

การศึกษาเชิงทฤษฎีเพื่อหาผลของความชื้นในอากาศต่อการถ่ายโอนความร้อนบนผิวเย็นโดย การวิเคราะห์เชิงมิติ

Theoretical analysis for an effect of air humidity on heat transfer on a cold surface by dimensional analysis.

ธนากร วงศ์วัฒนาเสถียร¹ สัญญา สิงห์ธวัช²

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น
โทรศัพท์ +66-43-244296 Ext. 125 Fax. +66-43-245878 E-mail: tanwon@kku.ac.th¹, Singthawat@hotmail.com²

Tanakorn Wongwuttanasatian Sanya Singthawat

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, 40002, Thailand

Tel. +66-43-244296 Ext. 125 Fax. +66-43-245878 E-mail: tanwon@kku.ac.th¹, Singthawat@hotmail.com²

บทคัดย่อ

จุดประสงค์ของการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ต้องการหาความสัมพันธ์ที่มีผลต่อการพาความร้อนของอากาศชื้นทั้งในสภาวะผิวแห้งและผิวเปียก การสร้างกลุ่มตัวแปรไร้มิตินี้จะใช้ทฤษฎีบทกึ่งแอม-พายในการวิเคราะห์ ซึ่งในเบื้องต้นจะตั้งสมมติฐานว่าความชื้นในอากาศน่าจะมีผลต่อการถ่ายโอนความร้อนและใช้การวิเคราะห์เชิงมิติพบว่าการถ่ายโอนความร้อนในสภาวะผิวแห้ง นัสเซลท์นัมเบอร์ ขึ้นกับ เรโนลด์นัมเบอร์ เพรนต์ลนัมเบอร์ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ $Nu = f(Re, Pr, \phi)$ สำหรับการถ่ายโอนความร้อนในกรณีผิวเปียกพบว่า นัสเซลท์นัมเบอร์ ขึ้นกับ เรโนลด์นัมเบอร์ เพรนต์ลนัมเบอร์ แกรซฮอฟนัมเบอร์ จาคอบนัมเบอร์ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ $Nu = f(Re, Pr, Gr, Ja, \phi)$ กลุ่มตัวแปรที่ได้เหล่านี้จะนำมากำหนดความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรโดยอาศัยการทำสหสัมพันธ์จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

Abstract

In this paper, dimensionless parameters that affect on moist air convective heat transfer in both dry and wet surface conditions are being determined. Buckingham-Pi Theorem is used for this analysis. Initially, the humidity of air was assumed to be a parameter that affect the heat transfer. By dimensional analysis, it is shown that under a dry surface condition, Nusselt number depends on Reynolds number, Prandtl number and the relative humidity $[Nu = f(Re, Pr, \phi)]$. For a wet surface condition, Nusselt number is a function of Reynolds number, Prandtl number, Grashof number,

Jacob number and the relative humidity $[Nu = f(Re, Pr, Gr, Ja, \phi)]$. These dimensionless parameters will be correlated using experimental data to determine the semi empirical relation between these parameters.

1. บทนำ

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่เป็นการทำความเย็นให้กับอากาศแบบไม่สัมผัสโดยตรงนั้นค่าความต้านทานความร้อนหลักคือค่าความต้านทานความร้อนผิวกาศ ดังนั้นการทราบค่าความต้านทานความร้อนหรือค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนผิวกาศที่ถูกต้องจะเป็นผลดีในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนดังกล่าว สำหรับประเทศในเขตร้อนชื้นแล้วความชื้นของอากาศเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนผิวกาศ โดยเฉพาะประเทศไทยซึ่งมีความชื้นสูงและเปลี่ยนแปลงในช่วงกว้าง (40%-95%, ความชื้นสัมพัทธ์) นอกจากภาระในการทำความเย็นแล้วต้องรับภาระในการลดความชื้นด้วย เมื่ออากาศชื้นผ่านคอยล์เย็นและมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดน้ำค้างไอน้ำในอากาศชื้นจะเกิดการควบแน่นเป็นหยดน้ำที่ผิวท่อสารทำความเย็น ซึ่งจะมีผลต่อการไหลของอากาศและการถ่ายเทความร้อนในผิวกาศ จากการค้นคว้างานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ยังไม่มีการศึกษาอย่างแพร่หลายนักและผลการศึกษายังขัดแย้งกันอยู่ Man-Hoe Kim^[1] และคณะได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องมือทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของความชื้นของอากาศขาเข้าต่อสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนผิวกาศของคอยล์เย็น โดยมีสารทำความเย็นเป็น glycol สภาวะของอากาศที่ทำการทดสอบมีอุณหภูมิ 12° C และความชื้นสัมพัทธ์ 60-90% โดยสารทำความเย็นมีอุณหภูมิ 0-2.5° C.

ผลการทดสอบพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผิวด้านอากาศมีค่าลดลงเมื่อค่าความชื้นของอากาศขาเข้ามีค่าสูงขึ้น และพบว่าความดันลด (Pressure drop) ในกรณีผิวเปียกสูงกว่าในกรณีผิวแห้ง 3 – 14% Wei-Song^[2] และคณะ ศึกษาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ compact fin-and-tube heat exchanger ในสภาวะผิวเปียก สภาวะของอากาศขาเข้าที่ทำการทดสอบเป็นมีอุณหภูมิกระเปาะแห้ง 27 ± 0.5 °C ความชื้นสัมพัทธ์ตั้งแต่ 50 – 90% ความเร็วของอากาศขาเข้า 0.3 – 0.35 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิของน้ำเย็นขาเข้า 6.5 ± 2 °C ความเร็วของน้ำเย็นขาเข้า 1.2 – 2.0 เมตรต่อวินาที พบว่าความชื้นของอากาศขาเข้ามีอิทธิพลต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนน้อย แต่อย่างไรก็ยังพบว่าความชื้นสูงจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าสภาวะที่ความชื้นต่ำเล็กน้อย

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาสมรรถนะของคอยล์เย็นเมื่อความชื้นของอากาศเปลี่ยนแปลง โดยเป็นส่วนของการวิเคราะห์เชิงมิติเพื่อสร้างกลุ่มตัวแปรไร้มิติสำหรับทำนายสมรรถนะของคอยล์เย็นโดยใช้ทฤษฎี Buckingham-π ซึ่งเป็นทฤษฎีหนึ่งในหลายๆทฤษฎีที่นิยมนำมาใช้ในการวิเคราะห์เชิงมิติมาใช้ในการศึกษาค้นคว้า

2. ทฤษฎี Buckingham-π

การออกแบบทางวิศวกรรมเพื่อให้ได้ต้นแบบตามที่ต้องการ พฤติกรรมทางฟิสิกส์และวิศวกรรมจะถูกศึกษาจากแบบจำลอง โดยทั่วไปแบบจำลองจะมีขนาดเล็กกว่าต้นแบบ แต่ทำการทดลองการทำงานภายใต้สภาวะเดียวกับต้นแบบ ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรหลายๆตัวของแบบจำลองนั้นการวิเคราะห์เชิงมิติจะถูกนำมาใช้แทนการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีซึ่งยุ่งยากและไม่เหมาะสม พื้นฐานของการวิเคราะห์เชิงมิติคือการลดจำนวนตัวแปรที่มีหลายตัวของแบบจำลองหรือปัญหา เป็นกลุ่มของตัวแปรไร้มิติที่เป็นอิสระต่อกันให้เหลือจำนวนน้อยกลุ่มลง ในที่นี้จะกล่าวถึงทฤษฎีวิเคราะห์เชิงมิติที่นำมาใช้อย่างแพร่หลายคือทฤษฎี Buckingham-π

จากปัญหาทางกายภาพที่มีตัวแปรที่เกี่ยวข้องจำนวน n ตัวโดยตัวแปรตามหนึ่งตัวที่เราสนใจเป็นฟังก์ชันของตัวแปรอิสระจำนวน $n-1$ ตัว เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านั้นได้ดังนี้

$$g = f(q_1, q_2, \dots, q_{n-1})$$

โดย g = ตัวแปรตามที่เราสนใจ

$$q_1, q_2, \dots, q_{n-1} = \text{ตัวแปรอิสระที่มีผลต่อตัวแปรตาม}$$

ในทางคณิตศาสตร์เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปฟังก์ชันสมมูลได้ดังนี้ $g(q_1, q_2, \dots, q_{n-1}) = 0$ โดยฟังก์ชัน g เป็นฟังก์ชันที่ยังไม่ทราบรูปแบบและแตกต่างจากฟังก์ชัน f ทฤษฎี Buckingham-π จะไม่สามารถหาฟังก์ชัน g ได้ แต่จะทำการจัดรูปแบบตัวแปรทั้ง n ตัวให้เป็นกลุ่มตัวแปรไร้มิติจำนวน $n-m$ กลุ่ม โดยเรียกกลุ่มเหล่านั้นว่ากลุ่มตัวแปรพาย (Π - parameter) ซึ่งจะเขียนในรูป $G(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-m}) = 0$

หรือ $\Pi_1 = G_1(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-m})$ จำนวน m ปกติมีค่าเท่ากับจำนวนตัวแปรอิสระ (หรือหน่วยพื้นฐาน) ที่น้อยที่สุดที่สามารถแสดงหน่วยของตัวแปร

ทุกตัวที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้ ทฤษฎี Buckingham-π นั้นไม่ได้วิเคราะห์รูปแบบของฟังก์ชัน G หรือ G_1 แต่จะหาเทอมของกลุ่มตัวแปรพาย $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-m}$ การหารูปแบบของฟังก์ชัน G นั้นจะต้องใช้ข้อมูลจากการทดลองมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรพายที่สร้างขึ้น

การสร้างกลุ่มตัวแปรพาย

การสร้างกลุ่มตัวแปรพายมีขั้นตอนทั้งหมด 6 ขั้นตอนดังนี้

- (1) กำหนดพารามิเตอร์ทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับระบบ ในขั้นตอนนี้อาจจะตัดพารามิเตอร์บางตัวออกไปเพื่อให้การวิเคราะห์ง่ายขึ้น และกำหนดให้สัญลักษณ์ n แทนจำนวนพารามิเตอร์ทั้งหมด
- (2) เลือกกลุ่มมิติพื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ เช่น ระบบ M L t หรือ F L t สำหรับระบบทางความร้อนต้องการพารามิเตอร์ T (อุณหภูมิ) รวมด้วย
- (3) กำหนดมิติของพารามิเตอร์ทุกตัวในเทอมของมิติพื้นฐานที่เลือกใช้ และให้สัญลักษณ์ m แทนจำนวนมิติพื้นฐาน
- (4) เลือกพารามิเตอร์จากกลุ่มพารามิเตอร์ในขั้นตอนที่ 3 เพื่อใช้เป็นพารามิเตอร์ซ้ำ ซึ่งจำนวนพารามิเตอร์ซ้ำโดยทั่วไปจะเท่ากับจำนวนมิติพื้นฐาน
- (5) จัดสมการมิติโดยรวมพารามิเตอร์ซ้ำทั้งหมดกับพารามิเตอร์ที่เหลือทีละตัวเพื่อทำการจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติ โดยจะมีสมการที่จัดได้ทั้งหมด $n-m$ สมการ จากนั้นทำการแก้สมการพารามิเตอร์เหล่านั้นจะทำให้ได้กลุ่มตัวแปรไร้มิติ
- (6) ตรวจสอบมิติของกลุ่มตัวแปรที่สร้างขึ้นมาว่าเป็นกลุ่มตัวแปรไร้มิติจริงหรือไม่

3. การวิเคราะห์เชิงมิติสำหรับการถ่ายโอนความร้อนบนผิวเย็น

ตามที่กล่าวไปแล้วว่าการวิเคราะห์เชิงมิติสำหรับการถ่ายพาความร้อนของอากาศชื้นนั้นสามารถแยกตามสภาวะของผิวเย็นได้เป็นสองกรณี การถ่ายพาความร้อนของอากาศชื้นในสภาวะผิวแห้ง และสภาวะผิวเปียก ซึ่งทั้งสองกรณีมีความแตกต่างกันซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

3.1 การวิเคราะห์เชิงมิติสำหรับการพาความร้อนของอากาศชื้นในสภาวะผิวแห้ง

การศึกษาค้นคว้านี้ต้องการศึกษาถึงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนผิวด้านอากาศของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนในการพาความร้อนในสภาวะผิวแห้งเป็นการพาความร้อนที่เป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนเท่านั้นไม่มีการถ่ายเทมวล จึงไม่มีการถ่ายเทความร้อนแฝง ดังนั้นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h_o) ที่เลือกศึกษาคือ ค่าการนำความร้อน (k) ความหนืด (μ) ความจุความร้อนจำเพาะ (c_p) ความหนาแน่นของอากาศชื้น (ρ) เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (D) ความเร็วเฉลี่ย (V) และเนื่องจากอากาศที่ทดสอบเป็นอากาศชื้นดังนั้นความชื้นของอากาศ (ϕ) จึงเป็นอีกปัจจัยและเป็นประเด็นหลักในการศึกษาในครั้งนี้ ดังนั้นจะเขียนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระในรูป $h_o = f(k, \mu, c_p, \rho, D, V, \phi)$

ขั้นตอนต่อไปต้องพิจารณามิติของตัวแปรทุกที่เกี่ยวข้องกับตัว ซึ่ง

สามารถพิจารณาได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\text{มิติของ } h_o &= \text{มิติของ } \frac{\text{energy}}{\text{area} \times \text{time} \times \text{temperature}} \\ &= \frac{(ML^2/T^2)}{L^2 \times T \times \theta} = \frac{M}{T^3\theta} \\ \text{มิติของ } k &= \text{มิติของ } \frac{\text{energy}}{\text{area} \times \text{time} \times \left(\frac{\text{temperature}}{\text{length}}\right)} \\ &= \frac{(ML^2/T^2)}{L^2 \times T \times (\theta/L)} = \frac{ML}{T^3\theta} \\ \text{มิติของ } c_p &= \text{มิติของ } \frac{\text{energy}}{(\text{mass} \times \text{temperature})} \\ &= \frac{(ML^2/T^2)}{M \times \theta} = \frac{L^2}{T^2\theta}\end{aligned}$$

ทำนองเดียวกันจะหามิติของตัวแปรต่างๆได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\text{มิติของ } \mu &= \frac{M}{LT} & \text{มิติของ } \rho &= \frac{M}{L^3} \\ \text{มิติของ } D &= L & \text{มิติของ } V &= \frac{L}{T} \\ \text{มิติของ } \phi &= 1 \text{ (เทอมไร้มิติ)}\end{aligned}$$

ตารางที่ 3.1 แสดงมิติของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการพาความร้อนในสภาวะที่คอยล์เย็นเป็นแบบผิวแห้ง

ตัวแปร	h_o	k	c_p	μ	ρ	D	V	ϕ
มิติ	$\frac{M}{T^3\theta}$	$\frac{ML}{T^3\theta}$	$\frac{L^2}{T^2\theta}$	$\frac{M}{LT}$	$\frac{M}{L^3}$	L	$\frac{L}{T}$	1

ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ทั้งหมดมี 8 ตัวแปร โดยมีมิติแสดงได้ดังตารางที่ 3.1 จำนวนตัวแปรพื้นฐานที่น้อยที่สุดที่สามารถระบุมิติของตัวแปรทั้งหมดได้ต้องใช้ตัวแปรพื้นฐาน 4 ตัวคือ M, L, T, θ โดย M คือมวล L คือความยาว T คือเวลา θ คืออุณหภูมิ

$$\text{จำนวนมิติพื้นฐาน} \quad m = 4 \text{ ตัว } (M, L, T, \theta)$$

$$\text{จำนวนตัวแปรเดิม} \quad n = 8 \text{ ตัว } (h_o, k, \mu, c_p, \rho, D, V, \phi)$$

$$\text{กลุ่มพายมีทั้งหมด } n - m = 8 - 4 = 4 \text{ กลุ่ม}$$

กำหนดตัวแปรซ้ำคือ k, μ, ρ, D ดังนั้นกลุ่มพายทั้งหมดเขียนได้ดังนี้

$$\Pi_1 = k^{a_1} \cdot \mu^{b_1} \cdot \rho^{c_1} \cdot D^{d_1} \cdot h_o, \quad \Pi_2 = k^{a_2} \cdot \mu^{b_2} \cdot \rho^{c_2} \cdot D^{d_2} \cdot V$$

$$\Pi_3 = k^{a_3} \cdot \mu^{b_3} \cdot \rho^{c_3} \cdot D^{d_3} \cdot c_p, \quad \Pi_4 = k^{a_4} \cdot \mu^{b_4} \cdot \rho^{c_4} \cdot D^{d_4} \cdot \phi$$

จากกลุ่ม Π_1 เมื่อเป็นเทอมไร้มิตินั้นจะได้ว่า

$$\left(\frac{ML}{T^3\theta}\right)^{a_1} \cdot \left(\frac{M}{LT}\right)^{b_1} \cdot \left(\frac{M}{L^3}\right)^{c_1} \cdot (L)^{d_1} \cdot \left(\frac{M}{T^3\theta}\right) = M^o L^o T^o \theta^o$$

$$M : a_1 + b_1 + c_1 + 1 = 0$$

$$L : a_1 - b_1 - 3c_1 + d_1 = 0$$

$$T : -3a_1 - b_1 - 3 = 0$$

$$\theta : -a_1 - 1 = 0$$

เมื่อแก้สมการจะได้ว่า $a_1 = -1, b_1 = 0, c_1 = 0, d_1 = 1$

ดังนั้นเทอม Π_1 สามารถเขียนได้เป็น $\Pi_1 = \frac{hD}{k} = Nu$ ทำนองเดียวกันเมื่อ

แก้สมการของกลุ่มตัวแปรพายทั้งหมดจะสามารถเขียนกลุ่มตัวแปรพายได้ดังนี้

$$\Pi_1 = \frac{hD}{k} = Nu, \quad \Pi_2 = \frac{\rho VD}{\mu} = Re, \quad \Pi_3 = \frac{\mu c_p}{k} = Pr$$

$$\Pi_4 = \phi$$

ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ในรูป $f(Nu, Pr, Re, \phi) = 0$

$$\text{หรือ } Nu = f(Pr, Re, \phi)$$

3.2 การวิเคราะห์เชิงมิติสำหรับการพาความร้อนของอากาศชั้นในสภาวะผิวเปียก

การวิเคราะห์เชิงมิติสำหรับการพาความร้อนของอากาศชั้นในสภาวะผิวเปียกนั้นปัจจัยที่มีอิทธิพลซึ่งต้องศึกษาเพิ่มเติมจากกรณีการพาความร้อนของอากาศชั้นในสภาวะผิวแห้งคือปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการควบแน่นของไอน้ำในอากาศ และ ปัจจัยที่มีผลต่อการระคายน้ำควบแน่น ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการระคายน้ำควบแน่นเป็นผลของแรงโน้มถ่วงของโลกที่กระทำกับมวลของน้ำควบแน่น ดังนั้นน้ำหนักของน้ำควบแน่นจึงมีผลโดยตรงกับการระคายของน้ำควบแน่น เมื่อพิจารณาน้ำควบแน่นที่มีความหนาแน่น ρ_l มีไอน้ำอิ่มตัวที่มีความหนาแน่น ρ_v ไหลอยู่รอบๆ แรงที่ทำให้น้ำควบแน่นระคายลงสู่ด้านล่างจะเท่ากับ $g(\rho_l - \rho_v)$ ส่วนปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการควบแน่นของไอน้ำในอากาศชั้น (การเปลี่ยนเฟส) คืออุณหภูมิอิ่มตัวของไอน้ำที่บริเวณผิวเย็น (T_s) และอุณหภูมิของผิวเย็น (T_w) โดยพิจารณาความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสองจุด ($T_s - T_w$) แต่ในกรณีที่อุณหภูมิของผิวเย็นต่ำกว่าอุณหภูมิของอากาศอิ่มตัวที่ผิวเปียกจะมีผลทำให้ น้ำควบแน่นระคายความร้อนสู่ผิวเปียกและเกิดสภาวะเย็นยิ่งยวดขึ้น กระบวนการดังกล่าวนั้นสรุปได้ว่าไอน้ำอิ่มตัวที่ผิวเปียกเกิดการควบแน่นและคายความร้อนแฝงหลังจากนั้นก็คายความร้อนสัมผัสให้กับผิวเปียกทำให้เกิดสภาวะเย็นยิ่งยวดดังนั้นในการพิจารณาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการควบแน่นนั้นจึงรวมเอาผลของการคายความร้อนสัมผัสของน้ำควบแน่นด้วยซึ่งสามารถใช้ตัวเลขจากอบซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความร้อนสัมผัส

$$\text{ต่อความร้อนแฝง } Ja = \frac{c_p(T_s - T_w)}{h_{fg}} \text{ และเป็นตัวแปรไร้มิติอยู่แล้วรวมเข้าไป}$$

ในการวิเคราะห์ด้วย

ดังนั้นในการวิเคราะห์เชิงมิติสำหรับการพาความร้อนของอากาศชั้นในสภาวะผิวเปียกมีตัวแปรที่ต้องพิจารณาทั้งหมด 10 ตัว คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h_o) ค่าการนำความร้อน (k) ความหนืด (μ) ความจุความร้อนจำเพาะ (c_p) ความหนาแน่นของอากาศชั้น (ρ) เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (D) ความเร็วเฉลี่ย (V) ความชื้นของอากาศ (ϕ) แรงเนื่องจากน้ำหนักของน้ำควบแน่น $g(\rho_l - \rho_v)$ และ ตัวเลขจากอบ (Ja) ซึ่งสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรได้ดังนี้ $h_o = f(k, \mu, c_p, \rho, D, V, \phi, g(\rho_l - \rho_v), Ja)$

ชุดทดสอบซึ่งแสดงในรูปที่ 4.2 เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบกลุ่มท่อที่มีการจัดเรียงตัวแบบแถวเรียง (in-line) จำนวน 8 ท่อต่อแถว จำนวน 4 แถว ทั้งหมดรวมเป็น 32 ท่อ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ 1 นิ้ว ความยาวท่อ 40 เซนติเมตร อัตราส่วนของระยะระหว่างจุดศูนย์กลางท่อทั้งในแนวตั้งและแนวนอนต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ $\left(\frac{S_L}{D}, \frac{S_T}{D}\right)$ มี

ค่าประมาณ 1.25 เท่ากัน สภาวะของอากาศที่ใช้ทดสอบถูกควบคุมด้วยชุดควบคุมสภาวะอากาศซึ่งประกอบด้วย ชุดท่อลดความชื้น อุปกรณ์เพิ่มความชื้น และเครื่องทำความร้อน ในขณะที่น้ำเย็นถูกควบคุมให้อัตราการไหล และอุณหภูมิคงที่ตลอดการทดลอง การวัดอุณหภูมิของอากาศจะติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (K-type thermocouple) จำนวน 4 จุดที่ทางเข้าของชุดทดสอบ และ 9 จุดที่ทางออกของชุดทดสอบ อัตราการไหลของอากาศสามารถวัดได้โดยติดตั้งออร์ฟิส (Orifice plate) ที่บริเวณทางเข้าและทางออกของชุดทดสอบ ในการศึกษาครั้งนี้จะทำการทดสอบในช่วงที่อากาศมีการไหลแบบราบเรียบในช่วงเรย์น็อลด์สตั้งแต่ 100 ถึง 2000 และเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศตั้งแต่ 10% ถึง 90% น้ำเย็นจะถูกควบคุมให้มีอุณหภูมิ 10°C และอัตราการไหล 20 ลิตรต่อ นาที คงที่ตลอดการทดสอบ

5. การแปลงข้อมูล

เมื่ออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนถูกนำมาใช้เป็นคอยล์เย็นเพื่อทำความเย็นให้กับอากาศชื้นจะสามารถกำหนดสภาวะของคอยล์เย็นตามสภาพของผิวคอยล์ได้เป็น 2 สภาวะ คือ คอยล์เย็นในสภาวะผิวแห้ง และ คอยล์เย็นในสภาวะผิวเปียก สภาวะผิวเปียกจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิของผิวคอยล์เย็นต่ำกว่าอุณหภูมิอิ่มตัวของไอน้ำในอากาศชื้นทำให้เกิดการควบแน่นและมีการสะสมของน้ำควบแน่นที่บริเวณผิวคอยล์เย็นทำให้ทั้งการถ่ายเทความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝง การวิเคราะห์หาอัตราการถ่ายเทความร้อนของผิวคอยล์เย็นในสภาวะผิวเปียกสามารถหาได้จากผลต่างของเอนทาลปีของอากาศขาเข้าและอากาศขาออกจากชุดทดสอบ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศชื้นสามารถหาได้จากสมการความต้านทานความร้อนรวมของระบบ

$$\frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{h_o A_o} + \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\delta_w}{k_w A_w} \quad (1)$$

เมื่อ h_i เป็นสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำเย็นภายในท่อ h_o เป็นสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศชื้น สำหรับกรณีที่ท่อทำด้วยวัสดุทองแดงค่าความต้านทานความร้อนของผนังท่อ $\left(\frac{\delta_w}{k_w A_w}\right)$ จะมีค่าน้อยกว่า 2% ของความต้านทานความร้อนรวมของระบบ ดังนั้นจึงสามารถตัดเทอมของความต้านทานความร้อนของผนังท่อออกไปได้^[3] ดังนั้นสมการ [1] จะอยู่ในรูป

$$\frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{h_o A_o} + \frac{1}{h_i A_i} \quad (2)$$

ดังนั้นจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศชื้นได้จากสมการ

$$h_o = \frac{1}{1/U_o - A_o/(h_i A_i)} \quad (3)$$

การที่จะหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศชื้นนั้นจะต้องทราบค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำเย็นที่ไหลภายในท่อและค่าความต้านทานความร้อนรวมของระบบ เมื่อสมมติให้อุณหภูมิที่ผิวของคอยล์เย็นมีค่าคงที่ดังนั้นการพาความร้อนที่เกิดขึ้นจะเป็นการพาความร้อนแบบบังคับในท่อกลมภายใต้สภาวะการไหลแบบราบเรียบและอุณหภูมิผิวคงที่^[4] ซึ่งมีสมการความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนดังนี้

$$Nu = \frac{hD}{k} = 3.66 \quad (4)$$

ความต้านทานความร้อนรวมของระบบสามารถหาได้จากสมการ

$$Q = A_s U_o \Delta T_{LM} \quad (5)$$

$$\text{โดย } \Delta T_{LM} = \frac{(T_{air,in} - T_w) - (T_{air,out} - T_w)}{\ln[(T_{air,in} - T_w)/(T_{air,out} - T_w)]}$$

เมื่อ T_w คืออุณหภูมิของผิวคอยล์เย็น

กำหนดให้ Q, Q_w คือค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนในกรณีผิวแห้งและผิวเปียกตามลำดับ $\dot{M}_i, \dot{M}_o$ เป็นอัตราการไหลของอากาศชื้นขาเข้าและขาออกจากชุดทดสอบตามลำดับ และ h_o, h_{ow} คือค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในกรณีผิวแห้งและผิวเปียกตามลำดับ จะได้ว่า

กรณีผิวแห้ง

$$Q = \dot{M}_i c_p (T_{air,in} - T_{air,out}) \quad (6)$$

$$Q = A_s U_o \Delta T_{LM} \quad (7)$$

$$U_o = \frac{Q}{A_s \Delta T_{LM}} \quad (8)$$

สมการที่ (3) และสมการที่ (8) จะนำไปใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศชื้น และนำไปหาค่านัสเซลท์นัมเบอร์ จากสมการ

$$Nu = \frac{hD}{k} \text{ โดย } D \text{ คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อ}$$

กรณีผิวเปียก

$$Q_w = \dot{M}_i i_i - \dot{M}_o i_o \quad (9)$$

เมื่อ i_i, i_o เป็นเอนทาลปีของอากาศชื้นที่บริเวณทางเข้าและทางออกของชุดทดสอบตามลำดับ โดยค่าเอนทาลปีของอากาศชื้นหาได้จาก

$$i = c_{p,da}T_{db} + W(i_g + c_{p,v}T_{db}) \quad (10)$$

เมื่อ T_{db} คืออุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศชื้น i_g คือเอนทาลปีของไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศชื้น $c_{p,da}, c_{p,v}$ คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศแห้งและไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศชื้นตามลำดับ ดังนั้นจะได้ว่า

$$Q_w = \dot{M}_i[c_{p,da}T_{db,in} + W_i(i_g + c_{p,v}T_{db,in})] - \dot{M}_o[c_{p,da}T_{db,out} + W_o(i_g + c_{p,v}T_{db,out})] \quad (11)$$

$$Q_w = A_s U_{ow} \Delta T_{LM} \quad (12)$$

$$U_{ow} = \frac{Q_w}{A_s \Delta T_{LM}} \quad (13)$$

สมการที่ (3) และ (13) จะนำไปใช้หาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศชื้นและนำไปหาค่าตัวเลขนัมเบอร์จากสมการ $Nu = \frac{hD}{k}$

จากการวิเคราะห์เชิงมิติของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง พบว่าตัวเลขนัมเบอร์ ขึ้นกับ เรโนลด์นัมเบอร์ เพรนต์นัมเบอร์ แกรซอฟนัมเบอร์ จากอบนัมเบอร์ และ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะขึ้นกับคุณสมบัติของอากาศและน้ำควบแน่นที่เกิดจากการกลั่นตัวของไอน้ำ ในการศึกษาครั้งนี้จะใช้โปรแกรม EES (Engineering Equation Solver) ในการหาค่าคุณสมบัติของอากาศชื้นที่สภาวะต่างๆจากอุณหภูมิ ความชื้น และความดันของอากาศที่ได้จากการทดลอง สำหรับเรโนลด์นัมเบอร์ในกรณีการไหลผ่านกลุ่มท่อขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของมวล

$$Re = \frac{DG_{max}}{\mu}, \quad D \text{ คือเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ } G_{max} \text{ คืออัตราการไหลของมวล}$$

สูงสุดต่อพื้นที่ โดย $G_{max} = \frac{\dot{M}_i}{A_{min}}$, A_{min} คือพื้นที่การไหลอิสระที่มีค่าน้อย

ที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของท่อลดลงด้วยพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของผิวเย็นที่ขวางการไหล $A_{min} = (W \times H)_{air-duct} - (D \times L \times N)$, L คือความยาวของท่อ N คือจำนวนท่อต่อแถว

6. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์สมรรถนะของคอยล์เย็นเมื่อความชื้นของอากาศเปลี่ยนแปลง โดยในบทความนี้เป็นการนำเสนอในส่วนของการวิเคราะห์เชิงมิติเพื่อหากลุ่มตัวแปรไร้มิติที่มีผลต่อการพาความร้อนของอากาศชื้น ซึ่งมีสองกรณีคือ กรณีที่ผิวคอยล์เย็นมีสภาวะเป็นผิวแห้งจะได้กลุ่มตัวแปรไร้มิติซึ่งเขียนในรูปฟังก์ชันได้เป็น $Nu = f(Re, Pr, \phi)$ สำหรับการถ่ายโอนความร้อนในกรณีที่ผิวคอยล์เย็นมีสภาวะเป็นผิวเปียกต้องพิจารณาผลของการควบแน่นของไอน้ำในอากาศด้วย กลุ่มตัวแปรที่สร้างขึ้นจะอยู่ในรูป $Nu = f(Re, Pr, Gr, Ja, \phi)$ กลุ่มตัวแปรไร้มิติที่สร้างขึ้นสามารถนำมาสร้างสมการสหสัมพันธ์เพื่อทำนายผลของความชื้นต่อสมรรถนะของคอยล์เย็นได้โดยอาศัยการทำ สหสัมพันธ์จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ปัจจุบันขั้นตอนการทดลองกำลังอยู่ในระหว่างการดำเนินงาน

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับความกรุณาอย่างยิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์อนุสรณ์ ชินสุวรรณ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ เกี่ยวกับหลักการและแนวความคิดในงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยขอนแก่นผู้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยในโครงการนักวิจัยรุ่นใหม่ประจำปี พ.ศ. 2544

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Kim MH, Song S and Bullard CW "Effect of inlet humidity condition on the air-side performance of an inclined brazed aluminum evaporator", International Journal of refrigeration, 2002, Vol.25, pp.611-620
- [2] Chi CW, Wei SL and Yu JC. "A comparison of the performance of the fin-and-tube heat exchanger in wet condition; with and without hydrophilic coating", Applied Thermal Engineering, 2002, Vol.22, PP.267-278
- [3] Chi CW, Ralph LW and Kuan YC. "Data reduction for air-side performance of fin-and-tube heat exchangers", Experimental Thermal and fluid science, 2000, vol.21, pp.218-226
- [4] Ozisik MN. "Heat transfer a basic approach", McGraw-Hill, Inc, 1985