

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยในอดีต

ถ่านหิน

ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงธรรมชาติ ที่เกิดจากการรวมตัวทับถมของซากพืชและสิ่งมีชีวิต เป็นเวลานานนับล้านปีภายใต้การเปลี่ยนแปลงของเปลือกโลกและกระบวนการทางเคมี คุณภาพของถ่านหินจึงแตกต่างกันตามระยะเวลาในการเกิด เมื่อแบ่งศักดิ์ของถ่านหิน (rank) ตามคุณภาพ ถ่านหินจากต่ำถึงสูง โดยคิดจากร้อยละโดยน้ำหนักคาร์บอนคงตัวหรือค่าความร้อนตามวิธีมาตรฐาน ASTM D388 ที่นิยมกันดังแสดงในตารางที่ 2.1 ได้ 4 ชั้นคือ

ก. ลิกไนต์ (lignite) ถ่านหินคุณภาพต่ำสุด เปลี่ยนแปลงมาจากพีท ให้ความร้อนสูงกว่าถ่านไม้และคว้าน้อยกว่าพีท บางครั้งเรียกว่า ถ่านหินสีน้ำตาล (brown coal)

ข. ซับบิทูมินัส (subbituminous) ให้ความร้อนสูงกว่าลิกไนต์ นิยมแปรสภาพเป็นเชื้อเพลิงเหลว หรือ แก๊ส

ค. บิทูมินัส (bituminous) เป็นถ่านหินเนื้อแน่น แข็ง และมันวาว เปราะ เมื่อเผาไหม้ให้คว้าน้อย และความร้อนสูงมาก

ง. แอนทราไซต์ (anthracite) เป็นถ่านหินคุณภาพดีที่สุด มีความแข็งมาก ดำสนิท เป็นมันวาวติดไฟยาก แต่ให้ความร้อนสูงมาก เผาไหม้ได้นาน

โครงสร้างถ่านหิน

ถ่านหินโดยทั่วไปประกอบด้วยธาตุคาร์บอนเป็นแกนหลัก ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการให้พลังงาน โดยมีธาตุไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และกำมะถัน เป็นส่วนประกอบร่วม เรียกส่วนนี้ว่า maceral นอกจากนี้ยังมี ซิลิกอน แคลเซียม เหล็ก อลูมิเนียม แมกนีเซียม และอนินทรีย์สารอื่นๆ รวมกันเป็นส่วนของ mineral matter ปะปนในเนื้อถ่านหิน เมื่อถ่านหินเผาไหม้ ส่วน maceral ให้ความร้อนและแก๊สออกมา ส่วนของ mineral matter คงเหลืออยู่กลายเป็นเถ้า โมเลกุลสมมุติของถ่านหินตามความเข้าใจของนักวิทยาศาสตร์แสดงในรูปที่ 2.1 เป็นโมเลกุลขนาดใหญ่มีน้ำหนักโมเลกุลมาก ภายในโครงสร้างประกอบด้วยวงแหวนอะโรมาติก

Class/Group	Fixed carbon limits (Dry, Mineral-Matter-Free Basis), %		Volatile matter limits (Dry, Mineral-Matter-Free Basis), %		Gross Calorific value limits (Moist ^B , (Mineral-Matter-Free Basis)				Agglomerating Character
	Equal or Greater than	Less than	Greater than	Equal or Less than	Btu/lb		Mj/kg ^C		
					Equal or Greater than	Less than	Equal or Greater than	Less than	
I. Anthracitic:									
Meta-anthracite	98	...	...	2	...	...	...	...
Anthracite	92	98	2	8	...	...	...	...	nonagglomerating
Semianthracite ^D	86	92	8	14	...	...	...	...
II. Bituminous:									
Low volatile bituminous coal	78	86	14	22	...	...	...	...
Medium volatile bituminous coal	69	78	22	31	...	...	...	...
High volatile A bituminous coal	...	69	31	...	14 000 ^E	...	32.6	...	commonly
High volatile B bituminous coal	...	...	...	...	13 000 ^E	14 000	30.2	32.6	agglomerating ^F
High volatile C bituminous coal	...	...	...	...	11 500	13 000	26.7	30.2	
					10 500	11 500	24.4	26.7	agglomerating
III. Subbituminous:									
Subbituminous A coal	...	...	...	...	10 500	11 500	24.4	26.7	
Subbituminous B coal	...	...	...	...	9 500	10 500	22.1	24.4	
Subbituminous C coal	...	...	...	...	8 300	9 500	19.3	22.1	
									nonagglomerating
IV. Lignitic:									
Lignite A	...	...	...	...	6 300 ^I	8 300	14.700	19.300	
Lignite B	...	...	...	...	...	6 300	...	14.700	

^A This classification does not apply to certain coals, as discussed in section 1

^B Moist refer to coal containing its natural inherent moisture but not including visible water on the surface of the coal

^C Megajoules per kilogram. To convert British thermal unit per pound to megajoules per kilogram, multiply by 0.002326

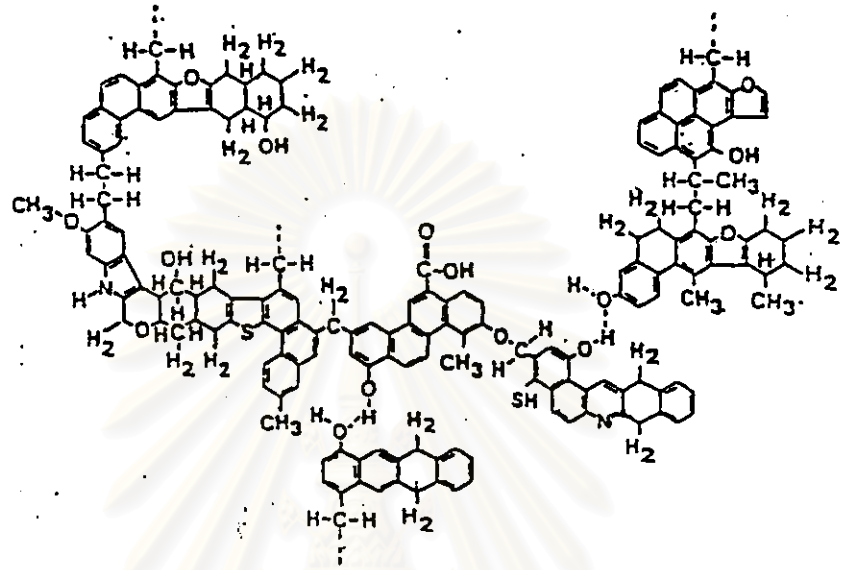
^D If agglomerating, classify in low volatile group of the bituminous class

^E Coals having 69% or more fixed carbon on the dry, mineral-matter-free-basis shall be classified according to fixed carbon, regardless of gross calorific value

^F It is recognized that there may be nonagglomerating varieties in these group of bituminous class, and that there are not able exceptions in high volatile C bituminous group

^I Editorially corrected

(aromatic) และวงแหวนที่มีอะตอมของ ออกซิเจน กำมะถัน หรือ ไนโตรเจน ประกอบอยู่กับ คาร์บอน รวมทั้งกลุ่ม functional group ต่างๆ



$\begin{matrix} \text{O} \\ \parallel \\ -\text{C}-\text{OH} \end{matrix}$, $-\text{OH}$, $-\text{O}-\text{CH}_3$, $\begin{matrix} \text{O} \\ \parallel \\ -\text{C}-\text{H} \end{matrix}$ คือ functional groups
 $-\text{CH}_2-$, $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$, $-\text{CH}_2-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}-$ คือ aliphatic bridges

ที่มา : ASTM D388 (1986)

รูปที่ 2.1 โมเลกุลสมมุติของถ่านหิน

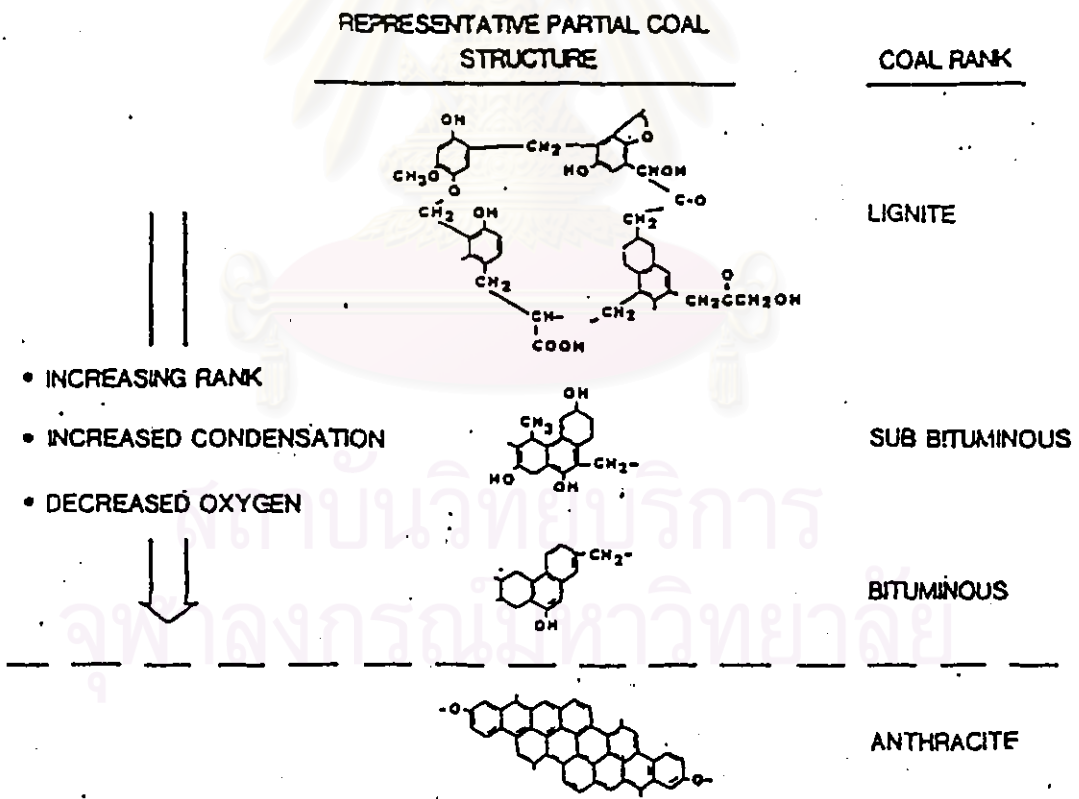
1. โครงสร้างอินทรีย์ (organic structure)

โครงสร้างอินทรีย์ของถ่านหินประกอบด้วย พันธะเคมีชนิด cross linked polymer เชื่อมโครงสร้างสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ และมีบางส่วนที่ไม่เป็นโครงสร้างพอลิเมอร์ จากการศึกษา X-ray scattering technique พบว่า เมื่อสกัดถ่านหินเพิ่มขึ้น การรวมตัวของวงแหวนอะโรมาติกเชื่อมต่อกันมากขึ้น ดังรูปที่ 2.2 สารประกอบอินทรีย์ที่พบในโครงสร้าง

ถ่านหิน ได้แก่ benzene, phenol, naphthalene, cyclohexane และสารประกอบพวก dihydro aromatic ต่างๆ เป็นต้น

2. สารประกอบแร่ธาตุ (mineral matter)

สารประกอบแร่ธาตุที่พบในถ่านหินมักเป็นสารประกอบพวกสารอนินทรีย์ พบในปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับสารอินทรีย์ของคาร์บอน สารประกอบแร่ธาตุที่พบในถ่านหินมักอยู่ในรูปของสารประกอบที่มีอะตอมของธาตุ ซิลิกอน เหล็ก แคลเซียม แมกนีเซียม อลูมิเนียม โซเดียม โพแทสเซียม และกำมะถัน รวมกันเป็นสารประกอบต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 แบ่งกลุ่มของสารประกอบได้ดังนี้



ที่มา : Meger (1981)

รูปที่ 2.2 การรวมตัวของวงแหวนอะโรมาติกเมื่อศักดิ์ของถ่านหินเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2.2 สารประกอบแร่ธาตุที่พบในถ่านหิน

<p>Silicates:</p> <p>Clay minerals</p> <p>Kaolinite $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$</p> <p>Illite</p> <p>Montmorillonite</p> <p>Chlorite</p> <p>Mixed-layer clays</p>	<p>Carbonates:</p> <p>Calcite CaCO_3</p> <p>Dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$</p> <p>Siderite FeCO_3</p> <p>Aragonite CaCO_3</p> <p>Ankerite $\text{FeMgCa}_2(\text{CO}_3)_4$</p> <p>Dawsonite $\text{NaAlCO}_3(\text{OH})_2$</p> <p>Strontianite SrCO_3</p>
<p>Sulphates:</p> <p>Gypsum $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$</p> <p>Barite BaSO_4</p> <p>Anhydrite CaSO_4</p> <p>Coquimbite $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$</p> <p>Szomolnokite $\text{FeSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$</p> <p>Natrojarosite $\text{NaFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$</p> <p>Thenardite Na_2SO_4</p> <p>Bassanite $2\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$</p>	<p>Sulphides:</p> <p>Pyrite FeS_2</p> <p>Marcasite FeS_2</p> <p>Sphalerite ZnS</p> <p>Galena PbS</p>
<p>Other minerals:</p> <p>Apatite $\text{Ca}_5\text{F}(\text{PO}_4)_3$</p> <p>Goyazite $\text{SrAl}_3(\text{PO}_4)(\text{OH})_5\text{H}_2\text{O}$</p> <p>Anatase TiO_2</p> <p>Rutile TiO_2</p> <p>Haematite Fe_2O_3</p> <p>Goethite $\text{Fe}(\text{OH})_3$</p> <p>Zircon ZrSiO_4</p>	<p>Others:</p> <p>Quartz SiO_2</p> <p>Chalcedony SiO_2</p> <p>Felspar KAlSi_3O_8</p> <p>Tourmaline $\text{NaMg}_3\text{Al}_6\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{OH})_4$</p>

ที่มา : Challis (1983)

ก. กลุ่มซิลิเกต (silicates) มีอิลไลต์ (illite) เคโอลิไนต์ (kaolinite) เป็นต้น

ข. กลุ่มคาร์บอเนต (carbonates) มีแคลไซต์ (calcite) โดโลไมต์ (dolomite)

ซิเดอไรต์ (siderite) เป็นต้น

ค. กลุ่มซัลเฟต (sulphates) มียิปซัม (gypsum) แอนไฮไดรด์ (anhydride)

เป็นต้น

ง. กลุ่มซัลไฟด์ (sulphides) ที่พบบ่อยคือ มาคาไซต์ (marcasite) และไพไรต์

(pyrite)

จ. แร่ธาตุอื่นๆ (other mineral) เช่น ควอตซ์ (quartz) เฟลด์สปาร์ (felspar)

เป็นต้น

กำมะถันในถ่านหิน (Ward, 1984)

กำมะถันในถ่านหินมีหลายรูปแบบพบกระจายทั่วไปในถ่านหิน จัดแบ่งได้ 2 ประเภท คือ

ก. กำมะถันอินทรีย์ (organic sulphur) มีโครงสร้างในลักษณะพันธะเคมีที่ซับซ้อน พบทั่วไปในถ่านหิน สามารถกำจัดออกได้ด้วยวิธีทางกายภาพ

ข. กำมะถันอนินทรีย์ (inorganic sulphur) มี 2 รูปแบบ ได้แก่

- กำมะถันซัลเฟต (sulphate sulphur) ที่พบในถ่านหินเป็นโลหะซัลเฟต เช่น สารประกอบแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) สารประกอบซัลเฟตของเหล็ก (FeSO_4) เป็นต้น กำมะถันชนิดนี้มีน้อยกว่ารูปแบบอื่น

- กำมะถันไพไรต์ (pyritic sulphur) พบในลักษณะสารประกอบโลหะซัลไฟด์ และมาคาไซต์ ซึ่งไม่ละลายน้ำ แยกออกได้โดยวิธีทางกายภาพ

ถ้ำถ่านหิน (Beer, 1987)

ถ้ำถ่านหินเป็นส่วนที่เหลือของ mineral matter ในถ่านหิน ภายหลังจากเผาไหม้ของถ่านหิน ถ่านหินจะปล่อยสารระเหย (volatile) ออกมาเป็นอันดับแรก มีรูพรุนเกิดขึ้นโดยรอบๆ ถ่านหิน และมีแก๊สบางส่วนเหลืออยู่ภายใน ซึ่งเป็นไอของสารอนินทรีย์ของเหล็ก แมกนีเซียม โซเดียม และซิลิกอนไม่สามารถดันออกมาได้ จึงทำให้เกิดรูกลวงในลักษณะของ cenosphere ขึ้นภายในของอนุภาคของถ่านหิน และเมื่อไอของสารอนินทรีย์ถูกปล่อยออกมาในรูปของหยด

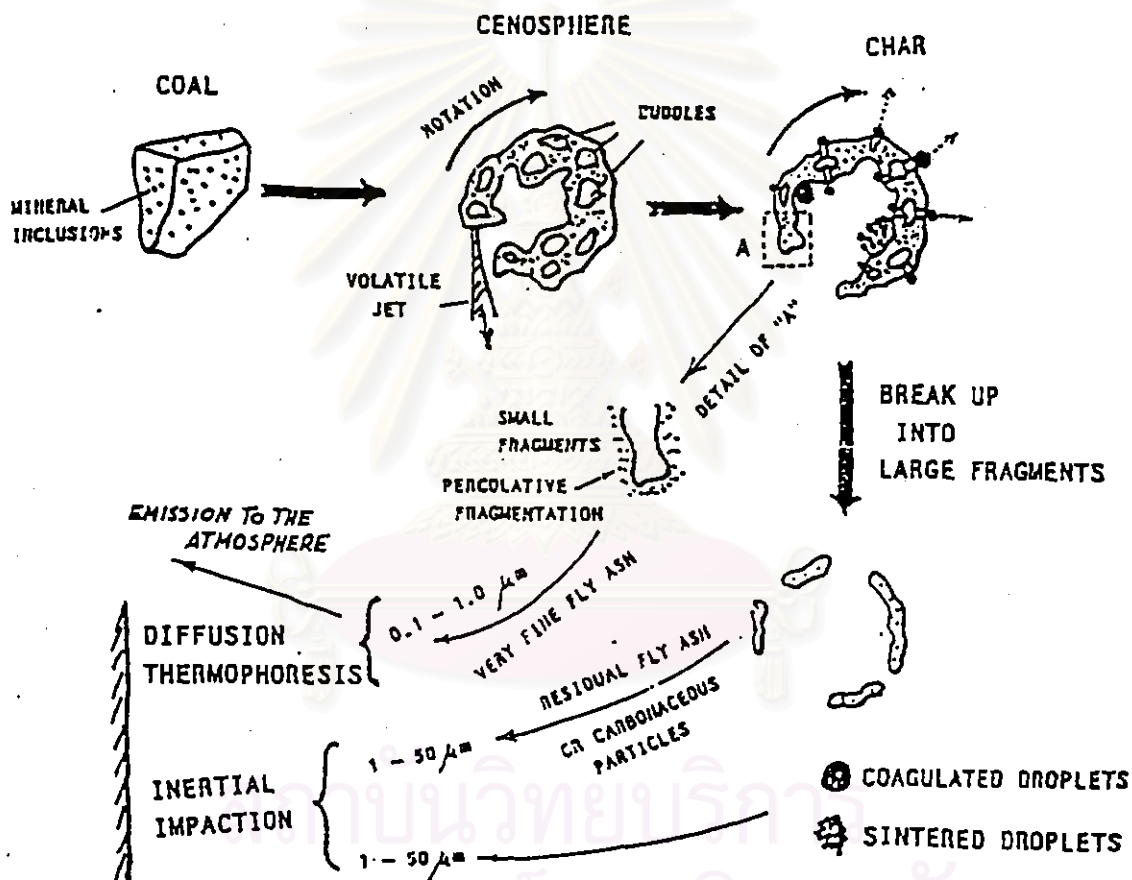
ของเหลว การแตกของอนุภาคถ่านหินจึงเกิดขึ้นได้เป็นชิ้นส่วนเล็กๆ มีขนาดต่างๆ กัน ตั้งแต่ 0.1-50 ไมครอน และได้ละอองขนาดเล็กประมาณ 0.05 ไมครอน อนุภาคเหล่านี้เรียกว่า เถ้า เถ้าบางส่วนที่ได้สะสมอยู่บนผิวหน้าของตัวถ่ายโอนความร้อน และมีบางส่วนปลอยสู่บรรยากาศ ดังรูปที่ 2.3 ขนาดของเถ้าขึ้นกับขนาดถ่านหินที่ใช้ ถ่านหินที่มีเม็ดใหญ่จะทำให้ได้เถ้าขนาดใหญ่ ส่วนถ่านหินที่ถูกบดละเอียด (pulverized coal) จะทำให้ได้เถ้าขนาดเล็กลง ดังนั้นเถ้าจาก pulverized coal fired boiler ซึ่งใช้ถ่านหินบดละเอียด จึงมีอนุภาคเล็กกว่าเถ้าจาก spreader stoker fired boiler ดังแสดงในรูปที่ 2.4

เถ้าถ่านหินแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ตามลักษณะการเกิดของสารประกอบแร่ธาตุในถ่านหิน ดังนี้

ก. เถ้าที่เกิดจากสารอินทรีย์ในถ่านหิน (intrinsic ash) เกิดจากสารอินทรีย์ที่พืชดูดซึมไว้ในขณะที่พืชยังมีชีวิตอยู่ เถ้าส่วนนี้ไม่สามารถกำจัดออกโดยการทำความสะอาด ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ อลูมิเนียมออกไซด์ เป็นต้น

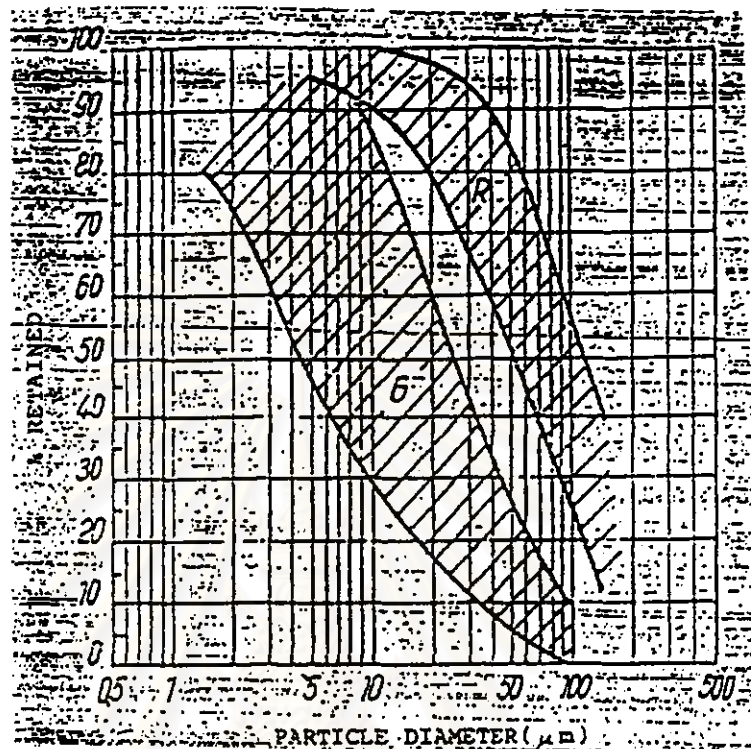
ข. เถ้าที่เกิดจากสารอินทรีย์ภายนอก (extrinsic ash) เกิดจากสารอินทรีย์ที่น้ำพัดพามาขณะเกิดการสะสมของถ่านหิน ได้แก่ ตะกอนดิน ไฟไรต์ ยิปซัม ดิน เป็นต้น เถ้าชนิดนี้สามารถกำจัดออกโดยการทำความสะอาดได้บ้าง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ที่มา : Gilbert (1963)

รูปที่ 2.3 การเกิดเต้าถ่านหินขณะเผาไหม้



ที่มา : เกริกชัย (2529)

รูปที่ 2.4 การกระจายขนาดของอนุภาค fly ash จาก stoker-fired boiler (R)
และ pulverized-coal-fired boiler (G)

1. องค์ประกอบแก้วถ่านหิน

สารประกอบแร่ธาตุที่พบในแก้วถ่านหิน จากการวิเคราะห์ถ่านหินด้วย X-ray diffraction ในช่วงอุณหภูมิ 400-1550 องศาเซลเซียส ของ Unsworth J.F., 1988 แสดงให้เห็นสารประกอบแร่ธาตุที่พบได้แก่ ควออร์ตซ์ เคโอลิไนต์ อิลไลต์ โคควิมไบต์ (coquimbite) โตไลไมต์ แคลไซต์ บัสแซนไนต์ (bussanite) ดังรูปที่ 2.5

Unuma, 1986 และผู้ร่วมงาน ได้ใช้ X-ray diffraction ศึกษาแก้วถ่านหินในช่วงอุณหภูมิ 200-1200 องศาเซลเซียส พบองค์ประกอบแก้วประกอบด้วย ควออร์ตซ์

ดินขาว (kaolin) โดโลไมต์ แคลไซต์ แอนไฮไดรต์ เฟลด์สปาร์ ไพไรต์ ซิเดอไรต์ ฮีมาไทต์และ มุลไลต์

Warne, 1965 และ Gorman, 1973 ได้ใช้เครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน differential thermal analysis (DTA) เพื่อดูสารประกอบแร่ธาตุในแก้วถ่านหิน จากกราฟที่ออกมาตามช่วงของการเปลี่ยนแปลง ดังตารางที่ 2.3

ดังนั้นสารประกอบแร่ธาตุที่พบในแก้วถ่านหินจึงแบ่งได้ 6 กลุ่ม ดังตารางที่ 2.4

K = KAOLINITE	A = ANOHTHITE
C = CALCITE	G = GEHLENITE
F = FLUORAPATITE	M = MULLITE
P = PYRITE	
Q = QUARTZ	
B = BASSANITE	



ที่มา : Beer (1987)

รูปที่ 2.5 แสดงผลของ X-ray diffraction แก้วถ่านหินในช่วง อุณหภูมิ 400-1500 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 2.3 ลักษณะของ Thermogram ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DTA

Mineral	Chemical formula (idealized)	Endothermic effects			Exothermic effects		
		Peak temp range (C)	Intensity	Interpretation	Peak temp range (C)	Intensity	Interpretation
Kaolin	$Al_2Si_4O_{10}(OH)_6$	100-200	Small	Release of adsorbed water	950-1000 (980)	Intense	Phase transformation to Al_2O_3 and nucleation of mullite
		500-600 (580)	Intense	Dehydroxylation			
Illite		60-150 (136)	Small	Release of interlayer water	940-950	Small	Phase transformation to Spinel
		370-620 (535)	Moderate	Dehydroxylation			
Montmorillonite		850-900	Small	Lattice destruction	900-920	Small	Phase transformation to Spinel phase
		100-150 (137)	Moderate	Release of interlayer water			
Prochlorite	$Mg_6Si_4O_{10}(OH)_8$	600-730 (685)	Moderate	Dehydroxylation	880-900 (870)	Small	Formation of olivine (Mg,Fe) $_2SiO_4$
		850-900	Small	Lattice destruction			
Mixed-layer illite- montmorillonite		560-750 (650)	Intense	Decomposition of brucite layer	900-950 (945)	Small	Phase transformation
		750-820 (795)	Small	Dehydration of talc layer			
		820-880 (842)	Small	Dehydration			
		50-150 (115) (137)	Small	Release of adsorbed and interlayer water			
Calcite	$CaCO_3$	450-680 (630)	Small	Dehydroxylation			
		600-850 (640)	Small	Dehydroxylation			
Dolomite	$CaMg(CO_3)_2$	710-950 (915)	Moderate	Decarbonation			
		740-800 (780)	Intense	Decarbonation			
Siderite	$FeCO_3$	815-910 (890)	Intense	Decarbonation			
		425-610	Moderate	Decarbonation			
Quartz	SiO_2	570	Very small	Quartz			
		(570)		Inversion			
Gypsum	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	100-150 (145)	Intense	Dehydration	350-370	Very small	Phase transformation - $CaSO_4$
		150-200 (174)	Intense	Dehydration			

ที่มา : Warne (1965)

ตารางที่ 2.4 สารประกอบแร่ธาตุที่พบในถ้ำถ่านหิน

Group	Typical Species and Approximate formular
Shale	Muscovite (common potash mica), $K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$
	Illite (soda mica), $Na_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$
	Montmorillonite (clay), $(Mg,Ca)O \cdot Al_2O_3 \cdot 5SiO_2 \cdot nH_2O$
Kaolin	Kaolinite (clay), $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$
	Matahalloysite, $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 4H_2O$
Sulphid	Pyrite and Marcacite, FeS_2
Carbonate	Calcite (limestone), $CaCO_3$
	Dolomite, $CaCO_3 \cdot MgCO_3$
	Ankerite, $2CaCO_3 \cdot MgCO_3 \cdot FeCO_3$
Chloride	Halite (common salt), $NaCl$
	Sylvite, KCl
Accessory Mineral	Occurring in minor quantities associated with the Shell Group
	Quartz, SiO_2
	Felspar, $(K,Na)_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$
	Garnet, $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3SiO_2$
	Hornblende, $CaO \cdot 3FeO \cdot 4SiO_2$
	Gypsum, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$
	Apatite, $9CaO \cdot 3P_2O_5 \cdot CaF_2$
	Zircon, $ZrSiO_4$
	Diaspore, $Al_2O_3 \cdot H_2O$
	Magnetite, Fe_3O_4
	Hematite, Fe_2O_3

ที่มา : Gorman (1973)

2. ปัญหาของถ้ำถ่านหินในเตาเผาและหม้อไอน้ำ (Meger, 1981)

เตาเผาและหม้อไอน้ำที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง มักพบปัญหาของถ้ำถ่านหิน เกาะติดตามผนังของเตาเผา และผิวของท่อไอน้ำ ซึ่งเป็นสาเหตุของการทำให้เกิดการกัดกร่อน และสึกกร่อนของเตาเผาในเวลาต่อมาที่ส่วนต่างๆ ของเครื่องมือ ดังนี้

ก. เกาะสะสมบนเตาเผา (furnace epistite) มักเกิดบนส่วนของท่อน้ำที่อยู่ตามผนังเตา ทำให้เกิดการลดการถ่ายโอนความร้อนจากเปลวไฟที่ไปยังผนังท่อที่ต่อไปยังท่อน้ำ มีไอน้ำเกิดขึ้นน้อย และแก๊สที่ปล่อยออกมาจากเตามีอุณหภูมิสูง ทำความเสียหายแก่เทอร์ไบน์ (turbine) อาจใช้โบลวเออร์ช่วยกำจัดเถ้าที่สะสมบนผนังเตาได้ แต่ถ้าเถ้าหลอมเหลวเป็นของแข็งสะสม โบลวเออร์จะไม่สามารถช่วยกำจัดได้ การสะสมของเถ้าหลอมเหลวบนผนังนี้เรียกว่า การเกิดสลัก (slagging)

ข. การสะสมบนซูเปอร์ฮีทเตอร์ และ ฮีทเตอร์ (superheater / reheater deposits) เกิดในส่วนของผิวท่อที่เป็นทางผ่านของเถ้า เรียกรวมชนิดนี้ว่า ฟาวลิง (fouling) ซึ่งคล้ายเป็นฉนวนกั้นการถ่ายโอนความร้อนจากแก๊สร้อน และลดอัตราการถ่ายโอนความร้อน ทำให้ความดันของแก๊สเพิ่มขึ้น อัตราการไหลของอากาศลดลง และอัตราการเผาไหม้ลดลง

ค. การกัดกร่อนของผนังท่อ (wall-tube corrosion) พบในส่วนของผนังท่อที่มีการสะสมของเถ้าหนาแน่น มีปฏิกิริยาระหว่าง เหล็ก (Fe) กับ Na_2SO_4 หรือ K_2SO_4 เกิดเป็น $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_7$ และ $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_7$ หรือ $\text{Na}_3\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$ และ $\text{K}_3\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$ ซึ่งทำให้เกิดการกัดกร่อนของผนัง

ง. การกัดกร่อนของซูเปอร์ฮีทเตอร์ และ ฮีทเตอร์ (superheater / reheater corrosion) เกิดจากการสะสมของ $\text{Na}_3\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$ และ $\text{K}_3\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$ ที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการกัดกร่อนของผิวท่อส่วนที่มาจากเกาะของเถ้าบนผิวโลหะ

จ. การกัดกร่อนของเครื่องอุ่นอากาศ (air preheater corrosion) การกัดกร่อนนี้เกิดจาก H_2SO_4 ที่ได้จาก H_2O และ SO_3 ที่มาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ฉ. การสึกกร่อน (erosion) เป็นผลต่อเนื่องจากการสะสมและกัดกร่อนที่มากขึ้นบนผิวโลหะที่เป็นส่วนต่างๆ ของเตา รวมทั้งที่แผ่นซูเปอร์ฮีทเตอร์ ฮีทเตอร์ และอีคอนอไมเซอร์

แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (sulphur dioxide) (Kenneth, 1976)

ซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นแก๊สไม่มีสีแต่มีรส ที่ระดับความเข้มข้นสูงมากพอจะมีกลิ่นฉุนระคายจมูก แสงแดดและมลพิษอื่นๆ เช่น ไฮโดรคาร์บอน เป็นต้น สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยามีผลเป็นซัลเฟอร์ไตรออกไซด์และกรดกำมะถันในที่สุด นอกจากนั้นหากอยู่รวมกับอนุภาคมลสารซึ่งมีตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น แมกนีเซียม เหล็ก และวานาเดียม จะเกิดมีปฏิกิริยาเติมออกซิเจนเกิดเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และกรดกำมะถันเช่นเดียวกัน หรือไม่เช่นนั้นละอองน้ำในอากาศซึ่งมีอิมโมเนียเจือปนอยู่ด้วยก็อาจทำปฏิกิริยากับแก๊สนี้ เกิดเป็นกรดกำมะถันได้อีก

การสันดาปเชื้อเพลิงเพื่อใช้พลังงานในการดำรงชีวิตของมนุษย์ และการอุตสาหกรรม

ทำให้เกิดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ นอกจากนี้ยังเกิดจากการผลิตปิโตรเลียม การถลุงโลหะ การทำเยื่อกระดาษ และการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง

1. สมบัติทางกายภาพของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์

แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นแก๊สไม่ติดไฟ ไม่เกิดการระเบิดและไม่มีสี ที่ระดับความเข้มข้นสูงกว่า 0.3-1.0 ppm ในอากาศ จะรับรู้ได้โดยประสาทสัมผัส ที่ความเข้มข้นสูงกว่า 3.0 ppm จะมึนกลิ่นฉุน รู้สึกระคายเคืองต่อโพรงจมูกและเยื่อเมือก เป็นแก๊สที่ละลายน้ำได้ดี โดยมีค่าการละลายอยู่ที่ 11.29 g/100 ml ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับแก๊สอื่นคือ ออกซิเจน ไนตริกออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีค่าการละลาย 0.004, 0.006, 0.003 และ 0.169 g/100 ml ตามลำดับที่อุณหภูมิเดียวกัน แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีค่าคงที่ทางกายภาพแสดงได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ตารางแสดงค่าคงที่ทางกายภาพของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์

Physical Content of SO ₂	
Molecular weight	64.06
Density (g/l) (gas)	2.927 at 0 °C ; 1 atm
Specific gravity (liq)	1.434 at -10 °C
Molecular volume (ml) (liq)	44
Melting point (°C)	-75.64
Boiling point (°C)	-10.02
Critical temperature (°C)	157.2
Critical pressure (atm)	77.7
Heat of fusion (kcal/mol)	1.769
Heat of vaporization (kcal/mol)	5.96
Dielectric constant (E)	13.8 at 14.5 °C
Viscosity (dyne sec/cm ²)	0.0039 at 0 °C
Molecular boiling point constant (°C/1000 g)	1.45
Dipole moment (Debye unit)	1.61

ที่มา : เกริกชัย (2529)

2. ผลกระทบของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ (วงศ์พันธ์, 2536)

แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นตัวที่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศ ซึ่งมีผลต่อระบบทางเดินหายใจ ระคายเคืองต่อเยื่อตา อันตรายต่อปอดทำให้มีอาการแน่นหน้าอก หายใจถี่ ทำงานได้น้อยลง และยังมีผลต่อการเพาะปลูก เมื่อพืชได้รับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงๆ จะมีผลให้เซลล์ตายในระหว่างขอบใบหรือระหว่างเส้นใบ ในขั้นต้นจะมีลักษณะบวมน้ำ ใบจะร่วงในไม่ช้าหรือหลุดร่วงเฉพาะเซลล์ตรงส่วนที่เกี่ยวแห้งเท่านั้น ทำให้ใบขาดกระรุ่งกระริ่ง

ในปี ค.ศ. 1967 US. Public Health Service ได้ประมาณระดับของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่สิ่งมีชีวิตสามารถยอมรับได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ระดับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่สิ่งมีชีวิตยอมรับได้

Exposure time interval	Approximate SO ₂ Con ^c hazardous to human health (ppm)	Approximate SO ₂ Con ^c hazardous to vegetable (ppm)
1 hr	0.5	0.8
1 day	0.2	0.3
4 days	0.15	0.2
1 month	0.07	0.09
1 year	0.01	0.01

ที่มา : เกริกชัย (2529)

การกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้ (อรุณรัตน์, 2528)

ในการนำถ่านหินมาใช้เป็นเชื้อเพลิง จะก่อให้เกิดปัญหาด้านการกัดกร่อนและปัญหา

เกี่ยวกับสภาวะเป็นพิษ เนื่องจากในถ่านหินมีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ เมื่อเผาไหม้แล้วจะให้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ออกมา เมื่อแก๊สทั้งสองถูกปล่อยออกสู่อากาศจะกลายเป็นกรดซัลฟูริก (H_2SO_3) และกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาต่างๆ จึงต้องมีการกำจัดกำมะถันในถ่านหิน ซึ่งกระบวนการกำจัดสามารถแบ่งออกเป็น 3 วิธีใหญ่ๆ คือ

- ก. วิธีการทางฟิสิกส์ เช่น electropolitic separation, magnetic separation
- ข. วิธีการชีววิทยา วิธีการนี้ใช้เชื้อจุลินทรีย์ในการย่อยสลายกำมะถันให้ลดน้อยลง
- ค. วิธีการเคมี คือใช้ปฏิกิริยาเคมีในการกำจัดกำมะถันให้น้อยลง

นอกจากนี้ยังแบ่งวิธีการกำจัดกำมะถันออกได้เป็น 3 ลักษณะ ตามช่วงเวลาการกำจัดคือ

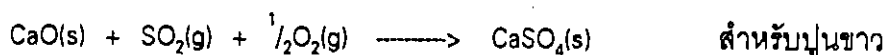
1. วิธีการกำจัดกำมะถันก่อนการเผาไหม้

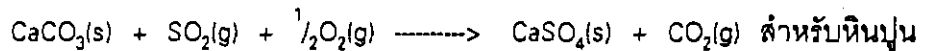
ก. วิธีการกายภาพ เป็นวิธีหนึ่งที่ย่างและไม่สลับซับซ้อน แต่กำจัดได้เฉพาะกำมะถันอนินทรีย์ (inorganic sulphur) เท่านั้น โดยอาศัยหลักของความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะ

ข. วิธีการเคมี มีหลายวิธีด้วยกัน เช่น ไฮโดรดีซัลเฟอร์ไรเซชัน (hydrodesulphurization) และออกซิไดซัลเฟอร์ไรเซชัน (oxydesulphurization) โดยให้แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยา ซึ่งกำมะถันอนินทรีย์และกำมะถันไพไรต์เท่านั้นที่เข้าทำปฏิกิริยา ส่วนกำมะถันซัลเฟตจะไม่ทำปฏิกิริยาและค้างอยู่ในถ่านหินเอง

2. วิธีการกำจัดกำมะถันขณะเผาไหม้

วิธีนี้ทำโดยการเติมสารเคมีบางชนิดลงไปในช่วงที่เกิดการเผาไหม้ แล้วให้สารเคมีที่เติมลงไปรวมตัวกับกำมะถันที่สลายตัวจากการเผาไหม้ เป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่ที่สามารถแยกออกจากการเผาไหม้ได้ ตัวอย่างเช่น การใช้ปูนขาว (lime) หินปูน (limestone) หรือโดโลไมต์ (dolomite) ผสมลงไประหว่างการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิดไรเซชัน โดยถ่านหินที่ใช้มีขนาด 1 นิ้ว เมื่อเผาไหม้ถ่านหินจะเกิดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งถูกกำจัดตามปฏิกิริยาดังนี้





จากปฏิกิริยาดังกล่าว เป็นปฏิกิริยาระหว่างแก๊สและของแข็ง ดังนั้นปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นหรือไม่ขึ้นกับพื้นที่ผิวของการสัมผัสของสารทั้งสอง ส่วนแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) ที่เกิดขึ้นสามารถกำจัดออกได้ง่ายโดยใช้เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic precipitator) หรือถุงกรอง (bag filter) เป็นต้น

3. วิธีการกำจัดกำมะถันหลังการเผาไหม้

วิธีนี้เป็นการดึงเอาแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกจากฟลูแก๊ส (flue gas) โดยมีกระบวนการดูดซึมแก๊สที่เกิดขึ้น ซึ่งมีได้หลายวิธีต่างกันออกไป และมีประสิทธิภาพในการจับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์แตกต่างกันไป

กระบวนการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกจากฟลูแก๊ส (เกริกชัย, 2529)

มีการวิจัยอย่างกว้างขวางเพื่อที่จะหาวิธีที่เหมาะสมในการดึงเอาแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกจากฟลูแก๊สแต่ก็ยังไม่มียุติวิธีใดที่ให้ผลอย่างสมบูรณ์ อุปสรรคแรกเนื่องจากปกติแก๊สที่ปล่อยนั้นจะมีปริมาณมากแต่กลับมีซัลเฟอร์ไดออกไซด์ปะปนอยู่น้อย ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงมาก และสอง by product ที่เกิดขึ้นนั้นมักเป็นของไม่มีคุณค่า และไม่สามารถนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ได้ นอกจากนี้การที่ต้องดึงแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกจากฟลูแก๊สซึ่งปกติจะมีอุณหภูมิสูง และความดันต่ำ ทำให้กระบวนการกำจัดจำเป็นต้องกระทำในภาวะดังกล่าว และในฟลูแก๊สเองนั้นก็ยังมีสิ่งสกปรกต่างๆ เจือปนอยู่ ซึ่งจะเป็นอุปสรรคต่อการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในฟลูแก๊ส ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายต่างๆ เพิ่มขึ้นไปอีก

สำหรับในปัจจุบันกรรมวิธีที่ใช้ในการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ อาจจัดแบ่งออกได้เป็น 4 กระบวนการดังต่อไปนี้คือ

1. Wet absorption process
2. Catalytic oxidation process
3. Wet and dry adsorption process
4. Dry adsorption process

ซึ่งรายละเอียดของกระบวนการแต่ละชนิดมีดังต่อไปนี้

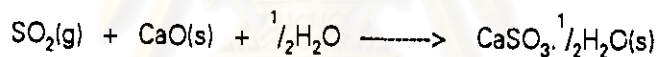
1. กระบวนการแบบ Wet absorption process

เป็นวิธีที่นิยมมากในระบบการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ได้มีการพัฒนาและศึกษาอย่างกว้างขวางทั่วโลก โดยมากเครื่องปฏิกรณ์แบบนี้จะเป็นแบบ spray column reactor โดยให้แก๊สกับของแข็งพ่นสวนทางกันลงมา กระบวนการต่างๆ มักแบ่งตามชนิดของสารเคมีที่ใช้ เช่น

ก. Wet limestone process สารเคมีที่ใช้ใน wet scrubber คือหินปูน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นใน limestone scrubbing เป็นไปดังสมการ



ข. Lime process ระบบนี้ใช้ปูนขาว (lime) ในการทำปฏิกิริยากับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ปฏิกิริยารวมของ lime scrubbing เป็นไปดังสมการ



ค. Magnesium oxide process มีลักษณะเดียวกับ calcium oxide และยังมีกระบวนการอื่นๆ อีกที่มีการศึกษา เช่น Aqueous sodium, Double alkali sulfuric acid เป็นต้น

2. กระบวนการแบบ Catalytic oxidation process

เป็นกระบวนการที่อาศัย catalytic oxidation เป็นพื้นฐาน แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปะปนอยู่ในฟลูแก๊ส จะถูกผ่านไบบน catalyst bed และถูกออกซิไดซ์ไปเป็น SO_3 แล้วจึงทำปฏิกิริยากับน้ำได้กรดซัลฟูริก ซึ่งเป็น by product ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ตัวอย่างของกระบวนการแบบนี้ ได้แก่ Monsanto catalytic oxidation and other process

3. กระบวนการแบบ Wet and dry adsorption process

กระบวนการนี้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะถูกดึงออกจากกระแสของฟลูแก๊ส

โดยการดูดซับ (adsorption) วัชชีวนของ Activated solid ซึ่งเป็นวิธีที่น่าสนใจมากเพราะสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ จากการวิจัยได้สารหลายชนิด เช่น Zeolite, Silica gel และ Ion exchange resins ส่วนสารดูดซับที่มักใช้เชิงพาณิชย์มักจะใช้คาร์บอน

4. กระบวนการแบบ Dry adsorption process (Hokkaido electric power plant, 1992)

กระบวนการในการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โดยวิธีการ dry absorption with reaction นี้เป็นกระบวนการที่กำลังได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากมีข้อดีกว่าระบบแบบ aqueous absorption คือสามารถใช้ในการบำบัดฟลูแก๊สได้ในขณะที่มีอุณหภูมิสูง ทำให้ไม่ต้องมีระบบทำความเย็นเพื่อลดอุณหภูมิของฟลูแก๊สลงมา ในระบบแบบนี้จะเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาของแก๊สกับ absorbent ซึ่งปกติควรจะเป็นวัสดุที่มีราคาต่ำ เช่น หินปูน ปูนขาว เป็นต้น กระบวนการแบบนี้นิยมกันมากที่สุดได้แก่ แบบ limestone dry injection process แม้ว่าจะเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์จำกัดก็ตาม สำหรับกระบวนการแบบที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ หรือ regenerable dry process นั้นมีความยุ่งยากจากการที่ต้องมีการสูญเสียสารดูดซับไปบ้าง และจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูง เพราะความซับซ้อนของระบบ regeneration แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการแบบนี้กำลังได้รับการพัฒนาอยู่

ลักษณะของสารดูดซับ (absorbent) ที่ใช้ในกระบวนการแบบนี้จะต้องมีพื้นที่ผิวสูง (high surface area) มีความพรุนสูง (high porosity) ซึ่งสามารถทำได้ด้วยวิธีการกระตุ้นโดยวิธีต่างๆ เช่น การกระตุ้นด้วยไอน้ำ (steam curing) เพื่อให้ได้ activated solid หรือการทำ calcination เป็นต้น ตัวอย่างของกระบวนการแบบนี้คือ

4.1 Injection of alkaline solid

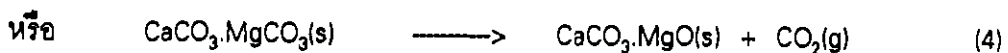
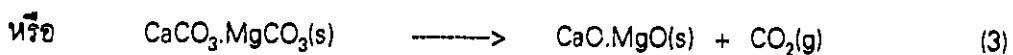
แนวคิดของกระบวนการแบบนี้คือ การพ่นฝุ่นผงที่แห้งของโลหะอัลคาไลเข้าไปใน boiler tilebox หรือพ่นเข้าไปในฟลูแก๊ส ให้ทำปฏิกิริยากับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์แล้วจึงเก็บรวบรวมเอาผงที่ใช้แล้วเหล่านั้นออกมาพร้อมกับเถ้าลอย ซึ่งวิธีนี้นิยมทำกันมาก กระบวนการแบบหนึ่งที่ใช้วิธีนี้คือ กระบวนการแบบ Limestone หรือ Dolomite Injection ซึ่งใช้หินปูนหรือโดโลไมต์บดละเอียดพ่นเข้าไปในถ่านหินหรือเตาเผา ปัญหาหนึ่งของกระบวนการ

แบบนี้คือ ความสามารถในการทำปฏิกิริยาของหินปูนและการกระจายตัวของหินปูน ซึ่งเป็นปัญหาทางด้านเทคนิค เพราะการเกิดการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะปรากฏในช่วงสั้นๆ ในแก๊สที่ร้อน และจะเกิดเมื่อแก๊สมีการสัมผัสกับปูนขาวเท่านั้น การเกิด calcination นั้นปกติจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 2000 °F ทำให้ในการพ่นต้องมีการเลือกตำแหน่งที่มีความร้อนอยู่ในระดับดังกล่าว ซึ่งอุณหภูมิที่อยู่ในช่วง 3000 °F นั้นมักจะอยู่บริเวณกันเตา ถ้าหากพ่นลงไปไม่ดีก็อาจจะทำให้ไฟดับได้ ส่วนการที่จะพ่นลงไปในเรื่องเพลิงก็จะทำให้อุณหภูมิในการเผาไหม้ตกลง

ปฏิกิริยาระหว่างแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับหินปูนที่เกิดการ calcination แล้ว ประสิทธิภาพในการกำจัดขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายชนิด เช่นปริมาณของหินปูนที่ใช้ โดยปกติใช้หินปูนในปริมาณที่ได้จากการคำนวณทาง stoichiometric จะสามารถกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในแก๊สร้อนได้ประมาณ 20 % และหากเพิ่มหินปูนเกินพอ 75 % ก็จะสามารถลดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ถึง 40-50 % เช่นเดียวกัน ถ้าหากลดปริมาณหินปูนลงก็จะทำให้ประสิทธิภาพลดลง ข้อดีของระบบนี้คือ สามารถที่จะประยุกต์กับโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินหรือน้ำมัน ง่ายในการติดตั้งใช้งาน และลงทุนน้อย แต่ข้อเสียก็คือโดยทั่วไปมักมีประสิทธิผลต่ำคือ ประมาณ 25-35 % ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นดังนี้

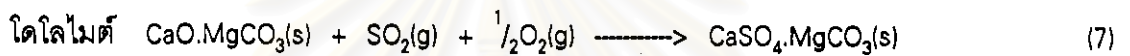
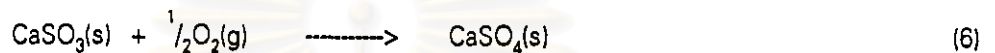
ก. ปฏิกิริยาแคลซิเนชัน (Calcination) (อรุณรัตน์, 2528)

เป็นปฏิกิริยาการสลายตัวของตัวดูดจับ (adsorbent) เมื่อได้รับพลังงานความร้อนเกิดขึ้นเป็นสารประกอบออกไซด์ที่มีความพรุนและว่องไวต่อปฏิกิริยา



ข. ปฏิกริยาซัลเฟชัน (sulfation)

ปฏิกริยาสำคัญระหว่างแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และสารประกอบออกไซด์ ในบรรยากาศที่มีออกซิเจนมากเกินพอ เกิดเป็นสารประกอบซัลเฟต มีสีน้ำตาล. ภายในรูปพุนบริเวณผิวนอกของอนุภาคจะเกิดปฏิกริยาดังนี้



ในกรณีที่ใช้ปูนขาว (Lime) เป็นสารดูดซึม ปฏิกริยาเคมีที่เกิดขึ้น และรายละเอียดกลไกของปฏิกริยาระหว่างปูนขาวกับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ มีรายละเอียดดังนี้



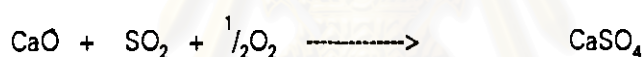
รายละเอียดในการเกิดปฏิกริยาเคมีมีดังนี้

ปฏิกริยาเคมีระหว่างปูนขาวกับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จะไม่เกิดที่อุณหภูมิบรรยากาศ (Atmospheric temperature) ปฏิกริยาซัลเฟชันอาจดำเนินไปตามปฏิกริยาที่ (9)

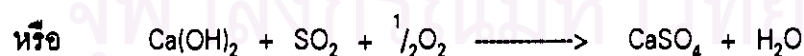
หรือ (11) ก็ได้แล้วแต่อุณหภูมิ การเกิดแคลเซียมซัลไฟท์ (CaSO_3) จะเป็นไปตามปฏิกิริยาที่ (9) ได้ต่อเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 650°C อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ (9) จะช้ามาก ซึ่งเป็นข้อสนับสนุนว่าพบแคลเซียมซัลไฟท์ (CaSO_3) น้อยมาก ปฏิกิริยาออกซิเดชันตามสมการที่ (11) มีความเป็นไปได้มากเมื่อมีแก๊สออกซิเจนประมาณ 3 % ในวัฏภาคแก๊ส

โดยปกติถ้ามีแก๊สออกซิเจนในวัฏภาคแก๊ส ซัลไฟท์จะถูกออกซิไดซ์ไปเป็นซัลเฟตซึ่งเป็นรูปแบบที่เสถียรมากกว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ จะเกิดปฏิกิริยาเคมีตามสมการ (12) และ (13) ปฏิกิริยาตามสมการที่ (13) เกิดจากความไม่ได้อส่วนของซัลไฟท์ จึงสลายตัวให้ผลิตภัณฑ์คือ แคลเซียมซัลไฟด์ (CaS) แทนที่จะเกิดตามสมการที่ (10) แต่ถ้ามีแก๊สออกซิเจนอยู่ในวัฏภาคแก๊ส ตามหลักเทอร์โมไดนามิกส์ความเป็นไปได้ที่จะเกิดซัลเฟต (CaSO_4) ตามสมการที่ (10) มากกว่าเกิดซัลไฟด์ (CaS) ตามสมการที่ (13) ที่อุณหภูมิปฏิบัติการ

สำหรับในงานวิจัยนี้ จะใช้เถ้าลอยซึ่งมีส่วนประกอบของปูนขาว (CaO) เป็นตัวดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้ ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง CaO กับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นไปตามปฏิกิริยาดังนี้คือ (Hsia, 1993)



หรือจากงานวิจัยที่ใช้อุณหภูมิในช่วงต่ำ ดังนั้นสามารถเกิดปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวกับไอน้ำได้ด้วย ดังนี้



โดยมีกลไกของการเกิดปฏิกิริยาดังนี้ (พัชร, 2533)

1. การเกิดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในห่องเผาไหม้



2. การเกิดออกซิเดชันของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ไปเป็นแก๊สซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ในวัฏภาคแก๊ส

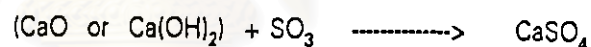


การเกิดปฏิกิริยาในขั้นนี้ อาจถูกเร่งให้เกิดโดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยานั้น อาจเป็นสารพวกสารเจือปน (impurity) ที่มีอยู่ในถ่านหิน เช่น Fe_2O_3 , V_2O_5 , Cr_2O_3 เป็นต้น ซึ่งจะมีในปริมาณที่แตกต่างออกไป

3. การแพร่ผ่านของแก๊สซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ไปยังผิวสัมผัสระหว่างแก๊สกับอนุภาคของแข็ง

4. การแพร่ผ่านของแก๊สซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ผ่านชั้นของแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) ที่เกิดอยู่บริเวณด้านนอกของอนุภาคไปยังส่วนของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยา

5. ปฏิกิริยาระหว่าง CaO หรือ Ca(OH)_2 กับ SO_3 เป็นไปดังนี้



การนำเถ้าลอยมาใช้ในการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Ferraiolo, 1990)

ในรอบหลายสิบปีที่ผ่านมาได้มีผู้สนใจที่จะนำเอาเถ้าลอยมาประยุกต์ในการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์อยู่เป็นจำนวนมาก เนื่องจากเถ้าลอยมีสารประกอบอินทรีย์อยู่หลายชนิดที่มีสมบัติที่จะทำปฏิกิริยากับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ และในขณะเดียวกันปัญหาจากฝุ่นละอองของเถ้าลอยเองก็เป็นปัญหาสำคัญประการหนึ่ง กระบวนการที่ถูกนำมาใช้ในการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โดยทั่วไปมักเป็นกระบวนการแบบ Wet absorption process และ Dry absorption process ซึ่งในที่นี้จะยกตัวอย่างกระบวนการที่ทำการศึกษาวิจัย

1. Dry process flue gas desulphurizer utilizing fly ash

เป็นกระบวนการดูดซึมแบบแห้ง โดยนำเอาเถ้าลอยมาเป็นส่วนประกอบในการผลิตสารดูดซึม (absorbent) ร่วมกับปูนขาว (CaO) ที่จะใช้ในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ซึ่งมีข้อดีดังนี้

ก. ถ้ำลอยมีพวก alkalinity อยู่สูง โดยจะประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ประมาณ 15 % ซึ่งกว่า 40 % สามารถกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ (หรือ 6 % ของถ้ำลอยทั้งหมด) แต่ก็ต้องมีการเติมปูนขาวลงไปอีกเพื่อให้ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์อยู่ในเกณฑ์สูง

ข. ถ้ำลอยเป็นของไม่มีค่าทางเศรษฐกิจ ดังนั้นถ้าสามารถพัฒนานำมาใช้จะเป็นการลดต้นทุนในการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ค. ถ้ำที่ใช้แล้วสามารถนำมาถมที่ทำทาง เนื่องจากมีส่วนประกอบของยิปซัมจากปฏิกิริยาการดูดซึมน้ำทำให้มีความแข็งแรงมากขึ้น ไม่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษและเสียค่าใช้จ่ายไม่มาก

ง. ในกระบวนการแบบแห้งสามารถทำปฏิกิริยาได้ในอุณหภูมิที่สูง ดังนั้นไม่จำเป็นต้องลดอุณหภูมิของฟลูแก๊สลงมา จึงประหยัดค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบทำความเย็น

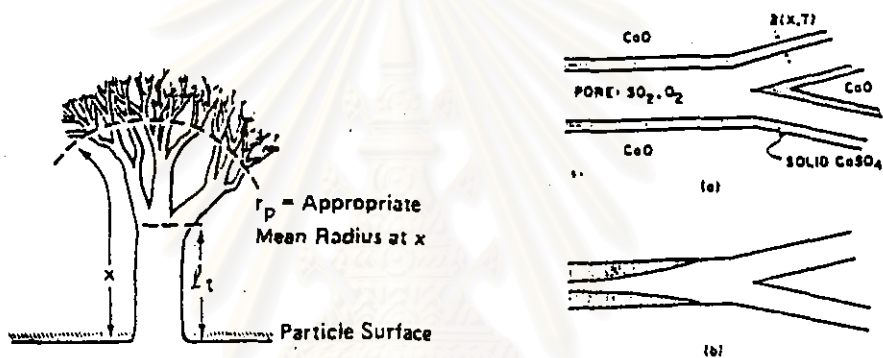
จ. ในกระบวนการแบบแห้ง เป็นกระบวนการระหว่างแก๊สกับของแข็ง ซึ่งปกติจะใช้วัสดุที่มีราคาถูกอยู่แล้ว

ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาเคมี (Slack, 1971)

ก. สมบัติทางกายภาพของปูนขาว (CaO) สมบัตินี้คือ ขนาดและปริมาตรของรูพรุน (pore size and pore volume) การกระจายตัวของขนาดรูพรุน (pore size distribution) พื้นที่ผิวสัมผัส (surface area) ตลอดจนสิ่งเจือปนที่มีในปูนขาว

รูพรุนของ CaO ต้องมีขนาดพอเหมาะ ไม่เล็กหรือใหญ่เกินไป และมีปริมาตรรูพรุนมากพอให้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์แพร่ผ่านจากวัฏภาคแก๊สเข้าไปในอนุภาคของ CaO ด้วยอัตราเร็วที่สุด กล่าวคือมีแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่จะทำปฏิกิริยากับ CaO ได้ตลอดเวลา ถ้าขนาดของรูพรุนเล็กไปจะทำให้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ไม่สามารถแพร่ผ่านเข้าไปถึงพื้นผิวของ CaO ในส่วนที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยา เนื่องจากมีการอุดตันจากแคลเซียมซัลเฟต (CaSO₄) อย่างรวดเร็ว ลักษณะการเข้าทำปฏิกิริยาของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับปูนขาวแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 ถ้าขนาดรูพรุนใหญ่เกินไปจะทำให้พื้นที่ผิวส่วนที่มีประโยชน์ในการทำปฏิกิริยา (reactive site) ของ CaO มีน้อยหรือกล่าวได้ว่ามีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อยมีผลให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้น้อยลง แต่ขนาดรูพรุนใหญ่จะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ดีกว่ารูพรุนเล็ก เพราะแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์แพร่ผ่านสะดวก ขนาดรูพรุนในอุดมคติมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ

0.2-0.3 ไมโครเมตร ถ้ารูพรุนขนาดเล็กกว่า 0.1 ไมโครเมตร จะถูกอุดตันโดย CaSO_4 อย่างรวดเร็ว แต่ถ้าใหญ่กว่า 0.3 ไมโครเมตร พื้นที่ผิวที่ใช้ทำปฏิกิริยาจะลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน พบว่าขนาดของอนุภาคที่เหมาะสมที่สุดประมาณ 3-8 ไมโครเมตร



ที่มา : Simon (1987)

รูปที่ 2.6 แสดงถึงลักษณะการเข้าทำปฏิกิริยาของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับปูนขาว (CaO)

ข. อัตราส่วนของ CaO ต่อแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์โดยโมล ตามสมการเคมีพบว่า CaO ทำปฏิกิริยากับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในอัตราส่วน 1:1 แต่ความเป็นจริงจะต้องใช้ CaO มากกว่า เนื่องจากไม่สามารถใช้ CaO ได้เต็มประสิทธิภาพ เป็นผลมาจาก CaSO_4 จะเข้าไปอุดตันในรูพรุนของ CaO ทำให้ CaO บางส่วนไม่ถูกทำปฏิกิริยา ส่วนมากต้องใช้อัตราส่วนนี้มากกว่า 3 จึงจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นที่น่าพอใจ

ค. อุณหภูมิ จะต้องพิจารณาตัวแปรอื่นประกอบด้วย เช่น ความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นต้น

ง. เวลาในการทำปฏิกิริยา (residence time)

จ. ความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เมื่อพิจารณาทางด้านจลนพลศาสตร์

พบว่าปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จึงเป็นตัวแปรสำคัญเมื่อปฏิกิริยาเป็นขั้นตอนที่ควบคุมปฏิกิริยารวม (reaction control) ถ้าความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์สูงจะทำให้ปฏิกิริยาในตอนต้นเร็วมาก มีผลให้เกิด CaSO_4 เข้าไปอุดตันรูพรุนของ CaO อย่างรวดเร็ว ปฏิกิริยาจึงช้าลงตามลำดับ ตามทฤษฎีอัตราเร็วปฏิกิริยา (reaction rate theory) กล่าวว่ปฏิกิริยาจะถูกควบคุมโดยการแพร่ของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (diffusion control)

จ. ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจน (O_2) มากเกินไป ในวัฏภาคแก๊สจะเป็นผลดีในการผลักดันให้ปฏิกิริยา $\text{CaO} + \text{SO}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \longrightarrow \text{CaSO}_4$ ดำเนินไปข้างหน้า

ข. ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ปฏิกิริยาออกซิเดชันและซัลเฟชันเป็นปฏิกิริยาที่มีความสำคัญในการควบคุมอัตราเร็วของปฏิกิริยาทั้งหมด ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ F. Gioia และ G. Mura พบว่า V_2O_5 ประมาณ 0.1 % ที่เติมลงในปูนขาวจะช่วยให้เกิดการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ดีมาก นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อมี Fe_2O_3 ประมาณ 1 % จะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ดีขึ้นกว่าเดิม 50 % นอกเหนือจาก Fe_2O_3 , V_2O_5 แล้ว สารประกอบอื่นที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งคือ Cr_2O_3 , SnO_2 , K_2O , CuO เป็นต้น ส่วนตัวยับยั้งปฏิกิริยาซัลเฟชัน (inhibition effect on sulfation reaction) เช่น SnCl_2

ฟลูอิดเซชัน (Fluidization)

ฟลูอิดเซชัน เป็นกระบวนการที่ทำให้อนุภาคของแข็งภายในหอตดลอง ซึ่งเรียกว่า เบด (bed) เกิดการเคลื่อนที่ลอยตัวอย่างอิสระและหมุนเวียนจนเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสม่ำเสมอ โดยอาศัยการไหลของของไหลผ่านแผ่นกระจายอากาศทางด้านล่างเป็นตัวกลางในการเคลื่อนที่ ซึ่งการเคลื่อนที่หมุนเวียนกันอย่างสม่ำเสมอของเบดลักษณะนี้จะทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนระหว่างเม็ดของแข็งได้เป็นอย่างดี ด้วยเหตุนี้อุณหภูมิเบดจึงสม่ำเสมอตลอดเวลา นอกจากนี้ยังเกิดการถ่ายโอนความร้อนระหว่างผนังเครื่องปฏิกรณ์และเม็ดของแข็งได้อย่างดีด้วย

เมื่อพิจารณาสสมบัติของเทคนิคฟลูอิดเซชันเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งหรือเบดบรรจุ พบว่ามีข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ข้อได้เปรียบ

1. ในสภาพฟลูอิดเบด อนุภาคของแข็งจะเกิดการเคลื่อนที่หมุนเวียนอยู่ตลอดเวลาทำให้เกิดการผสมกันได้อย่างรวดเร็ว อนุภาคมีภายในเบดคงที่ตลอดซึ่งต่างจากเบดนิ่งหรือเบดบรรจุอนุภาคจะไม่เท่ากันตลอดทั้งเบด
2. มีการจัดเรียงตัวของอนุภาคของแข็ง อนุภาคที่มีน้ำหนักน้อยจะอยู่ส่วนบนและที่มีน้ำหนักมากจะอยู่ส่วนล่าง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการแยกขนาดอนุภาคของแข็งได้ นอกจากนี้แรงเสียดทานต่อการไหลของของไหลมีค่าน้อยกว่าเบดนิ่งมาก
3. จากสมบัติที่คล้ายกับของไหล ฟลูอิดเบดจึงสามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้ คือปล่อยให้ของแข็งไหลออกจากเบดและไหลเติมเข้าไปในเบดได้ การควบคุมก็จะทำได้ง่าย
4. การที่อนุภาคของแข็งไหลหมุนเวียนอยู่ภายในเบด เม็ดของแข็งนี้สามารถที่จะเป็นตัวนำความร้อนจากผนังแหล่งความร้อนให้กับของไหลได้มากกว่า เพราะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วของไหลเท่ากัน ฟลูอิดเบดจึงเหมาะสมกับกระบวนการที่มีปฏิกิริยาให้ความร้อนหรือดูดความร้อนจำนวนมาก
5. พื้นที่สัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็งกับของไหลมีมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเบดนิ่งที่ใช้จำนวนอนุภาคของแข็งเท่ากัน ฟลูอิดเบดจึงมีประโยชน์ในการขยายงานที่มีทั้งการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวลสาร
6. การทำงานด้วยฟลูอิดเบดจะเสียพลังงานน้อยกว่า เพราะแรงเสียดทานและความดันลดภายในเบดน้อยกว่าในเบดบรรจุมาก
7. สามารถกำจัดขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้โดยไม่ต้องหยุดเครื่องทำงาน
8. สามารถใช้ในการขนส่งอนุภาคของแข็งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้

2. ข้อเสียเปรียบ

1. ในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดเบด เวลาที่ของไหลสัมผัสกับอนุภาคของแข็งสั้นมากจึงต้องใช้เบดสูงๆ หรือเบดหลายชั้น ทำให้สิ้นเปลืองเงินลงทุนมาก
2. เนื่องจากเกิดการผสมกันอย่างรวดเร็ว บางครั้งเวลาที่อนุภาคของแข็งอยู่ในเบดสั้นเกินไป เมื่อทำงานแบบต่อเนื่องทำให้ผลลัพธ์ที่ได้แยกลง
3. การทำงานมีข้อจำกัด เพราะถ้าให้ความเร็วของของไหลสูงเกินไป อนุภาค

ของแข็งก็จะออกจากเบดไปพร้อมกับของไหล

4. ในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไรซ์เบด จะเกิดการสันเสเหือนของหอตกลง หรือเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากอนุภาคของแข็งกระทบกับผนังหอตกลง

5. เทคนิคนี้ใช้กับอนุภาคของแข็งที่เป็ยกหรือเป็นยางไม่ได้ เพราะจะเกิดการเกาะเป็นก้อนใหญ่และตกตะกอนมายังส่วนล่างของเบด

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- Desal และ Yang (1983) ศึกษาอิทธิพลของ Fe_2O_3 ในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซัลเฟชัน (sulfation reaction) ในห้องเผาไหม้แบบฟลูอิดไรซ์เบด พบว่า Fe_2O_3 แม้ปริมาณเพียงเล็กน้อย (ประมาณ 1.08 %) ที่เคลือบลงบนผิวของ CaO จะช่วยให้ประสิทธิภาพในการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ดีกว่าเมื่อไม่มีการเคลือบ Fe_2O_3 ถึง 65 % และความต้องการ CaO ลดลงประมาณ 40 % แต่เมื่อเพิ่ม Fe_2O_3 เป็น 3.2 % ผลการจับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะดีขึ้นในช่วงแรก แต่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 1 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะลดลง ซึ่งอธิบายได้ว่าการที่ Fe_2O_3 ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจาก Fe_2O_3 เป็น n-type semiconductor ที่มีอิเล็กตรอนมากเกินไป นั่นคือความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูง ดังนั้นจึงมีผลทำให้ CaO มีความสามารถในการทำปฏิกิริยา (activity) สูงขึ้น นอกจากนี้พบว่าการประกอบ K_2O , CuO และ SnO_2 ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้เล็กน้อย

- Hartman และ Conghlin (1976) ศึกษาปฏิกิริยาของ SO_2 , O_2 และ CaO โดยอาศัย Grain theory มาอ้างอิงเพื่อใช้สร้างสมการคณิตศาสตร์อธิบายการถ่ายโอนมวลสารและปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นพบว่าอัตราการเปลี่ยน CaO เป็น $CaSO_4$ ขึ้นอยู่กับอิทธิพลของตัวแปรหลายตัว อาทิ ความพรุน (porosity) ของ CaO ขนาดรูพรุนในอนุภาค CaO ความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ทำปฏิกิริยา เป็นต้น

- Gioin และ Mura (1980) ได้แสดงสมการคณิตศาสตร์ โดยอ้างกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่ตั้งสมมุติฐานว่า SO_2 ถูกออกซิไดซ์กลายเป็น SO_3 ก่อน จากนั้น SO_3 จึงแพร่ผ่านเข้าไปในชั้นของรูพรุนของ CaO ทำปฏิกิริยาเป็น $CaSO_4$ ซึ่งผลของสมการที่แสดงนี้สอดคล้องกับข้อมูลการทดลอง ตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ อาทิ เวลาในการทำปฏิกิริยา (residence time) อุณหภูมิ โครงสร้างของรูพรุน เป็นต้น ในปี

ต่อมา (1980) ทั้งสองได้เสนอผลงานวิจัยที่เกี่ยวกับตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) เพียงเล็กน้อยเท่านั้น เช่น การเติม V_2O_5 น้อยกว่า 0.1 % จะทำให้การกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ดีมาก

- Simon G. A. (1987) ศึกษาการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยปูนขาว โดยเสนอแบบจำลองเพื่ออธิบายการเกิดซัลเฟตไว้ว่า มีโครงสร้างของรูพรุนเป็นรูปต้นไม้ รูพรุนที่มีขนาดเล็ก เส้นผ่านศูนย์กลาง 1-10 ไมโครเมตร ถูกควบคุมทางจลนพลศาสตร์และมีแนวโน้มว่าจะเต็มรูพรุนที่มีขนาดเล็กที่สุดก่อน อนาคตปูนขาวสูญเสียพื้นที่ผิวภายในทำให้ความสามารถในการทำปฏิกิริยาลดลง ส่วนรูพรุนที่มีขนาดใหญ่เส้นผ่านศูนย์กลาง 100 ไมโครเมตรถึง 1 มิลลิเมตร ถูกควบคุมด้วยการแพร่ผ่าน $CaSO_4$ เกิดการอุดตันทำให้มีผลสัมฤทธิ์ลดลง มีความต้านทานการแพร่มากขึ้น CaO ที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาจึงมีโอกาสทำปฏิกิริยากับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์น้อยลง

- Smith และคณะ (1980) ศึกษาสารที่ระเหยได้จากถ่านล้อย พบว่าเมื่อให้ความร้อนแก่ถ่านล้อยจนถึงอุณหภูมิ $1400^\circ C$ สารที่สามารถระเหยได้จะระเหยออกมาอย่างสมบูรณ์ เช่น Hg, Se, As, Br, I เป็นต้น และพบว่าแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์สามารถระเหยได้เมื่ออุณหภูมิสูงถึง $300^\circ C$ และจะเพิ่มปริมาณมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

- พูนศักดิ์ เทียนสว่าง (2538) ศึกษาการดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยสารดูดซึมนที่มีถ่านล้อยิกไนต์เป็นองค์ประกอบในเบดนิ่ง โดยใช้สารดูดซึมนที่มีถ่านล้อย ปูนขาว และยิปซัมเป็นองค์ประกอบ พบว่าอัตราส่วนของถ่านล้อย ปูนขาว และยิปซัมที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์สูงสุดคือ 6:4:2 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซึมนที่เหมาะสมคือ $200^\circ C$ และ 0.95 เซนติเมตร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย