

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ถ่านหินและกำเนิดของถ่านหิน

ถ่านหิน เป็นเชื้อเพลิงแข็งธรรมชาติประกอบด้วยสารอินทรีย์หลายชนิด เกิดจากการ  
ผุพังและการสะสมตัวของซากพืชเป็นเวลานาน โดยมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและทางกายภาพ  
ซึ่งปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงนี้ ได้แก่ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน, ปฏิกิริยารีดักชัน,  
ปฏิกิริยาย่อยสลาย และปฏิกิริยารวมตัว เป็นต้น ปฏิกิริยาเหล่านี้เกิดจากจุลินทรีย์ เช่น  
เชื้อรา และแบคทีเรีย นอกจากนี้สภาวะแวดล้อมทางธรณี เช่น ความร้อน, ความดัน, การยุบตัว  
รวมทั้งระยะเวลาที่ทับถม จะทำให้ถ่านหินมีลักษณะและคุณภาพต่าง ๆ กันออกไป

2.1.1 ถ่านหิน จำแนกตามลักษณะของการสะสมตัวได้เป็น 2 ชนิด

ก. ถ่านหินฮิวมิก (Humic Coals)

เป็นถ่านหินที่เกิดจากการสะสมตัวของซากพืชตรงบริเวณเดิมที่พืชเคย  
เจริญเติบโตมาก่อน สารอินทรีย์ในซากพืชเกิดการสลายตัว และรวมตัวกันใหม่ เรียกว่า พีท  
(peat) ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปเป็นถ่านหินที่มีคุณภาพดีขึ้น ถ่านหินฮิวมิกมีลักษณะเป็นเงาวาว  
สีน้ำตาลถึงดำ สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าว่ามีการเปลี่ยนแปลงมาจากเนื้อเยื่อของพืชซ้อนกัน  
เป็นชั้น ๆ สำหรับถ่านหินคุณภาพต่ำที่มีลักษณะเช่นนี้ เรียกว่า ฮิวมินิต (huminite) ส่วน  
ถ่านหินคุณภาพสูง จะเรียกว่า ไวทรินิต (vitrinite)

ข. ถ่านหินแซปโพรเปลิก (Sapropelic Coals)

เป็นถ่านหินที่เกิดจากการสะสมของดินโคลนที่มีอินทรีย์วัตถุมาก รวมทั้ง  
ซากพืชและอินทรีย์วัตถุที่ถูกพัดพามาทับถมในแอ่งน้ำตื้นในสภาวะที่ขาดออกซิเจน สำหรับถ่านหิน  
แซปโพรเปลิกที่ประกอบด้วยอินทรีย์วัตถุจำพวกสาหร่าย เรียกว่าถ่านหินบ็อกเฮด (boghead coal)  
ส่วนถ่านหินที่มีปริมาณสปอร์มาก เรียกว่า ถ่านหินแคนเนล (cannel coal) ลักษณะของถ่านหิน  
ชนิดนี้เป็นชั้นขุ่น ไม่ซ้อนกันเป็นชั้น ๆ

### 2.1.2 สภาพแวดล้อมที่เกิดการสะสมเป็นถ่านหิน

การสะสมของอินทรีย์วัตถุในสภาพแวดล้อมต่างกัน ทำให้ถ่านหินมีองค์ประกอบแตกต่างกันไป Stopes และ Wheeler (5) ได้ศึกษาการสะสมของอินทรีย์วัตถุในแหล่งต่าง ๆ กัน คือ

ก. ในน้ำทะเล เกิดจากการสะสมของลำห่วยตามชายฝั่งทะเล และอินทรีย์วัตถุที่ถูกพัดพามา เช่นก้อนขุ่ย หรือซากพืชตามชายฝั่งทะเล ถ่านหินที่เกิดจากการสะสมแบบนี้มีน้อย และพบไม่บ่อยนัก

ข. ในน้ำกร่อย เกิดจากการสะสมของพืชในเขตร้อน ซึ่งเจริญเติบโตในดินโคลนหรือแอ่งน้ำขุ่นแฉะ พืชจำพวกหญ้าและต้นไม้ที่เจริญเติบโตในน้ำกร่อย และพืชในบริเวณที่น้ำทะเลขึ้นถึง นอกจากนี้ยังรวมถึงอินทรีย์วัตถุจากบริเวณอื่นที่ถูกพัดพามาด้วย

ค. ในน้ำจืด เกิดจากการสะสมของพืชที่อยู่ในป่าริมทะเลสาบน้ำจืด รวมทั้งที่ถูกน้ำพัดพาลงสู่ทะเลสาบ หรือลำห่วยต่าง ๆ ซึ่งเกิดขึ้นในทะเลสาบนั้น หรือเกิดจากการสะสมตัวของอินทรีย์วัตถุบริเวณปากแม่น้ำ และส่วนที่คดเคี้ยวของแม่น้ำ

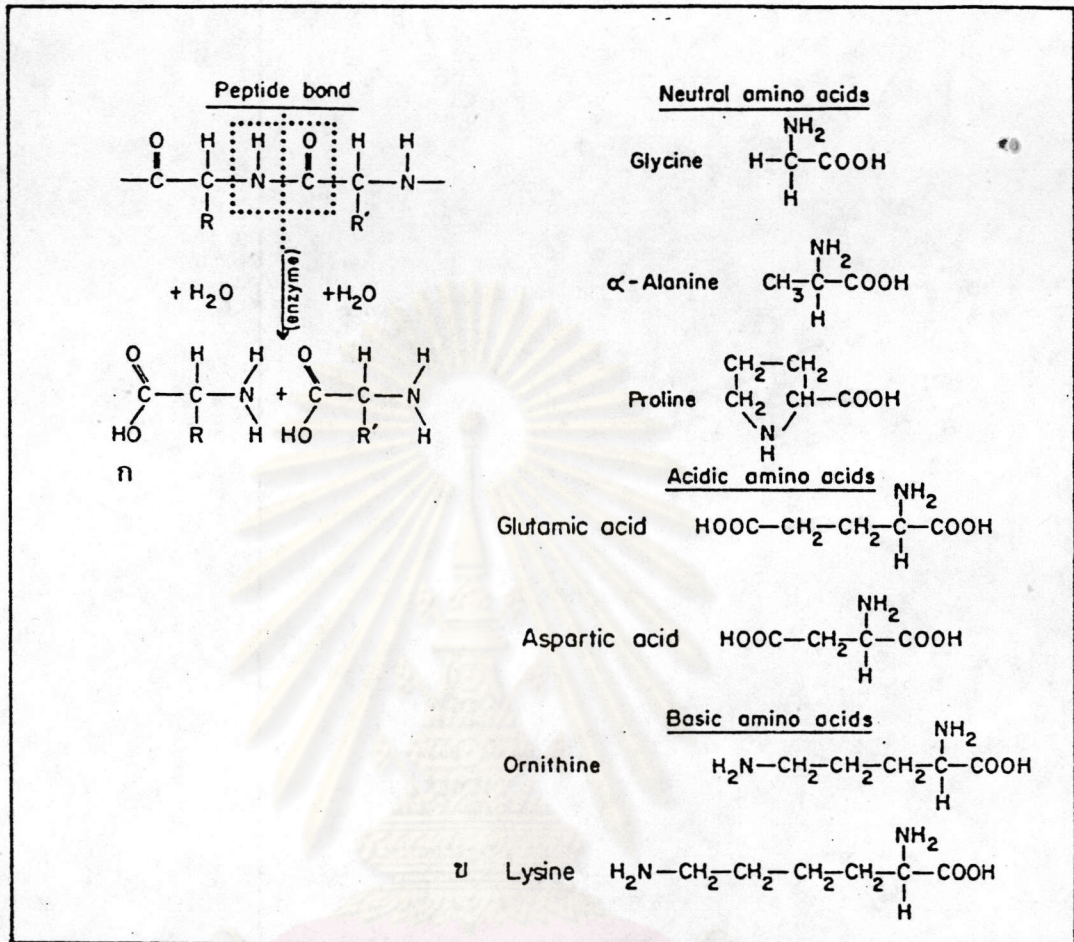
ง. บนแผ่นดิน เกิดจากการสะสมตัวของพืชที่ขบขึ้นในที่ชื้นแฉะ เช่นพวกมอสและเฟิร์น หรือเกิดจากการสะสมตัวของต้นไม้ในป่าที่มีอากาศชื้น

### 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของอินทรีย์วัตถุที่เป็นต้นกำเนิดของถ่านหิน

จากการศึกษาที่ผ่านมา (6) เป็นที่ทราบกันดีว่า แแบคทีเรีย, ลำห่วย, พืชยืนต้น และพืชยืนสูงต่าง ๆ เป็นต้นกำเนิดของอินทรีย์วัตถุที่สะสมอยู่ใต้ดิน และกลุ่มของสิ่งมีชีวิตเหล่านี้มีความสำคัญเป็นตัวกำหนดองค์ประกอบและชนิดของสารประกอบอินทรีย์ที่อยู่ในถ่านหิน องค์ประกอบหลักเหล่านี้คือ โปรตีน, คาร์โบไฮเดรต และไขมัน ซึ่งจะกล่าวถึงแต่ละชนิดโดยย่อ ดังต่อไปนี้

#### 2.2.1 โปรตีน

โปรตีน ประกอบด้วยกรดอะมิโนที่มาต่อกันด้วยพันธะเปปไทด์ ซึ่งสลายได้เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยเอนไซม์บางชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.1

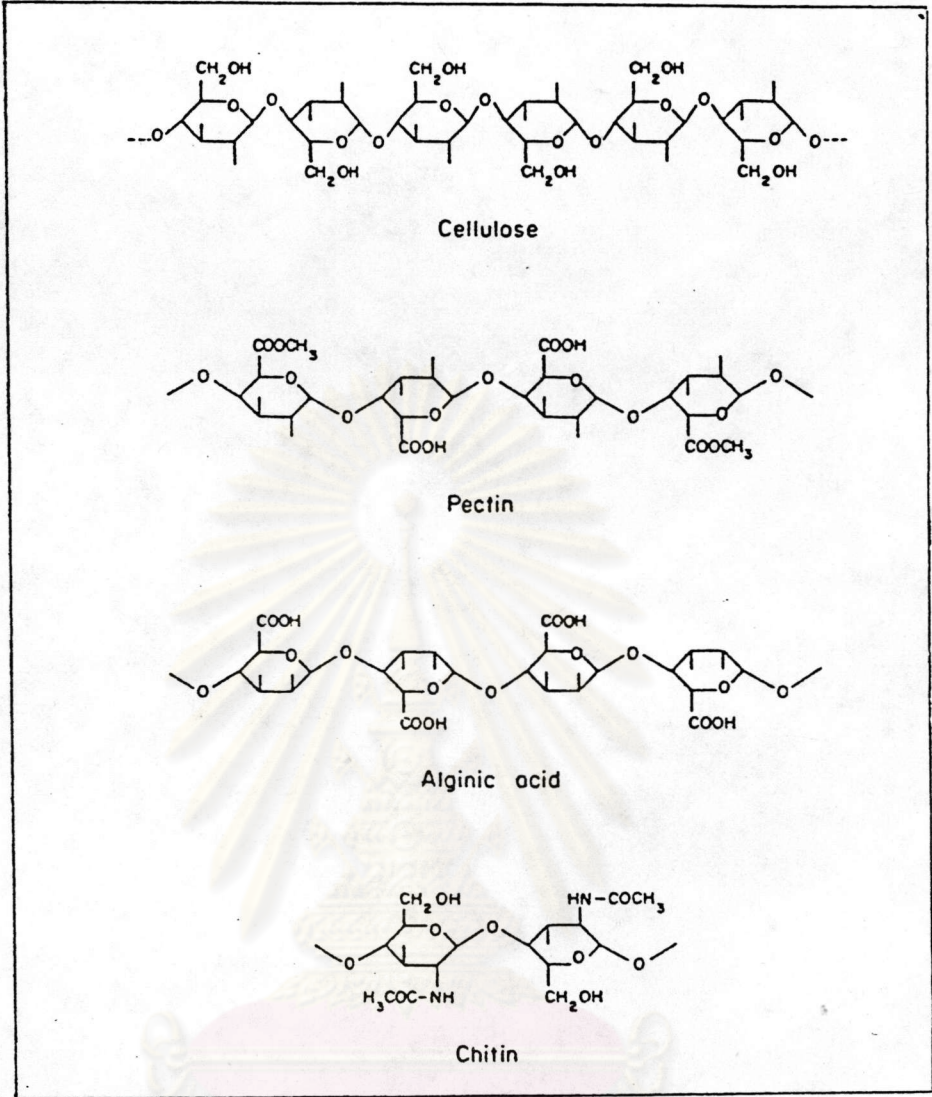


รูปที่ 2.1 ก. แสดงปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส พันธะเปปไทด์ของโปรตีน (6)

ข. แสดงโครงสร้างของกรดอะมิโนที่ตรวจพบในพืช (6)

### 2.2.2 คาร์โบไฮเดรต

คาร์โบไฮเดรต ประกอบด้วยน้ำตาลชนิดต่าง ๆ คือ โมโน-, ได-, ไตร- หรือ โพลีแซ็กคาไรด์ ซึ่งถูกสลายได้โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เกิดน้ำตาลโมเลกุลเล็กที่ละลายน้ำได้ คาร์โบไฮเดรตเป็นสารประกอบที่สำคัญในสิ่งมีชีวิต คือเป็นแหล่งกำเนิดของพลังงานและสารประกอบที่เป็นเนื้อเยื่อรองรับ เช่น เซลลูโลส, เพกทิน, กรดอัลลิกิน และไคทิน ดังแสดงในรูปที่ 2.2

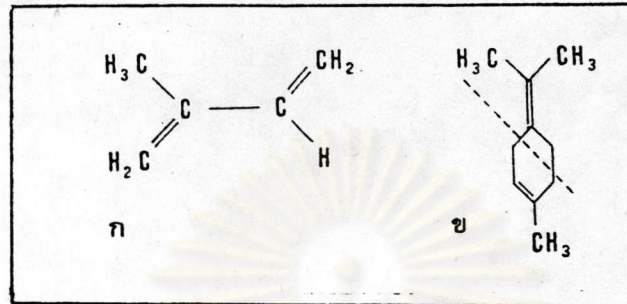


รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของคาร์โบไฮเดรตชนิดต่าง ๆ (6)

คาร์โบไฮเดรตที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของสิ่งมีชีวิต และเป็นต้นกำเนิดของอินทรีย์สารต่าง ๆ ในดิน เช่น เซลลูโลส, เพกทิน และกรดอัลจินิก โดยทั่วไปพืชชั้นสูงจะมีโครงสร้างที่เป็นเซลลูโลสมากกว่าพืชชั้นต่ำ นอกจากนี้ ในแบคทีเรียและพืชชั้นสูงบางชนิดยังพบเพกทิน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในสารละลายน้ำตา

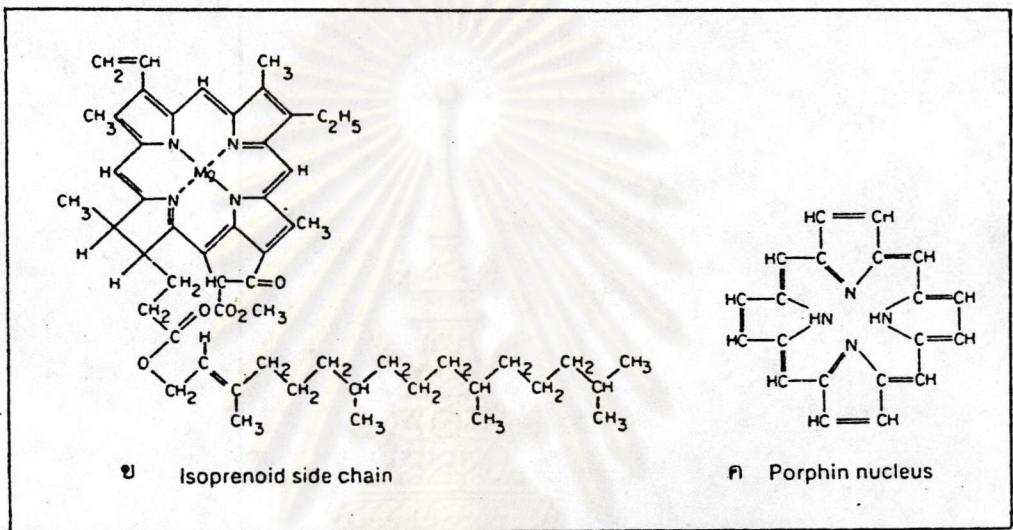
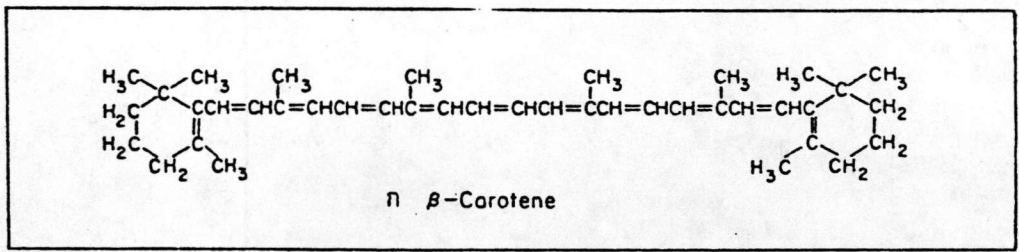


หรือ phosphatides) ซึ่งหน่วยย่อยของสารประกอบเหล่านี้คือหน่วยไอโซพรีน (isoprene unit) ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอน 5 อะตอม ดังแสดงในรูปที่ 2.4



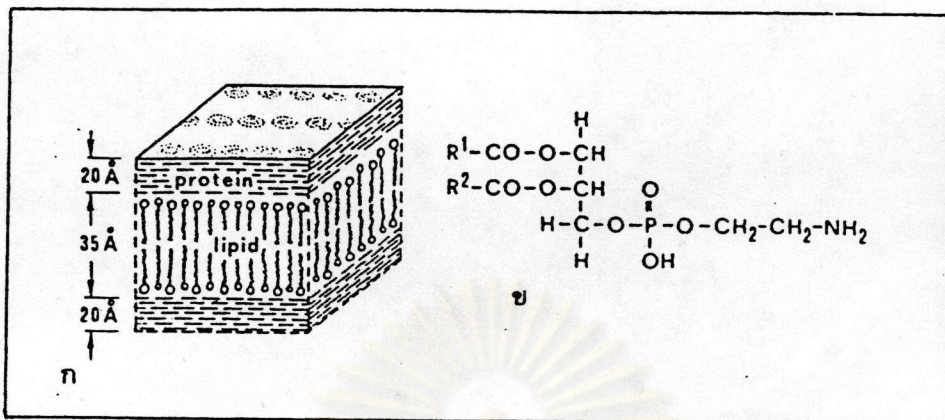
- รูปที่ 2.4 ก. แสดงหน่วยไอโซพรีน ซึ่งเป็นหน่วยย่อยของสารประเภทสเตอรอยด์, เทอร์พีน และแคโรทีนอยด์ (6)
- ข. แสดงเทอร์พีนโนเลน (terpinolen) เกิดจาก ไอโซพรีน 2 หน่วย สับเป็นวง (6)

หน่วยไอโซพรีน พบได้ในพืชบางชนิด เป็นสารที่ระเหยง่าย และ ร่องไว้ในการทำปฏิกิริยา โมเลกุลที่เกิดจากหน่วยไอโซพรีน 2, 3, 4, 6 และ 8 หน่วย มีชื่อเรียกว่า เทอร์พีน (terpenes), เซสควิเทอร์พีน (sesquiterpenes), ไดเทอร์พีน (diterpenes), ไตรเทอร์พีน (triterpenes) และ เตตระเทอร์พีน (tetraterpenes) ตามลำดับ นอกจากนี้ในธรรมชาติยังพบ โพลีเทอร์พีน (polyterpenes) ในสไปร์ และใน เนื้อเยื่อเกล็ดตัวของพืชชั้นสูง สำหรับเตตระเทอร์พีนกลุ่มที่สำคัญ คือ สารสีแคโรทีนอยด์ (carotenoid pigments) เช่น เบตา-แคโรทีน ( $\beta$ -carotene) ประกอบด้วย ไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว และหน่วยไอโซพรีน สารสีแคโรทีนอยด์มีสีแดงหรือเหลือง เนื่องจากมีพันธะคู่ แบบคอนจูเกตในโมเลกุล พบมากในลำห่อ, ผล และใบของพืชชั้นสูง กลุ่มของสารสีอีกกลุ่ม ที่สำคัญคือ อนุพันธ์ของคลอโรฟิลล์ (chlorophyll) ซึ่งมีโครงสร้างที่นิวเคลียสเป็นพอร์พีน (porphin) มีวงไพโรล (pyrole ring) 4 วงเชื่อมต่อกันด้วยมีเทน (-CH=; methine) พบว่าโซ่ข้างไฟทิล (phytyl side chain) ของคลอโรฟิลล์ คล้ายกับไอโซพรีนอยด์ที่ตรวจพบใน ดินตะกอน และน้ำมัน



- รูปที่ 2.5 ก. แสดงโครงสร้างของเบตา-แคโรทีน (6)  
 ข. แสดงโครงสร้างของคลอโรฟิลล์ (6)  
 ค. แสดงโครงสร้างของนิวเคลียสเฟอริน (6)

พอลิฟอสฟิด เป็นไขมันที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของเนื้อเยื่อ ต่างจากไขมันธรรมดา คือ มีกลุ่มของกรตฟอสฟอริก และมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ก. แสดงโครงสร้างของเนื้อเยื่อ (6)

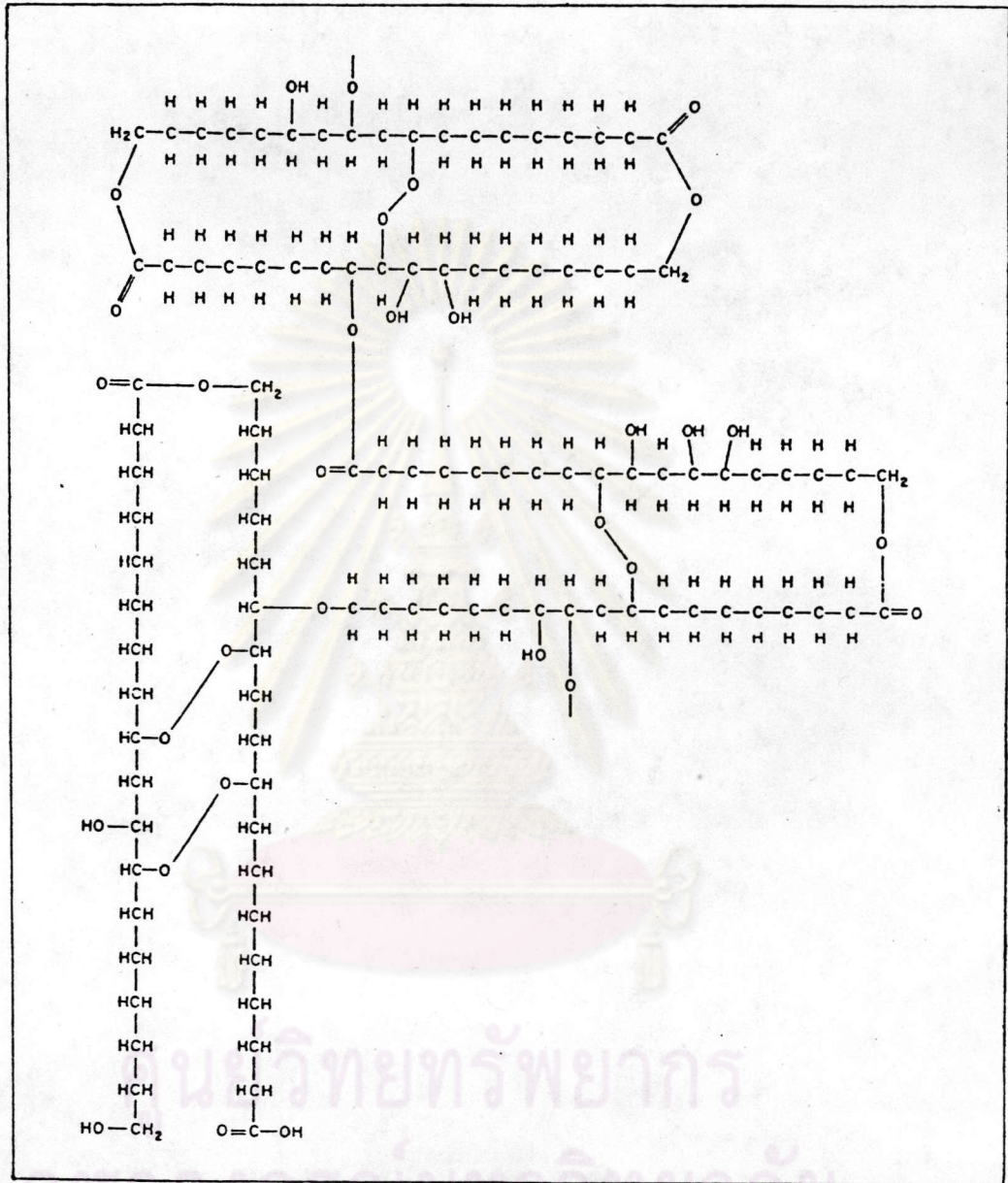
ข. แสดงโครงสร้างของฟอสโฟลิพิด (6)

สารประกอบที่สำคัญอื่น ๆ ได้แก่ คิวทิน, ลิกนิน และแทนนิน สำหรับ  
 คิวทินเป็นไขมันที่มีโครงสร้างแบบเชื่อมโยง (cross-linked structure) ระหว่าง  
 กรดไขมัน กับแอลกอฮอล์ และพบบนผิวของเซลล์พืช และ ผนังของสปอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



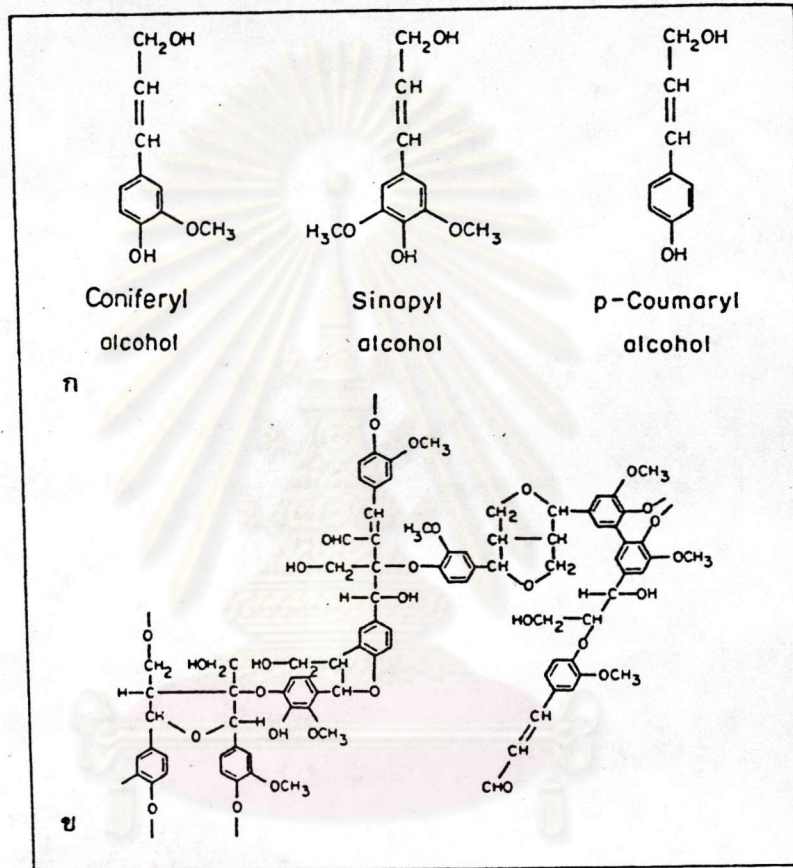
ศูนย์วิจัยและพัฒนาการเกษตร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





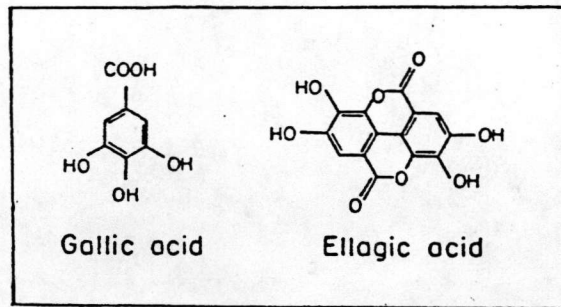
รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของคิวทิน พบในเนื้อเยื่อที่ทำหน้าที่ปกป้องของพืช (6)

สำหรับโครงสร้างของลิกนิน มีลักษณะเป็นร่างแหล่สามมิติ ของโพลีฟีนอล ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการไล่น้ำ และการรวมตัวของอะโรมาติกแอลกอฮอล์ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 จะพบลิกนินในเนื้อเยื่อรองรับของพืช



รูปที่ 2.8 ก. แสดงโครงสร้างของอะโรมาติกแอลกอฮอล์ ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของลิกนิน (6)  
 ข. แสดงโครงสร้างของลิกนินโมเลกุล (6)

สำหรับแทนนิน มีโครงสร้างอยู่ระหว่างลิกนินและเซลลูโลส โดยที่ในโครงสร้างอะโรมาติก ประกอบขึ้นด้วยหมู่คาร์บอกซิล และหมู่ฟีนอลิก ดังแสดงในรูปที่ 2.9 พบแทนนินในเยื่อรา, ส่ำหระ่าย, เปลือกไม้ และใบไม้ของพืชชั้นสูง



รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างของสารตั้งต้นของแทนนิน (6)

## 2.3 ขบวนการเกิดพืท

### 2.3.1 ลักษณะการเกิดทางธรณีวิทยา

พืท เกิดจากการสะสมของซากพืท ดังนั้นองค์ประกอบและปริมาณของพืทในบริเวณที่มีการสะสมจึงเป็นตัวกำหนดชนิดและปริมาณของพืท ปัจจัยสำคัญของการที่ซากพืทจะเกิดเป็นพืท คือ สภาวะของอากาศ และการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวโลก สภาวะของอากาศมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราการเจริญเติบโตของพืท คือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความชื้น พืทจะเจริญเติบโตมากขึ้น ทำให้มีปริมาณของซากพืทบริเวณนั้นมากขึ้นด้วย สำหรับการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวโลก เช่น ภูเขาไฟระเบิด แผ่นดินไหวแตกแยก บางแห่งถูกทับถม บางแห่งถูกยกให้สูงขึ้นหรือต่ำลง จะทำให้พื้นที่บริเวณนั้นเกิดความเหมาะสมในการเกิดพืท

ในบริเวณเขตร้อนที่เป็นแอ่งน้ำขังและ เช่น ตามชายฝั่งที่ค้ำตะวันออกเฉียงเหนือของเกาะลูมาตรา และชายฝั่งที่ค้ำใต้ของเกาะบอร์เนียว และเกาะนิวกินี มีสภาวะเอื้ออำนวยต่อการเจริญเติบโตของพืทในอัตราสูง อย่างไรก็ตาม พบว่าขบวนการย่อยสลายของซากพืทบริเวณนี้ก็แผ่ช้าลงอย่างรวดเร็วด้วย ดังนั้นการเกิดพืทจึงเกิดได้น้อย ตรงกันข้ามกับในเขตหนาว เช่น ในบริเวณแถบสแกนดิเนเวีย, สกอตแลนด์, อะลาสกา และ แคนาดา จะเป็นสภาวะที่ดียิ่งที่สุดของพืทที่จะสะสมตัวโดยไม่แผ่ช้าลงไปเสียก่อน พืทสามารถสะสมตัวมีความหนาหลายร้อยเมตร โดยมีอัตราการสะสมตัวโดยเฉลี่ย 1 มิลลิเมตรต่อปี สภาวะที่ช่วยให้การสะสมของซากพืทและอินทรีย์วัตถุเกิดเป็นพืทได้อย่างสมบูรณ์ คือต้องมีสิ่งปกคลุมซากพืทและอินทรีย์วัตถุเหล่านี้ สิ่งปกคลุมนั้นได้แก่ น้ำค้าง ซึ่งจะป้องกันการสลายตัวและการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของซากอินทรีย์วัตถุ อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของขบวนการเกิดพืทค่อนข้างต่ำ มากกว่า 10% ของซากอินทรีย์วัตถุจะสลายตัวไปก่อนที่จะเกิดการฝังตัว

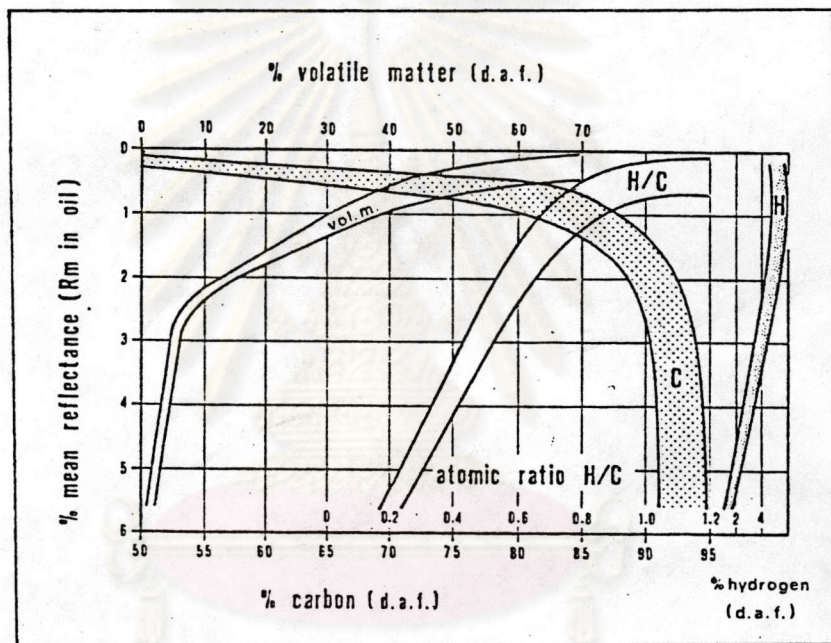
### 2.3.2 ลักษณะการเกิดทางชีวเคมีและธรณีเคมี

การละลายของซากพืช และอินทรีย์วัตถุต่าง ๆ บนพื้นดิน เป็นจุดเริ่มต้นของ ขบวนการทางชีวเคมี และขบวนการทางธรณีเคมี ในสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน ซากพืชจะเกิดการสลายตัวด้วยปฏิกิริยาทางเคมีต่าง ๆ ขึ้นกับชนิดของจุลินทรีย์ ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน เชื้อราบางกลุ่มสามารถสลายซากพืชที่มีองค์ประกอบเป็นเซลลูโลสได้ดีกว่าลิกนิน อย่างไรก็ตาม องค์ประกอบบางส่วนของพืช เช่น ใย, คิวทีเคิล, ลิปอ์ และ เรซิน สลายตัวได้ยากไม่ว่าจะอยู่ในสภาวะที่มีออกซิเจนหรือไม่มีออกซิเจน ดังนั้นสารเหล่านี้จึงปรากฏอยู่ในถ่านหิน และเป็นหลักฐานยืนยันว่าเป็นต้นกำเนิดของถ่านหิน นอกจากนี้ เชื้อรา และแบคทีเรียซึ่งเป็นตัวการสำคัญในการสลายคาร์โบไฮเดรต และโปรตีนแล้ว องค์ประกอบของสิ่งมีชีวิตเล็ก ๆ เหล่านี้คือ ไบโอมัน, คาร์โบไฮเดรต และ กรดอะมิโน ก็เป็นส่วนหนึ่งที่ถูกสะสม และสามารถตรวจพบได้ในพีท

สารประกอบฮิวมิก (humic substance) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขบวนการเกิดพีทเกิดขึ้นโดย ในขั้นแรก จุลินทรีย์จะสลายซากพืช สารอินทรีย์ในซากพืชจะเกิดปฏิกิริยาดีโพลีเมอไรเซชัน (depolymerization) ได้สารประกอบย่อยของพวกอะโรมาติก, ฟีนอลิก และคาร์บอกซิลิก ขึ้นต่อไปจะเกิดการรวมตัวใหม่ โดยเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชัน และ โพลีคอนเดนเซชันของโมเลกุลชนิดต่าง ๆ ได้โพลีเมอร์ของสารประกอบฮิวมิก การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในช่วงนี้มีความซับซ้อนมาก โครงสร้างของคาร์บอนในโมเลกุลจะเปลี่ยนแปลง องค์ประกอบอื่นคือ กลุ่มเฮเทอโรอะตอม (hetero-atom) ซึ่งได้แก่ กำมะถัน, ไนโตรเจน, และธาตุอื่น ๆ ก็ยังมีการเปลี่ยนแปลงด้วย สารประกอบฮิวมิกเหล่านี้จะถูกทับถมโดยดินตะกอนในน้ำนิ่ง เมื่อน้ำบริเวณนี้ขาดออกซิเจนและเริ่มเน่า ปฏิกิริยาการสลายตัวจะถูกยับยั้ง ถึงแม้ว่าในขั้นแรกจะถูกทำลายได้อย่างช้า ๆ โดยแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจน แต่ในที่สุดแบคทีเรียทั้งหมดก็จะหยุดการเจริญเติบโต และตายสะสมรวมเป็นพีท และเมื่อพีทนี้ถูกทับถมด้วยอินทรีย์วัตถุ รวมทั้งเกิดการเปลี่ยนแปลงทางธรณี เช่น การเคลื่อนตัวของเปลือกโลก แรงกดดัน และความร้อนจากภายในโลกเป็นระยะเวลาานาน ๆ ทำให้พีทที่ฝังอยู่ในดินเปลี่ยนสภาพเป็นถ่านหินที่มีคุณภาพสูงขึ้น

## 2.4 ขบวนการเกิดถ่านหิน

ขบวนการเกิดถ่านหิน เป็นขบวนการที่เกิดภายหลังขบวนการเกิดพืช โดยมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และทางกายภาพ โดยอาศัยความดัน, อุณหภูมิ และเวลา พืชจะเปลี่ยนไปเป็น ถ่านสีน้ำตาล, ลิกไนต์, ซับซิมินัล, อนุมินัล และ แอนทราไซต์ ในที่สุด ในแต่ละขั้นของการเกิดถ่านหินแต่ละชนิด จะแสดงถึงความสมบูรณ์ของการเป็นถ่านหิน โดยพิจารณาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เป็นตัวกำหนดคุณภาพของถ่านหิน ได้แก่ การสะท้อนแสง (reflectance), ปริมาณความชื้น, ปริมาณสารระเหย, ปริมาณคาร์บอน, ปริมาณไฮโดรเจน และค่าความร้อน ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์เหล่านี้แสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสะท้อนแสง, ปริมาณสารระเหย, ปริมาณคาร์บอน และไฮโดรเจน (7)

การสะท้อนแสงใช้บอกคุณภาพของถ่านหิน โดยการวัดแสงสะท้อนจากผิวของถ่านหิน ถ่านหินคุณภาพดีจะมีค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนสูง สอดคล้องกับปริมาณคาร์บอนที่สูง และปริมาณสารระเหยที่ต่ำ สำหรับการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพอื่น ๆ คือ ความหนาแน่น และดัชนีหักเหที่เพิ่มขึ้น หรือความพรุนที่ลดลง ก็เป็นส่วนสำคัญในการเพิ่มคุณภาพของถ่านหิน นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยปฏิกิริยาต่าง ๆ คือ ปฏิกิริยาการรวมตัว, ปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชัน, ปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชัน, การสูญเสียหมู่ฟังก์ชันที่เฉพาะที่มีออกซิเจน กำมะถัน และไนโตรเจนที่อยู่ใน

โครงสร้างของถ่านหินอย่างต่อเนื่อง จะทำให้ปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น เกิดถ่านหินที่มีคุณภาพสูงขึ้น

Cartz และ Hirch (8) เสนอโครงสร้างของถ่านหินโดยใช้เทคนิคทางเอ็กซ์เรย์

ตั้งแสดงในรูปที่ 2.11 ก ส่วน Given (9) เสนอโครงสร้างของถ่านหินโดยใช้ข้อมูลทางเคมี

ตั้งแสดงในรูปที่ 2.11 ข ถ่านหินจะมีโครงสร้างอะโรมาติกเป็นแกนกลางเชื่อมต่อกันด้วยส่วน


เชื่อมไฮโดรอะโรมาติก และเมทิลีน ซึ่งมีหมู่เมทิล, ไฮดรอกซิล, คาร์บอกซิล, คีโต, เอมีน

หรือหมู่ทำหน้าที่เฉพาะอื่น ๆ ที่อยู่ปลายส่วนเชื่อมนั้น คุณภาพของถ่านหินจะขึ้นอยู่กับความเป็น

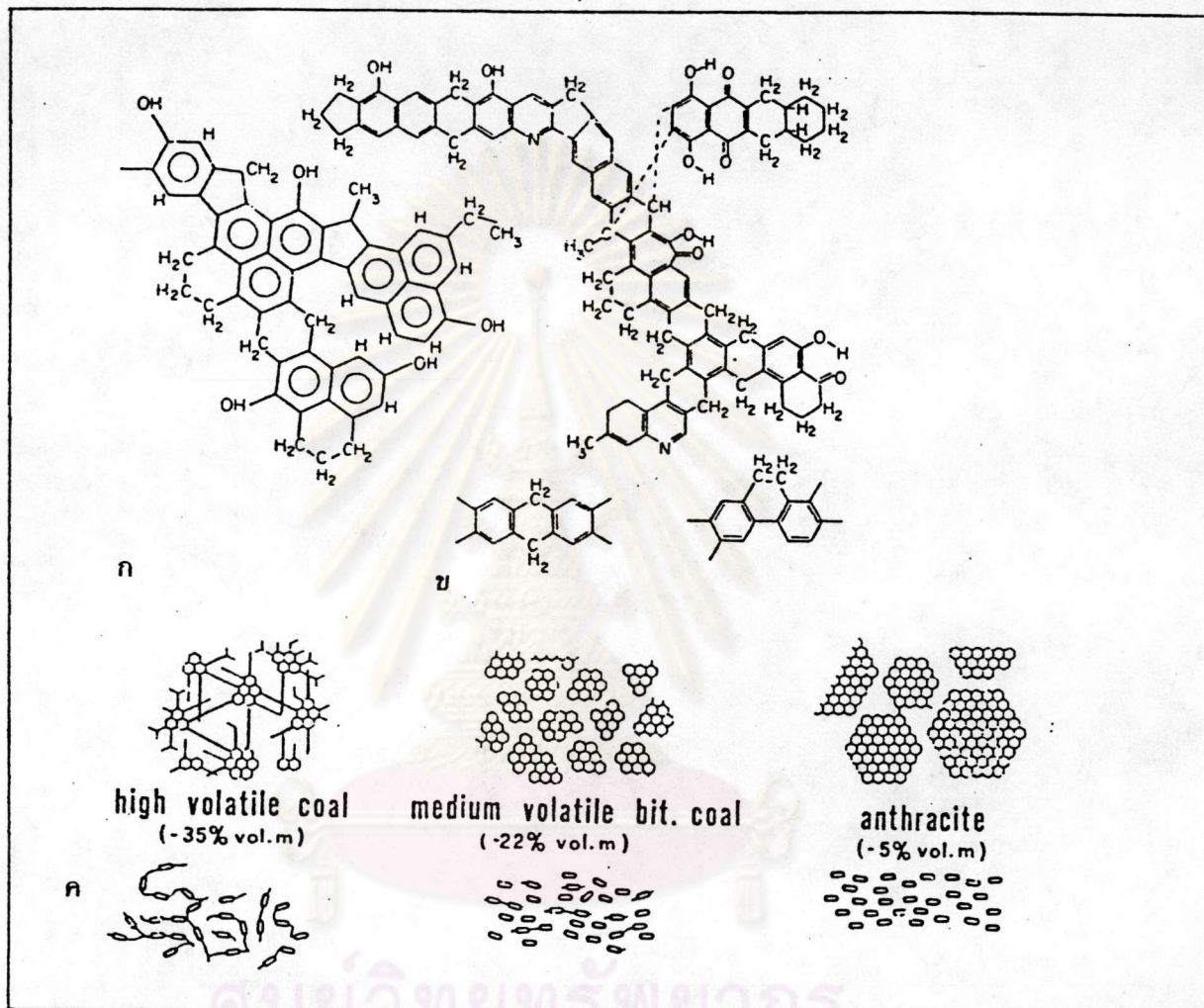
อะโรมาติกและปริมาณของกลุ่มเฮเทอโรอะตอม กล่าวคือ ถ่านหินที่มีคุณภาพสูงจะมีความเป็น

อะโรมาติกมาก และปริมาณของกลุ่มเฮเทอโรอะตอมจะลดลงในระหว่างขบวนการเกิดถ่านหิน

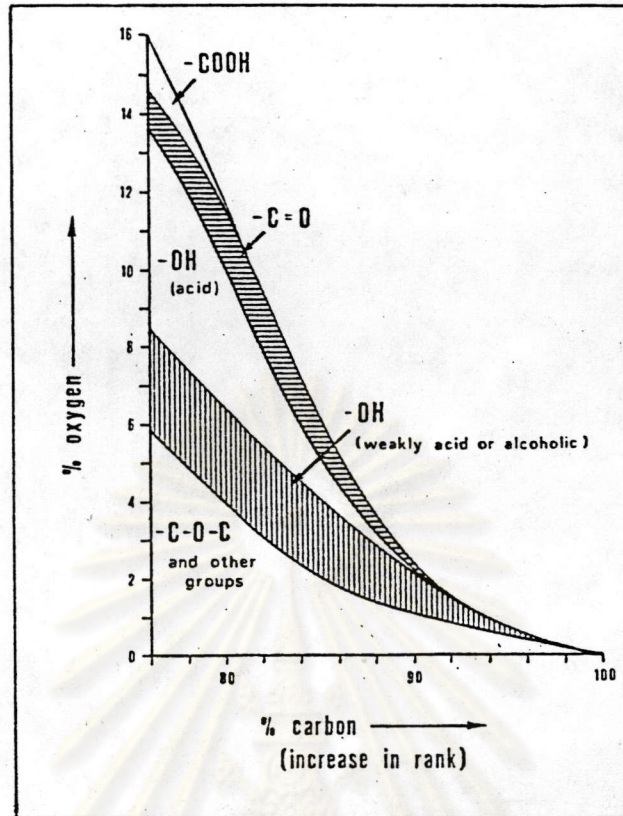
โดยการสูญเสียหมู่ทำหน้าที่เฉพาะ เช่น หมู่ทำหน้าที่เฉพาะที่มีออกซิเจน



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



- รูปที่ 2.11 ก. แสดงโครงสร้างของถ่านหินไวโตนต์ (85.5% C) โดยอาศัยข้อมูลทางรังสีเอ็กซ์ (8)
- ข. แสดงโครงสร้างของถ่านหินไวโตนต์ (82.0% C) โดยอาศัยข้อมูลทางเคมี (9)
- ค. แสดงโครงสร้างของถ่านหินที่มีปริมาณสารระเหยต่าง ๆ กัน (10)

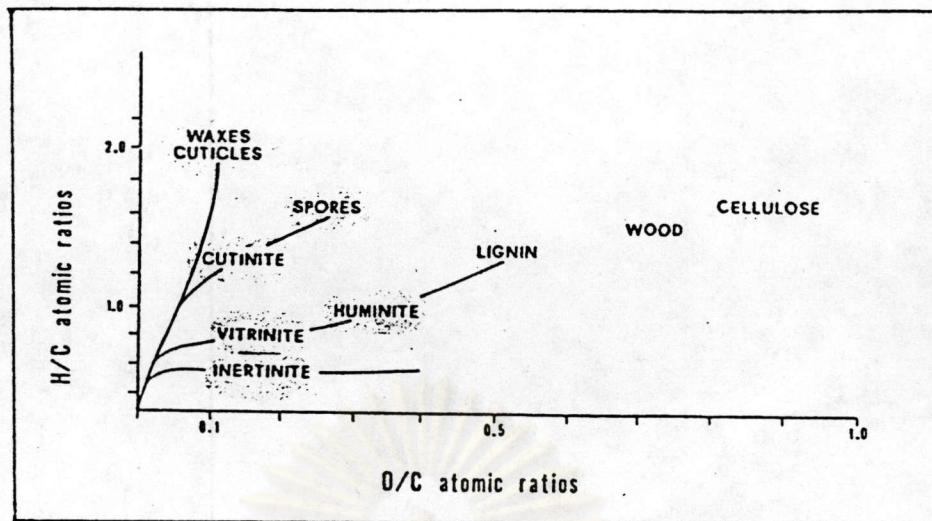


รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหมู่ทำหน้าที่เฉพาะต่าง ๆ ที่มีออกซิเจน กับคุณภาพของ ถ่านหิน (เมื่อ %C เพิ่มขึ้น) (11)

จากรูปที่ 2.12 จะเห็นได้ว่าถ่านหินที่มีคุณภาพดีขึ้น (% C เพิ่มขึ้น) หมู่ทำหน้าที่เฉพาะที่มีออกซิเจนจะน้อยลง สำหรับหมู่ทำหน้าที่เฉพาะที่มีอะตอมของธาตุอื่น ๆ เช่น ไนโตรเจน มักพบอยู่ในรูปของสารประกอบเอมีน, ไพรีดีน และไพโรล, กำมะถันในรูปของไทออล, ซัลไฟด์, ไทโออีเทอร์ และไทโอฟิน หมู่ทำหน้าที่เฉพาะเหล่านี้จะมีปริมาณน้อยลงเมื่อถ่านหินมีคุณภาพดีขึ้นด้วย

ในปี ค.ศ. 1961 Van Krevelen (12) ได้รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับถ่านหินไว้เป็นจำนวนมาก ในจำนวนข้อมูลเหล่านี้ มีข้อมูลกลุ่มหนึ่งซึ่งมีประโยชน์มากเมื่อนำมาสร้างแผนภาพ เรียกว่า Van Krevelen-diagram ดังแสดงในรูปที่ 2.13





รูปที่ 2.13 แสดงแผนภาพของ Van Krevelen ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนอะตอมมิก H/C และ อะตอมมิก O/C ของอินทรีย์วัตถุต่าง ๆ ที่เป็นต้นกำเนิดของถ่านหิน (12)

จากรูปที่ 2.13 อินทรีย์วัตถุต่าง ๆ ที่จะสลายกลายเป็นถ่านหินสามารถจัดได้เป็น 3 กลุ่ม ตามระดับอัตราส่วนอะตอมมิก H/C และ อะตอมมิก O/C ที่เป็นองค์ประกอบ

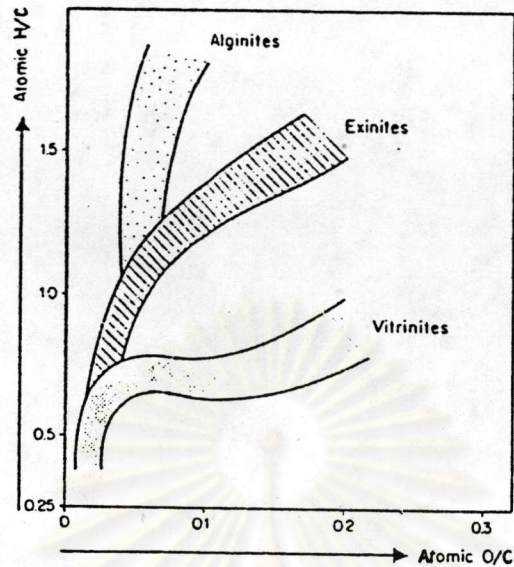
กลุ่มที่ 1 พวกไข และคิวทิเคิล มีปริมาณออกซิเจนน้อย แต่มีปริมาณไฮโดรเจนสูง

กลุ่มที่ 2 พวกสปอร์ มีปริมาณออกซิเจนและไฮโดรเจนปานกลาง

กลุ่มที่ 3 พวกเซลลูโลส และลิกนิน มีปริมาณออกซิเจนสูง

อินทรีย์วัตถุทั้ง 3 กลุ่ม เป็นต้นกำเนิดของถ่านหิน 3 ชนิด ซึ่งสามารถแสดงขั้นตอนการวิวัฒนาการของการเกิดถ่านหินได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.14

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.14 แสดงขั้นตอนการวิวัฒนาการของการเกิดถ่านหิน 3 กลุ่ม (12)

จากรูปที่ 2.14 แยกให้เห็นกลุ่มของถ่านหิน 3 กลุ่ม คือ อัลจินิต์ (alginites), เอ็กซีนิต์ (exinites) และไวทรินิต์ (vitrinites) ซึ่งแต่ละกลุ่มมีวิวัฒนาการมาจากต้นกำเนิดที่เป็นอินทรีย์วัตถุต่าง ๆ กัน คือ อัลจินิต์ มีกำเนิดจากสาหร่ายที่มีองค์ประกอบเป็นไฮโดรเจนเป็นส่วนใหญ่ จึงมีอัตราส่วนอะตอม H/C สูง สำหรับเอ็กซีนิต์ มีกำเนิดจากสปอร์ ซึ่งมีอัตราส่วนอะตอม H/C สูงพอสมควร และไวทรินิต์ มีกำเนิดจากพืชชั้นสูง ซึ่งมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ จึงมีอัตราส่วนอะตอม O/C สูง เมื่อเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงในขบวนการเกิดถ่านหิน อัลจินิต์และเอ็กซีนิต์ ซึ่งมีปริมาณไฮโดรเจนสูง จะสูญเสียไฮโดรเจน ในขณะที่ไวทรินิต์จะสูญเสียออกซิเจน ผลิตภัณฑ์สุดท้ายจากขบวนการดังกล่าวคือ ถ่านหินชนิดแอนทราไซต์ ซึ่งมีปริมาณออกซิเจนและไฮโดรเจนต่ำ แต่จะมีปริมาณคาร์บอนสูง

## 2.5 องค์ประกอบของอินทรีย์วัตถุในถ่านหิน

ชนิดและปริมาณของอินทรีย์วัตถุที่ปรากฏในถ่านหินจะแตกต่างกันไปตามแหล่งที่พบถ่านหินนั้น อินทรีย์วัตถุเป็นส่วนที่เหลือภายหลังจากการเผาไหม้ เรียกว่า แก๊สถ่านหิน สารอินทรีย์ในถ่านหินแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

ก. สารอินทรีย์ซึ่งเป็นองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิตที่กลายเป็นถ่านหิน ได้แก่ แร่ธาตุที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช ถูกทับถมพร้อมกับซากอินทรีย์ และปรากฏเป็นองค์ประกอบใน

ถ่านหินด้วย เช่น ออกไซด์ของโพแทสเซียม, โซเดียม, แมกนีเซียม และซิลิคอน เป็นต้น

ข. สารอนินทรีย์ที่ทับถมลงบนแนวของถ่านหินขณะเกิดการสะสมตัวของถ่านหิน ได้แก่ ยิบซั่ม ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), ไพไรต์ ( $\text{FeS}_2$ ), ทินปูนแอนคิไรต์ (ankerites) ทินเชลล์ และดิน เป็นต้น

### 2.5.1 สารอนินทรีย์ซึ่งเป็นองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิตที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นถ่านหิน

พืชทุกชนิดต้องการสารอนินทรีย์สำหรับการเจริญเติบโต โดยดูดซึมแร่ธาตุจากพื้นดิน พืชต่างชนิดกันก็จะมีชนิดและปริมาณสารอนินทรีย์ต่างกันด้วย ขึ้นอยู่กับความต้องการของพืช และธรรมชาติของดินบริเวณนั้นด้วย เช่น พืชหลายชนิดชอบขึ้นในบริเวณที่มีปูน, เกลือ หรือ ซอล์ค แต่จะไม่ขึ้นในบริเวณที่เป็นทราย นอกจากนี้ยังพบว่า ชนิดและปริมาณอนินทรีย์สารที่พืชดูดซึมขึ้นไปนั้นยังขึ้นกับชนิดของพืช เช่น พืชตระกูลหญ้าหลายชนิด ดูดซึมซิลิกา แล้วไปสะสมอยู่ในผนังเซลล์ ในขณะที่พืชจำพวกไลโคพอด (lycopods) ดูดซึมอะลูมินามากกว่า จากการศึกษาพบว่า องค์ประกอบของอนินทรีย์ธาตุในพืช คือ Ca, Mg, Fe, Al, Na, K, Mn, Ti, S, Si และ P องค์ประกอบเหล่านี้มีปริมาณน้อยกว่า 2% ซึ่งความแตกต่างของปริมาณสารอนินทรีย์แต่ละชนิดเหล่านี้ไม่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของพืชเพียงอย่างเดียวแต่ยังขึ้นกับส่วนต่างๆ ของพืช เช่น ในลำต้น จะมีสารอนินทรีย์น้อยกว่า 1%, ในใบไม้มีน้อยกว่า 0.5% และในเปลือกไม้คอร์ก มีถึง 20% สำหรับในเซลล์ทั่ว ๆ ไปของสิ่งมีชีวิตจะเกิดอนินทรีย์ธาตุ ในระหว่างการสลายโปรตีน เกิดสารประกอบไนโตรเจน และกำมะถันเกิดขึ้น ส่วนฟอสฟอรัสที่อยู่ในกรดนิวคลีอิก จะสลายเป็นกรดฟอสฟอริก สำหรับสารอนินทรีย์ที่อยู่ในรูปของเกลือต่าง ๆ ได้แก่ Na, K, Mg, Fe และ Ca จะตกผลึกอยู่ในพาราเรโนโคมา (parenchyma) เช่น แคลเซียมออกซาลेट นอกจากนี้พบว่าต้นไม้หลายชนิดมี Ca, Fe และอยู่ภายนอกเซลล์ สำหรับ Mg พบว่าเป็นองค์ประกอบในคลอโรฟิลล์

### 2.5.2 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของสารอนินทรีย์ในระหว่างการสลายตัวของพืช

องค์ประกอบของอนินทรีย์ธาตุในพืช จะมีการเปลี่ยนแปลงหลังจากพืชตาย และมีการสลายตัว ในบางครั้งไม่พบสารอนินทรีย์ในถ่านหิน เนื่องจากละลายน้ำไป เช่น เกลือคลอไรด์ของ Na, K และ Mg หรือสลายเป็นก๊าซระเหยไป เช่น ไนโตรเจนในโปรตีนสลายเป็นแอมโมเนีย, สารประกอบกำมะถันสลายเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจน นอกจากนี้พบว่า ภายใต้สภาวะที่เป็นกลาง สารประกอบอนินทรีย์ของธาตุ Ca, Mg, Fe และ Al จะรวมตัวกับกรดฮิวมิก เป็นสารประกอบเชิงซ้อนพวกคอลลอยด์ และจากการศึกษาการเกิดถ่านหินไนโตรเจน และกำมะถัน ซึ่งเป็นองค์ประกอบของโปรตีนที่สลายได้ง่าย ได้ผลผลิตเป็นกรดอะมิโน

จะรวมกับผลผลิตที่ได้จากการสลายเฮลลูโลส เกิดกรดฮิวมิกแล้วเปลี่ยนแปลงเป็นถ่านหินต่อไป  
ในขณะที่สารประกอบอินทรีย์สลายเป็นก๊าซในรูปของไฮโดรเจนซัลไฟด์, คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ  
ในสถานะที่เป็นกลาง หากมีปริมาณเหล็กเพียงพอ ไฮโดรเจนซัลไฟด์จะทำปฏิกิริยากับเหล็ก เกิด  
ตะกอนเหล็กซัลไฟด์ ซึ่งจะสะสมจนเป็นไพไรต์ (pyrite) หรือมาร์คาไซต์ (marcasite)  
รวมตัวอยู่ในเนื้อของถ่านหิน

### 2.5.3 องค์ประกอบของสารอนินทรีย์จากแหล่งภายนอก

สารประกอบอนินทรีย์จากแหล่งภายนอกสามารถเข้าไปสะสมในขณะที่เกิด  
ถ่านหินได้ แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

- ก. สารอนินทรีย์ที่เกิดการทับถมในระหว่างการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมี  
(syngenetic mineral matter) เช่น ไพไรต์ เกิดจากการสะสมของแบคทีเรียที่มีกำมะถัน  
เป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง
- ข. สารอนินทรีย์ที่เกิดการทับถมภายหลังจากเกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมี  
(epigenetic mineral matter) เกิดการทับถมในระหว่างที่จะกลายเป็นถ่านหินอย่างสมบูรณ์

### 2.5.4 องค์ประกอบของสารอนินทรีย์ภายในถ่านหิน

โดยทั่วไปพบว่าสารอนินทรีย์มากกว่า 95% ประกอบด้วยแร่ 3 ชนิด คือ  
คาโอลินิต์ (kaolinite), แคลไซต์ (calcite) และไพไรต์ (pyrite) และในถ่านหิน  
มากกว่า 95% ประกอบด้วย  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $\text{CaO}$  ที่เหลืออีก 5% เป็น  
 $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  และ  $\text{TiO}_2$  อนินทรีย์สารต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 แสดงสารอนินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ที่พบในถ่านหิน (13)

Mineral	Approximate formula
Kaolin ...	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot xH_2O$
Muscovite ...	$K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$
Biotite ...	$K_2O \cdot MgO \cdot Al_2O_3 \cdot 3SiO_2 \cdot H_2O$
Epidote ...	$4CaO \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot H_2O$
Quartz ...	$SiO_2$
Prochlorite ...	$2FeO \cdot 2MgO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$
Penninite ...	$5MgO \cdot Al_2O_3 \cdot 3SiO_2 \cdot 2H_2O$
Albite ...	$Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$
Orthoclase ...	$K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$
Hornblende ...	$CaO \cdot 3FeO \cdot 4SiO_2$
Augite ...	$CaO \cdot MgO \cdot 2SiO_2$
Cyanite ...	$Al_2O_3 \cdot SiO_2$
Staurolite ...	$2FeO \cdot 5Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$
Pyrites, ...	$FeS_2$
Marcasite ...	
Calcite ...	$CaCO_3$
Ankerite, ...	$2CaCO_3 \cdot MgCO_3 \cdot FeCO_3$
Brass-stone ...	
Siderite ...	$FeCO_3$
Witherite ...	$BaCO_3$
Gypsum ...	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
Barytes ...	$BaSO_4$
Salt ...	$NaCl$
Apatite ...	$3Ca_3P_2O_8 \cdot CaF_2$
Mispickel ...	$FeS_2 \cdot FeAs_2$
Zinc-blende ...	$ZnS$
Copper Pyrites ...	$CuFeS_2$
Galena ...	$PbS$
Dolomite ...	$CaCO_3 \cdot MgCO_3$
Haematite ...	$Fe_2O_3$

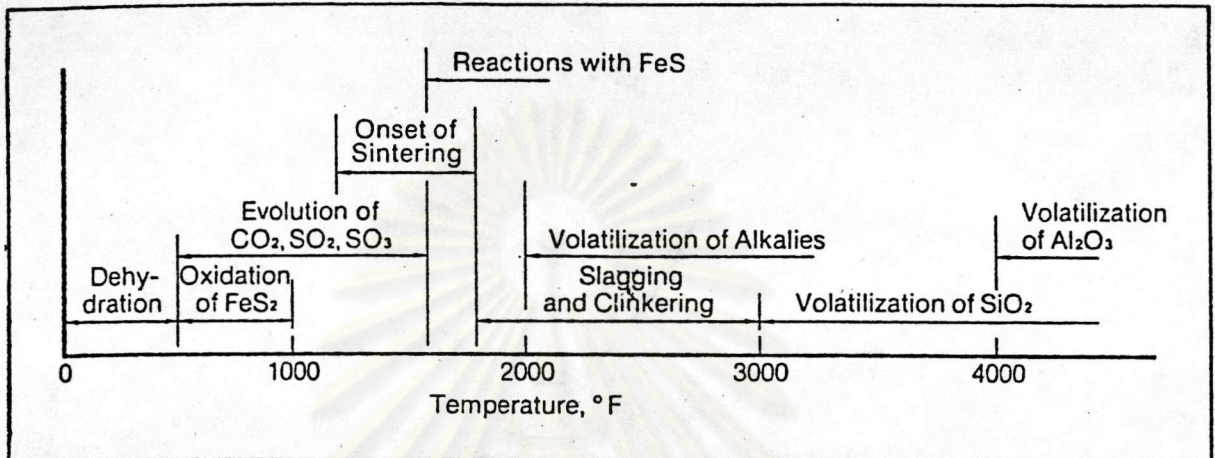
สำหรับธาตุที่มีปริมาณน้อย ที่พบโดยทั่วไปในถ่านหินคือ Be, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb และ Zn นอกจากนี้ถ่านหินบางแหล่งพบว่าธาตุที่สำคัญ เช่น V, Se, Ga และ Ge เป็นต้น

### 2.5.5 เถ้าในถ่านหิน (ash in coal)

เถ้าของถ่านหิน เป็นส่วนที่เกิดจากสารอนินทรีย์ในถ่านหิน ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่ต้องการ เพราะทำให้สิ้นเปลืองในการขนส่ง และต้องกำจัดออกจากเตาเผา เนื่องจากจะไปทำให้การทำงานของเตาเผามีปัญหา นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณเถ้าและองค์ประกอบของเถ้าในถ่านหินเป็นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งในการออกแบบเตาเผา และการกำจัดเถ้าถ่านหินออกจากเตาเผา ซึ่งจำเป็นต้องรู้ปริมาณขององค์ประกอบในเถ้าถ่านหิน ดังนั้นการวิเคราะห์หาองค์ประกอบในเถ้าจึงมีความสำคัญ ถึงแม้ว่าในบางครั้งจะไม่สามารถบอกการกระจาย หรือสภาพธรรมชาติของสารอนินทรีย์ได้ แต่ก็จะเป็นข้อมูลพื้นฐานซึ่งมีประโยชน์ทางการศึกษา และการนำถ่านหินไปใช้ประโยชน์

### 2.5.6 ปฏิกริยาเคมีของ แก้วถ่านหินในระหว่างเกิดการเผาไหม้

นักวิทยาศาสตร์(14)ซึ่งทำการศึกษา แก้วถ่านหิน พบว่าความร้อนที่ให้กับถ่านหินที่อุณหภูมิต่าง ๆ กันในเตาเผา มีผลต่อสารอนินทรีย์ที่จะให้แก๊สชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงผลของความร้อนที่มีต่อสารอนินทรีย์ในถ่านหิน (14)

สารประกอบอนินทรีย์จะเริ่มเปลี่ยนแปลงเมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ และเกิดปฏิกิริยาเคมี ได้สารประกอบเชิงซ้อนใหม่ ซึ่งมีปริมาณออกซิเจนน้อยกว่าสารเริ่มต้น เพราะออกซิเจนถูกใช้ไปโดยรีดิวซิงกาซ (reducing gas) และคาร์บอนที่ร้อน (hot carbon) เช่น  $Fe_3O_4$  และ  $FeS_2$  ซึ่งพบในถ่านหินมักจะถูกรีดิวซ์เป็น  $Fe_2O_3$  หรือ  $FeO$  และ  $FeS$  ในบางครั้งจะเหลือแต่โลหะเหล็ก สารประกอบใหม่นี้จะทำให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวต่ำลง เช่นเดียวกับ  $Na_2O$ ,  $K_2O$  และ  $MgO$  สำหรับ  $SiO_2$  และ  $Al_2O_3$  จะทำให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวสูงขึ้น ดังนั้นถ่านหินที่มีปริมาณเหล็กในแก้วถ่านหินมาก จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาคือ ในขณะที่แก้วของถ่านหินหลอมเป็นกาก (slag) สารประกอบเหล็กที่อยู่ในกากจะถูกรีดิวซ์เป็นโลหะเหล็ก จะอยู่ส่วนล่างสุด หากที่จะกำจัดออกไม่ว่าจะอยู่ในสภาพที่เป็นหรือร้อน นอกจากนี้เหล็กซึ่งอยู่ในรูปไพไรต์ ( $FeS_2$ ) เมื่อได้รับความร้อนจะรวมตัวกับออกซิเจน เกิดเป็นเหล็กออกไซด์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $SO_2$ ) หรือซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $SO_3$ ) สำหรับสารประกอบโซเดียม, โพแทสเซียม เมื่อรวมตัวกับกำมะถันแล้วมีอุณหภูมิในการหลอมเหลวต่ำ สามารถที่จะกลายเป็นของเหลว แล้วส่วนตัวอยู่บนผนังเตาส่วนที่หล่อด้วยน้ำเย็น (water cooled furnace wall) เป็นชั้นสีขาวของสารประกอบ  $(Na, K)_3, Al(SO_4)_3$  ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญ

ที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนบนผนังของเตาเผา

## 2.6 การสกัดลำดับชั้นของถ่านหิน

ถ่านหิน ประกอบด้วยอินทรีย์สารซึ่งมาจากพืชชั้นต่ำและชั้นสูง หรือจากสิ่งมีชีวิตเล็ก ๆ ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีแตกต่างกัน ตามขบวนการเกิดถ่านหิน โดยปกติถ่านหินจะเปลี่ยนแปลงมาจากเนื้อเยื่อของไม้ ซึ่งพบกรดฮิวมิกมาก ส่วนถ่านหินที่ผิดปกติจะมีองค์ประกอบอื่นสูง เช่น สลอปอร์ หรือไฮ ซึ่งพบในถ่านหินแคนเนล สำหรับการละลายของสำหรับ จะพบในถ่านหินบ็อกเฮด การสกัดลำดับชั้นของถ่านหินมีหลายระบบ โดยทั่วไปจะจำแนกตามองค์ประกอบหลักของถ่านหิน ในการพิจารณา จะอาศัยผลที่ได้จากการวิเคราะห์คุณภาพถ่านหินโดยประมาณ และโดยละเอียด

### 2.6.1 การสกัดลำดับชั้นโดยพิจารณาจากผลการวิเคราะห์โดยละเอียด

ในปี ค.ศ. 1837 Regnault (15) เป็นคนแรกที่สกัดลำดับชั้นของถ่านหิน โดยใช้ผลการวิเคราะห์โดยละเอียด คือ %C, %H, %N, %S และ %O ต่อมาในปี ค.ศ. 1918 Grüner และ Bousquet (15) ได้พัฒนาการสกัดลำดับชั้นของถ่านหิน โดยอาศัยองค์ประกอบอื่นร่วมพิจารณาด้วย คือ ปริมาณคาร์บอนคงตัว, ปริมาณสารระเหย, ค่าความร้อน และลักษณะของถ่านหินในระหว่างการเผาไหม้ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

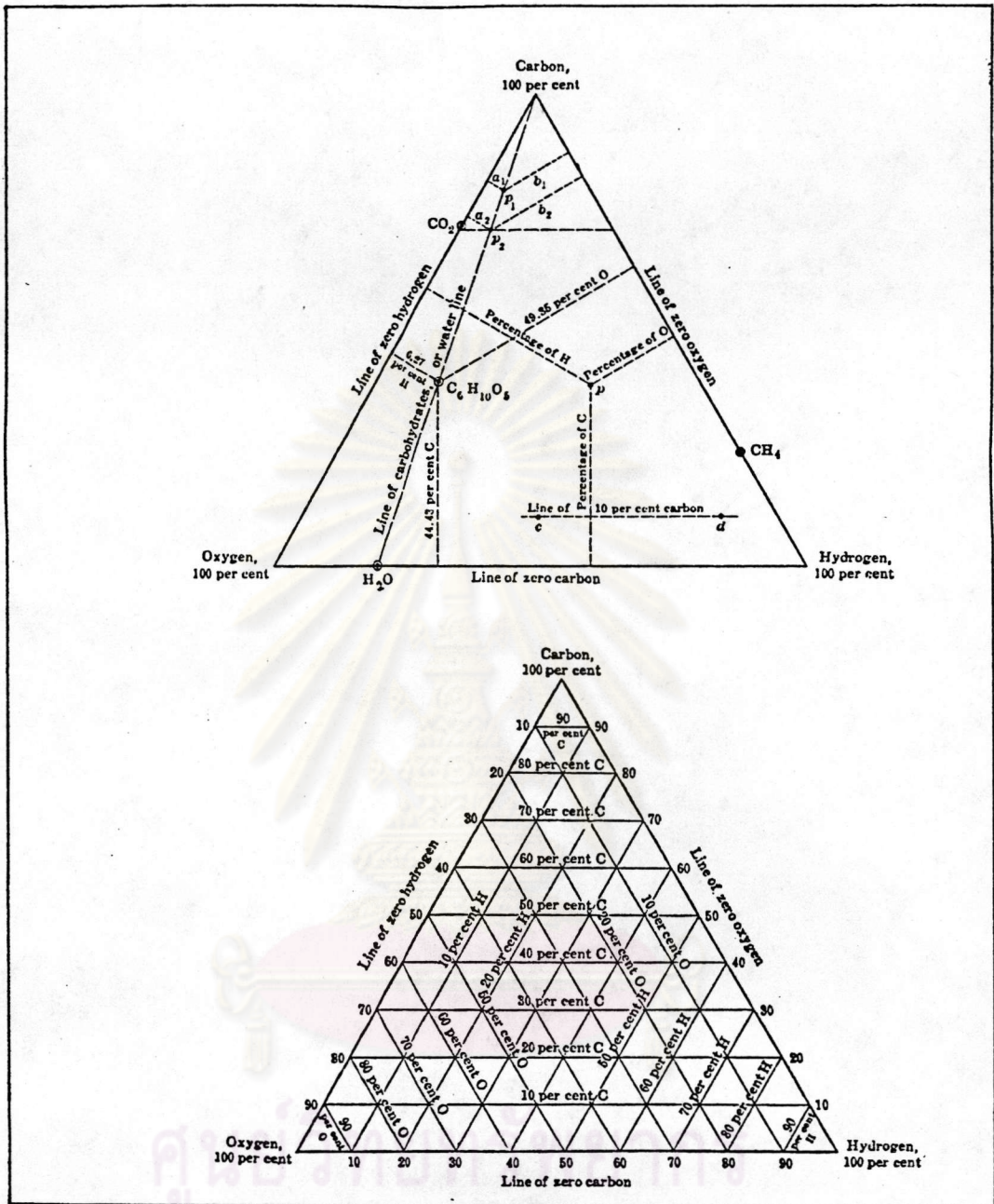
ตารางที่ 2.2 แสดงการสกัดลำดับชั้นของถ่านหิน โดย Grüner-Bousquet (15)

No. of Class	Character of Coal	C %	H %	F.C. %	V.M. %	C.V. cal/g	Nature of Coke
I	Dry, long flame, non-caking	75-80	4.5-5.5	60-55	40-45	8000-8500	Powdery or slightly coherent
II	Fat, long flame	80-85	5.0-5.8	68-60	32-40	8500-8800	Caked, but friable
III	Fat, "properly named"	84-89	5.0-5.5	74-68	26-32	8800-9300	Caked, moderately compact
IV	Fat, short flame	88-91	4.5-5.5	82-74	18-26	9300-9600	Caked, very compact, lustrous
V	Lean coals—semi-anthracites	90-93	4.0-5.5	90-82	10-18	9200-9600	Powdery or slightly coherent
VI	Anthracites	93-95	4.0-2.0	92-90	8-10	9110-9200	Non-coherent—powdery

N.B. (1) Data are on the ash-free-dry basis.

(2) Calorific values are too high, by modern standards, by ca. 600 cal/g.

ในปี ค.ศ. 1907 Grout และ Ralston (13) ได้พัฒนาผลการวิเคราะห์อย่างละเอียดของ %C, %H และ %O โดยไม่รวมปริมาณความชื้น และเก็บ มาสร้างแผนภาพสามเหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงแผนภาพสามเหลี่ยมของ Grout และ Ralston (13)

จะเห็นว่าผลรวมของเส้นตั้งฉากทั้งสามเส้นที่ลากจากจุดใด ๆ ไปยังด้านของสามเหลี่ยม เป็นค่าคงที่ ซึ่งเป็น %C, %H และ %O เช่น เซลลูโลส  $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$  เมื่อคำนวณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแต่ละธาตุ จะได้จุดตั้งแสดงในรูปที่ 2.16

ในปี ค.ศ. 1900 Seyler (13) ได้เสนอการจัดลำดับชั้นของถ่านหิน โดยพิจารณาจากปริมาณคาร์บอนเป็นหลัก และแบ่งเป็นตระกูล (genera) ซึ่งพิจารณาปริมาณไฮโดรเจนเป็นหลัก โดยไม่รวมความชื้นและสารอินทรีย์ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

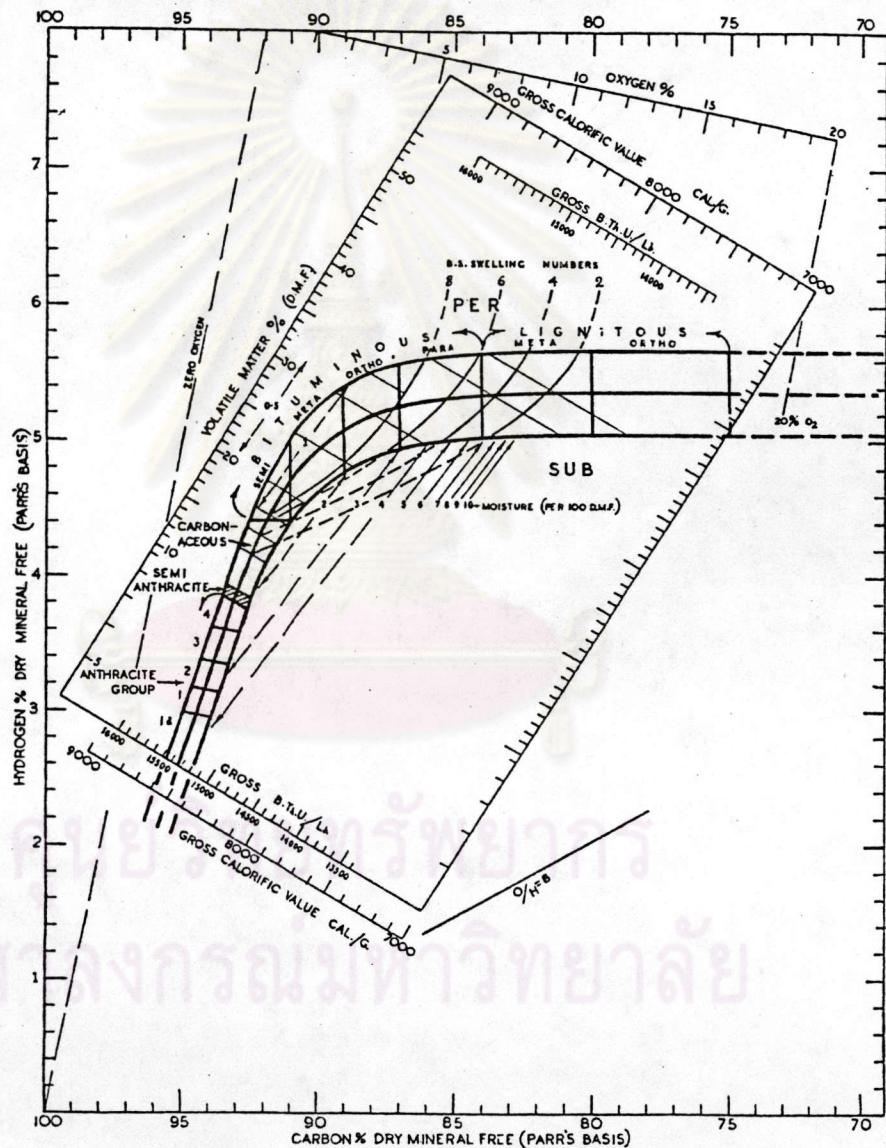


ตารางที่ 2.3 แสดงการลำดับชั้นของถ่านหินโดย Seyler (13)

Genera	Species						
	Anthracite	Carbonaceous	Bituminous			Lignitous	
			Meta-	Ortho-	Para-	Meta-	Ortho-
	Carbon over 93.3%	Carbon % 93.3—91.2	Carbon % 91.2—89.0	Carbon % 89.0—87.0	Carbon % 87.0—84.0	Carbon % 84—80	Carbon % 80—75
Per-bituminous Hydrogen > 5.8%	—	—	Per-bituminous (per-meta-bituminous)	Per-bituminous (per-ortho-bituminous)	Per-bituminous (per-para-bituminous)	Per-lignitous	
Bituminous, Hydrogen 5.0—5.8%	—	Pseudo-bituminous species	Meta-bituminous	Ortho-bituminous	Para-bituminous	Lignitous Meta Ortho	
Semi-bituminous Hydrogen 4.5—5.0%	—	Semi-bituminous species (ortho- semi-bituminous)	Sub-bituminous (sub-meta-bituminous)	Sub-bituminous (sub-ortho-bituminous)	Sub-bituminous	Sub-lignitous Meta Ortho	
Carbonaceous Hydrogen 4.0—4.5%	Semi-anthracitic species	Carbonaceous species (ortho-carbonaceous)	Pseudo-carbonaceous (sub-meta-bituminous)	Pseudo-carbonaceous (sub-ortho-bituminous)	Pseudo-carbonaceous (sub-para-bituminous)		
Anthracitic Hydrogen < 4%	Ortho-anthracitic	Pseudo-anthracite (sub-carbonaceous)	Pseudo-anthracite (sub-meta-bituminous)	Pseudo-anthracite (sub-ortho-bituminous)	Pseudo-anthracite (sub-para-bituminous)		

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถ่านหินที่มีปริมาณของไฮโดรเจนในระดับต่าง ๆ กัน จะถูกเรียกโดยย่อว่า  
 นำหน้าเป็น ออร์โธ-, ซับ- และเปอร์- (ortho-, sub- and per-) สำหรับเปอร์เซนต์ไฮโดร-  
 เจนที่พบในระดับต่ำกว่าปกติ และระดับสูงกว่าปกติ ในบางครั้งอาจใช้คำนำหน้าเป็น  
 ซับ-ไฮดรอลิ และ เปอร์-ไฮดรอลิ (sub-hydrous and per-hydrous) นอกจากนี้  
 Seyler ได้สร้างแผนภาพแสดงการคัดลำดับชั้นของถ่านหิน ดังแสดงในรูปที่ 2.17



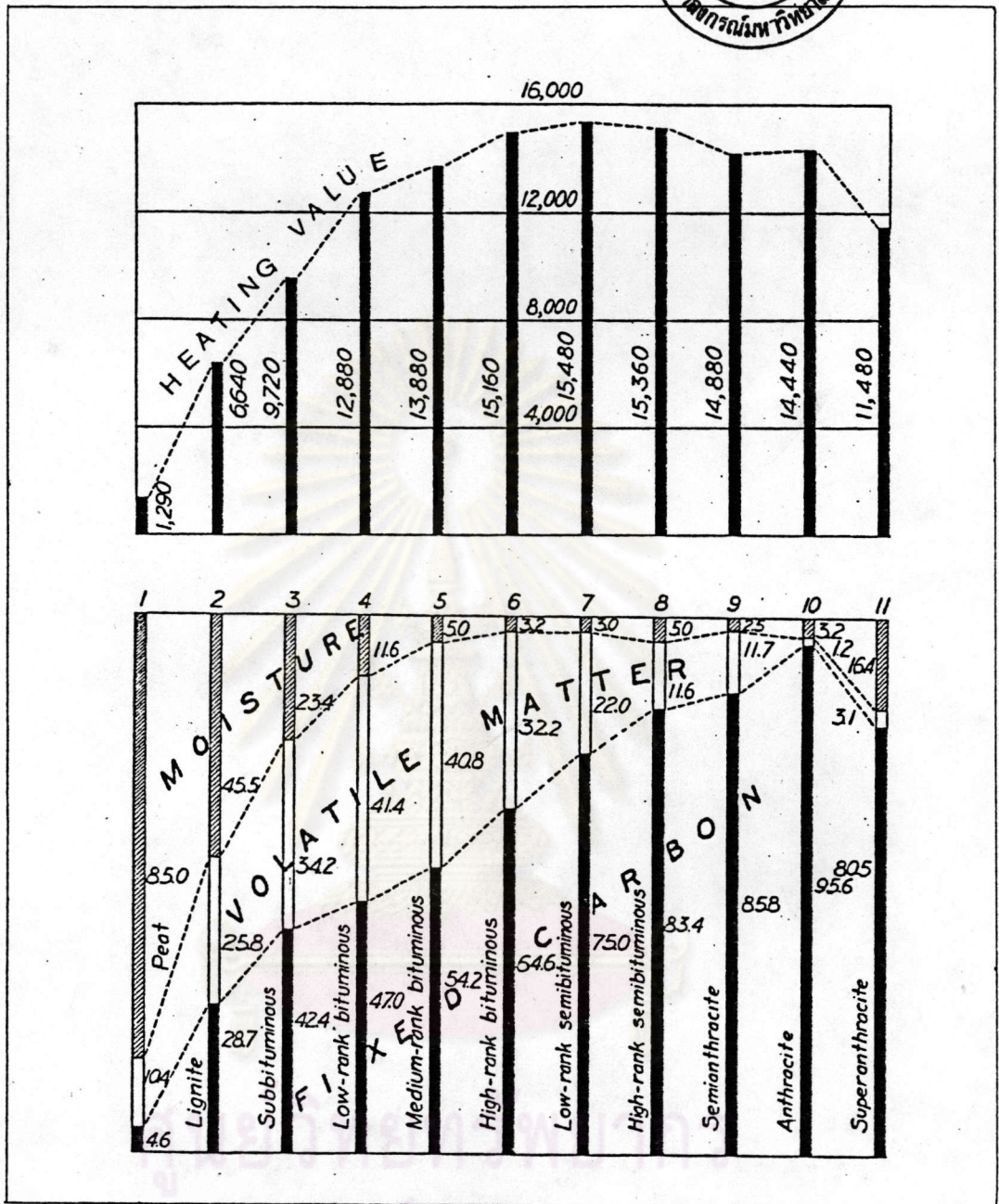
รูปที่ 2.17 แสดงแผนภาพการคัดลำดับชั้นของถ่านหินโดย Seyler (13)

Seyler ได้หาความสัมพันธ์ของคาร์บอนและไฮโดรเจน จะได้แผนภาพรูป-  
ใหญ่เป็นแถบโค้ง (เส้นทึบ) ในช่วงคาร์บอน 97-70% และไฮโดรเจน 2.0-5.8% ซึ่งสุดเป็น  
ถ่านหินอวิมิคชนิดปกติ ถ้าถ่านหินใดอยู่เหนือแถบโค้งขึ้นไป พบว่าเป็นถ่านหินที่มีไฮโดรเจนมาก  
กว่าปกติ เรียกว่า เพอร์-ไฮโดรลีส สำหรับถ่านหินที่อยู่ใต้แถบโค้ง ก็จะเป็นถ่านหินที่มีไฮโดร-  
เจนน้อยกว่าปกติ เรียกว่า ฮับ-ไฮโดรลีส ต่อมา Seyler ได้เพิ่มแผนภาพซึ่งสร้างจากค่าสาร-  
ระเหย และค่าความร้อนในรูปเล็ก นอกจากนี้ Seyler ยังได้สร้างสมการแสดงความสัมพันธ์  
ระหว่างคาร์บอน, ไฮโดรเจน, สารระเหย และค่าความร้อน เพื่อใช้สร้างแผนภาพไว้ด้วย  
การลำดับขั้นถ่านหินของ Seyler เป็นที่นิยมมาก เพราะให้ข้อมูลที่ถูกต้อง และมีประโยชน์

#### 2.6.2 การลำดับขั้นโดยพิจารณาจากผลการวิเคราะห์โดยประมาณ

ในปี ค.ศ. 1877 Frazer (14) เป็นคนแรกที่ลำดับขั้นของถ่านหิน  
โดยใช้ค่าความร้อน และอัตราส่วนของคาร์บอนคงตัวและสารระเหย ต่อมาในปี ค.ศ. 1906  
Campbell (16) ได้ศึกษาการลำดับขั้นของถ่านหิน และสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  
ค่าความร้อน, ปริมาณความชื้น, ปริมาณสารระเหย และปริมาณคาร์บอนคงตัวของถ่านหินคุณภาพ  
ต่าง ๆ จากพิท ถึงแอนทราไซต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.18

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.18 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความร้อน, ปริมาณความชื้น, ปริมาณสารระเหย และ ปริมาณคาร์บอนคงตัวของถ่านหินคุณภาพต่าง ๆ จากพีทถึงแอนทราไซต์ (16)

ปัจจุบันการลำดับขั้นของถ่านหิน ควรพิจารณาจากผลการวิเคราะห์โดยประ-  
 มาณ ที่สำคัญมี 3 แบบ คือ

- ก. ระบบของคณะกรรมการวิจัยและคณะกรรมการถ่านหินแห่งชาติอังกฤษ (15)

(The Fuel Research Board/National Coal Board-Coal Rank Code Numbers)

ระบบนี้คัดลำดับชั้นของถ่านหินโดยพิจารณาปริมาณสารระเหย (ไม่รวม ความชื้นและสารอินทรีย์) และคุณสมบัติการเป็นโค้กตามวิธีของ Gray-King

ย. ระบบของคณะกรรมการถ่านหินของกลุ่มเศรษฐกิจแห่งยุโรป (15)  
(Coal Committee of the Economic Committee for Europe)

การคัดลำดับชั้นของถ่านหินโดยระบบนี้ ได้นำระบบที่คณะกรรมการถ่านหิน แห่งชาติอังกฤษร่วมกับระบบของ ASTM เข้าด้วยกัน โดยพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์สารระเหย จากลำดับชั้นยังแบ่งออกเป็นกลุ่ม และกลุ่มย่อย ตามคุณสมบัติการเป็นโค้ก และคุณสมบัติการเป็นโค้ก

ค. ระบบ ASTM (15) (The American Society for Testing and materials)

พัฒนามาจากการคัดลำดับชั้นของถ่านหินตามแบบของ Campbell, Ashley และ Parr

Ashley (13) พบว่าความชื้นและปริมาณคาร์บอนมีผลต่อคุณภาพของถ่านหิน การคัดลำดับชั้นของ Parr (17) ใช้อัตราส่วนของค่าความร้อนกับสารระเหยเป็นตัวบอกคุณภาพ ของถ่านหิน ในขณะที่ Campbell (16) ใช้อัตราส่วนของคาร์บอนคงตัวกับสารระเหยเป็นตัว กำหนดคุณภาพของถ่านหิน จะเห็นได้ว่าการคัดลำดับชั้นของถ่านหินโดยระบบนี้ ปริมาณคาร์บอนและ สารระเหยเป็นตัวกำหนดคุณภาพของถ่านหินคักดีสูง (high rank coal) และค่าความร้อน (รวม ความชื้นและไม่รวมสารอินทรีย์) เป็นตัวกำหนดคุณภาพของถ่านหินคักดีต่ำ (low rank coal) ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.4 การสัคแบ่งถ่านหินตามศักดิ์ โดบวิธี ASTM D.388<sup>A</sup> (18)

Class	Group	Fixed Carbon Limits, percent (Dry, Mineral-Matter-Free Basis)		Volatile Matter Limits, percent (Dry, Mineral-Matter-Free Basis)		Calorific Value Limits, Btu per pound (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	
I. Anthracitic	1. Meta-anthracite	98	...	...	2	...	...	} nonagglomerating
	2. Anthracite	92	98	2	8	...	...	
	3. Semianthracite <sup>C</sup>	86	92	8	14	...	...	
II. 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	...	14 000 <sup>D</sup>	...	
	4. High volatile B bituminous coal	...	...	...	...	13 000 <sup>D</sup>	14 000	
	5. High volatile C bituminous coal	...	...	...	...	11 500	13 000	
III. Subbituminous	1. Subbituminous A coal	...	...	...	...	10 500	11 500	} nonagglomerating
	2. Subbituminous B coal	...	...	...	...	9 500	10 500	
	3. Subbituminous C coal	...	...	...	...	8 300	9 500	
IV. Lignitic	1. Lignite A	...	...	...	...	6 300	8 300	} nonagglomerating
	2. Lignite B	...	...	...	...	...	6 300	

<sup>A</sup> This classification does not include a few coals, principally nonbanded varieties, which have unusual physical and chemical properties and which come within the limits of fixed carbon or calorific value of the high-volatile bituminous and subbituminous ranks. All of these coals either contain less than 48 % dry, mineral-matter-free fixed carbon or have more than 15 500 moist, mineral-matter-free British thermal units per pound.

<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 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.

จากตารางที่ 2.4 จะเห็นว่าคุณภาพของถ่านหินจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น และปริมาณสารระเหยจะลดลง ในระหว่างที่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นถ่านหินที่มีคุณภาพดีขึ้นโดยความดันและความร้อน ถ่านหินชนิดต่าง ๆ จะมีสมบัติทางกายภาพที่เฉพาะต่าง ๆ กัน คือ

แอนทราไซต์ (Anthracite) เป็นถ่านหินที่มีคุณภาพสูงที่สุด มีลักษณะแข็งเปราะ มีสีดำเป็นมัน และเป็นเนื้อเดียวกัน มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง มีสารระเหยต่ำ ทำให้ติดไฟยาก เมื่อติดไฟจะให้ความร้อนสูงมาก และติดไฟอยู่นาน จึงนิยมใช้ในครัวเรือน หรือ ฉะนั้นก็บดเป็นชิ้นเล็ก ๆ ผสมกับถ่านหินชนิดอื่น แอนทราไซต์ยังแบ่งออกเป็นอีก 2 ชนิดย่อย ๆ คือ เมตา และ เซมิแอนทราไซต์

บิทูมินัส (Bituminous) เป็นถ่านหินที่มีลักษณะรวมตัวเป็นก้อนเมื่อถูกความร้อน มีปริมาณคาร์บอนคงตัวน้อยกว่าแอนทราไซต์ (ต่ำกว่า 86%) แต่มีสารระเหยมากกว่าให้ค่าความร้อนสูงกว่า และติดไฟง่ายกว่า ถ่านหินชนิดนี้แบ่งออกได้อีกเป็น 5 ชนิด คือ

1. บิทูมินัสที่มีปริมาณสารระเหยต่ำ
2. บิทูมินัสที่มีปริมาณสารระเหยปานกลาง
3. บิทูมินัสที่มีปริมาณสารระเหยสูง ประเภท A
4. บิทูมินัสที่มีปริมาณสารระเหยสูง ประเภท B
5. บิทูมินัสที่มีปริมาณสารระเหยสูง ประเภท C

บิทูมินัส 2 ชนิดแรกนี้มีลักษณะเป็นสีเทาดำ และเป็นแกรนูลาร์ ส่วนอีก 3 ชนิดหลัง มีลักษณะโครงสร้างที่แข็งแกร่ง ไม่แตกง่าย และมีความชื้น ปริมาณถ่าน และกำมะถันสูงกว่าพวกแรก

ซับบิทูมินัส (Sub bituminous coal) เป็นถ่านหินที่มีลักษณะผิวหน้าเรียบไม่เป็นชั้น มีสีน้ำตาลดำหรือดำ เป็นเนื้อเดียวกัน มีความชื้น 15-30% ให้ค่าความร้อน 8300-11500 ซีทียู/ปอนด์

ลิกไนต์ (Lignite) เป็นถ่านหินชั้นต่ำสุด มีสีน้ำตาล โครงสร้างเป็นแบบแผ่น มีกำเนิดมาจากพืช มีปริมาณสารระเหยและความชื้นสูง ให้ค่าความร้อนต่ำ มีความแข็งพอสมควร

พีท (Peat) ในหลาย ๆ ประเทศ และตาม ASTM ไม่นับพีทเป็นเชื้อเพลิง แต่จัดเป็นพวกเศษซากของพืชที่ทับถมกัน มีเค้ขดินหินไปปนอยู่ โดยที่เนื้อวัสดุสลายไปเพียงบางส่วน

มีลักษณะพรุน มีความชื้นสูงมาก ให้ค่าความร้อนต่ำ ปริมาณแก๊สสูง แต่มีปริมาณกำมะถันน้อย

## 2.7 การสกัดถ่านหินด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction)

ในการสกัดถ่านหินด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ เช่น เฮกเซน, โทลูอีน, แอลกอฮอล์, ปีโตรเลียม หรืออีเทอร์ สารประกอบอินทรีย์ที่ถูกสกัดออกมาอยู่ในตัวทำละลาย เรียกว่า บิทูเมน (bitumen) ส่วนของแข็งที่ไม่ถูกสกัดออกมาเรียกว่า เคอโรเจน (kerogen) ซึ่งในอดีตผู้ทำการวิจัยได้สกัดถ่านหินแล้วนำมาหาปริมาณของบิทูเมนเพื่ออธิบายถึงกลไกในการเกิดโค้ก แต่ได้ผลไม่ดีนัก เพราะสกัดด้วยตัวทำละลายชนิดธรรมดาซึ่งสกัดได้น้อยมาก ต่อมาในปลายศตวรรษที่ 19 Bedson (13) ได้ทำการสกัดถ่านหินด้วยไฟรดิน พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสกัดจะลดลงเมื่อคุณภาพของถ่านหินสูงขึ้น Mayo และ Kirshen (19) ทำการสกัดถ่านหินด้วยไฟรดิน เปรียบเทียบกับขบวนการ SRC (solvent-refined coal) จากถ่านหินแหล่งเดียวกัน แล้วนำมาแยกเป็นส่วน ๆ พบว่าทั้ง 2 กลุ่มมีองค์ประกอบและน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยคล้ายกัน และจากการทดลองเกี่ยวกับการเกิดพีนอลและไฟรดินอันตรกิริยา (interaction) สรุปได้ว่า ขบวนการ SRC ทำให้เกิดการแตกของพันธะอีเทอร์ (ether links) และทำให้มีการสูญเสียออกซิเจนและกำมะถัน โดยไม่ทำให้กลุ่มที่แสดงความเป็นกรดและเบสเปลี่ยนแปลงไปมากนัก แต่น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยจะเปลี่ยนไป

Schiller และ Mathiason (20) ได้พัฒนาวิธีแยกของเหลวจากถ่านหินโดยวิธีง่าย ๆ รวดเร็ว โดยให้ตัวอย่างถูกดูดซับบนอะลูมินา แล้วชะล้างออกมาด้วยเฮกเซน, โทลูอีน, คลอโรฟอร์ม และเตตระไฮโดรฟูแรน/10% เอทานอล สารประกอบหลักในแต่ละส่วนที่ถูกชะล้างมาได้คือ พวกไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว, อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน, เบนโซฟูแรน, อีเทอร์, สารประกอบไนโตรเจน และสารประกอบไฮดรอกซิล ตามลำดับ โดยการทดลองใช้ mass spectrometer ช่วยในการวิเคราะห์ด้วย

Schweighardt และ Thame (21) ได้ศึกษาวิธีแยกและบอกลักษณะเฉพาะของเหลวจากถ่านหิน โดยใช้หลักการละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ เพื่อเป็นการประหยัดเวลาและใช้อุปกรณ์ง่าย ๆ ซึ่งสามารถแบ่งสารประกอบออกได้เป็น 5 ประเภท คือ น้ำมัน, แอลส์ฟิลีน, สารประกอบที่ไม่ละลายในเบนซีน, ฟรีแอลส์ฟิลีน และสารประกอบที่ไม่ละลายในเตตระไฮโดรฟูแรน

Boduszynski และ Hurtubise (22) ได้ศึกษาวิธีแยกของเหลวจากขบวนการ SRC และ hydrotreated SRC โดยแยกออกเป็น 3 ประเภท คือ น้ำมัน ซึ่งละลายได้ใน



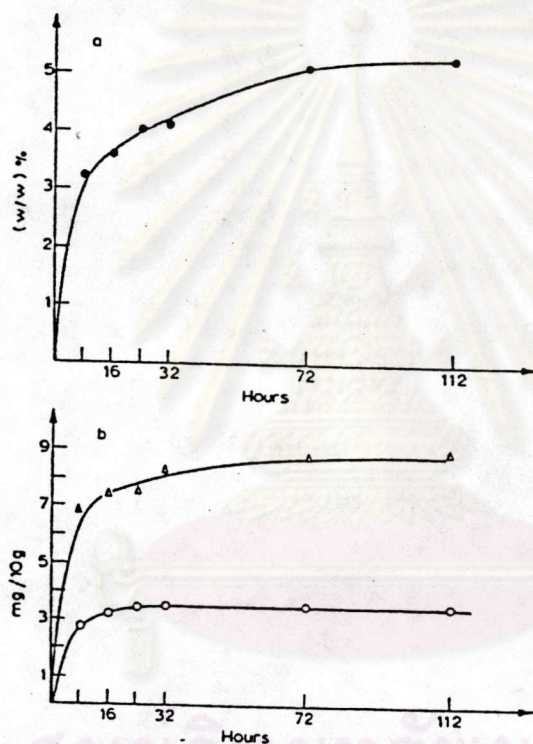
เอกเซน, แอลฟ์ลีนซึ่งเป็นส่วนที่ละลายได้ในโทลูอิน แต่ไม่ละลายในเอกเซน และพีแอลฟ์ลีน ซึ่งเป็นส่วนที่ละลายได้ในไพรีน แต่ไม่ละลายในโทลูอิน การแยกเป็นส่วน ๆ ทำได้โดยใช้เทคนิค ลิวิด โครมาโตกราฟี และใช้คอลัมน์ชนิดฟลูออโรแพค (fluoropac) แล้วนำมาชะล้างด้วยเอกเซน, โทลูอิน และไพรีน จากการทดลองสามารถทำการแยกออกเป็นพวก ๆ ได้ดีโดยไม่ต้องทำให้แห้ง และละลายใหม่อีก

Farcasiu (23) ได้ศึกษาหาวิธีแยก และหาลักษณะเฉพาะของน้ำมันถ่านหิน โดยอาศัยหลักการเก็บส่วนต่าง ๆ ของน้ำมันที่นำไปผ่านคอลัมน์โครมาโตกราฟี แล้วชะล้างออกด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ นำแต่ละส่วนนี้ไปวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่เฉพาะ เพื่อหาโครงสร้างของสารเหล่านี้

จากการศึกษาหาวิธีแยกของเหลวที่ได้จากถ่านหิน ทั้งจากขบวนการ SRC, ขบวนการ liquefaction, ขบวนการกลั่นสลาย และการสกัดถ่านหินด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ต่าง ๆ (24) นอกจากนี้จะบอกชนิดของสารประกอบในแต่ละส่วนแล้ว ในส่วนที่ 1 ซึ่งชะล้างด้วยเอกเซน ยังนำมาใช้ศึกษาต้นกำเนิดของถ่านหินได้อีกด้วย เป็นที่ทราบกันดีว่า ในโครงสร้างของถ่านหินประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดต่าง ๆ เช่น นอร์มัล-อัลเคน, อะไซคลิก ไอโซพรีนอยด์, สเตอเรน และเทอร์เพน ถึงแม้ว่าสารประกอบเหล่านี้จะถูกสกัดออกมาได้น้อย แต่ก็สามารถบอกได้ว่าเป็นสารชนิดใด สารเหล่านี้มีความสำคัญมาก เพราะสามารถไขข้อสงสัยถึงต้นกำเนิดของถ่านหินได้ (25,26) โครงสร้างของสารประกอบเหล่านี้มีความเสถียร(stability) ในขณะที่ฝังตัวอยู่เป็นระยะเวลานาน โดยที่โครงสร้างไม่เปลี่ยนแปลง จึงสามารถตรวจพบได้ในถ่านหิน, น้ำมันปิโตรเลียม, หินน้ำมัน และดินตะกอนที่สะสมมาเป็นเวลานาน หรือเพิ่งจะสะสม โครงสร้างของสารประกอบที่ตรวจพบนี้มีความสัมพันธ์กับสิ่งมีชีวิต จึงสามารถไขข้อสงสัยถึงต้นกำเนิดของถ่านหินได้ (27) โดยเฉพาะกลุ่มอัลเคนซึ่งได้จากปฏิกิริยารีดักชันของกรดไขมัน กลุ่มอัลเคนเหล่านี้มีพันธะ -C-C- และ H-C- ที่ทนทานต่อปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น สิ่งมีชีวิตในธรรมชาติ ในพืชชั้นสูงจะมีกรดไขมันโซ่ตรง ซึ่งมีคาร์บอนเป็นเลขคู่ในระหว่าง  $C_{20}$  ถึง  $C_{34}$  สำหรับพืชชั้นต่ำ เช่นสาหร่าย มีกรดไขมันโซ่ตรง ซึ่งมีคาร์บอนเป็นเลขคู่ คือ  $C_{18}$  ในระหว่างการสะสมของซากพืชเหล่านี้ จะเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันของกรดไขมันได้ นอร์มัล-พาราฟินเป็นเลขคี่ สำหรับพืชชั้นสูงจะมีคาร์บอนเลขคี่ระหว่าง  $C_{19}$  ถึง  $C_{33}$  สำหรับสาหร่ายเป็นคาร์บอนเลขคี่ คือ  $C_{17}$  ดังนั้นจากการวิเคราะห์หื่อนอร์มัลพาราฟิน ทำให้ทราบถึงต้นกำเนิดของถ่านหินว่ามีต้นกำเนิดมาจากพืชชั้นสูงหรือจากสาหร่าย สำหรับอัลเคนชนิดอื่น เช่น พรีสเทน (pristane) และไฟเทน (phytane)

ซึ่งตรวจพบในน้ำขุ่น, ถ่านหิน และดินตะกอน พบว่ามีต้นกำเนิดมาจากคลอโรฟิลล์ (28) นอกจากนี้ Jones และคณะ (29) พบว่า ไฮโดรคาร์บอนพวกไซคลิก-อัลเคน เช่น ไตรเทอร์เพน, สเตอรอยด์ มีต้นกำเนิดมาจากสเตอรอยด์, ไตรเทอร์พีนอยด์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของสิ่งมีชีวิตหลายชนิด

สำหรับการศึกษาความสมบูรณ์ของการเป็นถ่านหิน Alexander และคณะ (30) ได้ทำการศึกษาโดยทำการสกัดถ่านหินคุณภาพต่าง ๆ ด้วยโทลูอีน/25% เอทานอล โดยใช้เวลาในการสกัดต่าง ๆ กัน ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แสดงปริมาณผลิตภัณฑ์ที่สกัดได้จากถ่านหินลิกไนต์ที่เมือง Torony ในระยะเวลาต่าง ๆ กันคือ

- a. • เป็นผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่ได้จากการสกัด
- b. • เป็นปริมาณอะซิฟแลคไฮโดรคาร์บอน
- เป็นปริมาณอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

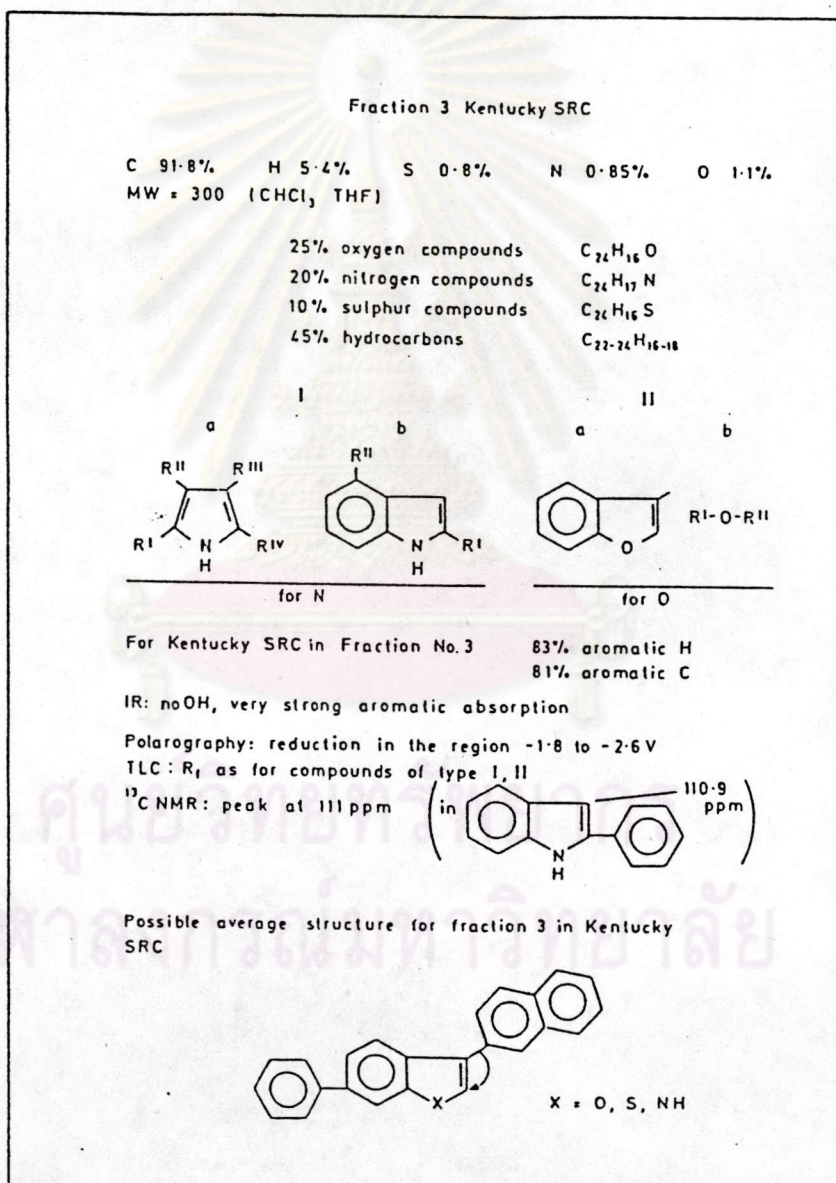
นำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสกัดนี้ไปแยกเป็นส่วน ๆ โดยใช้เทคนิคทาง ลิกวิด

โครมาโตกราฟี ตามวิธีของ Farcasiu (23) โดยใช้ตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ ะล้างผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสกัด สามารถแยกสารประกอบออกเป็นส่วนต่าง ๆ คือ

ส่วนที่ 1 ะล้างด้วยเฮกเซน จะประกอบด้วยพวกไฮโดรคาร์บอนที่อิ่มตัว ทั้งที่เป็น ไซโตรเจน, โพลีแกม และเป็นวง ซึ่งส่วนนี้มีปริมาณน้อย

ส่วนที่ 2 ปลายด้วยเฮกเซน/15% เบนซีน ประกอบด้วย พวอะโรมาติก, ไฮโดรอะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน

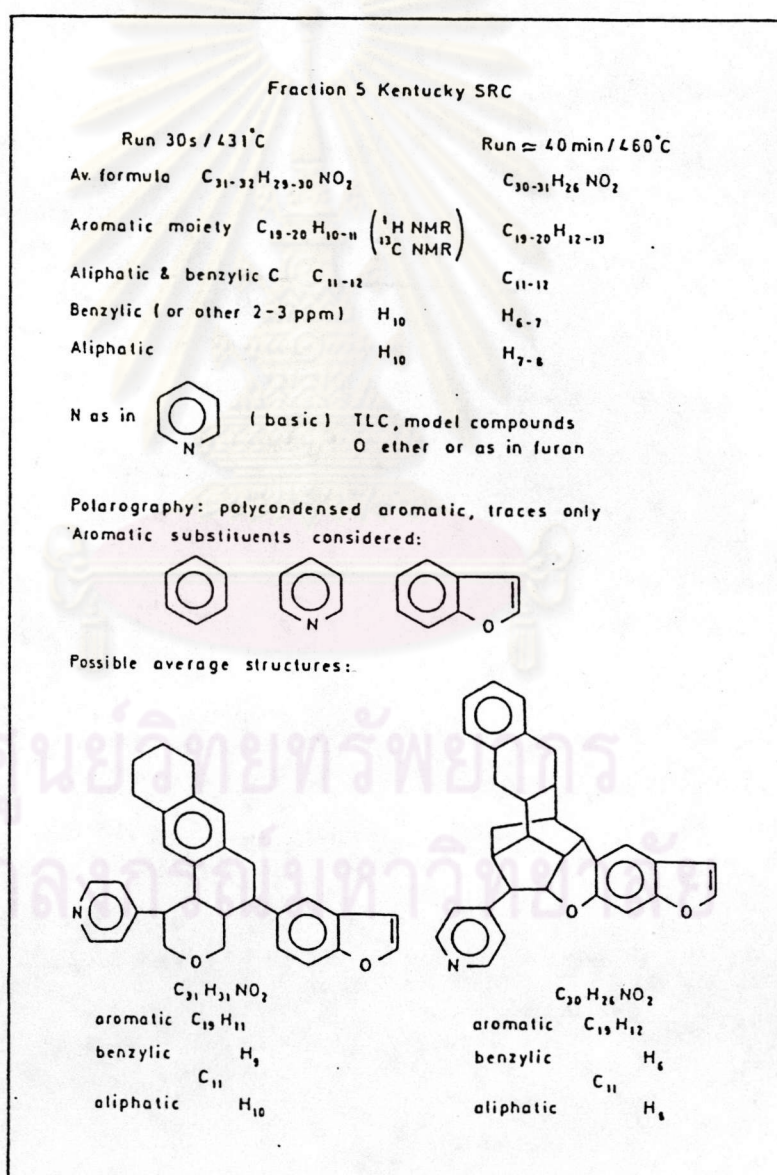
ส่วนที่ 3 ปลายด้วยคลอโรฟอร์ม เป็นส่วนแรกที่สารประกอบโพลาร์เริ่มถูกปลายออกจากคอลัมน์ เป็นสารประกอบพวโพลาร์อะโรมาติกที่มีธาตุ N, O และ S อยู่ในโครงสร้าง มีสภาพไม่เป็นเบส (nonbasic) จากการแยกของเหลวจากถ่านหินจากเมือง Kentucky โดยวิธีนี้ พบว่าส่วนนี้มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 300 ซึ่งโครงสร้างที่เป็นไปได้ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แสดงโครงสร้างที่เป็นไปได้ของสารประกอบในส่วนที่ 3 ซึ่งถูกปลายด้วยคลอโรฟอร์ม (23)

ส่วนที่ 4 ฆ่าล้างด้วยคลอโรฟอร์ม/10% โดเอทิลอีเทอร์ เป็นสารประกอบพวกโมโน-ฟีนอล จากการแยกของเหลวจากถ่านหินจากเมือง Kentucky แล้วนำไปศึกษาโดยใช้เทคนิค thin-layer chromatography และ infrared spectrophotometry มีสูตรโครงสร้างที่เป็นไปได้คือ  $C_{22}H_{16}O$  และ  $C_{22}H_{17}NO$

ส่วนที่ 5 ฆ่าล้างด้วยโดเอทิลอีเทอร์/3% เอทานอล จากการศึกษพบว่า โมโนโคร-สร้างของสารประกอบ มีไนโตร เจนอยู่เป็นจำนวนมาก และตรวจพบว่ามีสภาพเป็นเบส โครงสร้างที่เป็นไปได้ของสารประกอบในส่วนที่ 5 จากการตรวจวิเคราะห์ของเหลวจากถ่านหินของเมือง Kentucky พบว่ามีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แสดงโครงสร้างที่เป็นไปได้ของสารประกอบในส่วนที่ 5 ซึ่งถูกฆ่าล้างด้วยโดเอทิล-อีเทอร์/3% เอทานอล (23)

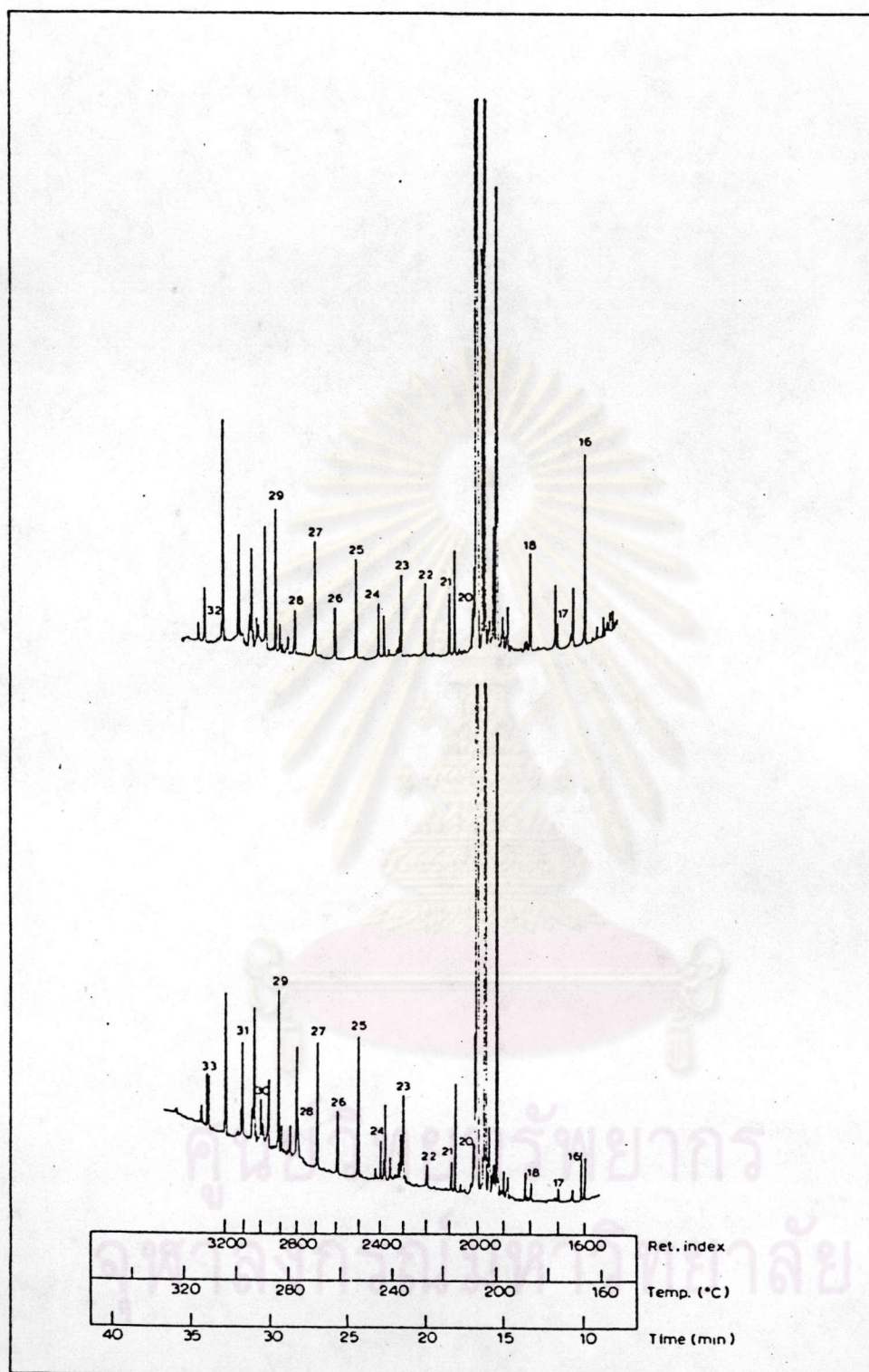
ส่วนที่ 6 ะล้างด้วยเมทานอล สารประกอบส่วนนี้พบว่าเป็นโพลาร์มากที่สุด มีหมู่ทำหน้าที่เฉพาะในโมเลกุลมาก ส่วนรายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างกำลังทำการศึกษาคือ

ส่วนที่ 7 ะล้างด้วยคลอโรฟอร์ม/3% เอทานอล สารประกอบส่วนนี้มีจำนวนออกซิเจนในโครงสร้างอยู่มาก เป็นสารประกอบพวกโพลีฟีนอล สำหรับลักษณะเฉพาะของส่วนนี้กำลังทำการศึกษาคือ

สารประกอบแต่ละส่วนในของเหลวที่สกัดได้จากถ่านหินนั้นมีปริมาณไม่เท่ากัน ซึ่งสามารถบอกถึงลักษณะเฉพาะของถ่านหินในแต่ละแหล่ง ถ่านหินที่มีความสมบูรณ์ของการเป็นถ่านหินจะมีสารประกอบโพลาร์น้อย เนื่องจากเกิดการสูญเสียโมเลกุลที่มีหมู่ทำหน้าที่เฉพาะต่าง ๆ ในระหว่างการทับถมอยู่ใต้พื้นดิน

นอกจากนี้ เมื่อวิเคราะห์ส่วนที่ 1 ซึ่งะล้างด้วยเฮกเซนไปริเคราะห้หาค่าองค์ประกอบพาราฟินิกไฮโดรคาร์บอน โดยเทคนิค gas chromatography พบว่าถ่านหินแต่ละชนิดมีโครมาโตแกรมต่างกัน ออกไปเป็นลักษณะเฉพาะดังแสดงในรูปที่ 2.22, 2.23, และ 2.24

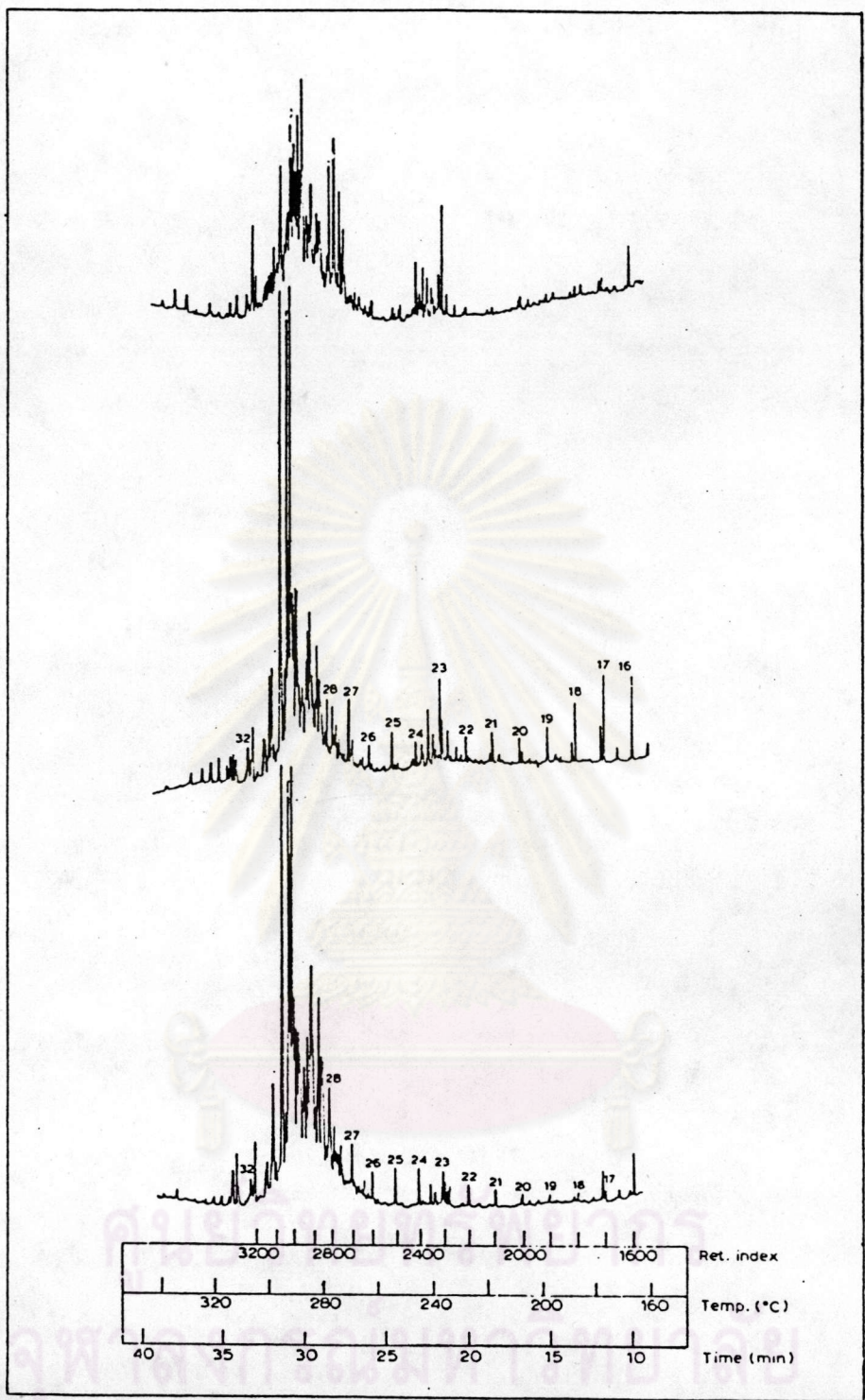
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.22 แสดงโครมาโตแกรมของอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนของถ่านหินลิกไนต์จาก

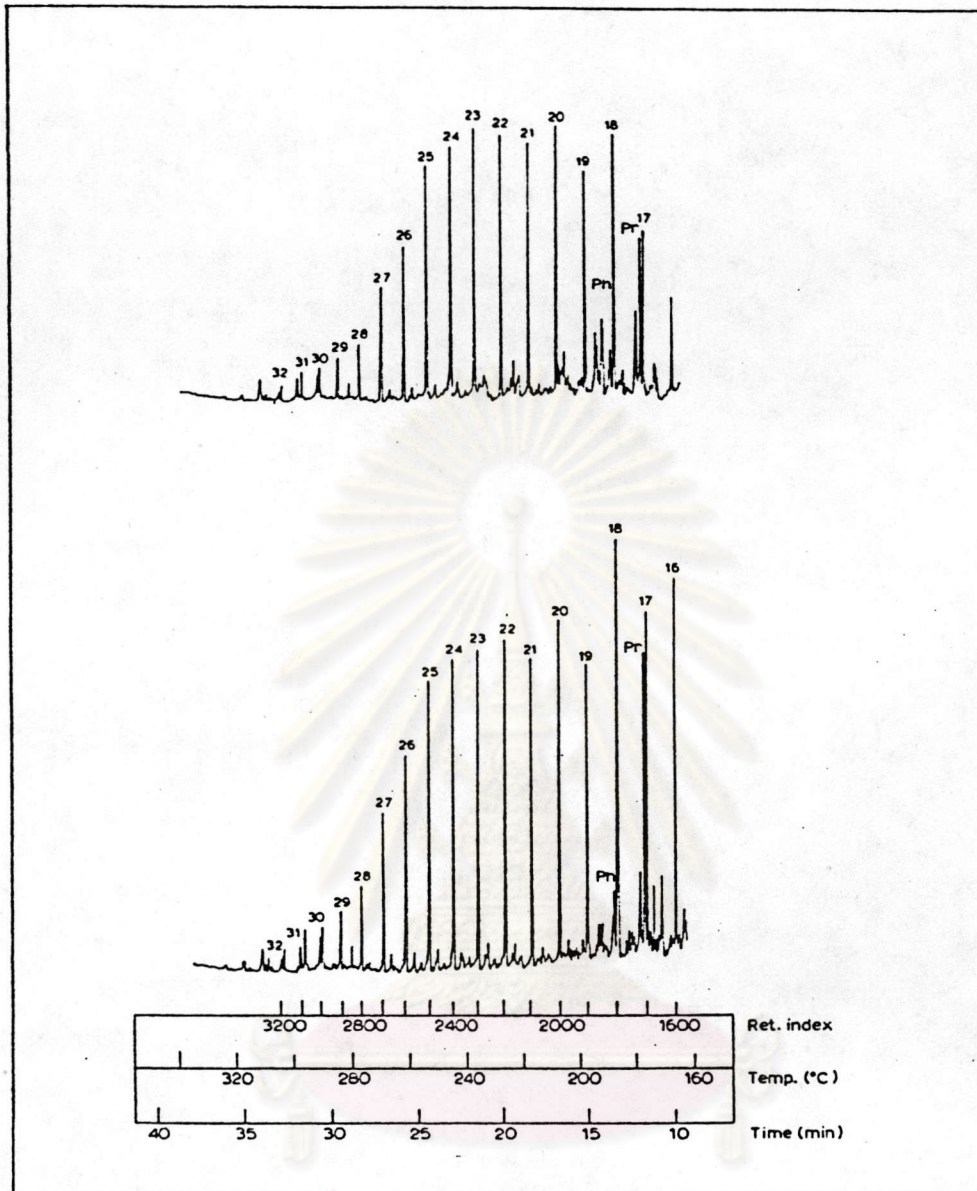
ก. เมือง Gyonyosvisonta (30)

ข. เมือง Torony (30)



รูปที่ 2.23 แสดงโครมาโตแกรมของอะลิแฟติก ไฮโดรคาร์บอนของถ่านหินสีน้ำตาล จากแหล่งต่าง ๆ

- ก. เมือง Dorog (30)
- ข. เมือง Tatabanya k/I (30)
- ค. เมือง Tatabanya k/II (30)



รูปที่ 2.24 แสดงโครมาโตแกรมของอะลิฟาติก ไฮโดรคาร์บอน ในถ่านหินชนิดแข็ง (hard coal), Pr = Pristane, Ph = Phytane จากแหล่ง  
 ก. เมือง Komlo (30)  
 ข. เมือง Pecs (30)

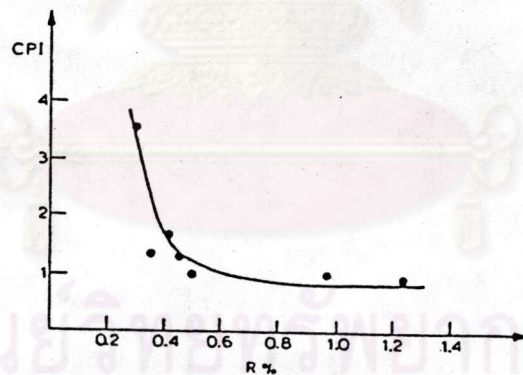


จากโครมาโตแกรมพบว่า การกระจายของนอร์มัล-อัลเคนเป็น homologous series ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของถ่านหินคุณภาพต่าง ๆ สำหรับถ่านหินชนิดลิกไนต์ การกระจายจะมีมากในช่วงนอร์มัล-อัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนสูง และจะเลื่อนไปทางนอร์มัล-อัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนต่ำกว่าเมื่อถ่านหินมีคุณภาพสูงขึ้น เนื่องจากเกิดการสลายพันธะของนอร์มัล-อัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนสูง โดยความร้อน และความดันในขณะที่สะสมตัวอยู่ที่พื้นโลก

จากโครมาโตแกรม ความสูงของพีกเป็นสัดส่วนกับปริมาณของสารพาราฟินิกไฮโดรคาร์บอน ดังนั้นจึงสามารถนำไปคำนวณหาค่า "carbon preference index" จากสูตร

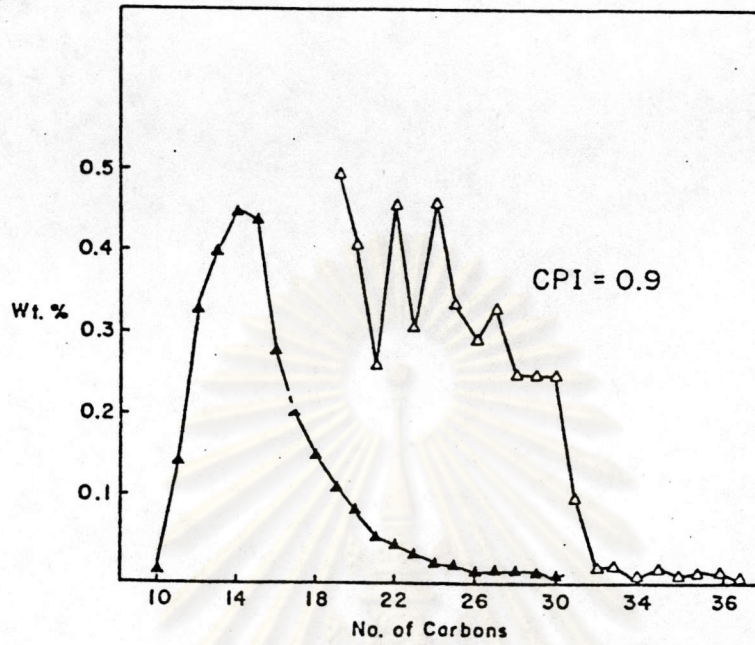
$$CPI = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sum \text{conc}^n C_{17}-C_{31}}{\sum \text{conc}^n C_{16}-C_{30}} + \frac{\sum \text{conc}^n C_{17}-C_{31}}{\sum \text{conc}^n C_{18}-C_{32}} \right]$$

เป็นค่าแสดงการกระจายของนอร์มัล-อัลเคนซึ่งบอกความแตกต่างระหว่างปริมาณของนอร์มัล-อัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนเลขคี่ และคาร์บอนเลขคู่ (30) ซึ่งเมื่อนำค่า CPI นี้ไปหาความสัมพันธ์กับ % การสะท้อน ซึ่งพบว่าไม่เป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CPI และ % การสะท้อนของถ่านหินคุณภาพต่าง ๆ (30)

Farmum และคณะ (31) ทำการวิเคราะห์นอร์มัล-อัลเคนที่ได้จากการสกัดด้วยคลอโรฟอร์ม และนอร์มัล-อัลเคนที่ได้จากขบวนการ liquefaction พบว่านอร์มัล-อัลเคนที่ได้จากการสกัดมีปริมาณน้อยกว่านอร์มัล-อัลเคนที่ได้จากขบวนการ liquefaction 10% แสดงว่าการสลายพันธะในระหว่างขบวนการ liquefaction ทำให้เกิดนอร์มัล-อัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนต่ำเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายของนอร์มัล-อัลเคนที่ได้จากถ่านหินชนิดบิทูมินัส จากเมือง Powhatau (31)

- △ จากการสกัดด้วยคลอโรฟอร์ม
- ▲ จากขบวนการ liquefaction

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย