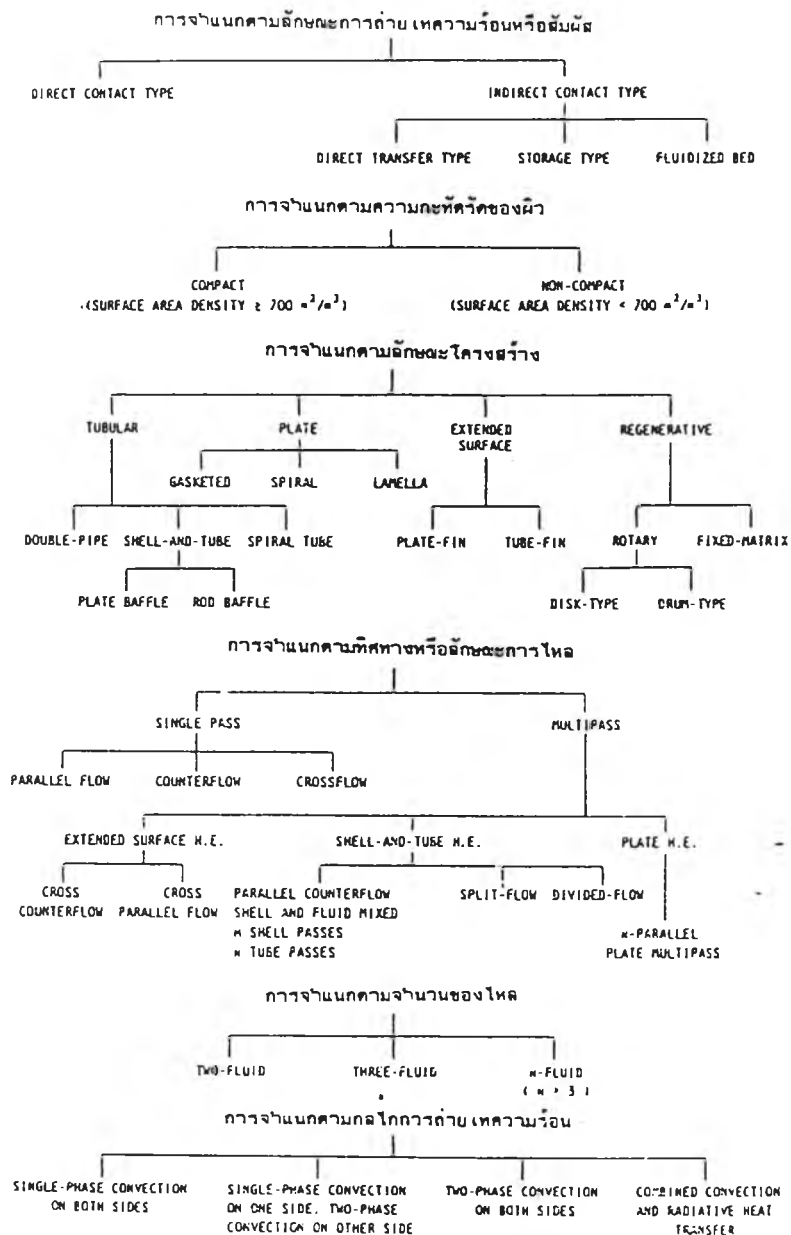


## บทที่ 2

### ทฤษฎีและการออกแบบ

#### 2.1 ทฤษฎีการแลกเปลี่ยนความร้อน

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) เป็นอุปกรณ์ที่มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ซึ่งมีอุณหภูมิแตกต่างกัน ซึ่งสามารถจำแนกได้ดังนี้



ภาพที่ 2-1 แผนผังแสดงการจำแนกชนิดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

ในการออกแบบระบบของ shell-and-tube heat exchanger จะอาศัยพื้นฐานการคำนวณของการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นตลอดพื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อน , อุณหภูมิที่แตกต่าง , และการสูญเสียความดันในการไหล[3]

โดยการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลร้อน และของไหลเย็น ในช่วงพื้นที่เล็ก ๆ  $dA$  คือ

$$dQ = U (T_h - T_c) dA \quad (2-1)$$

เมื่อ  $U$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม โดยยึดจากพื้นที่ผิวนอกของท่อ

$A$  คือ ค่าพื้นที่ผิวภายนอกท่อ

$T_h - T_c$  คืออุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างของไหลร้อน และของไหลเย็น ในช่วงพื้นที่เล็ก ๆ

$dA$

โดยค่าของ  $U$  สามารถหาได้โดย

$$\frac{1}{A_o U} = \frac{1}{A_i h_i} + \frac{1}{A_o h_o} + \frac{D_o \ln(D_o/D_i)}{2k} + R_d \quad (2-2)$$

เมื่อ  $A_i$  คือพื้นที่ผิวภายในท่อ ( $m^2$ )

$A_o$  คือพื้นที่ผิวภายนอกท่อ ( $m^2$ )

$h_i$  คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหลภายในท่อ ( $W/m^2K$ )

$h_o$  คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหลภายนอกท่อ ( $W/m^2K$ )

$D_i$  คือเส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อ ( $m$ )

$D_o$  คือเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกท่อ ( $m$ )

$k$  คือค่าการนำความร้อนของท่อ ( $W/mK$ )

$R_d$  คือค่าความต้านทาน ผิวนอกท่อ (fouling resistance)

และ  $dQ$  ของแต่ละของไหลสามารถคำนวณได้จาก[5]

$$dQ = (mC_p)_c dT_c = -(mC_p)_h dT_h \quad (2-3)$$

$$\text{หรือ} \quad dQ = W_c dT_c = -W_h dT_h \quad (2-4)$$

เมื่อ  $W = mC_p$

อักษรห้อย  $c$  และ  $h$  หมายถึงของไหลเย็นและร้อนตามลำดับ

ต้นฉบับ หน้าขาดหาย

ต้นฉบับ หน้าขาดหาย

$$\begin{aligned} \epsilon &= \frac{Wc1(Tco-Tci)1+Wc2(Tco-Tci)2}{Wmin(Thi - Tci)} \\ &= \frac{Wc1(Tco-Tci)1+Wc2(Tco-Tci)2}{Wc1(Thi - Tci)} \end{aligned}$$

เมื่อ  $Wc1$  และ  $Wc2$  มีค่าใกล้เคียงกันมาก

ทำให้  $Wc2/Wc1 = 1$  จะได้

$$\epsilon = \frac{(Tc1+Tc2)o-(Tc1+Tc2)i}{(Thi - Tci)} \quad (2-16)$$

ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Thermal Efficiency)[2]

$$\text{ประสิทธิภาพทางความร้อน} = \frac{\text{อัตราการความร้อนที่ของไหลเย็นได้รับ}}{\text{อัตราการความร้อนที่ของไหลร้อนคายออก}} \quad (2-17)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{Q_{c,total}}{Q_h} \\ &= \frac{Wc1(Tco-Tci)1+Wc2(Tco-Tci)2}{Wh(Thi - Tho)} \quad (2-18) \end{aligned}$$

ค่า Reynold number : Re

เมื่อ  $Re < 2000$  สำหรับการไหลแบบ laminar

$2000 < Re < 4000$  สำหรับการไหลแบบ transition

$Re \geq 4000$  สำหรับการไหลแบบ turbulent

$$\text{เมื่อ} \quad Re = \frac{VD_o}{\nu} \quad (2-19)$$

เมื่อค่าของ  $\nu$  คือค่าความหนืดเปรียบเทียบของของไหล ( $m^2/s$ )

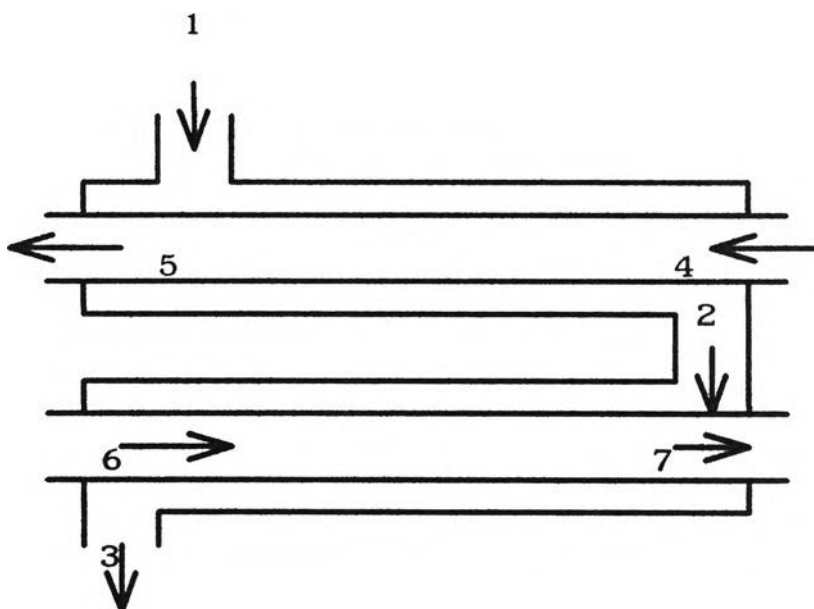
$D_o$  คือเส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อ (m)

$V$  คือค่าความเร็วของของไหล (m/s)

2.2 ขั้นตอนในการออกแบบจะต้องคำนึงถึง

- สมการการหาพื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อน
- ค่า Heat load
- ค่า  $\Delta T$
- ค่า  $U$

### 2.2.1 ลักษณะโครงสร้างของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้ของไหล 3 ชนิดแบบที่ 1

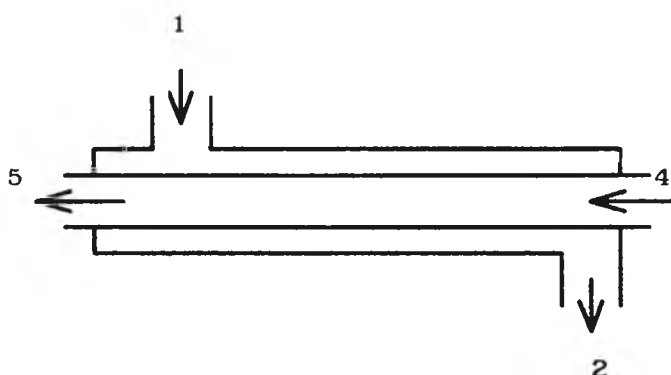


ภาพที่ 2-2 แสดงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้ของไหล 3 ชนิดแบบที่ 1

- ตำแหน่งที่ 1 ของไหลร้อนเข้า HX1 ( T1 )
- ตำแหน่งที่ 2 ของไหลร้อนออก HX1 เข้าสู่ HX2 ( T2 )
- ตำแหน่งที่ 3 ของไหลร้อนออก HX2 ( T3 )
- ตำแหน่งที่ 4 ของไหลเย็นชนิดที่ 1 เข้า HX1 ( C1 ,in )
- ตำแหน่งที่ 5 ของไหลเย็นชนิดที่ 1 ออก HX1 ( C1 ,out )
- ตำแหน่งที่ 6 ของไหลเย็นชนิดที่ 2 เข้า HX2 ( C2 ,in )
- ตำแหน่งที่ 7 ของไหลเย็นชนิดที่ 2 ออก HX2 ( C2 ,out )

จากโครงสร้างของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนตามที่ออกแบบ จะเห็นว่าสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ

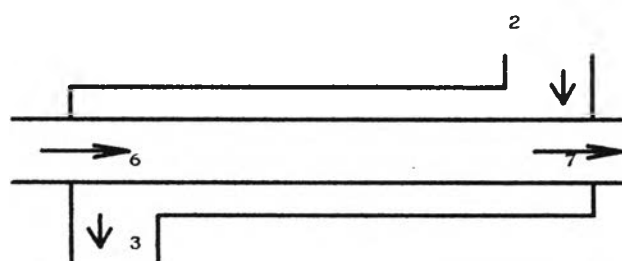
ส่วนที่ 1 เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ counter flow



ภาพที่ 2-3 แสดงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนส่วนแรกแบบ counter flow

- เมื่อ
- ตำแหน่งที่ 1 ของไหลร้อนเข้า HX1 ( $T_1$ )
  - ตำแหน่งที่ 2 ของไหลร้อนออก HX1 เข้าสู่ HX2 ( $T_2$ )
  - ตำแหน่งที่ 4 ของไหลเย็นชนิดที่ 1 เข้า HX1 ( $C_1, in$ )
  - ตำแหน่งที่ 5 ของไหลเย็นชนิดที่ 1 ออก HX1 ( $C_1, out$ )

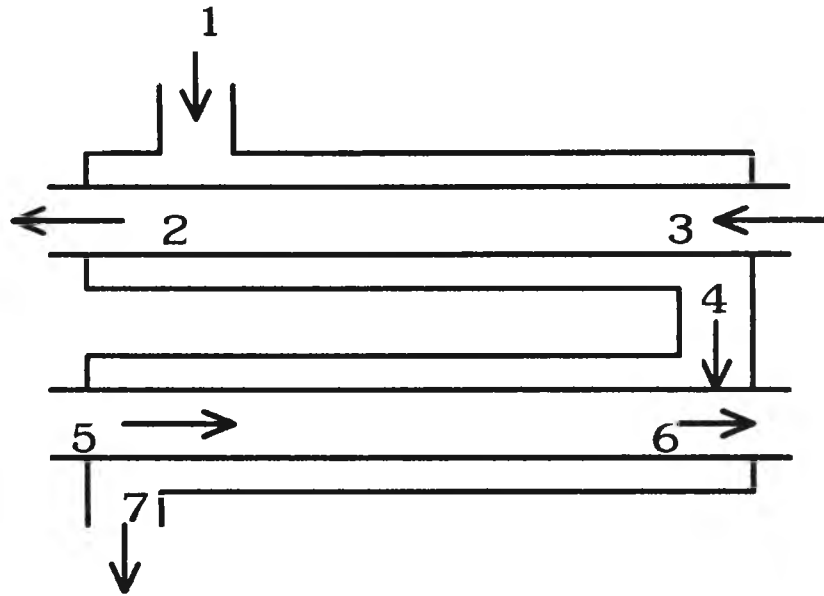
จากความสัมพันธ์ของค่าต่างสำหรับการไหลชนิดนี้ ซึ่งได้จากสมการที่ (13) และ (14) คือ ส่วนที่ 2 จัดเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ counter flow



ภาพที่ 2-4 แสดงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนส่วนที่ 2 แบบ counter flow

- เมื่อ
- ตำแหน่งที่ 2 ของไหลร้อนออก HX1 เข้าสู่ HX2 ( $T_2$ )
  - ตำแหน่งที่ 6 ของไหลเย็นชนิดที่ 2 เข้า HX2 ( $C_2, in$ )
  - ตำแหน่งที่ 7 ของไหลเย็นชนิดที่ 2 ออก HX2 ( $C_2, out$ )
  - ตำแหน่งที่ 3 ของไหลร้อนออก HX2 ( $T_3$ )

จากลักษณะของโครงสร้างของระบบทั้ง 2 ส่วน



จะพบว่าเราสามารถประมาณค่าของการถ่ายเทความร้อน ของระบบได้โดย

ส่วนที่ 1

$$\begin{aligned}
 \text{จาก} \quad Q_h &= W_h \Delta T_h \\
 &= W_h (T_{h,in} - T_{h,out}) \\
 Q_c &= W_{c1}(T_{c1,out} - T_{c1,in}) + W_{c2}(T_{c2,out} - T_{c2,in})
 \end{aligned}$$

จากสมการ( 2-14 ): Heat Capacity Ratio

$$\text{Heat Capacity Ratio, } R = \frac{T_{hi} - T_{ho}}{(T_{c1} + T_{c2})_o - (T_{c1} + T_{c2})_i} = \frac{W_c}{W_h}$$

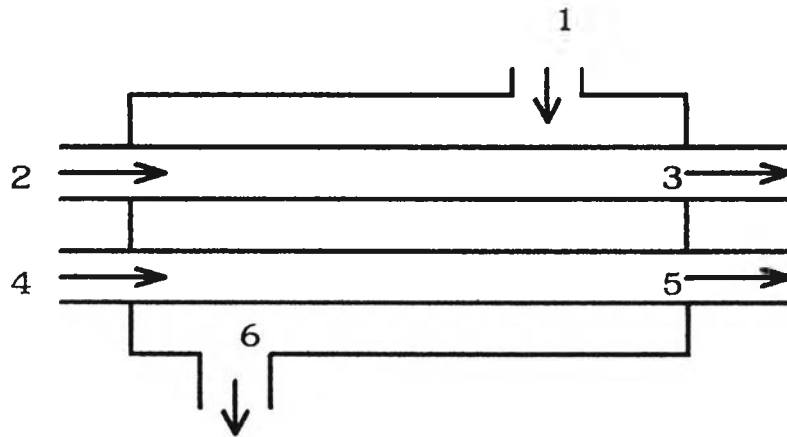
จากสมการ(2-16): thermal effectiveness

$$\varepsilon = \frac{(T_{c1} + T_{c2})_o - (T_{c1} + T_{c2})_i}{(T_{hi} - T_{ci})}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ประสิทธิภาพทางความร้อน} &= \frac{\text{ปริมาณความร้อนที่ของไหลเย็นได้รับ}}{\text{ปริมาณความร้อนที่ของไหลร้อนคายออก}} \\
 &= \frac{W_{c1}(T_{c1,out} - T_{c1,in}) + W_{c2}(T_{c2,out} - T_{c2,in})}{W_h (T_{h,in} - T_{h,out})}
 \end{aligned}$$



### 2.2.2 ลักษณะโครงสร้างของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้ของไหล 3 ชนิดแบบที่ 2



ภาพที่ 2-5 แสดงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้ของไหล 3 ชนิดแบบที่ 2 (ท่อวางซ้อนกัน)

ตำแหน่งที่ 1 ของไหลร้อนเข้า HX ( $T_1$ )

ตำแหน่งที่ 2 ของไหลเย็นชนิดที่ 1 เข้า HX ( $C_1, in$ )

ตำแหน่งที่ 3 ของไหลเย็นชนิดที่ 1 ออก HX ( $C_1, out$ )

ตำแหน่งที่ 4 ของไหลเย็นชนิดที่ 2 เข้า HX ( $C_2, in$ )

ตำแหน่งที่ 5 ของไหลเย็นชนิดที่ 2 ออก HX ( $C_2, out$ )

ตำแหน่งที่ 6 ของไหลร้อนออก HX ( $T_3$ )

จากสมการ (2-14), Heat Capacity Ratio

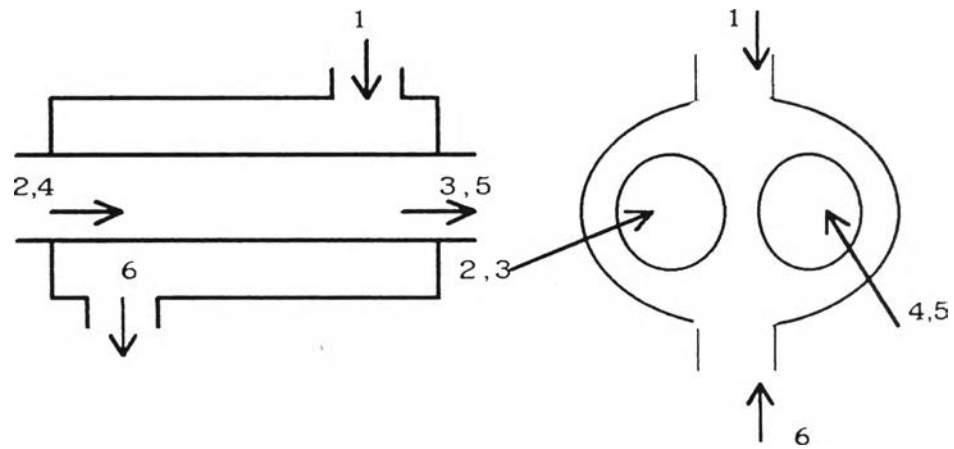
$$R = \frac{T_{hi} - T_{ho}}{(T_{c1} + T_{c2})_o - (T_{c1} + T_{c2})_i}$$

และจากสมการ (2-16),  $\epsilon$  คือ thermal effectiveness

$$\epsilon = \frac{(T_{c1} + T_{c2})_o - (T_{c1} + T_{c2})_i}{T_{hi} - T_{ci}}$$

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพทางความร้อน} &= \frac{\text{ปริมาณความร้อนที่ของไหลเย็นได้รับ}}{\text{ปริมาณความร้อนที่ของไหลร้อนคายออก}} \\ &= \frac{W_{c1}(T_{c1,out} - T_{c1,in}) + W_{c2}(T_{c2,out} - T_{c2,in})}{W_{h1}(T_{h1,in} - T_{h1,out})} \end{aligned}$$

### 2.2.3 ลักษณะโครงสร้างของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้ของไหล 3 ชนิดแบบที่ 3



ภาพที่ 2-6 แสดงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้ของไหล 3 ชนิดแบบที่ 2 (ที่วางขนานกัน)

ตำแหน่งที่ 1 ของไหลร้อนเข้า HX ( $T_1$ )

ตำแหน่งที่ 2 ของไหลเย็นชนิดที่ 1 เข้า HX ( $C_{1,in}$ )

ตำแหน่งที่ 3 ของไหลเย็นชนิดที่ 1 ออก HX ( $C_{1,out}$ )

ตำแหน่งที่ 4 ของไหลเย็นชนิดที่ 2 เข้า HX ( $C_{2,in}$ )

ตำแหน่งที่ 5 ของไหลเย็นชนิดที่ 2 ออก HX ( $C_{2,out}$ )

ตำแหน่งที่ 6 ของไหลร้อนออก HX ( $T_3$ )

จากสมการ (2-14), Heat Capacity Ratio

$$R = \frac{T_{hi} - T_{ho}}{(T_{c_1} + T_{c_2})_o - (T_{c_1} + T_{c_2})_i}$$

และจากสมการ (2-16)  $\epsilon$  คือ thermal effectiveness

$$\epsilon = \frac{(T_{c_1} + T_{c_2})_o - (T_{c_1} + T_{c_2})_i}{T_{hi} - T_{ci}}$$

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพทางความร้อน} &= \frac{\text{ปริมาณความร้อนที่ของไหลเย็นได้รับ}}{\text{ปริมาณความร้อนที่ของไหลร้อนคายออก}} \\ &= \frac{Wc_1(T_{c1,out} - T_{c1,in}) + Wc_2(T_{c2,out} - T_{c2,in})}{Wh_1(T_{h1,in} - T_{h1,out})} \end{aligned}$$

## 2.3 คุณสมบัติของของไหล

จากระบบได้มีการเลือกใช้ของไหล 3 ชนิดด้วยกัน โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ  
กลุ่มที่ 1 ของไหลเย็นประกอบด้วย

### 2.3.1 น้ำมันเตา (เกรด A) มีคุณสมบัติดังนี้

รายละเอียด

ความหนาแน่น	max	0.985	kg / l
Flash Point	min	60	C
Pour Point	max	24	C
ค่าความร้อน@ 25 C		0.45	kcal / kg C
ค่าความร้อนจากการเผาไหม้	min	10,000	cal / g
ปริมาณซัลเฟอร์		2.0	% wt
ค่าความหนืด @ 50 C	min	7	cSt
	max	24	cSt

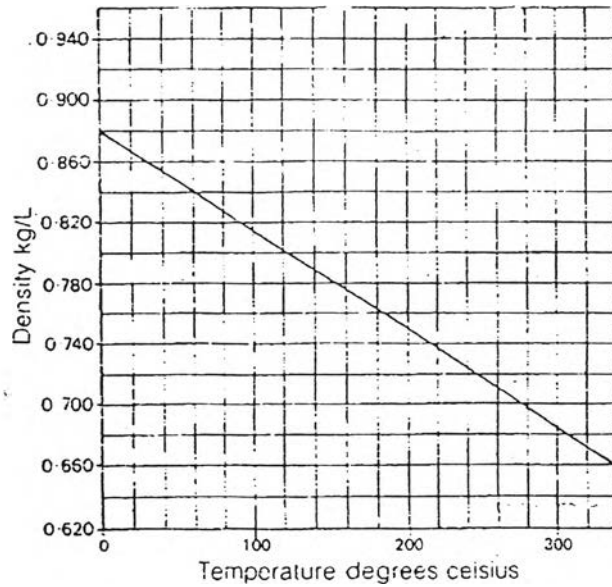
### 2.3.2 Shell Thermia Oil B

เป็นน้ำมันเพื่อใช้ในการถ่ายเทความร้อน สำหรับการถ่ายเทความร้อนทางอ้อมในระบบปิด  
เช่นใช้ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

รายละเอียด

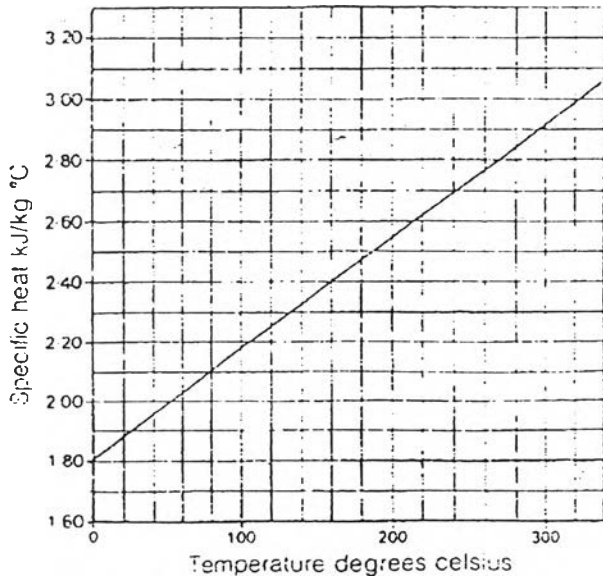
ความหนาแน่น		0.868	kg / l
Flash Point , closed		220	C
Flash Point , open		232	C
Fire Point		255	C
Pour Point		-18	C
ค่าความหนืด @	0 C	229	cSt
	40 C	24.6	cSt
	100 C	4.65	cSt
	200 C	1.18	cSt
	300 C	0.57	cSt

และคุณสมบัติอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง



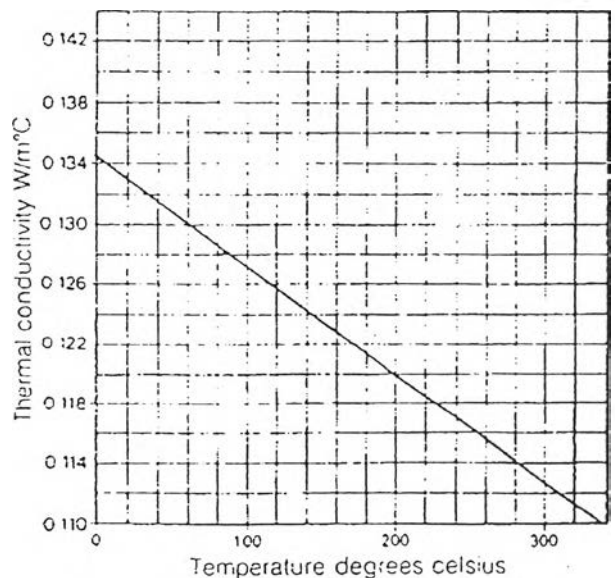
Variation of Density with Temperature

ภาพที่ 2-7 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น กับอุณหภูมิ



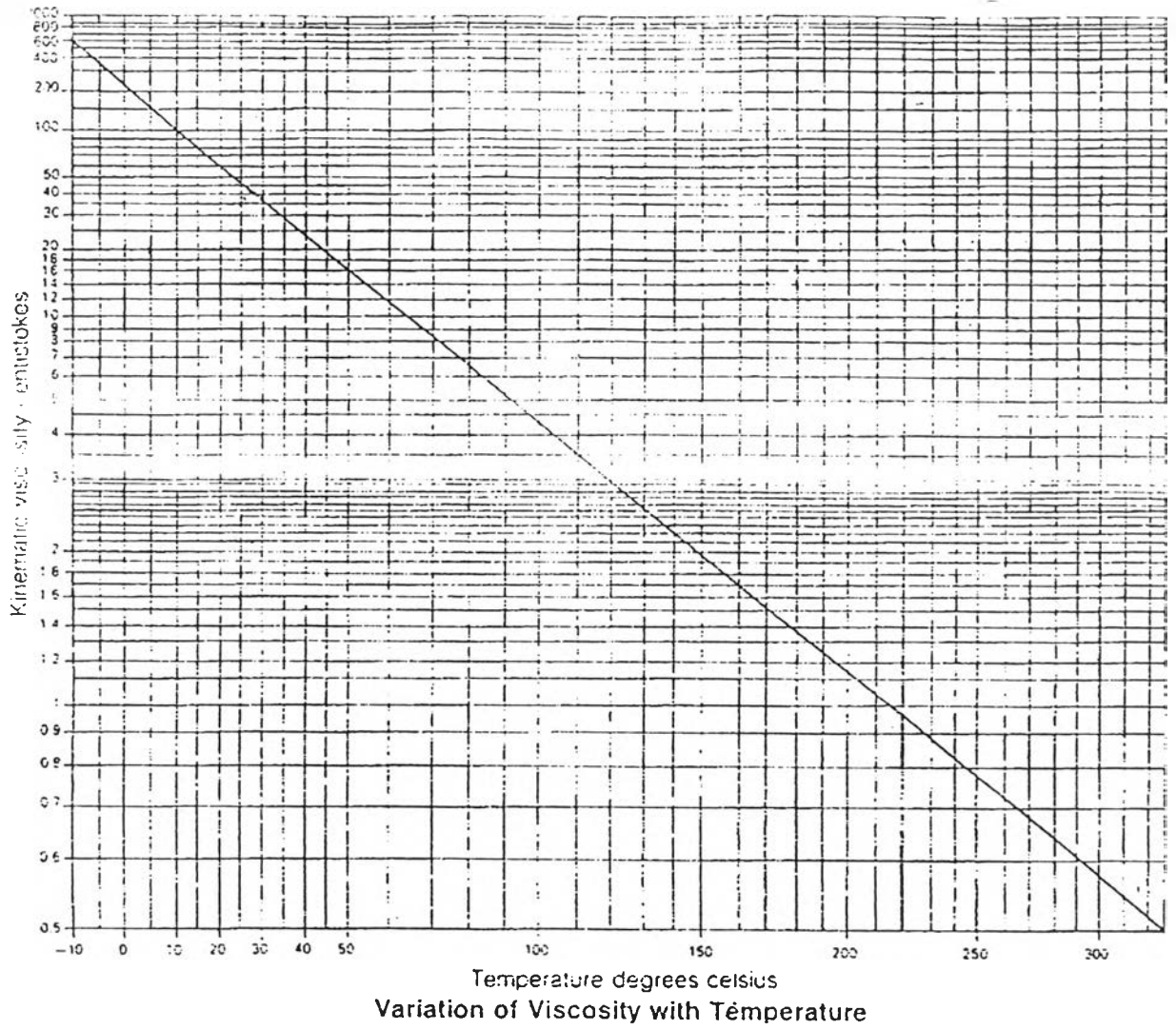
Variation of Specific Heat with Temperature

ภาพที่ 2-8 ค่าความร้อนจำเพาะ กับอุณหภูมิ



Variation of Thermal Conductivity with Temperature

ภาพที่ 2-9 ค่าการนำความร้อน กับอุณหภูมิ



ภาพที่ 2-10 การเปลี่ยนแปลงของค่าความหนืด กับอุณหภูมิ

ภาพที่ 2-10 ค่าความร้อนจำเพาะ กับอุณหภูมิ ภาพที่ 2-11 ค่าการนำความร้อน กับอุณหภูมิ  
กลุ่มที่ 2 ของไหลร้อนมี 1 ชนิด

### 2.3.3 น้ำ (H<sub>2</sub>O)

อุณหภูมิ ความหนาแน่น ความร้อนจำเพาะ ความหนืด ส.ป.ส การนำความร้อน

t (C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg C)	$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	k (W/m.K)
0	1,002.28	4.2178	$1.788 \times 10^{-6}$	0.552
20	1,002.52	4.1818	$1.006 \times 10^{-6}$	0.597
40	994.59	4.1784	$0.658 \times 10^{-6}$	0.628
60	985.46	4.1843	$0.478 \times 10^{-6}$	0.651
80	974.08	4.1964	$0.364 \times 10^{-6}$	0.668
100	960.63	4.2161	$0.294 \times 10^{-6}$	0.680
120	945.25	4.250	$0.247 \times 10^{-6}$	0.685