บทที่ 3

การออกแบบและสร้าง

3.1 การออกแบบปั๊มความร้อน

สำหรับการศึกษาวิจัยเครื่องอบแห้งชนิดปั๊มความร้อนในครั้งนี้ ได้ดำเนินการออกแบบโดยคำนวณจากการอบข้าวเปลือก 500 kg จากความชื้นเริ่มต้น 13% มาตรฐานเปียก ให้เหลือความชื้นสุดท้าย 5% มาตรฐานเปียก ดังนี้

ข้าวเปลือก 500 kg ความชื้น 13% wb (มาตรฐานเปียก) มีน้ำอยู่ = (13*500) / 100 = 65 kg

อบให้เหลือความชื้นสุดท้าย 5% wb คำนวณน้ำหนักสุดท้ายได้จากสูตร 2.5 ดังนี้

น้ำหนักสุดท้าย = 500*(1-0.13) / (1-0.05) = 458 kg

ข้าวสุดท้าย 458 kg ความชื้น 5% wb มีน้ำอยู่ = (5*458) / 100 = 23 kg

คือต้องระเหยน้ำออกจากข้าว = 65 – 23 = 42 kg

คิดเป็นปริมาณความร้อน = 42 kg * 2250 kJ/ kg = 94,500 kJ

ใช้เวลาอบ 7 ชม. หรือ เป็นปริมาณความร้อน = 94,500 kJ / 7 h *3600 s = 3.75 kW

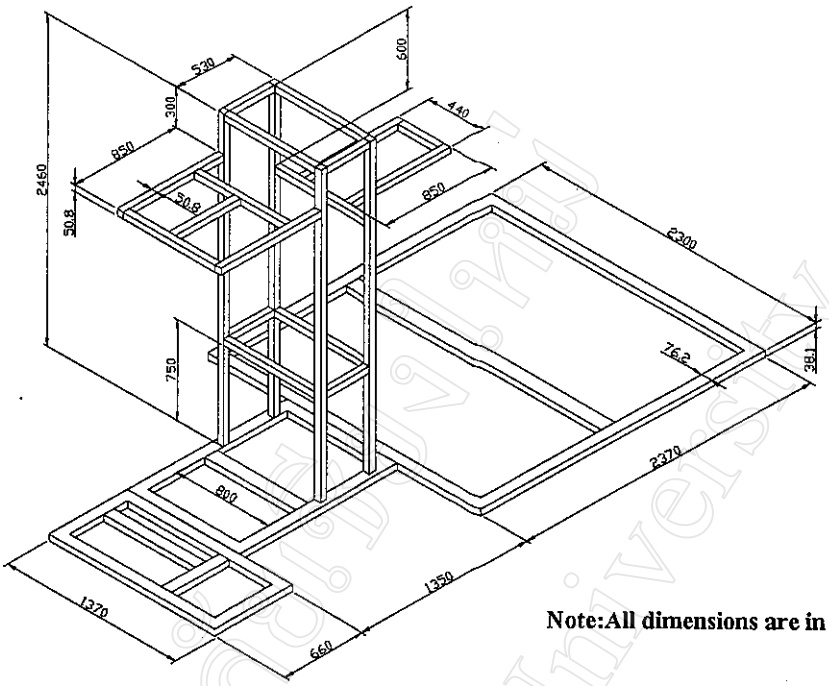
ถ้าคิดว่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ส่วนควบแน่นของปั๊มความร้อนเป็น 50% แล้วจะได้ความร้อนที่ต้องการที่ส่วนควบแน่นของปั๊มความร้อน หรือ Q_c = 3.75 kW / 0.50 = 7.5 kW

จาก Hermetic Compressor ดังนั้นใช้ Heat-reject ratio หรือ $Q_c / Q_e = 1.3$

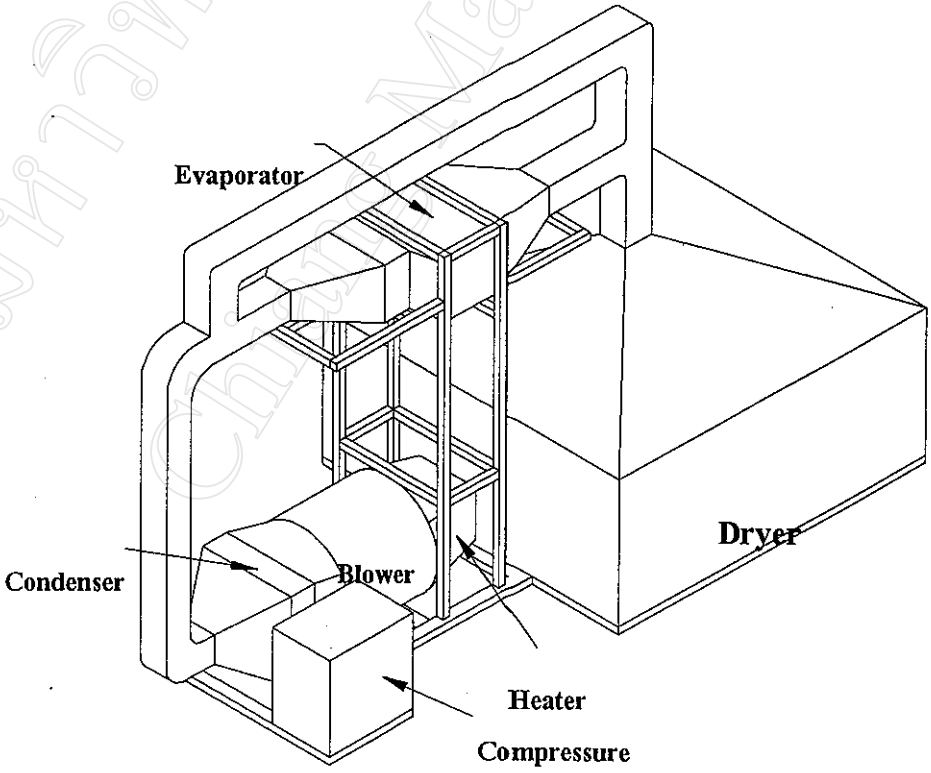
ดังนั้น Q_e = 7.5 kW./ 1.3 = 5.77 kW

ใช้ปั๊มความร้อนที่มี Q_c = 7.5 kW , Q_e = 5.77 kW

ดำเนินการสร้าง และทดสอบโดยใช้พัดลมหมุนเวียนอากาศ (Blower) ของเครื่องอบแห้งที่ใช้ในปัจจุบัน คือ แบบ Axial Flow ที่ขับด้วยมอเตอร์ 1 HP, 1430 rpm มีปริมาณลมหมุนเวียน(จากการวัดจริง) 0.4 kg /s หรือ 9.3 m^3/min-m^3ข้าวเปลือก ปั๊มความร้อนออกแบบโดยมีองค์ประกอบของเครื่องทำความเย็นสำหรับห้องเย็นที่มีส่วนทำระเหย (Evaporator) ขนาด 4000 Btu/h (Low Temp.) ชุดส่วนควบแน่น (Condensing Unit) ซึ่งมีเครื่องอัดไอ (Compressure) 1.5 HP และ Thermostatic Exp. Valve รุ่น FF-1 ซึ่งเมื่อทดสอบและคำนวณค่า Q_c พบว่าที่ส่วนควบแน่นของปั๊มความร้อนเพิ่มอุณหภูมิอากาศได้ 20 °C คิดเป็น Q_c = (0.4 kg /s)*(1 kJ/kg-°K)*(20 °K) = 8 kW หรือคิดเป็น Q_e = 8 kW / 1.3 = 6.15 kW และมีขดลวดความร้อนไฟฟ้าขนาด 6 kW ทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานเสริมเพื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งในกรณีที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ได้จากปั๊มความร้อนไม่ถึงอุณหภูมิอบแห้งที่ต้องการ และทำหน้าที่ในการควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้ง โดยมีรายละเอียดโครงสร้างและอุปกรณ์ดังแสดงในรูป 3.1 และ 3.2



รูป 3.1 แสดงโครงสร้างที่รับส่วนประกอบต่าง ๆ



รูป 3.2 แสดงองค์ประกอบของเครื่องอบแห้งชนิดปั๊มความร้อน

3.2 การทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งชนิดปั๊มความร้อน

ทำการทดสอบเบื้องต้นเพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของเครื่องอบแห้งชนิดปั๊มความร้อน โดยมีการจำลองภาระงานด้วยการเพิ่มน้ำในถังอบ (ชุบกระสอบป่าน) ปริมาณ 6,000 cm^3 และทำการอบที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 50 °C แบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ลักษณะคือ การปล่อยอากาศไม่ผ่านส่วนทำระเหย (Bypass) ที่ 0% , 25% และ 50% คิดเทียบเป็นอัตราเร็วลมผ่านส่วนทำระเหย เท่ากับ 0.44 0.33 และ 0.22 kg / s ตามลำดับ พบว่า

ค่าความร้อนของปั๊มความร้อนส่วนควบแน่นทำได้ที่อัตราเร็วลม 0.44 , 0.33 และ 0.22 kg / s เท่ากับ 9.04, 8.59 และ 7.27 kW ค่าความร้อนที่ส่วนทำระเหยทำได้เท่ากับ 7.21 , 6.47 และ 5.34 kW ค่าความร้อนที่ต้องนำออกจากระบบโดยการคิดเทียบว่าอุณหภูมิที่ออกจากส่วนทำระเหยจะต้องเท่ากับอุณหภูมิจุดน้ำค้างของอากาศที่เข้าส่วนทำระเหย เท่ากับ 15.28 , 6.52 และ 2.71 kW ได้ค่า COP_{HP} เท่ากับ 2.94 , 2.86 และ 2.69 ได้ค่า COP_{refrig} เท่ากับ 1.98 , 2.07 และ 1.93 ตามลำดับ และค่า MER เท่ากับ 1.38 , 1.77 และ 1.80 kg water condense/ kWh ตามลำดับ

ทำการทดสอบการอบแห้งข้าวเปลือก 500 kg โดยการปรับความชื้น ในระบบปิด ทดสอบที่อุณหภูมิอบแห้ง 3 ค่าคือ 50 °C , 55 °C และ 60 °C ตามลำดับ ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น (จาก hot air oven) 22.73% , 16% และ 19.64% wb เหลือ 14.22% , 7.7% และ 9.72% wb ได้ค่าความร้อนของปั๊มความร้อนในส่วนควบแน่นเท่ากับ 10.91 , 10.52 และ 10.52 kW ค่าความร้อนที่ส่วนทำระเหยเท่ากับ 7.20 , 9.18 และ 8.38 kW ค่า COP_{HP} เท่ากับ 3.33 , 2.91 และ 3.14 ค่า COP_{refrig} เท่ากับ 2.20 , 2.75 และ 2.32 ค่า MER เท่ากับ 8.06 , 5.27 และ 6.48 kg water condense/ kWh และได้ค่าความร้อนที่ต้องนำออกจากระบบโดยการคิดเทียบอุณหภูมิที่ออกจากส่วนทำระเหยจะต้องเท่ากับอุณหภูมิจุดน้ำค้างเท่ากับ 1.42 , 12.81 และ 10.47 kW ตามลำดับ

จากการทดสอบเพื่อหาสภาวะการทำงานของเครื่องอบแห้งชนิดปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิอากาศ 50 °C , 55 °C และ 60 °C พบว่าอุณหภูมิที่สามารถใช้งานได้ดีสำหรับเครื่องอบแห้งชนิดปั๊มความร้อนนี้ คือที่ 55 °C ดังนั้นในการอบแห้งเพื่อให้สามารถทำการทดลองได้ต่อเนื่องและปลอดภัยจะใช้อุณหภูมิ 55 °C โดยทดสอบกับข้าวเปลือกมีความชื้นเริ่มต้นที่ต่ำ มีผลทำให้ได้ค่าปริมาณความร้อนที่ต้องนำออกจากระบบมีค่ามากที่สุด (ในเวลาเท่ากัน) ซึ่งก็สอดคล้องกับการจำลองภาระงานในตอนแรก

ดังนั้นการทำงานของเครื่องอบแห้งชนิดปั๊มความร้อนในระบบปิด จำเป็นต้องมีการดึงเอาความร้อนออกจากระบบบริเวณก่อนเข้าส่วนทำระเหย เพื่อทำให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงขึ้น คือส่วนทำระเหยทำงานได้ดี และค่าความร้อนนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ ความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ และอุณหภูมิการอบแห้ง

3.3 การออกแบบเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบ

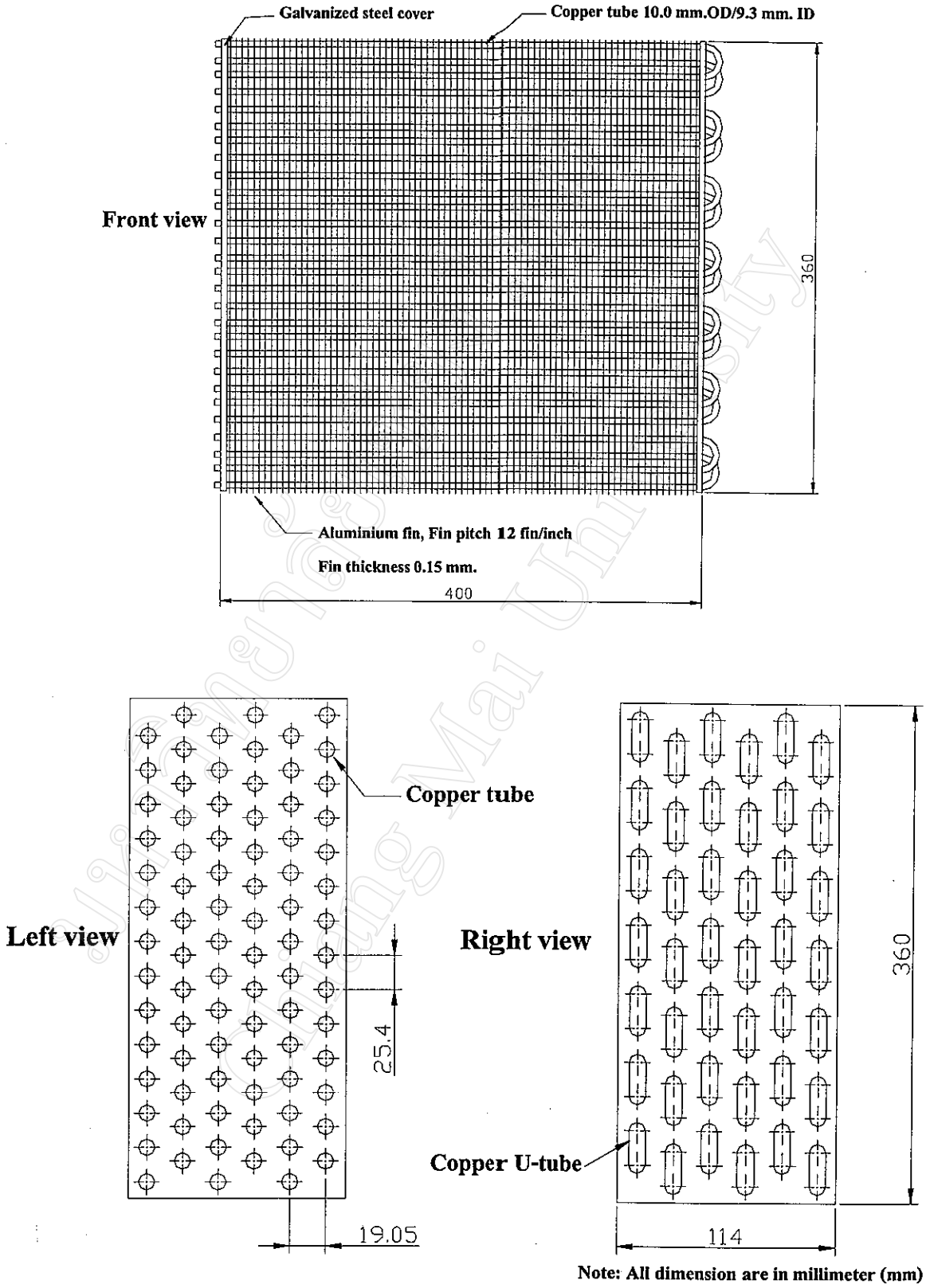
3.3.1 ข้อมูลและข้อกำหนดเบื้องต้นของการออกแบบ

ในการออกแบบเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบสำหรับการวิจัยนี้ เป็นการออกแบบตามลักษณะทางกายภาพของคอยล์ที่จะนำมาสร้างเป็นเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบ คือต้องป้อนข้อมูลขนาดต่าง ๆ ของคอยล์ที่นำมาสร้างก่อนแล้วโปรแกรมคอมพิวเตอร์จึงคำนวณค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดในทางทฤษฎีของเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบออกมาได้ และในการศึกษาวิจัยนี้จะใช้คอยล์ของเครื่องปรับอากาศเก่ามาสร้าง คือดัดแปลงสร้างเป็นเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบสำหรับระบบอบแห้งชนิดปั๊มความร้อนแล้วนำไปติดตั้งในระบบโดยที่มีการดัดแปลงท่อลมของระบบน้อยที่สุด ซึ่งลักษณะทางกายภาพของคอยล์ที่จะนำมาสร้างเป็นเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบนี้ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. เป็นคอยล์แบบท่อกลมและครีบชนิดคลื่นต่อเนื่อง (Circular tube-continuous wavy fin)
2. ความยาวช่วงครีบและความสูงของคอยล์ เท่ากับ 400 มม. และ 360 มม. ตามลำดับ
3. ท่อในคอยล์เป็นท่อทองแดงชนิดผิวในเรียบ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกเท่ากันคือ 10.0 มม. และมีระยะระหว่างจุดศูนย์กลางท่อของคอยล์ในแนวตั้งฉากกับการไหลเท่ากัน คือ 25.4 มม.
4. ครีบของคอยล์เป็นอลูมิเนียมมีความหนาเท่ากันคือ 0.15 มม. และมีระยะครีบเท่ากันคือ 12 ครีบต่อนิ้ว
5. การจัดเรียงท่อในแต่ละแถวภายในคอยล์ จะมีการจัดเรียงแบบเหลื่อมกัน (Staggered alignment)

การศึกษาวิจัยนี้ ได้เลือกใช้คอยล์ที่จะนำมาสร้างเป็นเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบ คือ คอยล์แบบ 6 แถวเพื่อที่จะนำมาสร้างเป็นเทอร์โมไซฟอนแบบ 42 ลูป แสดงดังรูป 3.3

สาเหตุที่ใช้เทอร์โมไซฟอนแบบ 42 ลูปในการศึกษาวิจัยครั้งนี้เพราะต้องการที่จะให้มีการถ่ายเทความร้อนออกจากอากาศก่อนที่จะเข้าส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อนให้ได้มากที่สุดเท่าที่จะหาซื้อคอยล์มาสร้างเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบนี้ได้ และ เมื่อนำเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบนี้เข้าไปติดตั้งในระบบ แล้วจะต้องมีการดัดแปลงท่อลมของระบบน้อยที่สุด



รูป 3.3 แสดงคอยล์แบบ 6 แถว ที่จะนำมาสร้างเป็นเทอร์โมไซฟอนแบบ 42 ลูป

3.3.2 ชนิดและปริมาณการเติมสารทำงาน

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิการใช้งานของเทอร์โมไซฟอนในระบบอบแห้งชนิดปั๊มความร้อนที่ช่วงประมาณ (10 – 60 °C) แล้วพิจารณาถึงคุณสมบัติต่าง ๆ คือ จุดเยือกแข็ง จุดเดือด ความดันและค่าความร้อนแฝงของสารที่จะนำมาเลือกเป็นสารทำงาน และยังพิจารณาถึงความเหมาะสมเข้ากันได้กับภาชนะบรรจุคือท่อทองแดง แล้วจะได้ผลดังแสดงในตาราง 3.1

ตาราง 3.1 แสดงคุณสมบัติของสารต่าง ๆ ที่จะเลือกเป็นสารทำงาน [สาโรช ไหวเคลื่อน, 2540]

สาร	ความเหมาะสมกับท่อทองแดง	จุดเหยือกแข็ง (°C)	จุดเดือด (°C)	ความดัน (kPa.)		ความร้อนแฝง (kJ/ kg)		หมายเหตุ
				ที่ 10°C	ที่ 60°C	ที่ 10°C	ที่ 60°C	
R-11	เหมาะสม	-111	24	60.68	313.29	186.28	166.93	เหมาะสม
R-12	เหมาะสม	-158	-30	422.76	1522.7	147.64	114.49	ความดันสูงเกิน
R-22	เหมาะสม	-160	-41	681.19	2427.4	196.44	139.58	ความดันสูงเกิน
R-113	เหมาะสม	-35	48	23.92	150.45	155.25	139.64	จุดเดือดสูงเกิน
R-123	เหมาะสม	-107	28	50.57	286.24	176.79	156.19	เหมาะสมที่สุด
R-134a	เหมาะสม	-97	-26	414.49	1681.5	190.87	139.37	ความดันสูงเกิน
R-502	เหมาะสม	-	-46	773.05	2601.4	139.14	87.65	ความดันสูงเกิน
น้ำ	เหมาะสม	0	100	1.23	19.92	2477.20	2357.9	จุดเดือดสูงเกิน

พิจารณาถึงความเหมาะสมกับท่อทองแดง [สาโรช ไหวเคลื่อน, 2540] พบว่าสารทุกตัวมีความเหมาะสมกับท่อทองแดง

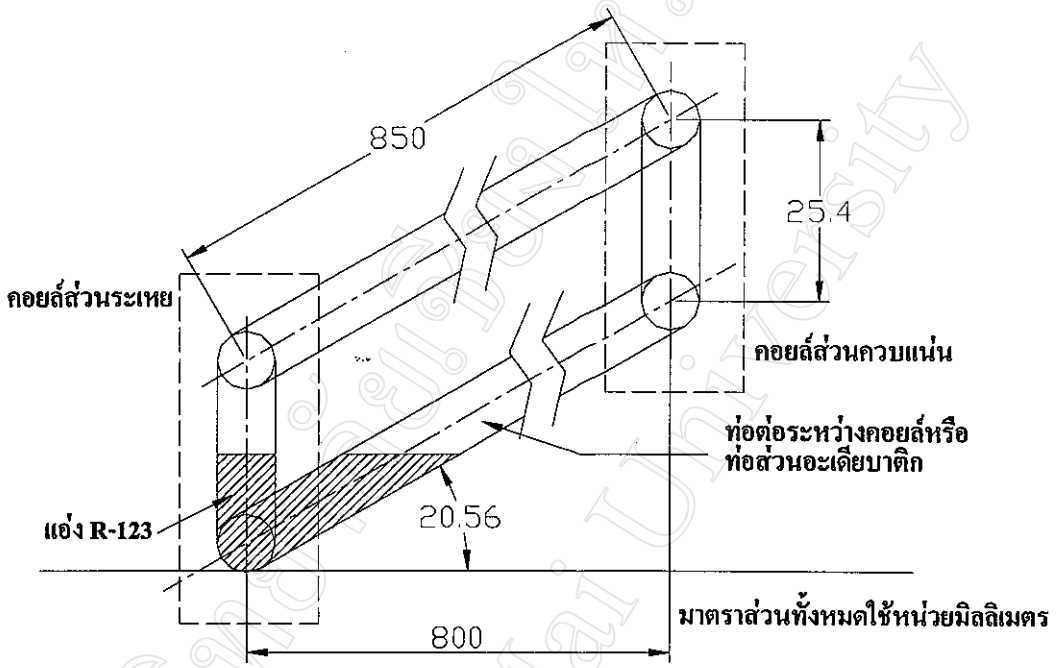
พิจารณาจุดเยือกแข็งของสารแต่ละตัว พบว่าจุดเยือกแข็งของสารทุกตัวมีค่าต่ำกว่าช่วงอุณหภูมิการใช้งานก็จะไม่มีการแข็งตัวเมื่อถูกนำมาใช้งาน ดังนั้นจุดเยือกแข็งของสารทุกตัว ไม่ได้มีผลต่อการเลือกสารทำงานในครั้งนี้

พิจารณาจุดเดือด พบว่า R-113 และน้ำ มีจุดเดือดสูงกว่าหรือเกือบจะสูงกว่าช่วงอุณหภูมิการใช้งาน นั่นหมายความว่า R-113 และน้ำ ไม่มีการเดือดเมื่อถูกนำมาใช้งาน จึงไม่สามารถนำมาใช้งานกับเทอร์โมไซฟอนในช่วงอุณหภูมิการใช้งานนี้ได้

พิจารณาความดัน พบว่า R-12 , R-22 , R-134a และ R-502 มีความดันในช่วงอุณหภูมิการใช้งานสูงเมื่อเทียบกับสารอื่น จึงเสี่ยงต่อการรั่วซึมเมื่อมีการใช้งานในเทอร์โมไซฟอนเป็นเวลานาน ๆ จึงไม่เหมาะสม

พิจารณาสารที่เหลือคือ R-11 และ R-123 จะมีความดันในช่วงอุณหภูมิการใช้งานใกล้เคียงกัน และค่าความร้อนแฝงของทั้งคู่ก็มีค่าใกล้เคียงกัน แต่เนื่องจากว่า R-11 จะมีปัญหาเรื่องสาร CFC ซึ่งเป็นปัญหากับสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงเลือก R-123 เป็นสารทำงานสำหรับเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบที่มีช่วงอุณหภูมิใช้งานประมาณ 10 –60 °C นี้

สำหรับปริมาณการเติมสารทำงานในเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบนี้ จะใช้ประมาณ 50% ของปริมาตรในท่อของคอยล์ส่วนระเหย เพราะที่ปริมาณการเติม 50% นี้จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนมากที่สุด [สาโรช ไหวเคลื่อน, 2540]



รูป 3.4 แสดงสารทำงาน (R-123) ที่ถูกบรรจุในเทอร์โมไซฟอน 1 ลูป

ความยาวของท่อส่วนที่มีของเหลวบรรจุอยู่ = ความยาวของท่อในแนวนอน + ครึ่งหนึ่งของความยาวของท่อโค้ง + ความยาวของท่อต่อระหว่างคอยล์ส่วนที่เป็นของเหลว

$$= 0.400 + \frac{1}{2}\left(\frac{\pi \times 25.4 \times 10^{-3}}{2}\right) + \frac{25.4 \times 10^{-3}}{2 \times \sin(20.56)}$$

$$= 0.400 + 0.02 + 0.036$$

$$= 0.456 \text{ m}$$

ปริมาณของ R-123 ในสถานะของเหลว $= \frac{\pi D_i^2}{4} \times L$

$$= \frac{\pi\left(9.3 \times 10^{-3}\right)^2}{4} \times 0.456$$

$$= 3.098 * 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$= 30.98 \text{ cm}^3 \text{ หรือ cc}$$

$$\approx 40 \text{ cc}$$

3.4 การสร้างและติดตั้งเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบเข้ากับระบบอบแห้งชนิดปั๊มความร้อน

ขั้นตอนในการสร้างเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบ มีดังต่อไปนี้

1. นำคอยล์ที่จะสร้างเป็นเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบมาทำความสะอาดครีบ และภายในท่อโดยใช้น้ำผงซักฟอกใส่เข้าไปในท่อแต่ละลูปให้เต็มแล้วทิ้งไว้ 1 คืน ใช้น้ำสะอาดล้างออก แล้วเติมสารอะซีโตนเข้าไปในท่อแต่ละลูปให้เต็มแล้วทิ้งไว้ 1 คืน เทสารอะซีโตนออกจากท่อให้หมด ทิ้งไว้ให้ภายในท่อแห้ง

2. นำคอยล์ที่จะสร้างเป็นเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบ มาจัดให้มีระยะห่าง และมีลักษณะเหมือนกับที่จะนำไปติดตั้งเข้าในระบบที่ตำแหน่งหน้าและหลังส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อน

3. นำท่อทองแดงชนิดบาง (Copper tube type M) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 3/8 นิ้ว มาตัดให้พอดีและดัดเป็นรูปตัวยู เพื่อทำเป็นท่อเชื่อมต่อระหว่างคอยล์ส่วนระเหยกับคอยล์ส่วนควบแน่นของเทอร์โมไซฟอนหรือเป็นส่วนอะเดียบาติกของเทอร์โมไซฟอน

4. เชื่อมต่อท่อส่วนอะเดียบาติกเข้ากับท่อของคอยล์ส่วนระเหย และท่อของคอยล์ส่วนควบแน่นของเทอร์โมไซฟอนเพื่อให้ครบวงรอบ

5. เชื่อมวาล์วลูกศรหรือวาล์วเติมน้ำยาเข้ากับท่อท่อนล่างในแต่ละลูปของเทอร์โมไซฟอน

6. ถอดลูกศรของวาล์วเติมน้ำยา แล้วใช้น้ำใส่เข้าไปในท่อของแต่ละลูป เพื่อทำความสะอาดแล้วระบายน้ำออกทิ้งจากท่อให้หมด แล้วเติมสารอะซีโตนเข้าไปในท่อแต่ละลูปให้เต็มแล้วทิ้งไว้ 1 คืน เพื่อทำความสะอาดคราบมันและคราบเขม่าจากการเชื่อม แล้วระบายสารอะซีโตนออกจากท่อให้หมด ทิ้งไว้ให้ภายในท่อแห้ง

7. อัดอากาศความดันสูงเข้าไปในท่อแต่ละลูป แล้วนำไปใส่ถังน้ำเพื่อเป็นการตรวจสอบการรั่ว

8. ดูดอากาศออกจากท่อหรือทำสูญญากาศภายในท่อแต่ละลูปโดยใช้เครื่องทำสูญญากาศ และเพื่อเป็นการตรวจสอบการรั่วด้วย แล้วเติมสารทำงาน หรือ R-123 เข้าไปในท่อทีละลูป โดยใช้วิธีเติมตามปริมาณของเหลวที่คำนวณได้ของแต่ละลูป

9. ทดสอบการทำงานของชุดเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบก่อนนำไปติดตั้งกับระบบอบแห้งชนิดปั๊มความร้อน โดยให้ความร้อนที่ส่วนคอยล์ส่วนระเหยของเทอร์โมไซฟอน แล้วปล่อยให้คอยล์ส่วนควบแน่นระบายความร้อนออกให้กับอากาศแวดล้อมโดยธรรมชาติ

ซึ่งหลังจากนี้เทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบก็สามารถนำไปใช้งานได้ และมีลักษณะการติดตั้งเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบเข้ากับส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อนในระบบอบแห้งชนิดปั๊มความร้อน แสดงในรูป 3.5

รูป 3.5 แสดงการติดตั้งเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบเข้ากับส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อน

3.5 โปรแกรมคอมพิวเตอร์

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ คือ Microsoft Excel 97 ประกอบด้วย 2 ส่วน คือโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับช่วยในการคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดในทางทฤษฎีของเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบและค่าความต้านทานความร้อน (Z) ต่าง ๆ เพื่อจะหาค่าประสิทธิผลของของเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบ และโปรแกรมช่วยการคำนวณหาคุณสมบัติต่าง ๆ ของอากาศในทางไซโคเมตริก คือคำนวณค่าแอนทาลปีจำเพาะ (h) และคำนวณความชื้นจำเพาะ (Ω) จากข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่วัดได้ เพื่อจะหาปริมาณความร้อนของส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นของปั๊มความร้อน หาค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (SMER) และหาค่าประสิทธิภาพเครื่องอบแห้ง (DE) ซึ่งจะแสดงรายละเอียดของโปรแกรม ในภาคผนวก ง