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอแอมโมเนียสำหรับการระบายอากาศแบบฉุกเฉินนี้ เรียกว่า สภาวะ Contaminant Concentration Purging โดยสภาวะเริ่มต้น แอมโมเนียที่รั่วออกไปผสมกับอากาศในห้องโดยรอบมีสภาพกลายเป็นสารผสมระหว่างอากาศและแอมโมเนีย (air - ammonia mixture) จากการรับรู้โดย ammonia

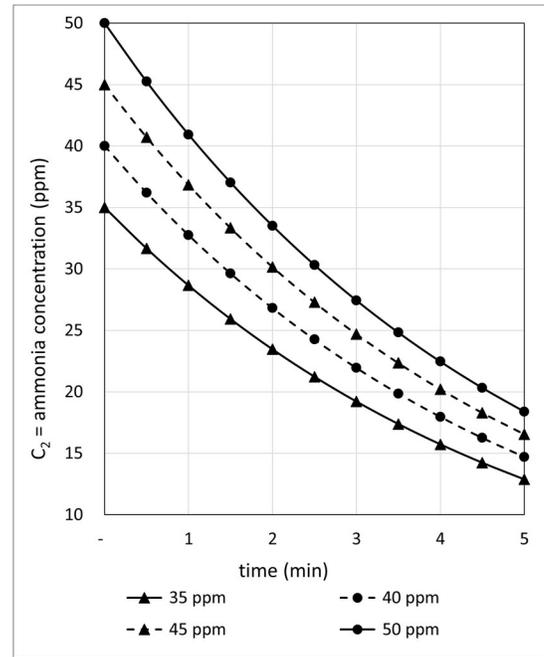
detector ระบบทำความเย็น shutdown ไปแล้ว และวาล์วหลักถูกปิดไปแล้ว ไม่มีการรั่วเพิ่มเติม แต่ความเข้มข้นของไอแอมโมเนียยังคงอยู่ ระบบระบายอากาศแบบฉุกฉินเริ่มทำงาน ซึ่งอาจเป็นการทำงานเพิ่มเติมจากระบบระบายอากาศเดิม หรือเป็นระบบใหม่แยกทำงานต่างหากก็เป็นไปได้

กรณีเมื่อความเข้มข้นของไอแอมโมเนียเริ่มต้นที่ 35, 40, 45, และ 50 ส่วนในล้านส่วน, ต้องการลดความเข้มข้นต่ำกว่า 25 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้การระบายอากาศแบบฉุกฉิน 30 ACH ตามข้อกำหนดของ IIAR (International Institute of Ammonia Refrigeration) [16]



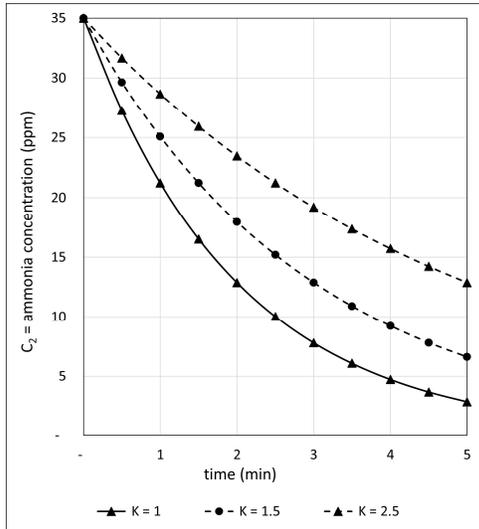
รูปที่ 12 แบบจำลองการรั่ว ร่วมกับแบบจำลองวิเคราะห์ dynamic model ของ ventilation (Contaminant Purging)

$K = 2.5$  (Fair air inlet & Best exhaust) อ้างอิงสภาพห้องเครื่องจาก ACGIH ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอแอมโมเนียต่อเวลา แสดงได้ดังกราฟรูปที่ 13 จะเห็นได้ว่า จากสภาพห้องเครื่องที่มีค่า  $K = 2.5$  และมีการระบายอากาศฉุกฉิน 30 ACH ความเข้มข้นของไอแอมโมเนียเริ่มต้นส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการระบายอากาศเพื่อควบคุมความเข้มข้นให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย กรณี ความเข้มข้นของไอแอมโมเนียเริ่มต้น 35, 40, 45, 50 ส่วนในล้านส่วน และต้องการลดความเข้มข้นลงมาเท่ากับ 25 ส่วนในล้านส่วน ต้องใช้เวลา 1.68, 2.35, 2.94, 3.47 นาที ตามลำดับ



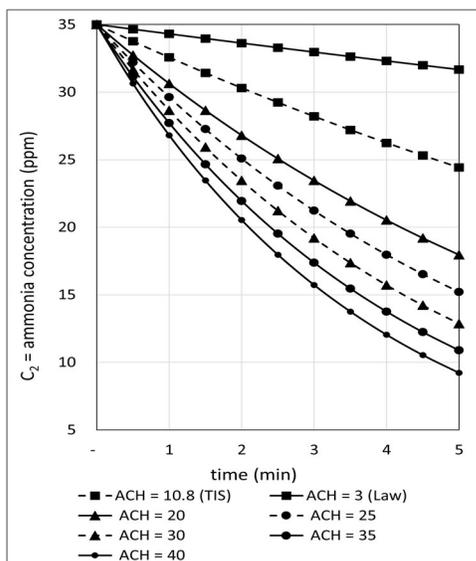
รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Concentration ที่แตกต่างกัน และ Time ในสภาวะ Purging stage เมื่อความเข้มข้นลดลงในช่วงเวลา 5 นาที

กรณีศึกษาเมื่อความเข้มข้นของไอแอมโมเนียเริ่มต้นที่ 35 ppm ใช้การระบายอากาศแบบฉุกฉิน 30 ACH ตามข้อกำหนดของ IIAR (International Institute of Ammonia Refrigeration)  $K = 2.5$  อ้างอิงสภาพห้องเครื่องจาก ACGIH ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอแอมโมเนียต่อเวลา แสดงได้ดังกราฟรูปที่ 14 จะเห็นได้ว่า จากสภาพห้องเครื่องที่มีความเข้มข้นของไอแอมโมเนียเริ่มต้นที่ 35 ส่วนในล้านส่วน ใช้การระบายอากาศแบบฉุกฉิน 30 ACH ค่า  $K$  นี้ ส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการระบายอากาศเพื่อควบคุมความเข้มข้นให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย กรณี ค่า  $K = 1, 1.5, 2.5$  และต้องการลดความเข้มข้นลงมาเท่ากับ 25 ส่วนในล้านส่วน ต้องใช้เวลา 0.67, 1.01, 1.68 นาที ตามลำดับ



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Concentration และ Time ในสภาวะ Purging stage เมื่อค่า  $K$  แตกต่างกัน

กรณีศึกษาเมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนียเริ่มต้นที่ 35 ส่วนในล้านส่วน สภาพห้องเครื่องที่มีค่า  $K = 2.5$  การระบายอากาศแบบฉุกฉิน ส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการระบายอากาศเพื่อควบคุมความเข้มข้นให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอมโมเนียต่อเวลา แสดงได้ดังกราฟรูปที่ 15 กรณี การระบายอากาศแบบฉุกฉิน 3 (กฎกระทรวงฯ), 10.8 (มอก.), 20, 25, 30, 35, 40 ACH และต้องการลดความเข้มข้นลงมาเท่ากับ 25 ส่วนในล้านส่วน ต้องใช้เวลา 16.82, 4.67, 2.52, 2.02, 1.68, 1.44, 1.26 นาที ตามลำดับ



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่าง Concentration และ Time ในสภาวะ Purging stage เมื่อค่าอัตราการระบายอากาศแตกต่างกัน

## 8. เปรียบเทียบอัตราการระบายอากาศ

ปัจจุบันการออกแบบการระบายอากาศสำหรับห้องเครื่องระบบทำความเย็นแบบแอมโมเนีย มีการอ้างอิงจาก 3 แหล่งข้อมูล ซึ่งมีข้อมูลไม่สอดคล้องกัน ทำให้หลายครั้งเกิดความสับสน ในการเลือกใช้

แหล่งข้อมูลที่ 1 มาจากกฎกระทรวงกำหนดมาตรการความปลอดภัยเกี่ยวกับระบบทำความเย็นที่ใช้แอมโมเนียเป็นสารทำความเย็นในโรงงาน พ.ศ. 2554 ออกโดยกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ซึ่งระบุว่าลักษณะห้องเครื่องต้องมีการระบายอากาศ ในกรณีที่ห้องเครื่องใช้การระบายอากาศแบบใช้พัดลม เพื่อให้อากาศหมุนเวียนภายในอย่างเพียงพอและเกิดความปลอดภัยแก่คนงาน ที่สามารถเปลี่ยนอากาศในห้องได้อย่างสมบูรณ์ภายในยี่สิบนาที และระบายอากาศเก่าทั้งหมดออกสู่ภายนอกอาคาร

แหล่งข้อมูลที่ 2 มาจากมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 3023-2563) ระบบการทำความเย็นแอมโมเนียแบบอัดไอ ออกโดยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ซึ่งกำหนดให้อัตราระบายอากาศปกติ ห้องเครื่องต้องออกแบบให้มีอัตราการระบายอากาศเท่ากับ 0.003 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ต่อพื้นที่ 1 ตารางเมตร อัตราระบายอากาศแบบฉุกฉิน ห้องเครื่องต้องออกแบบให้มีอัตราการระบายอากาศจาก 2 สมการ โดยให้เลือกค่าที่มากกว่าในการออกแบบ ดังสมการที่ (16) และสมการที่ (17)

$$Q = 0.07 \times G_{mass}^{0.5} \quad (16)$$

โดย

$G_{mass}$  คือมวลของน้ำยาแอมโมเนีย ในระบบที่ใหญ่ที่สุด ซึ่งส่วนต่างๆ ของระบบนี้ ต้องถูกติดตั้งอยู่ภายในห้องเครื่องจักรกล ซึ่งมีหน่วยเป็นกิโลกรัม (กิโลกรัม)

$$Q = V \times 0.003 \quad (17)$$

แหล่งข้อมูลที่ 3 มาจากมาตรฐานการออกแบบ Equipment, Design, and Installation of Closed-Circuit Ammonia Mechanical Refrigerating Systems ออกโดย IIR (INTERNATIONAL INSTITUTE OF AMMONIA

REFRIGERATION) ซึ่งกำหนดให้อัตราระบายอากาศปกติ ห้องเครื่องต้องออกแบบให้มีอัตราการระบายอากาศ เท่ากับ 20 ACH อัตราระบายอากาศแบบฉุกเฉิน ห้องเครื่องต้องออกแบบให้มีอัตราการระบายอากาศ เท่ากับ 30 ACH

เพื่อทำให้เกิดการเปรียบเทียบกันได้โดยง่ายในกรณีศึกษา นี้ จึงได้ปรับหน่วยทั้ง 3 กรณีให้อยู่ในหน่วย air change (ACH) เดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบอัตราการระบายอากาศ

ข้อกำหนดที่เกี่ยวข้อง	การระบายอากาศ สถานะพื้นฐาน (ACH)	การระบายอากาศ สถานะฉุกเฉิน (ACH)
กฎกระทรวง	3	3
มอก.3023	0.98	10.80
IIAR	20	30

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าในสถานะฉุกเฉิน การระบายอากาศตามกฎหมาย พิจารณาได้ว่ามีค่าที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับ มอก. หรือมาตรฐานสากล ดังนั้นการปรับปรุงกฎหมายในเรื่องค่ากำหนดการระบายอากาศสถานะฉุกเฉิน สำหรับกฎกระทรวง กำหนดมาตรฐานความปลอดภัยเกี่ยวกับระบบทำความเย็นที่ใช้แอมโมเนียเป็นสารทำความเย็นในอนาคตเป็นเรื่องจำเป็น

## 9. บทสรุป (Conclusion)

1) จากการเปรียบเทียบการรั่วจากสถานะของเหลว และการรั่วจากสถานะก๊าซในระบบทำความเย็น พบว่าการประเมินการรั่วไหลที่เลวร้ายที่สุด (worst case scenario) จะเกิดขึ้นจากด้าน high side pressure ในสถานะของเหลว

2) การวิเคราะห์อัตราการรั่วไหลของระบบทำความเย็นแบบแอมโมเนียด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถดำเนินการได้ในสถานะพลศาสตร์ (Transient state)

3) ผลการวิเคราะห์ simulation สถานะพลศาสตร์ (Transient state) การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอแอมโมเนีย จะมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงแบบ Exponential เนื่องจากพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงที่วิเคราะห์มาจาก Natural logarithm function ในการ buildup ค่าความเข้มข้นของไอแอมโมเนีย ขนาดของรั่วรั่วส่งผลต่ออัตราการ

เปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณาปัจจัยร่วมระหว่างความดันและขนาดรั่วรั่ว พบว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ความแตกต่างของขนาดรั่วรั่ว ก็จะส่งผลต่ออัตราการรั่วไหลที่แตกต่างกันมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ Buildup stage ส่งผลอย่างมากต่อความเร็วในการตอบสนองของ ammonia detector

4) Purging stage มีความสำคัญในช่วงการระบายแอมโมเนียแบบฉุกเฉิน เพื่อให้คนมีเวลาหนีออกจากพื้นที่ได้นานมากขึ้น พื้นที่ห้องเครื่องมีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น จากการปรับเปลี่ยนค่า การวิเคราะห์ simulation สถานะพลศาสตร์ (Transient state) ช่วยทำให้ประเมินเวลาที่ใช้สำหรับการ purging และตรวจสอบสภาพการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของไอแอมโมเนีย

5) ความเข้มข้นเริ่มต้น สภาพการผสมของอากาศในห้องเครื่อง ส่งผลต่อระยะเวลาในการ purging ในรูปแบบที่ว่าถ้าความเข้มข้นเริ่มต้นสูง ทำให้ต้องใช้เวลามากขึ้น หรือสภาพการผสมของอากาศในห้องเครื่องไม่ดี (ค่า  $K$  สูง ตามมาตรฐาน ACGIH) ส่งผลทำให้ต้องใช้เวลามากขึ้น

6) ปริมาณการหมุนเวียนอากาศ (air change) สำหรับสถานะฉุกเฉิน ส่งผลต่อระยะเวลาในการ purging ในรูปแบบที่ว่าถ้าปริมาณการหมุนเวียนอากาศสูง ทำให้ลดเวลาในการ purging ได้อย่างมีนัยสำคัญ และเทคนิคในการทำ dynamic simulation เป็นเครื่องมือช่วยที่สำคัญในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอแอมโมเนียต่อเวลา

7) โรงงานใช้เทคนิคการวิเคราะห์จากงานวิจัยชิ้นนี้เป็นเครื่องมือในการพิจารณาขนาดพัดลม เพิ่มเติมจากที่กฎหมายกำหนด

8) จากการเปรียบเทียบการวิเคราะห์อัตราการระบายอากาศจาก 3 แหล่งข้อมูล ประกอบไปด้วย 1) กฎหมายปัจจุบันของกรมโรงงานอุตสาหกรรม 2) มอก. 3) IIAR พบว่าไม่สอดคล้องกัน ดังนั้นการปรับปรุงกฎหมายในเรื่องค่ากำหนดการระบายอากาศสถานะฉุกเฉิน สำหรับกฎกระทรวง กำหนดมาตรฐานความปลอดภัยเกี่ยวกับระบบทำความเย็นที่ใช้แอมโมเนียเป็นสารทำความเย็นในอนาคตเป็นเรื่องจำเป็นที่ต้องดำเนินการ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Welch J. Future trends in ammonia refrigeration design. In: *ASME 2009 Citrus Engineering Conference (CEC2009); 19 Mar 2009; Lake Alfred (FL)*. USA. Paper No.: CEC2009-5504.
- [2] Sinyagovsky A, Kornilov I, Kotlyar L. Ammonia refrigeration systems: company innovation practice. In: *6th IIR International Conference on Ammonia and CO2 Refrigeration Technologies; Apr 2015*. Ohrid, Macedonia.
- [3] Cholik A, Ruhyat N, Novianto S. Performance evaluation of ammonia refrigeration systems in a texturizing plant. *International Journal of Innovation in Mechanical Engineering and Advanced Materials*. 2024;6(3):161–172.
- [4] Liu Y, Harikrishnan B, Kolluru R, Mastorakos E. Computational fluid dynamics simulation of ammonia leakage scenarios during ship-to-ship bunkering. *Ocean Engineering*. 2024; 312: 119136.
- [5] Kocsis Z, Dobor J, Kóródi G, Kuk E. Industrial safety analysis of accidents involving ammonia, with special regard to cold-storage facilities. *Academic and Applied Research in Military and Public Management Science*. 2015;14(3):273–284.
- [6] Kocsis Z, Dobor J, Kóródi G, Kuk E. Industrial safety analysis of accidents involving ammonia, with special regard to cold-storage facilities II. *Academic and Applied Research in Military and Public Management Science*. 2016;15(1): 37–49.
- [7] Pachai AC. *Ammonia Safety by Design and Maintenance*. IIR Bull. 2010; 2010-1.
- [8] Biscotti PS, Reinheimer MA, Scenna NJ. A risk-based design of ammonia refrigeration systems in food manufacturing plants. *Latin American Applied Research - An International Journal*. 2019;49(1): 55 –60
- [9] Rosa AC, de Souza IT, Terra A, Hammad AWA, Di Gregório LT, Vázquez E, et al. Quantitative risk analysis applied to refrigeration's industry using computational modeling. *Results in Engineering*. 2021;9: 100202.
- [10] Nakyai T, Phatrabuddha S, Homsri P, Phatrabuddha N. Risk assessment of ammonia leakage by fault tree analysis: case study in the ice manufacture, Chonburi province. *F1000Research*. 2025;14:192. เข้าถึงได้จาก: <https://doi.org/10.12688/f1000research.159905.1> [เข้าถึงเมื่อ 10 มีนาคม 2025].
- [11] Luo C, Zhao Y, Xu K, Liu L, Wang C, Zhang Y, et al. Study on the regularity of ammonia-related refrigeration accidents in China from 2010 to 2020. *International journal of environmental research and public health*. 2022;19(14):8230.
- [12] Nashira A, Nugrahani AP, Rahmah AU, Cahyono T. Quantitative risk assessment of ammonia release from storage tanks using RISKCURVES software. *Engineering Proceedings*. 2025;84:80.
- [13] Mansor Ali MX, Juhari ML, Arifin K, Abas A, Don Ramli DR, Zulkifli SS, et al. Ammonia leakage and safety research: a century of progress, present risks, and future directions through a bibliometric lens. *Paper Asia*. 2025;41(3b):355–373. เข้าถึงได้จาก: <https://doi.org/10.59953/paperasia.v41i3b.500>.
- [14] กระทรวงอุตสาหกรรม. กฎกระทรวงกำหนดมาตรการความปลอดภัยเกี่ยวกับระบบทำความเย็นที่ใช้แอมโมเนียเป็นสารทำความเย็นในโรงงาน พ.ศ. 2554. ราชกิจจานุเบกษา. 2554; เล่ม 128 (ตอนที่ 25 ก); 11 เม.ย. 2554.
- [15] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. มอก. 3023–2563 ระบบการทำความเย็นแอมโมเนียแบบอัดไอ. กรุงเทพฯ: สผอ.; 2563.
- [16] International Institute of Ammonia Refrigeration (IIR). *ANSI/IIR 2-2008 (with Addendum B, 2012): Equipment, design, and installation of closed-circuit ammonia mechanical refrigerating systems*. Arlington (VA): IIR; 2012.