

บทที่ 1

บทนำ

การใช้อ่านกัมมันต์ (activated carbon) เป็นทางเลือกหนึ่งที่จะใช้ในการบำบัดหรือกำจัดมลสารที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียโดยอาศัยการดูดซับ แต่เนื่องจากอ่านกัมมันต์ซึ่งใช้เป็นตัวดูดซับเป็นวัสดุที่มีราคาสูงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศ เพราะแม้ว่าประเทศไทยจะสามารถผลิตอ่านกัมมันต์ได้ แต่ก็ยังไม่เพียงพอกับความต้องการ จากข้อมูลของกรมศุลกากรในปี พ.ศ.2544 ประเทศไทยนำเข้าอ่านกัมมันต์คิดเป็นมูลค่า 80,995,679 บาท และมูลค่าเพิ่มขึ้นเป็น 137,144,762 บาท ในปี พ.ศ. 2553⁽¹⁾

อ่านกัมมันต์ หมายถึงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัตถุดิบทางธรรมชาติหรืออินทรีย์วัตถุซึ่งมีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก มาผ่านกรรมวิธีก่ออ่านกัมมันต์จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำ มีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง มีสมบัติในการดูดซับสารต่างๆ ได้ดี และได้มีการนำอ่านกัมมันต์ไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในหลายด้าน เช่น ทางด้านอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมยา และระบบบำบัดน้ำเสียเป็นต้น⁽²⁾ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำวัตถุดิบเหลือทิ้งทางการเกษตรมาผลิตเป็นอ่านกัมมันต์เป็นจำนวนมากเนื่องจากหาได้ง่ายและมีราคาถูก ได้แก่ ชังข้าวโพด จี่เลื้อย กะลาปาล์มน้ำมัน กะลามะพร้าว เศษไม้ เปลือกถั่วชนิดต่างๆ เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้ได้นำไผ่รวกซึ่งเป็นวัตถุดิบทางธรรมชาติที่มีราคาถูกและมีอยู่มากในประเทศไทย ซึ่งคาดว่าจะมีความเหมาะสมในการนำมาใช้ในการเตรียมเป็นอ่านชาร์และอ่านกัมมันต์ โดยจะทำการศึกษาอ่านชาร์และอ่านกัมมันต์จากไผ่รวกโดยวิธีการแยกสลายด้วยความร้อน ทั้งนี้เพื่อขยายฐานประโยชน์ของไผ่รวกให้มากยิ่งขึ้น

1.1 ไผ่⁽³⁾

ไผ่ยืนพืชชนิดหนึ่งที่รู้จักกันดีทั่วโลก มีความเกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันของมนุษย์มาอย่างช้านาน โดยเฉพาะในภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก ไผ่เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวจัดอยู่ในพืชตระกูลหญ้าที่สูงที่สุดในโลก และเป็นพืชเมืองร้อน ไผ่ใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง เช่น ใช้ในการก่อสร้างไม้ นั่งร้านทาสีฉาบปูน ใช้จักสานภาชนะต่าง ๆ ใช้ทำเครื่องดนตรี ใช้เป็นเชื้อกระดาษในอุตสาหกรรมทำกระดาษ ทำเครื่องกีฬา ใช้เป็นอาวุธ เช่น คันธนู หอก หลาว ใช้เป็นเครื่องอุปกรณ์การประมง เช่น ทำเสาโป๊ะ ทำเครื่องมือในการเกษตร นอกจากนั้นใบไผ่ยังใช้ห่อขนม หน่อไผ่ใช้เป็นอาหารอย่างวิเศษ และกอไผ่ยังใช้ประดับสวนได้งดงาม

ไม้ไผ่ที่นำมาทำเป็นที่อยู่อาศัย คุณสมบัติพิเศษของไม้ไผ่ที่สามารถใช้ประโยชน์ได้โดยไม่ต้องแปรรูป และเป็นไม้ที่มีความคงทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศได้ดี จึงมีการนำไม้ไผ่มาสร้างเป็นบ้านเรือนที่พักอาศัยกันทั่วไป หรือใช้ไม้ไผ่เป็นโครงสร้างและส่วนประกอบของบ้านเรือน ได้แก่ ใช้ลำไม้ไผ่เป็นเสา โครงหลังคา และใช้ไม้ไผ่แปรรูปด้วยการผ่าเป็นซีกๆ เป็นพื้นและสานเป็นแผงใช้เป็นฝาเรือน เป็นต้น

งานไม้ไผ่ที่ใช้เป็นเครื่องเรือนและเครื่องตกแต่ง งานไม้ไผ่ประเภทนี้มีใช้ทั่วไปในหลายประเทศ เช่น ทำเป็นโต๊ะ เก้าอี้ เตียงนอน แม้บางชนิดจะดูเป็นสิ่งที่ทำได้ง่ายๆ ไม่มีราคามากนัก แต่ใช้ประโยชน์ได้ดีเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมและภูมิอากาศ

งานไม้ไผ่ที่ใช้เกี่ยวกับพิธีกรรมสำหรับคนไทยนั้น ไม้ไผ่ได้เข้ามาเกี่ยวข้องกับวิถีชีวิตตั้งแต่เกิดจนตาย เช่น คนไทยโบราณมักสร้างบ้านด้วยไม้ไผ่ เมื่อทารกคลอดออกมาจากครรภ์มารดา วิชาที่แรกที่เรียกว่า ตกฟาก เป็นต้น

ทางด้านพืชอาหาร หน่อของไม้ไผ่ สามารถนำมารับประทาน และแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่าเป็นหน่อไม้ดองได้

จากการรายงานในปี ค.ศ. 1985 ขององค์การ IDRC (International Development Research Center) แห่งรัฐบาลแคนาดา สามารถจำแนกชนิดพันธุ์ไม้ไผ่ในประเทศต่างๆ พอสรุปชนิดของไม้ไผ่ (species) ได้ดังนี้

1. ประเทศจีน มีชนิดไม้ไผ่จำนวน 300 ชนิด
2. ประเทศอินเดีย มีชนิดไม้ไผ่จำนวน 130 ชนิด
3. ประเทศไทย มีชนิดไม้ไผ่จำนวน 60 ชนิด
4. ประเทศบังกลาเทศ มีชนิดไม้ไผ่จำนวน 32 ชนิด
5. ประเทศฟิลิปปินส์ มีชนิดไม้ไผ่จำนวน 55 ชนิด
6. ประเทศอินโดนีเซีย มีชนิดไม้ไผ่จำนวน 31 ชนิด
7. ประเทศมาเลเซีย มีชนิดไม้ไผ่จำนวน 12 ชนิด
8. ประเทศปาปัวนิวกินี มีชนิดไม้ไผ่จำนวน 26 ชนิด
9. ประเทศไต้หวัน มีชนิดไม้ไผ่จำนวน 40 ชนิด
10. ประเทศภูฏาน มีชนิดไม้ไผ่จำนวน 30 ชนิด

ไผ่รวก⁽⁴⁾ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Thyrsostachys Siamensis* Gamble

ชื่อวงศ์ : Gramineae

ชื่อสกุลไม้ : *Thyrsostachys* Gamble

ชื่อพื้นเมือง : ไผ่รวก ไผ่รวก รวก (ภาคกลาง) ฮวก (ภาคเหนือ) แสดงดังรูป 1.1



รูป 1.1 ต้นไผ่รวก

นิเวศวิทยาและการกระจายพันธุ์ : พบทั่วไปในที่ราบจนถึงภูเขาสูง 400 - 600 เมตรจากระดับน้ำทะเลปานกลาง พบทั่วไปในภาคเหนือ ภาคตะวันตก ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคตะวันออกบางส่วนและในประเทศพม่า

ลักษณะทั่วไป :

ลำต้น : ขึ้นเป็นกอแน่นลำต้นขนาดเล็ก มีความสูงประมาณ 7-15 เมตร ส่วนโคนมีเนื้อหนาเกือบตัน ที่ปลายลำมีเนื้อบาง ถ้าพบในบริเวณที่มีความชุ่มชื้นสูง ลำต้นจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 4-7 เซนติเมตร ถ้าพบในที่แห้งแล้งจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2-4 เซนติเมตร ลำมีสีเขียวอมเทา ปล้องจะยาวประมาณ 15-30 เซนติเมตร โดยปกติเนื้อจะหนา กาบหุ้มลำยาวประมาณ 22-28 เซนติเมตร กว้างประมาณ 11-20 เซนติเมตร กาบมักจะติดต้นอยู่นาน สีเป็นสีฟาง ด้านหลัง

ปกคลุมด้วยขนอ่อนสีขาว มีร่องเป็นแนวเล็กๆ สอดขึ้นไปหาปลาย ซึ่งเป็นรูปที่ตัดเป็นลูกคลื่น กระจุกใบมีรูปสามเหลี่ยม อาจจะไม่ชัด กระจุกใบมีเล็กน้อยและหยักไม่สม่ำเสมอ ใบยอดกาบยาวประมาณ 10-12 ซม. เป็นรูปสามเหลี่ยมมนแหลม ขาวและแคบ ขอบงอโค้งเข้า

ใบ : ปลายใบเรียวแหลม โคนใบป้านหรือเกือบกลม ยาวประมาณ 7-22 เซนติเมตร กว้างประมาณ 0.5-1.5 เซนติเมตร ท้องใบมีขน เส้นกลางใบข้างบนแบน เส้นลายใบประมาณ 4-6 เส้น ขอบใบสากและคม ก้านใบสั้นประมาณ 0.5 เซนติเมตร กระจุกใบเล็ก ขอบใบมีหนามเล็กประมาณ 2-3 อัน กาบใบแคบไม่มีขน นอกจากตามขอบอาจจะมีขนอ่อน

ดอก : จะออกดอกเป็นกลุ่ม (gregariour flowering) ไม้ไผ่ที่ออกดอกประเภทนี้จะออกดอกพร้อมกันครอบคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกว้าง

หน่อ : หน่อใช้รับประทานได้ ที่นิยมคือใช้ทำซุพหน่อไม้

การขยายพันธุ์และการผลิตกล้า:

ไผ่รวกสามารถให้ผลผลิตเมล็ดได้จำนวนมากในแต่ละปี การขยายพันธุ์โดยใช้เมล็ดจะได้กล้าปริมาณมาก เพราะเมล็ดไผ่รวก 1 กิโลกรัม มีจำนวนเมล็ดมากถึง 50,300 เมล็ด และสามารถขยายพันธุ์โดยแยกเหง้าได้ แต่ค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง และได้ปริมาณจำกัด นอกจากนี้ยังสามารถทำการปักชำเหง้าค้างปีได้ ซึ่งเหง้าค้างปีเป็นเหง้าของกล้าไผ่อายุ 2-5 ปี ที่งอกจากเมล็ดในสภาพธรรมชาติ เป็นเหง้าที่มีขนาดเล็ก มีปริมาณมาก การปักชำเหง้าค้างปีจะเสียค่าใช้จ่ายน้อยกว่าการแยกเหง้าขนาดใหญ่ และกล้าไผ่ที่ได้สามารถตั้งตัวและเจริญเติบโตได้เร็วกว่ากล้าที่เพาะจากเมล็ด ประมาณ 3 เท่า ซึ่งเมล็ดไม้ไผ่รวกส่วนมากจะสั้น หากเก็บไว้นานๆ เปอร์เซ็นต์การงอกจะลดลงเรื่อยๆ เช่น เมล็ดที่เก็บไว้นานประมาณ 7 เดือน ในสภาพธรรมชาติเมื่อนำมาเพาะปรากฏว่าไม่งอกเลย ทั้งที่มีเมล็ดดีถึง 96 เปอร์เซ็นต์

ประโยชน์ : ไม้ไผ่รวกใช้ ทำรั้ว ทำคันทับ ทำเครื่องจักสาน เครื่องมือกลกรรมบางอย่าง ใ้เป็นน้ำดื่ม หน่อรับประทานได้

1.2 กระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน (pyrolysis)

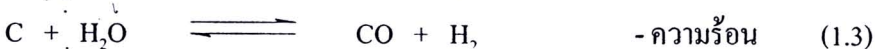
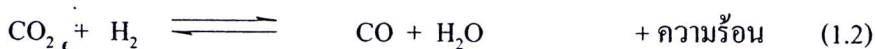
เป็นกระบวนการที่ทำให้สารประกอบอินทรีย์ขนาดใหญ่ ที่ต่อกันเป็นสายโซ่ยาวแตกออกเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงหรือต่อกันเป็นสายโซ่ที่สั้นลง โดยถูกย่อยสลายทางเคมีด้วยความร้อน ณ อุณหภูมิสูง ๆ ในที่ที่อัดอากาศปราศจากออกซิเจน อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนอยู่ในช่วงระหว่าง 400-700 องศาเซลเซียส กระบวนการนี้แตกต่างกับกระบวนการเผาทั้งเป็นเผา (incineration) ในเตาเผา ทั้งนี้เพราะการเผาทั้งในเตาเผาเป็นกระบวนการสันดาปแบบปฏิกิริยาคายความร้อนโดยตรงกับอากาศ แต่การแยกสลายด้วยความร้อนเป็นกระบวนการแบบ

ปฏิกิริยาดูดความร้อนที่ต้องใช้ความร้อนเป็นพลังงานเพื่อแยกองค์ประกอบต่าง ๆ ซึ่งจะระเหยกลายเป็นไอออกจากสารอินทรีย์ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นสารประกอบที่มีคุณค่ามาก⁽⁵⁾ ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนทั่ว ๆ ไป จะเป็นดังนี้⁽⁶⁾

ปฏิกิริยามูลฐาน



ปฏิกิริยารอง



1.2.1 กลไกการเกิดการแยกสลายด้วยความร้อน⁽⁶⁾

1. ช่วงก่อนการแยกสลายด้วยความร้อน (pre-pyrolysis)

ในช่วงอุณหภูมิจาก 120-200 องศาเซลเซียส ช่วงนี้จะมีการจัดองค์ประกอบภายในวัตถุดิบใหม่คือ องค์ประกอบน้ำในวัตถุดิบจะระเหยออกไปมีการทำลายพันธะใน โมเลกุลของวัตถุดิบบางส่วน และเริ่มมีอนุมูลอิสระ (free radical) เกิดขึ้น รวมทั้งยังมีการเกิดหมู่คาร์บอนิล (carbonyl group) หมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group) และหมู่ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydro peroxide group) ขึ้น

เมื่อชีวมวลได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (น้อยกว่า 200 องศาเซลเซียส) เป็นเวลานาน โครงสร้างภายในของชีวมวลจะมีการเปลี่ยนแปลง ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความแตกต่างกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแยกสลายตัวด้วยความร้อนวัตถุดิบชนิดเดียวกัน แต่ไม่มีช่วงก่อนการแยกสลายด้วยความร้อน ดังนั้นขั้นตอนของช่วงก่อนการแยกสลายด้วยความร้อน จึงมีความสำคัญต่อกระบวนการทั้งหมด

2. ช่วงการสลายส่วนที่เป็นของแข็ง

เป็นขั้นตอนหลักของกระบวนการเกิดการแยกสลายด้วยความร้อน ขั้นตอนนี้จะมีอัตราการเกิดที่เร็วมาก และจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ของกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนโดยที่อุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 300-600 องศาเซลเซียส

ในการเปลี่ยนแปลงทางเคมีนั้น โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่เป็นสายโซ่ยาวจะเกิดการแตกตัวของพันธะ C-C, C-S และ C-O พร้อมกับการเกิดสารผลิตภัณฑ์ระหว่างปฏิกิริยา (intermediate) สารผลิตภัณฑ์เหล่านี้จะดึงไฮโดรเจนจากสารอื่นแล้วกลั่นตัวเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันได้ผ่านไค์ใน ขณะที่ถ่านนี้ไม่เกิดปฏิกิริยา ก็จะกลายเป็นถ่านชาร์ไปในที่สุดเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น น้ำมันทาร์จะผ่านกระบวนการแตกตัว (cracking) และถูกทำให้เป็นแก๊สซึ่งผลิตภัณฑ์ มีเทน ไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์ต่อไป

1.2.2 ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการการแยกสลายด้วยความร้อน⁽⁷⁻⁹⁾

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้ แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

1. แก๊ส: ในการทำลายพันธะด้วยความร้อนแก๊สที่ได้ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 53 โดยน้ำหนัก คาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 39 โดยน้ำหนัก สารประกอบไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 6.7 โดยน้ำหนัก และไฮโดรเจนร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ตามสถานะเงื่อนไขที่อยากให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สมาก จะมีการเติมอากาศลงไปในปฏิกิริยาเพื่อทำให้คาร์บอนบางส่วนเกิดการเผาไหม้ ทำให้ได้แก๊สจากการเผาไหม้มากขึ้น และทำให้เกิดแก๊สผสมระหว่างไฮโดรเจน กับคาร์บอนมอนอกไซด์มากจะเรียกแก๊สผสมนี้ว่า “แก๊สสังเคราะห์ (synthesis gas)” สำหรับกระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมี โดยความร้อนเพื่อให้ได้แก๊สเป็นส่วนใหญ่นี้เรียกว่า “แก๊สซิฟิเคชัน (gasification)” กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,500-1,600 องศาเซลเซียส ซึ่งต้องเติมอากาศหรือออกซิเจนเข้าไปบางส่วนเพื่อรักษาสภาพของอุณหภูมิสูง ๆ นี้ได้ สารอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนจะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน ไอน้ำ และ คาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก๊สเชื้อเพลิงเป็นผลิตภัณฑ์หลัก

2. ของเหลว: ของเหลวที่ได้จากการทำลายพันธะด้วยความร้อนมีชื่อเรียกว่า น้ำมันชีวภาพ “pyrolysis oil” หรือ “bio – oil” ของเหลวนี้นี้ประกอบด้วยน้ำ และสารอินทรีย์ ซึ่งควบแน่นออกมาจากกระบวนการ นอกจากนี้อาจจะประกอบด้วยเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งหลุดออกจากกระบวนการได้โดยการระเหย สำหรับสถานะเงื่อนไขนี้จะไม่ใช้อากาศหรือว่าออกซิเจนเลยในระบบ และมีการให้ความร้อนกับระบบในอัตราที่สูง และเร็ว จึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมันชีวภาพมากที่สุด เรียกกระบวนการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบด้วยความร้อนเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นของเหลวเป็นส่วนใหญ่นี้ว่า การแยกสลายด้วยความร้อน

3. ของแข็ง: ของแข็งที่ได้จากกระบวนการทำลายพันธะด้วยความร้อนนี้จะเรียกว่า ถ่านชาร์ (char) ซึ่งจะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับถ่านคาร์บอน ซึ่งเงื่อนไขสถานะที่เหมาะสมคือ ไม่มีการให้อากาศหรือว่าออกซิเจนเลยในระบบและมีอัตราการให้ความร้อนอย่างช้า ๆ และสม่ำเสมอเป็นขั้นตอนเริ่มต้นของการทำให้โครงสร้างมีรูพรุน โดยทำให้เกิดการแตกตัวทางเคมีของสารที่

ไม่ใช่คาร์บอน (เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน) ออกมาในรูปของแก๊ส คาร์บอนอิสระที่มีอยู่จะรวมตัวกันในรูปของถ่านชาร์ จึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งมาก เรียกกระบวนการการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบเพื่อให้ได้ของแข็งเป็นส่วนใหญ่นี้ว่า “คาร์บอนไนเซชัน (carbonization)” ถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนเซชันควรมีลักษณะดังต่อไปนี้

- มีสีดำตลอด (uniformly black)
- เมื่อหักดู ส่วนที่หักจะมีผิวที่เป็นมันเงา (shiny surface)
- ปลายที่หักจะแหลมคม (sharp)
- ปราศจากผงฝุ่นและขี้เถ้า

ถ่านชาร์ที่ได้จากขั้นตอนการคาร์บอนไนเซชันนี้มีความสามารถในการดูดซับต่ำ เพราะว่าการทำให้เกิดถ่านชาร์จะใช้อุณหภูมิประมาณ 400-600 องศาเซลเซียส ซึ่งยังคงมีน้ำมันทาร์ตกค้างอยู่ภายในช่องว่าง (pore) หรือเกาะอยู่ตามผิว จึงจำเป็นต้องนำถ่านนี้ไปผ่านกระบวนการพัฒนาโครงสร้างไปในทิศทางเดียวกับการเกิดคาร์บอนไนเซชัน หรือ ก็คือการทำการกระตุ้นนั่นเอง

1.2.3 ประโยชน์ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน^(7, 10)

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ดังนี้

- ผลิตภัณฑ์แก๊ส : ค่าความร้อนของแก๊สที่ได้มีค่าสูงเทียบได้กับเชื้อเพลิงหลายชนิดสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้
- ผลิตภัณฑ์ของเหลว : สมบัติของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการแยกสลายด้วยความร้อนมีคุณสมบัติอยู่ระหว่างน้ำมันดีเซล และน้ำมันเตา กล่าวคือ มีค่าความถ่วงจำเพาะ ความหนืด และการกลั่นลำดับส่วนใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล ในขณะที่คุณค่าเชิงความร้อนใกล้เคียงกับน้ำมันเตา แต่มีปริมาณซัลเฟอร์น้อยกว่าน้ำมันเตา ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นพลังงานใหม่ได้
- ผลิตภัณฑ์ของแข็ง : ใช้เป็นตัวดูดซับได้ โดยต้องนำถ่านชาร์ที่ได้ทำการกระตุ้นอีกครั้งหนึ่งก่อน เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวและเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ

1.3 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่อยู่ในรูปคาร์บอนอสัณฐาน (amorphous carbon) ชนิดหนึ่ง แต่ถูกผลิตขึ้นมาเป็นพิเศษโดยกระบวนการก่อกัมมันต์ (activation) ซึ่งทำให้พื้นที่ผิวภายใน (internal surface area) เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนจำนวนมาก แต่ถ้าหากศึกษาด้วยเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชัน (x-ray diffraction) หรือศึกษาโครงสร้างจากการสะท้อนและการเบี่ยงเบนของรังสีเอ็กซ์เมื่อตกกระทบวัตถุ โครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะมีความแตกต่างจากถ่านชนิดอื่นๆ เช่น ถ่าน

ลิกไนท์ ถ่านโค้ก ถ่านไม้ หรือแกรไฟต์ เป็นต้นถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับสูง อันเนื่องมาจากมีพื้นที่ผิวมาก มีความจุในการดูดซับสูง ผิวโครงสร้างเป็นแบบรูพรุนขนาดเล็ก จำนวนมา(microporous structure) และมีความว่องไวในการดูดซับสูง

โดยทั่วไปแล้วผิวหน้าของถ่านกัมมันต์นั้นไม่มีขั้ว แต่เนื่องจากมีสารประกอบออกไซด์ เกิดขึ้นเสมอที่ผิวหน้า และการจัดเรียงของอะตอมอยู่ในลักษณะเฮกซะโกนัล(hexagonal) ทำให้ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงกว่าตัวดูดซับอื่นๆ เช่น ซิลิกาเจล (silica gel) จึงทำให้ดูดซับสารได้มากกว่า⁽¹¹⁾

ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่เตรียมขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด ซึ่งทำได้โดยการทำให้รูพรุนหรือโครงสร้างภายในมีเนื้อคาร์บอนมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ รูพรุนนี้มีขนาดตั้งแต่ 20 อังสตรอม (angstrom: Å) ถึง 20,000 อังสตรอม ดังนั้นพื้นที่ผิวจึงสูง และมีความสามารถในการดูดซับ (adsorption capacity) สูงเช่นเดียวกัน การวัดพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์อาจจะกระทำได้โดยการวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine number) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ โดยปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับไอโอดีน ได้แก่ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (size and surface area) ลักษณะของสารดูดซับ (nature of adsorbents) อุณหภูมิ (temperature) และเวลาในการสัมผัส (contact time)

1.3.1 วิวัฒนาการของถ่านกัมมันต์⁽¹²⁾

ราวปลายศตวรรษที่ 15 องค์การบริการสาธารณสุขของประเทศสหรัฐอเมริกา ได้นำถ่านจากไม้ (charcoal) มาใช้ในการดูดสีและกลิ่นจากน้ำธรรมชาติ เพื่อนำกลับมาใช้สำหรับอุปโภคบริโภคในแหล่งชุมชน ใน ค.ศ. 1811 มีการนำถ่านที่ผลิตจากกระดูกสัตว์มาใช้ในการดูดสี พบว่าสามารถดูดสีได้ดีกว่าถ่านไม้ จึงนำมาใช้ฟอกสีของน้ำตาลทราย ในปี ค.ศ. 1822 มีการนำถ่านมาผสมกับเลือดและขี้เถ้า (potash) ถ่านที่ได้มีคุณสมบัติในการดูดสีดีกว่าถ่านธรรมดาถึง 20-50 เท่า แต่การผลิตไม่เพียงพอต่อการใช้ในอุตสาหกรรม ต่อมาในปี ค.ศ. 1902 Ostreyko นักวิทยาศาสตร์ชาวโปแลนด์ ศึกษาวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้ โดยนำไม้ไปเผาในบรรยากาศของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และนำถ่านที่ได้ผสมกับคลอไรด์ของโลหะแล้วนำไปเผากระตุ้นที่อุณหภูมิสูงในเวลาต่อมาได้มีการผลิตถ่านกัมมันต์เชิงการค้าขึ้น พอสรุปโดยสังเขปดังนี้

- ค.ศ. 1906 เริ่มมีการตั้งโรงงานผลิตถ่านกัมมันต์ในเชิงธุรกิจขึ้นในยุโรป ชื่อ อีนิต (Eponite)
- ค.ศ. 1910 มีการใช้ถ่านกัมมันต์แบบเม็ดในอุตสาหกรรมน้ำดื่ม เมืองรีดดิ้ง ประเทศอังกฤษ
- ค.ศ. 1911 มีการตั้งโรงงานผลิตถ่านกัมมันต์ชื่อ นอริท (Norit) ในยุโรป
- ค.ศ. 1913 การผลิตถ่านกัมมันต์ในเชิงธุรกิจได้กำเนิดขึ้นในประเทศสหรัฐอเมริกา ในชื่อว่า ฟิลท์ชาร์ (Filtchar)

- ค.ศ. 1928 มีการใช้ถ่านกัมมันต์แบบผง ในการควบคุมกลิ่นและรส โดยบริษัท ซิกาโก มีท แพกเกอร์ จำกัด
- ค.ศ. 1929 ได้มีการใช้ถ่านกัมมันต์แบบผงไปใช้ในการทำหน้ากากป้องกันแก๊สพิษ สำหรับใช้ในสงครามในประเทศเยอรมัน
- ค.ศ. 1930 ได้มีการผลิตถ่านกัมมันต์จากวัตถุดิบหลายชนิด เพื่อให้มีความหลากหลายในการเลือกใช้งานได้มากขึ้น
- ค.ศ. 1978 ได้มีการคิดค้นพื้นสภาพของถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้ว โดยนำไปเผาในเตาเผาภายใต้บรรยากาศแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ในประเทศสหรัฐอเมริกา

จากนั้นก็มีการพัฒนากระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ เพื่อให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้ในอุตสาหกรรมมากขึ้น เช่น ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากขี้เลื่อย เปลือกถั่ว หรือถ่านลิกไนต์ เป็นต้น

1.3.2 ชนิดของถ่านกัมมันต์⁽¹²⁾

ชนิดของถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งโดยอาศัยหลักต่างๆ มากมายขึ้นอยู่กับความสะดวกของผู้ใช้งานตัวอย่างการแบ่งชนิดของถ่านกัมมันต์ ได้แก่

1) การแบ่งตามชนิดของสารกระตุ้น

- ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี (chemical activated carbon) ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากวิธีนี้มักจะมีรูพรุนขนาดใหญ่
- ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ (physical activated carbon) ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากวิธีนี้มักจะมีรูพรุนขนาดเล็ก นิยมใช้ดูดซับแก๊สและไอระเหย

2) การแบ่งตามขนาดอนุภาค

- ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (granular activated carbon) มีลักษณะเป็นเม็ด ซึ่งได้จากการอัดผ่านเครื่องอัดเป็นเส้นกลมๆแล้วตัดออกเป็นท่อนเท่าๆกัน หรืออาจทำ เป็นเกล็ดที่ได้จากการย่อยอนุภาคขนาดใหญ่ ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มักใช้ในการดูดซับแก๊สและไอระเหย
- ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (powdered activated carbon) มีลักษณะเป็นผงซึ่งได้จากการบดถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มักใช้งานเกี่ยวกับการดูดซับในสถานะของเหลว

ซึ่งคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผงและชนิดเม็ดตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.) 900-2547 โดยทดสอบตามมาตรฐานของ American Water Works Association (AWWA) แสดงดังตารางที่ 1.1 และ 1.2

ตาราง 1.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผง⁽¹³⁾

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด
ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า	600
ความหนาแน่นปรากฏ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.20-0.75

ตาราง 1.2 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด⁽¹³⁾

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด
ค่าไอโอดีน	600
ความชื้น ร้อยละ 5 ไม่เกิน	8
ความหนาแน่นปรากฏ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) ไม่น้อยกว่า	0.36
ความแข็ง ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	70

3) การแบ่งตามขนาดรูพรุนบนผิวของถ่านกัมมันต์ (แบ่งตามเกณฑ์ของ International Union of Pure and Applied Chemistry, IUPAC)

- ถ่านกัมมันต์รูพรุนขนาดเล็ก (micropore) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเล็กกว่า 2 นาโนเมตร มีความสำคัญที่สุดในการดูดซับ นิยมใช้ประโยชน์เกี่ยวกับการดูดซับแก๊สและไอระเหย

- ถ่านกัมมันต์รูพรุนขนาดกลาง (mesopore) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนระหว่าง 2 – 50 นาโนเมตร มักนำไปใช้ดูดซับสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ เช่น การฟอกสี

- ถ่านกัมมันต์รูพรุนขนาดใหญ่ (macropore) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร โดยปกติไม่มีความสำคัญในการดูดซับสารต่างๆ เป็นเพียงทางส่งผ่านอนุภาคที่ถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนขนาดเล็กและมีผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับ

4) การแบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์

- ถ่านกัมมันต์ความหนาแน่นต่ำ ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้เพื่อดูดซับในสารละลาย เช่น การฟอกสีของน้ำตาลดิบให้เป็นสีขาวบริสุทธิ์ หรือการให้น้ำให้บริสุทธิ์ เป็นต้น

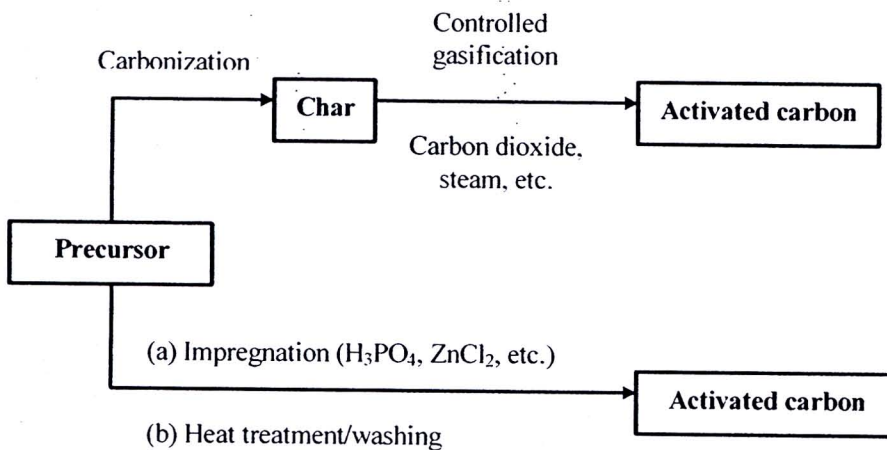
- ถ่านกัมมันต์ความหนาแน่นสูง ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้ดูดซับพิษ หรือไอระเหย

5) การแบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ

- สำหรับดูดซับแก๊ส (gas adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับสารพิษ กลิ่น และไอของสารอินทรีย์ ส่วนมากเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการเผาถ่านประเภท hard artificial char ซึ่งเป็นถ่านที่ได้จากเมล็ดผลไม้ หรือถ่านไม้ที่เผาด้วยความดันสูง
- สำหรับดูดซับสี (color adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นตัวฟอกสีส่วนมากเป็นถ่านที่ได้จากการเผาถ่านประเภท soft artificial char ซึ่งเป็นถ่านที่ได้จากถ่านไม้ ถ่านขาน้อย ถ่านจากแกลบ ถ่านตากหินน้ำมัน และถ่านจากกากน้ำตาล
- สำหรับดูดซับโลหะ (metal adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่เป็นตัวแยกพวกโลหะชนิดต่างๆ เช่น ถ่านที่ใช้ในการแยก ทอง เงิน แพลทินัม และแร่

1.3.3 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์⁽¹⁴⁾

กรรมวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์มีมากมายหลายวิธี ซึ่งขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบ และคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ แต่โดยทั่วไปประกอบไปด้วยขั้นตอน 3 ขั้นตอนดังนี้ คือ การเตรียมวัตถุดิบ การคาร์บอนไนซ์และการกระตุ้นแสดงดังรูป 1.2



รูป 1.2 กรรมวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์⁽¹³⁾

1) การเตรียมวัตถุดิบ⁽¹⁶⁾

การผลิตถ่านกัมมันต์สามารถเริ่มจากวัตถุดิบใดๆก็ได้ ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักอยู่ด้วย เช่น ไม้ ขี้เลื่อย กะลามะพร้าว ชังข้าวโพด หรือวัตถุดิบที่ถ่าน เช่น ถ่านลิกไนต์ ถ่านบิทูมินัส

เป็นต้น ในการผลิตเพื่อการค้า สมบัติบางประการของวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตถ่านกัมมันต์ มีดังนี้ คือ

- มีค่าคาร์บอนคงตัวสูง (fixed carbon)
- มีปริมาณความชื้น (moisture) ต่ำ
- มีสารที่ระเหยได้ (volatile matter)
- มีปริมาณขี้เถ้า (ash) ต่ำ
- ไม่สลายตัวเมื่อเก็บ
- สามารถใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูง

การคัดเลือกวัตถุดิบที่เหมาะสมแก่การผลิตนั้น นอกจากพิจารณาสมบัติบางประการของวัตถุดิบแล้ว ยังต้องคำนึงราคาต้นทุน และกระบวนการผลิต ตลอดจนวัตถุประสงค์การนำถ่านกัมมันต์ไปใช้งานด้วยสำหรับการเตรียมวัตถุดิบ อาจนำวัตถุดิบมาร้อนลดขนาดหรือบดเพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสมก่อนที่จะนำไปสู่กระบวนการเผาหรือการกระตุ่นเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์ซึ่งบางครั้งวัตถุดิบอาจมีความแข็งและเหนียว ยากแก่การบดวัตถุดิบโดยตรง ก็อาจนำวัตถุดิบนั้นไปเผาให้เป็นถ่านหรือการคาร์บอนไนซ์ (carbonization) ก่อน แล้วจึงนำมาบดลดขนาดก็ได้

2.) การคาร์บอนไนซ์ (carbonization) ^(12, 14, 17)

การคาร์บอนไนซ์เป็นกระบวนการทางไพโรไลซิส (pyrolysis) ทำโดยการเผาวัตถุดิบในที่อับอากาศในอุณหภูมิต่ำกว่า 800 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์สามประเภท ได้แก่ ถ่านที่มีลักษณะสีดำเรียกว่า ชาร์ (char) ส่วนที่เป็นของเหลวเรียกว่าทาร์ (tar) และสว่นที่เป็นแก๊ส

ขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์จัดว่าเป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญมากที่สุดในการผลิตถ่านกัมมันต์เนื่องจากในการคาร์บอนไนซ์จะมีการเริ่มสร้างของโครงสร้างรูพรุน โดยในระหว่างการคาร์บอนไนซ์ ธาตุและองค์ประกอบต่างๆที่ไม่ใช่คาร์บอนรวมถึงสารระเหยต่างๆ เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และน้ำ จะถูกกำจัดออกจากโครงสร้างของวัตถุดิบในรูปของแก๊สและน้ำมันทาร์ จากนั้นจะได้ถ่านชาร์ที่มีการจัดตัวของโครงสร้างผลึกที่ไม่เป็นระเบียบซึ่งจะมีช่องว่างรูพรุนระหว่างผลึก โดยถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ควรมีลักษณะดังนี้

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



การคาร์บอนให้ได้อ่านที่คุณสมบัติที่ต้องการทำได้โดยการปรับสถานะให้เหมาะสม โดยมีตัวแปรคือ

1.) อุณหภูมิ

อุณหภูมิจะมีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์มากที่สุด คือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ปริมาณการเกิดอ่านชาร์จะลดลง ส่วนน้ำมันนาร์และแก๊สที่ได้เพิ่มมากขึ้น และคุณสมบัติของน้ำมันนาร์จะมีกลุ่มโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปด้วย เพราะการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานเพื่อทำลายพันธะภายในโครงสร้างของวัตถุดิบนั้น แสดงดังรูป 1.3

2.) อัตราความร้อน

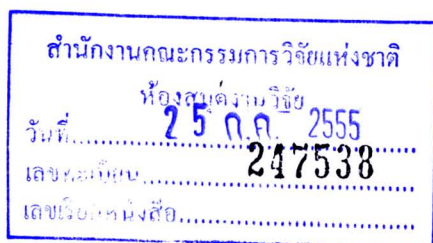
อัตราความร้อนจะมีผลต่อคุณสมบัติและปริมาณของน้ำมันนาร์และสารระเหย การเพิ่มอัตราการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจะมีผลทำให้ปริมาณสารระเหยถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็วทำให้ได้อ่านที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าได้อ่านจากการให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำกว่า เพราะได้อ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนให้ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิสูง คาร์บอนจะเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่า ทำให้เกิดช่องว่างเป็นรูพรุนขนาดใหญ่เมื่อทำการกระตุ้น สารกระตุ้นจะเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่าย

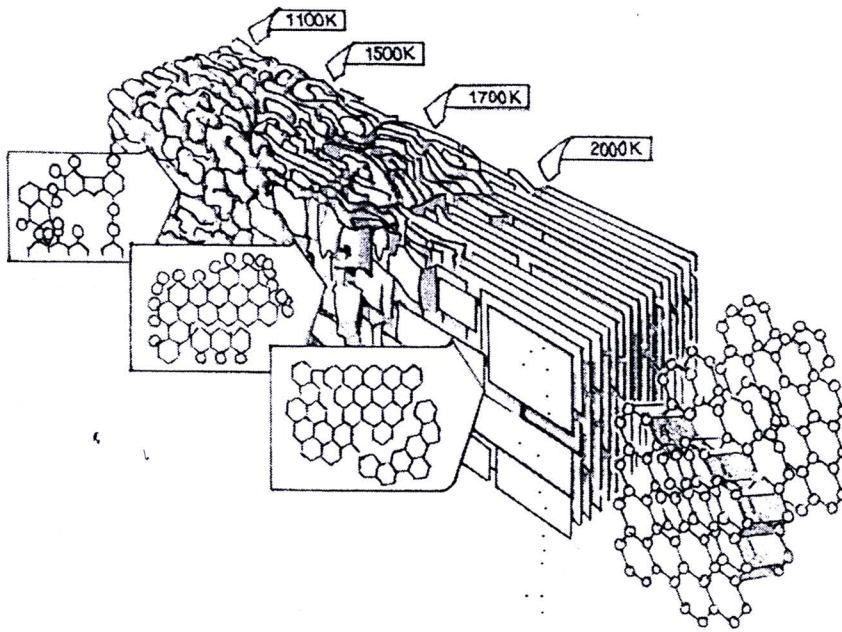
3.) ตัวกลางของปฏิกิริยา

ตัวกลางของปฏิกิริยา (medium of reaction) จะมีผลกระทบต่อปฏิกิริยา ถ้าแก๊สและไอที่เกิดระหว่างการไพโรไลซิสถูกพาออกไปอย่างรวดเร็ว โดยแก๊สที่เป็นตัวกลางเช่น แก๊สไนโตรเจน (เฉื่อยต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ของคาร์บอน) และแก๊สจากการเผาไหม้ ถ้าตัวกลางเป็นแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ปริมาณได้อ่านที่ได้จะน้อยกว่าตัวกลางที่เป็นแก๊สไนโตรเจน แต่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับตัวกระตุ้นสูงกว่า

4.) ธรรมชาติของวัตถุดิบ

วัตถุดิบแต่ละชนิดจะมีสถานะที่เหมาะสมแตกต่างกันในการคาร์บอนให้ โดยได้อ่านกัมมันต์ที่แตกต่างกันอาจมีวิธีการกระตุ้นที่แตกต่างกัน เพื่อให้ได้อ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดีที่สุด ซึ่งเหมาะแก่การนำไปใช้งานในระบบที่เหมาะสมต่อไป





รูป 1.3 การจัดเรียงตัวของคาร์บอนที่อุณหภูมิต่างๆ⁽¹³⁾

3.) การกระตุ้น (activation)

การกระตุ้น⁽¹⁴⁾ หมายถึงการทำให้คาร์บอนหรือถ่านมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิว และการทำให้ถ่านมีความว่องไวมากขึ้น ความหมายของการกระตุ้นมี 3 ลักษณะ คือ

- เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวว่องไว (active surface area) โดยเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไป และส่วนที่มีอำนาจดูดซับขึ้นมาแทน

- เป็นการเพิ่มความว่องไวในการดูดซับให้กับผิวที่มีอยู่แล้ว ซึ่งหมายถึงทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้น โดยจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ เพื่อให้มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น

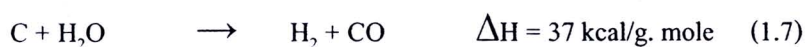
- เป็นการกำจัดสารอินทรีย์วัตถุหรืออนินทรีย์วัตถุต่างๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ (active center)

การกระตุ้นถ่านกัมมันต์แบ่งตามกลไกวิธีการกระตุ้นที่ใช้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี ใหญ่ๆ คือ

- การกระตุ้นทางกายภาพ

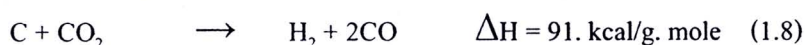
วิธีกระตุ้นทางกายภาพเป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยที่ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น ให้มีรูพรุนขนาดต่างๆ ให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้น และคาร์บอนมีการจัดเรียงโครงสร้างใหม่ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับให้สูงขึ้น โดยทั่วไปสารที่ใช้ในการกระตุ้นทางกายภาพ ได้แก่ ไออน้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ อากาศ แก๊สออกซิเจน และแก๊สไฮโดรเจนจากการเผา ซึ่งเรียกก๊าซดังกล่าวว่าแก๊สออกซิไดซ์ (oxidizing gas) โดยใช้ร่วมกับการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 – 1000°C ขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบ แก๊สพวกนี้จะไปทำปฏิกิริยากับทาร์ที่เหลืออยู่และคาร์บอนอะตอมในถ่านเกิดการแก๊สซิฟิเคชัน (gasification) บางส่วนของเม็ดถ่านทำให้คาร์บอนอะตอมหลุดออกไป ทำให้เกิดรูพรุนด้วยกลไกที่ต่างกันไปคือ การเปิดรูพรุนที่ปิด การทำให้รูพรุนขนาดเล็กใหญ่ขึ้น และการสร้างรูพรุนใหม่ ทำให้ถ่านมีรูพรุนและมีพื้นที่ผิวที่มีอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้น จึงส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ข้อดีของการกระตุ้นวิธีนี้คือ ไม่มีสารเคมีตกค้างอยู่ในถ่านกัมมันต์ แต่มีข้อเสียคือต้องใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นสูง ตัวแปรที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์ ได้แก่ ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบ ชนิดของแก๊สออกซิไดซ์ อัตราส่วนของแก๊สที่ใช้ อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น ตัวอย่างการกระตุ้นโดยวิธีทางกายภาพ คือ⁽¹⁶⁾

- การกระตุ้นด้วยไออน้ำ โดยการใช้ไออน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์คาร์บอน จัดว่าเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ดังนั้นจึงต้องทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการ 1.7



อัตราการออกซิไดซ์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ไม่ควรให้อุณหภูมิสูงเกิน 1,000 องศาเซลเซียส เพราะปฏิกิริยาจะกลายเป็น diffusion controlled rate ซึ่งอะตอมของคาร์บอนที่อยู่ชั้นนอก จำนวนมากจะถูกเผาไหม้ให้มีขนาดและความพรุนของอนุภาคเล็กลง

- การกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์คาร์บอน จัดว่าเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนเช่นกัน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 1.8



จากค่า ΔH จะเห็นได้ว่าปฏิกิริยานี้ต้องการพลังงานความร้อนมากกว่าวิธีการกระตุ้นด้วยไออน้ำ ดังนั้นจึงใช้อุณหภูมิกระตุ้นสูงกว่าการกระตุ้นด้วยไออน้ำ โดยทั่วไปมักจะใช้

อุณหภูมิในการกระตุ้นประมาณ 850-1,100 องศาเซลเซียส ทั้งนี้อุณหภูมิที่ใช้จะขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ด้วย แต่ในทางปฏิบัติแล้วจะใช้แก๊สเชื้อเพลิงเผาไหม้ ซึ่งจะให้ทั้งไอน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และอาจมีแก๊สออกซิเจนส่วนเกินบ้างเล็กน้อย หรืออาจจะมีการเติมไอน้ำเข้าไปด้วยเพื่อเป็นการกระตุ้น โดยใช้ทั้งสองวิธีร่วมกัน

- การกระตุ้นด้วยอากาศ โดยการใช้ออกซิเจนในอากาศเป็นตัวออกซิไดซ์คาร์บอน เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ จัดเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการ 1.9 และ 1.10



การใช้อากาศเพื่อทำการกระตุ้นมีการใช้กันน้อยมาก ทั้งนี้เพราะว่าการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในสภาวะที่ต้องการทำได้ยากกว่า อีกทั้งแก๊สออกซิเจนอาจจะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ผิวของถ่านทำให้เกิดความเสียหายได้ด้วย

- การกระตุ้นทางเคมี⁽¹²⁾

วิธีกระตุ้น ทางเคมี เป็นการคาร์บอนในวัตถุดิบที่ผสมกับสารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้นที่อุณหภูมิ 500-900 องศาเซลเซียส ขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ สารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้นโดยทั่วไปเป็นสารประเภทอัลคาไลน์ โลหะอัลคาไลน์ สารประกอบคาร์บอนเนต สารประเภทเบส และกรดบางชนิด เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โพแทสเซียมคาร์บอนเนต (K_2CO_3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl_2) และ กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เป็นต้น

สารเคมีที่เติมลงไปจะช่วยทำลายโครงสร้างของวัตถุดิบและขณะที่ทำการคาร์บอนไนซ์จะเกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ในวัตถุดิบ และเกิด การเชื่อมไขว้กัน (cross-link) ของโครงสร้างทำให้ถ่านหินเกิดรูพรุนขึ้น สารระเหยบางตัวในโครงสร้างของวัตถุดิบไม่สามารถหลุดออกไปได้ เนื่องจากเกิดการเชื่อมไขว้กันนี้ทำให้ปริมาณคาร์บอนที่ได้เพิ่มขึ้นและการเกิดทาร์ลดลง การเชื่อมไขว้กัน ประกอบกับสารเคมีที่ใช้มีความคงทนต่อการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงๆ จึงยังคงสภาพหุ้มอยู่รอบๆ และแทรกตัวอยู่ภายใน ทำให้เกิดการหดตัวน้อยเมื่อนำถ่านที่ได้มาล้าง สารเคมีออกด้วยน้ำหรือกรดจะเกิดช่องว่างหรือรูพรุนเพิ่มขึ้นอีก

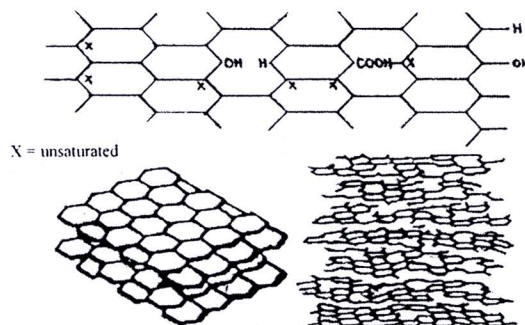
ข้อดีของวิธีนี้คือ ใช้อุณหภูมิไม่สูงมากนัก แต่มีข้อเสียคือมีสารตกค้างในถ่านกัมมันต์ทำให้ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมี รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ต้องเป็นชนิด

พิเศษที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้เพราะสารเคมีบางชนิดเป็นสารกัดกร่อน ตัวแปรที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี ได้แก่ ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบ ชนิดของสารเคมี อัตราส่วนของสารเคมีต่อวัตถุดิบ อุณหภูมิ และเวลา

1.3.4 ลักษณะและโครงสร้างของถ่านกัมมันต์⁽¹³⁾

ถ่านกัมมันต์นั้นมีโครงสร้างเช่นเดียวกับแกรไฟต์ แต่มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่า ผลึกแกรไฟต์ประกอบไปด้วยชั้นคาร์บอนอะตอมในรูปของวงเบนซีน (benzene ring) หรือกลุ่มของคาร์บอนอะตอมที่มีโครงสร้างคล้ายรูปหกเหลี่ยม นั่นคือแต่ละอะตอมจะเกิดพันธะเดียวกับอีก 3 อะตอมในแผ่นราบ (plan) ในลักษณะสมมาตรกัน อิเล็กตรอนที่ใช้ในการเกิดพันธะนี้เป็นวงอิเล็กตรอน ความยาวระหว่างอะตอมภายในชั้นประมาณ 1.442 อังสตรอม อิเล็กตรอนที่เหลืออีกหนึ่งเป็นไพอิเล็กตรอน จะเคลื่อนที่ไปทั่วทั้งโครงสร้างเกิดเป็นเรโซแนนซ์ (resonance) เพื่อให้โครงสร้างเสถียยิ่งขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) แต่ละแผ่นราบห่างกัน 3.354 อังสตรอม การสลับตำแหน่ง (displacement) ในทิศทางขนานกับแผ่น (layer) จะเกิดง่ายเพราะแรงแวนเดอร์วาลส์อ่อน ดังนั้นจะเกิดข้อบกพร่อง (defect) ในโครงสร้าง ณ จุดนี้ได้ง่าย

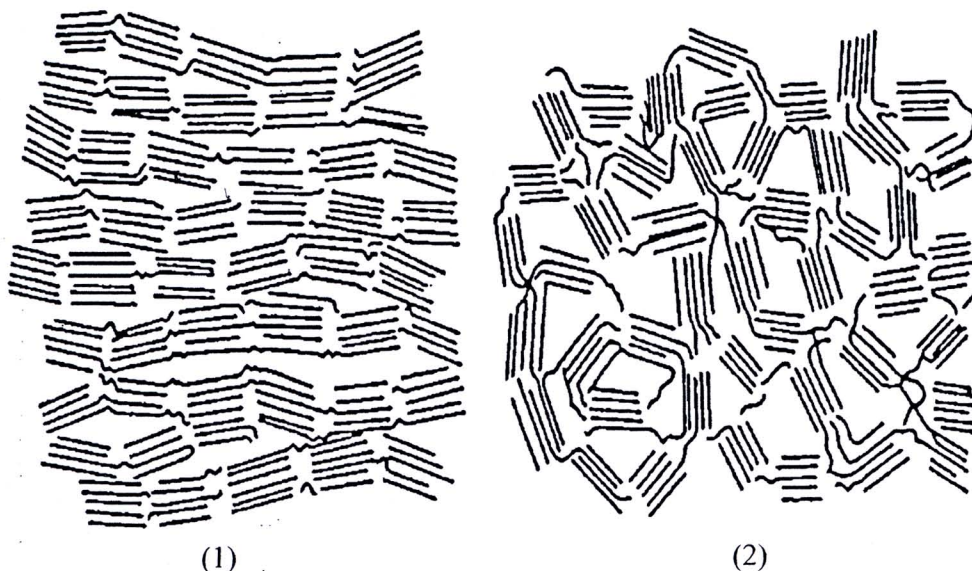
เมื่อศึกษาด้วยเอ็กซเรย์แฟกชันพบว่า ถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยโครงสร้างที่เป็นผลึกเล็กๆ ที่ไม่สมบูรณ์ เกิดการเบี่ยงเบนในแนวฉากและซ้อนเหลื่อมกันในแนวราบ การจัดเรียงตัวของผลึกเล็กๆจะมีทิศทางที่ไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการคาร์บอนไนซ์เซชัน ผลึกเล็กๆนี้มักมีความสูง 9-12 อังสตรอม กว้าง (เส้นผ่าศูนย์กลางกลางหน้าตัด) ประมาณ 20-30 อังสตรอม ประกอบด้วยแผ่นราบของชั้นระนาบแกรไฟต์ และมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 9 เท่า ของความกว้างของอะตอมคาร์บอนรูปหกเหลี่ยม



รูป 1.4 โครงสร้างที่เป็นผลึกของถ่านกัมมันต์⁽¹³⁾



โครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะขึ้นอยู่กับสถานะในการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิ และเวลาในการให้ความร้อน ได้มีการพยายามแบ่งประเภทของถ่านกัมมันต์ตามโครงสร้างของผลึก ตัวอย่างเช่น แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ โครงสร้างที่เป็นแกรไฟต์ง่ายที่อุณหภูมิสูง (easily undergoing graphitization) และ โครงสร้างที่มีลักษณะแกรไฟต์เพียงเล็กน้อย (ที่สถานะเดียวกัน) (undergoing graphitization to small degree)



รูป 1.5 แสดง (1) โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ที่เป็นแกรไฟต์ง่าย
และ (2) โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแกรไฟต์เล็กน้อย⁽¹³⁾

1.3.5 โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์⁽¹³⁾

ในการกระตุ้นจะทำให้ถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์เซชันมีความพรุนมากขึ้น เนื่องจากมีการสูญเสียสารประกอบระหว่างช่องของผลึกคาร์บอน รูพรุนทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ การกระตุ้นที่เหมาะสมคือการทำให้มีความพรุนมากขึ้น ไม่ใช่ขนาดของรูใหญ่ขึ้น

เมื่อพิจารณาลักษณะผิวของถ่านกัมมันต์ จะพบว่าลักษณะเป็นรูพรุนจำนวนมาก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน รูพรุนเหล่านี้จะลึกเข้าไปในเนื้อของถ่านกัมมันต์อย่างไม่เป็นระเบียบ และความลึกไม่สม่ำเสมอ ลักษณะของรูปร่างของรูนั้นไม่สามารถบอกได้แน่นอน บางรูมีลักษณะเปิดข้างหนึ่งปิดข้างหนึ่ง บางครั้งเป็นรูปตัววี

การจำแนกชนิดของรูพรุนตามขนาดรัศมีของรูพรุนออกเป็น

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

- มีโซพอร์ (mesopores) หรือทรานซิชันนัลพอร์ (transitional pores) ขนาดรัศมีอยู่ระหว่าง 15-2,000 อังสตรอม ปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.1-0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิว 20-100 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ตัวอย่างสารดูดซับที่มีขนาดของรูเป็นมีโซพอร์ ได้แก่ ซิลิกาเจล (silica gel) อะลูมินาเจล (alumina gels) อะมิโนซิลิเกตคະຕະລີสท์ (aminosilicate catalyst)

- ไมโครพอร์ (micropore) ขนาดรัศมีรูน้อยกว่า 12-15 อังสตรอม ปริมาตร 0.2-0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวจำเพาะมาก โดยมีค่าหลายร้อยตารางเมตรต่อกรัม บางครั้งถึง 1,500 ตารางเมตรต่อกรัม ไมโครพอร์มีความสำคัญที่สุดในการดูดซับ เนื่องจากพื้นที่การดูดซับและพลังงานดูดซับ (adsorption energy) มากที่สุด ทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้นมากที่ความดันต่ำๆ รูพรุนขนาดเล็กมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งเชื่อว่าปริมาณของรูพรุนแต่ละขนาด หรือที่เรียกกันว่า การกระจายขนาดของรูพรุน (pore size distribution) จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ และวิธีการกระตุ้น ตัวอย่างของตัวดูดซับที่มีขนาดของรูเป็นไมโครพอร์ คือ ซีโอไลต์ (zeolite)

โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ส่วนมากประกอบด้วยรูพรุนกระจาย โครงสร้างที่มีแมคโครพอร์ มีโซพอร์ และไมโครพอร์ เรียกว่า โครงสร้างผสม (mixed structure type) โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เกรดการค้าจะมีรูพรุนขนาดประมาณ 200-300 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม สำหรับรูพรุนขนาดเล็กซึ่งมีผลต่อการดูดซับ จะมีประมาณร้อยละ 90-95 ของพื้นที่ทั้งหมด นอกจากนี้ยังพบว่าความจุในการดูดซับยังขึ้นอยู่กับลักษณะและธรรมชาติของผิวด้วย กล่าวคือ ถ้าบริเวณผิวของถ่านเป็นเพียงระนาบพื้นฐาน (basal planes) ซึ่งไม่มีหมู่ฟังก์ชันนัลอื่นๆ การดูดซับจะเกิดแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเป็นแรงยึดเหนี่ยวที่ค่อนข้างอ่อน แม้ว่าจะดูดซับได้แต่ก็มีโอกาสที่จะหลุดออกง่าย แต่ถ้าเป็นผิวบริเวณที่มีหมู่ฟังก์ชันนัล การดูดซับจะเกิดจากแรงที่แข็งแรง โอกาสที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะหลุดออกจึงน้อยกว่า หมู่ฟังก์ชันนัลบริเวณผิวถ่านกัมมันต์มี 2 ชนิด คือ พวกออกไซด์ของกรด ซึ่งพบมากในถ่านกัมมันต์ที่ผลิตที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400-500 องศาเซลเซียส และพวกออกไซด์ของด่าง ซึ่งพบมากในถ่านที่ผลิตที่อุณหภูมิประมาณ 800-1,000 องศาเซลเซียส

1.3.6 โครงสร้างทางเคมีของผิวถ่านกัมมันต์^(12, 13)

จากการกระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชัน อะตอมต่างๆที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจน จะถูกกำจัดออกในรูปของแก๊ส อะตอมคาร์บอนที่เหมือนจะเรียงตัวเป็นชั้นๆ แต่ละชั้นประกอบไปด้วยวงแหวนหกเหลี่ยม (aromatic ring) เชื่อมโยงกันอย่างไม่เป็นระเบียบและเกิดช่องว่างหรือโพรง ซึ่งจะเป็นที่อยู่ของพวกทาร์ และสารอื่นที่ได้จากการเผาผลาญ ช่องว่างเหล่านี้จะกลายเป็นรูพรุนที่มีความสามารถในการดูดซับด้วยกระบวนการที่เรียกว่า การกระตุ้น โดยการล้างพวกทาร์และสารต่างๆที่ได้จากการเผาผลาญออกจากช่องว่างหรือโพรง และสร้างหมู่ฟังก์ชันนัลขึ้นมาแทน ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จึงเป็นผลสืบเนื่องจากโครงสร้างทางเคมีด้วย

ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เกิดจากอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งอยู่ในสภาพที่ไม่เสถียร คือ วาเลนซ์ไม่อิ่มตัว (unsaturated valencies) จึงพยายามที่จะเกาะกับอะตอมหรือโมเลกุลอื่น เช่น ออกซิเจนในอากาศ หรืออะตอมต่างๆที่อยู่ในสารตั้งต้น กระบวนการกระตุ้นจะช่วยให้การเกาะของอะตอมคาร์บอนกับอะตอมอื่นกลายเป็นพันธะเคมีที่แข็งแรง มักจะเกิดกับอะตอมคาร์บอนที่อยู่ที่ยอดของวงแหวนหกเหลี่ยม ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับแบบเคมี (chemisorption) กับออกซิเจนที่อุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส และกลายสภาพเป็นออกไซด์เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้พบว่ายังสามารถสร้างพันธะที่แข็งแรงกับอะตอมไฮโดรเจน ซึ่งจะไม่หลุดออกมาแม้จะใช้อุณหภูมิสูงถึง 1,000 องศาเซลเซียส และสามารถดึงอะตอมไนโตรเจนออกจากโมเลกุลแอมโมเนีย และซัลเฟอร์ออกจากโมเลกุลไฮโดรเจนซัลไฟด์ และดึงอะตอมกลุ่มฮาโลเจน (halogen) ออกจากโมเลกุลฮาโลเจน ทั้งที่อยู่ในสภาพแก๊สหรือของเหลวก็ได้ จึงเกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันนัลต่างๆบนผิวของถ่านกัมมันต์ แต่ที่สำคัญคือผิวที่เกิดจากอะตอมของคาร์บอนและออกซิเจน หรือที่เรียกว่า ผิวออกไซด์

1.3.7 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

ในอุตสาหกรรมมีการใช้ถ่านกัมมันต์อย่างแพร่หลาย หน้าที่ของถ่านกัมมันต์ในแต่ละอุตสาหกรรมจะแตกต่างกันไป ตัวอย่างเช่น

- ถ่านกัมมันต์ประเภทที่ใช้กับการดูดซับแก๊สหรือไอ
 - ใช้ในอุตสาหกรรมทำน้ำกากป้องกันแก๊สพิษ ทั้งที่ใช้ในการทหาร และที่ใช้กันทั่วไป ทั้งนี้เพราะถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับแก๊สพิษและไอของสารอินทรีย์ได้
 - ใช้แยกแก๊สโซลีนออกจากแก๊สธรรมชาติ
 - ใช้แยกเบนซีน (benzene) ออกจากแก๊สอุตสาหกรรม

- ใช้แยกไอระเหยของตัวทำละลายที่ใช้แล้วเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยถ่านกัมมันต์จะดูดซับไอระเหยเหล่านั้นที่อุณหภูมิห้องและคายออกที่ความดันของไอต่ำ เช่น การสกัดด้วยตัวทำละลาย การหมัก อุตสาหกรรมพลาสติก ผลิตภัณฑ์ยาง เป็นต้น

● ประเภทที่ใช้กับของเหลว (ฟอกสีและทำให้ของเหลวบริสุทธิ์) ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น

- ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำตาล เพื่อฟอกสีและทำให้น้ำตาลดิบบริสุทธิ์ขึ้น
- ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมันและไขมันสำหรับบริโภค นอกจากใช้ในการฟอกสีแล้วยังใช้ในการแยกเอทานูและเปอร้ออกไซด์ออกจากน้ำมันและไขมันด้วย
- แยกสิ่งเจือปนจากผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น เจลาติน น้ำส้ม เพ็กติน ซ็อกโกแลต น้ำผลไม้ เพราะไม่เป็นอันตรายและไม่เกิดปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์อาหาร
- ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องเค็มแอลกอฮอล์ เช่น ไวน์ วิสกี้ มักใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อดูดซับกลิ่นที่ไม่ต้องการ เช่น เอสเทอร์ ทำให้ได้เครื่องดื่มที่มีรสชาติที่ดีขึ้น
- ใช้ทำน้ำดื่มให้บริสุทธิ์ เป็นการกำจัดสี รส และกลิ่น นอกจากนี้ยังใช้ในการบำบัดน้ำเสีย
- ใช้ในทางการแพทย์ เช่น ให้ยาดูดซับบนถ่านกัมมันต์ ยาจะค่อยๆออกฤทธิ์ โดยมีความเข้มข้นสม่ำเสมอ ตัวอย่างคือ ไฮโดรซิลอะมิโนฟีนิลาโซนิคแอซิด (hydroxylaminophenylarsonic acid) สำหรับรักษาโรคที่เกิดจากการติดเชื้ออะมีบา และพาราไซค์ และยังใช้ดูดสารพิษจากผู้ที่กินยาเกินขนาด หรือกินยาพิษ นอกจากนี้ยังใช้รักษาอาการมีแก๊สมากในกระเพาะอาหารอีกด้วย

1.4 การดูดซับ^(13, 17, 18)

การดูดซับ (adsorption) หมายถึง การเพิ่มความเข้มข้นของสารที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ (adsorbent) หรือในทางกลับกันเป็นการลดลงของความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) บนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ สารซึ่งมีพลังงานอิสระที่ผิวดำ (low surface free energy) จะถูกดูดซับได้ดี ในขณะที่สารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวสูงกว่า (higher surface free energy) จะไม่ถูกดูดซับ

การดูดซับเป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงดูดโมเลกุล หรือคอลลอยด์ซึ่งอาจจะอยู่ในของเหลว หรือแก๊สให้มาเกาะติดบนผิว ถือได้ว่าเป็นการเคลื่อนย้ายสารระหว่างสถานะต่างๆทั้ง 3 สถานะ ซึ่งมีได้ทั้งแบบของเหลว-ของเหลว แก๊ส-ของเหลว และของเหลว-ของแก๊ส

1.4.1 กลไกการดูดซับ

การดูดซับ เป็นกระบวนการแยกสารที่ต้องการออกจากสารละลายของเหลว หรือแก๊ส โดยให้สารละลายหรือแก๊สผสมไหลสัมผัสกับตัวดูดซับ สารแต่ละชนิดในสารละลายมีความสามารถในการกระจายบนผิว และเกิดแรงดึงดูดได้ต่างกัน ปรากฏการณ์ดูดซับขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของตัวดูดซับ สมบัติทางเคมีที่ผิวของตัวดูดซับ และสารที่เป็นตัวถูกดูดซับ โดยกลไกการดูดซับมี 2 ประเภท ดังนี้

1. การดูดซับทางกายภาพ

เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง โมเลกุลของตัวดูดซับ (adsorbent) กับสารที่ถูกดูดซับ (adsorbate) โดยแรงยึดเหนี่ยวเป็นแบบแวนเดอร์วาลส์ จึงเป็นการยึดเหนี่ยวที่ไม่แข็งแรงและไม่มีพันธะเคมีเกิดขึ้น ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิปกติ ให้ความร้อนออกมาเล็กน้อย แต่มากกว่าความร้อนของการควบแน่น สามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในพื้นที่ที่โมเลกุลเดินทางมาถึงผิวหน้า แต่กรณีที่ตัวดูดซับมีความพรุนสูง อัตราการดูดซับจะช้าลงเพราะถูกจำกัดด้วยอัตราเร็วของการแพร่ภายในรูพรุน การดูดซับทางกายภาพเกิดขึ้นได้บนพื้นผิวทั้งหมดของตัวดูดซับทำให้ปริมาณการดูดซับสูงมากต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ การดูดซับอาจเกิดขึ้นได้มากกว่าหนึ่งชั้นของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ การลดความดันหรือเพิ่มอุณหภูมิของระบบจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง และทำให้ตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่ออกจากตัวดูดซับ ปรากฏการณ์ช่วงนี้เรียกว่า desorption ซึ่งเป็นวิธีการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง

2. การดูดซับทางเคมี

เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะแตกต่างกับการดูดซับทางกายภาพ โดยจะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวสารที่ถูกดูดซับ เกิดเป็นสารประกอบระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับ ทำให้ปริมาณของตัวดูดซับลดลง จะให้ความร้อนออกมาสูงมาก เพราะการเกิดปฏิกิริยาเคมีไม่ขึ้นกับความดันมากนัก และดูดซับตัวถูกดูดซับไว้ได้ในปริมาณน้อยต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ เนื่องจากการดูดซับโดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมีบนพื้นผิวนั้นเกิดได้บนพื้นที่ผิวบางแห่งเท่านั้น แต่การดูดซับทางกายภาพเกิดขึ้นได้บนพื้นผิวทั้งหมด และการดูดซับแบบนี้จะไม่สามารถเกิด desorption ได้เพราะองค์ประกอบที่ถูกดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบผันกลับไม่ได้ ปรากฏการณ์นี้จะขึ้นกับสารถูกดูดซับ และสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม ซึ่งพบว่าสารบางชนิดที่อุณหภูมิปกติไม่เกิดการดูดซับทางเคมี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิก็สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้

1.4.2 ขั้นตอนการดูดซับ

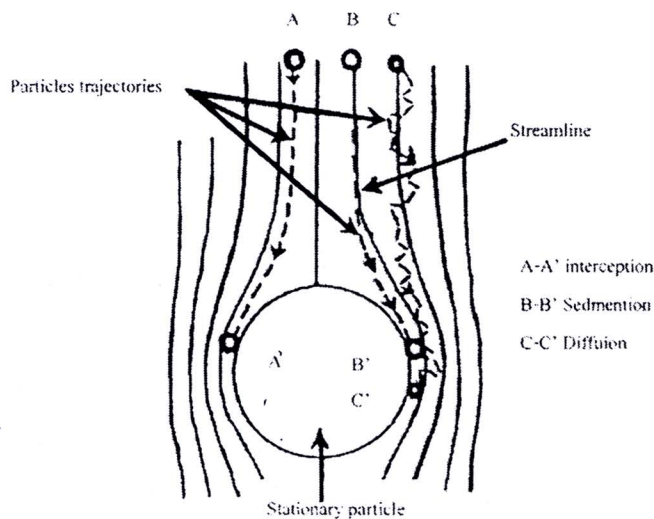
ขั้นตอนของการดูดซับสามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารละลาย หรือสารแขวนลอยเข้าไปหาถ่านกัมมันต์ โดยการเคลื่อนที่จะมีลักษณะคล้ายกับการกรองน้ำซึ่งเป็นการเคลื่อนย้ายของสารแขวนลอยในน้ำเข้ามาติดที่ถ่านกัมมันต์ ซึ่งสารแขวนลอยจะเคลื่อนที่เข้าหาสารกรองได้ 2 วิธี ดังรูป 1.6 โดยวิธีแรกเป็นการเคลื่อนที่ตามธรรมชาติของสารที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน และเป็นการเคลื่อนที่แบบ บราวเนียน (Brownian diffusion) ส่วนวิธีที่สองเป็นการเคลื่อนที่ตามเส้นทางการไหลของน้ำ โดยสารแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอนจะวิ่งเบียดเข้าหาสารกรอง (interception) ในขณะที่ผ่านช่องว่างขนาดเล็ก นอกจากนี้สารแขวนลอยขนาดใหญ่ยังอาจตกตะกอนในทิศทางที่เคลื่อนที่เข้าหาถ่านกัมมันต์ได้

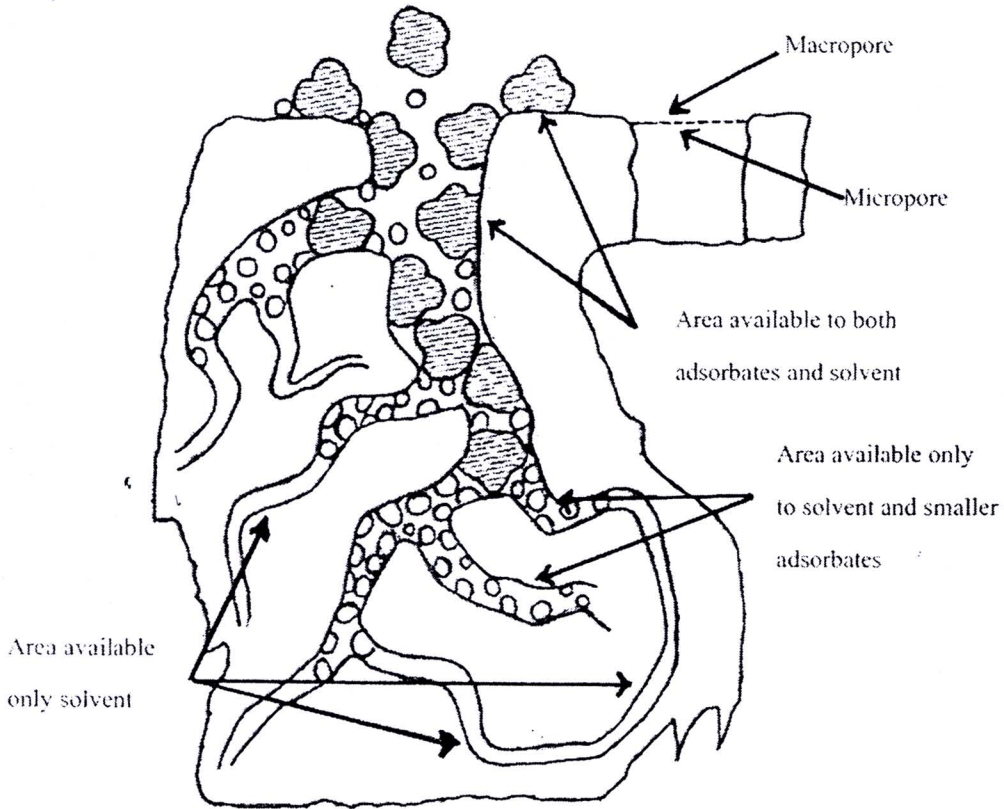
ขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอน Film diffusion เมื่อโมเลกุลของสารแขวนลอยเข้ามาถึงถ่านกัมมันต์ซึ่งโดยปกติแล้วถ่านกัมมันต์จะมีฟิล์มของน้ำห่อหุ้มอยู่โดยรอบ คล้ายเยื่อบางๆ โมเลกุลต้องทำการแทรกตัวผ่านฟิล์มของน้ำให้ได้จึงจะเข้าไปในถ่านกัมมันต์ได้

ขั้นตอนที่ 3 ขั้นตอน Pre diffusion เนื่องจากสาเหตุที่ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวส่วนใหญ่อยู่ในโพรง หรือช่องว่างภายใน ดังรูปที่ 1.7 โมเลกุลของสารแขวนลอยจะต้องแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างของถ่านกัมมันต์ให้ได้ จึงจะมีการดูดซับเกิดขึ้น

ขั้นตอนที่ 4 ขั้นตอนนี้ โมเลกุลของสารแขวนลอยจะต้องเกาะติดบนผิวของถ่านกัมมันต์ได้ โดยไม่หลุดออกไป จึงจะถือว่าเกิดการดูดซับที่ผิวอย่างสมบูรณ์



รูป 1.6 กลไกการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยในน้ำเข้าหาถ่านกัมมันต์⁽¹³⁾



รูป 1.7 แสดงถึงโพรง หรือช่องว่างภายในถ่านกัมมันต์³⁾

1.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์

1) ความปั่นป่วน

ความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นจากการกวนสารละลาย หรือการไหลผ่านคอลัมน์จะมีผลต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีขนาดและคุณลักษณะทางกายภาพต่างกัน ทำการดูดซับของถ่านกัมมันต์ต้องการความปั่นป่วนในระดับที่ต่างกันออกไป เช่น ถ่านกัมมันต์แบบผง ต้องการความปั่นป่วนสูงจึงจะเกิดการดูดซับดี เนื่องจากอัตราเร็วของการดูดซับขึ้นอยู่กับ การแพร่ผ่านรูพรุนของโมเลกุลที่ถูกดูดซับเข้าสู่โพรงช่องว่างของถ่านกัมมันต์ แต่ถ่านกัมมันต์แบบ เกร็ดต้องการความปั่นป่วนต่ำ เนื่องจากอัตราเร็วของการดูดซับขึ้นอยู่กับ การแพร่ผ่านฟิล์ม ออกซิไฮเดรท

2) ขนาดและพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์

ขนาดของถ่านกัมมันต์เป็นสัดส่วนผกผันกับอัตราการดูดซับของถ่านกัมมันต์ ดังนั้นถ่านกัมมันต์แบบผงจึงมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ส่วนพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์นั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับไอโอดีน (capacity of iodine adsorption) กล่าวคือกรณีที่มีพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ส่วนมากเป็นพื้นที่ผิวของช่องว่างหรือโพรงภายใน ขนาดภายนอกของถ่านกัมมันต์จะไม่ค่อยมีผลต่อการกำหนดพื้นที่ผิว ถ่านกัมมันต์ทั้งแบบผงและแบบเกล็ดจึงมีพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักไม่แตกต่างกัน จึงทำให้ถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิดมีความสามารถในการดูดซับใกล้เคียงกัน แต่ถ่านกัมมันต์แบบผงจะมีอัตราการดูดซับสูงกว่าถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด

3) ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของถ่านกัมมันต์

เมื่อเกิดการดูดซับโมเลกุลของสารจะถูกดึงออกจากน้ำ และไปเกาะติดบนผิวถ่านกัมมันต์ สารที่สามารถแตกตัวเป็นไอออนจะละลายน้ำได้ ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำอย่างเหนียวแน่น ทำให้สารนี้เกิดการดูดซับบนผิวของถ่านกัมมันต์ได้ยาก แต่อย่างไรก็ตามสารที่ละลายน้ำได้บางชนิดสามารถเกาะติดผิวถ่านกัมมันต์ได้

4) ขนาดของสารที่ถูกดูดซับบนผิวถ่านกัมมันต์

ขนาดของสารที่ถูกดูดซับบนผิวถ่านกัมมันต์มีความสำคัญอย่างมากต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากการดูดซับส่วนใหญ่เกิดขึ้นภายในโพรงของถ่านกัมมันต์ จากการวิจัยพบว่า การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อสารที่ถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่าโพรงของถ่านกัมมันต์เพียงเล็กน้อย เนื่องจากจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างสารและถ่านกัมมันต์มากที่สุด จึงทำให้สารขนาดเล็กนี้ถูกดูดเข้าสู่รูพรุนของถ่านกัมมันต์ก่อน จากนั้นสารขนาดใหญ่จึงจะถูกดูดเข้าสู่รูพรุนตามลำดับ

5) ค่าความเป็นกรดค่า (pH) ของสารละลาย

เนื่องจากถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่ถูกนำมาใช้ในการดูดซับสารออกจากสารละลาย ดังนั้นค่าความเป็นกรดค่าของสารตัวที่ละลายจะมีผลต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากค่าความเป็นกรดค่าของสารละลายจะมีผลต่อการแตกตัวของไอออนของตัวถูกละลาย ถ้าสารละลายเป็นกรด จะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์ลดลง เนื่องจากไฮโดรเจนไอออน (H^+) จะเกาะติดที่ผิวของถ่านกัมมันต์ได้ดี ทำให้ถ่านมีรูพรุนน้อยลง

6) อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลต่อการดูดซับอย่างมากถ้าอยู่ในสถานะของเหลว เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารละลาย จะทำให้อัตราการดูดซับสูงขึ้น แต่ความสามารถในการดูดซับลดลง

1.4.4 ไอโซเทอมการดูดซับ

การดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ปฏิกิริยาที่มีผลต่อการดูดซับคือ ความดันหรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ อุณหภูมิ ชนิดของสารดูดซับและสารดูดซับ ดังนั้นในการดูดซับจะต้องคำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้ด้วย โดยทั่วไปมักจะควบคุมให้อุณหภูมิของการดูดซับให้คงที่ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับกับความดันหรือความเข้มข้นของสารละลายที่สถานะสมดุลของการดูดซับ โดยเส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวเรียกว่า “ไอโซเทอม (isotherm)” ดังแสดงในรูป 1.8 ซึ่งเป็นการจำแนกไอโซเทอมการดูดซับแก๊สตามระบบ IUPAC โดยไอโซเทอม 5 ชนิดแรก (Type I ถึง Type V) ได้ถูกจำแนกไว้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1940 โดยนักวิทยาศาสตร์ 4 ท่าน ได้แก่ S. Brunauer, L.S. Deming, W.S. Diming and E. Teller (Rouquerol, Rouquerol and Sing, 1999) หรืออาจเรียกการจำแนกไอโซเทอม 5 ชนิดแรกว่าเป็นการจำแนกตามแบบของ BDDT

Type I เป็นไอโซเทอมสำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) หรือเรียกว่าแบบแลงเมียร์ (Langmuir) เป็นแบบที่ง่ายที่สุด เป็นปรากฏการณ์การดูดซับของสารที่ไม่มี ความพรุน หรือมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เช่น ถ่านกัมมันต์ หรือซีโอไลต์ พบทั้งในการดูดซับทางเคมี และการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (relative pressure) ต่ำๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูง เข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

Type II ไอโซเทอมรูปตัวเอส (S-shaped isotherm) มักจะเกิดกับวัสดุที่ไม่มีความพรุนหรือมีความพรุนขนาดใหญ่ (macro-porous) ที่จุดเปลี่ยนกราฟ (inflection point or knee of isotherm) เป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าถูกคลุมแบบชั้นเดียวเกือบสมบูรณ์แล้ว เมื่อเพิ่มความดันจะทำให้การดูดซับเกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งชั้น ดังนั้นการดูดซับแบบนี้จึงเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer adsorption)

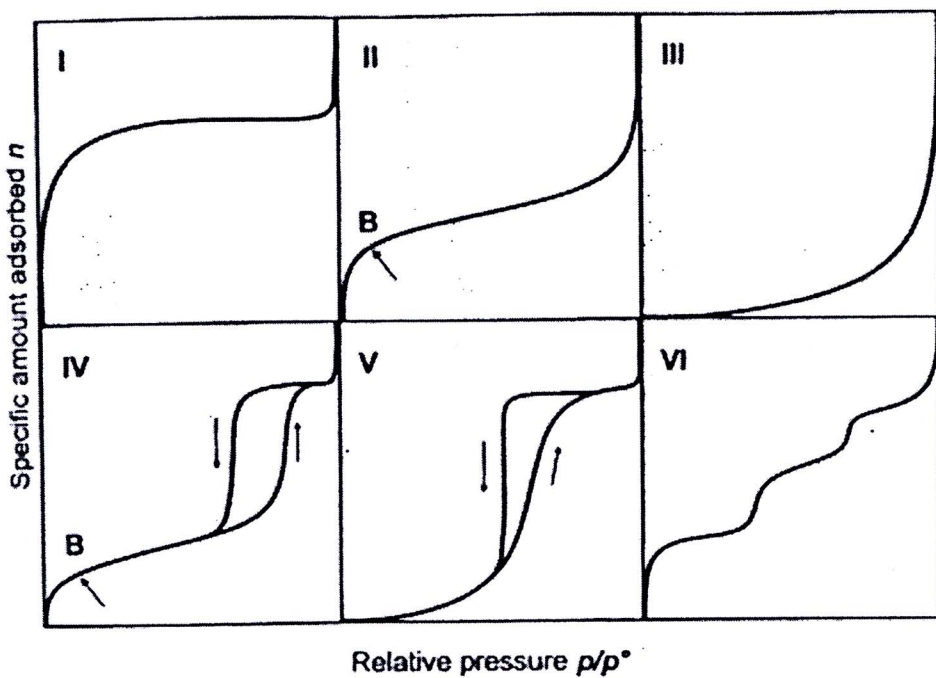
Type III เป็นไอโซเทอมที่ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟ มีรูปร่างคล้ายกระจกแก้ว ไอโซเทอมแบบนี้ไม่ค่อยพบมากนักจะเกิดกับการดูดซับที่ไม่แข็งแรง เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นกับของแข็งที่ไม่มีรูพรุน (nonporous solid) และของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ แต่เป็นพวกที่มีแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับที่ไม่แข็งแรงทำให้ดูดซับได้น้อย เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ แต่เมื่อเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันเองทำให้ดูดซับได้มากขึ้นที่ความดันสัมพัทธ์ที่มีค่าสูง

Type IV เป็นไอโซเทอมที่พบมากในวัสดุที่มีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดกลาง (ขนาดรูพรุนระหว่าง 2-50 นาโนเมตร) ในช่วงแรกซึ่งมีค่าความดันสัมพัทธ์ต่ำเส้นไอโซเทอมจะ

เหมือนกับไอโซเทอมชนิดที่ 2 จากนั้นการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้น เนื่องจากเกิดการควบแน่นแคปิลารี (capillary condensation) ขึ้นในรูพรุน ซึ่งทำให้เกิด hysteresis loop ในช่วง desorption ซึ่งข้อมูลของการเกิดการควบแน่นในช่วงแคปิลารีสามารถนำมาคำนวณหาการกระจายขนาดของรูพรุน (pore size distribution) ในของแข็งที่มีรูพรุนขนาดกลางได้ การควบแน่นแคปิลารีทำให้ช่วง desorption มีปริมาณดูดซับที่สูงกว่าการเกิดการดูดซับที่ความดันเท่ากัน

Type V เหมือนไอโซเทอมชนิด Type IV ต่างกันเพียงเกิดการควบแน่นในรูพรุน (มี hysteresis loop) ไอโซเทอมแบบนี้จะพบไม่บ่อยนัก

Type VI เป็นไอโซเทอมแบบขั้นบันได (stepped isotherm) ไอโซเทอมแบบนี้จะพบไม่บ่อยนัก โดยมากพบในระบบที่เป็นการดูดซับแบบชั้นต่อชั้นบนพื้นที่ผิวที่ค่อนข้างคล้ายกัน (uniform) โดยรูปร่างของไอโซเทอมจะขึ้นอยู่กับระบบ และอุณหภูมิในการดูดซับ



รูป 1.8 ไอโซเทอมการดูดซับ⁽¹³⁾



1.5 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

ปริญธร เต็มฉัตรศิลป์⁽¹³⁾ ได้ทำการศึกษาการเตรียม และวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของ ถ่านกัมมันต์จากไม้ตอง และไม้หมาจู อายุ 1-3 ปี จากบริเวณจังหวัด กาญจนบุรี โดยการกระตุ้นทางเคมี ซึ่งสารที่ใช้ในการกระตุ้น ได้แก่ กรดฟอสฟอริก โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และกรดไนตริก ผลการศึกษาพบว่า สมบัติของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ การวิเคราะห์แบบประมาณ และความสามารถในการดูดซับ ขึ้นอยู่กับพันธุ์และชนิดของไม้ ไม้ ชนิดของสารกระตุ้น และสภาวะในการกระตุ้น และสภาวะในการกระตุ้น นอกจากนั้นได้ทำการศึกษาการดูดซับสารละลายสีเมทิลีนบลู การดูดซับ ไอโอดีน และคลอรีนด้วยวิธีการแบบสองกรด จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ของไม้ตองและไม้หมาจูคือ 450 องศาเซลเซียส ไม้ตองอายุ 2 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกในอัตราส่วน 1:4 เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้น 4:0 (น้ำต่อกรด) ให้ค่าการดูดซับ ไอโอดีนสูงที่สุดเท่ากับ 615.84 มิลลิกรัมต่อกรัม และสามารถดูดสารละลายสีเมทิลีนบลูได้ 8.4674 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนไม้หมาจูอายุ 3 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกในอัตราส่วน 1:4 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้น 4:0 (น้ำต่อกรด) ให้ค่าการดูดซับ ไอโอดีนสูงที่สุดเท่ากับ 277.24 มิลลิกรัมต่อกรัม และสามารถดูดสารละลายสีเมทิลีนบลู 8.4746 มิลลิกรัมต่อกรัม

รวินทร์ และคณะ⁽¹⁹⁾ ได้ทำการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับสารละลายสีเมทิลีนบลูโดยใช้ แกลบคัดแปรทำปฏิกิริยากับกรดไนตริกจากการทดลองทำการศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้นและอุณหภูมิของสารละลายสีเมทิลีนบลู นอกจากนั้นยังทำการศึกษาไอโซเทอม และจลนศาสตร์ ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นและอุณหภูมิของสารละลายสีเมทิลีนบลูมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น ไอโซเทอมของการดูดซับ ศึกษาจากแบบจำลองแลงเมียร์และฟรุนดลิช พบว่าสอดคล้องกับแบบสมการฟรุนดลิชมากกว่าสมการแลงเมียร์ จลนศาสตร์ของการดูดซับศึกษาจากแบบจำลอง pseudo-first order และ pseudo-second order พบว่าจลนศาสตร์ในการดูดซับสอดคล้องกับสมการ pseudo-second order อัตราเร็วของการดูดซับ ในช่วงเริ่มต้น มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.308 ถึง 0.965 มิลลิกรัมต่อ-นาทีก เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายสี เมทิลีนบลู จาก 20 ถึง 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

สาวิตรี และคณะ⁽²⁰⁾ ได้ทำการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากก้านทะลายปาล์มน้ำมันและการดูดซับเชื้อ *Escherichia coli* ซึ่งมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน คือการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที และกระตุ้นทางเคมีที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร โดยอัตราส่วนระหว่างสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และถ่านชาร์ คือ 1:1 อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที จากการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้มีคุณสมบัติคือ ค่าความหนาแน่นเชิง

ปริมาตร 0.346 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าการดูดซับไอโอดีน 1,308 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าการดูดซับสารละลายสีเมทิลินบลู 248 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อนำถ่านกัมมันต์นี้จำนวน 1 กรัม มาทำการดูดซับเชื้อ *E.coli* เป็นเวลา 21 ชั่วโมงด้วยกระบวนการแบบ batch พบว่าการดูดซับของถ่านกัมมันต์กั้นทะเลสาบปาล์มน้ำมันเป็นไปตามสมการของฟรุนดิช คือ $q_c = 0.9905 C_c^{0.07}$

Hameed และคณะ⁽²¹⁾ ได้ทำการศึกษาจลนศาสตร์และสมดุลของการดูดซับสารละลายสีเมทิลินบลูของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้ไผ่ ซึ่งทำการกระตุ้นโดยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และทำการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่าไอโซเทอมการดูดซับสอดคล้องกับสมการแบบแลงเมียร์ ซึ่งจะเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวมีค่าการดูดซับสารละลายสีเมทิลินบลูสูงสุดคือ 454.2 มิลลิกรัมต่อกรัม และจลนศาสตร์ของการดูดซับสอดคล้องกับสมการ pseudo-second-order มากกว่า pseudo-first order

Hussien และคณะ⁽²²⁾ ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมัน โดยการใช้วิธีการกระตุ้นทางเคมี-กายภาพ (physical-chemical activation) โดยใช้สารละลายสังกะสีคลอไรด์ (zinc chloride) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในการกระตุ้น ทำการเผากระตุ้นที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และผ่านด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์ที่เผากระตุ้นสารละลายสังกะสีคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0-10 โดยน้ำหนัก จะมีไมโครพอร์มากกว่าถ่านกัมมันต์ที่เผากระตุ้นด้วยสารละลายสังกะสีคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 10-30 โดยน้ำหนัก และถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงที่สุดเท่ากับ 1,839 ตารางเมตรต่อกรัม

Kannan และคณะ⁽²³⁾ ได้ศึกษาจลนศาสตร์และกลไกการดูดซับสารละลายสีเมทิลินบลูของถ่านกัมมันต์ทางการค้าเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้ไผ่, กะลามะพร้าว, เปลือกถั่ว, ฟางข้าว และ ขี้เลื่อย โดยทำการคาร์บอนไนซ์ที่ 300 องศาเซลเซียส ทำการกระตุ้นที่สารละลายสังกะสีคลอไรด์ (zinc chloride) ที่ 700 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่าไอโซเทอมการดูดซับสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์เป็นแบบการดูดซับแบบชั้นเดียวและจลนศาสตร์ของการดูดซับเป็นแบบ pseudo-first order จากการทดลองพบว่าความสามารถในการดูดซับสารละลายสีเมทิลินบลูของถ่านกัมมันต์ทางการค้ามีประสิทธิภาพมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้ไผ่, กะลามะพร้าว, เปลือกถั่ว, ฟางข้าว และขี้เลื่อย

Lua และคณะ⁽²⁴⁾ ได้ทำการศึกษาผลของสภาวะของการแยกสลายด้วยความร้อนต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจาก Pistachio-nut shell ซึ่งได้ศึกษาผลของอุณหภูมิในการแยกสลายด้วยความร้อน เวลาที่ค้างไว้ ณ อุณหภูมิสุดท้าย อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน และอัตราการให้ความร้อน ที่มีผลต่อถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ ซึ่งในการกระตุ้นนั้นทำการกระตุ้นโดยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และเวลาในการกระตุ้น 30 นาที อัตราการให้