

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัย

2.1 ความหมายของถ่านกัมมันต์ (active หรือ activated carbon)

ถ่านกัมมันต์ มีชื่ออื่น ๆ อีกว่า คาร์บอนกัมมันต์ ถ่านไว ถ่านดูดซับ ถ่านที่มีปฏิกิริยา มีชื่อเรียกในภาษาอังกฤษว่า activated carbon หรือ active carbon ถ่านกัมมันต์มีคุณสมบัติในการดูดซับได้ทั้งสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ การที่ดูดซับได้ดี เพราะ ผิวของถ่านมีรูพรุน และมีพื้นที่ผิวมาก (อยู่ในช่วง $300-500 \text{ m}^2/\text{s}$) จึงมีสมบัติในการดูดซับ อนุภาคสารต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ถ่านกัมมันต์ , 2542)

2.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์

วัสดุที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ ควรมีคุณสมบัติ ดังต่อไปนี้

1. เป็นของเหลือทิ้ง หรือมีราคาถูก
2. มีปริมาณคาร์บอนสูง
3. มีปริมาณสารอนินทรีย์ต่ำ
4. มีความสะดวกในการนำมาใช้งาน เช่น ไม่สลายตัวเมื่อเก็บ
5. สามารถผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ที่คุณภาพสูงได้ (ภัทรา ปัญญาวัฒน์กิจ, 2540)

วัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบโดยตรง มักเป็นพวกอินทรีย์วัตถุ (หมายถึงสารที่มีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ) เป็นส่วนใหญ่ สามารถแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆได้ดังนี้

1. พวกเซลลูโลสที่มาจากพืช เช่น แกลบ กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม ชานอ้อย เปลือกมังคุด เปลือกทุเรียน และซังข้าวโพด
2. พวกถ่านหิน เช่น ลิกไนต์ และพีท

สำหรับวัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบในรูปถ่าน มักเป็นถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์อินทรีย์วัตถุ หรือที่เรียกว่า ถ่านสังเคราะห์ (artificial char) หรืออาจเป็นถ่านที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (natural char) เช่น ถ่านหิน

ถ่านสังเคราะห์ยังแบ่งตามอินทรีย์วัตถุที่ใช้เป็น 2 ประเภท คือ

1. ถ่านสังเคราะห์เนื้อแข็ง (hard artificial char) เช่น ถ่านน้ำตาล และถ่านไม้ที่ได้จากการคาร์โบไนซ์ที่ความดันสูง
2. ถ่านสังเคราะห์เนื้ออ่อน (soft artificial char) เช่น ถ่านไม้, ถ่านขาน้อย, ถ่านเกลบ, ถ่านหินน้ำมัน และถ่านน้ำตาล (จุฑามาส จิตต์เจริญ, 2544)

คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบ ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งจะเห็นว่าวัสดุที่ใช้จะมีค่าต่ำ อย่างไรก็ตามคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ยังขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ กล่าวคือ วัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ และปริมาณสารระเหยสูง เช่น ไม้ ลิกนิน เป็นต้น มักจะให้ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาณของรูพรุน (pore volume) สูง และความหนาแน่นต่ำ ซึ่งใช้ในการดูดซับสารละลายได้ดี แต่ดูดซับก๊าซได้ไม่ดี นอกจากนี้คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ยังขึ้นอยู่กับการผลิต เครื่องมือที่ใช้ในการผลิต และสภาวะที่ใช้ในการผลิต เป็นต้น ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะระบุให้แน่นอนว่าวัสดุใดจะใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมกับงานแบบใด

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์และการใช้ประโยชน์

วัสดุ	ค่าคาร์บอน (%wt)	ค่าสารระเหย (%wt)	ความหนาแน่น (g/wt)	ค่าต่ำ (%wt)	การใช้ประโยชน์
ไม้เนื้ออ่อน	40-45	55-60	0.40-0.50	0.3-1.1	การดูดซับใน สารละลาย
ไม้เนื้อแข็ง	40-42	55-60	0.55-0.80	0.3-1.2	การดูดซับใน สารละลาย
ลิกนิน	35-40	58-60	0.30-0.40	-	การดูดซับใน สารละลาย
เปลือกถั่วลิสง	40-45	55-60	1.40	0.5-0.6	การดูดซับไอ
ลิกไนต์	55-70	25-40	1.00-1.35	5.0-6.0	การบำบัดน้ำเสีย
ถ่านหิน เนื้ออ่อน	65-80	20-30	1.25-1.50	2.0-1.2	การดูดซับใน สารละลายและไอ
ปิโตรเลียมโค้ก	70-85	15-20	1.35	0.5-0.7	การบำบัด
ถ่านหินเนื้อกึ่ง แข็ง	70-75	10-15	1.45	5-15	การดูดซับไอ
ถ่านหินเนื้อแข็ง	85-95	5-10	1.50-1.80	2-15	การดูดซับไอ

ที่มา : Bansal and Coworker , (1988) อ้างใน จุฑามาส จิตต์เจริญ , 2544, หน้า 6

วัตถุดิบที่ใช้สังเคราะห์มีหลายชนิด เช่น ชานอ้อย (bagases) เมล็ดพืช (cereals) และเลือด (blood) เป็นต้น (ชนิดของวัตถุดิบที่มีการศึกษาเพื่อใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ แสดงในตารางที่ 2.2)

ตารางที่ 2.2 แสดงวัตถุดิบต่าง ๆ ที่ได้มีการศึกษาใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์

ชานอ้อย (bagases)	วัชรพืชทะเล (kelp and seaweed)
กากของบีท (beet – sugar sludges)	เขม่า (lampblack)
เลือด (blood)	กากหนัง (leather waste)
กระดูก (bones)	ลิกนิน (lignin)
สารจำพวกแป้ง (carbohydrate)	ถ่านหินลิกไนต์ (lignite)
เมล็ดพืช (cereals)	กากน้ำตาล (molasses)
ถ่านหิน (caol)	เปลือกลูกนัท (nut shell)
กะลามะพร้าว (coconut shells)	หินน้ำมัน (oil shell)
เมล็ดกาแฟ (coffee beans)	ถ่านหินชนิดร่วน (peat)
เมล็ดผลไม้ (fruit pits)	กากกรดปิโตรเลียม (petroleum acid studge)
แกรไฟต์ (graphyte)	ถ่านหินน้ำมัน (petroleum coak)
ไม้ (wood)	ของเสียจากยาง (rubber waste)
เปลือกเมล็ดฝ้าย (cottonseed hull)	จี้เลื่อย (sawdust)

ที่มา : Faust and Aly , 1980

จากการศึกษาพบว่า การผลิตถ่านกัมมันต์ สามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรงหรือเริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้วก็ได้ วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์จะพิจารณาในทฤษฎีวัตถุ วัตถุที่มีคาร์บอน ไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ในรูปของถ่าน นั้นพบว่าส่วนใหญ่ใช้ถ่านที่ได้จากการเผาอินทรีย์วัตถุ ซึ่งเรียกกันว่า “ถ่านสังเคราะห์” (artificial char) เป็นส่วนใหญ่ อาจใช้ถ่านที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น แกรไฟต์ แอนทราไซต์ ถ่านที่ได้จากอินทรีย์วัตถุ แบ่งออกตามวัตถุดิบที่นำมาใช้ 2 ประเภท

1. ถ่านแข็ง (hard artificial char) เช่น ถ่านน้ำตาล ถ่านที่ได้จากเมล็ดผลไม้ ถ่านที่เผาด้วยความดันสูง (high-pressure wood charcoal)

2. ถ่านอ่อน (soft artificial char) เช่น ถ่านไม้ ถ่านชานอ้อย ถ่านแกลบ ถ่านหินน้ำมัน ถ่านกากน้ำตาล

โดยทฤษฎีแล้วอินทรีย์วัตถุทุกชนิดสามารถนำมาทำถ่านกัมมันต์ได้ แต่ว่าคุณสมบัติในการดูดสี หรือดูดกลิ่น จะแตกต่างกันนอกจากนี้แล้ว อุณหภูมิและเวลา ในการทำคาร์บอนไนซ์ (carbonization) และ กระบวนการกระตุ้น (activation) มีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณสมบัติการดูดกลิ่นและดูดสีของถ่านกัมมันต์ได้ ด้วยเหตุนี้ถ่านกัมมันต์จึงมีมากมายหลายชนิด โดยส่วนใหญ่จะแบ่งแยกตามคุณสมบัติการดูดซับสารต่าง ๆ เช่น กะลามะพร้าว เมื่อเผาจะให้ถ่านที่มีคุณสมบัติต่อการดูดกลิ่นและสีเพราะมีรูพรุนขนาดเล็ก ถ่านกัมมันต์ที่นิยมใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียส่วนใหญ่ใช้ถ่านที่ทำมาจาก ถ่านหิน หรือถ่านโค้กชนิดต่าง ๆ

2.3 ชนิดของถ่านกัมมันต์

สามารถแบ่งออกได้โดยใช้หลักต่างๆทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสะดวกของผู้ใช้ ตัวอย่างการแบ่งชนิดของถ่านกัมมันต์ (ภัทรา ปัญญาวัฒนกิจ , 2540) ได้แก่

2.3.1. แบ่งตามชนิดของตัวกระตุ้น

ก. กระตุ้นทางเคมี (chemical activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับผิวคาร์บอน มักเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ตัวกระตุ้นที่ใช้ได้แก่ $ZnCl_2$ และ $NaCl$ เป็นต้น

ข. กระตุ้นทางฟิสิกส์ (physical activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้ก๊าซออกซิไดซ์ เช่น ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีรูพรุนขนาดเล็ก นิยมใช้ในการดูดก๊าซและไอระเหย

2.3.2. แบ่งตามขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์

ก. ขนาดเล็ก (micropore) คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนประมาณ 1.5 นาโนเมตร มักใช้ในการดูดซับก๊าซหรือไอระเหย

ข. ขนาดกลาง (transitional pore หรือ mesopore) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีรูพรุนประมาณ 1.5 - 100 นาโนเมตร มักนำไปใช้ประโยชน์ในปฏิกิริยา ที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic reaction) ดูดซับสารที่มีโมเลกุลใหญ่ เช่น การฟอกสี

ค. ขนาดใหญ่ (macropore) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนมากกว่า 100 นาโนเมตร โดยปกติไม่มีความสำคัญในการจับสารต่างๆ แต่เป็นตัวช่วยให้สารที่ถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปยังรูพรุนเล็กได้ง่ายขึ้นมักนำไปใช้ประโยชน์ในการฟอกสีและผลิตยา

2.3.3. แบ่งตามลักษณะรูปร่าง

ก. ประเภทเป็นผง (powder) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 ไมโครเมตร ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ถ่านกัมมันต์, 2542) ใช้สำหรับฟอกสีในของเหลว ดูดกลืนสารละลายได้หลายชนิด

ข. ประเภทเป็นเม็ด (pellet) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 ไมโครเมตร ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ถ่านกัมมันต์, 2542) มีลักษณะเป็นเม็ดซึ่งได้จากการอัดผ่านเครื่องอัด หรืออาจทำเป็นเกล็ดใช้สำหรับทำก๊าซให้บริสุทธิ์ หรือการทำตัวละลายที่ใช้แล้วให้บริสุทธิ์ นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในกระบวนการปฏิกิริยาของก๊าซและใช้ทำหน้ากักป้องกันก๊าซและไอพิษต่างๆ

2.3.4. แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์

ก. ความหนาแน่นต่ำ มักใช้ประโยชน์ในสถานะที่เป็นสารละลาย เช่น ฟอกสีน้ำตาลดิบหรือทำน้ำให้บริสุทธิ์

ข. ความหนาแน่นสูง ใช้ในการดูดซับก๊าซหรือไอระเหย

2.3.5. แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ

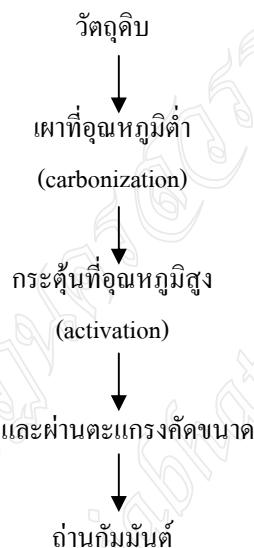
ก. Gas adsorbents หมายถึงถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับก๊าซพิษ กลิ่นและไอของสารอินทรีย์ ส่วนใหญ่เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นถ่านประเภท hard artificial char ซึ่งเป็นถ่านที่ได้จากเมล็ดผลไม้และถ่านไม้ที่เผาที่ความดันสูง

ข. Colour adsorbents หมายถึง ถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นตัวฟอกสี ส่วนมากเป็นการเผาถ่านประเภท soft artificial char ซึ่งเป็นถ่านที่ได้จากถ่านไม้ ถ่านขาน้อย ถ่านจากเกล็ด ถ่านจากหินน้ำมันและถ่านจากกากน้ำตาล

ค. Metal adsorbents หมายถึง ถ่านกัมมันต์ที่เป็นตัวแยกพวกโลหะต่างๆ เช่น ถ่านที่ใช้ในการแยกทอง เงิน แพลตินัมจากแร่

2.4 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

กรรมวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์มีหลายชนิด โดยการผลิตจะขึ้นอยู่กับว่าต้องการใช้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณสมบัติอย่างไรและใช้วัตถุดิบชนิดใด กรรมวิธีโดยทั่วไปแสดงดังในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์

ที่มา: จุฑามาส จิตต์เจริญ , 2544 , หน้า 9

ในขั้นตอนแรกของการผลิตถ่านกัมมันต์ ต้องนำวัตถุดิบมาทำการไพโรไลซิส เพื่อเพิ่มสัดส่วนของคาร์บอนในโครงสร้าง (carbonization) ภายใต้อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส ทำให้สารระเหยง่ายและสารที่มีมวลโมเลกุลต่ำระเหยออกไป จึงมีส่วนประกอบของโครงสร้างที่เหลืออยู่ส่วนใหญ่เป็นคาร์บอน จากนั้นนำคาร์บอนที่เหลือจากกระบวนการไพโรไลซิสไปกระตุ้นด้วยแก๊สที่มีคุณสมบัติช่วยกระตุ้น ได้แก่ ไออน้ำ หรือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จะต่ำกว่า 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หรืออาจน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของวัตถุดิบในบางกรณี นอกจากนี้ยังใช้สารเคมีที่ช่วยกระตุ้นได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ นอกจากนั้นยังสามารถใช้แคลเซียมคลอไรด์ และกรดฟอสฟอริก เป็นต้น (จุฑามาส จิตต์เจริญ , 2544)

กรรมวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์มีมากมายหลายวิธี ซึ่งขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบ และคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ ประกอบด้วยขั้นตอน 3 ขั้นตอน ดังนี้ คือ การเตรียมวัตถุดิบ การคาร์บอนไนซ์ และการกระตุ้น

2.4.1 การเตรียมวัตถุดิบ

ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ จีเลื่อย กะลามะพร้าว แกลบ เปลือกถั่ว ยางรถยนต์เก่า ถ่านหิน พีท เป็นต้น ซึ่งการผลิตถ่านกัมมันต์สามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรงหรือเริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้วก็ได้ขึ้นอยู่กับการผลิต แต่โดยทั่วไปมักนำวัตถุดิบมาบดและคัดขนาดก่อนที่จะนำมาคาร์บอนไนซ์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคาร์บอนไนซ์แล้วจึงนำมาบดและคัดขนาดก็ได้ (ภัทรา ปัญญาวัฒน์กิจ , 2540)

2.4.2 การคาร์บอนไนซ์ (Carbonization)

การคาร์บอนไนซ์เข้มข้นเป็นกระบวนการไพโรไลซิสรูปแบบหนึ่งที่จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ในรูปของชาร์ (char) ที่เป็นของแข็งมากกว่าน้ำมันทาร์ (tar) และก๊าซ หรืออาจกล่าวได้ว่าการคาร์บอนไนซ์เป็นการเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้สูงขึ้น โดยการเผาในที่อับอากาศที่อุณหภูมิ 200 - 500 °C

ปฏิกิริยาไพโรไลซิสต้องการความร้อนทั้งทางตรงและทางอ้อมที่ได้จากการออกซิเดชันเพียงบางส่วน หรือจากปฏิกิริยาอื่นๆ ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งในปัจจุบันกระบวนการสลายตัวทางความร้อนในสภาวะที่มีออกซิเจนน้อย หรือในที่มีการถ่ายเทความร้อนให้เกิดการไพโรไลซิสโดยตรงจากการเผาไหม้บางส่วนของชาร์และก๊าซ เรียกว่าเป็น “ กระบวนการไพโรไลซิส ” (Jones,1987 ; Kohoan และ Barkordor ,1979 อ้างใน ภัทรา ปัญญาวัฒน์กิจ , 2540)

Kohoan และ Barkordor ,(1979) อ้างใน ภัทรา ปัญญาวัฒน์กิจ ,(2540) ได้ให้คำนิยามกว้างๆ ของกระบวนการไพโรไลซิส เป็นเทคโนโลยีที่วัตถุที่ประกอบด้วยคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบหลักเกิดการสลายตัวด้วยความร้อน โดยมีอาณาเขตอย่างน้อยหนึ่งอาณาเขตที่เกิดการสลายตัวทางความร้อนในที่ที่ไม่มีออกซิเจน

Reed และ Janzen , (1979) อ้างใน ภัทรา ปัญญาวัฒน์กิจ ,(2540) ได้อธิบายถึงความแตกต่างของทอมไพโรไลซิส ก๊าซซิฟิเคชัน และการเผาไหม้ ไว้ว่า กระบวนการเหล่านี้เป็นกระบวนการพื้นฐาน คือ ปริมาณอากาศที่ใช้มีส่วนสัมพันธ์กับปริมาณเชื้อเพลิงไพโรไลซิสโซนเป็นส่วนที่มีอากาศน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ของอากาศที่ใช้ทางทฤษฎีการเผาไหม้ คือ อากาศระหว่าง 25-50 เปอร์เซ็นต์เป็นส่วนของก๊าซซิฟิเคชัน และส่วนของการเผาไหม้มีอากาศตั้งแต่ 100 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป

การไพโรไลซิส แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การไพโรไลซิสแบบช้า และแบบเร็ว การไพโรไลซิสแบบช้าจะเกิดสมดุลในบริเวณช่วงแคบ (local equilibrium) ด้วยอัตราการให้ความร้อนช้าพอที่จะทำให้เกิดความสมดุลตามอุณหภูมิ ในกรณีนี้ปริมาณและการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์จะขึ้นอยู่กับแนวของอุณหภูมิเดิม (temperature history) ส่วนการไพโรไลซิสแบบเร็วจะไม่คำนึงถึง

การคาร์โบไนซ์เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการ ผลิตถ่านกัมมันต์ เพราะเป็นขั้นตอนเริ่มต้นของโครงสร้างที่เป็นรูพรุน โดยการทำให้เกิดการแตกตัวทางเคมีของสารที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจนและไฮโดรเจนออกมาในรูปก๊าซ คาร์บอนอิสระที่มีอยู่จะรวมตัวกันในรูปของชาร์ ถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์โบไนซ์ควรมีลักษณะดังนี้

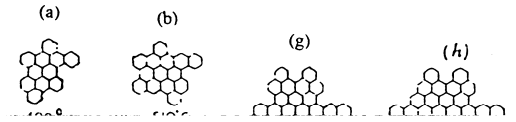
- มีสีดำตลอด (uniformly black)
- เมื่อหักดูส่วนที่หักจะมีผิวมันเงา
- ปลายที่หักจะแหลมคม (sharp)
- ปราศจากผงฝุ่นและขี้เถ้า

ถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์โบไนซ์ มีความสามารถในการดูดซับต่ำทั้งนี้เพราะว่าการทำถ่านชาร์ใช้อุณหภูมิประมาณ 400-500 °C ซึ่งยังคงมีน้ำมันทาร์ตกค้างอยู่ภายในช่องว่าง (pore) หรือเกาะอยู่ตามผิวจึงจำเป็นต้องนำถ่านนี้ไปผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับ ดังนั้นการกระตุ้นจึงเป็นเพียงการพัฒนาโครงสร้างให้เป็นไปทางเดียวกับการคาร์โบไนซ์เท่านั้นโดยทั่วไปวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยการกระตุ้นด้วยไอน้ำควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- สารระเหยต่ำ
- ปริมาณคาร์บอนสูง
- มีความพรุนสูง
- มีความแข็งแรงเพียงพอต่อการขัดสี

โดยธรรมชาติไม่สามารถพบคุณสมบัติที่ต้องการทั้งหมด ดังนั้นการคาร์โบไนซ์ถ่านจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ในการปรับสภาวะในการไพโรไลซิสให้เหมาะสม ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการคาร์โบไนซ์ (ภัทร ปัญญาวัฒนกิจ, 2540) คือ

2.4.2.1 อุณหภูมิ กระบวนการคาร์โบไนซ์ เป็นการกลั่นสลายของสารอินทรีย์ เพื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนในสารอินทรีย์ โดยจะเกิดการหักออกตรงบริเวณที่มีพันธะอ่อน หรือมีหมู่โมเลกุลที่หลุดออกได้ง่ายทำให้กลุ่มโมเลกุลที่เป็นวงแหวนแตกออกจากกันเป็นกลุ่มๆ จำนวนมาก โครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกหลักที่เหลือกลายเป็นโครงสร้างของถ่านชาร์ ซึ่งการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่เผา ส่วนโครงสร้างโมเลกุลขนาดเล็ก จะกลั่นสลายตัวออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆที่อุณหภูมิห้อง ได้แก่ น้ำแอมโมเนีย น้ำมันทาร์ และก๊าซต่างๆ



รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงของคาร์บอนอะตอมตามอุณหภูมิที่เผา
ที่มา : Hassler . (1974) อ้างใน สุโรชินี สกุดดวงดี , 2545 , หน้า 7

อย่างไรก็ตามสิ่งที่สำคัญที่สุดของกระบวนการนี้คือ อุณหภูมิสุดท้ายของการคาร์โบไนซ์ มีความสัมพันธ์กับพลังงานที่ใช้ในการสลายพันธะเคมีในวัตถุดิบออกมาเป็นสารระเหยที่อุณหภูมิสูง ถ่านชาร์จะมีการจัดระเบียบของโครงสร้างมากกว่า เช่น ถ่านหินเกรดสูงจะหดตัวมากขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการคาร์โบไนซ์ เป็นผลทำให้ปริมาตรของรูพรุนเล็กๆทั้งหมดที่เกิดขึ้นในชั้นแรกของการคาร์โบไนซ์ลดลง และเมื่อถ่านหินมีความแข็งมากขึ้น แต่จากผลการวิจัยของ Debowski (1980) อ้างใน ภัทธา ปัญญวัฒน์กิจ , (2540) พบว่าถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์โบไนซ์ที่อุณหภูมิ 300°C มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาน้อยกว่าถ่านที่ได้จากการคาร์โบไนซ์ที่อุณหภูมิ 600°C ซึ่งการลดลงของความว่องไวในการทำปฏิกิริยาจะมากขึ้นเมื่อคาร์บอนคงตัวลดลง

2.4.2.2 อัตราการให้ความร้อน เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากการไพโรไลซิส กล่าวคือ ถ้าอัตราการให้ความร้อนสูง ปริมาณสารระเหยจะถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็วถ่านที่ได้จะมีรูพรุนขนาดใหญ่ ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าถ่านที่ได้จากการให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำกว่า เพราะว่าถ่านที่ได้จากการคาร์โบไนซ์ด้วยอัตราเพิ่มอุณหภูมิสูง คาร์บอนจะเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่า ทำให้เกิดช่องว่างเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ เมื่อทำการกระตุ้นสารกระตุ้นจะเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่าย

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงผลของอัตราการให้ความร้อนที่มีต่อสมบัติของเม็ดถ่าน

Heating rate/ $^{\circ}\text{C min}^{-1}$	Mechanical strength of granule, %	Bulk density of granules g/cm^3	Pore volume of granules cm^3/g			
			Total	Micropores	Micropores	Micropores
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 : Jankoska , 1991

2.4.2.3 ตัวกลางของปฏิกิริยา จะมีผลกระทบต่อปฏิกิริยา ถ้าแก๊สและไอที่เกิดขึ้นระหว่างการไพโรไลซิสถูกพาออกไปอย่างรวดเร็ว โดยแก๊สที่เป็นตัวกลาง เช่น แก๊สไนโตรเจน หรือแก๊สจากการเผาไหม้ ถ้าตัวกลางเป็นแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ ปริมาณถ่านชาร์ที่ได้จะน้อยกว่าตัวกลางที่เป็นแก๊สไนโตรเจน แต่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับตัวกระตุ้นสูงกว่า เนื่องจากการเผาไหม้มีส่วนช่วยสร้างรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อนำไปกระตุ้นมีผลทำให้แก๊สกระตุ้น สามารถแทรกตัวเข้าไปในอนุภาคถ่านชาร์ได้ง่าย

โดยทั่วไปการคาร์โบไนซ์จะมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ 2 ช่วง คือ ช่วงอ่อนตัว (softening period) และช่วงหลังการอ่อนตัว (after softening period) ในช่วงการอ่อนตัวควรให้ความร้อนในอัตราที่ต่ำให้แก๊สหลุดออกจากโพรงภายในได้โดยไม่สลายตัวหรือเปลี่ยนรูปเป็นของแข็งอุดแน่นภายในโพรง และถ่านชาร์ที่ได้จะแน่นและแข็ง (จุฑามาส จิตต์เจริญ, 2544)

2.4.3 การกระตุ้น (Activation)

การกระตุ้น หมายถึง การทำให้คาร์บอนหรือถ่านมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิว และการทำให้ผิวถ่านมีความว่องไวมากขึ้น ได้พิจารณาความหมายของการกระตุ้นไว้ 3 ลักษณะ (ภัทรา ปัญญาวัฒนกิจ, 2540) คือ

1) เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวว่องไว (active surface area) โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไปและเกิดส่วนที่มีอำนาจดูดซับขึ้นมาแทน

2) เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวว่องไวในการดูดซับให้กับผิวที่มีอยู่แล้ว ซึ่งหมายถึงทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้น โดยจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ เพื่อให้มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น

3) เป็นการกำจัดสารอินทรีย์วัตถุหรืออนินทรีย์วัตถุต่างๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ (active center)

ในการผลิตถ่านกัมมันต์ต้องพยายามทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาของแก๊สช่วยกระตุ้นกับถ่านที่ผิวช้ากว่าอัตราการแพร่ของแก๊สเข้าไปในรูพรุน เพื่อให้การพัฒนาเกิดขึ้นตลอดทั่วทั้งพื้นผิวและรูพรุน กระบวนการกระตุ้นนี้ทำให้เลขออกซิเดชันของคาร์บอนเพิ่มขึ้น หรือเป็นการทำให้คาร์บอนที่ผิวของถ่านเกิดพันธะกับออกซิเจน

วัตถุดิบที่ใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่เป็นวัตถุดิบที่เหลือทิ้งจากการเกษตร คือ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนทั้งที่เป็นโซ่ยาวและเป็นวง เช่น ลิควิน และเซลลูโลส เป็นต้น เมื่อนำคาร์บอนในโซ่ จะเกิดการสร้างวงอะโรมาติก โดยอะตอมคาร์บอนซึ่งเดิมสร้างพันธะโดยใช้ orbital จากชั้น 2s จำนวน 2 ตัว และชั้น 2p จำนวน 2 ตัว จะเกิดการไฮบริไดเซชัน เปลี่ยนมาใช้ orbital จากชั้น 2s จำนวน 1 ตัว และชั้น 2p จำนวน 2 ตัว และมีอิเล็กตรอนอิสระจากชั้น 2p อีก 1 ตัว (sp^2 hybridization) จึงเกิดพันธะแบบซิกมา (sigma bond) กับคาร์บอนอะตอมที่อยู่ข้างเคียง 3 ตัวเรียงกันเป็นรูปสามเหลี่ยมในระนาบเดียวกัน และอิเล็กตรอนอิสระที่เหลือจะโคจรอยู่บน และล่างของระนาบ พร้อมทั้งเกิดพันธะแบบไพ (pi bond) ดังในรูป 2.3 ในที่สุดจะเกิดเป็นวงแหวนอะโรมาติกที่มีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ (resonance) ใต้ทั่วโครงสร้าง ซึ่งเรียกว่า วงเบนซิน หรือวงอะโรมาติก วงเบนซินแต่ละวงจะเชื่อมติดกันจนมีลักษณะเป็นแผ่น สำหรับโครงสร้างถ่านชาร์จะมีแผ่นของวงเบนซินนี้อยู่หลายแผ่น เรียงตัวกันเป็นชั้นๆ อย่างไม่มีระเบียบ ซึ่งการจัดเรียงตัวในลักษณะนี้จะเกิดแรงผลักระหว่างชั้นจากไพอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่อยู่บนและล่างของแต่ละชั้น ถ่านชาร์จะสร้างเสถียรภาพด้วยการใช้ไพอิเล็กตรอนสร้างพันธะเคมี โดยการดึงอะตอมแปลกปลอมอื่นเข้าสู่โครงสร้าง เช่น ไนโตรเจน ออกซิเจน หรือฟอสฟอรัส เป็นต้น

แต่การดึงอะตอมของออกซิเจนจากบรรยากาศจะง่ายที่สุด ดังนั้น จึงมักพบออกซิเจนในโครงสร้างถ่านชาร์เสมอ ดังรูปที่ 2.3 เช่น การเกิดเป็นวงเบนซินจากลิควิน ซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโซ่ยาวมาก และมักพบในวัสดุทางการเกษตรที่มีความแข็งและเหนียว การผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยซิงค์คลอไรด์ จะป้องกันไม่ให้ถ่านชาร์ที่เพิ่งเตรียมได้เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน โดยการห่อหุ้มโครงสร้างของวัตถุดิบด้วยซิงค์คลอไรด์ตั้งแต่ก่อนที่จะนำไปคาร์บอนไนซ์ ซึ่งจะช่วย

รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีโดยการเตรียมถ่านชาร์จากวัสดุทางการเกษตร
ที่มา : จุฑามาส จิตต์ เจริญ, 2544, หน้า 13

สำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยแก๊สออกซิไดซ์ เป็นการจัดเรียงโครงสร้างถ่านชาร์ที่มีเสถียรภาพแล้ว แต่อำนาจการดูดซับต่ำ ดังรูปที่ 2.4 (ก) เป็นภาพของการเกิดปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์ ก่อนการเกิดปฏิกิริยากระตุ้นอะตอมออกซิเจนของหมู่ไฮดรอกซิลจะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนน้อย เนื่องจากคาร์บอนในตำแหน่งที่ 1 มีความเป็นบวกจากผลของแรงดึงดูดทางไฟฟ้าของออกซิเจน เมื่อเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำ โดยใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งจะมีการกำจัดอะตอมของไฮโดรเจนออกจากโครงสร้าง เพื่อสร้างพันธะไพอิกพันธะหนึ่ง ทำให้เกิดวงเบนซินที่มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูง จึงช่วยเพิ่มความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในอะตอมของออกซิเจน เมื่อเกิดการดูดซับกับไอออน หรือโมเลกุลที่มีขั้วเป็นบวกจึงเกิดได้ดีขึ้น ปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์ยังหมายถึงการล้างโมเลกุลแปลกปลอมต่างๆ เช่น ทาร์ ออกจากบริเวณที่ใช้ในการดูดซับซึ่งเกิดในช่วงคาร์บอนัส ดังรูปที่ 2.4 (ข) เป็นภาพจำลองการกำจัดโมเลกุลของฟีนอล ซึ่งเป็นสารชนิดหนึ่งในน้ำมันทาร์ หมู่ไฮดรอกซิลของฟีนอลจะทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในวงเบนซินของฟีนอลลดลง เนื่องจากผลแรงดึงดูดทางไฟฟ้าของออกซิเจนตำแหน่งที่ 1 มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนน้อยลง ปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยไอน้ำ และความร้อนจะช่วยทำให้ฟีนอลหลุดออก จึงทำให้ออกซิเจนตำแหน่งที่ 1 มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น อำนาจการดูดซับจึงสูงขึ้น (สุโรชนี สุกุลดวงดี , 2545)

รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยการออกซิไดซ์
ที่มา : Mukerjee 1974 อ้างใน ภัทธา ปัญญวัฒน์กิจ , 2540 , หน้า 21

2.5 วิธีการกระตุ้นเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์

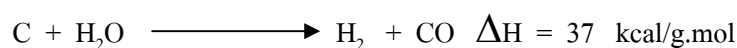
ในปี ค.ศ. 1983 Berl อ้างใน ภัทธา ปัญญวัฒน์กิจ , 2540 ได้แบ่งวิธีการกระตุ้นในการผลิตถ่านกัมมันต์ ได้ดังนี้

2.5.1 วิธีการกระตุ้นทางกายภาพ (physical activation)

กระบวนการนี้ใช้แก๊สเป็นตัวออกซิไดซ์ (oxidizing gas) เช่น ไอน้ำ อากาศ หรือคาร์บอนไดออกไซด์ไปทำการออกซิไดซ์น้ำมันดิน และอะตอมของคาร์บอนบางตัวในโครงสร้างผลึกในสถานะที่ควบคุมไว้ทำให้รูพรุน (pore) กว้างมากขึ้นและทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น

2.5.1.1 การกระตุ้นด้วยไอน้ำ (activation with steam)

ปฏิกิริยานี้ใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์คาร์บอนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็น ปฏิกิริยาคูดความร้อน (endothermic) ดังนั้นจึงต้องทำที่อุณหภูมิสูงประมาณ 760-950 องศาเซลเซียส ดังสมการ



อัตราการออกซิไดซ์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วแต่ไม่ควรให้อุณหภูมิสูงเกิน 1,000 °C เพราะปฏิกิริยาจะกลายเป็น diffusion controlled rate ซึ่งจะตอมของคาร์บอนที่อยู่ชั้นนอก จำนวนมากจะถูกเผาไหม้ ทำให้ขนาดและความพรุนของอนุภาคเล็กลง

2.5.1.2 การกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (activation with carbondioxide)

ปฏิกิริยานี้ใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนเช่นกันดังสมการ



จากค่า ΔH จะเห็นว่าปฏิกิริยานี้ต้องการพลังงานความร้อนมากกว่าวิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำ จึงต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าโดยใช้อุณหภูมิประมาณ 850-1100 °C อุณหภูมิที่ใช้ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ด้วยในทางเทคนิคการปฏิบัติแล้วจะใช้แก๊สเชื้อเพลิงเผาไหม้ซึ่งจะให้ทั้งไอน้ำเข้าไปด้วยเพื่อเป็นการกระตุ้นโดยใช้ทั้งสองวิธีร่วมกัน

2.5.1.3 การกระตุ้นด้วยอากาศ (activation with air)

ปฏิกิริยานี้ใช้ออกซิเจนในอากาศเป็นตัวออกซิไดซ์คาร์บอนทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังสมการ



การใช้อากาศเพื่อทำการกระตุ้นมีการใช้น้อยมากทั้งนี้เพราะว่า การควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในสภาวะที่ต้องการทำได้ลำบากกว่าชนิดดูดความร้อน อีกทั้งออกซิเจนจะทำให้ผิวของถ่านไหม้ไปทำให้เกิดการสูญเสียอย่างมาก

สำหรับการกระตุ้นทางกายภาพนี้ มีข้อดีคือ หลังจากกระตุ้นแล้ว สามารถนำไปใช้ได้ทันที ไม่ต้องมีปัญหาในการล้างสารที่อาจเป็นอันตราย ส่วนข้อเสียคือ ต้องใช้อุณหภูมิในการเผาสูงกว่าวิธีทางเคมีสำหรับรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ใช้จะเล็กกว่าชนิดที่ผลิตด้วยวิธีการทางเคมี รูพรุนมีขนาดประมาณ micropore ซึ่งเหมาะสำหรับดูดกลิ่น หรือ แก๊สพิษ

ตารางที่ 2.4 แสดงสภาวะสำหรับการทำให้เป็นถ่านและกระตุ้นสำหรับวัตถุดิบบางชนิด

วัตถุดิบ	อุณหภูมิและเวลาของการทำให้เป็นถ่าน (°C)	อุณหภูมิและเวลาของการกระตุ้น	สารที่ใช้กระตุ้น
กากน้ำตาล	110-120	800-1000	$\text{Ca(OH)}_2\text{Ca(PO}_4)_3$
ลิกไนต์	700 เวลา 1 ชม.	800 เวลา 1 ชม.	ไอน้ำ
ถ่านหิน	400-900	700-900	ไอน้ำ
ไม้	400-600 เวลา 2 ชม.	700 เวลา 1 ชม.	ไอน้ำ
กากปิโตรเลียม	100-400	900-920 เวลา 1-2 ชม. 900-950 เวลา 3-4 ชม.	ไอน้ำ
ขานอ้อย	480-500	800-950	ไอน้ำ
กะลามะพร้าว	300-700	700-1050 เวลา 0.5-1 ชม.	ไอน้ำ

ที่มา : Hassler , 1974

2.5.2 วิธีการกระตุ้นทางเคมี (chemical activation)

หลักการของการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีนี้ คือ เมื่อนำวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาผสมกับเกลืออนินทรีย์ด้วยอัตราส่วนต่างๆ แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิสูง อนุกรมที่จะทำให้อินทรีย์วัตถุสลายตัว เกลืออนินทรีย์จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การย่อยสลายอินทรีย์วัตถุให้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากเกลืออนินทรีย์เหล่านี้มีความคงทนต่อการสลายที่อุณหภูมิสูงๆ จึงยังคงสภาพหุ้มอยู่รอบๆ ถ่านและแทรกตัวอยู่ภายใน ทำให้การหดตัวของถ่านเกิดขึ้นได้จำกัด เมื่อนำมาสกัดเอาสารอนินทรีย์ออกก็จะเกิดช่องว่างหรือรูพรุน ซึ่งแต่เดิมเป็นที่ที่สารอนินทรีย์เคยอยู่ ข้อดีของการกระตุ้นทางเคมี คือ ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีรูพรุนสูง และแทรกซึมอยู่ทั่วเนื้อถ่าน ใช้อุณหภูมิในการผลิตไม่สูง ส่วนข้อเสีย คือ ต้องล้างสารเคมีที่ใช้กระตุ้นออกให้หมดไม่ให้เหลือตกค้างเพื่อความปลอดภัยในการนำไปใช้งาน จึงเป็นการสิ้นเปลืองแรงงานและเวลา สารเคมีที่ใช้มีราคาค่อนข้างสูง นอกจากนี้สารเคมีที่ใช้บางชนิดมีฤทธิ์กัดกร่อนภาชนะ หรือเครื่องมือที่ใช้ในการผลิต ทำให้อายุการใช้งานสั้นลง (จุฑามาส จิตต์เจริญ , 2544) สารเคมีที่ใช้กระตุ้นได้แก่

กรดบอริก (H_3BO_3)

เกลือแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2)

แคลเซียมไฮดรอกไซด์ Ca(OH)

แคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca(PO}_3)_2$)

โปตัสเซียมไธโอไซยาเนต ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_3$)

เกลือแมงกานีสคลอไรด์ (MnCl_2)

แมงกานีสซัลเฟต (MnSO_4)

กรดไนตริก (HNO_3)

ไซยาไนด์ (CN^-)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
ปูนโดโลไมต์ ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)	โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4)
เฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_3)	กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)
กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4)	ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl_2)

2.6 การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นตัวกระตุ้น

ZnCl_2 มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 136.28 มักอยู่ในรูปไฮเดรต

ZnCl_2 ที่ให้อยู่ในรูปของสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง ถ้าเป็นสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง จะอยู่ในรูป สารประกอบเชิงซ้อน $[\text{ZnCl}_3]^-$ หรือ $[\text{ZnCl}_4]^{2-}$ สารละลายเข้มข้นของ ZnCl_2 มีความเป็นกรดสูง สามารถละลายแป้ง, เซลลูโลสและสารอินทรีย์ต่างๆ ได้ เชื่อกันว่าวัตถุดิบที่นำมาผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีใช้ ZnCl_2 ควรจะมีเซลลูโลสมาก เช่น ชานอ้อย

แม้ว่ากลไกการเกิดปฏิกิริยายังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด แต่ก็ได้นำ ZnCl_2 มาใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ พบว่าการใช้ ZnCl_2 คาร์บอนร่วมกับไม้, เซลลูโลสหรือฟิท โดยใช้อัตราส่วนของวัตถุดิบ : ZnCl_2 = 1:6 เติมน้ำเท่าที่จำเป็น นำไปอบแห้งและคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 400-900 °C หรือใช้วัตถุดิบ : สารละลาย ZnCl_2 เข้มข้น=1:0.5 ถึง 4 (วัตถุดิบที่ใช้คือ ผงฟิทหรือผงจีเลี่ย) มีการเติมกรดไฮโดรคลอริกหรือกรดฟอสฟอริกด้วย จากนั้นจึงนำไปอบแห้งและคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 400-900°C เช่นกัน หลังจากนั้น ถ่านที่ได้จำเป็นต้องนำไปล้างด้วยน้ำและกรด HCl เจือจาง เพื่อเอา ZnCl_2 ที่เหลือและสาร Basic zinc chlorides ที่เกิดในปฏิกิริยาออกไป, ZnCl_2 ที่ใช้แล้วสามารถนำมาใช้ใหม่ได้อีก จากการศึกษาพบว่าการใช้ปริมาณ ZnCl_2 เพิ่มขึ้น จะช่วยเพิ่มคุณภาพของถ่านกัมมันต์ให้ดีขึ้น (สุโรชนี สกลดวงดี, 2545)

Burrage อ้างใน สุโรชนี สกลดวงดี 2545 ได้ให้ความเห็นว่า การผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุที่มาจากพืช (vegetable matter) ด้วยสารดูดน้ำ ทำให้มีความสามารถในการละลายลิกนินหรือเซลลูโลสของสารกระตุ้นที่ใช้ ดังนั้น วัสดุที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบจึงควรมีปริมาณลิกนิน ซึ่งต่อมา Mukherjee อ้างใน สุโรชนี สกลดวงดี 2545 ได้ทดลองผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว ซึ่งมีปริมาณลิกนินร้อยละ 32.4 และเปลือกถั่วลิสง (groundnut hull) ซึ่งมีปริมาณลิกนินร้อยละ 20.7 พบว่าที่ภาวะเดียวกัน ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกะลามะพร้าว มีความสามารถในการดูดซับสูงกว่า ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากเปลือกถั่วลิสง นอกจากนี้ยังพบว่า ZnCl_2 สามารถละลายกำมะถันออกมาจากวัตถุดิบในรูปของ ZnS ด้วย

2.7 โครงสร้างผลึกของถ่านกัมมันต์

ผลจากการศึกษาโครงสร้างของถ่านกัมมันต์โดยใช้การกระจายตัวของรังสีเอกซ์ พบว่าถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างคล้ายกับแกรไฟต์ เพียงแต่ไม่สมบูรณ์เท่ากับแกรไฟต์

โครงสร้างของแกรไฟต์ ดังรูปที่ 2.5 อาจเรียกว่าโครงสร้างที่เป็นระนาบ (layered-structure) โดยในแต่ละชั้นของคาร์บอนจะยึดกันด้วยโคเวเลนต์บนชนิดในรูปของวงหกเหลี่ยม (hexagonal) คล้ายๆกับวงหกเหลี่ยมของสารประกอบอะโรมาติก ระยะระหว่างคาร์บอนอะตอม ยึดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals forces) และมีการจัดเรียงของอะตอมคาร์บอนแบบ ABAB...หรือแบบ ABCABC (สุโรชินี สกุดดวงดี ,2545)

ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นพบว่าโครงสร้างถ่านกัมมันต์มีลักษณะคล้ายคลึงกับผลึกของแกรไฟต์ แต่ขาดความเป็นระเบียบ (microcrystalline or amorphous) กล่าวคือ โครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะประกอบด้วยแต่ละชั้นที่มีลักษณะคล้ายชั้นของแกรไฟต์ (graphite like layer) เรียงตัวซ้อนกันอยู่ ตั้งแต่ 3-30 ชั้นต่อความหนาประมาณ 10-100 อังสตรอม ซึ่งระนาบนี้จะไม่เรียงตัวกันอย่างสมบูรณ์ มุมจะไม่แน่นอน และแต่ละระนาบซ้อนกัน อย่างไม่มีระเบียบ ประมาณกันว่าระยะห่างแต่ละระนาบ ประมาณ 3.6 อังสตรอมซึ่งมากกว่าของแกรไฟต์

รูปที่ 2.5 การจัดเรียงของอะตอมคาร์บอนในแกรไฟต์ว่ามีการจัดเรียงเป็นชั้น

ที่มา : Jankowska , 1991 อ้างใน สุโรชินี สกุดดวงดี , 2545 , หน้า 11

2.8 โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ (Structure of active carbon)

ในการกระตุ้นจะทำให้ถ่านที่ได้จากการคาร์โบไนซ์มีความพรุนมากขึ้นเนื่องจากการสูญเสียสารประกอบคาร์บอนระหว่าง ช่องว่างผลึกคาร์บอนซึ่งมีการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอม แตกต่างกันในผลึกของแกรไฟต์ ดังรูปที่ 2.6 โดยรูพรุนที่เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น เพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ การกระตุ้นที่เหมาะสม คือ การทำให้มีความพรุนไม่ใช่เป็นการกระตุ้นให้ ขนาดใหญ่

19

รูปที่ 2.6 การจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมในผลึกของแกรไฟต์

ที่มา : Jankoska , 1991 , อ้างใน จุฑามาศ จิตต์เจริญ, 2544, หน้า 16

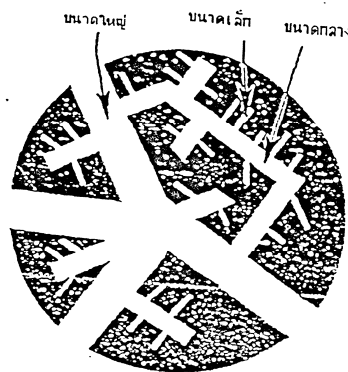
โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ขึ้นอยู่กับสถานะการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิ และเวลาในการให้ความร้อน นอกจากนี้ยังขึ้นกับชนิด และความบริสุทธิ์ของวัตถุดิบที่ใช้ โดยอุณหภูมิถือว่าเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเรียงตัวของผลึก โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 1,000 ตารางเมตรต่อกรัม และบางครั้งมีจำนวนมากถึง 1,500 ตารางเมตรต่อกรัม ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของขนาด และรูปร่างของรูพรุน จึงทำให้มีผลต่อกลไกการดูดซับ ดังนั้น จึงจำแนกชนิดของรูพรุนตามขนาดของรูพรุนออกเป็น 3 ประเภท (จุฑามาศ จิตต์เจริญ , 2544) ได้ดังรูปที่ 2.7 คือ

1. **รูพรุนขนาดใหญ่ (macropore)** มีเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนมากกว่า 50 นาโนเมตร มีปริมาตรของรูพรุนขนาดใหญ่อยู่ระหว่าง 0.2-0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และมีพื้นที่ผิวจำเพาะไม่เกิน 0.5 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับรูพรุนชนิดอื่นแล้ว รูพรุนขนาดใหญ่มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยมาก ดังนั้น รูพรุนประเภทนี้จึงไม่มีความสำคัญต่อการดูดซับเพียงแต่ทำหน้าที่เป็นทางส่งผ่านอนุภาคเข้าไปในรูพรุนที่เล็กกว่า

2. รูพรุนขนาดกลาง (mesopore) หรือที่เรียกว่า transitional pores มีเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน 2-25 นาโนเมตร มีปริมาตรรูพรุนขนาดกลางประมาณ 0.1-0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม มีพื้นที่ผิวจำเพาะระหว่าง 20-100 ตารางเมตรต่อกรัม ตัวอย่างสารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลางได้แก่ ซิลิกา เจล (silica gel) อะลูมินา เจล (alumona gel)

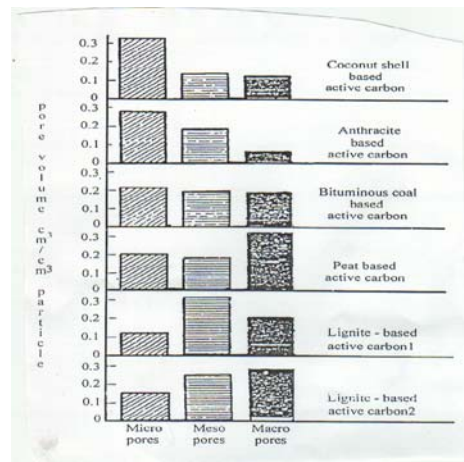
3. รูพรุนขนาดเล็ก (micropore) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนน้อยกว่า 2 นาโนเมตร มีปริมาตรรูพรุนอยู่ระหว่าง 0.2-0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า 100 ตารางเมตรต่อกรัม พลังงานในการดูดซับของรูพรุนขนาดเล็กมีมากกว่ารูพรุนขนาดกลาง หรือผิวอื่นที่ไม่มีรูพรุน ดังนั้น รูพรุนขนาดเล็กจึงมีความสำคัญที่สุดในการดูดซับ เนื่องจากมีพื้นที่การดูดซับและพลังงานดูดซับ (adsorption energy) มากที่สุด ทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้นมากที่ความดันต่ำ ๆ

ถ่านกัมมันต์จะประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมากมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน รูพรุนเหล่านี้จะลึกเข้าไปในเนื้อของถ่านกัมมันต์ อย่างไม่เป็นระเบียบและความลึกไม่สม่ำเสมอ ลักษณะของรูพรุนเปรียบได้กับหลอดแก้วขนาดเล็ก (capillary tube) ที่เสียบเข้าไปในเนื้อถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปจะเรียกรูพรุนเหล่านี้ตามขนาด ดังรูปที่ 2.7 คือ ขนาดเล็ก (micropores) มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเล็กกว่า 2 นาโนเมตร , ขนาดกลาง (mesopores) มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 ถึง 50 นาโนเมตร และรูพรุนขนาดใหญ่ (macropores) มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 50 นาโนเมตร รูพรุนขนาดเล็กมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ เชื่อว่าปริมาณของรูพรุนแต่ละขนาด หรือที่เรียกกันว่าการกระจายขนาดของรูพรุน (pore size distribution) จะขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 เปรียบเทียบขนาดและการวางตัวของรูพรุนขนาดต่าง

ที่มา : สุโรชนี สุกดวงดี , 2545 , หน้า 12



รูปที่ 2.8 เปรียบเทียบการกระจายขนาดของรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากวัตถุดิบต่างๆ

ที่มา : Bansal and coworker , 1988. อ้างใน ภัทรา ปัญญวัฒน์กิจ , 2540 , หน้า 35

รูพรุนส่วนใหญ่จะเกิดในช่วงการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์ ซึ่งเป็นการกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ ออกจากช่องว่างของถ่านที่ใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้น รวมทั้งเกิดการจัดเรียงและเคลื่อนย้ายอะตอมหรือกลุ่มอะตอม เพื่อทำให้เกิดช่องว่างที่มีอำนาจในการดูดซับ รูพรุนที่มีขนาดใหญ่ จะทำหน้าที่เป็นเพียงทางผ่านของสารถูกดูดซับเข้าไปยังรูพรุนขนาดเล็ก จึงไม่มีผลต่อความจุในการดูดซับ แต่จะมีผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับ สำหรับรูพรุนขนาดกลางนั้นสามารถดูดซับโมเลกุลของเหลวได้บ้าง และมีสำคัญมากขึ้นเมื่อดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์สูงๆ โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เกรดการค้า จะมีรูพรุนขนาดกลางประมาณ 200 - 300 ตารางเมตรต่อกรัม สำหรับรูพรุนขนาดเล็กมีหน้าที่ในการดูดซับ จึงมีผลต่อความจุในการดูดซับ โดยเฉพาะการดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ ถ่านกัมมันต์จะมีรูพรุนขนาดเล็กประมาณร้อยละ 90 - 95 ของพื้นที่ผิวทั้งหมด นอกจากนี้ยังพบว่าความจุในการดูดซับยังขึ้นกับลักษณะและธรรมชาติของผิวด้วย กล่าวคือถ้าผิวของถ่านเป็นเพียงระนาบพื้นฐาน (basal planes) ซึ่งไม่มีฟังก์ชันอื่นๆ การดูดซับจะเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์หรืออาจเกิดจากไฟอิลิกตรอน แรงยึดเหนี่ยวทั้งสองเป็นแรงที่ค่อนข้างอ่อน แม้ว่าจะดูดซับได้ แต่ก็มีโอกาสที่จะหลุดออกได้ง่าย แต่ถ้าเป็นผิวบริเวณที่มีหมู่ฟังก์ชันการดูดซับจะเกิดจากแรงที่แข็งแรง โอกาสที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะหลุดออกจึงมีน้อยกว่าหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ มี 2 ชนิดคือ พวกออกไซด์ของเบส ซึ่งพบมากในถ่านกัมมันต์ที่ผลิตที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400-500 °C และพวกออกไซด์ของเบส ซึ่งพบมากในถ่านกัมมันต์ที่ผลิตที่อุณหภูมิประมาณ 800-1000 °C (สุโรชินี สกุลดวงดี , 2545)

2.9 โครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์เตรียมจากถ่านที่ได้จากเผาสารอินทรีย์ด้วยความร้อน (pyrolysis) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1000°C ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่าการคาร์โบไนซ์ ซึ่งจะต่อมต่าง ๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอน ได้แก่ ออกซิเจน, ไนโตรเจน และไฮโดรเจนจะถูกกำจัดออกในรูปของก๊าซ อะตอมคาร์บอนที่เหลือจะจัดเรียงเป็นชั้น ๆ แต่ละชั้นจะประกอบด้วยวงอะโรมาติก (aromatic ring) เชื่อมโยงกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ทำให้เกิดช่องว่างหรือโพรง ซึ่งเป็นที่อยู่ของพวกทาร์ และสารอื่น ๆ ที่ได้จากการเผา สลาย ช่องว่างรูพรุนเหล่านี้จะกลายเป็นรูพรุนที่มีความสามารถในการดูดซับด้วยกระบวนการที่เรียกว่า การกระตุ้น โดยการล้างพวกทาร์และสารต่างๆ ที่ได้จากการเผา สลายออกจากช่องว่าง หรือโพรง และจะสร้างหมู่ฟังก์ชันขึ้นขึ้นมาแทน ดังนั้นโครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์มีผลต่อความสามารถในการดูดซับด้วย (ภัทรา ปัญญวัฒน์กิจ , 2540)

โดยทั่วไปผิวของถ่านกัมมันต์เกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันชนิดต่างๆ ซึ่งเกิดจากอะตอมของคาร์บอน ออกซิเจน ที่เรียกว่า ผิวออกไซด์ของถ่านกัมมันต์ สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท (จุฑามาศ จิตต์เจริญ , 2544) คือ

2.9.1 ชนิดที่เป็นกรด

มักเกิดในถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นที่อุณหภูมิไม่สูงนัก คือ ประมาณ 400 ถึง 500°C หมู่ฟังก์ชันที่เกาะอยู่บนผิวถ่านกัมมันต์จะมีสมบัติคล้ายกรด ได้แก่ Carbonyls, Phenols, Lactones, Aldehyde, Ketones, Quinones, Hydroquinone และ Anhydride เป็นต้น ดังรูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์แบบนี้ค่อนข้างเสถียรแม้จะอยู่ในสุญญากาศ โดยทั่วไปจะเสถียรที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200°C ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้เล็กน้อยจะสลายตัว เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ และถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้มากๆ จะเกิดการสลายตัวให้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจนและตัวอย่างปฏิกิริยาการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่มีผิวเป็นกรด

รูปที่ 2.9 ตัวอย่างหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดบนผิวถ่านกัมมันต์

ที่มา : Suzuki, 1990, อ้างใน จุฑามาศ จิตต์เจริญ , 2544, หน้า 19

รูปที่ 2.10 ตัวอย่างปฏิกิริยาของถ่านกัมมันต์ที่มีผิวเป็นกรด
ที่มา : Mutton, 1971, อ้างใน จุฑามาศ จิตต์เจริญ , 2540 , หน้า 19

2.9.2 ชนิดที่เป็นด่าง

เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 - 900 °C หมู่ฟังก์ชันที่เกาะอยู่บนผิวของถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับโมเลกุลกรดได้ดี ได้แก่ ตัวอย่างปฏิกิริยาการดูดซับโมเลกุลกรดของถ่านกัมมันต์ที่มีผิวเป็นด่าง

รูปที่ 2.11 ตัวอย่างปฏิกิริยาการดูดซับโมเลกุลด้วยถ่านกัมมันต์ที่มีผิวเป็นด่าง
ที่มา : Mutton, 1971, อ้างใน จุฑามาศ จิตต์เจริญ , 2540, หน้า 19

2.10 ทฤษฎีการดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นการแยกองค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายของเหลวหรือแก๊ส โดยให้สารละลายหรือแก๊สผสมไหลสัมผัสกับตัวดูดซับ ซึ่งอาจเป็นของเหลวหรือของแข็ง ตัวดูดซับชนิดหนึ่งๆอาจมีความสามารถดูดซับองค์ประกอบต่างๆในสารละลายต้องเลือกชนิดตัวดูดซับให้เหมาะสม ตัวอย่างของตัวดูดซับ เช่น silica gel และถ่านกัมมันต์ เป็นต้น (จุฑามาศ จิตต์เจริญ , 2544)

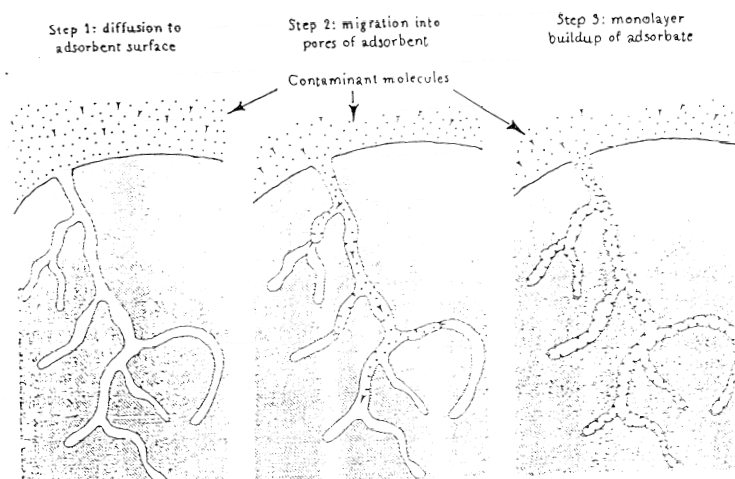
2.10.1 กลไกการดูดซับ (mechanism of adsorption)

เนื่องจากการดูดซับเป็นการถ่ายเทมวลสาร (mass transfer) จากก๊าซ หรือ ของเหลว มายังของแข็ง หรือของเหลว การดูดซับเกิดขึ้นเป็น 3 ระยะติดต่อกัน (พงค์ศักดิ์ โอหารส , 2539) ดังรูปที่ 2.12

ระยะที่ 1 โมเลกุลของสิ่งสกปรก (adsorbate) ในน้ำเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของ เม็ดถ่าน

ระยะที่ 2 โมเลกุลของสิ่งสกปรกจะฟุ้งกระจาย(diffusion)เข้าไปในรูพรุนของเม็ดถ่าน

ระยะที่ 3 เกิดการดูดซับในรูพรุนนี้ระหว่างสิ่งสกปรกและพื้นที่ผิวของเม็ดถ่านซึ่ง อาจจะดูดซับด้วยแรงทางฟิสิกส์ หรือเคมี หรือทั้งสองอย่างร่วมกัน



รูปที่ 2.12 แสดงถึงกลไกการดูดซับสารของถ่านกัมมันต์

ที่มา : Gergova .K . (1993) . อ้างใน พงค์ศักดิ์ โอหารส , 2539, หน้า 25

2.10.2 ปรัชญาการดูดซับของถ่านกัมมันต์

เป็นปรัชญาการที่โมเลกุลของสารไปเกาะอยู่บนผิวหน้าของของแข็งหรือของเหลว สารที่ไปเกาะเรียกว่า สารที่ถูกดูดซับ และของแข็งหรือของเหลวที่มีพื้นผิวให้สารนั้นเกาะเรียกว่า สารดูดซับ (สุโรชินี สกุดวงดี , 2545) แบ่งได้เป็น 2 ชนิด ดังนี้

1. การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับองค์ประกอบที่ถูกดูดซับ ซึ่งมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่าง

การดูดซับทางกายภาพมีลักษณะ (พงศ์ศักดิ์ โอชารส , 2539) ดังนี้

ก. เป็นแรงดึงดูดกันทางไฟฟ้าสถิตย์ เกิดระหว่างโมเลกุลที่เป็นโพลาร์กับโพลาร์ คือ โมเลกุลของ adsorbate เป็นชนิดโพลาร์และของ adsorbent ต้องเป็นโพลาร์ด้วย ชนิดนอนโพลาร์กับนอนโพลาร์และโพลาร์กับนอนโพลาร์ การเกาะจับของโมเลกุลชนิดต่างๆ เหล่านี้เกิดขึ้นจากผล 3 อย่าง ดังรูปที่ 2.13

รูปที่ 2.13 แสดงถึงการดูดซับสารของถ่านกัมมันต์ในลักษณะต่าง ๆ กันด้วยแรงทางกายภาพ

ที่มา : Gergova . K , 2993 , อ้างใน พงศ์ศักดิ์ โอชารส , 2539 , หน้า 26

1) โพลาร์กับโพลาร์โมเลกุลเกิดจาก orientation effect คือแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงข้าม

2) นอนโพลาร์กับนอนโพลาร์โมเลกุล เกิดจาก dispersion effect ซึ่งเป็นผลมาจากการอาศัยหลักการตรงที่ว่า นอนโพลาร์โมเลกุลสามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลโมเลกุลได้ ถ้า

3) โพลาร์และนอนโพลาร์โมเลกุลเกิดจาก induce effect ซึ่งเกิดจากการเหนี่ยวนำของโพลาร์โมเลกุลเข้ามาใกล้กับนอนโพลาร์โมเลกุล เหนี่ยวนำให้เกิดประจุตรงข้ามแล้วดึงดูดกัน

ข. การเกาะจับเป็นแรงอย่างอ่อนๆ ซึ่งเรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ เนื่องจากเป็นแรงอ่อนจึงสามารถเปลี่ยนกลับไปกลับมาได้

2. การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption หรือ chemisorption) เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูงซึ่งแตกต่างกับการดูดซับทางกายภาพ โดยที่จะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวดูดซับกับองค์ประกอบที่ต้องการดูดซับสร้างสารประกอบระหว่างตัวถูกดูดซับ ทำให้ปริมาณของตัวดูดซับลดลง จะให้ความร้อนออกมาสูงเพราะเกิดปฏิกิริยาเคมี ไม่ขึ้นกับความดันมากนัก และดูดตัวถูกดูดซับไว้ในปริมาณน้อยต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ เนื่องจากการดูดซับโดยปฏิกิริยาทางเคมีบนพื้นผิวนั้นเกิดขึ้นได้บนพื้นที่ผิวบางแห่งเท่านั้น แต่การดูดซับทางกายภาพเกิดขึ้นได้บนพื้นที่ผิวทั้งหมด และการดูดซับแบบนี้จะไม่สามารถเกิด desorption ได้เพราะองค์ประกอบที่ถูกดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมี และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบผันกลับไม่ ปรากฏการณ์นี้จะขึ้นกับองค์ประกอบและสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม ซึ่งพบว่าองค์ประกอบบางชนิดที่อุณหภูมิปกติจะไม่เกิดการดูดซับทางเคมี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิก็สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้ (จุฑามาส จิตต์เจริญ , 2544)

การดูดซับทางเคมีมีลักษณะ ดังนี้

ก. เป็นชนิดพันธะเคมี (chemical bond) เกิดจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันหรือให้อิเล็กตรอนไปเลยหรือเกิดจากการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนมีผลทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวแข็งแรงกว่าแรงฟิสิกส์

ข. ไม่สามารถเปลี่ยนกลับไปกลับมาได้ เพราะยึดเหนี่ยวด้วยแรงที่มาก มีการจับกันเป็นสารประกอบเคมี

2.11 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การดูดซับ (effects on adsorption)

ในระหว่างที่มีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลของตัวถูกละลายจะถูกกำจัดออกจากน้ำและไปเกาะติดอยู่บนถ่านกัมมันต์ หรือ สารดูดติดผิว อื่นๆ โมเลกุลส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่ในโพรงของคาร์บอนและมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาคาร์บอน

อัตราเร็วและขีดความสามารถของการดูดติดผิวของคาร์บอนขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ (พงศ์ศักดิ์ โอหารส , 2539) ดังนี้

2.11.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของคาร์บอน

คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของคาร์บอน คือ ขนาด และพื้นที่ผิว ขนาดของคาร์บอนมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วของการดูดติดผิวในทางลบ กล่าวคือ อัตราดูดติดผิวเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดคาร์บอน ดังนั้น คาร์บอนผงจึงมีอัตราเร็วในการดูดติดผิวสูงกว่าคาร์บอนเม็ด ส่วนพื้นที่ผิวของคาร์บอนนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขีดความสามารถในการดูดติดผิว (adsorptive capacity) นั่นคือ คาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลได้มากกว่าคาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวน้อย อนึ่งเนื่องจากพื้นที่ผิวส่วนใหญ่ของคาร์บอน ได้มาจากช่องว่างหรือโพรงภายใน ขนาดของคาร์บอนจึงมีบทบาทน้อยในการกำหนดพื้นที่ผิว คาร์บอนทั้งแบบผงและแบบเม็ดจึงมีพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักใกล้เคียงกันซึ่ง หมายถึงการมีความสามารถในการดูดติดผิวใกล้เคียงกัน (แต่อัตราไม่เท่ากัน)

2.11.2 ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดติดบนผิวคาร์บอน

เมื่อมีการดูดติดผิวเกิดขึ้น โมเลกุลจะถูกดึงออกจากน้ำ และไปเกาะติดบนผิวของของแข็งสารที่ละลายน้ำได้ (หรือแตกตัวเป็นไอออน) ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่น จึงเป็นสารที่ยากต่อการดูดติดผิว สารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อยมักสามารถเกาะติดบนผิวคาร์บอนได้ดียิ่งขึ้นตาม เกณฑ์ที่กล่าวมานี้ก็ไม่ได้เป็นจริงเสมอไปทั้งนี้เพราะสารที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดเกาะติดผิวคาร์บอนได้ยากแต่ในทางตรงกันข้าม การดูดติดผิวอาจเกิดขึ้นได้ง่ายกับสารที่ละลายน้ำได้ดีด้วยเหตุนี้จึงไม่อาจกล่าวได้อย่างเต็มที่ว่ามีความสัมพันธ์อย่างแน่นนอนในเชิงปริมาณระหว่างความสามารถในการดูดติดผิว และสามารถในการละลายน้ำ

2.11.3 ขนาดของสารที่ถูกดูดติดบนผิวของคาร์บอน

ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดติดผิวซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในโพรง (pores) ของคาร์บอน จากการวิจัยพบว่าการดูดติดผิวจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อมีสารขนาดเล็กกว่าโพรงเล็กน้อย (พอดีเข้าไปในโพรงได้) ทั้งนี้เพราะว่าแรงดึงดูดระหว่างสารและคาร์บอนจะมีค่ามากที่สุดโมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในโพรงก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจึงถูกดูดเข้าไป

2.11.4 ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)

ถ้าค่าพีเอชลดลงอัตราการดูดซับจะเร็วและมาก เพราะพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและ การละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อการดูดซับด้วย นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่เพิ่มมากขึ้นยังสามารถเกาะติดผิวคาร์บอนได้ดีทำให้คาร์บอนมีสภาพเป็นกลาง (nutralized) เสมอเนื่องจากคาร์บอนเป็นนอนโพลาร์ค่อนข้างจะลบเล็กน้อย จึงทำให้โมเลกุลนอนโพลาร์ของสารในน้ำมาเกาะที่ผิวของคาร์บอนได้ดีขึ้น

2.11.5 อุณหภูมิ (temperature)

อุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราเร็วในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการดูดซับติดผิวจะลดลง เนื่องจากกระบวนการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน

2.12 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับสีของถ่านกัมมันต์

การดูดซับสีในสารละลายด้วยถ่านกัมมันต์ ก็เป็นที่นิยมใช้กันมานานแล้ว และเครื่องมือที่ใช้วัดปริมาณสี คือ การใช้ spectrophotometer และประการสำคัญการเลือกใช้ถ่านกัมมันต์ต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับสารที่จะดูดซับ ทั้งนี้เพราะว่าถ่านกัมมันต์ตัวหนึ่งๆ ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้กับสารทุกชนิด ดังรูปที่ 2.14

รูปที่ 2.14 ความสามารถในการดูดซับสีของถ่านกัมมันต์ 5 ชนิด

ที่มา : Hassler , 2974 , อ้างใน ภัทธา ปัญญวัฒน์กิจ , 2540 , หน้า 42

2.12.1 พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์

โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนเชื่อมโยงกันด้วยรูพรุน ลักษณะเหมือนตาข่ายมีรูปร่างแตกต่างกันออกไป พบว่าเมื่อใช้เวลากระตุ้นเพิ่มขึ้น surface area จะสูงขึ้น ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมี ความสามารถในการดูดซับ(adsorptive power) เพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 2.5 เมื่อกระตุ้นถ่านที่ 30 นาที ได้ถ่านกัมมันต์มี surface area 815 ตร.ม./ก. มี ความสามารถในการดูดซับได้ aniline blue 0.14 กรัม/กรัม แต่ถ้าเพิ่มเวลาในการกระตุ้นเป็น 45

ตารางที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของเวลาการกระตุ้นที่มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์กับค่าการดูดซับ

Time of activation ¹ minutes	Surface area m ² /g Carbon	Adsorption ²	
		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 . อ้างใน ภัทรา ปัญญวัฒน์กิจ , 2540 , หน้า 43

¹ Air activation of acid-wash black-ash at 550 °C

² Gram adsorbed per gram carbon at an equilibrium on solution of 0.1 g/l

ตารางที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์กับความสามารถในการดูดซับไอโอดีน และโมลาส

Power Surface area m ² /g CarbonW ^a	Adsorption ^b	
	Iodine	Molass collour
770	0.60	0.20
902	0.62	1.6

ที่มา : Hassler , John W., 1963 : 216. อ้างใน ภัทรา ปัญญวัฒน์กิจ , 2540 , หน้า 44

^a : Anthracite pre-roasted with alkali , then wased and steam activation at 75 °C

^b : Iodine adsorption expressed as g iodine/g carbon ; molasses adsorption as colour unit adsorbed / g carbon

Gergova , K , (1993) อ้างใน ภัทรา ปัญญวัฒน์กิจ , (2540) ได้ทำการผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุทางการเกษตร แบบชั้นเดียว คือ ทำการไพโรไลซิสและกระตุ้นด้วยไอน้ำอิมด้วยด่างในอุปกรณ์ตัวเดียวกัน พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากวัตถุดิบต่างชนิดกันจะให้พื้นที่ผิวรูพรุนแตกต่างกัน และเมื่อนำมาศึกษาหาความสามารถในการดูดซับ ก็จะทำให้ค่าแตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ความสามารถในการดูดซับ บนผิวถ่านกัมมันต์จากวัตถุดิบชนิดต่างๆ

วัตถุดิบ	Surface area, cm ² /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	600	62
Iztok		

ที่มา : Gergova , K.et al., 1993, 329, อ้างใน ภัทรา ปัญญวัฒน์กิจ , 2540 , หน้า 45

2.12.2 pH ของสารละลาย

Seco , Aurora et al . (1977) . อ้างใน ภัทรา ปัญญวัฒน์กิจ . (2540) . ได้ทำการทดลองการดูดซับ Cu และ Ni บนถ่านกัมมันต์ พบว่าการกำจัด Ni และ Cu ขึ้นกับ pH ของสารละลาย และสามารถกำจัด Cu ตั้งแต่ 0 ถึง 100% ได้ในช่วง pH แคบ คือประมาณ 2-6.5 สำหรับ Cu และ pH = 4-7 สำหรับ Ni แสดงดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ความสามารถในการดูดซับ Cu และ Ni บนถ่านกัมมันต์ (Darco 12-20 Mesh) ที่ 20 °C

Initial metal , mg/g (GAC)	Metal removed , mg/g (GAC)			
	pH			
	4	5	6	7
Cu	0.30	0.24	0.30	0.30
	0.60	0.43	0.59	0.60
	1.21	0.71	1.16	1.19

Initial metal , mg/g (GAC)	Metal removed , mg/g (GAC)			
	pH			
	4	5	6	7
Cu	2.48	1.08	2.22	2.33
	0.28	0.03	0.19	0.26
	0.54	0.05	0.31	0.45
	1.17	0.07	0.51	0.85
Ni	2.25	0.09	0.73	1.35

ที่มา : Seco, Aurora et al ., 1997 : 27 . อ้างใน ภัทรา ปัญญวัฒน์กิจ , 2540 , หน้า 46

2.12.3 อุณหภูมิ และเวลาในการสัมผัส (temperature and contact time)

จากการศึกษาการกำจัดตะกั่ว (Pb) จากน้ำโดยการดูดซับด้วย kaolinitic clay ของ Faraday F.O. (1996) . อ้างใน ภัทรา ปัญญวัฒน์กิจ , (2540) พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารละลาย จาก 30 ถึง 50 °C การดูดซับตะกั่วจะเพิ่มขึ้นจาก 5.203 เป็น 8.612 มก./กรัม ที่ pH 5.5 ที่ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น 10 mg/l และค่า adsorption capacity ของตะกั่วมีค่าสูงสุด ณ อุณหภูมิ 50°C

Gupta , G.S. et al (1988) . อ้างใน ภัทรา ปัญญวัฒน์กิจ , (2540) . ได้ทำการศึกษา การกำจัดสี omeca chrome red ME ด้วย fly ash พบว่า ที่เวลาสมดุล 120 นาที สำหรับแต่ละความเข้มข้นของสี การกำจัดสีจะลดลงจาก 99 % เป็น 69 % เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย เพิ่มขึ้นจาก 5 เป็น 20 มก./ลิตร ที่ 300 °C pH = 4.2

2.12.4 ผลของขนาดอนุภาค

การกำจัดสีจะเพิ่มขึ้นขนาดอนุภาคของ fly ash ลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิวรูพรุน จากการดูดซับของสีจากสารละลายเข้มข้น 10 มก./ล. พบว่าจะเพิ่มขึ้น จาก 64/91 เมื่อลดขนาดอนุภาคของ จาก 125 เป็น 53 ไมโครเมตร ที่ 30°C

2.13 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีคุณสมบัติในการดูดซับที่ดี จึงถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านการฟอกสีและแต่งรสสารได้หลายชนิด โดยมีการประมาณกันว่ามีถึงร้อยละ 60 ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตขึ้นได้เป็นถ่านกัมมันต์ชนิดผง ซึ่งนำไปใช้กับสารที่เป็นของเหลว ส่วนที่เหลือจะเป็นถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด ซึ่งนำไปประยุกต์ใช้กับสารที่เป็นแก๊ส อุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่นำถ่านกัมมันต์ไปใช้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

2.13.1 ประเภทที่ใช้ในการดูดซับของเหลว (liquid phase carbon)

ซึ่งถ่านกัมมันต์ถูกนำไปใช้ในสารละลายหรือของเหลวในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้แก่

1) อุตสาหกรรมน้ำตาล นิยมใช้ในการฟอกสีน้ำตาล และทำให้น้ำตาลบริสุทธิ์ขึ้น นอกจากนี้แล้วยังใช้ในการดูด สารพวกไนโตรจีนัส และ โลอะฟลิติก อัลคาลอยด์ จากน้ำอ้อย และสารละลายน้ำตาล โดยตรวจสอบได้จากการวัดปริมาณ Gum และ Pectin การวัดค่าความหนืดของสารละลายน้ำตาล

2) อุตสาหกรรมน้ำมันและไขมันสำหรับบริโภค โดยใช้ดูดสิ่งปลอมปนที่อยู่ในน้ำมันพืช ดูดซับตัวยับยั้งปฏิกิริยาโดยไม่ดูดสี และใช้ร่วมกับดินฟอกสี เพื่อทำให้น้ำมันได้สีตามที่ต้องการและได้รสที่ดีขึ้น

3) อุตสาหกรรมอาหารโดยใช้การดูดกลิ่นและฟอกสี เช่น น้ำผลไม้ที่ได้จากการคั้น อาจมีลักษณะขุ่นมัว ซึ่งแก้ไขโดยการเติมถ่านกัมมันต์ลงไปเพียงเล็กน้อยแล้วกรองออก แต่ถ้าเติมมากจะทำให้รสและกลิ่นของน้ำผลไม้เปลี่ยนไป

4) อุตสาหกรรมเครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์ โดยใช้ในการดูดกลิ่นที่ไม่ต้องการหรือใช้ทำให้เครื่องดื่มมีรสชาติดีขึ้น เช่น ไวน์ และวีสกี

5) อุตสาหกรรมเคมีและยา เช่น acetanilide , caffeine และ calcium ferrocyanide โดยในต่างประเทศมีการทดลองใช้ถ่านกัมมันต์รักษาโรคโดยตรง เช่น รักษาอาการอักเสบจากการติดเชื้อ ขจัดสารพิษ ลดแก๊สในกระเพาะอาหาร ดูดเชื้อแบคทีเรียที่เป็นตัวผลิตแก๊สในลำไส้

6) อุตสาหกรรมการทำน้ำให้บริสุทธิ์ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ดูดคลอรีนหรือสารที่เป็นพิษอื่น ๆ ที่ติดมากับน้ำประปาหรือน้ำบาดาล ซึ่งอาจทำได้สองทาง คือ ถ่านกัมมันต์ชนิดผงจะนำมาผสมลงในน้ำแล้วกรองออก ส่วนถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดจะทำเป็นชั้นให้น้ำไหลผ่าน ซึ่งได้มีการดัดแปลงให้เป็นเครื่องกรองน้ำ เพื่อทำให้น้ำบริสุทธิ์

7) อุตสาหกรรมการแยกสารที่ต้องการ เช่น ใช้ในการทำให้อัตมาละลายบริสุทธิ์เพื่อนำกลับมาใหม่ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ตัวอย่างอุตสาหกรรมที่ใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่

ชนิดของอุตสาหกรรม	ตัวทำละลายที่ดูดกลับมาใช้ใหม่
การผลิตดินปืนชนิดไม่มีควัน	Alcohol, Ether, Acetone
การพิมพ์	Xylene, Toluene, Benzene
การชักแห้ง	Petrol, Benzene, Trichloroethylene, Trichloroethane
การผลิตเรซิ่น	Ether, Alcohol, Carbondisulfide, Acetone
อุตสาหกรรมยาง ผ้าเคลือบยาง	Petrol, Benzene, Toluene
สินค้ายางแอสเบสตอส	
โรงพ่นสี	Thinners for nitrocellulose lacquers
การผลิตเซลลูลอยด์	Alcohol
การผลิตพลาสติกและหนังเทียม	Alcohol, Ether, Acetone, Esters
กรรมวิธีการสกัด	Petrol, Benzene, Trichloroethylene
อุตสาหกรรมการผลิตฟิล์มและแผ่นโลหะบาง	Alcohol, Ether, Acetone, Methylenechloride
การทำแผ่นแก้วสำหรับติด	Petrol
อุตสาหกรรมเคลือบผ้าและกระดาษ	Alcohol, Acetone, Ketone, Lacquers, น้ำมันชักเงา
อุตสาหกรรมใยสังเคราะห์	Ketone, Benzene

ที่มา : จุฬามาส จิตต์เจริญ , 2544, หน้า 21

2.12.2 ประเภทที่ใช้ในการดูดซับแก๊สและไอ เช่น

- 1) อุตสาหกรรมทำหน้าสากป้องกันแก๊สพิษและไอของสารอินทรีย์
- 2) อุตสาหกรรมปรับอากาศ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ดูดควันหรือกลิ่นไอเสียที่ไม่ต้องการตามห้องปรับอากาศหรือตู้เย็น
- 3) อุตสาหกรรมทำบุหรี โดยใช้ถ่านกัมมันต์ลงในกันกรองของบุหรีบางชนิด

2.14 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์ (มอก.900-2532)

2.14.1 ขอบข่าย มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

กำหนดชนิด ขนาด คุณลักษณะที่ต้องการ การบรรจุ เครื่องหมายและฉลาก การชักตัวอย่างและเกณฑ์การตัดสิน และการทดสอบถ่านกัมมันต์

2.14.2 บทนิยาม

ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ มีดังต่อไปนี้

1) **ถ่านกัมมันต์** หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัตถุดิบธรรมชาติที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาผ่านกรรมวิธีก่อกัมมันต์ จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำ มีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีพื้นผิวสูง มีสมบัติในการดูดซับสารต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี

2) **ค่าไอโอดีน** หมายถึง จำนวนมิลลิกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซับไว้ด้วยถ่านกัมมันต์เมื่อความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนหลังจากถูกดูดซับและผ่านการกรองแล้ว

2.14.3 ชนิดของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

- 1) ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (powdered activated carbon)
- 2) ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (granular activated carbon)

2.14.4 ขนาด

1) ถ่านกัมมันต์ชนิดผง

ให้เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้ซื้อกับผู้ขาย แต่ปริมาณที่ผ่านแรง 150 ไมโครเมตร ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนักการทดสอบให้ปฏิบัติตามข้อ 9

2) ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด

ให้เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้ซื้อกับผู้ขาย แต่ปริมาณที่ผ่านแรง 150 ไมโครเมตร ต้องไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก การทดสอบให้ปฏิบัติตามข้อ 9

2.14.5 คุณลักษณะที่ต้องการ

1) ลักษณะทั่วไป

- ก. ถ่านกัมมันต์ผง ต้องละเอียดสีดำ ปราศจากสิ่งแปลกปลอมใด ๆ
- ข. ถ่านกัมมันต์เม็ด ต้องเป็นเม็ดสีดำ ปราศจากสิ่งแปลกปลอมใด ๆ

2) คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมี

- ก. ถ่านกัมมันต์ผง ให้เป็นไปตามตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของถ่านกัมมันต์

รายการ	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด	วิธีทดสอบ
1	ค่าไอโอดีนไม่น้อยกว่า	600	AWWA B660
2	ความหนาแน่นปรากฏ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร	0.20 – 0.75	

ที่มา : มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ถ่านกัมมันต์ 2542, หน้า 3

หมายเหตุ AWWA หมายถึง American Water Works Association

ข. ถ่านกัมมันต์เม็ด ให้เป็นไปตามตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของถ่านกัมมันต์เม็ด

รายการที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด	วิธีทดสอบ
1	ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า	600	AWWA B604
2	ความชื้นร้อยละ ไม่เกิน	8	
3	ความหนาแน่นปรากฏ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรไม่น้อยกว่า	0.36	
4	ความแข็ง ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	70	AWWA B604 RO-Tap Abration test

ที่มา : มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ถ่านกัมมันต์, 2542 , หน้า 4

2.14.6 การบรรจุ

- ก) ให้บรรจุถ่านกัมมันต์ในภาชนะบรรจุที่สะอาด แห้ง และปิดได้สนิท
- ข) น้ำหนักสุทธิของถ่านกัมมันต์ในแต่ละภาชนะบรรจุ ต้องไม่น้อยกว่าที่ระบุไว้ที่ฉลาก

2.14.7 เครื่องหมายและฉลาก

- ก) ที่ภาชนะบรรจุถ่านกัมมันต์อย่างน้อยต้องมีเลขอักษร หรือเครื่องหมายแจ้งรายละเอียดต่อไปนี้ให้เห็นได้ง่ายชัดเจน
 1. ชนิด
 2. น้ำหนักสุทธิเป็นกิโลกรัม
 3. เดือน ปีที่ผลิต หรือรหัสรุ่นที่ผลิต

4. ชื่อผู้ผลิตหรือโรงงานที่ผลิต หรือเครื่องหมายการค้าที่จดทะเบียน
ในกรณีที่ใช้ภาษาต่างประเทศ ต้องมีความหมายตรงกับภาษาไทยที่กำหนดไว้

ข้างต้น

ข) ผู้ผลิตผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่เป็นไปตามมาตรฐานนี้ จะแสดงเครื่องหมาย
มาตรฐานกับผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนั้น ต่อเมื่อได้รับใบอนุญาตจากคณะกรรมการมาตรฐาน
ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศุรพงษ์ วัฒนะจิระ และคณะ (2544) ทำการศึกษาการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด
จากกะลามะพร้าวในคอลัมน์แบบชั้นตรึงการกำจัดฟีนอลออกจากน้ำเสียโดยการดูดซับด้วย
ถ่านกัมมันต์ สามารถทำได้หลายวิธี เช่น แบบระบบถังเท (batch system) และระบบการไหล
ต่อเนื่อง (continuous system) ผ่านคอลัมน์แบบชั้นตรึง (fixed bed column) ระบบการไหล
ต่อเนื่องผ่านคอลัมน์แบบชั้นตรึงที่บรรจุด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดเป็นระบบหนึ่งที่น่าสนใจใช้กัน
โดยทั่วไปในการกำจัดมลสารที่มีอยู่ในน้ำเสีย เช่น ยาฆ่าแมลง, โลหะหนัก และสารประกอบฟีน
อล เป็นต้น โดยมักใช้เป็น การบำบัดน้ำเสียขั้นตอนสุดท้าย ทดลองโดยการสูบน้ำเสียที่อัตรา
บรรทุกทางชลศาสตร์ประมาณ 2.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. เข้าสู่ถังปฏิกิริยาทางด้านบนด้วยเครื่องสูบน้ำ
เสีย และทำให้น้ำเสียท่วมชั้นถ่านกัมมันต์ โดยการยกระดับท่อน้ำออกจากระบบให้สูงเหนือชั้นถ่าน
และน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วไหลออกจากถังปฏิกิริยาทางท่อออกด้านล่างถึงปฏิกิริยาทำจากท่อพีวีซี
ทึบแสง เพื่อป้องกันการย่อยสลายฟีนอลจากแสงมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในประมาณ 3.8
เซนติเมตร ภายในบรรจุด้วยถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวที่มีความลึก 20 เซนติเมตร โดยรองรับ
ชั้นถ่านกัมมันต์ด้วยใยแก้วสังเคราะห์ น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ฟีนอลซึ่ง
เตรียมจากน้ำประปาที่ทิ้งไว้ไม่ต่ำกว่า 24 ชั่วโมง สำหรับการทดลอง ผลของความเข้มข้นของฟีนอล
เริ่มต้นในน้ำเสียระหว่างประมาณ 5 ถึง 50 มก./ล. ที่ค่าพีเอชระหว่างประมาณๆ ส่วนการทดลองผล
ของพีเอชต่อการดูดซับฟีนอล ทำการทดลองในช่วงของพีเอชระหว่างประมาณ 3 ถึง 11 ที่ความ
เข้มข้นของฟีนอล เริ่มต้นประมาณ 5 มก./ล. โดยการปรับพีเอชใช้กรดไฮโดรคลอริก เพื่อลดพีเอช
และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อเพิ่มพีเอช ผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นเริ่มต้น
ของฟีนอลเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ความสามารถในการดูดซับฟีนอล และความยาวของโซนการส่งถ่าย
มวลของถ่านกัมมันต์กะลามะพร้าวมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนผลของการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของน้ำที่เข้าสู่
ระบบพบว่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์กะลามะพร้าวมีค่ามากที่สุดที่พีเอช
ประมาณ 9

สุโรชนี สกุดดวงดี (2545) ทำการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์และการทดสอบความชอบในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มโดยใช้สารละลายซิงค์คลอไรด์ ในการกระตุ้น ความเข้มข้น 7.3 M พบว่า สภาวะที่เหมาะสม คือ ความเข้มข้นสารละลายซิงค์คลอไรด์ต่อกะลาปาล์มเป็น 3:1 (น้ำหนัก:น้ำหนัก) ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส นาน 120 นาที เมื่อนำไปวิเคราะห์ค่าร้อยละของผลผลิตพบว่า มีค่าผลผลิต 49.18 % ค่าพื้นที่ผิว 2168 ตารางเมตรต่อกรัม และค่าการดูดซับไอโอดีน 1565 มิลลิกรัมต่อกรัม ขนาดของรูพรุนอยู่ในช่วง 2-10 นาโนเมตร ถ่านกัมมันต์ที่ได้ถูกนำไปทดสอบการดูดซับตัวทำละลายอินทรีย์ เพื่อศึกษาความชอบในการดูดซับ พบว่าถ่านกัมมันต์มีความสามารถดูดซับตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว ได้ดีกว่าตัวทำละลายที่มีขั้ว ลำดับการดูดซับ คือ สามารถดูดซับโทลูอินได้ดีพอๆกับเฮกเซนและดีกว่าเมทานอล

จุฑามาส จิตต์เจริญ (2544) ทำการศึกษาการวิเคราะห์เชิงพื้นผิวและการตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเปลือกผลปาล์มสำหรับดูดซับสารไอเสียจากโรงงาน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลการทดลองพบว่า ผลการศึกษา จุลโครงสร้างของกะลาปาล์ม ด้วย SEM พบว่าผิวด้านนอกของกะลาปาล์มมีลักษณะขรุขระและมีเส้นใยปกคลุมอยู่บางส่วน ส่วนผิวด้านในมีลักษณะไม่เรียบและมีรอยแตกอยู่ทั่วไป นอกจากนี้ผิวภาคตัดขวางประกอบด้วยวงแหวนเหลี่ยมต่อเนื่องกันและภายในวงแหวนเหลี่ยมจะประกอบด้วยจุดเล็กๆกระจายตัวอยู่จำนวนมากซึ่งคาดว่าจะเป็นส่วนของเส้นใย จากผลการวิเคราะห์พบว่ากะลาปาล์มมีความเหมาะสมในการนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ เพราะมีความชื้นและปริมาณเถ้าหรือสารอินทรีย์ต่ำและมีปริมาณคาร์บอน เป็นองค์ประกอบสูงและมีพื้นที่ผิวที่มี ความสามารถในการดูดซับสูง เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย $ZnCl_2$ เพิ่มขึ้น ค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 27.59 เป็น 38.45% โดยน้ำหนัก และค่าสูงสุดมีความเข้มข้นของสารละลาย $ZnCl_2$ 35% โดยน้ำหนัก โดยมีค่าเท่ากับ 38.45 % โดยน้ำหนัก เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย $ZnCl_2$ จาก 25 ถึง 35% โดยน้ำหนัก การเพิ่มขึ้นของปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้นไม่มากนักโดยกระตุ้นด้วยสารละลาย $ZnCl_2$ ที่มีความเข้มข้นมากกว่า 35 % โดยน้ำหนัก การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลาย $ZnCl_2$ ต่อเลขไอโอดีน พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย $ZnCl_2$ จาก 0 ถึง 35% โดยน้ำหนัก ถ่านกัมมันต์จะมีเลขไอโอดีนเพิ่มขึ้นจาก 68.51 เป็น 96.29 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าเลขไอโอดีนสูงสุดที่ความเข้มข้นของสารละลาย $ZnCl_2$ ที่ใช้ในการกระตุ้น 35% โดยน้ำหนัก โดยมีค่าเท่ากับ 96.29 มิลลิกรัมต่อกรัม ผลการศึกษาจุลโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลาย $ZnCl_2$ ที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยใช้ SEM พบว่าลักษณะจุลโครงสร้างโดยทั่วไปของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลาย $ZnCl_2$ จาก 0% ถึง 35% โดยน้ำหนักเหมือนกัน คือ พื้นที่ผิวประกอบด้วยรูพรุนขนาดใหญ่และขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วไป แต่ลักษณะที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้

ภัทธา ปัญญวัฒน์กิจ (2540) ได้ทำการศึกษา การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมัน กระตุ้นด้วยไอน้ำอิมัลชันด้วย เป็น การนำกะลาปาล์มน้ำมันซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้ง จากกระบวนการ ผลิตน้ำมันปาล์ม มาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตคุณสมบัติทาง เคมี และทางกายภาพบางประการของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้และศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีของ ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตขึ้น โดยแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ คาร์โบไนซ์และการกระตุ้นด้วยไอน้ำอิมัลชัน ด้วย ผลการทดลองพบว่า คุณสมบัติเบื้องต้นของกะลาปาล์มน้ำมันมีคุณสมบัติดังนี้ ความชื้น (M) ร้อยละ 11.87 , เถ้า (Ash) ร้อยละ 2.20 , ปริมาณสารระเหย (VCM) ร้อยละ 69.87 , ปริมาณคาร์บอน คงตัว (FC) ร้อยละ 16.06 , พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (S_{BET}) 12.20 ตารางเมตรต่อกรัม , พื้นที่ผิวรูพรุน ชนิดมีโซพอร์ 12.20 ตารางเมตรต่อกรัม และพื้นที่ผิวรูพรุนชนิดไมโครพอร์ 0.00 ตารางเมตรต่อ กรัม ผลการศึกษา พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการคาร์โบไนซ์ คือ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ถ่านกะลาปาล์มน้ำมันที่ได้มีสมบัติดังนี้ ปริมาณผลิตภัณฑ์ (YC) ร้อยละ 31.50 , ปริมาณเถ้า (Ash) ร้อยละ 6.24 , ปริมาณสารระเหย (VCM) ร้อยละ 27.76 และปริมาณคาร์บอนคง ตัว (FC) ร้อยละ 64.48 ส่วนสภาวะที่ใช้ในการกระตุ้นถ่านกะลาปาล์มน้ำมันให้เป็นถ่านกัมมันต์ คือ

มหาวิทยาลัยราชภัฏ
Rajabhat University

±

