

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 ความหมายของถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

หมายถึง ผลิตภัณฑ์ได้จากการนำเอาวัตถุดิบที่มี คาร์บอน เป็นองค์ประกอบหลักมาผ่านกระบวนการก่อกัมมันต์ (โดยการใช้ความร้อน) จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำ มีโครงสร้างเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง มีสมบัติดูดซับสูง

2.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์

วัตถุดิบนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ ควรจะมีสมบัติดังต่อไปนี้

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

วัตถุดิบใช้เป็นวัตถุดิบมักเป็นพวกอินทรีย์วัตถุ สามารถแบ่งออกได้เป็นชนิดต่าง ๆ ดังนี้

- พวกเซลลูโลสที่มาจากพืช เช่น แกลบ กะลามะพร้าว ขาน้อยหรือ ช้างข้าวโพด เป็นต้น
- พวกถ่านหิน เช่น ลิกไนต์ พีท เป็นต้น
- ส่วนต่าง ๆ ของสัตว์ เช่น กระดุก เป็นต้น

สำหรับวัตถุดิบใช้เป็นวัตถุดิบในรูปถ่านชาร์ มักเป็นถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ อินทรีย์วัตถุหรือที่เรียกว่าถ่านสังเคราะห์ (Artificial char) หรืออาจเป็นถ่านที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural char) เช่น ถ่านหิน โดยปกติส่วนมากวัตถุดิบที่นิยมใช้เตรียมถ่านกัมมันต์มักจะมีค่าต่ำ อย่างไรก็ตามสมบัติของถ่านกัมมันต์ยังขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ กล่าวคือวัตถุดิบที่มีความหนาแน่นต่ำและปริมาณสารระเหยสูง เช่น ไม้ ลิกไนต์ เป็นต้น มักจะให้ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาตรของรูพรุน (Pore volume) สูงและความหนาแน่นต่ำ ซึ่งใช้ในการดูดซับสารละลายได้ดีแต่ดูดซับแก๊สได้ไม่ดี ส่วนวัตถุดิบที่มีความหนาแน่นสูงและมีสารระเหยสูง เช่น กะลามะพร้าว กะลาตาลโตนด ซึ่งมีค่าปริมาณสารระเหยร้อยละ

80.1 และ 80.8 ตามลำดับ (บุญชัย ตระกูลมหารชัย, 2537) จะทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีปริมาตรของรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore volume) สูงสามารถดูดซับได้ทั้งในสารละลายและแก๊ส นอกจากนี้สมบัติของถ่านกัมมันต์ ยังขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ เช่น วิธีการผลิต เครื่องมือที่ใช้ในการผลิตและภาวะที่ใช้ในการผลิตเป็นต้น ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะระบุให้แน่นอนว่าวัสดุชนิดใดจะใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมกับงานแบบใด

2.3 ชนิดของถ่านกัมมันต์

สามารถแบ่งออกได้โดยใช้หลักต่าง ๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ ความสะดวกของผู้ใช้ ตัวอย่างการแบ่งชนิดของถ่านกัมมันต์ ได้แก่

2.3.1 แบ่งตามชนิดของตัวกระตุ้น

ก. กระตุ้นทางเคมี (Chemical activation)

เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับผิวคาร์บอน มักเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ตัวกระตุ้นที่ใช้ได้แก่ $ZnCl_2$ และ $NaCl$ เป็นต้น

ข. กระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation)

เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้แก๊สออกซิไดซ์ เช่น ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ อากาศ ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีรูพรุนขนาดเล็ก นิยมใช้ในการดูดซับแก๊สและไอระเหย

2.3.2 แบ่งตามขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์

ก. ขนาดเล็ก (Micropore) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนเล็กกว่า 1.5 นาโนเมตร มักใช้ในการดูดซับแก๊สหรือ ไอระเหย

ข. ขนาดกลาง (Mesopore) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีรูพรุนประมาณ 1.5 ถึง 100 นาโนเมตร มักนำไปใช้ประโยชน์ในปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic reaction) ใช้ดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น การฟอกสี

ค. ขนาดใหญ่ (Macropore) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนมากกว่า 100 นาโนเมตร โดยปกติไม่มีความสำคัญในการดูดซับสารต่าง ๆ แต่เป็นตัวช่วยให้สารที่ถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปยังรูพรุนเล็กได้ง่ายขึ้นมักนำไปใช้ประโยชน์ในการฟอกสี และการผลิตยา

2.3.3 แบ่งตามลักษณะของรูปร่าง

ก. ประเภทเป็นผง (Powder) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 นาโนเมตร ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก มีลักษณะผง ใช้สำหรับฟอกสีและดูดกลิ่นในของเหลว

ข. ประเภทเป็นเม็ด (Pellet) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 นาโนเมตร ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นเม็ดซึ่งได้จากการอัดผ่านเครื่องอัด หรืออาจทำเป็นเม็ดใช้สำหรับทำแก๊สให้บริสุทธิ์หรือการทำตัวทำละลายที่ใช้แล้วให้บริสุทธิ์ นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการปฏิกริยาของแก๊ส และใช้ทำหน้าที่ปกป้องกันแก๊สและไอพิษต่าง ๆ

2.3.4 แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์

.ก. ความหนาแน่นต่ำ มักใช้ประโยชน์ในภาวะที่เป็นสารละลาย เช่น ฟอกสีน้ำตาลดิบ หรือทำน้ำให้บริสุทธิ์

ข. ความหนาแน่นสูง ใช้ในการดูดซับแก๊ส หรือ ไอระเหย

2.4 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

กรรมวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์มีมากมายหลายวิธี ซึ่งขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบและสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ แต่โดยทั่วไปประกอบด้วยขั้นตอน 3 ขั้นตอนดังนี้ คือ การเตรียมวัตถุดิบ การคาร์บอนไนซ์ และการกระตุ้น

2.4.1 การเตรียมวัตถุดิบ ถ่านกัมมันต์ผลิตได้จากวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ ไม้เลื่อย กะลามะพร้าว แกลบ เปลือกถั่ว ขางรถยนต์เก่า ถ่านหิน พีท เป็นต้น ซึ่งการผลิตถ่านกัมมันต์สามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรง หรือเริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านชาร์แล้วก็ได้ ขึ้นอยู่กับการผลิต แต่โดยทั่วไปมักนำวัตถุดิบมาบดและคัดขนาดก่อนที่จะนำมาคาร์บอนไนซ์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคาร์บอนไนซ์ แล้วจึงนำมาบดและคัดขนาดเพื่อนำไปกระตุ้นต่อไป

2.4.2 คาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) เป็นกระบวนการไพโรไลซิสรูปแบบหนึ่งที่จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ในรูปของถ่านชาร์ (Char) ที่เป็นของแข็งมากกว่าน้ำมันทาร์ (Tar) หรือแก๊ส หรืออาจกล่าวได้ว่าการคาร์บอนไนซ์เป็นการเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้สูงขึ้น โดยการเผาในที่อับอากาศที่อุณหภูมิ 200 - 500 องศาเซลเซียส

ปฏิกิริยาไพโรไลซิสต้องการความร้อนทั้งทางตรงและทางอ้อมที่ได้จากการออกซิเดชันเพียงบางส่วน หรือจากปฏิกิริยาอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งในปัจจุบันกระบวนการสลายตัวทางความร้อนในภาวะที่ออกซิเจนน้อยหรือในที่ที่มีการถ่ายเทความร้อนทำให้เกิดการไพโรไลซิสโดยตรงจากการเผาไหม้บางส่วน of ถ่านชาร์และแก๊สเรียกได้ว่าเป็น "กระบวนการไพโรไลซิส" กระบวนการไพโรไลซิส เป็นเทคโนโลยีที่วัตถุดิบประกอบด้วยคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบหลักเกิดการสลายตัวด้วย

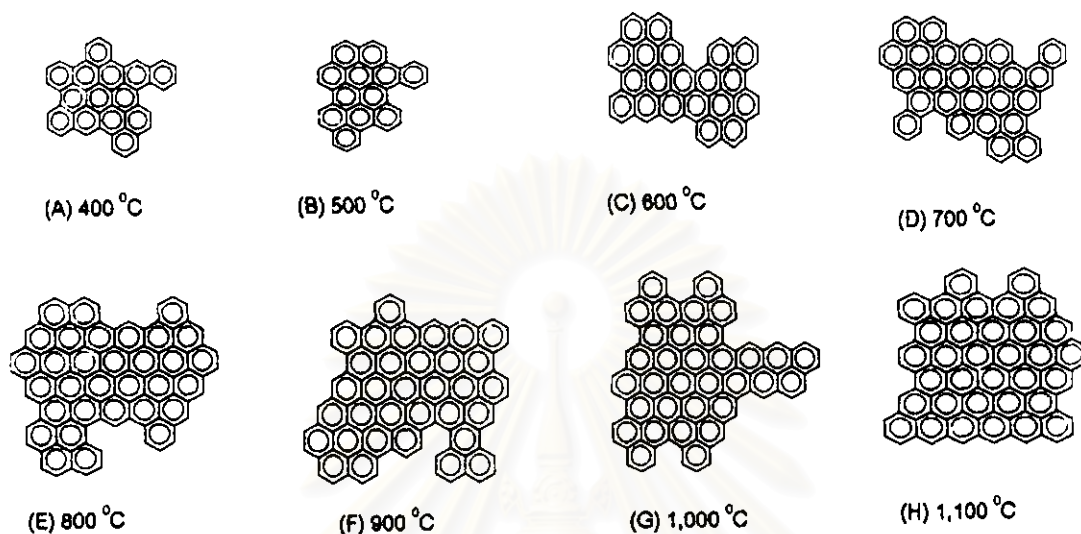
ความร้อน โดยมีอาณาเขตอย่างน้อยหนึ่งอาณาเขตที่เกิดการสลายตัวทางความร้อนในที่ที่ไม่มีออกซิเจน

ความแตกต่างของเทอมไพโรไลซิส แก๊สซิทีเคชัน และการเผาไหม้ ดูได้จากปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ คือ ปริมาณอากาศที่ใช้มีส่วนสัมพันธ์กับปริมาณเชื้อเพลิง ไพโรไลซิสโซนเป็นส่วนที่มีอากาศน้อยกว่าร้อยละ 20 ของอากาศที่ใช้เผาไหม้ทางทฤษฎี แก๊สซิทีเคชันเป็นส่วนที่ใช้อากาศระหว่างร้อยละ 25-50 ที่ใช้เผาไหม้ทางทฤษฎี และส่วนของกาเผาไหม้ใช้อากาศมากกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไป การคาร์บอนเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์เพราะเป็นขั้นตอนเริ่มต้นของโครงสร้างที่เป็นรูพรุน โดยเกิดการสลายตัวของโครงสร้างให้ส่วนที่ระเหยง่าย เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจนคาร์บอนเบา ออกมาในรูปของแก๊ส คาร์บอนอิสระที่มีอยู่จะรวมตัวกันในรูปของถ่านชาร์ ถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนมีความสามารถในการดูดซับต่ำทั้งนี้เพราะว่าการทำถ่านชาร์ใช้อุณหภูมิประมาณ 400 - 500 องศาเซลเซียส ซึ่งยังคงมีน้ำมันทาร์ตกค้างอยู่ในช่องว่าง (Pore) หรือเกาะอยู่ตามผิวจึงจำเป็นต้องนำถ่านชาร์นี้ไปผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับ ดังนั้นการกระตุ้นจึงเป็นเพียงการพัฒนาโครงสร้างให้เป็นไปทางเดียวกับการคาร์บอนเท่านั้น

การคาร์บอนมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ในการปรับภาวะในการไพโรไลซิสให้เหมาะสม จึงปัจจัยที่มีผลต่อการคาร์บอนคือ

2.4.2.1 อุณหภูมิ กระบวนการคาร์บอนเป็นการกลั่นสลายของสารอินทรีย์เพื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนในสารอินทรีย์ โดยจะเกิดการหักออกตรงบริเวณที่มีพันธะอ่อน หรือมีหมู่โมเลกุลที่หลุดออกได้ง่าย ทำให้กลุ่มโมเลกุลที่เป็นวงแหวนแตกออกจากกันเป็นกลุ่ม ๆ จำนวนมาก โครงสร้างวงแหวนอะโรแมติกหลักที่เหลือกลายเป็นโครงสร้างของถ่านชาร์ ซึ่งการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่เผา ส่วนโครงสร้างโมเลกุลขนาดเล็กจะกลั่นสลายตัวออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้องได้แก่ น้ำแอมโมเนีย น้ำมันทาร์ และแก๊สต่าง ๆ

อย่างไรก็ตามสิ่งที่สำคัญที่สุดของกระบวนการนี้คือ อุณหภูมิสุดท้ายของการคาร์บอน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับพลังงานที่ใช้ในการสลายพันธะเคมีในวัสดุดิบออกมาเป็นสารระเหย ที่อุณหภูมิสูง ถ่านชาร์จะมีการจัดระเบียบของโครงสร้างมากกว่า เช่นถ่านหินเกรดสูงจะหดตัวมากขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการคาร์บอน เป็นผลทำให้ปริมาตรของรูพรุนเล็ก ๆ ทั้งหมดที่เกิดขึ้นในขั้นแรกของการคาร์บอนลดลง และเม็ดถ่านหินมีความแข็งมากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาลดลง



รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงของคาร์บอนอะตอมตามอุณหภูมิที่เผา (Hassler, 1974)

ตารางที่ 2.1 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์ถ่านหินต่อสมบัติของถ่านรารีที่เตรียมขึ้นได้ (Jankowska, 1991)

Final carbonization temperature (°C)	Mechanical strength of the granules (%)	Bluk density of granules (g cm ⁻³)	Rate of oxidation with CO ₂ at 820 °C g(g min) ⁻¹	Activation energy Of the granules (kJ mol ⁻¹)
400	Unstable	0.62	-	-
500	72.7	0.60	-	-
600	93.8	0.61	0.00194	212
700	98.0	0.65	0.00156	237
800	98.4	0.69	0.00134	256

2.4.2.2 อัตราการให้ความร้อน เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากการไพโรไลซิส กล่าวคือ ถ้าอัตราการให้ความร้อนสูงปริมาณสารระเหยจะถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว ด้านซาริที่ได้จะมีรูพรุนขนาดใหญ่ ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าด้านซาริที่ได้จากการให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำกว่าเพราะว่าด้านที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิสูงคาร์บอนจะเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่า ทำให้เกิดช่องว่างเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ เมื่อทำการกระตุ้นสารกระตุ้นจะเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่าย

ตารางที่ 2.2 ผลของอัตราการให้ความร้อนที่มีต่อสมบัติของเม็ดด้านซาริ (Jankowska, 1991)

Heating rate ($^{\circ}\text{C min.}^{-1}$)	Mechanical strength of granules (%)	Bulk density of granules (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

2.4.2.3 ตัวกลางของปฏิกิริยา (Medium of reaction) จะมีผลกระทบต่อปฏิกิริยา ถ้าแก๊สและไอที่เกิดขึ้นระหว่างการไพโรไลซิสถูกพาออกไปอย่างรวดเร็ว โดยแก๊สที่เป็นตัวกลาง เช่น แก๊สไนโตรเจน (เชื่อมต่อกับปฏิกิริยาการเผาไหม้ของคาร์บอน) หรือแก๊สจากการเผาไหม้ ถ้าตัวกลางเป็นแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ ปริมาณด้านซาริที่ได้จะน้อยกว่าตัวกลางที่เป็นแก๊สไนโตรเจน แต่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับตัวกระตุ้นสูงกว่า เนื่องจากการเผาไหม้มีส่วนช่วยสร้างรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อนำไปกระตุ้นมีผลทำให้แก๊สกระตุ้นสามารถแทรกตัวเข้าไปในอนุภาคด้านซาริได้ง่าย

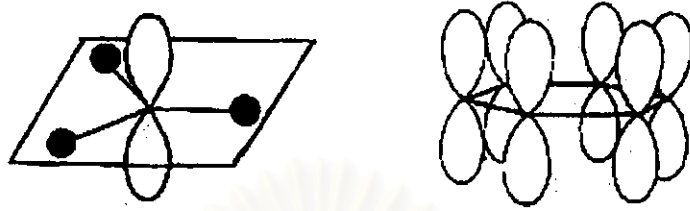
โดยทั่วไปการคาร์บอนไนซ์จะมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ 2 ช่วง คือ ช่วงอ่อนตัว (Softening period) และ ช่วงหลังการอ่อนตัว (After softening period) ในช่วงการอ่อนตัวควรให้ความร้อนด้วย

อัตราที่ต่ำเพื่อให้เกิดหลุดออกจากโพรงภายในได้ โดยไม่สลายตัวหรือเปลี่ยนรูปเป็นของแข็งอุดแน่นภายในโพรง และผ่านสารที่ได้จะแน่นและแข็งด้วย (Bansel and Coworker ,1988)

2.4.3 การกระตุ้น (Activation) การกระตุ้น หมายถึง การทำให้คาร์บอนหรือผ่านสารมีความสามารถในจุดจับสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิวและการทำให้ผิวผ่านสารมีความว่องไวมากขึ้น (นิชรี นิลนนท์ ,2541) ได้พิจารณาความหมายของการกระตุ้นไว้ 3 ลักษณะ คือ

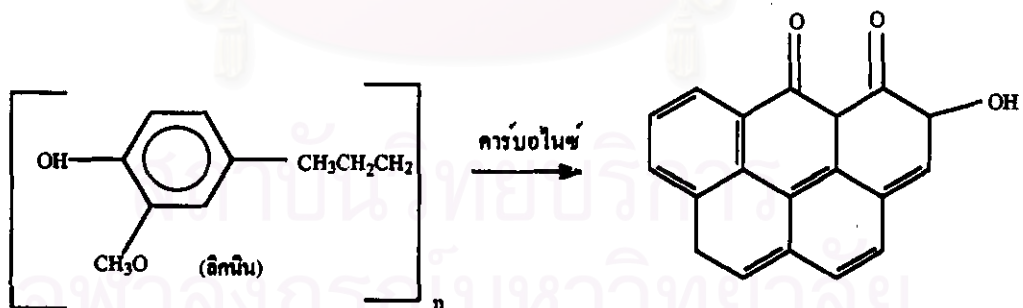
- เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวว่องไว (Active surface area) โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้โมเลกุลบางโมเลกุลหลุดออกไป ทำให้เกิดส่วนที่มีอำนาจดูดซับขึ้นมาแทน
- เป็นการเพิ่มความว่องไวในการดูดซับให้กับผิวที่มีอยู่แล้ว หมายถึงทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้นโดยจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ เพื่อให้มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น
- เป็นการกำจัดสารอินทรีย์วัตถุหรืออนินทรีย์วัตถุต่าง ๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ (Active center)

วัตถุดิบที่ใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่เป็นวัตถุดิบเหลือทิ้งทางการเกษตร คือเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนทั้งที่เป็นโซ่ยาวและที่เป็นวง เช่น ลิกนิน เซลลูโลส เป็นต้น เมื่อนำมาคาร์บอนไนซ์จะเกิดการสร้างวงอะโรแมติก (Aromatization) โดยอะตอมคาร์บอนซึ่งเดิมสร้างพันธะโดยใช้อิเล็กตรอนจากชั้น 2s จำนวน 2 ตัว และชั้น 2p จำนวน 2 ตัว จะเกิดการไฮบริไดเซชัน เปลี่ยนมาใช้อิเล็กตรอนจากชั้น 2s จำนวน 1 ตัว และชั้น 2p จำนวน 2 ตัว และมีอิเล็กตรอนอิสระจากชั้น 2p อีก 1 ตัว (sp^2 Hybridization) จึงเกิดพันธะแบบซิกมา (Sigma bond) กับคาร์บอนอะตอมที่อยู่ข้างเคียง 3 ตัวเรียงกันเป็นรูปสามเหลี่ยมในระนาบเดียวกันและอิเล็กตรอนอิสระที่เหลือจะโคจรอยู่บนและล่างของระนาบ พร้อมทั้งจะเกิดพันธะแบบไพ (Pi bond) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ในที่สุดจะเกิดเป็นวงแหวนอะโรแมติกที่มีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ (Resonance) ได้ทั่วโครงสร้างซึ่งเรียกว่าวงเบนซินหรือวงอะโรแมติก วงเบนซินแต่ละวงจะเชื่อมติดกันจนมีลักษณะเป็นแผ่นสำหรับโครงสร้างผ่านสารจะมีแผ่นของวงเบนซินนี้อยู่หลายแผ่นเรียงตัวกันเป็นชั้น ๆ อย่างไม่มีระเบียบ ซึ่งการเรียงตัวในลักษณะนี้ จะเกิดแรงผลักระหว่างชั้น จากไพอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่อยู่บนและล่างของแต่ละชั้น ผ่านสารจะสร้างเสถียรภาพ ด้วยการให้ไพอิเล็กตรอนสร้างพันธะเคมีโดยการดึงอะตอมแปลกปลอมอื่นเข้าสู่โครงสร้าง เช่น ไนโตรเจน ออกซิเจน หรือฟอสฟอรัส เป็นต้น



รูปที่ 2.2 แสดงตำแหน่งของอิเล็กตรอนของคาร์บอนที่เกิดจาก sp^2 Hybridization

แต่การดึงอะตอมออกซิเจนจากบรรยากาศจะง่ายที่สุด ดังนั้นจึงมักพบออกซิเจนในโครงสร้างด้านซาร์เลมอ ตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 2.3 เช่นการเกิดวงเบนซินจากลิกัน ซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโซ่ยาวมากและมักพบในวัสดุทางการเกษตรที่มีความแข็งและเหนียว การผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยซิงค์คลอไรด์จะป้องกันไม่ให้ออกซิเจนที่เพิ่งเตรียมได้เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน โดยการห่อหุ้มโครงสร้างของวัสดุด้วยซิงค์คลอไรด์ตั้งแต่ก่อนที่จะนำไปคาร์บอนไนซ์ ซึ่งจะช่วยระงับการเกิดน้ำมันถ่าน แต่จะเกิดหมู่ฟังก์ชันนัลที่เป็นกรด เช่น $-Cl^-$, $-COOH^-$ เป็นต้น (Calurta et al. ,1991) จึงทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีความสามารถในการดูดซับสูง

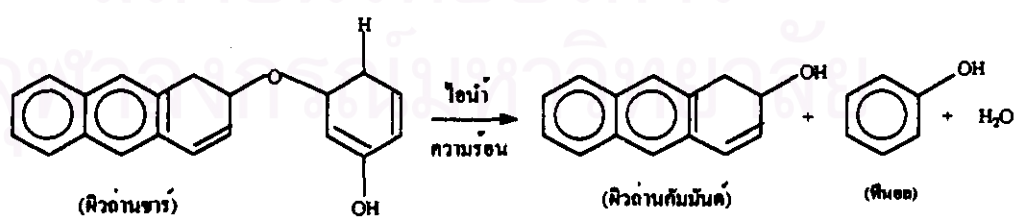
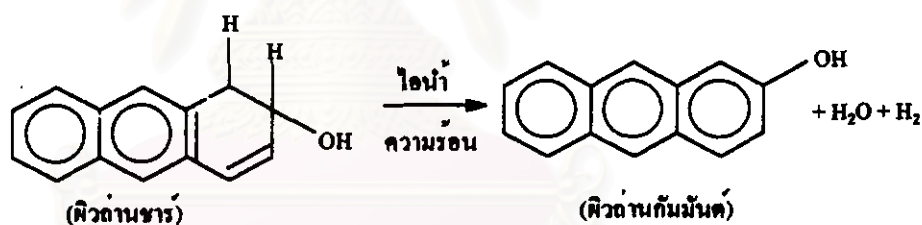


รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีโดยการเตรียมถ่านซาร์จากวัสดุทางการเกษตร

(Calurta et al. 1991)

สำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยแก๊สออกซิไดซ์ เป็นการจัดเรียงโครงสร้างด้านซาร์ที่มีเสถียรภาพแล้ว แต่อำนาจการดูดซับต่ำ ดังรูปที่ 2.4 (ก) เป็นภาพจำลองของการเกิดปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วย

แก๊สออกซิไดซ์ ก่อนเกิดปฏิกิริยาการกระตุ้นอะตอมออกซิเจนของหมู่ไฮดรอกซีจะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนน้อย เนื่องจากคาร์บอนในตำแหน่งที่ 1 มีความเป็นบวก จากผลของแรงดึงทางไฟฟ้าของออกซิเจน เมื่อเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำ โดยใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งจะมีการกำจัดอะตอมไฮโดรเจนออกจากโครงสร้าง เพื่อสร้างพันธะไพอิกพันธะหนึ่ง ทำให้เกิดวงเบนซิน ซึ่งวงเบนซินนี้มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูง จึงช่วยเพิ่มความหนาแน่นอิเล็กตรอนของอะตอมออกซิเจน เมื่อเกิดการดูดซับกับอิออนหรือโมเลกุลที่มีรั้วเป็นบวกจึงเกิดได้ดีขึ้น ปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์ยังหมายถึงการล้างโมเลกุลแปลกปลอมต่าง ๆ เช่น ทาร์ ออกจากบริเวณที่ใช้ในการดูดซับซึ่งเกิดในช่วงคาร์บอนที่ดังรูปที่ 2.4 (ก) เป็นภาพจำลองการกำจัดโมเลกุลฟีนอล ออกจากโครงสร้างของถ่านชาร์ ซึ่งฟีนอลเป็นสารชนิดหนึ่งในน้ำมันทาร์ หมู่ไฮดรอกซีของฟีนอลจะทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในวงเบนซินของฟีนอลลดลง เนื่องจากผลแรงดึงทางไฟฟ้าของออกซิเจน ทำให้ออกซิเจนตำแหน่งที่ 1 มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนน้อยลง ปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยไอน้ำและความร้อนจะช่วยทำให้ฟีนอลหลุดออกจึงทำให้ออกซิเจนตำแหน่งที่ 1 มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น อันมาจากการดูดซับจึงสูงขึ้น



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี ของปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์ (นิชชรี นิลนนท์, 2541)

2.4.3.1 วิธีกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation)

เป็นวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยให้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน มีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารเคมีที่นิยมใช้ ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) นอกจากนี้ยังมีสารเคมีตัวอื่น ๆ เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ข้อดีของการกระตุ้นด้วยวิธีนี้คือใช้อุณหภูมิไม่สูงมาก (400 - 600 องศาเซลเซียส) แต่มีข้อเสียคือมีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ทำให้ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีออก อีกทั้งอุปกรณ์ที่ใช้ก็ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถทนทานต่อการกัดกร่อนได้

2.4.3.2 วิธีการกระตุ้นทางกายภาพ (Physical Activation)

เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยที่ผิวของคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่นการจัดเรียงตัวใหม่ ซึ่งจะช่วยให้ถ่านชาร์เพิ่มความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น แก๊สที่นิยมใช้ในการออกซิไดซ์ ได้แก่ ไอน้ำ อิมมิตวียิ่งยวด แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สออกซิเจน โดยใช้ร่วมกับความร้อน ปฏิกิริยาการกระตุ้นอาจเกิดจากการใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียว แต่ต้องใช้อุณหภูมิสูงมากถึง 1,200 องศาเซลเซียส แต่ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จะมีคุณภาพต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้โดยการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์

ปัจจัยที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์ คือ (Hassler, 1974)

- สมบัติทางเคมีและความเข้มข้นของแก๊สออกซิไดซ์ที่ใช้
- อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา
- ระยะเวลาของปฏิกิริยา
- ชนิดและปริมาณของวัตถุดิบที่ใช้

อุณหภูมิที่ใช้ไม่สามารถกำหนดได้แน่นอน แต่มักไม่เกิน 1,000 องศาเซลเซียส เพราะว่าถ้าใช้ อุณหภูมิสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส จะทำให้อำนาจการดูดซับของถ่านกัมมันต์ลดน้อยลง อุณหภูมิที่ใช้ทั่วไปอยู่ในช่วง 800 - 900 องศาเซลเซียส แต่ก็มีบ้างที่ใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส

ข้อดีของการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์คือ ไม่มีสารเคมีตกค้าง ข้อเสียคือต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่า การกระตุ้นด้วยสารเคมี

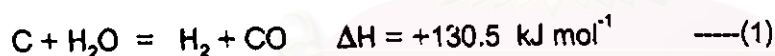
การกระตุ้น คาร์บอนอะตอมจะทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิไดซ์ เกิดเป็นแก๊สออกไซด์ของคาร์บอน แพร่ออกจากผิวของคาร์บอน เกิดแก๊สซิฟิเคชันบางส่วนของเม็ดถ่านชาร์เป็นรูพรุนขึ้นในโครงสร้างของถ่าน ถ่านชาร์ประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมาก ซึ่งเกิดจากช่องว่างระหว่างผลึกในการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอม รูพรุนเหล่านี้ถูกอุดตันไว้ด้วยน้ำมันหาร์ท ที่เกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อน และถูกขัดขวางด้วยอะมอฟัสคาร์บอน ดังนั้นการกระตุ้นจึงเป็นการเปิดรูพรุนที่ถูกปิด และสร้างรูพรุนขึ้น

มาใหม่ด้วย การกระตุ้นตัวอย่างถ่านชาร์หลาย ๆ ตัวอย่างพบว่า การกระตุ้นด้วยไอน้ำให้ผลดีกว่าการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดีกว่าการกระตุ้นด้วยอากาศ การกระตุ้นด้วยไอน้ำต้องใช้อุณหภูมิสูงพอที่จะทำให้เกิดการออกซิไดซ์อย่างรวดเร็ว แต่ไม่ควรเกิน 1,000 องศาเซลเซียส เพราะจะทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีสมบัติในการดูดซับลดลง การกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ใช้อุณหภูมิ 800 - 900 องศาเซลเซียส ส่วนการกระตุ้นด้วยอากาศใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส เนื่องจากอากาศสามารถทำให้เกิดการเผาไหม้ได้ จึงไม่นิยมใช้ในการกระตุ้น เพราะทำให้ควบคุมอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาได้ลำบาก

ปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์บอนขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวออกซิไดซ์ และอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิต่ำอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างคาร์บอนกับตัวออกซิไดซ์ต่ำ จึงเป็นผลให้ได้รูปพูนที่ต้องการช้า แต่ที่อุณหภูมิสูงเกินไปปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดที่ผิววนอกของอนุภาค ทำให้เกิดการสูญเสียคาร์บอนแต่ไม่ทำให้เกิดรูปพูนขึ้น

การกระตุ้นด้วยไอน้ำ การใช้ไอน้ำในที่นี้หมายถึงการใช้ไอน้ำยิ่งยวด (Superheated steam) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบดูดความร้อน และเป็นปฏิกิริยาเคมีที่ซับซ้อน แต่โดยทั่วไปจะสมมติเป็นปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) ของถ่านชาร์

ดังสมการ ที่ (1) และ (2) (Rodriguez - Reinoso and Lanires - Solano, 1965)



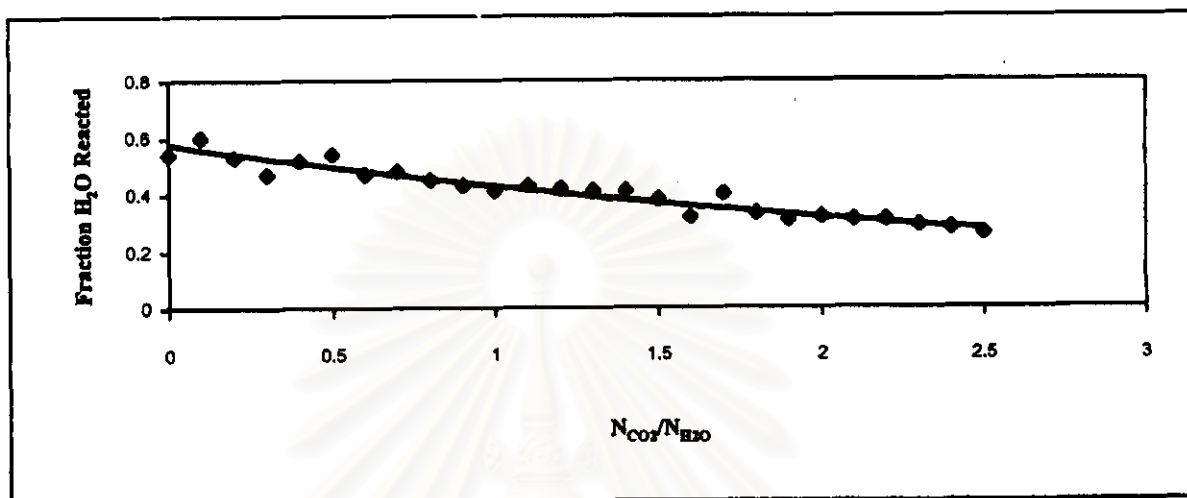
อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี (r) สามารถเขียนแบบ Langmuir - Hinshelwood ได้ดังนี้

$$r = \frac{k_1 p_{\text{H}_2\text{O}}}{1 + k_2 p_{\text{H}_2\text{O}} + k_3 p_{\text{H}_2}} \quad \text{----(2)}$$

โดยที่ $p_{\text{H}_2\text{O}}$ และ p_{H_2} = ความดันย่อยของแก๊ส H_2O และ H_2

k_1, k_2, k_3 = ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาหาได้จากทดลอง

ส่วนการใช้ไอน้ำที่มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผสมอยู่ด้วยในการกระตุ้น ไอน้ำจะเกิดปฏิกิริยาลดลง ทั้งนี้เพราะแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีอยู่จะเกิดปฏิกิริยาแข่งขันกับไอน้ำ



รูปที่ 2.5 ผลของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อปฏิกิริยา การกระตุ้นด้วยไอน้ำ
ที่มา : (Ergun et al., 1965)

การกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วงระหว่าง 800 ถึง 900 องศาเซลเซียส วัสดุที่ถูกรีดใช้ควรถูกเผาเป็นถ่านชาร์เสียก่อน ส่วนวิธีการผลิตนั้น คล้ายกับการกระตุ้นด้วยไอน้ำและปฏิกิริยาเป็นแบบดูดความร้อน ดังสมการ (3) และ (4)



$$r = \frac{k_1 p_{CO_2}}{1 + k_2 p_{CO} + k_3 p_{CO_2}} \quad \text{---(4)}$$

โดยที่ p_{CO_2} และ p_{CO} = ความดันย่อยของแก๊ส CO_2 และ CO

k_1, k_2, k_3 = ค่าคงที่อัตราที่เกิดปฏิกิริยาหาได้จากกราฟทดลอง

ค. การกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิเจน (หรืออากาศ) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนที่เกิดขึ้นง่าย และเร็วกว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำ หรือการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คาดว่าขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาอาจเป็นดังสมการ



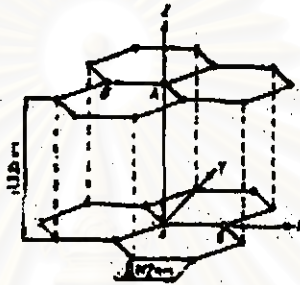
ปฏิกิริยาทั้งสองเป็นแบบคายความร้อน และอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนมอนนอกไซด์กับคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ถ่านชาร์ที่ถูกกระตุ้นด้วยอากาศที่มีออกซิเจนปนอยู่จะเกิดหมู่ฟังก์ชันนอลที่มีออกซิเจนขึ้นที่ผิวของถ่านชาร์จำนวนมาก แต่อากาศไม่นิยมใช้เป็นตัวกระตุ้น เพราะควบคุมได้ยาก และเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนจึงไม่สามารถรักษาอุณหภูมิในเตาให้คงที่ได้ ทั้งนี้เพราะออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงเกินไป

ตารางที่ 2.3 การดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้น ณ ภาวะต่าง ๆ กัน (Hassler, 1974)

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

2.5 โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ (Structure of Activated carbon)

ในการกระตุ้นจะทำให้ถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์มีความพรุนมากขึ้นเนื่องจากการสูญเสียสารประกอบคาร์บอนระหว่างช่องว่างผลึกคาร์บอน รูพรุนทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น เพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ การกระตุ้นที่เหมาะสม คือการทำให้มีความพรุนไม่ใช่เป็นการกระตุ้นให้ขนาดของรูใหญ่



รูปที่ 2.6 การจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมในผลึกของแกรไฟต์ (Jankowska, 1991)

โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ขึ้นอยู่กับภาวะการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิ และเวลาในการให้ความร้อน นอกจากนี้ยังขึ้นกับชนิด และความบริสุทธิ์ของวัตถุดิบที่ใช้ ผลึกของแกรไฟต์มีสมบัติใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 ถึง 10 นาโนเมตร พบว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเรียงตัวของผลึก โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 1,000 ตารางเมตรต่อกรัม และบางครั้งมีจำนวนมากถึง 1,500 ตารางเมตรต่อกรัม ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของรูปร่างและขนาดของความพรุน จึงทำให้มีผลต่อกลไกการดูดซับ ดังนั้นจึงได้จำแนกชนิดของรูพรุนตามขนาดรัศมีรูพรุนออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

- รูพรุนขนาดใหญ่ (Macropores) มีรัศมีรูพรุนมากกว่าหรือเท่ากับ 500 ไมโครเมตร มีปริมาตรของ รูพรุนขนาดใหญ่อยู่ระหว่าง 0.2 – 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และมีพื้นที่ผิวจำเพาะไม่เกิน 0.5 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับรูพรุนประเภทอื่นแล้ว รูพรุนขนาดใหญ่มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยมาก ดังนั้นรูพรุนประเภทนี้จึงไม่มีความสำคัญต่อการดูดซับ เพียงแต่ทำหน้าที่เป็นทางส่งผ่านอนุภาคเข้าไปในรูที่เล็กกว่า

- รูพรุนขนาดกลาง (Mesopores) หรือที่เรียกกันว่า Transitional pores มีรัศมีรูพรุนอยู่ในช่วงระหว่าง 15 ถึง 500 ไมโครเมตร โดยเฉลี่ยถ่านกัมมันต์มีปริมาตรของมีรูพรุนขนาดกลางประมาณ

0.1 – 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และมีพื้นที่ผิวจำเพาะระหว่าง 20 – 100 ตารางเมตรต่อกรัม ตัวอย่างสารดูดซับ ที่มีรูพรุนขนาดกลาง ได้แก่ ซิลิกาเจล (Silica gel) อะลูมินาเจล (Alumina gel) และ อะมิโนซิลิเกต คะตะลิสต์ (Amino silicate catalyst)

- รูพรุนขนาดเล็ก (Micropores) ปกติมีขนาดรัศมีรูพรุนน้อยกว่า 15 ไมโครเมตร โดยเฉลี่ยถ่านกัมมันต์มีปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.2 - 0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า 100 ตารางเมตรต่อกรัม พลังงานในการดูดซับของรูพรุนขนาดเล็กมีมากกว่าในรูพรุนขนาดกลาง หรือผิวอื่นที่ไม่มีรูพรุน ดังนั้นรูพรุนขนาดเล็กจึงมีความสำคัญที่สุดในการดูดซับ เนื่องจากมีพื้นที่การดูดซับ และพลังงานดูดซับ (Adsorption energy) มากที่สุด ทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้นมากที่ความดันต่ำ ๆ รูพรุนขนาดเล็กมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวจำเพาะ เชื่อกันว่าปริมาณของรูพรุนแต่ละขนาดหรือที่เรียกกันว่าการกระจายขนาดของรูพรุน จะขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบ และวิธีการกระตุ้น

รูพรุนส่วนใหญ่จะเกิดในช่วงการออกซิไดซ์ ซึ่งเป็นการกำจัดสารอินทรีย์ต่าง ๆ ออกจากช่องว่างของถ่านซาร์ที่ใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้น รวมทั้งเกิดการจัดเรียงและเคลื่อนย้ายอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเพื่อให้เกิดช่องว่างที่มีอำนาจในการดูดซับ รูพรุนที่มีขนาดใหญ่จะทำหน้าที่เป็นเพียงทางผ่านของสารถูกดูดซับเข้าไปยังรูพรุนขนาดเล็ก (Redriguez-Reinoso et al, 1965) จึงไม่มีผลต่อการดูดซับ แต่จะมีผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับ ส่วนรูพรุนขนาดกลางนั้นสามารถดูดซับโมเลกุลของของเหลวได้บ้าง รูพรุนขนาดเล็กมีหน้าที่ในการดูดซับ จึงมีผลต่อความจุในการดูดซับ โดยเฉพาะการดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ

2.6 โครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์เตรียมมาจากถ่านซาร์ที่ได้จากเผาผลาญสารอินทรีย์ด้วยความร้อน (Pyrolysis) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่าคาร์บอนไนเซชัน อะตอมต่าง ๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอน ได้แก่ ออกซิเจน ไนโตรเจนและ ไฮโดรเจน จะถูกกำจัดออกในรูปของแก๊ส อะตอมคาร์บอนที่เหลือจะจัดเรียงเป็นชั้น ๆ แต่ละชั้นจะประกอบด้วยวงแหวนอะโรมาติก (Aromatic ring) เชื่อมโยงกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ทำให้เกิดช่องว่างหรือโพรง ซึ่งเป็นที่อยู่ของพวกทาร์ และสารอื่น ๆ ที่ได้จากการเผาผลาญ ช่องว่างรูพรุนเหล่านี้จะกลายเป็นรูพรุนที่มีความสามารถในการดูดซับโดยการกระตุ้น ซึ่งจะเป็นการล้างพวกทาร์และสารต่าง ๆ ที่ได้จากการเผาผลาญออกจากช่องว่างหรือโพรง แล้วจะสร้างหมู่ฟังก์ชันนัลขึ้นมาแทน ดังนั้นโครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์มีผลต่อความสามารถในการดูดซับด้วย

โดยทั่วไปผิวของถ่านกัมมันต์เกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันชนิดต่าง ๆ ซึ่งเกิดจากอะตอมของคาร์บอนกับออกซิเจน ที่เรียกว่า ผิวออกไซด์ มีอยู่ 2 ชนิด คือ

2.6.1 ชนิดที่เป็นกรด มักเกิดในถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นที่อุณหภูมิไม่สูงมากนัก คือ ประมาณ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส หมู่ฟังก์ชันที่เกาะอยู่บนผิวถ่านกัมมันต์จะมีสมบัติคล้ายกรด ได้แก่ Carbonyls, Phenols, Lactones, Aldehyde, Ketones, Quinones, Hydroquinone, Anhydride เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์แบบนี้ค่อนข้างเสถียรแม้จะอยู่ในสุญญากาศ โดยทั่วไปจะเสถียรที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้เล็กน้อยจะสลายตัวเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ และถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้มาก ๆ จะเกิดการสลายตัวให้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน

I : Carboxyl group,

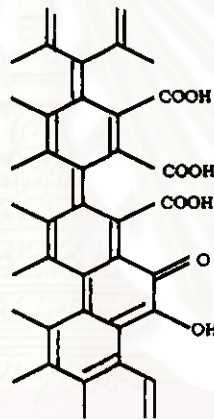
a: Removed by 200 °C

b: Removed above 325 °C

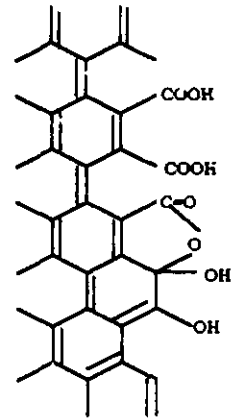
II: Carboxyl group which exists as lactol group

III: Phenolic hydroxyl group

IV: Carboxyl group



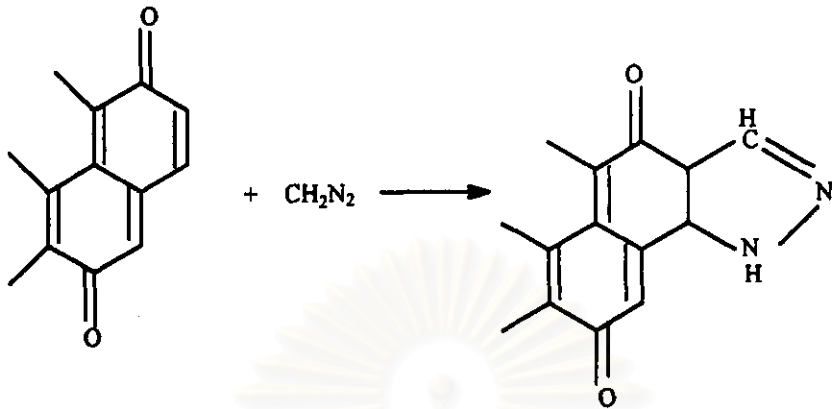
Open type



Lactone type

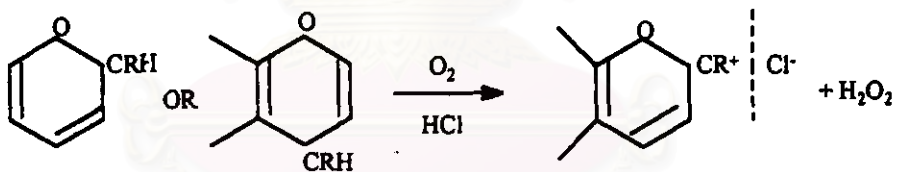
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดบนผิวถ่านกัมมันต์ (Suzuki, 1990)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างปฏิกิริยาของถ่านกัมมันต์ที่มีผิวเป็นกรด (Mattson ,1971)

2.6.2 ชนิดที่เป็นต่าง เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 ถึง 900 องศาเซลเซียส หมู่ฟังก์ชันนัลที่เกาะอยู่บนผิวของถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับโมเลกุลของกรดได้ดี ได้แก่ Hydroxide, Carbonate เป็นต้น



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างปฏิกิริยาการดูดซับโมเลกุลกรด ด้วยถ่านกัมมันต์ที่มีผิวเป็นต่าง (Bansel and Coworker, 1988)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากการศึกษาของ Gergova (1993) พบว่าถึงแม้จะทำการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการเดียวกันจากวัตถุดิบต่างชนิดกัน หมู่ฟังก์ชันัลของออกซิเจนบนผิวของถ่านกัมมันต์จะมีความแตกต่างกันด้วย ดังแสดงในตารางที่ 2.4

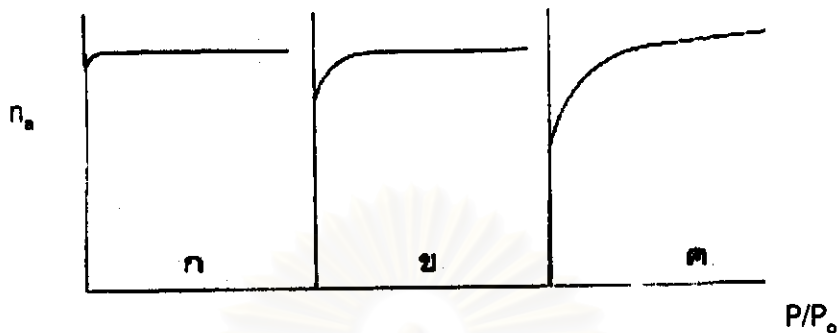
ตารางที่ 2.4 ส่วนประกอบหมู่ฟังก์ชันัลของออกซิเจนบนผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัตถุดิบที่เหลือจากการเกษตรต่างชนิดกัน (Gergova, 1993)

วัตถุดิบ	Content of surface functional groups (mg-eq g ⁻¹)	
	C-O ± 0.03	O-H ±0.05
Apricot stones	3.27	0.02
Grape seeds	1.32	2.05
Cherry stones	1.42	1.90

2.7 ทฤษฎีการดูดซับ

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่โมเลกุล ของสารที่เรียกว่าสารถูกดูดซับ (Adsorbate) เกาะอยู่บนผิวตัวดูดซับ (Adsorbent)

กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการหนึ่งที่สารประกอบต่าง ๆ เคลื่อนย้ายจากสารละลายจนกระทั่งเข้าสู่ภาวะสมดุลระหว่าง ความเข้มข้นของสารละลายกับปริมาณผิวของตัวดูดซับ การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักคาร์บอน และความเข้มข้นของสารละลายที่เหลืออยู่ ซึ่งเส้นความสัมพันธ์นี้เราเรียกว่า "ไอโซเทอมของการดูดซับ" สำหรับถ่านกัมมันต์จะมีลักษณะของไอโซเทอมแตกต่างกันไปตามชนิดของรูพรุน ดังแสดงในรูปที่ 2.10



Different types of adsorption isotherms (N_2 at 77 K) on microporous carbons

รูปที่ 2.10 เส้นไอโซเทอมของถ่านกัมมันต์ชนิดต่าง ๆ

ที่มา: Rodriguez-Reinoso, 1965

(ก) ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก ที่มีขนาดไม่แตกต่างกันมาก เส้นความสัมพันธ์จะขนานกับแกนราบ

(ข) ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก และมีขนาดแตกต่างกันมากกว่าแบบแรก เส้นความสัมพันธ์จะขนานกับแกนราบ แต่ก่อนที่จะเข้าสู่ช่วงแนวราบเส้นความสัมพันธ์จะมีความโค้งมนมากกว่าและความเข้มข้นที่สมดุลของสารดูดซับสูงกว่า

(ค) ถ่านกัมมันต์จะประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กที่มีขนาดแตกต่างกันมาก และมีรูพรุนขนาดกลาง มักพบถ่านกัมมันต์เกรดการค้า

อัตราเร็วของการดูดซับขึ้นกับขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้ (Jankowska, 1991)

- การพาโมเลกุลสารดูดซับผ่านชั้นฟิล์มซึ่งอยู่รอบ ๆ สารดูดซับ
- การแพร่กระจายเข้าไปในรูพรุน และผ่านไปตามผนังของผิวรูพรุนของสารดูดซับ
- ยึดติดกับโมเลกุลของสารดูดซับด้วยผิวว่องไว อีกทั้งยังเกิดพันธะระหว่างสารดูดซับกับผิวด้านกัมมันต์

โดยทั่วไปการดูดซับมี 2 ชนิด คือการดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) เกิดขึ้นโดยพันธะที่ดึงดูดระหว่างสารดูดซับ กับตัวดูดซับ เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ เป็นแรงที่อ่อน ดังนั้นสารดูดซับอาจหลุดจากกันได้ง่าย อันเป็นกระบวนการย้อนกลับ ส่วนการดูดซับอีกชนิดหนึ่งคือการดูดซับทาง

เคมี (Chemical adsorption) เกิดขึ้นโดยมีพันธะที่เชื่อมระหว่างสารดูดซับกับตัวดูดซับเป็นพันธะที่แข็งแรง และจึงไม่เกิดกระบวนการย้อนกลับ การดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ปริมาณของสารดูดซับที่ถูกยึดโดยตัวดูดซับขึ้นกับความเข้มข้นของสารดูดซับ อุณหภูมิ ชนิดของตัวดูดซับและสารดูดซับ โดยทั่วไปการศึกษาหาปริมาณสารดูดซับ จะทำการวัดที่อุณหภูมิคงที่ ซึ่งความสัมพันธ์ที่ได้นี้เรียกว่า ไอโซเทอมของการดูดซับ สมการที่ใช้อธิบายข้อมูลไอโซเทอม ได้แก่ Freundlich, Langmuir และ Brunauer, Emmet & Teller หรือ ที่เรียกกันว่า BET isotherm ไอโซเทอมนี้ได้พัฒนาโดย Freundlich และ Langmuir ซึ่งเป็นสมการที่นำมาประยุกต์ใช้มากที่สุดในการใช้หาพื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์

2.7.1 แรงตึงผิว (Surface Tension)

หยดของเหลวมีแนวโน้มที่จะจัดตัวเป็นทรงกลมซึ่งเป็นรูปร่างที่มีพื้นที่ผิวน้อยที่สุดสำหรับปริมาตรที่มีอยู่ เปรียบเหมือนว่าของเหลวถูกปิดล้อมด้วยผิวที่ยืดหยุ่นได้ ลักษณะนี้มีความแตกต่างกันระหว่างแรงตึงผิวกับแรงตึงจากวัสดุที่มีความยืดหยุ่นได้ ถ้าดึงวัสดุผิววัสดุจะตึงขึ้นแต่ถ้าแผ่ของเหลวออกเพื่อให้มีพื้นที่มากขึ้นแรงตึงผิวจะลดลง แรงตึงผิวเป็นค่าที่แสดงถึงแรงยึดโมเลกุลของเหลวไว้ด้วยกัน โมเลกุลในหยดเหลวคงรูปอยู่ได้จากการดึงดูดซึ่งกันและกันกับโมเลกุลรอบ ๆ ข้าง แต่โมเลกุลซึ่งอยู่ที่ผิวจะได้รับแรงตึงจากภายในซึ่งไม่สมดุลกับภายนอก ดึงสู่ภายในจนกระทั่งพื้นผิวมีขนาดเล็กที่สุด ถ้าหากมีหยดของเหลวขนาดไม่เท่ากันสองหยดอยู่ในบริเวณเดียวกัน หยดของเหลวจะสามารถรวมเป็นหยดเดียว ซึ่งมีพื้นที่ผิวรวมน้อยกว่าขนาดตอนเริ่มต้นรวมกัน กรณีเช่นนี้เกิดเมื่อหยดของเหลวสัมผัสกัน สำหรับหยดของเหลวที่ไม่สัมผัสกันการรวมกันจะเกิดโดยการถ่ายเทผ่านภาวะไอ หากในระบบมีองค์ประกอบมากกว่าหนึ่ง มีแรงตึงผิวไม่เท่ากัน จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในองค์ประกอบที่ผิวหน้า ตัวอย่างเช่น กรณีสารละลายเอธานอลที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย เอธานอลมีแรงยึดกันของโมเลกุลน้อยกว่าน้ำจะอยู่ที่ผิวหน้า โมเลกุลของน้ำมีแรงยึดกันมากกว่าทำให้มีแรงตึงผิวมากกว่า การดึงดูดซึ่งกันและกันระหว่างโมเลกุลของน้ำนี้ จะทำให้มีแรงเบียดแทรกผิวหน้าโมเลกุลที่มีแรงดึงดูดน้อยกว่า

ปรากฏการณ์จากแรงตึงผิวใช้อธิบายความสามารถในการทำให้สารบริสุทธิ์ของถ่านกัมมันต์ คาดกันว่าสารปนเปื้อนซึ่งมีแรงตึงผิวต่ำกว่าจะรวมตัวกันเป็นฟิล์มที่ผิวของเหลวและหน้าที่ของถ่านกัมมันต์ คือ การทำให้มีพื้นที่ผิวมาก ๆ ที่จะให้ฟิล์มของเหลวไปเกาะ

2.7.2 การกลั่นตัวในคาпилลารี (Capillary Condensation)

ของเหลวที่เปียกผนังท่อคาพิลลารีจะขึ้นสู่ท่อ และผิวหน้าของเหลวจะเว้าเข้าข้างในและมีความดันไอต่ำลง ภายในท่อคาพิลลารีเล็ก ๆ นี้ไอจะกลั่นตัวเป็นของเหลวเมื่อความดันไอต่ำลง การกลั่นตัวขึ้นกับเส้นผ่านศูนย์กลางคาพิลลารี ตามทฤษฎีเมื่อคาพิลลารีในโครงสร้างของของแข็งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ กัน คาพิลลารีที่แคบที่สุดจะมีความดันไอต่ำที่สุด คาพิลลารีจะให้พื้นผิวซึ่งเกิดการดูดซับได้ แต่ความแตกต่างในเรื่องขนาดและรูปร่างของคาพิลลารี จะมีความสำคัญในเรื่องการดูดซับในหลายกรณี ผ่านกัมมันต์ไม่สามารถที่จะดูดซับสารได้เต็มที่ เนื่องจากพื้นผิวส่วนใหญ่เป็นผนังของคาพิลลารีและโมเลกุลที่จะผ่านเข้าไปได้จะต้องมีขนาดเล็กพอจะลอดเข้าไป โครงสร้างของผ่านกัมมันต์มีลักษณะเป็นตาข่ายของรูพรุนซึ่งมีรูปร่างและขนาดแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้

2.7.3 ทฤษฎีของแลงเมียร์ (Langmuir Theory)

พื้นผิวของตัวดูดซับจะมีลักษณะแตกต่างกัน เมื่อโมเลกุลของไอเคลื่อนที่มาชนกับที่ว่างบนผิวที่เหมาะสม โมเลกุลก็จะเกาะติดอยู่ การเกาะติดนี้ขึ้นกับพลังงานความแข็งแรงของการดึงดูด ชนิดของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ ในตอนแรกเมื่อพื้นผิวยังไม่มียโมเลกุลเกาะอยู่ จำนวนโมเลกุลที่กลั่นตัวจะมีมากกว่าที่ระเหย เมื่ออัตราการระเหยเท่ากับการกลั่นตัวก็จะถึงจุดสมดุลจำนวนโมเลกุลซึ่งถูกดูดซับที่สมดุลเป็นฟังก์ชันของปัจจัยต่าง ๆ คือ

1. เวลาเฉลี่ยระหว่างที่โมเลกุลกลั่นตัวและกลับกลายเป็นไอ
2. พื้นที่รวมของพื้นผิวของแข็ง
3. สัดส่วนของพื้นผิวรวมซึ่งมีอำนาจในการดูดซับโดยเฉพาะ
4. จำนวนโมเลกุลที่สามารถถูกดูดซับในสถานะแก๊สหรือสารระเหย
5. จำนวนชั้นของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ

2.7.4 การดูดซับทางกายภาพและทางเคมี (Physical and Chemical Adsorption)

การดูดซับทางกายภาพมีแรงยึดเกาะจากการดูดซับอ่อน ต้องการพลังงานเพื่อการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าแรงยึดทางเคมี เมื่ออยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว และ แก๊ส โมเลกุลที่ถูกดูดซับยังมีสมบัติทางเคมีเหมือนเดิม สามารถเกิดการดูดซับได้หลายชั้น การดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของสารดูดซับและผิวของสารดูดซับมีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนกันหรือใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน พันธะที่เกิดขึ้นเป็นพันธะทางเคมี การดูดซับโดยวิธีนี้จะแรงกว่าการดูดซับทางกายภาพ บางครั้งการดูดซับต้องอาศัยพลังงานเข้าร่วมด้วยเรียกว่า การดูดซับแบบกระตุ้น (Activated Adsorption) ชั้นการดูดซับทางเคมีหนาเพียงโมเลกุลเดียว เพราะโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับโมเลกุลบนผิวของสารดูดซับต้องสัมผัสกันโดยตรง และเกิดการถ่ายเทหรือใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทั้งสองแบบคือ

1. ขนาดความร้อนของการดูดซับ เมื่อแก๊สดูดซับบนผิวของสารดูดซับ จะมีความร้อนถูกปล่อยออกมา ถ้าเป็นการดูดซับทางกายภาพจะมีขนาดพอกับความร้อนที่ปล่อยออกมาในการกลั่นตัวจากแก๊สเป็นของเหลว ประมาณกิโลแคลอรีต่อโมล ถ้าเป็นการดูดซับทางเคมีความร้อนของการดูดซับประมาณ 10^4 ถึง 10^5 แคลอรีต่อโมล
2. อุณหภูมิการดูดซับ การดูดซับทางกายภาพเกิดภายใต้ภาวะ อุณหภูมิ และความดันที่เหมาะสม ขณะที่การดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นเฉพาะเมื่อสารสามารถเกิดพันธะเคมีกับผิวของตัวดูดซับ
3. โมเลกุลที่ถูกดูดซับทางกายภาพ สามารถทำให้หลุดออกจากผิวของตัวดูดซับได้ด้วยวิธีลดความดันที่อุณหภูมิเดียวกับการดูดซับโดยโมเลกุลไม่เปลี่ยนแปลง การจัดชั้นโมเลกุลที่ถูกดูดซับโดยวิธีเคมีทำได้ยาก
4. จำนวนชั้นที่ถูกดูดซับ การดูดซับทางกายภาพสามารถเกิดขึ้นโมเลกุลที่ถูกดูดซับบนผิวร้อนกันได้หลายชั้น แต่การดูดซับทางเคมีมักเกิดโมเลกุลที่ถูกดูดซับเพียงชั้นเดียว บางกรณีการดูดซับทางกายภาพอาจเกิดบนชั้นโมเลกุลที่ถูกดูดซับทางเคมี
5. พลังงานกระตุ้น การดูดซับทางกายภาพเกิดได้อย่างรวดเร็วไม่ต้องอาศัยพลังงานกระตุ้น การดูดซับทางเคมีอาจเกิดได้ทันทีโดยทั่วไปแต่ต้องอาศัยพลังงานกระตุ้น

2.7.5 ลักษณะทางคุณภาพของผิว (Qualitative Characteristics of Surfaces)

ทฤษฎีนี้อธิบายการเลือกดูดซับบนผิวด้านกัมมันต์ที่มีต่อสารต่าง ๆ โดยอธิบายในรูปของ แอคทีฟเซนเตอร์(Active Center) ทฤษฎีนี้คิดว่าอำนาจการดูดซับไม่ได้มีอยู่บนทุกส่วนของพื้นผิว แต่อำนาจการดูดซับเฉพาะสารจะมีอยู่เป็นส่วนย่อย ๆ แยกจากกันเรียกว่า แอคทีฟเซนเตอร์ ที่บริเวณเหล่านี้อะตอมที่ผิวจะจัดเรียงตัวเป็นลักษณะเฉพาะ ซึ่งวิธีในการกระตุ้นจะให้ลักษณะเฉพาะตัวของแอคทีฟเซนเตอร์ บนผิวด้านกัมมันต์หนึ่ง ๆ จะมี แอคทีฟเซนเตอร์ หลายแบบ พื้นผิวที่ดูดซับสองแบบซึ่งดูดซับภายใต้ภาวะเดียวกัน เมื่อภาวะเปลี่ยนไปอำนาจการดูดซับก็อาจแตกต่างกันได้ แต่ละแอคทีฟเซนเตอร์ จะมีการเลือกชนิดของสารที่จะถูกดูดซับ ซึ่งอาจจะไม่ใช่เพียงชนิดเดียวกัน

2.8 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับสีของถ่านกัมมันต์

การดูดซับสีในสารละลายด้วยถ่านกัมมันต์ ประการสำคัญขึ้นอยู่กับ การเลือกใช้ถ่านกัมมันต์ ต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับสารที่จะดูดซับ ทั้งนี้เพราะว่าถ่านกัมมันต์ตัวหนึ่ง ๆ ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้กับสารทุกชนิด

โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อน เชื่อมโยงกันด้วยรูพรุนลักษณะเหมือนตาข่ายมีรูปร่างแตกต่างกันออกไป พบว่าเมื่อใช้เวลากะตุ้นเพิ่มขึ้น พื้นที่ผิวจะสูงขึ้น ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีความสามารถในการดูดซับ (Adsorptive power) เพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2.5 เมื่อกระตุ้นถ่านซาร์ที่ได้จากถ่านหินซับปิทูนินด์ เป็นเวลา 30 นาที ด้วยอากาศที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิว 815 ตารางเมตรต่อกรัม มีความสามารถในการดูดซับ Aniline blue ได้ 0.14 กรัมต่อกรัม แต่ถ้าเพิ่มเวลาในการกระตุ้นเป็น 45 นาที พื้นที่ผิวเท่ากับ 1,065 ตารางเมตรต่อกรัม มีความสามารถดูดซับ Aniline blue ได้ 0.28 กรัมต่อกรัม ซึ่งการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าส่วน พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเพียง 250 ตารางเมตรต่อกรัม ที่เป็นเช่นนี้อธิบายได้ว่าในช่วงแรกของการกระตุ้น รูพรุนยังเล็กเกินไปที่จะยอมให้โมเลกุลของ Aniline blue เข้าไปยังรูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้ แต่เมื่อเพิ่มเวลาการกระตุ้นมากขึ้น จะทำให้มีการขยายขนาดของรูพรุน จนทำให้สามารถดูดซับ Aniline blue เพิ่มขึ้นได้

ตารางที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของเวลาการกระตุ้นที่มีต่อค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์กับค่าการดูดซับ

Time ¹ of activation minutes	Surface area m ² /g Carbon	Adsorption (m ² /g)	
		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

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

2.9 สมบัติของไมโครเวฟ

ไมโครเวฟ เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีลักษณะเหมือนแสงที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง และสามารถทะลุผ่านสสารที่มีความโปร่งใสได้ เป็นพลังงาน (radiant energy) แตกต่างจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่าง ๆ คือ แตกต่างที่ความยาวของคลื่นและความถี่ ไมโครเวฟจะมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงของคลื่นวิทยุกับรังสีอินฟราเรด ความยาวคลื่นของแม่เหล็กไฟฟ้าจะแปรผกผันกับความถี่ ซึ่งมีความถี่ประมาณ 300 MHz ถึง 300 GHz ไมโครเวฟเดินทางเป็นเส้นตรงเหมือนกับแสง และสะท้อนหักเหกับโลหะผ่านอากาศและตัวกลางอื่น ๆ แต่ไม่ทุกชนิด เช่น แก้วบางชนิด กระดาษ และพลาสติก ไมโครเวฟจะถูกดูดกลืนได้ด้วยพวกลสารไดอิเล็กตริก เช่น น้ำ หรือคาร์บอน เมื่อไมโครเวฟถูกสะท้อนกลับมันจะไม่ให้ความร้อนกับผิวสัมผัสนั้น มันจะให้ความร้อนเฉพาะกับวัตถุที่ถูกกลืนมันเท่านั้น ในการให้ความร้อนมันจะสูญเสียพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า (Loss factor) วัตถุที่ถูกกลืนไมโครเวฟได้สูงสามารถถูกทำให้ร้อนได้ง่ายด้วยไมโครเวฟ

กลไกการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

วัตถุโดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยอนุภาคประจุไฟฟ้าบวก และอนุภาคประจุไฟฟ้าลบจำนวนเท่ากัน จึงทำให้วัตถุนั้นมีลักษณะเป็นกลางทางไฟฟ้า ถ้าวัตถุไม่มีสมบัติการนำนั้นคือเป็นพวกลสารไดอิเล็กตริก แต่เมื่อนำไปวางในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โมเลกุลจะถูกเหนี่ยวนำทำให้เกิดการเคลื่อนที่ไปทิศทางต่าง ๆ และพยายามเรียงตัวตามสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้านี้โมเลกุลจะทำตัวเหมือนมี 2 ขั้ว และหมุนรอบตัวตามแกน โมเลกุลเหล่านี้จะจัดตัวตามแนวขั้วบวกและลบ กระแสไฟฟ้าทั่วไปจะเปลี่ยนทิศทางกลับไปมา 60 ครั้งใน 1 วินาที ในทำนองเดียวกันไมโครเวฟมีความถี่อยู่ในช่วง 915-2,450 MHz เมื่อผ่านไมโครเวฟลงไป โมเลกุลที่มีขั้วมีแนวโน้มที่จะเรียงตัวเป็นเส้นตรงตามสนามแม่เหล็ก แต่สนามแม่เหล็กจะกลับไปกลับมา 915-2,450 ล้านครั้งต่อวินาที โมเลกุลซึ่งพยายามที่จะแกว่งที่ความถี่นั้น จะทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างโมเลกุล จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว

จากการที่สารไดอิเล็กตริกสามารถทำให้ร้อนขึ้นได้จากการให้พลังงานไมโครเวฟเข้าไป โดยความร้อนที่เกิดขึ้น มาจากการจัดเรียงตัวของสารไดอิเล็กตริกตามขั้วไฟฟ้าภายใต้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีการสลับไปมาอย่างรวดเร็ว เรียกว่าการเกิดไดโพลโรเทชัน (Dipole Rotation) ผลจากการเกิดไดโพลโรเทชัน ทำให้สารไดอิเล็กตริก ร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว ยกตัวอย่างเช่นโมเลกุลของน้ำ ซึ่งปกติเป็นโมเลกุลที่มีขั้ว (กฤษณา ชูติมา, 2518) ภายใต้ภาวะปรกติ โมเลกุลของมันจะจัดเรียงตัวแบบอิสระ แต่เมื่อมีสนามไฟฟ้ามากกระทำ มันจะพยายามจัดเรียงตัวตามสนามไฟฟ้า ผลจากการสลับไปมาของขั้ว

ไฟฟ้า ทำให้โมเลกุลของมันต้องปรับตัวตามการเปลี่ยนแปลงมีผลทำให้ความร้อนเกิดขึ้น อันเนื่องมาจากการเสียดสีกันในระหว่างการหมุนของโมเลกุลตามสนามไฟฟ้า

การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟสามารถแสดงได้เป็นค่าคงที่เชิงซ้อน (ϵ^*) ดังสมการที่ 1

$$\epsilon^* = \epsilon' - j \epsilon'' \dots\dots\dots(1)$$

โดยที่ ϵ' คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

ϵ'' คือเทอม (Loss factor) เป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการทำให้ สารไดอิเล็กตริก ร้อนขึ้น ส่วนค่าพลังงานที่ถูกดูดซับของสารไดอิเล็กตริก แสดงได้ดังสมการที่ 2

$$P = 0.556 \cdot 10^{-10} \epsilon'' E^2 V \dots\dots\dots(2)$$

โดยที่ P ค่าพลังงานที่ถูกดูดซับโดยสารไดอิเล็กตริก (Watts)

f คือค่าความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ (Hz)

E คือค่ารากที่สองของความเข้มของสนามไฟฟ้าในเนื้อวัตถุ (Voles/cm)

V คือ ปริมาตรของวัตถุ (cm^3)

ค่าความลึกในการทะลุผ่าน (D_p) คือความลึกที่ไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านเข้าไปในเนื้อวัตถุและความเข้มลดลงเหลือ 36.8 % ของความเข้มเริ่มต้นสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3

$$D_p = \lambda_0 \cdot [(1 + (\epsilon''/\epsilon')^2)^{1/2} - 1]^{1/2} / (2\pi(2\epsilon')^{1/2}) \dots\dots\dots(3)$$

โดยที่ λ_0 คือความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศที่ 2,450 Hz เท่ากับ 12.24 cm.

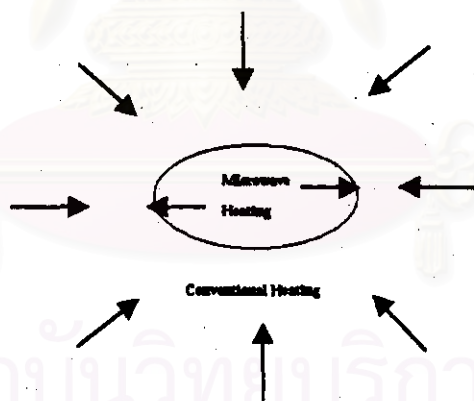
โดยปรกติด้านหินนั้นมีความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟน้อยมาก (Cha ,1994) แต่ด้านซาร์ที่ได้จากการไพโรไลซ์ด้านหิน จะมีลักษณะเป็นไดอิเล็กตริกค่อนข้างมาก (Bates, 1989) สอดคล้องกับ (Berkowitz, 1985) ค่าไดอิเล็กตริกจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่ออุณหภูมิในการไพโรไลซ์สูงกว่า 600 องศาเซลเซียส และค่าการนำไฟฟ้าของด้านหินจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อทำการไพโรไลซ์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 480 องศาเซลเซียส จากที่ได้ทราบมาแล้วว่าด้านซาร์ที่ได้จากการไพโรไลซ์ มีความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ดี เมื่อด้านซาร์อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า อุณหภูมิของด้านซาร์จะสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้อุณหภูมิของแก๊สเฟสกับอนุภาคด้านซาร์แตกต่างกันมาก ถ้าโมเลกุลของแก๊สมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบเมื่อส่งผ่านไปยังด้านซาร์ คาร์บอนจะจับออกซิเจนอย่างรวดเร็ว เช่น โมเลกุลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระขึ้น หรือทำปฏิกิริยาโดยตรงกับออกซิเจนที่มีในโมเลกุล

สรุป ไมโครเวฟสามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาของด้านซารีได้ดังนี้

1. ทำปฏิกิริยาโดยตรงกับธาตุในโมเลกุล
2. สร้างอิเล็กตรอนอิสระเมื่อโมเลกุลแก๊สสัมผัสกับด้านซารี
3. เป็นแหล่งความร้อนให้กับอนุภาคของแข็งสำหรับปฏิกิริยา

ความแตกต่างของการให้ความร้อน

ในการให้ความร้อนโดยทั่วไป เช่นการใช้เปลวไฟโดยตรง การแผ่รังสี และการใช้อากาศร้อน แหล่งความร้อนจะทำให้โมเลกุลของวัตถุร้อนจากผิวภายนอกเข้าไปข้างใน ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (temperature gradient) ซึ่งอาจจะเผาไหม้ส่วนนอก ก่อนที่อุณหภูมิข้างในจะสูง ขึ้นถึงระดับที่ต้องการ ในทางตรงข้ามไมโครเวฟจะทะลุทะลวงวัตถุที่หนาหลาย ๆ เซนติเมตรพร้อมกันหมด ทำให้โมเลกุลที่มีขั้วสั้นสะเทือนในเวลาเดียวกันจะไม่มีการนำความร้อนจากผิวนอกเข้าไปข้างใน แต่ความร้อนจะถูกสร้างขึ้นอย่างรวดเร็วพร้อม ๆ กันทั่ววัตถุดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การให้ความร้อนแบบธรรมดาเปรียบเทียบกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.10.1 งานวิจัยในประเทศ

บุญชัย ตระกูลมหชัย (2537) ทำการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาตาลโดนดด้วยวิธีทางกายภาพ ภาวะที่เหมาะสมคือใช้ถ่านชาร์เตรียมจากจากกะลาตาลโดนด คาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง มีขนาดของอนุภาค 1.19 ถึง 1.68 มิลลิเมตร กระตุ้นด้วยแก๊สผสมที่ได้จากการเผาไหม้น้ำมันดีเซลกับไอน้ำอิ่มตัวยิ่งยวด ที่มีความเร็ว 6.44 เมตรต่อวินาที ในฟลูอิไดซ์เบดได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิว 1,800 ถึง 1,900 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าการดูดซับไอโอดีน 1,000 ถึง 1,300 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู 250 ถึง 350 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าแฉ่ำร้อยละ 10 ถึง 15 โดยน้ำหนัก ค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้ 30 ถึง 40

ภัทรา ปัญญาวัฒน์กิจ (2540) ได้ทำการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมันโดยกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวดยิ่ง พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์คือที่ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ถ่านที่ได้มีสมบัติดังนี้ ปริมาณผลิตภัณฑ์ร้อยละ 31.50 ปริมาณแฉ่ำร้อยละ 6.24 ปริมาณสารระเหยร้อยละ 27.76 และปริมาณคาร์บอนคงตัวเท่ากับ 64.48 ส่วนภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นคือที่ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมงใช้ขนาดถ่านชาร์ 0.35-0.85 มิลลิเมตร มีร้อยละผลิตภัณฑ์ 19.31 ความหนาแน่นเชิงปริมาตร 0.53 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าการดูดซับไอโอดีนและเมทธิลีนบลูเท่ากับ 779 และ 137 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมดเท่ากับ 670 ตารางเมตรต่อกรัม ประสิทธิภาพในการดูดซับไดโครเมตไอออนที่ pH 1 และ 2 เท่ากับ 147 และ 117 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

นิชชรี นิลนนท์ (2541) ศึกษาถึงการผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้โกงกาง โดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวดยิ่งกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์คือที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าของภัทรา ปัญญาวัฒน์กิจ (2540) เนื่องจากสารระเหยในไม้โกงกางสามารถไล่ออกได้ง่ายกว่ากะลาปาล์ม จึงใช้อุณหภูมิต่ำกว่า และทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ขนาดอนุภาค 0.6-1.18 มิลลิเมตร โดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดยิ่งกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในอัตราไหล 5 ลิตรต่อวินาที พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีสมบัติดังนี้ ค่าการดูดซับไอโอดีน 675 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู 254 มิลลิกรัมต่อกรัม

ค่าความหนาแน่น 0.323 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าพื้นที่ผิว 640 ตารางเมตรต่อกรัม ร้อยละผลิตภัณฑ์ 27.47

2.10.2 งานวิจัยต่างประเทศ

2.10.2.1 การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินและวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

Rish and Harrison (1985) พบว่าการกระตุ้นถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) ด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยการให้ความร้อนแบบธรรมดา จะมีค่าพื้นที่ผิวสูงสุดเท่ากับ 460 ตารางเมตรต่อกรัม

Kirubakaran, C. John, Krishnah, K. and Seshadri S. K. (1991) ได้ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว โดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งกับฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized bed) พบว่าประสิทธิภาพในการกระตุ้นด้วยฟลูอิดไคซ์เบด ดีกว่าแบบเบดนิ่งที่ภาวะในการผลิตเดียวกัน (ขนาด เวลา อัตราส่วนสารเคมีที่ใช้กระตุ้น แก๊สตัวกลาง) ดูจากค่าการดูดซับไอโอดีนและฟีนอล ที่ดีกว่า โดยใช้เวลาและอุณหภูมิในการกระตุ้นต่ำกว่า เมื่อเทียบกับแบบเบดนิ่ง และพบว่าการใช้แก๊สไนโตรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สตัวกลาง จะทำให้ปริมาณผลผลิตที่ได้สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับอากาศ ทั้งนี้เพราะอากาศมีส่วนทำให้เกิดการเผาไหม้ของคาร์บอนและภาวะที่เหมาะสมที่ศึกษาคือที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชม. โดยใช้ $ZnCl_2$ เป็นตัวกระตุ้น โดยใช้อัตราส่วนสารเคมีในการกระตุ้นที่ ร้อยละ 25 และใช้แก๊สไนโตรเจน และ คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สตัวกลาง ซึ่งมีค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 1,100 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีค่าพื้นที่ผิวสูงสุดเท่ากับ 2,000 ตารางเมตรต่อกรัม

Gergova, K. and others (1993) ได้ทำการทดลองผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุที่เหลือจากการเกษตร เช่น Apricot stone, Cherry stone และ Grape seeds ด้วยขั้นตอนเดียว คือ รวมกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน และกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำเข้าด้วยกัน ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส 650 องศาเซลเซียส และ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 2 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง ตามลำดับ ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 2.6 ถึง 2.8

ตารางที่ 2.6 สมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร

(Gergova et al.,1993)

วัตถุดิบ	ร้อยละถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตรต่อกรัม)	การดูดซับไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม)	การดูดซับเมทธิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อกรัม)
Apricot stones	18.16	1175	894	285
Grape seeds	26.23	487	607	192
Cherry stones	11.17	836	907	185

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

ดังนั้นวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ เป็นปัจจัยสำคัญต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ ทั้งนี้เนื่องจากวัตถุดิบแต่ละชนิดมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน และนอกจากนี้ปริมาณของลิกนินและเซลลูโลส ก็เป็นปัจจัยที่ควรนำมาพิจารณาในการเลือกวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์

(Gergova et al.,1993)

วัตถุดิบ	ร้อยละเซลลูโลส	ร้อยละลิกนิน	ร้อยละไฮโดรเซลลูโลส	อัตราส่วน ลิกนินต่อเซลลูโลส
Apricot stones	30	37	58	1.23
Grape seed	30	49	48	1.63
Cherry stones	28	40	55	1.43

ตารางที่ 2.8 คุณลักษณะของรูพรุน และความสามารถในการดูดซับของถ่านลิกนินกับถ่านเซลลูโลส (Gergova et al.,1993)

วัสดุดิบ	ร้อยละถ่าน ที่เตรียมได้	การดูดซับ ไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม)	V_{total} (cm^3/g)	V_{1micro} (cm^3/g)	V_{2meso} (cm^3/g)	V_{3macro} (cm^3/g)
เซลลูโลส	12.0	415	0.74	0.34	0.05	0.35
ลิกนิน	8.5	311	1.56	0.33	0.16	1.07

Gergova, K. and others (1993) ศึกษาการกระตุ้นวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรและถ่านหินลิกนิน เช่น เมล็ดแอปเปิ้ล เมล็ดลูกนัท เปลือกถั่วอัลมอนด์ และกะลามะพร้าวด้วยขั้นตอนเดียว คือ รวมกระบวนการคาร์บอนในเข้ชั้และกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำเข้าด้วยกัน โดยศึกษาถึงวิวัฒนาการของพื้นที่ผิวที่ว่องไวของถ่านกัมมันต์ พบว่าสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้เช่น รูพรุน ขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ เวลาในการกระตุ้น และธรรมชาติของวัสดุดิบและเมื่อนำไปศึกษาการดูดซับไอออนทองแดง พบว่าถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดกลางและใหญ่ มีความสามารถในการดูดซับไอออนทองแดงได้ดี

Gergova, K. and others (1995) ได้ทำการศึกษาถึงโครงสร้างรูพรุนของถ่านหินแอนทราไซต์ที่ทำการเผาด้วยแก๊สต่าง ๆ ก่อนนำมากระตุ้นด้วยไอน้ำที่ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูง และมีโครงสร้างเป็นรูพรุนขนาดเล็ก

Mohd Zobir Hussein and others (1995) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากขี้ของเปลือกต้นปาล์ม โดยการกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ และ CO_2 การใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นตัวกระตุ้นเพียงอย่างเดียวทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีสมบัติเป็นด่าง (pH=10) ส่วนการใช้ $ZnCl_2$ เป็นตัวร่วมในการกระตุ้นจะทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีสมบัติเป็นกรด (pH ประมาณ 6.6) จากการศึกษาพบว่าการใช้ความเข้มข้นของ $ZnCl_2$ ในช่วงร้อยละ 0-10 จะทำให้ได้รูพรุนขนาดเล็กและเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ $ZnCl_2$ ขึ้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของรูพรุนขนาดเล็กไปเป็นรูพรุนขนาดกลาง และจากการทดลองพบว่ามีความเป็นไปได้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากขี้ของต้นปาล์ม เนื่องจากค่าพื้นที่ผิวที่เตรียมได้มีค่ามาก (มากกว่า 2,000 ตารางเมตรต่อกรัม)

Ajay K. Dalai and others (1996) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินของแคนาดา โดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยใช้อุณหภูมิในช่วง 650-850 องศาเซลเซียส เวลา 0.5-4 ชั่วโมง ใช้ค่าการดูดซับไอโอดีนในการบอกคุณภาพของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ โดยการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบ เบดนิ่ง และแบบ ตะปั่วเต็ดเบด (Spouted bed) พบว่าผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้จากการใช้เบดนิ่ง ภายใต้อากาศที่ทำการทดลอง มีค่าการดูดซับที่ดีกว่าการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบ ตะปั่วเต็ดเบด

Hsishen Teng and others (1996) ศึกษาถึงผลของอัตราส่วนระหว่าง C/O ในถ่านหินปิภูมิแนล เมื่อใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ พบว่าค่าพื้นที่ผิว (BET surface area) ของถ่านชาร์มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของ C/O เนื่องจากออกซิเจนจะก่อตัวเป็นหมู่ฟังก์ชันบนผิวถ่านชาร์เกิดโครงสร้างแบบโครงตาข่าย ช่วยลดสมบัติเทอร์โมพลาสติกของถ่านหินในระหว่างการคาร์บอนไนซ์ ทำให้ลดการเกิดเค้กบนผิวถ่านชาร์ได้ (ซึ่งจะป้องกันการเกิดรูพรุนขึ้น) ในการกระตุ้นถ่านชาร์จากถ่านหินที่มีอัตราส่วน C/O สูงพบว่าเส้นไอโซเทอมมีลักษณะแบนราบ แสดงว่าลักษณะรูพรุนที่ได้เป็นแบบขนาดเล็ก โดยพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนจะมีค่ามากที่สุด เมื่อค่าการเผาไหม้เท่ากับร้อยละ 55 หลังจากนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อทำการกระตุ้นต่อไป เนื่องจากเกิดการรวมตัวของรูพรุนเกิดเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้นและการมีเม็ดตกค้างอยู่ในรูพรุน

Nestor Tancredi and others (1996) ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากเศษไม้ยูคาลิปตัสโดยการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สผสมระหว่าง แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับแก๊สออกซิเจน และไอน้ำเพื่อศึกษาถึงผลของสารกระตุ้นที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากการศึกษาพบว่าคาร์บอนไนซ์ช่วยให้สารระเหยในเนื้อไม้และทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็กขึ้นแต่มีอยู่ค่อนข้างจำกัด

ผลของการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

การเพิ่มขึ้นของการเผาไหม้ช่วยให้มีการพัฒนาของรูพรุนมากขึ้นเห็นได้จากรูพรุนขนาดกลางเพิ่มขึ้นดังในตารางที่ 2.9 ส่วนรูพรุนขนาดใหญ่โดยทั่วไปมักมีอยู่แล้วในเนื้อไม้ ผลจากการกระตุ้นในกรณีนี้จะมีผลในกรณีการเผาไหม้สูง ๆ

ตารางที่ 2.9 ลักษณะโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ที่ได้จากการกระตุ้นถ่านชาร์จากไม้ยูคาลิปตัส ที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ที่ 800 องศาเซลเซียส ด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

(Nestor Tancredi and others, 1996)

Bumoff (wt%)	A_{BET} (m^2/g)	$V_{\text{DR CO}_2}$ (m^3/g)	$V_{\text{DR N}_2}$ (m^3/g)	V_t (cm^3/g)	V_{meso} (cm^3/g)	V_{macro} (cm^3/g)
13	780	0.3	0.31	0.32	0.07	0.95
26	970	0.34	0.39	0.4	0.06	0.96
35	1040	0.35	0.41	0.44	0.15	0.99
47	1190	0.35	0.48	0.52	0.26	1.17

ผลของแก๊สออกซิเจนในแก๊สกระตุ้น

พบว่า การที่มีแก๊สออกซิเจนผสมอยู่ด้วยปริมาณเล็กน้อยในแก๊สกระตุ้นทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เร็ว แต่เมื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณรูพรุน ที่ค่าการเผาไหม้เดียวกันกับการใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ กระตุ้น (bumoff 47% ตารางที่ 2.9 และ bumoff 48% ตารางที่ 2.10) พบว่ามีการเพิ่มขึ้นของรูพรุนใหญ่เท่านั้น ในขณะที่รูพรุนขนาดเล็กและกลางมีจำนวนลดลง

ตารางที่ 2.10 ลักษณะโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ที่ได้จากการกระตุ้นถ่านชาร์จากไม้ยูคาลิปตัสที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ที่ 800 องศาเซลเซียส ด้วยแก๊สผสมระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับแก๊สออกซิเจน (Nestor Tancredi and others, 1996)

O_2 (vol. %)	Bumoff (wt. %)	A_{BET} (m^2/g)	$V_{\text{DR CO}_2}$ (m^3/g)	$V_{\text{DR N}_2}$ (m^3/g)	V_t (cm^3/g)	V_{meso} (cm^3/g)	V_{macro} (cm^3/g)
3.4	48	1240	0.39	0.53	0.46	0.2	1.36
5.2	61	1440	0.41	0.62	0.48	0.27	1.69

ผลของการกระตุ้นด้วยไอน้ำ

การใช้ไอน้ำกระตุ้น ช่วยเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาให้เร็วขึ้น นอกจากนั้นทำให้เกิดรูพรุนขนาดกลางและใหญ่มากขึ้น การกระตุ้นด้วยไอน้ำมีผลโดยเฉพาะกับรูพรุนขนาดใหญ่ค่อนข้างมากเนื่องจากไอน้ำมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนได้ดีกว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แต่เนื่องจากมีข้อจำกัดจากการแพร่ผ่านของไอน้ำทำให้ปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) ทำให้เกิดการขยายตัวของรูพรุนเกิดเป็นรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ ซึ่งผลที่ได้จะสอดคล้องกับค่าในตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 ลักษณะโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ที่ได้จากการกระตุ้นถ่านไม้ยูคาลิปตัสที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ที่ 800 องศาเซลเซียส ด้วยไอน้ำ (Nestor Tancredi and others, 1996)

Temp. (°C)	Bumoff (wt. %)	A_{BET} (m^2/g)	$V_{DR} CO_2$ (m^2/g)	$V_{DR} N_2$ (m^2/g)	V_t (cm^3/g)	V_{meso} (cm^3/g)	V_{macro} (cm^3/g)
800	26	870	0.29	0.36	0.39	0.24	1.59
800	40	1,030	0.31	0.43	0.41	0.36	1.97
800	56	1,190	0.31	0.5	0.39	0.49	2.38
750	20	810	0.28	0.34	0.36	0.11	1.37
750	37	940	0.29	0.39	0.4	0.26	1.63
750	47	1,070	0.31	0.45	0.42	0.36	2.04

Nestor Tancredi and others (1996) ศึกษาถึงปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับถ่านชาร์ที่ได้จากไม้ยูคาลิปตัส พบว่าที่คอนเวอร์ชัน (Conversion) ต่ำ ๆ ค่ารีเอกติวิตี (reactivity) ที่เพิ่มขึ้นมาจากการที่พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน ส่วนที่คอนเวอร์ชันสูง ค่ารีเอกติวิตีที่เพิ่มขึ้นมาจากการเพิ่มขึ้นของความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของสารอินทรีย์ (Na, K) ในวัตถุดิบ และค่าพลังงานที่ใช้กระตุ้นอยู่ในช่วง 230-261 กิโลจูล/โมล

Gonzalez-Serrano E. and others (1997) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จาก คราฟต์ลิกนิน (Kraft Lignin) โดยการกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ พบว่าที่อุณหภูมิกระตุ้นต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส การพัฒนารูพรุนเกิดจากการไล่สารระเหยเห็นได้ชัดเจนจากการสูญเสียมวลที่สูง หลังจากนั้นที่อุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส มีการสูญเสียมวลค่อนข้างน้อย ดังนั้นการพัฒนารูพรุนจะเกิดมาจากการจัด

เรียงตัวใหม่ของคาร์บอนอะตอมทำให้มีค่าพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงขึ้นเป็น 600 องศาเซลเซียส ปริมาตรรูพรุนของถ่านชาร์จะลดลงอันเนื่องมาจากการหดตัวของรูพรุนเป็นผลมาจากความร้อนที่สูงขึ้น โดยผลการทดลองที่ได้จะสอดคล้องกับงานของ Caturla et. al. (1991) เป็นการทดลองกระตุ้นเมล็ดลูกพีชด้วย $ZnCl_2$ และจากการศึกษาด้วยเส้นไอโซเทอม พบว่าการกระตุ้นที่ 350 องศาเซลเซียส เส้นไอโซเทอมมีลักษณะเป็นเส้นตรงในแนวราบที่ความดันต่ำ แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างรูพรุนมีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็ก กล่าวคือมีความกว้างประมาณ 1-2 เท่าของอนุภาคที่มีขนาดเล็กที่สามารถดูดซับได้ (0.3 นาโนเมตร) และเมื่ออุณหภูมิกระตุ้นสูงขึ้นเส้นไอโซเทอมจะมีความชันเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นถึงการพัฒนารูพรุนขนาดกลางและใหญ่ และจากการศึกษาพบว่าสามารถเลือกเตรียมถ่านกัมมันต์ให้เหมาะสมกับการใช้งานได้ เช่นถ้าต้องการนำไปใช้ในการดูดซับแก๊ส ซึ่งต้องการรูพรุนขนาดเล็กก็ควรเลือกภาวะในการผลิตคือใช้อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสและอัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อน้ำหนักถ่านชาร์น้อยกว่า 1 สำหรับการใช้งานในของเหลว ซึ่งต้องการรูพรุนขนาดใหญ่ก็เลือกใช้ภาวะที่ อุณหภูมิ 450 - 500 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อน้ำหนักถ่านชาร์มากกว่า 1.5 และในการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากคราฟติกินโดยการกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ในงานวิจัยนี้สามารถเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีค่าพื้นที่ผิวสูงที่สุดเท่ากับ 1,800 ตารางเมตรต่อกรัม ที่ภาวะ 500 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อน้ำหนักถ่านชาร์เท่ากับ 2.3 โดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็ก

Satya Sai, P. M. and Jaleel Ahmed (1997) ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว โดยการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดเซชัน พบว่ามีประสิทธิภาพดีในการใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ จากการทดลองพบว่า การเพิ่มขึ้นของ เวลาในการทำปฏิกิริยา ความเร็วของแก๊สตัวกลาง ขนาดของอนุภาค และอุณหภูมิ ช่วยให้ผลดีต่อการกระตุ้น แต่การเพิ่มขึ้นของเวลามาก ๆ ก็มีสาเหตุทำให้เกิดการขยายตัวของรูพรุน และการรวมตัวของรูพรุนเป็นผลทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีนลดลง ผลของความสูงของเบด พบว่าเมื่อเบดมีความสูงมากกว่า เส้นผ่านศูนย์กลางมาก ๆ ทำให้ค่าไอโอดีนลดต่ำลง เนื่องมาจากการเกิด สลักกิ้ง (Slugging) มีผลทำให้การสัมผัสกันระหว่างแก๊สกับของแข็งเป็นไปได้ไม่ดี และผลของแก๊สตัวกลางที่ใช้ พบว่าการใช้น้ำจะมีประสิทธิภาพดีที่สุด รองลงมาคือแก๊สผสมระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับไอน้ำ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ตามลำดับ และผลจากการกระตุ้นพบว่า มีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุดเท่ากับ 1,328 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าพื้นที่ผิวสูงสุดเท่ากับ 4,300 ตารางเมตรต่อกรัม

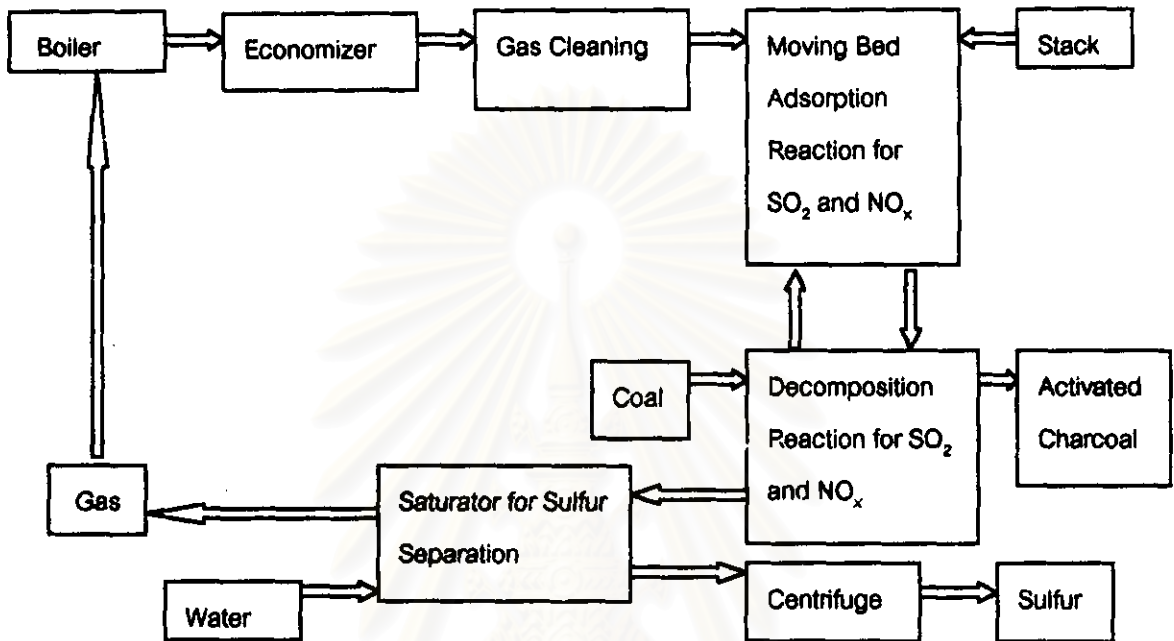
2.10.2.2 การประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟในการให้ความร้อนแก่ปฏิกิริยา

Cha, C. Y. and Kim, B. K. (1993) พบว่าถ่านหินจะไม่เกิดการไพโรไลส์ (Pyrolyst) เลยภายใต้ภาวะที่ทำการทดลอง (500 W. 60 นาที) แต่เมื่อมีการผสมถ่านซาร์เข้าไปด้วย จะช่วยทำให้เกิดการไพโรไลส์อย่างรวดเร็วเนื่องจากถ่านซาร์มีสมบัติในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ดี นอกจากนั้นพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลส์ยังมีสมบัติในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ดีด้วย และได้อธิบายถึงการเพิ่มขึ้นของปฏิกิริยาเคมีของถ่านซาร์ ด้วยคลื่นไมโครเวฟดังนี้

1. ทำปฏิกิริยาโดยตรงกับธาตุในโมเลกุลที่ถูกสับผัด
2. สร้างอิเล็คตรอนอิสระเมื่อโมเลกุลของแก๊สสับผัดกับถ่านซาร์
3. เป็นตัวที่ทำให้อนุภาคของของแข็งร้อนขึ้น

Cha, C. Y. (1994) ศึกษาการประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟในการทำปฏิกิริยากำจัด SO_2 กับ NO_x ภายในเบดที่บรรจุไว้ด้วยถ่านซาร์ แก๊สที่ใช้ศึกษาได้มาจากการเผาไหม้จากโรงงานไฟฟ้า ซึ่งจะถูกส่งผ่านไปดูดซับด้วยถ่านซาร์ จากนั้นจะใช้พลังงานไมโครเวฟในการช่วยให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนในเบดกับ SO_2 กับ NO_x ทำให้เกิดเป็น กำมะถันและแก๊สไนโตรเจน นอกจากนั้นยังช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวให้กับถ่านซาร์จาก 7 ตารางเมตรต่อกรัม เป็น 700 ตารางเมตรต่อกรัม ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์เป็นผลผลิตร่วมจากปฏิกิริยา จากการศึกษาในห้องปฏิบัติการพบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัด SO_2 กับ NO_x ได้ถึงร้อยละ 98 จากข้อมูลที่ได้ในห้องปฏิบัติการ ผู้วิจัยได้นำไปสร้างเป็นโรงงานต้นแบบเพื่อใช้ศึกษาการกำจัด SO_2 กับ NO_x ที่ได้จากการเผาไหม้จริงต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะของกระบวนการที่ใช้ในการศึกษากำจัด SO_2 และ NO_x ด้วยพลังงานไมโครเวฟ

Challa, S. Little, W.E. and Cha, C. Y. (1994) ศึกษาสมบัติไดอิเล็กตริกของถ่านชาร์ เพื่อประโยชน์ในการออกแบบเครื่องมือที่ใช้ไมโครเวฟในการประยุกต์ใช้กำจัดแก๊ส NO_x และ SO_2 ที่ได้จากการเผาไหม้ จากการศึกษาพบว่ากระบวนการฟื้นฟูประสิทธิภาพช่วยเพิ่มค่าแฟคเตอร์สูญเสีย (Loss factor) ทำให้ความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟสูงขึ้นและค่าแฟคเตอร์สูญเสียของวัสดุจะมีค่าสูงขึ้นกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จากการศึกษาตัวอย่างถ่านหินที่ใช้สามารถสรุปค่าไดอิเล็กตริกได้ดังตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 ค่าไดอิเล็กตริกของถ่านชาร์ชนิดต่าง ๆ (Challa, S. Little, W.E. and Cha, C. Y., 1994)

Dielectric Properties of Various Types of Char		
Char Type	Dielectric Constant	Skin Depth, (cm.)
Fresh calcined char	10.10-2.45j	1.641
NO _x saturated char	10.17-2.13j	1.782
Regenerated Char (4 th cycle NO _x)	10.64-2.43j	1.668
Regenerated Char (15 cycle NO)	9.23-2.59j	1.617
Sulfur saturated char	9.53-2.60j	1.613
Regenerated Char (2 cycle SO ₂)	10.09-3.13j	1.470
Regenerated Char (21 cycle SO ₂)	9.49-4.55j	1.220

Cha, C. Y. and Kong, Y. (1995) ศึกษาถึงการใช้อ่างชาร์นำมาดูดซับ NO_x แล้วนำไปฟื้นฟูสภาพด้วยพลังงานไมโครเวฟ พบว่าพลังงานไมโครเวฟสามารถเหนี่ยวนำปฏิกิริยาการกำจัด NO_x ได้ โดยมีการใช้คาร์บอนไปในปฏิกิริยา ทำให้ถ่านชาร์ที่ได้มีรูพรุนและพื้นที่ผิวมากขึ้น โดยมีค่าสูงชันจาก 82 เป็น 800 ตารางเมตรต่อกรัม หลังจากผ่านกระบวนการดูดซับและฟื้นฟูสภาพมา 9 ครั้ง และจากการทดลองได้มีการทำชุดทดลองเปรียบเทียบโดยใช้ถ่านชาร์ให้ดูดซับอากาศแทน NO_x โดยใช้ภาชนะการทดลองเดียวกันกับการดูดซับ NO_x แล้วนำไปฟื้นฟูประสิทธิภาพ ด้วยพลังงานไมโครเวฟ พบว่าถ่านชาร์ที่ใช้ก็มีค่าพื้นที่ผิวสูงชันด้วย แต่การเพิ่มขึ้นจะน้อยกว่าถ่านชาร์ที่ได้นำไปดูดซับ NO_x การที่พื้นที่ผิวของถ่านชาร์ในชุดเปรียบเทียบเพิ่มขึ้นนำมาจากการไล่สารระเหยออกจากถ่านชาร์และปฏิกิริยาระหว่างถ่านชาร์กับน้ำที่ดูดซับอยู่บนผิวถ่านชาร์

Kong, Y. G. and Cha, C. Y. (1995) ได้ทำการศึกษาถึงการใช้อ่างดูดซับที่ทำจากคาร์บอน 6 ชนิดที่มาจากแหล่งต่างกัน เป็นถ่านหิน 3 ตัว ถ่านชาร์ 2 ตัว และถ่านกัมมันต์ 1 ตัว โดยศึกษาถึงผลที่ได้จากการนำถ่านดูดซับไปดูดซับ NO_x ให้อิ่มตัวและทำการฟื้นฟูประสิทธิภาพถ่านดูดซับที่ได้จากคาร์บอนแตกต่างกันทั้ง 6 ชนิด เป็นจำนวน 9 รอบ พบว่าตัวอย่างถ่านดูดซับทั้ง 6 ชนิด มีถ่านกัมมันต์เพียงชนิดเดียวที่ให้แนวโน้มในทางลบคือค่าพื้นที่ผิวมีค่าลดลง อันเนื่องมาจากการเกิดรวมตัวของรูพรุนที่มีอยู่แล้วของถ่านกัมมันต์ ในขณะที่ถ่านดูดซับตัวอื่นมีค่าพื้นที่ผิวสูงชัน จากการศึกษาพบว่า

ปริมาณไนโตรเจนที่มีอยู่ในตัวอย่างมีผลต่อการดูดซับ NO_x ด้วย เพราะไนโตรเจนที่มีอยู่จะเกิดเป็นสารประกอบที่มีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยทำให้การดูดซับ NO_x มากขึ้น จากการศึกษาของสากลการกำจัด NO_x พบว่าในบรรยากาศที่ประกอบด้วย ไอน้ำและออกซิเจน NO จะเปลี่ยนไปเป็น NO_2 และ HNO_3 บนผิวของตัวดูดซับ และการใช้พลังงานไมโครเวฟสามารถกำจัด NO_x ที่ถูกดูดซับได้ถึง 90% ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สไนโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิห้อง และข้อดีของวิธีนี้คือได้ผลิตภัณฑ์ร่วมที่มีค่าคือ ถ่านกัมมันต์

Kong, Y. G. and Cha, C. Y. (1996) ศึกษาการใช้พลังงานไมโครเวฟ ในการฟื้นฟูประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านชาร์ที่ผ่านการดูดซับ NO_x จนอิ่มตัว โดยการนำถ่านชาร์ที่ได้ไปวางไว้ในสนามพลังงานไมโครเวฟ จากน้ำหนักที่หายไปสามารถใช้คำนวณค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาระหว่าง $\text{NO} - \text{C}$ ได้จากผลการทดลองพบว่ามีเกิดสารประกอบเชิงซ้อนขึ้นที่ผิวถ่านชาร์ และพบว่าการเพิ่มขึ้นของพลังงานไฟฟ้าที่ให้กับเครื่องกำเนิดพลังงานไมโครเวฟ ช่วยทำให้สารเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นลดลง และช่วยเพิ่มอัตราการฟื้นฟูประสิทธิภาพของถ่านชาร์ เมื่อใช้พลังงานไฟฟ้ามากกว่า 300 W.

Kong, Y. G. and Cha, C. Y. (1996) ได้ทำการทดลองฟื้นฟูประสิทธิภาพ (Regenerate) ตัวอย่างถ่านชาร์ (Char) ที่มีการดูดซับอิ่มตัวด้วยพวกออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยออกไซด์ของไนโตรเจนจะดูดซับอยู่ในรูปของ HNO_3 และ NO_2 เมื่อในแก๊สที่ป้อนเข้ามีไอน้ำและออกซิเจนอยู่ด้วย จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิของแก๊สที่ออกจากกระบวนการมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง และผลจากการดูดซับด้วยรูพรุนขนาดเล็ก ทำให้ภายในรูพรุนเกิดเป็นจุดร้อนขึ้น อันเนื่องมาจาก การดูดซับพลังงานไมโครเวฟของพวก HNO_3 และ NO_2 ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ของออกไซด์ของไนโตรเจน จากการศึกษาพบว่ากระบวนการนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนออกไซด์ได้ถึงร้อยละ 98

Loren, M. Norman and Cha, C. Y. (1996) ศึกษาการใช้พลังงานไมโครเวฟในการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินโดยการใช้ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นแก๊สกระตุ้น พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นตรงกับความเข้มของสนามไฟฟ้า (กำลังไฟฟ้าที่ให้กับเครื่องกำเนิดพลังงานไมโครเวฟ) ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นได้ประกอบไปด้วยรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก และพื้นที่ผิวสูงสุดที่เตรียมได้มีค่าประมาณ 400 ตารางเมตรต่อกรัม

Deng, S. D. and Lin, Y. S. (1997) ศึกษาถึงการประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟในการให้ความร้อน สำหรับสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยอาศัยการกระจายตัวของส่วน แอททิฟ เข้าไปในรูพรุนของ ซีโอไลต์ ตัวดูดซับที่ใช้ในการศึกษาคือ CuO และ CuCl เพื่อใช้สำหรับกำจัด SO₂ ในอุตสาหกรรม ใช้ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD และ การดูดซับแก๊ส ไนโตรเจน เพื่อบอกถึงโครงสร้างของรูพรุน พื้นที่ผิว และการกระจายตัวของส่วน แอททิฟ บนผิวของตัวดูดซับ การใช้พลังงานไมโครเวฟในการให้ความร้อน ช่วยลดเวลาลงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับให้ความร้อนแบบธรรมดา เช่นในการทดลองนี้ถ้าต้องการเตรียม DAY Zeolite ต้องใช้อุณหภูมิสูงที่ 850 °C เป็นเวลา 36 ชั่วโมง ในขณะที่การใช้พลังงานไมโครเวฟที่ 600 W. ใช้เวลาแค่ 60 นาที และจากการศึกษาด้วย XRD พบว่าลักษณะโครงสร้างของ ซีโอไลต์ ที่เตรียมได้จากทั้งสองวิธีมีโครงสร้างลักษณะเดียวกัน

Jon, C. J. G. and Tal, H. S. (1998) ศึกษาถึงการใช้ถ่านกัมมันต์ ดูดซับ เบนซีน โทลูอิน ไชลีน และของผลมทั้งสามชนิด จากนั้นบำบัดโดยการใช้พลังงานไมโครเวฟ โดยความเข้มข้นที่ใช้ของ เบนซีน เท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นที่ใช้ของ โทลูอิน เท่ากับ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นที่ใช้ของ ไชลีน เท่ากับ 24.6 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นที่ใช้ของของผลมทั้งสามชนิด เท่ากับ 13.4 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าหลังจากผ่านการบำบัดแล้วจะได้ H₂O และ CO₂ ออกมาเท่านั้น ส่วน เบนซีน โทลูอิน ไชลีน และของผลมของทั้งสามชนิด ไม่สามารถที่ตรวจวัดได้พบ ถ่านกัมมันต์ภายใต้สนามพลังงานไมโครเวฟจะดูดซับพลังงานไมโครเวฟและทำให้ตัวมันร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิของเม็ดถ่านกัมมันต์ จะมีอุณหภูมิประมาณ 1,200 - 1,800 °C ภายใน 4 นาที หลังจากที่ใช้พลังงานไมโครเวฟเข้าไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย