บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 ถ่านหินและกำเนิดของถ่านหิน

ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงแข็งธรรมชาติประกอบด้วยสารอินทรีย์หลายชนิด เกิดจากการผุพังและการสะสมตัวของซากพืชเป็นเวลานานนับล้านปี โดยมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและทางกายภาพ ซึ่งปฏิกริยาที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงนี้ ได้แก่ ปฏิกริยาออกซิเดชัน, ปฏิกริยารีดักชัน, ปฏิกริยาย่อยสลาย และปฏิกริยารวมตัว เป็นต้น ปฏิกริยาเหล่านี้เกิดจากจุลินทรีย์ เช่น เชื้อรา และแบคทีเรีย นอกจากนี้สภาวะแวดล้อมทางธรณี เช่น ความร้อน, ความดัน, การยุบตัว รวมทั้งระยะเวลาที่ทับถม ทำให้ซากพืชที่ทับถมกันนี้แปรสภาพเป็นถ่านหินลักษณะและคุณภาพต่าง ๆ กันออกไป โดยมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ คาร์บอน และไฮโดรเจน อาจจะมีแร่ธาตุอื่น ๆ เจือปนอยู่บ้าง เช่น กำมะถัน, ออกซิเจน, ไนโตรเจน เป็นต้น ถ่านหินที่มีอายุมากที่สุดประมาณว่ามากกว่า 250 ล้านปี ส่วนอายุน้อยที่สุดประมาณ 20 ล้านปี

2.2 ชนิดและคุณสมบัติของถ่านหิน

ถ่านหินสามารถแบ่งหรือจำแนกได้ในลักษณะต่าง ๆ กัน เช่น

2.2.1 ถ่านหินจำแนกตามลักษณะของการสะสมตัวได้เป็น 2 ชนิด (3)

ก. ถ่านหินฮิวมิก (Humic coals)

เป็นถ่านหินที่เกิดจากการสะสมตัวของซากพืช ตรงบริเวณเดิมที่พืชเคยเจริญเติบโตมาก่อน สารอินทรีย์ในซากพืชเกิดการสลายตัว และรวมตัวกันใหม่ เรียกว่า พีท (peat) ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปเป็นถ่านหินที่มีคุณภาพดีขึ้น ถ่านหินฮิวมิกมีลักษณะเป็นเงาวาว สีน้ำตาลถึงดำ สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าว่ามีลักษณะเปลี่ยนแปลงมาจากเนื้อเยื่อของพืชซ้อนกันเป็นชั้น ๆ สำหรับถ่านหินคุณภาพต่ำที่มีลักษณะเช่นนี้ เรียกว่า ฮิวมิไนต์ (huminite) ส่วนถ่านหินคุณภาพสูง จะเรียกว่า ไวทริไนต์ (vitrinite)

ข. ถ่านหินแซบโพรพีลิก (Sapropelic coals)

เป็นถ่านหินที่เกิดจากการสะสมของดินโคลนที่มีอินทรีย์วัตถุมาก รวมทั้งซากพืชและอนินทรีย์วัตถุที่ถูกพัดพามาทับถมในแอ่งน้ำตื้นในสภาวะที่ขาดออกซิเจน สำหรับถ่านหินแซบโพรพีลิกที่ประกอบด้วยอินทรีย์วัตถุจำพวกสาหร่าย เรียกว่า ถ่านหินบอกเฮด (boghead coal) ส่วนถ่านหินที่มีปริมาณสปอร์มาก เรียกว่า ถ่านหินแคนเนล (cannel coal) ลักษณะของถ่านหินชนิดนี้เป็นชิ้นขุ่น ไม่ซ้อนกันเป็นชั้น ๆ

2.2.2 การจัดแบ่งถ่านหินโดยคำนึงถึงคุณภาพในการให้พลังงาน โดยนักธรณีวิทยาได้ดังนี้

ก. พีท (peat) ประกอบด้วยซากพืชบางส่วน ซึ่งได้สลายตัวไปแล้ว ยังปรากฏให้เห็นร่องรอยของเนื้อไม้อยู่ ลักษณะเป็นสีน้ำมัน มีรูพรุนคล้ายฟองน้ำ มีปริมาณออกซิเจนและน้ำค่อนข้างสูง ให้ค่าความร้อนน้อย เมื่อติดไฟจะมีควันมาก

ข. ลิกไนท์ (lignite) หรือถ่านหินสีน้ำตาล (brown coal) เป็นถ่านหินคุณภาพต่ำที่สุด วิวัฒนาการมาจากพีท และยังปรากฏร่องรอยของเนื้อไม้อยู่ มีสีน้ำตาล มีปริมาณออกซิเจนค่อนข้างสูง (อาจถึง 30 %) มีความชื้นสูง ให้ค่าความร้อนต่ำ ไม่สามารถขนส่งเป็นระยะทางไกล ๆ หรือกองเก็บเป็นเวลานานได้ เพราะมีโอกาสเกิดการติดไฟได้เอง (spontaneous combustion)

ค. ซับบิทูมินัส (subbituminous) เป็นถ่านหินที่มีสีดำคล้ายขี้ผึ้ง ให้ค่าความร้อนสูงกว่าลิกไนท์ สามารถนำไปแปรสภาพเป็นเชื้อเพลิงเหลว หรือก๊าซ

ง. บิทูมินัส (bituminous) เป็นถ่านหินคุณภาพสูง ใช้เวลาในการแปรสภาพยาวนานกว่าลิกไนท์ เนื้อแน่นแข็ง มีสีดำ มักประกอบด้วยถ่านหินที่มีลักษณะมันวาว ไม่มีร่องรอยของเนื้อไม้ปรากฏอยู่ มีเถ้าต่ำ ให้ควันน้อย ให้ค่าความร้อนสูง เหมาะสำหรับผลิตเป็นถ่านโค้ก นิยมใช้กันแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ

จ. แอนทราไซท์ (anthracite) เป็นถ่านหินคุณภาพดีที่สุด มีสีดำสนิท เป็นมันวาว มีความแข็งมาก และมีคาร์บอนสูงมาก อาจถึง 90 % ในขณะที่มีความชื้นต่ำ ติดไฟยากแต่ให้ค่าความร้อนสูง ให้ระยะเวลาในการเผาไหม้ยาวนาน

นอกจากนี้ยังมีการแบ่งถ่านหินตามศักดิ์ (rank) (4) โดยวิธีมาตรฐาน ASTM ได้เป็น 4 ชั้นใหญ่ ๆ คือ ลิกไนท์, ซับบิทูมินัส, บิทูมินัส และแอนทราไซท์ โดยเรียงจากคุณภาพต่ำถึงสูง พิจารณาจากองค์ประกอบที่สำคัญ คิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก เช่น คาร์บอนคงตัว, สารระเหยได้, ความชื้น, เถ้า, กำมะถัน และค่าความร้อน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 การแบ่งถ่านหินตามศักดิ์ โดยวิธีมาตรฐาน ASTM D 388 (5)

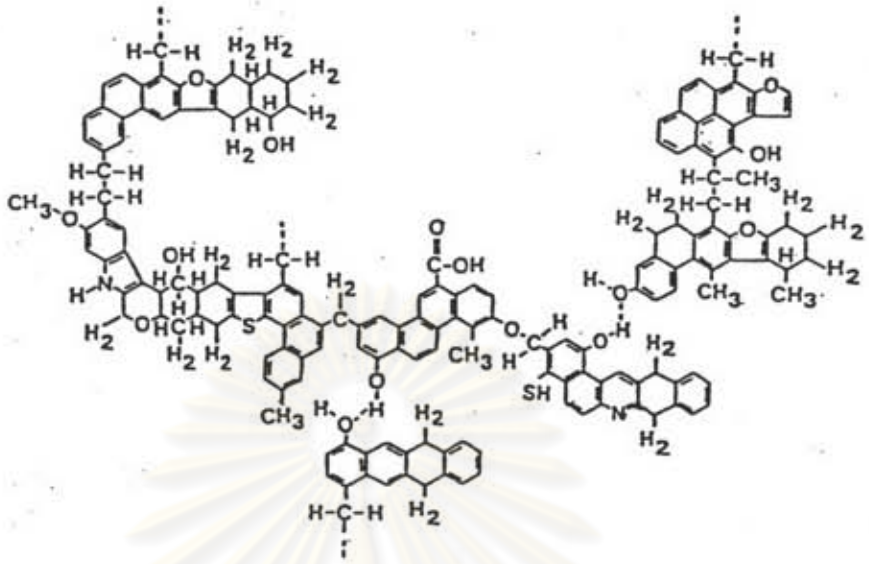
Class	Group	Fixed Carbon Limits, % (Dry, Mineral-Matter-Free Basis)		Volatile Matter Limits, % (Dry, Mineral-Matter-Free Basis)		Gross Calorific Value Limits, Btu/lb (Moist,[B] Mineral-Matter-Free Basis)		Agglomerating Character
		Equal or Greater Than	Less Than	Greater Than	Equal or Less Than	Equal or Greater Than	Less Than	
I. Anthracitic	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	
						10 500	11 500	agglomerating
III. Subbituminous	1. Subbituminous *A* coal	...	...	...	...	10 500	11 500	nonagglomerating
	2. Subbituminous *B* coal	...	...	...	...	9 500	10 500	
	3. Subbituminous *C* coal	...	...	...	...	8 300	9 500	
IV. Lignitic	1. Lignite *A*	...	...	...	...	6 300	8 300	
	2. Lignite *B*	...	...	...	...	...	6 300	

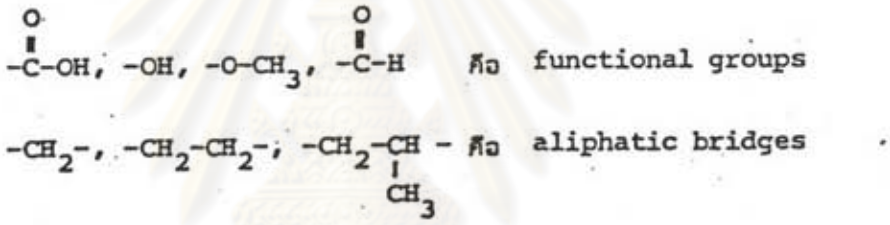
[A] This classification does not apply to certain coals, as discussed in Note 1.
[B] Moist refers to coal containing its natural inherent moisture but not including visible water on the surface of the coal.
[C] If agglomerating, classify in low-volatile group of the bituminous class.
[D] Coals having 69 % or more fixed carbon on the dry, mineral-matter-free basis shall be classified according to fixed carbon, regardless of gross 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.

2.3 โครงสร้างและองค์ประกอบของถ่านหิน

คาร์บอนเป็นธาตุที่มีมากที่สุด และอยู่ในโครงสร้างถ่านหินที่เป็นส่วนอินทรีย์ (organic coal matrix) ซึ่งเป็นส่วนที่ให้พลังงานของถ่านหิน ในส่วนนี้จะมีธาตุไฮโดรเจน, กำมะถัน, ออกซิเจน และไนโตรเจน ประกอบอยู่ด้วยเล็กน้อย เรียกส่วนนี้ทั้งหมดว่า maceral สำหรับธาตุอื่น ๆ ที่เป็นสารประกอบอนินทรีย์อยู่กระจัดกระจายทั่วไปในถ่านหิน เรียกว่า mineral matter (crytalline inorganic compound) เช่น อิลไลต์, แคลไซต์, ยิปซัม, มาคาไซต์, ไพไรต์ เป็นต้น (6)

เมื่อนำถ่านหินไปเผาไหม้เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง ส่วน maceral จะกลายเป็นก๊าซ และส่วน mineral matter จะยังคงเหลือจากการเผาไหม้เป็นเถ้า (ash) แต่จะมีสารประกอบแร่ธาตุบางตัวไม่เปลี่ยนเป็นเถ้า เช่น ที่อุณหภูมิสูง ๆ คาร์บอเนตจะสลายตัวกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กำมะถันสลายตัวเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไพไรต์ (FeS_2) ถูกออกซิไดซ์ โดยเหล็กเปลี่ยนไปอยู่ในรูปสารประกอบออกไซด์ของเหล็กกลายเป็นส่วนประกอบของเถ้า ปริมาณธาตุต่าง ๆ ที่มีในถ่านหินขึ้นอยู่กับกระบวนการเกิดถ่านหิน (coalification) โดยเริ่มจากซากพืชจนเป็นถ่านหินตามที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.1 พบว่า เมื่อศักดิ์ (rank) หรือคุณภาพของถ่านหินสูงขึ้นจะมีปริมาณคาร์บอนมากขึ้น เนื่องจากในกระบวนการเกิดถ่านหินมีการขจัดไฮโดรเจน, ออกซิเจน, ไนโตรเจน ออกไปเป็นปริมาณมากในรูปก๊าซมีเทน (methane) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในกระบวนการ pyrolysis จะมีการขจัดไฮโดรเจนและออกซิเจนอย่างสมบูรณ์ คาร์บอนยังคงอยู่ ส่วนไนโตรเจนและกำมะถันเหลือในปริมาณน้อยมาก แม้ว่าถ่านหินจะเป็นที่รู้จักนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในระยะเวลายาวนานแล้ว แต่โครงสร้างทางเคมี หรือสูตรโมเลกุลนั้นยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด ตามความเข้าใจของนักวิทยาศาสตร์คิดว่าโครงสร้างทางเคมีของถ่านหินประกอบด้วยโมเลกุลของวงแหวนอะโรมาติก (aromatic) และไฮโดรอะโรมาติก (hydroaromatic) เกาะกันอยู่เป็นกลุ่ม ๆ แต่ละกลุ่มอาจเชื่อมกันด้วยแขนของโมเลกุลอะลิฟาติก (aliphatic) ภายในกลุ่มแต่ละกลุ่มยังมีวงแหวนที่มีอะตอมของธาตุออกซิเจน, กำมะถัน หรือไนโตรเจน ประกอบอยู่กับคาร์บอนรวมทั้งกลุ่มที่ทำหน้าที่เป็นกรด, ด่าง, อีเทอร์ หรือหมู่ทำหน้าที่เฉพาะ (functional group) อื่น ๆ (7) ซึ่งแสดงเป็นโมเลกุลสมมติในรูปที่ 2.1





รูปที่ 2.1 โมเลกุลสมมติของถ่านหิน (7)

2.3.1 โครงสร้างอินทรีย์ (organnic structure)

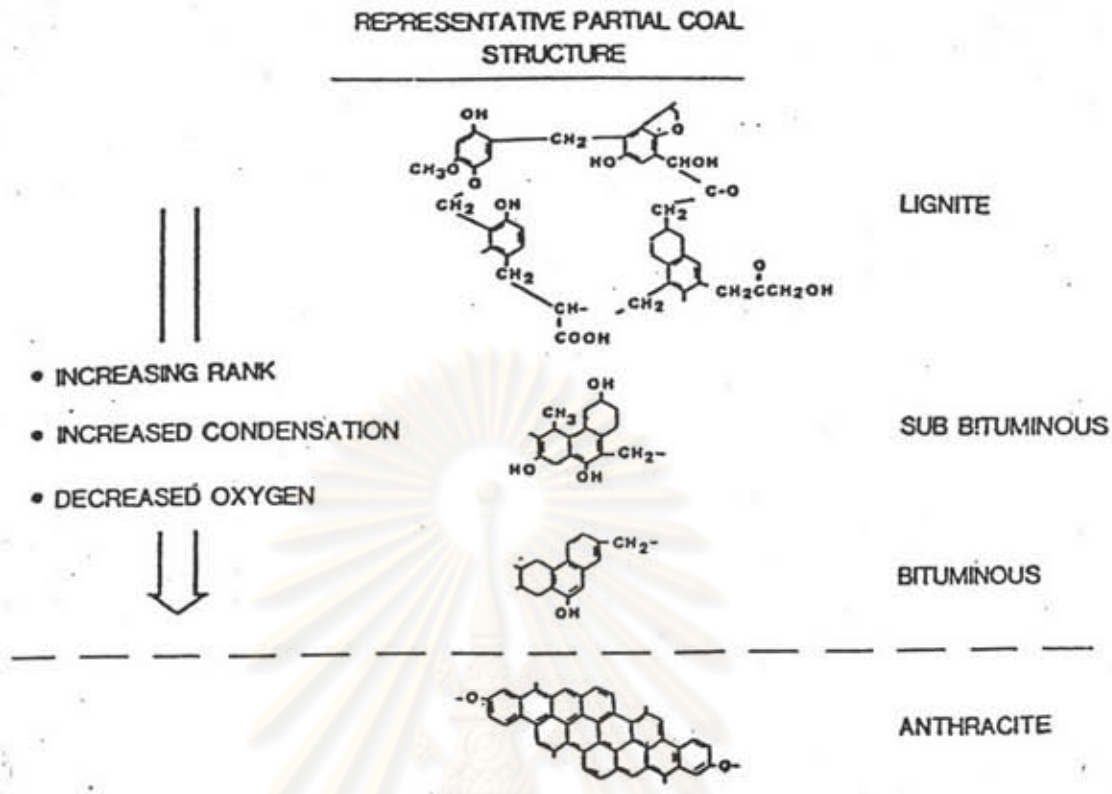
พิจารณาปริมาณธาตุโดยน้ำหนักเมื่อไม่คิดความชื้นและแร่ธาตุ (dry mineral matter, free element) ในถ่านหิน พบว่า มีคาร์บอนประมาณ 90-97 ส่วน, ไฮโดรเจน 3-5 ส่วน, ออกซิเจน 1-2 ส่วน และมีกำมะถันกับไนโตรเจนในส่วนโครงสร้างอินทรีย์ 1-2 ส่วน เมื่อคิดเทียบจากอัตราส่วนโดยน้ำหนักอะตอมของธาตุ (atomic ratio) ไฮโดรเจนจะเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่สำคัญของโครงสร้างถ่านหิน ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 อัตราส่วนโดยน้ำหนักอะตอมของธาตุในถ่านหินศักดิ์ต่าง ๆ (6)

Coal rank	Atomic ratio				
	C	H	O	N	S
Anthracite	100	50	2-5	1-2	1/2-1
Bituminous	100	70	4-8	1-2	1/2-1
Subbituminous	100	80	10-20	1-2	1/2-1
Lignite	100	80	20-25	1-2	1/2-1

เมื่อศักดิ์ของถ่านหินสูงขึ้น อัตราส่วนโดยน้ำหนักของอะตอมไฮโดรเจนต่อคาร์บอน และออกซิเจนต่อคาร์บอนจะลดลง ส่วนกำมะถันและไนโตรเจนมีค่าน้อยมากจนไม่มีความสำคัญ สารประกอบอินทรีย์ที่พบในโครงสร้างถ่านหินที่สำคัญ ๆ ได้แก่ benzene, cyclohexane, cyclohexanone, methylene, napthalene, phenyl ether, polymethylene, phenanthrene และสารประกอบพวก dihyroaromatic เช่น carbozolbenzathiophene และ pyridine ส่วนหมู่ทำหน้าที่เฉพาะต่าง ๆ ที่มีคือ hydroxy, carboxy, amino และ thiol

โครงสร้างสารประกอบอินทรีย์ต่าง ๆ จะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเคมีชนิด cross linked polymer และมีบางส่วนที่ไม่เป็นโครงสร้างแบบโพลิเมอร์ (6) จากการศึกษา X-ray scattering technique พบว่า เมื่อศักดิ์ถ่านหินเพิ่มขึ้น การรวมตัวของวงแหวนอะโรมาติกเชื่อมต่อกันมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การรวมตัวของวงแหวนอะโรมาติกเมื่อคักดี่ของถ่านหินเพิ่มขึ้น (8)

2.3.2 สารประกอบแร่ธาตุ (mineral matter)

ซิลิกอนเป็นแร่ธาตุที่พบมากที่สุด นอกจากนี้ยังมี อลูมิเนียม, เหล็ก, แคลเซียม, แมกนีเซียม, โซเดียม และโปตัสเซียม เป็นต้น ธาตุเหล่านี้รวมตัวกันเป็นสารประกอบ หรือรวมกับอะตอมของธาตุอื่น ๆ ให้สารประกอบต่าง ๆ มากมาย แร่ธาตุในถ่านหินแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ประเภทที่มีโครงสร้างเป็น "ส่วนหนึ่ง" ของถ่านหินเลย ซึ่งส่วนนี้ไม่สามารถแยกออกมาได้โดยวิธีทางกายภาพ อีกประเภทหนึ่งเป็นอนินทรีย์สาร (inorganic) สามารถแยกจำกัดโดยการบดให้ละเอียด (crushing) หรือโดยวิธีทางกายภาพอื่น ๆ สำหรับเถ้าของถ่านหินจะเป็นแร่ธาตุประเภทแรก คือ ไม่สามารถแยกด้วยวิธีทางกายภาพได้ แบ่งกลุ่มสารประกอบต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ได้ดังนี้

ก. กลุ่มซิลิเกต (silicates) มี อิลไลต์ (illite), เคโอลิไนต์ (kaolinite) เป็นต้น

ข. กลุ่มคาร์บอเนต (carbonates) มี แคลไซต์ (calcite), โดโลไมต์ (dolomite), ซิเดอร์ไรต์ (siderite) เป็นต้น

ค. กลุ่มซัลเฟต (sulphates) มี ยิปซัม (gypsum), แอนไฮไดรต์ (anhydrite) เป็นต้น

ง. กลุ่มซัลไฟด์ (sulphides) ที่พบมากคือ มาคาไซต์ (marcasite) และไพไรต์ (pyrite)

จ. แร่ธาตุอื่น ๆ (other minerals) เช่น ควอร์ตซ์ (quartz), เฟลด์สปาร์ (feldspar) เป็นต้น

ตารางที่ 2.3 สารประกอบแร่ธาตุที่พบในถ่านหิน (9)

Silicates :

- Clay minerals
- Kaolinite $Al_2Si_2O_5(OH)_4$
- Illite
- Montmorillonite
- Chlorite
- Mixed-layer clays

Carbonates:

- Calcite $CaCO_3$
- Dolomite $CaMg(CO_3)_2$
- Siderite $FeCO_3$
- Aragonite $CaCO_3$
- Ankerite $FeMgCa_2(CO_3)_4$
- Dawsonite $NaAlCO_3(OH)_2$
- Strontianite $SrCO_3$

Sulphate:

- Gypsum $CaSO_4.2H_2O$
- Barite $BaSO_4$
- Anhydrite $CaSO_4$
- Coquimbite $Fe_2(SO_4)_3.9H_2O$
- Szomolnokite $FeSO_4H_2O$
- Natrojarosite $NaFe_3(SO_4)_2(OH)_6$
- Thenardite Na_2SO_4
- Bassanite $2CaSO_4.H_2O$

Sulphides:

- Pyrite FeS_2
- Marcasite FeS_2
- Sphalerite ZnS
- Galena PbS

Other minerals:

- Apatite $Ca_5F(PO_4)_3$
- Goyazite $SrAl_3(PO_4)_2(OH)_5H_2O$
- Anatase TiO_2
- Rutile TiO_2
- Haematite Fe_2O_3
- Goethite $Fe(OH)_3$
- Zircon $ZrSiO_4$

Others:

- Quartz SiO_2
- Chalcedony SiO_2
- Feldspar $KAlSi_3O_8$
- Tourmaline $NaMg_3Al_6B_3Si_6O_{27}(OH)_4$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4 กำมะถันในถ่านหิน (10)

กำมะถันในถ่านหินมีหลายรูปแบบ พบกระจายทั่วไปในถ่านหิน จัดแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.4.1 กำมะถันอินทรีย์ (organic sulfur) มีโครงสร้างในลักษณะพันธะเคมีที่ซับซ้อน พบทั่วไปในถ่านหินไม่สามารถขจัดออกได้ด้วยวิธีทางกายภาพ

2.4.2 กำมะถันอนินทรีย์ (inorganic sulfur) มี 2 รูปแบบ ได้แก่

ก. กำมะถันซัลเฟต (sulfate sulfur) ที่พบในถ่านหินเป็นโลหะซัลเฟต เช่น สารประกอบแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$), แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$), สารประกอบซัลเฟตของเหล็ก ($FeSO_4$) เป็นต้น กำมะถันชนิดนี้มีน้อยกว่ารูปแบบอื่น

ข. กำมะถันไพไรต์ (pyritic sulfur) พบในลักษณะสารประกอบโลหะซัลไฟด์ และมาร์คาไซต์ ซึ่งไม่ละลายน้ำ แยกออกได้โดยวิธีทางกายภาพ

2.5 วิธีวิเคราะห์ถ่านหิน (11)

วิธีวิเคราะห์ถ่านหินแบ่งออกเป็นสองแบบคือ การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ในการวิเคราะห์แบบแรกแบ่งกลุ่มของสารประกอบในถ่านหินออกเป็น 4 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ ความชื้น (moisture), สารระเหยได้ (volatile matter), คาร์บอนคงตัว (fixed carbon) และเถ้า (ash) ปริมาณของสารระเหยได้รวมกับปริมาณคาร์บอนคงตัว เรียกว่า ปริมาณส่วนที่เผาไหม้ได้ (combustible) ส่วนการวิเคราะห์แบบหลัง เป็นการวิเคราะห์โดยละเอียด โดยวิเคราะห์ธาตุสำคัญแต่ละธาตุที่มีอยู่ในถ่านหินคือ คาร์บอน, ไฮโดรเจนสุทธิ, กำมะถัน, ไนโตรเจน, น้ำในรูปส่วนประกอบของสารอินทรีย์ และในรูปความชื้น ตลอดจนเถ้า การวิเคราะห์โดยวิธีนี้เสียเวลา แต่มีประโยชน์ในการคำนวณสมดุลมวลสาร และสมดุลพลังงาน

ในอุตสาหกรรมโดยทั่วไปและในการซื้อขายถ่านหินนิยมใช้ผลการวิเคราะห์แบบประมาณเพื่อดูถึงคุณภาพของถ่านหินซึ่งต้องทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตราฐานที่ระบุไว้ในหนังสือวิเคราะห์มาตราฐานของประเทศต่าง ๆ (เช่น มาตราฐาน ASTM ของสหรัฐอเมริกา, มาตราฐาน IP ของอังกฤษ เป็นต้น) โดยใช้หลักการสูญเสียน้ำหนักของถ่านหินหลังจากการเผาที่อุณหภูมิคงที่ที่ระดับต่าง ๆ กันดังนี้

ความชื้น (M) เป็นน้ำหนักที่สูญเสียไปหลังจากการอบถ่านหินบดละเอียดที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะที่กำหนดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง น้ำที่เป็นความชื้นจะระเหยออกมา ส่วนน้ำที่เป็นสารประกอบของสารอนินทรีย์ยังคงอยู่ในถ่านหิน

เถ้า (A) เป็นน้ำหนักที่คงอยู่ภายหลังจากการเผาถ่านหินบดละเอียดที่อุณหภูมิ 725 องศาเซลเซียส จนกระทั่งเหลืออยู่แต่สารอนินทรีย์ที่ถูกออกซิไดซ์สมบูรณ์แล้ว ดังนั้น น้ำหนักเป็นร้อยละของเถ้านี้จึงน้อยกว่าน้ำหนักของแร่ธาตุที่มีอยู่ในถ่านหินเดิม เพราะแร่ธาตุประเภท

คาร์บอเนต, ซัลไฟต์ และอื่น ๆ จะถูกออกซิไดซ์ไปเป็นสารออกไซด์จนหมด ความสัมพันธ์ของร้อยละของแร่ธาตุกับร้อยละของเถ้าโดยประมาณคือ

$$\underset{\text{(\% mineral matter)}}{\text{ร้อยละของแร่ธาตุ}} = 1.1 \times \underset{\text{(\% ash)}}{\text{ร้อยละของเถ้า}} \qquad (2.1)$$

สารระเหยได้ (VM) เป็นน้ำหนักที่สูญเสียไป (หักความชื้นออกแล้ว) หลังจากการเผาถ่านหินบดละเอียดที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที โดยไม่ให้สัมผัสกับอากาศเพื่อกลั่นสลายสารที่ระเหยได้ในเนื้อถ่านหินออกมา

คาร์บอนคงตัว (FC) เป็นผลต่างจากการคำนวณคือ

$$\text{ร้อยละคาร์บอนคงตัว} = 100 - (\text{ร้อยละความชื้น} + \text{เถ้า} + \text{สารระเหยได้}) \qquad (2.2)$$

ซึ่งแสดงค่าใกล้เคียงกับร้อยละของคาร์บอนที่เหลืออยู่ภายหลังการกลั่นถ่านหินในกระบวนการอุตสาหกรรม ค่าร้อยละของคาร์บอนคงตัวนี้ น้อยกว่า ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดที่มีอยู่ในถ่านหิน เนื่องจากยังมีคาร์บอนอีกจำนวนหนึ่งในรูปสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในส่วนของสารระเหยได้

ผลการวิเคราะห์ถ่านหินแบบประมาณจะช่วยบอกถึงคุณภาพและคุณสมบัติของถ่านหินในการเผาไหม้ ดังนี้

ความชื้น (M) + เถ้า (A) = วัสดุเฉื่อย, ไม่มีคุณค่าแต่อย่างใด

สารระเหยได้ (VM) + คาร์บอนคงตัว (FC) = ปริมาณถ่านหิน "บริสุทธิ์" หรือส่วนที่เผาไหม้ได้ (combustible) เป็นส่วนที่มีคุณค่า

เถ้า (A) = เป็นการวัดเถ้าของการเผาไหม้จริง (cinder)

$\frac{\text{คาร์บอนคงตัว}}{\text{สารระเหยได้}}\left(\frac{FC}{VM}\right)$ = เรียกว่าอัตราส่วนของเชื้อเพลิง (fuel ratio) เป็นอัตราส่วนที่แสดงถึงปริมาณที่เชื้อเพลิงจะเผาไหม้บนตะแกรง ต่อปริมาณของเชื้อเพลิงที่จะเผาไหม้เหนือตะแกรง

สารระเหยได้ (VM) = เป็นการวัดการเกิดควัน ยิ่งค่าสารระเหยได้สูง โอกาสเกิดควันก็ยิ่งมาก

เถ้า (A) + คาร์บอนคงตัว (FC) = ผลได้ของถ่านหินในรูปของถ่านโค้ก

อัตราส่วนของเชื้อเพลิง (FC/VM) สามารถบอกถึงศักดิ์ของถ่านหินได้โดยประมาณ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ศักดิ์ของถ่านหิน (11)

ศักดิ์ของถ่านหิน	อัตราส่วนของเชื้อเพลิง (FC/VM)
แอนทราไซท์	10 - 60
เซมิแอนทราไซท์	6 - 10
เซมิบิทูมินัส	3 - 7
บิทูมินัส	1/2 - 3

สำหรับถ่านหินที่มีศักดิ์ต่ำกว่าถ่านหินบิทูมินัส เช่น ถ่านหินซับบิทูมินัส และลิกไนท์ จะมีอัตราส่วนของเชื้อเพลิงเช่นเดียวกับถ่านหินบิทูมินัส แต่ต้องใช้ปริมาณน้ำ หรือออกซิเจนที่มีอยู่เป็นเครื่องช่วยจำแนกด้วย

ในการวิเคราะห์แบบแยกธาตุนั้นได้แบ่งการวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ที่มีอยู่ในถ่านหิน คือ ทำการวิเคราะห์ความชื้น, เถ้า, คาร์บอนทั้งหมด, ไฮโดรเจน, กำมะถัน และไนโตรเจน ส่วนออกซิเจนเป็นผลต่างระหว่าง 100 กับผลรวมของปริมาณของธาตุองค์ประกอบทั้งหมด

2.6 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) (12,13)

การถดถอยเป็นเทคนิคทางสถิติที่ใช้ในการหาสมการเส้นตรงหรือเส้นโค้ง สมการเหล่านั้นจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองประเภท คือ ตัวแปรตาม (dependent variable) ตัวหนึ่ง และตัวแปรอิสระ (independent variable) อีกตัวหนึ่งหรือมากกว่า สมการที่ได้จากเทคนิคดังกล่าวจะแสดงว่าตัวแปรตามมีการผันแปรตามตัวแปรอิสระที่ผู้วิเคราะห์เลือกใช้อย่างไร

การวิเคราะห์การถดถอยแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ การถดถอยอย่างง่าย (simple regression) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระหนึ่งตัว และการถดถอยเชิงซ้อน (multiple regression) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระตั้งแต่สองตัวขึ้นไป ในงานนี้ใช้การถดถอยเชิงซ้อน โดยกำหนดตัวแปรตาม คือ ค่าความร้อน ส่วนตัวแปรอิสระซึ่งมีหลายตัว คือ ความชื้น, เถ้า, สารระเหยได้ และคาร์บอนคงตัว

2.6.1 สัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (The coefficient of determination)

สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ คือ ดัชนีที่ใช้แสดงขนาดของความแปรปรวนที่เกิดขึ้น

ในตัวแปรตามที่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการถดถอย หรืออาจกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า สัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจก็คือ ขนาดของความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ

ค่าของสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ, r^2 แสดงโดยใช้ค่าสัดส่วนของความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระต่อ ความแปรปรวนที่เกิดขึ้นทั้งหมดในตัวแปรตาม ดังนั้น r^2 จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

ถ้า r^2 เท่ากับ 0 แสดงว่า ความแปรปรวนทั้งหมดที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามไม่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ

ถ้า r^2 มีค่าเข้าใกล้ 0 เช่น $r^2 = 0.2$ แสดงว่า 20 % ของความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามสามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ (สมการถดถอย) ส่วนอีก 80 % ที่เหลือควรจะเนื่องมาจากปัจจัยอื่น ๆ

ถ้า r^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 เช่น $r^2 = 0.95$ แสดงว่า 95 % ของความแปรปรวนที่เกิดในตัวแปรตามสามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ

ถ้า r^2 เท่ากับ 1 แสดงว่า ความแปรปรวนทั้งหมดที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามสามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ

2.6.2 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจเชิงซ้อน (The coefficient of multiple determination)

สัมประสิทธิ์การตัดสินใจเชิงซ้อน, R^2 มีความหมายเช่นเดียวกับสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ กล่าวคือ เป็นอัตราส่วนระหว่างค่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามที่สามารถอธิบายได้ต่อความแปรปรวนที่เกิดขึ้นทั้งหมดในตัวแปรตาม ซึ่งใช้สำหรับการถดถอยเชิงซ้อน

2.6.3 การถดถอยที่เป็นเส้นตรงเชิงซ้อน (Multiple linear regression)

ความสัมพันธ์ของ y ที่แปรตาม x ในกรณีที่ x มี k ตัว คือ

$$y = f(x_1, x_2, \ldots, x_k)$$

ถ้าความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นเส้นตรง จะได้

$$y = B_0 + \sum_{i=1}^{k} B_i x_i \qquad (2.3)$$

โดยที่ B_0 และ B_i เป็นค่าคงที่

รูปแบบของสมการ (2.3) เรียกว่า Deterministic Mathematical Model ของตัวแปรหลาย ๆ ตัว

เนื่องจากความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการเก็บข้อมูล การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรตามและตัวแปรอิสระจำเป็นต้องใช้รูปแบบ Probabilistic Model

016331

ซึ่งจะมีสมการเป็น

$$y = B_o + \sum_{i=1}^{k} B_i x_i + e \qquad (2.4)$$

สมการดังกล่าวมีสมมติฐานที่ต้องยอมรับดังนี้

1. B_o และ B_i $(i = 1,2,\ldots,k)$ เป็นค่าคงที่
2. y เป็นตัวแปรตามซึ่งมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับ x_i
3. e เป็นความเบี่ยงเบนที่มีค่าเท่ากับผลต่างของ y ที่เกิดขึ้นจริงกับค่าของ y ที่พยากรณ์ได้บนเส้นถดถอย
4. e มีลักษณะการกระจายของความน่าจะเป็นแบบนอร์มอลที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และความแปรปรวนเท่ากับ σ_e^2
5. ค่าของ e ใด ๆ เป็นค่าที่เป็นอิสระแก่กัน กล่าวคือ ความเบี่ยงเบนออกจากเส้นถดถอยของข้อมูลตัวหนึ่ง ไม่มีผลต่อความเบี่ยงเบนของข้อมูลตัวอื่น ๆ

ดังนั้นจากข้อมูล จะคำนวณค่าเฉลี่ยของ y, $u_{y|x_1,x_2,\ldots,x_k}$ ได้ดังนี้

$$u_{y|x_1,x_2,\ldots,x_k} = B_o + \sum_{i=1}^{k} B_i x_i \qquad (2.5)$$

สมการ (2.5) คือ เส้นถดถอยของ y จากตัวแปรอิสระ x_i ซึ่งจะแทนความสัมพันธ์เฉลี่ยระหว่างตัวแปร x_i และ y ในประชากร ค่าของ B_o ในสมการเส้นถดถอยเชิงซ้อนจะเท่ากับค่าของ y เมื่อ $x_1 = 0, x_2 = 0, \ldots, x_k = 0$ ส่วนค่าของ B_i จะเป็นตัวบอกความสัมพันธ์ระหว่าง y กับ x_1, y กับ $x_2,\ldots,$ y กับ x_k กล่าวคือ ถ้า x_1, $x_2,\ldots, x_k$ ไม่มีอิทธิพลต่อ y แล้ว ค่าของ $B_1, B_2,\ldots, B_k$ ควรมีค่าเป็นศูนย์ นอกจากนี้ B_i ยังเป็นตัวบอกอัตราการเปลี่ยนแปลงใน y เมื่อ x_i เปลี่ยนแปลงไปหนึ่งหน่วย เช่น B_1 ใช้เป็นตัววัดอัตราการเปลี่ยนแปลงใน y เมื่อ x_1 เปลี่ยนแปลงไปหนึ่งหน่วย โดยที่ $x_2, x_3,\ldots, x_k$ มีค่าคงที่

การคำนวณค่า B_i สามารถใช้หลักการกำลังสองน้อยที่สุด (least square) โดยในปัจจุบันได้มีโปรแกรมสำเร็จรูป (software) ต่าง ๆ สำหรับใช้คำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ เช่น Lotus 1-2-3, Microsoft เป็นต้น

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับประเทศไทยยังไม่เคยมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเรื่องนี้มาก่อน จึงมีเฉพาะงานวิจัยของต่างประเทศ ซึ่งพอสรุปได้ดังนี้

Goutal (14) ในปี ค.ศ.1902 ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนกับผลวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินศักดิ์ต่าง ๆ ได้ความสัมพันธ์เป็น

$$P = 82C + aV$$

เมื่อ P คือ ค่าความร้อนมีหน่วยเป็นแคลอรี/กรัม, C คือ ร้อยละคาร์บอนคงตัว (สภาวะไม่รวมความชื้น), V คือ ร้อยละสารระเหยได้ (สภาวะไม่รวมความชื้น) และ a คือ ค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งแปรเปลี่ยนตามร้อยละสารระเหยได้ ซึ่งค่า a หาได้จากตารางระหว่าง V ' กับ a โดย V ' = Vx100/(V+C) ดังนี้

V '	5	10	15	20	25	30	35	38	40
a	145	130	117	109	103	98	94	85	80

และได้เสนอไว้ว่าสามารถใช้ได้กับถ่านหินทุกศักดิ์

Earnest และ Fyans (15) ในปี ค.ศ.1982 ได้นำเครื่อง Thermogravimetry (TG) มาใช้ในการวิเคราะห์แบบประมาณ โดยทั้งคู่พบว่า ความสัมพันธ์ของ Goutal สามารถใช้ได้ดีกับถ่านหินศักดิ์บิทูมินัส ที่มีค่า V ' อยู่ในช่วง 5-35 % และมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 2 % นอกจากนี้ได้เสนอความสัมพันธ์ที่ใช้กับถ่านหินศักดิ์แอนทราไซท์ และถ่านโค้ก คือ

แอนทราไซท์ : $P = 82C + 82V$

โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ 1 % และ

ถ่านโค้ก : $P = 82C$

โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยต่ำกว่า 4.5 % ซึ่งไม่ได้ระบุจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการสร้างความสัมพันธ์ดังกล่าวไว้

Ferguson และ Rowe (16) ในปี ค.ศ.1986 ได้ศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนกับผลวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินลิกไนท์ โดยนำข้อมูลผลวิเคราะห์ของถ่านหินศักดิ์ลิกไนท์ เอ จำนวน 23 ข้อมูลจาก Pennsylvania State University Coal Research Laboratory's Coal Data Bank มาสร้างความสัมพันธ์โดยใช้เมตริกซ์ (matrix) และหลักกำลังสองน้อยที่สุด (least square) ได้ความสัมพันธ์ คือ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$Q\ (Btu/lb) = -2.26x10^{5}M^{-1} + 108A + 297VM + 281FC$$

เมื่อ M, A, VM และ FC คือ ร้อยละความชื้น, เถ้า, สารระเหยได้ และคาร์บอนคงตัว ตามลำดับ พบว่า มีค่าความเบี่ยงเบนเฉลี่ย (average deviation) อยู่ในช่วง $\pm$ 1.2 % แต่ไม่สามารถอธิบายได้ว่าทำไมเทอมของความชื้นจึงเป็นส่วนผกผัน

Urkan และ Arikol (17) ในปี ค.ศ.1989 ได้ศึกษาหาความสัมพันธ์ดังกล่าวของถ่านหินประเทศตุรกี โดยใช้ตัวอย่างถ่านหินศักดิ์บิทูมินัสถึงลิกไนท์ จำนวน 20 ตัวอย่าง (บิทูมินัส 2 ตัวอย่าง, ซับบิทูมินัส 3 ตัวอย่าง และลิกไนท์ 15 ตัวอย่าง) มาทำการวิเคราะห์ค่าความร้อน และวิเคราะห์แบบประมาณ จากผลการทดลองพบว่า ค่าความร้อนของสารระเหยได้มีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนของถ่านหินสภาวะไม่รวมความชื้นและเถ้า (dry ash-free basis) และพัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดังกล่าวจนได้ความสัมพันธ์เป็น

$$HHV = (39821X^{2} - 80861X + 58378)[1.0 - 0.01(A+M)]$$

เมื่อ HHV คือ ค่าความร้อนรวมมีหน่วยเป็นกิโลแคลอรี/กิโลกรัม, X คือ อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารระเหยได้กับส่วนที่เผาไหม้ได้ หรือ VM/(VM+FC), A และ M คือ ร้อยละเถ้า และความชื้น ตามลำดับ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 4.1 % และเมื่อนำไปทดสอบกับข้อมูลทั้งหมด 47 ข้อมูล พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 4.1 % เช่นกัน

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมดที่กล่าวถึง จะเห็นได้ว่าไม่มีงานวิจัยใดที่ศึกษาถึงความสัมพันธ์ดังกล่าวของถ่านหินศักดิ์ซับบิทูมินัสโดยตรง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย