

ระบบทำความเย็นโดยใช้ CO₂ เป็นสารทำความเย็น

CO₂ Refrigerant in Refrigeration System



สุเมธ เจียมบุตร

คงศักดิ์ ชินนานบุญ

บริษัท พัฒน์กล จำกัด (มหาชน)

บทนำ

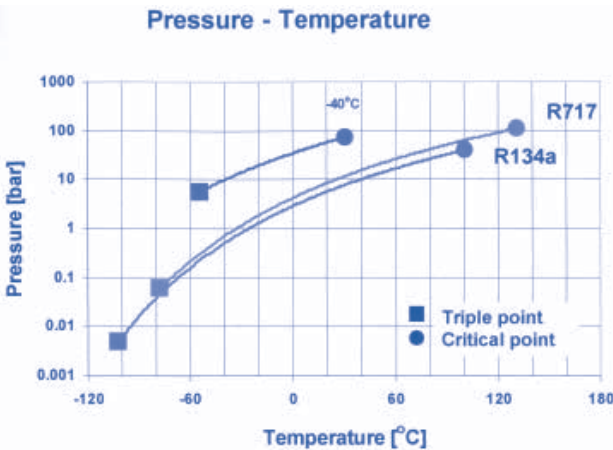
Carbon dioxide (CO₂) หรือ R744 ถูกใช้เป็นสารทำความเย็นมานานแล้ว จดสิทธิบัตรครั้งแรก (British Patent) โดย Alexander Twining ในปี ค.ศ. 1850 Thaddeus S.C. Lowe ออกแบบเครื่องทำน้ำแข็งโดยใช้ CO₂ ในปี ค.ศ. 1867 เนื่องจากข้อดีของ CO₂ ที่จัดเป็นสารทำความเย็นแบบปลอดภัย คือไม่เป็นพิษและไม่ติดไฟ จึงทำให้ระบบทำความเย็นโดยใช้ CO₂ ถูกพัฒนาเรื่อยมา โดยมีความนิยมใช้กันมากในช่วงปี ค.ศ. 1920 ถึงช่วงต้นปี ค.ศ. 1930 ในอุตสาหกรรมการเดินเรือ ส่วนแอมโมเนีย (NH₃ หรือ R717) ยังนิยมใช้ในอุตสาหกรรมทำความเย็นทั่วไป จนกระทั่งมีการปรากฏตัวของ CFC ในปี ค.ศ. 1928 จึงทำให้ CO₂ ค่อยๆ ลดความนิยมลงและหายออกไปจากตลาดในปี ค.ศ. 1960 สาเหตุหลักที่ทำให้ CO₂ หายออกไปจากตลาดเนื่องจาก CO₂ มีระดับความดันในระบบสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับ CFC ในช่วงปี ค.ศ. 1990 CO₂ เริ่มนำกลับมาใช้อีกครั้งหนึ่งเนื่องจากผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมของโลกอันเนื่องมาจากการรั่วไหลของ CFC และ HCFC แล้วทำให้ชั้นโอโซนในบรรยากาศโลกถูกทำลายและทำให้โลกร้อนขึ้น ประกอบกับข้อจำกัดของปริมาณการชาร์จแอมโมเนียในระบบทำความเย็นขนาดใหญ่

CO₂ ถูกจัดเป็น Natural Refrigerant เหมือนกับแอมโมเนีย, น้ำ และไฮโดรคาร์บอน (เช่น โพรเพน (propane) และบิวเทน (butane) เป็นต้น) แต่สารทำความเย็นเหล่านี้ล้วนแต่มีข้อด้อยบางอย่าง เช่น แอมโมเนียมีความเป็นพิษ, น้ำมีข้อจำกัดอันเนื่องมาจากจุดเยือกแข็งของน้ำที่ 0°C และมีค่า volumetric refrigeration capacity ต่ำ ส่วนไฮโดรคาร์บอนจุดติดไฟได้หรือระเบิดได้

CO₂ มีคุณสมบัติต่างจากสารทำความเย็นที่ใช้กันอยู่ทั่วไป (เช่น HCFC-22, HFC-134a, HFC-404A เป็นต้น) หลายอย่างเช่น CO₂ มีระดับความดันในระบบสูงกว่า, มีช่วงอุณหภูมิทำงานที่แคบกว่า, มีความดันที่ Triple point ที่สูงกว่ามากและมีอุณหภูมิที่ Critical point ที่ต่ำกว่ามาก

คุณสมบัติของ CO₂

CO₂ มีความดันที่ Triple point ที่สูงมากคือ 5.2 bar ซึ่งสูงกว่าความดันบรรยากาศกรณีนี้อาจจะทำให้เกิดปัญหาได้ ถ้าไม่ได้เตรียมอุปกรณ์ทางด้านความปลอดภัยเอาไว้ก่อน และมีอุณหภูมิที่ Critical point ที่ต่ำมาก คือ 31.1°C ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อเรื่องการออกแบบระบบทำความเย็น ดังแสดงในรูปที่ 1

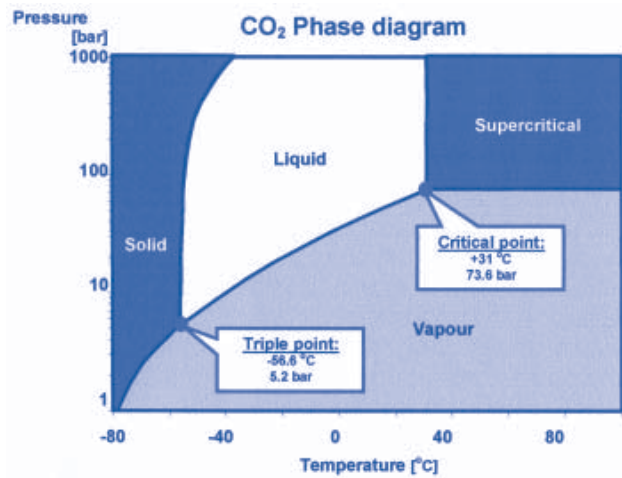


รูปที่ 1 เปรียบเทียบความดันและอุณหภูมิระหว่าง CO₂, แอมโมเนีย (R717) และ R134a; ที่มา Danfoss[1]

CO ₂ properties compared with various refrigerants				
Refrigerant	CO ₂	R134a	R404A	NH ₃
Flammable or explosive	NO	NO	NO	(YES)
Toxic	NO	NO	NO	YES
Natural substance	YES	NO	YES	NO
Ozone Depletion	0	0	0	0
Potential (ODP)				
Global Warming	1	1,300	3,260	0
Potential (GWP)				
Critical point	bar	73.6	40.7	113
	°C	31.1	101.2	132.4
Triple point	bar	5.2	0.004	0.028
	°C	-56.6	-103.3	-77.7

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ระหว่าง CO₂ กับ R134a, R404A และแอมโมเนีย; ที่มา Guntner [3]

CO₂ สามารถมีสถานะ (phase) ได้ทั้ง 3 สถานะ คือ ของแข็ง (solid), ของเหลว (liquid) และไอ (vapour) ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่า CO₂ สามารถมีสถานะเป็นของผสม 2 สถานะในสภาวะสมดุลได้ คือ ระหว่างของแข็งกับไอ, ของเหลวกับไอ และของแข็งกับของเหลว



รูปที่ 2 CO₂ Phase Diagram; ที่มา Danfoss[1]

ที่ความดันบรรยากาศ CO₂ สามารถมีสถานะได้ 2 อย่าง คือ ของแข็งและไอ ไม่สามารถมีสถานะเป็นของเหลวได้ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า -78.4°C CO₂ จะมีสถานะเป็นของแข็ง ซึ่งเรียกว่าน้ำแข็งแห้ง (dry ice) ที่อุณหภูมิสูงกว่านี้ CO₂ จะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นไอ ซึ่งเรียกว่า การระเหิด

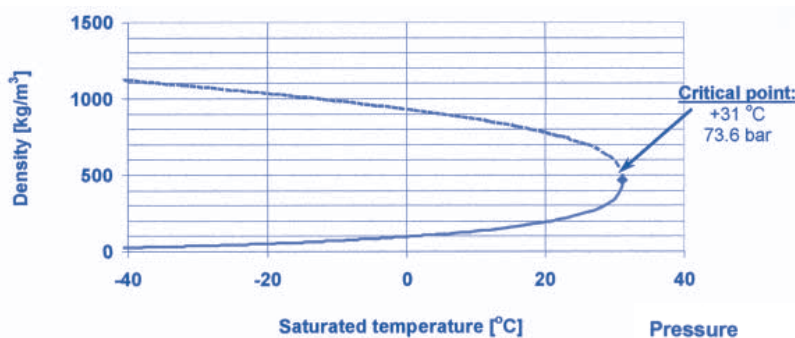
ที่ความดัน 5.2 bar และอุณหภูมิ -56.6°C CO₂ จะอยู่ในสถานะพิเศษที่เรียกว่า triple point ซึ่งก็คือมีสถานะทั้ง 3 สถานะ (ของแข็ง, ของเหลว และไอ) อยู่ในสภาวะสมดุล

จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าที่จุด critical point คือ อุณหภูมิ +31.1°C และความดัน 73.6 bar CO₂ จะมี

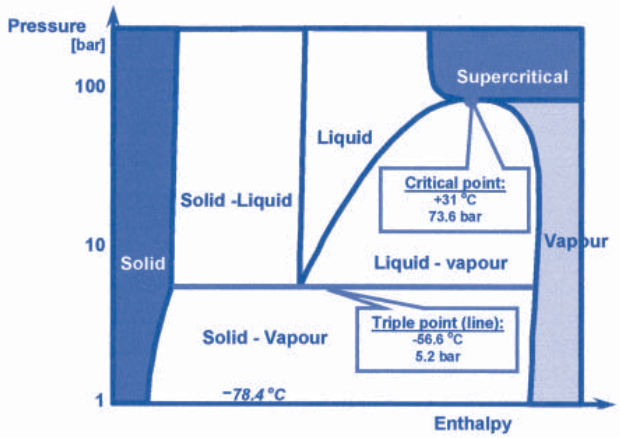
ความหนาแน่นของของเหลวและไอเท่ากัน ดังนั้นที่จุดนี้จะไม่สามารถแยกแยะสถานะทั้ง 2 สถานะได้ และเกิดเป็นสถานะใหม่ขึ้นที่เรียกว่า สถานะ supercritical (supercritical phase) โดยทั่วไปเรามักจะใช้ p-h diagram ในการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของสารทำความเย็น ซึ่งในที่นี้จะแสดงให้เห็นถึงสถานะของ triple point (line) และย่าน supercritical phase ที่อยู่เหนือ critical point ดังแสดงในรูปที่ 4

การใช้ CO₂ เป็นสารทำความเย็น

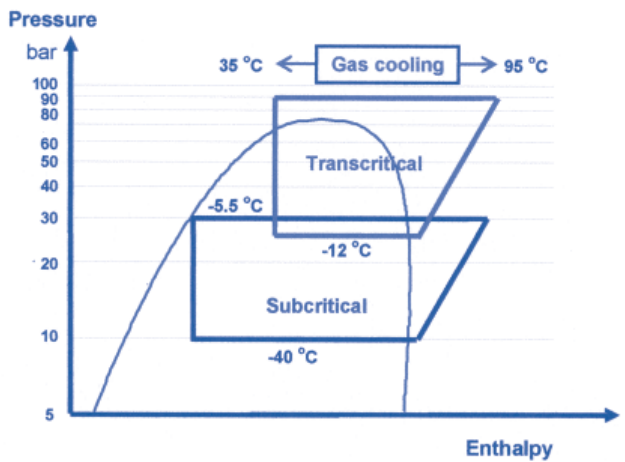
CO₂ สามารถถูกใช้เป็นสารทำความเย็นได้ทั้งในช่วง subcritical และ supercritical ระบบทำความเย็นโดยทั่วไป จะให้อยู่ในช่วง subcritical ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งก็คือ วงจรของระบบทำความเย็นจะอยู่สูงกว่า triple point และอยู่ต่ำกว่า critical point ในระบบทำความเย็นแบบ single stage จะต้องพิจารณาถึงข้อจำกัดทางด้านอุณหภูมิของคอนเดนเซอร์และความดันภายในระบบที่มีค่าสูงมาก



รูปที่ 3 แสดงความหนาแน่น (density) ของ CO₂ ในสถานะของเหลวและไอที่อุณหภูมิต่าง ๆ; ที่มา Danfoss[1]



รูปที่ 4 Log p-h diagram of CO₂; ที่มา Danfoss[1]



รูปที่ 5 Subcritical and Transcritical CO₂ Refrigeration Circuit; ที่มา Danfoss[1]

ระบบทำความเย็นแบบ Transcritical คือ วงจรของระบบทำความเย็นจะอยู่ในช่วง subcritical (evaporation) และ supercritical (gas cooling) ดังแสดงในรูปที่ 5 มักจะใช้ในระบบทำความเย็นขนาดเล็ก, ระบบปรับอากาศรถยนต์, heat pump

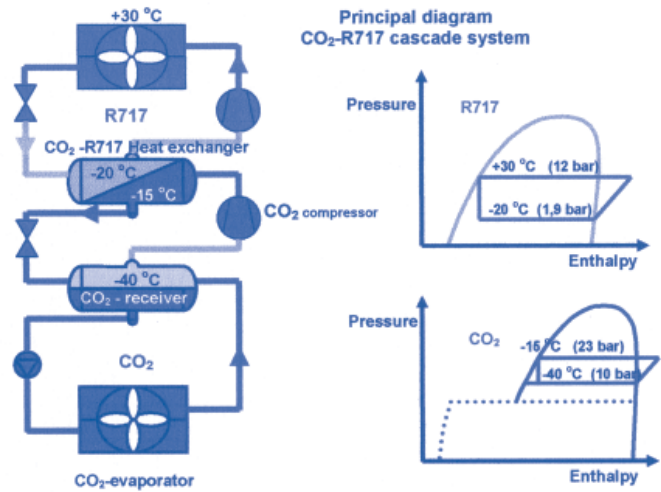
ขนาดเล็ก และระบบทำความเย็นในซูเปอร์มาร์เก็ต แต่ไม่นิยมใช้ในระบบทำความเย็นอุตสาหกรรม

CO₂-NH₃ Cascade System

ระบบทำความเย็นโดยใช้ CO₂ เป็นสารทำความเย็นส่วนมากจะใช้เป็นแบบ cascade system เพื่อที่จะได้ควบคุมความดันภายในระบบไม่ให้สูงมากเกินไป ทำให้สามารถเลือกใช้อุปกรณ์การทำความเย็นได้เหมือนกับระบบทำความเย็นโดยปกติทั่วไป เช่น คอมเพรสเซอร์, อุปกรณ์ควบคุม และ วาล์ว เป็นต้น

ระบบ cascade CO₂ ส่วนมากจะใช้คู่กับแอมโมเนีย ในกรณีนี้วงจรของ CO₂ จะสามารถทำงานได้หลายแบบ เช่น direct expansion system (DX), pump recirculation system และ brine system

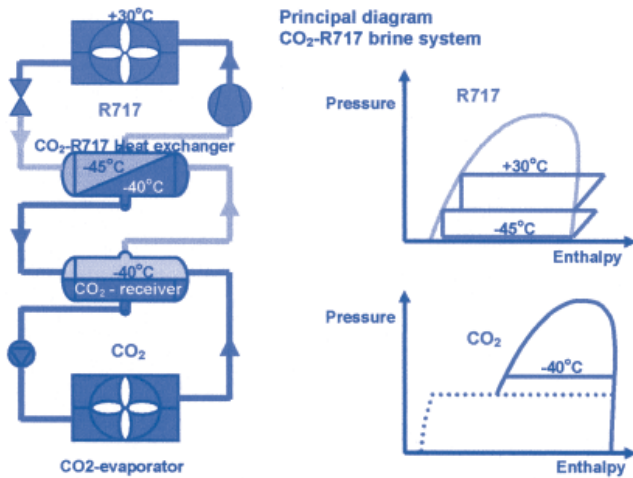
รูปที่ 6 แสดงระบบทำความเย็นอุณหภูมิต่ำโดยใช้ CO₂ cascade กับแอมโมเนีย โดยที่ระบบ CO₂ เป็นแบบ pump recirculation system โดย CO₂ จะถูกปั๊มออกจาก CO₂-receiver เข้าอีวาโปเรเตอร์ CO₂ บางส่วนจะระเหยแล้วกลับเข้าสู่ CO₂-receiver ใ้ CO₂ จะถูกดูดเข้าสู่คอมเพรสเซอร์และไปควบแน่นภายใน CO₂-NH₃ heat exchanger โดย heat exchanger นี้จะทำหน้าที่เป็นคอนเดนเซอร์ของระบบ CO₂ และเป็นอีวาโปเรเตอร์ของระบบแอมโมเนีย ซึ่งระบบนี้จะใช้ปริมาณแอมโมเนียภายในระบบประมาณ 10% เมื่อเปรียบเทียบกับระบบทำความเย็นแบบปกติที่ใช้แอมโมเนียเพียงอย่างเดียวเท่านั้น



รูปที่ 6 Principle diagram; CO₂-NH₃ Cascade Refrigeration System; ที่มา Danfoss[1]

CO₂-NH₃ Brine System

รูปที่ 7 แสดงระบบทำความเย็นอุณหภูมิต่ำ -40°C โดยใช้ CO₂ เป็นสารทำความเย็นทุติยภูมิ (secondary-fluid mode) หรือเรียกว่า brine system โดย CO₂ จะถูกปั๊มจาก CO₂-receiver เข้าอีวาโปเรเตอร์ CO₂ บางส่วนจะระเหยแล้วกลับเข้าสู่ CO₂-receiver ระบบนี้จะไม่ต้องใช้ CO₂ compressor โดยไออิมตัวจาก CO₂-receiver จะไหลเวียนเข้าสู่ CO₂-NH₃ heat exchanger แล้วควบแน่นไหลกลับเข้าสู่ CO₂-receiver โดย heat exchanger นี้ ทำหน้าที่เป็นอีวาโปเรเตอร์ของระบบแอมโมเนีย



รูปที่ 7 Principal diagram; CO₂-NH₃ Brine System; ที่มา Danfoss [1]

ความดันภายในระบบ CO₂ เมื่อเครื่องหยุดทำงาน

สิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาในเรื่องของความดันภายในระบบ CO₂ มีดังต่อไปนี้

1. ความดันภายในระบบในระหว่างที่เครื่องทำงาน ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของระบบ (เช่น Single-Stage System, Cascade System, Brine System) และการขึ้นๆ ลงๆ ของภาระการทำความเย็น

2. ความดันภายในระบบในระหว่างที่เครื่องหยุดทำงาน เนื่องจากความร้อนจากภายนอกถ่ายเทเข้ามาภายในระบบทำให้ระบบมีอุณหภูมิสูงขึ้น ถ้าระบบมีอุณหภูมิ 0°C ความดันภายในระบบจะเท่ากับ 34.9 bar และที่อุณหภูมิ +20°C ความดันภายในระบบจะสูงขึ้นถึง 57.2 bar ถ้าต้องออกแบบระบบเพื่อให้สามารถรับแรงดันได้สูงมากถึงขนาดนี้ จะมีต้นทุนที่สูงมาก ดังนั้นจึงใช้วิธีจำกัดความดันสูงสุดในระบบแทน เช่น

- ติดตั้งระบบทำความเย็นขนาดเล็กแยกต่างหาก เพื่อรักษาอุณหภูมิของ liquid ภายใน CO₂-receiver ไม่ให้มีค่าความดันสูงกว่าความดันปกติ หรือจำกัดความดันให้อยู่ภายใต้ค่าที่ยอมรับได้เช่น 30 bar เป็นต้น

- ถ้าเป็นระบบขนาดเล็ก อาจจะปล่อยทิ้งออกไปเลยก็ได้ โดยติดตั้ง Safety Valve ความดันออกแบบ

ระบบทำความเย็นอุณหภูมิต่ำมักจะต้องมีการละลายน้ำแข็ง (defrost) เช่น ใช้น้ำสเปรย์, ใช้ไฟฟ้า หรือใช้ hot gas เป็นต้น ซึ่งวิธี hot gas จะมีประสิทธิภาพสูงสุด แต่ก็ทำให้ความดันภายในระบบสูงขึ้นมากที่สุด ถ้าความดันออกแบบมีค่าเท่ากับ 50 barg อุณหภูมิในการ defrost สูงสุดที่เป็นไปได้จะมีค่าประมาณ +9°C

เนื่องจากความดันที่อุณหภูมิอิ่มตัว +9°C มีค่าประมาณ 43 barg รวมกับ 10% สำหรับ safety valve และ 5% สำหรับกรณีที่มี load ขึ้นสูงสุด ก็จะได้ค่า Maximum Allowance Working Pressure ประมาณ 50 barg

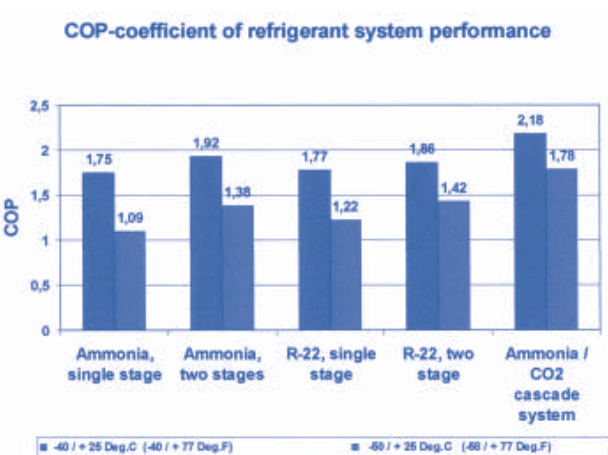
ความปลอดภัย

CO₂ เป็นสารที่ไม่มีกลิ่น ไม่มีสี จัดเป็นสารทำความเย็นที่ไม่ติดไฟและไม่เป็นพิษ (Safety Group A1) สิ่งเหล่านี้คือข้อดี แต่ก็มีข้อเสียคือในความเป็นจริงแล้ว CO₂ ไม่มีกลิ่นทำให้ไม่สามารถรับรู้ได้ด้วยจมูกเมื่อมีการรั่ว (ถ้าเป็นแอมโมเนียรั่วจะมีกลิ่นฉุน) และ CO₂ หนักกว่าอากาศ ดังนั้นเมื่อมีการรั่วออกมา CO₂ จะถูกสะสมอยู่ที่พื้น ซึ่งจะ

เป็นอันตรายในกรณีที่อยู่ในห้องปิดไม่มีอากาศถ่ายเท โดย CO₂ จะไปแทนที่ออกซิเจน ทำให้หายใจไม่ออก (ที่อุณหภูมิ 0°C CO₂ มีความหนาแน่นมากกว่าอากาศ 1.5 เท่า) ดังนั้นจึงควรมีระบบตรวจสอบการรั่วของ CO₂ และ/หรือ ระบบระบายอากาศฉุกเฉิน

CO₂ ให้ประสิทธิภาพดีกว่า

ในระบบ CO₂-NH₃ Cascade จำเป็นจะต้องมี Cascade heat exchanger และจะต้องมีการสูญเสียประสิทธิภาพอันเนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสารทำความเย็นทั้งสองชนิด แต่ประสิทธิภาพของ CO₂ compressor และการถ่ายเทความร้อนของ CO₂ ที่ดีกว่า จึงทำให้ระบบ CO₂ cascade มีประสิทธิภาพโดยรวมดีกว่าระบบทำความเย็นที่ใช้กันอยู่ทั่วไป ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบ COP ของระบบทำความเย็นแบบต่าง ๆ; ที่มา Danfoss[1]

การรั่วซึมของ CO₂-NH₃ Cascade System

ความดันของ CO₂ ภายใน Cascade heat exchanger จะสูงกว่าความดันของแอมโมเนีย ดังนั้นเมื่อเกิดการรั่วซึมจึงเกิดภายในระบบแอมโมเนีย ทำให้เกิดแอมโมเนียมคาร์บาเมต (Ammonium Carbamate) ซึ่งมีสถานะเป็นของแข็งสามารถกักความร้อนทำให้ Heat exchanger เสียหายได้

น้ำมันหล่อลื่นในระบบทำความเย็น CO₂

สามารถใช้ได้ทั้งน้ำมันหล่อลื่นที่สามารถผสม (Miscible) และไม่ผสม (Non-miscible) กับ CO₂ ดังนี้

1. **น้ำมัน PAO (Polyalphaolefin oil)** ไม่ผสมกับ CO₂ โดยความหนาแน่นของน้ำมัน PAO จะน้อยกว่า Liquid CO₂ ดังนั้นน้ำมัน PAO จะลอยอยู่บน Liquid CO₂ ทำให้เป็นการยากในการถ่ายน้ำมันออกจากระบบ (ซึ่งไม่เหมือนกับระบบแอมโมเนียที่น้ำมันจะหนักกว่าแอมโมเนีย ทำให้ถ่ายน้ำมันออกจากระบบได้ง่ายกว่า) ดังนั้น ถ้าน้ำมันอยู่ในอีวาโปเรเตอร์จะทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลง เพื่อป้องกันปัญหานี้ระบบทำความเย็น CO₂ ที่เลือกใช้น้ำมัน PAO จะต้องมี Oil separator ที่คอมเพรสเซอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงมาก

2. **น้ำมัน POE (Polyol ester oil)** สามารถผสมกับ CO₂ ได้ ดังนั้นระบบการจัดการน้ำมันจึงง่ายกว่า แต่การใช้น้ำมัน POE นั้นต้องพึงระวังไว้เสมอว่าน้ำมัน POE สามารถดูดซับความชื้นได้อย่างรวดเร็ว และจะเปลี่ยนสถานะกลายเป็นกรดสามารถกัดกร่อนระบบได้ ดังนั้น ขั้นตอนการแวกคัมระบบ (evacuation) จะต้อง

มั่นใจว่าไม่มีความชื้นหรืออากาศหลงเหลืออยู่ในระบบ และการถ่ายหรือเปลี่ยนน้ำมัน จะต้องไม่ให้น้ำมันสัมผัสกับความชื้นหรืออากาศด้วยเช่นกัน

น้ำภายในระบบทำความเย็น CO₂ สร้างปัญหา

อันที่จริงแล้วภายในระบบทำความเย็นไม่สมควรจะมีน้ำมัน, อากาศ, น้ำ และเศษผงต่างๆ อยู่แล้ว ซึ่งสิ่งเหล่านี้สามารถทำให้เกิดปัญหาได้ ถ้ามีน้ำอยู่ภายในระบบ CO₂ เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 0°C น้ำจะกลายเป็นผลึกน้ำแข็งแล้วไปอุดตันอุปกรณ์ต่างๆ ได้ เช่น control valves, solenoid valves, filter เป็นต้น จะเป็นปัญหามากสำหรับระบบ Flooded และ DX แต่สำหรับระบบ Brine system จะมีปัญหาน้อยกว่าเนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้มีความยุ่งยากน้อยกว่า ควรติดตั้ง Dryer ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับความชื้นสูง และมีความดันตกคร่อมต่ำในท่อด้าน liquid line

โดยรวมระบบท่อ CO₂ เล็กกว่า

เนื่องจากความหนาแน่นของ CO₂ ในสถานะไอมีค่ามากกว่าไอสารทำความเย็นอื่นๆ (เช่น แอมโมเนีย, R134a เป็นต้น) ทำให้ท่อด้าน Dry suction และ Wet Return สำหรับระบบ CO₂ มีขนาดเล็กกว่าระบบอื่นๆ มาก ส่วนท่อ Liquid สำหรับระบบ CO₂ จะมีขนาดใหญ่กว่าระบบแอมโมเนียและใกล้เคียงกับระบบ R134a

แต่เมื่อพิจารณาถึงระบบท่อทั้งหมดแล้ว ระบบ CO₂ จะใช้ท่อน้อยกว่าระบบแอมโมเนียประมาณ 2.5 เท่า และน้อยกว่าระบบ R134a ประมาณ 7 เท่า

คอมเพรสเซอร์ CO₂ มีขนาดเล็กกว่า

เปรียบเทียบที่ขนาดการทำงานเป็นเท่ากันและเงื่อนไขการทำงานเดียวกัน ขนาดคอมเพรสเซอร์สำหรับระบบ CO₂ จะมีขนาดเล็กกว่าระบบแอมโมเนียประมาณ 8 เท่า และเล็กกว่าระบบ R404A ประมาณ 6 เท่า

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของ CO₂ สูงกว่า

เปรียบเทียบที่เงื่อนไขการทำงานเดียวกัน (ขนาดท่อเท่ากัน, การจัดเรียงท่อเหมือนกัน, ความเร็วลมเท่ากัน, evaporation หรือ condensation temperature เดียวกัน เป็นต้น) ระบบ CO₂ จะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าระบบแอมโมเนียและระบบ HFC ทั้งแบบ DX และ Pump recirculation

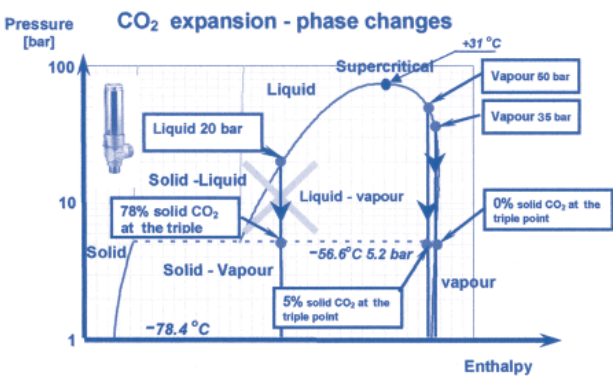
การติดตั้ง safety valve ในระบบทำความเย็น CO₂

ระบบทำความเย็น CO₂ จะไม่สามารถทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า -56.6°C ได้เพราะว่าจะเกิด solid (Triple point ของ CO₂ คือ -56.6°C, 5.2 bar) เมื่อ liquid CO₂ ถูกปล่อยสู่บรรยากาศ (ความดันต่ำกว่า 5.2 bar) จะเกิดผงของแข็ง (solid powder) ที่เรียกว่าน้ำแข็งแห้ง (dry ice)

ในการติดตั้ง safety valve เมื่อ safety valve เปิดแล้วระบาย CO₂ ออกสู่บรรยากาศ อาจจะทำให้เกิดผงของแข็งได้ จากรูปที่ 9 เป็นการจำลองสถานการณ์การเปิด safety valve 3 สถานการณ์ ในกรณีที่ตั้งความดันของ relief valve ในสถานะ

ไอที่ 35 bar หรือน้อยกว่า เมื่อระบาย CO₂ สู่บรรยากาศ (ความดันต่ำกว่า Triple point line) จะเป็นไอเพียงอย่างเดียว

ถ้าตั้งความดันของ relief valve ในสถานะไอที่ 50 bar เมื่อระบาย CO₂ สู่บรรยากาศแล้ว จะเกิด solid ประมาณ 5% ในกรณีนี้ถ้าทางออกของ relief valve ต่อเข้ากับท่อที่คดเคี้ยวไปมาอาจจะทำให้เกิดการอุดตันภายในท่อได้ วิธีแก้ปัญหานี้อาจจะปล่อย CO₂ ออกสู่บรรยากาศโดยตรงโดยที่ไม่ต้องติดตั้งท่อที่ทางออกของ relief valve



รูปที่ 9 CO₂ expansion-phase changes safety valves; ที่มา Danfoss[1]

ถ้าตั้งความดันของ relief valve ในสถานะของเหลวที่ 20 bar เมื่อระบาย CO₂ ออกสู่บรรยากาศแล้วจะเกิด solid ประมาณ 78% ในกรณีนี้จะ เป็นปัญหาอย่างมาก อาจจะทำให้เกิดการอุดตันภายในท่อที่ต่อเข้ากับทางออกของ relief valve ได้ อาจป้องกันได้โดยการต่อ safety valve เข้ากับจุดใดในระบบที่มีความดันสูงกว่า 5.2 bar

สรุป

CO₂ เป็นสารทำความเย็นที่เหมาะสมสำหรับระบบทำความเย็นอุตสาหกรรมอุณหภูมิต่ำ แต่ไม่สามารถนำไปแทนระบบแอมโมเนียได้อย่างสมบูรณ์ ส่วนมากแล้วจะใช้เป็นแบบ cascade system โดยใช้แอมโมเนียเป็นสารทำความเย็นด้านวงจรอุณหภูมิสูง

อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับระบบทำความเย็น CO₂ จะต้องรับแรงดันได้สูงอย่างน้อย 40 bar ซึ่งปัจจุบันผู้ผลิตอุปกรณ์ต่างๆ เหล่านี้ล้วนผลิตอุปกรณ์สำหรับระบบ CO₂ ที่สามารถทนแรงดันสูงได้แล้ว

การทราบถึงคุณสมบัติของ CO₂ ว่าแตกต่างจากสารทำความเย็นชนิดอื่นอย่างไร จะช่วยให้สามารถออกแบบ, ติดตั้ง และเดินเครื่องได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย

เอกสารอ้างอิง

1. Danfoss; CO₂-presentation; PART I and Part II
2. Danfoss; CO₂ refrigerant for industrial refrigeration (article)
3. Guntner; heat Xchanger special; special publication; ISSUE 10/2004