

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 หลักการและทฤษฎีของท่อความร้อน

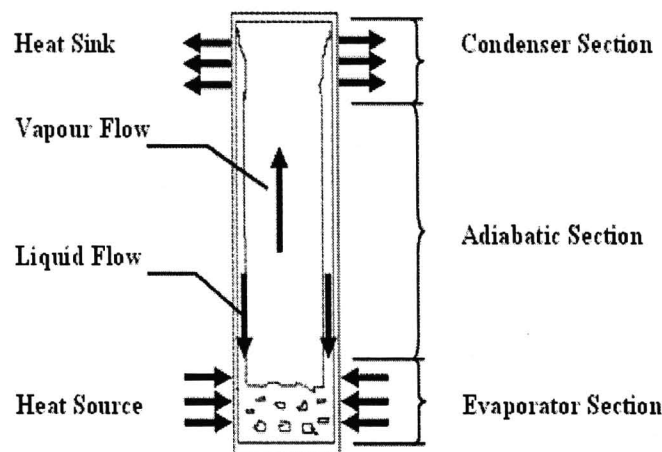
2.1.1 ท่อความร้อน

ท่อความร้อน (Heat Pipe) เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีค่าการนำความร้อนสูงมาก โดย R.S. Gaugler เป็นคนแรกที่ได้นำเสนอความคิดเกี่ยวกับท่อความร้อนในปี 1942 แต่อย่างไรก็ดีผู้ที่เป็นคนประดิษฐ์ท่อความร้อนขึ้นจนสามารถนำไปใช้งานได้จริงคือ G.M. Grover โดยได้ทำการประดิษฐ์ขึ้นในช่วงต้นทศวรรษที่ 1960 นับตั้งแต่นั้นเป็นต้นมาท่อความร้อนก็ได้เป็นที่รู้จักกันทั่วไปและได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วท่อความร้อนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดด้วยกันคือ

1. ท่อความร้อนแบบไม่มีวัสดุพรุนหรือที่เรียกกันว่า เทอร์โมไซฟอน
2. ท่อความร้อนแบบมีวัสดุพรุน

2.1.1.1 เทอร์โมไซฟอน

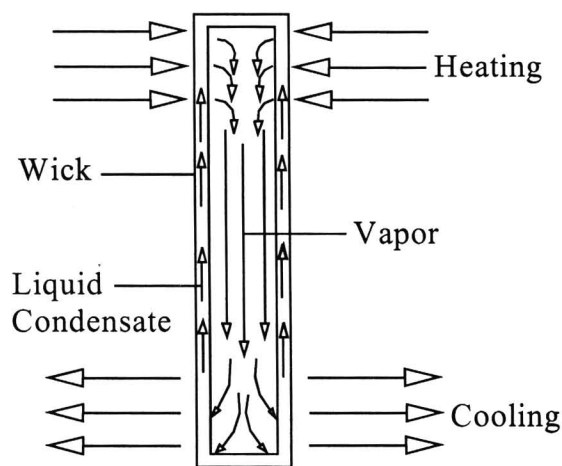
เทอร์โมไซฟอน คือท่อความร้อนที่ไม่มีวัสดุพรุนที่ช่วยในการดึงสารทำงานที่กลั่นตัวที่ส่วนควบแน่นให้ไหลกลับมายังส่วนทำระเหย โดยเทอร์โมไซฟอนจะประกอบด้วยส่วนทำระเหย(Evaporator section) ส่วนกันความร้อน(Adiabatic section) และส่วนควบแน่น(Condenser section) ซึ่งมีหลักการทำงานดังนี้คือ เมื่อสารทำงานที่บรรจุอยู่ภายในท่อบริเวณส่วนทำระเหยได้รับความร้อน สารทำงานจะระเหยกลายเป็นไอลอยขึ้นด้านบนนำเอาความร้อนไปยังส่วนควบแน่นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าและระบายความร้อนออกที่ส่วนควบแน่น จากนั้นสารทำงานที่กลั่นตัวเป็นของเหลวจะไหลย้อนกลับตกลงมาตามผนังด้านในของท่อสู่ส่วนทำระเหย โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก สารทำงานก็จะรับเอาความร้อนจากส่วนทำระเหยอีกครั้งรูป 2.1



รูป 2.1 เทอร์โมไซฟอนหรือท่อความร้อนแบบไม่มีวัสดุพูน (Dunn and Reay, 1982)

2.1.1.2 ท่อความร้อนแบบมีวัสดุพูน

ท่อความร้อน คืออุปกรณ์ที่มีสภาพการนำความร้อนที่สูง ท่อความร้อนใช้หลักการระเหยและกลั่นตัวของสารทำงาน ท่อความร้อนเป็นท่อปิด ซึ่งภายในเป็นสุญญากาศและมีสารทำงานบรรจุอยู่ จะแบ่งท่อเป็น 3 ส่วนตามหลักการทำงานคือ ส่วนทำระเหย ส่วนไม่ถ่ายเทความร้อน และส่วนกลั่นตัว โครงสร้างท่อความร้อนแบบมีวัสดุพูนแสดงดังรูป 2.2 ท่อความร้อนถูกบรรจุด้วยสารทำงาน ซึ่งหลักการทำงานคล้ายกับเทอร์โมไซฟอน แต่แตกต่างกันตรงหลักการการไหลกลับสู่ส่วนทำระเหยของของเหลวควบแน่น ท่อความร้อนชนิดนี้จะใช้แรงคาпилลารี จึงสามารถทำงานสวนแรงโน้มถ่วงโลก จึงทำให้สามารถจัดวางได้อย่างอิสระได้



รูป 2.2 ท่อความร้อนแบบมีวัสดุพูน (Dunn and Reay, 1982)

จากรูป 2.1 จะเห็นว่าส่วนประกอบต่างๆ ของท่อความร้อนมีด้วยกันทั้งหมด 2 ส่วนด้วยกัน คือ ท่อบรรจุ ซึ่งทำหน้าที่เป็นที่บรรจุสารทำงาน โดยปกติจะใช้วัสดุที่มีค่าการนำความร้อนสูง มีความแข็งแรงเพียงพอต่อแรงดันของสารทำงานที่จะเกิดขึ้นจากภายในตัวท่อ และต้องไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารทำงานภายในท่อ และสิ่งแวดล้อมภายนอกท่อ การบรรจุสารทำงานลงในตัวท่อความร้อนทำโดยการทำให้ตัวท่อความร้อนเป็นสุญญากาศ จากนั้นจึงเริ่มบรรจุสารทำงานลงในท่อ

สารทำงาน เป็นตัวกลางส่งผ่านความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง ไปยังแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ โดยเมื่อสารทำงานที่อยู่ในส่วนทำระเหยได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง ก็จะเกิดการระเหยกลายเป็นไอ โดยอุณหภูมิที่น้อยที่สุดที่ทำให้สารทำงานเกิดการระเหยจะเป็นอุณหภูมิอิ่มตัวที่สอดคล้องกับความดันภายในท่อความร้อน ไอสารทำงานที่เกิดจากการระเหยจะไหลไปยังส่วนควบแน่น และเมื่อไอสารทำงานสัมผัสกับผนังท่อที่อยู่ในแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ ก็จะสูญเสียความร้อนให้กับผนังท่อนั้นและควบแน่นกลายเป็นของเหลวและไหลกลับมายังส่วนทำระเหย ด้วยแรงโน้มถ่วงโลก

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย

2.2.1 คุณลักษณะการส่งถ่ายความร้อนของเทอร์โมไซฟอน

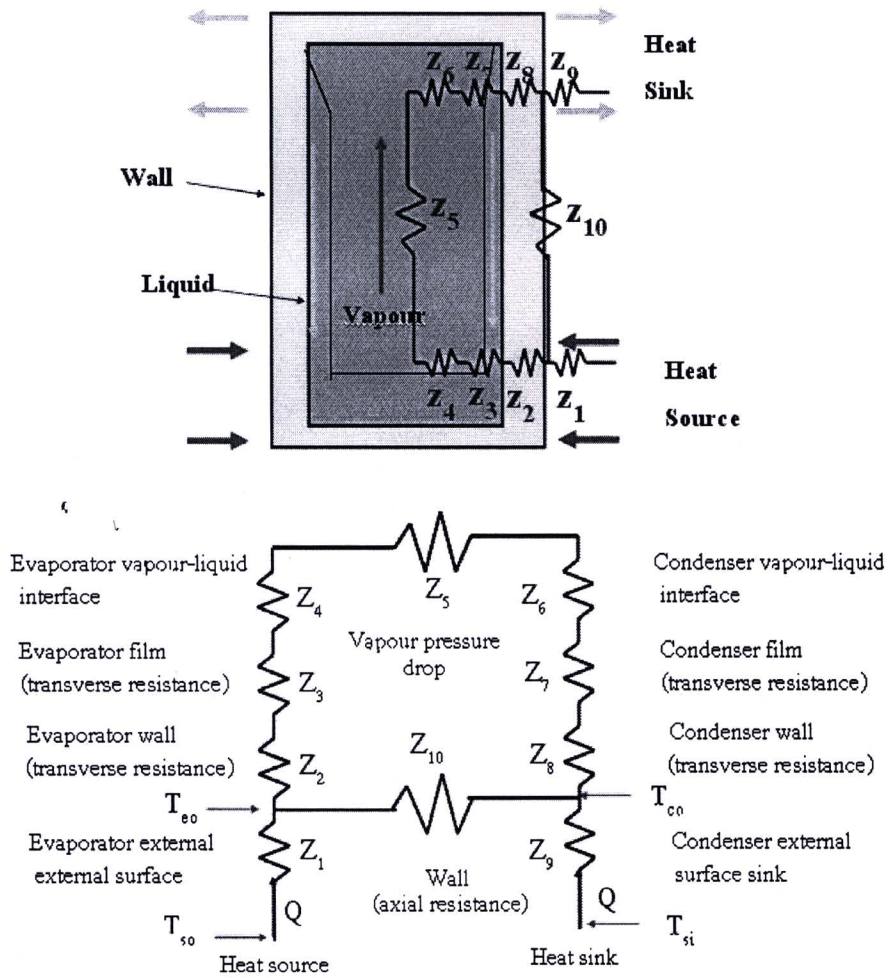
สมรรถนะของท่อความร้อน สามารถแสดงได้โดยค่าความต้านทานความร้อนรวม (Z_{total}) อัตราการส่งถ่ายความร้อนจริง (Q) และผลต่างระหว่างแหล่งให้ความร้อน และแหล่งรับความร้อน (ΔT) โดยใช้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$Q = \frac{\Delta T}{Z_{total}} \quad (2.1)$$

โดยที่
$$Z_{total} = Z_1 + \left(\frac{Z_{int} \times Z_{10}}{Z_{int} + Z_{10}} \right) + Z_9$$

และ
$$Z_{int} = Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_7 + Z_8$$

ค่าความต้านทานทางความร้อนรวมถูกแทนในรูปของเครือข่ายทางอุดมคติของค่าความต้านทานทางความร้อนรวม (Z_1 ถึง Z_{10}) ดังรูป 2.3



รูป 2.3 เครือข่ายทางอุณหพลศาสตร์ของค่าความต้านทานทางความร้อนรวมของท่อความร้อน

(Dunn and Reay, 1982)

Z_1 และ Z_9 คือค่าความต้านทานทางความร้อนระหว่างแหล่งให้ความร้อนกับผิวท่อด้านนอกของส่วนทำระเหย และระหว่างผิวท่อด้านนอกของส่วนควบแน่นกับแหล่งรับความร้อนตามลำดับ คำนวณหาได้จาก

$$Z_1 = \frac{1}{h_{eo} A_{eo}} \quad (2.2)$$

$$Z_9 = \frac{1}{h_{co} A_{co}} \quad (2.3)$$

Z_2 และ Z_8 คือค่าความต้านทานทางความร้อนของผนังท่อส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นตามลำดับ คำนวณหาได้จาก

$$Z_2 = \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D}\right)}{2\pi l_e k} \quad (2.4)$$

$$Z_8 = \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D}\right)}{2\pi l_c k} \quad (2.5)$$

Z_3 และ Z_7 คือค่าความต้านทานทางความร้อนภายในของการเดือดและการควบแน่นของสารทำงานภายในท่อ ประกอบด้วยคุณสมบัติของสารทำงานและอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อ คำนวณหาได้จาก

Z_3 ประกอบด้วย Z_{3p} และ Z_{3f}

Z_{3p} คือ ความต้านทานของของเหลวที่เกิดจากแอ่งของเหลว คำนวณหาได้จาก

$$Z_{3p} = \frac{1}{\Phi_3 g^{0.2} Q^{0.4} (\pi D_i L_e)^{0.6}} \quad (2.6)$$

เมื่อ Φ_3 คือ ค่าคงที่ของสารทำงาน Figure of Merit ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$\Phi_3 = 0.325 \frac{\rho_l^{0.5} k_l^{0.3} C_{pl}^{0.7}}{\rho_v^{0.25} L^{0.4} \mu_l^{0.1}} \left[\frac{P_v}{P_a} \right]^{0.23} \quad (2.7)$$

Z_{3f} คือ ความต้านทานของของเหลวที่เกิดจากแผ่นฟิล์มของเหลวเหนือส่วนแอ่งของเหลวในส่วนรับความร้อน คำนวณหาได้จาก

$$Z_{3f} = \frac{0.235 Q^{1/3}}{D_i^{4/3} g^{1/3} L_e \Phi_2^{4/3}} \quad (2.8)$$

Φ_2 คือ ค่าคงที่ของสารทำงาน Figure of Merit ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$\Phi_2 = \left(\frac{Lk_l^2}{\mu_l} \right)^{1/4} \quad (2.9)$$

เงื่อนไขในการใช้ Z_{3p} และ Z_{3f} เพื่อใช้เป็นค่า Z_3 คือ

$$\text{ถ้า } Z_{3p} > Z_{3f}$$

$$Z_3 = Z_{3p}$$

$$\text{ถ้า } Z_{3p} < Z_{3f}$$

$$Z_3 = Z_{3p} F + Z_{3f} (1-F)$$

เมื่อ F คือ อัตราส่วนการเติม

$$F = \frac{V_l}{AL_e}$$

เมื่อ V_l คือ ปริมาตรของสารทำงานที่เติม

A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ

Z_7 คือ ค่าความต้านทานทางความร้อนภายในของการควบแน่นของสารทำงานภายในท่อ โดยเป็นความต้านทานของของเหลวที่เกิดจากแผ่นฟิล์มของเหลวที่ไหลกลับในส่วนควบแน่น คำนวณหาได้เช่นเดียวกับ Z_{3f} คือ

$$Z_7 = \frac{0.235Q^{1/3}}{D_i^{4/3} g^{1/3} L_e \Phi_2^{4/3}} \quad (2.10)$$

Z_4 และ Z_6 คือค่าความต้านทานทางความร้อนที่เกิดขึ้นที่หน้าสัมผัสระหว่างของเหลวและไอสารทำงานภายในท่อส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานอื่นๆ จึงไม่นำมาพิจารณา

Z_5 คือ ค่าความต้านทานทางความร้อนอันเนื่องมาจากความดันไอตกคร่อมระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น มีผลทำให้อุณหภูมิอิ่มตัวของสารทำงานลดลงด้วย อัตราการควบแน่นจึงลดลง แต่มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่าความต้านทานอื่นๆ จึงไม่นำมาพิจารณา

Z_{10} คือ ค่าความต้านทานทางความร้อนตามแนวแกนของผนังท่อบรรจุ โดยการนำความร้อนขึ้นกับความหนาและวัสดุที่ใช้ทำท่อความร้อนหาค่าประมาณจากสมการ

$$Z_{10} = \frac{0.5l_e + l_a + 0.5l_c}{Ak} \quad (2.11)$$

สำหรับการทำงานตามปรกติของเทอร์โมไซฟอน ที่มีส่วนทำระเหยอยู่ระดับต่ำกว่าส่วนควบแน่น การนำความร้อนตามแนวยาวของผนังท่อจะช่วยทำงานเล็กน้อย ดังนั้นจึงอาจใช้หลักการ “เทอร์มอลไดโอด (Thermal diode)” ซึ่งจะได้เกณฑ์ในการพิจารณาดังสมการ

$$\frac{Z_{10}}{Z_2 + Z_3 + Z_7 + Z_8} > 20 \quad (2.12)$$

หากเป็นไปตามสมการด้านบน ค่าความต้านทานทางความร้อนรวมจะเป็น

$$Z_{total} = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_7 + Z_8 + Z_9$$

แต่หากไม่เป็นไปตามสมการด้านบน จะต้องพิจารณา Z_{10} ด้วย โดยค่าความต้านทานทางความร้อนรวมจะเป็น

$$Z_{total} = Z_1 + \left[\frac{(Z_2 + Z_3 + Z_7 + Z_8) \times Z_{10}}{Z_2 + Z_3 + Z_7 + Z_8 + Z_{10}} \right] + Z_9 \quad (2.13)$$

2.2.2 ขีดจำกัดการทำงานสูงสุดของเทอร์โมไซฟอน

เมื่อแหล่งให้ความร้อนและแหล่งรับความร้อนมีความแตกต่างของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จะทำให้เทอร์โมไซฟอนมีการถ่ายเทความร้อนได้สูงขึ้นจนถึงจุดๆ หนึ่ง ซึ่งจะทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุด เรียกว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนวิกฤต ทั้งนี้เนื่องจากขีดจำกัดในการถ่ายเทความร้อน คือ ขีดจำกัดความดันไอ (Vapour pressure limit) ขีดจำกัดความเร็วเสียง (Sonic limit) ขีดจำกัดการแห้ง (Dryout limit) ขีดจำกัดการเดือด (Boiling limit) และขีดจำกัดการไหลสวนทาง (Counter-current flow limit) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้คือ

2.2.2.1 ขีดจำกัดความดันไอ (Vapour pressure limit) เกิดขึ้นที่การทำงานของเทอร์โมไซฟอนทำงานที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ ทำให้ความดันตกคร่อมของไอมีผลต่อการถ่ายเทความร้อน ขีดจำกัดความดันไอหาได้จาก

$$\frac{Q_m}{Ak} = \frac{D^2 P_v \rho_v}{64 \mu_v L_{eff}} \quad (2.14)$$

2.2.2.2 ขีดจำกัดความเร็วเสียง (Sonic limit) เกิดขึ้นเมื่อใช้งานเทอร์โมไซฟอนที่ความดันต่ำ จึงทำให้ความเร็วของไอมีก้าวเข้าใกล้กับความเร็วเสียงในไอ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ความร้อนไม่สามารถถ่ายเทได้สูงขึ้นไปอีก ดังนั้นการคำนวณหาขีดจำกัดความเร็วเสียง จะเป็นการประมาณค่าการถ่ายเทความร้อนสูง สามารถหาได้จาก

$$\frac{Q_{max}}{AL} = 0.5(\rho_l \rho_v)^{0.5} \quad (2.15)$$

2.2.2.3 ขีดจำกัดการแห้ง (Dryout limit) ขีดจำกัดนี้เกิดขึ้นได้สองกรณี คือ เมื่อเดิมสารทำงานปริมาณน้อยเกินไปและเดิมสารทำงานปริมาณมากเกินไป มีรายละเอียดดังนี้

ก. เมื่อเดิมสารทำงานปริมาณน้อยเกินไป หากมีการป้อนฟลักซ์ความร้อนช่วงการระเหยสูง จะทำให้ของเหลวส่วนล่างเริ่มแห้ง อุณหภูมิผนังจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น

ข. เมื่อเดิมสารทำงานมากเกินไป จะทำให้สารทำงานระเหยกลายเป็นไอได้มากขึ้น และระดับผิวของเหลวลดลงอย่างช้าๆ ผลต่อมาจะมีแรงเหวี่ยงระหว่างความเร็วของไอกับของเหลวที่ควบแน่นสูงขึ้น จะทำให้เกิดการสะสมของของเหลวในช่วงการควบแน่นมากขึ้น ทำให้เกิดการเหือดแห้งเหนือบ่อของเหลว อุณหภูมิของผนังท่อจะสูงขึ้น เมื่อน้ำหนักของเหลวที่ควบแน่นมากกว่าแรงดันไอ ของเหลวจะตกลงสู่ช่วงการระเหยและจะทำให้อุณหภูมิที่ผนังแกว่งไปมา

2.2.2.4 ขีดจำกัดการเดือด (Boiling limit) เกิดขึ้นเมื่อสถานะที่มีการป้อนฟลักซ์ความร้อนเข้าสู่ช่วงการระเหยสูงๆ ทำให้เกิดการเดือดรุนแรงขึ้นและพบว่ามีฟิล์มไอเคลือบที่ผิวของส่วนทำระเหย ฟิล์มไอนี้จะเป็นชั้นกั้นระหว่างผิวแลกเปลี่ยนความร้อนและของเหลวในส่วนทำระเหย ทำให้ของเหลวในส่วนทำระเหยไม่สามารถสัมผัสกับผิวแลกเปลี่ยนความร้อนได้ และการส่งผ่านความร้อนจากผิวแลกเปลี่ยนความร้อนในส่วนทำระเหยไปยังสารทำงานก็ยุติลง ซึ่งทำให้ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนในบริเวณนั้นมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เกิดเป็นจุดร้อนจัด (hot spot) ขึ้น ขัดขวางการ

ไหลเวียนของของเหลว จัดจำกัดนี้เรียกว่า จัดจำกัดเนื่องจากการเดือด ซึ่งคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\frac{Q_{\max}}{A_e} = 0.12L(\rho_v)^{0.5}[\sigma g(\rho_l - \rho_v)]^{0.25} \quad (2.16)$$

โดยที่ A_e คือ พื้นที่ผิวภายในของส่วนทำระเหย

$$A_e = \pi D_o l_e$$

σ คือ แรงตึงผิว (Surface tension) ของสารทำงาน

2.2.2.5 จัดจำกัดการไหลสวนทาง (Counter-current flow limit) เกิดขึ้นเมื่อเพิ่มฟลักซ์ความร้อนขึ้น ทำให้สารทำงานระเหยเป็นไอน้ำมากขึ้นและมีความเร็วสูงขึ้น ทำให้แรงเฉือนที่ผิวสัมผัสของไอน้ำกับของเหลวที่ไหลลงมาจากส่วนควบแน่นมีค่าสูงขึ้นด้วย ทำให้เกิดการดันไม่ไหลของเหลวไหลลงสู่แอ่งของเหลว ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การท่วม (Flooding) หรือการหอบพา (Entrainment) ทำให้เกิดจัดจำกัดขึ้นคือ จัดจำกัดการท่วม (Flooding limit) หรือจัดจำกัดการหอบพา (Entrainment limit) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$\frac{Q_{\max}}{AL} = f_1 f_2 f_3 (\rho_v)^{0.5} [g(\rho_l - \rho_v) \sigma_l]^{0.25} \quad (2.17)$$

เมื่อ f_1 เป็นฟังก์ชันของ Bond number

$$Bo = D \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{0.5} \quad (2.18)$$

ถ้า $Bo > 11$, $f_1 = 8.2$

f_2 เป็นฟังก์ชันไร้มิติของความดัน K_p

$$K_p = \frac{\rho_v}{[g(\rho_l - \rho_v) \sigma]^{0.5}} \quad (2.19)$$

และ

$$f_2 = K_p^{-0.17} \quad \text{if, } K_p \leq 4 \times 10^4$$

และ

$$f_2 = 0.165 \text{ if, } K_p > 4 \times 10^4$$

f_3 เป็นฟังก์ชันของมุมเอียงเมื่อท่ออยู่ในแนวตั้งฉากมีค่าเท่ากับ 1

2.2.3 การออกแบบเทอร์โมไซฟอน

เทอร์โมไซฟอนเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีส่วนประกอบสำคัญ 2 อย่างด้วยกัน คือ

1. สารทำงาน (Working fluid)
2. ท่อบรรจุ (Container)

ในการเลือกวัสดุที่เหมาะสมของทั้ง 2 อย่าง จะต้องมียุทธศาสตร์ประกอบหลายอย่างที่จะต้องนำมาพิจารณา โดยจะมีหลักการพื้นฐานในการเลือกดังต่อไปนี้

2.2.3.1 สารทำงาน (Working fluid) ปัจจัยแรกสำหรับการเลือกสารทำงานที่เหมาะสม คือ ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ทำงานและการเลือกสารทำงานใดๆ สิ่งที่ต้องพิจารณาเป็นอันดับแรก คือ

- การเข้ากันได้กับผนังท่อที่บรรจุ
- เสถียรภาพทางความร้อนที่ดี
- สามารถเปียกได้กับผนังท่อที่บรรจุ
- ความดันไอจะต้องไม่สูงหรือต่ำเกินไปในช่วงอุณหภูมิที่ทำงาน
- มีค่าความร้อนแฝงสูง
- มีค่าการนำความร้อนสูง
- มีความหนืดในสภาพของเหลวและไอน้ำ
- แรงตึงผิวสูง
- มีจุดไหลเหวหรือจุดเยือกแข็งที่ยอมรับได้

ในการเลือกสารทำงานนั้น จะต้องดูจากลักษณะเฉพาะทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งเกี่ยวข้องกับขีดจำกัดต่างๆ ของการไหล ของความร้อนภายในท่อความร้อน นั่นก็คือ ขีดจำกัดต่างๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

2.2.3.2 ท่อบรรจุ (Container) หน้าที่ของท่อบรรจุคือ ป้องกันสารทำงานไม่ให้ออกสู่สิ่งแวดล้อม ดังนั้นจะต้องเป็นส่วนที่ป้องกันการรั่วไหลได้และสามารถควบคุมความแตกต่างของความดันระหว่างผนังและสามารถที่ถ่ายเทความร้อนเข้า - ออกที่เกิดขึ้นจากสารทำงานได้

การเลือกวัสดุของผนังท่อนั้นจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกันคือ

- ความเข้ากันได้กับสารทำงาน
- อัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนัก
- ค่าการนำความร้อน
- ง่ายต่อการขึ้นรูป เชื่อม กลึง ขัด และดัด
- มีค่าความพรุนที่ต่ำ
- มีค่าความเปื่อยที่ดี

ดังนั้นในการออกแบบท่อความร้อนเพื่อที่จะทำให้สามารถส่งถ่ายความร้อนได้สูงที่สุด จึงจำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

2.2.4 หลักการของระบบการปลูกพืชแบบไม่ใช้ดิน

การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน หมายถึง วิธีการปลูกพืชเพื่อให้พืชได้รับสารอาหารหรือสารละลายธาตุอาหารพืชที่มีน้ำที่ผสมกับธาตุอาหารที่พืชต้องการ จากทางรากพืชโดยพืชที่ปลูกนั้นจะปลูกลงบนวัสดุปลูกหรือโดยไม่ต้องมีวัสดุปลูกก็ได้ จำแนกออกได้หลายรูปแบบ ดังนี้

2.2.4.1 ระบบการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินตามวิธีการปลูก

2.2.4.1.1 การปลูกพืชโดยให้รากลอยอยู่ในอากาศหรือ แอโรโปนิคส์ (Aeroponics) การปลูกพืชโดยให้รากลอยอยู่ในอากาศหรือการปลูกในอากาศ (Aeroponics) หรือ แอโรโปนิคส์ เป็นการปลูกในภาชนะที่มีการยึดต้นพืชให้ส่วนรากแขวนลอยในอากาศ เพื่อรับสารอาหารที่พ่นให้เป็นระยะตามช่วงเวลาที่กำหนด การปลูกแบบนี้ในอดีตมีข้อเสียคือ นอกจากต้องลงทุนค่าใช้จ่ายในด้านวัสดุอุปกรณ์ค่อนข้างสูงแล้ว ยังต้องเสียค่าไฟฟ้าจากเครื่องสูบน้ำเพื่อพ่นสูงกว่าวิธีการอื่นๆ เนื่องจากต้องพ่นสารอาหารไปที่รากพืชเป็นระยะๆ ที่สำคัญคือ ถ้าระบบพ่นอุดตัน (หรือปั๊มและระบบไฟฟ้ามีปัญหา) จะทำให้พืชเสียหาย

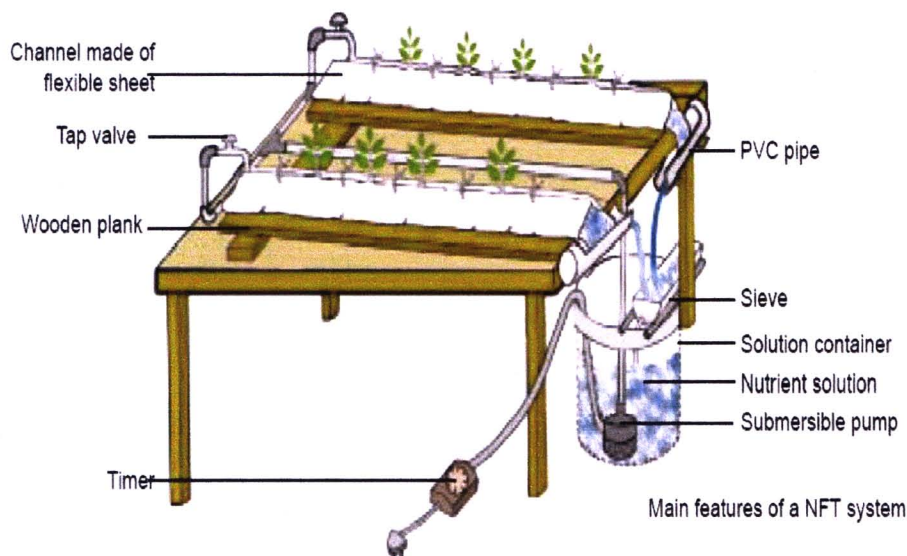
2.2.4.1.2 การปลูกพืชในวัสดุปลูก (Substrate Culture) คือ การปลูกโดยใช้วัสดุปลูกที่เป็นของแข็ง สามารถจำแนกได้เป็นวัสดุปลูกอนินทรีย์สารและวัสดุปลูกอินทรีย์สาร

วัสดุปลูกที่เป็นอนินทรีย์สาร ได้แก่ วัสดุที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ทราย(sand) ก้อนกรวด (gravel) หินเกล็ด หินภูเขาไฟหรือพูไมซ์ (pumice) หินชิสต์ (schist)

วัสดุที่ผ่านกระบวนการโดยใช้ความร้อน เช่น ดินเผา (ceramic) เม็ดดินเผา (expanded clay) โยหิน หรือร็อควูล (rockwool) เพอร์ไลต์ (perlite) เวอร์มิคิวไลต์ (vermiculite) ไฮโดรตอน (hydroton) และ ถ่านแกลบหยาบที่ได้จากการเผาแกลบสด วัสดุสังเคราะห์ เช่น เม็ดโฟม แผ่นฟองน้ำ สารดูด ความชื้น และเส้นใยพลาสติก วัสดุเหลือใช้จากโรงงาน/โรงสี เช่น เศษอิฐจากการทำอิฐมอดู เศษ ดินเผาจากโรงงาน เครื่องปั้นดินเผา ขี้เถ้าแกลบ

วัสดุปลูกที่เป็นอินทรีย์สาร ได้แก่ วัสดุที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ฟางข้าว ขี้เลื่อย เปลือกถั่วเปลือกไม้ ฟิท วัสดุเหลือใช้จากโรงงาน/โรงสี เช่น ขุยมะพร้าว แกลบสด กากขาน้อยจากโรงงานน้ำตาล

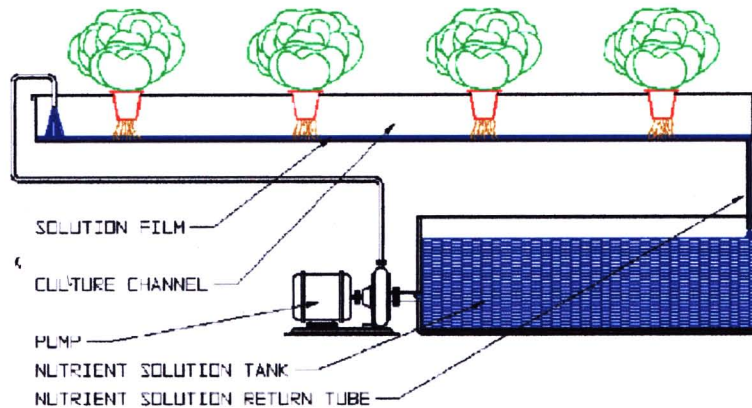
2.2.4.1.3 การปลูกพืชในสารละลายธาตุอาหารพืชหรือการปลูกให้รากพืชสัมผัส น้ำ (Water Culture หรือ Hydroponics) เป็นการปลูกพืชที่ไม่ใช้วัสดุปลูก กล่าวคือจะปลูกพืชลง บนสารละลายธาตุอาหารพืชโดยให้รากพืชสัมผัส กับสารอาหารโดยตรง คำว่า Hydroponics มาจาก การรวมคำ ในภาษากรีกสองคำ คือคำ ว่า Hydro หมายถึงน้ำ และ Ponos หมายถึง งาน ซึ่งเมื่อ รวมกันแล้ว ความหมายก็คือ Water-working หรือหมายถึง การทำงานของน้ำ (สารละลายธาตุ อาหาร) ผ่านรากพืช



รูป 2.4 ระบบปลูกพืชแบบให้รากพืชสัมผัสสารอาหาร (Water Culture หรือ Hydroponics)
(Hydroponics Department of Agriculture Ministry of Agriculture)

ผู้ที่จะปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินในลักษณะนี้ จะต้องควบคุมอุณหภูมิของ สารละลายธาตุอาหารพืชให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืช จำแนกออกเป็น

การปลูกแบบระบบให้สารละลายธาตุอาหารพืชไหลผ่านรากพืชเป็นแผ่นบางบนรางปลูกอย่างต่อเนื่อง (Nutrient Film Technique, NFT) เป็นการให้สารอาหารไหลไปอย่างช้าๆ บนแผ่นฟิล์มบางๆ ประมาณ 1-2 มิลลิเมตร ผ่านรากพืชที่ปลูกบนรางตามความลาดชันของรางปลูก



รูป 2.5 ระบบปลูกพืชแบบสารละลายธาตุอาหารพืชไหลผ่านรากพืชเป็นแผ่นบางบนรางปลูกอย่างต่อเนื่อง (NFT) (www.hhydro.com/images/NFT)



รูป 2.6 รางหรือรางปลูก (www.kmitl.ac.th/soilkmitl)

การปลูกแบบระบบให้สารละลายธาตุอาหารพืชไหลผ่านรากพืชแบบแผ่นหนานรางปลูกอย่างต่อเนื่อง (Nutrient Flow Technique, NFLT) วิธีนี้จะดูเสมือนกับการปลูกพืชให้ลอยแช่น้ำในลำธารเล็กๆ ที่มีน้ำคั้นๆ ให้ไหลช้าๆ อย่างสม่ำเสมอบนรางปลูกอย่างต่อเนื่อง แต่มีระดับความลึกของสารละลายที่ส่งมาให้ลึกกว่าระบบ NFT คือลึกประมาณมากกว่า 3 มิลลิเมตรจนถึง 15 มิลลิเมตร มีอัตราการไหลของสารละลายและความลาดชันของรางปลูกมากกว่าระบบ NFT

การปลูกแบบระบบให้สารละลายธาตุอาหารพืชไหลผ่านรากพืชในรางปลูกหรือท่อปลูกหรือถาดปลูกในระดับลึก (Deep Flow Technique, DFT) วิธีนี้จะให้สารละลายธาตุอาหารสูงกว่า 2 แบบแรกที่กล่าวมา ซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาเมื่อระบบไฟฟ้าขัดข้อง รากพืชยังสามารถใช้น้ำหรือสารละลายที่ท่วมขังอยู่ในรางปลูก

2.2.4.2 ระบบการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินตามวิธีการให้สารละลายธาตุอาหารพืช

การให้สารละลายธาตุอาหารพืชแบบท่วมสลับกับการระบายน้ำออกอย่างต่อเนื่อง (Flood and Drain, FAD) การให้สารละลายธาตุอาหารพืชแบบน้ำหยด การให้สารละลายธาตุอาหารพืชโดยการดูดซึม เป็นการให้สารอาหารซึมผ่านวัสดุปลูกเข้าสู่รากพืชแบบการดูดน้ำม้วนจากใต้ตะเกียงหรือ Capillary Action การให้สารละลายธาตุอาหารพืชที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารพืช จำแนกเป็น 2 วิธี คือ การให้สารละลายธาตุอาหารพืชแบบไม่หมุนเวียน จำแนกออกเป็น 2 ลักษณะ คือการให้สารละลายธาตุอาหารพืชแบบเดิมอากาศ และแบบไม่เดิมอากาศ การให้สารละลายธาตุอาหารพืชแบบหมุนเวียน แบบ NFT, NFLT, DFT, DRFT และ FAD

2.2.4.3 ระบบการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินตามระบบการใช้สารละลายธาตุอาหารพืช

2.2.4.3.1 ระบบที่นำเอาสารละลายธาตุอาหารพืชที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่หรือระบบปิด (Closed System หรือ Recirculating System) เป็นวิธีที่ปฏิบัติกันโดยทั่วไปโดยเฉพาะในการปลูกพืชสารละลายธาตุอาหารพืช เช่น NFT, NFLT, NDFT และ FAD

2.2.4.3.2 ระบบที่ไม่นำเอาสารละลายธาตุอาหารพืชที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่หรือระบบเปิด (Open System หรือ Nonrecirculating System) พืชจะได้รับสารอาหารที่เตรียมขึ้นใหม่เสมอใช้กับระบบการปลูกที่ใช้วัสดุปลูก

2.2.4.4 ระบบการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินแบบประยุกต์ เหมาะสำหรับการปลูกในพื้นที่จำกัดเพื่อประโยชน์ด้านการบริโภค ความสวยงามและนันทนาการ เช่นการปลูกแบบแขวน การปลูกแบบลอย การปลูกแบบเล่นระดับ และแบบแคปซูล

2.2.5 ปัจจัยต่อการเจริญเติบโตและการพัฒนาการของพืช

ไม่ว่าจะปลูกด้วยวิธีดั้งเดิมหรือด้วยวิธีไฮโดรโปนิคส์ ถูกควบคุมโดยปัจจัยทั้งภายในและภายนอก การเรียนรู้ถึงอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ เหล่านี้จึงเป็นเรื่องจำเป็น เนื่องจากเป็นความรู้พื้นฐานที่สำคัญในการกำหนดความสำเร็จหรือล้มเหลวในการปลูกพืช การเจริญเติบโตของพืชที่ปลูกด้วยวิธีไฮโดรโปนิคส์ขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ซึ่งอาจจำแนกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 3 กลุ่ม ดังนี้

2.2.5.1 พันธุกรรม เป็นปัจจัยภายในตัวพืชเองเพราะเกี่ยวข้องกับยีนซึ่งอยู่ในโครโมโซมของพืช ยีนเป็นตัวกำหนดลักษณะต่างๆ เช่น ความสูง รูปร่าง สี นอกจากนั้นยังเป็นตัวกำหนดว่าพืชจะเจริญเติบโตดี ให้ผลผลิตสูงหรือสามารถต้านทานศัตรูพืชได้ดีเพียงใด ปัจจัยทางพันธุกรรมจะมีอิทธิพลร่วมกับสภาพแวดล้อม

2.2.5.2 สารควบคุมการเจริญเติบโต ไม่ว่าการปลูกพืชด้วยวิธีดั้งเดิมหรือปลูกด้วยวิธีไฮโดรโปนิคส์ พืชมีสารควบคุมการเจริญเติบโตและการพัฒนาของส่วนต่างๆ อยู่ตลอดเวลา สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชเป็นสารอินทรีย์ ซึ่งไม่จำกัดว่าพืชสร้างขึ้นเองหรือมนุษย์สังเคราะห์ขึ้น สารปริมาณเพียงเล็กน้อยในช่วงเพียงส่วนในล้านส่วน (ppm) ก็สามารถกระตุ้นยับยั้งหรือเปลี่ยนการเจริญเติบโตของพืชได้

2.2.5.2 สภาพแวดล้อม สภาพแวดล้อมเป็นปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งการตอบสนองต่อปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ไม่ได้แตกต่างกันไม่ว่าจะปลูกพืชด้วยวิธีดั้งเดิมหรือด้วยวิธีไฮโดรโปนิคส์ ปัจจัยที่เป็นตัวควบคุมการเจริญเติบโตและการพัฒนาการของพืชมีอยู่หลายปัจจัย แต่มีปัจจัยที่สำคัญดังต่อไปนี้

2.2.5.2.1 อุณหภูมิ อุณหภูมิควบคุมอัตราการเจริญเติบโตของพืช โดยมีผลโดยตรงต่อการสังเคราะห์แสง การหายใจ การดูดซึมน้ำและการคายน้ำและกิจกรรมของเอนไซม์ต่างๆ โดยทั่วไปอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีผลในการเร่งขบวนการทางเคมีต่างๆ ในพืช ขบวนการเหล่านี้ควบคุมโดยเอนไซม์ ซึ่งจะทำงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิแคบๆ อุณหภูมิสูงหรือต่ำกว่าช่วงที่เหมาะสมจะทำให้เอนไซม์ทำงานลดลง มีผลให้ปฏิกิริยาเคมีต่างๆ ในพืชลดลงหรือหยุดไปด้วย

เมื่อถึงจุดนี้ พืชจะอยู่ในภาวะเครียดและหยุดเจริญเติบโต และอาจตายได้ในที่สุด การควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชจึงเป็นเรื่องสำคัญ สำหรับการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์ อุณหภูมิมีบทบาทสำคัญมากต่อการเจริญเติบโตของพืช เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ออกซิเจนละลายน้ำได้ลดลง ทำให้มีออกซิเจนไม่เพียงพอต่อการหายใจของราก

2.2.5.2.2 ความชื้นสัมพัทธ์ มีผลโดยตรงต่อการคายน้ำของพืช เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูงจะทำให้พืชคายน้ำน้อยลง ส่งผลให้การลำเลียงแร่ธาตุอาหารต่างๆ จากรากไปสู่ใบลดลง และยังทำให้อุณหภูมิที่ใบสูงขึ้น นอกจากนี้ความชื้นสัมพัทธ์สูงยังเป็นสาเหตุทำให้เกิดโรคบางโรคได้ง่ายอีกด้วย

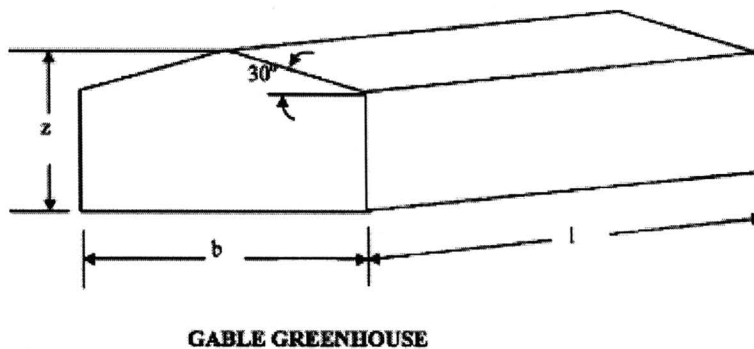
2.2.5.2.3 แสง เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตและพัฒนาการของพืช เพราะแสงเป็นปัจจัยสำคัญในการสร้างอาหารหรือการสังเคราะห์แสงของพืช โดยมีคลอโรฟิลล์เป็นตัวรับแสงไปใช้เป็นพลังงานในการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ เป็นคาร์โบไฮเดรตและออกซิเจน แสงมีคุณสมบัติ 3 ประการที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช ได้แก่ ความยาวคลื่น ความเข้มแสง และระยะเวลาที่พืชได้รับแสง คุณสมบัติที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชที่ปลูกด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์ที่สุด คือความเข้มแสง ความเข้มแสงที่มากเกินไปหรือน้อยเกินไป จะมีผลในการลดการสังเคราะห์แสงของพืช ทำให้พืชมีการเจริญเติบโตลดลง สำหรับการปลูกพืชในประเทศไทย ซึ่งอยู่ในเขตร้อน ได้รับแสงที่มีความเข้มสูง การปลูกพืชในที่โล่งจึงต้องมีการให้ร่มเงาเพื่อลดความเข้มแสง นอกจากนี้แสงยังสัมพันธ์กับอุณหภูมิคือ เมื่อแสงมีความเข้มมากขึ้นอุณหภูมิก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งในการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์จะมองข้ามความสัมพันธ์นี้ไม่ได้ เนื่องจากอุณหภูมิของสารละลายที่ใช้ปลูกพืชมีบทบาทอย่างมากต่อกิจกรรมของราก

2.2.5.2.4 องค์ประกอบของบรรยากาศ พืชต้องใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์แสง ในอากาศโดยปกติมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณร้อยละ 0.03 ซึ่งเพียงพอต่อความต้องการของพืช นอกจากนี้ในบริเวณที่มีพืชหนาแน่นคาร์บอนไดออกไซด์อาจเป็นตัวจำกัดการเจริญเติบโตของพืชได้ในเวลากลางวัน เนื่องจากมีการสังเคราะห์แสงเกิดขึ้นมาก นอกจากคาร์บอนไดออกไซด์แล้ว พืชต้องการออกซิเจนใช้ในการหายใจเพื่อเปลี่ยนพลังงานเคมีที่สะสมไว้ในรูปคาร์โบไฮเดรตเป็นพลังงานใช้ในปฏิกิริยาเคมีต่างๆ ในการปลูกพืชด้วยวิธีไฮโดรโปนิคส์นั้นส่วนที่อยู่เหนือดินมักไม่มีปัญหาการขาดออกซิเจน เนื่องจากในอากาศมีออกซิเจนอยู่ถึงร้อยละ 20 แต่ในส่วนของรากที่อยู่ในสารละลายมักเกิดปัญหาเนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช จึงต้องมีการเติมออกซิเจนในสารละลายซึ่งอาจทำได้โดยใช้ปั๊มหรือเครื่องสูบลม หรืออาจใช้ระบบหมุนเวียนสารละลาย โดยปกติควรรักษาระดับออกซิเจนในสารละลายให้อยู่ที่ 8 ppm

2.2.6 โรงเรือน (Green House)

ปกติการปลูกผักไร้ดินแบบใช้สารละลาย หรือไฮโดรโปนิคส์ ภายใต้โรงเรือนที่มีมุ้งคลุมหรือเป็นแผ่นโพลีเอทิลีน (Polyethylene film) หลังคาแบบรูปหน้าจั่ว (GABLE GREENHOUSE) ดังรูป 2.7 ที่พบเห็นกันทั่วไป โรงเรือนจะมีระบบระบายอากาศโดยใช้พัดลม เพื่อดูดอากาศออกจากโรงเรือน โดยมีระบบทำความเย็นของโรงเรือน เป็นระบบการทำ ความเย็นแบบแฝงความเย็น หรือบางโรงเรือนอาจมีระบบพ่นหมอกหรือไม่มีก็ได้ นอกจากนี้ มีการใช้

ระบบถาดโฟมปลูกผักหรือระบบรางพีวีซี เพื่อให้ น้ำไหลไปยังรากผักเพื่อผักจะได้ดูด สารอาหารและมีระบบทำความเย็นของสารอาหารด้วย



รูป 2.7 โรงเรือน (Gupta and Chandra, 2002)

ระบบทำความเย็นของโรงเรือนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ระบบ ดังนี้

2.2.6.1 ระบบทำความเย็นแบบแฝงความเย็น (Evaporative Cooling System)

การทำความเย็นภายในโรงเรือน จะใช้พัดลมดูดอากาศผ่านระบบทำความเย็นแบบแฝงความเย็น (ซึ่งเป็นแบบน้ำเย็นไหลผ่านแผงทำความเย็น) ดังรูป 2.8 และ รูป 2.9 เข้ามาภายในโรงเรือน โดยเมื่ออากาศจากภายนอกโรงเรือนที่มีอุณหภูมิสูง ผ่านแผงทำความเย็น อุณหภูมิของอากาศจะลดลง เนื่องจากน้ำดูดซับความร้อนจากอากาศไปเมื่อผ่านแผงทำความเย็น ทำให้อุณหภูมิภายในโรงเรือนลดลง และพัดลมที่ดูดอากาศนี้ เป็นปัจจัยหลักของการใช้พลังงานไฟฟ้าของโรงเรือนโดยการถ่ายเทความร้อนของระบบทำความเย็นแบบแฝงความเย็น ดังรูป 2.9 และรูป 2.10 สามารถหาได้ ดังนี้

$$m_e = m_a (W_2 - W_1) = h_M A_s \Delta \rho_v \quad (2.20)$$

$$q = \rho_a c_{pa} Q (T_1 - T_2) + \rho_a Q (W_1 (h_{g1} - h_{g2}) - W_2 (h_{g2} - h_{gwb})) \quad (2.21)$$

หรือ

$$q = h_H A_s \Delta T_{ln} \quad (2.22)$$

เมื่อ

m_e	คือ อัตราการระเหยของน้ำ, (kg/h)
m_a	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, (kg/h)
ρ_a	คือ ความหนาแน่นของอากาศ, (kg/m ³)
A_s	คือ พื้นที่ผิวรวมของแผง, (m ²)
h_H	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, (W/m ² K)
h_M	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายมวล, (m/h)
h_{g1}	คือ เอนทาลปีขาเข้าของไอน้ำอิ่มตัว, (kJ/kg)
h_{g2}	คือ เอนทาลปีขาออกของไอน้ำอิ่มตัว, (kJ/kg)
h_{gwb}	คือ เอนทาลปีของไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศเข้า, (kJ/kg)
W_1	คือ สัดส่วนความชื้นต่ออากาศแห้งทางเข้า, (kg _w /kg _a)
W_2	คือ สัดส่วนความชื้นอากาศแห้งทางออก, (kg _w /kg _a)
T_1	คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งทางเข้า, (°C)
T_2	คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งทางออก, (°C)
c_p	คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง, (kJ/kg K)
q	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน, (W)
Q	คือ อัตราการไหลอากาศเชิงปริมาตร, (m ³ /h)

$\Delta T_{\ln}$ คือ ความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยลอการิทึมสำหรับอุณหภูมิน้ำค้างที่,
(°C)

$$\Delta T_{\ln} = \frac{(T_2 - T_1)}{\ln((T_2 - T_{wb})/(T_1 - T_{wb}))}$$

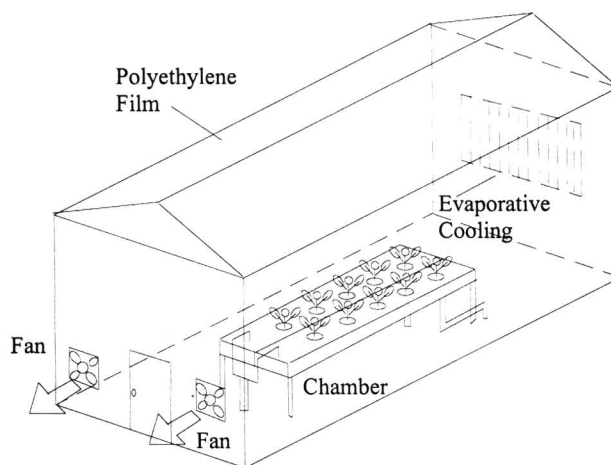
T_{wb} คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียก, (°C)

$$\Delta \rho_v = \frac{(\rho_{v2} - \rho_{v1})}{\ln((\rho_{v2} - \rho_{wb})/(\rho_{v1} - \rho_{wb}))}$$

ρ_{wb} คือ ความหนาแน่นของไอน้ำที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก, (kg/m³)

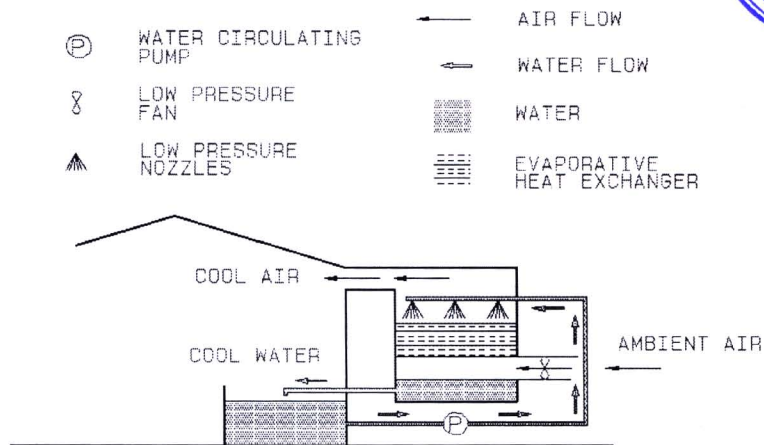
ρ_{v1} คือ ความหนาแน่นของไอน้ำในกระแสนอากาศก่อนเข้าแผงทำความเย็น,
(kg/m³)

ρ_{v2} คือ ความหนาแน่นของไอน้ำในกระแสนอากาศหลังผ่านแผงทำความเย็น, (kg/m³)

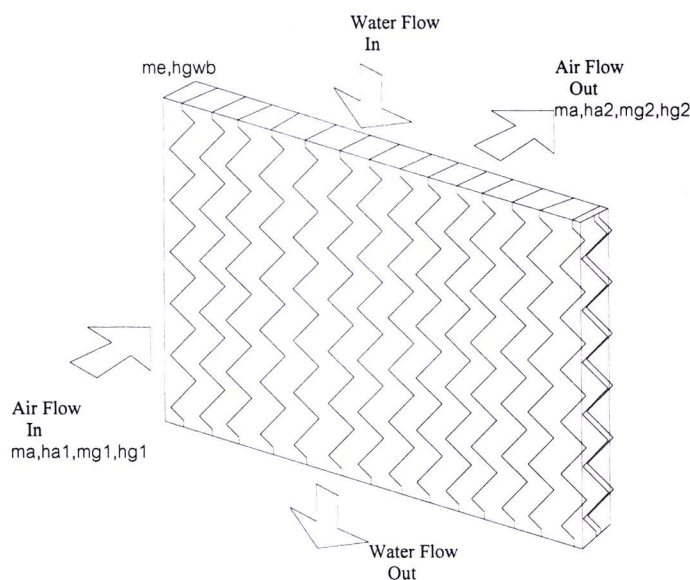


รูป 2.8 โรงเรือนระบบปลูกพืชไฮโดรโปนิคส์และระบบทำความเย็น

(Srihajong et al., 2005)



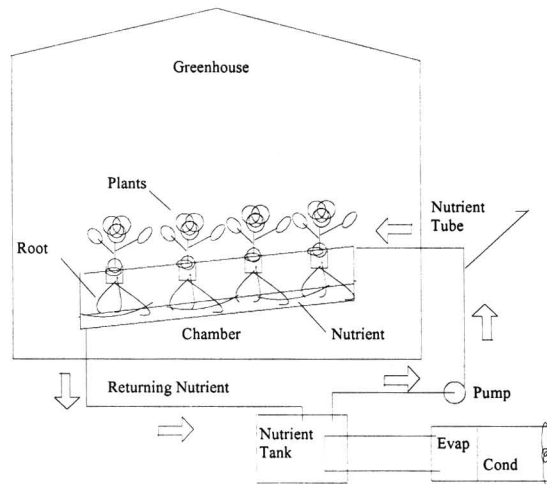
รูป 2.9 ระบบทำความเย็นแบบแผงความเย็นหรือ Pad System (Baird ,1993)



รูป 2.10 วงจรระบบทำความเย็นแบบแผงความเย็นหรือ Pad System (Chung-Min Liao, 2002)

2.2.6.2 ระบบทำความเย็นสารอาหาร (Nutrient Refrigeration System)

เมื่อสารอาหารไหลผ่านรางปลูกพืชและยังได้รับความร้อนจากแสงแดด แล้วดังรูป 2.11 อุณหภูมิของสารอาหารจะสูงขึ้น และไหลกลับไปยังถังเก็บ เพื่อลดอุณหภูมิของสารอาหารลง จึงใช้ระบบทำความเย็นในการลดอุณหภูมิของสารอาหาร ซึ่งเป็นปัจจัยหลักของการใช้พลังงานทางไฟฟ้าของระบบทำความเย็นสารอาหาร



รูป 2.11 ระบบทำความเย็นของสารอาหารพืช (Srihajong et al., 2005)

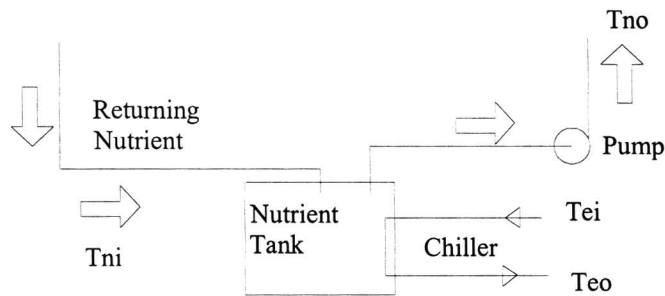
โดยการถ่ายเทความร้อนของระบบทำความเย็นของสารอาหาร สามารถหาได้ ดังนี้

2.2.6.2.1 การถ่ายเทความร้อนระหว่างสารอาหารและส่วนทำระเหย

(Heat Transfer Between Nutrient and Evaporator section) ดังรูป 2.12

$$Q_e = \frac{U_e A_e ((T_{ni} - T_{eo}) - (T_{no} - T_{ei}))}{\ln[(T_{ni} - T_{eo}) / (T_{no} - T_{ei})]} \quad (2.23)$$

- เมื่อ Q_e คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ส่วนทำระเหย, (W)
 U_e คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่ส่วนทำระเหย, (W/m²°C)
 A_e คือ พื้นที่การถ่ายเทความร้อนที่ส่วนทำระเหย, (m²)
 T_{ei} คือ อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ทางเข้า, (°C)
 T_{eo} คือ อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ทางออก, (°C)
 T_{ni} คือ อุณหภูมิของสารอาหารที่ทางเข้า, (°C)
 T_{no} คือ อุณหภูมิของสารอาหารที่ทางออก, (°C)



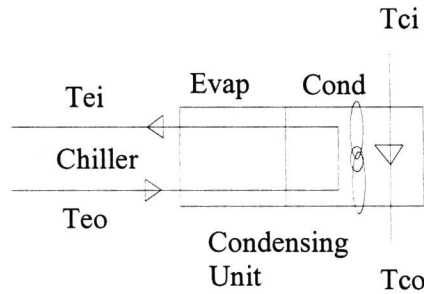
รูป 2.12 การถ่ายเทความร้อนของสารอาหาร (Srihajong et al., 2005)

2.2.6.2.2 การถ่ายเทความร้อนระหว่างสารทำความเย็น (Heat Transfer Between Refrigerant) ดังรูป 2.13

$$Q_c = \frac{U_c A_c ((T_{ei} - T_{co}) - (T_{eo} - T_{ci}))}{\ln[(T_{ei} - T_{co}) / (T_{eo} - T_{ci})]} \quad (2.24)$$

เมื่อ

- Q_c คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ส่วนควบแน่น, (W)
- U_c คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่ส่วนควบแน่น, (W/m²°C)
- A_c คือ พื้นที่การถ่ายเทความร้อนที่ส่วนควบแน่น, (m²)
- T_{ei} คือ อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ทางเข้าส่วนทำระเหย, (°C)
- T_{co} คือ อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ทางออกส่วนทำระเหย, (°C)
- T_{ci} คือ อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ทางเข้าส่วนควบแน่น, (°C)
- T_{co} คือ อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ทางออกส่วนควบแน่น, (°C)

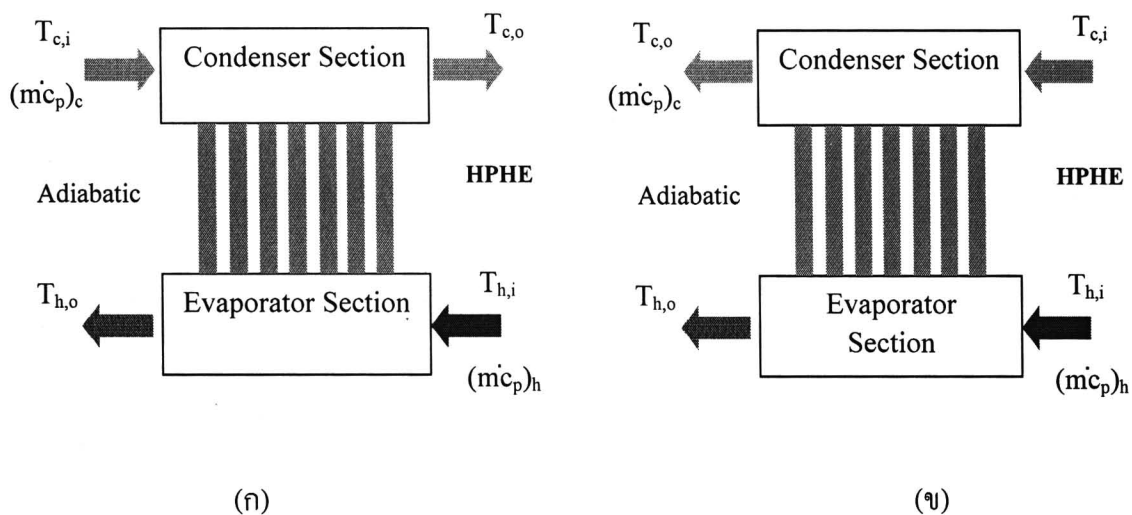


รูป 2.13 การถ่ายเทความร้อนของสารทำความเย็น (Srihajong et al., 2005)

2.2.7 ค่าประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อน (HPHE) เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดหนึ่งที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลร้อนกับของไหลเย็น โดยอาศัยท่อความร้อนที่มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนสูง เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อนจะมีลักษณะดังรูป 2.14 ประกอบด้วยท่อความร้อนเรียงกันอยู่เป็นแถวอยู่ภายในตัวเครื่อง ท่อความร้อนที่ใช้สามารถเลือกใช้ได้ทั้งท่อความร้อนแบบมีวัสดุพอรุนและท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

ปริมาณของการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อน และการกระจายอุณหภูมิของของไหลร้อนและของไหลเย็นเป็นดังแสดงในรูป 2.14 รูป 2.15 และรูป 2.16 ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูป 2.14 แสดงลักษณะการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อน

(ก)แบบไหลสวนทาง (ข) แบบไหลตามกัน

2.2.7.1 การส่งถ่ายความร้อนของ HPHE แบบไหลสวนทาง

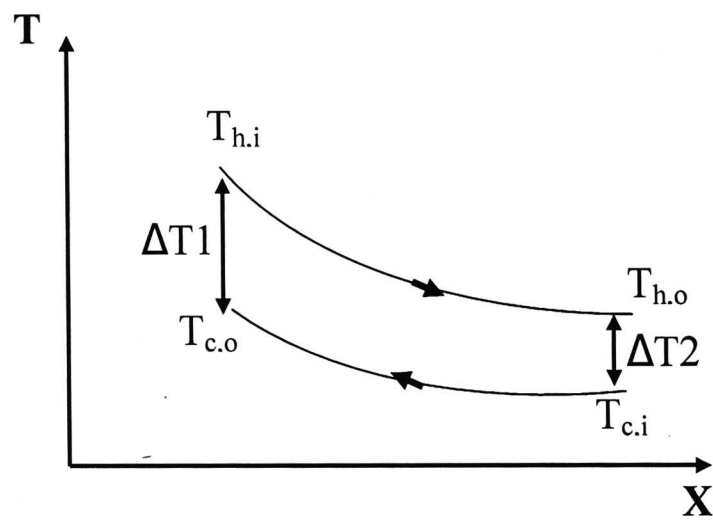
จากรูป 2.14 (ก) ของไหลร้อนจะไหลเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อนส่วนล่างและของไหลเย็นจะไหลเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อนที่ส่วนบนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จากรูป 2.15 จะเห็นได้ว่าการกระจายอุณหภูมิของของไหลร้อนจะมีค่าลดลงเมื่อระยะทางในการแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้นและการกระจายอุณหภูมิของไหลเย็นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางในการแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการส่งถ่ายความร้อนจากของไหลร้อนผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระบายความร้อนให้แก่ของไหลเย็น ซึ่งการคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ของไหลสองชนิดไม่ปนกันสามารถคำนวณได้ตามสมการ

พิจารณาค่าการส่งถ่ายความร้อนด้านของไหลเย็น

$$Q_c = (\dot{m}c_p)_c (T_{c,o} - T_{c,i}) \tag{2.25}$$

พิจารณาค่าการส่งถ่ายความร้อนด้านของไหลร้อน

$$Q_h = (\dot{m}c_p)_h (T_{h,i} - T_{h,o}) \tag{2.26}$$



รูป 2.15 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทาง

(Frank P. Incropera, Fundamentals of heat and mass transfer, 1996)

จะเห็นว่าสมการข้างต้นจะพิจารณาเฉพาะการส่งถ่ายความร้อนแต่ละกระแสน้ำของไหล ดังนั้นในการที่จะพิจารณาถึงการส่งถ่ายความร้อนสองกระแสน้ำรวมกันจึงต้องมีวิธีการคิดค่าการส่งถ่ายความร้อนจากทั้งสองกระแสน้ำคือพิจารณาถึงความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ย Logarithmic Mean Temperature Difference (LMTD) เพื่อใช้ควบคุมการส่งถ่ายความร้อนของแต่ละกระแสน้ำให้สอดคล้องกันซึ่งเป็นสภาวะที่เกิดการส่งถ่ายความร้อนจริง

$$Q = UA\Delta T_{LM} \quad (2.27)$$

เมื่อ

$$\Delta T_{LM} = \frac{[(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})]}{\ln \left[\frac{(T_{h,i} - T_{c,o})}{(T_{h,o} - T_{c,i})} \right]}$$

ค่าประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือ ค่าที่บอกถึงการส่งถ่ายความร้อนว่าสามารถส่งถ่ายความร้อนได้มากน้อยแค่ไหน ซึ่งสามารถหาได้ดังสมการ

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{\max}} \quad (2.28)$$

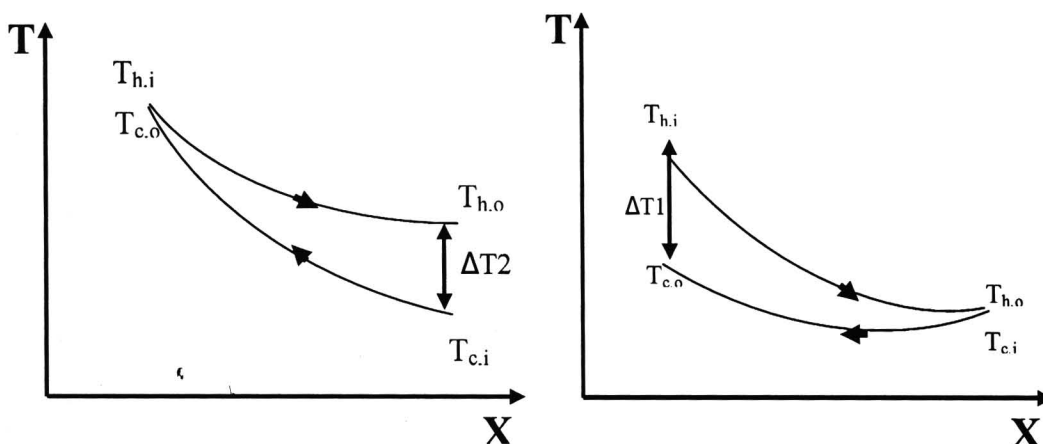
เมื่อ

Q คือ ค่าการส่งถ่ายความร้อนที่สามารถทำได้

$Q_{\max}$ คือ ค่าการส่งถ่ายความร้อนที่สามารถทำได้มากที่สุด

$Q_{\max}$ นั้นสามารถพิจารณาได้สองกรณีคือ เมื่อค่า $(\dot{m}c_p)_c < (\dot{m}c_p)_h$ ซึ่งทำให้ผลต่างของ $(T_{c,o} - T_{c,i}) > (T_{h,i} - T_{c,o})$ จากรูป 2.16 (ก) เมื่อระยะทางการแลกเปลี่ยนความร้อนมากๆ (x เข้าใกล้ระยะอนันต์) จะทำให้ $(T_{c,o} = T_{h,i})$ ดังนั้นจากสมการ (2.25) จะได้

$$Q_{\max} = (\dot{m}c_p)_c (T_{h,i} - T_{c,i}) \quad (2.29)$$



รูป 2.16 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทาง

$$(ก) (\dot{m}c_p)_c < (\dot{m}c_p)_h \quad (ข) (\dot{m}c_p)_h < (\dot{m}c_p)_c$$

(Frank P. Incropera, Fundamentals of heat and mass transfer, 1996)

และเมื่อค่า $(\dot{m}c_p)_h < (\dot{m}c_p)_c$ ซึ่งทำให้ผลต่างของ $(T_{h,i} - T_{h,o}) > (T_{c,o} - T_{c,i})$ จากรูป 2.16 (ข) เมื่อระยะทางการแลกเปลี่ยนความร้อนมากๆ (x เข้าใกล้ระยะอนันต์) จะทำให้ $(T_{h,o} = T_{c,i})$ ดังนั้นจากสมการ (2.26) จะได้

$$Q_{\max} = (\dot{m}c_p)_h (T_{h,i} - T_{c,i}) \quad (2.30)$$

ดังนั้นสามารถเขียน $Q_{\max}$ ได้ดังนี้

$$Q_{\max} = (\dot{m}c_p)_{\min} (T_{h,i} - T_{c,i}) \quad (2.31)$$

ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้านของไหลเย็นสามารถหาดังสมการ

$$\mathcal{E}_c = \frac{(\dot{m}c_p)_c (T_{c,o} - T_{c,i})}{(\dot{m}c_p)_{\min} (T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (2.32)$$

ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้านของไหลร้อนสามารถหาได้ดัง
สมการ

$$\mathcal{E}_h = \frac{(\dot{m}c_p)_h (T_{h,i} - T_{h,o})}{(\dot{m}c_p)_{\min} (T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (2.33)$$

2.2.7.2 การส่งถ่ายความร้อนของ HPHE แบบไหลตามกัน

จากรูป 2.14 (ข) ของไหลร้อนจะไหลเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อนส่วนล่างและของไหลเย็นจะไหลเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อนที่ส่วนบนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จากรูป 2.17 จะเห็นได้ว่าการกระจายอุณหภูมิของของไหลร้อนจะมีค่าลดลงเมื่อระยะทางในการแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้นและการกระจายอุณหภูมิของไหลเย็นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางในการแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการส่งถ่ายความร้อนจากของไหลร้อนผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระบายความร้อนให้แก่ของไหลเย็น ซึ่งการคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ของไหลสองชนิดไม่ปนกันสามารถคำนวณได้ตามสมการ

พิจารณาค่าการส่งถ่ายความร้อนด้านของไหลเย็น

$$Q_c = (\dot{m}c_p)_c (T_{c,i} - T_{c,o}) \quad (2.34)$$

พิจารณาค่าการส่งถ่ายความร้อนด้านของไหลร้อน

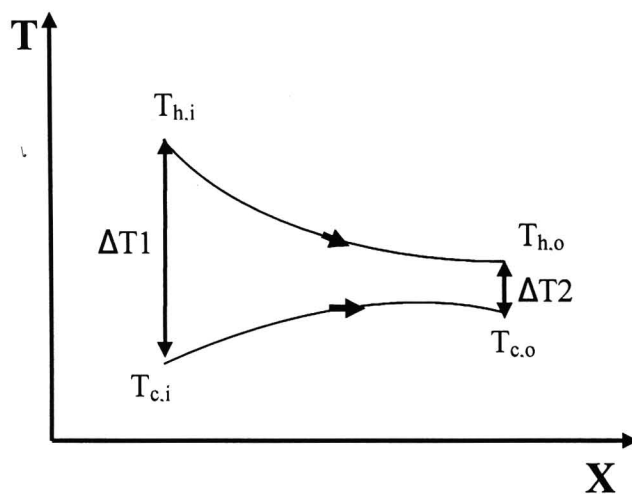
$$Q_h = (\dot{m}c_p)_h (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (2.35)$$

ในทำนองเดียวกันกับการพิจารณาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทางจะได้ค่าการส่งถ่ายความร้อนโดยวิธีการพิจารณาความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ย Logarithmic Mean Temperature Difference (LMTD) ได้ดังสมการ

$$Q = UA\Delta T_{LM} \quad (2.36)$$

เมื่อ

$$\Delta T_{LM} = \frac{[(T_{h,i} - T_{c,i}) - (T_{h,o} - T_{c,o})]}{\ln \left[\frac{(T_{h,i} - T_{c,i})}{(T_{h,o} - T_{c,o})} \right]}$$



รูป 2.17 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตามกัน

(Frank P. Incropera, Fundamentals of heat and mass transfer, 1996)

ค่าประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือ ค่าที่บอกถึงการส่งถ่ายความร้อนว่าสามารถส่งถ่ายความร้อนได้มากน้อยแค่ไหน ซึ่งสามารถหาได้ดังสมการ

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{\max}} \quad (2.37)$$

เมื่อ Q คือ ค่าการส่งถ่ายความร้อนที่สามารถทำได้
 $Q_{\max}$ คือ ค่าการส่งถ่ายความร้อนที่สามารถทำได้มากที่สุด

ในทำนองเดียวกันกับการพิจารณาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทาง จะได้ค่าการส่งถ่ายความร้อนที่สามารถทำได้มากที่สุด ดังนี้

$$Q_{\max} = (\dot{m}c_p)_{\min} (T_{h,i} - T_{c,i}) \quad (2.38)$$

ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้านของไหลเย็นสามารถหาได้ดัง

สมการ

$$\mathcal{E}_c = \frac{(\dot{m}c_p)_c (T_{c,o} - T_{c,i})}{(\dot{m}c_p)_{\min} (T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (2.39)$$

ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้านของไหลร้อนสามารถหาได้ดัง

สมการ

$$\mathcal{E}_h = \frac{(\dot{m}c_p)_h (T_{h,i} - T_{h,o})}{(\dot{m}c_p)_{\min} (T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (2.40)$$

2.2.8 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

การออกแบบชุดท่อความร้อนต้องพิจารณาถึงหลักเกณฑ์ทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.2.8.1 จุดคุ้มทุน (Breakeven Point)

จุดคุ้มทุน คือ จุดที่รายได้มีค่าเท่ากับรายจ่าย หรือจุดที่มีกำไรเท่ากับศูนย์

$$N^* = \frac{F}{p - v} \quad (2.41)$$

เมื่อ

N^* คือ ปริมาณที่จุดคุ้มทุนพอดี

F คือ ต้นทุนคงที่ (Fix Cost)

v คือ ต้นทุนแปรผันต่อหน่วย

2.2.8.2 วิธีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value Method)

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ คือ จำนวนผลประโยชน์สุทธิที่ได้รับตลอดระยะเวลาของโครงการ อาจจะมีค่าเป็นบวกหรือลบหรือศูนย์ได้ ขึ้นอยู่กับขนาด (magnitude) ของมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์รวม (PVB) หักออกด้วยมูลค่าปัจจุบันของต้นทุนรวม (PVC) ของโครงการนั้นสามารถหาได้ดังนี้

$$NPV = PVB - PVC \tag{2.42}$$

โดยที่

$$PVB = \sum_{t=1}^m \frac{B_t}{(1+r)^t}$$

โดยที่

$$PVC = \sum_{t=1}^k \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

ดังนั้น

$$NPV = \sum_{t=1}^m \frac{B_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=1}^k \frac{C_t}{(1+r)^t} \tag{2.43}$$

โดย

- t คือ ปี
- m คือ อายุของโครงการ
- k คือ ระยะเวลาในการก่อสร้างระบบ
- r คือ อัตราดอกเบี้ยหรืออัตราคิดลดที่เหมาะสม
- B_t คือ ผลประโยชน์ของโครงการในปีที่ t
- C_t คือ ค่าใช้จ่ายในการลงทุนของโครงการในปีที่ t

การตัดสินใจ

- ถ้า NPV เป็นบวกโครงการยอมรับได้
- ถ้า NPV เป็นลบโครงการยอมรับไม่ได้

2.2.8.3 วิธีระยะเวลาคืนทุน (Payback Period Method, PB)

ระยะเวลาคืนทุน คือ ระยะเวลาที่กระแสเงินสดรับสุทธิจากการลงทุนมีจำนวนเท่ากับกระแสเงินสดจ่ายลงทุนสุทธิตอนเริ่มโครงการ การคำนวณระยะเวลาคืนทุน สามารถหาได้ดังนี้

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = (\text{เงินลงทุนสุทธิ}) / (\text{รายได้รับสุทธิรายปี}) \quad (2.44)$$

2.2.8.4 วิธีอัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return Method, IRR)

อัตราผลตอบแทนภายใน คือ ผลตอบแทนเป็นร้อยละต่อโครงการ หรือหมายถึงอัตราดอกเบี้ยในกระบวนการคิดลดที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของโครงการมีค่าเท่ากับ 0 ณ จุดนี้จำเป็นต้องอธิบายเพิ่มเติมถึงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราดอกเบี้ยกับขนาดของมูลค่าปัจจุบันสุทธิ ถ้าอัตราดอกเบี้ยระดับหนึ่งที่ใช้ในกระบวนการคิดลดแล้วทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิมีค่าลดลงแล้วทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิมีค่าเป็นบวก อัตราดอกเบี้ยระดับใหม่ที่สูงกว่าจะทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิมีค่าลดลง และลดลงต่อไปตราบเท่าที่อัตราดอกเบี้ยยังคงเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ ในที่นี้จะมีอัตราดอกเบี้ยระดับหนึ่งที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิมีค่าเท่ากับ 0 พอดี ซึ่งก็คือ อัตราผลตอบแทนภายในโครงการ เมื่อกำหนดให้ r คืออัตราผลตอบแทนภายในโครงการ และค่าของ r จะสามารถหาได้จากการแก้สมการข้างล่างนี้

$$\sum_{t=1}^n \frac{(B_t - C_t)}{(1 + r)^t} = 0 \quad (2.45)$$

โดย

- t คือ ปี
- r คือ อัตราดอกเบี้ยหรืออัตราคิดลดที่เหมาะสม
- B_t คือ ผลประโยชน์ของโครงการในปีที่ t
- C_t คือ ค่าใช้จ่ายในการลงทุนของโครงการในปีที่ t

หลักการตัดสินใจที่แสดงว่าโครงการมีค่าความเหมาะสมและคุ้มค่าทางด้านเศรษฐกิจและด้านการเงินหรือไม่นั้น ให้พิจารณาจากอัตราผลตอบแทนภายในโครงการคือ เมื่ออัตราผลตอบแทนภายในโครงการสูงกว่าค่าเสียโอกาสของทุน

2.2.8.5 วิธีอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (Benefit-Cost Ratio, BCR)

อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน คือ มูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์หารด้วยมูลค่าปัจจุบันของต้นทุนรวม ผลประโยชน์จะเกิดขึ้นตลอดอายุทางเศรษฐกิจของโครงการ ถึงแม้ว่าการลงทุนโครงการผ่านพ้นไปแล้ว ในขณะที่ต้นทุนการก่อสร้างจะเกิดขึ้นเฉพาะในการลงทุนเท่านั้น ส่วนต้นทุนที่อยู่ในรูปค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน ซ่อมแซมบำรุงรักษาและบำรุงทดแทนอุปกรณ์ที่เสื่อมสภาพ จะเกิดขึ้นตลอดอายุทางเศรษฐกิจของโครงการ จากนั้นจะนำเอากระแสผลประโยชน์และกระแสต้นทุนของโครงการที่ได้ปรับค่าไปตามเวลาหรือคิดเป็นมูลค่าปัจจุบันแล้วมาเปรียบเทียบกับกันเพื่อหาอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุนดังนี้

$$BCR = \frac{PVB}{PVC}$$

ดังนั้น

$$BCR = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}} \quad (2.46)$$

โดย

- t คือ ปี
- r คือ อัตราดอกเบี้ยหรืออัตราคิดลดที่เหมาะสม
- B_t คือ ผลประโยชน์ของโครงการในปีที่ t
- C_t คือ ค่าใช้จ่ายในการลงทุนของโครงการในปีที่ t

หลักการตัดสินใจที่แสดงว่าโครงการมีค่าความเหมาะสมและคุ้มค่าทางด้านเศรษฐกิจและด้านการเงินหรือไม่นั้น ให้พิจารณาจากอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุนคือ เมื่ออัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุนมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1

2.2.8.6 มูลค่ากำไรสุทธิ (Net saving)

ในการออกแบบในงานวิศวกรรมหรือโครงสร้างต่างๆ รวมถึงงานวิจัยทั่วไป จำเป็นต้องตัดสินใจออกแบบและสร้างเพื่อให้เกิดประโยชน์มากที่สุดประหยัดงบประมาณที่สุด

ดังนั้นในการออกแบบจริงจำเป็นต้องนำเอาหลักการทางด้านเศรษฐศาสตร์มาช่วยในการตัดสินใจเพื่อให้การออกแบบและสร้างนั้นเกิดประโยชน์มากที่สุดและเสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด ดังนั้นจึงได้มีงานวิจัยการประมาณมูลค่ากำไรสุทธิ (Net saving) ที่ได้จากการสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่างๆ ไป (Soylemez et al., 2003) สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการประยุกต์สมการของ Soylemez et al., 2003 มาใช้เพื่อหามูลค่ากำไรสุทธิในการออกแบบสร้างท่อความร้อนไว้ดังสมการต่อไปนี้

$$S = C_E H Q - C_{HP} \quad (2.47)$$

เมื่อ

S คือ มูลค่ากำไรสุทธิ (บาท)

C_E คือ ราคาของพลังงานความร้อนที่สามารถถ่ายเทได้ (บาท/Wh)

H คือ อายุการทำงานของท่อความร้อน (hr)

Q คือ อัตราความร้อนที่สามารถถ่ายเทได้ (W)

C_{HP} คือ ราคาชุดท่อความร้อน (บาท)

หรือ

$$S = \frac{(P_1)(Diesel)}{CE} (H)(Heat_rate) - (1 - R_v(1+d)^{-Year})(Cu_tube_price) \quad (2.48)$$

เมื่อ

$$Cu_tube_price = (Cu_price + weld_Cu + Cap_Cu + WF_price)(tube) \quad (2.49)$$

เมื่อ

P_1 คือ ปี (year)

$Diesel$ คือ น้ำมันดีเซล (Baht / liter)

CE คือ ค่าการทำความร้อน (MJ / liter)

H คือ อายุการใช้งาน (hrs / year)

$Heat_rate$ คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (Watt)

R_v คือ resale value (%)

d คือ อัตราดอกเบี้ย (%)
Year คือ ปี (year)
Cu_tube_price คือ ราคาสร้างท่อความร้อน (Baht)
Cu_price คือ ราคาท่อทองแดง (Baht)
weld_Cu คือ ราคาเชื่อมท่อ (Baht)
Cap_Cu คือ ราคาฝาปิดท่อ (Baht)
WF_price คือ ราคาสารทำงาน (Baht / kg)
tube คือ จำนวนท่อ (ท่อ)