บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 หลักการทำงานของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

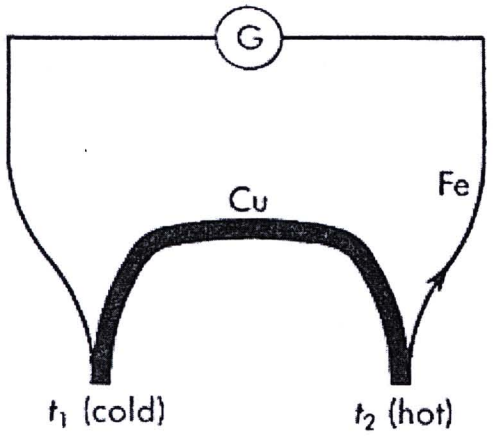
อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric device) [6] เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถกำเนิดกระแสไฟฟ้าได้จากผลต่างของอุณหภูมิตามปรากฏการณ์ซีเบ็ค (Seebeck Effect) และในทางตรงกันข้าม หากป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ก็จะเกิดผลต่างของอุณหภูมิที่ตัวอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ตามปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect) อาจจะเรียกอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกนี้ว่า เทอร์โมอิเล็กทริกเซลล์ (Thermoelectric Cell), เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (Thermoelectric Module) หรือ เซลล์ความร้อน ก็ได้

2.1.1 ปรากฏการณ์ซีเบ็ค (Seebeck Effect)

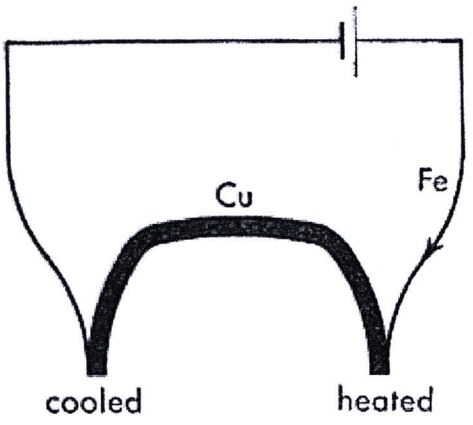
ปี ค.ศ. 1821 Thomas Johann Seebeck ได้พบว่า หากให้อุณหภูมิต่างกันที่รอยต่อของโลหะ 2 ชนิด (T1 และ T2) จะทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างปลายโลหะทั้งสองขึ้น จากผลของความแตกต่างปริมาณประจุ ดังในรูปที่ 2.1 ปริมาณของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับผลต่างของอุณหภูมิที่รอยต่อโลหะทั้งสอง เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นว่า Seebeck Effect ซึ่งหลักการนี้ถูกนำมาใช้เป็นรอยต่อเทอร์โมคัปเปิลสำหรับงานวัดอุณหภูมิในปัจจุบัน และมีการพัฒนาอุปกรณ์จากปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นเซลล์ความร้อน

2.1.2 ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect)

ปี ค.ศ. 1834 Jean Peltier ได้ทำการทดลองผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในรอยต่อโลหะ 2 ชนิดที่เชื่อมต่อกัน ดังในรูปที่ 2.2 ผลที่เกิดขึ้น คือ รอยต่อระหว่างโลหะด้านหนึ่งจะร้อนขึ้น ส่วนอีกด้านหนึ่งจะเย็นลง อันเป็นกระบวนการเชิงอุณหพลศาสตร์ของพาหะประจุที่เคลื่อนที่พร้อมนำความร้อนจากด้านเย็นไปยังด้านร้อนของรอยต่อโอห์มมิก เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นว่า Peltier Effect ซึ่งมีลักษณะเป็นกระบวนย้อนกลับของปรากฏการณ์ซีเบ็ค



รูปที่ 2.1 Seebeck effect ที่ปลายรอยต่อโลหะ



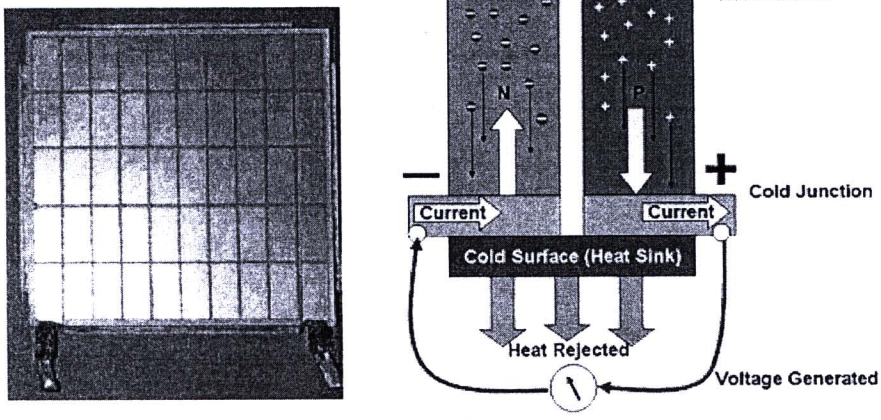
รูปที่ 2.2 Peltier effect ที่ปลายรอยต่อโลหะ

2.2 การนำอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกไปใช้งาน

จากปรากฏการณ์ดังกล่าวข้างต้น ได้มีการพัฒนาสารกึ่งตัวนำและสร้างรอยต่อโอห์มมิก (Ohmic junction) ขึ้นแทนรอยต่อเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ของโลหะสองชนิด ทำให้ได้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสูงขึ้น ปัจจุบันมีการผลิตในรูปรอยต่อขนาดเล็กหลายรอยต่อบนพื้นที่ขนาดใหญ่เพื่อนำไปใช้งานได้ใน 2 ลักษณะ คือ เป็นอุปกรณ์ผลิตกระแสไฟฟ้าจากความร้อนและเป็นอุปกรณ์ทำความเย็น

2.2.1 อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า

อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ออกแบบมาเพื่อใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยเฉพาะ แสดงในรูปที่ 2.3 ก จะให้กำลังไฟฟ้าต่อเซลล์สูงมากกว่า 10 W และทำงานที่อุณหภูมิสูงระหว่าง 250 – 500 °C เรียกอุปกรณ์นี้ว่า "เทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอร์เรเตอร์ (Thermoelectric Generator :TEG)" จากพฤติกรรมรอยต่อโอห์มมิกของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก เมื่อมีความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างรอยต่อด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิลิเมนต์ ตามปรากฏการณ์ (Seebeck effect) จะมีผลให้กลุ่มอิเล็กตรอนในวัสดุด้านร้อนมีพลังงานจลน์สูงกว่าวัสดุด้านเย็นและเคลื่อนที่เร็วกว่า เกิดความต่างปริมาณของประจุไฟฟ้าและกำเนิดไฟฟ้าขึ้นที่ปลายขั้วต่อของอุปกรณ์พร้อมจ่ายกระแสไฟฟ้าให้โหลด (Load) ได้ ดังแผนภาพในรูปที่ 2.3 ข ในพื้นที่ซึ่งมีอุณหภูมิแวดล้อมต่ำการผลิตไฟฟ้าจากอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกจะให้ประสิทธิภาพค่อนข้างสูง โดยสามารถใช้ไอโซโทปรังสีเป็นแหล่งความร้อนและระบายความร้อนสู่บรรยากาศโดยตรง ดังตัวอย่างเทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอร์เรเตอร์ในรูปที่ 2.4 ที่ใช้ความร้อนจากไอโซโทปรังสี (Radioisotope thermoelectric generator, RTG) [7] มีขนาด 240 W น้ำหนัก 5 kg ใช้ต้นกำเนิดรังสี Sr-90 ความแรงรังสี 40 kCi



ก.รูปร่างของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอร์เรเตอร์ ข.โครงสร้างของเทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอร์เตอร์

รูปที่ 2.3 แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอร์เรเตอร์

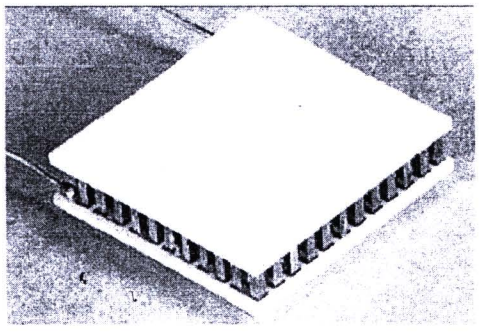
Dimensions of the cylinder	10 by 10 centimetres
Weight	5 kilograms
Capacity	240 watts
Concentration of strontium 90	1,500 TBq, or 40,000 curies
Temperature on the surface, centigrade	300-400 degrees
Exposition dose rate at the distance of 0,02 to 0,5 metres	28-10 Sv/h

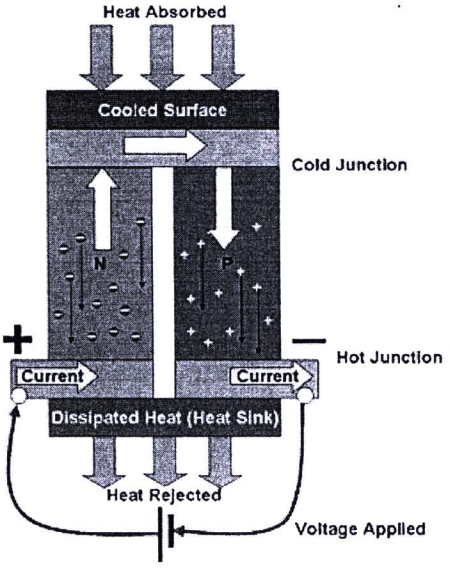
รูปที่ 2.4 เทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอร์เรเตอร์ใช้ความร้อนจากไอโซโทปรังสี

2.2.2 อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับทำความเย็น

เทอร์โมอิเล็กทริกที่ออกแบบมาเพื่อทำความเย็นโดยเฉพาะ แสดงในรูปที่ 2.5 ก ผนังด้านเย็นสามารถดูดกลืนปริมาณความร้อนได้ตั้งแต่ 10 – 130 W/Cell ขึ้นกับขนาดของอุปกรณ์ ผนังด้านร้อนทนอุณหภูมิสูงสุดได้ไม่เกิน 140 °C มักเรียกอุปกรณ์นี้ว่า "เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ (Thermoelectric Cooler :TEC)" หรือเพลเทียร์คูลเลอร์ การทำความเย็นสามารถทำได้โดยการให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านบริเวณรอยต่อโอห์มมิกของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ (TEC) ส่งผลให้เกิดการดูดกลืนความร้อนของกลุ่มอิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่จากรอยต่อผนังด้านเย็น ผ่านเทอร์โมอิลิเมนต์และนำไปปลดปล่อยที่รอยต่อผนังด้านร้อน ทำให้เกิดความแตกต่างอุณหภูมิ ส่งผลให้

ผนังรอยต่อด้านเย็นมีอุณหภูมิลดต่ำลง อุณหภูมิของความเย็นจะขึ้นกับปริมาณกระแสไฟฟ้าและการระบายความร้อนที่รอยต่อผนังด้านร้อนออก ดังรูปที่ 2.5 ข





ก รูปร่างของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ ข โครงสร้างของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์

รูปที่ 2.5 แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์

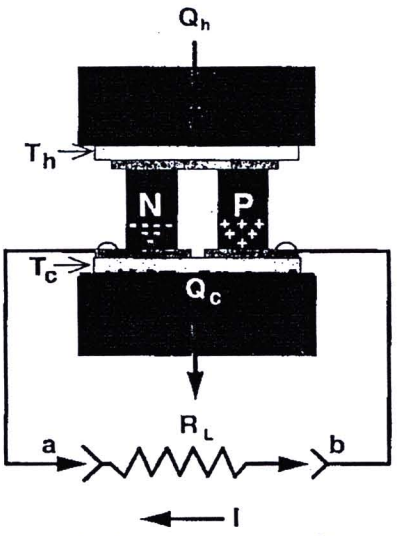
2.3 การประยุกต์เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ในการผลิตกระแสไฟฟ้า

จากที่กล่าวข้างต้นแล้วว่าอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ถูกออกแบบมาเพื่อการทำความเย็น แต่ในทางปฏิบัติสามารถที่จะนำเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์เป็นอุปกรณ์ผลิตกระแสไฟฟ้าได้ โดยอาศัยกระบวนการย้อนกลับการทำงานของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ซึ่งจะเหมาะกับแหล่งความร้อนประเภทเกรดต่ำ (Low grade waste heat) เนื่องจากข้อจำกัดด้านการทนอุณหภูมิของเซลล์

2.3.1 การวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเพื่อออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อน

ในกระบวนการย้อนกลับสามารถใช้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผนังด้านร้อนและผนังด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ ก่อให้เกิดบริเวณต่างปริมาณประจุไฟฟ้าและเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น

การวิเคราะห์ปริมาณไฟฟ้าเพื่อออกแบบโมดูลผลิตไฟฟ้าสามารถประยุกต์สมการของเทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอร์เรเตอร์ [8] ตามวงจรในรูปที่ 2.6 ดังนี้



รูปที่ 2.6 วงจรไฟฟ้าของเซลล์ความร้อน 1 เซลล์ เมื่อ $T_h > T_c$

ในสภาวะที่ไม่มีการใส่โหลด (Load) เป็นวงจรเปิด ค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ระหว่าง a และ b

จะได้ $$V = S \times \Delta T$$ 2.1

เมื่อ V เป็น ค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นจากเซลล์ความร้อน (V)

S เป็น ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ของซีเบ็ค (V/K)

ΔT เป็น ค่าผลต่างอุณหภูมิของเซลล์ความร้อน (K) ซึ่ง $\Delta T = T_h - T_c$

เมื่อมีการใส่โหลดให้กับเซลล์ความร้อน ค่าความต่างศักย์จะเป็นไปตามการจ่ายกำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า โดยเกิดภาวะการแบ่งแรงดันไฟฟ้าระหว่างความต้านทานภายในและโหลด ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลดจะมีค่า

$$I = \frac{S \times \Delta T}{R_C + R_L}$$ 2.2

เมื่อ I เป็น ค่ากระแสที่เกิดขึ้น (A)

R_C เป็น ค่าเฉลี่ยความต้านทานภายในของเซลล์ความร้อน (Ω)

R_L เป็น ค่าความต้านทานโหลด (Ω)

เซลล์ความร้อนจะจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อค่าความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานภายในของเซลล์ความร้อน โดยแรงดันไฟฟ้าจะลดลงเป็นครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด

ความร้อนทั้งหมดที่ต้องให้กับเซลล์ความร้อน จะหาได้จาก

$$Q_h = (S \times T_h \times I) - (0.5 \times I^2 \times R_C) + (K_C \times \Delta T) \quad \text{..... 2.3}$$

เมื่อ Q_h เป็น ค่าความร้อนที่รับเข้ามา (W)

K_C เป็น ค่าการนำความร้อนของเซลล์ความร้อน (W/K)

T_h เป็น อุณหภูมิด้านร้อนของเซลล์ความร้อน (K)

ขณะที่ประสิทธิภาพของเซลล์ความร้อน (E_g) หาได้จาก

$$E_g = \frac{V \times I}{Q_h} \times 100\% \quad \text{..... 2.4}$$

สำหรับโมดูลเซลล์ความร้อนที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง จะต้องใช้เซลล์ความร้อนมากกว่า 1 เซลล์ ต่ออันดับเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่ต้องการและต่อขนานกันในการเพิ่มกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.7 สมการของแรงดันไฟฟ้า จะได้

$$V_O = S_M \times \Delta T = I \times (R_M + R_L) \quad \text{..... 2.5}$$

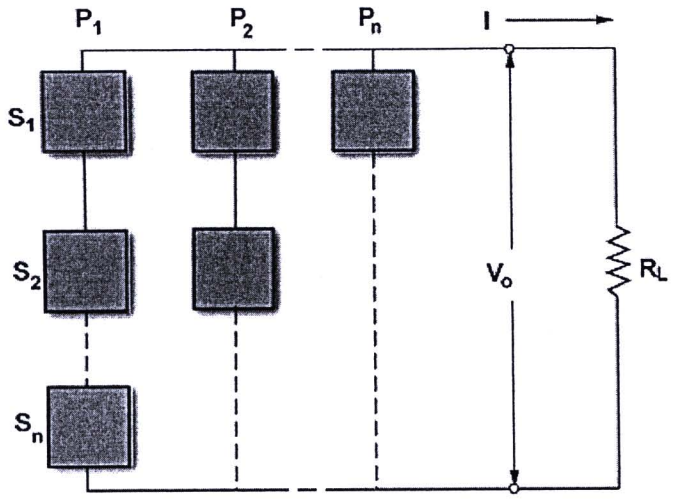
เมื่อ V_O เป็น ค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้น (V)

S_M เป็น ค่าเฉลี่ยโมดูลสัมประสิทธิ์ของซีเบ็ค (V/K)

R_M เป็น ค่าเฉลี่ยโมดูลความต้านทาน (Ω)

กำลัง (P_O) ที่ได้จากโมดูลเซลล์ความร้อน

$$P_O = R_L \times \left[\frac{S_M \times \Delta T}{R_M + R_L} \right]^2 \quad \text{..... 2.6}$$



รูปที่ 2.7 การจัดวงจรแบบผสมเพื่อเพิ่มแรงดันและกระแสไฟฟ้าในโมดูลเซลล์ความร้อน

ในการคำนวณหาจำนวนเซลล์ความร้อนของโมดูลเซลล์ความร้อน เริ่มจากการพิจารณากำลังไฟฟ้าที่ต้องการ และการจัดเรียงเซลล์ความร้อนทั้งอันดับและขนานกัน โดยจำนวนเซลล์ความร้อนหาได้จาก

$$N_T = N_S \times N_P \qquad \text{..... 2.7}$$

โดยที่ N_T เป็น จำนวนเซลล์ความร้อนทั้งหมด

N_S เป็น จำนวนเซลล์ความร้อนต่ออันดับกัน

N_P เป็น จำนวนเซลล์ความร้อนต่อขนานกัน

จากวงจรรูปที่ 2.7 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลดชนิดตัวต้านทาน จะมีค่าดังนี้

$$I = \frac{N_S \times S_M \times \Delta T}{\left(\frac{N_S \times R_M}{N_P}\right) + R_L} \qquad \text{..... 2.8}$$

แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากชุดเซลล์ความร้อน ตามกฎของโอห์มจะมีค่าเป็น

$$V_O = \left[\frac{N_S \times S_M \times \Delta T}{\left(\frac{N_S \times R_M}{N_P} \right) + R_L} \right] \times R_L \qquad \text{..... 2.9}$$

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากโมดูลเซลล์ความร้อน จึงหาได้จาก

$$P_O = V_O \times I = \frac{N_T \times (S_M \times \Delta T)^2}{4 \times R_M} \qquad \text{..... 2.10}$$

ปริมาณความร้อนที่ชุดเซลล์ความร้อนทั้งหมดต้องการใช้ในการกำเนิดกำลังไฟฟ้ามีค่า

$$Q_h = N_T \times \left[\frac{S_M \times T_h \times I}{N_P} - 0.5 \times R_M \times \left(\frac{I}{N_P} \right)^2 + K_M \times \Delta T \right] \qquad \text{..... 2.11}$$

และประสิทธิภาพของชุดเซลล์ความร้อนจะคำนวณได้จาก

$$E_g = \frac{P_O}{Q_h} \times 100\% \qquad \text{..... 2.12}$$

ประสิทธิภาพสูงสุดเกิดขึ้น เมื่อความต้านทานภายในของชุดเซลล์ความร้อน (R_{GEN}) เท่ากับความต้านทานของโหลด (R_L)

$$R_{GEN} = \frac{N_S \times R_M}{N_P} \qquad \text{..... 2.13}$$

ค่า S_M, R_M และความนำความร้อน (K_M) ในบางกรณีอาจกำหนดจากอุณหภูมิเฉลี่ยของผนังด้านร้อนและด้านเย็นของชุดเซลล์ความร้อน

$$T_{avg} = \frac{T_h + T_c}{2} \qquad \text{..... 2.14}$$

2.4 ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของเซลล์ความร้อน จากสมการที่ 2.12 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และความร้อนที่จ่ายให้ระบบ การที่จะผลิตไฟฟ้าได้ประสิทธิภาพสูงนั้นอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกต้องประกอบด้วยเทอร์โมอิเมนต์ (Thermo-element) ที่มีคุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกที่ดี

2.4.1 คุณสมบัติที่ดีของวัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมอิลิเมนต์

วัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมอิลิเมนต์ในเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกที่มีประสิทธิภาพสูงในการผลิตไฟฟ้าจะต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญ ดังนี้

1) มีสภาพนำไฟฟ้าสูงแต่เกิดความร้อนเพียงเล็กน้อย (ความร้อนเกิดจากความต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า)
2) มีสภาพนำความร้อนต่ำ เพื่อป้องกันการนำความร้อนผ่านวัสดุ
3) สามารถแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าหรือแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นความเย็นได้มากที่สุด

คุณสมบัติทั้ง 3 ประการ มีความสัมพันธ์กันทางฟิสิกส์ สำหรับใช้บ่งชี้คุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของวัสดุ (Z) ตามสมการที่ 2.15 [4] ดังนี้

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\lambda} \qquad \text{..... 2.15}$$

โดยที่ α คือ สัมประสิทธิ์ซีเบ็ค $\left[\frac{\Delta V}{\Delta T}\right]$ (Volt/Kelvin)

σ คือ สภาพนำไฟฟ้าของวัสดุ (Ampere/Volt·meter)

และ λ คือ สภาพนำความร้อนของวัสดุ (Watt/meter·Kelvin)

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

เนื่องจาก Z มีหน่วยต่ออุณหภูมิ แต่ในทางปฏิบัติเพื่อให้ค่าบ่งชี้เปรียบเทียบกันได้ง่ายควรจะไม่มีหน่วย ค่า Z จึงคูณด้วย T โดยที่ T คือ อุณหภูมิเฉลี่ยขณะทำงาน และค่า ZT จะเรียกว่าค่า figure-of-merit ซึ่งเป็นการใช้บ่งบอกถึงคุณสมบัติการเปลี่ยนความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าสูงสุดหรือการทำความเย็นสูงสุดของวัสดุที่ใช้ผลิตเทอร์โมอิลิเมนต์ ซึ่งเป็นชิ้นส่วนหลักของอุปกรณ์เทอร์

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 23 ก.ค. 2555
เลขทะเบียน 247009
เลขเรียกหนังสือ

โมอิเล็กทริก วัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมอิลิเมนต์ที่ดีจะต้องนำไฟฟ้าดีและเป็นฉนวนความร้อนที่ดีในเวลาเดียวกัน

2.4.2 การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าจากอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

ได้มีการศึกษาประสิทธิภาพสูงสุดของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกประเภทเซลล์ความร้อนในการผลิตไฟฟ้าขณะที่มีผลต่างอุณหภูมิสูงขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้า โดยประสิทธิภาพสูงสุดของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (η_{max}) เป็นไปตามความสัมพันธ์ดังสมการ 2.16

$$\eta_{max} = \left[\frac{T_h - T_c}{T_h}\right] \cdot \left[\frac{\left(1+Z^*\bar{T}\right)^{0.5} - 1}{\left(1+Z^*\bar{T}\right)^{0.5} + 1}\right] \qquad \text{.....2.16}$$

Z^* คือ ค่า Z ของคู่เทอร์โมอิลิเมนต์ P type – N type ที่ดีที่สุด (V/K)

T_h และ T_c คือ อุณหภูมิผนังด้านร้อนและด้านเย็นตามลำดับ (K)

$\bar{T}$ คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของอุณหภูมิผนังด้านร้อนและด้านเย็น (K)

จากสมการจะเห็นว่าการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าทำได้โดยเลือกคุณสมบัติของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีค่า ZT มากกว่า 1 ซึ่งจะทำให้ได้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่มากกว่า 5 % [4] แต่ค่อนข้างหายาก เนื่องจากสิ่งที่กล่าวถึงเป็นข้อจำกัดของเซลล์ความร้อนที่ผลิตมาในเชิงพาณิชย์ จึงไม่สามารถเปลี่ยนคุณสมบัติของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกได้ ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าจึงปรับแก้ได้ที่ความแตกต่างอุณหภูมิขณะทำงาน โดยการจ่ายความร้อนที่ผนังด้านร้อนและระบายความร้อนออกจากผนังด้านเย็นของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกให้มีความแตกต่างอุณหภูมิได้มากที่สุด

2.5 แหล่งกำเนิดความร้อนเหลือทิ้ง

ความร้อนเหลือทิ้ง (Waste Heat) เป็นความร้อนที่เกิดจากการระบายความร้อนเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิของจักรกลหรือแหล่งผลิตความร้อนหลักขนาดใหญ่ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมออกทิ้งสู่สิ่งแวดล้อม เช่น การเผาไหม้ การผลิตไอน้ำ การหลอมวัสดุและการแปรรูป

วัสดุ เป็นต้น ความร้อนที่ระบายออกจากระบบนี้หากไม่นำมาใช้ประโยชน์จะมีสภาพเป็นความร้อนเหลือทิ้งและบางระบบยังจำเป็นต้องลดอุณหภูมิด้วยการใช้ระบบหล่อเย็นช่วยลดพลังงาน

เมื่อพิจารณาในเชิงการใช้ประโยชน์ พลังงานเหลือทิ้งส่วนนี้จะมีสภาพเป็นแหล่งความร้อนที่ให้ปริมาณความร้อนต่อเนื่องตราบที่ระบบทำงานอยู่ ความร้อนเหลือทิ้งโดยทั่วไปจะแบ่งตามเกรดเป็น 3 ช่วง คือ ความร้อนเหลือทิ้งเกรดสูงมีอุณหภูมิระหว่าง 600 – 1600^{o}C ความร้อนเหลือทิ้งเกรดปานกลางมีอุณหภูมิระหว่าง 200 – 500^{o}C และความร้อนเหลือทิ้งเกรดต่ำอุณหภูมิระหว่าง 60 – 150^{o}C แหล่งความร้อนเหลือทิ้งที่น่าสนใจ ได้แก่ ความร้อนเหลือทิ้งจากระบบระบายความร้อน และความร้อนจากพลังงานทดแทนตามธรรมชาติ ดังนี้

1. แหล่งความร้อนจากการระบายความร้อน ได้แก่ การระบายความร้อนจากระบบหล่อเย็นสารกัมมันตรังสีความแรงรังสีสูงหรือแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วในระยะรอลดความแรงรังสี (Cool down period) การระบายความร้อนในกระบวนการทางอุตสาหกรรมและการระบายความร้อนจากแหล่งสันดาปขนาดใหญ่

2. แหล่งความร้อนจากพลังงานทดแทน ได้แก่ ความร้อนจากน้ำร้อนที่ได้จากพลังงานแสงอาทิตย์ การต้มน้ำด้วยเชื้อเพลิงชีวมวลและเชื้อเพลิงอื่น ๆ ในการแปรรูปผลผลิตการเกษตร

การคืนกลับความร้อนเหลือทิ้ง (Waste heat recovery) โดยการแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกแทนการทิ้งเปล่า ช่วยประหยัดการใช้ไฟฟ้าจากระบบหลักและช่วยลดขนาดระบบระบายความร้อน อย่างไรก็ตามการพัฒนาแหล่งความร้อนเหลือทิ้งให้มีระดับอุณหภูมิเหมาะกับการใช้งานต้องการอุปกรณ์ที่สำคัญ คือ ระบบแลกเปลี่ยนความร้อน และกระบวนการควบคุมการไหลเวียนของของไหลพาความร้อนเข้าและออกจากระบบผลิตไฟฟ้าเพื่อการถ่ายโอนความร้อนที่ผนังด้านร้อนและผนังด้านเย็นของโมดูลเซลล์ความร้อนซึ่งสามารถจัดการได้ทั้งระบบปิดสนิทและระบบเปิดที่มีอ่างสำรองน้ำ

2.6 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) ในโมดูลเซลล์ความร้อน

ในศาสตร์ทางด้านวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับพลังงานความร้อน (Thermal energy) ระบบการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) นับว่าเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยให้ระบบสามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ การออกแบบระบบถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็นซึ่งจะต้องคำนึงถึงในลำดับแรกและรวมไปถึงต้นทุนของวัสดุที่ทำมาออกแบบและสร้าง

ในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) เพื่อการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์ความร้อน นั้นประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ผนังด้านร้อนและออกจากผนังด้านเย็นของเซลล์เป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนให้กับผนังเซลล์ด้านร้อนและการระบาย

ความร้อนออกจากผนังเซลล์ด้านเย็นที่ดี จะทำให้เกิดผลต่างอุณหภูมิมากขึ้นเป็นผลให้กำลังไฟฟ้าได้สูงขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้การประยุกต์ใช้กระบวนการไหลเวียนของน้ำตามธรรมชาติ (Natural flow) ในส่วนของการถ่ายเทความร้อนภายในระบบเพื่อช่วยในการลดใช้พลังงานภายนอกมาบังคับจะต้องพิจารณาควบคู่กัน กระบวนการถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นระหว่างของไหลใช้งาน (Working Fluid) 2 ส่วน โดยมีตัวกลางหรือวัสดุระหว่างพื้นที่บริเวณผนังเซลล์ความร้อนที่มีการสัมผัสซึ่งกันและกัน จากด้านที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ด้านที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า เป็นการถ่ายเทความร้อนจากผลต่างของอุณหภูมิที่เรียกว่า "แรงขับดัน" (Driving Force) ด้วยวิธีการถ่ายเทความร้อน ได้แก่ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน ในทางปฏิบัติแล้วส่วนใหญ่จะอาศัยการนำความร้อนและพาความร้อนเป็นหลัก ส่วนการแผ่รังสีความร้อนจะเกิดบริเวณผนังด้านนอกโมดูลในการถ่ายเทความร้อน สู่บรรยากาศเท่านั้น กระบวนการถ่ายเทความร้อนในตัวกลางดังกล่าวจะมีแรงพยายามต้านทานการถ่ายเทความร้อนเสมอ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการถ่ายเทความร้อนแต่ละรูปแบบด้วย อัตราการถ่ายเทความร้อนสามารถสรุปเป็นสมการได้ 2.17 ดังนี้

อัตราการถ่ายเทความร้อน = แรงขับดัน / ความต้านทาน 2.17

2.6.1 รูปแบบของการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนจากแหล่งกำเนิดอุณหภูมิสามารถแบ่งตามลักษณะการส่งถ่ายความร้อนผ่านตัวกลางต่างๆ ได้ 3 รูปแบบ คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน ดังนี้ [9]

ก. การนำความร้อน (Heat Conduction) คือ การถ่ายเทความร้อนให้กับอนุภาคบริเวณผิวสัมผัสที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยตัวกลางมีสถานะเป็นของแข็งอยู่กับที่เป็นตัวนำความร้อน ส่วนมากตัวกลางจะเป็นวัสดุจำพวกโลหะ การถ่ายเทความร้อนรูปแบบนี้จะนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบถ่ายเทความร้อนสู่ผนังด้านร้อนและการระบายความร้อนจากผนังด้านเย็นของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ปริมาณการถ่ายเทความร้อนตามกฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ "Fourier's law of conduction" เป็นไปตามสมการ 2.18 ดังนี้

$$q = -kA\frac{\Delta t}{\Delta x} \qquad \text{.....2.18}$$

เมื่อ q = ปริมาณการถ่ายเทความร้อนในหนึ่งหน่วยมวล

k = ค่าสภาพการนำความร้อน

A = พื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเทความร้อน

ΔT = ผลต่างของอุณหภูมิ

Δx = ระยะห่างระหว่างสองบริเวณที่อุณหภูมิต่างกัน

ข. การพาความร้อน (Heat Convection) คือ การถ่ายเทความร้อนที่มีวัสดุตัวกลางเคลื่อนที่ไปพร้อมกับการพาความร้อนพาจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า วัสดุตัวกลางจะมีสถานะเป็นของเหลว หรือก๊าซ อาจจะเรียกวัสดุตัวกลางนี้ว่า "ของไหลใช้งาน" (Working fluid) แบ่งลักษณะการพาความร้อนเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่

การพาความร้อนแบบบังคับ (Force convection)

การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นเมื่อมีแรงภายนอกมาบังคับให้ของไหลเคลื่อนที่พร้อม ๆ กับทำหน้าที่ถ่ายโอนความร้อนบริเวณพื้นที่สัมผัส โดยต้องมีอุปกรณ์ช่วยในการเคลื่อนที่ เช่น ระบบสูบของไหล (Pump) และการขับอากาศจากพัดลม เป็นต้น ในระบบนี้ต้องพึ่งพาพลังงานจากภายนอกช่วยมาเสริม

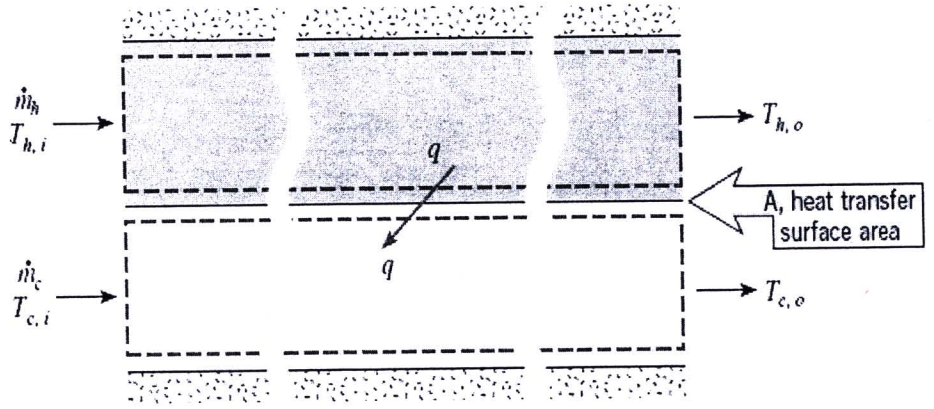
การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural convection)

การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของความหนาแน่นของตัวกลาง อันเป็นผลมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิของของไหลใช้งาน ก่อให้เกิดการขยายตัวและความดันในระบบ การไหลเวียนของไหลในการพาความร้อนเกิดจากแรงอัดร่วมกับแรงโน้มถ่วงตามกระบวนการไซฟอน (Syphon) โดยไม่ต้องพึ่งพาพลังงานจากภายนอกช่วยเสริม การพาความร้อนแบบธรรมชาตินี้จะนำมาประยุกต์ใช้กับระบบผลิตความร้อนในลูปปิด (Closed loop) แบบเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon) [5]

ค. การแผ่รังสีความร้อน (Heat radiation) คือ การถ่ายเทความร้อนโดยไม่มีวัสดุตัวกลางมาช่วยในการถ่ายเทความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบคลื่นความร้อนไปกระทบกับวัตถุนั้นๆ

2.6.2 การแพร่กระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

เมื่อการไหลของของไหลภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีทิศทางต่างกัน จะทำให้พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนมีการแพร่กระจายอุณหภูมิแตกต่างกันออกไป การแพร่กระจายอุณหภูมิของพื้นผิวนี้จะนำไปพิจารณาในการกำหนดทิศทางการไหลของน้ำร้อนภายในโมดูลถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Module) และการระบายความร้อนด้วยน้ำ (Water Heat Exchanger) ให้มีการถ่ายเทความร้อนและรักษาผลต่างอุณหภูมิบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างสม่ำเสมอ



รูปที่ 2.8 การแพร่กระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

จากรูปที่ 2.8 การหาค่าปริมาณความร้อนจากการถ่ายเทความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$Q_h = \dot{m}_h C_{p,h}(T_{h,i} - T_{h,o}) \quad \text{..... 2.19}$$

$$Q_c = \dot{m}_c C_{p,c}(T_{c,o} - T_{c,i}) \quad \text{..... 2.20}$$

เมื่อ Q_h คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำร้อน (W)

Q_c คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำเย็น (W)

$\dot{m}_h$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำร้อน (kg/s)

$\dot{m}_c$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเย็น (kg/s)

$C_{p,h}$ คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำร้อน (J/kg.K)

$C_{p,c}$ คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำเย็น (J/kg.K)

$T_{h,i}$ คือ อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้า (K)

$T_{h,o}$ คือ อุณหภูมิน้ำร้อนขาออก (K)

$T_{c,i}$ คือ อุณหภูมิน้ำเย็นขาเข้า (K)

$T_{c,o}$ คือ อุณหภูมิน้ำเย็นขาออก (K)

อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสามารถหาได้จาก

$$Q_{ave} = \frac{1}{2}(Q_h + Q_c) \quad \text{..... 2.21}$$

$$Q_{ave} = (UA)\Delta T_{LMTD}$$

เมื่อ Q_{ave} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย (W)

U คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (W/ m^2K)

A คือ บริเวณพื้นที่ที่แลกเปลี่ยนความร้อน (m^2)

ΔT_{LMTD} คือ ค่าความต่างของอุณหภูมิเชิงล็อกเฉลี่ย (K)

โดยค่าความต่างของอุณหภูมิเชิงล็อกเฉลี่ย (Log Mean Temperature Difference: ΔT_{LMTD}) จะขึ้นอยู่กับลักษณะรูปแบบของการไหล 2 แบบเท่านั้น คือ กรณีของไหลเคลื่อนที่ขนานไปในทิศทางเดียวกัน (Parallel Flow) และกรณีของไหลสวนทางกัน (Counter Flow) ซึ่งมีการแพร่กระจายความร้อนสู่จุดสมดุลอุณหภูมิที่เป็นรูปแบบเฉพาะ ดังแสดงเส้นกราฟจากการคำนวณในรูปที่ 2.9 และ 2.10

เมื่อ $T_{h,i}$ คือ อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้า (K)

$T_{c,i}$ คือ อุณหภูมิน้ำเย็นขาเข้า (K)

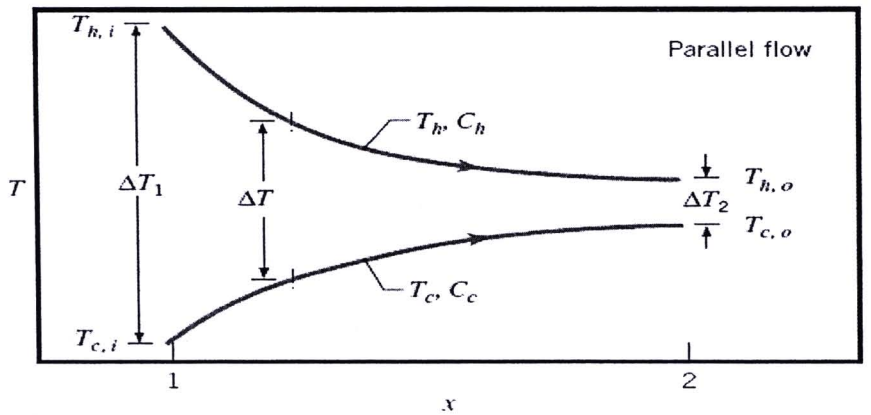
$T_{h,o}$ คือ อุณหภูมิน้ำร้อนขาออก (K)

$T_{c,o}$ คือ อุณหภูมิน้ำเย็นขาออก (K)

ΔT_1 คือ ผลต่างของอุณหภูมิน้ำขาเข้า (K)

ΔT_2 คือ ผลต่างของอุณหภูมิน้ำขาออก (K)

กรณีของไหลเคลื่อนที่ขนานไปในทิศทางเดียวกัน (Parallel Flow)

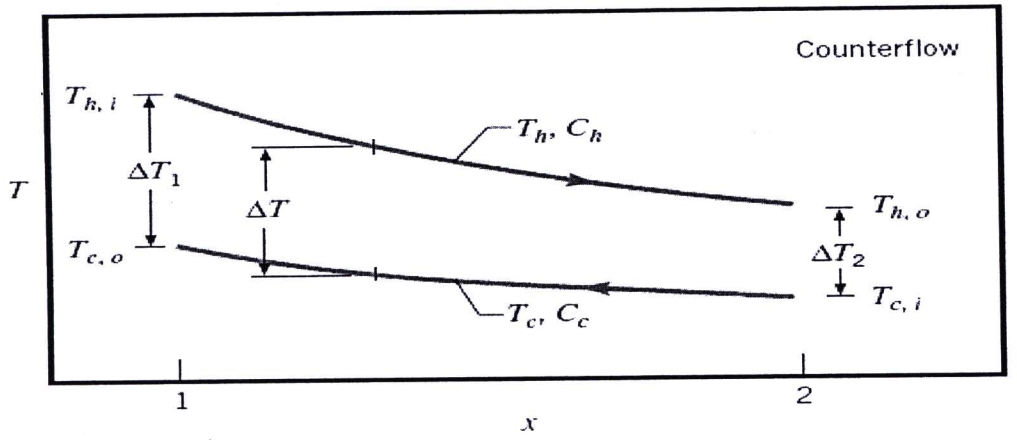


รูปที่ 2.9 การแพร่กระจายอุณหภูมิของการเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน

$$\Delta T_1 = T_{h,i} - T_{c,i}$$

$$\Delta T_2 = T_{h,o} - T_{c,o}$$

กรณีของไหลสวนทางกัน (Counter Flow)



รูปที่ 2.10 การแพร่กระจายอุณหภูมิชนิดของไหลสวนทางกัน

$$\Delta T_1 = T_{h,i} - T_{c,o}$$

$$\Delta T_2 = T_{h,o} - T_{c,i}$$

จะได้ค่าผลต่างอุณหภูมิเชิงล็อกเฉลี่ยดังสมการที่ 2.10

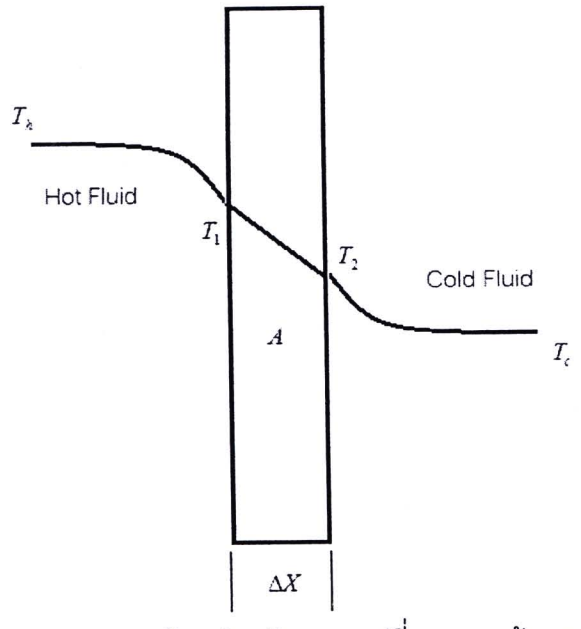
$$\Delta T_{LMTD} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \Delta T_2 / \Delta T_1} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \Delta T_1 / \Delta T_2} \quad \text{..... 2.22}$$

หากการไหลในรูปแบบที่ไม่ได้อยู่ในกรณีของไหลเคลื่อนที่ขนานไปในทิศทางเดียวกัน (Parallel Flow) หรือ กรณีของไหลสวนทางกัน (Counter Flow) เช่น การไหลแบบผสม (Cross Flow) จะต้องมีค่าของแฟกเตอร์ F เข้ามาช่วยในการ แก้ปัญหา ซึ่งจะมีความยุ่งยากมากขึ้น

$$Q = UAF\Delta T_{LMTD} \quad \text{..... 2.23}$$

2.6.3 การถ่ายเทความร้อนของวัสดุแลกเปลี่ยนความร้อน

อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance) จาก 3 แหล่ง ได้แก่ ความต้านทานความร้อนของการไหลด้านน้ำร้อน ความต้านทานความร้อนผ่านวัสดุแลกเปลี่ยนความร้อน และความต้านทานความร้อนของการไหลด้านน้ำเย็น



รูปที่ 2.11 การถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุแลกเปลี่ยนความร้อนของวัสดุ 1 แผ่น

ในสภาวะคงตัวการไหลของความร้อนจะถ่ายเทความร้อนจากน้ำร้อนผ่านวัสดุแลกเปลี่ยนความร้อน และวัสดุแลกเปลี่ยนความร้อนจะถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำเย็นระบายความร้อนตามลำดับ

จะได้สมการที่มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$Q_{h-1} = h_h A(T_h - T_1) \qquad \text{..... 2.24}$$

$$Q_{1-2} = \frac{K_w A}{\Delta X}(T_1 - T_2) \qquad \text{.....2.25}$$

$$Q_{2-c} = h_c(T_2 - T_c) \qquad \text{.....2.26}$$

นำสมการที่ 2.24, 2.25, 2.26 มารวมกันแล้วทำการจัดรูปแบบสมการใหม่ได้ดังนี้

$$Q = \frac{T_h - T_c}{\frac{1}{h_h A} + \frac{\Delta X}{K_w A} + \frac{1}{h_c A}} \qquad \text{.....2.27}$$

เมื่อ Q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)

T_h คือ อุณหภูมิของน้ำร้อน (K)

T_c คือ อุณหภูมิของน้ำเย็น (K)

T_1 คือ อุณหภูมิของน้ำร้อนที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อน (K)

T_2 คือ อุณหภูมิของน้ำเย็นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อน (K)

h_h คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของน้ำร้อน (W/m^2K)

h_c คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของน้ำเย็น (W/m^2K)

K_w คือ ค่าความนำความร้อนของวัสดุแลกเปลี่ยนความร้อน (W/mK)

A คือ พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน (m^2)

ΔX คือ ความหนาของวัสดุแลกเปลี่ยนความร้อน (m)

จากสมการที่ 2.27 จะเป็นเพียงการวิเคราะห์อย่างง่าย แต่หากพิจารณาให้ถี่ถ้วนแล้วจะพบว่าการแพร่กระจายของอุณหภูมิของผิวแลกเปลี่ยนความร้อนไม่เท่ากันทั่วทุกบริเวณ เป็นไปตามเส้นกราฟดังรูปที่ 2.9 และ รูปที่ 2.10 ส่งผลให้ผลต่างของอุณหภูมิแต่ละบริเวณไม่เท่ากันไปด้วย ฉะนั้นจะต้องใช้วิธีวิเคราะห์แบบผลต่างเชิงล็อก (Log Mean Temperature Difference: ΔT_{LMTD}) เข้ามาช่วย จะได้สมการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมใหม่ดังนี้

$$Q = UAF\frac{T_h - T_c}{\frac{1}{h_h A} + \frac{\Delta X}{K_w A} + \frac{1}{h_c A}} \qquad \text{..... 2.28}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_h} + \frac{\Delta X}{K_w} + \frac{1}{h_c}} \text{ หรือ } U = \frac{1}{R_h + R_w + R_c} \qquad \text{..... 2.29}$$

เมื่อ $R_h = \frac{1}{h_h}$ คือ ความต้านทานการไหลความร้อนด้านน้ำร้อน (m^2K/W)

$R_w = \frac{\Delta X}{K_w}$ คือ ความต้านทานของวัสดุแลกเปลี่ยนร้อน (m^2K/W)

$R_c = \frac{1}{h_c}$ คือ ความต้านทานการไหลด้านน้ำเย็น (m^2K/W)

2.6.4 ระบบน้ำร้อนไหลเวียน

การไหลเวียนของน้ำตามธรรมชาติในลูปปิด (Closed loop natural flow) จากผลของความแตกต่างของอุณหภูมิของของไหลใช้งานในระบบพาความร้อน เรียกว่า เทอร์โมไซฟอน

(Thermosyphon) การไหลเวียนเกิดจากการที่ของไหลบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าเปลี่ยนความหนาแน่นเกิดการขยายตัวและเกิดความดันในระบบปิด ดันของไหลพร้อมพาความร้อนเคลื่อนตัวสู่บริเวณอุณหภูมิต่ำกว่าด้วยการเสริมของแรงโน้มถ่วงเป็นวงรอบโดยไม่ต้องพึ่งพาพลังงานจากภายนอกช่วยเสริม ระบบผลิตน้ำร้อนไหลเวียนตามธรรมชาติในลูปปิดแบบเทอร์โมไซฟอนมีข้อดีดังนี้

1) เป็นระบบทำงานแบบ Passive โดยไม่มีอุปกรณ์ต้นกำลังมาขับการไหลเวียนของน้ำ เช่น ปั๊มน้ำ

2) สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดี แม้มีความต่างอุณหภูมิระหว่างน้ำร้อนและน้ำเย็นเพียงเล็กน้อย

3) น้ำไหลเวียนในลูปปิดสามารถหมุนเวียนกลับมาใช้ได้ตลอด (Re-boiling)

4) ต้นทุนถูกกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับระบบแบบ Active ที่ต้องมีอุปกรณ์มาขับดันการไหลเวียนของน้ำ

ในกระบวนการไหลเวียนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระบบทั้งสองด้าน คือ การเพิ่มอุณหภูมิและการเย็นตัว เป็นลักษณะการถ่ายโอนความร้อนแบบการพาความร้อน สามารถพิจารณาได้จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's cooling law)

$$Q = hA\Delta T \qquad \text{..... 2.30}$$

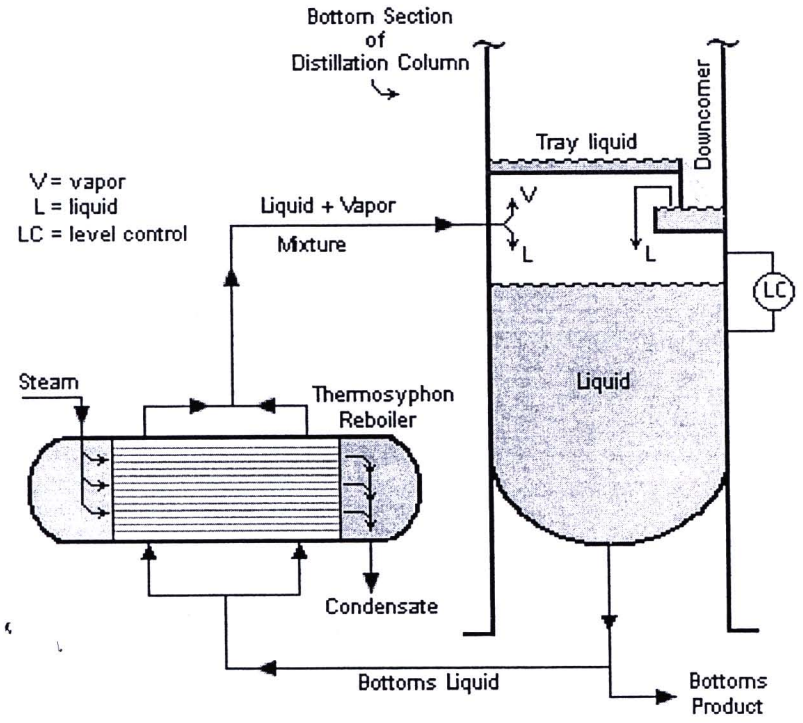
เมื่อ Q คือ ปริมาณความร้อนที่เกิดการถ่ายโอนเนื่องจากการพา (W)

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (W/m^2K)

A คือ พื้นที่ที่แลกเปลี่ยนความร้อน (m^2)

ΔT คือ ผลต่างอุณหภูมิ (°C หรือ K)

ระบบต้มน้ำหรือแลกเปลี่ยนความร้อนจากไอน้ำเพื่อผลิตน้ำร้อนไหลเวียนถ่ายความร้อนให้ผนังอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและหมุนเวียนกลับมาต้มใหม่อย่างต่อเนื่องในลูปปิด เรียกว่าระบบเทอร์โมไซฟอนรีบอยเลอร์ (Thermosyphon reboiler) ดังแสดงในแผนรูปที่ 2.12 โดยน้ำต้มเดือดในระบบจะอยู่ในสภาพน้ำร้อนและไอน้ำผสมกัน มีอุณหภูมิสูงและมีแรงส่งในการพาความร้อนของของไหลสูง การหมุนเวียนถ่ายเทความร้อนในลูปปิดมีความซับซ้อน อย่างไรก็ตามอัตราการไหลเวียนและแรงดันไอน้ำของเทอร์โมไซฟอนสามารถคำนวณได้จากวิธีของแฟร์ (Methods of Fair) [10]



รูปที่ 2.12 แผนภาพระบบเทอร์โมไซฟอนแบบของไหลหมุนเวียนต้มซ้ำใหม่