

หน่วยควบคุมคาร์บอนไดออกไซด์  
สำหรับระบบการทำความสะอาดด้วยละอองน้ำแข็งแห้ง



ธนพัฒน์ ถาวรวัฒน์สกุล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

หน่วยควบคุมคาร์บอนไดออกไซด์  
สำหรับระบบการทำความสะอาดด้วยละอองน้ำแข็งแห้ง



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CO<sub>2</sub> CONDENSING UNIT FOR DRY-ICE CLEANING SYSTEM



THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง หน่วยควบคุมคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับระบบการทำมาสะอาด  
ด้วยละอองน้ำแข็งแห้ง  
โดย นายธนวัฒน์ ถาวรวัฒน์สกุล  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์



.....ประธานกรรมการ  
(ผศ.ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์)



.....กรรมการ  
(อ.บุญชัย โชติวิริยวานิชย์)



.....กรรมการ  
(รศ.ดร. เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์)

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	หน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับระบบการทำมาสะอาดด้วยละอองน้ำแข็งแห้ง
โดย	นายธนวัฒน์ ถาวรวัฒน์สกุล
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub> Condensing unit) ของเครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง (Dry-ice generator) ซึ่งหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์จะมีหน้าที่ควบแน่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เปลี่ยนสถานะกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์เหลว โดยออกแบบให้หน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์มีการถ่ายเทความร้อนกับสารทำความเย็น R404A ในลักษณะท่อสองชั้น มีท่อภายในเป็นท่อทองแดงสำหรับการไหลเวียนของสารทำความเย็น R404A และท่อชั้นนอกเป็นท่อเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ โดยกำหนดให้มีทิศทางของการไหลเป็นแบบทิศทางเดียวกัน (Parallel flow) ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์ที่ไหลเข้าสู่หน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์จะอยู่ที่สภาวะความดันและอุณหภูมิประมาณ 48 bar และ 30 °C ตามลำดับ และหลังจากที่ผ่านเข้าสู่หน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์แล้ว คาร์บอนไดออกไซด์จะถ่ายเทความร้อนกับสารทำความเย็น R404A ปริมาณ 300 ถึง 350 g จนควบแน่นกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่มีอุณหภูมิ 10 °C หรือต่ำกว่า เมื่อพลังงานในการกลายเป็นของเหลว (Heat of condensation) ของคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าประมาณ 232.6 J/g และจากการศึกษาเครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้งพบว่าอัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกพ่นออกขณะใช้งาน มีค่าสูงสุดที่ 0.83 g/s จึงสามารถคำนวณภาระการทำความเย็นได้ มีค่าประมาณ 193.06 J/s ซึ่งคอมเพรสเซอร์ที่ใช้อยู่สามารถรับภาระการทำความเย็นได้ 373 J/s คิดเป็นประมาณ 2 เท่าของภาระการทำความเย็นที่ต้องการ จึงสรุปได้ว่าการออกแบบหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์นี้ สามารถรองรับการใช้งานเครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้งที่อัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ 0.83 g/s ได้

Report Title	CO <sub>2</sub> condensing unit for dry-ice cleaning system
By	Mr. Tanapat Thavornwatsakul
Degree	Bachelor Degree of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2016
Advisor	Asst.Prof.Dr. Surat Areerat

### Abstract

This study investigates the design of a CO<sub>2</sub> condensing unit of a dry-ice generator, where the CO<sub>2</sub> condensing unit is responsible for the condensation of carbon dioxide to transform the carbon dioxide into a liquid carbon dioxide. By designing the CO<sub>2</sub> condensing unit, carbon dioxide and refrigerant R404A will be able to exchange their heat in form of a double pipe. Internal pipe is a copper tube for refrigerant R404A circulation and outer tube is stainless steel pipe for carbon dioxide flow. The direction of the flow is parallel. The carbon dioxide that flows into the CO<sub>2</sub> condensing unit is at a pressure and temperature of about 48 bar and 30 °C, respectively. After entering the CO<sub>2</sub> condensing unit, carbon dioxide transfers its heat to amount of 350 g of refrigerant R404A and transform into liquid carbon dioxide at 10 °C when the heat of condensation of CO<sub>2</sub> is considered about 232.6 J/g. Maximum mass flow rate of carbon dioxide was sprayed out during operation is 0.83 g/s, thus the cooling load can be calculated at about 193.06 J/s. The compressor currently used can assume a cooling load of 373 J/s, about 2 times the cooling load needed. It is concluded that the design of CO<sub>2</sub> condensing unit can support the use of dry-ice generator at a mass flow rate of 0.83 g/s carbon dioxide.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ภายใต้ความดูแล และการให้คำแนะนำจากคณะอาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี และบุคคลอีกหลายฝ่าย ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์ ผู้ซึ่งให้คำปรึกษาและถ่ายทอดคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ รวมไปถึงความรู้และประสบการณ์ในการดำเนินงาน

ขอขอบคุณ นาย สุรัชย์ อ้อถาวรพัฒน์ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่คอยช่วยเหลือและให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการทำงาน รวมถึงสอนการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ที่เอื้อต่อการทำปริญญานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณ นาย ชรินทร์ ชนะพันธ์ พนักงานขาย จากบริษัท เอ็ม. เจ. บางกอกควาล์ว และ ฟิตตั้ง จำกั๊ด ผู้ให้คำปรึกษา และอำนวยความสะดวกเกี่ยวกับการสั่งซื้อชิ้นส่วนอุปกรณ์ในการสร้างหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งทำให้ปริญญานิพนธ์นี้ประสบความสำเร็จ

สุดท้ายนี้ ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และสมาชิกทุกคนในครอบครัวผู้เป็นกำลังใจ คอยให้การสนับสนุน ให้ความช่วยเหลือทุกประการมาโดยตลอด จนสำเร็จการศึกษา

ธนพัฒน์ ถาวรวัฒน์สกุล

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	IV
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	V
กิตติกรรมประกาศ	VI
สารบัญ	VII
สารบัญตาราง	IX
สารบัญรูป	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 วิธีการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 การทำความสะอาดพื้นผิวในระดับอุตสาหกรรม	4
2.2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน	7
2.3 การคำนวณการถ่ายเทความร้อนแบบท่อสองชั้น	9
2.4 การดูลพลังงาน	13
2.5 ระบบการทำความเย็น	15
2.6 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับสารทำความเย็น	17
2.7 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำแข็งแห้ง	18
2.8 กลไกการเกิดน้ำแข็งแห้ง	19
บทที่ 3 การทดลอง	20
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบและทดลอง	20
3.2 ขนาดของท่อสองชั้น	21
3.3 ขั้นตอนการออกแบบ	22
3.4 ขั้นตอนการทดลอง	22
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	24
4.1 ผลการออกแบบหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์	24
4.2 ผลการทดลอง	25

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	28
5.1 สรุปผลการออกแบบและการทดลอง	28
5.2 ข้อเสนอแนะ	28
เอกสารอ้างอิง	29
ภาคผนวก	31
ภาคผนวก ก ขนาดต่างๆ ของท่อเหล็กกล้าไร้สนิม และท่อทองแดง	32
ภาคผนวก ข ข้อมูลอุณหภูมิที่บันทึกได้จากการทดลอง	35
ภาคผนวก ค การวัดอัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์	37
ภาคผนวก ง การคำนวณอัตราการไหลของสารทำความเย็น R404A	39
ภาคผนวก จ การคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อสองชั้น	40



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 กระบวนการทำความสะอาดโดยใช้สารเคมี	4
รูปที่ 2.2 อุปกรณ์การทำความสะอาดโดยใช้คลื่นเสียง	5
รูปที่ 2.3 การทำความสะอาดโดยใช้ของไหลเหนือวิกฤติ	6
รูปที่ 2.4 การทำความสะอาดโดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง	7
รูปที่ 2.5 ลักษณะการไหลของของไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น	10
รูปที่ 2.6 การถ่ายเทความร้อนของท่อสองชั้น	11
รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ของไหลไหลในทิศทางเดียวกัน	12
รูปที่ 2.8 ระบบการทำความเย็นแบบอัดไอ	16
รูปที่ 2.9 แผนภูมิความดันเอนทัลปี อธิบายการทำงานของระบบทำความเย็นแบบอัดไอ	17
รูปที่ 2.10 แผนภูมิความดันเอนทัลปีของคาร์บอนไดออกไซด์	19
รูปที่ 3.1 โมเดลเบื้องต้นของหน่วยควบแน่นแบบท่อสองชั้น	20
รูปที่ 3.2 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทองแดง (ท่อภายใน) และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเหล็กกล้าไร้สนิม (ท่อภายนอก)	21
รูปที่ 3.3 หน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนหุ้มฉนวนความร้อน	21
รูปที่ 3.4 แผนภูมิความดัน เอนทัลปีของสารทำความเย็น R404A	23
รูปที่ 4.1 แผนภูมิความดัน เอนทัลปีของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการคำนวณภาระการทำความเย็น	25
รูปที่ 4.2 อุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่ได้จากการทดลองเทียบการคำนวณ	27
รูปที่ ก-1 ท่อเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless pipe)	32
รูปที่ ก-2 ท่อทองแดง (Copper pipe)	34
รูปที่ ค-1 กราฟระหว่างมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่พ่นออกเทียบกับเวลา	38

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เทคโนโลยีในการทำความสะอาดพื้นผิวชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์ ในอุตสาหกรรมต่างๆ อาจเป็นส่วนสำคัญที่สุดส่วนหนึ่งของกระบวนการการผลิต เพราะสำหรับอุตสาหกรรมบางประเภทนั้น ความสะอาดของพื้นผิวชิ้นงานเป็นสิ่งที่ต้องถูกคำนึงถึงเป็นอันดับแรก โดยตัวอย่างของอุตสาหกรรมที่ต้องมีเทคโนโลยีในการทำความสะอาดพื้นผิวชิ้นงานเข้ามามีบทบาทต่อกระบวนการผลิตอย่างมาก ได้แก่ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมคอมพิวเตอร์ เป็นต้น ซึ่งต้องการความแม่นยำในการทำความสะอาดพื้นผิวของตัวชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก และต้องสามารถลดการปนเปื้อนสิ่งสกปรกในชิ้นงานให้เหลืออยู่ในระดับที่ยอมรับได้อย่างมีมาตรฐาน

เทคนิคในการทำความสะอาดแบบดั้งเดิมนั้นมีอยู่หลากหลายรูปแบบ และหลากหลายกรรมวิธีด้วยกัน เช่น การทำความสะอาดโดยใช้ตัวทำละลาย (Solvent cleaning) การทำความสะอาดโดยใช้คลื่นเสียง (Ultrasonic cleaning) เป็นต้น ซึ่งวิธีการดังกล่าวเป็นการทำความสะอาดแบบกะ ซึ่งจะใช้เวลานาน นอกจากนั้นยังทำให้เกิดของเสียเนื่องมาจากการใช้สารเคมีในการทำ ความสะอาด จึงทำให้มีค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียตามมา และยังมีอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

ทางเลือกของการทำความสะอาดชิ้นงานอิเล็กทรอนิกส์ที่ควรค่าแก่การพัฒนาขึ้นมาใช้ประโยชน์นั้น ควรเป็นวิธีการทำความสะอาดที่ ไม่ก่อให้เกิดของเสียหลังจากกระบวนการทำความสะอาด เพื่อที่จะสามารถลดค่าใช้จ่ายของขั้นตอนในการกำจัดของเสีย และเพื่อช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมได้ จึงมีการนำเอาคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งได้จากกระบวนการแยกแก๊ส กระบวนการเผาไหม้ มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ด้วยการเปลี่ยนวัฏภาคให้อยู่ในรูปของแข็งแล้วใช้ในการทำความสะอาดพื้นผิวชิ้นงานอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะไม่ก่อให้เกิดของเสียหลังกระบวนการทำความสะอาด และไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย เราเรียกคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในสถานะของแข็งว่า น้ำแข็งแห้ง

น้ำแข็งแห้ง หมายถึง คาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในสถานะของแข็ง ซึ่งมีอุณหภูมิที่ต่ำมากถึง  $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน น้ำแข็งแห้งได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมหลายด้าน เช่น การถนอมอาหาร การยั้งยั้งการเติบโตของแบคทีเรียเพื่อรักษาสุขภาพของศพ เป็นต้น และในปัจจุบัน น้ำแข็งแห้งได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในด้านการทำความสะอาดอีกด้วย โดยกลไกการเกิดน้ำแข็งแห้งนั้นสามารถอธิบายได้ด้วยหลักการทางอุณหพลศาสตร์

จากเหตุผลดังกล่าว ทำให้เกิดการศึกษาค้นคว้าและสร้างเทคโนโลยีในการทำ ความสะอาดวิธีการใหม่ขึ้น นั่นคือการใช้เครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง ซึ่งได้มีการพัฒนาต่อมาจนสามารถใช้ทดแทนการทำความสะอาดแบบดั้งเดิมในงานทำความสะอาดพื้นผิวชิ้นงานอิเล็กทรอนิกส์ได้

โดยหัวใจสำคัญของเครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง คือ ส่วนของหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide condensing unit) ซึ่งมีหน้าที่ในการทำให้คาร์บอนไดออกไซด์ควบแน่นกลายเป็นของเหลว เพื่อให้สามารถสร้างอนุภาคของละอองน้ำแข็งแห้งได้ในสัดส่วนที่มากกว่าในสถานะแก๊ส

หน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์ ของเครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้งที่มีอยู่ในปัจจุบันเป็นลักษณะที่ใช้เอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol) เป็นตัวกลางในการทำความเย็น ซึ่งจะต้องใช้ปริมาณที่ค่อนข้างมาก จึงทำให้หน่วยควบแน่นมีขนาดที่ค่อนข้างใหญ่ ไม่สะดวกต่อการเคลื่อนย้าย และอาจเป็นอุปสรรคต่อการนำเข้าไปใช้ในกระบวนการผลิตจริง โครงการนี้จึงเป็นการศึกษาและออกแบบหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อพัฒนาให้เป็นรูปแบบใหม่ โดยเปลี่ยนรูปแบบให้อยู่ในลักษณะของหน่วยควบแน่นแบบท่อสองชั้น (Double pipe condensing unit) และ ศึกษาความเป็นไปได้ที่ในอนาคตจะพัฒนาหน่วยควบแน่นให้มีขนาดที่กะทัดรัดมากขึ้น ในรูปแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์ให้มีขนาดเหมาะสม
2. ศึกษาความเป็นไปได้ในการควบคุมความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่ผ่านการควบแน่นโดยหน่วยควบแน่นแบบท่อสองชั้น
3. สร้างหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์ให้กลายเป็น คาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่มีความหนาแน่นสูงกว่า  $830 \text{ kg/m}^3$  สามารถใช้ในกระบวนการทำความสะอาดพื้นผิวชิ้นงานอิเล็กทรอนิกส์ได้

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ออกแบบและสร้างหน่วยควบแน่นแบบท่อสองชั้น โดยใช้ท่อภายในเป็นท่อทองแดง (Copper) สำหรับวงจรการไหลเวียนของสารทำความเย็น R404A และใช้ท่อนอกเป็นท่อเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) สำหรับการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารทำความเย็น R404A ที่ใส่เข้าไปในระบบ กับความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ควบแน่นได้

## 1.4 วิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาระบบการทำงานของเครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง
2. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
3. คำนวณดุลพลังงานเพื่อการออกแบบเบื้องต้น ของการควบแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ และภาระการทำความเย็น (Cooling load)
4. สั่งซื้อชิ้นส่วน อุปกรณ์ที่จำเป็นต้องใช้ในการสร้างหน่วยควบแน่น เช่น ท่อเหล็กกล้าไร้สนิม ท่อทองแดง เป็นต้น
5. ประกอบชิ้นส่วนเพื่อสร้างหน่วยควบแน่น และทดสอบความสามารถในการควบแน่น
6. ใช้ข้อมูลอุณหภูมิ ความดัน จากการทดลอง และใช้แผนภูมิความดัน เอนทัลปี ในการช่วย คำนวณภาระการทำความเย็น
7. คำนวณดุลพลังงาน (Enthalpy balance) เพื่อหาค่าอัตราการไหลของสารทำความเย็น R404A จากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของสารทำความเย็น R404A กับ ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ควบแน่นได้

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ความรู้เกี่ยวกับการคำนวณดุลพลังงาน และการออกแบบหน่วยควบแน่น คาร์บอนไดออกไซด์ให้สามารถสร้างอนุภาคละอองน้ำแข็งแห้งและนำไปใช้ใน อุตสาหกรรมจริง
2. สามารถสร้างหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีขนาดที่เหมาะสมตรงกับความต้องการของภาคอุตสาหกรรมได้
3. เป็นแนวทางในการศึกษาการควบคุมความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อเป็น ประโยชน์ในการประยุกต์ใช้ด้านอื่นๆ ต่อไป

## บทที่ 2

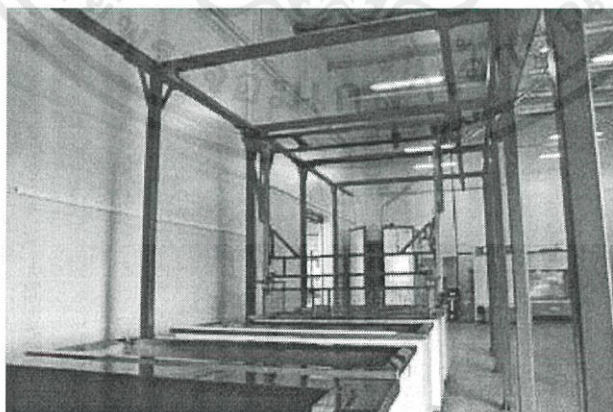
### ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การทำความสะอาดพื้นผิวในระดับอุตสาหกรรม [13-14]

การทำความสะอาดพื้นผิวของชิ้นงานมีอยู่หลากหลายกรรมวิธี ซึ่งการเลือกกระบวนการ เพื่อการทำความสะอาดควรพิจารณาจากปัจจัยต่างๆ เช่น ชนิดของวัสดุ ชนิดของสิ่งสกปรก ความสามารถในการทำความสะอาด ต้นทุนและความคุ้มค่าในการใช้งาน ความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้กับกระบวนการการผลิตหลัก ไปจนถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อม ในกรณีที่ใช้สารเคมีในการทำความสะอาดจนเกิดเป็นของเสีย ซึ่งกระบวนการ การทำความสะอาดวิธีต่างๆ มีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป ยกตัวอย่างกระบวนการทำความสะอาดพื้นผิวในภาคอุตสาหกรรมมีดังนี้

##### 2.1.1 การทำความสะอาดโดยใช้สารเคมีเป็นตัวทำละลาย (Solvent cleaning)

การทำความสะอาดโดยใช้สารเคมีเป็นตัวทำละลาย เป็นการทำความสะอาดโดยใช้สารละลาย ซึ่งการทำความสะอาดวิธีนี้เป็นกระบวนการแบบกะ โดยทั่วไปจะใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย แต่เนื่องจากน้ำมีแรงตึงผิวสูง ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้กับกระบวนการทำความสะอาดพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เพราะจะทำให้ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดลดลง จึงมีการผสมสารเคมีลงไปใต้น้ำเพื่อลดแรงตึงผิว ให้น้ำกลายเป็นสารละลายที่มีประสิทธิภาพในการทำความสะอาดได้ แต่การผสมสารเคมีลงไปใต้น้ำนั้น นอกจากจะเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายแล้ว ยังอาจส่งผลให้เกิดของเสียที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และนำมาซึ่งค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้ในการบำบัดอีกด้วย



รูปที่ 2.1 กระบวนการทำความสะอาดโดยใช้สารเคมี [14]

### 2.1.2 การทำความสะอาดโดยใช้คลื่นเสียง (Ultrasonic cleaning)

การทำความสะอาดโดยใช้คลื่นเสียง เป็นการทำความสะอาดอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนโดยใช้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ (Ultrasound) เป็นการทำความสะอาดแบบกะ โดยใช้เสียงที่อยู่ในช่วงระดับความถี่ 15-400 kHz ที่ถูกสร้างด้วยตัวแปลงสัญญาณ (Transducer) ความถี่ที่ใช้จะขึ้นอยู่กับชนิดของสิ่งที่ต้องการทำความสะอาด เครื่องอัลตราโซนิก มีหลักการทำงานคือ ส่งคลื่นความถี่สูงลงสู่สารละลายที่ใช้ชะล้างซึ่งเป็นของเหลว ส่งผลให้โมเลกุลของของเหลวเกิดการบีบอัดและคลายตัวเป็นจังหวะจนเกิดเป็นฟองอากาศเล็กๆ จำนวนมากผุดขึ้น เรียกลักษณะดังกล่าวว่ากระบวนการกัดอัดของเหลว (Cavitation) ซึ่งฟองอากาศเล็กๆดังกล่าวจะมีพลังงานแฝงอยู่ สามารถชะล้างสิ่งสกปรกที่ติดอยู่บนผิวชิ้นงานได้โดยไม่ทำลายชิ้นงาน และเนื่องจากฟองอากาศมีขนาดเล็ก อีกทั้งมีจำนวนมาก ทำให้สามารถเข้าทำความสะอาดในซอกมุมเล็กๆของชิ้นงานได้ ยิ่งเครื่องอัลตราโซนิกสามารถผลิตคลื่นความถี่ได้สูงเท่าไร ก็ยิ่งส่งผลให้เกิดฟองอากาศจำนวนมากขึ้นพร้อมกับพลังงานแฝงที่สูงขึ้น ซึ่งก็จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำความสะอาดดีขึ้นด้วย ระบบการทำความสะอาดแบบนี้จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีสารละลายทำความสะอาดที่เหมาะสม เพราะลำพังการสั่นของของเหลวเพียงอย่างเดียว ไม่สามารถทำการชะล้างสิ่งสกปรกออกจากผิวชิ้นงานได้ สารที่ใช้ทำความสะอาด ปกติแล้วจะใช้น้ำผสมกับสารเคมี ใช้เป็นตัวทำละลาย ซึ่งการทำความสะอาดแบบอัลตราโซนิกนี้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เช่น การทำความสะอาดเครื่องประดับ แวนตา อุปกรณ์การแพทย์ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การทำความสะอาดด้วยวิธีนี้ยังคงใช้สารเคมีเป็นตัวทำละลายอยู่ จึงมีข้อเสียเช่นเดียวกับวิธีการทำความสะอาดด้วยสารเคมี



รูปที่ 2.2 อุปกรณ์การทำความสะอาดโดยใช้คลื่นเสียง

### 2.1.3 การทำความสะอาดโดยใช้ของไหลเหนือวิกฤติ (Super critical fluid cleaning)

การทำความสะอาดโดยใช้ของไหลเหนือวิกฤติ เป็นการใช้ของไหลเหนือวิกฤติในการทำความสะอาด โดยของไหลเหนือวิกฤติ มีสมบัติคล้ายทั้งของเหลวและก๊าซ กล่าวคือมีความหนาแน่นคล้ายของเหลว แต่มีความหนืดคล้ายก๊าซ ของไหลเหนือวิกฤติที่นิยมใช้กัน คือ คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติ เนื่องจากมีสมบัติจุดวิกฤติที่ต่ำ ไม่มีอันตรายและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยหลังจากจบกระบวนการทำความสะอาดแล้ว จะไม่ทิ้งของเสียในรูปของเหลว ทำให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียได้อีกด้วย อย่างไรก็ตาม การทำความสะอาดด้วยวิธีนี้เป็นการทำความสะอาดแบบกะ และมีหลักการสำคัญเป็นการละลาย หากสิ่งสกปรกที่ต้องการกำจัด เป็นสารจำพวกอนินทรีย์ หรืออนุภาคของโลหะ จะทำให้ไม่สามารถทำความสะอาดได้ นอกจากนี้กระบวนการทำความสะอาดโดยใช้ของไหลเหนือวิกฤติยังเป็นกระบวนการที่ต้องใช้ความดันสูงทำให้มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ

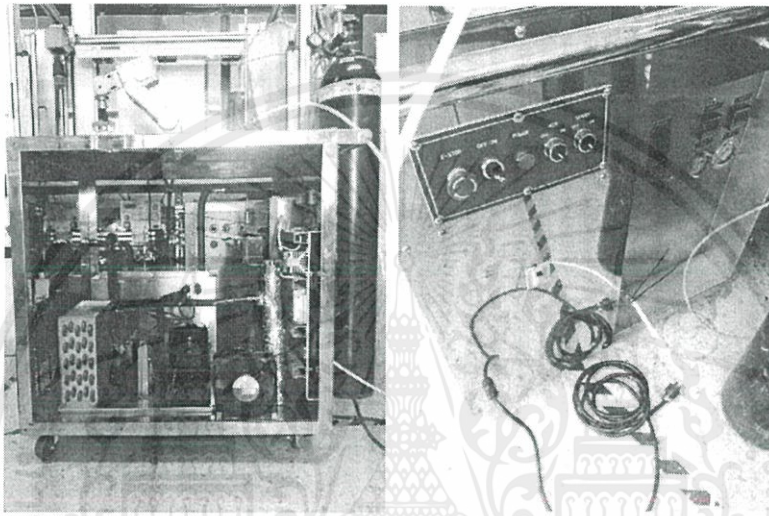


รูปที่ 2.3 การทำความสะอาดโดยใช้ของไหลเหนือวิกฤติ [13]

### 2.1.4 การทำความสะอาดโดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง (Carbon dioxide snow cleaning)

การทำความสะอาดโดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง เป็นการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหลว ไหลผ่านหัวฉีดขนาดเล็ก ทำให้ความดันลดลงอย่างรวดเร็วเกิดเป็นของผสมระหว่างละอองน้ำแข็งแห้งและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กระบวนการทำความสะอาดด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงในการนำไปประยุกต์ใช้กับการทำความสะอาดพื้นผิวที่มีสิ่งสกปรกจำพวกฝุ่นขนาดเล็กกว่าระดับไมโครเมตร รวมถึงชั้นฟิล์มอินทรีย์ที่มีความหนาไม่มากนัก โดยอาศัยหลักการถ่ายเทโมเมนตัมของอนุภาคละอองน้ำแข็งแห้งเป็นหลักในการทำความสะอาด การทำความสะอาดโดยการพ่นละอองน้ำแข็งแห้งได้ถูกนำมาพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ทดแทนการทำความสะอาดด้วยตัวทำละลายที่เป็นสารเคมี โดยมุ่งเน้นการ

ทำความสะอาดชิ้นงานที่ต้องการความสะอาดในระดับสูง และต้องการความแม่นยำในการทำ ความสะอาด ซึ่งในอดีตจะใช้ตัวทำละลายที่มีประสิทธิภาพในการทำ ความสะอาดสูงแต่มีสารเคมีที่เป็นอันตรายในการล้าง การทำความสะอาดโดยการฟ่นละอองน้ำแข็งแห้งจึงมีความน่าสนใจในการนำมาพัฒนาเพื่อใช้กับอุตสาหกรรมต่างๆ ต่อไปในอนาคต ซึ่งข้อดีของกระบวนการทำความสะอาดรูปแบบนี้คือไม่ทำให้เกิดของเสียในรูปสารละลายของเหลว จึงทำให้ต้นทุนในการดำเนินการน้อยกว่าการทำ ความสะอาดแบบใช้สารเคมีเป็นตัวทำละลายและแบบใช้คลื่นเสียง นอกจากนี้ยังมีความปลอดภัยใน ด้านความอันตรายของสารเคมีอีกด้วย



รูปที่ 2.4 การทำความสะอาดโดยการฟ่นละอองน้ำแข็งแห้ง

## 2.2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน [1]

### 2.2.1 การถ่ายเทความร้อนแบบนำความร้อน (Conduction heat transfer)

การถ่ายเทความร้อนแบบนำความร้อน คือ กระบวนการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยการเคลื่อนไหวของอะตอม หรือโมเลกุลในของแข็ง จะเกิดขึ้นเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิของวัตถุ ซึ่งมีสถานะเป็นของแข็ง หรือของไหลที่อยู่นิ่ง โดยการถ่ายเทพลังงานความร้อนจะเกิดในทิศทางจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่า ไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า และอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่จะเป็นสัดส่วนกับความแตกต่างของอุณหภูมิต่อระยะทาง เขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{q_x}{A} \sim \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.1)$$

เมื่อใส่ค่าคงที่ของสัดส่วนความสัมพันธ์ จะได้เป็นดังสมการที่ 2.2

$$q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $q_x$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนแบบนำความร้อน มีหน่วยเป็น W

$A$  คือ พื้นที่ผิวสัมผัสที่เกิดการนำความร้อน มีหน่วยเป็น  $m^2$

$\frac{\partial T}{\partial x}$  คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิต่อระยะทาง มีหน่วยเป็น K

$k$  คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (thermal conductivity) ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะตัว ของวัสดุ มีหน่วยเป็น  $W/(m \cdot K)$

สมการข้างต้น เรียกว่า กฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ (Fourier's law of heat conduction)

## 2.2.2 การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน (Convection heat transfer)

การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน คือ กระบวนการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัย การเคลื่อนที่ของของไหล จะเกิดขึ้นเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิของวัตถุ ซึ่งมีสถานะเป็น ของไหล สัมผัสกับวัตถุที่มีสถานะเป็นของแข็ง โดยความร้อนที่เกิดจากการพา สามารถอธิบาย ได้ดังสมการที่ 2.3

$$q = hA(T_w - T_\infty) \quad (2.3)$$

เมื่อ  $q$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน มีหน่วยเป็น W

$h$  คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection heat transfer coefficient) มีหน่วย เป็น  $W/(m^2 \cdot K)$

$A$  คือ พื้นที่ผิวสัมผัสที่เกิดการพาความร้อน มีหน่วยเป็น  $m^2$

$T_w$  คือ อุณหภูมิที่ผิวของของแข็ง มีหน่วยเป็น K

$T_\infty$  คือ อุณหภูมิของของไหล มีหน่วยเป็น K

สมการข้างต้น เรียกว่า กฎการทำความเย็นของนิวตัน (Newton's law of cooling) จะสังเกตได้ว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนจะสัมพันธ์กับความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวของของแข็งกับของไหล สัมพันธ์กับพื้นที่ผิวสัมผัส ที่เกิดการพาความร้อน และสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน แบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ การพาความร้อนโดยธรรมชาติหรือแบบอิสระ (Natural convection) และ การพาความร้อนโดยการบังคับ (Forced convection) ซึ่งรูปแบบของการพาความร้อนจะส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ )

### 2.2.3 ปัจจัยที่ผลต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

การพาความร้อนระหว่างวัตถุกับของไหล เป็นปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัตถุ ประเภทของของไหล โครงสร้างของชั้นผิวสัมผัส ฯลฯ อย่างไรก็ตาม เราสามารถหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในรูปของฟังก์ชันของปริมาณทางฟิสิกส์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องได้

ในการพาความร้อนด้วยการบังคับ จะมีปริมาณทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่

- ความเร็วของของไหล  $u$  (m/s)
- ความยาวที่เป็นตัวแทนของวัตถุหรือระยะทาง  $x$  (m)
- ความหนืดของของไหล  $\mu$  (Pa·s)
- ความหนาแน่นของของไหล  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>)
- ความจุความร้อนจำเพาะ  $c_p$  (J/(kg·K))
- สัมประสิทธิ์การนำความร้อน  $k$  (W/(m·K))

ปรากฏการณ์การพาความร้อนด้วยการบังคับ สามารถอธิบายด้วยฟังก์ชันของ ปริมาณต่างๆ ในรูปของปริมาณไร้มิติต่างๆ ดังต่อไปนี้ คือ

Reynolds number (Re)

$$Re = \frac{\rho u x}{\mu} = \frac{\rho Q x}{A \mu} \quad (2.4)$$

Prandtl number (Pr)

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (2.5)$$

Nusselt number (Nu)

$$Nu = 1.86 (Pr Re)^{1/3} \left(\frac{D}{L}\right)^{1/3} \quad (2.6)$$

จากปริมาณไร้มิตินี้ที่แสดงด้วยสมการที่ 2.4 ถึง 2.6 ทำให้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนได้ด้วยสมการที่ 2.7 ดังนี้

$$h = Nu \left(\frac{k}{x}\right) \quad (2.7)$$

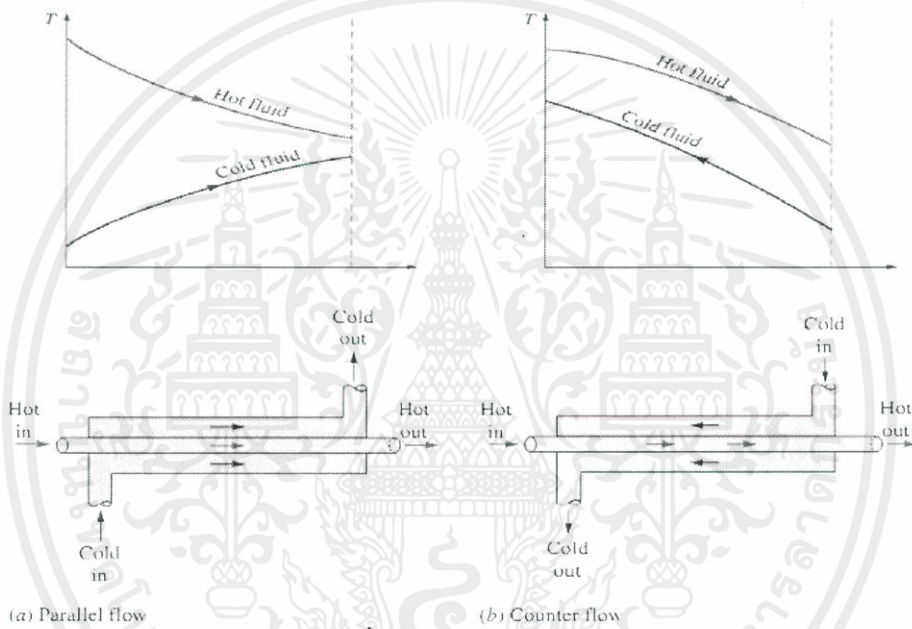
### 2.3 การคำนวณการถ่ายเทความร้อนแบบท่อสองชั้น [2]

เนื่องจากการออกแบบหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์ของเครื่องฟั่นละอองน้ำแข็งแห้ง นั้นมีลักษณะเป็นเครื่องควบแน่นแบบท่อสองชั้น มีหลักการการคำนวณเปรียบได้กับการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น จึงจำเป็นต้องสนใจถึงความหมายและหน้าที่ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ด้วยนิยามดังต่อไปนี้

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือ เครื่องมือที่ใช้สำหรับถ่ายเทความร้อนจากของไหลชนิดหนึ่งไปยังของไหลอีกชนิดหนึ่ง โดยที่ของไหลไม่จำเป็นต้องผสมกัน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญมากอย่างหนึ่ง เพราะเป็นเครื่องมือที่ใช้ในระบบต่างๆ ทางวิศวกรรมอย่างกว้างขวาง

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด เช่น แบบเชลล์และท่อ (Shell and tube) แบบท่อสองชั้น (Double pipe) แบบของไหลไหลตั้งฉากกัน (Cross flow) เป็นต้น

หน่วยควบคุมคาร์บอนไดออกไซด์แบบท่อสองชั้นจะมีลักษณะคล้ายกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น (Double pipe heat exchanger) คือจะอยู่ในลักษณะที่ท่อสองท่อสวมเข้าด้วยกันดัง รูปที่ 2.5 ส่วนทิศทางการไหลของของไหลสำหรับหน่วยควบคุมจะเป็นไปในลักษณะไหลในทิศทางเดียวกัน (Parallel flow)



รูปที่ 2.5 ลักษณะการไหลของของไหล ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น

(a) ไหลแบบทิศทางเดียวกัน (b) ไหลแบบสวนทางกัน

### 2.3.1 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient)

การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลร้อน ที่มีอุณหภูมิเป็น  $T_h$  กับของไหลเย็นที่มีอุณหภูมิเป็น  $T_c$  ที่กันโดยผนังทึบ สามารถอธิบายได้ ด้วยสมการที่ 2.8

$$q = \frac{\Delta T}{R} = UA\Delta T = U_i A_i \Delta T = U_o A_o \Delta T \quad (2.8)$$

เมื่อ  $U$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient) มีหน่วยเป็น  $W/(m^2 \cdot K)$

$R$  คือ ความต้านทานการถ่ายเทความร้อน (Thermal resistance) มีหน่วยเป็น  $(K \cdot m^2)/W$

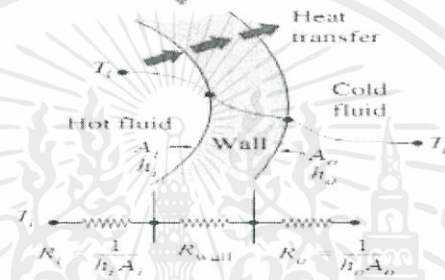
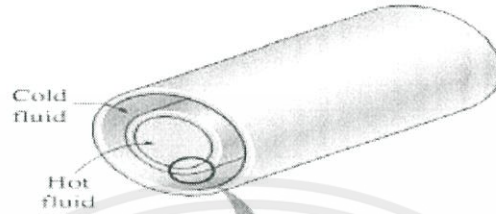
$A_i$  คือ พื้นผิวสัมผัสที่เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในท่อชั้นใน มีหน่วยเป็น  $m^2$

$A_o$  คือ พื้นผิวสัมผัสที่เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนภายนอกท่อชั้นใน มีหน่วยเป็น  $m^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.8 จะได้ ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนดังสมการที่ 2.9 และวงจรการถ่ายเทความร้อนแสดงดังรูปที่ 2.6

$$R = \frac{1}{UA} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} \quad (2.9)$$



รูปที่ 2.6 การถ่ายเทความร้อนของท่อสองชั้น

จากรูปที่ 2.6 สามารถเขียนในรูปความต้านทานความร้อนรวมได้ ดังสมการที่ 2.10

$$R = R_{total} = R_i + R_{wall} + R_o \quad (2.10)$$

โดย  $R_i$  คือ ความต้านทานการพาความร้อนของผิวท่อภายใน มีค่าเป็น

$$R_i = \frac{1}{h_i A_i} \quad (2.11)$$

$R_o$  คือ ความต้านทานการพาความร้อนของผิวท่อนอก

$$R_o = \frac{1}{h_o A_o} \quad (2.12)$$

สำหรับในกรณีของท่อสองชั้น (double pipe) จะมี  $A_i = \pi D_i L$  และ  $A_o = \pi D_o L$  ดังนั้นความต้านทานการนำความร้อน ( $R_{wall}$ ) ที่ผิวท่อจะมีค่าเป็น

$$R_{wall} = \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k L} \quad (2.13)$$

เมื่อนำสมการที่ 2.11 ถึงสมการที่ 2.13 แทนค่าในสมการที่ 2.10 จะสามารถหาความต้านทานการถ่ายเทความร้อนรวมได้ จากนั้นหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมได้ดังสมการที่ 2.14 และ สมการที่ 2.15

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{[\ln(D_o/D_i)]A_i}{2\pi kl} + \frac{A_i}{h_o A_o}} \quad (2.14)$$

หรือ

$$U_o = \frac{1}{\frac{A_o}{h_i A_i} + \frac{[\ln(D_o/D_i)]A_o}{2\pi kl} + \frac{1}{h_o}} \quad (2.15)$$

### 2.3.2 วิธีหาความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบล็อก (The log mean temperature difference, LMTD method)

อุณหภูมิของของไหลต่างๆ ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนั้นปกติแล้วจะมค่าไม่คงที่ แต่จะแปรค่าจาก จุด หนึ่งไปถึงจุดหนึ่งเมื่อมีความร้อนถ่ายเทจากของไหลที่ร้อน ไปของไหลที่เย็นกว่า ดังนั้นถึงแม้ว่าความต้านทาน ความร้อนตามทางของไหลจะมีค่าคงที่ก็ตาม อัตราการถ่ายเทความร้อนจะแปรค่าตามเส้นการไหลใน อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ทั้งนี้เพราะอัตราการถ่ายเทความร้อนจะแปรค่าตามความแตกต่างของอุณหภูมิ ของไหลร้อนและของไหลเย็นที่แต่หน้าตัดตั้ง รูปที่ 2.7 ระบายห่างระหว่างเส้นกราฟทั้งสองจะเป็นความแตกต่างของอุณหภูมิมะหว่างของไหลทั้งสอง

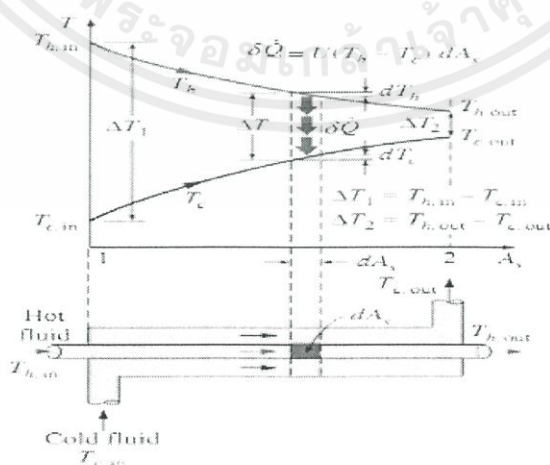
โดยการหาความแตกต่างของอุณหภูมิจลี่ยแบบล็อก สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น ที่ของไหลไหลในทิศทางเดียวกัน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.16

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (2.16)$$

โดยที่  $\Delta T_1 = T_{h,in} - T_{c,in}$  และ  $\Delta T_2 = T_{h,out} - T_{c,out}$

$T_h$  หมายถึง อุณหภูมิของของไหลที่มีอุณหภูมิสูงกว่า

$T_c$  หมายถึง อุณหภูมิของของไหลที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า



รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ของไหลไหลในทิศทางเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 การดุลพลังงาน (Enthalpy balance) [15]

### 2.4.1 รูปแบบของพลังงาน (Forms of energy)

พลังงาน คือ ความสามารถในการทำงาน มีหน่วยเป็น จูล (Joule)

พลังงานสามารถแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังนี้ คือ

พลังงานจลน์ (Kinetic energy) หมายถึง พลังงานที่เกิดจากการที่วัตถุกำลังเคลื่อนที่ ซึ่งปริมาณของพลังงานจลน์ในวัตถุ จะมีค่าขึ้นกับมวลและความเร็วของวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่นั้น

พลังงานศักย์ (Potential energy) หมายถึง พลังงานที่เกิดขึ้นเมื่อวัตถุถูกวางอยู่ในตำแหน่งที่สามารถเคลื่อนที่ได้ ไม่ว่าจะจากแรงโน้มถ่วง หรือแรงดึงดูดจากแม่เหล็ก

พลังงานภายใน (Internal energy) หมายถึง พลังงานที่มีอยู่ หรือสะสมอยู่ในระบบ เช่น พลังงานจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลในสาร

หากระบบที่เราทำการศึกษาคือเป็นระบบปิด คือ ไม่เกิดการถ่ายเทมวลผ่านขอบเขตของระบบ ในระหว่างที่ดำเนินกระบวนการ พลังงานจะสามารถถ่ายโอนระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อมได้ในลักษณะของ ความร้อน (Heat) และ งาน (Work)

ความร้อน (Heat) คือ พลังงานที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม

งาน (Work) คือ พลังงานที่เกิดจากแรงขับเคลื่อนอื่นๆ นอกเหนือจากความแตกต่างของอุณหภูมิ เช่น งานที่เกิดจากแรงเชิงกล

กระบวนการของระบบอาจเกิดได้ในลักษณะต่างๆ ดังนี้ คือ กระบวนการแบบต่อเนื่อง (Continuous process) กระบวนการแบบกะ (Batch process) กระบวนการแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous process) ซึ่งกระบวนการทุกแบบนี้ มีสมการสมดุลทั่วไป (General balance equation) เป็นสมการเดียวกัน ดังนี้

$$\text{Input} - \text{Output} + \text{Generation} - \text{Consumption} = \text{Accumulation} \quad (2.17)$$

สมการนี้สามารถใช้อธิบายสมดุลของมวล พลังงาน โมเมนตัม ฯลฯ ซึ่งในที่นี้จะใช้ในการอธิบายสมดุลของพลังงาน

โดยที่ Input คือ พลังงานที่เข้าสู่ระบบ

Output คือ พลังงานที่ออกจากระบบ

Generation คือ พลังงานที่เกิดขึ้นในระบบ

Consumption คือ พลังงานที่ถูกใช้ไปในระบบ

Accumulation คือ พลังงานที่ถูกสะสมอยู่ในระบบ

## 2.4.2 การดุลพลังงานสำหรับระบบปิด

ระบบปิด (Closed system) หมายถึง ระบบที่ไม่มีการถ่ายเทมวล แต่อาจมีการถ่ายเทพลังงานระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งการสังเกตว่าระบบที่เราสนใจเป็นระบบปิดหรือระบบเปิดสามารถสังเกตได้จาก มีการถ่ายเทมวลเข้าออกจากระบบหรือไม่ และเนื่องจากระบบไม่มีการเกิดปฏิกิริยา ทำให้พจน์ของ Generation และ Consumption ไม่มีผล ดังนั้นการดุลพลังงานของระบบปิดจะเป็นไปตามสมการ คือ

$$\text{Accumulation} = \text{Input} - \text{Output} \quad (2.18)$$

ในการถ่ายเทพลังงานจากเวลาเริ่มต้น (Initial) จนถึงเวลาสิ้นสุด (Final) สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & \text{Final system energy} - \text{Initial system energy} \\ & = \\ & \text{Net energy transferred to the system (in - out)} \end{aligned} \quad (2.19)$$

ซึ่ง Initial system energy =  $U_i + E_{ki} + E_{pi}$

Final system energy =  $U_f + E_{kf} + E_{pf}$

Energy transferred =  $Q - W$

โดยที่ i และ f หมายถึง ณ เวลาเริ่มต้น และ เวลาสิ้นสุด

เมื่อนำมาแทนค่าลงในสมการ จะได้ว่า

$$\Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p = Q - W \quad (2.20)$$

พลังงานภายในของระบบ ส่วนมากจะขึ้นกับ Chemical composition, State of aggregation (Solid, Liquid, Gas) และอุณหภูมิของสสารเป็นสำคัญ พลังงานภายในไม่ขึ้นกับความดัน สำหรับก๊าซอุดมคติ ของเหลว และของแข็ง

ถ้าระบบไม่มีความเร่ง  $\Delta E_k = 0$  และระบบไม่มีการเคลื่อนที่ขึ้นหรือลง  $\Delta E_p = 0$  ถ้าระบบหรือสิ่งแวดล้อมมีฉนวนหุ้ม  $Q = 0$  เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Adiabatic งานที่กระทำโดยระบบปิด หรืองานที่กระทำบนระบบปิด โดยการเลื่อนตำแหน่งขอบเขตของระบบ เช่น การเลื่อนกระบอกลูกสูบขึ้นแรงเสียดทาน มีการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้า หรือการแผ่รังสีผ่านเข้าออกจากระบบ มีการหมุนของเพลลา เป็นต้น ซึ่งหากไม่มีปรากฏการณ์เหล่านี้  $W = 0$

### 2.4.3 คุณสมบัติจำเพาะ (Specific properties) และ เอนทาลปี (Enthalpy)

คุณสมบัติที่ขึ้นกับปริมาณ (Extensive property) หมายถึง คุณสมบัติของสสารที่ขึ้นอยู่กับปริมาณของสสาร เช่น มวล (Mass) ปริมาตร (Volume) อัตราการไหลเชิงมวล (Mass flow rate) อัตราการไหลเชิงปริมาตร (Volumetric flow rate) อัตราการไหลเชิงโมล (Molar flow rate) พลังงานจลน์ พลังงานศักย์ พลังงานภายใน และ เอนทาลปี

คุณสมบัติที่ไม่ขึ้นกับปริมาณ (Intensive property) หมายถึง คุณสมบัติของสสารที่ไม่ขึ้นกับปริมาณของสสาร เช่น ความหนาแน่น (Density) อุณหภูมิ (Temperature) ความดัน (Pressure) ปริมาตรจำเพาะ (Specific volume) เอนทาลปีจำเพาะ (Specific enthalpy)

คุณสมบัติจำเพาะ (Specific property) คือ คุณสมบัติที่ไม่ขึ้นกับปริมาณที่คำนวณมาจากคุณสมบัติที่ขึ้นกับปริมาณ ทหารด้วยปริมาณสสารทั้งหมด จะใช้สัญลักษณ์  $\hat{\cdot}$  แทนคุณสมบัติจำเพาะ เช่น ปริมาตรจำเพาะ ( $\hat{V}$ ) คือ จำนวนปริมาตรทั้งหมด ทหารด้วยปริมาณสสาร

ที่ความดันและอุณหภูมิค่าหนึ่ง สสารมีพลังงานภายในจำเพาะเท่ากับ  $\hat{U}$  (J/kg) สสารมีมวล  $m$  (kg) ดังนั้นพลังงานภายในทั้งหมด คำนวณได้จาก

$$U \text{ (J)} = m \text{ (kg)} \times \hat{U} \text{ (J/kg)} \quad (2.21)$$

สำหรับระบบไหลต่อเนื่องโดยที่อัตราการไหลเชิงมวล เท่ากับ  $\dot{m}$  (kg/s) อัตราการถ่ายเทพลังงานภายในจะสามารถคำนวณได้เป็น

$$\dot{U} \text{ (J/s)} = \dot{m} \text{ (kg/s)} \times \hat{U} \text{ (J/kg)} \quad (2.22)$$

คุณสมบัติที่อยู่ในสมดุลมวลของระบบเปิด ได้แก่ เอนทาลปีจำเพาะ (Specific enthalpy)

$$\hat{H} = \hat{U} + P\hat{V} \quad (2.23)$$

การคำนวณเอนทาลปีสำหรับระบบไหลต่อเนื่อง จึงเป็นไปตามสมการ

$$\dot{H} \text{ (J/s)} = \dot{m} \text{ (kg/s)} \times \hat{H} \text{ (J/kg)} \quad (2.24)$$

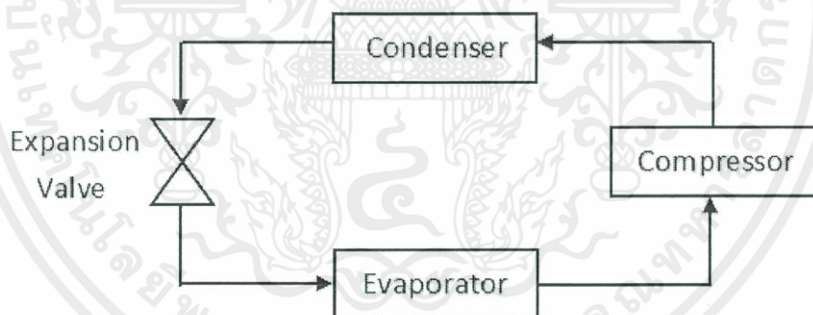
## 2.5 ระบบการทำความเย็น

ระบบการทำความเย็น ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน มีมากมายหลายแบบตามแต่จุดประสงค์ของผู้ใช้งาน เช่น การทำความเย็นเพื่อการผลิตอาหาร เก็บรักษาอาหาร หรือการทำความเย็นเพื่อการขนส่ง ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น โรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมี โรงกลั่น ระบบการทำความเย็นก็เป็นส่วนสำคัญเช่นกัน นอกจากนั้น ระบบการทำความเย็นก็มีบทบาทต่อชีวิตประจำวันของเราเป็นอย่างมาก ได้แก่ ตู้เย็น เครื่องปรับอากาศ เป็นต้น

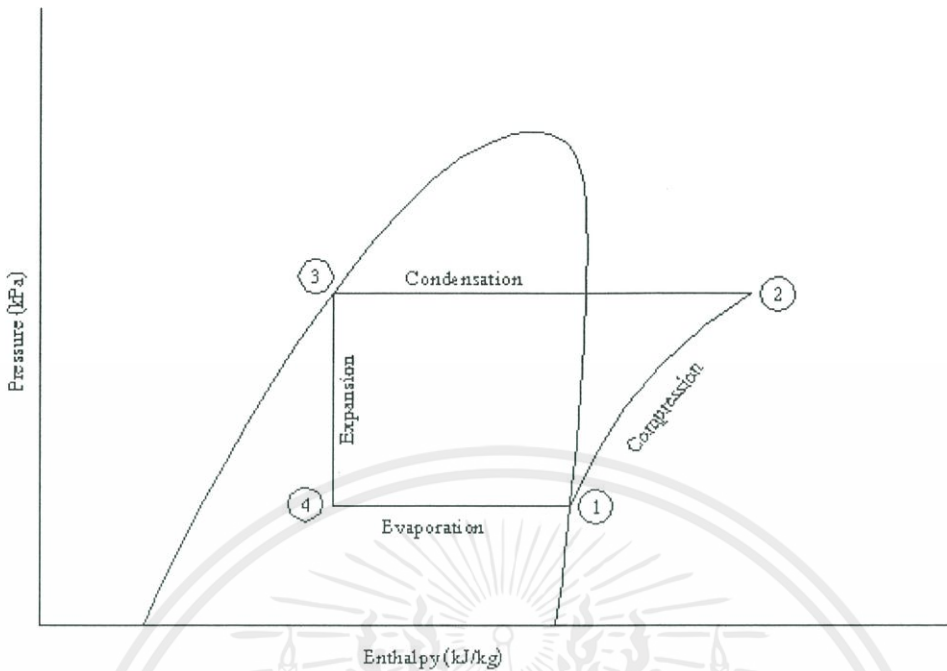
### 2.5.1 ระบบทำความเย็นแบบอัดไอ [16]

ระบบการทำความเย็นแบบอัดไอ อาศัยการทำงานแบบอัดไอของสารทำความเย็น ด้วย compressor เพื่อนำสารทำความเย็นที่รับความร้อนจนเปลี่ยนสถานะเป็นไอไปแล้วกลับมาใช้อีก ซึ่งสารทำความเย็นจะไหลเวียนภายในระบบปิดอยู่ตลอดเวลา ในระบบทำความเย็นแบบอัดไอจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักดังนี้ คือ เครื่องระเหย (Evaporator) คอมเพรสเซอร์ (Compressor) เครื่องควบแน่น (Condenser) และ วาล์วขยายตัว (Expansion valve) ซึ่งอุปกรณ์แต่ละส่วนมีหน้าที่ดังนี้ คือ

1. Evaporator จะทำหน้าที่ดูดความร้อนจากพื้นที่หรือวัตถุที่ต้องการทำความเย็น ไปใช้ในการเดือดกลายเป็นไอของสารทำความเย็น
2. Compressor ทำหน้าที่ ดูดสารทำความเย็นให้ไหลเวียนภายในระบบพร้อมกับอัดไอของสารทำความเย็นที่มีความดันต่ำให้เป็นไอของสารทำความเย็นที่มีความดันสูงและอุณหภูมิสูง
3. Condenser ทำหน้าที่ระบายความร้อนให้กับไอของสารทำความเย็นที่มี อุณหภูมิสูง ออกสู่อากาศภายนอกระบบ เมื่อไอของสารทำความเย็นได้รับการระบายความร้อนจะเกิดการควบแน่นเป็นสารทำความเย็นที่มีสถานะเป็นของเหลว
4. Expansion Valve ทำหน้าที่ควบคุมการไหลของสารทำความเย็นที่ไหลเข้า Evaporator



รูปที่ 2.8 ระบบการทำความเย็นแบบอัดไอ



รูปที่ 2.9 แผนภูมิความดันเอนทาลปี อธิบายการทำงานของระบบทำความเย็นแบบอัดไอ

จากรูปที่ 2.9 จะเห็นได้ว่า ที่หมายเลข 1 ถึงหมายเลข 2 คือ สภาวะที่ไอของสารทำความเย็นที่มีความดันต่ำถูกอัดด้วย compressor จนกลายเป็นไอของสารทำความเย็นที่มีความดันและอุณหภูมิสูง จากนั้นที่หมายเลข 2 ถึงหมายเลข 3 จะเป็นการระบายความร้อนของไอของสารทำความเย็นซึ่งมีอุณหภูมิสูงให้มีอุณหภูมิต่ำลง และเมื่อไอของสารทำความเย็นได้รับการระบายความร้อนแล้ว จะเกิดการควบแน่นกลายเป็นสารทำความเย็นซึ่งมีสถานะเป็นของเหลว จากนั้นสารทำความเย็นจะถูกลดความดันลงด้วย expansion valve และสามารถไหลเวียนกลับมาทำหน้าที่ทำความเย็นได้ต่อไป

## 2.6 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับสารทำความเย็น [16]

สารทำความเย็น หมายถึง สารที่ทำให้ระบบเกิดความเย็น โดยการดูดความร้อนจากระบบและเปลี่ยนสถานะของตัวสารทำความเย็นจากของเหลวเป็นไอ จากนั้นเมื่อไอของสารทำความเย็นนำความร้อนไปถ่ายเทออกนอกระบบ จะทำให้ควบแน่นกลับมาเป็นของเหลวอีกครั้ง ซึ่งสารทำความเย็นจะถูกใช้หมุนเวียนอยู่ในวงจรทำความเย็น สารทำความเย็นมีอยู่มากมายหลายชนิด หากใช้สูตรทางเคมีเป็นเกณฑ์ในการจำแนก จะสามารถแบ่งออกได้ 4 กลุ่มหลักๆ ดังนี้

**กลุ่มที่ 1** CFC (Chlorofluorocarbon) ประกอบด้วย คลอรีน ฟลูออรีน และคาร์บอน เช่น R11, R12 เป็นต้น หรือเรียกว่า CFC-11, CFC-12

**กลุ่มที่ 2** HFC (Hydrofluorocarbon) ประกอบด้วย ไฮโดรเจน ฟลูออรีน และคาร์บอน เช่น R404A, R134a เป็นต้น หรือเรียกว่า HFC-404A, HFC-134a

กลุ่มที่ 3 HCFC (Hydrochlorofluorocarbon) ประกอบด้วย ไฮโดรเจน คลอรีน ฟลูออรีน และคาร์บอน เช่น R22 หรือเรียกว่า HCFC-22

กลุ่มที่ 4 HC (Hydrocarbon) ประกอบด้วย ไฮโดรเจน และคาร์บอน เช่น R290 หรือเรียกว่า HC-290

จะเห็นได้ว่า สารทำความเย็นทั้ง 4 กลุ่ม ดังกล่าว มีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันไป งานแต่ละชนิดจึงจำเป็นต้องเลือกใช้สารทำความเย็นที่เหมาะสม เช่น สารทำความเย็น R134a Tetrafluoroethane ( $\text{CH}_2\text{FCF}_3$ ) เหมาะสำหรับระบบปรับอากาศในรถยนต์ แต่สำหรับสารทำความเย็น R717 Ammonia ( $\text{NH}_3$ ) จะเหมาะกับระบบทำความเย็นที่ต้องการอุณหภูมิติดลบ เป็นต้น

## 2.7 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำแข็งแห้ง

### 2.7.1 คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide) [3]

คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) สามารถเป็นได้ 4 วัฏภาค คือ ก๊าซ ของเหลว ของแข็งและของไหลเหนือวิกฤติ โดยทั่วไปแล้วคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นสารที่ไม่เป็นพิษ ไม่กัดกร่อน และไม่ทำลายโอโซน เมื่ออยู่ที่สภาวะความดันและอุณหภูมิห้องคาร์บอนไดออกไซด์ จะอยู่ในวัฏภาคก๊าซ ซึ่งมีความเสถียรและเฉื่อยต่อปฏิกิริยา ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส มีความหนาแน่นมากกว่าอากาศประมาณ 1.5 เท่า จึงมีน้ำหนักมากกว่าอากาศ ดังนั้น ในพื้นที่อับ อากาศ ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จึงสามารถเพิ่มขึ้นได้ ซึ่งจะมีความเป็นพิษ เมื่อความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ในอากาศมีค่ามากกว่า 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

### 2.7.2 น้ำแข็งแห้ง (Dry ice) [4-5]

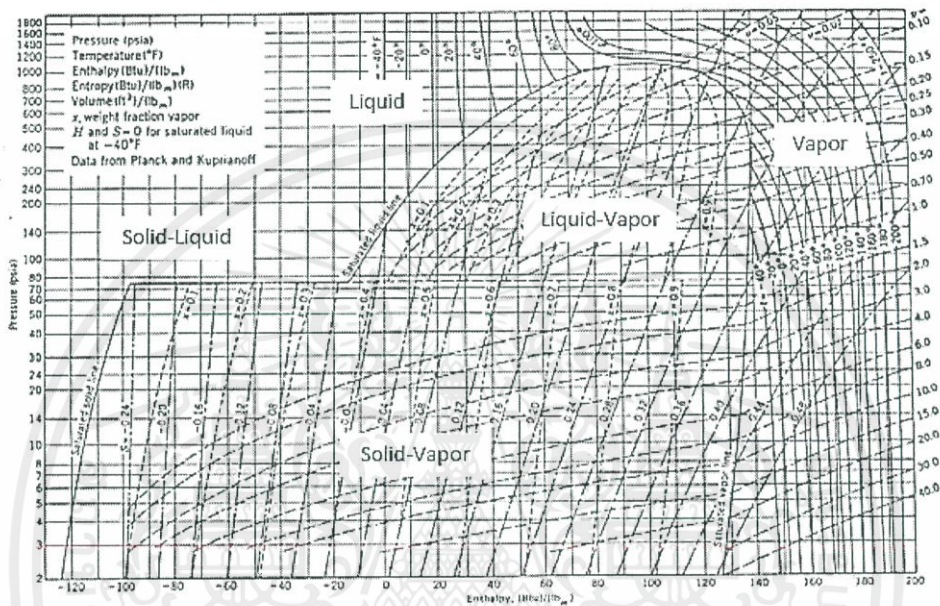
น้ำแข็งแห้ง (Dry ice) เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ในสถานะของแข็ง เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า คาร์บอนไดออกไซด์แข็ง หรือ solid carbon dioxide เตรียมได้จากการนำก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ มาผ่านกระบวนการอัดและทำให้เย็นลงภายใต้ความดันสูงกลายเป็น คาร์บอนไดออกไซด์เหลว แล้วลด ความดันลงอย่างรวดเร็วโดยการพ่นคาร์บอนไดออกไซด์ เหลวสู่ความดันบรรยากาศ ผลที่ได้คือเกล็ดน้ำแข็งคล้ายเกล็ดหิมะ แล้วจึงนำมาอัดเป็น รูปแบบและขนาดต่าง ๆ ตามวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้

น้ำแข็งแห้งแตกต่างจากน้ำแข็งธรรมดาทั่วไปคือ มีอุณหภูมิเย็นจัดถึง  $-79\text{ }^{\circ}\text{C}$  ในขณะที่น้ำแข็งธรรมดาทั่วไปมีอุณหภูมิประมาณ  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  และที่อุณหภูมิห้อง น้ำแข็งแห้งจะ ระเหิดกลายเป็น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยไม่หลอมละลายเป็นของเหลว น้ำแข็งแห้งจะให้ความเย็นมากกว่าน้ำแข็งธรรมดาทั่วไปถึง 2 หรือ 3 เท่าเมื่อเทียบโดยน้ำหนักหรือปริมาตรที่เท่ากัน

- น้ำแข็งแห้งได้ถูกนำมาเอามาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมหลากหลายรูปแบบดังนี้ เช่น
- อุตสาหกรรมอาหาร ใช้ในการแช่แข็งเนื้อสัตว์ ไอศกรีม ผัก ผลไม้ เพื่อรักษาความสด
  - อุตสาหกรรมการแพทย์ ใช้ในการรักษาสภาพของศพ อีกทั้งป้องกันการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ในการขนส่งเวชภัณฑ์ เช่น ยา หรือสารเคมี
  - อุตสาหกรรมการทำความสะอาด ใช้น้ำแข็งแห้งในการพ่นทำความสะอาดพื้นผิวของชิ้นงาน

## 2.8 กลไกการเกิดน้ำแข็งแห้ง

น้ำแข็งแห้งเกิดจากกระบวนการเปลี่ยนวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์ ที่เกิดจากการขยายตัวแบบเอนทาลปีคงที่ ขณะเคลื่อนที่ผ่านรูอริฟิส โดยสามารถอธิบายการเกิดน้ำแข็งแห้งได้ผ่านแผนภูมิความดัน เอนทาลปี (Pressure enthalpy diagram) ประกอบกับหลักการทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic)



รูปที่ 2.10 แผนภูมิความดันเอนทาลปีของคาร์บอนไดออกไซด์

การขยายตัวแบบเอนทาลปีคงที่ที่เกิดขึ้นเมื่อคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นของไหล เคลื่อนที่ผ่านรูอริฟิส พบว่าขณะที่ความดันลดลงอย่างรวดเร็ว คาร์บอนไดออกไซด์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคจากของไหลเข้าสู่วัฏภาคของแข็งและก๊าซ (Solid-vapor) โดยจะเรียกกระบวนการทั้งสองวัฏภาคนี้ว่า ละอองน้ำแข็งแห้ง ซึ่งละอองน้ำแข็งแห้งนี้จะถูกนำมาใช้ทำความสะอาด โดยละอองน้ำแข็งแห้งนี้จะถูกพ่นออกมาจากหัวฉีดที่มีความเร็วสูง เมื่อนำไปใช้ฉีดพ่นพื้นผิวชิ้นงานจะสามารถขจัดสิ่งปนเปื้อนออกจากพื้นผิวได้ [10]

## บทที่ 3

### การทดลอง

#### 3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบและทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการสร้างหน่วยควบแน่นแบบท่อสองชั้น ประกอบด้วย ท่อภายนอกคือท่อเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) สำหรับการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ และท่อภายในคือท่อทองแดง (Copper) สำหรับการไหลเวียนของสารทำความเย็น แสดงลักษณะเบื้องต้น ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โมเดลเบื้องต้นของหน่วยควบแน่นแบบท่อสองชั้น

##### 3.1.1 ท่อเหล็กกล้าไร้สนิม

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1/2 นิ้ว ความหนา 0.065 นิ้ว จากบริษัท เอ็ม. เจ. บางกอกวาล์ว และ ฟิตติ้ง จำกัด

##### 3.1.2 ท่อทองแดง

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1/4 นิ้ว ชนิดหนาพิเศษ 1.2 มิลลิเมตร จากบริษัท โพล์วเทคเวิร์ลด์ จำกัด

##### 3.1.3 ทรงกระบอก (Cylinder) 300 cm<sup>3</sup>

##### 3.1.4 สารทำความเย็น R404A

##### 3.1.5 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

##### 3.1.6 เครื่องพ่นละอองน้ำแข็งแห้ง

##### 3.1.7 เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermocouple)

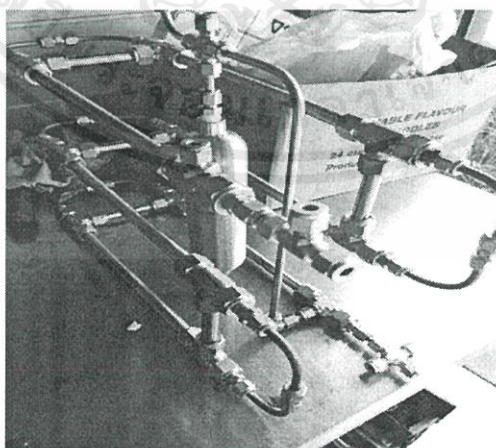
##### 3.1.8 เครื่องวัดความดัน (Pressure gauge)

### 3.2 ขนาดของท่อสองชั้น

สำหรับท่อทองแดงจะเป็นท่อที่อยู่ภายใน ใช้สำหรับการไหลเวียนของสารทำความเย็น โดยใช้สารทำความเย็นเป็น R404A และในส่วนของท่อเหล็กกล้าไร้สนิม จะใช้สำหรับการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งทั้งสองท่อมียุทธศาสตร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.2 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทองแดง (ท่อภายใน) และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเหล็กกล้าไร้สนิม (ท่อภายนอก)



รูปที่ 3.3 หน่วยควบคุมคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนหุ้มฉนวนความร้อน

### 3.3 ขั้นตอนการออกแบบ

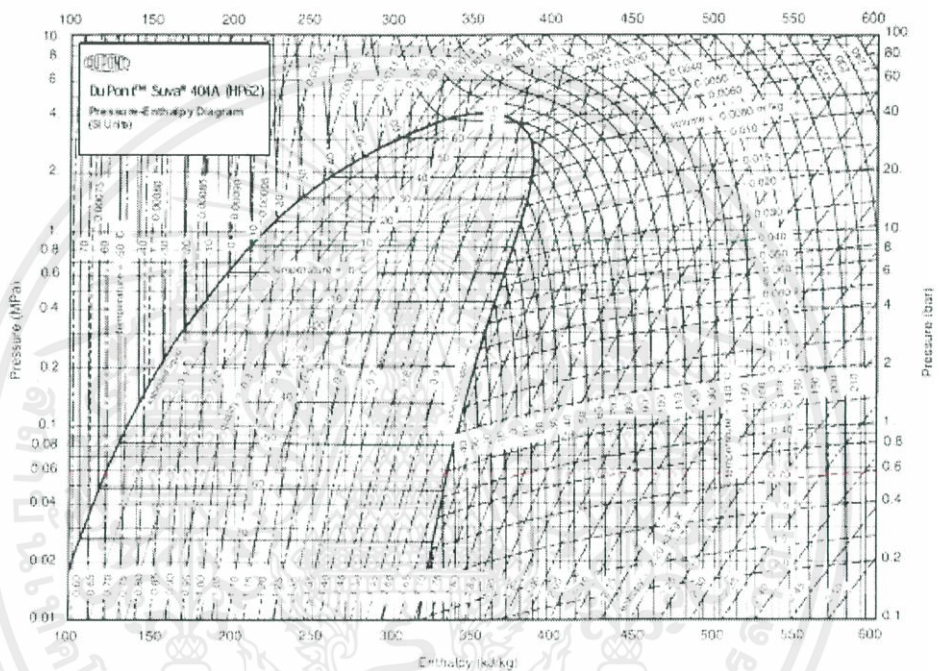
ในขั้นตอนแรกของการออกแบบจะเริ่มจากการศึกษาหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์ของเครื่องฟั่นละอองน้ำแข็งซึ่งอยู่ในลักษณะของท่อขดเหล็กกล้าไร้สนิมและแช่ในเอทิลีนไกลคอลซึ่งเป็นตัวกลางในการทำความเย็น (Cooling media) โดยศึกษาปริมาณภาระการทำความเย็นที่หน่วยควบแน่นนี้ต้องรองรับ ในการทำให้คาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 30 °C เย็นตัวจนควบแน่นกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 10 °C โดยใช้แผนภูมิความดัน เอนทาลปีเข้ามาช่วยในการคำนวณภาระการทำความเย็นดังกล่าว จากนั้นจึงนำภาระการทำความเย็นมาเป็นแนวทางในการออกแบบหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์แบบท่อสองชั้น

### 3.4 ขั้นตอนการทดลอง

หลังจากเสร็จสิ้นการออกแบบชิ้นส่วนต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในการสร้างหน่วยควบแน่นแบบท่อสองชั้นแล้ว จึงนำมาประกอบและทดลองใช้กับเครื่องฟั่นละอองน้ำแข็งแห้ง ซึ่งการทดลองจะต้องมีการวัดอุณหภูมิของสารทำความเย็น R404A ทั้งขาเข้าและขาออก จากหน่วยควบแน่น โดยใช้เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermocouple) นอกจากนี้ต้องมีเครื่องวัดความดัน (Pressure gauge) ใช้วัดความดันของสารทำความเย็น R404A เพื่อทำการตรวจสอบว่าสารทำความเย็น R404A ได้เปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอหรือไม่ จากนั้นนำข้อมูลที่ทำการวัดค่าได้มาตรวจสอบกับแผนภูมิความดันเอนทาลปี และทำการคำนวณดุลพลังงานเพื่อหาค่าอัตราการไหลของสารทำความเย็น R404A โดยทำการทดลองเติมสารทำความเย็น R404A ตั้งแต่ 100 g , 200 g , 250 g , 300 g และ 350 g จากนั้นนำอัตราการไหลของสารทำความเย็น R404A มาศึกษาหาความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ใน Cylinder

- 1) เติมสารทำความเย็น R404A ปริมาณ 100 g ลงในระบบ
- 2) เปิดถึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ให้ก๊าซไหลผ่านหน่วยควบแน่นเพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็น กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
- 3) สังเกตอุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์ใน Cylinder รอจนอุณหภูมิคงที่
- 4) จดบันทึกอุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันป้อนเข้า 48 bar
- 5) เพิ่มความดันป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 55 bar
- 6) สังเกตอุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์ใน Cylinder รอจนอุณหภูมิคงที่
- 7) จดบันทึกอุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันป้อนเข้า 55 bar
- 8) เพิ่มความดันป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 62 bar
- 9) สังเกตอุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์ใน Cylinder รอจนอุณหภูมิคงที่
- 10) จดบันทึกอุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันป้อนเข้า 62 bar
- 11) เติมสารทำความเย็น R404A ปริมาณ 200 g ลงในระบบ ทำข้อ 2 ถึง 10 ซ้ำ
- 12) เติมสารทำความเย็น R404A ปริมาณ 250 g ลงในระบบ ทำข้อ 2 ถึง 10 ซ้ำ

- 13) เติมสารทำความเย็น R404A ปริมาณ 300 g ลงในระบบ ทำข้อ 2 ถึง 10 ซ้ำ
- 14) เติมสารทำความเย็น R404A ปริมาณ 350 g ลงในระบบ ทำข้อ 2 ถึง 10 ซ้ำ
- 15) เมื่อได้อุณหภูมิที่จุดบันทึกมาแล้ว นำมาเปิดแผนภูมิความดัน เอนทาลปี ของคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อหาปริมาณ heat of condensation ของคาร์บอนไดออกไซด์ ในแต่ละสภาวะ นำมาคำนวณภาระการทำความเย็นได้
- 16) ตรวจสอบความดัน อุณหภูมิขาเข้า และอุณหภูมิขาออกของสารทำความเย็น R404A นำมาเปิดแผนภูมิความดัน เอนทาลปี ของสารทำความเย็น R404A เพื่อหาปริมาณ heat of vaporization



รูปที่ 3.4 แผนภูมิความดัน เอนทาลปี ของสารทำความเย็น R404A

- 17) ทดลองหาอัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์โดยนำถังแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์วางบนตราชั่ง ทำการฉีดย่นแล้ววัดน้ำหนักที่หายไปเทียบกับเวลา 30 วินาที ทดลองจำนวน 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย
- 18) คำนวณอัตราการไหลเชิงมวล ของสารทำความเย็น R404A จากสมการ  $\dot{m}_{CO_2} \Delta h_{CO_2} = \dot{m}_{R404A} \Delta h_{R404A}$
- 19) นำค่าอุณหภูมิและความดันของคาร์บอนไดออกไซด์มาหาค่าความหนาแน่น
- 20) ได้ผลเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์กับอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำความเย็น R404A

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการออกแบบหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์

การคำนวณเพื่อการออกแบบหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้หลักการดุลพลังงาน เข้ามาช่วยคำนวณภาระการทำความเย็น ปรากฏว่าได้ผลการออกแบบดังนี้

เอนทาลปีจำเพาะของคาร์บอนไดออกไซด์ในสถานะแก๊ส ที่สภาวะความดัน 48 bar อุณหภูมิ 30 °C มีค่าประมาณ 148 btu/lb ( ประมาณ 344.3 J/g) ซึ่งเราต้องการควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์ จากสภาวะดังกล่าวให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่สภาวะความดัน 48 bar อุณหภูมิประมาณ 10 °C ซึ่งมีเอนทาลปีจำเพาะอยู่ที่ประมาณ 48 btu/lb (ประมาณ 111.6 J/g) ดังนั้น ปริมาณเอนทาลปีที่จะต้องทำการดึงออกจากคาร์บอนไดออกไซด์ในสถานะแก๊ส ที่สภาวะความดัน 48 bar อุณหภูมิ 30 °C เพื่อให้ควบแน่นกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่สภาวะความดัน 48 bar อุณหภูมิประมาณ 10 °C จึงมีค่าประมาณ 100 btu/lb (ประมาณ 232.6 J/g) และจากการทดลอง วัดอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์พบว่า มีอัตราการไหลประมาณ 0.83 g/s จำคำนวณออกมา เป็นภาระการทำความเย็นได้ประมาณ 193.06 J/s

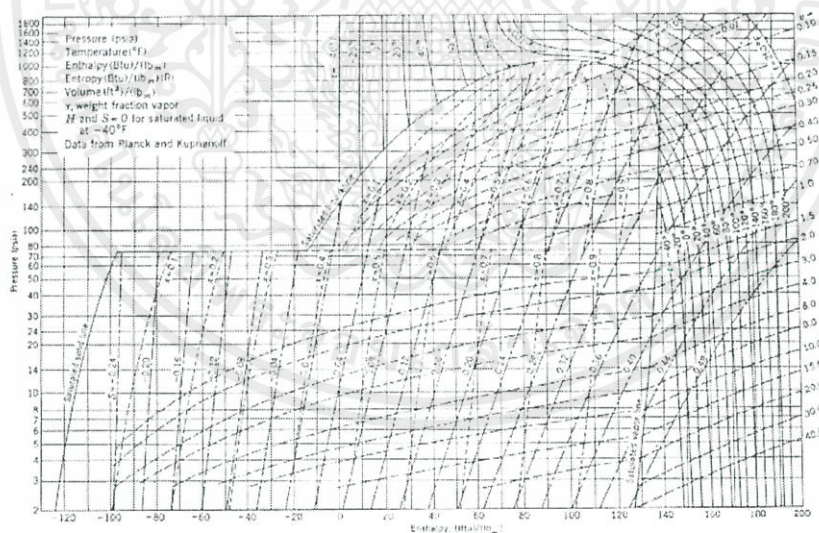


Fig. 12-8 Pressure-enthalpy diagram for carbon dioxide.

รูปที่ 4.1 แผนภูมิความดันเอนทาลปีของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการคำนวณภาระการทำความเย็น

จากนั้นทำการออกแบบหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์แบบท่อสองชั้น โดยให้ท่อภายในเป็นท่อทองแดงสำหรับการไหลเวียนของสารทำความเย็น และท่อภายนอกเป็นท่อเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งพื้นที่ผิวสัมผัสในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นกับคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าประมาณ  $0.01892 \text{ m}^2$  ทำการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ได้เท่ากับ  $483.988 \text{ W/m}^2\text{K}$

## 4.2 ผลการทดลอง

### 4.2.1 อุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่ได้จากการคำนวณ

จากการทดลองทำให้ทราบอุณหภูมิขาเข้าขาออกของสารทำความเย็น R404A ซึ่งสามารถหา heat of vaporization ของสารทำความเย็น R404A ได้จากแผนภูมิความดัน เอนทาลปี และจากการคำนวณภาระการทำความเย็น (Q) จึงสามารถคำนวณอัตราการไหลของสารทำความเย็น R404A ทำให้สามารถนำมาคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U) ได้ ทำให้สามารถคำนวณหาผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยแบบล็อก ( $\Delta T_{LM}$ ) ได้ จากสมการ  $Q = UA\Delta T_{LM}$  จากนั้นใช้ Goal seek ในโปรแกรม Microsoft Excel ในการคำนวณหาอุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่ได้จากการคำนวณเมื่ออัตราการไหลของสารทำความเย็นที่ได้ มาจากการทดลองที่ใช้ปริมาณสารทำความเย็นเท่ากับ  $300 \text{ g}$

Mass flow rate of R404A (g/s)	Pressure of CO <sub>2</sub> (bar)	U (W/m <sup>2</sup> K)	Q (W)	Temperature of liquid CO <sub>2</sub> (°C), T <sub>CO<sub>2</sub></sub> (Cal)
0.9267	48	477.291	185.337	11.02
0.9119	55	475.388	181.474	9.66
0.8624	62	468.716	169.891	6.63

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่ได้จากการคำนวณเมื่ออัตราการไหลของสารทำความเย็นที่ได้ มาจากการทดลองที่ใช้ปริมาณสารทำความเย็นเท่ากับ  $350 \text{ g}$

Mass flow rate of R404A (g/s)	Pressure of CO <sub>2</sub> (bar)	U (W/m <sup>2</sup> K)	Q (W)	Temperature of liquid CO <sub>2</sub> (°C), T <sub>CO<sub>2</sub></sub> (Cal)
0.9800	48	483.988	193.058	8.62
0.9407	55	479.080	184.370	6.83
0.9000	62	473.946	175.688	5.06

#### 4.2.2 อุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่ได้จากการทดลอง

จากการคำนวณปริมาณภาระการทำความเย็นของหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์ของเครื่องฟ้นละอองน้ำแข็งแห้งเครื่องก่อนหน้า จึงนำมาซึ่งการออกแบบหน่วยควบแน่นในลักษณะที่มีขนาดกะทัดรัดขึ้น ในรูปแบบของหน่วยควบแน่นแบบท่อสองชั้น จากการวัดอุณหภูมิที่ขาเข้าและขาออกของหน่วยควบแน่น และทำการคำนวณดุลพลังงาน พบว่าหน่วยควบแน่นสามารถควบแน่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เปลี่ยนสถานะจากก๊าซกลายเป็นของเหลวที่มีความหนาแน่นสูงกว่า  $830 \text{ kg/m}^3$  ได้ ซึ่งจะต้องใช้สารทำความเย็น R404A ในปริมาณ 300 ถึง 350 g ดังแสดงใน ตารางที่ 4.3 และ ตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิและความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการทดลองโดยมีสารทำความเย็นอยู่ในระบบ 300 g

R404A (300 g)			
Pressure of CO <sub>2</sub> (bar)	Temperature of liquid CO <sub>2</sub> (°C)	Density of liquid CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Mass flow rate of R404A (g/s)
48	12	864	0.9267
55	10	875	0.9119
62	8	897	0.8624

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการทดลองโดยมีสารทำความเย็นอยู่ในระบบ 350 g

R404A (350 g)			
Pressure of CO <sub>2</sub> (bar)	Temperature of liquid CO <sub>2</sub> (°C)	Density of liquid CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Mass flow rate of R404A (g/s)
48	10	867	0.9800
55	8	888	0.9407
62	6	910	0.9000

จากผลการทดลอง พบว่าคาร์บอนไดออกไซด์สามารถถูกควบแน่นเป็นของเหลวได้เมื่อมีปริมาณของสารทำความเย็น R404A อยู่ในระบบเป็น 300 ถึง 350 g แต่ทั้งนี้ ความสามารถในการควบแน่นก็ขึ้นอยู่กับความดันป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย ซึ่งความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวสามารถปรับเปลี่ยน และควบคุมได้ จากปริมาณของสารทำความเย็นที่อยู่ในระบบ และความดันป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์นั่นเอง ซึ่งในระบบการทำความสะอาดด้วยการฟ้นละอองน้ำแข็งแห้ง จะต้องการคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่มีความหนาแน่นสูงกว่า  $830 \text{ kg/m}^3$  จากผลการทดลองจึงสรุปได้ว่าหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์แบบท่อสองชั้น สามารถควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์ให้สามารถใช้กับระบบการทำความสะอาดด้วยละอองน้ำแข็งแห้งได้

อุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับอุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่ได้จากการคำนวณ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.5 และ ตารางที่ 4.6

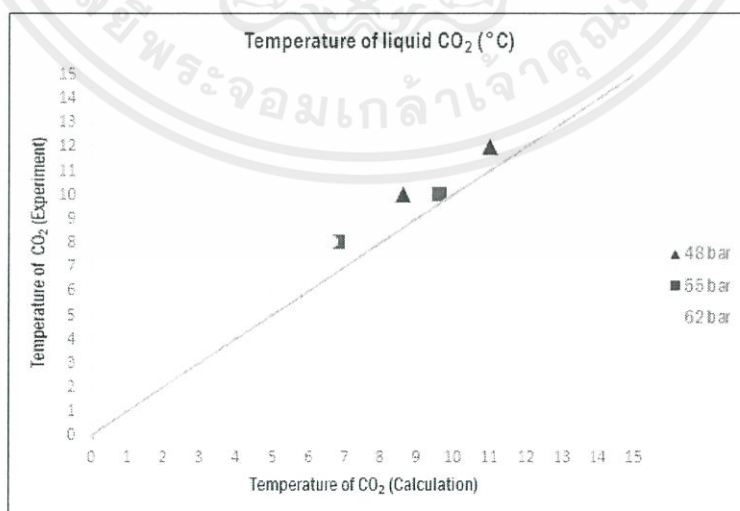
ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่ได้จากการทดลองเทียบการคำนวณเมื่อใช้สารทำความเย็นปริมาณ 300 g

R404A (300 g)			
Mass flow rate of R404A (g/s)	Pressure of CO <sub>2</sub> (bar)	Temperature of liquid CO <sub>2</sub> (experiment) (°C)	Temperature of liquid CO <sub>2</sub> (calculation) (°C)
0.9267	48	12	11.02
0.9119	55	10	9.66
0.8624	62	8	6.63

ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่ได้จากการทดลองเทียบการคำนวณเมื่อใช้สารทำความเย็นปริมาณ 350 g

R404A (350 g)			
Mass flow rate of R404A (g/s)	Pressure of CO <sub>2</sub> (bar)	Temperature of liquid CO <sub>2</sub> (experiment) (°C)	Temperature of liquid CO <sub>2</sub> (calculation) (°C)
0.9800	48	10	8.62
0.9407	55	8	6.83
0.9000	62	6	5.06

เมื่อทำการพล็อตกราฟเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่ได้จากการทดลองเทียบกับการคำนวณ จะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 อุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่ได้จากการทดลองเทียบการคำนวณ

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการออกแบบและการทดลอง

โครงการนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับความเป็นไปได้ของการออกแบบเพื่อพัฒนาหน่วยควบแน่นของเครื่องฟั่นละอองน้ำแข็งแห้งให้อยู่ในลักษณะของหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์แบบท่อสองชั้น ซึ่งจะทำให้หน่วยควบแน่นมีขนาดกะทัดรัดมากขึ้น โดยใช้แนวคิดการคำนวณภาระการทำความเย็นมาช่วยในการออกแบบ พบว่าต้องใช้กำลังประมาณ 193.06 Watt เพื่อควบแน่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์เหลว ทำให้เครื่องฟั่นละอองน้ำแข็งแห้งสามารถสร้างอนุภาคละอองน้ำแข็งแห้งได้ เช่นเดียวกับหน่วยควบแน่นแบบเดิม และจากการทดลอง พบว่าหน่วยควบแน่นแบบท่อสองชั้น สามารถนำมาใช้แทนหน่วยควบแน่นแบบเดิมได้ โดยที่ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวจะต้องถูกควบคุมให้สูงกว่า  $830 \text{ kg/m}^3$  ซึ่งความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวจะถูกปรับเปลี่ยนได้จากความดันป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ และปริมาณของสารทำความเย็น R404A ที่เติมลงไปในระบบ

จากการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมสามารถประมาณอุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวได้ในแนวโน้มน้ำที่ต่ำกว่าอุณหภูมิที่ได้จากการทดลอง อาจมีสาเหตุเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของสมการที่ใช้ในการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม การคำนวณอัตราการไหลของสารทำความเย็น R404A เพราะอัตราการไหลคำนวณมาจาก heat of vaporization ซึ่งอ่านค่าจากแผนภูมิความดัน เอนทัลปี จึงทำให้อาจมีการคลาดเคลื่อนได้

จากการทดลองจึงสรุปได้ว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานในกระบวนการทำความสะอาดพื้นผิวชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ คือ ความดันขาเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์ต้องมีค่ามากกว่า 48 bar และ ปริมาณสารทำความเย็นที่เติมลงไปในระบบต้องมีน้ำหนักประมาณ 300 ถึง 350 g เพื่อให้สามารถแลกเปลี่ยนความร้อนกับคาร์บอนไดออกไซด์ได้จนมีอุณหภูมิอยู่ประมาณ  $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$  หรือต่ำกว่า

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน โดยอาจทำการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสการถ่ายเทความร้อนระหว่าง ท่อทองแดง กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งอาจทำได้โดยการเพิ่มครีบบีบที่ท่อ หรือเพิ่มความยาวท่อ เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสการถ่ายเทความร้อน เป็นต้น

5.2.2 ศึกษาการควบคุมความหนาแน่นของสารชนิดอื่นๆ นอกเหนือจากคาร์บอนไดออกไซด์ หรืออาจเป็นสารผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับสารอื่นๆ เพื่อเป็นประโยชน์ในการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมด้านอื่นๆ ต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] J.P Holman. “Heat transfer, Tenth edition”. Southern Methodist University.
- [2] Completes engineering. “Article heat exchanger”, [Online]. Available: <http://www.completesengineering.com>. 2016.
- [3] Wikipedia. “Carbon dioxide”, [Online]. Available: <https://th.wikipedia.org/wiki/คาร์บอนไดออกไซด์>. 2016.
- [4] กลุ่มพิษวิทยาและชีวเคมี สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์สาธารณสุข กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์.2546 หนังสือความรู้เกี่ยวกับสิ่งเป็นพิษ. เล่มที่ 17. บริษัท พี.เอ.ลีฟวิ่ง จำกัด, [Online]. Available: <http://webdb.dmsc.moph.go.th/>. 2016.
- [5] บริษัท ไทยดรายไอซ์ จำกัด. “น้ำแข็งแห้ง”, [Online]. Available: <http://www.thaidryice.com>. 2016.
- [6] Web.mit.edu. “CO<sub>2</sub> Phase diagram”, [Online]. Available: <http://web.mit.edu/co2/>. 2016.
- [7] พิชร พิริยะวิทยะ. 2558. “การศึกษาการทำความสะอาดโดยการฟ่นละอองน้ำแข็งแห้งที่ผลิตจาก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์”. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [8] Sangchai group. “ท่อทองแดงชนิดม้วน”, [Online]. Available: <http://www.sangchaigroup.com/product/>. 2016.
- [9] บริษัท เอ็ม เจ บางกอกควาล์วและฟิตติ้ง จำกัด. “Tubing and pipe”, [Online]. Available: <http://www.swagelok.com>. 2016.
- [10] S. Banerjee and A. Campbell, “Principles and Mechanisms of Sub-Micrometer Particle Removal by CO<sub>2</sub> Cryogenic Technique”, Journal of Adhesion Science and Technology 19 (9), pp. 739-751, 2005.
- [11] Wikipedia. “Stainless steel”, [Online]. Available: <https://th.wikipedia.org/wiki/เหล็กกล้าไร้สนิม>. 2016
- [12] Engineering toolbox. “Properties of CO<sub>2</sub>” and “Properties of R12”, [Online]. Available: <http://www.engineeringtoolbox.com>. 2016
- [13] Unitech Annemasse, “eCO<sub>2</sub> sc”, [Online]. Available: <http://www.unitechannemasse.com/co2/co2-machine.html>. 2016
- [14] Direct Industry, [Online]. Available: <http://www.directindustry.com>. 2016

- [15] F. Richard and R. Ronald, “Elementary Principles of Chemical Processes”.  
John Wiley & Son, Inc. 2005.
- [16] Blogspot. “Refrigerations” , [Online]. Available:  
<http://refrigerations.blogspot.com/2012/01/vapor-compression-system.html>





ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### ขนาดต่างๆ ของท่อเหล็กกล้าไร้สนิม และท่อทองแดง

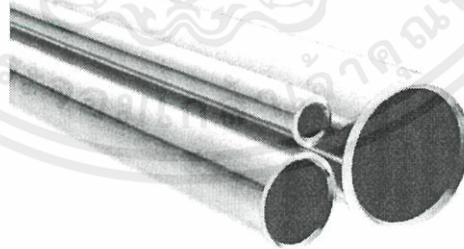
#### 1. ท่อเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless pipe)

เหล็กกล้าไร้สนิมมีอยู่หลากหลายแบบ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมี โดยองค์ประกอบที่แตกต่างกันนั้นก็ให้คุณสมบัติและราคาที่แตกต่างกันไป สำหรับเหล็กกล้า ไร้สนิม คุณภาพระดับเชิงการค้า (Commercial grade) จะมีองค์ประกอบของโครเมียม และนิกเกิล เป็น 18 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ [11]

ข้อมูลองค์ประกอบและขนาดต่างๆ ของท่อเหล็กกล้าไร้สนิมที่จะใช้ในการสร้างหน่วยควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์จากบริษัท เอ็ม เจ บางกอกวาล์วและฟิตติ้ง จำกัด แสดงดังตารางที่ ก-1 และ ตารางที่ ก-2 ตามลำดับ

ตารางที่ ก-1 องค์ประกอบทางเคมีของท่อเหล็กกล้าไร้สนิม

Element	Composition (wt.%)
Carbon	≤ 0.03
Chromium	17
Nickel	13
Molybdenum	2.6



รูปที่ ก-1 ท่อเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless pipe)

ตารางที่ ก-2 เส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาของท่อเหล็กกล้าไร้สนิม [9]

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (inch)	ความหนา (inch)
1/16	0.014
	0.020
1/8	0.028
	0.035
1/4	0.035
	0.049
	0.065
3/8	0.035
	0.049
	0.065
1/2	0.035
	0.049
	0.065
	0.083
5/8	0.049
	0.065
3/4	0.049
	0.065
1	0.083

## 2. ท่อทองแดง (Copper pipe) [8]

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความหนาของท่อทองแดง ตามมาตรฐานมีดังตารางที่ ก-3

ตารางที่ ก-3 เส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาของท่อทองแดง

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (inch)	ความหนา (mm.)
1/4	0.40
1/4	0.50
1/4	0.71
5/16	0.40
5/16	0.50
5/16	0.60
5/16	0.70
3/8	0.46
3/8	0.50
3/8	0.60
3/8	0.71
1/2	0.48
1/2	0.60
5/8	0.54
5/8	0.71
3/4	0.61
3/4	0.71
3/4	0.81



รูปที่ ก-2 ท่อทองแดง (Copper pipe)

## ภาคผนวก ข

## ข้อมูลอุณหภูมิที่บันทึกได้จากการทดลอง

ตารางที่ ข-1 อุณหภูมิและความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการทดลองโดยมีสารทำ  
ความเย็นอยู่ในระบบ 100 g

R404A (100 g)			
Pressure of CO <sub>2</sub> (bar)	Temperature of liquid CO <sub>2</sub> (°C)	Density of liquid CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Mass flow rate of R404A (g/s)
48	30	116	-
55	30	148	-
62	30	190	-

ตารางที่ ข-2 อุณหภูมิและความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการทดลองโดยมีสารทำ  
ความเย็นอยู่ในระบบ 200 g

R404A (200 g)			
Pressure of CO <sub>2</sub> (bar)	Temperature of liquid CO <sub>2</sub> (°C)	Density of liquid CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Mass flow rate of R404A (g/s)
48	25	122	-
55	25	152	-
62	25	163	-

ตารางที่ ข-3 อุณหภูมิและความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการทดลองโดยมีสารทำ  
ความเย็นอยู่ในระบบ 250 g

R404A (250 g)			
Pressure of CO <sub>2</sub> (bar)	Temperature of liquid CO <sub>2</sub> (°C)	Density of liquid CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Mass flow rate of R404A (g/s)
48	18	130	-
55	18	797	0.871
62	18	807	0.891

ตารางที่ ข-4 อุณหภูมิและความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการทดลองโดยมีสารทำ  
ความเย็นอยู่ในระบบ 300 g

R404A (300 g)			
Pressure of CO <sub>2</sub> (bar)	Temperature of liquid CO <sub>2</sub> (°C)	Density of liquid CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Mass flow rate of R404A (g/s)
48	12	864	0.9267
55	10	875	0.9119
62	8	897	0.8624

ตารางที่ ข-5 อุณหภูมิและความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการทดลองโดยมีสารทำ  
ความเย็นอยู่ในระบบ 350 g

R404A (350 g)			
Pressure of CO <sub>2</sub> (bar)	Temperature of liquid CO <sub>2</sub> (°C)	Density of liquid CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Mass flow rate of R404A (g/s)
48	10	867	0.9800
55	8	888	0.9407
62	6	910	0.9000

หมายเหตุ : อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำความเย็น R404A ที่ไม่ถูกคำนวณ เนื่องจากมีปริมาณไม่  
เพียงพอที่จะทำให้คาร์บอนไดออกไซด์ควบแน่นกลายเป็นของเหลว

## ภาคผนวก ค

### การวัดอัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์

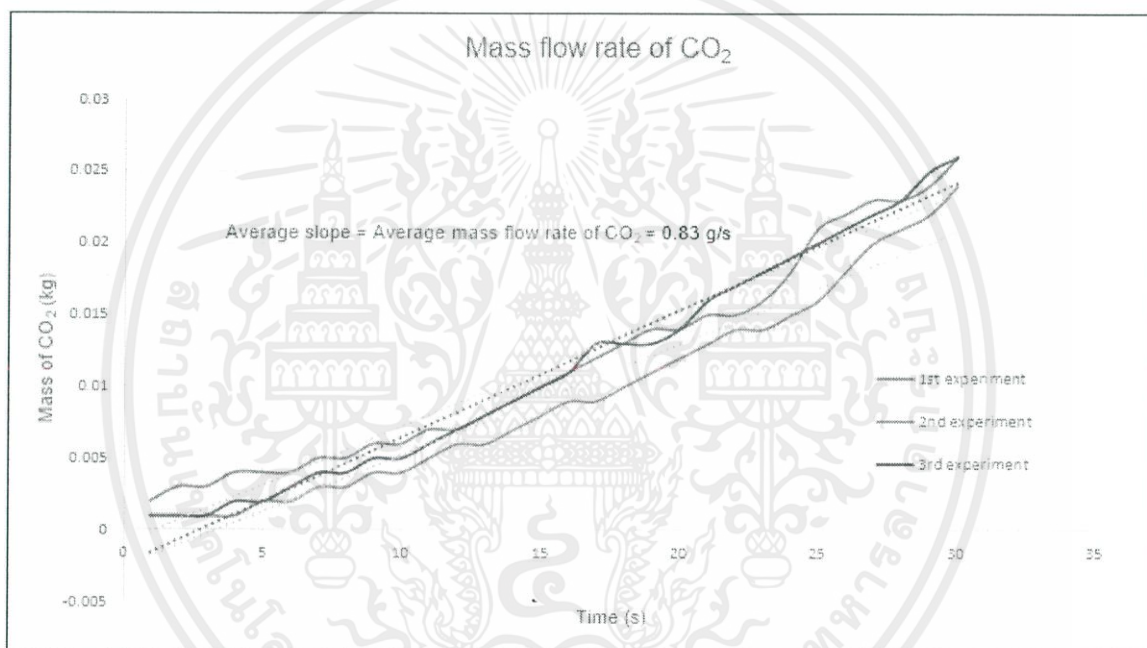
เนื่องจากในโรงงานอุตสาหกรรมการทำความสะอาดชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ด้วยละอองน้ำแข็งแห้งนั้นมีลักษณะการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแบบต่อเนื่อง ทำให้การคำนวณปริมาณพลังงานความร้อนที่ต้องดึงออกจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์เหลว นั้น ต้องคำนวณจากอัตราการไหลเชิงมวล ซึ่งจากการทดลอง ตั้งถังก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไว้บนตราซิ่ง ทำการตั้งค่าให้น้ำหนักเป็นศูนย์ แล้วทำการฉีดพ่นละอองน้ำแข็งแห้งโดยเปิดวาล์วให้สุด ทดสอบทั้งหมด 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย จะได้ผลดังแสดงในตารางที่ ค-1

ตารางที่ ค-1 ตารางบันทึกน้ำหนักของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกฉีดพ่นออกในขณะที่เปิดวาล์วสุดเป็นเวลา 30 วินาที

อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ (g/s)			
เวลา (s)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	0.002	0.001	0.001
2	0.003	0.001	0.001
3	0.003	0.001	0.001
4	0.004	0.002	0.001
5	0.004	0.002	0.002
6	0.004	0.003	0.002
7	0.005	0.004	0.003
8	0.005	0.004	0.003
9	0.006	0.005	0.004
10	0.006	0.005	0.004
11	0.007	0.006	0.005
12	0.007	0.007	0.006
13	0.008	0.008	0.006
14	0.009	0.009	0.007
15	0.01	0.01	0.008
16	0.011	0.011	0.009
17	0.012	0.013	0.009
18	0.013	0.013	0.01
19	0.014	0.013	0.011
20	0.014	0.014	0.012
21	0.015	0.016	0.013
22	0.015	0.017	0.014
23	0.016	0.018	0.014

เวลา (s)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
24	0.018	0.019	0.015
25	0.021	0.02	0.016
26	0.022	0.021	0.018
27	0.023	0.022	0.02
28	0.023	0.023	0.021
29	0.024	0.025	0.022
30	0.026	0.026	0.024

จากข้อมูลที่ได้จากการทำการทดลองข้างต้น นำมาพล็อตกราฟ ได้ดังแสดงในรูปที่ ค-1



รูปที่ ค-1 กราฟระหว่างมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่พ่นออกเทียบกับเวลา

จากรูปที่ ค-1 สามารถนำมาหาอัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ด้วยการหาความชัน ได้อัตราการไหลเชิงมวลดังตารางที่ ค-2

ตารางที่ ค-2 อัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง

	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
Mass flow rate (g/s)	0.8	0.9	0.8
Average mass flow rate (g/s)	0.83		
Average mass flow rate (lb/s)	$1.83 \times 10^{-3}$		

## ภาคผนวก ง

## การคำนวณอัตราการไหลของสารทำความเย็น R404A

การคำนวณอัตราการไหลของสารทำความเย็น R404A สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\dot{m}_{\text{CO}_2} \Delta h_{\text{CO}_2} = \dot{m}_{\text{R404A}} \Delta h_{\text{R404A}}$$

โดยที่  $\dot{m}_{\text{CO}_2}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์

$\Delta h_{\text{CO}_2}$  คือ Heat of condensation ของคาร์บอนไดออกไซด์

$\dot{m}_{\text{R404A}}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำความเย็น R404A

$\Delta h_{\text{R404A}}$  คือ Heat of vaporization ของสารทำความเย็น R404A

ตัวอย่างการคำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำความเย็น R404A ที่ใส่ลงไปในระบบ เป็นปริมาณ 350 g ที่สภาวะความดันป้อนเข้าของคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 48 bar

จากการวัดอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่ามีค่าประมาณ 0.83 g/s

Heat of condensation ของคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งหาได้จากแผนภูมิความดัน เอนทาลปี พบว่ามีค่าประมาณ 232.6 J/g

จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิขาเข้าของสารทำความเย็นเป็น  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$  และขาออกเป็น  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  ดังนั้น Heat of vaporization ของสารทำความเย็น R404A สามารถหาได้จากแผนภูมิความดัน เอนทาลปี มีค่าประมาณ 197 J/g

แทนค่าในสมการ

$$\dot{m}_{\text{CO}_2} \Delta h_{\text{CO}_2} = \dot{m}_{\text{R404A}} \Delta h_{\text{R404A}}$$

$$0.83 \times 232.6 = \dot{m}_{\text{R404A}} \times 197$$

$$\dot{m}_{\text{R404A}} = 0.98\text{ g/s}$$

## ภาคผนวก จ

## การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของท่อสองชั้น

จากสมการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

$$U = \frac{1}{R_{in} + R_{wall} + R_{out}}$$

- คำนวณ  $R_{in}$  จากสมการ

$$Re_{in} = \frac{\rho D v}{\mu} = \frac{1193.2 \times 0.00395 \times 0.0667}{0.000212} = 1489$$

$$Nu_{in} = 1.86 (RePr)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{D}{L}\right)^{\frac{1}{3}} = 1.86 \times (1489 \times 4.4)^{\frac{1}{3}} \times \left(\frac{0.00395}{1.524}\right)^{\frac{1}{3}} = 4.78$$

$$h_{in} = \frac{Nu \times k}{D} \times F = \frac{4.78 \times 0.081}{0.00395} \times 6.62 = 649 \frac{W}{m^2 K}$$

$$R_{in} = \frac{1}{h_{in}} = \frac{1}{649} = 0.00154 \frac{m^2 K}{W}$$

- คำนวณ  $R_{wall}$  จากสมการ

$$R_{wall} = \frac{\ln\left(\frac{d_{out}}{d_{in}}\right) A_{in}}{2\pi k l} = \frac{\ln\left(\frac{6.35}{3.95}\right) \times 0.01892}{2\pi \times 401 \times 1.524} = 2.34 \times 10^{-6} \frac{m^2 K}{W}$$

- คำนวณ  $R_{out}$  จากสมการ

$$Re_{out} = \frac{\rho D v}{\mu} = \frac{117 \times 0.003048 \times 0.972}{1.6598 \times 10^{-5}} = 20880$$

$$\begin{aligned} Nu_{out} &= 0.0214 (Re^{0.8} - 100) Pr^{0.4} \\ &= 0.0214 (20880^{0.8} - 100) \times 1.16^{0.4} = 62.6 \end{aligned}$$

$$h_{out} = \frac{Nu \times k}{D} = \frac{62.6 \times 0.02316}{0.003048} = 1189 \frac{W}{m^2 K}$$

$$R_{out} = \frac{A_{in}}{h_{out}A_{out}} = \frac{0.01892}{1189 \times 0.03041} = 0.00052 \frac{m^2K}{W}$$

ดังนั้นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U) จึงมีค่าเท่ากับ

$$U = \frac{1}{R_{in} + R_{wall} + R_{out}} = \frac{1}{0.00154 + (2.34 \times 10^{-6}) + 0.00052} = 483.988 \frac{W}{m^2K}$$

