บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัตถุดิบธรรมชาติหรืออินทรียวัตถุซึ่งมีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก มาผ่านกรรมวิธีก่อกัมมันต์ (Activation) จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำที่ไม่ใช่สารบริสุทธิ์ แต่เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่สามารถเขียนสูตรทางเคมีได้ มีลักษณะเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง และมีคุณสมบัติในการดูดซับสารได้ดี เช่น ดูดกลิ่น ดูดสี หรือสารปนเปื้อนอื่น ๆ ซึ่งส่วนใหญ่วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์มักเป็นวัสดุเหลือใช้หรือวัสดุที่มีราคาถูก มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง แต่มีปริมาณสารอนินทรีย์ต่ำ และให้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูง ได้แก่ พวกเซลลูโลส ถ่านหิน หรือพวกที่มาจากสัตว์ เช่น กระดูก เป็นต้น (เกศรา นุตาลัย และคณะ, 2531)

นอกจากนี้สมบัติของถ่านกัมมันต์ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ อีกหลายอย่าง เช่น วิธีการผลิต สภาวะในการใช้งาน เป็นต้น จึงเป็นการยากที่จะระบุว่าวัสดุชนิดใดจะใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ที่เหมาะกับงานแบบใด (บุญชัย ตระกูลมหาชัย, 2537) และจากตารางที่ 2-1 แสดงวัสดุที่แตกต่างกันสำหรับการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ พร้อมการนำไปใช้ประโยชน์

ตารางที่ 2-1 สมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์และการใช้ประโยชน์ (Bansel, 1988 อ้างถึงใน อรวรรณ ศิริโชติ และคณะ, 2543)

วัสดุ	ปริมาณคาร์บอน	ปริมาณสารระเหย	ความหนาแน่น	ปริมาณเถ้า	การใช้ประโยชน์
ไม้เนื้ออ่อน	40-45	55-60	0.40-0.50	0.3-1.1	การดูดซับในสารละลาย
ไม้เนื้อแข็ง	40-42	55-60	0.55-0.80	0.3-1.2	การดูดซับในสารละลาย
ลิกไนซ์	55-70	25-40	1.00-1.35	0.5-6.0	การบำบัดน้ำเสีย
ถ่านหินเนื้ออ่อน	65-80	20-30	1.25-1.50	2.0-12	การดูดซับในสารละลาย
ปิโตรเลียมโค้ก	70-85	12-20	1.35	0.5-0.7	การบำบัดน้ำเสีย
ถ่านหินเนื้อกึ่งแข็ง	70-75	10-15	1.45	5-15	การดูดซับไอ
ถ่านหินเนื้อแข็ง	85-95	5-10	1.50-1.80	2-15	การดูดซับไอ

2.1.1 วิวัฒนาการของถ่านกัมมันต์

คุณสมบัติในการดูดซับสีในของเหลวของถ่านกัมมันต์เป็นที่ทราบกันมาตั้งแต่คริสต์ศตวรรษที่ 15 ส่วนคุณสมบัติในการดูดซับแก๊สเพิ่งจะมีในปี พ.ศ. 2328 แต่ไม่มีผู้ที่สนใจจนกระทั่งปี 2354 นักวิทยาศาสตร์พบว่า ถ่านจากกระดูกสามารถดูดซับสีได้มากกว่าถ่านซึ่งทำจากไม้ จึงนิยมนำถ่านกระดูกมาใช้ในการฟอกน้ำตาลทรายให้ขาวสะอาดบริสุทธิ์กันมาก และได้มีการค้นคว้าต่อ จนกระทั่งปี พ.ศ. 2356 มีผู้พบว่าถ่านที่ได้จากการเผาเลือดกับด่างขี้เถ้า (Potash) มีคุณสมบัติในการดูดซับสีมากกว่าถ่านกระดูกถึง 20-50 เท่า แต่ไม่สามารถที่จะผลิตได้ในปริมาณมากเพียงพอที่จะนำไปใช้ในโรงงานได้ ต่อมาประมาณปี พ.ศ. 2443 มีนักวิทยาศาสตร์ชาวโปแลนด์ได้คิดค้นวิธีผลิตถ่านกัมมันต์ขึ้นใหม่ โดยการเผาถ่านในบรรยากาศของคาร์บอนไดออกไซด์ และอีกวิธีหนึ่งใช้คลอไรด์ของโลหะผสมกับถ่านแล้วนำไปเผา ซึ่งนับได้ว่าเป็นผู้ริเริ่มทำให้เกิดอุตสาหกรรมการผลิตถ่านชื่อต่าง ๆ และได้มีการปรับปรุงคุณภาพไปเรื่อย ๆ ถ่านที่ผลิตขึ้นเหล่านี้ได้มีการนำไปใช้ในการดูดซับสี ฟอกสี ในโรงงานผลิตน้ำตาลทรายเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งใช้ได้ผลดีกว่าถ่านกระดูกมาก ส่วนสมบัติในการดูดกลิ่นและแก๊สของถ่านกัมมันต์เพิ่งได้รับความสนใจในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 1 ซึ่งมีการนำไปใช้ในการทำหน้ากากป้องกันแก๊สพิษ จากจุดนี้ทำให้นักวิทยาศาสตร์สนใจในคุณสมบัติการทำให้แก๊สบริสุทธิ์ของถ่านกัมมันต์ ซึ่งจากการทดลองโดยใช้วิธีการต่าง ๆ ได้พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการฟอกน้ำตาลนั้นไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการทำหน้ากากป้องกันแก๊สพิษ เพราะมีลักษณะพองและเบา และจำเป็นต้องใช้เป็นจำนวนมาก ทำให้มีผู้พยายามผลิตถ่านชนิดใหม่ที่มีความหนาแน่นมากขึ้น สำหรับใช้ในการดูดแก๊สโดยเฉพาะ ซึ่งต่อมาเมื่อสงครามโลกสิ้นสุดลง การค้นคว้าก็บรรลุผลสำเร็จ และมีผู้นำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น การดูดซับไอของสารละลาย การดูดซับไอเบนซินจากแก๊สอื่น ๆ เป็นต้น (อรวรรณ ศิริโชติ และคณะ, 2543)

2.1.2 ชนิดของถ่านกัมมันต์

ชนิดของถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งประเภทได้โดยใช้หลักเกณฑ์ต่าง ๆ มากมาย ซึ่งขึ้นอยู่กับความสะดวกของผู้ใช้ ได้แก่

2.1.2.1 การแบ่งชนิดของถ่านกัมมันต์ตามเกณฑ์ของลักษณะการกระตุ้น (บุญชัย ตระกูลมหาชัย, 2537)

(ก) การกระตุ้นเชิงกายภาพ (Physical activation) คือ ถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นโดยการใช้แก๊สออกซิไดซ์ เช่น ไอน้ำที่ร้อนยิ่งยวด (Superheated stream) หรือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นประมาณ 700-1,000 องศาเซลเซียส เพื่อให้สารอินทรีย์ต่าง ๆ สลาย

ไป ทำให้โครงสร้างภายในมีลักษณะเป็นรูพรุน (Porous) กระจายอยู่ทั่วไป ขนาดของรูพรุนที่ได้จะมีขนาดเล็กกว่าการกระตุ้นเชิงเคมี ซึ่งมีข้อดี คือสามารถนำมาใช้งานได้เลยทันที โดยไม่ต้องล้างสารที่เหลือตกค้าง นิยมใช้ในงานประเภทดูดซับแก๊สและไอระเหย

(ข) การกระตุ้นเชิงเคมี (Chemical activation) คือ ถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นโดยใช้สารเคมี เช่น ซิงค์คลอไรด์ หรือกรดฟอสฟอริก เป็นต้น โดยใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นประมาณ 600-700 องศาเซลเซียส ซึ่งตัวกระตุ้นจะแทรกเข้าไปในเนื้อถ่านอย่างทั่วถึง ทำให้ส่วนที่ไม่บริสุทธิ์ละลายหมดไปเร็วขึ้น และเกิดรูพรุนขนาดใหญ่ แต่เป็นวิธีที่มีต้นทุนในการผลิตสูง เพราะต้องนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปล้างเอาสารเคมีซึ่งติดมากับถ่านกัมมันต์ออกให้หมดก่อนนำไปใช้งาน

(ค) การกระตุ้นแบบผสม (Mixed physical and chemical activation) คือ ถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นโดยใช้ทั้งการกระตุ้นเชิงกายภาพและเชิงเคมีร่วมกัน โดยทั่วไปจะเริ่มจากการใช้การกระตุ้นเชิงเคมีก่อน จากนั้นนำไปกระตุ้นต่อด้วยการกระตุ้นเชิงกายภาพ เพื่อเป็นการเพิ่มจำนวนรูพรุนให้มากขึ้น

2.1.2.2 การแบ่งชนิดของถ่านกัมมันต์ตามเกณฑ์ของความหนาแน่น

(ก) ถ่านกัมมันต์ความหนาแน่นต่ำ ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับสารละลาย เช่น ฟอกสีน้ำตาล หรือการทำน้ำให้บริสุทธิ์

(ข) ถ่านกัมมันต์ความหนาแน่นสูง ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้งานกับวัฏภาคแก๊ส เช่น ใช้ในการดูดซับแก๊สหรือไอระเหย

2.1.2.3 การแบ่งชนิดของถ่านกัมมันต์ตามเกณฑ์ขนาดรูพรุนบนผิวของถ่านกัมมันต์ (ธราพงษ์ วิทิตศานต์, 2554)

(ก) ถ่านกัมมันต์ชนิดรูพรุนขนาดเล็ก (Micropores) คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีรูพรุนน้อยกว่า 1.5 นาโนเมตร ส่วนมากใช้ในการดูดซับแก๊สและไอระเหย

(ข) ถ่านกัมมันต์ชนิดรูพรุนขนาดกลาง (Mesopores) คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีรูพรุนอยู่ในช่วง 1.5 ถึง 200 นาโนเมตร มักนำไปใช้ประโยชน์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี หรือใช้ดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น ฟอกสี

(ค) ถ่านกัมมันต์ชนิดรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropores) คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีรูพรุนมากกว่า 200 นาโนเมตร เป็นตัวช่วยให้สารถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปยังรูพรุนขนาดเล็กได้ง่ายขึ้น มักนำไปใช้ประโยชน์ในการฟอกสี ผลิตยา และบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น

2.1.2.4 การแบ่งชนิดของถ่านกัมมันต์ตามเกณฑ์ของรูปร่างและขนาด

โดยทั่วไปในการเลือกใช้ถ่านกัมมันต์จะเลือกใช้ชนิดใดก็ได้ แล้วแต่ความเหมาะสมในการใช้งานถ่านกัมมันต์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่ 3 ชนิด ได้แก่

(ก) ชนิดผง (Powder actived carbon : PAC) คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดอนุภาค 0.015-0.025 มิลลิเมตร มีรูพรุนขนาดเล็ก การถ่ายเทมวลและการแพร่ต่ำ แต่มีอัตราการดูดซับสูง เหมาะสำหรับใช้ในวัฏจักรของเหลวที่เป็นสารละลาย โดยทั่วไปจะนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น การฟอกสีในอุตสาหกรรมน้ำตาล หรือสีย้อมในโรงงานทอผ้า เป็นต้น

(ข) ชนิดเม็ด (Granular actived carbon : GAC) คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดอนุภาค 1-5 มิลลิเมตร มีรูพรุนค่อนข้างใหญ่ มีพื้นที่ผิวภายในสูง และมีอัตราการแพร่สูง เหมาะสำหรับการใช้งานในวัฏจักรของเหลวที่มีความหนืดต่ำ โดยทั่วไปจะนำมาใช้แยกแก๊สและไอ เช่น อุตสาหกรรมทำหน้ากากป้องกันแก๊สพิษ การปรับอากาศ และการผลิตน้ำบริสุทธิ์ เป็นต้น

(ค) ชนิดก้อนกลม (Pelleted actived carbon or spherical actived carbon) คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดอนุภาค 2-5 มิลลิเมตร มีความแข็งแรงเชิงกลสูง สามารถใช้งานได้เหมือนถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด แต่สามารถดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ได้ดี

2.1.2.5 การแบ่งชนิดของถ่านกัมมันต์ตามเกณฑ์ชนิดของสารที่ถูกดูดซับ

(ก) ใช้ดูดซับแก๊ส (Gas adsorbent) คือ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับแก๊ส เช่น ดูดซับแก๊สพิษ หรือกลิ่นไอของสารอินทรีย์ ส่วนมากได้จากการกระตุ้นถ่านประเภท Hard artificial char

(ข) ใช้ฟอกสี (Decolourisation) คือ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นตัวฟอกสี ส่วนมากเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นถ่านประเภท Soft artificial char

(ค) ใช้ดูดซับพวกโลหะ (Metal adsorbent) คือ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นตัวแยกพวกโลหะต่าง ๆ เช่น ใช้ในการแยกทอง เงิน หรือทองคำขาวจากแร่

2.1.3 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

ปัจจุบันกรรมวิธีในการผลิตถ่านกัมมันต์มีหลายวิธี ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตและวัตถุประสงค์ของการใช้งาน โดยทั่วไปมีขั้นตอนในการผลิตประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน (บุญชัย ตระกูลมหาชัย, 2537) คือ

2.1.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ

วัตถุดิบที่นำมาผลิตถ่านกัมมันต์ต้องมีองค์ประกอบของคาร์บอนเป็นจำนวนมาก และมีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบน้อย ปริมาณเถ้าที่มีในวัตถุดิบไม่ควรเกินร้อยละ 3 การผลิตถ่านกัมมันต์สามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรงหรือเริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้วก็ได้ แต่โดยทั่วไปมักนำวัตถุดิบมาบดและคัดขนาดก่อนที่จะนำมาทำการคาร์บอไนเซชัน

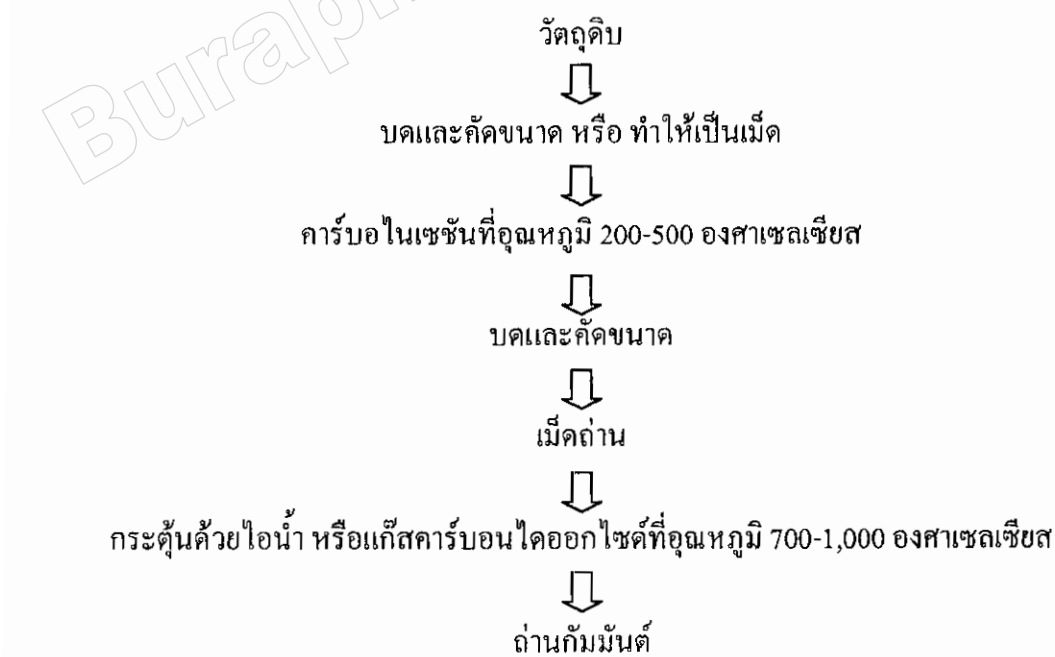
2.1.3.2 การคาร์บอไนซ์เซชัน (Carbonization)

เป็นการนำวัตถุดิบมาเผาในสภาวะที่มีแก๊สออกซิเจนน้อย เพื่อไล่สารที่ไม่ใช่คาร์บอนออกไป ส่วนคาร์บอนอิสระที่เหลืออยู่จะรวมตัวกันเป็นผลึกได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของถ่านชาร์ (Char) ซึ่งขนาดของผลึกจะขึ้นกับอุณหภูมิในการเผา องค์ประกอบ และโครงสร้างของวัตถุดิบ แต่ถ่านที่ได้จากขั้นตอนนี้จะมีความสามารถในการดูดซับต่ำมาก เนื่องจากมีน้ำมันดิบ (Tar) ตกค้างอยู่ภายในรูพรุนหรือเกาะอยู่ตามผิว จึงจำเป็นต้องนำไปผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับ

2.1.3.3 การกระตุ้น (Activation)

เป็นขั้นตอนที่ทำให้ถ่านมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น โดยการทำให้ถ่านมีรูพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น การทำให้ผิวของถ่านมีความว่องไวมากขึ้น และกำจัดน้ำมันดิบให้หลุดออกมา ซึ่งการกระตุ้นสามารถทำได้ 3 วิธี ดังที่กล่าวแล้วในหัวข้อ 2.1.2.1 คือ

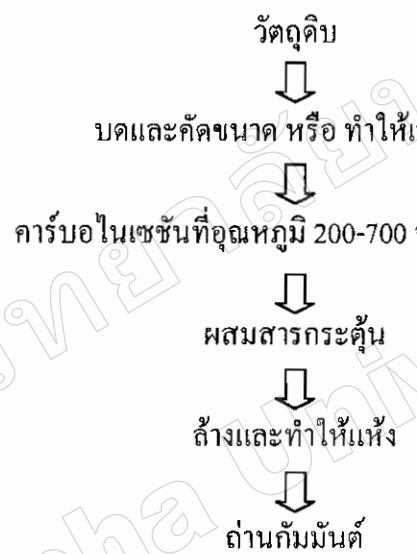
(ก) การกระตุ้นเชิงกายภาพ (Physical activation) เป็นวิธีการกระตุ้นด้วยแก๊สที่เหมาะสม เช่น แก๊สออกซิเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำร้อนยิ่งยวด เป็นต้น อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 700-1,000 องศาเซลเซียส ปัจจัยที่มีผลในการกระตุ้นเชิงกายภาพได้แก่ สมบัติทางเคมีและความเข้มข้นของแก๊สที่ใช้ในการออกซิไดซ์ อุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยา ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบของวัตถุดิบที่ใช้ และเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น จากภาพที่ 2-1 เป็นการแสดงขั้นตอนสรุปการกระตุ้นเชิงกายภาพ สำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์



ภาพที่ 2-1 สรุปขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นเชิงกายภาพ

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

(ข) การกระตุ้นเชิงเคมี (Chemical activation) เป็นวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์โดยให้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารเคมีที่นิยมใช้ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือกรดฟอสฟอริก เป็นต้น ข้อดีของวิธีนี้ คือ อุณหภูมิที่ใช้ไม่สูงมากนัก แต่มีข้อเสีย คือ มีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ ทำให้เสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีดังกล่าวเพิ่มขึ้น รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ก็ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ จากภาพที่ 2-2 เป็นการแสดงขั้นตอนสรุปการกระตุ้นเชิงเคมี สำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์



ภาพที่ 2-2 สรุปขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นเชิงเคมี

(ค) การกระตุ้นแบบผสม (Mixed physical and chemical activation) เป็นการกระตุ้น คือ ใช้ทั้งการกระตุ้นเชิงกายภาพและเชิงกัมมันต์ร่วมกัน โดยมีวัตถุประสงค์ในการเพิ่มจำนวนรูพรุนให้มากขึ้น ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ดีขึ้นด้วย

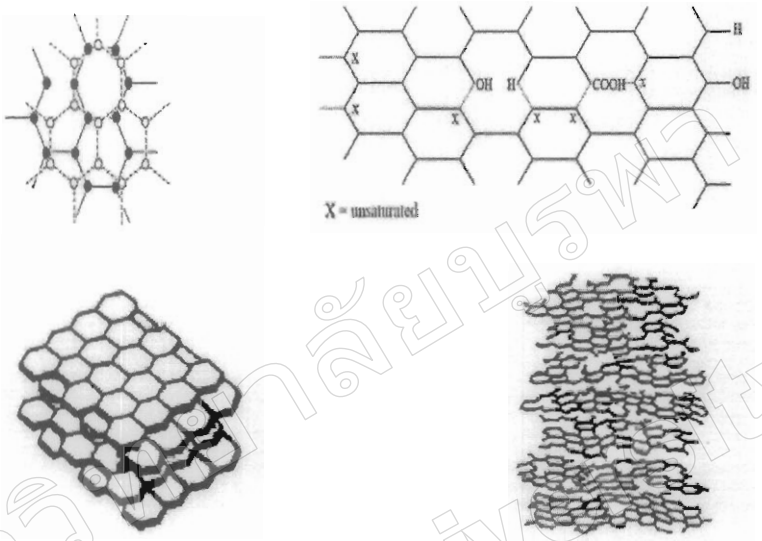
2.1.4 โครงสร้างและคุณสมบัติทั่วไปของถ่านกัมมันต์

2.1.4.1 ลักษณะโครงสร้างของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์เตรียมได้จากกระบวนการคาร์บอไนเซชันสารอินทรีย์ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,000 องศาเซลเซียส อะตอมต่าง ๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจน จะถูกกำจัดออกในรูปของแก๊ส ส่วนอะตอมคาร์บอนที่เหลือจะเรียงกันเป็นชั้น ๆ แต่ละชั้นประกอบด้วยวงหกเหลี่ยมเชื่อมโยงกันอย่างไม่เป็นระเบียบและเกิดช่องว่างหรือโพรง ซึ่งมี

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

โครงสร้างคล้ายกับผลึกของแกรไฟต์ ดังแสดงในภาพที่ 2-3 เมื่อผ่านกระบวนการกระตุ้นสารต่าง ๆ จะถูกชะล้างออกไป ทำให้ช่องว่างเหล่านี้จะกลายเป็นรูพรุนที่มีความสามารถในการดูดซับสูง และมีการสร้างหมู่ฟังก์ชันขึ้นมาแทนที่ ดังนั้นความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จึงเป็นผลสืบเนื่องจากโครงสร้างทางเคมีด้วย



ภาพที่ 2-3 ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์ (Berl, 1938 อ้างถึงใน อรวรรณ ศิริโชติ และคณะ, 2543)

ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์เกิดจากอิเล็กตรอนอิสระในวงโคจรนอกสุดมีไม่ครบตามกฎออกเตต จึงพยายามที่จะเกาะกับอะตอมหรือโมเลกุลอื่นที่บริเวณขอบของวงหกเหลี่ยม เช่น ออกซิเจนในอากาศหรืออะตอมต่าง ๆ กระบวนการกระตุ้นจะทำให้การเกาะของอะตอมคาร์บอนกับอะตอมอื่นกลายเป็นพันธะเคมีที่แข็งแรง และเกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ บนผิวของถ่านกัมมันต์ ซึ่งจะแสดงสมบัติเฉพาะตัวที่มีผลต่อการดูดซับ มี 2 ชนิด คือ

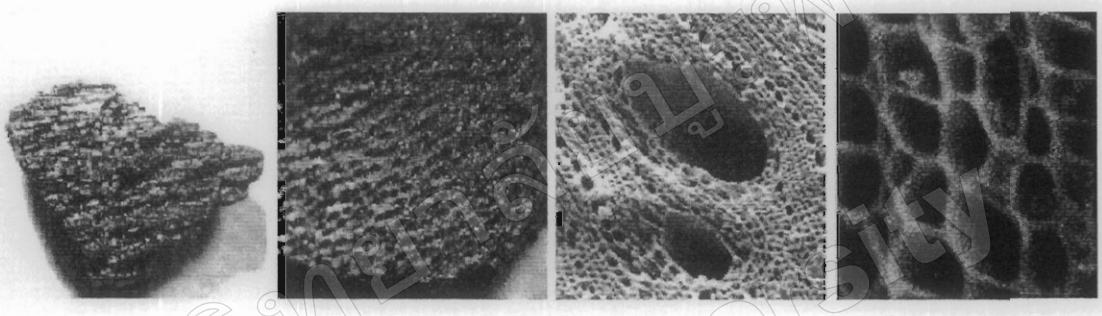
(ก) ชนิดที่เป็นกรด มักเกิดในถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นที่อุณหภูมิไม่สูงมาก หมู่ที่แสดงสมบัติเฉพาะตัวที่เกาะอยู่บนผิวของถ่านกัมมันต์จะมีคุณสมบัติคล้ายกรด ได้แก่ คาร์บอร์นิล ฟีนอล แลกโตน อัลดีไฮด์ คีโตน ควิโนน ไฮโดรควิโนน เป็นต้น โครงสร้างของถ่านกัมมันต์แบบนี้สามารถดูดซับโมเลกุลที่เป็นด่างได้ดี ค่อนข้างเสถียรแม้อยู่ในสุญญากาศ

(ข) ชนิดที่เป็นด่าง มักเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800-900 องศาเซลเซียส มีหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัวที่เกาะอยู่บนผิวของถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับโมเลกุลของกรดได้ดี จะเกิดปฏิกิริยาการดูดซับกับออกซิเจนและกรดไฮโดรคลอริก แล้วเกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ขึ้น ได้แก่ ไฮดรอกไซด์คาร์บอเนต เป็นต้น

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

2.1.4.2 โครงสร้างรูพรุน

การเปลี่ยนแปลงสมบัติในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จะเกิดขึ้นในขั้นตอนของการกระตุ้น เนื่องจากมีการสูญเสียสารประกอบคาร์บอนระหว่างช่องว่างผลึกคาร์บอน ทำให้ลักษณะผิวของถ่านกัมมันต์มีรูพรุนจำนวนมาก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน รูพรุนเหล่านี้จึงลึกเข้าไปในเนื้อของถ่านอย่างไม่เป็นระเบียบ ความลึกไม่สม่ำเสมอ ขนาดของรูพรุนไม่เท่ากัน และมีปริมาณของรูพรุนหรือการกระจายของขนาดของรูพรุน (Pore size distribution) แตกต่างกัน โดยจะขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้และวิธีการกระตุ้น ดังภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2-4 การเปรียบเทียบขนาดและการจัดวางตัวของรูพรุนขนาดต่าง ๆ (ธราพงษ์ วิทิตศานต์, 2553)

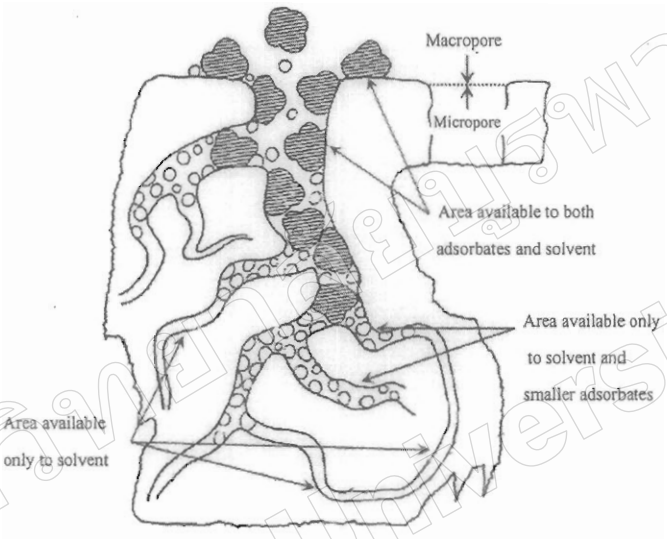
โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ขึ้นอยู่กับสภาวะการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อน นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดและความบริสุทธิ์ของวัตถุดิบที่ใช้ สามารถจำแนกชนิดของรูพรุนออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

(ก) รูพรุนขนาดใหญ่ (Macropores) มีรัศมีรูพรุนมากกว่า 50 อังสตรอม โดยเฉลี่ยจะมีปริมาตรรูพรุนอยู่ระหว่าง 0.2-0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และมีพื้นที่ผิวจำเพาะไม่เกิน 0.5 ตารางเมตรต่อกรัม รูพรุนขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยมาก และเป็นรูพรุนที่ไม่มีความสำคัญต่อการดูดซับ ทำหน้าที่เป็นเพียงทางผ่านของสารเข้าสู่รูพรุนขนาดเล็กเท่านั้น จึงมีผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับ

(ข) รูพรุนขนาดกลาง (Mesopores) มีรัศมีรูพรุนอยู่ในช่วง 20-50 อังสตรอม โดยเฉลี่ยจะมีปริมาตรรูพรุนอยู่ระหว่าง 0.1- 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 20-100 ตารางเมตรต่อกรัม ได้แก่ ซิลิกาเจล (Silica gel) อะลูมินาเจล (Alumina gel) ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดกลางสามารถดูดซับโมเลกุลของเหลวได้บ้าง โดยทั่วไปถ่านเกรดการค้าจะมีรูพรุนขนาดกลางประมาณ 200-300 ตารางเมตรต่อกรัม

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

(ค) รูพรุนขนาดเล็ก (Micropores) มีรัศมีรูพรุนน้อยกว่า 20 อังสตรอม โดยเฉลี่ยจะมีปริมาตรรูพรุนอยู่ระหว่าง 0.2 - 0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็กจัดเป็นรูพรุนที่มีความสำคัญในการดูดซับ เนื่องจากมีพื้นที่การดูดซับและพลังงานในการดูดซับ (Adsorption energy) สูง ทำให้มีการดูดซับเพิ่มขึ้นที่ความดันต่ำ ๆ จากภาพที่ 2-5 แสดงลักษณะและการวางตัวของรูปพรุนขนาดต่าง ๆ ในถ่านกัมมันต์



ภาพที่ 2-5 การวางตัวของรูพรุนขนาดต่างๆ (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2538)

2.1.4.3 คุณสมบัติทั่วไปของถ่านกัมมันต์

โดยทั่วไปการพิจารณาคุณภาพหรือประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จะพิจารณาคุณสมบัติต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

(ก) พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area)

นิยมใช้เพื่อแสดงคุณภาพของถ่านกัมมันต์มากกว่าการหาปริมาตรรูพรุน ซึ่งต้องขึ้นอยู่กับกลไกของการดูดซับ แต่การหาพื้นที่ผิวก็มีข้อจำกัด คือ โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับต้องมีการเรียงตัวแบบชั้นเดียวในลักษณะที่ปกคลุมผิวของตัวดูดซับหรือถ่านกัมมันต์พอดี

(ข) ปริมาณเถ้า (Ash content)

เถ้า หมายถึง การหาปริมาณสารอินทรีย์ที่ทนความร้อนได้สูงและปนเปื้อนอยู่ในถ่านกัมมันต์ เถ้าจะทำให้ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ลดลง เนื่องจากเถ้าอุดตันอยู่ในรูพรุน โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์มีค่าเถ้าไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ถ้ามีปริมาณสูงควรนำไปล้างด้วยน้ำหรือสารละลายกรด ซึ่งจะช่วยให้สามารถดูดซับได้ดีขึ้น (บุญชัย ตระกูลมหาชัย, 2537)

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

(ค) ความเป็นกรดด่าง (pH)

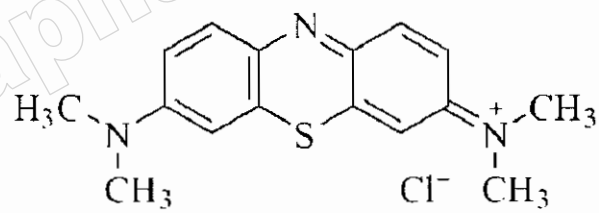
ความเป็นกรดด่างของถ่านกัมมันต์อาจจำกัดความเหมือนกับความเป็นกรดด่างของสารแขวนลอยของถ่านกัมมันต์ในน้ำกลั่น หรือในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับสารละลายที่ใช้น้ำ ความเป็นกรดด่างของถ่านกัมมันต์จะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนความเป็นกรดด่างของผลิตภัณฑ์เป็นอันมาก ซึ่งผู้ใช้สามารถปรับเปลี่ยนโดยลดผลกระทบของกรดหรือด่างลงได้โดยการเติมสารที่มีความเป็นกรดด่างตรงกันข้าม เพื่อปรับให้ถ่านกัมมันต์มีความเป็นกรดด่างตามต้องการ

(ง) ความหนาแน่นปรากฏ (Bulk density)

ความหนาแน่นปรากฏ หมายถึง การหาน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ต่อปริมาตร ซึ่งปริมาตรในที่นี้ หมายถึง ปริมาตรรวมทั้งหมดของอนุภาค ช่องว่างระหว่างอนุภาค และปริมาตรของรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ดังนั้นค่านี้จึงขึ้นกับขนาดและความพรุนของถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เกรดการค้ามีความหนาแน่นปรากฏ 0.3-0.5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร นอกจากนี้ความหนาแน่นปรากฏยังขึ้นกับความชื้นของอนุภาคด้วย กล่าวคือ อนุภาคที่มีความชื้นเพิ่มขึ้นจะมีค่าความหนาแน่นปรากฏเพิ่มขึ้น

(จ) การดูดซับเมทิลีนบลู

เมทิลีนบลูเป็นสารประกอบอะโรมาติก มีสูตรโมเลกุลเป็น $C_{16}H_{18}N_3SCl$ มวลโมเลกุลเท่ากับ 319.85 กรัมต่อโมล โครงสร้างแสดงดังภาพที่ 2-6



ภาพที่ 2-6 ลักษณะโครงสร้างของเมทิลีนบลู

การหาความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูเป็นการทดสอบการดูดซับสีออกจากน้ำของถ่านกัมมันต์ โดยใช้สีน้ำเงินที่เกิดจากสารเมทิลีนบลู ซึ่งเป็นสีอนินทรีย์ประเภทด่างและมีประจุเป็นบวก เชื่อว่ารูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15 อังสตรอม (Hassler, 1974 อ้างถึงใน อรวรรณ ศิริโชติ และคณะ, 2543) จะเป็นบริเวณที่ใช้ในการดูดซับโมเลกุลของเมทิลีนบลูได้ดีที่สุด การวิเคราะห์เมทิลีนบลูจึงต้องควบคุมเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่แน่นอนเพื่อให้การวิเคราะห์เป็นที่น่าเชื่อถือ โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เกรดการค้าจะมีค่าเมทิลีนบลู 200-350 มิลลิกรัมต่อกรัม

(ฉ) การดูดซับไอโอดีน (Iodine number)

การหาความสามารถในการดูดซับไอโอดีนเป็นการทดสอบสมบัติการดูดซับสารพิษออกจากน้ำของถ่านกัมมันต์โดยใช้ไอโอดีนเป็นสารดูดซับ เนื่องจากเป็นสารพิษที่มีความสามารถในการกัดกร่อนสูง โดยเฉพาะที่อยู่ในสภาพที่เป็นแก๊ส สำหรับการวิเคราะห์ในโครงงานนี้ได้ใช้ ASTM (American Associate Testing Method) เนื่องจาก ASTM ได้กำหนดความเข้มข้นของไอโอดีนที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 0.02 นอร์มัล ซึ่งสามารถควบคุมได้ด้วยการแปรน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ถ่านกัมมันต์ที่ดีมีคุณภาพดีควรใช้น้ำหนักในการวิเคราะห์ต่ำ ในทางปฏิบัติจึงไม่สามารถทำให้ความเข้มข้นของไอโอดีนที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 0.02 นอร์มัล ได้พอดี จึงต้องทำการวิเคราะห์โดยใช้น้ำหนัก 3 ค่า เพื่อให้ความเข้มข้นของไอโอดีนที่สภาวะสมดุลมีค่ามากกว่า ใกล้เคียง และน้อยกว่า 0.02 นอร์มัล แล้วใช้วิธีคำนวณค่าการดูดซับไอโอดีน โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เกรดการค้ามีค่าไอโอดีนมากกว่า 800 มิลลิกรัมต่อกรัม

(ช) การดูดซับฟีนอล (Phenol number)

เป็นการทดสอบความสามารถในการกำจัดกลิ่นในน้ำใช้ ปริมาณคาร์บอนที่ต้องการใช้ในการลดความเข้มข้นของฟีนอลในน้ำให้เหลือ 0.1- 0.001 ส่วนในล้านส่วน (ppm) เรียกว่า phenol number (บุญชัย ตระกูลมหชัย, 2537)

(ซ) ความแข็งแรงและความต้านทานต่อการขัดสี

ในทุกขั้นตอนของกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์จะถูกใช้งานอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดการขัดสีระหว่างอนุภาคถ่านและอนุภาคอื่น ๆ ซึ่งจะปะปนกับกระแสของของไหล ผลคือการแตกหักของถ่านกัมมันต์บางส่วนและหลุดออกมากับกระแสของของไหล ปัญหานี้ป้องกันได้โดยการกำหนดค่าความต้านทานต่อการขัดสีต่ำสุดของถ่านกัมมันต์เอาไว้สำหรับถ่านกัมมันต์แบบเม็ด (Hassler, 1974 อ้างถึงใน อรวรรณ ศิริโชติ และคณะ, 2543)

ส่วนความแข็งแรงของถ่านกัมมันต์นั้นจะวัดและเปรียบเทียบจากขนาดอนุภาคเฉลี่ยเริ่มต้นใช้และเมื่อใช้งานเสร็จ เพราะถ่านกัมมันต์บางส่วนจะมีการแตกหักออกเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กลง ซึ่งจะนำมาคำนวณและเปรียบเทียบออกมาเป็นความแข็งแรงอีกขั้นตอนหนึ่ง

(ฌ) ค่าจุดประจุศูนย์ (pH_{pzc})

จุดประจุศูนย์ หมายถึง ค่าความเป็นกรดด่างของคอลลอยด์ในขณะที่ผลรวมของประจุบวกและประจุลบบนพื้นที่ผิวของคอลลอยด์เท่ากับศูนย์ เช่น เมื่อคอลลอยด์ดินมีความเป็นกรดด่างเท่ากับ 4 ผลรวมของประจุบวกและลบบนพื้นที่ผิวของเคโอลิไนต์จะเท่ากับศูนย์ ค่าความเป็นกรดด่างดังกล่าว คือ จุดประจุศูนย์ของเคโอลิไนต์ สำหรับถ่านกัมมันต์ก็สามารถหาค่านี้ได้ ซึ่งจะบอกให้ทราบถึงลักษณะหมู่ฟังก์ชันส่วนใหญ่บนผิวของถ่านกัมมันต์ว่าเป็นกรดหรือด่าง

2.2 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นกระบวนการแยกสารองค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายของเหลวหรือแก๊ส โดยให้สารละลายของเหลวหรือแก๊สผสมไหลสัมผัสกับตัวดูดซับ (Adsorbent) ซึ่งสารแต่ละชนิดในสารละลายมีความสามารถในการกระจายบนผิว และเกิดแรงดึงดูดกับตัวดูดซับได้ต่างกัน ความสามารถในการดูดซับขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของตัวดูดซับ สมบัติทางเคมีของตัวดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ จำนวนชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับ (Adsorbate) ที่ถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวของสารดูดซับ และขนาดรูพรุนในสารดูดซับ ดังนั้นในการแยกองค์ประกอบที่ต้องการจึงต้องเลือกตัวดูดซับให้เหมาะสมกับองค์ประกอบของสารถูกดูดซับนั้น (สมร หิรัญประดิษฐกุล และวิภาวรรณ แสงสง่า, 2555)

2.2.1 ทฤษฎีการดูดซับ

การดูดซับ (adsorption) หมายถึง การที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับถูกดึงเข้ามาติดที่พื้นผิวของตัวดูดซับ หรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่พื้นผิวของสารถูกดูดซับ (Adsorbate) ที่สัมผัสโดยตรงกับสารดูดซับ (Adsorbent) โดยสารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวต่ำ (Low surface free energy) จะถูกดูดซับได้ดี ในขณะที่สารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวสูง (Higher surface free energy) จะไม่ถูกดูดซับ ซึ่งพลังงานอิสระที่ผิวของสารดูดซับจะมีความสัมพันธ์กับแรงตึงผิว (Surface tension) และพื้นที่ผิว (Surface area) ดังนี้

$$G_{surface} = \gamma A \qquad (1)$$

เมื่อ $G_{surface}$ = พลังงานอิสระที่ผิว

γ = แรงตึงผิว

A = พื้นที่ผิว

ปริมาณสารถูกดูดซับขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสัมบูรณ์ ความดัน และพลังงานศักย์ของอันตรกิริยา (Interaction potential energy) ระหว่างสารถูกดูดซับ ซึ่งอาจเป็นของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส กับตัวดูดซับ ซึ่งอาจเป็นของเหลวหรือของแข็ง ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น หรือความดัน และอุณหภูมิ จะทำให้ปริมาณการดูดซับเปลี่ยนแปลง

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

การดูดซับจะเกิดได้ก็ต่อเมื่อมีการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างตัวดูดซับกับสารถูกดูดซับ ซึ่งสารถูกดูดซับที่ใช้ศึกษาอาจเป็นโมเลกุลของแก๊ส หรือตัวทำละลายในสารละลาย การดูดซับของแก๊สหรือตัวถูกละลายในสารละลายจะเกิดขึ้นจนกระทั่งเกิดสมดุลระหว่างโมเลกุลของแก๊สในสภาวะแก๊สกับโมเลกุลของแก๊สที่ผิวของของแข็ง หรือเกิดสมดุลระหว่างโมเลกุลของตัวละลายในสารละลายกับโมเลกุลของตัวถูกละลายที่ผิวของแข็ง

2.2.2 ชนิดของการดูดซับ

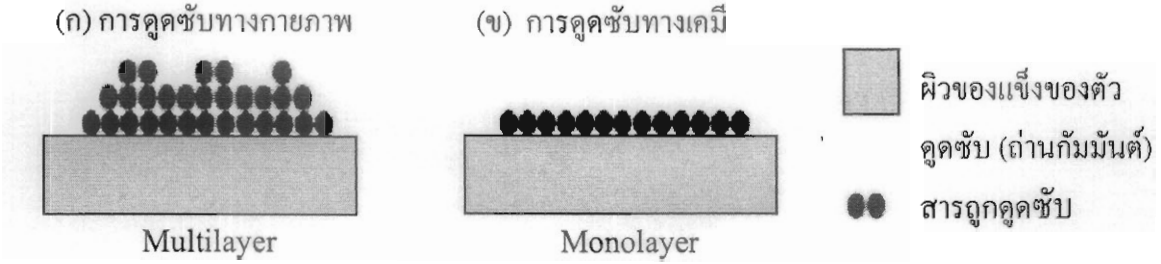
การดูดซับบนผิวของแข็ง แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด โดยอาศัยแรงที่ดูดซับระหว่างพื้นผิวโมเลกุลเป็นเกณฑ์ (นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ และคณิตา ตังคณานุรักษ์, 2550) คือ

2.2.2.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption หรือ Physisorption)

การดูดซับทางกายภาพเป็นการดูดซับที่มีแรงกระทำอย่างอ่อน ๆ ระหว่างสารถูกดูดซับกับตัวดูดซับ โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะถูกยึดติดอยู่กับผิวของแข็งของตัวดูดซับโดยอาศัยแรงวันเดอร์วาล (van der Waals) เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างสารที่อยู่ในของเหลวกับสารดูดซับมีมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างสารในของเหลวกับของเหลว ทำให้สารที่อยู่ในของเหลวเข้าติดอยู่ที่ตัวดูดซับแทน พลังงานความร้อนของการดูดซับทางกายภาพอยู่ในช่วง 20 - 40 กิโลจูลต่อโมล และไม่สามารถเกิดขึ้นได้อย่างถาวร เพราะสามารถเกิดกระบวนการผันกลับได้ง่าย การดูดซับทางกายภาพเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดของตัวถูกดูดซับ และในการดูดซับแบบนี้โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะถูกดูดซับบนผิวของของแข็งในลักษณะที่ซ้อนกันหลาย ๆ ชั้น ดังภาพที่ 2-7 (ก)

2.2.2.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorptionหรือ Chemisorption)

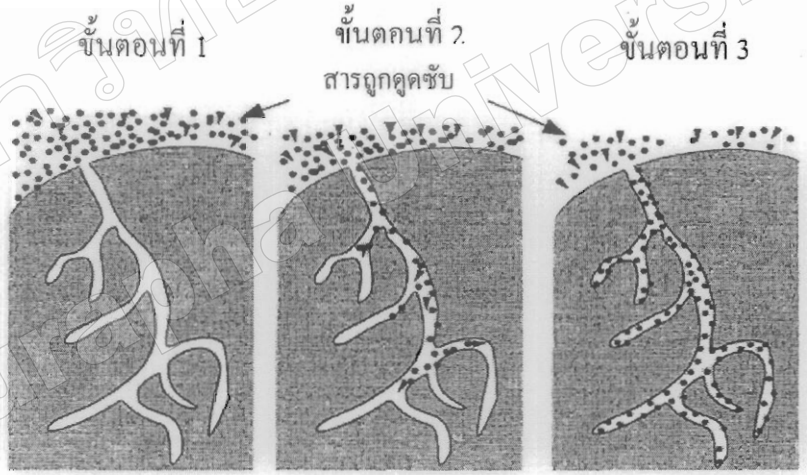
การดูดซับทางเคมีโมเลกุลของสารถูกดูดซับถูกยึดติดอยู่กับผิวของแข็งโดยพันธะโคเวเลนต์ที่แข็งแรง มักเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารที่ถูกดูดซับ ซึ่งพลังงานความร้อนของการดูดซับทางเคมีอยู่ในช่วง 80 - 400 กิโลจูลต่อโมล การดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับที่สารสามารถอยู่บนผิวตัวดูดซับได้เพียงชั้นเดียวเท่านั้น และเกิดขึ้นอย่างจำเพาะเจาะจง กล่าวคือ จะเกิดได้ก็ต่อเมื่อตัวดูดซับและสารถูกดูดซับทำปฏิกิริยากันได้เท่านั้น เป็นการดูดซับอย่างแท้จริง ไม่เกิดกระบวนการผันกลับ ถ้าจะทำให้โมเลกุลหลุดออก ต้องใช้อุณหภูมิสูง ๆ และลดความดันลงมากๆ นอกจากนี้พบแก๊สที่หลุดออกไปจากพื้นผิวของของแข็งอาจเป็นคนละชนิดกับแก๊สที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของของแข็งก็ได้ ในการดูดซับแบบการดูดซับทางเคมีโมเลกุลของแก๊สจะถูกดูดซับบนผิวของของแข็งในลักษณะที่เป็นชั้นเดียว ดังภาพที่ 2-7 (ข)



ภาพที่ 2-7 ภาพจำลองแสดง (ก) การดูดซับทางกายภาพ เป็นการดูดซับแบบหลายชั้น "Multilayer" และ (ข) การดูดซับทางเคมี เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว "Monolayer" (Klaus, 2010)

2.2.3 ขั้นตอนการดูดซับ

การดูดซับเป็นกระบวนการที่โมเลกุลของสารจับติดกับผิวด้านในของถ่านกัมมันต์ ซึ่งขั้นตอนของการดูดซับสามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้ (แสดงดังภาพที่ 2-8)



ภาพที่ 2-8 ขั้นตอนการดูดซับสารของถ่านกัมมันต์ (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2548)

2.2.3.1 ขั้นตอนที่ 1 คือ การแพร่ของโมเลกุลของสารละลาย หรือสารแขวนลอย หรือที่เรียกว่าโมเลกุลสารถูกดูดซับไปยังผิวภายนอกของถ่านกัมมันต์ โดยโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะต้องแทรกผ่านฟิล์มของน้ำ ซึ่งมีลักษณะคล้ายเยื่อบาง ๆ เพื่อเข้าไปในผิวของถ่านกัมมันต์

2.2.3.2 ขั้นตอนที่ 2 คือการที่โมเกลุลของสารถูกดูดซับ จะเคลื่อนที่แทรกเข้าไปในรูพรุนของถ่านกัมมันต์

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

2.2.3.3 ขั้นตอนที่ 3 คือ ขั้นตอนที่เกิดการดูดซับขึ้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ เมื่อโมเลกุลของสารถูกดูดซับเคลื่อนที่เข้าในรูพรุนของถ่านกัมมันต์แล้ว โมเลกุลเหล่านี้จะเกาะติดที่ผิวของถ่านกัมมันต์เป็นชั้น ๆ โดยไม่หลุดออก

2.2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ขณะที่มีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลของสารที่ต้องการดูดซับจะไปเกาะติดอยู่บนผิวของตัวดูดซับ ซึ่งโมเลกุลส่วนใหญ่จะเกาะติดอยู่ภายในโพรงของตัวดูดซับ มีเพียงบางส่วนเท่านั้นที่เกาะติดอยู่ที่ผิวภายนอก กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นได้จนถึงจุดสมดุล ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราเร็วและความสามารถในการดูดซับมีดังต่อไปนี้

2.2.4.1 การถูกรบกวนของน้ำ

อัตราเร็วของการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับการส่งผ่านโมเลกุลของสารดูดซับผ่านฟิล์มที่ล้อมรอบตัวดูดซับ หรือการแทรกตัวเข้าสู่ช่องว่าง ซึ่งถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มที่ล้อมลอบสารดูดซับจะมีความหนาแน่นมาก เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับ ทำให้การส่งผ่านโมเลกุลของตัวถูกดูดซับผ่านฟิล์มที่ล้อมรอบตัวดูดซับเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้าม ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูง ทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มเข้าไปหาตัวถูกดูดซับเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง กรณีนี้การแทรกตัวเข้าสู่ช่องว่างจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

2.2.4.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ

ขนาดของตัวดูดซับ จะเป็นสัดส่วนที่ผกผันกับอัตราเร็วของการดูดซับ ส่วนพื้นที่ผิวจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขีดความสามารถในการดูดซับ หมายความว่า สารที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมมีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลได้มากกว่าสารที่มีพื้นที่ในการดูดซับน้อย

2.2.4.3 ขนาดของสารถูกดูดซับ

ขนาดโมเลกุลของสารถูกดูดซับมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ จากการศึกษาพบว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่าโพรงของตัวดูดซับเล็กน้อย หรือขนาดของโมเลกุลเข้าโพรงได้พอดี เพราะแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและสารถูกดูดซับจะมีค่ามากที่สุด โดยโมเลกุลของตัวถูกดูดซับขนาดเล็กจะหลุดเข้าไปในโพรงก่อน จากนั้นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่จึงจะเข้าไปได้

2.2.4.4 ความสามารถในการละลายน้ำของสารถูกดูดซับ

เมื่อมีการดูดซับโมเลกุลของสารจะไปติดอยู่บนผิวของของแข็ง สารที่ละลายน้ำหรือแตกตัวเป็นไอออนมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้สูง ทำให้ยากต่อการดูดซับ ส่วนสารที่ไม่ละลายน้ำ

หรือสารที่ละลายน้ำได้น้อยมักเกาะติดได้ดีกว่า อย่างไรก็ตามเหตุผลนี้ก็ไม่ได้จริงเสมอไป เพราะยังมีสารที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดที่ไม่เกาะติดผิวของตัวดูดซับ

2.2.4.5 อุณหภูมิของระบบ

ในการดูดซับทางกายภาพ ความสามารถในการดูดซับจะเปลี่ยนไปตามค่าอุณหภูมิ เนื่องจาก

(ก) การดูดซับเป็นกระบวนการคายพลังงานความร้อน (Exothermic) ดังนั้น ความสามารถในการดูดซับจึงลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

(ข) อุณหภูมิมีผลต่อค่าการละลายของตัวถูกดูดซับ ตัวถูกดูดซับบางชนิดจะมีค่าการละลายเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับของตัวถูกดูดซับประเภทนี้จะไม่ขึ้นอุณหภูมิ แต่มีตัวถูกดูดซับบางชนิดมีค่าการละลายน้ำลดลง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับของตัวถูกดูดซับประเภทนี้จะขึ้นกับอุณหภูมิ เช่น นอร์มอลบิวทานอล (Normal butanol)

2.2.4.6 ค่าความเป็นกรดด่างของสารละลาย

ค่าความเป็นกรดด่างของสารละลายมีผลต่อความเป็นขั้วของผิวตัวดูดซับและโมเลกุลของตัวถูกละลาย ซึ่งจะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับโมเลกุลของสารต่าง ๆ ที่ผิวของตัวดูดซับ ประกอบด้วยกลุ่มแตกตัวได้อย่างน้อย 2 ชนิด แสดงตามสมการที่ (2) และ (3)

$$HS \rightleftharpoons S^{\cdot} + H^{+} \qquad (2)$$

$$S^{+} \rightleftharpoons S + H^{+} \qquad (3)$$

เมื่อ S^{+} เป็นตำแหน่งบนผิวตัวดูดซับที่มีความเป็นกรด

$S^{\cdot}$ เป็นตำแหน่งบนผิวตัวดูดซับที่มีความเป็นด่าง

ความหนาแน่นของประจุที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่แปรผันตามปริมาณ S^{+} และ $S^{\cdot}$ ที่มีอยู่ โดยเมื่อค่าความเป็นกรดด่างสูง จะมีปริมาณ $S^{\cdot}$ มากกว่า S^{+} ดังนั้นจึงมีประจุลบที่ผิวตัวดูดซับ ส่วนที่ค่าความเป็นกรดด่างต่ำจะมีปริมาณ S^{+} มากกว่า $S^{\cdot}$ ดังนั้นที่ผิวตัวดูดซับจึงมีประจุเป็นบวก

2.2.4.7 ระยะเวลาที่สารละลายสัมผัสกับตัวดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามเวลา จนกระทั่งถึงเวลาที่ระบบเข้าสู่สมดุล ซึ่งเป็นเวลาที่อัตราการดูดซับ (Rate of adsorption) เท่ากับอัตราการคาย (Rate of desorption) ความสามารถในการดูดซับจะมีค่ามากที่สุด จากนั้นจะมีค่าคงที่

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

2.2.4.8 ตัวทำละลาย

อิทธิพลของตัวทำละลายมีผลต่อการดูดซับ อาจเกิดขึ้นมาจาก

(ก) แรงกระทำระหว่างตัวทำละลายกับตัวถูกละลายในสารละลาย

(ข) แรงกระทำระหว่างตัวทำละลายกับสารถูกดูดซับ ซึ่งเป็นแบบใดขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของตัวทำละลาย และตัวดูดซับ

(ค) แรงกระทำระหว่างตัวทำละลายกับผิวของตัวดูดซับ

2.2.5 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ไอโซเทอร์มการดูดซับสารละลายบนผิวของแข็ง จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ใด ๆ โดยทั่วไปปริมาณของสารละลายที่ถูกดูดซับในรูปของโมเลกุลบนสารดูดซับ 1 กรัม จากสารละลาย อาจคำนวณได้จากสมการ

$$a = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m} \qquad (4)$$

เมื่อ a = จำนวนโมลของตัวถูกดูดซับ

C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ

C_e = ความเข้มข้นสุดท้ายของตัวถูกดูดซับ

V = ปริมาณของตัวถูกดูดซับ

m = มวลของตัวดูดซับ

หากพิจารณาที่สภาวะสมดุล สามารถเขียนได้เป็น

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m} \qquad (5)$$

เมื่อ q_e = จำนวนโมลของตัวถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล

C_e = ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

2.2.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm)

ในปี ค.ศ. 1916 เออร์วิง แลงเมียร์ (Irving Langmuir) ได้เสนอไอโซเทอร์มการดูดซับแบบที่ง่ายที่สุด ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว และเป็นการดูดซับทางเคมี ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ มีข้อสมมติดังนี้

2.2.6.1 โมเลกุลที่ถูกดูดซับ (Adsorbed species) มีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่งจำเพาะที่แน่นอน โดยในแต่ละโมเลกุลของตัวดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น และโมเลกุลตัวดูดซับเหมาะสำหรับโมเลกุลแบบชั้นเดียว

2.2.6.2 ในแต่ละตำแหน่งมีค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ พื้นผิวดูดซับมีลักษณะที่เหมือนกันหมด โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่สามารถย้ายข้ามผิวหรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงได้ และไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้กัน

จากการศึกษาไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ที่ภาวะสมดุล สามารถแสดงสมการความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายบนผิวของแข็งได้ดังสมการ

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1+K_L C_e} \qquad (6)$$

หรือ

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L q_m} + \frac{C_e}{q_m} \qquad (7)$$

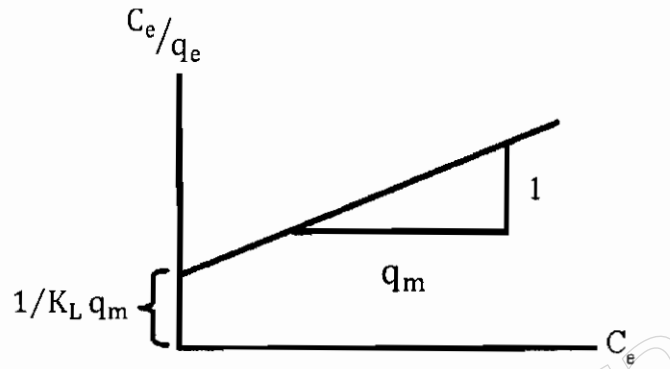
เมื่อ q_e = ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนผิวตัวดูดซับ หนัก 1 กรัม (mmol/g)

C_e = ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล (mmol/L)

q_m = ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนผิวตัวดูดซับในชั้น Monolayer (mmol/g)

K_L = ค่าคงที่ของการดูดซับ ณ อุณหภูมิหนึ่ง ๆ

เมื่อสร้างกราฟระหว่าง $\frac{C_e}{q_e}$ กับ C_e จะได้กราฟเส้นตรง มีจุดตัดแกนเป็น $\frac{1}{K_L q_m}$ และมีความชันเท่ากับ $\frac{1}{q_m}$ ดังภาพที่ 2-9



ภาพที่ 2-9 ตัวอย่างรูปแบบไอโซเทอร์มการดูดซับตามแบบจำลองของแลงเมียร์

2.2.7 ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดิช (Freundlich adsorption isotherm)

ในปี ค.ศ. 1880-1941 นักฟิสิกส์-เคมี ชาวเยอรมัน Herbert Max Finlay Freundlich ได้เสนอไอโซเทอร์มการดูดซับที่พัฒนามาจากไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ทั้งการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ การดูดซับบนผิวของตัวถูกดูดซับจะเป็นแบบหลายชั้น พื้นผิวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียว มักอธิบายการดูดซับของสารประเภทอินทรีย์และสารประเภทอนินทรีย์บนตัวดูดซับหลายประเภท เช่น ถ่านกัมมันต์ และเรซินสังเคราะห์

$$q_e = \frac{X}{m} = K_F C_e^{1/n} \qquad (8)$$

$$\text{Log } q_e = \log \frac{X}{m} = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \qquad (9)$$

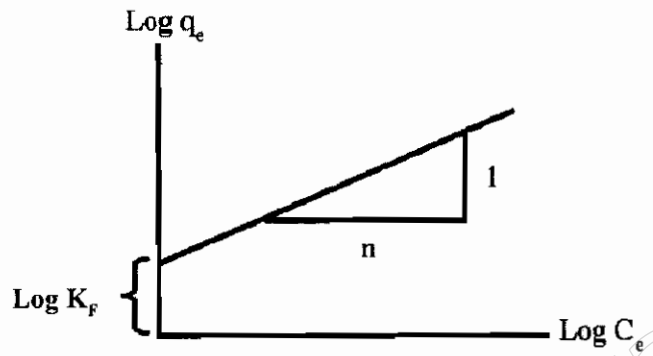
เมื่อ q_e = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (mmol/g)

C_e = ความเข้มข้นสมดุลของตัวถูกดูดซับ (mmol/L หรือ mM)

K_F = ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (mmol/g)

1/n = ค่าคงที่ที่แสดงถึงการขึ้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย (Concentration Dependence)

สมการฟรุนดิช เมื่อสร้างกราฟระหว่างค่า log q_e กับ log C_e ที่อุณหภูมิคงที่ จะได้กราฟเส้นตรงจุดตัดแกน Y สามารถนำมาหาค่า k ได้ และความชั้นของกราฟเป็น $\frac{1}{n}$ ซึ่งสามารถหาค่า n ได้ ดังภาพที่ 2-10 และสามารถอธิบายได้ดัง ตารางที่ 2-2



ภาพที่ 2-10 ตัวอย่างไอโซเทอร์มการดูดซับตามแบบจำลองของฟรุนดิช

ตารางที่ 2-2 คำอธิบายและความหมายของค่า K และ 1/n จากสมการของฟรุนดิช (Sabio et al., 2011 อ้างถึงใน อรวรรณ ศิริโชติ และคณะ, 2543)

1/n	K	คำอธิบาย
ต่ำ	สูง	ความสามารถในการดูดซับสูงและจะเปลี่ยนตามความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในอัตราที่ไม่สูงมากนัก
	ต่ำ	ความสามารถในการดูดซับต่ำในทุกช่วงความเข้มข้น
สูง	สูง	ความสามารถในการดูดซับสูงมากเมื่อความเข้มข้นสูงและความสามารถในการดูดซับจะลดลงอย่างมากเมื่อความเข้มข้นต่ำ
	ต่ำ	ความสามารถในการดูดซับสูงเมื่อความเข้มข้นสูงและความสามารถในการดูดซับต่ำเมื่อความเข้มข้นต่ำ

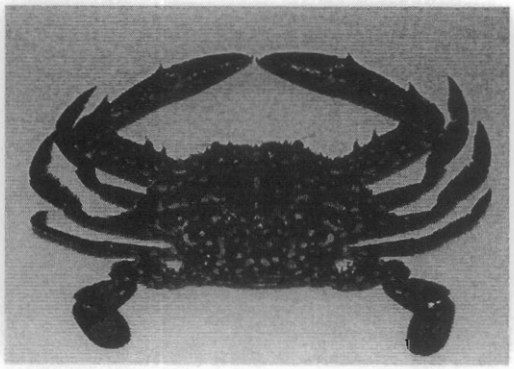
2.3 ปู (Crab)

ปูจัดเป็นสัตว์น้ำประเภทเท้าปล้องชนิดหนึ่ง อยู่ในไฟลัมอาร์โทรโพดา (Arthropoda) เป็นพวกเดียวกับแมลง ไม่มีกระดูกสันหลัง มีลักษณะเด่น คือ มีกระดองแข็งหุ้มลำตัวอยู่ มีรยางค์ขาเป็นข้อปล้อง มีทั้งหมด 5 คู่ คู่แรกเป็นก้ามขนาดใหญ่ และมี 8 ขา อาศัยอยู่ตามชายหาดและป่าชายเลน ออกหากินในเวลากลางคืน และมีการขยายพันธุ์โดยการวางไข่

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา
ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

2.3.1 ปูม้า (Blue swimmer crab)



วงศ์ : *Portunidae*

สกุล : *Portunus*

ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Portunus pelagicus*

ชื่อสามัญ : Blue Crab, Blue swimmer crab, Blue manna crab, Sand crab

ภาพที่ 2-11 ลักษณะของปูม้า

ปัจจุบันมีการจำแนกชนิดของปูไว้แล้ว 6,000 ชนิด แต่ละชนิดมีชื่อทางวิทยาศาสตร์และชื่อเรียกในภาษาอังกฤษแตกต่างกันตามชนิดและสายพันธุ์ เช่น ปูดำหรือปูทะเล ปูม้า ปูแสม เป็นต้น ในประเทศไทยพบสายพันธุ์ปูแล้วประมาณ 824 ชนิด แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะปูม้าที่ได้นำมาทำการวิจัยเท่านั้น (สำนักวิจัยและพัฒนาประมงทะเล, 2554)

ปูม้าจัดเป็นปูที่อาศัยอยู่ในทะเล ซึ่งมีสายพันธุ์กว่า 90 ชนิดทั่วโลก พบในประเทศไทยประมาณ 19 สายพันธุ์ ลำตัวแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนหัว อก และท้อง มีกระดองหุ้มอยู่ตอนบน ลักษณะกระดองกว้าง จับปิ้งเป็นรูปสามเหลี่ยมเรียวสูง มีขาทั้งหมด 5 คู่ คู่แรกเป็นก้ามขนาดใหญ่ ส่วนขาอีก 3 คู่ จะมีขนาดเล็ก ปลายแหลม ใช้เป็นขาเดิน ขาคู่สุดท้ายตอนปลายมีลักษณะเป็นใบพาย ใช้ในการว่ายน้ำ สำหรับปูม้าในประเทศไทยสามารถพบได้แทบทุกจังหวัด อาศัยอยู่บริเวณปากแม่น้ำและบริเวณแถบชายฝั่ง ว่ายน้ำได้เร็ว ออกหากินในเวลากลางคืน กินซากพืชและสัตว์ที่ตายแล้วเป็นอาหาร กลางวันฝังตัวตามพื้นทราย โผล่ตาและหนวดไว้จับเหยื่อและหลบหลีกศัตรู เมื่อถึงฤดูกาลวางไข่ ปูม้าตัวเมียจะมีไข่ติดอยู่บริเวณรยางค์ซึ่งเคยเป็นขาว่ายน้ำในระยะวัยอ่อน ซึ่งสามารถวางไข่ได้ครั้งละมาก ๆ

2.4 สีย้อม (Dyes)

สีย้อมเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดไม่อิ่มตัวที่สกัดได้จากน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหิน ซึ่งจะถูกเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่าง ๆ มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด บางชนิดละลายน้ำได้ บางชนิดจะไม่ละลายน้ำแต่จะละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น อีเทอร์ เป็นต้น ซึ่งสี

337475

ที่ใช้ในการย้อมวัสดุสิ่งทอมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับเส้นใย และกระบวนการย้อมที่แตกต่างกัน ทำให้ความคงทนของสีแตกต่างกันออกไปตามแต่ละประเภท (รัชนีย์ รุกขชาติ, 2553)

ในกระบวนการย้อมสี วัตถุจะดูดซับโมเลกุลของสีย้อมเข้าสู่ภายในโมเลกุลโดยการแพร่แล้วเกิดพันธะยึดกันแน่นด้วยพันธะไอออนิก (Ionic bond) หรือพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) ซึ่งสีที่ปรากฏออกมาทำให้ตามนุษย์มองเห็นเกิดจากการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมประเภทหนึ่งภายในโมเลกุลของสีย้อม กลุ่มอะตอมเหล่านี้จะเป็นตัวเพิ่มสีให้แก่สารประกอบอะโรมาติก โดยการดูดกลืนแถบสีขาวไว้บางแถบแสงและปล่อยออกมาบางแถบแสง ทำให้มนุษย์มองเห็นสีของสีย้อมแตกต่างกันไป กลุ่มอะตอมนี้เรียกว่า โครโมฟอร์ (Chromophore) ซึ่งมี 7 กลุ่ม คือ

- กลุ่มไนโตรโซ (Nitroso Group)
- กลุ่มไนโตร (Nitro Group)
- กลุ่มอะโซ (Azo Group)
- กลุ่มเอทิลลีน (Ethylene Group)
- กลุ่มคาร์บอนิล (Carbonyl Group)
- กลุ่มคาร์บอนิล-ไนโตรเจน (Carbonyl-Nitrogen Group)
- กลุ่มซัลเฟอร์ (Sulphur Group)

2.4.1 ประเภทของสีย้อม

การจำแนกประเภทของสีย้อม สามารถแบ่งประเภทได้โดยใช้หลักเกณฑ์ต่าง ๆ มากมาย ซึ่งขึ้นอยู่กับความสะดวกของผู้ใช้ (สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น) ได้แก่

2.4.1.1 การแบ่งชนิดของสีย้อมตามเกณฑ์ของแหล่งวัตถุดิบ

(ก) สีย้อมธรรมชาติ (Natural dyes) เป็นสีย้อมที่มีแหล่งวัตถุดิบมาจากธรรมชาติโดยเฉพาะพืชและสัตว์ ตัวอย่างสีย้อมที่มาจากส่วนประกอบพืช ได้แก่ ลำต้น ดอก เปลือก ใบ เป็นต้น ตัวอย่างเช่น สีดำจากลูกมะเกลือ สีน้ำเงินจากต้นคราม สีเหลืองจากเนื้อไม้โอ๊ก สีแสดจากดอกกรรณิการ์ สีแดงจากรากต้นเข็ม ในขณะที่ตัวอย่างสีย้อมที่มาสัตว์ เช่น สีม่วงจากหอยสังข์หนาม เป็นต้น

(ข) สีย้อมสังเคราะห์ (Synthetic dyes) เป็นสีย้อมที่มีแหล่งวัตถุดิบมาจากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี เช่น สีไดเร็กท์ สีรีแอคทีฟ สีเอซิด สีเบสิก สีซัลเฟอร์ เป็นต้น

2.4.1.2 การแบ่งชนิดของสีย้อมตามเกณฑ์วิธีการนำไปใช้

(ก) สีไดเร็กท์ (Direct dye) สีชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิคที่ทำให้ตัวสีสามารถละลายน้ำได้ มีประจุลบ นิยมใช้ย้อมเส้นใย

เซลลูโลส โดยโมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใย และยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ไม่ทนต่อการซักน้ำ ตกง่าย แต่ทนแสง

(ข) สีรีแอคทีฟ (Reactive dye) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุเป็นลบ ให้สีสันสดใส สีติดทนนานในทุกสภาวะ เหมาะสำหรับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง 70 - 75 องศาเซลเซียส และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิปกติเมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นด่าง โดยโมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกไซด์ (OH^-) ของเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสภาวะที่เป็นด่าง กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส

(ค) สีแว็ต (Vat dye) สีชนิดนี้เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ สีอินดิโก (Indigoid) และสีแอนทราควินอยด์ (Antraquinoid) เมื่อทำการย้อมต้องเตรียมน้ำย้อมให้สีแว็ตทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ สีแว็ตจะถูกรีดิวส์ให้กลายเป็นเกลือที่ละลายน้ำได้ แล้วจึงซึมเข้าไปในเส้นใย เมื่อนำผ้าไปผึ่งในอากาศสีในเส้นใยจะถูกออกซิไดส์กลายเป็นสีแว็ต

(ง) สีซัลเฟอร์ (Sulfer dye) เป็นสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อทำการย้อมต้องรีดิวซ์สีเพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ แต่สีซัลเฟอร์ที่ผลิตมาจำหน่ายในรูปที่ถูกรีดิวซ์จะละลายน้ำได้ นิยมนำสีซัลเฟอร์มาย้อมฝ้าย สีจะติดทน และมีราคาถูก แต่สีอ่อนจะไม่ทนต่อการซัก

(จ) สีเอซิด (Acid dye) เป็นสีที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน มีประจุเป็นลบ ละลายน้ำได้ดี ไม่ทนการซัก และไม่ทนเหงื่อ กลไกในการติดสีเกิดเป็นพันธะไอออนิกในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน บางชนิดสามารถนำไปย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ดี เช่น ปอ ป่าน ไนลอน ใยขนแกะ ไหม และอะคลิริก

(ฉ) สีดิสเพอร์ส (Disperse dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ แต่มีสมบัติกระจายได้ดี เมื่อพิจารณากลุ่มเคมีในตัวสีย้อม สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ สีย้อมอะโซ (Azo dyes) และสีย้อมอะมิโนแอนทราคิวโนน (Amino antraquinone) ในกระบวนการย้อมจะต้องใช้สารตัวพา (Carrier) ช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใยหรือย้อมโดยใช้อุณหภูมิ และความดันสูง มักใช้ย้อมผ้าประเภทเส้นใยอะซิเตท ไนลอน เส้นใยโพลีเอสเตอร์ และอะคริลิก ทนแสงและการซักฟอก แต่ถ้าถูกควันหรือแก๊สบางชนิด เช่น แก๊สไนตรัสออกไซด์ ก็จะทำให้สีซีดได้

(ช) สีเบสิก (Basic or cationic dye) สีชนิดนี้เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (Organic base) ละลายน้ำได้ สีติดทนนาน นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอน และใยอะคริลิก ไม่ควรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติเพราะจะไม่ทนการซักและแสง ในขณะย้อมโมเลกุลของสีส่วนที่มีประจุลบจะยึดจับกับโมเลกุลของเส้นใย ทำให้สีติดทนทาน

(ซ) สีอะโซอิค (Azoic dye) สีย้อมชนิดนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ ก่อนที่สีจะย้อมสีจึงต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อน แล้วจึงย้อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโพแนนท์จึงจะเกิดเป็นสีได้ สีประเภทนี้ทนต่อการซัก แต่ไม่ทนต่อการขัดถู สามารถใช้ย้อมเส้นใยได้ทั้งเซลลูโลสและไนลอน

(ฌ) สีมอร์แดนท์ หรือโครม (Mordant or chrome dye) เป็นสีย้อมที่มีโมเลกุลใหญ่ สามารถใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและเส้นใยพอลีเอไมด์ได้ดี ในการย้อมสีจะต้องใช้สารช่วยให้ติดสี เช่น สารประกอบออกไซด์ของโลหะ เช่น ดีบุก โครเมียม เหล็ก อะลูมิเนียม มาจับกับสีมอร์แดนท์หลาย ๆ โมเลกุล แล้วละลายน้ำ จึงทำให้ย้อมสีได้ง่าย

2.4.2 ความเป็นพิษของสีย้อม

สีย้อมเป็นสารที่จัดได้ว่ามีความเป็นพิษต่ำ โดยไม่พบว่ามีอัตราการตายหรือเจ็บป่วยของผู้ที่ทำงานในโรงงานฟอกย้อมสีสูงกว่าบุคคลอาชีพอื่น ๆ สีย้อมอาจเข้าสู่ร่างกายของผู้ใช้ได้ 3 ทาง คือ ทางจมูก ทางผิวหนัง และทางระบบทางเดินอาหาร แต่สารวัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์สีย้อมบางชนิดมีความเป็นพิษสูงมาก และมีบางตัวเป็นสารก่อมะเร็ง ด้วยเหตุนี้ปัญหาสำคัญของสีย้อมในน้ำทิ้ง มิได้อยู่ที่ความเป็นพิษของสีย้อมเท่านั้น แต่อยู่ที่สีของน้ำทิ้งอีกด้วย เนื่องจากสีย้อมเป็นสารที่มีสีเข้ม ยากต่อการย่อยสลาย

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมและการประยุกต์ใช้ถ่านกัมมันต์จากเปลือกปู

ประภาส คุณนาม และคณะ (2545) ได้ศึกษาการดูดซับโลหะหนักผสมของแคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว โครเมียม นิกเกิล และสังกะสี ในน้ำทิ้ง(น้ำเสียสังเคราะห์)โดยใช้กระดองปู ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นของโลหะในน้ำทิ้ง ความเป็นกรดด่างของน้ำทิ้ง ขนาดของผงกระดองปูที่ศึกษามีสองขนาดคือที่ 16 mesh และ 20 mesh การเผาของกระดองปูทำที่ 650 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่ากระดองปูที่เผาดูดซับโลหะหนักได้ดีกว่ากระดองปูที่ไม่เผา สามารถดูดซับโลหะหนักได้เกือบทุกตัวด้วยยกเว้น โครเมียมความเป็นกรดด่างที่ดีสำหรับการดูดซับคือ 4 - 6 ความเป็นกรดด่างเท่ากับ 2 จะเกิดการดูดซับได้ไม่ดีเพราะมีโลหะหนักเหลืออยู่ทุกตัว Cr จะเหลืออยู่ในทุกค่าความเป็นกรด สำหรับกระดองปูที่ไม่เผาจะเกิดการดูดซับดีที่ความเป็นกรดด่างเท่ากับ 4 และที่ค่าความเป็นกรดด่างค่าอื่น ๆ พบว่าโลหะหนักทุกตัวเหลืออยู่ ขนาดของผงกระดองปูที่ 16 mesh

สามารถดูดซับได้ดีกว่า 20 mesh เล็กน้อย ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ 100 ppm เป็นความเข้มข้นเฉลี่ยจากน้ำทิ้งจริง และสามารถดูดซับได้ดีที่ความเป็นกรดด่าง 4 - 6

สิริชื่น ตะนุสะ (2543) ได้ศึกษาความสามารถในการดูดซับตะกั่วด้วยตัวดูดซับที่เตรียมจากกระดองปูและเปลือกหอยแครงซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่น โดยทำการทดสอบแบบไม่ต่อเนื่องของวัตถุ ขนาด และสารที่ใช้กระตุ้น พบว่ากระดองปูขนาด 16-80 mesh กระตุ้นด้วยกรดไฮโดรคลอริกมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้ดีที่สุด ซึ่งคำนวณค่าคงที่จากสมการการดูดซับของฟรุนดิชมีค่าเท่ากับ 1,050 มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมกระดองปู และในการทดสอบแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ของตัวดูดซับโดยใช้น้ำที่มีตะกั่วปนเปื้อนจากเหมืองตะกั่ว-ดีบุกร้างที่ตำบลถ้ำทะลุ อำเภอบันนังสตา จังหวัดยะลา ซึ่งมีความเข้มข้น 0.042 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าคอลัมน์สามารถใช้กับน้ำปนเปื้อนตะกั่วได้มากถึง 500 เท่าของปริมาตรบรรจุคอลัมน์ ก่อนน้ำที่ผ่านคอลัมน์จะมีความเข้มข้นตะกั่วสูงถึง 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่องค์การอนามัยโลกได้กำหนดไว้ ทั้งนี้ความสามารถเต็มที่ของคอลัมน์สามารถใช้กับน้ำปนเปื้อนได้สูงถึง 7,125 เท่าของปริมาตรบรรจุของคอลัมน์

An, Park and Kim (2001) ได้ศึกษาความสามารถของกระดองปูในการดูดซับโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และโครเมียม จากสารละลายสังเคราะห์ โดยเปรียบเทียบกับตัวดูดซับหลายชนิด ได้แก่ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวก ซีโอไลท์ ถ่านกัมมันต์แบบเม็ด และถ่านกัมมันต์แบบผง พบว่า ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของเปลือกปู > เรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวก > ซีโอไลท์ > ถ่านกัมมันต์แบบผง > ถ่านกัมมันต์แบบเม็ด ตามลำดับดังนั้นถ่านกัมมันต์จากเปลือกปูสามารถดูดซับโลหะหนักได้ดีที่สุด นอกจากนี้พบว่าการกำจัดโลหะหนักด้วยวิธีการนี้มีความจำเพาะเจาะจงสำหรับไอออนโลหะตะกั่วและโครเมียม ซึ่งจากการศึกษาพบว่าการดูดซับไอออนโลหะหนักด้วยเปลือกปูเป็นไปตามทฤษฎีของแลงเมียร์ และฟรุนดิช

Porpino et al. (2011) ได้ศึกษาการดูดซับธาตุเหล็กด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกปู สายพันธ์ Ucides cordatus เพราะเป็นวัตถุดิบที่หาง่ายและราคาถูก โดยศึกษาค่าความเป็นกรดด่างของสารละลาย มวลของตัวดูดซับ ขนาดอนุภาคของตัวดูดซับ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ และความเข้มข้นของสารละลาย พบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลอง คือ มีค่าความเป็นกรดด่างเท่ากับ 2 เวลาที่ใช้ในการดูดซับเท่ากับ 840 นาที และมวลของตัวดูดซับที่ใช้หนัก 0.25 กรัม จากการศึกษาปฏิกิริยาอันดับหนึ่งสามารถอธิบายกระบวนการดูดซับได้ดีที่สุด และการศึกษาสมดุลของการดูดซับระหว่างไอออนเหล็กกับตัวดูดซับเป็นไปตามทฤษฎีของแลงเมียร์

Vijayaraghavan, Palanivelu and Velan (2005) ได้ศึกษาการดูดซับของทองแดงและโคบอลต์ด้วยเปลือกปู โดยได้ศึกษาผลของอนุภาคที่มีขนาดแตกต่างกัน (0.456-1.117 มิลลิเมตร)

ปริมาณของตัวดูดซับ (1-10 กรัมต่อลิตร) ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก (500-2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) และค่าความเป็นกรดเบสของสารละลาย (3.5-6) โดยใช้การทดลองแบบแบตช์ อนุภาคที่มีขนาดที่เหมาะสมคือ 0.767 มิลลิเมตร ปริมาณตัวดูดซับ 5 กรัมต่อลิตร และค่าความเป็นกรดด่างของสารละลายเริ่มต้นเท่ากับ 6 สามารถดูดซับทองแดงและโคบอลต์ได้ 243.9 และ 322.6 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งในช่วงเริ่มต้นสามารถดูดซับได้อย่างรวดเร็ว และเข้าสู่สมดุลในเวลา 2 ชั่วโมง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูง (> 0.998) ตัวดูดซับที่เตรียมได้มีประสิทธิภาพสูงและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

2.5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดสีย้อมด้วยวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมจากเปลือกปู

จิตนา ชำนาญมนูญธรรม (2542) ได้ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับของสีย้อม 4 ชนิด บนตัวดูดซับ 3 ชนิด พบว่าตัวดูดซับทุกชนิดสามารถดูดซับสีเอซิด สีรีแอคทีฟ และสีไดเร็กท์ได้ดีในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรดด่างเท่ากับ 5 หรือต่ำกว่า โดยไคโตซานจะดูดซับสีย้อมสูงกว่าไคตินและเปลือกกุ้ง แต่สีเบสิกจะถูกดูดซับได้ดีในสารละลายด่างที่มีค่าความเป็นกรดด่างเท่ากับ 10 หรือสูงกว่า โดยเปลือกกุ้งจะดูดซับสีเบสิกได้สูงกว่าไคตินและไคโตซานมาก ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับและความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเพิ่มขึ้น แต่จะลดลงเมื่ออนุภาคของตัวดูดซับมีขนาดเพิ่มขึ้น ปริมาณของสีทุกชนิดที่ถูกดูดซับยกเว้นสีเบสิกจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย นอกจากนี้ยังศึกษาการคายการดูดซับของสีย้อมที่ค่าความเป็นกรดด่างและอุณหภูมิต่าง ๆ กัน สีย้อมสามารถคายการดูดซับจากตัวดูดซับได้ดีที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และค่าความเป็นกรดด่างเท่ากับ 10 หรือสูงกว่า ยกเว้นสีเบสิกจะคายการดูดซับได้ดีในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรดด่างเท่ากับ 3 หรือต่ำกว่า สีรีแอคทีฟจะคายการดูดซับได้น้อยที่สุด ในการกำจัดสีย้อมออกจากน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอให้ผลเช่นเดียวกันกับการกำจัดสีย้อมออกจากสารละลาย ของสีย้อมที่สังเคราะห์ขึ้น ไคโตซานสามารถดูดซับสีเอซิด สีรีแอคทีฟ และสีไดเร็กท์ได้ในปริมาณสูงสุดเกือบถึง 72% 61% และ 94% ตามลำดับ ส่วนเปลือกกุ้งสามารถดูดซับสีเบสิกจากน้ำทิ้งได้ในปริมาณสูงถึง 43% ปริมาณสีย้อมที่กำจัดได้จะขึ้นอยู่กับชนิดของสีย้อมในน้ำทิ้ง

Trung et al. (2003) ได้ศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของไคโตซานดัดแปรกับถ่านกัมมันต์ และไคโตซานทั่วไป พบว่าในการกำจัดสีออกจากน้ำทิ้งของโรงงานสิ่งทอ พบว่า การใช้ไคโตซานดัดแปรสามารถกำจัดสีได้ถึง 88% ในขณะที่ถ่านกัมมันต์และไคโตซานทั่วไป สามารถกำจัดได้เพียง 23 และ 42% ตามลำดับ นอกจากนี้ ยังพบว่าไคโตซานดัดแปรสามารถใช้ในการกำจัดสีจากน้ำทิ้งที่มีค่าความเป็นกรดด่าง ตั้งแต่ 4.5-8.1 และสามารถใช้ได้ถึง 10 ครั้ง หากมีการบำบัดด้วยกรดซัลฟูริกเจือจาง

Wen, Li, Jia and Cheng (2007) ได้ศึกษาการใช้เปลือกปูและไคโตซานชนิดผงในการกำจัดสีย้อมที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย เนื่องจากอุตสาหกรรมสิ่งทอส่วนใหญ่ไม่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม ซึ่งเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม และกำลังทวีความรุนแรงมากขึ้น ถึงแม้จะมีการปรับเปลี่ยนกระบวนการย้อมสี งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาวิธีการกำจัดสีย้อมด้วยเปลือกปูและไคโตซานชนิดผง โดยใช้วิธีโซลิดเฟสไมโครเอ็กซ์แทรกชันและแก๊สโครมาโทกราฟี หรือแมสสเปกโทรเมตรีในการวิเคราะห์

Wong, Szeto, Cheung and Mckay (2004) ได้ศึกษาความสามารถของไคโตซานที่สกัดจากเปลือกปูในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียโดยการดูดซับ โดยศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อมใช้ของแลงเมียร์ ฟรุนดิช และรีลิช-ปีเตอร์สัน โดยใช้สี 5 ตัวอย่าง ได้แก่ สีเขียว-25 สีส้ม-10 สีส้ม-12 สีแดง-18 และสีแดง-73 พบว่า สีเขียว-25 สีส้ม-12 สีแดง-18 และสีแดง-73 ไอโซเทอร์มการดูดซับเป็นแบบแลงเมียร์ ส่วนสีส้ม-10 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิช

Wong, Szeto, Cheung and Mckay (2004) ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมด้วยไคโตซานจากเปลือกปูที่ผ่านวิธีการดีอะซิทิลเลชัน โดยศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อมใช้ของแลงเมียร์ ฟรุนดิช และรีลิช-ปีเตอร์สัน พบว่าไอโซเทอร์มการดูดซับเป็นแบบแลงเมียร์ จลนศาสตร์ การดูดซับเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และจากการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม และมวลของไคโตซาน พบว่า เมื่อความเข้มข้นและมวลของไคโตซานสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับสีย้อมเพิ่มสูงขึ้นถึง 60% ภายในระยะเวลาอันสั้น

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University