



บทที่ 2

## วารสารปริทัศน์

### 2.1 ถ่านหิน (4)

ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงของผสมที่มีสถานะเป็นของแข็งเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติจากสิ่งมีชีวิตจำพวกพืชที่เจริญเติบโตและล้มตาย เกิดการทับถมและสะสมตัวเป็นชั้นในแอ่ง หรือสถานที่เหมาะสมทางธรณีวิทยา พืชซากเหล่านี้จะเน่าเปื่อยและถูกทับถมด้วยดินและหินจนเกิดแรงบีบหรือแรงกดทำให้เกิดความร้อนขึ้น พร้อมกับมีการแข็งตัวและเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบหลัก ได้แก่ ธาตุคาร์บอนเพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณธาตุไฮโดรเจนและออกซิเจนลดลงไปเรื่อย ๆ จนกลายเป็นถ่านหินที่ขุดพบในปัจจุบัน โดยทั่วไปมีสีเข้มตั้งแต่สีน้ำตาลถึงดำสนิทมีการจำแนกถ่านหินตามประเภทอาศัยหลักตามมาตรฐาน ASTM D 388 แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 (5)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**D 388**

**TABLE 1 Classification of Coals by Rank<sup>a</sup>**

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

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

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

<sup>c</sup> If agglomerating, classify in low-volatile group of the bituminous class.

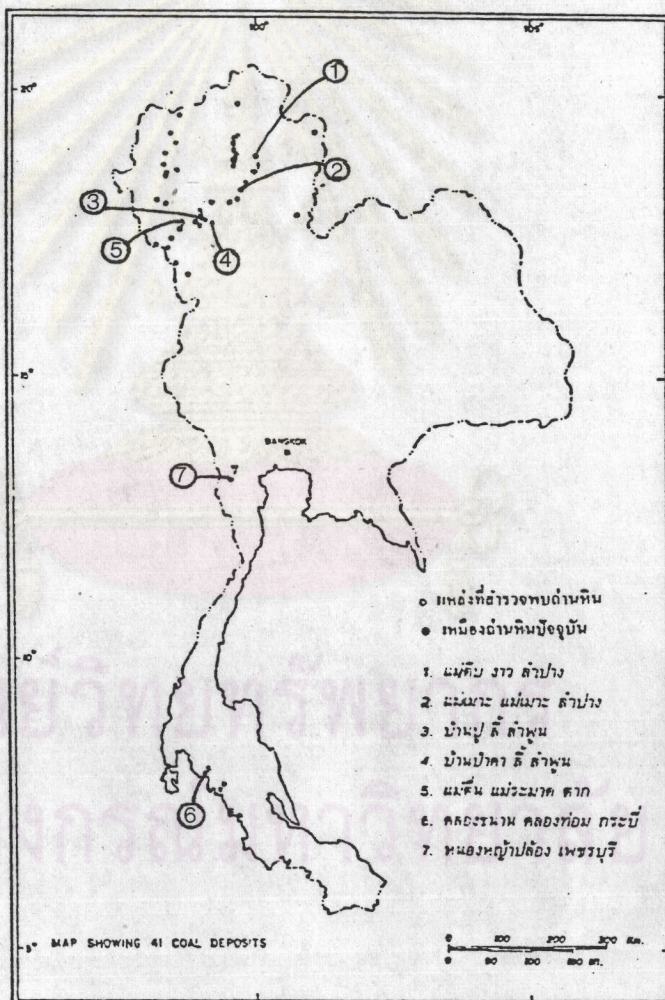
<sup>d</sup> Coals having 69 % or more fixed carbon on the dry, mineral-matter-free basis shall be classified according to fixed carbon, regardless of gross calorific value.

<sup>e</sup> 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.

ตารางที่ 2.1 แสดงการจำแนกชนิดถ่านหิน โดยลำดับตาม ASTM D 388 (5)

### 2.1.1 แหล่งถ่านหินในประเทศไทย (6)

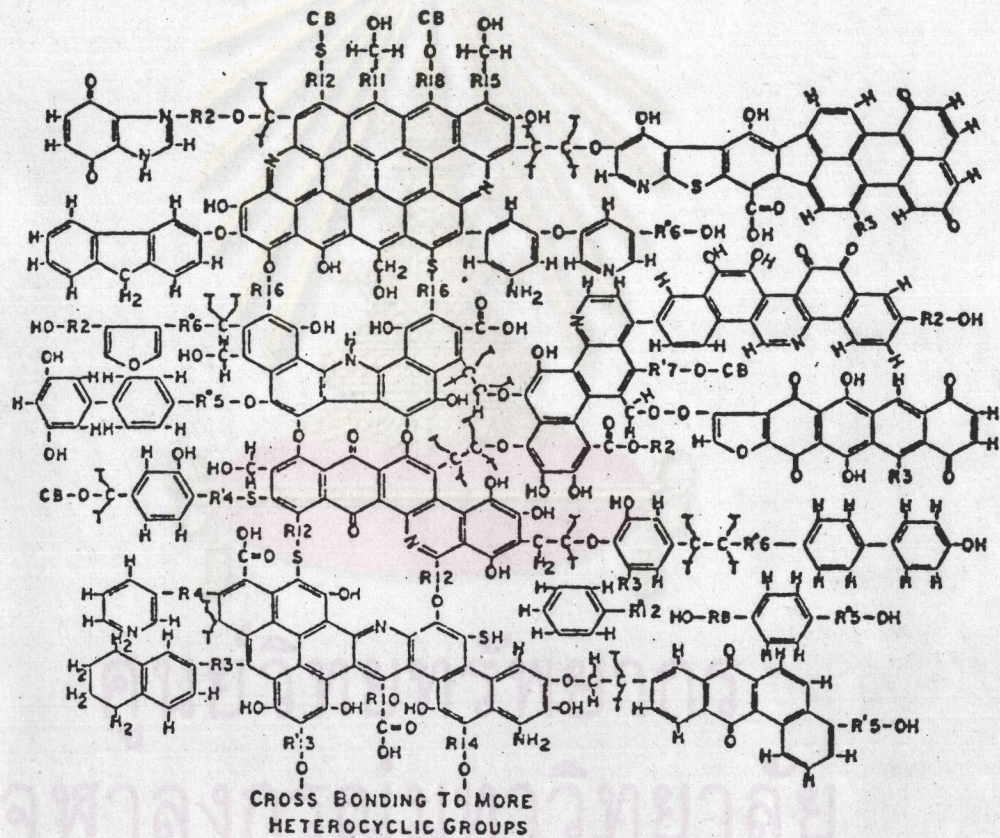
ถ่านหินภายในประเทศเกิดร่วมกับชั้นหินตะกอนที่มีอายุระหว่าง 1.8 ถึง 6.5 ล้านปีเป็นหินตะกอนของมหายุคซีโนโซนิคซึ่งตัวหินตะกอนเป็นยุคเทอร์เชียรี ชนิดของถ่านหินตั้งแต่ลึกในใต้จนถึงแอนทราไซต์กระจายอยู่ทั่วไปทุกภาค และในบริเวณภาคเหนือมีความหนาแน่นของแอ่งถ่านหินมากที่สุด. (ในรูป 2.1)



รูปที่ 2.1 แสดงบริเวณแหล่งถ่านหินในประเทศไทย (6)

2.1.2 โครงสร้างทางเคมีของถ่านหิน (7)

โครงสร้างโมเลกุลของถ่านหินนั้นยังไม่มีข้อมูลใดยืนยันได้แน่นอน โดยสันนิษฐานว่าโครงสร้างทางเคมีของถ่านหินประกอบด้วยกลุ่มโมเลกุลวงแหวนอะโรมาติก (aromatic) เป็นหลักเกาะกันอยู่เป็นกลุ่ม ๆ แต่ละกลุ่มเชื่อมกันอยู่ด้วยแขนของหมู่อะลิฟาติก (aliphatic) ลื่น ๆ เช่น หมู่ของเมทิลลีน (methylene) ภายในกลุ่มแต่ละกลุ่มยังมีวงแหวนที่มีอะตอมของธาตุออกซิเจน กำมะถันหรือไนโตรเจนประกอบอยู่กับคาร์บอน รวมทั้งกลุ่มที่ทำหน้าที่ความเป็นกรด-ด่าง อีเทอร์หรือหมู่อื่น ๆ (functional group) แทนที่ไฮโดรเจนในวงแหวนอีกด้วย ดังแสดงเป็นโมเลกุลสมมุติในรูปที่ 2.2



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

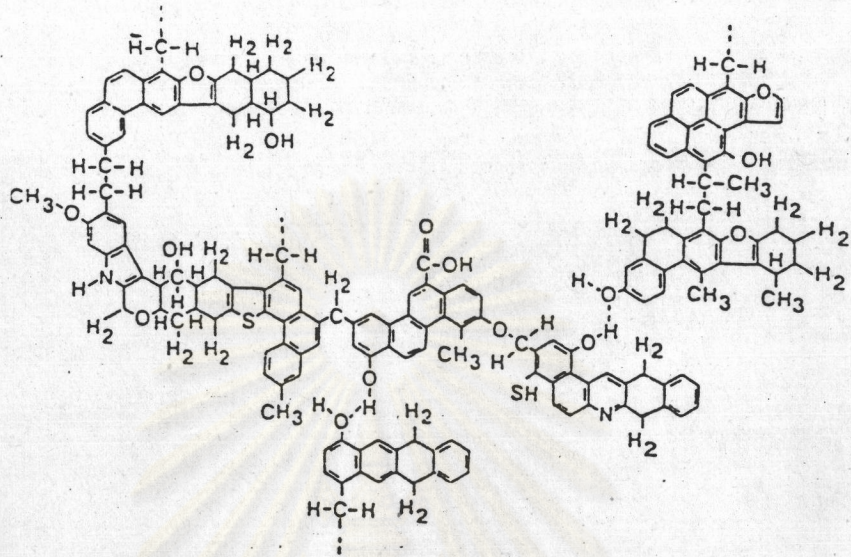
รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างโมเลกุลสมมุติของถ่านหิน (7)

## 2.2 การคาร์บอนไนซ์ของถ่านหิน (8)

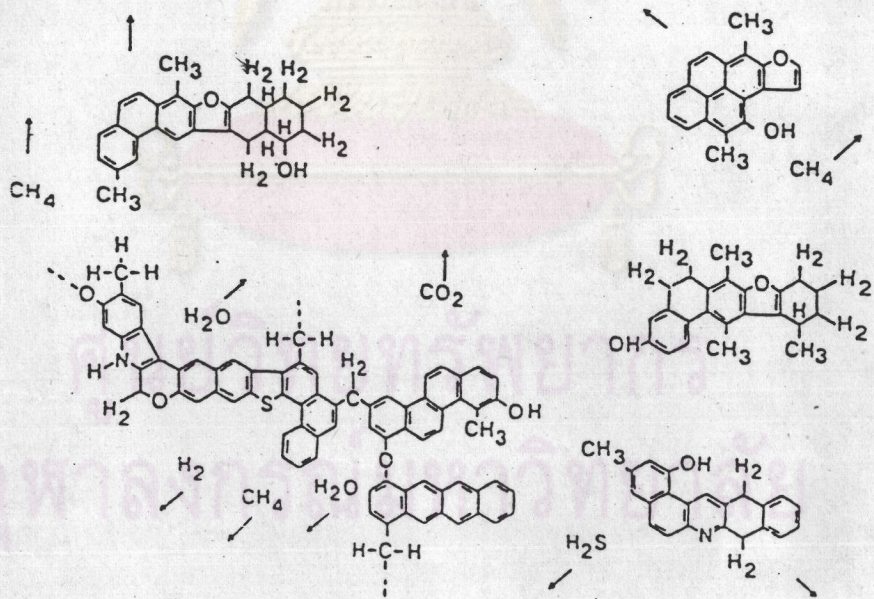
### 2.2.1 กระบวนการคาร์บอนไนซ์ (carbonization)

กระบวนการคาร์บอนไนซ์ เป็นการกลั่นสลายของสารอินทรีย์ โดยไม่สัมผัสกับอากาศ เพื่อเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนของสารอินทรีย์ ขณะเดียวกันก็ได้ผลิตภัณฑ์อื่นที่เป็นของเหลวและก๊าซออกมาด้วย โดยจะเกิดการหักออกตรงบริเวณที่มีพันธะที่อ่อนหรือหมู่ที่หลุดออกได้ง่าย ทำให้กลุ่มโมเลกุลวงแหวนแตกออกจากกันเป็นกลุ่ม ๆ จำนวนมาก ดังรูปที่ 2.3

โครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกหลักที่เหลือนกลายเป็นโครงสร้างของถ่านชาร์. ส่วนกลุ่มโครงสร้างโมเลกุลหรือหมู่ที่มีขนาดเล็กกว่า จะกลั่นสลายตัวออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง ได้แก่ น้ำ แอมโมเนีย น้ำมันทาร์ และก๊าซต่าง ๆ จำนวนปริมาณและคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ประเภทของถ่านหิน อัตราการให้ความร้อน ความดัน อุณหภูมิ เป็นต้น



Summary of coal structure information in a hypothetical coal molecule



Cracking of hypothetical coal molecule during thermal decomposition

รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะการแตกสลายของโมเลกุลถ่านหินด้วยความร้อน (9)

## 2.2.2 การแบ่งชนิดของการคาร์บอนไนซ์

การคาร์บอนไนซ์ถ่านหิน แบ่งออกได้เป็น 3 ระดับอุณหภูมิคือ

2.2.2.1 การคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำ (low-temperature carbonization) อุณหภูมิระหว่าง 450-700 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้ปริมาณถ่านชาร์และน้ำมันทาร์มาก

2.2.2.2 การคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิกลาง (medium-temperature carbonization) อุณหภูมิระหว่าง 700-900 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้ปริมาณถ่านชาร์และก๊าซมาก

2.2.2.3 การคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิสูง (high-temperature carbonization) อุณหภูมิระหว่าง 900-1050 องศาเซลเซียส เพื่อต้องการถ่านโค้กชนิดแข็งสำหรับใช้กับโรงงานถลุงโลหะและก๊าซ

## 2.2.3 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์มี 3 ประเภท คือ

2.2.3.1 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง เรียกว่า ถ่านชาร์ สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือผลิตสารเคมีอื่นได้อีก เช่น พวักแอคทีฟคาร์บอน (activated carbon) แนพทาลิน แอนทาซีนและสารประกอบไซยาโนเจน แต่โดยมากนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงไร้ควัน ทำให้มีผลเสียต่อสภาพแวดล้อมน้อยมาก

2.2.3.2 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว ได้แก่ น้ำและสารประกอบที่ละลายน้ำ อีกส่วนหนึ่งจะเป็นน้ำมันทาร์ องค์ประกอบของน้ำมันทาร์เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างส่วนมากเป็นพวกวงแหวนแนพทาลินเชื่อมด้วยหมู่ของเอทิลีน (ethylene) โมเลกุลของน้ำมันทาร์มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนตั้งแต่  $C_5 - C_{22}$  ประกอบเป็นโครงสร้างของสารเคมีต่าง ๆ อาจมีมากกว่า 200 ชนิด แบ่งออกได้ตามอุณหภูมิที่ใช้ในการกลั่นเป็น 5 พวก คือ

ก. พวักน้ำมันเบา (light oil) ช่วงอุณหภูมิ <200 องศาเซลเซียส ได้แก่ เบนซีน (benzene) เอทิลเบนซีน (ethyl benzene) ทูลูอิน (toluene) ไชลีน (xylene) เป็นต้น

ข. พวักน้ำมันช่วงกลาง (middle oil) ช่วงอุณหภูมิ 200-250 องศาเซลเซียส ได้แก่ ฟีนอล (phenol) ไพริดีน (pyridine)

ค. พวักน้ำมันช่วงหนัก (heavy oil) ช่วงอุณหภูมิ 250-300 องศาเซลเซียส ได้แก่ ไดเมทิลแนพทาลิน (dimethylnaphthalene)

ง. น้ำมันแอนทาซีน (anthracene) ช่วงอุณหภูมิ 300-350 องศาเซลเซียส ได้แก่ ฟลูออรีน (fluorene) ฟีนแอนทรีน (phenanthrene)

จ. พากพีช (pitch) มีอุณหภูมิมากกว่า 350 องศาเซลเซียส  
ได้แก่ น้ำมันหนักบางประเภท ไช (red wax)

2.2.3.3 ผลผลิตที่เป็นก๊าซ เป็นของผสมระหว่างก๊าซอินทรีย์และอนินทรีย์  
ก๊าซอินทรีย์ ได้แก่ ไฮโดรเจน ไนโตรเจน คาร์บอนมอนนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และ  
แอมโมเนีย ส่วนก๊าซอินทรีย์ ได้แก่ มีเทน อีเทน เอทิลีน เป็นต้น

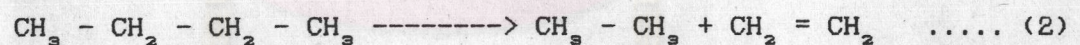
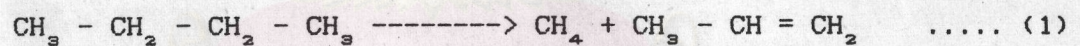
ผลผลิตในข้อ 2.2.3.2 และ 2.2.3.3 รวมเรียกว่าผลิตภัณฑ์  
ผลพลอยได้ โดยเฉพาะน้ำมันที่ปัจจุบันมีคุณค่าทางเศรษฐกิจมาก สามารถนำไปใช้ผลิตน้ำมัน  
แทนการผลิตจากการกลั่นจากปิโตรเลียมเหลวได้หรือใช้ในการผลิตสารเคมีอื่นได้

2.2.4 กลไกปฏิกิริยาการแตกตัวทางเคมีด้วยความร้อน (thermal cracking) (10)

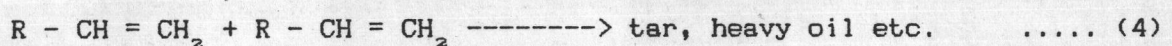
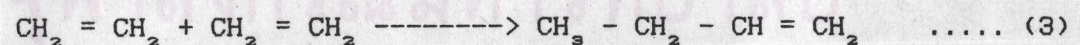
ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นของถ่านหินที่มีมวลโมเลกุลมากมีแตกตัวเมื่อได้รับความร้อน  
ไปเป็นสารที่มีมวลโมเลกุลน้อย เมื่อมีอุณหภูมิมากกว่า 300 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการแตก  
ระหว่างพันธะคาร์บอน

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการให้ความร้อนกับถ่านหินแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ

2.2.4.1 การแตกสลายของโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่เป็นโมเลกุลมีขนาดเล็กลง  
ดังสมการที่ (1) และ (2)



2.2.4.2 ปฏิกิริยาการรวมตัวจากสารผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กจากข้อ 2.2.4.1  
รวมตัวกันเอง ดังสมการที่ (3) และ (4)

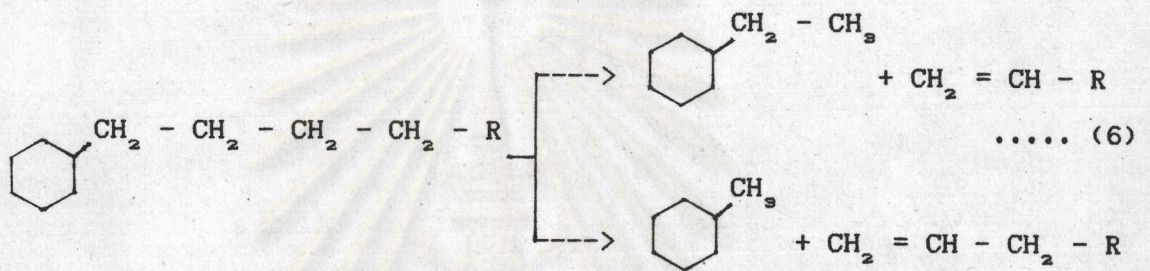
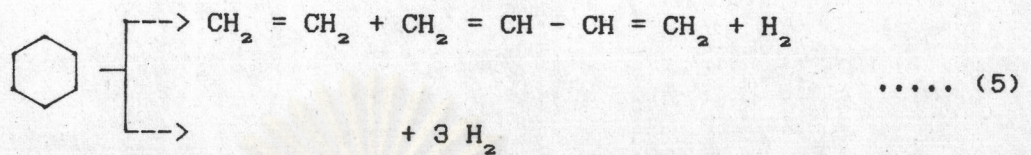


กลไกปฏิกิริยาเคมีของการรวมตัว จะผ่านปฏิกิริยาการแตกตัว  
เป็นอนุมูลอิสระก่อน

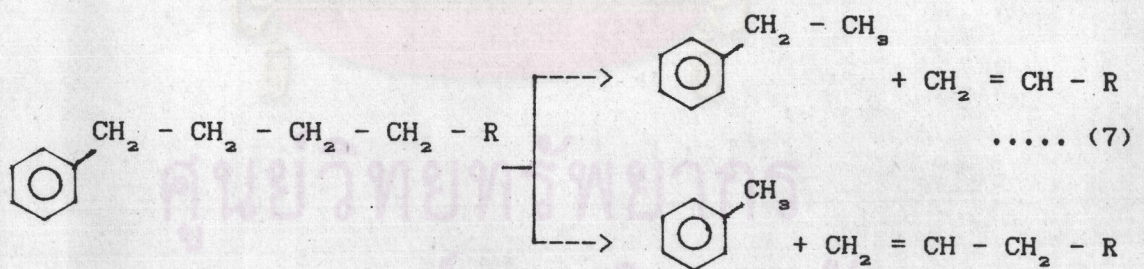
นอกจากนี้ยังมีปฏิกิริยาข้างเคียง เช่น การเปลี่ยนแปลง



โครงสร้างไปเป็นอย่างอื่น เช่น ไซโคลเฮกเซน เปลี่ยนไปเป็นเบนซีนหรือโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก  
ดังสมการที่ (5) และ (6)

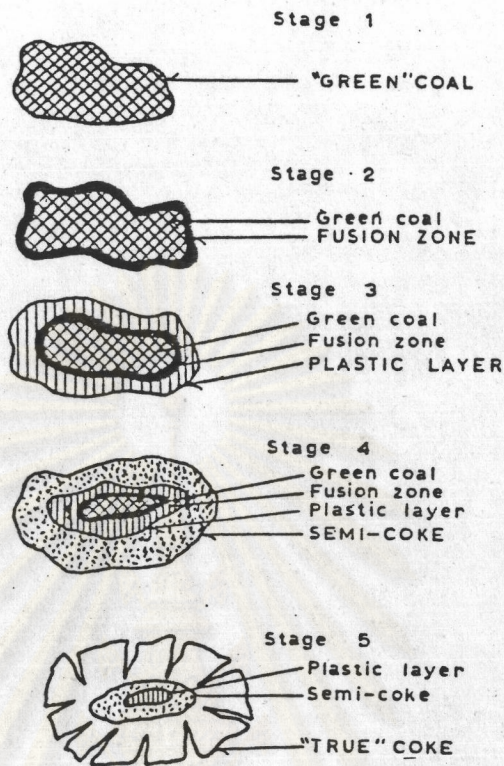


พวกวงแหวนไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่จะแตกตัวเป็นสารวงแหวน  
ไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก และโมเลกุลที่มีขนาดเล็กได้ ที่อุณหภูมิ 350-500 องศาเซลเซียส ดัง  
สมการที่ (7)



2.2.5 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของถ่านหินในระหว่างการคาร์บอไนซ์

การเปลี่ยนรูปร่างของถ่านหินในระหว่างการคาร์บอไนซ์จนกลายเป็นถ่านชาร์  
เริ่มแรกถ่านหินได้รับความร้อนแล้ว จะมีลักษณะอ่อนตัวหรือมีคุณสมบัติคล้ายพลาสติกเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ  
ให้สูงขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงอุณหภูมิหนึ่งก็กลับแข็งตัวอีกครั้งหนึ่งกลายเป็นถ่านชาร์และที่อุณหภูมิ 1,000  
องศาเซลเซียสจะเปลี่ยนแปลงเป็นถ่านโค้ก ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงขั้นตอนการเกิดถ่านโค้ก (11)

- ก. ครั้งแรกถ่านหินยังแข็งตัว ขณะที่เริ่มให้ความร้อน
- ข. เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนถึง 350-400 องศาเซลเซียส จะเกิดการหลอมตัวหรือการอ่อนตัวที่ผิวนอกก่อน เป็นชั้น ๆ รอบ ๆ นอก
- ค. ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 400-500 องศาเซลเซียส ชั้นของการอ่อนตัวจะผ่านเข้ามาถึงตรงกลางทำให้มีลักษณะการรวมตัวกันจะมีคุณสมบัติคล้ายพลาสติก ก๊าซไม่สามารถซึมผ่านทะลุเข้าไปได้ ก๊าซที่อยู่ภายในร้อนขึ้นซึ่งจะขยายตัวเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้เกิดความดันภายในสูงกว่าภายนอก ถ่านหินก็จะเกิดการพองตัวขึ้น ขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอีกชั้นของพลาสติกจะเริ่มมีการแตกตัว ก๊าซที่อยู่ภายในจะผ่านทะลุออกมาสู่ภายนอกทำให้เกิดโพรงขึ้น ถ่านหินเดิมจะมีการเปลี่ยนแปลงสภาพเป็นของแข็งอีกครั้งหนึ่ง
- ง. ที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส มีการแตกโครงสร้างออกมาได้พวกก๊าซต่าง ๆ ออกมามากขึ้น เช่น ก๊าซไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์และมีเทน
- จ. ที่อุณหภูมิมากกว่า 700 องศาเซลเซียส โครงสร้างคาร์บอนของธาตุคาร์บอนจะมีการจัดเรียงตัวแน่นเป็นชั้น ๆ ทำให้มีระเบียบมากขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ จึงมี

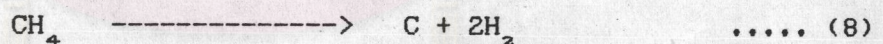
ลักษณะการแข็งตัวมากขึ้น ในขณะที่เดียวกันจะเกิดโพรงขนาดใหญ่มากขึ้นที่ผิว แต่จำนวนโพรงไม่เพิ่มขึ้นอีก เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 1,000 องศาเซลเซียสถ่านชาร์จะกลายเป็นถ่านโค้ก

### 2.2.6 การเปลี่ยนแปลงทางเคมี (12)

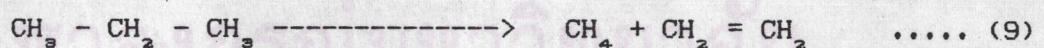
ถ่านหินเมื่อได้รับความร้อนในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี กล่าวคือ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส สารระเหยในถ่านหิน (volatile) จะถูกสลายเป็นก๊าซ ซึ่งประกอบด้วยไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์และมีเทน แต่บางส่วนของก๊าซถูกดูดซึม (absorb) ไว้ที่ผิวของถ่านหิน ในช่วงอุณหภูมิ 200-400 องศาเซลเซียส ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะระเหยออกมา ปริมาณและองค์ประกอบของก๊าซที่ได้ขึ้นอยู่กับอายุและชนิดของถ่านหิน โดยไม่ขึ้นกับปริมาณของสารระเหยที่มีอยู่ในถ่านหิน เช่น ลิกไนต์จะถูกสลายตัวได้รวดเร็วกว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น

ในช่วงอุณหภูมิ 350-450 องศาเซลเซียส ปริมาณของก๊าซจะเพิ่มขึ้นและจะเริ่มมีสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน เช่น พาราฟิน (paraffin) โอลิฟิน (olefin) เกิดขึ้นพร้อมกับมีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นแต่ยังมีปริมาณน้อย และจะเพิ่มปริมาณมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ จนมีปริมาณมากกว่าก๊าซชนิดอื่น เนื่องจากสารไฮโดรคาร์บอนตัวอื่นจะสลายตัวให้ก๊าซไฮโดรเจนเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

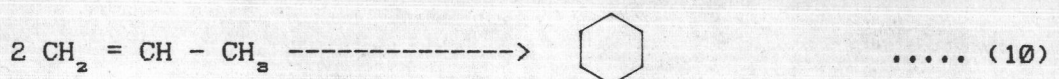
ที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ระเหยได้จากการคาร์บอนไนซ์จะถูกสลายตัว เช่น ก๊าซมีเทนถูกสลายเป็นก๊าซไฮโดรเจนดังสมการที่ (8)



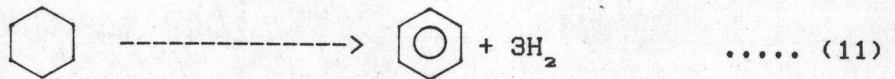
หรือ โพรเพนสลายตัวให้ก๊าซมีเทนและเอทิลีน ตามสมการที่ (9)



นอกจากนี้ ที่อุณหภูมิสูงกว่า 700 องศาเซลเซียส สารประกอบพวกโอลิฟิน จะเกิดปฏิกิริยาให้สารประกอบพวกอะลิฟาติก (aliphatic) ดังสมการที่ (10)



และอาจเกิดปฏิกิริยากำจัดไฮโดรเจน (dehydrogenation) ได้สารประกอบอะโรมาติก คือเบนซีนและก๊าซไฮโดรเจน ดังสมการที่ (11)



พร้อมทั้งอาจเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง (side reaction) ได้ ไซลีน โทลูอิน และสารประกอบพวกฟีนอลอาจเกิดการรวมตัวกับไฮโดรเจนได้เบนซีนและน้ำ ดังสมการที่ (12)



ปฏิกิริยาการสลายตัวของเบนซีน แนพทีนและฟีนอล จะเกิดในช่วงอุณหภูมิ 700 และ 800 องศาเซลเซียส สารประกอบอะโรมาติกที่มีมวลโมเลกุลสูง (high aromatic compound) เช่น แนพทาลีน (naphthalene) แอนทราซีน (anthracene) จะพบในน้ำมันคาร์ได้น้อยในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 700 องศาเซลเซียสการเพิ่มอุณหภูมิและช่วงเวลาในการคาร์บอนไนซ์ จะทำให้ผลิตภัณฑ์เริ่มแรก (primary product) ที่ได้ในช่วงอุณหภูมิต่ำเกิดปฏิกิริยาทุติยภูมิต่อเป็นผลิตภัณฑ์พวกเบนซีน แนพทาลีน พร้อมทั้งก๊าซมีเทน ไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ นอกจากนี้สารประกอบที่มีโครงสร้างซับซ้อนที่เกิดขึ้นอาจเกาะอยู่ที่ผิวของถ่านชาร์

### 2.3 ปัจจัยของการคาร์บอนไนซ์ในฟลูอิดไธด์เบด (4, 11)

การเกิดปฏิกิริยาการคาร์บอนไนซ์ของถ่านหินเป็นถ่านชาร์และผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ คุณสมบัติและปริมาณของผลิตภัณฑ์ จะขึ้นกับปัจจัยหลายประการดังกล่าวคือ

#### 2.3.1 ประเภทของถ่านหิน

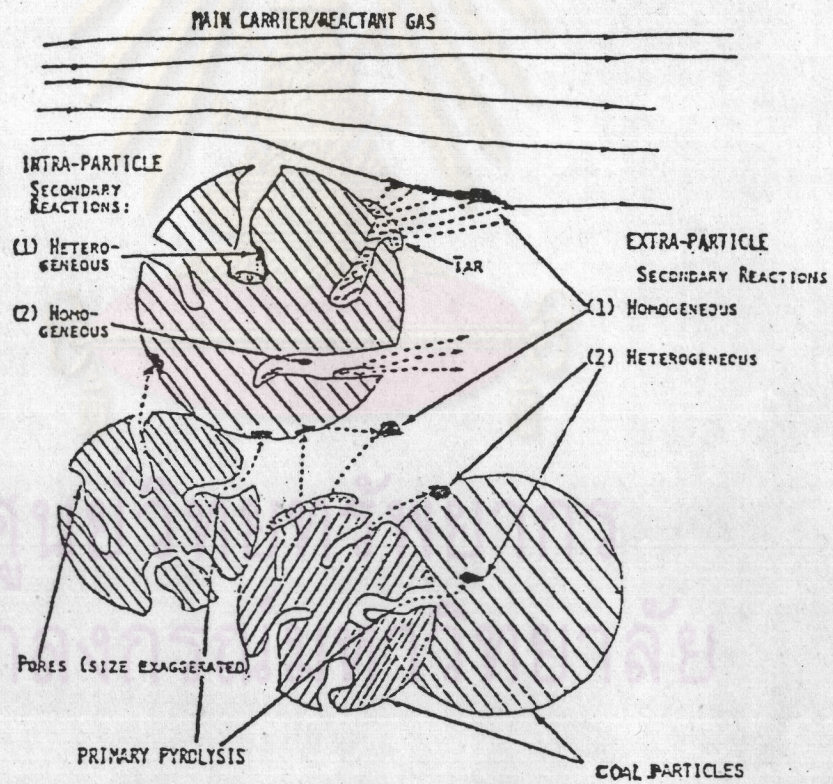
ถ่านหินที่มีค่าคีตต่ำลงจะมีคุณสมบัติของน้ำมันคาร์เป็นพวกอะโรมาติกและทาร์-กรดมากขึ้นและกลุ่มของพวกไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัวลดลง ส่วนการคาร์บอนไนซ์ของถ่านหินที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน ตั้งแต่ลิกไนต์จนถึงแอนทราไซต์ พบว่า ถ่านบิทูมินัสและซับบิทูมินัสเหมาะที่จะนำมาคาร์บอนไนซ์เพื่อให้ได้ถ่านชาร์และปริมาณน้ำมันคาร์มากกว่าถ่านหินชนิดอื่น

#### 2.3.2 อุณหภูมิ

อุณหภูมิจะมีผลต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์มากที่สุด คือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ปริมาณการเกิดถ่านชาร์จะลดลง ส่วนน้ำมันคาร์และก๊าซที่ได้เพิ่มมากขึ้นและคุณสมบัติของน้ำมันคาร์จะมีกลุ่มโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปด้วย เพราะการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานเพื่อทำลายพันธะภายในโครงสร้างของถ่านหิน

2.3.3 อัตราการให้ความร้อน (13)

อัตราการให้ความร้อนจะมีผลต่อคุณสมบัติและปริมาณของน้ำมันทาร์ การเพิ่มอัตราความร้อนอย่างรวดเร็วมีผลทำให้ได้ปริมาณน้ำมันทาร์มาก (ตารางที่ 2.2) เพราะโมเลกุลของน้ำมันทาร์ที่อยู่ในสภาวะก๊าซ จะมีช่วงเวลาที่ได้รับความร้อนนั้นสั้นมาก ผลิตภัณฑ์ที่ออกมาจึงเกิดปฏิกิริยาน้อยเนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นใหญ่จะเกิดที่อุณหภูมิสุดท้าย ซึ่งไม่ขึ้นกับปฏิกิริยาก่อนหน้านั้น กล่าวคือจะไม่เกิดการปฏิกิริยาทุติยภูมิ (secondary reaction) ต่อทันที (แสดงไว้ในรูปที่ 2.5) ทำให้ไม่ต้องสูญเสียปริมาณและคุณสมบัติของน้ำมันทาร์



รูปที่ 2.5 แสดงการเกิดปฏิกิริยาปฐมภูมิและทุติยภูมิของถ่านหินจากการคาร์บอไนซ์ (13)

ตารางที่ 2.2 แสดงอิทธิพลของอัตราการเพิ่มอุณหภูมิต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ (4)

Product	Yields, wt % of Coal		
	Rapid Pyrolysis	Fischer Assay (slow)	Ratio of Rapid to Slow
Gas	7.25	8.44	0.86
Pyrolysis water	4.10	4.60	0.89
Tar and light oils (boiling as follows):	26.40	14.82	1.78
Fraction I, up to 140°C at 1 mm Hg	6.50	8.02	0.81
Fraction II, 140–230°C at 1 mm Hg	2.87	2.71	1.06
Residue at 230°C and 1 mm Hg	17.05	4.11	4.15
Coke	62.25	72.14	0.86

#### 2.3.4 ความดัน

ความดันมีผลต่อการเพิ่มปริมาณผลิตภัณฑ์คือที่ความดันต่ำจะ ได้ปริมาณน้ำมันทาร์มากกว่าที่ความดันสูง แต่ปริมาณของถ่านชาร์จะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันสูงขึ้น ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงอิทธิพลของความดันต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ (4)

Product	Yield, wt % of Coal (as-received)					
	Lignite			Bituminous		
	Vacuum <sup>a</sup>	1 atm	69 atm	Vacuum <sup>a</sup>	1 atm	69 atm
CO	6.1	7.1	9.0	2.0	2.4	2.5
CO <sub>2</sub>	7.6	8.4	10.6	1.4	1.2	1.7
H <sub>2</sub> O <sup>b</sup>	17.7	16.5	13.4	6.8	7.8	9.5
H <sub>2</sub>	— <sup>c</sup>	0.50	— <sup>c</sup>	0.75	1.0	— <sup>c</sup>
CH <sub>4</sub>	0.94	1.3	2.5	1.6	2.5	3.2
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.43	0.56	0.55	0.45	0.83	0.46
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.21	0.18	0.17	0.44	0.51	0.89
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> +C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.46	0.37	0.38	0.71	1.3	0.71
Other HC gases	0.60	[0.47]	0.21	0.98	1.3	1.6
Light HC liquids	0.81		1.1	1.6	2.4	2.0
Tar	6.9	5.4	2.8	31.9	23.0	12
Char	55.2	58.7	59.0	48.5	53.0	62.4
	97.0	99.5	99.7	97.1	97.2	97.0
Error (loss)	3.0	0.5	0.3	2.9	2.8	3.0

<sup>a</sup>  $6.6 \times 10^{-3}$  atm He.

<sup>b</sup> Includes coal moisture (lignite, 6.8%; bituminous, 1.4%); may include some H<sub>2</sub>S.

<sup>c</sup> Not measured.

### 2.3.5 ขนาดของอนุภาค

ขนาดของอนุภาคจะไม่มีผลต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์ไนริทอร์ทแบบพิชเชอร์ แต่ในกระบวนการฟลูอิดไอเซชัน อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าจะให้ปริมาณน้ำมันคาร์ได้มากกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ แสดงไว้ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงอิทธิพลของช่วงขนาดอนุภาคต่าง ๆ ต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ (4)

Product	Yield, wt % of Coal (as-received)			
	53-88 $\mu\text{m}$ (avg., 74 $\mu\text{m}$ )	<300 $\mu\text{m}$ <sup>a</sup>	300-830 $\mu\text{m}$	830-990 $\mu\text{m}$
CO	2.4	2.7	3.2	3.0
CO <sub>2</sub>	1.2	1.1	1.2	1.3
H <sub>2</sub> O <sup>b</sup>	7.8	5.4	5.3	7.2
H <sub>2</sub>	1.0	— <sup>c</sup>	— <sup>c</sup>	0.99
CH <sub>4</sub>	2.5	2.9	3.0	3.2
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.83	1.0	1.1	1.3
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.51	0.50	0.55	0.63
C <sub>3</sub> 's	1.3	0.92	0.84	1.1
Other HC gases	1.3	1.4	1.1	1.2
Light HC liquids	2.4	2.5	2.6	2.7
Tar	23.0	24.2	21.3	18.4
Char	53.0	57.1	56.5	55.8
	97.2	99.7	96.7	96.8
Error (loss)	2.8	0.3	3.3	3.2
Number of runs	20	1	2	3

<sup>a</sup> 830-990  $\mu\text{m}$  sample ground to pass 297- $\mu\text{m}$  sieve.

<sup>b</sup> Includes coal moisture (1.4%); may include some H<sub>2</sub>S.

<sup>c</sup> Not measured.

### 2.3.6 เวลาที่อนุภาคอยู่ในเบด

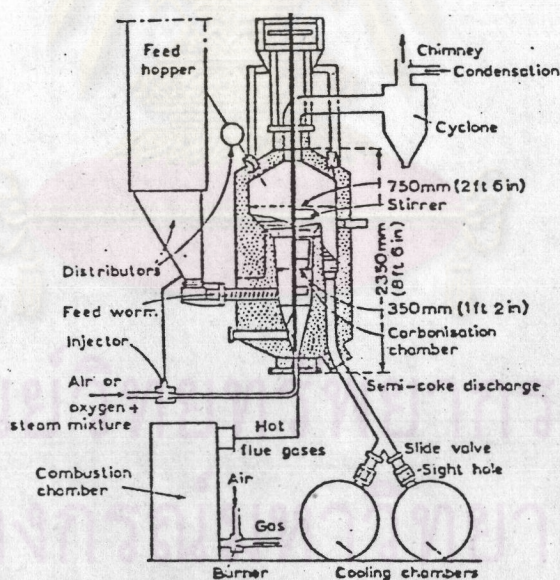
ช่วงเวลาที่อนุภาคอยู่ในเบดนานจะเกิดการระเหยและแตกตัวของโครงสร้างถ่านหินทำให้น้ำหนักของเม็ดอนุภาคถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอไนซ์มีน้ำหนักเบากว่าถ่านหินที่บ้อนเข้ามา และมีอนุภาคบางส่วนแตกเล็กลงเนื่องจากการชนกันระหว่างอนุภาค ทำให้มีอนุภาคหลุดออกจากเบดมากขึ้นตามเวลา

## 2.4 ผลงานการวิจัย

### 2.4.1 ผลงานวิจัยภายนอกประเทศ

แนวความคิดและการพัฒนาการใช้เทคนิคด้านฟลูอิดเซชัน ได้เจริญก้าวหน้าขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากสงครามโลกครั้งที่ 2 ในขณะที่เศรษฐกิจตกต่ำและเกิดวิกฤตการณ์ทางด้านพลังงานในประเทศต่าง ๆ ได้หันมาสนใจศึกษาค้นคว้าการนำพลังงานมาใช้้อย่างประหยัดและให้ผลคุ้มค่า

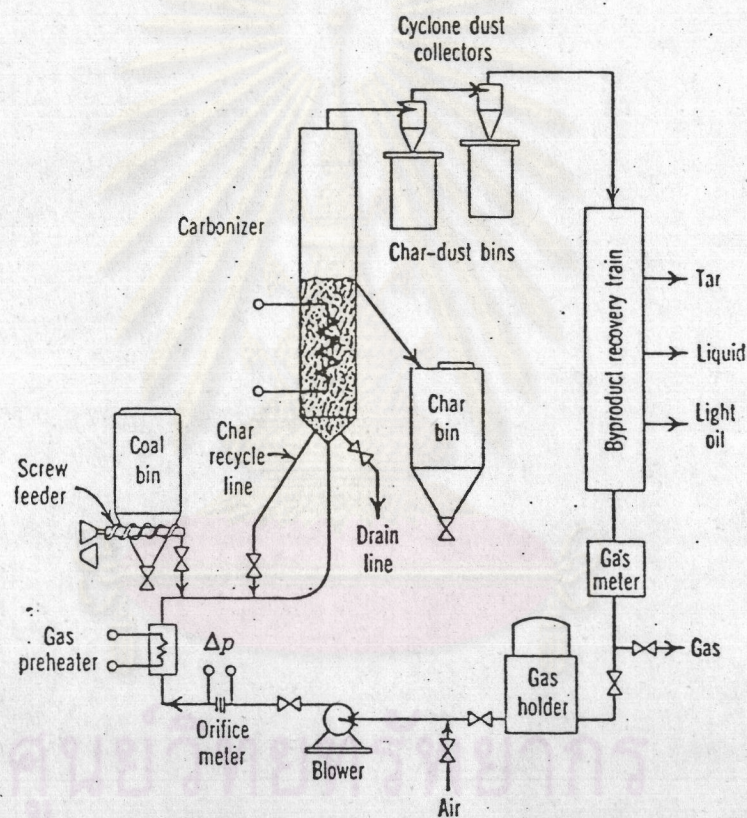
สถาบัน Cerchar Laboratories (14) ในปี ค.ศ. 1949 ได้ทำการทดลองคาร์บอนไนซ์ในฟลูอิดเบด ซึ่งมีอัตราการบ่อนถ่านหิน 100 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยใช้ก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมกับอากาศเป็นก๊าซตัวพา ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน และมีอุณหภูมิภายในเบดระหว่าง 500 ถึง 600 องศาเซลเซียส ผลการทดลองคือได้ปริมาณถ่านชาร์ร้อยละ 71 ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (แสดงในรูปที่ 2.6)



รูปที่ 2.6 แสดงการคาร์บอนไนซ์ของถ่านหินในฟลูอิดเบดของสถาบัน Cerchar (14)



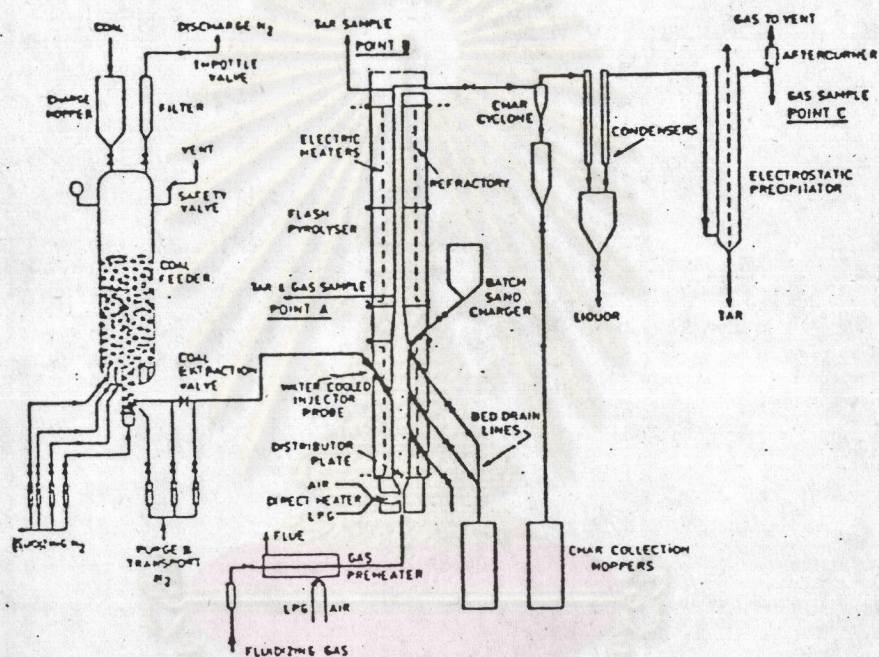
Bowling (15) ในปี ค.ศ.1961 ได้ทำการคาร์บอนไนซ์ถ่านหินจากแหล่ง Wallarah Seam ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเตาคาร์บอนไนซ์แบบฟลูอิดไอซ์เบด 15 เซนติเมตร ในช่วงอุณหภูมิ 460-600 องศาเซลเซียสและใช้ก๊าซที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ผสมกับอากาศมาหมุนเวียน แสดงในรูป 2.7 พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อปริมาณและคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ ซึ่งค่าคาร์บอนคงตัวที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นร้อยละ 88.7 (ไม่รวมความชื้นและเถ้า) และน้ำมันทาร์เป็นร้อยละ 8.0 ของผลิตภัณฑ์



รูปที่ 2.7 แสดงแผนภาพของการคาร์บอนไนซ์ถ่านหินแบบฟลูอิดไอซ์เบดของ Bowling (15)

ต่อมาในระยะหลังการศึกษาด้านคาร์บอนไนซ์จะอธิบายออกมาในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ (16) การถ่ายเทมวลสารระหว่างถ่านหินไปเป็นผลิตภัณฑ์ (17) การศึกษาถึงคุณลักษณะโครงสร้างของถ่านชาร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน (18) การศึกษาด้านคุณสมบัติและองค์ประกอบของน้ำมันทาร์และก๊าซที่ได้โดยใช้วิธี GC-MS (19) ในระยะหลังได้มีการใช้เทคนิคต่าง ๆ เพิ่มขึ้น โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันทาร์ให้มากขึ้น คือใช้วิธีการทำปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน (hydrogenation) ในฟลูอิดไอซ์เบดพร้อมกับการเพิ่มอัตราความร้อนสูงอย่างรวดเร็ว

Ralph (20) ปี ค.ศ. 1980 ได้ศึกษาการคาร์บอนไนซ์ของถ่านหินจากแหล่ง Loy Yang และ Millmerran ด้วยเทคนิคทางฟลูอิดไอเซน (แสดงในรูปที่ 2.8) โดยมีอัตราการป้อนถ่านหิน 20 กิโลกรัมต่อชั่วโมงที่ขนาดของอนุภาคถ่านหิน 0.07-0.1 มิลลิเมตร ที่สภาวะความดันบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 600-700 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.5



รูปที่ 2.8 แสดงกระบวนการคาร์บอนไนซ์แบบฟลูอิดไอเซนเบดของ Ralph (20)

ตารางที่ 2.5 แสดงปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแหล่ง Loy Yang และ Millmerran (20)

Pyrolysis Temperature (°C)	Products Yield (%W/W of Coal)			
	Char	Tar	Gas	Total
606 (a)	59.1	24.1	13.7	97.0
697 (a)	54.9	21.2	21.2	97.3
602 (b)	55.6	31.5	11.9	99.0
708 (b)	51.9	27.0	19.5	98.4

(a) ถ่านหินจากแหล่ง Loy Yang

(b) ถ่านหินจากแหล่ง Millmerran

#### 2.4.2 ผลงานวิจัยภายในประเทศ

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการพัฒนาถ่านหินเพื่อมาใช้เป็นเชื้อเพลิง เริ่มขึ้นหลังจากเกิดวิกฤตการณ์น้ำมันทั่วโลก จึงได้มีผู้วิจัยและค้นคว้าที่จะนำถ่านหินมาใช้เป็นพลังงานทดแทนน้ำมันส่วนมากมุ่งศึกษาถึงปริมาณและคุณสมบัติถ่านชาร์ในรีทอร์ทมาตรฐานแบบพิซเซอร์

พจนานุกรม (21) ในปี ค.ศ. 1977 ได้ทำการคาร์บอนไนซ์ถ่านหิน 3 แหล่ง คือ แหล่งลี่ จังหวัดลำพูน แหล่งแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และบางปุดำ จังหวัดกระบี่ โดยใช้ถ่านหินหนัก 200 กรัม อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 7-8 องศาเซลเซียสต่อนาที ขนาดถ่านหินเล็กกว่า 4.76 มิลลิเมตร ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 400-900 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ที่ได้นำมาศึกษาคุณภาพและวิเคราะห์ ทุกระดับ 100 องศาเซลเซียส พบว่า ถ่านลิกไนต์จากแหล่งลี่สามารถผลิตถ่านชาร์ที่มีคุณภาพดีกว่าแหล่งแม่เมาะและบางปุดำ คือ มีค่าคาร์บอนคงตัวถึงร้อยละ 94.5 (ไม่รวมความชื้นและเถ้า) ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และได้ปริมาณน้ำมันทาร์สูงสุด 7.1 มิลลิลิตรที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

อนัญญา พจนารถ (22) ในปี ค.ศ. 1985 ได้ศึกษาการคาร์บอนไนซ์จากแหล่งแม่ตึบ จังหวัดลำปาง ในระบบรีทอร์ทแบบพิซเซอร์ แยกขนาดถ่านหินออกเป็น 4 ขนาด คือ 2.0-7.0, 1.0-2.0, 0.5-1.0 และ 0.25-0.50 มิลลิเมตร ทำการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 300-1,000 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีทุกระดับ 100

หอสมุดกลาง สถาบันวิจัยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

องศาเซลเซียส เพื่อหาสภาวะและขนาดของถ่านหินที่เหมาะสมจากการคาร์บอนไนซ์เป็นปริมาณและคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์แล้วนำมาคาร์บอนไนซ์ในรีทอร์ทขนาดห้องปฏิบัติการ เพื่อผลิตถ่านอัดก้อนไว้คว้นโดยใช้ตัวประสานต่าง ๆ กัน ได้แก่ แป้งเปียกหรือแป้งมันสำปะหลังและแบลคลิกเคอร์ จากผลการคาร์บอนไนซ์ในรีทอร์ทแบบพิกเซอร์ พบว่า ช่วงขนาด 0.5-7.0 มิลลิเมตรคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 600 และ 700 องศาเซลเซียสเหมาะสม พบว่า มีค่าคาร์บอนคงตัวเป็นร้อยละ 87.64 และ 95.71 และให้ค่าความร้อน 8,283 และ 8,505 แคลอรีต่อกรัม (ไม่รวมความชื้นและเถ้า) ตามลำดับ

ประโยชน์ ศรีสุภานต์ (23) ในปี ค.ศ. 1985 ได้ทำการคาร์บอนไนซ์ของถ่านหินจากแหล่งแม่เมาะ ลี้และกระบี่ ในรีทอร์ทแบบพิกเซอร์ที่อุณหภูมิ 400-900 องศาเซลเซียส ขนาดของอนุภาค 0.5-1.0, 1.0-2.0 และ มากกว่า 2.0 มิลลิเมตรที่ความดันบรรยากาศ พบว่า ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 0.5-1.0 มิลลิเมตร มีปริมาณผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ในตารางที่ 2.6 และมีค่าคาร์บอนคงตัวจากแหล่งต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.6 แสดงค่าผลิตภัณฑ์จากการคาร์บอนไนซ์ถ่านหินจากแหล่งต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 0.5-1.0 มิลลิเมตร (23)

ผลิตภัณฑ์ ถ่านหิน 100 กรัม (air - dried basis)	แหล่งถ่านหิน		
	แม่เมาะ	ลี้	กระบี่
ถ่านชาร์ (กรัม)	50.5	51.0	53.5
น้ำมันทาร์ (ลบ.ซม.)	5.0	11.0	2.5
ของเหลว (ลบ.ซม.)	32.0	27.0	29.0
ก๊าซ (ลบ.ซม.)	14,000	6,600	12,000

ตารางที่ 2.7 แสดงค่าคาร์บอนคงตัวของถ่านชาร์ที่ได้การคาร์บอนไนซ์ของถ่านหินจากแหล่งต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (ไม่รวมความชื้นและเถ้า) (23)

ขนาดของอนุภาค (มิลลิเมตร)	ค่าคาร์บอนคงตัวจากแหล่งต่าง ๆ		
	แม่เมาะ	ลี้	กระบี่
0.5-1.0	86.58	91.05	87.85
1.0-2.0	91.82	*	81.83
> 2.0	94.93	*	83.02

\* ไม่มีผลการทดลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2.5 ข้อดีและข้อเสียของการใช้เทคนิคฟลูอิดเซชัน (24,25)

ข้อเปรียบเทียบระหว่างข้อดีและข้อเสียของการใช้เทคนิคทางฟลูอิดเซชัน กับเทคนิคอื่น ๆ พอสรุปได้ ดังนี้

### 2.5.1 ข้อดี

ก. จากคุณสมบัติที่เม็ดของแข็ง มีการเคลื่อนที่คล้ายกับของไหล ทำให้สามารถควบคุมระบบได้ง่าย และสามารถควบคุมได้อย่างต่อเนื่อง (continuous)

ข. เม็ดของแข็งมีการผสมกันอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ ทำให้อนุภาคนั้นภายในเบตมีค่าคงที่เท่ากันทุกจุด

ค. เนื่องจากมีการผสมของเม็ดของแข็งอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ ทำให้ระบบนี้เหมาะสมในกรณีที่มีการดูดหรือคายความร้อนปริมาณมาก ๆ ได้

ง. อัตราการถ่ายเทมวลสารและพลังงานสูง

### 2.5.2 ข้อเสีย

ก. เกิดการขัดสีระหว่างของแข็งและภาชนะ ทำให้เกิดการสึกกร่อน เม็ดของแข็งมีขนาดเล็กลง

ข. การทำงานของระบบให้ได้ผล มีข้อจำกัด ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวกระจายของไหล ชนิดและรูปร่างของเบต อัตราความเร็วของของไหลที่ใช้ ขนาดและชนิดของเม็ดของแข็ง

ค. การทำงานของระบบมีการรั่วซึมของก๊าซที่เป็นตัวกลางออกจากเบต ทำให้ต้องเพิ่มก๊าซเข้าไปอีกจำนวนหนึ่ง

ง. การใช้ก๊าซเป็นตัวกลาง ทำให้ต้องเปลืองพลังงานในการเพิ่มอนุภาคนั้นกับก๊าซนั้น ทำให้ต้นทุนสูง

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย