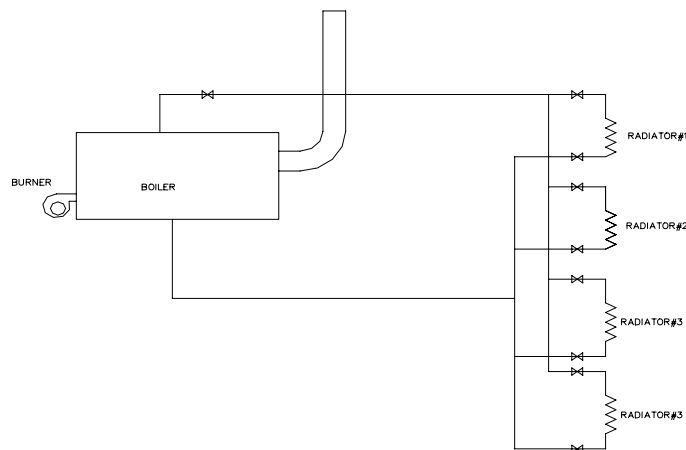


## การพัฒนา Radiant Tube Burner

### โจทย์ หรือปัญหาในการใช้พลังงานความร้อนในอุตสาหกรรม

จากการที่อุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่ต้องการความร้อนในการอบแห้ง หรือต้มน้ำร้อนเพื่อใช้งาน ซึ่งไม่สามารถให้ความร้อนกับอากาศโดยตรงได้ ดังเช่น การอบแห้งพืชผลทางการเกษตร และ อุตสาหกรรมอาหารต่าง ๆ เนื่องจากอากาศร้อนนี้จะต้องมีการผสมกับผลจากการเผาไหม้ (Combustion Result) มีทั้งคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) คาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) และอื่น ๆ ที่อาจจะส่งผลให้ ก๊าซที่ไม่ต้องการนั้นไปผสมกับผลิตภัณฑ์ได้

ในอุตสาหกรรมขนาดกลาง และขนาดใหญ่ นั้นจะใช้การลงทุนหม้อต้มน้ำและนำไอน้ำไป

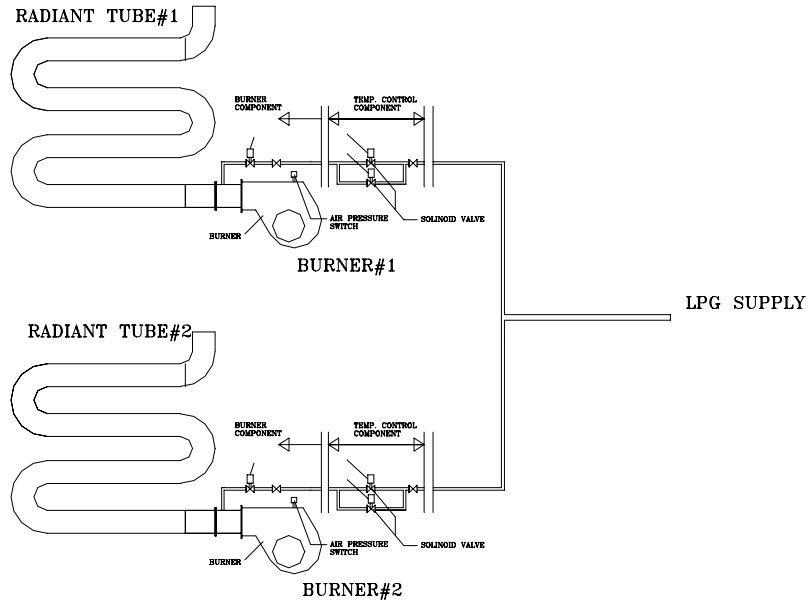


ผ่านแผงระบายความร้อน (Radiator) ไปยังจุดต่าง ๆ ที่ให้ความร้อน

### รูปที่ 1 การให้ความร้อนโดยผ่านหม้อไอน้ำ (Boiler)

การลงทุนโดยใช้หม้อไอน้ำ (Boiler) นั้นเป็นการลงทุนที่สูง และในขณะที่น้ำร้อนนี้จะต้องถูกส่งเข้าไปยังแผงให้ความร้อน (Radiator) จะมีการสูญเสียความร้อนในระบบท่อ

ทางเลือกอีกประการหนึ่งในการใช้พลังงาน ซึ่งเป็นที่นิยมกันแพร่หลายในประเทศ อุตสาหกรรมตะวันตก คือ การใช้พลังงาน ใช้ Radiant Tube Burner



รูปที่ 2 Radiant Tube Burner

Radiant Tube Burner นี้จะทำงานโดยการให้ Burner ฟันไฟเข้าไปในท่อที่มีลักษณะขดกันเป็นแผงกระจายความร้อน ที่เรียกว่า Radiant Tube การสูญเสียความร้อนที่ออกมาจากปลายท่อหรือ ประสิทธิภาพในการให้ความร้อนนี้จะขึ้นอยู่กับความยาวของท่อไฟที่ขดเป็นแผงให้ความร้อนนี้

จะเห็นว่าการให้ความร้อนโดยตรงที่จุดให้ความร้อนนี้จะลดการลงทุนหม้อไอน้ำ และลดความสูญเสียพลังงานของไอน้ำที่ถูกส่งไปตามท่อ รวมทั้งประสิทธิภาพโดยรวมนี้ที่สามารถกำหนดได้โดยความยาวของท่อไฟที่แผงความร้อนนี้

การวิเคราะห์ในเชิงตัวเลขของการลงทุนและการสิ้นเปลืองพลังงานตามตัวอย่างการคำนวณดังต่อไปนี้

**ตัวอย่าง** หากโรงงานผลิตอาหารแห่งหนึ่งต้องการ Radiator จำนวน 10 จุดในแต่ละ Radiator จะให้พลังงานความร้อนที่ 100 kW จะต้องการใช้เชื้อเพลิงและลงทุนทั้งหมดเท่าไร

**กรณีที่ 1 การใช้หม้อไอน้ำ**

พลังงานรวมทั้งหมดที่ต้องการใช้  $10 \times 100 = 1000 \text{ kW}$

ความร้อนสูญเสียเนื่องจากระบบท่อส่งไอน้ำ  $= 10\%$

พลังงานจากหม้อไอน้ำที่ที่ต้องการ	1100 / 0.9	=	1111.11 kW
ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหม้อไอน้ำ		=	90%
จะต้องใช้พลังงานจาก Burner	1111.11 / 0.9	=	1234 kW
ค่าความร้อนของการเผาไหม้เฉลี่ยของก๊าซ LPG (Net Calorific Value)		=	46000 kJ/Kg
ดังนั้นปริมาณการใช้ LPG /วินาที		=	1234/46000
LPG/ชม.		=	$\frac{1234 \times 3,600}{46,000}$
		=	96.57 ก.ก./ชม.
ค่าใช้จ่ายในการใช้พลังงานหาก LPG ราคาประมาณ 10 บาท/ก.ก.		=	965.70 บาท/ชม.
คำนวณที่ 10 ชม./วัน ดังนั้นพลังงาน		=	9,657.00 บาท/วัน
		=	3,524,805.00 บาท/ปี

ในส่วนของการลงทุนเบื้องต้นนั้นวิเคราะห์จากการที่ต้องการผลิตไอน้ำให้ได้พลังงาน 1200 kW หรือ 4,320,000 kJ/hr.

ปริมาณพลังงานของไอน้ำหากเป็นการผลิตไอน้ำอิ่มตัว (Saturated Steam) ที่ความดันบรรยากาศได้ปริมาณไอน้ำถึง 1,700 ก.ก./ชม. หรือ 1.7 ตัน/ชม. ซึ่งหม้อไอน้ำ (Boilers) ที่มีกำลังขนาดนี้จะมีราคาประมาณ 2,000,000.00 บาท

ค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ท่อไอน้ำ = 1,500,000 บาท

พร้อมทั้งระบบควบคุมและแผงความร้อน

รวมค่าใช้จ่ายในการลงทุนทั้งหมด = 3,500,000 บาท

### กรณีที่ใช้ความร้อนจาก Radiant Tube Burner

ประสิทธิภาพในการให้ความร้อนของ Radiant Tube Burner นั้นสามารถออกแบบได้โดยการเพิ่มความยาวของท่อ

ดังนั้นหากกำหนดให้ความยาวที่เหมาะสมสามารถให้มีประสิทธิภาพในการให้ความร้อนได้ถึง 90%

ดังนั้นความต้องการพลังงานจากหัวเตาของแต่ละจุดของ Radiator

$$= 100/0.90 = 111.11 \text{ kW}$$

กำลังความร้อนทั้งหมด 10 จุด	=	1111 kW
อัตราการใช้เชื้อเพลิง LPG/ชม.	=	1111 x 3600
		<u>46,000</u>
	=	87 ก.ก./ชม.
	=	870 ก.ก./วัน
	=	317,550 ก.ก./ปี
ดังนั้น ค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิง LPG/ปี	=	<u>3,175,500</u> ก.ก/ปี

การลงทุนในเบื้องต้น Radiant Tube Burner		
พร้อมอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ พร้อมการติดตั้งประมาณ		150,000 บาท/ชุด
รวมการลงทุนทั้งหมด 10 ชุด	=	1,500,000 บาท

จะเห็นว่าในการใช้พลังงานที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนโดย Radiant Tube Burner นี้ จะเป็นการประหยัดพลังงาน เมื่อเทียบกับการผ่านกระบวนการให้ความร้อนโดยหม้อไอน้ำถึง 349,305.00 บาท/ปี โดยการลงทุนในเบื้องต้นก็น้อยกว่ากันมากกว่า 50%

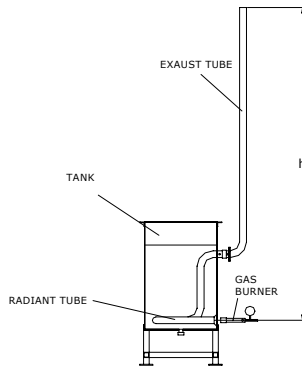
ข้อดีประการหนึ่งของการใช้ Radiant Tube Burner เมื่อเทียบกับการใช้หม้อไอน้ำก็คือ การลดความเสี่ยงต่อการหยุดงานทั้งระบบ เนื่องจากการใช้หม้อไอน้ำนั้น หากมีการตัดระบบการทำงาน ของ Boiler ไม่ว่าสาเหตุใดก็ตามจะทำให้ระบบการจ่ายความร้อนทั้งระบบต้องหยุดทำงาน ซึ่งอาจจะต้องป้องกันโดยการลงทุน Boiler สำรอง (Stand by Boiler) ซึ่งจะต้องใช้เงินลงทุน จำนวนมาก ไม่น้อยกว่า 50 % ของการลงทุนขั้นต้น

แต่หากเป็นการใช้ Radiant Tube Gas Burner ซึ่งแม้จะมีการหยุดทำงานของ Burner ชุดใดชุดหนึ่งก็ตาม แต่ชุดที่เหลือก็จะทำงานก็จะทำงานต่อไปได้ และในการป้องกันทำได้โดยการลงทุนสำรอง Radiant Burner อีก 1 หรือ 2 ชุด ซึ่งเป็นราคาน้อยมากเมื่อเทียบกับการลงทุน Boiler อีกลูกหนึ่ง ซึ่งเป็นเพียงการลงทุนเพิ่มอีกไม่ถึง 20 %

ข้อดีอีกประการหนึ่งของการใช้ Radiant Tube ในลักษณะของตัวอย่างนี้คือ สามารถทำให้ธุรกิจ และอุตสาหกรรมขนาดเล็กเช่นมี Radiator เพียงจำนวนน้อยไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน Boiler ซึ่งธุรกิจลักษณะนี้จะทำการใช้แผงความร้อนโดย Heating Element ที่จ่ายความร้อน ด้วยพลังงานไฟฟ้า ซึ่งจะมีปริมาณการสิ้นเปลืองพลังงานที่คิดเป็นจำนวนเงินแล้วจะมากกว่าแบบที่ใช้ Radiant Tube ที่ 3 เท่า

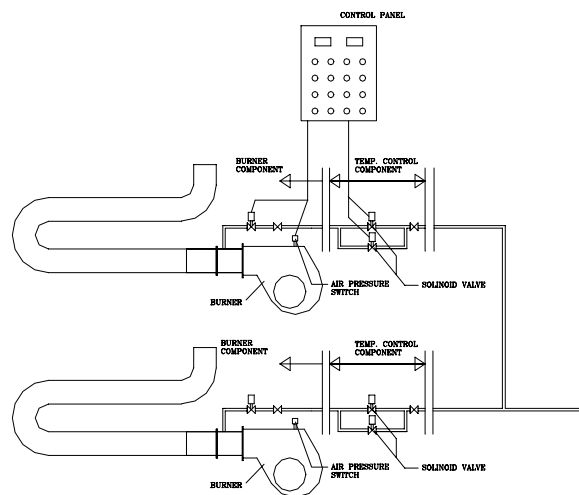
อีกประการหนึ่งของการประยุกต์ใช้ Radiant Tube คือ การที่นำเอา Radiant Tube ไปใช้กับการต้มน้ำ ซึ่งในการทดลองเบื้องต้น โดยการใช้ Radiant Tube แบบ Natural Draught นี้

สามารถทำให้มีประสิทธิภาพในการให้ความร้อนกับน้ำเดือดที่ 100 °C ได้ประมาณ 50 % ที่มากกว่าการต้มน้ำแบบทั่วไปที่ใช้เตาแก๊สแบบแรงดันบรรยากาศ (Atmosphere gas Burner) เช่นในร้านอาหาร และอุตสาหกรรมเล็กๆ ทั่วไป



หากมีการใช้ Radiant Tube ที่เป็นที่ใช้ Burner แรงอัดอากาศ (Forced Draught Radiant Tube Burner) แล้วจะไม่มีข้อจำกัดในเรื่องความยาวที่จะทำให้เพิ่มประสิทธิภาพของการให้ความร้อนซึ่งจะถึง 90 % ทำให้มีการประหยัดพลังงานอย่างเห็นได้ชัด

### รูปที่ 3 Radiant Tube ในลักษณะ Natural draught

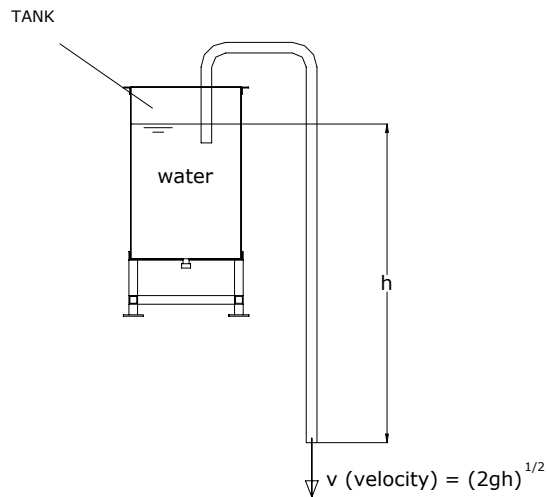


RADIANT TUBE BURNER

## รูปที่ 4 Radiant Tube ในลักษณะของ Forced Draught

### Natural Draught Radiant Tube (อยู่ระหว่างการยื่นขอสิทธิบัตร)

จากการทำการทดสอบการใช้ Radiant Tube Burner ในการต้มน้ำร้อน ซึ่งใช้การทดลอง โดยใช้ Atmospheric Burner ขนาด 20 kW แบบ Venturi Type ที่ทำการผันเปลวไฟเข้าไปในท่อโดยไม่มีแรงอัดอากาศจากพัดลมหรือเครื่องอัดอากาศใด ๆ เข้าไปในท่อ ซึ่งปรากฏการณ์ที่ได้



จากการทดลอง คือการที่อากาศร้อนจากการเผาไหม้ลอยตัวสูงที่พุ่งตรงปากปล่อง

ลักษณะการลอยตัวเช่นนี้จะมีความเร็วมากกว่าการลอยตัวอิสระของอากาศร้อน ซึ่งจะ เป็นการลอยตัวที่มีแรงเหวี่ยงนำในการไหลในลักษณะเกี่ยวกับปรากฏการณ์ของกาลักน้ำ

(Siphon)

### รูปที่ 5 กาลักน้ำ (SIPHON)

ปรากฏการณ์ของกาลักน้ำนี้จะทำให้น้ำไหลลงไปที่ปากท่อที่อยู่ต่ำกว่าระดับผิวน้ำ โดย ความเร็วที่ปลายท่อทางออก  $V$  จะหาได้จากสูตรดังนี้

$$V = U^2 + 2ah \quad (\text{สมมติว่าท่อไม่มีแรงเสียดทาน})$$

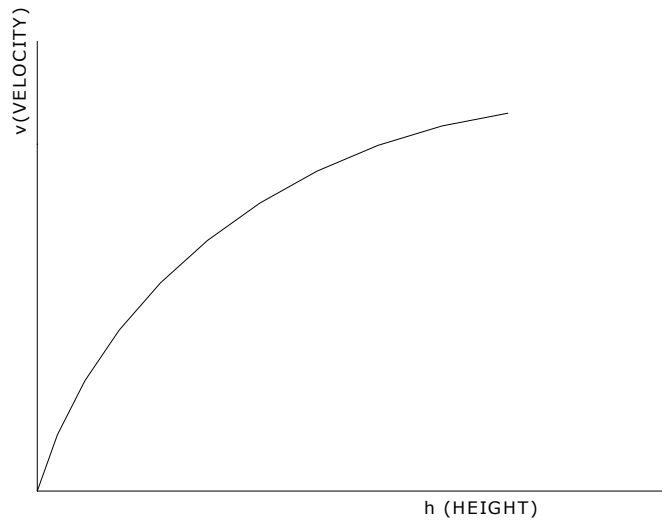
$V$  คือความเร็วปลายท่อ

$U$  คือความเร็วคงที่ผิวน้ำ = 0

$a$  = ความเร็วอัตราเร่งของการไหลซึ่งเท่ากับค่าแรงโน้มถ่วงของโลก ( $g$ )

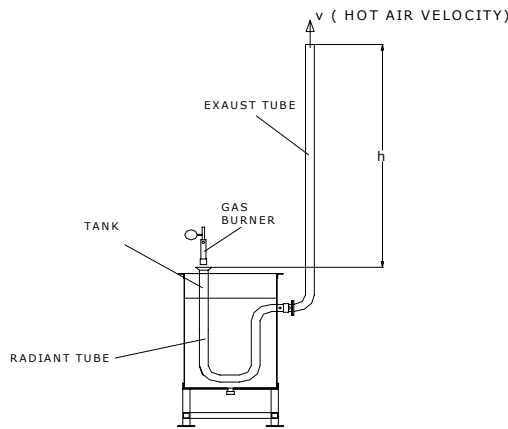
ดังนั้น  $V = (2gh)^{1/2}$

จะเห็นว่าความสัมพันธ์ของการไหลของน้ำของปรากฏการณ์กาลักน้ำนี้ คือความเร็วของน้ำที่ไหล จะมีค่าสัมพันธ์กับความต่างระดับของผิวน้ำกับปากท่อ (h)



**รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงและความเร็วของน้ำจากปรากฏการณ์กาลักน้ำ**

สำหรับปรากฏการณ์ไหลของอากาศร้อนในท่อ Radiant Tube นั้นก็เช่นกันแต่จะเป็นการไหลในทิศทางตรงกันข้ามกับการไหลของกาลักน้ำ โดยการไหลของอากาศร้อนนี้อาจเรียกว่าปรากฏการณ์ Thermo – Siphon โดยปรากฏการณ์นี้จะอธิบายได้ ดังต่อไปนี้



### รูปที่ 7 การไหลแบบ Thermo – Siphon

ความเร็วที่ปลายท่อทางออกของ Radiant Tube นี้จะได้จากสมการ

$$V = (2ah)^{1/2} \text{ (สมมติว่าไม่มีความต้านทานภายในท่อ)}$$

โดยที่  $a$  เป็นอัตราเร่งเนื่องมาจากแรงลอยตัว ( $F = ma$ )

$h$  คือความสูงต่างระดับของทางเข้าและทางออก

แต่เนื่องจากการไหลของอากาศนี้จะทำให้ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ถูกถ่ายเทออกจากผนังท่อ Radiant Tube อย่างต่อเนื่องทำให้อุณหภูมิของอากาศร้อนภายในท่อลดลงซึ่งแรงลอยตัวนี้ก็จะถูกลดลงไปด้วย ดังนี้

$$F = f(t)$$

(อุณหภูมิเป็นฟังก์ชันของแรงลอยตัว)

$$F = a$$

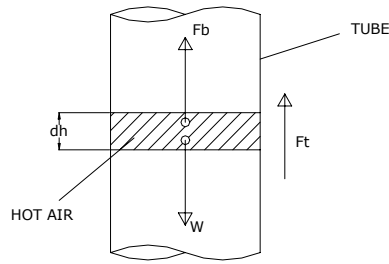
$$\text{ดังนั้น } a = f(t)$$

แต่อุณหภูมิ ( $t$ ) เป็นฟังก์ชันของความสูง ( $h$ ) ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะการขดของท่อ Radiant Tube นี้

$$\text{ดังนั้น } a = f(h)$$

$$V = f(h)$$

ดังนั้นความสัมพันธ์ของความเร็วในการไหลของอากาศร้อนอาจจะต้องอธิบายในรูปของสมการดิฟเฟอเรนเชียล (Differential Equation) ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะการขดของท่อ อัตราการถ่ายเทความร้อน และอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง



**การคำนวณแรงลอยตัวนั้นสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้**

- กำหนดให้น้ำหนักสุทธิของอากาศในสถานะปกติ =  $W_a$
- แรงลอยตัวของอากาศ =  $F_b$

ในกรณีที่ไม่มี การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศจะทำให้ไม่มีการเคลื่อนที่ของอากาศ  
ขึ้นลง

$$\therefore \sum F = 0 = F_b - W_a$$

ดังนั้น  $F_b = W_a$

โดยที่ความหนาแน่นของอากาศในกรณีปกตินี้ =  $P_a$

ในกรณีที่อากาศถูกเพิ่มอุณหภูมิขึ้น ซึ่งจะทำให้ความหนาแน่นของอากาศลดน้อยลงเป็น  
ค่า  $P_t$

$$V = m/P_t$$

ดังนั้นน้ำหนักของอากาศภายในบรรยากาศปกติที่ถูกแทนที่

$$W_a = m \frac{P_a}{P_t} g$$

แรงลอยตัว  $F_b = m \frac{P_a}{P_t} g$

แรงเคลื่อนตัวของอากาศ  $F_t$  คือผลลัพธ์จากการรวมแรงลอยตัวและน้ำหนักอากาศร้อน

$$F_t = F_b - W_t$$

$$F_t = m \frac{P_a}{P_t} g - mg$$

$$F_t = mg (P_a/P_t - 1) \quad (1)$$

**หมายเหตุ** : สมการนี้ไม่ได้คำนึงถึงแรงทานของอากาศกับท่อ  
 จะเห็นว่าจากสมการที่ (1) หาก อากาศภายในท่อมีอุณหภูมิเท่ากับ  
 อากาศในบรรยากาศปกติแล้วค่า  $P_a$  จะเท่ากับ  $P_t$   
 ซึ่งจะทำให้แรงเคลื่อนตัว  $F_t = 0$  นั้นหมายถึงไม่มีการเคลื่อนไหวของ  
 อากาศขึ้นลง

การหาความสัมพันธ์ของความหนาแน่น  $P_t, P_a$  กับอุณหภูมิของอากาศ  
 นั้น อาจจะมีมองเห็นภาพได้ชัดขึ้นนั้นหากมีการวิเคราะห์ โดยการตั้งสมมุติฐานให้  
 อากาศเป็น Perfect gas ดังนี้

$$PV = m RT$$

$$P = \rho RT$$

$$P_a = \rho_a R T_a$$

$$P_t = \rho_t R T_t$$

$$R = \frac{P_a}{\rho_a} = \frac{P_t}{\rho_t}$$

$$P_a T_a = P_t T_t$$

ในกรณีนี้ความดัน  $P_a = P_t$  ดังนี้

$$1 = 1$$

$$P_a T_a = P_t T_t$$

$$P_a T_a = P_t T_t$$

$$P_a T_a = P_t T_t$$

$$P_a = T_t$$

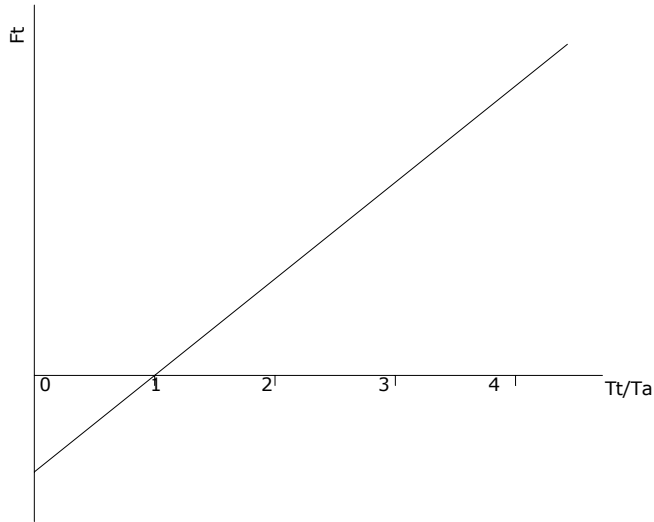
$$P_t = T_a$$

### กำหนดให้

$P_a$  คือความดันบรรยากาศปกติ

$P_t$  คือความดันบรรยากาศร้อนในท่อ

$T_a$  คืออุณหภูมิบรรยากาศปกติ (Kelvin)



$T_f$  คืออุณหภูมิอากาศร้อนในท่อ (Kelvin)

ดังนั้นสมการที่ (2) สามารถเขียนในลักษณะที่มีความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนตัวของอากาศกับอุณหภูมิได้ดังนี้

$$F_t = mg (T_t / T_a - 1) \quad (2) \quad \text{_____}$$

**รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนตัวของอากาศร้อนในท่อกับอัตราส่วนของอุณหภูมิในท่อกับอุณหภูมิในบรรยากาศ ( $T_t/T_a$ )**

จากการทดลองเมื่อวันที่ 15-16 มีนาคม 2543 ซึ่งทำการทดลองต้มน้ำโดยใช้ ท่อ Radiant Tube ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 1/2" ความสูงต่างระดับของทางเข้าและทางออกท่อที่ 1.9 เมตร โดยใช้ Atmospheric Burner ขนาด 20 kW ซึ่งทำให้เกิดปรากฏการณ์ Thermo Siphon ที่สามารถดึงอากาศใหม่ (Fresh - Air) จากปากทางเข้าของท่อมาทำการเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์ซึ่งหากเทียบกับ ปริมาณของอากาศที่ต้องการเผาไหม้ ก๊าซ LPG ที่กำลัง 20 kW จะต้องใช้อากาศบริสุทธิ์ที่ความดันบรรยากาศถึง 0.3211 ลบ.เมตร/นาที หรือ 11.33 cfm หรือ เป็นความเร็วในท่อ เส้นผ่าศูนย์กลาง 2 1/2 นิ้ว เท่ากับ 1.69 เมตร/วินาที

ตารางทดสอบครั้งที่ 1 วันที่ 15 มีนาคม 2543

น้ำ 202 ลิตร ราคาแก๊ส 10 บาท/ กก. ไม่มีฉนวน , ความดัน Nozzle =12 PSI

Time	Temp. ( C )	Internal Energy(Water)		LPG Consumption				Efficiency (%)
		kJ/kg	kJ	kg	kJ	kg/kg(water)	Baht/kg(Water)	
0:00	28	115	23,230	0	0	0	0	
0:10	30			0.2	9,881	0.00099	0.0099	
0:20	44			0.45	22,233	0.0022	0.022	
0:30	51			0.7	34,585	0.0034	0.034	
0:40	58			0.95	46,936	0.0047	0.047	
0:50	65			1.2	59,288	0.0059	0.059	
1:00	71			1.45	71,640	0.00717	0.0717	
1:10	77	320	64,640	1.7	83,991	0.00841	0.0841	49.3
1:20	83	340	68,680	2	98,813	0.0099	0.099	46
1:30	88			2.2	108,694	0.01	0.1	
1:40	92			2.45	121,046	0.012	0.12	
1:50	96			2.65	130,927	0.013	0.13	
2:00	98			2.9	143,279	0.014	0.14	
2:10	101	418.94	84,626	3.3	163,042	0.016	0.16	37.6

ตารางที่ 1 ข้อมูลการทดสอบ Natural Draught Radiant Tube Burner ครั้งที่ 1

ตารางทดสอบครั้งที่ 2 วันที่ 16 มีนาคม 2543

น้ำ 202 ลิตร, ราคาแก๊ส 10 บาท/ กก. , ความดัน Nozzle =12 PSI ,มีฉนวน Micro Fiber 16 K หนา 1"

Time	Temp. ( C )	Internal Energy(Water)		LPG Consumption				Efficiency (%)
		kJ/kg	kJ	kg	kJ	kg/kg(water)	Baht/kg(Water)	
0:00	29	115	24,705	0	0	0	0	
0:10	38			0.265	13,092	1.3x10-3	0.013	
0:20	46			0.53	22,233	2.62x10-3	0.0262	
0:30	55	230.2	46,500.40	0.795	39,277	3.9x10-3	0.039	55.50%
0:40	62	259.4	52,399	1.06	52,369	5.2x10-3	0.052	52.80%
0:50	69	288.7	58,317	1.322	65,313	6.54x10-3	0.065	51.40%
1:00	76	318.1	64,256	1.59	78,554	7.87x10-3	0.078	50.34%
1:10	82	343.2	69,326	1.855	91,640	9.1x10-3	0.091	48.60%
1:20	89	372.6	75,265	2.12	104,738	0.0105	0.105	48.20%
1:30	95	397.9	80,376	2.385	117,831	0.0118	0.118	47.20%
1:40	100	418.94	84,626	2.65	130,927	0.013	0.13	45.70%

ตารางที่ 2 ข้อมูลการทดสอบ Natural Draught Radiant Tube Burner ครั้งที่2