

บทที่ 2

โรงไฟฟ้าแม่เมาะ

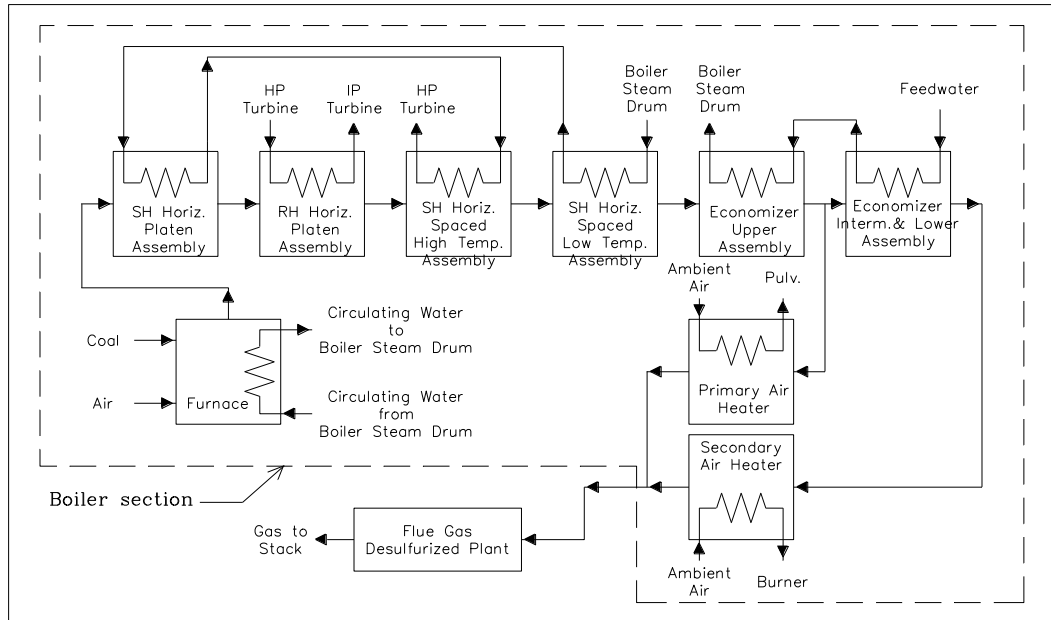
2.1 สภาพทั่วไป

โรงไฟฟ้าแม่เมาะเป็นโรงไฟฟ้าพลังความร้อนที่ใช้ถ่านลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง ตั้งอยู่ที่ ต.แม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง มีเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าจำนวน 13 เครื่อง ได้แก่ เครื่องที่ 1 – 3 มีกำลังผลิตติดตั้งเครื่องละ 75 MW เครื่องที่ 4 – 7 มีกำลังผลิตติดตั้งเครื่องละ 150 MW และเครื่องที่ 8 – 13 มีกำลังผลิตเครื่องละ 300 MW รวมเป็นกำลังผลิตติดตั้งทั้งหมด 2,625 MW ปัจจุบันเครื่องที่ 1-3 ได้หยุดใช้งาน เนื่องจากยังไม่ได้ติดตั้งเครื่องกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และเป็นการป้องกันปัญหามลภาวะทางอากาศ โดยส่งไฟฟ้าให้กับภาคเหนือและภาคกลางของประเทศอย่างทั่วถึงและมั่นคง

2.2 กระบวนการผลิตของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

โรงไฟฟ้าแม่เมาะใช้ถ่านลิกไนต์ที่ขุดได้จากเหมืองแม่เมาะเป็นเชื้อเพลิง โดยถ่านหินลิกไนต์ที่ขุดได้จะผ่านกระบวนการคัดแยกและโม่บดให้ถ่านมีขนาดเล็กลงตามลำดับ จนสุดท้ายถ่านหินจะถูกบดให้ละเอียดจนคล้ายผงแป้งด้วยเครื่องโม่ถ่าน (Pulverizer หรือ mill) ผงถ่านจะถูกส่งเข้าไปด้วยลมร้อน (Primary air) ไปตามท่อ ส่งผ่านถ่านไปที่หัวจ่ายผงถ่าน (Coal nozzle) เข้าไปลุกไหม้ในเตาเผา (Furnace) ให้ความร้อนในหม้อน้ำ เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำในท่อ (Water wall tube) กับผนังของท่อที่สัมผัสความร้อน น้ำในท่อจะระเหยกลายเป็นไอน้ำ จากนั้นได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นอีกจนเปลี่ยนสภาพเป็นไอน้ำ (Superheated steam) ไหลตามท่อด้วยความดันสูงและอุณหภูมิสูง ไปผลักดันเพลลาของกังหัน (Turbine) ให้หมุน โดยที่เพลลาของกังหันด้านหนึ่งจะต่อกับเพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ทำให้เพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุนตามไปด้วย เมื่อสนามแม่เหล็กที่ติดอยู่กับเพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุนขดลวดที่อยู่ที่สนามแม่เหล็กจะเกิดการเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้น พลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะถูกส่งออกไปเข้าหม้อแปลงไฟฟ้าแปลงแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นเพื่อส่งไปพื้นที่ต่าง ๆ ของประเทศตามสายส่งไฟฟ้าแรงสูง จากนั้นจะมีการลดแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ลงมาโดยหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมและตามบ้านเรือนต่อไป

จากรูป 2.1 และ 2.2 เส้นประในรูปแสดงขอบเขตของหม้อไอน้ำ



รูป 2.2 ตำแหน่ง ทิศทางการไหลของน้ำและไอน้ำผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในหม้อไอน้ำ

2.3 ข้อมูลอุปกรณ์ทั่วไปของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

โรงไฟฟ้าแม่เมาะ เครื่องที่ 8-13 มีขนาดกำลังผลิตเครื่องละ 300 MW จำนวน 6 เครื่อง มีระบบให้ไอน้ำลงคอนเดนเซอร์โดยไม่ผ่านกังหัน (Turbine bypass system หรือ High pressure steam bypass system) มีการแบ่งระบบอุปกรณ์ในการควบคุมการเดินเครื่อง ออกเป็น 3 กลุ่ม คือ อุปกรณ์หม้อไอน้ำ อุปกรณ์กังหัน และอุปกรณ์ไฟฟ้า ต่อไปนี้

2.3.1 อุปกรณ์หม้อไอน้ำ

หม้อไอน้ำและอุปกรณ์ประกอบ มีข้อมูลทั่วไปดังแสดงในตาราง 2.1

2.3.2 อุปกรณ์กังหัน

กังหันและอุปกรณ์ประกอบ มีข้อมูลทั่วไปดังแสดงในตาราง 2.2

2.3.3 อุปกรณ์ไฟฟ้า

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและอุปกรณ์ประกอบ มีข้อมูลทั่วไปดังแสดงในตาราง 2.3

ตาราง 2.1 ข้อมูลทั่วไปของหม้อไอน้ำและอุปกรณ์ประกอบ

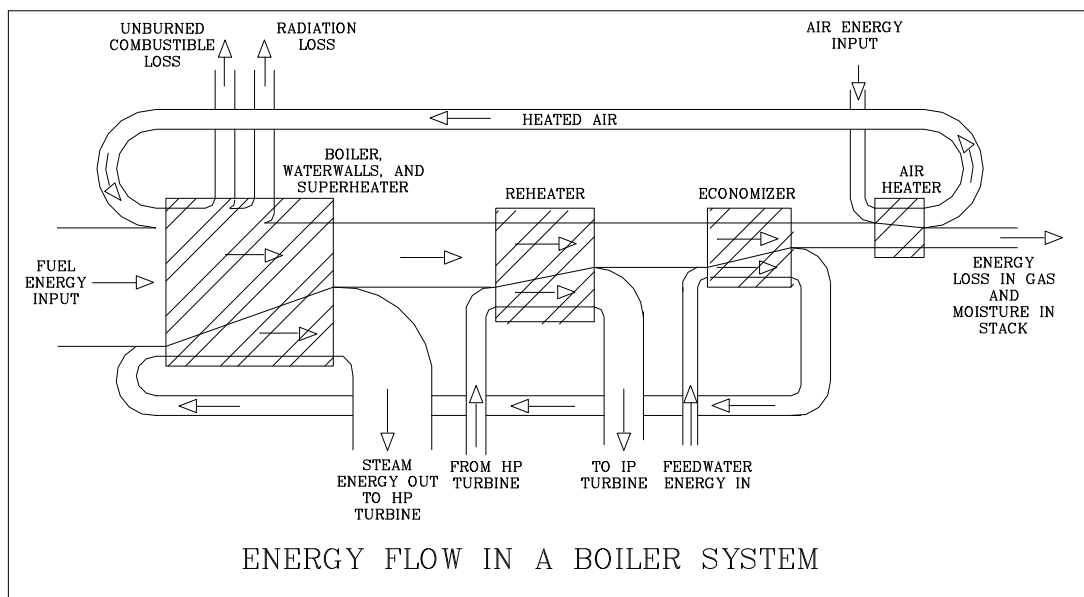
รายการ	จำนวน	หน่วย
บริษัทผู้ผลิต: CEMAR MARUBENI		
ชนิด (Type): Forced circulation drum type		
ไอน้ำหลัก (Life steam) ที่ 100% MCR		
ความดันไอน้ำ (Steam pressure)	167	bar(g)
อุณหภูมิไอน้ำ (Steam temperature)	540	°C
อัตราการไหลของไอน้ำ (Steam flow)	265	kg/s
ไอน้ำออกเครื่องให้ความร้อนซ้ำ (Reheated steam) ที่ 100% MCR		
ความดันไอน้ำ (Reheated steam pressure)	42.8	bar(g)
อุณหภูมิไอน้ำ (Reheated steam temperature)	540	°C
อัตราการไหลของไอน้ำ (Reheated steam flow)	243	kg/s
น้ำเลี้ยง (Feedwater) ที่ 100% MCR		
ความดันที่ทางเข้าเครื่องอุ่นน้ำเลี้ยง (Pressure at economizer inlet)	181.4	bar(g)
อุณหภูมิที่ทางเข้าเครื่องอุ่นน้ำเลี้ยง (Temperature at economizer inlet)	247.0	°C
อัตราการไหลที่ทางเข้าเครื่องอุ่นน้ำเลี้ยง (Flow through economizer inlet)	248.6	kg/s

ตาราง 2.2 ข้อมูลทั่วไปของกังหันและอุปกรณ์ประกอบ

รายการ	จำนวน	หน่วย
บริษัทผู้ผลิต: Fuji Electric Co., Ltd.		
ชนิด: Tandem compound reaction type		
จำนวนกังหัน	3	
ไอน้ำหลัก (Life steam) ที่ high pressure stop valve, 100% GTC		
ความดันของไอน้ำ	160	bar(g)
อุณหภูมิของไอน้ำ	538	°C
อัตราการไหลของไอน้ำ	245	kg/s
อัตราเร็วรอบของกังหัน (Turbine speed)	3000	rpm
ความดันออกจาก กังหันชุดสุดท้าย (Exhaust pressure) ที่ 100% GTC	0.0771	bar(a)

ตาราง 2.3 ข้อมูลทั่วไปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และอุปกรณ์ประกอบ

รายการ	จำนวน	หน่วย
บริษัทผู้ผลิต: Fuji Electric Co., Ltd.		
ชนิด: Turbo-gen. H ₂ cooled axial direct cooling of rotor		
Nominal continuous power output	333.333	MVA
Rated power factor, over-excited	0.9	
Rated voltage between lines	18000	V
Rated frequency	50	Hz



รูป 2.3 ทิศทางการไหลของพลังงานในหม้อไอน้ำ

2.4 เชื้อเพลิง

โรงไฟฟ้าแม่เมาะได้ถูกออกแบบให้ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงหลัก และใช้น้ำมันดีเซลเกรดต่ำเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้เสริมในช่วงที่การเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิงหลักทำไม่ได้หรือทำได้ไม่สมบูรณ์ เช่น ช่วงเริ่มจุดเตา หรือช่วงที่ถ่านมีความชื้นมาก ถ่านติดไหลไม่สะดวก เป็นต้น ในการออกแบบโรงไฟฟ้าแม่เมาะ เครื่องที่ 4-13 ได้เลือกตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์มาทำการวิเคราะห์แบบที่ได้รับจริง (Lignite analysis, as received) ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตาราง 2.4

ตาราง 2.4 ผลการวิเคราะห์ถ่านหินลิกไนต์ แบบที่ได้รับจริง (Lignite analysis, as received)

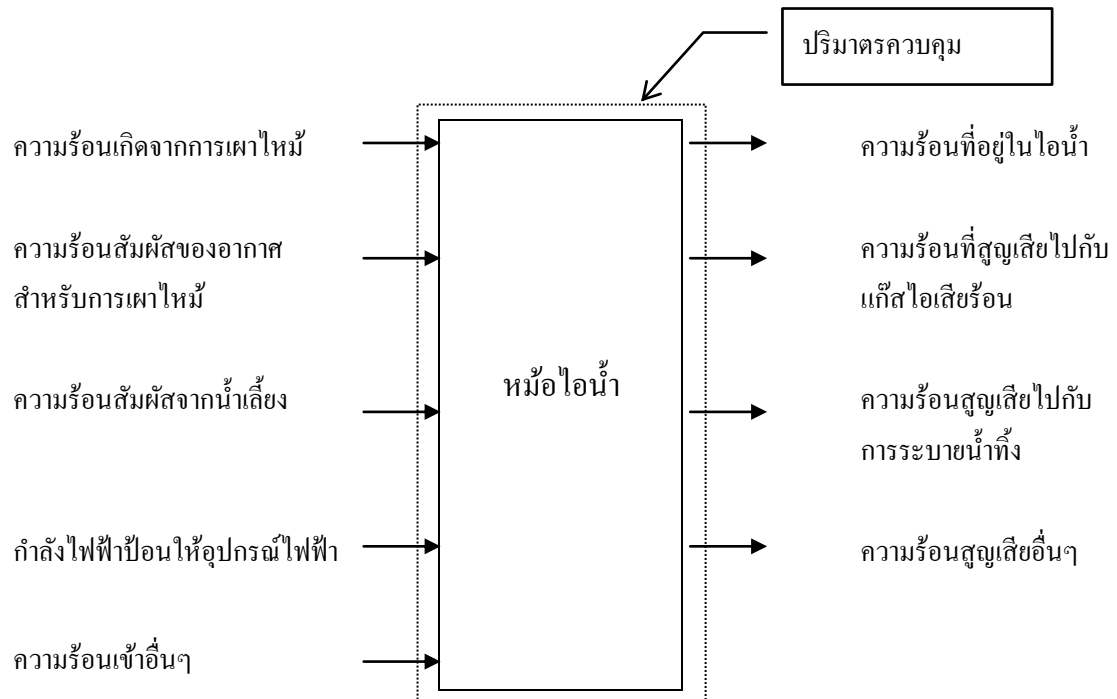
กลุ่มตัวอย่าง	หน่วย	1	2	3	4	5	6	7	8
<u>Proximate analysis</u>									
Moisture	%	29.76	30.69	31.01	33.61	33.15	33.81	35.17	35.14
Ash	%	30.69	27.30	25.59	17.86	19.25	17.41	13.42	13.49
Volatile matter	%	22.12	35.92	25.73	25.56	27.48	28.2	26.91	27.69
Fixed carbon	%	17.43	6.09	17.67	22.97	20.12	20.58	24.50	23.68
<u>Ultimate analysis</u>									
Carbon	%	25.99	28.17	28.84	33.45	32.16	35.20	34.42	35.48
Hydrogen	%	2.06	2.15	2.2	3.18	2.28	2.28	2.35	2.49
Sulfur	%	2.98	2.7	1.79	1.67	1.72	2.98	2.78	2.07
Nitrogen	%	0.8	0.9	1.08	1.08	1.18	0.91	1.05	1.25
Oxygen	%	7.71	8.08	9.48	9.14	10.25	7.41	10.80	10.27
Chlorine	%	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
<u>Calorific values</u>									
Net C.V. (as received)	kcal/kg	2033	2274	2356	2664	2676	2846	2930	2992

คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านหินลิกไนต์

ความหนาแน่นของถ่านหินลิกไนต์ (Density of lignite) 0.9 t/m^3

2.5 การคำนวณสมรรถนะ (Performance calculation)

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ และการสูญเสียความร้อน จาก สมคิด สลัดยะนันท์ (2542) ใช้หลักการสมดุลความร้อน โดยอาศัยทฤษฎีเกี่ยวกับการอนุรักษ์พลังงาน ที่กำหนดไว้ว่า ความร้อนที่เข้าระบบเท่ากับความร้อนออกจากระบบ โดยใช้กฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์ ถือว่า หม้อไอน้ำเป็นปริมาตรควบคุม มีความร้อนที่เข้าปริมาตรควบคุมได้แก่ ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ความร้อนสัมผัสจากน้ำเลี้ยง ความร้อนสัมผัสของอากาศสำหรับการเผาไหม้ กำลังไฟฟ้าป้อนให้อุปกรณ์ไฟฟ้า และความร้อนเข้าอื่นๆ ส่วนความร้อนที่ออกจากปริมาตรควบคุมได้แก่ ความร้อนที่อยู่ในไอน้ำ ความร้อนสูญเสียไปกับแก๊สไอเสียร้อน ความร้อนสูญเสียไปกับการระบายน้ำทิ้ง และความร้อนสูญเสียอื่นๆ ดังแสดงในรูป 2.4



รูป 2.4 สมดุลความร้อนของหม้อไอน้ำ

2.5.1 ข้อสมมุติฐานการพิจารณาทฤษฎี

ข้อสมมุติฐานต่อไปนี้ได้กำหนดไว้เพื่อให้การวิเคราะห์พลังงานมีความเป็นไปได้ มีรายละเอียดดังนี้

2.5.1.1 ในการวิเคราะห์ไม่คิดค่าความแตกต่างระหว่างพลังงานจลน์และพลังงานศักย์

2.5.1.2 อัตราการไหลของน้ำเลี้ยงจะเท่ากับอัตราการไหลของไอน้ำรวมกับอัตราการระบายน้ำทิ้ง

2.5.1.3 การไหลเป็นแบบมิติเดียวในจุดที่มวลผ่านเข้าเขตปริมาณควบคุม

2.5.1.4 ค่าพลังงานทางเคมีของเชื้อเพลิงถือว่ามีค่าเท่ากับค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิง

2.5.1.5 คิดค่ากำลังไฟฟ้าของพัดลม และเครื่องสูบน้ำเลี้ยง นอกนั้นถือว่ามีค่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่าอื่นๆ

ในการคำนวณสมรรถนะของหม้อไอน้ำ ใช้รูปแบบการคำนวณจาก Driscoll, J. et al. (1965) และ Driscoll, J. et al. (1968) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.5.2 วิเคราะห์ถ่านหินลิกไนต์โดย การวิเคราะห์พื้นฐานแบบที่ได้รับความนิยม (Ultimate analysis, Fuel as received)

ผลการวิเคราะห์ได้ข้อมูลดังแสดงตัวอย่างต่อไปนี้

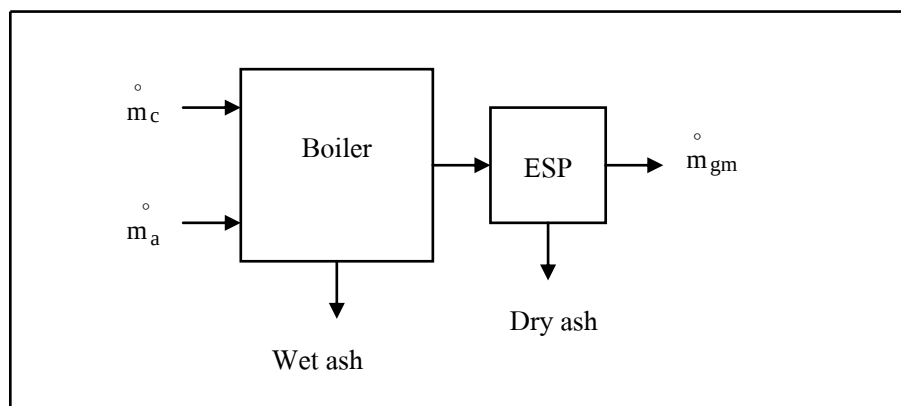
C = 26 %, H = 2.04 %, N = 0.8 %, O = 7.71 %, S = 3 %, M = 29.76 %, A = 30.69 %

โดยที่

- A คืออัตราส่วนโดยมวลของขี้เถ้าในเชื้อเพลิงแข็ง (%)
- C คืออัตราส่วนโดยมวลของคาร์บอนในเชื้อเพลิงแข็ง (%)
- H คืออัตราส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงแข็ง (%)
- M คืออัตราส่วนโดยมวลของความชื้นในเชื้อเพลิงแข็ง (%)
- N คืออัตราส่วนโดยมวลของไนโตรเจนในเชื้อเพลิงแข็ง (%)
- O คืออัตราส่วนโดยมวลของออกซิเจนในเชื้อเพลิงแข็ง (%)
- S คืออัตราส่วนโดยมวลของซัลเฟอร์ในเชื้อเพลิงแข็ง (%)

2.5.3 ประมาณความชื้นในแก๊สไอเสีย (Approximate moisture in flue gas)

ความชื้นในแก๊สไอเสียมาจากความชื้นในเชื้อเพลิง และความชื้นที่ได้จากการเผาไหม้ของไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง เมื่อเกิดการเผาไหม้จะเกิดขี้เถ้าแบ่งออกได้ 2 อย่างคือ ขี้เถ้าเปียก (Wet ash) ประมาณ 15 % และขี้เถ้าแห้ง (Dry ash) ประมาณ 85 % ในส่วนของขี้เถ้าแห้ง ESP ดักไว้ได้ 99.5 % ดังนั้นขี้เถ้าจะถูกดักไว้ถึง 99.6 % ของมวลขี้เถ้าในเชื้อเพลิง

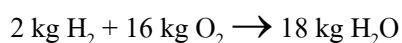
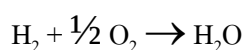


รูป 2.5 ทิศทางการไหลของถ่านหิน อากาศเข้าหม้อไอน้ำ และแก๊สไอเสียร้อนออกจากหม้อไอน้ำ

อัตราส่วนโดยมวลของความชื้นในแก๊สไอเสียร้อน สามารถทำการคำนวณได้จากสมการ (2.1)

$$mf_{H_2O} = \frac{\overset{\circ}{m}_c(\overset{\circ}{m}ois)}{\overset{\circ}{m}_{gm}} \quad (2.1)$$

จากการเผาไหม้ไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงแล้วได้น้ำเกิดขึ้น ดังนี้



$$\text{ดังนั้น อัตราส่วนโดยมวล (mass ratio) } \frac{H_2O}{H_2} = \frac{18}{2} = 9$$

หมายเหตุ

น้ำหนักโมเลกุลของ H = 1 g/g mole, น้ำหนักโมเลกุลของ O = 16 g/g mole

อัตราส่วนโดยมวลของน้ำที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ในหม้อไอน้ำ กำหนดหาได้จาก
สมการ (2.2)

$$mois = mf_M + 9mf_H \quad (2.2)$$

อัตราการไหลของแก๊สไอเสียชื้น หาได้จากสมการ (2.3)

$$\overset{\circ}{m}_{gm} = \overset{\circ}{m}_a + (1 - 0.996mf_A) \overset{\circ}{m}_c \quad (2.3)$$

โดยที่

mf_A คืออัตราส่วนโดยมวลของซีเอนในเชื้อเพลิง

mf_H	คืออัตราส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงแข็ง
mf_M	คืออัตราส่วนโดยมวลของความชื้นในเชื้อเพลิงแข็ง
mf_{H_2O}	คืออัตราส่วนโดยมวลของความชื้นในแก๊สไอเสียร้อน ต่อมวลเชื้อเพลิง (kg_{H_2O}/kg_{fuel})
$mois$	คืออัตราส่วนโดยมวลของน้ำที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ในหม้อไอน้ำ
$\dot{m}_a$	คืออัตราการไหลของอากาศสำหรับการเผาไหม้ (kg/s)
$\dot{m}_c$	คืออัตราการไหลของถ่านหิน (kg/s)
$\dot{m}_{gm}$	คืออัตราการไหลของแก๊สไอเสียชื้น (kg/s)

ตัวอย่าง

แทนค่าผลการวิเคราะห์ถ่านหินลิกไนต์จากการวิเคราะห์พื้นฐานแบบที่ได้รับความนิยม ลงในสมการ (2.1), (2.2) และ (2.3) ได้ผลดังนี้

$$mois = 0.2976 + 9(0.024) = 0.5136 \text{ } kg_{H_2O}/kg_{fuel}$$

$$mf_{H_2O} = \frac{(77.1 \text{ } kg/s)(0.5136 \text{ } kg_{H_2O}/kg_{fuel})}{371 \text{ } kg/s + \{[1 - (0.996 \times 0.3069)] \times 77.1 \text{ } kg/s\}}$$

$$= 0.0933 \text{ } kg_{H_2O}/kg_{fuel}$$

2.5.4 ความร้อนจำเพาะของแก๊สไอเสียชื้น (Specific heat of wet flue gas)

ความร้อนจำเพาะของแก๊สไอเสียชื้น สามารถคำนวณดังนี้

$$c_{p,gm} = c_{p,g}(1 - mf_{H_2O}) + c_{p,v}(mf_{H_2O}) \quad (2.4)$$

โดยที่

$c_{p,g}$	คือความร้อนจำเพาะของแก๊สไอเสียแห้ง (Specific heat of dry flue gas) $= 1.01 \text{ } kJ/kg \text{ } K$
$c_{p,gm}$	คือความร้อนจำเพาะของแก๊สไอเสียชื้น ($kJ/kg \text{ } K$)
$c_{p,v}$	คือความร้อนจำเพาะของไอน้ำ (Specific heat of vapor)

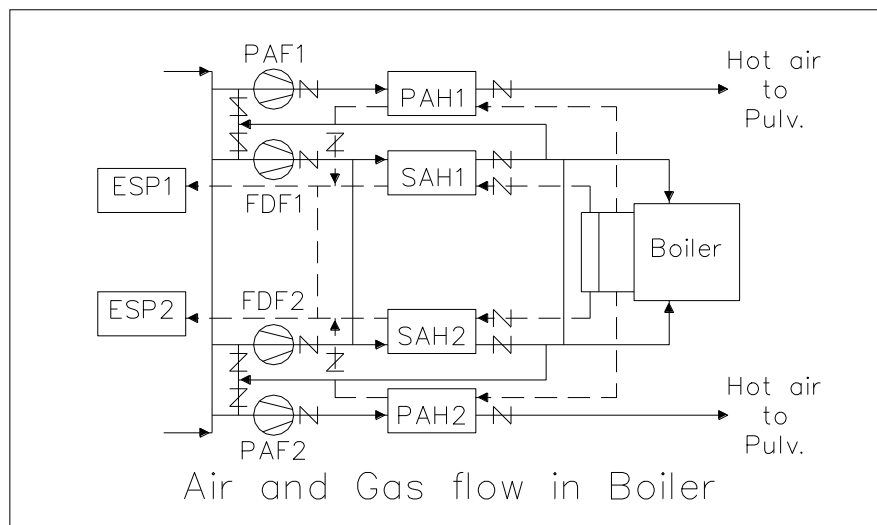
$$= 1.97 \text{ kJ/kg K}$$

ตัวอย่าง

เมื่อนำค่าของ mf_{H_2O} ที่คำนวณได้แทนในสมการ (2.4) จะได้

$$c_{p, gm} = 1.01(1 - 0.0933) + 1.97(0.0933) = 1.0996 \text{ kJ/kg K}$$

เครื่องอุ่นอากาศของโรงไฟฟ้ามี 2 แบบ คือ Primary air heater (PAH) และ Secondary air heater (SAH) สำหรับ SAH เป็นชนิด Regenerative air heater มีท่อต่อจากท่ออากาศด้านออกของ SAH นำอากาศร้อนไหลวนมาอุ่นอากาศไหลเข้าทั้ง PAH และ SAH ดังแสดงในรูป 2.6 ดังนั้นในการคำนวณจึงต้องทำการคำนวณทั้ง 2 อย่างร่วมกัน



รูป 2.6 ทิศทางการไหลของอากาศและแก๊สไอเสียในหม้อไอน้ำ

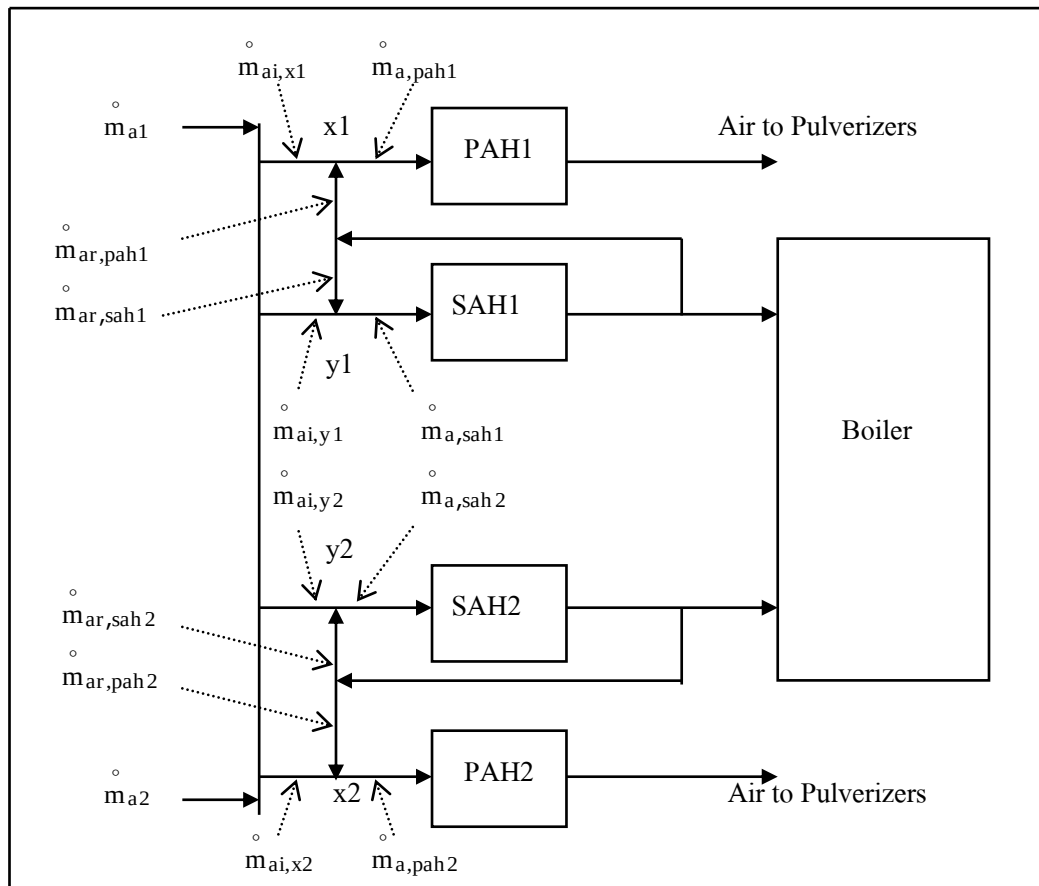
จากรูป 2.6 เส้นประ หมายถึงเส้นทางการไหลของแก๊สไอเสีย ส่วนเส้นทึบ หมายถึงเส้นทางการไหลของอากาศ

โดยที่

ESP1 คือ Electrostatic precipitator no.1

- ESP2 คือ Electrostatic precipitator no.2
- FDF1 คือ Forced draft fan no.1
- FDF2 คือ Forced draft fan no.2
- PAF1 คือ Primary air fan no.1
- PAF2 คือ Primary air fan no.2

เมื่อนำรูป 2.6 มาใส่รายละเอียดแสดงทิศทางและอัตราการไหลของอากาศ ได้รูปดังแสดง
ในรูป 2.7



รูป 2.7 ทิศทางและอัตราการไหลของอากาศผ่านเครื่องอุ่นอากาศ

2.5.5 อัตราการไหลของอากาศสำหรับการเผาไหม้ (Combustion air flow)

จากรูป 2.6 และรูป 2.7 อากาศไหลเข้าหม้อไอน้ำได้ 2 ทาง คือเข้าด้านที่ 1 และ 2 ของหม้อไอน้ำ อัตราการไหลของอากาศคือ $\dot{m}_{a1}$ และ $\dot{m}_{a2}$ ตามลำดับ ดังนั้นหาอัตราการไหลของอากาศรวมได้ดังนี้

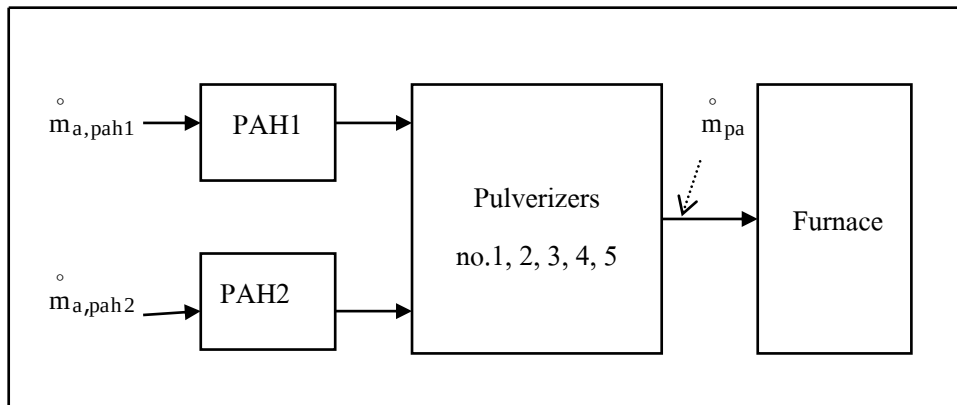
$$\dot{m}_a = \dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2} \quad (2.5)$$

โดยที่

$\dot{m}_a$ คืออัตราการไหลของอากาศสำหรับการเผาไหม้ (kg/s)

$\dot{m}_{a1}$ คืออัตราการไหลของอากาศสำหรับการเผาไหม้ ที่ทางเข้าด้าน 1 (kg/s)

$\dot{m}_{a2}$ คืออัตราการไหลของอากาศสำหรับการเผาไหม้ ที่ทางเข้าด้าน 2 (kg/s)



รูป 2.8 ทิศทางการไหลของอากาศผ่านโม้เข้าเตาเผา

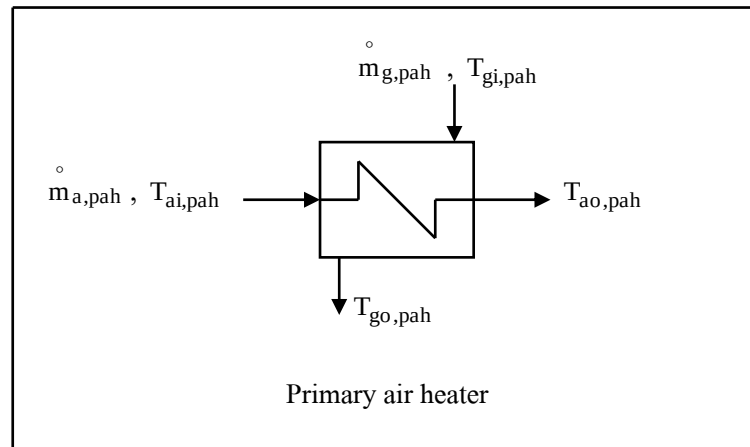
2.5.6 อัตราการไหลของอากาศเข้าโม้ สำหรับการเผาไหม้ (Primary air flow)

อัตราการไหลของอากาศเข้าโม้ทั้งหมด จะเท่ากับอัตราการไหลของอากาศเข้าโม้แต่ละโม้
จากรูป 2.8 หากเดินใช้งานทั้ง 5 โม้ อัตราการไหลของอากาศเข้าโม้ทั้งหมด หาได้ดังนี้คือ

$$\dot{m}_{pa} = \dot{m}_{pa1} + \dot{m}_{pa2} + \dot{m}_{pa3} + \dot{m}_{pa4} + \dot{m}_{pa5} \quad (2.6)$$

โดยที่

$\dot{m}_{pa}$	คืออัตราการไหลของอากาศเข้าโม้รวม (kg/s)
$\dot{m}_{pa1}$	คืออัตราการไหลของอากาศเข้าโม้ 1 (kg/s)
$\dot{m}_{pa2}$	คืออัตราการไหลของอากาศเข้าโม้ 2 (kg/s)
$\dot{m}_{pa3}$	คืออัตราการไหลของอากาศเข้าโม้ 3 (kg/s)
$\dot{m}_{pa4}$	คืออัตราการไหลของอากาศเข้าโม้ 4 (kg/s)
$\dot{m}_{pa5}$	คืออัตราการไหลของอากาศเข้าโม้ 5 (kg/s)



รูป 2.9 การแลกเปลี่ยนความร้อนใน PAH

2.5.7 อัตราการไหลของแก๊สผ่าน PAH (Primary gas flow)

จากรูป 2.9 เมื่อทำสมดุลความร้อนที่ PAH โดยกำหนดให้ไม่มีการสูญเสียความร้อนจากการถ่ายเทความร้อนที่ PAH จะได้สมการดังนี้

$$Q_{gas} = Q_{air}$$

$$(\dot{m} c_p \Delta T)_{gas} = (\dot{m} c_p \Delta T)_{air}$$

$$\dot{m}_{g,pah} c_{p,gm} (T_{gi,pah} - T_{go,pah}) = \dot{m}_{a,pah} c_{p,a} (T_{ao,pah} - T_{ai,pah}) \quad (2.7)$$

จาก สมการ (2.7) สามารถหาอัตราการไหลของแก๊สผ่าน PAH ได้

$$\dot{m}_{g,pah} = \frac{\dot{m}_{a,pah} c_{p,a} (T_{ao,pah} - T_{ai,pah})}{c_{p,gm} (T_{gi,pah} - T_{go,pah})} \quad (2.8)$$

อุณหภูมิที่ใช้ในการคำนวณของ PAH มีดังนี้

$$T_{ai,pah} = \frac{T_{ai,pah1} + T_{ai,pah2}}{2} \quad (2.9)$$

$$T_{ao,pah} = \frac{T_{ao,pah1} + T_{ao,pah2}}{2} \quad (2.10)$$

$$T_{gi,pah} = \frac{T_{gi,pah1} + T_{gi,pah2}}{2} \quad (2.11)$$

$$T_{go,pah} = \frac{T_{go,pah1} + T_{go,pah2}}{2} \quad (2.12)$$

อัตราการไหลของอากาศและแก๊สที่ใช้ในการคำนวณ มีความหมายดังนี้

$$\dot{m}_{a,pah} = \dot{m}_{a,pah1} + \dot{m}_{a,pah2} \quad (2.13)$$

$$\dot{m}_{g,pah} = \dot{m}_{g,pah1} + \dot{m}_{g,pah2} \quad (2.14)$$

โดยปกติ หลังจากเดินโม้ใช้งาน จะปิดลิ้นอากาศเย็น (Cold air damper) ใช้งานเฉพาะลิ้นอากาศร้อน (Hot air damper) ควบคุมและส่งอากาศเข้าโม้ ดังนั้นอัตราการไหลของอากาศทั้งหมดที่เข้า PAH จะเท่ากับอัตราการไหลของอากาศร้อนผ่านโม้ ดังแสดงในสมการ (2.15)

$$\dot{m}_{a,pah} = \dot{m}_{pa} \quad (2.15)$$

โดยที่

c_p คือความร้อนจำเพาะ (kJ/kg K)

$c_{p,a}$	คือความร้อนจำเพาะของอากาศ (kJ/kg K)
$c_{p,gm}$	คือความร้อนจำเพาะของแก๊สไอเสียขึ้น (kJ/kg K)
$\dot{m}$	คืออัตราการไหล (kg/s)
$\dot{m}_{pa}$	คืออัตราการไหลของอากาศเข้าโม (kg/s)
$\dot{m}_{a,pah}$	คืออัตราการไหลของอากาศเข้า PAH (kg/s)
$\dot{m}_{a,pah1}$	คืออัตราการไหลของอากาศเข้า PAH1 (kg/s)
$\dot{m}_{a,pah2}$	คืออัตราการไหลของอากาศเข้า PAH2 (kg/s)
$\dot{m}_{g,pah}$	คืออัตราการไหลของแก๊สไอเสียผ่าน PAH (kg/s)
Q_{air}	คือความร้อนของอากาศ (kW)
Q_{gas}	คือความร้อนของแก๊ส (kW)
$T_{ai,pah}$	คืออุณหภูมิของอากาศเข้า PAH ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{ai,pah1}$	คืออุณหภูมิของอากาศเข้า PAH1 ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{ai,pah2}$	คืออุณหภูมิของอากาศเข้า PAH2 ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{ao,pah}$	คืออุณหภูมิของอากาศออก PAH ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{ao,pah1}$	คืออุณหภูมิของอากาศออก PAH1 ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{ao,pah2}$	คืออุณหภูมิของอากาศออก PAH2 ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{gi,pah}$	คืออุณหภูมิของแก๊สเข้า PAH ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{gi,pah1}$	คืออุณหภูมิของแก๊สเข้า PAH 1 ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{gi,pah2}$	คืออุณหภูมิของแก๊สเข้า PAH2 ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{go,pah}$	คืออุณหภูมิของแก๊สออก PAH ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{go,pah1}$	คืออุณหภูมิของแก๊สออก PAH1 ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{go,pah2}$	คืออุณหภูมิของแก๊สออก PAH2 ($^{\circ}\text{C}$)
ΔT	คือความแตกต่างของอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)

2.5.8 อัตราการไหลวนกลับของอากาศเข้า PAH (Primary air recirculation flow)

จากรูป 2.7 พิจารณาสมดุลความร้อนที่จุด x1 ได้ผลดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \dot{m}_{a,pah1} c_{p,a} (T_{ai,pah1} - T_{ref}) &= \dot{m}_{ar,pah1} c_{p,a} (T_{ao,sah1} - T_{ref}) \\ &+ \dot{m}_{ai,x1} c_{p,a} (T_a - T_{ref}) \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{a,pah1} c_{p,a} (T_{ai,pah1} - T_{ref}) &= \dot{m}_{ar,pah1} c_{p,a} (T_{ao,sah1} - T_{ref}) \\ &+ (\dot{m}_{a,pah1} - \dot{m}_{ar,pah1}) c_{p,a} (T_a - T_{ref}) \end{aligned} \quad (2.17)$$

สมการ (2.17) เมื่อจัดรูปใหม่ ได้ผลดังนี้

$$\dot{m}_{ar,pah1} = \dot{m}_{a,pah1} \frac{(T_{ai,pah1} - T_a)}{(T_{ao,sah1} - T_a)} \quad (2.18)$$

ในทำนองเดียวกัน เมื่อพิจารณาสมดุลความร้อนที่จุด x2 ได้ว่า

$$\dot{m}_{ar,pah2} = \dot{m}_{a,pah2} \frac{(T_{ai,pah2} - T_a)}{(T_{ao,sah2} - T_a)} \quad (2.19)$$

จากสมการ (2.18) และ (2.19) สามารถหาอัตราการไหลวนกลับของอากาศเข้า PAH ได้ดังนี้

$$\dot{m}_{ar,pah} = \dot{m}_{ar,pah1} + \dot{m}_{ar,pah2} \quad (2.20)$$

$$\dot{m}_{ar,pah} = \dot{m}_{a,pah1} \frac{(T_{ai,pah1} - T_a)}{(T_{ao,sah1} - T_a)} + \dot{m}_{a,pah2} \frac{(T_{ai,pah2} - T_a)}{(T_{ao,sah2} - T_a)} \quad (2.21)$$

สามารถประมาณการหาอัตราการไหลวนกลับของอากาศเข้า PAH ได้ดังนี้

$$\dot{m}_{ar,pah} = \dot{m}_{a,pah} \frac{(T_{ai,pah} - T_a)}{(T_{ao,sah} - T_a)} \quad (2.22)$$

โดยที่

$\dot{m}_{a,pah}$	คืออัตราการไหลของอากาศเข้า PAH (kg/s)
$\dot{m}_{a,pah1}$	คืออัตราการไหลของอากาศเข้า PAH1 (kg/s)
$\dot{m}_{a,pah2}$	คืออัตราการไหลของอากาศเข้า PAH2 (kg/s)
$\dot{m}_{ar,pah}$	คืออัตราการไหลวนกลับของอากาศเข้า PAH (kg/s)
$\dot{m}_{ar,pah1}$	คืออัตราการไหลวนกลับของอากาศเข้า PAH1 (kg/s)
$\dot{m}_{ar,pah2}$	คืออัตราการไหลวนกลับของอากาศเข้า PAH2 (kg/s)
T_a	คืออุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าหม้อไอน้ำ ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{ai,pah}$	คืออุณหภูมิของอากาศเข้า PAH ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{ai,pah1}$	คืออุณหภูมิของอากาศเข้า PAH1 ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{ai,pah2}$	คืออุณหภูมิของอากาศเข้า PAH2 ($^{\circ}\text{C}$)
T_{ref}	คืออุณหภูมิของอากาศอ้างอิง ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{go,sah}$	คืออุณหภูมิของแก๊สออกจาก SAH ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{go,sah1}$	คืออุณหภูมิของแก๊สออกจาก SAH1 ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{go,sah2}$	คืออุณหภูมิของแก๊สออกจาก SAH2 ($^{\circ}\text{C}$)

2.5.9 อัตราการไหลวนกลับของอากาศเข้า SAH (Secondary air recirculation flow)

จากรูป 2.7 พิจารณาสมดุลความร้อนที่จุด y1 ได้ผลดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \dot{m}_{a,sah1} c_{p,a} (T_{ai,sah1} - T_{ref}) &= \dot{m}_{ar,sah1} c_{p,a} (T_{ao,sah1} - T_{ref}) \\ &+ \dot{m}_{ai,y1} c_{p,a} (T_a - T_{ref}) \end{aligned} \quad (2.23)$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{a,sah1} c_{p,a} (T_{ai,sah1} - T_{ref}) &= \dot{m}_{ar,sah1} c_{p,a} (T_{ao,sah1} - T_{ref}) \\ &+ (\dot{m}_{a,sah1} - \dot{m}_{ar,sah1}) c_{p,a} (T_a - T_{ref}) \end{aligned} \quad (2.24)$$

จากสมการ (2.24) เมื่อจัดรูปใหม่ ได้ผลดังนี้

$$\dot{m}_{ar,sah1} = \dot{m}_{a,sah1} \frac{(T_{ai,sah1} - T_a)}{(T_{ao,sah1} - T_a)} \quad (2.25)$$

ในทำนองเดียวกัน เมื่อพิจารณาสมดุลความร้อนที่จุด y2 ได้ว่า

$$\dot{m}_{ar,sah2} = \dot{m}_{a,sah2} \frac{(T_{ai,sah2} - T_a)}{(T_{ao,sah2} - T_a)} \quad (2.26)$$

จากสมการ (2.25) และ (2.26) สามารถหาอัตราการไหลวนกลับของอากาศเข้า SAH ได้
ดังนี้

$$\dot{m}_{ar,sah} = \dot{m}_{ar,sah1} + \dot{m}_{ar,sah2} \quad (2.27)$$

$$\dot{m}_{ar,sah} = \dot{m}_{a,sah1} \frac{(T_{ai,sah1} - T_a)}{(T_{ao,sah1} - T_a)} + \dot{m}_{a,sah2} \frac{(T_{ai,sah2} - T_a)}{(T_{ao,sah2} - T_a)} \quad (2.28)$$

สามารถประมาณการหาอัตราการไหลวนกลับของอากาศเข้า SAH ได้ดังนี้

$$\dot{m}_{ar,sah} = \dot{m}_{a,sah} \frac{(T_{ai,sah} - T_a)}{(T_{ao,sah} - T_a)} \quad (2.29)$$

โดยที่

$\dot{m}_{a,sah}$	คืออัตราการไหลของอากาศเข้า SAH (kg/s)
$\dot{m}_{a,sah1}$	คืออัตราการไหลของอากาศเข้า SAH1 (kg/s)
$\dot{m}_{a,sah2}$	คืออัตราการไหลของอากาศเข้า SAH2 (kg/s)
$\dot{m}_{ar,sah}$	คืออัตราการไหลวนกลับของอากาศเข้า SAH (kg/s)
$\dot{m}_{ar,sah1}$	คืออัตราการไหลวนกลับของอากาศเข้า SAH1 (kg/s)

$\dot{m}_{ar,sah2}$	คืออัตราการไหลวนกลับของอากาศเข้า SAH2 (kg/s)
T_a	คืออุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าหม้อไอน้ำ ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{ai,sah}$	คืออุณหภูมิของอากาศเข้า SAH ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{ai,sah1}$	คืออุณหภูมิของอากาศเข้า SAH1 ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{ai,sah2}$	คืออุณหภูมิของอากาศเข้า SAH2 ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{go,sah}$	คืออุณหภูมิของแก๊สออกจาก SAH ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{go,sah1}$	คืออุณหภูมิของแก๊สออกจาก SAH1 ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{go,sah2}$	คืออุณหภูมิของแก๊สออกจาก SAH2 ($^{\circ}\text{C}$)
T_{ref}	คืออุณหภูมิของอากาศอ้างอิง ($^{\circ}\text{C}$)

2.5.10 อัตราการไหลของอากาศผ่าน SAH (Secondary air flow)

จากรูป 2.7 อัตราการไหลของอากาศรวมเข้าเตาเผา เท่ากับอัตราการไหลของอากาศผ่าน PAH และ SAH ลบด้วยอัตราการไหลย้อนกลับของอากาศเข้า PAH และ SAH

$$\dot{m}_a = \dot{m}_{a,pah} + \dot{m}_{a,sah} - \dot{m}_{ar,pah} - \dot{m}_{ar,sah} \quad (2.30)$$

เมื่อนำค่า $\dot{m}_{ar,sah}$ จากสมการ (2.29) แทนค่าลงในสมการ (2.30)

$$\dot{m}_a = \dot{m}_{a,pah} + \dot{m}_{a,sah} - \dot{m}_{ar,pah} - \dot{m}_{a,sah} \frac{(T_{ai,sah} - T_a)}{(T_{ao,sah} - T_a)} \quad (2.31)$$

จากสมการ (2.31) สามารถหาอัตราการไหลของอากาศผ่าน SAH ได้ดังนี้

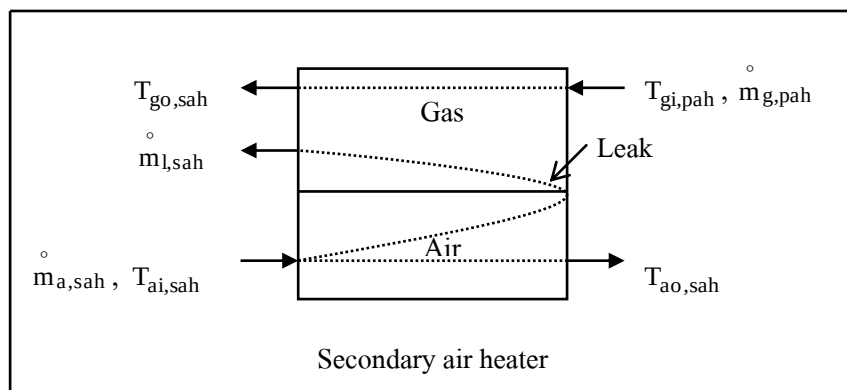
$$\dot{m}_{a,sah} = \frac{(\dot{m}_a + \dot{m}_{ar,pah} - \dot{m}_{a,pah})(T_{go,sah} - T_a)}{(T_{ao,sah} - T_{ai,sah})} \quad (2.32)$$

กำหนดให้ $T_{ao,sah} = T_{go,sah}$ ดังนั้นอัตราการไหลของอากาศผ่าน SAH คือ

$$\dot{m}_{a,sah} = \frac{(\dot{m}_a + \dot{m}_{ar,pah} - \dot{m}_{a,pah})(T_{go,sah} - T_a)}{(T_{go,sah} - T_{ai,sah})} \quad (2.33)$$

โดยที่

$\dot{m}_a$	คืออัตราการไหลของอากาศสำหรับการเผาไหม้ (kg/s)
$\dot{m}_{a,pah}$	คืออัตราการไหลของอากาศเข้า PAH (kg/s)
$\dot{m}_{a,sah}$	คืออัตราการไหลของอากาศเข้า SAH (kg/s)
$\dot{m}_{ar,pah}$	คืออัตราการไหลวนกลับของอากาศเข้า PAH (kg/s)
$\dot{m}_{ar,sah}$	คืออัตราการไหลวนกลับของอากาศเข้า SAH (kg/s)
$\dot{m}_{a,sah}$	คืออัตราการไหลของอากาศเข้า SAH (kg/s)
$T_{ai,sah1}$	คืออุณหภูมิของอากาศเข้า SAH1 ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{ai,sah2}$	คืออุณหภูมิของอากาศเข้า SAH2 ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{ao,sah1}$	คืออุณหภูมิของอากาศออก SAH1 ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{ao,sah2}$	คืออุณหภูมิของอากาศออก SAH2 ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{go,sah1}$	คืออุณหภูมิของแก๊สออก SAH1 ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{go,sah2}$	คืออุณหภูมิของแก๊สออก SAH2 ($^{\circ}\text{C}$)
T_{ref}	คืออุณหภูมิของอากาศอ้างอิง ($^{\circ}\text{C}$)



รูป 2.10 การแลกเปลี่ยนความร้อนใน SAH

2.5.11 อัตราการไหลของแก๊สไอเสียผ่าน SAH (Secondary gas flow)

จากรูป 2.10 SAH เป็นแบบรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative type) ในการแลกเปลี่ยนความร้อน มีการรั่วไหลเกิดขึ้น เมื่อพิจารณาสมดุลความร้อน SAH จะได้ผลดังนี้

$$Q_{\text{absorbed}} = Q_{\text{rejected}} \quad (2.34)$$

$$Q_{\text{absorbed}} = \dot{m}_{a,\text{sah}} \left(1 - \frac{l_{\text{sah}}}{100}\right) c_{p,a} (T_{\text{ao,sah}} - T_{\text{ai,sah}}) \quad (2.35)$$

$$Q_{\text{rejected}} = \dot{m}_{g,\text{sah}} c_{p,\text{gm}} (T_{\text{gi,sah}} - T_{\text{go,sah}}) + \dot{m}_{l,\text{sah}} c_{p,a} (T_{\text{go,sah}} - T_{\text{ai,sah}}) \quad (2.36)$$

เมื่อค่าในสมการ (2.35) และ (2.36) แทนลงในสมการ (2.34) ได้ผลดังนี้

$$\begin{aligned} & \dot{m}_{a,\text{sah}} \left(1 - \frac{l_{\text{sah}}}{100}\right) c_{p,a} (T_{\text{ao,sah}} - T_{\text{ai,sah}}) \\ &= \dot{m}_{g,\text{sah}} c_{p,\text{gm}} (T_{\text{gi,sah}} - T_{\text{go,sah}}) + \dot{m}_{l,\text{sah}} c_{p,a} (T_{\text{go,sah}} - T_{\text{ai,sah}}) \\ & \dot{m}_{a,\text{sah}} \left(1 - \frac{l_{\text{sah}}}{100}\right) c_{p,a} (T_{\text{ao,sah}} - T_{\text{ai,sah}}) \\ &= \dot{m}_{g,\text{sah}} c_{p,\text{gm}} (T_{\text{gi,sah}} - T_{\text{go,sah}}) \\ & \quad + \dot{m}_{a,\text{sah}} \left(\frac{l_{\text{sah}}}{100}\right) c_{p,a} (T_{\text{go,sah}} - T_{\text{ai,sah}}) \end{aligned} \quad (2.37)$$

จากสมการ (2.37) จัดรูปใหม่ หาค่าอัตราการใช้ของแก๊สไอเสียผ่าน SAH ได้ดังนี้

$$\dot{m}_{g,\text{sah}} = \frac{\dot{m}_{a,\text{sah}} c_{p,a} \left[\left(1 - \frac{l_{\text{sah}}}{100}\right) (T_{\text{ao,sah}} - T_{\text{ai,sah}}) - \left(\frac{l_{\text{sah}}}{100}\right) (T_{\text{go,sah}} - T_{\text{ai,sah}}) \right]}{c_{p,\text{gm}} (T_{\text{gi,sah}} - T_{\text{go,sah}})} \quad (2.38)$$

อุณหภูมิที่ใช้ในการคำนวณของ SAH มีดังนี้

$$T_{\text{ai,sah}} = \frac{T_{\text{ai,sah}1} + T_{\text{ai,sah}2}}{2} \quad (2.39)$$

$$T_{ao,sah} = \frac{T_{ao,sah1} + T_{ao,sah2}}{2} \quad (2.40)$$

$$T_{gi,sah} = \frac{T_{gi,sah1} + T_{gi,sah2}}{2} \quad (2.41)$$

$$T_{go,sah} = \frac{T_{go,sah1} + T_{go,sah2}}{2} \quad (2.42)$$

อัตราการไหลของอากาศและแก๊ส ที่ใช้ในการคำนวณมีดังนี้

$$\dot{m}_{a,sah} = \dot{m}_{a,sah1} + \dot{m}_{a,sah2} \quad (2.43)$$

$$\dot{m}_{g,sah} = \dot{m}_{g,sah1} + \dot{m}_{g,sah2} \quad (2.44)$$

การรั่วของ SAH ที่ใช้ในการคำนวณมีดังนี้

$$l_{sah} = \frac{l_{sah1} + l_{sah2}}{2} \quad (2.45)$$

โดยที่

$C_{p,a}$	คือความร้อนจำเพาะของอากาศ (kJ/kg K)
$C_{p,gm}$	คือความร้อนจำเพาะของแก๊สไอเสียขึ้น (kJ/kg K)
l_{sah}	คือเปอร์เซ็นต์การรั่วของ SAH (%)
l_{sah1}	คือเปอร์เซ็นต์การรั่วของ SAH1 (%)
l_{sah2}	คือเปอร์เซ็นต์การรั่วของ SAH2 (%)
$\dot{m}_{a,sah}$	คืออัตราการไหลของอากาศเข้า SAH (kg/s)
$\dot{m}_{a,sah}$	คืออัตราการไหลของอากาศเข้า SAH (kg/s)
$\dot{m}_{a,sah}$	คืออัตราการไหลของอากาศเข้า SAH (kg/s)
$\dot{m}_{g,sah}$	คืออัตราการไหลของแก๊สไอเสียผ่าน SAH (kg/s)
$\dot{m}_{g,sah}$	คืออัตราการไหลของแก๊สไอเสียผ่าน SAH (kg/s)
$\dot{m}_{g,sah}$	คืออัตราการไหลของแก๊สไอเสียผ่าน SAH (kg/s)

Q_{absorbed}	คือความร้อนที่รับเอาไว้ (kW)
Q_{rejected}	คือความร้อนที่ให้ไป (kW)
$T_{\text{ai,sah}}$	คืออุณหภูมิของอากาศเข้า SAH ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{\text{ai,sah1}}$	คืออุณหภูมิของอากาศเข้า SAH1 ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{\text{ai,sah2}}$	คืออุณหภูมิของอากาศเข้า SAH2 ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{\text{ao,sah}}$	คืออุณหภูมิของอากาศออก SAH ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{\text{ao,sah1}}$	คืออุณหภูมิของอากาศออก SAH1 ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{\text{ao,sah2}}$	คืออุณหภูมิของอากาศออก SAH2 ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{\text{gi,sah}}$	คืออุณหภูมิของแก๊สเข้า SAH ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{\text{gi,sah1}}$	คืออุณหภูมิของแก๊สเข้า SAH1 ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{\text{gi,sah2}}$	คืออุณหภูมิของแก๊สเข้า SAH2 ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{\text{go,sah}}$	คืออุณหภูมิของแก๊สออก SAH ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{\text{go,sah1}}$	คืออุณหภูมิของแก๊สออก SAH1 ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{\text{go,sah2}}$	คืออุณหภูมิของแก๊สออก SAH2 ($^{\circ}\text{C}$)

2.5.12 อุณหภูมิแก๊สออกจากเครื่องอุ่นอากาศ ซึ่งปรับค่าสำหรับอุณหภูมิอากาศเข้า ที่เบี่ยงเบนจากค่าที่ออกแบบ (Corrected gas temperature leaving air heater for deviation from design entering air temperature)

เครื่องอุ่นอากาศ ซึ่งได้แก่ PAH1 PAH2 SAH1 และ SAH2 ได้ถูกออกแบบไว้สำหรับอุณหภูมิอากาศเข้าเท่ากับ 26.7°C ดังนั้นหากการใช้งานจริง อุณหภูมิอากาศเข้าเครื่องอุ่นอากาศเบี่ยงเบนไปจากค่าที่ออกแบบ เมื่อจะคำนวณค่าประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนจะต้องทำการปรับค่าด้วย อ้างอิงจาก Driscoll, J. et al. (1968)

อุณหภูมิแก๊สออกจาก PAH1 PAH2 SAH1 และ SAH2 ซึ่งปรับค่าสำหรับอุณหภูมิอากาศเข้า ที่เบี่ยงเบนจากค่าที่ออกแบบ สามารถคำนวณได้ดังสมการ (2.46), (2.47), (2.48) และ (2.49) ตามลำดับ

$$T_{\text{go,pah1_r}} = \frac{T_{\text{ref}}(T_{\text{gi,pah1}} - T_{\text{go,pah1}}) + T_{\text{gi,pah1}}(T_{\text{go,pah1}} - T_{\text{ai,pah1}})}{T_{\text{gi,pah1}} - T_{\text{ai,pah1}}} \quad (2.46)$$

$$T_{go,pah2_r} = \frac{T_{ref}(T_{gi,pah2} - T_{go,pah2}) + T_{gi,pah2}(T_{go,pah2} - T_{ai,pah2})}{T_{gi,pah2} - T_{ai,pah2}} \quad (2.47)$$

$$T_{go,sah1_r} = \frac{T_{ref}(T_{gi,sah1} - T_{go,sah1}) + T_{gi,sah1}(T_{go,sah1} - T_{ai,sah1})}{T_{gi,sah1} - T_{ai,sah1}} \quad (2.48)$$

$$T_{go,sah2_r} = \frac{T_{ref}(T_{gi,sah2} - T_{go,sah2}) + T_{gi,sah2}(T_{go,sah2} - T_{ai,sah2})}{T_{gi,sah2} - T_{ai,sah2}} \quad (2.49)$$

โดยที่

$T_{ai,pah1}$	คืออุณหภูมิของอากาศเข้า PAH1 (°C)
$T_{ai,pah2}$	คืออุณหภูมิของอากาศเข้า PAH2 (°C)
$T_{ai,sah1}$	คืออุณหภูมิของอากาศเข้า SAH1 (°C)
$T_{ai,sah2}$	คืออุณหภูมิของอากาศเข้า SAH2 (°C)
$T_{gi,pah1}$	คืออุณหภูมิของแก๊สเข้า PAH1 (°C)
$T_{gi,pah2}$	คืออุณหภูมิของแก๊สเข้า PAH2 (°C)
$T_{gi,sah1}$	คืออุณหภูมิของแก๊สเข้า SAH1 (°C)
$T_{gi,sah2}$	คืออุณหภูมิของแก๊สเข้า SAH2 (°C)
$T_{go,pah1}$	คืออุณหภูมิของแก๊สออก PAH1 (°C)
$T_{go,pah1_r}$	คืออุณหภูมิของแก๊สออก PAH1 ซึ่งปรับค่าสำหรับอุณหภูมิอากาศเข้า ที่เบี่ยงเบนจากค่าที่ออกแบบ (°C)
$T_{go,pah2}$	คืออุณหภูมิของแก๊สออก PAH2 (°C)
$T_{go,pah2_r}$	คืออุณหภูมิของแก๊สออก PAH2 ซึ่งปรับค่าสำหรับอุณหภูมิอากาศเข้า ที่เบี่ยงเบนจากค่าที่ออกแบบ (°C)
$T_{go,sah1}$	คืออุณหภูมิของแก๊สออก SAH1 (°C)
$T_{go,sah1_r}$	คืออุณหภูมิของแก๊สออก SAH1 ซึ่งปรับค่าสำหรับอุณหภูมิอากาศเข้า ที่เบี่ยงเบนจากค่าที่ออกแบบ (°C)
$T_{go,sah2}$	คืออุณหภูมิของแก๊สออก SAH2 (°C)
$T_{go,sah2_r}$	คืออุณหภูมิของแก๊สออก SAH2 ซึ่งปรับค่าสำหรับอุณหภูมิอากาศเข้า ที่เบี่ยงเบนจากค่าที่ออกแบบ (°C)
T_{ref}	คืออุณหภูมิของอากาศอ้างอิง (°C)

$$= 26.7^{\circ}\text{C}$$

2.5.13 อุณหภูมิแก๊สออกจาก SAH1 และ SAH2 ปรับค่าสำหรับอุณหภูมิอากาศเข้า ที่เบี่ยงเบนจากค่าที่ออกแบบ และสำหรับการไม่มีอากาศรั่ว (SAH1 and SAH2 outlet gas temperatures corrected for deviation from design entering air temperature and no air leakage)

โดยปกติ SAH1 และ SAH2 ซึ่งเป็นแบบรีเจนเนอเรทีฟ จะมีการรั่วของอากาศ ดังนั้นการคำนวณหาประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนความร้อน จะต้องปรับค่าอุณหภูมิแก๊สออกจาก เครื่องอุ่นอากาศ เสมือนว่าไม่มีอากาศรั่ว และในขณะเดียวกันก็ต้องปรับค่าสำหรับอุณหภูมิอากาศเข้า ที่เบี่ยงเบนจากค่าที่ออกแบบด้วย ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ (2.50) และ (2.51) อ้างอิงจาก Driscoll, J. et al. (1968)

$$T_{go,sah1_rnl} = \frac{\frac{l_{sah1}}{100} c_{p,a} (T_{go,sah1_r} - T_{ref})}{c_{p,gm}} + T_{go,sah1_r} \quad (2.50)$$

$$T_{go,sah2_rnl} = \frac{\frac{l_{sah2}}{100} c_{p,a} (T_{go,sah2_r} - T_{ref})}{c_{p,gm}} + T_{go,sah2_r} \quad (2.51)$$

โดยที่

$c_{p,a}$	คือความร้อนจำเพาะของอากาศ (kJ/kg K)
$c_{p,gm}$	คือความร้อนจำเพาะของแก๊สไอเสียขึ้น (kJ/kg K)
l_{sah1}	คือ SAH1 leakage (%)
l_{sah2}	คือ SAH2 leakage (%)
$T_{go,sah1}$	คืออุณหภูมิของแก๊สออก SAH1 ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{go,sah2}$	คืออุณหภูมิของแก๊สออก SAH2 ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{go,sah1_r}$	คืออุณหภูมิแก๊สออกจาก SAH1 ปรับค่าสำหรับอุณหภูมิอากาศเข้า ที่เบี่ยงเบนจากค่าที่ออกแบบ ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{go,sah1_rnl}$	คืออุณหภูมิแก๊สออกจาก SAH1 ปรับค่าสำหรับอุณหภูมิอากาศเข้า ที่เบี่ยงเบนจากค่าที่ออกแบบ และการไม่มีอากาศรั่ว ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{go,sah2_r}$	คืออุณหภูมิแก๊สออกจาก SAH2 ปรับค่าสำหรับอุณหภูมิอากาศเข้า ที่เบี่ยงเบนจากค่าที่ออกแบบ ($^{\circ}\text{C}$)

$T_{go, sah2_rnl}$	คืออุณหภูมิแก๊สออกจาก SAH2 ปรับค่าสำหรับอุณหภูมิอากาศเข้า ที่ เบี่ยงเบนจากค่าที่ออกแบบ และการไม่มีอากาศรั่ว ($^{\circ}C$)
T_{ref}	คืออุณหภูมิของอากาศอ้างอิง ($^{\circ}C$) $= 26.7^{\circ}C$

2.5.14 อัตราส่วนความร้อนของแก๊สเปรียบเทียบกับของอากาศผ่านเครื่องอุ่นอากาศ (The ratio of heat capacity of air passing through the heater to the heat capacity of the gas passing through the heater)

สามารถหาได้จากสมการ (2.53), (2.54), (2.55) และ (2.56) อ้างอิงจาก Driscoll, J. et al. (1968)

เมื่อพิจารณาสมดุลความร้อนในเครื่องอุ่นอากาศ จะได้ว่า

$$Q_g = Q_a$$

$$(\dot{m} c_p)_g (T_{gi} - T_{go}) = (\dot{m} c_p)_a (T_{ao} - T_{ai})$$

$$\text{เมื่อกำหนดให้ } (\dot{m} c_p)_g \approx (\dot{m} c_p)_a$$

ดังนั้นได้ว่า

$$xr = \frac{T_{gi} - T_{go}}{T_{ao} - T_{ai}} \quad (2.52)$$

เมื่อนำสมการ (2.52) แทนค่าสำหรับ PAH1, PAH2, SAH1 และ SAH2 โดยกำหนดให้ $(\dot{m} c_p)_g = (\dot{m} c_p)_a$ จะได้ดังนี้

$$xr_{pah1} = \frac{T_{gi, pah1} - T_{go, pah1}}{T_{ao, pah1} - T_{ai, pah1}} \quad (2.53)$$

$$xr_{pah2} = \frac{T_{gi, pah2} - T_{go, pah2}}{T_{ao, pah2} - T_{ai, pah2}} \quad (2.54)$$

$$x_{r_{sah1}} = \frac{T_{gi,sah1} - T_{go,sah1_nl}}{T_{ao,sah1} - T_{ai,sah1}} \quad (2.55)$$

$$x_{r_{sah2}} = \frac{T_{gi,sah2} - T_{go,sah2_nl}}{T_{ao,sah2} - T_{ai,sah2}} \quad (2.56)$$

โดยที่

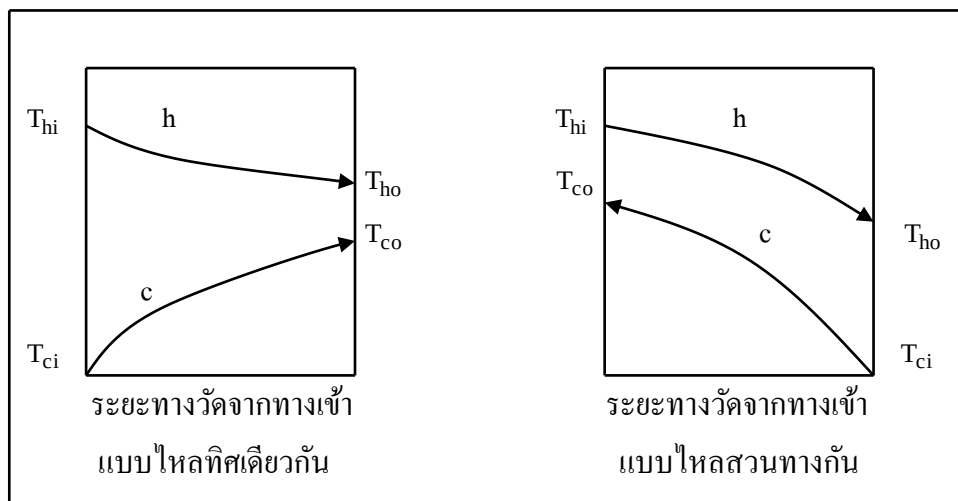
a	คืออากาศ
c _p	คือความร้อนจำเพาะ (kJ/kg K)
g	คือแก๊ส
m [°]	คืออัตราการไหล (kg/s)
T _{ai}	คืออุณหภูมิของอากาศเข้า (°C)
T _{ai,pah1}	คืออุณหภูมิของอากาศเข้า PAH1 (°C)
T _{ai,pah2}	คืออุณหภูมิของอากาศเข้า PAH2 (°C)
T _{ai,sah1}	คืออุณหภูมิของอากาศเข้า SAH1 (°C)
T _{ai,sah2}	คืออุณหภูมิของอากาศเข้า SAH2 (°C)
T _{ao}	คืออุณหภูมิของอากาศออก (°C)
T _{ao,pah1}	คืออุณหภูมิของอากาศออก PAH1 (°C)
T _{ao,pah2}	คืออุณหภูมิของอากาศออก PAH2 (°C)
T _{ao,sah1}	คืออุณหภูมิของอากาศออก SAH1 (°C)
T _{ao,sah2}	คืออุณหภูมิของอากาศออก SAH2 (°C)
T _{gi}	คืออุณหภูมิของแก๊สเข้า (°C)
T _{gi,pah1}	คืออุณหภูมิของแก๊สเข้า PAH1 (°C)
T _{gi,pah2}	คืออุณหภูมิของแก๊สเข้า PAH2 (°C)
T _{gi,sah1}	คืออุณหภูมิของแก๊สเข้า SAH1 (°C)
T _{gi,sah2}	คืออุณหภูมิของแก๊สเข้า SAH2 (°C)
T _{go}	คืออุณหภูมิของแก๊สออก (°C)
T _{go,pah1}	คืออุณหภูมิของแก๊สออก PAH1 (°C)
T _{go,pah2}	คืออุณหภูมิของแก๊สออก PAH2 (°C)
T _{go,sah1}	คืออุณหภูมิของแก๊สออก SAH1 (°C)

$T_{go,sah1_nl}$	คืออุณหภูมิแก๊สออกจาก SAH1 ปรับค่าสำหรับการไม่มีอากาศรั่ว ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{go,sah2}$	คืออุณหภูมิของแก๊สออก SAH2 ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{go,sah2_nl}$	คืออุณหภูมิแก๊สออกจาก SAH2 ปรับค่าสำหรับการไม่มีอากาศรั่ว ($^{\circ}\text{C}$)
$x_{r_{pah1}}$	คืออัตราส่วนความร้อนของแก๊สเปรียบเทียบกับของอากาศผ่าน PAH1
$x_{r_{pah2}}$	คืออัตราส่วนความร้อนของแก๊สเปรียบเทียบกับของอากาศผ่าน PAH2
$x_{r_{sah1}}$	คืออัตราส่วนความร้อนของแก๊สเปรียบเทียบกับของอากาศผ่าน SAH1
$x_{r_{sah2}}$	คืออัตราส่วนความร้อนของแก๊สเปรียบเทียบกับของอากาศผ่าน SAH2

2.5.15 ประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อน ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger effectiveness)

ประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (ε) คืออัตราส่วนระหว่างการถ่ายเทความร้อนจริง (Q) กับการถ่ายเทความร้อนได้สูงสุด ($Q_{\max}$) จากของไหลหนึ่งไปสู่อีกของของไหลหนึ่ง ซึ่งมีค่าความร้อนจำเพาะ อุณหภูมิทางเข้า และอัตราการไหล เป็นค่าเดียวกันกับการถ่ายเทความร้อนจริง สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{\max}} \quad (2.57)$$



รูป 2.11 การกระจายอุณหภูมิสำหรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน