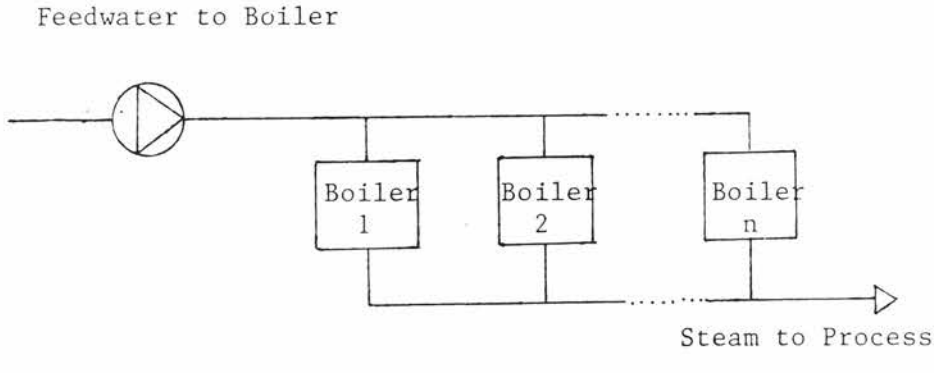
บทที่ 4

การจำลองระบบเพื่อการ optimization

ระบบงานที่ใหญ่ ๆ เมื่อต้องการให้ระบบมีประสิทธิภาพที่ดี จำเป็นต้องเข้าใจถึงการทำงานที่สัมพันธ์กันของอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบ กล่าวคือความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถภาพหรือประสิทธิภาพของ Boilers, Chillers, Pumps, Heaters และอุปกรณ์อื่น ๆ จากการทำงานที่สัมพันธ์ภายในระบบนี้ นำมาสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบรวม

4.1 ระบบผลิตไอน้ำ

การจำลองระบบไอน้ำ เพื่อการใช้ประโยชน์สูงสุด ได้อธิบายโดย Cho[1] Edelston[2] และ LaSpisa[3] โดยทั่ว ๆ ไปหม้อน้ำมักตั้งรวมกันเป็นชุด และจ่ายไอน้ำไปยังท่อร่วมเพื่อส่งไอน้ำไปใช้งานตามจุดต่าง ๆ ดังรูป 4.1

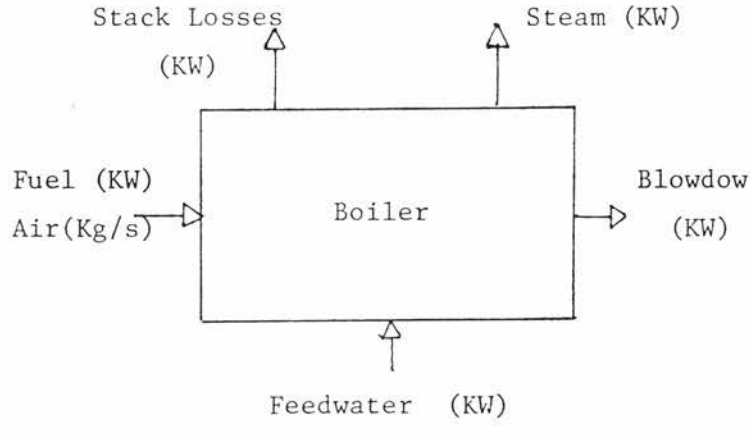


รูปที่ 4.1 ระบบผลิตไอน้ำในลักษณะต่อขนานกัน จ่ายไอน้ำไปยังท่อร่วม

หม้อน้ำแต่ละตัวอาจจะแตกต่างกันในเรื่องชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ (Types of fuel) ความสามารถสูงสุด (Maximum capacities) และความแตกต่างกันของประสิทธิภาพ (Efficiency curves) การจำลองแบบหม้อน้ำ เป็นการสร้างสมการเพื่อแสดงการใช้งานสภาวะต่าง ๆ เพื่อบรรลุอุปสงค์ (Demand) ที่ต้องการ

ขั้นแรกให้พิจารณาเส้นแสดงประสิทธิภาพ (Efficiency curves) ของหม้อน้ำ ซึ่งหาได้โดยทำการทดลอง หรือโดยการวิเคราะห์จากตารางข้อมูลหรือการจดบันทึกค่าของไอน้ำที่ได้กับพลังงานที่ใช้ การสมดุลย์ทางพลังงาน (Energy balance) ของหม้อน้ำ แสดงในรูป 4.2 สำหรับหม้อน้ำแต่ละตัว การสมดุลย์ทางพลังงานนี้จะแปรผันกับภาระ (load) ดังนั้นเมื่อกล่าวถึงระบบทั้งหมดจะมีเส้นแสดงประสิทธิภาพแตกต่างกันอิสระตามแบบของหม้อน้ำแต่ละตัว ความแตกต่างของเส้นประสิทธิภาพของหม้อน้ำนั้นยังมีผลมาจากประสิทธิภาพการเผาไหม้ และความสกปรกของท่อ (Tube fouling) ในหม้อน้ำแต่ละตัวด้วย

สำหรับการศึกษาวิจัยครั้งนี้ เส้นแสดงประสิทธิภาพของหม้อน้ำแต่ละตัว ได้จากการวิเคราะห์จากตารางข้อมูล



รูปที่ 4.2 แสดงการสมดุลย์ทางพลังงานของเครื่องผลิตไอน้ำ

ให้ X_i เป็นภาระอุปสงค์ (Load demand) (Kg/s) ที่ต้องการจากหม้อน้ำ 'i' สมมุติให้หม้อน้ำแต่ละตัวมีเส้นแสดงประสิทธิภาพอยู่ในรูป Polynomial ดังนี้

$$N_i(x_i) = a_i + b_i x_i + c_i x_i^2 + \ldots \quad (4.1)$$

เมื่อ $N_i(x_i)$ คือ ประสิทธิภาพของหม้อน้ำ 'i' ที่ภาระ x_i

a_i, b_i และ c_i ... เป็นตัวคงที่

E_i = พลังงานที่ให้กับหม้อน้ำ 'i' (Energy input) เพื่อผลิตไอน้ำที่ภาระ x_i

$E_i = hx_i$ (KJ/s) เมื่อประสิทธิภาพของหม้อน้ำ 100 % (4.2)

เมื่อ h (KJ/Kg) คือ enthalpy ที่ต้องการเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำ (Feed water) ให้สูงขึ้นเท่ากับอุณหภูมิของไอน้ำที่ต้องการ, h เป็นฟังชั่นของอุณหภูมิน้ำ (Feed water temperature)

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของหม้อน้ำต่ำกว่า 100 % พลังงานที่ใช้ (Energy input) จะเท่ากับ

$$E_i = \frac{h\, x_i}{N_i} \quad (KJ/s) \quad (4.3)$$

$$= h\, x_i / (a_i + b_i x_i + c_i x_i^2 + \ldots) \quad (KJ/s) \quad (4.4)$$

ให้ q_i (KJ/unit) = พลังงานที่มีอยู่ในน้ำมันเชื่อเพลิง unit 'i' ที่ใช้กับหม้อน้ำ 'i'

R_i (฿/unit) = ราคาของน้ำมันเชื้อเพลิง unit 'i'

K_i (฿/s) = ค่าใช้จ่ายในการทำงานของหม้อน้ำ 'i'

$$K_i = \frac{R_i h\, x_i}{q_i(a_i + b_i x_i + c_i x_i^2 + \ldots)} \quad (฿/s) \quad (4.5)$$

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากสมการ (4.5) ติดอักษรห้องท้าย 'i' ลงบน enthalpy ของน้ำที่เข้าหม้อน้ำ 'i' เพราะมีโอกาสที่เป็นไปได้ว่าหม้อน้ำตัวหนึ่งผลิตไอน้ำอิ่มตัว (Saturated steam) ขณะเดียวกันหม้อน้ำตัวอื่นผลิตไอน้ำยิ่งยวด (Superheated steam)

$$K_i = \frac{R_i h_i x_i}{q_i(a_i+b_i x_i+c_i x_i^2+\ldots)} \quad (฿/s) \tag{4.6}$$

ค่าใช้จ่ายทั้งหมดของขบวนการผลิตไอน้ำ ได้จากการรวมค่าใช้จ่ายในการทำงานของหม้อน้ำแต่ละตัว

$$\hat{K} = \sum_{i=1}^{n} \frac{R_i h_i x_i}{q_i(a_i+b_i x_i+c_i x_i^2+\ldots)} \quad (฿/s) \tag{4.7}$$

เพื่อให้ค่าใช้จ่าย $\hat{K}$ ต่ำสุด สำหรับความต้องการการใช้ไอน้ำทั้งหมด X แสดงในรูป Optimization terminology ดังนี้

Objective Function :

$$\text{Min } \hat{K} = \sum_{i=1}^{n} \frac{R_i h_i x_i}{q_i(a_i+b_i x_i+c_i x_1^2+\ldots)} \tag{4.8}$$

Constraints :

$$\text{Subject to} \quad \sum_{i=1}^{n} x_i = X \tag{4.9}$$

(S.T.)

$$M_i \geq x_i \geq 0 \qquad i = 1,2, \ldots,n$$

เมื่อ M_i = ความสามารถสูงสุดในการผลิตไอน้ำของหม้อน้ำ 'i'

4.2 ระบบทำความเย็นด้วยน้ำเย็นหมุนเวียน

การ Optimization ระบบทำความเย็นขนาดใหญ่ ก็คล้ายกันกับระบบในหม้อน้ำที่กล่าวข้างต้น Chiller แต่ละตัวจ่ายน้ำเย็นไปยังท่อร่วม เพื่อส่งน้ำเย็นไปใช้งานตามจุดต่างๆ

แต่ที่แตกต่างกันระหว่างปัญหาทั้งสองก็คือ ผลของอุณหภูมิของน้ำที่เข้าคอนเดนเซอร์ (Condenser water temperature) ที่มีต่อสมรรถภาพการทำงาน (Coefficient of performance) ของเครื่องแต่ละชุดในการ Optimizing chiller ที่ต่อทำงานร่วมกันหลายตัว ข้อมูลทางสมรรภาพการทำงานของเครื่องได้มาจากโรงงานผู้ผลิต และเป็นข้อมูลสำหรับแต่ละเครื่องเท่านั้น สมมุติให้อุณหภูมิของน้ำที่เข้าคอนเดนเซอร์ Entering condenser water temperature (ECWT) ปกติจะเท่ากับ $35^{o}C$

Chiller แต่ละตัวที่จ่ายน้ำเย็นไปยังท่อร่วม จะมีเส้นสัมประสิทธิการทำงานที่คล้ายคลึงกัน การ Optimization จากการเลือกเส้นสัมประสิทธิเส้นใดเส้นหนึ่งโดยถือค่า ECWT จากข้อมูลทางสมรรถภาพของ Chiller แต่ละตัว ในการเลือกอาจใช้วิธีการ Interpolation ถ้าค่าของ ECWT ไม่ใช่ค่าเดียวกับที่ปรากฏในเส้นสัมประสิทธิการทำงานกับภาระ (Load) เมื่อเราได้เส้นสัมประสิทธิการทำงานกับภาระ การ Optimize จะกระทำดังต่อไปนี้ กำหนดชุดของเครื่องจักรที่ทำความเย็น ใช้อักษรห้อยท้าย 'j' แสดงเครื่องจักรที่กล่าวถึง

พลังงานที่ให้กับ Chiller แต่ละตัว คำนวณได้ดังนี้

$$E_j = \frac{y_j}{\beta_j(y_j, T_k)} \quad \text{(Kw)} \qquad (4.10)$$

เมื่อ E_j = พลังงานที่ให้กับ Chiller 'j' (Kw)

y_j = ภาระการทำความเย็นของ Chiller 'j' (Kw)

β_j = สมรรถภาพการทำงานของ Chiller 'j'

T_k = ECWT , (^{o}C)

ค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่อง Chiller 'j' คือ

$$Q_j = C_j E_j \quad (฿/s) \qquad (4.11)$$

$$Q_j = \frac{C_j y_j}{\beta_j} \quad (฿/s) \qquad (4.12)$$

เมื่อ C_j = ค่าใช้จ่ายของพลังงานที่ให้กับ Chiller 'j' (฿/KJ)

ค่าใช้จ่ายของพลังงานที่ให้กับ Chiller, C_j หาได้ดังนี้

$$C_j = \frac{\hat{K}}{X\Delta h} \quad (฿/KJ) \tag{4.13}$$

เมื่อ X = ความต้องการใช้ไอน้ำทั้งหมด Total steam demand, (Kg/s)

$\hat{K}$ = ค่าใช้จ่ายของการผลิตไอน้ำ (฿/s)

Δh = พลังงานที่ให้กับไอน้ำ (KJ/Kg)

ค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องทำความเย็น $\hat{Q}$, จะแสดงได้เป็น

$$\hat{Q} = \sum_{j=1}^{3} Q_j \quad (฿/s) \tag{4.14}$$

$$= \sum_{j=1}^{3} C_j E_j \tag{4.15}$$

$$= \sum_{j=1}^{3} \frac{C_j y_j}{\beta_j} \tag{4.16}$$

$$\hat{Q} = \frac{\hat{K}}{\Sigma x_i \Delta h_i} \sum_{j=1}^{3} \frac{y_j}{\beta_j} \tag{4.17}$$

ดังนั้นในการ Optimize chiller จะได้

Objective Function

$$\text{Min } Q = \sum_{j=1}^{3} \frac{C_j y_j}{\beta_j} \quad (฿/s) \tag{4.18}$$

Constraints :

$$\text{S.T.} \quad \sum_{j=1}^{3} y_j = Y \quad (Kw) \tag{4.19}$$

$$0 \leq y_j \leq N_j \qquad j = 1,2,3$$

เมื่อ Y = ภาระทำความเย็นทั้งหมด (KW)

N_j = ความสามารถสูงสุดของ Chiller 'j' (KW)

β_j = Coefficience of performance

$\hat{S} = \frac{K}{\Sigma x_i \Delta h_i}$ (฿/KJ)

$\hat{S}$ = ค่าใช้จ่ายไอน้ำต่อการผลิตพลังงานความร้อน, ฿/KJ

เส้นสัมประสิทธิการทำงานของ chillers เป็นฟังชั่นของภาระ (load), Y_j, และค่า ECWT, T_k ซึ่งเขียนได้เป็น $\beta_{j,k}(Y_j, T_k)$ และแสดงอยู่ในรูป polynomial ได้ดังนี้

$$\beta_{j,k}(y_j, T_k) = a_{j,k} + b_{j,k} y_j + c_{j,k} y_j^2 + \ldots \quad (4.20)$$

ซึ่ง $a_{j,k}$, $b_{j,k}$, $c_{j,k}$ เป็นค่าคงที่ และดีกรีของ polynomial เลือกได้ตามลักษณะของข้อมูล ถ้า ECWT(T'_k) ไม่ใช่ค่าเดียวกันกับที่ใช้หาเส้นสัมประสิทธิที่ได้ ใช้วิธี interpolated ระหว่างเส้นสัมประสิทธิ์ที่อยู่ใกล้กันสองเส้น ซึ่งจะได้เส้นสัมประสิทธิ์เส้นใหม่ อีกวิธีหนึ่งอาจใช้วิธี bias ซึ่งวิธีนี้ได้ผลดีถ้าเส้นสัมประสิทธิ์มีค่าสม่ำเสมอ ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$\beta_{j,k}(y_j, T'_k) = a_{j,k} + b_{j,k} y_j + c_{j,k} y_j^2 + \ldots + B \quad (4.21)$$

ซึ่งเทอมแรกคือ เส้นสัมประสิทธิ์ที่ ECWT มีค่าต่ำกว่าค่า ECWT ที่ไม่แน่นอน (T'_k) และ B คือค่า bias ดังรูป 4.3

มีหลายวิธีที่ใช้ในการสร้างเส้นสัมประสิทธิ์การทำงานของ chiller เช่นวิธีของ Zimmer[4] ดังนี้

$$\beta_j((\Delta T)_i, F_i) = a_i F_i^2 + b_i (\Delta T)_i^2 + c_i F_i + d_i (\Delta T)_i + e_i F_i (\Delta T)_i + f_i \quad (4.22)$$

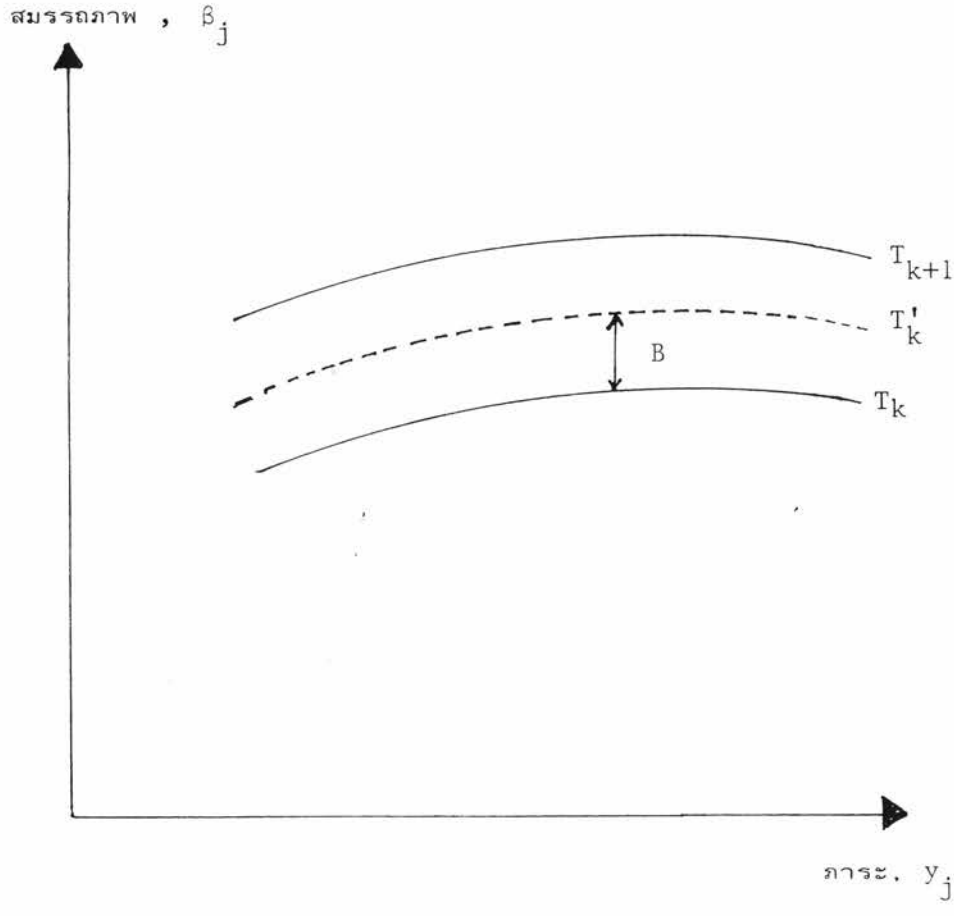
ซึ่ง $(\Delta T)_i$ = อุณหภูมิแตกต่างของน้ำเย็นของ chiller i

F_i = การไหลของน้ำเย็นของ chiller i

$a_i, b_i, c_i, d_i, c_i, f_i$ = ค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งคำนวณโดยการวิเคราะห์แบบรีเกรสชั่น

D.L. May, et al., ให้ข้อคิดว่าเส้นสัมประสิทธิ์การทำงานเป็นรูปฟังชั่นของตัวแปรที่กล่าวข้างต้นบวกกับการไหลของน้ำระบายความร้อน (condenser water flow) และค่าแตกต่างของอุณหภูมิ[5]

สำหรับการศึกษาในครั้งนี้จะใช้สมการที่ (4.20) แสดงการหาเส้นสัมประสิทธิ์การทำงานของ Chiller เพื่อใช้ในการ Optimization



รูปที่ 4.3 แสดงเส้นสัมประสิทธิ์ของเครื่องทำความเย็นโดยการไบแอส

$$\beta_{j,k} = a_{j,k} + b_{j,k} + c_{j,k}\, y_j^2$$

ซึ่ง $$B = \frac{T'_k - T_k}{T_{k+1} - T_k} [\beta_{j,k}(y_j , T_{k+1}) - \beta_{j,k}(y_j , T_k)]$$

4.3 เครื่องทำความร้อน

ในลักษณะที่คล้ายกันกับระบบที่กล่าวข้างต้น เครื่องทำความร้อน มีสมการค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องคือ

$$\hat{U} = \sum_{k=1}^{4} u_k \qquad (฿/s) \tag{4.23}$$

$$= \sum_{k=1}^{4} \frac{C_k z_k}{\eta_k} \tag{4.24}$$

Objective function

$$\text{Min } U = \sum_{k=1}^{4} \frac{C_k z_k}{\eta_k} \qquad (฿/s) \tag{4.25}$$

Constraints

$$\text{S.T. } \sum_{k=1}^{4} z_k = Z \qquad (Kw) \tag{4.26}$$

$$0 \leq z_k \leq p_k \qquad k = 1,\ldots,4$$

เมื่อ Z = ภาระการทำความร้อนทั้งหมด (Kw)

P_k = ความสามารถสูงสุดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน 'k'

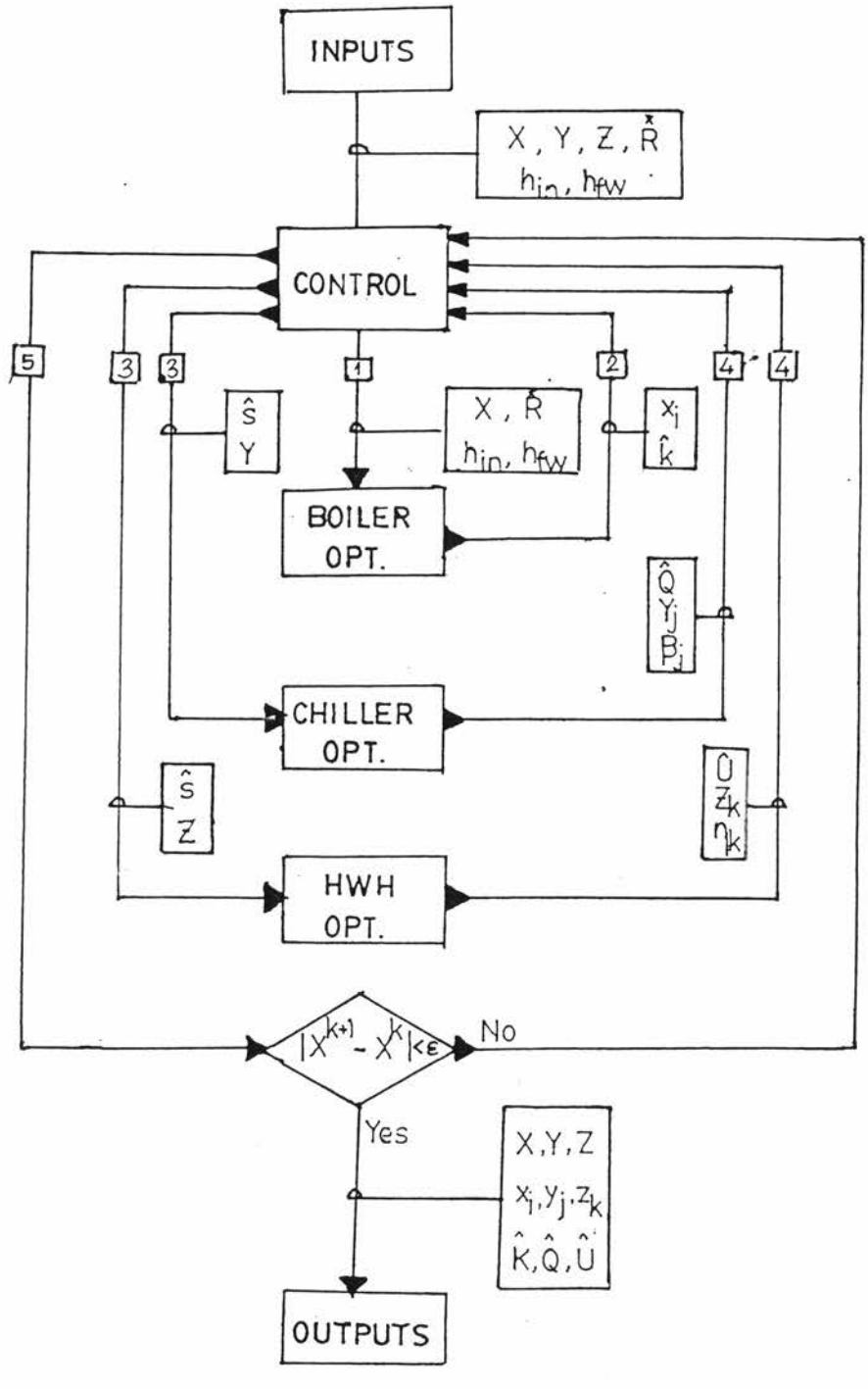
η_k = ประสิทธิภาพการทำงานของ เครื่องทำความร้อน 'k'

4.4 ขั้นตอนในการทดสอบ

ขั้นตอนในการทดสอบระบบร่วม คือ รวมปัญหา เรื่อง Boiler และปัญหา เรื่อง Chiller เป็น เรื่องเดียว การกระทำดังกล่าวโดยใช้ผังภูมิแสดงในรูป 4.4 โปรแกรมควบคุมทำการวิเคราะห์ เพื่อการคำนวณค่าต่าง ๆ แล้วส่งผลลัพธ์ไปสู่ขั้นตอนสุดท้าย

โดยขั้นตอนแรกเริ่มที่ป้อนให้คือ ค่าประมาณของปริมาณไอน้ำ สภาวะไอน้ำ พร้อมด้วยราคาน้ำมันเชื้อเพลิง จะส่งไปยัง Boiler Optimization Routine เพื่อคำนวณค่า

ภาระหม้อน้ำ (x_i) และค่าใช้จ่ายในการทำงานของหม้อน้ำ ($\hat{K}$) และส่งผลเข้าสู่โปรแกรมควบคุม ซึ่งจะทำการคำนวณแล้วให้ค่าใช้จ่ายไอน้ำต่อการผลิตพลังงานความร้อน ($\hat{S}$) จากนั้น Cooling Load (Y), Heating Load (Z) ซึ่งได้จาก Program Subroutine และค่าใช้จ่ายไอน้ำที่คำนวณได้จะส่งไปยัง Chiller Optimization Program และ Hot Water Heater Optimization Program ซึ่งทำการคำนวณแล้วได้ค่า Chiller Load (y_j) และ Heating Load (z_k) และค่าใช้จ่ายในการทำงาน $\hat{Q}$ และ $\hat{U}$ ในโปรแกรมควบคุมจะคำนวณจำนวนไอน้ำที่ใช้ใน Chillers และ Hot Water Heater แล้วนำผลรวมของไอน้ำทั้งหมดมาเปรียบเทียบกับไอน้ำที่สมมุติ ในตอนแรกเริ่มว่าใกล้เคียงกันหรือไม่ ก่อนสิ้นสุดโปรแกรม ถ้าไม่ใกล้เคียงกันก็ให้เริ่มต้นใหม่โดยให้ค่าภาระไอน้ำที่ได้เป็นค่าอินพุทที่จะส่งไปยัง Boiler Optimization Program ต่อไปแล้วทำการคำนวณตามขั้นตอนต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้น จนได้ค่าปริมาณไอน้ำทั้งสองค่าเท่ากัน หรือผลต่างของค่าทั้งสองน้อยกว่า ε



รูปที่ 4.4 แผนผังขั้นตอนการ optimization

INPUTS

X = Steam demand (Kg/s)

Y = Chiller load (Kw)

Z = Hot water heater load, (Kw)

$\overset{*}{R}$ = Fuel cost (฿/Kg)

h_{in} = Mixed boiler enthalpy (KJ/Kg)

h_{fw} = Feed water enthalpy (KJ/Kg)

CONTROL

$$\hat{S} = \frac{\hat{K}}{X\Delta h} \qquad (฿KJ)$$

$$X = \sum_{j=1}^{3} \frac{y_j}{\Delta h_j \beta_j} + \sum_{k=1}^{4} \frac{z_k}{h_k \eta_k} \qquad (Kg/s)$$

NOTE : (ดูใน Boiler Opt.)

$$\overset{*}{R} = \frac{R_i h_i}{q_i}$$

R_i = Cost of fuel unit 'i' (฿/unit)

h_i = The enthalpy rise of feed water to boiler 'i' (KJ/Kg)

q_i = The energy content per fuel unit 'i' (KJ/unit)

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในระบบทำความเย็นหากมีระบบ Electrical Chillers เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย สมการ Objective function ซึ่งเป็นรูปของค่าใช้จ่ายที่จะทำการ Minimize ก็จะเพิ่มเทอมที่เป็นค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าเข้าไปด้วย เช่น จากสมการ (4.11)

ค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องทำความเย็น j คือ

$$Q_j = C_j E_j \quad (฿/s) \quad \ldots\ldots\ldots \quad (4.27)$$

$$= \frac{C_j Y_j}{\beta_j}$$

ซึ่ง E_j = พลังงานที่ใช้กับเครื่องทำความเย็น j, KW

C_j = ค่าใช้จ่ายพลังงานที่ให้กับเครื่องทำความเย็น j, ฿/KJ

สำหรับ Electrical Centrifugal :

$$C_j = \frac{e}{3600} \quad ฿/KJ \quad \ldots\ldots\ldots \quad (4.28)$$

สำหรับ Steam Driven Chillers :

$$C_j = \frac{\hat{k}}{T\Delta h} \quad (฿/KJ) \quad \ldots\ldots\ldots \quad (4.29)$$

ซึ่ง e = ค่าใช้จ่ายกระแสไฟฟ้า, ฿/KWh

T = ปริมาณการใช้ไอน้ำ , Kg/s

Δh = พลังงานที่ให้กับไอน้ำ m KJ/Kg

ดังนั้น ถ้ามีเครื่องทำความเย็นหลายตัวและใช้พลังงานที่แตกต่างกันจึงเขียนค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องได้ดังนี้

$$\hat{Q} = \sum_{j=1}^{n} Q_j \quad (฿/S) \quad \ldots\ldots\ldots \quad (4.30)$$

$$= \sum_{j=1}^{n} C_j E_j \quad \ldots\ldots\ldots \quad (4.31)$$

$$= \sum_{j=1}^{n} \frac{C_j Y_j}{\beta_j} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (4.32)$$

$$\hat{Q} = \frac{\hat{K}}{T\Delta h} \sum_{j=1}^{m} \frac{Y_j}{\beta_j} + \sum_{i=1}^{n} \frac{Y_i e}{\beta_i (3600)} \quad (฿/S) \ldots\ldots \quad (4.33)$$

สมการที่ 4.33 $\hat{Q}$ เป็นค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการเดินเครื่องทำความเย็น โดยที่เทอมแรกทางขวามือเป็นค่าใช้จ่ายของเครื่องทำความเย็นในระบบดูดซับ และเทอมที่สองเป็นค่าใช้จ่ายของเครื่องทำความเย็นในระบบที่ใช้ไฟฟ้า

I 10297510