



บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงที่ใช้เวลานานนับล้านปีของการสะสมตัวของซากพืชซากสัตว์สภาพแวดล้อมที่เหมาะสมของกระบวนการทางธรณีวิทยา โดยได้รับอิทธิพลจากความดันและความร้อนของผิวโลกแล้วกลายเป็นพีท (peat) ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงภายในทั้งทางเคมี และกายภาพแล้วค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นถ่านหินชนิดต่าง ๆ โดยมีคาร์บอน (C) เป็นธาตุองค์ประกอบหลัก และมีแร่ธาตุต่าง ๆ เจือปนอยู่ด้วยเช่น ซิลิกอน (Si) ไนโตรเจน (N) และกำมะถัน (S) ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในถ่านหินที่ก่อให้เกิดปัญหาเมื่อนำถ่านหินมาใช้เป็นเชื้อเพลิง

การแบ่งลำดับศักดิ์ (rank) ของถ่านหิน

การจำแนกชนิดของถ่านหินตามศักดิ์ (rank) โดยวิธีมาตรฐานของอเมริกา (American Society for Testing Materials, ASTM) ดังตารางที่ 2.1(2) ซึ่งพิจารณา คาร์บอนคงที่ ค่าความร้อนและลักษณะ agglomeration สามารถแบ่งถ่านหินออกได้เป็น 4 ชั้น ดังนี้ (3)

ก. แอนทราไซต์ (Anthracite) เป็นถ่านหินคุณภาพดีที่สุดในลำดับเป็นเงามัน ความวาวสูงแข็งมาก ปริมาณคาร์บอนคงที่สูงกว่าร้อยละ 86 ขึ้นไป ปริมาณความชื้นต่ำมาก และมีค่าความร้อนสูงแต่จุดติดไฟยาก

ข. บิทูมินัส (Bituminous) เป็นถ่านหินเนื้อแน่น แข็ง มีสีดำ ลักษณะมันวาว ปริมาณคาร์บอนคงที่ร้อยละ 69-86 ให้ค่าความร้อนสูง ใช้ในอุตสาหกรรมถลุงโลหะ

ค. ซับบิทูมินัส (Subbituminous) เป็นถ่านหินที่มีสีดำคล้ายขี้ผึ้ง ให้ค่าความร้อนสูงกว่าลิกไนท์

ง. ลิกไนท์ (Lignite) เป็นถ่านหินคุณภาพต่ำสุด วิศวกรรมการมาจากพีท มีซากพืชปรากฏอยู่เล็กน้อย มีปริมาณความชื้นและออกซิเจนค่อนข้างสูง ให้ค่าความร้อนต่ำ

นอกจากนี้ยังมีการแบ่งถ่านหินตามระบบมาตรฐานระหว่างประเทศ (International System) โดยพิจารณาจากค่าสารระเหย (volatile matter) และค่าความร้อน (Heating Value)

2.1 องค์ประกอบและโครงสร้างของถ่านหิน

ปริมาณธาตุต่าง ๆ ที่มีในถ่านหินขึ้นอยู่กับกระบวนการเกิดถ่านหิน (Coalification) ธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักของถ่านหินคือ คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ส่วนธาตุอื่น ๆ ที่มีอยู่ด้วยในปริมาณน้อย คือ กำมะถัน ซิลิกอน ไนโตรเจน อลูมิเนียม เหล็ก แคลเซียม แมงกานีส

ตารางที่ 2.1 การแบ่งถ่านหินตามศักดิ์ วิทยวิธี ASTM 388 (2)

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

^a This classification does not apply to certain coals, as discussed in Note 1.

^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 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 according to fixed carbon, regardless of calorific value.

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

ไบโอสเตียม ไซเตียม และดีตาเนียม คาร์บอนเป็นธาตุที่มีมากที่สุดในการสร้างถ่านหินซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้พลังงานเกิดจากอินทรีย์สาร โดยมีธาตุไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และกำมะถันประกอบอยู่ด้วยเล็กน้อย รวมเรียกส่วนนี้ว่า maceral (organic coal matrix) ส่วนธาตุอื่น ๆ ที่รวมกันเป็นสารประกอบอนินทรีย์แทรกในเนื้อถ่านหิน เรียกว่า mineral matter (crystalline inorganic compounds) (4)

เมื่อนำถ่านหินมาซีเป็นเชื้อเพลิง maceral เป็นส่วนที่ทำให้ความร้อนและก๊าซจากการเผาไหม้ ส่วนที่เหลือจากการเผาไหม้ คือ เถ้า (ash) ซึ่งเป็นส่วนของ mineral matter ที่อุณหภูมิสูง ๆ สารประกอบของแร่ธาตุบางตัวจะสลายตัวเป็นก๊าซ เช่น กำมะถันสลายตัวเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คาร์บอนเนตสลายตัวเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไพไรต์สลายตัวเป็นเหล็กและเหล็กเปลี่ยนแปลงอยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ของเหล็กซึ่งเป็นส่วนประกอบในเถ้า

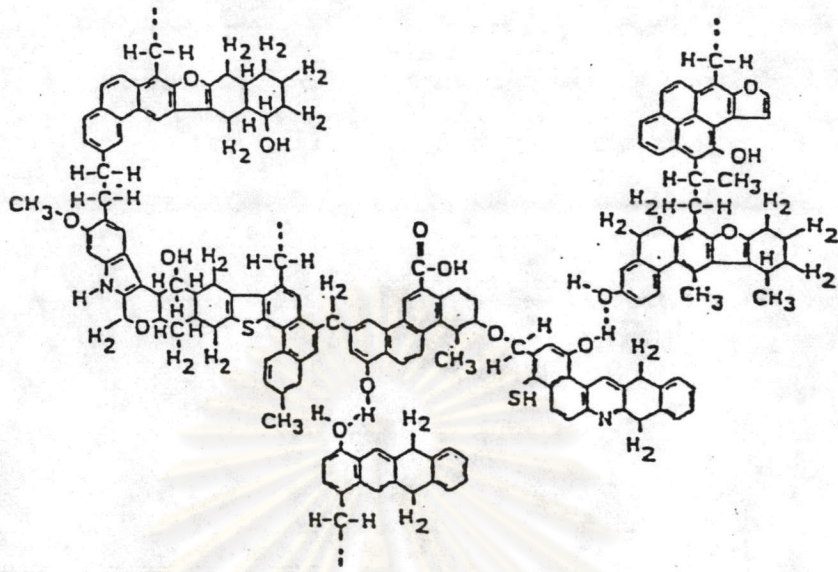
โครงสร้างทางเคมีหรือสูตรโมเลกุลของถ่านหินยังไม่ทราบแน่ชัด แต่นักวิทยาศาสตร์คาดว่าถ่านหินประกอบด้วยโมเลกุลของวงแหวนอะโรมาติก (aromatic) และไฮโดรอะโรมาติก (hydroaromatic) ที่เชื่อมกันด้วยโมเลกุลอะลิฟาติก (aliphatic) ภายในโมเลกุลยังประกอบด้วยอะตอมของธาตุออกซิเจน ไนโตรเจน กำมะถัน และกรุปฟังก์ชัน (functional group) ต่าง ๆ รวมอยู่ด้วย (5) ดังรูป 2.1 แสดงโมเลกุลสมมติของถ่านหิน

โครงสร้างโมเลกุลของถ่านหินแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ตามสมบัติทางเคมี คือ ส่วนโครงสร้างอินทรีย์ (organic structure) และส่วนที่เป็นสารประกอบแร่ธาตุ

ก. โครงสร้างอินทรีย์ (organic structure)

โครงสร้างอินทรีย์ของถ่านหินประกอบด้วยคาร์บอนประมาณ 70-79 ส่วน ไฮโดรเจน 3-5 ส่วน ออกซิเจน 1-2 ส่วน กำมะถันและไนโตรเจน 1-2 ส่วนโดยน้ำหนักเมื่อไม่คิดความชื้น เมื่อเทียบอัตราส่วนโดยน้ำหนักของอะตอมของธาตุ (atomic ratio) พบว่าไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในโครงสร้างถ่านหิน เมื่อตัดตัวของถ่านหินสูงขึ้นอัตราส่วนโดยน้ำหนักของอะตอมไฮโดรเจนต่อคาร์บอน และออกซิเจนต่อคาร์บอนจะลดลง

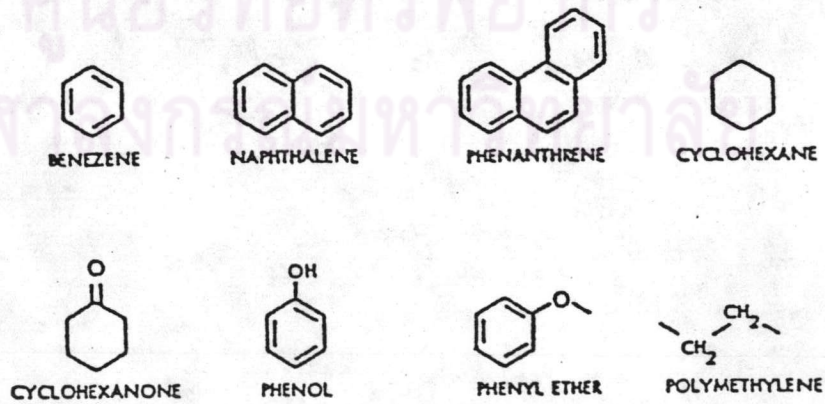
การศึกษาสารประกอบอินทรีย์ในโครงสร้างถ่านหิน โดยใช้สเปกโตรสโกปี รังสีอินฟราเรด หรือวิธีทางเคมีอื่น ๆ ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าโครงสร้างที่แน่นอนของถ่านหินเป็นอย่างไร แต่จากงานวิจัยของนักวิทยาศาสตร์ต่าง ๆ พอที่จะทราบได้ว่าสารประกอบอินทรีย์ในโมเลกุลของถ่านหินเป็นสารประกอบพวกเบนซีน ไฮโดรคาร์บอน ไฮโดรคาร์บอน เมทิลีน แนพทาเลน ฟีนอล ฟีนอลิเทอร์ ฟีลิมิทธิลีน ฟีนันทริน สารประกอบไฮโดรอะโรมาติก เช่น คาร์บาซิล เบนซาโทโรฟิน และไพรีน นอกจากนี้ยังมีกรุปฟังก์ชัน (functional group) คือ ไฮดรอกซิล คาร์บอกซิล อะมิโน และไทออล ดังแสดงในรูป 2.2



$\begin{matrix} \text{O} \\ || \\ -\text{C}-\text{OH} \end{matrix}$, $-\text{OH}$, $-\text{O}-\text{CH}_3$, $\begin{matrix} \text{O} \\ || \\ -\text{C}-\text{H} \end{matrix}$ คือ functional groups

$-\text{CH}_2-$, $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$, $-\text{CH}_2-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}-$ คือ aliphatic bridges

รูปที่ 2.1 โมเลกุลสมมุติของถ่านหิน (5)



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างสารประกอบอินทรีย์ในถ่านหิน (4)

ข. สารประกอบแร่ธาตุ

ซิลิกอนเป็นธาตุองค์ประกอบหลักในส่วนของ mineral matter นอกจากนี้ยังมี อลูมิเนียม เหล็ก แคลเซียม แมกนีเซียม ดิเตเนียม ไรต์เซียมและโปตัสเซียม ซึ่งจะรวมตัวกันเป็น สารประกอบหรือรวมกับอะตอมของธาตุอื่น ๆ ในสารประกอบต่าง ๆ ส่วนใหญ่มีอยู่ในรูปสารประกอบออกไซด์ ดังตารางที่ 2.2 แร่ธาตุที่พบมากที่สุดคือ Illite, Kaolinite เป็นพวกดินเหนียว (Clay)

สารประกอบแร่ธาตุเหล่านี้จะรวมกันเป็นส่วนหนึ่งของเนื้อถ่านหิน ส่วนนี้จะแยกออกมาโดยวิธีทางกายภาพได้ยาก แต่ถ้ารวมตัวแล้วจับกันเป็นก้อนปะปนอยู่อย่างหลวมในถ่านหินพอที่จะแยกออกได้ด้วยวิธีทางกายภาพ

ตารางที่ 2.2 แร่ธาตุส่วนใหญ่ที่พบในถ่านหิน (4)

Mineral Group	Mineral	Formula
Aluminosilicate (clay)	Illite	$(OH)_4K_2(Si_6Al_2)Al_4O_{20}$
	Kaolinite	$(OH)_6Si_4Al_4O_{10}$
Sulfide	Pyrite	FeS_2
Carbonates	Dolomite	$CaCO_3 \cdot MgCO_3$
	Ankerite	$2CaCO_3 \cdot MgCO_3 \cdot FeCO_3$
	Calcite	$CaCO_3$
Silica	Quartz	SiO_2

2.2 การจำแนกชนิดและลักษณะของกำมะถันในถ่านหิน

กำมะถันเป็นธาตุที่ไม่ต้องการในถ่านหิน เนื่องจากทำให้เกิดการกัดกร่อนแก่อุปกรณ์การเผาไหม้และก่อให้เกิดมลภาวะเป็นพิษหลังการเผาไหม้ถ่านหิน ปริมาณกำมะถันรวมที่มีอยู่ในถ่านหินพบตั้งแต่ 0.1-10% โดยน้ำหนัก (6) กำมะถันในถ่านหินมีรูปแบบต่าง ๆ แบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

กำมะถันอนินทรีย์ (inorganic sulfur) แบ่งเป็น 2 รูปแบบคือ

- กำมะถันไพไรต์ (pyritic sulfur)
- กำมะถันซัลเฟต (sulfate sulfur)

กำมะถันอินทรีย์ (organic sulfur)

ก. กำมะถันไพไรต์ (pyritic sulfur)

กำมะถันไพไรต์ในถ่านหินอยู่ในรูปของสารประกอบโลหะซัลไฟด์ คือ แร่ไพไรต์ (pyrite) และแร่มาร์คาไซต์ (marcasite) แร่ทั้งสองชนิดมีสูตรเคมีเหมือนกันคือ FeS₂ แต่มีความแตกต่างกันทางโครงสร้างผลึกและคุณสมบัติทางกายภาพ คือ ไพไรต์มีโครงสร้างผลึกแบบ cubic มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 5 ส่วนมาร์คาไซต์มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ rhombic ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 4.87 เมื่อเทียบกับถ่านหินซึ่งมีความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 1.3-1.8 และไม่ละลายน้ำ จากคุณสมบัติที่แตกต่างกันด้านความถ่วงจำเพาะนี้ สามารถแยกกำมะถันไพไรต์ออกจากถ่านหินโดยวิธีทางกายภาพคือ specific gravity separation ได้ ส่วนกำมะถันไพไรต์ที่มีขนาดเล็กมากสามารถขจัดได้ด้วยวิธีทางเคมี

ขนาดของไพไรต์ที่พบในถ่านหินมีหลายรูปแบบ คือ (4)

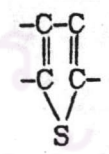
1. Epigenetic : ขนาดใหญ่มากกว่า 50 ไมครอน
2. Syngenetic : เป็นผลึกที่มีขนาดเล็กประมาณ 5-50 ไมครอน
3. Finely intergrown และ ultrafine pyrite : เป็นผลึกขนาดเล็กมาก มีขนาดเล็กกว่า 5 ไมครอน

ข. กำมะถันซัลเฟต (sulfate sulfur)

พบในถ่านหินในลักษณะของโลหะซัลเฟต เช่น สารประกอบแคลเซียมซัลเฟต (CaSO₄) สารประกอบซัลเฟตของเหล็ก (FeSO₄) สารประกอบซัลเฟตของทองแดง (CuSO₄) สารประกอบแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO₄) หรืออาจพบในลักษณะของแร่ยิปซัม (gypsum) ปริมาณกำมะถันซัลเฟตมีน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณกำมะถันไพไรต์และกำมะถันอินทรีย์

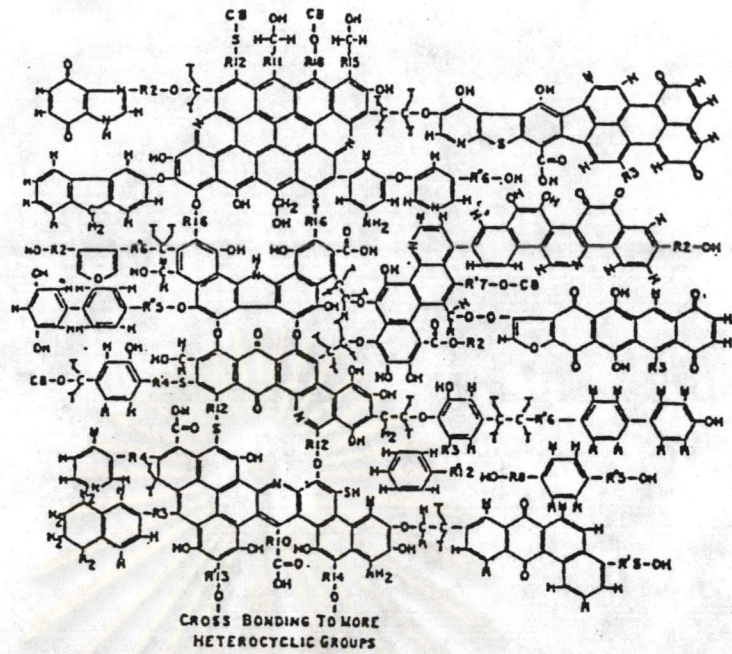
ค. กำมะถันอินทรีย์ (organic sulfur) (4, 6, 7)

กำมะถันอินทรีย์มีประมาณร้อยละ 30 ถึง 70 ของปริมาณกำมะถันรวมในถ่านหินพบกระจัดกระจายทั่วไปในถ่านหิน อยู่ในโครงสร้างอินทรีย์ของถ่านหิน ส่วนมากอยู่ในรูปสารประกอบพวก heterocyclic ซึ่งมีพันธะเสถียรมาก มีสูตรโครงสร้างเป็น



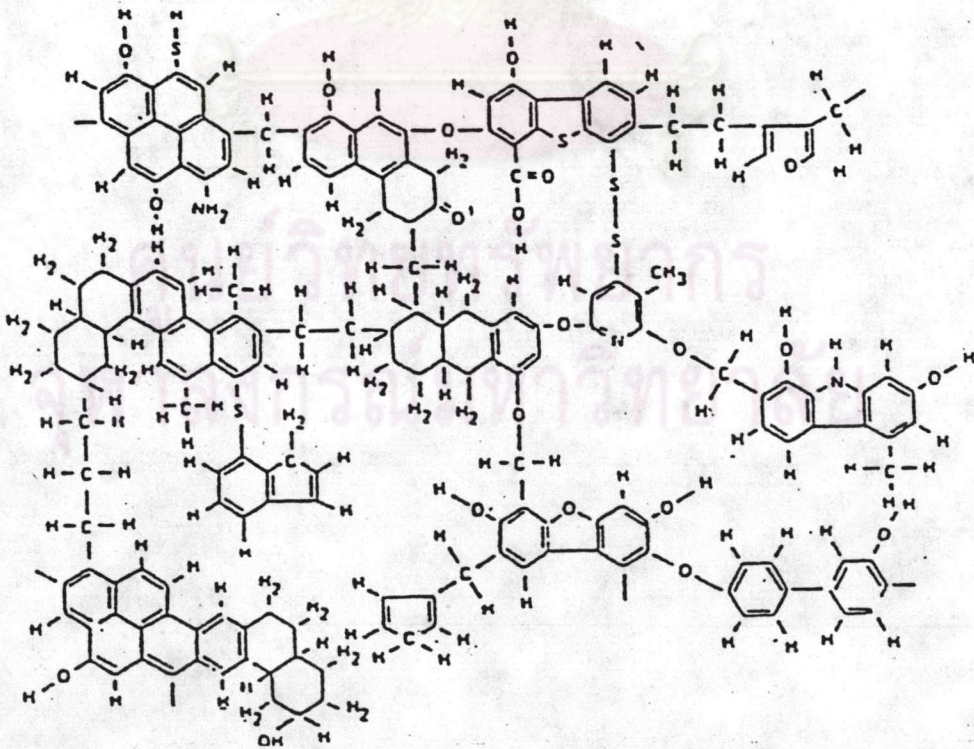
mercaptan (R-S-H), sulfide (R-S-R'), disulfide (R-S-S-R') thiophenol (C₆H₅SH) และ thioether เป็นต้น ตัวอย่างลักษณะโครงสร้างของกำมะถันอินทรีย์แสดงในรูป 2.3 และตัวอย่างลักษณะโครงสร้างของกำมะถันอินทรีย์ของสารประกอบพวกไดซัลไฟด์ในถ่านหินดังแสดงในรูป 2.4

เนื่องจากกำมะถันอินทรีย์มีโครงสร้างที่เสถียรมาก ในการขจัดกำมะถันอินทรีย์จึงไม่สามารถใช้วิธีทางกายภาพได้ ต้องใช้วิธีทางเคมีเพื่อทำลายพันธะเคมีระหว่างกำมะถันกับคาร์บอน ปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการขจัดกำมะถันไพไรต์ใช้ไม่ได้กับกำมะถันอินทรีย์ เพราะกำมะถันอินทรีย์มีโครงสร้างที่เสถียรกว่าและไม่ไว (reactive) ต่อปฏิกิริยาทำไพไรต์



- RⁿN = Alicyclic rings of N carbons.
- RN = Alkyl side chain of N carbons.
- R'N = Unsaturated alkyl side chain of N carbons.
- CB = Cross bonding by O or S to new heterocyclic groups with side chains.
- T = Tetrahedral 3 dimensional C-C bonds, C-O bonds and C-S bonds.

รูปที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างของกำมะถันอินทรีย์ที่มีสารประกอบพวก mercaptan, sulfide และ heterocyclic ring ในโครงสร้างของถ่านหิน (6)



รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างของกำมะถันอินทรีย์ของสารประกอบพวกไดซัลไฟด์ในโครงสร้างของถ่านหิน (6)

วิธีการวิเคราะห์ปริมาณกำมะถันอินทรีย์ไม่สามารถวิเคราะห์โดยตรงได้ เนื่องจากโครงสร้างที่ซับซ้อนของกำมะถันอินทรีย์ ดังนั้น ปริมาณกำมะถันอินทรีย์คำนวณได้จากปริมาณกำมะถันรวมหักออกด้วยปริมาณกำมะถันไพไรต์ และปริมาณกำมะถันซัลเฟต

2.3 การขจัดกำมะถันในถ่านหิน

เมื่อนำถ่านหินมาใช้เป็นเชื้อเพลิง ระหว่างเกิดการเผาไหม้กำมะถันในถ่านหินจะรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศให้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เมื่อก๊าซทั้งสองถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศจะทำให้เกิดมลภาวะ เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ก๊าซทั้งสองนี้ถ้ารวมตัวกับไอน้ำในบรรยากาศจะกลายเป็นกรดซัลฟูรัส (H_2SO_3) และกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) มีฤทธิ์ในการกัดกร่อนอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อลดปัญหาดังกล่าวข้างต้น จึงต้องขจัดกำมะถันในถ่านหิน วิธีการขจัดกำมะถันในถ่านหินแบ่งตามช่วงเวลาทำการขจัดได้ 3 วิธีคือ

ก. วิธีการขจัดกำมะถันก่อนการเผาไหม้ (6)

เป็นการลดปริมาณกำมะถันในถ่านหินก่อนนำถ่านหินไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ อาจใช้วิธีทางกายภาพ หรือวิธีทางเคมีก็ได้ นอกจากนี้ยังมีกระบวนการทำถ่านหินให้เป็นเชื้อเพลิงก๊าซ (gasification) หรือ เชื้อเพลิงเหลว (liquefaction)

ข. วิธีการขจัดกำมะถันระหว่างการเผาไหม้ (8)

โดยการเติมสารเคมีบางชนิดลงไปในช่วงเกิดการเผาไหม้ ซึ่งสารเคมีที่เติมลงไปจะรวมตัวกับกำมะถันที่สลายตัวจากการเผาไหม้ เกิดเป็นสารประกอบใหม่ที่สามารถแยกออกจากการเผาไหม้ได้ เช่น การเติมปูนขาว (lime, CaO) หินปูน (lime stone, CaCO_3) ลงไปในช่วงการเผาไหม้ถ่านหินที่มีขนาด 1 นิ้ว หรือเล็กกว่าในฟลูอิไดซ์เบด (Fluidized bed) เมื่อเผาไหม้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะถูกกำจัดโดยเปลี่ยนไปอยู่ในรูปสารประกอบแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) ซึ่งสามารถขจัดออกได้ง่าย โดยใช้เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic precipitator) หรือถุงกรอง (filter bag)

ค. วิธีการขจัดกำมะถันหลังการเผาไหม้ (8)

เป็นวิธีการใช้สารเคมีเพื่อจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ออกมาเป็นฟลูเอซ (flue gas) หลังการเผาไหม้ เช่น การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ วิธีนี้เสียค่าใช้จ่ายสูงมาก วิธีการนี้ไม่ได้รับประโยชน์เท่าใดนัก เนื่องจากปริมาณน้ำซดงเท่าเดิม อีกวิธีหนึ่งคือ การสร้างปล่องไฟสูง ๆ เป็นการลดความเข้มข้นของก๊าซที่เป็นมลภาวะได้

การเลือกใช้กระบวนการใดในการขจัดกำมะถันเพื่อผลิตถ่านหินคุณภาพดีที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่าย ปริมาณกำมะถันและแก๊สในถ่านหินเป็นตัวควบคุมคุณภาพของถ่านหินที่มีความสำคัญในการกำหนดราคาถ่านหินด้วย กระบวนการขจัดกำมะถันและ แก๊สก่อนนำถ่านหินไปเผาไหม้เป็นกระบวนการหนึ่งที่นาสนใจศึกษา กระบวนการขจัดกำมะถันในถ่านหินก่อนการเผาไหม้ แบ่งเป็น 2 วิธีใหญ่ ๆ คือ วิธีทางกายภาพ และวิธีทางเคมี

2.3.1 กระบวนการขจัดกำมะถันโดยวิธีทางกายภาพ

การขจัดกำมะถันโดยวิธีทางกายภาพเป็นการขจัดกำมะถันไพไรต์โดยอาศัยคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ถ่านหินมีค่าความถ่วงจำเพาะระหว่าง 1.2 ถึง 1.7 เมื่อเทียบกับกำมะถันไพไรต์ที่มีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 4.9 ถึง 5.0 และพวก noncombustible ash มีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 2.0 ถึง 2.6 (9) จากค่าความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะระหว่างถ่านหินกับกำมะถันไพไรต์และถ่านนี้ นำมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการแยกกำมะถันไพไรต์และถ่านออกจากถ่านหินได้ Surface Properties เป็นคุณสมบัติทางกายภาพอีกอย่างหนึ่งที่ใช้ในกระบวนการ Froth Flotation เพื่อแยกถ่านหินและถ่านออกจากกัน โดยอาศัยคุณสมบัติความแตกต่างกันในการเป็น hydrophilic ของถ่านหินและถ่าน กระบวนการที่ใช้ขจัดกำมะถันโดยวิธีทางกายภาพ ซึ่งอาศัยสมบัติทางกายภาพดังกล่าวมาแล้วนั้น แบ่งออกได้ 2 กระบวนการ คือ (9)

Dry Mechanical Separation Process

Wet Mechanical Separation Process

ตัวอย่างของกระบวนการแบบ Dry Mechanical Separation Process คือ

Magness Process เป็นกระบวนการที่อาศัยเทคนิค dry, low-intensity magnetic โดยใช้ไอรอนเพนตาคาร์บอนิล (iron pentacarbonyl, $\text{Fe}(\text{CO})_5$) ที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ 170°C ไอรอนคาร์บอนิลจะสลายตัวเกิดเป็นสารที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กกับถ่านและกำมะถันไพไรต์เท่านั้น ถ่านหินจะถูกแยกออกจากกำมะถันไพไรต์และถ่านในเครื่อง magnetic separator

ตัวอย่างของกระบวนการแบบ Wet Mechanical Separation Process ได้แก่ Froth Flotation, Oil Agglomeration เป็นต้น

Froth Flotation เป็นกระบวนการที่ใช้ในการแยกกำมะถันไพไรต์ และถ่านออกจากถ่านหินที่บดละเอียด โดยผ่าน air bubble ไปใน coal slurry เนื่องจากถ่านหินมีสมบัติเป็น hydrophobic ดังนั้นอนุภาคถ่านหินจะจับตัวกับ air bubble แล้วลอยตัวขึ้นมาบนผิวหน้าของ slurry ซึ่งจะถูกแยกออกไป ในขณะที่พวกแร่ธาตุต่าง ๆ ที่มีคุณสมบัติเป็น hydrophilic จะจับกับน้ำจมตัวลงสู่ด้านล่างของภาชนะ กระบวนการนี้อาศัย Flotation Reagents ช่วยให้การแยกกำมะถันไพไรต์ ถ่าน ออกจากถ่านหินได้ดีขึ้น

Oil Agglomeration หรือ Spherical Agglomeration Process เป็นกระบวนการที่ใช้ได้ดีกับถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 200 เมช (mesh) อาศัยหลักการแขวนลอยของถ่านหินในสารละลาย โดยเติม agglomerating oil ซึ่งไม่ละลายน้ำลงไปในน้ำที่มีถ่านหินแขวนลอยอยู่ น้ำมันที่เติมลงไปจับกับอนุภาคของถ่านหินที่มีคุณสมบัติเป็น hydrophobic รวมตัวเป็นกลุ่ม (agglomerate) ลอยตัวอยู่บนน้ำ ในขณะที่ส่วนที่เป็นแร่ธาตุและไพไรต์มีสมบัติเป็นพวก

hydrophilic จะจมลงสู่ด้านล่างของถังกวน กระบวนการนี้สามารถจัดกำมะถันไพไรต์และแก้วออกจากถ่านหินได้ agglomerating oil ที่ใช้ เช่น kerosene-like petroleum distillate ซึ่งให้ผลดีที่สุด นอกจากนี้ยังมี น้ำมันเตา น้ำมันก๊าด น้ำมันห่านถ่านหินเบา และ น้ำมันดิบหนัก เป็นต้น

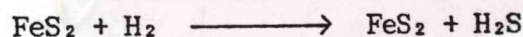
กระบวนการจัดกำมะถันโดยวิธีทางกายภาพทั้ง Dry และ Wet Mechanical Separation Process นี้จัดได้เฉพาะกำมะถันไพไรต์และแก้วที่จับตัวหลวม ๆ กับถ่านหินเท่านั้น แต่ไม่สามารถจัดกำมะถันอินทรีย์ได้เพราะอยู่ในส่วน coal matrix ในโครงสร้างของถ่านหิน ซึ่งอาจใช้วิธีทางเคมีในการจัดได้

2.3.2 กระบวนการจัดกำมะถันโดยวิธีทางเคมี

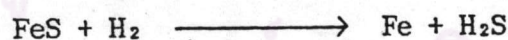
กระบวนการจัดกำมะถันโดยวิธีทางเคมีนี้ อาศัยสารเคมีนำมาทำปฏิกิริยากับถ่านหินภายใต้สภาวะปฏิกิริยาที่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิ ความดันที่เหมาะสม กระบวนการทางเคมีสามารถจัดกำมะถันไพไรต์และกำมะถันอินทรีย์ซึ่งไม่สามารถจัดโดยวิธีทางกายภาพได้ ปฏิกิริยาเคมีที่สำคัญที่ใช้ในการจัดกำมะถัน ได้แก่ ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation) ปฏิกิริยากับสารละลายเบส และปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) เป็นต้น

ก. ปฏิกิริยาเคมีที่ใช้จัดกำมะถันไพไรต์

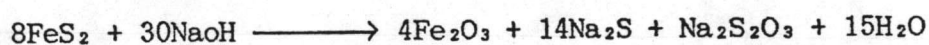
- ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (6) เป็นปฏิกิริยาที่กำมะถันไพไรต์ทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนให้สารประกอบซัลไฟด์ของ เหล็กและก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์



ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 230°C จะเกิดปฏิกิริยาต่อไปดังสมการ



- ปฏิกิริยากับสารละลายเบส (10) กำมะถันไพไรต์ในถ่านหินทำปฏิกิริยากับสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ แยกกำมะถันออกมาในรูปเกลือของโซเดียม



- ปฏิกิริยาออกซิเดชัน เป็นปฏิกิริยาที่ใช้สารที่มีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ (oxidizing agent) เช่น ก๊าซออกซิเจน (O_2) สารละลายเพอร์ริกซัลเฟต $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ H_2O_2 , สารละลายคอปเปอร์คลอไรด์ CuCl_2 , สารละลาย

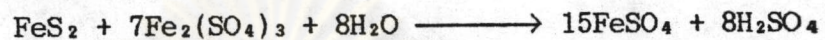


คอปเปอร์ซัลเฟต CuSO_4 เป็นต้น

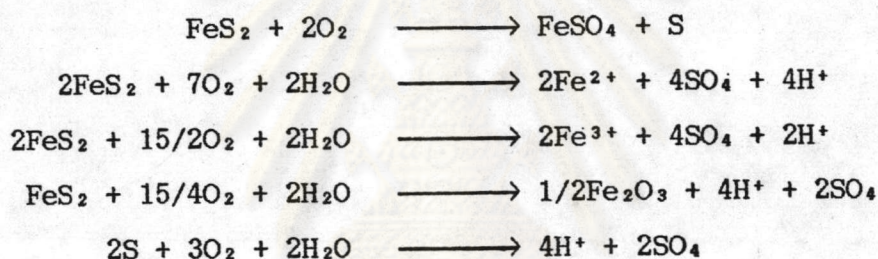
เมื่อใช้ก๊าซซอกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น คือ (6)



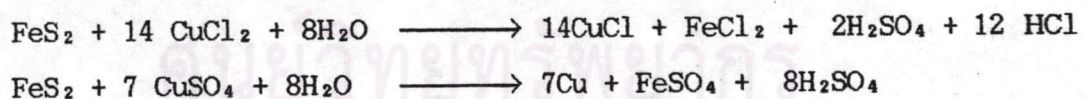
เมื่อใช้สารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตเป็นตัวออกซิไดซ์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น คือ (11)



เมื่อใช้สารละลายไฮดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์ ซึ่งจะแตกตัวให้ก๊าซซอกซิเจนออกมาทำปฏิกิริยาดังสมการ (12)

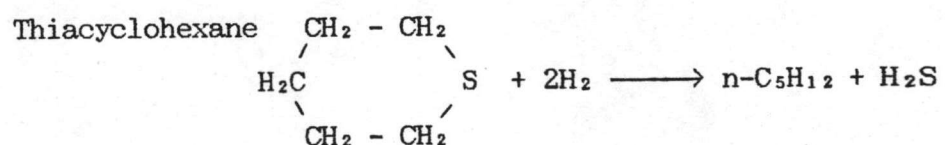
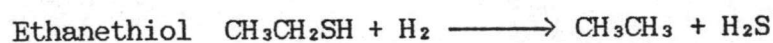


เมื่อใช้สารละลายคอปเปอร์คลอไรด์หรือคอปเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวออกซิไดซ์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ (13)



ข. ปฏิกิริยาเคมีที่ใช้ในการขจัดกำมะถันอินทรีย์

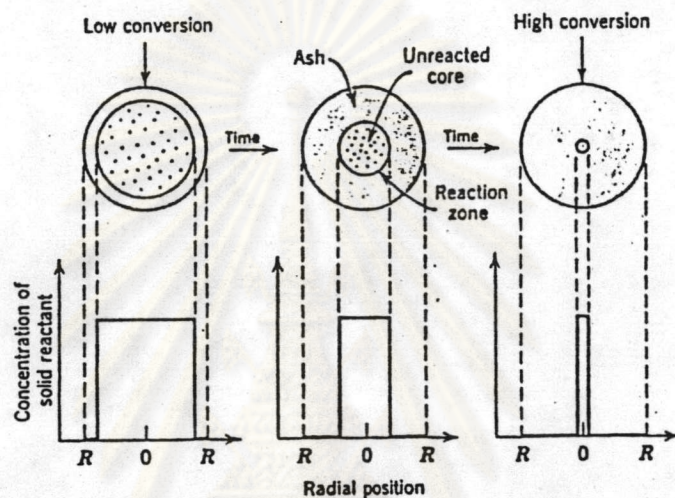
- ปฏิกิริยาไฮดรจิเนชัน (6) กำมะถันอินทรีย์ที่อยู่ในรูปสารประกอบ thiol, sulfides, disulfides และ Thiophene ให้นำมาทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจน ให้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวและก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ดังปฏิกิริยา



สมการอัตราความเร็วรวมต้องพิจารณาการถ่ายเทมวลสาร (mass transfer) พร้อมทั้ง จลนศาสตร์เคมี (Chemical kinetics) ด้วย

2.4.1 กระบวนการเกิดของปฏิกิริยาตามแบบจำลอง unreacted core model

Yagi และ Kunii (14) สมมุติห้อนุภาคกำหนดเป็นทรงกลม ตอนแรกปฏิกิริยา จะเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของอนุภาคก่อนเกิดขึ้นแก้ว แล้วปฏิกิริยาจะเลื่อนเข้าไปในอนุภาคของแข็ง ใน ระหว่างเกิดปฏิกิริยาขนาดของ unreacted core จะลดลง ดังรูป



รูปที่ 2.5 แสดงขนาดอนุภาคของถ่านหินเมื่อเวลาผ่านไปจนปฏิกิริยา (14)

ขั้นตอนการเข้าทำปฏิกิริยาของสาร A แยกได้เป็น 5 ขั้นตอน

1. ก๊าซ A แพร่ผ่านชั้นฟิล์มที่ล้อมรอบอนุภาคของของแข็ง ไปยังผิวของของแข็ง
2. การแพร่ของสาร A ผ่านชั้นแก้วไปยังผิวของแกนที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยา
3. ปฏิกิริยาของก๊าซ A กับของแข็ง
4. การแพร่ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซผ่านชั้นแก้วออกสู่ผิวหน้าของแข็ง
5. การแพร่ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซผ่านชั้นฟิล์มกลับไปยังส่วนที่เป็นของเหลวที่ล้อมรอบของแข็งนั้น

สมมุติให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบไม่ผันกลับ (irreversible) ขั้นตอนที่ 4 และ 5 จะไม่เกิดขึ้น

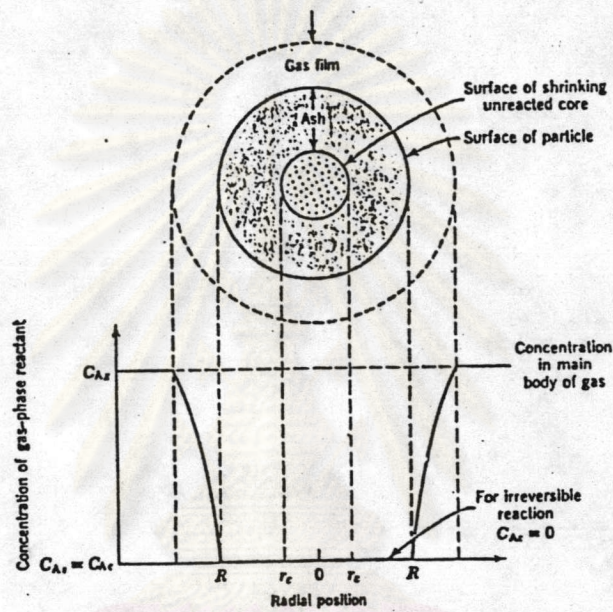
สมมุติฐานในการเข้าทำปฏิกิริยา คือ

- ปริมาณถ่านหินต่อสารละลายคงที่ทุกจุดในเครื่องปฏิกรณ์
- สมบัติของอนุภาคถ่านหินเหมือนกันหมดทุกอนุภาค
- อนุภาคถ่านหินเป็นทรงกลมและมีขนาดเท่ากันทุกอนุภาค

- สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลผ่านชั้นฟิล์มสู่ผิวถ่านหินมีค่าคงที่
- ขั้นตอนที่ช้าที่สุดเป็นขั้นตอนควบคุมในปฏิกิริยาทั้งหมด
- อุณหภูมิทุกจุดในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากันหมด

กลไกปฏิกิริยาควบคุมด้วยขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่งของขั้นตอนการเข้าทำปฏิกิริยาที่กล่าวมาข้างต้น จากขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 3 อันนี้จะแสดงถึงโมเดลของแต่ละขั้นตอนคือ

ก. การควบคุมด้วยการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (Diffusion Through Gas Film Controls) เมื่อพิจารณาให้ความต้านทานของฟิล์มเป็นขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วของปฏิกิริยา



รูปที่ 2.6 แสดงโปรไฟล์ความเข้มข้นก๊าซ A เมื่อการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเป็นขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยา (14)

กำหนดให้ค่าผลต่างความเข้มข้น $C_{Ag} - C_{As}$ คงที่ตลอดเวลา ตามรูปที่ 2.6 จากสมการ (2.1) เขียนความสัมพันธ์ได้ว่า

$$dN_B = b dN_A \tag{2.2}$$

$$-1/S_{ex} dN_B/dt = -1/4\pi R^2 dN_B/dt = -b/4\pi R^2 dN_A/dt = b k_g (C_{Ag} - C_{As}) \tag{2.3}$$

เมื่อ $C_{As} = 0$

$$-1/S_{ex} dN_B/dt = b k_g C_{Ag} \tag{2.4}$$

ให้จำนวนโมลของสาร B เท่ากับ $N_B = \rho_B V$

$$= (\text{moles B/cm}^3 \text{ solid})(\text{cm}^3 \text{ solid}) \quad (2.5)$$

เมื่อสาร A และสาร B เกิดปฏิกิริยาไปทำให้ปริมาตรและรัศมีแกนกลางลดลง ดังนั้น สมการ (2.2) เขียนใหม่ได้ว่า

$$-dN_B = -bdN_A = -\rho_B dV = -\rho_B d(4/3\pi r_c^3) = -4\pi\rho_B r_c^2 dr_c \quad (2.6)$$

แทนค่าสมการ (2.6) ในสมการ (2.4) จะได้อัตราเร็วของปฏิกิริยาในเทอมของรัศมีแกนกลางทางลดลงคือ

$$-1/5\pi r_c^2 dN_B/dt = -\rho_B r_c^2/R^2 dr_c/dt = bk_g C_{A_g} \quad (2.7)$$

จัดรูปสมการ (2.7) แล้วอินทิเกรต ได้สมการสำหรับแกนกลางที่มีขนาดเล็กลงตามเวลาคือ

$$-\rho_B/R^2 \int_R^{r_c} r_c^2 dr_c = bk_g C_{A_g} \int_0^t dt$$

$$t = \rho_B R/3bk_g C_{A_g} [1 - (r_c/R)^3] \quad (2.8)$$

จากสมการ (2.8) เมื่อ $r_c = 0$ จะได้เวลาที่เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ คือ

$$\tau = \rho_B R/3bk_g C_{A_g} \quad (2.9)$$

สมการอนุกรมของรัศมีแกนกลางกับอัตราส่วนเวลาระหว่างเวลาใด ๆ กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ หาได้โดยนำสมการ (2.8) หารด้วย สมการ (2.9) คือ

$$t/\tau = 1 - (r_c/R)^3$$

อินเทอมของสัดส่วนการเปลี่ยน (fractional conversion)

ปริมาตรของแกนกลางที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยา

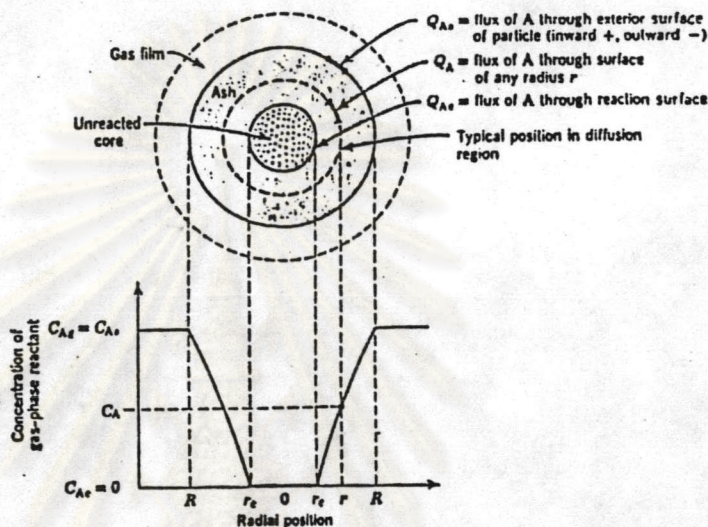
$$1-X_B = \frac{\text{ปริมาตรของแกนกลางที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยา}}{\text{ปริมาตรทั้งหมดของอนุภาค}}$$

$$1-X_B = (4/3\pi r_c^3)/(4/3\pi R^3) = (r_c/R)^3 \quad (2.10)$$

ดังนั้น สมการอนุกรมของรัศมีแกนกลางกับอัตราส่วนระหว่างเวลาใด ๆ กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ เขียนในเทอมของสัดส่วนการเปลี่ยนได้ดังนี้

$$t/\tau = 1 - (r_c/R)^3 = X_B \tag{2.11}$$

ข. การควบคุมด้วยการแพร่ผ่านชั้นเถ้า (Diffusion through Ash Layer Control)



รูปที่ 2.7 แสดงโปรไฟล์ความเข้มข้นก๊าซ A เมื่อการแพร่ผ่านชั้นเถ้าเป็นขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยา (14)

เนื่องจากอัตราการลดลงของรัศมีแกนกลางช้ากว่าอัตราของการแพร่ของสาร A เข้าสู่แกนกลางประมาณ 1000 เท่า เป็นอัตราส่วนอย่างคร่าว ๆ ของความหนาแน่นระหว่างของแข็งกับก๊าซ เนื่องจากเหตุผลดังกล่าวขนาดของแกนกลางที่เวลาใด ๆ จะมีค่าคงที่ ตามรูปที่ 2.7 จากสมมุติฐานนี้ช่วยให้แก้สมการได้ง่ายขึ้น ซึ่งอัตราเร็วของสาร A ในการแพร่เข้าสู่บริเวณที่เกิดปฏิกิริยาคือ

$$-dN_A/dt = 4\pi r^2 Q_A = 4\pi R^2 Q_{As} = 4\pi r_c^2 Q_{Ac} = \text{ค่าคงที่} \tag{2.12}$$

ถ้าให้อัตราการถ่ายเทมวลต่อหน่วยพื้นที่ (flux) ของสาร A ในชั้นของเถ้า เป็นไปตามสมการของ Fick's law สำหรับการแพร่ที่สวนทางกันของจำนวนโมลที่เท่ากัน (equimolar counterdiffusion) และให้ค่า Q_A และ dC_A/dr มีค่าเป็นบวก จะได้

$$Q_A = De dC_A/dr \tag{2.13}$$



แทนค่า Q_A จากสมการ (2.13) ลงในสมการ (2.12) จะได้สมการในเทอมของรัศมี r ใด ๆ

$$-dN_A/dt = 4\pi r^2 De dC_A/dr = \text{ค่าคงที่} \quad (2.14)$$

อินทิเกรตผ่านชั้นแก้วจาก R ถึง r_c จะได้

หรือ

$$-dN_A/dt \int_R^{r_c} dr/r^2 = 4\pi De \int_{C_{Ag}=C_{As}}^{C_{Ac}=0} dC_A$$

$$-dN_A/dt (1/r_c - 1/R) = 4\pi De C_{Ag} \quad (2.15)$$

ในขั้นตอนที่สองของการวิเคราะห์ ถ้าให้ขนาดของแกนกลางเปลี่ยนไปตามเวลา และ $dN_A/dt = \text{ค่าคงที่}$ ขณะที่ขนาดของแกนกลางลดลงเมื่อเวลาผ่านไปชั้นของแก้วจะหนาขึ้นมีผลต่อการแพร่ของสาร A ซึ่งจะช้าลง ดังนั้นก่อนอินทิเกรตสมการ (2.15) จะเปลี่ยนค่า N_A ให้อยู่ในเทอมของ r_c ซึ่งความสัมพันธ์นี้ได้มาจากสมการ (2.6)

$$-\rho_B \int_{r_c=R}^{r_c} (1/r_c - 1/R) r_c^2 dr_c = bDeC_{Ag} \int_0^t dt$$

เมื่ออินทิเกรตจะได้

$$t = \rho_B R^2 / 6bDeC_{Ag} [1 - 3(r_c/R)^2 + 2(r_c/R)^3] \quad (2.16)$$

จากสมการ (2.16) เมื่อ $r_c = 0$ จะได้เวลาที่เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ มีค่า

$$\tau = \rho_B R^2 / 6bDeC_{Ag} \quad (2.17)$$

ดังนั้นเมื่อนำสมการ (2.16) หาด้วยสมการ (2.17) จะได้สมการในรูปของรัศมีแกนกลางกับอัตราส่วนเวลาระหว่างเวลาใด ๆ กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ คือ

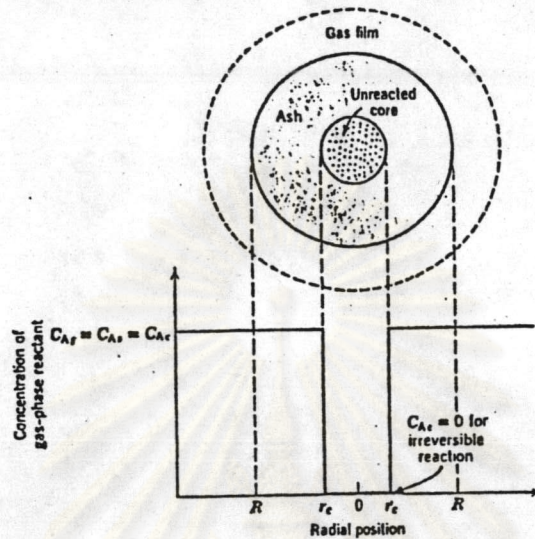
$$t/\tau = 1 - 3(r_c/R)^2 + 2(r_c/R)^3 \quad (2.18)$$

หรือเขียนสมการ (2.18) ในเทอมของความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับสัดส่วนการเปลี่ยน (fractional conversion) ได้เป็น

$$t/\tau = 1 - 3(1-X_B)^{2/3} + 2(1-X_B) \quad (2.19)$$

ค. การควบคุมด้วยปฏิกิริยาเคมี (Chemical Reaction Controls)

เมื่อพิจารณาถึงความแตกต่างของความเข้มข้นภายในอนุภาคระหว่างเกิดปฏิกิริยาเคมีซึ่งเป็นตัวควบคุมอัตราเร็วของปฏิกิริยา



รูปที่ 2.8 แสดงความเข้มข้นก๊าซ A เมื่อปฏิกิริยาเคมีเป็นขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยา (14)

เมื่อปริมาณของสารที่เข้าทำปฏิกิริยาเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวของอนุภาค ดังนั้น อัตราเร็วปฏิกิริยาตามรูปที่ 2.8 คือ

$$-1/4 \pi r_c^2 dN_B/dt = -b/4 \pi r_c^2 dN_A/dt = bk_s C_{Ag} \quad (2.20)$$

แทนค่า N_B ให้อยู่ในเทอมของรัศมี r_c จากสมการ (2.6) ได้

$$-1/4 \pi r_c^2 \rho_B 4 \pi r_c^2 dr_c/dt = -\rho_B dr_c/dt = bk_s C_{Ag} \quad (2.21)$$

อินทิเกรตสมการ (2.21)

$$-\rho_B \int_R^{r_c} dr_c = bk_s C_{Ag} \int_0^t dt$$

$$t = \rho_B / bk_s C_{Ag} (R - r_c) \quad (2.22)$$

เมื่อแทนค่า $r_c = 0$ ในสมการ (2.22) จะได้เวลาที่เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์คือ

$$\tau = \rho_B R / b k_s C_{Ag} \quad (2.23)$$

นำสมการ (2.22) หาด้วยสมการ (2.23) จะได้สมการในรูปของรัศมีแกนกลางกับอัตราส่วนเวลาระหว่างเวลาใด ๆ กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ คือ

$$t/\tau = 1 - r_c/R \quad (2.24)$$

หรือสมการ (2.24) เขียนในเทอมของความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับสัดส่วนการเปลี่ยน (fractional Conversion) ได้เป็น

$$t/\tau = 1 - (1 - X_B)^{1/3} \quad (2.25)$$

ถ้าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบอนุกรม (series) และความเข้มข้นเป็นสมการเชิงเส้น ดังนั้น

$$t_{\text{total}} = t_{\text{film alone}} + t_{\text{ash alone}} + t_{\text{reaction alone}} \quad (2.26)$$

$$\tau_{\text{total}} = \tau_{\text{film alone}} + \tau_{\text{ash alone}} + \tau_{\text{reaction alone}} \quad (2.27)$$

$$-1/S_{\text{ex}} dN_B/dt = bC_A/[1/k_g + R(R - r_c)/r_c De + R/r_c^2 k_s] \quad (2.28)$$

$$\text{หรือ} \quad -dr_c/dt = (bC_A/\rho_B) / \left[\underbrace{r_c^2/R^2 k_g}_{\text{film}} + \underbrace{\{(R - r_c) r_c\}/RDe}_{\text{ash}} + \underbrace{1/k_s}_{\text{reaction}} \right] \quad (2.29)$$

2.4.2 การศึกษาปฏิกิริยาแบบจำลองจลนศาสตร์ (Continuous reaction model)

สมมติฐานที่เข้าในการอธิบายกลไกของปฏิกิริยาเป็นไปตาม continuous reaction model คือ การเกิดปฏิกิริยาดำเนินไปอย่างต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์แบบไม่ต่อเนื่อง (batch reactor) โดยที่

อัตราการหายไปของสาร A = อัตราการเปลี่ยนแปลงของโมล A ต่อหน่วยปริมาตร

$$-r_A = -1/V \cdot dN_A/dt \quad (2.30)$$

เมื่อปริมาตรคงที่ จะได้ $-r_A = -dC_A/dt$ (2.31)

สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเขียนในเทอมความเข้มข้นและอุณหภูมิได้ ดังนี้

$$-r_A = kC_A^n = k_0 e^{-E/RT} C_A^n \quad (2.32)$$

สมการ (2.32) เขียนในเทอมลอการิทึมได้ว่า

$$\ln(-r_A) = \ln k + n \ln C_A \quad (2.33)$$

จากสมการ (2.33) ถ้าเขียนกราฟระหว่าง $\ln(-r_A)$ กับ $\ln C_A$ จะได้กราฟเส้นตรง มีความชันเท่ากับ n และกราฟตัดแกน y ที่ $\ln k$

เมื่อปริมาตรคงที่ จะได้ความสัมพันธ์ของ C_A และ X_A คือ

$$X_A = 1 - C_A/C_{A0} \quad (2.34)$$

และ $dC_A = -C_{A0} dX_A$ (2.35)

จากสมการ (2.31) และสมการ (2.35) นำมาอินทิเกรต

$$\int_0^t dt = - \int_{C_{A0}}^{C_A} dC_A / (-r_A) = C_{A0} \int_0^{X_A} dX_A / (-r_A)$$

ดังนั้นเวลาของการเกิดปฏิกิริยา คือ

$$t = - \int_{C_{A0}}^{C_A} dC_A / (-r_A) = C_{A0} \int_0^{X_A} dX_A / (-r_A) \quad (2.36)$$

ถ้าอันดับอัตราเร็วปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับ 2 (Second order reaction) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วปฏิกิริยา ($-r_P$) กับความเข้มข้นไพเรต์ (C_P) ตามสมการที่ (2.32) คือ (15)

$$-r_P = k_2 C_P^2 \quad (2.37)$$

$$k_2 dt = -dC_P / C_P^2 \quad (2.38)$$

$$k_2 t = 1/C_P - 1/C_{P0} \quad (2.39)$$

$$k_2t + 1/C_{P_0} = 1/C_P \quad (2.40)$$

$$\text{เมื่อ } X = 1 - C_P/C_{P_0}$$

$$k_2tC_{P_0} = \{1/(1-X)\} - 1 \quad (2.41)$$

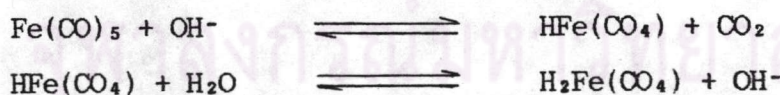
เมื่อพลอตกราฟระหว่าง $1/C_P$ กับ t ตามสมการที่ (2.40) จะได้กราฟเส้นตรง ความชันของเส้นตรงที่ได้มีค่าเท่ากับ $k_2C_{P_0}$


2.5 ผลงานวิจัย

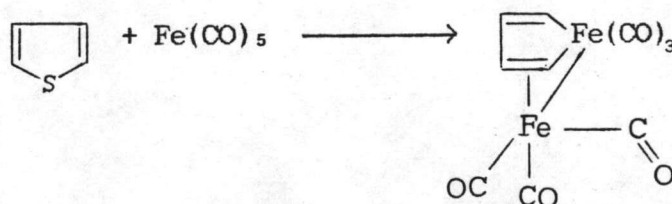
Clifford R. Porter. et.al. (16) ศึกษาการขจัดกำมะถันอินทรีย์ออกจากถ่านหิน โดยให้ถ่านหินทำปฏิกิริยากับสารประกอบพวก metal carbonyl $[Fe(CO)_5]$ และน้ำ ภายใต้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าปานกลาง (pH 7.5 - 10.7) ช่วงอุณหภูมิ $55^\circ - 120^\circ$ ช่วงเวลา 2 - 15 ชั่วโมง ดังตัวอย่างการทดลองต่อไปนี้

ถ่านหินจาก No.6 Seam, Ohio ขนาด 200 เมช (mesh) นำถ่านหิน 100 กรัม ผสมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) แล้วเติมแอนไฮดริสเมทานอล 600 มิลลิลิตร กวนให้เข้ากันจนเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน ผ่านก๊าซไนโตรเจนลงไป แล้วเติมเหล็กเพนทาคาร์บอนิล $[Fe(CO)_5]$ ลงไป 61.1 กรัม ให้ความร้อนแก่ของผสมจนถึงอุณหภูมิ 65° ใช้เวลานาน 3 วัน จากนั้นกรองและล้างถ่านหินด้วยแอนไฮดริสเมทานอล นำถ่านหินไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100° จากผลการทดลองพบว่าสามารถขจัดกำมะถันอินทรีย์ได้ร้อยละ 87

กลไกของปฏิกิริยาภายใต้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าปานกลาง เหล็กเพนทาคาร์บอนิล $[Fe(CO)_5]$ จะถูกไฮดรอลิซิสไปเป็นเหล็กเตตราคาร์บอนิลไฮไดรด์แอนไอออน $[HFe(CO)_4]$ และเหล็กเตตราคาร์บอนิลไดไฮไดรด์ ซึ่งว่องไวกว่าเหล็กเพนทาคาร์บอนิล ซึ่งเป็นตัวที่จะไปทำปฏิกิริยากับกำมะถันอินทรีย์ในถ่านหิน ปฏิกิริยาที่เหล็กเพนทาคาร์บอนิลถูกไฮดรอลิซิส แสดงได้ดังสมการ



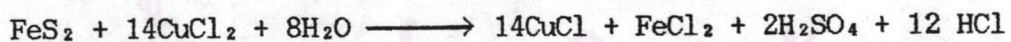
ปฏิกิริยาในการขจัดกำมะถันอินทรีย์ในถ่านหิน (สารประกอบพวก thiophene )
ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการ




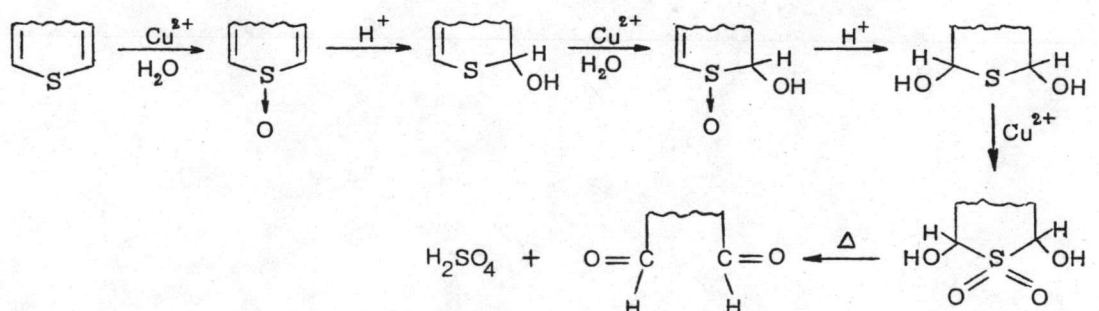
H. Kara และ R. Ceylan (17) ศึกษาการขจัดกำมะถันจากถ่านหินด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยใช้ตัวอย่างถ่านหิน Central Anatolian lignite จากเหมือง Beysehir, Ilgin, Ermenek และ Dadagi มีปริมาณกำมะถันรวมร้อยละ 1.2, 1.9, 1.8 และ 8.5 ตามลำดับ ถ่านหินที่ใช้มีขนาด 74-149 ไมโครเมตร ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 20% ปริมาณถ่านหิน 8 กรัม ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 400 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 70 °C ระยะเวลา 8 ชั่วโมง สามารถลดปริมาณกำมะถันรวมได้ร้อยละ 59-76 และสามารถลดปริมาณกำมะถันอินทรีย์จากตัวอย่างถ่านหินเหมือง Beysehir ได้ร้อยละ 12.5 สำหรับตัวอย่างถ่านหินจากเหมือง Dadagi ซึ่งมีปริมาณกำมะถันสูง การขจัดกำมะถันด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลดปริมาณกำมะถันลงได้เล็กน้อย จึงได้ศึกษาการขจัดกำมะถันโดยใช้ molten caustic (NaOH/KOH = 1/1) ที่อุณหภูมิ 300 °C และ 450 °C ระยะเวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที จากผลการทดลองลดปริมาณกำมะถันรวมได้ร้อยละ 47-83 และลดปริมาณกำมะถันได้ร้อยละ 77-91

Ludmila Lompa - Krzymien (13) ศึกษาการขจัดกำมะถันจากถ่านหินด้วยสารละลายของ cupric ions เป็นตัวออกซิไดซ์ (oxidizing agent) ตัวอย่างสารละลายที่ใช้เป็นตัวออกซิไดซ์ คือ สารละลาย cupric chloride (CuCl_2) การทดลองใช้ตัวอย่างถ่านหินจาก Nova Scotia (Prince coal) มีปริมาณกำมะถันรวมร้อยละ 4.9 โดยน้ำหนัก ถ่านหินที่ใช้มีขนาด 35 mesh ปริมาณถ่านหิน 2 กรัม ต่อสารละลาย 10 มิลลิลิตร ความเข้มข้นของสารละลาย CuCl_2 5% และ 10% ที่อุณหภูมิ 200 °C เวลา 1 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่าลดปริมาณกำมะถันได้เกือบหมดทั้งกำมะถันไพไรต์และกำมะถันอินทรีย์ ลดปริมาณกำมะถันได้ประมาณร้อยละ 50

ปฏิกิริยาการออกซิไดซ์กำมะถันไพไรต์ด้วย Cupric ions (Cu^{2+}) จากสารละลาย CuCl_2 จะได้กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ดังปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ



ปฏิกิริยาการออกซิไดซ์กำมะถันอินทรีย์ (สารประกอบพวก thiophene, ) ด้วย cupric ions ได้ water-soluble products ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ



Jestharaj B. Joshi และ Yatish T. Shah (18) ศึกษาเกี่ยวกับจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาออกซิเดชันในการขจัดกำมะถันอินทรีย์จากถ่านหิน โดยศึกษาเมื่อถ่านหินทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจน ภายใต้สภาวะปฏิกิริยาที่เป็นกรด เป็นกลางและเป็นด่าง ในเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน ที่ช่วงอุณหภูมิ 130° – 200° ซ ภายใต้ความดันของออกซิเจนในช่วง 0.32 – 1.36 MPa ระยะเวลา 0 – 1.5 ชั่วโมง ถ่านหินที่ใช้มีขนาด 75 – 955 ไมโครเมตร ผลการทดลองพบว่าในสภาวะปฏิกิริยาที่เป็นกรดจะไม่มีผลต่อการขจัดกำมะถันอินทรีย์จากถ่านหิน แต่ในสภาวะปฏิกิริยาที่เป็นกลาง (pH 7) และเป็นด่าง ($0.2M$ Na_2CO_3) การขจัดกำมะถันอินทรีย์เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง เทียบกับความเข้มข้นของกำมะถันอินทรีย์ที่ถูกขจัดไปคือ $-dC_A/dt = k_1C_A$ สภาวะที่เป็นกลาง ที่อุณหภูมิ 170° ซ ภายใต้ความดันย่อยของออกซิเจน 0.68 MPa ได้ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการขจัดกำมะถันอินทรีย์มีค่าเท่ากับ 5.34×10^{-4} วินาที $^{-1}$ และสภาวะของปฏิกิริยาที่เป็นด่าง ภายใต้ความดันย่อยของออกซิเจน 0.68 MPa ที่อุณหภูมิ 130° ซ และ 150° ซ จะได้ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการขจัดกำมะถันอินทรีย์มีค่าเท่ากับ 4.46×10^{-4} วินาที $^{-1}$ และ 5.83×10^{-1} วินาที $^{-1}$ ตามลำดับ และให้ค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 30×10^3 กิโลจูลต่อกิโลโมล

D. Slagle, Y.T. Shah และ J.B Joshi (19) ศึกษาอัตราเร็วของปฏิกิริยาการขจัดกำมะถันอินทรีย์จากถ่านหิน Upper Freeport ซึ่งมีกำมะถันอินทรีย์ในปริมาณต่ำ คือ ร้อยละ 0.76 การทดลองอาศัยปฏิกิริยาออกซิเดชัน ใช้ถ่านหินขนาด 100 mesh ช่วงอุณหภูมิ 150° – 210° ซ ภายใต้ความดันย่อยของออกซิเจน 1.24 – 1.6 MPa ระยะเวลา 0 – 40 นาที ถ้าใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 190° ซ จะไม่ให้เห็นผลการขจัดกำมะถันอินทรีย์ จากผลการทดลองการขจัดกำมะถันอินทรีย์ต้องให้พลังงานกระตุ้น (activation energy, E_a) เท่ากับ 78.9×10^6 จูลต่อกิโลโมล และมีค่า frequency factor, A_0 เท่ากับ 2.1×10^4 กิโลกรัมของกำมะถันต่อกิโลกรัมของถ่านหิน-กำมะถัน พบว่าปฏิกิริยาการขจัดกำมะถันอินทรีย์นี้เป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์ เทียบกับความเข้มข้นของกำมะถันอินทรีย์ทั้งหมด แสดงสมการค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาในรูปสมการของ Arrhenius ได้ดังนี้

$$k^{\circ} = A_0 \exp(-E_a/RT)$$

จากผลการทดลองแสดงค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาได้ดังสมการ

$$k^{\circ} = 2.1 \times 10^4 \exp(-78.9 \times 10^6/RT); (\text{kg of S/kg of coal-S})$$

เมื่อ k° = ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับศูนย์ของกำมะถันอินทรีย์, กิโลกรัมของกำมะถันต่อกิโลกรัมของถ่านหิน - นาที



- A_0 = Arrhenius frequency factor
 E_a = พลังงานกระตุ้น, จูลต่อกรัม
 R = ค่าคงที่ของก๊าซ, จูลต่อกรัม-เคลวิน
 T = อุณหภูมิ, เคลวิน

สำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันในการขจัดกำมะถันไพไรต์จากถ่านหินให้ผลการทดลองสอดคล้องกับอัตราเร็วของปฏิกิริยาดังกล่าว คือ

$$dC_s/dt = -k_2^p C_s$$

จากผลการทดลองได้ค่า k_2^p เท่ากับ 1.14×10^4 ม³ ต่อกรัม-วินาที และได้ค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 46.5×10^6 จูลต่อกรัม แสดงค่าคงที่ของอัตราเร็วปฏิกิริยาในรูปสมการของ Arrhenius ได้ดังนี้

$$k_2^p = 1.14 \times 10^4 \exp(-46.5 \times 10^6 / RT)$$

เมื่อ k_2^p = ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาดังกล่าว, ม³ ต่อกรัม-วินาที

เมื่ออาศัยรูปแบบ shrinking core model และข้อมูลการทดลองพบว่าปฏิกิริยาการขจัดกำมะถันสอดคล้องกับรูปแบบการควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาด้วยการแพร่ผ่านชั้นผลิตภัณฑ์ (diffusion through product layer) เขียนความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงเวลาได้เป็น

$$t/\tau = 1 - 3(1-X)^{2/3} + 2(1-X)$$

เมื่อ $\tau = \rho_B R^2 / 6bD_e C_{AL}$

และการแพร่มีพลังงานกระตุ้นของการแพร่ประสิทธิผล (D_e) เท่ากับ 33×10^6 จูลต่อกรัม

Toks Oshinowo และ O.Ofi (20) ศึกษาจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาออกซิเดชันในการขจัดกำมะถันไพไรต์จากถ่านหิน Lafia ด้วยสารละลายเพอริคลอไรด์ ($FeCl_3$) ตัวอย่างถ่านหินที่มีปริมาณกำมะถันรวมร้อยละ 5 ทำการทดลองศึกษาในช่วงอุณหภูมิ $60^\circ - 105^\circ$ C ความเข้มข้นของสารละลายเพอริคลอไรด์ 0.2-1.0 โมลาร์ อัตราเร็วการกวาด 700 รอบต่อ

นาที่ ขนาดถ่านหิน -0.210 ถึง $+0.841$ มิลลิเมตร และช่วงเวลา $0-14$ ชั่วโมง จากการทดลองศึกษาภายใต้สภาวะปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 105°C ความเข้มข้นของสารละลายเฟอริกคลอไรด์ 1.0 โมลาร์ ระยะเวลา 13 ชั่วโมง สามารถลดปริมาณกำมะถันไพไรต์ได้ร้อยละ $93-95$ จากผลการทดลองพบว่าการลดปริมาณกำมะถันจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทดลอง เพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเฟอริกคลอไรด์และลดขนาดของถ่านหิน

การศึกษาหาขั้นตอนที่เป็นตัวควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาโดยอาศัย unreacted shrinking core model จากข้อมูลการทดลองพบว่าการควบคุมด้วยปฏิกิริยาเคมีเป็นขั้นตอนที่ควบคุมปฏิกิริยาทั้งหมด (chemical reaction control) เขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงกับเวลาได้เป็น

$$t/\tau = 1 - (1-X)^{1/3}$$

จากข้อมูลการทดลองพบว่าปฏิกิริยาการขจัดกำมะถันไพไรต์ให้ผลสอดคล้องกับอัตราเร็วปฏิกิริยาแบบ two-parameter pseudo-homogeneous kinetic model แสดงดังสมการคือ

$$r = k(C_B/C_{B_0})^{2/3}C_A^{1/2} \quad (2.42)$$

ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาในรูปสมการของ Arrhenius แสดงได้ดังสมการคือ

$$k = 117.48 \exp(-20.233/RT)$$

และมีค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาเท่ากับ -20.233 กิโลจูลต่อโมล

เมื่อ C_A = ความเข้มข้นของสารละลายเฟอริกคลอไรด์, โมลต่อลิตร
 C_{B_0} = ความเข้มข้นของกำมะถันไพไรต์ในถ่านหินเริ่มต้น, โมลต่อลิตร
 C_B = ความเข้มข้นของกำมะถันไพไรต์ในถ่านหินหลังเกิดปฏิกิริยา, โมลต่อลิตร
 r = อัตราเร็วปฏิกิริยา (2.37), ชั่วโมง $^{-1}$
 k = ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยา (2.37), (โมล/ลิตร) $^{-1/2}$, ชั่วโมง $^{-1}$

วิทยา บันสุวรรณ (21) ศึกษาการขจัดกำมะถันจากถ่านหินเหมืองแม่เมาะด้วยสารละลายเฟอริกซัลเฟต ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ระยะเวลา 4 ชม. ปริมาณถ่านหินต่อสารละลาย 50 กรัมต่อสารละลาย 500 มล. ที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 4 ชม. ขจัดกำมะถันรวมได้ร้อยละ 30 ขจัดกำมะถันไพไรต์ได้ร้อยละ 30 ขจัดเก่าได้ร้อยละ 17 และสาร

ละลาย regenerate ด้วยก๊าซออกซิเจนตลอดเวลา

สมชัย อัครทิวา และประเสริฐ กสิกิจสกุลผล (22) ศึกษาการขจัดกำมะถันจากถ่านหินเมืองกระบี่ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 นอร์มัล ใช้ถ่านหินขนาด 100-200 ไมครอน ที่อุณหภูมิ 80 °ซ ความดัน 1 บรรยากาศ เวลา 1 ชม. ลดกำมะถันรวมได้ร้อยละ 48 ลดปริมาณแก๊สได้ร้อยละ 10.3 และได้ปริมาณความร้อนเพิ่มขึ้นร้อยละ 13.5

กัทธินา ศิริจีระชัย (23) ศึกษาการขจัดกำมะถันจากถ่านหินแหล่งแม่ตึบด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ใช้ถ่านหินขนาด 150-250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 100 กรัม ต่อสารละลาย 500 มล. ที่อุณหภูมิ 100-120 °ซ เวลา 1 ชม. ลดปริมาณกำมะถันรวมได้ร้อยละ 32.75 ลดปริมาณกำมะถันไพไรต์ได้ร้อยละ 60.56 และลดปริมาณกำมะถันซัลเฟตได้ร้อยละ 85.33 เมื่อใช้ออกซิเจนร่วมในปฏิกิริยาด้วย โดยให้ความดัน 1.44-3.85 กก./ตร.ซม. สามารถลดปริมาณกำมะถันรวมได้ร้อยละ 38.43 ลดปริมาณกำมะถันไพไรต์ได้ร้อยละ 66.20 และลดปริมาณกำมะถันซัลเฟตได้ร้อยละ 85.33

เอกชัย อานนท์กิจพานิช (24) ศึกษาการขจัดกำมะถันจากถ่านหินเหมืองแม่เมาะด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 10-15% ใช้น้ำหนักต่อปริมาตร กน 0.1 นอร์มอล กรดซัลฟูริก ใช้ถ่านหินขนาดต่ำกว่า 250 ไมครอน ปริมาณถ่านหิน 30 กรัมต่อสารละลาย 300 มล. ที่อุณหภูมิ 25-30 °ซ เวลา 1-1.5 ชม. สามารถลดกำมะถันรวมได้ร้อยละ 48.82 ลดกำมะถันซัลเฟตได้ร้อยละ 84.28 ลดปริมาณกำมะถันไพไรต์ได้ร้อยละ 97.30 ลดกำมะถันอินทรีย์ได้ร้อยละ 9.50 ลดปริมาณแก๊สได้ร้อยละ 68.81 และได้ค่าปริมาณความร้อนเพิ่มขึ้นร้อยละ 11.69 อัตราเร็วปฏิกิริยาการขจัดกำมะถันไพไรต์เป็นปฏิกิริยาอันดับสอง ขั้นตอนการควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาไพไรต์เป็นแบบควบคุมโดยการแพร่ มีค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาของไพไรต์ (k_2) และค่าการแพร่ประสิทธิผล (De) คือ

$$\text{สำหรับถ่านหินเหมืองแม่เมาะ } k_2 = 12.02 \times 10^6 \exp(-52.61 \times 10^6/RT)$$

$$De = 1.78 \times 10^{-5} \exp(-33.22 \times 10^6/RT)$$

$$\text{สำหรับถ่านหินเหมืองป่าคา } k_2 = 3.88 \times 10^6 \exp(-49.71 \times 10^6/RT)$$

$$De = 1.15 \times 10^{-5} \exp(-33.09 \times 10^6/RT)$$

งานวิจัยนี้ได้เลือกสภาวะที่ใช้ในการทดลองในการขจัดกำมะถันในถ่านหินแม่เมาะ โดยตัวแปรสำคัญที่ทำการศึกษา คือ ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 10 และ 20 % อุณหภูมิ 120, 140 และ 150 °ซ; ขนาดถ่านหิน 150-250, 250-500, 500-600 ไมครอน และอัตราการกวน 1400 รอบต่อนาที

การเลือกศึกษาที่ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 10 และ 20% เนื่องจากผลงานวิจัยของ Ludmila Lompa-Krzymien (13) ได้ทำการศึกษาการขจัดกำมะถันในถ่านหิน รดน้ำใช้สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 10% อุณหภูมิ 200°ซ ใช้เวลา 1 ชม. ให้ผลในการลดปริมาณกำมะถันรวม 98.57% และลดเถ้าได้ประมาณ 50% จะเห็นว่าความเข้มข้นของสารละลาย 10% ให้ผลในการลดปริมาณกำมะถันและเถ้าได้ดีมาก นอกจากความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่ใช้แล้ว ต้องคำนึงถึงอุณหภูมิในการทดลองด้วย ซึ่งผลงานวิจัยของ Ludmila Lompa-Krzymien ได้สรุปว่าอุณหภูมิที่ใช้ในปฏิบัติการขจัดกำมะถันรดน้ำใช้สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่จะให้ผลในการลดปริมาณกำมะถันได้ดี อุณหภูมิควรอยู่ในช่วง 150-250°ซ หรืออุณหภูมิต่ำสุดที่ใช้คือ 140°ซ งานวิจัยใช้อุณหภูมิต่ำสุด คือ 120°ซ นั้นเพราะต้องการทราบว่าที่อุณหภูมินี้จะให้ผลในการลดปริมาณกำมะถันเป็นอย่างไร เมื่อเทียบกับการใช้อุณหภูมิ 140°ซ ที่กล่าวไว้ในผลงานวิจัยของ Ludmila Lompa-Krzymien ในการเลือกใช้ขนาดถ่านหิน 3 ขนาดนั้น ผลงานวิจัยของ Ludmila Lompa-Krzymien ใช้ขนาดถ่านหิน 500 ไมครอน และจากผลงานวิจัยของ วิทยา บันสุวรรณ (21) กัทธิดา ศิริจีระชัย (23) และเอกชัย อานนท์-กิจพานิช (24) ใช้ขนาดถ่านหิน 150-250 ไมครอน ซึ่งสรุปได้ว่าเป็นขนาดถ่านหินที่เหมาะสมในปฏิบัติการขจัดกำมะถัน นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อศึกษาผลของอัตราเร็วการกวนในปฏิบัติการขจัดกำมะถันในเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนนี้ จากผลการทดลองพบว่า อัตราเร็วการกวนไม่มีผลต่อการลดปริมาณกำมะถันในถ่านหิน ผลงานวิจัยที่ผ่านมา (21), (23), (24) ใช้อัตราการกวน 1000-1400 รอบต่อนาที ในการทดลอง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้อัตราเร็วการกวน 1400 รอบต่อนาที และเลือกสภาวะที่ใช้ในการทดลองในการขจัดกำมะถันในถ่านหินแม่เมาะดังกล่าวข้างต้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย