

## บทที่ 2

### วารสารปริทรรศน์

#### 2.1 ความหมายของถ่านกัมมันต์ (Active หรือ Activated carbon)

หมายถึง ผลิตภัณฑ์ได้จากการนำเอาวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาผ่านกระบวนการก่อกัมมันต์จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำ มีโครงสร้างเป็นรูพรุนมีพื้นที่ผิวสูง มีสมบัติดูดซับสูง (พินพิมล ลิง ชิววงศ์,2537)

2.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ (บุญชัย ตระกูลมหชัย,2536) วัสดุที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ ควรมีสมบัติดังต่อไปนี้

- เป็นของเหลือทิ้ง หรือมีราคาถูก
- มีปริมาณคาร์บอนสูง
- มีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำ
- มีความสะดวกในการนำมาใช้งาน เช่น ไม่สลายตัวเมื่อเก็บ
- สามารถผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ที่คุณภาพสูงได้

ตัวอย่างสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งจะเห็นว่า วัสดุที่ใช้จะมีค่าต่ำ อย่างไรก็ตามสมบัติของถ่านกัมมันต์ยังขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ กล่าวคือ วัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำและปริมาณสารระเหยสูง เช่น ไม้ ลิกนิน เป็นต้น มักจะให้ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาตรรูพรุน (Pore volume) สูง และความหนาแน่นต่ำ ซึ่งใช้ในการดูดซับสารละลายได้ดีแต่ดูดซับแก๊สได้ไม่ดี ส่วนวัสดุที่มีความหนาแน่นสูงและมีสารระเหยสูง เช่น กะลามะพร้าว กะลาตาลโดนด ซึ่งมีค่าปริมาณสารระเหยร้อยละ 80.1 และ 80.8 ตามลำดับ (บุญชัย ตระกูลมหชัย,2536) จะทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาตรของรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore volume) สูง สามารถดูดซับได้ทั้งในสารละลายและแก๊ส นอกจากนี้สมบัติของถ่านกัมมันต์ยังขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ อีก เช่น วิธีการผลิต เครื่องมือมือที่ใช้ในการผลิตและภาวะที่ใช้ในการผลิต เป็นต้น ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะระบุให้แน่ชัดว่าวัสดุชนิดใดจะใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมกับงานแบบใด

ตารางที่ 2.1 สมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์และการใช้ประโยชน์

วัสดุ	ค่าคาร์บอน %	ค่าสารระเหย %	ค่าความหนา แน่น (g/cc)	ค่าเถ้า %	การใช้ประโยชน์ (การดูดซับใน)
ไม้เนื้ออ่อน	40-45	55-60	0.40 -0.50	0.3 -1.1	สารละลาย
ไม้เนื้อแข็ง	40-42	55-60	0.55-0.80	0.3-1.2	สารละลาย
ลิกนิน	35-40	58-60	0.30-0.40	-	สารละลาย
เปลือกถั่ว	40-45	55-60	1.40	0.5-0.6	ไอ
ลิกไนท์	55-70	25-40	1.00-1.35	5.0-6.0	การบำบัดน้ำ
ถ่านหินเนื้ออ่อน	65-80	20-30	1.25-1.50	2.0-1.2	สารละลาย
ปิโตรเลียมโค้ก	70-85	15-20	1.35	0.5-0.7	การบำบัด
ถ่านหินเนื้อกึ่งแข็ง	70-75	10-15	1.45	5.0-15	ไอ
ถ่านหินเนื้อแข็ง	85-95	5-10	1.50-1.80	2.0-15	ไอ

ที่มา :Bansel and coworker,1988

2.3 ชนิดของถ่านกัมมันต์ สามารถแบ่งออกได้โดยใช้หลักต่างๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสะดวกของผู้ใช้ ตัวอย่างการแบ่งชนิดของถ่านกัมมันต์ (เกศรา นุตาลัย,2532) ได้แก่

#### 2.3.1 แบ่งตามชนิดของตัวกระตุ้น

##### ก. กระตุ้นทางเคมี (chemical activated carbon)

เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับผิวคาร์บอน มักเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ตัวกระตุ้นที่ใช้ได้แก่  $ZnCl_2$  และ  $NaCl$

##### ข. กระตุ้นทางฟิสิกส์ (Physical activated carbon)

เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้แก๊สออกซิไดซ์ เช่น ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีรูพรุนขนาดเล็ก นิยมใช้ในการดูดแก๊ส และไอระเหย

#### 2.3.2 แบ่งตามขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์

ก. ขนาดเล็ก (Micropore) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนประมาณ 1.5 นาโนเมตร มักใช้ในการดูดซับแก๊ส หรือ ไอระเหย

ข. ขนาดกลาง (Transitional pore หรือ Mesopore) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีรูพรุนประมาณ 1.5 ถึง 100 นาโนเมตร มักนำไปใช้ประโยชน์ในปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic reaction) ดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น การฟอกสี

ค. ขนาดใหญ่ (Macropore) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนมากกว่า 100 นาโนเมตร โดยปกติไม่มีความสำคัญในการดูดซับสารต่าง ๆ แต่เป็นตัวช่วยให้สารที่ถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปยังรูพรุนเล็กได้ง่ายขึ้นมักนำไปใช้ประโยชน์ในการฟอกสีและการผลิตยา

### 2.3.3 แบ่งตามลักษณะของรูปร่าง

ก. ประเภทเป็นผง (Powder) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 นาโนเมตร ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก มีลักษณะผงใช้สำหรับฟอกสีในของเหลว ดูดกลิ่นสารละลายได้หลายชนิด

ข. ประเภทเป็นเม็ด (Pellet) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 นาโนเมตร ไม่น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนักมีลักษณะเป็นเม็ดซึ่งได้จากการอัดผ่านเครื่องอัดหรืออาจทำเป็นเกล็ดใช้สำหรับทำแก๊สให้บริสุทธิ์หรือการทำตัวทำละลายที่ใช้แล้วให้บริสุทธิ์ นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาของแก๊ส และใช้ทำหน้ากักป้องกันแก๊สและไอพิษต่างๆ

### 2.3.4 แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์

ก. ความหนาแน่นต่ำ มักใช้ประโยชน์ในภาวะที่เป็นสารละลาย เช่น ฟอกสีน้ำตาลดิบหรือทำน้ำให้บริสุทธิ์

ข. ความหนาแน่นสูง ใช้ในการดูดซับแก๊สหรือไอระเหย

### 2.3.5 แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ

ก. Gas adsorbents หมายถึงถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับแก๊สพิษ กลิ่นและไอของสารอินทรีย์ ส่วนใหญ่เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นถ่านประเภท Hard artificial char ซึ่งเป็นถ่านที่ได้จากเมล็ดผลไม้และถ่านไม้ที่เผาที่ความดันสูง

ข. Colour adsorbents หมายถึง ถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นตัวฟอกสี ส่วนมากเป็นการเผาถ่านประเภท Soft artificial char ซึ่งเป็นถ่านที่ได้จาก ถ่านไม้ ถ่านขาน้อย ถ่านจากแกลบ ถ่านจากหิน น้ำมันและถ่านจากกากน้ำตาล

ค. Metal adsorbents หมายถึง ถ่านกัมมันต์ที่เป็นตัวแยกพวกโลหะต่างๆ เช่น ถ่านที่ใช้ในการแยกทอง เงิน พัลลัดินัมจากแร่ นอกจากนี้ยังแบ่งตามภาวะที่ใช้ เช่น Liquid - Phase Carbon ; Gas - Phase Carbon

2.4 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ (เกศรา นุตาลัย และคณะ,2532) กรรมวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์มีมากมายหลายวิธี ซึ่งขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบและสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ แต่โดยทั่วไปประกอบด้วยขั้นตอน 3 ขั้นตอนดังนี้ คือ การเตรียมวัตถุดิบ การคาร์บอนไนซ์ และการกระตุ้น

2.4.1 การเตรียมวัตถุดิบ ถ่านกัมมันต์ผลิตได้จากวัตถุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ ไม้เลื้อย กะลามะพร้าว แกลบ เปลือกถั่ว ยางรถยนต์เก่า ถ่านหิน พีท เป็นต้น ซึ่งการผลิตถ่านกัมมันต์สามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรง หรือเริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้วก็ได้ ขึ้นอยู่กับการผลิต (อรนุช ขาวเมื่อน้อย และ ศุภสิทธิ กิติชัย,2538) แต่โดยทั่วไปมักนำวัตถุดิบมาบดและคัดขนาดก่อนที่จะนำมาคาร์บอนไนซ์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคาร์บอนไนซ์แล้วจึงนำมาบดและคัดขนาดก็ได้ (บุญชัย ตระกูลมหชัย,2536)

2.4.2 การคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) การคาร์บอนไนเซชันเป็นกระบวนการไพโรไลซิสรูปแบบหนึ่งที่จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ในรูปของชาร์ (Char) ที่เป็นของแข็งมากกว่าน้ำมันทาร์ (Tar) และแก๊สหรืออาจกล่าวได้ว่าการคาร์บอนไนซ์เป็นการเพิ่มเปอร์เซ็นต์คาร์บอนให้สูงขึ้น โดยการเผาในที่อับอากาศที่อุณหภูมิ 200 - 500 องศาเซลเซียส

ปฏิกิริยาไพโรไลซิสต้องการความร้อนทั้งทางตรงและทางอ้อมที่ได้จากการออกซิเดชันเพียงบางส่วนหรือจากปฏิกิริยาอื่นๆที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งในปัจจุบันกระบวนการสลายตัวทางความร้อนในภาวะที่ออกซิเจนน้อย หรือในที่ที่มีการถ่ายเทความร้อนทำให้เกิดการไพโรไลซิสโดยตรง จากการเผาไหม้บางส่วนของชาร์และแก๊สเรียกได้ว่าเป็น "กระบวนการไพโรไลซิส" (Kohoan และ Barkordor,1979)

Kohoan และ Barkordor,1979 ได้ให้คำนิยามกว้างๆของ กระบวนการไพโรไลซิส เป็นเทคโนโลยีที่วัตถุที่ประกอบด้วยคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักเกิดการสลายตัวด้วยความร้อน โดยมีอาณาเขตอย่างน้อยหนึ่งอาณาเขตที่เกิดการสลายตัวทางความร้อนในที่ที่ไม่มีออกซิเจน

Reed และ Janzen,1979 ได้อธิบายถึงความแตกต่างของเทอมไพโรไลซิส แก๊สซิฟิเคชัน และการเผาไหม้ไว้ว่ากระบวนการเหล่านี้เป็นกระบวนการพื้นฐาน คือ ปริมาณอากาศที่ใช้มีส่วนสัมพันธ์กับปริมาณเชื้อเพลิงไพโรไลซิสโซนเป็นส่วนที่มีอากาศน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ของอากาศที่ใช้ทางทฤษฎี การเผาไหม้ คืออากาศระหว่าง 25 - 50 เปอร์เซ็นต์เป็นส่วนของ แก๊สซิฟิเคชัน และส่วนของการเผาไหม้มีอากาศตั้งแต่ 100 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป

การไพโรไลซิส แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การไพโรไลซิสแบบช้าและแบบรวดเร็ว การไพโรไลซิสแบบช้าจะเกิดสมดุลในบริเวณช่วงแคบ(Local equilibrium) ด้วยอัตราการให้ความร้อนช้าพอที่จะทำให้เกิดความสมดุลตามอุณหภูมิ กรณีนี้ปริมาณและการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์จะขึ้นอยู่กับ

แนวของอุณหภูมิเดิม ส่วนการไพโรไลซิสแบบรวดเร็วจะไม่คำนึงถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงการให้ความร้อนแต่จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ของช่วงอุณหภูมิสุดท้าย

การคาร์บอนไนซ์เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์เพราะเป็นขั้นตอนเริ่มต้นการเกิดโครงสร้างที่เป็นรูพรุน โดยการทำให้เกิดการแตกตัวทางเคมีของสารที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจน ออกมาในรูปของแก๊ส คาร์บอนอิสระที่มีอยู่จะรวมตัวกันในรูปของชาร์ ถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ควรจะมีลักษณะดังนี้ (Hassler, 1974)

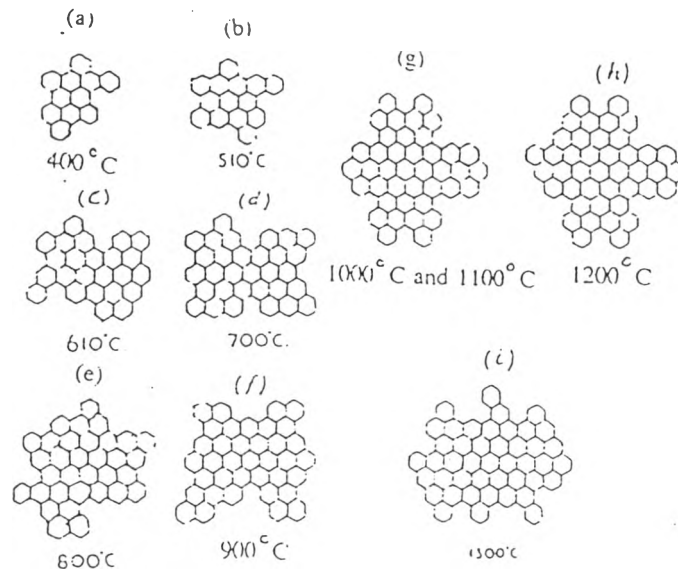
- มีสีดำตลอด (Uniformly black)
- เมื่อหักดู ส่วนที่หักจะมีผิวมันเงา
- ปลายที่หักจะแหลมคม (Sharp)
- ปราศจากผงฝุ่นและขี้เถ้า

ถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ มีความสามารถในการดูดซับต่ำทั้งนี้เพราะว่าการทำถ่านชาร์ใช้อุณหภูมิประมาณ 300 - 500 องศาเซลเซียส ซึ่งยังคงมีน้ำมันทาร์ตกค้างอยู่ภายในช่องว่าง (Pore) หรือเกาะอยู่ตามผิวจึงจำเป็นต้องนำถ่านนี้ไปผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับ ดังนั้นการกระตุ้นจึงเป็นเพียงการพัฒนาโครงสร้างให้เป็นไปทางเดียวกับการคาร์บอนไนซ์เท่านั้น โดยทั่วไปวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยการกระตุ้นด้วยไอน้ำควรมีสมบัติดังต่อไปนี้

- สารระเหยต่ำ
- ปริมาณคาร์บอนสูง
- มีความพรุนสูง
- มีความแข็งเพียงพอต่อการขัดสี

โดยธรรมชาติไม่สามารถพบสมบัติที่ต้องการทั้งหมด ดังนั้นการคาร์บอนไนซ์ถ่านจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ในการปรับภาวะในการไพโรไลซิสให้เหมาะสม ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการคาร์บอนไนซ์คือ

2.4.2.1 อุณหภูมิ กระบวนการคาร์บอนไนซ์เป็นการกลั่นสลายของสารอินทรีย์เพื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์คาร์บอนในสารอินทรีย์ โดยจะเกิดการหักออกตรงบริเวณที่มีพันธะอ่อน หรือมีหมู่โมเลกุลที่หลุดออกได้ง่ายทำให้กลุ่มโมเลกุลที่เป็นวงแหวนแตกออกจากกันเป็นกลุ่มๆ จำนวนมากโครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกหลักที่เหลือกลายเป็นโครงสร้างของถ่านชาร์ ซึ่งการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่เผา ส่วนโครงสร้างโมเลกุลขนาดเล็กจะกลั่นสลายตัวออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆที่อุณหภูมิห้อง ได้แก่ น้ำ แอมโมเนีย น้ำมันทาร์ และแก๊สต่างๆ



รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงของคาร์บอนอะตอมตามอุณหภูมิที่เผา  
ที่มา: Hassler (1974)

อย่างไรก็ตามสิ่งที่สำคัญที่สุดของกระบวนการนี้คือ อุณหภูมิสุดท้ายของการคาร์บอนไนซ์ มีความสัมพันธ์กับพลังงานที่ใช้ในการสลายพันธะเคมีในวัตถุดิบออกมาเป็นสารระเหยที่อุณหภูมิสูง ถ่านชาร์จะมีการจัดระเบียบของโครงสร้างมากกว่า เช่น ถ่านหินเกรดสูงจะหดตัวมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการคาร์บอนไนซ์ เป็นผลทำให้ปริมาตรของรูพรุนเล็กๆ ทั้งหมดที่เกิดขึ้นในชั้นแรกของการคาร์บอนไนซ์ ลดลง และเม็ดถ่านหินมีความแข็งมากขึ้น แต่จากผลการวิจัยของ Debowski (1980) พบว่าถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาน้อยกว่าถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ซึ่งการลดลงของความว่องไวในการทำปฏิกิริยาจะมากขึ้นเมื่อคาร์บอนคงตัวลดลง

2.4.2.2 อัตราการให้ความร้อน เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากการไพโรไลซิส กล่าวคือ ถ้าอัตราการให้ความร้อนสูงปริมาณสารระเหยจะถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว ถ่านที่ได้จะมีรูพรุนขนาดใหญ่ ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าถ่านที่ได้จากการให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำกว่าเพราะว่าถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิสูง คาร์บอนจะเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่า ทำให้เกิดช่องว่างเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ เมื่อทำการกระตุ้น สารกระตุ้นจะเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่าย

ตารางที่ 2.2 ผลของอัตราการให้ความร้อนที่มีต่อสมบัติของถ่านเม็ด

Heating rate / °C min. <sup>-1</sup>	Mechanical strength of granules , %	Bulk density of granules / g cm <sup>3</sup>	Pore volume of granules (cm <sup>3</sup> g <sup>-1</sup> )			
			Total Pore	Micro pore	Meso pore	Macro pore
1	93.0	0.71	0.24	-	-	-
5	94.0	0.70	0.22	0.12	0.01	0.09
8	94.1	0.72	0.23	-	-	-
20	91.5	0.62	0.28	-	-	-
stepwise growth	60.0	0.28	1.09	0.11	0.03	0.95

ที่มา: Jankowska(1991)

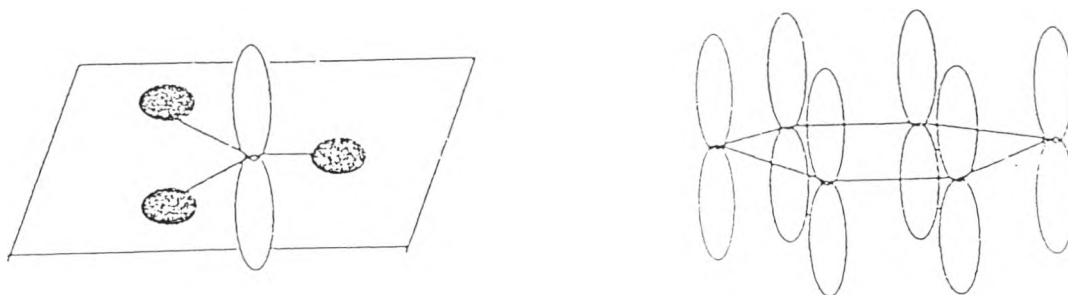
2.4.2.3 ตัวกลางของปฏิกิริยา(Medium of reaction) จะมีผลกระทบต่อปฏิกิริยา ถ้าแก๊สและไอที่เกิดระหว่างการไพโรไลซิสถูกพาออกไปอย่างรวดเร็ว โดยแก๊สที่เป็นตัวกลาง เช่น แก๊สไนโตรเจน (เฉื่อยต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ของคาร์บอน) และแก๊สจากการเผาไหม้ ถ้าตัวกลางเป็นแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ ปริมาณถ่านที่ได้จะน้อยกว่าตัวกลางที่เป็นแก๊สไนโตรเจน แต่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับตัวกระตุ้นสูงกว่า (Ignasiak ,1972 และ Pererii,1973) การคาร์บอนไนซ์โดยใช้อากาศเป็นตัวกลางในเตาเผาแบบฟลูอิดไอดีจะใช้พลังงานต่ำ เพราะความร้อนจากการเผาไหม้ของสารระเหยจะให้ความร้อนกับเตาฟลูอิดไอดี

โดยทั่วไปการคาร์บอนไนซ์จะมีการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์ 2 ช่วง คือ ช่วงอ่อนตัว (Softening period) และ ช่วงหลังการอ่อนตัว (After softening period) ในระหว่างการอ่อนตัวควรให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำเพื่อให้แก๊สหลุดออกจากโพรงภายในได้ โดยไม่สลายตัวหรือเปลี่ยนรูปเป็นของแข็งอัดแน่นภายในโพรงและถ่านที่ได้จะแน่นและแข็งด้วย (Bansal et al. ,1988)

2.4.3 การกระตุ้น (Activation) หมายถึง การทำให้คาร์บอนหรือถ่านมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิว และการทำให้ผิวถ่านมีความว่องไวมากขึ้น (Mukherjee ,1974) ได้พิจารณาความหมายของการกระตุ้นไว้ 3 ลักษณะ คือ

- เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวว่องไว (Active surface area) โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไป และเกิดส่วนที่มีอำนาจดูดซับขึ้นมาแทน
- เป็นการเพิ่มความว่องไวในการดูดซับให้กับผิวที่มีอยู่แล้ว ซึ่งหมายถึงทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้นโดยจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ เพื่อให้มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น
- เป็นการกำจัดสารอินทรีย์วัตถุหรืออนินทรีย์วัตถุต่างๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ (Active center)

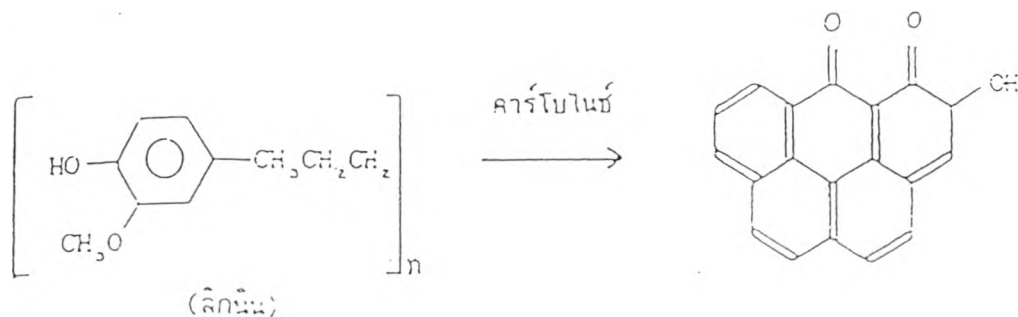
วัตถุดิบที่ใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่เป็นวัสดุทางการเกษตร คือเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนทั้งที่เป็นโซ่ยาวและที่เป็นวง เช่น ลิกนิน เซลลูโลส เป็นต้น เมื่อนำมาคาร์บอนไนซ์จะเกิดการสร้างวงอะโรมาติก(Aromatization) โดยอะตอมคาร์บอนซึ่งเดิมสร้างพันธะโดยใช้อิเล็กตรอนจากชั้น 2s จำนวน 1 ตัว และชั้น 2p จำนวน 3 ตัว จะเปลี่ยนมาใช้จากอิเล็กตรอนจากชั้น 2s จำนวน 1 ตัว และชั้น 2p จำนวน 2 ตัว และมีอิเล็กตรอนอิสระจากชั้น 2p อีก 1 ตัว ( $sp^2$  Hybridization) จึงเกิดพันธะแบบซิกมา (Sigma bond) กับคาร์บอนอะตอมที่อยู่ข้างเคียง 3 ตัวเรียงกันเป็นรูปสามเหลี่ยมในระนาบเดียวกันและอิเล็กตรอนอิสระที่เหลือจะโคจรอยู่บนและล่างระนาบ พร้อมทั้งจะเกิดพันธะแบบไพ (Pi bond) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ในที่สุดจะเกิดเป็นวงหกเหลี่ยมที่มีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ (Resonance) ได้ทั่วโครงสร้างซึ่งเรียกว่าวงเบนซินหรือวงอะโรมาติก วงเบนซินแต่ละวงจะเชื่อมติดกันจนมีลักษณะเป็นแผ่นสำหรับโครงสร้างถ่านจะมีแผ่นของวงเบนซินนี้อยู่หลายแผ่นเรียงตัวกันเป็นชั้นๆอย่างไม่มีระเบียบ ซึ่งการเรียงตัวในลักษณะนี้จะเกิดแรงผลักระหว่างชั้นจากไพอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่อยู่บนและล่างของแต่ละชั้น ถ่านจะสร้างเสถียรภาพด้วยการใช้ไพอิเล็กตรอนสร้างพันธะโดยการดึงอะตอมแปลกปลอมอื่นเข้าสู่โครงสร้าง เช่น ไนโตรเจน ออกซิเจน



รูปที่ 2.2 แสดงตำแหน่งของอิเล็กตรอนของคาร์บอนที่เกิดจาก  $sp^2$  Hybridization



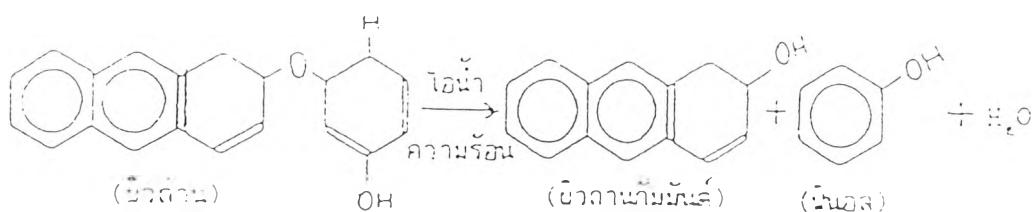
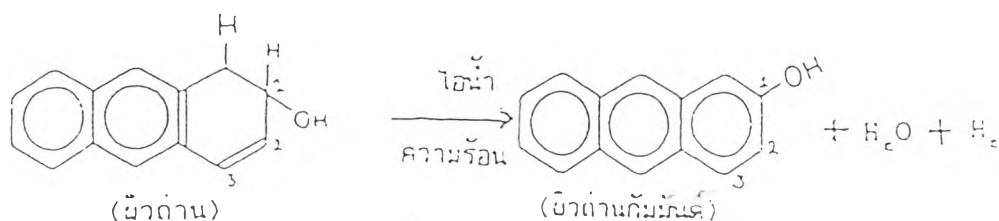
หรือ ฟอสฟอรัส เป็นต้น แต่การดึงอะตอมออกซิเจนจากบรรยากาศจะง่ายที่สุด ดังนั้นจึงมักพบออกซิเจนในโครงสร้างด้านเสมอ ตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 2.3 เช่นการเกิดวงเบนซินจากลิควิน ซึ่ง เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโซ่ยาวมากและมักพบในวัสดุทางการเกษตรที่มีความแข็งและเหนียว การผลิตด้านกัมมันต์ด้วยซิงค์คลอไรด์จะป้องกันไม่ให้อาณัติที่เพิ่งเตรียมได้เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน โดยการห่อหุ้มโครงสร้างของวัสดุด้วยซิงค์คลอไรด์ตั้งแต่ก่อนที่จะนำไปคาร์โบไนซ์ ซึ่งจะไม่เกิดน้ำมัน ทาร์จากปฏิกิริยาการคาร์โบไนเซชัน แต่จะเกิดหมู่ฟังก์ชันนัลที่เป็นกรด เช่น  $-Cl$ ,  $-COOH$  เป็นต้น (Calurla et al ,1991) จึงทำให้ได้อาณัติที่มีความสามารถในการดูดซับสูง อย่างไรก็ตามในปัจจุบันยังไม่ทราบกลไกหรือขั้นตอนที่แน่นอนของการเกิดปฏิกิริยา



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี โดยการเตรียมด้านจากวัสดุทางการเกษตร  
ที่มา: Calurla et al.(1991)

สำหรับการผลิตด้านกัมมันต์ด้วยก๊าซออกซิไดซ์ เป็นการจัดเรียงโครงสร้างด้านที่มีเสถียรภาพแล้ว แต่อำนาจการดูดซับต่ำ ดังรูปที่ 2.4 เป็นภาพจำลองของการเกิดปฏิกิริยา การกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์ก่อนเกิดปฏิกิริยาการกระตุ้น อะตอมออกซิเจนของหมู่ไฮดรอกซิลจะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนน้อย เนื่องจากคาร์บอนในตำแหน่งที่ 1 มีความเป็นบวกจากผลของแรงดึงทางไฟฟ้าของออกซิเจนเมื่อเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำ โดยใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งจะมีการกำจัดอะตอมไฮโดรเจนออกจากโครงสร้างเพื่อสร้างพันธะไพอิกพันธะหนึ่ง ทำให้เกิดวงเบนซินซึ่งวงเบนซินนี้มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูง จึงช่วยเพิ่มความหนาแน่นอิเล็กตรอนของอะตอมออกซิเจนเมื่อเกิดการดูดซับกับไอออนหรือโมเลกุลที่มีขั้วเป็นบวกจึงเกิดได้ดีขึ้น ปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์ยังหมายถึงการล้าง

โมเลกุลแปลกปลอมต่างๆ เช่น ทาร์ (Tar) ออกจากบริเวณที่ใช้ในการดูดซับซึ่งเกิดในช่วงคาร์บอนไนด์ ดังรูปที่ 2.4(ข) เป็นภาพจำลองการกำจัดโมเลกุลฟีนอลออกจากโครงสร้างของถ่าน ซึ่งฟีนอลเป็นสารชนิดหนึ่งในน้ำมันทาร์ หมู่ไฮดรอกซีของฟีนอลจะทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในวงเบนซีนของฟีนอลลดลงเนื่องจากผลแรงดึงทางไฟฟ้าของออกซิเจน ทำให้ออกซิเจนตำแหน่งที่ 1 มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนน้อยลง ปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยไอน้ำและความร้อนจะช่วยทำให้ฟีนอลหลุดออก จึงทำให้ออกซิเจนตำแหน่งที่ 1 มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น อันอาจการดูดซับจึงสูงขึ้น



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์

ที่มา : Mukherjee (1947)

2.5 วิธีการกระตุ้นเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์ ในปี ค.ศ.1983 Berl ได้แบ่งวิธีการกระตุ้นในการผลิตถ่านกัมมันต์ ได้ดังนี้

#### 2.5.1 วิธีการกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation)

เป็นวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์โดยให้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารเคมีที่นิยมใช้ ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ ( $ZnCl_2$ ) นอกจากนี้ยังมีสารเคมีตัวอื่นๆ เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ( $CaCl_2$ ) กรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) ข้อดีของการกระตุ้นด้วยวิธีนี้คือใช้อุณหภูมิไม่สูงมาก (400 - 600 องศาเซลเซียส) แต่มีข้อเสียคือมีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ทำให้ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีออก อีกทั้งอุปกรณ์ที่ใช้ก็ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถทนทานต่อการกัดกร่อนได้

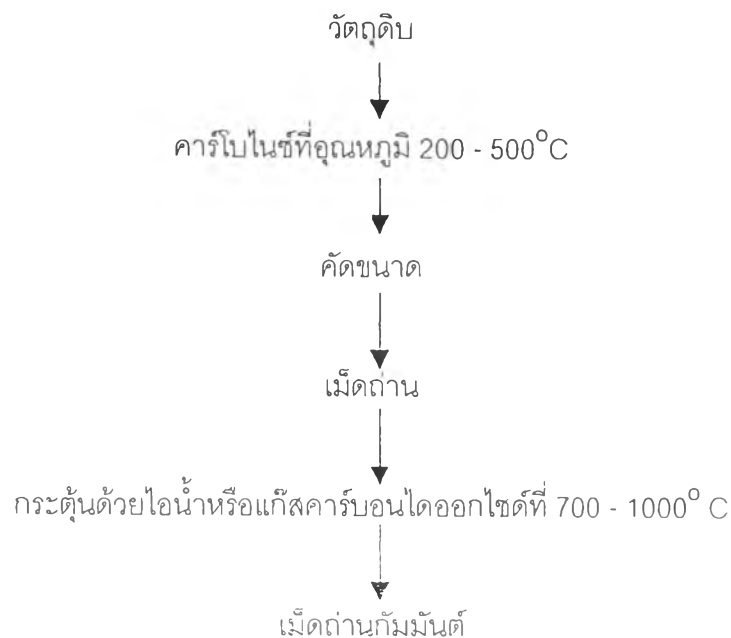
#### 2.5.2 วิธีการกระตุ้นทางฟิสิกส์ (Physical Activation)

เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยที่ผิวของคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์ เช่นการจัดเรียงตัวใหม่ ซึ่งจะทำให้ถ่านเพิ่มความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น แก๊สที่นิยมใช้ในการออกซิไดซ์ ได้แก่ ไอน้ำ อิมมัตวียังยวด แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สออกซิเจน โดยใช้ร่วมกับความร้อน ปฏิกิริยาการกระตุ้นอาจเกิดจากการใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียว แต่ต้องใช้อุณหภูมิสูงมากถึง 1,200 องศาเซลเซียส แต่ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จะมีคุณภาพต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์ ปัจจัยที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์ คือ (Hassler, 1967)

- สมบัติทางเคมีและความเข้มข้นของแก๊สออกซิไดซ์ที่ใช้
- อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา
- ระยะเวลาของปฏิกิริยา
- ชนิดและปริมาณของวัสดุที่ใช้

อุณหภูมิที่ใช้ไม่สามารถกำหนดได้แน่นอนแต่ก็ไม่เกิน 1000 องศาเซลเซียส เพราะว่าถ้าใช้อุณหภูมิสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส จะทำให้อำนาจการดูดซับของถ่านลดน้อยลง อุณหภูมิที่ใช้ทั่วไปอยู่ในช่วง 800 - 900 องศาเซลเซียส แต่ก็มีบ้างที่ใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส

ข้อดีของการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์คือ ไม่มีสารเคมีตกค้าง ข้อเสียคือ ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าการกระตุ้นด้วยสารเคมี



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยแก๊สออกซิไดซ์

ที่มา: บุญชัย ตระกูลมหชัย ,2536:18

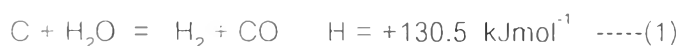
การกระตุ้น คาร์บอนจะทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์ เป็นคาร์บอนออกไซด์แพร่ออกจากผิวของคาร์บอน เกิดแก๊สซิฟิเคชันบางส่วนของเม็ดถ่านเป็นรูพรุนในโครงสร้างของถ่าน ถ่านจากการคาร์บอนไนซ์จะประกอบด้วยรูพรุนเล็กๆจำนวนมาก ซึ่งเกิดจากช่องว่างระหว่างผลึกในการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอม รูพรุนนี้จะถูกอุดตันไว้ด้วยสารที่เกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อน และถูกขัดขวางด้วยอะมอฟัสคาร์บอน ดังนั้นการกระตุ้นจึงเป็นการเปิดรูพรุนที่ถูกปิด และสร้างรูพรุนขึ้นมาใหม่ด้วย

จากการกระตุ้นตัวอย่างชาร์ (Chars) หลาย ๆ ตัวอย่าง พบว่าการ กระตุ้นด้วยไอน้ำให้ผลดีกว่า การกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดีกว่าการกระตุ้นด้วยอากาศ การกระตุ้นด้วยไอน้ำต้องใช้อุณหภูมิสูงพอที่จะทำให้เกิดการออกซิไดซ์อย่างรวดเร็ว แต่ไม่ควรเกิน 1000 องศาเซลเซียส เพราะจะทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีสมบัติในการดูดซับลดลง การกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ใช้อุณหภูมิ 800 - 900 องศาเซลเซียส ส่วนการกระตุ้นด้วยอากาศใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส

ปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์บอนเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับความเข้มข้นของตัวออกซิไดซ์ อย่างไรก็ตามอุณหภูมิก็เป็นปัจจัยที่สำคัญของการออกซิเดชัน

กล่าวคือที่อุณหภูมิต่ำอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างคาร์บอนกับตัวออกซิไดซ์จะต่ำ จึงเป็นผลให้ได้รูปพรุนที่ต้องการช้า กระบวนการออกซิเดชันจะถูกกำหนดโดยความว่องไวในการทำปฏิกิริยาของถ่านกับตัวออกซิไดซ์ ถ้าความว่องไวสูงจะทำให้อุณหภูมิที่เหมาะสมต่ำ พบว่าถ่านที่ได้จากการคาร์โบไนซ์ถ่านหินบิทูมินัส ใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นต่ำกว่าถ่านที่ได้จากการคาร์โบไนซ์แอนทราไซด์ และเมื่อเปรียบเทียบการกระตุ้นถ่านด้วย แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และออกซิเจน พบว่าการกระตุ้นด้วยออกซิเจนมีความสามารถสูงสุด ส่วนการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีความสามารถต่ำที่สุด

ก.การกระตุ้นด้วยไอน้ำ การใช้ไอน้ำในที่นี้หมายถึงการใช้ไอน้ำยิ่งยวด (Superheated steam) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบดูดความร้อน (อุไรวรรณ ธรรมรัตน์พคุณ, 2523) และเป็นปฏิกิริยาเคมีที่ซับซ้อน แต่โดยทั่วไปจะสมมุติเป็นปฏิกิริยาแก๊ซซิฟิเคชัน (Gasification) ของถ่าน ดังสมการ ที่ (1) และ (2) [Rodriguez - Reinoso and Lanires - Solano, 1965]



อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี (r) สามารถเขียนแบบ Langmuir - Hinshel wood ได้ดังนี้

$$r = \frac{kP_{H_2O}}{1 + K_1P_{H_2O} + K_2P_{H_2}} \quad \text{----(2)}$$

โดยที่  $P_{H_2O}$  และ  $P_{H_2}$  = ความดันย่อยของแก๊ส  $H_2O$  และ  $H_2$

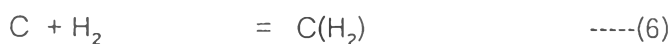
k = ค่าคงที่อัตรา

$K_1$  และ  $K_2$  = ค่าคงที่การดูดซับ

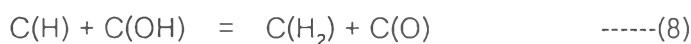
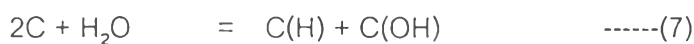
อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่มีการศึกษามากที่สุดไม่เพียงแต่เฉพาะปฏิกิริยาที่มีการกระตุ้นเท่านั้น นอกจากนี้ยังมีการศึกษาถึงปฏิกิริยาการผลิต วอเตอร์แก๊ซ (Water gas) รวมทั้งการยับยั้งไฮโดรเจนอีกด้วย กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับไอน้ำ เขียนได้ดังสมการ



การยับยั้งปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นโดยการที่แก๊สไฮโดรเจนไปกินส่วนที่ใช้สำหรับดูดซับของถ่านกัมมันต์ (Long และ Sykes, 1948) ดังสมการที่ 6



ในขั้นแรก น้ำที่ถูกดูดซับจะแตกตัวดังสมการ 7 ถึง 8



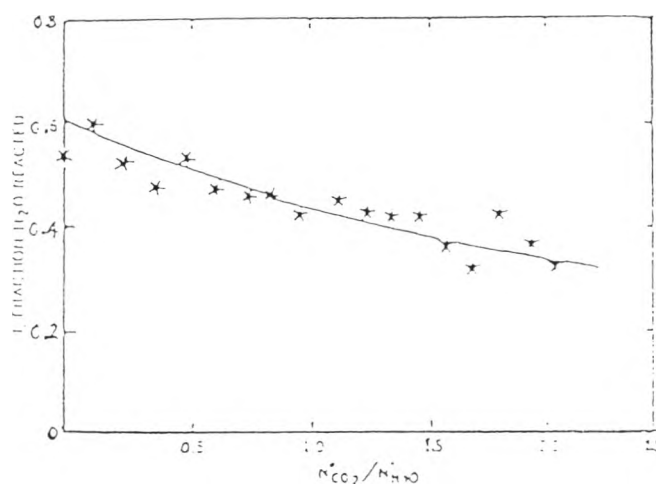
พบว่าไฮโดรเจนและออกซิเจนจะถูกดูดซับที่บริเวณใกล้กับส่วนที่ใช้ดูดซับประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ผิว ปฏิกิริยาหุติยภูมิของคาร์บอนมอนนอกไซด์กับไอน้ำที่เรียกว่า "ปฏิกิริยาไฮโมจีเนียส วอเตอร์แก๊ส" (Reif, 1952) ดังสมการ



โดยที่ผิวของคาร์บอนเร่งปฏิกิริยาให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการ



การใช้ไอน้ำที่มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผสมอยู่ ไอน้ำจะเกิดปฏิกิริยาลดลง ทั้งนี้เพราะแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดปฏิกิริยาแข่งขันกับไอน้ำ แต่ปฏิกิริยารวมจะเพิ่มขึ้น ดังแสดงดังรูป



รูปที่ 2.6 ผลของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อปฏิกิริยา การกระตุ้นด้วยไอน้ำ  
ที่มา : Ergun et al., 1965

ข. การกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วงระหว่าง 800 - 900 °C วัตถุประสงค์ที่ใช้ควรถูกเผาเป็นถ่านเสียก่อน ส่วนวิธีการผลิตนั้นคล้ายกับการกระตุ้นด้วยไอน้ำ และปฏิกิริยาเป็นแบบดูดความร้อน แสดงดังสมการ



$$r = \frac{kP_{\text{CO}_2}}{1 + K_1P_{\text{CO}} + K_2P_{\text{CO}}} \quad \text{----(12)}$$

โดยที่  $P_{\text{CO}}$  และ  $P_{\text{CO}_2}$  = ความดันย่อยของแก๊ส  $\text{CO}_2$  และ  $\text{CO}$

$k$  = ค่าคงที่อัตรา

$K_1$  และ  $K_2$  = ค่าคงที่ของการดูดซับ

Jankowska (1991) ได้ทำการศึกษากลไกของปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งอธิบายความแตกต่างได้ 2 กลไกในแง่การเป็นตัวยับยั้งของคาร์บอนมอนนอกไซด์ ดังแสดงดังสมการ



ค. การกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิเจน(หรืออากาศ) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนที่เกิดขึ้นง่าย และเร็วกว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำกับการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยายังไม่ทราบแน่นอน แต่คาดว่าขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาอาจเป็นดังสมการ



ปฏิกิริยาทั้งสองเป็นแบบคายความร้อน แม้ว่ากลไกของปฏิกิริยายังไม่ทราบแน่ชัด แต่ยังคงพิสูจน์ได้ว่าคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นต้นของคาร์บอนออกซิเดชัน หรือคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่เกิดขึ้นก่อนแล้วทำปฏิกิริยาเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนมอนนอกไซด์กับคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ถ่านที่ถูกกระตุ้นด้วยอากาศที่มีออกซิเจนปน

อยู่จะเกิดหมุ่ฟุ้งชั้นนัลที่มีออกซิเจนชั้นที่ผิวของถ่านเป็นจำนวนมาก แต่การกระตุ้นด้วยอากาศไม่นิยมใช้เป็นตัวกระตุ้น เพราะควบคุมได้ยาก และเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนจึงไม่สามารถรักษาอุณหภูมิในเตาให้คงที่ได้ ทั้งนี้เพราะออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงเกินไป

Ergun และ Mentser(1965)ได้สร้างสมการและทำการทดลองโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ และสมมติว่าบริเวณที่กลายเป็นจุดว่องไวในการดูดซับเกิดจากโมเลกุลของไอน้ำที่ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนอิสระ (CF) ได้แก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนที่เกาะกับออกซิเจน (CO) ดังแสดงดังสมการ



การที่มี CO มาก แสดงว่าปฏิกิริยาการกระตุ้นเกิดได้ดี แต่ COเกิดการสลายตัวได้ง่ายดังนี้



โดยที่  $n = 0, 1$  และ  $2$  ถ้า  $n = 2$  หมายความว่าปฏิกิริยาการสลายตัว

จะเพิ่มจุดที่เกิดปฏิกิริยาในสมการที่ 21 ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น ถ้า  $n = 1$  แสดงว่าปฏิกิริยาการสลายตัวไม่มีผลต่อถ่านกัมมันต์แต่ถ้า  $n = 0$  แสดงว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้มีความว่องไวน้อยลง แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่เกิดขึ้นในสมการที่ 21 สามารถดึงอะตอมออกซิเจนออกจาก CO ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ กับ CF และในทางตรงกันข้าม CF ก็สามารถดึงอะตอมออกซิเจน ออกจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แล้วเกิด CO ได้ ดังสมการที่ 22 ซึ่งก็เป็นปฏิกิริยาการกระตุ้นถ่านให้เป็นถ่านกัมมันต์ด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นั่นเอง



จากการศึกษาของ Ergun และ Menster (1965) พบว่าค่าคงที่สมดุลขึ้นกับอุณหภูมิ ไม่ขึ้นกับคาร์บอน พบว่าที่อุณหภูมิ 1000 , 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส ขนาดของอนุภาคไม่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา จึงอาจสรุปได้ว่า การแพร่ผ่านฟิล์ม (Film boundary diffusion) ไม่มีผลต่อปฏิกิริยา



ตารางที่ 2.3 การดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้น ณ ภาวะต่างๆ กัน

Activated Condition		Chrysolidine R	Substance adsorbed , g/g carbon		
Gas	Temp. °C		Ponceau R	Aniline blue	Iodine
Air	600	0.34	0.10	0.05	0.36
Air	740	0.16	0.08	0.05	0.40
Air	790	0.15	0.08	0.06	0.42
Air	860	0.14	0.08	0.06	0.42
Air	910	0.13	0.10	0.06	0.40
Steam	770	0.37	0.19	0.16	0.60
Steam	825	0.37	0.16	0.17	0.60
Steam	880	0.36	0.17	0.21	0.62
CO <sub>2</sub>	880	0.32	0.12	-	-

ที่มา: Hassler (1974)

## 2.6 เครื่องมือที่ใช้ในการผลิตถ่านหรือถ่านกัมมันต์

2.6.1 เครื่องคาร์บอนไนเซอร์ (Carbonizer) (สมชาย บุญธีระเลิศ ,2525) คือเครื่องมือที่ใช้แปรสภาพอินทรีย์วัตถุให้เป็นถ่านมีหลายแบบ ส่วนมากจะเน้นถึงความสามารถในการกระจายความร้อนให้สม่ำเสมอ มีประสิทธิภาพสูง ประหยัด และปลอดภัย โดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ

- แบบไม่ต่อเนื่อง เช่น แบบหลุมกลบ แบบกองสุม หรือแบบก่ออิฐ ฯลฯ
- แบบต่อเนื่อง เช่น แบบเตาหมุน แบบฟลูอิด์เบด ฯลฯ

## 2.6.2 เครื่องแอคติเวเตอร์ (Activator) ตัวอย่างของเครื่องแอคติเวเตอร์มีดังนี้

เตาหมุน (Rotary kiln) รูปร่างของเตาเป็นทรงกระบอก โดยมีเครื่องจักรทำให้เตาหมุนได้ตลอดเวลา ออกแบบโดยวิศวกรชาวญี่ปุ่นชื่อ Tsutomu Kato ข้อดีของเตาแบบนี้ คือสามารถปรับขนาดของรูพรุนที่เกิดจากการกระตุ้นได้เตาหมุนชนิดนี้เป็นแบบที่โรงงานผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวในประเทศไทยใช้เป็นเครื่องปฏิกรณ์ในการผลิต

ฟลูอิโดซ์เบด สร้างโดย Jun-lohi Kawabata และคณะ ในปี ค.ศ.1972 เพื่อผลิต ถ่านกัมมันต์ชนิดหยาบ โดยกระตุ้นด้วยไอน้ำอิมตัววยดยั้งที่อุณหภูมิ 600 ถึง 2000 องศาเซลเซียส ข้อดีของเครื่องกระตุ้นแบบนี้ คือ ควบคุมอุณหภูมิได้ง่าย

ฟลูอิโดซ์เบดแบบให้ความร้อนในเบด (Internal - heat type fluidized bed) เป็น เครื่องผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยไอน้ำอิมตัววยดยั้งใช้ความร้อนจากการเผาไหม้แก๊สสูงต้ม (LPG) เพื่อให้ อุณหภูมิในเบดเท่ากับ 720 - 790 องศาเซลเซียส

ฟลูอิโดซ์เบดแบบสองชั้น (Two stage fluidized bed) เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วย ไอน้ำอิมตัววยดยั้ง ใช้ความร้อนจากการเผาไหม้น้ำมันเพื่อให้อุณหภูมิในเบดเท่ากับ 800 -900 องศา- เซลเซียสถ่านกัมมันต์ที่ได้จากเครื่องแอกติเวเตอร์แบบนี้มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน

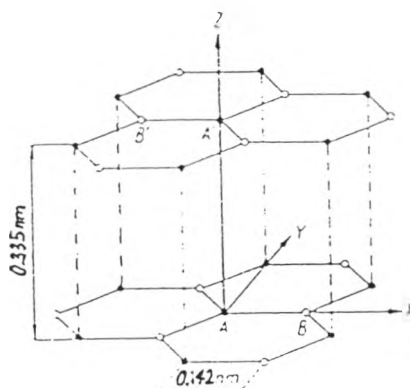
ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบเทคนิคต่างๆ ที่ใช้ในปฏิกริยาระหว่างแก๊สกับของแข็ง

	ลักษณะทั่วไป	การกระจายอุณหภูมิในเบด
Fixed Bed	-ทำงานแบบต่อเนื่องไม่ได้ -ขนาดของผลิตภัณฑ์ไม่สม่ำเสมอ	-อุณหภูมิแตกต่างกันมาก -ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้
Moving Bed	-สารป้อนต้องมีขนาดใกล้เคียงกันและไม่ เล็กจนเกินไป -เป็นระบบที่ใช้ในอุตสาหกรรม	-สามารถควบคุมได้ง่ายด้วยการ ปรับเปลี่ยนอัตราการไหลหรือการ หมุนเวียนของอนุภาคขนาดใหญ่
Fluidized Bed	-สารป้อนมีขนาดเท่าไรก็ได้ เป็นระบบที่ใช้ในอุตสาหกรรม	-อุณหภูมิคงที่และสม่ำเสมอโดย การทดแทนกันระหว่างวัตถุดิบที่ ป้อนเข้ากับผลิตภัณฑ์ที่ไหลออก
Cocurrent Pnenatic transport	-เหมาะสำหรับปฏิกริยาที่เกิดรวดเร็ว	-อุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงตามการ ไหลของอนุภาคซึ่งแก้ไขให้อุณหภูมิ เปลี่ยนแปลงน้อยลง ด้วยการปรับ เปลี่ยนอัตราการไหลของอนุภาค

ที่มา: แปลจาก Kunii (1969)

## 2.7 โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ (Structure of Activated carbon )

ในการกระตุ้นจะทำให้ถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์มีความพรุนมากขึ้นเนื่องจากการสูญเสียสารประกอบคาร์บอนระหว่างช่องว่างผลึกคาร์บอน รูพรุนทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ การกระตุ้นที่เหมาะสม คือการทำให้มีความพรุนไม่ใช่เป็นการกระตุ้นให้ขนาดของรูใหญ่จะทำให้โครงสร้างแข็งแรงยิ่งขึ้นแสดงดังรูป



รูปที่ 2.7 การจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมในผลึกของแกรไฟต์

( Ordering of Carbon atoms in a crystal of graphite )

ที่มา : Jankowska , 1991

โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ขึ้นอยู่กับภาวะการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อน นอกจากนี้ยังขึ้นกับชนิด และความบริสุทธิ์ของวัตถุดิบที่ใช้ ผลึกของแกรไฟต์มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ควรมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 – 10 นาโนเมตร เช่น คาร์บอนที่ผลิตจาก Poly vinyl chloride กับ Poly vinyl iodine พบว่าการเผาวัตถุดิบตัวแรกที่อุณหภูมิ 1000 ถึง 1720 องศาเซลเซียส จะได้ชั้นผลึกของแกรไฟต์เพิ่มขึ้นจาก 4.5 ถึง 33 มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.8 ถึง 6.3 นาโนเมตร สำหรับวัตถุดิบตัวที่สองใช้อุณหภูมิ 2000 องศาเซลเซียส มีจำนวนชั้นเพิ่มขึ้นจาก 1.6 ถึง 2.2 นาโนเมตร จะพบว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเรียงตัวของผลึก โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 1000 ตารางเมตรต่อกรัม และบางครั้งมีจำนวนมากถึง 1500 ตารางเมตร ต่อ กรัม ซึ่งขึ้น

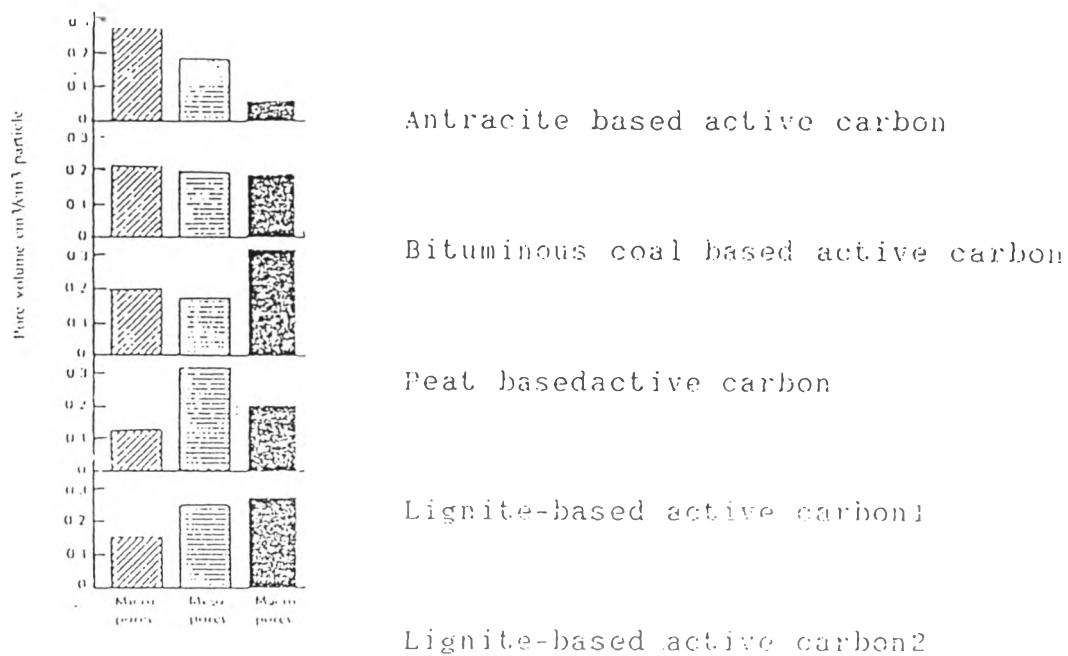
อยู่กับความแตกต่างของรูปร่าง และขนาดของความพรุน จึงทำให้มีผลต่อกลไกการดูดซับ (Dubinin , 1966 ) ดังนั้นจึงได้จำแนกชนิดของรูพรุนตามขนาดรัศมีรูพรุนออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

- แมคโครพอร์ (Macropores) มีรัศมีรูพรุนมากกว่าหรือเท่ากับ 500 อังสตรอม มีปริมาตรของ Macropores อยู่ระหว่าง 0.2 – 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และมีพื้นที่ผิวจำเพาะไม่เกิน 0.5 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับรูพรุนประเภทอื่นแล้ว Macropores มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยมาก ดังนั้นรูพรุนประเภทนี้จึงไม่มีความสำคัญต่อการดูดซับ เพียงแต่ทำหน้าที่เป็นทางส่งผ่านอนุภาคเข้าไปในรูที่เล็กกว่า

- มีโซพอร์ (Mesopores ) หรือที่เรียกกันว่า Transitional pores มีรัศมีรูพรุนอยู่ในช่วงระหว่าง 20 ถึง 500 อังสตรอม โดยเฉลี่ยถ่านกัมมันต์มีปริมาตรของมีโซพอร์ประมาณ 0.1 – 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัมและมีพื้นที่ผิวจำเพาะระหว่าง 20 – 100 ตารางเมตรต่อกรัม ตัวอย่างสารดูดซับที่มีรูพรุนเป็นมีโซพอร์ ได้แก่ ซิลิกาเจล ( Silica gel ) อะลูมินาเจล ( Alumina gel ) และ อะมิโนซิลิเกตคะตะลิส ( Amino silicate catalyst)

- ไมโครพอร์ ( Micropores ) ปกติมีขนาดรัศมีรูพรุนน้อยกว่า 20 อังสตรอม โดยเฉลี่ย Active carbons มีปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.2-0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัมพลังงานในการดูดซับไมโครพอร์มีมากกว่าในมีโซพอร์ หรือผิวอื่น ๆ ที่ไม่มีรูพรุน ดังนั้นไมโครพอร์จึงมีความสำคัญที่สุดในการดูดซับ เนื่องจากมีพื้นที่การดูดซับ และพลังงานดูดซับ ( Adsorption energy ) มากที่สุด ทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้นมากที่ความดันต่ำ ๆ รูพรุนขนาดเล็กจึงมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวจำเพาะ เชื่อกันว่าปริมาณของรูพรุนแต่ละขนาดหรือที่เรียกกันว่าการกระจายขนาดของรูพรุน ( Pore size distribution ) จะขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบ และวิธีการกระตุ้น ดังรูปที่ 2.8

โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เกรดการค้า จะมีรูพรุนขนาดกลางประมาณ 200 – 300 ตารางเมตร ต่อวัน และมีรูพรุนขนาดเล็กประมาณร้อยละ 90 ถึง 95 ของพื้นที่ผิวทั้งหมด นอกจากนี้พบว่า การดูดซับยังขึ้นกับธรรมชาติของผิวถ่านกัมมันต์อีกด้วย กล่าวคือถ้าบริเวณผิวมีหมู่ฟังก์ชันนัล การดูดซับบนผิวถ่านจะเกิดจากแรงที่แข็งแรง โดยทั่วไป หมู่ฟังก์ชันนัลบนผิวของถ่านกัมมันต์มี 2 ชนิด คือ พวากออกไซด์ของกรด ซึ่งพบมากในถ่านกัมมันต์ที่ผลิตที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส และพวกออกไซด์ของด่างซึ่งพบมากในถ่านกัมมันต์ที่ผลิตที่อุณหภูมิประมาณ 800 ถึง 1000 องศาเซลเซียส ( รุติกร อิศระเสนีย์ , 2539 )



รูปที่ 2.8 การเปรียบเทียบการกระจายขนาดของรูพรุน ของถ่านกัมมันต์จากวัตถุดิบต่างชนิดกัน ด้วยกรรมวิธีการผลิตต่างกัน (ที่มา : Bansal and coworker , 1988 )

รูพรุนส่วนใหญ่จะเกิดในช่วงก๊าซออกซิไดซ์ ซึ่งเป็นการกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ ออกจากช่องว่างของถ่านที่ใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้น รวมทั้งเกิดการจัดเรียงและเคลื่อนย้ายอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเพื่อให้เกิดช่องว่างที่มีอำนาจในการดูดซับ รูพรุนที่มีขนาดใหญ่จะทำหน้าที่เป็นเพียงทางผ่านของสารถูกดูดซับเข้าไปยังรูพรุนขนาดเล็ก (Redriguez-Reinoso et al,1965) จึงไม่มีผลต่อการดูดซับ แต่จะมีผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับ สำหรับรูพรุนขนาดกลางนั้นสามารถดูดซับโมเลกุลของของเหลวได้บ้างรูพรุนขนาดเล็กมีหน้าที่ในการดูดซับ จึงมีผลต่อความจุในการดูดซับ โดยเฉพาะการดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ

## 2.8 โครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์เตรียมได้จากถ่านที่ได้จากเผาผลาญสารอินทรีย์ด้วยความร้อน (Pyrolysis) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1000 องศาเซลเซียสซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่าการคาร์บิไนซ์ ซึ่งอะตอมต่าง ๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอน ได้แก่ ออกซิเจน ไนโตรเจนและ ไฮโดรเจน จะถูกกำจัดออกในรูปของก๊าซ อะตอมคาร์บอนที่เหลือจะจัดเรียงเป็นชั้น ๆ แต่ละชั้นจะประกอบด้วยวงแหวนเหลี่ยม (Aromatic ring) เชื่อมโยงกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ทำให้เกิดช่องว่างหรือโพรง ซึ่งเป็นที่อยู่ของพวกพหุวัฏ และสารอื่นๆที่ได้จากการเผาผลาญ

ช่องว่างรูพรุนเหล่านี้จะกลายเป็นรูพรุนที่มีความสามารถในการดูดซับโดยการกระตุ้น ซึ่งจะเป็นการล้างพวกสารและสารต่างๆที่ได้จากการเผาผลาญออกจากช่องว่างหรือโพรง แล้วจะสร้างหมู่ฟังก์ชันชนิดขึ้นมาแทน ดังนั้นโครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์มีผลต่อความสามารถในการดูดซับด้วย

โดยทั่วไปผิวของถ่านกัมมันต์เกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันชนิดต่างๆ ซึ่งเกิดจากอะตอมของคาร์บอนกับออกซิเจน ที่เรียกว่า ผิวออกไซด์ มีอยู่ 2 ชนิด คือ

2.8.1 ชนิดที่เป็นกรด มักเกิดในถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นที่อุณหภูมิไม่สูงมากนัก คือ ประมาณ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส หมู่ฟังก์ชันชนิดที่เกาะอยู่บนผิวถ่านกัมมันต์จะมีคุณสมบัติคล้ายกรด ได้แก่ Carbonyls, Phenols, Lactones, Aldehyde, Ketones, Quinones, Hydroquinone, Anhydride เป็นต้น ดังแสดงดังรูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์แบบนี้ค่อนข้างเสถียรแม้จะอยู่ในสภาวะอากาศ โดยทั่วไปจะเสถียรที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้เล็กน้อย จะสลายตัวเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ และถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้มากๆ จะเกิดการสลายตัวให้ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน

I : Carboxyl group,

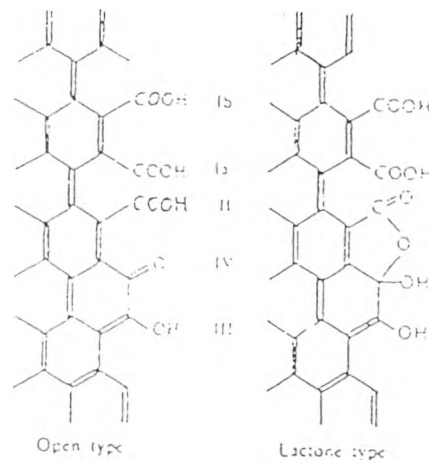
a: Removed by 200 °C

b: Removed above 325 °C

II: Carboxyl group which exists as lactol group

III: Phenolic hydroxyl group

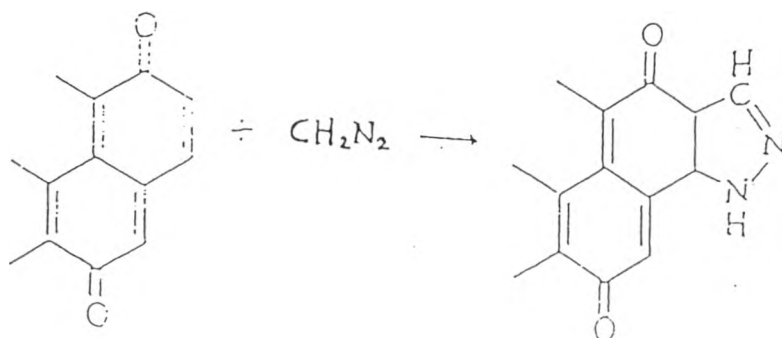
IV: Carboxyl group



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างหมู่ฟังก์ชันชนิดที่เป็นกรดบนผิวถ่านกัมมันต์

Surface oxides on carbon surface

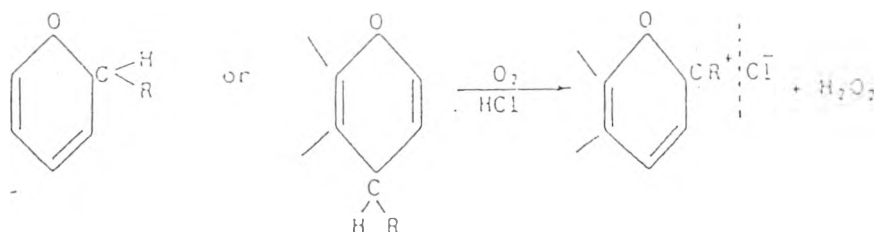
ที่มา: Suzuki, 1990



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างปฏิกิริยาของถ่านกัมมันต์ที่มีผิวเป็นกรด

ที่มา : Mattson ,1971

2.8.2 ชนิดที่เป็นต่าง เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 ถึง 900 องศาเซลเซียส หมู่ฟังก์ชันนัลที่เกาะอยู่บนผิวของถ่านกัมมันต์ สามารถดูดซับโมเลกุลของกรดได้ดี ได้แก่ Hydroxide, Carbonate เป็นต้น



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างปฏิกิริยาการดูดซับโมเลกุลกรด ด้วยถ่านกัมมันต์ที่มีผิวเป็นต่าง

ที่มา : Bansal,1988

จากการศึกษาของ K.Gergova (1993) พบว่าถึงแม้จะทำการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการเดียวกันจากวัตถุดิบต่างชนิดกัน ฟังก์ชันนัลกรุปของออกซิเจนบนผิวของถ่านกัมมันต์จะมีความแตกต่างกันดังตาราง

ตารางที่ 2.5 ส่วนประกอบฟังก์ชันนัลกรุปของออกซิเจนบนผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัตถุดิบที่เหลือจากการเกษตรต่างชนิดกัน

วัตถุดิบ	Content of surface functional groups mg-eq g <sup>-1</sup>	
	=C=O 0.03	-OH 0.05
Apricot stones	3.27	0.02
Grape seeds	1.32	2.05
Cherry stones	1.42	1.90

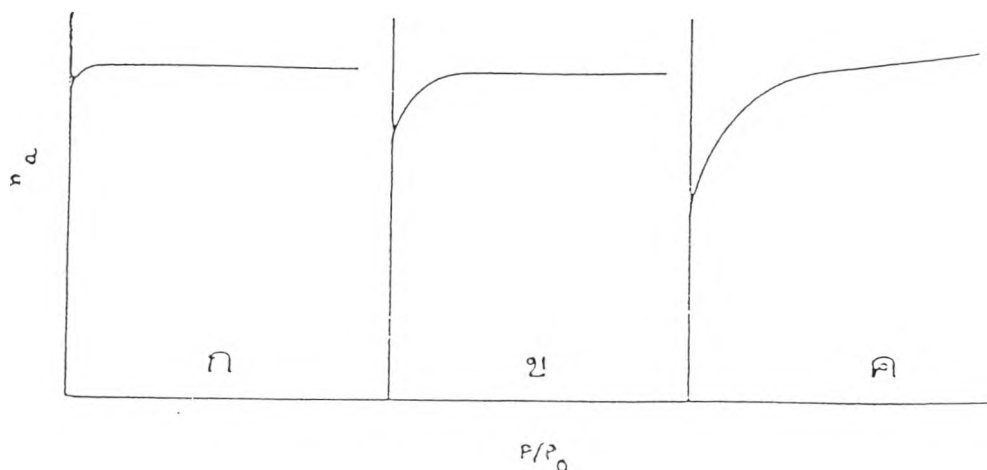
ที่มา : K.Gergova , 1993

## 2.9 ทฤษฎีการดูดซับ

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่โมเลกุล ของสารที่เรียกว่าสารถูกดูดซับ (Adsorbate) เกาะอยู่บนผิวสารดูดซับ (Adsorbent) ด้วยแรงดึงดูด อยู่ 3 ประเภท คือ แรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Exchange adsorption) แรงดึงดูดแวนเดอร์วาลส์ (Physic or Ideal adsorption) และ แรงดึงดูดทางเคมี (Chemisorption or chemical adsorption)

กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีสารประกอบต่างๆ เคลื่อนย้ายจากสารละลายจนกระทั่งสู่ภาวะสมดุลระหว่าง ความเข้มข้นของสารละลายกับปริมาณผิวของตัวดูดซับ การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักคาร์บอน และความเข้มข้นของสารละลายที่เหลืออยู่ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์นี้เราเรียกว่า "Adsorption Isotherm" สำหรับถ่านกัมมันต์จะมีลักษณะของไอโซ-เทอมแตกต่างกันไปตามชนิดของรูพรุน ดังแสดงในรูปที่ 2.12





Different types of adsorption isotherms ( $N_2$  at 77 K) on microporous carbons  
(Reprinted with permission from Ref.20)

รูปที่ 2.12 เส้นไอโซเทอมของถ่านกัมมันต์ชนิดต่างๆ

ที่มา: Rodriguez-Reinoso, 1965

(ก) ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็กซึ่งมีขนาดไม่แตกต่างกันมาก เส้นความสัมพันธ์จะขนานกับแกนราบ

(ข) ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็กและมีขนาดแตกต่างกันมากกว่าแบบแรก เส้นความสัมพันธ์จะขนานกับแกนราบ แต่ก่อนที่จะเข้าสู่ช่วงแนวราบเส้นความสัมพันธ์จะมีความโค้งมนมากกว่าและความเข้มข้นที่สมดุลของสารถูกดูดซับสูงกว่า

(ค) ถ่านกัมมันต์จะประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กที่มีขนาดแตกต่างกันมาก และมีรูพรุนขนาดกลาง มักพบถ่านกัมมันต์เกรดการค้า

การดูดซับเป็นกระบวนการพลวัต กล่าวคือเป็นการพาสารประกอบจากสารละลายเพื่อเข้าสู่การดูดซับของผิวรูพรุน เช่น ถ่านกัมมันต์ อัตราเร็วของการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน (Jankowska, 1991) โดยเรียงลำดับได้ดังนี้

- การพาโมเลกุลสารถูกดูดซับผ่านฟิล์มซึ่งอยู่รอบๆสารดูดซับ
- การแพร่กระจายเข้าไปในรูพรุน และผ่านไปตามผนังของผิวรูพรุนของสารดูดซับ
- ยึดติดกับโมเลกุลของสารดูดซับด้วยผิววงใน อีกทั้งยังเกิดบอนด์ระหว่างสารถูกดูดซับกับ

ถ่านกัมมันต์

โดยทั่วไปการดูดซับมี 2 ชนิด คือการดูดซับทางฟิสิกส์ ( Physical adsorption ) หมายถึง พันธะที่ดึงดูดระหว่างสารถูกดูดซับ กับสารดูดซับ เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ เป็นแรงที่อ่อน ดังนั้นสารถูกดูดซับจึงอาจหลุดออกมาได้ง่าย ซึ่งเป็นกระบวนการย้อนกลับ ส่วนการดูดซับอีกชนิดหนึ่งคือการดูดซับทางเคมี (Chemisorb or Chemical adsorption) พันธะที่เชื่อมระหว่างสารถูกดูดซับกับสารดูดซับเป็นบอนด์ที่แข็งแรงและเป็นกระบวนการไม่ย้อนกลับ การดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ปริมาณของสารถูกดูดซับที่ถูกยึดโดยสารดูดซับขึ้นกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ อุณหภูมิ ชนิดของสารดูดซับ และสารถูกดูดซับ โดยทั่วไปการศึกษาหาปริมาณสารถูกดูดซับ ที่อุณหภูมิคงที่ ซึ่งความสัมพันธ์ที่ได้นี้ เรียกว่า Adsorption isotherm สมการที่ใช้อธิบายข้อมูลไอโซเทอม ได้แก่ Freundlich, Langmuir และ Brunauer, Emmet & Teller หรือ ที่เรียกกันว่า BET isotherm ไอโซเทอมนี้ได้พัฒนาโดย Freundlich และ Langmuir ซึ่งเป็นสมการที่นำมาประยุกต์ใช้มากที่สุดในการใช้ Activated carbon สำหรับการบำบัดน้ำเสีย ดังแสดงดังสมการ

Freundlich isotherm equation

$$\log Q_e = \log X_m + k \log C_e$$

Langmuir isotherm equation

$$C_e/Q_e = 1/X_m k + C_e/X_m$$

เมื่อ  $Q_e$  = มิลลิกรัม สารถูกดูดซับต่อกรัม น้ำหนักสารดูดซับ

$C_e$  = equilibrium concentration

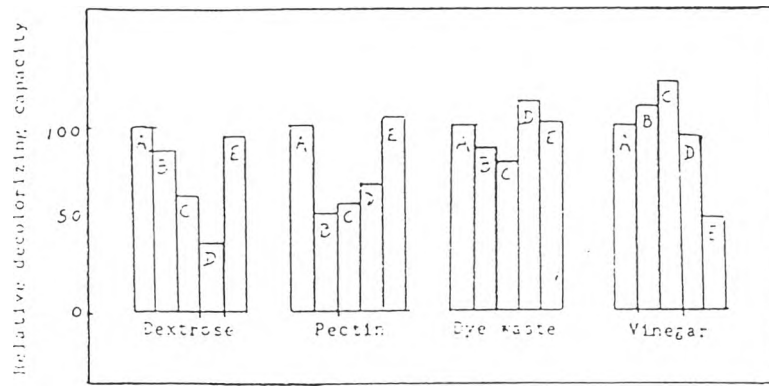
$X_m$  = มิลลิกรัม สารถูกดูดซับที่ Monolayer ต่อ กรัม น้ำหนักสารดูดซับ (Adsorption capacity)

$k$  = ค่าคงที่ที่ขึ้นกับ adsorption enthalpy

## 2.10 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับสีของถ่านกัมมันต์

การดูดซับสีในสารละลายด้วยถ่านกัมมันต์ ก็เป็นที่นิยมใช้กันมานานแล้ว และเครื่องมือที่ใช้วัดปริมาณสี คือ การใช้ Spectrophotometer และประการสำคัญการเลือกใช้ถ่านกัมมันต์ต้องเลือกใช้ให้

เหมาะสมกับสารที่จะดูดซับ ทั้งนี้เพราะว่าถ่านกัมมันต์ตัวหนึ่งๆไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้กับสารทุกชนิด (Hassler,1974) ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ความสามารถในการดูดซับสีของถ่านกัมมันต์ 5 ชนิด

2.10.1 พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อน เชื่อมโยงกันด้วยรูพรุนลักษณะเหมือนตาข่ายมีรูปร่างแตกต่างกันออกไป พบว่าเมื่อใช้เวลาระตุ้นเพิ่มขึ้น Surface area จะสูงขึ้น ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีความสามารถในการดูดซับ ( Adsorptive power ) เพิ่มมากขึ้น ดังตารางที่ 2.6 เมื่อกระตุ้นถ่านที่ 30 นาที ได้ถ่านกัมมันต์มี Surface area 815 ตารางเมตรต่อกรัม มีความสามารถในการดูดซับ Aniline blue ได้ 0.14 กรัมต่อกรัมถ่าน แต่ถ้าเพิ่มเวลาในการกระตุ้นเป็น 45 นาที Surface area เท่ากับ 1065 ตารางเมตรต่อกรัม มีความสามารถดูดซับ Aniline blue ได้ 0.28 กรัมต่อกรัมถ่าน ซึ่งการดูดซับ จะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ส่วน Surface area เพิ่มขึ้นเพียง 250 ตารางเมตรต่อกรัม ที่เป็นเช่นนี้อธิบายได้ว่าในช่วงแรกของการกระตุ้นรูพรุนยังเล็กเกินไปที่จะยอมให้โมเลกุลของ Aniline blue เข้าไปยังรูพรุนของถ่านได้ เมื่อเริ่มเวลาการกระตุ้น จาก 10 นาที เป็น 20 นาที Surface area จะเพิ่มขึ้นจาก 402 เป็น 690 ตารางเมตรต่อกรัม พบว่าค่าการดูดซับ ฟีนอลเพิ่มจาก 0.09 เป็น 0.15 กรัมต่อกรัมถ่านหลังจากนั้นการเพิ่มเวลาการกระตุ้นไม่ส่งผลต่อค่าการดูดซับฟีนอล

ตารางที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์กับค่าการดูดซับ

Time <sup>1</sup> of activation minutes	Surface area m <sup>2</sup> /g Carbon	Adsorption	
		Phenol	Aniline Blue
10	402	0.09	0.05
20	600	0.15	0.11
30	815	0.15	0.14
40	990	0.15	0.20
50	1065	0.15	0.28

ที่มา : Hassler,1974

<sup>1</sup> Air activation of acid-wash black-ash at 550 °C

<sup>2</sup> Gram adsorbed per gram carbon at an equilibrium in solution of 0.1 g/l

ตารางที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์กับความสามารถในการดูดซับไอโอดีน และ โมลาส

Power Surface area m <sup>2</sup> /g Carbon W <sup>a</sup>	Adsorption <sup>b</sup>	
	Iodine	Molass collour
770	0.60	0.20
902	0.62	1.6

ที่มา: Hassler,John W.,1963:216

a: Anthracite pre-roasted with alkali, then washed and steam activation at 75 oC

b: Iodine adsorption expressed as g iodine/g carbon ;

molasses adsorption as colour unit adsorbed /g carbon

Gergova, K (1993) ได้ทำการผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุทางการเกษตร แบบขั้นตอนเดียว คือ ทำการไพโรไลซิสและกระตุ้นด้วยไอน้ำอิมิตด้วยวดยิ่งในอุปกรณ์ตัวเดียวกัน พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จาก วัสดุดิบต่างชนิดกันจะให้พื้นที่ผิวรูพรุนแตกต่างกัน และเมื่อนำมาศึกษาหาความสามารถในการดูดซับ Copper ion ก็จะทำให้ค่าแตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ความสามารถในการดูดซับ Copper ions บนผิวถ่านกัมมันต์จากวัสดุดิบชนิดต่างๆ

วัสดุดิบ	Surface area, cm <sup>2</sup> /g	Adsorption capacity for copper ions, mg/g
Apricot stones	1175	6
Grape seeds	487	24
Almond shells	946	22
Nut shells	904	38
Coconut shells	700	20
Lignite Mariza Iztok	600	62

ที่มา: Gergova, K et al., 1993:329

#### 2.10.2 pH ของสารละลาย Seco, Aurora et al.(1977)

ได้ทำการทดลองการดูดซับ Cu และ Ni บนถ่านกัมมันต์ พบว่าการกำจัด Ni และ Cu ขึ้นกับ pH ของสารละลาย และสามารถกำจัด Cu ตั้งแต่ 0 ถึง 100 % ได้ในช่วง pH แคบ คือ ประมาณ 2 - 6.5 สำหรับ Cu และ pH = 4 - 7 สำหรับ Ni แสดงดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ความสามารถในการดูดซับ Cu และ Ni บนถ่านกัมมันต์ ( Darco 12-20 Mesh ) ที่ 20°C

Initial Metal	Metal removed , mg/g (GAC)				
	pH	4	5	6	7
Cu	0.30	0.24	0.29	0.30	0.30
	0.60	0.43	0.55	0.59	0.60
	1.21	0.71	1.02	1.16	1.19
	2.48	1.08	1.76	2.22	2.33
Ni	0.28	0.03	0.09	0.19	0.26
	0.54	0.05	0.14	0.31	0.45
	1.17	0.07	0.21	0.51	0.85
	2.25	0.09	0.28	0.73	1.35

ที่มา: Seco,Aurora et al.,1997:27

2.10.3 อุณหภูมิ และ เวลาในการสัมผัส ( Temperature and Contact time) จากการศึกษาการกำจัดตะกั่ว (Pb) จากน้ำโดยการดูดซับด้วย Kaolinitic Clay ของ Orumwense ,Faraday F.O.(1996) พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายจาก 30 ถึง 50 องศาเซลเซียส การดูดซับตะกั่วจะเพิ่มขึ้นจาก 5.203 เป็น 8.612 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ pH 5.5 ที่ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่า Adsorption capacity ของตะกั่วมีค่าสูงสุด ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

Gupta, G.S. et al. (1988) ได้เฝ้าการศึกษาการกำจัดสี Omega Chrome Red ME ด้วย fly ash พบว่า ที่เวลาสัมผัส 120 นาที สำหรับแต่ละความเข้มข้นของสี การกำจัดสีจะลดลงจาก 99 % เป็น 69 % เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย เพิ่มขึ้นจาก 5 เป็น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ 30 องศาเซลเซียส pH =4.2

2.10.4 ผลของขนาดอนุภาค การกำจัดสีจะเพิ่มขึ้นขนาดอนุภาคของ fly ash ลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิวรูพรุน (Poots et al., 1976 ) จากการดูดซับของสีจากสารละลายเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าจะเพิ่มขึ้น จาก 64 - 91 % เมื่อลดขนาดอนุภาคของ Fly ash จาก 125 เป็น 53 ไมโครเมตร ที่ 30 องศาเซลเซียส

### 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kirubakaran, C.J. et al. (1991) ได้ทำการทดลองผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว โดยใช้  $ZnCl_2$  และ  $H_3PO_4$  เป็นสารกระตุ้นโดยทำการกระตุ้นในเครื่องแอกติเวเตอร์แบบฟลูอิดิซด์เบดและแบบเบดนิ่ง เพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆ ในการผลิต ซึ่งส่งผลต่อสมบัติในการดูดซับ ได้แก่ ชนิดและปริมาณของสารกระตุ้น อุณหภูมิ เวลา ขนาดของอนุภาค และตัวกลางที่ใช้ในการทำให้เกิดการฟลูอิดิซด์ ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2.11 ขั้นตอนในการทดลอง คือ แخذกะลามะพร้าวในสารกระตุ้น แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส แล้วนำไปกระตุ้นในเครื่องแอกติเวเตอร์โดยใช้ความเร็วของตัวกลาง 1 ถึง 2 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดิซด์ สำหรับเครื่องแอกติเวเตอร์แบบเบดนิ่งใช้อัตราการไหลของตัวกลาง 200 ลิตรต่อชั่วโมง ผลของการทดลองสรุปได้ดังนี้

- ผลของเวลา การกระตุ้นในฟลูอิดิซด์เบดจะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติในการดูดซับไอโอดีนและการดูดซับฟีนอล สูงขึ้นอย่างรวดเร็วใน 30 นาทีแรก จากนั้นจะค่อยสูงขึ้นอย่างช้าๆ และลดลงเมื่อใช้เวลาในการกระตุ้นมากกว่า 120 นาที ส่วนการกระตุ้นในเบดนิ่ง สมบัติในการดูดซับไอโอดีนและฟีนอล จะค่อย ๆ สูงขึ้นอย่างช้า ๆ และสรุปได้ว่าเวลาที่เหมาะสม คือที่ 2 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบถ่านกัมมันต์ที่ได้จากทั้ง 2 วิธีพบว่า การดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตในฟลูอิดิซด์เบดสูงกว่าในเบดนิ่ง

- ผลของขนาดอนุภาค เครื่องแอกติเวเตอร์แบบฟลูอิดิซด์เบดแบบฟลูอิดิซด์กระตุ้นวัตถุดิบขนาดใหญ่ได้ดีกว่าในเบดนิ่ง ทั้งนี้เพราะผิวของวัตถุดิบสามารถใช้ในการเกิดปฏิกิริยา ได้จากการทดลองพบว่าควรใช้วัตถุดิบที่มีขนาด 0.515 มิลลิเมตร

- ผลของอุณหภูมิ ถ้าพิจารณาถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้และมีสมบัติในการดูดซับเท่ากัน พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตในเครื่องแอกติเวเตอร์แบบฟลูอิดิซด์ใช้อุณหภูมิต่ำกว่าในเบดนิ่ง ทั้งนี้เพราะสามารถถ่ายเทมวลความร้อนได้ดีกว่า

ตารางที่ 2.10 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองของ Kirubakaran, C.J.

Variable	Static Bed	Fluidized Bed
1. Particle size (dp) mm	0.25-0.4, 0.4-0.63, 0.63-0.80, 0.8-1.0, 1.0-1.2	
2. Activation temp. , °C	300, 400, 500, 600, 700, 800	
3. Activation time , min.	30, 60, 90, 120, 150, 180	
4. Reagent selection	$H_3PO_4$ / $ZnCl_2$ , 25, 50, 100, 150	
5. Impregnation ratio (I.R.), wt%	200	

ที่มา: Kirubakaran,C.J.,1974

การดูดซับฟีนอลจะลดลง ซึ่งอาจเกิดจากรูพรุนขนาดเล็กถูกทำลายไป แต่ไม่ส่งผลต่อค่าการดูดซับไอโอดีน ส่วนการกระตุ้นด้วย  $ZnCl_2$  เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าการดูดซับไอโอดีนและฟีนอลจะสูงขึ้น ทั้งนี้เชื่อกันว่า  $ZnCl_2$  (732 องศาเซลเซียส) มีจุดเดือดสูงกว่า  $H_3PO_4$  (213 องศาเซลเซียส)

- ผลของชนิดและปริมาณสารกระตุ้น พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารกระตุ้น ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีสมบัติในการดูดซับเพิ่มขึ้นทั้งในเครื่องแอกติเวตแบบฟลูอิดไคซ์เบดและแบบเบตนิ่ง จะให้คุณสมบัติในการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อใช้ปริมาณสารกระตุ้นความเข้มข้นไม่เกินร้อยละ 25 นอกจากนี้ยังพบว่าถ้าเพิ่มปริมาณสารกระตุ้น สมบัติในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และผลจากการทดลองพบว่า  $ZnCl_2$  เป็นสารกระตุ้นที่ให้สมบัติในการดูดซับของถ่านกัมมันต์สูงกว่าใช้  $H_3PO_4$  ในการกระตุ้นถึง 2 เท่า

- ผลของตัวกลางที่ใช้ในฟลูอิดไคซ์เบด พบว่าการใช้แก๊สไนโตรเจนหรือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จะมีสมบัติในการดูดซับสูงกว่าการใช้อากาศเป็นตัวกลาง เช่นเมื่อใช้  $ZnCl_2$  เป็นสารกระตุ้นและใช้ในโตรเจนเป็นตัวกลาง จะให้ค่าการดูดซับไอโอดีน 1100 คาร์บอนไดออกไซด์ มีค่า 1000 และ ใช้อากาศให้ค่าการดูดซับเป็น 800 มิลลิกรัมต่อกรัม

Mukherjee,S and et al.,(1974) ได้ทำการทดลองผลิตถ่านกัมมันต์จากวัตถุดิบ 2 ชนิด คือ กะลามะพร้าว และเปลือกถั่วลิสง โดยใช้ สารกระตุ้นต่างๆ คือ  $ZnCl_2$ ,  $CaCl_2$ ,  $NaOH$  และ  $H_2SO_4$  ในถ้วยพอร์ซเลน โดยให้ความร้อนแล้วนำไปวางในเตาเผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 600 ถึง 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำถ่านที่ได้ไปล้างสารกระตุ้นออกด้วยสารละลายกรดไฮโดรริก และน้ำกลั่น แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 250 ถึง 300 องศาเซลเซียส บดแล้วนำมาผ่านร่อนขนาด 200 เมช นำมาวิเคราะห์สมบัติการดูดซับ และความหนาแน่นเชิงปริมาตร ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

- ตัวแปรที่มีผลต่อปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ พบว่าถ่านกัมมันต์จากถั่วลิสงสูงกว่าถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว และพบว่า  $ZnCl_2$  จะเป็นสารกระตุ้นที่ทำให้เกิดถ่านกัมมันต์น้อยที่สุด เมื่อ  $ZnCl_2$  สัมผัสกับวัตถุดิบตลอดเวลาในการกระตุ้น ดังนั้นจึงไม่ควรล้าง  $ZnCl_2$  ออกก่อนนำไปให้ความร้อนในขั้นกระตุ้น

- ตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติ ในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้พบว่าการใช้  $ZnCl_2$  ร่วมกับ  $HCl$  เป็นสารกระตุ้น จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติในการดูดซับสูงสุด ทั้ง 3 ค่า คือ ค่าการดูดซับไอโอดีน ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู และค่าการดูดซับคาร์ราเมล แต่ถ้าใช้  $ZnCl_2$  จะได้ถ่านกัมมันต์ที่ให้ค่าการดูด



ซึบคาร์บอนได้ดีเท่านั้น ส่วนการใช้ NaOH และ  $H_2SO_4$  เป็นสารกระตุ้นจะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติในการดูดซับน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามปริมาณ  $ZnCl_2$  ที่ใช้ในการกระตุ้นถั่วลิสงไม่ควรเกินร้อยละ 62.5 เพราะจะทำให้สมบัติในการดูดซับเมทิลีนบลูลดลง สำหรับกะลามะพร้าวควรใช้ ร้อยละ 67 ถึง 300 นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้  $ZnCl_2$  กระตุ้นถ่านกัมมันต์มาแล้ว และเมื่อนำมากระตุ้นด้วย  $ZnCl_2$  อีกเป็นครั้งที่สอง จะทำให้สมบัติในการดูดซับลดลง

- ตัวแปรที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรพบว่าจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของ  $ZnCl_2$  หรือ  $CaCl_2$  แสดงว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้มีความพรุนสูงขึ้นสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเปลือกถั่วลิสง เมื่อความหนาแน่นเชิงปริมาตรลดลง สมบัติในการดูดซับคาร์บอนจะสูงขึ้น แต่การดูดซับเมทิลีนบลูจะลดลง และไม่มีผลต่อการดูดซับอื่นๆ ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าวพบว่า การดูดซับเมทิลีนบลูจะลดลงเท่านั้น โดยจะไม่มีผลต่อการดูดซับอื่นๆ

Johnson et al.,(1977) ได้ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากผงถ่านหินขนาด 8x30 เมชสหรัฐ ความหนาแน่นปรากฏเท่ากับ 0.735 โดยการอบเม็ดถ่านหินให้แห้ง แล้วนำไปกระตุ้นด้วยแก๊สผสมระหว่างไอน้ำอิ่มตัวด้วยด่างกับแก๊สไนโตรเจน อัตราการไหล 2.5 และ 1000 มิลลิลิตร/นาที ที่อุณหภูมิ 760 ถึง 860 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที นอกจากนี้ได้ทดลองล้างผงถ่านหินด้วยกรดไฮโดรคลอริกร้อยละ 10 ก่อนนำมากระตุ้น ดังผลการทดลอง

	สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้	
	ไม่ล้าง	ล้าง
ค่าการดูดซับไอโอดีน, มก./ก.	615	655
ค่าการดูดซับโมลาส, มก./ก.	315	299
ค่าการดูดซับคาร์บอนเตตระคลอไรด์, มก./ก.	3.62	3.00
ค่าความหนาแน่นปรากฏ,ก./ลบ.ซม.	0.477	0.506
ถั่ว, %wt	8.57	8.12

ที่มา Johnson et al.,1977

Ninomiya et al.,(1974) ได้ทดลองผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มม. นำมาคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการป้อนวัตถุดิบ 272 กรัม/ชั่วโมง จากนั้นนำไปกระตุ้นในเครื่องแอกติเวเตอร์แบบฟลูอิดไรซ์เบดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเบด 150 มม.

สูง 300 มม. โดยการทำให้เกิดการฟลูอิดด้วยแก๊สผสมระหว่างอากาศกับไอน้ำอ้อมด้วยวดยิ่ง ที่มีไอน้ำร้อยละ 58 โดยปริมาตร ความเร็วของตัวกลาง 20 ซม./วินาที และอุณหภูมิภายในเบดเป็น 805 องศาเซลเซียส จากผลการศึกษาได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติดังนี้

	สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้
ความหนาแน่นปรากฏแพคกิ้ง, ก./ลบ.ซม.	448
ค่าการดูดซับเบนซินร้อยละ	38.2
ค่าการดูดซับไอโอดีน, มก./ก.	12.3

บุญชัย ตระกูลมหชัย (2534) ทำการทดลองผลิตถ่านกัมมันต์จากพีทไทยที่บดผ่านตะแกรงขนาด 8 มม. และพีทญี่ปุ่นที่บดผ่านตะแกรงขนาด 5 กับ 8 มม. แล้วนำไปคาร์บอนไนซ์แบบฟลูอิดไอดีเบดที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วนำไปกระตุ้นในเครื่องแอกติเวเตอร์แบบฟลูอิดไอดีเบด (ทำด้วยสแตนเลสเบอร์ 316 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 44 มม. สูง 30 ซม. ที่อุณหภูมิ 850 และ 900 องศาเซลเซียส แปรเวลา 10 , 20,30 และ 40 นาที ดังผลการทดลอง

สมบัติ	ถ่านกัมมันต์จากพีทไทย	ถ่านกัมมันต์จากพีทญี่ปุ่น
พื้นที่ผิวบีกิต, ตร.ม./ก.	383.4-623.5	243.2-510.4
ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู, มก./ก.	58.2-227.0	64.1-191.0
ค่าการดูดซับไอโอดีน, มก./ก.	662.9-1030.8	442.0-832.3

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากพีทญี่ปุ่นที่บดผ่านตะแกรงต่างกันมีสมบัติคล้ายกัน และถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านที่ได้จากเครื่องคาร์บอนไนเซอร์แบบฟลูอิดไอดีเบด มีสมบัติในการดูดซับดีกว่าถ่านที่ผลิตจากเครื่องคาร์บอนไนเซอร์แบบเบดนิ่ง นอกจากนี้ได้ทำการทดลองลดปริมาณแก๊สที่ไปด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกร้อยละ 5 ต้มให้เดือด 20 นาที จากผลการทดลองสามารถลดปริมาณแก๊สลงอย่างเห็นได้ชัด และถ่านกัมมันต์จากพีทญี่ปุ่นมีสมบัติเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลต่อถ่านกัมมันต์จากพีทไทย ทั้งนี้เพราะถ่านกัมมันต์จากพีทญี่ปุ่นมีค่าแก๊สสูงมาก (ร้อยละ 30-50) จึงส่งผลให้ถ่านกัมมันต์มีสมบัติในการดูดซับน้อยลง เมื่อนำไปล้างแก๊สออกสมบัติในการดูดซับจึงเพิ่มขึ้น ส่วนถ่านกัมมันต์จากพีทไทยมีปริมาณแก๊ส ร้อยละ 10-15 จึงมีผลต่อการดูดซับเพียงเล็กน้อย

นเรศ จันทรเทียน และคณะ (2534) ทำการศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำกะลาตาลโตนดมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ โดยใช้ไอน้ำอิมตัววยดยั้งในเครื่องแอกติเวเตอร์แบบฟลูอิดไธซ์เบด และใช้  $ZnCl_2$  ในเครื่องแอกติเวเตอร์แบบเบดนึ่ง การผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยไอน้ำอิมตัววยดยั้งในเครื่องแอกติเวเตอร์แบบฟลูอิดไธซ์เบด ทดลองโดยทำการคาร์บอนไนซ์กะลาตาลโตนดในเตาเผาไฟฟ้า (Muffle furnace) ที่  $300\text{ }^{\circ}C$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง คัดขนาดให้ได้ขนาด 2-5 มม. แล้วนำไปกระตุ้นด้วยไอน้ำอิมตัววยดยั้งในเครื่องแอกติเวเตอร์แบบฟลูอิดไธซ์เบด ซึ่งมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกที่ทำจากสแตนเลสเบอร์ 316 หนา 4 มม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร สูง 50 เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูประมาณ 0.17 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับไอโอดีน 600 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วย  $ZnCl_2$  ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนึ่ง ทำโดยคาร์บอนไนซ์กะลาตาลโตนดในเครื่องคาร์บอนไนเซอร์ (เบดทำด้วยสแตนเลสเบอร์ 316 เป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด  $17 \times 19.5 \times 53$  เซนติเมตร) ที่อุณหภูมิ  $300\text{ }^{\circ}C$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำมาตัดขนาด 2-5 มิลลิเมตร แล้วแช่ในสารละลาย  $ZnCl_2$  เข้มข้นร้อยละ 50 โดยใช้ถ่าน 3 กรัม ต่อ สารละลาย  $ZnCl_2$  9 มิลลิลิตร แล้วนำไปกระตุ้นในเตาเผา (Muffle furnace) ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ผลการทดลองพบว่าค่าการดูดซับเมทิลีนบลูประมาณ 362-376 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับไอโอดีน 1088 - 1117 มิลลิกรัมต่อกรัม

บุญชัย ตระกูลมหชัย (2537) ได้ทำการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาตาลโตนดด้วยวิธีทางฟิสิกส์ ภาวะที่เหมาะสมคือใช้ถ่านกะลาตาลโตนดคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 2 ชม. มีขนาดของอนุภาค 1.19 ถึง 1.68 มิลลิเมตร แล้วกระตุ้นด้วยแก๊สผลมที่ได้จากการเผาไหม้ น้ำมันดีเซล กับไอน้ำอิมตัววยดยั้งยวด ที่มีความเร็ว 6.44 เมตรต่อวินาที ในฟลูอิดไธซ์เบดได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิว 1800 ถึง 1900 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าไอโอดีน 1,000 ถึง 1,300 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าเมทิลีนบลู 250 ถึง 350 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าถ้ำร้อยละ 10 ถึง 15 โดยน้ำหนักถ้ำร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้ 30 ถึง 40

ภัทรา ปัญญาวัฒนกิจ (2540) ได้ทำการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม พบภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์ คือ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ถ่านกะลาปาล์มที่ได้มีสมบัติดังนี้ ปริมาณผลิตภัณฑ์ร้อยละ 31.50 , ปริมาณถ้ำร้อยละ 6.24 , ปริมาณสารระเหยร้อยละ 27.76 และปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 64.48 ส่วนภาวะที่ใช้ในการกระตุ้น คือ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ใช้ถ่านขนาด 0.355 - 0.85 มิลลิเมตร มีร้อยละของปริมาณผลิตภัณฑ์

19.31 , ความหนาแน่นเชิงปริมาตร 0.53 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร , ค่าการดูดซับไอโอดีนและเมทธิลีนบลู 779 และ 136.96 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ , พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด 670.1 ตารางเมตรต่อกรัม มีประสิทธิภาพการดูดซับอยู่ในช่วง  $147 \pm 0$  และ  $117 \pm 6$  มิลลิกรัมต่อกรัม ของการดูดซับไดโครเมต ไอออน ณ สารละลาย pH = 1 และ pH = 2 ตามลำดับ

อุไรวรรณ ธรรมรัตน์พคุณ (2523) ได้ทำการทดลองคาร์บอนในซีกะลามะพร้าวในถึงน้ำมันขนาด 200 ลิตร แล้วนำมากระตุ้นด้วยไอน้ำอ้อมตัวยั้งยวดในเตาแบบหมุน (Rotary kiln) ที่ทำด้วยเหล็กไร้สนิมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ปลายแต่ละด้านปิดด้วยตะแกรงเพื่อป้องกันไม่ให้ถ่านหลุดออกไป ท่อหมุนในแนวนอนด้วยอัตรา 4 รอบต่อนาที ภาวะที่ใช้คือ ถ่านขนาด 4 - 10 เมช (2.00 - 4.76 มิลลิเมตร) ครั้งละ 500 กรัม อุณหภูมิ 700 - 1050 องศาเซลเซียส แปรเวลาดังแต่ 30 , 40, 45 ,50 ,55 ,60 ,90 ,105, 110 และ 130 นาที จากผลการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้โดยการกระตุ้นที่เวลา 30 - 130 นาที มีคุณภาพ ดังนี้

	คุณสมบัติถ่านกัมมันต์
ค่าการดูดซับไอโอดีน, มก./ก.	1540
ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู, มก./ก.	5-371
ค่าความแข็ง	30-42
ค่าความหนาแน่นปรากฏ	0.31-0.59

เกศรา บุตาชัย และ ฉวันะ (2532) ได้ทำการทดลองนำฟืนที่ผ่านแรงขนาด 60 เมช มาผสมกับแป้งมันสำปะหลังสุก (แป้ง 15 กรัม ในน้ำ 390 มล.) โดยใช้น้ำหนักแป้งแห้งร้อยละ 5 ของน้ำหนักดินพู่แห้งอัดให้เป็นเม็ดอบให้แห้งที่ 110 องศาเซลเซียส แล้วนำไปคาร์บอนที่ 500 องศาเซลเซียสจากนั้นนำไปกระตุ้นในเตาเผาแบบหมุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของเบต 10 เซนติเมตร และยาว 35 เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส แปรเวลาที่ 1,2,3 และ 4 ชม.ผ่านความดันไอน้ำ 20 ปอนด์ ต่อ ตารางนิ้ว พบว่าที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชม. จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีความสามารถในการดูดซับสูงที่สุด คือค่าไอโอดีนประมาณ 1200 มิลลิกรัม/กรัม ค่าเมทธิลีนบลูประมาณ 296 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิวรูพรุน 881 ตารางเมตรต่อกรัมและผลิตภัณฑ์ที่ได้คิดเป็นร้อยละ 8

อรนุช ชาวเมืองน้อย และ ศุภสิทธิ กิตชัย (2538) ได้ทำการศึกษาผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมันโดยการคาร์บอนไนซ์ และกระตุ้นด้วยไอน้ำอ้อมตัวยั้งยวดในเบตนิ่ง โดยทำการคาร์บอนไนซ์ใน

ช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์ 5 - 11 ชั่วโมงพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์ คือ อุณหภูมิเบด 400 องศาเซลเซียส อากาศอัด 0.1 บาร์ (45 นาที) เวลาในการคาร์บอนไนซ์ 9 ชั่วโมง ได้ผลิตภัณฑ์เป็นถ่านกะลา (ถ่านชาร์) ร้อยละ 47.0 ปริมาณคาร์บอนคงตัว ร้อยละ 68.25 สารระเหยร้อยละ 25.02 และเถ้าร้อยละ 6.93

ส่วนการกระตุ้นด้วยไอน้ำอิมพัลส์ยิ่งยวดในเบดนิ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเบด 4.5 เซนติเมตร ความลึกของเบด 30 เซนติเมตร ตัวแปรที่ศึกษาคือ อุณหภูมิของเบดขณะเริ่มป้อนไอน้ำ และอากาศ 800 - 900 องศาเซลเซียส ขนาดถ่านกะลา 0.355 - 0.5 , 0.5 - 1.0 และ 1.0 - 2.0 มิลลิเมตร เวลาที่ใช้ในการกระตุ้น 45 , 60 และ 75 นาที พบว่า ภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นด้วยไอน้ำยิ่งยวด คือ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 1.0 - 2.0 มิลลิเมตร เวลาที่ใช้ในการกระตุ้น 60 นาที อัตราการป้อนถ่านกะลา 70 กรัม ต่อครั้ง อากาศอัด 420 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ไอน้ำยิ่งยวด 945 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ได้ผลิตภัณฑ์เป็นถ่านกัมมันต์ ร้อยละ 18.5 มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมด 795.35 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าการดูดซับไอโอดีน 856.94 มิลลิเมตรต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู 250.63 มิลลิกรัมต่อกรัม

Kagawa-S Nakamura-T Noda - K Ikawa - T (1992) ได้ทำการผลิตถ่านกัมมันต์จาก Walnut Shell ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมากและราคาต่ำ จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติดังต่อไปนี้

1. จากวัตถุดิบเมื่อทำการคาร์บอนไนซ์ จะให้ผลผลิตที่เป็น Macropore เป็นจำนวนมาก
2. ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำให้ปริมาณสูงสุด เมื่อใช้อุณหภูมิ 1173 K และปริมาณของถ่านที่ได้มีความสัมพันธ์กับปริมาณของไอน้ำ และ เวลาที่ใช้กระตุ้น
3. จากการหาพื้นที่ผิวโดย BET พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวเป็นแบบ Micropores ขนาดรัศมี  $2 \times 10^9$  เมตร
4. Activated carbon ที่ได้ส่วนใหญ่เป็นพวกที่มี Micropores สูงและมี Macropore volume แต่มี Mesopores จำนวนน้อย จากการศึกษาค่าการดูดซับ Hexane - benzene พบว่าถ่านกัมมันต์จาก Walnut shell สามารถดูดซับได้มากกว่า Synthetic Zeolite 5A ดังนั้น Walnut shell จึงเหมาะสมใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์

Simitzis-J Sfyraakis-J (1994) ได้ทำการศึกษาการไพโรไลซิสของวัสดุพวกพืชจาก Lignocellulosic biomass ที่เหลือจากการเกษตรและโรงงานอุตสาหกรรมสกัดพวก Olive Oil และ

lignin ทำให้ได้วัตถุที่มีสมบัติพวก Carbonaceous ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับ สารละลาย Methylene blue และ สารละลาย Alizarin yellow

Dalai-AK Zaman-J Hall - ES Tollefson- EL (1996) ได้ทำการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์ จากถ่านหินประเภทต่าง ๆ จากแคนาดาตะวันตก ได้แก่ พวก Bienfait lignite , Roselyn , Montgomery , Atlas - Century and Egg Lake subbituminous coals , Coals Valley และ Smoky River bituminous coals กระตุ้นด้วยไอน้ำโดยใช้ Fixed Bed Reactor และ Spouted Bed - kiln System เพื่อผลิตเป็น GAC ใช้เวลา 0.5 - 4.0 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 650 - 850 องศาเซลเซียส ซึ่งถ่านกัมมันต์เหล่านี้ให้ค่า การดูดซับไอโอดีน เท่ากับ 500 หรือมากกว่า 500 มก./ก.ยกเว้น Smoky River Bienfiat lignite มีค่าการดูดไอโอดีน สูงสุดถึง 545 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ Yield ร้อยละ 29 โดยน้ำหนักที่ 650 องศาเซลเซียส ถ่านกัมมันต์จาก Montgomery และ Atlas-Century coals ให้ค่าการดูดซับไอโอดีน 620 และ 579 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ Yield ร้อยละ 36 และ 37 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ที่ 700 องศาเซลเซียส และเมื่อทำการกระตุ้นที่ 650 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง Roselyn coal จะให้ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าการดูดซับไอโอดีน 730 มิลลิกรัมต่อกรัม และถ่านกัมมันต์จาก Coal Valley ให้ค่า การดูดซับไอโอดีนน้อยที่สุด คือ 370 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และให้ค่าสูงเพิ่มเป็น 571 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อทำการกระตุ้นที่ 760 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง และจะให้ร้อยละน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ลดลงจาก 59 เป็น ร้อยละ 45 มีปริมาณเถ้าสูงถึง 23 - 67 ร้อยละโดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นข้อจำกัดทางด้านคุณภาพ เมื่อทำการเปรียบเทียบการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีของ Fixed Bed และ Spouted Bed - Kiln Reaction System ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยวิธีของ Fixed Bed System จะมีสมบัติในการดูดซับสูงกว่า

Gergova-K Eser-S Schobert - HH Klimkiewicz - M Brown - PW (1995) ได้ทำการศึกษา โครงสร้างรูพรุน (Porosity) ของแอนทราไซต์ที่เผาด้วยแก๊สต่าง ๆ ก่อนแล้วทำการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูง และมีโครงสร้างของรูพรุนที่ดี ซึ่งมีโครงสร้างเป็น Microporous structure และพบว่า สารที่ใช้กระตุ้นถ่านมีผลต่อความพรุนของถ่าน McKay-G Alduri-B (1990) ได้ทำการศึกษาการดูดซับของสีเบสิก 3 ชนิด Basic-Blue 69 (Astrazone Blue) , Basic Red 22 (Maxillon Red) และ Basic Yellow 21(Astrazone Yellow) ด้วยถ่านกัมมันต์ พบว่าจุดสมดุลของไอโซเทอมมีความสามารถดูดซับสูงสุดถึง 800 มิลลิกรัมต่อกรัม, 535 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 635 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ไอโซเทอมที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ สมการ Langmuir , Freundlich และ Redlich Perterson

Guzel-F (1996) ได้ทำการศึกษาผิวของถ่านกัมมันต์ชนิดที่เป็นกรด โดยทำการดูดซับสารละลาย Methylene blue (Cationic) กับ Metanil yellow (Anionic) พบว่า ที่ 298 เคลวิน ผิวของถ่านกัมมันต์มีปริมาณของ Methylene blue มากกว่า Metanil yellow ทั้งนี้เพราะว่าถูกผลักรอกจากผิวของถ่านกัมมันต์ ส่วน Methylene blue ถูกดึงดูดเข้าสู่ผิวของถ่านกัมมันต์

K.Gergova N.Petrov & V.Minkova (1993) ได้ทำการทดลองผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุที่เหลือจากการเกษตร เช่น Apricot stone, Cherry stone และ Grape seeds ด้วยขั้นตอนเดียว คือ รวมกระบวนการคาร์บอนเซชัน และการกระตุ้นด้วยไอน้ำเข้าด้วยกัน โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 600,650 และ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง ผลการศึกษาแสดงดังตาราง

ตารางที่ 2.11 สมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร

วัตถุดิบ	ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ (%wt)	พื้นที่ผิวจำเพาะโดยอากาศ (ตร.ม. / ก.)	การดูดซับไอโอดีน (มก./ ก.)	การดูดซับเมทิลีนบลู (มก. / ก.)
Apricot stones	18.16	1175	894	285
Grape seeds	26.23	487	607	192
Cherry stones	11.17	836	907	185

จากการศึกษาพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จาก Apricot stones ได้โครงสร้างรูพรุนชนิด ไมโครพอร์ และมีความเหมาะสมในการดูดซับโมเลกุลขนาดเล็ก ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ได้จาก Grape seeds กับ Cherry stones โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จะเป็น ชนิด มีโซพอร์ และ เมสโคพอร์ จึงมีความเหมาะสมในการดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่

ดังนั้นวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์เป็นปัจจัยสำคัญ ต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ ทั้งนี้เนื่องจากวัตถุดิบแต่ละชนิดมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน และนอกจากนี้ ปริมาณของลิกนิน และเซลลูโลส ก็เป็นปัจจัยที่ควรนำมาพิจารณาในการเลือกวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์

ตารางที่ 2.12 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์

วัตถุดิบ	เซลลูโลส , %	ลิกนิน , %	ไฮโลเซลลูโลส	ลิกนิน / เซลลูโลส
Apricot stones	30	37	58	1.23
Grape seed	30	49	48	1.63
Cherry stones	28	40	55	1.43

ตารางที่ 2.13 คุณลักษณะของรูพรุน และความสามารถในการดูดซับของถ่านลิกนิน กับถ่านเซลลูโลส

วัตถุดิบ	นน.ถ่านที่ได้ (%wt)	การดูดซับ ไอโอดีน มก. / ก.	$V_{total}$ $cm^3/g$	$V_{1micro}$ $cm^3/g$	$V_{2meso}$ $cm^3/g$	$V_{3macro}$ $cm^3/g$
เซลลูโลส	12.0	415	0.74	0.34	0.05	0.35
ลิกนิน	8.5	311	1.56	0.33	0.16	1.07

J.H.Potgieter (1991) ได้ทำการทดลองการดูดซับ Methylene blue ด้วยถ่านกัมมันต์เกรดการค้า โดยการใช้ Methylene blue (Analytical-grade) ละลายในน้ำกลั่นให้มีความเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ถ่านกัมมันต์ น้ำหนัก 0.001 กรัม ถึง 0.100 กรัม ใน Flask ขนาด 250 มิลลิลิตร ในแต่ละ Flask เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร แล้วเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 72 ชั่วโมง แล้ววัดปริมาณ MB ที่เหลือด้วยเครื่อง Spectronic 20 Spectrophotometer ที่ 630 นาโนเมตร

ตารางที่ 2.14 การดูดซับเมทิลีนบลูด้วยถ่านกัมมันต์ที่ 25 °C

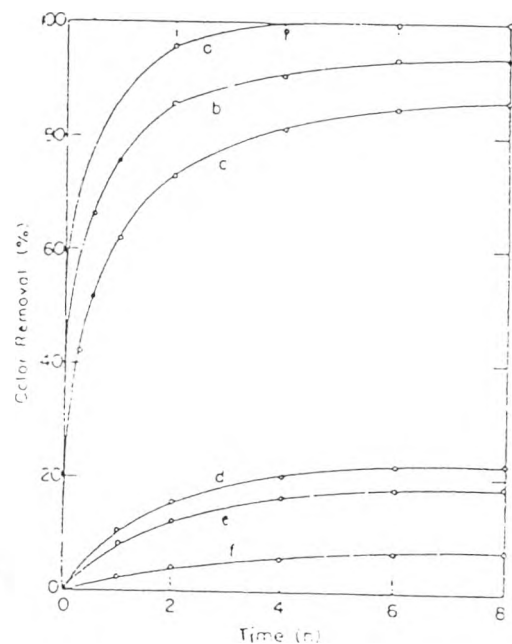
Activated carbon mass (mg)	Initial MB mass before adsorption (mg)	Final MB mass after adsorption (mg)	Mass of MB adsorbed (mg)	[MB] after adsorption ( $mg/dm^3$ )
1	2.50	1.99	0.51	19.9
5	2.50	1.08	1.42	10.8



Activated carbon mass (mg)	Initial MB mass before adsorption (mg)	Final MB mass after adsorption (mg)	Mass of MB adsorbed (mg)	[MB] after adsorption (mg/dm <sup>3</sup> )
12.5	2.50	0.35	2.15	3.5
25	2.50	0.10	2.40	1.0
30	2.50	0.07	2.43	0.07
100	2.50	0.02	2.48	0.02

Sheng H.Lin (1993) ได้ทำการทดลองการดูดซับ สีติสเพอร์ส (C.I Disperse Red 60) ด้วยสารดูดซับชนิดต่างๆ ได้แก่ Activated alumina, Powder activated carbon (PAC), Molecular sieve, Sawdust, Granular activated carbon (GAC) และ Diatomite โดยการใช้สารดูดซับ 0.5 , 1.0, 1.5 , 2.0 และ 2.5 กรัม ใส่ลงในขวดแก้ว ที่มี 100 มิลลิลิตร ของ 150 ppm. ของสารละลายสี ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.14

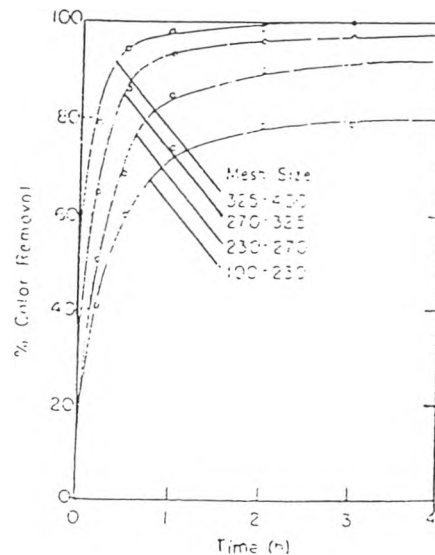
- (a) Activated aluminum
- (b) Powder activated carbon (PAC)
- (c) Molecular sieve
- (d) Sawdust
- (e) Granular activated carbon (GAC)
- (f) Diatomite



รูปที่ 2.14 การกำจัดสีด้วยสารดูดซับชนิดต่างๆ

Sheng H. Lin (1993) ได้ทำการศึกษา การดูดซับ สีติสเพอร์ส (C.I Disperse Red 60 ซึ่งเป็นสีที่นิยมใช้ในโรงงาน) โดยการใช้ 1 และ 1.5 กรัม ของ PAC (ทำมาจาก Sawdust อบให้แห้งที่ 100 °C เป็นเวลา 24 ชม.) ขนาด 325-100 เมช ใส่ลงในขวดแก้ว ที่มีสารละลายสีติสเพอร์สอยู่ 100 มิลลิลิตร ณ ความเข้มข้น 25 , 75 , 150 และ 150 ppm. แล้วทำการทดลองซ้ำ โดยใช้ PAC ขนาดต่าง ๆ คือ 100-230, 230-270 และ 270-325 เมช หาปริมาณสีโดยการใช้เครื่อง Spectrophotometer (Model

TC-1 Tokyo Denshoku) จากผลการศึกษาพบว่าขนาดของ PAC มีผลต่อการดูดซับสี แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การกำจัดสีด้วย Powder activated carbon (PAC) ขนาดต่าง ๆ ในสารละลายสีที่มีความเข้มข้น 150 ppm

A.R. Bowers and c.p. Huang, 1980 ได้ทำการศึกษากำจัด Chromium (VI) น้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า pH ที่เหมาะสมคือ 2.5

Toyokichi ได้รายงานว่ Cr (VI) สามารถถูกกำจัดได้ด้วยถ่านกัมมันต์ เมื่อน้ำเสียที่มีปริมาณ 100 ppm. ของ  $CrO_4^{2-}$  ลงบนถ่านกัมมันต์ 1 กิโลกรัมที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ ในอัตรา 1 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง. พบว่าน้ำเสียหลังผ่านการกำจัด มี  $CrO_4^{2-}$  อยู่ น้อยกว่า 0.1 ppm.

Tagashira et al. ได้ทำการศึกษา โดยการผสม 200 มิลลิลิตร สารละลาย  $K_2Cr_2O_7$  (534 ppm. Cr) กับ 5 กรัม ผงถ่านจากกะลาสะพราว (100-200 เมช 15% , 200-325 เมช 15% และ <325 เมช 70%) แล้วให้ความร้อนใน Autoclave ที่ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที สามารถกำจัด Cr (VI) เหลือเพียง 0.1 ppm

Tsuda ได้ทำการศึกษาโดยผสม 10 Na<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 50 มล. กับ 5 กรัม Activated carbon ใน Flask เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่ 25 องศาเซลเซียส พบว่าสามารถดูดซับ CrO<sub>3</sub> ได้ 38.7 และ 3.3% ณ pH 3 และ 7 ตามลำดับ

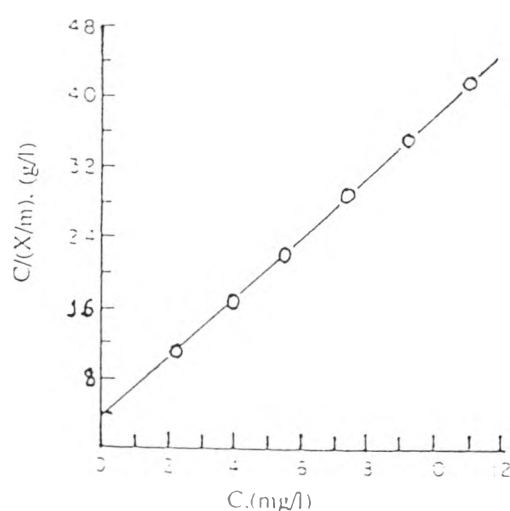
K.K.Panday, Gur Prasad and V.N.Singh, 1984 ได้ทำการศึกษาการกำจัด Cr(VI) ด้วย Fly ash กับ Wollastonite(1:1) พบว่าการกำจัด Cr(VI) ขึ้นกับ ความเข้มข้น , pH และ อุณหภูมิของสารละลายภาวะที่ดูดซับ Cr(VI) ได้ดีที่สุด คือที่ pH 2 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสและความเข้มข้นของสารละลาย K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> อยู่ในช่วง 0.6 M ถึง 1.6x10<sup>-4</sup> M หากความสามารถในการดูดซับ Cr(VI) บนผิว Fly ash กับ Wollastonite (1:1) โดยใช้ Langmuir plot ดังสมการ

$$\frac{C}{x/m} = \frac{1}{K_1 K_2} + \frac{C}{K_2}$$

เมื่อ C = ความเข้มข้น K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> ณ จุดสมดุล , mg/l

X/m = ปริมาณ Cr(VI) ที่ถูกดูดซับ , mg/g

K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub> = Langmuir's constants



รูปที่ 2.16 Langmuir plot ของการดูดซับ Cr(VI) บน Fly ash กับ Wollastonite(1:1) อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส pH =2