# การปรับปรุงระบบทำความเย็น ให้เกิดประโยชน์สูงสุด เพื่อการประหยัดพลังงาน

# Optimization of Chiller Plant for Energy Conservation


**ประพันธ์ จิตรเจริญชัย**
**ธเนศ นามานุศาสตร์**
**ธเนศ จันทิมา**

**สุรชัย ระตะนะอาพร**

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
บางเขน กรุงเทพฯ



*บทความฉบับนี้ แสดงความสัมพันธ์ในการทำงานระหว่างอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบทำความเย็นและจำลองความสัมพันธ์นั้นให้อยู่ในรูปแบบทางคณิตศาสตร์ เพื่ออาศัยทฤษฎีและคุณสมบัติทางคณิตศาสตร์ ค้นหาจุดที่สามารถปรับปรุงระบบทำความเย็นให้ทำงานได้ประสิทธิภาพสูงสุด ประหยัดพลังงาน และลดค่าใช้จ่ายลง แล้วใช้จุดนั้นกำหนดสภาวะการทำงาน ต่าง ๆ ของระบบ*

*This paper showed the functions of the equipments in Chiller Plant, the system can be making in mathematical forming. Using the theories and the Physical laws simulated to its optimum state. The energy conservation and the economization will be used to set up the condition of the system.*


### 1. บทนำ

ระบบงานที่ใหญ่ๆ เมื่อต้องการเดินเครื่องเพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพดีสูงสุด จำเป็นต้องเข้าใจถึงการทำงานที่สัมพันธ์กันของอุปกรณ์ต่างๆ ภายในระบบ กล่าวคือความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถภาพหรือประสิทธิภาพของ Boilers, Chillers, Pumps, Heaters และอุปกรณ์อื่นๆ จากการทำงานที่สัมพันธ์ภายในระบบนี้ นำมาสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบรวม

### 2. การ Optimization

การ Optimization ที่กล่าวในที่นี้ หมายความถึงการทำฟังชั่นที่กำลังพิจารณาให้มีค่าต่ำสุด (Minimization) ภายใต้เงื่อนไขของสมการบังคับ (constraints) ฟังชั่นที่กำลังพิจารณาเราเรียกว่า "Objective Function"

Objective Function : min f(x)

$$
\begin{aligned}
S.T \quad & P_i(x) = a_i & i &= 1,2,\ldots,m_1 < n \\
& q_j(x) = b_j & j &= 1,2,\ldots,m_2 \\
& c_k \le x_k \le d_k & k &= 1,2,\ldots,n
\end{aligned}
$$

ซึ่ง f(x) คือ ฟังชั่นที่ต้องการทำให้มีค่าต่ำสุด (minimized) ซึ่งค่า $a_i$, $b_j$, $c_k$ และ $d_k$ เป็นค่าคงที่และ $P_i(x)$, $q_j(x)$, และ f(x) เป็นฟังชั่นเชิงเส้นหรือฟังชั่นไม่เชิงเส้นก็ได้

การ Optimization ระบบ chiller ประกอบด้วย objective functions ซึ่งเป็นฟังชั่นไม่เชิงเส้น (nonlinear) และฟังชั่นเป็นแบบ separable ซึ่งหมายถึง Objective function f(x) เขียนในรูปดังนี้

$$f(x) = \sum_{I=1}^{n} Y_i(x_i)$$

### 3. Lagrange Multiplier

วิธีการ Optimization ที่ใช้แก้ปัญหาระบบร่วมนั้นพิจารณาจากวิธีการของ Lagrange multiplier Technique ซึ่งหาจุดที่ทำให้สมการ Objective function มีค่าต่ำสุด และต้องสอดคล้องกับสมการ constraints

การสร้าง Lagrange multiplier augment function กระทำดังนี้ สมมุติว่ามีสมการที่กำลังพิจารณาดังนี้

$$Min\,f(x)$$

$$S.T \qquad g_i(x) = 0 \qquad i = 1,2,3...m < n$$

ซึ่ง f(x) เป็นสมการที่จะ optimized และ $g_i$ (x) เป็นสมการ constraints โดยที่ x เป็นตัวแปรอิสระ ดังนั้นรูปแบบของ Lagrange Multiplier ซึ่งเรียกว่า "Lagrangian" คือ

$$L(x,\lambda) = f(x) + \sum_{I=1}^{m} \lambda_i g_i(x) \qquad (1)$$

Lagrange Multipliers, $\lambda_I$ เป็นตัวแปรไม่ทราบค่า ซึ่งจะได้ m+n สมการและตัวแปรไม่ทราบค่า m+n ตัว การหาผลลัพธ์ของสมการ ทำได้โดยการทำอนุพันธ์บางส่วน เทียบกับตัวแปรไม่ทราบค่าแต่ละตัว แล้วให้สมการมีค่าเท่ากับศูนย์ อนุพันธ์บางส่วนของสมการ (1) คือ

$$\frac{\partial L}{\partial x_j} = \frac{\partial f}{\partial x_j} + \sum_{i=1}^{m} \lambda_i \frac{\partial g_i}{\partial x_j} = 0 \quad j = 1,2,...,n$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_i} = g_i(x) \qquad i = 1,2,...,m$$

ซึ่ง $x_j$ เป็นค่าย่อยของ $\underline{x}$

ค่า optimal ของ Langrangian เป็นค่าเดียวกันกับค่า optimal ของสมการเริ่มแรก

ให้ $X^{(0)}$ เป็นค่าที่สมมติครั้งแรก ในการหาค่าของสมการไม่เป็นเชิงเส้น ใน $\underline{X}$ ให้ $\underline{F}(X^{(0)})$ เป็นค่าของสมการที่สมมติครั้งแรก $\underline{J}(\underline{X}^{(0)})$ เป็นค่า Jacobian ที่ $\underline{X}^{(0)}$ (superscript แสดง iteration) ดังนั้น initial iteration คือ

$$\underline{J}(\underline{X}^{(0)})\, \underline{Y}^{(0)} = -\underline{F}(\underline{X}^{(0)})$$

ซึ่งหาค่า $Y^{(0)}$ ได้ iterative ครั้งต่อไปใช้

$$\underline{X}^{(1)} = \underline{X}^{(0)} + \underline{Y}^{(0)}$$

ดังนั้นเขียนในรูปทั่วๆ ไปได้

$$\underline{J}(\underline{X}^{(k)})\, \underline{Y}^{(k)} = -\underline{F}(\underline{X}^{(k)})$$

ซึ่งหาค่า $\underline{Y}^{(k)}$

และ $$\underline{X}^{(k+1)} = \underline{X}^{(k)} + \underline{Y}^{(k)}$$

จะเกิด Convergence เมื่อผลลัพธ์

$$/\, \underline{X}^{(k+1)} - \underline{X}^{(k)} \,/ < \varepsilon$$

**4. ระบบทำความเย็นด้วยน้ำเย็นหมุนเวียน**

การ Optimization ระบบทำความเย็นขนาดใหญ่ Chiller แต่ละตัวจ่ายน้ำเย็นไปยังท่อร่วม เพื่อส่งน้ำเย็นไปใช้งานตามจุดต่างๆ อุณหภูมิของน้ำที่เข้าคอนเดนเซอร์ (Condenser water temperature) มีผลต่อสมรรถภาพการทำงาน (Coefficient of performance) ของเครื่องแต่ละชุดในการ Optimizing chiller ที่ต่อทำงานร่วมกันหลายตัว ข้อมูลทางสมรรถภาพการทำงานของเครื่องได้มาจากโรงงานผู้ผลิต และเป็นข้อมูลสำหรับแต่ละเครื่องเท่านั้นสมมุติให้อุณหภูมิของน้ำที่เข้าคอนเดนเซอร์ Entering condenser water temperature (ECWT) ปกติจะเท่ากับ 35°C

Chiller แต่ละตัวที่จ่ายน้ำเย็นไปยังท่อร่วม จะมีเส้นสัมประสิทธิ์การทำงานที่คล้ายคลึงกัน การ Optimization จากการเลือกเส้นสัมประสิทธิ์เส้นใดเส้นหนึ่งโดยถือค่า ECWT จากข้อมูลทางสมรรถภาพของ Chiller แต่ละตัว ในการเลือกอาจใช้วิธีการ Interpolation ถ้าค่าของ ECWT ไม่ใช่ค่าเดียวกับที่ปรากฏในเส้นสัมประสิทธิ์การทำงานกับภาระ (Load) เมื่อเราได้เส้นสัมประสิทธิ์การทำงานกับภาระ การ Optimize จะกระทำดังต่อไปนี้ กำหนดชุดของเครื่องจักรที่ทำความเย็นใช้อักษรห้อยท้าย ' j ' แสดงเครื่องจักรที่กล่าวถึง

พลังงานที่ให้กับ Chiller แต่ละตัว คำนวณได้ดังนี้

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

เมื่อ $E_j$ = พลังงานที่ให้กับ Chiller ' j ' (Kw)

$y_j$ = ภาระการทำความเย็นของ Chiller ' j ' (Kw)

$\beta_j$ = สมรรถภาพการทำงานของ Chiller ' j '

Tk = ECWT , (°C)

ค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่อง Chiller ' j ' คือ

$$Q_j = C_j E_j \qquad (B/s)$$

$$Q_j = \frac{C_j y_j}{\beta_j} \qquad (B/s)$$

เมื่อ $C_j$ = ค่าใช้จ่ายของพลังงานที่ให้กับ Chiller ' j ' (B/KJ)

ค่าใช้จ่ายของพลังงานที่ให้กับ Chiller, $C_j$ หาได้ดังนี้

$$C_j = \frac{K}{X\Delta h} \qquad (B/KJ)$$

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

K = ค่าใช้จ่ายของการผลิตไอน้ำ (B/s)

$\Delta h$ = พลังงานที่ให้กับไอน้ำ (KJ/Kg)

ค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องทำความเย็น ,Q, จะแสดงได้เป็น

$$Q = \sum_{j=1}^{3} Q_j \qquad (B/s)$$

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

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

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

ดังนั้นในการ Optimize chiller จะได้ Objective Function

$$Min\, Q = \sum_{j=1}^{3} \frac{C_j y_j}{\beta_j} \qquad (B/s)$$

*Constraints :*

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

$$0 \le y_j \le N_j \quad j = 1,2,3$$

เมื่อ Y = ภาระทำความเย็นทั้งหมด (KW)

$N_j$ = ความสามารถสูงสุดของ Chiller ' j ' (KW)

$\beta_j$ = Coefficience of performance

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

S = ค่าใช้จ่ายไอน้ำต่อการผลิตพลังงานความร้อน (B/KJ)

เส้นสัมประสิทธิ์การทำงานของ Chillers เป็นฟังชั่นของภาระ (load), $Y_j$, และค่า ECWT, $T_k$ ซึ่งเขียนได้เป็น $B_{j,k}$ ($Y_j$,$T_k$) และแสดงอยู่ในรูป polynomial ได้ดังนี้

$$\beta_{j,k}\ (y_j, T_k) = a_{j,k} + b_{j,k}\ y_j + c_j, k\ y^2_j + \ldots$$

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

$$\beta_{j,k}\ (y_j, T'_k) = a_{j,k} + b_{j,k}\ y_j + c_j, k\ y^2_j + \ldots + B$$

ซึ่งเทอมแรกคือ เส้นสัมประสิทธิ์ที่ ECWT มีค่าต่ำกว่าค่า ECWT ที่ไม่แน่นอน ($T'_k$) และ B คือค่า bias มีหลายวิธีที่ใช้ในการสร้างเส้นสัมประสิทธิ์การทำงานของ chiller

$$\beta_j\ ((\Delta T)_i, F_i) = a_i F^2_i + b_i\ (\Delta T)^2_i + c_i F_i + d_i\ (\Delta T)_i + e_j F_i\ (\Delta T)\ i + f_i$$

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

$F_i$ = การไหลของน้ำเย็นของ chiller i

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

## 5. เอกสารอ้างอิง


5.1) สุรชัย ระตะนะอาพร,"**วิทยานิพนธ์ การใช้ระบบทำความเย็นและหม้อน้ำให้เกิดประโยชน์สูงสุด เพื่อการประหยัดพลังงาน**", จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี 2529

5.2) Hewlon Zimmer, **"Chiller Control Using On-Line Allocation for Energy Conservation"**, Instrument Society of America, 1976

5.3) Leon S, Lasdon , **"Optimization Theory for Large System."** London: The Macmillan Company, 1970

5.4) Donald A. Pierre. **"Mathematical Programming Via Augmented Lagrangian."** Reading, Massachusetts, Addison-Wesley Publishing Company. Inc., 1975