

บทที่ 4

การสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับช่วยคำนวณ

การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับทำความสะอาด และวิธีป้องกันการกัดกร่อนที่เหมาะสมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนต่างเป็นฟังก์ชันของเวลาซึ่งมีความซับซ้อนมากในเชิงการคำนวณจำเป็นต้องมีโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยลดเวลาในการคำนวณ ดังนั้นการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ได้สร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ 2 โปรแกรม คือ โปรแกรมออกแบบป้องกันการกัดกร่อน โดยที่ภายในโปรแกรมจะประกอบด้วย การหาราคาที่จ่ายสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนซึ่งรวมถึงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการทำความสะอาดและค่าสูญเสียจากฟาวลิง โปรแกรมที่สองคือโปรแกรมแนะนำวิธีที่ป้องกันการกัดกร่อนที่เหมาะสมสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน ซึ่งมีรายละเอียดเกี่ยวกับโปรแกรมดังนี้

4.1 ข้อกำหนดภายในโปรแกรม

4.1.1 สภาพะการทำงาน of เครื่องแลกเปลี่ยน

ก. คำนวณความร้อนสูญเสียและการกัดกร่อนของท่อเทอร์โมไซฟอนในส่วนด้านในและส่วนที่สัมผัสไอร้อนทั้ง

ข. ไอร้อนทั้งได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมระหว่างน้ำมันเตาเกรด A และน้ำมันดีเซลโดยผสมกับน้ำมันดีเซล 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

ค. อุณหภูมิการใช้งานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอยู่ในช่วง 150 – 250 องศาเซลเซียส

ง. ลักษณะของการวางของท่อในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนเป็นแบบสลับแถว

4.1.2 ลักษณะของท่อและวัสดุที่ใช้ทำท่อเทอร์โมไซฟอน

เนื่องจากเงื่อนไขของอุณหภูมิการใช้งานของเครื่องแลกเปลี่ยนในสภาวะการทำงานที่ 225 องศาเซลเซียส วัสดุที่เหมาะสมในการใช้งานนี้ได้แสดงในตาราง 4.1 มีทั้งท่อธรรมดาและท่อคิกครีป ลักษณะของครีปเป็นแบบกลมยาวจากเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อ 10 มม. วัสดุที่ใช้ทำครีปเป็นชนิดเดียวกับวัสดุที่ใช้ทำท่อ

ตาราง 4.1 ค่าการนำความร้อนของวัสดุ

ที่มา : Frank (1990)

ชนิดท่อ	ค่าการนำความร้อนของวัสดุ(W/m-K)
ท่อเหล็ก	63.28
ท่อทองแดง	373.58
ท่ออะลูมิเนียม	233.15
ท่อเหล็กครีปเหล็ก	63.28
ท่อทองแดงครีปทองแดง	373.58
ท่ออะลูมิเนียมครีปอะลูมิเนียม	233.15

4.1.3 การป้องกันการกัดกร่อน

ก.ป้องกันการกัดกร่อนภายนอกโดยการเคลือบสีทนความร้อนหนา 0.3 มม.

ข.ป้องกันการกัดกร่อนภายนอกโดยการเคลือบอีพอกซีที่ความหนา 0.19 มม.

ค.ป้องกันการกัดกร่อนภายในโดยการเติมสารยับยั้งการกัดกร่อน โซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟตลงในสารทำงาน ปริมาณ 20 ppm.

ง.ป้องกันการกัดกร่อนภายในโดยการเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

จ.ป้องกันการกัดกร่อนภายนอกโดยการเคลือบสีทนความร้อนหนา 0.3 มม. พร้อมทั้งป้องกันการกัดกร่อนภายในโดยการเติมสารยับยั้งการกัดกร่อนโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟตลงในสารทำงาน ปริมาณ 20 ppm.

ฉ.ป้องกันการกัดกร่อนภายนอกโดยการเคลือบสีทนความร้อนหนา 0.3 มม. พร้อมทั้งป้องกันการกัดกร่อนภายในโดยการเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ช.ป้องกันการกัดกร่อนภายนอกโดยการเคลือบอีพอกซีที่ความหนา 0.19 มม. พร้อมทั้งป้องกันการกัดกร่อนภายในโดยการเติมสารยับยั้งการกัดกร่อนโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟตลงในสารทำงาน ปริมาณ 20 ppm.

ซ. ป้องกันการกัดกร่อนภายนอกโดยการเคลือบอีพอกซีที่ความหนา 0.19 มม. พร้อมทั้งป้องกันการกัดกร่อนภายในโดยการเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.1.4 ขนาดของท่อ

ขนาดของท่อที่ใช้ในโปรแกรมแสดงในตาราง 4.2

ตาราง 4.2 ขนาดของท่อที่ใช้ในโปรแกรม

ชนิดท่อ					
เหล็ก		ทองแดง		อะลูมิเนียม	
OD	ID	OD	ID	OD	ID
17.15	13.84	15.875	13.843	15.878	13.843
21.34	15.79	19.05	16.7	19.05	16.65
26.67	20.79	22.225	19.939	-	-
33.4	26.67	28.575	26.035	-	-

4.1.5 สารทำงานที่ใช้ในเทอร์โมไซฟอน

เมื่อพิจารณาถึงข้อจำกัดเกี่ยวกับอุณหภูมิการใช้งานของเครื่องแลกเปลี่ยนพบว่าสารทำงานที่เหมาะสมสำหรับอุณหภูมิ 225 องศาเซลเซียส ได้แก่

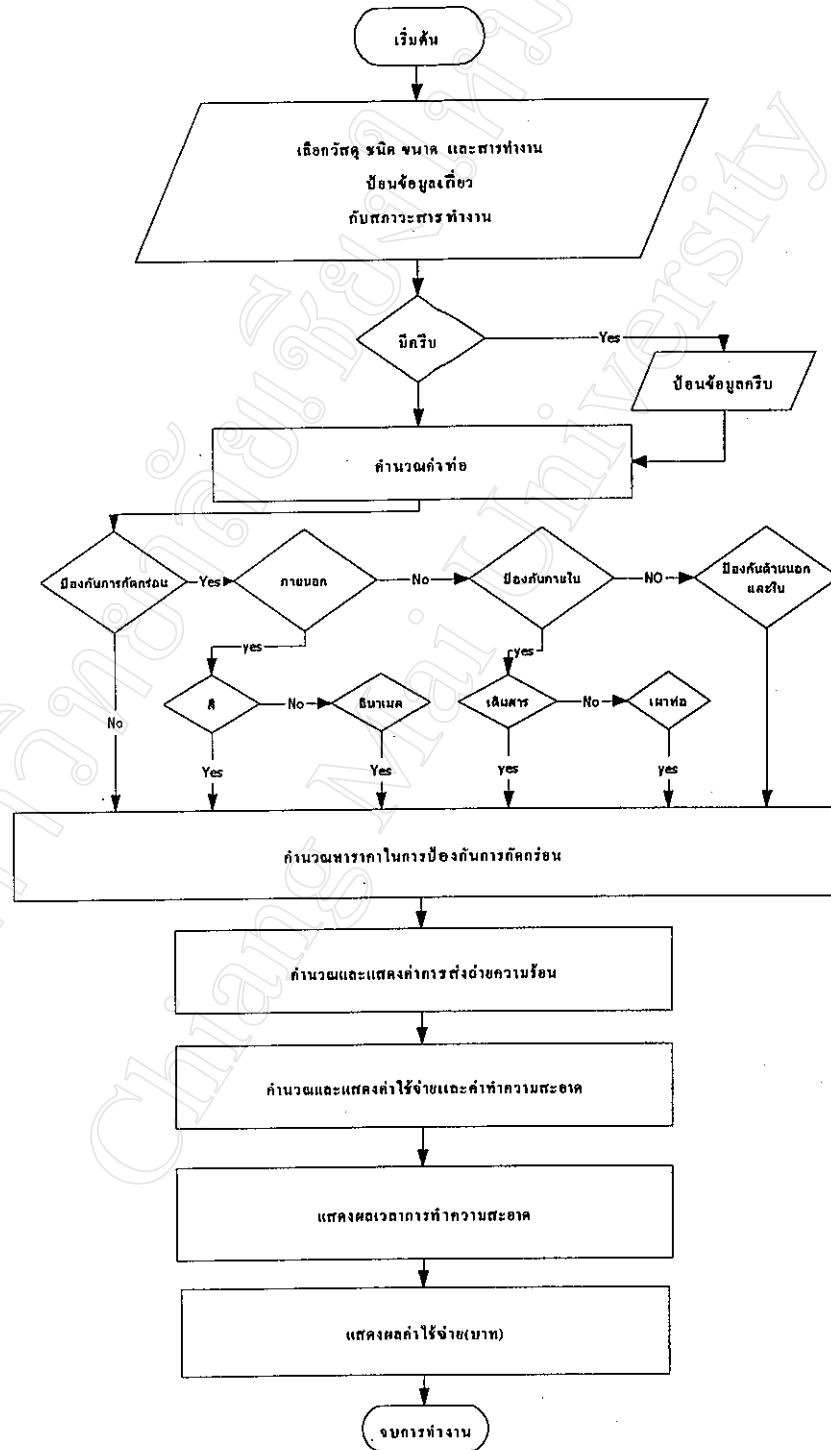
ก. น้ำ

ข. แอมโมเนีย

ค. อะซิโตน

4.2 โปรแกรมออกแบบป้องกันการกักร้อน

การคำนวณของโปรแกรมการออกแบบป้องกันการกักร้อนที่เหมาะสมสามารถแสดงได้ดังรูป 4.1 และผลจากโปรแกรมนี้ได้แสดงไว้ในภาคผนวก



รูปที่ 4.1 แสดงผังการคำนวณของโปรแกรมออกแบบป้องกันการกักร้อน
ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

เริ่มจากการเลือกวัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมไซฟอน สารทำงาน และขนาดของท่อ จากนั้นกำหนดสภาวะการทำงานสำหรับใช้ในการคำนวณเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนแสดงดังตาราง 4.3

ตาราง 4.3 ข้อมูลเกี่ยวกับสภาวะการทำงานและขนาดของเทอร์โมไซฟอน
ที่ใช้ใน โปรแกรม

ข้อมูลที่ต้องใช้ในการคำนวณกับเทอร์โมไซฟอน	หน่วย
อุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้า	เซลเซียส
อุณหภูมิก๊าซร้อนขาออก	เซลเซียส
ความยาวทั้งหมด	เมตร
ความยาวส่วนทำระเหย	เมตร
ความยาวส่วนควบแน่น	เมตร
จำนวนท่อทั้งหมด	ท่อ
จำนวนท่อด้านที่รับไอเสียร้อน (Np)	ท่อ
ความเร็วก๊าซร้อนขาเข้า	เมตร/วินาที
อัตราไหลของน้ำเย็น	ลิตร/นาที
ระยะห่างของท่อด้านข้าง (SI)	เมตร
ระยะห่างของท่อด้านรับไอเสียร้อน (SI)	เมตร
เวลาการทำงานทั้งหมดของเครื่องแลกเปลี่ยน	ชั่วโมง

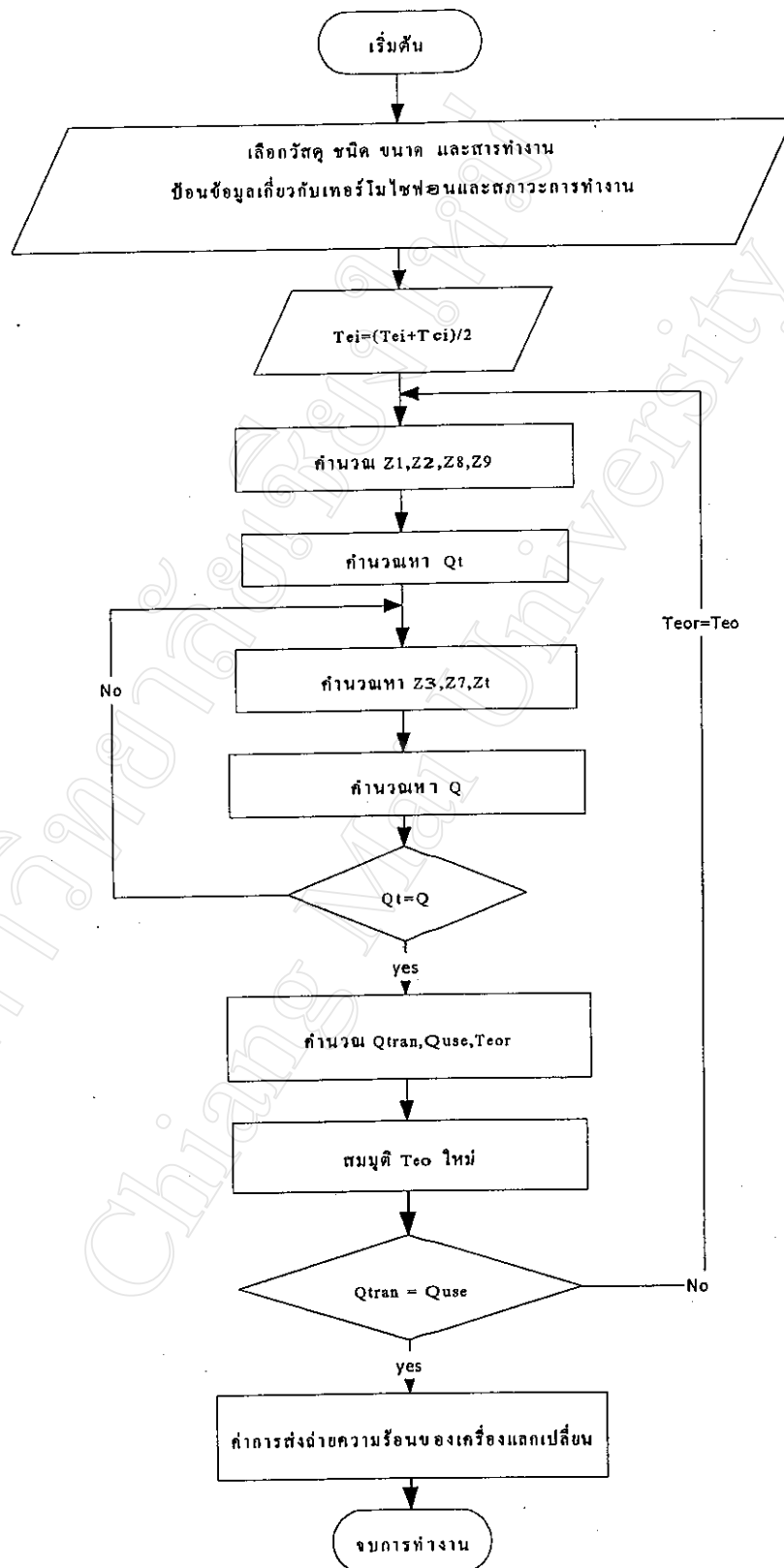
คำนวณหาค่าใช้จ่ายในการผลิตท่อเทอร์โมไซฟอน เลือกวิธีที่ใช้ในการป้องกันการกัดกร่อน และโปรแกรมจะทำการคำนวณและแสดงผลค่าการส่งถ่ายความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยน คำนวณหาค่าการทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนต่อครั้ง ทำการคำนวณเปรียบเทียบหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับการทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยน และคำนวณหาค่าใช้จ่ายรวมของเครื่องแลกเปลี่ยนพร้อมทั้งแสดงผล ซึ่งรายละเอียดของการคำนวณในโปรแกรมสามารถอธิบายได้ดังนี้

4.2.1 การคำนวณหาค่าการส่งถ่ายความร้อนรวมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

ฝั่งการคำนวณหาค่าการส่งถ่ายความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนแสดงดังในรูป 4.2 หลังการกำหนดคุณลักษณะและสภาวะการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วสามารถหาค่าการส่งถ่ายความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนได้ดังนี้

กำหนดอุณหภูมิก๊าซร้อนขาออกโดยให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิของก๊าซร้อนขาเข้ากับอุณหภูมิน้ำเย็นขาเข้าจะได้ดังสมการ

$$T_{co} = \frac{T_{ci} + T_{ci}}{2} \quad (4.1)$$



รูปที่ 4.2 ผังการคำนวณหาค่าการส่งถ่ายความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนแบบเทอร์มิสโตน

เมื่อกำหนดให้การส่งถ่ายความร้อนมีค่าเท่ากันระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นสมการ จะได้ว่า

$$Q = m_c C_{p_c} (T_{co} - T_{ci}) = m_e C_{p_e} (T_{ei} - T_{eo}) \quad (4.2)$$

และกำหนดให้ $m_c C_{p_c}$ คือ C_{min_c} และ $m_e C_{p_e}$ คือ C_{min_e}

ดังนั้นจากสมการ (4.2) จะสามารถหาอุณหภูมิน้ำเย็นขาออกได้จาก

$$T_{co} = \left(\frac{C_{min_e} \times (T_{ei} - T_{eo})}{C_{min_c}} \right) + T_{ci} \quad (4.3)$$

เนื่องจากเงื่อนไขการส่งถ่ายความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนเท่ากันทั้งส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นผลต่างของอุณหภูมิสามารถหาได้จากอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงลอการิทึมได้ดังนี้

$$LMTD = \frac{(T_{ei} - T_{co}) - (T_{eo} - T_{ci})}{\ln((T_{ei} - T_{eo}) / (T_{co} - T_{ci}))} \quad (4.4)$$

ทำการหาค่าการส่งถ่ายความร้อนเริ่มต้นจาก

$$Z_t = Z_1 + Z_2 + Z_8 + Z_9 \quad (4.5)$$

จากสมการ (4.5) จะพบว่าค่าความต้านทานรวมประกอบด้วยค่าความต้านทานต่างๆซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

การคำนวณหาค่าความต้านทานการพาความร้อนที่ผิวภายนอกท่อ (Z_1 และ Z_9) หาได้จากสมการ (2.7) และ (2.8) จะพบว่าค่า h_e และ h_c ขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับของไหลที่ไหลผ่านและค่าสัมประสิทธิ์ การพาความร้อนที่ส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นสามารถคำนวณหาได้ดังนี้

$$h_e = \frac{k_e \times Nu_e}{D_o} \quad (4.6)$$

$$h_c = \frac{k_c \times Nu_c}{D_o} \quad (4.7)$$

ค่า Nu_e และ Nu_c เป็นค่าตัวเลขนัสเซลต์ (Nusselt number) ของก๊าซร้อนและน้ำเย็นคือ

$$Nu_e = C_1 \times C_2 \times Re^m \quad (4.8)$$

$$Nu_c = 1.13 \times C_1 \times C_2 \times Re^m \times Pr^{1/3} \quad (4.9)$$

ซึ่ง Re เป็นค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) สามารถหาได้จากสมการ

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (4.10)$$

เมื่อนำสมการ (4.6-4.10) แทนลงในสมการที่ (2.7) และ (2.8) จะสามารถหาค่าของการต้านทานการพาความร้อนที่ส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นได้ ค่าความต้านทานการนำความร้อนของท่อ (Z_2 และ Z_8) ใช้สมการ (2.9) และ (2.10) ในการคำนวณ เมื่อหาค่าความต้านทาน Z_1, Z_2, Z_8 และ Z_9 ได้แล้วนำไปแทนในสมการที่ (4.5) จะทำให้ได้ค่า Z_t จากนั้นทำการหาค่าการส่งถ่ายความร้อนเริ่มต้นจาก

$$Q_t = \frac{LMTD}{Z_t} \quad (4.11)$$

จากนั้นทำการคำนวณหาค่าความต้านทานภายในท่อโดย

ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นภายในท่อในส่วนทำระเหย (Z_3) เลือกใช้สมการสำหรับคำนวณจากเงื่อนไขตามสมการที่ (2.15) และ (2.16) โดยใช้อัตราส่วนการเติม 50 เปอร์เซ็นต์ในสมการหาค่าความต้านทานภายในท่อในส่วนทำระเหยจะมีฟังก์ชันของค่าการส่งถ่ายความร้อน (Q) รวมอยู่ด้วยการหาค่าดังกล่าวต้องทำการหาค่าการส่งถ่ายความร้อนเริ่มต้นก่อนและนำค่าการส่งถ่ายความร้อนที่ได้ไปแทนในสมการ

ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นภายในท่อในส่วนควบแน่น (Z_7) สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.18) ซึ่งมีฟังก์ชันของการส่งถ่ายความร้อนประกอบอยู่เช่นเดียวกับการหาค่าความต้านทานภายในในส่วนทำระเหย ดังนั้นต้องแทนค่าการส่งถ่ายความร้อนเริ่มต้นลงในสมการนี้เช่นกัน

นำผลจากสมการ (4.11) ไปแทนในสมการ (2.15) หรือ (2.16) และ (2.18) จะสามารถหาค่าความต้านทานภายในท่อได้จากนั้นนำค่าที่ได้แทนลงในสมการ (2.19) จะทำให้สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานรวมของเทอร์โมไซฟอนได้ และนำไปแทนในสมการ (2.1) จะทำให้ทราบค่าการส่งถ่ายความร้อน ทำการแทนค่าจนกระทั่งค่า $Q = Q_t$ เมื่อได้ค่าการส่งถ่ายความร้อนสำหรับหนึ่งท่อแล้วนำไปหาค่าการส่งถ่ายความร้อนรวมของระบบโดยสมการ

$$Q_{tran} = N_{ohp} \times Q \quad (4.12)$$

เมื่อ N_{ohp} คือจำนวนท่อทั้งหมดของเทอร์โมไซฟอน

4.2.2 การคำนวณค่าใช้จ่ายของเครื่องแลกเปลี่ยนและเวลาการทำความสะอาดเหมาะสม

```

graph TD
    Start([เริ่มต้น]) --> Input[/ข้อมูลเกี่ยวกับเทอร์โมไทรฟอน/]
    Input --> Read[คำนวณราคาซื้อ]
    Read --> Decision1{ป้องกันการกักร้อน}
    Decision1 -- No --> Read
    Decision1 -- Yes --> Decision2{ภายนอก}
    Decision2 -- No --> Decision3{ป้องกันภายใน}
    Decision2 -- Yes --> Decision4{ถี่}
    Decision3 -- No --> Decision5{ป้องกันค่านอกและใน}
    Decision3 -- Yes --> Decision6{อินามอ}
    Decision4 -- No --> Decision6
    Decision4 -- Yes --> Read
    Decision5 -- Yes --> Read
    Decision5 -- No --> Decision7{เคาท์}
    Decision6 -- No --> Decision7
    Decision6 -- Yes --> Read
    Decision7 -- No --> Read
    Decision7 -- Yes --> Read
    Read --> Process[คำนวณหาราคาในการป้องกันการกักร้อน]
    Process --> Process2[คำนวณหาราคาในการทำความสะอาด]
    Process2 --> Process3[คำนวณค่าใช้จ่ายเนื่องจากฟาร์มถึง T>0]
    Process3 --> Decision8{ค่าใช้จ่ายเนื่องจากฟาร์มถึง -  
ค่าใช้จ่ายเนื่องจากทำความสะอาด}
    Decision8 -- No --> Process3
    Decision8 -- Yes --> Process4[แสดงเวลาที่เหมาะสมสำหรับทำทำความสะอาด]
    Process4 --> End([จบการทำงาน])
  
```

รูปที่ 4.3 ฟังก์การคำนวณหาค่าใช้จ่ายของเครื่องแลกเปลี่ยนและเวลาการทำความสะดวกที่เหมาะสม

จากรูป 4.3 เริ่มจากป้อนข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ ซึ่งได้แก่ มิติต่างๆของเทอร์โมไซโฟนและสภาวะการทำงาน จากนั้นจะทำการคำนวณราคาท่อโดยจะทำการคำนวณโดยแบ่งตามชนิดของวัสดุและลักษณะของท่อเทอร์โมไซโฟนซึ่งข้อมูลเกี่ยวกับราคการผลิตท่อได้จากการเสนอราคาของบริษัทรับทำเทอร์โมไซโฟน และนำมาคิดเป็นหน่วยพื้นที่สำหรับท่อที่มีครีป และ ทำการประเมินราคาต่อท่อสำหรับท่อเทอร์โมไซโฟนที่ผิวเรียบ จากนั้นโปรแกรมจะคำนวณราคาสำหรับการป้องกันการกัดกร่อนแต่ละวิธีซึ่งอาจจะเลือกที่จะป้องกันหรือไม่ป้องกันการกัดกร่อนก็ได้ถ้าไม่ทำการเลือกวิธีป้องกันการกัดกร่อนค่าสำหรับการป้องกันการกัดกร่อนก็จะถูกตัดทิ้ง ในการคิดค่าใช้จ่ายสำหรับการป้องกันการกัดกร่อนของแต่ละวิธีสามารถหาได้ดังนี้

- ราคาป้องกันโดยการเคลือบสี

ราคาป้องกันความร้อนจากสีสามารถหาได้โดย เทียบราคาสีที่ใช้เคลือบต่อพื้นที่ ซึ่งในโปรแกรมได้กำหนดให้ผู้ใช้งานกำหนดจำนวนของท่อ ขนาด และลักษณะของท่อ ทำให้สามารถหาพื้นที่ที่ใช้ต้องการเคลือบผิวได้ ดังนั้นสามารถนำไปเทียบกับราคาสีทำให้ทราบราคาในการ ป้องกันโดยการเคลือบสีได้

- ราคาป้องกันโดยการเคลือบอินามัล

การเคลือบอินามัลในที่นี้สามารถเคลือบได้เฉพาะท่อเหล็กและท่อทองแดง ส่วนท่ออะลูมิเนียมไม่สามารถเคลือบได้ทั้งนี้เนื่องจากการเคลือบอินามัลจะมีวิธีเฉพาะสำหรับเคลือบโลหะแต่ละชนิด ราคาที่ใช้สำหรับการคำนวณ ได้จากใบเสนอราคาของบริษัทที่รับในการเคลือบ

- ราคาป้องกันโดยการเติมสารยับยั้ง Na_2HPO_4 ปริมาณ 20 ppm.

การคิดค่าใช้จ่ายสำหรับการเติมสารป้องกัน Na_2HPO_4 ลงในสารทำงานคือน้ำปริมาณ 20 ppm. เป็นปริมาณสารที่น้อยมากการว่าจ้างสำหรับการเติมสารชนิดนี้จะคิดเป็นตัวอย่าง (Solution) ตัวอย่างละ 200 บาท

- ราคาป้องกันโดยการเผาท่อที่ 550 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง

ราคาจากการเผาท่อหาได้จากปริมาณแก๊สที่ใช้เผาท่อ 1 ชั่วโมงใช้แก๊ส 30 กิโลกรัม เป็นจำนวนราคา 360 บาท การเผาท่อสามารถเผาได้ครั้งละ 150 ท่อ ดังนั้นการคิดราคาในการเผาต้องทำการคิดเป็นครั้งที่เผา เช่น การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต้องการใช้ท่อ 60 ท่อ ก็เสียค่าใช้จ่าย 360 บาท และถ้าต้องการออกแบบท่อเกิน 150 ท่อ เช่น 160 ท่อ จะคิดว่าทำการเผา 2 ครั้งดังนั้นต้องเสียค่าใช้จ่าย 720 บาท

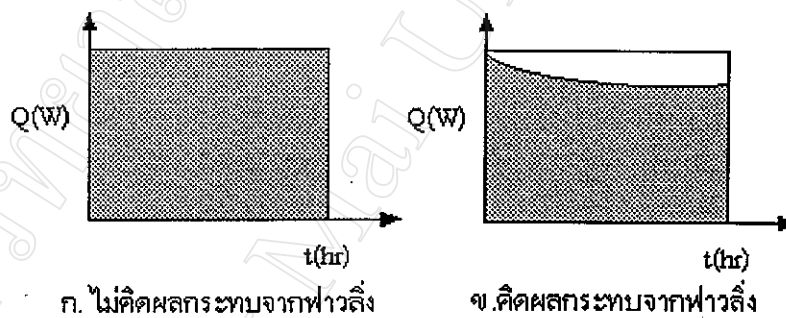
สำหรับการป้องกันทั้งภายนอกและภายในของผิวเทอร์โมไซโฟนก็จะทำการเพิ่มราคาสำหรับการป้องกันการกัดกร่อนเข้าไป เช่น ทำการป้องกันการกัดกร่อนภายนอกด้วยสีพร้อมทั้งป้องกันภายในโดยการเติมสารยับยั้ง Na_2HPO_4 ปริมาณ 20 ppm. ลงในสารทำงาน วิธีนี้จะทำการคิดราคาการป้องกันการกัดกร่อนของการเคลือบสีรวมกับราคาในการป้องกันภายในคือ 200 บาท

การคำนวณหาราคาในการทำความสะดวกตามรูปที่ 4.3 ค่าการทำความสะดวกเป็นสิ่งกำหนดเริ่มต้นสำหรับการหาเวลาทำความสะดวกเพราะ เมื่อทราบราคาสำหรับการทำความสะดวกต่อครั้งจะทำให้ทราบว่าทำความสะดวกเมื่อเวลาใดจึงจะเหมาะสมโดยเปรียบเทียบกับรายจ่ายจากค่าสูญเสียเนื่องจากฟาวลิง การทำความสะดวกบ่อยครั้งจะทำให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนส่งถ่ายความร้อนได้ดีแต่จะทำให้ราคาในการทำความสะดวกสูงในทางกลับกันถ้าไม่ทำความสะดวกเครื่องแลกเปลี่ยนหรือทำความสะดวกน้อยครั้งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการทำความสะดวกแต่จะทำให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพและทำให้สูญเสียรายได้จากการดึงความร้อนกลับ รายจ่ายสำหรับการทำความสะดวกขึ้นอยู่กับพื้นที่ ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ถ้าเครื่อง

แลกเปลี่ยนความร้อนมีขนาดใหญ่จะทำให้ค่าใช้จ่ายสำหรับการทำความสะอาดยิ่งมีค่ามากกว่าเครื่องแลกเปลี่ยนที่มีขนาดเล็ก ในการศึกษานี้ได้อ้างอิงถึงราคาการทำความสะอาดยจากโรงงานผลิตไฟฟ้าแม่เมาะจังหวัดลำปางซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายในการทำความสะอาดยคิดเป็นต่อตารางเมตร คือ 10 บาทต่อตารางเมตร

จากนั้นทำการคำนวณหาค่าใช้จ่ายเนื่องจากความร้อนสูญเสียเนื่องจากฟาวลิงถ้าพิจารณาถึงการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน โดยไม่คิดการสูญเสียเนื่องจากเขม่าจะทำให้เครื่องแลกเปลี่ยนสามารถส่งถ่ายความร้อนได้เต็มประสิทธิภาพ แสดงดังรูป 4.4 ก. และจะได้พลังงานมีหน่วยเป็นจูล (J) แต่ในการทำงานเครื่องแลกเปลี่ยนในสภาวะที่มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกที่ปลิวมากกับก๊าซเสียร้อนปริมาณมากเมื่อเวลาทำงานเพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถส่งถ่ายความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนลดลงแสดงดังรูป 4.4 ข. ในการศึกษานี้จะพิจารณาเฉพาะราคาที่ต้องจ่ายเนื่องจากฟาวลิงหรือค่าการสูญเสียความร้อนเนื่องจากฟาวลิง ซึ่งเป็นพื้นที่ส่วนที่หายไปนรูป 4.4 ข. มีวิธีการหาดังนี้

ทำการอินทิเกรตเพื่อหาพื้นที่ของส่วนความร้อนสูญเสียเนื่องจากฟาวลิงจะได้เป็นความร้อนที่สูญเสียเนื่องจากเขม่า $Q_{fouling}$ มีหน่วยเป็นจูล (J)



รูปที่ 4.4 การส่งถ่ายความร้อนต่อเวลาของเครื่องแลกเปลี่ยน

ทำการเทียบจากค่าใช้จ่ายจากค่าสูญเสียเนื่องจากน้ำมันเตาโดยการหาปริมาตรของน้ำมันที่สูญเสียจากสมการ

$$V = \frac{Q_{fouling}}{HHV \times \rho} \quad (4.13)$$

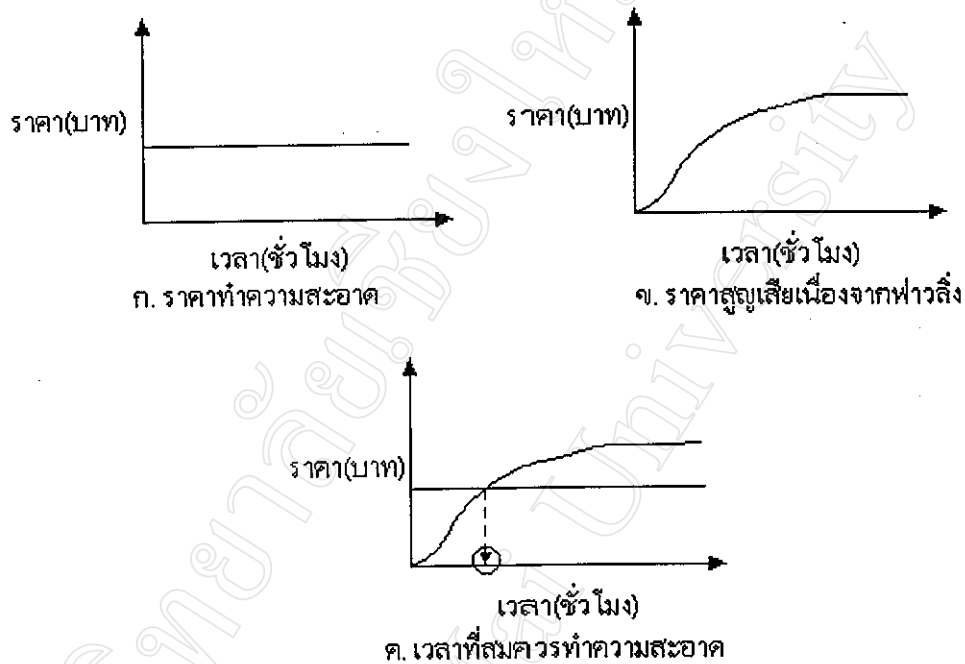
V คือ ปริมาตรของน้ำมันเตาสูญเสีย

HHV คือ ค่าความร้อนของน้ำมันเตา = 44 MJ/kg

ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำมันเตาที่ใช้ = 965 kg/m³

ปริมาณน้ำมันที่สูญเสียแล้วนำไปเทียบเป็นราคาโดยคือน้ำมันเตาเกรด A ลิตรละ 7 บาท

เมื่อทราบราคาทำความสะอาดครั้ง และค่าใช้จ่ายเนื่องจากความร้อนสูญเสียจะแสดงอยู่ในรูป 4.5 ก. และ ข. เมื่อนำค่าใช้จ่ายทั้งสองซ้อนกันจะพบว่าเกิดจุดตัดซึ่งเมื่อลากเส้นลงมาในแกนของเวลาจะพบเวลาที่ เหมาะสำหรับการทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่แสดงในแกนของเวลาดังรูป 4.5 ค.



รูปที่ 4.5 กราฟหาเวลาทำความสะอาดที่เหมาะสม

4.2.4 การคำนวณค่าใช้จ่ายรวม

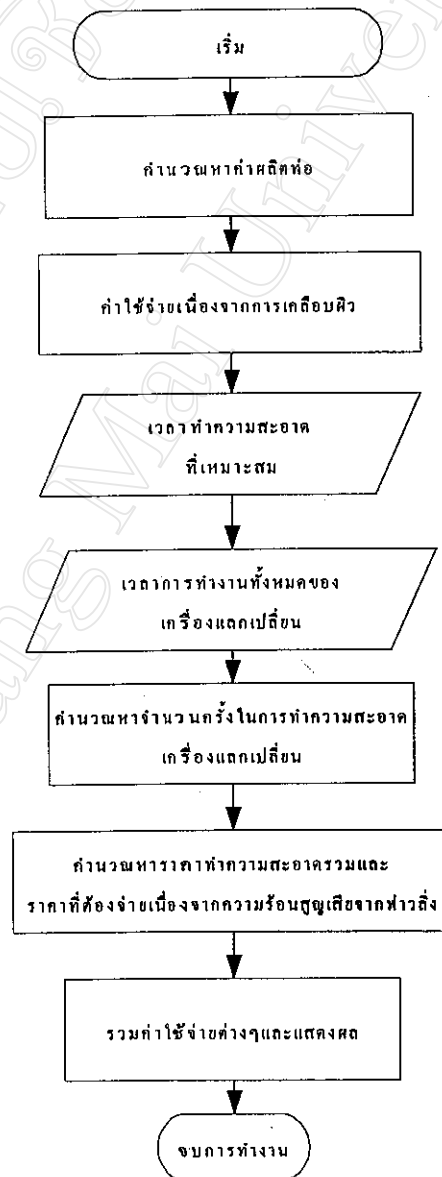
การคำนวณค่าใช้จ่ายรวมแสดงดังรูป 4.6 เมื่อทราบราคาในการผลิตต่อ ราคาของการป้องกัน และราคาของการทำความสะอาดครั้ง จากเงื่อนไขของเวลาการทำงานทั้งหมดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้สามารถหาจำนวนครั้งในการทำความสะอาดได้ จะพบว่าจากเวลาที่ใช้ในการทำความสะอาดจะมีช่วงของ เวลาที่ปล่อยให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำงานไประยะหนึ่งระยะเวลาดังกล่าวก็จะมีฟาวลิงมาเกาะที่ผิวทำให้เกิดค่าใช้จ่ายเนื่องจากฟาวลิงในระยะเวลาดังกล่าวด้วย ซึ่งสามารถหาค่าการทำความสะอาดรวมและค่าใช้จ่ายจากการสูญเสียเนื่องจากฟาวลิงได้ดังสมการ

$$\text{CostClean} = \frac{T_{\text{Operating}}}{T_{\text{Clean}}} \times C_{\text{Clean}} \quad (4.14)$$

$$\text{CostFouling} = \frac{T_{\text{Operating}}}{T_{\text{Clean}}} \times C_{\text{Fouling}} \quad (4.15)$$

เมื่อ	CostClean	คือ ค่าใช้จ่ายในการทำความสะอาดที่เวลาทำงานทั้งหมด
	CostFouling	คือ ค่าใช้จ่ายจากความร้อนสูญเสียเนื่องจากเขม่า
	$T_{Operating}$	คือ เวลาทำงานทั้งหมดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
	T_{Clean}	คือ เวลาทำความสะอาดที่เหมาะสม
	C_{Clean}	คือ ค่าทำความสะอาดต่อครั้ง
	$C_{Fouling}$	คือ ค่าใช้จ่ายจากความร้อนสูญเสียเนื่องจากเขม่าที่เวลาทำความสะอาดที่

เหมาะสม



รูปที่ 4.6 ผังการคำนวณหาค่าใช้จ่ายรวมของเครื่องแลกเปลี่ยน

ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดสามารถหาได้จากผลรวมระหว่างค่าใช้จ่ายเริ่มต้น กับค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากเวลาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งค่าใช้จ่ายรวมแสดงดังสมการ

$$C_{\text{Total}} = C_{\text{Tube}} + C_{\text{Coating}} + C_{\text{Clean}} + C_{\text{Fouling}} \quad (4.15)$$

เมื่อ C_{Total} คือ ค่าใช้จ่ายรวม
 C_{Tube} คือ ค่าในการสร้างเทอร์โมไซฟอน
 C_{Coating} คือ ค่าในการป้องกันการกัดกร่อน
 C_{Clean} คือ ค่าใช้จ่ายเนื่องจากการทำความสะอาด
 C_{Fouling} คือ ค่าใช้ความร้อนสูญเสียเนื่องจากฟาวลิง

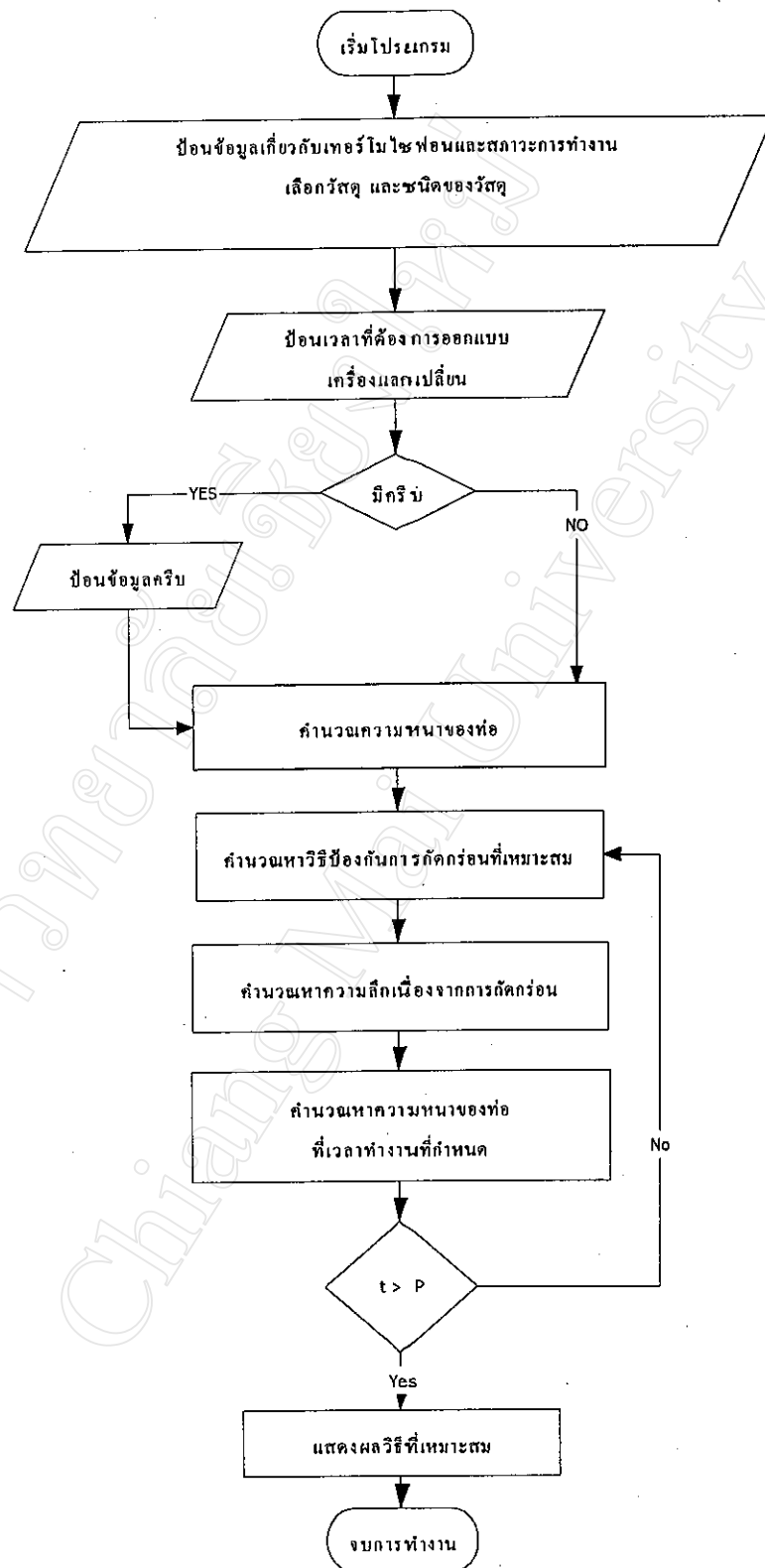
4.3 โปรแกรมแนะนำการป้องกันการกัดกร่อน

การป้องกันการกัดกร่อนที่เหมาะสมพิจารณาจากความต้องการของผู้ออกแบบว่าต้องการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีอายุการใช้งานยาวนานเท่าไร ถ้าต้องการออกแบบให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีอายุการใช้งานน้อย ก็ไม่จำเป็นต้องเคลือบผิวเพื่อป้องกันการกัดกร่อน แต่ถ้าผู้ใช้ต้องการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ยาวนานจำเป็นต้องใช้การเคลือบผิวเพื่อป้องกันการกัดกร่อน สำหรับวิธีที่เหมาะสมในการป้องกันขึ้นอยู่กับวิธีในการเคลือบและความเข้ากันได้ระหว่างวิธีที่ใช้เคลือบกับชนิดของวัสดุ ซึ่งพิจารณาจากสมการที่ได้จากการทดลองของ ขวัญชัย ไกลทอง (2541) , ประชา ชื่นยกุล (2541), ถนัด เกษประดิษฐ์ (2543) และปิยะนันท์ เจริญสวรรค์ (2540) ซึ่งการกัดกร่อนจะเป็นฟังก์ชันของเวลาเมื่อกำหนดเวลาที่ต้องการลงในสมการที่ได้จากการทดลองจะทำให้ทราบระยะของการกัดกร่อนแล้วนำไปลบกับความหนาของท่อจะทำให้ทราบความหนาของท่อที่เหลืออยู่ และจากเงื่อนไขของสภาวะการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำให้เราทราบถึงอุณหภูมิที่ใช้งาน ดังนั้นเราสามารถทราบความดันเนื่องจากอุณหภูมิ และสามารถหาความหนาที่ท่อสามารถทนความดันได้จากสมการ

$$\text{ความหนาของท่อ} = \frac{Pr}{\sigma_r} \quad (4.16)$$

เมื่อ σ_r คือ ความเค้นตามแนวรัศมีของท่อ
 P คือ ความดัน
 r คือ รัศมีของท่อ

เมื่อทราบความหนาที่ท่อสามารถทนความดันแล้วจะนำไปเปรียบเทียบกับความหนาที่เวลาการทำงานผ่านไปและเปรียบเทียบหาวิธีที่สามารถป้องกันการกัดกร่อนที่เวลาดังกล่าวได้ ข้อมูลที่ใช้ในโปรแกรมแสดงดังตาราง 4.4 และโปรแกรมการคำนวณแสดงดังรูป 4.5



รูปที่ 4.5 ผังการคำนวณหาวิธีการป้องกันการกัดกร่อนที่เหมาะสม

ตาราง 4.4 ข้อมูลที่ใช้ในโปรแกรมออกแบบป้องกันการกัดกร่อน

ข้อมูลเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ในการคำนวณ	หน่วย
ความยาวท่อทั้งหมด	เมตร
ความยาวส่วนทำระเหย	เมตร
ความยาวส่วนควบแน่น	เมตร
จำนวนท่อทั้งหมด	เมตร
เวลาการทำงานทั้งหมด	ปี

สำหรับเงื่อนไขของโปรแกรมในส่วนนี้ได้แก่

- อุณหภูมิเฉลี่ยของก๊าซร้อนขาเข้า 225 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิของน้ำเย็นขาเข้า 32 องศาเซลเซียส
- ความเร็วของน้ำ 17 ลิตร/นาที่
- ความเร็วของก๊าซร้อน 4.7 เมตร/วินาที
- สารทำงานเป็นน้ำ

ผลของโปรแกรมนี้จะแสดงเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการป้องกันการกัดกร่อน

4.4 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

ความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นสำหรับการเขียนโปรแกรมโดยทั่วไปมีอยู่ 2 กรณี คือการเขียนโปรแกรมไม่ถูกต้องตามหลักไวยากรณ์ของโปรแกรมที่กำหนดและการผิดพลาดเนื่องจากผู้เขียนมีความเข้าใจผิดพลาดซึ่งคำตอบที่ได้จากโปรแกรมจะไม่ตรงกับที่ได้คำนวณไว้วิธีการแก้ไขความผิดพลาดทั้ง 2 กรณีสามารถทำได้ดังนี้

4.4.1 ผิดพลาดจากการเขียนโปรแกรมไม่ถูกต้องตามหลักไวยากรณ์

โปรแกรมวิชาวาลเบสิกมีการตรวจสอบความผิดพลาดเบื้องต้นคล้ายกับภาษาคอมพิวเตอร์โดยทั่วไปแต่มีข้อดีคือผู้ใช้โปรแกรมสามารถตรวจสอบค่าตัวแปรที่ต้องการในขณะที่โปรแกรมกำลังทำงานได้ทำให้ทราบถึงความผิดพลาดต่างๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นในระหว่างการทำงานของโปรแกรม นอกจากนั้นยังสามารถสั่งให้โปรแกรมหยุดเพื่อตรวจสอบในตำแหน่งใดก็ได้ในโปรแกรม ทำให้สามารถช่วยแก้ปัญหาเกี่ยวกับความผิดพลาด

4.4.2 ผิดพลาดเนื่องจากความเข้าใจผิดจากผู้เขียน

หลังจากผ่านการตรวจสอบในหัวข้อ 4.4.1 แล้วเพื่อป้องกันการความผิดพลาดจากการคำนวณจำเป็นต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมโดยการแยกโปรแกรมออกเป็นโปรแกรมย่อยๆ แล้วตรวจสอบกับการคำนวณด้วยเครื่องคิดเลขเปรียบเทียบเพราะ เนื่องจากโปรแกรมที่ใช้เขียนนี้เป็นโปรแกรมที่ช่วยสำหรับการออกแบบหาการป้องกันการป้องกันที่เหมาะสมดังนั้นค่าที่ได้จากการคำนวณโดยเครื่องคิดเลขกับโปรแกรมต้องมีค่าเท่ากัน