

## รายการอ้างอิง

- [1] ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช. การศึกษาการถ่ายเทความร้อนในเตาชนิดท่อไฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญา  
มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
- [2] Wibulswas, P., and Ajson, K. Energy Recovery and Cogeneration in a Thai Glass  
Factory. การประชุมทางวิชาการร่วมสาขาวิศวกรรมเครื่องกลและวิศวกรรมเคมี. การ  
ถ่ายเทความร้อน มวลและโมเมนตัม '32 (ภาคกระบวนการความร้อนและเคมี).  
วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ 12-13 ธันวาคม 2532 : 13-1  
– 18.
- [3] Morita, M., and Tanigawa, T. Optimal Design for High Performance Industrial  
Furnace Applied High Temperature Air Combustion Technology. Kagaku  
Kogaku Ronbunshu 27 (2000): 227 – 235.
- [4] Ishii, T., Zhang, C., and Sugiyama, S. Numerical Simulations of Highly Preheated  
Air Combustion in an Industrial Furnace. Journal of Energy Resources  
Technology 120 (1998): 276 – 284.
- [5] Gupta, A. K., Bolz, S., and Hasegawa, T. Effect of Air Preheat Temperature and  
Oxygen Concentration on Flame Structure and Emission. Journal of  
Energy Resources Technology 121 (1999): 209 – 216.
- [6] Hasegawa, T., and Tanaka, R. High Temperature Air Combustion – Revolution in  
Combustion Technology (Part I : New Findings on High Temperature Air  
Combustion). JSME International Journal 41 (1998): 1079 – 1084.
- [7] Hoogendoorn, C. J., Ballintijn, C. M., and Dorresteyn, W. R. Heat-flux Studies in  
Vertical Tube Furnaces. Journal Institutes of Fuel 43 (1970): 511 – 516.
- [8] Selcuk, N., Siddall, R. G., and Beer, J. M. Prediction of the Effect of Flame  
Length on Temperature and Radiative Heat Flux Distributions in a Process  
Fluid Heater. Journal Institutes of Fuel 48 (1975): 89 – 96.
- [9] สมรัฐ เกิดสุวรรณ. เทคโนโลยีการเผาไหม้ด้วยอากาศที่อุณหภูมิสูง. วารสารวิศวกรรมสาร  
(กรกฎาคม 2546): 92 – 94.
- [10] Cengel, Y. A. Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer. 1<sup>st</sup> ed.,  
New York : McGraw-Hill, 1997.
- [11] สมศรี จรุงเรือง. ระเบียบวิธีวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์  
แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- [12] Holman, J. P. Heat Transfer. 8<sup>th</sup> ed., New York : McGraw-Hill, 1997.

- [13] Etherington, H., and Etherington, G. Modern furnace technology. 3<sup>rd</sup> ed., London : Charles Griffin, 1961.
- [14] กัญจนา บุญยเกียรติ. เชื้อเพลิงและการเผาไหม้. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [15] โยชิฮิโกะ ทาคามูระ. เทคนิคการประหยัดความร้อนในอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2543.
- [16] Data sheet for energy control. The energy conservation center, JAPAN.
- [17] บริษัทการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย จำกัด (มหาชน). แหล่งที่มา: <http://www.pttplc.com>.
- [18] ปราโมทย์ ไชยเวท. ปิโตรเลียมเทคโนโลยี. กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.
- [19] Roiey, A., Jaffret, C., Carnot-Grandolphe, S., Durand, B., Jullian, S., and Valais, M. Natural Gas: Production Processing Transport. Institut Francais du Petrole Publications, France, 1997.
- [20] Baukal, C. E. Heat Transfer in Industrial Combustion. Florida : CRC Press, 2000.
- [21] สำเริง จักรใจ. การเผาไหม้. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก1 ปริมาณทองแดงที่ใช้ก่อนติดตั้งอุปกรณ์อุณหอากาศ (NG)

เวลา	Cathode (kg)	bar (kg)	Rod (kg)	Scrap (kg)
8.30	2,263.00			
8.35	2,363.00			
8.40	2,303.00			
8.45	2,242.00			
8.50	2,255.00			
8.58	2,304.00			
9.02	2,233.00			
9.07	75.00	400.00		
9.15	2,351.00			
9.20	2,264.00			
9.25	150.00	1,200.00		
9.30	75.00	1,160.00		
9.35	2,320.00			
9.40	2,256.00			
9.45	2,206.00			
9.50				1,740.00
9.55	2,342.00			
10.01	157.00		1,177.00	
10.07	2,236.00			
10.13	157.00		1,179.00	
10.17	2,313.00			
10.34	2,296.00			
10.36	159.00		1,177.00	
10.45	2,324.00			
10.50	2,271.00			
10.53	2,296.00			

เวลา	Cathode (kg)	bar (kg)	Rod (kg)	Scrap (kg)
10.56	2,201.00			
10.59	2,305.00			
11.03	159.00		1,177.00	
11.09		1,160.00		
11.11	75.00	,160.00		
11.19	75.00	1,120.00		
11.23	2,300.00			
11.28	159.00		1,286.00	
<b>รวม</b>	51,485.00	6,200.00	5,996.00	1,740.00
ปริมาณทองแดงที่ใช้ในการหลอมเฉลี่ย 21806 kg/hr				

ตารางที่ ก2 ปริมาณทองแดงที่ใช้ในการหลอมหลังติดตั้งอุปกรณ์อากาศ (NG)

เวลา	Cathode (kg)	Bar (kg)	Rod (kg)
15.47	2,648.00	1080	
15.55	2,552.00	1080	
16.07	2,539.00	1080	
16.1	2,580.00	1080	
16.15	2,587.00	1080	
16.24	2,540.00	1080	
16.32	2,579.00	1080	
16.45	2,590.00	1080	
16.58	2,648.00		1,669.00
17.08	2,678.00	1080	
17.16	2,683.00	1080	
17.35	2,576.00	1080	
17.56	2,660.00	1080	
18.09	2,698.00	1080	
18.13	2,661.00	1080	
18.22	2,696.00	1080	
18.47	2,525.00		
19.06	2,668.00		1,659.00
รวม	47108	16200	3,328.00
ปริมาณทองแดงที่ใช้ในการหลอมเฉลี่ย 22,212 kg/hr			

ตารางที่ ก3 การตรวจวัดเตาหลอมทองแดงก่อนใช้อุปกรณ์อุ่นอากาศ (LPG)

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่า				ค่าเฉลี่ย
			1	2	3	4	
ข้อมูลจากการตรวจวัด							
จำนวนครั้งในการวัด			1	2	3	4	
ปริมาณออกซิเจนในก๊าซเสีย	O <sub>2</sub>	%	16.6	15.7	15.5	16.2	16.0
ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในก๊าซเสีย	CO	ppm	900	753	981	922	889.0
อุณหภูมิก๊าซเสีย	T <sub>g</sub>	°C	363	367	362	366	364.5
อุณหภูมิผิวเตา	T <sub>c</sub>	°C	280	195	280	300	236.75
			273	205	188	250	
			220	182	180	215	
			255	290	215	260	

ตารางที่ ก4 การตรวจวัดเตาหลอมทองแดงก่อนใช้อุปกรณ์อุ่นอากาศ (NG)

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่า				ค่าเฉลี่ย
			1	2	3	4	
ข้อมูลจากการตรวจวัด							
เวลา			1	2	3	4	
ปริมาณออกซิเจนในก๊าซเสีย	O <sub>2</sub>	%	13.8	12.3	15.0	15.9	14.25
ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในก๊าซเสีย	CO	ppm	3000	3000	2800	2700	2875.0
อุณหภูมิก๊าซเสีย	T <sub>g</sub>	°C	405	433	381	406	406.3
อุณหภูมิผิวเตา	T <sub>c</sub>	°C	260	230	232	242	221.88
			275	245	250	252	
			190	170	185	190	
			215	206	212	196	

ตารางที่ ก5 การตรวจวัดเตาหลอมทองแดงหลังใช้อุปกรณ์อุ่นอากาศ (NG)

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่า				ค่าเฉลี่ย
ข้อมูลจากการตรวจวัด							
จำนวนครั้งในการวัด			1	2	3	4	
ปริมาณออกซิเจนในก๊าซเสีย	O <sub>2</sub>	%	13.8	12.3	12.0	14	13.03
ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในก๊าซเสีย	CO	ppm	2863	2543	2800	2700	2726.5
อุณหภูมิก๊าซเสีย	T <sub>g</sub>	°C	385	280	381	321	341.8
อุณหภูมิผิวเตา	T <sub>c</sub>	°C	260	275	256	256	230.63
			275	245	250	252	
			190	170	185	200	
			215	206	212	243	



ตารางที่ 6 ข้อมูลการทดลองเฉลี่ยของเตาหลอม (LPG)

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่า
<b>เชื้อเพลิง LPG</b>			
ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์	CO	ppm	889
ก๊าซออกซิเจน	O <sub>2</sub>	%	16
อุณหภูมิก๊าซเสีย	T <sub>g</sub>	°C	364.5
ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง	$\dot{m}_f$	Nm <sup>3</sup> /hr	340
อุณหภูมิเชื้อเพลิงก่อนเข้าเตาหลอม	T <sub>f</sub>	°C	35
ปริมาณทองแดงที่เข้าเตาหลอม	$\dot{m}_f$	kg/hr	22,060
อุณหภูมิทองแดงก่อนเข้าเตาหลอม	T <sub>cu,i</sub>	°C	35
อุณหภูมิทองแดงออกจากเตาหลอม	T <sub>cu,o</sub>	°C	1,080
อุณหภูมิอากาศเผาไหม้	T <sub>a</sub>	°C	70
ปริมาณน้ำหล่อเย็น	$\dot{m}_w$	°C	89.4
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้า	T <sub>w,i</sub>	°C	34
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นออก	T <sub>w,o</sub>	°C	35
อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม	T <sub>sur</sub>	°C	35
อุณหภูมิอ้างอิง	T <sub>r</sub>	°C	35
พื้นที่ผิวเตาหลอม	A	m <sup>2</sup>	40.24
อุณหภูมิผิวเตาหลอมเฉลี่ย	T <sub>wall</sub>	°C	236.75
Emissivity	$\epsilon$	-	0.4
<b>ข้อมูลทั่วไป</b>			
ความร้อนจำเพาะของอากาศ	C <sub>p,a</sub>	kJ/kg °C	1.005
ความร้อนจำเพาะของทองแดง	C <sub>p,cu</sub>	kJ/kg °C	0.38
ความร้อนจำเพาะของน้ำ	C <sub>p,w</sub>	kJ/kg °C	4.187
ความร้อนจำเพาะของก๊าซเสีย	C <sub>p,fluc</sub>	kcal/Nm <sup>3</sup> K	0.33
ความหนาแน่นของอากาศ	$\rho_a$	kg/Nm <sup>3</sup>	1.293
ความหนาแน่นของ LPG	$\rho_{LPG}$	kg/Nm <sup>3</sup>	2.004
ความหนาแน่นของน้ำ (ที่ 34°C)	$\rho_w$	kg/m <sup>3</sup>	994.29
ค่าความร้อนต่ำของ LPG	LHV	MJ/Nm <sup>3</sup>	90.02
ค่าความร้อนแฝงของทองแดง	LH	kJ/kg	205.4

ตารางที่ ก7 ข้อมูลการทดลองเฉลี่ยของเตาหลอม (NG)

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่า
<b>เชื้อเพลิง NG</b>			
ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์	CO	ppm	2,875
ก๊าซออกซิเจน	O <sub>2</sub>	%	14.3
อุณหภูมิก๊าซเสีย	$T_g$	°C	406.3
ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง	$\dot{m}_f$	Nm <sup>3</sup> /hr	819
อุณหภูมิเชื้อเพลิงก่อนเข้าเตาหลอม	$T_f$	°C	32
ปริมาณทองแดงที่เข้าเตาหลอม	$\dot{m}_{cu}$	kg/hr	22,000
อุณหภูมิทองแดงก่อนเข้าเตาหลอม	$T_{cu,i}$	°C	35
อุณหภูมิทองแดงออกจากเตาหลอม	$T_{cu,o}$	°C	1,080
อุณหภูมิอากาศเผาไหม้	$T_a$	°C	36.59
ปริมาณน้ำหล่อเย็น	$\dot{m}_w$	°C	89.4
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้า	$T_{w,i}$	°C	34
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นออก	$T_{w,o}$	°C	36
อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม	$T_{sur}$	°C	35
อุณหภูมิอ้างอิง	$T_r$	°C	35
พื้นที่ผิวเตาหลอม	$A$	m <sup>2</sup>	40.24
อุณหภูมิผิวเตาหลอมเฉลี่ย	$T_{wall}$	°C	221.88
Emissivity	$\epsilon$	-	0.4
<b>ข้อมูลทั่วไป</b>			
ความร้อนจำเพาะของอากาศ	$C_{p,a}$	kJ/kg °C	1.005
ความร้อนจำเพาะของทองแดง	$C_{p,cu}$	kJ/kg °C	0.38
ความร้อนจำเพาะของน้ำ	$C_{p,w}$	kJ/kg °C	4.187
ความร้อนจำเพาะของก๊าซเสีย	$C_{p,fluc}$	kcal/Nm <sup>3</sup> K	0.33
ความหนาแน่นของอากาศ	$\rho_a$	kg/Nm <sup>3</sup>	1.293
ความหนาแน่นของ NG	$\rho_{ng}$	kg/Nm <sup>3</sup>	1.015
ความหนาแน่นของน้ำ (ที่ 34°C)	$\rho_w$	kg/m <sup>3</sup>	994.29
ค่าความร้อนต่ำของ LPG	LHV	MJ/Nm <sup>3</sup>	33.99
ค่าความร้อนแฝงของทองแดง	LH	kJ/kg	205.4

ตารางที่ ก8 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณสมดุลความร้อน (LPG)

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่า
<b>เชื้อเพลิง LPG</b>			
ราคาเชื้อเพลิง	Baht	Baht/MMBTU	
ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง	$\dot{m}_f$	Nm <sup>3</sup> /hr	340
ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง	LHV	MJ/Nm <sup>3</sup>	90.02
ค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิง	$\rho_{LPG}$	kg/Nm <sup>3</sup>	2.004
<b>ทองแดง</b>			
ปริมาณทองแดงเข้าเตาหลอม	$\dot{m}_{cu}$	kg/hr	20060
ความร้อนจำเพาะของทองแดง	$C_{p,cu}$	kJ/kg °C	0.38
อุณหภูมิทองแดงก่อนเข้าเตาหลอม	$T_{cu,i}$	°C	35
อุณหภูมิทองแดงออกจากเตาหลอม	$T_{cu,o}$	°C	1,080
<b>ก๊าซไอเสีย</b>			
ปริมาณก๊าซออกซิเจนในก๊าซไอเสีย	O <sub>2</sub>	%	16
ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์	CO	ppm	889
อุณหภูมิก๊าซไอเสียเฉลี่ย	$T_g$	°C	365.5
ความร้อนจำเพาะของก๊าซไอเสีย	$C_{p,fluc}$	kcal/Nm <sup>3</sup> °C	0.33
อัตราส่วนอากาศ	$m$	-	4.20
ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี	$A_o$	Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup>	23.96
ปริมาณอากาศจริง	$A$	Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup>	100.63
ปริมาณก๊าซเสียเชิงทฤษฎี	$G_o$	Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup>	26.09
ปริมาณก๊าซเสียจริง	$G$	Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup>	102.76
ค่าความร้อนของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์	-	MJ/kg	13.76
ความหนาแน่นของน้ำที่ 34 °C	$\rho_w$	kg/m <sup>3</sup>	994.29

ตารางที่ ก9 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณสมดุลความร้อนก่อนติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ (NG)

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่า
<b>เชื้อเพลิง NG</b>			
ราคาเชื้อเพลิง	Baht	Baht/MMBTU	
ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง	$\dot{m}_f$	Nm <sup>3</sup> /hr	819
ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง	LHV	MJ/Nm <sup>3</sup>	33.99
ค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิง	$\rho_{NG}$	kg/Nm <sup>3</sup>	1.015
<b>ทองแดง</b>			
ปริมาณทองแดงเข้าเตาหลอม	$\dot{m}_{cu}$	kg/hr	22,000
ความร้อนจำเพาะของทองแดง	$C_{p,cu}$	kJ/kg °C	0.38
อุณหภูมิทองแดงก่อนเข้าเตาหลอม	$T_{cu,i}$	°C	35
อุณหภูมิทองแดงออกจากเตาหลอม	$T_{cu,o}$	°C	1,080
<b>ก๊าซไอเสีย</b>			
ปริมาณก๊าซออกซิเจนในก๊าซไอเสีย	O <sub>2</sub>	%	14.25
ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์	CO	ppm	2,875
อุณหภูมิก๊าซไอเสียเฉลี่ย	$T_g$	°C	406.3
ความร้อนจำเพาะของก๊าซไอเสีย	$C_{p,fluc}$	kcal/Nm <sup>3</sup> °C	0.33
อัตราส่วนอากาศ	$m$	-	3.11
ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี	$A_o$	Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup>	9.17
ปริมาณอากาศจริง	$A$	Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup>	28.52
ปริมาณก๊าซเสียเชิงทฤษฎี	$G_o$	Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup>	10.16
ปริมาณก๊าซเสียจริง	$G$	Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup>	29.51
ค่าความร้อนของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์	-	MJ/kg	13.76
ความหนาแน่นของน้ำที่ 34 °C	$\rho_w$	kg/m <sup>3</sup>	994.29

ตารางที่ ก10 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณสมดุลความร้อนหลังติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ (NG)

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่า
<b>เชื้อเพลิง NG</b>			
ราคาเชื้อเพลิง	Baht	Baht/MMBTU	
ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง	$\dot{m}_f$	Nm <sup>3</sup> /hr	730
ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง	LHV	MJ/Nm <sup>3</sup>	33.99
ค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิง	$\rho_{NG}$	kg/Nm <sup>3</sup>	1.015
<b>ทองแดง</b>			
ปริมาณทองแดงเข้าเตาหลอม	$\dot{m}_{cu}$	kg/hr	22,200
ความร้อนจำเพาะของทองแดง	$C_{p,cu}$	kJ/kg °C	0.38
อุณหภูมิทองแดงก่อนเข้าเตาหลอม	$T_{cu,i}$	°C	30
อุณหภูมิทองแดงออกจากเตาหลอม	$T_{cu,o}$	°C	1,080
<b>ก๊าซไอเสีย</b>			
ปริมาณก๊าซออกซิเจนในก๊าซไอเสีย	O <sub>2</sub>	%	13.03
ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์	CO	ppm	2,726.5
อุณหภูมิก๊าซไอเสียเฉลี่ย	$T_g$	°C	341.8
ความร้อนจำเพาะของก๊าซไอเสีย	$C_{p,guc}$	kcal/Nm <sup>3</sup> °C	0.33
อัตราส่วนอากาศ	$m$	-	2.63
ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี	$A_o$	Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup>	9.17
ปริมาณอากาศจริง	$A$	Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup>	24.16
ปริมาณก๊าซเสียเชิงทฤษฎี	$G_o$	Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup>	10.16
ปริมาณก๊าซเสียจริง	$G$	Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup>	25.15
ค่าความร้อนของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์	-	MJ/kg	13.76
ความหนาแน่นของน้ำที่ 34 °C	$\rho_w$	kg/m <sup>3</sup>	994.29

ตารางที่ ก11 การทดลองอุณหภูมิอากาศในอุปกรณ์อุณหภูมิอากาศ

รายการที่วัด	จำนวนครั้งที่วัด										เฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
อุณหภูมิก๊าซไอเสีย ( $T_{flue}$ ), °C	275	285.5	280	275.5	280	279.5	279	287.7	285.8	280.3	280.83
อุณหภูมิผนัง ( $T_{flue}$ ), °C	35	35.9	36	35	35.9	35.5	35	36.4	36	35.3	35.6
ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ppm	168	179	202	177	189	168	171	173	205	173	180.5
ปริมาณก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ), %	20.6	18.3	14.3	18.7	16.3	20.5	17.5	17	14	15.7	17.29
ความเร็วอากาศ ( $V_{air}$ ), m/s	8	7.5	8.9	9.7	8.2	8.9	9.8	8	9.3	0	8.7
อุณหภูมิอากาศทางเข้า Blower ( $T_{blower}$ ), °C	38.25	38.3	38.38	38.44	38.63	35.17	35.36	35.49	35.51	35.34	36.59
อุณหภูมิอากาศออกจากอุปกรณ์อุณหภูมิอากาศ ( $T_{a,out}$ )	45	53	56	60	63	67	70	73	75	92	65.4
ปริมาณก๊าซธรรมชาติที่ใช้เฉลี่ย ( $Nm^3/hr$ )	43										

ตารางที่ ก12 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณสมดุลความร้อนของอุปกรณ์อุณหภูมิอากาศ (NG)

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่า
<b>เชื้อเพลิง NG</b>			
ราคาเชื้อเพลิง	Baht	Baht/MMBTU	
ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง	$m_f$	$Nm^3/hr$	43
ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง	LHV	$MJ/Nm^3$	33.99
ค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิง	$\rho_{NG}$	$kg/Nm^3$	1.015
<b>ก๊าซไอเสีย</b>			
ปริมาณก๊าซออกซิเจนในก๊าซไอเสีย	$O_2$	%	17.29
ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์	CO	ppm	180.5
อุณหภูมิก๊าซไอเสียเฉลี่ย	$T_g$	°C	280.83
ความร้อนจำเพาะของก๊าซไอเสีย	$C_{p,fluc}$	$kcal/Nm^3\ ^\circ C$	0.33
อัตราส่วนอากาศ	$m$	-	5.66
ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี	$A_o$	$Nm^3/Nm^3$	9.17
ปริมาณอากาศจริง	$A$	$Nm^3/Nm^3$	51.90
ปริมาณก๊าซเสียเชิงทฤษฎี	$G_o$	$Nm^3/Nm^3$	10.16
ปริมาณก๊าซเสียจริง	$G$	$Nm^3/Nm^3$	52.90
ค่าความร้อนของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์	-	$MJ/kg$	13.76
อุณหภูมิมิวเฉลี่ยของอุปกรณ์อุณหภูมิอากาศ	$T_{wall,pre}$	°C	35.6

ตาราง ก13 อุณหภูมิอากาศเผาไหม้กับปริมาณออกซิเจนในทองแดง

เวลา	อุณหภูมิอากาศเผาไหม้ (°C)	ปริมาณ O <sub>2</sub> ในเตาพัก (ppm)	เวลาบรรจุผลิตภัณฑ์	ปริมาณ O <sub>2</sub> ในลวดทองแดง
16.00	52.37	2309.00	18.46	382.00
16.30	62.10	2295.00	18.54	366.40
17.00	62.29	2413.00	19.02	434.70
17.30	66.33	761.60	19.10	453.90
18.00	66.95	668.00	19.19	424.00
18.30	67.33	528.00	19.27	380.40
19.00	66.72	481.80	19.35	413.20
19.30	66.38	424.00	19.44	423.80
20.00	65.97	451.00	19.52	451.00
20.30	68.56	452.60	20.00	442.10
21.00	67.74	587.00	20.02	468.10
21.30	66.27	1060.00	20.10	416.80
22.00	68.85	1105.00	20.18	420.90
22.30	69.96	542.00	20.26	452.60
23.00	70.90	274.00	20.35	452.40
23.30	71.40	250.00	20.43	533.90
24.00	71.47	437.30	20.51	587.00
24.30	72.10	305.00	20.59	627.10
01.00	72.35	295.00	21.07	606.10
หยุดเตาหลอมเวลา 01.07 น.			21.16	659.50

## ภาคผนวก ข

การคำนวณหาค่า Adiabatic flame temperature ของก๊าซ NG

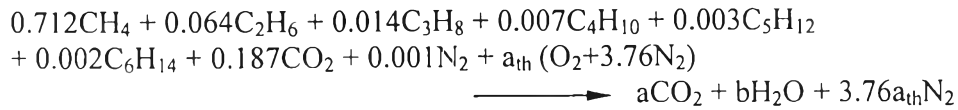
จากตารางแสดงองค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติของ บริษัทการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย จำกัด (มหาชน) ที่ใช้ในบริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด

ตารางที่ ข1 องค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติของ บริษัทการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย จำกัด (มหาชน)

Components	Average (mole%)
C1 Methane	71.293
C2 Ethane	6.419
C3 Propane	1.355
C4 Iso butane	0.314
C4 Normal butane	0.369
C5 Iso pentane	0.198
C5 Normal pentane	0.113
C6 Hexane plus	0.182
CO <sub>2</sub> Carbon dioxide	18.676
N <sub>2</sub> Nitrogen	1.105
Total	100



การเผาไหม้สมบูรณ์สำหรับเชื้อเพลิง 1 kmol จะได้ว่า



สมดุลอะตอม

$$\text{C: } 0.712 + 2(0.064) + 3(0.014) + 4(0.007) + 5(0.003) + 6(0.002) + 0.187 = a$$

ดังนั้น

$$a = 1.124$$

$$\text{H: } 4(0.712) + 6(0.064) + 8(0.014) + 10(0.007) + 12(0.003) + 14(0.002) = 2b$$

ดังนั้น

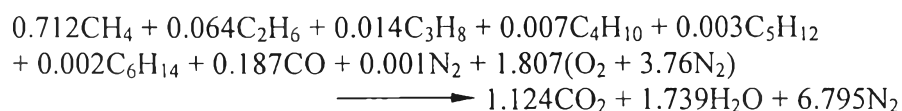
$$b = 1.739$$

$$\text{O: } 2(0.187) + 2a_{\text{th}} = 2(a) + b$$

ดังนั้น

$$a_{\text{th}} = 1.807$$

ดังนั้นสมการการเผาไหม้ที่สมบูรณ์สามารถเขียนได้ดังนี้



ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 298 K

จากสมการ

$$\sum_{i=1}^N N_p h_{f,i,p}^\circ - \sum_{i=1}^N N_r h_{f,i,r}^\circ - \sum_{i=1}^N N_r (h_{T_i} - h_{T_{298}}) + \sum_{i=1}^N N_p (h_{T_i} - h_{298}) = \Delta H$$

กำหนดให้

$$\Delta H = 0$$

ดังนั้นเทอมที่ 3 ในสมการจะเท่ากับ 0

$$\Delta H_r = \sum_{i=1}^N N_p h_{f,r}^0 - \sum_{i=1}^N N_r h_{f,r}^0$$

เปิดตารางหาค่า Enthalpy of formation จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \Delta H_r &= 1.124(-94054 \text{ cal}) + 1.739(-57798 \text{ cal}) - (-32285.606 \\ \text{cal}) &= -173941.812 \text{ cal} \end{aligned}$$

ทำการเดาค่าเริ่มต้น  $T_f = 2000 \text{ K}$  จะได้ Thermal enthalpy change จากการเปิดตารางผลต่างของ Enthalpy คือ

$$\begin{aligned} \text{Thermal enthalpy change} &= 1.124(24110 - 2238.11) \text{ cal} + 1.739(19630 - \\ &2367.7) \text{ cal} + 6.795(15494.8 - 2072.3) \text{ cal} \\ \text{Thermal enthalpy change} &= 145842.75 \text{ cal} \end{aligned}$$

ทำการเดาค่า  $T_f = 2300 \text{ K}$  จะได้ Thermal enthalpy change จากการเปิดตารางผลต่างของ Enthalpy คือ

$$\begin{aligned} &= 1.124(28520 - 2238.11) \text{ cal} + 1.739(23283 - 2367.7) \text{ cal} \\ &+ 6.795(18092.3 - 2072.3) \text{ cal} \\ &= 174768.45 \text{ cal} \end{aligned}$$

จะได้

$T_{f,NG} \text{ (K)}$	Thermal energy (cal)
2000	145842.75
$T_{f,NG}$	173941.812
2300	174768.45

ทำการประมาณแบบเชิงเส้นจะได้ค่า Adiabatic flame temperature

$$T_{f,NG} = 2291.43 \text{ K}$$

1. การคำนวณสมดุลความร้อนของเตาหลอมทองแดงเมื่อใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิง

1) ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี ( $A_o$ )

$$\begin{aligned} A_o &= \frac{11.05 \times LHV}{10,000} + 0.2 \\ &= \frac{11.05 \times 21,500}{10,000} + 0.2 \\ &= 23.96 \frac{\text{Nm}^3}{\text{Nm}^3} \end{aligned}$$

2) ปริมาณก๊าซเสียเชิงทฤษฎี ( $G_o$ )

$$\begin{aligned} G_o &= \frac{11.9 \times LHV}{10,000} + 0.5 \\ &= \frac{11.9 \times 21,500}{10,000} + 0.5 \\ &= 26.09 \frac{\text{Nm}^3}{\text{Nm}^3} \end{aligned}$$

3) อัตราส่วนอากาศ ( $m$ )

$$\begin{aligned} m &= \frac{21}{21 - O_2} \\ &= \frac{21}{21 - 16} \\ &= 4.20 \end{aligned}$$

4) ปริมาณอากาศจริง ( $A$ )

$$\begin{aligned} A &= A_o \times m \\ &= 23.96 \times 4.20 \\ &= 100.63 \end{aligned}$$

5) ปริมาณก๊าซเสียจริง ( $G$ )

$$\begin{aligned} G &= G_o + A_o (m - 1) \\ &= 26.09 + 23.96(4.20 - 1) \\ &= 102.76 \frac{\text{Nm}^3}{\text{Nm}^3} \end{aligned}$$

การคำนวณความร้อนเข้า

1) ความร้อนของเชื้อเพลิง ( $\dot{Q}_f$ )

$$\begin{aligned} \dot{Q}_f &= \dot{m}_f \times LHV \\ &= 340 \frac{\text{Nm}^3}{\text{hr}} \times 90.02 \frac{\text{MJ}}{\text{Nm}^3} \\ &= 30,606.80 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}} \end{aligned}$$

2) ความร้อนของอากาศเผาไหม้ ( $\dot{Q}_a$ )

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{sa} &= \dot{m}_f \times A \times \rho_a \times C_{pa} \times (T_{a,i} - T_r) \\ &= 340 \frac{\text{Nm}^3}{\text{hr}} \times 100.63 \times 1.293 \frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3} \times 1.005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \times (70 - 35)^\circ\text{C} \\ &= 1,556,136 \frac{\text{kJ}}{\text{hr}} \\ &= 1,556.14 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}} \end{aligned}$$

การคำนวณความร้อนออก

1) ความร้อนที่ถ่ายเทให้กับทองแดง ( $\dot{Q}_{cu}$ )

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{cu} &= \dot{m}_{cu} \times C_{p,cu} \times (T_{cu,o} - T_{cu,i}) + \dot{m}_{cu} \times LH \\ &= 22,060 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \times 0.38 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \times (1080 - 35)^\circ\text{C} + 22,060 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \times 205.4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ &= 13,291,150 \frac{\text{kJ}}{\text{hr}} \\ &= 13,291.15 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}} \end{aligned}$$

2) ความร้อนสูญเสียในก๊าซเสีย ( $\dot{Q}_{flue}$ )

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{flue} &= \dot{m}_f \times G \times C_{p,flue} \times (T_{flue} - T_r) \\ &= 340 \frac{\text{Nm}^3}{\text{hr}} \times 102.76 \times 0.33 \frac{\text{kcal}}{\text{Nm}^3\text{K}} \times 4.187 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \times (364.5 - 35) ^\circ\text{C} \\ &= 15,906,835 \frac{\text{kJ}}{\text{hr}} \\ &= 15,906.84 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}}\end{aligned}$$

3) ความร้อนสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น ( $\dot{Q}_w$ )

$$\begin{aligned}\dot{Q}_w &= \dot{m}_w \times \rho_w \times C_{p,w} \times (T_{w,o} - T_{w,i}) \\ &= 89.4 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \times 994.29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 4.187 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \times (35 - 32) ^\circ\text{C} \\ &= 1,116.541 \frac{\text{kJ}}{\text{hr}} \\ &= 1,116.54 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}}\end{aligned}$$

4) ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา ( $\dot{Q}_{wall}$ )

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{wall} &= \frac{1}{1,000} \left\{ \sum_i^N \left[ 2.2(T_{wall} - T_{amb})^{5/4} + 4.88 \times \varepsilon \times \left( \left( \frac{T_{wall} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{amb} + 273}{100} \right)^4 \right) \right] \times A_i \times 4.186 \right\} \\ &= \frac{1}{1,000} \left\{ \left[ 2.2(236.75 - 35)^{5/4} + 4.88 \times 0.4 \times \left( \left( \frac{509.75}{100} \right)^4 - \left( \frac{308}{100} \right)^4 \right) \right] \times 40.24 \times 4.186 \right\} \\ &= 474.19 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}}\end{aligned}$$

5) ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ( $\dot{Q}_{co}$ )

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{co} &= \dot{m}_f \times \rho_f \times G \times CO \times 13.76 \times \frac{1}{10^6} \\ &= 340 \frac{\text{Nm}^3}{\text{hr}} \times 2.004 \frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3} \times 102.76 \times \frac{889}{10^6} \times 13.76 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \\ &= 856.50 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}}\end{aligned}$$

6) ความร้อนสูญเสียอื่นๆ ( $\dot{Q}_{un}$ )

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{un} &= \dot{Q}_f + \dot{Q}_{sa} - \dot{Q}_{cu} - \dot{Q}_{flue} - \dot{Q}_w - \dot{Q}_{wall} - \dot{Q}_{co} \\ &= 30,606.80 + 1,556.14 - 13,291.15 - 15,906.84 - 1,116.54 - 474.19 - 856.50 \\ &= 517.72 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}}\end{aligned}$$

2. การทำสมดุลความร้อนของเตาหลอมทองแดงเมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง (ก่อนติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ)

การคำนวณทำได้ในลักษณะเดียวกับสมดุลความร้อนของเตาหลอมทองแดงเมื่อใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิง

3. การทำสมดุลความร้อนของเตาหลอมทองแดงเมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง (หลังติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ)

การคำนวณทำได้ในลักษณะเดียวกับสมดุลความร้อนของเตาหลอมทองแดงเมื่อใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิง

4. การทำสมดุลความร้อนของอุปกรณ์อุ่นอากาศ

1) ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี ( $A_o$ )

$$\begin{aligned}A_o &= \frac{11.05 \times LHV}{10,000} + 0.2 \\ &= \frac{11.05 \times 8,117.86}{10,000} + 0.2 \\ &= 9.17 \frac{\text{Nm}^3}{\text{Nm}^3}\end{aligned}$$

2) ปริมาณก๊าซเสียเชิงทฤษฎี ( $G_o$ )

$$\begin{aligned}G_o &= \frac{11.9 \times LHV}{10,000} + 0.5 \\ &= \frac{11.9 \times 8,117.86}{10,000} + 0.5 \\ &= 10.16 \frac{\text{Nm}^3}{\text{Nm}^3}\end{aligned}$$

3) อัตราส่วนอากาศ ( $m$ )

$$\begin{aligned} m &= \frac{21}{21 - O_2} \\ &= \frac{21}{21 - 17.29} \\ &= 5.66 \end{aligned}$$

4) ปริมาณอากาศจริง ( $A$ )

$$\begin{aligned} A &= A_o \times m \\ &= 9.17 \times 5.66 \\ &= 51.90 \end{aligned}$$

5) ปริมาณก๊าซเสียจริง ( $G$ )

$$\begin{aligned} G &= G_o + A_o (m - 1) \\ &= 10.16 + 9.17 (5.66 - 1) \\ &= 52.90 \frac{\text{Nm}^3}{\text{Nm}^3} \end{aligned}$$

การคำนวณความร้อนเข้า

1) ความร้อนของเชื้อเพลิง ( $\dot{Q}_f$ )

$$\begin{aligned} \dot{Q}_f &= \dot{m}_f \times \text{LHV} \\ &= 43 \frac{\text{Nm}^3}{\text{hr}} \times 33.99 \frac{\text{MJ}}{\text{Nm}^3} \\ &= 1,461.57 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}} \end{aligned}$$

2) ความร้อนของอากาศเผาไหม้ ( $\dot{Q}_{sa}$ )

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{sa} &= \dot{m}_f \times A \times \rho_a \times C_{pa} \times (T_{ai} - T_r) \\ &= 43 \frac{\text{Nm}^3}{\text{hr}} \times 51.90 \times 1.293 \frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3} \times 1.005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \times (36.59 - 30) ^\circ\text{C} \\ &= 19,111.11 \frac{\text{kJ}}{\text{hr}} \\ &= 19.11 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}}\end{aligned}$$

การคำนวณความร้อนออก

1) ความร้อนสูญเสียในก๊าซเสีย ( $\dot{Q}_{flue}$ )

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{flue} &= \dot{m}_f \times G \times C_{p,flue} \times (T_{flue} - T_r) \\ &= 43 \frac{\text{Nm}^3}{\text{hr}} \times 52.90 \times 0.33 \frac{\text{kcal}}{\text{Nm}^3\text{K}} \times 4.187 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \times (280.83 - 30) ^\circ\text{C} \\ &= 788,352.60 \frac{\text{kJ}}{\text{hr}} \\ &= 788.35 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}}\end{aligned}$$

2) ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา ( $\dot{Q}_{wall}$ )

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{wall} &= \frac{1}{1,000} \left\{ \sum_i \left[ 2.2(T_{wall} - T_{amb})^{5/4} + 4.88 \times \varepsilon \times \left| \left( \frac{T_{wall} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{amb} + 273}{100} \right)^4 \right| \right] \times A_i \times 4.186 \right\} \\ &= \frac{1}{1,000} \left\{ 2.2(35.6 - 30)^{5/4} + 4.88 \times \varepsilon \times \left| \left( \frac{308.6}{100} \right)^4 - \left( \frac{303}{100} \right)^4 \right| \right\} \times 72.02 \times 4.186 \\ &= 8.97 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}}\end{aligned}$$

3) ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ( $\dot{Q}_{co}$ )

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{co} &= \dot{m}_f \times \rho_f \times G \times CO \times 13.76 \times \frac{1}{10^6} \\ &= 43 \frac{\text{Nm}^3}{\text{hr}} \times 1.015 \frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3} \times 52.90 \times \frac{180.5}{10^6} \times 13.76 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \\ &= 5.73 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}}\end{aligned}$$



จากการปรับปรุงหลักการทำสมดุลความร้อนของอุปกรณ์อุ่นอากาศซึ่งแนะนำโดย Shires จะได้ว่า

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{f,pre} + \dot{Q}_{sa,pre} &= \dot{Q}_{hotgas} + \dot{Q}_{wall,pre} + \dot{Q}_{flue,pre} + \dot{Q}_{co,pre} \\ \dot{Q}_{hotgas} &= (\dot{Q}_{f,pre} + \dot{Q}_{sa,pre}) - (\dot{Q}_{flue,pre} + \dot{Q}_{wall,pre} + \dot{Q}_{co,pre}) \\ &= (1,461.57 + 19.11) - (788.35 + 8.97 + 5.73) \\ &= 677.63 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}}\end{aligned}$$

ดังนั้นประสิทธิภาพทางความร้อนจะได้

$$\begin{aligned}\eta_{th,model} &= \frac{677.63 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}}}{1,466.18 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}}} \\ &= 46.21\%\end{aligned}$$

5 ประสิทธิภาพทางความร้อนของอุปกรณ์อุ่นอากาศที่ได้จากการวัด

$$\eta_{th,meas} = \frac{\dot{Q}_{output}}{\dot{Q}_{input}}$$

$$\dot{Q}_{output} = \dot{m}_a \times C_{pa,ave} \times (T_{out,ave} - T_{in,ave})$$

$$T_{out,ave} = 65.40 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{in,ave} = 36.59 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\begin{aligned}T_{ave} &= \frac{65.4 + 36.59}{2} \\ &= 50.95 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (323.95 \text{ K})\end{aligned}$$

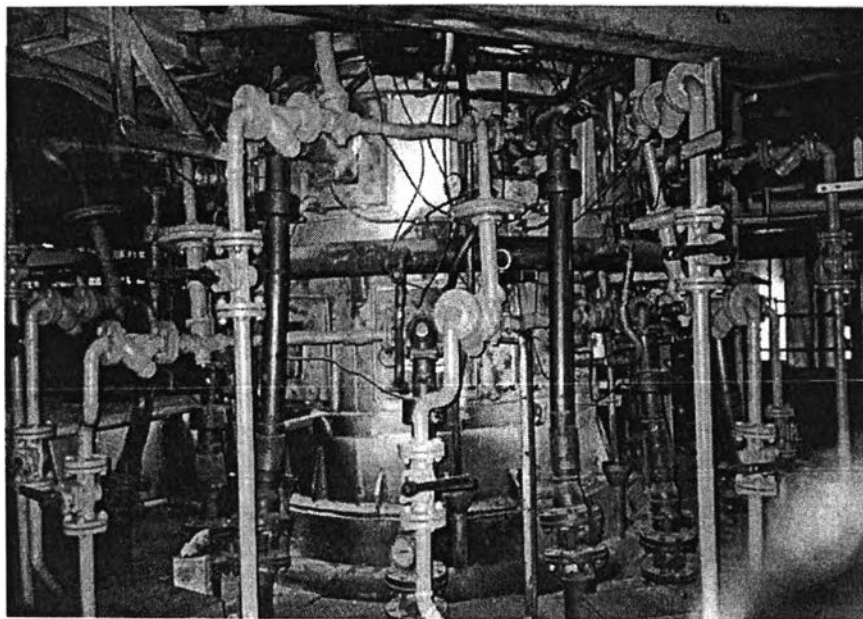
$$s_{ave,@323.95\text{K}} = 1.091 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$C_{pave,@323.95\text{K}} = 1.007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

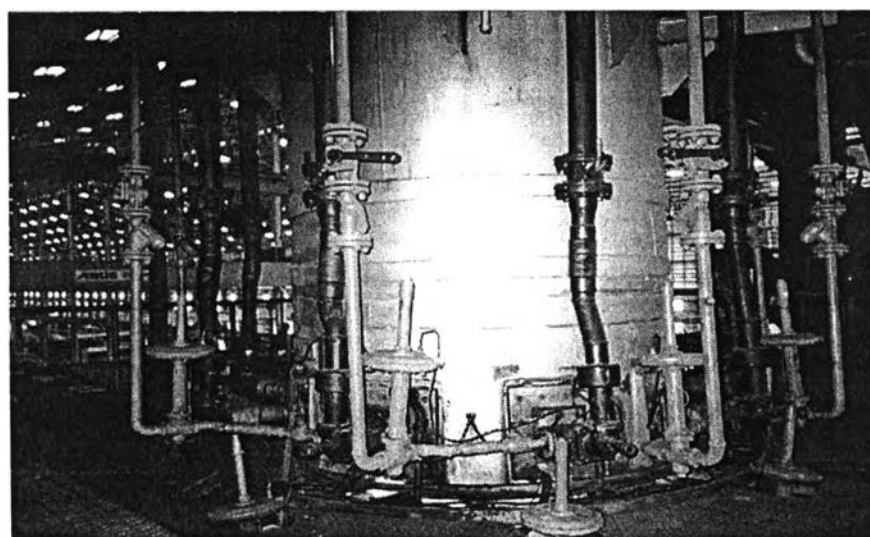
$$\begin{aligned}\dot{Q}_{output} &= 5.47 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 1.091 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 1.007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \times (65.4 - 36.59) \text{ }^{\circ}\text{C} \\ &= 625 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}h_{th,meas} &= \frac{625 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}}}{1,466.18 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}}} \\ &= 42.51\%\end{aligned}$$

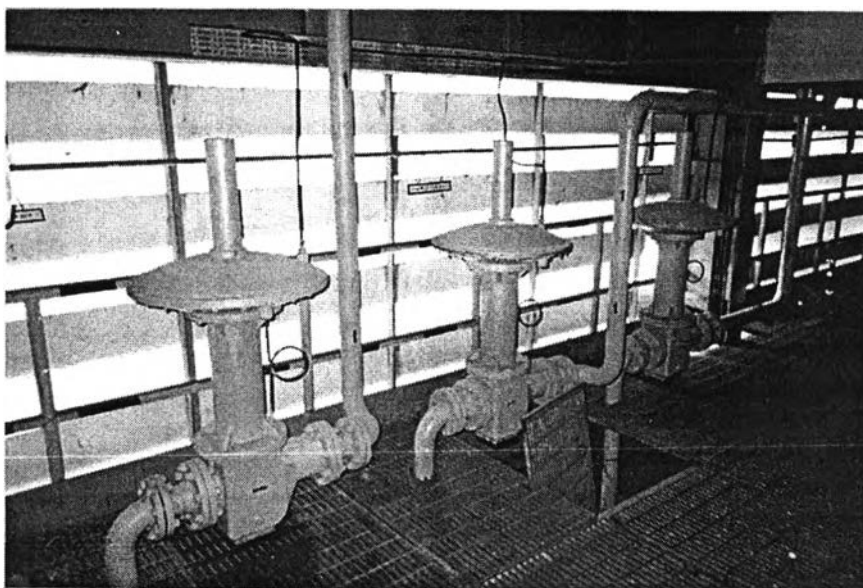
## ภาคผนวก ค



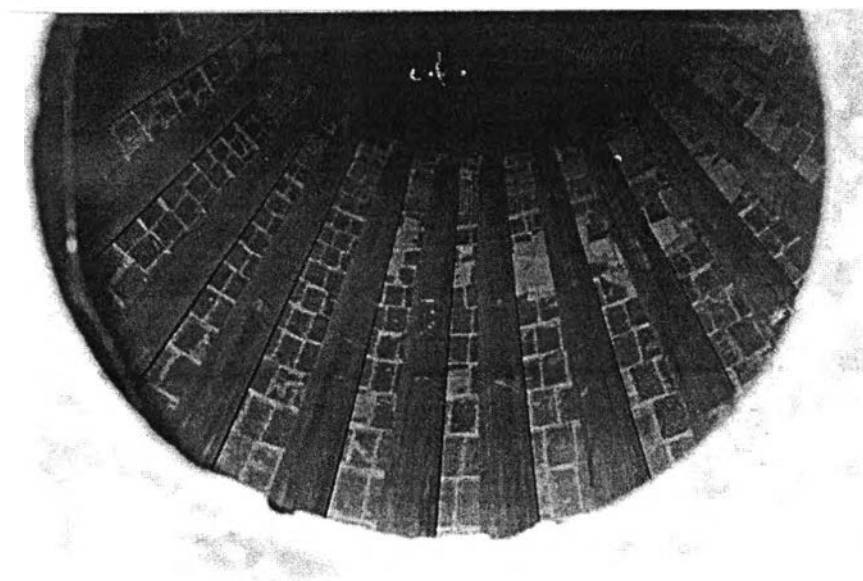
รูปที่ ค1 หัวเผา ROW A,B ของเตาหลอมทองแดง



รูปที่ ค2 หัวเผา Row C ของเตาหลอมทองแดง



รูปที่ ค3 อุปกรณ์ปรับความดันก๊าซของเตาหลอมทองแดง (Zone regulator)



รูปที่ ค4 ท่ออากาศร้อนภายในอุปกรณ์อุ่นอากาศ



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายรัชชัย สิริสระคู เกิดเมื่อวันที่ 27 มีนาคม 2519 ที่จังหวัดร้อยเอ็ด สำเร็จการศึกษา  
ระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ จากมหาวิทยาลัย  
เทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2541 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรม  
ศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2544