หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

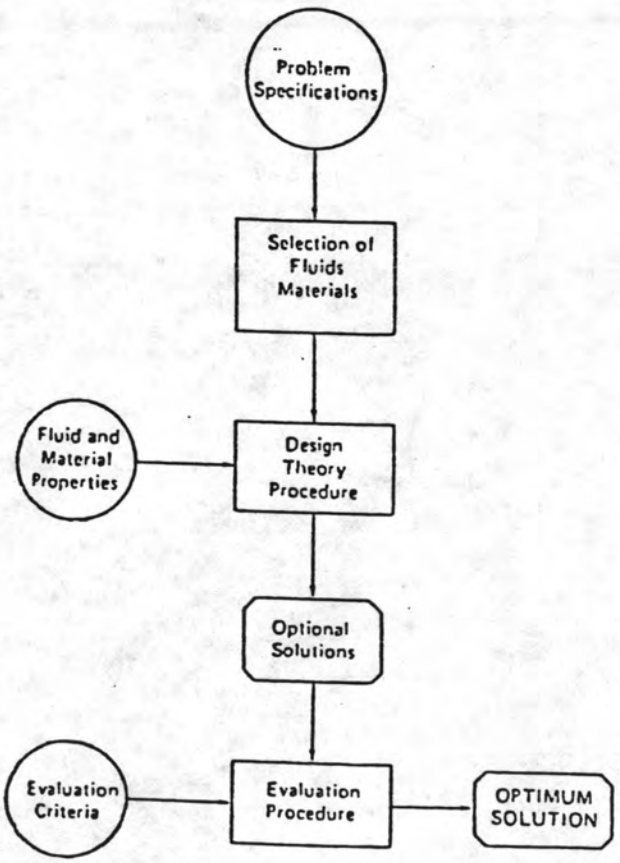
บทที่ 3
การสร้างฮีตไพป์แบบไหลครบวงจร และระบบทดสอบสมรรถนะ

3.1 การเลือกส่วนประกอบต่างๆ ของฮีตไพป์ไร้วิกค์

ฮีตไพป์ไร้วิกค์ประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วนคือ

1. ของไหลใช้งาน
2. ท่อปิดผนึก

ก่อนที่จะทำการออกแบบและสร้างท่อฮีตไพป์ไร้วิกค์ จำเป็นจะต้องพิจารณาเลือกส่วนประกอบทั้งสองให้มีความเหมาะสมซึ่งกัน (compatability) โดยอาศัยขั้นตอนที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการออกแบบฮีตไพป์ไร้วิกค์

3.1.1 การเลือกของไหลใช้งาน

ก. คุณลมบัติของของไหลใช้งาน ก่อนอื่นเลือกของไหลใช้งานให้เหมาะสมกับอุณหภูมิใช้งานของฮีตไพป์ไร้วิกค์ ตารางที่ 3.1 แสดงชนิดของของไหลใช้งานที่ใช้ได้ที่อุณหภูมิไอต่างๆถ้ามีของไหลใช้งานให้เลือกมากกว่า 1 ชนิด ควรเลือกของไหลใช้งานที่มีคุณลมบัติเฉพาะดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 ชนิดของไหลใช้งานที่ช่วงอุณหภูมิใช้งานต่างๆ

Medium	Melting point (°C)	Boiling point at atmos.press. (°C)	Useful range (°C)
Hellum	-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. เปียกผิววัสดุท่อได้ดี
4. ความดันไอไม่สูงหรือไม่น้อยเกินไปในช่วงอุณหภูมิใช้งาน
5. มีค่าความร้อนแฝงของการระเหยสูง
6. มีความหนืดต่ำทั้งในสภาพของเหลวและไอ
7. มีค่าความนำความร้อนสูง
8. มีจุดเยือกแข็งและจุดหลอมตัวที่ยอมรับได้

ข. ตัวเลขเมอริท (Merit number)

การเลือกชนิดของไหลใช้งานที่มีลักษณะสมบัติข้างต้นอย่างครบถ้วน เป็นเรื่องไม่ง่ายนัก ดังนั้น ในบางครั้งจะใช้ตัวเลขเมอริท M เป็นตัวตัดสิน โดยที่

$$M = \frac{\sigma_l \rho_l \lambda}{\mu_l} \quad (W/cm^2)$$

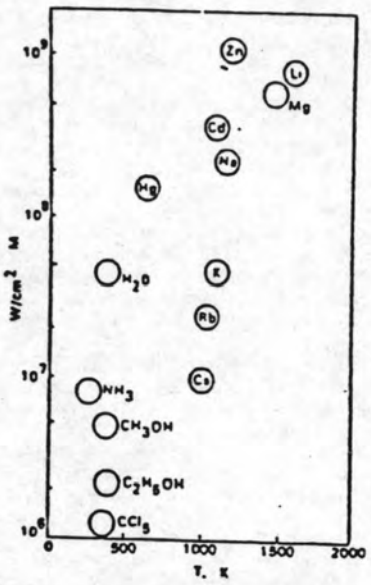
ρ_l = ความหนาแน่นของของเหลว (gm/cm²)

σ_l = แรงดึงผิวของของเหลว (gm_f/cm)

λ = ความร้อนแฝงของการระเหย (J/gm)

μ = ความหนืดของของเหลว (CP)

รูปที่ 3.2 แสดงค่าตัวเลขเมอริทของของไหลใช้งานตัวสำคัญที่ช่วงอุณหภูมิการใช้งานต่างๆ ถ้าค่าตัวเลขเมอริทของของไหลใช้งานใดมีค่าสูง แสดงว่าของไหลใช้งานนั้นมีความเหมาะสมมาก แต่ยังจำเป็นต้องคำนึงถึงราคา ความปลอดภัยและฤทธิ์กัดกร่อนของของไหลใช้งานนั้นด้วย



รูปที่ 3.2 ค่าตัวเลขเมอริทของของไหลใช้งานที่อุณหภูมิจุดเดือด

3.1.2 การเลือกวัสดุท่อ

ก. ความเข้ากันได้ (compatability)

การเลือกวัสดุที่ใช้ทำท่อต้องคำนึงถึงความเข้ากันได้กับของไหลใช้งานเป็นสำคัญ เช่น พิจารณาว่าจะเกิดปฏิกริยาเคมี การสลายตัวของของไหลใช้งานและการกัดกร่อนของท่อหรือไม่ ถ้ามีปรากฏการณ์ใดปรากฏการณ์หนึ่งเกิดขึ้น ก็แสดงว่าวัสดุท่อไม่เหมาะสม

ปฏิกริยาเคมีหรือการสลายตัวของของไหลใช้งานจะทำให้เกิดก๊าซที่ไม่สามารถควบแน่นได้ขึ้นภายในท่อฮีตไพป์ ซึ่งจะทำให้สมรรถนะของฮีตไพป์ต่ำลงได้

การผุกร่อนของวัสดุท่อจะทำให้คุณสมบัติของผิววัสดุเปลี่ยนไป ผลก็คือมุมของการเปียกผิวระหว่างของเหลวกับวัสดุจะเปลี่ยนแปลงไป อีกทั้งยังอาจเกิดเศษอนุภาคของแข็งขึ้นกีดขวางการไหลกลับของของเหลวใช้งาน หรือเกิด

ก๊าซขึ้น ผลก็คือสมรรถนะของฮีตไพป์ก็จะต่ำลง ความเข้ากันได้ของวัสดุกับของไหลใช้งานต่างๆ มีแสดงไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ความเข้ากันได้ระหว่างของไหลใช้งานกับวัสดุท่อ

Fluids	Al	Cu	Fe	Ni	[a]ss 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

[a]ss = stainless steel.

[b]C = compatible; I = incompatible;blank = data not available.

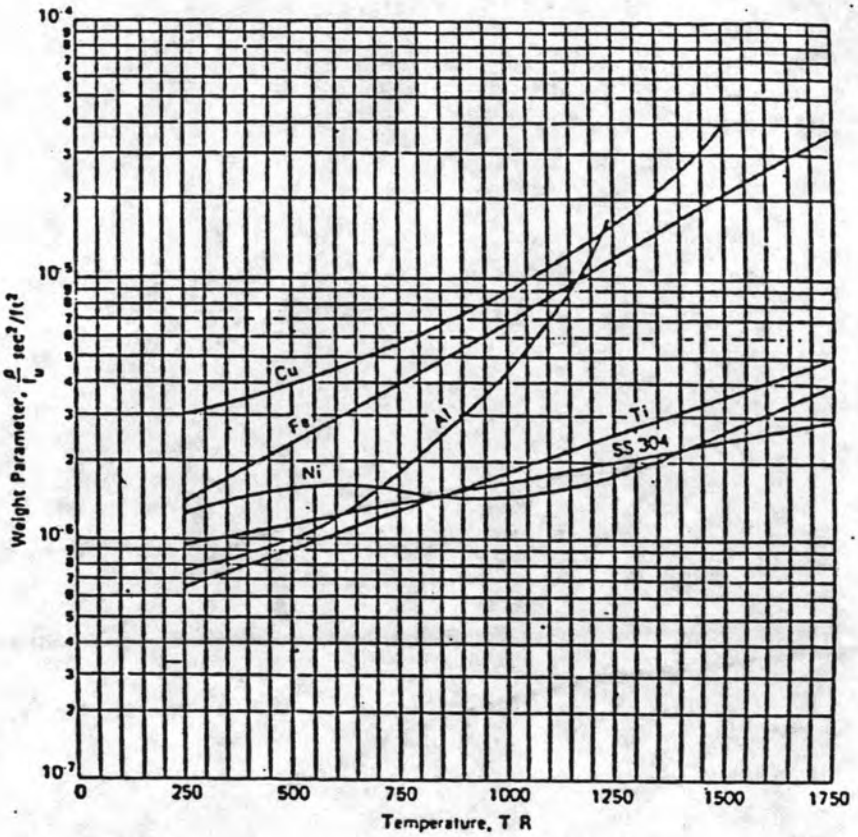
[c]Possible hydrogen generation.

ข. น้ำหนักและผลลดอุณหภูมิของวัสดุ

นอกจากจะคำนึงถึงความเข้ากันได้แล้ว ยังต้องสนใจน้ำหนักของวัสดุและผลลดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นอีกด้วย

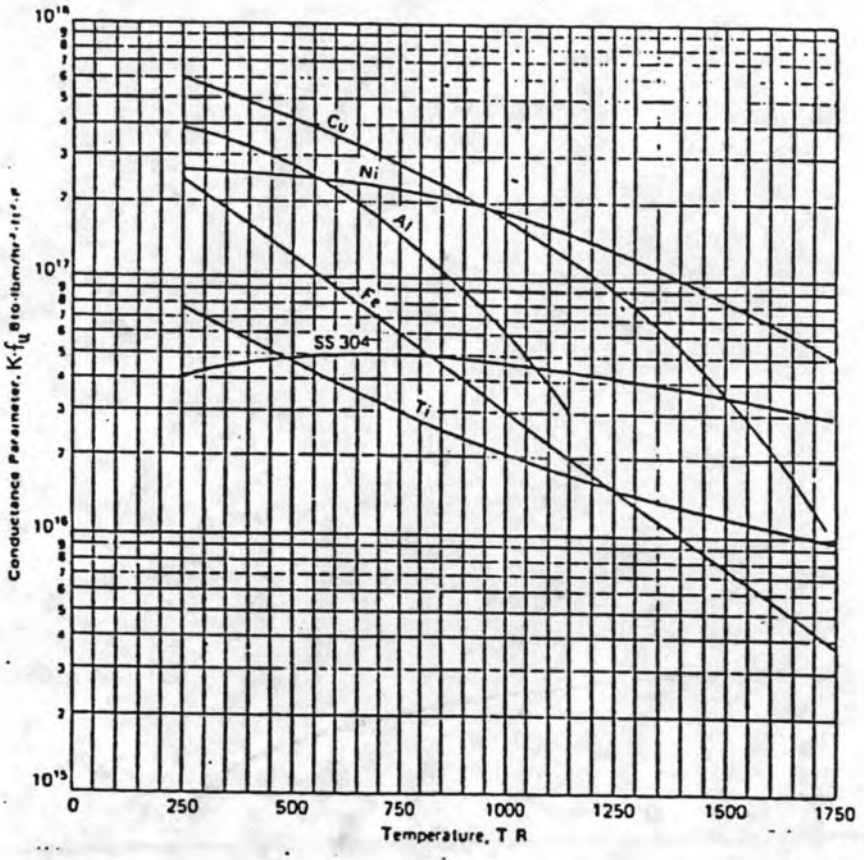
ข.1 น้ำหนักของวัสดุท่อนั้นแปรผันตามผลคูณของความหนาของท่อกับความหนาแน่นของวัสดุ (ให้รูปทรงภายนอกคงที่) แต่ความหนาของท่อที่สามารถทนต่อแรงดันไอได้จะแปรผกผันกับความทนแรงดึงสูงสุดของวัสดุ (Ultimate tensile strengh, UTS, f_u) นั่นคือน้ำหนักของวัสดุท่อที่ใช้

จะแปรผัน โดยตรงกับ (ρ/f_u) รูปที่ 3.3 แสดงค่า (ρ/f_u) ที่อุณหภูมิต่างๆ ของวัสดุแต่ละชนิด



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Weight Parameter (ρ/f_u) กับอุณหภูมิ

ข.2 ผลลดอุณหภูมิ ผลลดของอุณหภูมิจะแปรผันโดยตรงกับความหนาของผนังท่อและแปรผกผันกับค่าความนำความร้อน (K) ของวัสดุ นั่นคือผลลดของอุณหภูมินี้จะแปรผกผันกับ $(K.f_u)$ ค่า $(K.f_u)$ ที่อุณหภูมิใช้งานต่างๆ ของวัสดุมีแสดงไว้ในรูป 3.4



รูปที่ 3.4 ค่า Conductance parameter ($K.f_{\mu}$) ที่อุณหภูมิการใช้งานต่างๆของวัสดุ

จากรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าวัสดุทองแดง (Cu) มีค่า ($K.f_{\mu}$) สูงกว่าวัสดุชนิดอื่นใด ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 1,000°R นี่หมายความว่า ในช่วงอุณหภูมินี้ทองแดงให้ผลลดอุณหภูมิน้อยที่สุด

ในการเลือกวัสดุนี้ ปัจจัยที่สำคัญที่ต้องไม่ลืมคือ ราคาของวัสดุ เครื่องมือที่ต้องใช้ในการขึ้นรูป การเชื่อมและอุปสรรคต่างๆที่จะเกิดขึ้นในการสร้างและใช้งาน

3.1.3 ขั้นตอนการเลือกส่วนประกอบทั้ง 2 ส่วน

1. เลือกของไหลใช้งานหนึ่งชนิดโดยอาศัยตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 ของไหลใช้งานนั้นจะต้องให้ค่าการถ่ายเทของเหลวสูง และสภาพการนำความร้อนของของเหลวสูงพอ อีกทั้งต้องไม่เป็นพิษและไม่ติดไฟด้วย

2. เลือกชนิดของวัสดุท่อที่เข้ากันได้โดยอาศัยตารางที่ 3.2 นอกจากนี้ต้องคำนึงให้มีน้ำหนักเบาและผลลดของอุณหภูมิน้อย โดยใช้รูป 3.3 และ 3.4

การเลือกส่วนประกอบทั้ง 2 ส่วนนี้ เป็นสิ่งที่ขาดไม่ได้ในการออกแบบฮีตไพป์ไร้วิกค์

3.2 การกำหนดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อฮีตไพป์

ท่อฮีตไพป์สามารถทำด้วยท่อชนิดต่างๆ ขึ้นอยู่กับรูปร่างพื้นที่หน้าตัดของท่อ ท่อที่นิยมใช้ทั่วไปเป็นท่อทรงกระบอก เพราะหาซื้อได้ง่ายและเป็นท่อที่สามารถทนความดันได้ดีกว่าท่อรูปร่างอื่นๆ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อมีความสำคัญต่อฮีตไพป์มาก เพราะเป็นตัวกำหนดความเร็วของไอ ถ้าตัวเลขแมคห์ของไอมีค่าสูง จะเกิดการอัดตัวของไอขึ้น และการกระจายของอุณหภูมิในแนวแกนของฮีทไปป์มาก ค่าตัวเลขแมคห์ของไอ ควรยึดหลักว่ามีค่าไม่เกิน 0.2 เพราะที่ค่านี้การอัดตัวของไอ และผลต่างของอุณหภูมิในแนวแกนมีน้อยจนของเหลวสามารถระเหยได้ ถ้าต้องการออกแบบฮีตไพป์ให้ส่งผ่านความร้อนสูงสุดในแนวแกนเป็น Q_{max} เส้นผ่าศูนย์กลางย่านไอผ่าน d_v ในกรณีตัวเลขแมคห์ ($M_v = 0.2$) คือ

$$d_v = \frac{1}{\pi \rho_v \lambda} \sqrt{\frac{20\, Q_{max}}{\gamma_v R_v T_v}}$$

โดยที่ d_v = เส้นผ่าศูนย์กลางของย่านไอผ่าน (m)

Q_{max} = ฟลักซ์ความร้อนที่ส่งผ่านในแนวแกน (W/m^2)

ρ_v = ความหนาแน่นของไอ (kg/m^3)

γ_v = อัตราส่วนความร้อนจำเพาะของไอ

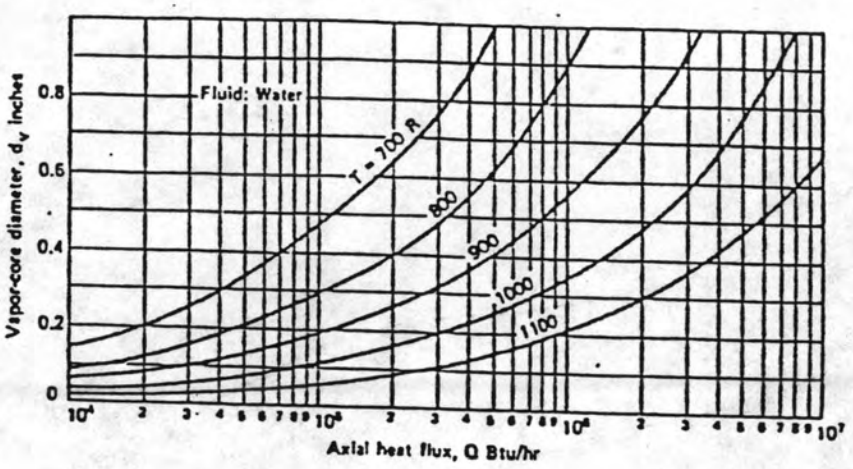
λ = ความร้อนแฝงของการระเหย (J/kg)

1029944

R_v = ค่าคงที่ของแก๊ซ

T_v = อุณหภูมิของไอ (K)

สมการที่ (3.1) สามารถแสดงเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางของย่านไอผ่านกับฟลักซ์ความร้อนตามแนวแกน

3.3 การเลือกและคำนวณออกแบบท่อฮีตไพป์

การคำนวณออกแบบท่อฮีตไพป์ต้องคำนึงถึงความทนทานต่อความดันไอที่เกิดขึ้นภายในท่อฮีตไพป์ โดยทั่วไปนิยมใช้มาตรฐาน ASME โดยยึดหลักว่าความเค้นสูงสุดของวัสดุที่ยอมได้ (maximum allowable stress) จะเป็น 1/4 เท่า ของความทนต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุนั้น (Ultimate tensile strengh, UTS, f_{tu}) อนึ่ง การออกแบบโครงสร้างของท่อแบ่งออกได้เป็นข้อๆ ดังนี้

1. สำหรับท่อทรงกระบอกที่มีความหนาของผนังท่อน้อยกว่า 10% ของเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ ความเค้นสูงสุดที่ยอมได้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.2)

$$f_{max} = Pd_o/2t \qquad (3.2)$$

f_{max} = ความเค้นสูงสุดที่ผนังท่อรับได้

P = ผลต่างของความดันที่สองด้านของผนังท่อ

d_o = เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อ

t = ความหนาของผนังท่อ

2. สำหรับท่อทรงกระบอกที่มีผนังท่อหนา ความเค้นสูงสุดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.3)

$$f_{max} = P(d^2_o + d^2_i)/(d^2_o - d^2_i) \qquad (3.3)$$

f_{max} = ความเค้นสูงสุดที่ยอมได้

P = ผลต่างของความดันที่สองด้านของผนัง

d_o = เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อ

d_i = เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อ

หมวกปิดท่อฮีตไพป์ก็จัดอยู่ในประเภทวัสดุท่อเช่นกัน หมวกปิดท่อนี้มีรูปร่างหลายอย่าง เช่นเสี้ยวของวงกลม กรวยหรือแผ่นราบ การคำนวณออกแบบก็ลามารถทำได้ดังนี้

1. สำหรับหมวกปิดท่อเนื้อหนาแบบทรงกลมครึ่งซีก ความเค้นสูงสุดที่ยอมได้คำนวณได้จากสมการที่ (3.4)

$$f_{max} = P(d^3_o + 2d^3_i)/2(d^3_o - d^3_i) \qquad (3.4)$$

2. สำหรับหมวกปิดท่อแบบทรงกลมครึ่งซีก เนื้อบางน้อยกว่า 10% ของเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกท่อ ความเค้นสูงสุดคำนวณได้จากสมการที่ (3.5)

$$f_{max} = Pd_o/4t \qquad (3.5)$$

3. สำหรับหมวกปิดท่อแบบแผ่นราบ ความเค้นสูงสุดคำนวณได้จากสมการที่ (3.6)

$$f_{max} = Pd^2_o/8t \qquad (3.6)$$

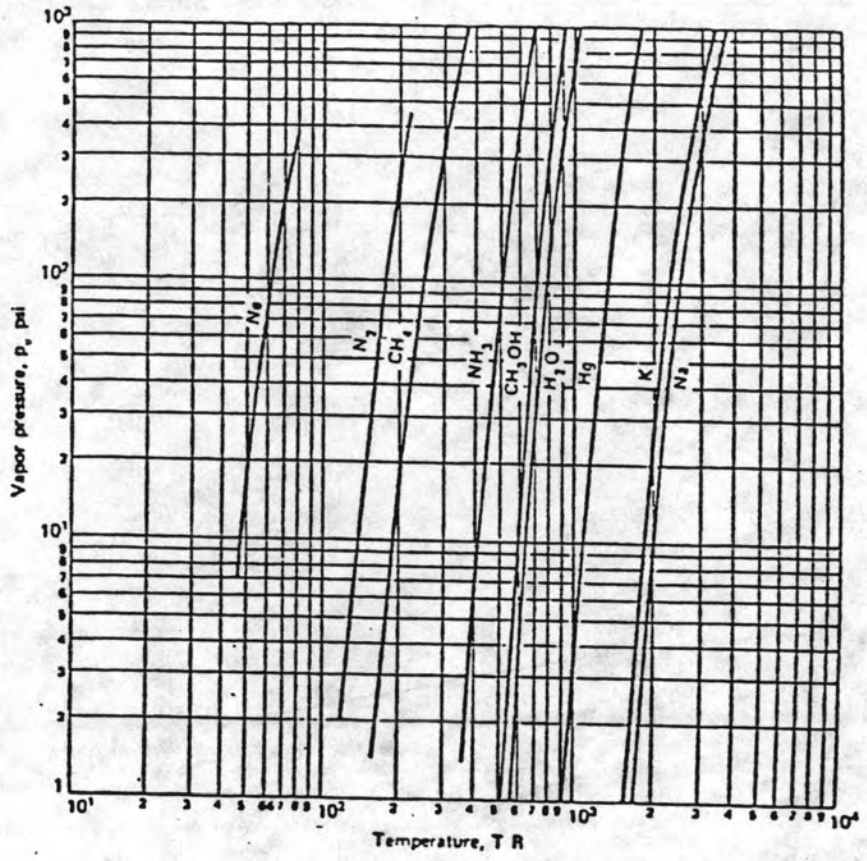
f_{max} = ความเค้นสูงสุด

P = ผลต่างของความดันที่สองด้านของผนังหมวกปิดท่อ

d_o = เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของหมวกปิดท่อ

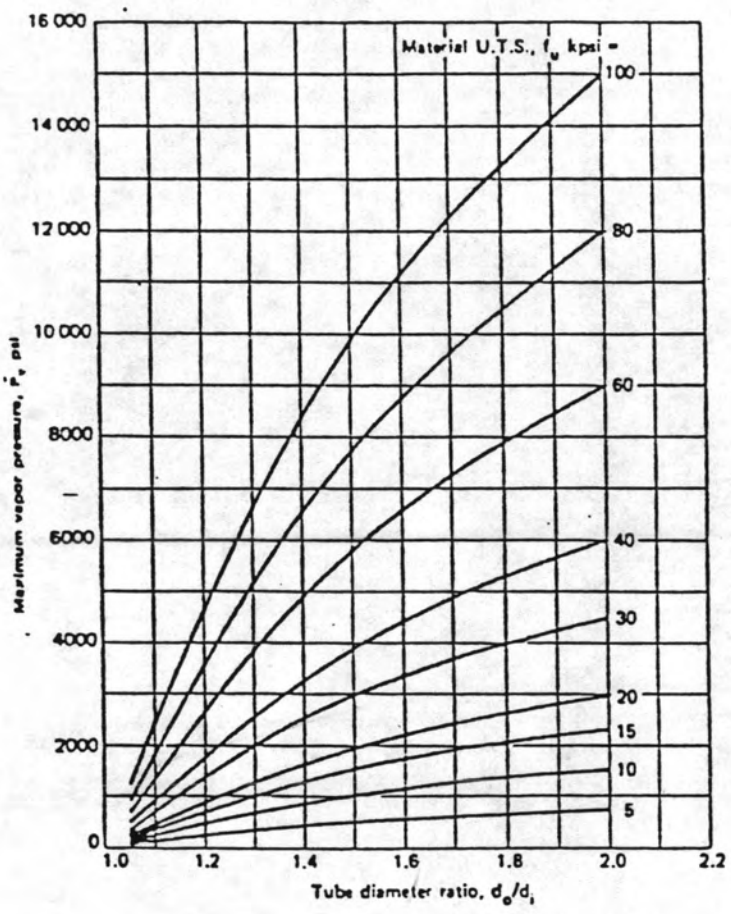
d_i = เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของหมวกปิดท่อ

ผลต่างของความดันที่สองด้านของผนังท่อ/หมวกปิดท่อมีค่าเท่ากับความดันไอของของไหลใช้งานที่อุณหภูมิใช้งานสูงสุดหักลบด้วยความดันบรรยากาศภายนอก รูปที่ 3.6 แสดงค่าความดันไอของของไหลใช้งานบางประเภท

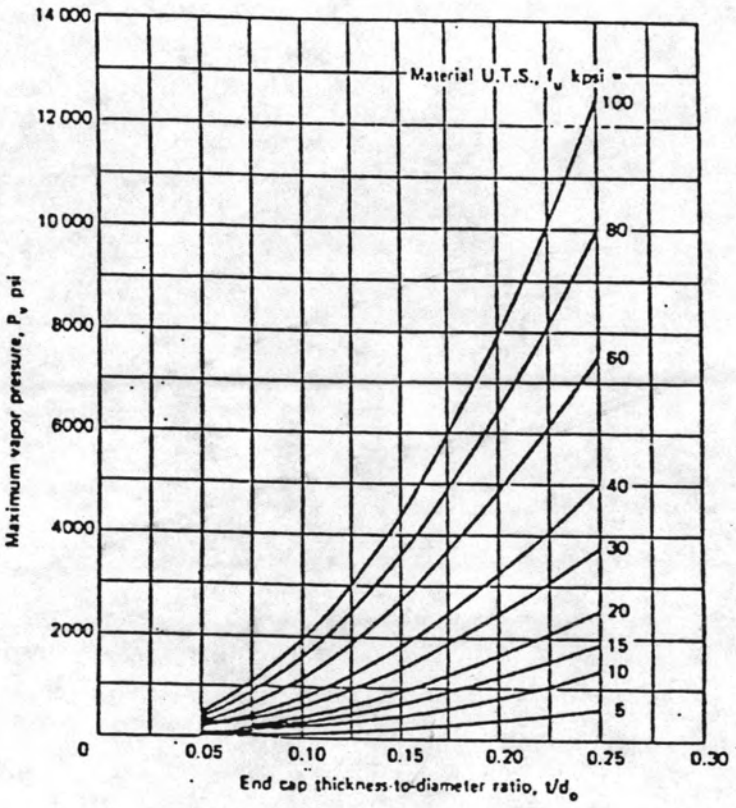


รูปที่ 3.6 ความดันไอที่อุณหภูมิต่างๆของของไหลใช้งาน

เพื่อความสะดวกในการออกแบบ เราสามารถนำเอาสมการที่ (3.2)-(3.6) ไปเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดท่อ (d_o/d_i) หรือขนาดหมวกปิดท่อ (t/d_o) กับความดันไอของของไหลใช้งาน (P_v) ดังรูปที่ 3.7 และ 3.8



รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอสูงสุด
กับอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลาง ภายนอกและภายในของท่อ

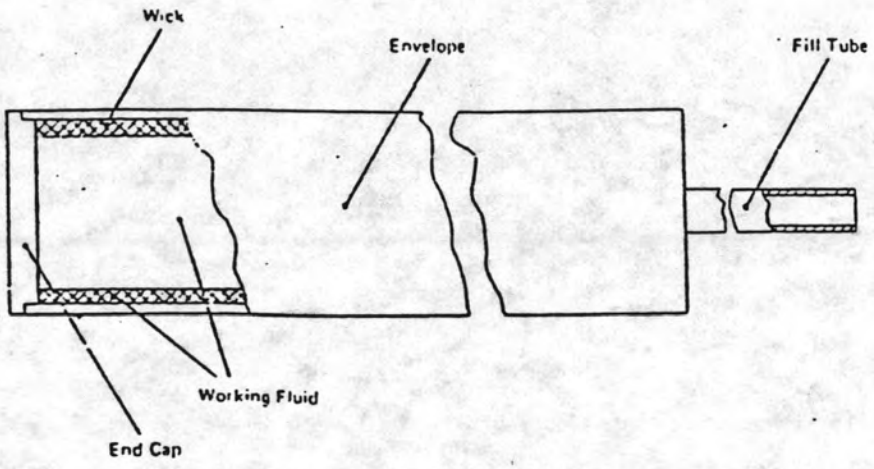


รูปที่ 3.8
ความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอสูงสุดกับอัตราส่วนความหนาของหมวกปิดท่อต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ

3.4 การสร้างฮีตไพป์ไร้วิกค์

3.4.1 ส่วนประกอบของฮีตไพป์ไร้วิกค์

ฮีตไพป์ทั่วไปมีส่วนประกอบ 5 ชิ้น คือ ท่อ (Envelope), วิกค์ (Wick), หมวกปิดท่อ (End cap), ท่อเติม (Fill tube) และของไหลใช้งาน (Working fluid) (รูป 3.9) แต่ฮีตไพป์ไร้วิกค์จะมีส่วนประกอบเพียง 4 ส่วน คือ ไม่มีวิกค์ ในที่นี้จะอธิบายเฉพาะส่วนประกอบของฮีตไพป์ไร้วิกค์เท่านั้น

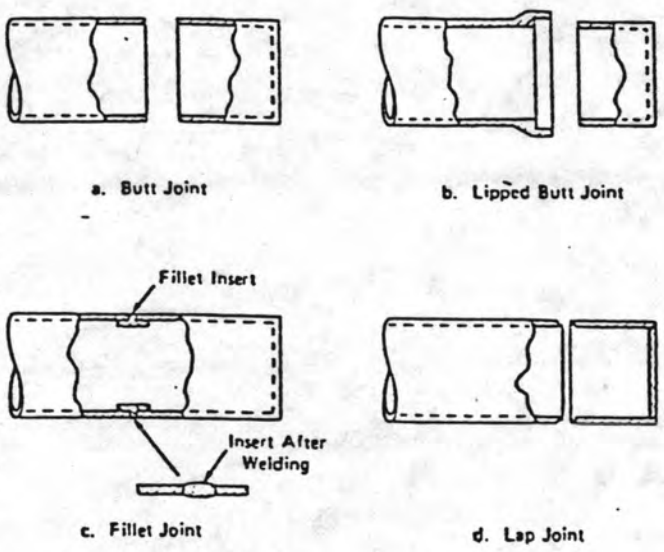


รูปที่ 3.9 ส่วนประกอบต่างๆของฮีตไพป์ทั่วไป

1. ท่อ ท่อที่ใช้ทำฮีตไพป์มีหลายประเภทและหลายขนาด การเลือกท่อในตอนออกแบบฮีตไพป์นั้นต้องคำนึงถึงราคาของท่อด้วย ท่อที่ใช้ทั่วไปมี 2 ประเภทคือ ท่อไร้ตะเข็บและท่อเชื่อมต่อ (Butt welding tubes)

สิ่งที่ควรระวังในการตัดท่อให้ได้ความยาวที่ต้องการคือ การเสียรูปของปลายท่อเพราะถ้าเกิดการเสียรูปแล้ว รอยเชื่อมหมวกปิดท่อจะไม่ทนทานและเกิดรูรั่วได้ง่าย

2. หมวกปิดท่อ หมวกปิดท่อที่ใช้ควรมีความหนาของผนังน้อยที่สุดที่จะทนต่อความเค้นที่เกิดขึ้นได้ หมวกปิดท่อจะถูกเชื่อมติดกับปลายท่อ รูปแบบของการเชื่อมติดนี้มีความสำคัญมากต่อการสร้างฮีตไพป์และแบ่งได้เป็น 4 แบบ คือ แบบเชื่อมธรรมดา (Butt joint), แบบเชื่อมประกบ (Lipped butt joint), แบบเชื่อมเติมร่อง (Fillet joint) และแบบเชื่อมเหลื่อม (Lap joint) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.10



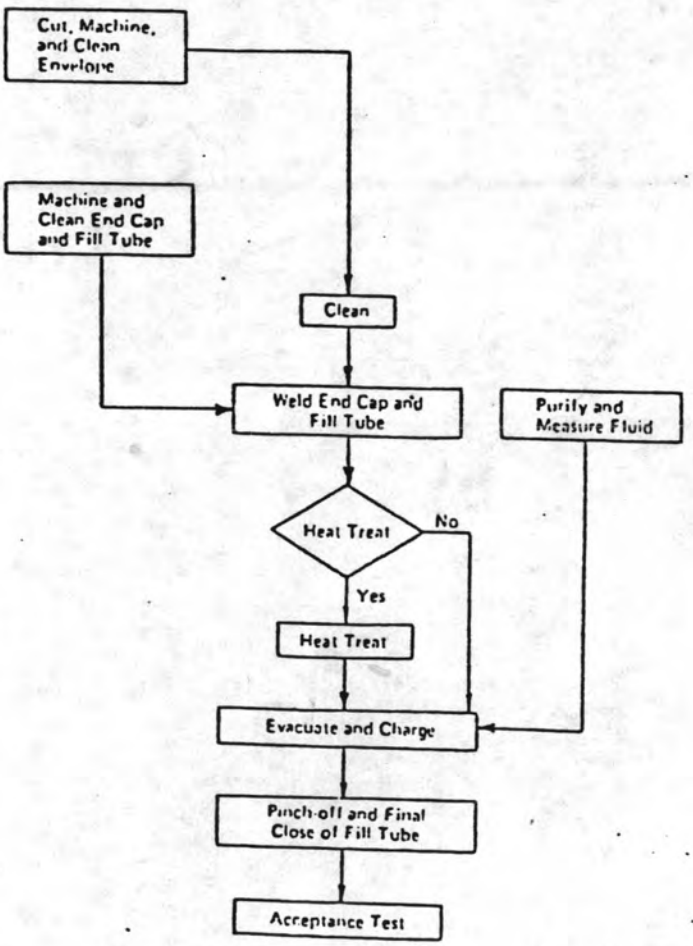
รูปที่ 3.10 วิธีเชื่อมต่อหมวกปิดท่อแบบต่างๆ

สิ่งที่ควรระวังในการเชื่อมหมวกคือ หมวกปิดท่อและตัวท่อต้องอยู่ในแนวตรง รอยเชื่อมต้องแข็งแรง ไม่มีรอยรั่วซึม ความหนาของรอยเชื่อมต้องมีขนาดใกล้เคียงกับความหนาของผนังท่อและรอยเชื่อมนั้นควรจะอยู่บนเนื้อของหมวกปิดท่อและบนตัวท่อเท่าๆกัน อีกทั้งต้องเป็นรอยที่สม่ำเสมอด้วย ในการเชื่อมต่อหมวกปิดท่อนี้ไม่ควรใช้การเชื่อมต่อแบบธรรมดา (Butt joint)

3. ท่อเติม เป็นท่อต่อขนาดเล็กบนหมวกปิดท่อด้านใดด้านหนึ่งของฮีตไพป์ เพื่อใช้เป็นทางดึงหรือไล่อากาศออกจากฮีตไพป์และเป็นทางเติมของไหลใช้งานเข้าท่อ ก่อนที่ใช้งานฮีตไพป์จะต้องปิดท่อเติมให้สนิทเสียก่อน อาจจะโดยการบีบให้แบนแล้วเชื่อมปิดปลาย ท่อเติมนี้ควรมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกไม่เกิน 1/4 นิ้ว และเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 1/6 นิ้ว

4. ของไหลใช้งาน ของไหลใช้งานที่ใส่ในท่อฮีตไพป์ต้องมีปริมาณที่พอเหมาะและต้องมีความบริสุทธิ์สูง

ขั้นตอนการสร้างฮีตไพป์มีแสดงไว้ในรูป 3.11



หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.11 แผนผังขั้นตอนการสร้างฮีตไพป์

3.4.2 การทำความสะอาดส่วนประกอบต่างๆ

ความสะอาดของส่วนประกอบมีผลต่อสมรรถนะและอายุการใช้งานของฮีตไพป์มาก

วิธีการทำความสะอาดมีดังต่อไปนี้

ก. การทำความสะอาดส่วนประกอบที่เป็นโลหะ

แบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนคือ

1. การกำจัดคราบไขมัน (Degreasing) คราบไขมันที่ติดมากับวัสดุอาจเป็น น้ำมัน ไข หรือจาระบี โดยทั่วไปจะใช้สารละลายจำพวกเมทธิลีนไดโครเมท (Methylenedichromate) ไตรคลอโรอีเทน (Trichloroethane) และไตรคลอโรเอธิลีน (Trichloroethylene) แต่นิยมใช้สารละลายไตรคลอโรอีเทน เพราะมีราคาถูกกว่า สารละลายนี้สามารถใช้ทำความสะอาดได้ทุกซอกมุม โดยอาศัยเครื่องมือที่ทันสมัย (Ultrasonic cleaning equipments) ในขณะที่ชิ้นส่วนแช่อยู่ในสารละลายควรจะใช้แปรงแปรงเบาๆด้วย

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

สารอัลคาไลน์ที่ยกมานี้เป็นชื่อทางการค้าและประกอบด้วยสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดฟอง (Synthetic organic surfactants) หรือสบู่ 2-10% และเกลือของด่างอย่างน้อย 2 ชนิด เช่น เกลือของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Caustic soda) โซเดียมออโธซิลิเกต โซเดียมคาร์บอเนท (Soda ash) โซเดียมเตตราบอเรท (Borax) หรือโซเดียมโพลิฟอสเฟส เป็นต้น

อนึ่ง ยังมีอนุภาคของแข็งอีกชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นบนผิวโลหะเนื้อแข็ง เช่น พวกสเตนเลสในรูปของจุดตำหนิของเนื้อเหล็ก เนื่องจากอนุภาคเหล่านี้ลามารถทำปฏิกริยาเคมีกับของไหลใช้งานจึงต้องกำจัดออกโดยการใช้สารออกซิไดซิง ซึ่งไม่เกิดปฏิกริยาเคมีกับตัวสเตนเลสเอง เช่น กรดไนตริก โซเดียมไดโครเมท โปแตสเซียมไดโครเมท หรือสารผสมของสารพวกนี้

3. การกำจัดออกไซด์ (Deoxydizing) โลหะทั่วไปจะเกิดออกไซด์ปกคลุมผิวนอกอยู่โดยรอบ ซึ่งทำให้คุณสมบัติเปียกผิวของโลหะนั้นถดถอยลง อีกทั้งออกไซด์ของโลหะบางชนิดก็ลามารถทำปฏิกริยาเคมีกับของไหลใช้งานและก่อให้เกิดสิ่งที่ไม่ต้องการด้วย เช่น ออกไซด์ของอลูมิเนียมจะทำปฏิกริยาเคมีกับแอมโมเนียให้ก๊าซไนโตรเจน ไฮโดรเจนและโลหะอลูมิเนียม เป็นต้น ทำให้อีทไปบ์มีสมรรถนะต่ำลงมาก วิธีการกำจัดออกไซด์ย่อมขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ

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

หลังจากกำจัดออกไซด์จากชิ้นส่วนต่างๆแล้วต้องล้างด้วยน้ำสะอาด 2 นาทีและกลั้วด้วยน้ำกลั่นทันที จากนั้น ทำให้แห้งด้วยอากาศสะอาด กลั้วด้วยไอโซโปรพิลแอลกอออล์ไร้น้ำแล้วทำให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนร้อน 70°C ที่ผ่านการกรองแล้ว

ตัวอย่างของขั้นตอนการทำความสะอาดชิ้นส่วนที่เป็นทองแดงและอลูมิเนียมมีดังนี้

1. แช่ในไตรคลอโรอีเทนที่อุณหภูมิห้องและใช้แปรงถูเป็นระยะๆ
2. กลั้วด้วยไตรคลอโรอีเทนที่อุณหภูมิห้อง
3. จุ่มอลูมิเนียมลงใน Oakite No 164 (15-75 กก./ม^3) ส่วนทองแดงใน Coppa Kleen (15-75 กก./ม^3) ที่ 60 - 80 °C เป็นเวลานาน 5-30 นาที
4. ล้างด้วยน้ำสะอาด 2 นาที

5. จุ่มลงในสารละลายโซเดียมไดโครเมทและกรดกำมะถันที่อุณหภูมิห้อง 5-30 นาที
6. ล้างด้วยน้ำสะอาด 2 นาที แล้วกลั้วด้วยน้ำกลั่น
7. เป่าให้แห้งด้วยอากาศสะอาด
8. ล้างด้วยไอโซโปรพิลแอลกอฮอล์ไร้น้ำ
9. เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนสะอาดที่ 160°ฟ (70°C)

ข. การทำความสะอาดของไหลใช้งาน

การทำของไหลใช้งานให้บริสุทธิ์มีขั้นตอนดังนี้

1. การกลั่น ของไหลใช้งานจำพวกน้ำและของเหลวอินทรีย์ เช่น อาซิโตน, เอทธานอล เป็นต้น จำต้องผ่านการกลั่นเสียก่อน

2. การกำจัดน้ำจากของเหลว โดยใช้ซิลิกาเจล (Silica gel) หรืออลูมินา (Alumina)

3. การกำจัดก๊าซต่างๆที่ละลายอยู่ในของไหลใช้งาน ในกรณีที่ใช้งานฮีทไปป์อุณหภูมิสูงกว่า 200°ซ (392°ฟ) จำเป็นต้องไล่ก๊าซที่ละลายอยู่ในของไหลออกโดยวิธี freezing degassing

3.4.3 ขั้นตอนการประกอบฮีตไพป์

เมื่อทำความสะอาดชิ้นส่วนต่างๆเรียบร้อยแล้ว ควรรีบประกอบขึ้นโดยไม่ปล่อยทิ้งไว้เนิ่นนาน ขั้นตอนการประกอบที่สำคัญคือ การเชื่อมต่อหมวกปิดท่อและท่อเติม

ในกรณีที่หมวกปิดท่อไม่มีท่อเติมตั้งแต่แรก เราจะต้องเชื่อมท่อเติมกับหมวกเสียก่อนหลังจากนั้นจึงทำการเชื่อมหมวกปิดท่อทั้งด้านที่มีท่อเติมและด้านที่ไม่มีท่อเติมเข้ากับท่อ การเชื่อมต่อทั้งหมดจะต้องไม่มีรอยรั่วและรอยร้าว เพราะจะทำให้ระบบสูญญากาศของฮีตไพป์เสียได้ การเชื่อมที่สามารถใช้ได้ในการสร้างฮีตไพป์นี้ได้แก่ การเชื่อมแบบ TIG (Tungsten-Inert Gas Welding) และการเชื่อมแบบ EBW (Electron Beam Welding)

ก. การเชื่อมแบบ TIG เป็นการเชื่อมด้วยไฟฟ้า โดยมีแท่งเชื่อมถาวร (electrode) เป็น Tungsten และลวดเชื่อม (filler metals) เป็นโลหะชนิดอื่น การเชื่อมแบบนี้จะมีช่องพ่นก๊าซเฉื่อยรอบๆแท่งเชื่อมถาวรเพื่อปกคลุมรอยเชื่อมไม่ให้ถูกกับอากาศ ทำให้รอยเชื่อมสะอาดไม่เกิดรอยรั่ว

ข. การเชื่อมแบบ EBW เป็นการเชื่อมที่มีการสร้างห้องสูญญากาศเพื่อปกป้องรอยเชื่อมจากอากาศ การเชื่อมแบบนี้ใช้ปริมาณความร้อนน้อยกว่าการเชื่อมทั่วไปและมีการกระจายของความร้อนบนผิวโลหะในบริเวณแคบๆ ทำให้ผิวโลหะและรอยเชื่อมไม่มีสารประกอบใดๆเกิดขึ้น

นอกจากการเชื่อมที่ถูกต้องแล้ว ควรมีอุปกรณ์ตรวจสอบรอยรั่วที่มีประสิทธิภาพสูง (เช่น mass spectrometer โดยลดความดันในท่อลง แล้วตรวจดูว่าก๊าซฮีเลียมที่อยู่ภายนอกท่อซึมผ่านเข้าในท่อหรือไม่)

การเชื่อมท่อฮีตไพป์จะไม่ใช้น้ำยาประสาน (flux) ในการเชื่อมเพราะทำให้เกิดรอยรั่วได้ง่าย

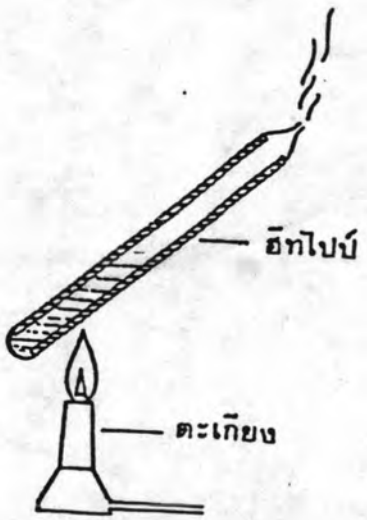
3.4.4 การเติมของไหลใช้งานและการทำสูญญากาศ

เมื่อประกอบชิ้นส่วนต่างๆเรียบร้อยแล้ว ลักษณะภายนอกจะเหมือนฮีตไพป์ทุกอย่าง ขั้นตอนต่อไปเป็นการเติมของไหลใช้งานและการทำสูญญากาศภายในท่อ

วิธีที่จะกล่าวในที่นี้เป็นวิธีสำหรับการสร้างฮีตไพป์ อุณหภูมิใช้งานต่ำ (Low temperature heat pipe) ซึ่งมีอยู่ 4 วิธี จากง่ายไปหายากดังนี้

ก. แบบให้ความร้อนโดยตรงต่อฮีตไพป์

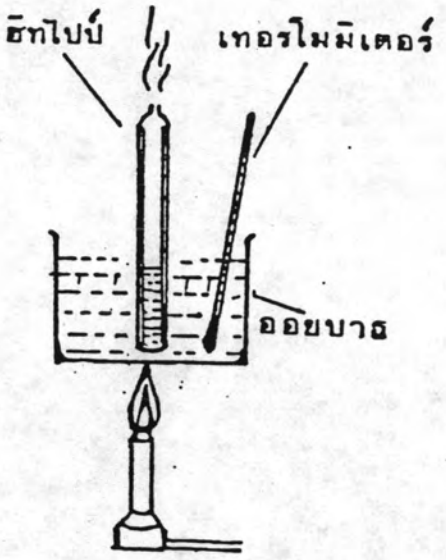
กรรมวิธีนี้นับว่าเป็นวิธีแบบง่ายที่สุด หลังจากประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เป็นท่อฮีตไพป์เรียบร้อยแล้ว จะเติมของไหลใช้งานเข้าไปในท่อฮีตไพป์โดยตรงในปริมาณมากเกินพอ จากนั้นไล่อากาศและก๊าซไม่ควบแน่นที่ค้างอยู่ในท่อและที่ละลายอยู่ในของเหลว โดยการเอาเปลวไฟไปลนบริเวณด้านล่างของฮีตไพป์ ดังรูปที่ 3.12 เมื่อของไหลใช้งานเริ่มเดือดพล่าน ไอของไหลใช้งานที่พุ่งออกมาก็จะช่วยไล่อากาศที่อยู่ภายในท่อฮีตไพป์ หลังจากปล่อยให้เดือดเป็นเวลาพอเหมาะ และของไหลใช้งานในท่อมีปริมาณเหลือตามต้องการแล้ว ก็ทำการปิดผนึกปลายท่อด้านบนในขณะที่ของไหลใช้งานยังคงเดือดพล่านอยู่



รูปที่ 3.12 วิธีการผลิตฮีตไพป์แบบให้ความร้อนโดยตรง

ข. แบบให้ความร้อนต่อฮีตไพป์โดยใช้ออยบาธ (oil bath)

กรรมวิธีนี้ต้องลงทุนมากกว่าวิธีที่ 1 เล็กน้อย แต่หลักการดำเนินงานยังคงเหมือนกัน จะต่างกันตรงที่วิธีที่สองนี้ใช้ออยบาธที่รักษาอุณหภูมิของน้ำมันร้อนให้คงที่ (รูปที่ 3.13) เพื่อให้เกิดการเดือดอย่างสม่ำเสมอและสามารถควบคุมปริมาณของไหลใช้งานที่เหลือในท่อโดยการควบคุมระยะเวลาที่เดือด ดังนั้น จึงสามารถสร้างฮีตไพป์ที่มีสมรรถนะใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้และในเวลาอันสั้นด้วย (mass production) วิธีนี้เป็นวิธีผลิตฮีตไพป์ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้



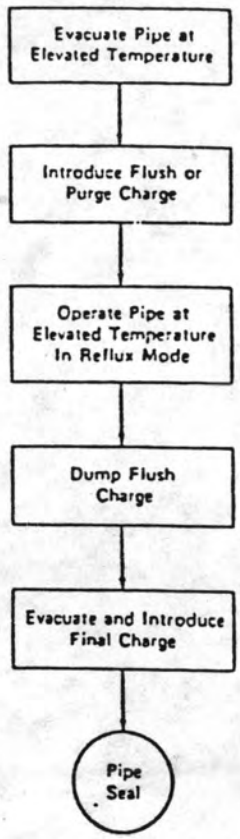
รูปที่ 3.13 วิธีการผลิตฮีตไพป์แบบใช้ออยบาธ

เนื่องจากกรรมวิธีทั้งลองแบบข้างต้นใช้ไอของของไหลไปไล่ที่อากาศที่อยู่ภายในท่อ จึงมีชื่อเรียกว่า การสร้างแบบการระเหย

วิธีอีก 2 วิธี ที่จะแนะนำต่อไปนี้เป็นวิธีที่สร้างระบบสูญญากาศภายในท่อโดยใช้ปั๊มสูญญากาศ (Vaccum pump) ปั๊มสูญญากาศที่ใช้ต้องสามารถสร้างสูญญากาศได้ถึง 10^{-4} torr. เช่น diffusion pump หรือ sorption pump ที่มี molecular sieve

ค. การใช้ปั๊มสูญญากาศแบบที่ 1

เป็นวิธีที่ใช้ปั๊มสูญญากาศแต่ไม่ยุ่งยากมาก ขั้นตอนการสร้างฮีตไพป์มีไว้ในรูปที่ 3.14 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.14 ขั้นตอนการสร้างฮีตไพป์โดยใช้ปั๊มสูญญากาศ แบบที่ 1

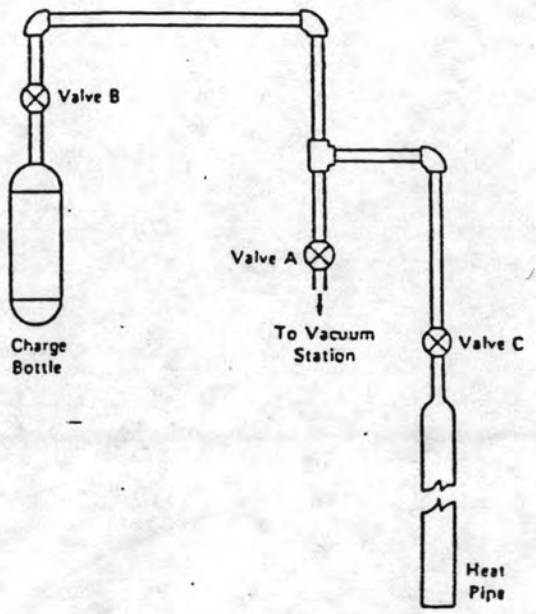
ค.1 การไล่ก๊าซออกจากของไหลใช้งานโดยวิธี freezing degassing

บรรจุของไหลใช้งานไว้ในขวดป้อน (charge bottle) แล้วปิดวาล์ว A,B และ C แช่ขวดป้อนไว้ในถังก๊าซไนโตรเจนเหลว ถ้าของไหลใช้งานเป็นแอมโมเนีย (ถ้าเป็นโซเดียมเหลว ให้ปล่อยทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง) เมื่อของไหลใช้งานแข็งตัวแล้ว นำเอาขวดป้อนออกและปล่อยให้ของไหลใช้งานหลอมตัวเพื่อไล่ฟองของก๊าซที่ติดค้างอยู่ในของไหลใช้งานที่แข็งตัว จากนั้นเปิดวาล์ว A และ B เพื่อดูดเอาก๊าซออก (ของไหลใช้งานบางส่วนที่ระเหยเป็นไอจะถูกดูดออกมาด้วย) แล้วปิดวาล์ว และทำซ้ำประมาณ 2-4 ครั้ง จนแน่ใจว่าของไหลใช้งานไม่มีก๊าซละลายเหลืออยู่

ค.2 การทำสูญญากาศภายในท่อและการเติมของไหลใช้งาน

เมื่อได้ของไหลใช้งานจากขั้นตอนก่อนแล้ว ต่อไปเป็นการทำสูญญากาศภายในท่อและการเติมของไหลใช้งาน

ระบบการผลิต โดยสรุปมีแสดงไว้ในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ระบบการผลิตฮีตไพป์โดยใช้ปั๊มสูญญากาศแบบที่ 1

รายละเอียดขั้นตอนการสร้าง

1. ดูดอากาศออกโดยปิดวาล์ว B แล้วเปิดวาล์ว A และ C ให้ความร้อนกับฮีตไพป์เพื่อให้ก๊าซที่เกาะอยู่บนเนื้อวัสดุท่อและวิกค์หลุดออกมา ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดอากาศและก๊าซออกนี้จะขึ้นโดยตรงกับอุณหภูมิของฮีตไพป์

2. กลั้วท่อด้วยของเหลวใช้งาน โดยเปิดวาล์ว B และอุ่นขวดบ้อนให้ร้อนกว่าจุดเดือดของของไหลใช้งานที่ความดันในระบบนั้น ปล่อยให้ไอของของไหลใช้งานไหลเข้าไปในท่อเล็กน้อยเพื่อกลั้วภายในท่อ แล้วปิดวาล์ว B เพื่อดูดเอาของไหลใช้งานออก และเปิดวาาล์ว B ใหม่ทำซ้ำกันประมาณ 2 ครั้ง

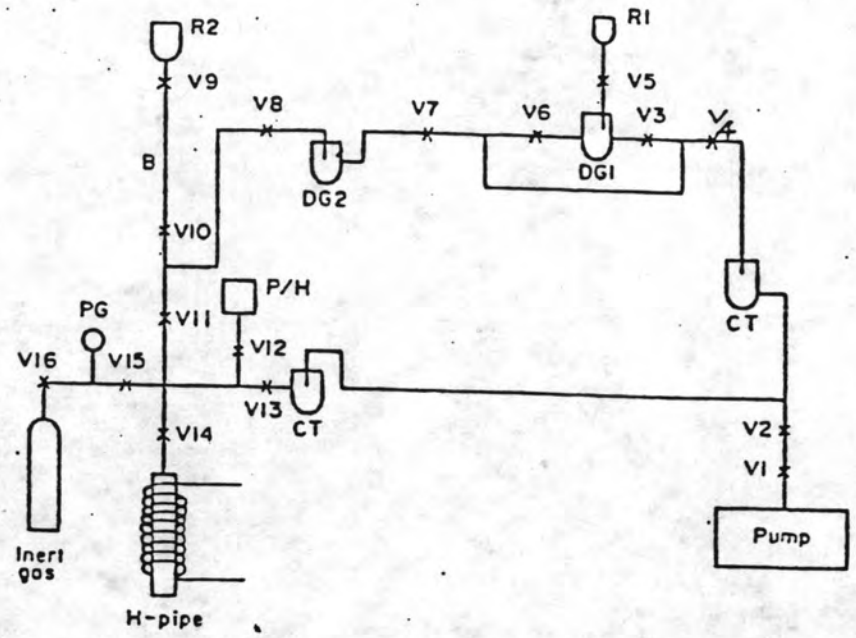
3. บรรจุของไหลใช้งาน ปริมาณที่บรรจุสามารถวัดและควบคุมได้โดยวิธีต่างๆขึ้นกับสถานะของของไหลใช้งานที่อุณหภูมิห้อง ดังต่อไปนี้

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

3.2 สถานะของเหลวหรือของแข็ง ปริมาณที่บรรจุสามารถวัดได้จากผลต่างของปริมาณของของไหลใช้งานก่อน และหลังการบรรจุ โดยการปิดวาล์ว A เปิดวาล์ว B และ C เมื่อให้ความร้อนกับขวดบ้อน ในขณะที่ให้ความเย็นท่อฮีตไพป์ ของไหลใช้งานก็จะกลายเป็นไอและไหลจากขวดบรรจุและไปควบแน่นในท่อฮีตไพป์ เมื่อได้ปริมาณตามที่ต้องการแล้วก็ปิดวาล์ว B และ C ฮีทไปป์จะอยู่ในสภาพพร้อมที่จะปิดผนึก

ง. การใช้ปั๊มสูญญากาศแบบที่ 2

เป็นวิธีสร้างฮีตไพป์ที่ซับซ้อนมากกว่าวิธีแบบที่ 3 ระบบการผลิตนี้มีแสดงไว้ในรูปที่ 3.16 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.15 ระบบการผลิตฮีตไพป์โดยใช้ปั๊มสูญญากาศแบบที่ 2

1. ปิดวาล์วทั้งหมดที่เปิดสู่ภายนอก (V5, V9, V14, V15)
2. เดินปั๊มสูญญากาศโดยที่วาล์ว V1, V2 ยังคงปิดอยู่
3. หล่อเย็นตัวปั๊มสูญญากาศและกับดักเย็น (Cold Trap, CT) ด้วยก๊าซไนโตรเจนเหลว
4. ทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที เปิดวาล์ว V1, V2 ดูดอากาศในระบบออกจนได้ความดันประมาณ 0.01 มม. ปรอท เวลาที่ใช้ในการนี้จะขึ้นกับความจุของปั๊ม ความสะอาดของระบบและปริมาตรภายในรวมของระบบ
5. ปิดวาล์ว V4, V5 และ V6 เติมของไหลใช้งานลงไปใน R1
6. ค่อยๆเปิดวาล์ว V5 ให้ของไหลใช้งานลงสู่ภาชนะ DG, เมื่อได้ปริมาณมากพอก็ปิด แล้วทำให้แข็งตัว โดยแช่ในก๊าซไนโตรเจนเหลว

7. เมื่อของไหลใช้งานแข็งตัวเปิดวาล์ว V4 เพื่อดูดเอาอากาศออกแล้วปิด จากนั้นทำให้ของไหลใช้งานหลอมตัวและปล่อยให้ฟองก๊าซปุดออก แล้วทำให้ของไหลใช้งานแข็งตัวใหม่
8. เปิดวาล์ว V4 เพื่อดูดเอาก๊าซที่หลุดออกจากของไหลใช้งานออก
9. ปิดวาล์ว V4, V3, V8 และเปิดวาล์ว V6, V7 แช่ DG_2 ในถังไนโตรเจนเหลว
10. หลอมเหลวของไหลใช้งานใน DG_1 ด้วยลมร้อน แล้วส่งของไหลใช้งานไปยัง DG_2 จากนั้นก็ทำการไล่ก๊าซที่ละลายอยู่ในของไหลใช้งานออกในลักษณะเดียวกับ DG_1
11. หลังจากของไหลใช้งานผ่านการไล่อากาศออกแล้ว ปิดวาล์ว V4, V6 เพื่อกันการไหลย้อนกลับของของไหลใช้งาน

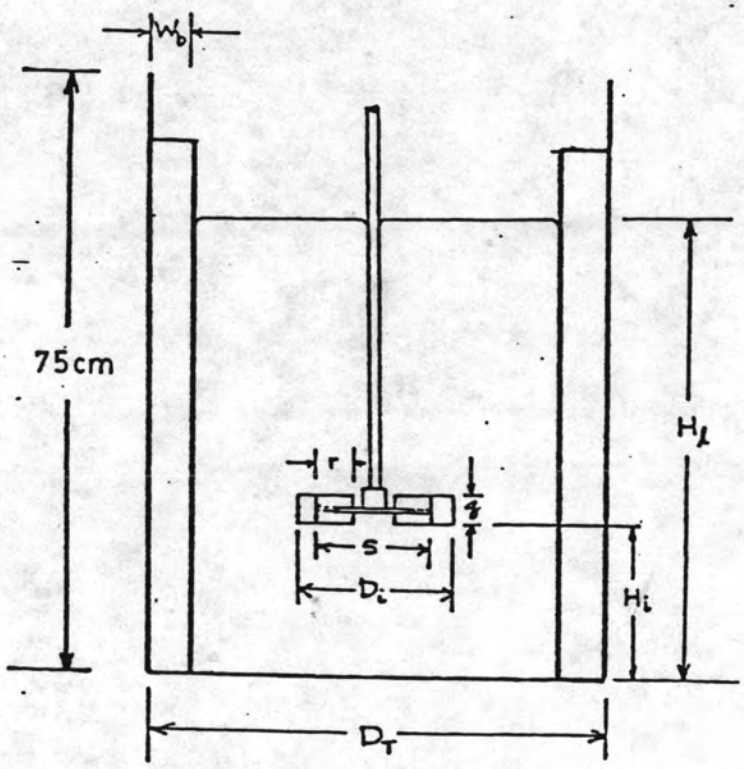
3.5 เครื่องมือที่ใช้สร้าง CLHP และทดสอบ Transient response

กรรมวิธีที่ใช้สร้าง CLHP ในงานวิจัยนี้เป็นกรรมวิธีที่ใช้ออยบาธ (Oil bath) ให้ความร้อนต่อ CLHP แก้ว ซึ่งบรรจุของไหลใช้งาน (น้ำกลั่น triple distillation ขององค์การเภสัชกรรม) โดยใช้ไอของน้ำเดือดไล่อากาศที่อยู่ในท่อออกไป การตัดสินใจเลือกกรรมวิธีนี้ มีเหตุผลที่สำคัญ 4 ประการคือ

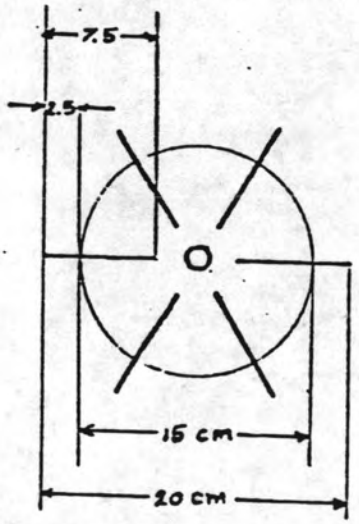
1. สามารถควบคุมปริมาณของไหลใช้งานที่เหลืออยู่ภายในท่อฮีตไพป์ได้
2. สะดวกต่อการผลิตจำนวนมาก (Mass production)
3. เป็นระบบที่สามารถใช้ทดสอบ Transient response ได้ด้วย
4. ต้นทุนถูกเมื่อเทียบกับระบบอื่นๆ

3.5.1 ออยบาธที่ใช้สร้าง CLHP

ระบบการสร้าง CLHP ที่ออกแบบขึ้น ประกอบด้วย ถังกวนสำหรับใส่น้ำมันร้อนที่อุณหภูมิคงที่ เพื่อใช้ต้มของเหลวใช้งานภายใน CLHP ที่จุ่มลงในถังนี้ ถังที่สร้างขึ้นกำหนดขนาดให้สามารถผลิต CLHP ที่มีขนาดใหญ่ที่สุดประมาณ 50 ซ.ม. (ความยาวในแนวระดับของส่วนที่รับความร้อน) แผนภาพของออยบาธแสดงไว้ในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 (ก) ไดอะแกรมของออยบาธที่ออกแบบสร้าง



รูปที่ 3.17 (ข) รายละเอียดของใบพัดกวน

ข้อกำหนดการออกแบบ D_T = 60 cm.

$D_1 = \frac{1}{3} D_T = 20$ cm.

$H_1 = D_1 = 20$ cm.

$q = \frac{1}{5} D_1 = 4$ cm.

$r = \frac{1}{4} D_1 = 5$ cm.

$s = \frac{3}{4} D_1 = 15$ cm.

$H_1 = D_T = 60$ cm.

$W_b = \frac{1}{10} D_T = 6$ cm.

STIRRER: 6-BLADE FLAT BLADE TURBINE

NUMBER OF BAFFLE: 4

LIQUID: ESSOTHERM 500

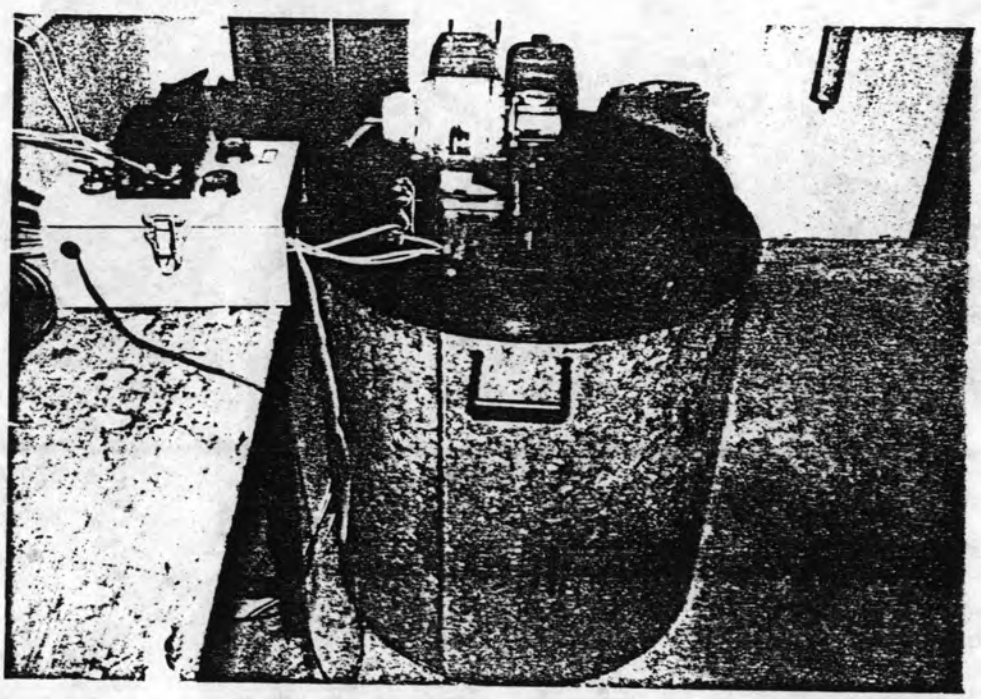
VOLUME OF LIQUID: 169.6 LITRES.

OPERATING TEMPERATURE: 120-130 C

VISCOSITY RANGE: 3.0-3.3 CENTIPOISES

SPECIFIC HEAT: 0.55 Btu/lb/ F

POWER SUPPLY: 2 FIXED HEATER COILS (1 KW EACH)
2 EXTERNAL HEATERS (2 KW EACH)
TOTAL 6 KW



รูปที่ 3.18 ภาพถ่ายออยบาธที่ออกแบบสร้างขึ้น

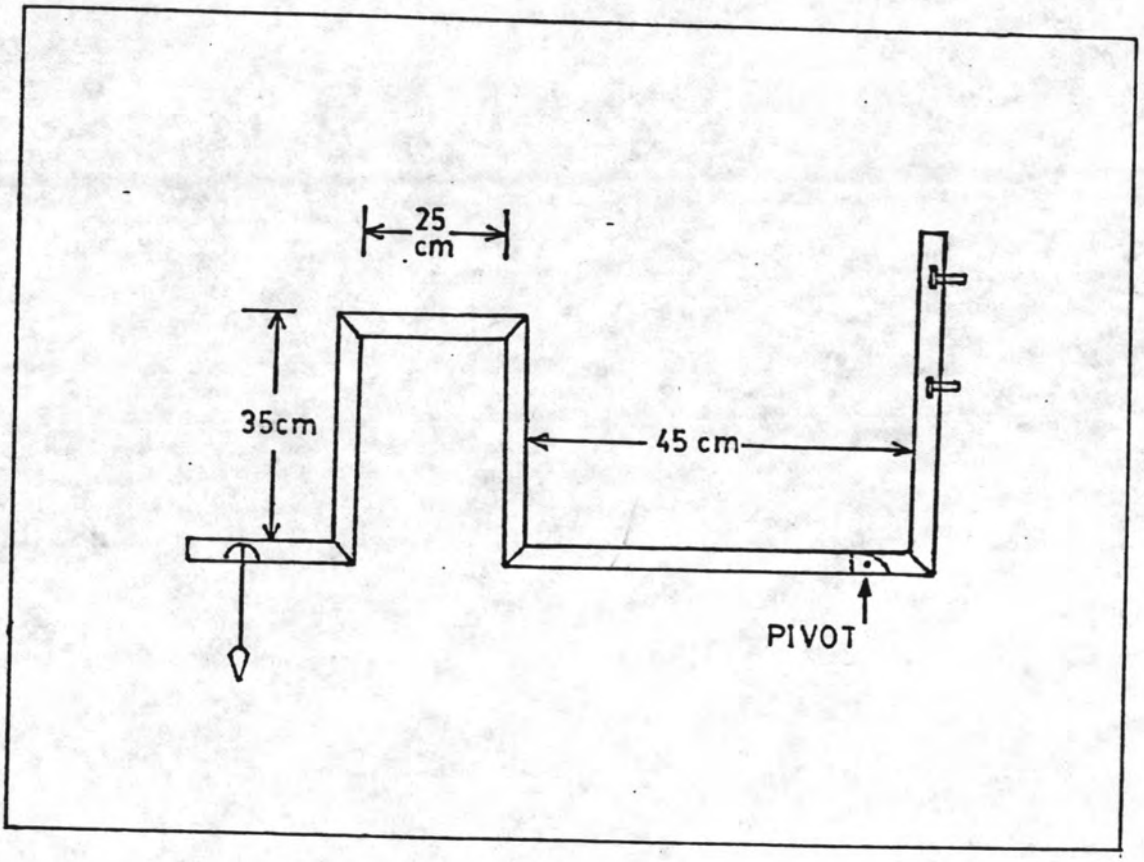
ออยบาธที่สร้างขึ้นเป็นถังสองชั้น ตัวถังชั้นในเป็นเหล็กกล้า หนา 2 มม. ถังชั้นนอกทำด้วยสังกะสี กันถังระหว่างถังชั้นในกับถังชั้นนอกรองรับไว้ด้วยแผ่นใยหิน (Asbestos) หนา 1 นิ้ว ด้านข้างระหว่างถังชั้นในและถังชั้นนอกบุไว้ด้วยแผ่นฉนวนกันความร้อน (Microfiber) หนา 1 นิ้ว

การให้ความร้อนกับน้ำมันในถัง อาศัยลวดความร้อนขนาด 1000 วัตต์ 2 เส้น ขดเป็นวงกลม โดยติดตั้งไว้ที่ความสูง 25 และ 50 ซม. จากก้นถัง นอกจากนั้นหากต้องการให้น้ำมันมีอุณหภูมิถึงจุดที่กำหนดเร็วยิ่งขึ้น จะใช้ขดลวดความร้อนจากภายนอกเสริมได้ด้วย

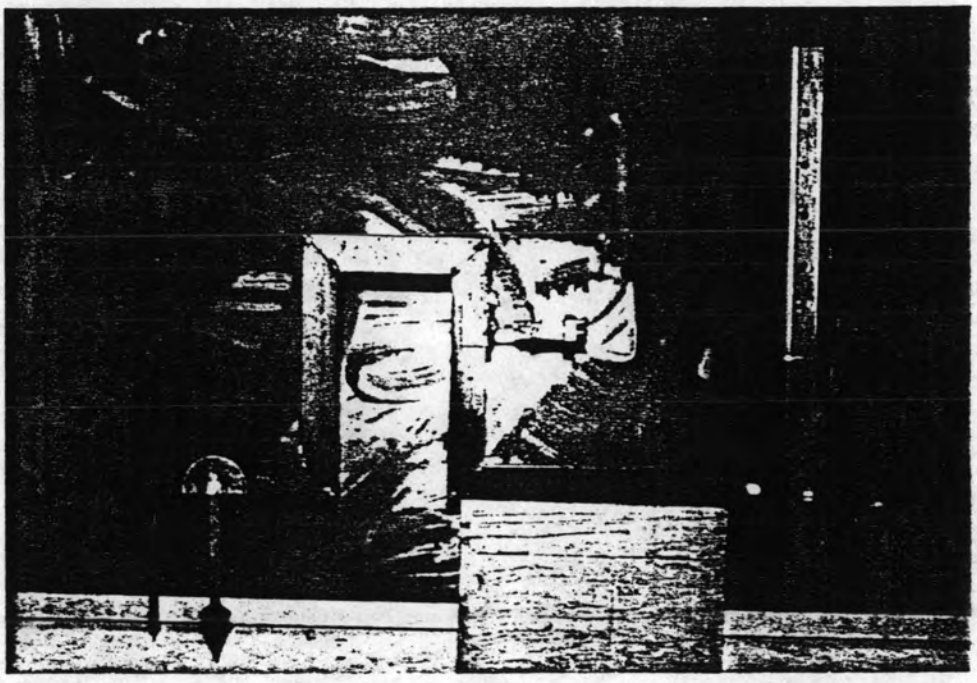
การกวนน้ำมันในถังเพื่อให้เกิดการกระจายของอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอ อาศัยมอเตอร์ (Gear motor) ที่มีอัตราทด 1:25 เพื่อลดรอบหมุน เนื่องจากน้ำมันมีความหนืดมาก

3.5.2 อุปกรณ์ปรับมุมเอียง

การทดสอบ Transient response ที่มุมเอียงต่างๆก็ยังทำได้ โดยอาศัยออยบาธที่สร้างขึ้น อุปกรณ์สำหรับปรับมุมเอียงของช่วงการระเหยของ CLHP ที่ออกแบบไว้มีแสดงในรูป 3.19 และ 3.20



รูปที่ 3.19 ไดอะแกรมของอุปกรณ์สำหรับปรับมุมเอียง

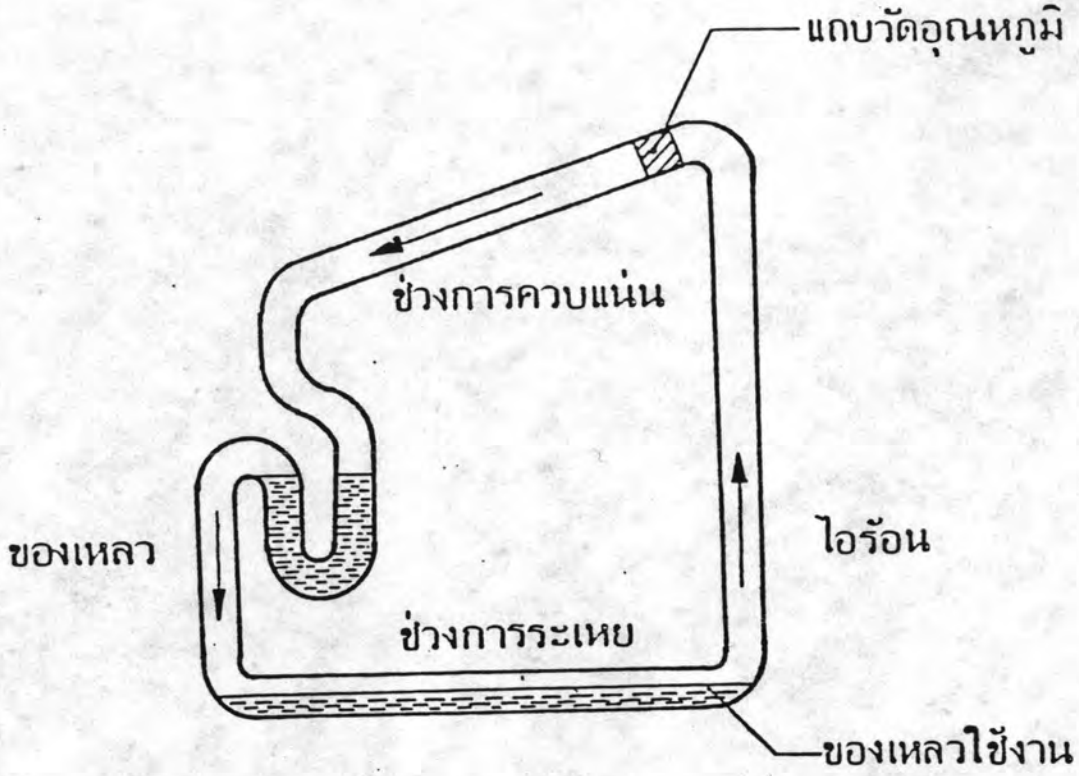


รูปที่ 3.20 ภาพถ่ายของอุปกรณ์สำหรับปรับมุมเอียง

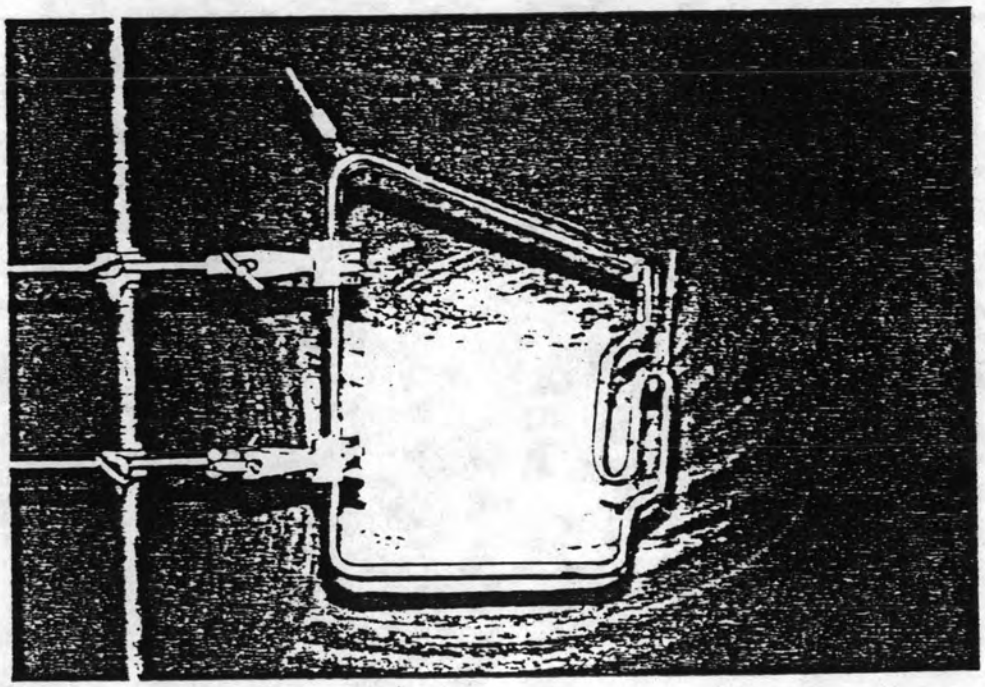
3.6 โครงสร้างและรายละเอียดของฮีตไพป์แบบไหลครบวงจรที่ทดลองสร้างขึ้น

3.6.1 ฮีตไพป์แบบไหลครบวงจรต้นแบบที่หนึ่ง

ฮีตไพป์แบบไหลครบวงจรแบบแรกที่ทดลองสร้างขึ้น (กำหนดสัญญลักษณ์เป็น CLHP Type A) มีตัวโครงสร้างเป็นแก้วทนความร้อน (Pyrex), ของเหลวใช้งานเป็นน้ำกลั่นบริสุทธิ์ รูปที่ 3.21 และ 3.22 เป็นไดอะแกรมและภาพถ่ายของ CLHP Type A ตามลำดับ



รูปที่ 3.21 ไดอะแกรมของ CLHP Type A



รูปที่ 3.22 ภาพถ่ายของ CLHP Type A

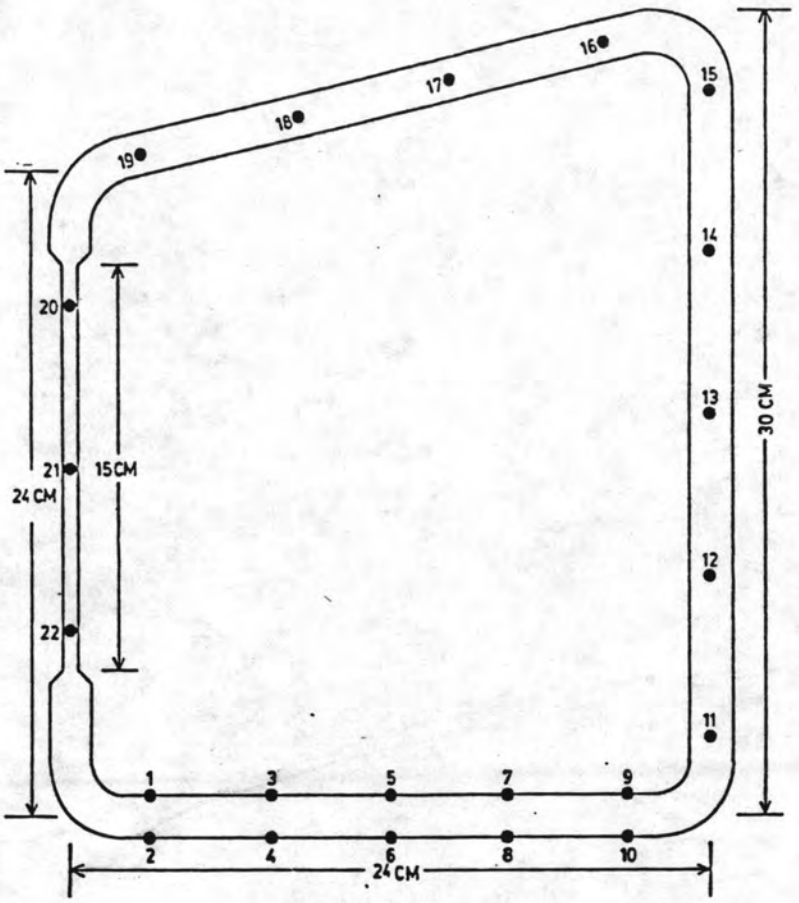
จุดสำคัญในการออกแบบ CLHP Type A คือ ต้องการกำหนดทิศทางการไหลได้ล่วงหน้า โดยออกแบบช่องทางการไหลกลับของของเหลวควบแน่น เป็นรูปตัว U เพื่อทำหน้าที่ป้องกันการไหลย้อนทิศของไอ

จากผลการทดสอบ CLHP Type A โดยการจุ่มลงในน้ำมันร้อน 125 ซ ปรากฏว่าสามารถทำงานได้ดังที่คาดหวังไว้ กล่าวคือ สามารถเพิ่มอุณหภูมิในช่วงการควบแน่นให้สูงถึงค่าที่กำหนด (70 ซ) ได้ในเวลา 20-30 วินาที เมื่อวางช่วงการระเหยอยู่ในแนวระดับ

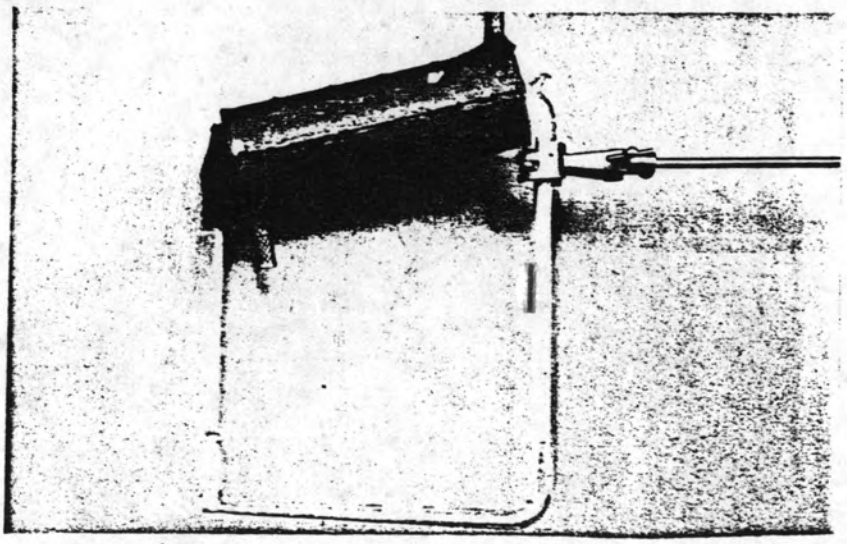
3.6.2. ฮีตไพป์แบบไหลครบวงจร ต้นแบบที่สอง

ข้อสังเกตที่สำคัญประการหนึ่ง ที่ได้จากการศึกษาต้นแบบ CLHP Type A คือ ความยุ่งยากในการสร้างท่อรูปตัว U, รูปร่างที่เทอะทะของรูปตัว U และความแปรเปลี่ยนของปริมาณของเหลวที่สะสมอยู่ในหลอดรูปตัว U เมื่อวางเอียงที่มุมต่างๆ

ด้วยเหตุนี้จึงได้สร้างต้นแบบที่สอง (กำหนดสัญญลักษณ์ เป็น CLHP Type B) โดยการเปลี่ยนรูปตัว U เป็นหลอดแก้วตรงที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเรียวกว่า เพื่อทำหน้าที่ชักนำไอร้อนให้ไหลขึ้นด้านที่เส้นผ่าศูนย์กลางโตกว่า ในขณะเดียวกับที่ของเหลวจากการควบแน่น สามารถไหลกลับลงไปยังช่วงการระเหยได้สะดวกขึ้น รูปที่ 3.23 และ 3.24 เป็นไดอะแกรมและภาพถ่ายของ CLHP Type B ตามลำดับ



รูปที่ 3.23 ไดอะแกรมของ CLHP Type B



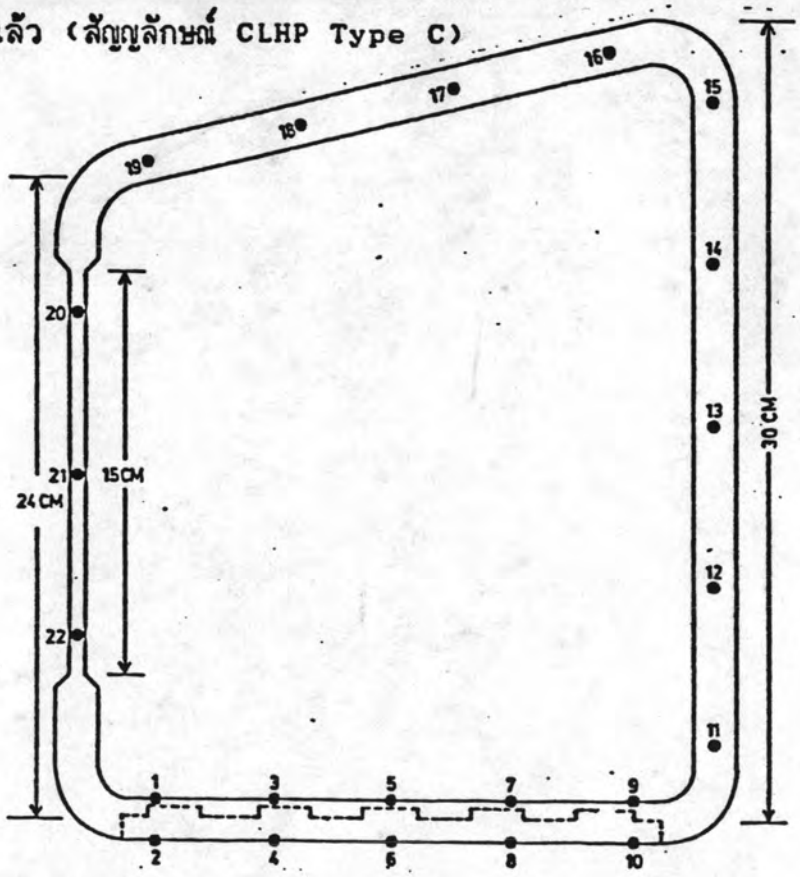
รูปที่ 3.24 ภาพถ่ายของ CLHP Type B

3.6.3 ฮีตไพป์แบบไหลครบวงจร ต้นแบบที่สาม

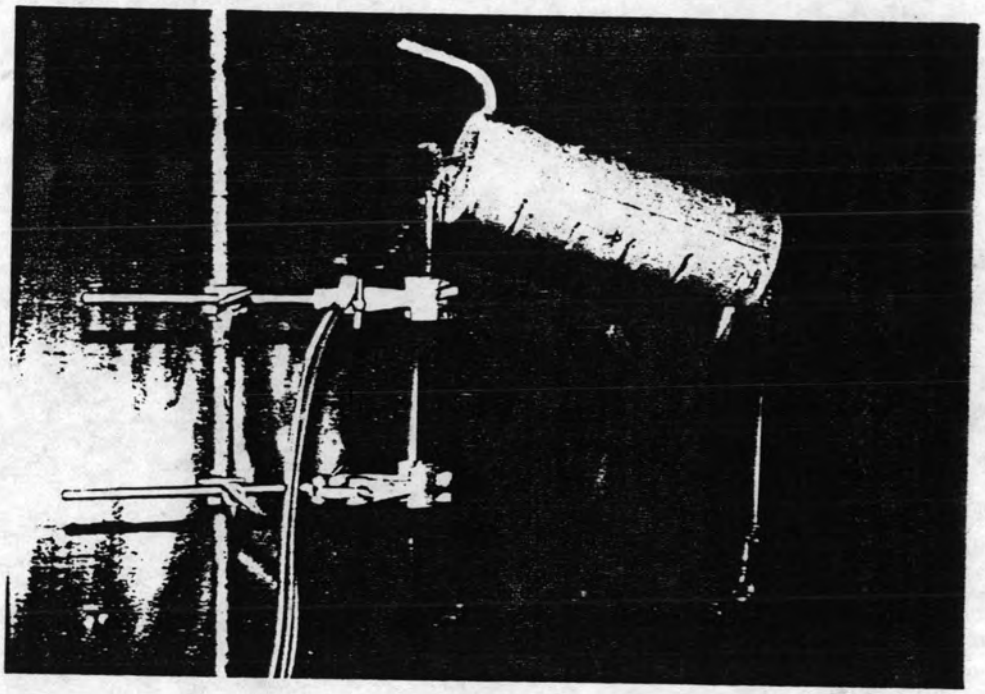
จากแนวคิดที่ว่า การที่ของเหลวจะระเหยได้ดีนั้น นอกจากการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังท่อในช่วงการระเหยจะสูงแล้ว ของเหลวใช้งานยังต้องมีพื้นผิวอิสระมากและไอที่เกิดขึ้นต้องมีช่องการไหลที่โตพอด้วย ผู้วิจัยจึงได้ทดลองปรับปรุงสมรรถนะการทำงานของ CLHP Type B โดยการเพิ่มแพคกิ้งที่ออกแบบเป็นพิเศษสำหรับช่วงการระเหย โดยมีข้อกำหนดพื้นฐานที่สำคัญ 3 ข้อ คือ

1. เพิ่มพื้นที่การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลใช้งานภายในท่อกับแหล่งความร้อนภายนอก
2. รักษาพื้นที่ผิวของของไหลใช้งานในช่วงการระเหยให้มากด้วย
3. ทั้งนี้ต้องไม่ขัดขวางต่อการเคลื่อนที่ของไอ

รูปที่ 3.25 และ 3.26 เป็นไดอะแกรม และภาพถ่ายของ CLHP Type B ที่ปรับปรุงแล้ว (สัญญลักษณ์ CLHP Type C)



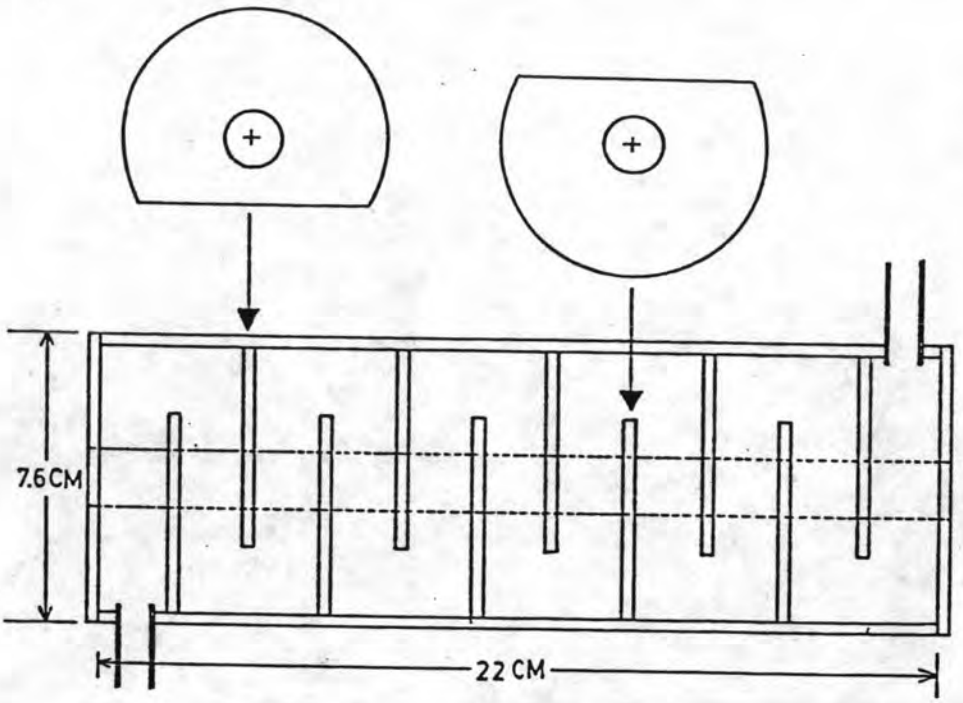
รูปที่ 3.25 ไดอะแกรมของ CLHP Type C



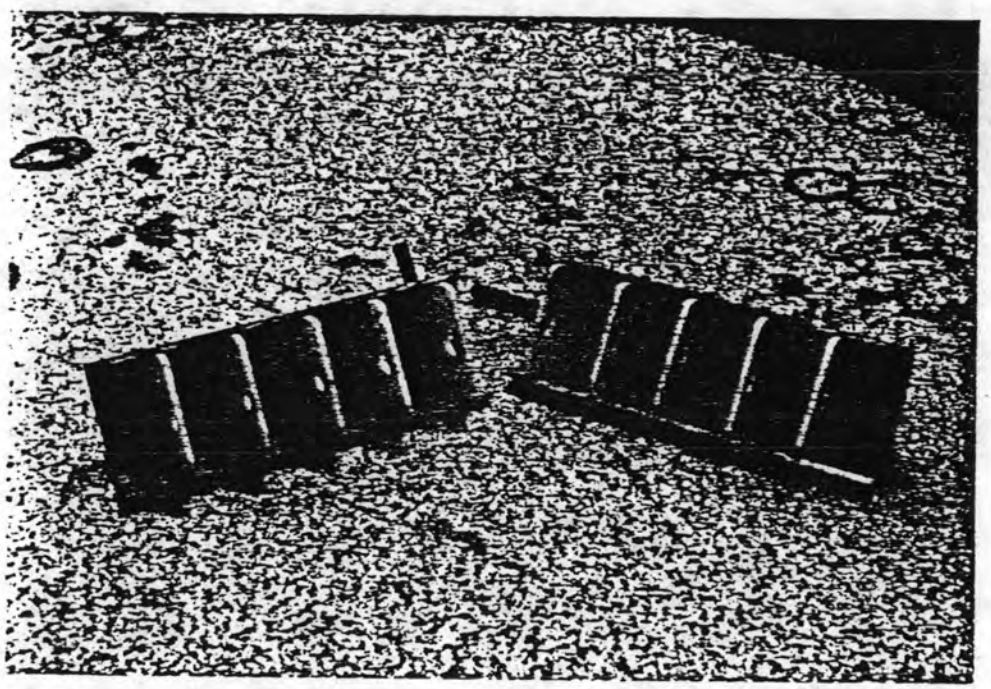
รูปที่ 3.26 ภาพถ่ายของ CLHP Type C

3.7 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ช่วงการควบแน่น

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ช่วงการควบแน่น ทำหน้าที่รับความร้อนจากไอที่ควบแน่น โดยส่งผ่านความร้อนให้กับน้ำหล่อเย็น (coolant) วัสดุที่เป็นองค์ประกอบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือ แผ่นปลาสติค หนา 3 มม. เป็นฝาปิดหัว-ท้าย และ segmental baffle ส่วนเชลล์ (shell) ทำด้วยท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว รูปที่ 3.27 และ 3.28 เป็นไดอะแกรมและภาพถ่ายของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ออกแบบสร้างขึ้น



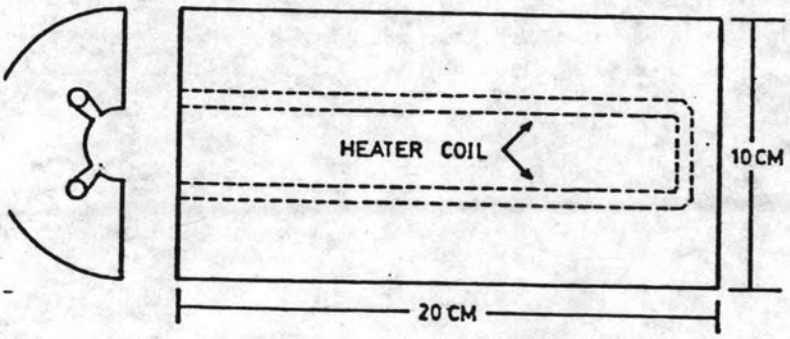
รูปที่ 3.27 ไดอะแกรมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



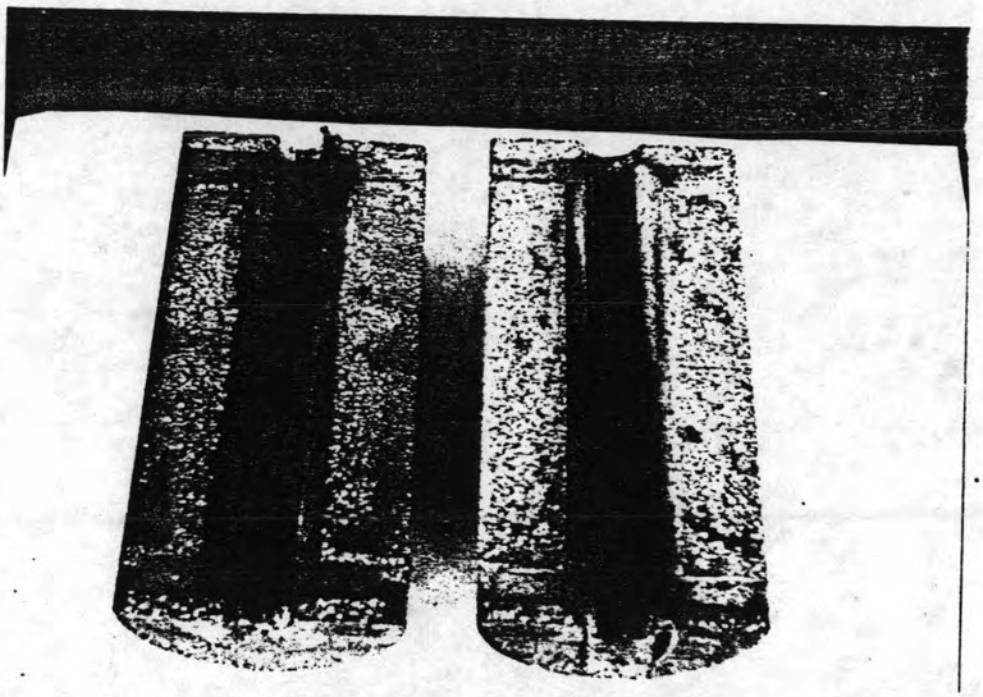
รูปที่ 3.28 ภาพถ่ายเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

3.8 เตาไฟฟ้า ให้ความร้อนกับช่วงการระเหย

การให้ความร้อนกับของเหลวใช้งานที่อยู่ในช่วงการระเหยอาศัยเตาไฟฟ้า ที่หล่อขึ้นมาจากคอนกรีตทนไฟ (castable) โดยใช้ลวดความร้อน (nichrome) 2 เส้น แต่ละเส้นให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 1 กิโลวัตต์ เตาไฟฟ้าประกอบด้วยครึ่งทรงกระบอกที่เหมือนกัน (identical) 2 ชิ้น รายละเอียดของเตาไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมีแสดงไว้ในไดอะแกรมและภาพถ่ายรูปที่ 3.29 และ 3.30 ตามลำดับ



รูปที่ 3.29 ไดอะแกรมของเตาไฟฟ้า



รูปที่ 3.30 ภาพถ่ายของเตาไฟฟ้า

3.9 ขั้นตอนการประดิษฐ์ CLHP

กระบวนการผลิต CLHP นับจากการประกอบ CLHP เป็นรูปร่างเสร็จแล้วมีขั้นตอนต่อไปนี้

1. ให้ความร้อนกับน้ำมันในออยบาธ จนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำมันถึง 125 ซ
2. นำ CLHP ที่ประกอบเป็นรูปร่างเสร็จแล้วไปล้างทำความสะอาด (กรรมวิธีการล้างดูจากหัวข้อ 3.4.2)
3. นำ CLHP ที่ล้างแล้วมาเติมของเหลวใช้งาน โดยวัดปริมาตรเติมด้วย burette

4. นำ CLHP ที่เติมของเหลวใช้งานแล้วไปจุ่มลงในออยบาธ โดยรักษาความลึกให้คงที่ เป็นเวลา 3 นาที (ฮีทไปป์แก้ว) แล้วปิดระบบให้มิดชิดอากาศโดยใช้คลิปหนีบสายยางที่ท่อเติม จากนั้นจิงขันสกรูรัดสายยางให้แน่นอีกชั้นหนึ่ง
5. ในกรณีของ CLHP ที่มีโครงสร้างเป็นแก้ว อาจปิดผนึกระบบอย่างถาวร โดยใช้เปลวไฟจากแก๊ซ (Oxy-butane) พ่นที่บริเวณรอบๆท่อเติมที่เป็นแก้ว เมื่อแก้วร้อนจะหลอมและยุบตัวลงปิดทางเข้าออก เนื่องจากความดันภายนอก CLHP มีค่าสูงกว่าความดันภายใน
6. ในกรณีของ CLHP ที่มีโครงสร้างเป็นทองแดง การปิดระบบอย่างถาวรทำโดยใช้คีมบีบท่อเติมทองแดงให้ติดกัน 2 จุด แล้วใช้กาว Epoxy ปิดผนึกที่ปลาย