

บรรณานุกรม

1. Gaugler, R.S., "Heat Transfer Devices," U.S. Pat 2,350,348, 1944.
2. Grover, G.M., "Evaporation-condensation Heat Transfer Device," U.S. Pat 3,229,759, 1963.
3. Reay, D.A., "Heat Pipe," Phys. Technol., Vol. 16, 1985.
4. Dunn, P., Reay, D.A., Heat Pipe, Pergamon Press, Great Britain, 3 rd ed., 1983.
5. Feldman, Jr. K.T., Srinivasan, R., "Investigation of Heat Transfer Limits in Two-Phase Closed Thermosyphons," 5th IHPC, 1984.
6. Negishi, K., Sawada, T., "Heat Transfer Performance of Inclined Two-Phase Closed Thermosyphon," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 26, No.8, pp. 1207-1213, 1983.
7. Negishi, K., "Thermo-Fluidynamics of Two-Phase Thermosyphons," 5th IHPC, 1984.
8. Shiraishi, M., Yoneya, M., Yabe, A. "Visual Study of Operating Limit in the Two-Phase Closed Thermosyphon," 5th IHPC, 1984.
9. Yabe, A., et al., "Studies of Enhanced Boiling Surfaces For Two-Phase Closed Thermosyphons," 5th IHPC, 1984.
10. Read, D.A. , Heat Recovery Systems, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1979.
11. Lee, Y., Bedrossian, A., "The Characteristic of Heat Exchangers Using Heat Pipes or Thermosyphons," Int. J. Heat Mass Transfer, vol.21, pp. 221-9, 1978.

12. Chaudourne, S., "Modelization And Optimization of Heat Pipe Heat Exchangers," 5th IHPC , 1984.
13. Krishnan, K.N., Rao, K.S., "Analysis and Design of a Heat Pipe Heat Exchanger," 5th IHPC, 1984.
14. Andros, F.E., "Heat Transfer Characteristics of the Two-Phase Closed Thermosyphon (Wickless Heat Pipe) Including Direct Flow Observation," Ph.D. dissertation, Arizona State University, 1980.
15. Casarosa, C., Latrofa, E. "The Geyser Effect in a Two-Phase Thermosyphon," Int. J. Heat Mass Transfer, V. 26, No.6, pp. 933-941, 1983.
16. Tu, C., Xie, G., Hu, C., Gao, Z., Hong, R., "The Two-Phase Closed Thermosyphon: An Experimental study with Flow Pattern and Optimum Fill Charge," Two-Phase Flow and Heat Transfer. (Chen, x.j., Veziroglu, T.N., eds.), Hemisphere Publishing Corporation, U.S.A., 1985.
17. Imura, H., Sasaguchi, K., Kozai, H., "Critical Heat Flux in a Closed Two-Phase Thermosyphon," Int. J. Heat Mass Transfer, v.26, No.8, pp. 1181-1188, 1983.
18. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล, "การสร้างฮีทไพป์และการทดสอบสมรรถนะของฮีทไพป์." รายงานทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทสาขาวิชาการ, สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 2526.
19. ชุมพล สุริยฉาย, "การออกแบบและสร้างฮีทไพป์," วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2526.
20. Kabac, S., Bergles, A.E., Mayinger, F., Heat Exchangers, Hemisphere Publishing Corporation, 1981.

21. Ozisik, M.N., Heat Transfer, Mc Graw-Hill Book Company, 1985.
22. Whitaker, S., "Forced Convection Heat Transfer Calculation for flow in Pipes, past Flat Plates, Single Cylinders, and for flow in Packed Bed and Tube Bundle," AICHE J., 18, pp. 361-371, 1972.
23. Shiraishi, M., Kikuchi, K., Yamanishi, T., "Investigation of Heat Transfer Characteristics of a Two-Phase Closed Thermosyphon," Advances in Heat Pipe Technology (Reay, D.A., ed.), pp. 95-104, Pergamon Press, 1982.
24. Kobayashi, K., Yamamoto, T., Kuroki, T., Nagata, K., "Heat Transfer Performance of a Two-Phase Closed Thermosyphon," 5th IHPC, 1984.
25. Wen, Y., Guo, S., "Experimental Heat Transfer Performance of Two-Phase Thermosyphons," 5th IHPC, 1984.
26. Lee, Y., Clements, B.R., "An Analysis of Heat Exchangers Using Finned Two-Phase Closed Thermosyphons," 5th IHPC, 1984.
27. Rohsenow, W.M., Hartnett, J.P., Handbook of Heat Transfer, chap 13, Mc Graw-Hill Book Co., New York, 1973.
28. Stule, P., Vasiliev, L.L., Kiseljev, V.G., Matvejev, Ju. N., "Heat Pipe Heat Exchangers in Heat Recovery Systems," Heat Recovery Systems, V.5, No.5, pp 415-418, 1985.
29. วิวัฒน์ ตันทะพานิชกุล "โครงการการศึกษา ทดสอบและสร้างโมเดลคณิตศาสตร์สำหรับการทำงานของฮีทไปป์" รายงานผลการวิจัยทุนวิจัยรัชดาภิเษกสมโภช, 2526.

30. สมใจ ฉิเชียรโสภณ "การศึกษาเกี่ยวกับสมรรถนะและการสร้างแบบจำลองของฮีทไปป์" วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2526.
31. Kays, W.M., London, A.L., Compact Heat Exchangers, 2nd ed, Mc Graw-Hill Book Company, 1964.
32. Krishnan, K.N., Rao, K.S., "Analysis and Design of a Heat Pipe Heat Exchanger," 5th IHPC, 1984.
33. Chaudourne, S. "Modelization and Optimization of Heat Pipe Heat Exchangers," 5th IHPC, 1984.
34. Perry, H.R., Green, D.W., Maloney, J.O., Perry's Chemical Engineering Handbook, Mc Graw-Hill Book Co., 6 th ed., 1984.
35. Kern, D.Q., Process Heat Transfer , Mc Graw- Hill Book Co., 1950.
36. Chi, S.W., Heat Pipe Theory and Practice, Hemisphere Publishing corporation, 1976.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

การออกแบบฮีทไปป์ไร้วิกค์

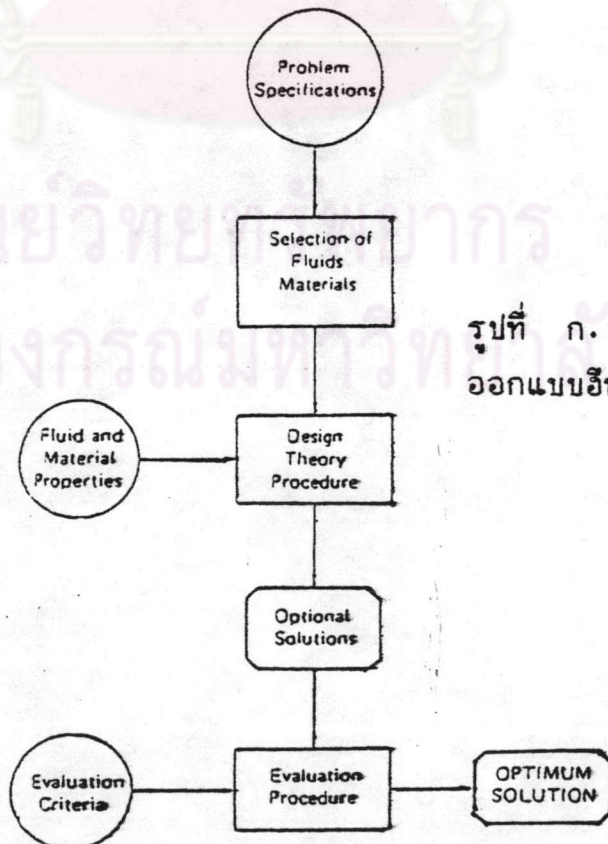
ก. การออกแบบฮีทไปป์ไร้วิกค์ (4), (18), (19), (36)

ก.1 การเลือกส่วนประกอบต่าง ๆ ของฮีทไปป์ไร้วิกค์

ฮีทไปป์ไร้วิกค์ประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วนคือ

1. ของไหลใช้งาน
2. ท่อปิดผนึก

ก่อนที่จะทำการออกแบบและสร้างท่อฮีทไปป์ไร้วิกค์ จำเป็นต้องพิจารณาเลือกส่วนประกอบทั้งสองให้มีความเหมาะสมซึ่งกันและกัน ดังขั้นตอนที่แสดงไว้ในรูปที่ ก. 1



รูปที่ ก.1 ขั้นตอนการออกแบบฮีทไปป์ไร้วิกค์



ก.1.1 การเลือกของไหลใช้งาน

ก.1.1.1 คุณสมบัติของของไหลใช้งาน ในขั้นแรกต้องเลือกของไหลใช้งานให้เหมาะสมกับอุณหภูมิใช้งานของไอในฮีทไปป์ไรวัคค์ ตารางที่ ก.1 แสดงชนิดของของไหลใช้งานที่ใช้ได้ที่อุณหภูมิไอต่าง ๆ ถ้ามีของไหลใช้งานให้เลือกมากกว่า 1 ชนิด ควรเลือกของไหลใช้งานที่มีคุณสมบัติเฉพาะดังต่อไปนี้

ตารางที่ ก.1 ชนิดของไหลใช้งานที่ช่วงอุณหภูมิใช้งานต่าง ๆ

Medium	Melting point (°C)	Boiling point at atmos.press. (°C)	Useful range (°C)
Helium	-272	-269	-271 - -269
Nitrogen	-210	-196	-203 - -160
Ammonia	-78	-33	-60 - 100
Freon 11	-111	24	-40 - 120
Pentane	-130	28	-20 - 120
Freon 113	-35	48	-10 - 100
Acetone	-95	57	0 - 120
Methanol	-98	64	10 - 130
Flutec PP2*	-50	76	10 - 160
Ethanol	-112	78	0 - 130
Heptane	-90	98	0 - 150
Water	0	100	30 - 200
Flutec PP9*	-70	160	0 - 225
Thermex	12	257	150 - 395
Mercury	-39	361	250 - 650
Caesium	29	670	450 - 900
Potassium	62	774	500 - 1000
Sodium	98	892	600 - 1200
Lithium	179	1340	1000 - 1800
Silver	960	2212	1800 - 2300

* Included for cases where electrical insulation is a requirement

1. จะต้องเข้ากันได้ดีกับวัสดุ
2. ทนความร้อนได้ดี (เสถียรภาพเชิงความร้อนสูง)
3. เบี่ยงผิววัสดุท่อได้ดี
4. ความดันไอไม่สูงหรือไม่น้อยเกินไปที่อุณหภูมิใช้งาน
5. มีค่าความร้อนแฝงของการระเหยสูง
6. มีความหนืดต่ำทั้งในสภาพของเหลวและไอ
7. มีค่าความนำความร้อนสูง
8. มีจุดเยือกแข็งและจุดหลอมตัวที่ยอมรับได้

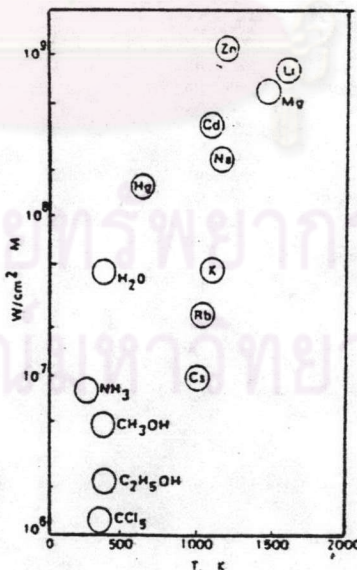
ก.1.1.2 ตัวเลขเมอริท (Merit number)

การเลือกชนิดของไหลใช้งานที่มีลักษณะสมบัติเฉพาะข้างต้น เป็นเรื่องไม่่ง่ายนัก ดังนั้นในบางครั้งจะใช้ตัวเลขเมอริท M เป็นตัวตัดสินแทน โดยที่

$$M = \frac{\sigma_L \rho_L \lambda}{\mu_L} g_c \quad (W/cm^2) \quad (ก.1.1)$$

ρ_L = ความหนาแน่นของของเหลว (g/cm^3)
 σ_L = แรงตึงผิวของของเหลว (g_m/cm)
 λ = ความร้อนแฝงของการระเหย (J/gm)
 μ_L = ความหนืดของของเหลว ($g/cm \cdot sec$)
 g_c = ตัวแปรหน่วย ($980.7 g_m \cdot cm / g_m \cdot sec^2$)

รูปที่ ก.2 แสดงค่าตัวเลขเมอริทของของไหลใช้งานตัวสำคัญในช่วงอุณหภูมิการใช้งานต่าง ๆ ถ้าค่าตัวเลขเมอริทของของไหลใช้งานใดมีค่าสูง แสดงว่าของไหลใช้งานนั้นมีความเหมาะสมมาก แต่ยังคงจำเป็นต้องคำนึงถึงราคา ความปลอดภัยและฤทธิ์กัดกร่อนของของไหลใช้งานนั้นด้วย



รูปที่ ก.2 ค่าตัวเลขเมอริทของของไหลใช้งานที่อุณหภูมิจุดเดือด

ก.1.2 การเลือกวัสดุท่อ

ก.1.2.1 ความเข้ากันได้ (Compatibility)

การเลือกวัสดุที่ใช้ทำท่อต้องคำนึงถึงความเข้ากันได้กับของไหลใช้งาน เป็นสำคัญ โดยพิจารณาว่าจะเกิดปฏิกิริยาเคมีการสลายตัวของของไหลใช้งาน และการกัดกร่อนของท่อหรือไม่ ถ้ามีปรากฏการณ์ใดปรากฏการณ์หนึ่งเกิดขึ้น ก็แสดงว่าวัสดุท่อไม่เหมาะสม

ปฏิกิริยาเคมีหรือการสลายตัวของของไหลใช้งานจะทำให้เกิดก๊าซที่ไม่สามารถควบแน่นได้ขึ้นภายในท่อฮีทไปป์ ซึ่งแม้แต่ปริมาณเพียงนิดเดียว ก็จะทำให้สมรรถนะของฮีทไปป์ต่ำลงได้

การผุกร่อนของวัสดุท่อจะทำให้คุณสมบัติของผิววัสดุเปลี่ยนไป ผลก็คือมุมของการเปียกผิวระหว่างของเหลวกับวัสดุเปลี่ยนแปลงไป อีกทั้งยังอาจเกิดเศษอนุภาคของแข็งขึ้นกีดขวางการไหลกลับของของเหลวใช้งาน หรือเกิดก๊าซขึ้น ผลก็คือสมรรถนะของฮีทไปป์ก็จะต่ำลง ความเข้ากันได้ของวัสดุกับของไหลใช้งานต่าง ๆ มีแสดงไว้ในตารางที่ ก.2

Fluids	Al	Cu	Fe	Ni	SS ^a 304	Ti
Nitrogen	C ^b	C	C	C	C	
Methane	C	C			C	
Ammonia	C		C	C	C	
Methanol	I	C	C	C	C	
Water	I	C		C	C ^c	C
Potassium				C		I
Sodium				C	C	I

^aSS = stainless steel.

^bC = compatible; I = incompatible; blank = data not available.

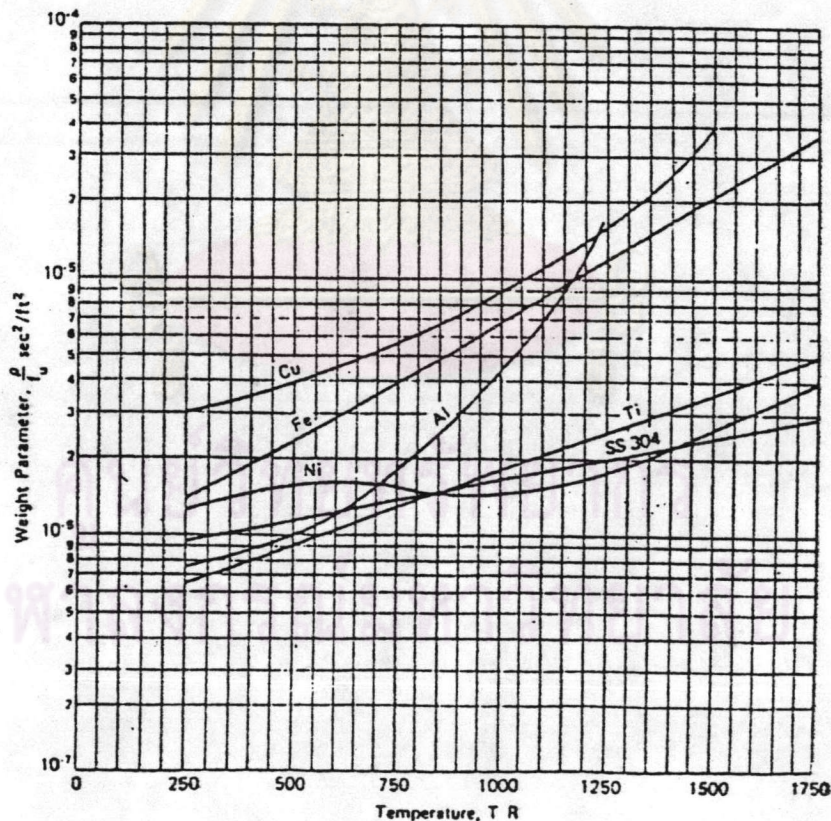
^cPossible hydrogen generation.

ตารางที่ ก.2 ความเข้ากันได้ระหว่างของไหลใช้งานกับวัสดุท่อ

ก.1.2.2 น้ำหนักและผลลตอณภูมิของวัสดุ

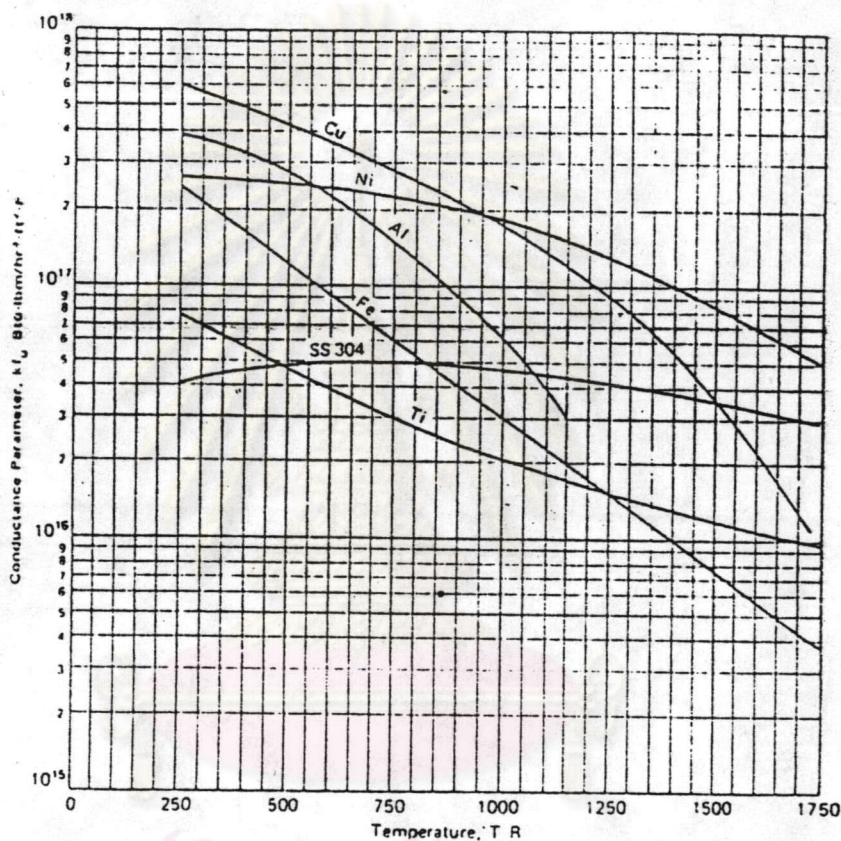
นอกจากจะคำนึงถึงความเข้ากันได้แล้ว ยังต้องสนใจน้ำหนักของวัสดุ และผลลตอณภูมิที่เกิดขึ้นอีกด้วย

ก.1.2.2.1 น้ำหนักของวัสดุที่ขึ้นแปรผันตามผลคูณของความหนาของท่อกับความหนาแน่นของวัสดุ (ให้รูปทรงภายนอกคงที่) แต่ความหนาของท่อที่สามารถทนต่อแรงดันไอได้จะแปรผกผันกับความทนแรงดึงสูงสุดของวัสดุ (Ultimate tensile strength, UTS, f_u) นั่นคือน้ำหนักของวัสดุท่อที่ใช้จะแปรผันโดยตรงกับ (ρ / f_u) รูปที่ ก.3 แสดงค่า (ρ / f_u) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของวัสดุแต่ละชนิด



รูปที่ ก.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ρ / f_u) กับอุณหภูมิ

ก.1.2.2.2 ผลลตของอุณหภูมิ ผลลตของอุณหภูมิจะแปรผันโดยตรงกับความหนาของผนังท่อและแปรผกผันกับค่าความนำความร้อน (k) ของวัสดุ นั่นคือผลลตของอุณหภูมินี้จะแปรผกผันกับ $(k \cdot f_u)$ ค่า $(k \cdot f_u)$ ที่อุณหภูมิใช้งานต่าง ๆ ของวัสดุมีแสดงไว้ในรูป ก.4



รูปที่ ก.4 ค่า $(k \cdot f_u)$ ที่อุณหภูมิการใช้งานต่าง ๆ ของวัสดุ

จากรูปที่ ก.4 จะเห็นได้ว่าวัสดุทองแดง (Cu) มีค่า $(k \cdot f_u)$ สูงกว่าวัสดุชนิดใด ๆ ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 1,000 ° R นี้หมายความว่าในช่วงอุณหภูมินี้ทองแดงให้ผลลตอุณหภูมิน้อยที่สุด

ในการเลือกวัสดุนี้ ปัจจัยที่สำคัญที่ต้องไม่ลืมคือ ราคาของวัสดุ เครื่องมือที่ต้องใช้ในการขึ้นรูป การเชื่อมและอุปสรรคต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น

ก.1.3 ขั้นตอนการเลือกส่วนประกอบทั้ง 2 ส่วน

1. เลือกของไหลใช้งานหนึ่งชนิดจากตารางที่ ก.1 และรูปที่ ก.2 ของไหลใช้งานนั้นจะต้องให้ค่าถ่ายเทของเหลวสูง และสภาพการนำความร้อนของของเหลวสูงพอ อีกทั้งต้องไม่เป็นพิษและไม่ติดไฟด้วย
2. เลือกชนิดของวัสดุท่อที่เข้ากันได้โดยอาศัยตารางที่ ก.2 นอกจากนี้ต้องคำนึงให้มีน้ำหนักเบาและผลลดยของอุณหภูมิโดยใช้รูป ก.3 และ ก.4

การเลือกส่วนประกอบทั้ง 2 ส่วนนี้ เป็นสิ่งที่ขาดไม่ได้ในการออกแบบฮีทไปป์ไร้วิกค์

ก.2 การออกแบบฮีทไปป์

หลังจากเลือกของไหลใช้งานวัสดุท่อแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการออกแบบฮีทไปป์ไร้วิกค์ที่จะสร้าง ขั้นตอนในการออกแบบนี้สามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อฮีทไปป์ โดยให้ความเร็วของไอไม่สูงเกินไป
2. เลือกและคำนวณออกแบบท่อฮีทไปป์ โดยคำนึงถึงลักษณะการใช้งานของฮีทไปป์
3. ตรวจสอบหาขีดจำกัดที่อาจเกิดขึ้นได้ เพื่อให้ทราบว่าฮีทไปป์ที่สร้างขึ้นทำงานภายใต้ขีดจำกัดอะไร ในเงื่อนไขใด

ตัวอย่างการออกแบบฮีทไปป์ที่เสนอในที่นี้ เป็นการออกแบบฮีทไปป์แบบไร้วิกค์

ก.2.1 การกำหนดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อฮีทไปป์

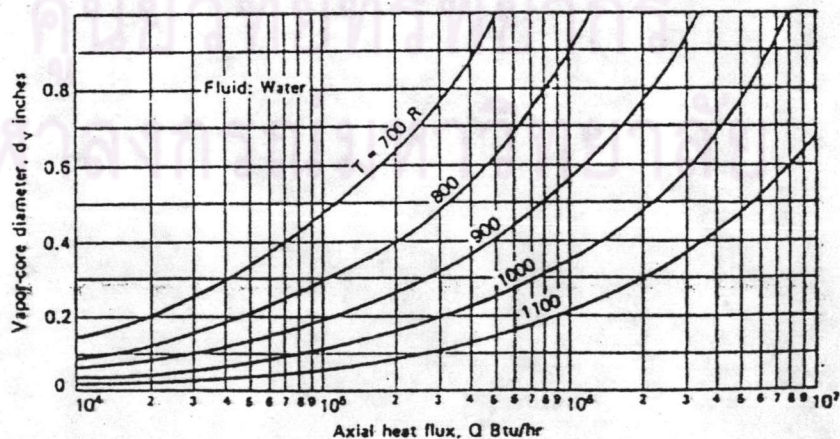
ท่อฮีทไปป์อาจมีรูปร่างของพื้นที่หน้าตัดของท่อแบบต่าง ๆ ท่อที่นิยมใช้ทั่วไปเป็นท่อทรงกระบอก เพราะหาซื้อได้ง่ายและเป็นท่อที่สามารถทนความดัน

ได้ดีกว่าท่อรูปร่างอื่น ๆ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อมีความสำคัญต่ออีทไปป์มาก เพราะเป็นตัวกำหนดความเร็วของไอ ถ้าตัวเลขแมคค์ (Mach number) ของไอมี่ค่าสูงจะเกิดการอัดตัวของไอขึ้น และการกระจายของอุณหภูมิในแนวแกนของอีทไปป์จะมีมาก ควรยึดหลักให้ค่าตัวเลขแมคค์ของไอมี่ค่าไม่เกิน 0.2 เพราะที่ค่านี้การอัดตัวของไอและผลต่างของอุณหภูมิในแนวแกนมีน้อยจนสามารถละเลยได้ ถ้าต้องการออกแบบอีทไปป์ให้ส่งผ่านความร้อนสูงสุดในแนวแกนเป็น Q_{max} เส้นผ่าศูนย์กลาง d_v ของย่านไอผ่าน ในกรณีนี้ตัวเลขแมคค์เท่ากับ 0.2 ($M_v = 0.2$) คือ

$$d_v = \left(\frac{20 Q_{max}}{\rho_v \lambda (r_v R_v T_v)^{1/2}} \right)^{1/2} \quad (ก.2.1)$$

- d_v = เส้นผ่าศูนย์กลางของผ่านไอผ่าน
- Q_{max} = ฟิลักซ์ความร้อนที่ส่งผ่านในแนวแกน
- ρ_v = ความหนาแน่นของไอ
- r_v = อัตราส่วนของความร้อนจำเพาะของไอ
- λ = ความร้อนแฝงของการระเหย
- R_v = ค่าคงที่ของก๊าซ
- T_v = อุณหภูมิของไอ

สมการที่ ก.2.1 สามารถแสดงเป็นกราฟได้ดังรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.5 การออกแบบเส้นผ่าศูนย์กลางของย่านไอผ่าน

ก.2.2 การเลือกและคำนวณออกแบบท่ออีทไปป์

การเลือกประเภทของท่ออีทไปป์ต้องคำนึงถึงความทนทานต่อความดันไอที่เกิดขึ้นภายในท่ออีทไปป์ โดยทั่วไปนิยมใช้มาตรฐาน ASME โดยยึดหลักว่า ความเค้นสูงสุดที่ยอมได้ (maximum allowable stress) จะเป็น $1/4$ เท่า ของความทนต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุนั้น (Ultimate tensile strength, UTS, f_{tu}) อนึ่งการออกแบบ โครงสร้างของท่อแบ่งออกได้เป็นข้อ ๆ ดังนี้

1. สำหรับท่อทรงกระบอกที่มีความหนาของผนังท่อน้อยกว่า 10 % ของเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ ความเค้นสูงสุดที่ยอมได้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (ก.2.2)

$$f_{max} = \frac{\Delta P d_o}{2t} \quad (\text{ก.2.2})$$

$$\begin{aligned} f_{max} &= \text{ความเค้นสูงสุดที่ผนังท่อรับได้} \\ \Delta P &= \text{ผลต่างของความดันที่ 2 ด้านของผนังท่อ} \\ d_o &= \text{เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อ} \\ t &= \text{ความหนาของผนังท่อ} \end{aligned}$$

2. สำหรับท่อทรงกระบอกที่มีผนังท่อนหนา ความเค้นสูงสุดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (ก.2.3)

$$\begin{aligned} f_{max} &= \Delta P (d_o^2 + 2d_i^2) / 2 (d_o^2 - d_i^2) \quad (\text{ก.2.3}) \\ f_{max} &= \text{ความเค้นสูงสุดที่ยอมได้} \\ \Delta P &= \text{ผลต่างของความดันที่สองด้านของผนัง} \\ d_o &= \text{เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อ} \\ d_i &= \text{เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อ} \end{aligned}$$

หมวกปิดท่ออีทไปป์ก็จัดอยู่ในประเภทวัสดุท่อเช่นกัน หมวกปิดท่อนี้มีรูปร่างหลายอย่าง เช่น เลี้ยวของวงกลม กรวยหรือแผ่นราบ การคำนวณออกแบบก็สามารถทำได้ดังนี้

1. สำหรับหมวกปิดท่อนี้อ่อนแบบทรงกลมครึ่งเสี้ยว ความเค้นสูงสุดที่ยอมได้ คำนวณได้จากสมการที่ (ก.2.4)

$$f_{max} = \Delta P (d_o^2 + 2d_i^2) / 2(d_o^2 - d_i^2) \quad (\text{ก.2.4})$$

2. สำหรับหมวกปิดท่อนี้อ่อนแบบทรงกลมครึ่งเสี้ยวเนื้อบางน้อยกว่า 10 % ของเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกท่อ ความเค้นสูงสุดคำนวณได้จากสมการที่ (ก.2.5)

$$f_{max} = \frac{\Delta P d_o}{4t} \quad (\text{ก.2.5})$$

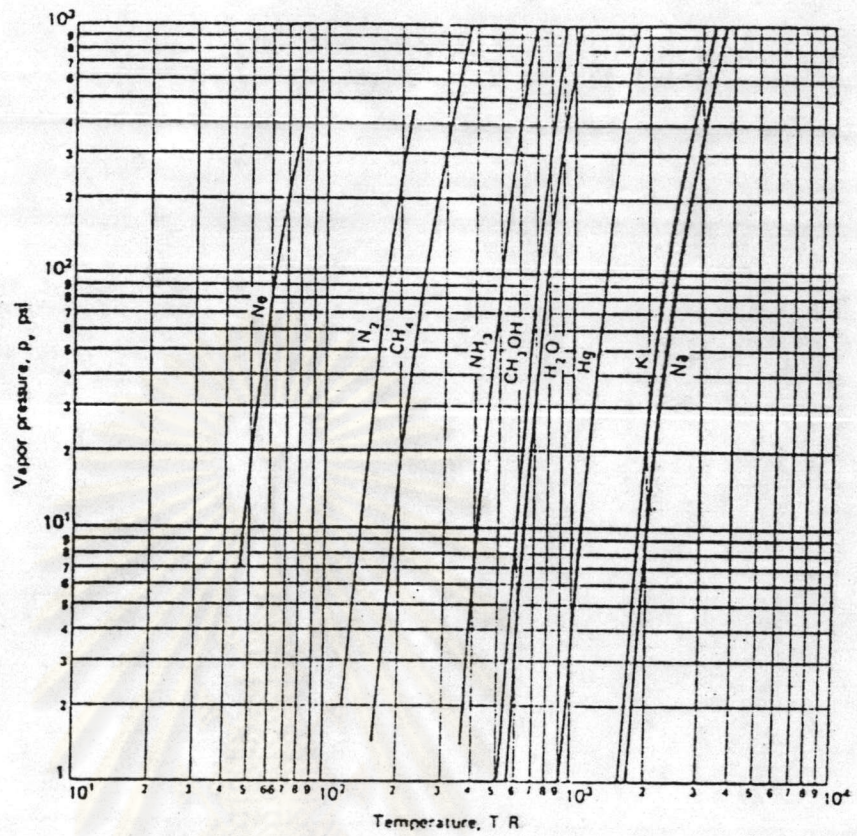
3. สำหรับหมวกปิดท่อนี้อ่อนแบบแผ่นราบ ความเค้นสูงสุดคำนวณได้จากสมการที่ (ก.2.6)

$$f_{max} = \Delta P d_o^2 / 8t^2 \quad (\text{ก.2.6})$$

f_{max} = ความเค้นสูงสุด
 ΔP = ผลต่างของความดันที่สองด้านของผนังหมวกปิดท่อ
 d_o = เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของหมวกปิดท่อ
 d_i = เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของหมวกปิดท่อ

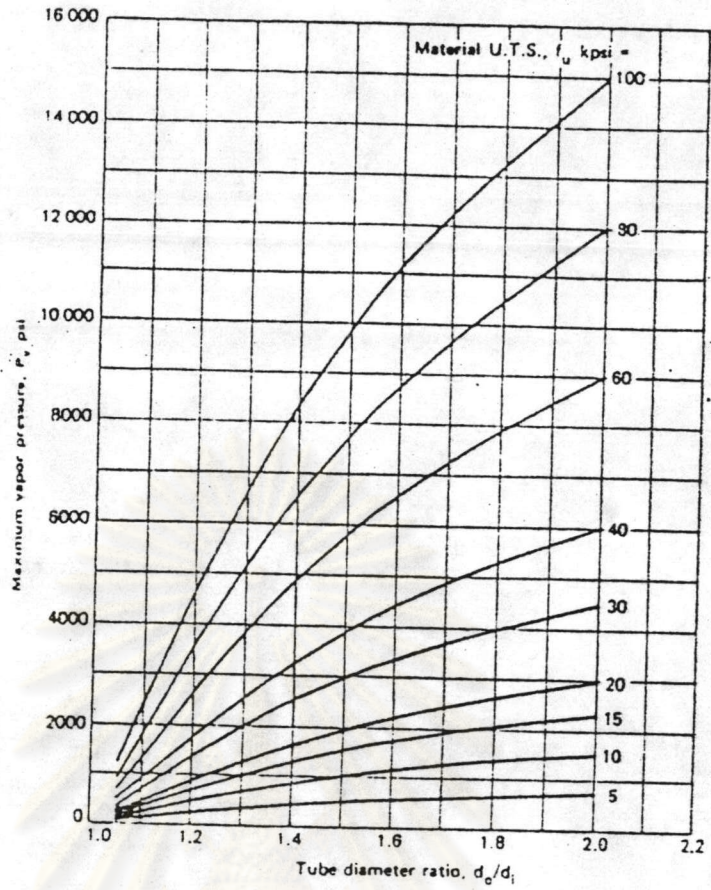
ผลต่างของความดันที่สองด้านของผนังท่อ/หมวกปิดท่อ P มีค่าเท่ากับ ความดันไอของของไหลใช้งานที่อุณหภูมิใช้งานสูงสุดหักลบด้วยความดันบรรยากาศภายนอก รูปที่ ก.6 แสดงตัวอย่างความดันไอของของไหลใช้งานบางประเภท

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

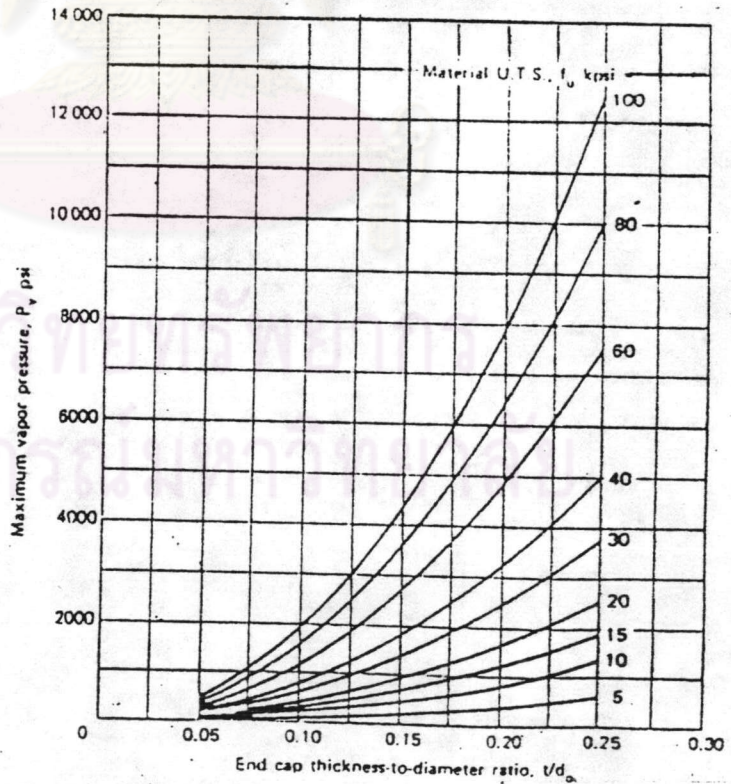


รูปที่ ก.6 ความดันไอที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของของไหลใช้งาน

เพื่อความสะดวกในการออกแบบ เราสามารถนำเอาสมการที่ (ก.2.2) - (ก.2.8) ไปเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดท่อ (d_o/d_i) หรือขนาดหมวกปิดท่อ (t/d_o) กับความดันไอของของไหลใช้งาน (p_v) ดังรูปที่ ก.7 และ ก.8



รูปที่ ก.7 การออกแบบขนาดของท่อ

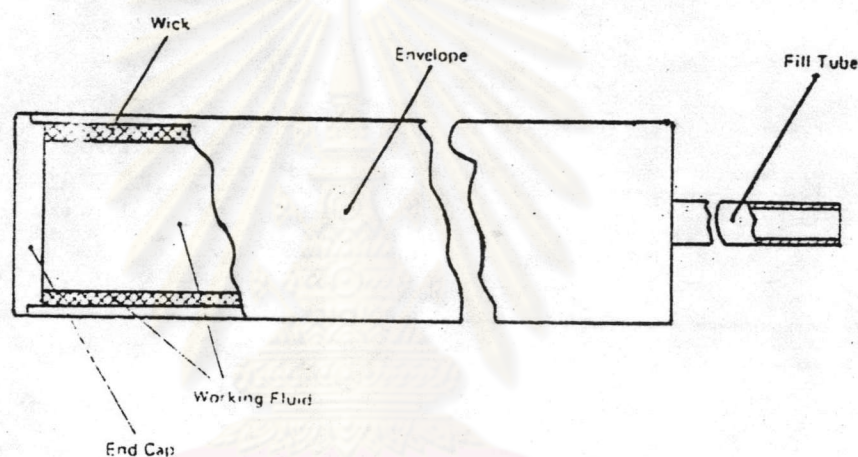


รูปที่ ก.8 การออกแบบขนาดของหมวกปิดท่อ

ก.3 การสร้างฮีทไปป์ไร้วิกค์

ก.3.1 ส่วนประกอบของฮีทไปป์ไร้วิกค์

ฮีทไปป์ทั่วไปมีส่วนประกอบ 5 ชิ้น คือ ท่อ (Envelope) , วิกค์ (Wick) , หมวกปิดท่อ (End cap) , ท่อเติม (Fill tube) และของไหลใช้งาน (Working fluid) (รูป ก.9) แต่ฮีทไปป์ไร้วิกค์จะมีส่วนประกอบเพียง 4 ส่วน เพราะไม่มีวิกค์ ในที่นี้จะอธิบายเฉพาะส่วนประกอบของฮีทไปป์ไร้วิกค์เท่านั้น



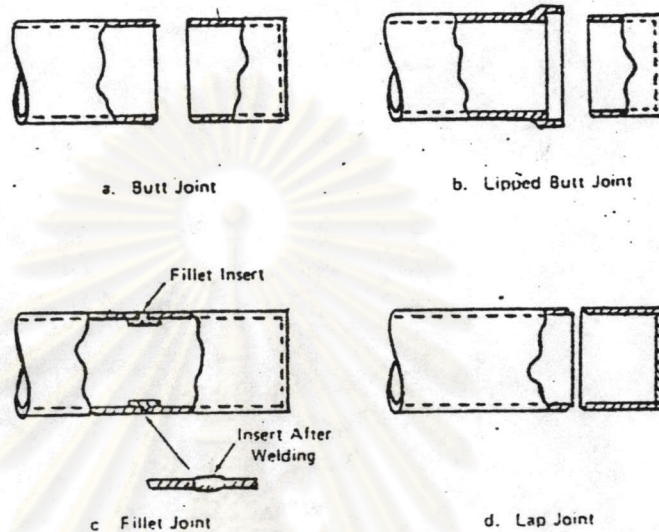
รูปที่ ก.9 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของฮีทไปป์ทั่วไป

1. ท่อ ท่อที่ใช้ทำฮีทไปป์มีหลายประเภทและหลายขนาด การเลือกท่อในตอนออกแบบฮีทไปป์นั้นต้องคำนึงถึงราคาของท่อด้วย ท่อที่ใช้ทั่วไปมี 2 ประเภทคือ ท่อไร้ตะเข็บและท่อเชื่อมต้ำ (Butt welding tubes)

สิ่งที่ควรระวังในการตัดท่อให้ได้ความยาวที่ต้องการคือ การเสียรูปของปลายท่อ เพราะถ้าเกิดการเสียรูปแล้ว รอยเชื่อมหมวกปิดท่อจะไม่ทนทานและเกิดรูรั่วได้ง่าย

2. หมวกปิดท่อ หมวกปิดท่อที่ใช้ควรมีความหนาของผนังน้อยที่สุดที่จะทนต่อความเค้นที่เกิดขึ้นได้หมวกปิดท่อจะถูกเชื่อมติดกับปลายท่อ รูปแบบของการเชื่อมติดนี้มีความสำคัญมากต่อการสร้างฮีทไปป์และแบ่งได้เป็น 4 แบบ คือ

แบบเชื่อมต่อธรรมดา (Butt joint) , แบบเชื่อมประกบ (Lipped butt joint) , แบบเชื่อมเติมร่อง (Fillet joint) และแบบเชื่อมเหลื่อม (Lap joint) ดังแสดงไว้ในรูปที่ ก.10



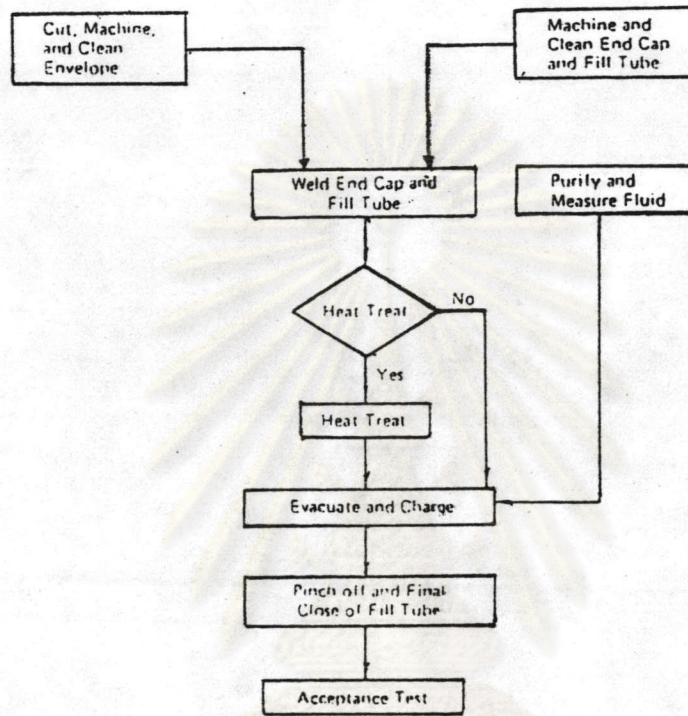
รูปที่ ก. 10 วิธีเชื่อมต่อหมวกปิดท่อแบบต่าง ๆ

สิ่งที่ควรระวังในการเชื่อมหมวกคือ หมวกปิดท่อและตัวท่อต้องอยู่ในแนวตรง รอยเชื่อมต้องแข็งแรง ไม่มีรอยร้าวซึม ความหนาของรอยเชื่อมต้องมีขนาดใกล้เคียงกับความหนาของผนังท่อและรอยเชื่อมนั้นควรจะอยู่บนเนื้อของหมวกปิดท่อและบนตัวท่อเท่า ๆ กัน อีกทั้งต้องเป็นรอยที่สม่ำเสมอด้วย ในการเชื่อมต่อหมวกปิดท่อนี้ไม่ควรใช้การเชื่อมต่อแบบธรรมดา (Butt joint)

3. ท่อเติม เป็นท่อต่อขนาดเล็กบนหมวกปิดท่อด้านใดด้านหนึ่งของฮีทไพบ์ เพื่อใช้เป็นทางดึงหรือไล่อากาศออกจากฮีทไพบ์และเติมของไหลใช้งานเข้าท่อ ก่อนที่ใช้งานฮีทไพบ์จะต้องปิดท่อเติมให้สนิทเสียก่อน อาจจะทำโดยการบีบให้แบนแล้วเชื่อมปิดปลาย ท่อเติมนี้ควรมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกไม่เกิน $1/4$ นิ้ว และเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน $1/16$ นิ้ว

4. ของไหลใช้งาน ของไหลใช้งานที่ใส่ในท่อฮีทไพบ์ต้องมีปริมาณที่พอเหมาะและต้องมีความบริสุทธิ์สูง

ขั้นตอนการสร้างฮีทไปป์มีแสดงไว้ในรูปที่ ก. 11



รูปที่ ก. 11 แผนผังขั้นตอนการสร้างฮีทไปป์

ก. 3.2 การทำความสะอาดส่วนประกอบต่าง ๆ

ความสะอาดของส่วนประกอบมีผลต่อสมรรถนะและอายุการใช้งานของฮีทไปป์มาก

วิธีการทำความสะอาดมีดังต่อไปนี้

ก. 3.2.1 การทำความสะอาดส่วนประกอบที่เป็นโลหะ

แบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนคือ

1. การกำจัดคราบไขมัน (Degreasing) คราบไขมันที่ติดมากับวัสดุอาจเป็นน้ำมัน ไข หรือจาระบี โดยทั่วไปจะใช้สารละลายจำพวกเมทิลีนไดโครเมท (Methylenedichromate) ไตรคลอโรอีเทน (Trichloroethane) และไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene) แต่นิยมใช้สารละลายไตรคลอโรอีเทน เพราะมีราคาถูกกว่าสารละลายนี้สามารถใช้ทำความสะอาดได้ทุกซอกทุกมุม โดยต้องพึ่งเครื่องมือที่ทันสมัย (Ultrasonic cleaning equipments) ในขณะที่ชิ้นส่วนแช่อยู่ในสารละลายควรจะใช้แปรงแปรงเบา ๆ ด้วย

2. การกำจัดอนุภาคของแข็ง (Solid particle removal) อนุภาคของแข็งบางชนิดอาจถูกกำจัดออกไปตั้งแต่ขั้นตอนการกำจัดคราบไขมันแล้ว แต่ยังมีอนุภาคบางอย่าง เช่น ไขมันสกปรกของแข็งหรือของแข็ง ซึ่งไม่สามารถล้างออกได้ด้วยสารละลาย จึงจำเป็นต้องใช้สารพวกอัลคาไลน์ (Alkaline) เช่นใช้ Oakite ในกรณีของโลหะอลูมิเนียม และ Coppa-Kleen ในกรณีของทองแดง เป็นต้น

สารอัลคาไลน์ที่ยกมานี้เป็นชื่อทางการค้าและประกอบด้วยสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดฟอง (Synthetic organic surfactants) หรือสบู่ 2-10 % และเกลือของด่างอย่างน้อย 2 ชนิด เช่น เกลือของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Caustic soda) โซเดียมอซิซิลิเกต โซเดียมคาร์บอเนต (Soda ash) โซเดียมเตตราโบเรท (Borax) หรือโซเดียมโพลีฟอสเฟส เป็นต้น

อนึ่ง ยังมีอนุภาคของแข็งอีกชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นบนผิวโลหะเนื้อแข็ง เช่น พวกละเอียดในรูปของจุดตำหนิของเนื้อเหล็ก เนื่องจากอนุภาคเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับของไหลใช้งานจึงต้องกำจัดออกโดยการใช้ออกซิไดซิง ซึ่งไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีกับตัวสแตนเลสเอง เช่น กรดไนตริก โซเดียมไดโครเมท โพแตสเซียมไดโครเมท หรือสารผสมของสารพวกนี้

3. การกำจัดออกไซด์ (Deoxydizing) โลหะทั่วไปจะเกิดออกไซด์ปกคลุมผิวโดยรอบ ซึ่งทำให้คุณสมบัติเปียกผิวของโลหะนั้นลดลง

อีกทั้งออกไซด์ของโลหะบางชนิดก็สามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับของไหลใช้งาน และก่อให้เกิดสิ่งที่ไม่ต้องการด้วย เช่น ออกไซด์ของอลูมิเนียมจะทำปฏิกิริยาเคมีกับแอมโมเนียให้ก๊าซไนโตรเจน ไฮโดรเจนและโลหะอลูมิเนียม เป็นต้น ทำให้ฮีทไปป์มีสมรรถนะต่ำลงมาก วิธีการกำจัดออกไซด์ย่อมขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ

การกำจัดออกไซด์ของทองแดงและอลูมิเนียมทำได้โดย จุ่มลงในสารละลายของ 15-30 กก./ม³ โซเดียมไดโครเมตและ 4-7 % โดยปริมาตร กรดกำมะถันที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5-30 นาที

หลังจากกำจัดออกไซด์จากชิ้นส่วนต่าง ๆ แล้วต้องล้างด้วยน้ำสะอาด 2 นาที และกลั้วด้วยน้ำกลั่นทันที จากนั้น ทำให้แห้งด้วยอากาศสะอาด แล้วกลั้วด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ไร้น้ำ แล้วทำให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนร้อน 160 ° ฟ ที่ผ่านการกรองแล้ว

ตัวอย่างของขั้นตอนการทำความสะอาดชิ้นส่วนที่เป็นทองแดงและอลูมิเนียมมีดังนี้

1. แช่ไนโตรคลอโรอีเทนอุณหภูมิห้องและใช้แปรงถูเป็นระยะ ๆ
2. กลั้วด้วยไนโตรคลอโรอีเทนอุณหภูมิห้อง
3. จุ่มอลูมิเนียมลงใน Oakite No 164 (15-75 กก./ม³) ส่วนทองแดงใน (Coppa Kleen (15-75 กก./ม³) ที่ 140-180 ° ฟ เป็นเวลานาน 5-30 นาที
4. ชะด้วยน้ำสะอาด 2 นาที
5. จุ่มลงในสารละลายโซเดียมไดโครเมตและกรดกำมะถันที่อุณหภูมิห้อง 5-30 นาที
6. ล้างด้วยน้ำสะอาด 2 นาที แล้วกลั้วด้วยน้ำกลั่น
7. เป่าให้แห้งด้วยอากาศสะอาด
8. ล้างด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ไร้น้ำ
9. เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนสะอาดที่ 160 ° ฟ

ก.3.3.2 การทำความสะอาดของไหลใช้งาน

การทำของไหลใช้งานให้บริสุทธิ์มีขั้นตอนดังนี้

1. การกลั่น ของไหลใช้งานจำพวกน้ำและสารละลายอินทรีย์ เช่น อาซิโตน เอทานอล เป็นต้น จำต้องผ่านการกลั่นเสียก่อน
2. การกำจัดความชื้น โดยใช้ซิลิกาเจล (Silica gel) หรือ อลูมินา (Alumina)
3. การกำจัดก๊าซต่าง ๆ ที่ละลายอยู่ในของไหลใช้งาน โดยในกรณีที่ใช้งานอีทไปป์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 200°C (392°F) จำเป็นต้องไล่ก๊าซที่ละลายอยู่ในของไหลออกโดยวิธี Freezing degassing

ก.3.3 ขั้นตอนการประกอบอีทไปป์

เมื่อทำความสะอาดชิ้นส่วนต่าง ๆ เรียบร้อยแล้ว ควรประกอบเข้ากันทันทีโดยไม่ปล่อยให้เย็นนาน ขั้นตอนการประกอบที่สำคัญคือ การเชื่อมต่อหวมกปิดท่อและท่อเติม

ในกรณีที่หวมกปิดท่อไม่มีท่อเติมตั้งแต่แรก เราจะต้องเชื่อมต่อเติมกับหวมกเสียก่อน หลังจากนั้นจึงทำการเชื่อมต่อหวมกปิดท่อทั้งด้านที่มีท่อเติมและด้านที่ไม่มีท่อเติมเข้ากับท่อ การเชื่อมต่อทั้งหมดจะต้องไม่มีรอยร้าวและรอยร้าว เพราะจะทำให้ระบบสุญญากาศของอีทไปป์เสียได้ การเชื่อมที่สามารถใช้ได้ในการสร้างอีทไปป์นี้ได้แก่ การเชื่อมแบบ TIG (Tungsten-Inert Gas Welding) และการเชื่อมแบบ EBW (Electron Beam Welding)

ก. การเชื่อมแบบ TIG เป็นการเชื่อมด้วยไฟฟ้า โดยมีแท่งเชื่อมถาวร (electrode) เป็น Tungsten และลวดเชื่อม (filler metals) เป็นโลหะชนิดอื่น การเชื่อมแบบนี้จะมีช่องพ่นก๊าซเฉื่อยรอบ ๆ แท่งเชื่อมถาวรเพื่อปกคลุมรอยเชื่อมไม่ให้ถูกกับอากาศ ทำให้รอยเชื่อมสะอาดไม่เกิดรอยร้าว

ข. การเชื่อมแบบ EBW เป็นการเชื่อมที่มีการสร้างห้องสุญญากาศ

เพื่อปกป้องรอยเชื่อมจากอากาศ การเชื่อมแบบนี้ใช้ปริมาณความร้อนน้อยกว่า การเชื่อมทั่วไปและมีการกระจายของความร้อนบนผิวโลหะในบริเวณแคบ ๆ ทำให้ผิวโลหะและรอยเชื่อมไม่มีสารประกอบใด ๆ เกิดขึ้น

นอกจากการเชื่อมที่ถูกต้องแล้ว ควรมีอุปกรณ์ตรวจสอบรอยรั่วที่มีประสิทธิภาพสูง เช่น mass spectrometer โดยลดความดันในห้องแล้วตรวจดูว่าก๊าซฮีเลียมที่อยู่ภายนอกท่อซึมผ่านเข้าในท่อหรือไม่

การเชื่อมท่ออีกต่อไปจะไม่ใช้น้ำยาประสาน (flux) ในการเชื่อม เพราะทำให้เกิดรอยรั่วได้ง่าย

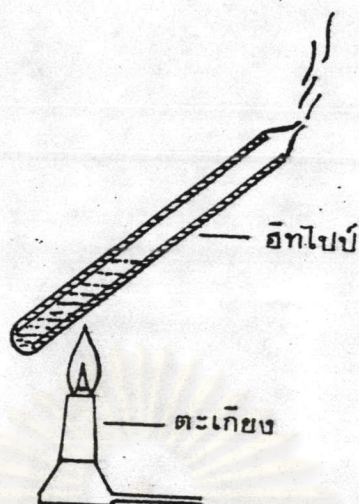
ก.3.4 การเติมของไหลใช้งานและการทำสุญญากาศ

เมื่อประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ เรียบร้อยแล้ว ลักษณะภายนอกจะเหมือน อีทไปป์ทุกอย่าง ขั้นตอนต่อไปเป็นการเติมของไหลใช้งานและการทำสุญญากาศ ภายในท่อ

วิธีที่จะกล่าวในที่นี้เป็นวิธีสำหรับการสร้างอีทไปป์ที่อุณหภูมิใช้งานต่ำ (Low temperature heat pipe) ซึ่งมีอยู่ 4 วิธี จากง่ายไปหายาก ดังนี้

ก.3.4.1 แบบให้ความร้อนโดยตรงต่ออีทไปป์

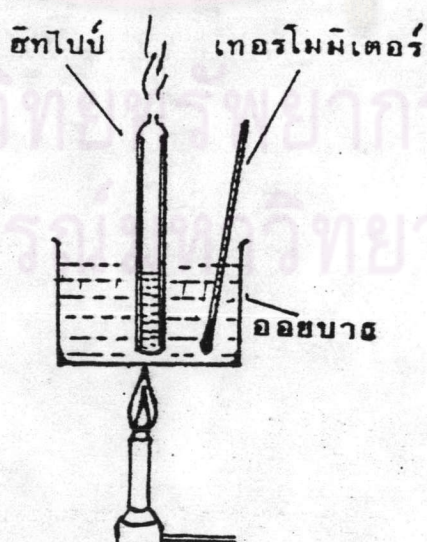
กรรมวิธีนี้นับว่าเป็นวิธีแบบง่ายที่สุด หลังจากประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ เป็นท่ออีทไปป์ เรียบร้อยแล้ว จะเติมของไหลใช้งานเข้าไปในท่ออีทไปป์โดยตรง ในปริมาณมากเกินพอ จากนั้นไล่อากาศและก๊าซไม่ควบแน่นที่ค้างอยู่ในท่อและที่ละลายอยู่ในของเหลว โดยการเอาเปลมไฟไปรณบริเวณด้านล่างของอีทไปป์ ดังรูปที่ ก.13 เมื่อของไหลใช้งานเริ่มเดือดพล่าน ไอน้ำของไหลใช้งานที่พุ่งออกมาจะช่วยไล่ที่อากาศที่อยู่ภายในท่ออีทไปป์ หลังจากปล่อยให้เดือดเป็นเวลานานพอเหมาะ และของไหลใช้งานในท่อมีปริมาณเหลือตามต้องการแล้ว ก็ทำการปิดผนึกปลายท่อด้านบนในขณะที่ของไหลใช้งานยังคงเดือดพล่านอยู่



รูปที่ ก.12 วิธีการผลิตอีทไพบ์แบบให้ความร้อนโดยตรง

ก.3.4.2 แบบให้ความร้อนต่ออีทไพบ์โดยใช้ออยบาส (oil bath)

กรรมวิธีนี้ต้องลงทุนมากกว่าวิธีที่ 1 เล็กน้อย แต่หลักการดำเนินงานยังคงเหมือนกัน จะต่างกันตรงที่วิธีที่สองนี้ใช้ออยบาสที่รักษาอุณหภูมิของน้ำมันร้อนให้คงที่ (รูปที่ ก.14) เพื่อให้เกิดการเดือดอย่างสม่ำเสมอและสามารถควบคุมปริมาณของไหลใช้งานที่เหลือในท่อโดยการควบคุมระยะเวลาที่เดือด ดังนั้นจึงสามารถสร้างอีทไพบ์ที่มีสมรรถนะใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้และในเวลาอันสั้นด้วย (mass production)



รูปที่ ก.13 วิธีการผลิตอีทไพบ์แบบใช้ออยบาส

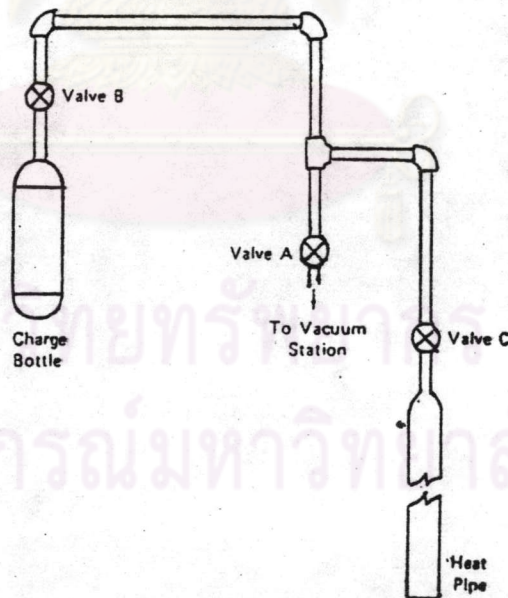
วิธีนี้เป็นวิธีผลิตอีทไพบ์ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้

เนื่องจากกรรมวิธีทั้งสองแบบข้างต้นใช้ไอของของไหลไปไล่ที่อากาศที่อยู่ภายในท่อ จึงมีชื่อเรียกว่า การสร้างแบบการระเหย

วิธีอีก 2 วิธี ที่จะแนะนำต่อไปนี้เป็นวิธีที่สร้างระบบสุญญากาศภายในท่อโดยใช้ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) ปั๊มสุญญากาศที่ใช้ต้องสามารถสร้างสุญญากาศได้ถึง 10^{-4} torr. เช่น diffusion pump หรือ sorption pump ที่มี molecular sieve

ก.3.4.3 การใช้ปั๊มสุญญากาศแบบที่ 1

เป็นวิธีที่ใช้ปั๊มสุญญากาศ แต่ไม่ยุ่งยาก กรรมวิธีมีแสดงไว้ในรูป ก.14 โดยมีขั้นตอนการผลิตดังต่อไปนี้



รูปที่ ก.14 ระบบการผลิตอีทไพบ์โดยใช้ปั๊มสุญญากาศ แบบที่ 1

ก. การไล่ก๊าซออกจากของไหลใช้งานโดยวิธี freezing degassing

บรรจุของไหลใช้งานไว้ในขวดบ้อน (charge bottle) แล้วปิดวาล์ว A , B และ C แخذขวดบ้อนไว้ในถังก๊าซไนโตรเจนเหลว ถ้าของไหลใช้งานเป็นแอมโมเนีย (ถ้าเป็นโซเดียมเหลว ให้ปล่อยทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง) เมื่อของไหลใช้งานแข็งตัวแล้ว นำเอาขวดบ้อนออกและปล่อยให้ของไหลใช้งานหลอมตัวเพื่อไล่ฟองของก๊าซที่ติดค้างอยู่ในของไหลที่แข็งตัว จากนั้นเปิดวาล์ว A และ B เพื่อดูดเอาก๊าซออก (ของไหลใช้งานบางส่วนที่ระเหยเป็นไอจะถูกดูดออกมาด้วย) แล้วปิดวาล์ว และทำซ้ำประมาณ 2-4 ครั้ง จนแน่ใจว่าของไหลใช้งานไม่มีก๊าซละลายเหลืออยู่

ข. การทำสุญญากาศภายในท่อและการเติมของไหลใช้งาน

เมื่อได้ของไหลใช้งานจากขั้นตอนก่อนแล้ว ต่อไปเป็นการทำสุญญากาศภายในท่อ และการเติมของไหลใช้งาน

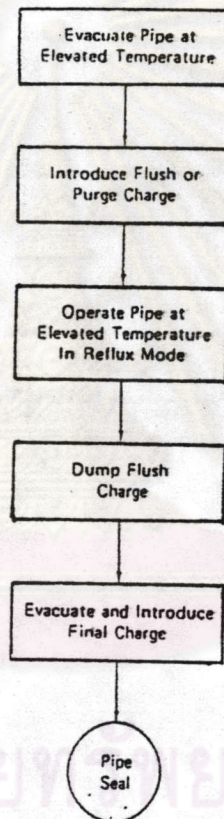
ลำดับของขั้นตอนโดยสรุปมีแสดงในรูป ก. 15

1. ดูดอากาศออกโดยปิดวาล์ว B แล้วเปิดวาล์ว A และ C ให้ความร้อนกับฮีทไปป์ เพื่อให้ก๊าซที่เกาะอยู่บนเนื้อวัสดุท่อและวิก์หลุดออกมา ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดอากาศและก๊าซออกนี้จะขึ้นโดยตรงกับอุณหภูมิของฮีทไปป์
2. กลั้วท่อด้วยของเหลวใช้งาน โดยเปิดวาล์ว B และทำขวดบ้อนเข้าให้ร้อนกว่าจุดเดือดของของไหลใช้งานที่ความดันในระบบนั้น ปล่อยให้ไอของของไหลใช้งานไหลเข้าไปในท่อเล็กน้อยเพื่อกลั้วภายในท่อ แล้วปิดวาล์ว B เพื่อดูดเอาของไหลใช้งานออก และเปิดวาล์ว B ใหม่ ทำซ้ำกันประมาณ 2 ครั้ง
3. บรรจุของไหลใช้งาน ปริมาณที่บรรจุสามารถวัดและควบคุมได้โดยวิธีต่างกัน ขึ้นกับสถานะของของไหลใช้งานที่อุณหภูมิห้อง ดังต่อไปนี้

3.1 สถานะก๊าซ (กรณีของ Cryogenic heat pipe-fluid) ปริมาณที่บรรจุสามารถวัดได้จากความดันภายในท่อที่อุณหภูมิห้อง โดยการปิดวาล์ว A เปิดวาล์ว B และ C จนได้ปริมาณที่ต้องการ เมื่อปิด

วาล์ว B และ C ท่อฮีทไปป์ก็อยู่ในสภาพพร้อมที่จะปิดผนึก

3.2 สถานะของเหลวหรือของแข็ง ปริมาณที่บรรจุสามารถวัดได้จากผลต่างของปริมาณของของไหลใช้งานก่อน และหลังการบรรจุ โดยการปิดวาล์ว A เปิดวาล์ว B และ C เมื่อให้ความร้อนกับขวดป้อนเข้า ในขณะที่ให้ความเย็นต่อฮีทไปป์ ของไหลใช้งานก็จะกลายเป็นไอและไหลจากขวดบรรจุ และไปควบแน่นในท่อฮีทไปป์ เมื่อได้ปริมาณตามที่ต้องการแล้วก็ปิดวาล์ว B และ C ท่อฮีทไปป์จะอยู่ในสภาพพร้อมที่จะปิดผนึก

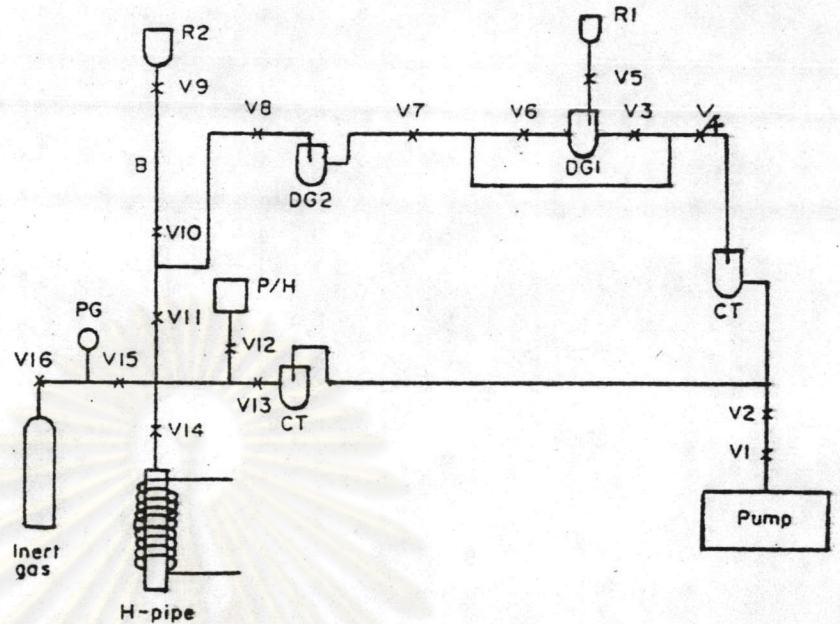


รูปที่ ก. 15 ลำดับขั้นตอนการสร้างฮีทไปป์

ก.3.4.4 การใช้ปั๊มสุญญากาศแบบที่ 2

เป็นกรรมวิธีที่ใช้สร้างฮีทไปป์ที่ซับซ้อนมากกว่ากรรมวิธีแบบที่ 3 กรรมวิธีการผลิตนี้มีแสดงไว้ในรูปที่ ก. 16 ดังต่อไปนี้

- ก. การไล่ก๊าซที่ละลายอยู่ในของไหลใช้งาน
- ข. การทำสุญญากาศภายในท่อและการเติมของไหลใช้งาน



รูปที่ ก.16 ระบบการผลิตอีทไปป์โดยใช้ปั๊มสุญญากาศแบบที่ 2
ขั้นตอนการผลิตมีดังนี้

1. ปิดวาล์วทั้งหมดที่เปิดสู่ภายนอก (V5, V9, V14, V15)
2. เดินปั๊มสุญญากาศโดยวาล์ว V1, V2 ยังคงปิดอยู่
3. หล่อเย็นตัวปั๊มสุญญากาศและกับดักเย็น (Cold Trap, CT) ด้วยก๊าซไนโตรเจนเหลว
4. ทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที เปิดวาล์ว V1, V2 ดูดอากาศในระบบออกจนได้ความดันประมาณ 0.01 มม.ปรอท เวลาที่ใช้ในการนี้จะขึ้นกับความจุของปั๊ม ความสะอาดของระบบและปริมาณภายในรวมของระบบ
5. ปิดวาล์ว V4, V5 และ V6 เต็มของไหลใช้งานลงใน R1
6. ค่อย ๆ เปิดวาล์ว V5 ให้ของไหลใช้งานลงสู่ภาชนะ DG₁ เมื่อได้ปริมาณมากพอก็ปิด แล้วทำให้แข็งตัวโดยแช่ในก๊าซไนโตรเจนเหลว
7. เมื่อของไหลใช้งานแข็งตัว เปิดวาล์ว V4 เพื่อดูดเอาอากาศออก แล้วปิดจากนั้นทำให้ของไหลใช้งานหลอมตัวและปล่อยให้ฟองก๊าซพุ่งออก แล้วทำให้ของไหลใช้งานแข็งตัวใหม่
8. เปิดวาล์ว V4 เพื่อดูดเอาก๊าซที่หลุดออกจากของไหลใช้งานออก

9. ปิดวาล์ว V4 , V3 , V8 และเปิดวาล์ว V6 , V7
 แต่ DG₂ ในถังไนโตรเจนเหลว

10. หลอมเหลวของไหลใช้งานใน DG₁ ด้วยลมร้อน แล้วส่งของ
 ไหลใช้งานไปยัง DG₂ จากนั้นก็ทำการไล่ก๊าซที่ละลายอยู่ในของไหลใช้งาน
 ออกในลักษณะเดียวกับ DG₁

11. หลังจากของไหลใช้งานผ่านการไล่อากาศออกแล้ว ปิดวาล์ว
 V4 , V6 เพื่อกันการไหลย้อนกลับของของไหลใช้งาน

12. ปิดวาล์ว V7 , V11 และเปิดวาล์ว V8 , V10 จากนั้น
 ก็ใช้ความร้อนไล่ของไหลใช้งานให้เข้าไปอยู่ในบูเรต (Burette , B) แล้ว
 ปิดวาล์ว V10 , V8 และเปิดวาล์ว V11 จากนั้นดึงสูญญากาศให้มากขึ้น
 ถึงประมาณ 0.005 มม.ปรอท

13. ติดท่อฮีทไปป์เข้ากับระบบ เปิดวาล์ว V14 เพื่อดูดเอาอากาศ
 ออกพร้อมกับให้ความร้อนต่อฮีทไปป์ รอจนระดับของสูญญากาศกลับคืนที่เดิม

14. จุ่มปลายด้านล่างของฮีทไปป์ลงในถังไนโตรเจนเหลว ค่อย ๆ
 เปิดวาล์ว V10 เพื่อส่งของไหลใช้งานไปควมแน่นในท่อฮีทไปป์ เมื่อได้ปริมาณ
 มากพอก็ปิดวาล์ว V10 ใช้ความร้อนไล่ของไหลใช้งานที่ยังคงตกค้างอยู่ให้เข้า
 ไปในท่อฮีทไปป์จนหมดแล้วปิดวาล์ว

15. ทำการไล่ก๊าซออกจากของไหลใช้งานในท่อฮีทไปป์โดยวิธี
 freezing degassing อีกครั้ง โดยเปิด - ปิดวาล์ว V14 จากนั้นท่อ
 ฮีทไปป์ก็อยู่ในสภาวะพร้อมที่จะปิดผนึก

ก.3.5 การปิดผนึกท่อฮีทไปป์

ต้องปิดผนึกก่อนนำไปใช้งาน วิธีการปิดผนึกท่อฮีทไปป์มีหลายอย่าง
 แต่วิธีที่เป็นที่ยอมรับว่าประหยัดและไม่มีรอยรั่วเป็นดังนี้

1. บีบปลายท่อเติมให้แบนสนิท โดยปล่อยเครื่องบีบที่ต่อค้างไว้
2. ตัดท่อฮีทไปป์ออกจากวาล์วที่ริมรอยบีบด้านวาล์ว
3. เชื่อมปลายท่อเติมด้วยวิธีการเชื่อมแบบ TIG หรือแบบ EBW
 จากนั้นจึงคลายเครื่องบีบที่ต่อได้

แม้การสร้างท่อฮีทไปป์จะเสร็จสมบูรณ์แล้ว แต่ก็จำเป็นต้องผ่าน
 การทดสอบสมรรถนะเสียก่อน จึงจะมั่นใจในคุณภาพได้

ภาคผนวก ข.

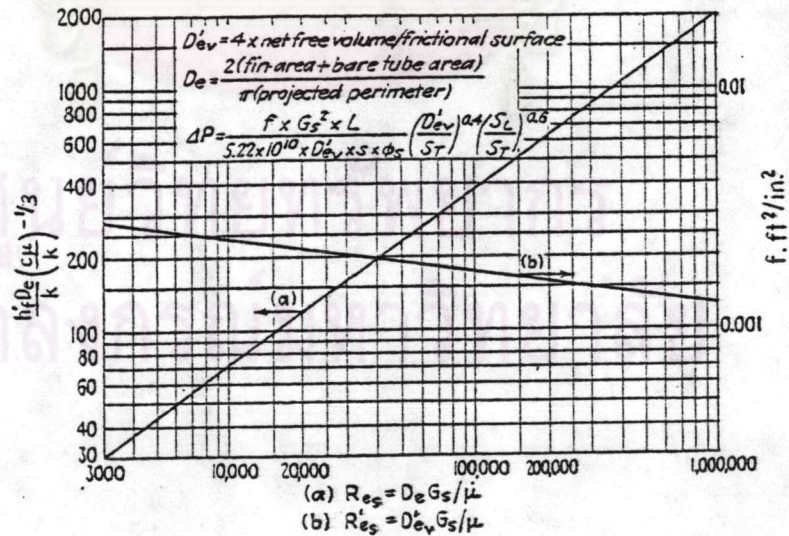
ค่าคงที่ต่าง ๆ และหน่วยเปรียบเทียบ

ตาราง ข.1 ค่าคงที่ในสมการของ Zukausk

Table 8-5 Constant c_2 and exponent m of Eq. (8-97)

Geometry	Re	c_2	m	Remarks
In-line	10 to 10^2	0.8	0.40	
	10^2 to 10^3	Large and moderate longitudinal pitch, can be regarded as a single tube		
	10^3 to 2×10^5	0.27	0.63	
	2×10^5 to 10^6	0.21	0.84	
Staggered	10 to 10^2	0.9	0.40	
	10^2 to 10^3	About 20 percent higher than that for single tube		
	10^3 to 2×10^5	$0.35 \left(\frac{S_T}{S_L} \right)^{0.2}$	0.60	$\frac{S_T}{S_L} < 2$
	10^3 to 2×10^5	0.40	0.60	$\frac{S_T}{S_L} > 2$
	2×10^5 to 10^6	0.022	0.84	

Source: Zukauskas [47].



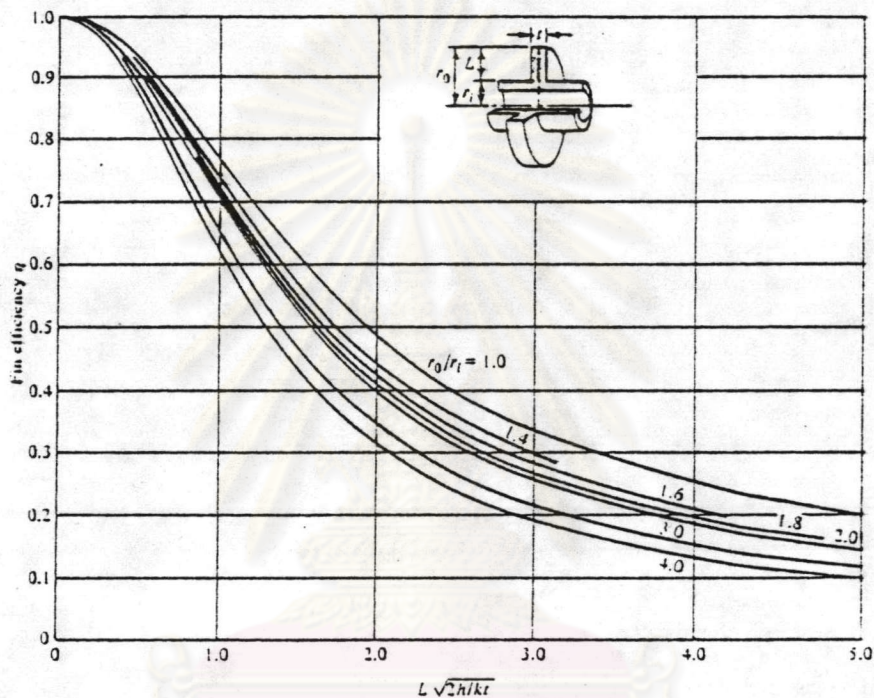
รูป ข.1 สมบัติการถ่ายเทความร้อนและความดันสูญเสียของครีบ

ตาราง ข.2 หน่วยเปรียบเทียบต่าง ๆ

DIMENSIONAL EQUIVALENTS

Length	1 ft = 12 in. = 30.48 cm = 0.3048 m 1 m = 100 cm = 39.37 in. = 3.28 ft
Mass	1 lbm = 0.03108 slug = 453.59 g = 0.45359 kg 1 kg = 1000 g = 0.06852 slug = 2.205 lbm
Time	1 hr = 3600 sec 1 sec = 2.778×10^{-4} hr
Force	1 lbf = 4.448×10^5 dyne = 4.448 N 1 N = 10^5 dyne = 0.2249 lbf
Angle	1 degree = 1.745×10^{-2} rad 1 rad = 57.30 degrees
Temperature	1 deg F = 1 deg R = 0.5556 deg C = 0.5556 deg K 1 deg K = 1 deg C = 1.8 deg R = 1.8 deg F deg F = 1.8 deg C + 32 deg C = 0.5556(deg F - 32) deg R = deg F + 459.69 deg K = deg C + 273.16 deg R = 1.8 deg K deg K = 0.5556 deg R
Energy	1 Btu = 777.66 ft-lbf = 252 cal = 1.054×10^{10} erg = 1054 J 1 J = 10^7 erg = 0.239 cal = 0.7375 ft-lbf = 9.485×10^{-4} Btu
Power	1 Btu/hr = 2.778×10^{-4} Btu/sec = 2.929×10^6 erg/sec = 0.2929 W 1 W = 10^7 erg/sec = 9.481×10^{-4} Btu/sec = 3.414 Btu/hr
Pressure	1 lbf/ft ² = 6.944×10^{-3} lbf/in. ² = 478.8 dyne/cm ² = 47.88 N/m ² 1 lbf/in. ² = 144 lbf/ft ² = 68,948 dyne/cm ² = 6894.8 N/m ² 1 N/m ² = 10 dyne/cm ² = 1.450×10^{-4} lbf/in. ² = 2.089×10^{-2} lbf/ft ²
Area	1 ft ² = 144 in. ² = 929 cm ² = 0.0929 m ² 1 m ² = 10 ⁴ cm ² = 1550 in. ² = 10.76 ft ²
Volume	1 ft ³ = 1728 in. ³ = 2.832×10^4 cm ³ = 0.02832 m ³ 1 m ³ = 10 ⁶ cm ³ = 6.102×10^4 in. ³ = 35.31 ft ³ 1 gal (U.S. liquid) = 0.13368 ft ³ = 0.003785 m ³
Density	1 lbm/ft ³ = 0.03108 slug/ft ³ = 1.602×10^{-2} g/cm ³ = 16.02 kg/m ³ 1 kg/m ³ = 10^{-3} g/cm ³ = 0.00194 slug/ft ³ = 0.06242 lbm/ft ³
Viscosity (dynamic)	1 lbm/ft-hr = 8.634×10^{-6} slug/ft-sec = 4.134 $\times 10^{-3}$ g/cm-sec = 4.134×10^{-4} kg/m-sec 1 kg/m-sec = 10 g/cm-sec = 2.089×10^{-2} slug/ft-sec = 2.419×10^3 lbm/ft-hr
Thermal conductivity	1 Btu/ft-hr-F = 2.778×10^{-4} Btu/ft-sec-F = 1.730×10^5 erg/cm-sec-K = 1.730 W/m-K 1 W/m-K = 10^5 erg/cm-sec-K = 1.606×10^{-4} Btu/ft-sec-F = 0.578 Btu/ft-hr-F

Surface tension	1 lbf/ft = 1.459×10^4 dyne/cm = 14.59 N/m 1 N/m = 10^3 dyne/cm = 0.06854 lbf/ft
Latent heat of vaporization	1 Btu/lbm = 32.174 Btu/slug = 2.32×10^7 erg/g = 2.324×10^3 J/kg 1 J/kg = 10^4 erg/g = 1.384×10^{-2} Btu/slug = 4.303×10^{-4} Btu/lbm
Heat transfer coefficient	1 Btu/ft ² -hr-F = 5.674×10^3 erg/cm ² -sec-K = 5.674 W/m ² -K 1 W/m ² -K = 10^3 erg/cm ² -sec-K = 0.1762 Btu/ft ² -hr-F



รูป ข.2 ประสิทธิภาพของครีบ

PHYSICAL CONSTANTS

Gravitational acceleration (standard), $g = 32.174$ ft/sec² = 980.7 cm/sec² = 9.807 m/sec²

Universal gas constant, $\bar{R} = 1545.2$ ft-lbf/lbm-mol-R = 1.987 Btu/lbm-mol-R = 8.314×10^7 erg/g-mol-K = 8.314×10^3 J/kg-mol-K

Mechanical equivalent of heat, $J = 777.66$ ft-lbf/Btu = 4.184×10^7 erg/cal = 1 N-m/J

Stefan-Boltzman constant, $\sigma = 0.1713 \times 10^{-8}$ Btu/ft²-hr-R⁴ = 5.670×10^{-5} erg/cm²-sec-K⁴ = 5.670×10^{-8} W/m²-K⁴

ตาราง ข.3 ค่าคงที่

ภาคผนวก ค.

คุณสมบัติของน้ำและวัสดุของแข็ง

ตาราง ค.1 ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ

VOLUME PROPERTIES OF ORDINARY WATER

G. S. KELL

Reprinted by permission of the American Chemical Society, publishers of Journal of Chemical and Engineering Data, 12, 67-68 (1967)

(Specific volume v , density ρ , thermal expansivity $\alpha = d \ln v/dt = -d \ln \rho/dt$, compressibility $\kappa = -d \ln v/dp = d \ln \rho/dp$)

$t, ^\circ\text{C.}$	$v, \text{Cc./G.}$	$\rho, \text{G./Ml.}$	$10^6 \alpha, \text{Deg.}^{-1}$	$10^6 \kappa, \text{Bar}^{-1}$	$t, ^\circ\text{C.}$	$v, \text{Cc./G.}$	$\rho, \text{G./Ml.}$	$10^6 \alpha, \text{Deg.}^{-1}$	$10^6 \kappa, \text{Bar}^{-1}$
-20	1.00658	0.99349	-678.48	61.94	48	1.011194	0.988957	443.95	44.15
-18	1.00532	0.99474	-580.33	60.48	49	1.011647	0.988515	450.92	44.16
-16	1.00424	0.99581	-495.74	59.11	50	1.012107	0.988066	457.81	44.17
-14	1.00332	0.99672	-420.85	57.83	51	1.012574	0.987610	464.64	44.19
-12	1.00254	0.99749	-354.33	56.64	52	1.013048	0.987148	471.40	44.21
-10	1.001895	0.998137	-294.73	55.52	53	1.013529	0.986680	478.10	44.24
-9	1.001614	0.998417	-267.18	54.99	54	1.014017	0.986205	484.74	44.26
-8	1.001359	0.998671	-240.95	54.48	55	1.014512	0.985723	491.32	44.29
-7	1.001131	0.998899	-215.94	53.98	56	1.015014	0.985236	497.84	44.33
-6	1.000926	0.999102	-192.06	53.50	57	1.015522	0.984743	504.30	44.37
-5	1.000746	0.999283	-169.22	53.04	58	1.016038	0.984243	510.71	44.41
-4	1.000587	0.999441	-147.34	52.60	59	1.016560	0.983737	517.07	44.45
-3	1.000451	0.999578	-126.36	52.17	60	1.017089	0.983226	523.38	44.50
-2	1.000334	0.999694	-106.20	51.76	61	1.017625	0.982708	529.64	44.55
-1	1.000238	0.999790	-86.81	51.36	62	1.018167	0.982185	535.85	44.61
0	1.000160	0.999868	-68.14	50.98	63	1.018716	0.981655	542.02	44.66
1	1.000101	0.999927	-50.14	50.61	64	1.019271	0.981120	548.14	44.72
2	1.000060	0.999968	-32.77	50.26	65	1.019833	0.980580	554.22	44.79
3	1.000036	0.999992	-15.98	49.92	66	1.020402	0.980034	560.26	44.85
4	1.000028	1.000000	0.26	49.59	67	1.020977	0.979482	566.26	44.92
5	1.000036	0.999992	15.98	49.28	68	1.021558	0.978924	572.22	45.00
6	1.000060	0.999968	31.23	48.98	69	1.022146	0.978361	578.15	45.07
7	1.000098	0.999930	46.01	48.69	70	1.022740	0.977793	584.04	45.15
8	1.000151	0.999877	60.37	48.41	71	1.023340	0.977219	589.89	45.23
9	1.000219	0.999809	74.33	48.15	72	1.023947	0.976640	595.72	45.32
10	1.000300	0.999728	87.90	47.89	73	1.024560	0.976056	601.51	45.40
11	1.000395	0.999634	101.12	47.65	74	1.025180	0.975466	607.27	45.49
12	1.000502	0.999526	113.99	47.42	75	1.025805	0.974871	613.00	45.59
13	1.000623	0.999406	126.54	47.19	76	1.026437	0.974271	618.71	45.68
14	1.000755	0.999273	138.78	46.98	77	1.027076	0.973665	624.39	45.78
15	1.000900	0.999129	150.73	46.78	78	1.027720	0.973055	630.04	45.88
16	1.001057	0.998972	162.41	46.59	79	1.028371	0.972439	635.67	45.99
17	1.001225	0.998804	173.83	46.40	80	1.029027	0.971819	641.27	46.10
18	1.001405	0.998625	184.99	46.23	81	1.029690	0.971193	646.86	46.21
19	1.001596	0.998435	195.91	46.06	82	1.030360	0.970562	652.42	46.32
20	1.001797	0.998234	206.61	45.91	83	1.031035	0.969926	657.96	46.44
21	1.002010	0.998022	217.10	45.76	84	1.031716	0.969286	663.48	46.56
22	1.002232	0.997801	227.37	45.62	85	1.032404	0.968640	668.98	46.68
23	1.002465	0.997569	237.45	45.48	86	1.033098	0.967990	674.47	46.81
24	1.002708	0.997327	247.34	45.36	87	1.033797	0.967335	679.94	46.94
25	1.002961	0.997075	257.05	45.24	88	1.034503	0.966674	685.40	47.07
26	1.003224	0.996814	266.59	45.13	89	1.035216	0.966009	690.84	47.20
27	1.003496	0.996544	275.96	45.02	90	1.035934	0.965340	696.26	47.34
28	1.003778	0.996264	285.17	44.93	91	1.036658	0.964665	701.68	47.48
29	1.004069	0.995976	294.23	44.84	92	1.037389	0.963986	707.08	47.63
30	1.004369	0.995678	303.14	44.75	93	1.038125	0.963302	712.48	47.77
31	1.004678	0.995372	311.92	44.67	94	1.038868	0.962613	717.86	47.93
32	1.004995	0.995057	320.55	44.60	95	1.039617	0.961920	723.24	48.08
33	1.005322	0.994734	329.06	44.54	96	1.040372	0.961222	728.60	48.24
34	1.005657	0.994403	337.44	44.48	97	1.041133	0.960519	733.96	48.40
35	1.006000	0.994063	345.71	44.42	98	1.041900	0.959812	739.32	48.56
36	1.006352	0.993716	353.85	44.37	99	1.042673	0.959100	744.67	48.73
37	1.006713	0.993360	361.89	44.33	100	1.043453	0.958384	750.01	48.90
38	1.007081	0.992997	369.81	44.29	101	1.044239	0.957662	755.36	49.07
39	1.007457	0.992626	377.64	44.25	102	1.045030	0.956937	760.70	49.25
40	1.007842	0.992247	385.36	44.22	103	1.045828	0.956207	766.03	49.43
41	1.008234	0.991861	392.99	44.20	104	1.046633	0.955472	771.37	49.62
42	1.008634	0.991467	400.52	44.18	105	1.047443	0.954733	776.71	49.80
43	1.009042	0.991067	407.97	44.16	106	1.048260	0.953989	782.05	50.00
44	1.009458	0.990659	415.33	44.15	107	1.049083	0.953240	787.39	50.19
45	1.009881	0.990244	422.60	44.15	108	1.049912	0.952488	792.73	50.39
46	1.010311	0.989822	429.80	44.14	109	1.050747	0.951730	798.07	50.59
47	1.010749	0.989393	436.91	44.15	110	1.051589	0.950968	803.42	50.80

ตาราง ค.2 ความจุความร้อนของน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ



SPECIFIC HEAT OF WATER

Heat Capacity of Air-free Water 0°-100°C at 1 Atmosphere Pressure

The heat capacity of air-free water is given in international steam table calories per gram and in absolute joules per gram. (1 absolute joule = 0.238846 I.T. Cal.).

The enthalpy or heat content is given for air-free water in I.T. Cal. per gram and in absolute joules per gram.

From Osborne, Surness and Ginnings; B. of S. Jour. Res. 23, 238, 1939.

Temp. °C	Thermal Capacity		Enthalpy		Temp. °C	Thermal Capacity		Enthalpy	
	Cal./g/°C	Joules/g/°C	Cal./g	Joules/g		Cal./g/°C	Joules/g/°C	Cal./g	Joules/g
0	1.00738	4.2177	0.0245	0.1026	50	.99854	4.1807	50.0079	209.3729
1	1.00652	4.2141	1.0314	4.3184	51	.99862	4.1810	51.0065	213.5538
2	1.00571	4.2107	2.0376	8.5308	52	.99871	4.1814	52.0051	217.7350
3	1.00499	4.2077	3.0429	12.7400	53	.99878	4.1817	53.0039	221.9166
4	1.00430	4.2048	4.0475	16.9462	54	.99885	4.1820	54.0027	226.0984
5	1.00368	4.2022	5.0515	21.1498	55	.99895	4.1824	55.0016	230.2806
6	1.00313	4.1999	6.0549	25.3508	56	.99905	4.1828	56.0006	234.4632
7	1.00260	4.1977	7.0578	29.5496	57	.99914	4.1832	56.9997	238.6462
8	1.00213	4.1957	8.0602	33.7463	58	.99924	4.1836	57.9989	242.8296
9	1.00170	4.1939	9.0621	37.9410	59	.99933	4.1840	58.9982	247.0134
10	1.00129	4.1922	10.0636	42.1341	60	.99943	4.1844	59.9975	251.1976
11	1.00093	4.1907	11.0647	46.3255	61	.99954	4.1849	60.9970	255.3822
12	1.00060	4.1893	12.0654	50.5155	62	.99964	4.1853	61.9966	259.5673
13	1.00029	4.1880	13.0659	54.7041	63	.99976	4.1858	62.9963	263.7529
14	1.00002	4.1869	14.0660	58.8916	64	.99988	4.1863	63.9962	267.9390
15	.99976	4.1858	15.0659	63.0779	65	1.00000	4.1868	64.9961	272.1256
16	.99955	4.1849	16.0655	67.2632	66	1.00014	4.1874	65.9962	276.3127
17	.99933	4.1840	17.0650	71.4476	67	1.00026	4.1879	66.9964	280.5003
18	.99914	4.1832	18.0642	75.6312	68	1.00041	4.1885	67.9967	284.6885
19	.99897	4.1825	19.0633	79.8141	69	1.00053	4.1890	68.9972	288.8772
20	.99883	4.1819	20.0622	83.9963	70	1.00067	4.1896	69.9977	293.0665
21	.99869	4.1813	21.0609	88.1778	71	1.00081	4.1902	70.9985	297.2564
22	.99857	4.1808	22.0596	92.3589	72	1.00096	4.1908	71.9994	301.4469
23	.99847	4.1804	23.0581	96.5395	73	1.00112	4.1915	73.0004	305.6381
24	.99838	4.1800	24.0565	100.7196	74	1.00127	4.1921	74.0016	309.8299
25	.99828	4.1796	25.0548	104.8994	75	1.00143	4.1928	75.0030	314.0224
26	.99821	4.1793	26.0530	109.0788	76	1.00160	4.1935	76.0045	318.2155
27	.99814	4.1790	27.0512	113.2580	77	1.00177	4.1942	77.0062	322.4094
28	.99809	4.1788	28.0493	117.4369	78	1.00194	4.1949	78.0080	326.6039
29	.99804	4.1786	29.0474	121.6157	79	1.00213	4.1957	79.0101	330.7992
30	.99802	4.1785	30.0455	125.7943	80	1.00229	4.1964	80.0123	334.9952
31	.99799	4.1784	31.0435	129.9727	81	1.00248	4.1972	81.0147	339.1920
32	.99797	4.1783	32.0414	134.1510	82	1.00268	4.1980	82.0172	343.3897
33	.99797	4.1783	33.0394	138.3293	83	1.00287	4.1988	83.0200	347.5881
34	.99795	4.1782	34.0374	142.5076	84	1.00308	4.1997	84.0230	351.7873
35	.99795	4.1782	35.0353	146.6858	85	1.00327	4.2005	85.0262	355.9874
36	.99797	4.1783	36.0333	150.8641	86	1.00349	4.2014	86.0295	360.1883
37	.99797	4.1783	37.0312	155.0423	87	1.00370	4.2023	87.0331	364.3902
38	.99799	4.1784	38.0292	159.2207	88	1.00392	4.2032	88.0369	368.5929
39	.99802	4.1785	39.0272	163.3991	89	1.00416	4.2042	89.0410	372.7966
40	.99804	4.1786	40.0253	167.5777	90	1.00437	4.2051	90.0452	377.0012
41	.99807	4.1787	41.0233	171.7563	91	1.00461	4.2061	91.0497	381.2068
42	.99811	4.1789	42.0214	175.9351	92	1.00485	4.2071	92.0545	385.4135
43	.99816	4.1791	43.0195	180.1141	93	1.00509	4.2081	93.0594	389.6211
44	.99819	4.1792	44.0177	184.2933	94	1.00535	4.2092	94.0647	393.8297
45	.99826	4.1795	45.0159	188.4726	95	1.00561	4.2103	95.0701	398.0395
46	.99830	4.1797	46.0142	192.6522	96	1.00588	4.2114	96.0759	402.2503
47	.99835	4.1799	47.0125	196.8320	97	1.00614	4.2125	97.0819	406.4622
48	.99842	4.1802	48.0109	201.0120	98	1.00640	4.2136	98.0882	410.6753
49	.99847	4.1804	49.0094	205.1923	99	1.00669	4.2148	99.0947	414.8895
					100	1.00697	4.2160	100.1015	419.1049

ตาราง ค.3 ความนำความร้อนของน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ

THERMAL CONDUCTIVITY OF CERTAIN LIQUIDS

From NSRDS-NBS 8
R. W. Powell, C. Y. Ho, and P. E. Liley

The thermal conductivity, k , is given in the units Milliwatt $\text{cm}^{-1} \text{K}^{-1}$. To convert to $\text{Cal}(\text{gm}) \text{hr}^{-1} \text{cm}^{-1} \text{K}^{-1}$ multiply the values listed in the table by 0.860421

T (K)	Helium	Nitrogen	Argon	Carbon tetrachloride	Diphenyl	m-Terphenyl	Toluene	Water
2.4	0.192							
2.5	0.193							
2.8	0.197							
3.0	0.204							
3.2	0.214							
3.4	0.227							
3.6	0.241							
3.8	0.260							
4.0	0.282							
4.2	0.307							
4.4	(0.335)†							
4.6	(0.366)†							
4.8	(0.400)†							
5.0	(0.437)†							
5.2	(0.477)†							
60		1.692†						
65		1.598						
70		1.504						
75		1.411						
80		1.320†	1.315†					
85		1.229†	1.258					
90		1.140†	1.200†					
95		1.051†	1.141†					
100		0.965†	1.082†					
105		0.879†	1.023†					
110		0.794†	0.963†					
115		0.710†	0.903†					
120		0.627†	0.842†					
125		0.544†	0.780†					
130			0.717†					
135			0.654†					
140			0.591†					
145			0.527†					
150			0.463†				(1.710)†	
160							(1.694)†	
170							(1.699)†	
180							1.644	
190							1.619	
200							1.594	
210							1.569	
220							1.543	
230							1.518	
240				(1.169)†			1.492	
250				(1.160)†				
250				1.131			1.467	5.22†
260				1.112			1.442	5.39†
270				1.093			1.416	5.55†
280				1.074			1.391	5.71
290				1.055			1.366	5.92
300				1.036			1.340	6.09
310				1.017			1.315	6.23
320				0.997			1.289	6.37
330				0.978			1.264	6.48
340				0.959	(1.402)†		1.238	6.59
350				0.940	(1.387)†			
360				(0.921)	1.373	(1.361)†	1.213	6.68
370				(0.902)	1.359	(1.356)†	1.188	6.75
380				(0.882)	1.345	1.351	1.162	6.80
390				(0.863)	1.331	1.346	1.137	6.84†
400				(0.844)	1.316	1.341	(1.112)†	6.86†
410				(0.825)	1.302	1.335	(1.086)†	6.86†
420				(0.806)	1.288	1.329	(1.061)†	6.86†
430				(0.787)	1.274	1.323	(1.036)†	6.84†
440				(0.768)	1.259	1.317	(1.013)†	6.81†
450				(0.749)	1.245	1.310	(0.985)†	6.78†
460					1.231	1.304	(0.959)†	6.73†
470					1.217	1.297	(0.933)†	6.67†
480					1.202	1.290	(0.908)†	6.61†
490					1.188	1.283	(0.885)†	6.53†
500					1.174	1.276	(0.862)†	6.45†
510					1.160	1.268	(0.839)†	6.36†
520					1.146	1.261		6.24†
530					1.131	1.254		6.12†
540					1.117†	1.246		5.99†
550					1.103†	1.238		5.86†
560					1.089†	1.230		5.71†
570					1.074†	1.222		5.55†
580					1.060†	1.213		5.39†
590					1.046†	1.205		5.20†
600					1.032†	1.197		5.01†
610					1.018†	1.188		4.81†
620						1.180		4.60†
630						1.172		4.40†
640						1.163		(4.20)†
650						1.155†		(4.01)†
660						1.146†		

† Extrapolated for the supercooled liquid, [Approximate n.m.p. in K: N₂, 63; A, 84; CCl₄, 250; C₁₂H₁₀, 342; m-C₁₀H₈, 361; p-C₁₀H₈, 486; C₇H₈, 178; H₂O, 273.1].

‡ Under saturation vapor pressure [Approximate n.b.p. in K: He, 4.3; N₂, 77; A, 88; CCl₄, 360; C₁₂H₁₀, 528; m-C₁₀H₈, 637; p-C₁₀H₈, 668; C₇H₈, 384; H₂O, 373].

ตาราง ค.4 ความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ

THE VISCOSITY OF WATER 0°C TO 100°C

Contribution from the National Bureau of Standards; not subject to copyright.

°C	η (cp)	°C	η (cp)	°C	η (cp)	°C	η (cp)
0	1.787	26	0.3705	52	0.5290	78	0.3638
1	1.728	27	.3513	53	.5204	79	.3592
2	1.671	28	.3327	54	.5121	80	.3547
3	1.618	29	.3148	55	.5040	81	.3503
4	1.567	30	.2975	56	.4961	82	.3460
5	1.519	31	.2808	57	.4884	83	.3418
6	1.472	32	.2647	58	.4809	84	.3377
7	1.428	33	.2491	59	.4736	85	.3337
8	1.386	34	.2340	60	.4665	86	.3297
9	1.346	35	.2194	61	.4596	87	.3259
10	1.307	36	.2052	62	.4529	88	.3221
11	1.271	37	.1915	63	.4462	89	.3184
12	1.235	38	.1783	64	.4398	90	.3147
13	1.202	39	.1654	65	.4335	91	.3111
14	1.169	40	.1529	66	.4273	92	.3076
15	1.139	41	.1408	67	.4213	93	.3042
16	1.109	42	.1291	68	.4155	94	.3008
17	1.081	43	.1178	69	.4098	95	.2975
18	1.053	44	.1067	70	.4042	96	.2942
19	1.027	45	.9960	71	.3987	97	.2911
20	1.002	46	.9356	72	.3934	98	.2879
21	0.9779	47	.8755	73	.3882	99	.2848
22	.9543	48	.8156	74	.3831	100	.2818
23	.9325	49	.7561	75	.3781		
24	.9111	50	.6968	76	.3732		
25	.8904	51	.6378	77	.3684		

The above table was calculated from the following empirical relationships derived from measurements in viscometers calibrated with water at 20°C (and one atmosphere), modified to agree with the currently accepted value for the viscosity at 20° of 1.002 cp:

$$0^\circ \text{ to } 20^\circ \text{C: } \log_{10} \eta = \frac{1301}{998.333 + 3.1855(T-20) + 0.00585(T-20)^2} - 3.30233$$

(R. C. Hardy and R. L. Cottingham, J. Res. NBS 42, 573 (1949).)

$$20^\circ \text{ to } 100^\circ \text{C: } \log_{10} \frac{\eta}{\eta_{20}} = \frac{1.3272(20-T) - 0.001053(T-20)^2}{T + 105}$$

(J. F. Swindells, NBS, unpublished results.)

ตาราง ค.5 คุณสมบัติของน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ

WATER

Temp. °C	Latent Heat kJ/kg	Liquid Density kg/m ³	Vapour Density kg/m ³	Liquid Thermal Conductivity W/m°C	Liquid Viscos. cP	Vapour Viscos. cP×10 ²	Vapour Press. Bar	Vapour Specific Heat kJ/kg°C	Liquid Surface Tension N/m×10 ²
20	2448	998.2	0.01	0.512	1.00	0.96	0.02	1.35	7.40
40	2402	992.3	0.05	0.530	0.65	1.04	0.07	1.36	6.96
60	2359	983.0	0.14	0.549	0.47	1.12	0.20	1.37	6.52
80	2309	972.0	0.29	0.568	0.36	1.19	0.47	1.38	6.26
100	2258	958.0	0.60	0.580	0.28	1.27	1.01	1.38	5.89
120	2200	945.0	1.12	0.682	0.23	1.34	2.02	1.39	5.50
140	2139	928.0	1.99	0.683	0.20	1.41	3.90	1.90	5.06
160	2074	909.0	3.27	0.679	0.17	1.49	6.44	1.91	4.56
180	2003	888.0	5.16	0.669	0.15	1.57	10.04	1.92	4.29
200	1967	865.0	7.87	0.559	0.14	1.65	16.19	1.93	3.89

Properties of Saturated Steam (H₂O) at a Given Temperature (in International System of Units-SI)

Temperature		Pressure	Specific volume		Density		Specific enthalpy		Heat of vaporization $r=i''-i'$	Specific entropy	
t	T		Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor		Liquid	Vapor
$^{\circ}\text{C}$	K	p	v'	v''	ρ'	ρ''	i'	i''	r	s'	s''
		bar	m ³ /kg	m ³ /kg	kg/m ³	kg/m ³	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg K	kJ/kg K
0.01	273.16	0.006106	0.0010002	206.3	999.80	0.004847	0.00	2501	2501	0.0000	9.1544
1	274.15	0.006566	0.0010001	192.6	999.90	0.005192	4.22	2502	2498	0.0154	9.1281
2	275.15	0.007054	0.0010001	179.9	999.90	0.005559	8.42	2504	2496	0.0306	9.1018
3	276.15	0.007575	0.0010001	168.2	999.90	0.005945	12.63	2506	2493	0.0458	9.0757
4	277.15	0.008125	0.0010001	157.3	999.90	0.006357	16.84	2508	2491	0.0610	9.0498
5	278.15	0.008719	0.0010001	147.2	999.90	0.006793	21.05	2510	2489	0.0762	9.0241
6	279.15	0.009347	0.0010001	137.8	999.90	0.007257	25.25	2512	2489	0.0913	8.9978
7	280.15	0.010013	0.0010001	129.1	999.90	0.007746	29.45	2514	2485	0.1063	8.9736
8	281.15	0.010721	0.0010002	121.0	999.80	0.008264	33.55	2516	2482	0.1212	8.9485
9	282.15	0.011473	0.0010003	113.4	999.70	0.008818	37.85	2517	2479	0.1361	8.9238
10	283.15	0.012277	0.0010004	106.42	999.60	0.009398	42.04	2519	2477	0.1510	8.8994
11	284.15	0.013118	0.0010005	99.91	999.50	0.01001	46.22	2521	2475	0.1658	8.8752
12	285.15	0.014016	0.0010006	93.84	999.40	0.01066	50.41	2523	2473	0.1805	8.8513
13	286.15	0.014967	0.0010007	88.18	999.30	0.01134	54.60	2525	2470	0.1952	8.8276
14	287.15	0.015974	0.0010008	82.90	999.20	0.01206	58.78	2527	2468	0.2098	8.8040
15	288.15	0.017041	0.0010010	77.97	999.00	0.01282	62.97	2528	2465	0.2244	8.7806
16	289.15	0.018170	0.0010011	73.39	998.90	0.01363	67.16	2530	2463	0.2389	8.7574
17	290.14	0.019364	0.0010013	69.10	998.70	0.01447	71.34	2532	2461	0.2534	8.7344
18	291.15	0.02062	0.0010015	65.09	998.50	0.01536	75.53	2534	2458	0.2678	8.7116
19	292.15	0.02196	0.0010016	61.34	998.40	0.01630	79.72	2536	2456	0.2821	8.6890
20	293.15	0.02337	0.0010018	57.84	998.20	0.01729	83.90	2537	2454	0.2964	8.6665
21	294.15	0.02486	0.0010021	54.56	997.90	0.01833	88.09	2539	2451	0.3107	8.6442
22	295.15	0.02643	0.0010023	51.50	997.71	0.01942	92.27	2541	2449	0.3249	8.6220
23	296.15	0.02808	0.0010025	48.62	997.51	0.02057	96.46	2543	2447	0.3391	8.6001
24	297.15	0.02982	0.0010028	45.93	997.21	0.02177	100.63	2545	2444	0.3532	8.5785
25	298.15	0.03166	0.0010030	43.40	997.01	0.02304	104.81	2547	2442	0.3672	8.5570
26	299.15	0.03360	0.0010033	41.04	996.71	0.02437	108.99	2548	2440	0.3812	8.5358
27	300.15	0.03564	0.0010036	38.82	996.41	0.02576	113.17	2550	2437	0.3951	8.5147
28	301.15	0.03779	0.0010038	36.73	996.21	0.02723	117.35	2552	2435	0.4090	8.4938
29	302.15	0.04004	0.0010041	34.77	995.92	0.02876	121.53	2554	2432	0.4228	8.4730
30	303.15	0.04241	0.0010044	32.93	995.62	0.03037	125.71	2556	2430	0.4366	8.4523
31	304.15	0.04491	0.0010047	31.20	995.32	0.03205	129.89	2558	2428	0.4503	8.4319
32	305.15	0.04753	0.0010051	29.57	994.93	0.03382	134.07	2559	2425	0.4640	8.4117
33	306.15	0.05029	0.0010054	28.04	994.63	0.03566	138.25	2561	2423	0.4777	8.3916
34	307.15	0.05318	0.0010057	26.60	994.33	0.03759	142.42	2563	2421	0.4913	8.3716
35	308.15	0.05622	0.0010061	25.24	993.94	0.03962	146.60	2565	2418	0.5049	8.3519
36	309.15	0.05940	0.0010064	23.97	993.64	0.04172	150.78	2567	2416	0.5185	8.3323
37	310.15	0.06274	0.0010068	22.77	993.25	0.04392	154.96	2569	2414	0.5320	8.3129
38	311.15	0.06624	0.0010071	21.63	992.95	0.04623	159.14	2570	2411	0.5455	8.2938
39	312.15	0.06991	0.0010075	20.56	992.56	0.04864	163.32	2572	2409	0.5589	8.2748
40	313.15	0.07375	0.0010079	19.55	992.16	0.05115	167.50	2574	2406	0.5723	8.2559
41	314.15	0.07777	0.0010083	18.59	991.77	0.05379	171.67	2575	2403	0.5856	8.2372
42	315.15	0.08198	0.0010087	17.69	991.38	0.05653	175.86	2577	2401	0.5988	8.2187
43	316.15	0.08639	0.0010091	16.84	990.98	0.05938	180.04	2579	2399	0.6120	8.2003
44	317.15	0.09101	0.0010095	16.04	990.59	0.06234	184.22	2581	2397	0.6252	8.1820
45	318.15	0.09584	0.0010099	15.28	990.20	0.06544	188.40	2582	2394	0.6384	8.1638
46	319.15	0.10088	0.0010103	14.56	989.81	0.06868	192.58	2584	2391	0.6516	8.1458
47	320.15	0.10614	0.0010108	13.88	989.32	0.07205	196.76	2586	2389	0.6647	8.1279
48	321.15	0.11163	0.0010112	13.23	988.92	0.07559	200.93	2588	2387	0.6778	8.1102
49	322.15	0.11736	0.0010116	12.62	988.53	0.07924	205.11	2590	2385	0.6908	8.0927
50	323.15	0.12335	0.0010121	12.04	988.04	0.08306	209.3	2592	2383	0.7038	8.0753
51	324.15	0.12960	0.0010126	11.50	987.56	0.08696	213.5	2593	2380	0.7167	8.0579
52	325.15	0.13612	0.0010130	10.98	987.17	0.09107	217.7	2595	2377	0.7295	8.0407
53	326.15	0.14292	0.0010135	10.49	986.68	0.09533	221.9	2597	2375	0.7423	8.0236
54	327.15	0.15001	0.0010140	10.02	986.19	0.09980	226.0	2599	2373	0.7551	8.0068

Properties of Saturated Steam (H₂O) at a Given Temperature (in International System of Units—SI) (Continued)

Temperature		Pressure	Specific volume		Density		Specific enthalpy		Heat of vaporization	Specific entropy	
			Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor		Liquid	Vapor
<i>t</i>	<i>T</i>	<i>p</i>	<i>v</i> '	<i>v</i> "	<i>ρ</i> '	<i>ρ</i> "	<i>i</i> '	<i>i</i> "	<i>r</i> = <i>i</i> " - <i>i</i> '	<i>s</i> '	<i>s</i> "
°C	K	bar	m ³ /kg	m ³ /kg	kg/m ³	kg/m ³	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg K	kJ/kg K
55	328.15	0.15740	0.0010145	9.578	985.71	0.1044	230.2	2600	2370	0.7679	7.9901
56	329.15	0.16510	0.0010150	9.158	985.22	0.1092	234.4	2602	2368	0.7806	7.9736
57	330.15	0.17312	0.0010155	8.757	984.74	0.1142	238.6	2604	2365	0.7933	7.9571
58	331.15	0.18146	0.0010160	8.380	984.25	0.1193	242.8	2606	2363	0.8059	7.9407
59	332.15	0.19014	0.0010166	8.020	983.67	0.1247	246.9	2608	2361	0.8185	7.9245
60	333.15	0.19917	0.0010171	7.678	983.19	0.1302	251.1	2609	2358	0.8311	7.9084
61	334.15	0.2086	0.0010177	7.353	982.61	0.1360	255.3	2611	2355	0.8436	7.8925
62	335.15	0.2184	0.0010182	7.043	982.13	0.1420	259.5	2613	2353	0.8561	7.8767
63	336.15	0.2285	0.0010188	6.749	981.55	0.1482	263.7	2614	2350	0.8686	7.8609
64	337.15	0.2391	0.0010193	6.468	981.07	0.1546	267.9	2616	2348	0.8810	7.8452
65	338.15	0.2501	0.0010199	6.201	980.49	0.1613	272.1	2617	2345	0.8934	7.8297
66	339.15	0.2615	0.0010205	5.947	979.91	0.1681	276.2	2619	2343	0.9057	7.8144
67	340.15	0.2733	0.0010210	5.705	979.43	0.1753	280.4	2621	2341	0.9180	7.7992
68	341.15	0.2856	0.0010216	5.475	978.86	0.1826	284.6	2623	2338	0.9303	7.7841
69	342.15	0.2984	0.0010222	5.255	978.28	0.1903	288.8	2625	2336	0.9426	7.7692
70	343.15	0.3117	0.0010228	5.045	977.71	0.1982	293.0	2626	2333	0.9549	7.7544
71	344.15	0.3254	0.0010234	4.846	977.14	0.2064	297.2	2628	2331	0.9672	7.7396
72	345.15	0.3396	0.0010240	4.655	976.56	0.2148	301.4	2630	2329	0.9794	7.7249
73	346.15	0.3543	0.0010246	4.473	975.99	0.2236	305.6	2631	2326	0.9916	7.7103
74	347.15	0.3696	0.0010252	4.299	975.42	0.2326	309.8	2633	2323	1.0037	7.6958
75	348.15	0.3855	0.0010258	4.133	974.85	0.2420	314.0	2635	2321	1.0157	7.6815
76	349.15	0.4019	0.0010264	3.975	974.28	0.2516	318.2	2636	2318	1.0277	7.6673
77	350.15	0.4189	0.0010270	3.824	973.71	0.2615	322.4	2638	2316	1.0396	7.6533
78	351.15	0.4365	0.0010277	3.679	973.05	0.2718	326.4	2639	2313	1.0515	7.6393
79	352.15	0.4547	0.0010283	3.540	972.48	0.2825	330.6	2641	2310	1.0634	7.6254
80	353.15	0.4736	0.0010290	3.408	971.82	0.2934	334.9	2643	2308	1.0753	7.6116
81	354.15	0.4931	0.0010297	3.282	971.16	0.3047	339.1	2645	2306	1.0872	7.5979
82	355.15	0.5133	0.0010304	3.161	970.50	0.3164	343.3	2646	2303	1.0990	7.5843
83	356.15	0.5342	0.0010310	3.045	969.93	0.3284	347.5	2648	2300	1.1107	7.5707
84	357.15	0.5558	0.0010317	2.934	969.27	0.3408	351.7	2650	2298	1.1225	7.5572
85	358.15	0.5781	0.0010324	2.828	968.62	0.3536	355.9	2651	2295	1.1342	7.5438
86	359.15	0.6011	0.0010331	2.727	967.96	0.3667	360.1	2653	2293	1.1459	7.5305
87	360.15	0.6249	0.0010338	2.629	967.31	0.3804	364.3	2655	2291	1.1576	7.5174
88	361.15	0.6495	0.0010345	2.536	966.65	0.3943	368.5	2656	2288	1.1693	7.5044
89	362.15	0.6749	0.0010352	2.447	966.00	0.4087	372.7	2658	2285	1.1809	7.4915
90	363.15	0.7011	0.0010359	2.361	965.34	0.4235	377.0	2659	2282	1.1925	7.4787
91	364.15	0.7281	0.0010366	2.279	964.69	0.4388	381.2	2661	2280	1.2041	7.4660
92	365.15	0.7560	0.0010373	2.200	964.04	0.4545	385.4	2662	2277	1.2157	7.4533
93	366.15	0.7848	0.0010381	2.124	963.30	0.4708	389.6	2664	2274	1.2272	7.4407
94	367.15	0.8145	0.0010388	2.052	962.65	0.4873	393.8	2666	2272	1.2387	7.4281
95	368.15	0.8451	0.0010396	1.982	961.91	0.5045	398.0	2668	2270	1.2502	7.4155
96	369.15	0.8767	0.0010404	1.915	961.17	0.5222	402.2	2669	2267	1.2617	7.4030
97	370.15	0.9093	0.0010412	1.851	960.43	0.5402	406.4	2671	2265	1.2731	7.3907
98	371.15	0.9429	0.0010420	1.789	959.69	0.5590	410.7	2673	2262	1.2845	7.3786
99	372.15	0.9775	0.0010427	1.730	959.05	0.5780	414.9	2674	2259	1.2958	7.3666
100	373.15	1.0131	0.0010435	1.673	958.31	0.5977	419.1	2676	2257	1.3071	7.3547
101	374.15	1.0498	0.0010443	1.618	957.58	0.6181	423.3	2677	2254	1.3184	7.3429
102	375.15	1.0876	0.0010450	1.566	956.94	0.6386	427.5	2679	2251	1.3297	7.3311
103	376.15	1.1265	0.0010458	1.515	956.21	0.6601	431.7	2680	2248	1.3409	7.3193
104	377.15	1.1666	0.0010466	1.466	955.47	0.6821	436.0	2681	2245	1.3521	7.3076
105	378.15	1.2079	0.0010474	1.419	954.75	0.7047	440.2	2683	2243	1.3632	7.2959
106	379.15	1.2504	0.0010482	1.374	954.02	0.7278	444.4	2685	2241	1.3743	7.2843
107	380.15	1.2941	0.0010490	1.331	953.29	0.7513	448.6	2687	2238	1.3854	7.2728
108	381.15	1.3390	0.0010498	1.289	952.56	0.7758	452.9	2688	2235	1.3964	7.2614
109	382.15	1.3852	0.0010507	1.249	951.75	0.8006	457.1	2689	2232	1.4074	7.2500

Properties of Saturated Steam (H₂O) at a Given Temperature (in International System of Units—SI) (Continued)

Temperature		Pressure	Specific volume		Density		Specific enthalpy		Heat of vaporization	Specific entropy	
			Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor		Liquid	Vapor
<i>t</i>	<i>T</i>	<i>p</i>	<i>v</i> '	<i>v</i> ''	<i>ρ</i> '	<i>ρ</i> ''	<i>i</i> '	<i>i</i> ''	<i>r = i</i> '' - <i>i</i> '	<i>s</i> '	<i>s</i> ''
°C	K	bar	m ³ /kg	m ³ /kg	kg/m ³	kg/m ³	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg K	kJ/kg K
110	383.15	1.4326	0.0010515	1.210	951.02	0.8264	461.3	2691	2230	1.4184	7.2387
111	384.15	1.4814	0.0010523	1.173	950.30	0.8525	465.6	2693	2272	1.4294	7.2274
112	385.15	1.5316	0.0010532	1.137	949.49	0.8795	469.8	2694	2224	1.4404	7.2162
113	386.15	1.5831	0.0010540	1.102	948.77	0.9074	474.0	2696	2222	1.4514	7.2051
114	387.15	1.6361	0.0010549	1.069	947.96	0.9354	478.2	2697	2219	1.4624	7.1941
115	388.15	1.6905	0.0010559	1.036	947.15	0.9652	482.5	2698	2216	1.4733	7.1832
116	389.15	1.7464	0.0010567	1.005	946.34	0.9950	486.7	2700	2213	1.4842	7.1724
117	390.15	1.8038	0.0010576	0.9754	945.54	1.025	491.0	2702	2211	1.4951	7.1616
118	391.15	1.8628	0.0010585	0.9465	944.73	1.056	495.2	2703	2208	1.5060	7.1509
119	392.15	1.9233	0.0010594	0.9186	943.93	1.089	499.5	2705	2205	1.5169	7.1403
120	393.15	1.9854	0.0010603	0.8917	943.13	1.121	503.7	2706	2202	1.5277	7.1298
121	394.15	2.0491	0.0010612	0.8657	942.33	1.155	507.9	2708	2200	1.5385	7.1193
122	395.15	2.1144	0.0010621	0.8407	941.53	1.189	512.2	2709	2197	1.5492	7.1089
123	396.15	2.1814	0.0010630	0.8164	940.73	1.225	516.5	2710	2194	1.5599	7.0985
124	397.15	2.2502	0.0010640	0.7930	939.85	1.261	520.8	2712	2191	1.5706	7.0881
125	398.15	2.3208	0.0010649	0.7704	939.06	1.298	525.0	2713	2188	1.5814	7.0777
126	399.15	2.3932	0.0010658	0.7486	938.26	1.336	529.2	2715	2186	1.5922	7.0674
127	400.15	2.4674	0.0010668	0.7276	937.38	1.374	533.4	2716	2183	1.6029	7.0573
128	401.15	2.5434	0.0010677	0.7074	936.59	1.414	537.7	2718	2180	1.6135	7.0472
129	402.15	2.6213	0.0010687	0.6880	935.72	1.454	542.0	2719	2177	1.6240	7.0372
130	403.15	2.7011	0.0010697	0.6683	934.84	1.496	546.3	2721	2174	1.6354	7.0272
131	404.15	2.7829	0.0010707	0.6499	933.97	1.539	550.5	2722	2171	1.6450	7.0173
132	404.15	2.8668	0.0010717	0.6321	933.10	1.582	554.8	2723	2168	1.6555	7.0074
133	406.15	2.9528	0.0010727	0.6148	932.23	1.626	559.0	2724	2165	1.6659	6.9976
134	407.15	3.041	0.0010737	0.5981	931.36	1.672	563.2	2725	2162	1.6764	6.9878
135	408.15	3.130	0.0010747	0.5820	930.49	1.718	567.5	2727	2159	1.6869	6.9781
136	409.15	3.222	0.0010757	0.5664	929.63	1.765	571.8	2728	2156	1.6973	6.9685
137	410.15	3.317	0.0010767	0.5512	928.76	1.814	576.1	2730	2154	1.7078	6.9589
138	411.15	3.414	0.0010777	0.5366	927.90	1.864	580.4	2731	2151	1.7183	6.9493
139	412.15	3.513	0.0010788	0.5224	926.96	1.914	584.7	2733	2148	1.7278	6.9398
140	413.15	3.614	0.0010798	0.5087	926.10	1.966	589.0	2734	2145	1.7392	6.9304
141	414.15	3.717	0.0010808	0.4953	925.24	2.019	593.3	2735	2142	1.7496	6.9211
142	415.15	3.823	0.0010819	0.4824	924.30	2.073	597.6	2737	2139	1.7599	6.9117
143	416.15	3.931	0.0010829	0.4699	923.45	2.128	601.9	2738	2136	1.7702	6.9024
144	417.15	4.042	0.0010840	0.4579	922.51	2.184	606.2	2739	2133	1.7804	6.8932
145	418.15	4.155	0.0010851	0.4461	921.57	2.242	610.5	2740	2130	1.7907	6.8839
146	419.15	4.271	0.0010862	0.4347	920.64	2.300	614.8	2742	2127	1.8009	6.8747
147	420.15	4.389	0.0010873	0.4237	919.71	2.360	619.1	2743	2124	1.8112	6.8655
148	421.15	4.510	0.0010884	0.4130	918.78	2.421	623.4	2744	2121	1.8214	6.8564
149	422.15	4.634	0.0010895	0.4026	917.85	2.484	627.8	2745	2117	1.8316	6.8473
150	423.15	4.760	0.0010906	0.3926	916.93	2.547	632.2	2746	2114	1.8418	6.8383
151	424.15	4.889	0.0010917	0.3828	916.00	2.612	636.6	2748	2111	1.8520	6.8293
152	425.15	5.020	0.0010928	0.3733	915.08	2.679	641.0	2749	2108	1.8622	6.8204
153	426.15	5.155	0.0010939	0.3641	914.16	2.746	645.3	2750	2105	1.8723	6.8115
154	427.15	5.293	0.0010950	0.3552	913.24	2.815	649.6	2752	2102	1.8824	6.8027
155	428.15	5.433	0.0010962	0.3466	912.24	2.885	653.9	2753	2099	1.8924	6.7940
156	429.15	5.576	0.0010974	0.3381	911.24	2.958	658.2	2754	2096	1.9025	6.7854
157	430.15	5.723	0.0010986	0.3299	910.25	3.030	662.5	2755	2092	1.9125	6.7768
158	431.15	5.872	0.0010998	0.3220	909.26	3.106	666.9	2756	2089	1.9226	6.7681
159	432.15	6.024	0.0011009	0.3143	908.35	3.182	671.2	2757	2086	1.9326	6.7595
160	433.15	6.180	0.0011021	0.3068	907.36	3.258	675.6	2758	2082	1.9427	6.7508
161	434.15	6.339	0.0011033	0.2996	906.37	3.338	679.9	2759	2079	1.9527	6.7421
162	435.15	6.502	0.0011044	0.2925	905.47	3.419	684.2	2760	2076	1.9627	6.7335
163	436.15	6.667	0.0011056	0.2856	904.49	3.500	688.6	2761	2072	1.9726	6.7250
164	437.15	6.836	0.0011069	0.2790	903.42	3.584	692.9	2762	2069	1.9825	6.7165

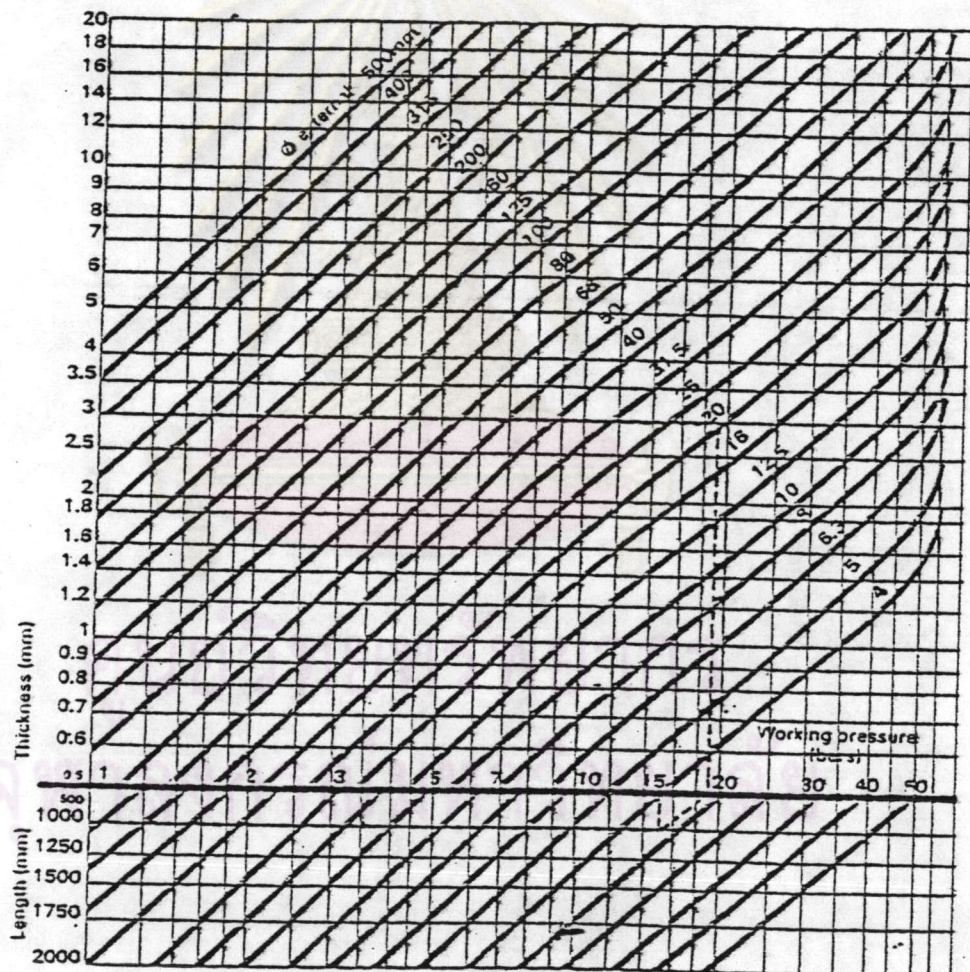
ตาราง ค.7 คุณสมบัติทางกายภาพของแก้ว Pyrex

Physical Properties

Coefficient of Expansion	$33 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ between 20°C - 300°C
Specific Heat	750 J/kg $^{\circ}\text{C}$ at 20°C
Thermal Conductivity	1.13 W/m $^{\circ}\text{K}$ at 20°C
Density	2.23×10^3 kg/m 3
Poisson's Ratio	0.22 between 25°C - 400°C
Young's Modulus	6,500 kg/mm 2 at 25°C
Rigidity Modulus	2,660 kg/mm 2 at 25°C
DPH (Vickers) Hardness	580 kg/mm 2 with 50 gram load
Knoop Hardness	550 kg/mm 2 with 50 gram load
Relative Hardness	1.52 (comparative Soda-Lime=1)
Refractive Index	1.474 Sodium D-Line
Dielectric Constant	4.6 at 1 MHz and 20°C
Power Factor	0.50% at 1 MHz and 20°C
Loss Factor	2.6% at 1 MHz and 20°C
Log $_{10}$ Volume Resistivity	15 ohm-cms at 20°C
Surface Resistivity	10^{13} ohms per square cm at 50% humidity

Thermal Conductivity
 at 20°C 1.13 W/m $^{\circ}\text{K}$
 150°C 1.25 W/m $^{\circ}\text{K}$
 300°C 1.42 W/m $^{\circ}\text{K}$

Safe working pressures



Pyrex tubing

Recommended safe working pressures, in relation to the external diameter wall thickness and the total length of the tube.

(1 kg/cm 2 = 0.98 bar or hpz)

Example: a 20 mm diameter tubing, with a 3 mm wall thickness
 for L = 500 mm $P_s = 19.5$
 for L = 1000 mm $P_s = 19.5$

(The testing pressure is considered to be twice that of the safe working pressure.)

รูป ค.1 ความดันใช้งานของแก้ว Pyrex ขนาดต่าง ๆ

ภาคผนวก ง.

โปรแกรมคอมพิวเตอร์

1. โปรแกรมคอมพิวเตอร์ การหาสมการถดถอยเชิงเส้น

```
10 REM Program least square fit (log-log)
20 INPUT "Number of data";N
30 DIM X(N),Y(N)
40 FOR I=1 TO N
50 INPUT "X(i)=";X(I)
60 INPUT "Y(i)=";Y(I)
70 X1=X1+LOG(X(I))
80 X2=X2+(LOG(X(I)))^2
90 X3=X3+LOG(X(I))*LOG(Y(I))
100 Y1=Y1+LOG(Y(I))
110 NEXT I
120 FOR I =1 TO N
130 X4=X4+(X(I)-X1/N)*(Y(I)-Y1/N)
140 X5=X5+(X(I)-X1/N)^2
150 Y2=Y2+(Y(I)-Y1/N)^2
160 NEXT I
170 R=X4/(X5*Y2)^.5
180 B=(X3-X1*Y1/N)/(X2-X1^2/N)
190 A=EXP((Y1-B*X1)/N)
200 PRINT TAB(10);"Y = A*X^B"
210 LPRINT TAB(10);"Y = A*X^B"
220 PRINT "A=";A,"B=";B,"R(XY)=";R
230 LPRINT "A=";A,"B=";B,"R(XY)=";R
240 END
```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. โปรแกรมคอมพิวเตอร์ หาคคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ

```

10 REM WATER PROPERTY
20 INPUT "temperature";T
30 REM WATER PROPERTY
40 DLQ=1000.84109#-.033900857##*T-.00495049544##*T^2+.0000104651299##*T^3
50 DVP=.00861462206#-.0000722105615##*T+.0000266703573##*T^2-.000000147758556##*T^3
  +4.772656490-09*T^4
60 VP=.0166082829#-.000734921545##*T+.0000627483241##*T^2-.000000654202949##*T^3+.0
  000000109653593##*T^4
70 CP=4201.92627#-1.62180901##*T+.0363622308##*T^2-.000309996307##*T^3+.00000122821
  439##*T^4
80 VIS=.00171670897#-.0000502196126##*T+.000000898907956##*T^2-9.856705680-09*T^3+
  5.971878550-11*T^4-1.517161510-13*T^5
90 K=.568971991##+.00190699428##*T-.00000891613161##*T^2+.0000000104898961##*T^3
100 HFG=2502612.69#-2500.41797##*T+4.46722412##*T^2-.0633306503##*T^3+.000228844583
  ##*T^4
110 SUR=(75.772898#-.149544895##*T-.0000302884728##*T^2-.00000350629125##*T^3+.0000
  00018903819##*T^4)/1000
120 PRINT"Liquid density =";DLQ;" Kg/m^3"
130 LPRINT"Liquid density =";DLQ;" Kg/m^3"
140 PRINT"Vapor density =";DVP;" Kg/m^3"
150 LPRINT"Vapor density =";DVP;" Kg/m^3"
160 PRINT"Vapor pressure=";VP;"bar"
170 LPRINT"Vapor pressure=";VP;"bar"
180 PRINT"Thermal conductivity of water =";K;" Watt/m-c"
190 LPRINT"Thermal conductivity of water =";K;" Watt/m-c"
200 PRINT"Heat capacity of water =";CP;" j/Kg"
210 LPRINT"Heat capacity of water =";CP;" j/Kg"
220 PRINT"Heat of vaporization =";HFG;" j/Kg"
230 LPRINT"Heat of vaporization =";HFG;" j/Kg"
240 PRINT"Viscosity of water =";VIS;" Kg/m-sec"
250 LPRINT"Viscosity of water =";VIS;" Kg/m-sec"
260 PRINT"Surface tension of water =";SUR;" N/m"
270 LPRINT"Surface tension of water =";SUR;" N/m"
280 END

```

3. โปรแกรมคอมพิวเตอร์การหาค่าคงที่ต่าง ๆ ในสมการการเดือด ของ Rohsenow

```

10 REM CALCULATION CONSTANTS OF ROHSENOW EQUATION (Csf,r)
20 INPUT "Number of data";N
30 DIM Q(N),TOH(N),TOC(N),TIH(N),TIC(N),DTQ(N),DTI(N),TS(N),UA(N)
40 DIM X(N),Y(N)
50 INPUT "Thermal conductivity of heat-pipe tube";KM
60 INPUT "Evaporator length (m)";LH
70 INPUT "Condenser length (m)";LC
80 INPUT "Outer radius of tube (m)";RO
90 INPUT "Inner radius of tube (m)";RI
100 FOR J=1 TO N
110 INPUT "Heat transfer rate (Watt)";Q(J)
120 INPUT "Evaporator temperature (c)";TOH(J)
130 INPUT "Condenser temperature (c)";TOC(J)
140 TIH(J) = TOH(J)-Q(J)*LOG(RO/RI)/2/3.14159/LH/KM
150 TIC(J) = TOC(J)+Q(J)*LOG(RO/RI)/2/3.14159/LC/KM
160 DTQ(J) = TOH(J)-TOC(J)
170 DTI(J) = TIH(J)-TIC(J)
180 UA(J) = Q(J)/DTQ(J)
190 NEXT J
200 FOR I=1 TO N
210 TS = TIC(I)
220 TF=(TIC(I)+TS)/2
230 T=TS
240 GOSUB 810
250 HV=HFG
260 T=TF
270 GOSUB 810
280 TR=.532*(4*Q(I)/(2*3.14159*RI)*VIS/HV/DLQ^2/9.810001)^(1/3)*Q(I)/(2*3.14159*
RI*LC)/K+TIC(I)
290 IF ABS(TR-TS)<=.001 THEN 320
300 TS=TR
310 GOTO 220
320 TS(I) = TS
330 NEXT I
340 FOR I =1 TO N
350 T =TS(I)
360 GOSUB 810
370 HV=HFG:P=VP:RV=DVP
380 T=(TS(I)+TIH(I))/2
390 GOSUB 810
400 Y(I)=K/HV*(TIH(I)-TS(I))/VIS
410 X(I)=Q(I)/(2*3.14159*RI*LH)/VIS/HV*(SUR/9.810001/(DLQ-RV))^5
420 X1=X1+LOG(X(I))
430 X2=X2+(LOG(X(I)))^2
440 X3=X3+LOG(X(I))*LOG(Y(I))
450 Y1=Y1+LOG(Y(I))
460 NEXT I
470 FOR I =1 TO N
480 X4=X4+(X(I)-X1/N)*(Y(I)-Y1/N)
490 X5=X5+(X(I)-X1/N)^2
500 Y2=Y2+(Y(I)-Y1/N)^2
510 NEXT I
520 R=X4/(X5*Y2)^.5
530 B=(X3-X1*Y1/N)/(X2-X1^2/N)
540 A=EXP((Y1-B*X1)/N)
550 PRINT"Y=A*X^B; A=";A,"B=";B,"R(xy)=";R
560 LPRINT"Y=A*X^B; A=";A,"B=";B,"R(xy)=";R
570 LPRINT

```

```

580 PRINT TAB(2); "Q(out)"; TAB(10); "UA(exp)"; TAB(20); "UA(cal)"; TAB(30); "Hih"; TAB(
40); "Hic"; TAB(58); "X"; TAB(68); "Y"
590 LPRINT TAB(2); "Q(out)"; TAB(10); "UA(exp)"; TAB(20); "UA(cal)"; TAB(30); "Hih"; TAB
(40); "Hic"; TAB(58); "X"; TAB(68); "Y"
600 FOR I =1 TO N
610 T =TS(I)
620 GOSUB 810
630 HV=HFG:P=VP:RV=DVP
640 X1=X1+X(I)
650 T=(TS(I)+TIH(I))/2
660 GOSUB 810
670 HIH=Q(I)^(1-B)*CP/A/HV/CP/VIS*K/(1/VIS/HV/(2*3.14159*RI*LH)*(SUR/9.810001/(D
LQ-RV))^5)^B/(2*3.14159*RI*LH)
680 T=(TIC(I)+TS(I))/2
690 GOSUB 810
700 HIC=1.47*K*(HV*DLQ^2*9.810001/4/Q(I)*(2*3.14159*RI)/VIS)^(1/3)
710 UAC=1/(LOG(RO/RI)/2/3.14159/KM/LH+1/(HIH*2*3.14159*RI*LH)+LOG(RO/RI)/2/3.141
59/KM/LC+1/HIC/2/3.14159/RI/LC)
720 VAR=VAR+(UAC-UA(I))^2
730 PRINT TAB(1); Q(I); TAB(9); UA(I); TAB(20); UAC; TAB(30); HIH; TAB(40); HIC; TAB(55); X
(I); TAB(65); Y(I)
740 LPRINT TAB(1); Q(I); TAB(9); UA(I); TAB(20); UAC; TAB(30); HIH; TAB(40); HIC; TAB(55);
X(I); TAB(65); Y(I)
750 NEXT I
760 PRINT "Variance of UA (SS) ="; VAR
770 LPRINT
780 LPRINT "Variance of UA (SS) ="; VAR
790 END
800 END
810 REM WATER PROPERTY
820 DLQ=1000.84109#-.033900857#*T-.00495049544#*T^2+.0000104651299#*T^3
830 DVP=.00861462206#-.0000722105615#*T+.0000266703573#*T^2-.000000147758556#*T^
3+4.77265649D-09*T^4
840 VP=.0166082829#-.000734921545#*T+.0000627483241#*T^2-.000000654202949#*T^3+.
0000000109653593#*T^4
850 CP=4201.92627#-1.62180901#*T+.0363622308#*T^2-.000309996307#*T^3+.0000012282
1439#*T^4
860 VIS=.00171670897#-.0000502196126#*T+.000000898907956#*T^2-9.85670568D-09*T^3
+5.97187855D-11*T^4-1.51716151D-13*T^5
870 K=.568971991#+.00190699428#*T-.00000891613161#*T^2+.0000000104898961#*T^3
880 HFG=2502612.69#-2500.41797#*T+4.46722412#*T^2-.0633306503#*T^3+.000228844583
#*T^4
890 SUR=(75.772898#-.149544895#*T-.0000302884728#*T^2-.00000350629125#*T^3+.0000
00018903819#*T^4)/1000
900 RETURN

```

4. โปรแกรมคอมพิวเตอร์การคำนวณออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

```

10 REM PROGRAM CALCULATES HEAT-PIPE HEAT EXCHANGER AREA
20 REM WATER IS WORKING FLUID OF HEAT-PIPE
30 REM water is the woking fluid of heat pipe
40 INPUT"OUTTER DIAMETER OF HEAT-PIPE (M)";ODP
50 INPUT"INNER DIAMETER OF HEAT-PIPE (M)";IDP
60 INPUT"EVAPORATING LENGTH (M)";LE
70 INPUT"CONDENSATIONN LENGTH (m)";LC
80 INPUT"HEIGHT OF WORKING FLUID IN PIPE FROM BOTTOM (M)";LW
90 INPUT"TEMPERATURE OF HOT FLUID IN (C)";THIN
100 INPUT"temperature of hot fluid out (m)";THOT
110 INPUT"MASS FLOW RATE OF HOT FLUID (kg/sec)";FH
120 INPUT"Heat capacity of hot fluid (j/Kg)";CPH
130 INPUT "Heat transfer coefficient of hot outter surface (Watt/m^2/c)";HOH
140 INPUT"Effective hot surface area (m^2) ";AOH
150 INPUT"TEMPERATURE OF COOL FLUID IN (C)";TCIN
160 INPUT"temperature of cool fluid out (c)";TCOT
170 INPUT"MASS FLOW RATE OF COOL FLUID (KG/sec)";FC
180 INPUT"Heat capacity of cool fluid (j/Kg)";CPC
190 INPUT "Heat transfer coefficient of cool outter surface (Watt/m^2/c)";HOC
200 INPUT"Effective cool surface area (m^2) ";AOC
210 INPUT"constant Csf =";CSF
220 INPUT"THERMAL CONDUCTIVITY OF HEAT PIPE TUBE (W/M-C)";KP
230 LMTD=((THIN-TCOT)-(THOT-TCIN))/LOG((THIN-TCOT)/(THOT-TCIN))
240 Q=FH*CPH*(THIN-THOT)
250 THOA=(THIN+THOT)/2
260 TCOA=(TCIN+TCOT)/2
270 DT=THOA-TCOA
280 UA=1/(1/HOH/AOH+LOG(ODP/IDP)/2/3.14159/KP/LE+LOG(ODP/IDP)/2/3.14159/KP/LC+1/HOC/AOC)
290 QOUT=UA*DT
300 TIH = THOA-QOUT*LOG(ODP/IDP)/2/3.14159/KP/LE-QOUT/HOH/AOH
310 TIC = TCOA-QOUT*LOG(ODP/IDP)/2/3.14159/KP/LC-QOUT/HOC/AOC
320 TS = TIC
330 TF=(TIC+TS)/2
340 T=TS
350 GOSUB 620
360 HV=HFG
370 T=TF
380 GOSUB 620
390 TR=.532*(4*QOUT/3.14159/IDP*VIS/HV/DLQ^2/9.810001)^(1/3)*QOUT/3.14159/IDP/LC/K+TIC
400 IF ABS(TR-TS)<=.001 THEN 430
410 TS=TR
420 GOTO 330
430 T =TS
440 GOSUB 620
450 HV=HFG:P=VP:RV=DVP
460 TF=(TS+TIC)/2
470 T=TF
480 GOSUB 620
490 HIC=1.47*K*(HV*DLQ^2*9.810001/4/QOUT*3.14159*IDP/VIS)^(1/3)
500 T=(TS+TIH)/2

```

```

510 GOSUB 630
520 HIH = QOUT^.67*CP/CSF/HV/CP/VIS*K/(1/VIS/HV/3.14159/IDP/LW*(SUR/9.8/(DLQ-RV)
)^.5)^.33/3.14159/IDP/LW
530 HIF=1.47*K*(HV*DLQ^2*9.810001/4/QOUT*3.14159*IDP/(LE-LW)*LE/VIS)^(1/3)
540 UAC=1/(1/UA+1/(HIH*3.14159*IDP*LW+HIF*3.14159*IDP*LF)+1/HIC/3.14159/IDP/LC)
550 QC=UAC*LMTD
560 IF ABS(QC-QOUT) <=.001 THEN 590
570 QOUT=(QC+QOUT)/2
580 GOTO 300
590 N=Q/QC
600 PRINT"Number of heat pipe tube ";N
610 LPRINT TAB(5);"Number of heat pipe tube ";N
620 END
630 REM WATER PROPERTY
640 DLQ=1000.84109#-.033900857#*T-.00495049544#*T^2+.0000104651299#*T^3
650 DVP=.00861462206#-.0000722105615#*T+.0000266703573#*T^2-.000000147758556#*T^
3+4.77265649D-09*T^4
660 VP=.0166082829#-.000734921545#*T+.0000627483241#*T^2-.000000654202949#*T^3+.
0000000109653593#*T^4
670 CP=4201.92627#-1.62180901#*T+.0363622308#*T^2-.000309996307#*T^3+.0000012282
1439#*T^4
680 VIS=.00171670897#-.0000502196126#*T+.000000898907956#*T^2-9.85670568D-09*T^3
+5.97187855D-11*T^4-1.51716151D-13*T^5
690 K=.568971991#+.00190699428#*T-.00000891613161#*T^2+.0000000104898961#*T^3
700 HFG=2502612.69#-2500.41797#*T+4.46722412#*T^2-.0633306503#*T^3+.000228844583
#*T^4
710 SUR=(75.772898#-.149544895#*T-.0000302884728#*T^2-.00000350629125#*T^3+.0000
00018903819#*T^4)/1000
720 RETURN

```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชีวประวัติ

นายมิชัย ตั้งสถาพรพาณิชย์ เกิดวันที่ 28 เมษายน 2497
จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมี
จากคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล เมื่อปีการศึกษา 2525.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย