



บทที่ 2

ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการสร้างสีทไปป์และการวิเคราะห์การทำงานของ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบสีทไปป์ไวัวิกค์

ในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน สิ่งที่จะต้องคำนึงถึงเป็นสิ่งแรกคือ การเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเงื่อนไขการใช้งาน (ความดัน อุณหภูมิ เป็นต้น) ตลอดจนคุณสมบัติเชิงกายภาพ และคุณสมบัติเชิงเคมีของของไหลที่ต้องการจะแลกเปลี่ยนความร้อน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบสีทไปป์ก็เช่นกัน ไม่อาจจะละเลยประเด็นหลักในการพิจารณานี้ได้ นอกจากนี้ในกรณีของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบสีทไปป์ เรายังจะต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมกันขององค์ประกอบที่สำคัญของสีทไปป์อีกด้วย องค์ประกอบที่สำคัญของสีทไปป์ไวัวิกค์นั้นมี 2 ส่วนหลักคือ

1. ของไหลใช้งาน
2. วัสดุที่ใช้ทำท่อ

ต่อไปนี้จะกล่าวถึงหลักการในการเลือกองค์ประกอบทั้ง 2 นี้และหลักการวิเคราะห์การทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบสีทไปป์ อนึ่ง การพิจารณาออกแบบเพื่อให้เหมาะสมกับของไหลภายนอกนั้นจะเป็นไปในทำนองเดียวกันกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดอื่นๆ (48) ซึ่งจะขอไม่นำมากล่าวไว้ในที่นี้

2.1 การเลือกของไหลใช้งาน (10, 11, 12)

หัวข้อแรกในการพิจารณาเพื่อเลือกใช้ของไหลใช้งานที่เหมาะสม ก็คือ ช่วงของอุณหภูมิใช้งานที่เหมาะสมสำหรับของไหลชนิดต่างๆ จากข้อมูลที่น่ามาแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิที่ใช้งานหนึ่งๆนั้นอาจมีของไหลหลายชนิดที่สามารถนำมาใช้งานได้ ดังนั้น จึงต้องนำคุณสมบัติอื่นๆมาพิจารณาประกอบเพื่อเลือกของไหลที่เหมาะสมกับการใช้งานมากที่สุด

ตารางที่ 2.1 ช่วงอุณหภูมิใช้งานที่เหมาะสมของของไหลใช้งานชนิดต่างๆ (12)

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

ปัจจัยพื้นฐานที่นำมาประกอบการพิจารณาเลือกของไหลใช้งาน ได้แก่

1. มีความเหมาะสมกับวัสดุที่ใช้ทำท่อ
2. มีเสถียรภาพเชิงความร้อนสูง
3. มีความสามารถในการเปียกวัสดุที่ใช้ทำท่อ
4. มีความดันไอไม่สูงหรือต่ำเกินไปในช่วงอุณหภูมิใช้งาน
5. มีค่าความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอสูง
6. มีความนำความร้อนสูง
7. เป็นของเหลวและไอที่มีค่าความหนืดต่ำ
8. เป็นสารที่มีจุดแข็งตัวและจุดไหลต่างจากอุณหภูมิใช้งานในช่วงที่ยอมรับได้

2.1.1 ความเหมาะสมกับวัสดุที่ใช้ทำท่อ

จะต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมของของไหลใช้งานกับวัสดุที่ใช้ทำท่อ และวิธีการในการประกอบ รายละเอียดในการพิจารณาความเหมาะสมนี้จะได้กล่าวถึงในหัวข้อการเลือกวัสดุทำท่อ

2.1.2 เสถียรภาพเชิงความร้อนสูง

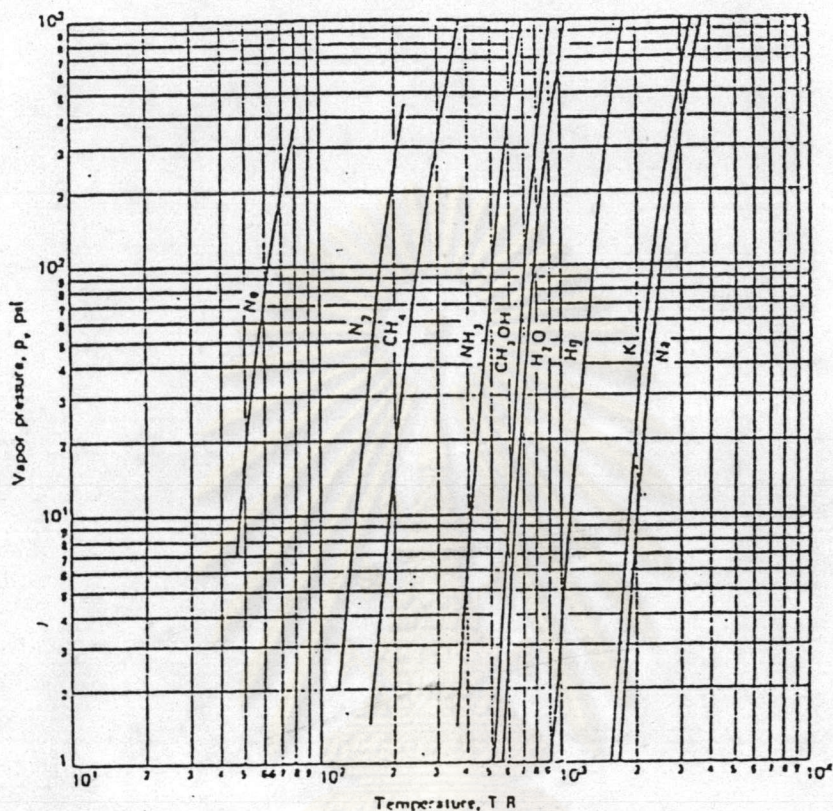
สิ่งหนึ่งที่จะต้องพิจารณาคือ การสลายตัวของของไหลใช้งานที่อาจเกิดขึ้นได้เนื่องจากความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งพวกสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งจะต้องรักษาอุณหภูมิของการใช้งานให้ต่ำกว่าค่าที่กำหนด เพื่อป้องกันการแตกตัวของของไหลใช้งานเป็นสารประกอบชนิดอื่น ดังนั้นจึงควรเลือกของไหลใช้งานที่มีเสถียรภาพเชิงความร้อนสูงในช่วงอุณหภูมิใช้งานที่ต้องการ

2.1.3 ความสามารถในการเป็ยวัสดุที่ใช้ทำท่อ

ความสามารถในการเป็ยวัสดุที่ใช้ทำท่อ หมายถึง การที่ของไหลใช้งานจะต้องเกาะเป็ยผิวของวัสดุที่ใช้ทำท่อได้ดี นั่นคือ มุมสัมผัสระหว่างผิวของหยดของไหลกับวัสดุที่ใช้ทำท่อจะต้องมีค่าเท่ากับศูนย์หรือมีค่าน้อยมาก

2.1.4 ความดันไอไม่สูงหรือต่ำเกินไปในช่วงอุณหภูมิใช้งาน

ความดันไอของของไหลใช้งานตลอดช่วงของอุณหภูมิใช้งาน จะต้องมีความสูงเพียงพอ ทั้งนี้ เพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้ไอของของไหลใช้งานมีความเร็วน้อยเกินไป ซึ่งจะทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิตามแนวท่อฮีทไปป์สูง อย่างไรก็ตาม ความดันไอจะต้องไม่สูงเกินไป เพราะจะทำให้ต้องใช้ท่อที่มีผนังหนามาก อันเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายโดยไม่จำเป็น โดยปกติแล้วมักกำหนดให้ความดันที่ปลายบนสุดของท่อฮีทไปป์มีค่าไม่ควรเกิน 7 บรรยากาศ (48)



รูปที่ 2.1 ความดันไอที่อุณหภูมิต่างๆของของไหลใช้งาน

2.1.5 ค่าความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอสูง

ถ้าของไหลใช้งานมีค่าความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอสูง ไอของของไหลจะสามารถถ่ายเทความร้อนได้ในอัตราสูง โดยมีการไหลของไอของของไหลในอัตราต่ำ ดังนั้นค่าความดันลดภายในท่อฮีทไปป์จะมีค่าต่ำ และความแตกต่างของอุณหภูมิภายในท่อฮีทไปป์มีค่าไม่สูงมากนัก

2.1.6 ความนำความร้อนสูง

ความนำความร้อนของของไหลใช้งาน ควรจะมีค่าสูงเพื่อทำให้ผลต่างของอุณหภูมิในแนวรัศมีของท่อมีค่าต่ำ

2.1.7 ของเหลวและไอมีค่าความหนืดต่ำ

ของไหลใช้งานทั้งในสถานะของเหลวและไอควรมีค่าความหนืดต่ำ เพราะจะทำให้ค่าความต้านทานการไหลมีค่าต่ำ จึงเกิดการไหลเวียนอย่างสะดวกและรวดเร็ว

2.1.8 จุดแข็งตัวและจุดไหลห่างจากอุณหภูมิใช้งานในช่วงที่ยอมรับได้

ของไหลใช้งานจะต้องมีสภาวะเป็นของเหลว และมีจุดไหล (pour point) ห่างจากช่วงของอุณหภูมิใช้งานมากพอ เพื่อให้ของเหลวที่ควบแน่นในช่วงการควบแน่นสามารถไหลกลับสู่ช่วงการระเหยได้ทัน

ในกรณีที่มีของไหลใช้งานให้เลือกใช้มากกว่าหนึ่งชนิด เราอาจใช้ตัวเลขเมอริท (Merit Number, M) หรือ Liquid Transfer Factor เป็นเกณฑ์ในการเลือกสารที่ให้การถ่ายเทความร้อนสูง ดังนี้

$$M = \rho_0 \sigma_0 L / \mu_L \quad (2.1)$$

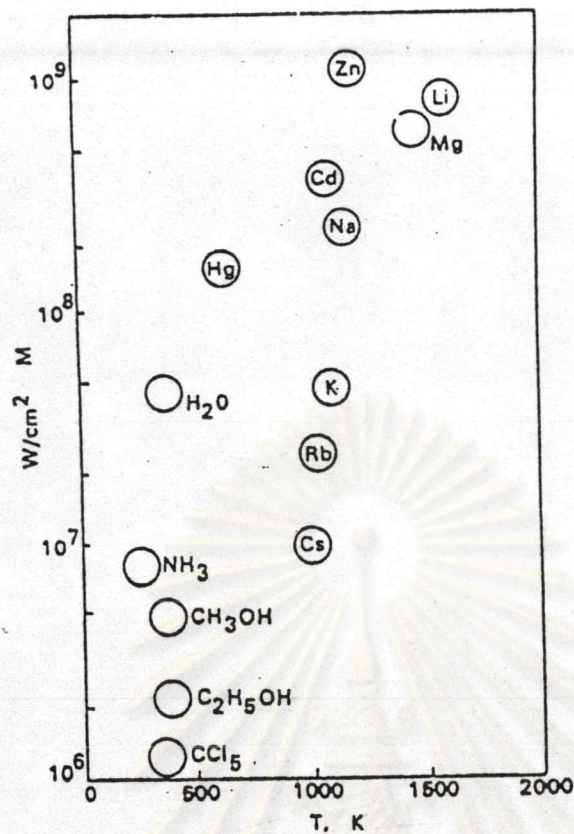
เมื่อ

ρ_0 = ความหนาแน่นของของเหลว

σ_0 = ค่าแรงตึงผิวของของไหลใช้งาน

L = ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของของไหลใช้งาน

μ_L = ค่าความหนืดของของไหลใช้งาน



รูปที่ 2.2 ค่าตัวเลขเมอริทของของไหลใช้งานชนิดต่างๆที่อุณหภูมิจุดเดือด (1๖)

ตารางที่ 2.2 ค่าตัวเลขเมอริท (M) ที่จุดเดือดของของไหลใช้งานในช่วงอุณหภูมิระหว่าง -200 ถึง 1500 องศาเซลเซียส (63)

Normal operating temperature range, °C	Working fluid	Properties at atmospheric pressure		Suitable material for shell and wick
		Boiling point, °C	Liquid transport factor, kW/m²	
-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	5×10^6	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 1 500	Lithium	1 330	8×10^9	Tantalum, TZM

จากรูปที่ 2.2 และตารางที่ 2.2 จะเห็นว่า น้ำเป็นของไหลใช้งานที่ น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง เพราะมีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอและค่าแรงตึง-ผิวสูง เมื่อเปรียบเทียบกับของไหลอินทรีย์ชนิดอื่นๆ อาทิเช่น อะซิโตน และ แอลกอฮอล์

นอกจากประเด็นต่างๆในการเลือกที่กล่าวมาแล้ว ประเด็นสุดท้ายที่ต้อง ไม่ลืมในการเลือกของไหลใช้งานได้แก่ ราคา ความยากง่ายในการซื้อหา และการออมซ่อมระหว่างปัจจัยต่างๆข้างต้น ตลอดจนตัวเลขเมอริท

รายละเอียดการเลือกและข้อมูลของของไหลใช้งานเพิ่มเติมจะหาได้จาก เอกสารอ้างอิง (10, 11, 12)

2.2 การเลือกวัสดุทำท่อฮีทไปป์ไว้วิคค์ (12)

หน้าที่ของตัวท่อฮีทไปป์คือ แยกของไหลใช้งานจากของไหลภายนอก ดังนั้นตัวท่อที่ใช้ทำฮีทไปป์จะต้องไม่รั่ว สามารถทนต่อความดันที่แตกต่างกันระหว่าง ภายในและภายนอก และสามารถทำการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังท่อไปมาระหว่าง ของไหลใช้งานและภายนอกได้ดี นั่นคือมีค่าความนำความร้อนสูงนั่นเอง

การเลือกวัสดุที่ใช้ทำท่อนั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่ต้องพิจารณาหลายประการ อันได้แก่

1. ความเหมาะสมกันระหว่างวัสดุที่ใช้ทำท่อกับของไหลใช้งานที่อยู่ภายในและกับของไหลภายนอก
2. อัตราส่วนของความแข็งแรงต่อน้ำหนักของวัสดุที่จะใช้ทำตัวท่อ
3. ความนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำท่อ
4. ความยากง่ายในการขึ้นรูป, การเชื่อม
5. ความสามารถในการเปียกของของไหลใช้งานที่อยู่ภายในและของไหลภายนอกกับวัสดุที่ใช้ทำท่อ

2.2.1 ความเหมาะสมกันระหว่างวัสดุที่ใช้ทำท่อกับของไหลใช้งานที่อยู่ภายในและกับของไหลภายนอก

การพิจารณาเลือกวัสดุที่จะใช้ทำท่อนั้น จะต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมของวัสดุกับของไหลทั้ง 2 ด้าน โดยจะพิจารณาถึงการกัดกร่อนเป็นประเด็น

หลัก นอกจากนั้นความเหมาะสมกันของของไหลใช้งานกับวัสดุที่ใช้ทำท่อฮีทไปป์จะเกี่ยวข้องกับปัญหาทางด้านอายุการใช้งานของฮีทไปป์

สรุปแล้วปัญหาหลักของความไม่เหมาะสมระหว่างของไหลใช้งานกับท่อฮีทไปป์ไว้วิคค์มี 2 ประการคือ

- การกัดกร่อน
- การเกิดการสร้างก๊าซซึ่งไม่ควบแน่น

(non-condensable gas)

การกัดกร่อนของของไหลใช้งานต่อท่อฮีทไปป์ไว้วิคค์ เป็นปัญหาพื้นฐานในทำนองเดียวกันกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดอื่นๆ ฮีทไปป์จะไม่สามารถทำงานได้เลยถ้าเกิดการรั่วซึม ส่วนการเกิดก๊าซซึ่งไม่ควบแน่นนั้น ก็เป็นปัญหาที่พบได้บ่อยที่ทำให้ฮีทไปป์ไม่สามารถทำงานได้หรือมีประสิทธิภาพไม่ดีเท่าที่ควร ก๊าซที่เกิดขึ้นเหล่านี้มักจะสะสมอยู่ในช่องของการควบแน่น ซึ่งจะนำไปกีดขวางการควบแน่นของไอของของไหลใช้งาน ปัญหาที่เกิดขึ้นนี้สามารถจะตรวจพบได้ง่าย โดยสังเกตการลดของอุณหภูมิตามแนวแกนอย่างชัดเจนที่ช่วงต่อระหว่างไอกับก๊าซที่ไม่ควบแน่นที่สะสมอยู่

อนึ่ง เป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องพึงระลึกถึงเสมอว่า แม้ว่าจะมีการพิจารณาเลือกองค์ประกอบทั้ง 2 อย่าง โดยพิจารณาจากเอกสารอ้างอิงต่างๆ เพื่อขจัดปัญหาที่กล่าวถึงนี้แล้วก็ตาม ก็ยังอาจจะเกิดปัญหาได้ ถ้ามีขั้นตอนในการประกอบแตกต่างกัน หรือขั้นตอนในการเตรียมชิ้นงานแตกต่างกัน ดังนั้น จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องหาข้อมูลเกี่ยวกับความเหมาะสมกันขององค์ประกอบใหม่ทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนในการทำความสะอาดท่อ หรือขั้นตอนในการประกอบ

นอกจากนี้ การผุกร่อนของวัสดุท่อเพียงเล็กน้อย ก็จะทำให้คุณสมบัติของผิวท่อภายในเปลี่ยนไป ผลก็คือมุมของการเป็ยผิวดระหว่างของไหลใช้งานกับผิวท่อจะเปลี่ยนไป อีกทั้งยังอาจเกิดเศษอนุภาคของของแข็งขึ้นกีดขวางการไหลกลับของของไหลใช้งาน หรืออาจเกิดก๊าซที่ไม่ควบแน่นขึ้น ผลก็คือทำให้สมรรถนะของฮีทไปป์ไว้วิคค์ต่ำลงเช่นกัน

ตารางที่ 2.3 ความเข้ากันได้ของวัสดุท่อกับของไหลใช้งาน (12)

(ก)

Structural Material	Working Fluid					
	Water	Acetone	Ammonia	Methanol	Dow-A	Dow-E
Copper	RU	RU	NR	RU	RU	RU
Aluminium	GNC	RL	RU	NR	UK	NR
Stainless Steel	GNT	PC	RU	GNT	RU	RU
Nickel	PC	PC	RU	RL	RU	RL
Refrasil Fibre	RU	RU	RU	RU	RU	RU

RU Recommended by past successful usage

RL Recommended by literature

PC Probably compatible

NR Not recommended

UK Unknown

GNC Generation of gas at all temperatures

GNT Generation of gas at elevated temperatures, when
oxide present

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

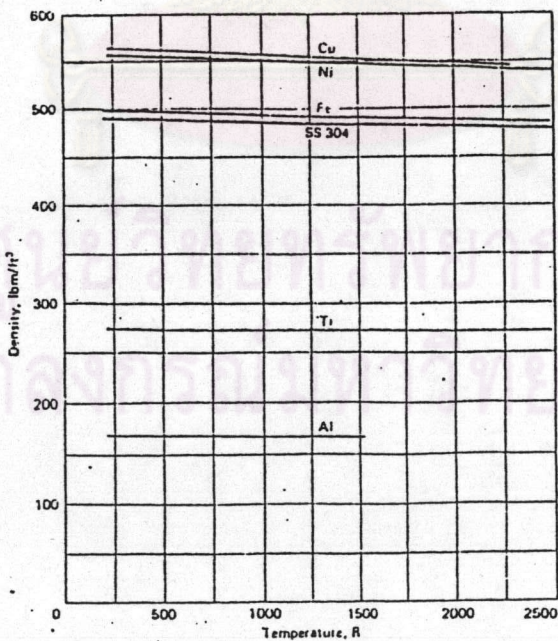
(ข)

Working Fluid	Structural Material				
	Aluminum	Copper	Nickel	Type 304 Stainless Steel	Niobium
Nitrogen				Y	
Ammonia	Y	N	Y	Y	
Freon-11	Y				
Methanol	N	Y	Y	Y	
Acetone	D	Y		Y	
Water	N	Y	D	D	
Dowtherm		Y		D	
Cesium		N		Y	Y
Potassium		N		Y	Y
Sodium		N		Y	Y
Lithium		N	N	N	Y

*Symbols: Y = yes, well demonstrated; D = depends on surface treatment, temperature region, etc; N = not suitable.

2.2.2 อัตราส่วนของความแข็งแรงต่อน้ำหนักของวัสดุที่ใช้ทำต่อฮีทไปป์ไร้วิกค์

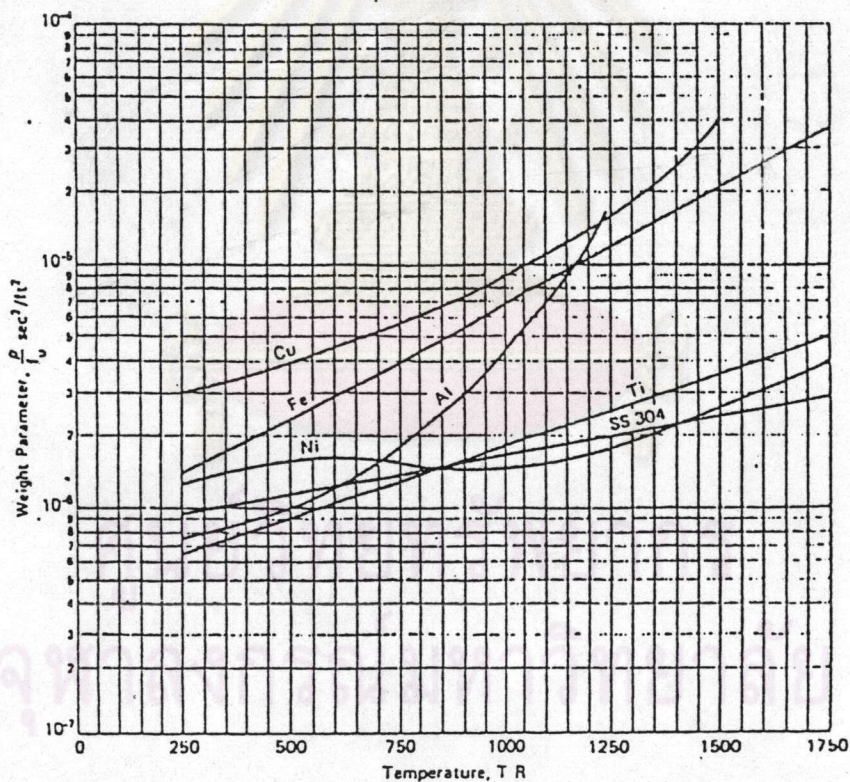
น้ำหนักของวัสดุที่ใช้ ก็เป็นปัจจัยอีกประการหนึ่งที่จะต้องนำมาพิจารณา เพราะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะประกอบด้วยแท่งฮีทไปป์ไร้วิกค์



รูปที่ 2.3 ความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้ทำท่อชนิดต่างๆ

จำนวนมาก ถ้าวัสดุที่ใช้ทำท่อน้ำหนักมากไป ผลก็คือจะทำให้น้ำหนักรวมของเครื่อง แลกเปลี่ยนความร้อนมากตามไปด้วย รูปที่ 2.3 แสดงความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้ ทำที่ชนิดต่างๆ

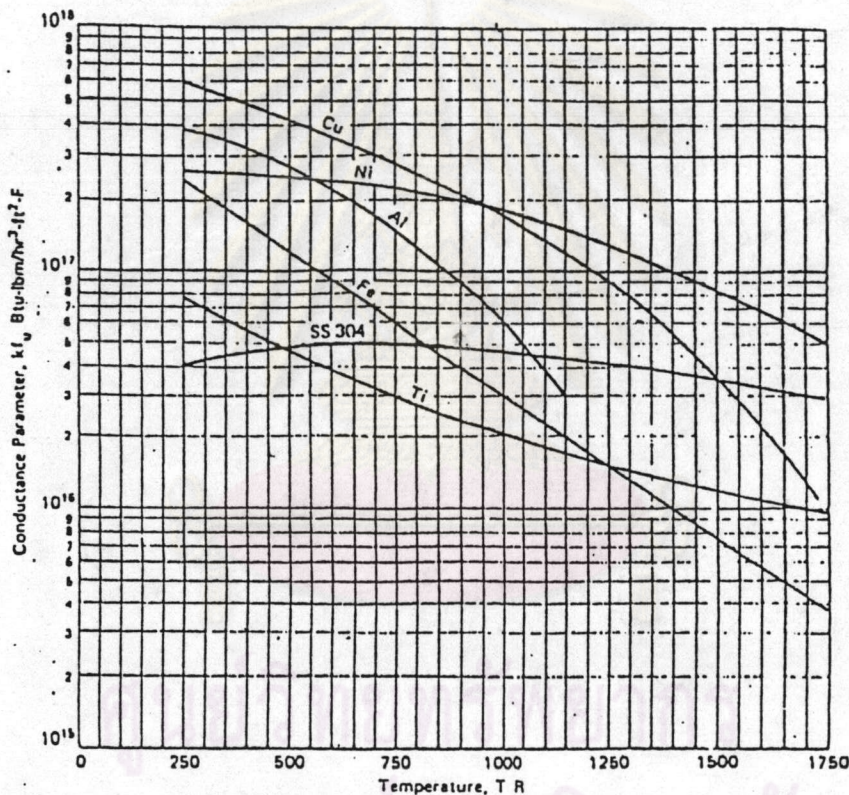
น้ำหนักรวมของท่อนั้นแปรผันตามผลคูณของความหนาของผนังท่อกับความหนาแน่นของวัสดุ แต่ความหนาของท่อที่สามารถทนต่อแรงดันไอของของไหล ใช้งานได้นั้น จะแปรผกผันกับค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดของวัสดุ (Ultimate tensile strength, f_u) นั่นคือ น้ำหนักของท่อที่ใช้จะแปรผันตามพารามิเตอร์ น้ำหนัก (Weight Parameter, c/f_u) รูป 2.4 แสดงค่าความหนาแน่นและ ค่าพารามิเตอร์น้ำหนักของวัสดุชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง (P/f_u) กับอุณหภูมิ

2.2.3 ความนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำท่อ

เกรเดียนต์ของอุณหภูมิในแนวรัศมีผ่านวัสดุที่ใช้ทำท่อฮีทไปป์ไร้-วิกค์จะแปรผกผันกับค่าความนำความร้อนของวัสดุ (Thermal Conductivity) และค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดของวัสดุ (f_u) นั่นคือ แปรผกผันกับพารามิเตอร์ความนำความร้อน (Conductance parameter, kf_u) ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ค่า (kf_u) ที่อุณหภูมิการใช้งานต่างๆของวัสดุ

จากรูป 2.5 จะเห็นว่าทองแดงมีค่าพารามิเตอร์ความนำความร้อน (kf_u) สูงกว่าวัสดุชนิดอื่นๆในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 1,000 องศาแรนกิน ซึ่งหมายความว่าในช่วง

อุณหภูมินี้ของแดงมีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิน้อยที่สุด

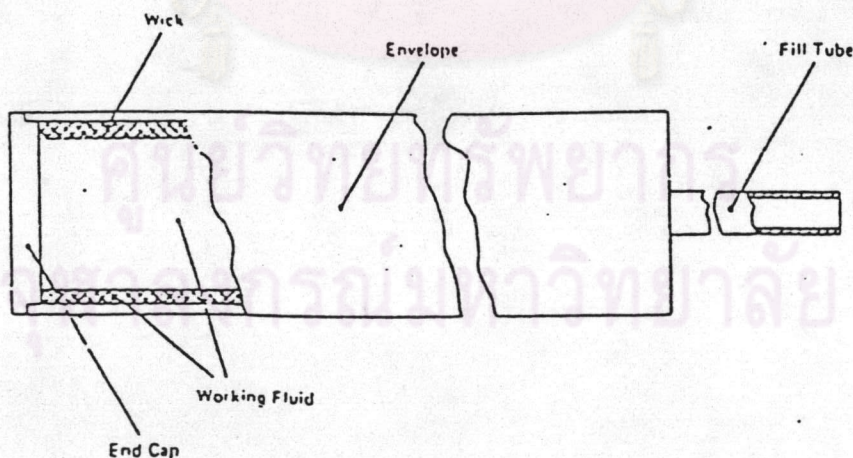
อนึ่ง ปัจจัยที่สำคัญที่ต้องไม่ลืมคือ ราคาของวัสดุ ปัญหาของความยากง่ายในการขึ้นรูป การเชื่อม และอุปสรรคต่างๆที่จะเกิดขึ้นในการสร้างและการนำไปใช้งาน

2.3 การสร้างฮีทไปป์ไร้วิกส์ (12)

ในหัวข้อที่ 2.1 เราได้กล่าวถึงการเลือกองค์ประกอบหลักทั้ง 2 ส่วนของฮีทไปป์ไร้วิกส์อันได้แก่ การเลือกของไหลใช้งาน และการเลือกวัสดุที่จะใช้ ในหัวข้อนี้เราจะกล่าวถึงขั้นตอนและวิธีการทั่วไปในการนำส่วนประกอบทั้ง 2 มาประกอบเข้าด้วยกันเพื่อสร้างเป็นฮีทไปป์ไร้วิกส์

2.3.1 ส่วนประกอบของฮีทไปป์ไร้วิกส์

ฮีทไปป์ทั่วไปมีส่วนประกอบ 5 ชิ้นคือ ท่อ (Envelope), วิกส์ (Wick), หมวกปิดท่อ (End cap), ท่อเติม (Fill tube) และของไหลใช้งาน (Working fluid) (รูปที่ 2.6) แต่ฮีทไปป์ไร้วิกส์จะมีส่วนประกอบเพียง 4 ส่วนคือ ไม่มีวิกส์ ในที่นี้จะอธิบายเฉพาะส่วนประกอบของฮีทไปป์ไร้วิกส์ เท่านั้น

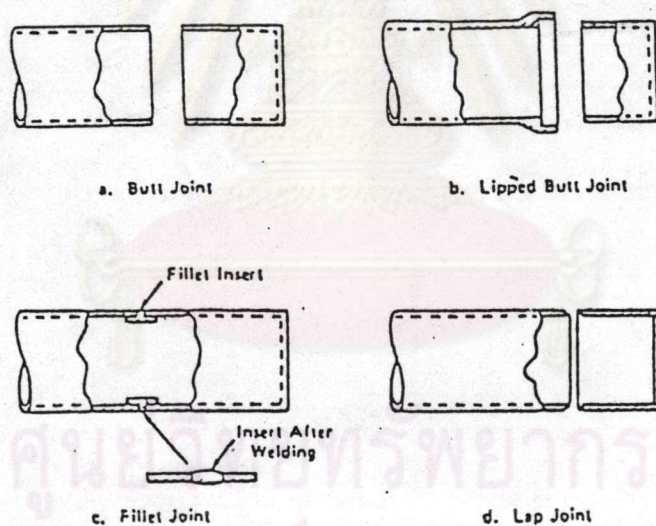


รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบต่างๆของฮีทไปป์ทั่วไป

1. ท่อ ท่อที่ใช้ทำฮีทไประปมีหลายประเภทและหลายขนาด การเลือกท่อในตอนออกแบบฮีทไประปนั้นต้องคำนึงถึงราคาของท่อด้วย ท่อที่ใช้ทั่วไปมี 2 ประเภท คือ ท่อไร้ตะเข็บและท่อเชื่อมต่อ (Butt welding tubes)

สิ่งที่ควรระวังในเวลาตัดท่อให้ได้ความยาวที่ต้องการคือ การเสียรูปของปลายท่อเพราะถ้าเกิดการเสียรูปแล้ว รอยเชื่อมหมวกปิดท่อจะไม่ทนทานและเกิดรูรั่วได้ง่าย

2. หมวกปิดท่อ หมวกปิดท่อที่ใช้ควรมีความหนาของผนังน้อยที่สุดที่จะทนต่อความเค้นที่เกิดขึ้นได้ หมวกปิดท่อจะถูกเชื่อมติดกับปลายท่อ รูปแบบของการเชื่อมติดนี้มีความสำคัญมากต่อการสร้างฮีทไประปและแบ่งได้เป็น 4 แบบคือ แบบเชื่อมธรรมดา (Butt joint), แบบเชื่อมประกบ (Lipped butt joint), แบบเชื่อมติร่อง (Fillet joint) และแบบเชื่อมเหลื่อม (Lap joint) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 วิธีเชื่อมต่อหมวกปิดท่อแบบต่างๆ

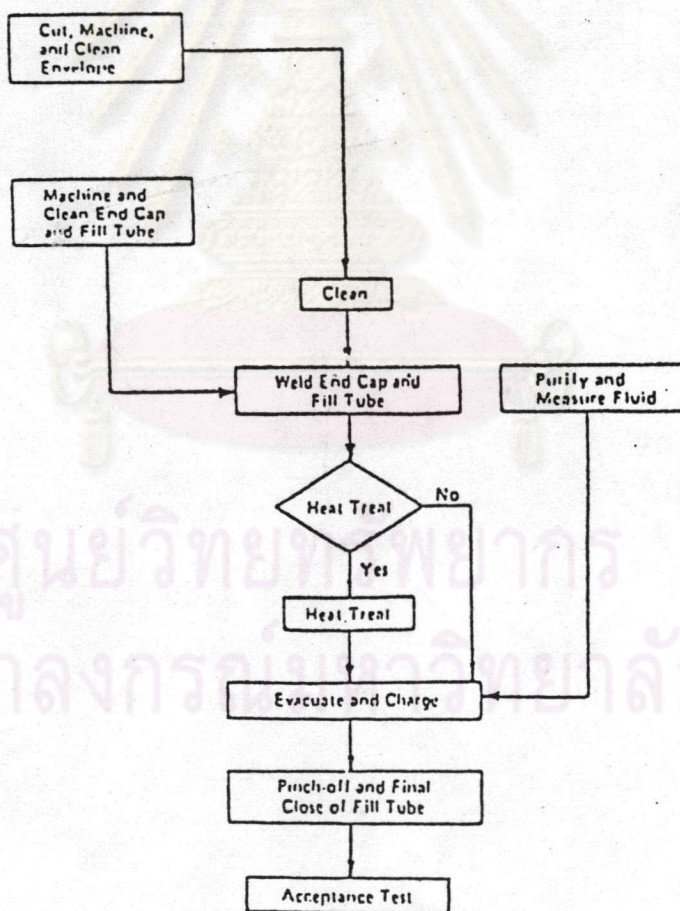
สิ่งที่ควรระวังในการเชื่อมหมวกคือ หมวกปิดท่อและตัวท่อต้องอยู่ในแนวตรง รอยเชื่อมต้องแข็งแรง ไม่มีรอยรั่วซึม ความหนาของรอยเชื่อมต้องมีขนาดใกล้เคียงกับความหนาของผนังท่อและรอยเชื่อมนั้นควรอยู่บนเนื้อของหมวก

ปิดท่อและบนตัวท่อเท่าๆกัน อีกทั้งต้องเป็นรอยที่สม่ำเสมอด้วย โดยทั่วไปไม่ควรใช้การเชื่อมต่อนแบบธรรมดา (Butt joint)

3. ท่อเติม เป็นท่อต่อขนาดเล็กบนหมวกปิดท่อด้านใดด้านหนึ่งของฮีท-ไปป์ เพื่อใช้เป็นทางดึงหรือไล่อากาศออกจากฮีทไปป์และเป็นทางเติมของไหลใช้งานเข้าท่อ ก่อนที่ใช้งานฮีทไปป์ จะต้องปิดท่อเติมให้สนิทเสียก่อน อาจจะใช้การบีบให้แบนแล้วเชื่อมปิดปลาย ท่อเติมนี้ควรมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกไม่เกิน 1/4 นิ้วและเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1/6 นิ้ว

4. ของไหลใช้งาน ของไหลใช้งานที่ใส่ในท่อฮีทไปป์ต้องมีปริมาณที่พอเหมาะและต้องมีความบริสุทธิ์สูง

ขั้นตอนการสร้างฮีทไปป์มีแสดงไว้ในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แผนผังขั้นตอนการสร้างฮีทไปป์

2.3.2 การทำความสะอาดส่วนประกอบต่างๆ

ความสะอาดของส่วนประกอบมีผลต่อสมรรถนะและอายุการใช้งานของฮีทไปป์มาก วิธีการทำความสะอาดมีดังต่อไปนี้

ก. การทำความสะอาดส่วนประกอบที่เป็นโลหะ แบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนคือ

1. การกำจัดคราบไขมัน (Degreasing) คราบไขมันที่ติดมากับวัสดุอาจเป็น น้ำมัน ไข หรือจาระบี โดยทั่วไปจะใช้สารละลายจำพวก เมทิลีนไดโครเมท (Methylene dichromate) 1,1,1-ไตรคลอโรอีเทน (1,1,1-Trichloroethane) และไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene) แต่นิยมใช้สารละลาย 1,1,1-ไตรคลอโรอีเทน เพราะมีราคาถูกกว่า สารละลายนี้สามารถใช้ทำความสะอาดได้ทุกซอกทุกมุม โดยอาศัยเครื่องมือที่ทันสมัย (Ultrasonic cleaning equipment) ในขณะที่ชิ้นส่วนแช่อยู่ในสารละลายควรจะใช้แปรงแปรงเบาๆด้วย

2. การกำจัดอนุภาคของแข็ง (Solid particle removal) อนุภาคของแข็งบางชนิดอาจถูกกำจัดออกไปตั้งแต่ขั้นตอนการกำจัดคราบไขมันแล้ว แต่ยังมีอนุภาคบางอย่าง เช่น ไขมันสภาพกึ่งของแข็งหรือของแข็ง ซึ่งไม่สามารถล้างออกได้หมดด้วยสารละลาย จึงจำเป็นต้องใช้สารพวกอัลคาไลน์ (Alkaline) เช่น ใช้ Oakite ในกรณีของโลหะอลูมิเนียมและ Coppa-Kleen ในกรณีของทองแดง เป็นต้น

สารอัลคาไลน์ที่ขยี้กมานี้เป็นชื่อทางการค้าและประกอบด้วยสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดฟอง (Synthetic organic surfactants) หรือสบู่ 2-10 % และเกลือของต่างอย่างน้อย 2 ชนิดเช่น เกลือของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Caustic soda) โซเดียมอโรซิเลต โซเดียมคาร์บอเนต (Soda ash) โซเดียมเตตราโบเรท (Borax) หรือโซเดียมโพลีฟอสเฟต เป็นต้น

อนึ่ง ยังมีอนุภาคของแข็งอีกชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นบนผิวโลหะเนื้อแข็งเช่น พวงสแตนเลสในรูปของจุดดำหนิของเนื้อเหล็ก เนื่องจากอนุภาคเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับของไหลใช้งาน จึงต้องกำจัดออกโดยการให้สารออกซิไดซิง ซึ่งไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีกับตัวสแตนเลสเอง เช่น กรดไนตริก โซเดียมไดโครเมท โปแตสเซียมไดโครเมท หรือสารผสมของสารพวกนี้

3. การกำจัดออกไซด์ (Deoxydizing) โลหะทั่วไปจะเกิดออกไซด์ปกคลุมผิววนอกอยู่โดยรอบ ซึ่งทำให้คุณสมบัติเปียกผิวของโลหะนั้นถดถอยลง อีกทั้งออกไซด์ของโลหะบางชนิดก็สามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับของไหลใช้งานและก่อให้เกิดสิ่งที่ไม่ต้องการด้วย เช่น ออกไซด์ของอลูมิเนียมจะทำปฏิกิริยาเคมีกับแอมโมเนียให้ก๊าซไนโตรเจน ไส้ไนโตรเจนและโลหะอลูมิเนียม เป็นต้น ทำให้ฮีทไปป์มีสมรรถนะต่ำลง วิธีการกำจัดออกไซด์ย่อมขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ

การกำจัดออกไซด์ของทองแดงและอลูมิเนียมทำได้โดยการจุ่มลงในสารละลายของ $15-30$ กก./ m^3 โซเดียมไดโครเมทและ $4-7$ % โดยปริมาตรกรดกำมะถันที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา $5-30$ นาที

หลังจากกำจัดออกไซด์จากชิ้นส่วนต่างๆแล้ว ต้องล้างด้วยน้ำสะอาด 2 นาทีและกลั้วด้วยน้ำกลั่นทันที จากนั้น ทำแห้งด้วยอากาศสะอาด กลั้วด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ไร้น้ำแล้วทำให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนร้อน 70 °ซ. ที่ผ่านการกรองแล้ว

ตัวอย่างของขั้นตอนการทำความสะอาดชิ้นส่วนที่เป็นทองแดงและอลูมิเนียมมีดังนี้

1. แช่ในไตรคลอโรอีเทนที่อุณหภูมิห้องและใช้แปรงถูเป็นระยะๆ
2. กลั้วด้วยไตรคลอโรอีเทนที่อุณหภูมิห้อง
3. จุ่มอลูมิเนียมลงใน Oakite No 164 ($15-75$ กก./ m^3) ส่วนทองแดงใน Coppa Kleen ($15-75$ กก./ m^3) ที่ $60-80$ °ซ. เป็นเวลานาน $5-30$ นาที
4. ล้างด้วยน้ำสะอาด 2 นาที
5. จุ่มลงในสารละลายโซเดียมโครเมทและกรดกำมะถันที่อุณหภูมิห้อง $5-30$ นาที
6. ล้างด้วยน้ำสะอาด 2 นาที แล้วกลั้วด้วยน้ำกลั่น
7. เป่าให้แห้งด้วยอากาศสะอาด
8. ล้างด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ไร้น้ำ
9. เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนสะอาดที่ 70 °ซ

ข. การทำความสะอาดของไหลใช้งาน

การทำของไหลใช้งานให้บริสุทธิ์มีขั้นตอนดังนี้

1. การกลั่น ของไหลใช้งานจำพวกน้ำและของเหลวอินทรีย์เช่น อาซิโตน, เอทานอล เป็นต้น จำต้องผ่านการกลั่นเสียก่อน
2. การกำจัดน้ำจากของเหลว โดยใช้ซิลิกาเจล (Silica gel) หรือ อลูมินา (Alumina)
3. การกำจัดกาซต่างๆที่ละลายอยู่ในของไหลใช้งาน ในกรณีที่ใช้งานสีที่ไป่ปอดหมุมสูงกว่า 200 °ซ. (392 °ฟ.) จำเป็นต้องไล่กาซที่ละลายอยู่ในของไหลของไหลออกโดยวิธี freezing degassing

2.3.3 ขั้นตอนการประกอบสีที่ไป่

เมื่อทำความสะอาดชิ้นส่วนต่างๆเรียบร้อยแล้ว ควรรีบประกอบชิ้นโดยไม่ปล่อยทิ้งไว้เนิ่นนาน ขั้นตอนการประกอบที่สำคัญคือ การเชื่อมต่อหมวกปิดท่อและท่อเติม

ในกรณีที่หมวกปิดท่อไม่มีท่อเติมตั้งแต่แรก เราจะต้องเชื่อมท่อเติมกับหมวกเสียก่อน หลังจากนั้นจึงทำการเชื่อมหมวกปิดท่อทั้งด้านที่มีท่อเติมและด้านที่ไม่มีท่อเติมเข้ากับท่อ การเชื่อมต่อทั้งหมดจะต้องไม่มีรอยรั่วและรอยร้าวเพราะจะทำให้ระบบสุญญากาศของสีที่ไป่เสียได้ การเชื่อมที่สามารถใช้ได้ในการสร้างสีที่ไป่นี้ได้แก่ การเชื่อมแบบ TIG (Tungsten-Inert Gas Welding) และการเชื่อมแบบ EBW (Electron Beam Welding)

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

ข. การเชื่อมแบบ EBW เป็นการเชื่อมที่มีการสร้างห้องสุญญากาศเพื่อปกป้องรอยเชื่อมจากอากาศ การเชื่อมแบบนี้ใช้ปริมาณความร้อนน้อยกว่าการเชื่อมทั่วไปและมีการกระจายของความร้อนบนผิวโลหะในบริเวณแคบๆ ทำให้ผิวโลหะและรอยเชื่อมไม่มีสารประกอบใดๆเกิดขึ้น

นอกจากการเชื่อมที่ถูกต้องแล้ว ควรมีอุปกรณ์ตรวจสอบรอยรั่วที่มีประสิทธิภาพสูง (เช่น mass spectrometer โดยลดความดันในท่อ

ลง แล้วตรวจดูว่าก๊าซฮีเลียมที่อยู่ภายนอกท่อซึมผ่านเข้าในท่อหรือไม่)

การเชื่อมท่อฮีทไปป์จะไม่ใช้น้ำยาประสาน (Flux) ในการเชื่อมเพราะทำให้เกิดรอยร้าวได้ง่าย

2.3.4 การเติมของไหลใช้งานและการทำสุญญากาศ

เมื่อประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เรียบร้อยแล้ว ลักษณะภายนอกจะเหมือนฮีทไปป์ทุกอย่าง ขั้นตอนต่อไปเป็นการเติมของไหลใช้งานและการทำสุญญากาศภายในท่อ

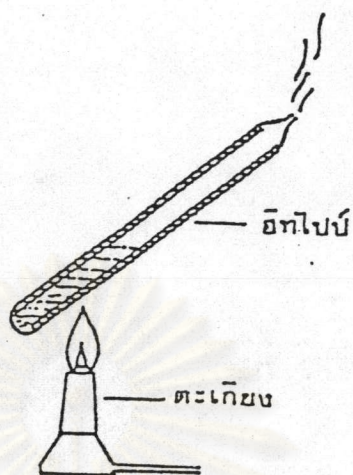
วิธีที่จะกล่าวในที่นี้เป็นวิธีสำหรับการสร้างฮีทไปป์ชนิดอุณหภูมิใช้งานต่ำ (low temperature heat pipe) ซึ่งมีอยู่ 4 วิธี จากง่ายไปหายากดังนี้

ก. แบบให้ความร้อนโดยตรงต่อฮีทไปป์

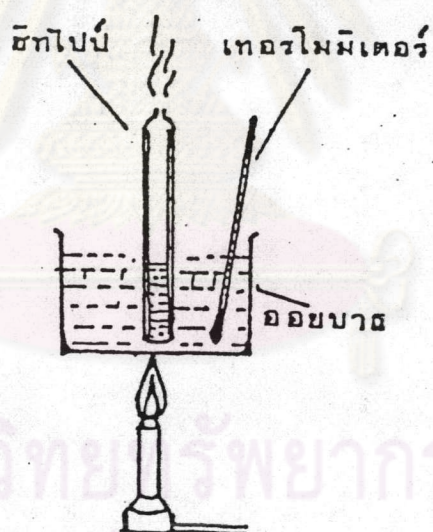
กรรมวิธีนี้นับว่าเป็นวิธีแบบง่ายที่สุด หลังจากประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เป็นท่อฮีทไปป์ เรียบร้อยแล้ว จะเติมของไหลใช้งานเข้าไปในท่อฮีทไปป์โดยตรงในปริมาณมากเกินพอ จากนั้นไล่อากาศและก๊าซไม่ควมแน่นที่ค้างอยู่ในท่อและที่ละลายอยู่ในของเหลว โดยการเอาเปลวไฟไปลนบริเวณด้านล่างของฮีทไปป์ ดังรูปที่ 2.9 เมื่อของไหลใช้งานเริ่มเดือดด้านล่าง ไอน้ำของไหลใช้งานที่พุ่งออกมาก็จะช่วยไล่อากาศที่อยู่ภายในท่อฮีทไปป์ หลังจากปล่อยให้เดือดเป็นเวลาพอเหมาะ และของไหลใช้งานในท่อมี่ปริมาณเหลือตามต้องการแล้ว ก็ทำการปิดผนึกปลายท่อด้านบนในขณะที่ของไหลใช้งานยังคงเดือดด้านล่างอยู่

ข. แบบให้ความร้อนต่อฮีทไปป์โดยใช้อ้อยบาธ (oil bath)

กรรมวิธีนี้ต้องลงทุนมากกว่าวิธีที่ 1 เล็กน้อย แต่หลักการดำเนินงานยังคงเหมือนกัน จะต่างกันตรงที่วิธีที่สองนี้ใช้อ้อยบาธที่รักษาอุณหภูมิของน้ำมันร้อนให้คงที่ (รูปที่ 2.10) เพื่อให้เกิดการเดือดอย่างสม่ำเสมอและสามารถควบคุมปริมาณของไหลใช้งานที่เหลือในท่อโดยการควบคุมระยะเวลาที่เดือด ดังนั้นจึงสามารถสร้างฮีทไปป์ที่มีสมรรถนะใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้และในเวลาอันสั้นด้วย (mass production)



รูปที่ 2.9 วิธีการผลิตอ็อกไซม์แบบให้ความร้อนโดยตรง



รูปที่ 2.10 วิธีการผลิตอ็อกไซม์แบบใช้ออยบาศ

เนื่องจากกรรมวิธีทั้งสองแบบข้างต้นใช้ไอของของไหลไปไล่ที่อากาศที่อยู่ภายในท่อ จึงมีชื่อเรียกว่า การสร้างแบบการระเหย

วิธีอีก 2 วิธี ที่จะแนะนำต่อไปนี้เป็นวิธีที่สร้างระบบสุญญากาศภายในท่อโดยใช้ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) ปั๊มสุญญากาศที่ใช้ต้องสามารถสร้างสุญญากาศได้ถึง 10^{-4} torr. เช่น diffusion pump

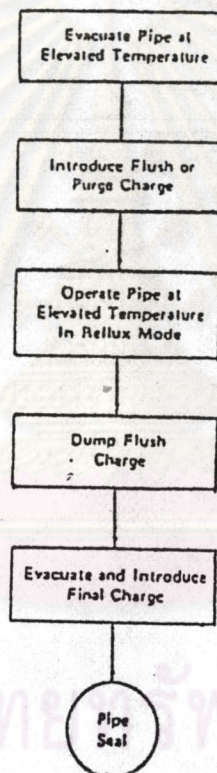
หรือ sorption pump ที่มี molecular sieve

ค. การใช้ปั๊มสุญญากาศแบบที่ 1

เป็นวิธีที่ใช้ปั๊มสุญญากาศแต่ไม่ยุ่งยากมาก

ขั้นตอนการ

สร้างฮีทไปป์มีไว้ในรูปที่ 2.11 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการสร้างฮีทไปป์โดยใช้ปั๊มสุญญากาศ แบบที่ 1

ค.1 การไล่ก๊าซออกจากของไหลใช้งานโดยวิธี freezing degassing

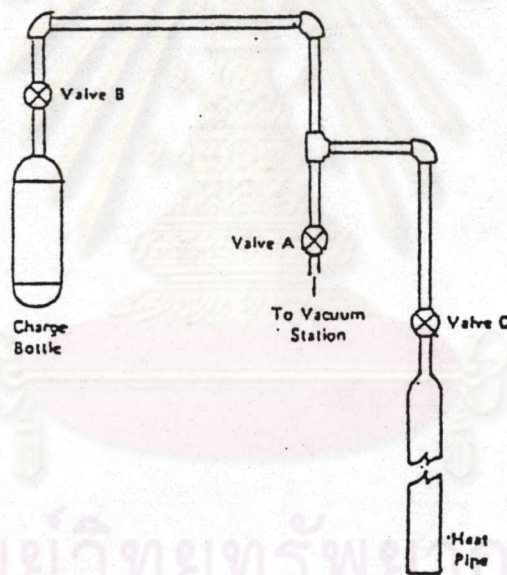
บรรจุของไหลใช้งานไว้ในขวดป้อน (charge bottle)

แล้วปิดวาล์ว A, B และ C แล้วขวดป้อนไว้ในถังก๊าซไนโตรเจนเหลว ถ้าของไหล

ใช้งานเป็นแอมโมเนีย (ถ้าเป็นโซเดียมเหลว ให้ปล่อยทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง) เมื่อของไหลใช้งานแข็งตัวแล้ว นำเอาขวดป้อนออกและปล่อยให้ของไหลใช้งานหลอมตัวเพื่อไล่ฟองของก๊าซที่ติดค้างอยู่ในของไหลใช้งานที่แข็งตัว จากนั้นเปิดวาล์ว A และ B เพื่อดูดเอาก๊าซออก (ของไหลใช้งานบางส่วนที่ระเหยเป็นไอจะถูกดูดออกมาด้วย) แล้วปิดวาล์ว และทำซ้ำประมาณ 2-4 ครั้ง จนแน่ใจว่าของไหลใช้งานไม่มีก๊าซละลายเหลืออยู่

ค.2 การทำสุญญากาศภายในท่อและการเติมของไหลใช้งาน
เมื่อได้ของไหลใช้งานจากขั้นตอนก่อนแล้ว ต่อไปเป็น
การทำสุญญากาศภายในท่อและการเติมของไหลใช้งาน

ระบบการผลิต โดยสรุปมีแสดงไว้ในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ระบบการผลิตฮีทไปป์โดยใช้ปั๊มสุญญากาศแบบที่ 1

รายละเอียดขั้นตอนการสร้าง

1. ดูดอากาศออกโดยเปิดวาล์ว B แล้วปิดวาล์ว A และ C ให้ความร้อนกับฮีทไปป์เพื่อให้ก๊าซที่เกาะอยู่บนเนื้อวัสดุท่อและวิกต์หลุดออกมา ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดอากาศและก๊าซออกนั้น จะขึ้นโดยตรงกับอุณหภูมิของฮีทไปป์

2. กลั้วท่อด้วยของเหลวใช้งาน โดยเปิดวาล์ว B และอุณหภูมิร้อนกว่าจุดเดือดของของไหลใช้งานที่ความดันในระบบนั้น ปล่อยให้ไอของของไหลใช้งานไหลเข้าไปในท่อเล็กน้อยเพื่อกลั้วภายในท่อ แล้วปิดวาล์ว B เพื่อจุดเอาของไหลใช้งานออก และปิดวาล์ว B ใหม่ ทำซ้ำกันประมาณ 2 ครั้ง

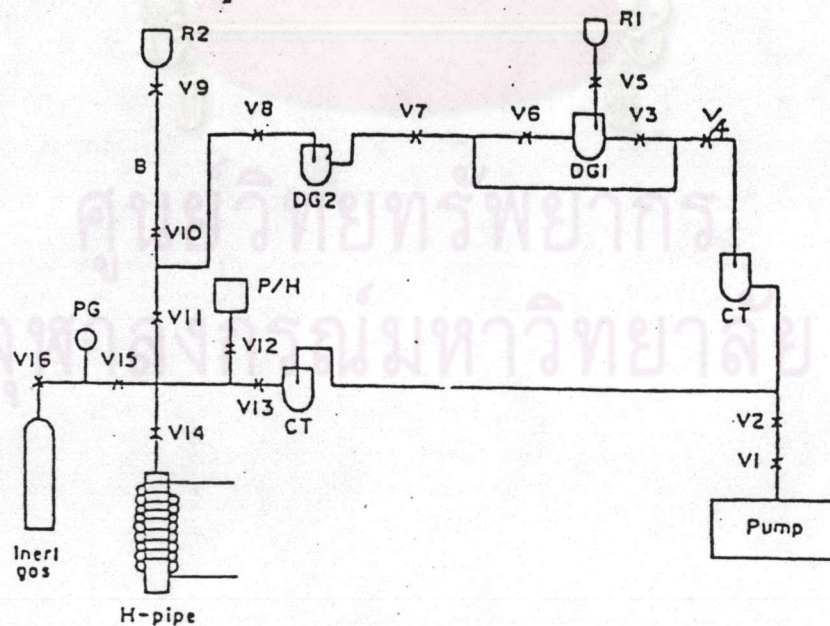
3. บรรจุของไหลใช้งาน ปริมาณที่บรรจุสามารถวัดและควบคุมได้โดยวิธีต่างๆขึ้นกับสถานะของของไหลใช้งานที่อุณหภูมิห้อง ดังต่อไปนี้

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

3.2 สถานะของของเหลวหรือของแข็ง ปริมาณที่บรรจุสามารถวัดได้จากผลต่างของปริมาณของของไหลใช้งานก่อนและหลังการบรรจุ โดยการปิดวาล์ว A เปิดวาล์ว B และ C เมื่อให้ความร้อนกับขวดป้อน ในขณะที่ให้ความเย็นที่ฮีทไปป์ เมื่อได้ปริมาณตามที่ต้องการแล้วก็ปิดวาล์ว B และ C ฮีทไปป์จะอยู่ในสภาพพร้อมที่จะปิดผนึก

ง. การใช้ปั๊มสุญญากาศแบบที่ 2

เป็นวิธีการสร้างฮีทไปป์ที่ซับซ้อนมากกว่าวิธีแบบที่ 3 ระบบการผลิตนี้มีแสดงไว้ในรูปที่ 2.13 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.13 ระบบการผลิตฮีทไปป์โดยใช้ปั๊มสุญญากาศแบบที่ 2

1. ปิดวาล์วทั้งหมดที่เปิดสู่ภายนอก (V5, V9, V14, V15)
2. เดินปั๊มสุญญากาศโดยที่วาล์ว V1, V2 ยังคงปิดอยู่
3. หล่อเย็นตัวปั๊มสุญญากาศและกับดักเย็น (Cold Trap, CT) ด้วยก๊าซไนโตรเจนเหลว
4. ทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที เปิดวาล์ว V1, V2 ดูอากาศในระบบออกจนได้ความดันประมาณ 0.01 มม.ปรอท เวลาที่ใช้ในการนี้จะขึ้นกับความจุของปั๊ม ความสะอาดของระบบและปริมาตรภายในรวมของระบบ
5. ปิดวาล์ว V4, V5 และ V6 เต็มของไหลใช้งานลงไป R1
6. ค่อยๆเปิดวาล์ว V5 ให้ของไหลใช้งานลงสู่ภาชนะ DG₁ เมื่อได้ปริมาณมากพอก็ปิด แล้วทำให้แข็งตัว โดยแช่ในก๊าซไนโตรเจนเหลว
7. เมื่อของไหลใช้งานแข็งตัว เปิดวาล์ว V4 เพื่อดูอากาศออกแล้วปิด จากนั้นทำให้ของไหลใช้งานหลอมตัวและปล่อยให้ฟองก๊าซพุ่งออก แล้วทำให้ของไหลใช้งานแข็งตัวใหม่
8. เปิดวาล์ว V4 เพื่อดูเอาอากาศที่หลุดออกจากของไหลใช้งานออก
9. ปิดวาล์ว V4, V3, V8 และเปิดวาล์ว V6, V7 แช่ DG₂ ในถังไนโตรเจนเหลว
10. หลอมเหลวของไหลใช้งานใน DG₁ ด้วยลมร้อน แล้วส่งของไหลใช้งานไปยัง DG₂ จากนั้นก็ทำการไล่ก๊าซที่ละลายอยู่ในของไหลใช้งานออกในลักษณะเดียวกับ DG₁
11. หลังจากของไหลใช้งานผ่านการไล่อากาศออกแล้ว ปิดวาล์ว V4, V6 เพื่อกั้นการไหลย้อนกลับของของไหลใช้งาน
12. ปิดวาล์ว V7, V11 และเปิดวาล์ว V8, V10 จากนั้นก็ใช้ความร้อนไล่ของไหลใช้งานให้เข้าไปอยู่ในบูเรต (Burette, B) แล้วปิดวาล์ว V10, V8 และเปิดวาล์ว V11 จากนั้นดึงสุญญากาศให้มากขึ้นถึงประมาณ 0.005 มม.ปรอท
13. ติดท่ออีทไปป์เข้ากับระบบ เปิดวาล์ว V14 เพื่อดูเอาอากาศออกพร้อมกับให้ความร้อนต่ออีทไปป์ รอจนระดับของสุญญากาศกลับคืนที่เดิม
14. จุ่มปลายด้านล่างของอีทไปป์ลงในถังไนโตรเจนเหลว ค่อยๆเปิดวาล์ว V10 เพื่อส่งของไหลใช้งานไปควมแน่นในท่ออีทไปป์ เมื่อได้ปริมาณมากพอก็ปิดวาล์ว V10 ใช้ความร้อนไล่ของไหลใช้งานที่ยังคงตกค้างอยู่ให้เข้าไปในท่ออีทไปป์จนหมดแล้วปิดวาล์ว

15. ทำการไล่ก๊าซออกจากของไหลใช้งานในท่อฮีทไปป์โดยวิธี freezing degassing อีกครั้ง โดยเปิด-ปิดวาล์ว V14 จากนั้นท่อฮีทไปป์ก็อยู่ในสภาพพร้อมที่จะปิดผนึก

2.4 การประเมินสมรรถภาพการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ (42)

ขั้นตอนที่สำคัญของการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จะเกี่ยวข้องกับ การประเมินขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อนำมาประยุกต์ในการใช้งานตามที่ต้องการได้อย่างเหมาะสม ต่อไปนี้จะกล่าวถึงหลักการที่สำคัญบางประการในการประเมินค่าสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์

แนวทางในการประเมินสมรรถนะการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ไว้วิคค์ มีอยู่ด้วยกัน 3 แนวทาง ได้แก่

- 2.4.1 วิธีการวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองการนำความร้อน (Conductance Model)
- 2.4.2 วิธีการวิเคราะห์โดยอาศัย Effectiveness Number of Transfer unit
- 2.4.3 วิธีการวิเคราะห์โดยอาศัยการประเมินสมรรถนะอัตราการถ่ายเทมวลสารภายในแท่งฮีทไปป์

ในที่นี้จะขอกกล่าวถึงวิธีการที่ 2.4.1 และ 2.4.2 เท่านั้น ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์กันมาก ส่วนวิธีที่ 2.4.3 นั้นเหมาะสำหรับการทำนายอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดของฮีทไปป์ที่กำหนดให้ ซึ่งไม่เป็นประเด็นที่สนใจในงานนี้ จึงขอไม่นำมากล่าวถึง ณ ที่นี้

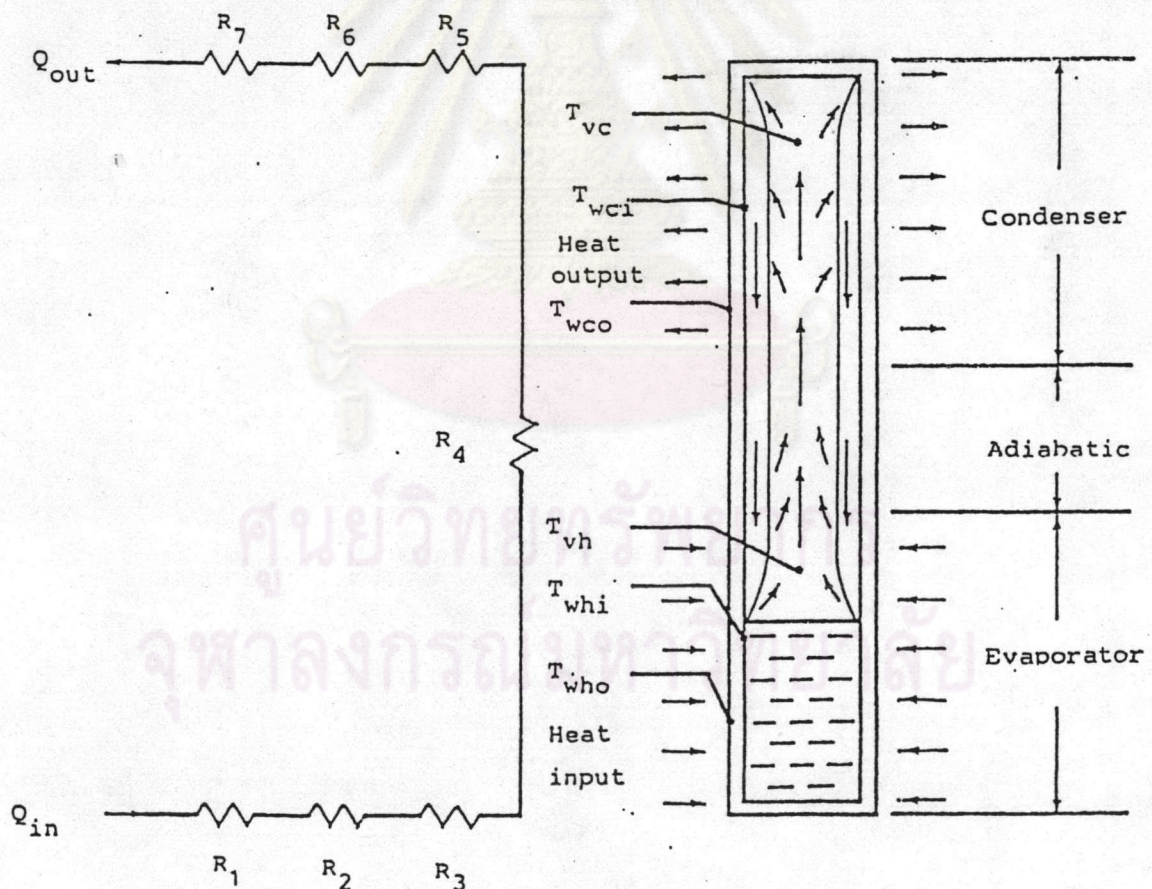
2.4.1 วิธีการวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองการนำความร้อน (Conductance Model) (42)

อัตราการถ่ายเทความร้อนรวม (U) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่สภาวะคงที่ สามารถวิเคราะห์มาจากสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของแต่ละชั้นตามแบบจำลองการส่งผ่านความร้อน โดยพิจารณาฮีทไปป์ทีละ 1 แท่ง

ตามรูปที่ 2.14

ขั้นตอนการส่งผ่านความร้อนแบ่งออกเป็นช่วงต่างๆ 7 ช่วงได้แก่

1. ผ่านฟิล์มความต้านทานด้านนอกของผนังช่วงการระเหย (R_1)
2. ผ่านผนังท่อของช่วงการระเหย (R_2)
3. ผ่านฟิล์มความต้านทานด้านในของผนังช่วงการระเหยและผ่านของไหลที่กำลังเดือดระเหยเป็นไอ (R_3)
4. ความต้านทานการไหลของไอจากช่วงการระเหยไปยังช่วงการควบแน่น (R_4)
5. ผ่านฟิล์มด้านในที่เกิดจากไอกลั่นตัวเป็นของเหลวที่ผนังด้านในของช่วงการควบแน่น (R_5)
6. ผ่านผนังท่อของช่วงการควบแน่น (R_6)
7. ผ่านฟิล์มความต้านทานด้านนอกของช่วงการควบแน่น (R_7)



รูปที่ 2.14 แบบจำลองการส่งผ่านความร้อนโดยการนำ

สมมติฐานของแบบจำลองความนำความร้อนที่ใช้มีดังนี้

- การส่งผ่านความร้อนตามแนวแกนในเนื้อผนังท่อมีน้อยมาก
- ความต้านทานการส่งผ่านความร้อนโดยไอจากด้านระเหยสู่ด้านกลั่นตัวมีค่าน้อยมาก ในกรณีการทำงานไม่ถึงจุดจำกัด (Limit) (นั่นคือ $R_s = 0$)

ที่สภาวะคงที่ (Steady State)

$$Q_c = \Sigma Q_D = UA_c (\Delta T)_{lm} = K_c (\Delta T)_{lm} \quad (2.2a)$$

$$= m_c C_{pc} (\Delta T)_c = m_h C_{ph} (\Delta T)_h \quad (2.2b)$$

- ในที่นี้
- Q_c = อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (วัตต์)
 - Q_D = อัตราการถ่ายเทความร้อนของฮีทไปป์แท่งที่ P ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (วัตต์)
 - U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (วัตต์/ม² °ซ)
 - A_c = พื้นที่ผิวทั้งหมดของการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (ม²)
 - K_c = ความนำความร้อน (วัตต์/°ซ)
 - $(\Delta T)_{lm}$ = ผลต่างอุณหภูมิเชิงลอการิทึม (°ซ)

กรณีที่ของไหลไหลสวนทางกันในเครื่อง

$$(\Delta T)_{lm} = \frac{(T_{h1} - T_{c2}) - (T_{h2} - T_{c1})}{\ln \left[\frac{(T_{h1} - T_{c2})}{(T_{h2} - T_{c1})} \right]} \quad (2.3)$$

- ในที่นี้
- T_{h1} = อุณหภูมิของของไหลร้อนที่เข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (°ซ)
 - T_{h2} = อุณหภูมิของของไหลร้อนที่ผ่านออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (°ซ)

T_{c1} = อุณหภูมิของของไหลเย็นที่เข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (°C)
 T_{c2} = อุณหภูมิของของไหลเย็นที่ผ่านออกจากเครื่องแลกเปลี่ยน-
 ความร้อน (°C)

จากสมการ 2.2 และ 2.3 จะเห็นได้ว่าเราสามารถคำนวณค่า Q_c จากการทดลองได้โดยใช้สมการที่ 2.2 a โดยวัดอุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออกของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 2 สาย แล้วคำนวณ $(\Delta T)_{lm}$ ได้จากสมการ 2.3 จากนั้นนำค่า Q_c และ $(\Delta T)_{lm}$ ที่คำนวณได้มาหาค่า U ได้จากสมการที่ 2.2 ซึ่งแสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของเครื่องแลกเปลี่ยน-ความร้อน

นอกจากนี้ถ้าเรามีการวัดอุณหภูมิที่ผิวท่อ เราสามารถจะคำนวณค่า U ตามทฤษฎีได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{1}{U_{it} A_{it}} = \frac{1}{h_{oh} A_{oh}} + \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi k L_{nt}} + \frac{1}{h_{ih} A_{ih}} + \frac{1}{h_{ic} A_{ic}} + \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi k L_{ct}} + \frac{1}{h_{oc} A_{oc}} \quad (2.4)$$

$$\frac{1}{U_{it}} = \frac{A_{it}}{h_{oh} A_{oh}} + \frac{A_{it} \ln(r_o/r_i)}{2\pi k L_{nt}} + \frac{A_{it}}{h_{ih} A_{ih}} + \frac{A_{it}}{h_{ic} A_{ic}} + \frac{A_{it} \ln(r_o/r_i)}{2\pi k L_{ct}} + \frac{A_{it}}{h_{oc} A_{oc}} \quad (2.5)$$

เมื่อ U_{it} = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของเครื่องแลกเปลี่ยน-ความร้อนโดยใช้พื้นที่ภายในแท่งฮีทไปป์เป็นฐานอ้างอิง (วัตต์/ม² °ซ)

A_{it} = พื้นที่ผิวภายในรวมของแท่งฮีทไปป์ทุกแท่ง (ม²)

A_{oh}, A_{oc} = พื้นที่ผิวภายนอกของท่อฮีทไปป์ทุกแท่งด้านร้อนและด้านเย็นตามลำดับ (ม²)

A_{ih}, A_{ic} = พื้นที่ผิวภายในของท่อฮีทไปป์ทุกแท่งด้านร้อนและด้านเย็นตามลำดับ (ม²)

L_{hc}, L_{cc} = ความยาวรวมของท่อฮีทไปป์ทุกแท่งด้านร้อนและด้านเย็นตามลำดับ (ม)

h_{oh}, h_{oc} = ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์มชั้นนอกของฮีทไปป์ทุกแท่งในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (วัตต์/ม² °ซ)

h_{ih}, h_{ic} = ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์มชั้นในของฮีทไปป์ทุกแท่งในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (วัตต์/ม² °ซ)

ค่า Q_u ในสมการ 2.2 คืออัตราการถ่ายเทความร้อนของฮีทไปป์ 1 แท่ง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากแบบจำลองในทำนองเดียวกัน รายละเอียดในการคำนวณสำหรับฮีทไปป์ไว้วิคค์ 1 แท่งนี้ สามารถอ่านเพิ่มเติมได้จากเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์ฮีทไปป์ไว้วิคค์ 1 แท่ง (7,42)

2.4.1.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มชั้นนอกของฮีทไปป์ (46)

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มชั้นนอกของท่อถ่ายเทความร้อน ซึ่งรวมทั้งท่อฮีทไปป์ มีผู้ได้ทำการทดลองและสรุปไว้เป็นความสัมพันธ์มากมาย ความสัมพันธ์เหล่านี้จะแสดงไว้ในความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขนัสเซิลด์ (Nusselt Number, Nu) โดยเป็นฟังก์ชันของตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number, Re) และตัวเลขพรานด์ตล์ (Prandtl Number, Pr)

ตัวอย่างของความสัมพันธ์ที่นิยมใช้กัน ซึ่งได้รวบรวมมาจากความสัมพันธ์อื่นๆ โดย Zukauska (46) สำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มชั้นนอกสำหรับการไหลตั้งฉากกับมัดท่อกลม ได้แก่

$$h_{mD}/k = C_2 Re^n Pr^{0.35} (Pr/Pr_w)^m \quad (2.6)$$

เมื่อ Pr_w = ตัวเลขพรานด์ตล์ที่คำนวณจากอุณหภูมิที่ผนังท่อ

$n = 0$ สำหรับก๊าซ

$= 1/4$ สำหรับของเหลว

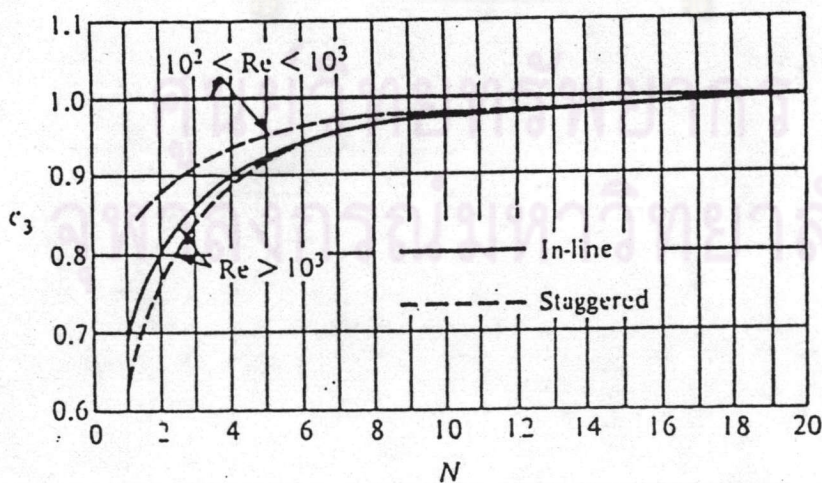
สมการนี้ใช้ได้กับค่าตัวเลขพรานด์ตล์ที่อยู่ในช่วง $0.7 < Pr < 500$ และจำนวนแลวมมากกว่าหรือเท่ากับ 20 คุณสมบัติทางกายภาพต่างๆ จะประเมินจากอุณหภูมิเฉลี่ยของฟิล์มที่ผิวท่อ ส่วนเทอมความสัมพันธ์ของความหนืด

$(Pr/Pr_s)^m$ จะถูกนำมาใช้ในการคำนวณในกรณีของของเหลว

สมการที่ 2.6 สามารถใช้ได้ดีกับการทดลองที่มีมัดท่อในแนวของการไหลเท่ากับ 20 แถวหรือมากกว่า สำหรับมัดท่อที่มีต่ำกว่า 20 แถว ค่าตัวเลขนี้สเซลล์ด์สามารถหาได้จาก

ตารางที่ 2.4 ค่าของสัมประสิทธิ์ C_2 และ m ของสมการที่ 2.6 สำหรับคู่ของวัสดุและของไหล (46)

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	



รูปที่ 2.15 Correction factor C_3 ของสมการที่ 2.7 (46)

$$Nu_N = C_3 Nu_{N,20} \quad (2.7)$$

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ C_3 หาได้จากรูปที่ 2.15

ความสัมพันธ์ที่กล่าวมานี้ ใช้กับมัดของท่อกลมเท่านั้น สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีรูปแบบเป็นแบบอื่นๆ อาจหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้จากตารางของหนังสือคู่มือการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่างๆ ตัวอย่างของตารางเหล่านี้แสดงไว้ในเอกสารที่เกี่ยวกับการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่างๆไป (47, 48) ซึ่งมักจะแสดงไว้ในลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่าง StPr กับ Re

2.4.1.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์มภายใน ($h_{i,h}, h_{i,c}$) ของท่อยืดไปป์ (46)

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์มภายในของยืดไปป์ไว้วิคคั้น สามารถแบ่งออกพิจารณาได้เป็น 3 ส่วนคือ

1. ส่วนที่มีของเหลวใช้งานบรรจุอยู่ (ต่ำกว่าระดับของเหลวใช้งาน)
2. ส่วนที่อยู่เหนือระดับของเหลวใช้งานจนถึงส่วนบนสุดของช่วงการระเหย
3. ส่วนที่อยู่ในช่วงของการควบแน่น

2.3.1.2.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านแผ่นฟิล์มในส่วนที่มีของเหลวใช้งานบรรจุอยู่

ในส่วนนี้จะมีของเหลวใช้งานสัมผัสกับผนังท่อด้านใน การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในส่วนนี้ จะใช้สมการการถ่ายเทความร้อนแบบการเดือด (Pool boiling) ของ Rohsenow (46)

$$\frac{C_p (T_{wh1} - T_w)}{H_{fg} Pr^m} = C_{sf} \left[\frac{Q/A}{\mu_1 H_{fg}} \sqrt{\frac{g_e \sigma}{g(\rho_1 - \rho_v)}} \right]^n \quad (2.8)$$

$$h_{in} = \frac{Q^{0.75} C_{s1}}{AC_{sf} H_{fx} Pr^n} \left[\frac{Q/A}{A_{in} \mu_1 H_{fx}} \sqrt{\frac{g_c \sigma}{g(\rho_1 - \rho_v)}} \right]^{-0.75} \quad (2.9)$$

$$h_{in(pool)} = \frac{\mu_1 H_{fx}}{(T_{whi} - T_s)} \sqrt{\frac{g(\rho_1 - \rho_v)}{g_c \sigma}} \left[\frac{C_p (T_{whi} - T_s)}{H_{fx} Pr^n \rho_{sf}} \right]^{1/4} \quad (2.10)$$

คุณสมบัติทางกายภาพที่ใช้ในการคำนวณ จะใช้ค่าที่ได้จากอุณหภูมิจเฉลี่ยระหว่าง T_{whi} และ T_s ยกเว้นค่า H_{fx} จะใช้ค่าที่อุณหภูมิต T_s ในทันที

$h_{in(pool)}$ = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบการเดือดผ่านฟิล์มในส่วนที่มีของเหลวใช้งานบรรจุอยู่ (วัตต์/ม² °ซ)

C_{p1} = ความร้อนจำเพาะของของเหลวอิ่มตัว (จูล/กก. °ซ)

C_{sf} = ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลองซึ่งเป็นค่าเฉพาะของคู่ผิวของแข็ง-ของเหลว (Surface-fluid combination) ค่านี้แสดงไว้ในตารางที่ 2.5

H_{fx} = ความร้อนแฝงของการระเหย (จูล/กก.)

g = ความเร่งภายใต้แรงโน้มถ่วง (9.8 ม/วินาที²)

g_c = ตัวคูณแปลงหน่วย

Pr = $C_{p1} \mu_1 / k_1$ = ตัวเลขพรานด์ตล (Prandtl Number) ของของเหลวใช้งาน

Q = อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ก่อให้เกิดการเดือด (วัตต์)

A = พื้นที่การถ่ายเทความร้อนของด้านการระเหย (ม²)

μ_1 = ความหนืดของของเหลวใช้งาน (กก/ม-วินาที)

$\rho_1 - \rho_v$ = ความหนาแน่นของของเหลวและของไอตามลำดับ (กก/ม³)

σ = แรงตึงผิวของของเหลวใช้งาน (นิวตัน/ม)

s = ค่าคงที่ มีค่า 1 สำหรับน้ำ และ 1.7 สำหรับของเหลวอื่น

χ = ค่าคงที่จากการทดลอง ซึ่งขึ้นกับจำนวนและขนาดของ nucleation site บนผิวถ่ายเทความร้อน จากการวิเคราะห์ของ Rohsenow χ มีค่าเท่ากับ 0.33

ค่าของแรงตึงผิวสำหรับคู่ของเหลวและไอ (σ) สำหรับของเหลวต่างๆได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ค่าของสัมประสิทธิ์ C_{sf} สำหรับสมการที่ 2.8 ของคู่มือระหว่างของเหลวกับพื้นผิววัสดุ

Liquid-surface combination	C_{sf}
Water-copper	0.0130
Water-scored copper	0.0068
Water-emery-polished copper	0.0128
Water-emery-polished, paraffin-treated copper	0.0147
Water-chemically etched stainless steel	0.0133
Water-mechanically polished stainless steel	0.0132
Water-ground and polished stainless steel	0.0080
Water-Teflon pitted stainless steel	0.0058
Water-platinum	0.0130
Water-brass	0.0060
Benzene-chromium	0.0100
Ethyl alcohol-chromium	0.0027
Carbon tetrachloride-copper	0.0130
Carbon tetrachloride-emery-polished copper	0.0070
n-Pentane-emery-polished copper	0.0154
n-Pentane-emery-polished nickel	0.0127
n-Pentane-emery-rubber copper	0.0074
n-Pentane-lapped copper	0.0049

2.4.1.2.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเท

ความร้อนผ่านฟิล์มที่อยู่เหนือระดับของเหลวใช้งานจนถึงส่วนบนสุดของช่วงการระเหย

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเท

ความร้อนผ่านฟิล์มที่อยู่เหนือระดับของเหลวใช้งานจนถึงส่วนบนสุดของช่วงการระเหย จะใช้สมการ film boiling ของ Bromley (49)

$$h_{\text{film}} = 0.620 \left[\frac{k_v^2 (\rho_l - \rho_v) \rho_v g}{\mu_v D_o (T_{\text{wh}} - T_s)} \right]^{1/4} \quad (2.11)$$

h_{film} = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์มด้านในของช่วงการระเหย (วัตต์/ม²-°ซ)

k_v = ค่าความนำความร้อนของของเหลว (วัตต์/กก-°ซ)

ρ_l, ρ_v = ความหนาแน่นของของเหลวและไอตามลำดับ (กก/ม³)

μ_v = ความหนืดของของเหลว (กก/ม-วินาที)

g = ความเร่งภายใต้แรงโน้มถ่วง (9.8 ม/วินาที²)

2.4.1.2.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเท-
ความร้อนผ่านแผ่นฟิล์มในช่วงการควบแน่น

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเท
ความร้อนในส่วนนี้ จะใช้ทฤษฎีฟิล์มของนัสเซลท์ (Nusselt Film Theory) (46)

$$h_{ic(film)} = 0.943 \left[\frac{g \rho_1 (\rho_1 - \rho_v) H_{fg} k_1^3}{\mu_1 (T_{sat} - T_m) L_f} \right]^{1/4} \quad (2.12)$$

$$h_{ic(film)} = 1.47 k_1 \left[\frac{H_{fg} A_{if} g \rho_1^2}{4 Q L_f \rho_1} \right]^{1/3} \quad (2.13)$$

$h_{ic(film)}$ = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์มด้านในของช่วงการ
ควบแน่น (วัตต์/ม²-°ซ)

k_1 = ค่าความนำความร้อนของของเหลว (วัตต์/กก-°ซ)

H_{fg} = ความร้อนแฝงของการระเหย (จูล/กก)

ρ_1, ρ_v = ความหนาแน่นของของเหลวและไอตามลำดับ (กก/ม³)

μ_1 = ความหนืดของของเหลว (กก/ม-วินาที)

g = ความเร่งภายใต้แรงโน้มถ่วง (9.8 ม/วินาที²)

Q = อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์มของช่วงการระเหย (วัตต์)

$A_{if(film)}$ = พื้นที่ผิวของการถ่ายเทความร้อนของฟิล์มด้านในของช่วง
การระเหย (ม²)

$L_{(film)}$ = ความยาวของช่วงการควบแน่น (ม)

ที่กล่าวมานั้น เป็นการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์มด้านใน
ของอีกไปป์ไว้วิคส์ต่างๆไป

2.4.2 วิธีวิเคราะห์โดยอาศัย Effectiveness Number of Transfer Unit (39,40,41)

ทฤษฎีวิเคราะห์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Effectiveness Number of Transfer Unit นี้พัฒนาขึ้นโดย Kay และ London (47) โดยให้นิยามต่างๆไว้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Effectiveness (E)} &= \frac{\text{Actual Heat Transfer Rate}}{\text{Maximum Possible Heat Transfer Rate}} \\ &= Q/Q_{\max} \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\text{Number of (Heat) Transfer Unit (NTU)} = \frac{AU_m}{C_{\min}} \quad (2.15)$$

ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด (Q_{\max}) นี้ ได้จากการพิจารณาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทางกัน จาก $Q = mC_p \Delta T$ ถ้าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของของไหลสายใด มีค่าเท่ากับความแตกต่างของอุณหภูมิตั้งแต่เข้าของสายร้อนและของสายเย็น ค่า mC_p จะมีค่าต่ำสุดเนื่องจากพลังงานที่สูญเสียจากของไหลสายหนึ่งจะต้องเท่ากับพลังงานที่ของไหลอีกสายหนึ่งได้รับ ถ้าเราพิจารณาสายที่มี $(mC_p)_{\max}$ แล้ว ของไหลอีกสายหนึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูงกว่าที่จะเป็นไปได้ ดังนั้น

$$Q_{\max} = (mC_p)_{\min} (T_{h1} - T_{c1}) \quad (2.16)$$

จากสมการ (2.14) และ (2.16) จะได้ว่า

$$Q = E(mC_p)_{\min} (T_{h1} - T_{c1}) \quad (2.17a)$$

$$\text{หรือ} \quad E = \frac{Q}{(mC_p)_{\min} (T_{h1} - T_{c1})} \quad (2.17b)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนจริง (Q) หาได้จาก

$$Q = m_h C_{ph} (T_{hi} - T_{ho}) = m_c C_{pc} (T_{co} - T_{ci}) \quad (2.18)$$

แทนค่าสมการที่ (2.18) ลงในสมการที่ (2.17b) ได้

$$E_h = \frac{C_h (T_{hi} - T_{ho})}{C_{min} (T_{hi} - T_{ci})} \quad (2.19a)$$

$$E_c = \frac{C_c (T_{ci} - T_{co})}{C_{min} (T_{hi} - T_{ci})} \quad (2.19b)$$

โดยที่

$$C_h = m_h C_{ph} \quad \text{และ} \quad C_c = m_c C_{pc}$$

ค่า C_{min} = ค่าที่น้อยกว่าระหว่าง C_h และ C_c

ความหมายทางกายภาพของตัวเลขไร้มิติ NTU (46) คือ

$$NTU = \frac{AU_m}{C_{min}} = \frac{\text{heat capacity of exchanger, W/}^\circ\text{C}}{\text{heat capacity of flow, W/}^\circ\text{C}}$$

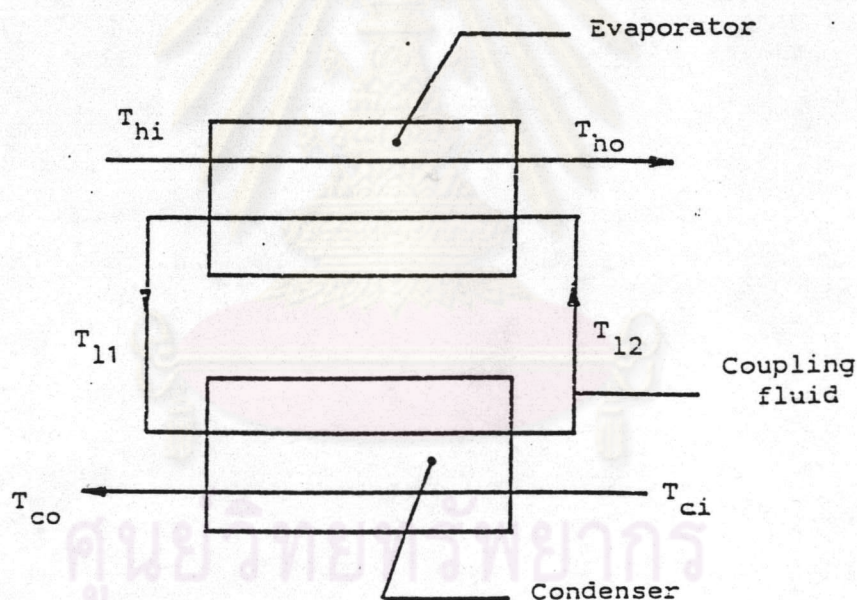
ที่ค่า U_m/C_{min} คงที่ ค่า NTU เป็นตัวกำหนดพื้นที่ของการถ่ายเทความร้อนหรือขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ค่า NTU ยิ่งสูงแสดงว่าต้องใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดใหญ่ขึ้น

ผลจากการคำนวณทางทฤษฎีแสดงให้เห็นว่า ถ้า $E < 40\%$ ค่าอัตราส่วนของความจุ (C) = C_{min}/C_{max} จะไม่มีผลมากนักต่อค่าประสิทธิภาพ (E)

เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดอื่น ๆ ที่มีค่า NTU และ C เท่ากัน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทางจะให้ค่าประสิทธิภาพ (E) สูงที่สุด นั่นคือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทางจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดด้วย

2.4.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E และ NTU

Kay และ London ได้พัฒนาสมการแสดงความสัมพันธ์ของ E-NTU ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Liquid-Coupled Indirect Type (47) ในที่นี้จะพิจารณาเพียงกรณีที่ C_L มีค่าสูงที่สุด เนื่องจากการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลภายนอกและของไหลใช้งานภายในท่อฮีทไปป์ ของไหลใช้งานจะมีการเปลี่ยนสถานะ (Phase) ที่บริเวณช่วงการระเหย (evaporator) และช่วงการควบแน่น (condenser) ดังนั้น ค่าของ capacity rate ของของไหลใช้งาน (C_L) จะมีค่าสูงมาก จนถึงได้ว่าเข้าใกล้ ∞



รูปที่ 2.16 แบบจำลองการส่งผ่านความร้อนแบบ Liquid-Coupled Indirect Type

ในกรณีที่ $C_L > C_c > C_h$; $E = \frac{1}{\frac{1}{E_h} + \frac{C_h/C_c}{E_c} - \frac{C_c}{C_L}}$ (2.20a)

ถ้า $C_L \rightarrow \infty$; $E = \frac{1}{\frac{1}{E_h} + \frac{C_h/C_c}{E_c}}$ (2.20b)

ในกรณีที่ $C_L > C_h > C_c$; $E = \frac{1}{\frac{1}{E_c} + \frac{C_c/C_h}{E_h} - \frac{C_c}{C_L}}$ (2.21a)

ถ้า $C_L \rightarrow \infty$; $E = \frac{1}{\frac{1}{E_c} + \frac{C_c/C_h}{E_h}}$ (2.21b)

สำหรับกรณีอื่นหาได้จากเอกสารอ้างอิงข้างต้น
พิจารณาการแลกเปลี่ยนความร้อนบริเวณช่วงการระเหยและช่วงการควบแน่น

ที่ช่วงการระเหย $NTU_h = U_h A_h / C_h$ (2.22a)

ที่ช่วงการควบแน่น $NTU_c = U_c A_c / C_c$ (2.22b)

สำหรับ effectiveness ของสายร้อน (E_h) และสายเย็น (E_c) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของ effectiveness และ NTU ในกรณีของไหลไหลสวนทางกัน

$$E = \frac{1 - \text{Exp}[-NTU(1 - C_r)]}{1 - C_r \text{Exp}[-NTU(1 - C_r)]} \quad (2.23)$$

เมื่อ $C_r = C_{\min} / C_{\max}$

สำหรับช่วงการระเหย (Evaporator) ค่า $C_{max} = C_L$ และ
 $C_{min} = C_h$ เมื่อ $C_L \rightarrow \infty$ ดังนั้นเทอม $C_{min}/C_{max} \rightarrow 0$

$$E_h = 1 - \text{Exp}(-NTU_h) \quad (2.24)$$

และจากสมการที่ 2.13

$$E_h = (T_{h1} - T_{ho}) / (T_{h1} - T_s) \quad (2.25)$$

สำหรับช่วงการควบแน่น (condenser) ในทำนองเดียวกันจะได้

$$E_c = 1 - \text{Exp}(-NTU_c) \quad (2.26)$$

และจากสมการที่ 2.14

$$E_c = (T_{co} - T_{ci}) / (T_s - T_{ci}) \quad (2.27)$$

นำค่า E_h และ E_c ที่คำนวณได้จากสมการที่ 2.24 และ 2.26 แทนค่าลงในสมการที่ 2.20b หรือ 2.21b เพื่อหาค่า Overall effectiveness ได้ว่า

$$E = \frac{1}{\frac{1}{(1 - \text{Exp}(-NTU_{min}))} + \frac{C_r}{(1 - \text{Exp}(-NTU_{max}))}} \quad (2.28)$$

$$E = \frac{(1 - \text{Exp}(-NTU_{min})) (1 - \text{Exp}(-NTU_{max}))}{1 - \text{Exp}(-NTU_{max}) + C_r (1 - \text{Exp}(-NTU_{min}))} \quad (2.29)$$

เมื่อ $NTU_{min} = NTU$ ของของไหลสาย C_{min}
 $NTU_{max} = NTU$ ของของไหลสาย C_{max}