

บทที่ 2

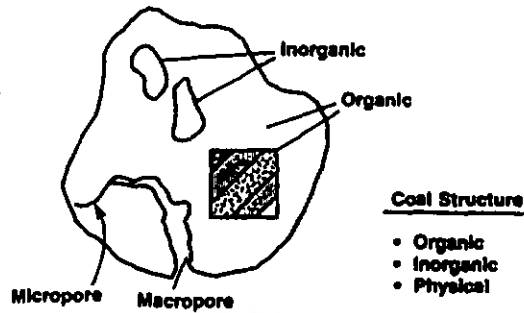
วารสารปริทัศน์

2.1 ถ่านหิน (Schlosberg, 1985)

ถ่านหินเกิดจากการทับถมของซากพืชซากสัตว์ ซึ่งอาจสะสมกันอยู่ชายฝั่งทะเล บริเวณน้ำกร่อย น้ำจืด หรือบนแผ่นดินที่ขึ้นแฉะ ในขณะเดียวกันเกิดการชะกร่อนของดินตกตะกอนลงทับถมกับซากพืช ทำให้เกิดการเน่าเปื่อยผุพังกลายเป็นถ่านพีต (peat) (ใบไม้ใบหญ้าเน่าตายเหลือแต่ก้านใบ) ในภาคใต้ คือ พุท ถ่านพีตนี้จะป็นต้นกำเนิดของถ่านหิน ในทางธรณีวิทยาถือว่าถ่านหินเป็นหินตะกอน (sedimentary rocks) ชนิดหนึ่ง ซึ่งแตกต่างจากหินตะกอนชนิดอื่นตรงที่ว่าประกอบด้วยสารอินทรีย์เป็นส่วนใหญ่ โดยทั่วไปมีสีเข้มตั้งแต่สีน้ำตาลจนถึงดำสนิท องค์ประกอบหลักของถ่านหิน ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และมีธาตุต่าง ๆ เป็นสิ่งเจือปน เช่น กำมะถัน ไนโตรเจน เหล็ก แคลเซียม อะลูมิเนียม ซิลิคอน แมงกานีส โพแทสเซียม โซเดียม และไทเทเนียม นอกจากนี้ยังมีธาตุอื่นปนอยู่บ้างขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม และกระบวนการเกิดถ่านหิน (coalification) คาร์บอนเป็นธาตุที่มีมากที่สุดและอยู่เป็นโครงสร้างในโมเลกุลถ่านหิน เรียกว่า organic coal matrix ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการให้พลังงาน นอกจากนี้ยังมีธาตุไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และกำมะถัน เป็นส่วนประกอบอยู่ด้วย เรียกรวมส่วนนี้ว่า maceral matter ส่วนสารประกอบอนินทรีย์ที่เกิดจากธาตุอื่น ๆ ที่รวมตัวกันแทรกในเนื้อถ่านหิน หรือรวมตัวเป็นก้อนอย่างเห็นได้ชัด เรียกส่วนนี้ว่า mineral matter (crystalline inorganic compounds) ธาตุไนโตรเจนส่วนใหญ่ประกอบอยู่ในส่วนของ maceral ธาตุออกซิเจนประกอบอยู่ทั้งในส่วนของ maceral และ mineral

เมื่อนำถ่านหินไปใช้เป็นเชื้อเพลิง maceral เกิดการเผาไหม้ให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส ส่วน mineral matter ให้ของแข็งที่ยังคงเหลือจากการเผาไหม้ ซึ่งหมายถึงเถ้า (ash) ที่อุณหภูมิสูง ๆ สารประกอบของธาตุบางตัวจะสลายตัวเป็นแก๊ส เช่น กำมะถันสลายตัวให้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) คาร์บอนสลายตัวเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และเหล็กออกไซด์สลายเป็นออกไซด์ซึ่งเป็นส่วนประกอบในเถ้า

โครงสร้างโมเลกุลของถ่านหินแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ตามสมบัติทางเคมี คือส่วนโครงสร้างอินทรีย์ และส่วนที่เป็นสารประกอบแร่ธาตุ (อนินทรีย์) แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างถ่านหิน (Schlosberg, 1985)

2.1.1 โครงสร้างอินทรีย์ (มณฑิล, 2535)

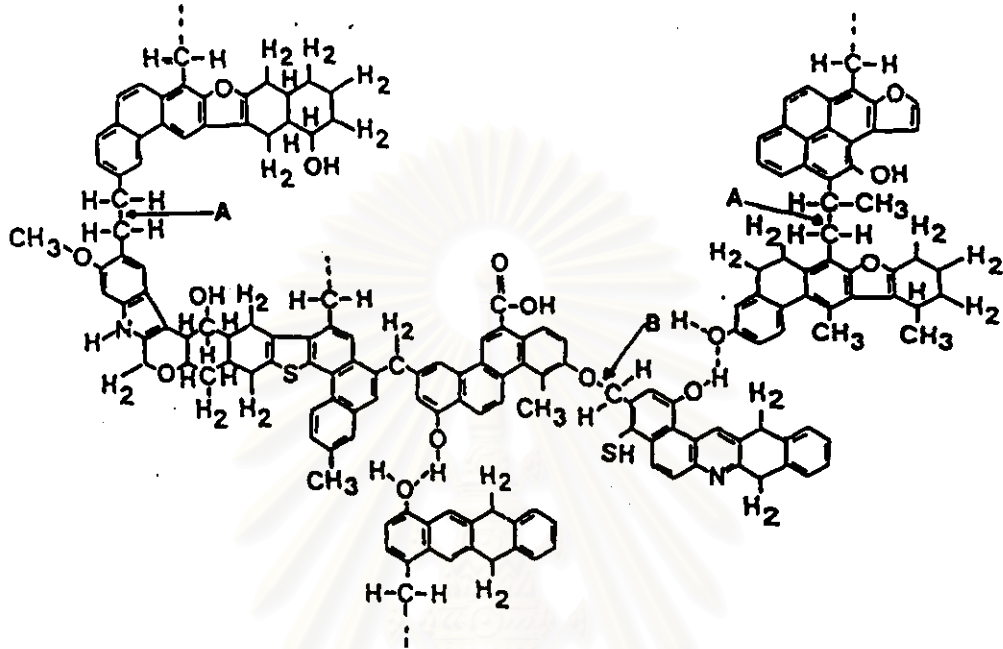
โครงสร้างอินทรีย์ของถ่านหินประกอบด้วยคาร์บอนประมาณร้อยละ 70-79 ไฮโดรเจนร้อยละ 3 ถึง 5 ออกซิเจน กำมะถันและไนโตรเจนร้อยละ 1 ถึง 2 โดยน้ำหนัก เมื่อไม่คิดความชื้น และเมื่อเทียบอัตราส่วนโดยน้ำหนักของอะตอม (atomic ratio) พบว่าไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในโครงสร้างถ่านหิน เมื่อศักดิ์ของถ่านหินสูงขึ้น อัตราส่วนโดยน้ำหนักของอะตอมไฮโดรเจนต่อคาร์บอน และออกซิเจนต่อคาร์บอนจะลดลง

การศึกษาสารประกอบอินทรีย์ในโครงสร้างถ่านหิน โดยใช้ spectroscopy chromatography หรือวิธีทางเคมีอื่น ๆ ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าโครงสร้างที่แน่นอนของถ่านหินเป็นอย่างไร นอกจากพอจะทราบได้ว่าสารประกอบอินทรีย์ในโมเลกุลของถ่านหินเป็นสารประกอบพวก เบนซีน ไสโคลเฮกเซน ไสโคลเฮกซาโนน เมซิลีน ฟีนอล ฟีนอลิเธอร์ โพลีเมซิลีน ฟีนันทริน และสารประกอบ hydroaromatic เช่น คาร์บาโรล เบนซาทิโอฟีน และไพริดีน นอกจากนี้ยังมีกลุ่มฟังก์ชัน คือ ไฮดรอกซี คาร์บอกซี อะมิโน และไฮออล รูปที่ 2.2 แสดงสมมติฐานโครงสร้างของโมเลกุลถ่านหิน

2.1.2 สารประกอบแร่ธาตุ

ส่วนที่เป็นแร่ธาตุของถ่านหิน ซิลิคอนเป็นธาตุที่พบมากที่สุด นอกจากนี้ยังมี อะลูมิเนียม เหล็ก แคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม และโพแทสเซียม ธาตุเหล่านี้รวมตัวกันเป็นสารประกอบหรือรวมกับอะตอมของธาตุอื่น ๆ ให้สารประกอบต่าง ๆ มากมาย ส่วนประกอบแร่ธาตุและส่วนประกอบอินทรีย์อาจอยู่รวมกันผสมกันอย่างหนาแน่นหรือหลวม ๆ ถ้าอยู่รวมกัน

แน่นอนการแยกเอาแร่ธาตุออกไปจากส่วนที่เป็น coal matrix โดยวิธีทางกายภาพทำได้ยากมาก หรือทำไม่ได้



รูปที่ 2.2 สมมติฐานโครงสร้างโมเลกุลของถ่านหิน (Schlosberg, 1985)

ในการปรับปรุงคุณภาพถ่านหิน มักให้ความสำคัญกับการกำจัดกำมะถันซึ่งเป็นสารมลพิษ กำมะถันมีรูปแบบต่าง ๆ มากมาย และกระจุกกระจายอยู่ทั้งในส่วน maceral และ mineral matter

2.2 การจำแนกถ่านหิน

ถ่านหิน กำเนิดขึ้นโดยการสะสมของอินทรีย์สารจำนวนมากในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม เก็บรักษาไว้ในกระบวนการทางธรณีวิทยา และผ่านการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพ โดยมีอิทธิพลจากความร้อนและความกดดันผ่านช่วงเวลาหลายร้อยล้านปี ถ่านหินที่มีอายุนานจะมีศักดิ์ (rank) สูงขึ้น ดังนั้นถ่านหินแต่ละแหล่งซึ่งมีอายุไม่เท่ากันจึงมีคุณสมบัติแตกต่างกันตามถิ่นกำเนิด

นักธรณีวิทยา ได้จัดแบ่งถ่านหินโดยคำนึงถึงคุณภาพในการให้พลังงาน ดังนี้

ก. พีต (peat) ประกอบด้วยซากพืชซึ่งสลายตัวไปแล้วบางส่วน ยังปรากฏให้เห็นร่องรอยของเนื้อไม้อยู่ มีปริมาณออกซิเจนและน้ำค่อนข้างสูง ให้ค่าความร้อนน้อย เมื่อติดไฟจะมีควันมาก

ข. ลิกไนต์ (lignite) หรือถ่านหินสีน้ำตาล (brown coal) เป็นถ่านหินคุณภาพต่ำสุด วิวัฒนาการมาจากพีตและยังมีร่องรอยของเนื้อไม้อยู่ มีสีน้ำตาล มีปริมาณออกซิเจนค่อนข้างสูง (อาจถึงร้อยละ 30) ความชื้นสูง (ร้อยละ 30-70) ให้ค่าความร้อนต่ำ ถ่านหินประเภทนี้ไม่สามารถจะขนส่งเป็นระยะทางไกลหรือกองเก็บไว้นานได้ เพราะมีโอกาสเกิดการติดไฟได้เอง (spontaneous combustion)

ค. ซับบิทูมินัส (sub-bituminous) เป็นถ่านหินที่มีสีดำคล้ายขี้ผึ้ง ให้ค่าความร้อนสูงกว่าลิกไนต์ สามารถนำไปแปรสภาพเป็นเชื้อเพลิงเหลว หรือแก๊สได้

ง. บิทูมินัส (bituminous) เป็นถ่านหินเนื้อแน่นมีลักษณะแข็งและมีสีดำเป็นมันวาว เข้ม และเกาะตัวเป็นก้อนเมื่อถูกความร้อน (caking) มีปริมาณเถ้าต่ำ ให้ความร้อนสูง เป็นถ่านที่เหมาะสมสำหรับผลิตเป็นถ่านโค้ก นิยมใช้แพร่หลายในอุตสาหกรรม

จ. แอนทราไซต์ (anthracite) เป็นถ่านหินคุณภาพดีที่สุด มีลักษณะดำเป็นเงามัน มีความวาวสูง มีความแข็งมาก ปริมาณคาร์บอนสูง ขณะที่ปริมาณความชื้นต่ำ จุดติดไฟยาก แต่ให้ค่าความร้อนสูง

นอกจากนี้ยังมีการจำแนกถ่านหินตามศักดิ์ (rank) ซึ่งเป็นค่าที่วัดความสมบูรณ์ของการเปลี่ยนแปลงทางธรณีวิทยาที่กลายเป็นถ่านหิน โดยวิธีมาตรฐาน (ASTM D 388) ได้เป็น 4 ชั้นใหญ่ ๆ คือ ลิกไนต์ ซับบิทูมินัส บิทูมินัส และแอนทราไซต์ เรียงจากคุณภาพต่ำถึงสูง โดยพิจารณาจากคุณสมบัติของถ่านหินนั้น ๆ ได้แก่ คาร์บอนคงตัว, สารระเหย, ลักษณะการรวมตัว (agglomerating character) และค่าความร้อน แสดงดังตารางที่ 2.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 การจำแนกถ่านหินตามคักดี (ASTM D388)

Class/Group	Fixed Carbon Limits (Dry, Mineral-Matter-Free Basis), %		Volatile Matter Limits (Dry, Mineral-Matter-Free Basis), %		Gross Calorific Value Limits (Moist, ^a Mineral-Matter-Free Basis)				Agglomerating Character
	Equal or Greater Than	Less Than	Greater Than	Equal or Less Than	Btu/lb		MJ/kg ^c		
					Equal or Greater Than	Less Than	Equal or Greater Than	Less Than	
Anthracitic:									
Meta-anthracite	98			2					nonagglomerating
Anthracite	92	98	2	8					
Semianthracite ^d	88	92	8	14					
Bituminous:									
Low volatile bituminous coal	78	88	14	22					commonly agglomerating
Medium volatile bituminous coal	69	78	22	31	14 000 ^e		32.6		
High volatile A bituminous coal		69	31		13 000 ^e	14 000	30.2	32.6	
High volatile B bituminous coal					11 500	13 000	26.7	30.2	agglomerating
High volatile C bituminous coal					10 500	11 500	24.4	26.7	
Subbituminous:					10 500	11 500	24.4	26.7	nonagglomerating
Subbituminous A coal					9 500	10 500	22.1	24.4	
Subbituminous B coal					8 300	9 500	19.3	22.1	
Subbituminous C coal									
Lignite:					6 300 ^f	8 300	14.7	19.3	
Lignite A						6 300		14.7	
Lignite B									

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

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

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

^d If agglomerating, classify in low-volatile group of the bituminous class.

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

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

† Editorially corrected.

2.3 การวิเคราะห์ถ่านหิน

การวิเคราะห์ถ่านหินมีประโยชน์เพื่อนำไปใช้ในกรณีต่าง ๆ ดังนี้

- ก. การจำแนกถ่านหิน
- ข. การกำหนดราคาถ่านหินตามคุณภาพ
- ค. การควบคุมคุณภาพถ่านหิน
- ง. การเลือกใช้หรือออกแบบอุปกรณ์การเผาไหม้
- จ. การคำนวณปริมาณ เช่น ปริมาณถ่านหินและปริมาณอากาศที่ต้องใช้ในการเผาไหม้ เป็นต้น

การวิเคราะห์ถ่านหินในห้องปฏิบัติการแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ

2.3.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) เป็นการวิเคราะห์ที่พัฒนามาขึ้นเพื่อใช้ในการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังจากให้ความร้อนถ่านหินภายใต้ภาวะที่กำหนด องค์ประกอบส่วนใหญ่ของถ่านหินที่วิเคราะห์ได้ คือ

2.3.1.1 ความชื้น (moisture) พบว่า ถ้าถ่านหินที่มีอายุน้อยที่สุดจะมีความชื้นอยู่มาก เมื่ออายุมากขึ้น แรงดันต่าง ๆ บนผิวโลกที่กดทับลงบนแนวถ่านหินและความร้อนทำให้ความชื้นน้อยลง ความชื้นในถ่านหินมี 2 รูป คือ

ก. ความชื้นที่ติดแน่นอยู่ในเนื้อถ่านหิน (inherent moisture) เกิดจากคุณสมบัติของถ่านหิน การดูดความชื้นเข้าไปในเนื้อถ่านหินเป็นปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอายุของถ่านหิน อุณหภูมิ และความชื้น ณ แหล่งกำเนิด

ข. ความชื้นอิสระ (free or accidental moisture) เป็นความชื้นที่ถ่านหินดูดไว้ที่ผิว ซึ่งจะสูญเสียไปเมื่อทิ้งไว้ในอากาศ

ความชื้นจะมีผลต่อถ่านหินในแง่ต่าง ๆ คือ ความชื้นทำให้ถ่านหินมีน้ำหนักมากขึ้น ทำให้สิ้นเปลืองค่าขนส่งโดยเปล่าประโยชน์ ในด้านการใช้งาน เมื่อนำถ่านหินมาเผาไหม้ความชื้นจะระเหยกลายเป็นไอโดยดึงความร้อนให้สูญเสียไปกับฟลูแกส หรือแก๊สผลผลิตจากการเผาไหม้ ในรูปของความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิเพิ่ม (sensible heat) ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (latent heat) แต่มีข้อดีคือ เมื่อความชื้นระเหยไป เนื้อถ่านหินจะมีความพรุน ทำให้อากาศแทรกผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ดี

2.3.1.2 เถ้า (ash) คือ ส่วนที่เหลือของสารอนินทรีย์ภายหลังจากการเผาไหม้โดยสารอนินทรีย์ในถ่านหิน แบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

ก. สารอนินทรีย์ซึ่งเป็นองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิตที่กลายเป็นถ่านหินได้แก่ แร่ธาตุที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชถูกทับถมพร้อมกับซากอินทรีย์ และปรากฏเป็นองค์ประกอบในถ่านหินด้วย เช่น ออกไซด์ของโพแทสเซียม, โซเดียม, แมกนีเซียม, แคลเซียม และซิลิคอน เป็นต้น

ข. สารอนินทรีย์ที่ทับถมลงบนแนวของถ่านหินขณะที่กำลังเกิดการสะสมตัว ได้แก่ ยิบซัม กำมะถันไพไรต์ หินดินดาน และดิน เป็นต้น

โดยทั่วไปพบว่า สารอนินทรีย์มากกว่าร้อยละ 95 ประกอบด้วยแร่ 3 ชนิด คือ คาโอลิไนต์ (kaolinite) แคลไซต์ (calcite) และกำมะถันไพไรต์ (pyrite) และในถ่านหินมากกว่าร้อยละ 95 ประกอบด้วย SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO ที่เหลืออีกร้อยละ 5 เป็น MgO , Na_2O , K_2O และ TiO_2

ถ่านหินเมื่อถูกเผาไหม้จะปล่อยสารระเหยออกมา ทำให้เกิดรูปพรุนขึ้นรอบ ๆ อนุภาคถ่านหิน แก๊สที่เหลืออยู่ในอนุภาค ซึ่งเป็นของอนินทรีย์สารพวก เหล็ก แมกนีเซียม โซเดียม และซัลเฟอร์ออกไซด์ของ SiO_2 ไม่สามารถดันออกมาได้ง่าย ภายในอนุภาคถ่านหินจึงเกิดรูปกลวงขึ้นภายใน ไอของสารอนินทรีย์ดังกล่าวจะทำให้อนุภาคถ่านหินแตกออกเป็นส่วนตัว ๆ ปล่อยไอของสารต่าง ๆ ออกมา อนุภาคที่แตกออกจะมีขนาดต่าง ๆ กัน ตั้งแต่ 0.1-50 ไมโครเมตร

เรียกอนุภาคเหล่านี้ว่าเถ้า ซึ่งบางส่วนจะเกาะบนผิวหน้าของตัวถ่ายเทความร้อน และบางส่วน ออกสู่อากาศ

2.3.1.3 สารระเหย (volatile matter) คือส่วนที่สลายตัวจากถ่านหินเมื่อได้รับความร้อนในที่ที่ไม่มีอากาศอยู่ในช่วงเวลาและอุณหภูมิที่กำหนด องค์ประกอบของถ่านหินที่สลายตัวง่ายจะระเหยออกมาแล้วสลายตัวเป็น 3 องค์ประกอบที่สำคัญคือ แก๊ส น้ำมันทาร์ และ ของเหลวแอมโมเนีย (ammonia liquor) ละลายอยู่ในน้ำจากการแตกตัวของโมเลกุลที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบซึ่งไม่ใช่ความชื้นอิสระ

สารระเหยมีความสำคัญมากในการวิเคราะห์ถ่านหิน เพราะส่วนประกอบของสารระเหยแตกต่างกันไปตามศักดิ์ของถ่านหิน โดยปริมาณจะลดลงเมื่อถ่านหินมีศักดิ์สูงขึ้น

2.3.1.4 คาร์บอนคงตัว (fixed carbon) เป็นของแข็งที่เป็นคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่ที่เหลืออยู่ในถ่านหิน ได้จากร้อยละที่เหลือจากการวิเคราะห์แบบประมาณ เมื่อหักค่าความชื้น สารระเหย และเถ้า ดังสมการที่ 2.1

$$\text{คาร์บอนคงตัว} = 100 - (\text{ความชื้น} + \text{สารระเหย} + \text{เถ้า}) \quad \text{---(2.1)}$$

ดังนั้นถ่านหินที่มีศักดิ์สูงจะมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงด้วย

2.3.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุแต่ละตัวที่รวมกันอยู่ในโครงสร้างถ่านหิน ธาตุเหล่านี้ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน กำมะถัน ไนโตรเจน และออกซิเจน รวมทั้งการวิเคราะห์หาปริมาณเถ้าที่มีอยู่ในถ่านหินด้วย

2.3.3 การทดลองเพิ่มเติม (additional tests) เป็นการทดสอบเพื่อนำมาเป็นข้อมูลสนับสนุนในการตรวจสอบถ่านหิน เช่น การหาค่าความร้อน ค่าความถ่วงจำเพาะ ค่าความสามารถในการเผาไหม้ ปริมาณและรูปแบบของกำมะถัน เป็นต้น

2.4 กำมะถันในถ่านหิน (Lowry, ed., 1963)

กำมะถัน เป็นธาตุในถ่านหินที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนอุปกรณ์เผาไหม้ และก่อให้เกิดมลพิษ ภายหลังการเผาไหม้ถ่านหิน ปริมาณกำมะถันที่มีอยู่ในถ่านหิน อาจพบตั้งแต่ 0.1 ถึงมากกว่าร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก กำมะถันในถ่านหินแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

2.4.1 กำมะถันอนินทรีย์ (inorganic sulphur) (มณพิไล, 2535) แบ่งเป็น 2 รูปแบบ คือ

2.4.1.1 กำมะถันกำมะถันไพไรต์ (pyritic sulphur)

เกิดจากกำมะถันอนินทรีย์ที่เกิดการละลายตัว เนื่องจากกระบวนการเกิดด้านหิน แล้วทำปฏิกิริยากับสารละลายที่มีเหล็กหรือทองแดงเป็นองค์ประกอบตกผลึกในช่องว่างหรือรอยแตกในชั้นด้านหิน พบในลักษณะของสารประกอบโลหะซัลไฟด์คือ กำมะถันไพไรต์และมาร์คาไซต์ (marcasite) ซึ่งมีสูตรโมเลกุลเหมือนกันคือ FeS_2 แต่มีโครงสร้างผลึกและคุณสมบัติทางกายภาพแตกต่างกัน โดยไพไรต์มีโครงสร้างผลึกแบบ cubic มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 5 ส่วนมาร์คาไซต์มีโครงสร้างผลึกแบบ rhombic มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 4.87 เมื่อเทียบกับด้านหินซึ่งมีความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 1.3-1.8 จากคุณสมบัติที่ต่างกันทางด้านความถ่วงจำเพาะนี้ทำให้สามารถแยกกำมะถันไพไรต์บางส่วนออกจากด้านหินโดยวิธีทางกายภาพ ส่วนใหญ่กำมะถันไพไรต์ในด้านหินประกอบด้วยไพไรต์ นอกจากนี้ยังอาจพบสารประกอบซัลไฟด์ในรูปอื่น เช่น sphalerite (ZnS), galena (PbS), chalcopyrite ($CuFeS_2$), pyrrhotite ($Fe_{1-x}S$), arsenopyrite ($FeAsS$) และอื่น ๆ ในปริมาณเล็กน้อย

ขนาดของไพไรต์ในด้านหินปรากฏอยู่ในหลายรูปแบบ คือ แบบที่ 1 Epigenetic ขนาดใหญ่กว่า 50 ไมโครเมตร แบบที่ 2 Syngenetic เป็นผลึกที่มีขนาด 5-50 ไมโครเมตร และ แบบที่ 3 Finely intergrown ultrafine pyrite เป็นผลึกขนาดเล็กกว่า 5 ไมโครเมตร สามารถแบ่งลักษณะไพไรต์ที่พบได้เป็น

1) Authogenic primary deposit pyrites

เป็นไพไรต์ที่แทรกอยู่ในเนื้อด้านหิน โดยทั่วไปมี 2 รูปแบบ คือ แบบที่ 1 framboidal pyrite ลักษณะเป็นเม็ดกลมเล็ก ๆ (เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ถึง 40 ไมโครเมตร) อาจพบกระจายอยู่ทั่วไปหรือเกาะเป็นกลุ่ม แบบที่ 2 เป็นไพไรต์ที่เข้าไปแทนที่ส่วนที่เป็นเนื้อไม้และเปลือกไม้ของพืช ทำให้เห็นเป็นรูปร่างของพืชนั้น ไพไรต์ทั้งสองแบบแทรกอยู่ในเนื้อไม้ทั่วไป และไม่สามารถแยกหรือกำจัดออกจากด้านหินโดยวิธีกายภาพ

2) Authogenic secondary deposit pyrites

เป็นไพไรต์ที่เกิดขึ้นภายหลังจากกระบวนการเกิดด้านหิน ลักษณะที่พบแทรกอยู่ตามแนวแตกของด้านหิน ประกอบด้วยผลึกเล็ก ๆ อาจเกาะกันเป็นแผ่น หรือถ้ำรอยแตกนั้นใหญ่อาจเกาะกันเป็นก้อนใหญ่ ไพไรต์ชนิดนี้สามารถแยกหรือกำจัดออกจากด้านหินได้ง่ายโดยวิธีทางกายภาพ เพราะไม่ได้รวมอยู่ในเนื้อด้านหิน

2.4.1.2 กำมะถันซัลเฟต (sulphate sulphur)

กำมะถันซัลเฟตจะพบในลักษณะของโลหะซัลเฟต เช่น แอนไฮไดรต์ ($CaSO_4$) ยิปซัม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) แบไรต์ ($BaSO_4$) สารประกอบซัลเฟตของเหล็ก ($FeSO_4$)

ทองแดง (CuSO_4) แมกนีเซียม (MgSO_4) โดยปกติจะพบปริมาณกำมะถันซัลเฟตในด้านหินน้อย เมื่อเทียบกับปริมาณไฟโรต์และกำมะถันอินทรีย์

2.4.2 กำมะถันอินทรีย์ (organic sulphur) (Garcia-Labiano, Hampartsoumian และ Williams, 1995)

กำมะถันอินทรีย์มีกระจุกกระจายทั่วไปในด้านหิน ประมาณร้อยละ 30-70 ของปริมาณกำมะถันรวมในด้านหิน อยู่ในลักษณะโครงสร้างพันธะเคมีหลายรูปแบบที่ซับซ้อน Garcia-Labiano, *et al.* (1995) เสนอว่า กำมะถันอินทรีย์ที่พบในด้านหินอาจจะประกอบด้วยวงแหวน aromatic หรือหมู่ฟังก์ชัน aliphatic โดยทั่วไปแบ่งได้เป็น mercaptans (R-SH), aliphatic and aryl sulphides (R-S-R'), disulphides (R-S-S-R') และ thiophenes (สารประกอบ aromatic ซึ่งมีกำมะถันเป็นส่วนหนึ่งของวงแหวน) ประมาณร้อยละ 40 ถึง 70 กำมะถันอินทรีย์ในด้านหินจะมีโครงสร้างเป็น thiophene และอนุพันธ์ของมัน กระบวนการเกิดด้านหินอาจเป็นสาเหตุทำให้กำมะถันอินทรีย์เปลี่ยนรูปจาก R-SH เป็น R-S-R' และ thiophene ในที่สุดโดยปฏิกิริยา cyclization

กำมะถันอินทรีย์ซึ่งประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน aliphatic มีโครงสร้างไม่เสถียรมากนัก จึงกลายเป็นแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ง่าย ส่วนพวกวงแหวน aromatic มีความเสถียรมากกว่า เนื่องจากกำมะถันมี resonance ในวงแหวนซึ่งทำให้พันธะคาร์บอนและกำมะถันที่จับกันเสถียรมากขึ้น จึงไม่สามารถใช้วิธีทางกายภาพกำจัดออกจากด้านหินได้ ต้องใช้วิธีทางเคมีเพื่อทำลายพันธะเคมีระหว่างกำมะถันและคาร์บอน (C-S bond) ปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการกำจัดกำมะถันไฟโรต์ใช้ไม่ได้กับกำมะถันอินทรีย์ เพราะกำมะถันอินทรีย์มีโครงสร้างที่เสถียรมากและไม่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับกำมะถันไฟโรต์

วิธีการวิเคราะห์ปริมาณกำมะถันอินทรีย์ไม่สามารถวิเคราะห์ได้โดยตรง เนื่องจากโครงสร้างที่ซับซ้อน ดังนั้นจึงคำนวณจากปริมาณกำมะถันรวมหักออกด้วยปริมาณกำมะถันไฟโรต์และปริมาณกำมะถันซัลเฟตดังสมการที่ 2.2

$$\text{กำมะถันอินทรีย์} = \text{กำมะถันรวม} - \text{กำมะถันไฟโรต์} - \text{กำมะถันซัลเฟต} \quad \text{---(2.2)}$$

2.5 การกำจัดกำมะถันในด้านหิน (มณฑล, 2535)

การกำจัดกำมะถันในด้านหินเป็นส่วนสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการนำด้านหินมาใช้งาน วิธีการกำจัดกำมะถันในด้านหินแบ่งตามขั้นตอนการใช้งานดังนี้ คือ

ก. การกำจัดกำมะถันก่อนการเผาไหม้

เป็นการลดปริมาณกำมะถันในถ่านหิน ก่อนนำถ่านหินไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ โดยอาจใช้วิธีทางกายภาพ เคมี หรือชีวภาพ นอกจากนี้ยังมีกระบวนการไพโรไลซิสทำให้ถ่านหินสลายตัวเป็นถ่านชาร์ กระบวนการทำให้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงแก๊ส (gasification) หรือเชื้อเพลิงเหลว (liquefaction)

ข. การกำจัดกำมะถันระหว่างการเผาไหม้

โดยการเติมสารบางชนิดลงไประหว่างการเผาไหม้ เพื่อรวมตัวกับกำมะถันที่สลายตัวจากการเผาไหม้ เกิดเป็นสารประกอบที่สามารถแยกออกได้ เช่น การเติมปูนขาว (lime, CaO) หรือหินปูน (limestone, CaCO₃) เมื่อเผาไหม้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะถูกกำจัดโดยเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของสารประกอบแคลเซียมซัลเฟต (CaSO₄) ซึ่งสามารถกำจัดออกได้ง่าย โดยใช้เครื่องกำจัดฝุ่นไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitator) หรือถุงกรอง (filter bag)

ค. การกำจัดกำมะถันหลังการเผาไหม้

ใช้สารเคมี เช่น ปูนขาวหรือหินปูน ดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ออกมาพร้อมกับปลุกแก๊สหลังการเผาไหม้ (FGD, flue gas desulphurization) วิธีการนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดกำมะถันสูงมาก อย่างไรก็ตามค่าใช้จ่ายในการลงทุนและดำเนินการก็สูงมากเช่นกัน นอกจากนี้ยังมีปัญหาในการจัดการกับของเสียในรูปของแข็งที่เกิดขึ้นอีกด้วย

กระบวนการกำจัดกำมะถันก่อนนำถ่านหินไปใช้เป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพถ่านหินที่น่าสนใจแบ่งออกได้เป็น 3 วิธีคือ กายภาพ เคมี และชีวภาพ

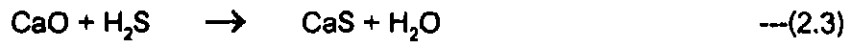
วิธีทางกายภาพอาศัยคุณสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกันของถ่านหินและกำมะถัน เช่น ความถ่วงจำเพาะ ความสามารถในการดูดซับโดยแม่เหล็ก และความสามารถในการละลายในตัวทำละลาย เป็นต้น มาใช้ในการแยกออกจากกัน อย่างไรก็ตามวิธีการทางกายภาพมีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำในการกำจัดกำมะถันและไม่สามารถกำจัดกำมะถันอินทรีย์ได้

วิธีทางชีวภาพอาศัยเชื้อจุลินทรีย์ เช่น แบคทีเรียบางชนิดกำจัดกำมะถันอินทรีย์จากถ่านหิน จึงต้องใช้เวลาในการย่อยกำมะถันของเชื้อจุลินทรีย์ และการพัฒนายังอยู่ในระดับห้องปฏิบัติการเท่านั้น

วิธีทางเคมี สามารถกำจัดกำมะถันอินทรีย์ได้ดี แต่กำจัดกำมะถันอินทรีย์ได้ต่ำเนื่องจากพันธะระหว่างคาร์บอนและกำมะถันในโครงสร้างถ่านหินมีความเสถียรมาก นอกจากนี้ยังต้องเสียค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคมีและต้องดำเนินการภายใต้ภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา

ในระยะเวลาที่ผ่านมา มีงานวิจัยและพัฒนาที่นำหลักไพโรไลซิสมาสลายสารประกอบกำมะถันอินทรีย์และอนินทรีย์ให้กลายเป็นแก๊สแล้วทำความสะอาดแก๊สนั้นภายหลัง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่สะอาดทั้งที่เป็นแก๊ส ของเหลว และถ่านชาร์ สารประกอบกำมะถันที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่อยู่ในรูปแก๊ส

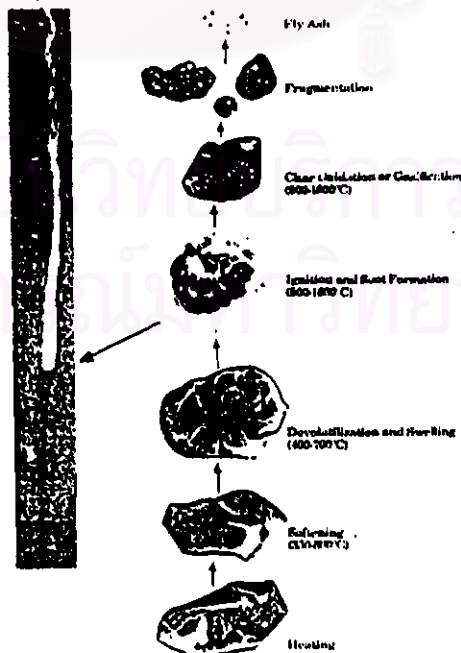
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ สามารถกำจัดได้สะดวกโดยใช้ปูนขาว (lime) ทำหน้าที่ดูดซับ เมื่อเทียบกับการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์โดยตรงดังสมการ 2.3 และ 2.4



Lin, Khang, และ Keener (1997) พบว่าการนำปูนขาว มาใช้ในการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้จำกัดเพียงร้อยละ 62 ขณะที่ Cao สามารถเปลี่ยนเป็น CaS เมื่อทำปฏิกิริยากับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ถึงร้อยละ 100 และเนื่องจากเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เพิ่มขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะยังคงดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้น

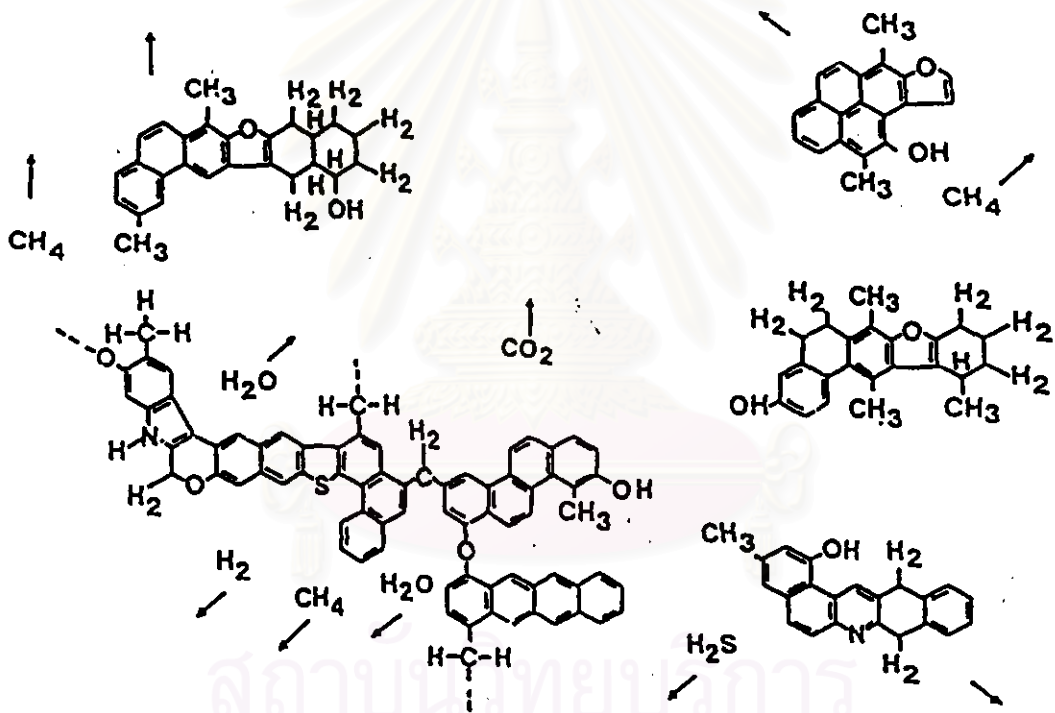
2.6 ไพโรไลซิส (Pyrolysis) (Schlosberg, 1985)

ไพโรไลซิส คือ การสลายตัวทางความร้อน (thermal decomposition) หรือการกลั่นสลายตัว (destructive distillation) ในที่จำกัดอากาศหรือควบคุมบรรยากาศ เป็นขั้นตอนสำคัญสำหรับกระบวนการเปลี่ยนรูปด้านหินมากมาย เช่น มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิและสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการทำให้ด้านหินเป็นเชื้อเพลิงแก๊ส ควบคุมการแตกตัวออกเริ่มต้นของมาโครโมเลกุล ในกระบวนการทำให้ด้านหินเป็นเชื้อเพลิงเหลว Solomon, Fletcher และ Pugmire (1993) แสดงอิทธิพลของไพโรไลซิสที่มีผลทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์กระบวนการไพโรไลซิสควบคุมการพองตัว (swelling) การรวมตัวของอนุภาค ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาและโครงสร้างของด้านชาร์ ควบคุมการจุดติดไฟ อุณหภูมิและเสถียรภาพของเปลวไฟระหว่างการเผาไหม้ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กระบวนการเผาไหม้ด้านหิน (Solomon, et al., 1993)

เมื่อได้รับความร้อนโมเลกุลของถ่านหินจะเริ่มอ่อนตัวและแตกออกโดยเฉพาะโมเลกุลระหว่างหมู่ aliphatic ด้วยกันและระหว่างหมู่ aliphatic กับออกซิเจน จะแตกออกได้ง่าย การแตกออกของพันธะเหล่านี้ทำให้เกิดกลุ่มโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงไปในผลิตภัณฑ์ของเหลวและแก๊ส รูปที่ 2.4 แสดงสมมติฐานการแตกออกของโมเลกุลถ่านหินระหว่างการสลายตัวทางความร้อน ที่อุณหภูมิต่ำโครงสร้างวงแหวน aromatic มีการจัดเรียงตัวกันใหม่น้อยมาก ส่วนโครงสร้าง aliphatic หรือ hydroaromatic ของถ่านหินจะสลายตัว แก๊ส CO₂ เกิดจากหมู่ carboxyl น้ำเกิดจากหมู่ hydroxyl แก๊สไฮโดรคาร์บอนเกิดจากหมู่ aliphatic แก๊ส H₂S เกิดจาก mercaptans และแก๊ส CO บางส่วนเกิดจากหมู่ ether ที่อุณหภูมิสูงโครงสร้างวงแหวน aromatic เกิดการแตกตัวและจัดเรียงตัวใหม่ ในขั้นตอนนี้จะเกิดแก๊ส H₂ จากไฮโดรเจนใน aromatic แก๊ส CS₂ จาก thiophenes แก๊ส HCN จากวงแหวนไนโตรเจน และแก๊ส CO จากหมู่ ether ที่ยึดแน่น



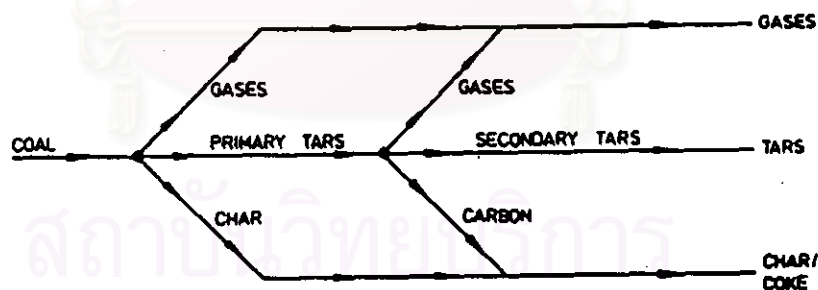
รูปที่ 2.4 สมมติฐานการแตกออกของโมเลกุลถ่านหินระหว่างไพโรไลซิส (Schlosberg, 1985)

เมื่อผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ถ่านหินสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการระเหยไประหว่างน้ำและสารระเหย องค์ประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ในถ่านหินเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งด้านกายภาพและเคมี ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้ประกอบด้วยของแข็งที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบเป็นส่วนใหญ่เรียกว่าถ่านชาร์ ส่วนผลิตภัณฑ์อื่นได้แก่ ของเหลวและแก๊ส ปริมาณผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ มากมาย ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน บรรยากาศ ความดัน ขนาดของถ่านหิน เวลาที่ใช้ ชนิดของถ่านหิน และชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ เป็นต้น น้ำหนักที่หายไปของถ่านชาร์จะออกมาในรูปของ

แก๊ส (CH_4 , CO , CO_2 , H_2O , สารประกอบไฮโดรคาร์บอนเบาและอื่น ๆ) และน้ำมันทาร์ซึ่งมีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง ขั้นตอนการเกิดแก๊สสามารถทำนายได้ถูกต้องโดยแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ได้และโดยใช้การกระจายตัวของค่าพลังงานกระตุ้น ขณะที่ขั้นตอนระหว่างการเกิดน้ำมันทาร์และถ่านชาร์มีความซับซ้อนมากกว่า โดยทั่วไปเป็นที่เห็นตรงกันว่าขั้นตอนการเกิดน้ำมันทาร์ดำเนินไปตามขั้นตอนต่อไปนี้ (Solomon, et al., 1993)

- ก. เกิดปฏิกิริยาการแตกออกของโมเลกุลขนาดใหญ่ของถ่านหิน (depolymerization) ได้โมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงเรียกว่า "metaplast"
- ข. โมเลกุล metaplast เกิดปฏิกิริยาการรวมตัวกันอีกครั้ง (repolymerization)
- ค. โมเลกุลที่มีขนาดเบาเคลื่อนที่จากผิวของอนุภาคถ่านหินโดย การระเหย (vaporization) การพา (convection) และการแพร่ในสถานะแก๊ส (gas-phase diffusion) ร่วมกัน
- ง. โมเลกุลภายในอนุภาคถ่านหินเคลื่อนที่สู่ผิวโดยการพาและการแพร่ไปตามรูพรุน สำหรับถ่านหินที่มีเนื้อแข็ง และเคลื่อนที่มากับของเหลวหรือฟองแก๊สสำหรับถ่านหินที่มีเนื้ออ่อนเมื่อได้รับความร้อน

ส่วนถ่านชาร์เกิดจากอนุภาคที่ไม่ระเหยออกไปหรือที่ควบแน่นกลับเข้ามาอีกครั้ง ขั้นตอนในกระบวนการไพโรไลซิสแสดงดังรูปที่ 2.5



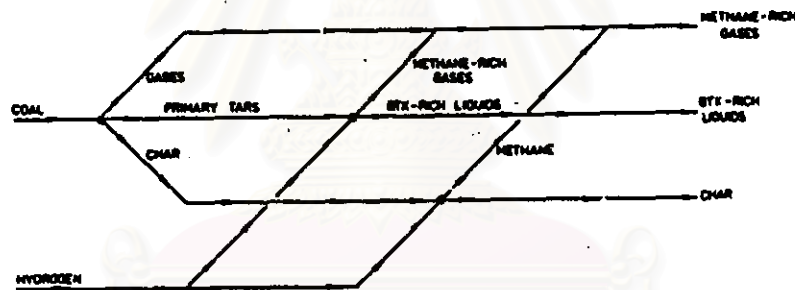
รูปที่ 2.5 ขั้นตอนในกระบวนการไพโรไลซิส (Merrick, 1984)

ไพโรไลซิสสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ตามอุณหภูมิที่ใช้ คือ

ก. ไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำ (low temperature pyrolysis) ช่วงอุณหภูมิไม่เกิน 800 องศาเซลเซียส ให้ผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ที่มีรูพรุน มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูง ค่อนข้างอ่อนและเปราะ ไร้ควัน เหมาะสำหรับการใช้เป็นเชื้อเพลิงทั่วไป ทั้งยังได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันทาร์ปริมาณสูง

ข.ไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูง (high temperature pyrolysis) ช่วงอุณหภูมิมากกว่า 800 องศาเซลเซียส ให้ผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ที่มีลักษณะแข็งและไม่ร่วงเอนในการเกิดปฏิกิริยา ใช้มากในกระบวนการถลุงเหล็ก ให้ผลิตภัณฑ์แก๊สปริมาณสูงมากและผลิตภัณฑ์น้ำมันทาร์ปริมาณต่ำ

กระบวนการสำคัญอีกกระบวนการหนึ่ง ซึ่งมีหลักการคล้ายกับไพโรไลซิส คือ ไฮโดรไพโรไลซิสซึ่งคือ การสลายตัวทางความร้อนภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจน เป็นขั้นตอนที่อยู่ระหว่าง liquefaction และ integral gasification (Strugnelli และ Patrick, 1995) แก๊สไฮโดรเจนทำหน้าที่ยับยั้งการแตกตัวทางความร้อนของน้ำมันทาร์ที่เกิดขึ้นในช่วงแรก (Merrick, 1984) ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่ประกอบด้วย น้ำมันทาร์ ของเหลว รวมทั้งสารประกอบ aromatic โดยเฉพาะเบนซีน โทลูอีน และไซลีน และบางส่วนเกิดปฏิกิริยา hydrogasification ของถ่านชาร์ได้ ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอน โดยเฉพาะมีเทนและอีเทน ปฏิกิริยาเหล่านี้ขึ้นอยู่กับเวลา อุณหภูมิ และความดันที่ใช้ ไฮโดรไพโรไลซิสใช้เป็นส่วนมากในการผลิตเชื้อเพลิงพิเศษ (premium fuel) ในรูปของมีเทน ขั้นตอนในกระบวนการไฮโดรไพโรไลซิสแสดงดังรูปที่ 2.6



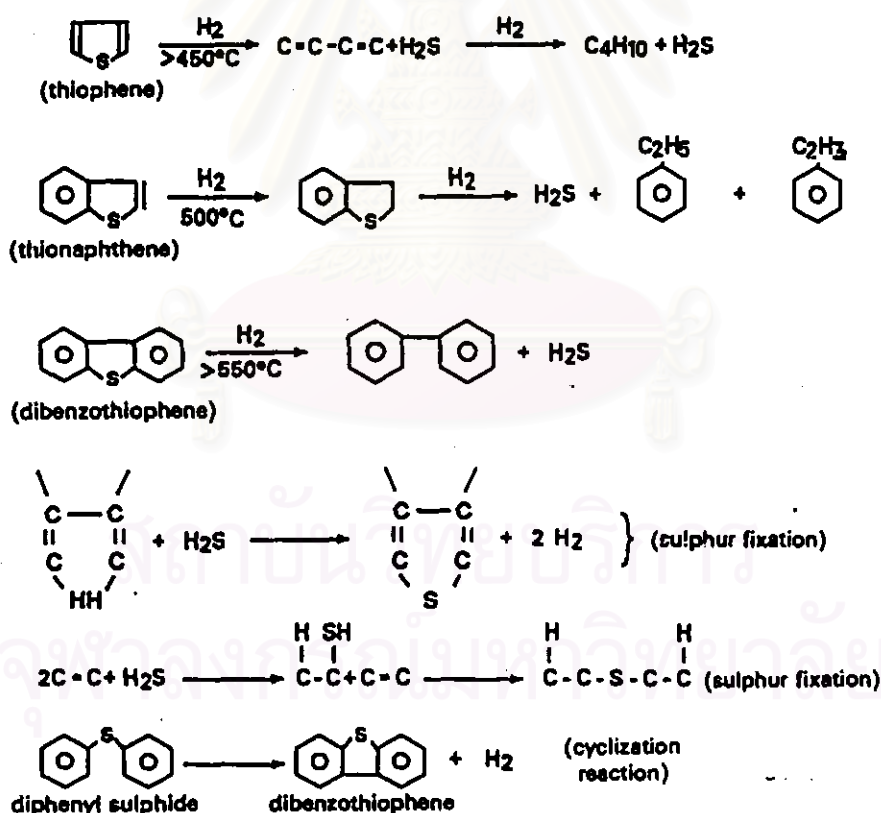
รูปที่ 2.6 ขั้นตอนในกระบวนการไฮโดรไพโรไลซิส (Merrick, 1984)

2.7 การกำจัดกำมะถันโดยไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำ (Khan, 1989)

ไพโรไลซิสสามารถกำจัดได้ทั้งกำมะถันอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยสารประกอบกำมะถันในด้านหินจะสลายตัวและกระจายไปในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ พฤติกรรมของสารประกอบกำมะถันระหว่างไพโรไลซิสขึ้นอยู่กับปัจจัยมากมาย เช่น สักดิ์ของถ่านหิน ปริมาณของและรูปแบบของกำมะถันที่กระจายตัวในถ่านหิน ปริมาณและชนิดของ mineral matter รวมทั้งภาวะที่ใช้ในการทดลอง ถ่านหินที่มีศักดิ์สูงกว่าจะมีรูปแบบขององค์ประกอบกำมะถันที่มีความเสถียรมากกว่า (สารประกอบ thiophenic) ทำให้กำจัดได้ยากกว่า Gryglewicz (1995) รายงานว่า mineral

องศาเซลเซียส โครงสร้างที่เป็นรูปพวงของถ่านหินจะถูกทำลายและอาจยับยั้งการปลดปล่อยกำมะถันจากถ่านหิน Ibarra, Bonet, *et al.* (1994) เสนอว่ากำมะถันอินทรีย์สลายตัวสูงสุดในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 500 ถึง 560 องศาเซลเซียส ขณะที่ Khan (1989) พบว่าสารประกอบ aliphatic ส่วนใหญ่สลายตัวที่อุณหภูมิราว 500 องศาเซลเซียส diethyl sulphides เริ่มสลายตัวที่ประมาณ 400 องศาเซลเซียส ไปเป็นแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ และ mercaptans ส่วน aliphatic and aryl sulphides, mercaptans และ disulphides สลายตัวที่อุณหภูมิระหว่าง 700 และ 800 องศาเซลเซียส สารประกอบ thiophenic มีความเสถียรมากสลายตัวได้บ้างที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสขึ้นไป แต่ส่วนใหญ่ยังคงอยู่ในผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ ตัวอย่างของปฏิกิริยาของกำมะถันอินทรีย์แสดงดังตาราง 2.3

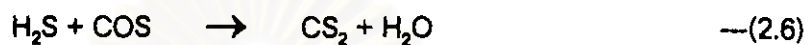
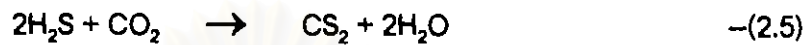
ตารางที่ 2.3 ปฏิกิริยาที่อาจเกิดขึ้นของกำมะถันอินทรีย์ระหว่างไพโรไลซิสถ่านหิน (Khan, 1989)



นอกจากนี้ Ibarra, Palacios, *et al.* (1994) รายงานเพิ่มเติมสอดคล้องกับ Gryglewicz และ Jasienko (1992) ว่ากำมะถันอินทรีย์จะเพิ่มขึ้นในช่วงที่กำมะถันไพไรต์เกิดการสลายตัวเนื่อง

จากธาตุกำมะถันหรือแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นสามารถสร้างพันธะ C-S กับ coal matrix ขึ้นมาใหม่ทำให้ปริมาณกำมะถันในด้านซาร์เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับสมการการจับยึดกำมะถัน (sulphur fixation) ที่เสนอโดย Khan (1989) ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.3

ผลิตภัณฑ์แก๊สส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์และคาร์บอนิลซัลไฟด์ (COS) และที่อุณหภูมิสูง (สูงกว่า 850 องศาเซลเซียส) แก๊สทั้งสองชนิดอาจเกิดปฏิกิริยาต่อไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดซัลไฟด์ Khan (1989) เสนอไว้ดังสมการ



2.8 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการสูญเสียน้ำหนักของถ่านหินระหว่างไพโรไลซิส (Teng, Lin, และ Ho, 1997)

จลนพลศาสตร์การระเหยของสารระเหยระหว่างไพโรไลซิสสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในรูปของแข็งรวมทั้งถ่านหิน สามารถแสดงได้โดยใช้แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียบกับปริมาณสารระเหยที่ยังไม่ถูกปลดปล่อยออกมา อัตราการเกิดสารระเหยเป็น

$$dV_i/dt = k_i(V_i^* - V_i) \quad \text{---(2.8)}$$

โดย V_i คือ ปริมาณสะสมของสารระเหย i ที่เกิดขึ้นเมื่อเข้าใกล้เวลา t , V_i^* คือ ปริมาณสารระเหย i ทั้งหมดที่เกิดขึ้น (ที่เวลา $t = \infty$) และ k_i คือ ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งสามารถแสดงได้ในรูปสมการ Arrhenius คือ

$$k_i = A_i \exp(-E_i/RT) \quad \text{---(2.9)}$$

โดย T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์, R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส, A_i คือ ปัจจัยความถี่ (frequency factor) และ E_i คือ พลังงานกระตุ้นสำหรับปฏิกิริยา i ใด ๆ และเมื่อไพโรไลซิสที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (H) คงที่จะได้

$$H = dT/dt \quad \text{---(2.10)}$$

แทนลงในสมการ (2.8) จะได้

$$dV_i/dT = k_i(V_i^* - V_i)/H \quad \text{---(2.11)}$$

จากการศึกษาข้อมูลทาง thermogravimetric ทำให้ทราบอุณหภูมิซึ่งเกิดการปลดปล่อยสารระเหยมากที่สุด (T_{max}) ที่อุณหภูมิดังกล่าวอนุพันธ์ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเท่ากับศูนย์ เพราะฉะนั้นจากสมการที่ (2.8) ที่ $T = T_{max}$

$$d^2V_i/dt^2 = k_i(-dV_i/dt) + (V_i^* - V_i)(dk_i/dt) = 0 \quad \text{---(2.12)}$$

หรือ

$$d^2V/dT^2 = (k/H)(-dV/dT) + [(V_1 - V_2)/H](dk/dT) = 0 \quad \text{---(2.13)}$$

หาอนุพันธ์สมการที่ (2.9) เทียบกับอุณหภูมิ จะได้

$$dk/dT = A_i(E/RT^2)\exp(-E/RT) \quad \text{---(2.14)}$$

แทนสมการที่ (2.11) และ (2.14) ในสมการ (2.13)

$$\ln[H/(Tmax)^2] = \ln(A_i R/E_i) - E_i/RTmax \quad \text{---(2.15)}$$

จากสมการที่ (2.15) ค่าพลังงานกระตุ้น (E_i) และ ปัจจัยความถี่ (A_i) คำนวณได้จากค่าความชันและจุดตัดแกน y ของสมการเส้นตรงที่เกิดจากความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln[H/(Tmax)^2]$ และ $1/Tmax$

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การค้นคว้าวิจัยและพัฒนาเพื่อลดกำมะถันในถ่านหินโดยกระบวนการไพโรไลซิสแบ่งได้เป็น ไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำ และไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูง

2.9.1 ไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำ

2.9.1.1 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพในการกำจัดกำมะถันระหว่างไพโรไลซิส Ibarra, Bonet, *et al.* (1994) ศึกษาช่วงอุณหภูมิและองค์ประกอบของกำมะถันที่ปลดปล่อยออกมาเมื่อไพโรไลส์ถ่านหินสเปนที่มีกำมะถันอินทรีย์และกำมะถันไพไรต์สูงที่อุณหภูมิต่าง ๆ จนถึง 850 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่ออนาทีในเบดคงที่ พบว่าแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 500 ถึง 560 และ 630 ถึง 700 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของกำมะถันอินทรีย์และกำมะถันไพไรต์ตามลำดับ ส่วนการเกิดแก๊สคาร์บอนิลซัลไฟด์ เป็นไปในทำนองเดียวกับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ และการเกิดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ สัมพันธ์กับปริมาณกำมะถันไพไรต์ซึ่งถูกออกซิไดส์ในขณะไพโรไลส์ และการสลายตัวของเหล็กซัลเฟตที่เกิดจากการออกซิไดส์ของกำมะถันไพไรต์ในขณะกองเก็บ ประสิทธิภาพในการกำจัดกำมะถันรวมอยู่ระหว่างร้อยละ 35 ถึง 64 ในช่วงอุณหภูมิ 670 ถึง 700 องศาเซลเซียส แต่สามารถกำจัดได้ถึงร้อยละ 90 จนสมบูรณ์ ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 700 องศาเซลเซียสขึ้นไป

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องอีกหนึ่งชิ้นเสนอโดย Gryglewicz (1995) ซึ่งทดลองไพโรไลส์ถ่านหินที่มีปริมาณกำมะถันสูง (ร้อยละ 4.9) ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 330 ถึง 1700 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศของแก๊สที่เกิดขึ้น และวิเคราะห์พบรูปแบบกำมะถันโดยวิธีเคมีและกล้องจุลทรรศน์ชนิด scanning electron ที่ติดตั้ง x-ray detector ไว้ พบว่ากำมะถันไพไรต์จะเปลี่ยนเป็น

เฟอร์ริซัลไฟด์ที่อุณหภูมิระหว่าง 360 ถึง 700 องศาเซลเซียส ซึ่งมีผลให้ปริมาณกำมะถันอินทรีย์ในถ่านชาร์เพิ่มขึ้นโดยเฉพาะในช่วง 450 ถึง 600 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีการสะสมของกำมะถันซัลไฟด์ที่เกิดจากกำมะถันอินทรีย์ที่ผิวด้านชาร์ มีผลให้เกิดปฏิกิริยาการจับซัลไฟด์โดยสารประกอบอัลคาไล calcite และ siderite ที่มีในถ่านหิน ผู้วิจัยได้เสนอว่า เพื่อให้การกำจัดกำมะถันและการไล่แก๊สที่เกิดออกจากพื้นผิวมีประสิทธิภาพ ควรล้างถ่านหินเพื่อไล่ส่วนประกอบที่เป็นอัลคาไลก่อนไพโรไลส์ และขณะไพโรไลส์ควรผ่านแก๊สเฉื่อยเพื่อไล่สารประกอบกำมะถันที่เป็นแก๊สออกจากพื้นผิวให้มากที่สุด

2.9.1.2 การศึกษาอิทธิพลของชนิดของถ่านหินและการกระจายตัวของกำมะถัน

ถ่านหินต่างชนิดกันมีองค์ประกอบและรูปแบบการกระจายตัวของกำมะถันแตกต่างกัน นักวิจัยหลายท่านพยายามศึกษาอิทธิพลของตัวแปรดังกล่าว Khan (1989) ศึกษาการกระจายของกำมะถันในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ได้จากไพโรไลซิสถ่านหินบิทูมินัสของสหรัฐอเมริกา 32 ชนิดที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณกำมะถันที่กระจายในผลิตภัณฑ์แก๊ส ของเหลว และถ่านชาร์ ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณกำมะถันในถ่านหินและขึ้นอยู่กับภาวะในการทดลอง ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน และอัตราการให้ความร้อน ปริมาณกำมะถันในผลิตภัณฑ์ของเหลวสัมพันธ์กับปริมาณกำมะถันรวมในถ่านหิน ปริมาณกำมะถันในถ่านชาร์สัมพันธ์กับปริมาณกำมะถันไพโรตีในถ่านหิน ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์รวมกับคาร์บอนิลซัลไฟด์ในผลิตภัณฑ์แก๊สสัมพันธ์กับปริมาณกำมะถันรวมในถ่านหินเช่นกัน และปริมาณกำมะถันในแก๊สและของเหลวรวมกันสัมพันธ์กับปริมาณกำมะถันอินทรีย์ในถ่านหิน นอกจากนี้ผู้วิจัยยังเสนอว่าองค์ประกอบกำมะถันที่สลายง่ายได้แก่ thiols, sulphides และ disulphides มีส่วนสำคัญในการทำให้เกิด แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์และคาร์บอนิลซัลไฟด์ ในผลิตภัณฑ์แก๊ส ส่วนแก๊สคาร์บอนไดซัลไฟด์เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง

ผู้วิจัยอีกท่านหนึ่งท่าน Gryglewicz (1996) ศึกษาการกำจัดกำมะถันจากถ่านหินโปแลนด์ที่มีศักดิ์ต่างกันและมีร้อยละกำมะถันระหว่าง 0.37 ถึง 4.9 จำนวน 20 ตัวอย่างไพโรไลส์ที่ 1000 องศาเซลเซียสในบรรยากาศของแก๊สที่เกิดขึ้น พบว่าอัตราการกำจัดกำมะถันลดลงเมื่อศักดิ์ถ่านหินสูงขึ้น และการกำจัดสัมพันธ์กับปริมาณกำมะถันในรูปแบบที่เป็น non-thiophenic ซึ่งสลายได้ง่ายกว่า และยังพบความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละกำมะถันรวมในถ่านชาร์ที่ได้กับร้อยละกำมะถันรวม กำมะถันไพโรตี และกำมะถันอินทรีย์ในถ่านหินตั้งต้นอีกด้วย งานวิจัยอีกหนึ่งชิ้นของ Ibarra, Palacios, et al.(1994) ทำการศึกษาอิทธิพลของสารอินทรีย์ (organic matter) และปริมาณกำมะถันไพโรตีต่อการกำจัดกำมะถันระหว่างไพโรไลซิสถ่านหินด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาทีจนถึงอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณกำมะถันอินทรีย์ลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสำหรับตัวอย่างที่มีปริมาณกำมะถันไพโรตีต่ำมากหรือไม่มี ส่วนใน

ถ่านหินที่มีปริมาณกำมะถันไพไรต์สูง กำมะถันอินทรีย์ในถ่านชาร์จะเพิ่มขึ้นตั้งแต่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสขึ้นไป และในถ่านหินที่มีปริมาณสารอินทรีย์สูงกำมะถันไพไรต์จะสลายตัวได้ดี

2.9.1.3 การศึกษาอิทธิพลของบรรยากาศในระหว่างไพโรไลซิส

บรรยากาศที่ใช้ไพโรไลซิส

กำจัดกำมะถัน งานดังกล่าวเสนอโดย Ibarra, Moliner และ Miranda (1990) ศึกษาการกระจายตัวของรูปแบบกำมะถันในถ่านหินสเปนที่มีศักดิ์ต่ำมีร้อยละกำมะถันตั้งแต่ 2.0 ถึง 9.6 โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสในบรรยากาศของแก๊สฮีเลียม และแก๊สไฮโดรเจน (ความดัน 3 เมกะปาสคาล) พบว่าสามารถกำจัดกำมะถันได้ตั้งแต่ร้อยละ 40 ถึง 70 ในถ่านหินศักดิ์ต่ำกำมะถันอินทรีย์มีความเสถียรน้อยกว่าจึงสลายออกมาได้มากกว่าร้อยละ 80 กำมะถันไพไรต์ในถ่านหินสลายตัวเป็นแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์และ pyrrhotite ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็ก ดังนั้นหลังไพโรไลซิสจึงสามารถแยก pyrrhotite ออกจากถ่านชาร์ได้เพิ่มเติม ทั้งนี้ไพโรไลซิสในบรรยากาศไฮโดรเจนสามารถกำจัดกำมะถันโดยเฉพาะกำมะถันอินทรีย์ได้มากกว่าบรรยากาศฮีเลียม แต่ให้ปริมาณ ถ่านชาร์ต่ำกว่า

2.9.1.4 การศึกษาของอัตราการให้ความร้อน

Sugawara, K. *et al.* (1994) และ Sugawara, T. *et al.* (1991) เป็นอีกกลุ่มนักวิจัยที่ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ รวมทั้งอัตราการให้ความร้อนที่มีต่อพฤติกรรมของสารประกอบกำมะถันที่เกิดขึ้น งานวิจัยส่วนหนึ่งทดลองไพโรไลซิสถ่านหินโดยเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อนในบรรยากาศไนโตรเจนในช่วงอุณหภูมิ 300 ถึง 900 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 20 และ 100 องศาเซลเซียสต่ออนาที พบว่าในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 500 ถึง 700 องศาเซลเซียสสามารถกำจัดกำมะถันได้ดีที่สุด โดยอัตราการให้ความร้อนสูงกว่าและโดยเฉพาะในบรรยากาศไฮโดรเจนสามารถกำจัดกำมะถันได้ดีกว่า

2.9.1.5 การศึกษาจลนพลศาสตร์ในกระบวนการไพโรไลซิส

Garcia-Labiano *et al.* (1995) ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการปลดปล่อยกำมะถันระหว่างไพโรไลซิสถ่านหิน 4 ชนิดที่มีศักดิ์ต่างกัน ที่อัตราการให้ความร้อนสูงในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 700 ถึง 1200 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อน 1100 องศาเซลเซียสต่ออนาที โดยใช้แบบจำลองปฏิกิริยาเดี่ยว (single reaction model) ในการคำนวณอัตราการปลดปล่อยกำมะถัน ค่าปัจจัยความถี่ และค่าพลังงานกระตุ้นของถ่านหินแต่ละชนิด พบความสัมพันธ์ระหว่างศักดิ์ของถ่านหินและตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ ค่าพลังงานกระตุ้นจะอยู่ในช่วงระหว่าง 20 ถึง 100 กิโลจูลต่อโมล โดยถ่านหินลิกไนต์จะให้ค่าต่ำสุด เนื่องจากประกอบด้วยกลุ่มกำมะถันอินทรีย์ที่มีเสถียรภาพต่ำเป็นส่วนใหญ่จึงสลายตัวเป็นสารประกอบกำมะถันเมื่อให้ความร้อนในปริมาณที่สูงกว่าถ่านหินที่มีศักดิ์สูงกว่า งานวิจัยอีกชิ้นหนึ่งที่ศึกษาจลนพลศาสตร์ในกระบวนการ

ไพโรไลซิสที่อุณหภูมิคงที่ โดยประยุกต์นำปูนขาวมาใช้ในการกำจัดสารประกอบกำมะถันที่เกิดขึ้นระหว่างไพโรไลซิสเสนอโดย Lin, *et al.* (1997) ศึกษาการกำจัดกำมะถันจากถ่านหินที่อุณหภูมิคงที่โดยเครื่องปฏิกรณ์ dual-screw coal feeder ที่อุณหภูมิระหว่าง 400 ถึง 475 องศาเซลเซียสและกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นโดยปูนขาว พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการทดลองทำให้สามารถกำจัดกำมะถันและสารระเหยได้ดีขึ้น ค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับกระบวนการกำจัดสารระเหยและกำจัดกำมะถันคือ 170,021 และ 78,732 กิโลจูลต่อกิโลโมล ตามลำดับโดยใช้แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

2.9.2 ไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูง

มีงานวิจัยที่ศึกษากระบวนการกำจัดกำมะถันในถ่านหินโดยไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงไม่มากนักโดยมี Gryglewicz เป็นนักวิจัยหลักที่ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงอย่างต่อเนื่อง โดย Gryglewicz และ Jasienko (1992) ทดลองไพโรไลสถ่านหินถึงอุณหภูมิ 1700 องศาเซลเซียสในเครื่องปฏิกรณ์เบดคงที่ ในบรรยากาศของแก๊สที่เกิดจากการทดลอง พบปริมาณกำมะถันอินทรีย์มากในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 330 และ 600 องศาเซลเซียส ซึ่งกำมะถันไพไรต์สลายตัวเป็นเฟอร์รัสซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 1700 องศาเซลเซียส สามารถกำจัดกำมะถันได้ร้อยละ 89.8 และ Gryglewicz, Wilk *et al.* (1996) ศึกษาการกำจัดกำมะถันจากถ่านหินบิทูมินัสที่มีปริมาณกำมะถันไพไรต์สูงในบรรยากาศของแก๊สที่เกิดขึ้นด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 เคลวินต่อวินาที ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 330 ถึง 1000 องศาเซลเซียส พบความสัมพันธ์ระหว่างกำมะถันอินทรีย์และกำมะถันไพไรต์ โดยกำมะถันอินทรีย์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิที่กำมะถันไพไรต์เกิดการสลายตัว (330 ถึง 500 องศาเซลเซียส) และจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อกำมะถันไพไรต์สลายตัวหมด

2.9.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในประเทศ

ความสนใจภายในประเทศในการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณภาพ การแปรรูป โดยเฉพาะการนำเทคนิคไพโรไลซิสมาใช้ในการลดกำมะถันในถ่านหินก่อนนำไปใช้ไม่เป็นที่แพร่หลายนัก งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ ไพโรไลซิสและถ่านหิน ได้แก่งานวิจัยของ Tia, S. และคณะ (1991) ศึกษาจลนพลศาสตร์เมื่อไพโรไลสและเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ในประเทศโดยเฉพาะในภาวะที่เป็นอนุภาคเดี่ยว ที่อัตราการให้ความร้อนต่ำประมาณ 5 ถึง 50 เคลวินต่อวินาที โดย thermogravimetric analyser พบว่าแบบจำลอง multireaction สามารถใช้ในการทำนายค่าพลังงานกระตุ้นและปริมาณของผลิตภัณฑ์ระหว่างไพโรไลซิสได้เป็นอย่างดี

อนัญญา พจนารถ (2528) ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพเศษถ่านหินโดยคาร์บอนในเข
 ชั้นในช่วงอุณหภูมิ 300 ถึง 1000 องศาเซลเซียสในรีโทอร์ทมาตรฐานแบบพีซเซอร์ พบช่วงขนาดที่
 เหมาะสมคือ 0.5 ถึง 1.0 มิลลิเมตรที่อุณหภูมิ 600 และ 700 องศาเซลเซียส งานวิจัยที่ศึกษาการ
 ลดกำมะถันจากถ่านหิน สมฤดี ริมพะสุต (2535) ศึกษาจลนพลศาสตร์การสลายตัวของกำมะถัน
 ในถ่านหินระหว่างคาร์บอนในเขชั้น จากตัวอย่างถ่านหินแม่เมาะและบางปุดำในเตาเผาแบบท่อ
 (tubular furnace) ที่อุณหภูมิ 400 ถึง 700 องศาเซลเซียส ตั้งแต่เวลา 0 ถึง 90 นาที พบว่าการเพิ่ม
 อุณหภูมิและเวลาทำให้กำจัดกำมะถันได้ดีขึ้น โดยเฉพาะกำมะถันไพไรต์และกำมะถันซัลเฟต ส่วน
 กำมะถันอินทรีย์มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก สำหรับถ่านหินแม่เมาะ กำมะถันไพไรต์และกำมะถัน
 ซัลเฟตสลายตัวสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที และ 600 องศาเซลเซียส
 เวลา 10 นาที ตามลำดับ ส่วนถ่านหินบางปุดำ กำมะถันไพไรต์และกำมะถันซัลเฟตสลายตัว
 สมบูรณ์ที่ 700 องศาเซลเซียส เวลา 20 และ 10 นาที ตามลำดับ

งานวิจัยอีกชิ้นหนึ่งศึกษาการกำจัดกำมะถันในถ่านหินโดยวิธีการทางเคมี มณฑิไล
 แห่งทรัพย์เจริญ (2535) ศึกษาจลนพลศาสตร์การกำจัดกำมะถันในถ่านหินแม่เมาะ โดยกระบวนการ
 การเมเยอร์ส โดยใช้สารละลายเพอริกคลอไรด์และสารละลายเพอริกซัลเฟตเป็นตัวออกซิไดซ์ ใน
 เครื่องปฏิกรณ์แบบไม่ต่อเนื่อง ผลการทดลองพบว่า ภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดกำมะถันคือ
 ความเข้มข้นของสารละลายเพอริกคลอไรด์และซัลเฟต 1.0 โมลต่อลิตร ปริมาณถ่านหิน 100 กรัม
 ต่อสารละลาย 500 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส อัตราการกวน 500 รอบต่อนาที เวลา
 240 นาที โดยกำจัดกำมะถันรวมได้ร้อยละ 40.06 กำมะถันไพไรต์ได้ร้อยละ 70.25 และกำมะถัน
 ซัลเฟตได้ร้อยละ 97.01 สำหรับเพอริกคลอไรด์ และกำจัดกำมะถันรวมได้ร้อยละ 41.10 กำมะถัน
 ไพไรต์ร้อยละ 71.77 และกำมะถันซัลเฟตร้อยละ 96.41 สำหรับเพอริกซัลเฟต

ดังนั้นจะเห็นได้ว่ายังไม่ม้งานวิจัยใดที่เน้นการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มี
 ต่อความสามารถในการกำจัดกำมะถันในถ่านหิน และการกระจายตัวของกำมะถันรูปต่าง ๆ
 ระหว่างไพโรไลซิส เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดกำมะถัน ประกอบกับงานวิจัยที่ผ่านมา
 เป็นผลการดำเนินงานที่นานมาแล้ว สมควรมีการศึกษาเพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจในการใช้
 กระบวนการไพโรไลซิสในการกำจัดกำมะถัน ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อไปในการนำไปใช้เป็นทาง
 เลือกที่น่าสนใจในการลดกำมะถันในถ่านหินในระดับอุตสาหกรรม และยังเป็นประโยชน์อย่างมาก
 ในการทำความเข้าใจถึงขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงของถ่านหินในกระบวนการแปรรูปถ่านหินโดยวิธี
 อื่น เช่น กระบวนการทำให้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงแก๊ส เนื่องจากถ่านหินต้องผ่านขั้นตอนการสลาย
 ตัวโดยไพโรไลซิสก่อน