

การศึกษาและประเมินประสิทธิภาพของระบบดับเพลิงด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์  
สำหรับเครื่องเคลือบผิวพลาสติกด้วยกาวในโรงงานผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติกแบบอ่อน  
Study and Evaluation of the Efficiency of Carbon Dioxide Fire Extinguishing System  
for Glue Laminating Machine in Flexible Plastic Packaging Factory

พัศราพร ไพรวลัย<sup>1</sup> และ ประกอบ สุรวัฒนารณ<sup>2\*</sup>

Passaraporn Praiswan<sup>1</sup> and Prakob Surawattanawan<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมความปลอดภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร 10900 ประเทศไทย

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

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

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

\*E-mail: fengpsw@ku.ac.th

Received: May 31, 2025

Revised: Jul 06, 2025

Accepted: Jul 09, 2025

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและประเมินประสิทธิภาพของระบบดับเพลิงด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้กับเครื่องเคลือบผิวพลาสติกด้วยกาวในโรงงานผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติกแบบอ่อนโดยยึดตามมาตรฐาน NFPA 12 โดยเครื่องจักรที่ใช้ในการศึกษานี้มีช่องเปิดทั้งด้านบนและด้านล่าง ซึ่งส่งผลให้เกิดการรั่วไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขณะใช้งานระบบดับเพลิง การรั่วไหลนี้ส่งผลให้ต้องใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี โดยจากการคำนวณพบว่าปริมาตรของเครื่องจักรเท่ากับ 7.48 ลูกบาศก์เมตร และปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ควรใช้ตามปริมาตรเครื่องจักรและความเข้มข้นของก๊าซที่เหมาะสม คือ 9.77 กิโลกรัม แต่เมื่อนำค่าการรั่วไหลที่เกิดจากช่องเปิดด้านล่าง ซึ่งมีพื้นที่รวม 1.03 ตารางเมตร มาพิจารณาจะต้องใช้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ เพิ่มขึ้นเป็น 124.60 กิโลกรัม ซึ่งคิดเป็นปริมาณการสูญเสียมากกว่า 13 เท่า จากการศึกษาผลของอุณหภูมิโดยรอบของเครื่องจักรต่อการรั่วไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต้องใช้จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และเมื่อทดลองลดขนาดช่องเปิดด้านล่างลงทีละ 1 เซนติเมตร เพื่อวิเคราะห์ปริมาณการรั่วไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์พบว่าสามารถลดการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งมีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการวางแผนและออกแบบระบบดับเพลิงในอนาคต ผลการศึกษานี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงการออกแบบระบบดับเพลิงด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เหมาะสมกับเครื่องจักรในอุตสาหกรรมพลาสติกให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการดับเพลิง ลดความเสียหาย และเพิ่มความปลอดภัยแก่บุคลากรและทรัพย์สินในสถานประกอบการ

**คำสำคัญ:** ระบบดับเพลิงด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โรงงานผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติกแบบอ่อน มาตรฐาน NFPA 12

#### Abstract

This research aimed to study and evaluate the efficiency of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) fire extinguishing system used with a glue laminating machine in a flexible plastic packaging factory based on NFPA 12 standard. The machine used in this study had openings at both the top and bottom, resulting in CO<sub>2</sub> leakage during fire extinguishing. This leakage caused the use of CO<sub>2</sub> in a quantity greater than that estimated by theoretical calculation. From the calculation, it was found that the internal volume of the machine was 7.48 m<sup>3</sup>, and the required CO<sub>2</sub> mass based on the machine volume and the appropriate gas concentration was 9.77 kg. However, when considering the leakage from the bottom opening, which had a total area of 1.03 m<sup>2</sup>, the and the required

CO<sub>2</sub> mass increased to 124.60 kg, which was a loss of more than 13 times. From the study of the effect of ambient temperature around the machine on CO<sub>2</sub> leakage, it was found that the required CO<sub>2</sub> mass increased as the temperature increased. When the experiment was performed by reducing the size of the bottom opening by 1 cm at a time to analyze the amount of carbon dioxide gas leakage, it was found that the required CO<sub>2</sub> could be significantly reduced, which is very useful for planning and designing future fire extinguishing system. The results of this study can be used as a guideline for improving the design of carbon dioxide fire extinguishing systems to be suitable for machinery in the plastic industry to maximize fire extinguishing efficiency, reduce damage, and increase safety for personnel and assets in the workplace.

**Keywords:** Carbon dioxide fire extinguishing system, Flexible plastic packaging factory, NFPA 12 standard

## 1. บทนำ

จากสถิติข้อมูลการเกิดเหตุเพลิงไหม้ของกรมโรงงานอุตสาหกรรม [1] พบว่าเหตุเพลิงไหม้ที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นกับภาคอุตสาหกรรมมากที่สุด โดยเหตุเพลิงไหม้เกิดในช่วงเดือนเมษายนถึงพฤษภาคมมากที่สุด เมื่อจำแนกเหตุเพลิงไหม้ตามกลุ่มอุตสาหกรรมพบว่า 26% เกิดขึ้นกับอุตสาหกรรมประเภทพลาสติก ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมผลิตเม็ดพลาสติก อุตสาหกรรมผลิตบรรจุภัณฑ์ที่ทำมาจากพลาสติก เนื่องจากคุณสมบัติของพลาสติกจะสามารถติดไฟได้ง่าย และพลาสติกมีคุณสมบัติที่ก่อให้เกิดไฟฟ้าสถิตที่พื้นผิวได้ หากมีการเสียดสีหรือเคลื่อนตัวด้วยความเร็ว

กรณีศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นบริษัทผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติกแบบอ่อน โดยบริษัทมีโรงงานผลิตมากกว่า 212 โรงงานภายใน 40 ประเทศทั่วโลก และโรงงานในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงเหนือจำนวน 20 โรงงานมีการเก็บข้อมูลสถิติการเกิดเพลิงไหม้ระหว่างปี 2565 ถึง 2566 พบว่าในปี 2566 มีจำนวนเหตุเพลิงไหม้เพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 2 เท่าเมื่อเทียบกับปี 2565 และเมื่อจำแนกตามประเภทเครื่องจักรที่เกิดเหตุเพลิงไหม้ พบว่าเหตุเพลิงไหม้เกิดจากเครื่องเคลือบผิวด้วยกาว คิดเป็น 50% ของเหตุเพลิงไหม้ที่เกิดขึ้นทั้งหมด เนื่องจากการผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติกมีความเสี่ยงในการเกิดเพลิงไหม้สูง ทางบริษัทผู้ผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติกแบบอ่อนได้ให้ความสำคัญในการกำหนดป้องกันและระงับเหตุเพลิงไหม้ โดยกำหนดให้มีการติดตั้งระบบดับเพลิงด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เครื่องเคลือบผิวด้วยกาว ผู้วิจัยได้เก็บข้อมูลจำนวนถึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีการติดตั้งที่เครื่องเคลือบผิวด้วยกาวจากทั้ง 4 สาขาภายในประเทศไทย ได้แก่ สมุทรปราการ ระยอง ชลบุรี และเพชรบุรี พบว่าจำนวนถึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ติดตั้งมีปริมาณแตกต่างกัน โดย

เครื่องเคลือบผิวด้วยกาวที่นำมาศึกษาในครั้งนี้ มีการติดตั้งถึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมด 8 ถึง

ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาและประเมินประสิทธิภาพของระบบดับเพลิงด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของเครื่องเคลือบผิวพลาสติกด้วยกาวในโรงงานผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติกแบบอ่อน เพื่อใช้เป็นแนวทางในการติดตั้งระบบดับเพลิงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เหมาะสมกับเครื่องจักร และลดความรุนแรงในการเกิดเพลิงไหม้

## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

### 2.1. วัสดุอุปกรณ์

- 1) เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล Lenovo รุ่น Yoga 6
- 2) Intel® CORE i5-8265U CPU 1.6GHz RAM: 8 GB
- 3) กล้องดิจิทัล สำหรับบันทึกภาพ สถานที่ และอุปกรณ์ในพื้นที่ที่ศึกษา
- 4) แบบแปลนเครื่องเคลือบผิวด้วยกาว
- 5) มาตรฐานความปลอดภัย NFPA 12

### 2.2. เครื่องจักรที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องจักรที่ใช้ในการวิจัยคือเครื่องเคลือบผิวด้วยกาวของโรงงานผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติกแบบอ่อนแห่งหนึ่งจำนวน 1 เครื่อง

### 2.3. การศึกษาการทำงานของเครื่องเคลือบผิวด้วยกาวที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดอัคคีภัย

เครื่องเคลือบผิวด้วยกาวที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดเพลิงไหม้ มาจากขั้นตอนในการเคลือบผิวด้วยกาว โดยการเคลือบผิวเป็นการเพิ่มคุณสมบัติของแผ่นพลาสติก [2] ให้สามารถกันความชื้น กันน้ำ และกันกลิ่น ด้วยการเชื่อมต่อแผ่นพลาสติก

หลายชั้นเข้าด้วยกัน โดยในขั้นตอนการเคลือบผิวจะเริ่มต้น ขบวนการจากการนำแผ่นพลาสติกส่งผ่านไปยังชุดพ่นกาวที่ ผสมกับตัวทำละลาย เมทิล (Methyl) เอทิล (Ethyl) คีโตน (Ketone) และ เอทิลอะซิเตท (Ethyl acetate) แผ่นพลาสติก ถูกพ่นด้วยกาวและตัวทำละลายจะมีความชื้นสูง จึงต่อส่งต่อ แผ่นพลาสติกเข้าสู่สายพานเตาอบที่มีอุณหภูมิ 220 องศา เซลเซียส เพื่อให้ตัวทำละลายระเหยออกจนเหลือกาวที่มี คุณสมบัติยึดติดแน่น และทำการประกบเข้ากับแผ่นพลาสติก อีกชนิดที่วิ่งผ่านไปยังลูกกลิ้ง เพื่อหนีบให้แผ่นพลาสติกสอง แผ่นติดกันอย่างแนบสนิท [3] โดยกระบวนการดังกล่าวจะมีการเคลื่อนที่ด้วยความรวดเร็ว 350 ตารางเมตรต่อนาที องค์ประกอบที่สำคัญในการเกิดเพลิงไหม้ ในจุดพ่นกาวมี ไอรระเหยของสารเคมีไวไฟ และมีการเกิดไฟฟ้าสถิตที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแผ่นพลาสติก รวมถึงมีการใช้ก๊าซปิโตรเลียม เหลวเป็นเชื้อเพลิง ในการก่อให้เกิดความร้อนของเตาอบ ดัง แสดงใน Figure 1

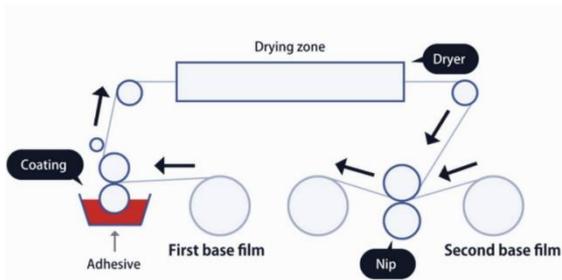


Figure 1 Lamination process

#### 2.4. การศึกษาการเกิดไฟฟ้าสถิตในขั้นตอนการเคลือบผิว

การเกิดไฟฟ้าสถิตในกระบวนการเคลือบผิวพลาสติก ด้วยกาว จะเกิดได้จากการเสียดสีของแผ่นพลาสติก หรือแผ่นฟิล์มมีการเคลื่อนที่ผ่านแท่นลูกกลิ้ง เมื่อผ่านกระบวนการเคลือบผิว แผ่นพลาสติกวิ่งผ่านเครื่องจักรจากม้วนหนึ่งไป พันเก็บที่ปลายทาง จึงเป็นขั้นตอนที่แผ่นพลาสติกที่มีความยาว ต่อเนื่อง และการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุด 350 ตารางเมตร ต่อนาที โดยปกติผิวของแผ่นพลาสติกจะมีค่าประจุไฟฟ้าเป็นลบ เมื่อมีเสียดสีกับแท่นลูกกลิ้งที่ทำมาจากโลหะที่มีประจุบวก ดังแสดงใน Figure 2 จะทำให้แท่นลูกกลิ้งสูญเสียอิเล็กตรอน ให้กับแผ่นพลาสติก และเมื่อแผ่นพลาสติกกับแท่นลูกกลิ้งแยก ออกจากกัน จะทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่กลับไปยัง แท่นลูกกลิ้ง แผ่นพลาสติกก็จะมีปริมาณอิเล็กตรอนสะสมอยู่

ปริมาณมาก และไม่มีความเป็นกลางทางไฟฟ้า ทำให้เกิดการปล่อยประจุไฟฟ้าสถิต [4], [5] โดยเครื่องจักรได้มีการติดตั้ง อุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่ายเทประจุไฟฟ้าและการทำให้เป็นกลางทางไฟฟ้า เรียกว่า Anti-static bar แบบป้องกันการระเบิด อุปกรณ์จะทำงานโดยการปล่อยไอออน เพื่อทำลายไฟฟ้าสถิต ในสภาพแวดล้อมที่ไวต่อการจุดระเบิด และใช้โครงสร้างพิเศษ ที่ป้องกันการเกิดประกายไฟภายในอุปกรณ์ ช่วยลดความเสี่ยง จากการจุดระเบิดที่เกิดจากประจุไฟฟ้าสถิตได้อย่างปลอดภัย และมีประสิทธิภาพ เพื่อลดโอกาสการเกิดไฟฟ้าสถิตจากการ เคลื่อนที่ของแผ่นพลาสติก

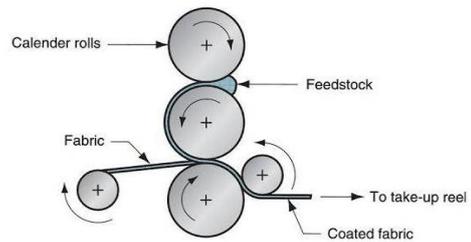


Figure 2 Electrostatic occurrence in lamination process

#### 2.5. มาตรฐานระบบดับเพลิงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ NFPA 12

NFPA 12 ที่เกี่ยวข้องกับระบบดับเพลิงด้วยก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide fire extinguishing systems) [6] ถูกออกแบบมาเพื่อป้องกันและควบคุมไฟใน สถานที่ที่มีความเสี่ยงสูง เช่น ห้องเครื่องจักร ห้องไฟฟ้า โรงงานอุตสาหกรรม และคลังเก็บวัตถุไวไฟ [7] ประกอบไปด้วยรายละเอียดทั้งหมด 9 หมวด ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้ ในหมวดที่ 5 เรื่องของระบบดับเพลิงแบบปกคลุม (Total flooding system) ที่อธิบายถึงข้อรูปแบบการทำงาน ข้อจำกัด ระบบปิด การรั่วไหลหรือการระบายอากาศ ชนิดของการเกิด เพลิงไหม้ และข้อกำหนดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับ ไฟไหม้ที่ผิว รวมถึงภาคผนวกเรื่องการออกแบบ และ ภาคผนวกเรื่องการรั่วไหล

#### 2.6. การศึกษาส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องเคลือบผิวด้วยกาว

เครื่องเคลือบผิวด้วยกาวที่นำมาใช้ในการศึกษาเป็น เครื่องเคลือบกาวชนิดใช้สารเคมีเป็นตัวทำละลาย ดังแสดงใน Figure 3

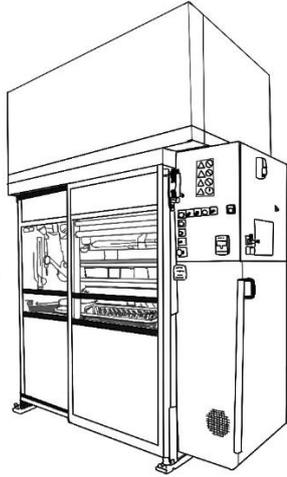


Figure 3 Laminating machine

เครื่องเคลือบผิวด้วยกาวมีขนาดดังนี้ ด้านกว้าง 1.25 เมตร ด้านยาว 2.71 เมตร ความสูงจากพื้น 2.20 เมตร

เครื่องเคลือบผิวพลาสติกด้วยกาวเป็นเครื่องจักรที่มีช่องเปิดด้านล่างและช่องเปิดด้านบนสำหรับนำแผ่นพลาสติกเข้าสู่ระบบโซนอบแห้งด้วยความร้อน

ช่องเปิดของเครื่องเคลือบด้านล่างทั้ง 4 ด้าน มีขนาดดังนี้ ด้านกว้าง 1.25 เมตร ด้านยาว 2.71 เมตร ความสูงจากพื้น 0.13 เมตร

ช่องเปิดของเครื่องเคลือบด้านบน 1 ช่อง มีขนาดดังนี้ ด้านกว้าง 0.07 เมตร ด้านยาว 1.57 เมตร

### 2.7. การระบายอากาศภายในเครื่องเคลือบผิวด้วยกาวและการไหลของก๊าซ

ด้วยเหตุที่เครื่องเคลือบผิวมีช่องเปิดด้านล่าง และมีช่องเปิดด้านบนสำหรับลำเลียงชิ้นงาน ในการออกแบบระบบดับเพลิงด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะต้องพิจารณารายละเอียดเพิ่มเติมตามหลักทางวิศวกรรม คือ การระบายอากาศ และการไหลของก๊าซ รวมถึง คุณสมบัติของก๊าซผสม โดยการระบายอากาศของเครื่องเคลือบผิวในขณะที่ทำการผลิตจะเป็นแบบเชิงกล เนื่องจากมีการติดตั้งพัดลมสำหรับดูดไอระเหยของสารเคมีออก แต่เมื่อระบบดับเพลิงด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำงาน เครื่องจักรจะถูกตัดระบบไฟฟ้าทั้งหมดทำให้พัดลมดูดอากาศจะหยุดทำงาน ภายในเครื่องเคลือบผิวด้วยกาวจะมีระบบระบายอากาศเป็นแบบธรรมชาติ จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตามทิศทางลมและอุณหภูมิ ส่งผลให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมาสามารถรั่วไหลออกทางช่องเปิดได้ง่าย

การเปลี่ยนสถานะของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบดับเพลิงจะเป็นไปตามทฤษฎีเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamics) [8] และกลศาสตร์ของไหล ได้แก่ กฎของแก๊สอุดมคติ รวมถึงทฤษฎีการไหลของก๊าซผสม จะเกิดขึ้นจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในพื้นที่ที่มีอากาศเดิมอยู่ ดังแสดงใน Figure 4 จะอาศัยพฤติกรรมของไหล การขยายตัว การผสม และการรั่วไหลของก๊าซผสมในระบบ การไหลของก๊าซผสมจะได้รับผลจากคุณสมบัติของก๊าซแต่ละตัว เช่น มวลโมเลกุล ความหนาแน่น และความสามารถในการขยายตัว [9]

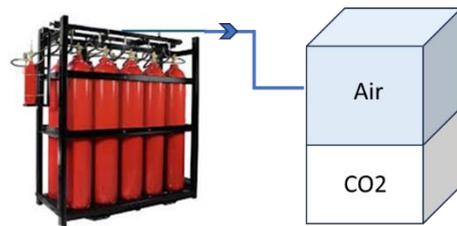


Figure 4 Mixture of gases in laminating machine

### 3. ผลการวิจัย

การคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นไปตามมาตรฐาน NFPA 12 [6] สามารถคำนวณได้ 2 วิธี ดังนี้

#### 3.1. การคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คำนวณจากการรั่วไหล

โดยอ้างอิงจากกราฟคำนวณอัตราการไหลตามภาคผนวกของ NFPA 12 เรื่องอัตราการรั่วไหล ดังแสดงใน Figure 5 โดยกราฟดังกล่าวอ้างอิงอุณหภูมิภายในและภายนอกอยู่ที่ 21 องศาเซลเซียส

ขั้นตอนในการคำนวณดังนี้

- หาปริมาตรของเครื่องเคลือบผิวด้วยกาว จากความกว้าง ความยาว และความสูงของเครื่อง โดยเครื่องเคลือบผิวมีปริมาตรทั้งหมด  $1.25 \times 2.71 \times 2.20 = 7.48$  ลูกบาศก์เมตร

- หาค่าตัวแปรในการออกแบบ ดังแสดงใน Table 1 โดยอ้างอิงตามปริมาตรของเครื่องเคลือบผิวด้วยกาวนำ ปริมาณด้านบน มาเลือกค่าตัวแปรจะได้เท่ากับ 1.07 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อนำมาคูณกับปริมาตรเครื่องจะได้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ตามปริมาตรอยู่ที่  $7.48 \times 1.07 = 8.01$  กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อลูกบาศก์เมตร

**Table 1** Volume factor and flooding factor [6]

Volume of space (M <sup>3</sup> )	Volume factor (m <sup>3</sup> /kg CO <sub>2</sub> )	Flooding factor (kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )	Calculated quantity (kg) (Not less than)
Up to 3.96	0.86	1.15	-
3.97-14.15	0.93	1.07	4.5
14.16-45.28	0.99	1.01	15.1
45.29-127.35	1.11	0.90	45.4
127.36-1415.0	1.25	0.80	113.5
Over 1415.0	1.37	0.74	1135.0

- เลือกสารเคมีที่ใช้ในการเคลือบผิว เพื่อกำหนดค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการดับเพลิงจากสารเคมีที่ใช้ เมทิล เอทิล คีโตน จะต้องใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นอย่างน้อย 40 เปอร์เซ็นต์ในการดับเพลิง ดังแสดงใน Table 2

**Table 2** Minimum carbon dioxide concentrations for extinguishment [6]

Materials	Theoretical Minimum CO <sub>2</sub> concentration (%)	Minimum design CO <sub>2</sub> concentration (%)
Methane	25	34
Methyl acetate	29	35
Methyl alcohol	33	40
Methyl butene	30	36
Methyl ethyl ketone	33	40

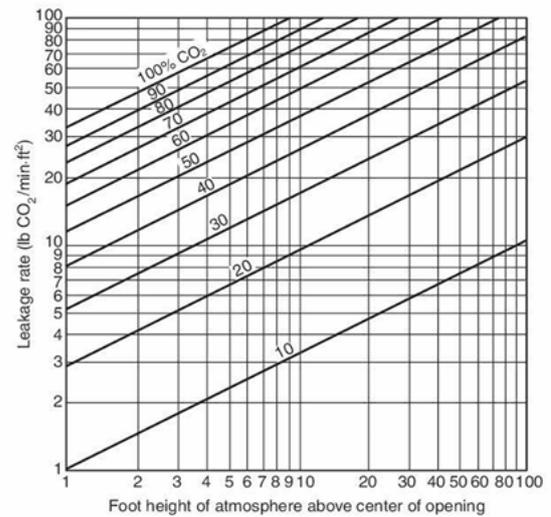
- เลือกตัวแปรตามชนิดของสารเคมีใช้งานโดยอ้างอิงข้อมูลตามมาตรฐานสากล (ISO 6813) [10] ดังแสดงใน Table 3 ในการปรับปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อนำมาคูณกับปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ตามปริมาตร จะได้ค่า  $8.01 \times 1.22 = 9.77$  กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อนาที

**Table 3** Material factor following ISO 6813 [10]

Combustible of flammable material	Material factor (kg)	design CO <sub>2</sub> concentration (%)	Hold time (min)
Methane	1	34	-
Methyl acetate	1.03	35	-
Methyl alcohol	1.22	40	-
Methyl butene	1.06	36	-
Methyl ethyl ketone	1.22	40	-

- การคำนวณพื้นที่ช่องเปิดของเครื่องจักร จากความกว้าง ความยาว โดยคำนวณพื้นที่รวมทุกด้าน โดยเครื่องจักรมีพื้นที่ช่องเปิดด้านล่าง 1.03 ตารางเมตร และพื้นที่ช่องเปิดด้านบน 0.10 ตารางเมตร

- การหาอัตราการรั่วไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกราฟจะต้องหาระยะห่างระหว่างช่องเปิด 2 ช่อง และเทียบกับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการดับเพลิง จะได้ข้อมูลอัตราการรั่วไหลเป็นอัตราส่วนปอนด์ต่อนาทีต่อตารางฟุต ดังแสดงใน Figure 5



**Figure 5** Calculated CO<sub>2</sub> loss rate [6]

การอ่านค่าการรั่วไหลจากกราฟ ดังแสดงใน Figure 5 จะต้องวัดระยะห่างระหว่างช่องเปิดด้านล่างและด้านบน ซึ่งมีระยะห่างกัน 2 เมตร นำมาแปลงหน่วยให้เป็นฟุต จะได้ที่ 6.6 ฟุต และดูค่าความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ คือ 40% จะได้อัตราการรั่วไหลอยู่ที่ 22 ปอนด์ต่อนาทีต่อตารางฟุต แปลงให้เป็นหน่วยเดียวกับปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากปริมาตร ได้ค่าอยู่ที่ 108.67 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อนาทีต่อตารางเมตร

- หาปริมาณการรั่วไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยนำอัตราการรั่วไหลคูณกับพื้นที่ช่องเปิด  $1.03 \times 108.67 = 112.03$  กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อนาที

- หาปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดจากปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่จากปริมาตรรวมกับปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดการรั่วไหล  $9.77 + 112.03 = 121.80$  กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อนาที ดังแสดงใน Table 4

**Table 4** Volume of carbon dioxide calculated by leakage ratio

Volume	Volume of CO <sub>2</sub> (kg CO <sub>2</sub> /min)
Machine volume	9.77
Leakage volume	112.03
Total volume	121.80

### 3.2. การคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สมการอัตราการรั่วไหลแบบไม่มีระบบระบายอากาศ

ในการคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสมการอัตราการรั่วไหลแบบไม่มีระบบระบายอากาศ ตามมาตรฐาน NFPA 12 โดยทั่วไปจะเป็นการคำนวณจากสภาพของห้องปิดที่มีโอกาสรั่วไหลและมีอากาศเข้าจากด้านบน [11] แต่ไม่ได้มีการกำหนดขั้นตอนในการคำนวณหาปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กรณีเกิดก๊าซผสม ผู้วิจัยจึงประยุกต์ทฤษฎีเทอร์โมไดนามิกส์ของก๊าซผสมมาใช้ในงานวิจัย ได้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์หรือวิธีการวิเคราะห์กฎของก๊าซ และการวิเคราะห์ก๊าซผสม เข้ามาใช้ในการประเมิน

กฎของก๊าซ คือ สมการที่เชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน อุณหภูมิ และปริมาตรจำเพาะ โดยค่าความดันและอุณหภูมิจะต้องเป็นค่าสัมบูรณ์ ค่าคงที่ของก๊าซ (R) ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามชนิดของก๊าซ ผลคูณระหว่าง ค่าคงที่ของก๊าซ (R - Gas constant) และมวลโมลาร์ (M - Molar mass หรือ มวลโมเลกุล (Molecular weight) จะมีค่าเท่ากับค่าคงตัวของแก๊สอุดมคติ (R<sub>u</sub> - Universal gas constant) โดยที่ค่าคงตัวของแก๊สอุดมคติจะสามารถประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ได้กับทุกรูปแบบของก๊าซ ในโครงการวิจัยนี้ใช้ค่าคงตัวของแก๊สอุดมคติ 8.31447 กิโลจูลต่อกิโลโมลต่อเคลวิน หรือ กิโลปาสคาลลูกบาศก์เมตรต่อกิโลโมลเคลวิน

$$PV = RT \quad (1)$$

เมื่อ

P = ความดันสัมบูรณ์ (กิโลปาสคาล)

v = ปริมาตรจำเพาะ (ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)

R = ค่าคงที่ของก๊าซชนิดที่พิจารณา (กิโลจูลต่อกิโลโมลเคลวิน)

$$R = \frac{R_u}{M} \quad (2)$$

เมื่อ

R<sub>u</sub> = ค่าคงตัวของแก๊สอุดมคติค่าคงตัวของแก๊สอุดมคติ

M = มวลโมลาร์ (กิโลกรัมต่อกิโลโมล)

มวลของก๊าซสามารถวิเคราะห์ได้จาก ผลคูณระหว่างมวลโมลาร์และ จำนวนโมล

$$m = MN \quad (3)$$

เมื่อ

m = มวลของก๊าซ (กิโลกรัม)

N = จำนวนโมล (กิโลโมล)

ในโครงการวิจัยนี้มีความจำเป็นต้องพิจารณาก๊าซในรูปแบบของก๊าซผสม ซึ่งประกอบไปด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอากาศ คุณสมบัติของก๊าซผสมขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและปริมาณของก๊าซที่ผสมกัน ในการวิเคราะห์ก๊าซผสมจึงจำเป็นต้องทราบส่วนประกอบ และคุณสมบัติของก๊าซส่วนย่อยแต่ละตัว มี 2 วิธีการในการนิยามองค์ประกอบของก๊าซผสมนี้

1) วิธีวิเคราะห์โมลาร์ (Molar analysis) โดยการพิจารณาจากจำนวนของโมลของส่วนประกอบก๊าซย่อย

2) วิธีโดยน้ำหนักและปริมาตร (Gravimetric analysis) โดยการพิจารณาจากมวล ของส่วนประกอบก๊าซย่อย

ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีวิเคราะห์โมลาร์ในการวิเคราะห์พิจารณาจากก๊าซผสมที่มีอยู่ 2 ส่วนประกอบ คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอากาศ

น้ำหนักโมลของก๊าซผสม คือ ผลรวมของจำนวนโมลของส่วนประกอบย่อย

$$N_m = \sum_{i=1}^k N_i = N_{CO_2} + N_{air} \quad (4)$$

เศษส่วนโมล (y<sub>i</sub>) วิเคราะห์ได้จากอัตราส่วนของจำนวนโมลของส่วนประกอบย่อย ต่อจำนวนโมลของก๊าซผสม

$$y_i = \frac{N_i}{N_m}, y_{CO_2} = \frac{N_{CO_2}}{N_m}, y_{air} = \frac{N_{air}}{N_m} \quad (5)$$

$$y_{CO_2} + y_{air} = \frac{N_{CO_2}}{N_m} + \frac{N_{air}}{N_m} = 1 \quad (6)$$

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถนำไปหาค่าเฉลี่ยโมลโมลาร์ได้

$$M_m = \frac{m_m}{N_m} = \frac{\sum m_i}{N_m} = \frac{m_{CO_2} + m_{air}}{N_{CO_2} + N_{air}} \quad (7)$$

$$= \frac{\sum N_i M_i}{N_m} = \frac{N_{CO_2} M_{CO_2} + N_{air} M_{air}}{N_{CO_2} + N_{air}} \quad (8)$$

$$= \sum y_i M_i = y_{CO_2} M_{CO_2} + y_{air} M_{air} \quad (9)$$

เมื่อหาค่าเฉลี่ยโมลโมลาร์แล้วสามารถนำไปวิเคราะห์หาค่าคงที่ของก๊าซผสมได้

$$R_m = \frac{R_u}{M_m} \quad (10)$$

จากทฤษฎีข้างต้นจะต้องคำนวณหาค่าของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอากาศ เพื่อนำไปคำนวณปริมาณการรั่วไหลของระบบดับเพลิงด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

- คำนวณหาความหนาแน่นของอากาศ จากสมการ

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (11)$$

เมื่อ

P = ความดันอากาศ 100 กิโลปาสกาล

R = ค่าคงที่ของอากาศตาม ASHRAE [6]

0.287 กิโลปาสกาลลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมเคลวิน

จะได้

$$\rho = \frac{100}{0.287 \times 294}$$

= 1.185 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

- คำนวณหามวลของอากาศ จากสมการ

$$M = \rho V \quad (12)$$

เมื่อ

$\rho$  = ความหนาแน่นของอากาศ 1.185 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

V = ปริมาตรของเครื่องจักร 7.42 ลูกบาศก์เมตร

จะได้

$$M = 1.185 \times 7.42 = 8.87 \text{ กิโลกรัม}$$

- คำนวณหามวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากสมการ

$$M = \rho_{CO_2} V \quad (13)$$

เมื่อ

$\rho_{CO_2}$  = ความหนาแน่นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

1.070 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

V = ปริมาตรของเครื่องจักร 7.42 ลูกบาศก์เมตร

จะได้

$$M = 1.070 \times 7.42$$

$$= 8.01 \text{ กิโลกรัม}$$

- คำนวณหาความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

จากสมการ

$$P = \rho_{CO_2} RT \quad (14)$$

เมื่อ

$\rho_{CO_2}$  = ความหนาแน่นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

1.070 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

R = ค่าคงที่ของอากาศตาม ASHRAE [9]

0.189 กิโลปาสกาลลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมเคลวิน

จะได้

$$P = 1.07 \times 0.189 \times 294$$

$$= 159.42 \text{ kPa}$$

- คำนวณก๊าซผสมตามทฤษฎีเทอร์โมไดนามิกส์ โดย

หาสมมูลมวล (Mass total) จากสมการ

$$M_{total} = m_{air} + m_{CO_2} \quad (15)$$

เมื่อ

$m_{air}$  = มวลโมเลกุลอากาศ 8.87 กิโลกรัม

$m_{CO_2}$  = มวลโมเลกุล CO<sub>2</sub> 8.01 กิโลกรัม

จะได้

$$M_{total} = 8.87 + 8.01 = 16.88 \text{ กิโลกรัม}$$

- คำนวณหาสัดส่วนมวล (Mass Fraction) จากสมการ

$$Mf_i = \frac{m_i}{\sum m_i} \quad (16)$$

จะได้

$$Mf_{air} = \frac{8.868}{16.874} = 0.526$$

$$Mf_{CO_2} = \frac{8.06}{16.874} = 0.474$$

- คำนวณหาน้ำหนักของโมลโดยใช้ข้อมูลจาก ASHARE [6]

จะได้

$$Mole_{air} = 28.97 \text{ kg/kmol}$$

$$Mole_{CO_2} = 44.01 \text{ kg/kmol}$$

- หาเลขโมลรวม (Mole Number total) จากเลขอะโวกาโด (Avogadro's Number) จากสมการ

$$M = \frac{m}{N} \quad (17)$$

จะได้

$$Mole\ number_{air} = \frac{8.868}{28.97} = 0.306 \text{ กิโลโมล}$$

$$Mole\ number_{CO_2} = \frac{8.06}{44.01} = 0.182 \text{ กิโลโมล}$$

$$Mole\ number\ total = 0.306 + 0.182 = 0.488 \text{ กิโลโมล}$$

- หาสัดส่วนโมล (Mole fraction) จากสมการ

$$Y_i = \frac{N_i}{\sum N_i} \quad (18)$$

จะได้

$$Mole\ fraction_{air} = \frac{0.306}{0.488} = 0.627$$

$$Mole\ fraction_{CO_2} = \frac{0.182}{0.488} = 0.373$$

- คำนวณหาความดันก๊าซผสม จากสมการ

$$P_{total} = P_{air} + P_{CO_2} \quad (19)$$

เมื่อ

$$P_{air} = 100 \text{ กิโลปาสคาล}$$

$$P_{CO_2} = 59.42 \text{ กิโลปาสคาล}$$

$$P_{total} = 100 + 59.42 = 159.42 \text{ กิโลปาสคาล}$$

- คำนวณหาน้ำหนักโมลเฉลี่ยจากมวลรวม จากสมการ

$$M_{avg} = \frac{m_{total}}{MN_{total}} \quad (20)$$

เมื่อ

$$m_{total} = \text{น้ำหนัก Mole ทั้งหมด } 16.87 \text{ กิโลกรัมโมล}$$

$$MN_{total} = \text{เลขโมลรวม } 0.48 \text{ กิโลกรัมโมล}$$

จะได้

$$M_{avg} = \frac{16.87}{0.48} = 34.576 \text{ กิโลกรัมโมล}$$

- คำนวณหาค่าคงที่ของก๊าซผสม จากสมการ

$$R_{avg} = \frac{R}{M_{avg}} \quad (21)$$

เมื่อ

$$R = \text{ค่าคงที่ของอากาศ } 8.314 \text{ กิโลจูลต่อกิโลโมล เคลวิน}$$

$$M_{avg} = \text{น้ำหนักโมลเฉลี่ย } 34.576 \text{ กิโลกรัมโมล}$$

จะได้

$$R_{avg} = \frac{8.314}{34.576} = 0.235 \text{ กิโลจูลต่อกิโลโมลเคลวิน}$$

คำนวณความหนาแน่นของก๊าซผสม จากสมการ

$$\rho = \frac{PM_{avg}}{RT} \quad (22)$$

จะได้

$$\rho = \frac{159.424 \times 34.567}{8.314 \times 294} = 2.255 \text{ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร}$$

$$= 2.255 \text{ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร}$$

เมื่อได้ข้อมูลสำหรับการคำนวณตามทฤษฎีก๊าซผสมจึงนำมาคำนวณในสมการ

$$R = 60Cp_{CO_2}A \sqrt{\frac{2g(p_1-p_2)h}{\rho_1}} \quad (23)$$

เมื่อ

C = ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 40%

$p_{CO_2}$  = ความหนาแน่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

1.07 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

A = พื้นที่ช่องเปิด 1.03 ตารางเมตร

g = ความถ่วงจำเพาะของก๊าซ

9.81 เมตรต่อวินาทียกกำลังสอง

$p_1$  = ความหนาแน่นของอากาศ

2.25 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

(คำนวณจากเทอร์โมไดนามิกส์ของก๊าซผสม)

$p_2$  = ความหนาแน่นของอากาศรอบนอก

1.185 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์

(คำนวณจากสมการ  $p = P/RT$ )

h = ระยะห่างระหว่างช่องเปิดและช่องเปิดด้านบน 2 เมตร

จะได้

$$R = 60 \times 40 \times 1.070 \times 1.03 \sqrt{\frac{2 \times 9.810 (2.255 - 1.185)^2}{2.255}}$$

$$= 114.231 \text{ (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออนาที)}$$

- คำนวณหาปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดที่ใช้สำหรับการดับเพลิง

จะได้

ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปริมาตร 9.77 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออนาที (Table 5)

ปริมาณก๊าซปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่รั่วไหล 114.23 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออนาที (Table 5)

ปริมาณก๊าซปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดจะได้  $9.77 + 114.23 = 124.0$  กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออนาที (Table 5)

เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณการรั่วไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่จะนำมาใช้ในการออกแบบก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบดับเพลิงสำหรับเครื่องเคลือบผิวด้วยกาว ที่อุณหภูมิกายในและภายนอก 21 องศาเซลเซียส จากข้อมูลใน Table 6 จะเห็นได้ว่าการคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งสองวิธีมีผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกัน ผู้วิจัยจึงพิจารณาที่จะใช้สมการคำนวณอัตราการรั่วไหลมาเป็นวิธีในการคำนวณ ผู้วิจัยจึงต้องพิสูจน์ผลการคำนวณเพื่อให้สามารถคำนวณข้อมูลได้ตรงตามเงื่อนไขของ NFPA 12 [6] เนื่องจากอุณหภูมิโดยรอบของเครื่องเคลือบผิวด้วยกาวอยู่

ที่ 27 องศาเซลเซียส สามารถเปลี่ยนค่าในการคำนวณได้ตรงตามหน้างานจริง

**Table 5** Volume of carbon dioxide calculated from leakage formula

Volume	Volume of CO <sub>2</sub> (kg CO <sub>2</sub> /min)
Machine volume	9.77
Leakage volume	114.23
Total volume	124.00

**Table 6** Volume and concentration of carbon dioxide calculated from different methods

Item	Leakage graph	Leakage formula
Volume of machine (m <sup>3</sup> )	7.48	7.48
CO <sub>2</sub> concentrate (%)	40	40
Machine volume (kg CO <sub>2</sub> /min)	9.77	9.77
Leakage volume (kg CO <sub>2</sub> /min)	112.03	114.23
Total volume (kg CO <sub>2</sub> /min)	121.80	124.00

#### 4. อภิปรายผลการวิจัย

##### 4.1. อุณหภูมิมีผลต่อการคำนวณการรั่วไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

การศึกษาครั้งนี้ได้วิเคราะห์ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณการรั่วไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบดับเพลิง โดยคำนวณจากสมการคำนวณอัตราการรั่วไหล เมื่อมีอุณหภูมิรอบนอกแตกต่างกันจะมีผลต่อปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างไร ซึ่งเป็นระบบที่ต้องอาศัยความสามารถในการรักษาความเข้มข้นของก๊าซในพื้นที่ปิด เพื่อให้บรรลุผลในการดับเพลิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากการวิเคราะห์พบว่า อุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นของก๊าซลดลง ในขณะที่ความดันและความเร็วของการไหลเพิ่มขึ้นตามหลักการของก๊าซอุดมคติและพลศาสตร์ของของไหล การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ทำให้อัตราการรั่วไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Figure 6)

ข้อมูลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่า ค่าฐานของอุณหภูมิที่มีผลต่อการรั่วไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ 21 องศาเซลเซียสอ้างอิงตาม NFPA 12 เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 21 องศาเซลเซียส อัตราการรั่วไหลจะลดลงต่ำลง ตัวอย่างเช่น

เมื่ออุณหภูมิลดลงอยู่ที่ 15 องศาเซลเซียส จะลดอัตราการรั่วไหลลง 0.82% ในทางตรงกันข้ามเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 21 องศาเซลเซียส อัตราการรั่วไหลจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ เช่น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 30 องศาเซลเซียส อัตราการรั่วไหลจะเพิ่มขึ้น 0.79 % ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นและความดันของก๊าซตามกฎของก๊าซอุดมคติ

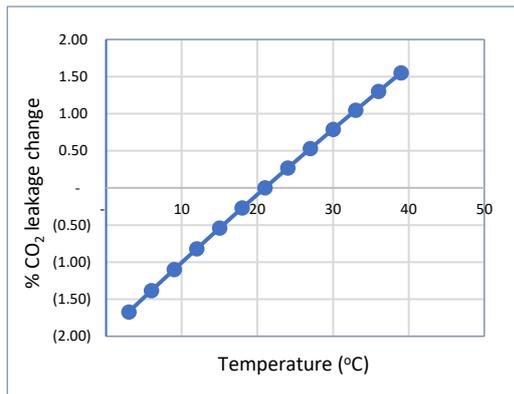


Figure 6 Relationship between % CO<sub>2</sub> leakage change and temperature

#### 4.2. การพิจารณารูปแบบการปรับปรุงช่องเปิดเพื่อลดการรั่วไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

จากที่ได้ทำการศึกษาขั้นตอนในการปฏิบัติงานจากสถานที่จริง พบว่ากิจกรรมที่เกิดขึ้นจะอยู่บริเวณด้านหน้าเครื่องเคลือบผิวด้วยกาว โดยมีความถี่ในการปฏิบัติงานเป็นไปตามชนิดของการผลิตที่จะมีการเปลี่ยนแปลงชนิดของกาวในส่วนทางด้านต่าง ๆ ของเครื่องเคลือบผิวด้วยกาว จะไม่มีกิจกรรมที่เกี่ยวข้อง เมื่อพิจารณาถึงรูปแบบของการติดตั้งเครื่องเคลือบผิวด้วยกาวจะมีลักษณะการออกแบบเป็นหมวดปรับระดับ จึงได้ทดลองลดขนาดของช่องเปิด เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการลดการรั่วไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในการทดลองจะพิจารณาลดช่องเปิดด้านล่างเท่านั้น เนื่องจากช่องเปิดด้านบนเป็นช่องสำหรับนำแผ่นพลาสติกออกจากเครื่องไม่สามารถลดขนาดหรือปิดช่องดังกล่าวได้ โดยในการคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเริ่มลดขนาดลงทีละ 1 เซนติเมตร จะสามารถลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลง

จากการพิจารณาปรับปรุงช่องเปิดด้านล่าง พบว่า การลดขนาดช่องเปิดของเครื่องเคลือบผิวด้วยกาวช่วยลดการรั่วไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยปกติจะต้องใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รวม 124.60 กิโลกรัม

คาร์บอนไดออกไซด์ แต่หากยกเลิกช่องเปิดด้านล่างทั้ง 4 ด้าน โดยยังคงมีช่องเปิดด้านบนสำหรับนำแผ่นพลาสติกออกไปสู่กระบวนการผลิตลำดับต่อไปตามความจำเป็น จะใช้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเหลือเพียง 18.60 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ ในการดับเพลิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Table 7)

Table 7 Volume of carbon dioxide at different gaps of machine

Gap of machine (cm)	Volume of CO <sub>2</sub> (kg CO <sub>2</sub> /min)
12	124.60
11	115.77
10	106.94
9	98.10
8	89.27
7	80.44
6	71.60
5	62.77
4	53.93
3	45.10
2	36.27
1	27.43
Remain only feeding gap	18.60

#### 5. บทสรุป

จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าการใช้ระบบดับเพลิงด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับเครื่องเคลือบผิวด้วยกาว ซึ่งลักษณะของเครื่องเคลือบผิวเป็นแบบกึ่งปิดล้อม โดยมีช่องเปิดด้านล่างสำหรับระบายอากาศ และช่องเปิดด้านบนสำหรับลำเลียงชิ้นงาน ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องเคลือบผิวในการออกแบบได้คำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่จำเป็นต้องใช้ในระบบแบบปกคลุม (Total flooding) [12] เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อความต้องการด้านความปลอดภัยได้อย่างเข้มงวด

ในการประเมินระบบดับเพลิงพบว่าปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คำนวณตามหลักการของ NFPA 12 สำหรับพื้นที่ดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 124.60 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งสูงกว่าปริมาณอ้างอิงในสภาวะทฤษฎีที่ปิดสนิท

(9.77 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์) อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการติดตามปริมาณการรั่วไหลที่วัดได้จริงจำนวน 114.83 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ แสดงให้เห็นว่าระบบมีการสูญเสียก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากช่องเปิดด้านล่างเกือบทั้งหมดทันทีหลังการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แม้ระบบจะมีการสูญเสียก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านช่องเปิดในระดับสูง แต่ภายใต้เงื่อนไขของนโยบายขององค์กรที่เลือกใช้ระบบดับเพลิงแบบปกคลุม (Total flooding) การเพิ่มระบบดับเพลิงแบบปกคลุม (Flooding factor) และการออกแบบโดยคำนึงถึงลักษณะของการรั่วไหลทำให้ระบบยังสามารถตอบสนองต่อความต้องการด้านความปลอดภัยได้อย่างครบถ้วน การใช้แบบจำลองตามหลักของแก๊สอุดมคติร่วมกับทฤษฎีการไหลของของไหล ยังสามารถใช้สนับสนุนการคำนวณเพื่อให้ระบบมีความแม่นยำและประสิทธิภาพสูงสุดในบริบทของพื้นที่ที่มีช่องเปิดถาวร

จากการศึกษาของผู้วิจัย สามารถนำข้อมูลข้างต้นไปศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับประสิทธิผลและประสิทธิภาพของการลดขนาดพื้นที่ช่องทางเปิดด้านบน โดยที่ไม่กระทบกับกระบวนการผลิต เพื่อให้เกิดประโยชน์ในการควบคุมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการดับเพลิงมากยิ่งขึ้นต่อไป

## 6. References

- [1] Department of Industrial Works. 2023. **Warning for Fire Hazards during Summer.** <https://www.diw.go.th/webdiw/pr66-175/>. Accessed 1 July 2025. (in Thai)
- [2] Dunn, T. 2015. **Manufacturing Flexible Packaging: Materials, Machinery, and Techniques.** Amsterdam: Elsevier.
- [3] Hemasathon, A. 2006. **Fire Protection for Plastic Industry.** M.Eng. Thesis, Kasetsart University. (in Thai)
- [4] Charoensorn, P. and et al. 2020. Fringe field assisted electrostatic discharge in polypropylene manufacturing. In: **Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Electrical Engineering Congress,** 4-6 March 2020. Chiang Mai, Thailand.
- [5] Oncel, H.U. and Resuloglu, E. 2022. Solution proposals for fires occurring in the lamination units of inline lamination machines. **International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences.** 34(1): 123-130.
- [6] National Fire Protection Association. 2022. **NFPA 12 Standard on Carbon Dioxide Extinguishing Systems.** <https://www.edufire.ir/storage/Library/etfa%20gazi/NFPA%2012-2022.pdf>. Accessed 1 July 2025.
- [7] Sakulphueak, S. 2017. **Design and Comparison of Fire Protection System: A Case Study in Semi-Product Warehouse for Paints Manufacturing.** M.Eng. Thesis, Kasetsart University. (in Thai)
- [8] Moukalled, F., Mangani, L. and Darwish, M. 2016. **The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics.** Berlin: Springer Nature.
- [9] Fukuda, S., Ohmi, T. and Sugawa, S. 2006. Development and Practical Application of High-efficiency Fire Control System for the Clean Room. In: **Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on Semiconductor Manufacturing,** 25-27 September 2006. Tokyo, Japan.
- [10] International Organization of Standardization. 2022. **International Standard ISO6183. 3<sup>rd</sup> edition.** <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/74513/6ce7fd12896b4ec7939ecb59f110c272/ISO-6183-2022.pdf>. Accessed 1 July 2025.
- [11] Thepparit, T. 2017. **Analysis and Design of Oxygen Reduction Fire Suppression Systems in an Elevator Machine Room by Numerical Simulations.** M.Eng. Thesis, Kasetsart University. (in Thai)
- [12] Thummacharoen, O. 2023. **Improving Air Ventilation in the Machining Room Using Computational Fluid Dynamics.** M.Eng. Thesis, Kasetsart University. (in Thai)