

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 ชนิดของถ่านหิน

ถ่านหินโดยทั่วไป จะมีการจัดแบ่งลำดับชั้นตามคุณภาพ (Singer, 1991) ได้ดังต่อไปนี้

2.1.1 พีท (Peat) : เป็นถ่านหินที่อายุน้อยที่สุด มีคุณภาพต่ำที่สุด ประกอบด้วยซากพืชบางส่วน ซึ่งเกิดการสลายตัวขึ้น แล้วยังปรากฏร่องรอยเนื้อไม้ให้เห็น ลักษณะเป็นสีน้ำตาลรูปทรงคล้ายฟองน้ำ มีปริมาณออกซิเจนและน้ำอยู่ค่อนข้างสูง ให้ค่าความร้อนต่ำ เมื่อคิกไฟจะให้ควันมาก

2.1.2 ลิกไนต์ (Lignite หรือ Brow Coal) : เป็นถ่านหินที่วิวัฒนาการมาจากพีท และยังปรากฏร่องรอยเนื้อไม้อยู่บ้าง มีสีน้ำตาล มีปริมาณออกซิเจนค่อนข้างสูง มีความชื้นสูงถึง 30-70 เปอร์เซ็นต์ ให้ค่าความร้อนต่ำ สามารถเกิดการลุกไหม้ขึ้นได้เอง (Spontaneous Combustion) ถ้าเก็บกองไว้เป็นเวลานาน

2.1.3 ซับบิทูมินัส (Subbituminous) : เป็นถ่านหินที่มีลักษณะสีน้ำตาลซีดๆ ให้ค่าความร้อนสูงกว่าลิกไนต์ มีปริมาณความชื้นประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ เหมาะสำหรับการใช้เป็นเชื้อเพลิง ในการผลิตไฟฟ้า

2.1.4 บิทูมินัส (Bituminous) : เป็นถ่านหินเนื้อแข็ง มีสีดำ ลักษณะมันวาว มีปริมาณคาร์บอน 69-86 เปอร์เซ็นต์ มีความชื้น 1.5-7 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีร่องรอยของเนื้อไม้ปรากฏอยู่ ให้ค่าความร้อนสูง ควันน้อย ถ่านหินเป็นถ่านหินคุณภาพสูง เหมาะสำหรับการใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมงานถลุงโลหะต่างๆ

2.1.5 แอนทราไซต์ (Anthracite) : เป็นถ่านหินที่มีคุณภาพดีที่สุด มีสีดำสนิท มันวาว มีความแข็งมาก มีปริมาณคาร์บอนสูงถึง 80 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไป มีปริมาณความชื้นต่ำมาก คิกไฟยาก แต่ให้ค่าความร้อนสูง และมีระยะเวลาการเผาไหม้ยาวนาน

การจำแนกถ่านหินลักษณะดังกล่าว เป็นการกำหนดชั้นของถ่านหิน โดยวิธีมาตรฐานของอเมริกา (American Society for Testing Materials : ASTM D 388) ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งจะพิจารณาค่าคาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon Limit, %) ค่าความร้อน (Calorific Value Limits, Btu/lb) และลักษณะการรวมกลุ่ม (Agglomeration) นอกจากนี้ ยังมีการแบ่งถ่านหิน ตามระบบมาตรฐานระหว่างประเทศ (International System) โดยพิจารณาจากค่าสารระเหย (Volatile Matter) และค่าความร้อน (Heating Value) สำหรับถ่านหินแม่เหมาะเป็นถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) ที่เกิดขึ้นตั้งแต่ยุคเทอร์เชียรี (Tertiary) คือเมื่อประมาณ 80-100 ล้านปีก่อน ลิกไนต์โดยทั่วไปเป็นเชื้อเพลิงแข็ง ที่เกิดจากซากต้นไม้โบราณที่ถูกทับถม และเปลี่ยนสภาพตามสภาพแวดล้อมในสมัยนั้น จนส่วนประกอบของต้นไม้กลายเป็นเชื้อเพลิง ที่สามารถคิกไฟให้ความร้อนได้ สำหรับลิกไนต์แม่เหมาะ จะมีการสะสมตัวอยู่ในหุบเขาเป็นลักษณะการสะสมตัวของสิ่งต่างๆที่มีอยู่เดิมในแม่น้ำ ทะเลสาบ ห้วย หนอง จึงทำให้พบร่องรอยของซากสิ่งมีชีวิตที่เกี่ยวกับลำน้ำอยู่ในถ่านหินด้วย เมื่อมีการเคลื่อนตัวของพื้นโลก ทำให้แอ่งถ่านหินถูกเลื่อนให้เคลื่อนที่แยกออกไปจากกัน การที่คุณภาพของถ่านหินแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในการเกิด อันได้แก่ ระยะเวลา แรงกดดันเหนือซากสิ่งมีชีวิต และอุณหภูมิ

ตาราง 2.1 Classification of Coal by Rank^a (Singer, 1991)

Class and Group	Fixed Carbon Limits, % (Dry, Mineral- Matter-Free Basis)		Volatile Matter Limits, % (Dry, Mineral- Matter-Free Basis)		Calorific Value Limits, Btu/lb (Moist, ^b Mineral-Matter- Free Basis)			Agglomerating Character
	Equal or Greater Than		Equal or Greater Than		Equal or Greater Than		Less Than	
	Less Than	Less Than	Less Than	Less Than	Less Than	Less Than		
I. Anthracitic								
1. Meta-anthracite	98	...	...	2	...	...		nonagglom-
2. Anthracite	92	98	2	8	...	...		erating
3. Semianthracite ^c	86	92	8	14	...	...
II. Bituminous								
1. Low-volatile bituminous coal	78	86	14	22	...	...
2. Medium volatile bituminous coal	69	78	22	31	...	...
3. High-volatile A bituminous coal	...	69	31	...	14,000 ^d	...		commonly agglomerating ^e
4. High-volatile B bituminous coal	...	...	...	...	13,000 ^d	...		
5. High-volatile C bituminous coal	...	...	...	...	11,500	13,000		
					10,500	11,500		agglomerating
III. Subbituminous								
1. Subbituminous A coal	...	...	...	...	10,500	11,500		
2. Subbituminous B coal	...	...	...	...	9,500	10,500		
3. Subbituminous C coal	...	...	...	...	8,300	9,500		nonagglom- erating
IV. Lignite								
1. Lignite A	...	...	...	...	6,300	8,300		
2. Lignite B	...	...	...	...	...	6,300		

^a This classification does not include a few coal, principally nonbanded varieties, which have unusual physical and chemical properties and which come within the limits of fixed carbon or calorific value of the high-volatile bituminous and subbituminous ranks. All of these coals either contain less than 48% dry, mineral-matter-free fixed carbon or have more than 15,500 moist, mineral-matter-free Btu per pound.

^b Moist refers to coal containing its natural inherent moisture but not including visible water on the surface of the coal.

^c If agglomerating, Classify in the low-volatile group of the bituminous class.

^d Coals having 69% or more fixed carbon on the dry, mineral-matter-free basis shall be classified by fixed carbon, regardless of calorific value.

^e It is recognized that there may be nonagglomerating varieties in these groups of the bituminous class, and there are notable exceptions in high-volatile C bituminous group.

2.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านหิน

การที่จะทราบคุณสมบัติทั่วไปของถ่านหิน จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ หาค่าของคุณสมบัติของถ่านหิน ซึ่งจะมีประโยชน์ในการจำแนกชนิดถ่านหิน การกำหนดราคาถ่านหินตามคุณภาพ การควบคุมคุณภาพของถ่านหิน และการเลือกใช้หรือการออกแบบอุปกรณ์เผาไหม้ การวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านหิน จะมีการแบ่งเป็น 2 ลักษณะใหญ่ๆ ได้แก่ การวิเคราะห์ถ่านหินโดยประมาณ (Proximate Analysis) และการวิเคราะห์โดยละเอียด (Ultimate Analysis) การรายงานผลอาจรายงานบนฐาน (Basis) ต่างๆ คือ As-received Air-dried และ Moisture free ตามที่ได้แสดงการเปรียบเทียบในตารางที่ 2.2 การวิเคราะห์ถ่านหินแต่ละลักษณะ จะมีรายละเอียดดังนี้

ตาราง 2.2 การเปรียบเทียบรายงานการวิเคราะห์ถ่านหินบนฐานต่างๆ (Singer,1991)

การวิเคราะห์โดยประมาณ	หน่วย	As-received Basis (*)	Dry Basis (*) $\times 100/(100-M)$	Ash and Moisture free Basis (*) $\times 100/(100-M-A)$
Moisture (M)	%	10.0	-	-
Ash (A)	%	10.0	11.1	-
Volatile matter	%	36.0	40.0	45.0
Fixed carbon	%	<u>44.0</u>	<u>48.9</u>	<u>55.0</u>
Total	%	<u>100.0</u>	<u>100.0</u>	<u>100.0</u>
Heating value	kJ	11,200.0	12,444.0	14,000.0
Sulfur	%	3.6	4.0	4.5

2.2.1 การวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate Analysis) เป็นการวิเคราะห์ที่แสดงคุณสมบัติการเผาไหม้ของถ่านหิน (Burning Behavior) การติดไฟ และการเกิดปริมาณเถ้า คุณสมบัติที่ได้จากการวิเคราะห์โดยประมาณคือ

2.2.1.1 ความชื้น (Moisture) ในถ่านหินจะมี Free Moisture และ Inherent Moisture ซึ่ง Free Moisture เป็นความชื้นที่บอกให้ทราบว่า ถ่านหินนั้นชื้นเกาะติดภาชนะหรือเครื่องมือ ทำให้การไหลโดยน้ำหนักของมันเองไม่ดี ในขณะที่ Inherent Moisture เป็นความชื้นที่ยังคงเหลืออยู่หลังจากไล่ Free Moisture ออกไปแล้ว ความชื้นไม่มีคุณค่าทางความร้อนและในการเผาไหม้ จะมีการสูญเสียความร้อนไปประมาณ 0.1 เปอร์เซ็นต์ ต่อทุกๆ 1 เปอร์เซ็นต์ของความชื้นถ่านหิน

2.2.1.2 สารระเหย (Volatile Matter) ส่วนที่ระเหยเป็นก๊าซหรือไอได้ เมื่อได้รับความร้อนในเตา ส่วนประกอบสำคัญที่พบ คือ ไฮโดรเจน ออกซิเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ มีความสำคัญในการพิจารณาเกี่ยวกับการเก็บ และการขนถ่ายเชื้อเพลิง การวิเคราะห์ทำได้โดยนำถ่านขนาด 60 Mesh 1 กรัม ใส่ในแก้วที่มีฝาปิด เเผาในเตาที่มีอุณหภูมิ 950 °C นาน 7 นาที ชั่งน้ำหนักที่หายไป คิดเป็นร้อยละของน้ำหนัก

2.2.1.3 ปริมาณเถ้า (Ash Content) เถ้าเป็นแร่ธาตุต่างๆ ที่เหลือจากการเผาไหม้ถ่านหินหลังจากส่วนที่เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้หมดไป ปริมาณของเถ้าที่เหลือจะมีความสำคัญมากในการซื้อขายถ่านหิน เพราะสามารถประมาณค่าความร้อนที่จะได้จากถ่าน โดยการดูจากปริมาณของเถ้า นอกจากนี้ สัดส่วนของแร่ธาตุที่เหลือ เช่น สัดส่วนของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกเนเซียมออกไซด์ (MgO) และเหล็กออกไซด์ (FeO) ซึ่งถ้ามีปริมาณมากก็จะมีผลทำให้ Fusion Temperature ของถ่านลดลง การวิเคราะห์ทำได้โดยการนำถ่านขนาด 60 Mesh 1 กรัม เเผาในเตาที่อุณหภูมิ 750 °C ประมาณ 1 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ ซึ่งน้ำหนักที่เหลืออยู่คิดเป็นร้อยละของน้ำหนัก

2.2.1.4 ปริมาณคาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon) เป็นเชื้อเพลิงของแข็งที่เหลือจากการได้ Volatile Matter และ Moisture ออกจากถ่านหินและไม่รวมเถ้า ลักษณะและคุณภาพของคาร์บอนคงที่จะใช้ในการกำหนดการเลือกแบบของเตาเผา และอุปกรณ์ของเตาเผา ค่าปริมาณของแข็งที่เหลือจากการไล่สารระเหยและความชื้นหาได้โดยคำนวณจากสูตร

$$\% \text{ Fixed Carbon} = 100 - (\% \text{ Moisture} + \% \text{ Ash} + \% \text{ Volatile Matter})$$

2.2.1.5 ปริมาณกำมะถัน (Sulfur Content) คือปริมาณของกำมะถันในถ่านหิน เมื่อเกิดการเผาไหม้ กำมะถันจะติดไฟได้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ พร้อมกับให้ค่าความร้อนออกมา ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นนั้น เป็นมลสารที่จะเปลี่ยนแปลงเป็นสารกัดกร่อน ในกรณีที่ถ่านหินมีกำมะถันสูง อาจทำให้เกิดการอุดตันการกัดกร่อนของทางเดินก๊าซด้านนอกเตา (Gas Duct) นอกจากนั้น ไอเสียที่มีกำมะถันมากยังเป็นปัญหาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมทางอากาศได้อีกด้วย การวิเคราะห์ทำได้โดยการใช้เครื่อง Sulfur Analyzer โดยชั่งถ่านลิกไนต์ขนาด 60 Mesh ประมาณ 50 mg ใน Combustion Boat คลุมผิวของถ่านด้วย Vanadium Pentoxide แล้วนำไปเผา ซึ่งถ่านจะถูกเผาไหม้ กำมะถันจะกลายเป็นก๊าซเมื่อถูกน้ำหรือสารละลายจะกลายเป็นกรดกำมะถัน เมื่อวิเคราะห์ปริมาณกรดแล้วนำมาคำนวณกลับเป็นกำมะถัน เครื่อง Sulfur Analyzer นี้จะสามารถคำนวณปริมาณกำมะถันในสารละลายได้เลย โดยเทียบกับปริมาณกำมะถันที่ทราบค่าในถ่านมาตรฐาน

2.2.1.6 ค่าปริมาณความร้อน (Heating Value หรือ Calorific Value) คือปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินหนึ่งหน่วยน้ำหนักอย่างสมบูรณ์ สามารถรายงานได้ 2 วิธี คือ บอกรวมเป็นปริมาณความร้อนรวม ซึ่งรวมค่าความร้อนแฝงของน้ำด้วย เรียกว่า High Heating Value (HHV) หรือ Gross Calorific Value และบอกปริมาณความร้อนโดยไม่รวมค่าความร้อนแฝงของน้ำ เรียกว่า Low Heating Value (LHV) การวิเคราะห์ใช้เครื่องหาปริมาณความร้อน (Bomb Calorimeter) ขั้นตอนมีดังนี้ ใส่เชื้อเพลิงจำนวนหนึ่งลงในภาชนะที่เรียกว่า บอมบ์ (Bomb) แล้วใส่บอมบ์ลงในภาชนะทดสอบ (Test Chamber) ของเครื่อง แล้วปิดภาชนะดังกล่าว และจุดไฟ (Ignite) ให้แก่เชื้อเพลิงในบอมบ์ด้วยขดลวดหลอม (Fuse) ถ่านที่เผาไหม้ในบอมบ์จะถ่ายเทความร้อนให้น้ำที่ทราบปริมาณที่แน่นอน เมื่อวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของน้ำ จะสามารถคำนวณปริมาณความร้อนของถ่านลิกไนต์ได้ โดยเทียบกับสารมาตรฐานที่ทราบค่าความร้อนแน่นอน

2.2.1.7 อุณหภูมิการหลอมตัวของเถ้า (Ash Fusion Temperature) มีประโยชน์ในการออกแบบหรือเลือกชนิดของอุปกรณ์เผาไหม้ ใช้บอกว่าถ่านนี้ควรจะเผาได้ถึงอุณหภูมิสูงเท่าใดถ้าจึงจะไม่หลอมละลายจนอุดตันในเตา วิธีวิเคราะห์ทำได้โดยนำถ่านลิกไนต์มากลกับพิมพ์เป็นปริมาตรกลม ด้านสูงเป็นมุมฉาก นำไปตั้งใน

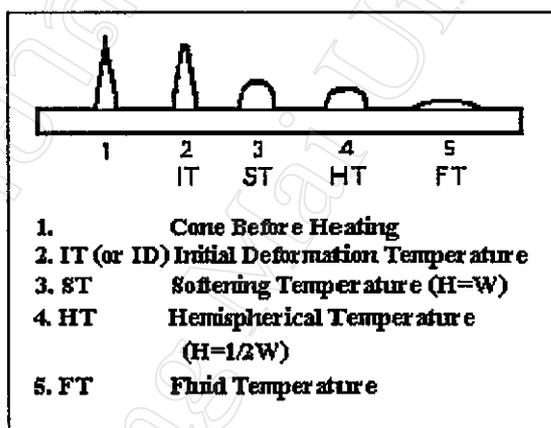
เตาเผาที่เพิ่มอุณหภูมิได้ถึง 1500 °C มีหน้าตาทรงแสงและคอยสังเกตการหลอมตัวของรูปสามเหลี่ยม ตามแสดงในรูปที่ 2.1 จากนั้นบันทึกอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนี้

ก. อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนรูป (Initial Deformation Temperature, IT) ปลายบนสุดเริ่มโค้งเป็นอุณหภูมิแรกที่เด้ามีปฏิกิริยาต่อความร้อน

ข. อุณหภูมิที่เริ่มหลอม (Softening Temperature, ST) รูปสามเหลี่ยมหลอมเป็นรูปโค้งมีความสูงเท่ากับความกว้างฐาน เป็นจุดที่เด้าหลอมตัว

ค. อุณหภูมิที่มีการหลอมตัวอย่างรวดเร็ว (Hemispherical Temperature, HT) รูปโค้งมีความสูงเป็นครึ่งหนึ่งของฐาน ณ อุณหภูมิที่เด้าจะหลอมตัวอย่างรวดเร็ว

ง. อุณหภูมิที่เด้ากลายเป็นของไหล (Fluid Temperature, FT) ความสูงทั้งหมดเบนราบลงกับพื้น เด้าหลอมละลายกลายเป็นของไหล



รูป 2.1 อุณหภูมิต่างๆของเด้าเมื่อเริ่มหลอม (Singer,1991)

2.2.2 การวิเคราะห์ถ่านหินโดยละเอียด (Ultimate Analysis) การวิเคราะห์แบบนี้เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลัก ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจน และกำมะถัน วิเคราะห์ตัวอย่างโดยการเผาตัวอย่างเด้าลิกไนต์ให้หมดในบรรยากาศของออกซิเจน เมื่อเผาไหม้สมบูรณ์ผลิตภัณฑ์ที่ได้ จะอยู่ในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ภายในเครื่องที่ใช้ทำการวิเคราะห์ จะมีส่วนที่วิเคราะห์ก๊าซเหล่านี้ได้ สำหรับก๊าซออกซิเจน โดยปกติจะหาได้จากการคำนวณ โดยนำค่าอื่นๆ มาลบออกจาก 100 ส่วน ในส่วนของไนโตรเจนจะต้องนำเอาลิกไนต์ไปหลอมละลายกับสารเคมีอื่นให้ไนโตรเจนกลายเป็นเกลือแอมโมเนียก่อน แล้วจึงกลั่นให้กลายเป็นก๊าซ จากนั้นจึงวิเคราะห์ปริมาณ คิคกลับเป็นไนโตรเจน ปัจจุบันศูนย์วิเคราะห์วิจัยถ่านและลิกไนต์ โรงไฟฟ้าแม่เมาะสามารถหาปริมาณธาตุต่างๆ ดังกล่าวด้วยเครื่อง CHN Analyzer การวิเคราะห์ถ่านหินโดยละเอียด จะใช้ประโยชน์ในการประเมินประสิทธิภาพของการเผาไหม้

2.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้า (Ash Composition) (Singer,1991)

ถ่านหินเมื่อถูกเผาให้ละเอียด และส่งเข้าไปในเตาเผาไหม้ ที่มีอากาศเพียงพอ การเผาไหม้จะเกิดได้อย่างสมบูรณ์ ความร้อนในเตาเผาไหม้จะช่วยให้ปฏิกิริยาทางเคมีของการเผาไหม้เปลี่ยนแปลงสภาพของแร่ธาตุ (Mineral Matter) ที่มีอยู่ในถ่านหินให้เป็นแร่ธาตุในรูปของออกไซด์ของโลหะหลายชนิดที่ซับซ้อน ลักษณะเถ้าที่ได้จากโรงไฟฟ้าโดยทั่วไปพอจะแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.3.1 เถ้าลอย (Fly Ash หรือ Pulverized Fuel Ash หรือ Dry Ash) เป็นเถ้าที่ได้จากการเผาผงถ่านในกระบวนการผลิตไฟฟ้า เถ้าจะถูกแยกออกจากลมร้อนที่พัดออกไปสู่ปล่องควัน (Stack) โดยอาศัยเครื่องจับฝุ่นด้วยไฟฟ้า (Electrostatic precipitators) และถูกรวบรวมไว้ที่ถังเก็บ (Ash Hopper)

2.3.2 เถ้าหนัก (Bottom Ash หรือ Wet Ash) เป็นเถ้าที่ได้จากการปะทะ ของอนุภาคเถ้าในบริเวณที่เผาไหม้ (Combustion Zone) อุณหภูมิบริเวณนี้สูงพอที่จะหลอมเถ้าที่จะปะทะกัน รวมเป็นเม็ดหรือก้อนตกลงสู่ก้นเตาเผาไหม้ บางส่วนของอนุภาคเถ้าจะไปปะทะกับผนังเตาและหลอมติดกัน ทำให้อนุภาคเถ้าสะสมรวมกันเป็นก้อนใหญ่ เมื่อรับน้ำหนักไม่ไหวก็จะหลุดตกลงสู่ก้นเตา ซึ่งเรียกเถ้าส่วนนี้ว่า แสลด (Slag) การเตรียมตัวอย่างของเถ้าที่จะนำมาวิเคราะห์นั้น แบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีแรก ถ้าเป็นเถ้าหนัก จะนำตัวอย่างเถ้าหนักใส่ถาดที่มีอุณหภูมิ 100 °C 1 ชิ้น จากนั้นนำมาบดให้ละเอียดแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 Mesh ให้ได้ตัวอย่างประมาณ 50-80 กรัม แบ่งตัวอย่างเป็น 2 ส่วน ส่วนหนึ่งนำไปหาปริมาณคาร์บอนที่เหลือ (Unburnt Carbon) อีกส่วนหนึ่งนำไปเผาที่อุณหภูมิ 750 °C เพื่อนำไปวิเคราะห์ออกไซด์ของเถ้า (Ash Composition) กรณีที่สอง ถ้าเป็นเถ้าลอย เนื่องจากเป็นเถ้าซึ่งแห้งและละเอียดมากอยู่แล้ว จึงไม่จำเป็นต้องอบไล่ความชื้น ให้นำเถ้านี้มาร่อนผ่านตะแกรง 200 Mesh แล้วนำเถ้าดังกล่าวมาแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนหนึ่งนำไปหาปริมาณคาร์บอนที่เหลือ อีกส่วนหนึ่งนำไปเผาที่อุณหภูมิ 750 °C เพื่อนำไปหาออกไซด์ของเถ้า

การวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้า เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาองค์ประกอบต่างๆ ในเถ้าถ่านหิน ซึ่งประกอบด้วย ซิลิกา (Si_2O) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) อลูมินา (Al_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกเนเซียมออกไซด์ (MgO) ทิตาเนียมออกไซด์ (TiO_2) โซเดียมไดออกไซด์ (Na_2O) โพแทสเซียมไดออกไซด์ (K_2O) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) แต่เดิมทางศูนย์วิเคราะห์หิวซ์ถ่านและถ่านหินต้องเอาเถ้าไปหลอมละลายในกรด แล้วจึงแยกวิเคราะห์หาธาตุแต่ละตัวโดยใช้การวัดความเข้มข้นด้วยเครื่อง AA (Atomic Absorption Spectroscopy) โดยใช้หลักการดูดกลืนคลื่นแสงของสารซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของธาตุ ปัจจุบันใช้เครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometer ซึ่งรังสี X-ray จะส่งผ่านไปที่ผิวตัวอย่างเถ้าที่อัดแน่นเป็นแผ่น หรือหลอมเป็นผลึกคล้ายแก้ว และในเครื่องจะวิเคราะห์ ความเข้มของรังสีที่เกิดจากแต่ละธาตุกลายออกมา โดยเทียบกับธาตุมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้น แล้วคำนวณออกมาเป็นร้อยละ ของส่วนประกอบของธาตุ จากผลการวิเคราะห์ออกไซด์ ของเถ้า ส่วนประกอบทางเคมีหลักของเถ้า จะเป็นตามตารางที่ 2.3 จะเห็นว่า SiO_2 Al_2O_3 SiO_2 Fe_2O_3 CaO และ MgO จะมีอยู่ในส่วนของเถ้าถ่านหินประมาณ 95 % ที่เหลือจะเป็น Na_2O K_2O ที่มีส่วนสำคัญในการช่วยหลอม (Flux) ให้เถ้าหลอมเหลว

ผลของปริมาณธาตุเหล็กในเถ้าถ่านหิน สารประกอบของธาตุเหล็กมีผลต่อปฏิกิริยาเคมีในการเกิดเถ้าถ่านหิน จะเห็นได้จากเถ้าถ่านหินที่มีธาตุเหล็กสูงมักทำให้เกิดปัญหาในเตาเสมอ ในแอสลดหรือเถ้าใต้เตา เมื่อนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบเถ้าพบว่า มีสารประกอบของธาตุเหล็กสูง เมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมีแล้ว ธาตุเหล็กในสาร

ตาราง 2.3 แสดงองค์ประกอบของถ่านหิน วิเคราะห์โดยใช้หลักเกณฑ์
ออกไซด์ของถ่าน (วารกรณ์ คุณาวานากิจ, 2540)

สารประกอบ	ร้อยละ	สารประกอบ	ร้อยละ
SiO ₂	35-40	Na ₂ O	0.4-1.0
Al ₂ O ₃	20-30	K ₂ O	1.5-3
Fe ₂ O ₃	10-15	TiO ₂	0.5-1
CaO	5-20	SO ₃	5-20
MgO	2-3		

ประกอบ (Metallic Iron) จะจมลงส่วนล่างของสแลกที่หลอมละลาย (Molten Slag) ถ่านหินบางชนิดธาตุเหล็กจะอยู่ในรูปของไฟไรท์ (FeS) ซึ่งในขณะที่ถ่านหินถูกส่งผ่านเข้าไปในเตา ธาตุเหล็กและกำมะถันจะรวมตัวกับออกซิเจน โดยที่ธาตุเหล็กจะรวมตัวเป็นเหล็กซัลไฟด์ เปลี่ยนไปเป็นแมกเนไทต์ (Magnetite) และเหล็กออกไซด์ ส่วนกำมะถัน (S) จะรวมตัวกับออกซิเจน เป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) หรือซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) นอกจากนี้ กำมะถัน (S) อาจรวมตัวกับโซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) เป็นสารประกอบที่ทำให้อุณหภูมิแตกกลายเป็นของไหลต่ำมาก สารประกอบกำมะถันของ Na และ K นอกจากจะอยู่ในสถานะเป็นไอแล้ว ยังกลั่นตัว (Condense) อยู่บนผนังเตาในส่วนที่มีอุณหภูมิต่ำ และอาจเป็นปัจจัยที่สำคัญในการเกิดการกัดกร่อน (Corrosion) ของผนังเตา (Furnace Wall Tube)

2.4 คุณสมบัติทางเคมีของถ่าน (Ash Chemical Properties) (Singer, 1991)

เนื่องจากส่วนประกอบของถ่านถ่านหิน (Coal Ash Component) เป็นออกไซด์ของโลหะ ดังนั้นเมื่อละลายน้ำ โลหะแต่ละชนิดจะแสดงผลในการเป็นด่างไม่เหมือนกัน ดังนั้นในทางเคมีเราจึงจัดแบ่งออกไซด์ของโลหะที่เป็นส่วนประกอบของถ่านได้ 2 จำพวก คือ

ส่วนประกอบที่แสดงฤทธิ์เป็นกรด (Acidic Oxide) ได้แก่ SiO₂, Al₂O₃ และ TiO₂ จะพบได้ทั่วไปในถ่านถ่านหินที่มีจุดหลอมเหลว (Melting Point) สูงๆ

ส่วนประกอบที่แสดงฤทธิ์เป็นด่าง (Basic Oxide) ได้แก่ Fe₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O จะพบได้ในถ่านถ่านหินที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ

จากตารางที่ 2.4 ถ้าธาตุเหล่านี้รวมตัวกับอากาศ (Oxygen) ให้สภาวะอุณหภูมิที่พอเหมาะ ธาตุจะถูกเปลี่ยนแปลงรูปเป็นออกไซด์ จุดหลอมเหลวของถ่านจะแทนที่โดยน้ำหนักเฉลี่ยของออกไซด์ แต่ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ได้เกลือที่มีโครงสร้างสลับซับซ้อน (Complex Salt) และมีคุณสมบัติทางกายภาพแตกต่างกัน นอกจากนี้ จุดหลอมเหลวของสารประกอบ (Compound) โดยทั่วไปจะต่ำลง ส่วนประกอบที่แสดงฤทธิ์เป็นกรด (Acidic Oxide) ที่มีปริมาณออกไซด์ร้อยละ 20-90 ในถ่าน ส่วนมากจะมีอุณหภูมิหลอมเหลวและการเกิดสแลกสูงตามไปด้วย ส่วนประกอบที่แสดงฤทธิ์เป็นด่าง (Basic Oxide) มีปริมาณออกไซด์ร้อยละ 5-80 ในถ่าน โดยไม่ว่าปริมาณสูงหรือต่ำ มีผลทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวจะอยู่ในเกณฑ์ต่ำสุด

ตาราง 2.4 คุณสมบัติของเถ้าถ่านหิน (Singer,1991)

Element	Oxide	Melting Temp (°F)	Chemical Property	Compound	Melting Temp (°F)
Si	SiO ₂	3120	Acidic	Na ₂ SiO ₃	1610
Al	Al ₂ O ₃	3710	Acidic	K ₂ SiO ₃	1790
Ti	TiO ₂	3340	Acidic	Al ₂ O ₃ .Na ₂ O.6SiO ₂	2010
Fe	Fe ₂ O ₃	2850	Basic	Al ₂ O ₃ .K ₂ O.6SiO ₂	2100
Ca	CaO	4575	Basic	FeSiO ₂	2090
Mg	MgO	5070	Basic	CaO.Fe ₂ O ₃	2280
Na	Na ₂ O	Sublimes at 2330	Basic	CaO.MgO.2SiO ₂	2535
K	K ₂ O	Decomposes at 660	Basic	CaSiO ₃	2804

2.4.1 ความสัมพันธ์ของ Base/Acid Ratio (B/A)

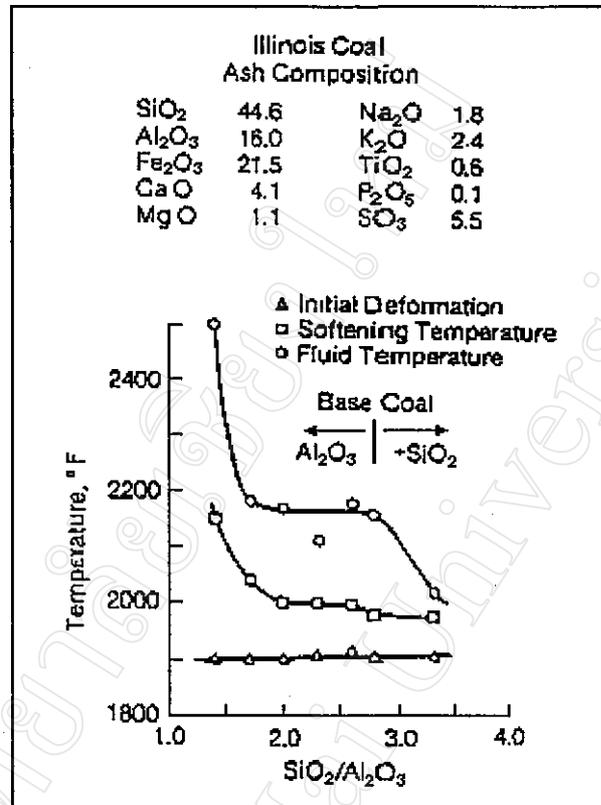
ค่า Base/Acid Ratio จะเป็นดัชนีที่สะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพของโลหะในเถ้า ที่รวมตัวกันในกระบวนการสันดาป (Combustion) ที่ทำให้ได้เกลือของธาตุที่จุดหลอมเหลวต่ำ โดย

$$\frac{B}{A} = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2}$$

เถ้าที่มีส่วนประกอบส่วนมากเป็นอลูมินัมและเหล็ก จะมีคุณสมบัติในการเกิดแอสลัคแตกต่างจากเถ้าที่มีส่วนประกอบเป็นซิลิกาและอลูมินา แต่อัตราส่วน (Ratio) ของทั้ง 2 คู่ ก็มีโอกาสที่จะเท่ากัน ในบางกรณี Base/Acid Ratio ยังมีส่วนช่วยในการสังเกตอุณหภูมิในการหลอมเหลวของเถ้า (Ash-Fusibility Temperature) พร้อมๆ กับข้อมูลอื่นๆ ในการคาดคะเนปฏิกิริยาการเกิดเถ้าในเตาเผาไหม้ เถ้าที่มี Base/Acid Ratio อยู่ในช่วง 0.4-0.7 จะมีจุดหลอมเหลวของเถ้าต่ำ และมีโอกาสเกิดแอสลัคได้สูง

2.4.2 ความสัมพันธ์ของ Silica/Alumina Ratio (SiO₂/Al₂O₃)

ค่าโดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง 0.8-4.0 Silica/Alumina Ratio จะช่วยเพิ่มข้อมูลทางด้าน การหลอมเหลวของเถ้า ค่าของทั้งคู่เป็น Acid Oxide ซึ่งเป็นออกไซด์ที่หลอมละลายได้ที่อุณหภูมิสูง ซิลิกาชอบที่จะรวมตัวกับธาตุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำมากกว่าที่จะรวมกับอะลูมินา ถ้ามีถ่านหิน 2 ชนิด มี Base/Acid Ratio เท่ากัน พวกที่มี Silica/Alumina Ratio สูงจะมีจุดหลอมเหลวละลายของเถ้าต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ผลจากการทดลองเพิ่มอะลูมินา ลงในเถ้า สารประกอบซิลิเกต (Silicate) ที่ได้จะขึ้นอยู่กับปริมาณของการเพิ่มอะลูมินา อุณหภูมิ เวลาการเกิดปฏิกิริยา และปัจจัยอื่นๆ



รูป 2.2 ความสัมพันธ์ของ Ash-fusibility temperature กับ Silica/Alumina ratio (Singer,1991)

2.4.3 ความสัมพันธ์ของ Iron/Calcium Ratio (Fe₂O₃/CaO)

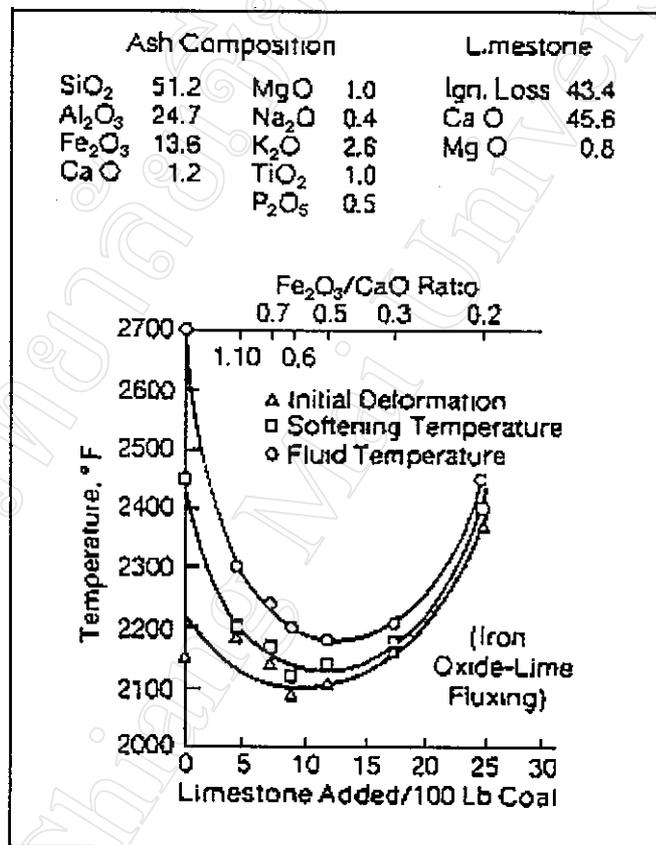
คุณสมบัติที่ช่วยในการบ่งชี้การวัดความแตกต่างของการเกิดการหลอมตัวของถ่าน (Fluxing) คือ ค่าอัตราส่วนของเหล็กและ Calcium ส่วนประกอบของ Basic Oxide ในถ่าน จะมีปริมาณเหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) และปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) มากที่สุด ดังตารางที่ 2.5 Nicholls และ Selvig ,1932 ได้ทำการศึกษาค้นคว้าความสัมพันธ์ของปริมาณเหล็กออกไซด์และปริมาณแคลเซียมออกไซด์ ที่มีผลต่อการหลอมละลายของถ่าน ได้สรุปผลไว้ดังนี้

2.4.3.1 ปริมาณเหล็กออกไซด์ที่มีน้อยกว่าร้อยละ 20 มีผลให้เกิดการหลอมละลายเพิ่มขึ้น แต่ช่วงระหว่างร้อยละ 20-40 จะไม่มีผลต่อการหลอมละลาย

2.4.3.2 ผลของการหลอมละลายของเหล็กออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ จะได้สารประกอบเชิงซ้อน และมีส่วนสัมพันธ์กันกับร้อยละของออกไซด์ทั้งสองในถ่าน ถ้านถ่านมีปริมาณเหล็กออกไซด์เกินมากกว่าร้อยละ 14 การเพิ่มปริมาณแคลเซียมออกไซด์ลงไปจะทำให้อุณหภูมิที่ถ่านกลายเป็นของไหล ต่ำลงกว่าเพิ่มปริมาณเหล็กออกไซด์ในปริมาณเท่าๆ กัน Iron/Calcium ที่มีค่าประมาณ 0.2-10 จะมีผลทำให้อุณหภูมิในการหลอมละลายของถ่านต่ำลง ดังจะเห็นได้จากการทดลองกับ Eastern U.S. Coal ตามรูปที่ 2.3

ตาราง 2.5 ความสัมพันธ์ของปริมาณเหล็กออกไซด์ที่มีต่อการหลอมละลายของถ่าน (Nicholls and Selvig ,1932)

Coal	Fe ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃ /CaO Ratio	Softening Temperature ° F
1	31.8	0.3	106.0	2360
2	24.8	2.0	12.4	2270
3	21.3	4.8	4.4	2130



รูป 2.3 ผลของการเพิ่มปริมาณแคลเซียมออกไซด์กับอุณหภูมิถ่านที่กลายเป็นของไหลของ Eastern Coal (Nicholls and Selvig ,1932)

2.4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เริ่มหลอม (Softening Temperature) ของถ่านกับการกำจัดเถ้าที่เกาะตัว ถ่านหินที่ถูกพัฒนาถึงบริเวณที่มีการดูดซับความร้อนและมีอุณหภูมิใกล้อุณหภูมิที่เริ่มหลอม จะเกิดการสะสมของเถ้าเกาะติดที่มีลักษณะรูพรุน (Porous) ยึดติดกับท่อผนังเตา ถ่านที่เกาะตัวจะหลุดออกด้วยน้ำหนักของมันหรือถูกเป่าออกโดยเครื่องเป่าถ่านจากผนังเตา ถ่านที่เกาะตัวเกิดขึ้นในบริเวณเตาที่มีอุณหภูมิสูง (High Gas Temperature) บริเวณผิวของถ่านที่เกาะตัวอาจจะมีอุณหภูมิถึงจุดหลอมเหลว แล้วไหลลงมาตามท่อผนังเตา ถ่านอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่เริ่มหลอมแล้ว

อนุภาคนั้นจะไม่รวมตัวกัน แต่จะอยู่ในรูปฝุ่น (Dust) อีกประการหนึ่ง ถ้าอนุภาคของเถ้ามาถึงบริเวณที่มีอุณหภูมิเท่าอุณหภูมิที่เริ่มหลอมและมีเวลาพอเพียงที่จะประพุดคั่วคล้ายพลาสติก (Plastic) หรือของเหลว (Liquid) แล้วเถ้าที่เกาะตัวนี้จะมีแรงยึดติดแน่นและยากที่จะกำจัดออก และจะสะสมก่อตัวมากขึ้น ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวนความร้อน เมื่อมีอุณหภูมิมิบริเวณผิวของเถ้าที่เกาะตัวสูงขึ้นจนกระทั่งอุณหภูมิที่เถ้ากลายเป็นของไหล แสลดก็จะไหลร่วงหล่นมาเอง อุณหภูมิแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนรูป (IT) และอุณหภูมิที่เถ้ากลายเป็นของไหล (FT) สามารถที่จะคาดคะเนชนิดการเกิดเถ้าเกาะตัวบนผิวท่อเตาเผาไหม้ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจาก IT ไปยัง FT มีมากขึ้นแสลดที่เกิดขึ้นก็จะมามากขึ้นก่อนที่เถ้าที่เกาะจะกลายเป็นของไหล และไหลเอี่ยมทำให้แรงยึดระหว่างเถ้าและผิวท่อน้อย จะส่งผลคือคือการเป่าออก (Soot Blowing)

2.4.5 ค่า Fouling Index (R_f) :

เป็นค่าที่บ่งบอกผลการเผาไหม้ที่ก่อให้เกิดเถ้าและการกัดกร่อนอื่นๆ เป็นผลทำให้เกิดการเกาะตัวของเถ้าบนผนังท่ออย่างน้อยเพียงใด โดยค่า Fouling Index คำนวณจากปริมาณ Na_2O คูณกับอัตราส่วนของ $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ กับ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ โดยมีรูปสมการดังนี้

$$R_f = \text{Na}_2\text{O} \left(\frac{\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2} \right)$$

โดยกำหนดชนิดของปริมาณการเกาะตัวของเถ้าดังนี้

Fouling Type	Fouling Index (R_f)
น้อย (Low)	น้อยกว่า 0.2
ปานกลาง (Medium)	0.2 – 0.5
สูง (High)	0.5 – 1.0
รุนแรง (Severe)	มากกว่า 1.0

2.4.6 ปริมาณ Total Alkalies : ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)

Alkalies ที่อยู่ในเถ้า จะเป็นตัวทำให้อุณหภูมิการหลอมตัวของเถ้าต่ำ สารประกอบพวกโซเดียมจะมีอุณหภูมิการหลอมตัวต่ำกว่า $900\text{ }^\circ\text{C}$ ($1650\text{ }^\circ\text{F}$) ถ้าเถ้ามี Alkalies สูงจะทำให้มีเถ้าหลอมละลาย และเกาะตัวแน่นบนผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

2.5 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ในหม้อกำเนิดไอน้ำ (Steam Generator) จะถ่ายเทไปให้น้ำและไอน้ำ โดยการผ่านท่อที่ประกอบเป็นผนังเตา การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น จะมีทั้ง 3 แบบคือ การแผ่รังสี (Radiation) การนำความร้อน (Conduction) และการพาความร้อน (Convection)

2.5.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี (Radiation Heat Transfer), q_r : รังสีความร้อนที่แผ่ออกไป จะเป็นคลื่น จากสิ่งที่ย้อนไปยังสิ่งที่ยื่นกว่า ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทโดยการแผ่รังสีขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิแตกต่าง

ระหว่างถึงสองสิ่ง ข้อสำคัญของการแผ่รังสี คือตัวรับความร้อนอยู่ในแนวเดียวกับตัวให้ความร้อน (Line of Sight) ทั้งนี้ เพราะรังสีไม่สามารถโค้งงอได้ การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี จะเกิดได้ทั้งจากวัตถุเรืองแสงและไม่เรืองแสง (Luminous and Non-Luminous) เช่น ถ้ามองเห็นเปลวไฟ หรือแสงแดง,ขาวจากวัตถุ จะถือเป็นแบบ Luminous ก๊าซร้อน (Hot Gas) ซึ่งมองไม่เห็นเปลวไฟ จะถือเป็นแบบ Non-Luminous อัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนสุทธิจากการแผ่รังสีจากห้องเผาไหม้ไปยังผนังเตา สามารถหาได้จากกฎของสเตฟาน-โบลทซ์มันน์ (Stefan-Boltzmann Law) ดังนี้

$$q_r = \sigma A \epsilon (T_g^4 - T_w^4) \quad (2.1)$$

เมื่อ σ คือ ค่าคงที่สเตฟาน-โบลทซ์มันน์ (Stefan - Boltzmann Constant) มีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ ϵ คือ การแผ่รังสี (Emissivity) ของเปลวไฟไปยังพื้นที่รับความร้อน A คือ พื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อน (m^2) T_g, T_w คือ อุณหภูมิของก๊าซร้อน และที่ผิววัตถุรับความร้อน, (K) ในการแก้ปัญหาการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีเกิดขึ้นพร้อม ๆ กับการถ่ายเทความร้อนแบบอื่น ๆ การแก้ปัญหาลังกล่าว จะสามารถทำให้ง่ายขึ้น โดยการนำค่าความต้านทานความร้อนของการแผ่รังสี R_r มาใช้ จะได้สมการการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี ดังนี้

$$q_r = \frac{T_g - T_w}{R_r} \quad (2.2)$$

เมื่อ $R_r =$ ค่าความต้านทานความร้อนของการแผ่รังสี
 $= (1/h_r A)$

โดยที่ h_r คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี (Radiative Heat Transfer Coefficient)

2.5.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ (Conduction Heat Transfer), q_k : การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ หรือการนำความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยวิธีเดียว ที่เกิดขึ้นในวัตถุที่เป็นตัวกลางที่บดบังแสง เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ โดยอาศัยกฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ (Fourier's Law of Conduction) เขียนได้ดังนี้

$$q_k = \frac{kA}{X} (T_H - T_L) \quad (2.3)$$

เมื่อ k คือ ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity), ($\text{W/m} \cdot \text{K}$) A คือ พื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อน (m^2) X คือ ความหนาของผนังนำความร้อน, (m) T_H คือ อุณหภูมิของผนังด้านที่ร้อน (Hot Face) ที่ $X = 0$, (K) T_L คือ อุณหภูมิของผนังด้านที่เย็น (Cold Face) ที่ $X = L$, (K) ในหม้อกำเนิดไอน้ำ (Boiler) ผนังเตาจะเป็นท่อทรงกระบอก (Cylinder) ดังนั้นสมการการนำความร้อน สามารถเขียนได้เป็นสมการ ดังนี้

$$q_k = \frac{(T_H - T_L)}{\frac{1}{2 \pi k l} \ln \left(\frac{d_o}{d_i} \right)} \quad (2.4)$$

เมื่อ l คือ ความยาวของรูปทรงกระบอก, (m) d_i คือ เส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อ (Inside Diameter), (m) d_o คือ เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกท่อ (Outside Diameter), (m)

2.5.3 การถ่ายเทความร้อน โดยการพา (Convection Heat Transfer), q_c :

เมื่อของไหล (Fluid) สัมผัสกับผิววัตถุที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน ก็จะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนระหว่างของไหลกับวัตถุ ขบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า การถ่ายเทความร้อนโดยการพา หรือการพาความร้อน ในการออกแบบหม้อไอน้ำ จะมั่นใจว่าของไหลจะมีการผสมกันอย่างดี (Well Mixed) และมีค่า เรย์โนลด์สจำนวน (Reynolds Number = Re) มากกว่า 2000 เมื่ออาศัยกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's Law of Cooling) จะสามารถเขียนสมการการถ่ายเทความร้อนโดยการพา ได้ดังนี้

$$q_c = h_c A (T_b - T_w) \quad (2.5)$$

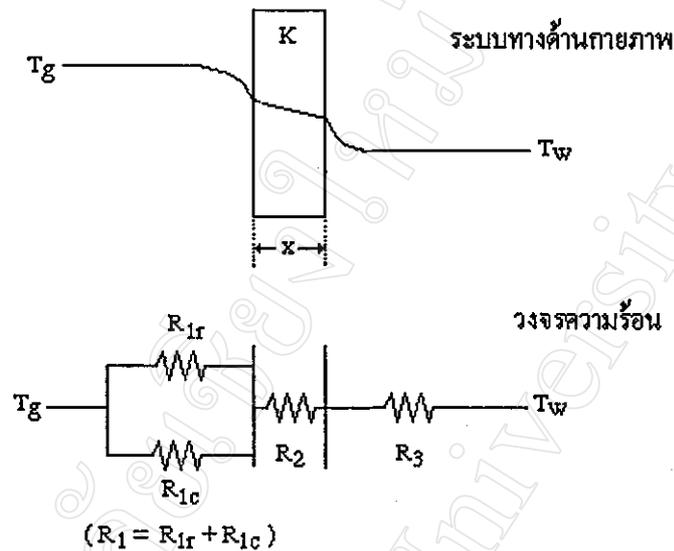
เมื่อ h_c คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพา (Coefficient of Convection Heat Transfer), (W/m^2K) A คือ พื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อน, (m^2) T_b คือ อุณหภูมิของของไหล (Bulk Temperature), (K) T_w คือ อุณหภูมิที่ผิววัตถุรับความร้อน, (K)

2.5.4 การถ่ายเทความร้อนแบบรวม (Combined Heat Transfer) :

ในระบบจริงนั้น ความร้อนจะไหลผ่านชั้นต่าง ๆ ของวัตถุ ที่ต่อความต้านทานแบบอนุกรมและมักจะมีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นพร้อม ๆ กันทั้งสองแบบ ดังรูปที่ 2.4 โดยความร้อนจะไหลจาก อุณหภูมิ T_g ผ่านวัตถุหนา X ไปยังอุณหภูมิ T_w เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว จะได้อัตราการถ่ายเทความร้อน q ตามสมการที่ 2.6

$$q = \frac{T_g - T_w}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{\Delta T}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (2.6)$$

โดยที่ T_g, T_w คือ อุณหภูมิของก๊าซร้อน และอุณหภูมิของของไหลในท่อ, (K, °C) R_1, R_2, R_3 คือค่าความต้านทานความร้อนด้านก๊าซร้อน ค่าความต้านทานความร้อนของวัตถุหรือท่อ และค่าความต้านทานความร้อนของของไหลในท่อ, (K/kW)



รูป 2.4 วงจรรความร้อนของการถ่ายเทความร้อนแบบรวม

อัตราการถ่ายเทความร้อนในสมการที่ 2.6 นั้นอยู่ในเทอมความแตกต่างของอุณหภูมิ และคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนของแต่ละหน้าตัด ที่อยู่ในเส้นทางการเคลื่อนที่ของความร้อน เราสามารถดัดแปลงสมการดังกล่าวใหม่ ด้วยการรวมความต้านทานความร้อนแต่ละตัวเข้าด้วยกัน จะได้สมการที่ 2.7

$$q = UA \Delta T \quad (2.7)$$

$$\text{เมื่อ} \quad UA = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{1}{R_t}$$

และ U คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall Heat Transfer Coefficient)

ในการออกแบบและการวางท่อในหม้อกำเนิดไอน้ำนั้น ทางวิศวกรจะพิจารณาถึงค่าความต้านทานความร้อน ตลอดทางที่ความร้อนไหลผ่าน เช่น Gas Films, Water/Steam Films, ความหนาและชนิดโลหะของท่อ และในบางครั้งอาจพิจารณาถึงผิวความสกปรกที่อยู่บนผิวท่อด้วย ซึ่งค่าความต้านทานความร้อนของผิวท่อที่สกปรกนั้นอาจได้จากประสบการณ์ หรือข้อมูลจากการทดลอง หรือบางทีจะต้องพิจารณาถึงค่า Effectiveness Factor ของพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนด้วย ในการเลือกชนิดโลหะและความหนาของท่อนั้นจะพิจารณาจากค่าความดัน (Pressure) และอุณหภูมิ (Temperature) ของการใช้งาน รวมถึงค่าความต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion Resistance) ด้วย ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall Heat Transfer Coefficient) จึงต้องพิจารณาจากค่าความต้านทานความร้อนของผนังท่อ และความหนาของท่อ รวมถึงค่าความสกปรกบนผิวท่อตาม

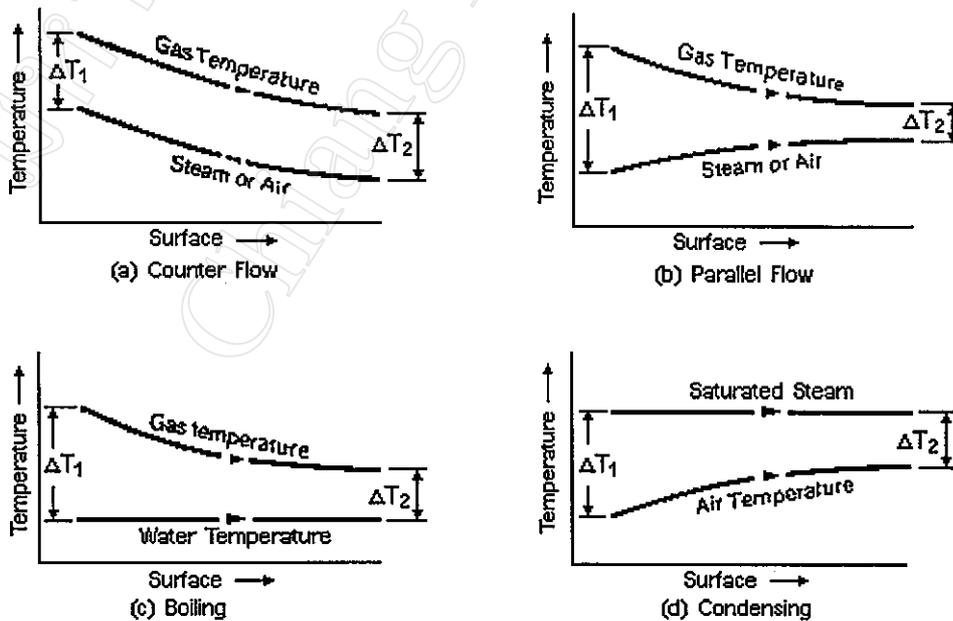
ที่กล่าวมา จึงสามารถเขียนเป็นสมการการถ่ายเทความร้อน ผ่านผิวต่าง ๆ และผนังที่ออกจากความร้อนไปยังไอน้ำได้จากสมการ ดังนี้

$$Q = UA \Delta T_m \tag{2.8}$$

โดยค่า ΔT_m (Logarithmic Mean Temperature Difference) หาได้จากสมการ

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \tag{2.9}$$

ในการออกแบบการวางพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนในหม้อกำเนิดไอน้ำนั้น ส่วนใหญ่จะออกแบบให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนของก๊าซร้อนกับไอน้ำ อยู่ 2 แบบ คือ แบบ Parallel Flow และ Counter Flow ค่า ΔT_m ของ Parallel Flow จะต่ำกว่าแบบ Counter Flow ดังนั้น จึงต้องออกแบบให้มีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนมากกว่า แต่อย่างไรก็ตาม พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Parallel Flow จะทำให้ได้ค่าอุณหภูมิของผิวท่อ (Metal Temperature) ต่ำกว่าแบบ Counter Flow จึงพิจารณาเลือกใช้เกรดโลหะต่ำกว่าได้ แต่บางครั้งจะแยกรูปแบบการแลกเปลี่ยนความร้อนออกเป็นแบบ Counter Flow, Parallel Flow, Boiling และ Condensing ดังรูปที่ 2.5



รูป 2.5 รูปแบบการแลกเปลี่ยนความร้อน (Singer, 1991)

2.6 ผลกระทบจากสิ่งสกปรก (Effects of Fouling) (Agrawal and Kakac, 1991)

สิ่งสกปรกสามารถแบ่งแยกออกเป็นชนิดต่างๆ ได้หลายชนิด แล้วแต่แนวทางที่นำมาพิจารณาในการแบ่งแยก แนวทางที่นำมาแบ่งแยกนั้น มีอยู่ด้วยกันหลายแบบ เช่น ชนิดของอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อน (Boiling, Condensation), ชนิดของของไหล (Liquid, Gas) และชนิดของอุปกรณ์ใช้งาน (Refrigeration, Power Generation) อย่างไรก็ตามได้มีวิวัฒนาการในการแยกชนิดของสิ่งสกปรกโดยใช้หลักการทางวิทยาศาสตร์ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการทำนายกระบวนการเกิดสิ่งสกปรก การแยกชนิดของสิ่งสกปรกโดย Epstein, 1983 ได้เป็นที่ยอมรับแพร่หลาย ซึ่งได้จัดแบ่งสิ่งสกปรกออกเป็นชนิดต่างๆ ดังนี้ Particulate, Crystallization, Corrosion, Biofouling และ Chemical Reaction โดยแต่ละชนิดมีรายละเอียดดังนี้

2.6.1 Particulate Fouling เป็นสิ่งสกปรกที่เกิดจากอนุภาคของแข็งที่แขวนลอยอยู่ในของไหลไปเกาะสะสมบนพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ตัวอย่างเช่น ในเครื่องกำเนิดไอน้ำจะเกิด Particulate Fouling เมื่อมี Unburnt Fuel หรือ Ashes ถูกพัดพามาในกาชเผาไหม้ ใน Air Cooled Condensers จะพบสิ่งสกปรกประเภทนี้บ่อย เนื่องจากมีการสะสมจากฝุ่นผงในอากาศ ขนาดและรูปร่างของอนุภาค จะมีขนาดตั้งแต่ต่ำกว่าไมโครเมตร จนถึงขนาดประมาณ 2-3 มิลลิเมตร Particulate Fouling ที่พบได้แก่ Sand, Muds, Corrosion Debris, Dust ในกาชร้อน รวมถึงเถ้าในกาชที่เกิดการเผาไหม้

2.6.2 Crystallization Fouling เป็นสิ่งสกปรกที่เกิดจากการตกผลึก จากสารละลายประเภทเกลือ (Dissolved Inorganic Salts) ในกระบวนการของของไหล ซึ่งอยู่เหนือจุดอิ่มตัว (Supersaturation) ตลอดกระบวนการทางความร้อน (Heating) และความเย็น (Cooling) ในระบบ Cooling Water System มักจะเกิด Crystallization Fouling เนื่องจากในสารละลายเกลือจะมีพวก Calcium, Magnesium Carbonates, Silicates และ Phosphates ผสมอยู่สิ่งสกปรกพวกนี้จะตกตะกอนในน้ำหล่อเย็น แล้วถูกพัดพาไปที่คอนเดนเซอร์ ก่อให้เกิดปัญหาขึ้น เป็นต้น

2.6.3 Corrosion Fouling เป็นสิ่งสกปรกที่เกิดจากการกัดกร่อน พวกของไหลประเภท Corrosive Fluid มักจะทำให้พื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเกิดการกัดกร่อน เช่น สารไม่มีบริสุทธิในเชื้อเพลิงพวก Alkali Metals, Sulfur และ Vanadium สามารถทำให้เกิดการกัดกร่อนในหม้อกำเนิดไอน้ำที่ใช้ น้ำมัน (Oil Fire Boilers) อนุภาคที่ออกมาจากการกัดกร่อน มักจะก่อให้เกิดปัญหาทางด้านที่เป็นของเหลว อนุภาคจากการกัดกร่อน จะถูกพัดพาไปยังชิ้นส่วนต่างในระบบ และก่อให้เกิดปัญหาขึ้น

2.6.4 Biofouling เป็นสิ่งสกปรกที่เกิดจากการก่อตัวหรือการเพิ่มขึ้นของพวกสิ่งมีชีวิต ในพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อน Biofouling เหล่านี้ประกอบด้วยพวก Microorganisms เช่น Bacteria, Algae และ Molds ผลที่ได้จากสิ่งดังกล่าวนี้ เรียกว่า Microbial Fouling โรงไฟฟ้าที่ใช้น้ำทะเลในการหล่อเย็น มักจะพบว่าเกิดพวก Biofouling ในคอนเดนเซอร์

2.6.5 Chemical Reaction Fouling เป็นสิ่งสกปรกที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมี โดยปราศจากกระบวนการของของไหล จะแตกต่างจาก Corrosion Fouling พื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนจะไม่มีส่วนร่วมในการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี แต่บางทีอาจจะเป็นเพียงตัว Catalyst ตัวอย่างเช่น การเกิด Polymerization, Cracking และ Coking ของพวกไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbons)

กระบวนการพื้นฐานในการเกาะตัวของสิ่งสกปรกจะมีขั้นตอนการเกิด 5 ขั้นตอน ซึ่งอธิบายรายละเอียดโดย Epstein, 1983 ดังนี้

- ขั้นเริ่มต้น (Initiation) ในขั้นเริ่มต้นนี้ สภาวะของพื้นที่ผิว จะมีผลต่อการเกิดสิ่งสกปรก เช่น ค่าอุณหภูมิพื้นผิว ชนิดของโลหะ ความละเอียดและความหยาบ รวมถึงความแข็งแรงของสารเคลือบผิว ซึ่งจะมีอิทธิพลต่อระยะเวลาการก่อตัวของสิ่งสกปรก ยกตัวอย่างเช่น การเกิด Crystallization Fouling จะมีแนวโน้มในการเกิดลดลง เมื่ออุณหภูมิเหนือจุดอิ่มตัวเพิ่มขึ้น โดยจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิของพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อน สำหรับ Chemical Reaction Fouling ระยะเวลาจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากมีความเร่งของตัวเหนี่ยวนำขั้น (Induction)

- การเคลื่อนย้าย (Transport) ในขั้นนี้สารที่เป็นสิ่งสกปรกจากของเหลว (Bulk Fluid) จะถูกเคลื่อนย้ายไปยังพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อน การเคลื่อนย้ายจะสำเร็จได้ต้องอาศัยปรากฏการณ์ อันประกอบด้วยการแพร่ (Diffusion), การตกตะกอน (Sedimentation) และ การเคลื่อนตัวเนื่องจากความร้อน (Thermophoresis) ความแตกต่างของความเข้มข้นของของเหลว (Bulk Fluid) C_b ที่อยู่ใกล้เคียงกัน เข้าไปจนถึงความเข้มข้นที่อยู่ใกล้ผิวแลกเปลี่ยนความร้อน C_s จะเป็นผลให้เกิดการเคลื่อนย้าย โดยการแพร่ ค่าการสะสมตัว (Local Deposition Flux) m_d สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$m_d = h_p (C_b - C_s) \quad (2.10)$$

เมื่อ h_p = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทของมวลโดยการพา (Convective Mass Transfer Coefficient) โดยที่ h_p จะอยู่ในรูปของ Sherwood Number ($Sh = h_p d/D$) นั่นคือ h_p จะขึ้นกับตัวแปร อัตราการไหล และรูปร่างทางเรขาคณิต ในกรณีของการตกตะกอนนั้น จะอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity) โดยที่อนุภาคขนาดใหญ่ในของเหลว จะตกตะกอนที่ความเร็วของเหลวต่ำๆ ส่วนการเคลื่อนที่เนื่องจากความร้อน จะเป็นการเคลื่อนตัวของอนุภาค ที่มีขนาดเล็ก ตั้งแต่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง $5 \mu\text{M}$ ลงไปจนถึงขนาด $0.1 \mu\text{M}$ โดยจะขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิของของไหลขณะนั้น ผิวของผนังที่เย็นจะสัมพันธ์กับอนุภาคที่เหลวคล้ายวุ้น ส่วนผนังที่ร้อนจะผลักอนุภาคนั้นออกไป

- การเกาะติด (Attachment) ชิ้นส่วนของสิ่งสกปรกจะถูกให้เคลื่อนตัวไปเกาะติดที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อน กระบวนการเกาะติดจะไม่มีค่านอน แต่พอมีหลักการที่จะนำมาอธิบาย โดยใช้ความสามารถในการยึดเกาะ (Degree of Adherence) แรงที่กระทำบนอนุภาคที่จะทำให้เกิดการเกาะติดบนพื้นที่ผิว ก็เป็นสิ่งสำคัญที่จะนำมาพิจารณาด้วย นอกจากนั้นยังขึ้นกับคุณสมบัติของโลหะ ความหนาแน่น ขนาด และสภาวะของพื้นผิว

- การกำจัดออก (Removal) อนุภาคที่เป็นสิ่งสกปรกบางตัวจะหลุดออกจากพื้นผิวทันทีทันใด หลังจากที่มีการเกาะตัว แต่บางตัวก็จะหลุดเข้าไป โดยทั่วไปค่าแรงเฉือน (Shear Forces) ที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นที่ผิวของของไหล กับชิ้นของสิ่งสกปรกที่เกาะตัว จะถูกนำมาพิจารณาถึงการถูกกำจัดออกของ Fouling ค่าแรงเฉือนจะขึ้นอยู่กับความเร็วที่สัมผัสบนพื้นที่ผิว ความหนืดของของไหล และความหยาบของพื้นที่ผิว กระบวนการของการกำจัดออกที่เห็นได้ชัด ได้แก่ การถูกละลาย (Dissolution), การสึกกร่อน (Erosion) และ การหลุดไปของเนื้อโลหะ (Spalling)

- การก่อตัวขึ้น (Aging) จะมีอนุภาคบางตัวของสิ่งสกปรกเท่านั้น ที่เกาะตัวอยู่บนพื้นที่ผิว และเพิ่มปริมาณมากขึ้น และคุณสมบัติทางกลของอนุภาคดังกล่าว สามารถเปลี่ยนแปลงไปได้ตลอดเวลา เนื่องจากมีการเปลี่ยนโครงสร้างของผลึก (Crystal) และโครงสร้างทางเคมี

เมื่อมีสิ่งสกปรกเกิดสะสมตัวขึ้นบริเวณผนังท่อในหม้อกำเนิดไอน้ำ ซึ่งเป็นสิ่งไม่พึงปรารถนาของผิวแลกเปลี่ยนความร้อน โดยจะมีผลทำให้ไปเพิ่มค่าความต้านทานความร้อนและทำให้ความดันของกาซร้อนลดลง (Pressure Drop) การวิเคราะห์ทางความร้อนเมื่อมีสิ่งสกปรกหรือเถ้าในหม้อกำเนิดไอน้ำ จะพิจารณาจากอัตราการเปลี่ยนแปลง การถ่ายเทความร้อนจากสมการ

$$Q = UA\Delta T = \frac{\Delta T}{R_t} = \frac{T_g - T_w}{R_t} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } R_t &= \text{ค่าความต้านทานความร้อนรวม} \\ &= R_{\text{gas}} + R_{\text{deposit}} + R_{\text{wall}} + R_{\text{water,steam}} \end{aligned}$$

กรณีที่ผนังท่อสะอาดจะได้สมการเป็น

$$Q_c = \frac{\Delta T}{R_{t,c}} \quad (2.12)$$

$$\text{เมื่อ } R_{t,c} = R_{\text{gas}} + R_{\text{wall}} + R_{\text{water,steam}}$$

และเมื่อผนังท่อมมีเถ้าหรือสิ่งสกปรกสะสมอยู่จะได้สมการเป็น

$$Q_f = \frac{\Delta T}{R_{t,f}} \quad (2.13)$$

$$\text{เมื่อ } R_{t,f} = R_{\text{gas}} + R_{\text{deposit}} + R_{\text{wall}} + R_{\text{water,steam}}$$

ถ้าเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนขณะที่มีเถ้า (Ash Deposit) สะสมตัวขึ้นกับสภาวะที่ท่อสะอาด เรียกว่า Fouling Factor (FF) นั่นคือ

$$FF = \frac{Q_c}{Q_f} \quad (2.14)$$

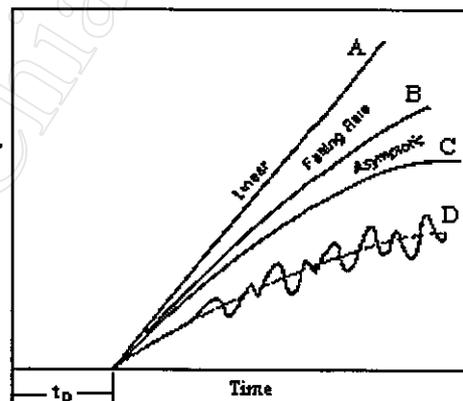
2.7 รูปแบบการสะสมตัวของเถ้าบนผนังท่อ (Agrawal and Kakac, 1991)

การหารูปแบบของการเกิดเถ้าสะสมตัวบนผนังท่อในหม้อกำเนิดไอน้ำ ว่ามีการเกาะตัวมากน้อยเท่าไร มีลักษณะเป็นอย่างไร จะเริ่มพิจารณาตั้งแต่ที่ผิวท่อสะอาด เมื่อเวลาผ่านไปจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร ค่าผลรวมทั้งหมดของกระบวนการเกิดสิ่งสกปรก ก็คือ การเกาะสะสมตัวสุทธิของสิ่งสกปรกบนพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ความหนาของสิ่งสกปรกจะขึ้นอยู่กับเวลา ในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จะพิจารณาให้ค่าความต้านทานความร้อนของสิ่งสกปรกมีค่าคงที่ และพิจารณาในช่วงสภาวะตั้งแต่ผิวสะอาดจนถึงสกปรก โดยขึ้นอยู่กับแนวความคิดที่ว่า การเปลี่ยนแปลงของ อัตราการเกาะตัวของสิ่งสกปรก (Deposition Rate, ϕ_d) กับ อัตราการหลุดร่วง (Removal Rate, ϕ_r) ของเถ้าหรือสิ่งสกปรก (Deposit) ซึ่งจะเขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{dR_f}{dt} = \phi_d - \phi_r \quad (2.15)$$

รูปแบบพื้นฐานในการเกิดสิ่งสกปรกทั้งหมดนั้น ได้มาจากรูปแบบที่ง่ายๆ ภายใต้สมมุติฐาน (Pinheiro, 1981) ดังนี้

- มีชนิดของสิ่งสกปรกเกิดขึ้นเพียงชนิดเดียว
- ตลอดชั้นความหนาของสิ่งสกปรกถือว่ามีลักษณะคล้ายกันหมด (Homogeneous)
- ความหยาบ ขรุขระ ของสิ่งสกปรกสามารถตัดทิ้งได้ ไม่นำมาพิจารณา
- ไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของของไหล
- ค่าสภาวะเริ่มต้นของพื้นที่ผิว จะไม่นำมาพิจารณา



รูป 2.6 รูปแบบการเกาะสะสมตัวของ Fouling (Agrawal and Kakac, 1991)

อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าไม่มีรูปแบบใดที่ถือเป็นมาตรฐานรวมได้ทุกสภาวะของตัวแปร ที่มีผลต่อการเกิดสิ่งสกปรก แต่ก็มีมีการพิจารณาถึงรูปแบบการเกิดสิ่งสกปรกเมื่อกำหนดให้ตัวแปรที่สำคัญมีการเปลี่ยนแปลงไป

ตัวแปรที่สำคัญ ได้แก่ เวลา(Time), ความเร็ว (Velocity), อุณหภูมิ (Temperature) และ ความเข้มข้นของของไหล (Concentration) นอกจากนั้นยังมีตัวแปรอื่นที่มีการนำมาพิจารณา เช่น ชนิดและสถานะของพื้นที่ผิว คุณสมบัติของของไหลประเภทของกระบวนการเกิด การออกแบบอุปกรณ์ และสถานะการเปลี่ยนแปลงในการเดินเครื่องเกี่ยวกับค่าตัวแปรที่กล่าวมา จะถูกกำหนดหลังจากเกิดปรากฏการณ์ขึ้นอย่างสมบูรณ์ ตลอดช่วงเวลาในการเกิดสิ่งสกปรกตั้งแต่ยังไม่มีการเกิดอะไรขึ้น จนถึงเกิดมีตัวแปรอื่นๆมากมาย ที่เข้ามามีส่วนในการเกิดสิ่งสกปรก โดยทั่วไปรูปแบบของการเกาะตัวของสิ่งสกปรกบนผนังท่อจะมีด้วยกัน 4 แบบ คือ แบบ Linear, แบบ Falling Rate, แบบ Asymptotic, แบบ Sawtooth Configuration รูปแบบทั้งหมดจะเป็นฟังก์ชันกับเวลา ตามที่แสดงในรูปที่ 2.6 ถ้าอัตราการเกาะสะสมตัว (Deposition Rate) มีค่าคงที่ และอัตราการหลุดร่วง (Removal Rate) มีค่าเล็กน้อยสามารถตัดทิ้งไปได้ หรือ ถ้าความแตกต่างระหว่างอัตราการเกาะสะสมตัวกับอัตราการหลุดร่วงมีค่าคงที่ รูปแบบของ Fouling-Time จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง ดังแสดงใน กราฟ Curve A จะเรียกว่าเป็น Linear Fouling จะใช้อธิบายสิ่งสกปรกประเภท เหนียว (Tough), แข็ง (Hard), เกาะยึดแน่น (Adherent) ในกรณีนี้สิ่งสกปรกจะเกาะตัวมากขึ้นตลอดเวลา จนกว่าจะได้รับการทำความสะอาด ในกรณีที่อัตราการเกาะสะสมตัวมีค่าคงที่ และอัตราการหลุดร่วงมีค่าน้อยมาก สามารถตัดทิ้งได้นั้น เมื่อทำการ Integrated สมการที่ 2.15 จะได้ผลดังสมการที่ 2.16

$$R_f = \phi_d \cdot t \quad (2.16)$$

สมการที่ 2.16 ถูกพัฒนาโดย Mc Cabe และ Robinson, 1924 โดยถือว่าเป็นรูปแบบง่ายๆ ที่นำมาใช้อธิบายการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว ส่วนรูปแบบที่ใช้อธิบายการเกาะตัวของสิ่งสกปรกอย่างกว้างขวาง คือ Asymptotic Fouling ดังแสดงในกราฟรูปแบบ C จะเกิดกรณีดังกล่าว เมื่ออัตราการเกาะสะสมตัว มีค่าคงที่ และอัตราการหลุดร่วง เป็นสัดส่วนกับขนาดชั้นความหนาของสิ่งสกปรก และถือว่าแรงเสียดทานระหว่างชั้น มีค่าลดลงตามเวลา และถือว่ากระบวนการระหว่างชั้นมีค่าน้อยไม่นำมาพิจารณา สมมติให้ฟังก์ชันของอัตราการหลุดร่วง (ϕ_r) เป็นสัดส่วนกับค่าความต้านทานความร้อนของสิ่งสกปรก หรือ Fouling Resistance ($\phi_r = bR_f$) และฟังก์ชันการเกาะสะสมตัว (Deposition) มีค่าคงที่ ($\phi_d = a$) ดังนั้นสมการที่ 2.15 จะเขียนได้ใหม่ดังสมการที่ 2.17 ดังนี้

$$\frac{dR_f}{dt} = a - bR_f \quad (2.17)$$

เมื่อ a, b เป็นค่าคงที่ (Constant) สมการดังกล่าว ถูกพัฒนามาจาก Kern และ Seaton, 1959 สมการที่ 2.17 อาจจัดรูปเพื่อให้ได้ค่า Fouling Resistance ดังสมการที่ 2.18 ดังนี้

$$R_f = R_f^* (1 - e^{-t/\theta}) \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } R_f^* &= \text{Asymptotic Fouling Factor} \\ &= a/b \end{aligned}$$

$$\theta = \text{Time Constant} = 1/b$$

จากสมการที่ 2.18 จะใช้ประมาณการเกิด Asymptotic Fouling ในส่วน Falling-Rate Fouling จะแสดงในกราฟรูปแบบ B เส้นกราฟจะอยู่ระหว่างกราฟ Linear Fouling กับ Asymptotic Fouling ในกรณีนี้จะเกิดขึ้นได้เมื่ออัตราการเกาะสะสมตัว เป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาของสิ่งสกปรก และในกรณีที่สภาวะการเดินเครื่องมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา จะได้ผลการเกิดการเกาะตัวของสิ่งสกปรก ดังแสดงในกราฟรูปแบบ D ซึ่งเรียกว่ารูปแบบฟันเลื่อย (Saw Tooth Configuration) กรณีดังกล่าวมักเกิดขึ้นใน Cooling Tower Water จำนวนรูปแบบของ Semiempirical Models ได้ถูกพัฒนามาเป็นเวลาหลายปี เพื่อนำมาอธิบายถึงพฤติกรรมการเกาะตัวของสิ่งสกปรกในปัจจุบันได้มีการวิจัยเพื่อหารูปแบบต่างๆ โดย Epstein , 1983 ซึ่งได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการเกาะสะสมตัว (Deposition Rate), อัตราการหลุดร่วง (Removal Rate) และผลการเกิด Asymptotic Fouling เทียบกับตัวแปรแต่ละตัว ดังแสดงในตารางที่ 2.6 จากตารางจะเห็นว่า ตัวแปรความเร็ว (Velocity) เป็นตัวแปรเดียวที่ไปลดการเกิด Asymptotic Fouling

ตาราง 2.6 ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อรูปแบบการเกิด Asymptotic Fouling
(Agrawal and Kakac, 1991)

Parameter Increased	Deposit Rate	Removal Rate	Asymptotic Fouling
Stickiness	Increases	Decreases	Increases
Surface Temperature	Increases	Questionable	Increases
Toughness	Questionable	Decreases	Increases
Roughness	Increases (?)	Increases	Questionable
In-situ Corrosion	Increases	Questionable	Increases
Ex-situ Corrosion	Increases	Questionable	Increases
Velocity	Decreases	Increases	Decreases