

วารสารปริทัศน์

2.1 พีต (peat)

พีต เกิดจากการดักจับทับถมกันของพืชที่อยู่บริเวณที่ราบลุ่มปากแม่น้ำ ชายฝั่งหรือหนองบึง ที่มีน้ำขังเฉอะแฉะ (swamp) เป็นเวลานาน แต่ยังไม่สลายตัวไม่สมบูรณ์ เป็นพื้นที่ที่มีความชื้นกรดสูง (พีเอช 3.2-4.8) และขาดธาตุอาหาร ดังนั้นจึงใช้ประโยชน์ทางเกษตรกรรมได้ไม่เต็มที่

ขั้นตอนการเกิดพีตเป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นก่อนจะเปลี่ยนแปลงต่อไปโดยอุณหภูมิและความดัน กลายเป็นถ่านหิน ในขั้นแรกจะเกิดการย่อยสลายโดยแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจน (aerobic bacteria) และรา เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพียงบางส่วน และไฮโดรไลซิสย่อยสลายเซลลูโลส โปรตีน และลิกนินบางส่วนจะกลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะคล้ายวุ้น (colloidal product) ซึ่งจะสะสมตัวเป็นพีตโดยมีลักษณะเป็นไฮโดรซอล (hydrosol) และเปลี่ยนแปลงเป็นไฮโดรเจล (hydrogel) ผลผลิตที่เป็นพีตจะถูกฝังอยู่ในชั้นหนาๆ ของโคลนตม เมื่อน้ำบริเวณนั้นเริ่มเน่า และขาดออกซิเจน ปฏิกิริยาการสลายตัวจะถูกยับยั้งแม้ในขั้นแรก ๆ ยังถูกทำลายได้อย่างช้า ๆ โดยแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic bacteria) แต่ในที่สุดแบคทีเรียทั้งหมดก็จะหยุดการเจริญเติบโต และตาย

ชั้นของพีตที่สะสมตัวอยู่ใต้โคลนตมเป็นชั้นหนานี้ ถูกทับถมต่อโดยชั้นสารอินทรีย์ที่สะสม มีน้ำหนักมากขึ้นเรื่อย ๆ อย่างช้า ๆ ทำให้เกิดความดันอัดแน่นจนไล่น้ำที่รวมตัวอยู่กับพีตออกจนมีสภาพเป็นเจล ความดันที่กดทับมากขึ้นเป็นระยะเวลาาน ๆ รวมทั้งความดันจากที่อื่น ๆ และอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของเปลือกโลก อันเป็นสาเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อพีตที่ถูกฝังอยู่ให้เปลี่ยนสภาพไปตามลำดับจากพีตเปลี่ยนเป็น ลิกไนต์ ซับบิทูมินัส บิทูมินัส และ แอนทราไซต์ ซึ่งมีศักดิ์ (rank) สูงขึ้นตามลำดับ ซึ่งขั้นตอนการกลายเป็นถ่านหินนี้จะกินเวลานับล้านปี (อินัญญา พจนารถ, 2528)

2.1.1 การจำแนกประเภทของพีต

องค์ประกอบของพีตจะเปลี่ยนไปตามลักษณะพื้นที่ ความลึก และชนิดของพืช หรืออาจกล่าวได้ว่าองค์ประกอบของพีตขึ้นอยู่กับสภาพทางภูมิศาสตร์ พฤกษศาสตร์และการสลายตัว

ของพืช โดยเฉพาะสภาพภูมิศาสตร์นั้นเกี่ยวข้องกับน้ำในแหล่งของพืช เพราะน้ำเป็นองค์ประกอบสำคัญที่สะสมอยู่ในพืชและเป็นตัวควบคุมการละลายของสารอินทรีย์ในดิน พืชสามารถจำแนกประเภทได้เป็น 3 ประเภท คือ

2.1.1.1 โลงมีว (low - moor)

มักพบน้ำปกคลุมบริเวณผิวหน้าของแหล่งเสมอ น้ำมีสารละลายอินทรีย์ที่ละลายมาจากดินอินทรีย์บริเวณใกล้เคียงปนอยู่มากและ ชนิดของพืชเป็นพืชจำพวกหญ้าพันธุ์ไม้จำพวก อ้อ กก แปก พืชที่มีเนื้อไม้มาก เช่น อัลเดอร์ (alder) วิลโลว์ (willow) เบิร์ช (birch) สน เป็นต้น พืชจากโลงมีวมีค่าพีเอช (pH) 4-7.5 ใต้อ้อยละ 3-14 ของน้ำหนักพืชแห้ง และมีระดับการสลายตัว 25-45 เปอร์เซ็นต์ โดยระดับการสลายตัวจะเป็นตัวบอกถึงสัดส่วนของของวัสดุที่เหลืออยู่ ตัวอย่างเช่น สลายตัว 50 เปอร์เซ็นต์ อาจหมายถึงเหลือวัสดุเดิม 10 เปอร์เซ็นต์ และ 10 เปอร์เซ็นต์เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการสลายตัว ที่เหลืออีก 80 เปอร์เซ็นต์ เป็นส่วนที่หายไประหว่างกระบวนการสลายตัว

2.1.1.2 ทรานซิชันนัล (transitional)

เป็นลักษณะของพื้นที่อยู่ระหว่างโลงมีวกับไฮมีว แหล่งน้ำมีสารอินทรีย์ละลายปนอยู่น้อยกว่าโลงมีว พืชที่ขึ้นอยู่บริเวณแหล่งไม่ต้องการแร่ธาตุมากนัก พืชมีค่าพีเอช 3.5-6

2.1.1.3 ไฮมีว (high - moor)

น้ำในแหล่งนี้ได้มาจากฝนหรือหิมะโดยตรงปริมาณแร่ธาตุในน้ำจึงต่ำ ชนิดของพืชเป็นพวกมอส (mosses) หรือสเฟกนัม (Sphagnum) หญ้าและพันธุ์ไม้เตี้ย ๆ มีการสลายตัวน้อยกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ ค่าพีเอช 3-5 ใต้อ้อยกว่าร้อยละ 3 ของน้ำหนักพืชแห้ง

2.1.2 องค์ประกอบของพืช

พืชประกอบด้วยน้ำเป็นส่วนใหญ่ ประมาณ 70-90 เปอร์เซ็นต์นอกนั้นเป็นสารอินทรีย์มีสารอินทรีย์ปนอยู่บ้างเล็กน้อย ธาตุองค์ประกอบของพืชดังแสดงในตารางที่ 2.1

พืชมีส่วนประกอบคล้ายกับพืชมาก เพราะพืชเกิดจากการสลายตัวเพียงบางส่วน of พืช ทั้งพืชและพืชมีส่วนประกอบหลักประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน พืชจะมีสารที่เกิดจากการย่อยสลาย เช่น แวกซ์ และเรซิน ดังตัวอย่างที่แสดงในตารางที่ 2.2 ค่าความร้อนที่ได้จากไม้แห้งประมาณ 20 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม และพืชแห้งให้ความร้อนประมาณ 20-24 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม

ตารางที่ 2.1 แสดงธาตุองค์ประกอบของพีต (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)

Elemental Composition of Peat (% of Dry Organic Material)

Organic element	Slightly decomposed sphagnum peat	Highly decomposed sphagnum peat	Highly decomposed low-moor peat
Carbon	48-53	56-58	59-63
Hydrogen	5.0-6.1	5.5-6.1	5.1-6.1
Oxygen	40-46	34-39	31-34
Nitrogen	0.5-1.0	0.8-1.1	0.9-1.9
Sulfur	0.1-0.2	0.1-0.3	0.2-0.5

ที่มา : Fushman (1980)

ตารางที่ 2.2 แสดงองค์ประกอบหลักของพีตตามระดับของการสลายตัว

Compound	Degree of humification		
	1-2 %	5-6 %	9-10 %
Cellulose	15-20	5-15	-
Hemicellulose	15-30	10-25	0-2
Lignin	5-40	5-30	5-20
Humic substances	0- 5	20-30	50-60
Bitumens	1-10	5-15	5-20
Nitrogen (as protein)	3-14	5-20	5-25

ที่มา : Ekman (1982)

2.2 ถ่านกัมมันต์ (activated carbon)

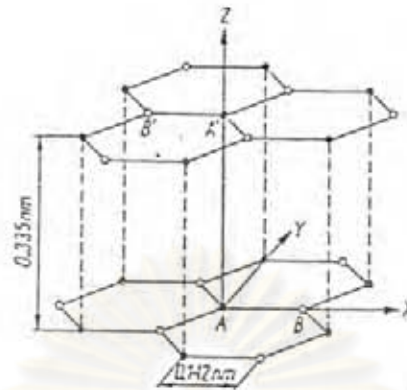
ถ่านกัมมันต์ คือ คาร์บอนที่อยู่ในรูปคาร์บอนอสัณฐาน(amorphous carbon) ชนิดหนึ่ง แต่ถูกผลิตขึ้นมาเป็นพิเศษโดยการกระตุ้น(activation) ซึ่งจะทำการเพิ่มพื้นที่ผิวภายใน (internal surface area) เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนจำนวนมาก แต่ถ้าศึกษาด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน(X-ray diffraction)หรือศึกษาโครงสร้างจากการสะท้อนและเบี่ยงเบนของรังสีเอ็กซ์เมื่อกระทบกับวัตถุ โครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะมีความเป็นผลึก(crystallites) อยู่บ้างแต่มีข้อบกพร่องไม่สมบูรณ์เหมือนกับแกรไฟต์ โดยทั่วไปแล้วผิวหน้าของถ่านกัมมันต์นั้นไม่มีผิว แต่เนื่องจากมีสารประกอบออกไซด์เกิดขึ้นเสมอที่ผิวหน้าและการเรียงตัวของอะตอมอยู่ในลักษณะเฮกซโกนัล(hexagonal) ทำให้ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์เป็นผิวเล็กน้อย แต่เนื่องจากผิวหน้าของถ่านกัมมันต์สูงกว่าอย่างอื่น เช่น ซิลิกาเจล (silica gel) จึงทำให้ดูดซับพวกสารได้มากกว่า (เพียรพรศ ทศคร, 2534)

2.2.1 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์

2.2.1.1 โครงสร้างผลึก

ถ่านกัมมันต์นี้มีโครงสร้างเช่นเดียวกับแกรไฟต์แต่มีการจัดเรียงเป็นระเบียบน้อยกว่า ผลึกแกรไฟต์ประกอบด้วยชั้นคาร์บอนอะตอมในรูปของ เบนซีนริง(benzene ring) แต่ละอะตอมจับกับอีก 3 อะตอมในแผ่นราบ(plane) ในลักษณะสมมาตรกัน โครงสร้างแผ่นราบ(planar)จะถูกทำให้เสถียรโดยการเกิดรีโซแนนซ์(resonance) และการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในแผ่นราบจะทำให้แกรไฟต์แสดงความสามารถในการนำไฟฟ้า ในทิศทางของแผ่นราบในมุมตั้งฉากกับแผ่นราบแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาล(Van der Waals) แต่ละแผ่นราบห่างกัน 3.354 อังสตรอม ดิสเพลสเมนต์(displacement)ในทิศทางขนานกับแผ่น(layer) จะง่ายเพราะแรงยึดเหนี่ยวแวนเดอร์วาลอ่อน ดังนั้นอาจจะเกิดข้อบกพร่อง(defect) ตรงจุดนี้ได้ง่าย ดังรูปที่ 2.1 (วิชา วศุรงค์วรณ, 2528)

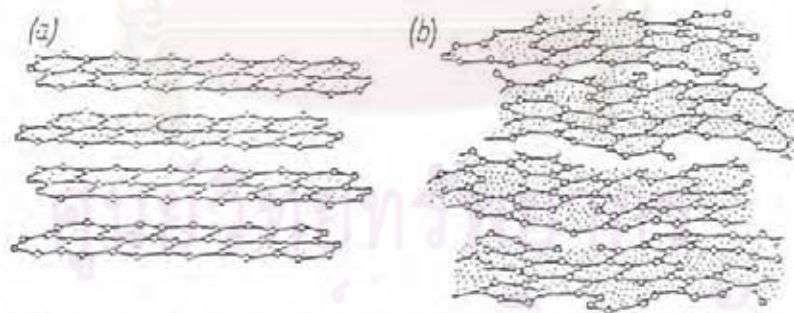
เมื่อศึกษาโดยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันพบว่า ถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยโครงสร้างที่เป็นผลึกเล็ก ๆ ที่ไม่สมบูรณ์ เกิดการเบี่ยงเบนในแนวฉากและการซ้อนเหลื่อมกันในแนวระนาบเรียกว่าเทอร์โบสแตติกสตรัคเจอร์ (turbostatic structure) การจัดเรียงของผลึกเล็ก ๆ จะมีทิศทางไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิของการคาร์บอนไนท์ ผลึกเล็ก ๆ นี้ก็มีความสูง 9-12 อังสตรอม กว้าง(เส้นผ่าศูนย์กลางหน้าตัด) ประมาณ 20-30 อังสตรอม ประกอบด้วย 3 แผ่นระนาบของชั้นแกรไฟต์ และมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 9 เท่าของความกว้างของอะตอมคาร์บอนรูป 6 เหลี่ยม รูปที่ 2.2



Ordering of carbon atoms in a crystal of graphite.

ที่มา : Jankowska (1991)

รูปที่ 2.1 การจัดเรียงอะตอมของคาร์บอนในผลึกแกรไฟต์

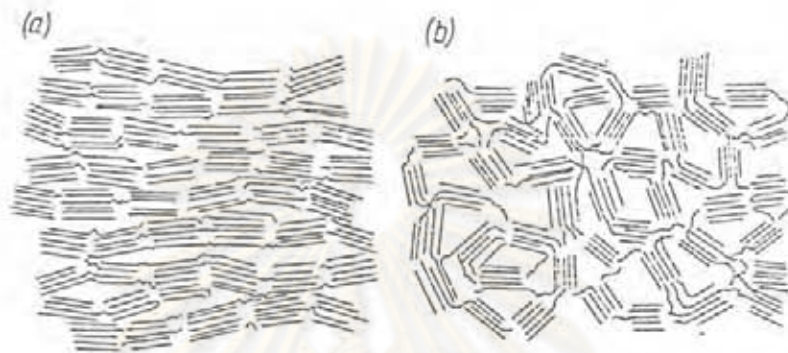


Comparison of three-dimensional crystal lattice of graphite (a) and the turbostratic structure (b)

ที่มา : Jankowska (1991)

รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบภาพสามมิติผลึกของแกรไฟต์กับลักษณะโครงสร้างเทอร์โบสแตติก

โครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะขึ้นอยู่กับสภาวะในการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อน ได้มีการพยายามแบ่งประเภทของถ่านกัมมันต์ตามโครงสร้างของผลึก ตัวอย่างเช่น แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือโครงสร้างที่เป็นแกรไฟต์ง่ายที่อุณหภูมิสูง และโครงสร้างที่มีลักษณะแกรไฟต์เพียงเล็กน้อย(ที่สภาวะเดียวกัน) ดังรูปที่ 2.3



Schematic illustration of the structure of active carbon: (a) easily undergoing graphitization, (b) undergoing graphitization to a small degree

ที่มา : Jankowska (1991)

รูปที่ 2.3 แผนภาพอธิบายโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ โครงสร้างที่เป็นแกรไฟต์ได้ง่ายกับโครงสร้างที่มีลักษณะแกรไฟต์เล็กน้อย

2.2.1.2 โครงสร้างรูพรุน

ในการกระตุ้นจะทำให้ถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์มีความพรุนมากขึ้น เนื่องจากมีการสูญเสียสารประกอบคาร์บอนระหว่างช่องว่างระหว่างผลึกของคาร์บอน รูพรุนทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ การกระตุ้นที่เหมาะสมคือการทำให้มีความพรุนมากไม่ใช่ให้ขนาดของรูใหญ่

ลักษณะรูปร่างของรูนั้นไม่สามารถบอกได้แน่นอนบางรูจะมีลักษณะคล้ายหลอดแคบปลายเปิดหัวท้าย บางรูมีลักษณะเปิดข้างหนึ่งปิดข้างหนึ่งบางครั้งเป็นรูปตัววี Dubinin (1966) ได้ทำการทดลองเตรียมถ่านกัมมันต์จากนิตและซีเลียดด้วยซิงค์คลอไรด์ พบว่าลักษณะรูที่เกิดขึ้นเป็นรูคอแคบคล้ายคอขวด หรือที่เรียกว่าอิงค์บอทเทิล(ink-bottle) ในขณะที่กระตุ้นซีเลียดด้วยไอน้ำแล้วได้ลักษณะรูที่แตกต่างกัน ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าลักษณะรูที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียมและวัตถุดิบที่ใช้

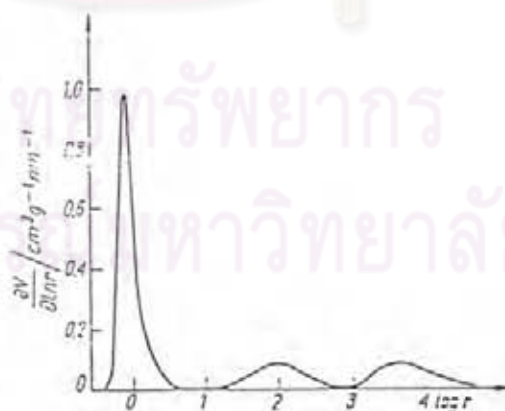
Dubinin (1966) ได้จำแนกชนิดของรูพรุนตามขนาดรัศมีรูพรุน ออกเป็น แมคโครพอร์ มีโซพอร์ และไมโครพอร์

แมคโครพอร์(macropores) รัศมีของรูพรุนมากกว่าหรือเท่ากับ 1,000-2,000 อังสตรอม ปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.2-0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวไม่เกิน 0.5 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับรูพรุนประเภทอื่น ดังนั้นแมคโครพอร์จึงไม่ค่อยมีความสำคัญในการดูดซับเป็นเพียงทางส่งผ่านอนุภาคเข้าไปในรูที่เล็กกว่า

มีโซพอร์(mesopores) หรือทรานซิชั่นัลพอร์(transitional pores) ขนาดรัศมีอยู่ระหว่าง 15-16 อังสตรอม ถึง 1,000-2,000 อังสตรอม ปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.1-0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิว 20-100 ตารางเมตรต่อกรัม ตัวอย่างตัวดูดซับที่มีขนาดของรูเป็นมีโซพอร์ ได้แก่ ซิลิกาเจล(silica gels) อะลูมินาเจล(alumina gels) และอะมิโนซิลิเกตคะตะลิส(aminosilicate catalyst)

ไมโครพอร์(micropores) ขนาดรัศมีของรูน้อยกว่า 15-16 อังสตรอม ปริมาตร 0.2-0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวจำเพาะมากหลายร้อยตารางเมตรต่อกรัม บางครั้งถึง 1500 ตารางเมตรต่อกรัม ไมโครพอร์มีความสำคัญที่สุดในการดูดซับ เนื่องจากพื้นที่การดูดซับและพลังงานดูดซับ (adsorption energy) มากที่สุด ทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้นมากที่ความดันต่ำ ๆ ตัวอย่างของตัวดูดซับที่มีขนาดของรูที่เป็นไมโครพอร์ คือ ซีโอไลต์ (zeolite)

โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ ส่วนมากประกอบด้วยรูพรุนกระจัดกระจาย ตัวอย่างเช่น การกระจายความแตกต่างของปริมาตรรูพรุนทั้ง 3 ชนิดกับรัศมี ดังรูปที่ 2.4



Differential volume distribution curve for pores of active carbon

ที่มา : Jankowska (1991)

รูปที่ 2.4 กราฟแสดงการกระจายความแตกต่างของปริมาตรกับรัศมีรูพรุน

โครงสร้างที่มีทั้งแมคโครพอร์ มีโซพอร์ และไมโครพอร์เรียกว่า โครงสร้างผสม (mixed structure type) แมคโครพอร์เป็นโพรงทางเปิดสู่ผิวภายนอก มีโซพอร์เป็นกิ่งออกมาจากแมคโครพอร์ และไมโครพอร์เป็นกิ่งออกมาจากมีโซพอร์อีกทีหนึ่ง รูปที่ 2.5 ด้านกัมมันต์จะมีพื้นที่ผิวประมาณ 500-1,400 ตารางเมตรต่อกรัม โดยทั่วไปประมาณ 1,000 ตารางเมตรต่อกรัม



ที่มา : เสริมพล รัตนสุข และไชยยุทธ กลิ่นสุคนธ์, 2518

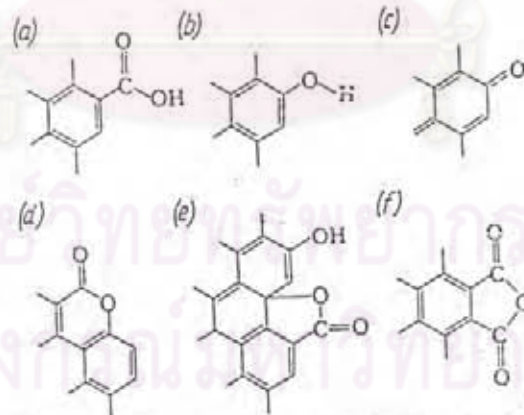
รูปที่ 2.5 การดูดซับโมเลกุลของสิ่งสกปรกโดยด้านกัมมันต์

2.2.1.3 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณผิวของด้านกัมมันต์

ผิวของด้านกัมมันต์ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันนัล (functional group) หลายชนิด หมู่ฟังก์ชันนัลเหล่านี้มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของด้านกัมมันต์ ได้แก่ การดูดซับ อิเล็กโตรเคมี คະตาไลติก กรด-เบส ริดอกซ์ ไฮโดรโชนิก-ไฮโดรนิลิก และคุณสมบัติอื่น ๆ หมู่ฟังก์ชันที่สำคัญที่สุด คือสารประกอบออกซิเจน ซึ่งเกิดจากวัตถุดิบในการผลิตโดยเฉพาะอย่างยิ่ง วัตถุดิบที่มีออกซิเจนค่อนข้างมาก เช่น ไม้ พืช พีนอลพอร์มาลดีไฮด์เรซิน เป็นต้น แต่ส่วนใหญ่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิต เช่น ระหว่างกระตุ้นด้วยก๊าซที่เป็นตัวออกซิไดซ์

การเพิ่มสารประกอบออกซิเจนที่ผิวแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 ได้แก่ก๊าซที่เป็นตัวออกซิไดซ์ ได้แก่ ออกซิเจน โอโซน อากาศ คาร์บอนไดออกไซด์ ไออน้ำ และไนโตรเจนออกไซด์ กลุ่มที่ 2 เป็นสารละลายโดยเฉพาะที่เป็นตัวออกซิไดซ์ ได้แก่ สารละลายผสมของกรดไนตริกกับกรดซัลฟูริก กรดไนตริก โบรอนไฮดรอกไซด์แมงกานีส สารละลายคลอรีน โซเดียมไฮโปคลอไรต์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และแอมโมเนียมซัลเฟต ปริมาณออกซิเจนที่ผิวขึ้นอยู่กับชนิดของตัวออกซิไดซ์และสภาวะการเปลี่ยนแปลง Van der Plas (1970) กล่าวว่าในการกระตุ้นด้วยอากาศ สารประกอบออกซิเจนที่ผิวมาจาก ออกซิเจนในอากาศเข้าไปรวมตัวเป็นหมู่ฟังก์ชันัลที่ผิวมากกว่าที่เป็นองค์ประกอบอยู่ที่ผิว ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ของพื้นผิวออกซิเจนจะมาจากอากาศ โดยทั่วไปสารประกอบออกซิเจนแบ่งออกเป็นชนิดใหญ่ ๆ 2 ชนิด คือ หมู่ฟังก์ชันัลที่เป็นกรด และหมู่ฟังก์ชันัลที่เป็นเบส หมู่ฟังก์ชันัลที่เป็นกรดแสดงดังรูปที่ 2.6 หมู่ฟังก์ชันัลที่เป็นเบสมักจะมีโครงสร้างประกอบด้วยโครมีน (chromene) หรือคล้ายโครงสร้างของไพโรน (pyrone) ดังแสดงในรูปที่ 2.7

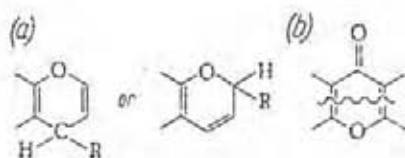
บริเวณผิวถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันัลทั้งที่เป็นกรดและเป็นเบส Dubinin (1966) พบว่าผิวของถ่านกัมมันต์จะมีหมู่ฟังก์ชันัลที่เป็นกรดประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ หมู่ฟังก์ชันัลที่เป็นเบสประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ผิวทั้งหมด Tarkovaskya (1977) ได้แสดงแบบจำลองของผิวคาร์บอนที่ถูกออกซิไดซ์ไว้ดังรูปที่ 2.8



Principal types of acidic oxygen surface functional groups: (a) carboxyl, (b) phenolic, (c) quinonoid, (d) normal lactone, (e) fluorescein-type lactone, (f) anhydride originating from neighbouring carboxyl groups

ที่มา : Jankowska (1991)

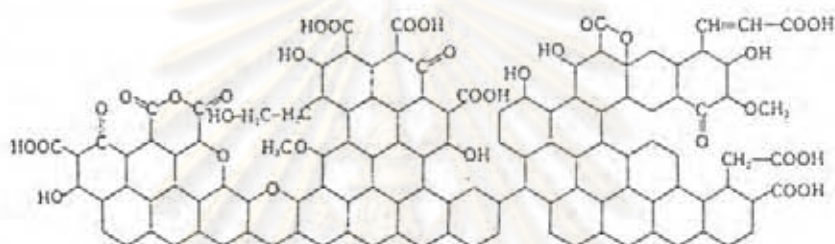
รูปที่ 2.6 รูปแสดงชนิดของหมู่ฟังก์ชันัลที่เป็นกรด



Functional groups of basic character: (a) chromene
(b) pyrone-like

ที่มา : Jankowska (1991)

รูปที่ 2.7 รูปแสดงชนิดของหมู่ฟังก์ชันัลที่เป็นเบส



Model of a fragment of an oxidized active carbon surface

ที่มา : Jankowska (1991)

รูปที่ 2.8 แสดงแบบจำลองของผิวคาร์บอนที่ถูกออกซิไดซ์

2.2.2 ชนิดของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ที่มีขายทั่วไปแบ่งออกตามลักษณะรูปร่างได้ 2 พวก คือ ชนิดผง และชนิดเม็ด

2.2.2.1 ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powder Activated Carbon)

ทำโดยการนำเอาถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มาบด รูปร่างจะแตกต่างกันออกไปขึ้นกับวิธีการบดซึ่งจะมีผลทำให้คุณสมบัติการดูดซับแตกต่างกัน ถ่านกัมมันต์ชนิดผงนี้ใช้สำหรับดูดสี ในสภาวะที่เป็นของเหลวเป็นส่วนใหญ่ โดยทั่วไปมีขนาด 5-100 ไมโครเมตร

2.2.2.2 ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular Activated Carbon)

ทำจากวัตถุดิบที่บดเป็นเม็ดหรือแบบผงทำให้เป็นเม็ดโดยการเติมตัวประสาน(binding agent) ตัวอย่างเช่น ทาร์(tar) แล้วนำมาอัดเป็นเม็ด วัตถุดิบที่นิยมทำ

ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดได้แก่ วัสดุที่ค่อนข้างแข็งและความหนาแน่นสูง เช่น กะลามะพร้าว ถ่านหิน ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มักใช้ในการดูดกลิ่นก๊าซพิษ และไอของสารละลายอินทรีย์

2.2.3 คุณสมบัติในการดูดซับของถ่านกัมมันต์

ปรากฏการณ์ดูดซับของถ่านกัมมันต์ มีการดูดซับด้วยแรงดูดซับทางฟิสิกส์ (physical adsorption) และดูดซับด้วยพันธะเคมี (chemical adsorption or chemisorption)

แรงดูดซับทางฟิสิกส์ ถ่านกัมมันต์นั้นยึดติดกับสารที่ถูกดูดด้วยแรงทางฟิสิกส์ ได้แก่ แรงแวนเดอร์วาล ซึ่งมาจากกลุ่มของอิเล็กตรอนอิสระที่อยู่บริเวณผิวของถ่านกัมมันต์ แรงแรงทางฟิสิกส์เป็นแรงที่อ่อนไม่แข็งแรง ดังนั้นสารที่ถูกดูดจะสามารถหลุดออกได้ง่าย ตัวอย่าง คือ การดูดซับของก๊าซไนโตรเจนบนถ่านกัมมันต์ ก๊าซไนโตรเจนจะหลุดออกจากผิวของถ่านกัมมันต์ ถ้าใช้สุญญากาศหรือให้อุณหภูมิสูงขึ้น

แรงดูดซับทางเคมี อิเล็กตรอนของถ่านกัมมันต์ทำให้เกิดพันธะเคมี (chemical bond) ที่แข็งแรงซึ่งบางอันแข็งแรงกว่าพันธะระหว่างคาร์บอนอะตอม ดังนั้นสารที่ถูกดูดจะไม่สามารถหลุดออกได้ง่ายเหมือนแรงทางฟิสิกส์ เช่น ก๊าซออกซิเจนที่ถูกดูดซับจะสามารถเอาออกได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิ ก๊าซที่ถูกดูดออกจะไม่อยู่ในรูปออกซิเจนอิสระแต่เป็นสารประกอบที่มีคาร์บอนอะตอมคือคาร์บอนมอนอกไซด์ หรือคาร์บอนไดออกไซด์

เมื่อสารถูกดูดยึดติดกับถ่านกัมมันต์ ซึ่งจะดูดไว้ที่ผิวภายนอกหรือระหว่างผิว ทั้งสองจะเป็นสองวัสดุ ดังนั้นถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวภายนอกมากกว่าจะมีการดูดซับที่สูงกว่า แต่พื้นที่ผิวไม่จำเป็นที่จะต้องเป็นตัวกำหนดการใช้ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์เสมอไป การใช้ชนิดของถ่านกัมมันต์ให้เหมาะสมถึงแม้จะมีพื้นที่ผิวน้อยกว่าแต่มีประสิทธิภาพสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวมากกว่า เพราะบางครั้งเราใช้ประโยชน์จากถ่านกัมมันต์ในแง่ที่ว่า เป็นตัวเลือกสารว่าจะถูกดูดโดยถ่านกัมมันต์หรือไม่

หลายโอกาสที่ถ่านกัมมันต์ดูเหมือนกับว่า ไม่สามารถดูดซับสารได้เต็มที่เหมือนกับเป็นส่วนากที่ตองทั้ง พื้นที่ผิวส่วนใหญ่ของถ่านกัมมันต์เป็นผนังของรูรูและพื้นที่ผิวส่วนนี้ต้องเป็นสารที่มีขนาดโมเลกุลเล็กพอที่จะเข้าไปได้ ดังนั้นการดูดซับจึงขึ้นกับขนาดและรูปร่างของรูรูด้วย ตัวดูดต้องมีการรูรูขนาดเล็กที่สุดแตกต่างกันออกไป (Smisek, 1970) ซึ่งในตารางที่ 2.3 เป็นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่น้อยที่สุดสำหรับตัวดูด

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงเส้นผ่าศูนย์กลางที่น้อยที่สุดสำหรับตัวดูด

MINIMUM PORE DIAMETER FOR ADSORBATES

Adsorbate	Minimum Pore, Diameter, A
Iodine	10
Potassium permanganate	10
Mathylene Blue	15
Erythrosine red	19
Molasses	circa 28

ที่มา : Hassler (1974)

2.2.4 การทดสอบคุณสมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์

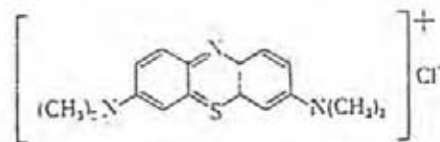
การทดสอบคุณสมบัติในสารละลายเพียงชนิดเดียวนั้นไม่เพียงพอสำหรับจะบอกลักษณะการดูดซับได้ คุณสมบัติการดูดซับสามารถประมาณจากการเปรียบเทียบในตัวดูดหลายชนิด ตัวอย่างเช่น เปรียบเทียบกับสารโมเลกุลใหญ่ของเมทิลีนบลู หรือไอโอดีน

2.2.4.1 การดูดซับไอโอดีน

ศึกษากระบวนการดูดซับของไอโอดีน การหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ เป็นวิธีทดสอบที่ง่ายสำหรับประมาณค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ ไอโอดีนนัมเบอร์เป็นการหาจำนวนมิลลิกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ 1 กรัม ไอโอดีนถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดของรูใหญ่กว่า 1 นาโนเมตร

2.2.4.2 การดูดซับเมทิลีนบลู

ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู นั้นจะแสดงความสามารถในการดูดซับสารที่มีโครงสร้างคล้ายเมทิลีนบลู ถ่านกัมมันต์จะต้องมีขนาดของรูใหญ่กว่า 1.5 นาโนเมตร



ที่มา : Jankowska (1991)

รูปที่ 2.9 รูปแสดงโมเลกุลของเมทิลีนบลู

2.2.4.3 พื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area)

ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติการดูดซับที่ดีที่สุด วิธีที่นิยมที่สุดที่ใช้ในการหาค่าพื้นที่ผิว คือวิธีเบท(BET method) โดยนักวิทยาศาสตร์ที่ชื่อ Brunauer, Emmett และ Teller โดยอาศัยหลักการให้คาร์บอนดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนผิวเป็นฟิล์มบาง ๆ พื้นที่ผิวคำนวณจากความแตกต่างของความดัน เมื่อมีการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนผิวของคาร์บอน ตัวอย่าง วิธีนี้ให้ค่าที่เชื่อถือได้มากที่สุด หน่วยของค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ คือ ตารางเมตรต่อกรัม ตัวอย่างของความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซับกับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ของพื้นที่ผิวกับค่าการดูดซับ

RELATION OF SURFACE AREA TO SPECIFIC ADSORPTION POWER

Time of activation ^a minutes	Surface area sq M/g carbon	Adsorption ^b	
		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
45	1065	0.15	0.28

^a Air-activation of acid-wash black-ash at 550 °C

^b Gram adsorbed per gram carbon at an equilibrium concentration in solution of 0.10 g/liter

ที่มา : Hassler (1974)

2.2.5 คุณลักษณะของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ที่มีขายในท้องตลาดมีอยู่มากมายหลายชนิด ส่วนใหญ่จะเป็นเชื้อทางการค้าแล้วแต่บริษัทผู้ผลิตจะตั้งชื่อ ซึ่งก็มีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไปตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 - ตารางแสดงคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตขายในท้องตลาด

PROPERTIES OF SEVERAL COMMERCIALY AVAILABLE CARBONS*

	ICI AMERICA HYDRODARCO 3000	CALGON FILTRASORB 300 (3x30)	WESTBACO NUCHAR WV-L (8x30)	WITCO 317 (12x30)
PHYSICAL PROPERTIES				
Surface area, m ² /gm (BET)	600-520	950-1050	1000	1050
Apparent density, gm/cc	0.43	0.48	0.48	0.48
Density, backwashed and drained, lb/cu.ft.	22	26	26	30
Real density, gm/cc	2.0	2.1	2.1	2.1
Particle density, gm/cc	1.4-1.5	1.3-1.4	1.4	0.92
Effective size, mm	0.3-0.9	0.8-0.9	0.35-1.05	0.89
Uniformity coefficient	1.7	1.9 or less	1.3 or less	1.44
Pore volume, cc/gm	0.95	0.35	0.35	0.60
Mean particle diameter, mm	1.5	1.5-1.7	1.5-1.7	1.2
SPECIFICATIONS				
Sieve size (U.S. std. series)				
Larger than No. 8 (max. %)	3	3	3	-
Larger than No. 12 (max. %)	-	-	-	5
Smaller than No. 30 (max. %)	5	5	5	5
Smaller than No. 40 (max. %)	-	-	-	-
Iodine No.	650	900	950	1000
Abrasion No., Minimum	**	70	70	85
Ash (%)	**	3	7.5	0.5
Moisture as packed (max. %)	**	2	2	1

* Other sizes of Carbon are available on request from the manufacturers.

** No available data from the manufacturer.

- Not applicable to this size carbon.

ศูนย์วิทยทรัพยากร

ที่มา : เสริมพล รัตนสุข และไชยยุทธ กลิ่นสุคนธ์, 2518
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ในประเทศไทย มีผู้ผลิตอยู่รายเดียว คือ บริษัท
อุทุมพรเคมีคอลจำกัด โดยใช้กะลามะพร้าวเป็นวัตถุดิบซึ่งมีคุณสมบัติ (วิเคราะห์โดยสถาบันวิจัย-
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย) ดังตารางที่ 2.6

ปัจจุบันได้มีผู้ผลิตถ่านกัมมันต์มากมาย และใช้ในวงการต่าง ๆ ดังแสดงใน
ตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตในประเทศไทย

	Powder Carbon	Granular Carbon
Raw Material	Coconut shell	Coconut shell
Activation method	Steam	Steam
Size (mesh)	< 325	12 40
Surface area (m^2/g)	605	640
Iodine Number (mg/g)	995	875
Methylene blue adsorption (mg/g)	195	181
Density (g/cm^3)	0.797	0.533
pH	10	9.6

ที่มา : เกศรา นุตาลัยและคณะ, 2531

ตารางที่ 2.7 แสดงชนิดต่าง ๆ ของถ่านกัมมันต์

Name	Manufacture	Raw material	Activation method	Applications
Acticarbon	Carbon Actifs, Paris Acticarbon Corp. New York	Wood	Steam	Solvent Vapor recovery

Name	Manufacture	Raw material	Activation method	Applications
Activated carbon	Brimsdown Chemical Works, Ltd., Brimsdown, England	.....	.....	Solvent recovery, and in decolorizing oils
Activated carbon	Pittsburgh Coke and Iron Co., Pittsburgh	Coal	Gas	Gas-mask purposes
Adsopur	Research Products Corp., New York	.....	.....	Mercury Vapor adsorption
Adsorbite	Barneby Cheney Engineering Co. Columbus, Ohio	Nutshells	Gas and Steam	Solvent recovery
Bachite	Chemical Warfare Service	Coal	.....	Gas mask
Carbonut	Pacific By-Products Co., San Jose, Calif.	Fruit pits	.....	Solvent recovery
Columbia activated carbons	Carbide Carbon Chemicals Corp., New York	Coconut shells carbonaceous material	Gas and Steam	Solvent recovery, gasmask, charcoal, air purification of catalysts and gases
Deodorite	Barneby Cheney Engineering Co., Columbus, Ohio	Nutshells	.....	Deodorizing either gases or liquids
Deosite	Chemicals Warfare Service	Coconut shell	Steam or carbon dioxide	Gas mask

Name	Manufacture	Raw material	Activation method	Applications
Hi-ac	General Carbon Company, Los Angeles	Nutshells or fruit pits	.....	(Not in production)
Higenit	Badischen Holz Industries AG., Germany	Coal	Gas	Sugar industry, solvent recovery
Palmite	Pan American Shell Co., Mobile, Ala. U.S.A.	Cohune and Babassu nutshells	Steam	Solvent recovery Gas mask (Meets C.W.S. standards)
Supersorbokohle	European	Peat or coal	.....	Gas-mask purposes
Sutcliffe carbon	Sutcliffe, Speakman and Co. of Leigh Lancashire, England	coal	Steam	Decolorization of sugar and of oils, also for gas adsorption, and recovery of solvent vapor

ที่มา : เพียรบรรค ทศคร, 2534

2.2.6 การฟื้นฟูถ่านกัมมันต์ (Regeneration)

เมื่อถ่านกัมมันต์ถูกใช้ไปนาน ๆ ฐานของเม็ดถ่านจะถูกอุดตันด้วยโมเลกุลของสิ่งสกปรกทำให้ถ่านหมดประสิทธิภาพในการดูดซับ เนื่องจากถ่านดูดซับมีราคาแพง ดังนั้นเพื่อที่จะลดค่าใช้จ่ายจึงต้องนำถ่านกัมมันต์ที่หมดประสิทธิภาพมาฟื้นฟูสภาพ เป็นการไล่สารที่ถูกดูดออกจากถ่านกัมมันต์เพื่อนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่ ซึ่งทำได้โดย

2.2.6.1 ฟื้นฟูอุณหภูมิ

ปฏิกิริยาดูดซับโดยทั่วไปเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน เมื่ออุณหภูมิ

สูงขึ้นจะดูดซับได้น้อยลง หรือสารที่ถูกดูดจะระเหยออกมา

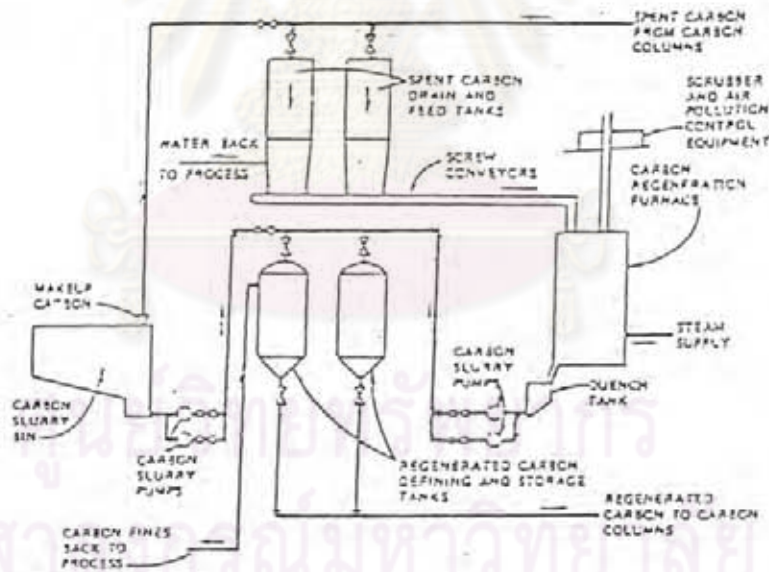
2.2.6.2 ลดความดันหรือความเข้มข้นของสารที่ถูกดูด

เป็นการลดความดันไอของสารที่ถูกดูด ทำให้สารที่ถูกดูดระเหยหรือแพร่ออกมา

2.2.6.3 ใช้การแทนที่(replacement)

โดยเป็นการให้โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับได้ดีกว่าเข้าแทนที่เช่นใช้น้ำแทนที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น

ตัวอย่างการนำถ่านกัมมันต์มาใช้สภาพอื่นหนึ่ง คือการนำถ่านกัมมันต์ไปเผาในเตาแบบ มัลติเบิลฮาร์ท(Multiple Hearth) โดยควบคุมภาวะการเผาไหม้โมเลกุลของสิ่งสกปรกระเหยออกมา และถูกเผาไหม้ไป รูปที่ 2.10 แสดงแผนผังระบบการฟื้นฟูคุณภาพของถ่านกัมมันต์ ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้



ที่มา : เสริมพล รัตนสุข และไชยยุทธ กลิ่นสุคนธ์, 2518
รูปที่ 2.10 แผนภาพแสดงระบบการฟื้นฟูคุณภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์

ขั้นแรก ถ่านกัมมันต์ที่หมดประสิทธิภาพร่วมกับน้ำเป็นน้ำขุ่น(slurry) ถูกสูบเข้ามาในระบบฟื้นฟูคุณภาพ

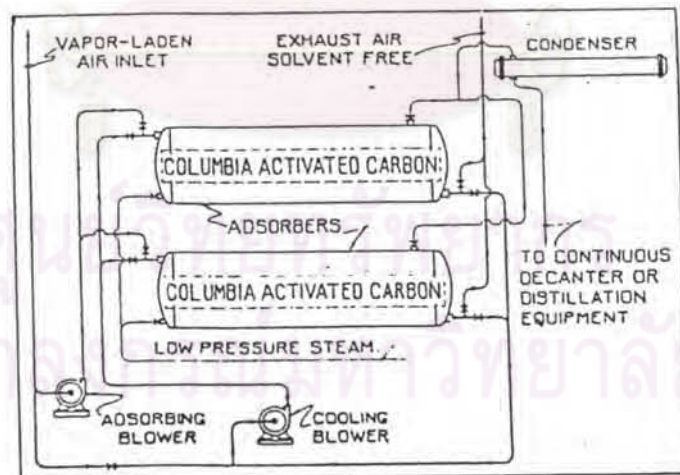
ขั้นที่สอง ถ่านกัมมันต์จะถูกแยกออกจากน้ำ แล้วจึงส่งเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 1500-1700 ฟาเรนไฮต์ ความคมการเผาไหม้ให้โมเลกุลของสิ่งสกปรกในรูของเม็ดถ่านระเหยเป็นไอ และถูกเผาละลายตัวไป

ขั้นที่สาม ถ่านกัมมันต์ที่ร้อนจัดถูกทำให้เย็นโดยจุ่มลงในน้ำ(quenching)

ขั้นที่สี่ ถ่านที่เย็นแล้วถูกนำไปแยกเศษผงถ่านออก แล้วจึงนำไปเก็บไว้หรือนำกลับไปใช้งาน

การฟื้นฟูคุณภาพของถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีนี้จะใช้เวลาประมาณ 30 นาที และสิ้นเปลืองพลังงานประมาณ 4250 บีทียต่อถ่านหนึ่งปอนด์

ตัวอย่างอีกตัวอย่างหนึ่ง เป็นการนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่และเป็นการนำตัวทำละลายกลับมาใช้อีก ดังในรูปที่ 2.11 เป็นแผนภาพแสดงการนำตัวทำละลายกลับมาใช้อีก โดยใช้ถ่านกัมมันต์โคลัมเบียเป็นตัวดูดซับ ถ่านกัมมันต์ที่อิ่มตัวด้วยไอหรือสีย้อมที่มันดูดซับไว้ นั้นก็มีที่ไอ น้ำต่อเข้าคอลัมน์ถ่านกัมมันต์ เพื่อพ่นไอน้ำที่ความดันต่ำเข้าไปไล่สีย้อมที่มันดูดซับอยู่ออกไป แล้วควบแน่นไอให้กลับเป็นของเหลวจะได้ตัวทำละลาย และถ่านกัมมันต์ที่สามารถนำมาใช้งานได้ใหม่



ที่มา : Hassler (1974)

รูปที่ 2.11 แสดงการนำสารละลายกลับมาใช้ใหม่โดยใช้ถ่านกัมมันต์โคลัมเบีย

2.2.7 ประโยชน์ของด่านกัมมันต์

2.1.7.1 ประเภทที่ใช้ในการดูดซับก๊าซหรือไอ

- ใช้ในอุตสาหกรรมทำหน้าที่ปกป้องกันก๊าซพิษ ทั้งที่ใช้ทางการทหารและที่ใช้กันทั่วไป ทั้งนี้เพราะด่านกัมมันต์สามารถดูดซับก๊าซพิษและไอของสารอินทรีย์ได้
- ใช้แยกไอระเหยของตัวทำละลายที่ใช้แล้ว เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยด่านกัมมันต์จะดูดซับไอระเหยเหล่านั้นที่อุณหภูมิห้อง และจะคายออกที่ความดันของไอระเหยต่ำ ๆ เช่น การสกัดสารด้วยตัวทำละลาย อุตสาหกรรมพลาสติก ผลิตภัณฑ์ยาง เป็นต้น
- ใช้กำจัดสิ่งเจือปนออกจากก๊าซ เช่น ก๊าซไฮโดรเจน ซีเลียม ไนโตรเจน อะเซทิลีน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นต้น
- ใช้สำหรับปรับอากาศ ในบริเวณอาคารต่าง ๆ โดยใช้กำจัดกลิ่นจากอากาศในเครื่องปรับอากาศทำให้อากาศบริสุทธิ์ มักใช้ตามโรงพยาบาล สนามบิน และโรงแรม เป็นต้น
- กำจัดสารประกอบออร์แกนิกซ์ลเฟอร์ไดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสิ่งเจือปนอื่น ๆ จากโรงงานอุตสาหกรรม

2.1.7.2 ประเภทที่ใช้กับของเหลว (ฟอกสีของเหลว และทำให้ของเหลวบริสุทธิ์) ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท ได้แก่

- ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำตาล เพื่อฟอกสีให้น้ำตาลดิบบริสุทธิ์ขึ้น
- ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมัน และไขมันสำหรับบริโภค ใช้ในการฟอกสี และยังใช้ในการแยกเอาสบู่และเปอร์ออกไซด์ออกจากน้ำมันและไขมันด้วย
- แยกสิ่งเจือปนจากผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น น้ำส้ม เกลาติน ฝัสดิน และน้ำผลไม้ เพราะไม่เป็นอันตรายและไม่เกิดปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์อาหาร
- ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ เช่น ไวน์ วิสกี้ และเบียร์ มักใช้ด่านกัมมันต์เพื่อตกตะกอนและสารที่ไม่ต้องการ เช่น เอสเทอร์ ทำให้เครื่องดื่มที่ได้มีรสชาติดีขึ้น
- ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีและยา เช่น ใช้กำจัดสิ่งเจือปนในยา และเคมีภัณฑ์อื่น ๆ เช่น สเตปโตมัยซิน (Streptomycin) คาเฟอีน (Cafeine) โซเดียมอะซิเตท (Sodium acetate) รวมทั้งกรดต่าง ๆ
- ใช้ในทางการแพทย์ เช่น ให้ยาถูกดูดซับบนด่านกัมมันต์ ยางจะค่อย ๆ ออกฤทธิ์โดยมีความเข้มข้นสม่ำเสมอ ตัวอย่างคือ ไฮดรอกซีอะมิโนฟีนิลอะโรนิคแอซิด (hydroxyaminophenylarsonic acid) สำหรับรักษาโรคที่เกิดจากการติดเชื้อ อะมิบา และ

พาราไซต์ และยังใช้ดูดสารพิษจากผู้ที่ได้รับยาเกินขนาดหรือกินยาพิษ นอกจากนี้ยังใช้รักษาอาการ
มีแก๊สมากในกระเพาะ

- ใช้ทำน้ำดื่มให้บริสุทธิ์ กำจัด รส สี และกลิ่น นอกจากนี้ยังใช้
ในการบำบัดน้ำเสีย
- ใช้ในอุตสาหกรรมแยกสารที่ต้องการ เช่น การแยกทองเหลือง
การสกัดจากแร่ด้วยวิธีไฮยาไลต์
- ใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยา ทำหน้าที่เป็นตัวพาสารเร่ง
ปฏิกิริยา(catalyst carrier) เช่น เป็นตัวพาสารเร่งปฏิกิริยาประเภทที่ราคาแพง ได้แก่
แพลทินัม นัลลาเดียม สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (hydrogenation) เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิว
สำหรับทำปฏิกิริยา

2.3 กระบวนการผลิตด่างแกมมันต์

ในปัจจุบันกรรมวิธีผลิตด่างแกมมันต์มีมากมายหลายวิธีขึ้นอยู่กับว่าวัตถุดิบคืออะไร ลักษณะ
และคุณสมบัติของด่างแกมมันต์ที่ต้องการ

กระบวนการผลิตประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ ๆ 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนวัตถุดิบ
คาร์บอนไอโซไซอัน และแอคติเวชัน ดังรูป 2.12

2.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ

ด่างแกมมันต์ สามารถผลิตจากวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ ซีลีออย
กะลามะพร้าว แกลบ เปลือกถั่ว เมล็ดผลไม้ ยาง พลาสติก ด่านหิน และพืธ ซึ่งการผลิตด่าง
แกมมันต์สามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรง หรือเริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นด่างแล้วก็ได้ขึ้นอยู่กับวิธีการผลิต
การผลิตด่างแกมมันต์จากพืธโดยวิธีกระตุ้นด้วยไอน้ำในเฟลิวไดซ์เบด นั้นจะต้อง
ทำการอบพืธให้แห้ง บดและคัดขนาดให้ได้ตามต้องการ แล้วจึงนำไปทำการคาร์บอนไชน์และกระตุ้น
ต่อไปตามลำดับ

สำหรับพืธที่มีลักษณะเป็นผง อาจนำมาทำให้เป็นเม็ดโดยใช้ตัวประสาน ได้แก่
แป้ง น้ำมันเคา หรือทาร์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากกระบวนการคาร์บอนไชน์ แล้วนำไปอัดเป็นเม็ด
ก่อนที่จะคาร์บอนไชน์เป็นขั้นตอนต่อไป



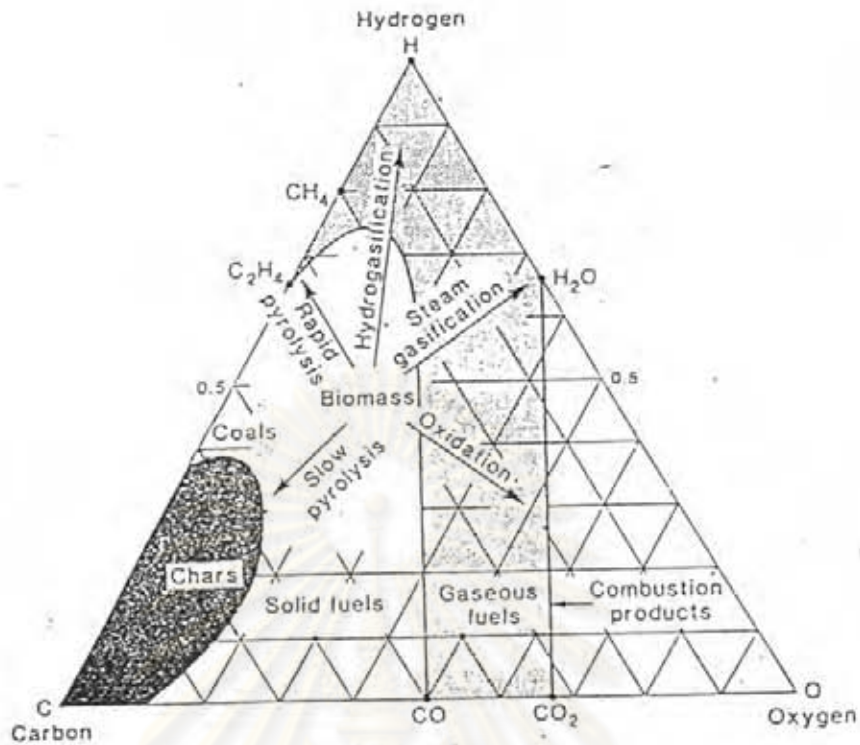
รูปที่ 2.12 แสดงกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

2.3.2 คาร์บอนไเซชัน (carbonization)

การคาร์บอนไเซชัน เป็นกระบวนการไพโรไลซิส(pyrolysis) รูปแบบหนึ่งที่จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ในรูปของชาร์ที่เป็นของแข็งมากกว่าน้ำมันทาร์ และก๊าซ

ปฏิกิริยาไพโรไลซิสต้องการความร้อนทั้งโดยทางอ้อม(รีออร์ท) และทางตรง ที่ได้จากการออกซิเดชันเพียงบางส่วน หรือจากปฏิกิริยาอื่นๆที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งในปัจจุบันกระบวนการสลายตัวทางความร้อนในสภาวะที่มีออกซิเจนน้อย หรืออินที่มีการถ่ายเทความร้อนให้เกิดการไพโรไลซิสโดยตรงจากการเผาไหม้บางส่วนของชาร์ และก๊าซ เรียกว่าเป็นกระบวนการไพโรไลซิส (Jones, 1978; Kohan and Barkordor, 1979)

กระบวนการแปรรูปโดยความร้อน ได้แก่ ไพโรไลซิส ก๊าซซิฟิเคชัน (gasification) และการเผาไหม้ โดยแผนภาพอธิบายกระบวนการเหล่านี้ไปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ จะแสดงไว้ในกราฟสามเหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 2.13



ที่มา : Probstien และ Hick (1985)

รูปที่ 2.13 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของชีวมวล

Kohan และ Barkodor ได้ให้คำนิยามกว้าง ๆ ของกระบวนการไพโรไลซิส กล่าวคือเป็นเทคโนโลยีที่วัตถุดิบประกอบด้วยคาร์บอนเกิดการสลายตัวทางความร้อน โดยมีอากาศเข้าอย่างน้อยหนึ่งอากาศเขตที่เกิดการสลายตัวทางความร้อนในที่ไม่มีออกซิเจน

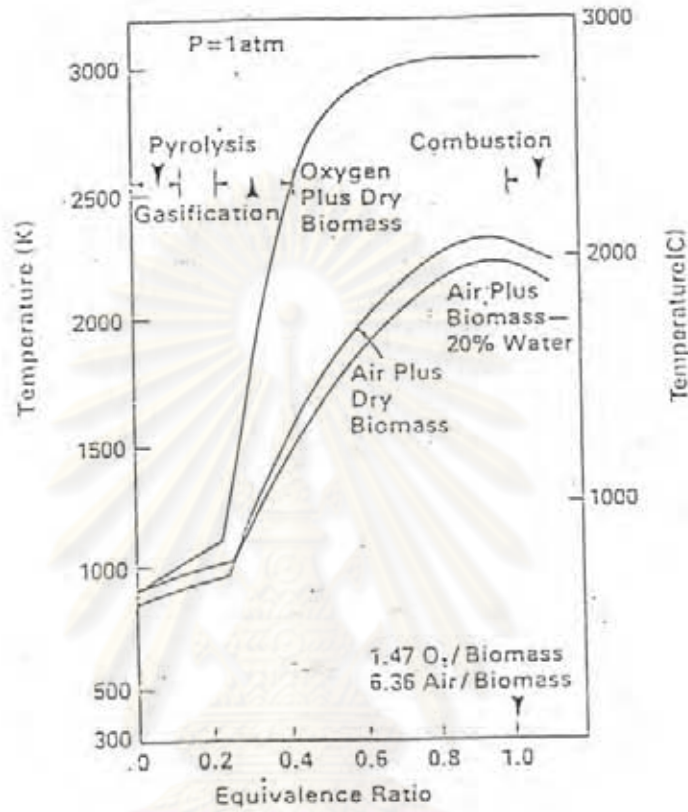
Reed และ Jantzen, 1979 ได้อธิบายถึงความแตกต่างของเทอมไพโรไลซิส ก๊าซซิฟิเคชัน และการเผาไหม้ว่า พื้นฐานของกระบวนการเหล่านี้คือปริมาณอากาศที่ใช้มีส่วนสัมพันธ์กับปริมาณเชื้อเพลิง

Desrosiers, 1979 ได้คำนวณปฏิกิริยาสมดุลแบบอะเดียบาติกของไม้ที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงต่างๆ และนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งจะบอกถึงอากาศเขตของการไพโรไลซิส ก๊าซซิฟิเคชัน และการเผาไหม้

ไพโรไลซิสโซน เป็นส่วนที่มีอากาศน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ของอากาศที่ใช้ทางทฤษฎีการเผาไหม้ อากาศระหว่าง 25-50 เปอร์เซ็นต์เป็นส่วนก๊าซซิฟิเคชัน และส่วนของการเผาไหม้มีอากาศตั้งแต่ 100 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป

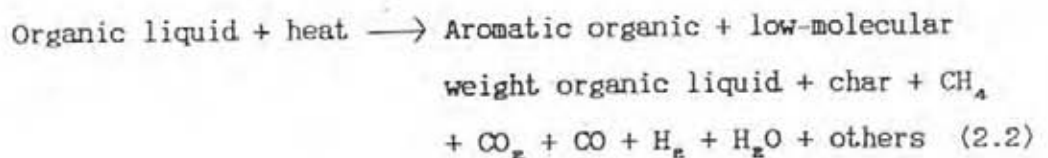
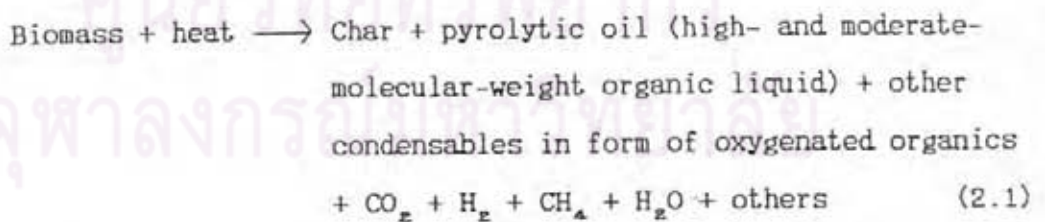
เมื่อชีวมวลเกิดการสลายตัวทางความร้อน จะเกิดอนุกรมของปฏิกิริยาต่าง ๆ

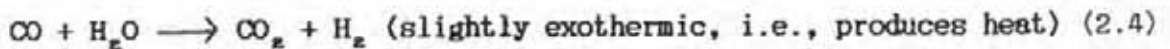
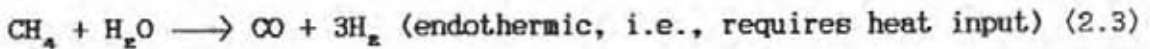
ได้ก๊าซที่มีพลังงานปานกลาง น้ำมันที่มีองค์ประกอบซับซ้อน และชาร์ ซึ่งปฏิกิริยาของกระบวนการไพโรไลซิสชีวมวลสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.1 ถึง 2.4



ที่มา : SERI/TR-33-239 (1979)

รูปที่ 2.14 อุณหภูมิของปฏิกิริยาแบบอะเดียบาติกของชีวมวล





การไพโรไลซิสแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือการไพโรไลซิสแบบช้า และแบบรวดเร็ว การไพโรไลซิสแบบช้าจะเกิดสมดุลในบริเวณช่วงแคบ(local equilibrium) โดยอัตราการให้ความร้อนจะช้าพอที่จะทำให้เกิดความสมดุลตามอุณหภูมิ ในกรณีนี้ปริมาณ และการกระจายของผลิตภัณฑ์จะขึ้นกับแนวของอุณหภูมิเดิม(temperature history) ส่วนการไพโรไลซิสแบบรวดเร็วจะไม่คำนึงถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงการให้ความร้อน แต่การไพโรไลซิสจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ของช่วงอุณหภูมิสุดท้าย

คาร์บอนในเข้ชั้น เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์เพราะเป็นขั้นตอนเริ่มต้นของโครงสร้างที่เป็นรูพรุน การกระตุ้นเป็นเมียงพัฒนาโครงสร้างไปในทิศทางเดียวกับการคาร์บอนไนซ์เท่านั้น

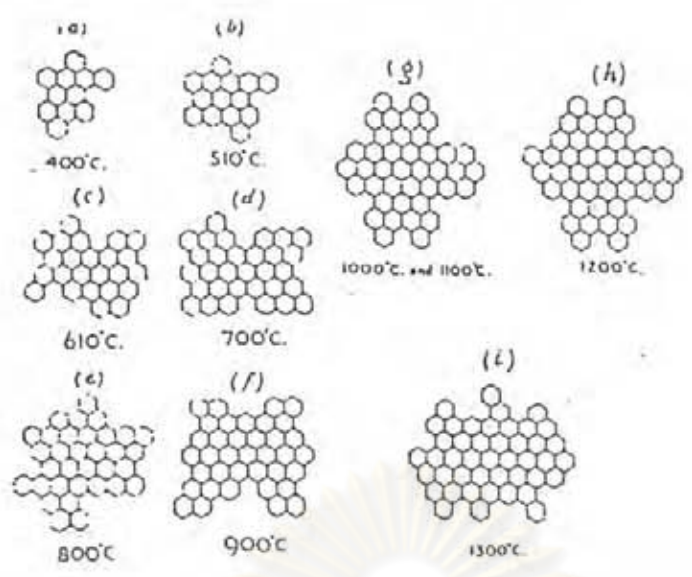
วัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยเฉพาะวิธีกระตุ้นด้วยไอน้ำนั้น ต้องการคุณสมบัติที่สำคัญดังนี้

- (1) สารระเหยต่ำ
- (2) ค่าคาร์บอนคงตัวสูง
- (3) มีความพรุน
- (4) มีความแข็งแรงเพียงพอต่อการขัดสี

ซึ่งในธรรมชาติไม่พบคุณสมบัติที่ต้องการทั้งหมด ดังนั้นต้องทำการคาร์บอนไนซ์ให้เกิดการสลายตัวด้วยความร้อนเป็นการไล่ทาร์ แล้วเปลี่ยนเป็นโค้ก การคาร์บอนไนซ์ให้ได้ถ่านที่มีคุณสมบัติที่ต้องการทำได้โดยปรับสภาวะในการไพโรไลซิสให้เหมาะสม โดยมีตัวแปร คือ

2.3.2.1 อุณหภูมิของการคาร์บอนไนซ์

กระบวนการคาร์บอนไนซ์เป็นการกลั่นสลายของสารอินทรีย์ เพื่อเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนของสารอินทรีย์ขณะเดียวกันก็ได้ผลิตภัณฑ์อื่นที่เป็นของเหลวและก๊าซออกมาด้วย โดยจะเกิดการหักออกตรงบริเวณที่มีพันธะที่อ่อนหรือหมู่ที่หลุดออกได้ง่ายทำให้กลุ่มโมเลกุลวงแหวนแตกออกจากกันเป็นกลุ่ม ๆ จำนวนมาก โครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกหลักที่เลือกกลายเป็นโครงสร้างของถ่านชาร์ โดยการจัดเรียงของคาร์บอนอะตอมจะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิที่เผา ดังรูปที่ 2.14 ส่วนกลุ่มโครงสร้างโมเลกุลหรือหมู่ที่มีขนาดเล็กกว่า จะกลั่นสลายตัวออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่อุณหภูมิต่าง ได้แก่ น้ำ แอมโมเนีย น้ำมันหยาบ และก๊าซต่าง ๆ



ที่มา : Hassler (1974)

รูปที่ 2.15 การเปลี่ยนแปลงของการจัดเรียงคาร์บอนอะตอมตามอุณหภูมิที่เผา

สิ่งที่สำคัญที่สุดของกระบวนการนี้ คือ อุณหภูมิสุดท้ายของการคาร์บอนไธ เพราะมีความสัมพันธ์กับพลังงานที่ใช้ในการสลายพันธะเคมีในวัตถุดิบ ออกมาเป็นสารระเหย ที่อุณหภูมิสูงด้านซาร์จะมีการจัดระเบียบของโครงสร้างมากกว่า เช่น ด้านหินแกรตสูงจะหดตัวมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการคาร์บอนไธ เป็นผลทำให้ปริมาตรทั้งหมดของรูพรุนเล็ก ๆ ที่เกิดขึ้นในชั้นแรกของการคาร์บอนไธลดลง และเมื่อด้านมีความแข็งมากขึ้น อย่างไรก็ตามจากการวิจัยของ Debowski, 1980 พบว่าด้านที่ได้จากการคาร์บอนไธที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาน้อยกว่าด้านจากการคาร์บอนไธที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสซึ่งการลดลงของความว่องไวในการทำปฏิกิริยาจะมากขึ้นเมื่อค่าคาร์บอนแดงตัวลดลง

2.3.2.2 อัตราการให้ความร้อน

ผลกระทบของอัตราการให้ความร้อนเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากการไพโรไลซิส แต่เดิมสภาวะในการให้ความร้อนถูกแบ่งด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิประมาณ 20 องศาเซลเซียสต่อวินาที อันเป็นช่วงที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยสารระเหยออกอย่างรวดเร็ว ดังนั้นอัตราการให้ความร้อนต่ำจะถูกนิยามให้มีผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับ หรือน้อยกว่าค่าที่กำหนด และโดยทั่ว ๆ ไปอัตราการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจะมีผลต่างของอุณหภูมิมากกว่า $10^3 - 10^5$ องศาเซลเซียสต่อวินาที

ถ้าอัตราการให้ความร้อนสูง ปริมาณสารระเหยจะถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว ผลก็คือ จะได้ด้านที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าด้านที่ได้จากการให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำกว่า เนื่องจากด้านที่ได้จากการคาร์บอนไธด้วยอัตราการ

เพิ่มอุณหภูมิสูง คาร์บอนจะเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยทำให้เกิดช่องว่างมากเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ เมื่อทำปฏิกิริยาแอกติเวชัน ตัวกระตุ้นจะเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่าย ความสำคัญของอัตราการเพิ่มอุณหภูมิต่อคุณสมบัติของเม็ดถ่าน แสดงดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 แสดงผลของอัตราการเพิ่มอุณหภูมิต่อคุณสมบัติของเม็ดถ่าน

Effect of the rate of heating on the properties of carbonized granules

Heating rate $^{\circ}\text{C min}^{-1}$	Mechanical strength of granules /%	Bulk density of granules $/\text{g cm}^{-3}$	Pore volume of granules $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$			
			total	micro-pores	meso-pores	macro-pores
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)

2.3.2.3 ตัวกลางของปฏิกิริยา (medium of reaction)

ตัวกลางของปฏิกิริยาจะมีผลกระทบต่อปฏิกิริยาดำก๊าซ และไอที่เกิดขึ้นระหว่างการไพโรไลซิสถูกพาออกไปอย่างรวดเร็วโดยก๊าซที่เป็นตัวกลาง เช่นก๊าซไนโตรเจน (เมื่อต่อปฏิกิริยาเผาไหม้ของคาร์บอน) และก๊าซจากการเผาไหม้ ถ้าตัวกลางเป็นก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ปริมาณที่เป็นถ่านจะน้อยกว่าตัวกลางที่เป็นไนโตรเจน แต่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับตัวกระตุ้นสูงกว่า Ignasiak, 1972 และ Perederii, 1973 พบว่าการคาร์บอนไนซ์โดยใช้อากาศเป็นตัวกลางในเตาแบบฟลูอิดซ์เบด ใช้พลังงานต่ำเพราะความร้อนจากการเผาไหม้ของสารระเหยจะให้ความร้อนกับเตาฟลูอิดซ์เบด

จุดมุ่งหมายหลักของกระบวนการคาร์บอนไนซ์นั้นก็เพื่อผลิตให้ได้ถ่านที่มีรูพรุน และการจัดเรียงของคาร์บอนอะตอมให้เป็นระเบียบมากกว่าวัสดุดิบ ซึ่งปัจจัยทั้งสองมีผลต่อความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับตัวกระตุ้น (Jankowska, 1991)

2.3.3 การกระตุ้น หรือแอคติเวชัน (activation)

เป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพสำหรับคาร์บอน ด้วยการเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้นโดยการทำให้มีรูพรุนมากขึ้นเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสารอื่น ๆ ของถ่านกัมมันต์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระหว่างการกระตุ้นไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด สาเหตุหนึ่งก็เนื่องมาจากว่าวิธีการกระตุ้นนั้นมีมากมายหลายวิธี และประสิทธิภาพของการกระตุ้นยังขึ้นกับลักษณะและชนิดของวัสดุคิด รวมถึงวิธีการอื่น ๆ ก่อนการกระตุ้นด้วย

การกระตุ้นแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

2.3.3.1 การกระตุ้นทางเคมี (chemical activation)

ใช้สารเคมีเป็นตัวกระตุ้น เช่น ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$)

กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เป็นต้น

2.3.3.2 การกระตุ้นทางฟิสิกส์ (physical activation)

ใช้ก๊าซที่เป็นตัวออกซิไดซ์เป็นตัวกระตุ้น เช่น ก๊าซออกซิเจน

ไอน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซออกซิเจน เป็นต้น

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการคาร์บอนไอนซ์ยังเป็นตัวดูดซับที่ไม่ดีต้องทำการกระตุ้นให้ได้ถ่านที่มีการดูดซับสูง วิธีการกระตุ้น คือให้ทำปฏิกิริยากับก๊าซที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิสูง ดังสมการที่ 2.5 ถึง 2.8



ตัวแปรในการใช้ก๊าซที่เป็นตัวออกซิไดซ์ มลิตถ่านกัมมันต์มีดังนี้

(1) คุณสมบัติทางเคมีและความเข้มข้นของตัวออกซิไดซ์ที่ใช้ใน

การกระตุ้น

(2) อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา

(3) ระยะเวลาของปฏิกิริยา

(4) ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบในวัตถุดิบที่ใช้

กระบวนการกระตุ้น คาร์บอนทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์ เป็น คาร์บอนออกไซด์แพร่ออกจากผิวของคาร์บอน เกิดก๊าซซีพีเคขึ้นบางส่วนของเม็ดถ่านเป็นรูพรุนชั้น ในโครงสร้างของถ่าน ถ่านจากการคาร์บอนไธประกอบด้วยรูพรุนเล็ก ๆ จำนวนมากเกิดจาก ช่องว่างระหว่างผลึกในการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอม รูพรุนนี้มักจะถูกบรรจุไว้ด้วยทาร์ที่เกิด จากการสลายตัวด้วยความร้อน และถูกขวางด้วยอะมอไฟส์คาร์บอน การกระตุ้นจึงเป็นทั้งการเปิดรู ที่ถูกปิดและสร้างรูใหม่ขึ้นด้วย

การกระตุ้นในหลายตัวอย่างของถ่านชาร์ พบว่าการกระตุ้นด้วย ไอ่น้ำได้ผลดีกว่ากระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ดีกว่า กระตุ้นด้วยอากาศ ดังแสดงในตารางที่ 2.9 การกระตุ้นด้วยไอ่น้ำต้องใช้อุณหภูมิสูงพอที่จะให้เกิด การออกซิไดซ์อย่างรวดเร็วแต่ไม่ควรเกิน 1,000 องศาเซลเซียสเพราะจะลดคุณสมบัติการดูดซับ การกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ ใช้อุณหภูมิ 800-900 องศาเซลเซียส ส่วนการกระตุ้นด้วย อากาศใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 2.9 แสดงการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ตัวกระตุ้นต่างกัน

ADSORPTION BY ACTIVATED PINE WOOD CHAR

Gas	Activation conditions		Substance adsorbed, g/g carbon		
	Temperature °C	Chryso- idine R	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	0.17	0.17	0.60
Steam	880	0.36	0.16	0.21	0.62
CO ₂	880	0.32	0.12		

All processes of activation conducted to 30% yield based on weight of original char. Adsorption evaluated at an equilibrium solution concentration of 0.10 g/liter.

ที่มา : Hassler (1974)

ปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์บอนเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนตัวทำปฏิกิริยาจะถูกส่งเข้ามารอบผิวของอนุภาคและแพร่เข้าไปในรู ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงขึ้นกับความเข้มข้นของตัวออกซิไดซ์ อย่างไรก็ตามอุณหภูมิก็เป็นปัจจัยที่สำคัญของกระบวนการออกซิเดชัน ที่อุณหภูมิต่ำอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างคาร์บอนกับตัวออกซิไดซ์จะต่ำเป็นผลให้ได้รูพรุนที่ต้องการช้า ที่อุณหภูมิสูงเกินกว่าอัตราการแพร่ของตัวออกซิไดซ์เข้าไปในอนุภาค ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดที่ผิวนอกของอนุภาคเกิดการสูญเสียคาร์บอนโดยไม่ทำให้เกิดรูพรุน

อัตราเร็วของกระบวนการออกซิเดชันถูกกำหนดโดยความว่องไวในการทำปฏิกิริยาของถ่านกับตัวออกซิไดซ์ ถ้าความว่องไวสูงจะทำให้อุณหภูมิที่เหมาะสมต่ำ พบว่าถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนต์ถ่านหินบิทูมินัส ใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นต่ำกว่าถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนต์แอนทราไซต์ เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการออกซิไดซ์ของ คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และออกซิเจน ออกซิเจนจะมีความสามารถสูงสุด โดยที่คาร์บอนไดออกไซด์มีความสามารถต่ำสุด

2.3.3.2.1 การกระตุ้นโดยใช้ออกซิเจน

โดยทั่วไปหมายถึงการกระตุ้นด้วยอากาศปฏิกิริยาของคาร์บอนกับออกซิเจนจะได้ผลผลิตเป็น คาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังแสดงในสมการที่ 2.9 และ 2.10

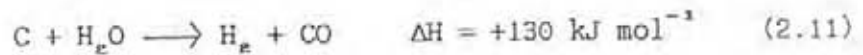


ปฏิกิริยาทั้งสองเป็นแบบ คายความร้อน กลไกของปฏิกิริยายังไม่ทราบแน่ชัด และยังคงพิสูจน์ว่าคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นต้นของคาร์บอนออกซิเดชัน หรือ คาร์บอนมอนอกไซด์เกิดขึ้นก่อนแล้วทำปฏิกิริยาเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ปัจจุบันมองว่าทั้งคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นต้น (Smisek, 1970) และอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์ต่อคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ถ่านที่ถูกกระตุ้นด้วยอากาศที่มีออกซิเจนเพียงจะเกิดหมุ่นึ่งก็ขึ้นกับอัตราที่มีออกซิเจนในองค์ประกอบ ชั้นที่ผิวของถ่านเป็นจำนวนมาก แต่อากาศก็ไม่ค่อยนิยมที่จะใช้เป็นตัวกระตุ้นเพราะควบคุมได้ยาก และเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนทำให้ไม่สามารถรักษาอุณหภูมิภายในเตาให้คงที่ได้ ดังนั้นออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงเกินไป

2.3.3.2.2 การกระตุ้นโดยใช้ไอน้ำ

ปฏิกิริยาเคมีระหว่างไอน้ำกับคาร์บอนเป็นปฏิกิริยา

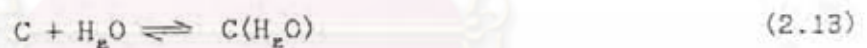
ดูดความร้อน สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.11



กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ได้ มีการศึกษากันมากมากที่สุดไม่เพียงแต่ปฏิกิริยาการกระตุ้น แต่ยังผลิตวอเตอร์แก๊ส ปฏิกิริยาของคาร์บอนกับไอน้ำจะถูกยับยั้งโดยการเกิดไฮโดรเจน ขณะที่มอลลิบลูคาร์บอนมอนอกไซด์ อัตราเร็วของปฏิกิริยาที่ก๊าซซีพีเคชั่น แสดงดังสมการที่ 2.12

$$v = \frac{k_1 p_{\text{H}_2\text{O}}}{1 + k_2 p_{\text{H}_2\text{O}} + k_3 p_{\text{H}_2}} \quad (2.12)$$

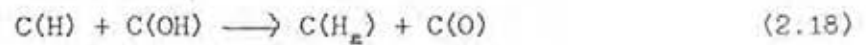
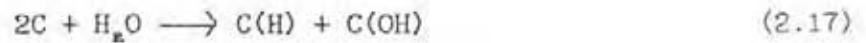
เมื่อ p_{H_2} และ $p_{\text{H}_2\text{O}}$ เป็นความดันย่อย (partial pressure) ของไฮโดรเจน และไอน้ำตามลำดับ ค่า k_1 , k_2 , k_3 เป็นค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง กลไกของปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับไอน้ำเขียนดังสมการที่ 2.13 ถึง 2.15



การยับยั้งที่เกิดขึ้นเนื่องจากไฮโดรเจนจะไปกินส่วนที่ใช้สำหรับดูดซับของถ่านกัมมันต์ ดังสมการที่ 2.16



Long และ Sykes, 1948 ในขั้นแรกของ
ปฏิกิริยา น้ำที่ถูกดูดซับจะแตกตัวดังสมการที่ 2.17 ถึง 2.18



ไฮโดรเจน และออกซิเจนจะถูกดูดซับที่บริเวณ
ใกล้เคียงส่วนที่ใช้ดูดซับ ซึ่งประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ผิว

ปฏิกิริยาของคาร์บอนกับไอน้ำอธิบายโดยปฏิกิริยา
ทุติยภูมิของคาร์บอนมอนอกไซด์กับไอน้ำ เรียกว่าปฏิกิริยาไฮโมจิเนียสวอเตอร์แก๊ส แรงปฏิกิริยา
โดยผิวของคาร์บอน ดังสมการที่ 2.19



Reif, 1952 อธิบายการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์
และผิวคาร์บอนที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังสมการที่ 2.20



การกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 750-950 องศา
เซลเซียส

2.3.3.2.3 การกระตุ้นโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์

อัตราเร็วของปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับ
คาร์บอนไดออกไซด์ อธิบายได้คล้ายกับปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับไอน้ำ ดังสมการที่ 2.21

$$v = \frac{k_1 p_{CO_2}}{1 + k_2 p_{CO} + k_3 p_{CO_2}} \quad (2.21)$$

เมื่อ p_{c_0} และ p_{c_0} เป็นความดันย่อยของ คาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ตามลำดับ k_1, k_2, k_3 เป็นค่าคงที่จากการทดลอง กลไกของปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ อธิบายได้ 2 กลไก ซึ่งแตกต่างกันในแง่ของการอธิบายการเป็นด้วยปัจจัยของ คาร์บอนมอนอกไซด์ ดังสมการที่ 2.22 ถึง 2.26 (Jankowska, 1991)

(1)

$$c + \infty_e \longrightarrow c(0) + \infty \quad (2.22)$$

$$c(0) \longrightarrow \infty \quad (2.23)$$

$$\infty + c \longrightarrow c(\infty) \quad (2.24)$$

(2)

$$c + \infty_e \longrightarrow c(0) + \infty \quad (2.25)$$

$$c(0) \longrightarrow \infty \quad (2.26)$$

2.4 การถ่ายเทความร้อนในเฟลูอิดซ์เบด

การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะ คือ

2.4.1 การถ่ายเทความร้อนระหว่างเม็ดของแข็งกับของไหล

กลไกของกระบวนการนี้แบ่งเป็นกระบวนการย่อย 2 ประเภท คือ ความร้อน จากของไหลถ่ายเทให้กับเม็ดของแข็ง และความร้อนจากเม็ดของแข็งถ่ายเทให้กับของไหล ซึ่ง กระบวนการนี้กระทำต่อเนื่องทั้งของไหลและเม็ดของแข็ง

2.4.2 การถ่ายเทความร้อนจากผิวของหอยทาดลองให้แก่เม็ดของแข็ง

กลไกที่เกิดขึ้นสำหรับการถ่ายเทความร้อนแบบนี้มีอยู่ 3 สมมติฐาน คือ

ก. ระหว่างผนังของหอยทาดลองกับเม็ดของแข็งที่เคลื่อนที่อยู่ในเบด มีชั้นของ ของไหลเป็นฟิล์มบาง ๆ ทำหน้าที่เหมือนเบาะ ความร้อนจากผนังต้องผ่านชั้นนี้ก่อนถึงจะเดินทาง ไปถึงเม็ดของแข็ง โดยสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาของฟิล์ม

ข. จากการเคลื่อนที่ของเม็ดของแข็ง ซึ่งบางครั้งเม็ดของแข็งวิ่งเข้าไปกระทบกับผนังเองโดยตรงในช่วงเวลาสั้น ๆ ความร้อนจากผนังผ่านเข้ามาในเม็ดของแข็งด้วย วิธีการนำความร้อนซึ่งเกิดจากอนุภาคต่างระหว่างผนังกับเม็ดของแข็ง

ค. ฟองก๊าซลอยผ่านเบตตรงบริเวณใกล้เคียงผนัง เมื่อฟองก๊าซลอยผ่านไป กลุ่มเม็ดของแข็งกลุ่มหนึ่งก็เข้ามาแทนที่ กลุ่มเม็ดของแข็งนี้จะรับความร้อนจากผนังแล้วหลุดไป เพราะฟองก๊าซที่ลอยตามหลังดันกลุ่มเม็ดของแข็งให้อยู่ส่วนอื่นของเบต ความร้อนทั้งหมดจะสะสมอยู่ในเบตหนาแน่น

ปัจจุบันนี้ได้มีการนำเอาเทคนิคฟลูอิดเซชันมาใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง ดังจะเห็นได้จากการอบแห้ง กระบวนการเกิดปฏิกิริยาเคมีและการเผาไหม้ แต่ระบบฟลูอิดเซชันก็มีทั้งข้อดีและข้อเสีย ดังนี้

ข้อดี

1. จากการที่เม็ดของแข็งมีพฤติกรรมเคลื่อนที่คล้ายของไหล ทำให้สามารถควบคุมระบบได้ง่าย และสามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้
2. เม็ดของแข็งมีการผสมกันอย่างรวดเร็ว และสม่ำเสมอ ทำให้อนุภาคภายในเบตมีค่าคงที่เท่ากันทุกจุด
3. เนื่องจากการผสมกันของเม็ดของแข็งอย่างรวดเร็ว ทำให้ระบบนี้เหมาะสมในกรณีที่ต้องการมีการตัด หรือคายความร้อนเป็นปริมาณมาก
4. การที่เม็ดของแข็งหมุนเวียนอยู่ในเบตเม็ดของแข็งนี้สามารถที่จะเป็นตัวนำความร้อนจากผนังแหล่งความร้อนให้กับของไหลได้มากกว่า เพราะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบที่ความเร็วของไหลเดียวกัน
5. พื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดของแข็งกับของไหลมีมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับเบตหนึ่งที่ใช้พวกเม็ดของแข็งเท่ากัน จึงมีประโยชน์สำหรับงานที่มีการถ่ายเทความร้อน และมวลสาร
6. การทำงานด้วยฟลูอิดเบตเสียพลังงานน้อยกว่า เพราะแรงเสียดทานและความดันตกของเบตน้อยกว่าในเบตหนึ่ง

ข้อเสีย

1. การขัดสีระหว่างเม็ดของแข็งกับผนัง ทำให้เกิดการสึกกร่อนของเม็ดของแข็งทำให้มีขนาดเล็กลง
2. เวลาที่ของแข็งสัมผัสกับเม็ดของแข็งสั้นมาก จึงต้องใช้เบตสูง ๆ หรือเบตหลายชั้นทำให้เปลืองเงินลงทุนมาก

3. การทำงานให้ได้ผลดีมีข้อจำกัดซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวกระจายของไหลชนิด รูปร่างของเบด ความเร็วของไหลที่ใช้ ขนาด และชนิดของเม็ดของแข็ง

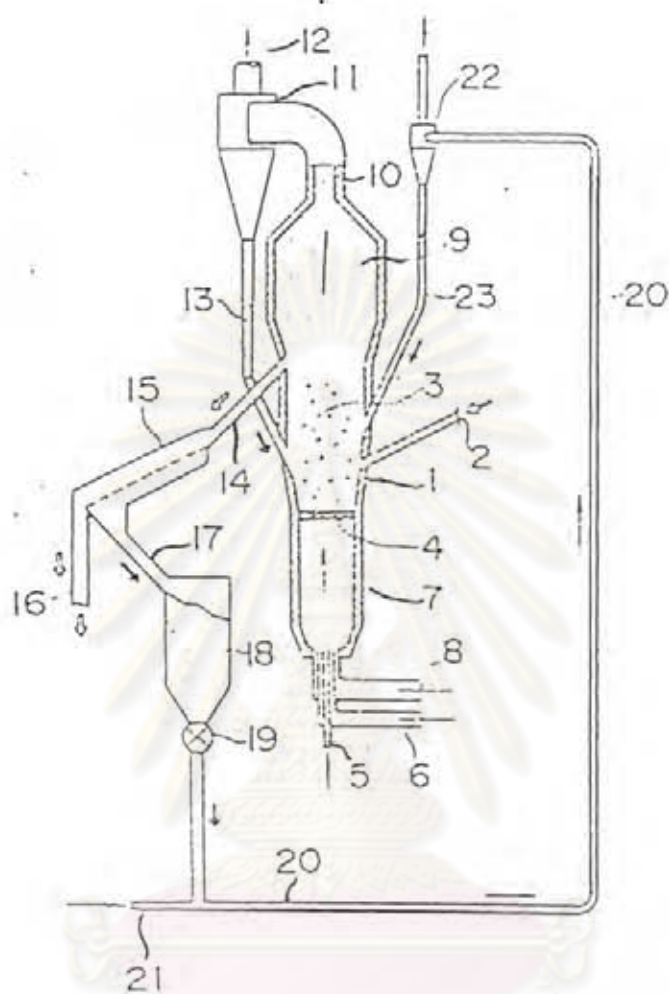
4. การใช้ก๊าซเป็นตัวกลาง ทำให้ต้องเปลืองพลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิ ก๊าซนั้นทำให้ต้นทุนในการทำงานสูงขึ้น

2.5 ผลงานการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ninomiya et al. ; U.S. Patent 3,852,216 ; 1974 ได้ทำการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ในฟลูอิดไรซ์เบด โดยผสมกับอะลูมินา ซึ่งเจือยต่อกับปฏิกิริยา ขนาดอนุภาค 0.12 มิลลิเมตร ปริมาณ 1.2 เท่าของถ่านไม้เริ่มต้นโดยปริมาตร เพื่อให้ความเร็วของก๊าซร้อนผสมไอน้ำวดยิ่งในการเกิดฟลูอิดเซชันต่ำลง ถ่านไม้ได้จากการคาร์บอนไรซ์จากถ่านหินหึ่งจนถึง 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง กระตุ้นด้วยอัตราการป้อน 272 กรัมต่อชั่วโมง เครื่องปฏิกรณ์มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร ดังรูป 2.15 ก๊าซร้อนผสมไอน้ำวดยิ่งมีอุณหภูมิ 1360 องศาเซลเซียส ไอน้ำ 58 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความเร็ว 20 เซนติเมตรต่อวินาที อนุกรมภายในเบด 805 องศาเซลเซียส ทำการผลิตถ่านกัมมันต์แบบต่อเนื่อง ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 แสดงผลการทดลองของ Ninomiya et. al.

Weight of partially activated carbon in the coarse granule form in fluidized bed	539 g
Amount of active carbon produced	158 g/hr
Physical properties of produced active	
- Packing density	448 g/l
- Benzene adsorption	38.2 %
- Iodine adsorption	1230 mg/g
- Hardness	99.3 %



รูปที่ 2.15 แสดงเครื่องปฏิบัติการทดลองของ Ninomiya et al.

Johnson et al. ; U.S. Patent 4,014,817 ; 1977 ผลิตน้ำมันก๊าดจาก
ผงถ่านหิน โดยปรับปรุงคุณภาพน้ำมันก๊าดด้วยการล้างด้วยกรดก่อนการกระตุ่น ผงถ่านหินขนาด
8 30 (U.S. Sieve) ความหนาแน่น 0.735 ทำให้แห้งและออกซิไดซ์ในเฟลิวอิโดซ์เบด 60 นาที
อุณหภูมิระหว่าง 165-205 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของอากาศ 1.5 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที
ความหนาแน่นแห้งทำให้แห้ง 0.707 กระตุ่นด้วยไอน้ำผสมก๊าซไนโตรเจน อัตราการไหล 2.5
มิลลิเมตรต่อนาที ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 2.11

และใช้ตัวอย่าง 100 กรัม ล้างด้วยสารละลาย 10 เปอร์เซ็นต์กรดไฮโดรคลอริก 150 มิลลิลิตร ต้มเดือดนาน 35 นาที ล้างด้วยน้ำกลั่น 150 มิลลิลิตร ต้มเดือดนาน 35 นาที จากนั้นกรอง ทำซ้ำจนครบ 5 ครั้ง ทำให้แห้งและออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 18 ชั่วโมง กระตุ้นที่ 680-905 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 87 นาที ผลที่ได้ตั้งแสดงในตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.11 แสดงคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากวัตถุดิบที่ล้างด้วยกรด

Activation Temp °C	I _a	Mol	CCl ₄	AD(g/ml)	Ash (%by wt)
760-860	615	315	36.2	0.477	8.57

ตารางที่ 2.12 แสดงคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากวัตถุดิบที่สกัดด้วยกรด

Activation Temp °C	I _a	Mol	CCl ₄	AD(g/ml)	Ash (%by wt)
760-860	655	299	30.0	0.506	8.12

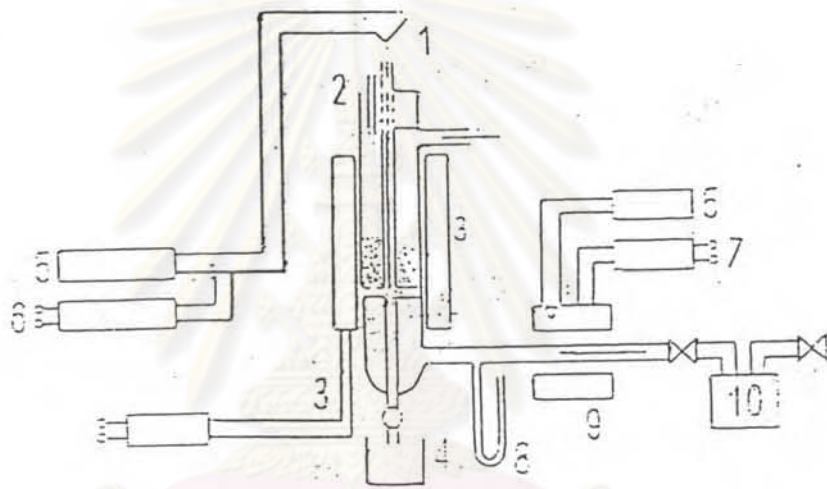
เกศรา นุตาลัย และคณะ 2531 จากรายงานการวิจัยการผลิตถ่านกัมมันต์จากดินพรุ ในห้องปฏิบัติการ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ได้ทำการผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีกระตุ้นด้วยไอน้ำในเตาแบบหมุน (rotary kiln) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ยาว 350 มิลลิเมตร การทดลองเป็นแบบกะ วัตถุดิบเป็นเม็ดถ่านขนาด 4-8 เมช ครั้งละ 300 กรัม ที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส เวลา 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 2.13

ตารางที่ 2.13 แสดงผลของอุณหภูมิและเวลาต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์

PROPERTY	RAW MAT. (Carbonized 500 °C 1 hr)	TEMPERATURE (°C)					
		800			900		
		TIME (hr)					
		1	2	1	2	3	4
Iodine no. (mg/g)	327	575	704	919	1060	1142	1216
Methylene blue adsorption (mg/g)	112	89	113	96	161	250	296
Surface area (BET) (m ² /g)	139	378	464	612	707	831	881
Yield (%dry peat)	45-52	31.0	19.6	26.1	20.7	9.2	7.7
Density (g/cm ³)	0.532	0.658	0.525	0.547	0.457	0.389	0.363
pH	5.9	6.7	7.3	9.6	9.2	9.5	9.8

เกสร้า นุตาลัย และคณะ 2534 จากรายงานการผลิตถ่านกัมมันต์จากพืชโดยการเผาและกระตุ้นด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เบด สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ได้ทำการทดลองในแอคติเวเตออร์ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 44 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2.16 วัสดุเป็นถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ในเตาแบบเบดนิ่ง (fixed bed) และแบบฟลูอิดเบด ขนาดวัสดุ 0.5-1.0 มิลลิเมตร การทดลองเป็นแบบกะ ครั้งละ 25 กรัม ที่อุณหภูมิ 850 และ 900 องศาเซลเซียส เวลา 10, 20, 30 และ 40 นาที

ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2.13 และตารางที่ 2.14 พบว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลา 40 นาที ให้ค่าการดูดซับสูงสุด และถ่านกัมมันต์ที่ใช้วัสดุจากถ่านพืชที่คาร์บอนไนซ์แบบฟลูอิดเบดมีคุณสมบัติการดูดซับดีกว่าคาร์บอนไนซ์แบบเบดนิ่ง



- | | |
|-------------------------|-----------------------------|
| 1 Thermocouple | 6 Temperature controller |
| 2 Sample inlet | 7 Electric transformer |
| 3 Electric furnace | 8 Manometer |
| 4 Product receiver | 9 Heating band |
| 5 Temperature indicator | 10 Superheated steam boiler |

รูปที่ 2.16 แสดงเตากระตุ้นแบบฟลูอิด์เบด

ตารางที่ 2.14 แสดงคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เวลา 10, 20, 30 และ 40 นาที

Raw material	Time (min)	Yield (%)	S.A. (m^2/g)	M.B. (mg/g)	I.A. (mg/g)	B.D. (g/cm^3)	Ash (%)
T-TCP8	0	-	-	3.7	-	0.38	5.5
	10	60.8	384.4	58.7	662.9	0.34	13.8
	20	48.6	481.5	92.1	-	0.26	11.0
	30	37.1	523.7	127.9	876.7	0.21	14.1
	40	25.1	545.7	127.3	-	0.15	13.6
T-FCP8	0	-	-	0	-	-	-
	10	62.3	452.0	73.6	-	0.29	6.5
	20	47.4	512.9	123.5	870.4	0.23	7.7
	30	35.7	597.7	192.1	989.0	0.20	11.9
	40	25.9	619.6	227.0	1013.0	0.17	17.3

T-TCP8 = ถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนต์แบบเบตนิ่ง

T-FCP8 = ถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนต์แบบฟลูอิดซ์เบต

S.A. = Surface area

M.B. = Methylene blue adsorption

B.D. = Bulk density

I.A. = Iodine adsorption number

ตารางที่ 2.15 แสดงคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลา 10, 20, 30 และ 40 นาที

Raw material	Time (min)	Yield (%)	S.A. (m^2/g)	M.B. (mg/g)	I.A. (mg/g)	B.D. (g/cm^3)	Ash (%)
T-TCP8	0	-	-	3.7	-	0.38	5.5
	10	62.8	407.2	77.3	637.2	0.35	14.0
	20	44.4	421.5	86.8	738.1	0.28	13.6
	30	31.8	563.4	92.6	773.1	0.21	16.6
	40	17.5	508.6	193.3	834.9	0.15	24.8
T-FCP8	0	-	-	0	-	-	-
	10	58.4	504.2	58.2	-	0.29	6.5
	20	35.9	567.7	166.2	861.6	0.23	13.4
	30	27.7	563.1	176.1	858.0	0.17	19.7
	40	21.6	623.5	188.3	1017.7	0.14	30.3

T-TCP8 = ถ่านที่ได้จากการคาร์บอนีตชนิดแบบเบตนิ่ง

T-FCP8 = ถ่านที่ได้จากการคาร์บอนีตชนิดแบบฟลูอิด์เบต

S.A. = Surface area

M.B. = Methylene blue adsorption

B.D. = Bulk density

I.A. = Iodine adsorption number

ทดลองโดยใช้ถ่านเม็ดขนาด 0.297-1.41 มิลลิเมตรที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลา 20, 30, 40, 50, 60, 75 และ 90 นาที ผลดังแสดงในตารางที่ 2.15

ตารางที่ 2.16 แสดงผลของเวลาที่มีต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ในการกระตุ้นด้วย
ไอน้ำที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

Time (min)	Yield (%)	S.A. (m ² /g)	M.B. (mg/g)	I.A. (mg/g)	B.D. (g/cm ³)	Ash (%)
0	-	-	1.2	28	0.41	4.59
20	54.6	472	57.6	571.3	0.38	7.79
30	50.1	542	84.7	646.6	0.36	7.77
40	41.6	603	137.5	698.7	0.31	9.37
50	34.8	656	178.5	729.2	0.29	11.21
60	22.3	814	260.9	922.4	0.19	16.15
75	12.2	876	307.0	998.4	0.14	29.06
90	8.1	966	296.6	972.8	0.12	33.28
60 (wash)	95	839	274.8	875.3	-	9.58

ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่เวลา 90 นาทีจะมีพื้นที่ผิวมากที่สุด แต่มีเถ้ามากที่สุด
และเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ต่ำสุด สำหรับการล้างด้วยกรดจะให้ค่าพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นไม่มากนักแต่ปริมาณ
เถ้าจะลดลงมาก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ไร้สนิมเจาะรูขนาดของรู 2.3 มิลลิเมตร ที่ที่ช่องว่างประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ มีหน้าที่กระจายก๊าซให้สม่ำเสมอ อากาศมาจากเครื่องอัดอากาศในโรงงานโดยให้อากาศไหลมาตามท่อ มีมาตรวัดอัตราการไหล (rotameter) และวาล์วเป็นตัวควบคุม

ด้านบนต่อกับไซโคลนผ่านไปยังคอลัมน์ควบแน่น และไปที่เครื่องกำจัดก๊าซแบบดูดซึมตามลำดับ ระหว่างไซโคลนกับคอลัมน์ควบแน่นมีวาล์วควบคุม 1 ตัว

3.1.2.2 ระบบป้อนวัตถุดิบแบบสกรู (screw feeder)

เป็นถังทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม SS. 304 มีขนาด กว้าง 25 เซนติเมตร ยาว 25 เซนติเมตร และสูง 38 เซนติเมตร ใช้สกรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตรเพื่อป้อนวัตถุดิบเข้าสู่เบด ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขนาด 0.5 แรงม้า ทดรอบ หมุนด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที

3.1.2.3 ตัวแยกฝุ่นของแข็งแบบไซโคลน (cyclone)

เป็นเครื่องแยกอนุภาคของแข็งขนาดเล็กในก๊าซ โดยอาศัยการหมุนของก๊าซเข้าเครื่องในแนวสัมผัส แยกของแข็งออกมาทางด้านล่างก๊าซจะไหลออกทางด้านบน ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม SS. 304 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 เซนติเมตรสูง 60 เซนติเมตร

3.1.2.4 ถังเก็บผลิตภัณฑ์ (storage tank)

เป็นอุปกรณ์ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม SS. 304 ใช้สำหรับเก็บผลิตภัณฑ์ที่ออกจากเบด และทำให้ผลิตภัณฑ์เย็นลงด้วย ถังเก็บมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 เซนติเมตร สูง 80 เซนติเมตร มีวาล์วสำหรับควบคุมการปิด-เปิด 3 ตัว ตัวแรกอยู่ระหว่างเบดกับถังเก็บ ตัวที่สอง เป็นวาล์วปล่อยให้ก๊าซไหลในการไล่ผลิตภัณฑ์ออกจากเบด ตัวที่สามสำหรับนำผลิตภัณฑ์ออกจากถังเก็บ

3.1.2.5 คอลัมน์ควบแน่น (condensing column)

ทำด้วยเหล็กมีลักษณะเป็นท่อ 2 ชั้นตรงกลางท่อชั้นในให้ก๊าซร้อนผ่าน ระหว่างท่อชั้นนอกกับชั้นในให้น้ำเย็นไหลผ่าน มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 5 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 9 เซนติเมตร สูง 100 เซนติเมตร

3.1.2.6 ถังเก็บน้ำมันหาร์ท

ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม SS. 304 มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร สูง 50 เซนติเมตร อยู่ใต้คอลัมน์ควบแน่น สำหรับเก็บน้ำมันหาร์ทที่ได้จากการควบแน่นก๊าซร้อน

3.1.2.7 หอกำจัดก๊าซแบบดูดซึม (scrubber)

ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม SS. 304 มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 60