

บทที่ 3

ทฤษฎีการเผาไหม้

(Combustion theory)

ความสำคัญของเนื้อหาวิชา (Overview)

การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาเคมี ที่ซึ่งวัตถุที่เผาไหม้ได้จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนพร้อมกับปลดปล่อยความร้อนออกมา ในขณะเดียวกันก็จะแปรสภาพไปเป็นสารประกอบออกไซด์ หรือผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่สมบูรณ์ ได้แก่คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ก่อให้เกิดการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงไปโดยเปล่าประโยชน์ และก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ

ดังนั้นการทราบหลักการของกระบวนการเผาไหม้ และวิธีการควบคุมการเผาไหม้ให้สมบูรณ์จึงมีความสำคัญต่อการอนุรักษ์พลังงาน และรักษาสีสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ การทราบสาเหตุของการสูญเสียความร้อนในรูปแบบต่างของระบบ และอุปกรณ์ความร้อน พร้อมทั้งแนวทางในการป้องกัน จะช่วยให้สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานความร้อนของระบบโดยรวมให้สูงขึ้นได้อีกด้วย

วัตถุประสงค์ (Objective)

1. เพื่อให้เข้าใจหลักการของการเผาไหม้
2. เพื่อให้สามารถนำหลักการเผาไหม้ไปประยุกต์ใช้กับการอนุรักษ์พลังงานได้

บทนำ (Introduction)

เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการศึกษาเกี่ยวกับเชื้อเพลิง และการเผาไหม้ประเภทของเชื้อเพลิง และวิธีการทดสอบเชื้อเพลิงทฤษฎีการเผาไหม้ และการคำนวณการเผาไหม้ปฏิกิริยา และกระบวนการเผาไหม้ค่าความร้อนเชื้อเพลิงปริมาณอากาศที่ต้องการในทางทฤษฎี และในการเผาไหม้จริง การวิเคราะห์ก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ การคำนวณสมดุลพลังงานความร้อนก่อน และหลังการเผาไหม้กรณีศึกษาของการอนุรักษ์พลังงานวิธีการเผาไหม้ และอุปกรณ์การเผาไหม้เครื่องยนต์สันดาปภายในหลักการการทำงานของเครื่องยนต์สันดาปภายใน การปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องยนต์สันดาปภายในการบำรุงรักษาระบบเตาเผาโครงสร้างพื้นฐานของเตาเผา ประเภทของเตาเผา การอนุรักษ์พลังงานของเตาเผา วัสดุสำหรับอุปกรณ์ความร้อน ประเภท และคุณสมบัติของวัสดุทนไฟชนิดต่างๆ วัสดุทนไฟที่ใช้กับเตาหลอม วัสดุกันความร้อน โครงสร้างของผนังเตา

3.1 เชื้อเพลิงและการเผาไหม้

เชื้อเพลิง หมายถึง สารที่สามารถเผาไหม้ได้โดยง่ายเมื่อทำปฏิกิริยากับอากาศหรือออกซิเจนและความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้นั้นสามารถนำมาใช้งานอย่างได้คุ้มค่าทางเศรษฐกิจ ดังนั้น การจะนำสิ่งใดมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้นั้น จำเป็นต้องสามารถผลิตได้เป็นจำนวนมาก สามารถจัดหามาใช้ได้อย่างสะดวก เก็บรักษา ขนส่ง และใช้งานได้ง่าย นอกจากนี้ สารที่เกิดจากการเผาไหม้ (เช่น ไอเสีย ชี๊เส้า เป็นต้น) ต้องไม่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ทางอากาศ ทางน้ำ ฯลฯ

เชื้อเพลิงสามารถแบ่งออกได้ตามสภาพทางกายภาพ เป็นเชื้อเพลิงก๊าซ เชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงแข็ง

3.1.1 เชื้อเพลิงก๊าซ

เชื้อเพลิงก๊าซเป็นเชื้อเพลิงที่อยู่ในสถานะก๊าซภายใต้อุณหภูมิและความดันปกติ แบ่งออกเป็นก๊าซธรรมชาติซึ่งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และก๊าซที่ผลิตขึ้นจากการแยกเชื้อเพลิงแข็งหรือเชื้อเพลิงเหลวชนิดอื่น

ตารางที่ 3.1 ลักษณะทั่วไปของเชื้อเพลิงก๊าซ

เชื้อเพลิงก๊าซ			องค์ประกอบ (%)							ค่าความร้อนสูง	วัตถุประสงค์
			CO ₂	C _m H _n	O ₂	CO	H ₂	C _x H _{2x+2}	N ₂	[MJ/m ³]	การใช้งานหลัก
พวก น้ำมันดิบ	จากการ แยกสลาย	ก๊าซแยกสลายด้วยความร้อน ^{*1}	4.3	30.6	1.2	5.9	17.8	34.5	5.7	39.7	ก๊าซใช้หุงต้ม (town gas)
		ก๊าซแยกสลายด้วย catalyst ^{*1}	8.9	7.1	0.2	14.6	56.2	12.0	1.0	19.3	เหมือนข้างต้น
		ก๊าซผ่านไอน้ำอุณหภูมิสูง ^{*2}	10.5	0.1	-	21	33.6	1.3	0.8	11.5	ก๊าซหุงต้ม (town gas)
		ก๊าซผ่านไอน้ำอุณหภูมิต่ำ ^{*2}	21.7	-	-	1.5	21.6	55.2	-	24.9	ก๊าซหุงต้ม (town gas)
	ธรรมชาติ	ก๊าซแห้ง	3.4	-	0.1	-	-	94.6	0.9	37.7	ก๊าซหุงต้ม (town gas) กานันต์ไฟฟ้า
		ก๊าซชื้น	0.7	-	-	-	-	99.3	-	51.1	เหมือนข้างต้น
		ก๊าซ LPG (ประเภท 2 หมายเลข 4)	-	6.3	-	-	-	93.7	-	132.8	อุตสาหกรรม ก๊าซหุงต้ม (town gas)
		เหมือนข้างต้น (ประเภท 1 หมายเลข 2)	-	20.6	-	-	-	79.4	-	107.2	สำหรับครัวเรือน
	พวก	ก๊าซถ่านหิน (ก๊าซเตาถ่านโค้ก)	2.5	3.0	0.7	9.9	52.1	27.3	4.5	20.9	ก๊าซหุงต้ม (town gas) และ kiln
	ถ่านหิน	ก๊าซ blast furnace	17.7	-	-	23.9	2.9	-	55.5	3.7	kiln และหม้อไอน้ำ

*1 น้ำมันที่เป็นวัตถุดิบ น้ำมันดิบจากทางใต้วิธีไซคลิก

*2 น้ำมันที่เป็นวัตถุดิบ แนนทา อัตราความดัน catalyst ค่อนข้าง

*ก๊าซ LPG ให้ดูรายละเอียดการจำแนกประเภทในตารางที่ 3.3

3.1.1.1 สมบัติของเชื้อเพลิงก๊าซ

ข้อดี

(1) เทียบกับเชื้อเพลิงแข็ง และเชื้อเพลิงเหลวแล้ว แม้ว่าปริมาณอากาศส่วนเกิน (Excess air) จะมีน้อยก็ยังสามารถเผาไหม้สมบูรณ์ได้ง่ายกว่า เผาไหม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีประสิทธิภาพในการเผาไหม้สูง

(2) นอกจากการอุ่น (Preheat) อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (Combustion air) แล้วยังสามารถอุ่นตัวเชื้อเพลิงเองได้อีกด้วย ดังนั้น แม้ว่าเชื้อเพลิงจะมีค่าความร้อนค่อนข้างต่ำ แต่ก็สามารถเผาไหม้ให้อุณหภูมิสูงได้

(3) สามารถปรับระดับการเผาไหม้ได้สะดวกด้วยวาล์วปรับ ดังนั้น จึงสามารถจุดไฟ และดับไฟได้โดยง่าย และสามารถปรับอัตราส่วนระหว่างเชื้อเพลิง และอากาศได้ตามที่ต้องการ รวมทั้งยังสามารถใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติ ระบบควบคุมอุณหภูมิให้ความร้อนเฉพาะที่หรือให้ความร้อนกระจายทั่วสม่ำเสมอ หรือปรับสภาพบรรยากาศภายในเตาเผาได้สะดวกอีกด้วย

(4) ไม่มีขี้เถ้าเป็นส่วนประกอบในเชื้อเพลิง

(5) มีส่วนผสมของกำมะถันน้อยมาก จึงไม่ทำให้เกิดมลพิษทางอากาศคือซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ข้อเสีย

(1) เทียบกับความร้อนที่ได้เท่ากัน ต้องใช้ปริมาณมากกว่าเชื้อเพลิงอื่นๆ จึงไม่สะดวกในการขนส่งลำเลียง

(2) การเก็บกักก๊าซต้องใช้ถังก๊าซ จึงมีค่าใช้จ่ายด้านสิ่งก่อสร้างสูง

(3) ราคาเชื้อเพลิงแพงกว่าเชื้อเพลิงเหลว

(4) ต้องควบคุมความปลอดภัยอย่างเข้มงวดเนื่องจากมีอันตรายจากการรั่วไหล และการระเบิด

3.1.1.2 ลักษณะของเชื้อเพลิงก๊าซ

ตารางที่ 3.2 แสดงองค์ประกอบหลักๆ ของเชื้อเพลิงก๊าซ และลักษณะขององค์ประกอบนั้น หากทราบสัดส่วนขององค์ประกอบต่างๆ เหล่านี้ในเชื้อเพลิง ก็สามารถคำนวณคุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงก๊าซนั้นโดยประมาณได้ เช่น ความถ่วงจำเพาะ ค่าความร้อน การเผาไหม้ และ Explosion limit ฯลฯ เป็นต้น

ตารางที่ 3.2 ลักษณะขององค์ประกอบของเชื้อเพลิงก๊าซ

องค์ประกอบ	สูตรโมเลกุล	ค่าความร้อนสูง [MJ/m ³ _N]	ความถ่วงจำเพาะ (อากาศ = 1)	ความหนาแน่น [kg/m ³ _N]
มีเทน	CH ₄	39.9	0.544	0,7168
อีเทน	C ₂ H ₆	70.5	1.049	1,356
โพรเพน	C ₃ H ₈	101	1.550	2,004
บิวเทน	n-C ₄ H ₁₀	132	2.067	2,672
ไอโซบิวเทน	i-C ₄ H ₁₀	133	2.074	2,682
เอทิลีน	C ₂ H ₄	63.4	0.9750	1,2604
โพรพิลีน	C ₃ H ₆	93.6	1.481	1.9370
บิวทิลีน	n-C ₄ H ₈	125	1.937	2,558
ไอโซบิวทิลีน	i-C ₄ H ₈	123		
คาร์บอนมอนอกไซด์	CO	12.6 ^{*4}	0.9669 ^{*3}	1.2500
คาร์บอนไดออกไซด์	CO ₂	-	1.5291	1,9769
ไฮโดรเจน	H ₂	12.8	0.0695	0,0899
ออกซิเจน	O ₂	-	1.1053	1.4290
ไนโตรเจน	N ₂	-	0.9673	1,2505

*1 JIS M 8012 *2 JIS M 8013 *3 Koppers Handbuch der Brennstoff-technik

*4 DIN 51850 *5 I.G.U.

3.1.1.3 ประเภทของเชื้อเพลิงก๊าซ

1. ก๊าซธรรมชาติ

เป็นเชื้อเพลิงก๊าซที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเป็นหลัก มีทั้งก๊าซที่ได้จากบ่อน้ำมันซึ่งเป็นก๊าซที่เกิดขึ้นพร้อมกับน้ำมัน และก๊าซที่ได้จากบ่อก๊าซซึ่งไม่มีน้ำมัน นอกจากนี้สภาพของก๊าซของแบ่งออกได้เป็นก๊าซแห้งและก๊าซชื้น สำหรับก๊าซแห้งจะมีก๊าซมีเทน (CH_4) เป็นองค์ประกอบไม่น้อยกว่า 95 % ส่วนก๊าซชื้นนอกจากจะมีก๊าซมีเทน อีเทน (C_2H_6) แล้ว ยังมีสารไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอนตั้งแต่โพรเพน (C_3H_8) ขึ้นไปเป็นองค์ประกอบ ก๊าซธรรมชาติมีค่าความร้อนสูง ($36\text{--}48 \text{ MJ/m}^3$) เผาไหม้ได้ง่าย และโอเสียจากการเผาไหม้จะทำให้เกิดมลพิษทางอากาศน้อยที่สุดเทียบกับเชื้อเพลิงทุกชนิด

การขนส่งทางบกจะขนส่งก๊าซตามท่อก๊าซ (Pipeline) ในสภาพก๊าซ การขนส่งทางน้ำจะขนส่งในสภาพของเหลวโดยใส่เรือแท้งเกอร์ห้องเย็น แล้วถ่ายใส่ถังก๊าซเหนือพื้นดินหรือใต้ดินในสภาพของเหลว โดยทั่วไปก๊าซธรรมชาติที่ลดอุณหภูมิเหลือ -162°C จนเป็นของเหลว จะเรียกว่า ก๊าซธรรมชาติเหลว (Liquefied Natural Gas หรือก๊าซ LNG)

2. ก๊าซ LPG

ก๊าซ LPG หมายถึงก๊าซที่มีองค์ประกอบหลักเป็นสารไฮโดรคาร์บอนพวกปิโตรเลียมซึ่งอยู่ในสถานะก๊าซที่อุณหภูมิและความดันปกติ แต่เมื่อเพิ่มความดันหรือลดอุณหภูมิจะกลายเป็นของเหลวได้ง่าย โดยทั่วไปจะเป็นก๊าซผสมระหว่างโพรเพนกับบิวเทน มีชื่อเรียกทั่วไปว่า ก๊าซ LPG (Liquefied Petroleum Gas) มีทั้งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติในบ่อน้ำมัน และที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ

คุณสมบัติของก๊าซ LPG คือ มีค่าความร้อนสูงและเป็นก๊าซที่สะอาด ขนส่งได้สะดวก ปรับระดับการเผาไหม้ได้สะดวก จึงนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในอุตสาหกรรม และในครัวเรือน ตารางที่ 3.3 แสดงก๊าซ LPG ชนิดต่างๆ ตามมาตรฐาน JIS

ตารางที่ 3.3 มาตรฐานก๊าซ LPG (JIS K 2240-1991)

ประเภท	หัวข้อ	องค์ประกอบ (mol %)				กำมะถัน [% โดยมวล]	ความดันไอ (40°C) [MPa]	ความหนาแน่น (15°C) [g/cm ³]	การกักครอง แผ่นเหล็กกล้า (40°C , 1 h)	วัตถุประสงค์ การใช้งานหลัก
		อีเทน + เอทิลีน	โพรเพน + โพรพิลีน	บิวเทน + บิวทิลีน	บิวทาไดอิน					
ประเภท 1	เบอร์ 1	ไม่เกิน 5	ไม่เกิน 80	ไม่เกิน 20	ไม่เกิน 0.5	ไม่เกิน 0.015	ไม่เกิน 1.53	0.005-0.620	ไม่เกิน 1	เชื้อเพลิงสำหรับครัวเรือน เชื้อเพลิงสำหรับพาณิชย์
	เบอร์ 2		60 ขึ้นไป ไม่ถึง 80	ไม่เกิน 40						
	เบอร์ 3		ไม่ถึง 60	30 ขึ้นไป						
ประเภท 2	เบอร์ 1	-	ไม่น้อยกว่า 90	ไม่เกิน 10	- *1	ไม่เกิน 0.02	ไม่เกิน 1.55	0.005-0.620	ไม่เกิน 1	เชื้อเพลิงและวัตถุดิบ สำหรับอุตสาหกรรม เชื้อเพลิงรถยนต์
	เบอร์ 2		50 ขึ้นไป ไม่ถึง 90	ไม่เกิน 50			ไม่เกิน 1.25			
	เบอร์ 3		ไม่ถึง 50	50 ขึ้นไป ไม่ถึง 90			ไม่เกิน 0.52			
	เบอร์ 4		ไม่เกิน 10	90 ขึ้นไป			ไม่เกิน 0.52			

*1 กรณีที่ใช้กับรถยนต์ ใช้ในอุตสาหกรรม (ทั้งเป็นเชื้อเพลิงและเป็นวัตถุดิบ) หรืออื่นๆ ปริมาณบิวทาไดอินที่มีอยู่ต้องไม่เป็นอุปสรรคต่อวัตถุประสงค์การใช้นั้น

หมายเหตุ บิวเทน + บิวทิลีน หมายถึง ของผสมระหว่างไอโซบิวเทน n-บิวเทน ไอโซบิวทิลีน 1-บิวทิลีน trans 2-บิวทิลีน นอกจากนี้ บิวทาไดอิน หมายถึง 1,3-บิวทาไดอิน

3. ก๊าซหุงต้ม (Town gas)

ก๊าซหุงต้มเป็นเชื้อเพลิงก๊าซที่ส่งผ่านไปตามท่อก๊าซจ่ายให้แก่โรงงาน อาคาร และครัวเรือน แต่เดิมใช้ก๊าซถ่านหินเป็นหลัก แต่ปัจจุบันมีการใช้ก๊าซธรรมชาติมีสัดส่วนมากขึ้น

ก๊าซหุงต้มเป็นก๊าซที่สะอาด มีประสิทธิภาพการเผาไหม้สูง ปรับระดับการเผาไหม้ได้สะดวก มีปริมาณสำรองที่สามารถใช้งานได้เป็นเวลานาน จึงมีคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิงในอุดมคติ อย่างไรก็ตาม ก๊าซหุงต้มมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับวัตถุดิบ และอุปกรณ์ที่ใช้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์เผาไหม้ที่เหมาะสมกับชนิดของก๊าซ

4. ก๊าซที่ได้จากการแยกสลายน้ำมัน

ก๊าซที่ได้จากการแยกสลายน้ำมัน หมายถึง ก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จากการนำสารไฮโดรคาร์บอนมาแยกสลายด้วยความร้อน ด้วยการเผาไหม้บางส่วน ด้วยการปรับสภาพด้วยไอน้ำ หรือด้วยการทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเพื่อทำให้มีขนาดโมเลกุลเล็กลง วัตถุดิบในการผลิตที่ใช้กันมากได้แก่ Off-oil จากโรงกลั่นน้ำมัน ก๊าซ LPG แنفทา น้ำมันก๊าด น้ำมันหนัก ฯลฯ

5. ก๊าซเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ

ก๊าซถ่านหิน (ก๊าซจากเตาถ่านโค้ก) เป็นก๊าซที่เป็นผลพลอยได้จากการนำถ่านหินมากลั่นแห้ง (Dry distillation) เพื่อผลิตเป็นถ่านโค้ก ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอน ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ ฯลฯ มีค่าความร้อนไม่เกิน 22 MJ/m_N^3 ใช้เป็นเชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำ และเป็นวัตถุดิบในการทำก๊าซหุงต้ม (Town gas) เป็นต้น

ก๊าซจากเตาหลอมเหล็ก เป็นก๊าซที่ได้จากส่วนบนสุดของเตาในกระบวนการผลิตเหล็ก เรียกว่า ก๊าซ Blast furnace หรือ ก๊าซ B (ย่อกจากจาก Blast furnace gas) เป็นก๊าซที่มีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งสามารถติดไฟได้ มีค่าความร้อนไม่เกิน 3.8 MJ/m_N^3

ก๊าซทิ้งจากโรงกลั่นน้ำมัน (off gas) เป็นก๊าซที่ปล่อยจากกระบวนการกลั่นน้ำมันต่างๆ ในโรงกลั่น องค์ประกอบจะขึ้นอยู่กับประเภทของเครื่องจักร ลักษณะของน้ำมันดิบ เงื่อนไขการเดินเครื่อง ฯลฯ จะมีไฮโดรคาร์บอน เช่น C_3 , C_4 ฯลฯ อยู่มาก

3.1.2 เชื้อเพลิงเหลว

เชื้อเพลิงเหลว หมายถึง เชื้อเพลิงที่อยู่ในสถานะของเหลวภายใต้อุณหภูมิ และความดันปกติ เชื้อเพลิงเหลวที่ใช้กันทั่วไปในปัจจุบันเกือบทั้งหมดจะเป็นเชื้อเพลิงปิโตรเลียม การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจะนำน้ำมันดิบที่ขุดได้จากบ่อน้ำมัน มากลั่น แยกสลาย (แยกสลายด้วย Catalyst แยกสลายด้วยการทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจน เป็นต้น) ทำ Alkylation กลั่นลำดับส่วน ฯลฯ เพื่อแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมที่เหมาะสมกับวัตถุประสงค์การใช้งานแต่ละประเภท ตารางที่ 3.4 แสดงลักษณะทั่วไปของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม

ตารางที่ 3.4 ลักษณะทั่วไปของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม

เชื้อเพลิง	องค์ประกอบหลัก	ช่วงจุดเดือด [°C]	ค่าความร้อนสูง [MJ/kg]	วัตถุประสงค์ การใช้งานหลัก
น้ำมันเบนซิน	C, H	30-210	46.1	เครื่องยนต์เบนซิน
น้ำมันก๊าด	C, H	160-300	46.0	เครื่องยนต์ขนาดเล็กสำหรับการเกษตร ใช้ในครัวเรือน
น้ำมันเบา	C, H	160-360	41.9	เครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก
น้ำมันหนัก	C, H (O, S)	250-360	42.8-46.5	หม้อไอน้ำ เตาอุตสาหกรรม เครื่องยนต์ดีเซลขนาดใหญ่

3.1.2.1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงเหลว

- ข้อดี**
- (1) มีค่าความร้อนสูง
 - (2) ราคาถูกเทียบต่อค่าความร้อนหนึ่งหน่วย
 - (3) จัดเก็บและขนส่งสะดวก ไม่ค่อยเสื่อมสภาพระหว่างการจัดเก็บ
 - (4) ประสิทธิภาพในการเผาไหม้สูง
 - (5) มีเขื่อน้อย
 - (6) เผาไหม้ง่าย ใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติได้ง่าย
- ข้อเสีย**
- (1) อุณหภูมิในการเผาไหม้สูง ทำให้เกิดความร้อนในบางจุดที่อาจสูงเกินไปได้ง่าย
 - (2) น้ำมันหนักจะมีองค์ประกอบของกำมะถันมาก เป็นสาเหตุของมลพิษทางอากาศได้ง่าย
 - (3) หัวเผาเชื้อเพลิง (Burner) บางชนิดจะทำให้เกิดเสียงดังได้ง่าย

3.1.2.2 ประเภทและลักษณะของเชื้อเพลิงเหลว

1. น้ำมันดิบ

หมายถึงน้ำมันดิบที่ขุดได้จากบ่อน้ำมันใต้ดินที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ น้ำมันดิบจะมีคุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีแตกต่างกันขึ้นอยู่กับแหล่งที่พบและชั้นความลึกของน้ำมันดิบ องค์ประกอบหลักได้แก่สารไฮโดรคาร์บอน อย่างไรก็ตาม น้ำมันดิบทั่วไปจะมีพาราฟิน และแนฟเทนไฮโดรคาร์บอนรวมอยู่ด้วยเป็นจำนวนมาก บางครั้งก็มีสารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนรวมอยู่ด้วยเป็นจำนวนมาก แต่น้ำมันดิบแทบจะไม่มีสารพวกโอลิฟินไฮโดรคาร์บอนรวมอยู่เลย

2. น้ำมันเบนซิน (Gasoline)

เป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมที่มีช่วงจุดเดือดเดียวกับแนฟทา (30-210 °C) แต่มีการปรับส่วนผสมให้เหมาะสมในการใช้เป็นเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์สันดาปภายใน จึงแยกออกมาเป็นประเภทต่างหากจากแนฟทา

น้ำมันเบนซินแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ น้ำมันเบนซินสำหรับรถยนต์ น้ำมันเบนซินสำหรับเครื่องบิน และน้ำมันเบนซินสำหรับอุตสาหกรรม

ลักษณะที่จำเป็นของน้ำมันเบนซินสำหรับรถยนต์ ได้แก่ การป้องกันเครื่องยนต์น็อค การกลายเป็นไอได้ง่าย (Volatility) ความปลอดภัย และความสะอาด การป้องกันเครื่องยนต์น็อคจะใช้ค่าออกเทนเป็นตัวชี้วัด วิธีการวัดค่าออกเทน แบ่งออกเป็นวิธี Research method กับวิธี Motor method

3. น้ำมันก๊าด

เป็นน้ำมันที่มีช่วงจุดเดือด 160-300°C ในการกลั่นลำดับส่วนจะได้ออกมาระหว่างเนฟทา กับน้ำมันเบา มีความหนาแน่น 0.78-0.80 g/cm³ มีค่าความร้อนสูง 46 MJ/kg ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับทำความร้อนและทำครัว เช่น ฮีตเตอร์น้ำมัน เป็นต้น ใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กตามครัวเรือน และใช้ล้างทำความสะอาดเครื่องจักรต่างๆ มีลักษณะดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 มาตรฐานน้ำมันก๊าด (JIS K 2003-1996)

หัวข้อ ประเภท	flash point [°C]	อุณหภูมิที่ออกมา 95% ในการกลั่นลำดับส่วน [°C]	กำมะถัน [%]	smoke point [mm]	การกักร้อนแผ่นทองแดง (50°C, 3 h)	สี [Saybolt]
เบอร์ 1	ไม่น้อยกว่า 40	ไม่เกิน 270	ไม่เกิน 0.008	23 ขึ้นไป *1	ไม่เกิน 1	+25 ขึ้นไป
เบอร์ 2		ไม่เกิน 300	ไม่เกิน 0.50	-	-	-

*1 Smoke point ของน้ำมันก๊าดเบอร์ 1 สำหรับฤดูหนาว เท่ากับ ตั้งแต่ 21 ขึ้นไป

ในการใช้น้ำมันก๊าดที่ทำความร้อน และใช้ในครัว ก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้มักจะถูกปล่อยทิ้งในห้องนั่นเอง ดังนั้นจึงต้องใช้น้ำมันน้ำมันก๊าดใสที่มีความบริสุทธิ์สูง และต้องใส่ใจคุณสมบัติเรื่องจุดให้ควัน (Smoke point) ปริมาณกำมะถัน และคุณสมบัติในการกลั่นลำดับส่วน เป็นต้น ส่วน Smoke point เป็นตัวบ่งชี้คร่าวๆ ว่าเชื้อเพลิงนั้นเกิดเขม่ายากง่ายเพียงใด ยิ่งมีค่าต่ำยิ่งเกิดเขม่าได้ง่าย นอกจากนี้ smoke point ยังขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ ช่วงจุดเดือด ฯลฯ โดย Normal paraffin จะมี Smoke point สูงที่สุด ส่วน Polycyclic aromatic hydrocarbon จะมี Smoke point ต่ำที่สุด

น้ำมันก๊าดที่ใช้ในเครื่องยนต์ขนาดเล็กสำหรับการเกษตรต่างๆ จะเป็นน้ำมันก๊าดสีขา น้ำมันก๊าดสีขาจะต้องมีคุณสมบัติป้องกันการน็อคในระดับหนึ่ง แต่ Smoking point ไม่มีปัญหาใดๆ ดังนั้นโดยทั่วไปจึงผลิตจากน้ำมันดิบที่มีอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนซึ่งมีค่าออกเทนสูงรวมอยู่ในปริมาณสูง

4. น้ำมันดีเซล

มีช่วงจุดเดือด 160-360°C เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่ได้ออกมาระหว่างน้ำมันก๊าดกับน้ำมันหนักในการกลั่นลำดับส่วน

ส่วนใหญ่แล้วจะใช้เป็นเชื้อเพลิงเครื่องยนต์ดีเซลหมุนเร็วสำหรับรถยนต์ เครื่องจักรก่อสร้าง รถไฟ หรือเรือ และใช้สำหรับเครื่องยนต์ Hot-bulb ในเรือประมง และเครื่องยนต์ขนาดเล็กสำหรับการเกษตร

ตารางที่ 3.6 แสดงมาตรฐานและลักษณะของน้ำมันเบาที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน JIS

ตารางที่ 3.6 มาตรฐานน้ำมันเบา (JIS K 2204-1997)

หัวข้อ ประเภท	flash point [°C]	อุณหภูมิที่ออกมา 95% ในการกลั่นลำดับส่วน [°C]	pour point [°C]	cold filter plug- ging point [°C]	คาร์บอนที่เหลือเมื่อกลั่นเหลือ น้ำมัน 10% [% โดยมวล]	cetane index ^{*2}	ความหนืดจลน์ (°C) [mm ² /s] {cSt} ^{*3}	กำมะถัน [% โดยมวล]
เบอร์ 1 พิเศษ	50 ขึ้นไป	ไม่เกิน 360	ไม่เกิน +5	-	ไม่เกิน 0.1	50 ขึ้นไป	2.7 ขึ้นไป	ไม่เกิน 0.05
เบอร์ 1	50 ขึ้นไป	ไม่เกิน 360	ไม่เกิน -2.5	ไม่เกิน -1		50 ขึ้นไป	2.7 ขึ้นไป	
เบอร์ 2	50 ขึ้นไป	ไม่เกิน 350	ไม่เกิน -7.5	ไม่เกิน -5		45 ขึ้นไป	2.5 ขึ้นไป	
เบอร์ 3	45 ขึ้นไป	ไม่เกิน 330 ^{*1}	ไม่เกิน -20	ไม่เกิน -12		45 ขึ้นไป	2.0 ขึ้นไป	
เบอร์ 3 พิเศษ	45 ขึ้นไป	ไม่เกิน 330	ไม่เกิน -30	ไม่เกิน -19		45 ขึ้นไป	1.7 ขึ้นไป	

*1 ทั้งนี้ กรณีที่ความหนืดจลน์ (30°C) ไม่เกิน 4.7 mm²/s {cSt} ต้อง ไม่เกิน 350°C

*2 ค่า cetane index อาจจะใช้ cetane number ก็ได้

*3 1 mm²/s = 1 cSt

เชื้อเพลิงเครื่องยนต์ดีเซลหมุนเร็ว ต้องมีความสามารถในการติดไฟได้ดี มีจุดติดไฟไม่ต่ำเกินไป มีความหนืดที่เหมาะสมในขณะที่ใช้งาน มี Pour point ต่ำ และมีกำมะถันต่ำ ความสามารถในการติดไฟจะใช้ Cetane number ในการประเมิน

5. น้ำมันเตา

โดยทั่วไป น้ำมันเตาเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีน้ำหนักโมเลกุลมาก ได้จากการนำน้ำมันที่เหลือจากการกลั่นลำดับส่วนน้ำมันดิบ น้ำมันที่เหลือจากการแยกสลาย และน้ำมันที่เหลือจากน้ำมันเบามาผสมกัน แต่เดิมจะแบ่งเป็นน้ำมันเตา A น้ำมันเตา B และน้ำมันเตา C แต่ในมาตรฐาน JIS จะใช้ความหนืดจลน์เป็นหลักในการแบ่งน้ำมันหนักออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ประเภท 1 (น้ำมันเตา A) ประเภท 2 (น้ำมันเตา B) และประเภท 3 (น้ำมันเตา C) นอกจากนี้ น้ำมันเตาประเภท 1 ยังแบ่งย่อยตามปริมาณกำมะถันเป็นเบอร์ 1 และเบอร์ 2 และประเภท 3 ยังแบ่งย่อยตามความหนืดเป็นเบอร์ 1 เบอร์ 2 และเบอร์ 3 ซึ่งมาตรฐานนี้จะแสดงไว้ในตารางที่ 3.7 การแบ่งประเภทน้ำมันเตาจะมีชื่อเรียก และรายละเอียดแตกต่างกันในแต่ละประเทศ แต่มาตรฐานการแบ่งจะใช้ความหนืดเป็นหลัก

ตารางที่ 3.7 มาตรฐานน้ำมันเตา (JIS K 2205-1991)

ประเภท		ปฏิกิริยา	flash point °C	ความหนืดจลน์ (50°C) mm ² /s {cSt} ⁽²⁾	pour point °C	คาร์บอนเหลือ % โดยมวล	ความชื้น % โดยปริมาตร	ซีดี % โดยมวล	กำมะถัน % โดยมวล
ประเภท 1	เบอร์ 1	เป็นกลาง	60 ขึ้นไป	ไม่เกิน 20	ไม่เกิน 5 ⁽¹⁾	ไม่เกิน 4	ไม่เกิน 0.3	ไม่เกิน 0.05	ไม่เกิน 0.5
	เบอร์ 2								ไม่เกิน 2.0
ประเภท 2									
ประเภท 3	เบอร์ 1		70 ขึ้นไป	ไม่เกิน 250	-	-	ไม่เกิน 0.5	ไม่เกิน 0.1	ไม่เกิน 3.5
	เบอร์ 2								-
	เบอร์ 3								-

*1 ค่า pour point ของน้ำมันประเภท 1 และ 2 สำหรับฤดูหนาวต้องไม่เกิน 0°C ค่า pour point ของน้ำมันประเภท 1 สำหรับฤดูร้อนต้องไม่เกิน 10°C

*2 1 mm²/s = 1 cSt

สำหรับในแง่ของการใช้งานแล้ว น้ำมันเตายังสามารถแบ่งได้เป็นน้ำมันดีเซลหมุนช้า สำหรับใช้ในเครื่องยนต์ดีเซล และน้ำมันเตาสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงของอุปกรณ์ให้ความร้อน เช่น หม้อไอน้ำ และเตาเผา เป็นต้น ความต้องการใช้น้ำมันหนักส่วนใหญ่จะอยู่ที่น้ำมันเตา โดยเฉพาะอย่างยิ่งการกำเนิดไฟฟ้า มีสัดส่วนความต้องการถึงประมาณ 30% ของความต้องการน้ำมันเตาทั้งหมด รองลงมาได้แก่ อุตสาหกรรม ซีเมนต์ เคมี และเหล็กตามลำดับ ต่อไปนี้จะอธิบายคุณสมบัติต่างๆ ของน้ำมันเตา

ความหนาแน่น

น้ำมันเตา A มีความหนาแน่นประมาณ $0.83-0.88 \text{ g/cm}^3$ น้ำมันเตา B ประมาณ $0.91-0.93 \text{ g/cm}^3$ และน้ำมันเตา C ประมาณ $0.94-0.97 \text{ g/cm}^3$ ความหนาแน่นยิ่งมาก อัตราส่วนระหว่าง C/H (คาร์บอนต่อไฮโดรเจน) ก็ยิ่งสูงขึ้น ทำให้ค่าความร้อนต่ำลง ความหนาแน่นนอกจากใช้เป็นเกณฑ์ในการแบ่งประเภทน้ำมันหนักแล้ว ยังใช้เป็นตัวชี้วัดลักษณะอื่นๆ ด้วย

จุดวาบไฟ

เป็นคุณสมบัติบังคับในแง่ของความปลอดภัยซึ่งใช้วัดอันตรายต่ออัคคีภัย น้ำมันเตาชนิดต่างๆ จะมีจุดติดไฟแตกต่างกันมาก ในมาตรฐาน JIS จะกำหนดจุดติดไฟของน้ำมันเตา A และ B ไม่ต่ำกว่า 60°C น้ำมันเตา C ไม่ต่ำกว่า 70°C

ความหนืด

เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการจ่ายน้ำมันและฉีดพ่นน้ำมันในการฉีดพ่นน้ำมันเพื่อเผาไหม้ ความหนืดจะขึ้นอยู่กัอุณหภูมิ ดังนั้น น้ำมันเตาที่มีความหนืดสูงจะต้องนำไปให้ความร้อนให้มีความหนืดเหมาะสมที่จะฉีดพ่น

โดยทั่วไปความหนืดที่จำเป็นในการจ่ายน้ำมันจะเท่ากับ $500-1000 \text{ mm}^2/\text{s}$ และความหนืดที่จำเป็นในการฉีดพ่นและเผาไหม้ด้วย Burner จะขึ้นอยู่กัประเภทของ Burner แต่โดยคร่าวๆ แล้วจะเท่ากับ $15-45 \text{ mm}^2/\text{s}$ ดังนั้นส่วนมากแล้วน้ำมันเตา A และ B จะสามารถใช้งานได้ทันทีโดยไม่ต้องให้ความร้อนก่อน แต่น้ำมันเตา C ในการจ่ายน้ำมันจะต้องอุ่นให้มีอุณหภูมิ $20-30^{\circ}\text{C}$ และในการฉีดพ่นเพื่อเผาไหม้ต้องมีอุณหภูมิ $80-90^{\circ}\text{C}$

จุดไหลเท

เป็นคุณสมบัติที่สำคัญซึ่งใช้วัดความสามารถในการไหลที่อุณหภูมิต่ำ โดยทั่วไป น้ำมันเตาที่มีความหนืดต่ำจะมีจุดไหลเทต่ำกว่าน้ำมันเตาที่มีความหนืดสูง น้ำมันเตายังมีแอสฟัลเทนหรือแว็กซ์สูงเท่าใดจะยังมีจุดไหลเทสูงขึ้นเท่านั้น อนึ่งจุดไหลเทเป็นคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาได้ง่าย จึงต้องใช้ความระมัดระวังโดยจุดไหลเทของน้ำมันเตาที่มีจำหน่ายทั่วไป น้ำมันเตา A จะเท่ากับ -20 ถึง -5°C น้ำมันเตา B เท่ากับ -20 ถึง -2.5°C น้ำมันเตา C เท่ากับ -5 ถึง 47°C

คาร์บอนคงเหลือ (Carbon residue)

คาร์บอนคงเหลือ หมายถึง ปริมาณคาร์บอนเมื่อนำเชื้อเพลิงไปทำ Carbonization ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Condensed aromatic hydrocarbon จุดเดือดสูง เรซินและแอสฟัลเทนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง

คุณสมบัตินี้จะมีผลอย่างมากต่อการเกิดสารประกอบคาร์บอนที่ Nozzle ของ Burner ปริมาณเขม่าในก๊าซเผาไหม้ ระดับการเกิดถ่านโค้กเมื่อนำน้ำมันหนักไปทำ Gasification และการเกิดคาร์บอนในห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซล

กำมะถัน

เมื่อสารประกอบของกำมะถันในน้ำมันหนักเกิดการเผาไหม้ จะเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์หรือซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ถ้าอุณหภูมิไม่เกิน Dew point ของไอเสีย ก๊าซเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับน้ำซึ่งเกิดขึ้นจากการเผาไหม้ กลายเป็นกรดซัลฟูริก ซึ่งจะกัดกร่อนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนอุณหภูมิต่ำและจุดอื่นๆ หากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในก๊าซเผาไหม้ถูกปล่อยสู่บรรยากาศ จะทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ จึงต้องติดตั้งเครื่องกำจัดกำมะถันจากไอเสียหรือเครื่องกำจัดกำมะถันจากน้ำมันหนัก

ไนโตรเจน

เมื่อไนโตรเจนในน้ำมันเตาเกิดการเผาไหม้ ส่วนหนึ่งจะกลายเป็นสารประกอบไนโตรัสออกไซด์ปล่อยออกไปในบรรยากาศ โดยทั่วไปในน้ำมันเตา A จะมีไนโตรเจน 0.01-0.03% [kg/kg] น้ำมันเตา B และ C จะมี 0.1-0.4% [kg/kg] ซึ่งมีสัดส่วนน้อยกว่ากำมะถันมาก

ซีเถ้า

ในน้ำมันเตาจะมีสารประกอบของโลหะหนักอยู่ด้วยเล็กน้อย สารประกอบเหล่านี้หลังจากเผาไหม้จะกลายเป็นซีเถ้า โลหะที่มีได้แก่ เหล็ก ซิลิกอน อลูมิเนียม แคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม นิกเกิล วาเนเดียม เป็นต้น ซึ่งเมื่อเผาไหม้จะสะสมอยู่ที่พื้นผิวถ่ายเทความร้อนของหม้อไอน้ำ และขัดขวางการถ่ายเทความร้อน นอกจากนี้ เมื่อโลหะวาเนเดียมเผาไหม้ จะทำปฏิกิริยากับโซเดียมหรืออื่นๆ เกิดสารประกอบที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ ซึ่งจะกัดกร่อนท่อให้ความร้อนหรือส่วนอื่นๆ ของหม้อไอน้ำ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า High temperature corrosion หรือ Vanadium attack

ค่าความร้อน

น้ำมันเตามีความแตกต่างจากถ่านหินตรงที่ ถ่านหินเตามีความหนาแน่นเท่ากันแล้ว ค่าความร้อนจะเกือบเท่ากัน อย่างไรก็ตาม หากมีปริมาณกำมะถันสูง ค่าความร้อนอาจลดลงไปบ้างได้ น้ำมันเตาที่มีจำหน่ายทั่วไปจะมีค่าความร้อนสูงระหว่าง 42.8-46.5 MJ/kg

3.1.3 เชื้อเพลิงแข็ง

เชื้อเพลิงแข็งหมายถึงเชื้อเพลิงที่ใช้ในงานที่เป็นของแข็ง เชื้อเพลิงแข็งหลักๆ ได้แก่ เชื้อเพลิงธรรมชาติ เช่น ถ่านหิน ลิกไนต์ ถ่านพีท ไม้ ฯลฯ และเชื้อเพลิงที่ได้จากการนำเชื้อเพลิงธรรมชาติมาเผาถ่าน (Carbonization) เช่น ถ่านโค้ก (Coke) ถ่านเซมิโค้ก (Semi-coke) ถ่านลิกไนต์โค้ก (Lignite coke) ถ่านไม้ เป็นต้น ตารางที่ 3.8 แสดงลักษณะทั่วไปของเชื้อเพลิงแข็ง

ตารางที่ 3.8 ลักษณะของถ่านหิน

หัวข้อ	ความหนาแน่น	ความร้อนจำเพาะ	อุณหภูมิติดไฟ	ค่าความร้อน
ประเภท	[g/cm ³]		[°C]	[kJ/ถ่านหินบริสุทธิ์ kg]
ลิกไนต์และ Brown coal	0.8-1.5	0.26-0.28	250-300	23,020-31,400
บิทูมินัส	1.2-1.7	0.24-0.28	300-400	31,400-36,840
แอนทราไซต์	1.5-1.8	0.22-0.24	400-450	34,330-35,580

3.1.3.1 ถ่านหิน

1. ชนิดของถ่านหิน

ถ่านหินเกิดจากพืชดึกดำบรรพ์เปลี่ยนเป็นถ่านหินช้าๆ ด้วยความร้อน และความดันใต้ผิวโลก ดังนั้น คุณสมบัติของถ่านหินจึงขึ้นอยู่กับประเภทของพืชที่เป็นต้นกำเนิด สภาพการทับถม coal rank และสภาพของดิน เป็นต้น

คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนที่อยู่ในเชื้อเพลิงแข็งธรรมชาตินั้น เมื่อไม่ค่อยๆ เปลี่ยนสภาพเป็นถ่านหินมากขึ้น สัดส่วนของคาร์บอนจะเพิ่มขึ้น สัดส่วนของออกซิเจนจะลดลง การเปลี่ยนสภาพนี้เรียกว่า การเปลี่ยนเป็นถ่านหิน (Coalification) และตัวชี้วัดว่าเปลี่ยนเป็นถ่านหินได้มากเพียงใด เรียกว่า Coal rank ยิ่งค่า Coal rank สูง เมื่อทำ Proximate analysis จะพบว่า Fixed carbon จะเพิ่มขึ้น Volatile matter จะลดลง และ Fuel ratio (Fixed carbon / Volatile matter) จะเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ถ่านหินในประเทศไทยส่วนใหญ่จะมี Coal rank ต่ำ และส่วนใหญ่จะมี Fuel ratio ต่ำ จึงยากต่อการจำแนกประเภท จึงใช้ค่าความร้อนของถ่านหินบริสุทธิ์ (ค่าความร้อนที่แปลงเป็น Dry mineral matter free basis) มาช่วยในการจำแนกประเภทด้วย วิธีการจำแนกประเภทแบบนี้แสดงไว้ในตารางที่ 3.9

ตาราง 3.9 ตารางจำแนกประเภทถ่านหินในประเทศไทย (JIS M 1002-1978)

ประเภท		ค่าความร้อน ^a (ชดเชยให้เป็น dry ash-free basis) [kJ/kg]	fuel ratio	caking property	หมายเหตุ
เกรดของถ่านหิน	ชนิด				
แอนทราไซต์ (A)	A ₁	-	4.0 ขึ้นไป	non-caking	blind coal ที่เกิดจากปฏิกิริยาของหินภูเขาไฟ
	A ₂				
บิทูมินัส (B, C)	B ₁	35160 ขึ้นไป	1.5 ขึ้นไป	strongly caking	
	B ₂		ไม่ถึง 1.5		
	C	33910 ขึ้นไป ไม่ถึง 35160	-	caking	
ซับบิทูมินัส (D, E)	D	32650 ขึ้นไป ไม่ถึง 33910	-	weakly caking	
	E	30560 ขึ้นไป ไม่ถึง 32650	-	non-caking	
brown coal (F)	F ₁	29470 ขึ้นไป ไม่ถึง 30560	-	non-caking	
	F ₂	24280 ขึ้นไป ไม่ถึง 29470	-		

*1 ค่าความร้อน (ชดเชยเทียบเท่าไม่มีความชื้นและไม่มีขี้เถ้า) = $\frac{\text{ค่าความร้อน}}{100 - \text{อัตราส่วนชดเชยขี้เถ้า} \times \text{สัดส่วนขี้เถ้า} - \text{สัดส่วนความชื้น}}$

100-อัตราส่วนชดเชยขี้เถ้า × สัดส่วนขี้เถ้า-สัดส่วนความชื้น

ทั้งนี้ อัตราส่วนชดเชยขี้เถ้าให้ใช้วิธีการถ่านหินแห่งประเทศไทย

ที่มา: คำอธิบายมาตรฐานการคำนวณถ่านหิน, เมษายน พ.ศ. 2492, ฝ่ายเอกสารวิชาการที่ 2 กองวิชาการและกองถ่านหิน การถ่านหินแห่งประเทศไทย

2. สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านหิน

ความหนาแน่นเป็นปัจจัยที่สำคัญในการพิจารณาคุณสมบัติและโครงสร้างทางกายภาพของถ่านหิน การวัดความหนาแน่นที่แท้จริงของถ่านหิน ปัจจุบันเชื่อว่าการวัดด้วยวิธีแทนที่ด้วยก๊าซฮีเลียมเป็นวิธีที่เชื่อถือได้ที่สุด

ความร้อนจำเพาะของถ่านหินมีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้นตาม Coal rank ค่าความร้อนของถ่านหินสามารถคำนวณได้คร่าวๆ จากธาตุองค์ประกอบ และเป็นปัจจัยที่สำคัญในการประเมินการเผาไหม้ของถ่านหิน

นอกจากนี้ เมื่อนำถ่านหินไปทำถ่านโค้กด้วยการอัดความดัน อัตราส่วนระหว่างปริมาตรที่ได้ก่อน และหลังผ่านกรรมวิธี เรียกว่า Expansion เนื่องจาก Expansion มีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับ Caking property ของถ่านหิน ดังนั้น จึงใช้ Expansion ที่หาได้จากวิธี Coke button ในมาตรฐาน JIS M 801 เป็นตัวชี้วัด Caking property

คุณสมบัติทางเคมีของถ่านหินจะหาได้จากการทำ Proximate analysis และ Ultimate analysis

การทำ Proximate analysis เป็นการหาปริมาณความชื้น ชี้เถ้า และ Volatile matter เพื่อคำนวณหาปริมาณ Fixed carbon ค่าเหล่านี้สามารถหาได้ค่อนข้างสะดวก จึงนิยมใช้เป็นวิธีตรวจสอบคุณสมบัติของถ่านหิน

การทำ Ultimate analysis เป็นการวิเคราะห์คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และกำมะถันที่เผาไหม้ได้ในถ่านหิน โดยแสดงค่าร้อยละที่ Dry basis

คาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักของถ่านหิน ในถ่านหินบริสุทธิ์จะมีคาร์บอน 70-80% [kg/kg] ถ่านหินยังมี Coal rank สูงจะยังมีคาร์บอนในสัดส่วนสูง ดังนั้น อัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจน (อัตราส่วน C/H) จึงเป็นตัวชี้วัด Coal rank อย่างหนึ่ง

สำหรับไฮโดรเจน ในถ่านหินบิทูมินัส ในถ่านหินบริสุทธิ์จะมี 5-6% [kg/kg]

ส่วนไนโตรเจน ในถ่านหินบริสุทธิ์จะมี 0.5-1.5% [kg/kg] เนื่องจากเมื่อเผาไหม้จะเปลี่ยนเป็นสารประกอบไนโตรสออกไซด์ จึงต้องระมัดระวังเรื่องมาตรการป้องกันมลพิษ

สำหรับออกซิเจน ในถ่านหินบริสุทธิ์จะมี 10-20% [kg/kg] แต่เมื่อ coal rank สูงขึ้น จะมีสัดส่วนลดลง

กำมะถันที่เผาไหม้ได้ในถ่านหินบริสุทธิ์จะมี 0.5-2% [kg/kg] เมื่อถ่านหินเผาไหม้ กำมะถันอินทรีย์ส่วนหนึ่งซึ่งเป็นเกลือซัลเฟตส่วนใหญ่จะเหลืออยู่เป็นชี้เถ้า แต่อีกส่วนหนึ่งจะกลายเป็นสารประกอบซัลไฟด์ และเปลี่ยนเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ส่วนกำมะถันอินทรีย์จะเผาไหม้ทั้งหมดกลายเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ กำมะถันเหล่านี้รวมเรียกว่า กำมะถันที่เผาไหม้ได้

3.1.3.2 ลิกไนต์

ลิกไนต์เป็น Brown coal ชนิดหนึ่ง โดย Brown coal ที่ลักษณะเป็นสีดำโดยทั่วไปจะถือว่าเป็นถ่านหิน แต่ถ้ามีสีน้ำตาลจะเรียกว่า ลิกไนต์

ลิกไนต์มีความชื้นมากกว่าถ่านหิน (ประมาณ 30-50% [kg/kg]) ได้รับอิทธิพลจากภูมิอากาศได้ง่าย ทำให้เกิดรอยแยก และแตกออกได้ง่าย มีค่าความร้อน 12.5-16.7 MJ/kg และมีอุณหภูมิการเผาไหม้ต่ำ แต่เมื่อทำให้แห้งแล้วจะมีอุณหภูมิติดไฟต่ำ เผาไหม้ได้ดี นอกจากใช้ในโรงงาน และบ้านเรือนในบริเวณใกล้เคียงกับเหมืองลิกไนต์แล้ว ยังนำมาทำ Low temperature carbonization เพื่อทำเป็น Lignite coke อีกด้วย

3.1.3.3 ถ่านโค้ก

ได้จากการนำถ่านหินวัตถุดิบที่มี Caking coal เป็นองค์ประกอบหลักมาทำ Carbonization ที่อุณหภูมิสูงประมาณ $1,000^{\circ}\text{C}$ ใช้ในการถลุงเหล็ก และงานหล่อโลหะเป็นหลัก

องค์ประกอบหลักของถ่านโค้กได้แก่ คาร์บอน ถ่านโค้กที่ดีจะมีความชื้น ชี้อ่อน Volatile matter กำมะถัน และฟอสฟอรัส ฯลฯ อยู่ต่ำ

ถ่านโค้กสำหรับใช้งานทั่วไป จะใช้ในการให้ความร้อน และทำคริว ใช้บดพืชผลการเกษตร ด้วยอากาศร้อน เป็นต้น ถ่านโค้กมีข้อดีคือให้ความร้อนสูงกว่าถ่านหิน และมีควันและฝุ่นดำ (Soot) น้อยกว่า

3.2 ประเภทของเชื้อเพลิงและวิธีการทดสอบเชื้อเพลิง

3.2.1 การวัดค่าความร้อน

1. เชื้อเพลิงก๊าซ

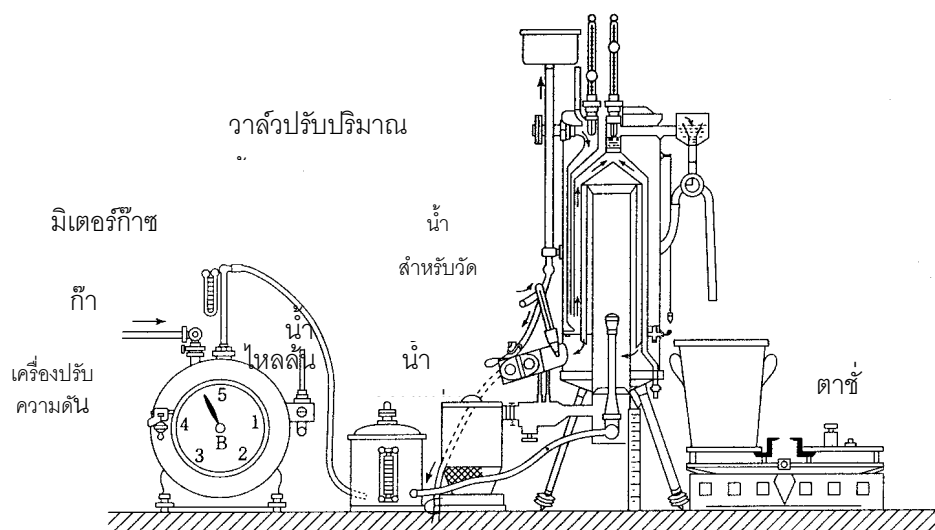
การวัดค่าความร้อนของเชื้อเพลิงก๊าซจะใช้ Junker's flow type gas calorimeter ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (JIS K 2301) วิธีนี้จะใช้กับเชื้อเพลิงก๊าซที่มีค่าความร้อนสูงระหว่าง $8.4\text{--}62.8\text{ MJ/m}^3_{\text{N}}$

วิธีวัดจะนำก๊าซตัวอย่าง 5 L หรือ 10 L ไปเผาไหม้อย่างสมบูรณ์กับอากาศด้วย Gas Burner และถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นทั้งหมดให้แก่กระแสน้ำที่ไหลอยู่ในแคลอริมิเตอร์ ซึ่งสามารถหาค่าความร้อนสูงได้จากปริมาณก๊าซตัวอย่าง ปริมาณน้ำที่ไหล และผลต่างอุณหภูมิขาเข้าและขาออกของน้ำที่ไหล

การวัดค่าความร้อนของก๊าซธรรมชาติที่มีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบหลัก และมีสัดส่วนของไฮโดรคาร์บอนตั้งแต่โพรเพนขึ้นไปอยู่ในเชื้อเพลิงน้อยนั้น จะใช้วิธี Gas chromatography (JIS K 2301) หาอัตราส่วนร้อยละขององค์ประกอบออกมาก่อน แล้วใช้การคำนวณค่าความร้อนของก๊าซผสมออกจากค่าความร้อนเดี่ยวๆ ขององค์ประกอบแต่ละตัว

2. เชื้อเพลิงเหลว

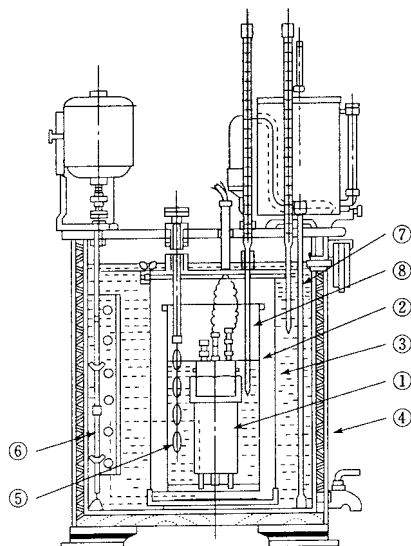
การวัดค่าความร้อนของน้ำมันดิบ และน้ำมันเชื้อเพลิง จะใช้ Automatic bomb calorimeter ที่มีสมรรถนะไม่ต่ำกว่า Bomb calorimeter แบบ B (JIS K 2279)



รูปที่ 3.1 Junker's flow type gas calorimeter

3. เชื้อเพลิงแข็ง

การวัดค่าความร้อนของถ่านหิน และถ่านโค้ก จะใช้ Bomb calorimeter แบบ B ดังแสดงในรูปที่ 3.2 หรือ Automatic bomb calorimeter (JIS M 8814) อนึ่ง ค่าความร้อนของถ่านไม้ และ Briquette ก็สามารถวัดได้ด้วยวิธีเดียวกันนี้ด้วย



- (1) Bomb (2) กระบอกใน (3) กระบอกกลาง (4) กระบอกนอก (5) เครื่องกวกระบอกใน
(6) เครื่องกวกระบอกนอก (7) เทอร์โมมิเตอร์กระบอกใน (8) เทอร์โมมิเตอร์กระบอกนอก

รูปที่ 3.2 Bomb calorimeter แบบ B

การหาค่าความร้อนทำได้โดยนำเชื้อเพลิงในสภาพแห้ง และมีมวลประมาณ 1 g ใส่ไว้ในจานเผาไหม้ แขนงานไว้ใน Bomb ให้สัมผัสกับเส้นลวดนิเกิลสำหรับจุดไฟ ยึดเส้นลวดนิเกิลทั้งสองด้านไว้กับขั้วไฟฟ้า เติมนอกซิเจนใน Bomb อัดให้มีความดันประมาณ 2.5 MPa แล้วจ่ายกระแสไฟฟ้าให้เส้นลวดนิเกิลเพื่อจุดไฟ โดย Bomb จะบรรจุอยู่ในกระบอกในระหว่างกระบอกกลาง และกระบอกนอก ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทให้น้ำในกระบอกใน เมื่อน้ำในกระบอกในมีอุณหภูมิสูงขึ้น ให้เติมน้ำอุ่นลงในกระบอกนอก รักษาผลต่างอุณหภูมิของน้ำในกระบอกใน และนอกไม่ให้เกิน 0.1°C จะสามารถวัดการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำในกระบอกในได้ แล้วใช้สมการต่อไปนี้คำนวณหาความร้อนสูงของตัวอย่าง 1 g โดยในกรณีของถ่านหินจะคำนวณที่ Equilibrium moisture และกรณีของถ่านโค้กจะคำนวณที่ Dry basis

ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงที่วัด [J/g]

$$= \frac{4.186 \times \{ \text{ปริมาณน้ำในกระบอกใน [g]} + \text{ความจุความร้อนเทียบเท่า น้ำ [g]} \times \text{อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น [°C]} \}}{\text{ปริมาณตัวอย่าง [g]}}$$

ความจุความร้อนเทียบเท่า น้ำ: เนื่องจากใน Calorimeter ความร้อนที่เกิดขึ้นส่วนหนึ่งจะถ่ายเทสู่ตัวเครื่อง ดังนั้นจึงแสดงความจุ

ความร้อนของตัวเครื่องด้วยปริมาณน้ำที่มีความจุความร้อนเทียบเท่ากัน ค่านี้เรียกว่า ความจุความร้อน เทียบเท่าของ Calorimeter
กรณีที่หาคำนวณค่าความร้อนต่ำจากค่าความร้อนสูง จะใช้สมการดังต่อไปนี้

$$\text{ค่าความร้อนต่ำ [MJ/kg]} = \text{ค่าความร้อนสูง [MJ/kg]} - \frac{2.44(9h + w)}{100}$$

ในที่นี้ h คือ อัตราส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง [%]

w คือ อัตราส่วนโดยมวลของความชื้นในเชื้อเพลิง [%]

ทั้งนี้ ทั้งค่าความร้อน ความชื้น และไฮโดรเจน ต้องเป็นค่าที่ฐานเดียวกัน

3.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบ

3.2.2.1 เชื้อเพลิงก๊าซ

องค์ประกอบของเชื้อเพลิงก๊าซ แบ่งออกได้เป็น องค์ประกอบทั่วไป (ไฮโดรคาร์บอนที่มีสถานะก๊าซ (เช่น มีเทน ฯลฯ) คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน และไนโตรเจน) และองค์ประกอบพิเศษซึ่งมีอยู่ในปริมาณน้อย (กำมะถันรวม ไฮโดรเจนซัลไฟด์ แอมโมเนีย แนฟทาซีน และความชื้น)

วิธีการวิเคราะห์โดยทั่วไปสำหรับก๊าซเชื้อเพลิง เช่น ก๊าซหุงต้ม (town gas) และก๊าซธรรมชาติซึ่งใช้เป็นเชื้อเพลิง จะใช้วิธีตามมาตรฐาน JIS K 2301 และสำหรับก๊าซธรรมชาติเหลว (LNG) จะใช้วิธีตามมาตรฐาน JIS K 2240

1. วิเคราะห์องค์ประกอบทั่วไป

วิธี Gas chromatography จะวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas chromatography ที่ตรวจจับการนำความร้อนหรือมี Hydrogen flame ionization detector

องค์ประกอบที่สามารถวัดได้ด้วยวิธีนี้ ได้แก่ ไฮโดรเจน (H_2) ออกซิเจน (O_2) ไนโตรเจน (N_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีเทน (CH_4) อีเทน (C_2H_6) เอทิลีน (C_2H_4) โพรเพน (C_3H_8) โพรพิลีน (C_3H_6) บิวเทน (C_4H_{10}) ไอโซเมอร์ของบิวทีน (C_4H_{10}) เป็นต้น

2. วิเคราะห์องค์ประกอบพิเศษ

องค์ประกอบที่ต้องวิเคราะห์ด้วยวิธีพิเศษ และวิธีวิเคราะห์ แสดงไว้ในตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 องค์ประกอบที่จะวิเคราะห์และประเภทของวิธีวิเคราะห์

องค์ประกอบที่จะวิเคราะห์	วิธีวิเคราะห์
กำมะถันรวม	วิธี Barium per chlorate gravimetric วิธี Dimethyl sulfonazo-III absorption spectrometric
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	วิธี Iodometric titration วิธี Methylene blue absorption spectrometric วิธีใช้กระดาษทดสอบ Lead acetate
แอมโมเนีย	วิธีไตเตรตให้เป็นกลาง วิธี Indophenol absorption spectrometric วิธีใช้กระดาษทดสอบ Silver nitrate - manganese nitrate
เนฟทาซีน	วิธี Gas chromatography
ความชื้น	วิธี Adsorption weighing วิธี Dew point

3.2.2.2 เชื้อเพลิงเหลว

ต่อไปนี้จะอธิบายวิธีทดสอบองค์ประกอบตามมาตรฐาน JIS

1. วิธีวิเคราะห์องค์ประกอบ (JIS K 2536)

ใช้วิธี Fluorescent indicator adsorption วัดปริมาณองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนในผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม โดยแยกเป็นไฮโดรคาร์บอน 3 ประเภท ได้แก่ ไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว โอลิฟิน ไฮโดรคาร์บอน และอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน และใช้วิธี Gas chromatography ในการวัดเบนซีน โทลูอีน ไซลีน เมทานอล เมทิลเทอเชียรีบิวทิลอีเทอร์ (MTBE) ฯลฯ

วิธีทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.11 วิธีทดสอบประเภทต่างๆ

ประเภท	ประเภทของไฮโดรคาร์บอนและองค์ประกอบที่ทดสอบ	ขอบเขตการใช้งาน	หน่วยของผลการทดสอบ	ตัวอย่างของน้ำมันที่ทดสอบได้
Fluorescent indicator adsorption method	อิ่มตัว โอลิฟิน อะโรมาติก	ใช้กับผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมที่มีจุดสิ้นสุด*ไม่เกิน 315°C ^{*1}	[% โดยปริมาตร]	น้ำมันเบนซินรถยนต์ น้ำมันแก๊สโซลีนเครื่องบิน น้ำมันเชื้อเพลิงเทอร์โบเครื่องยนต์ น้ำมันก๊าด
วิธีทดสอบสารอะโรมาติกเบนซีนด้วย Gas chromatography	อะโรมาติก เบนซีน โทลูอีน ไซลีน	ใช้กับผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมที่มีจุดสิ้นสุด*ไม่เกิน 220°C ^{*1}	[% โดยมวล] หรือ [% โดยปริมาตร]	น้ำมันเบนซินปรับสภาพ น้ำมันเบนซินรถยนต์ น้ำมันแก๊สโซลีนเครื่องบิน
วิธีทดสอบองค์ประกอบรวมด้วย Gas chromatography	องค์ประกอบรวม เบนซีน โทลูอีน ไซลีน เมทานอล MTBE น้ำมันก๊าด	ใช้กับผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมที่มีจุดสิ้นสุด*ไม่เกิน 250°C ^{*1}		น้ำมันเบนซินปรับสภาพ น้ำมันเบนซินรถยนต์
วิธีทดสอบสารประกอบของออกซิเจนด้วย Gas chromatography	เมทานอล MTBE		[% โดยปริมาตร]	น้ำมันเบนซินรถยนต์

*1 จุดสิ้นสุด ให้ยึดตามวิธีทดสอบการกลั่นด้วยวิธีความดันปกติที่กำหนดไว้ใน JIS K 2254 หมายถึงจุดที่มีการเปลี่ยนสถานะ

2. วิธีทดสอบกำมะถัน

ตารางที่ 3.12 แสดงประเภท และขอบเขตการใช้วิธีทดสอบกำมะถันในน้ำมันดิบ และผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมรวมทั้งตัวอย่างน้ำมันที่ทดสอบได้ จากวิธีทดสอบดังต่อไปนี้

Sulfonazo-III titration method after oxyhydrogen flame combustion

นำตัวอย่างไปเผาไหม้ด้วยเปลวไฟออกซิเจน-ไฮโดรเจน นำออกไซด์ของกำมะถันที่เกิดขึ้นไปละลายในไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อให้เป็นกรดซัลฟูริก นำสารละลายที่ได้ไปไตเตรตกับสารละลายมาตรฐานแบเรียมเปอร์คลอเรตโดยใช้ไดเมทิลซัลโฟนาโซ III เป็นอินดิเคเตอร์ แล้วคำนวณหาปริมาณกำมะถันในเชื้อเพลิง

Precise coulometric titration method

นำตัวอย่างใส่ใน combustion tube ที่อุ่นให้ร้อนแล้ว ทำการเผาไหม้ในบรรยากาศของออกซิเจนและก๊าซเฉื่อย นำซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ไปละลายในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ทำ Coulometric titration และคำนวณหาปริมาณกำมะถันจากปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ไป

ตารางที่ 3.12 ประเภทของวิธีทดสอบ

ประเภทของวิธีทดสอบ	ตัวอย่างน้ำมันที่ทดสอบได้	ขอบเขตการวัด	หมายเหตุ
sulfonazo-III titration method after oxyhydrogen flame combustion	น้ำมันเบนซินรถยนต์ น้ำมันก๊าด	1-300 ppm โดยมวล	
precise coulometric titration method	น้ำมันเบา	1-1000 ppm โดยมวล	
air combustion tube method	น้ำมันดิบ น้ำมันเบา น้ำมันหนัก	ตั้งแต่ 0.01% โดยมวลขึ้นไป	
excitation method using radiation		ตั้งแต่ 0.010% โดยมวลขึ้นไป	
oxygen combustion tube method		ตั้งแต่ 0.01% โดยมวลขึ้นไป	
bomb method	น้ำมันดิบ น้ำมันหนัก น้ำมันหล่อลื่น	ตั้งแต่ 0.10% โดยมวลขึ้นไป	
lamp volume method	น้ำมันเบนซินรถยนต์ น้ำมันก๊าด	ตั้งแต่ 0.002% โดยมวลขึ้นไป	หมายเหตุ 1
wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry	น้ำมันเบนซินรถยนต์ น้ำมันก๊าด น้ำมันเบา น้ำมันหนัก น้ำมันดิบ น้ำมันหล่อลื่น	0.0010-2.50% โดยมวลขึ้นไป	หมายเหตุ 2

Air combustion tube method

ป้อนอากาศให้แก่ combustion tube ทำการเผาไหม้ตัวอย่าง นำสารประกอบออกไซด์ของกำมะถันที่เกิดขึ้นไปละลายในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อให้เป็นกรดซัลฟูริก นำไปไตเตรตด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ แล้วคำนวณหาปริมาณกำมะถันในเชื้อเพลิง

Excitation method using radiation

วิธี excitation method นี้เมื่อฉายรังสีที่ตัวอย่าง อะตอมของกำมะถันในตัวอย่างจะปลดปล่อยรังสี fluorescent x-ray ที่มีความเข้มแปรผันตามปริมาณกำมะถัน เมื่อแยกวัดรังสีนี้จะคำนวณหาปริมาณกำมะถันในตัวอย่างได้

Oxygen combustion tube method

ป้อนออกซิเจนให้แก่ Combustion tube แก้วควอตซ์ที่อุ่นให้ร้อนจนมีอุณหภูมิ 1150-1120°C ทำการเผาไหม้ตัวอย่าง นำสารประกอบออกไซด์ของกำมะถันที่เกิดขึ้นไปละลายในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (1%) เพื่อให้เป็นกรดซัลฟูริก นำกรดซัลฟูริกนี้ไปไตเตรตให้เป็นกลางด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ แล้วคำนวณหาปริมาณกำมะถัน

Bomb method

นำตัวอย่างไปเผาไหม้ใน bomb ซึ่งอัดออกซิเจนเอาไว้ แล้วล้างภายใน bomb วัดปริมาณเกลือซัลเฟตในน้ำที่ล้างออกมาในรูปแบบปริมาณซัลเฟต แล้วคำนวณหาปริมาณกำมะถัน

3. วิธีทดสอบไนโตรเจน (JIS K 2609)

องค์ประกอบไนโตรเจนในผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมสามารถวัดได้ด้วย Macro Kjeldahl method และ Instrumental method ได้แก่ Precise coulometric titration method และ Chemiluminescent method

Macro Kjeldahl method จะทำการแยกสลายด้วยความร้อนในกรดซัลฟูริกเข้มข้น ซึ่งเติมตัวเร่งปฏิกิริยาลงในตัวอย่าง เพื่อเปลี่ยนไนโตรเจนในตัวอย่างให้เป็นแอมโมเนียม เติมด่างแก่แล้วระเหยน้ำออกไป นำแอมโมเนียมที่เกิดขึ้นไปละลายในสารละลายกรดบอริก นำไปไตเตรตด้วยสารละลายมาตรฐาน กรดซัลฟูริกโดยใช้ Methyl purple หรือ Methyl red-methylene blue เป็นอินดิเคเตอร์ แล้วคำนวณหาปริมาณไนโตรเจน

Micro Kjeldahl method จะนำแอมโมเนียมที่เกิดขึ้นไปละลายในสารละลายกรดซัลฟูริกเจือจาง เติมสารละลาย 1-Naphthol และสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์เพื่อให้เกิดสี แล้ววัดการดูดกลืนแสงเพื่อหาปริมาณไนโตรเจน

Precise coulometric titration method จะนำตัวอย่างมาให้ความร้อน และแยกสลายในบรรยากาศของไฮโดรเจน ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการรีดักชัน เพื่อเปลี่ยนไนโตรเจนในตัวอย่างให้เป็นแอมโมเนีย หลังจากนั้นนำไปละลายในสารละลายอิเล็กโตรไลต์ ทำ Coulometric titration แล้วคำนวณหาปริมาณไนโตรเจน

Chemiluminescent method จะนำตัวอย่างที่อุ่นให้ร้อนแล้วใส่ใน Combustion tube ทำการแยกสลาย และออกซิเดชันในบรรยากาศของออกซิเจน เพื่อเปลี่ยนสารประกอบของไนโตรเจนในตัวอย่างให้เป็นไนโตรเจนมอนอกไซด์ หลังจากนั้น นำไนโตรเจนมอนอกไซด์ไปทำปฏิกิริยากับโอโซนเพื่อเปลี่ยนให้เป็นไนโตรเจนไดออกไซด์ในสถานะที่ถูกกระตุ้น ตรวจจับแสงที่ปลดปล่อยออกมาเมื่อโมเลกุลของสารนี้กลับสู่ภาวะพื้นฐานด้วย Photomultiplier tube แล้วคำนวณหาปริมาณไนโตรเจนจากปริมาณแสงนี้

4. วิธีทดสอบปริมาณคาร์บอนคงเหลือ (JIS K 2270)

นำ Crucible ที่มีบรรจุตัวอย่างอยู่ใน Crucible สองชั้น ปิดไม่ให้อากาศเข้าแล้วให้ความร้อน หลังจากนั้นให้ความร้อนสูงเป็นระยะเวลาที่กำหนดเพื่อแยกสลาย และทำปฏิกิริยา coking หลังจากนั้น นำ Crucible ไปทิ้งไว้ให้เย็นใน Desiccator ชั่งหามวล แล้วคำนวณปริมาณคาร์บอนคงเหลือ

5. วิธีทดสอบปริมาณซีเถ้า (JIS K 2272)

เผาตัวอย่างใน crucible เพื่อทำ carbonization หลังจากนั้นทำให้เป็นซีเถ้าโดยสมบูรณ์ที่ 775°C วัดปริมาณสารที่เลือกแล้วคำนวณปริมาณซีเถ้า

6. วิธีทดสอบความชื้น (JIS K 2275)

เติมตัวทำละลายที่ไม่ละลายน้ำ (ไซลีน) ลงในตัวอย่าง ค่อยๆ ให้ความร้อน และกลั่นตัวทำละลาย และน้ำที่ควบแน่นจะแยกตัวใน Water measuring tube

3.2.2.3 เชื้อเพลิงแข็ง

1. วิธี Ultimate analysis (JIS M 8813)

ต่อไปนี้จะอธิบายการทำ Ultimate analysis ของถ่านหิน และถ่านโค้ก

การทำ Ultimate analysis ที่กำหนดไว้ในมาตรฐานนี้ หมายถึงการวัดปริมาณคาร์บอน ไนโตรเจน กำมะถันรวม กำมะถันในซัลเฟอร์ ฟอสฟอรัส รวมทั้งคำนวณปริมาณออกซิเจน อนึ่ง มาตรฐานนี้ได้กำหนดวิธีวัดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปของเกลือคาร์บอเนตในถ่านหินไว้ด้วย

ในกรณีที่ตัวอย่างเป็นถ่านหินและถ่านโค้ก จะใช้ตัวอย่าง Air dried ที่เตรียมด้วยวิธีที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน JIS M 8811

ผลการทำ Ultimate analysis จะระบุเป็นสัดส่วนที่ Dry basis ขององค์ประกอบ 6 ตัว ได้แก่ ซัลเฟอร์ คาร์บอน ไนโตรเจน ออกซิเจน กำมะถัน และไนโตรเจน ทั้งนี้ องค์ประกอบต่อไปนี้ อาจแสดงค่าแยกออกมาต่างหากจาก 6 ตัวข้างต้น ขึ้นอยู่กับฐาน

กำมะถันรวมและฟอสฟอรัส...กรณีของถ่านหินจะใช้ Air dried basis หรือ Dry basis
กรณีของถ่านโค้กจะใช้ Dry basis

กำมะถันในซัลเฟอร์ Dry basis

คาร์บอนไดออกไซด์ในรูปของเกลือคาร์บอเนตในถ่านหิน Dry basis

วิธีวัดปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจน

Liebig method: เตรียมตัวอย่าง $800 \pm 20^{\circ}\text{C}$ ใน Combustion tube ป้อนออกซิเจนพร้อมกับเผาไหม้ตัวอย่าง เปลี่ยนคาร์บอนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เปลี่ยนไฮโดรเจนเป็นน้ำ นำไปละลายในสารละลายของแต่ละตัว แล้ววัดปริมาณที่เพิ่มขึ้นมา วิธีนี้มีความเที่ยงตรงสูงแต่ต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์

Sheffield high temperature method: นำตัวอย่างมาเผาไหม้ใน Combustion tube ที่มีอุณหภูมิ 1350°C โดยป้อนออกซิเจนให้ไหลผ่านด้วยความเร็วค่อนข้างสูง เปลี่ยนคาร์บอนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เปลี่ยนไฮโดรเจนเป็นน้ำ นำไปละลายในสารละลายของแต่ละตัว แล้ววัดปริมาณที่เพิ่มขึ้นมา วิธีนี้ใช้เวลาในการวิเคราะห์น้อย สารเคมีที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์มีน้อยชนิด และทำงานได้สะดวก แต่ต้องใช้เตาอุณหภูมิสูง

วิธีวัดปริมาณกำมะถันรวม

Eschka method: นำตัวอย่างมาผสมให้เข้ากันดีกับ Eschka mixture ซึ่งประกอบด้วยแมกนีเซียมออกไซด์และโซเดียมคาร์บอเนตในอัตราส่วน 2 : 1 นำ Eschka mixture มากลบด้านบนแล้วให้ความร้อน $800 \pm 20^{\circ}\text{C}$ ภายใต้บรรยากาศของอากาศ เพื่อเปลี่ยนกำมะถันรวมในตัวอย่างให้กลายเป็นเกลือซัลเฟต แล้วใช้สารละลายแบเรียมคลอไรด์ทำให้กลายตกตะกอนเป็นแบเรียมซัลเฟตแล้ววัดปริมาณ

วิธีเผาไหม้อุณหภูมิสูง: ให้ความร้อนแก่ตัวอย่างจนมีอุณหภูมิ 1350°C ในบรรยากาศของออกซิเจนเพื่อออกซิไดส์กำมะถันทั้งหมดให้กลายเป็นก๊าซ นำไปละลายในไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แล้วไตเตรตด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ หาปริมาณกำมะถันรวมเป็นอัตราส่วนร้อยละโดยมวลต่อมวลของตัวอย่าง วิธีนี้มีข้อดีคือใช้เวลาวัดน้อย

วิธีวัดปริมาณกำมะถันในซัลเฟอร์

การวัดกำมะถันในซัลเฟอร์ จะใช้ Gravimetric method หรือวิธีเผาไหม้อุณหภูมิสูงอย่างใดอย่างหนึ่ง

วิธีวัดปริมาณไนโตรเจน

กรณีของถ่านหิน จะใช้ Kjeldahl method หรือ Semi-micro Kjeldahl method กรณีของถ่านโค้กจะใช้ Kjeldahl method, Semi-micro gas chromatographic method หรือ Semi-micro Kjeldahl method ในการวัด

วิธีคำนวณอัตราส่วนร้อยละของออกซิเจน

อัตราส่วนร้อยละของออกซิเจนสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

ปริมาณออกซิเจนในตัวอย่าง [%] = $100 - \{ \text{คาร์บอน} [\%] + \text{ไฮโดรเจน} [\%] + \text{ไนโตรเจน} [\%] + \text{ซัลเฟอร์} [\%] + \text{กำมะถันรวม} [\%] - \text{ปริมาณกำมะถันในซัลเฟอร์} [\%] \times (\text{ปริมาณซัลเฟอร์ในตัวอย่าง} [\%] / 100) \}$

2. Proximate analysis

ในที่นี้จะอธิบาย Proximate analysis ของถ่านหิน และถ่านโค้ก

Proximate analysis หมายถึงการวิเคราะห์ปริมาณความชื้น ซัลเฟอร์ และ Volatile matter ในตัวอย่าง รวมทั้งคำนวณปริมาณ Fixed carbon ผลลัพธ์ที่ได้ในกรณีของถ่านหินจะระบุเป็นองค์ประกอบ 4 ตัวที่ Air dried basis ได้แก่ ความชื้น ซัลเฟอร์ Volatile matter และ Fixed carbon และในกรณีของถ่านโค้ก จะระบุเป็นองค์ประกอบ 3 ตัวที่ Dry basis ได้แก่ ซัลเฟอร์ Volatile matter และ Fixed carbon

ความชื้น : เปอร์เซ็นต์ % โดยมวลของมวลที่ลดลงต่อมวลของตัวอย่างเมื่อให้ความร้อนเพื่อให้แห้งที่ $107 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมงในกรณีที่ตัวอย่างเป็นถ่านหิน และที่ 200°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงกรณีที่เป็ถ่านโค้ก

ซัลเฟอร์ : เปอร์เซ็นต์ % โดยมวลของซัลเฟอร์ที่เหลือต่อมวลของตัวอย่างเมื่อให้ความร้อนตัวอย่างที่ 815°C เพื่อทำ Carbonization ภายใต้อากาศ

Volatile matter: นำตัวอย่างใส่ Crucible มีฝา หลีกเลี้ยงไม่ให้สัมผัสกับอากาศ และให้ความร้อนที่ 900°C เป็นเวลา 7 นาทีหาเปอร์เซ็นต์ % โดยมวลของมวลที่ลดลงจากการให้ความร้อนต่อมวลของตัวอย่าง แล้วลบออกด้วยปริมาณความชื้นที่วัดพร้อมๆ กัน

Fixed carbon: กรณีของถ่านหิน

Fixed carbon ที่ air dried basis Fixed carbon = $100 - (\text{ความชื้น} + \text{ซัลเฟอร์} + \text{Volatile matter})$

Fixed carbon ที่ dry basis Fixed carbon = $100 - (\text{ความชื้น} + \text{Volatile matter})$

กรณีของถ่านโค้ก Fixed carbon = $100 - (\text{ความชื้น} + \text{Volatile matter})$

3.2.3 การวัดสมบัติของเชื้อเพลิง

3.2.3.1 เชื้อเพลิงก๊าซ

วิธีวัดค่าความถ่วงจำเพาะของเชื้อเพลิงก๊าซ กำหนดไว้ในมาตรฐาน JIS K 2301 ความถ่วงจำเพาะในที่นี้ หมายถึง อัตราส่วนระหว่างมวลของก๊าซต่อมวลของอากาศที่มีปริมาตรเท่ากันที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน โดย Bunsen-Schilling method (Effusion method) จะให้อากาศ และก๊าซตัวอย่างแพร่ผ่านช่องเล็กๆ บนแผ่นทองคำขาว และคำนวณความถ่วงจำเพาะจากอัตราส่วนของเวลาที่ใช้ในการแพร่ ส่วน Specific gravity bottle method จะเติมอากาศแห้ง และก๊าซตัวอย่างแยกกันใส่ขวดความถ่วงจำเพาะที่

ทราบมวลอยู่แล้ว ปรับอุณหภูมิและความดัน แล้วชั่งน้ำหนักเพื่อกำหนดความถ่วงจำเพาะ นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณความถ่วงจำเพาะของก๊าซตัวอย่างด้วยการแยกองค์ประกอบด้วย Gas chromatography แล้วคำนวณจากความถ่วงจำเพาะขององค์ประกอบแต่ละตัวได้อีกด้วย

3.2.3.2 เชื้อเพลิงเหลว

1. วิธีทดสอบความหนาแน่น (JIS K 2249)

ความหนาแน่นของน้ำมันดิบ และผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม ปกติจะระบุค่าที่ 15°C วิธีทดสอบระบุไว้ในมาตรฐาน JIS

2. วิธีทดสอบความหนืดจลน์ (JIS K 2283)

นำตัวอย่างใส่ใน Glass capillary viscometer วางไว้ในอ่างอุณหภูมิคงที่ (Constant temperature bath) เมื่อทำให้มีอุณหภูมิเท่ากับตัวอย่างแล้ว จะวัดเวลาที่ตัวอย่างที่มีปริมาตรค่าหนึ่งไหลผ่านหลอด capillary นำระยะเวลาการไหลนี้มาคูณกับค่าคงที่ของ Viscometer ซึ่งทราบค่าอยู่แล้วจะได้เป็นความหนืดจลน์ของตัวอย่าง Glass capillary viscometer ที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่ Cannon-Fenske viscometer และ Cannon-Fenske viscometer for non-transparent liquid เป็นต้น

3. วิธีทดสอบ Flash point (JIS K 2265)

ให้ความร้อนแก่ตัวอย่างด้วยอุปกรณ์และเงื่อนไขที่กำหนด เมื่อนำเปลวไฟเล็กๆ เข้าใกล้ผิวหน้าของน้ำมัน อุณหภูมิต่ำสุดของตัวอย่างที่ทำให้ก๊าซผสมระหว่างไอน้ำมันกับอากาศติดไฟ เรียกว่า Flash point วิธีทดสอบ Flash point ของน้ำมันเชื้อเพลิงมี 2 วิธีดังต่อไปนี้

วิธี TAG closed cup method ใช้กับน้ำมันดิบ น้ำมันแก๊สโซลีนสำหรับอุตสาหกรรม น้ำมันก๊าด น้ำมันเชื้อเพลิงเทอร์ไบน์สำหรับเครื่องบิน ฯลฯ ที่มี Flash point ไม่เกิน 93°C ส่วนวิธี Pensky-Martens closed cup method ใช้กับเชื้อเพลิงที่จะเป็นต้องวัด Closed cup flash point และเชื้อเพลิงน้ำมันดิบ น้ำมันเบา น้ำมันหนัก ฯลฯ ที่ไม่สามารถใช้กับการทดสอบ Flash point ด้วยวิธี TAG closed cup method ได้

4. วิธีทดสอบ Pour point (JIS K 2269)

นำเชื้อเพลิงในหลอดทดลองมาอุ่น (Preheat) แล้วทำให้เย็นด้วยวิธีที่กำหนด เมื่ออุณหภูมิภายในหลอดทดลองลดลงทุกๆ 2.5°C นำหลอดทดลองออกมาสังเกต อ่านค่าอุณหภูมิที่ตัวอย่างไม่เปลี่ยนแปลงเป็นระยะเวลาที่กำหนด นำอุณหภูมิที่อ่านได้นี้บวกด้วย 2.5°C จะถือว่าเป็น Pour point

5. วิธีทดสอบค่าออกเทนและ Cetane number (JIS K 2280)

ค่าออกเทนเป็นตัวชี้วัดความสามารถในการป้องกันเครื่องยนต์น็อกของเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ที่จุดระเบิดด้วยประกายไฟ การวัดทำได้โดยเดินเครื่องยนต์ CFR ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด เปรียบเทียบความสามารถในการป้องกันเครื่องยนต์น็อกของตัวอย่างกับเชื้อเพลิงมาตรฐานซึ่งเป็นสารผสมระหว่างไอโซออกเทนกับเฮปเทน สัดส่วน % โดยปริมาตรของไอโซออกเทนในเชื้อเพลิงมาตรฐานที่มีสามารถในการป้องกันเครื่องยนต์น็อกเท่ากับตัวอย่าง จะเท่ากับค่าออกเทนของตัวอย่าง เชื้อเพลิงที่มีค่าออกเทนเกิน 100 ให้เปรียบเทียบกับไอโซออกเทนที่เติม Tetra-ethyl lead แล้วหาค่าออกเทนจากความเข้มข้นของ Tetra-ethyl lead วิธีทดสอบแบ่งเป็นวิธี Research method กับวิธี Motor method มาตรฐาน

กำหนดให้น้ำมันเบนซินสำหรับรถยนต์ต้องใช้วิธีแรกในการทดสอบ สำหรับน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน จะทดสอบค่าออกเทนด้วยวิธี Supercharge (JIS K 2276)

Cetane number เป็นปัจจัยหนึ่งที่ใช้ชี้วัดความสามารถในการจุดระเบิดด้วยตัวเองของเชื้อเพลิงเครื่องยนต์ดีเซล โดยเปรียบเทียบความสามารถในการจุดระเบิดของตัวอย่างกับเชื้อเพลิงมาตรฐานซึ่งเป็นสารผสมระหว่างซีเทน (ค่าซีเทน 100) กับ Heptamethyl nonane (ค่าซีเทน 15) ค่าซีเทนจะหาได้จากส่วนผสมของเชื้อเพลิงมาตรฐานที่มีความสามารถในการจุดระเบิดเท่ากับตัวอย่าง

Cetane index ก็เป็นตัวชี้วัดความสามารถในการจุดระเบิดด้วยตัวเองของน้ำมันเชื้อเพลิงเครื่องยนต์ดีเซลเช่นกัน คำนี้นี้สามารถคำนวณที่ความหนาแน่น ณ 15°C และอุณหภูมิที่ได้ออกมาในการกลั่น 3 จุด (10% โดยปริมาตร 50% โดยปริมาตร และ 90% โดยปริมาตร) โดยใช้สมการความสัมพันธ์กับค่า Cetane number

3.2.3.3 เชื้อเพลิงแข็ง

1. ขนาดอนุภาคของถ่านหิน (JIS M 8801)

นำตะแกรงร่อนที่กำหนดมาร่อนตัวอย่าง วัดปริมาณที่เหลือนบนตะแกรงที่มีช่องแต่ละขนาด และวัดปริมาณที่ลอดผ่านตะแกรงที่มีช่องเล็กที่สุด แล้วแสดงขนาดอนุภาคของตัวอย่างเป็นร้อยละโดยมวลต่อมวลของตัวอย่าง

2. การขยายตัวของถ่านหิน (JIS M 8801)

การทดสอบการขยายตัวใน Crucible (Button method) จะให้ความร้อนแก่ตัวอย่างในถ้วย Crucible แล้วเปรียบเทียบกับรูปร่างของ Coke button ที่เกิดขึ้นกับขอบร่างมาตรฐานเพื่อหา Button index

3. Grindability ของถ่านหิน (JIS M 8801)

Grindability เป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการเลือก และออกแบบเครื่องบดถ่านหินในกรณีที่จะนำถ่านหินไปบดก่อนเผาไหม้ โดยทั่วไปจะวัดด้วยเครื่องทดสอบ Hardgrove grindability ซึ่งตัวเลขยิ่งสูงแสดงว่ายิ่งบดได้ง่าย

4. Fluidity ของถ่านหิน (JIS M 8801)

Gieseler plastometer method จะให้ความร้อนใน อ่างโลหะเหลว แก่ crucible ที่ใส่ตัวอย่างไว้ จะวัดระยะการเคลื่อนตัวของถ่านหินที่หลอม จะวัดระยะการเคลื่อนที่สัมพันธ์ทุก 1 นาทีของถ่านหินที่หลอมเหลว

5. Coking test

การทดสอบ Coakability มีวิธี small retort และวิธีเผาในกระป๋อง วิธี small retort จะนำตัวอย่างใส่ retort ที่กำหนดไปทำ carbonization ณ อุณหภูมิที่กำหนด วัด coke strength ที่ได้ด้วยวิธี JIS K 2151 แล้วแสดงด้วยดัชนี 15 mm

วิธีเผาในกระป๋อง จะนำตัวอย่างมาใส่ภาชนะ นำไปทำ Carbonization ใน Carbonizing furnace แล้วทดสอบ Coke strength ที่ได้รวมทั้งทดสอบคุณสมบัติอื่นๆ เพื่อแสดงผลของ Coking test

6. Ash fusion properties

นำตัวอย่างที่เผาเป็นซีเถ้าแล้วมากองเป็นกรวยสามเหลี่ยม นำไปใส่ในเตาไฟฟ้าให้ความร้อนที่อุณหภูมิที่กำหนด จดบันทึกอุณหภูมิที่กองซีเถ้าตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงที่กำหนด ได้แก่ Softening temperature, Hemisphere temperature และ Fluid (flow) temperature

7. Reflectance ของถ่านหิน

นำตัวอย่างที่บดแล้วมาผสมกับตัวประสาน binder ทำเป็น briquette แล้วขัดผิวหน้าให้เรียบ จากนั้นใช้ Polarizing microscope วัด Oil immersion reflectance สูงสุดของ Vitrinite ที่ผิวที่ขัดนั้นเป็นจำนวนครั้งเท่ากับที่กำหนด แล้วหาค่าเฉลี่ย ค่า reflectance ของถ่านหินเป็นปัจจัยสำคัญที่แสดง Coal rank และ Cokability ของถ่านหิน

3.3 ทฤษฎีการเผาไหม้และการคำนวณการเผาไหม้

ในการคำนวณการเผาไหม้ จะคำนวณปริมาณต่างๆ ต่อปริมาณเชื้อเพลิงหนึ่งหน่วย อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปสำหรับเชื้อเพลิงแข็งและเชื้อเพลิงเหลว จะใช้มวล 1 kg (เขียนตามความนิยมน่า kg_f) และสำหรับเชื้อเพลิงก๊าซ จะใช้ 1 m³_N (เขียนตามความนิยมน่า m³_{N-f}) เป็นปริมาณหนึ่งหน่วย หน่วย m³_N หมายถึงปริมาตรที่สภาวะมาตรฐาน (ความดัน 0.1013 MPa (1 บรรยากาศ) อุณหภูมิ 0°C (273.15 °K)) เมื่อแสดงปริมาณอากาศหรือปริมาณก๊าซเชื้อเพลิงต่างๆ ด้วยหน่วยนี้แล้ว จะสามารถกำหนดปริมาณสัมบูรณ์ของก๊าซเหล่านั้นได้ จึงมีความสะดวกในการใช้งาน

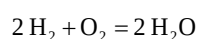
กรณีของเชื้อเพลิงแข็ง และเชื้อเพลิงเหลว จะแสดงสัดส่วนโดยมวล (kg / kg_f) ของคาร์บอน ไฮโดรเจน กำมะถัน ออกซิเจน ไนโตรเจน ความชื้น และซีเถ้าในเชื้อเพลิงด้วย C, H, S, O, N, w, a ตามลำดับ

$$C + H + S + O + N + w + a = 1 \quad (3.1)$$

ในกรณีของเชื้อเพลิงก๊าซ จะแสดงสัดส่วนโดยปริมาตร [m³_N / m³_{N-f}] ของคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน ก๊าซไฮโดรคาร์บอน ออกซิเจน ไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ ฯลฯ ซึ่งเป็นองค์ประกอบด้วย CO, H₂, C_mH_n, O₂, N₂, CO₂, H₂O ตามลำดับ

$$CO + H_2 + \sum C_m H_n + O_2 + N_2 + CO_2 + H_2O = 1 \quad (3.2)$$

สมการที่แสดงความสัมพันธ์เชิงปริมาณระหว่างก่อน และหลังปฏิกิริยาเผาไหม้ เรียกว่า สมการปฏิกิริยาเผาไหม้ ตัวอย่างเช่น ไฮโดรเจน และออกซิเจนเผาไหม้เกิดไอน้ำ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้



ปฏิกิริยาในห้องเผาไหม้ H₂ และ O₂ จะไม่เปลี่ยนเป็น H₂O ทั้งหมดทันที แต่จะต้องผ่านปฏิกิริยาพื้นฐานจำนวนมาก ทำให้เกิด H₂O ด้วยความเร็วค่าหนึ่ง และในขณะเดียวกันก็จะเกิดปฏิกิริยาที่ H₂O สลายตัวย้อนกลับกลายเป็น H₂ กับ O₂ อีกด้วย ดังนั้น H₂, O₂ และ H₂O จะยังคงอยู่ด้วยสัดส่วนค่าหนึ่งซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในขณะนั้น (สภาวะสมดุลเคมี) อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ต่อสารตั้งต้นจะมีค่าสูงมาก

ตอนที่ 2 บทที่ 3 ทฤษฎีการเผาไหม้

หากอุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ไม่ได้มีอุณหภูมิสูงมากแล้ว จะพิจารณาว่าสารตั้งต้นเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ทั้งหมดก็ได้

ตารางที่ 3.13 แสดงสมการปฏิกิริยาของธาตุองค์ประกอบต่างๆ เมื่อเชื้อเพลิงแข็ง และเชื้อเพลิงเหลว เกิดการเผาไหม้ ตัวอย่างเช่น หัวข้อ I ในตาราง เป็นสมการปฏิกิริยาในกรณีที่คาร์บอนเผาไหม้สมบูรณ์ คาร์บอน 1 kmol (12 kg) จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน 1 Kol (32 kg, 22.4 m_N^3) เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ 1 kmol (44 kg, 22.4 m_N^3) หากเชื้อเพลิง 1 kg มีคาร์บอนอยู่ c [kg] แล้ว เนื่องจากคาร์บอนจำนวน c [kg] จะเท่ากับ $c/12$ [kmol] ดังนั้น การทำให้คาร์บอนนี้เผาไหม้สมบูรณ์จะต้องใช้ O_2 จำนวน $(c/12) \times 22.4 [\text{m}_N^3]$ ผลจากการเผาไหม้สมบูรณ์ จะเกิด CO_2 ขึ้น $(c/12) \times 22.4 [\text{m}_N^3]$

ตารางที่ 3.14 แสดงสมการปฏิกิริยาของก๊าซหนึ่งๆ ที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิงก๊าซ ในทำนองเดียวกับตารางที่ 3.13

ตารางที่ 3.13 สมการปฏิกิริยาในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งและเชื้อเพลิงเหลว

I	C	+	O_2	=	CO_2
	1 kmol		1 kmol		1 kmol
	12 kg		32 kg		44 kg
	22.4 m_N^3		22.4 m_N^3		22.4 m_N^3
	c kg		$(c / 12) \times 22.4 \text{ m}_N^3$		$(c / 12) \times 22.4 \text{ m}_N^3$
II	C	+	$(1 / 2) \text{O}_2$	=	CO
	1 kmol		1/2 kmol		1 kmol
	12 kg		32/2 kg		28 kg
	$22.4/2 \text{ m}_N^3$		$22.4/2 \text{ m}_N^3$		22.4 m_N^3
	c kg		$(c / 12)/2 \times 22.4 \text{ m}_N^3$		$(c / 12) \times 22.4 \text{ m}_N^3$
III	H	+	$(1 / 4) \text{O}_2$	=	$(1 / 2) \text{H}_2\text{O}$
	1 kmol		1/4 kmol		1/2 kmol
	1 kg		32/4 kg		18/2 kg
	$22.4/4 \text{ m}_N^3$		$22.4/4 \text{ m}_N^3$		$22.4/2 \text{ m}_N^3$
	h kg		$(h / 4) \times 22.4 \text{ m}_N^3$		$(h / 2) \times 22.4 \text{ m}_N^3$
IV	S	+	O_2	=	SO_2
	1 kmol		1 kmol		1 kmol
	32 kg		32 kg		64 kg
	22.4 m_N^3		22.4 m_N^3		22.4 m_N^3
	s kg		$(s / 32) \times 22.4 \text{ m}_N^3$		$(s / 32) \times 22.4 \text{ m}_N^3$
V	N	=	$(1 / 2) \text{N}_2$		
	1 kmol		1 kmol		
	14 kg		28/2 kg		
	$22.4/2 \text{ m}_N^3$		$22.4/2 \text{ m}_N^3$		
	n kg		$(n / 28) \times 22.4 \text{ m}_N^3$		
VI	H_2O	=	H_2O		
	1 kmol		1 kmol		
	18 kg		18 kg		
	22.4 m_N^3		22.4 m_N^3		
	w kg		$(w / 18) \times 22.4 \text{ m}_N^3$		

ตารางที่ 3.14 สมการปฏิกิริยาในการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซ

I	CO	+	(1 / 2) O ₂	=	CO ₂
	1 kmol		1/2 kmol		1 kmol
	22.4 m _N ³		22.4/2 m _N ³		22.4 m _N ³
	co m _N ³		(1 / 2) co m _N ³		CO m _N ³
II	H ₂	+	(1 / 2) O ₂	=	H ₂ O
	1 kmol		1/2 kmol		1 kmol
	22.4 m _N ³		22.4/2 m _N ³		22.4 m _N ³
	h ₂ m _N ³		(1 / 2) h ₂ m _N ³		h ₂ m _N ³
III	C _m H _n	+	(m + $\frac{n}{4}$) O ₂	=	m CO ₂ + $\frac{n}{2}$ H ₂ O
	1 kmol		(m + $\frac{n}{4}$) kmol		m kmol $\frac{n}{2}$ kmol
	22.4 m _N ³		(m + $\frac{n}{4}$) × 22.4 m _N ³		m × 22.4 m _N ³ $(\frac{n}{2}) \times 22.4 m_N^3$
	C _m h _n m _N ³		(m + $\frac{n}{4}$) C _m h _n m _N ³		m C _m h _n m _N ³ $(\frac{n}{2}) C_m h_n m_N^3$

3.4 ปฏิกิริยาและกระบวนการเผาไหม้

3.4.1 ปฏิกิริยาเผาไหม้

ปฏิกิริยาเผาไหม้มีลักษณะเด่นคือ เป็นปฏิกิริยาอุณหภูมิสูง และความเร็วสูงที่ประกอบด้วยอะตอมและอนุมูลอิสระ รวมทั้งคุณสมบัติของปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของก๊าซ กล่าวคือปฏิกิริยาเผาไหม้ทั่วไปหากไม่สนใจกระบวนการระหว่างทางแล้ว ผลลัพธ์สุดท้ายแล้วจะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนในสถานะก๊าซ ไม่ว่าเชื้อเพลิงจะเป็นของแข็งหรือของเหลว เมื่อเริ่มเผาไหม้จะเกิดการกลายเป็นไวก่อน หลังจากนั้นจะทำปฏิกิริยาคายความร้อนในสถานะก๊าซระหว่างก๊าซเชื้อเพลิงกับสารออกซิเดชัน

เชื้อเพลิงไม่ว่าจะเป็นก๊าซ ของเหลว หรือของแข็ง จะประกอบด้วยอะตอมของ C, H, O ฯลฯ ที่ทำพันธะกันในรูปแบบต่างๆ อะตอมเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับออกซิเจนก่อให้เกิดแสง และความร้อนจากการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน สุดท้ายแล้วเชื้อเพลิงจะกลายเป็น CO₂, H₂O ทั้งนี้แล้ววัตถุประสงค์ของอุปกรณ์ที่ทำงานด้วยความร้อน ก็คือ การใช้ความร้อนที่เกิดขึ้นให้มีประสิทธิภาพมากที่สุดเท่าที่จะทำได้

ปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนและออกซิเจนที่ได้สัดส่วนตามทฤษฎีมีดังต่อไปนี้



อย่างไรก็ตาม ด้านซ้ายของสมการนี้จะแสดงเพียงสภาวะก่อนทำปฏิกิริยา และด้านขวาก็แสดงเพียงสภาวะหลังทำปฏิกิริยาเท่านั้น ไม่ได้แสดงให้เห็นกระบวนการที่เกิดขึ้นระหว่างทางแต่อย่างใด ในทางปฏิบัติเนื่องจากเปลวไฟจะมีอุณหภูมิสูง ดังนั้น H₂O จึงสลายตัว (Dissociation) ทำให้เกิดสารประกอบมีทั้ง H₂, O₂, OH, H, O

อยู่ด้วย ซึ่งเมื่อหลุดพ้นเปลวไฟออกมาปฏิกิริยาหลักทั้งหมดจะสิ้นสุดลง และได้สมดุลทางเคมีตามสมการอย่างใดก็ตาม ก่อนจะถึงจุดนั้น ปฏิกิริยาจะดำเนินไปโดยผ่านกระบวนการพื้นฐานจำนวนมาก เช่น



ทั้งนี้ M หมายถึงโมเลกุลใดๆ ซึ่งมีการแลกเปลี่ยนพลังงานกับ Chemical species ระหว่างการทำปฏิกิริยาเท่านั้น แต่ตัวมันเองจะไม่มีเปลี่ยนแปลง ปฏิกิริยา (R2)-(R6) เรียกว่า Elementary reaction ซึ่งปฏิกิริยาเหล่านี้ไม่เพียงดำเนินไปในทิศทางตามลูกศร (ปฏิกิริยาไปข้างหน้า) เท่านั้น แต่ยังดำเนินไปในทิศทางย้อนกลับด้วย (ปฏิกิริยาย้อนกลับ) ดังนั้น ปฏิกิริยาเผาไหม้จึงดำเนินต่อไปเรื่อยๆ ไม่มีสิ้นสุด และในก๊าซเผาไหม้จะมีสาร Intermediate จากปฏิกิริยารวมอยู่ด้วย ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Dissociation หรือ Thermal dissociation และเมื่อความเข้มข้นของ Chemical species อยู่ในภาวะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จะเรียกว่าได้**สมดุลเคมี** ปรากฏการณ์ Dissociation จะเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่ออุณหภูมิสูงเกิน 2000 K อย่างใดก็ตาม ปรากฏการณ์ดังกล่าวทำให้ปฏิกิริยาปลดปล่อยความร้อนจากการเผาไหม้ออกมาไม่หมด และทำให้อุณหภูมิก๊าซเผาไหม้ลดต่ำลง

3.4.2 การติดไฟกับการเคลื่อนที่ของเปลวไฟ

1. การติดไฟกับการจุดไฟ

เมื่อรักษารักษาอุณหภูมิของก๊าซขณะที่บรรจุก๊าซผสมที่ติดไฟได้ให้คงที่ที่ T_0 แล้ว ณ อุณหภูมิสูงกว่า T_0 ค่าหนึ่ง เมื่อเวลาผ่านไปเล็กน้อย ก๊าซผสมจะติดไฟด้วยตัวเองและระเบิด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การติดไฟด้วยตัวเองหรือการระเบิด เวลาที่ใช้ในการติดไฟ เรียกว่า Ignition delay หรือ Explosion delay ในขณะที่การให้พลังงานจำนวนหนึ่งแก่ก๊าซผสมด้วยประกายไฟจากไฟฟ้า ด้วยพื้นผิวอุณหภูมิสูง หรือด้วย Pilot flame ฯลฯ ให้เกิดเปลวไฟเล็กๆ ขึ้นก่อน แล้วให้เปลวไฟนั้นแผ่ไปทั่วทั้งก่อนก๊าซผสม เรียกว่า การจุดไฟ

อุณหภูมิติดไฟของเชื้อเพลิงแข็ง โดยทั่วไปจะวัดได้ด้วย Wearometer หรืออุปกรณ์อื่นๆ อุณหภูมิติดไฟของเชื้อเพลิงเหลว จะวัดด้วยวิธี Crucible method และอุณหภูมิติดไฟของเชื้อเพลิงก๊าซ จะมีวิธีวัด 2-3 วิธี เช่น Bomb method เป็นต้น

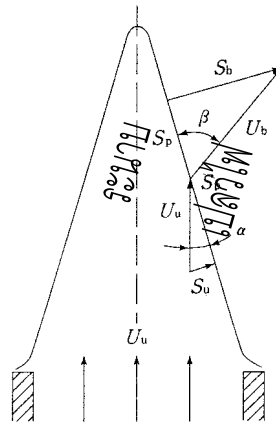
2. ความเร็วในการเผาไหม้กับความเร็วของเปลวไฟ

เปลวไฟมีคุณสมบัติในการเคลื่อนที่ด้วยตัวเองโดยอาศัยการนำความร้อน การแพร่ของโมเลกุล และปฏิกิริยาเคมีที่รวดเร็วเป็นแรงขับเคลื่อน ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเปลวไฟสัมพันธ์กับรอบหยุดนิ่ง (ผู้สังเกตที่อยู่กับที่) เรียกว่า Flame speed ในขณะที่ความเร็วของเปลวไฟเทียบสัมพันธ์กับก๊าซผสมที่

ยังไม่เผาไหม้ทางด้านหน้าของเปลวไฟ (ต้นเพลิง) เรียกว่า ความเร็วของการเผาไหม้ หากนิยามความเร็วในการเผาไหม้ว่า เท่ากับปริมาตรของอากาศผสมที่ยังไม่เผาไหม้ ที่ระนาบเปลวไฟหนึ่งหน่วยพื้นที่ใช้ไปต่อหนึ่งหน่วยเวลาแล้วจะเข้าใจได้ง่าย ในขณะที่ความเร็วของเปลวไฟจะขึ้นอยู่กับกลไกการไหลของก๊าซ และลักษณะของเปลวไฟ ความเร็วของการเผาไหม้ของเปลวไฟชนิด Premix ที่มีกระแสการไหลแบบราบเรียบ (Premixed-laminar flame) จะมีค่าเฉพาะตัวขึ้นอยู่กับประเภทของเชื้อเพลิง ส่วนผสม อุณหภูมิ และความดันของอากาศผสม ซึ่งเรียกว่า ความเร็วของการเผาไหม้ชนิด Premix แบบกระแสราบเรียบ (Premixed-laminar flame speed)

มีการเสนอวิธีวัดความเร็วของการเผาไหม้แบบกระแสราบเรียบหลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้กัน ได้แก่ (1) วิธี Slot Burner (2) วิธีลูกโป่งพองฟู (3) วิธี Flat flame Burner (4) วิธี Dual flame Burner (5) วิธี Bunsen Burner เป็นต้น

วิธี Slot Burner จะพ่นก๊าซผสมออกมาจากหัวฉีดทรงสี่เหลี่ยมที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างไม่น้อยกว่า 3 ทำให้เกิดเปลวไฟรูปเส้นที่สามเหลี่ยม หากวาดรูปลักษณะของกระแสเปลวไฟที่จุดกึ่งกลางด้านยาวจะได้ดังรูปที่ 3.3 เนื่องจากความเร็วของการเผาไหม้จะเท่ากับความเร็วในทิศทางตั้งฉากกับกระแสก๊าซผสมที่ยังไม่เผาไหม้ ดังนั้น



รูปที่ 3.3 รูปแบบกระแสเปลวไฟของ Slot Burner

$$S_u = U_u \sin \alpha \quad [\text{m/s}] \quad (3.3)$$

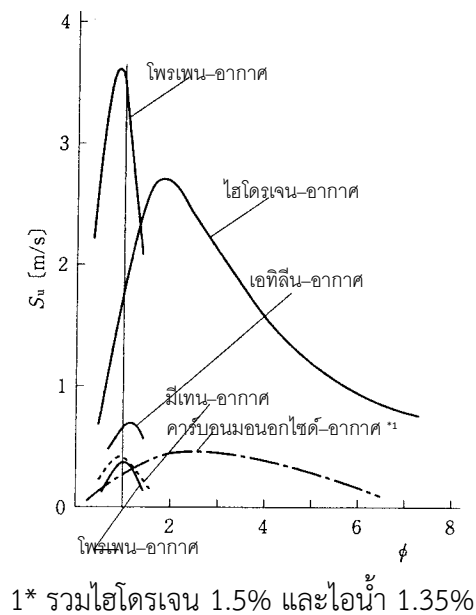
ถ้าวัดความเร็วของก๊าซผสมที่ยังไม่เผาไหม้ U_u [m/s] และมุม α ที่กระแสก๊าซผสมทำกับระนาบเปลวไฟแล้วสามารถคำนวณความเร็วการเผาไหม้ได้

สำหรับวิธี Bunsen Burner ก็สามารถคำนวณความเร็วของการเผาไหม้ได้ในทำนองเดียวกัน อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปเราจะนิยามความเร็วของการเผาไหม้ที่สอง ได้แก่ ปริมาตรของก๊าซผสมที่ยังไม่เผาไหม้ที่ถูกใช้ไปต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ระนาบเปลวไฟต่อหนึ่งหน่วยเวลา

$$S_u = \frac{V}{A_f} \quad [\text{m/s}] \quad (3.4)$$

ในที่นี้ V เป็นอัตราไหลโดยปริมาตรของก๊าซผสมที่ยังไม่เผาไหม้ [m^3/s] และ A_f เป็นพื้นที่เปลวไฟ [m^2] ที่คำนวณจากภาพถ่ายเปลวไฟโดยนำเปลวไฟหมุนรอบแกน

รูปที่ 3.4 แสดงค่าความเร็วของการเผาไหม้แบบกระแสราบเรียบที่วัดด้วยวิธี (1)-(5) วิธีใดวิธีหนึ่ง ในเชื้อเพลิงประเภทไฮโดรคาร์บอน เช่น มีเทน เอทิลีน โพรเพน ที่ Equivalent ratio ϕ (ส่วนกลับของอัตราส่วนอากาศ) ประมาณ 1.1 ความเร็วของการเผาไหม้จะมีค่าสูงสุด แต่สำหรับคาร์บอนมอนอกไซด์หรือไฮโดรเจน จะมีค่าสูงสุดเมื่อ Equivalent ratio มีค่าตั้งแต่ 2 ขึ้นไป คุณสมบัติของความเร็วของการเผาไหม้เช่นนี้ จะมีความคล้ายคลึงอย่างยิ่งกับคุณสมบัติของอุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้สมดุลในสถานะที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน ดังนั้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ (Preheat) ของก๊าซผสมที่ยังไม่เผาไหม้ อุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ในสถานะที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อนจะสูงขึ้น และความเร็วของการเผาไหม้จะสูงขึ้นด้วย นอกจากนี้ กรณีที่เพิ่มความดันย่อยของอากาศ (Oxygen enriched combustion method) ก็จะได้ผลเช่นเดียวกัน



รูปที่ 3.4 ความเร็วของการเผาไหม้แบบกระแสราบเรียบของอากาศผสมชนิดต่างๆ

3. Flammability limit

ก๊าซที่ผสมไว้แล้วจะมีช่วงความเข้มข้นที่ติดไฟได้ช่วงหนึ่งซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และความดัน หากความเข้มข้นของเชื้อเพลิงสูงกว่าหรือต่ำกว่าช่วงนั้น เปลวไฟจะไม่ติดไฟ ค่าต่ำสุดของช่วงความเข้มข้นนี้เรียกว่า Lean flammability limit และค่าสูงสุดเรียกว่า Rich flammability limit ค่าเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับการวัดด้วย ดังนั้น จึงกำหนดวิธีวัด Flammability limit โดยนำตัวอย่างก๊าซผสมใส่ไว้ในหลอดแก้วที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่น้อยกว่า 50 mm โดยไม่ต้องพิจารณา Quenching (การสูญเสียความร้อน) ที่ผนังหลอด ภายใต้ความดันบรรยากาศ ให้หลอดแก้วนี้ยาว 1.5-2 m และมีปลายปิดข้างหนึ่ง ความเข้มข้นของก๊าซผสมที่ทำให้เมื่อจุดไฟที่ปลายเปิดแล้ว เปลวไฟจะลามไปถึงปลายปิดด้วยความน่าจะเป็นไม่น้อยกว่า 50% จะถือว่าเป็น Flammability limit การเคลื่อนขึ้นข้างบนจะมีขีดจำกัดการติดไฟกว้างกว่าการเคลื่อนลงข้างล่างตัวอย่าง Flammability limit แสดงไว้ในตารางที่ 3.15

ตารางที่ 3.15 Flammability limit ^{*1} ของก๊าซผสมระหว่างเชื้อเพลิงต่างๆ - อากาศ

ชื่อเชื้อเพลิง	Lean flammability limit	Rich flammability limit	ชื่อเชื้อเพลิง	Lean flammability limit	Rich flammability limit
ไฮโดรเจน	4.0	75	บิวเทน	1.6-1.7	9.7-10
คาร์บอนมอนอกไซด์ ^{*2}	12.5	74	1,3-บิวทาไดอิน	2.0	12
มีเทน	5.0	15	เบนซีน	1.3	7.9
อีเทน	3.0	12.4	โทลูอิน	1.2	7.1
โพรเพน	2.1	9.5	ไซลีน	1.1	6.4-6.6
บิวเทน	1.8	8.4	ไซโคลเฮกเซน	1.3	7.8
เฮกเซน	1.2	7.4	อะเซติลไฮโดร	4.0	36
เอทิลีน	2.7	36	อะซีโตน	2.6	13
อะเซทิลีน	2.5	100 (81) ^{*3}	อัมโมเนีย	15	28
โพรพิลีน	2.0	11.0			

*1 101.325 kPa 298.15 K เปลวไฟลามขึ้นบน

*2 รวมไอน้ำจำนวนเล็กน้อย

*3 ตัวเลขในวงเล็บเป็นขีดจำกัดการติดไฟจากปฏิกิริยาหลายตัว ในวงเล็บเป็นจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน

4. ปรากฏการณ์ Quenching

เมื่อนำพื้นผิวของแข็งวางไว้ในเปลวไฟ เปลวไฟที่บริเวณใกล้พื้นผิวจะเย็นลง และความเร็วของปฏิกิริยาลดลง ทำให้ไม่สามารถเกิดเปลวไฟต่อไปได้ ดังนั้น ภายในระยะทางห่างจากพื้นผิวค่าหนึ่ง (ภายใต้ความดันบรรยากาศจะมีค่าไม่เกิน 1 mm) จะไม่เกิดเปลวไฟที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Quenching กล่าวกันว่าไฮโดรคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ที่ปล่อยออกมาจากเครื่องยนต์เบนซิน จะเกิดจาก Quenching ในสัดส่วนค่อนข้างสูง

ต่อไป เมื่อนำแผ่นวัสดุ 2 แผ่นวางขนานไว้ในก๊าซผสมที่ติดไฟได้ โดยค่อยๆ ลดระยะห่าง d_p ให้เข้าใกล้กันเรื่อยๆ ในที่สุดเปลวไฟจะไม่สามารถลามผ่านช่องว่างระหว่างแผ่นวัสดุไปได้ เนื่องจาก quenching ของแผ่นวัสดุทั้งคู่ส่งผลไปถึงตรงกลาง ทำให้เปลวไฟไม่สามารถเคลื่อนผ่านได้ ระยะทาง d_p ในขณะนั้นเรียกว่า Flat-plate quenching distance

3.4.3 กระบวนการเผาไหม้ในทางปฏิบัติ

1. วิธีการเผาไหม้ประเภทต่างๆ

วิธีการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซ แบ่งออกเป็นการเผาไหม้ด้วย Burner และการเผาไหม้ในภาชนะ วิธีแรกมีวัตถุประสงค์เพื่อให้กำเนิดเปลวไฟที่นิ่ง และสม่ำเสมอ วิธีหลังมีวัตถุประสงค์เพื่อเผาไหม้ก๊าซผสมที่อยู่ในภาชนะด้วยการเคลื่อนที่หรือการลามของเปลวไฟ

นอกจากนี้ ถ้าแบ่งวิธีการเผาไหม้โดยใช้เกณฑ์อีกแบบหนึ่ง ยังสามารถแบ่งได้เป็น Premix combustion, Partial premix combustion และ Diffuse combustion โดย Premix combustion จะนำเชื้อเพลิงกับอากาศมาผสมให้เข้ากันก่อนแล้วจึงนำไปเผาไหม้ มีคุณสมบัติเด่นคือเปลวไฟจะลามไปในก๊าซ Premix ด้วยตัวเอง ในขณะที่ Diffuse combustion จะใช้กระแสเชื้อเพลิงกับกระแสอากาศ หรือก่อนเชื้อเพลิงกับอากาศ ทำให้เกิดการเผาไหม้ตรงที่เชื้อเพลิงกับออกซิเจนสัมผัสกัน วิธีนี้จะทำให้เปลวไฟไม่เคลื่อนที่ ส่วน Partial premix combustion จะมีลักษณะอยู่ระหว่างทั้งสองวิธีข้างต้น โดยใช้ก๊าซ Premix ที่มีความเข้มข้นสูงเกินกว่า Flammability limit แทนเชื้อเพลิง

นอกจากนี้ การเผาไหม้ยังแบ่งออกตามการไหลของก๊าซอีกด้วย เปลวไฟว่าเป็นการไหลราบเรียบหรือปั่นป่วน ออกเป็น การเผาไหม้กระแสราบเรียบ (Laminar flame) และการเผาไหม้กระแสปั่นป่วน (Turbulent flame) ได้อีกด้วย เมื่อการไหลเปลี่ยนจากราบเรียบเป็นปั่นป่วน ลักษณะของเปลวไฟจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก โดยนอกจากจะมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นแล้ว ในการเผาไหม้แบบ Premix combustion ความเร็วของเปลวไฟยังเพิ่มขึ้น และในการเผาไหม้แบบ Diffuse combustion นั้น Combustion rate ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวของเปลวไฟจะเพิ่มขึ้นอีกด้วย

เมื่อเรียบเรียงการแบ่งประเภททั้ง 3 แบบข้างต้น จะได้ผลดังตารางที่ 3.16 การแบ่งประเภท A, B, C สามารถใช้ร่วมกันได้อย่างอิสระ ตัวอย่างเช่นการเผาไหม้กระแสราบเรียบ แบบ Diffuse combustion ด้วย Burner การเผาไหม้กระแสปั่นป่วนแบบ Premix ในภาชนะ เป็นต้น

ตารางที่ 3.16 วิธีเผาไหม้ประเภทต่างๆ

วิธีแบ่งประเภท	เกณฑ์ A	เกณฑ์ B	เกณฑ์ C
ชื่อ	การเผาไหม้ด้วย Burner การเผาไหม้ในภาชนะ	Premix combustion Partial premix combustion Diffuse combustion	การเผาไหม้กระแสราบเรียบ การเผาไหม้กระแสปั่นป่วน

2. ชีตความสามารถ (Capacity) ของอุปกรณ์เผาไหม้

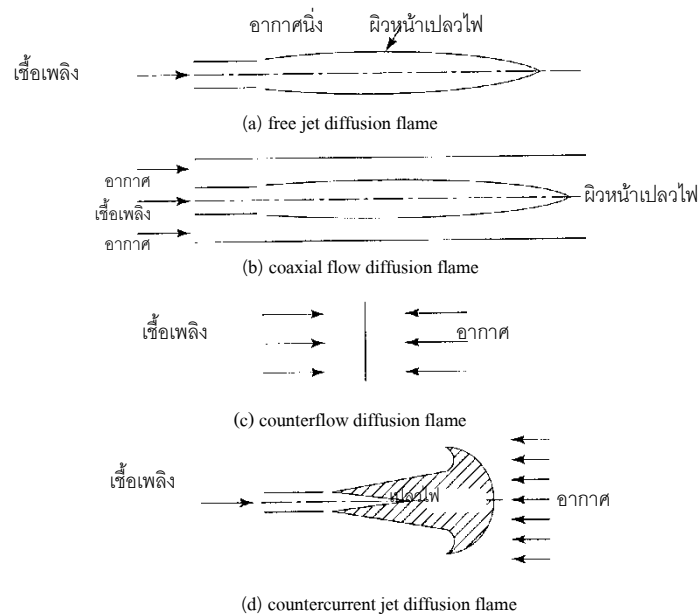
เนื่องจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาค่าหนึ่ง และสถานที่ในการเกิดปฏิกิริยาสถานที่หนึ่ง ดังนั้น ปริมาณเชื้อเพลิงที่สามารถเผาไหม้ได้ในห้องเผาไหม้จึงมีขีดจำกัดอยู่ค่าหนึ่งการเปรียบเทียบปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ จะแสดงในเทอม อัตราการกำเนิดความร้อน (ภาระความร้อน) ในห้องเผาไหม้ อัตราการเผาไหม้บนตะแกรง อัตราการกำเนิดความร้อน (ภาระความร้อน) บนตะแกรงเป็นต้น ยิ่งปริมาณเหล่านี้มีค่ามากเท่าใด ห้องเผาไหม้ก็จะเล็กลงเท่านั้น เพื่อให้เกิดข้อได้เปรียบ อย่างไรก็ตาม เชื้อเพลิงและ Burner ประเภทต่างๆ จะมีขีดจำกัด จึงไม่สามารถทำให้ปริมาณเหล่านี้มีค่าสูงเกินระดับหนึ่งได้

ในกรณีของการเผาไหม้ด้วย Burner จะใช้อัตราการกำเนิดความร้อนของห้องเผาไหม้ซึ่งเป็นค่าที่แสดงปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของห้องเผาไหม้ต่อหนึ่งหน่วยเวลา

ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งด้วยตะแกรง จะใช้อัตราการเผาไหม้บนตะแกรง ซึ่งเป็นปริมาณเชื้อเพลิงที่สามารถเผาไหม้ได้ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของตะแกรงต่อหนึ่งหน่วยเวลา หรือใช้อัตราการกำเนิดความร้อนบนตะแกรงเพื่อแปลงค่าข้างต้นเป็นปริมาณความร้อน

3. Diffuse combustion

เปลวไฟแบบ Diffusion flame มีหลายประเภท เช่น Free jet diffusion flame (รูปที่ 3.5 (a)) ซึ่งเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของ fuel jet ที่พ่นจาก Burner port ออกมาในอากาศที่หยุดนิ่ง Coaxial flow diffusion flame (รูปที่ 3.5 (b)) ซึ่งเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของกระแสเชื้อเพลิงที่พ่นออกมาจาก Burner port โดยมีแกนตรงกันกับกระแสอากาศ Counterflow diffusion flame (รูปที่ 3.5 (c)) ซึ่งเกิดขึ้นที่ผิวกระแทกระหว่างกระแสเชื้อเพลิงกับกระแสอากาศที่มีทิศทางตรงข้ามกัน และ Countercurrent jet diffusion flame (รูปที่ 3.5 (d)) ที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของ Fuel jet ที่พ่นสวนกระแสอากาศออกมา

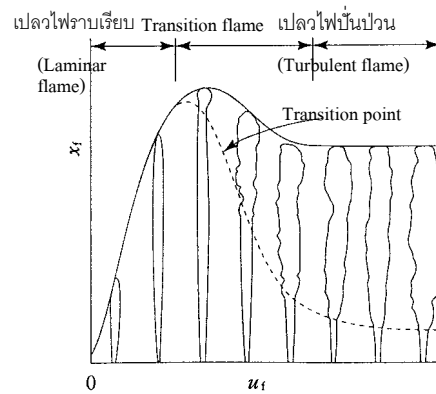


รูปที่ 3.5 Diffusion flame ลักษณะต่างๆ

เปลวไฟแบบ Coaxial flow diffusion flame ที่กระแสเชื้อเพลิงมีความเร็วสูงกว่ากระแสอากาศรอบๆ (บางครั้งเรียกว่า Coaxial jet diffusion flame) และ Free jet diffusion flame จะเรียกรวมๆ กันว่า Jet diffusion flame ซึ่งความเร็วเชื้อเพลิง u_f ของเปลวไฟเปล่านั้นจะมีผลต่อความยาว x_f ของเปลวไฟดังรูปที่ 3.6

เมื่อเชื้อเพลิงมีค่าความเร็วไหลต่ำ จะเกิดเปลวไฟราบเรียบ (Laminar flame) บางๆ ที่ไม่มีการปั่นป่วน จากการวิเคราะห์พบว่า

$$x_f \propto \frac{u_f d^2}{D_{fu}} \quad (3.5)$$



รูปที่ 3.6 ลักษณะและความยาวของ Jet diffusion flame

ทั้งนี้ d เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของปาก Burner และ D_{fu} เป็นสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ของเชื้อเพลิง กล่าวคือ ความยาวของเปลวไฟจะแปรผันตามกำลังสองของเส้นผ่านศูนย์กลางของปาก Burner และแปรผันตามความเร็วของเชื้อเพลิง ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มของค่าที่วัดได้จริงที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.6

อย่างไรก็ตาม เมื่อเชื้อเพลิงมีความเร็วสูงเกินค่าหนึ่ง ที่ปลายเปลวไฟจะเกิดการปั่นป่วนขึ้น เมื่อกระแสเชื้อเพลิงมีความเร็วเพิ่มขึ้น จุด Transition point ที่เริ่มเกิดการปั่นป่วน (แสดงด้วยเส้นประในรูป) จะค่อยๆ เลื่อนต่ำลงเข้าหาฐานของเปลวไฟ เมื่อเชื้อเพลิงมีความเร็วอยู่ในช่วงเปลวไฟปั่นป่วน (Turbulent flame) ซึ่งเปลวไฟเกือบทั้งเปลวจะเปลี่ยนเป็นเปลวไฟปั่นป่วน จะต้องเปลี่ยนค่า D_{fu} ในสมการ (3.5) เป็นสัมประสิทธิ์การแพร่หมุนวน (Eddy diffusion coefficient) ซึ่งมีสัญลักษณ์เขียนแทนด้วย ϵ เนื่องจาก Mixing length hypothesis ได้ว่า

$$\epsilon = l_u' \propto d \cdot u_f \quad (3.6)$$

ดังนั้น สมการ (3.5) จึงกลายเป็น

$$x_f \propto \frac{u_f d^2}{d \cdot u_f} = d \quad (3.7)$$

ทั้งนี้ l เป็น Mixing length และ u' เป็นระดับ (สัมบูรณ์) ของความปั่นป่วน จากสมการนี้จะได้ว่า ความยาวของ Diffusion flame กระแสปั่นป่วนจะไม่ขึ้นกับความเร็วของเชื้อเพลิง แต่จะแปรผันตามเส้นผ่านศูนย์กลางของปาก Burner เท่านั้น ซึ่งก็สอดคล้องกับแนวโน้มของค่าที่วัดได้จริงที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.6

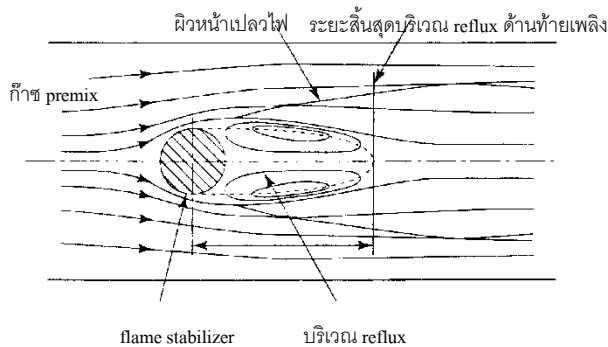
4. การรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ

หมายถึงการทำให้เปลวไฟมีเสถียรภาพในกระแสก๊าซ Premix ความเร็วสูง หรือการทำให้เปลวไฟมีเสถียรภาพที่ปลายเพลิงของ Burner ซึ่งอยู่ในกระแสดูดอากาศปฐมภูมิ วิธีการรักษาเสถียรภาพทำได้โดยใช้

(1) Flame stabilizer (2) Swirler (3) Countercurrent jet เป็นต้น ไม่ว่าวิธีใดก็ตาม จะทำงานด้วยการสร้างบริเวณที่มี Reflux หรือบริเวณที่เกิดกระแสความเร็วต่ำขึ้น แล้วทำให้เปลวไฟมีเสถียรภาพในบริเวณนั้น

Flame stabilizer ในหัวข้อ (1) หมายถึงวัตถุตั้งขวาง (Bluff body) ที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก จานกลม ทรงกลม พื้นผิวรูปตัว V หรือพื้นผิวรูปกรวยกลม ฯลฯ ซึ่งจะกักก๊าซเผาไหม้แล้วมีอุณหภูมิสูงไว้ในบริเวณ Fefflux ปิดล้อมบริเวณที่เกิดขึ้นที่ Wake ของตัวมัน แล้วใช้ก๊าซนี้เป็นเชื้อในการจุดไฟให้กระแสก๊าซ Premix ความเร็วสูง ลักษณะการไหลของก๊าซรอบๆ Flame stabilizer แสดงไว้ในรูปที่ 3.7 และรูปที่ 3.8 แสดง Blowoff limit ของเปลวไฟในกรณีที่วางท่อทองแดงเส้นผ่านศูนย์กลาง D ที่ให้ความเย็นด้วยน้ำไว้ในกระแสก๊าซ premix ระหว่างโพรมีเทน-อากาศ จะพบว่าความเร็วกระแส u_0 ณ ระบายหน้าตัดที่ตัดผ่านศูนย์กลางของ Flame stabilizer ยังมีค่าสูงเท่าใด Equivalent ratio ϕ ที่ทำให้เปลวไฟมีเสถียรภาพ ก็ยังมีช่วงแคบลงเท่านั้น

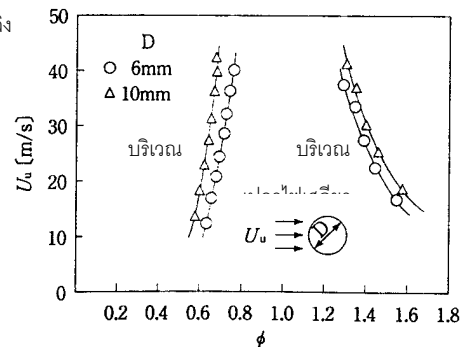
Swirler ในหัวข้อ (2) เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้กระแสเกิดการตีเกลียว ทำให้เกิด Reflux ขึ้นด้วยความดันลบที่บริเวณศูนย์กลาง เพื่อทำให้เปลวไฟมีเสถียรภาพ ความแตกต่างจาก Flame stabilizer คือวิธีทำให้เกิด Reflux เท่านั้น ส่วนหลักการทำงานเหมือนกันทุกประการ



รูปที่ 3.7 ลักษณะการไหลของก๊าซรอบๆ

Flame stabilizer

(เปลวไฟโพรมีเทน-อากาศ อุณหภูมิห้อง ความดันบรรยากาศ)



รูปที่ 3.8 Blow off limit จาก flame

stabilizer

รูปทรงกระบอก

(เปลวไฟโพรมีเทน-อากาศ อุณหภูมิห้อง ความดันบรรยากาศ)

Countercurrent jet ในข้อ (3) จะเป็นวิธีพ่น Jet สวนกับกระแสลมสม่ำเสมอ แล้วทำให้เปลวไฟมีเสถียรภาพ ณ บริเวณกระแสความเร็วต่ำใกล้ๆ กับจุดหยุดนิ่ง มีทั้งวิธีพ่น Fuel jet สวนกระแสอากาศ และวิธีพ่น Jet ของอากาศหรือก๊าซเผาไหม้อุณหภูมิปกติหรืออุณหภูมิสูงสวนกับกระแสก๊าซ Premix

นอกจากนี้ ยังมีวิธีคว้านปากหัวพ่น Fuel jet ให้กว้างขึ้นเป็นขั้นบันได หรือวิธีบากร่องบนผนัง ฯลฯ วิธีการเหล่านี้ก็สามารถพิจารณาได้ว่าเป็น Flame stabilizer ประเภทหนึ่ง

3.4.4 การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเหลว

1. วิธีเผาไหม้ประเภทต่างๆ

วิธีเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวแบ่งได้เป็น (1) Liquid surface combustion (2) Wick combustion (3) Evaporating combustion (4) Spray combustion

(1) Liquid surface combustion เป็นการถ่ายเทความร้อนจากเปลวไฟด้วยการแผ่รังสีหรือด้วยการพาความร้อนให้แก่ผิวหน้าของเชื้อเพลิงทำให้เกิดการระเหย แล้วนำไอระเหยที่เกิดขึ้นไปสัมผัสกับอากาศทำให้เกิดการเผาไหม้แบบ Diffusion combustion ขึ้นเหนือผิวหน้าของของเหลว แบ่งเป็น Pot combustion ซึ่งจะวางภาชนะใส่เชื้อเพลิงไว้ในกระแสดอากาศที่ไหลผ่านผิวหน้าเชื้อเพลิง แล้วทำให้เกิด Boundary layer combustion ซึ่งจะให้เกิดเปลวไฟลามขนานกับผิวหน้าของเหลว

(2) Wick combustion จะนำเชื้อเพลิงขนาดใหญ่ที่ทำจากฝ้ายหรือใยแก้วหรือผ้าหนาจุ่มลงไป น้ำมัน เพื่อดูดเชื้อเพลิงขึ้นมาด้วยปรากฏการณ์ Capillary แล้วใช้การพาความร้อนหรือการแผ่รังสีจากเปลวไฟถ่ายเทความร้อนให้ระเหยและเผาไหม้

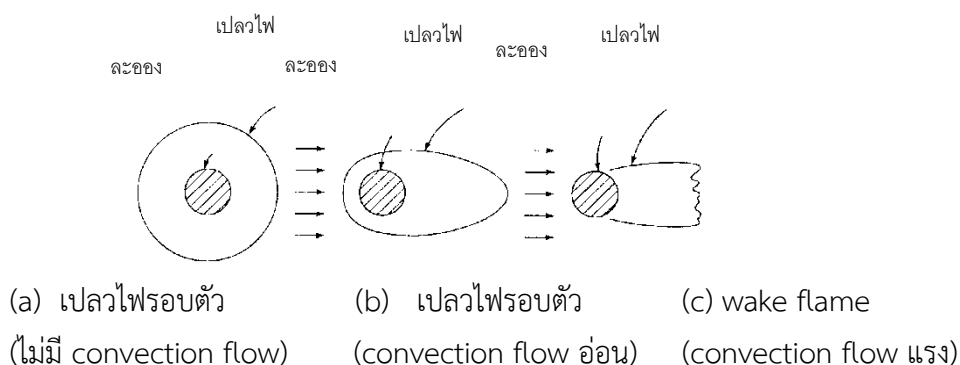
(3) Evaporating combustion จะให้ความร้อนด้วยเปลวไฟแก่เชื้อเพลิงที่ไหลอยู่ในท่อ ทำให้เชื้อเพลิงเหลวระเหย และเผาไหม้ด้วยวิธีเดียวกับเชื้อเพลิงก๊าซ

(4) Spray combustion จะใช้หัวฉีดพ่นเชื้อเพลิงเหลวให้เป็นละอองเล็กๆ ที่มีขนาดไม่กี่ μm ถึงหลายร้อย μm เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการระเหยแล้วนำไปเผาไหม้ วิธีนี้นิยมใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมต่อไปนี้จะอธิบายการเผาไหม้ด้วยหัวฉีด

2. การระเหยและเผาไหม้ของละออง

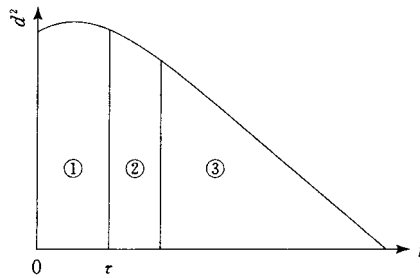
ละอองที่ถูกพ่นออกไปสัมผัสอย่างกระตั้นหันกับอากาศในบรรยากาศที่มีอุณหภูมิสูง และมีคุณสมบัติออกซิเดชันนั้น หากบรรยากาศดังกล่าวมีเงื่อนไขเหมาะสม และเส้นผ่านศูนย์กลางของละอองมีค่าสูงกว่าค่าวิกฤตค่าหนึ่งแล้ว เมื่อเวลาผ่านไปค่าหนึ่ง ละอองจะติดไฟด้วยตัวเอง การหน่วงเวลาติดไฟนี้แบ่งได้เป็นการหน่วงเวลาทางกายภาพตั้งแต่เริ่มเกิดก๊าซผสมขึ้นรอบๆ ละอองจนถึงสภาวะที่สามารถติดไฟได้ และการหน่วงเวลาทางเคมีตั้งแต่ปฏิกิริยาเริ่มดำเนินไปหลังจากนั้นจนถึงการติดไฟ

เมื่อติดไฟแล้วรอบๆ ละอองจะเกิดเปลวไฟ Diffusion flame ขึ้น ลักษณะของเปลวไฟนี้จะขึ้นอยู่กับความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างละอองกับอากาศรอบข้าง ดังรูปที่ 3.9 โดยรูปที่ 3.9 (a) เป็นกรณีที่ไม่มี Convection flow เลย ซึ่งบริเวณที่เกิดการเผาไหม้จะเป็นทรงกลมสมมาตร เกิดเปลวไฟรูปทรงกลม รูปที่ 3.9 (b) เป็นกรณีที่มี Free convection หรือ Forced convection เล็กน้อย ซึ่งเปลวไฟจะเปลี่ยนรูปเป็นรูปไข่ เปลวไฟในรูปที่ 3.9 (a) และรูปที่ 3.9 (b) เรียกว่า Envelope flame เมื่อ Forced convection เพิ่มขึ้นถึงค่าหนึ่ง เปลวไฟไถ่ๆ กับจุดหยุดนิ่งจะดับอย่างกระตั้นหัน เปลี่ยนเป็น Wake flame ดังรูปที่ 3.9 (c) โดย Envelope flame ในรูปที่ 3.9 (a) และรูปที่ 3.9 (b) เป็น Counterflow diffusion flame ที่เกิดขึ้นจากไอระเหยของเชื้อเพลิงจากผิวหน้าของละอองไปหาผิวหน้าของเปลวไฟกับออกซิเจนที่แพร่จากภายนอกมายังผิวหน้าของเปลวไฟ



รูปที่ 3.9 การเปลี่ยนแปลงลักษณะของการเผาไหม้ของละอองตามความเร็วสัมพัทธ์กับก๊าซ

ละอองของเชื้อเพลิงที่อยู่ในอากาศอุณหภูมิสูงเมื่อเวลาผ่านไปขนาดของละอองจะเปลี่ยนไปด้วย อย่างไรก็ตาม เมื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงของกำลังสองของเส้นผ่านศูนย์กลาง d ของละอองเทียบกับเวลา t แล้วจะได้รูปที่ 3.10 จากรูป (1) เป็น Ignition delay โดยเมื่ออุณหภูมิของละอองเพิ่มขึ้นจะเกิดการขยายตัวทำให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่อเริ่มระเหยละอองจะเริ่มเล็กลง (2) เป็นช่วง Non-stationary burning โดยหลังจากติดไฟที่เวลา τ แล้ว d^2 จะลดลงด้วยอัตราต่ำอยู่ระยะหนึ่ง จนเมื่อเข้าสู่ (3) Semi-stationary burning แล้ว d^2 จะลดลงเป็นเชิงเส้น สุดท้ายละอองจะหายไป ในช่วงนี้จะมีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.10 การเปลี่ยนแปลง d^2 ของละอองที่ติดไฟและเผาไหม้

$$\frac{d(d^2)}{dt} = -C_b \quad (3.8)$$

$$d^2 = d_0^2 - C_b(t - \tau) \quad (3.9)$$

ค่า C_b เรียกว่า burning-rate constant

3.4.5 การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง

รูปแบบการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง แบ่งออกได้เป็น (1) Evaporating combustion (2) Decomposing combustion (3) Surface combustion (4) Smoldering

(1) Evaporating combustion เป็นปรากฏการณ์ที่เชื้อเพลิงแข็งที่มีจุดหลอมเหลวค่อนข้างต่ำ จะหลอมเหลวก่อนเผาไหม้ แล้วระเหยในทำนองเดียวกับเชื้อเพลิงเหลว หลังจากนั้นจึงเผาไหม้ ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นในกรณีที่อุณหภูมิระเหยมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิสลายตัวด้วยความร้อน

(2) Decomposing combustion เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในกรณีที่อุณหภูมิสลายตัวด้วยความร้อนมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิระเหย โดยเมื่อได้รับความร้อน เชื้อเพลิงจะสลายตัวด้วยความร้อน และเมื่อ volatile matter ถูกปลดปล่อยออกจากพื้นผิวจะเกิดการเผาไหม้

(3) Surface combustion เป็นปรากฏการณ์ที่พบได้ในถ่านไม้หรือถ่านโค้กซึ่งแทบไม่มี volatile matter และพบได้ใน Fixed carbon หลังจาก Decomposing combustion โดยออกซิเจนหรือก๊าซที่มีคุณสมบัติออกซิเดชัน (เช่น CO_2) จะแพร่เข้าไปในช่องว่างบนพื้นผิวหรือภายในของแข็งแล้วเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้

(4) Smoldering สำหรับสสารที่มีอุณหภูมิสลายตัวด้วยความร้อนต่ำ เช่น กระดาษ หลังจากเกิดการสลายตัวด้วยความร้อน หาก Volatile matter ไม่ถูกจุดไฟ บางครั้งจะเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวซึ่งทำให้เกิดควันขึ้นเป็นจำนวนมาก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Smoldering สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากปฏิกิริยาที่พื้นผิวมีการดำเนินไปอย่างต่อเนื่องภายใต้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิติดไฟของ Volatile matter ถ้าบังคับควันให้ติดไฟ หรือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงกว่าจุดติดไฟของควันแล้ว การเผาไหม้จะเปลี่ยนรูปแบบเป็นการเผาไหม้ที่เกิดเปลวไฟ

วิธีการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง แบ่งออกได้เป็น (1) Grate firing (Fixed bed combustion) (2) Fluidized bed combustion (3) Pulverized coal firing

1. Grate firing

Grate firing เป็นการสร้าง Fixed bed ของเชื้อเพลิงแข็งบนตะแกรงที่เรียกว่าตะกรับ (Grate) แล้วปล่อยอากาศให้ไหลผ่านไปเพื่อเผาไหม้

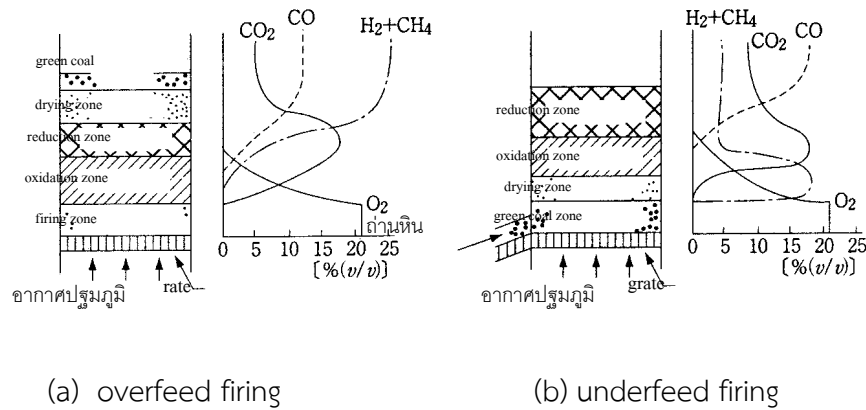
Fluidized bed combustion เป็นการเป่าอากาศเข้าไปจากด้านล่างของ Mixed particle bed ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคเล็กๆ ระหว่างสารทนไฟ (เช่น ทราย) กับเชื้อเพลิงแข็ง (ด้วยสัดส่วนของเชื้อเพลิงไม่เกินไม่กี่ %) เพื่อทำให้เกิด Fluidized bed ซึ่ง Particle bed ทั้งก่อนจะมีการเคลื่อนที่คล้ายการเดือด

สำหรับ Pulverized coal firing จะเป็นการนำเชื้อเพลิงที่ป่นเป็นอนุภาคเล็กๆ ด้วยเครื่องบดมาผสมกับอากาศปฐมภูมิแล้วพ่นออกมาด้วย Burner แล้วเผาไหม้ในสภาพลอยอยู่กลางอากาศ

2. Grate firing combustion

หมายถึงการผ่านอากาศเข้าไปใน Fixed bed ของเชื้อเพลิงแล้วทำการเผาไหม้ ซึ่งแบ่งตามทิศทางการป้อนเชื้อเพลิงและอากาศได้เป็น Overfeed firing กับ Underfeed firing

วิธี Overfeed firing จะมีทิศทางการป้อนถ่านหินตรงข้ามกับทิศทางการป้อนอากาศปฐมภูมิ ดังรูปที่ 3.11 (a) ตัวอย่างเช่น Hand fired stoker และ Spreader stoker เป็นต้น ถ่านหินที่ป้อนเข้าไปจะได้รับความร้อนจากก๊าซเผาไหม้ แล้วปล่อย Volatile matter ออกมาที่ Drying zone หลังจากนั้น ถ่านหินที่เปลี่ยนเป็นถ่านโค้กแล้ว จะรีดิวซ์ก๊าซที่เกิดขึ้นที่ Oxidation zone ให้เป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ Reduction zone และ Volatile matter ต่อมาคาร์บอนมอนอกไซด์จะผสมกับอากาศทุติยภูมิ และเผาไหม้ที่เหนือ Firing zone ส่วนใน Oxidation zone นั้น จะมีการป้อนออกซิเจนอย่างเพียงพอให้แก่ผิวหน้าก่อนถ่านหินที่เปลี่ยนเป็นถ่านโค้ก และร้อนจนแดง และการเผาไหม้แบบ Surface combustion จะให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ถ่านหินที่ผ่านทุกๆ Zone มาแล้วจะกลายเป็นขี้เถ้าสะสมอยู่บน Grate แล้วร่วงผ่านช่องว่างของ Grate ลงมาที่ถังเก็บขี้เถ้า ในวิธี Overfeed firing เนื่องจากก๊าซเผาไหม้อุณหภูมิสูงจะไหลผ่าน Green coal zone ที่ป้อนเข้ามา ดังนั้น การติดไฟจึงมีความแน่นอน และเหมาะกับการเผาไหม้ถ่านหินที่มี Coal rank ต่ำ



รูปที่ 3.11 โครงสร้างของ Firing zone

สำหรับวิธี Underfeed firing จะมีทิศทางการป้อนถ่านหินเดียวกับทิศทางการป้อนอากาศปฐุมุมุมิ ดังรูปที่ 3.11 (b) ตัวอย่างเช่น Underfeed stoker หรือส่วนที่ติดไฟของ Chain stoker เป็นต้น ในกรณีนี้ไม่เพียงแต่ Green coal zone จะสัมผัสกับก๊าซเผาไหม้เท่านั้น แต่การให้ความร้อนส่วนใหญ่ยังเกิดจากการนำความร้อนและการแผ่รังสีจาก Oxidation zone ซึ่งมีอุณหภูมิสูง กล่าวคือ การเผาไหม้ดำเนินไปอย่างต่อเนื่องได้ด้วยปรากฏการณ์การเคลื่อนของเปลวไฟ ดังนั้น ความเร็วของระนาบการติดไฟจึงขึ้นอยู่กับความเร็วกระแสของอากาศปฐุมุมุมิ ซึ่งความเร็ว S_f นั้นเรียกว่า Fluidization velocity ซึ่งมีค่าประมาณ 0.2 m/h โดย S_f จะเป็นฟังก์ชันของ Coal rank, particle size ของถ่านหิน อุณหภูมิของอากาศปฐุมุมุมิ ฯลฯ ค่า S_f จะมีค่าสูงถ้า Coal rank มีค่าต่ำ ค่าความร้อนและอุณหภูมิของอากาศปฐุมุมุมิมีค่าสูง และ Particle size มีค่าน้อย

3. Pulverized coal firing

เป็นวิธีนำอนุภาคถ่านหินที่บดด้วยเครื่องบด (ผ่านตะแกรงร่อน 200-mesh ประมาณ 80%) นำไปผสมกับอากาศปฐุมุมุมิแล้วพ่นจาก Burner ให้ลอยในอากาศแล้วเผาไหม้

Pulverized coal firing จะคล้ายกับ Spray combustion ของน้ำมันเชื้อเพลิงหนักด้วยเหตุผล 2 ประการคือ (1) เป็นการเผาไหม้ในสภาวะ 2-Phase flow และ (2) ในช่วง Decomposing combustion ในตอนต้น จะมีการปล่อยก๊าซที่ติดไฟได้ออกมาจำนวนมาก หลังจากนั้นจึงเข้าสู่ช่วง Surface combustion ของ Fixed carbon แต่แตกต่างจาก Spray combustion ตรงที่ (3) การเกิดก๊าซจากเชื้อเพลิงแข็ง (Gasification) มีความเร็วต่ำ ต้องใช้เวลาและระยะทางมากกว่าในการ Burn off (4) ไม่มีผิวหน้าเปลวไฟให้เห็นชัดเจน แต่เปลวไฟจะแผ่ไปทั่วทั้งห้องเผาไหม้ (5) การนำความร้อนด้วยการแผ่รังสีจากผนังเตาและจากเปลวไฟ จะมีอิทธิพลอย่างมากต่อเสถียรภาพของเปลวไฟและระยะทางที่ต้องใช้ในการ Burn off

Burn-off time ของ Pulverized coal (เวลาที่ต้องใช้ในการเผาไหม้ Fixed carbon ให้ได้ 99%) จะขึ้นอยู่กับความเร็วของปฏิกิริยาพื้นผิว ที่อัตราส่วนอากาศเท่ากับ 1.2 และที่อุณหภูมิภายในเตา 1300°C จะใช้เวลาประมาณ 1.8 วินาที ซึ่งใช้เวลามากเป็น 100 เท่าของเวลาระเหยของละอองที่คำนวณได้จากสมการที่ (3.9) โดยให้ $C_b = 1 \text{ mm}^2/\text{s}$

กลไกในการทำให้เปลวไฟของ Pulverized coal มีเสถียรภาพ สามารถทำได้โดย (1) การติดไฟด้วยการเคลื่อนที่ของเปลวไฟ (2) การติดไฟด้วยการแผ่รังสีความร้อนจากผนังเตาหรือจากเปลวไฟ (3) การติดไฟด้วยการผสมกับก๊าซเผาไหม้อุณหภูมิสูง (4) การติดไฟด้วยการสัมผัสกับผนังเตาอุณหภูมิสูง ความเร็วการเผาไหม้ของ Pulverized coal ที่วัดได้โดยใช้ Burner ที่ให้เปลวไฟรูปกรวยกลมหัวกลับภายใต้บรรยากาศเปิด

จะเท่ากับ 0.1-0.2 m/s ซึ่งภายใต้เงื่อนไขเช่นนี้ จะไม่สามารถเผาไหม้ด้วยความเร็วสูงได้ อย่างไรก็ตาม ในการเผาไหม้ภายใต้บรรยากาศที่มีอุณหภูมิสูงไม่น้อยกว่า 900°C จะมี Volatile matter ถูกปลดปล่อยออกมาถึง 80% ภายในเวลา 20 ms ดังนั้น เปลวไฟจึงสามารถลามไปในสถานะก๊าซได้ และวัดความเร็วการเผาไหม้ได้ 0.8-10 m/s ดังนั้น กลไกทั่วไปในการรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟของ Pulverized coal จึงได้แก่ การใช้ความร้อนจากการแผ่รังสีจากผนังเตา และจากเปลวไฟ และการผสมกับก๊าซเผาไหม้อุณหภูมิสูง ทำให้อุณหภูมิของ Pulverized coal สูงขึ้นด้วยอัตราไม่น้อยกว่า 104 °C/s และทำให้เปลวไฟลามไปในก๊าซผสมระหว่างอากาศกับ Volatile matter ที่ปลดปล่อยออกมาอย่างรวดเร็ว

3.5 ค่าความร้อนเชื้อเพลิง

3.5.1 ค่าความร้อนสูงกับค่าความร้อนต่ำ

ปริมาณความร้อนที่ได้ออกมาเมื่อเชื้อเพลิงปริมาณหนึ่งหน่วยที่อยู่ภายใต้สภาวะคงที่ค่าหนึ่ง (เช่น 101.3 kPa (1 บรรยากาศ) 25°C) เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ (กล่าวคือ ธาตุที่เผาไหม้ได้ในเชื้อเพลิง (C, H, S) ทั้งหมดถูกเปลี่ยนไปเป็นองค์ประกอบเคมีสุดท้ายที่เสถียร (CO₂, H₂O, SO₂)) จนถึงเมื่อสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นคายความร้อนกลับไปอยู่สู่สภาวะเริ่มแรก เรียกว่า ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง ดังนั้น ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงจึงหมายถึงปริมาณความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่สามารถนำมาใช้งานได้สูงสุดจากการเผาไหม้นั้น องค์ประกอบของก๊าซเผาไหม้ทุกชนิดจะมีสถานะเป็นก๊าซ ยกเว้น H₂O สำหรับ H₂O นั้น สถานะสุดท้ายอาจเป็นก๊าซ (ไอน้ำ) หรือของเหลว (น้ำ) ก็ได้ กรณีที่สุดท้ายแล้ว H₂O กลายเป็นน้ำ ไอน้ำที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้จะควบแน่นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง และปลดปล่อยความร้อนแฝงของการควบแน่นออกมา แต่ถ้า H₂O มีสถานะสุดท้ายเป็นก๊าซแล้ว เนื่องจากจะไม่เกิดความร้อนแฝงของการควบแน่น ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นทั้งหมดจึงน้อยลงเท่ากับความร้อนแฝงนั้น ค่าความร้อนในกรณีแรกที่ H₂O มีสถานะสุดท้ายเป็นของเหลว เรียกว่า ค่าความร้อนสูง (H_h) และกรณีที่เป็นก๊าซ เรียกว่า ค่าความร้อนต่ำ (H_t)

ในอุปกรณ์ที่ทำงานด้วยความร้อนจากการเผาไหม้ จะใช้ประสิทธิภาพความร้อนเป็นตัวชี้วัดสมรรถนะว่าอุปกรณ์นั้นสามารถนำพลังงานที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงมาใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพเพียงใด ในกรณีนี้ แม้ว่าปริมาณพลังงานความร้อนที่นำมาใช้งานจะเท่ากัน แต่สำหรับค่าพลังงานที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง การเลือกใช้ค่า H_h หรือ H_t จะทำให้คำนวณประสิทธิภาพความร้อนได้ไม่เท่ากัน ในอุปกรณ์ที่ทำงานด้วยความร้อนในอุตสาหกรรม หากลดอุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ลงมาต่ำกว่าอุณหภูมิอิ่มตัวของไอน้ำ น้ำที่ควบแน่นอาจทำให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนผุกร่อนได้ ดังนั้น โดยทั่วไป เราจะไม่นำความร้อนแฝงของการควบแน่นของไอน้ำในก๊าซเผาไหม้มาใช้งาน ด้วยเหตุดังกล่าว เมื่อจะให้คำจำกัดความประสิทธิภาพความร้อน ส่วนมากแล้ว มักจะใช้ค่าความร้อนต่ำเป็นค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

3.5.2 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแข็งและเชื้อเพลิงเหลว

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแข็ง และเชื้อเพลิงเหลว โดยทั่วไปจะใช้ Bomb calorimeter ในการวัด โดย Calorimeter เป็นอุปกรณ์ที่ถ่ายเทความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงให้แก่ น้ำใน calorimeter และวัดค่าความร้อนของเชื้อเพลิงจากปริมาณความร้อนที่มีอยู่ในน้ำที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากภายใน calorimeter ไอน้ำที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้จะเกิดการควบแน่น ค่าความร้อนที่วัดได้จึงเป็นค่าความร้อนสูง

สำหรับค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงแข็ง และเชื้อเพลิงเหลว หากทราบอัตราส่วนของไฮโดรเจน และความชื้นที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง ก็สามารถคำนวณได้โดยให้ความร้อนแฝงของการควบแน่นของ H_2O เท่ากับ 2.44 MJ / kg (ความร้อนแฝงของการควบแน่นที่ 25°C) ดังต่อไปนี้

$$H_\ell = H_h - 2.44(9h + w) \quad [\text{MJ / kg}_{-f}] \quad (3.10)$$

3.5.3 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงก๊าซ

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงก๊าซ โดยทั่วไปจะวัดด้วย Junker's flow type calorimeter ซึ่งค่าที่วัดได้จะเป็นค่าความร้อนสูง (H_h) ส่วนค่าความร้อนต่ำ จะคำนวณได้โดยให้ความร้อนแฝงของการควบแน่นของไอน้ำ 1 m_N^3 เท่ากับ $1.96 \text{ MJ / m}_N^3 (= 2.44 [\text{MJ / kg}] \times 18 [\text{kg / kmol}] / 22.4 [\text{m}_N^3 / \text{kmol}])$ ตามสมการต่อไปนี้

$$H_\ell = H_h - 1.96\{h_2 + \sum(n/2)c_m h_n\} \quad [\text{MJ / m}_{N-f}^3] \quad (3.11)$$

ก๊าซองค์ประกอบแต่ละตัวของเชื้อเพลิงก๊าซไม่ได้ทำพันธะเคมีต่อกัน ดังนั้น ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงก๊าซจึงสามารถคำนวณได้จากผลบวกของค่าความร้อนของก๊าซองค์ประกอบแต่ละตัวตามสมการต่อไปนี้

$$H_h = 12.6co + 12.8h_2 + \sum H_{hi} c_m h_n \quad [\text{MJ / m}_{N-f}^3] \quad (3.12)$$

$$H_\ell = 12.6co + 10.8h_2 + \sum H_{\ell i} c_m h_n \quad [\text{MJ / m}_{N-f}^3] \quad (3.13)$$

ในที่นี้ H_{hi} และ $H_{\ell i}$ เป็นค่าความร้อนสูง และค่าความร้อนต่ำของก๊าซไฮโดรคาร์บอนแต่ละตัว ตารางที่ 3.17 แสดงค่าความร้อนสูงของก๊าซที่สำคัญชนิดต่างๆ

ตารางที่ 3.17 ค่าความร้อนสูงของก๊าซองค์ประกอบแต่ละชนิดของเชื้อเพลิงก๊าซ

ก๊าซ	ค่าความร้อนสูง H_h [MJ / m_{N-f}^3]
H_2	12.8
CO	12.6
CH_4	39.8
C_2H_6	69.9
C_2H_4	63.0
C_2H_2	58.0
C_3H_8	99.1
C_3H_6	91.9
n- C_4H_{10}	128.5
iso- C_4H_{10}	128.1

3.6 ปริมาณอากาศที่ต้องการในทางทฤษฎีและในการเผาไหม้จริง

3.6.1 ปริมาณอากาศตามทฤษฎีกับอัตราส่วนอากาศ

ในการคำนวณการเผาไหม้ ปฏิกริยาพื้นฐานคือปฏิกริยาระหว่างองค์ประกอบที่เผาไหม้ได้ในเชื้อเพลิงกับออกซิเจน อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการเผาไหม้ทั่วไปจะใช้อากาศเป็นแหล่งออกซิเจน ดังนั้นในห้องเผาไหม้จึงมีไนโตรเจน (N_2) ติดมากับออกซิเจนด้วย เนื่องจากสามารถคิดว่ก๊าซอื่นๆ ในอากาศนอกเหนือจากออกซิเจนเป็นองค์ประกอบเฉื่อยที่ไม่เกี่ยวข้องกัฏปฏิกริยาเผาไหม้ ดังนั้น อัตราส่วนของออกซิเจนในอากาศจึงเป็นค่าที่มีความสำคัญ โดยอัตราส่วนโดยปริมาตรของออกซิเจนในอากาศเท่ากับ 0.210 (อัตราส่วนโดยมวลเท่ากับ 0.232) และองค์ประกอบที่เหลือจะถือว่าเป็นไนโตรเจนทั้งหมด

ปริมาณอากาศที่จำเป็นทางทฤษฎีในการเผาไหม้สมบูรณ์เชื้อเพลิงปริมาณหนึ่งหน่วย เรียกว่า ปริมาณอากาศตามทฤษฎี มีสัญลักษณ์ว่า A_0 [m_N^3 / kg_f] หรือ [m_N^3 / m_{N-f}] ในกรณีของเชื้อเพลิงแข็ง และเชื้อเพลิงเหลว เนื่องจาก

(ปริมาณอากาศตามทฤษฎี [m_N^3 / kg_f]) = { $\sum$ (ปริมาณออกซิเจนที่จำเป็นสำหรับธาตุที่เผาไหม้ได้แต่ละตัว [$kmol / kg$]) } $\times (22.4 / 0.21)$ ดังนั้น ตาราง 3.13 จึงสามารถแสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$A_0 = \frac{22.4}{0.21} \left\{ \left(\frac{c}{12} \right) + \frac{1}{4} \left(h - \frac{o}{8} \right) + \left(\frac{s}{32} \right) \right\} [m_N^3 / kg_{-f}] \quad (3.14)$$

สำหรับเชื้อเพลิงก๊าซ

(ปริมาณอากาศตามทฤษฎี [m_N^3 / m_{N-f}]) = { $\sum$ (ปริมาณออกซิเจนที่จำเป็นของก๊าซแต่ละชนิด [$kmol / kg$]) } $\times (1 / 0.21)$ จากตารางที่ 3.14

$$A_0 = \frac{1}{0.21} \left\{ \frac{1}{2} co + \frac{1}{2} h_2 + \sum (m + \frac{n}{4}) c_m h_n - o_2 \right\} [m_N^3 / m_{N-f}] \quad (3.15)$$

จากสมการที่ (3.14) และ (3.15) จะสรุปได้ว่า ปริมาณอากาศตามทฤษฎี A_0 จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนองค์ประกอบของเชื้อเพลิงเท่านั้น ซึ่งเป็นค่าเฉพาะตัวของเชื้อเพลิงนั้นๆ ในกรณีพิเศษที่ไม่ใช้อากาศ (บรรยากาศ) แต่ใช้อากาศที่มีออกซิเจนเข้มข้น (Oxygen enriched air) ในการเผาไหม้ ในกรณีนี้จะต้องเปลี่ยนตัวเลข 0.21 ในสมการข้างต้น

ปริมาณอากาศที่คำนวณได้จากสมการที่ (3.14) และ (3.15) เป็นปริมาณอากาศที่ต้องใช้พอดีในการเผาไหม้สมบูรณ์เชื้อเพลิงปริมาณหนึ่งหน่วย แต่ในทางปฏิบัติเพื่อให้มั่นใจว่าจะเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์อย่างแน่นอน เราจะป้อนอากาศให้มีปริมาณมากกว่าปริมาณอากาศตามทฤษฎีอยู่บ้างพอสมควร อัตราส่วนระหว่างปริมาณอากาศที่ป้อนให้จริงกับปริมาณอากาศตามทฤษฎีเรียกว่า อัตราส่วนอากาศ (Air ratio) หรือสัมประสิทธิ์อากาศส่วนเกิน (Excess air coefficient) (มีสัญลักษณ์ว่า α) หากให้ปริมาณอากาศที่ป้อนให้จริงเท่ากับ A แล้ว

$$A = \alpha A_0 \quad (3.16)$$

ดังนั้นจะมีปริมาณอากาศมากกว่าปริมาณอากาศตามทฤษฎีอยู่ $(\alpha - 1) A_0$

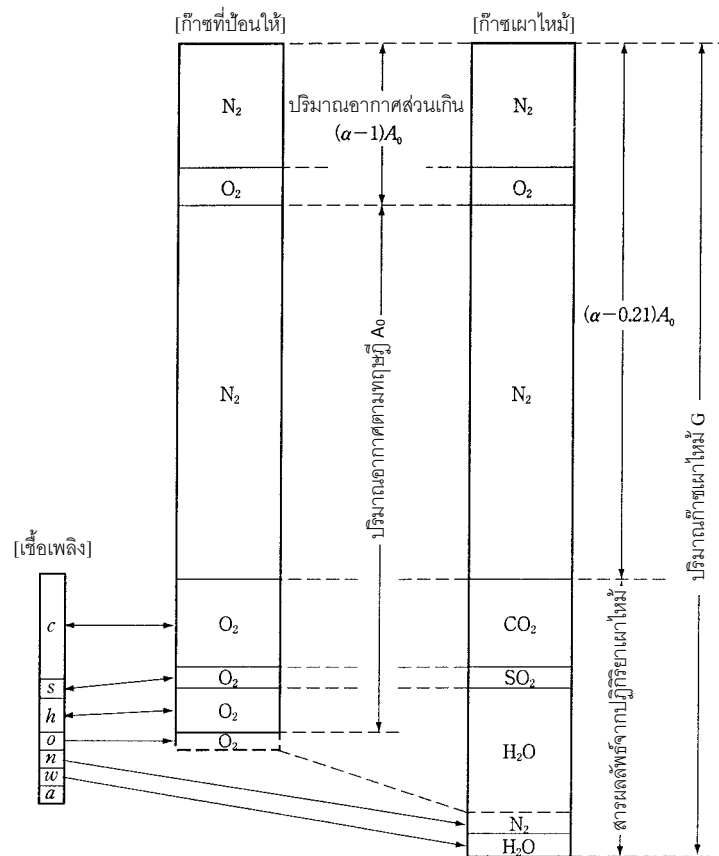
เพื่อให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์อย่างแน่นอน หากเราเพียงเผาไหม้ด้วยปริมาณอากาศที่มากกว่าปริมาณอากาศตามทฤษฎีอย่างมหาศาล ปริมาณก๊าซเผาไหม้จะเพิ่มขึ้นอย่างมากมาย ทำให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ลดต่ำลง ความสูญเสียจากความร้อนที่มีอยู่ในก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้จะเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ในแง่ของการใช้ความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น ในการควบคุมการเผาไหม้ การกำหนดอัตราส่วนอากาศจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากสามารถคำนวณอัตราส่วนอากาศจากผลการวิเคราะห์ก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้ได้ ซึ่งจะได้อธิบายต่อไป ดังนั้น สิ่งที่สำคัญคือ ต้องทำการวิเคราะห์ก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้อยู่เสมอเพื่อรักษาการเผาไหม้ให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสม

3.6.2 ปริมาณก๊าซเผาไหม้

ก๊าซอุณหภูมิสูงที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง เรียกว่า ก๊าซเผาไหม้ (Combustion gas) เมื่อก๊าซนี้ถ่ายเทความร้อนให้วัตถุที่ต้องการให้ความร้อน และไหลออกไปทางท่อไอเสียหรืออื่นๆ แล้ว จะเรียกว่า ก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้ กรณีที่เชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ด้วยอากาศที่มีปริมาณเท่ากับหรือมากกว่าปริมาณอากาศตามทฤษฎี องค์ประกอบของก๊าซเผาไหม้จะประกอบด้วย CO_2 , H_2O , SO_2 ซึ่งเป็นสารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาเผาไหม้ที่เกิดจากเชื้อเพลิง และประกอบด้วยอากาศที่ป้อนให้ยกเว้นออกซิเจนที่ถูกใช้ไปในการเผาไหม้สมบูรณ์ หากในเชื้อเพลิงมีไนโตรเจนหรือความชื้นอยู่ด้วย องค์ประกอบเหล่านี้จะกลายเป็นก๊าซไนโตรเจนและไอน้ำออกมาพร้อมกับก๊าซเผาไหม้ ซึ่ถ้าในเชื้อเพลิงจะถูกปลดปล่อยออกมาในรูปฝุ่นละออง ซึ่งจะไม่นำมาคิดเป็นปริมาณก๊าซเผาไหม้

ในก๊าซเผาไหม้จะมีไอน้ำรวมอยู่ด้วย แต่ในบางกรณีจะคำนวณก๊าซเผาไหม้โดยไม่คิดไอน้ำ ซึ่งเรียกว่า ก๊าซเผาไหม้แห้ง (Dry combustion gas) จะทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซเผาไหม้เพื่อควบคุมการเผาไหม้ ในการวิเคราะห์ เนื่องจากไอน้ำในก๊าซเผาไหม้จะถูกควบแน่น จึงวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซเผาไหม้แห้ง เพื่อระบุก๊าซเผาไหม้จริงๆ ซึ่งมีไอน้ำอยู่ บางครั้งจะเรียกว่า ก๊าซเผาไหม้เปียก (Wet combustion gas)

องค์ประกอบของก๊าซเผาไหม้ แสดงไว้โดยจำลองในรูปที่ 3.12 โดยสามารถพิจารณาได้ว่า



ที่มา “การคำนวณความร้อนเบื้องต้น III ฉบับปรับปรุงใหม่” โดย อ.มาซาคัตสึ ยามาซากิ (ECCJ)

รูปที่ 3.12 ผังจำลององค์ประกอบของก๊าซเผาไหม้ (1)

(ปริมาณก๊าซเผาไหม้) = (ปริมาณอากาศทั้งหมด) – (ปริมาณออกซิเจนตามทฤษฎี) + (ปริมาณสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้)

โดยปริมาณอากาศทั้งหมดที่ป้อนให้เท่ากับ αA_0 ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ไปในการเผาไหม้สมบูรณ์ (ปริมาณออกซิเจนตามทฤษฎี) เท่ากับ $0.21 A_0$ กรณีที่เผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งหรือเชื้อเพลิงเหลว ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเคมีจะแสดงอยู่ในตารางที่ 3.13 ดังนั้น ปริมาณก๊าซเผาไหม้ $G [m_N^3 / kg_f]$ จะเท่ากับ

$$G = (\alpha - 0.21) A_0 + 22.4 \left(\frac{c}{12} + \frac{h}{2} + \frac{s}{32} + \frac{n}{28} + \frac{w}{18} \right) [m_N^3 / kg_f] \quad (3.17)$$

นอกเหนือจากสมการข้างต้นแล้ว ยังสามารถคำนวณปริมาณก๊าซเผาไหม้จากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรก่อนและหลังการเผาไหม้ได้อีกด้วย ปริมาตรรวมของเชื้อเพลิงและอากาศที่ป้อนให้ก่อนการเผาไหม้จะเท่ากับ αA_0 [$\text{m}_N^3 / \text{kg}_f$] (ปริมาตรของเชื้อเพลิง 1 kg เทียบกับ αA_0 แล้วจะมีค่าน้อยมากสามารถตัดทิ้งได้) หากในเชื้อเพลิงมีออกซิเจนรวมอยู่ด้วย เพื่อความสะดวกจะคิดว่า ปริมาณก๊าซออกซิเจนจำนวนนั้น $(o / 32) \times 22.4$ [$\text{m}_N^3 / \text{kg}_f$] จะเข้าไปรวมกับปริมาณก่อนการเผาไหม้ αA_0 เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาตรก่อนและหลังการเผาไหม้ขององค์ประกอบแต่ละตัวในเชื้อเพลิง (ดูตารางที่ 3.13 และรูปที่ 3.12) จะได้ว่า

$$G = \alpha A_0 + 22.4 \left(\frac{o}{32} + \frac{h}{4} + \frac{n}{28} + \frac{w}{18} \right) [\text{m}_N^3 / \text{kg}_f] \quad (3.18)$$

ในกรณีที่ต้องประกอบของเชื้อเพลิงมีแต่ C และ H เท่านั้น (เชื้อเพลิงเหลวส่วนใหญ่จะสามารถพิจารณาเช่นนี้ได้)

$$G = \alpha A_0 + 5.6h [\text{m}_N^3 / \text{kg}_f] \quad (3.19)$$

ซึ่งเป็นสมการที่ง่ายมาก

สำหรับเชื้อเพลิงก๊าซ จากวิธีคิดเช่นเดียวกับสมการ (3.17) ข้างต้น จะได้ว่า

$$G = (\alpha - 0.21A_0) + co + h_2 + \sum (m + \frac{n}{4}) c_m h_n + n_2 + co_2 + h_2o [\text{m}_N^3 / \text{m}_{N-f}^3] \quad (3.20)$$

และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาตรก่อน และหลังการเผาไหม้ จะสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้ (เนื่องจากไม่สามารถตัดทิ้งปริมาตรของเชื้อเพลิงก๊าซก่อนการเผาไหม้ได้ ปริมาตรรวมก่อนการเผาไหม้จึงเท่ากับ $1 + \alpha A_0$ [$\text{m}_N^3 / \text{m}_{N-f}^3$])

$$G = 1 + \alpha A_0 - \frac{1}{2}co - \frac{1}{2}h_2 + \sum (\frac{n}{4} - 1) c_m h_n [\text{m}_N^3 / \text{m}_{N-f}^3] \quad (3.21)$$

3.6.3 ปริมาณก๊าซเผาไหม้แห้ง ปริมาณก๊าซเผาไหม้ตามทฤษฎี

ปริมาณก๊าซเผาไหม้แห้ง G' เท่ากับปริมาณก๊าซเผาไหม้เปียกลบด้วยปริมาณไอน้ำ แสดงด้วยสัญลักษณ์ G' สำหรับเชื้อเพลิงแข็ง และเชื้อเพลิงเหลว โดยสมการที่ (3.17) และ (3.18) จะเปลี่ยนเป็น

$$G' = (\alpha - 0.21) A_0 + 22.4 \left(\frac{c}{12} + \frac{s}{32} + \frac{n}{28} \right) [\text{m}_N^3 / \text{kg}_f] \quad (3.22)$$

$$G' = \alpha A_0 + 22.4 \left(\frac{o}{32} - \frac{h}{4} + \frac{n}{28} \right) [\text{m}_N^3 / \text{kg}_f] \quad (3.23)$$

กรณีที่ต้องประกอบของเชื้อเพลิงมีแต่ C และ H เท่านั้น จะได้ว่า

$$G' = \alpha A_0 + 5.6h [\text{m}_N^3 / \text{kg}_f] \quad (3.24)$$

กรณีของเชื้อเพลิงก๊าซ สมการที่ (3.20) และ (3.21) จะเปลี่ยนเป็นดังต่อไปนี้

$$G' = (\alpha - 0.21A_0) + \text{co} + \sum m c_m h_n + n_2 + \text{co}_2 \quad [m_N^3 / m_{N-f}^3] \quad (3.25)$$

$$G' = 1 + \alpha A_0 - \frac{1}{2} \text{co} - \frac{3}{2} h_2 + \sum (\frac{n}{4} + 1) c_m h_n - h_2 o \quad [m_N^3 / m_{N-f}^3] \quad (3.26)$$

ปริมาณก๊าซเผาไหม้ และปริมาณก๊าซเผาไหม้แห้งในกรณีที่สมมติว่าเชื้อเพลิงเผาไหม้สมบูรณ์ด้วยปริมาณอากาศตามทฤษฎี เรียกว่า ปริมาณก๊าซเผาไหม้ตามทฤษฎี (G_0) และปริมาณก๊าซเผาไหม้แห้งตามทฤษฎี (G'_0) ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยให้ $\alpha = 1$ (ดังนั้น G_0 และ G'_0 จึงเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับสัดส่วนองค์ประกอบของเชื้อเพลิงเท่านั้น เช่นเดียวกับปริมาณอากาศตามทฤษฎี A_0)

เมื่อดูรูปที่ 3.12 สามารถพิจารณาได้ว่า

(ปริมาณก๊าซเผาไหม้) = (ปริมาณก๊าซเผาไหม้ตามทฤษฎี) + (ปริมาณอากาศส่วนเกิน)

ดังนั้น จะได้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$G = G_0 + (\alpha - 1) A_0 \quad [m_N^3 / \text{kg}_{-f}], [m_N^3 / m_{N-f}^3] \quad (3.27)$$

$$G' = G'_0 + (\alpha - 1) A_0 \quad [m_N^3 / \text{kg}_{-f}], [m_N^3 / m_{N-f}^3] \quad (3.28)$$

กล่าวคือ สามารถพิจารณาได้ว่า ปริมาณก๊าซเผาไหม้ จะเท่ากับปริมาณก๊าซเผาไหม้ตามทฤษฎีซึ่งเป็นค่าเฉพาะตัวของเชื้อเพลิงหนึ่งๆ บวกกับปริมาณอากาศส่วนเกิน (ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนอากาศ) นั้นเอง

สมการคำนวณ G และ G' ข้างต้น ทุกสมการมีสมมติฐานว่ามีการป้อนอากาศเท่ากับหรือมากกว่าปริมาณอากาศตามทฤษฎี ($\alpha > 1$) และเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ อย่างไรก็ตาม บางครั้งแม้ว่า $\alpha > 1$ แต่หากเชื้อเพลิงกับอากาศผสมกันไม่ดี ก็อาจมีก๊าซที่ยังไม่เผาไหม้ เช่น CO ฯลฯ ปรากฏอยู่ในก๊าซเผาไหม้ได้ (ดูรูปที่ 3.12 ในหัวข้อ 3.6.2) ดังนั้น กรณีที่เกิดการเผาไหม้บางส่วนไม่สมบูรณ์ ต้องระวังว่า ไม่สามารถใช้สมการคำนวณ G และ G' ข้างต้นได้

3.6.4 สัดส่วนองค์ประกอบของก๊าซเผาไหม้

องค์ประกอบหลักของก๊าซเผาไหม้ ได้แก่ CO_2 , H_2O , O_2 , N_2 เป็นต้น อย่างไรก็ตาม หากในห้องเผาไหม้ เชื้อเพลิงกับอากาศผสมกันไม่ดี บางครั้งจะเกิด CO เหลืออยู่ในก๊าซเผาไหม้ นอกจากนี้ หากในเชื้อเพลิงมีกำมะถันอยู่ก็จะมี SO_2 ด้วย สัดส่วนขององค์ประกอบของก๊าซเผาไหม้เหล่านี้ จะเป็นข้อมูลที่สำคัญในการตรวจสอบอัตราส่วนอากาศขณะเดินเครื่อง และสภาพการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ว่าดีหรือไม่ดีเพียงใด

จากการวิเคราะห์ก๊าซเผาไหม้ สามารถวัดอัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซองค์ประกอบแต่ละชนิดในก๊าซเผาไหม้แห้งได้ โดยแสดงด้วย (CO_2), (O_2), (CO), (N_2) [m_N^3 / m_N^3]

[กรณีของการเผาไหม้สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงแข็งและเชื้อเพลิงเหลว]

$$(\text{CO}_2) = \frac{(c/12) \times 22.4}{G'} \quad [\text{m}_N^3 / \text{m}_N^3] \quad (3.29)$$

$$(\text{O}_2) = \frac{0.21(\alpha - 1)A_0}{G'} \quad [\text{m}_N^3 / \text{m}_N^3] \quad (3.30)$$

$$(\text{N}_2) = \frac{\{0.79\alpha A_0 + (n/28) \times 22.4\}}{G'} \quad [\text{m}_N^3 / \text{m}_N^3] \quad (3.31)$$

$$(\text{SO}_2) = \frac{(s/32) \times 22.4}{G'} \quad [\text{m}_N^3 / \text{m}_N^3] \quad (3.32)$$

[กรณีของการเผาไหม้สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงก๊าซ]

$$(\text{CO}_2) = \frac{\text{co} + \sum m c_m h_n + \text{co}_2}{G'} \quad [\text{m}_N^3 / \text{m}_N^3] \quad (3.33)$$

$$(\text{O}_2) = \frac{0.21(\alpha - 1)A_0}{G'} \quad [\text{m}_N^3 / \text{m}_N^3] \quad (3.34)$$

$$(\text{N}_2) = \frac{0.79\alpha A_0 + n_2}{G'} \quad [\text{m}_N^3 / \text{m}_N^3] \quad (3.35)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (3.29) ถึง สมการที่ (3.35) เนื่องจาก เป็นฟังก์ชันของสัดส่วนองค์ประกอบของเชื้อเพลิงกับอัตราส่วนอากาศ ดังนั้น สัดส่วนโดยปริมาณขององค์ประกอบใดๆ ในก๊าซเผาไหม้หนึ่งจะสามารถแสดงได้ด้วยสัดส่วนองค์ประกอบของเชื้อเพลิงกับอัตราส่วนอากาศ α เช่นกัน ดังนั้น หากไม่ทราบอัตราส่วนอากาศ α แต่ทราบสัดส่วนองค์ประกอบของเชื้อเพลิงหรือสัดส่วนโดยปริมาตรขององค์ประกอบของก๊าซเผาไหม้ตัวใดตัวหนึ่งแล้ว จากสมการความสัมพันธ์ขององค์ประกอบนั้นในจำนวนสมการตั้งแต่สมการที่ (3.29) ถึงสมการที่ (3.35) จะได้สมการ 1 ตัวแปรที่มีตัวแปรที่ไม่รู้ค่าเท่ากับ α เมื่อหาคำตอบของสมการนั้นจะหาค่า α ได้ ในจำนวนสมการเหล่านั้น สมการที่ (3.29) และ สมการที่ (3.35) ไม่มีอัตราส่วนอากาศ α เป็นตัวแปรโดยตรง ดังนั้น กรณีที่สามารถหาค่า G' ได้จากสัดส่วนองค์ประกอบของเชื้อเพลิงและสัดส่วนโดยปริมาตรขององค์ประกอบของก๊าซเผาไหม้แล้ว จะสามารถคำนวณได้โดยง่าย

ต่อไปนี้จะพิจารณากรณีที่คาร์บอนส่วนหนึ่งในเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ และสารผลลัพธ์ของการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์มีแต่ CO ในก๊าซเผาไหม้เท่านั้น ถ้าให้คาร์บอนในเชื้อเพลิงในสัดส่วน η_b เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ กล่าวคือ ในจำนวนคาร์บอน c [kg / kg-f] ที่อยู่ในเชื้อเพลิง คาร์บอนจำนวน $c \eta_b$ [kg / kg-f] จะเผาไหม้สมบูรณ์ และที่เหลือ $c(1 - \eta_b)$ [kg / kg-f] กลายเป็น CO แล้ว จากตารางที่ 3.13 หรือตารางปฏิกิริยาเผาไหม้ จะได้ว่า ปริมาณ CO_2 และ CO ที่เกิดขึ้นจะเท่ากับ $(c \eta_b / 12) \times 22.4$ และ $\{c(1 - \eta_b) / 12\} \times 22.4$ [m_N^3 / kg-f] ตามลำดับ ซึ่งผลบวกจะเท่ากับ $(c / 12) \times 22.4$ [m_N^3 / kg-f] กล่าวคือ CO_2 กับ

ตอนที่ 2 บทที่ 3 ทฤษฎีการเผาไหม้

CO ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงหนึ่งหน่วยมวล ไม่ว่าทั้งสองจะมีสัดส่วนเป็นเท่าใด ปริมาณรวมจะเท่ากับ $(c/12) \times 22.4 \text{ [m}_N^3 / \text{kg-f]}$ เสมอ ในกรณีของเชื้อเพลิงก๊าซก็เช่นกัน ปริมาณรวมของ CO_2 กับ CO จะเท่ากับ $\text{co} + \sum m c_m h_n + \text{co}_2 \text{ [m}_N^3 / \text{kg-f]}$ เสมอ ไม่ว่าทั้งสองจะมีสัดส่วนเท่าใดก็ตาม (ดูตารางที่ 3.14 ประกอบ) ดังนั้น จะได้ว่า

[กรณีที่เกิด CO เป็นสารผลิตภัณฑ์ของการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์]

$$(\text{CO}_2) + (\text{CO}) = \frac{(c/12) \times 22.4}{G'} \text{ [m}_N^3 / \text{m}_N^3] \quad (3.36)$$

$$(\text{CO}_2) + (\text{CO}) = \frac{\text{co} + \sum m c_m h_n + \text{co}_2}{G'} \text{ [m}_N^3 / \text{m}_N^3] \quad (3.37)$$

ในกรณีที่ มีสารผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เหลืออยู่ จะไม่สามารถคำนวณค่า G' จากสมการที่ (3.22) ถึงสมการที่ (3.26) ได้ แต่จากสมการที่ (3.36) และสมการที่ (3.37) จะสามารถคำนวณค่า G' ได้

3.6.5 การคำนวณอัตราส่วนอากาศ

อัตราส่วนอากาศ α หมายถึง อัตราส่วนระหว่างปริมาณอากาศที่ป้อนให้จริง A กับปริมาณอากาศตามทฤษฎี A_0 ซึ่งได้อธิบายไปแล้วว่าเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญในการควบคุมการเผาไหม้ ในอุปกรณ์เผาไหม้ในทางปฏิบัติ การวัดอัตราไหลของอากาศซึ่งป้อนให้เป็นจำนวนมากจะทำได้ไม่สะดวก จึงใช้สมการที่จะอธิบายต่อไปในการคำนวณอัตราส่วนอากาศ เพื่อพิจารณาสถานะการเผาไหม้ และควบคุมปริมาณการป้อนอากาศให้เหมาะสม ในหัวข้อก่อนได้อธิบายวิธีคำนวณอัตราส่วนอากาศจากสัดส่วนองค์ประกอบเชื้อเพลิงและสัดส่วนโดยปริมาตรของก๊าซเผาไหม้ไปแล้ว แต่ในสมการต่อไปนี้ (ภายใต้สมมติฐานบางประการ) จะสามารถคำนวณอัตราส่วนอากาศจากความเข้มข้นขององค์ประกอบของก๊าซเผาไหม้เท่านั้นได้

3.6.5.1 สมการคำนวณอัตราส่วนอากาศด้วยสมดุลไนโตรเจน

กรณีที่องค์ประกอบที่ไม่เผาไหม้ในก๊าซเผาไหม้ มีแต่ CO เท่านั้น สมดุลของ N_2 กล่าวคือ อัตราส่วนระหว่าง (ปริมาตรของ N_2 ในอากาศทั้งหมดที่ป้อนให้) ต่อ (ปริมาตรของ N_2 ในอากาศตามทฤษฎี) จะเท่ากับอัตราส่วนอากาศ α จะแสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้ (รูปที่ 3.13)

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{\text{(ปริมาตรของ } \text{N}_2 \text{ ในอากาศทั้งหมดที่ป้อนให้)}}{\{(\text{ปริมาตรของ } \text{N}_2 \text{ ในอากาศทั้งหมดที่ป้อนให้}) - (\text{ปริมาตรของ } \text{N}_2 \text{ ในอากาศส่วนเกิน})\}} \\ &= \frac{\{(N_2)G' - (n/28) \times 22.4\}}{\{(N_2)G' - (n/28) \times 22.4\} - (0.79/0.21) \{(\text{O}_2) - 0.5(\text{CO})\}G'} \end{aligned} \quad (3.38)$$

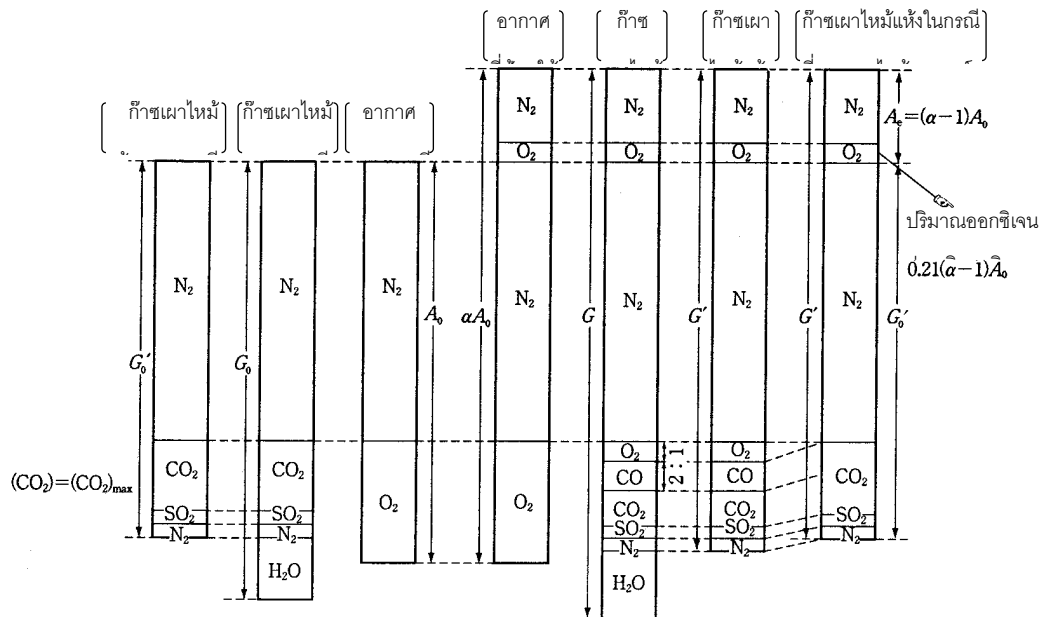
สมการข้างต้นเป็นสมการในกรณีของเชื้อเพลิงแข็งหรือเชื้อเพลิงเหลว กรณีของเชื้อเพลิงก๊าซ พจน์ $(n / 28) \times 22.4$ จะกลายเป็น n_2 ในที่นี้ หากถือว่าปริมาณก๊าซ N_2 ที่เกิดจากไนโตรเจนในเชื้อเพลิงมีปริมาณน้อยมากตัดทิ้งได้แล้ว จะสามารถคำนวณอัตราส่วนอากาศได้จากสมการต่อไปนี้
[ก๊าซไนโตรเจนที่เกิดจากเชื้อเพลิงมีน้อยมากสามารถตัดทิ้งได้ และองค์ประกอบที่ไม่เผาไหม้มีแต่ CO เท่านั้น]

$$\alpha = \frac{(N_2)}{(N_2) - (0.79/0.21) \{ (O_2) - 0.5(CO) \}} \quad (3.39)$$

นอกจากนี้ กรณีที่เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ ($(CO) = 0$) และให้ $(N_2) = 0.79$ โดยประมาณแล้ว จะได้สมการอย่างง่ายดังต่อไปนี้

[สมการอย่างง่ายในกรณีที่เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ และให้ $(N_2) = 0.79$ โดยประมาณ]

$$\alpha = \frac{0.21}{0.21 - (O_2)} \quad (3.40)$$



ที่มา “การคำนวณความร้อนเบื้องต้น III ฉบับปรับปรุงใหม่” โดย อ.มาชาศักดิ์ ยามาซากิ (ECCJ)

รูปที่ 3.13 ผังจำลององค์ประกอบของก๊าซเผาไหม้ (2)

จากสมการที่ (3.39) จะสามารถคำนวณ α ได้โดยง่ายเพียงแต่ทราบค่า (O_2) เท่านั้น สมการนี้มักใช้ในการคำนวณหาอัตราส่วนอากาศโดยคร่าวๆ ในการควบคุมการเผาไหม้ในทางปฏิบัติ

3.6.5.2 การคำนวณอัตราส่วนอากาศด้วย $(CO_2)_{max}$

การที่ (CO_2) ในก๊าซเผาไหม้จะมีค่าสูงสูดนั้น คาร์บอนทั้งหมดในเชื้อเพลิงจะต้องกลายเป็น CO_2 และปริมาณก๊าซเผาไหม้แห้ง G' ต้องมีค่าน้อยที่สุด กล่าวคือ เมื่อเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ด้วยปริมาณ

ตอนที่ 2 บทที่ 3 ทฤษฎีการเผาไหม้

อากาศตามทฤษฎี A_0 นั้นเอง ในกรณีนี้ ความเข้มข้นของ CO_2 ในก๊าซเผาไหม้แห้งจะเรียกว่า ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด มีสัญลักษณ์ $(CO_2)_{\max}$

$$(CO_2)_{\max} = \frac{(c/12) \times 22.4}{G'_0} \quad [m_N^3 / m_N^3] \quad (3.41)$$

$$(CO_2)_{\max} = \frac{co + \sum m c_m h_n + co_2}{G'_0} \quad [m_N^3 / m_N^3] \quad (3.42)$$

เนื่องจาก G'_0 จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนองค์ประกอบของเชื้อเพลิงเท่านั้น ดังนั้น $(CO_2)_{\max}$ จึงขึ้นกับสัดส่วนองค์ประกอบของเชื้อเพลิงเท่านั้น กล่าวคือ เป็นค่าเฉพาะของของเชื้อเพลิงเช่นกัน ค่า $(CO_2)_{\max}$ สามารถได้จากการวิเคราะห์ก๊าซเผาไหม้ ในกรณีของการเผาไหม้สมบูรณ์ เนื่องจากปริมาตรของก๊าซเผาไหม้แห้งตามทฤษฎีในก๊าซเผาไหม้แห้งจริงจำนวน 1 m_N^3 จะเท่ากับ $1 - (O_2) / 0.21 \text{ [m}_N^3]$ ดังนั้น

$$(CO_2)_{\max} = \frac{(CO_2)}{1 - \frac{(O_2)}{0.21}} \quad [m_N^3 / m_N^3] \quad (3.43)$$

ถ้าผลลัพธ์ของการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์มีแต่ CO เท่านั้นแล้ว

$$(CO_2)_{\max} = \frac{(CO_2) + (CO)}{1 - 0.5(CO) - \frac{(O_2) - 0.5(CO)}{0.21}} \quad [m_N^3 / m_N^3] \quad (3.44)$$

จากข้างต้น หากทราบค่า $(CO_2)_{\max}$ แล้ว จากค่า (CO_2) และ (CO) ในก๊าซเผาไหม้แห้ง จะสามารถคำนวณอัตราส่วนอากาศได้ดังต่อไปนี้

$[\alpha > 1 \text{ และถือว่าองค์ประกอบที่ไม่เผาไหม้มีแต่ CO เท่านั้น}]$

$$\alpha = \frac{1 - (CO_2) - 1.5(CO)}{\frac{1 - (CO_2)_{\max}}{0.79} \times \frac{(CO_2) + (CO)}{(CO_2)_{\max}}} + 0.21 \quad [m_N^3 / m_N^3] \quad (3.45)$$

[สมการอย่างง่ายในกรณีที่เผาไหม้สมบูรณ์]

นอกจากนี้ หากเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ ($(CO) = 0$) และแทนค่าสมการข้างต้นส่วนหนึ่งด้วย $(CO_2)_{\max} = 0.21$ แล้ว (กรณีที่ h, o, s, n มีค่าน้อยเทียบกับ c แล้ว จะได้ว่า $(CO_2)_{\max} \approx 0.21$) ได้จะสมการคำนวณอย่างง่ายดังต่อไปนี้

$$\alpha = \frac{(CO_2)_{\max}}{(CO_2)} \quad (3.46)$$

3.7 การวิเคราะห์ก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้

3.7.1 การวิเคราะห์ก๊าซเผาไหม้แบบต่าง ๆ

องค์ประกอบหลักในก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้ ได้แก่ N_2 , O_2 , CO_2 , H_2O อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของเชื้อเพลิง และสภาพการเผาไหม้บางอย่างจะทำให้เกิด CO , SO_2 , NO , NO_2 , HCL และไฮโดรคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ปริมาณเล็กน้อยได้ นอกจากนี้ บางครั้งยังมีอนุภาคของแข็งอีกด้วย เช่น เขม่า เป็นต้น การวิเคราะห์องค์ประกอบต่างๆ ในก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้ มีความสำคัญในการประมาณอัตราส่วนอากาศ การตรวจสอบปริมาณก๊าซเผาไหม้ การประมาณความสูญเสียในก๊าซไอเสียในสมดุลความร้อน การปรับปรุงสภาวะการเผาไหม้ เป็นต้น เครื่องวิเคราะห์ก๊าซเหล่านี้สามารถแบ่งออกได้เป็นเครื่องวิเคราะห์ทางเคมี และเครื่องวิเคราะห์ทางฟิสิกส์ ซึ่งยังแบ่งออกเป็นประเภทย่อยได้อีกตามตารางที่ 3.18

ตารางที่ 3.18 ประเภทของเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ

	วิธีวิเคราะห์	ชื่อเครื่องวิเคราะห์	องค์ประกอบที่วัด
เครื่องวิเคราะห์ก๊าซทางเคมี	การดูดกลืนของสารละลาย	Hempel gas analyzer	CO_2 , O_2 , CO , N_2
		Orsat gas analyzer	CO_2 , O_2 , CO , N_2
เครื่องวิเคราะห์ก๊าซทางฟิสิกส์	วิธีสัมประสิทธิ์การนำความร้อน	เครื่องวัด CO_2 แบบไฟฟ้า	CO_2
	วิธีความถ่วงจำเพาะ	เครื่องวัด CO_2 แบบความถ่วงจำเพาะ	CO_2
	วิธีการดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ต	เครื่องวิเคราะห์ก๊าซแบบรังสีอัลตราไวโอเล็ต	CO_2 , CO , CH_4 , SO_2 , NO
	วิธีการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด	เครื่องวิเคราะห์ก๊าซแบบรังสีอินฟราเรด	NO , NO_2 , SO_2
	วิธีการเปล่งแสงทางเคมี	เครื่องวิเคราะห์แบบการเปล่งแสงทางเคมี	NO , NO_x
	วิธีการนำไฟฟ้า	เครื่องบันทึก SO_2 อัตโนมัติ	SO_2
	วิธีไฟฟ้าเคมี	เครื่องวิเคราะห์ O_2 แบบเซอร์โคเนีย เครื่องวิเคราะห์ O_2 แบบแบตเตอรี่กลานี	O_2 O_2
	วิธีแม่เหล็ก	เครื่องวัด O_2 แบบแม่เหล็ก	O_2
	วิธีก๊าซโครมาโตกราฟี	ก๊าซโครมาโตกราฟี	CO_2 , N_2 , H_2 , O_2 , CO , CH_4 , SO_2 , NO_2

วิธีวิเคราะห์ทางฟิสิกส์หมายถึง วิธีวิเคราะห์เพื่อหาความเข้มข้นของ chemical species ที่อยู่ในก๊าซ ด้วยการวัดคุณสมบัติทางฟิสิกส์หรือทางเคมีฟิสิกส์ตัวอย่าง เช่น การดูดกลืน และการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (แสงที่มองเห็นได้ รังสีอัลตราไวโอเล็ต รังสีอินฟราเรด) สมบัติการนำความร้อน ความหนาแน่น ความเป็นแม่เหล็ก เป็นต้น ในกรณีที่ต้องมีกรรมวิธีหรือการกระทำทางเคมีเป็นขั้นตอนสนับสนุน บางครั้งก็ยิ่งเรียกรวมๆ กันกว้างๆ ว่าการวิเคราะห์ทางฟิสิกส์เช่นกัน หากตีความคำว่า วิธีวิเคราะห์ทางฟิสิกส์ในความหมายกว้างๆ เช่นนี้แล้ว วิธีการวิเคราะห์ก๊าซเกือบทั้งหมดจะจัดเป็นวิธีวิเคราะห์ทางฟิสิกส์ทั้งสิ้น

วิธีวิเคราะห์ทางเคมี หมายถึง Orsat gas analyzer, Hempel gas analyzer และการวิเคราะห์ปริมาณการวัดด้วยวิธีต่างๆ เท่านั้น อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้ มีทั้งแบบที่สามารถวัดความเข้มข้นได้อย่างต่อเนื่อง และแบบที่ต้องเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์เป็นครั้งๆ ไป โดยวิธีการวิเคราะห์ทางเคมีจะเป็นแบบหลัง ดังนั้น ในแง่ของความรวดเร็วจึงเสียเปรียบวิธีวิเคราะห์ทางฟิสิกส์

3.7.2 วิธีเก็บตัวอย่างก๊าซไอเสีย (JIS K 0095)

ในการเก็บตัวอย่างก๊าซจากท่อไอเสียเพื่อนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซ ให้อ้างอิงจากมาตรฐาน JIS และต้องคำนึงถึงปัญหาเฉพาะตัวขององค์ประกอบเป้าหมายด้วย

1. การเลือกตำแหน่งที่เก็บตัวอย่าง

ให้เลือกตำแหน่งท่อไอเสียที่สอดคล้องกับมาตรฐาน JIS โดยหลีกเลี่ยงตำแหน่งที่มีอากาศรั่วเข้ามาในท่อไอเสีย หรือตำแหน่งที่ฝุ่นละอองสะสมหรือร่วงหล่นในท่อไอเสีย ติดตั้งปากทางวัดโดยกำหนดตำแหน่งที่วัดหลายๆ แห่งให้สอดคล้องกับขนาด และรูปร่างของท่อไอเสีย ทั้งนี้ ในกรณีที่พิจารณาได้ว่าผลการวิเคราะห์ของแต่ละตำแหน่งจะแตกต่างกันน้อย และความหนาแน่นของก๊าซจะคงที่สม่ำเสมอตลอดระยะหน้าตัดของตำแหน่งที่เก็บตัวอย่าง เช่น ในท่อไอเสียของหม้อไอน้ำ จะเก็บตัวอย่างจากจุดใดๆ เพียง 1 จุดก็ได้

2. โครงสร้างของอุปกรณ์เก็บตัวอย่างก๊าซ

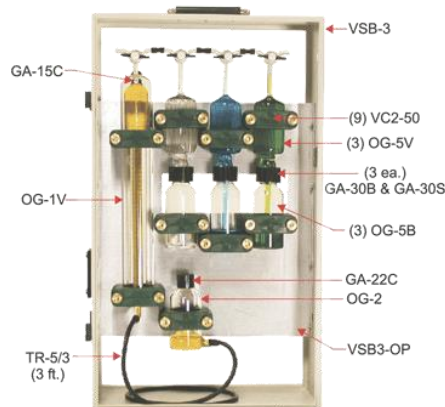
อุปกรณ์เก็บตัวอย่างโดยทั่วไปจะประกอบด้วยหลอดเก็บตัวอย่าง หลอดนำก๊าซ เครื่องทำความเย็น-กำจัดความชื้น หลอดแยกก๊าซ-ของเหลว กับดักน้ำควบแน่น ฯลฯ วัสดุที่ใช้ทำหลอดเก็บตัวอย่าง และหลอดนำก๊าซ จะต้องเลือกใช้วัสดุที่ไม่มีผลกระทบต่อผลการวิเคราะห์ก๊าซไอเสียเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี การดูดเกาะ ฯลฯ และต้องทนทานต่อการกัดกร่อน และเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดจากความชื้นหรือก๊าซที่มี dew point สูงในก๊าซไอเสียเกิดการควบแน่น ให้ทำการหุ้มฉนวนรักษาความร้อนหรือให้ความร้อนแก่หลอดเก็บตัวอย่าง และหลอดนำก๊าซตามความเหมาะสม

เพื่อป้องกันฝุ่นละอองต่างๆ ปะปนเข้าไปในก๊าซตัวอย่าง ให้ใส่สารกรองไว้ในหลอดเก็บตัวอย่างตามความเหมาะสม และใช้สารกรองละเอียดหลังจากผ่านหลอดแยกก๊าซ-ของเหลวมาแล้ว และเพื่อหลีกเลี่ยงความคลาดเคลื่อนในการชั่งน้ำหนักเนื่องจากน้ำที่ควบแน่นไปเกาะติดท่อต่างๆ ในเครื่องวิเคราะห์ และเนื่องจากความเสียหายจากความชื้น ให้ใช้เครื่องทำความเย็น-กำจัดความชื้น หลอดแยกก๊าซ-ของเหลว หรือกับดักน้ำควบแน่น ฯลฯ ในการทำความเย็นให้ความชื้นควบแน่นเป็นน้ำ และกำจัดความชื้นออกไป หรือใช้สารดูดความชื้นต่างๆ ช่วย

3.7.3 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซทางเคมี

ต่อไปนี้จะอธิบาย Orsat gas analyzer

Orsat gas analyzer เป็นเครื่องวิเคราะห์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ ในก๊าซไอเสียด้วยวิธี absorption method โดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ สารละลาย pyrogallol ที่เป็นตัวดูดซับ คอปเปอร์คลอไรด์ที่เป็นแอมโมเนีย เป็น absorbent อุปกรณ์นี้มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา พกพาสะดวก และใช้งานง่ายแต่ต้องมีความเชี่ยวชาญ (รูปที่ 3.14)



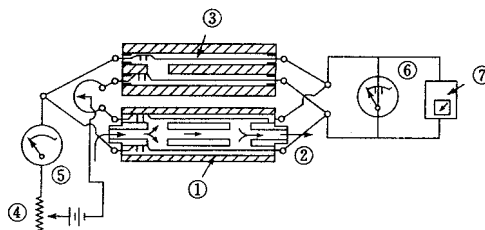
รูปที่ 3.14 Orsat Gas Analyzer

3.7.4 อุปกรณ์วิเคราะห์ก๊าซทางฟิสิกส์

1. การวิเคราะห์คาร์บอนไดออกไซด์

วิธีสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เครื่องวัด CO_2 แบบไฟฟ้า ทำงานด้วยหลักการว่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของ CO_2 จะต่ำกว่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศมาก เครื่องวัดนี้มีโครงสร้างดังรูปที่ 3.15 กล่าวคือให้ความร้อนประมาณ 100°C ด้วยไฟฟ้าแก่เส้นลวดทองคำขนาดเล็กที่ขึงไว้ในห้องก๊าซตัวอย่าง (1) กับห้องก๊าซมาตรฐาน (3) เนื่องจากสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของก๊าซห่อไอเสียในห้องก๊าซซึ่งมี CO_2 ปริมาณมาก จะสูงกว่าของอากาศ ดังนั้น การแผ่รังสีความร้อนของเส้นลวดในห้องก๊าซจึงมีระดับต่ำกว่า ดังนั้นอุณหภูมิของเส้นลวดในห้องก๊าซตัวอย่างจึงสูงกว่าในห้องก๊าซมาตรฐาน ทำให้มีความต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าด้วย ซึ่งสามารถวัดความต้านทานนั้นด้วย Wheatstone bridge แล้วแสดงค่าด้วยมิเตอร์ (6) หรือบันทึกด้วยเครื่องบันทึกผล (7)



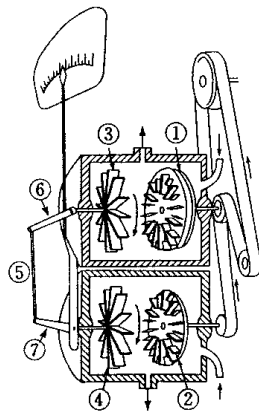
(1) ห้องก๊าซตัวอย่าง (2) ทางผ่านก๊าซ (3) ห้องก๊าซมาตรฐาน (4) ตัวต้านทานแบบสไลด์

(5) ammeter (6) มิเตอร์วัด (7) เครื่องบันทึกผล

รูปที่ 3.15 เครื่องวัด CO_2 แบบสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

วิธีความถ่วงจำเพาะ

เป็นวิธีการวัดปริมาณ CO_2 ที่มีอยู่โดยอาศัยหลักการว่า CO_2 จะมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าอากาศ ดังรูปที่ 3.16 โดยมีใบพัดที่มีลักษณะ และความเร็วเหมือนกัน 2 ตัว ตัวหนึ่งหมุนอยู่ในห้องอากาศ อีกตัวหนึ่งหมุนตรงข้ามกันป้อนไอเสียเข้าไป แล้วมีใบพัดรับลมอีกสองตัวที่หมุนได้อย่างอิสระ ติดตั้งในทิศทางที่รับแรงดันลมที่เกิดจากใบพัดสองตัวแรก เมื่อเป่ากระแสอากาศด้วยเงื่อนไขเดียวกันให้ใบพัดสองตัวหลังได้รับแรงลม แรงที่พยายามหมุนแกนด้านอากาศลงด้านล่างจะมีค่าเท่ากัน ก้านยึดระหว่างแกนทั้งสองจึงไม่ขยับ แต่เมื่อป้อนก๊าซทอไอเสียเข้าไปในห้องก๊าซ เนื่องจากทั้งสองจะมีความถ่วงจำเพาะต่างกัน แรงบิดที่แกนด้านก๊าซจึงมีค่าสูงกว่าแกนด้านอากาศ ทำให้ก้านยึดถูกแกนด้านก๊าซดึงขึ้นไป แล้วใช้การเคลื่อนที่ของแกนด้านอากาศ แกนด้านก๊าซ และก้านยึดที่เกิดจากผลต่างแรงบิดนี้ ไปขยับเข็มชี้หรือปากกาบันทึกผลที่ติดอยู่กับแกนของใบพัดรับลมด้านอากาศ



- (1) ใบพัดด้านก๊าซ
- (2) ใบพัดด้านอากาศ
- (3) ใบพัดรับลมด้านก๊าซ
- (4) ใบพัดรับลมด้านอากาศ

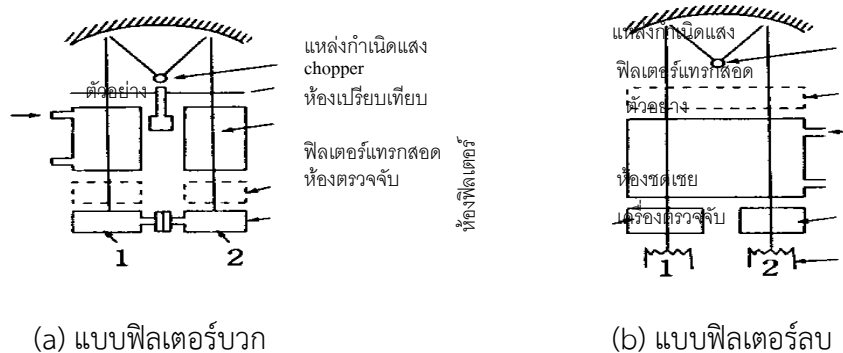
รูปที่ 3.16 เครื่องวัด CO_2 แบบความถ่วงจำเพาะ

ที่ส่วนล่างของเครื่องจะมีถังน้ำเพื่อให้ความชื้นแก่ก๊าซ และอากาศให้มีความชื้นเท่ากัน กรณีที่ใช้เป็นเครื่องวัด CO_2 ของก๊าซทอไอเสีย หากสัดส่วนของก๊าซอื่นนอกจาก CO_2 เปลี่ยนแปลงไป ความถ่วงจำเพาะของก๊าซผสมจะเปลี่ยนแปลงไปด้วย จึงเกิดความคลาดเคลื่อนได้บ้าง

วิธีวิเคราะห์ก๊าซด้วยรังสีอินฟราเรด

นอกจากก๊าซที่ 1 โมเลกุลประกอบด้วยธาตุเดียวกัน 2 อะตอม เช่น H_2 , N_2 , O_2 แล้ว ก๊าซอื่นๆ เกือบทุกชนิด เช่น CO_2 , CO , CH_4 ฯลฯ จะมีช่วงความยาวคลื่นการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเฉพาะตัว เครื่องวิเคราะห์แบบรังสีอินฟราเรดสำหรับอุตสาหกรรมจะใช้หลักการนี้ในการทำงาน โดยมีแบบฟิลเตอร์บวกและฟิลเตอร์ลบ รูปที่ 3.17 (a) แสดงแบบฟิลเตอร์บวก โดยทั่วไปจะใช้เส้นลวดนิโครมที่ร้อนแดงเป็นแหล่งกำเนิดแสง แล้วใช้กระจกสะท้อนแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 จะส่องผ่านห้องตัวอย่างเข้าไปในเครื่องตรวจจับ 1 และอีกส่วนหนึ่งจะส่องผ่านห้องเปรียบเทียบ (โดยทั่วไปจะใส่ N_2 ไว้) เข้าไปในเครื่องตรวจจับ 2 โดยในเครื่องตรวจจับ 1 และ 2 จะมีแต่ก๊าซที่จะวิเคราะห์เท่านั้นบรรจุไว้ด้วยความเข้มข้นสูง พลังงานดูดกลืนของห้องตรวจจับ 2 จะไม่เปลี่ยนแปลง แต่พลังงานที่ดูดกลืนในห้องตรวจจับ 1 จะเปลี่ยนแปลงไปตามความเข้มข้นของก๊าซที่จะวิเคราะห์ในห้องตัวอย่าง เมื่อวัดผลต่างพลังงานที่ถูกดูดกลืนในห้องตรวจจับ 1 และ 2 ด้วยการเปลี่ยนแปลงความจุของคาปาซิเตอร์ที่ต่ออยู่ระหว่างห้องทั้งสอง หรือด้วยวิธีอื่นๆ จะนำไปชี้วัดความเข้มข้นขององค์ประกอบก๊าซที่จะวิเคราะห์ได้ รูปที่ 3.17 (b) แสดงแบบฟิลเตอร์ลบ ซึ่งจะใช้เครื่องตรวจจับแบบ non-

selective และในห้องฟิลเตอร์จะมีก๊าซที่จะตรวจจับบรรจุอยู่ 100% ในห้องชดเชยจะบรรจุ N_2 หรือก๊าซจากห้องทดสอบที่จัดเอาก๊าซที่จะตรวจจับออกแล้ว ในกรณีนี้ จะวัดผลต่างของเครื่องตรวจจับทั้งคู่ เช่น เอาต์พุตของ bolometer เพื่อหาความเข้มข้นของก๊าซที่จะตรวจจับ



รูปที่ 3.17 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซแบบรังสีอินฟราเรด

2. การวิเคราะห์ออกซิเจน (JIS B 7983)

เครื่องวัด O_2 แบบแม่เหล็ก

เครื่องวัดแบบแม่เหล็กเป็นอุปกรณ์ที่สามารถวัดความเข้มข้นของออกซิเจนได้อย่างต่อเนื่อง โดยใช้แรงดึงดูดที่เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของออกซิเจนซึ่งเป็นสารแม่เหล็กถาวรถูกทำให้เป็นแม่เหล็กภายใต้สนามแม่เหล็ก แบ่งได้เป็น แบบลมแม่เหล็ก กับแบบแรงแม่เหล็ก สารแม่เหล็กจะใช้ในกรณีที่ละเว้นการพิจารณาผลกระทบของก๊าซที่ Bulk susceptibility มีค่าสูง (คาร์บอนมอนอกไซด์) ได้

(ก) เครื่องวัด O_2 แบบลมแม่เหล็ก

วิธีนี้จะให้ความร้อนแก่มอเลกุลของออกซิเจนส่วนหนึ่งที่ได้รับแรงดึงดูดในสนามแม่เหล็ก แล้วใช้ heating coil ในการตรวจจับลมแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการสูญเสียความเป็นแม่เหล็ก

(ข) เครื่องวัด O_2 แบบแรงแม่เหล็ก

แบบดัมเบล: วัดการเปลี่ยนตำแหน่งเมื่อดัมเบลที่ไม่เป็นสารแม่เหล็กถูกโมเลกุลของออกซิเจนซึ่งถูกทำให้กลายเป็นแม่เหล็กดันออกมาจากสนามแม่เหล็ก

แบบตรวจจับความดัน: วัดแรงดึงดูดที่กระทำต่อโมเลกุลออกซิเจนเป็นช่วงๆ ในสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเป็นช่วงๆ เป็นคาบ ในรูปของการเปลี่ยนแปลงความดัน back pressure ของก๊าซช่วงที่ไหลเข้ามาในสนามแม่เหล็กด้วยปริมาณคงที่

เครื่องวัด O_2 แบบไฟฟ้าเคมี

วิธีไฟฟ้าเคมี หมายถึงการใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชันรีดักชันทางไฟฟ้าเคมีของออกซิเจน ในการหาความเข้มข้นของออกซิเจนอย่างต่อเนื่อง แบ่งเป็นแบบเซอร์โคเนียกับแบบอิเล็กโทรด

แบบเซอร์โคเนีย: ติดตั้งขั้วไฟฟ้าไว้ที่ทั้งสองด้านของ Zirconia device ที่ได้รับความร้อนจนมีอุณหภูมิสูง ด้านหนึ่งป้อนก๊าซตัวอย่าง อีกด้านหนึ่งป้อนอากาศเข้าไปเพื่อให้เกิดความแตกต่างความเข้มข้นของออกซิเจน แล้วตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง

แบบอิเล็กโทรด: ตรวจจับกระแสไฟฟ้าอิเล็กโทรไลต์ที่เกิดขึ้นเมื่อออกซิเจนที่แพร่ผ่านไดอะแฟรมที่ยอมให้ก๊าซผ่านได้ถูกดูดซับ และแพร่ไปในถังอิเล็กโทรไลต์ และถูกรีดิวซ์ที่ผิวหน้าของอิเล็กโทรด

ของแข็ง วิธีนี้แบ่งเป็นวิธีอิเล็กทรอนิกส์ไฟฟ้าคงที่ซึ่งกำหนดศักย์ไฟฟ้ารีดักชันจากภายนอก กับวิธีแบบเตอรีกัลวานีซึ่งประกอบด้วยแบบเตอรีกัลวานี

3. การวิเคราะห์คาร์บอนมอนอกไซด์ (JIS K 0098)

วิธีก๊าซโครมาโตกราฟี

เก็บตัวอย่างก๊าซจำนวนหนึ่ง มาใส่ในก๊าซโครมาโตกราฟีที่ติดตั้งเครื่องตรวจจับการนำความร้อนไว้ แล้วคำนวณหาความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์จากความสูงของค่าสูงสุดของโครมาโตกราฟี

วิธีวิเคราะห์ก๊าซด้วยรังสีอินฟราเรด

ใช้การดูดกลืนแสงในช่วงรังสีอินฟราเรดของคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยวัดความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีในก๊าซตัวอย่างด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซแบบรังสีอินฟราเรดแบบ Non-dispersive

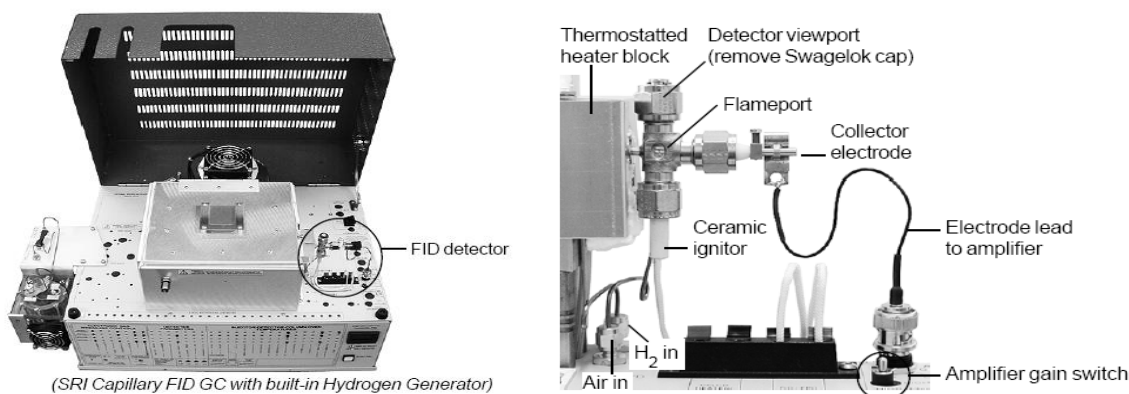
วิธีหลอดตรวจจับ

วัดความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยการย้อมสีโดยผ่านก๊าซตัวอย่างเข้าไปในหลอดตรวจจับคาร์บอนมอนอกไซด์ที่บรรจุสารตรวจจับปริมาณหนึ่งไว้ในหลอดแก้วเล็กๆ เป็นวิธีวัดที่ง่ายที่สุดในการหาค่าโดยคร่าวๆ ของความเข้มข้นคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีในก๊าซไอเสีย

4. การวิเคราะห์ไฮโดรคาร์บอนรวม

ต่อไปนี้จะอธิบายวิธีวิเคราะห์ไฮโดรคาร์บอนรวมโดยใช้ Flame Ionization Detector (FID)

ความเข้มข้นของไอออนในเปลวไฟออกซิเจน-ไฮโดรเจนปกติจะมีค่าน้อยมาก แต่เมื่อมีสารอินทรีย์อยู่ด้วยความเข้มข้นของไอออนในเปลวไฟออกซิเจน-ไฮโดรเจนจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากมาย FID เป็นอุปกรณ์ที่นำปรากฏการณ์นี้มาประยุกต์ใช้งาน ความไวของ FID จะขึ้นอยู่กับ Chemical species แต่จะเกือบแปรผันตามจำนวนอะตอมคาร์บอนในโมเลกุล นอกจากนี้ FID จะมีความไวต่อก๊าซอินทรีย์ต่ำมาก



รูปที่ 3.18 เครื่องวิเคราะห์ไฮโดรคาร์บอนรวม

5. การวิเคราะห์ NO_x (JIS B 7982)

เครื่องวัดที่สามารถวัดความเข้มข้นของ NO, NO₂ หรือ NO_x (NO + NO₂) ได้อย่างต่อเนื่องตามที่มาตรฐาน JIS กำหนดได้แก่ วิธีการแปลงแสงทางเคมี วิธีดูดกลืนรังสีอินฟราเรด วิธีดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ต และในภาคผนวกได้แสดงวิธีอิเล็กทรอนิกส์ไฟฟ้าคงที่ไว้ ตารางที่ 3.19 แสดงประเภทและช่วงการ

วัดของเครื่องวัด NO_x อัตโนมัติ ในที่นี้จะอธิบายหลักการทำงานคร่าวๆ ของวิธีการแปลงแสงทางเคมี ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด

เมื่อไนโตรเจนมอนอกไซด์ทำปฏิกิริยากับโอโซนเป็นไนโตรเจนไดออกไซด์ ส่วนหนึ่งจะกลายเป็นไนโตรเจนไดออกไซด์ที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น (NO₂^{*}) เมื่อสารนี้กลับสู่สภาวะพื้นฐาน จะแปลงแสงที่มีความยาวคลื่น 0.6-3.0 μm และมีความเข้มสูงสุดที่ 1.2 μm ปฏิกิริยานี้แสดงได้ดังต่อไปนี้

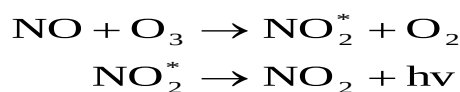
ตารางที่ 3.19 ประเภท ช่วงการวัด และองค์ประกอบเป้าหมายการวัดของเครื่องวัด NO_x อัตโนมัติ

ประเภทของเครื่องวัด	range ^{*1} (vol ppm)	สารเป้าหมายการวัด	เงื่อนไขการใช้งาน
หลักการ			
วิธีแปลงแสงทางเคมี	0-10 ถึง 0-2000	NO NO _x ^{*2}	กรณีที่สามารถไม่พิจารณาผลกระทบของ CO ₂ ที่มีอยู่ด้วยหรือกรณีที่สามารถกำจัดผลกระทบนั้นออกไปได้เท่านั้น
วิธีดูดกลืนรังสีอินฟราเรด	0-10 ถึง 0-2000	NO NO _x ^{*3}	กรณีที่สามารถไม่พิจารณาผลกระทบของ CO ₂ SO ₂ ความชื้นและไฮโดรคาร์บอนที่มีอยู่ด้วยหรือกรณีที่สามารถกำจัดผลกระทบนั้นออกไปได้เท่านั้น
วิธีดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ต	0-50 ถึง 0-2000	NO NO ₂ NO _x ^{*3}	กรณีที่สามารถไม่พิจารณาผลกระทบของ SO ₂ และไฮโดรคาร์บอนที่มีอยู่ด้วยหรือกรณีที่สามารถกำจัดผลกระทบนั้นออกไปได้เท่านั้น

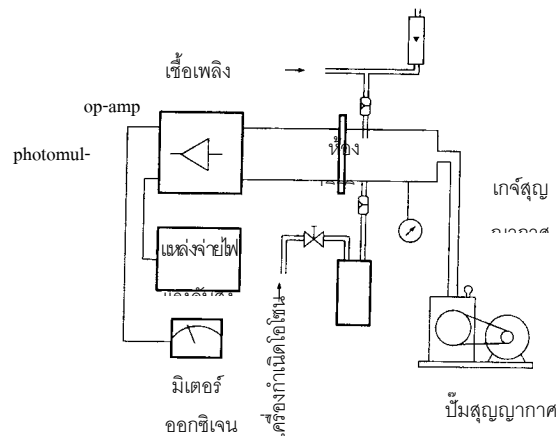
*1 ใน range นี้จะแบ่งเป็น range ย่อยๆ ตามความเหมาะสมกับวัตถุประสงค์การวัด

*2 NO_x จะวัดโดยแปลง NO₂ เป็น NO ก่อน

*3 เป็นปริมาณรวมของค่าของ NO กับ NO₂ ที่วัดได้



ปริมาณแสงที่เกิดขึ้นจะแปรผันตามความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ในตัวอย่าง และไม่มีผลกระทบจากไนโตรเจนไดออกไซด์ เอทิลีนจะทำปฏิกิริยากับโอโซนแปลงแสงเคมีที่มีความเข้มสูงสุดใกล้เคียงกับ 0.4 μm รูปที่ 3.19 จะแสดงหลักการทำงานคร่าวๆ ของเครื่องวิเคราะห์แบบการแปลงแสงทางเคมี เครื่องตรวจจับจะใช้ Photomultiplier tube โดยมีฟิลเตอร์ทางแสงที่ยอมให้แสงที่แปลงออกมาทางเคมีจากปฏิกิริยาของไนโตรเจนมอนอกไซด์เท่านั้นผ่านได้ การวัดความเข้มข้นของ NO_x จะนำก๊าซตัวอย่างมาผ่าน Converter ที่บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยารีดักชันพวก Molibden-carbon เอาไว้เพื่อเปลี่ยนไนโตรเจนไดออกไซด์ทั้งหมดให้เป็นไนโตรเจนมอนอกไซด์ก่อนแล้วจึงนำไปเข้าเครื่องวิเคราะห์



รูปที่ 3.19 เครื่องวิเคราะห์ไนโตรเจนมอนอกไซด์ด้วยการเปล่งแสงทางเคมี

6. การวิเคราะห์สารประกอบกำมะถัน (JIS B 7981)

เครื่องวัดที่สามารถวัดความเข้มข้นของ SO_2 ในก๊าซไอเสียได้อย่างต่อเนื่องตามที่มาตรฐาน JIS กำหนด ได้แก่ วิธีการนำไฟฟ้าของสารละลาย วิธีดูดกลืนรังสีอินฟราเรด วิธีดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ต และในภาคผนวกได้แสดงวิธีอิเล็กทรอนิกส์ไฟฟ้าคงที่ไว้ ตารางที่ 3.20 แสดงประเภทและช่วงการวัดของเครื่องวัด SO_2 อัตโนมัติ

วิธีการนำไฟฟ้าของสารละลาย จะนำซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในก๊าซตัวอย่างไปละลายในไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีคุณสมบัติเป็นกรดด้วยกรดซัลฟูริก แล้วหาความเข้มข้นจากการเปลี่ยนแปลงการนำไฟฟ้าของสารละลาย เนื่องจากไฮโดรเจนคลอไรด์ แอมโมเนีย ไนโตรเจนไดออกไซด์ในก๊าซไอเสียก็จะมีผลเพิ่มการนำไฟฟ้าของสารละลายเช่นเดียวกับซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ดังนั้น วิธีนี้จึงใช้ในกรณีที่สามารถไม่พิจารณาผลกระทบของสารเหล่านี้ได้เท่านั้น

ตารางที่ 3.20 ประเภทและช่วงการวัดของเครื่องวัด SO_2 อัตโนมัติ

ประเภทของเครื่องวัด	range ^{*1} (vol ppm)	หมายเหตุ
วิธีการนำไฟฟ้า	0-25 ถึง 0-2000	กรณีที่สามารถไม่พิจารณาผลกระทบของคาร์บอนไดออกไซด์ แอมโมเนีย ไฮโดรเจนคลอไรด์ และไนโตรเจนไดออกไซด์ที่มีอยู่ด้วยหรือกรณีที่สามารถกำจัดผลกระทบนั้นออกไปได้เท่านั้น
วิธีดูดกลืนรังสีอินฟราเรด	0-25 ถึง 0-2000	กรณีที่สามารถไม่พิจารณาผลกระทบของความชื้น คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรคาร์บอน ที่มีอยู่ด้วยหรือกรณีที่สามารถกำจัดผลกระทบนั้นออกไปได้เท่านั้น
วิธีดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ต	0-25 ถึง 0-2000	กรณีที่สามารถไม่พิจารณาผลกระทบของไนโตรเจนไดออกไซด์ที่มีอยู่ด้วยหรือกรณีที่สามารถกำจัดผลกระทบนั้นออกไปได้เท่านั้น
วิธีฟลูออเรสเซนซ์รังสีอัลตราไวโอเล็ต	0-10 ถึง 0-1000	กรณีที่สามารถไม่พิจารณาผลกระทบของไฮโดรคาร์บอนที่มีอยู่ด้วยหรือกรณีที่สามารถกำจัดผลกระทบนั้นออกไปได้เท่านั้น

7. วิธีก๊าซโครมาโตกราฟี

การวิเคราะห์ก๊าซเผาไหม้ สามารถใช้ก๊าซโครมาโตกราฟีได้ เมื่อเทียบกับเครื่องวิเคราะห์ก๊าซแบบรังสีอินฟราเรดแล้ว จะมีความเร็วในการตอบสนองต่ำกว่า และไม่สามารถวิเคราะห์ต่อเนื่องได้ อย่างไรก็ตาม หากติดตั้งเครื่องเก็บตัวอย่างก๊าซอัตโนมัติ จะสามารถทำการวิเคราะห์อัตโนมัติได้ ก๊าซโครมาโตกราฟีเหมาะสำหรับวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีองค์ประกอบจำนวนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งสามารถวิเคราะห์องค์ประกอบที่มีอยู่จำนวนน้อยมากได้ วิธีนี้สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบหลักของก๊าซเผาไหม้ ได้แก่ CO_2 , O_2 , CO , N_2 , CH_4 , SO_2 , NO_2 ได้

ก๊าซโครมาโตกราฟีจะติดตั้งเครื่องตรวจจับการนำความร้อน เครื่องนำก๊าซตัวอย่าง หรือเครื่องเก็บตัวอย่างก๊าซอัตโนมัติ โดยใช้ฮีเลียมหรือไฮโดรเจนเป็นก๊าซพาหะ เนื่องจากไม่สามารถสกัดแยกองค์ประกอบข้างต้นได้ด้วยการเติมเพียงครั้งเดียว ดังนั้น จึงใช้คอลัมน์ 2 ชนิดซึ่งมีความสามารถในการแยกไม่เท่ากัน โดยคอลัมน์ 1 ตัวจะวางไว้ใน Constant temperature bath ที่ทางผ่านกระแสน้ำก่อนเข้าเครื่องตรวจจับ อีกคอลัมน์หนึ่งจะติดตั้งไว้ที่ทางผ่านกระแสน้ำหลังเครื่องตรวจจับ วิธีนี้เรียกว่า Cell method ซึ่งสะดวกในการสกัดแยกและวัดปริมาณ

3.8 การคำนวณสมดุลพลังงานความร้อนก่อนและหลังการเผาไหม้

3.8.1 สมดุลความร้อนก่อนและหลังการเผาไหม้กับอุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ ตามทฤษฎี

อุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้สามารถคำนวณได้จากกฎการอนุรักษ์เอนทัลปีก่อน และหลังการเผาไหม้ กล่าวคือ ตั้งสมการให้ปริมาณความร้อนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงและในอากาศก่อนการเผาไหม้ เท่ากับปริมาณที่มีอยู่ในก๊าซเผาไหม้หลังการเผาไหม้บวกกับปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาจากก๊าซเผาไหม้ ปริมาณต่างๆ เกี่ยวกับสมดุลความร้อนก่อน และหลังปฏิกิริยาเผาไหม้สามารถแสดงได้ด้วยสัญลักษณ์ดังต่อไปนี้

ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง : H_f [kJ / kg_f], [kJ / m_N^3]

ประสิทธิภาพการเผาไหม้ : η_c

ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงและอากาศ : Q_p [kJ / kg_f], [kJ / m_N^3]

ปริมาณก๊าซเผาไหม้ (ปริมาณก๊าซเผาไหม้เปียก) : G [$\text{m}_N^3 / \text{kg}_f$], [$\text{m}_N^3 / \text{m}_N^3$]

ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่เฉลี่ยของก๊าซเผาไหม้ : c_{pm} [$\text{kJ} / (\text{m}_N^3 \cdot \text{K})$]

ปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยจากก๊าซเผาไหม้ : Q_r [kJ / kg_f], [kJ / m_N^3]

อุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ : T_g [K]

อุณหภูมิฐาน : T_0 [K]

ในที่นี้ ประสิทธิภาพการเผาไหม้ หมายถึงอัตราส่วนของพลังงานเคมีที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงถูกแปลงเป็นพลังงานความร้อน กล่าวคือ ในกรณีที่เชื้อเพลิงบางส่วนเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เกิดเป็น CO , H_2 , C_mH_n หรือสารที่ไม่เผาไหม้อื่นๆ เช่น เขม่า ฯลฯ เมื่อให้ปริมาณสารที่ไม่เผาไหม้เหล่านี้ต่อเชื้อเพลิงปริมาณหนึ่งหน่วยเท่ากับ b_i และให้ค่าความร้อนต่ำของสารเหล่านี้เท่ากับ H_{bi} แล้ว ประสิทธิภาพความร้อนในกรณีนี้จะเท่ากับ $\eta_c = 1 - (\text{ค่าความร้อนของสารที่ไม่เผาไหม้}) / (\text{ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง})$

$$\eta_c = 1 - \frac{\sum b_i H_{bi}}{H_\ell} \quad (3.47)$$

กรณีที่มีการ preheat อากาศสำหรับเผาไหม้ จะคำนวณได้ว่า

$$Q_p = (\text{ปริมาณอากาศ}) \times (\text{ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่เฉลี่ยของอากาศ}) \times \{(\text{อุณหภูมิ preheat}) - (\text{อุณหภูมิฐาน})\}$$

อุณหภูมิฐานโดยทั่วไปจะเลือกใช้อุณหภูมิบรรยากาศปกติ (25°C) สำหรับการปลดปล่อยความร้อนจากก๊าซเผาไหม้ จะประกอบด้วยการพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อนไปยังวัตถุที่จะให้ความร้อน นอกจากนี้ยังมีความร้อนที่ถ่ายเทผ่านผนังเตาออกไปภายนอกต่างๆ อีกด้วย ความร้อนเหล่านี้จะแสดงกันรวมๆ ด้วย Q_r สำหรับค่า c_{pm} เป็นค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่เฉลี่ยของก๊าซเผาไหม้เป็ยระหว่างอุณหภูมิ T_0 ถึง T_g และความร้อนที่มีอยู่ในก๊าซเผาไหม้จะคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$(\text{ปริมาณก๊าซเผาไหม้เป็ย}) \times (\text{ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่เฉลี่ย}) \times \{(\text{อุณหภูมิก๊าซเผาไหม้}) - (\text{อุณหภูมิฐาน})\}$$

ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงปริมาณหนึ่งหน่วย พลังงานก่อนการเผาไหม้ (พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้กับก๊าซเผาไหม้) จะเท่ากับ

$$\eta_c H_\ell + Q_p$$

และพลังงานหลังการเผาไหม้จะเท่ากับ

$$G c_{pm}(T_g - T_0) + Q_r$$

จากกฎการอนุรักษ์เอนทัลปี เมื่อดังสมการให้พลังงานก่อน และหลังการเผาไหม้เท่ากัน และจัดพจน์ใหม่แล้ว อุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ T_g จะแสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$T_g = \frac{\eta_c H_\ell + Q_p - Q_r}{G c_{pm}} + T_0 \quad [K] \quad (3.48)$$

อุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้เมื่อไม่มีการพา และแผ่รังสีความร้อนจากก๊าซเผาไหม้ ($Q_r = 0$) เรียกว่า อุณหภูมิก๊าซเผาไหม้เมื่อไม่มีการสูญเสียความร้อน (adiabatic combustion gas temperature) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อุณหภูมิก๊าซเผาไหม้ในกรณีที่เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิฐานเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์กับอากาศ ($Q_p = 0$, $\eta_c = 1$) เรียกว่า อุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้เมื่อไม่มีการถ่ายเทความร้อนตามทฤษฎี (T_{th})

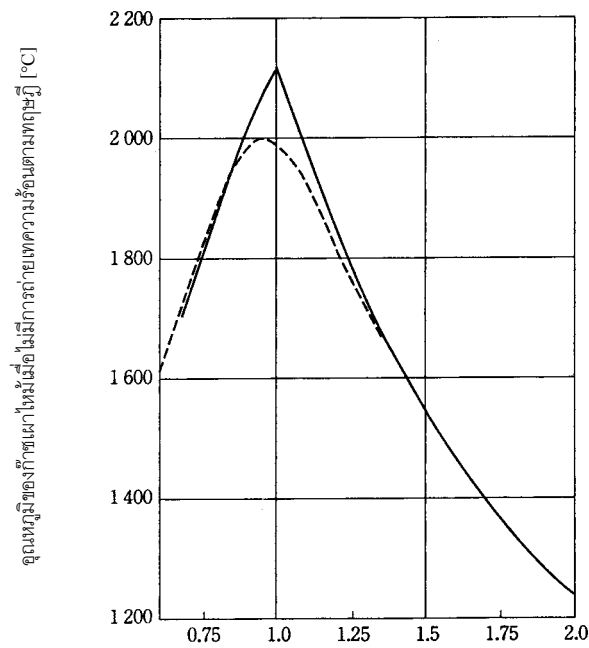
$$T_{th} = \frac{H_\ell}{G c_{pm}} + T_0 \quad [K] \quad (3.49)$$

เนื่องจากปริมาณก๊าซเผาไหม้เปียก G สามารถคำนวณได้จากสัดส่วนองค์ประกอบของเชื้อเพลิงและอัตราส่วนอากาศ และ H_f เป็นค่าเฉพาะตัวของเชื้อเพลิง ดังนั้น T_{th} จึงขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิงและอัตราส่วนอากาศเท่านั้น อุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้เมื่อไม่มีการสูญเสียความร้อนตามทฤษฎีในสมการ (3.49) จะมีค่าสูงสุดเมื่ออัตราส่วนอากาศ $\alpha = 1$ และเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ในอุดมคติ อุณหภูมินี้บางครั้งก็เรียกว่าอุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ตามทฤษฎีสูงสุด ตัวอย่างเช่น รูปที่ 3.20 แสดงอุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้เมื่อไม่มีการสูญเสียความร้อนตามทฤษฎีในกรณีที่เผาไหม้ C_3H_8 ด้วยอัตราส่วนอากาศต่างๆ และ ตาราง 3.21 แสดงอุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ตามทฤษฎีสูงสุดของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ

ตารางที่ 3.21 อุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ตามทฤษฎีสูงสุดของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ

ชนิดของเชื้อเพลิง	ค่าความร้อนต่ำ H_f	อุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ตามทฤษฎีสูงสุด T_{th}
H_2	10.80 MJ / m_{N-f}^3	2252°C
CO	12.64	2390
CH_4	35.83	2054
C_2H_2	56.26	2635
C_3H_8	91.30	2121
น้ำมันหนัก ($c = 0.87$ $h = 0.13$)	40.19 MJ/kg _f	2027

เชื้อเพลิง 25°C กับอากาศแห้งปริมาณตามทฤษฎี (สัดส่วน O_2 โดยปริมาตร 21%) เผาไหม้สมบูรณ์ภายใต้ความดัน 0.1 MPa (ความดันบรรยากาศ) และพิจารณาว่าก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้มีแค่ CO_2 , H_2O และ N_2 เท่านั้น



เผาไหม้โดยใช้อากาศแห้ง 25°C ภายใต้ความดัน 0.1 MPa (ความดันบรรยากาศ)

เส้นทึบ : ไม่พิจารณาสมดุลเคมี เมื่อ $\alpha \geq 1$ ถือว่าเผาไหม้สมบูรณ์

เมื่อ $\alpha < 1$ พิจารณาว่าสารผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์มีเฉพาะ CO เท่านั้น

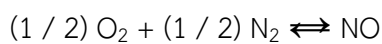
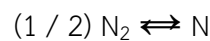
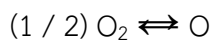
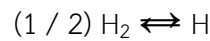
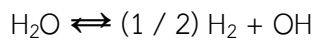
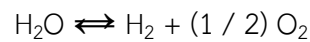
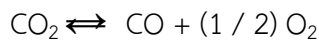
เส้นประ : จากการคำนวณสมดุลโดยพิจารณา chemical species ต่อไปนี้

CO_2 , CO , H_2O , H_2 , O_2 , N_2 , NO , O , H , OH

รูปที่ 3.20 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้เมื่อไม่มีการถ่ายเทความร้อนตามทฤษฎี (เผาไหม้ : C_3H_8)

3.8.2 อุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ที่สมดุล

ในการคำนวณอุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ในหัวข้อก่อน ได้พิจารณาองค์ประกอบของก๊าซเผาไหม้สมบูรณ์เท่านั้น เช่น N_2 , O_2 , CO_2 , H_2O , SO_2 เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ในก๊าซเผาไหม้อุณหภูมิสูงในทางปฏิบัติ องค์ประกอบของก๊าซเผาไหม้จะเกิดการสลายตัวด้วยความร้อน แม้ในกรณีที่อัตราส่วนอากาศมีเท่ากับ 1 หรือมากกว่าก็ตาม จะเกิดองค์ประกอบทางเคมีที่ไวต่อปฏิกิริยาจำนวนเล็กน้อย เช่น CO หรือ H_2 หรือ O , H , OH , N เป็นต้น ในก๊าซเผาไหม้อุณหภูมิสูงในปฏิกิริยาพื้นฐานต่อไปนี้



องค์ประกอบของก๊าซทั้งด้านซ้าย และขวาจะยังคงมีอยู่ทั้งคู่ในสภาวะสมดุล โดยความเร็วของปฏิกิริยาไปข้างหน้าในทิศไปทางขวาจะเท่ากับปฏิกิริยาย้อนกลับในทิศไปทางซ้าย อัตราส่วนขององค์ประกอบด้านซ้ายต่อด้านขวาที่มีอยู่จะเท่ากับ

$$K_{p1} = \frac{p_{CO} \cdot (p_{O_2})^{1/2}}{p_{CO_2}}, \quad K_{p2} = \frac{p_{H_2} \cdot (p_{O_2})^{1/2}}{p_{H_2O}},$$

ในที่นี้และอื่นๆ หมายถึงความดันย่อย ((ความดันย่อย) / (ความดันรวม) = (สัดส่วนโดยปริมาตรขององค์ประกอบ)) ขององค์ประกอบก๊าซแต่ละตัว K_{p1} และอื่นๆ เรียกว่า ค่าคงที่ของสมดุล ค่าคงที่ของสมดุลจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้เท่านั้น ซึ่งมีระบุไว้เป็นข้อมูลทางอุณหพลศาสตร์ อุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ในกรณีที่คำนึงถึงสมดุลเคมีในก๊าซเผาไหม้เช่นนี้ สามารถคำนวณได้ตามวิธีดังต่อไปนี้ อันดับแรก ให้สมมติอุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ T_g ตามความเหมาะสมและคำนวณสัดส่วนองค์ประกอบของก๊าซเผาไหม้ทั้งหมดโดยใช้ค่าคงที่ของสมดุล ณ อุณหภูมินั้น (สัดส่วนองค์ประกอบของก๊าซเผาไหม้สมดุล) หลังจากนั้นให้คำนวณพลังงานหลังปฏิกิริยาเผาไหม้ (ผลบวกของเอนทัลปีขององค์ประกอบของก๊าซเผาไหม้ทั้งหมด และปริมาณการถ่ายเทความร้อน) หากพลังงานนี้เท่ากับพลังงานก่อนการเผาไหม้ อุณหภูมินั้นจะเป็นอุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ที่ต้องการ หากไม่เท่ากัน ให้สมมติ T_g ใหม่ และหาอุณหภูมิที่ทำให้เกิดสมดุลพลังงานก่อนและหลังการเผาไหม้ อุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ที่คำนวณได้ด้วยวิธีนี้ เรียกว่า อุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ที่สมดุล และกรณีที่ไม่มีถ่ายเทความร้อนจากก๊าซเผาไหม้ จะเรียกว่า อุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ที่สมดุลเมื่อไม่มีการสูญเสียความร้อน รูปที่ 3.20 แสดงตัวอย่างผลการคำนวณอุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ที่สมดุลเมื่อไม่มีการสูญเสียความร้อน (การเผาไหม้ C_3H_8) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ทางทฤษฎีเมื่อไม่มีการถ่ายเทความร้อน จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงเกินกว่าประมาณ $1700^\circ C$ อิทธิพลของการสลายตัวด้วยความร้อนจะปรากฏชัดเจนขึ้น ทำให้คำนวณอุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ตามทฤษฎีได้สูงกว่าอุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ที่สมดุล แต่ผลต่างนั้นก็ได้ทำให้เกิดความผิดพลาดมากมาย ในการควบคุมความร้อนในทางปฏิบัติ หากทำการคำนวณอุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ตามที่อธิบายในหัวข้อก่อน ก็เพียงพอที่จะได้ข้อมูลที่มีประโยชน์แล้ว

3.9 กรณีศึกษาของการอนุรักษ์พลังงาน

3.9.1 รีเจนเนอเรทิฟเบิร์นเนอร์

ในเตาที่ต้องการอุณหภูมิสูง เช่น เตาหลอมแก้ว จะติดตั้งห้องกันความร้อนแบบ Switching โดยผ่านก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้เข้าไปในห้องหนึ่งให้กันความร้อนไว้ หลังจากนั้นทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 15-30 นาที จะสลับเอาอากาศสำหรับเผาไหม้ผ่านเข้าไปแทน เพื่อถ่ายเทความร้อนที่สะสมไว้ ทำให้ได้อากาศอุ่นที่มีอุณหภูมิสูง เมื่อทำห้องกันความร้อนนี้ให้มีขนาดกะทัดรัดเป็นชิ้นเดียวกับ Burner จะได้ Regenerative Burner

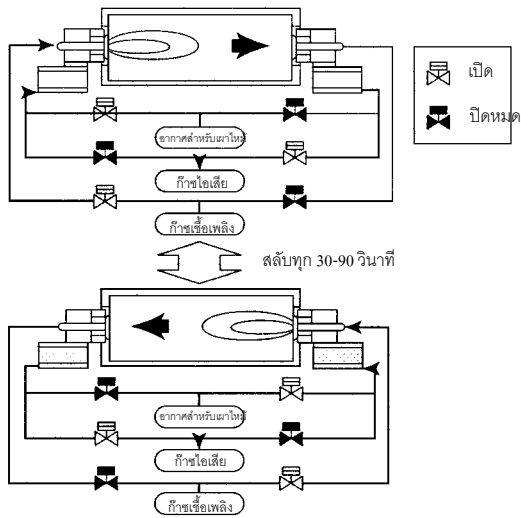
เนื่องจาก Regenerator จะมีความจุความร้อนต่ำ จึงจะมีการสลับทุกๆ ไม่กี่วินาที Burner แบบนี้จะมีทั้งแบบที่มี Burner และ Regenerator อย่างละ 2 ชุด แล้วใช้วาล์วสลับเส้นทางการไหลของก๊าซกับแบบที่มี Burner 1 ชุดแต่ให้ Regenerator หมุน หลักการทำงานของทั้งสองแบบแสดงไว้ในรูปที่ 3.21 และรูปที่ 3.22 Regenerator จะมีลักษณะเป็น Honeycomb หรือ Pebble ที่ทำจากอลูมินาความบริสุทธิ์สูง

การนำความร้อนในก๊าซไอเสียกลับมาใช้ โดยทั่วไปจะใช้ Recuperator แต่ใน Recuperator จะมีข้อจำกัดเรื่องวัสดุ ทำให้อุณหภูมิของก๊าซไอเสียที่จัดการได้จะมีค่าไม่เกิน 800-850 °C เท่านั้น กรณีที่สูงกว่านี้จะต้องนำไปผสมกับอากาศทำให้เย็นลงก่อน ทำให้เกิดความสูญเสียพลังงานที่มีประสิทธิภาพ (Effective energy) นอกจากนั้นยังพบว่าอากาศเมื่ออุ่นแล้วยังมีอุณหภูมิต่ำลงเนื่องจากการแผ่ความร้อนจากท่อลมอีกด้วย การใช้ Regenerative Burner มีคุณสมบัติดังตารางที่ 3.22

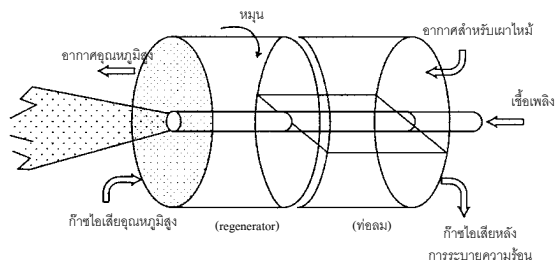
ตารางที่ 3.22 คุณสมบัติของ Regenerative Burner

อุณหภูมิภายในเตา	สามารถจัดการก๊าซอุณหภูมิสูงประมาณ 1400 [°C] ได้ ทำให้ได้ก๊าซอุ่นแล้วอุณหภูมิสูง 800-1300 [°C] จึงสามารถทำให้ภายในเตามีอุณหภูมิสูงได้ และเพิ่มปริมาณการถ่ายเทความร้อนในบริเวณเผาไหม้ อุณหภูมิสูง เชื้อเพลิงจะมีการติดไฟดี จึงสามารถเกลี่ยการแจกแจงอุณหภูมิภายในเตาให้สม่ำเสมอมากขึ้นได้ด้วยการแยกการเผาไหม้เชื้อเพลิงแบบกระจายและการบังคับหมุนเวียนก๊าซเผาไหม้
ปริมาณการแลกเปลี่ยนความร้อน	เทียบกับ Recuperator ที่จะมีการถ่ายเทความร้อนทางอ้อมแล้ว Regenerative Burner จะให้ความร้อน Regenerator โดยตรง ดังนั้นจึงมีปริมาณการแลกเปลี่ยนความร้อนต่อปริมาตรหนึ่งหน่วยสูงกว่า
ประสิทธิภาพอุณหภูมิ	เทียบกับ Recuperator ที่มีประสิทธิภาพอุณหภูมิ 70-85 [%] แล้ว Regenerative Burner จะมีค่าสูงตั้งแต่ 90 [%] ขึ้นไป จึงสามารถลดความสูญเสียในก๊าซไอเสียได้

เมื่ออุณหภูมิที่อุณหภูมิสูงขึ้น แม้ว่าอาจมีผลทำให้ NO_x เพิ่มขึ้น แต่ด้วยการเผาไหม้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยอากาศที่อุ่นแล้วอุณหภูมิสูง และการเปลี่ยนทิศทางเปลวไฟเป็นคาบด้วยระยะเวลาน้อย ทำให้เกิดบริเวณเผาไหม้สม่ำเสมอที่มีความเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และความหนาแน่นน้อย ผลก็คือทำให้ NO_x มีค่าต่ำกว่าที่มักจะคาดไว้



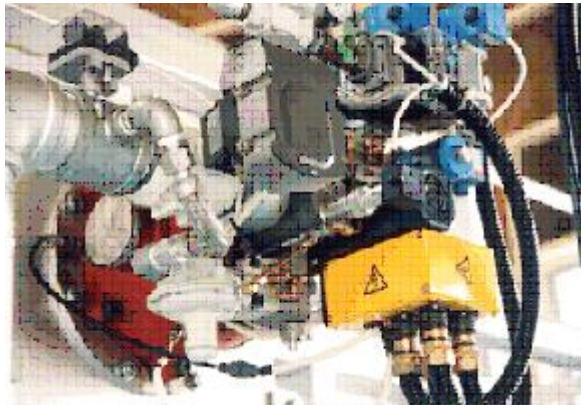
รูปที่ 3.21 หลักการทำงานของ Regenerative
Burner



รูปที่ 3.22 หลักการทำงานของ Regenerative
Burner แบบหมุน



รูปที่ 3.23 Regenerative Burner แบบหมุน



รูปที่ 3.24 Regenerative Burner

กรณีศึกษาที่ 1 การอนุรักษ์พลังงานในเตา Forging furnace ที่ใช้ Regenerative Burner

ผลิตภัณฑ์ : ผลิตภัณฑ์เหล็ก

จำนวนพนักงาน : 53 คน

ปริมาณพลังงานที่ใช้ต่อปี :

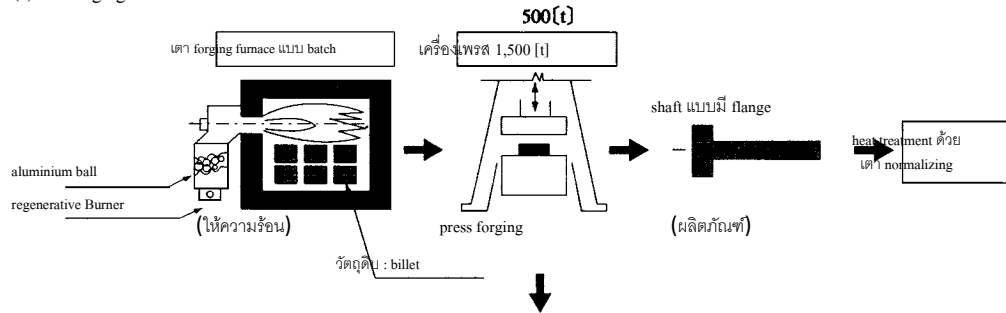
ก๊าซหุงต้ม (town gas)	1.3	ล้าน [m ³ /y]
ไฟฟ้า	1,330	[MWh/y]

1. ข้อมูลสรุป

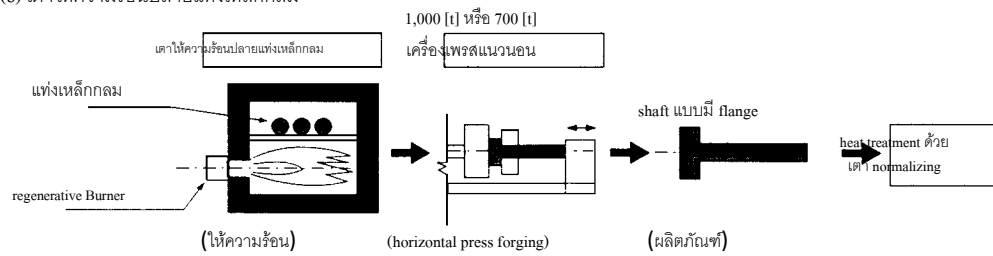
ใช้ระบบ Regenerative Burner ในเตา Forging furnace แบบ Batch กับเตาให้ความร้อนปลายแท่งเหล็กกลม (กระบวนการผลิตของอุปกรณ์เป้าหมายแสดงไว้ในรูปที่ 3.25) ซึ่งสามารถอนุรักษ์พลังงานโดยลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของเตาได้ 38-47 [%] นอกจากนั้น ยังทำการทุนแรงโดยให้เริ่มเดินเครื่องโดยไม่ใช้คน

ตอนที่ 2 บทที่ 3 ทฤษฎีการเผาไหม้

(a) เตา forging furnace แบบ batch



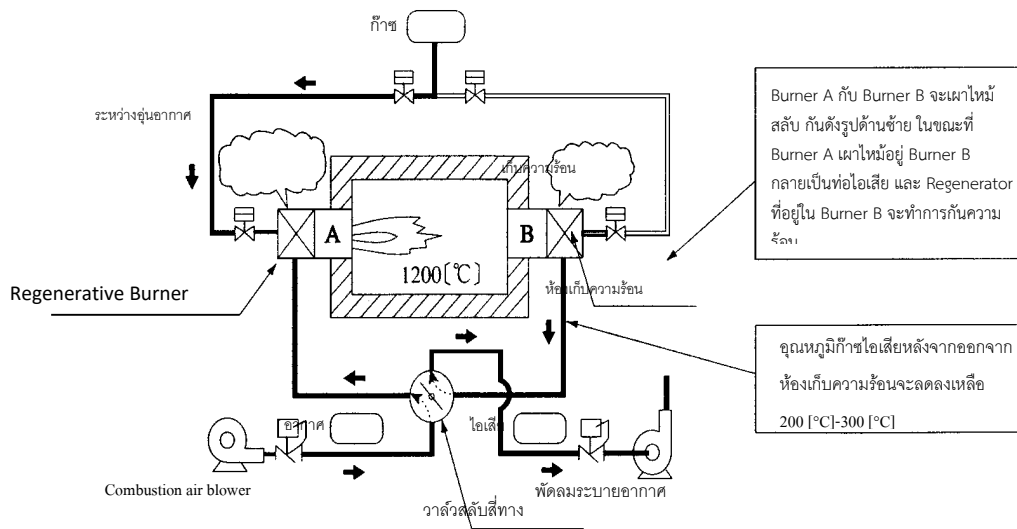
(b) เตาให้ความร้อนปลายแท่งเหล็กกลม



รูปที่ 3.25 กระบวนการผลิตของอุปกรณ์เป้าหมาย

2. มาตรการ

- พิจารณาจากรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 หลักการทำงานของระบบ Regenerator Burner

- ปรับปรุง และติดตั้งระบบควบคุมความดันในเตา

ตารางที่ 3.23 การปรับปรุงการควบคุมความดันในเตา

(ก) ก่อนปรับปรุง

เตา Forging furnace แบบ Batch	
ปริมาณที่จัดการ	Nor.20 [t/charge]
วัตถุดิบที่จัดการ	เหล็ก Billet เหล็ก ingot
อุณหภูมิให้ความร้อน	1,200-1,330 [°C]
Burner	Gas Burner 931 [kW] × 2 หัว = 1,862 [kW] (8 แส่น [kcal/h] × 2 หัว = 1.6 ล้าน [kcal/h])
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ท่อสองชั้นแบบแผ่นรังสี
การควบคุมการเผาไหม้	ควบคุมแปรผันตำแหน่ง PID
การควบคุมความดันในเตา	มี

เตาให้ความร้อนปลายแท่งเหล็กกลม	
ปริมาณที่จัดการ	Nor.770 [t/charge] (บริเวณให้ความร้อน)
วัตถุดิบที่จัดการ	แท่งเหล็กกลม (Round bar)
อุณหภูมิให้ความร้อน	1,200-1,330 [°C]
Burner	Gas Burner 466 [kW] + 291 [kW] = 757 [kW] (40 แส่น [kcal/h] + 2.5 แส่น [kcal/h] = 6.5 แส่น [kcal/h])
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	ไม่มี
การควบคุมการเผาไหม้	ควบคุมแปรผันตำแหน่ง PID
การควบคุมความดันในเตา	ไม่มี

(ข) หลังปรับปรุง

เตา Forging furnace แบบ Batch	
ปริมาณที่จัดการ	Nor.20 [t/charge]
วัตถุดิบที่จัดการ	เหล็ก Billet เหล็ก ingot
อุณหภูมิให้ความร้อน	1,200-1,330 [°C]
Burner	Twin regenerator Burner 815 [kW] (7 แส่น [kcal/h]) Regenerator : alumina ball เวลา Switching : 60 วินาที
การควบคุมการเผาไหม้	ควบคุมแปรผันตำแหน่ง PID (Process controller)
การควบคุมความดันในเตา	ควบคุมความดันในเตาแบบ Direct feedback
อื่นๆ	ใช้ระบบเริ่มเดินเครื่องโดยไม่ใช่ คนใช้ระบบ Pager monitor แจ้งเหตุผิดปกติ

เตาให้ความร้อนปลายแท่งเหล็กกลม	
ปริมาณที่จัดการ	Nor.580 [t/charge] (บริเวณให้ความร้อน)
วัตถุดิบที่จัดการ	แท่งเหล็กกลม (Round bar)
อุณหภูมิให้ความร้อน	1,200-1,330 [°C]
Burner	self regenerative Burner 466 [kW] (4 แส่น [kcal/h]) Regenerator : alumina ball เวลา Switching : 60 วินาที
การควบคุมการเผาไหม้	ควบคุมแปรผันตำแหน่ง PID (เครื่องปรับอุณหภูมิ)
การควบคุมความดันในเตา	Combustion air blower การควบคุมความเร็วรอบพัดลม ระบายอากาศ

3. ประสิทธิภาพ

(โปรดดูประสิทธิภาพจากตารางที่ 3.24 และตารางที่ 3.25)

ตารางที่ 3.24 ประสิทธิภาพหลังปรับปรุงเตา forging furnace แบบ batch

		ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	หมายเหตุ
(1)	การ อนุรักษ์ พลังงาน	ความสิ้นเปลือง ต่อหน่วยตลอดวัน	ประมาณ 3.98 [GJ/t] (ประมาณ 9.5 แส่น [kcal/t])	อนุรักษ์พลังงาน ได้ 47 %
		อัตราอนุรักษ์ พลังงาน	100	
		ค่าเชื้อเพลิง	6,040 [เยน/t]	
(2)	การแจกแจงอุณหภูมิภายในเตา		$\Delta t = 50$ [°C] (วัดอุณหภูมิผนังเตาด้วย Pyrometer)	ปรับปรุงการแจกแจง อุณหภูมิภายในเตาได้ $\Delta t = 10$ [°C]
(3)	ปริมาณการปล่อย CO ₂		100	ลดการปล่อย CO ₂ ได้ 47 %

ตารางที่ 3.25 ประสิทธิภาพหลังปรับปรุงเตาให้ความร้อนปลายแท่งเหล็กกลม

		ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	หมายเหตุ
การอนุรักษ์ พลังงาน	ความสิ้นเปลือง ต่อหน่วยตลอดวัน	ประมาณ 3.89 [GJ/t] (ประมาณ 9.3 แส่น [kcal/t])	ประมาณ 2.43 [GJ/t] (ประมาณ 5.8 แส่น [kcal/t])	อนุรักษ์พลังงานได้ 38 [%]
	อัตราอนุรักษ์ พลังงาน	100	62	
	ค่าเชื้อเพลิง	6,930 [เยน/t]	4,300 [เยน/t]	
ปริมาณการปล่อย CO ₂		100	62	ลดการปล่อย CO ₂ ได้ 38 [%]

กรณีศึกษาที่ 2 การเพิ่มประสิทธิภาพของเตา Heat treating furnace ด้วย Regenerative Burner

ผลิตภัณฑ์ : ชิ้นส่วนรถยนต์

จำนวนพนักงาน : 720 คน

ปริมาณการใช้พลังงานต่อปี :

ไฟฟ้า	11,892 [MWh/y]
ก๊าซหุงต้ม (town gas)	169,237 [m ³ /y]
น้ำมันหนัก	512 [kL/y]

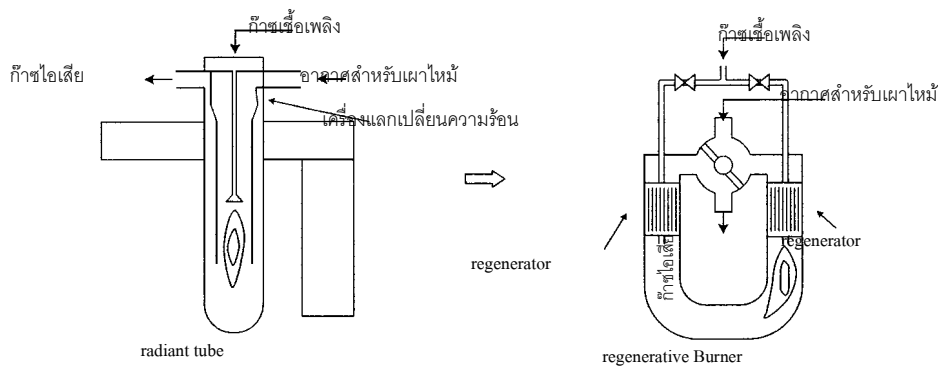
1. ข้อมูลสรุป

เปลี่ยนแหล่งความร้อนของเตา Heat treating furnace จากไฟฟ้าซึ่งมีราคาต่อความร้อนหนึ่งหน่วยสูงเป็นก๊าซหุงต้ม (Town gas) โดยใช้ Regenerative Burner เพื่อลดความสูญเสียในก๊าซไอเสีย พร้อมกับเปลี่ยนวัสดุทำผนังเตาเพื่อลดการแผ่ความร้อน

2. มาตรการ

■ ใช้ Regenerative Burner

Radiant tube เดิมจะมีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนน้อย เนื่องจากก๊าซไอเสียมีอุณหภูมิสูงถึง 500°C จึงเลือกใช้ Radiant tube แบบ Regenerative Burner ในรูปที่ 3.27 ด้านซ้าย การกระจายอุณหภูมิภายในเตาจะอยู่ในมาตรฐานเทียบเท่ากับเตาไฟฟ้า ก๊าซไอเสียมีอุณหภูมิต่ำลงเฉลี่ย 300°C



รูปที่ 3.27 Radiant tube

■ เสริมฉนวนความร้อนผนังเตา

อุณหภูมิผนังเตาของเตาก๊าซเดิมจะมีค่าเฉลี่ย 90°C ส่งผลให้อิฐทนไฟมีการแตกร้าว และความต้านทานความร้อนของบอร์ดฉนวนความร้อนมีค่าต่ำ ดังนั้นจึง

(ก) เปลี่ยนอิฐทนไฟจาก TB5 เป็น FLB

(ข) เปลี่ยนบอร์ดฉนวนความร้อนจาก silica #650 เป็น microtherm

มาตรการนี้ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของผนังเตาลดเหลือ 76°C

ประสิทธิภาพความร้อนเพิ่มขึ้น 22 [%] เทียบกับเตาก๊าซเดิมดังรูปที่ 3.28

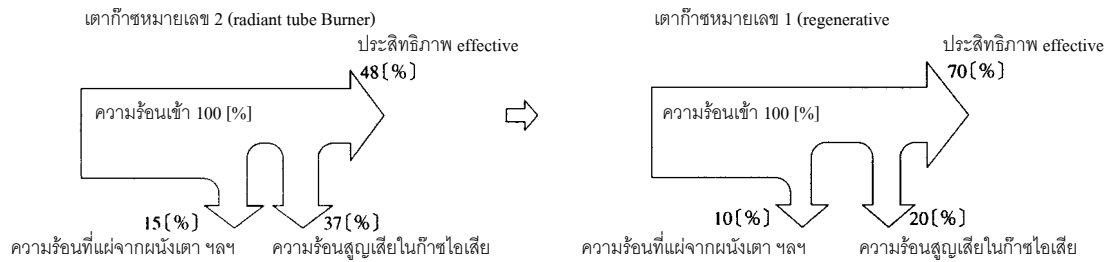
3. ประสิทธิภาพ

ความสิ้นเปลืองพลังงานต่อหน่วย ลดลง 36 [%]

การเกิด CO_2 ต่อหน่วย ลดลง 48 [%]

ต้นทุนพลังงาน ลดลง 33 [%] $\Delta 11$ [ล้านเยน/y]

ตอนที่ 2 บทที่ 3 ทฤษฎีการเผาไหม้



รูปที่ 3.28 ประสิทธิภาพความร้อน

กรณีศึกษาที่ 3 โครงสร้างของระบบเผาไหม้แบบอนุรักษ์พลังงาน

ประเภทปรับปรุงสภาพแวดล้อมของเตาชนิดมี Burner หลายกลุ่ม

ผลิตภัณฑ์ : ผลิตภัณฑ์เหล็ก

จำนวนพนักงาน : 5,500 คน

ปริมาณการใช้พลังงานต่อปี : เชื้อเพลิง 132 [PJ/y]

ไฟฟ้า 2.33 [TWh/y]

1. ข้อมูลสรุป

เตา Annealing furnace เหล็กแผ่นต่อเนื่อง (ดูรูปที่ 3.29) หนึ่งเตาจะมีการให้ความร้อนด้วย Radiant tube (RT) จำนวน 100-400 ท่อ โดย RT เหล่านี้จะมีจัดตำแหน่งแยกตามโซนต่างๆ ตามความยาวของเตา ในแต่ละโซนจะมี RT จำนวน 42 ท่อติดตั้งอยู่กับเฮดเดอร์ความสูง 20 [m] ซึ่งโดยโครงสร้างจะทำให้ก๊าซเผาไหม้กระจายตัวสม่ำเสมอได้ไม่ดี เครื่องวิเคราะห์ออกซิเจนมี 1 เครื่อง ทำการตรวจวัดความเข้มข้นของออกซิเจนในก๊าซไอเสียของแต่ละ RT ด้วยการสลับวาล์ว จึงมีจุดอ่อนที่เวลาตอบสนองช้า

RT แต่ละท่อมีการปรับอัตราไหลของเชื้อเพลิงด้วยวาล์วเพื่อให้อัตราส่วนอากาศมีค่าค่อนข้างสูง แต่หากเวลาผ่านไปสัก 1 ปี สมดุลจะเปลี่ยนไปทำให้บาง RT มีอากาศมากเกินไป และบาง RT มีอากาศน้อยเกินไป การปรับตั้งใหม่เป็นงานที่เหนียวยากโดยต้องทำงานในสภาพแวดล้อมอุณหภูมิสูง 60 [°C] เป็นเวลานาน ดังนั้นจึงได้จัดทำระบบควบคุมการเผาไหม้ใหม่ขึ้น

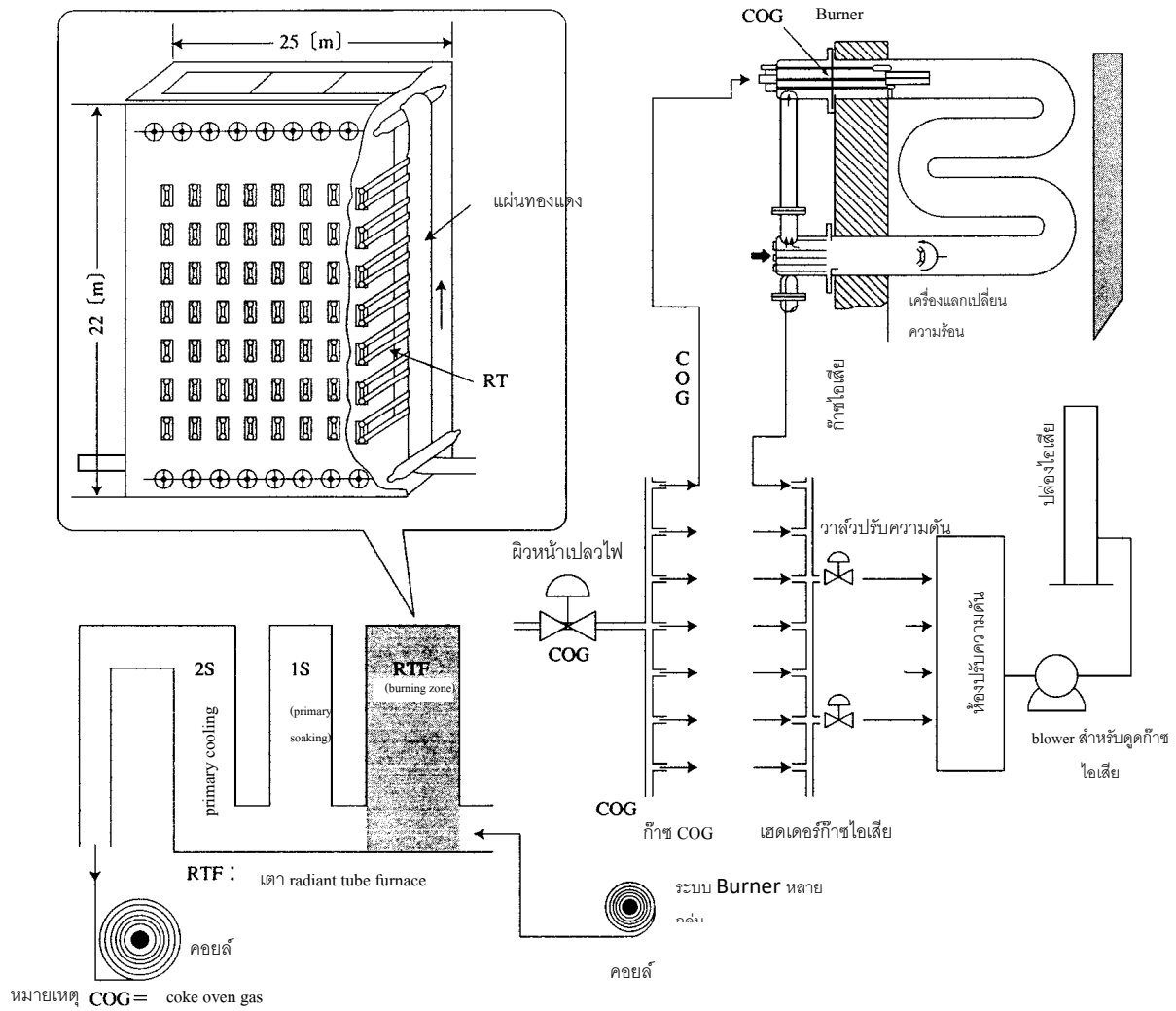
2. มาตรการ

- ระบบเฝ้าติดตามการเผาไหม้ของ RT แต่ละตัว

ติดตั้งเซ็นเซอร์ Zirconia แบบสอดซึ่งมีราคาถูกและมีขายทั่วไปเข้ากับแต่ละ RT เนื่องจากอุณหภูมิทนความร้อนของเซ็นเซอร์มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิก๊าซไอเสีย ดังนั้น จึงติดตั้งแผ่นกันเข้ากับ vent ของท่อก๊าซไอเสียดังรูปที่ 3.30 เพื่อนำก๊าซไอเสียส่วนหนึ่งไปยังบายพาสสำหรับทำให้เย็น แล้วติดตั้งเซ็นเซอร์ตรงนั้น

- การควบคุมอัตราส่วนอากาศต่ำสุดด้วยการตรวจสอบเขม่า

เลือกใช้เซ็นเซอร์แบบเลเซอร์ในการตรวจจับเขม่าความเข้มข้นต่ำอย่างต่อเนื่อง ติดตั้งไว้ 1 ตำแหน่งที่ท่อไอเสียรวมดังรูปที่ 3.31 ยึดเครื่องกำเนิดแสงกับเครื่องรับแสงไว้ที่ทั้งสองด้านของท่อที่เจาะรูก๊าซผ่านเอาไว้ และติดตั้งเลนส์รวมแสงไว้หน้าเครื่องรับแสง เพื่อป้องกันแนวแกนของลำแสงเบี่ยงเบนไปเนื่องจากการบิดตัวด้วยความร้อนของท่อไอเสีย เพื่อป้องกันพื้นผิวกำเนิดแสงและพื้นผิวรับแสงสกปรก จึงใช้ก๊าซไนโตรเจนในการ Purge ที่ผิวกระจกการระบายความร้อนให้เซ็นเซอร์จะใช้ Vortex cooler



รูปที่ 3.29 โครงสร้างของเตา RT กับระบบควบคุมการเผาไหม้

ในการนำสัญญาณขาออกของเซ็นเซอร์ตรวจจับเข้ามาไปป้อนให้ระบบควบคุมเดิม ได้ทำการปรับปรุงดังต่อไปนี้

(ก) ปรับอัตราส่วนอากาศซึ่งเคยกำหนดไว้คงที่ให้มีการเปลี่ยนแปลงเทียบกับภาระเป็นเส้นกราฟหักดังรูปที่ 3.32

(ข) ใช้วิธีควบคุมการกำหนดอัตราส่วนอากาศโดยอัตโนมัติ โดยขณะที่ไม่เกิดเขม่า จะกำหนดให้ใช้อัตราส่วนอากาศต่ำสุด กรณีที่เกิดเขม่าขึ้นจาก RT ที่ผิดปกติ จะกำหนดอัตราส่วนอากาศให้สูงขึ้น

3. ประสิทธิภาพ

■ การอนุรักษ์พลังงาน

เฉพาะเตา Annealing furnace แบบต่อเนื่องที่ได้ดำเนินมาตรการไปแล้วจะมีประสิทธิภาพดังต่อไปนี้

ความสัมพันธ์พลังงานต่อหน่วย

$$996 \rightarrow 896 \text{ [MJ/t]} \Delta 10 \text{ [%]}$$

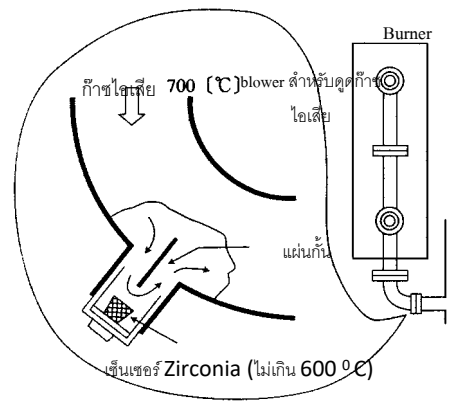
ความสัมพันธ์พลังงาน 896 $\rightarrow$ 808

$$\text{[TJ/y]} \Delta 10 \text{ [%]}$$

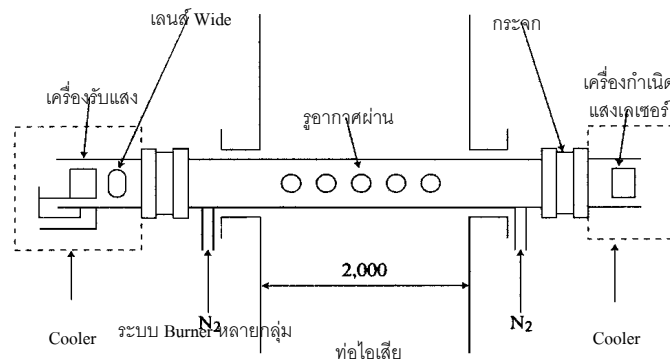
กรณีที่ขยายผลมาตรการนี้ไปปฏิบัติกับเตา annealing furnace อื่นด้วยจะเท่ากับ $\Delta 362$ [TJ/y]

■ ไม่เกิดควันที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าเลย

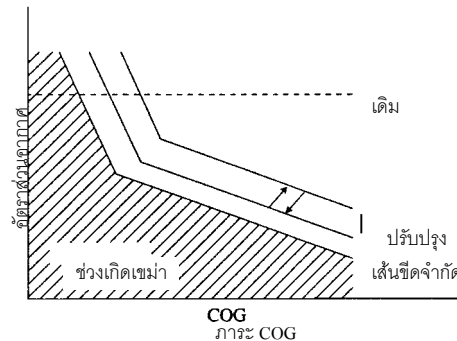
■ ลดงานปรับแต่งการเผาไหม้ลงได้มาก



รูปที่ 3.30 วิธีใช้เซ็นเซอร์แบบสอด



รูปที่ 3.31 เคำโครงของเซ็นเซอร์ตรวจจับเขม่า



รูปที่ 3.32 วิธีควบคุมอัตราส่วนอากาศ

กรณีศึกษาที่ 4 การปรับปรุงความสิ้นเปลืองน้ำมันหนักต่อหน่วยของเตาหลอมอลูมิเนียม

ผลิตภัณฑ์ : แท่งอลูมิเนียมหล่อ Billet

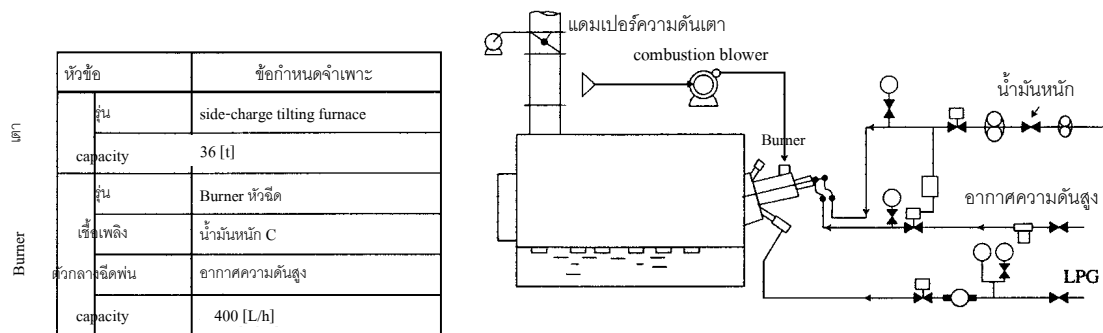
จำนวนพนักงาน : 149 คน

ปริมาณการใช้พลังงานต่อปี :

น้ำมันหนัก	12,000 [kL/y]
น้ำมันก๊าด	5,100 [kL/y]
LPG	600 [t/y]
ไฟฟ้า	15,000 [MWh/y]

1. ข้อมูลสรุป

ในเตาหลอมโลหะอลูมิเนียมและ return scrap ฯลฯ (ดูรูปที่ 3.33) เนื่องจากมีความต้องการเพิ่มปริมาณการหลอม จึงต้องป้อนวัตถุดิบเข้าไปถึงใกล้ๆ กับ Burner แม้ว่าจะเปลี่ยนเป็น Burner เปลวไฟสั้นแล้ว แต่ก็ยังปรับปรุงความสิ้นเปลืองต่อหน่วยได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น การเกิดควันดำก็ไม่หายอย่างสิ้นเชิง ดังนั้น จึงได้ดำเนินการแก้ไขปัญหาดังกล่าว

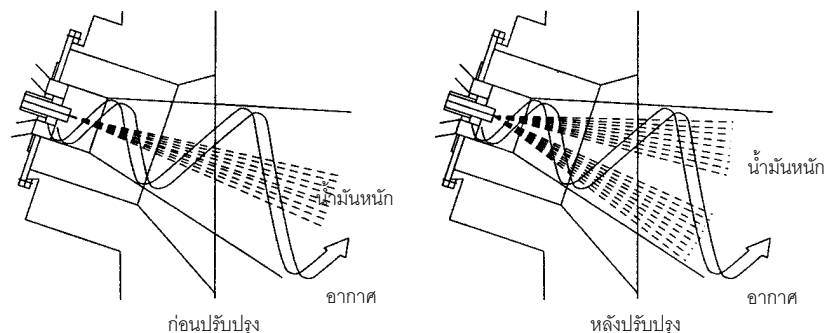


รูปที่ 3.33 เตาหลอมกับฟลาวเวอร์เผาไหม้ของเตา

2. มาตรการ

■ การดัดแปลง Burner

ขยายมุมฉีดเชื้อเพลิงให้กว้างขึ้นเพื่อให้ทิศทางฉีดเชื้อเพลิงสอดคล้องกับชั้นอากาศสำหรับเผาไหม้ (ดูรูปที่ 3.34)



รูปที่ 3.34 การผสมน้ำมันหนักที่ฉีดออกมาเกี่ยวกับอากาศสำหรับเผาไหม้

ตอนที่ 2 บทที่ 3 ทฤษฎีการเผาไหม้

■ การตรวจสอบ Burner

เปลี่ยนการตรวจสอบเมื่อผิดปกติเป็นการตรวจสอบเป็นระยะ

■ การปรับปรุงการตรวจวัดอุณหภูมิของโลหะ

ตำแหน่งที่ตรวจวัดของเทอร์โมคัปเปิลเดิมตื้นเกินไปจึงทำการแก้ไข เพื่อเพิ่มความเที่ยงตรงในการวัดอุณหภูมิ

■ การปรับปรุงรูปแบบการเผาไหม้น้ำมันหนัก

กำหนดปริมาณการเผาไหม้น้ำมันหนัก ความดันในเตา รูปแบบอัตราส่วนอากาศให้สอดคล้องกับปริมาณการป้อนวัตถุดิบ

■ ทบทวนการกำหนดการควบคุมโปรแกรมเผาไหม้

ทบทวนลดอุณหภูมิสูงสุดของบรรยากาศ ปริมาณการเผาไหม้น้ำมันหนัก Hi-Lo ปริมาณการเผาไหม้น้ำมันหนักต่ำสุด

3. ประสิทธิภาพ

ความสิ้นเปลืองน้ำมันหนักต่อหน่วย 64.0 58.6 [L/t]

ต้นทุนน้ำมันหนัก $\Delta 3,310$ [พินเยน/y]

กรณีศึกษาที่ 5 การอนุรักษ์พลังงานด้วย

การปรับปรุงวิธีการเดินเครื่องเตา Cupola

ผลิตภัณฑ์ : รถยนต์ ชิ้นส่วนรถยนต์

จำนวนพนักงาน : 6,500 คน

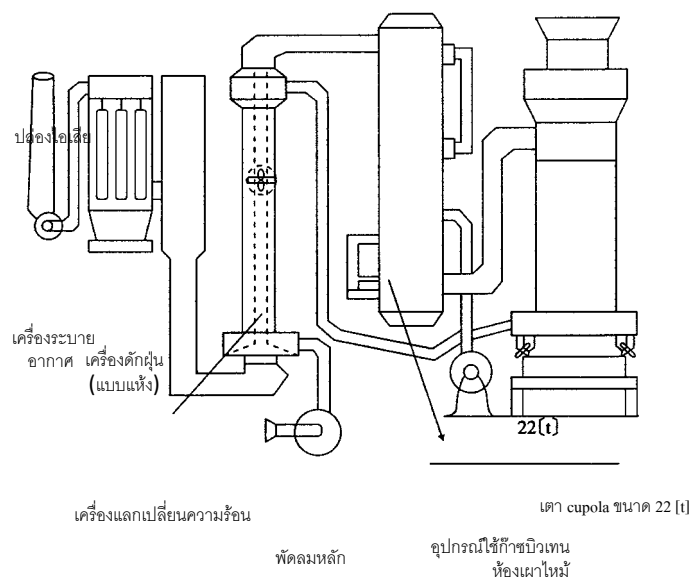
ปริมาณการใช้พลังงานต่อปี : ไฟฟ้า

400.6 [GWh/y]

น้ำมันหนัก/น้ำมันก๊าด 25,180 [kL/y]

ก๊าซชีวเทน 12,647 [t/y]

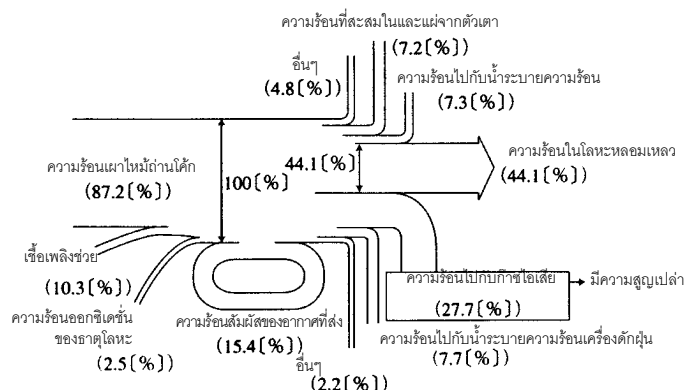
ถ่านโค้ก 33,329 [t/y]



1. เค้าโครง

ในตัวอย่างจะนำก๊าซ CO ในก๊าซไอเสียที่เกิดจากเตา Cupola มาเผาไหม้ แล้วนำความร้อนนี้กลับมาใช้ด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อเผาไหม้ CO อย่างสมบูรณ์ จะนำเชื้อเพลิงช่วยได้แก่ ก๊าซชีวเทนมาเผาไหม้ และรักษาอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ไว้ที่ 700-750 °C กระบวนการในเตา Cupola แสดงไว้ในรูปที่ 3.35 สมดุลความร้อนของระบบเตา cupola แสดงไว้ในรูปที่ 3.36 ตัวอย่างนี้จะทบทวนเงื่อนไขการเดินเครื่องเตา Cupola เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของ CO ในก๊าซไอเสียและลดก๊าซชีวเทน

รูปที่ 3.35 กระบวนการของเตา



รูปที่ 3.36 สมดุลความร้อนของระบบเตา

2. มาตรการ

■ สำรองเงื่อนไขการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ก๊าซไอเสียเพื่อป้องกันเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จะทำการควบคุมอุณหภูมิในกรณีที่อุณหภูมิเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหรืออุณหภูมิส่งอากาศสูงกว่าค่าที่กำหนด จะพัดละอองน้ำเข้าไปในห้องเผาไหม้ เมื่อพ่นน้ำเข้าไปด้านล่างจะมีอุณหภูมิต่ำลง ทำให้ปริมาณการเผาไหม้ก๊าซชีวเทนเพิ่มสูงขึ้น

จากการสำรวจพบว่า หากความเข้มข้น CO ในก๊าซไอเสียมีค่าไม่น้อยกว่า 16.5 [%] แล้วจะสามารถเผาไหม้ที่ด้านล่างห้องเผาไหม้ได้

■ เพิ่มความเข้มข้น CO

(ก) เพิ่มความหนาของชั้นวัสดุด้านบนช่องนำก๊าซเข้าที่ด้านบนของเตา Cupola อีก 500 [mm] เพื่อลดปริมาณอากาศที่ดูดเข้าจากส่วนบนสุดของเตา cupola นอกจากนั้น ยังกำหนดปริมาณส่งลมระหว่างเวลาพักให้เป็นมาตรฐานเพื่อจำกัดปริมาณของวัสดุที่ลดลง

(ข) เนื่องจากความเข้มข้น CO จะขึ้นอยู่กับปริมาณการส่งลม จึงได้รักษาปริมาณการส่งลมไว้ให้อยู่ในช่วงคงที่ช่วงหนึ่ง

(ค) กำหนดระดับการเปิดแฉกเป่าอากาศสำหรับเผาไหม้ให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด

(ง) ทำให้เครื่องควบคุมความดันสถิตภายในเตามีปฏิกิริยารวดเร็วขึ้น

3. ประสิทธิภาพ

ปริมาณการใช้ก๊าซชีวเทน 14.2 - 5.5 [m^3/t]

12 [ล้านเยน/y]

กรณีศึกษาที่ 6 มาตรการลดความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่อหน่วยของเตาให้ความร้อนรีดร้อน

ผลิตภัณฑ์ : ผลิตภัณฑ์หลัก เช่น เหล็กแผ่น

จำนวนพนักงาน : 120 คน

ปริมาณการใช้พลังงานต่อปี (โรงงานรีดร้อน) : LNG 116 [Mm^3/y]

ไฟฟ้า 329 [GWh/y]

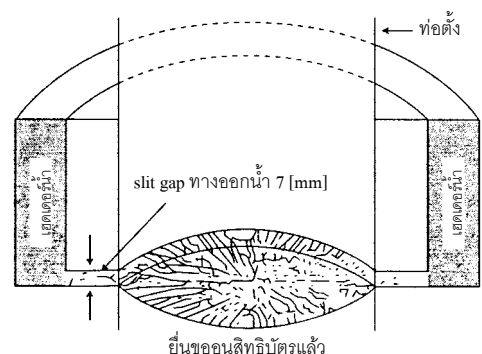
1. ข้อมูลสรุป

มาตรการปรับปรุงความสิ้นเปลืองพลังงานต่อหน่วยของเตาให้ความร้อนรีดร้อน

■ เพิ่มอัตราการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการปรับความดันภายในเตาให้เหมาะสม

■ ป้องกันอากาศเข้ามาในเตาด้วยการปรับปรุงการซีล

■ ลดอุณหภูมิก๊าซไอเสียที่ท้ายเตาโดยติดตั้งผนังกัน



รูปที่ 3.37 ภาพหน้าตัดโครงสร้างของ เครื่อง Water curtain seal

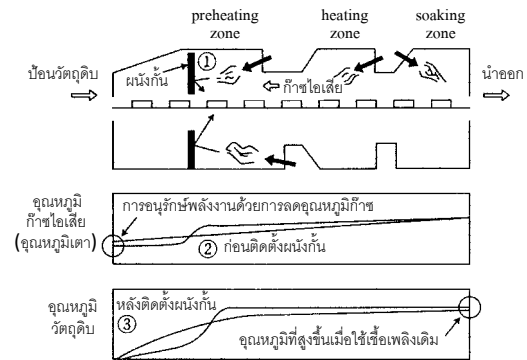
2. มาตรการ

■ เพื่อเพิ่มอัตราการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการปรับความดันภายในเตาให้เหมาะสมเมื่อวัดค่าความดันในเตาที่ทำให้ผลรวมของความสูญเสียเนื่องจากการพ่นก๊าซไอเสียออกไปและความสูญเสียจากอากาศภายนอกเข้ามามีค่าต่ำสุด และอุณหภูมิของอากาศที่ Preheat แล้วมีค่าสูงสุด ปรากฏว่ามีค่าเท่ากับ 14.9 [Pa] (1.5 [mmAq]) เนื่องจากเดิมเคยกำหนดไว้ให้เท่ากับ 17.9 [Pa] (1.8 [mmAq]) จึงได้เปลี่ยนให้เป็น 14.9 [Pa] (1.5 [mmAq])

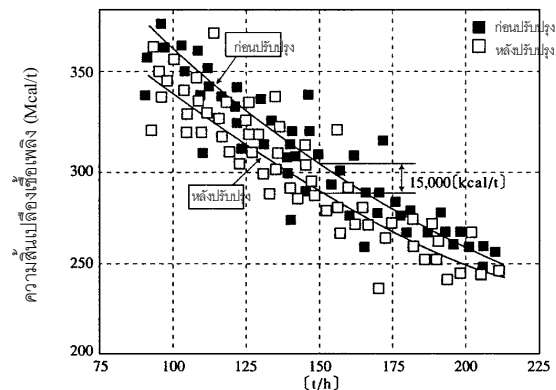
■ ป้องกันอากาศเข้ามาในเตาด้วยการปรับปรุงการซีลที่ช่องปล่อยโลหะเหลวด้านล่างของเตา จะมีแฉกเปอร์ติดตั้งอยู่ แต่แฉกเปอร์นี้ไม่สามารถซีลได้สนิท จึงมีอากาศเข้ามามาก ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ก๊าซไอเสียมีปริมาณเพิ่มขึ้น รวมทั้งทำให้คุณภาพและ Yield ของผลิตภัณฑ์ต่ำลง ดังนั้น จึงติดตั้งเครื่อง water curtain seal ในรูปที่ 3.37 จำนวน 12 แห่ง ความเข้มข้นออกซิเจนที่ใกล้ๆ กับช่องปล่อยโลหะเหลวเดิมเคยสูงถึง 17-18 [%] แต่ได้ลดลงเหลือ 2-5 [%] และความเข้มข้นออกซิเจนภายในเตาได้ลดลง 1-4 [%]

■ ลดอุณหภูมิก๊าซไอเสียที่ท้ายเตาโดยติดตั้งผนังกันที่ preheating zone ดังรูปที่ 3.38 เพื่อบังความร้อนแผ่รังสีจาก preheating Burner เพื่อลดอุณหภูมิก๊าซไอเสียด้านท้ายเตาทำให้การสูญเสียในก๊าซไอเสียลดต่ำลง รวมทั้งเพื่อเพิ่มอุณหภูมิเตาในบริเวณอุณหภูมิสูงของ preheating zone ทำให้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัตถุดิบเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย

เมื่อเปรียบเทียบความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงก่อน และหลังติดตั้งผนังกันแล้ว ในกรณีที่มีปริมาณการผลิตเฉลี่ย 150 [t/h] จะสามารถลดความสิ้นเปลืองต่อหน่วยได้ 63,000 [kJ/t] ดังรูปที่ 3.39



รูปที่ 3.38 แบบจำลองอุณหภูมิก๊าซไอเสียกับการเพิ่มอุณหภูมิของวัตถุดิบหลังติดตั้ง



รูป 3.39 ประสิทธิภาพของการติดตั้งผนัง

3. ประสิทธิภาพ

(สำหรับประสิทธิภาพโปรดดูตารางที่ 3.26)

ตารางที่ 3.26 ประสิทธิภาพของการปรับปรุง

มาตรการ		ลดความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่อหน่วยได้ [MJ/t]	ข้อได้เปรียบ[ล้านเยน/y]	
	เตาเป้าหมาย			เทียบเป็นทั้งหมด
ปรับความดันเตาให้เหมาะสมที่สุด	No.1	8.4	2.09	3.3
ปรับปรุงซีล	No.1	20.9	5.23	8.3
ติดตั้งผนังกัน	No.3	62.8	25.12	40.0
รวม			32.45	41.6

กรณีศึกษาที่ 7 การลดความสูญเสียในการเผาไหม้ด้วยการปรับปรุง Preheating zone ของเตาอบอิनाเมล ผลิตภัณฑ์ : ผลิตภัณฑ์เคลือบอิनाเมล อ่างอาบน้ำ เป็นต้น

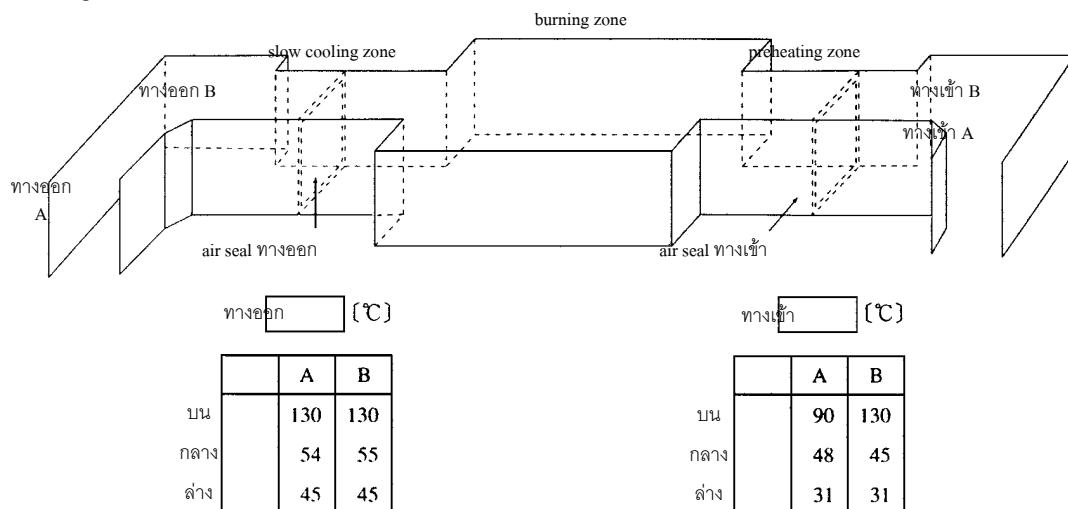
จำนวนพนักงาน : 444 คน

ปริมาณการใช้พลังงานต่อปี : ก๊าซธรรมชาติ 966,000 [m³/y]

ไฟฟ้า 280.5 [MWh/y]

1. ทัวไป

มีลมร้อนแผ่ออกมาจากทางเข้า/ทางออกเตาอบ และมีอากาศเย็นไหลเข้าไปทำให้เกิดความร้อนสูญเสียขึ้น นอกจากนั้น ด้านบนและด้านล่างของ Preheating zone ยังมีผลต่างอุณหภูมิสูง ทำให้ผลิตภัณฑ์ด้านบนและด้านล่างมีสีต่างกัน ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตต่ำลง (ดูรูปที่ 3.40) ดังนั้นจึงทำการปรับปรุง Preheating zone



รูปที่ 3.40 อุณหภูมิด้านบน และด้านล่างของทางเข้า และทางออกเตา Baking furnace

2. มาตรการ

■ ป้องกันการแผ่ความร้อน

(ก) เพิ่มปริมาตรอากาศ Air seal

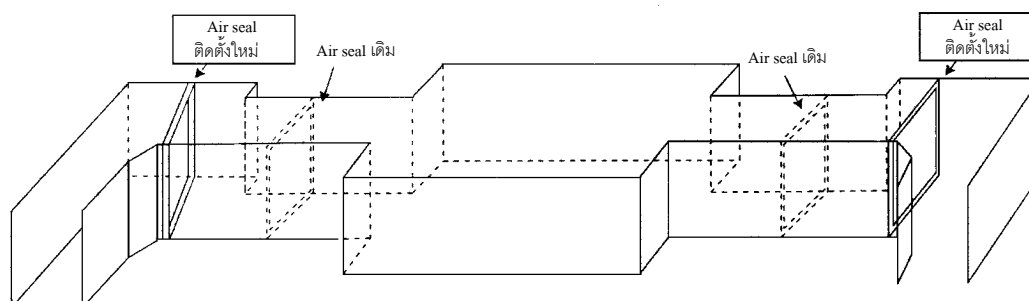
ปรับระดับการเปิดแฉกเปอร์ของ Air seal ทางเข้า-ทางออกเพื่อเพิ่มปริมาตรอากาศ

(ข) เพิ่ม Air seal

ติดตั้ง Air seal เพิ่มที่ด้านนอกของ Air seal เดิมให้ห่างออกมา 5 [m] เพื่อลดอากาศร้อนไหลออกและใช้บริเวณระหว่าง Seal ทั้งสองเป็น Primary preheating zone และ Primary slow cooling zone

(ค) เสริมฉนวนความร้อน

ติดตั้งฉนวนความร้อน Glass wool 100 [mm] ที่ผนัง Primary preheating zone และ Primary slow cooling zone



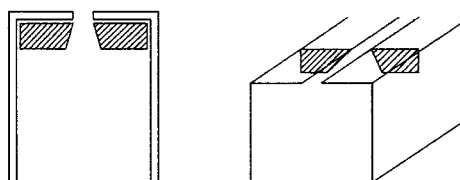
รูปที่ 3.41 Air seal ติดตั้งใหม่

(ง) ติดตั้งผนังห้อยบัง (ดูรูปที่ 3.42)

ติดตั้งผนังห้อยบังที่เพดานเพื่อป้องกันอากาศร้อนไหลออกจากด้านบนของ Preheating zone

(จ) ป้องกันอากาศร้อนไหลออกจากด้านบนของทางเข้าทางออกเตา โดยการติดตั้ง Guard ที่ช่องว่างระหว่างเพดานเตากับสายพาน

วัสดุ : สแตนเลส 1.6 [mm]
ตำแหน่ง : ด้านนอกของ air seal ติดตั้งใหม่



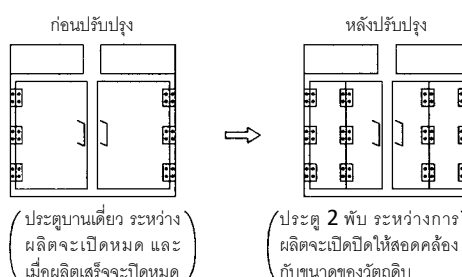
รูปที่ 3.42 ผนังห้อย

(ฉ) ปรับปรุงประตูทางเข้าทางออก

ปรับปรุงประตูซึ่งเดิมเป็นแบบบานเดียวเป็นแบบ 2 พับ และปรับระดับการเปิดประตูให้สอดคล้องกับขนาดของวัตถุดิบ

■ ปรับปรุงผลต่างของอุณหภูมิด้านบน และด้านล่างของ Preheating zone

(ก) ติดตั้ง Burner ช่วยที่ด้านล่างของ Preheating zone ติดตั้ง Radiant tube Burner ที่พื้นเตาเพื่อเพิ่มอุณหภูมิด้านล่างของ Preheating zone



รูปที่ 3.43 ประตู 2 พับ

(ข) ติดตั้ง Circulator ที่ Preheating zone เพื่อให้อุณหภูมิด้านบน-ด้านล่างของบรรยากาศใน Primary preheating zone สม่ำเสมอ

3. ประสิทธิภาพ

ผลต่างของอุณหภูมิด้านบน-ด้านล่างของ Preheating zone	120 → 60 [°C]
ปริมาณก๊าซเชื้อเพลิง	3,355 → 2,663 [m ³ /d]
จำนวนครั้งที่เกิดความสูญเสียในกระบวนการผลิต	3.1 → 0 [ครั้ง/เดือน]
มูลค่าประสิทธิภาพ	12.5 [ล้านเยน/ปี]

กรณีศึกษาที่ 8 การปรับปรุงการกันความร้อนของเตาหลอมแก้ว

ผลิตภัณฑ์ : ขวดแก้ว

จำนวนพนักงาน : 80 คน

ปริมาณการใช้พลังงานต่อปี : LPG 399,130 [kg/y]
ไฟฟ้า 7,917 [MWh/y]

1. ข้อมูลสรุป

การกันความร้อนของผนังด้านนอกเตาหลอมแก้ว หากเพิ่มขึ้นฉนวนความร้อนให้หนาขึ้น จะกันความร้อนได้ดีขึ้นและช่วยอนุรักษ์พลังงาน แต่ในทางกลับกัน การกักความร้อนวัสดุตัวเตาจากแก้วหลอมเหลวจะรุนแรงขึ้น ทำให้เกิดของเสียเนื่องจากวัสดุตัวเตาถูกกักความร้อนเพิ่มมากขึ้น และอายุการใช้งานของเตาหลอมสั้นลง ด้วยการใช้วิธีสร้างผลต่างของประสิทธิภาพการกันความร้อนของผนังเตาด้านนอก จะสามารถอนุรักษ์พลังงานได้โดยไม่ทำให้เกิดปัญหาข้างต้น

2. มาตรการ

กระบวนการผลิตขวดแก้วแสดงไว้ในรูป 3.44 การหลอมวัตถุดิบแก้วจะใช้เตาหลอมไฟฟ้า ซึ่งมีสัดส่วนการใช้ไฟฟ้า 70 [%] ของทั้งโรงงาน

(1) สภาพปัจจุบัน : วิธีติดตั้งวัสดุผนังเตาเดิม และสภาพการกักความร้อนวัสดุทนไฟหลังจากสิ้นสุดการใช้งานแสดงไว้ในรูป 3.45 หลังจากเริ่มใช้งานแล้ว 4 เดือน จะรู้ถึงความร้อนที่ผนังเตาออก แล้วระบายความร้อนจากวัสดุทนไฟด้วยอากาศจากภายนอก วัสดุทนไฟเมื่อผ่านไปประมาณ 1 ปีจะถูกแก้วหลอมเหลวกักความร้อนทำให้ความหนาลดลง จึงต้องเปลี่ยนวัสดุทนไฟใหม่ ส่วนที่ถูกกักความร้อนมากที่สุด ได้แก่ วัสดุทนไฟเหนือหัวไฟฟ้า

(2) มาตรการ : เสริมการกันความร้อนของวัสดุทนไฟที่ผนังด้านข้าง เพื่อลดปริมาณการใช้ไฟฟ้าของเตา อย่างไรก็ตาม จะต้องไม่ทำให้เกิดอัตราของเสียของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นเนื่องจากการกักความร้อนวัสดุทนไฟ และต้องไม่ทำให้อายุการใช้งานของเตาสั้นลง สำหรับเป้าหมายนี้ได้ดำเนินการมาตรการโดยเปลี่ยนวิธีกักความร้อนให้เหมาะสมกับสภาพการกักความร้อนวัสดุทนไฟที่ผนังด้านข้าง และเปลี่ยนระยะเวลาการรู้ถึงความร้อน โดยรูปธรรมแล้วจะเสริมฉนวนความร้อนโดยเปลี่ยนเป็นวิธี “ก่อดินยาว” จนถึงบริเวณ B ดังรูป 3.46 และเลื่อนช่วงเวลารู้ถึงความร้อนส่วนบนออกไปอีก 1 เดือนเป็น 5 เดือน และคงอุณหภูมิความร้อนส่วน B ไว้จนถึงสุดท้ายโดยไม่รื้อออก

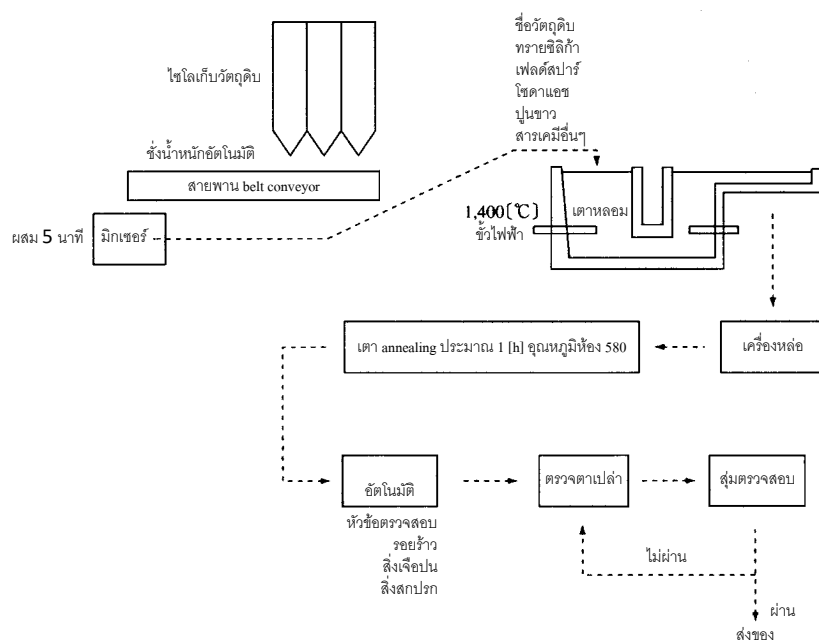
(3) ผลลัพธ์ : สภาพการกักความร้อนหลังปรับปรุงแสดงไว้ในเส้นประในรูป 3.46 โดยวัสดุทนไฟที่ผนังเตาจะมีถูกกักความร้อนสม่ำเสมอมากขึ้นกว่าเดิม (รูป 3.45) จนถึงด้านล่างของพื้นผิวที่สัมผัสกับแก้วหลอมเหลว

ตอนที่ 2 บทที่ 3 ทฤษฎีการเผาไหม้

นอกจากนั้น ยังไม่เกิดผลิตภัณฑ์ของเสียที่เกิดจากการกัดกร่อนวัสดุทนไฟ และอายุการใช้งานของเตาก็ไม่เปลี่ยนแปลง

3. ประสิทธิภาพ

ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อปี	4,575,000 [kWh/y] → 4,501,800 [kWh/y]
ปริมาณไฟฟ้า	73,200 [kWh/y]
เงื่อนไข	$73,200 \times 12 = 88$ [หมื่น/y]
มูลค่าเงินลงทุนปรับปรุง	2 [หมื่นบาท/ปี]
(ระยะเวลาคืนทุน	0.02 ปี)



รูปที่ 3.44 กระบวนการผลิตขวดแก้ว

รูปที่ 3.45 วิธีก่ออิฐกันความร้อนก่อนปรับปรุง กับสภาพการกัดกร่อนวัสดุทนไฟ	รูปที่ 3.46 วิธีก่ออิฐกันความร้อนหลังปรับปรุง กับสภาพการกัดกร่อนวัสดุทนไฟ

3.10 วิธีการเผาไหม้และอุปกรณ์การเผาไหม้

3.10.1 อุปกรณ์เผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซ

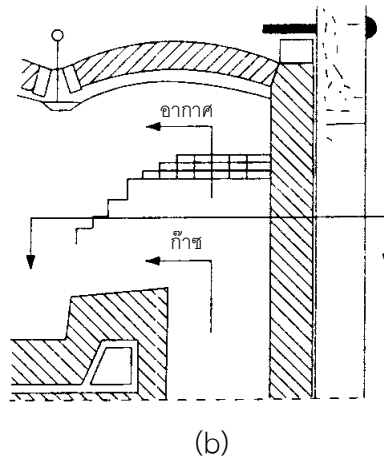
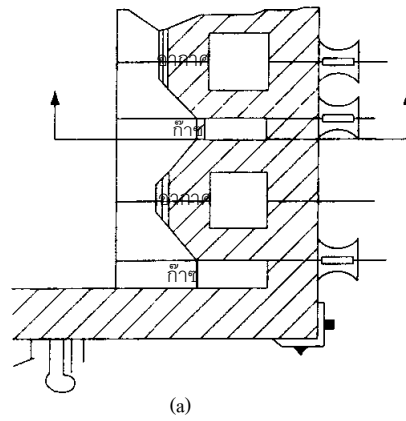
เชื้อเพลิงก๊าซสามารถผสมกับอากาศได้ง่าย และด้วยการปรับอัตราส่วนอากาศ จะสามารถสร้างบรรยากาศภายในเตาให้มีลักษณะออกซิเดชันหรือรีดักชันก็ได้ นอกจากนี้ ยังสามารถสร้างให้เกิดเปลวไฟ Luminous flame หรือ Non-luminous flame ก็ได้ ขึ้นอยู่กับวิธีการผสมเชื้อเพลิงกับอากาศ

เมื่อแบ่งประเภทของ Gas Burner ตามวิธีการผสมก๊าซกับอากาศสำหรับเผาไหม้ จะแบ่งได้เป็น (1) Diffusion Burner (2) Partially premixed Burner (3) Fully premixed Burner โดย Diffusion Burner บางครั้งก็เรียกว่า External mixing Burner ซึ่งจะผสมก๊าซกับอากาศสำหรับเผาไหม้ภายนอก Burner แล้วจึงเผาไหม้ เนื่องจากภายใน Burner จะไม่เกิดก๊าซผสมที่เผาไหม้ได้ ดังนั้น จึงไม่มีอันตรายจากการเกิดเปลวไฟวิ่งย้อนกลับ (Backfire) รวมทั้งสามารถ Preheat ทั้งก๊าซเชื้อเพลิงและอากาศให้มีอุณหภูมิสูงได้ จึงเป็น Gas Burner ที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม ส่วน Premixed Burner เทียบกับ Diffusion Burner แล้วจะสามารถเผาไหม้ที่ภาระความร้อนสูงได้ และสามารถให้เปลวไฟที่มีอุณหภูมิสูงได้ แต่จะเกิด Backfire และ Blow off (เปลวไฟดับเมื่อเพิ่มอัตราการเผาไหม้)ได้ง่ายกว่า รวมทั้งเปลวไฟอาจมีเสถียรภาพต่ำ ดังนั้น Premixed Burner จึงต้องมีโครงสร้างของ Burner ที่คำนึงถึงการรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟด้วย

(1) Diffusion Burner

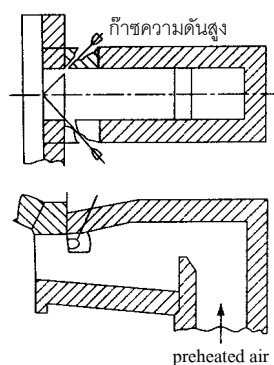
(ก) รูปร่างของ Port

กรณีที่จะใช้ก๊าซที่มีค่าความร้อนต่ำ เช่น Blast furnace gas หรือ Producer gas ใน Kiln จะทำการติดตั้งโครงสร้างของปากท่อพ่นไฟที่ทำจากวัสดุเดียวกับที่ทำเตาที่ผนังเตา แล้วพ่นอากาศกับก๊าซออกจากปากท่อคนละอัน ให้ผสมกันภายในเตา แล้วทำให้เผาไหม้ ปากท่อนี้เรียกว่า Gas port ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.47 โดยรูปที่ 3.47 (a) เป็น Port ที่ใช้เมื่อจะ Preheat ทั้งอากาศและก๊าซ และรูปที่ 3.43 (b) จะใช้ในกรณีที่พ่นก๊าซที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำออกมาทางด้านล่างของอากาศ แล้วให้แรงลอยตัวของก๊าซพาตัวเองขึ้นไปผสมให้เข้ากับอากาศ



รูปที่ 3.47 Gas port

อย่างไรก็ตาม กรณีที่จะเผาก๊าซที่มีค่าความร้อนสูง เช่น ก๊าซธรรมชาติ จะใช้วิธีพ่น Jet ความเร็วสูงออกจาก Nozzle ที่มีปากขนาดเล็กในรูปที่ 3.48 เข้าไปในเตา ในกรณีนี้ไม่ต้อง preheat ก๊าซเพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้ก๊าซสลายตัวเนื่องจากความร้อน และในกรณีนี้ยังสามารถใช้วิธีควบคุมปริมาณอากาศให้เกิดเปลวไฟ luminous flame เพื่อเร่งการถ่ายเทความร้อนภายในเตาได้อีกด้วย



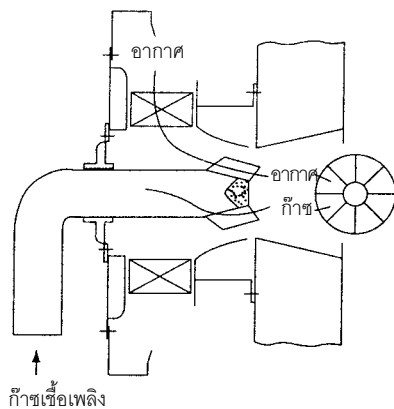
รูปที่ 3.48 gas port (กรณีที่เผาก๊าซที่มีค่าความร้อนสูง)

(ข) รูปร่างของ Nozzle

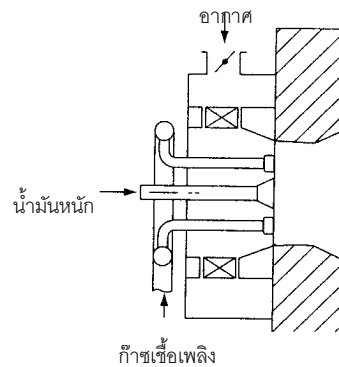
ในหม้อไอน้ำเนื่องจากไม่ต้องการอุณหภูมิสูงเป็นพิเศษ จึงนิยมใช้ Diffusion Burner ซึ่งมีความปลอดภัยสูง โดยมีการใช้ Blower ในการส่งก๊าซและอากาศด้วยความดันสูงเพื่อรักษาความดันภายในเตาให้เหมาะสม

นอกจากนี้ เนื่องจากในหม้อไอน้ำ เตาจะถูกล้อมรอบด้วยผนังที่ระบายความร้อนด้วยน้ำ ดังนั้น Burner สำหรับหม้อไอน้ำยังต้องมีการป้องกันเปลวไฟที่เหมาะสมอีกด้วย รูปร่างที่ใช้กันได้แก่ แบบ Gun แบบ Ring แบบ Spud แบบ Annular เป็นต้น รูปที่ 3.49 เป็นแบบที่เรียกว่า Centre fire (หรือแบบ Gun) ซึ่งเหมาะสมกับกรณีที่จะพ่นก๊าซด้วยความดันต่ำ และเพื่อให้สามารถปรับภาระความร้อนได้ในช่วงกว้าง จึงใช้วิธีเผาไหม้ผสมกันระหว่างก๊าซและน้ำมันหนัก รูปที่ 3.50 เป็นแบบที่เรียกว่า Multi-lance (หรือแบบ Multi-spud) ซึ่งเป็น Burner มีท่อ Lance หลายท่อขนานกันยื่นออกมาจาก Gas ring header เข้าไปใน Throat และจะพ่นก๊าซแผ่กว้างออกมาจากปากพ่นที่ปลายท่อ Lance แล้วเผาไหม้ อากาศสำหรับเผาไหม้จะพ่นออกมาจาก Throat ให้เกิดการ Swirling มาผสมกับ Jet ของก๊าซ Burner นี้ใช้สำหรับก๊าซที่มีค่าความร้อนสูง ส่วน Burner สำหรับก๊าซที่มีค่าความร้อนต่ำนั้น ถ้ามีภาระความร้อนเท่ากันจะต้องใช้ปริมาณก๊าซมากกว่า และมีอากาศสำหรับเผาไหม้น้อยกว่า ดังนั้นเพื่อให้ก๊าซกับอากาศผสมกันได้ดี จึงต้องมีโครงสร้างเป็นพิเศษ

Burner สำหรับอุตสาหกรรมจะต้องรองรับเงื่อนไขของวัตถุที่จะให้ความร้อนต่างๆ ที่แตกต่างกัน เช่น บรรยากาศ อุณหภูมิ เงื่อนไขการให้ความร้อน เป็นต้น ดังนั้น จึงมี Burner หลายชนิดจำหน่ายในท้องตลาด สิ่งที่สำคัญคือ การคัดเลือกใช้ Burner ที่เหมาะสมกับวัตถุประสงค์การใช้งาน



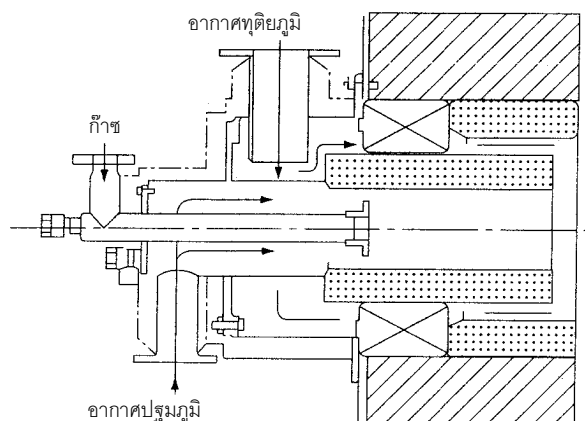
รูปที่ 3.49 Burner แบบ Center fire
(สำหรับความดันต่ำ)



รูปที่ 3.50 Burner รูป Multi-lance

เปลวไฟของการเผาไหม้ก๊าซเชื้อเพลิงเมื่อเทียบกับเปลวไฟของน้ำมันแล้ว โดยทั่วไป จะมีอัตราการแผ่รังสีของเปลวไฟต่ำกว่า ดังนั้น ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจึงต่ำกว่าด้วยการแผ่รังสีจากเปลวไฟจะประกอบด้วยรังสีจากก๊าซ เช่น CO_2 , H_2O และการแผ่รังสีจากของแข็ง แต่เนื่องจากอัตราการแผ่รังสีของเปลวไฟจะมีค่าต่ำเพียง 0.15-0.25 ดังนั้น การทำให้มีค่าเทียบเท่ากับเปลวไฟจากน้ำมัน หรือตั้งแต่ 0.5 ขึ้นไป จะต้องทำให้เกิดอนุภาคของคาร์บอนขึ้นจำนวนมาก จึงมีการพัฒนา Luminous flame Burner ขึ้นมาเพื่อตอบสนองวัตถุประสงค์นี้ รูปที่ 3.51 แสดงโครงสร้างของ Luminous

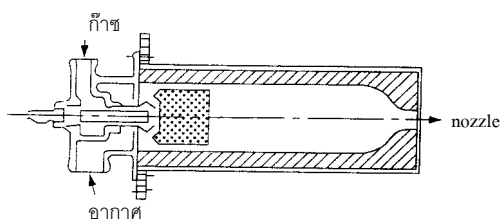
flame Burner ซึ่งใช้วิธีการเผาไหม้สองชั้น (Two stage combustion) โดยชั้นที่หนึ่งจะเผาไหม้ภายใต้สภาวะอากาศค่อนข้างไม่เพียงพอ เพื่อให้เกิดอนุภาคของคาร์บอนขึ้น และชั้นที่สองจะเผาไหม้สมบูรณ์



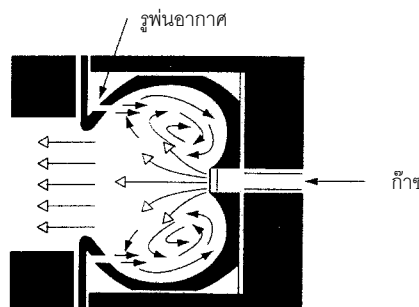
รูปที่ 3.51 โครงสร้างของ Luminous flame Burner

รูปที่ 3.52 แสดง High speed Burner ซึ่งจะพ่นก๊าซอุณหภูมิสูงออกมาด้วยความดันสูง แล้วให้ความร้อนด้วยการพาความร้อน โดยมีอัตราการค่าความร้อน 10^7 - 10^8 kJ/(m³·h) หรือสูงกว่า มีความเร็วของก๊าซเชื้อเพลิงที่พ่นออกมา 100-150 m/sec หรือสูงกว่า ข้อดีของวิธีนี้มีหลายประการ เช่น ห้องเผาไหม้มีขนาดกะทัดรัดเนื่องจากการเผาไหม้จะดำเนินไปด้วยภาวะความร้อนสูงและความเร็วสูง นอกจากนี้ยังเกิดเขม่าน้อย ทำให้วัตถุที่ต้องให้ความร้อนได้รับความเสียหายน้อย ฯลฯ แต่ปัญหาที่สำคัญอย่างยิ่งคือ เสถียรภาพของเปลวไฟ

รูปที่ 3.53 แสดง High load Burner ซึ่งใช้ในเตาให้ความร้อนแบบท่อ เรียกว่า Single troidal Burner ภายใน Burner ซึ่งทำจากวัสดุทนไฟ การป้อนอากาศจะพ่นจากปากพ่นจำนวนมากที่ติดตั้งอยู่ใกล้ๆ กับปากพ่นของ Burner เลียบตามผนังในทิศทางสวนกับทิศทางของเปลวไฟ และทำการเผาไหม้ภายใต้สภาวะภาวะความร้อนสูงโดยสร้างให้เกิดกระแสสวน Troidal ขึ้นตามรูป เนื่องจากก๊าซอุณหภูมิสูงจะพ่นเข้าไปภายในเตาด้วยความเร็วสูง จึงไปช่วยเร่งการหมุนเวียนของก๊าซภายในเตา



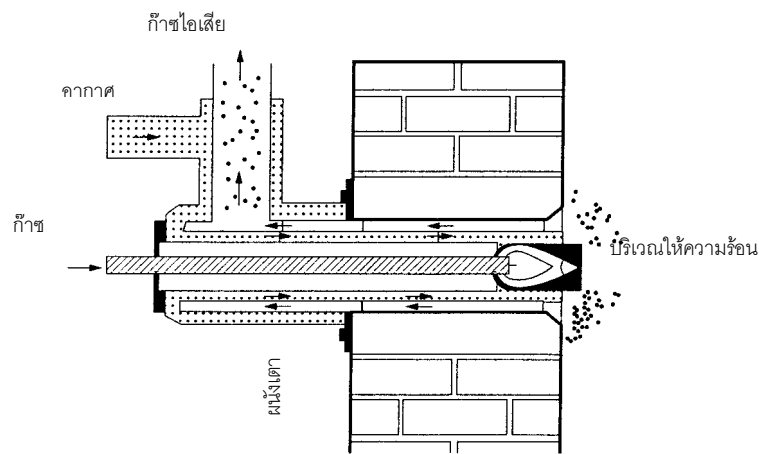
รูปที่ 3.52 high speed Burner



รูปที่ 3.53 single troidal Burner

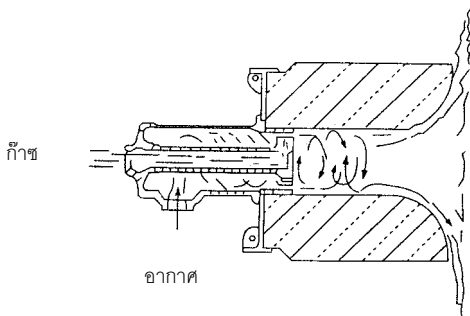
ทำให้มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น และการกระจายอุณหภูมิภายในเตามีความสม่ำเสมอ จึงสามารถหลีกเลี่ยงการได้รับความร้อนเฉพาะที่ และผนังของ Burner จะมีอุณหภูมิค่อนข้างต่ำกว่าอุณหภูมิของเปลวไฟด้วยอิทธิพลของกระแสอากาศเย็น

ในอุปกรณ์เผาไหม้อุณหภูมิสูง เนื่องจากความร้อนสูญเสียไปกับไอเสียจะมีค่าสูง จึงต้องมีการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Recuperator) ไว้ระหว่างท่อไอเสีย แล้วใช้ไอเสียในการ preheat อากาศสำหรับเผาไหม้ แต่มีข้อเสียคือต้องลงทุนสูง รูปที่ 3.54 แสดง Recuperative Burner ซึ่งมีท่อไอเสียและ Recuperator อยู่ในตัว เป็น Burner ที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อลดความยุ่งยาก และต้นทุนด้านอุปกรณ์ ซึ่งสามารถอนุรักษ์พลังงานได้ 20-50% โดย Burner ชนิดนี้สามารถใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงได้ด้วย แต่จะเหมาะกับก๊าซมากกว่า เนื่องจากสามารถใช้ Return flow ที่กลับมายัง Burner ได้อย่างสะดวก ควบคุมง่าย และซ่อมบำรุงสะดวก

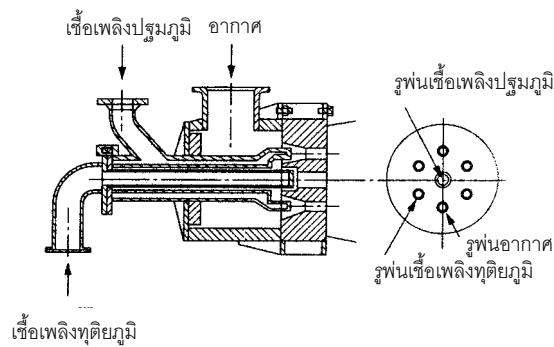


รูปที่ 3.54 recuperative Burner

รูปที่ 3.55 แสดง Disk-shaped flame Burner ซึ่งมีเปลวไฟแผ่เลียบไปตาม Burner tile เป็นรูปจาน เพื่อให้อากาศเกิดการ Swirling อย่างมาก Burner แบบนี้ใช้เพื่อให้ความร้อนด้วยการแผ่รังสีจากผนังเตา ซึ่งเปลวไฟจะไม่สัมผัสโดยตรงกับวัตถุที่ต้องการให้ความร้อน หรือใช้ถ่ายเทความร้อนโดยตรงด้วยการแผ่รังสีและการนำความร้อนโดยการให้ก๊าซเผาไหม้สัมผัสกับวัตถุที่ต้องการให้ความร้อนด้วยความเร็วสูง เป็นต้น รูปที่ 3.56 แสดง Variable flame Burner ซึ่งสามารถปรับรูปร่างของเปลวไฟได้ตามวัตถุประสงค์การใช้งานว่าจะให้ความร้อนแก่ชิ้นงานแบบใด โดยแบ่งการป้อนเชื้อเพลิงเป็นเชื้อเพลิงปฐมภูมิและเชื้อเพลิงทุติยภูมิ และควบคุมรูปร่างเปลวไฟได้ด้วยการปรับอัตราไหลของเชื้อเพลิงปฐมภูมิและทุติยภูมิ นอกจากนี้ ยังมี Burner ที่ปรับรูปร่างของเปลวไฟได้ด้วยการเลื่อน Nozzle หน้า-หลังอีกด้วย



รูปที่ 3.55 Disk-shaped flame Burner



รูปที่ 3.56 Variable flame Burner

(2) Partially premixed Burner

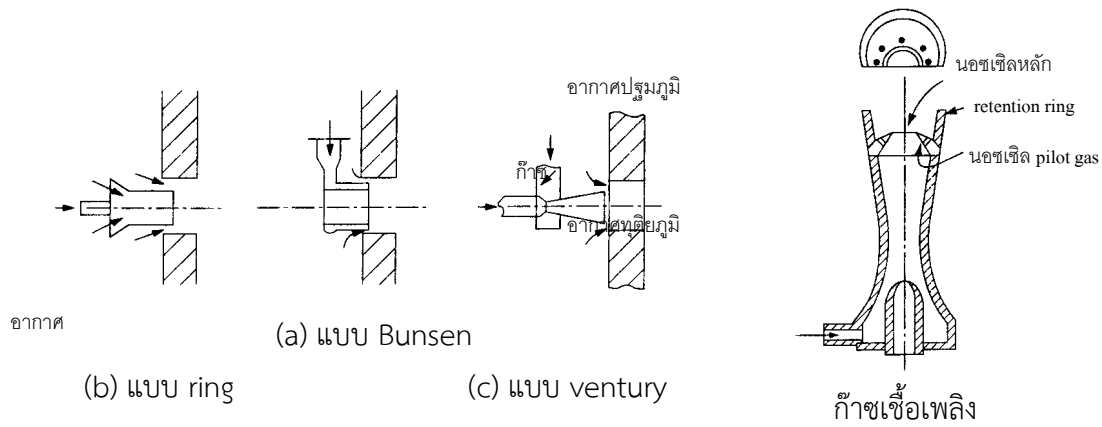
หมายถึง Burner แบบ Semi-premixed ซึ่งจะผสมอากาศสำหรับเผาไหม้ส่วนหนึ่งกับเชื้อเพลิงก่อน แล้วจึงพ่นออกจาก Burner ส่วนอากาศที่เหลือจะป้อนเข้าไปช่วยการเผาไหม้เป็นอากาศทุติยภูมิ ตัวอย่างเช่น Bunsen Burner เป็นต้น

การผสมก๊าซกับอากาศภายใน Burner มีทั้งวิธีพ่นอากาศออกมาด้วยความเร็วสูงเพื่อให้ดูดก๊าซเข้าไป กับวิธีพ่นก๊าซออกมาด้วยความเร็วสูงเพื่อให้ดูดอากาศเข้าไป

Burner แบบพ่นอากาศออกมาด้วยความเร็วสูงเพื่อให้ดูดก๊าซเข้าไป จะใช้ในกรณีที่ก๊าซมีความดันต่ำ จึงใช้อากาศอัดความดันในการดึงก๊าซเข้ามาทำการ Premix และมีประสิทธิภาพในการเพิ่มความดันของ Premixed gas

ส่วน Burner แบบพ่นก๊าซออกมาด้วยความเร็วสูงเพื่อให้ดูดอากาศเข้าไป มักพบในเตาเผาภายในครัวเรือนต่างๆ รูปที่ 3.57 แสดง Gas Burner แบบต่างๆ สำหรับใช้งานภายใต้ความดันบรรยากาศ รูปที่ 3.58 แสดง Flame retention Burner ที่ถูกพัฒนาขึ้นที่สหรัฐอเมริกา ซึ่งกล่าวกันว่ามีสมรรถนะสูงโดยที่ปลายของ Burner จะมีนอซเซิลหลักของ Burner อยู่ และรอบๆ นั้นจะมีนอซเซิล Pilot gas อยู่ และรอบๆ ออกไปอีกจะติดตั้ง Retention ring ซึ่ง Retention ring นี้มีประสิทธิภาพสูงมากในการรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ แม้ว่าก๊าซผสมจะมีความเร็วสูงแต่จะไม่เกิดการ Blow off ทำให้ขอบเขตของการเผาไหม้อย่างมีเสถียรภาพเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

เมื่อเผาไหม้ก๊าซปริมาณ 10-30% ของก๊าซที่ออกมาจากนอซเซิลหลักของ Burner ด้วย Pilot Burner แล้ว จะสามารถเพิ่มปริมาณการเผาไหม้ของ Burner หลักได้เป็น 10 เท่าของเดิม รวมทั้งภาระความร้อนของห้องเผาไหม้ก็เพิ่มขึ้นสูงเป็น 20 GJ/(m³·h) ดังนั้น จึงนิยมใช้อย่างแพร่หลายในเตาอุตสาหกรรมที่ต้องการอุณหภูมิสูง



รูปที่ 3.57 Burner แบบต่างๆ สำหรับใช้งานใต้ความดัน
บรรยากาศ

รูปที่ 3.57 Retention flame
Burner

ใน Partially premixed Burner ปริมาณอากาศที่นำไป Premix นั้นจะเท่ากับประมาณ 30-80% ของอากาศสำหรับเผาไหม้ และด้วยการปรับปริมาณอากาศปฐมภูมิ จะสามารถปรับความยาวและความสว่างของเปลวไฟได้ สำหรับ Premixed gas นั้น เกือบทุกกรณีจะกลายเป็นก๊าซผสมที่สามารถเผาไหม้ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องคำนึงถึง Backfire ด้วย นอกจากนี้ อากาศที่เหลือที่ยังขาดอยู่ทั้งหมดจะป้อนเข้าไปเป็นอากาศทุติยภูมิโดยดูดผ่าน Draft ภายในเตา

(3) Fully premixed Burner

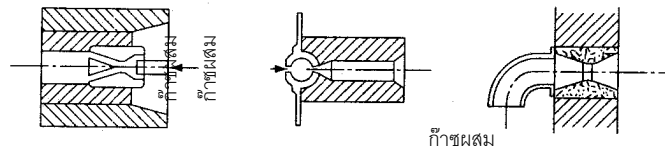
บางครั้งก็เรียกว่า Internal mixing Burner เป็นการเผาไหม้โดยใช้อากาศสำหรับเผาไหม้ 100% เป็นอากาศปฐมภูมิ ทำการ Premix ภายในตัว Burner แล้วจึงนำไปเผาไหม้ จึงไม่ต้องใช้อากาศทุติยภูมิ และสามารถเผาไหม้ได้ด้วยความเร็วสูง ดังนั้น จึงสามารถทำให้ห้องเผาไหม้มีขนาดเล็กได้ และสามารถเผาไหม้ที่ภาระความร้อนสูงได้ แต่ในทางกลับกัน ก็มีอันตรายจาก Backfire มากที่สุด จึงต้องคิดหามาตรการป้องกันไว้ด้วย

การ Premix ก๊าซกับอากาศสามารถแบ่งได้เหมือนกับ Partially premixed Burner ดังต่อไปนี้

(ก) Burner แบบใช้ก๊าซความดันสูงดูดอากาศเข้ามา

Burner แบบนี้จะใช้ Venture tube และพลังงานจลน์ของ Gas jet ในการดูดอากาศเข้าไปผสมกัน ดังนั้น ก๊าซจึงต้องมีความดันสูงพอที่จะดูดอากาศเข้ามา ความดันของก๊าซที่ต้องใช้จะขึ้นอยู่กับประเภทของก๊าซ ซึ่งเกือบแปรผันตรงกับค่าความร้อนของก๊าซ

รูปที่ 3.59 แสดงตัวอย่างของ Fully premixed Burner ซึ่งมีทั้งแบบใช้เปลวไฟสัมผัสกับ Stabilizing block และให้จุดที่สัมผัสนั้นเป็นต้นเพลิงของแข็งสำหรับให้ไฟติด เพื่อให้การเผาไหม้มีเสถียรภาพ หรือแบบใช้ Tunnel block หรือฉาบทนไฟซึ่งรักษาสภาพอุณหภูมิสูงไว้ให้เป็นพื้นผิวสำหรับให้ไฟติด นอกจากนี้ ยังมี Burner แบบที่เผาวัสดุทนไฟรูป Cup ให้ร้อนแดง แล้วใช้ความร้อนที่แผ่รังสีออกมาจากพื้นผิวนั้นอีกด้วย

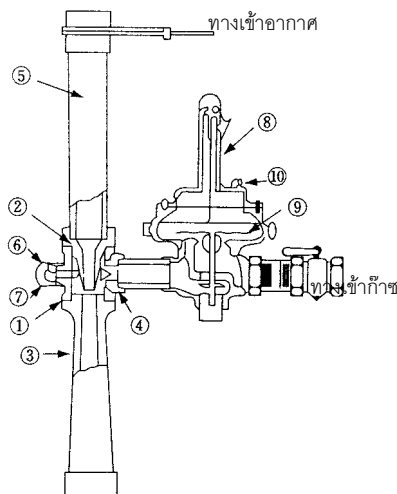


(a) แบบ Stabilizing block (b) แบบ Tunnel block (c) แบบฉาบทนไฟ

รูปที่ 3.59 fully premixed Burner แบบต่างๆ

(ข) Burner แบบใช้อากาศดูดก๊าซเข้ามา

ปริมาณอากาศที่ต้องใช้ในการเผาไหม้ก๊าซ 1 m^3 จะขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซ แต่โดยทั่วไปจะมีปริมาณหลายเท่าของปริมาณก๊าซ ดังนั้น การใช้อากาศดูดก๊าซเข้ามาจึงทำได้ง่ายกว่า และใช้อากาศความดันต่ำในการทำงาน Burner หลักๆ แบบนี้ได้แก่ แบบที่ใช้ Proportional mixer โดยใช้อากาศความดันต่ำที่อัดเข้าไปในการดูดก๊าซเข้ามาผสมกัน รูปที่ 3.60 แสดง Proportional mixer ซึ่งใช้ความดันลบที่เกิดขึ้นเมื่ออากาศความดันต่ำไหลผ่าน Throat ของ Venturi ในการดูดก๊าซที่กลายเป็นความดันบรรยากาศเข้ามาที่ Zero governor เมื่อปรับอัตราส่วนอากาศให้เท่ากับที่กำหนดด้วยวาล์วปรับอัตราส่วนอากาศแล้ว แม้ว่าความดันของอากาศจะเปลี่ยนไป ก็สามารถป้อนก๊าซผสมที่มีอัตราส่วนอากาศคงที่ได้ จึงสามารถปรับอัตราไหลได้ด้วยการปรับความดันของอากาศเท่านั้น โดยทั่วไปความดันของอากาศจะขึ้นอยู่กับความดันของก๊าซผสมที่ต้องการ แต่จะมีค่าประมาณ 3.5-20 kPa

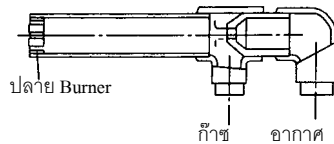


- (1) ข้อต่อดูดก๊าซรูปตัว T
- (2) Nozzle อากาศ
- (3) ท่อ Venturi
- (4) Gas orifice
- (5) ท่อนำอากาศ
- (6) วาล์วปรับอัตราส่วนอากาศ
- (7) ฝาครอบวาล์วในช่องก่อน
- (8) Gas pressure zero governor
- (9) Diaphragm
- (10) รูระบายอากาศ

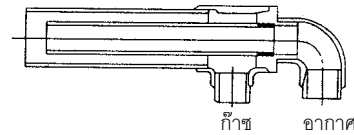
รูปที่ 3.60 Proportional mixer

(ค) Burner แบบอัดความดันทั้งก๊าซและอากาศ

Blast Burner เป็น Burner แบบที่จะกล่าวนี้ เนื่องจากมีการอัดความดันทั้งก๊าซและอากาศ ก๊าซผสมจึงมีความดันสูง ทำให้เกิด Backfire ได้ยากขึ้น และสามารถปรับปริมาณเชื้อเพลิงได้ในช่วงกว้าง Blast Burner มี 2 ประเภทได้แก่ (1) Premixed Burner (2) Nozzle-mix Burner ซึ่งตัวอย่างของแต่ละแบบแสดงไว้ในรูปที่ 3.61 และรูปที่ 3.62



รูปที่ 3.61 Premixed Burner



รูปที่ 3.62 Nozzle-mix Burner

ใน Premixed Burner ก๊าซเชื้อเพลิงจะมีความดันต่ำ แต่เมื่อพ่นอากาศอัดความดันจาก Nozzle อากาศจะดูดก๊าซเข้ามา ทำให้มีก๊าซไหลเข้าไปในท่อผสมมากกว่าปริมาณที่เกิดจากความดันของตัวเอง

ใน Nozzle-mix Burner จะใช้ท่อกลม 2 ชั้นที่มีแกนตรงกัน โดยป้อนก๊าซผ่านท่อนอก และป้อนอากาศผ่านท่อใน ให้ไปผสมกับที่ปลาย Nozzle จึงไม่มีอันตรายจาก Backfire เลย อย่างไรก็ตาม เปลวไฟที่เกิดขึ้นจะมีความยาวมากกว่า Premixed Burner.

3.10.2 อุปกรณ์เผาไหม้เชื้อเพลิงเหลว

1. Evaporating type กับ Spray type

การเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิงอย่างต่อเนื่องในอุตสาหกรรม มีทั้งวิธีใช้ไอระเหยของน้ำมันจากผิวหน้าของเหลวในภาชนะที่เรียกว่า Pan หรือ Pot และก๊าซที่เกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อน มาผสมกับอากาศแล้วนำไปเผาไหม้ ซึ่งเรียกว่า Evaporating combustion กับวิธีฉีดพ่นน้ำมันให้เป็นละอองเล็กๆ แล้วเผาไหม้กลางอากาศ ซึ่งเรียกว่า Spray combustion

เมื่อน้ำมันหนาสลายตัวด้วยความร้อน จะเกิดสารพวกคาร์บอนหลงเหลืออยู่ ดังนั้น ในการเผาไหม้แบบ Evaporating combustion จึงมีคาร์บอนตกตะกอนอยู่ใน pot ทำให้ไม่สามารถเผาไหม้ต่อเนื่องไปได้ ดังนั้น การเผาไหม้แบบ Evaporating combustion จะใช้กับน้ำมันที่ระเหยได้ง่าย เช่น น้ำมันก๊าด น้ำมันเบา ฯลฯ เท่านั้น

ในอุปกรณ์เผาไหม้แบบ Evaporating combustion น้ำมันในภาชนะซึ่งมีการรักษาระดับน้ำมันให้คงที่ จะระเหยกลายเป็นไอ แล้วไปผสมกับอากาศซึ่งเป่าออกมาจาก Blower แล้วเผาไหม้ ดังนั้น เพื่อเร่งการผสมระหว่างอากาศกับก๊าซที่เกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อน จึงมีการติดตั้งท่อกลมสำหรับผสม ซึ่งทำจากแผ่นโลหะที่มีรูพรุน 2 แท่งระหว่างทางผ่านของอากาศ และก๊าซ โดยเส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนาแน่น ตำแหน่ง ฯลฯ ของรูบนแผ่นโลหะที่มีรูพรุน จะมีผลต่อสมรรถนะของอุปกรณ์เผาไหม้ประเภทนี้

turndown ratio ของหัวเผาแบบนี้มีค่าประมาณ 1:5 โดยปริมาณน้ำมันสูงสุดจะเท่ากับประมาณ 10 L/h แต่ในอุปกรณ์ขนาดเล็กจะสามารถทำได้น้อยกว่านี้มาก อุปกรณ์บางชนิดปรับได้ต่ำกว่า 1 L/h

ในการเผาไหม้แบบ Spray combustion เนื่องจากจะต้องทำให้ละอองน้ำมันติดไฟ และเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ภายในบริเวณจำกัด ปัจจัยสำคัญคือเส้นผ่านศูนย์กลางของละอองน้ำมันที่พ่นออกมา ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางละอองน้ำมันนี้จำเป็นต้องมีขนาดไม่เกิน 300 μm ดังนั้น การปรับความหนืดของน้ำมัน และบำรุงรักษา Burner จึงมีความสำคัญ และสมรรถนะของหัวฉีดจะเป็นปัจจัยชี้ขาดประสิทธิภาพของ Burner

เส้นผ่านศูนย์กลางของละอองน้ำมันที่พ่นออกมานั้น ยังมีขนาดเล็กเท่าใด พื้นที่ผิวที่สัมผัสกับอากาศก็ยิ่งเพิ่มขึ้น ทำให้เผาไหม้ได้ดี อย่างไรก็ตาม ในการให้ความร้อนบางกรณีที่ไม่ต้องการเปลวไฟ สั้น สามารถให้ความร้อนด้วยเปลวไฟยาวได้ ก็ไม่จำเป็นต้องใช้ละอองน้ำมันที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมากนัก

2. ประเภทและคุณสมบัติของ Burner น้ำมันหนัก

(ก) การแบ่งประเภท Burner น้ำมันหนัก

เมื่อแบ่งประเภทของ Burner น้ำมันหนักตามวิธีการฉีดเชื้อเพลิง จะแบ่งได้เป็น

(1) แบบไฮดรอลิก (2) แบบ Atomizing (3) แบบ Rotary (แบบกล) ซึ่งแบบไฮดรอลิกเป็นวิธีฉีดน้ำมันอัดความดันผ่านรูเล็กๆ ให้เป็นละออง โครงสร้างจะไม่ซับซ้อน แต่คุณลักษณะในการฉีดเชื้อเพลิงจะด้อยกว่าวิธีอื่น เพื่อให้สามารถฉีดเชื้อเพลิงได้ดียิ่งขึ้นจำเป็นต้องรักษาความหนืดของเชื้อเพลิงให้อยู่ในระดับต่ำ

Atomizing Burner จะใช้ Atomizing medium (อากาศหรือไอน้ำ) ผสมกับน้ำมันที่รูของ Burner แล้วฉีดออกมา มีคุณลักษณะในการฉีดเชื้อเพลิงที่ดีเยี่ยม Burner แบบนี้ยังแบ่งได้อีกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ High pressure atomizing Burner และ Low pressure atomizing Burner.

Rotary Burner จะใช้มอเตอร์หรือเทอร์โบไบนหมุนแกนของ Burner เพื่อให้ น้ำมันเป็นละออง สามารถทำให้มีขนาดกะทัดรัด และมีใช้แพร่หลายในหม้อไอน้ำขนาดกลาง และขนาดเล็ก

Burner น้ำมันมีหลายประเภทตามที่กล่าวมาแล้ว แต่ละประเภทมีคุณลักษณะแตกต่างกัน จึงต้องเลือกใช้ Burner ที่เหมาะสมกับเงื่อนไขการให้ความร้อน โครงสร้างของเตา ฯลฯ ตารางที่ 3.27 แสดงคุณลักษณะของ Burner ชนิดต่าง ๆ

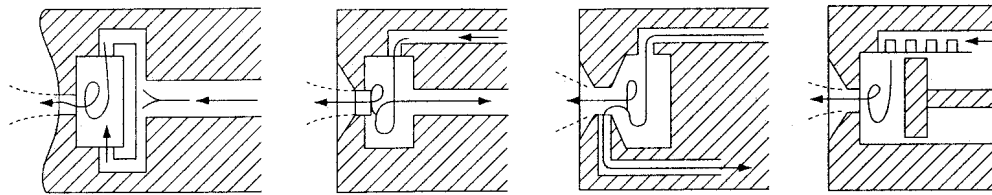
ตารางที่ 3.27 คุณสมบัติและวัตถุประสงค์การใช้งานของ Burner แบบต่างๆ

ประเภทของ burner	ช่วงการใช้งานเชื้อเพลิง [L/h]	มุมฉีดเชื้อเพลิง	turndown ratio	ลักษณะของเปลวไฟ	วัตถุประสงค์การใช้งาน
hydraulic burner	30-3000	ระหว่าง 40-90	แบบ non-return type 1 : 2.0 แบบ return type 1 : 3.0	เป็นเปลวไฟนุ่มกว้าง มีความยาวขึ้นอยู่กับอากาศที่ป้อนเข้าไป แต่ยังคงข้างสั้น	สำหรับกำเนิดไฟฟ้า สำหรับเรือ หม้อไอน้ำขนาดเล็กอื่นๆ ที่กระทำการเปลี่ยนแปลงน้อย
rotary burner	5-1000	ระหว่าง 40-80	1 : 5	มีมุมค่อนข้างกว้าง ปรับความยาวได้สะดวก อากาศที่ป้อนเข้าไป	หม้อไอน้ำขนาดกลางและเล็กที่กระทำการเปลี่ยนแปลง
high pressure atomizing burner	2-2000	ประมาณ 30	1 : 10	มีเปลวไฟนุ่มแคบที่สุด แบบ internal mixing type จะมีเปลวไฟนุ่มนวลกว่า	เตาเผาเนื้อ เคาะหลอมแก้ว cement kiln ฯลฯ ที่ต้องการความร้อนอย่างสม่ำเสมอ
low pressure atomizing burner	2-500	ระหว่าง 30-60	1 : 8	มีมุมค่อนข้างแคบ ความยาวน้อย แต่สามารถปรับได้สะดวกป้อนอุณหภูมิและทุกอุณหภูมิ	อุปกรณ์ให้ความร้อนขนาดค่อนข้างเล็ก เช่น เตาขนาดเล็ก heat treatment ฯลฯ

(ข) แบบไฮดรอลิก

Hydraulic Burner ประกอบด้วยแบบ Non-return type Burner และ Return type Burner ซึ่งมีหลักการทำงานดังรูปที่ 3.63

Hydraulic Burner ทุกแบบจะมีห้อง Vortex chamber ซึ่งน้ำมันอัดความดันจะไหลเข้ามาจากช่องบากหลายแห่งตามทิศทาง Eccentric ทำให้เกิดกระแสนวนทั่วทั้งห้อง รูปที่ 3.63 (a) เป็นแบบ Non-return type ซึ่งน้ำมันที่ไหลเข้ามาในห้อง Vortex chamber ทั้งหมดจะถูกพ่นออกไปทาง Nozzle ดังนั้นการปรับปริมาณน้ำมันจึงทำได้ด้วยการลดความดันของน้ำมันเท่านั้น



(a) แบบ Direct injection (b) แบบ Return type (c) แบบ Return type (d) แบบ Plunger type

รูปที่ 3.63 หลักการทำงานของ Hydraulic Burner

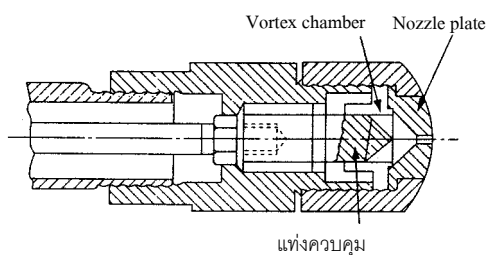
แต่การกระทำดังกล่าวจะทำให้ฉีดพ่นเชื้อเพลิงได้ไม่ดี จึงไม่สามารถลดปริมาณการเผาไหม้ลงได้มากนัก

Burner ในรูปที่ 3.63 (d) จะมีผนังด้านหนึ่งของห้อง Vortex chamber สามารถเคลื่อนที่ได้ เมื่อปรับความดันของน้ำมันเพื่อเพิ่มหรือลดปริมาณน้ำมัน จะเลื่อนผนังนี้ไปทางขวาหรือซ้ายเพื่อปรับพื้นที่ทางผ่านของน้ำมันเข้าไปยังห้อง Vortex chamber เพื่อให้ความเร็วกระแสน้ำมันที่ไหลเข้าไปมีค่าเกือบคงที่ เมื่อทำเช่นนี้แล้ว การ Swirling ในห้อง Vortex chamber จะมีความสม่ำเสมอคงที่ แม้น้ำมันจะมีความดันต่ำลงการฉีดเชื้อเพลิงก็ยังทำได้ดีเหมือนเดิม

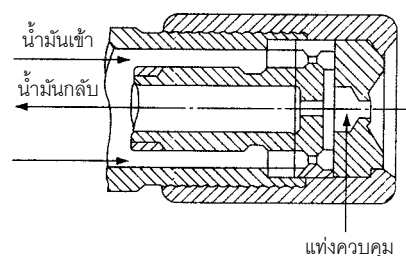
รูปที่ 3.64 แสดงโครงสร้างของ Non-return type hydraulic Burner ซึ่ง Burner แบบนี้ สามารถออกแบบให้มีมุมฉีดเชื้อเพลิงกว้างระหว่าง 40° ถึง 90° มุมฉีดเชื้อเพลิงจะมีการเปลี่ยนแปลงได้เล็กน้อยขึ้นอยู่กับความดันและความหนืดน้ำมัน

ปริมาณเชื้อเพลิงที่ฉีดจะเกือบแปรผันตามรากที่สองของความดันน้ำมัน หากเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดมีขนาดคงที่ จะมี turndown ratio ประมาณ $1/2$ เนื่องจากถ้าความดันน้ำมันต่ำกว่า 0.5 MPa แล้วการฉีดเชื้อเพลิงจะทำได้ไม่ดีอย่างยิ่ง

รูปที่ 3.65 แสดงโครงสร้างของ Return type hydraulic Burner ซึ่งความดันน้ำมันขาเข้าจะถูกรักษาค่าคงที่ ดังนั้น เมื่อเปิดวาล์วน้ำมันย้อนกลับเพื่อลดปริมาณฉีด-เผาไหม้เชื้อเพลิง ความดันในห้อง Vortex chamber จะลดต่ำลง ทำให้ความเร็วที่น้ำมันไหลเข้ามาในห้องมีค่าเพิ่มขึ้น ความเร็วในการ Swirling จากหัวฉีดของน้ำมันจะเพิ่มขึ้น จึงฉีดเชื้อเพลิงได้ดี Burner แบบนี้มี Turndown ratio ประมาณ $1/3$ ซึ่งในกรณีนี้ เมื่อปริมาณน้ำมันลดลง มุมฉีดเชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้นจาก 60° เป็น 85°



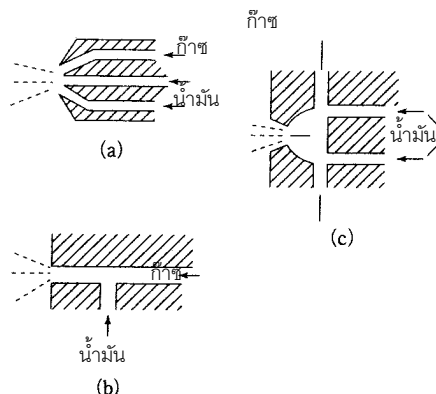
รูปที่ 3.64 หัวฉีดแบบ Non-return hydraulic type



รูปที่ 3.65 หัวฉีดแบบ Non-return hydraulic type

(ค) High pressure atomizing Burner

เป็น Burner ที่ใช้อากาศหรือไอน้ำความดันประมาณ 0.2-1.0 MPa เป็นตัวกลางฉีดน้ำมัน มีคุณลักษณะในการฉีดเชื้อเพลิงได้ดีกว่าแบบไฮดรอลิก หลักการทำงานแสดงไว้ในรูปที่ 3.66 (a), (b) และ (c) โดยรูปที่ 3.66 (a) เรียกว่า แบบ External mixing type ซึ่งจะผสมน้ำมันกับตัวกลางฉีดเชื้อเพลิงที่ปลาย Burner ส่วนรูปที่ 3.66 (b) และ (c) จะมีห้องผสมอยู่ในตัว Burner ซึ่งน้ำมันและตัวกลางจะผสมกันในห้องนี้ แล้วจึงฉีดออกไปภายนอก จึงเรียกว่า แบบ Internal mixing ซึ่งในกรณีส่วนใหญ่แล้ว

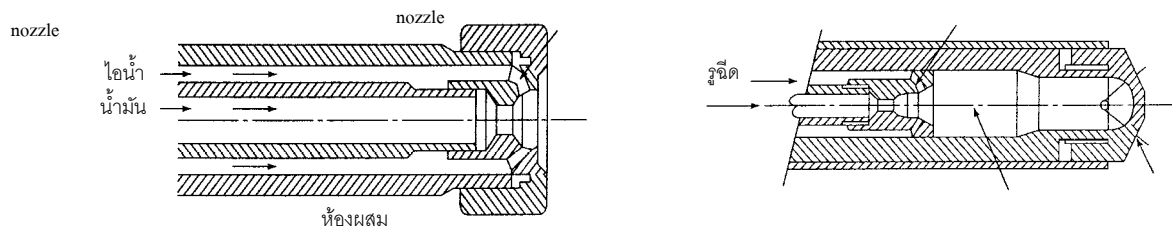


รูปที่ 3.66 หลักการทำงานของ Atomizing Burner

ห้องผสมจะมีโครงสร้างที่ทำให้เกิด Swirling flow และสามารถฉีดเชื้อเพลิงที่มีความหนืดสูงได้โดยใช้ตัวกลางปริมาณค่อนข้างน้อย

สำหรับตัวกลางฉีดเชื้อเพลิง กรณีที่สามารถหาไอน้ำที่มีความดันเท่ากับที่ต้องการได้ ได้จากหม้อไอน้ำ หากใช้ไอน้ำจะได้เปรียบกว่า เนื่องจากไอน้ำสามารถฉีดเชื้อเพลิงที่มีความหนืดสูงได้ดี และเหมาะกับการใช้งานที่ต้องการขีดความสามารถ (Capacity) สูง คุณลักษณะของเปลวไฟที่ฉีดเชื้อเพลิงด้วยไอน้ำจะมีความสว่างสูงกว่าบ้าง

ปริมาณตัวกลางที่ใช้ กรณีที่ใช้อากาศจะต้องใช้ประมาณไม่กี่ % ของปริมาณอากาศตามทฤษฎี ถ้าใช้ไอน้ำจะต้องใช้ 20-60% ของเชื้อเพลิง



รูปที่ 3.67 หัวฉีดแบบ External mixing type

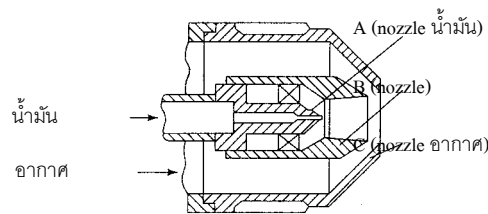
รูปที่ 3.68 หัวฉีดแบบ Internal mixing type

High pressure atomizing Burner จะมีเปลวไฟนุ่มแคบ และมีเปลวไฟยาว ดังนั้น วัตถุประสงค์การใช้งานจึงถูกจำกัด อย่างไรก็ตาม ในระยะหลังมีการผลิต Burner แบบบูรพูนกันมากขึ้น ข้อนี้จึงไม่ใช่ปัญหาอีกต่อไป

เนื่องจากใช้ตัวกลางฉีดเชื้อเพลิงที่มีความสูง จึงมีคุณลักษณะในการฉีดเชื้อเพลิงดีมาก แม้น้ำมันจะมีความหนืดสูงบ้างก็สามารถใช้งานได้ และมี Turndown ratio ประมาณ 1/10

(ง) Low pressure atomizing Burner

เป็น Burner ที่ใช้อากาศหรือไอน้ำความดันประมาณ 4-20 kPa เป็นตัวกลางฉีดเชื้อเพลิง นิยมใช้ในอุปกรณ์ความร้อนขนาดค่อนข้างเล็ก กล่าวคือ ไม่เกิน 500 L/h ปริมาณอากาศที่ใช้การฉีดเชื้อเพลิงจะมีปริมาณค่อนข้างมากเทียบกับแบบ High pressure atomizing type กล่าวคืออยู่ในช่วง 30-50% ของปริมาณอากาศทั้งหมดที่ต้องใช้ในการเผาไหม้ โครงสร้างของ Burner ชนิดนี้แสดงไว้ในรูปที่ 3.69 โดยแบ่งอากาศปริมาณมากออกเป็น 2 ส่วน แล้วผสมอากาศปฐมภูมิ และอากาศทุติยภูมิในการฉีดน้ำมัน อัตราส่วนระหว่างอากาศปฐมภูมิ และทุติยภูมินี้ สามารถปรับได้สะดวกด้วยคันบังคับ

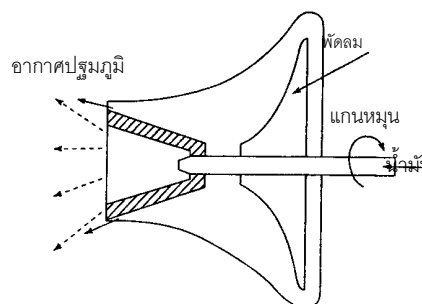


รูปที่ 3.69 หัวฉีดแบบ High pressure atomizing type

Burner แบบนี้ยังมี Proportional adjustment Burner ซึ่งสามารถปรับปริมาณน้ำมันกับปริมาณอากาศให้แปรผันตามกันโดยอัตโนมัติได้ด้วยคันบังคับเพียง 1 แท่ง Burner ประเภทนี้สามารถควบคุมการเผาไหม้อัตโนมัติได้สะดวก และมี Turndown ratio ประมาณ 1/8 จึงเหมาะกับเตาที่จำเป็นต้องปรับสภาพบรรยากาศ

(จ) Rotary Burner

ทำงานโดยปล่อยน้ำมันให้ไหลไปตามวัตถุที่หมุน แล้วใช้แรงหนีศูนย์กลางในการสาดน้ำมันไปในอากาศแล้วนำไปเผาไหม้ หลักการทำงานแสดงไว้ในรูปที่ 3.70 น้ำมันที่ป้อนเข้าไปในเพลากลวงซึ่งหมุนด้วยความเร็วรอบ 3500-4000 rpm จะแผ่เป็นชั้นเคลือบผิวด้านใน Nozzle ทรงรูปถ้วยแล้วกระจายออกจากขอบถ้วยตามแนวเส้นสัมผัส อากาศปฐมภูมิจะป้อนเข้าไปในน้ำมัน แต่เนื่องจากการป้อนด้วยพัดลม Fan จะไม่สามารถป้อนได้เกินกว่า 7-20% ของอากาศสำหรับเผาไหม้ อากาศที่เหลืออีกไม่น้อยกว่า 80% จึงต้องป้อนเข้าไปในห้องเผาไหม้จากช่องทางเข้าอากาศทุติยภูมิ



รูปที่ 3.70 หลักการทำงานของ Rotary Burner

ความดันน้ำมันจะเท่ากับความดัน flow-down ตามธรรมชาติ กล่าวคือประมาณ 20-100 kPa และมี turndown ratio ประมาณ 1/5 ซึ่งถือว่าปรับได้ช่วงกว้าง อย่างไรก็ตาม เมื่อน้ำมันมีปริมาณน้อยลง การฉีดเชื้อเพลิงจะทำได้ไม่ดีด้วย เชื้อเพลิงที่เหมาะสมคือน้ำมันหนักประเภท 1 และ 2

มุมฉีดเชื้อเพลิงสามารถปรับได้ในช่วง 40-80° โดยปรับความเร็วกระแสของหัวฉีด หรือปรับมุมของ Guide wing

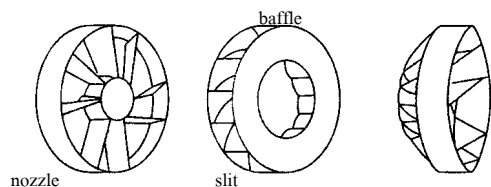
Burner แบบนี้สามารถทำให้มีขนาดกะทัดรัดโดยมีมอเตอร์ และปั๊มไฮดรอลิกอยู่ภายใน สามารถใช้กับหม้อไอน้ำขนาดกลาง และขนาดเล็กได้สะดวก จึงนิยมใช้กันแพร่หลาย

(จ) Stabilizer

Stabilizer มีไว้เพื่อรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ Stabilizer จะทำหน้าที่สร้างกระแส Reflux ของก๊าซเผาไหม้ที่ส่วนท้ายของกระแส เพื่อเร่งให้ก๊าซผสมติดไฟและทำให้เปลวไฟมีเสถียรภาพ

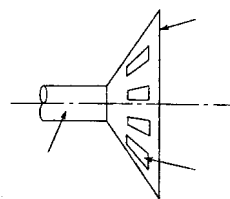
Stabilizer มีทั้งแบบ Swirl type และแบบ Baffle type ในแบบ Swirl type จะใช้แรงหนีศูนย์กลางของกระแส Swirling ทำให้กระแสของอากาศหันไปในทิศทางซีกด้านนอกเทียบกับเพลาของ Burner ทำให้ที่เพลามีความดันลบ จึงเกิดกระแสนย้อนกลับของก๊าซเผาไหม้อุณหภูมิสูงพุ่งเข้าหา Burner และเกิดบริเวณ Recirculation ขึ้น Stabilizer แบบ Swirl type จะมี 3 ประเภท ได้แก่ แบบ Axial flow แบบ Radial flow และแบบ Mixed flow ดังรูปที่ 3.71 แต่ที่นิยมใช้กันได้แก่แบบ Axial flow.

ส่วน Stabilizer แบบ Baffle type ที่นิยมใช้กันมากได้แก่ แบบกรวยที่แสดงในรูปที่ 3.72 เมื่ออากาศความเร็วสูงไหลไปตาม Baffle กระแสนั้นจะแยกตัวจาก Baffle ที่ขอบของมัน และทำให้เกิดบริเวณ recirculation ที่ด้านใน แต่ถ้ากระแส Recirculation แรงมากเกินไป คาร์บอนที่เกิดจากการสลายตัวของเชื้อเพลิงเหลวจะไปสะสมที่ปลาย Burner หรือ Stabilizer ในขณะที่ Slit ทำให้มีอากาศส่วนหนึ่งป้อนเข้าที่ปลาย Burner โดยตรง ช่วยป้องกันการสะสมของเขม่าและระบายความร้อนให้ Stabilizer



(a) axial flow (b) radial flow (c) mixed flow

รูปที่ 3.71 Swirl type stabilizer



รูปที่ 3.72 Stabilizer

3.10.3 อุปกรณ์เผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

หลังจากวิกฤติการณ์น้ำมัน นอกจากถ่านหินจะถูกพิจารณานำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงแทนน้ำมันแล้ว ยังมีแนวโน้มที่จะนำเชื้อเพลิงแข็งซึ่งที่ผ่านมาไม่ได้นำมาใช้หรือเอาทิ้งไป มาใช้ในทางอุตสาหกรรมอีกด้วย เชื้อเพลิงแข็งที่สำคัญได้แก่ ถ่านหิน อย่างไรก็ตาม นอกจากนี้อังการณำเชื้อเพลิงคุณภาพต่ำ เช่น ขยะพลาสติก ขยะ ไม้ฟืน ขยะทางการเกษตร ฯลฯ มาใช้เพิ่มขึ้น

ในที่นี้จะอธิบายอุปกรณ์เผาไหม้ถ่านหิน อย่างไรก็ตาม เชื้อเพลิงแข็งอื่นๆ ก็สามารถเผาไหม้ได้ด้วยอุปกรณ์ที่คล้ายกัน

วิธีเผาไหม้ถ่านหิน สามารถแบ่งได้เป็นการเผาไหม้บน Grate กับการเผาไหม้ Pulverized coal โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเผาไหม้ Pulverized coal จะใช้กับอุปกรณ์ขนาดใหญ่ เช่น หม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าพลังความร้อน เป็นต้น นอกจากนี้ ในระยะหลังยังมีการเผาไหม้แบบ Fluidized bed ด้วย

1. การเผาไหม้บน Grate

การเผาไหม้บน Grate จะป้อนก้อนถ่านหินที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5-25 mm บน grate เหล็กหล่อที่อากาศสามารถผ่านได้ แล้วป้อนอากาศผ่าน Grate เข้าไปในชั้น Green coal zone ให้เกิดการเผาไหม้ ทิศทางการป้อนเชื้อเพลิงกับอากาศสามารถแบ่งได้เป็นวิธี Overfeed กับวิธี Underfeed ในการเผาไหม้บน Grate เนื่องจากจะต้องรักษาการไหลของอากาศผ่านชั้น Green coal zone ตลอดเวลา จึงไม่เหมาะสมกับถ่านหินที่มีคุณสมบัติ Caking นอกจากนี้ ถ่านหินที่ติดไฟยาก เช่น Anthracite ก็ไม่เหมาะสมกับวิธี Underfeed

การเผาไหม้บน Grate แบ่งเป็นวิธี Hand fired กับวิธี Automatic fired แต่วิธีการเผาไหม้จะแบ่งเป็นวิธีหว่านถ่านหินบน Grate ตามตัวกับวิธีที่ Grate จะเป็น Chain stoker ซึ่งสามารถเลื่อนได้อันหนึ่ง Step grate ที่ใช้ในการเผาขยะก็เป็นตัวอย่างหนึ่งของ Grate เคลื่อนที่ได้

ในการเผาไหม้บน Grate ตัวชี้วัดความสามารถในการเผาไหม้บน Grate จะใช้อัตราการเผาไหม้บน Grate [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$] ซึ่งแสดงปริมาณการเผาไหม้ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของ Grate ต่อหนึ่งหน่วยเวลา กับภาระความร้อนของ Grate ซึ่งแสดงปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของ Grate ต่อหนึ่งหน่วยเวลา

2. อุปกรณ์เผาไหม้ Pulverized coal

การเผาไหม้ Pulverized coal แบ่งเป็นแบบสะสมกับแบบโดยตรง แบบสะสมจะปั่นเชื้อเพลิงเก็บไว้ในถังเก็บ แล้วใช้เครื่องป้อนค่อย ๆ นำออกมาจากถังเก็บในปริมาณที่ต้องใช้ นำมาผสมกับอากาศแล้วเผาไหม้ด้วย Burner ในขณะที่แบบโดยตรงจะค่อย ๆ ปั่นเชื้อเพลิงด้วยเครื่องปั่น แล้วป้อนอากาศนำ Pulverized coal ที่เกิดขึ้นป้อนเข้าไปที่ Burner โดยตรง

ในการเผาไหม้ Pulverized coal การควบคุมที่สำคัญที่สุดเพื่อให้เกิดเปลวไฟที่มีเสถียรภาพ ได้แก่ การรักษาระนาบติดไฟ Pulverized coal พ่นออกมาจาก Burner จะได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีหรือการพาความร้อนจากผิวหน้าเปลวไฟหรือผนังเตา แล้วมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนติดไฟ โดยทั่วไปเนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กจะติดไฟง่าย ดังนั้น โดยทั่วไปจึงต้องปั่นให้มีขนาดประมาณ $50 \mu\text{m}$ ดังนั้นในอุปกรณ์เผาไหม้ Pulverized coal นั้น เครื่องปั่นจึงเป็นส่วนที่มีความสำคัญมากที่สุด และเป็นตัวที่มีผลต่อความคุ้มทุน

Burner ที่ใช้ในการเผาไหม้ Pulverized coal นั้น เทียบกับ Burner น้ำมันหนักต่างๆ แล้วจะมีโครงสร้างเรียบง่ายกว่ามาก หากจะกล่าวแล้ว เพียงแค่สามารถพ่นก๊าซผสมระหว่าง Pulverized coal กับอากาศปฐมภูมิออกมาด้วยความเร็วที่ไม่ทำให้เกิด Backfire ได้ก็พอแล้ว สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากเชื้อเพลิงจะถูกปั่นให้มีขนาดที่ต้องการอยู่แล้ว จึงไม่จำเป็นต้องทำเชื้อเพลิงให้เป็นอนุภาคเล็กๆ เหมือนกับ Burner น้ำมันหนัก

ขนาดที่ต้องการ หมายถึง ขนาดที่สามารถรักษาระนาบติดไฟของเปลวไฟให้มีเสถียรภาพได้ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของถ่านหิน อุณหภูมิภายในเตา รูปร่างของเปลวไฟ ตำแหน่งของผนังเตา ฯลฯ อย่างไรก็ตาม กรณีของถ่านหินที่ขุดได้ทั่วไปในประเทศญี่ปุ่น (ที่มีอุณหภูมิติดไฟประมาณ 450°C) จะกำหนดให้ต้องสามารถลอดผ่านตะแกรงขนาด 200-mesh (มีรูขนาด $74 \mu\text{m}$) ได้ไม่น้อยกว่า 70% ปริมาณ

อากาศปฐมภูมิที่จะนำไปผสมกับ Pulverized coal แล้วป้อนให้ Burner โดยทั่วไปจะเท่ากับประมาณ 30% ของอากาศตามทฤษฎี

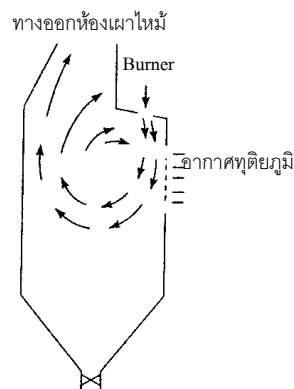
ระยะเวลาที่ Pulverized coal อยู่ในเตาจนถึงถูกปล่อยออกมาทางปล่องไฟจะเท่ากับ 2-3 วินาที เนื่องจากระยะเวลาที่มันอยู่ในบริเวณอุณหภูมิสูงเพื่อเผาไหม้ จะไม่เกิน $1/2$ ของระยะเวลาข้างต้น ดังนั้น หากไม่ป้อนอากาศทุติยภูมิอย่างเพียงพอให้กับเปลวไฟ ณ ตำแหน่งที่เหมาะสมในห้องเผาไหม้ อนุภาคเชื้อเพลิงจะเคลื่อนที่ไปยังปล่องไฟโดยที่ยังไม่เผาไหม้ ทำให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ลดลง ดังนั้นจึงต้องให้ความสำคัญกับตำแหน่งของ Burner และการกระจายอุณหภูมิภายในเตา กล่าวคือ pulverized coal Burner จะแตกต่างจาก Burner น้ำมันหนัก โดยในกรณีส่วนใหญ่ จะมี Burner และรูป้อนอากาศจำนวนมาก ณ ตำแหน่งที่เหมาะสมบนผนังเตา เพื่อให้เกิดกระแสและสนามอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำติดไฟทั่วทั้งเตา และเผาไหม้หมด จึงจะสามารถเผาไหม้ได้ดี จากการทดลองพบว่า การเผาก๊าซผสมระหว่าง pulverized coal กับอากาศให้มีเสถียรภาพในบรรยากาศเปิดโล่งโดยไม่มีการให้ความร้อนจากที่อื่น เป็นสิ่งที่ทำได้ยากมาก

จากเหตุผลข้างต้น จึงเป็นที่ทราบว่าจะไม่สามารถพิจารณาสมรรถนะของ Pulverized coal กับวิธีเผาไหม้แยกออกจากกันได้ โดยทั่วไปรูปแบบของเปลวไฟของการเผาไหม้ Pulverized coal ที่นิยมใช้กันทั่วไป จะมีวิธีการเผาไหม้รูปตัว U วิธีเผาไหม้รูปตัว L วิธีเผาไหม้ที่มุม (Corner firing) เป็นต้น

(ก) การเผาไหม้รูปตัว U

ตามรูปที่ 3.73 เป็นการพ่นก๊าซผสมระหว่าง Pulverized coal กับอากาศปฐมภูมิออกจาก Burner จำนวนมากที่ติดตั้งไว้ที่เพดานของหม้อไอน้ำ พ่นลงมาด้านล่างให้เกิดเปลวไฟ ในขณะที่ก๊าซไอเสียจะระบายออกทางด้านบน เปลวไฟจึงกลายเป็นรูปตัว U และอากาศทุติยภูมิจะป้อนเข้าจากผนังด้านข้างให้รวมกับเปลวไฟหลังจากที่ติดไฟแล้ว วิธีนี้ก๊าซเผาไหม้อุณหภูมิสูงจะย้อนเป็นรูปตัว U กลับไปที่ปากทางออก Burner ดังนั้น ปากทางออก Burner จึงได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีในปริมาณมากทำให้การติดไฟมีเสถียรภาพ

กรณีที่มีปริมาณการเผาไหม้สูง จะใช้ห้องเผาไหม้ 2 ห้องที่สมมาตรกันมาประกอบกัน และให้เปลวไฟรูปตัว U จำนวน 2 เปลวมารวมกันที่กลางเตาแล้วระบายไอเสียออกจากด้านบนที่กลางเตา วิธีนี้เรียกว่าการเผาไหม้รูปตัว W ซึ่งสามารถเผาไหม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพดีมาก

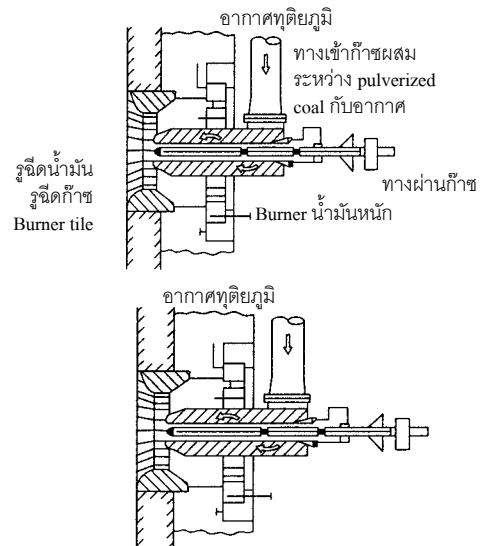
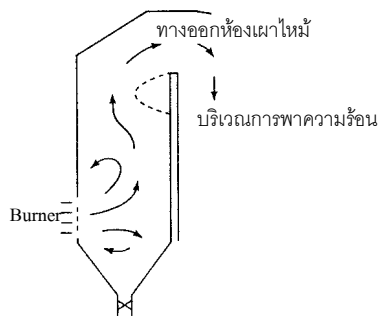


รูปที่ 3.73 การเผาไหม้รูปตัว U

(ข) การเผาไหม้รูปตัว L

ตามรูปที่ 3.74 เป็นการเรียง Burner หลายๆ ชั้นไว้ที่ผนังด้านหน้า แล้วให้เผาไหม้เกิดเปลวไฟแนวระดับพุ่งเข้าหาผนังด้านหลัง แล้วระบายก๊าซไอเสียออกทางด้านบน ซึ่งทำให้เกิดเปลวไฟรูปตัว L โดย Burner ที่ใช้วิธีนี้จะใช้ swirling burner ที่แสดงในรูปที่ 3.75 เพื่อให้ติดไฟได้อย่างมีประสิทธิภาพ Burner แบบนี้มีโครงสร้างเป็นท่อกลม 3 ชั้น ท่อชั้นในสุดจะติดตั้ง Burner น้ำมันหนักสำหรับ Preheat ท่อชั้นกลางจะพ่นก๊าซผสมระหว่าง Pulverized coal กับอากาศปฐมนุญ ท่อชั้นนอกจะพ่นอากาศทุติยภูมิออกมา ในท่อที่เป็นทางผ่านก๊าซผสมกับทางผ่านอากาศจะติดตั้ง Guide wing เอาไว้ เพื่อให้กระแสเกิดการ Swirling เปลวไฟจึงแผ่เป็นรูปกรวยกลมจากการ Swirling นั้น และความดันตรงกลางจะต่ำจึงดูดก๊าซอุณหภูมิสูงเข้ามา ทำให้การติดไฟมีประสิทธิภาพ การเผาไหม้รูปตัว L นี้ยังมีวิธีเผาไหม้แบบ Counter flow โดยติดตั้ง Burner ไว้ ณ ตำแหน่งที่สัมพันธ์กันบนผนังด้านหลัง และทำการเผาไหม้มาพบกันจากผนังด้านหน้าและหลังอีกด้วย

เมื่อใช้วิธีเผาไหม้แบบนี้ ที่กลางห้องเผาไหม้จะมีเปลวไฟ Swirling จำนวน 2 เปลว มาพบกันอย่างรุนแรง ทำให้เกิดแกนกลางที่มีอุณหภูมิสูง การเผาไหม้จึงมีประสิทธิภาพ



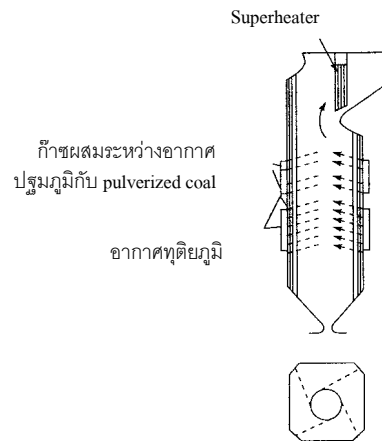
(Burner ใช้ได้ทั้ง Pulverized coal น้ำมันหนัก และก๊าซธรรมชาติ)

รูปที่ 3.74 การเผาไหม้รูปตัว L

รูปที่ 3.75 Swirling burner

(ค) การเผาไหม้ที่มุม (Corner firing)

ตามรูปที่ 3.76 มี Burner ติดตั้งไว้ที่มุมทั้ง 4 ของห้องเผาไหม้รูปสี่เหลี่ยมโดยติดตั้งไว้มุมละ 4 ชั้น และเมื่อเผาไหม้ให้เกิดเปลวไฟในทิศทางเยื้องศูนย์กลางรูป กระแสของก๊าซภายในเตาจะกลายเป็นกระแส Swirling รอบแกนกลางของเตา ก๊าซไอเสียจะระบายออกทางด้านบน วิธีนี้จะทำให้ส่วนกลางของเตามีบริเวณอุณหภูมิสูงอยู่ตลอดเวลา และสามารถเผาไหม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

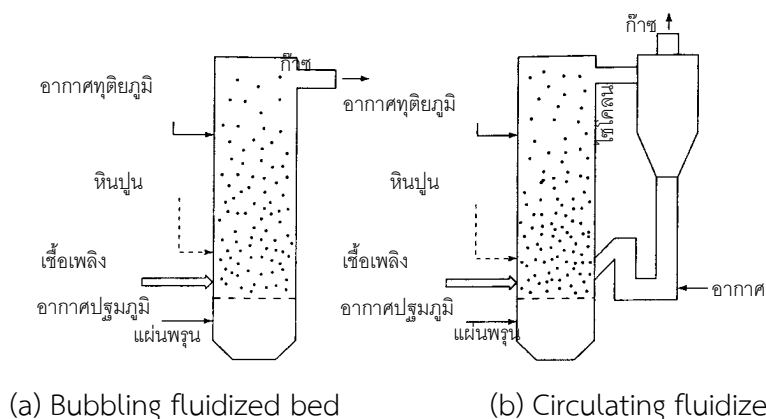


รูปที่ 3.76 การเผาไหม้ที่มุม

อัตรากำเนิดความร้อนของห้องเผาไหม้ในการเผาไหม้ Pulverized coal นั้นในอุปกรณ์ขนาดใหญ่ เช่น หม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าพลังความร้อน จะมีค่า $0.6-0.8 \text{ [GJ/(m}^3 \cdot \text{h)]}$ ในอุปกรณ์ขนาดเล็กจะมีค่า $1.2-2.0 \text{ [GJ/(m}^3 \cdot \text{h)]}$

3. Fluidized bed combustion

การเผาไหม้แบบ Fluidized bed combustion มีหลักการดังรูปที่ 3.77 โดยป้อนถ่านหินหยาบเส้นผ่านศูนย์กลาง $1-5 \text{ mm}$ บนแผ่นที่มีรูพรุนที่วางอยู่ด้านล่างของเตาทรงตั้ง ป้อนอากาศจากด้านล่างขึ้นข้างบน ให้เกิดการเคลื่อนไหวแล้วเผาไหม้ หรือใช้ทราย ฯลฯ เป็นตัวกลางในการเคลื่อนไหว ทำให้เคลื่อนไหวไปพร้อมๆ กับเชื้อเพลิงแล้วเผาไหม้ เนื่องจากการเคลื่อนไหวของวัตถุภายใน Fluidized bed จะมีความเร็วสูงมาก อัตรากำเนิดความร้อนของห้องเผาไหม้จึงมีค่าสูง และมีคุณลักษณะด้านการถ่ายเทความร้อนดี ถ้าใช้หินปูนเป็นตัวกลางการไหล จะสามารถลดการปล่อย SO_x ได้ นอกจากนี้ เนื่องจากการเผาไหม้อุณหภูมิต่ำ จึงเกิดสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจนน้อยอีกด้วย



รูปที่ 3.77 ภาพหลักการทำงานของ การเผาไหม้แบบ Fluidized bed combustion

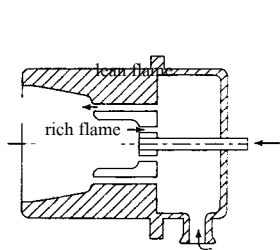
Circulating fluidized bed ในรูปที่ 3.77 (b) ด้านนอกจะมี Cyclone มีโครงสร้างเพื่อทำหน้าที่รวบรวมอนุภาคที่กระเด็นออกมาจากเตา แล้วหมุนเวียนกลับเข้าไปในเตาอีกครั้ง เทียบกับ Bubbling fluidized bed แล้ว เนื่องจากมีการ Recirculation อนุภาคที่ยังไม่เผาไหม้ ดังนั้นจึงมีประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงกว่า และสามารถป้อนอนุภาคหินปูนที่มีขนาดเล็กกว่าได้ ดังนั้น จึงมีประสิทธิภาพในการกำจัดกำมะถันสูงกว่าด้วย นอกจากนี้ ยังสามารถปรับความสูงของรอยต่อระหว่างชั้นหนาแน่นกับชั้นเบาบางของอนุภาคภายในเตาได้อีกด้วย

3.10.4 การเผาไหม้ที่ให้ NO_x ต่ำ

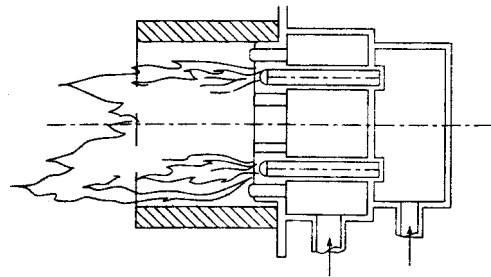
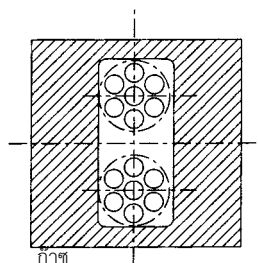
1. Low NO_x burner

นับตั้งแต่ปัญหามลพิษทางอากาศเนื่องจากการปล่อยก๊าซ NO_x ได้รับความสนใจก็มีการวิจัยเกี่ยวกับ Burner ที่กำเนิด NO_x ต่ำกันอย่างกว้างขวาง ปัจจุบันผู้ผลิต Burner ต่างก็วางจำหน่าย Low NO_x burner ในท้องตลาดแล้ว นอกจากการควบคุมการปล่อยก๊าซด้วยการปรับปรุงการเผาไหม้แล้ว จึงมีการนำ Low NO_x burner เข้ามาใช้ด้วย

เทคโนโลยีในการควบคุมการเกิดก๊าซ NO_x ด้วยการปรับปรุงการเผาไหม้นั้นมีหลายวิธี ได้แก่ Flue gas recirculation, การเผาไหม้สองชั้น การเผาไหม้ที่นำวิธี 2 วิธีข้างต้นมาใช้ร่วมกัน และ Bias (rich-lean) combustion ฯลฯ อย่างไรก็ตาม Low NO_x burner ส่วนมากจะนำวิธีเผาไหม้ซึ่งมีการปรับปรุงการเผาไหม้เหล่านี้มาใช้งานด้วยอุปกรณ์รอบๆ ตัว Burner รูปที่ 3.78 และรูปที่ 3.79 แสดงหลักการทำงานของ low NO_x erner ในการเผาไหม้ก๊าซ ซึ่งเราสามารถพิจารณาว่า bias combustion ที่จริงแล้วก็คือการเผาไหม้สองชั้นขนานกันนั่นเอง

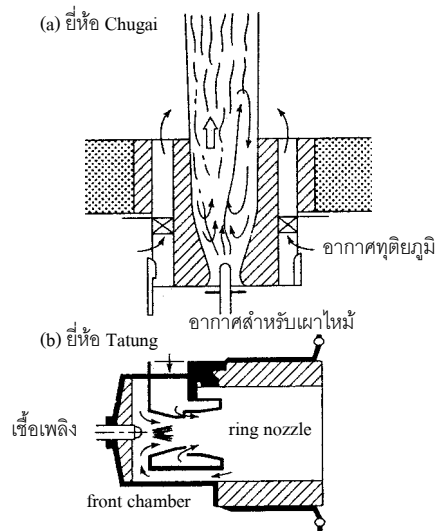


รูปที่ 3.78 หลักการทำงานของ การเผาไหม้สองชั้น

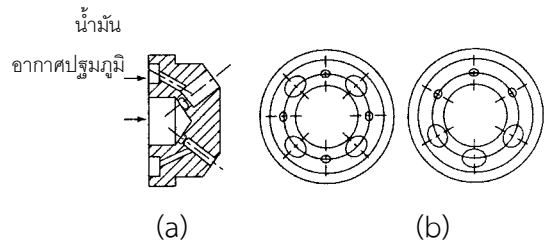


รูปที่ 3.79 หลักการทำงานของ Bias combustion

นอกจากนี้ Burner สำหรับเชื้อเพลิงเหลว ยังมีแบบที่แสดงในรูปที่ 3.80 และรูปที่ 3.81 อีกด้วย รูปที่ 3.80 เรียกว่าแบบ Automatic recirculating type ซึ่งจะใช้ jet ความเร็วสูงทำให้เกิดความดันลบใกล้เคียง กับ Nozzle เพื่อทำการ Circulate ก๊าซเผาไหม้ ส่วนรูปที่ 3.81 เป็น Burner ที่ทำการเผาไหม้แบบ Bias combustion ด้วยเปลวไฟเพียง 1 เปลว โดยออกแบบรูหัวฉีดที่ปลาย Burner ให้มีความไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้ ยังมี Burner ที่ควบคุมการเกิด NO_x ด้วยการลดอุณหภูมิของเปลวไฟ และระยะเวลาที่ก๊าซอยู่ในเตาให้น้อยลงอีกด้วย

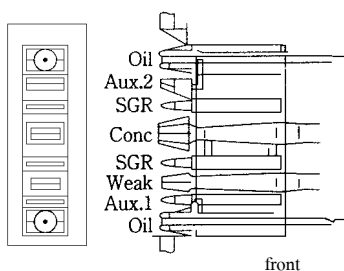


รูปที่ 3.80 Automatic recirculating low NO_x burner



รูปที่ 3.81 ตัวอย่างโครงสร้างของ Bias atomizer

กรณีของการเผาไหม้ Pulverized coal เนื่องจากถ่านหินจะมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนมากกว่าน้ำมันหนักมาก จึงเกิด NO_x ขึ้นจำนวนมาก ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็น Fuel NO_x รูปแบบการเผาไหม้ Pulverized coal นั้น จะแบ่งเป็นบริเวณเผาไหม้ปฐมภูมิ (การเผาไหม้ Volatile matter) กับบริเวณเผาไหม้ทุติยภูมิ (การเผาไหม้ของแข็งที่ Volatile matter ระเหยออกไปแล้ว ของแข็งนี้เรียกว่า Char) ในแต่ละบริเวณจะเกิด NO_x ขึ้น ไนโตรเจนจะอยู่ใน Volatile matter และใน Char เกือบเท่าๆ กัน แต่กล่าวกันว่า NO_x ที่เกิดขึ้นกว่า 70% เป็นไนโตรเจนที่อยู่ใน Volatile matter รูปที่ 3.82 แสดงการควบคุมการเกิด NO_x ด้วยการใช้ Conc burner และ Weak Burner ร่วมกันตามความเข้มข้นของ Pulverized coal ซึ่งเป็น Burner ที่มีเสถียรภาพในการติดไฟได้



- Oil : รุณิดน้ำมัน
- Aux : รุณิดสำรอง
- SGR : รุณิด recirculation ก๊าซไอเสีย
- Conc : รุณิด fuel-rich mixture (ถ่านหิน)
- Weak : รุณิด air-rich mixture (ถ่านหิน)

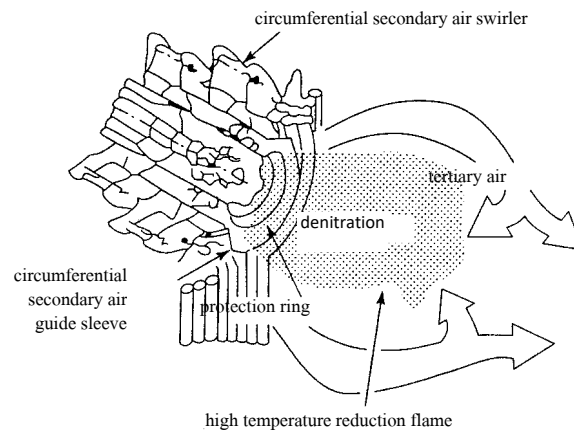
รูปที่ 3.82 แสดงการควบคุมการเกิด NO_x

2. การเผาไหม้รีดักชันอุณหภูมิสูง

เทคโนโลยีการเผาไหม้แต่เดิมเพื่อให้เกิด NO_x ต่ำนั้น ส่วนใหญ่จะเป็นเทคโนโลยีที่ควบคุมการเกิด NO_x ด้วยวิธีลดอุณหภูมิการเผาไหม้ อย่างไรก็ตาม การทำเช่นนี้จะประสิทธิภาพความร้อนลดลงอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ การเพิ่มประสิทธิภาพกับการควบคุมการปล่อย NO_x จึงต้อง Trade off ซึ่งกันและกัน แต่ในระยะหลังนี้ ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีที่สามารถลด NO_x ได้โดยไม่สูญเสียประสิทธิภาพ

เทคโนโลยีดังกล่าวจะใช้กับเชื้อเพลิงที่มีธาตุ N เป็นองค์ประกอบด้วยความเข้มข้นสูง เช่น น้ำมันหนัก และถ่านหิน โดยใช้อากาศที่ preheat แล้วทำการเผาไหม้อุณหภูมิสูงภายใต้สภาวะ Fuel-rich

ซึ่ง NO_x , CN, เอมีน ฯลฯ ที่เกิดขึ้นจะสลายตัวในขณะนั้นแล้วถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็น N_2 ส่วนองค์ประกอบที่เผาไหม้ได้ที่เหลือ จะนำไปเผาไหม้ด้วยอากาศที่ไม่ได้ preheat กล่าวคือเป็นการเผาไหม้สองชั้นแบบหนึ่งนั่นเอง ในขณะที่การเผาไหม้สองชั้นแบบเดิมจะพยายามลด NO_x ด้วยการลดความเข้มข้นของออกซิเจน และลดอุณหภูมิในการเผาไหม้ชั้นที่หนึ่ง แต่วิธีนี้ยังทำให้การเผาไหม้ชั้นที่หนึ่งมีอุณหภูมิสูงมากเท่าใด ประสิทธิภาพในการลด NO_x ก็จะปรากฏชัดเจนขึ้นเท่านั้น รูปที่ 3.83 แสดงตัวอย่างของ Pulverized coal fired low NO_x burner

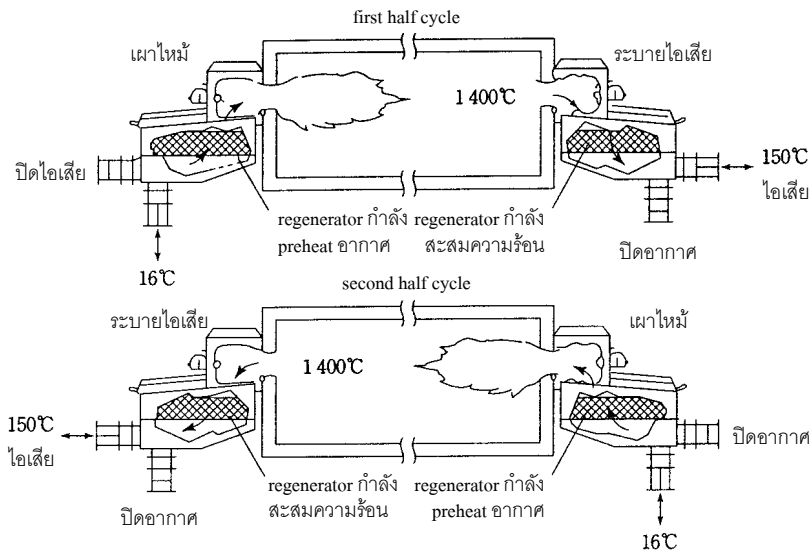


รูปที่ 3.83 Pulverized coal fired low NO_x burner

3.10.5 การเผาไหม้แบบสะสมความร้อน

การเผาไหม้แบบนี้ เป็นเทคโนโลยีการเผาไหม้ที่มีโครงสร้างรวมเอา Burner กับ regenerator (อุปกรณ์สะสมความร้อน) ไว้ด้วยกันทำให้กะทัดรัด และเมื่อใช้ Burner ดังกล่าว 2 ชุด สลับกันเผาไหม้แล้วจะมีประสิทธิภาพสูง รูปที่ 3.84 แสดงหลักการทำงาน โดยก๊าซเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจาก Burner ตัวหนึ่งจะถูกป้อนเข้าไปใน Regenerator ของ Burner ตัวที่หยุดทำงานอยู่เพื่อสะสมความร้อน หลังจากนั้นจะถูกระบายออกไป และเมื่อสลับเส้นทางของกระแสให้อากาศสำหรับเผาไหม้ไหลผ่าน Regenerator ที่สะสมความร้อนไว้แล้ว จะทำให้อากาศถูก Preheat จนมีอุณหภูมิสูง กล่าวได้ว่าเป็นเทคโนโลยีการเผาไหม้แบบอนุรักษ์พลังงานด้วยการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ การเผาไหม้แบบสะสมความร้อนมีใช้มานานแล้วในเตาหลอมแก้ว เตาเผาถ่านโค้ก ฯลฯ อย่างไรก็ตาม แต่เดิมระยะเวลาในการสลับจะนานถึง 15-20 นาที แต่ระยะหลังนี้มีการพัฒนาเทคโนโลยีที่ลดเวลาสลับลง (20 วินาที - 2 นาที) ทำให้เทคโนโลยีการเผาไหม้แบบสะสมความร้อนที่มีคาบสั้น (ความถี่สูง ความเร็วสูง) กำลังเป็นที่แพร่หลายมากขึ้น

วิธีนี้มีข้อดีหลายประการ ได้แก่ เมื่อเทียบกับการเผาไหม้แบบสะสมความร้อนในอดีตแล้ว ประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้น 20-40% จึงสามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้ และสามารถทำให้อุณหภูมิของอากาศที่ Preheat แล้วมีค่าสูงมากได้ ดังนั้นจึงมีการถ่ายเทความร้อนดีขึ้น และสามารถใช้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำได้ รวมทั้งตัวอุปกรณ์เองก็มีขนาดกะทัดรัด จึงสามารถคาดหวังได้ว่าการลงทุนด้านเครื่องจักรจะลดลงอย่างมาก



รูปที่ 3.84 หลักการทำงานของเครื่องยนต์แบบสะสมความร้อน

3.11 การอนุรักษ์พลังงานของเครื่องยนต์สันดาปภายใน

3.11.1 ประเภทและลักษณะสมบัติ

เครื่องยนต์สันดาปภายในเป็นเครื่องจักรที่ทำการเผาไหม้เชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ เพื่อให้กำเนิดก๊าซอุณหภูมิ และความดันสูง แล้วนำก๊าซนี้ไปใช้เป็น Working fluid โดยทำให้ขยายตัว เพื่อแปลงพลังงานความร้อนในก๊าซเป็นพลังงานกล โดยทั่วไปทำงานเป็น Open cycle โดย Working fluid ใน cycle จะมีสภาพเป็นก๊าซตลอดเวลาไม่มีการเปลี่ยนสถานะ

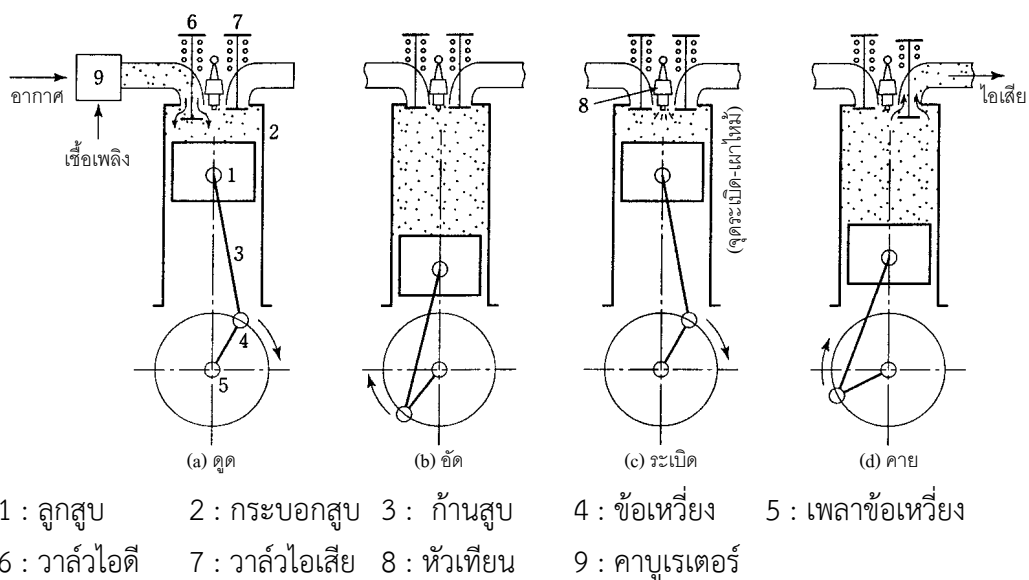
วิธีแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานกลสามารถแบ่งได้เป็นแบบปริมาตรโดยใช้การเคลื่อนที่ของลูกสูบซึ่งเกิดจากการขยายตัวของก๊าซเผาไหม้ในกระบอกสูบทำหน้าที่หมุนข้อเหวี่ยง กับแบบความเร็วโดยปล่อยให้ Working fluid ขยายตัวในเทอร์ไบน์เพื่อให้ใบพัดหมุน เครื่องยนต์แบบปริมาตรยังแบ่งตามวิธีจุดระเบิดเชื้อเพลิงได้เป็นเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยหัวเทียน (เครื่องยนต์เบนซิน เครื่องยนต์แก๊ส) ซึ่งเป็นเครื่องยนต์แบบ Otto cycle และเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยตัวเอง (เครื่องยนต์ดีเซล) ซึ่งเป็นเครื่องยนต์แบบ Diesel cycle ส่วนตัวอย่างของเครื่องยนต์แบบความเร็วได้แก่ ก๊าซเทอร์ไบน์

เครื่องยนต์สันดาปภายในมีอุปกรณ์เสริมต่างๆ ค่อนข้างน้อย จึงมีขนาดกะทัดรัด สามารถติดตั้ง-ดับเครื่องได้โดยใช้ระยะเวลาไม่นาน นอกจากนี้ ยังสามารถทำงานตามการเปลี่ยนแปลงภาระได้ดี จึงเป็นเครื่องต้นกำลังที่มีประวัติการใช้งานยาวนาน ในคำอธิบายต่อไปนี้ หากไม่ได้ระบุไว้เป็นอย่างอื่น เมื่อกล่าวว่าเครื่องยนต์สันดาปภายในใดๆ จะหมายถึง เครื่องยนต์สันดาปภายในแบบปริมาตร เพื่อให้เห็นความแตกต่างจากก๊าซเทอร์ไบน์

เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยหัวเทียน เป็นเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงเหลวที่เบา และระเหยเป็นไอได้ง่าย เช่น น้ำมันเบนซิน น้ำมันก๊าด น้ำมันเบา ฯลฯ หรือใช้เชื้อเพลิงก๊าซ เช่น ก๊าซธรรมชาติ ก๊าซถ่านหิน ก๊าซหุงต้ม (Town gas) เป็นต้น โดยจะผสมเชื้อเพลิงกับอากาศให้เข้ากันก่อนแล้วจึงดูดเข้าไปอัดในกระบอกสูบ แล้วใช้พลังงานจากภายนอกในการจุดระเบิด เครื่องยนต์แบบนี้มีใช้อย่างแพร่หลายในรถยนต์ เครื่องบินขนาดเล็ก เครื่องยนต์ขนาดกลาง และขนาดค่อนข้างเล็กที่มีกำลังไม่เกินหลาย kW สำหรับงานทั่วไปหรือสำหรับกำเนิดไฟฟ้า

ส่วนเครื่องยนต์ดีเซล จะดูดอากาศอย่างเดียวเข้าไปอัดในกระบอกสูบให้มีความดัน และอุณหภูมิสูงก่อน หลังจากนั้นจึงฉีดละอองเชื้อเพลิงเข้าไปในกระบอกสูบให้จุดระเบิดด้วยตัวเองโดยไม่ต้องใช้พลังงานจากภายนอก ดังนั้น ในเครื่องยนต์ดีเซล เนื่องจากต้องอัดอากาศให้มีความดันสูงถึงอุณหภูมิจุดระเบิดด้วยตัวเอง โดยหลักการแล้วจึงมีอัตราส่วนกำลังอัดสูง และมีประสิทธิภาพความร้อนสูง สามารถใช้น้ำมันปิโตรเลียมและน้ำมันหนักที่มีจุดเดือดสูง และราคาถูกได้ แต่เดิมเคยใช้เป็นเครื่องยนต์ขนาดค่อนข้างใหญ่ที่มีความเร็วต่ำสำหรับเรือ กำเนิดไฟฟ้า รถยนต์ขนาดใหญ่ เครื่องจักรก่อสร้าง ฯลฯ แต่ในปัจจุบัน มีการผลิตเครื่องยนต์ขนาดเล็กที่มีความเร็วสูงออกมาใช้แล้ว

ในเครื่องยนต์สันดาปภายใน เมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ไปกลับระหว่างจุดสูงสุด-จุดต่ำสุดภายในกระบอกสูบ จะเกิดการทำงาน 4 จังหวะ ได้แก่ ดูด อัด ระเบิด คาย การทำงานทั้งหมดนี้เรียกว่า 1 รอบ ในเครื่องยนต์ 4 จังหวะ เมื่อเพลาค้อเหวี่ยงหมุนไป 2 รอบ จะทำงานข้างต้นได้ 1 รอบ ในจำนวนการทำงานทั้ง 4 จังหวะนี้ แก๊สเผาไหม้จะทำงานจริงๆ ต่อลูกสูบเฉพาะจังหวะระเบิดเท่านั้น อีก 3 จังหวะที่เหลือจะเป็นการใช้พลังงานที่ข้อเหวี่ยงสะสมไว้จากส่วนหนึ่งของพลังงานจากจังหวะระเบิด รูปที่ 3.85 แสดงขั้นตอนการทำงานของเครื่องยนต์ 4 จังหวะ



รูปที่ 3.85 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องยนต์ 4 จังหวะ

นอกจากนี้ยังมีเครื่องยนต์ 2 จังหวะซึ่งเมื่อเพลาค้อเหวี่ยงหมุนไป 1 รอบ เครื่องยนต์จะทำงาน 1 รอบมี 2 จังหวะได้แก่ ดูด-อัด และระเบิด-คาย เครื่องยนต์แบบนี้ใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลสำหรับเรือขนาดใหญ่ และเครื่องยนต์เบนซินขนาดเล็ก เช่น เครื่องยนต์หัวไปขนาดเล็ก และจักรยานยนต์ขนาดเล็ก เป็นต้น

สำหรับงานกำเนิดไฟฟ้า โดยทั่วไปจะใช้เครื่องยนต์ดีเซลความเร็วปานกลาง (500-1000 rpm) 4 จังหวะซึ่งเทียบกับเครื่องยนต์ 2 จังหวะแล้วจะสามารถทำงานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระได้ดีกว่า และเมื่อเดินเครื่องที่ภาระไม่เต็มพิกัดแล้วประสิทธิภาพความร้อนจะลดลงไม่มาก

3.11.2 สมรรถนะ

ประสิทธิภาพความร้อนตามทฤษฎีของ Otto cycle ซึ่งเป็นไซเคิลตามทฤษฎีของ เครื่องยนต์เบนซินและเครื่องยนต์แก๊ส และมีการเปลี่ยนแปลงแบบ Adiabatic จำนวน 2 ครั้งกับการ เปลี่ยนแปลงปริมาตรคงที่ 2 ครั้ง ถ้าให้อัตราส่วนของความร้อนจำเพาะเท่ากับ K แล้ว ประสิทธิภาพความร้อน จะเท่ากับ

$$\eta = 1 - \frac{1}{\epsilon^{K-1}} \quad (3.11)$$

ดังนั้น หากอัตราส่วนกำลังอัด ϵ มีค่าสูง ประสิทธิภาพความร้อนจะเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ถ้าอัตราส่วนกำลังอัด มีค่าสูงเกินไป จะเกิดการน็อก (Detonation) ขึ้นทำให้ไม่สามารถเดินเครื่องได้ ดังนั้น ในทางปฏิบัติ แม้แต่ เครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซหุงต้ม (Town gas) เป็นเชื้อเพลิงก็มีอัตราส่วนกำลังอัดสูงสุดประมาณ 13 เท่าเท่านั้น ดังนั้น ในแง่ของประสิทธิภาพความร้อนจึงมีค่าต่ำกว่าเครื่องยนต์ดีเซลมาก ในขณะที่เครื่องยนต์ดีเซลจะมีสมบัติที่ดีคือ เผาไหม้ที่ความดันคงที่ และมีอัตราส่วนกำลังอัดสูง เครื่องยนต์ดีเซลหมุนเร็ว (1000-1800 rpm) จำนวนมากมี อัตราส่วนกำลังอัดถึง 23 เท่า

ปริมาณงานที่ก๊าซเผาไหม้หนึ่งหน่วยมวลกระทำได้ เป็นปริมาณที่สำคัญตัวหนึ่งในการ ประเมินสมรรถนะของเครื่องยนต์สันดาปภายใน ปริมาณงาน Effective work ต่อ 1 จังหวะของลูกสูบหารด้วย ปริมาตรจังหวะของเครื่องยนต์แล้วแสดงด้วยค่าความดันเฉลี่ย เรียกว่า Mean effective pressure มีสัญลักษณ์ว่า P_m ค่านี้เป็นเกณฑ์ของกำลังขาออกของเครื่องยนต์ซึ่งไม่ขึ้นกับขนาดของลูกสูบ และความเร็ว รอบหากใช้ Supercharger ป้อนอากาศจำนวนมากเข้าไปในกระบอกสูบ ปริมาณการเผาไหม้จะเพิ่มขึ้นภายใน กระบอกสูบปริมาตรเท่าเดิม ทำให้ Mean effective pressure สูงขึ้น จึงสามารถเพิ่มกำลังขาออกต่อกระบอก สูบให้สูงขึ้นได้

สมรรถนะอีกประการหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับข้างต้น ได้แก่ Output factor ซึ่งมีนิยามดังต่อไปนี้

$$(\text{Output factor}) = (\text{Net mean effective pressure}) \times (\text{ความเร็วเฉลี่ยของลูกสูบ}) \quad (3.12)$$

ในเครื่องยนต์สันดาปภายใน ความร้อนจากการเผาไหม้ส่วนใหญ่จะปล่อยทิ้งเป็นก๊าซ ไอดีเสีย และสูญเสียไปถึงน้ำระบายความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในเครื่องยนต์ดีเซลจะเดินเครื่องด้วยอัตรา อากาศส่วนเกินสูงมาก ในเครื่องยนต์ธรรมดา จะมีอัตราอากาศส่วนเกินประมาณ 1.4-1.6 ที่กำลังขาออกที่พิกัด และเครื่องยนต์ Supercharge จะมีอัตราอากาศส่วนเกินสูงถึง 1.7-2.3 ยิ่งเครื่องยนต์ขนาดใหญ่ยิ่งมีแนวโน้มมี ค่าสูงขึ้น ดังนั้น ไอดีเสียเครื่องยนต์ดีเซลจึงมีอุณหภูมิค่อนข้างต่ำแต่มีปริมาณไอดีเสียมาก ในเครื่องยนต์ Supercharge ถึงแม้จะสามารถนำพลังงานความร้อนในไอดีเสียกลับมาใช้ได้ถึง 30% แต่โดยรวมๆ แล้วความ สูญเสียในก๊าซไอดีเสียก็ยังมีค่าสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในเครื่องยนต์สำหรับกำเนิดไฟฟ้าซึ่งเดินเครื่องด้วย ความเร็วคงที่ แม้จะมีภาระไม่เต็มพิกัด แต่ปริมาณอากาศก็จะคงที่ ดังนั้น ประสิทธิภาพที่ภาระไม่เต็มพิกัดจึงมี ค่าต่ำ

ในทางกลับกัน ในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยหัวเทียน จะเดินเครื่องด้วยอัตราส่วนผสม ระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศคงที่ตลอดเวลา ปริมาณไอดีเสียไม่ว่าในเครื่องยนต์ธรรมดา หรือ Supercharge ก็มี การเปลี่ยนแปลงไปตามภาระ โดยเกือบจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณเชื้อเพลิง สำหรับอัตราอากาศส่วนเกินจะ มีค่าประมาณ 1.1-1.3 เท่าของอัตราส่วนผสมกับอากาศตามทฤษฎี (ตารางที่ 3.28) แต่ในกรณีที่ใช้ three-way

catalytic converter ในการบำบัดไอเสีย จะต้องควบคุมให้มีค่าใกล้เคียงกับ 1.0 เพื่อให้เกิดสมดุลระหว่างก๊าซที่มีสมบัติติดกันกับออกซิเดชั่น

ตารางที่ 3.28 คุณสมบัติของก๊าซเชื้อเพลิง

ประเภทของ ก๊าซ	สูตรเคมีและ สัดส่วน จำนวน โมเลกุล	ค่าความร้อน ต่ำ [kcal / m ³ _N]	อัตรา ส่วนผสม ตามทฤษฎี [m ³ _N / m ³ _N]	ค่าความร้อนของ ก๊าซ ผสมที่อัตราส่วน ผสม [kcal / m ³ _N]	explosion limit		อัตราส่วนกำลังอัด สูงสุด (เครื่องทดสอบ มาตรฐาน) C.C.R.	ค่า มีเทน M.N.	ค่าออก เทน (MON)
					low er	upp er			
ไฮโดรเจน	H ₂	2570	2.38	760	4.0	74.2	8.5	0	66
คาร์บอนมอนอกไซด์	CO	3020	2.38	893	12.5	74	13.0	73	100
มีเทน	CH ₄	8550	9.52	813	5.0	15	15.4	100	103
อีเทน	C ₂ H ₆	15370	16.7	868	3.0	12.5	12.4	43.5	101
โพรเพน	C ₃ H ₈	22100	23.8	901	2.2	9.5	12.2	35	97
i-บิวเทน	i-C ₄ H ₁₀	28240	31.0	908	1.9	8.5	5.5		98
n-บิวเทน	n-C ₄ H ₁₀	28330	31.0	922	1.9	8.8	8.0	10.5	89
town gas 6C	H ₂ : 45% CH ₄ , CO ฯลฯ	4050	4.2	779				33	
town gas 13A	CH ₄ : 88% C _n H _m	9940	10.95	832				66	
digestion gas	CH ₄ , CO ₂ , N ₂ ฯลฯ	4700-6500	5.2-7.2	750-790				90-130	

ระบบระบายความร้อนของเครื่องยนต์สันดาปภายใน ประกอบด้วยระบบอุณหภูมิสูงซึ่งใช้น้ำระบายความร้อนที่เสื่อสุบ และฝาสุบ กับระบบอุณหภูมิต่ำซึ่งใช้ระบายความร้อนน้ำมันหล่อลื่นและอากาศ ระบบอุณหภูมิสูงจะรักษาอุณหภูมิขาออกของน้ำระบายความร้อนไว้ที่ประมาณ 80-90°C ทำให้

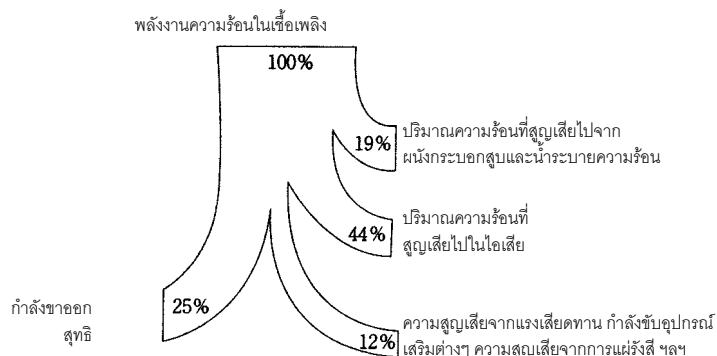
- * ลดความสูญเสียจากการระบายความร้อน
- * ประหยัดน้ำมันเพราะเผาไหม้ได้ดีเนื่องจากห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงขึ้น
- * ลดการกัดกร่อนของกรดไนตริกต่อปลอกสูบ แหวนลูกสูบ ฯลฯ และเพิ่มความทนทาน

ต่อการเสียดสีเนื่องจากอุณหภูมิรอบๆ ห้องเผาไหม้สูงขึ้น

* ไอเสียมีอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้สามารถนำความร้อนในไอเสียกลับมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเพิ่มประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้ เป็นต้น

ในระยะหลัง เริ่มมีเครื่องยนต์แก๊สที่ระบายความร้อนแบบ Vapor cooling ซึ่งทำให้กระบอกสูบมีอุณหภูมิสูงถึงประมาณ 120°C นอกจากนี้ ในเครื่องยนต์ดีเซลก็เริ่มมีการใช้น้ำมันที่มีจุดเดือดสูงเป็นตัวกลางระบายความร้อนแทนน้ำ ทำให้อุณหภูมิขาออกของของเหลวระบายความร้อนมีค่าสูงกว่า 100°C เพื่อให้ประหยัดน้ำมันและลดการผุกร่อน อย่างไรก็ตาม เนื่องจากผนังห้องเผาไหม้จะมีอุณหภูมิสูงขึ้น จึงต้องใช้เชื้อเพลิงที่มีค่าออกเทนสูงขึ้น และควรหลีกเลี่ยงการเดินเครื่องที่ภาระไม่เต็มพิกัดอีกด้วย

ในทางกลับกัน ระบบอุณหภูมิต่ำควรมีอุณหภูมิไม่เกิน 50°C เพื่อไม่ให้น้ำมันหล่อลื่นเสื่อมสภาพ ยิ่งเครื่องยนต์ที่ Supercharge มาก ปริมาณความร้อนของน้ำระบายความร้อนอากาศจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในเครื่องยนต์ดีเซล บางครั้งปริมาณความร้อนของระบบอุณหภูมิต่ำจะมีค่าถึง 30-40% ของปริมาณความร้อนของน้ำระบายความร้อนทั้งหมด รูปที่ 3.86 แสดงตัวอย่างสมดุลความร้อนของเครื่องยนต์เบนซิน



รูปที่ 3.86 ตัวอย่างสมดุลความร้อนของเครื่องยนต์ดีเซล

3.11.3 เชื้อเพลิงกับการเผาไหม้

1. เชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายใน จะมีค่าความร้อนของก๊าซผสมสูง ดังแสดงในตารางที่ 3.28 รวมทั้งมีอัตราส่วนกำลังอัดสูงสุดสูง กล่าวคือ เชื้อเพลิงที่มีค่าออกเทนสูงจะให้กำลังขาออกสูงและประสิทธิภาพสูงจึงเป็นเชื้อเพลิงที่ดี

เชื้อเพลิงก๊าซที่มีก๊าซมีเทนและก๊าซโพรเพนเป็นองค์ประกอบหลักจะมีค่าออกเทนสูงสามารถใช้กับเครื่องยนต์ Supercharge ที่มีอัตราส่วนกำลังอัดสูงได้ ส่วนบิวเทนแม้ว่าจะมีค่าความร้อนของก๊าซผสมสูงแต่มีค่าออกเทนต่ำ นอกจากนี้ก๊าซที่มีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลักก็จะมีค่าออกเทนต่ำอีกด้วย ในกรณีที่ใช้ก๊าซทั้งสองนี้จะต้องใช้เครื่องยนต์ธรรมดา ที่มีอัตราส่วนกำลังอัดต่ำลง กำลังขาออกจึงลดลงอย่างมาก และกรณีที่ต้องการกำลังขาออกเท่าเดิมจะต้องเพิ่มจำนวนลูกสูบ

สำหรับเมทานอลและเอเทนอล จะมีค่าออกเทนสูง และมีการคาดหวังว่าจะนำมาใช้ได้ในอนาคต นอกจากนี้ กรณีที่ใช้ก๊าซ regenerative และก๊าซผลพลอยได้ จะต้องพิจารณาถึงอัตราส่วนระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศและการน็อกของเครื่องยนต์ เพื่อตัดสินใจว่าเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือไม่

เครื่องยนต์ดีเซลมีข้อดีคือมีประสิทธิภาพสูงและสามารถใช้น้ำมันเชื้อเพลิงคุณภาพต่ำซึ่งมีราคาถูกได้ จึงสามารถลดค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่อง และเพิ่มความคุ้มทุน โดยมากจะใช้น้ำมันหนักชนิด A ส่วนน้ำมันหนักชนิด C ก็ใช้ได้ แต่ Acid dew point ของไอเสียจะมีค่าสูงขึ้น ดังนั้น กรณีที่จะนำความร้อนในไอเสียกลับมาใช้จะต้องคำนึงถึงการกัดกร่อนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วย นอกจากนี้ การเดินเครื่องด้วยน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดหนัก เช่น น้ำมันหนัก C ซึ่งมีองค์ประกอบที่ติดไฟยาก เช่น ไฮโดรคาร์บอนหนักเป็นจำนวนมาก รวมทั้งยังมีองค์ประกอบเบ็ดเตล็ดอื่น ๆ ซึ่งจะทำอันตรายต่อเครื่องยนต์ นอกจากนี้ น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีความหนืดสูงมาก มักจะทำให้ละอองเชื้อเพลิงจากหัวฉีดเชื้อเพลิงมีขนาดใหญ่ และมีการกระจายตัวไม่ดี คุณลักษณะการฉีดพ่นเชื้อเพลิงจึงไม่ค่อยดี ในทางกลับกันหากมีความหนืดน้อยเกินไป จะเร่งให้ปั๊มรั่วและสึกหรอเร็วขึ้น ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเผาไหม้ประกอบด้วยความละเอียดของการฉีดพ่นเชื้อเพลิง การกระจายตัว การทะลุทะลวง เป็นต้น ดังนั้น จึงต้องบำรุงรักษา และควบคุม Burner tip รวมทั้งความดันของปั๊มหัวฉีด ฯลฯ อย่างเข้มงวด

โดยทั่วไป ปัญหาที่เกิดขึ้นในการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิงชนิดหนักจะมีดังต่อไปนี้

- * แหวนลูกสูบ และปลอกสูบมีการสึกหรอเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มปริมาณ และสะสมของสารที่เกิดจากการเผาไหม้
- * ภาวะความร้อนรอบๆ ห้องเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้น
- * อุณหภูมิไอเสียมีค่าสูงขึ้นจากเหตุผลข้างต้น
- * เผาไหม้ได้ไม่ดีเมื่อเดินเครื่องที่ภาระต่ำ และความดันสูงสุดในลูกสูบสูงเกินไปเนื่องจากค่าซีเทนต่ำ
- * สมรรถนะต่ำลงและเกิด surging เนื่องจากใบพัด (เทอร์โบ) ของ Supercharger สกปรกมาก
- * ใส์กรองเสียหายเนื่องจากเกิดโคลนหรือเลน (Sludge) ขึ้นในน้ำมันเชื้อเพลิงมากกว่าปกติ
- * plunger ของปั๊มหัวฉีดสึกหรอมากกว่าปกติเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยา FCC (Fluid catalytic cracking)

ด้วยเหตุผลข้างต้น การเลือกใช้เชื้อเพลิงจะมีผลกระทบอย่างมากต่อการเดินเครื่องของระบบ ความคุ้มทุน สิ่งแวดล้อม ฯลฯ จึงต้องพิจารณาไม่เพียงแต่ราคาเท่านั้น แต่ต้องตัดสินใจอย่างบูรณาการโดยคำนึงถึงความสะดวกในการจัดซื้อ การใช้งานและจัดเก็บ ความปลอดภัย การบำรุงรักษา และสิ่งแวดล้อม

2. วิธี Supercharge

วิธีเพิ่มปริมาณอากาศสำหรับการเผาไหม้ของเครื่องยนต์สันดาปภายในเพื่อเพิ่มกำลังขาออกวิธีหนึ่ง ได้แก่ Supercharge ซึ่งสามารถทำให้เครื่องยนต์ที่มีความจุน้อยสามารถกำเนิดกำลังขาออกสูงได้ จึงทำให้เครื่องยนต์มีขนาดเล็ก และที่กำลังขาออกเท่ากันจะมีความเร็วรอบต่ำกว่า จึงช่วยประหยัดน้ำมัน

วิธี Supercharge แบ่งได้เป็นวิธีเชิงกลโดยขับ Supercharger ด้วยเพลาลูกเบี้ยว และวิธีขับใบพัด (เทอร์โบ) ของ Supercharger ด้วยไอเสีย โดยทั่วไปจะเรียกว่า Turbocharge โดยเฉพาะอย่างยิ่งวิธี Turbocharge จะมีขนาดเล็ก และน้ำหนักเบา รวมทั้งเมื่อภาระของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นปริมาณลมจะเพิ่มขึ้น จึงมีประสิทธิภาพเชิงกลสูงขึ้น สามารถเพิ่ม Mean effective pressure ได้ อย่างไรก็ตาม เมื่อเครื่องยนต์มีภาระต่ำหรือเมื่อมีความเร็วรอบต่ำซึ่งเมื่อไอเสียจะมีปริมาณลดลง จะไม่สามารถเพิ่มอากาศได้สูง รวมทั้งความเฉื่อยในการหมุนของ Turbocharger ยังทำให้เกิดการหน่วงเวลา ทำให้เครื่องยนต์ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงภาระได้ช้าลง รวมทั้งยังมีข้อจำกัดด้านวัสดุเนื่องจากอุณหภูมิของไอเสียอีกด้วย จึงต้องทำความเข้าใจไว้ล่วงหน้า

นอกจากนี้ เมื่อเพิ่มระดับการ Supercharge จะทำให้อุณหภูมิของผนังห้องเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิไอเสีย อุณหภูมิของก๊าซผสมหลังอัดแล้ว และภาวะความร้อนเพิ่มสูงขึ้น นอกจากจะจุดระเบิดเอง (น็อก) ได้ง่ายแล้ว ยังทำให้มีความเค้นจากความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างมากเนื่องจากความดันสูงสุดของการเผาไหม้เพิ่มขึ้นอีกด้วย ดังนั้น จึงต้องพิจารณาเรื่องความทนทานทั้งเชิงความร้อนและเชิงกลของวัสดุ เช่น การไหม้หรือแตกร้าวของฝาสูบ เป็นต้น รวมทั้งปลอกสูบ แหวนปะเก็น และร่องวงแหวนจะมีการสึกหรอรุนแรงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการใช้น้ำมันหนักจะต้องใช้ความระมัดระวัง

3. การน็อก

ได้อธิบายไปแล้วว่าหากสามารถทำให้เครื่องยนต์ Otto cycle มีอัตราส่วนกำลังอัดสูงได้ ประสิทธิภาพความร้อนตามทฤษฎีจะสูงขึ้นโดยไม่ขึ้นกับขนาดความจุของเครื่องยนต์ ภาวะ ความเร็วรอบ หรืออัตราส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ ฯลฯ อย่างไรก็ตามสำหรับเชื้อเพลิงที่มีจำหน่ายในท้องตลาดเมื่อเครื่องยนต์มีภาระสูงจะเกิดการเผาไหม้อย่างรวดเร็วกว่าปกติภายในกระบอกสูบที่มีอัตราส่วนกำลังอัดต่ำ

กว่าค่าในอุดมคติมาก เกิดเป็นเสียงน็อก (หรือน็อก) และทำให้กำลังขาออกรวมทั้งประสิทธิภาพความร้อนลดลง จึงไม่สามารถเพิ่มอัตราส่วนกำลังอัดให้สูงเกินกว่าค่าหนึ่งได้ ชีตจำกัดนี้เรียกว่า ค่า Maximum effective compression ratio

ในการลุกไหม้ของเปลวไฟของก๊าซผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ ส่วนที่เผาไหม้เป็นส่วนสุดท้าย (end gas) จะเผาไหม้อย่างรวดเร็ว ทำให้ความดันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วด้วย ดังนั้น ความดันภายในกระบอกสูบจึงไม่สมดุล เกิดเป็นคลื่นความดันหรือคลื่นกระแทกที่มีการสั่นสะเทือนสูงมาก เสียงน็อกเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการที่คลื่นนี้สะท้อนไปมาในห้องเผาไหม้ และกระแทกห้องเผาไหม้หลายๆ ครั้ง เรียกว่า knock หรือ knocking

end gas จะได้รับแรงอัดจากลูกสูบและการลุกไหม้ของเปลวไฟจนมีอุณหภูมิและความดันสูง ผลคือจะไปเร่งการถ่ายเทความร้อนให้แก่ผนังห้องเผาไหม้ ทำให้มีความร้อนสูญเสียมากขึ้นและรอบๆ ลูกสูบมีความร้อนสูงเกินไป ไม่เพียงแต่จะชักนำให้เกิดการเผาไหม้อย่างผิดปกติอื่นๆ ทำให้แหวนลูกสูบไหม้หรือลูกสูบเสียหาย แต่ในกรณีที่แรงกระแทกมีความรุนแรง อาจทำให้เกิดความเสียหายเชิงกล เช่น กระบอกสูบแตกหักเสียหายได้ เป็นต้น

เชื้อเพลิงแต่ละชนิดมีสมบัติในการต้านทานการน็อกเมื่ออัตราส่วนกำลังอัดมีค่าต่ำและสูงแตกต่างกัน คุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่ไม่เกิดการน็อกที่อัตราส่วนกำลังอัดสูง เรียกว่าสมบัติ Anti-knock (ความต้านทานการน็อก) ซึ่งดัชนีชี้วัดตัวหนึ่งได้แก่ ค่าออกเทน ค่านี้ใช้เฮปเทนซึ่งเป็นองค์ประกอบที่เกิดการน็อกง่ายที่สุดของน้ำมันเบนซินและไอโซออกเทนซึ่งเกิดการน็อกได้ยากที่สุดเป็นมาตรฐาน โดยค่าออกเทนของเชื้อเพลิงจะเท่ากับสัดส่วนโดยปริมาตรเทียบเป็นร้อยละของไอโซออกเทนในเชื้อเพลิงมาตรฐานที่เป็นส่วนผสมของสารทั้งสองตัวซึ่งมีความต้านทานการน็อกเท่ากับเชื้อเพลิงนั้นๆ

เงื่อนไขของเชื้อเพลิงที่ทำให้ไม่เกิดการน็อก จะต้องมีย่านออกเทนสูง ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการน็อก เช่น อุณหภูมิติดไฟด้วยตัวเอง ระยะเวลาติดไฟ (Ignition delay) ความเร็วของเปลวไฟ ฯลฯ จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบในเชื้อเพลิง โดยทั่วไปองค์ประกอบที่มีโครงสร้างโมเลกุลเรียบง่าย มีจำนวนอะตอมคาร์บอนมากเป็นโซ่ยาว และมีจุดเดือดยิ่งต่ำจะยิ่งน็อกยาก

ในเครื่องยนต์ดีเซล หากระยะเวลาติดไฟ (ระยะเวลาตั้งแต่ฉีดพ่นเชื้อเพลิงจนถึงติดไฟ) มีระยะเวลานานเกินไป ปริมาณก๊าซผสมที่ติดไฟได้ซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างนั้นจะมีเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการกระแทกเนื่องจากการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ดีเซลน็อก ตัวชี้วัดตัวหนึ่งเกี่ยวกับความสามารถในการติดไฟของเชื้อเพลิงดีเซล เรียกว่า ค่าซีเทน (Cetane number) และสำหรับเชื้อเพลิงก๊าซ จะใช้ค่ามีเทน (ตารางที่ 3.1)

ในการระบุค่าซีเทน จะให้ Cetane ซึ่งมีสมบัติการติดไฟดี มีค่าซีเทนเท่ากับ 100 และให้ Heptamethylnonane ซึ่งมีสมบัติการติดไฟไม่ดี มีค่าซีเทนเท่ากับ 15 แล้ววัดโดยใช้สมบัติการติดไฟของเชื้อเพลิงมาตรฐานซึ่งมีส่วนผสมของสารทั้งสอง และทราบค่าซีเทนอยู่แล้วเป็นเกณฑ์ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากมีความยุ่งยากในการวัด โดยทั่วไปจึงระบุด้วยค่า Cetane index ซึ่งหาได้จากการคำนวณจากสมบัติของเชื้อเพลิง ค่า Cetane index มีความสอดคล้องกับค่าที่วัดจริง และแม้แต่มมาตรฐาน JIS ก็ยอมรับให้ใช้ได้ การติดไฟให้ได้ดีภายใต้อุณหภูมิต่ำ จะต้องเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีค่าซีเทนสูง และระเหยง่าย น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีค่าซีเทนต่ำจะมีระยะเวลาติดไฟสูง และมีเปลวไฟยาว ทำให้ความสามารถในการเผาไหม้ต่ำลง และผลกระทบนั้นจะเห็นชัดเจนโดยเฉพาะอย่างยิ่งในเครื่องยนต์ความเร็วปานกลาง

ปัจจัยที่ช่วยลดการน็อกของก๊าซผสม ได้แก่ การลดระยะเวลาการลุกไหม้ของเปลวไฟ การลดความไม่สม่ำเสมอของเชื้อเพลิง การลดอุณหภูมิ และความดันของก๊าซผสม การใช้ก๊าซผสมที่เข้มข้น (Rich) หรือเบาบาง (Lean) เป็นต้น สำหรับอุณหภูมิของไอดี อุณหภูมิต่ำจะทำให้เกิดการน็อกได้ยากกว่า แม้แต่ในเครื่องยนต์ supercharge ก็ควรทำให้มีอุณหภูมิไม่เกิน 30°C การเดินเครื่องโดยให้ความร้อนแก่ไอดีเพื่อเร่งการกลายเป็นไอของเชื้อเพลิง เป็นสิ่งที่ไม่ควรทำในแง่ของการป้องกันการน็อก อย่างไรก็ตาม ในเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ น้ำมันหนัก C หากอุณหภูมิไอดีต่ำเกินไป จะเกิดการกัดกร่อนด้วยกรดไนตริกเนื่องจากเกิดน้ำควบแน่นขึ้น จึงต้องระมัดระวัง

ด้วยเหตุผลข้างต้น หากต้องการหลีกเลี่ยงการน็อก จะมีข้อจำกัดเรื่อง Net mean effective pressure โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยหัวเทียนเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซลแล้ว จะมีช่วงที่สามารถเผาไหม้ได้แคบกว่า เนื่องจากถ้าอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศหากเข้มข้นไปเครื่องยนต์จะน็อก หากเบาบางไปเครื่องยนต์จะสันเสียได้ง่าย

3.11.4 การเดินเครื่องและบำรุงรักษา

ชิ้นส่วนที่มีปัญหาเรื่องอายุการใช้งานในเครื่องจักรพลังความร้อน ส่วนใหญ่จะเป็นชิ้นส่วนที่ได้รับความร้อนสูง ซึ่งจะได้รับผลกระทบจากเชื้อเพลิงที่ใช้ ความดัน อุณหภูมิ ความเร็วรอบ และสภาพการเดินเครื่อง (Load ratio วิธี และจำนวนครั้งที่ติดเครื่อง-ดับเครื่อง เป็นต้น) ในการเผาไหม้ของเครื่องยนต์สันดาปภายใน ระยะเวลาการเผาไหม้ต่อ 1 รอบจะมีเวลาสั้นมาก จึงต้องใช้ความระมัดระวังในการคงไว้ซึ่งสมรรถนะของระบบหัวฉีดเชื้อเพลิง

พื้นฐานการเดินเครื่องของเครื่องจักรพลังความร้อน จะต้องพยายามให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ในการเดินเครื่องต่อเนื่องด้วยภาระคงที่โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน การเปลี่ยนแปลงภาระและการติดเครื่อง-ดับเครื่องซ้ำๆ กันจะมีอิทธิพลอย่างมากต่ออายุการใช้งาน นอกจากนี้ การเดินเครื่องด้วยภาระต่ำหรือเดินเบาเป็นระยะเวลานาน ไม่เพียงแต่จะมีประสิทธิภาพต่ำเท่านั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเครื่องยนต์ดีเซลจะเกิดปัญหาในกระบอกสูบ เช่น จะเกิดโคลนหรือเลน (Sludge) เพิ่มขึ้น การผุกร่อน ฯลฯ เพิ่มขึ้น จึงต้องใช้ความระมัดระวัง

ปัญหาที่สำคัญอีกประการหนึ่งในการเพิ่มสมรรถนะของเครื่องยนต์สันดาปภายในด้วยการเพิ่มอัตราส่วนกำลังอัดหรือวิธีอื่นๆ ได้แก่ การที่ก๊าซเผาไหม้รั่วออกมาระหว่างปลอกสูบกับแหวนลูกสูบ ซึ่งไม่เพียงแต่จะมีผลกระทบอย่างมากต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์เท่านั้น แต่ยังทำให้น้ำมันหล่อลื่นที่ผนังปลอกสูบแห้ง น้ำมันหล่อลื่นเสื่อมคุณภาพ อุณหภูมิของแบร้งสูงขึ้น ฯลฯ และเป็นสาเหตุให้เครื่องยนต์มีความทนทานลดลงอีกด้วย จึงต้องมีการบำรุงรักษาและควบคุมอย่างถี่ถ้วน

ค่าเชื้อเพลิงและค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเป็นหัวข้อสำคัญข้อหนึ่งที่มีผลต่อต้นทุนชีวิต ความคุ้มทุน เมื่อค่าแรงสูงขึ้น ค่าบำรุงรักษาจะมีแนวโน้มสูงขึ้นด้วย ในจำนวนนั้น หากสามารถยืดอายุของน้ำมันหล่อลื่นซึ่งมีระยะเวลาการเปลี่ยนถ่ายค่อนข้างสั้นออกไปได้ จะสามารถยืดระยะเวลาที่ต้องหยุดเครื่องเพื่อซ่อมบำรุงเป็นระยะได้ จึงช่วยเพิ่มอัตราการใช้เครื่องของระบบ

นอกจากนี้ ในการคงไว้ซึ่งสมรรถนะเป็นระยะเวลานานอย่างได้สมดุล ด้วยการหล่อลื่นและระบายความร้อนลูกสูบ แหวนลูกสูบ ปลอกสูบซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่มีอุณหภูมิสูง โดยไม่ให้ร้อน สึกหรอ หรือไหม้ ฯลฯ จะต้องใช้น้ำมันหล่อลื่นซึ่งมีระดับคุณภาพ และความหนืดเหมาะสมที่สุดกับเครื่องยนต์รุ่นนั้นๆ และเหมาะสมกับวัตถุประสงค์การใช้งาน ไม่ว่าจะทำอย่างไรก็ตาม น้ำมันหล่อลื่นจะรั่วเข้าไปในกระบอกสูบและเกิด

การเผาไหม้ ดังนั้น หากใช้น้ำมันที่ Base number สูงเกินไป ในเครื่องยนต์ดีเซลต่างๆ ที่ใช้น้ำมันหนัก จะเกิดโคลนหรือเลน (Sludge) จำนวนมากขึ้นที่ส่วนต่างๆ ในห้องเผาไหม้ ทำให้แหวนลูกสูบกับปลอกสูบมีความเสียดทานสูง หรือกลายเป็นศูนย์กลางของการเผาไหม้ผิดปกติ ปัญหาเรื่องความเหมาะสมระหว่างเชื้อเพลิงกับน้ำมันหล่อลื่น ในกรณีที่มีการสับเปลี่ยนใช้เชื้อเพลิงหลายชนิด จะเกิดปัญหาเช่นเดียวกันขึ้นระหว่างเชื้อเพลิงต่างชนิดกันด้วย จึงต้องใช้ความระมัดระวัง

การหล่อลื่นของระบบวาล์วโดยสร้างฟิล์มน้ำมันในชิ้นส่วน ก็เป็นจุดจับเคลื่อนที่สมบุกสมบันเช่นกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเครื่องยนต์แก๊ส เนื่องจากเชื้อเพลิงสามารถเผาไหม้ได้ดี จึงมีสารตกค้างน้อย ห้องเผาไหม้จะไม่ค่อยสกปรก อย่างไรก็ตาม เทียบกับเครื่องยนต์เบนซินและเครื่องยนต์ดีเซลแล้ว อนุภาคน้ำมันจะสูงกว่า และอุณหภูมิของน้ำมันในอ่างน้ำมันหล่อลื่นจะสูงถึง 90-100°C ซึ่งเป็นสภาพที่เข้มงวดสำหรับน้ำมันหล่อลื่น

สำหรับการสึกหรอ โดยทั่วไปเพียงแค่เพิ่มสารป้องกันการเสียดสีพวกฟอสฟอรัส (P) ในน้ำมันหล่อลื่นก็เพียงพอ และสำหรับสารทำความสะอาดโลหะ หากมีแคลเซียม (Ca) ในปริมาณสูงขึ้นการทนการเสียดสีจะมีแนวโน้มดีขึ้น อย่างไรก็ตาม P, Ca และสังกะสี (Zn) ต่างๆ เหล่านี้ในน้ำมันหล่อลื่น เป็นธาตุที่ทำลายตัวเร่งปฏิกิริยาใน three-way catalytic converter ซึ่งเป็นวิธีหลักในการลดปริมาณ NO_x ในประเทศญี่ปุ่น ทำให้ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาลดลงและอายุการใช้งานสั้นลง จึงต้องพยายามให้มีปริมาณน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ เป็นที่ทราบกันว่า P ทำให้เกิดสารที่มีลักษณะคล้ายแก้ว ซึ่งจะไปอุดตันรูเล็กของตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ เมื่อมี Zn ไปเกาะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา จะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาดูดซับ CO ได้น้อยลง เป็นปัญหาทำให้ความสามารถในการเลือกரிดิช NO ลดลง เป็นต้น การเลือกใช้น้ำมันหล่อลื่นที่เหมาะสม รวมทั้งการเลือกสารเติมแต่ง จึงต้องระวังไม่ให้ไปทำลายตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย

น้ำมันหล่อลื่นจะสัมผัสกับ NO_x ใน Blow-by gas ด้วย จึงต้องมี Base number ที่เหมาะสมเพื่อทำให้กรดไนตริกซึ่งเกิดจาก NO_x รวมตัวกับน้ำมันสภาพเป็นกลางเพื่อป้องกันชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ไม่ให้ผุกร่อนจากกรด นอกจากนี้ น้ำมันหล่อลื่นยังต้องมีความสามารถในการทำให้กรดเป็นกลางเพื่อป้องกันการเกิดสนิมที่ชิ้นส่วนของเครื่องยนต์เนื่องจากสารกัดกร่อน รวมทั้งความสามารถในการทำมาสะอาดและกระจายตะกอนที่เกิดขึ้น และสะสมในร่องแหวนลูกสูบต่างๆ ให้กระจายออกไปในน้ำมัน เพื่อรักษาการทำงานอย่างราบรื่นของชิ้นส่วนต่างๆ และป้องกันการเสียดสีอีกด้วย ยิ่งไปกว่านั้น ยังใช้น้ำมันหล่อลื่นที่มีความเป็นด่างสูงซึ่งมีเสถียรภาพดี ไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง เพื่อป้องกันการผุกร่อน การเสียดสี และการสะสมของสารที่เกิดจากการเผาไหม้ ดังนั้น สิ่งที่สำคัญในการทำให้ น้ำมันหล่อลื่นมีอายุการใช้งานยาวนาน ได้แก่ การใช้ base oil ที่มีเสถียรภาพดีต่อความร้อน และปฏิกิริยากับออกซิเจน โดยไม่ให้มีสารพวก Naphthobenzene กำมะถัน ไนโตรเจน ฯลฯ ซึ่งจะทำให้ น้ำมันหล่อลื่นสูญเสียความเฉื่อยต่อปฏิกิริยากับออกซิเจน รวมทั้งต้องเพิ่มดัชนีความหนืดและทำให้ระเหยได้ยาก จึงจะไม่กินน้ำมันหล่อลื่น สำหรับความหนืดยังต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับอุณหภูมิของน้ำระบายความร้อนอีกด้วย

การเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น ตามหลักการในอุดมคติแล้วควรทำการเฝ้าติดตาม และควบคุมการเปลี่ยนแปลงของ Base number และความหนืด รวมทั้งโคลนหรือเลน (Sludge) ต่างๆ และหากทำได้ควรทำการจัดระบบในการเปลี่ยนถ่ายด้วย

ทั้งนี้ต้องระมัดระวังไม่ให้น้ำระบายความร้อนเย็นจนเป็นน้ำแข็ง และต้องตรวจสอบคุณภาพน้ำด้วย ในเครื่องยนต์สันดาปภายใน น้ำระบายความร้อนจะมีอุณหภูมิสูง ดังนั้น กรณีที่น้ำระบายความร้อนมีคุณภาพไม่เหมาะสมจะทำให้ผนังด้านในเสื้อสูบผุกร่อน และมีแร่ธาตุต่างๆ มาสะสมอยู่ ทำให้เครื่องยนต์

ร้อนเกินไป บางครั้งอาจเกิดอุบัติเหตุร้ายแรงได้ รวมทั้งต้องระมัดระวังการแผ่ของของน้ำระบายความร้อนที่หม้อน้ำด้วย

ด้วยเหตุผลข้างต้น เนื่องจากไม่สามารถหลีกเลี่ยงความสกปรก และการสึกหรอของชิ้นส่วนต่างๆ ในการเดินเครื่องเครื่องยนต์สันดาปภายในได้ เพื่อให้สามารถเดินเครื่องอย่างต่อเนื่องโดยมีประสิทธิภาพสูงสม่ำเสมอ จึงต้องมีการใช้งาน ซ่อมบำรุง และควบคุมอย่างเป็นระบบ ในการทำเช่นนี้ต้องกำหนดระยะเวลาในการซ่อมบำรุง กำหนดเกณฑ์เกี่ยวกับขอบเขตในการ Overhaul และการเปลี่ยนชิ้นส่วนต่างๆ เพื่อให้เกิดการอนุรักษ์พลังงาน และความคุ้มค่าสูงสุด

3.11.5 ปัญหาสิ่งแวดล้อม

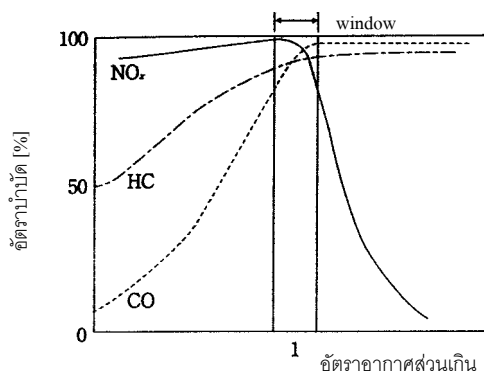
ปัญหาสิ่งแวดล้อมของเครื่องยนต์สันดาปภายใน ได้แก่ เสียงดัง การสั่นสะเทือน มลพิษทางอากาศ เป็นต้น

แหล่งกำเนิดเสียงหลักๆ มีอยู่ 3 แห่ง ได้แก่ ตัวเครื่องยนต์ เครื่อง Supercharger และท่อไอเสีย สำหรับ Supercharger สามารถป้องกันได้ด้วยการติดตั้งห้องดูดไอดี และใช้เครื่องเก็บเสียงไอดีก็บวสดูดซับเสียงบุนั่นภายในห้อง สำหรับเสียงจากท่อไอเสียเนื่องจากมีเสียงความถี่ต่ำรวมอยู่ด้วย จึงต้องป้องกันให้ครอบคลุมถึงความดันอากาศของเสียงความถี่ต่ำในช่วงที่หูไม่ได้ยินอีกด้วย

สำหรับการสั่นสะเทือนโดยทั่วไปจะสามารถแก้ไขได้ดี จึงไม่ค่อยเป็นปัญหา

สารก่อมลพิษทางอากาศที่มีอยู่ในก๊าซไอเสีย ประกอบด้วย ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ออกไซด์ของกำมะถัน (SO_x) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ (HC) ฝุ่นละออง เป็นต้น สำหรับ SO_x สามารถแก้ไขได้ด้วยการเลือกเชื้อเพลิงที่ใช้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเครื่องยนต์แก๊สซึ่งการเลือกใช้เชื้อเพลิงที่สะอาด จึงเผาไหม้ได้ดี มีความสกปรกและการสึกหรอจากสารที่เหลือจากการเผาไหม้ต่างๆ น้อย รวมทั้งสามารถลดและกำจัด NO_x , CO , HC ฯลฯ ได้ง่ายกว่าอีกด้วย

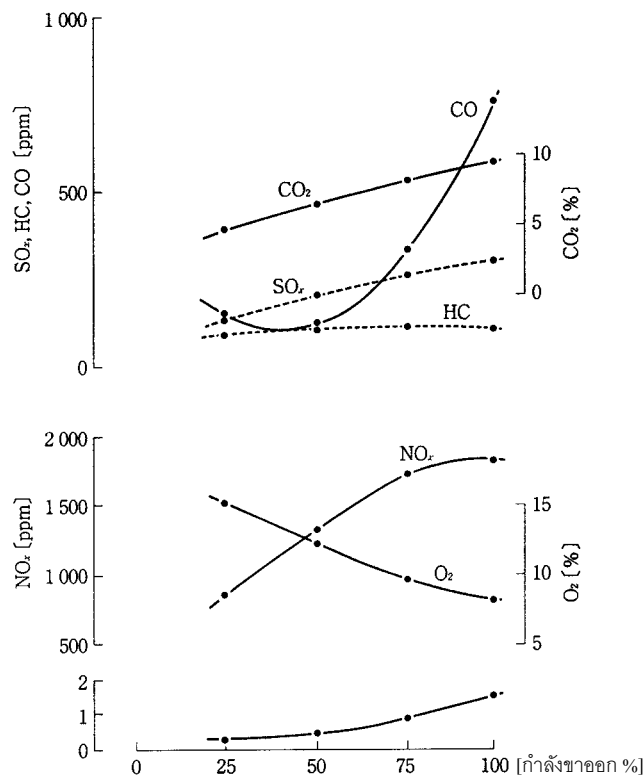
เทคโนโลยีการลด NO_x มีดังต่อไปนี้ กล่าวคือ มาตรการด้านโครงสร้างภายในของเครื่องยนต์ ได้แก่ (1) วิธีหมุนเวียนก๊าซไอเสีย (EGR) (2) วิธีเผาไหม้เบาบาง (lean burn) และ (3) วิธี Three-way catalytic converter (ตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งสามารถบำบัด HC , CO , NO_x ทั้งสามตัวได้พร้อมๆ กัน) ซึ่งจะนำไอเสียมาบำบัดภายนอกเครื่องยนต์ หรือนำวิธีการข้างต้นมาใช้ร่วมกัน วิธี Three-way catalytic converter มีสมรรถนะสูงในการบำบัดก๊าซไอเสีย แต่จำเป็นต้องเดินเครื่องยนต์ด้วยอัตราอากาศส่วนเกินใกล้เคียงกับ 1.0 ดังรูปที่ 3.87 นอกจากนี้บางครั้งยังเกิดปัญหาจากสารทำลายตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นองค์ประกอบสารเติมแต่งเชื้อเพลิง และน้ำมันหล่อลื่นอีกด้วย



รูปที่ 3.87 คุณลักษณะการบำบัดก๊าซไอเสียของ Three-way catalytic converter

สำหรับองค์ประกอบในไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล องค์ประกอบ HC และ CO จะน้อยกว่าเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยหัวเทียน อย่างไรก็ตาม ปัญหาคือ SO_x , NO_x และเขม่า (รูปที่ 3.88) โดย SO_x สามารถแก้ไขได้ด้วยการเลือกเชื้อเพลิงที่ใช้ แต่สำหรับ NO_x จะมีความสัมพันธ์ตรงข้ามกับประสิทธิภาพความร้อน และการเกิดเขม่า นอกจากนี้ ยังไม่สะดวกในการใช้ Three-way catalytic converter ที่อธิบายข้างต้น จึงมีการพัฒนาวิธี EGR และ Three-way catalytic converter สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลขึ้น ปัจจุบันแม้ว่าจะพัฒนาดีขึ้นมาก แต่ก็ยังมีปัญหาอยู่

การใช้เครื่องยนต์ Supercharge เทียบกับเครื่องยนต์ทั่วไปที่กำลังขาออกเท่ากันแล้วจะเกิดฝุ่นละอองน้อยกว่า แต่จะมี NO_x เพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.88 ตัวอย่างสภาพก๊าซไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล

3.12 ระบบเตาเผา

เมื่อให้ความร้อนแก่วัตถุใด สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของวัตถุนั้นจะเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนั้นการให้ความร้อนยังช่วยให้เกิดปฏิกิริยาเคมีอีกด้วย เตาอุตสาหกรรมเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิต โดยอาศัยผลลัพธ์ของความร้อนดังกล่าวในการถลุงวัตถุดิบ หลอม แปรรูปด้วยความร้อน ทำกรรมวิธีความร้อน แต่งผิว เป็นต้น ดังแสดงใน ตารางที่ 3.29 เตาอุตสาหกรรมหลักๆ ที่ใช้ในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ

ตารางที่ 3.29 เตาอุตสาหกรรมหลักๆ ที่ใช้ในอุตสาหกรรม

กิจการ	ชนิดของเตา
ถลุงเหล็ก	blast furnace, hot blast stove, sintering furnace, pelletizing furnace, coke oven
เหล็กกล้า รีดเหล็ก	revolving furnace, arc furnace, heating furnace, forging furnace
รถยนต์ เครื่องจักร	annealing furnace, brazing furnace, carburizing furnace, nitrogenation oven, sintering furnace, plating furnace, เครื่องกำเนิดบรรยากาศควบคุม
เหล็กหล่อ	cupola, เตาหลอมเหนียวน้ำ, heat treating furnace
โลหะอื่นนอกจากเหล็ก	smelting furnace, melting furnace, soaking pit, heating furnace, heat treating furnace (annealing, brazing, sintering), calciner
เซรามิก	melting furnace (แก้ว วัสดุทนไฟ glaze), calciner (วัตถุดิบสำหรับเซรามิก) baking furnace (ซีเมนต์ วัสดุทนไฟ ปูนขาว คาร์บอน เครื่องปั้นดินเผา กระเบื้อง หินลับมีด enamel) heat treating furnace (กระจกแผ่น หลอดภาพโทรทัศน์ ขวด เป็นต้น) graphitizing furnace (คาร์บอน)
อุตสาหกรรมเคมี	coke oven, gas generator, เตาให้ความร้อนน้ำมันปิโตรเลียม, cracking furnace, reformer
สิ่งแวดล้อม	เตาเผาขยะอุตสาหกรรม เตาเผาก๊าซไอเสีย

3.12.1 โครงสร้างพื้นฐานของเตาอุตสาหกรรม

โดยทั่วไปเตาอุตสาหกรรมจะประกอบด้วยส่วนประกอบต่อไปนี้

- (1) ฐาน : หากเตาไม่ได้มีน้ำหนักเบาเป็นพิเศษ โดยทั่วไปจะต้องมีฐานคอนกรีตเพื่อรองรับน้ำหนักของเตา
- (2) เปลือกเตา : เตาในปัจจุบันเกือบทั้งหมด จะห่อหุ้มด้วยเปลือกเตาที่ทำด้วยเหล็กแผ่น เชื่อมติดกับวัสดุเสริมความแข็งแรง เปลือกเตาจะรองรับฉนวนความร้อนที่ประกอบเป็นพื้นเตา ผนังเตา เพดานเตา ฯลฯ นอกจากนี้ ยังป้องกันก๊าซบรรยากาศภายในเตารั่วไหลออกไปภายนอก และป้องกันอากาศภายนอกเข้ามาอีกด้วย
- (3) โครงสร้างฉนวนความร้อน : โครงสร้างฉนวนความร้อนของผนังเตา ประกอบด้วย ฉนวนความร้อนทนไฟต่างๆ เช่น อิฐ เป็นต้น ฉนวนความร้อนทนไฟจะต้องเลือกใช้วัสดุ และโครงสร้างที่ทนทานต่อสภาพการใช้งาน เช่น อุณหภูมิและบรรยากาศของเตา แรงกระทำเชิงกล ฯลฯ รวมทั้งต้องลดความร้อนสูญเสียเนื่องจากการแผ่รังสี และการนำความร้อนให้เหลือน้อยที่สุด นอกจากนี้ เพื่อป้องกันพื้นผิวของชิ้นงานไม่ให้สกปรกจากฝุ่นฉนวนกันความร้อน บางครั้งจะบุด้านในเตาด้วยแผ่นเหล็กทนความร้อนอีกด้วย
- (4) อุปกรณ์ให้ความร้อน : วัตถุประสงค์ของเตาคือ การให้ความร้อนแก่วัตถุดิบ ดังนั้นจึงต้องมีอุปกรณ์ให้ความร้อน ซึ่งแบ่งคร่าวๆ ได้เป็นการให้ความร้อนด้วยการเผาไหม้กับการให้ความร้อนด้วยพลังงานไฟฟ้า
- (5) เครื่องลำเลียงวัตถุดิบ : เป็นอุปกรณ์ลำเลียงวัตถุดิบเข้าไปและออกจากเตา หรือ เคลื่อนย้ายวัตถุดิบภายในเตา เครื่องลำเลียงมีหลายชนิด สำหรับใช้กับเตาแบบ Batch และเตาแบบต่อเนื่อง อาจกล่าวได้ว่าความแตกต่างของประเภทของเตาโดยมากจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของประเภทของเครื่องลำเลียง

(6) อุปกรณ์นำความร้อนกลับมาใช้ : เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์จากพลังงานความร้อน ในเตาแบบเผาไหม้โดยมากจะมีอุปกรณ์นำความร้อนทิ้งจากความร้อนสัมผัสของก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้กลับมาใช้ประโยชน์ นอกจากนี้ ยังมีการนำความร้อนสัมผัสของวัตถุดิบกลับมาใช้กันมากอีกด้วย

(7) เครื่องควบคุม : เป็นอุปกรณ์ปรับอุณหภูมิ ความดัน อัตราไหล องค์ประกอบ ฯลฯ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือพร้อมๆ กันเพื่อรักษาสภาพการเดินเครื่องของเตาให้มีเสถียรภาพ เครื่องควบคุมมีหลายชนิดตั้งแต่ควบคุมลูปเดียวจนถึงควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ซึ่งสามารถควบคุมการผลิตได้ด้วย

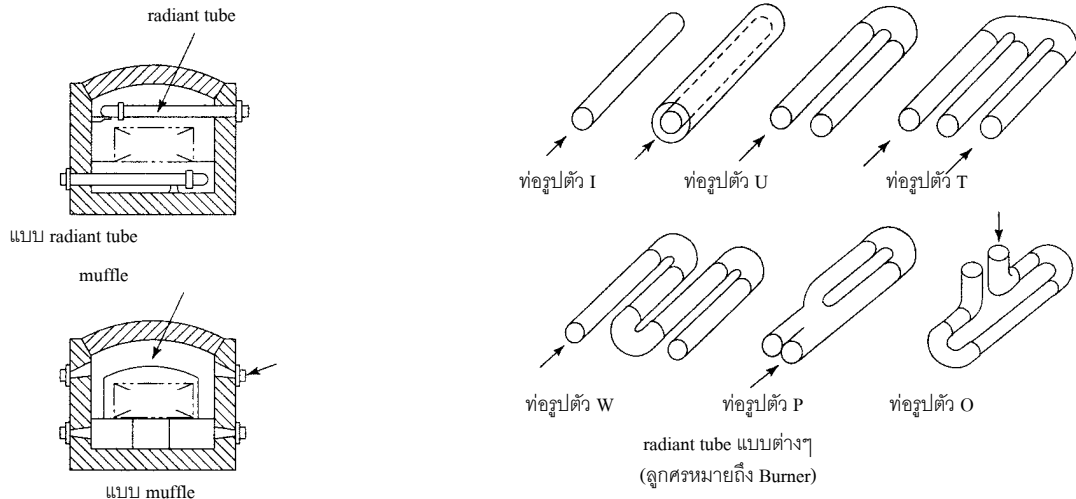
3.12.2 ประเภทของเตาอุตสาหกรรม

เตาอุตสาหกรรมผลิตขึ้นด้วยเทคโนโลยีแบบบูรณาการ ประกอบด้วย วิศวกรรมการเผาไหม้ วิศวกรรมการถ่ายเทความร้อน เทอร์โมไดนามิกส์ กลศาสตร์ของไหล วิศวกรรมโลหะ วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมวัสดุศาสตร์ วิศวกรรมปฏิกิริยา เป็นต้น เตาอุตสาหกรรมจะมีปัจจัยสำคัญแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การใช้งาน จึงไม่สามารถจำแนกได้อย่างเด็ดขาด

ในการแบ่งประเภทเตาอุตสาหกรรม จะมีปัจจัยอยู่ 5 ตัวที่จำเป็นในการประเมินลักษณะของเตา ได้แก่ วัตถุที่ต้องการให้ความร้อน เป้าหมายการให้ความร้อน แหล่งความร้อน วิธีเดินเครื่อง และปริมาณผลผลิต และประเภทของเตา ในจำนวนนี้ โดยมากจะแบ่งประเภทเตาด้วยปัจจัย 3 ตัว ได้แก่ แหล่งความร้อน วิธีเดินเครื่อง และปริมาณผลผลิต และประเภทของเตา

3.12.2.1 แหล่งความร้อนและวิธีให้ความร้อน

เมื่อแบ่งประเภทเตาอุตสาหกรรมตามแหล่งความร้อนที่ใช้ในการให้ความร้อน จะแบ่งได้เป็นเตาเผากับเตาไฟฟ้า เตาเผายังแบ่งออกได้เป็นกรณีที่ใช้เชื้อเพลิงแข็ง เช่น ถ่านโค้ก ถ่านหิน ฯลฯ กับกรณีที่ใช้เชื้อเพลิงเหลวและเชื้อเพลิงก๊าซ ส่วนเตาไฟฟ้าจะแบ่งออกได้เป็น Resistance furnace, Induction furnace, Arc furnace, Electron beam furnace และ Plasma furnace นอกจากนี้ เตาเผายังแบ่งเป็นแบบให้ความร้อนโดยตรงโดยให้ก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้สัมผัสกับวัตถุดิบโดยตรง กับแบบให้ความร้อนทางอ้อมซึ่งก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้จะไม่สัมผัสกับวัตถุดิบโดยตรงเพื่อไม่ให้เกิดการ Oxidation และ Decarbonization อีกด้วย โดยรูปธรรมแล้วแสดงไว้ในรูปที่ 3.89 โดยมีวิธีเผาไหม้เชื้อเพลิงในท่อปิดทำจากโลหะผสมทนความร้อนหรือเซรามิก เรียกว่า Radiant tube แล้วให้ความร้อนวัตถุดิบด้วยการแผ่รังสีความร้อนจากผิวด้านนอกท่อที่ได้รับความร้อน กับวิธีที่ครอบวัตถุดิบด้วยภาชนะทำจากโลหะผสมทนความร้อนหรือเซรามิก เรียกว่า Muffle แล้วให้ความร้อนวัตถุดิบด้วยการแผ่รังสีความร้อนจากผิวด้านในของ Muffle ที่ได้รับความร้อน เป็นต้น



รูปที่ 3.89 การให้ความร้อนทางอ้อมด้วยเตาเผา

ตารางที่ 3.30 แสดงตัวอย่างการแบ่งประเภทตามแหล่งความร้อน และวิธีให้ความร้อนในกรณีของเตาสำหรับโลหะ การให้ความร้อนด้วยการเผาไหม้โดยทั่วไปจะมีข้อดีดังต่อไปนี้

(1) ต้นทุนพลังงานมีราคาต่ำ : ในการใช้ประโยชน์จากสมบัติข้อนี้จะต้องนำปริมาณความร้อนสูญเสียที่ก๊าซไอเสียในเตา

ตารางที่ 3.30 ตัวอย่างวิธีให้ความร้อนของเตาสำหรับโลหะและวัสดุประสงค์การใช้งาน

ชนิดเตา	แหล่งความร้อน		วัตถุประสงค์การใช้งานเตา	
			ให้ความร้อนโดยตรง	ให้ความร้อนทางอ้อม
เตาเผา	เชื้อเพลิงแข็ง	ถ่านหิน ถ่านโค้ก ฯลฯ	smelting, steel making, forging	
	เชื้อเพลิงเหลว	น้ำมันหนัก น้ำมันก๊าด ฯลฯ	rolling, forging, quenching, tempering, annealing, normalizing, baking, plating	deoxygenation & bright heat treatment, quenching, annealing, carburizing, carburizing & denitrogenation, soft nitriding, sintering, brazing, hot blast generation
	เชื้อเพลิงก๊าซ	town gas โพรเพน บิวเทน ฯลฯ	drying, hot blast generation	
เตาไฟฟ้า	resistance furnace		เกือบเหมือนกับการให้ความร้อนทางอ้อมด้วยเตาเผา นอกจากนี้ยังใช้ทำ vacuum heat treatment, infrared heating, ohmic heating	
	inductance furnace	ความถี่สูง	ให้ความร้อนอย่างรวดเร็ว, surface quenching, melting, rolling, forging	
		ความถี่ต่ำ	melting, smelting, rolling, forging	
	arc furnace		steel making, หลอมโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก, ผลิต ferroalloy, แยกอลูมิเนียมด้วยไฟฟ้า	
	electron beam furnace		หลอมโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงและโลหะผสมที่มีความบริสุทธิ์สูง, evaporation coating, welding	
	plasma furnace		หลอมโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูง รีเวิร์ชแรอัท	

จะนำออกไป กลับมาใช้ในการอุ่นอากาศสำหรับเผาไหม้หรืออื่นๆ หากปล่อยก๊าซไอเสีย อุณหภูมิสูงทิ้งไป สมบัติข้อนี้จะไม่เป็นประโยชน์เลย

(2) สามารถใช้โมเมนตัมของก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ในการให้ความร้อนอย่างสม่ำเสมอได้ วิธีนี้จะได้เปรียบโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อให้ความร้อนด้วยการพาความร้อนในช่วงอุณหภูมิต่ำ

(3) สามารถทำ Forced firing ได้พอสมควร แม้จะมีความสูญเสียบ้าง คือ ประสิทธิภาพการเผาไหม้จะต่ำลงและอายุของฉนวนความร้อนทนไฟจะสั้นลง แต่ทำให้เตามีความยืดหยุ่นสูงขึ้น

(4) อุปกรณ์เผาไหม้ เช่น Burner, Blower หรือปั๊ม ฯลฯ มีต้นทุนต่ำกว่าอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยไฟฟ้า เช่น อุปกรณ์รับไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้า และ Heating element เป็นต้น

สำหรับข้อเสียดังต่อไปนี้

- (1) จะเกิดเสียงดังจากการเผาไหม้ จึงต้องมีมาตรการรองรับ
- (2) หากเชื้อเพลิงรั่วไหลจะมีอันตราย และก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีของเชื้อเพลิงก๊าซซึ่งส่วนใหญ่จะไม่มีสี จึงต้องมีมาตรการรองรับโดยคำนึงถึงอันตรายจากการติดไฟ
- (3) เชื้อเพลิงแข็งต้องมีวิธีเผาไหม้อย่างมีประสิทธิภาพสูง นอกจากนั้น ยังต้องหาวิธีกำจัดขี้เถ้าโดยไม่ก่อมลพิษอีกด้วย
- (4) อาจเกิดฝุ่นละออง NO_x และ SO_x จึงต้องใช้เชื้อเพลิงที่มีกำมะถันต่ำหรือติดตั้งเครื่องบำบัดก๊าซไอเสีย

ส่วนการให้ความร้อนด้วยไฟฟ้าโดยทั่วไปจะมีข้อดีดังต่อไปนี้

- (1) สามารถให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิสูงได้ง่ายกว่าการให้ความร้อนด้วยการเผาไหม้
- (2) สามารถทำให้วัตถุดิบมีอุณหภูมิสูงขึ้นจากภายในได้
- (3) สามารถให้ความร้อนภายใต้บรรยากาศควบคุมและสุญญากาศได้
- (4) ไม่มีความร้อนสูญเสียที่เทียบเท่ากับความร้อนสูญเสียที่ก๊าซไอเสียนำออกไปในการให้ความร้อนด้วยการเผาไหม้ จึงมีประสิทธิภาพสูง
- (5) ควบคุมอุณหภูมิได้ง่าย สามารถควบคุมละเอียด และควบคุมจากระยะไกลได้
- (6) สามารถให้ความร้อนได้รวดเร็ว
- (7) ทำงานได้สะดวก สภาพแวดล้อมก็สะอาด

สำหรับข้อเสียดังต่อไปนี้

- (1) อุปกรณ์รับไฟฟ้ามีต้นทุนสูง
- (2) ต้นทุนพลังงานมีราคาสูง
- (3) กรณีที่ให้ความร้อนด้วยความต้านทานไฟฟ้า ในช่วงอุณหภูมิสูงตั้งแต่ 1000°C ขึ้นไป ฉนวนความร้อนอาจจะนำไฟฟ้าได้ จึงต้องระมัดระวังเรื่องฉนวนไฟฟ้า

3.12.2.2 วิธีเดินเครื่องกับวิธีลำเลียงวัตถุดิบ

กรณีที่พิจารณาเตาด้วยรูปแบบการเดินเครื่อง จะแบ่งประเภทได้เป็นเตาแบบต่อเนื่องกับเตาแบบ batch และหากแบ่งด้วยรูปร่างของเตาแล้ว อาจแบ่งได้เป็นเตาแบบนอนกับเตาแบบตั้ง เครื่องลำเลียงวัตถุดิบจะมีหน้าที่ป้อนวัตถุดิบเข้าไปในเตาและนำออกมา ซึ่งเครื่องลำเลียงสำหรับเตาแบบต่อเนื่อง เตาแบบ Batch เตาแบบนอน และเตาแบบตั้งจะแตกต่างกัน

เตาแบบต่อเนื่องโดยทั่วไปวัตถุดิบจะถูกป้อนเข้าไปจากทางเข้าเตาด้านหนึ่งอย่างต่อเนื่อง และขณะที่เคลื่อนที่ภายในเตาด้วยความเร็วคงที่ จะมีการให้ความร้อนตามที่กำหนด วัตถุดิบที่ให้ความ

ร้อนหรือให้ความเย็นเสร็จแล้วจะออกมาจากทางออกอีกด้านหนึ่ง เตาแบบต่อเนื่องแบ่งเป็นแบบต่อเนื่องแท้จริงซึ่งวัตถุดิบจะถูกป้อน และนำออกจากเตาโดยไม่มีการพัก กับเตาแบบต่อเนื่องเป็นระยะซึ่งการป้อน และนำออกจากเตาจะเกิดขึ้นทุกช่วงเวลาที่กำหนด

เตาแบบ Batch เป็นวิธีที่เมื่อนำวัตถุดิบเข้าไปในเตาแล้ว วัตถุดิบจะวางอยู่ในเตาจนกว่าจะให้ความร้อนหรือความเย็นเสร็จ และถูกนำออกมา โดยมากมักมีทางเข้าและทางออกอยู่ที่เดียวกัน

ดังนั้น ในกระบวนการที่ต้องเปลี่ยนเงื่อนไขอุณหภูมิ และบรรยากาศตลอดไซเคิลการให้ความร้อน ในกรณีของเตาแบบต่อเนื่องจะแบ่งโซนตามทิศทางความยาวของเตาให้สอดคล้องกับไซเคิลการให้ความร้อน รักษาเงื่อนไขอุณหภูมิ และสภาพบรรยากาศของแต่ละโซนให้คงที่ แล้วลำเลียงวัตถุดิบด้วยความเร็วค่าหนึ่งก็ได้ไซเคิลการให้ความร้อนที่ต้องการ ในกรณีของเตาแบบ Batch จะใช้วิธีเปลี่ยนอุณหภูมิ และสภาพบรรยากาศภายในเตาให้สอดคล้องกับกำหนดเวลานั้น

ไม่ว่าจะเป็นเตาแบบต่อเนื่องหรือเตาแบบ Batch ก็สามารถให้ความร้อนหรือทำ Heat treatment พร้อมกันได้ สิ่งที่เป็นตัวกำหนดว่าจะเลือกใช้เตาแบบใดก็คือ ปริมาณผลผลิตที่ต้องการ และเงื่อนไขการเดินเครื่อง กล่าวคือ โดยทั่วไปเตาแบบต่อเนื่องจะเหมาะกับวัตถุดิบที่มีการผลิตน้อยชนิดแต่มีจำนวนมาก ส่วนเตาแบบ batch จะเหมาะกับวัตถุดิบที่แต่ละล็อตมีจำนวนน้อย

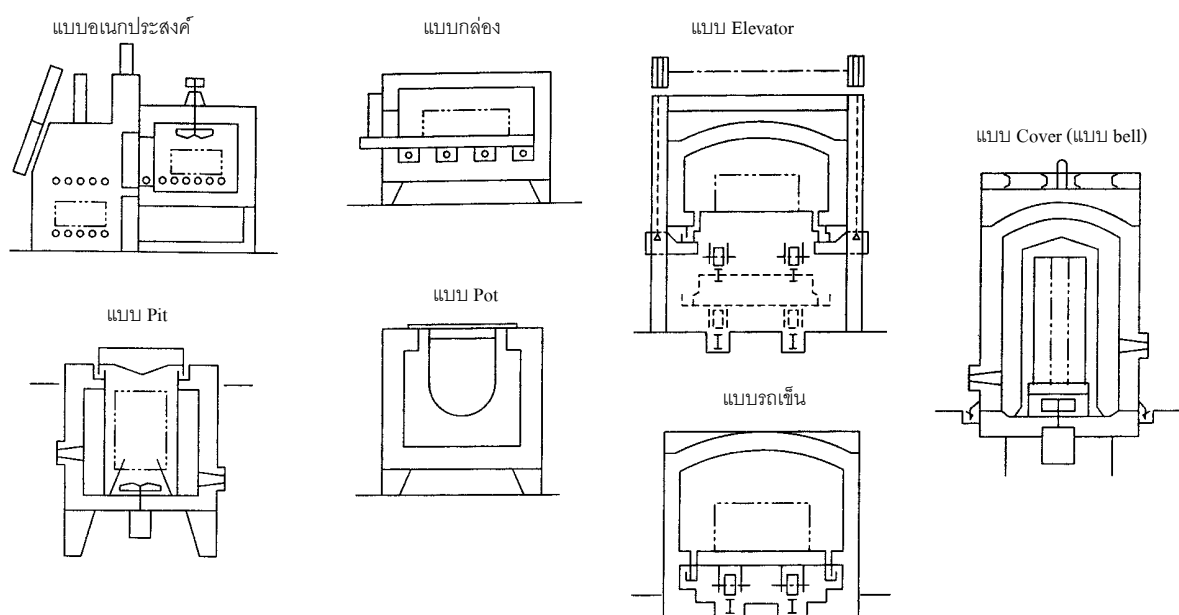
(1) ในการผลิตมากชนิด และมีจำนวนมาก จะใช้เตาแบบต่อเนื่อง หรือเตาแบบ Batch หลายตัวเดินเครื่องต่อเนื่อง

(2) ในการผลิตมากชนิดแต่มีจำนวนน้อย จะใช้เตาแบบ Batch

(3) ในการผลิตน้อยชนิดแต่มีจำนวนมาก จะใช้เตาแบบต่อเนื่องขนาดใหญ่เดินเครื่องต่อเนื่อง

(4) ในการผลิตน้อยชนิดแต่มีจำนวนน้อย จะใช้เตาแบบ Batch

เกณฑ์ตัดสินสุดท้ายว่าจะเลือกใช้เตาแบบต่อเนื่องหรือเตาแบบ Batch นอกจากลักษณะการเดินเครื่องแล้ว ยังต้องเปรียบเทียบต้นทุนเดินเครื่อง (เชื้อเพลิง กำลังไฟฟ้า น้ำ ฯลฯ) ต่อวัตถุดิบหนักหนึ่งหน่วย ซึ่งรวมถึง ความคุ้มทุนของต้นทุนค่าเตา ค่าบำรุงรักษา ค่าแรง ฯลฯ ด้วย



รูปที่ 3.90 ตัวอย่างเตาแบบ Batch ชนิดต่างๆ

(1) เตาแบบ Batch ชนิดต่างๆ และคุณสมบัติ

(ก) แบบบอเนกประสงค์ (แบบ all case)

เป็นการให้ความร้อนด้วย radiant tube หรือให้ความร้อนด้วยความต้านทานไฟฟ้า ใช้ในการทำ heat treatment โดยส่งก๊าซบรรยากาศควบคุมที่กำหนดเข้าไปในเตา

(ข) แบบ pit

พื้นที่ทำงานจะมีแต่ส่วนบนของเตาไหลออกมา ตัวเตาจะเป็นเตาแบบตั้งฝังอยู่ในหลุม

(ค) แบบบล็อกร

เป็นเตาที่มีโครงสร้างเรียบง่าย มีตั้งแต่ขนาดเล็กที่ใช้ในห้องทดลองจนถึงขนาดใหญ่ที่ใช้ในการ Annealing หรือให้ความร้อนแก่เหล็ก Ingot และเหล็ก Billet

(ง) แบบรถเข็น

นำวัตถุดิบบรรทุกใส่รถเข็นจากนอกเตา เปิดฝาเตาเข็นรถเข้าไป และปิดประตูแล้วจึงเริ่มให้ความร้อน วิธีให้ความร้อนมีทั้งทางตรง ทางอ้อม และให้ความร้อนด้วยไฟฟ้า

(จ) แบบ Cover

นำคอยล์มาเรียงเป็นชั้นๆ สูงขึ้นไป เช่น สตรีปคอยล์โลหะ คอยล์ลวด ฯลฯ แล้วครอบด้วยฉนวนที่เรียกว่า Inner cover ด้านนอกออกไปอีกยังครอบด้วยตัวเตาที่ติดตั้งอุปกรณ์ให้ความร้อนไว้เป็นการให้ความร้อนทางอ้อม

(ฉ) แบบ Elevator

เป็นแบบผสมระหว่างแบบรถเข็นกับแบบ Cover

(ช) แบบ Pot

ใช้กันมากกับ Crucible และ Salt bath

(ซ) แบบ Revolving furnace

เป็นแบบ Pot ขนาดใหญ่ แต่โดยทั่วไปจะไม่มีอุปกรณ์ให้ความร้อน ใช้ในการรักษาอุณหภูมิของกระบวนการด้วยความร้อนจากปฏิกิริยาของวัตถุดิบหลอมเหลว

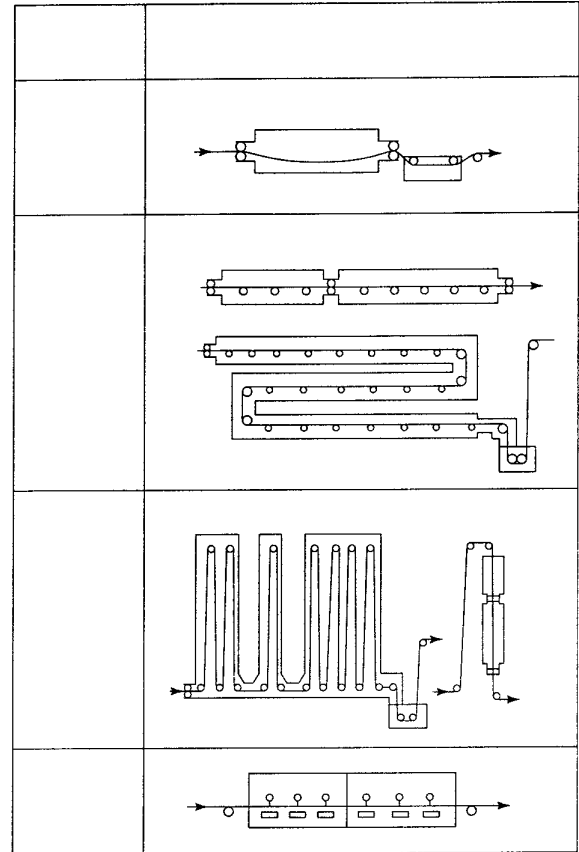
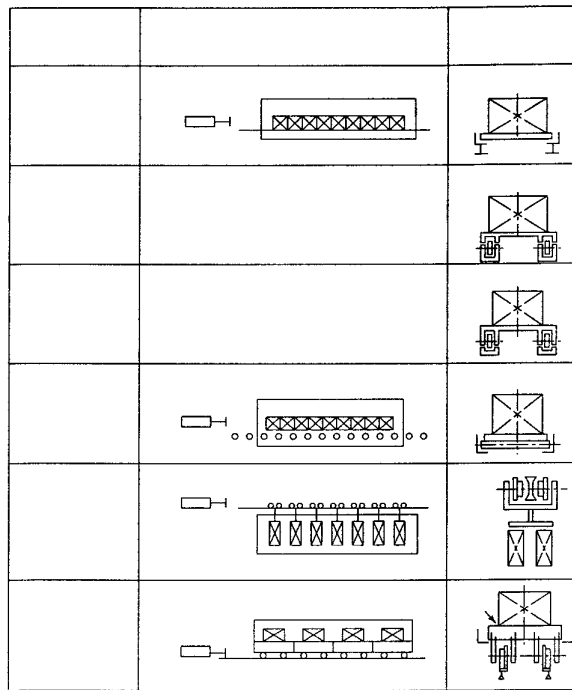
(2) เครื่องลำเลียงวัตถุดิบชนิดต่างๆ

ในเตาแบบต่อเนื่อง วัตถุดิบที่ต้องการให้ความร้อนจะป้อนเข้าจากทางเข้าด้านหนึ่งของเตาตลอดเวลา และวัตถุดิบที่ให้ความร้อน (ความเย็น) เสร็จแล้วจะนำออกมาจากทางออกอีกด้านหนึ่ง ดังนั้น เตาจึงต้องมีเครื่องลำเลียงวัตถุดิบอย่างใดอย่างหนึ่ง แม้แต่ในเตาแบบ Batch ก็มีการใช้เครื่องลำเลียงแบบง่ายๆ เช่น ปั่นจั่น, Hoist, Handler, Pusher เป็นต้น

เครื่องลำเลียงวัตถุดิบในเตาจะต้องทำงานที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นโดยทั่วไปจึงมีข้อจำกัดมากกว่าสายพานที่ใช้กันอยู่ทั่วไป เนื่องจากโลหะจะอ่อนลงเมื่ออุณหภูมิสูง เครื่องลำเลียงจึงต้องใช้โลหะที่มีความเสียดทานต่ำ เพราะเวลาที่อุณหภูมิสูงการหยอดน้ำมันหล่อลื่นให้ส่วนที่เสียดสีจะแทบไม่ช่วยอะไรเลย นอกจากนั้นยังต้องใช้วัสดุ และโครงสร้างที่เหมาะสมอีกด้วย

(3) วิธีลำเลียงวัตถุดิบของเตาแบบต่อเนื่อง

กลไกของวิธีลำเลียงวัตถุดิบที่สำคัญที่ใช้ในเตาแบบต่อเนื่อง แสดงไว้ในรูปที่ 3.91



ประเภท	รูปแบบเตา	กลไก
แบบ roller hearth		ชิ้นส่วน ขับเคลื่อน roller chain
แบบสกรู		
แบบ rotary retort		ขับเคลื่อน roller chain
แบบ shaker hearth		roller
แบบ walking beam		ชิ้นส่วน
แบบ walking beam		ชิ้นส่วน stroke

แบบ Strand

แบบ belt		link belt chain belt
แบบ slat		ชิ้นส่วน roller chain
แบบ overhead (แบบ monorail)		เช่น chain conveyor แบบ wave
แบบ rotary hearth		มีวิธีขับเคลื่อนหลายแบบ เช่น roller chain, bevel gear, locker arm เป็นต้น
แบบ เตาหลายชั้น		ช่องป้อนวัตถุดิบ ก๊าซไอเสีย arm hearth (ภาพตัดขวางเตา)

แบบสายพาน

รูปที่ 3.87 วิธีลำเลียงวัตถุดิบของเตาแบบต่อเนื่อง

3.12.2.3 เตาอุตสาหกรรมชนิดต่างๆ

ต่อไปนี้จะยกตัวอย่างอย่างเป็นรูปธรรม และอธิบายวิธีเดินเครื่อง ฯลฯ

(1) Sintering furnace เตาที่ทำให้ผงแร่ และวัตถุดิบที่เป็นผงจับตัวเป็นก้อนเพื่อผลิตวัตถุดิบสำหรับป้อนเตา Blast furnace เรียกว่า Sintering furnace เมื่อใช้ Sintering furnace จะช่วยลด Coke ratio และทำให้การทำงานของ Blast furnace มีเสถียรภาพ

(2) Hot blast stove เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบสะสมความร้อนด้วยการอุ่นอากาศที่เป่าจากรูระบายอากาศ (Tuyere) ของ Blast furnace เพื่อทำให้เป็นลมร้อน มีวัตถุประสงค์เพื่อป้อนลมร้อนอุณหภูมิ 1200-1350°C ด้วยความเร็ว 200-250 m/s ที่ปลายรูระบายอากาศ (Tuyere) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของลมร้อนจะทำให้สามารถลดอัตราส่วนเชื้อเพลิงได้

(3) Blast furnace เป็นอุปกรณ์หลักในการทำเหล็กดิบ (Pig iron) โดยใช้สินแร่เหล็กเป็นวัตถุดิบ แหล่งความร้อน และสารรีดิวซ์ของเตานี้ได้แก่ ถ่านโค้ก ส่วนตัวทำละลายเพื่อกำจัดสิ่งเจือปนจะใช้หินปูนเป็นหลัก ในรีแอกเตอร์ตัวเดียวจะมีหน้าที่การทำงานทั้งการอุ่น รีดิวซ์ หลอมเหลว และแยกเหล็กออกจาก Slag ในครั้งเดียว เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการเดินเครื่อง จะเดินเครื่องด้วยความดันสูง ป้อนอากาศที่มีอุณหภูมิสูง ป้อนออกซิเจนให้มาก ป้อนอากาศที่ควบคุมความชื้น พ่นเชื้อเพลิงทดแทนจากรูระบายอากาศ (Tuyere) ควบคุมการกระจายตัวของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าไป เป็นต้น วัตถุประสงค์ของการเดินเครื่องด้วยความดันสูงคือ เมื่ออุณหภูมิของก๊าซภายในเตาสูงเกินกว่าค่าหนึ่ง จะเกิดการไหลผ่านของอากาศอย่างผิดปกติ การเดินเครื่องด้วยความดันสูงจะป้องกันปรากฏการณ์นี้ได้ และยังมีผลรอง คือช่วยให้เกิดปฏิกิริยาดีขึ้น จึงช่วยลดอัตราส่วนเชื้อเพลิงได้อีกด้วย การควบคุมการกระจายตัวของวัตถุดิบ จะปรับความหนาของชั้นถ่านโค้กกับความหนาชั้นสินแร่เหล็กทำให้กระแสก๊าซซึ่งลอยตัวสูงขึ้นในเตา Blast furnace มีการแจกแจงที่เหมาะสม

(4) Revolving furnace เป็นเตาที่นอกจากเหล็กดิบหลอมเหลวซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักแล้ว ยังป้อนเหล็กดิบเย็น และเศษเหล็ก รวมทั้งหินปูนเพื่อกำจัดฟอสฟอรัส และกำมะถันเข้าไปในเตาเติมออกซิเจนบริสุทธิ์ความเร็วสูงจากด้านบนผิวหน้าของโลหะหลอมเหลว พร้อมทั้งกวนอย่างรุนแรงกับเหล็กหลอมเหลว เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว ก๊าซไอเสียจาก Revolving furnace จะเป็นก๊าซที่มี CO เป็นองค์ประกอบหลัก รวมทั้งมีเหล็กออกไซด์รวมอยู่เล็กน้อย นอกจากนี้ยังมีวิธีป้อนอากาศปริมาณมากเข้าไปทาง Hood ที่ช่องเตา เพื่อเผาไหม้ก๊าซ CO แล้วใช้หม้อไอน้ำแปลงให้เป็นไอน้ำอีกด้วย อย่างไรก็ตามเนื่องจากเตา Revolving furnace จะเดินเครื่องเป็นช่วงๆ จึงมีอัตราการใช้ประโยชน์จากความร้อนต่ำ ดังนั้น จึงนำไพลดอุณหภูมิแล้วนำกลับมาใช้ในรูปแบบก๊าซ โดยใช้เป็นเชื้อเพลิงและสารตั้งต้นสำหรับปฏิกิริยาเคมี

(5) Heating furnace เตาให้ความร้อนที่ใช้ในอุตสาหกรรมเหล็กกล้าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ให้ความร้อนอีกครั้งแก่เหล็ก Billet ที่ Slab มาแล้ว หรือเหล็ก Billet ที่ถูกหล่อออกมาอย่างต่อเนื่องให้มีอุณหภูมิสูงถึงจุดที่สามารถนำไปรีดร้อนได้ เตานี้มีทั้งแบบ Batch และแบบต่อเนื่อง แต่ที่ใช้กันมากจะเป็นแบบต่อเนื่อง อุณหภูมิที่ให้ความร้อนจะขึ้นอยู่กับเหล็ก Billet แต่โดยทั่วไปเหล็ก Billet จะได้จากเตาที่มีอุณหภูมิ 1100-1250°C เตา Heating furnace ที่ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีจะใช้ในการให้ความร้อน ระเหย และทำให้วัตถุดิบ (ของเหลวหรือก๊าซ) สลายตัวตามที่กระบวนการทางเคมีต้องการ ก๊าซเผาไหม้ในเตาจะมีอุณหภูมิ 800-1200°C ผนังเตาจะประกอบด้วยฉนวนกันความร้อนทนไฟเพื่อรักษาอุณหภูมิให้ในระดับดังกล่าว เตาจะให้ความร้อนแก่วัตถุดิบที่อยู่ในท่อซึ่งเรียงอยู่ในห้องเผาไหม้ โดยทั่วไปจึงเรียกว่า Fired tube heater

(6) Calciner เป็นการนำสินแร่ซัลไฟด์ของโลหะต่างๆ ไปทำปฏิกิริยากับออกซิเจนด้วยอากาศที่อุณหภูมิสูง เพื่อให้กลายเป็นก๊าซกรดซัลฟิวริก และออกไซด์ของโลหะ เรียกว่า Calcining เตาที่ทำ

หน้าที่เช่นนี้เกือบทั้งหมดจะเป็นแบบ Fluidized bed ซึ่งจะมี Nozzle พ่นอากาศที่ใช้ในการ Fluidize จำนวนมากเรียงอยู่ที่ Hearth โดยอากาศที่พ่นออกมาอย่างสม่ำเสมอทั่วเตาจะกวและผสมสินแร่ป่นที่ป้อนเข้ามาให้อยู่สภาพ Fluidized เกิดการ Calcining แล้วนำมาจากช่อง Overflow แผ่นเหล็กของตัวเตาจะมีการรักษาอุณหภูมิไม่ให้ต่ำกว่าจุด Acid dew point เพื่อไม่ให้ฝุ่นร้อน อุณหภูมิขึ้นอยู่กับชนิดของกรดกำมะถันที่เกิดขึ้น

(7) Reverberatory furnace เป็นเตาที่ให้ความร้อนเพดานเตาด้วยเปลวไฟจาก Burner แล้วใช้การแผ่รังสีความร้อนจากการหลอมสินแร่ทองแดงหรือทองแดง Electrolytic ปนกับเศษสายไฟฟ้า หรือ Aluminum base metal ปนกับ Scrap เป็นต้น เตานี้มีประสิทธิภาพความร้อนต่ำ จึงต้องใช้เชื้อเพลิงเพื่อให้อากาศที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อย หรือใช้ Waste-heat boiler นำความร้อนกลับมาในรูปไอน้ำ เป็นต้น

(8) Rotary melting furnace มีตัวเตาเป็นทรงกระบอกซึ่งจะหมุนอยู่ตลอดเวลา ยกเว้นเวลาเทโลหะหลอมเหลวออกมา ที่ปลายเตาด้านหนึ่งจะติดตั้ง Burner แบบถอดได้เอาไว้ จากปลายด้านเดียวกันจะป้อนวัตถุดิบเข้ามา เตาจะหมุนอยู่ตลอดเวลา ดังนั้น จึงไม่จำเป็นต้องกวน รวมทั้งพื้นที่ถ่ายเทความร้อนของวัตถุดิบที่เย็นจะมีพื้นที่มาก ใช้ในการหลอม Aluminum scrap

(9) Crucible furnace มักใช้เป็นเตาหลอมโลหะผสมทองแดง โลหะผสมเบา ฯลฯ ที่มีการผลิตจำนวนน้อย หรือใช้เป็นเตารักษาอุณหภูมิสำหรับการ Forging เตานี้มี Burner ติดตั้งไว้ในแนวเส้นสัมผัสกับผนังกันเตาเพื่อให้เปลวไฟหมุนเป็นเกลียวไต่ขึ้นมารอบ Crucible เตานี้โดยมากมักจะใช้หลอมและรักษาอุณหภูมิในตัวเดียวกัน จึงใช้ Burner ที่สามารถปรับเปลวไฟได้ในช่วงกว้าง

(10) Cupola ใช้เป็นเตาหลอมเหล็กหล่อ โดยใส่ Bed coke ให้ถึงความสูงเท่ากับ Tuyere line ที่กำหนดไว้ ป้อน Base metal ถ่านโค้ก และสารก่อ Slag สลับกันในอัตราส่วนค่าหนึ่งป้อนอากาศจากรูระบายอากาศ (Tuyere) ให้เผาไหม้ถ่านโค้กเพื่อหลอมวัตถุดิบ โลหะหลอมเหลว และ Slag จะมีความถ่วงจำเพาะต่างกัน จึงแยกกันไหลคนละช่องจากทางออกซึ่งอยู่ใกล้ๆ กันเตา เตาที่ทำการอุ่นอากาศด้วยความร้อนสัมผัสของก๊าซไอเสียจากด้านบนเตา และความร้อนจากการนำก๊าซ CO ในก๊าซไอเสียไปเผาไหม้ซ้ำ เรียกว่า Hot blast cupola ยังทำการหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูง ผนังเตาจะยิ่งถูกกัดกร่อนรุนแรง เตาที่ใช้ผนังเตาระบายความร้อนด้วยน้ำเพื่อป้องกันความเสียหายของเตา เรียกว่า Water cooling cupola

(11) Forging furnace ใช้ให้ความร้อนเหล็กให้มีอุณหภูมิ 1200-1300°C เพื่อทำ Hot forging ด้วยค้อนหรือทำ Hot pressing และสำหรับ Cold forging ยังใช้ในการทำ Process annealing ในกรณีที่มีการเปลี่ยนรูปมากและต้องทำ Cold forging ตั้งแต่ 2 ครั้งขึ้นไปอีกด้วย ความร้อนสูญเสียที่มีสัดส่วนสูงที่สุดของเตาได้แก่ ความร้อนสูญเสียในก๊าซไอเสีย โดยความร้อนนี้จะนำกลับมาใช้ด้วยการอุ่นวัตถุดิบหรืออุ่นอากาศ ในกรณีของเตาแบบ batch ความร้อนสะสมในวัสดุทนไฟก็เป็นความร้อนสูญเสียที่มีสัดส่วนสูงเช่นกัน เพื่อลดความสูญเสียนี้ จะใช้เซรามิกไฟเบอร์เป็นวัสดุทนไฟ ในการเดินเครื่อง

หากทำให้เตามีอุณหภูมิสูงขึ้น เวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนจะสั้นลง แต่ก๊าซไอเสียจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น หากทำให้เตามีอุณหภูมิต่ำลง ก๊าซไอเสียจะมีอุณหภูมิต่ำลงด้วย แต่เวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนจะนานขึ้น ทำให้เกิด Scale และ Decarburization ได้ ดังนั้น จึงต้องกำหนดอุณหภูมิเตาให้เหมาะสมกับประเภทและขนาดของวัตถุดิบ โดยทั่วไป จะให้เตามีอุณหภูมิสูงกว่าวัตถุดิบประมาณ 50°C

(12) Heat treating furnace เตานี้ใช้ในการทำ Annealing, Refining, Carburization ฯลฯ การทำ Annealing มีวัตถุประสงค์เพื่อให้แปรรูปเหล็กแผ่นรีดเย็นได้ง่ายยิ่งขึ้น แต่โดยทั่วไปจะเป็นการทำ Light annealing ดังนั้น ภายในเตาจึงเป็นบรรยากาศรีดักชั่น แม้ในการทำ Annealing

ชิ้นงาน Forging บางครั้งก็ให้ภายในเตาเป็นบรรยากาศ Non-oxidation เพื่อลดระยะตัดของเครื่องจักร เตา Annealing อลูมิเนียมเกือบทั้งหมดจะมีบรรยากาศ Non-oxidation อลูมิเนียมจะมี Blackness ต่ำมาก และมีจุดหลอมเหลวต่ำ ไม่สามารถให้ความร้อนด้วยการแผ่รังสีได้ ดังนั้น จึงให้ความร้อนด้วยการพาความร้อนแบบบังคับโดยหมุนเวียนอากาศร้อนปริมาณมาก

(13) Glass melting furnace แบ่งเป็น Pot furnace กับ Tank furnace โดย Pot furnace จะใช้กับการผลิตจำนวนน้อย เช่น แก้วชนิดพิเศษ และ Glaze เป็นต้น เตา Pot furnace ยังแบ่งเป็นแบบที่ใช้ Pot ที่มี Furnace กับแบบ Furnace ที่ใช้ pot แบบปากเปิด แบบแรกจะให้ความร้อนผ่านผนัง Pot จึงสะดวกในการหลอม Flint glass ซึ่งเมื่อถูกเปลวไฟจะเปลี่ยนสภาพได้ง่าย แบบหลังจะเหมาะกับการหลอมแก้วที่มีจุดหลอมเหลวสูง เช่น Optical glass เป็นต้น

Tank furnace เป็นเตา Reverberatory furnace ที่ป้อนวัตถุดิบลงไปในถังขนาดใหญ่อย่างต่อเนื่อง เพื่อทำการหลอม ทำให้บริสุทธิ์ ทำให้เย็น และนำออกมา ภายในเตาจะมีอุณหภูมิสูง อุณหภูมิสูงสุดในห้องหลอมเหลวส่วนมากจากการวัดจะพบว่าสูงกว่า 1600°C จึงจำเป็นต้องอุ่นอากาศสำหรับเผาไหม้

วิธีนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้แบ่งเป็นแบบ Regenerative กับแบบแลกเปลี่ยนความร้อน ในเตาขนาดเล็กมากไม่เกิน 10 t เนื่องจากไม่ต้องการให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจาก Regeneration และเพื่อความสะดวกในการเดินเครื่องเตา จะใช้ Recuperator tube ที่ทำจากเซรามิกหรือโลหะ ส่วน Tank furnace ขนาดใหญ่เกือบทั้งหมดจะใช้อุปกรณ์นำความร้อนกลับมาใช้แบบ Regenerative เหตุผลคือในก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้ของ Tank furnace จะมีของแข็งปลิว และไอระเหย เช่น ด่าง ฯลฯ รวมอยู่ด้วยเป็นจำนวนมาก ถ้าใช้ Recuperator จะเกิดปัญหาอุดตัน และอายุการใช้งาน แบบ Regenerative จึงได้เปรียบ

(14) Cement kiln เป็นเตาที่ใช้ในการเผาผงวัตถุดิบที่ประกอบด้วยพวกปูนขาว ดินเหนียว ซิลิกา หรือ Slag ของเหล็ก ฯลฯ ในอัตราส่วนที่กำหนด ให้มีสภาพกึ่งหลอมเหลว เตาที่ใช้โดยมากจะเป็นแบบ Rotary kiln เชื้อเพลิงที่ใช้กับ Rotary kiln แต่เดิมจะใช้น้ำมันหนัก แต่ปัจจุบันจะใช้ถ่านหินเกือบทั้งหมด เตาที่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไซโคลนซ้อนกัน 4 ชั้นที่ทางออกก๊าซไอเสียของ Rotary kiln ให้ก๊าซไอเสียผ่านไป เพื่อนำความร้อนมาใช้อุ่นวัตถุดิบ และทำให้เกิดปฏิกิริยา Decarbonation ประมาณ 40% เรียกว่า Suspension preheater (SP) Short kiln ส่วนเตาที่ระหว่าง SP กับ Kiln จะติดตั้งเตาช่วยเผาไหม้ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยา Decarbonation ไม่น้อยกว่า 85% เรียกว่า New suspension preheater (NSP) short kiln เตาแบบ Rotary kiln เป็นกลไกแลกเปลี่ยนความร้อนจากพื้นผิวของชั้นวัตถุดิบที่กองอยู่ จึงมีประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนต่ำ ดังนั้น Rotary kiln จึงใช้ทำปฏิกิริยาเพื่อทำ Clinker เท่านั้น ซึ่งจะเพิ่มสมรรถนะในการเผาได้มาก Clinker ที่ได้จาก Rotary kiln จะมีอุณหภูมิสูงถึง $1300-1400^{\circ}\text{C}$ จึงนำไประบายความร้อนด้วยอากาศ และอากาศร้อนที่ได้จะนำไปใช้เป็นอากาศหุติยภูมิสำหรับเผาไหม้

(15) Baking furnace สำหรับวัสดุทนไฟ เซรามิก กระเบื้อง ฯลฯ เตาเผาที่ใช้กันมากในปัจจุบันแบ่งเป็นแบบต่อเนื่อง (Tunnel kiln, Ring kiln) กับแบบไม่ต่อเนื่อง (Round kiln, Rectangular kiln, Shuttle kiln เป็นต้น) ในจำนวนนั้นที่ใช้กันมากที่สุดได้แก่ Tunnel kiln โดย Tunnel kiln ที่ใช้เผาวัสดุทนไฟเกือบทั้งหมดจะเป็นแบบ Direct firing วิธีลำเลียงวัตถุดิบจะใช้รถเข็นเกือบทั้งหมด เตาเผาเซรามิก และกระเบื้อง ฯลฯ โดยมากจะใช้ Tunnel kiln ขนาดเล็ก วิธีลำเลียงจะใช้วิธีขับเคลื่อนด้วยลูกกลิ้ง วิธีเผาไหม้แบ่งเป็นเผาไหม้ด้านบนกับเผาไหม้ด้านล่าง วิธีเผาไหม้ด้านบนจะติดตั้ง Burner ไว้ที่เพดานเตา ในเตา Tunnel kiln ก๊าซเผาไหม้ และวัตถุดิบจะมีทิศทางเคลื่อนที่สวนกัน ทำให้วัตถุดิบและก๊าซเกิดการแลกเปลี่ยน

ความร้อนได้ดี มีประสิทธิภาพความร้อนสูง ผลต่างอุณหภูมิระหว่างด้านบน และด้านล่างตามหน้าตัดของเตาจะมีผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ดังนั้น จึงมีการใช้วิธีการต่างๆ เพื่อให้อุณหภูมิแผ่กระจายอย่างสม่ำเสมอ วิธีทำให้อุณหภูมิด้านบนกับด้านล่างสม่ำเสมอมีดังต่อไปนี้

(ก) ดูดก๊าซอุณหภูมิต่ำที่บริเวณก้นเตานำไปใช้ความร้อนด้วยเครื่องหมุนเวียนเพิ่มความร้อน แล้วเป่าเข้ามาหมุนเวียนใหม่จากด้านบน

(ข) ในเตาแบบเผาไหม้ด้านข้าง ส่วนมากจะมีห้อง Precombustion chamber เพื่อไม่ให้เปลวไฟสัมผัสกับผลิตภัณฑ์โดยตรง แต่วิธีนี้แรงลอยตัวจะทำให้เปลวไฟพุ่งขึ้นด้านบนภายในเตาได้ง่าย และเลยต่อไปยังบริเวณ Preheat จึงทำให้อุณหภูมิระหว่างด้านบน และด้านล่างในบริเวณ Preheat มีค่าสูงเพื่อป้องกันปรากฏการณ์นี้ จะใช้วิธีเผาไหม้ด้านล่าง โดยเว้นช่องว่างระหว่างอิฐบนรถขึ้นกับด้านล่างของกองผลิตภัณฑ์ แล้วติดตั้ง Burner ขนาดเล็กกระจายในช่องว่างนั้นแล้วให้พ่นเปลวไฟเข้าไป

(ค) ในเตาแบบเผาไหม้ด้านบนซึ่งจะเรียงผลิตภัณฑ์บนรถขึ้นให้มีช่องว่างในกอง แล้วติดตั้ง Burner ให้พ่นเปลวไฟจากเพดานให้ตรงช่องว่างนั้น จะใช้ Burner ความเร็วสูง เพื่อดูดก๊าซรอบๆ เข้ามาวนผสมกันให้ดี เป็นต้น

3.12.3 การอนุรักษ์พลังงานในเตาเผาอุตสาหกรรม

ในการพิจารณาการอนุรักษ์พลังงานของเตา จะต้องเข้าใจความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นในการเดินเครื่องเตาเพื่อนำไปวิเคราะห์ โดยทั่วไปการคำนวณหาพลังงานที่ป้อนให้เตาและที่ไปของพลังงานเหล่านั้นว่าใช้ไปอย่างไร เรียกว่า การคำนวณสมดุลความร้อน ผลการคำนวณจะรู้ว่าเดินเครื่องเตาได้เหมาะสมหรือไม่ ใช้เชื้อเพลิงโดยสูญเสียเปล่าหรือไม่ และยังสามารถเตรียมมาตรการลดความร้อนสูญเสียให้เหลือน้อยที่สุดได้อีกด้วย ระยะเวลาวัดเตาเพื่อคำนวณสมดุลความร้อนจะขึ้นอยู่กับประเภทของเตา แต่ในการเดินเครื่องต่อเนื่อง จะใช้ค่าเฉลี่ยไม่ต่ำกว่า 3 ชั่วโมง ในการเดินเครื่องไม่ต่อเนื่อง จะใช้ค่าเฉลี่ยต่อการเดินเครื่อง 1 ครั้ง หรือแบ่งเป็นหลายๆ ชิ้นแล้วตัดเอาเฉพาะกระบวนการที่สำคัญที่สุด ปริมาณที่ใช้แสดงสมรรถนะของเตา ได้แก่ ประสิทธิภาพความร้อน และความสิ้นเปลืองพลังงาน (หรือปริมาณความร้อน) ต่อหน่วย

$$\text{ประสิทธิภาพความร้อนโดยทั่วไปจะแสดงด้วย } \eta [\%] = \frac{\text{ความร้อน effective}}{\text{ความร้อนที่ป้อนให้}} \times 100$$

ประสิทธิภาพยังมีค่าสูง แสดงว่าเตายังมีสมรรถนะสูง

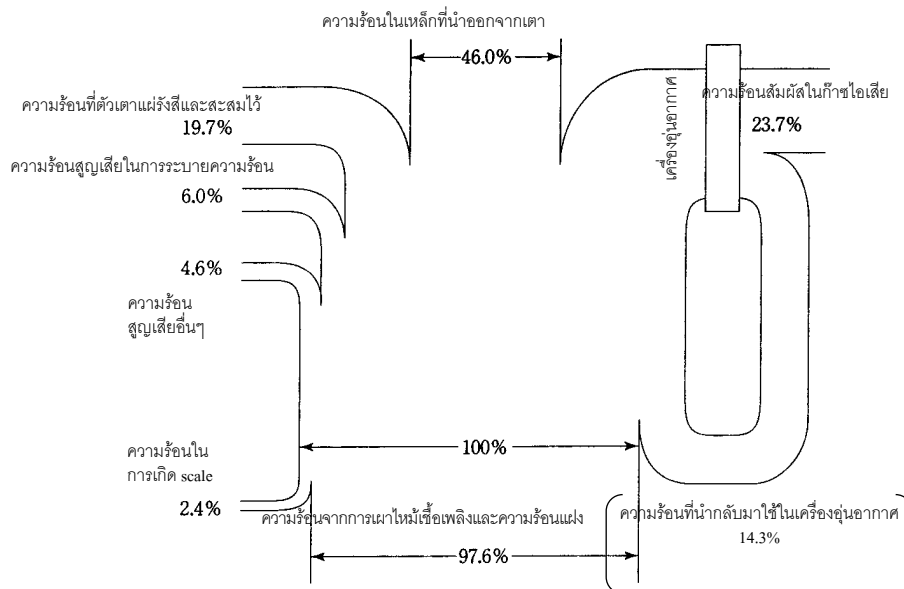
ความร้อนที่ป้อนให้จะมีทั้งกรณีที่เกิดความร้อนเข้าทั้งหมดกับกรณีที่คิดเฉพาะความร้อนจากเชื้อเพลิง

วิธีคิดความร้อน Effective จะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ที่ให้ความร้อน แต่ในการตัดสินใจความร้อนจะต้องพิจารณาอย่างถี่ถ้วน ตัวอย่างเช่น กรณีที่ให้ความร้อนวัตถุดิบด้วยอุณหภูมิสูงเกินจำเป็นในเตาให้ความร้อน Effective ที่ปรากฏจะมีค่ามาก แต่ในกรณีนี้จะมีความร้อนสูญเสียรวมอยู่ในความร้อน Effective ด้วย ความร้อน Effective ในการหลอมจะเท่ากับความร้อนแผ่บวกความร้อนสัมผัสของวัตถุ ในการให้ความร้อนจะเท่ากับความร้อนสัมผัสที่อุณหภูมิสูงสุดของวัตถุ ในเตาเผาซีเมนต์จะเท่ากับ (ความร้อนแผ่ในการกลายเป็นไอของน้ำ) + (ความร้อนที่ปฏิกิริยาคูดกลืน)

ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่อหน่วยหมายถึงปริมาณเชื้อเพลิงที่ป้อนให้ต่อวัตถุที่จะให้ความร้อนหนึ่งหน่วยมวล หากแสดงด้วยปริมาณความร้อนจะเรียกว่า ความสิ้นเปลืองความร้อนต่อหน่วย ส่วนอัตราส่วนเชื้อเพลิง (เชื้อเพลิง kg / เหล็ก t) ที่ใช้แสดงสมรรถนะของเตา Blast furnace จะเทียบเท่ากับ ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่อหน่วย

3.12.3.1 สมดุลความร้อนของเตาอุตสาหกรรม

เตาอุตสาหกรรมที่สำคัญ ได้แก่ เตาให้ความร้อน ซึ่งแสดงสมดุลความร้อนได้ดังรูปที่ 3.92 และตารางที่ 3.31



รูปที่ 3.92 สมดุลความร้อนของเตาให้ความร้อนเหล็ก Billet

ตารางที่ 3.31 ตารางสมดุลความร้อนของเตาให้ความร้อนเหล็ก Billet

ความร้อนเข้า			ความร้อนออก		
หัวข้อ	10 ³ kJ [10 ³ kcal]	[%]	หัวข้อ	10 ³ kJ [10 ³ kcal]	[%]
(1) ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	1765	97.2	(6) ความร้อนในเหล็กที่นำออกจากเตา	835	46.0
(2) ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง	7.5	0.4	(7) ความร้อนสัมผัสของก๊าซไอเสีย	431	23.7
(3) ความร้อนในเหล็กที่นำใส่เตา	–	–	(8) ความร้อนที่ตัวเตาแผ่รังสีและสะสมไว้	358	19.7
(4) ความร้อนในการเกิด scale	43.5	2.4	(9) ความร้อนสูญเสียในการระบายความร้อน	109	6.0
			(10) ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	83	4.6
รวม	1816 (434)	100	รวม	1816 (434)	100
(5) ความร้อนที่นำกลับมาใช้อุ่นอากาศสำหรับเผาไหม้	259.7	14.3			

หมายเหตุ) ประสิทธิภาพความร้อน = $\frac{(6) - (3)}{(1) + (2) + (4)} \times 100 = 46.0\%$

ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่อหน่วย = $1765 \times 10^3 \text{ [kJ/t]} (421.6 \times 10^3 \text{ [kcal/t]})$

ความร้อนออกที่สำคัญ ได้แก่ (ก) ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง (ข) ความร้อนสูญเสียในก๊าซไอเสีย (ค) ความร้อนที่แผ่รังสีจากตัวเตา และ (ง) ความร้อนสูญเสียในการระบายความร้อนพื้นฐานของการอนุรักษ์พลังงานในเตาให้ความร้อน คือ จะลดความร้อนทั้ง 4 ข้อนี้ได้อย่างไร และนอกจากทั้ง 4 ข้อนี้แล้ว จะนำความร้อนกลับมาใช้ให้มากที่สุดได้อย่างไร

3.12.3.2 การอนุรักษ์พลังงานของเตาให้ความร้อนเหล็ก Billet

ต่อไปนี้จะอธิบายกลวิธีอนุรักษ์พลังงานของเตาให้ความร้อนเหล็ก Billet โดยใช้ตัวอย่างรูปธรรมข้างต้น

(ก) การลดความร้อนสัมผัสในเหล็ก

จะต้องปฏิบัติตามกระบวนการรีดร้อนเหล็ก Billet กล่าวคือ ลำเลียงจากเตา Forging furnace แบบต่อเนื่องไปยังเตาให้ความร้อนโดยตรง เรียกว่า Direct rolling หรือป้อน Slab ที่ต้องป้อนด้วยมือเข้าเตาก่อนที่จะเย็น เรียกว่า Hot charge หรือการลดอุณหภูมิของเหล็กที่นำออกมาด้วยการเพิ่มความเร็วยของไลน์รีดเหล็ก อย่างไรก็ตาม วิธีการเหล่านี้ไม่ใช่มาตรการอนุรักษ์พลังงานเกี่ยวกับตัวเตา อุณหภูมิของเหล็ก billet ที่นำออกมาจากเตาจะถูกกำหนดด้วยเงื่อนไขในการรีด เช่น อุณหภูมิที่ทุกๆ จุดของเหล็ก Billet ที่ออกจากเครื่องรีดเหล็ก จะต้องไม่ต่ำกว่าอุณหภูมิที่เหล็กจะเปลี่ยนสภาพจากโครงสร้าง Austenite เป็น Ferrite + Pearlite ในกระบวนการทำให้เย็น ซึ่งเรียกว่า Ar₃ เป็นต้น ดังนั้น หากทำให้ช่วงการแจกแจงอุณหภูมิของเหล็ก Billet ที่เกิดจากผลต่างอุณหภูมิที่เกิดขึ้นตามทิศทางการรีดเหล็กในขณะที่ป้อนเหล็ก Billet ซึ่งเรียกว่า Skid mark และเกิดจากความไม่สม่ำเสมอในเตา มีช่วงแคบลงได้แล้ว จะสามารถลดอุณหภูมิที่นำเหล็กออกมาจากเตาได้ กล่าวคือ การอนุรักษ์พลังงานในแง่ของเตาในข้อนี้ สามารถทำได้โดยการทำให้อุณหภูมิภายในเตามีการแจกแจงสม่ำเสมอ ด้วยการลด Skid mark ซึ่งเกิดจาก Skid beam shift หรือ High skid button หรือ Skid beam หน้าตัดวงรี ฯลฯ และด้วยการใช้ Burner ความเร็วสูง

(ข) การลดความร้อนสูญเสียในก๊าซไอเสีย

กรณีของเตาเผา ความสูญเสียที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้คือความสูญเสียในก๊าซไอเสีย กล่าวคือในจำนวนความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ส่วนหนึ่งจะกลายเป็นความร้อนสัมผัสของก๊าซไอเสียเมื่อระบายก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้ออกไปจากเตา ความร้อนสูญเสียมีสัดส่วนสูงมากต่อความร้อนที่จำเป็นต้องใช้ในการให้ความร้อนเหล็ก การลดความร้อนสูญเสียนี้ ต้องใช้กลวิธีที่เป็นพื้นฐานของการอนุรักษ์พลังงาน ได้แก่ การควบคุมอัตราส่วนอากาศให้เหมาะสม ในการเผาไหม้เชื้อเพลิง ตามทฤษฎีแล้วเราสามารถเผาไหม้ได้ด้วยอัตราส่วนอากาศ 1.0 ก็เพียงพอแล้ว อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติเนื่องจากเชื้อเพลิงไม่ได้ผสมกับอากาศอย่างสมบูรณ์ จึงต้องเดินเครื่องด้วยปริมาณอากาศเกินจำเป็นไปบ้างเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดเขม่าขึ้น อย่างไรก็ตาม ยิ่งอัตราส่วนอากาศมีค่าสูงเท่าใด ปริมาณไอเสียที่จะต้องให้ความร้อนก็จะยิ่งเพิ่มขึ้นเท่านั้น แต่ก๊าซไอเสียที่เพิ่มขึ้นจากอากาศส่วนเกิน เป็นสิ่งที่ไม่มีความจำเป็นอย่างใดเลย ดังนั้นจึงต้องพยายามเผาไหม้ด้วยอัตราส่วนอากาศใกล้เคียงกับ 1.0 ให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ดังนั้น จึงมีการทำ Cross limit ของการควบคุม Cascade ของอุณหภูมิและอัตราไหล ทำการควบคุมความดันภายในเตาเพื่อลดอากาศที่ไหลเข้ามา รวมทั้งทำการควบคุม O₂ โดยอัตโนมัติเพื่อควบคุมอัตราส่วนอากาศอย่างเที่ยงตรง ทั้งในการเผาไหม้เต็มทีและเผาไหม้แบบ Turn down

นอกจากนี้ในกรณีพิเศษ ยังมีการลดความร้อนสูญเสียในก๊าซไอเสียด้วยการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนหรือเผาไหม้ด้วยออกซิเจนจำนวนมากอีกด้วย อย่างไรก็ตาม จะมีปัญหาเรื่องราคา

ออกซิเจน ปัจจุบัน ในเตาหลอมแก้วต่างๆ จะมีการนำเอาการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนมาใช้กันมากขึ้นเนื่องจากต้องการลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดใหญ่

นอกจากการลดปริมาณก๊าซไอเสียแล้ว ยังมีวิธีลดอุณหภูมิของก๊าซไอเสียเพื่อลดความสูญเสียในก๊าซไอเสียอีกด้วย

ในกรณีของเตาให้ความร้อนแบบดั้งเดิม ก๊าซไอเสียจะไหลเข้าจากทางออกวัตถุดิบ ไปออกที่ทางเข้าวัตถุดิบ กล่าวคือ ในเตาให้ความร้อนแบบดั้งเดิม อุณหภูมิที่ก๊าซไหลออกจากด้านทางเข้าวัตถุดิบจะเท่ากับอุณหภูมิก๊าซไอเสียของเตา อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิที่บริเวณทางออกวัตถุดิบจะต้องสูงกว่าอุณหภูมิของเหล็ก billet ที่จะนำออกจากเตาอยู่บ้าง และในกรณีที่ให้ความร้อน หากทำให้เตามีอุณหภูมิสูงขึ้น จะสามารถให้ความร้อนได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เตาสั่นลงได้ ดังนั้น ในบริเวณการให้ความร้อนจึงกำหนดอุณหภูมิไว้เท่ากับอุณหภูมิทนความร้อนสูงสุดของฉนวนความร้อนที่ใช้ ซึ่งมีค่าประมาณ 1250-1300°C ส่วนบริเวณทางเข้าวัตถุดิบจะพยายามกำหนดให้ต่ำที่สุดเพื่อลดความสูญเสียในก๊าซไอเสีย ตัวอย่างเช่น

กำหนด Heat pattern ของเหล็ก Billet ให้มีอุณหภูมิที่ทางเข้าต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้ และจัดให้มีบริเวณ Preheat ด้วยก๊าซไอเสียโดยไม่ติดตั้ง Burner เพื่อให้แลกเปลี่ยนความร้อนกับเหล็ก Billet และลดอุณหภูมิก๊าซไอเสีย อย่างไรก็ตาม สำหรับเตาที่มีความยาวเท่ากันหากค่อยๆ เพิ่มอุณหภูมิให้นุ่มนวลที่สุดเท่าที่จะทำได้แล้ว แม้ว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของหน้าตัดเหล็ก Billet โดยเฉลี่ยจะสอดคล้องกับความสามารถในการเพิ่มอุณหภูมิก็ตาม ปัญหาเรื่องความเร็วในการถ่ายเทความร้อนภายในตัวเหล็ก Billet จะทำให้เกิดการเปื้อนของอุณหภูมิของตัวยิ่งมากขึ้น กล่าวคือ เกิด Skid mark มากขึ้นนั่นเอง

การแก้ไขปัญหานี้จะต้องทำให้เตามีความยาวเพิ่มขึ้น กล่าวคือ ในเตาแบบดั้งเดิม หากต้องการลดอุณหภูมิของก๊าซไอเสีย จะต้องทำให้เตามีความยาวเพิ่มขึ้นไม่มีทางเลือก

ความยาวของเตาจะถูกจำกัดด้วยเหตุผลด้านความคุ้มค่า ได้แก่ ต้นทุนค่าเครื่องจักร ดังนั้น หากให้อุณหภูมิของเหล็ก Billet ที่นำออกจากเตามีอุณหภูมิ 1200°C แล้ว อุณหภูมิของก๊าซไอเสียที่ทางเข้าวัตถุดิบโดยทั่วไปจะเท่ากับ 1150-1000°C

จากเหตุผลข้างต้น ระยะหลังนี้ Regenerative Burner จึงได้รับความสนใจมากขึ้น รายละเอียดจะอธิบายในหัวข้อการนำก๊าซไอเสียกลับมาใช้

(ค) การลดความสูญเสียจากการแผ่รังสีจากตัวเตา และความสูญเสียในน้ำระบายความร้อน

ความสูญเสียนี้สามารถลดได้อย่างมากด้วยการเสริมฉนวนความร้อนที่ผนังเตาและตัวยึดในเตาที่ระบายความร้อนด้วยน้ำที่เรียกว่า Skid beam หรือ Post โดยทั่วไปในกรณีของเตาให้ความร้อนเหล็ก Billet จะเดินเครื่องต่อเนื่อง แต่ในปัจจุบันมักจะต้องหยุดเครื่องบ่อยขึ้นเพื่อปรับกำลังผลิตในกรณีนี้ตัวเตาจะถูกรักษาไว้ที่อุณหภูมิต่ำ แต่เมื่อเริ่มเดินเครื่องอีกครั้งจะต้องเพิ่มอุณหภูมิอีกครั้ง กล่าวคือต้องใช้พลังงานในส่วนของการทำความร้อนสะสมในตัวฉนวนความร้อนด้วย แต่จุดนี้สามารถอนุรักษ์พลังงานได้ด้วยการใช้ฉนวนความร้อนที่มีการสะสมความร้อนต่ำ

ไม่ว่ากรณีใดจะมีการใช้เซรามิกไฟเบอร์กันมาก แต่ระยะหลังจะมีการใช้เตาให้ความร้อนที่ใช้เซรามิกไฟเบอร์ทั้งตัวยกเว้นพื้นเตา ตารางที่ 3.32 จะเปรียบเทียบการแผ่รังสีความร้อน และความร้อนสะสมของฉนวนความร้อนแบบต่างๆ ในเตาเผา และยังแสดงการแผ่รังสีความร้อน ของฉนวนความร้อนแบบต่างๆ ของ Skid beam และ post อีกด้วย ไม่ว่าในกรณีใด หากใช้เซรามิกไฟเบอร์เป็นฉนวนความร้อนจะสามารถอนุรักษ์พลังงานได้มาก

เตาควรจะทำหน้าที่กักความร้อนไม่ให้ไหลออกภายนอกให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ อย่างไรก็ตาม ในการป้อนวัตถุดิบเข้า นำวัตถุดิบออก และการลำเลียงวัตถุดิบ จำเป็นต้องมีช่องเปิดเสมอ เพื่อลดความร้อนสูญเสียจากช่องเปิด และความร้อนสูญเสียจากเปลวไฟแลบออกนอกเตา จะติดตั้งอุปกรณ์ปิดผนึกที่สามารถขยับได้ อุปกรณ์ที่สำคัญได้แก่ ประตูสองชั้นทางด้านช่องนำวัตถุดิบออก และ Movable beam post cover เป็นต้น รูปที่ 3.93 แสดงตัวอย่างของประตูสองชั้น

(ง) การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้

ได้อธิบายไว้ในหัวข้อการลดความร้อนสูญเสียในก๊าซไอเสียแล้ว ว่าการจัดให้มีบริเวณ preheat ด้วยก๊าซไอเสียเป็นการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ในเตา ในที่นี้จะอธิบายการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ด้วยอุปกรณ์นำกลับมาใช้ชนิดต่าง ๆ

ในการอุ่นอากาศสำหรับเผาไหม้ด้วย Recuperator ความร้อนที่นำกลับมาใช้จะถูกหมุนเวียนกลับเข้าไปในเตาทันที จึงมีประสิทธิภาพการใช้งานสูง รูปที่ 3.94 แสดงอัตราการประหยัดเชื้อเพลิงด้วยการอุ่นอากาศ เครื่อง Recuperator บางชนิดจะทำด้วยเซรามิกซึ่งสามารถใช้ก๊าซไอเสียอุณหภูมิสูงได้โดยตรง แต่จะมีประสิทธิภาพต่ำ อากาศที่อุ่นแล้วจะมีอุณหภูมิประมาณ 400°C แต่ในกรณีของ Recuperator โลหะซึ่งมีประสิทธิภาพสูง ก๊าซไอเสียที่ป้อนให้ต้องมีอุณหภูมิไม่เกิน 900°C เนื่องจากข้อจำกัดเรื่องการทนความร้อนของโลหะ ดังนั้น โดยทั่วไปจะนำก๊าซไอเสียจากเตาไปเจือจางด้วยอากาศอุณหภูมิปกติ ก่อนป้อนให้ Recuperator ในกรณีนี้จะสามารถอุ่นอากาศให้มีอุณหภูมิสูงถึง 600°C

ในกรณีของเตาขนาดใหญ่ เช่น เตาให้ความร้อนเหล็ก Billet ฯลฯ หลังจากนำความร้อนกลับมาใช้ด้วยเครื่องแลกเปลี่ยน

ตารางที่ 3.32 เปรียบเทียบความร้อนที่แผ่รังสีและความร้อนสะสม

(1) เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ผิวเหล็กกับปริมาณความร้อนที่แผ่รังสี

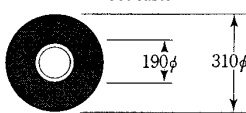
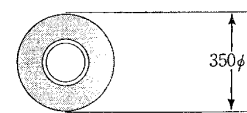
ผนังข้าง 410 (m ²)	ผนังพลาสติกเดิม				ผนังเดิม + veneering				ผนังเซรามิก F ตลอดความหนา			
ผิวเตาด้านใน Tf (°C)	ผิวเหล็ก To (°C)	ความร้อนแผ่รังสี		ผิวเหล็ก To (°C)	ความร้อนแผ่รังสี		ผิวเหล็ก To (°C)	ความร้อนแผ่รังสี		ผิวเหล็ก To (°C)	ความร้อนแผ่รังสี	
		(kJ/(m ² ·s))	(W)		(kJ/(m ² ·s))	(W)		(kJ/(m ² ·s))	(W)		(kJ/(m ² ·s))	(W)
1 200	115	1.455	59.7	103	1.208	49.5	71	0.652	26.7	49	0.321	13.1
800	83	0.850	34.8	71	0.654	26.7	49	0.321	13.1	49	0.321	13.1

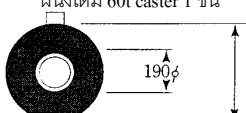
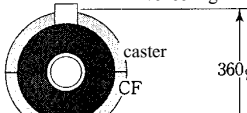
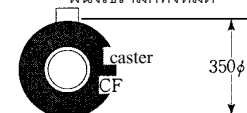
เพดาน 550 (m ²)	ผนังพลาสติกเดิม				ผนังเดิม + veneering				ผนังเซรามิก F ตลอดความหนา			
ผิวเตาด้านใน Tf (°C)	ผิวเหล็ก To (°C)	ความร้อนแผ่รังสี		ผิวเหล็ก To (°C)	ความร้อนแผ่รังสี		ผิวเหล็ก To (°C)	ความร้อนแผ่รังสี		ผิวเหล็ก To (°C)	ความร้อนแผ่รังสี	
		(kJ/(m ² ·s))	(W)		(kJ/(m ² ·s))	(W)		(kJ/(m ² ·s))	(W)		(kJ/(m ² ·s))	(W)
1 200	136	2.176	119.7	116	1.688	92.8	72	0.759	41.7	49	0.375	20.6
800	101	1.338	73.6	81	0.928	50.9	49	0.375	20.6	49	0.375	20.6

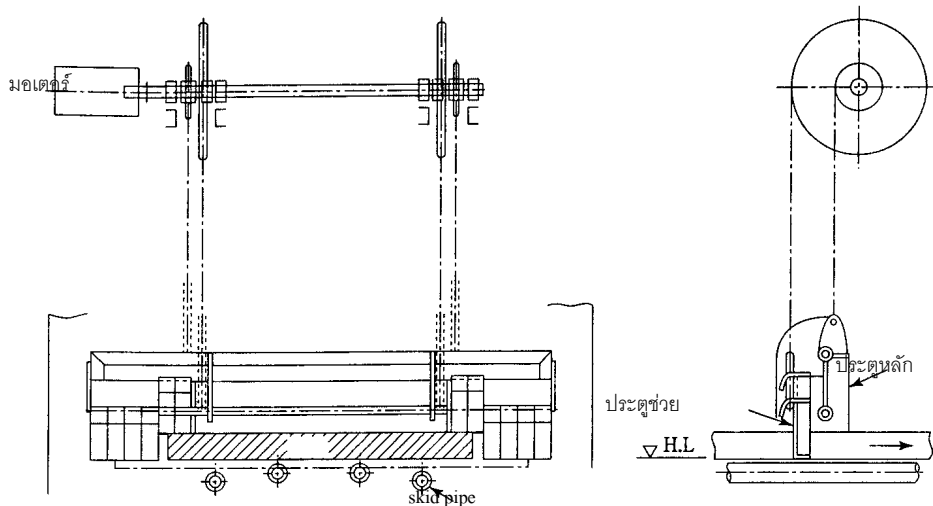
(2) เปรียบเทียบความร้อนที่สะสม

	Tf	ผนังพลาสติกเดิม		ผนังเดิม + veneering		ผนังเซรามิก F ตลอดความหนา	
		เพดาน	ผนังข้าง	เพดาน	ผนังข้าง	เพดาน	ผนังข้าง
$Q \times \text{พื้นที่}$ (MJ/(m ² ·s))	1200°C	0.0131	0.0164	0.0108	0.0147	4.89×10^{-4}	5.703×10^{-4}
	800°C	0.0089	0.0113	0.0068	0.0095	3.49×10^{-4}	4.07×10^{-4}
$\Sigma (W)$	1200°C	7174	6727	5965	6012	267	232
	800°C	4913	4640	3750	3340	192	169

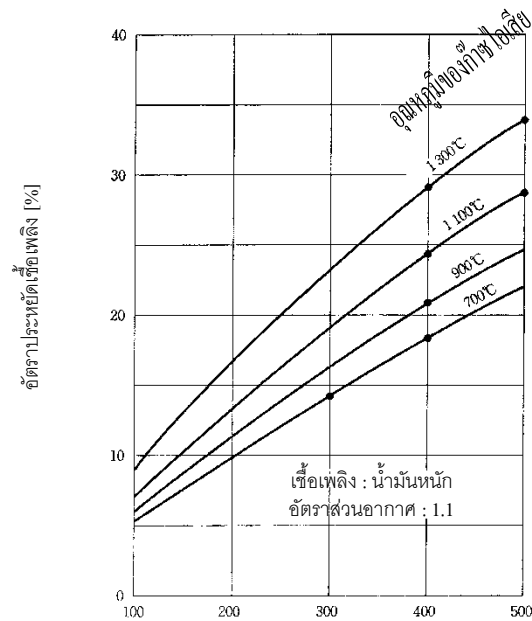
(3) ความร้อนสูญเสียที่ Beam ระบายความร้อนด้วยน้ำ

post	ผนังเดิม 60t caster 1 ชั้น	ผนังเดิม + veneering	ผนังเซรามิกทั้งหมด 80 mmt
			
ผิวเตาด้านใน Tf [°C]	ความสูญเสียในน้ำระบายความร้อน [kJ/(m·s)]	ความสูญเสียในน้ำระบายความร้อน [kJ/(m·s)]	ความสูญเสียในน้ำระบายความร้อน [kJ/(m·s)]
1200	8.50	6.63	2.79
800	5.12	3.49	1.51

post	ผนังเดิม 60t caster 1 ชั้น	ผนังเดิม + veneering	ผนังเซรามิกทั้งหมด
			
ผิวเตาด้านใน Tf [°C]	ความสูญเสียในน้ำระบายความร้อน [kJ/(m·s)]	ความสูญเสียในน้ำระบายความร้อน [kJ/(m·s)]	ความสูญเสียในน้ำระบายความร้อน [kJ/(m·s)]
1200	15.25	13.27	9.54
800	7.22	5.59	3.61



รูปที่ 3.93 ประตูป้อนวัตถุ 2 ชั้น

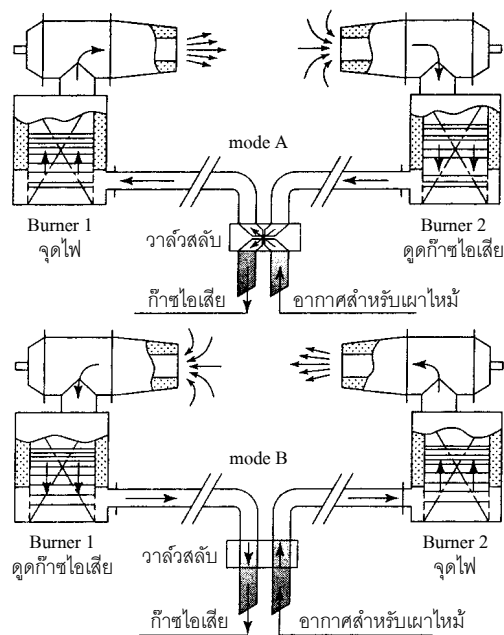


รูปที่ 3.94 อัตราการประหยัดเชื้อเพลิงด้วยการอุ่นอากาศ

ความร้อนแล้ว ยังนำความร้อนที่เหลือกลับมาใช้ด้วยการติดตั้ง Waste-heat boiler เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานของเครื่องจักรอื่นอีกด้วย

ระยะหลังนี้ มีการอนุรักษ์พลังงานด้วยการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศอุ่นให้สูงขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพสูงโดยใช้ Regenerative Burner ซึ่งจะเดินเครื่องเป็นคู่ดังรูปที่ 3.95

เมื่อจุดไฟ Burner A ก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้จะถูกดูดเข้าไปใน Burner B ซึ่งไม่ได้จุดไฟ ในขณะที่นั้นก๊าซจะแลกเปลี่ยนความร้อนโดยตรงกับ regenerator ที่ทำจากเซรามิก หลังจากนั้น 30-60 วินาทีจะใช้วาล์วสลับให้จุดไฟ Burner B และดูดก๊าซไอเสียนั้นเข้าไปใน Burner A โดยอากาศสำหรับเผาไหม้ของ Burner B จะแลกเปลี่ยนความร้อนโดยตรงกับ



รูปที่ 3.95 Regenerative burner

Regenerator ซึ่งได้รับความร้อนจากไอเสีย กรณีที่ก๊าซไอเสียจากเตาให้ความร้อนมีอุณหภูมิ 1200°C จะสามารถอุ่นอากาศให้มีอุณหภูมิสูงเกือบ 1100°C โดยเฉลี่ย ตัว Regenerator นั้นมีใช้ในเตาหลอมแก้วและ Hot blast furnace มาก่อนแล้ว แต่จะมีขนาดใหญ่มาก และระยะเวลาสลับนานมาก ส่วน Regenerative Burner จะมี Regenerator ติดตั้งอยู่กับ Burner แต่ละตัว แต่แรก Burner แบบนี้ถูกคาดหวังว่าจะสามารถอนุรักษ์พลังงานได้มาก แต่ปัญหาคือเมื่ออากาศที่อุ่นมีอุณหภูมิสูงขึ้น เปลวไฟของ Burner ก็มีอุณหภูมิสูงขึ้นด้วย ทำให้ค่า NO_x ที่ปล่อยออกมาเพิ่มขึ้นเป็นฟังก์ชันยกกำลัง อย่างไรก็ตาม ระยะหลังนี้มีการค้นคว้าวิจัยเพิ่มมากขึ้น ทำให้เข้าใจเทคโนโลยีที่สามารถเผาไหม้ด้วยอากาศอุ่นอุณหภูมิสูงเช่นนี้ด้วยค่า NO_x เท่าเดิมหรืออาจต่ำกว่าเดิมเสียอีก ยิ่งไปกว่านั้น กรณีของ Regenerative Burner ก๊าซไอเสียจะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิของก๊าซไอเสียหลังจากแลกเปลี่ยนความร้อนกับ Regenerator ของ Burner แต่ละตัวเสร็จแล้ว สุดท้ายจึงมีอุณหภูมิต่ำเพียงประมาณ 300°C แม้ว่าอุณหภูมิเตาที่ตำแหน่งของ Burner จะสูงมากก็ตาม ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องทำให้เตามีความยาวมากเพื่อลดอุณหภูมิของก๊าซไอเสียเหมือนกับเตาแบบเดิม สามารถให้ความร้อนเหล็ก Billet ได้โดยมีขนาดกะทัดรัด ในอนาคตคงจะมีการใช้ระบบ Burner แบบนี้มากขึ้นเรื่อยๆ เรื่องการนำความร้อนจากก๊าซไอเสียกลับมาใช้คงมีเพียงเท่านี้ อย่างไรก็ตาม ในกรณีพิเศษยังมีระบบ Hot cooling ซึ่งใช้ Skid beam ซึ่งเป็นแท่งรองรับในเตาที่ระบายความร้อนด้วยน้ำเพื่อกำเนิดไอน้ำอีกด้วย

(จ) การลดกำลังไฟฟ้า

การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยทั่วไปสามารถทำได้โดยเดินสายไฟให้เหมาะสมที่สุด ลดความสูญเสียจากความต้านทานไฟฟ้าให้เหลือน้อยที่สุด และติดตั้งคาปาซิเตอร์เพิ่มเพื่อเพาเวอร์แฟกเตอร์ รวมทั้งทำให้เกิดสมดุลในวงจรไฟฟ้า 3 เฟส เป็นต้น อย่างไรก็ตาม วิธีที่ใช้กันมากในเตาให้ความร้อนเหล็ก Billet ได้แก่ เดินเครื่อง Blower สำหรับการเผาไหม้ และพัดลมดูดก๊าซไอเสียแบบ VVVF

นอกจากนี้ในการขับ Walking beam มักจะใช้ซิลินเดอร์ไฮดรอลิกแบบก้านเดียวซึ่งกรณีที่จะเลื่อนด้านก้านสูบจะต้องใช้น้ำมันไฮดรอลิกปริมาณมาก ปริมาณน้ำมันที่ต้องใช้นี้จะเป็นตัวกำหนดขนาดของปั๊มไฮดรอลิกรวมทั้งมอเตอร์ด้วย เพื่อแก้ไขจุดนี้ จะมีการติดตั้งบายพาสทั้งด้านก้านสูบและด้านตรงข้ามก้านสูบ เพื่อลดปริมาณน้ำมันไฮดรอลิกที่ต้องใช้ให้น้อยลงและทำให้ปั๊มมีขนาดเล็กลงด้วย

(ฉ) การควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์

ในระยะหลังนอกจากระบบ Distributed computer system (DCS) หรือ Programmable logic controller (PLC) แล้ว ยังใช้คอมพิวเตอร์สำหรับควบคุม เรียกว่า Level II ซึ่งจะคำนวณอุณหภูมิของเหล็ก Billet แบบ Real time เพื่อควบคุมสภาพการเผาไหม้ให้สามารถให้ความร้อนอย่างเหมาะสมที่สุดอยู่เสมอให้รองรับรูปแบบการเดินเครื่องแบบต่างๆ เช่น การเปลี่ยนชนิดเหล็ก เป็นต้น เตาที่ใช้วิธีอนุรักษ์พลังงานเพื่อให้ใช้เชื้อเพลิงน้อยที่สุดแบบนี้กำลังมีจำนวนเพิ่มขึ้น และในอนาคตวิธีอนุรักษ์พลังงานที่ใช้คอมพิวเตอร์เช่นนี้จะมีมากขึ้นในอนาคต

3.12.3.4 กลวิธีอนุรักษ์พลังงานพิเศษอื่นๆ

(ก) เตา Annealing furnace แบบ Batch ที่มีบรรยากาศเป็นไฮโดรเจน

เตานี้ใช้สำหรับทำ Annealing คอยล์ที่แปรรูปเรียบร้อยแล้ว เรียกว่า Bell annealing furnace โดยจะนำคอยล์ที่พันแผ่นเหล็ก ฯลฯ มาซ้อนเป็นชั้นๆ แล้วให้ความร้อนทางอ้อมผ่าน Inner cover ซึ่งมีลักษณะคล้าย Muffle แต่เดิมโดยมากจะใช้ไนโตรเจนเป็นบรรยากาศภายใน Inner cover นี้ อย่างไรก็ตาม จากตารางที่ 3.33 ไฮโดรเจนจะมีคุณลักษณะด้านการถ่ายเทความร้อน ได้แก่ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน และความร้อนจำเพาะดีกว่าไนโตรเจนมาก จึงนำคุณลักษณะนี้มาใช้ประโยชน์ในการอนุรักษ์พลังงานโดยใช้บรรยากาศเป็นไฮโดรเจน 100% ซึ่งจะลดเวลาให้ความร้อนให้สั้นลงได้

ตารางที่ 3.33 เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของ H_2 กับ N_2

สมบัติทางกายภาพ	N_2	H_2	H_2 / N_2
สัมประสิทธิ์ความหนืด $[kg/m^2]$ ที่ $300^\circ C$	2.89×10^{-6}	1.39×10^{-6}	0.48
สัมประสิทธิ์ความหนืดจลน์ $[m^2/s]$ ที่ $300^\circ C$	0.491×10^{-4}	3.21×10^{-4}	6.54
สัมประสิทธิ์การนำความร้อน $[W/(m \cdot K)]$ ที่ $300^\circ C$	0.0442	0.295	6.67
thermal diffusivity $[m^2/s]$ ที่ $300^\circ C$	7.13×10^{-5}	4.94×10^{-4}	6.93
ความหนาแน่น $[kg/m^3]$ ที่ $300^\circ C$	0.596	0.0424	0.072
ความร้อนจำเพาะ $c_p [kJ/(kg \cdot K)]$ ที่ $300^\circ C$	1.070	14.55	13.6
Pr number ที่ $300^\circ C$	0.69	0.65	0.94
mean free path $[m]$ ที่ $300^\circ C$	49×10^{-6}	90×10^{-6}	1.84
self diffusion coefficient $[m^2/s]$ ที่ $300^\circ C$	2.03×10^{-5}	1.43×10^{-5}	7.0
interdiffusion coefficient $[m^2/s]$ H_2O ที่ $55^\circ C$	3.13×10^{-5}	1.121×10^{-5}	3.6
interdiffusion coefficient $[m^2/s]$ อากาศ ที่ $0^\circ C$	1.83×10^{-5}	6.11×10^{-5}	3.3

นอกจากนี้ในกระบวนการระบายความร้อน หากเพิ่มความดันจะทำให้ลดระยะเวลาลงได้ ความสามารถในการระบายความร้อนจะแปรผันตรงกับกำลัง 1 ของความหนาแน่นของก๊าซ และกำลัง 0.78 ของความเร็วกระแส ส่วนความดันสูญเสียของระบบจะแปรผันตรงกับกำลัง 1 ของความหนาแน่นและกำลัง 2 ของความเร็วลม เนื่องจากอัตราไหลจะแปรผันตามความเร็วลม ดังนั้นกำลังพัฒนาการระบายความร้อนจึงแปรผันตามกำลัง 1 ของความดัน และกำลัง 3 ของความเร็วลม กล่าวคือ กรณีที่ให้ความสามารถในการระบายความร้อนคงที่แล้ว การลดอัตราไหลแล้วเพิ่มความดันจะสิ้นเปลืองกำลังขับเคลื่อนน้อยกว่า กล่าวคือเป็นการอนุรักษ์พลังงานนั่นเอง

(ข) บริเวณ Direct firing ของเตา Annealing furnace แบบต่อเนื่องสำหรับเหล็กแผ่น

เตานี้ใช้ทำ Annealing ขั้นสุดท้ายหลังจากรีดเย็นแล้ว ใช้กับเหล็ก Strip ที่อยู่ในสภาพ Non-oxidation มาอย่างต่อเนื่อง ในการทำ Annealing แต่เดิมจะใช้บรรยากาศที่มีไฮโดรเจนผสมอยู่บ้าง แล้วให้ความร้อนทางอ้อมด้วย Radiant tube อย่างไรก็ตาม เมื่ออุณหภูมิของเหล็กกับอุณหภูมิของเตาต่างกันมาก พบว่าหากไม่ให้ความร้อนด้วยเปลวไฟโดยตรงที่เผาไหม้ด้วยอัตราส่วนอากาศต่ำกว่า 1.0 เล็กน้อยแล้ว จะไม่เกิดการออกซิเดชัน การทำเช่นนี้เรียกว่า บริเวณ Direct firing ในบริเวณนี้จะมีการพาความร้อน

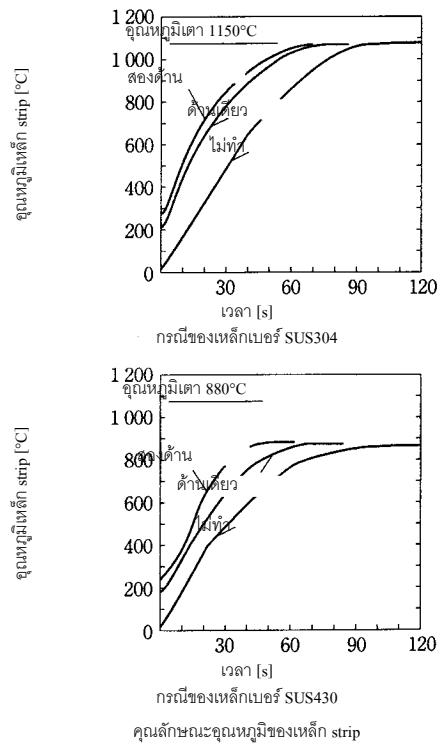
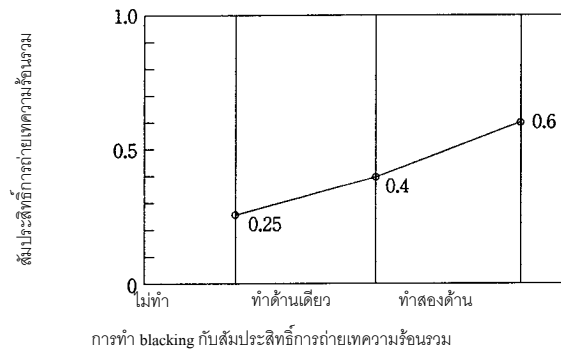
ร้อนจากเปลวไฟของ Burner ด้วย ทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนดีขึ้นมาก นอกจากจะอนุรักษ์พลังงานได้แล้วเตายังมีความยาวลดลงอีกด้วย

(ค) การทำ Blacking

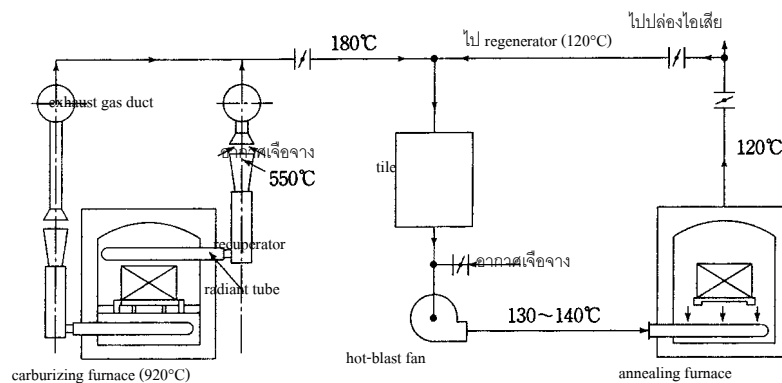
เป็นการเพิ่มความสามารถในการทำ Annealing วัสดุแปรรูปเย็นขึ้นถึง 20% โดยเพียงแค่เพิ่มกระบวนการนี้ที่ด้านทางเข้าวัตถุดิบของเตา Annealing furnace ในไลน์ Annealing pickling ของสแตนเลสเท่านั้น โดยใช้ Burner ชนิดพิเศษทำให้เกิดเขม่า ให้ไปเกาะที่ด้านหนึ่งของแผ่นเหล็กหรือทั้งสองด้าน เพื่อเพิ่ม Emissivity ทำให้ลดเวลาในการให้ความร้อนได้ ในช่วงอุณหภูมิต่ำวัตถุดิบจะมี Emissivity ต่ำ เขม่าจะเหลืออยู่ที่ผิวหน้าช่วยในการถ่ายเทความร้อน และเมื่อวัตถุดิบร้อนแดงที่ 700-800 °C เขม่าจะเผาไหม้หมดจึงไม่มีผลกระทบใดๆ ต่อผลิตภัณฑ์ รูปที่ 3.96 แสดงคุณลักษณะของการทำ Blacking ซึ่งสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเดิมจะมีค่า 0.25 แต่เมื่อทำ Blacking ทั้งสองด้านจะเพิ่มขึ้นเป็น 0.6 ผลลัพธ์คือ กรณีของเหล็กเบอร์ SUS304 เวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนจะมีอุณหภูมิเท่ากับที่กำหนดจะลดลงจากประมาณ 100 นาทีเหลือประมาณ 80 นาที นอกจากนี้ สำหรับเหล็กเบอร์ SUS430 เวลาจะลดลงจาก 100 นาทีเหลือประมาณ 60 นาที

(ง) การนำก๊าซไอเสียมาใช้ประโยชน์ระหว่างเตาหลายตัว

รูปที่ 3.97 แสดงตัวอย่างการใช้ก๊าซไอเสียของเตา Carburizing furnace เป็นแหล่งความร้อนของเตา Annealing furnace ในกรณีนี้ เตา Annealing furnace จะไม่ต้องใช้แหล่งความร้อนอื่นอีกเลย การทำเช่นนี้จะต้องวางแผน Layout เครื่องจักรให้ดี แต่สำหรับเตาอุณหภูมิต่ำจะเป็นการอนุรักษ์พลังงานที่ดีเลิศ นอกจากนี้ในกรณีของเตา Carburizing furnace บรรยากาศในเตาจะเป็นก๊าซที่สามารถเผาไหม้ได้ ดังนั้น จึงสามารถนำก๊าซบรรยากาศที่เป็นไอเสียมาเป็นเชื้อเพลิงของเตาอื่นเพื่ออนุรักษ์พลังงานได้



รูปที่ 3.96 คุณลักษณะของการทำ Blacking



รูปที่ 3.97 การนำก๊าซไอเสียของเตา Carburizing furnace มาใช้ในเตา Annealing furnace

3.13 วัสดุสำหรับอุปกรณ์ความร้อน

3.13.1 ฤทธิทั่วไป

วัสดุสำหรับอุปกรณ์ความร้อนแบ่งคร่าวๆ ได้เป็น วัสดุทนไฟความหนาแน่นสูงที่ทนทานต่อการกัดกร่อนทั้งทางกายภาพ และเคมี อิฐทนไฟกันความร้อน และวัสดุทนไฟความหนาแน่นต่ำ เช่น Castable น้ำหนักเบา ฯลฯ ซึ่งใช้เป็นวัสดุ Backup วัสดุข้างต้น และวัสดุกันความร้อนที่ใช้เป็นฉนวนความร้อนกันระหว่างด้านนอกของวัสดุข้างต้นกับเปลือกเตาหรือใช้เป็นฉนวนความร้อนของท่อต่างๆ ตารางที่ 3.34 แสดงประเภทวัสดุสำหรับอุปกรณ์ความร้อนประเภทต่างๆ แยกตามความหนาแน่นของวัสดุและรูปร่างเป็นหลัก รวมทั้งวิธีติดตั้งด้วย ในญี่ปุ่นก่อนหน้าปี พ.ศ. 2508 หากกล่าวว่าวัสดุทนไฟจะมีความหมายเป็นอิฐทนไฟ แต่หลังจากนั้นมีการใช้เซรามิกไฟเบอร์ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการอนุรักษ์พลังงานกันมากขึ้น นอกจากนั้นอิฐไม่เผา และวัสดุทนไฟที่ไม่มีรูปร่างแน่นอน เช่น castable ฯลฯ ซึ่งนำมาใช้แทนอิฐเผายังมีสัดส่วนสูงขึ้นถึง 45% ของวัสดุทนไฟทั้งหมด วัสดุทนไฟที่ต้องสัมผัสกับแก้ว และโลหะหลอมเหลวซึ่งมีอุณหภูมิสูง จะต้องเป็นวัสดุความหนาแน่นสูงที่ทนอุณหภูมิสูงและทนการกัดกร่อน แต่ในอุปกรณ์ความร้อนที่ต้องสัมผัสแต่ก๊าซเผาไหม้ทั่วไปและอากาศอุณหภูมิสูง จะใช้ผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์ที่มีประสิทธิภาพในการอนุรักษ์พลังงานสูง และอิฐทนไฟกันความร้อนน้ำหนักเบาเป็นหลัก

ตารางที่ 3.34 วัสดุสำหรับอุปกรณ์ความร้อนประเภทต่างๆ

1.	วัสดุทนไฟ (refractories)
1.1	วัสดุที่ใช้วัสดุดิบผง
1.1.1	วัสดุทนไฟความหนาแน่นสูง
(1)	พวกที่มีรูปร่างแน่นอน (พวกอิฐ) : ผลิตภัณฑ์เผา ผลิตภัณฑ์ไม่เผา
(2)	พวกที่ไม่มีรูปร่างแน่นอน castable, ramming material, gunning material, plastic, coating material, refractory mortar
1.1.2	วัสดุทนไฟความหนาแน่นต่ำ
(1)	พวกที่มีรูปร่างแน่นอน (พวกอิฐ) : ผลิตภัณฑ์เผา (insulating fire brick, board)
(2)	พวกที่ไม่มีรูปร่างแน่นอน lightweight castable, lightweight gunning material, insulating mortar
1.2	วัสดุทนไฟหล่อด้วยไฟฟ้า (electrocast refractories)
1.3	วัสดุทนไฟไฟเบอร์อนินทรีย์ (ceramic, alumina, zirconia, graphite เป็นต้น)
(1)	พวกที่มีรูปร่างแน่นอน (พวกอิฐ) : hard board, hard block, soft block
(2)	พวกที่ไม่มีรูปร่างแน่นอน : bulk, felt, blanket, fiber castable
2.	ฉนวนความร้อน (วัสดุกันความร้อน หรือ heat insulator)
2.1	ฉนวนความร้อน (heat insulator) : ผงสารอนินทรีย์ บอร์ดไฟเบอร์อนินทรีย์ ฉนวนขึ้นรูปแล้ว
2.2	ฉนวนความเย็น (cold insulator) : พวกที่มีรูปร่างแน่นอนทำจากโพรอินทรีย์ (แก้ว) หรืออินทรีย์

3.13.2 ประเภทของวัสดุทนไฟ

ประเภทของวัสดุทนไฟจะแบ่งตามความหนาแน่นและรูปร่างได้ตามตารางที่ 3.34 นอกจากนี้ยังแบ่งตามองค์ประกอบได้อีกด้วย ซึ่งในหนังสือเล่มนี้จะอธิบายเพียงว่าแบ่งเป็น 4 ประเภท ได้แก่ พวกออกไซด์ พวกคาร์ไบด์ พวกไนไตรด์ และพวกคาร์บอน วิธีแบ่งประเภททั่วไปที่ใช้ในการเก็บสถิติการผลิตวัสดุทนไฟจะแสดงไว้ในตารางที่ 3.35

ตามวิธีแบ่งแบบนี้ อิฐทนไฟ (รวมทั้งอิฐกันความร้อน) จะแบ่งออกตามองค์ประกอบ แต่วัสดุทนไฟพวกที่ไม่มีรูปร่างแน่นอนจะแบ่งตามวิธีติดตั้ง

ตารางที่ 3.35 วิธีแบ่งประเภททั่วไปของวัสดุทนไฟ

อิฐทนไฟ	พวกดินเหนียวมีดินขาวทนไฟธรรมชาติ $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, agalmatolite $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ฯลฯ เป็นหลัก หลังจากเผาแล้วจะกลายเป็น SiO_2 (cristobalite), $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ (mullite) พวกไฮโดรลูมิน่า Al_2O_3 50-99.9% โดยมวล ซิลิกา SiO_2 ไม่น้อยกว่า 93% โดยมวลโดโลไมต์ $\text{xMgO} \cdot \text{yCaO}$ มีอัตราส่วนได้หลายค่าเป็นเบส $\text{xMgO} \cdot \text{yCr}_2\text{O}_3$ พวกเซอร์คอน $\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$ อื่นๆ
รูปร่างไม่แน่นอน	castable พลาสติก gunning material refractory mortar

3.13.3 คุณลักษณะที่ต้องมีในอิฐทนไฟ

คุณภาพของอิฐทนไฟจะแสดงด้วยโครงสร้างทางจุลภาค เช่น องค์ประกอบทางเคมี ลักษณะของผลึก และขนาดอนุภาค ขนาดรูพรุน ฯลฯ และสมบัติทางมหภาค ได้แก่ ความหนาแน่น ความเป็นรูพรุน (Porosity) เป็นต้น สมบัติที่ต้องมีในอิฐทนไฟได้แก่

- (1) สมบัติเชิงกล (ความแข็งแรง การทนการเสียดสี)
- (2) สมบัติเชิงความร้อน (สัมประสิทธิ์การนำความร้อน Residual expansion / Shrinkage, Refractoriness under load, Thermal shock resistance, Refractoriness เป็นต้น)
- (3) สมบัติทางเคมี (การทนการกัดกร่อนทางเคมี : การกัดกร่อนจากไอต่าง ก๊าซที่มีสมบัติออกซิเดชัน-รีดักชัน แก้วหลอมเหลว และ Slag เป็นต้น)
- (4) สมบัติทางไฟฟ้า (การนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูง การกลายเป็นแบดเตอรีกับเกลือหลอมเหลว)
- (5) เสถียรภาพต่อแก๊สมันตรังสี เป็นต้น ต่อไปนี้จะอธิบายเฉพาะสมบัติที่สำคัญ

1. Refractoriness under load

เมื่อนำอิฐทนไฟเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm สูง 50 mm มาแขวนน้ำหนัก 0.20 MPa ไว้แล้วเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปเรื่อยๆ อุณหภูมิที่อิฐขยายตัวครั้งแรกแล้วเริ่มหดตัวลง เรียกว่า Refractoriness under load T_1 อุณหภูมิที่หดตัว 2% ของความสูงเดิมเรียกว่า T_2 อุณหภูมิที่หดตัว 20% เรียกว่า T_3 อุณหภูมิเหล่านี้กำหนดไว้ในมาตรฐาน JIS

หากวัสดุทนไฟมีการเปลี่ยนแปลงขนาด (ไม่ใช้การขยายตัวจากความร้อน) ระหว่างการใช้งาน จะเป็นสาเหตุให้ผนังเตาผุกร่อนหรือพังทลายได้ ค่า T_1 จึงต้องสูงกว่าอุณหภูมิใช้งาน

2. Residual expansion / shrinkage

สำหรับอิฐเผา หากวัสดุยังเปลี่ยนแปลงเป็นลักษณะที่มีเสถียรภาพภายใต้อุณหภูมิสูงไม่ได้ที่ ทุกครั้งที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูง อิฐจะมีการขยายตัวหรือหดตัว ซึ่งเท่ากับใช้อิฐที่เผาไม่ได้ที่ ระหว่างที่ใช้ก็เท่ากับนำไปเผาซ้ำ ซึ่ง Residual shrinkage จะทำให้เกิดการร้าวหรือพังทลายได้

3. Thermal shock resistance

เมื่ออุณหภูมิพื้นผิวของอิฐมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว จะเกิดความเค้นจากความร้อนขึ้น ความเค้นนั้นจะทำให้ผิวอิฐร้าว เกิดอันตรายจากการหลุดล่อนตกลงมาได้ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Thermal spalling การได้รับความร้อนหรือความเย็นอย่างรวดเร็วเป็นปัญหาสำคัญสำหรับอิฐทนไฟ

4. ความหนาแน่น ความเป็นรูพรุน การดูดซึมน้ำ

เป็นสมบัติพื้นฐานที่มีผลต่อความแข็งแรง สมบัติการนำความร้อน การยอมให้อากาศผ่านได้ และ Thermal spalling ของอิฐทนไฟ

5. ความแข็งแรง

Crushing strength และ Bending strength เป็นตัววัดความแข็งแรงที่สำคัญของอิฐทนไฟ โดยสิ่งที่สำคัญต่ออิฐที่ใช้ในบริเวณที่ต้องรับน้ำหนัก คือ Crushing strength ที่อุณหภูมิสูง

3.13.4 สมบัติของอิฐทนไฟชนิดต่างๆ

(1) อิฐดินเหนียวทนไฟ

อิฐดินเหนียวทนไฟทำจากดินเหนียวทนไฟซึ่งมีดินขาวผสมอยู่มาก นำไปเผาที่ 1100-1400°C แล้วนำไปบด (เรียกว่า Chamotte) นำไปปั่นรวมกับดินเหนียวดิบแล้วเผา บางครั้งก็เรียกว่า อิฐ Chamotte ปัจจุบันมีการนำมาใช้น้อยลงเหลือเพียงประมาณ 20% ของวัสดุทนไฟทั้งหมดเท่านั้น ส่วนมากเป็นเกรดธรรมดาที่มี Refractoriness under load ไม่เกิน 1400°C

มาตรฐาน JIS R 2304 กำหนดมาตรฐานของอิฐดินเหนียวทนไฟเอาไว้ ใ้การใช้งานโปรดดูจากมาตรฐาน

(2) อิฐซิลิกา

อิฐที่มีซิลิกา (SiO_2 เป็นหลัก) นี้มี Refractoriness under load ไม่น้อยกว่า 1,580°C มีความแข็งแรงเชิงกลสูง และไม่มีการหดตัวระหว่างใช้งาน เป็นอิฐที่ขาดไม่ได้ในเตาถ่านโค้กซึ่งต้องการการปิดกั้นก๊าซ แต่เดิมเคยใช้กันมากในเตา Arc furnace และเพดานโค้งของเตา Tank furnace แต่ปัจจุบันจะเปลี่ยนไปใช้วัสดุทนไฟแบบรูปรางไม่แน่นอนแทน

(3) อิฐอลูมินา

อิฐที่มีอลูมินาผสมอยู่ไม่น้อยกว่า 50% เรียกว่า อิฐอลูมินา มี Refractoriness และ Refractoriness under load สูงจึงไม่ค่อยเปลี่ยนรูปร่างที่อุณหภูมิสูง และมีการเปลี่ยนน้อยระหว่างการใช้งาน มีสมบัติการนำความร้อนสูง ทนต่อการกัดกร่อนจาก Slag และไม่ค่อยเกิด Thermal spalling เนื่องจากอิฐนี้มีสมบัติที่พึงประสงค์หลายประการ ในจำนวนวัสดุทนไฟทั้งหมด จะมีการผลิตอิฐอลูมินาแบบดินเหนียว

และแบบเบส และนำมาใช้จำนวนมาก มาตรฐาน JIS กำหนดให้ต้องมีลูมินาผสมอยู่ไม่น้อยกว่า 45% จนถึงไม่น้อยกว่า 80% โดยแบ่งเป็น 5 เกรด

การทำให้ลูมินาผสมอยู่ไม่น้อยกว่า 70% จะใช้ Sintered mullite หรือ Electro-fused mullite กับ Burned alumina, Sintered alumina หรือ Electro-fused alumina เป็นวัตถุดิบอิฐประเภทนี้เป็นอิฐคุณภาพสูงที่สามารถหาซื้อได้ง่าย

(4) อิฐโดโลไมต์

อิฐประเภทนี้ใช้โดโลไมต์เป็นวัตถุดิบ ผลิตขึ้นมาเพื่อใช้กับเตา BOF (Basic oxygen furnace) มีทั้งอิฐเผาและอิฐไม่เผา

(5) อิฐเซอร์คอน

ใช้ทรายเซอร์คอน ($ZrO_2 \cdot SiO_2$) บดเป็นวัตถุดิบ ใช้กับ Steel ladle และ Tundish เนื่องจากอิฐนี้มีเซอร์โคเนีย (ZrO_2) ผสมอยู่มาก จึงทนการกัดกร่อนของ Slag ได้ดี มีการนำไปใช้กับเตาหลอมแก้วอีกด้วย

(6) อิฐแมกนีเซีย

ใช้ Magnesite clinker ซึ่งได้จากการนำ Magnesite ในน้ำทะเลนำมาผ่านกรรมวิธีทางเคมีแล้วเผา หรือ Magnesite clinker ซึ่งได้จากการเผา Magnesite ธรรมชาติเป็นวัตถุดิบมีทั้งอิฐเผาและอิฐไม่เผา

อิฐที่เผาที่อุณหภูมิไม่น้อยกว่า $1,750^\circ C$ เรียกว่า อิฐ Direct bond ซึ่งจะทนทานต่อการกัดกร่อนจาก Slag ที่เป็นเบส โลหะหลอมเหลว และไอต่างได้ดี ใช้เป็นอิฐในห้องเก็บสะสมความร้อนสำหรับการถลุงเหล็กและโลหะอื่นที่ไม่ใช่เหล็ก และในเตา Glass tank furnace

(7) อิฐแมกนีเซีย / คาร์บอน

กราไฟต์มีสมบัติที่ไม่เปื่อยกโลหะหลอมเหลว และช่วยป้องกันไม่ให้โลหะหลอมเหลวซึมเข้ามาในตัวอิฐ อิฐไม่เผาที่ทำจาก Magnesite clinker ผสมกับกราไฟต์แล้วอัดเป็นก้อนภายใต้ความดันสูงโดยทำการไล่อากาศในสูญญากาศไปด้วย จะสามารถรองรับสภาพที่เข้มงวดในเตาถลุงเหล็กได้ดี จึงนิยมใช้กันมาก ข้อเสียคือมักจะถูกออกซิไดส์ได้ง่าย

(8) อิฐ Chrome magnesite / magnesite chrome

อิฐ Chrome ซึ่งใช้ Chromite เป็นวัตถุดิบจะเกิด Thermal spalling ได้ง่ายเพื่อปรับปรุงจุดนี้จึงเกิดอิฐ Magnesite chrome ซึ่งใช้ Chromite ผสมกับ Magnesite เป็นวัตถุดิบหลัก

โดยทั่วไปจะแบ่งเป็นอิฐเผาธรรมดาซึ่งมี Magnesite ไม่น้อยกว่า 50% กับอิฐ Direct bond ซึ่งมี Magnesite 60-80% และเผาที่อุณหภูมิไม่ต่ำกว่า $1,750^\circ C$ โดยอิฐ Direct bond จะมีความทนทานต่อการเสียดสีเชิงกลสูงมาก จึงใช้กันมากในเตาถลุงเหล็กและ Cement kiln

(9) อิฐซิลิกอนคาร์ไบด์

ซิลิกอนคาร์ไบด์มีสมบัติที่ดีคือ มีสมบัติการนำความร้อนสูง และมีความแข็งแรงเชิงกลสูงที่อุณหภูมิสูง รวมทั้งยังไม่ค่อยเปื่อยกโลหะหลอมเหลวอีกด้วย อย่างไรก็ตาม สมบัติการ Sintering จะไม่ดี แต่เดิมจึงใช้วิธี Clay bond โดยเติมดินเหนียวลงไปแล้วทำ Sintering แต่อิฐนี้จะไม่สามารแสดงสมบัติของซิลิกอนคาร์ไบด์ได้เต็มที่ อย่างไรก็ตาม ด้วยการพัฒนาวิธี Sintering ด้วยปฏิกิริยาโดยเติมซิลิกอนโลหะลงไปในอนุภาควัตถุดิบซิลิกอนคาร์ไบด์แล้วทำ Sintering ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจน จึงสามารถผลิตอิฐซิลิกอนคาร์ไบด์แบบ Silicon nitride bond ขึ้นมาได้

อิฐนี้ใช้เป็นชั้นวางในเตาเผาเซรามิก และใช้เป็นฟิลเตอร์โลหะหลอมเหลว อิฐคุณภาพสูงจะเป็น Fine ceramic ที่มีคุณภาพเทียบเท่า Silicon nitride จึงถูกคาดหวังว่าจะสามารถนำมาทำเป็นวัสดุในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอุณหภูมิสูงและชิ้นส่วนของเครื่องจักรพลังความร้อนได้

(10) อิฐพวกซิลิกอนไนไตรด์

ได้รับการพัฒนาขึ้นมาเรื่อยๆ ให้เป็นวัสดุสำหรับชิ้นส่วนทนความร้อนมากกว่าจะเป็นวัสดุทนไฟ เช่น Crucible สำหรับเตาหลอมโลหะ ชิ้นส่วนของ Burner และ Supercharger สำหรับรถยนต์ เป็นต้น การทำ Sintering โดยตรงจะทำได้ยาก โดยมากจึงใช้วิธี Sintering ด้วยปฏิกิริยา ซึ่งจะนำซิลิกอนโลหะไปทำ Sintering โดยให้ทำปฏิกิริยากับสารประกอบไนไตรด์ที่อุณหภูมิ 1,200 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน อิฐนี้มีสมบัติที่ดีคือ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดเมื่อทำ Sintering จึงสามารถผลิตเป็นรูปร่างที่ซับซ้อนได้ด้วยความเที่ยงตรงสูง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากความเร็วในการแพร่ของไนโตรเจน จึงสามารถผลิตให้มีเนื้อหนาได้ประมาณ 20 cm เท่านั้น

Supercharger สำหรับรถยนต์จะเป็นซิลิกอนไนไตรด์ที่ทำ Sintering โดยตรง

(11) อิฐคาร์บอน (Carbon block)

มีสมบัติการนำความร้อนสูง มีการขยายตัวด้วยความร้อนน้อย ไม่ค่อยเปื่อย โลหะหลอมเหลว และยังไม่ค่อยเกิด Thermal spalling อีกด้วย ดังนั้น hearth ของเตา Blast furnace จึงต้องทำด้วยอิฐนี้เท่านั้น วัตถุดิบมีใช้ทั้งกราไฟต์ธรรมชาติ และกราไฟต์สังเคราะห์ นอกจากนี้ยังใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับวัสดุทนไฟผสมซึ่งจะผสมแมกนีเซียหรืออลูมินาอีกด้วย

(12) อิฐอื่นๆ

ได้แก่ อิฐ Magnesite-spinel ซึ่งใช้ในเตาหลอมเหล็กและ Cement kiln อิฐเซอร์โคเนียแบบ Calcia stabilized ซึ่งใช้บุเตาอุณหภูมิสูง เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีอิฐ Calcia ซึ่งคาดหวังว่าสามารถใช้กับ Metallurgy ได้อีกด้วย

3.13.5 สมบัติของอิฐทนไฟชนิดต่างๆ ประเภท และคุณสมบัติของวัสดุทนไฟชนิดต่างๆ วัสดุทนไฟที่ใช้กับเตาหลอม วัสดุกันความร้อน โครงสร้างของผนังเตา

3.13.5.1 ประเภทและสมบัติของวัสดุทนไฟที่ไม่มีรูปร่างแน่นอน

วัสดุทนไฟที่ไม่มีรูปร่างแน่นอนโดยมากจะเป็นครีมที่ประกอบด้วยตัวสารทนไฟกับสาร bonding หรือเป็นวัสดุทนไฟแบบผง ซึ่งสามารถนำมาใช้ได้ทันที หรือนำมาผสมน้ำหรือของเหลวที่กำหนดให้เป็นครีมแล้วนำไปใช้ ระยะหลังวัสดุทนไฟแบบนี้มีการนำมาใช้ในสัดส่วนสูงขึ้น

การแบ่งประเภทตามสภาพที่จำหน่าย แบ่งคร่าวๆ ได้เป็น (1) ผงแห้ง (2) ครีม และแบ่งละเอียดได้ตามตารางที่ 3.36 ในจำนวนนี้ มอร์ตาร์ในลำดับที่ 8 จะใช้ร่วมกับอิฐเกือบทุกกรณี แทบจะไม่ใช่เดี่ยวๆ เลย ในทางปฏิบัติจึงมีเพียง 7 ประเภทเท่านั้น

ตารางที่ 3.36 ประเภทและสมบัติของวัสดุทนไฟที่ไม่มีรูปร่างแน่นอน

ประเภท	สภาพที่ จำหน่าย	วิธีใช้	การติดตั้งและสมบัติ	การใช้งานที่สำคัญ
1 castable (โดยมาก เป็นผนังเตาทนไฟ ถาวร)	เป็นผง ใส่ถุง หรือกระสอบ	ผสม ของเหลว เช่น น้ำ ฯลฯ นวด ให้เข้ากัน	เทหรือเขย่าเข้าไป เป็นวัสดุทนไฟที่ไม่มีรูปร่างแน่นอนที่ใช้มากที่สุด มีสัดส่วน 40%	blast furnace runner, ผนัง ladle, tundish, เพดานเตาอุตสาหกรรม, หม้อไอน้ำข้างผนัง, Burner tile, ฝาเตาไฟฟ้า (บางครั้งก็หล่อเอา), บุในท่อส่งอากาศอุณหภูมิสูง ฯลฯ
2 gunning material (a) cold gunning mat. (b) hot gunning mat.			มีทั้งแบบเปียกซึ่งจะผสมวัตถุดิบกับน้ำแล้วจึงนำไปพ่น กับแบบแห้งซึ่งจะพ่นวัตถุดิบด้วยอากาศให้ผสมกับน้ำที่ nozzle มีทั้งแบบพ่นเย็นกับพ่นร้อน เครื่องพ่นอัตโนมัติมีใช้กันแพร่หลาย ใช้มารองจาก castable	(a) ปล่องไอเสีย, หม้อไอน้ำ, tundish, ladle, torpedo car (b) ใช้มากในการซ่อมเตาเกี่ยวกับเหล็กซึ่งมีการสึกหรอมาก มีแนวโน้มที่จะเพิ่มหน้าที่ coating ในข้อ 3 เข้าไปพร้อมกันด้วย
3 coating material (สารเคลือบผิวหน้า)			ใช้แปรงหรือเกรียงทาที่ผิววัสดุทนไฟ หลังจากใช้แล้วกำจัดออกได้ง่าย และทาสีได้ มีแนวโน้มจะเปลี่ยนเป็น gunning	ใช้ปกป้องพื้นผิวของวัสดุทนไฟในการหล่อโลหะต่อเนื่อง เช่น ladle, tundish ฯลฯ และสามารถรองรับชนิดของเหล็กที่เปลี่ยนไปได้
4 พลาสติก (ผนังเตาทนไฟ)	เป็นครีม หุ้มแผ่นกันน้ำ	ใช้ได้เลย	ค่อยๆ ตอกเข้าไปด้วย air hammer เพื่อก่อผนัง สามารถทำผนังขนาดใหญ่เป็นชั้นเดียว	เคยใช้มากในเตาให้ความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งใน soaking pit ฯลฯ แต่ด้วยการหล่อโลหะต่อเนื่อง ทำให้จำนวนของเตาลดลง และการติดตั้งยังยุ่งยากจึงไม่ค่อยทำกันแล้ว
5 ramming material (ผนังเตาถาวรและซ่อม)	เป็นผง หยาบๆ มีน้ำน้อยกว่าข้อ 4	ใช้ได้เลย	ใช้ air hammer ตอกวัสดุซึ่งมีความชื้นน้อยเข้าไปในกรอบ ใช้กันมากในเตาที่มีสภาพเข้มงวด เช่น เตาเหนียวนำความถี่สูง / ต่ำ	เดิมใช้กับ blast furnace runner เป็นหลัก ปัจจุบันเปลี่ยนไปใช้ castable กันมากขึ้น วัสดุนี้ยุ่งยากเหมือนข้อ 5 จึงไม่ค่อยทำกัน
6 patching material (สำหรับซ่อมแซม)	เป็นครีม นิ่มกว่าข้อ 4	ใช้ได้เลย	ตอกเข้าไปเหมือนกับพลาสติก	ใช้ซ่อมแซมหลุมบ่อเล็กๆ ที่เกิดขึ้นที่ผนังเตาเป็นแห่งๆ
7 injection refractories	เป็นโคลน	ใช้ได้เลย	ใช้ปั๊มฉีดเข้าไป	ฉีดเข้าไปในช่องว่างระหว่างตัวเตา เช่น blast furnace กับเปลือกเหล็ก
8 refractory mortar (สำหรับก่อเตา)	เป็นผงใส่ถุง	ผสมน้ำและ / หรือน้ำยาอื่นๆ นวดให้เข้ากัน	โดยทั่วไปจะใช้เกรียง ใช้เชือกมอฐีเวลาก่อ การใช้ mortar มีแนวโน้มลดลงเนื่องจากอิมมูรูปร่างได้มาตรฐานมากขึ้น	ใช้ในการก่ออิฐทุกชนิด แต่ไม่ใช้กับบริเวณวัสดุทนไฟที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง (เช่น glass tank furnace, hot blast furnace Burner)

วัสดุพวกนี้มีข้อดีคือสามารถก่อผนังทนไฟได้เป็นชั้นเดียวสม่ำเสมอไม่มีรอยต่อเหมือนใช้อิฐทนไฟ

การป้องกันผนังอิฐไม่ให้ผุกร่อนที่รอยต่อ จะต้องเจียร และก่ออิฐด้วยความเที่ยงตรงสูงโดยไม่ใช้มอร์ตาร์ แต่วัสดุทนไฟที่ไม่มีรูปร่างแน่นอนจะไม่จำเป็นต้องทำเช่นนั้น จึงได้เปรียบในแง่ต้นทุนและระยะเวลาก่อสร้าง

1. Castable

Castable มี 3 ชนิด ได้แก่ แบบผสมซีเมนต์ปกติ แบบซีเมนต์ดำ และแบบกันความร้อนน้ำหนักเบา เมื่อแห้งแล้วจะมี Bulk density ไม่เกิน 1600 kg/m^3

แบบผสมซีเมนต์ปกติ จะเกิดปฏิกิริยาพันธะ Monohydration ทำให้เกิดสารไฮเดรตของซีเมนต์อลูมินา ซึ่งจะทำให้เกิดความแข็งแรง ความแข็งแรงหลังจากแห้ง และเผาแล้วจะเกือบแปรผันตามปริมาณของซีเมนต์ แต่จะทนไฟลดลง เมื่อมีซีเมนต์ตั้งแต่ 20% ขึ้นไปการทนไฟจะลดลงอย่างมาก จากมุมมองเรื่องความแข็งแรง การทนไฟ และต้นทุนแล้ว ส่วนใหญ่โดยทั่วไปจะผสมซีเมนต์อลูมินาประมาณ 15% เมื่อให้ความร้อนไปเรื่อย ตั้งแต่ 200°C ขึ้นไป จะเริ่มเกิดปฏิกิริยา Dehydration และเมื่อมีอุณหภูมิประมาณ 1000°C ปฏิกิริยา Dehydration จะเกิดอย่างสมบูรณ์ ที่อุณหภูมิสูงกว่านั้น Hot strength จะต่ำลง แต่จะเริ่มเกิดพันธะเซรามิก ทำให้มีความแข็งแรงที่อุณหภูมิปกติสูงขึ้น

หากน้ำที่ใช้ผสมมีปริมาณมาก ความเป็นรูพรุนจะสูง ทำให้ความแข็งแรงลดลง หากน้ำน้อยจะเทยาก ทำให้เข้าไปไม่ถึงซอกมุมต่างๆ ของแบบ โดยทั่วไปต้องใช้มากกว่า 12% เล็กน้อย การหล่อให้มีความหนาแน่น และความแข็งแรงสูงจะต้องลดปริมาณน้ำที่ใช้ผสม จึงเกิด Clay bond castable ที่ปั้นดินเหนียวที่เติมเข้าไปให้เป็นผงแล้วลดปริมาณซีเมนต์ลง ยิ่งกว่านั้นยังลดปริมาณดินเหนียวลง แล้วผสม Silica floor (ผงซิลิกาละเอียด) เข้าไป ทำให้ใช้น้ำเพียง 6-7% ได้ และเวลาเทต้องเขย่าเพื่อให้ไหลได้ดี เกิดเป็น Castable ที่ใช้น้ำน้อย ความหนาแน่น และความแข็งแรงสูง

2. Gunning material

Castable เป็นวัสดุที่ใช้เทในแบบ แต่ Gunning material จะใช้เครื่องพ่นเย็นหรือร้อน พ่นที่ผิวหน้าที่ต้องการเป็นชั้นๆ เพื่อทำให้เป็นผนังทนไฟโดยไม่ต้องใช้แบบ ใช้มากกับด้านในปล่องไอเสียที่แคบ ด้านในท่อไอเสีย ด้านในหม้อไอน้ำ เป็นต้น รวมทั้งในเตาอุณหภูมิสูงซึ่งแต่เดิมเคยใช้ Castable แต่ Gunning material ติดตั้งได้ง่ายกว่าจึงมีการนำมาใช้มากขึ้น ใช้งานได้หลากหลายตั้งแต่พ่นทั่วพื้นที่จนถึงใช้ซ่อมแซมเฉพาะที่ การซ่อมแซมร้อนจะใช้เครื่อง Hot gunning

3. Plastic refractories

ใช้เป็นวัสดุทำผนังเตาที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่เป็นชั้นเดียวและมีความทนทาน พลาสติกที่มีลักษณะเป็นครีมนี้เคยใช้กับเตา Soaking pit ขนาดใหญ่ เตาให้ความร้อน เป็นต้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจาก Castable มีคุณภาพสูงขึ้นมาก จึงไม่ค่อยใช้พลาสติกกันอีกแล้วเนื่องจากสิ้นเปลืองทั้งแรงงาน และเวลา นอกจากนี้ ยังมีการนำอุณหภูมิทนไฟน้ำหนักเบามาใช้เพิ่มขึ้นเพื่ออนุรักษ์พลังงาน จึงมีการใช้พลาสติกน้อยลงไปทุกที

4. Injection refractories

วัสดุนี้มีลักษณะเป็นโคลน (Slurry) ใช้สำหรับซ่อมแซมรอยร้าวหรือช่องว่างบนผนังเตา โดยใช้ปั๊มอัดเข้าไปจากภายนอกเพื่อซ่อมแซม

5. Refractory mortar

ใช้ก่อวัสดุที่มีรูปร่างแน่นอนพวกอิฐทนไฟ เช่น อิฐกันความร้อน เพื่อทำเป็นผนังเตา วัสดุนี้มีสมบัติเหมือนกับอิฐที่จะใช้ก่อ

3.13.5.2 อิฐทนไฟกันความร้อนและบอร์ด

อิฐทนไฟกันความร้อน (Insulating firebrick) มีการนำมาใช้กันมากตั้งแต่วิกฤตการณ์น้ำมันในปี พ.ศ. 2516 เนื่องจากเมื่อใช้กับอุณหภูมิสูงแล้วจะมีประสิทธิภาพสูงในการอนุรักษ์พลังงาน ตัวอย่างเช่น ในเตา Glass tank furnace จะใช้อิฐทนไฟกันความร้อนในการกั้นฉนวนความร้อนของอิฐ Electrocast กันมาก ในเตาอุณหภูมิสูงอื่นๆ ก็ใช้อิฐทนไฟกันความร้อนเป็นอิฐ Backup กันมาก

มาตรฐาน JIS กำหนดมาตรฐานของอิฐทนไฟกันความร้อนไว้ดังตารางที่ 3.37 โดยแบ่งเป็น 3 ประเภทจากความหนาแน่นต่ำไปหาสูงได้ A, B และ C ในทางปฏิบัติแล้วคือแบ่งเป็นอิฐกันความร้อนแบบ Diatomite ซึ่งใช้กับอุณหภูมิไม่เกินประมาณ 900 °C อิฐกันความร้อนแบบดินเหนียวทนไฟได้ถึงอุณหภูมิ 1,200-1,500 °C อิฐกันความร้อนทนไฟอุณหภูมิสูงตั้งแต่ 1,500 °C ขึ้นไป และบอร์ดกันความร้อนอุณหภูมิสูง

ในอิฐทนไฟกันความร้อน สมบัติ Residual expansion / shrinkage จะมีความสำคัญมาก เนื่องจากการหดตัวเมื่อได้รับความร้อนจะจำกัดอุณหภูมิใช้งานของอิฐ อิฐนี้มีรูพรุนมากจึงเกิด Thermal spalling น้อย แต่เนื่องจากมีความแข็งแรงต่ำ จึงทนต่อการได้รับความร้อนและความเย็นอย่างรวดเร็วไม่ได้ โดยอิฐจะร้าวหรือล่อน จึงต้องใช้ความระมัดระวัง

นอกจากนี้ยังมีรูพรุนมาก อากาศผ่านได้ดี ก๊าซ CO และ H₂ ในบรรยากาศเตาจึงซึมเข้ามารีดิวซ์ซิลิกาเกิดเป็น SiO ซึ่งจะระเหยทำให้อิฐพังทลาย หรือการที่ CO ไปรีดิวซ์เหล็กออกไซด์และการสลายตัวของ CO จะดึงคาร์บอนออกมาทำให้อิฐพังทลายได้เช่นกัน กรณีที่ควบคุมบรรยากาศเตาจึงต้องเลือกอิฐที่มีสิ่งเจือปนต่ำ

1. อิฐกันความร้อนแบบ Diatomite

อิฐนี้มี Diatomite เป็นวัตถุดิบหลักแล้วนำไปเผา ส่วนมากจะมีอุณหภูมิใช้งานที่ปลอดภัย 900 °C กับ 1,000 °C แม้ว่าช่วงอุณหภูมิจะจัดเป็นวัสดุกันความร้อน แต่วัตถุประสงค์การใช้งานในเตาอุตสาหกรรมจะค่อนข้างจำเพาะ ในที่นี้จึงนำมารวมไว้ในวัสดุทำเตา อิฐนี้เคยใช้กันมากเป็นอิฐ Backup ของอิฐทนไฟ แต่เมื่อการกันความร้อนต้องทำที่อุณหภูมิสูงขึ้น การใช้งานจึงจำกัดอยู่เพียงเตาขนาดใหญ่หรือเตาขนาดเล็กมากเท่านั้น

ตารางที่ 3.37 มาตรฐาน JIS เกี่ยวกับอิฐทนไฟกันความร้อน

ประเภท	อุณหภูมิทำให้ shrinkage on reheating ไม่เกิน 2% [°C]	bulk specific gravity	crushing strength [MPa]	สัมประสิทธิ์การ นำความร้อน (อุณหภูมิเฉลี่ย 350 ± 10°C) [W/(m·K)]
ประเภท 1	900	ไม่เกิน 0.50	ไม่น้อยกว่า 0.49	ไม่เกิน 0.15
ประเภท 2	1000	ไม่เกิน 0.50	ไม่น้อยกว่า 0.49	ไม่เกิน 0.16
ประเภท 3	1100	ไม่เกิน 0.50	ไม่น้อยกว่า 0.49	ไม่เกิน 0.17
A ประเภท 4	1200	ไม่เกิน 0.55	ไม่น้อยกว่า 0.78	ไม่เกิน 0.19
ประเภท 5	1300	ไม่เกิน 0.60	ไม่น้อยกว่า 0.78	ไม่เกิน 0.20
ประเภท 6	1400	ไม่เกิน 0.70	ไม่น้อยกว่า 0.98	ไม่เกิน 0.23
ประเภท 7	1500	ไม่เกิน 0.75	ไม่น้อยกว่า 0.98	ไม่เกิน 0.26
ประเภท 1	900	ไม่เกิน 0.70	ไม่น้อยกว่า 2.45	ไม่เกิน 0.20
ประเภท 2	1000	ไม่เกิน 0.70	ไม่น้อยกว่า 2.45	ไม่เกิน 0.21
ประเภท 3	1100	ไม่เกิน 0.75	ไม่น้อยกว่า 2.45	ไม่เกิน 0.23
B ประเภท 4	1200	ไม่เกิน 0.80	ไม่น้อยกว่า 2.45	ไม่เกิน 0.26
ประเภท 5	1300	ไม่เกิน 0.80	ไม่น้อยกว่า 2.45	ไม่เกิน 0.27
ประเภท 6	1400	ไม่เกิน 0.90	ไม่น้อยกว่า 2.94	ไม่เกิน 0.31
ประเภท 7	1500	ไม่เกิน 1.00	ไม่น้อยกว่า 2.94	ไม่เกิน 0.36
ประเภท 1	1300	ไม่เกิน 1.10	ไม่น้อยกว่า 4.90	ไม่เกิน 0.35
C ประเภท 2	1400	ไม่เกิน 1.20	ไม่น้อยกว่า 6.86	ไม่เกิน 0.44
ประเภท 3	1500	ไม่เกิน 1.25	ไม่น้อยกว่า 9.81	ไม่เกิน 0.52

2. อิฐกันความร้อนแบบดินเหนียวทนไฟ

ใช้กับอิฐทนไฟก่อเป็นเตาในเตาให้ความร้อน และเตา Sintering furnace หรือใช้ในเตา Heat treating furnace เกือบทุกเตา มีประสิทธิภาพในการลดความร้อนที่แผ่รังสีจากผนังเตา วัตถุดิบทำจากดินเหนียวทนไฟผสมกับวัตถุดิบ High alumina ตามอัตราส่วนที่เหมาะสมกับวัตถุประสงค์การใช้งาน เดิมทีเลื่อยหรือโม่อินทรีย์ลงไปเพื่อให้ได้ Bulk density ที่ต้องการ แล้วนำไปเผา อิฐนี้จะมีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนขึ้นอยู่กับ Bulk density เป็นหลัก ดังนั้น จึงมีบางผลิตภัณฑ์เพิ่ม Isolated closed pore ให้มากขึ้น และมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น มาตรฐานในตาราง 3.37 เกือบทั้งหมดจะใช้กับอิฐกันความร้อนทนไฟแบบหลังนี้

3. อิฐกันความร้อนทนไฟอุณหภูมิสูง

อิฐกันความร้อนทนไฟที่ใช้กับเตาที่มีอุณหภูมิตั้งแต่ 1500°C ขึ้นไปส่วนมากจะเป็นแบบ High alumina อิฐคุณภาพสูงจะใช้ Sintered alumina, อนุภาค Synthetic mullite, Electrocast alumina, Electrocast bubble alumina เป็นต้น อิฐที่ใช้ Electrocast alumina จะสามารถใช้ได้อย่างปลอดภัยถึง 1700°C และ Bubble alumina จะใช้ได้ถึง 1800°C

4. บอร์ดกันความร้อนอุณหภูมิสูง

การבודด้านในเตาความดันทานไฟฟ้าอุณหภูมิสูงมักใช้ Alumina board กันมาก โดย Alumina board บริสุทธิ์ 99% จะมีความทนทานเพียงพอที่จะใช้กับเตาไฟฟ้าอุณหภูมิสูงสุด 1,700°C

3.13.5.3 Electrocast refractories

Electrocast refractories ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้กับ Glass tank furnace แก้วหลอมเหลวจะไหลโดยมีอุณหภูมิสูงถึง 1,560°C ที่ผิวหน้า และมีต่างรวมอยู่ด้วยจำนวนมาก วัสดุทนไฟจึงถูกกัดกร่อนอย่างรุนแรงทั้งทางกายภาพ และเคมี นอกจากนี้เตา Clinker tunnel furnace ก็รองรับอุณหภูมิสูงมาก ผิวน้ำที่มาจากอิฐทนไฟสำหรับอุณหภูมิสูง ต้องรองรับการเดินเครื่องอย่างต่อเนื่องเพื่อรับการเผาปูนซีเมนต์ที่อุณหภูมิสูง 1,750-1,830°C วัสดุทนไฟที่ใช้เป็นเพดาน และผนังของบริเวณเผาไหม้ของเตานี้จึงมักเปลี่ยนรูปได้ง่ายด้วยเหตุนี้ จึงมักใช้วัสดุ Electrocast refractories ทำเตา

Electrocast refractories มีหลายประเภท ประมาณ 70% จะเป็นแบบ Alumina-silica-zirconia

อิฐ Electrocast จะผลิตด้วยการหลอมเหลววัตถุดิบที่ผสมแล้วในเตา Arc furnace ด้วยอุณหภูมิ 2,400-2,700°C แล้วเทเข้าไปในแบบหล่อ ขณะที่เย็นตัวลงวัสดุจะหดตัวทำให้เกิดช่องว่างขึ้น แต่จะมีวิธีหล่อเพื่อไม่ให้ช่องว่างนี้เป็นปัญหาในการใช้งาน มีการผลิตอิฐขนาดใหญ่ถึง 2,000 mm โดยก่อนส่งออกจากโรงงานจะนำผิวหน้ามาขัดเจียรแล้วลองก่อดูรอยต่อก่อน อิฐนี้คาดหวังว่าจะสามารถใช้กับ Grating ของเตาเผาได้

3.13.5.4 เซรามิกไฟเบอร์

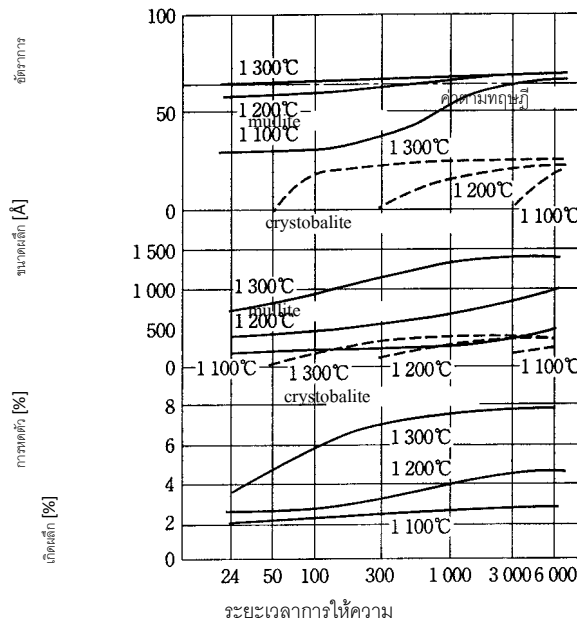
วัสดุทนไฟที่เรียกว่า เซรามิกไฟเบอร์ แต่เดิมจะหมายถึงเส้นใยพวก Alumina-silica ซึ่งจะนำผง Alumina กับผง Silica มาผสมกันด้วยอัตราส่วนค่าหนึ่ง แล้วเติม B_2O_3 , ZrO_2 , Cr_2O_3 , TiO_2 ตามความเหมาะสม แล้วนำไปหลอมที่อุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 2,000°C ด้วยเตา Arc furnace หรือ Resistance furnace หรือ Inductance furnace ปรับความหนืดแล้วทำให้เป็นเส้นใยด้วยการ Blowing โดยพ่นกระแสอากาศความเร็วสูงเข้าไป หรือด้วยการ Spinning โดยการใช้โรเตอร์ที่หมุนด้วยความเร็วสูง ตัวอย่างสมบัติของ เซรามิกไฟเบอร์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาดแสดงไว้ในตารางที่ 3.38

เซรามิกไฟเบอร์ที่มี Alumina และ Silica ในอัตราส่วนประมาณ 1 : 1 จะมีอุณหภูมิใช้งานสูงสุด

ตารางที่ 3.38 สมบัติของเซรามิกไฟเบอร์ที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด

ผู้ผลิต	A	B	C	D	E
เส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย [μm]	2.8	2.5 2.5	2-4 2-4		2.8 2.8 2.5
ความยาวของเส้นใย [mm]			< 80 < 80		
ความหนาแน่น [g/cm^3]	2.65	2.63 2.75	2.73 2.77		2.6 2.8 2.65
จุดหลอมเหลว [°C]					1760 1700 1760
อุณหภูมิใช้งานสูงสุด [°C]	1260	1300 1500	1260 1450	1260 1400	1260 1400 1500
องค์ประกอบทางเคมี [%]					
Al_2O_3	46.2	49 61	48 30	48 56	47.1 35.0 40.1
SiO_2	53.2	51 39	52 53	52 44	52.3 49.7 58.1
ZrO_2			16		15.0
Cr_2O_3					1.8

1260-1300°C ทั้งนี้อาจมี Silica ในปริมาณมากกว่าบ้าง ส่วนที่มีอุณหภูมิใช้งานสูงสุด 1500°C จะมี Alumina ในปริมาณมากกว่าเล็กน้อย หรือมีสารประกอบออกไซด์อื่นๆ เช่น Zirconia ฯลฯ ผสมอยู่ด้วยเป็นสารทำให้เสถียร การผลิตเส้นใยจะต้องทำให้เย็นอย่างรวดเร็วให้ควบแน่น จึงมีโมเลกุลที่ไม่เป็นผลึกอยู่เป็นจำนวนมาก เช่นเดียวกับแก้ว ในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง โมเลกุลเหล่านี้จะจับตัวเป็นผลึกทำให้สมบัติเปลี่ยนไป โดยทั่วไปตั้งแต่ 1000°C เป็นต้นไป จะเกิด Mullite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$) ขึ้น ยิ่งอุณหภูมิสูงขึ้น และเวลาผ่านไปนานขึ้นจะยิ่งเกิดมากขึ้น นอกจากนี้ตั้งแต่ประมาณ 1300°C ยังเกิด Cristobalite (SiO_2) ขึ้นอีกด้วย แนวโน้มการเกิดผลึกแสดงไว้ในรูปที่ 3.98



รูปที่ 3.98 การเกิดผลึกและการหดตัวของ blanket เซรามิกไฟเบอร์ (alumina / silica = 47 / 53)

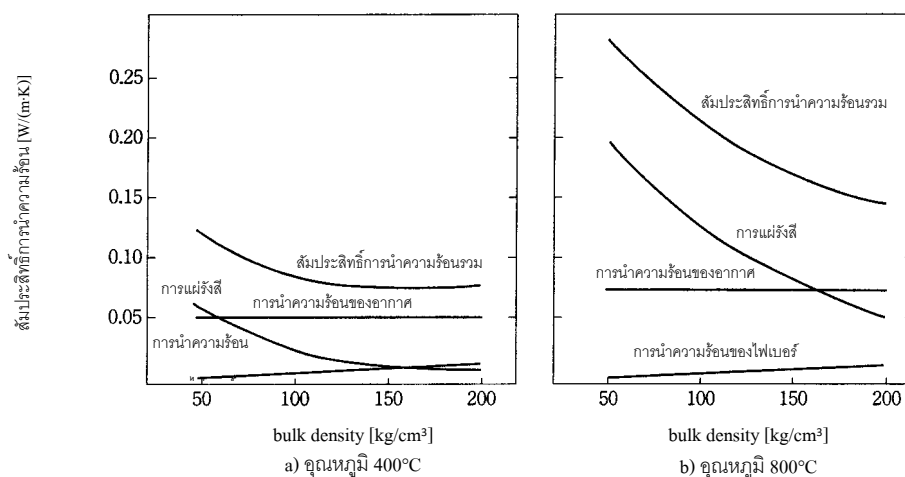
อุณหภูมิใช้งานสูงสุดของเซรามิกไฟเบอร์ แต่เดิมจะมีค่าต่ำเทียบกับอิฐ ทั้งๆ ที่มี Alumina เป็นองค์ประกอบในสัดส่วนสูง สาเหตุคือเนื่องจากการเกิดผลึกดังกล่าว อย่างไรก็ตามปัจจุบันมีการเพิ่มปริมาณ Alumina เข้าไปมากขึ้นเพื่อให้สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง นอกจากนั้น ยังมีไฟเบอร์แบบ High alumina crystallized fiber จำหน่ายอีกด้วย ไฟเบอร์เหล่านี้จะมีจุดหลอมเหลวสูงขึ้น จึงไม่ได้ผลิตจากการหลอมผงออกไซด์ดังที่อธิบายไปแล้วข้างต้น แต่ผลิตโดยการนำสารประกอบอินทรีย์ของอลูมิเนียมและซิลิกอนที่เป็นของเหลวมาทำเป็นเส้นใยแล้วนำไปเผาให้เกิดผลึกของสารออกไซด์ แล้วนำไปผสมกับไฟเบอร์แบบเดิม เพื่อผลิตเป็นบอร์ดที่มีระดับคุณภาพต่างๆ กันจำหน่าย ในกรณีนี้ Cristobalite ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับคอร์รันดัมกลายเป็น Mullite โดยระหว่างที่เกิดปฏิกิริยานี้ กล่าวกันว่าจะมีประสิทธิผลในการป้องกันการหดตัว และทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดีมาก ตัวอย่างสมบัติแสดงไว้ในตารางที่ 3.39

ตารางที่ 3.39 สมบัติของไฟเบอร์แบบ High alumina crystallized fiber

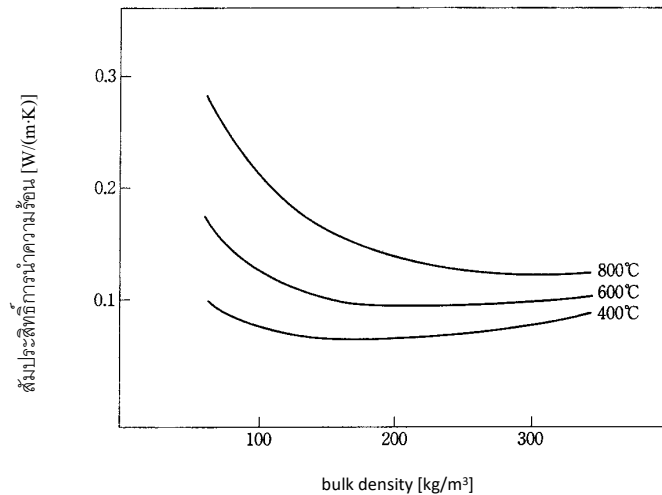
ผู้ผลิต	A		B	C	D
เส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย [μm]			4	3	2-4
ความยาวของเส้นใย [mm]			50-100		< 50
ความหนาแน่น [g/cm^3]	3.2	3.6	3.1	3.6	2.90
จุดหลอมเหลว [$^{\circ}\text{C}$]	1600	1600			1600
อุณหภูมิใช้งานสูงสุด [$^{\circ}\text{C}$]				1500	1700
องค์ประกอบทางเคมี [%]					
Al_2O_3	80	95	72	95	72
SiO_2	20	5	28	5	28
ผลึก*	A, M		M	A, M	M

* A : alumina M : mullite

การทนความร้อนของไฟเบอร์จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ และสภาพการเกิดผลึกที่กล่าวไปแล้วเกือบทั้งหมด อย่างไรก็ตามคุณลักษณะพื้นฐานอื่นๆ เช่น คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนจะขึ้นอยู่กับอย่างมากกับ Bulk density ทั้งนี้ ในการทำให้เป็นเส้นใยจะมีอนุภาคกลมที่กลายเป็นเส้นใยไม่หมดเหลืออยู่ซึ่งเรียกว่า Shot หากอนุภาคกลมนี้มีมากเกินไป แม้ Bulk density จะดูเหมือนมีค่าสูง แต่ Bulk density จริงๆ ของไฟเบอร์ซึ่งมีผลต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนจะเบากว่านั้น จึงต้องใช้ความระมัดระวัง รูปที่ 3.99 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเมื่อ Bulk density เปลี่ยนแปลงไป รูปที่ 3.100 แสดงการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเมื่อ Bulk density เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 3.99 รายละเอียดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเซรามิกไฟเบอร์



รูปที่ 3.100 ความสัมพันธ์ระหว่าง Bulk density กับสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของ Blanket เซรามิกไฟเบอร์

กลไกการถ่ายเทความร้อนของเซรามิกไฟเบอร์จะประกอบด้วย 3 ส่วน คือ การแผ่รังสี การนำความร้อนของอากาศในช่องว่าง และการนำความร้อนของไฟเบอร์ จากรูปจะเห็นว่า การแผ่รังสีที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจะลดลงเมื่อ Bulk density เพิ่มขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มกลับกับอิทธิพลของความร้อน เหตุผลคือในช่วง Bulk density ที่ใช้โดยทั่วไปของเซรามิกไฟเบอร์ รูปทรงจะมีลักษณะเชื่อมติดกัน เมื่อ Bulk density เพิ่มขึ้นจะเกิดการไปขวางการแผ่รังสีไว้ หากของแข็งมีลักษณะต่อเนื่องกันคุณลักษณะนี้คงจะมีแนวโน้มเหมือนอิทธิพลความร้อน ดังนั้นจึงพิจารณาได้ว่าการแผ่รังสีน่าจะมีค่าต่ำสุด ในกรณีของ Blanket ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 600 °C กล่าวกันว่า Bulk density ที่ทำให้สัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าต่ำสุดจะอยู่ที่ 0.2-0.25 g/cm³ นอกจากนี้กรณีที่บรรยากาศที่ใช้ไม่ใช่อากาศ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของก๊าซในช่องว่างตามข้างต้นก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่ก๊าซบรรยากาศประกอบด้วยก๊าซที่มีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูง เช่น ไฮโดรเจน ฮีเลียม ฯลฯ ตัวอย่างเช่น กรณีของบรรยากาศของเตาแบบดูดความร้อนซึ่งใช้ในการทำ Gas carburization ฯลฯ จะต้องชดเชยค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนด้วยการนำผลต่างสัมประสิทธิ์การนำความร้อนระหว่างก๊าซกับอากาศไปบวกกับสัมประสิทธิ์การนำความร้อนในกรณีที่เป็นอากาศด้วย นอกจากนี้ในการออกแบบยังต้องคำนึงถึงผลกระทบจากเหล็กยึด เช่น Stud ฯลฯ ซึ่งขึ้นกับวิธีการติดตั้ง ซึ่งอาจทำให้สัมประสิทธิ์การนำความร้อนในทางปฏิบัติลดลงเนื่องจากการพาความร้อนเชิงมหภาคในไฟเบอร์อีกด้วย

ผลิตภัณฑ์เซรามิกไฟเบอร์ นอกจากจะมี Bulk fiber ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พื้นฐานแล้ว ยังมี Blanket, Bboard และอื่นๆ อีกหลายชนิด ตารางที่ 3.40 แสดงประเภทและวัตถุประสงค์การใช้งาน รูปที่ 3.101 แสดงการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเมื่ออุณหภูมิของ Blanket และ Board เปลี่ยนไป ไฟเบอร์ที่ประกอบเป็นผลิตภัณฑ์ทุกชนิดยกเว้น Bulk จะมีสมบัติขึ้นอยู่กับการทิศทาง โดยสัมประสิทธิ์การนำความร้อนตามทิศทางความหนา กับทิศทางที่ตั้งฉากกันจะมีค่าแตกต่างกัน ความแตกต่างทางทิศทางไม่ได้มีกฎเกณฑ์ตายตัว แต่จะแตกต่างจากสัมประสิทธิ์การนำความร้อนปกติ 20-30% โดยทั่วไปในแคตตาล็อกจะระบุค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนตามทิศทางความหนา แต่ในการติดตั้งแบบ Stack บางครั้งจะต้องใช้สัมประสิทธิ์การนำความร้อนตามทิศทางตั้งฉากกับความหนา จึงต้องใช้ความระมัดระวัง รูปที่ 3.102 แสดงตัวอย่างของ Blanket และ Felt

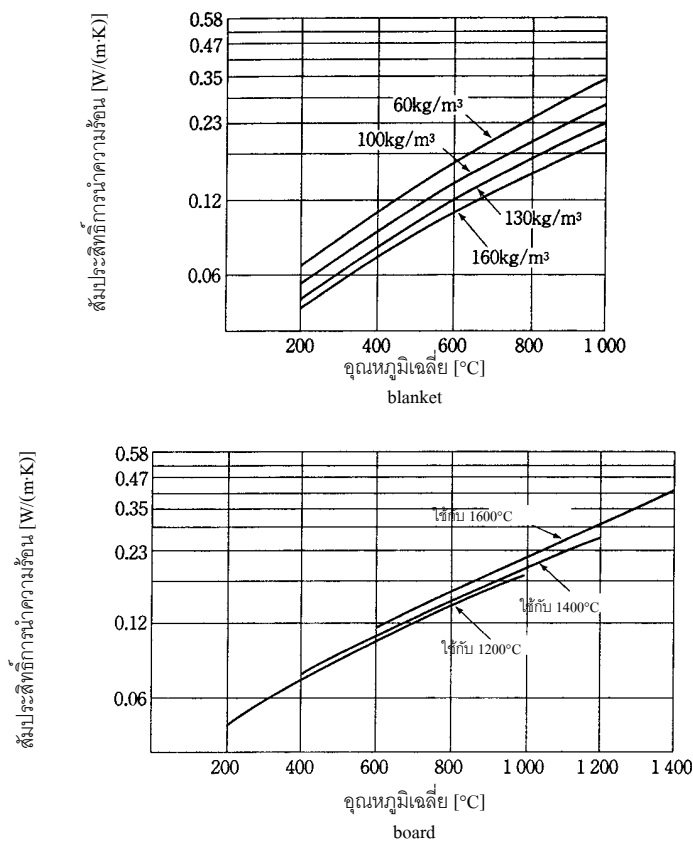
ตารางที่ 3.40 ประเภทและวัตถุประสงค์การใช้งานของผลิตภัณฑ์เซรามิกไฟเบอร์

ชื่อผลิตภัณฑ์	ลักษณะผลิตภัณฑ์	วัตถุประสงค์การใช้งานหลัก
bulk	มีเส้นใยสั้นๆ มารวมกันเป็นเส้น	เติมเสริมความแข็งแรงในการเก็บความร้อนของผนังเตา ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตภัณฑ์อื่นๆ
blanket	นำ bulk มาขึ้นรูปเป็น blanket (เหมือนเสื้อเส้นใยเป็นชั้นๆ) โดยไม่ใช่ binder เลย	วัสดุกันความร้อนสำหรับเพดานและผนังเตา วัสดุทำฟิลเตอร์ วัสดุกันไฟสำหรับอาคาร วัสดุเก็บเสียง
felt	นำ bulk มาแปรรูปด้วย binder อินทรีย์จำนวนเล็กน้อย ขึ้นรูปให้เป็นแผ่น	วัสดุกันความร้อน backup สำหรับเพดานและผนังเตา ซิลความร้อน
board	นำ bulk มาแปรรูปด้วย binder อนินทรีย์หรืออินทรีย์ ขึ้นรูปให้เป็นแผ่น	วัสดุกันความร้อนสำหรับผนังเตา วัสดุซิลิกา
wet felt	นำ binder อนินทรีย์มาทำให้ซึมเข้าไปใน blanket แล้วนำไปใส่ถุ้โพลีเอทิลีน เพื่อรักษาสภาพที่มีความชื้นไว้	บุภายในเตา (บริเวณที่ต้องทนความร้อนสูงและการเสียดสี) และอื่นๆ
paper	นำ bulk มาเติม binder ทำให้เป็นแผ่น	ใช้เป็นวัสดุ gasket สำหรับหม้อต้มน้ำร้อนและ gas stove เป็นต้น
ผลิตภัณฑ์ปั่น	นำ bulk มาเติมเส้นใยเสริมความแข็งแรงให้เป็น yarn แล้วแปรรูปให้เป็น cloth หรือ rope	cover ของสายลิตเทอร์โมคัปเปิล ผ่านกันความร้อน เป็นต้น
ผลิตภัณฑ์ขึ้นรูป	นำ bulk มาเติม binder แล้วขึ้นรูป มีรูปร่างหลายแบบ	วัสดุกันความร้อนของอุปกรณ์เผาไหม้ ปาก tap เตาหลอมอลูมิเนียม และ pipe cover สำหรับอุณหภูมิสูง เป็นต้น
block (module)	นำ bulk หรือ blanket ซ้อนกัน	วัสดุกันความร้อนสำหรับเพดานและผนังเตา
ผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีรูปร่างแน่นอน	ประกอบด้วย bulk, aggregate และ binder ผสมกัน	วัสดุอุดเติม วัสดุฉนวนผิวหน้า กาว เป็นต้น

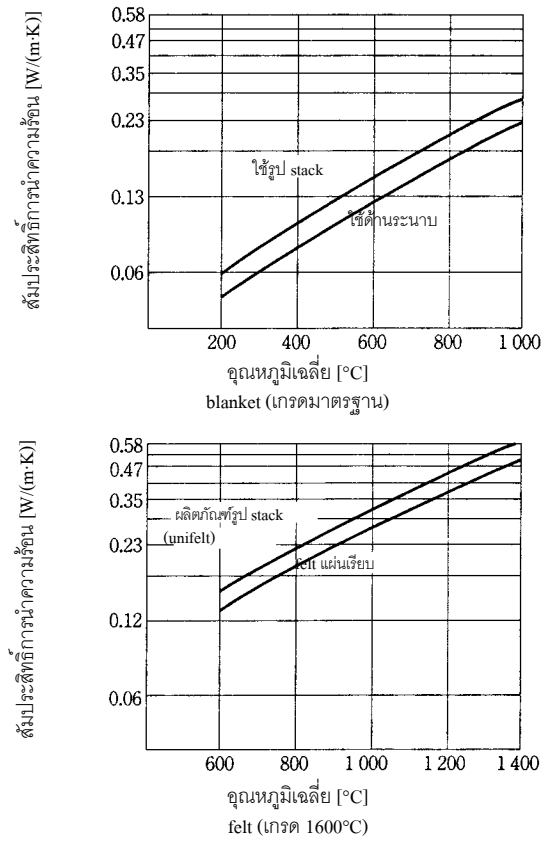
เซรามิกไฟเบอร์มีการกันความร้อนดีกว่าวัสดุทนไฟชนิดอื่นๆ มีน้ำหนักเบาและการสะสมความร้อนต่ำ การใช้แพร่หลายของเซรามิกไฟเบอร์อุณหภูมิสูงทำให้ระดับการทนไฟเพิ่มขึ้นด้วย เป็นวัสดุที่ดียิ่งในแง่ของการอนุรักษ์พลังงาน นอกจากนี้ยังมีผลในการเก็บเสียง ทำให้เสียงการเผาไหม้ในเตาเจียบบลง จึงช่วยปรับปรุงสภาพแวดล้อมได้อย่างดี เตาที่บุไฟเบอร์เซรามิกรอบด้านนับวันจะแพร่หลายมากขึ้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากมีความเป็นรูพรุน และมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงจึงถูกกัดกร่อนได้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะทำปฏิกิริยากับออกไซด์ของโลหะ Alkali และ Alkali earth เกิดเป็นสารประกอบที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ จึงถูกกัดกร่อนได้ง่าย การใช้กับเตาที่เกิดฝุ่นละอองขึ้นเป็นจำนวนมากจะต้องใช้ความระมัดระวัง นอกจากนี้เนื่องจากมันยอมให้อากาศผ่าน

ตอนที่ 2 บทที่ 3 ทฤษฎีการเผาไหม้

ได้ง่าย และดูความชื้นได้ดี กรณีที่ใช้บนวัสดุโครงสร้างในเตาสำหรับเหล็กกล้าสเตนเลสพวก Austenite ที่ระบายความร้อนด้วยน้ำ ในการติดตั้ง และเมื่อดับเตา ไฟเบอร์จะดูความชื้นไว้ หลังจากนั้นแม้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นก็จะไม่แห้งพอ ทำให้รอยเชื่อม Stud บนผิวหน้าโลหะหรือส่วนอื่นๆ เกิดการผุกร่อนและแตกร้าว เนื่องจากความเค้นได้ นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาใช้ไฟเบอร์ที่มีอุณหภูมิของคลอรีนละลายออกมาน้อย เช่น ใช้ Blanket ที่ไม่ได้ผลิตด้วย Wet process เป็นต้น



รูปที่ 3.101 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของผลิตภัณฑ์เซรามิกไฟเบอร์



รูปที่ 3.102 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเซรามิกไฟเบอร์ของแต่ละทิศทางที่ใช้งาน

3.13.5.5 ฉนวนกราไฟต์

ปัจจุบัน ในการแปรรูปวัสดุ เช่น Fine ceramic ฯลฯ จะต้องแปรรูปที่อุณหภูมิสูงกว่า 2,000°C เตาเช่นนี้โดยทั่วไปจะมีเปลือกเตาที่มีโครงสร้างแบบระบายความร้อนด้วยน้ำ และควบคุมบรรยากาศให้เป็นก๊าซเฉื่อย เช่น อาร์กอน ฯลฯ หรือสุญญากาศ วิธีกันความร้อนนอกจากจะใช้แผ่นสะท้อน เช่น โมลิบดีนัม ฯลฯ แล้ว ยังใช้ฉนวนกราไฟต์อีกด้วย

การทำฉนวนกราไฟต์มีทั้งวิธีนำเส้นใยคาร์บอนมาทำเป็น Felt หรือ Board กับวิธีนำเรซินที่แข็งตัวเมื่อได้รับความร้อนซึ่งมีสมบัติให้พองก๊าซมาทำให้เป็นคาร์บอนหรือกราไฟต์ ระดับการทนไฟจะขึ้นกับระดับการเป็นคาร์บอน แต่บางชนิดจะใช้งานได้ถึงประมาณ 3,000°C นอกจากนี้เพื่อเพิ่มความเป็นฉนวนความร้อน ยังใช้เซรามิกไฟเบอร์อุณหภูมิสูงเป็นวัสดุกันความร้อน Backup อีกด้วย ตัวอย่างคุณลักษณะของฉนวนกราไฟต์แสดงไว้ในตารางที่ 3.41

ตารางที่ 3.41 คุณลักษณะของฉนวนกราไฟต์

หัวข้อ	หน่วย	บริษัทญี่ปุ่น A	บริษัทญี่ปุ่น B	บริษัทอเมริกัน A	บริษัทอเมริกัน B	บริษัทอังกฤษ	บริษัทเยอรมัน
bulk density	g/cm ³	0.13-0.16	0.13-0.16	0.20	0.17-0.23	0.18-0.23	0.13-0.18
apparent porosity	%	—	—	87	85-90	89	86-90
specific resistance	μΩ·m	—	—	1000	—	850-4000	800-3000
crushing strength	MPa	—	1.53, 1.69	0.45	0.30	0.96	0.5-3.0
bending strength	MPa	0.50, 0.70	0.63, 0.99	—	0.80	1.20	—
carbon	%	99.8	99.9	ไม่น้อยกว่า 99	99.9	99.9	ไม่น้อยกว่า 99.7
ซีเมนต์	%	ไม่เกิน 0.1	ไม่เกิน 0.1	ไม่เกิน 0.08	0.1	0.1	ไม่เกิน 0.3
การนำความร้อน	W/(m·K)	สุญญากาศ Ar	N ₂	สุญญากาศ Ar	สุญญากาศ	Ar / สุญญากาศ	N ₂
อุณหภูมิปกติ		—	—	0.09 0.1	—	— —	0.16
500°C		0.079 0.13	0.26	0.20 0.26	0.16	0.17 0.11	0.18
1000°C		0.087 0.14	0.35	0.34 —	0.24	0.30 0.19	0.26
1500°C		0.145 0.23	0.56	0.66 —	0.31	0.44 0.29	0.53
2000°C		0.256 0.37	0.75	— —	—	0.64 0.46	—
thermal expansion coefficient	10 ⁻⁶ /°C	3.3-7.3	3.6-4.48	—	1.8-5.1	3-4	2.8-3.2
ความร้อนจำเพาะ	kJ/(kg·K)	—	—	—	—	0.63-2.05	—
อุณหภูมิที่สามารถใช้งาน	°C	2600		2500	2750	ไม่เกิน 3000	ไม่เกิน 3000
อุณหภูมิ heat treatment	°C	2000		2000	2300	2200	
มิติของผลิตภัณฑ์	mm	1000 × 500 × 30-60, 800 × 1500	1000 × 1000 × 30-50, 1500 × 1100	1400 × 600 × 150, 900 × 600	1000 × 600 × 150, 900 × 500	1500 × 1500 × 150, 1800 × ~	500 × 400 × 140

3.13.5.6 วัสดุกันความร้อน

วัสดุกันความร้อนไม่เพียงแต่นำมาใช้โดยตรงในการหุ้มท่ออากาศที่อุ่นแล้ว และท่อก๊าซไอเสียอุณหภูมิต่ำเท่านั้น แต่ยังใช้เป็นวัสดุโครงสร้างกันความร้อนชนิดหนึ่งที่ใช้คลุมด้านนอกของผนังเตาเป็นวัสดุทนไฟสำหรับด้านในแผ่นเหล็กที่เรียกว่าเปลือกเตา และใช้เป็น Backup ของวัสดุกันความร้อนทนไฟอีกด้วย

การแบ่งประเภทของวัสดุกันความร้อนมีหลายวิธี เช่น แบ่งตามโครงสร้างภายใน แบ่งตามวัสดุ เป็นต้น มาตรฐาน JIS A 9501 ฉบับปรับปรุงปี พ.ศ. 2538 ได้แบ่งประเภทไว้ดังต่อไปนี้

(1) วัสดุกันความร้อนเส้นใยแร่สังเคราะห์ (JIS A 9504)

วัสดุกันความร้อน Rock wool วัสดุกันความร้อน Glass wool

(2) วัสดุกันความร้อนพูนอนินทรีย์ที่มีรูพรุน (JIS A 9510)

วัสดุกันความร้อนแคลเซียมซิลิเกต วัสดุกันความร้อน Pearlite กันน้ำ

(3) วัสดุกันความร้อนพลาสติกโฟม (JIS A 9511)

วัสดุกันความร้อนโฟมโพลีสไตรีน วัสดุกันความร้อนโฟมยูรีเทนเนื้อแข็ง วัสดุกันความร้อนโฟมฟีนอล

ในจำนวนนี้ ประเภท (3) มักใช้เป็นวัสดุป้องกันการแข็งตัวหรือวัสดุกันความเย็นของท่อน้ำ ไม่ค่อยใช้ในเตาอุตสาหกรรม ต่อไปนี้จะอธิบายวัสดุกันความร้อนประเภท (1) และ (2)

3.13.5.6.1 วัสดุกันความร้อนเส้นใยแร่สังเคราะห์

1. กันความร้อน Rock wool

Rock wool ทำจากวัตถุดิบพวกซิลิเกต เช่น Andesite, Basalt เป็นหลัก แล้วเพิ่มวัตถุดิบพวกแคลเซียมออกไซด์ เช่น Iron slag, Nickel slag, Manganese slag หรือหินปูน ฯลฯ ลงไป ปรับส่วนผสม แล้วนำไปหลอมในเตา Cupola หรือ Arc furnace พร้อมกับถ่านโค้กซึ่งจะเป็นแหล่งความร้อน นำไปพ่นผ่าน Nozzle ให้ตกลงบนแผ่นจานซึ่งหมุนด้วยไอน้ำความดันสูงหรืออากาศอัด ให้กระจายออกไปด้วยแรงเหวี่ยงเพื่อให้เป็นเส้นใย เส้นใยดิบของ Rock wool ที่ผลิตด้วยวิธีนี้จะนำไปขึ้นรูป และอบแห้งด้วยกาวยาเกรซินฟีนอล ฯลฯ ทำเป็น Felt, Blanket, แอปกันความร้อน หรือกระบอกกันความร้อน วัสดุนี้มีองค์ประกอบทางเคมีที่หลากหลาย โดยสี ความอ่อนนุ่มและ Refractoriness จะขึ้นอยู่กับแร่ที่เป็นวัตถุดิบ อย่างไรก็ตาม ความสามารถในการกันความร้อนจะขึ้นอยู่อย่างมากกับเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย และอนุภาคที่เหลือยู่ที่ปลายเส้นใย ซึ่งเรียกว่า Shot เช่นเดียวกับเซรามิกไฟเบอร์ สมบัติเหล่านี้มีกำหนดไว้ในมาตรฐาน JIS แต่ในการใช้งานในทางปฏิบัติควรสอบถามจากผู้ผลิต

2. วัสดุกันความร้อน Glass wool

Glass wool ผลิตโดยการนำแก้ว Borosilicate ซึ่งมีออกไซด์ของโลหะ Alkali เช่น Na_2O และ K_2O ผสมอยู่ ไปหลอมเช่นเดียวกับ Rock wool แล้วทำให้เป็นเส้นใยด้วยการพ่นหรือใช้แรงเหวี่ยง พร้อมกันนั้นจะทำ Binder พวกรซินฟีนอล ฯลฯ เพื่อป้องกันเส้นใยเสื่อมสภาพเมื่อสัมผัสกับอากาศ แล้วนำไปขึ้นรูป เส้นใย Glass wool จะมีอัตราการกลายเป็นเส้นใยสูงกว่า Rock wool แต่เนื่องจากมีต่างรวมอยู่ด้วย เมื่ออยู่ในไอน้ำต่างจะละลายออกมาได้ง่ายทำให้ความแข็งแรงลดลง ดังนั้นจึงมีอุณหภูมิใช้งานต่ำกว่า Rock wool ในเตาอุตสาหกรรมนอกจากใช้กันความร้อนในท่ออุณหภูมิต่ำแล้วจะไม่ค่อยใช้กัน

สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุกันความร้อนเส้นใยแร่สังเคราะห์จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่น และอุณหภูมิ วัสดุกันความร้อนที่มีรูพรุนต่อเนื่องเหล่านี้ ในกรณีที่มีความหนาแน่นต่ำ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนจะยิ่งต่ำตามไปด้วย นอกจากการนำความร้อนแล้ว ยังต้องคำนึงถึงการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสี และสำหรับผนังตั้งฉากยังต้องคำนึงถึงการพาความร้อนเหมือนกับเซรามิกไฟเบอร์อีกด้วย ในการออกแบบจะต้องคำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้ ค่าความหนาแน่น อุณหภูมิหตุตัวเมื่อร้อน และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของ Rock wool และ Glass wool มีกำหนดไว้ในมาตรฐาน JIS A 9501

3.13.5.6.2 วัสดุกันความร้อนพรุนอนินทรีย์

ความหนาแน่น อุณหภูมิใช้งาน สัมประสิทธิ์การนำความร้อน และ Bending strength ของวัสดุเหล่านี้กำหนดไว้ในมาตรฐาน JIS A 9510

1. วัสดุกันความร้อนแคลเซียมซิลิเกต

เมื่อนำผงสารซิลิเกตมาทำปฏิกิริยากับผงปูนขาวจะได้เจลละเอียดของเกลือไฮเดรตแคลเซียมซิลิเกต ซึ่งจะพองตัวเป็นหลายสิบเท่าของวัตถุดิบ เมื่อเติมเส้นใยแร่ลงไปในส่วนนี้ นำไปป้อนขึ้นรูป แล้วรีดน้ำออกให้พอเหมาะ นำไปทำให้แข็งตัวในเตาความดัน แล้วอบให้แห้ง จะได้วัสดุขึ้นรูปแคลเซียมซิลิเกต ระบบผลึกจะมีแบบ Zonolite ($6\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) และ Tobermorite ($5\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) แบบแรกจัดเป็นผลิตภัณฑ์มาตรฐาน JIS หมายเลข 1 แบบหลังเป็นหมายเลข 2 สมบัติของวัสดุกันความร้อนแคลเซียมซิลิเกตคือ มีความแข็งแรงเชิงกลสูงกว่าวัสดุกันความร้อนชนิดอื่น และมีเสถียรภาพต่อความร้อน

2. วัสดุกันความร้อน Pearlite กันน้ำ

Pearlite แต่เดิมหมายถึง Pearlstone แต่ Pearlite ที่ใช้เรียกวัสดุกันความร้อนไม่ได้หมายถึง Pearlstone เท่านั้น แต่เป็นชื่อเรียกรวมๆ ของอนุภาคแก้วที่มีรูพรุนซึ่งผลิตจากการนำหินที่ประกอบด้วยแก้วธรรมชาติที่มี Volatile component เช่น Obsidian, Fluolite รวมอยู่ด้วย ไปปั่นเป็นผงทำให้มีขนาดอนุภาคสม่ำเสมอ เมื่อให้ความร้อนไม่น้อยกว่า 1000°C จะหลอมเหลวทำให้ Volatile component ระเหยกลายเป็นฟองก๊าซ ส่วนแก้วที่เหลือจะแข็งตัวกลายเป็นแก้วที่มีรูพรุน นอกจากวัตถุดิบดังกล่าวยังมีเส้นใยเสริมความแข็งแรง สารกันน้ำ สำหรับผลิตภัณฑ์มาตรฐาน JIS หมายเลข 3 จะผสม binder ที่เป็นอนุพันธ์ของซิลิกา หมายเลข 4 จะผสม Binder ที่เป็นโซเดียมซิลิเกต ผสมให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียว ขึ้นรูปและอบแห้งทำเป็นวัสดุกันความร้อน

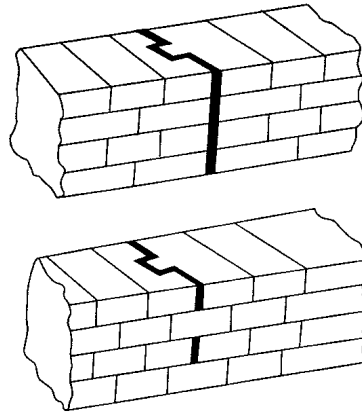
องค์ประกอบทางเคมีที่เป็นมาตรฐานคือ SiO_2 75%, Al_2O_3 15%, K_2O 4%, Na_2O 3.5% ที่เหลือเป็น Fe_2O_3 , CaO , MgO ซึ่งจะมีเสถียรภาพทางเคมี และยังกันน้ำได้ทุกด้านรวมถึงพื้นผิวหน้าตัดด้วย มีความแข็งแรงไม่เท่ากับแคลเซียมซิลิเกตแต่ก็ค่อนข้างแข็งแรงดี

3.13.5.7 โครงสร้างของผนังเตา

3.13.5.7.1 โครงสร้างผนังเตาก่ออิฐ

การก่ออิฐจะใช้อิฐมาตรฐานขนาด $230\text{ mm} \times 114\text{ mm} \times 65\text{ mm}$ ซึ่งเรียกว่าอิฐธรรมดา แต่การใช้อิฐส่วนที่เป็นทรงกระบอกหรือโค้งจะใช้อิฐมาตรฐานที่เรียกว่า wedge brick, key brick ซึ่งจะมีลักษณะเอียงไปด้านหนึ่งเป็นหลัก หรือนำอิฐมาตัดประกอบกันให้ได้รูปรอยต่อระหว่างอิฐจะยาด้วย mortar ซึ่งเป็นวัสดุทนไฟสำหรับเชื่อมโดยนำไปผสมกับน้ำ ในเตาอุตสาหกรรมรอยต่อจะ

มีระยะประมาณ 1.5-3 mm โดยต้องไม่ให้มีรอยต่อนี้เป็นเส้นตรงยาวตลอด โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องไม่ให้รอยต่อสำหรับขยายตัวซึ่งไม่ได้ยา mortar พาดผ่านทิศทางของเปลือกเตาดังรูปที่ 3.103 ระยะเว้นรอยต่อนี้มีความสำคัญมากในการออกแบบ ซึ่งระยะนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของอิฐที่ใช้ อิฐดินเหนียว และอิฐ Alumina จะเว้น 6-8 mm/m อิฐ Silica จะเว้น 13-15 mm/m อิฐ Magnesite-chrome และอิฐ Magnesite จะเว้น 21 mm/m ปัจจุบันจะไม่ค่อยก่ออิฐอย่างเดียวเป็นผนังสูงๆ หรือหนาๆ แต่สมมติว่ากรณีที่ใช้อิฐทนไฟกับอิฐกันความร้อนก่อผสมกัน ระหว่างชั้นจะต้องมีโครงสร้างป้องกันล้มโดยใช้อิฐทนไฟเป็นตัวเชื่อม



รูปที่ 3.103 รอยต่อสำหรับขยายตัวตั้งฉากและแต่ละชั้น

3.13.5.7.2 โครงสร้างผนังเตาวัสดุทนไฟที่ไม่มีรูปร่างแน่นอน

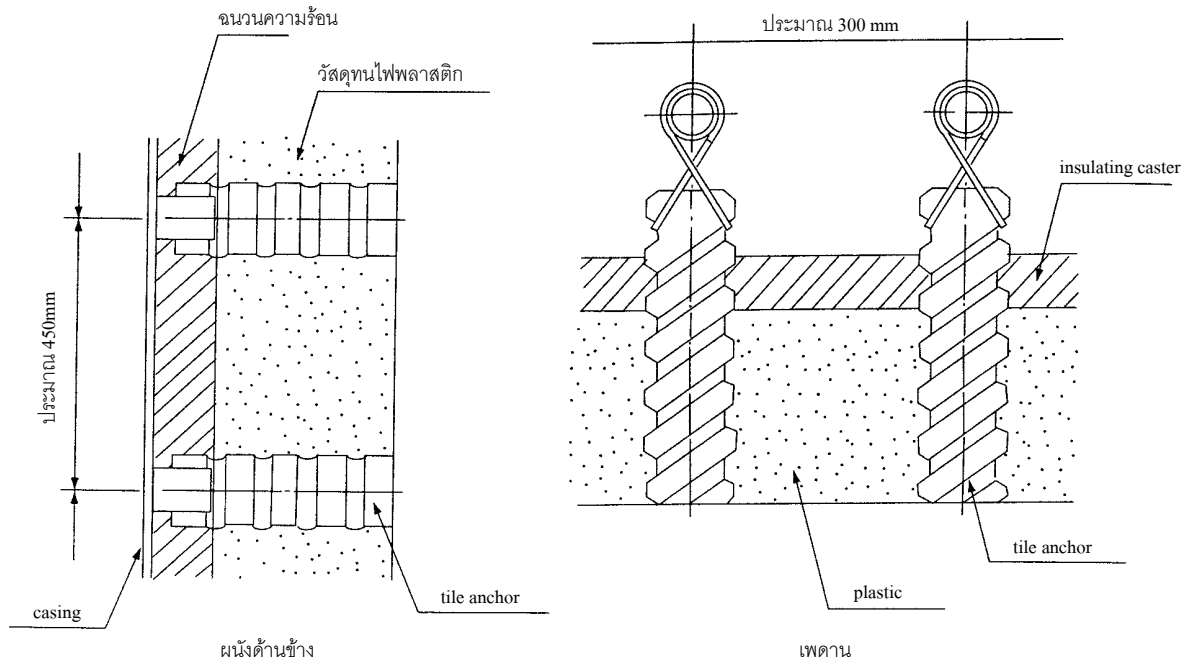
วัสดุทนไฟที่ไม่มีรูปร่างแน่นอนมีหลายประเภท รวมทั้ง Mortar ที่อธิบายในหัวข้อที่แล้วก็เป็นประเภทหนึ่ง ในที่นี้จะอธิบายวัสดุที่สำคัญ ได้แก่ วัสดุทนไฟ Castable และวัสดุทนไฟพลาสติก วัสดุทนไฟที่ไม่มีรูปร่างแน่นอนทั้ง 2 ประเภทสามารถก่อผนังที่มีโครงสร้างเป็นชั้นเดียวไม่มีรอยต่อ และสามารถใช้เครื่องจักรในการติดตั้ง เช่น การเทหล่อ ฯลฯ ได้ จึงทนแรงได้มาก เทียบกับการก่ออิฐแล้วยังมีข้อได้เปรียบคือมีข้อจำกัดในการออกแบบน้อยกว่า วัสดุทนไฟ Castable มีจำหน่ายในลักษณะเป็นผงซึ่งประกอบด้วยสาร Aggregate กับซีเมนต์อลูมินา และสารเพิ่มสมบัติให้ติดตั้งได้สะดวก วิธีติดตั้งทำได้ทั้งเทใช้เกรียงฉาบ และพ่น แต่โดยทั่วไปจะใช้วิธีเทเป็นหลัก ซึ่งมีทั้งการเทโดยตรงที่หน้างาน และการขึ้นรูปเป็น Precasting block มาจากโรงงาน แล้วนำไปประกอบภายหลัง รวมทั้งยังมีแบบ Pre-fabrication สำหรับประกอบติดเครื่องจักรและเปลือกเตาแบบเดียวกับ Burner tile อีกด้วย

กรณีของวัสดุทนไฟ Castable วัสดุนี้เมื่อแห้งจะหดตัว ทำให้ไปหักล้างกับการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน จึงไม่จำเป็นต้องเผื่อระยะขยายตัวมากเท่ากับการก่ออิฐ แต่กรณีของเตาที่มีผนังหนา และมีพื้นที่มาก จะเว้นรอยต่อไว้ทุก 1-2 m แล้วใช้ felt เซรามิกไฟเบอร์สอดไว้ในรอยต่อตัวยึด Castable จะใช้อิฐ Anchor brick, Anchor โลหะที่เรียกว่า Stud หรือใช้ตาข่ายโลหะ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิภายในเตา และความหนาของผนัง อิฐ Anchor brick ยังยึดไว้กับเปลือกเตาด้วยโลหะที่เรียกว่า Hanger metal ซึ่งมีโครงสร้างเป็นรูปตะขอที่สามารถรองรับการขยายตัวเล็กน้อยเมื่อได้รับความร้อนได้

วัสดุทนไฟพลาสติก เป็นวัสดุลักษณะเป็นครีมทำจาก Aggregate ที่ทนไฟหรือกันความร้อนได้ ผสมกับดินเหนียวหรือสาร Caking additives อื่นๆ กับน้ำที่เป็นตัวทำละลาย การติดตั้งจะใช้ค้อนหรือ Air hammer ตอกเข้าไปให้แน่น ช่องว่างสำหรับขยายตัวของวัสดุทนไฟพลาสติกจะ

ตอนที่ 2 บทที่ 3 ทฤษฎีการเผาไหม้

ใช้คัตเตอร์กรีดให้เป็นร่องลึก 30-50 mm ทุก 900-1200 mm เมื่อติดตั้งแล้วที่ผิวหน้าจะใช้แปรงทองเหลือง ฯลฯ ในการเล็มให้ได้ขนาดตามที่กำหนดและขูดผิวหน้าให้หยาบ เจาะรูขนาด 3-5 mm ลึก 2/3 ของความหนาของผนังทุกๆ 150-230 mm ทำเป็นรูอากาศผ่านเพื่อให้อบแห้งได้สม่ำเสมอ การอบแห้งจะเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 50°C/h สำหรับ Anchor จะเหมือนกับวัสดุทนไฟ Castable โดยทั่วไปจะใช้อิฐ Anchor brick ทุกๆ ระยะ 300-500 mm แล้วยึดอิฐด้วย Hanger metal กับเปลือกเตาหรือเพดาน ตัวอย่างการยึดแสดงไว้ในรูปที่ 3.104



รูปที่ 3.104 ตัวอย่างโครงสร้างของผนังพลาสติก

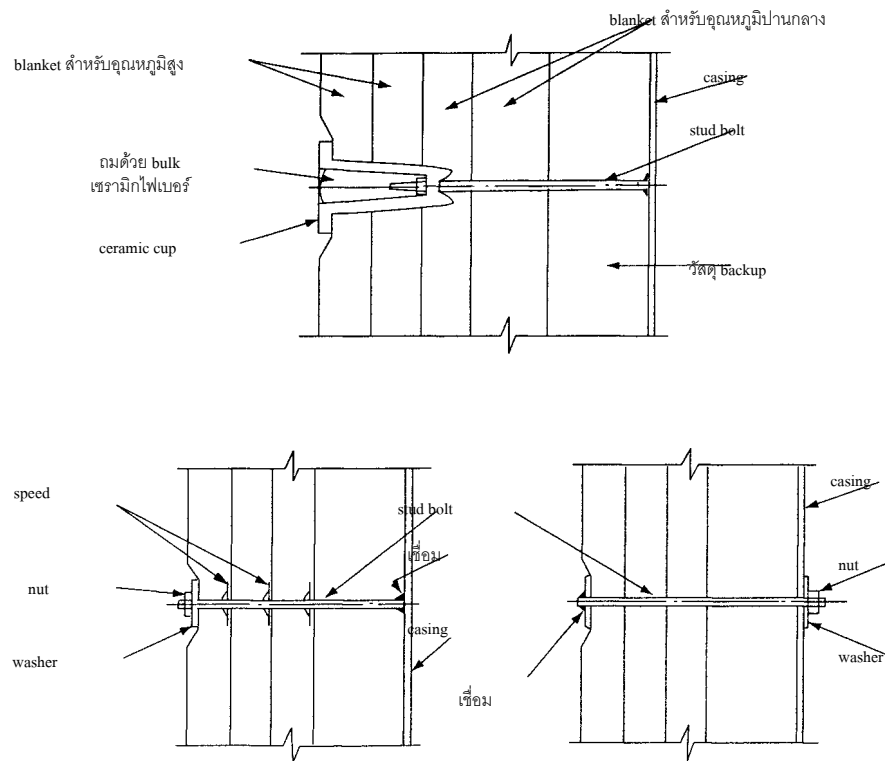
3.13.5.7.3 โครงสร้างผนังเตาเซรามิกไฟเบอร์

เซรามิกไฟเบอร์สามารถกันความร้อนได้ดี และยังติดตั้งได้สะดวก ปัจจุบันการใช้งานจึงแพร่หลายอย่างรวดเร็ว เมื่อกำหนดวัสดุทำไฟเบอร์ และความหนาฉนวนความร้อนให้เหมาะสมกับชนิดของเตา โครงสร้าง อุณหภูมิและบรรยากาศภายในเตาแล้ว วิธีติดตั้งจะถูกกำหนดไปด้วย วิธีติดตั้งที่สำคัญ ได้แก่ Paper lining, Stack lining, Block lining และ Board lining ซึ่งใช้บอร์ดในการติดตั้ง รวมทั้ง Veneer lining ซึ่งใช้ชั้นเซรามิกไฟเบอร์ปิดด้านในเตาที่มีอยู่แล้วอีกด้วย วิธี Paper lining บางครั้งก็เรียกว่า Layer lining โดยใช้วัสดุกันความร้อนปิดด้านในเตาซ้อนกันเป็นชั้นๆ เหมือนปิดวอลล์เปเปอร์ โดยทั่วไปด้านเปลือกเตาจะใช้วัสดุกันความร้อน เช่น Rock wool ฯลฯ เป็นวัสดุ Backup โดยใช้ Speed clip เสียบยึดไว้ชั่วคราวกับ Stud bolt ที่เชื่อมยึดเอาไว้แล้วดังรูปที่ 3.105 หลังจากนั้นนำ Blanket เซรามิกไฟเบอร์มาปิดทับเป็นชั้นๆ แล้วยึดด้วย Washer และ Nut เหล็กกล้าทนความร้อน นอกจากนี้ยังมีวิธีด้วยเซรามิกไฟเบอร์สำหรับอุณหภูมิสูง แล้วยึดด้วย Ceramic anchor อีกด้วย

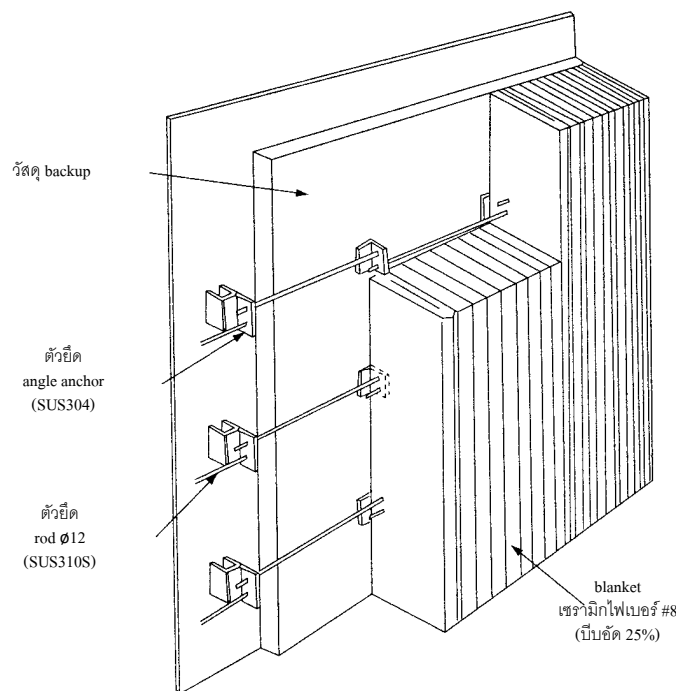
วัสดุนี้สามารถติดตั้งเป็นโครงสร้างกันความร้อนได้อย่างประหยัดโดยทำให้เหมาะสมกับอุณหภูมิของแต่ละจุดตั้งแต่ด้านในเตาจนถึงเปลือกเตา นอกจากนี้การติดตั้งยังทำได้สะดวก

ง่ายตาย แต่เนื่องจากตัวยึดจะโผล่ออกมาด้านในเตา อุณหภูมิใช้งานสูงสุดจึงต่ำกว่าวิธีติดตั้งแบบอื่น นอกจากนี้ blanket ยังล่อนเป็นชั้นๆ ได้ง่าย จึงมีจุดอ่อนที่ไม่สามารถใช้ในกรณีที่ก๊าซในเตามีความเร็วสูง

วิธี Stack lining จะตัด Blanket เป็นพับสั้นๆ ดังรูปที่ 3.106 แล้วซ้อนกันให้ตั้งฉากกับพื้นผิวเปลือกเตา ให้ปลายขอบด้านที่ตัด Blanket ยื่นเข้าไปในเตา และให้ความกว้างของ Blanket เป็นทิศทางความหนาของ Lining แล้วใช้ Rod ที่ทำจากเหล็กกล้าทนไฟ เสียบยึด Blanket ที่ซ้อนเป็นชั้นๆ ดังรูป เพื่อยึดไว้กับ Casing โครงสร้างนี้เป็นวิธีที่เสนอขึ้นมาเพื่อแก้ไขจุดอ่อนของวิธี



รูปที่ 3.105 ตัวอย่างวิธีติดตั้งแบบ Paper lining



รูปที่ 3.106 ตัวอย่าง Stack lining

Paper lining ซึ่งทำให้การเสื่อมสภาพของไฟเบอร์ที่พื้นผิวด้านในเตาไม่ส่งผลกระทบต่อตรงต่อการล่อน นอกจากนั้นตัวยึดยังไม่ไหลเข้าไปในเตาโดยตรงอีกด้วย รวมทั้งยังสามารถซ้อนกันแบบบีบอัดแน่น จึงมีขีดจำกัด อุณหภูมิใช้งานสูงกว่าวิธี Paper lining ประมาณ 50-100°C นอกจากนี้ยังรองรับความเร็วก๊าซในเตาได้สูงกว่า วิธี Paper lining อีกด้วย แม้ว่าจะมีข้อดีต่างๆ เหล่านี้ แต่ก็ต้องเพิ่มความหนาตามทิศทาง Lining เซรามิกไฟเบอร์ มีต้นทุนสูงกว่า จึงใช้เป็น Lining สำหรับเตาอุณหภูมิสูง ส่วนวิธี Block lining เป็นวิธี Stack แบบหนึ่งซึ่งจะใช้ Block ที่ทำจาก Blanket ซ้อนเป็นชั้นๆ แล้วขึ้นรูปเป็นสี่เหลี่ยม 300 mm ไว้แล้วมาก่อผนัง นอกจากจะทำให้ติดตั้งได้สะดวกแล้ว ยังสามารถสลับทิศทางเรียงตัวของชั้นได้อีกด้วย จึงสามารถลดกระแส Convection ในเซรามิกไฟเบอร์ได้

วิธี Board lining จะใช้ Board เนื้อละเอียดแทน Blanket วิธีนี้โดยพื้นฐานแล้วเหมือนกับวิธี Paper lining แต่สามารถทนทานต่อกระแสก๊าซภายในเตาได้จึงใช้กับเตาควบคุมบรรยากาศ เป็นต้น

3.14 บทสรุป

พื้นฐานทางด้านการเผาไหม้ คือการศึกษาหลักการของการเผาไหม้ ว่ามีองค์ประกอบอะไรบ้างที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ได้ ซึ่งจะมีหัวข้อ และเนื้อหาโดยสรุปดังนี้

เชื้อเพลิงและการเผาไหม้ เชื้อเพลิง หมายถึง สารที่สามารถเผาไหม้ได้โดยง่ายภายใต้บรรยากาศหรือออกซิเจน และความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้นั้นสามารถนำมาใช้งานอย่างได้คุ้มค่าทางเศรษฐกิจ นอกจากนี้ สารที่เกิดจากการเผาไหม้ (เช่น ไอเสีย ขี้เถ้า เป็นต้น) ต้องไม่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะกล่าวถึงเชื้อเพลิง 3 ประเภทคือ เชื้อเพลิงก๊าซ เชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงแข็ง โดยจะพูดถึง สมบัติของเชื้อเพลิง ลักษณะของเชื้อเพลิง และประเภทของเชื้อเพลิง ของเชื้อเพลิงทั้ง 3 ประเภท

ประเภทของเชื้อเพลิง และวิธีการทดสอบเชื้อเพลิง จะกล่าวถึง การวัดค่าความร้อน การวิเคราะห์องค์ประกอบ และการวัดคุณสมบัติของเชื้อเพลิง ทั้งเชื้อเพลิงก๊าซ เชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงแข็ง

ทฤษฎีการเผาไหม้ และการคำนวณการเผาไหม้ จะเป็นการคำนวณค่าความร้อนที่ได้รับจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง โดยพิจารณาจาก ส่วนผสมทางเคมีของเชื้อเพลิงนั้น ๆ

ปฏิกิริยา และกระบวนการเผาไหม้ มีลักษณะเด่น คือ เป็นปฏิกิริยาอุณหภูมิสูง และความเร็วสูงที่ประกอบด้วยอะตอม และอนุมูลอิสระ รวมทั้งคุณสมบัติของปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิทาง gas mechanics กล่าวคือ ปฏิกิริยาเผาไหม้ทั่วไปหากไม่สนใจกระบวนการระหว่างทางแล้ว สุดท้ายแล้วจะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนในสถานะก๊าซ ไม่ว่าเชื้อเพลิงจะเป็นของแข็งหรือของเหลว เมื่อเริ่มเผาไหม้จะเกิดการกลายเป็นไอก่อน หลังจากนั้นจะทำปฏิกิริยาคายความร้อนในสถานะก๊าซระหว่างก๊าซเชื้อเพลิงกับสารออกซิเดชัน

การติดไฟกับการจุดไฟ เมื่อรักษาอุณหภูมิของภาชนะที่บรรจุก๊าซผสมที่ติดไฟได้ให้คงที่ที่ T_0 แล้ว อุณหภูมิสูงกว่า T_0 ค่าหนึ่ง เมื่อเวลาผ่านไปเล็กน้อย ก๊าซผสมจะติดไฟด้วยตัวเอง และระเบิด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การติดไฟด้วยตัวเองหรือการระเบิด

ความเร็วในการเผาไหม้กับความเร็วของเปลวไฟ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเปลวไฟสัมพันธ์กับกรอบที่อยู่นิ่ง (ผู้สังเกต) เรียกว่า ความเร็วของเปลวไฟ ในขณะที่ความเร็วของเปลวไฟเทียบสัมพันธ์กับก๊าซผสมที่ยังไม่เผาไหม้ทางด้านหน้าของเปลวไฟ (ต้นเพลิง) เรียกว่า ความเร็วของการเผาไหม้

Flammability limit ก๊าซที่ผสมไว้แล้วจะมีช่วงค่าความเข้มข้นที่ติดไฟได้ช่วงหนึ่งซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดัน หากความเข้มข้นของเชื้อเพลิงสูงกว่าหรือต่ำกว่าช่วงนั้น เปลวไฟจะไม่ลาม ค่าต่ำสุดของช่วงความเข้มข้นนี้ เรียกว่า Lean flammability limit และค่าสูงสุดเรียกว่า Rich flammability limit

ปรากฏการณ์ Quenching เมื่อนำพื้นผิวของแข็งวางไว้ในเปลวไฟ เปลวไฟที่บริเวณใกล้พื้นผิวจะเย็นลงและความเร็วของปฏิกิริยาลดลง ทำให้ไม่สามารถเกิดเปลวไฟต่อไปได้ ดังนั้น ภายในระยะทางห่างจากพื้นผิวค่าหนึ่ง (ภายใต้ความดันบรรยากาศจะมีค่าไม่เกิน 1 mm) จะไม่เกิดเปลวไฟที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Quenching

กระบวนการเผาไหม้ในทางปฏิบัติ จะกล่าวถึงวิธีการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซ แบ่งออกเป็นการเผาไหม้ด้วย Burner และการเผาไหม้ในภาชนะ วิธีแรกมีวัตถุประสงค์เพื่อกำเนิดเปลวไฟที่นิ่งและสม่ำเสมอ วิธีหลังมีวัตถุประสงค์เพื่อเผาไหม้ก๊าซผสมที่อยู่ในภาชนะด้วยการเคลื่อนที่หรือการลามของเปลวไฟ

ขนาด (Capacity) ของอุปกรณ์เผาไหม้ เนื่องจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจำเป็นต้องใช้ระยะเวลา และสถานที่เป็นระยะเวลา และปริมาตรหนึ่ง ดังนั้น ปริมาณเชื้อเพลิงที่สามารถเผาไหม้ได้ในห้องเผาไหม้จึงมีขีดจำกัดอยู่ค่าหนึ่ง

Diffuse combustion เปลวไฟแบบ Diffusion flame มีหลายประเภท เช่น Free jet diffusion flame ซึ่งเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของ Fuel jet ที่พ่นจาก Burner port ออกมาในอากาศที่หยุดนิ่ง Coaxial flow diffusion flame ซึ่งเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของกระแสเชื้อเพลิงที่พ่นออกมาจาก Burner port โดยมีแกนตรงกันกับกระแสอากาศ Counterflow diffusion flame ซึ่งเกิดขึ้นที่ผิวกระแทกของกระแสเชื้อเพลิงกับกระแสอากาศที่มีทิศตรงข้ามกัน และ Countercurrent jet diffusion flame ที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของ Fuel jet ที่พ่นสวนกระแสอากาศออกมา

การรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ หมายถึงการทำให้เปลวไฟมีเสถียรภาพในกระแสก๊าซ Premix ความเร็วสูง หรือการทำให้เปลวไฟมีเสถียรภาพที่ปลายเปลวไฟของ Burner ซึ่งอยู่ในกระแสดูดอากาศปฐมภูมิ วิธีการรักษาเสถียรภาพทำได้โดยใช้ (1) Flame stabilizer (2) Swirler (3) Countercurrent jet เป็นต้น

การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเหลว วิธีเผาไหม้ประเภทต่าง ๆ แบ่งได้เป็น (1) Liquid surface combustion (2) Wick combustion (3) Evaporating combustion (4) Spray combustion

การระเหย และเผาไหม้ของละอองเชื้อเพลิงละอองที่ถูกพ่นออกไปสัมผัสอย่างกระตั้นหันกับบรรยากาศอุณหภูมิสูงที่มีคุณสมบัติออกซิเดชันนั้น หากบรรยากาศดังกล่าวมีเงื่อนไขเหมาะสม และเส้นผ่านศูนย์กลางของละอองมีค่าสูงกว่าค่าวิกฤตค่าหนึ่งแล้ว เมื่อเวลาผ่านไปค่าหนึ่งละอองจะติดไฟด้วยตัวเอง การหน่วงเวลาติดไฟนี้แบ่งได้เป็นการหน่วงเวลาทางกายภาพตั้งแต่เริ่มเกิดก๊าซผสมขึ้นรอบๆ ละอองจนถึงสภาวะที่สามารถติดไฟได้ และการหน่วงเวลาทางเคมีตั้งแต่ปฏิกิริยาเริ่มดำเนินไปหลังจากนั้นจนถึงการติดไฟ

การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง รูปแบบการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง แบ่งออกได้เป็น (1) Evaporating combustion (2) Decomposing combustion (3) Surface combustion (4) Smoldering และวิธีการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง แบ่งออกได้เป็น (1) Grate firing (fixed bed combustion) (2) Fluidized bed combustion (3) Pulverized coal firing

ค่าความร้อนเชื้อเพลิง จะกล่าวถึงค่าความร้อนสูงกับค่าความร้อนต่ำ ของเชื้อเพลิงโดยพิจารณาจากส่วนประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิง ความร้อนของเชื้อเพลิงแข็ง และเชื้อเพลิงเหลว โดยทั่วไปจะใช้ Bomb calorimeter ในการวัด ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงก๊าซ โดยทั่วไปจะวัดด้วย Junker's flow type calorimeter

ปริมาณอากาศที่ต้องการในทางทฤษฎี และในการเผาไหม้จริง คือปริมาณอากาศที่จำเป็นทางทฤษฎีในการเผาไหม้สมบูรณ์เชื้อเพลิงปริมาณหนึ่งหน่วย เรียกว่า ปริมาณอากาศตามทฤษฎี

ปริมาณก๊าซเผาไหม้ ก๊าซอุณหภูมิสูงที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง เรียกว่า ก๊าซเผาไหม้ (Combustion gas)

ปริมาณก๊าซเผาไหม้แห้ง หรือปริมาณก๊าซเผาไหม้ตามทฤษฎีเท่ากับปริมาณก๊าซเผาไหม้เปียกลบด้วยปริมาณไอน้ำ

สัดส่วนองค์ประกอบของก๊าซเผาไหม้ องค์ประกอบหลักของก๊าซเผาไหม้ ได้แก่ CO_2 , H_2O , O_2 , N_2 เป็นต้น

อัตราส่วนอากาศ หมายถึง อัตราส่วนระหว่างปริมาณอากาศที่ป้อนให้จริง กับปริมาณอากาศตามทฤษฎี

การวิเคราะห์ก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ วิเคราะห์จากประเภท และคุณสมบัติของก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้

วิธีเก็บตัวอย่างก๊าซไอเสีย (JIS K 0095) ในการเก็บตัวอย่างก๊าซจากไอเสียเพื่อนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซ ให้อ้างอิงจากมาตรฐาน JIS ซึ่งประกอบด้วย การเลือกตำแหน่งที่เก็บตัวอย่าง โครงสร้างของอุปกรณ์เก็บตัวอย่างก๊าซ

เครื่องวิเคราะห์ก๊าซทางเคมี Orsat gas analyzer เป็นเครื่องวิเคราะห์คาร์บอนไดออกไซด์ออกซิเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ในก๊าซไอเสียด้วยวิธี absorption method

การวิเคราะห์คาร์บอนไดออกไซด์โดยวิธีสัมประสิทธิ์การนำความร้อน มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เครื่องวัด CO_2 แบบไฟฟ้า อาศัยหลักการทำงานของสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของ CO_2 จะต่ำกว่า

สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศมาก วิธีความถ่วงจำเพาะเป็นวิธีการวัดปริมาณ CO_2 ที่มีอยู่โดยอาศัยหลักการว่า CO_2 จะมีค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่าอากาศ และวิธีวิเคราะห์ก๊าซด้วยรังสีอินฟราเรด นอกจากก๊าซที่ 1 โมเลกุลประกอบด้วยธาตุเดียวกัน 2 อะตอม เช่น H_2 , N_2 , O_2 แล้ว ก๊าซอื่นๆ เกือบทุกชนิด เช่น CO_2 , CO , CH_4 ฯลฯ จะมีช่วงความยาวคลื่นการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเฉพาะตัว

การวิเคราะห์ออกซิเจน (JIS B 7983) เครื่องวัด O_2 แบบแม่เหล็ก เป็นอุปกรณ์ที่สามารถวัดความเข้มข้นของออกซิเจนได้อย่างต่อเนื่อง แบ่งได้เป็น แบบลมแม่เหล็ก กับแบบแรงแม่เหล็ก และเครื่องวัด O_2 แบบไฟฟ้าเคมี วิธีไฟฟ้าเคมี หมายถึงการใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชันรีดักชันทางไฟฟ้าเคมีของออกซิเจน ในการหาความเข้มข้นของออกซิเจนอย่างต่อเนื่อง แบ่งเป็นแบบเซอร์โคเนียกับแบบอิเล็กโทรด

การวิเคราะห์คาร์บอนมอนอกไซด์ (JIS K 0098) ใช้วิธี ก๊าซโครมาโตกราฟี วิเคราะห์ก๊าซด้วยรังสีอินฟราเรด และวิธีหลอดตรวจจับ

นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ไฮโดรคาร์บอนรวม วิเคราะห์ NO_x (JIS B 7982) และการวิเคราะห์สารประกอบกำมะถัน (JIS B 7981)

สมดุลความร้อนก่อน และหลังการเผาไหม้กับอุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ตามทฤษฎี กล่าวคือ ตั้งสมการให้ปริมาณความร้อนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง และในอากาศก่อนการเผาไหม้ เท่ากับปริมาณที่มีอยู่ในก๊าซเผาไหม้หลังการเผาไหม้บวกกับปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาจากก๊าซเผาไหม้

กรณีศึกษาของการอนุรักษ์พลังงาน เป็นการศึกษาหลักการของรีเจนเนอเรทีฟเบิร์นเนอร์

อุปกรณ์เผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซ อุปกรณ์เผาไหม้เชื้อเพลิงเหลว และอุปกรณ์เผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

การเผาไหม้แบบ NO_x ต่ำ และการเผาไหม้แบบสะสมความร้อน

เครื่องยนต์สันดาปภายใน หลักการทำงานของเครื่องยนต์สันดาปภายใน ประเภทและสมบัติสมรรถนะ เชื้อเพลิงกับการเผาไหม้

การปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องยนต์สันดาปภายใน การบำรุงรักษา การเดินเครื่อง และบำรุงรักษา และปัญหาสิ่งแวดล้อม

ระบบเตาเผา โครงสร้างพื้นฐานของเตาเผา ประเภทของเตาเผา โครงสร้างพื้นฐานของเตาอุตสาหกรรม ประเภทของเตาอุตสาหกรรม

การอนุรักษ์พลังงานของเตาเผา สมดุลความร้อนของเตาอุตสาหกรรม การอนุรักษ์พลังงานของเตาให้ความร้อนเหล็ก billet กลวิธีอนุรักษ์พลังงานพิเศษอื่นๆ

วัสดุสำหรับอุปกรณ์ความร้อน ทฤษฎีทั่วไป ประเภทของวัสดุทนไฟ คุณลักษณะที่ต้องมีในอิฐทนไฟ สมบัติของอิฐทนไฟชนิดต่างๆ

ประเภท และคุณสมบัติของวัสดุทนไฟชนิดต่างๆ วัสดุทนไฟที่ใช้กับเตาหลอม วัสดุกันความร้อน โครงสร้างของผนังเตา อิฐทนไฟกันความร้อนและบอร์ด Electrocast refractories เซรามิกไฟเบอร์ ฉนวนกราไฟต์ วัสดุกันความร้อน โครงสร้างของผนังเตา