

## บทที่ 2

### วารสารปริทัศน์

ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงได้พิภพชนิดหนึ่ง เกิดจากการสะสมตัวของซากพืชเป็นระยะเวลา นานหลายสิบล้านปี ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เหมาะสมของกระบวนการทางธรณีวิทยา โดยได้รับ อิทธิพลจากความร้อนและความดันของพื้นผิวโลกจนกระทั่งเกิดเป็นพีท (peat) ซึ่งต่อมาจะ เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางเคมีและกายภาพเกิดเป็นถ่านหินชนิดต่าง ๆ โดยมีองค์ประกอบ ที่สำคัญคือ คาร์บอน (C) และไฮโดรเจน (H) โดยอาจมีธาตุอื่น ๆ เจือปนอยู่บ้าง เช่น กำมะถัน (S) ไนโตรเจน (N) ออกซิเจน (O) เป็นต้น

นักธรณีวิทยาได้จัดแบ่งถ่านหินโดยคำนึงถึงคุณภาพการให้พลังงานดังนี้ (Meyer, 1981)

ก. พีท (peat) ประกอบด้วยซากพืชบางส่วน ซึ่งได้สลายตัวไปแล้วแต่ยังปรากฏให้ เห็นร่องรอยของเนื้อไม้อยู่ มีรูพรุนคล้ายฟองน้ำ มีปริมาณออกซิเจนและความชื้นค่อนข้างสูง ค่าความร้อนต่ำ และเมื่อติดไฟจะมีความร้อน

ข. ลิกไนต์ (lignite) เป็นถ่านหินที่มีคุณภาพต่ำที่สุด มีวิวัฒนาการมาจากพีท โดย ยังคงปรากฏร่องรอยของเนื้อไม้อยู่บ้าง มีสีน้ำตาล มีปริมาณออกซิเจนค่อนข้างสูง ความชื้นสูง ให้ค่าความร้อนต่ำ มีโอกาสที่จะเกิดการติดไฟได้เอง (spontaneous combustion) จึงไม่ สามารถขนส่งเป็นระยะทางไกล ๆ หรือกองเก็บไว้นาน ๆ ได้

ค. ซับบิทูมินัส (subbituminous) มีสีน้ำตาลคล้ายขี้ผึ้ง ให้ค่าความร้อนสูงกว่า ลิกไนต์ สามารถที่จะแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงเหลว หรือก๊าซได้

ง. บิทูมินัส (bituminous) เป็นถ่านหินคุณภาพสูง ใช้เวลาในการแปรสภาพค่อนข้าง ยาวนาน เนื้อแน่นและแข็ง มีสีดำ ไม่ปรากฏร่องรอยของเนื้อไม้อยู่ มีค่าต่ำ ให้ความร้อนน้อย ให้ค่าความร้อนสูง เหมาะสำหรับนำไปผลิตเป็นถ่านโค้กและใช้ในอุตสาหกรรมถลุงโลหะ

จ. แอนทราไซต์ (anthracite) เป็นถ่านหินที่มีคุณภาพดีที่สุด มีสีดำสนิท เป็นมันวาว มีความแข็งแรงสูง มีปริมาณคาร์บอนสูงมาก ความชื้นต่ำ จุดติดไฟยาก แต่ให้ค่าความร้อนสูง และให้เวลาในการเผาไหม้ยาวนาน

นอกจากนี้ยังสามารถจำแนกชนิดของถ่านหินได้ตามคักต์ (rank) ตามวิธีมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา (ASTM) โดยเรียงจากคุณภาพต่ำถึงสูง ได้เป็น 4 ชั้นใหญ่ ๆ คือ ลิกไนต์ ซับบิทูมินัส บิทูมินัส และแอนทราไซต์ ดังตารางที่ 2.1 โดยพิจารณาจากองค์ประกอบที่สำคัญ ซึ่งเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก ได้แก่ คาร์บอนคงตัว (fixed carbon) สารระเหยได้ (volatile matter) ความชื้น (moisture) เถ้า (ash) องค์ประกอบอนินทรีย์ (inorganic compounds) และ ค่าความร้อน (heating value)

## 2.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของถ่านหิน (Elliott, 1981; Meyer, 1981)

องค์ประกอบส่วนใหญ่ของถ่านหินประกอบด้วย คาร์บอน และไฮโดรเจน และอาจมีธาตุอื่น ๆ ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีปริมาณน้อย ได้แก่ กำมะถัน ออกซิเจน ไนโตรเจน ซิลิกอน อลูมิเนียม เหล็ก แคลเซียม แมกเนเซียม โบแทสเซียม โซเดียม และไทเทเนียม เป็นต้น คาร์บอนซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีมากที่สุดไนโครงสร้างถ่านหินโดยอยู่ในโครงสร้างของส่วนที่เป็นส่วนอินทรีย์ (organic coal matter) ซึ่งเป็นส่วนที่ให้พลังงานของถ่านหิน ในส่วนที่เป็นส่วนอินทรีย์นี้ยังประกอบด้วยธาตุไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และกำมะถัน อยู่ด้วยโดยมีอยู่ในปริมาณน้อย ซึ่งเรียกส่วนนี้ว่า maceral สำหรับธาตุอื่น ๆ ที่เป็นองค์ประกอบอนินทรีย์ซึ่งมีอยู่กระจัดกระจายทั่วไปในเนื้อถ่านหิน เรียกว่า mineral matter เมื่อนำถ่านหินไปเผาไหม้ ส่วนที่เป็น marceral จะกลายเป็นก๊าซ และส่วนที่เป็น mineral matter ส่วนใหญ่จะคงเหลือเป็นเถ้า แต่มีสารประกอบแร่ธาตุบางตัวไม่เปลี่ยนเป็นเถ้า เช่น ที่อุณหภูมิสูง ๆ คาร์บอนจะสลายตัวกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือกำมะถันจะสลายตัวกลายเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไฟไรต์ถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปสารประกอบของเหล็กซึ่งเป็นส่วนประกอบของเถ้า ปริมาณของธาตุต่าง ๆ ในถ่านหินขึ้นอยู่กับกระบวนการเกิดถ่านหิน (coalification) โดยเริ่มจากซากพืชจนกระทั่งกลายเป็นถ่านหินดังที่กล่าวมาแล้ว ซึ่งพบว่าเมื่อคักต์สูงขึ้นจะมีปริมาณคาร์บอนมากขึ้น เนื่องจากกระบวนการเกิดถ่านหินจะมีการขจัดไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน ออกไปเป็นปริมาณมากในรูปของก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในกระบวนการ pyrolysis จะมีการขจัดไฮโดรเจนและออกซิเจนอย่างสมบูรณ์ โดยที่คาร์บอนยังคงอยู่ ส่วนไนโตรเจนและกำมะถันเหลืออยู่ในปริมาณน้อยมาก

ตารางที่ 2.1 การจำแนกถ่านหินตามมาตรฐาน ASTM D 388 (ASTM Standards,1992)

Class	Group	Fixed Carbon Limits, % (Dry, Mineral-Matter-Free Basis)		Volatile Matter Limits, % (Dry, Mineral-Matter-Free Basis)		Gross Calorific Value Limits, Cal/g <sup>b</sup> Moist, Mineral-Matter-Free Basis)		Agglomerating Character
		Equal or Greater than	Less Than	Greater Than	Equal or Less Than	Equal or Greater Than	Less Than	
1. Anthracitic	1. Meta-anthracite	98	...	...	2	...	...	nonagglomerating
	2. Anthracite	92	98	2	8	...	...	
	3. Semianthracite <sup>c</sup>	86	92	8	14	...	...	
2. Bituminous	1. Low volatile bituminous coal	78	86	14	22	...	...	commonly agglomerating <sup>e</sup>
	2. Medium volatile bituminous coal	69	78	22	31	...	...	
	3. High volatile A bituminous coal	...	69	31	...	7,777 <sup>d</sup>	...	
	4. High volatile B bituminous coal	...	...	...	...	7,222 <sup>d</sup>	7,777	
	5. High volatile C bituminous coal	...	...	...	...	6,389 <sup>e</sup>	7,222	
3. Subbituminous	1. Subbituminous A coal	...	...	...	...	5,833	6,389	agglomerating
	2. Subbituminous B coal	...	...	...	...	5,277	5,833	
	3. Subbituminous C coal	...	...	...	...	4,611	5,277	
4. Lignite	1. Lignite A	...	...	...	...	3,500	4,511	nonagglomerating
	2. Lignite B	...	...	...	...	...	3,500	

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

b Moist refer 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

โครงสร้างโมเลกุลของถ่านหินแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ตามสมบัติทางเคมีตามที่กล่าวแล้วข้างต้น คือ ส่วนโครงสร้างอินทรีย์ และส่วนประกอบที่เป็นแร่ธาตุ แต่ละส่วนมีรายละเอียด ดังนี้

#### ก. ส่วนโครงสร้างอินทรีย์

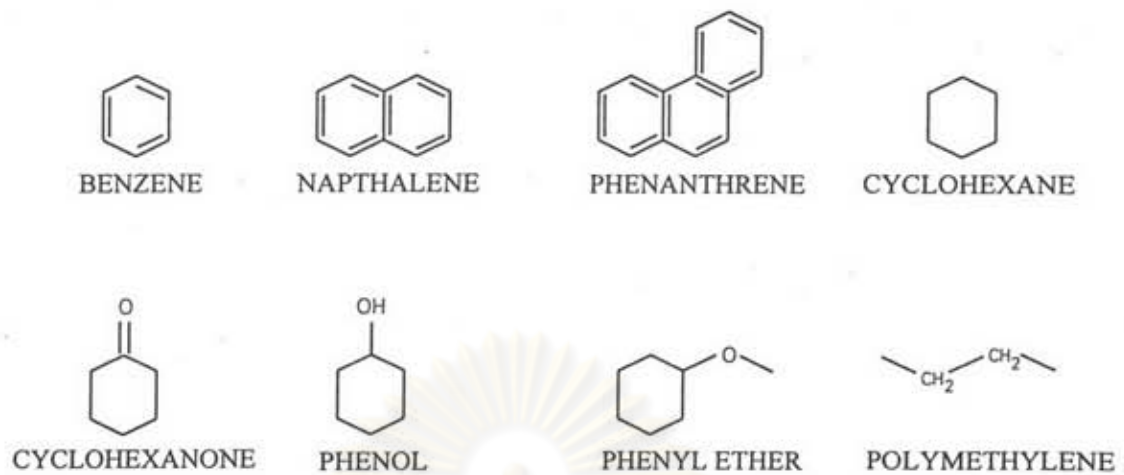
โครงสร้างอินทรีย์ของถ่านหินประกอบด้วยคาร์บอนประมาณ 90-97 ส่วน ไฮโดรเจน 3-5 ส่วน ออกซิเจน 1-2 ส่วน กำมะถันและไนโตรเจน 1-2 ส่วน โดยน้ำหนักเมื่อไม่คิดความชื้น และเมื่อคิดเทียบจากอัตราส่วนโดยน้ำหนักของอะตอมของธาตุ (atomic ratio) ดังแสดงในตารางที่ 2.2 พบว่าไฮโดรเจน เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของโครงสร้างถ่านหิน

ตารางที่ 2.2 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของอะตอมของธาตุในถ่านหินคักดีต่าง ๆ (Meyer, 1981)

คักดี	อัตราส่วนโดยน้ำหนักอะตอม				
	C	H	O	N	S
แอนทราไซต์	100	50	2-5	1-2	1/2-1
บิทูมินัส	100	70	4-8	1-2	1/2-1
ซับบิทูมินัส	100	80	10-20	1-2	1/2-1
ลิกไนต์	100	80	20-25	1-2	1/2-1

เมื่อคักดีของถ่านหินสูงขึ้น อัตราส่วนโดยน้ำหนักของอะตอมไฮโดรเจนต่อคาร์บอนและออกซิเจนต่อคาร์บอนจะลดลง

สารประกอบอินทรีย์ที่สำคัญ ๆ ที่พบในถ่านหิน ได้แก่ เบนซีน (Benzene) ไฮโคลเฮกเซน (cyclohexane) ไฮโคลเฮกซาโนน (cyclohexanone) เมทิลีน (methylene) แนพทาลีน (naphthalene) ฟีนอล (phenol) ฟีนิลอีเทอร์ (phenylether) โพลีเมทิลีน (polymethylene) ฟีนันทรีน (phenanthrene) และสารประกอบพวกไดไฮโดรอะโรมาติก (dihydroaromatic) เช่น คาร์บาโซล (carbazol) เบนซาทิโอฟีน (benzathiofene) และไพริดีน (pyridine) นอกจากนี้ยังมีหมู่ฟังก์ชัน (functional group) คือ ไฮดรอกซี (hydroxy) คาร์บอกซี (carboxy) อะมิโน (amino) และไทออล (thiol) ดังแสดงในรูป 2.1



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างสารประกอบอินทรีย์ในถ่านหิน (Meyer, 1981)

ข. ส่วนประกอบที่เป็นแร่ธาตุ (Elliott, 1981)

สารประกอบแร่ธาตุที่พบมากที่สุดในถ่านหินคือ ซิลิคอน นอกจากนี้ในถ่านหินยังประกอบด้วยแร่ธาตุอื่น ๆ ได้แก่ อลูมิเนียม เหล็ก แคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม และโปแตสเซียม เป็นต้น ธาตุต่าง ๆ เหล่านี้สามารถรวมตัวกับอะตอมของธาตุอื่น ๆ เกิดเป็นสารประกอบต่าง ๆ ซึ่งสามารถจัดแบ่งเป็น 5 กลุ่ม ได้แก่

1. หมู่อลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) หรือดินเหนียว (clay) จัดเป็นหมู่แร่ธาตุที่มีมากที่สุดในถ่านหิน เช่น เคโอลิไนต์ (kaolinite) และอิลไลต์ (illite) เป็นต้น
2. กลุ่มซัลไฟด์ (sulfide) เช่น ไพไรต์ (pyrite) และมาร์คาไซต์ (marcasite) เป็นต้น
3. กลุ่มคาร์บอเนต (carbonates) เช่น โดโลไมต์ (dolomite) แคลไซต์ (calcite) และแอนเกอร์ไรต์ (ankerite) เป็นต้น
4. กลุ่มซัลเฟต (sulfate) เป็นแร่ธาตุที่พบหลังจากเกิดการออกซิไดซ์ (oxidize) ของไพไรต์
5. กลุ่มซิลิกา (silica) เช่น ควอตซ์ (quartz) เป็นต้น

## 2.2 กำมะถันในถ่านหิน

ปริมาณกำมะถันที่พบในถ่านหินพบตั้งแต่ 0.1-10 % โดยน้ำหนัก (Elliott, 1978) และสามารถแบ่งกำมะถันในถ่านหินออกเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้สองประเภทคือ

- ก. กำมะถันอนินทรีย์ (inorganic sulfur) แบ่งเป็น 2 รูปแบบ คือ
  - กำมะถันไพไรต์ (pyretic sulfur)
  - กำมะถันซัลเฟต (sulfate sulfur)
- ข. กำมะถันอินทรีย์ (organic sulfur)

รายละเอียดของกำมะถันในแต่ละรูปแบบมีดังนี้

### 1. กำมะถันไพไรต์ (Elliott, 1978; Thiessen, 1963)

พบในลักษณะของสารประกอบโลหะซัลไฟด์ คือ แร่ไพไรต์ (pyrite) และ มาร์คาไซต์ (marcasite) แร่ทั้งสองชนิดนี้มีสูตรเคมีเหมือนกันคือ  $FeS_2$  แต่มีความแตกต่างกันทางโครงสร้างผลึก และคุณสมบัติทางกายภาพ คือ แร่ไพไรต์มีโครงสร้างผลึกแบบ isomeric หรือ cubic มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 5 ส่วนแร่มาร์คาไซต์มีโครงสร้างผลึกแบบ rhombic มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 4.87 มาร์คาไซต์จะเริ่มเปลี่ยนรูปเป็นไพไรต์ และสลายตัวให้  $FeS$  และ  $S$  ที่อุณหภูมิสูงกว่า  $420^{\circ}C$  แต่โดยปกติเรามักเรียกร่วมกันว่า ไพไรต์

กำมะถันไพไรต์มีคุณสมบัติเหมือนกับถ่านหินตรงที่ไม่ละลายน้ำ แต่มีความถ่วงจำเพาะแตกต่างจากถ่านหินมาก กล่าวคือ ถ่านหินมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.3-1.8 ดังนั้นจึงสามารถแยกกำมะถันไพไรต์ออกจากถ่านหินได้โดยใช้วิธีการทางกายภาพ ยกเว้นกำมะถันไพไรต์ขนาดเล็กมาก ซึ่งต้องอาศัยวิธีการทางเคมี

### 2. กำมะถันซัลเฟต (Elliott, 1978)

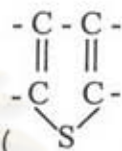
พบในถ่านหินในลักษณะของโลหะซัลเฟต เช่น สารประกอบแคลเซียมซัลเฟต ( $CaSO_4$ ) สารประกอบซัลเฟตของเหล็ก ( $FeSO_4$ ) สารประกอบซัลเฟตของทองแดง ( $CuSO_4$ ) สารประกอบซัลเฟตของแมกนีเซียม ( $MgSO_4$ ) เป็นต้น หรืออาจจะพบในลักษณะของแร่ เช่น ยิปซัม (gypsum) กำมะถันซัลเฟตมีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับกำมะถันไพไรต์และกำมะถันอินทรีย์ คือมีอยู่ประมาณร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก

### 3. กำมะถันอินทรีย์ (Elliott, 1978; Meyer, 1981; Thiessen, 1963)

กำมะถันอินทรีย์ในถ่านหินพบในลักษณะเป็นส่วนหนึ่งในเนื้อถ่านหินยึดกันด้วยพันธะเคมี ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีการทางเคมีในการกำจัด

กำมะถันอินทรีย์มีประมาณร้อยละ 30-70 ของปริมาณกำมะถันรวมในถ่านหิน โดยปกติเมื่อร้อยละกำมะถันรวมเพิ่มขึ้นปริมาณของกำมะถันอินทรีย์จะลดลง

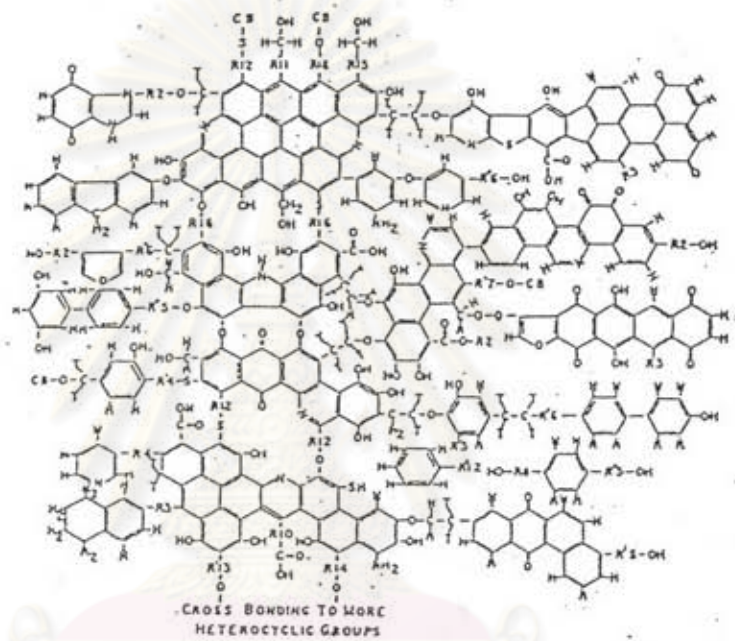
กำมะถันอินทรีย์จะอยู่ในโครงสร้างของถ่านหินส่วนที่เป็นโครงสร้างอินทรีย์



ส่วนมากอยู่ในรูปสารประกอบพวก heterocyclic ring ( ), thioether, sulfide (R-S-R'), mercaptan (R-S-H) และ thiophenol (C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>SH) เป็นต้น โดยสารประกอบเหล่านี้มีพันธะที่เสถียรมาก ตัวอย่างลักษณะโครงสร้างของกำมะถันอินทรีย์แสดงในรูปที่ 2.2 และตัวอย่างโครงสร้างของกำมะถันตามแนวความคิดของ W.H. Wisler แสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีกลุ่มกำมะถันที่เพิ่มขึ้นจากรูปที่ 2.2 คือสารประกอบพวกไดซัลไฟด์ (disulfide, R-S-S-R') โดยที่ R และ R' คือ สารประกอบวงแหวน (cyclic compound)

### 2.3 ไนโตรเจนในถ่านหิน

ไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบหนึ่งของถ่านหิน เกิดจากโปรตีนที่อยู่ในซากพืชที่ทับถมกันและผ่านกระบวนการเกิดถ่านหิน (coalification) โดยปริมาณโปรตีนเหล่านี้เปลี่ยนแปลงกลายเป็นองค์ประกอบอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนอยู่ โดยองค์ประกอบอินทรีย์เหล่านี้จะถูกย่อยสลายไปได้ด้วยจุลินทรีย์ต่าง ๆ และจะเสีสภาพหรือย่อยสลายไปได้ด้วยความร้อนในระหว่างกระบวนการเกิดถ่านหินหรือกระบวนการเปลี่ยนแปลงของโลก ดังนั้นถ่านหินที่มีค่ากำมะถันสูงจึงมีปริมาณไนโตรเจนน้อยกว่าถ่านหินที่มีค่ากำมะถันต่ำ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

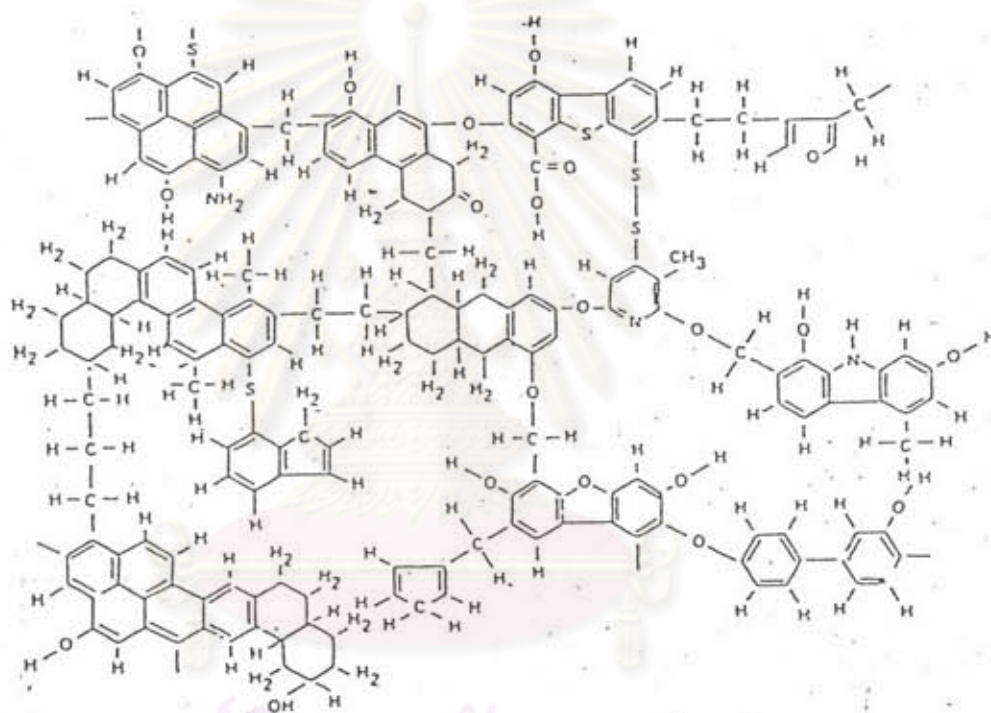


- $R^*N$  = Alicyclic rings of  $N$  carbons.  
 $R^N$  = Alkyl side chain of  $N$  carbons.  
 $R'N$  = Unsaturated alkyl side chain of  $N$  carbons.  
 $CB$  = Cross bonding by  $O$  or  $S$  to new heterocyclic groups with side chains.  
 $T$  = Tetrahedral 3 dimensional  $C-C$  bonds,  $C-O$  bonds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

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างของกำมะถันอินทรีย์ ที่มีสารประกอบพวก mercaptan, sulfide และ heterocyclic ring ในโครงสร้างถ่านหิน (Elliott, 1978)





ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างของกำมะถันอินทรีย์ตามแนวความคิดของ W.H. Wiser ที่มีสารประกอบพวกไดซัลไฟด์ในโครงสร้างของถ่านหิน (Elliott, 1978)

ตารางที่ 2.3 ปริมาณไนโตรเจนที่ปรากฏในถ่านหินศักดิ์ต่าง ๆ (Thiessen, 1963)

ศักดิ์ถ่านหิน	ปริมาณไนโตรเจน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
พีท	0.7-3.4
ลิกไนต์และซับบิทูมินัส	0.4-2.5
บิทูมินัส	0.6-2.8
แอนทราไซต์	0.2-1.5

เนื่องจากไนโตรเจนสามารถถูกย่อยสลายไปได้ด้วยความร้อนและจุลินทรีย์ ไนโตรเจนที่ยังคงเหลืออยู่ในถ่านหินจึงเป็นไนโตรเจนที่มีความเสถียรสูง โดยมักจะอยู่ในลักษณะวงแหวนอะโรมาติก (aromatic ring) เป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ ไพรีดีน (pyridine) ไพโรล (pyrrole) แสดงสูตรโครงสร้างในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 สูตรโครงสร้างของไพรีดีนและไพโรล (Flagan and Seinfeld, 1988)

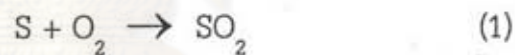
#### 2.4 การเผาไหม้ถ่านหิน (Elliott, 1981)

การเผาไหม้ของถ่านหินแบ่งออกเป็นสองช่วง คือ ช่วงแรกสารระเหยได้ (volatile matter) จะได้รับความร้อนระเหยออกมาและถูกเผาไหม้ จากนั้นถ่านหินจึงถูกเผาไหม้ โดยก่อนที่ถ่านหินจะติดไฟ น้ำที่อยู่ภายในจะถูกไล่ออกมาก่อนด้วยความร้อน และเมื่ออุณหภูมิ

สูงขึ้น ก๊าซที่ติดไฟได้และน้ำมันห่านจะถูกไล่ออกมา เรียกขั้นตอนนี้ว่า ปฏิกริยาไพโรไลซิส (pyrolysis) ซึ่งก๊าซที่ติดไฟได้และน้ำมันห่านที่ถูกไล่ออกมานั้นจะถูกเผาไหม้จนหมด หลังจากนั้นเนื้อถ่านหินจึงเริ่มเผาไหม้ต่อไป (Elliott, 1981) โดยถ่านหินจะเผาไหม้จากผิวด้านนอกเข้าไปในเนื้อถ่านหิน ในลักษณะการเกิดปฏิกิริยาตามแบบจำลองแกนหดตัว (shrinking core model) (Levenspeil, 1972) อัตราการเผาไหม้ถ่านหินขึ้นกับขนาดของถ่านหิน โดยถ่านหินที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าขนาดใหญ่ทำให้เผาไหม้ได้เร็วกว่าขนาดใหญ่ ซึ่งมีการเผาไหม้อย่างช้า ๆ และสม่ำเสมอ แต่ถ้าถ่านหินมีขนาดใหญ่เกินไปถ่านหินก็อาจจะไม่ติดไฟได้ ทั้งนี้เนื่องจากความร้อนจะถูกส่งเข้าไปในตัวเชื้อเพลิงจนหมด ทำให้ความร้อนไม่เพียงพอในการติดไฟ สำหรับความชื้นในถ่านหินจะมีผลทำให้ต้องใช้ความร้อนส่วนหนึ่งในการระเหยน้ำออกไป และน้ำส่วนนี้จะทำให้ส่วนผสมของก๊าซที่ติดไฟได้เจือจางลง จึงมีผลทำให้อัตราการเผาไหม้ช้าลง และประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลง

#### 2.4.1 การเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในการเผาไหม้ถ่านหิน

ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เกิดจากการออกซิไดส์กำมะถันในถ่านหินซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (1)



โดยกำมะถันอินทรีย์และกำมะถันไพไรต์ในถ่านหินจะถูกออกซิไดส์ ส่วนกำมะถันซัลเฟตมักจะเสถียรและไม่ถูกออกซิไดส์เกิดเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในระหว่างการเผาไหม้ (Elliott, 1981)

ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นอาจทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนต่อได้ก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ดังสมการที่ (2)

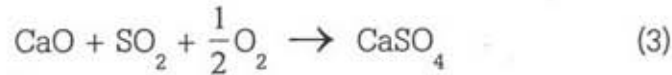


ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นระดับอุณหภูมิโดยปกติของการเผาไหม้จะไม่เกิดก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (เกริกชัย สุกาญจน์จที, 2529)

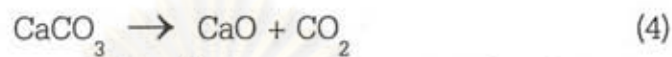
#### 2.4.2 การกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในระหว่างการเผาไหม้ถ่านหิน (Elliott, 1981)

การกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในระหว่างการเผาไหม้ถ่านหินทำได้หลายวิธี ได้แก่ การเติมปูนขาวหรือหินปูนลงไปในระหว่างการเผาไหม้ถ่านหินเพื่อกำจัดก๊าซซัลเฟอร์

ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการเผาไหม้ ในกรณีที่ใช้นิวทอนาปฏิริยาเคมีที่เกิดขึ้นแสดงได้ดังสมการที่ (3)



ในกรณีที่ใช้นิวทอนาจะเกิดปฏิริยาแคลไซน์ (calcination) ก่อน ตามสมการที่ (4) แล้วจึงเกิดปฏิริยาเป็นแคลเซียมซัลเฟตตามสมการที่ (3)



แคลเซียมซัลเฟตที่เกิดขึ้นเป็นของแข็งอยู่ร่วมกับเถ้า ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จึงไม่ถูกปล่อยออกไปสู่บรรยากาศ

#### 2.4.3 การเกิดไนโตรเจนออกไซด์ในระหว่างการเผาไหม้ถ่านหิน (Flagan and Seinfeld, 1988)

ไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการเผาไหม้ถ่านหินเป็นก๊าซไนตริกออกไซด์ (NO) เป็นส่วนใหญ่ และอาจทำปฏิริยาต่อไปกับก๊าซออกซิเจนได้เป็นไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>) ก๊าซไนตริกออกไซด์สามารถเกิดขึ้นได้สองทาง ได้แก่

1. เกิดการออกซิไดส์ของไนโตรเจนในอากาศ ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (5)



ซึ่งสามารถแบ่งเป็นปฏิริยาย่อยได้ดังนี้



จากสมการย่อยที่ (6) และ (7) จะเห็นว่าในสมการที่ (6) อะตอมของออกซิเจนซึ่งได้จากการแตกตัวของก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง จะทำปฏิริยากับก๊าซไนโตรเจนได้เป็นก๊าซไนตริกออกไซด์และอะตอมของไนโตรเจน จากนั้นอะตอมของไนโตรเจนจะทำปฏิริยากับก๊าซออกซิเจนได้เป็นก๊าซไนตริกออกไซด์และอะตอมของไนโตรเจนในสมการที่ (7) เป็นปฏิริยาลูกโซ่ที่เกิดต่อเนื่องกันไป จากการศึกษาทางด้านจลนพลศาสตร์ของปฏิริยานี้พบว่าปฏิริยาในสมการที่ (6) มีค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy) สูงและมีค่าสูงกว่าปฏิริยาที่ (7) ทั้งนี้เนื่องจากในปฏิริยาที่ (6) ต้องใช้พลังงานในการสลายโมเลกุลของไนโตรเจนซึ่งยึดกันด้วยพันธะสาม (triple bond) ซึ่งมีความแข็งแรงสูงมาก ให้กลายเป็นอะตอม จึงต้องใช้พลังงานสูงในการสลายพันธะ นอกจากนี้การสลายโมเลกุลของออกซิเจนในสมการที่ (7) ก็ต้อง

ใช้พลังงานสูงเช่นเดียวกัน เพราะโมเลกุลของออกซิเจนยึดกันด้วยพันธะคู่ (double bond) ซึ่งมีความแข็งแรงพอสมควร จึงต้องใช้พลังงานสูงในการสลายพันธะของออกซิเจนเช่นเดียวกัน

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการเกิดไนตริกออกไซด์จากการออกซิไดส์ไนโตรเจนในอากาศต้องใช้พลังงานที่สูงจึงจะเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวได้ นั่นคือต้องใช้อุณหภูมิการเผาไหม้ที่สูงในการเกิดปฏิกิริยานี้ ดังนั้นจึงเรียกไนตริกออกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการนี้ว่า Thermal-NO<sub>x</sub> (Flagan and Seinfeld, 1988)

2. เกิดจากการออกซิไดส์ของหมู่ฟังก์ชันของไนโตรเจนในถ่านหิน ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้ได้แก่ ไพรีดีน และไพโรล ซึ่งแสดงสมการการเกิดปฏิกิริยาได้ดังสมการที่ (8)



ไนตริกออกไซด์ทั้งหมดที่ปล่อยออกมาในระหว่างการเผาไหม้ของไนโตรเจนในถ่านหินเกิดจากสมการนี้ประมาณร้อยละ 85-95 ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นที่ในอุณหภูมิการเผาไหม้ไม่สูงนัก และเนื่องจากปฏิกิริยานี้เกิดจากการเผาไหม้ของไนโตรเจนที่เป็นหมู่ฟังก์ชันในถ่านหิน ดังนั้นจึงเรียกไนตริกออกไซด์จากกระบวนการนี้ว่า Fuel-NO<sub>x</sub> (Flagan and Seinfeld, 1988)

#### 2.4.4 การควบคุมการปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ในระหว่างการเผาไหม้

การเกิดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์นั้น เกิดขึ้นได้จากสองทางคือ เกิดจากการออกซิไดส์ของโมเลกุลของไนโตรเจนในอากาศ ซึ่งต้องใช้อุณหภูมิสูงมาก และเกิดจากการออกซิไดส์ของหมู่ฟังก์ชันของไนโตรเจนในถ่านหิน ซึ่งมักเกิดจากการที่มีปริมาณของอากาศที่พอดีกับเชื้อเพลิง (equivalence ratio  $\approx 1$ ) และมีอุณหภูมิของการเผาไหม้ที่สูง ดังนั้นการควบคุมการเกิดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์จะต้องควบคุมอุณหภูมิของการเผาไหม้ไม่ให้สูงเกินไป (ไม่ควรสูงกว่า 1000-1200 องศาเซลเซียส) สำหรับการควบคุมความสมดุลระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงนั้นสามารถทำได้โดยการทำให้เกิดการเผาไหม้เป็นชั้น ๆ (staged combustion) โดยในตอนแรกที่มีการเผาไหม้ ให้ใช้ปริมาณอากาศที่น้อย ๆ ซึ่งเรียกสภาวะเช่นนี้ว่า ภาวะเชื้อเพลิงเกินพอ (fuel rich condition) การกระทำเช่นนี้จะทำให้ปริมาณของไนโตรเจนออกไซด์ที่จะปล่อยออกมาน้อยลงเนื่องจากอากาศและเชื้อเพลิงไม่สมดุลกัน และทำให้มีอุณหภูมิของการเผาไหม้ต่ำ นอกจากนี้โมเลกุลของไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะสามารถทำปฏิกิริยากันเองและเกิดเป็นโมเลกุลของก๊าซไนโตรเจนซึ่งมีความเสถียรสูง เมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง ปริมาณไนโตรเจนในถ่านหินเริ่มน้อยลง และโมเลกุลของไนโตรเจนออกไซด์กลายเป็นโมเลกุลของก๊าซ

ไนโตรเจนมากขึ้น จึงให้ปริมาณอากาศเข้าไปมากเกินไปในการเผาไหม้ในขั้นถัดไป เรียกสภาวะเช่นนี้ว่า สภาวะอากาศเกินพอ (fuel lean condition) เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ต่อไป (Flagan and Seinfeld, 1988)

## 2.5 มาตรฐานการปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไนโตรเจนออกไซด์ในระหว่างการเผาไหม้

ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และก๊าซไนโตรเจนออกไซด์จัดเป็นสารมลพิษทางอากาศ โดยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะมีผลทำให้เกิดการระคายเคืองต่อทางเดินหายใจ ก๊าซนี้ส่วนใหญ่จะถูกดูดซึมไว้ที่บริเวณส่วนต้นของทางเดินหายใจ เนื่องจากเป็นก๊าซที่สามารถละลายน้ำได้ดี และจะเกิดเป็นกรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) ซึ่งจะมีผลต่อปอดและทางเดินหายใจเป็นอย่างมาก (อรพินท์ พัฒนเกรียงไกร, 2527) ส่วนก๊าซไนโตรเจนออกไซด์สามารถแบ่งได้เป็นสองชนิดที่สำคัญได้แก่ ก๊าซไนตริกออกไซด์ (NO) และก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ( $NO_2$ ) ซึ่งก๊าซชนิดหลังเป็นก๊าซมลพิษที่ร้ายแรงกว่าชนิดแรก (Jackson, et al, 1990) ก๊าซไนตริกออกไซด์นั้นจะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อทางเดินระบบหายใจและผิวหนัง (Lewis, 1991) ส่วนก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์จะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ โดยจะเกิดอันตรายในส่วนที่เป็นถุงลมเล็ก ๆ ภายในปอด และอาจทำให้ถึงแก่ความตายได้เมื่อมีความเข้มข้นของก๊าซนี้สูงเนื่องจากถุงลมเล็ก ๆ เหล่านั้นเกิดการโป่งพองและอักเสบ

เนื่องจากก๊าซดังกล่าวเป็นก๊าซมลพิษที่มีผลต่อร่างกาย และยังมีผลทำให้เกิดฝนกรด (acid rain) ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์หรือสิ่งก่อสร้างได้ จึงได้มีการกำหนดมาตรฐานของก๊าซดังกล่าวในอากาศ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น มาตรฐานของคุณภาพของอากาศ (air quality standard) และมาตรฐานของการปล่อยก๊าซมลพิษดังกล่าว (emissions standard) มาตรฐานเหล่านี้แตกต่างกันไปในแต่ละประเทศ ในที่นี้ได้แสดงมาตรฐานของคุณภาพอากาศของก๊าซดังกล่าวที่กำหนดไว้ในประเทศไทยและประเทศสหรัฐอเมริกาไว้ในตารางที่ 2.4 และตารางที่ 2.5 ได้แสดงมาตรฐานการปล่อยก๊าซมลพิษของก๊าซดังกล่าวของประเทศสหรัฐอเมริกา ในส่วนของประเทศไทยนั้นยังมิได้มีการกำหนดมาตรฐานการปล่อยก๊าซมลพิษที่เป็นทางการไว้ มีเพียงข้อเสนอแนะเท่านั้น ซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.5 เช่นเดียวกัน

ตารางที่ 2.4 มาตรฐานคุณภาพอากาศของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์  
ของประเทศไทยและประเทศสหรัฐอเมริกา

ก๊าซ	สหรัฐอเมริกา*	ไทย**
NO <sub>2</sub>		
- ค่าเฉลี่ยในเวลา 1 ชั่วโมง (mg/m <sup>3</sup> )	-	0.32
- ค่าเฉลี่ยเรขาคณิตใน 1 ปี (mg/m <sup>3</sup> )	0.10	-
SO <sub>2</sub>		
- ค่าเฉลี่ยในเวลา 24 ชั่วโมง (mg/m <sup>3</sup> )	0.365	0.30
- ค่าเฉลี่ยเรขาคณิตใน 1 ปี (mg/m <sup>3</sup> )	0.08	0.10

ที่มา : \* (United States of America. Office of the Federal Register, 1991)  
\*\* (ราชกิจจานุเบกษา, 2524)

ตารางที่ 2.5 มาตรฐานการปล่อย (standard emissions) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และก๊าซ  
ไนโตรเจนออกไซด์ของประเทศสหรัฐอเมริกา และข้อเสนอแนะของมาตรฐาน  
การปล่อยก๊าซทั้งสองของประเทศไทย

ก๊าซ	สหรัฐอเมริกา*	ไทย**	
		กรุงเทพฯ	ต่างจังหวัด
NO <sub>x</sub>			
(mg/J energy input)	$5.2 \times 10^{-4}$	-	-
(ppm, at stack gas)	150	500	500
SO <sub>2</sub>			
(mg/J energy input)	$2.6 \times 10^{-4}$	-	-
(ppm, at stack gas)	150	400	700

ที่มา : \* (United States of America. Office of Federal Register, 1991)  
\*\* (สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ)

## 2.6 การอัดก้อนถ่านหิน (อรุณรัตน์ วุฒิมงคลชัย, 2528; Lowry, 1963)

การอัดก้อนถ่านหินเป็นการนำผงถ่านหินหรือเศษถ่านหินผสมกับสารอื่นมาอัดเป็นก้อนในแบบอัด (mold) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. เพื่อนำถ่านหินที่มีขนาดเล็กเกินไปมาใช้งาน โดยทำให้เป็นก้อนที่มีขนาดเหมาะสมกับการใช้งาน
  2. เพื่อผลิตเชื้อเพลิงแข็งที่มีคุณสมบัติตามความต้องการในระหว่างการใช้เผาไหม้ เช่น ถ่านไร้ควัน หรือถ่านหินที่คงรูปแม้จะเผาไหม้หมด เป็นต้น
  3. เพื่อความสะดวกในการใช้งาน เช่น การขนส่ง การควบคุมปริมาณที่ใช้ เป็นต้น
- กระบวนการอัดก้อนถ่านหินจะเกี่ยวข้องกับแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของถ่านหิน (cohesive force) แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวประสานกับถ่านหิน (adhesive force) พฤติกรรมทาง rheology และการเย็บตัว การอัดก้อนจะต้องพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพของถ่านหินและคุณสมบัติทางเคมีของผิวถ่านหินเป็นสำคัญ

เนื่องจากถ่านหินมีลักษณะที่แตกต่างกันไป ขึ้นกับลักษณะการเกิดถ่านหิน (coalification) และอายุของถ่านหิน ดังนั้นการอัดก้อนถ่านหินจึงต้องมีกระบวนการหรือวิธีการที่แตกต่างกันไปบ้าง อย่างไรก็ตามสามารถแบ่งการอัดก้อนถ่านหินได้เป็น 2 แบบคือ

1. การอัดก้อนถ่านหินชนิดไม่มีตัวประสาน ใช้กับถ่านหินซับบิทูมินัส หรือลิกไนต์ ทำการอัดด้วยความดันสูง เครื่องอัดก้อนถ่านหินที่เหมาะสมในการอัดก้อนชนิดนี้คือ plunger type press หรือ double ring roll press
2. การอัดก้อนชนิดมีตัวประสาน ใช้สำหรับถ่านหินบิทูมินัส หรือแอนทราไซต์ โดยการเติมตัวประสาน (binder) ซึ่งทำหน้าที่ในการเกาะตัวหรือเย็บตัว (agglomeration) เครื่องอัดก้อนที่เหมาะสมในการอัดก้อนชนิดนี้คือ rotary table type หรือ double ring roll type

ในการอัดก้อนถ่านหินทั้งสองแบบนี้มีกระบวนการที่คล้ายกันมาก แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งกระบวนการอัดก้อนถ่านหินโดยทั่วไปสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. การอบแห้ง (drying) เพื่อเป็นการลดความชื้นของถ่านหินให้ลดลงเหลือประมาณ ร้อยละ 2-4
2. การบด (grinding) เพื่อบดถ่านหินให้มีขนาดที่เหมาะสม



3. การผสม (mixing) เพื่อเป็นการผสมถ่านหินให้เข้ากันดีกับตัวประสานหรือสารตัวเติมอื่น ๆ ตามสัดส่วนที่ต้องการ จากงานวิจัยที่ผ่านมามีพบว่าดินเหนียวเป็นตัวประสานที่ทำให้ง่ายและมีคุณภาพเป็นตัวประสานที่ดี (นิภา เศรษฐไพศาล, 2528) นอกจากนี้ยังมีการผสมปูนขาวลงไปเพื่อกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในระหว่างการเผาไหม้ถ่านหิน โดยงานวิจัยที่ผ่านมามีพบว่าอัตราส่วนโดยโมลของ  $\text{CaO/S}$  ที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 2.0-2.5 (ดวงพร ธีรภาพไพสิฐ, 2530)

4. การอัดก้อน (pressing) เป็นขั้นตอนที่นำเอาส่วนผสมที่เข้ากันได้ดีแล้วมาอัดก้อน

5. การอบหรือตากแห้ง (drying or air dried) เป็นการนำถ่านหินมาทำการลดความชื้น โดยการอบแห้งหรือทิ้งไว้ในอากาศ จากงานวิจัยที่ผ่านมามีพบว่าถ่านหินอัดก้อนที่นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิสูงความชื้นจะระเหยออกจากรูพรุนอย่างรวดเร็ว ทำให้ถ่านหินอัดก้อนมีความแข็งแรงลดลง ส่วนถ่านหินที่ตากทิ้งไว้ในอากาศความชื้นจะค่อย ๆ ระเหยออกไป ทำให้เกิดรูพรุนน้อยถ่านหินจึงมีความแข็งแรงสูงกว่า (อรุณรัตน์ วุฒิมงคลชัย, 2528)

ในบางครั้งกระบวนการอัดก้อนถ่านหินอาจมีการเพิ่มขั้นตอนการให้ความร้อน (heating process) แก่ถ่านหินและตัวประสานเพื่อให้ถ่านหินและตัวประสานมีความอ่อนตัวและเยิ้มตัวเข้าประสานกันได้ดีขึ้น ทำให้สามารถอัดเป็นรูปได้ง่ายและมีความแข็งแรงสูง นอกจากนี้ในกระบวนการอัดก้อนถ่านหินอาจกระทำแบบต่อเนื่อง โดยมีการนำถ่านหินและตัวประสานที่ยังไม่อัดเป็นก้อนกลับมายังกระบวนการอัดก้อนอีกครั้งหนึ่งเพื่ออัดให้เป็นก้อนต่อไป

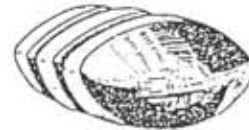
ถ่านหินอัดก้อนที่ได้จากกระบวนการอัดก้อนถ่านหินมีรูปร่างที่แตกต่างกันออกไป โดยปกติถ่านหินอัดก้อนที่ได้จะมีรูปทรงเป็นรูปไข่ (ovoid) หรือรูปอื่น ๆ เช่น rational หรือ phumacite ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.5 นอกจากนี้ยังอาจมีรูปทรงอื่น ๆ เช่น รูปทรงกระบอก รูปทรงกระบอกที่มีหน้าตัดเป็นรังผึ้ง ทั้งนี้ขึ้นกับรูปแบบการใช้งาน โดยทั่วไปในการใช้งานในครัวเรือนนิยมใช้ถ่านหินอัดก้อนที่มีรูปทรงเป็นรูปไข่ (ovoid)



OVOID



RATIONAL



PHURNACITE

รูปที่ 2.5 รูปร่างของถ่านหินอัดก้อน (Lowry, 1963)

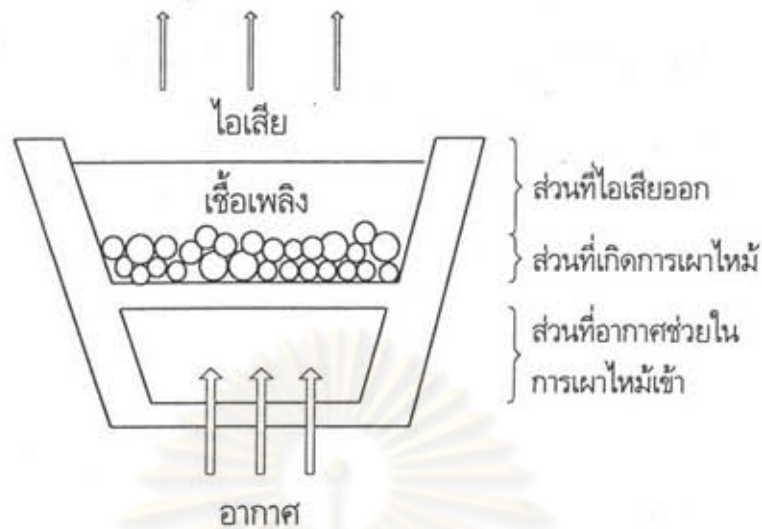
### 2.7 เตาหุงต้ม (นิยม จันทรเทพา และ ชีระ มนัสธรรม, 2527)

เตาหุงต้มคือ ภาชนะที่ใช้รองรับหรือประกอบเป็นส่วนในการเผาไหม้เชื้อเพลิงและสามารถนำความร้อนที่เกิดขึ้นไปสู่ระบบการอำนวยความสะดวกได้ทันที เตาหุงต้มจะมีส่วนประกอบที่จำเป็น 3 ส่วนคือ

1. ส่วนที่เกิดการเผาไหม้
2. ส่วนที่อากาศเข้าช่วยในการเผาไหม้
3. ส่วนที่ก๊าซจากการเผาไหม้ไหลออก

ดังแสดงในรูปที่ 2.6

โดยส่วนต่าง ๆ ต้องออกแบบให้ได้สัดส่วนกัน เตาหุงต้มจึงจะมีประสิทธิภาพการใช้งานสูง และก่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ในประเทศไทยนั้นได้มีการพัฒนาเตาหุงต้มที่มีประสิทธิภาพการใช้งานสูงขึ้นโดยสำนักงานพลังงานแห่งชาติ แต่ไม่มีจำหน่ายอย่างแพร่หลาย จึงทำให้ไม่เป็นที่นิยมใช้กันเท่าใดนัก เตาหุงต้มที่นิยมใช้กันทั่วไปและจัดเป็นเตาหุงต้มที่มีประสิทธิภาพสูงคือ เตาอั้งโล่ โดยมีปริมาณการใช้ถึงร้อยละ 71 ของเตาหุงต้มในครัวเรือน (นิยม จันทรเทพา และ ชีระ มนัสธรรม, 2527)



รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบที่จำเป็นสำหรับเตาหุงต้ม

เตาอั้งโล่โดยทั่วไปได้จากการนำดินเหนียวนำมาขึ้นรูปและเผาไฟให้สุก มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก ด้านบนเปิดด้านล่างปิด ภาชนะที่ใช้หุงต้มจะวางอยู่ด้านบน ภายในเตาแบ่งออกเป็นสองส่วน เชื้อเพลิงจะวางอยู่บนรังผึ้ง ซึ่งเป็นส่วนที่เกิดการเผาไหม้หรือเรียกว่า ห้องเผาไหม้ รังผึ้งจะมีลักษณะเป็นแผ่นอิฐเจาะรูและกันเตาเป็นสองส่วน รังผึ้งจะทำหน้าที่กระจายอากาศจากทางด้านล่างของเตาเข้าสู่ห้องเผาไหม้ และทำหน้าที่กันเชื้อเพลิงที่กำลังเผาไหม้ไม่ให้ตกลงไปด้านล่าง ถังที่เกิดขึ้นจะตกผ่านรูของรังผึ้งลงไปสู่กันเตา

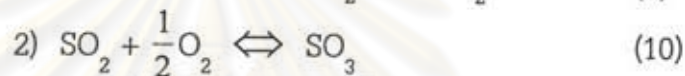
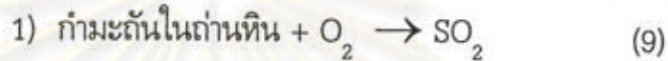
ส่วนล่างของเตาถัดจากรังผึ้งลงมาเป็นห้องที่รองรับเถ้าจากการเผาไหม้หรือเรียกว่า ห้องเถ้า ด้านหน้าของห้องเถ้ามีช่องลมเพื่อให้อากาศเข้าไปช่วยในการเผาไหม้เชื้อเพลิง ขอบด้านบนของเตามีเชิงเทิน 3 อัน เพื่อรองรับภาชนะ ถ้าความร้อนจากการเผาไหม้จะไหลผ่านช่องว่างระหว่างขอบเตาด้านบนกับภาชนะ เตาชนิดนี้มักจะมีโลหะแผ่นบาง ๆ หุ้มอยู่โดยรอบเพื่อความแข็งแรงและสวยงาม ช่องว่างระหว่างเตาและแผ่นโลหะมักมีซีเมนต์เคลือบบรรจุอยู่เพื่อทำหน้าที่เป็นฉนวนกันให้เกิดการสูญเสียความร้อนน้อยลง และมักจะมีแผ่นโลหะเป็นประตูเลื่อนขึ้นลงในแนวตั้งตรงช่องลมด้านหน้า เพื่อปรับขนาดช่องลมให้อากาศที่ไหลเข้าไปมีปริมาณที่เหมาะสม ลักษณะของเตาอั้งโล่ที่ดีคือ ขอบเตาด้านบนเสมอกันในแนวระดับ และมีเชิงเทินที่ไม่สูงเกินไป มีน้ำหนักเบา และเคลื่อนย้ายได้สะดวก (นิยม จันทร์เทพา และ ชีระ มนัสธรรม, 2527)

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.8.1 งานวิจัยด้านปฏิกิริยาระหว่างกำมะถันในถ่านหินและแคลเซียมออกไซด์

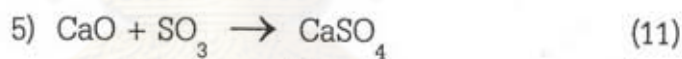
มีผู้ศึกษากลไกของปฏิกิริยาระหว่างกำมะถันในถ่านหินและแคลเซียมออกไซด์ไว้อย่างกว้างขวาง ได้แก่

Lalai (1979) และ Giogia (1980) ตั้งสมมติฐานว่าซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะเปลี่ยนเป็นซัลเฟอร์ไตรออกไซด์เสียก่อนแล้วจึงแพร่เข้าทำปฏิกิริยากับอนุภาคของแคลเซียมออกไซด์โดยมีปฏิกิริยาลอยเป็นดังนี้



3)  $\text{SO}_3$  ที่เกิดขึ้นจะแพร่ผ่านชั้นฟิล์มรอบอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ไปยังผิวหน้าของแคลเซียมออกไซด์

4)  $\text{SO}_3$  แพร่ผ่านชั้นผลิตภัณฑ์แคลเซียมออกไซด์ที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยากลายเป็นแคลเซียมซัลเฟต



ปฏิกิริยาถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่ 2), 3) และ 4) และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 850 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพการกำจัดกำมะถันจะลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสมดุลระหว่างซัลเฟอร์ไดออกไซด์และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ไม่เหมาะสม ทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ช้าลง

Borgwardt และ Bruce (1986) ศึกษาปฏิกิริยาโดยกำจัดความต้านทานต่าง ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องกับพื้นที่ผิว พบว่าปฏิกิริยาจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นแคลเซียมซัลเฟตซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นรอบอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ และเสนอสมการการเปลี่ยนของแคลเซียมออกไซด์ไปเป็นแคลเซียมซัลเฟตไว้ดังนี้

$$1-3(1-X)^{2/3} + 2(1-X) = k_d t \quad (12)$$

เมื่อ X คือ อัตราการเปลี่ยนจากแคลเซียมออกไซด์ไปเป็นแคลเซียมซัลเฟต

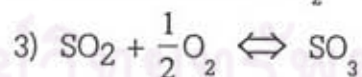
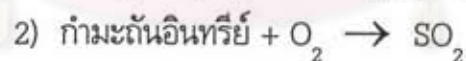
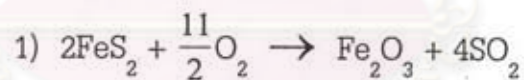
$k_d$  คือ ค่าคงที่สมดุล, (วินาที)<sup>-1</sup>

$t$  คือ เวลา, (วินาที)

และพบว่าปฏิกิริยานี้จะเกิดได้เร็วขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของแคลเซียมออกไซด์เพิ่มขึ้น

ดวงพร ธีรภาพไพสิฐ (2530) ศึกษาการกำจัดกำมะถันระหว่างการเผาไหม้ ถ่านหินอัดก้อนโดยใช้ปูนขาว โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S ในช่วง 0-4 จากการศึกษา พบว่าเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S เพิ่มขึ้น ปริมาณกำมะถันในเถ้าจะสูงขึ้น อัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S ที่เหมาะสมคือ 2.0-2.5 ซึ่งสามารถกำจัดกำมะถันรวมได้ร้อยละ 90-95

พัชรี ชุตติศิลป์ (2533) ศึกษาปฏิกิริยาระหว่างกำมะถันในถ่านหินกับปูนขาว โดยใช้ถ่านหินที่มีร้อยละกำมะถันรวมในช่วง 2-5 ผสมกับปูนขาวในอัตราส่วน CaO/S ระหว่าง 0-3 อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 600-1000 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศที่มีออกซิเจนเกินพอ ในหลอดแก้วควอร์ตซ์ที่ต่อกับอุปกรณ์ดักก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปลดปล่อยออกมา และศึกษาถึงโครงสร้างของสารประกอบในแร่ธาตุในถ่านหินโดยใช้วิธีทาง x-ray diffraction จากการศึกษาพบว่าที่อุณหภูมิในช่วง 800-900 องศาเซลเซียส ปูนขาวจะสามารถกำจัดกำมะถันได้ดี อัตราส่วนของ CaO/S ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 2-2.5 โดยสามารถกำจัดกำมะถันได้ร้อยละ 57-73 และจากผลการวิเคราะห์โครงสร้างของถ่านหินทั้งก่อนและหลังการเผาไหม้ สามารถแสดงขั้นตอนของปฏิกิริยาระหว่างกำมะถันกับปูนขาวได้ดังนี้

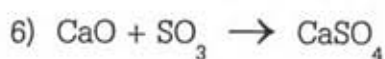


4)  $\text{SO}_3$  ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ (3) ถ่ายเทมวลสารจากวัฏภาคก๊าซ

ไปยังผิวของอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ แล้วเกิดปฏิกิริยาตามขั้นตอนที่ (6)

5)  $\text{SO}_3$  ที่ยังเหลืออยู่ แพร่ผ่านชั้นแคลเซียมซัลเฟต เข้าไปทำ

ปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์ที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยา



### 2.8.2 งานวิจัยด้านการปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์

มีผู้ศึกษาและทำการวิจัยเกี่ยวกับการเกิดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ในระหว่างการเผาไหม้ถ่านหินและเสนองานวิจัยไว้ดังนี้

Duxbury และ Welford (1989) ศึกษาการเผาไหม้ในถ่านหินชนิดที่อัตราการเผาไหม้ถ่านหิน 230 และ 325 กิโลกรัมต่อชั่วโมงและใช้ปริมาณอากาศเกินพอร้อยละ 3 และ 6 จากการศึกษาพบว่าเมื่อขนาดอนุภาคถ่านหินลดลงการปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์จะเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อขนาดของอนุภาคเล็กจะทำให้อากาศเข้าทำปฏิกิริยากับอนุภาคถ่านหินได้มากขึ้น

Ninomiya และคณะ (1989) ศึกษาการปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์อันเกิดจากไนโตรเจนในถ่านหิน โดยใช้ถ่านหินชนิดไม่มีการพองตัว (non-caking coal) จากแหล่ง Taiheiyō และถ่านหินคักด์แอนทราไซต์จากแหล่ง Taisei ซึ่งมีอัตราส่วนของคาร์บอนคงตัวและสารระเหยได้ เท่ากับ 1.1 และ 4.2 ตามลำดับ ทำการเผาไหม้อนุภาคถ่านหินเดี่ยวในเตาเผาแบบเบดนิ่ง (fixed bed) ในช่วงอุณหภูมิ 1,073-1,173 องศาเซลเซียส ถ่านหินที่ศึกษาผ่านการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง 100 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดผลของสารระเหยที่จะมีผลต่อการปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ จากการศึกษาพบว่าถ่านหินจากแหล่ง Taiheiyō เมื่อขนาดของอนุภาคใหญ่ขึ้นจะทำให้อัตราการเปลี่ยนไปเป็นก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ลดลง ขณะที่ถ่านหินจากแหล่ง Taisei ขนาดของอนุภาคถ่านหินไม่มีผลต่ออัตราการเปลี่ยนและเมื่ออัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนในถ่านหินสูงขึ้น อัตราการเปลี่ยนสูงขึ้นสำหรับถ่านหินทั้งสองแหล่ง

Smart และคณะ (1990) ศึกษาการปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ในการเผาไหม้ถ่านหินบดละเอียด โดยศึกษาผลของขนาดของ burner ที่มีต่อการปล่อยก๊าซดังกล่าว โดยใช้หัวเตาขนาด 0.9-3.4 เมกกะวัตต์ ที่มีรูปร่างเหมือนกันและใช้ความเร็วของอากาศเท่ากัน ถ่านหินที่ใช้เป็นถ่านหินในคักด์บิทูมินัสชนิดที่มีปริมาณสารระเหยสูง จากการศึกษาพบว่าเมื่อขนาดของ burner ใหญ่ขึ้น การปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์จะเพิ่มขึ้น

### 2.8.3 งานวิจัยด้านการอัดก้อนถ่านหิน

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอัดก้อนถ่านหิน มีผู้ทำการศึกษาและเสนองานวิจัยไว้ดังนี้

Huang และคณะ (1990) อัดก้อนถ่านหินโดยใช้เครื่องอัดก้อนแบบ double ring roll ใช้ถ่านหินและปูนขาวขนาด 30-60 เมช และทำการปรับปรุงกระบวนการอัดก้อนโดย

ทำการผสมปูนขาวกับสารที่เผาไหม้ได้ดี เช่น ถ่านไม้ ขี้เลื่อย ป้อนเข้าสู่ร่องโดยให้เคลือบผิวร่องไว้และป้อนถ่านหินเข้าตรงกลางร่อง ทำให้ถ่านหินอัดก้อนที่ได้มีปูนขาวและสารที่เผาไหม้ได้ดีเคลือบอยู่ที่ผิวนอกของถ่านหินอัดก้อน ช่วยให้ถ่านหินอัดก้อนจุดติดไฟง่ายและสามารถกำจัดกำมะถันได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้อัตราส่วนของสารที่ใช้จับกำมะถันต่อกำมะถันรวมในถ่านหินเพียง 1-2 : 1 เท่านั้น

นิภา เศรษฐไพศาล (2528) นำถ่านหินมาอัดก้อนเป็นทรงกระบอก 3 ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 10, 11 และ 12 ซม. สูง 5, 7 และ 7 ซม. ตามลำดับ ถ่านหินอัดก้อนที่ได้มีหน้าตัดเป็นรูปรีขี้ผึ้ง โดยมีช่องเจาะทะลุขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 ซม. ตามแนวตั้งจำนวน 12, 14 และ 16 ช่อง ตามลำดับ นำมาทดสอบกับเตาที่ได้มีการดัดแปลงให้เหมาะสมกับถ่านหินอัดก้อนที่ผลิตได้ พบว่ามีประสิทธิภาพการใช้งานร้อยละ 25-35 ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน

อรุณรัตน์ วุฒิมงคลชัย (2528) ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการอัดก้อนถ่านหินโดยใช้ถ่านหินขนาดเล็กกว่า 9.5 มม. ปริมาณถ่านหินอยู่ในช่วงร้อยละ 15-30 ใช้ดินเหนียวเป็นตัวประสาน และอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 1.5-4.0 จากการศึกษาพบว่าถ่านหินอัดก้อนที่ได้มีประสิทธิภาพการใช้งานใกล้เคียงกับถ่านไม้ โดยปูนขาวจะมีส่วนช่วยในการประสาน และอัตราส่วนโดยโมลของ CaO/S ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 1.5-3.0 ซึ่งทำให้ถ่านหินอัดก้อนมีความแข็งแรงเหมาะสมกับการใช้งานในครัวเรือนและมีประสิทธิภาพในการใช้งานสูง

สุชาติ อารีรุ่งเรืองกุล (2530) ศึกษาการใช้งานของถ่านหินอัดก้อนในเตาอั้งโล่ โดยใช้เตาอั้งโล่ 3 ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 24, 27 และ 30 ซม. ตามลำดับ พบว่ามีประสิทธิภาพของการใช้งานของถ่านหินอัดก้อนและถ่านหินใกล้เคียงกัน ประสิทธิภาพร้อยละ 30-33 และพบว่าความร้อนจะสูญเสียจากช่องว่างระหว่างขอบเตาด้านบนกับภาชนะมากที่สุด ซึ่งแก้ไขได้โดยการออกแบบให้ช่องดังกล่าวมีขนาดระหว่าง 0.7-1.0 ซม. และควรใช้ปริมาณถ่านหินอัดก้อนประมาณ 2/3 ของปริมาตรห้องเผาไหม้ จะทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นว่ายังไม่มียานวิจัยที่ทำการศึกษเกี่ยวกับการปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไนโตรเจนออกไซด์ออกมาในระหว่างการเผาไหม้ถ่านหินอัดก้อน โดยเฉพาะในการเผาไหม้ในเตาหุงต้มที่ใช้ในครัวเรือน งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษการปล่อยก๊าซดังกล่าวในถ่านหินอัดก้อนที่ใช้กับเตาหุงต้มที่ใช้ในครัวเรือน เพื่อให้เข้าใจถึงลักษณะการปล่อย

และตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการปล่อยก๊าซดังกล่าว อันจะเป็นแนวทางในการใช้ถ่านหินอัดก้อน ในการหุงต้มที่สามารถควบคุมการปล่อยก๊าซดังกล่าวออกมาในปริมาณที่เหมาะสมเป็นไปตาม มาตรฐานหรือผู้ใช้อยอมรับได้ ซึ่งจะทำให้มีการใช้ถ่านหินอัดก้อนในการหุงต้มหรือใช้งานต่าง ๆ ในครัวเรือนได้อย่างแพร่หลายต่อไป



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย