บทที่ 4
การเลือกและการผลิตฮีตไปป์

ฮีตไปป์ เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งทำงานโดยอาศัย ทฤษฎีเกี่ยวกับ Capillary effect ฮีตไปป์ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญๆ 3 อย่างคือ ตัวท่อ โครงสร้างวิก และ ของไหลใช้งาน ฮีตไปป์แบ่งออกได้เป็นเป็น3 ส่วนคือ ส่วนคอนเดนเซอร์(Condenser section) , ส่วนอีแวปโพเรเตอร์ (Evaporator section) และ ส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน (Adiabatic section)

การทำงานของ ฮีตไปป์ เมื่อส่วนอีแวปโพเรเตอร์ของ ฮีตไปป์ ได้รับความร้อนทำให้ของไหลใช้งานเกิดการระเหยตัวกลายเป็นไอแล้วไหลไปสู่ส่วนคอนเดนเซอร์ จากนั้น ของไหลใช้งานจะทำการคายความร้อนแล้วเกิดการกลั่นตัวกลายเป็นของเหลวแล้วไหลไปตามวิก (Wick) กลับไปที่ส่วนอีแวปโพเรเตอร์ใหม่ ที่ของไหลใช้งานไหลจากส่วนคอนเดนเซอร์มาสู่ส่วนอีแวปโพเรเตอร์ได้โดยอาศัย แรงทางคาปิลารี่ (Capillary action)

ต่อไปนี้จะกล่าวถึงหลักการในการเลือกองค์ประกอบทั้งสามส่วนและหลักการในการวิเคราะห์การทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีตไปป์

4.1 การเลือกของไหลใช้งาน

ขั้นตอนแรกในการเลือกของไหลใช้งานที่เหมาะสม ต้องคำนึงถึงช่วงของอุณหภูมิที่ใช้งานว่าเหมาะสมกับของไหลใช้งานชนิดใด จากตารางที่ 4.1 และ 4.2 จะเห็นว่าที่ช่วงของอุณหภูมิหนึ่งสามารถเลือกของไหลใช้งานได้มากกว่า 1 ชนิด ดังนั้นต้องดูคุณสมบัติอื่นๆ มาพิจารณา เพื่อเลือกของไหลใช้งานที่เหมาะสมที่สุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 ตารางการเลือกของไหลใช้งาน (Dunn, and Reay, 1978)

Medium	Melting point (°C)	Boiling point at atmos. Press. (°C)	Useful range (°C)
Hellium	-272	-269	จาก -271 ถึง - 269
Nitrogen	-210	-196	จาก -203 ถึง - 160
Ammonia	-78	-33	จาก -60 ถึง 100
Freon 11	-111	24	จาก -40ถึง120
Pentane	-130	28	จาก -20 ถึง120
Freon 113	-35	48	จาก -10 ถึง 100
Acetone	-95	5	จาก 0 ถึง 120
Methanol	-98	64	จาก10 ถึง 130
Flutec PP2*	-50	76	จาก 10 ถึง 160
Ethanol	-112	78	จาก 0 ถึง130
Heptane	-90	98	จาก 0 ถึง 150
Water	0	100	จาก 30 ถึง200
Flutec PPg*	-70	160	จาก 0 ถึง 225
Thermex	12	257	จาก 150 ถึง 395
Mercury	-39	361	จาก 250ถึง 650
Caesium	29	670	จาก450 ถึง 900
Potassium	62	774	จาก500 ถึง 1000
Sodium	98	892	จาก 600 ถึง 1,200
Lithium	179	1,340	จาก 1,000 ถึง 1,800
Silver	960	2,212	จาก 1,800 ถึง 2,300

* Included for cases where electrical insulation is a requirement

ตารางที่ 4.2 ตารางการเลือกของไหลใช้งาน

Temperature Range (K)	Working Fluid	Vessel Material	Measured Axial Heat Flux[a] (W/cm^2)	Measured Surface Heat Flux[a] (W/cm^2)
230 - 400	Methanol[b]	Copper, nickel, Stainless steel	0.45 at 373 K	75.5 at 373 K
280 - 500	Water	Copper, nickel	0.67 at 473 K	146 at 443 K
360 - 850	Mercury[c]	Stainless steel	25.1 at 533 K	181 at 533 K
673 – 1,073	Potassium	Nickel, Stainless steel	5.6 at 1,023 K	181 at 1,023 K
773 – 1,173	Sodium	Nickel, Stainless steel	9.3 at 1,123 K	224 at 1,033 K

[a] Varies with temperatyre

[b] Using threaded artery wick

[c] Based on sonic limit in heat pipe

ปัจจัยพื้นฐานที่จะต้องนำมาประกอบการพิจารณาเลือกของไหลใช้งานมีดังต่อไปนี้

1. ความเหมาะสมกับวัสดุที่ใช้ทำท่อ
2. เสถียรภาพเชิงความร้อน
3. ความสามารถในการเกาะเปียกกับวัสดุที่ใช้ทำท่อ
4. ความดันไอในช่วงอุณหภูมิใช้งาน
5. ค่าความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอ
6. ค่าการนำความร้อน
7. ค่าความหนืดของของเหลวและไอ
8. จุดแข็งตัวและจุดไหลต่างจากอุณหภูมิใช้งานในช่วงที่ยอมรับได้

4.1.1 ความเหมาะสมกับวัสดุที่ใช้ทำท่อ

จะต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมของของไหลใช้งานกับวัสดุที่ใช้ทำท่อ ว่าทำปฏิกริยากันหรือไม่ส่วนรายละเอียดในการพิจารณาความเหมาะสมกับการเลือกวัสดุที่ใช้ทำท่อ จะกล่าวในหัวข้อต่อไป

4.1.2 เสถียรภาพเชิงความร้อน

สิ่งหนึ่งที่ควรคำนึงถึง คือการสลายตัวของสารพวกอินทรีย์ ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นเนื่องจากความร้อน ดังนั้นจึงควรเลือกของไหลใช้งานที่มีเสถียรภาพเชิงความร้อนสูงในช่วงอุณหภูมิใช้งานที่ต้องการ

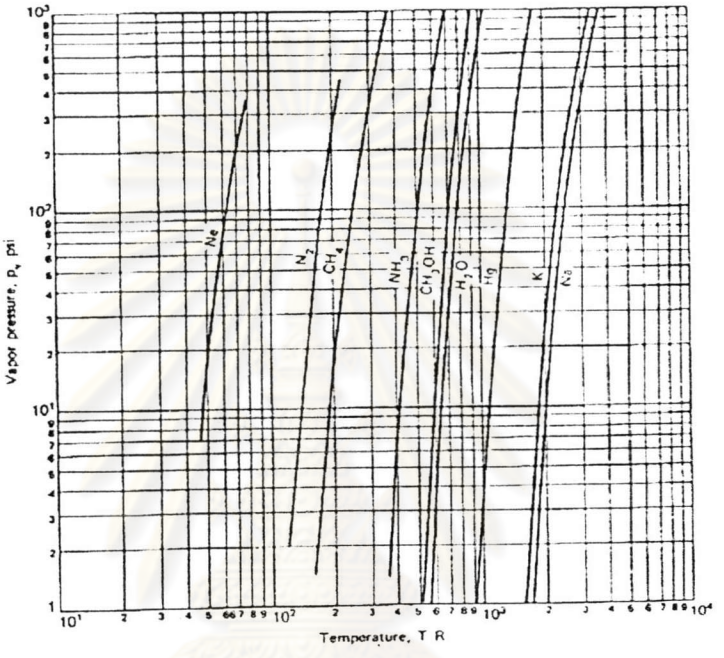
4.1.3 ความสามารถในการเกาะเปียกของวัสดุที่ใช้ทำท่อ

ความสามารถในการเปียกของวัสดุที่ใช้ทำท่อ หมายถึง การที่ของไหลใช้งานจะต้องเกาะเปียกผิวของวัสดุที่ใช้ทำท่อได้ดี นั่นคือ มุมสัมผัสระหว่างผิวของหยดของไหล กับวัสดุที่ใช้ทำท่อ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.4 ความดันไอในช่วงอุณหภูมิใช้งาน

ความดันไอของของไหลใช้งานตลอดช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน จะต้องมีค่าสูงเพียงพอ ต้องพยายามหลีกเลี่ยงไม่ให้ไอของของไหลใช้งานมีความเร็วน้อยเกินไป ซึ่งจะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิตามแนวท่อฮีตไปป์สูง อย่างไรก็ตามความดันไอในท่อฮีตไปป์ก็ไม่ควรสูงมากนักเพราะจะทำให้ต้องใช้ผนังของฮีตไปป์หนาดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ค่าความดันไอกับอุณหภูมิของของไหลใช้งานในฮีตไปป์ (Chi, 1976)

(1 psi=6.895*10^3 N/m^2, 1R = 0.5556K)

4.1.5 ค่าความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอ

ของไหลที่มีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอสูง จะสามารถถ่ายเทความร้อนได้ในอัตราสูง และมีอัตราการไหลของของไหลใช้งานต่ำ นำไปสู่ การลดลงของการสูญเสียความดัน (pressure drop) ด้วย

4.1.6 การนำความร้อนสูง

ของไหลใช้งานควรมีค่าการนำความร้อนสูง ซึ่งจะนำไปสู่ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิในแนวรัศมีของท่อมีค่าต่ำ

4.1.7 ค่าความหนืดของของเหลวและไอ

ของไหลใช้งานทั้งในสถานะของเหลวและไอ ควรมีค่าความหนืดต่ำ เพื่อจะทำให้การไหลของของไหลใช้งาน เกิดการไหลเวียนได้เร็ว เนื่องจากความต้านทานของการไหลมีค่าน้อย

4.1.8 จุดแข็งตัว และจุดไหล

ของไหลใช้งานจะต้องมีสภาวะเป็นของเหลว และมีจุดไหล (pour point) ห่างจากช่วงของอุณหภูมิใช้งานมากพอ เพื่อให้ของเหลวที่ควบแน่นในช่วงการควบแน่นสามารถไหลกลับสู่ช่วงการระเหยได้ทัน

ในกรณีที่มีของไหลใช้งานให้เลือกใช้งานได้มากกว่าหนึ่งชนิด เราอาจใช้ตัวเลขเมอริท (Merit Number,M) หรือ Liquid Transport Factor เป็นเกณฑ์ในการเลือกสารที่ให้การถ่ายเทความร้อนสูงดังนี้

$$M = \frac{\rho_l \sigma \ h_{fg}}{\mu_l} \qquad (4.1)$$

(Dunn, and Reay, 1978)

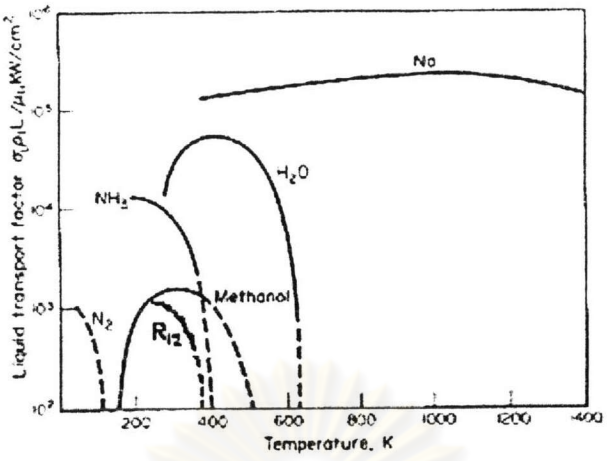
เมื่อ ρ_l = ความหนาแน่นของของไหลใช้งานในรูปของของเหลว

σ = ค่าแรงดึงผิวของของไหลใช้งาน

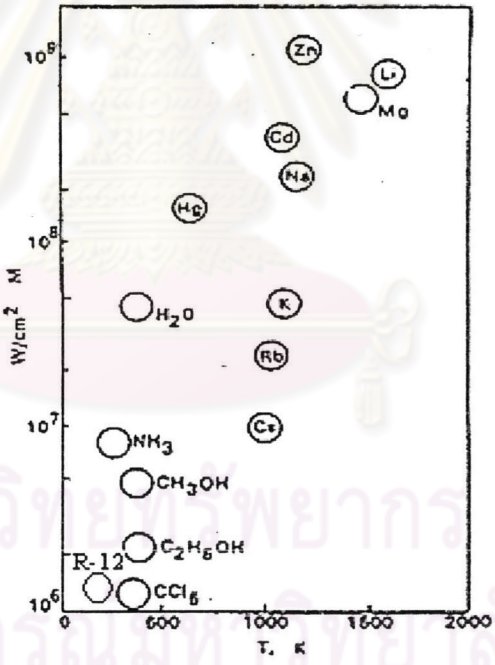
h_{fg} = ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของของไหลใช้งาน

μ_l = ค่าความหนืดของของไหลใช้งานในช่วงของของเหลว

นอกจากประเด็นต่างๆข้างต้น สิ่งต้องคำนึงประการต่อมาคือ ราคา และความยากง่ายในการซื้อในรูปที่ 4.2 จะแสดงถึงค่า เมอริท ของของไหลใช้งานต่างๆ ซึ่งค่าเหล่านี้สามารถคำนวณมาจากสมการที่ 1 และจากรูปที่ 4.3 จะแสดงค่าเมอริท ที่จุดเดือดของของไหลใช้งานต่างๆ ที่ความดันบรรยากาศ ส่วนในตารางที่ 4.3 แสดงถึงค่าการเปรียบเทียบกันระหว่าง จุดเดือด ช่วงอุณหภูมิการใช้งาน การเลือกวิกและตัวท่อของฮีตไปป์ กับค่าเมอริท เพื่อสะดวกในการพิจารณา



รูปที่ 4.2 ค่าตัวเลขเมอริทในการเลือกของไหลใช้งาน (Dunn, and Reay, 1978)



รูปที่ 4.3 ค่าเมอริทจุดเดือดของของไหลใช้งานต่างๆ
ที่ความดันบรรยากาศ (Dunn, and Reay. , 1978)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 ค่าของจุดเดือดของของไหลใช้งานในช่วงอุณหภูมิ –200 ถึง 1500 องศาเซลเซียส

Normal Operating Temperature range °C	Working Fluid	Properties at atmosphericpressure		Suitable material for shell and wick
		Boiling point °C	Liquid transport factor kW/m^2	
-200 to -170	Nitrogen	-196	$9*10^6$	Stainless steel
-70 to 50	Ammonia	-33	$1*10^8$	Stainless steel, nickel, aluminum
-60 to 40	Freon 12	-30	$1*10^7$	Stainless steel, copper
-30 to 100	Methanol	65	$5*10^7$	Copper
10 to 200	Water	100	$5*10^8$	Copper, nickel
190 to 500	Mercury	356	$2*10^9$	Stainless steel
400 to 800	Potassium	760	$5*10^8$	Stainless steel
500 to 900	Sodium	883	$2*10^9$	Stainless steel
900 to 1500	Lithium	1330	$8*10^9$	Tantalum, TZM

ในการทดสอบนี้ได้ทำการเลือกของไหลใช้งานคือ Methanol ซึ่งเหตุผลที่ตัดสินใจเลือกเพราะ

1. สาร Methanol มีค่าเมอริทอยู่ในช่วงการใช้งาน
2. สาร Methanol สามารถเติมได้ง่ายและหาซื้อง่ายราคาไม่สูงและไม่ทำปฏิกริยากับท่อทองแดง
3. สาร Methanol มีค่าแรงตึงผิวสูง ในช่วงอุณหภูมิที่ออกแบบ
4. การบรรจุสาร Methanol ใส่ท่อทองแดง สำหรับช่วงอุณหภูมิที่ทดลอง สามารถเติมได้เลย ไม่ต้องทำการดึงอากาศออกก่อน

4.2 การเลือกวัสดุที่ใช้ทำท่อฮีตไปป์

หน้าที่ของท่อฮีตไปป์คือ แยกของไหลใช้งานจากของไหลภายนอก ดังนั้นตัวท่อฮีตไปป์ต้องสามารถทนต่อความดันภายในท่อ และภายนอกท่อได้ และสามารถทำการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ภายในได้ดี นั่นคือมีค่าสภาพนำความร้อนสูง

ในการเลือกวัสดุที่จะนำมาทำท่อ จะต้องพิจารณาปัจจัยต่อไปนี้

1. ความเหมาะสมกันระหว่างวัสดุที่ใช้ทำท่อกับของไหลใช้งานที่อยู่ภายใน และกับของไหลภายนอก

2. อัตราส่วนของความแข็งแกร่งต่อน้ำหนักของวัสดุที่จะใช้ทำตัวท่อ

3. การนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำท่อ

4. ความยากง่ายในการขึ้นรูป การเชื่อม

5. ความสามารถในการเกาะเปียกของของไหลใช้งานที่อยู่ภายในและของไหลภายนอกกับวัสดุที่ใช้ทำท่อ

4.2.1 ความเหมาะสมกันระหว่างวัสดุที่ใช้ทำท่อกับของไหลใช้งานที่อยู่ภายในและกับของไหลภายนอก

การพิจารณาเลือกวัสดุที่ใช้ทำท่อนั้น จะต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมของวัสดุและของไหลทั้ง 2 ด้าน โดยจะพิจารณาถึงการกัดกร่อนเป็นประเด็นสำคัญดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การเข้ากันได้ระหว่างท่อกับของไหลใช้งาน (Chi, 1976)

FLUIDS	Solids					
	Al	Cu	Fe	Ni	Ss[a] 304	Ti
Nitrogen	C[b]	C	C	C	C	
Methane	C	C			C	
Ammonia	C		C		C	
Methanol	I	C	C	C	C	
Water	I	C		C	C[c]	C
Potassium				C		I
Sodium				C	C	I
Freon 12		C			C	

[a]SS = Stainless Steel

[b]C = Compatible; I = Incompatible; Blank = Data not available

[c]Possible hydrogen generation

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

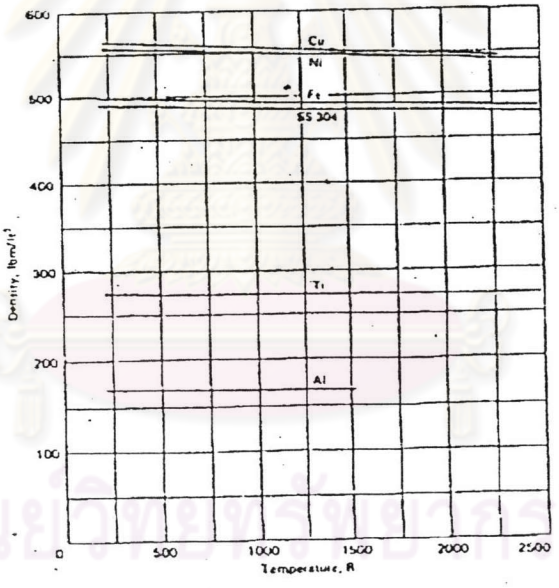
ปัญหาประการต่อมาคือการเกิดการสร้างก๊าซซึ่งไม่ควบแน่น (non-condensable gas)

การผุกร่อนของวัสดุท่อเพียงเล็กน้อย ก็จะทำให้คุณสมบัติของผิวท่อภายในเปลี่ยนไป ผลก็คือมุมของการเปียกผิวระหว่างของไหลใช้งานกับผิวท่อจะเปลี่ยนไป อีกทั้งยังอาจจะเกิดเศษอนุภาค

ของของแข็งที่เกิดขึ้นจะกีดขวางการไหลกลับของของไหลใช้งาน หรืออาจเกิดก๊าซที่ไม่ควบแน่นขึ้น ผลก็คือทำให้สมรรถนะของฮีทไปป์ต่ำลง

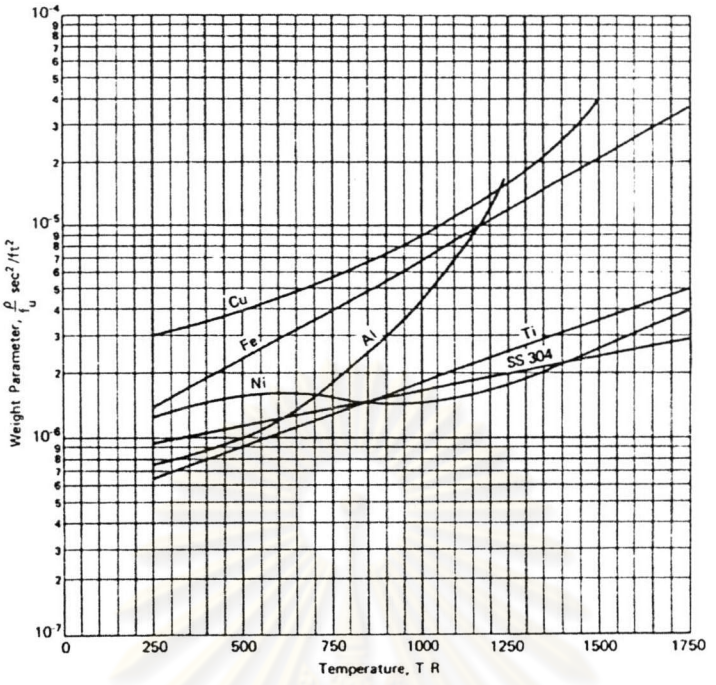
4.2.2 อัตราส่วนของความแข็งแกร่งต่อน้ำหนักของวัสดุที่ใช้ทำต่อฮีทไปป์

น้ำหนักของวัสดุที่ใช้ ก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ต้องนำมาคิดเพราะอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจำเป็นต้องใช้ฮีทไปป์จำนวนหลายอัน จะมีกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอุณหภูมิของวัสดุต่างๆ ถูกแสดงในรูปที่ 4.4 โดยน้ำหนักรวมของท่อนั้นจะแปรผันตามผลคูณของความหนาของผนังท่อกับความหนาแน่นของวัสดุ แต่ความหนาของท่อที่สามารถทนต่อความดันไอของของไหลใช้งานได้นั้น จะแปรผกผันกับค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดของวัสดุ (Ultimate tensile strength , f_u) นั้นคือ น้ำหนักของท่อที่ใช้จะแปรผันตามพารามิเตอร์น้ำหนัก (Weight Parameter, C/f_u) รูปที่ 4-5 แสดงค่าความหนาแน่นและค่าพารามิเตอร์น้ำหนักของวัสดุชนิดต่างๆ



รูปที่ 4.4 ความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้ทำท่อชนิดต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

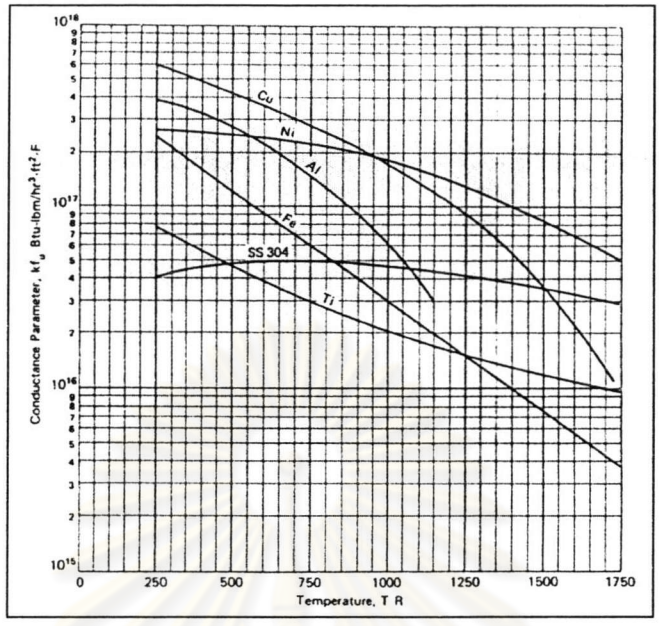


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ρ / f_u) กับ อุณหภูมิ (Chi, 1976)

4.2.3 การนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำท่อ

เกรเดียนต์ค่าของอุณหภูมิในแนวรัศมีผ่านวัสดุที่ใช้ทำท่อฮีตไปป์จะแปรผกผันกับค่าสภาพนำความร้อนขอวัสดุ (Thermal Conductivity) และค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดของวัสดุ (f_u) นั้นคือแปรผกผันกับพารามิเตอร์การนำความร้อน (conductance parameter, kf_u) ดังแสดงในรูปที่ 4.6

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.6 ค่า (kf_g) ที่อุณหภูมิใช้งานต่างๆของวัสดุ (Chi, 1976)

จากรูปดังกล่าวจะเห็นได้ว่าทองแดงมีค่าพารามิเตอร์การนำความร้อน (kf_g) สูงกว่าวัสดุชนิดอื่นๆ ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 1,000 R (555.6K) ซึ่งหมายความว่าในช่วงอุณหภูมินี้ทองแดงมีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิน้อยที่สุด

อนึ่งปัจจัยที่สำคัญที่ต้องไม่ลืมคือ ราคาของวัสดุ ปัญหาของความยากง่ายในการขึ้นรูป การเชื่อม และอุปสรรคต่างๆที่จะเกิดขึ้นในการสร้างและการนำไปใช้งาน

ในการทดสอบนี้ได้ทำการเลือกท่อทองแดงเนื่องมากจาก

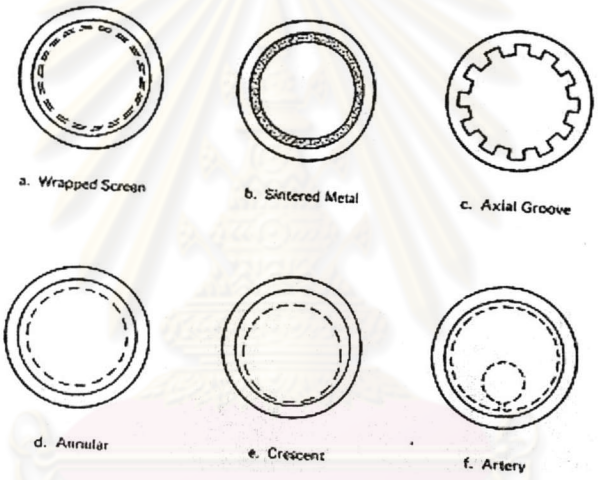
1. ทองแดงนำความร้อน, มีความหนาแน่นสูงและมีความแข็งแรงสูง
2. ทองแดงมีคุณลักษณะการเกาะเปียกที่ดี
3. ทองแดงไม่ทำปฏิกริยากับของไหลใช้งานคือ Methanol
4. ท่อทองแดงมีราคาไม่สูงและสามารถนำมาขึ้นรูปดัด งอ ได้ง่าย

4.3 การเลือกวิก (Wick)

วิกที่ดีควรมีคุณสมบัติการไหลย้อนกลับที่ดีกล่าวคือ ของไหลใช้งานสามารถไหลจากส่วนของคอนเดนเซอร์กลับไปสู่ส่วนของอีแวพอเรเตอร์ได้เร็ว

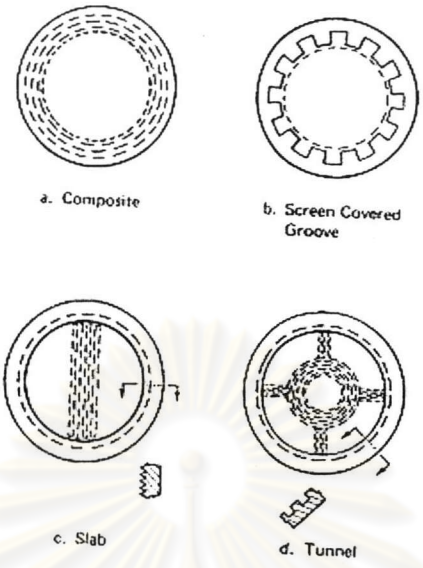
วิกกล่าวโดยกว้างๆ ประกอบด้วย 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. SIMPLE HOMO GENEOUS WICK เป็นวิกที่ประกอบด้วยโลหะชนิดเดียว
2. CURRENT COMPOSITE WICK เป็นวิกที่ประกอบด้วยโลหะ2ชนิดขึ้นไป
3. ADVANCED DESIGNS WICK เป็นวิกที่องค์ประกอบที่ซับซ้อน

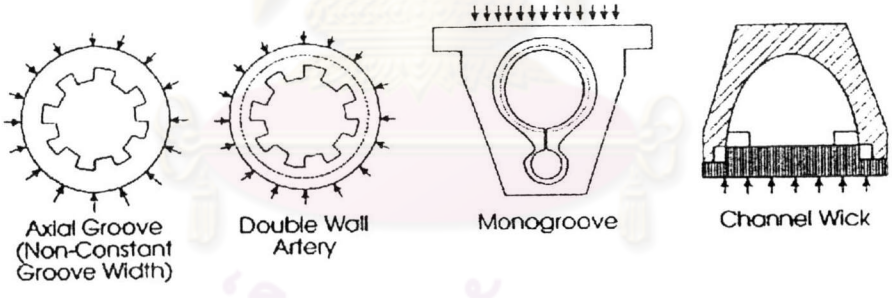


รูปที่ 4.7 ภาพแสดงวิกที่ทำมาจากวัสดุชนิดเดียวกัน (Chi, 1976)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.8 ภาพแสดงวิกที่ทำมาจากวัสดุต่างชนิดมาผสมกัน (Chi, 1976)



รูปที่ 4.9 ภาพแสดงวิกที่มีการออกแบบอย่างซับซ้อน (PETERSON, 1978:55)

โดยที่วิกแต่ละแบบจะมีค่า K (Wick Permeability) ที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 4.5

ดังนั้นในการจะเลือกวิกแบบไหนมาใช้มักจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการประดิษฐ์และลักษณะของการใช้งาน เช่นความสามารถในการตัดโค้งเป็นรูปตัวยูของท่อ

ตารางที่ 4.5 ค่าของ K(Wick Permeability) ของโครงสร้างวิกแบบต่างๆ (Chi, 1976)

Wick structures	K Expressions	
Circular artery	$K = \frac{r^2}{8}$	
Open rectangular grooves	$K = \frac{2\epsilon r_{h,l}^2}{(f_l \mathrm{Re}_l)}$	ϵ = porosity = $\frac{w}{s}$ s = groove pitch $r_{h,l} = \frac{2w\delta}{w + 2\delta}$ w = groove width δ = groove depth $(f_l \mathrm{Re}_l)$ from Fig. 2-4
Circular annular wick	$K = \frac{2r_{h,l}^2}{(f_l \mathrm{Re}_l)}$	$r_{h,l} = r_1 - r_2$ $(f_l \mathrm{Re}_l)$ from Fig. 2-5
Wrapped screen wick	$K = \frac{d^2\epsilon^3}{122(1-\epsilon)^2}$	d = wire diameter $\epsilon = 1 - \frac{1.05\pi Nd}{4}$ N = mesh number
Packed sphere	$K = \frac{r_s^2\epsilon^3}{37.5(1-\epsilon)^2}$	r_s = sphere radius ϵ = porosity (value depends on packing mode)

ในการทดสอบนี้ทำการเลือกวิกคือแบบ ไมโครกรูฟ และ ลวดตาข่ายโดย ไมโครกรูฟที่ใช้มีขนาดความลึก 0.2 ม.ม. ซึ่ง R. Marto and H. Weigel (15) ได้กำหนดว่า วิกแบบไมโครกรูฟ คือ กรูฟที่มีร่องลึก เกิน 0.5 ม.ม. ขึ้นไป ส่วนลวดตาข่ายที่เลือกทำจาก สแตนเลส ซึ่ง ตาข่ายเบอร์ 400 ซึ่งทั้งท่อเกลียวที่เลือก และ ลวดตาข่ายนั้น สามารถหาซื้อได้ไม่ยากนัก ไม่ทำปฏิกริยากับของไหลใช้งานและท่อ และมีคุณลักษณะของแรง Capillary ได้ดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย