



บทที่ 2

ทฤษฎี แนวความคิด และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎี แนวความคิดเกี่ยวกับถ่านกัมมันต์และการกำจัดโลหะหนักในบทนี้จะเป็นการให้ความหมายและการอธิบายคำศัพท์ทางเทคนิคบางคำ ทฤษฎีของถ่านกัมมันต์เกี่ยวกับ ชนิด ประเภท การเตรียม คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี โครงสร้าง และการพัฒนาถ่านกัมมันต์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นโดยการกระตุ้นด้วยวิธีการทางเคมี รวมทั้งผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำถ่านกระตุ้นและถ่านกัมมันต์อื่นไปใช้ประโยชน์ในการกำจัดโลหะและประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อม

2.1 กระบวนการดูดติดผิว (Adsorption Process)

กระบวนการดูดติดผิวเกิดขึ้นได้ในบริเวณผิวที่อยู่ระหว่างชั้นของแข็งกับของแข็ง (solid-solid) , ก๊าซกับของแข็ง (gas-solid) , ก๊าซกับของเหลว (gas-liquid) , ของเหลวกับของเหลว (liquid-liquid) หรือของเหลวกับของแข็ง (liquid-solid) การดูดติดผิวที่เป็นของแข็งขึ้นกับพื้นที่ผิวของของแข็ง เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ในการบำบัดน้ำเสีย กระบวนการจะเกี่ยวข้องกับชั้นระหว่างของแข็งคือถ่านกัมมันต์ กับของเหลวคือน้ำที่จะบำบัด

การดูดติดผิวมี 2 วิธี คือ วิธีทางกายภาพ (physisorption) และวิธีทางเคมี (chemisorption) ทั้ง 2 วิธีเกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของสารในของเหลวสัมผัสกับผิวของของแข็งเกิดแรงยึดที่ผิวสัมผัสกับโมเลกุลของสารปนเปื้อนในชั้นของเหลว เรียกสารที่ใช้ดูดติดผิวหรือสารที่ใช้ดูดซับว่า “ เอดซอร์เบนท์ ” (adsorbent) และเรียกสารปนเปื้อนที่ถูกดูดติดว่า “ เอดซอร์เบท ” (adsorbate)

2.1.1 การดูดติดผิวทางกายภาพ (Physisorption)

เกิดจากความแตกต่างของพลังงานและหรือแรงยึดทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นแรงยึดแบบแวนเดอร์วาลส์อ่อนๆ โมเลกุลของสารยึดติดจะมีแรงหรือพลังงานมากกว่าที่จะยึดผิวของวัตถุปนเปื้อนให้มาติดที่ผิว การดูดติดผิวแบบนี้จะมีหลายชั้นขึ้นกับความเข้มข้นของสารปนเปื้อน เมื่อความเข้มข้นของสารปนเปื้อนสูงจะเกิดขึ้นของโมเลกุลมากขึ้น ความสามารถในการดูดติดผิวโดยวิธีทางกายภาพนี้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงยึดระหว่างสารดูดติดผิว (adsorbent) กับสารถูกดูดติด (adsorbate) ถ้าแรงยึดอ่อนจะมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดติดผิว

2.1.2 วิธีการดูดติดผิวทางเคมี (Chemisorption)

การดูดติดผิวแบบนี้เกิดขึ้นเมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารดูดติดผิวกับสารถูกดูดติดผิว เกิดเป็นสารประกอบใหม่ทางเคมี (Chemical Compound) กระบวนการดูดติดผิวทางเคมีแตกต่างกับวิธีดูดติดผิวทางกายภาพ ส่วนทางเคมีนี้มีเพียงหนึ่งโมเลกุลที่ถูกดูดติดเพราะต้องการพลังงานในการทำให้เกิดสารประกอบทางเคมีที่ผิวของสารแอดซอร์เบนต์และพลังงานนี้มีผลต่อกระบวนการผันกลับ

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว

1. คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารดูดติดผิว เช่น พื้นที่ผิว (Surface area) ขนาดของโพรงของสารดูดซับ (Pore size) และองค์ประกอบทางเคมีของสารดูดซับ (Chemical composition)
2. คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารถูกดูดติดผิว (Adsorbate) เช่น ขนาดโมเลกุล (Molecular size) ประจุของโมเลกุล (Molecular Polarity) และองค์ประกอบทางเคมีของสารถูกดูดติดผิว
3. ความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิวที่มีอยู่ในชั้นของเหลวของสารละลาย
4. คุณสมบัติของชั้นของเหลว เช่น ความเป็นกรด-ด่าง (pH) อุณหภูมิ
5. เวลาที่ใช้ในระบบการดูดติดผิว

2.2 สารดูดติดผิวหรือสารดูดซับ (Adsorbent)

สารดูดติดผิวหรือสารดูดซับ เป็นกลุ่มของสารที่มีอำนาจดูด โมเลกุลต่าง ๆ มาติดที่บริเวณพื้นผิวหน้า สารดูดซับเป็นได้ทั้งสารอินทรีย์ อนินทรีย์ และโพลิเมอร์ ทั้งมาจากธรรมชาติ และที่มาจากการสังเคราะห์ขึ้นมา เพราะองค์ประกอบและโครงสร้างทางเคมีตลอดจนคุณสมบัติของสารดูดซับที่มาจากแหล่งที่ต่างกันจะมีวิธีการเตรียม คุณสมบัติ และปัจจัยควบคุมในการนำไปใช้ประโยชน์ในขอบข่ายตามวัตถุประสงค์ในการเตรียม รวมทั้งการพัฒนาต่อไปและการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์เมื่อหมดคุณสมบัติของการเป็นสารดูดซับแล้ว ประเภทของสารดูดซับอาจแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

2.2.1 ประเภทสารอนินทรีย์ (Inorganic Adsorbents)

สารดูดซับประเภทนี้ส่วนใหญ่ได้มาจากธรรมชาติทั้งจากดิน แร่ พีช และส่วนของสัตว์ และจากของเสียและผลพลอยได้ทางอุตสาหกรรม (waste and by-product) เช่น ดินเหนียว

(fuller earth) ออกไซด์ของโลหะ เช่น แมกนีเซียมออกไซด์ อลูมิเนียมออกไซด์หรืออลูมินา ซิลิกา หรือซิลิกาเจล เบนโทไนต์ พวกตะกอนซีแร่ ซีเถ้า เป็นต้น สารดูดซับประเภทอนินทรีย์มักจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำจึงทำให้มีข้อจำกัดในการนำไปดูดซับสารได้ไม่มากนัก อย่างไรก็ตามการกระตุ้นด้วยวิธีการต่างๆจะทำให้คุณสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนไปทำให้สามารถใช้ประโยชน์ ได้หลากหลายมากขึ้น (Cheremisinoff, 1978)

2.2.2 ประเภทสารอินทรีย์(Organic Adsorbents)

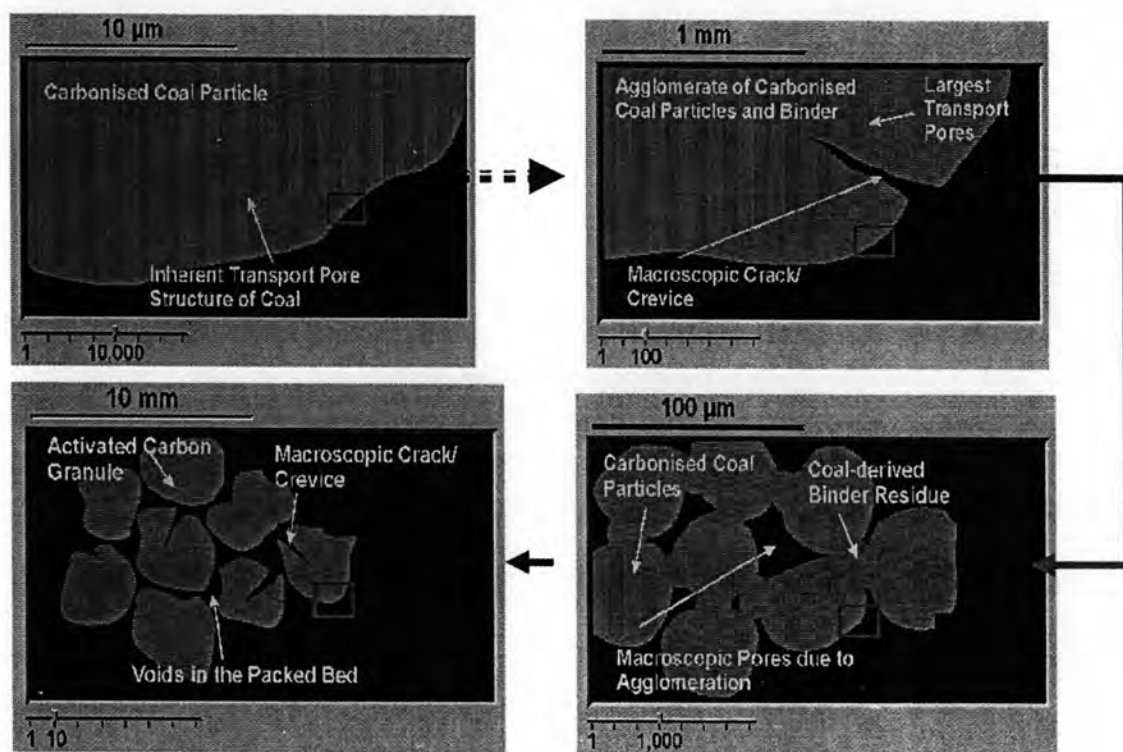
สารในกลุ่มนี้มีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอน ไนโตรเจน ออกซิเจนและไฮโดรเจน อาจมาจากธรรมชาติหรือการสังเคราะห์ขึ้น ที่มาจากธรรมชาติ เช่น ถ่านไม้ ถ่านหิน บีทูนินัส ลิกไนต์ ส่วนต่างๆ ของพืชและผลไม้ กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม เปลือกถั่ว ประเภทสารสังเคราะห์ เช่น ยางรถยนต์ ไอออนเอ็กซ์เชนจ์ เรซิน (iron exchange resin) พลาสติก กระดาษและสิ่งทอ สารดูดซับผิวประเภทสารอินทรีย์จะมีพื้นที่ผิวมาก จึงมีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับสารที่ไม่พึงประสงค์ ทั้งอายุการใช้งานที่ยาวนานและฟื้นฟูให้กลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ราคาจะแพงกว่าประเภทสารอนินทรีย์

2.3 ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

ถ่านกัมมันต์เกิดจากการนำเอาวัสดุที่มีองค์ประกอบหลักจำพวกคาร์บอนสูงๆมากระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้าง เช่น พื้นที่ผิว ปริมาณของโพรง ขนาดของโพรง และประจุบนพื้นผิวถ่าน เพื่อให้มีคุณสมบัติในการดูดซับดียิ่งขึ้น การกระตุ้นทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีใช้ความร้อน ก๊าซไอน้ำ และวิธีทางเคมี เมื่อกระตุ้นแล้วจะทำให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวมากขึ้น อาจสูงมากกว่า 1,000 ตารางเมตรต่อกรัมขึ้นไป (Cheremisinoff, P.N., 1978) การกระจายตัวของโพรงจะมีมากขึ้นทั้งขนาดของโพรงจะใหญ่ขึ้น รวมทั้งการทำให้พื้นที่ผิวถ่านมีการจัดเรียงตัวใหม่จากเดิมที่ไม่มีช่องหรือไม่มีประจุ ให้เกิดมีประจุหรือขั้วที่ผิว จะมีประจุ ขั้วบวกหรือขั้วลบได้ตามความต้องการที่จะนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ประโยชน์

การเตรียมถ่านกัมมันต์ให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด เพื่อให้มีการกระจายตัวของโพรงภายในเนื้อคาร์บอนมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ขนาดของโพรงหรือรูพรุนวัดได้โดยการใช้เครื่องมือวัดปริมาตรของโพรงเหล่านี้ (pore volume) โดยหลักการดูดก๊าซไนโตรเจน เมื่อโพรงใหญ่มีปริมาณมากก็จะเก็บกักก๊าซไนโตรเจนได้มาก เรียกคุณสมบัตินี้ว่าความจุในการดูดซับ (adsorptive capacity) ส่วนตัวชี้วัดทางเคมีเป็นความสามารถของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับปริมาณไอโอดีน เรียก "ไอโอดีน

นัมเบอร์” (iodine number) โดยทั่วไปค่าไอโอดีน นัมเบอร์ จะแปรผันโดยตรงกับปริมาณพื้นที่ผิวของ ถ่านกัมมันต์ เมื่อถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูง ขนาดของโพรงใหญ่ การกระจายตัวของโพรงมาก ปริมาตรของโพรงก็จะมาก การดูดซับไอโอดีนจะมาก ค่าไอโอดีนนัมเบอร์จะสูง เมื่อค่าไอโอดีน นัมเบอร์สูง ถ่านกัมมันต์นั้นจะมีความจุในการดูดซับสารที่เป็นมลภาวะได้มาก โดยเฉพาะสาร ประเภทที่มีโมเลกุลเล็ก ๆ สำหรับดัชนีชี้วัดความสามารถของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสาร โมเลกุล ขนาดใหญ่จะใช้ค่า “โมลาส นัมเบอร์” (molas number) การเกิดโพรงของถ่านกัมมันต์จะเริ่มแตกที่ผิว ขอบด้านนอกของอนุภาคของถ่านกัมมันต์ก่อน(ภาพที่ 2.1)



ที่มา : <http://www.Chemvironcarbon.com/definition/what is.htm>. (4 พฤศจิกายน 2547)

ภาพที่ 2.1 การเกิดพื้นที่ผิวและโพรงภายในเนื้อถ่านกัมมันต์

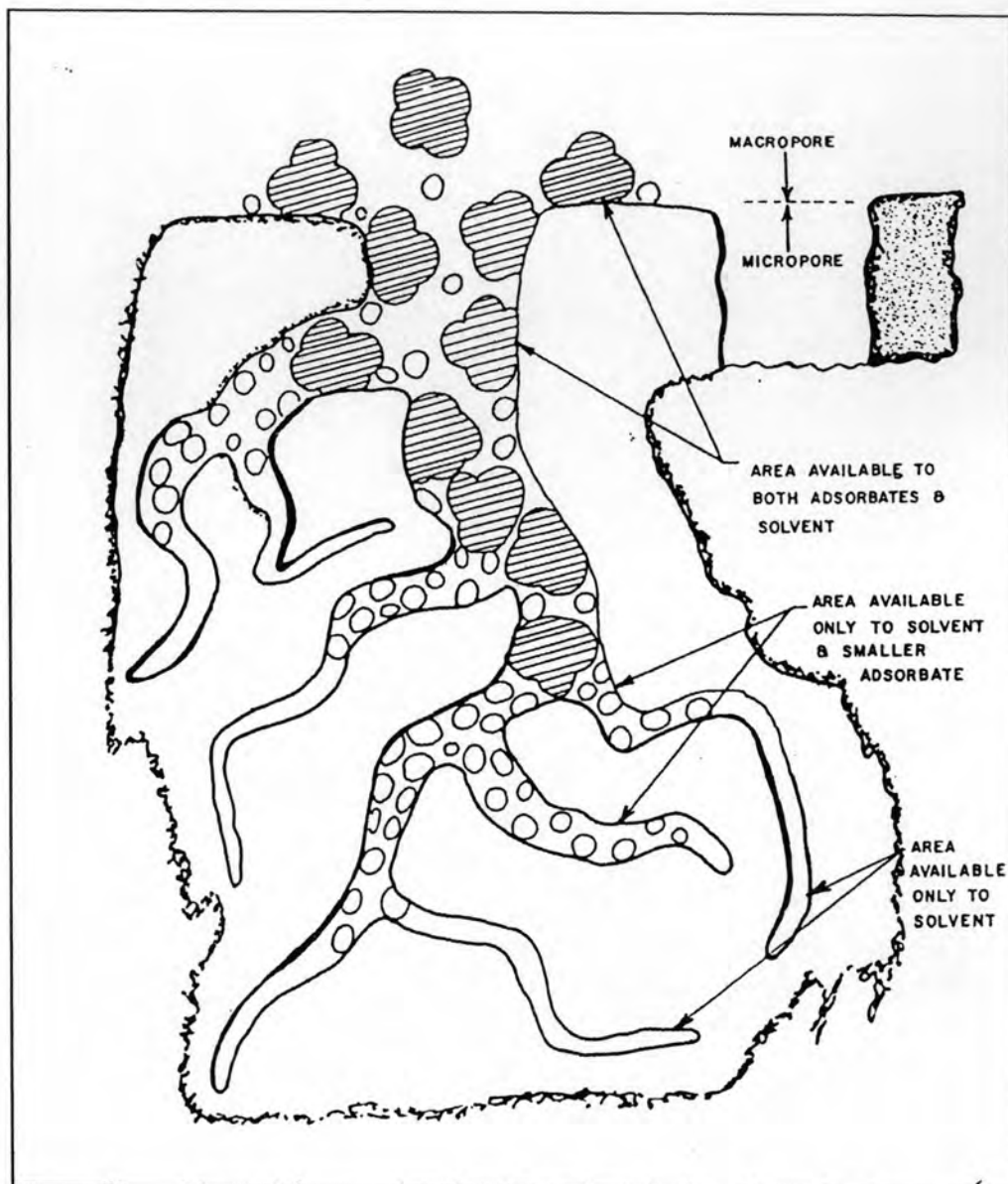
โครงสร้างของโพรงของสารดูดซับสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ โพรงขนาดใหญ่ (macropores) โพรงขนาดกลาง (transitional or mesopores) และโพรงขนาดเล็ก (micropores) ในระหว่างกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยก๊าซที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการออกซิเดชัน 2 ขั้นตอน คือ ขั้นแรกจะเกิดโพรงขนาดใหญ่ที่ขอบของโครงสร้างผลึกขณะเผา ขั้นที่สองจะเกิดโพรงขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่โดยการเผาที่ระนาบของผลึกถ่าน (Dubinin, 1966 อ้างในสุนีย์ กุ้ยเสงี่ยม, 2544:23-24)

ขนาดของโพรงแมคโครพอร์ในถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพจะต้องมีรัศมีใหญ่กว่า 500 ถึง 1,000 อังสตรอม ($^{\circ}A$) และช่วงที่โพรงมีรัศมี 5,000-20,000 อังสตรอม ปริมาตรของโพรงอยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 0.8 มิลลิลิตรต่อกรัม และพื้นที่ผิวอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 2 ตารางเมตรต่อกรัม ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้จะสามารถดูดซับสารอินทรีย์ขนาดใหญ่ เช่น ไวรัส เชื้อโรค แบคทีเรีย และ โพลีเมอร์ขนาดใหญ่ได้

สำหรับโพรงขนาดกลางเหมาะสำหรับการดูดซับของเหลวและตัวทำละลาย จะเกิดโพรงขนาดเล็กเป็นรูปพระจันทร์เสี้ยวที่ขอบโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ รัศมีของโพรงขนาดกลางอยู่ระหว่าง 1,000-2,000 อังสตรอม จะสามารถดูดซับสารที่มีโมเลกุลเดี่ยวและสารที่มีขนาดใหญ่หลายโมเลกุล ถ่านกัมมันต์โดยทั่วไปที่มีโพรงขนาดกลางจะมีปริมาตรของโพรงอยู่ระหว่าง 0.02 ถึง 0.10 มิลลิลิตรต่อกรัม และพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ระหว่าง 20 ถึง 70 ตารางเมตรต่อกรัม อย่างไรก็ตาม ขนาดของโพรงขนาดกลางของถ่านกัมมันต์อาจจะมีปริมาตรของโพรงสูงถึง 0.7 มิลลิลิตรต่อกรัม และพื้นที่ผิวจำเพาะอาจสูงถึง 200-450 ตารางเมตรต่อกรัม รัศมีของโพรงขนาดกลางโดยปกติอยู่ระหว่าง 40-200 อังสตรอม

โพรงขนาดเล็กของถ่านกัมมันต์จะมีค่าน้อยกว่า 18-20 อังสตรอม ปริมาตรของโพรงขนาดเล็กอยู่ระหว่าง 0.150-0.50 มิลลิลิตรต่อกรัม และพื้นที่ผิวจำเพาะปกติอย่างน้อยที่สุดจะเป็นร้อยละ 95 ของพื้นที่ผิวทั้งหมด

โครงสร้างของโพรงถ่านกัมมันต์ปกติทั่วไปเป็นไปตามหลักการของการกระจายตัวของโพรงทั้งสามขนาดดังกล่าว โดยโพรงขนาดใหญ่จะอยู่ที่พื้นผิวด้านนอกของถ่านกัมมันต์ มีโพรงขนาดเล็กน้อยมากที่จะเกิดมีที่ผิวด้านนอกของอนุภาคถ่านกัมมันต์ ส่วนใหญ่แล้วที่ผิวด้านนอกของอนุภาคจะเป็นโพรงขนาดใหญ่ แล้วโพรงขนาดกลางจะแตกกิ่งก้านแยกจากโพรงขนาดใหญ่และอยู่ถัดเข้าไปในชั้นของเนื้อถ่าน ส่วนโพรงขนาดเล็กจะแยกจากโพรงขนาดกลางและอยู่ข้างในลึกเข้าไปอีกตามภาพที่ 2.2 โพรงขนาดเล็กเหล่านี้มีความสำคัญมากในการดูดซับ เนื่องจากคุณสมบัติของพื้นที่ผิวจำเพาะที่มีค่าสูงมากรวมทั้งปริมาตรจำเพาะของโพรงที่มีขนาดปริมาณใหญ่มาก ทั้งนี้คุณสมบัติเหล่านี้ขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุตั้งต้นที่นำมาเตรียมถ่านกัมมันต์และวิธีการเตรียม (ตารางที่ 2.1)



ที่มา : Cheremisinoff , 1978: 5

ภาพที่ 2.2 ตำแหน่งของโพรงขนาดต่างๆของถ่านกัมมันต์

ตารางที่ 2.1 พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์บางชนิด

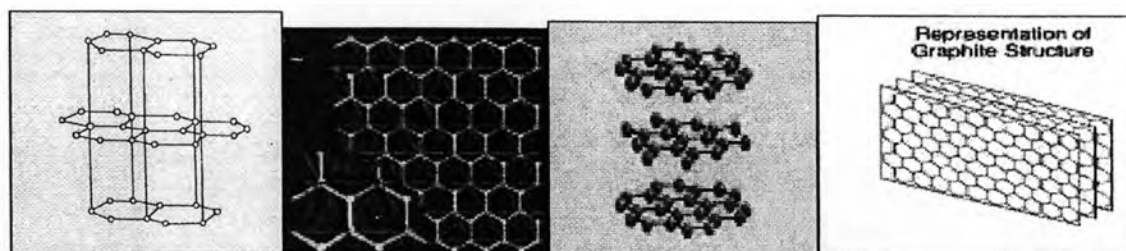
Commercial Name	Origin	Surface Area (m ² /g)
PCC SGL	Bituminous coal	1000-1200
PCC BPL	Bituminous coal	1000-1200
PCC RB	Bituminous coal	1200-1400
PCC GW	Bituminous coal	800-1000
Columbia CXA/SXA	Coconut shell	1100-1300

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์บางชนิด

Commercial Name	Origin	Surface Area (m ² /g)
Columbia AC	Coconut shell	1200-1400
Columbia G	Coconut shell	1100-1150
Darco S 51	Lignite	500-550
Darco G 60	Lignite	750-800
Darco KB	Wood	950-1000
Hydor Darco	Lignite	550-600
Nuchar Aqua	Pulp mill residue	550-650
Nuchar C	Pulp mill residue	1050-1100
Nuchar (various)	Pulp mill residue	500-1400
Norit (various)	Wood	700-1400

ที่มา : Chermisinoff, 1978: 3

โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่เป็นคาร์บอนอสัณฐาน(amorphous carbon)และมีโครงสร้างบางส่วนเป็นผลึก(crystallites) รูปหกเหลี่ยมเสกซะโกนัล (hexagonal) คล้ายกับโครงสร้างของกราไฟต์ แต่ไม่สมบูรณ์เหมือนกับกราไฟต์ คือ การกระจายตัวของขนาดของโพรงจะอยู่ในช่วงกว้างกว่าของกราไฟต์ (ภาพที่ 2.3)



ที่มา : Chermisinoff, 1978: 244

ภาพที่ 2.3 โครงสร้างถ่านกัมมันต์และการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนในผลึกกราไฟต์

2.3.1 ประเภทของถ่านกัมมันต์ (Forms of Activated Carbon)

การแบ่งประเภทของถ่านกัมมันต์ อาจแบ่งได้หลายแบบตามการให้ความสำคัญหรือวัตถุประสงค์ในการแบ่ง โดยดูจากลักษณะที่ปรากฏให้เห็นหรือแบ่งตามคุณสมบัติ แบ่งตามขนาดของโพรงภายในถ่านกัมมันต์หรือแบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ดังนี้ คือ

2.3.1.1 แบ่งตามลักษณะรูปร่างที่ปรากฏ

ถ่านกัมมันต์ในทางการค้าแบ่งตามรูปร่างลักษณะเป็นผง เม็ด หรือเกล็ดหรือ เพลเลตหรือเป็นก้อนและเป็นแผ่น

(ก) ผงถ่านกัมมันต์ (Powder Activated Carbon : PAC)

ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์ (ม.อ.ก., 2532) กำหนดให้ถ่านกัมมันต์ชนิดผงจะต้องมีขนาดที่สามารถร่อนผ่านตะแกรงขนาด 150 ไมโครเมตร ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก สำหรับทางการค้ากำหนดให้เป็นผงถ่านที่มีขนาดน้อยกว่า 0.18 มิลลิเมตร (80 mesh) เป็นส่วนใหญ่ ถ่านกัมมันต์ชนิดผงส่วนใหญ่ใช้ในการดูดซับของเหลวและก๊าซ

(ข) ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular Activated Carbon : GAC)

ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดจะต้องมีปริมาณถ่านที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 150 ไมโครเมตร ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดมีรูปร่างไม่แน่นอน ขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 5 มิลลิเมตร (ม.อ.ก., 2532) นิยมนำไปใช้ประโยชน์ในการดูดซับของเหลวและก๊าซ

(ค) ถ่านกัมมันต์ชนิดเพลเลตหรือเป็นก้อนเล็ก ๆ (Pelleted Activated Carbon)

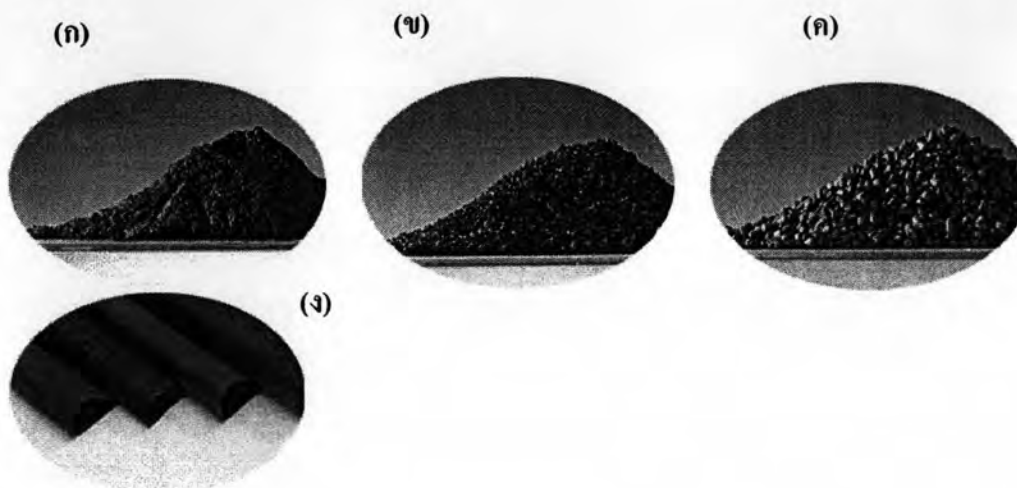
ถ่านกัมมันต์ชนิดก้อนจะมีรูปร่างเป็นก้อนเล็ก ๆ ทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 0.8 ถึง 5 มิลลิเมตร ชนิดนี้นิยมใช้ในการดูดซับก๊าซเพราะมีค่า "pressure drop" ต่ำ และความแข็งแรงเชิงกล (mechanical strength) สูง

(ง) ถ่านกัมมันต์ชนิดแผ่น (Sheet Activated Carbon)

ชนิดนี้เป็นแผ่นนิยมนำไปใช้งานสิ่งทอและเส้นใย (cloth and fibres) โดยอาศัยคุณสมบัติเด่นของถ่านกัมมันต์เพื่อทำเสื้อผ้าพิเศษใช้ประโยชน์เฉพาะทาง

ข้อดีและข้อเสียของถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดและชนิดผง ทั้ง 2 ชนิดต่างมีประโยชน์จุดเด่นและจุดด้อยของตัวเองคือถ่านกัมมันต์ชนิดผงราคาไม่แพงและมีความจุในการดูดซับ

(adsorptive capacity) สูงกว่าถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดเล็กน้อย แต่มีจุดด้อย คือ ค่อนข้างยากในการฟื้นฟูสภาพ (regeneration) ให้กลับมาใช้งานใหม่ และจะสูญเสียมากระหว่างการฟื้นฟูสภาพ และยุ่งยากที่จะควบคุมคุณสมบัติของผงถ่านกัมมันต์ภายหลังการฟื้นฟูสภาพ เพราะคุณสมบัติในการดูดซับสารอื่นจะด้อยลง และมักเกิดการตกตะกอนหากมีสารแขวนลอยอยู่ด้วย เนื่องจากผงถ่านกัมมันต์มีคุณสมบัติเป็นสารตกตะกอนที่ดี ในทางปฏิบัติจึงไม่มีการใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดผงอย่างเดียวในอุตสาหกรรมการบำบัดน้ำเสียและของเสียแต่ละจะใช้ชนิดเม็ดร่วมด้วย



ที่มา : [http://www.chemvironcarbon.com/carbon/definition/what is.htm](http://www.chemvironcarbon.com/carbon/definition/what%20is.htm). (4 พฤศจิกายน 2547)

ภาพที่ 2.4 ประเภทของถ่านกัมมันต์

2.3.1.2 แบ่งตามชนิดของสารกระตุ้น

ถ่านกัมมันต์แบ่งตามชนิดของสารกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารเคมี (chemical activated carbon) กับถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยความร้อนและก๊าซ (physical activated carbon) ชนิดที่กระตุ้นด้วยสารเคมีมักจะมีขนาดของโพรงในเนื้อถ่านขนาดใหญ่ ส่วนถ่านกัมมันต์ชนิดกระตุ้นด้วยความร้อนและหรือก๊าซจะมีโพรงในเนื้อถ่านขนาดเล็ก

2.3.1.3 แบ่งตามขนาดของโพรงบนผิวถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์แบ่งตามขนาดของโพรงในเนื้อถ่านเป็นชนิดโพรงขนาดเล็ก (micropores) โพรงขนาดกลาง (transitional pores หรือ mesopores) และชนิดโพรงขนาดใหญ่ (macropores) ถ่านกัมมันต์ชนิดไมโครพอร์มีรัศมีของโพรงไม่เกิน 15 นาโนเมตร มักใช้ในการดูดซับ

ก๊าซหรือไอระเหย ชนิดมีไซเฟอร์มีรัศมีของโพรงอยู่ระหว่าง 15 ถึง 100 นาโนเมตร มักใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนถ่านกัมมันต์ชนิดโพรงขนาดใหญ่มีรัศมีของโพรงใหญ่กว่า 100 นาโนเมตร มักใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมฟอกสีและอุตสาหกรรมการผลิตยา

2.3.1.4 แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์แบ่งตามความหนาแน่นเป็นชนิดความหนาแน่นต่ำกับชนิดความหนาแน่นสูง โดยชนิดความหนาแน่นต่ำนิยมใช้กับของเหลวหรือสารละลาย เช่น การฟอกสีน้ำตาลดิบ การกรองน้ำให้บริสุทธิ์ ส่วนชนิดความหนาแน่นสูงใช้กับการดูดซับก๊าซพิษหรือไอระเหย

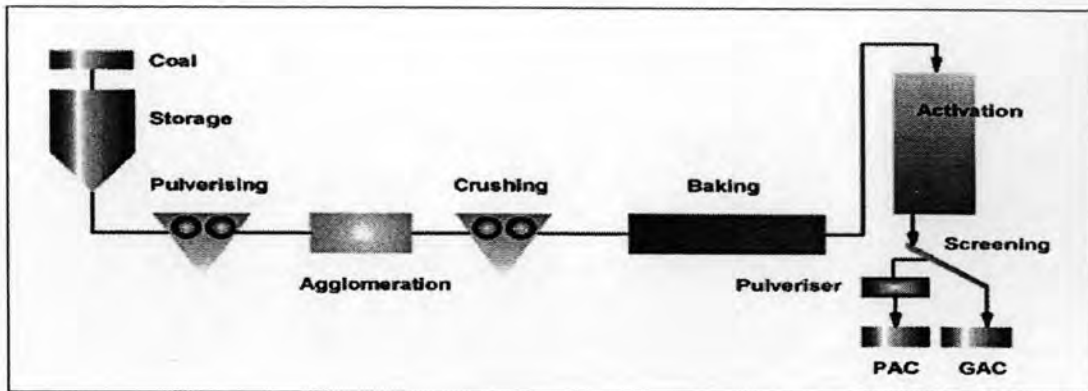
2.3.1.5 แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ

ถ่านกัมมันต์ที่แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ เป็นก๊าซ หรือสี หรือโลหะ ก็ จะเรียกชื่อชนิดตัวดูดซับตามชนิดตัวถูกดูดซับ เช่น ก๊าซ เอคซอร์เบนท์ (gas adsorbents) ถ่านกัมมันต์ดูดซับสีเรียก “ คัลเลอร์ เอคซอร์เบนท์ ” (colour adsorbents) และถ่านกัมมันต์ชนิดดูดซับโลหะเรียก “ เมทัล เอคซอร์เบนท์ ” (metal adsorbent) เป็นต้น

2.3.2 การผลิตถ่านกัมมันต์ (Producing of Activated Carbon)

การเตรียมถ่านกัมมันต์ในอุตสาหกรรมมีวิธีการเตรียมมากมายหลากหลายวิธี ขึ้นกับวัตถุประสงค์ที่ต้องการเตรียมเพื่อใช้ประโยชน์ในงานใด การเตรียมถ่านกัมมันต์หลังจากการเผาในที่ อับอากาศ (carbonization) แล้ว ต่อจากนั้นอาจกระตุ้นด้วยวิธีออกซิเดชันหรือใช้สารเคมี ใช้ความร้อน ไอน้ำ และหรือก๊าซ หรือการใช้หลายวิธีร่วมกัน สรุปขั้นตอนการเตรียมถ่านกัมมันต์ในอุตสาหกรรม (ภาพที่ 2.5)

ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากวัสดุต่างกันจะมีคุณสมบัติต่างกัน การนำไปใช้ประโยชน์จะ ต่างกันด้วย รายละเอียดของปัจจัยต่าง ๆ อาทิ อุณหภูมิ เวลา เครื่องมือ อุปกรณ์ ชนิดสารเคมีส่วนเข้า มามีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ วัสดุที่นำมาเตรียมถ่านกัมมันต์อาจจำแนกเป็น 3 แหล่ง ใหญ่ คือ มาจากแร่ธรรมชาติ จากของเสียในอุตสาหกรรม และจากผลิตภัณฑ์ของไม้และผลไม้หรือ ผลิตภัณฑ์จากพืชและสัตว์



ที่มา : <http://www.chemvironcarbon.com/carbon/definition/acmauf.htm>. (10 ธันวาคม 2547)

ภาพที่ 2.5 ขั้นตอนการเตรียมถ่านกัมมันต์ในอุตสาหกรรม

หลักการกว้าง ๆ ของการเตรียมถ่านกัมมันต์ คือ การเตรียมวัตถุดิบ การคาร์บอนไนซ์ เซชันหรือการเผาในที่อับอากาศ และการบดให้มีขนาดตามต้องการเหมาะในการใช้งาน รวมทั้งการ กระตุ้นให้ถ่านมีขนาดของโพรงภายในมากขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้น

2.3.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

วัสดุที่นำมาผลิตถ่านกัมมันต์จากแหล่งต่าง ๆ จะอยู่ในสภาพแวดล้อมเฉพาะ ของสารนั้น ๆ ซึ่งมีทั้งเศษฝุ่น ผง แร่ โลหะ น้ำมัน สารอินทรีย์ประเภทต่าง ๆ หากเป็นผลไม้หรือ เปลือกผลไม้ก็จะมีเส้นใย เมล็ดเข้ามาปะปน การเตรียมวัตถุดิบเพื่อทำความสะอาด กำจัดสิ่งที่ไม่พึง ประสงค์ออกไป การคัดขนาด การตัดและสับเป็นท่อนหรือชิ้น การบดหยาบ การบดละเอียด การ คัดร่อน การกำจัดความชื้น และการกำจัดสารอินทรีย์โดยใช้ความร้อน

การเตรียมวัตถุดิบเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่จะช่วยในการเตรียมขั้นตอน ต่อไป คือ คาร์บอนไนซ์เซชันให้มีประสิทธิภาพ และมีคุณภาพทั้งการประหยัคทรัพยากรด้านต่าง ๆ

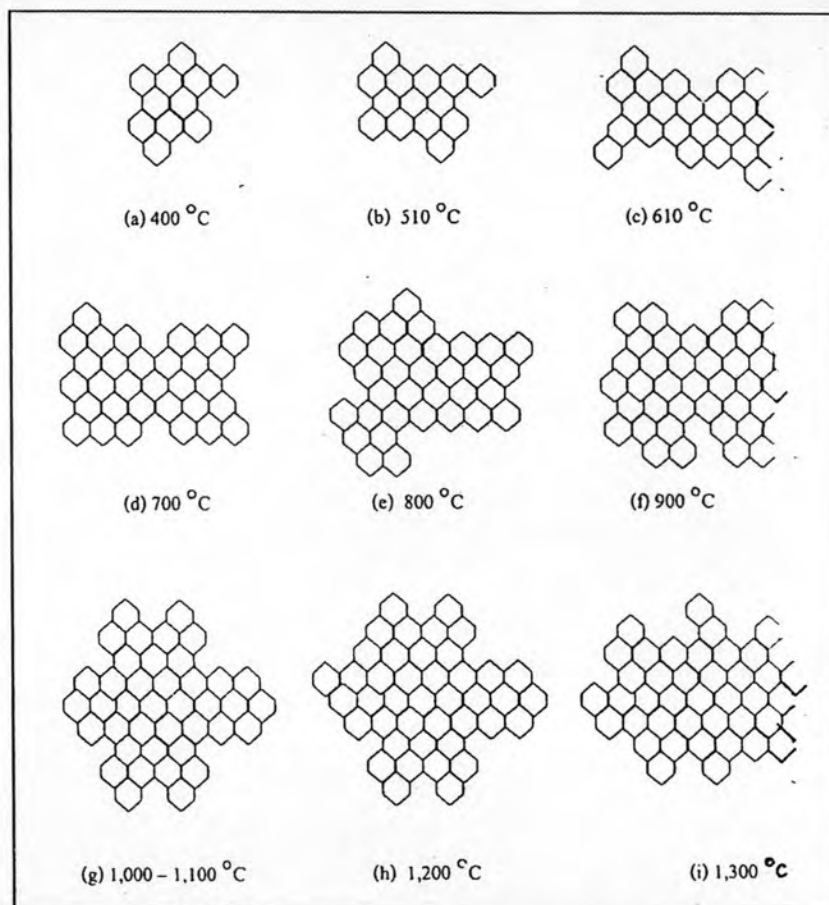
2.3.2.2 การทำให้เป็นถ่าน (Carbonization)

การทำให้เป็นถ่านเป็นขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ ให้เกิดเป็ผลิตภัณฑ์ ที่ เรียกว่า “ชาร์” (char) โดยการเผาในที่ที่ไม่มีอากาศหรือการควบคุมปริมาณอากาศให้มีจำกัด โดย

ปกติทั่วไปนิยมใช้อุณหภูมิต่ำ ๆ ต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส แต่ไม่ใช่หลักการที่ตายตัว อุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงขึ้นกับชนิดวัสดุที่นำมาเตรียมถ่านกัมมันต์ (Cheremisinoff, 1978 :242)

การเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ กันจะทำให้โครงสร้างของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนของวัสดุที่นำมาเตรียมถ่านกัมมันต์เปลี่ยนไป การเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น โครงสร้างการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมในถ่านกัมมันต์จะเปลี่ยนไป (Hassle, 1974 อ้างใน สุจนีย์ คู่ยเสงี่ยม, 2544: 13) ภาพที่ 2.6

อย่างไรก็ตามถ่านที่เตรียมได้จากการเผามีพื้นที่ผิวไม่มากนัก จำเป็นจะต้องมีการกระตุ้นให้โพรงภายในของถ่านใหญ่ขึ้น เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับ



ที่มา : hassle, 1974 อ้างใน สุจนีย์ คู่ยเสงี่ยม, 2544:13

ภาพที่ 2.6 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมในโครงสร้างของถ่านกัมมันต์

2.3.3 การกระตุ้นถ่านกัมมันต์ (Activation)

การกระตุ้นถ่านกัมมันต์ เพื่อการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีให้มีคุณสมบัติในการดูดซับสารได้มากขึ้นและรวดเร็วขึ้น คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นแล้วจะมีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้นและมีประจุเกิดขึ้นและมีปริมาณมากกว่าเดิม ประจุที่ผิวอาจเป็นประจุบวกหรือประจุลบ โดยการทำให้กลุ่มของสารที่ไม่พึงประสงค์ รวมทั้งสารปนเปื้อนหลุดออกไปจากผิวของถ่านกัมมันต์ และให้สารที่มีประจุเข้ามาจับที่ผิวของถ่าน เป็นการเพิ่มอำนาจการดูดซับ (Mukherjee และคณะ, 1947 อ้างใน สุจรรย์ คุษเสงี่ยม, 2544:15)

การกระตุ้นถ่านกัมมันต์สามารถทำได้โดยการกระตุ้นด้วยสารเคมี (chemical activation) หรือการกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ (physical activation)

2.3.3.1 การกระตุ้นด้วยสารเคมี (Chemical activation)

สารเคมีที่ใช้กระตุ้น มี 3 กลุ่มใหญ่ คือ กรด ต่าง และเกลือหรือใช้ร่วมกัน กรดมีทั้งกรดอินทรีย์และกรดอนินทรีย์ ต่างมีทั้งต่างอ่อนและต่างแก่ โดยใช้ความร้อนช่วยในการเร่งปฏิกิริยาให้ผลึกของสารเคมีเข้าไปอยู่ในโพรงของถ่านกัมมันต์ และความร้อนที่ใช้เผาจะช่วยกำจัดสารเคมีเหล่านี้ออกไปจากถ่านกัมมันต์ ภายหลังจากการกระตุ้นด้วยสารเคมีแล้วจะต้องล้างเอาสารเคมีส่วนที่ตกค้างออกให้หมด แต่ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากวัสดุบางประเภท เช่น กระจุกสัตว์ ความร้อนที่สูงมากไปจะทำลายโครงสร้างของถ่านทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง

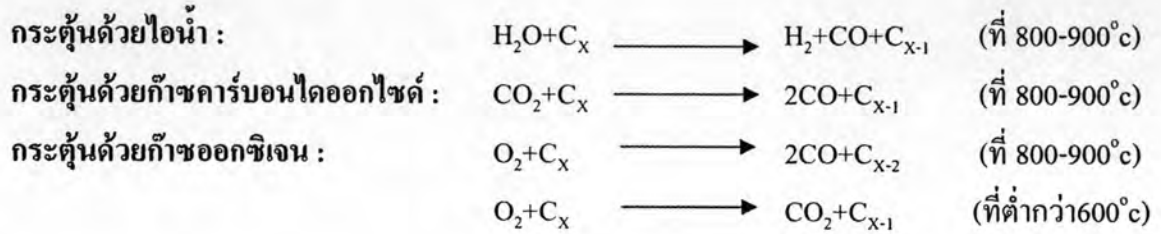
สารเคมีที่นิยมใช้ในการกระตุ้นทางเคมี เช่น กรดฟอสฟอริก กรดซัลฟูริก กรดไนตริก กรดอะซิติก โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ โปแตสเซียมคาร์บอเนต โปแตสเซียมไบคาร์บอเนต โปแตสเซียมซัลเฟต โซเดียมคลอไรด์ ซิงค์คลอไรด์ เพอริกคลอไรด์ และแคลเซียมคลอไรด์ เป็นต้น

2.3.3.2 การกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ (Physical activation)

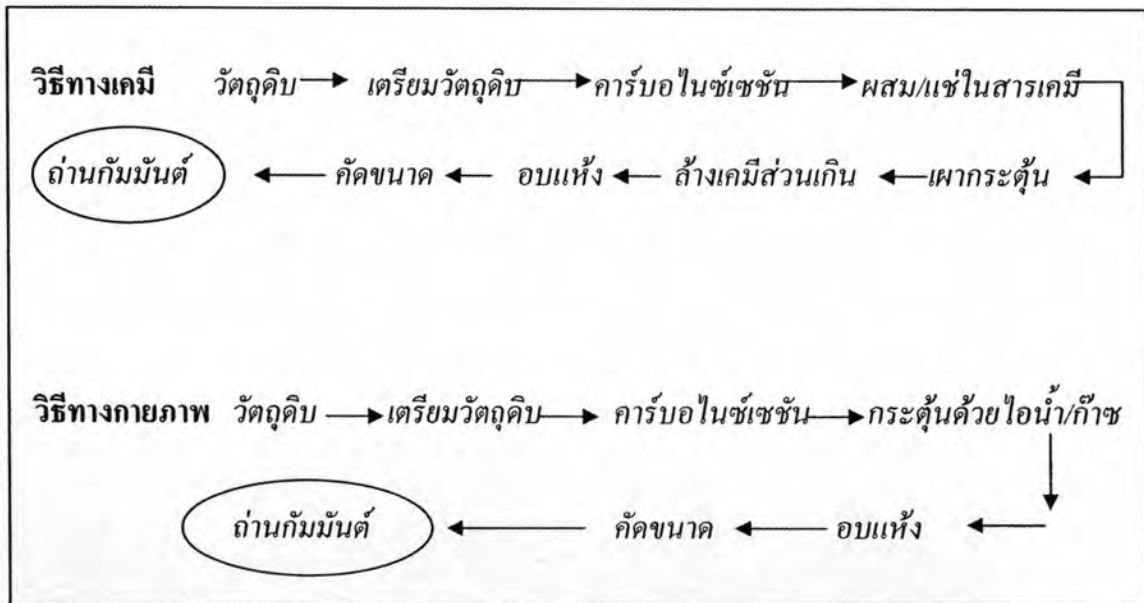
การกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพโดยใช้ความร้อน ไอน้ำหรือก๊าซกระตุ้นให้ผิวด้านจัดเรียงตัวของอะตอมใหม่ให้อยู่ในสภาพไม่มีระเบียบ ไรทิศทาง จึงเกิดเป็นโพรงที่ผิวเพิ่มมากกว่าเดิม เป็นการเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่าน การกระตุ้นด้วยไอน้ำอ้อมตัวยังขาดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ภายหลังจากการกระตุ้นจะขึ้นกับชนิดของก๊าซและความเข้มข้นของก๊าซที่มากระตุ้น อุณหภูมิระหว่างการ

ออกซิเดชัน ระยะเวลาในการกระตุ้น ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบของสารแร่ในวัสดุที่นำมาเตรียมถ่านหรือถ่านกัมมันต์ ปริมาณและคุณสมบัติของสารอินทรีย์ที่เป็นตัวกระตุ้นในระหว่างปฏิกิริยา (Cheremisinoff , 1978: 243) การกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีทางเคมีและทางกายภาพ (ภาพที่ 2.7)

ปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยความร้อน ไออน้ำและก๊าซ สามารถเขียนเป็นสมการง่าย ๆ ดังนี้



ข้อดีของการกระตุ้นด้วยวิธีใช้ความร้อน ไออน้ำหรือก๊าซ คือการไม่มีสารเคมีตกค้างหลังเสร็จสิ้นการกระตุ้น แต่วิธีนี้ก็สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายด้านพลังงานสูงกว่าวิธีกระตุ้นด้วยสารเคมี



ภาพที่ 2.7 การกระตุ้นถ่านด้วยวิธีทางเคมีและวิธีทางกายภาพ

2.3.4 การดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ (Adsorption with Activated Carbon)

น้ำเสียที่มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบนั้น โดยทั่วไปถ้าเป็นสารอินทรีย์ปริมาณมาก และขนาดโมเลกุลใหญ่ โครงสร้างสลับซับซ้อน การจะย่อยสลายโดยวิธีธรรมชาติทางชีวภาพโดย

อาศัยจุลินทรีย์นั้นเป็นได้ยากและใช้เวลานาน เมื่อของเสียหรือน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบ อยู่ในสภาวะขาดออกซิเจนก็จะเน่าเสียส่งกลิ่นเหม็นและมีสีต่างๆกันส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ของเสียประเภทสารอินทรีย์จำนวนมากเป็นของเสียอันตรายที่มีพิษสูง เช่น น้ำเสียจากโรงงานฟอก-ย้อม สิ่งทอมีสารอินทรีย์และโลหะหนัก รวมทั้งมีสีซึ่งกระทบต่อวงจรชีวิตในสิ่งแวดล้อม หากไม่ได้บำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยทิ้งสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ อนุภาคของคาร์บอนกัมมันต์มี โปร่งอยู่ทั่วไปในโครงสร้างจึงทำให้สามารถเกิดกลไกในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย โดยการดูด สารอินทรีย์ติดอยู่ที่ผิวของโปร่งเหล่านี้ ดังนั้นน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยคาร์บอนกัมมันต์จึงออกมาเป็น น้ำที่สะอาด (ภาพที่ 2.8)



ภาพที่ 2.8 การดูดติดผิวของสารอินทรีย์ในน้ำเสียของ ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพที่ดีในการบำบัดการปนเปื้อนของสารอินทรีย์และสาร โลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวางมาเป็นเวลานานแล้ว การกำจัดสาร อินทรีย์ออกจากน้ำเสียของคาร์บอนกัมมันต์โดยการดูดติดผิว

2.3.5 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon Characteristics)

ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวมากซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการเอดซอร์พชัน พื้นที่ผิว ของถ่านกัมมันต์โดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 500-1,400 ตารางเมตรต่อกรัม ถ่านกัมมันต์บางชนิดอาจมีพื้นที่ ผิวสูงถึง 2,500 ตารางเมตรต่อกรัม ปัจจัยลำดับถัดไปที่สำคัญรองจากพื้นที่ผิว คือ คุณสมบัติทางเคมี (chemical nature) ของผิวถ่านกัมมันต์ หรือคุณสมบัติการเกิดขั้วประจุ (polarity) ของถ่านกัมมันต์ ซึ่ง ขึ้นกับชนิดของถ่านและมีอิทธิพลต่อแรงยึดเกาะ(attractive)ระหว่างโมเลกุล ถ่านที่เตรียมจากวัสดุ ประเภทพืชจะมีประจุที่ผิวเป็นด่างหรือเป็นขั้วลบ จึงมีประสิทธิภาพในการดูดติดสีย้อม (dyes) สาร ให้สี (colors) และสารอินทรีย์ไม่อิ่มตัว (unsaturated organic compounds) อย่างไรก็ตามถ่านกัมมันต์

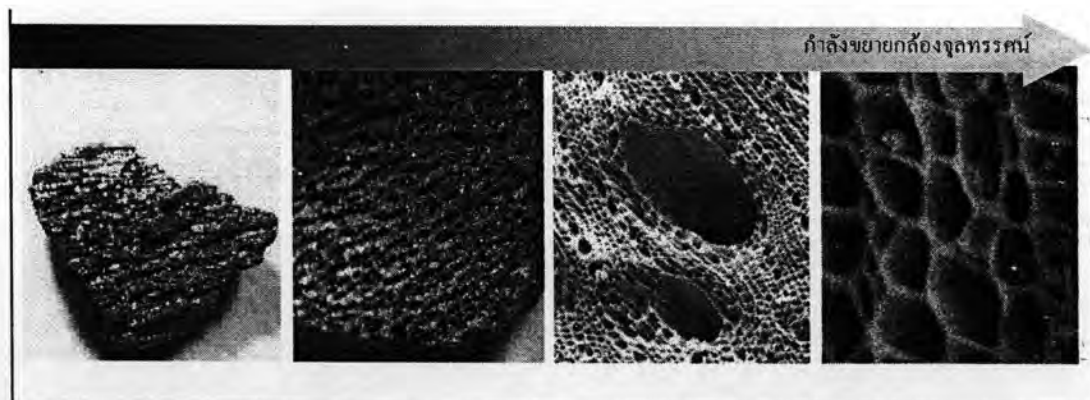
ก็มีพื้นที่ผิวอีกจำนวนมากที่ไม่มีขั้วประจุ(non-polar) จึงทำให้ดูดติดผิวสารประเภทอินทรีย์หรืออเล็กทรอไลต์ได้ยาก

อนุภาคของคาร์บอนกัมมันต์มีโพรงอยู่ทั่วไปในโครงสร้าง มีขนาดต่างๆกัน โพรงขนาดเล็ก โพรงขนาดกลาง และโพรงขนาดใหญ่ การแบ่งประเภทของโพรงถ่านทำให้สามารถควบคุมการเตรียมสารดูดซับให้ใช้ประโยชน์ตามที่ต้องการได้ การเตรียมถ่านคาร์บอนให้มีโพรงขนาดต่างๆทำได้โดยเมื่อคาร์บอนถูกกระตุ้นจะทำให้เกิดโพรงขนาดใหญ่ อาจมีขนาดมากกว่า 1,000 อังสตรอม ($^{\circ}\text{A}$) ส่วนโพรงขนาดเล็ก มีขนาดอยู่ระหว่าง 10-100 $^{\circ}\text{A}$ ขนาดของโพรงมีอิทธิพลต่อกระบวนการดูดติดผิว การกระจายตัวของขนาดของโพรงมีผลต่อขนาดโมเลกุลของสารที่จะถูกดูดติด

ถ้าโมเลกุลของสารที่จะถูกดูดซับมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของโพรงก็จะไม่ถูกดูดติดขนาดของโพรงที่เล็กจึงเหมาะกับสารประเภทตัวทำละลายที่จะเข้าไปได้

การกำจัดของเสียในน้ำด้วยถ่านกัมมันต์จะให้ผลดีจะต้องทำให้ถ่านกัมมันต์มีแบบที่เหมาะสม ซึ่งมี 2 ชนิด คือ ชนิดผงและชนิดเม็ด ชนิดผงนั้นมีขนาดเล็กกว่าสามารถร่อนผ่านตะแกรง (U.S. Sieve Series) เบอร์ 50 แต่ชนิดเม็ดจะมีขนาดใหญ่กว่า

อัตราการดูดติดผิว (adsorption rate) ขึ้นกับขนาดของโพรงของอนุภาคถ่านกัมมันต์ แต่ความจุในการดูดติดผิวขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวทั้งหมด การลดขนาดของอนุภาคของถ่านกัมมันต์ไม่มีผลกระทบ ต่อพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ การกระจายตัวของอนุภาคถ่านกัมมันต์มีผลโดยตรงต่อระบบของของเหลว (hydraulic's system) ความสามารถในการกรอง (filter ability) และการควบคุมคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ (ภาพที่ 2.9 และ ตารางที่ 2.2)



ที่มา: เพชร เจริญชัย [http://doenv.eng.cmu.ac.th/P1/Lesson/18June.ppt.Advance Water Supply Engineering.\(9 ๕๓47\)](http://doenv.eng.cmu.ac.th/P1/Lesson/18June.ppt.Advance Water Supply Engineering.(9 ๕๓47))

ภาพที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงขนาดของโพรงถ่านกัมมันต์เมื่อได้รับการกระตุ้น

ในประเทศญี่ปุ่นใช้ถ่านไม้สีดำ (black charcoal) ในกระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ใช้ปรับปรุงสภาพดิน ใช้ป้องกันการเกิดโรคในสวนผลไม้ แก้ไขปัญหาการปลูกพืชซ้ำ ดูดซับเคมีทางการเกษตรและปุ๋ยส่วนเกิน เพิ่มปริมาณแบคทีเรียในดิน เพิ่มปริมาณน้ำตาลในผลองุ่น ป้องกันการสูญเสีย ของดินซาวและลดความขมของใบชา

ในด้านการปศุสัตว์ถ่านไม้สีดำเมื่ออบคเป็นผงแล้วนำไปผสมในอาหารสัตว์เพื่อรักษาโรคเกี่ยวกับอวัยวะในการย่อยอาหาร เช่น เลี้ยงไก่ หมู วัวและม้า นอกจากนี้ยังใช้ถ่านไม้ผสมทำอาหารเสริมเป็นการเพิ่มคุณค่าของสารอาหารและช่วยระบบการย่อยอาหาร ลดการเกิดก๊าซในกระเพาะอาหารและลำไส้ ดับกลิ่นเหม็นของปุ๋ยธรรมชาติจากมูลสัตว์ ป้องกันท้องร่วง การเกิดก๊าซในช่องท้อง โรคเกี่ยวกับการสืบพันธุ์และโรคเกี่ยวกับลำไส้ทั้งในคนและสัตว์ รวมทั้งใช้ในการเพิ่มปริมาณและคุณภาพของเนื้อและไข่ของสัตว์เลี้ยงด้านการปศุสัตว์

ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์ด้านการถนอมอาหารทางการเกษตร ทำให้สามารถเก็บรักษาสินค้าด้านการเกษตรได้ยาวนานขึ้น โดยการดูดซับความชื้นและจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของการเน่าเสีย รวมทั้งใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องดื่มและแอลกอฮอล์ ในอุตสาหกรรมเคมีใช้ถ่านกัมมันต์ในการฟอกสีทำให้ของเหลวบริสุทธิ์ขึ้น โดยกำจัดสารปนเปื้อนในระหว่างการผลิตและสารปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์

ด้านการก่อสร้าง ถ่านกัมมันต์ช่วยยึดอายุของอาคารสิ่งก่อสร้าง ปรับปรุงสภาพของที่อยู่อาศัยให้สะดวกสบายและบริสุทธิ์ ปรับปรุงสภาพการอยู่อาศัยของโรงแรมและสถานบันเทิง และควบคุมความชื้นภายในอาคาร

ด้านสิ่งแวดล้อม ใช้ถ่านกัมมันต์ในการกำจัดสารพิษ สิ่งปนเปื้อนในน้ำเสีย ทั้งการปนเปื้อนของน้ำเสียจากชุมชน อุตสาหกรรมและน้ำเสียจากการเกษตร การปนเปื้อนของสารเคมีและก๊าซ ระหว่างขั้นตอนต่าง ๆ ในกระบวนการผลิต ในด้านการเกษตรจะมีการปนเปื้อนของสารฆ่าแมลง สารกำจัดวัชพืช สารเร่งและควบคุมความเจริญเติบโตพืช สารปรับปรุงดิน ปุ๋ยสังเคราะห์ เป็นต้น สารเหล่านี้มีองค์ประกอบเป็นสารอินทรีย์และโลหะหนักที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ สัตว์ และพืช และต่อสภาพแวดล้อม สารเหล่านี้เป็นต้นเหตุของการเกิดมะเร็งในมนุษย์และสัตว์ รวมทั้งส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม สารเหล่านี้เป็นต้นเหตุของการเกิดมะเร็งในมนุษย์และสัตว์ รวมทั้งส่งผลกระทบต่อเป็นลูกโซ่เมื่อปนเปื้อนเข้าสู่วงจรของสิ่งแวดล้อมจะส่งผลกระทบต่อเป็นวงกว้างทั้งในดิน บรรยากาศ ในอากาศและในแหล่งน้ำธรรมชาติ

2.4 โลหะหนักและการกำจัด

โลหะหนักแต่ละชนิดมีคุณสมบัติทางเคมี ทางกายภาพ ลักษณะและรูปแบบ สถานะ ตลอดจนประโยชน์และโทษแตกต่างกัน การกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิดจึงจำเป็นต้องศึกษาและทำความเข้าใจกับโลหะที่จะกำจัดแต่ละชนิดโดยสังเขปดังนี้

2.4.1 โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความหนาแน่นมากกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร หรือมีค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่า 5 ขึ้นไป และมีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23-92 ภายในคาบที่ 4-7 ของตารางธาตุ เช่น ตะกั่ว นิกเกิล โปรท แคดเมียม และสังกะสี เป็นต้น (Dean และคณะ, 1972 อ้างใน อุบลรัตน์, 2544)

2.4.1.1 ตะกั่ว (Lead : Pb)

ตะกั่วเป็นธาตุประเภทโลหะ มีน้ำหนักอะตอม 207.2 เลขอะตอมหรืออะตอมมิก นัมเบอร์ 82 เป็นธาตุในกรุป 6 A (IV A) ของตารางธาตุ (Periodic table) มีค่าวาเลนซ์เท่ากับ 2 และ 4 ค่าวาเลนซ์ 4 ของตะกั่วเป็นไอโซโทปที่เสถียร คุณสมบัติของตะกั่วเป็นโลหะหนักที่มีเนื้ออ่อนสีเทา ค่าความถ่วงจำเพาะ 11.35 จุดหลอมเหลวที่ 327.4 องศาเซลเซียส ไม่ละลายน้ำ แต่จะละลายช้า ๆ ในน้ำที่มีกรดอ่อน ๆ ตะกั่วเป็นโลหะที่ทนการกัดกร่อน รูปร่างของตะกั่วเป็นอินกอตแผ่น ท่อ เส้น เพสต์ ผงและผลึก เป็นต้น (Hawley, 1983) มีรัศมีของไอออนในผลึก (ionic radius in crystals) อยู่ในช่วง 1.19-1.49 อังสตรอม (David, 2004)

ความเป็นพิษของตะกั่ว เป็นพิษเมื่อสูดดม หายใจเอาฝุ่น ผง หรือไอของตะกั่วเข้าสู่ร่างกาย หรือการบริโภคอาหารและน้ำที่ปนเปื้อนสารตะกั่ว (มลิวรรณ บุญเสนอ, 2544) จะพบตะกั่วเป็นองค์ประกอบในแบตเตอรี่ ในสารเติมแต่งน้ำมันก๊าซโซลีน ในสารเคมีภัณฑ์ป้องกันการแผ่รังสี สารท่อหุ้มสายเคเบิล ในเครื่องมืออุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น ท่อ แท็งก์ ในสารเชื่อมโลหะ (solder and flux) เป็นส่วนประกอบในโลหะอัลลอยด์ ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเครื่องใช้ไฟฟ้า การทำเหมืองแร่และการถลุงแร่ เป็นต้น นอกจากนี้ ตะกั่วยังเป็นองค์ประกอบในเกลืออนินทรีย์หลายชนิด เช่น เลดคลอไรด์ เลด อซิเนต เลดอซิไนด์ และสารกำจัดวัชพืช (Hawley, 1983)

การปนเปื้อนของตะกั่วในสิ่งแวดล้อม จะพบตะกั่วได้ทั้งในดิน พืช ผัก ผลไม้ สัตว์บกและสัตว์น้ำ ในแหล่งน้ำธรรมชาติ ที่มาของสารตะกั่วในสิ่งแวดล้อมมาจากธรรมชาติ และมาจากกิจกรรมของมนุษย์ สินแร่ตะกั่วในธรรมชาติ เช่น กาลีนา เมื่อสลายตัวจะถูกออกซิไดซ์อย่างช้า ๆ ให้อยู่ในรูปคาร์บอเนตหรือถูกตรึงโดยแร่ดินเหนียว ออกไซด์ของเหล็กและอลูมิเนียมและอินทรีย์วัตถุ (ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545)

2.4.1.2 แคดเมียม (Cadmium : Cd)

แคดเมียมเป็นโลหะกึ่งรูป 2Bของตารางธาตุ (periodic table) มีเลขอะตอมเป็น 48 น้ำหนักอะตอมเป็น 112.4 มีวาเลนซ์ 2 มีไอโซโทปที่เสถียร 8 ไอโซโทป แคดเมียมเป็นโลหะที่อ่อนตัวสามารถตีแผ่เป็นแผ่นได้ ที่เป็นผงมีลักษณะสีเทาอ่อน ๆ เงามาวหรือสีฟ้าอ่อน เมื่อถูกความชื้นในอากาศจะหมองและผุกร่อนได้ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จะเปราะ มีความทนต่อค่าความถ่วงจำเพาะ 8.642 จุดหลอมเหลว 320.9 องศาเซลเซียส จุดเดือด 767 องศาเซลเซียส ค่าดัชนีหักเห 1.13 ความแข็ง (Mohs hardness) 2.0 ละลายในกรดโดยเฉพาะกรดไนตริก และละลายได้ในสารละลายแอมโมเนียมไนเตรท(Hawley, 1983) แคดเมียมมีรัศมีของไอออนในผลึก(ionic radius in crystals)อยู่ในช่วง 0.78-1.31 อังสตรอม(David, 2004)

แหล่งที่พบแคดเมียมในธรรมชาติ มักพบเกิดปะปนกับแร่สังกะสี ทองแดง และดีบุก ปกติในธรรมชาติจะอยู่รวมตัวกับกำมะถันเป็นแคดเมียมซัลไฟด์ในแร่กรีนอกโคท (CdS) และมักพบในแร่ตะกั่วและทองแดงที่มีสังกะสีอยู่ด้วย ผลิตภัณฑ์ของแคดเมียมที่พบเห็นได้ทั่วไปทางการค้ามีลักษณะเป็นผง เป็นแท่ง เป็นแผ่นและเป็นแร่ดิบ (ingots) ผลิตภัณฑ์ของแคดเมียมจะมีสิ่งเจือปนอยู่ต่ำมาก(สุกมาส พณิชศักดิ์พัฒนา, 2545)

แคดเมียมมีความเป็นพิษสูงมาก โดยเฉพาะเมื่อสูดเอาฝุ่นผงหรือไอเข้าสู่ทางเดินหายใจ แคดเมียมเป็นสารก่อมะเร็ง การปนเปื้อนของสารนี้เข้าสู่ร่างกายนอกจากการหายใจเอาฝุ่นผงและไอระเหยเข้าสู่ร่างกายแล้ว ยังเกิดจากการปนเปื้อนเข้าสู่อาหารที่บรรจุในภาชนะโลหะ ซึ่งโลหะนั้นมีแคดเมียมเป็นส่วนผสมประกอบอยู่ด้วย(มลิวรรณ บุญเสนอ, 2544)

ผงแคดเมียมถูกตีไฟได้และก่อความระคายเคือง สารประกอบของแคดเมียมที่ละลายน้ำได้ และออกไซด์ของแคดเมียมมีความเป็นพิษสูงมาก

ประโยชน์ของแคดเมียมในด้านอุตสาหกรรมใช้เคลือบผิวโลหะและเป็นองค์ประกอบของเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ทำแบตเตอรี่ของโทรศัพท์เคลื่อนที่ ลวดส่งผ่านกำลัง (power transmission wire) ใช้ทำฟิสิกเมนต์(สารให้สีในผลิตภัณฑ์เซรามิก) ในอุปกรณ์ของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เป็นองค์ประกอบในสารฆ่าเชื้อรา ในอุตสาหกรรมหมึกพิมพ์และการพิมพ์ในงานถ่ายภาพ ในอิเล็กทรอนิกส์ของหลอดไฟ และในเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น (Hawley, 1983)

2.4.2 การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

น้ำเสียที่มีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบ หากไม่ได้บำบัดให้น้ำเสียนั้นมีโลหะหนักในปริมาณต่ำ ๆ ตามเกณฑ์มาตรฐานที่หน่วยงานกำกับดูแลกำหนดไว้ จะมีความผิดและมีโทษทางกฎหมาย เมื่อโลหะหนักในน้ำเสียไม่ได้รับการบำบัดหรือการกำจัดน้ำนี้เมื่อระบายสู่แหล่งน้ำ

ออกไซด์ โครเมต ไนเตรต รวมทั้งอากาศก็จัดเป็นสารในกลุ่มนี้ ส่วนสารประเภทรีดิวเซอร์ ได้แก่ สารในกลุ่มโลหะซัลเฟต และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เช่น เฟอร์ซัลเฟต โซเดียมเมตาไบซัลเฟต

2.4.2.3 การรีเวิร์ส ออสโมซิส (Reverse Osmosis)

วิธีการนี้ใช้หลักการของเยื่อบางๆที่สังเคราะห์ขึ้นจากโพลีเมอร์สังเคราะห์ ประเภทเซลลูโลส (cellulose) และ โพลีเอไมด์ (polyamide) ซึ่งแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติเฉพาะตัวแตกต่างกัน เช่น ความทนทานต่อสภาพความเป็นกรด-ด่าง ความร้อน อุณหภูมิ ความดันและการออกซิไดซ์ หลักการทำงานคือเยื่อบาง ๆ นี้จะยอมให้ขนาดโมเลกุลของสารละลายในช่วงหนึ่งผ่านได้ และไม่ยอมให้โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ลอดผ่านแต่จะผลักให้อยู่อีกด้านหนึ่งของเมมเบรน วิธีการรีเวิร์ส ออสโมซิส สามารถใช้กำจัดได้ทั้งไอออนบวกและไอออนลบในสารละลาย สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในสารละลายค่อนข้างสูงอยู่ในช่วงร้อยละ 96-98 ของความเข้มข้นของโลหะที่ค่อนข้างสูง เช่น สามารถกำจัดแคดเมียม (Cd^{2+}) ได้ร้อยละ 96-98 ที่ความเข้มข้นสูงสุดร้อยละ 8-10 และนิกเกิล (Ni^{2+}) ได้ร้อยละ 98-99 ที่ความเข้มข้นสูงสุดร้อยละ 10-12 (มันสิน ตัญญาเวศน์, 2538 : หน้า 165) อย่างไรก็ตามวิธีนี้จะมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารปนเปื้อนในสารละลายจะต้องมีการบำบัดน้ำด้วยวิธีอื่นมาก่อน เพื่อให้ น้ำเสียมีลักษณะที่เหมาะสมที่จะใช้วิธีนี้ เช่น การตกตะกอนสารแขวนลอยและการปรับพีเอชเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน

2.4.2.4 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

วิธีการแลกเปลี่ยนไอออนอาศัยหลักการแลกเปลี่ยนไอออนที่ละลายอยู่ในสารละลายที่ต้องการกำจัดกับไอออนที่อยู่ในองค์ประกอบของวัสดุที่นำมาทำสารแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchanger) สารแลกเปลี่ยนไอออนมีทั้งชนิดสังเคราะห์และชนิดที่มาจากวัสดุธรรมชาติ ชนิดสังเคราะห์ขึ้นทำมาจากโพลีเมอร์ที่เรียกว่า “เรซิน” ที่นิยมใช้มักทำจากโพลีสไตรีน สำหรับประเภทที่ทำมาจากธรรมชาติ เช่น ชานอ้อย ผักตบชวา เปลือกผลไม้บางชนิด เรซินแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติความชอบในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกและไอออนลบต่างกัน เรซินแบบกรด (acidic cationic resin) จะใช้หมู่ไอออนบวกของตนเอง (H^+ หรือ Na^+) แลกกับไอออนบวกที่ต้องการกำจัด เช่น $Cd^{2+}, Hg^{2+}, Pb^{2+}$ เรียกการแลกเปลี่ยนไอออนบวกว่า “แคทไอออน เอ็กซ์เชนจ์” (cation exchange)

ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแบบกรดกับโลหะไอออนในสารละลาย



เรซิน โลหะหนักในสารละลาย
ที่ต้องการกำจัด



เรซินแบบด่างจะใช้ไอออนลบของดอน (OH^- หรือ Cl^-) แลกกับไอออนลบที่อยู่ในน้ำหรือในสารละลายที่ต้องการกำจัด เช่น ซัลเฟต (SO_4^{2-}), คลอไรด์ (Cl^-) เรียกการแลกเปลี่ยนไอออนลบว่า “แอนไอออนเอ็กซ์เชนจ์” (anion exchange)

เรซินสังเคราะห์ประเภทกรดแก่จะสามารถกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยได้ดี ประสิทธิภาพการกำจัดสูง จึงนิยมนำเรซินมากำจัดโลหะหนักในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่มรวมทั้งอุตสาหกรรม ถึงแม้เรซินสังเคราะห์จะมีราคาแพงมากก็นิยมนำมาใช้กำจัดโลหะเนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัด

2.4.2.5 การดูดติดผิว (Adsorption)

การดูดติดผิวเป็นกระบวนการที่สารดูดติดผิวหรือแอดซอร์เบนต์ (adsorbent) ดูดหรือยึดโมเลกุลของอีกสารหนึ่งที่อยู่ในตัวกลางที่เป็นของเหลวหรือก๊าซไว้ที่ผิวของสารยึดติด เกิดการเคลื่อนย้ายสาร (mass transfer) จากของเหลวหรือก๊าซไปยังผิวของของแข็งที่เป็นสารยึดติด สารที่ใช้ดูดติดผิว ได้แก่ ถ่านกัมมันต์และถ่านที่ทำจากวัสดุธรรมชาติ เปลือกผลไม้ ผลิตภัณฑ์จากพืชหรือสัตว์รวมทั้งจากแร่หรือมาจากของเสียทางอุตสาหกรรม (Industrial waste and by-product)

การดูดติดผิวของสารระหว่าง adsorbent กับ adsorbate อาจอธิบายด้วยกลไกทางกายภาพ (physisorption) กับกลไกทางเคมี (chemisorption) กลไกทางกายภาพนี้ขึ้นอยู่กับขนาดและปริมาตรของโพรงรวมทั้งพื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาคของสารยึดติดซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและชนิดของวัสดุที่นำมาผลิตถ่านกัมมันต์ โดยแรงยึดระหว่างโมเลกุลของสารเป็นแรงยึดอ่อนชนิดแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) สำหรับกลไกทางเคมีนั้นให้ความสำคัญกับการทำปฏิกิริยาระหว่างสารที่ถูกดูดติดกับสารทำหน้าที่ดูดติดผิวแล้วเกิดเป็นสารใหม่ขึ้น โดยใช้ตัวชี้วัด คือ ค่าไอโอดีน นัมเบอร์ (iodine number) กับ โมลาส นัมเบอร์ (molas number)

นอกจากวิธีการกำจัดโลหะหนักในสารละลายและในน้ำเสียจากแหล่งต่าง ๆ ยังมีวิธีอื่น ๆ อีก เช่น การระเหยให้แห้ง วิธีการใช้กระแสไฟฟ้าสกัดกลับคืน (electrolytic recovery) และวิธีอิเล็กโทรไดอะลิซิส (electrodialysis) เป็นต้น

วิธีการใช้สารดูดซับ ปริมาณของสารดูดซับที่ใส่จะมีความสัมพันธ์กับ ปริมาณของสารถูกดูดซับ ซึ่งนิยามอธิบายสมมติฐานของแบบจำลองความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองนี้ที่เรียก “ไอโซเทอม” (isotherm)

2.5 ความสามารถและไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Capacity and Adsorption Isotherm)

เมื่อตัวถูกละลายในสารละลายเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับและดำเนินการเช่นนี้ต่อไปเรื่อยๆ จนเกิดสภาวะสมดุลพลศาสตร์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายเท่ากับ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวของสารดูดซับ เรียกเกิดสมดุลของตัวดูดซับ ที่สภาวะนี้สามารถเขียน แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายกับสารดูดซับ โดยคิดเป็นน้ำหนักร้อยละ หรือปริมาตรของตัวถูกละลายต่อสารดูดซับหนักหนึ่งหน่วย โดยควบคุมให้อุณหภูมิและพีเอชเดียวกัน ไอโซเทอมจะบอกถึงพฤติกรรมของสารดูดซับว่าดูดซับแบบชั้นเดียว(mono-layer)หรือหลายชั้น(multi-layer)ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายกับสารดูดซับสามารถเขียน ความสัมพันธ์ของตัวแปรนี้ได้ 3 แบบ คือ ความสัมพันธ์ของไอโซเทอม แบบแลงมัวร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) แบบฟรุนดลิช (Freundlich Adsorption Isotherm) และแบบบีอีทีหรือแบบเบท (BET : Brunauer-Emmett-Teller Adsorption Isotherm หรือแบบเส้นตรง (Linear Isotherms ของ Henry's law) ดังนี้

2.5.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

แนวคิดของการดูดซับแบบนี้อธิบายว่า โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะอยู่ที่บริเวณที่ แน่นอนบนผิวของสารดูดซับ ซึ่งมีพื้นที่แน่นอนและสารถูกดูดซับจะมีได้หนึ่ง โมเลกุลเท่านั้นและเกิด ชั้นของสารถูกดูดซับเพียงชั้นเดียว (monolayer) พลังงานการดูดซับผิวของสารถูกดูดซับในแต่ละ บริเวณบนสารดูดซับมีค่าเท่ากัน สมการการดูดซับแบบแลงมัวร์เป็นดังนี้

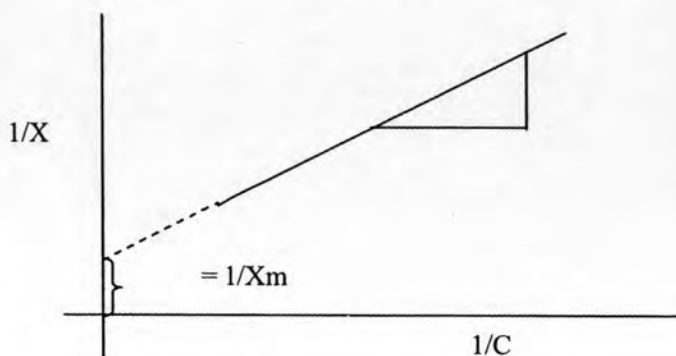
$$X = (X_m \cdot bC_e) / (1 + bC_e)$$

และเมื่อ X เข้าใกล้ X_m และ C_e เข้าใกล้ infinity (∞) สมการเขียนใหม่ได้เป็น

$$C_e/X = (1/bX_m) + (C_e/X_m)$$

หรือ
$$1/X = (1/X_m) + (1/C_e)(1/b \cdot X_m)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/X$ เป็นแกนตั้งและ $1/Ce$ เป็นแกนนอน จะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงมีความชันเป็น $1/bX_m$ และจุดตัดบนแกนตั้งมีค่า $1/X_m$ ตามภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์

- X คือ ปริมาณหรือความเข้มข้นของสารถูกละลายที่ถูกดูดติดบนสารดูดติดต่อ 1 หน่วย น้ำหนักของสารดูดติด มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม หรือ โมลต่อกรัม
- X_m คือ ปริมาณของสารถูกละลายที่มีปริมาณมากที่สุดที่ถูกดูดติดเมื่อเกิดเป็นชั้นสารดูดติดเพียงชั้นเดียว (Monolayer) มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม หรือ โมลต่อกรัม
- Ce คือ ความเข้มข้นของสารถูกละลายที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมหรือ โมลต่อลิตร
- b เป็นค่าคงที่ของพลังงานในการการดูดซับ

2.5.2 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบบีอีทีหรือเบท (BET : Brunauer Emmett-Teller Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบเบท พัฒนามาจากแบบแลงมัวร์ใช้อธิบายการดูดติดผิวสารถูกดูดติดเกิดเป็นหลายชั้น (multilayer) บนผิวสารดูดติด โดยแต่ละ โมเลกุลในชั้นแรกจะเป็นที่ยึดเกาะของผิวของชั้นของสารถูกดูดติดที่เกิดขึ้นในชั้นที่สองและชั้นต่อ ๆ ไป

สมการของไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบเบทเป็นดังนี้

$$\frac{Ce}{X(Cs-Ce)} = \left(\frac{1}{X_m b} \right) + \left(\frac{b-1}{X_m b} \right) \left(\frac{Ce}{Cs} \right)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C_e/X (C_s-C_e) กับ C_e/C_s จะได้เส้นตรงที่มีความชัน $(b-1)/X_m b$ ตัดแกนตั้งที่ $1/X_m b$

- X คือ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวต่อ 1 หน่วยน้ำหนัก ของสารดูดติดมีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม หรือ โมลต่อกรัม
- X_m คือ ปริมาณของตัวถูกละลายต่อ 1 หน่วยน้ำหนักของสารดูดติดที่ใช้ในการสร้างให้เกิดชั้นของสารดูดติดชั้นเดียว มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม หรือ โมลต่อกรัม
- C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร
- C_s คือ ความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายในน้ำที่อุณหภูมิหนึ่ง มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร
- b เป็นค่าคงที่ของพลังงานในการดูดติดผิว

2.5.3 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนด์ลิคซ์ (Freundlich Adsorption Isotherm)

เป็นแบบที่นิยมมากในการใช้อธิบายการดูดติดผิวของตัวถูกละลายในสารละลาย สมการของไอโซเทอมแบบฟรุนด์ลิคซ์เขียนได้เป็น

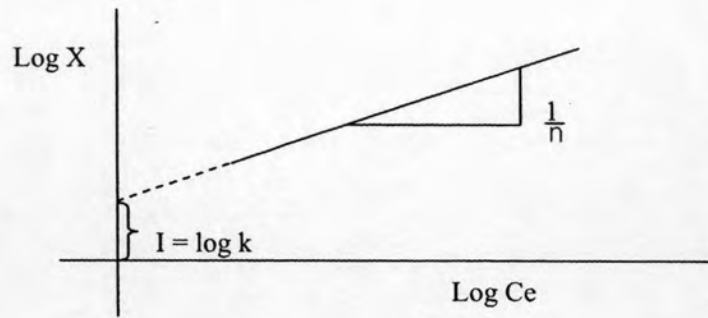
$$\frac{X}{m} = k C_e^{1/n}$$

$$\text{หรือ} \quad \log \frac{X}{m} = \log k + \frac{1}{n} (\log C_e)$$

- X เป็นปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิว มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร
- m เป็นน้ำหนักของสารดูดติดผิว มีหน่วยเป็นกรัม
- C_e เป็นความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร
- k เป็นค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับ
- $1/n$ เป็นค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ

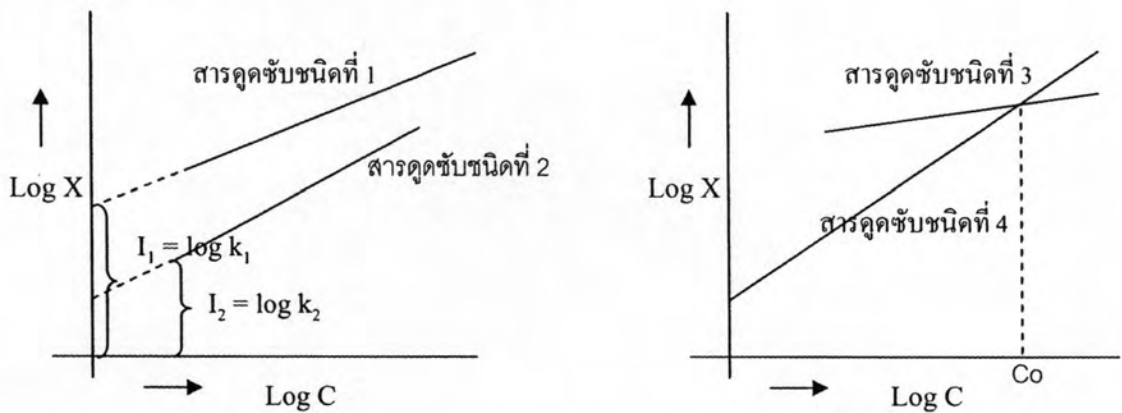
เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log \frac{X}{m}$ เป็นแกนตั้งกับ $\log C_e$ เป็นแกนนอนจะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง มีความชันเป็น $1/n$ ตัดแกนตั้งที่ $\log k$ เมื่อ $\log C_e = 0$ หรือ $C_e = 1$ (ภาพที่ 2.11)

ค่าความชัน ($1/n$) เป็นตัววัดความจุของการดูดติดผิว (Adsorption Capacity) โดย n มากกว่า 1 แสดงว่าสารดูดซับสามารถดูดติดสารถูกละลายได้ดี



ภาพที่ 2.11 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรอนด์ลิส

ประโยชน์ของค่าไอโซเทอมเป็นตัวชี้วัดว่าควรเลือกสารดูดติดชนิดใดจึงจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสิ่งปดอมปน หรือสารที่ต้องการกำจัดได้ดีกว่า ที่ความเข้มข้นของสารถูกละลายที่เท่ากัน ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน (ภาพที่ 2.12)

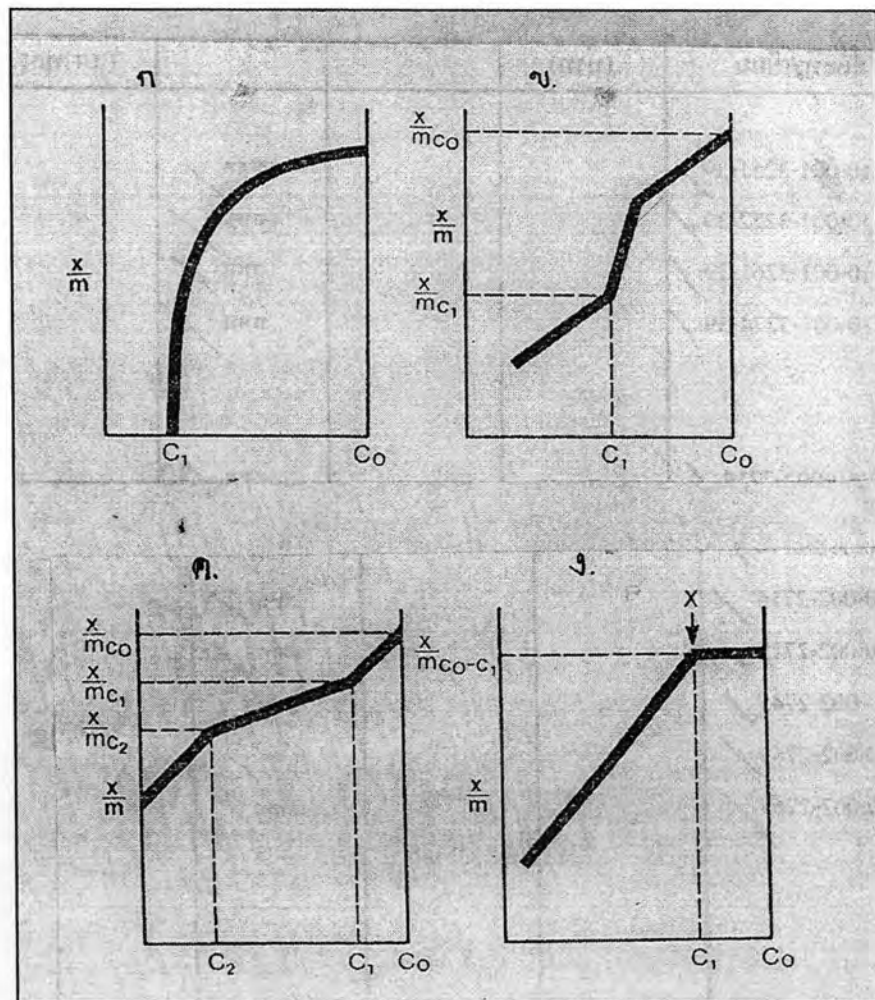


ภาพที่ 2.12 ไอโซเทอมกับประสิทธิภาพการดูดซับสารของถ่านกัมมันต์

ภาพที่ 2.12 สารดูดซับชนิดที่ 1 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารปดอมปนหรือสารถูกละลายได้มากกว่าสารดูดซับชนิดที่ 2 ที่ความเข้มข้นของตัวถูกละลายเท่ากัน เนื่องจากค่า $\log k$ มากกว่า หรือค่าไอโซเทอมมากกว่า ในทำนองเดียวกันสารดูดซับชนิดที่ 3 จะมีประสิทธิภาพดีกว่าสารดูดซับชนิดที่ 4 ที่ความเข้มข้นของสารถูกละลายที่ C_o แต่ถ้าความเข้มข้นของสารถูกละลายสูงกว่า C_o สารดูดซับชนิดที่ 4 จะมีประสิทธิภาพดีกว่าสารดูดซับชนิดที่ 3

2.5.4 ไอโซเทอมที่ไม่เป็นเส้นตรง (Nonlinear Isotherms)

โดยทั่วไปไอโซเทอมมักเป็นเส้นตรง มีโอกาสน้อยมากที่จะพบไอโซเทอมไม่เป็นเส้นตรง ซึ่งมีหลายแบบ เช่น แบบเส้นโค้ง (ภาพที่ 2.13(ก)) เป็นไอโซเทอมที่สารละลายที่นำมากำจัดมลสารมีสารอื่นที่ไม่สามารถดูดซับเป็นสารปนเปื้อนมาในสารละลาย ส่วนภาพ 2.13(ข) เป็นไอโซเทอมของสารละลายที่มีสารถูกดูดซับสองชนิดอยู่ด้วยกันซึ่งถูกดูดซับด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน ประสิทธิภาพการดูดซับต่างกัน สำหรับภาพที่ 2.13(ค) มีสารถูกดูดซับ 3 ชนิดผสมกัน และต่างถูกดูดซับด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน ภาพ 2.13(ง) มีสารถูกดูดซับต่างชนิดกันอยู่ในสารละลายเดียวกัน เช่น ดี และแต่ละสารถูกดูดซับด้วยอัตราเร็วเท่ากัน ไอโซเทอมจะเป็นเส้นตรง มีประสิทธิภาพสูงสุดที่จุด X ไอโซเทอมที่ไม่เป็นเส้นตรงชนิดต่างๆ (ภาพที่ 2.13)



ภาพที่ 2.13 ไอโซเทอมที่ไม่เป็นเส้นตรง

2.6 การฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้ว (Regeneration of Spent Activated Carbon)

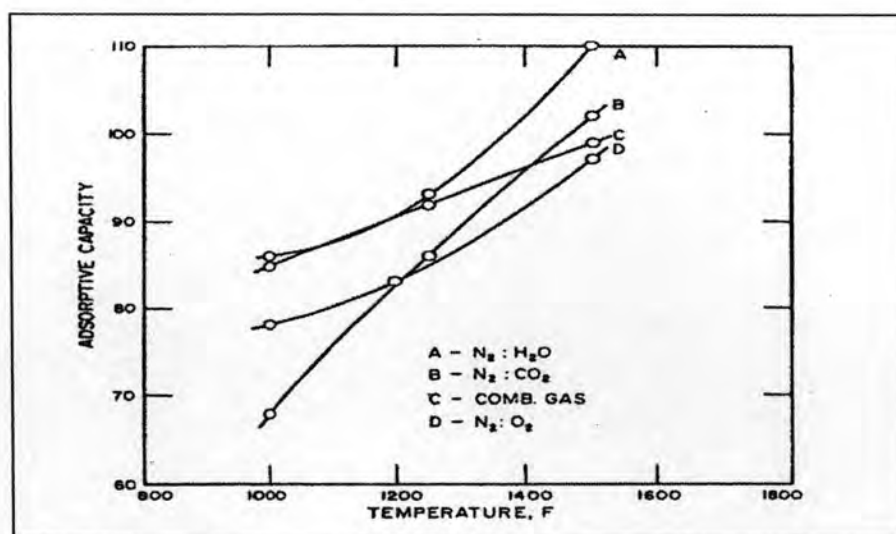
ถ่านกัมมันต์เมื่อใช้งานไประยะหนึ่ง ความสามารถในการดูดซับมลสาร หรือก๊าซ จะลดลงจนในที่สุดไม่สามารถดูดซับอีกต่อไป หากไม่มีการฟื้นฟูสภาพก็จะไม่สามารถดูดซับสารพิษอีกต่อไป

การฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วเพื่อให้ไอออนที่ถูกดูดซับไว้ที่ผิวและภายในโพรง หลุดออกมา และทำให้ถ่านกัมมันต์มีประจุอิสระที่ผิวเกิดขึ้นใหม่เพื่อให้มีอำนาจการดูดซับดั้งเดิม อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วไม่สามารถฟื้นฟูสภาพได้ร้อยละ 100 โดยทั่วไปเมื่อฟื้นฟูสภาพแล้วจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดอยู่ที่ร้อยละ 30-40

การฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วได้มีการทำและพัฒนามาแล้วร้อยกว่าปี โดยวิธีใช้ความร้อน ใช้สารเคมี ตัวทำละลาย วิธีสูญญากาศ วิธีทางชีววิทยา และวิธีเวท ออกซิเดชัน (wet oxidation) (Cheremisinoff, 1978)

2.6.1 การฟื้นฟูสภาพด้วยความร้อน (Thermal Regeneration)

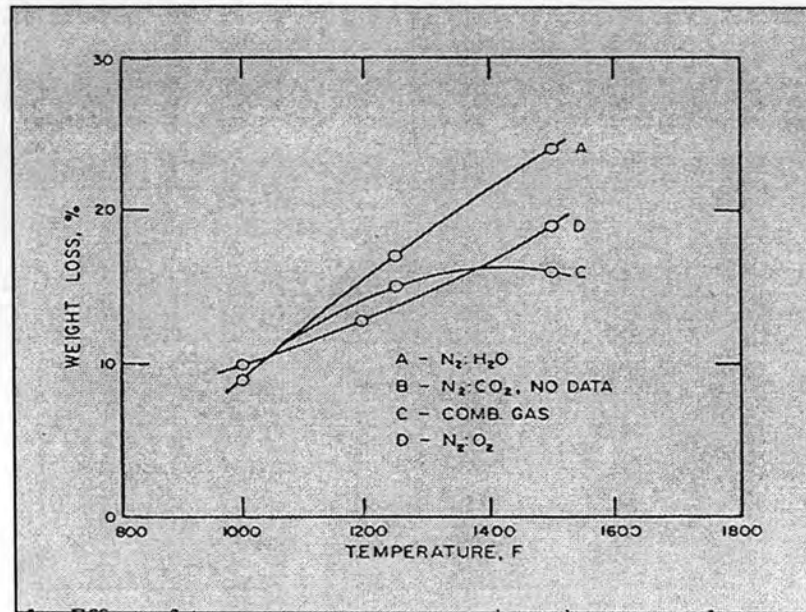
วิธีหนึ่งในการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วด้วยความร้อน คือวิธีฟลูอิดไbezเบด วิธีนี้มีข้อดีที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและความดันบรรยากาศได้และสามารถดำเนินการได้อย่างสะดวก และต่อเนื่อง วิธีนี้สัทธิภาพหรือความจุในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่นำมาฟื้นฟูสภาพจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการฟื้นฟูสภาพ (ภาพที่ 2.14)



ที่มา : Cheremisinoff, 1978: 883

ภาพที่ 2.14 อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วกับความจุในการดูดซับ

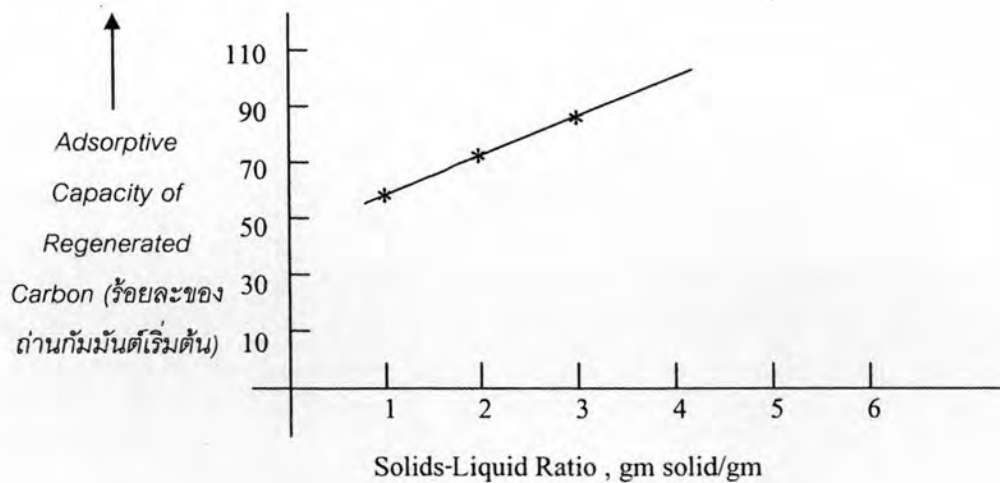
ในระหว่างการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วจะมีการสูญเสียน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (ภาพที่ 2.15)



ที่มา : Cheremisinoff, 1978: 883

ภาพที่ 2.15 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพสัมพันธ์กับปริมาณน้ำหนักสูญเสียของ ถ่านกัมมันต์

ความชื้นของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในกระบวนการฟื้นฟูสภาพมีผลต่อความจุของการดูดซับของถ่านกัมมันต์ภายหลังการฟื้นฟูสภาพ (ภาพที่ 2.16)



ภาพที่ 2.16 ผลของปริมาณความชื้นในถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วกับศักยภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์ภายหลังการฟื้นฟูสภาพแล้ว

2.6.2 การฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วด้วยวิธีทางเคมี (Regeneration of Spent Activated Carbon by Chemical Method)

การฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วด้วยวิธีทางเคมี โดยใช้สารเคมีประเภทลดแรงดึงผิว (surface active agent) สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ สารละลายของกรด ต่าง และเกลือ การเลือกใช้สารเคมีประเภทใดในการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุตั้งต้นที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์และชนิดสารที่ต้องการดูดซับ ซึ่งกลไกในการฟื้นฟูสภาพเกี่ยวข้องกับหลายปัจจัย เช่น อุณหภูมิ ความเข้มข้น ความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) ความสามารถละลายได้ของสารเคมีในการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ ความสามารถละลายของตัวถูกดูดซับในถ่านกัมมันต์ออกมาอยู่ในสารละลายของสารเคมีที่ทำหน้าที่ฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ และปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วที่นำมาฟื้นฟูสภาพ

เมื่อใช้สารเคมีเป็นตัวฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์แล้วจะต้องชะล้าง (rinse) สารเคมีที่เหลือค้างในถ่านกัมมันต์ให้สะอาดก่อนที่จะนำถ่านกัมมันต์นั้นไปใช้งานอีก และประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ในการกำจัดสารไม่พึงปรารถนาจะลดลง เนื่องจากการฟื้นฟูสภาพไม่สามารถทำได้ 100% การกินอำนาจทำได้บางส่วน (วารุณี สุภเสวตหิรัญ, 2542)

2.6.2.1 การฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วด้วยสารละลายกรด

สารละลายประเภทกรดอ่อน ทั้งกรดอินทรีย์และอนินทรีย์ (กรดแร่ หรือ mineral acids) จะมีประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ได้ดีกว่ากรดแก่ (มันสิน ดัณฑุลเวศม์, 2538 : หน้า 104) กรดอินทรีย์ที่นิยมใช้ เช่น กรดอะซิติก (acetic acid) กรดฟอร์มิก (formic acid) กรดอนินทรีย์ เช่น กรดกำมะถัน (sulfuric acid) กรดเกลือ (hydrochloric acid) กรดฟอสฟอริก (phosphoric acid) กรดไนตริก (nitric acid) ความเข้มข้นของกรดที่ใช้จะใช้ที่ความเข้มข้นต่ำ ๆ ปกติ นิยมใช้อยู่ระหว่างความเข้มข้นร้อยละ 5-35 แต่อาจสูงกว่านี้แล้วแต่กรณี (วารุณี สุภเสวตหิรัญ, 2542 : 23-29) การล้างด้วยกรดอ่อนๆ จะทำหลาย ๆ รอบ (cycle)

2.6.2.2 การฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วด้วยสารละลายของด่าง

สารละลายประเภทด่างอ่อนจะมีประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ได้ดีกว่าสารละลายของด่างแก่ (มันสิน ดัณฑุลเวศม์, 2538: 104) สารละลายด่างที่นิยมใช้ ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพตัสเซียมไฮดรอกไซด์ อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นของสารละลาย

ค่าที่ใช้จะอยู่ระหว่างร้อยละ 5-20 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิที่ใช้อยู่ระหว่าง 25-90 องศาเซลเซียส (วารุณี ศุภเสวตหิรัญ, 2542 :25-26)

2.6.2.3 การฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วด้วยสารละลายอินทรีย์

สารละลายอินทรีย์ที่นิยมใช้ในการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ขึ้นกับว่าถ่านกัมมันต์นั้นได้ผ่านการใช้งานในการดูดซับสารใดมาแล้ว เช่น ใช้สารละลายของฟอร์มัลดีไฮด์(formaldehyde) ในการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้ดูดซับกรดฟอร์มิก การใช้คาร์บอนไดซัลไฟด์ในการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้ดูดซับไอพิษและอากาศเสียในอุตสาหกรรมการผลิตถาวร นอกจากนี้สารละลายของอะซีโตนและไดคลอโรอีเทน เบนซีน โทลูอิน พาราไซลีน ออโรไซลีน เมตะไซลีน และนอลมอลเฮปเทน ก็นิยมนำมาใช้ฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้ว

2.7 กระดูกสัตว์และถ่านกัมมันต์จากกระดูกสัตว์

2.7.1 ประวัติและประโยชน์ของถ่านกระดูก (History and Uses of bone char)(Ebonex corporation, 2004)

มนุษย์รู้จักการใช้ประโยชน์จากกระดูกสัตว์มากกว่า 2,650 ปี ก่อนคริสตกาลใช้ถ่านกระดูกเป็นสีย้อม สีทาผนังหลุมฝังศพของกษัตริย์อียิปต์ ระหว่างคริสต์ศตวรรษที่ 18 ราชวงศ์ในริเบตใช้ถ่านกระดูกผสมกับกาวทำเป็นสีทา ในเวลาต่อมานำถ่านกระดูกมาผลิตยารักษาความเจ็บป่วยและรักษาโรค เช่น ยารักษาโรคลมบ้าหมู โรคระบาดในสัตว์ (anthrax) แผลเน่าเปื่อย และยาล้างปาก

ปี 1790 ใช้ถ่านกระดูกในการฟอกสีชา ฟอกสีน้ำตาลในอุตสาหกรรม ฟอกสีไวน์ เวนิกาและ เครื่องดื่ม นายปาเยนและลูกชาย และนายพลูวีนท (Payen and Sons, and Pluvinet) นำถ่านกระดูกมาฟอกสีน้ำตาลในอุตสาหกรรมเป็นครั้งแรก

นอกจากนี้ชาวพื้นเมืองอเมริกัน ยังพบว่ากระดูกควายอเมริกันไบสัน มีประโยชน์มาก เป็นปุ๋ยอย่างดีสำหรับพืช

ในปี 1885-1889 มีการนำกระดูกควาย โดยเฉพาะตรงส่วนกระดูกสันหลังมาขายในเชิงพาณิชย์ ในหลายรัฐของสหรัฐอเมริกา ต่อมาช่วงปลายปี 1889 ถึงต้นปี 1890 กระดูกควายหายากขาดตลาด จึงมีการค้นหาใช้วัสดุอื่นทดแทนถ่านกระดูก เช่น หินฟอสเฟต , indian burial grounds อย่างไรก็ตามไม่นิยมใช้กระดูกมนุษย์มาผลิตเป็นถ่านกระดูก

บริษัทมิซิแกน คาร์บอนเวอร์ค เป็นผู้ก่อตั้งและผลิตถ่านกระดูกในเชิงการค้าเป็นอุตสาหกรรมสำหรับการฟอกสีและทำน้ำตาลให้บริสุทธิ์ กิจการได้เติบโตอย่างมาก ความต้องการถ่านกระดูกมีมาก ต่อมาปี 1896 เกิดวิกฤตของกระดูกวัว ควาย ขาดแคลน เนื่องจากความต้องการมีมาก จึงมีการหาวัสดุอื่นแทนโดยใช้หินฟอสเฟตจำนวนมากผลิตผงถ่านดำ (bone black dust) ที่มีความละเอียดมากสำหรับอุตสาหกรรมน้ำตาล

ในปี 1920 ถ่านกระดูกรู้จักกันดีว่าเป็นสารให้สีดำ (bone black pigment) และเติบโตต่อไปเป็นอุตสาหกรรมผลิตสารให้สี (pigment) ซึ่งสามารถนำสารสีดำนี้ไปผลิตหมึกดำอินเดียอิงค์ เครื่องสำอางเช่น มาสคาร่า สีทา วานิช

ปัจจุบันนี้นิยมใช้ถ่านกระดูกเป็นสารดูดซับในการแยกโปรตีน เอ็นไซม์ ยาปฏิชีวนะ และกรดนิวคลีอิก และเป็นสารให้สี

2.7.2 องค์ประกอบของกระดูกสัตว์และถ่านกระดูก (Characteristic of Bone and Bone Char)

กระดูกสัตว์มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์หรือไตรแคลเซียม ฟอสเฟต ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) สารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทาร์ น้ำมันและไขมัน แคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมซัลเฟต และสารอื่น ๆ อีกเล็กน้อย อัตราส่วนของแคลเซียมต่อฟอสฟอรัส (Ca/P) เท่ากับ 1.67 องค์ประกอบทางเคมีและทางกายภาพของกระดูกวัวควายเผาที่ 700 องศาเซลเซียสในสภาพมีออกซิเจน (ตารางที่ 2.3) (วรรณ โฆสิตะมงคล, 2538) องค์ประกอบของถ่านกระดูกเปลี่ยนแปลงได้ตามสภาวะการเตรียม เช่น อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจน การกระตุ้นด้วยกรด ต่าง เกือบ ถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นจะมีอัตราส่วนของแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกระดูกที่ยังไม่ถูกกระตุ้น (สุชาดา, 2547) องค์ประกอบทางเคมีและทางกายภาพของถ่านกระดูกวัว ควาย (ตารางที่ 2.3) และองค์ประกอบของถ่านกระดูกสัตว์ทางการค้าที่ชื่อ Brimac 216 (ตารางที่ 2.4)

เนื่องจากองค์ประกอบของกระดูกสัตว์ที่มีส่วนที่เป็นทั้งขี้บวกและขี้ลอบอยู่ในตัว จึงทำให้ถ่านกระดูกสัตว์และถ่านกัมมันต์จากกระดูกสัตว์มีคุณสมบัติพิเศษแตกต่างจากถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากวัสดุอื่นที่สามารถกำจัดสารที่มีขี้หรือประจุชนิดโคชนิดหนึ่งแต่เพียงประเภทเดียว(สุชาดา, 2547) สารดูดซับที่เตรียมจากกระดูกสัตว์จึงมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดทั้งไอออนบวก(Biomin, 2004; Ko และคณะ, 2004; สุชาดา, 2547; จักรพงษ์, 2548) และไอออนลบ(Brown และคณะ, 1992; Phatumvanit และ Legeros, 1997; Cheung และคณะ, 2001; Pulford, 2001; Mjengera และ Mkongo, 2003; มณฑล, 2542; อุบลรัตน์, 2544; ศุภกิจ, 2545)

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีและทางกายภาพของถ่านกระดูกวัวควาย

องค์ประกอบทางเคมี(%)		ลักษณะทางกายภาพ	
แคลเซียม	38.7	ความหนาแน่น(กรัม/ม ³)	3.1341
ฟอสฟอรัส	18.1	การดูดซับน้ำ(%)	3.40
อัตราส่วนแคลเซียม ต่อฟอสฟอรัส (Ca/P)	1.65 : 1	ความต้านทานแรงอัด	218+36
แมกนีเซียม	0.616	สัมประสิทธิ์การกระจายตัวทางความร้อนที่ (27-1200°C)/ 10 ⁻⁶ K ⁻¹	14.12
เหล็ก (พีพีเอ็ม)	59.0	ความพรุนปรากฏ(%)	10.00
สังกะสี (พีพีเอ็ม)	168.5	พื้นที่ผิวจำเพาะ(ม ² /กรัม)	6.7474
ทองแดง (พีพีเอ็ม)	น้อยกว่า 1		
แมงกานีส (พีพีเอ็ม)	น้อยกว่า 1		
แคลเซียม (พีพีเอ็ม)	น้อยกว่า 0.001		
ตะกั่ว (พีพีเอ็ม)	น้อยกว่า 0.001		
ปรอท (พีพีเอ็ม)	น้อยกว่า 0.001		

ที่มา : วรณา โฉมิตะมงคล, 2538)

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบของถ่านกระดูกที่ใช้ชื่อทางการค้า Brimac 216

องค์ประกอบ/คุณสมบัติ	ปริมาณ
คาร์บอน (Carbon)	9-11%
เถ้าไม่ละลายในกรด (Acid insoluble ash)	ไม่เกิน 3%
ความชื้น (Moisture)	ไม่เกิน 5%
ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite)	70-76%
แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate)	7-9%
แคลเซียมซัลเฟต (Calcium Sulphate)	0.1-0.2%
พื้นที่ผิวทั้งหมด (Total surface area)	50 ตารางเมตรต่อกรัม (m ² /gm)

ตารางที่ 2.4(ต่อ) องค์ประกอบของถ่านกระดูกที่ใช้ชื่อทางการค้า Brimac 216

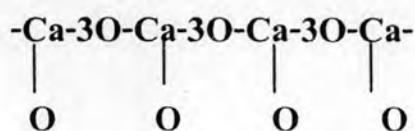
องค์ประกอบ/คุณสมบัติ	ปริมาณ
ปริมาณเหล็ก (คิดในรูปเหล็กออกไซด์ : Fe ₂ O ₃)	น้อยกว่า 0.3%
การกระจายตัวของโพรง (Pore size distribution)	7.5-60,000 นาโนเมตร (nm)
ปริมาตรของโพรง (Pore Volume)	0.225 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม (cm ³ /gm)
ความหนาแน่น (Bulk density)	640 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m ³) หรือ 40 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต (lb/ft ³)

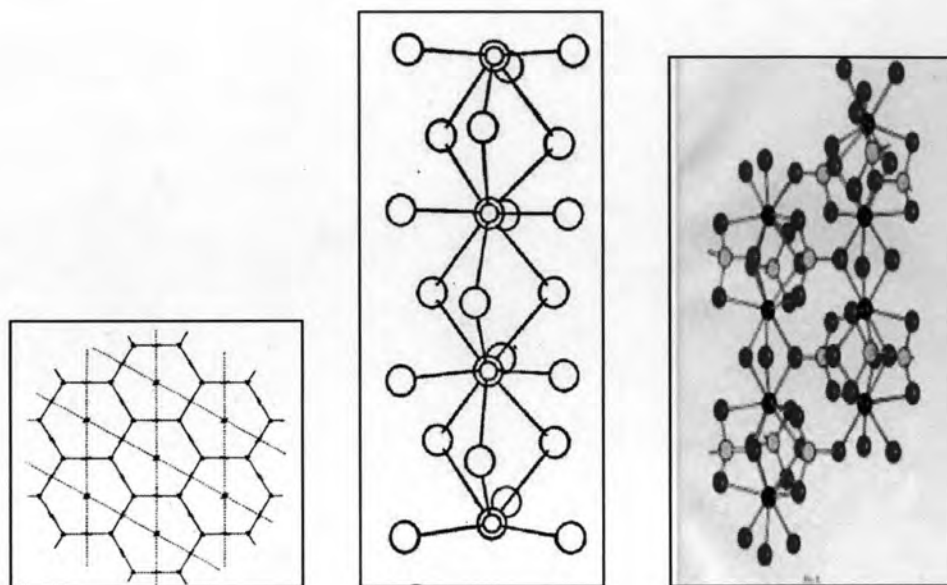
ที่มา : Irvine และ Knowles, 1997 อังโบลรัตน์ วาริวัฒนะ, 2544: 34

2.7.3 โครงสร้างของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์

Beevers (1945)(<http://www.admcintyre.pwp.blueyonder.co.uk>) ได้ศึกษาโครงสร้างอะตอมของแร่ฟลูออโรอะพาไทต์เปรียบเทียบกับโครงสร้างอะตอมของหินและวัสดุประเภทกระดูก โดยการวิเคราะห์ผลึกด้วยเอกซเรย์(X-ray crystal analysis) พบว่ากระดูกมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ Ca₅OH(PO₄)₃ มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนัล(hexagonal)) มีมิติของผลึกดังนี้คือ ด้าน a และด้าน b เท่ากันยาว 9.4180 อังสตรอม ด้าน c ยาว 6.8840 อังสตรอม มุมของผลึกรูปหกเหลี่ยมคือ มุมเอลฟาและเบตามีขนาด 90.0 องศา มุมแกมมามีขนาด 120.0 องศา และมีโครงสร้างผลึกใกล้เคียงกันมากกับโครงสร้างผลึกแร่ฟลูออโรอะพาไทต์(mineral fluor-apatite : Ca₅F(PO₄)₃ ซึ่งมีมิติของผลึกด้านทั้งสามดังนี้ ด้าน a และด้าน b เท่ากันยาว 9.4100 อังสตรอม ด้าน c ยาว 6.8800 อังสตรอม มีความสมมาตรของแกนตามแนวตั้ง(vertical symmetry-axes) และตามแนวที่ลากผ่านจุดกึ่งกลางของด้านหกเหลี่ยมอีกสี่ด้าน ภาพมองด้านตรง(ภาพที่ 2.17) และภาพภาคตัดขวาง(ภาพที่ 2.18)

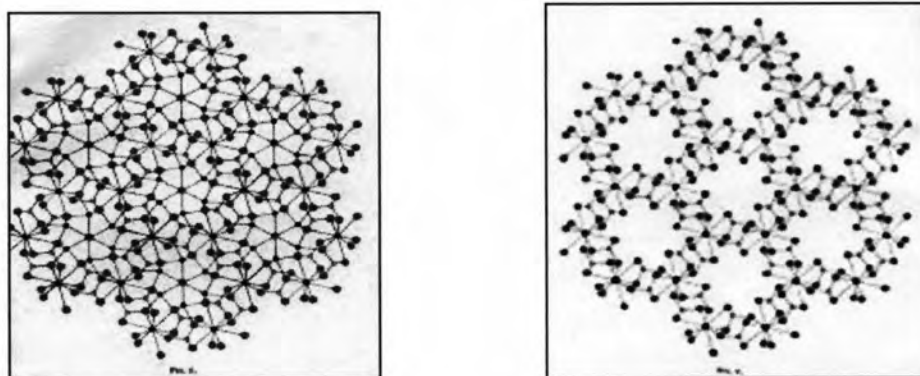
โครงสร้างของผลึกแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์มีอะตอมแคลเซียมแต่ละอะตอมจับกับ 9 อะตอมของออกซิเจนตามแนวระนาบ 3 อะตอม ข้างบน 3 อะตอม ข้างล่าง 3 อะตอมเขียนแผนการจัดเรียงอะตอมได้ดังนี้





ที่มา : <http://www.admcintyre.pwp.blueyonder.co.uk>

ภาพที่ 2.17 โครงสร้างของแกละเชื่อมไฮดรอกซีอะพาไทต์



ที่มา : <http://www.admcintyre.pwp.blueyonder.co.uk>

ภาพที่ 2.18 โครงสร้างของแกละเชื่อมไฮดรอกซีอะพาไทต์ (มุมมองด้านบน)

2.7.4 การเตรียมถ่านกระดูก (Bone char preparation)

การเตรียมถ่านกระดูก โดยทั่วไปเตรียมได้ 3 สภาวะ คือการเผาโดยใช้ออกซิเจน การเผาโดยจำกัดออกซิเจน(carbonization) และการเผาโดยไม่ใช้ออกซิเจน(สุษาคา สุทธิพิบูลย์, 2547)

2.7.4.1 สภาวะที่เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์



2.7.4.2 สภาวะที่เกิดการเผาไหม้แบบจำกัดออกซิเจน



2.7.4.3 สภาวะที่เกิดการเผาไหม้แบบไม่มีออกซิเจน



เพชร เฟ็งซัย (2004) ได้สรุปสภาวะการเตรียมถ่านกระดูกชนิดผงและชนิดเม็ดว่าการเตรียมถ่านกระดูกชนิดผงใช้อุณหภูมิต่ำกว่าการเตรียมถ่านกระดูกชนิดเกล็ด ชนิดผงเผาที่อุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส ชนิดเกล็ดเผาที่อุณหภูมิ 750-950 องศาเซลเซียส

ถ่านกระดูกชนิดผง



ถ่านกระดูกชนิดเกล็ด



Takahashi และคณะ (2003) คณะสัตวศาสตร์ มหาวิทยาลัยโอบิชิโร ประเทศญี่ปุ่นได้ศึกษานวัตกรรมผลิตสารดูดติดผิวถ่านกระดูกที่มีคุณภาพสูง จากซากวัวที่ไม่ได้มาตรฐานการตรวจสอบของ บีเอสอี(not submitted to BSE inspections) ด้วยหลักการการผลิตแบบคาร์บอนในเซชันที่ไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic carbonization) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส โดยไม่ให้เกิดไอของฟอสฟอรัสและควบคุมการเพิ่มพื้นที่ผิวของถ่านให้มีพื้นที่ผิวพอเหมาะตามต้องการและควบคุมฟอสฟอรัสให้อยู่ในรูปไฮไดรไรด์(hydrides)

ข้อควรระมัดระวังในการเตรียมถ่านกระดูกในการกำจัดแคทไอออน หรือ แอนไอออน คือ ที่อุณหภูมิสูงเกินไป (สูงกว่า 600 องศาเซลเซียส) จะไปทำลายโครงสร้างของอะพาไทต์ เกิดเป็นถ่านกระดูกที่มีสีเทาอ่อนข้างขาวที่เรียก "ไวท์ชาร์" (white char) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดสาร

ไม่พึงประสงค์ได้ต่ำกว่าถ่านดำ (black char) โดยมีการศึกษาวิจัย* ที่ตรงกันในเรื่องนี้ทั้งเอกสารทางวิชาการและจากสื่ออิเล็กทรอนิกส์

2.7.5 ประโยชน์ของถ่านกระดูกในด้านสิ่งแวดล้อม

- (1) ใช้กำจัดโลหะหนักในน้ำเสียและในดิน เช่น กำจัด ตะกั่ว แคดเมียม สังกะสี ทองแดง โครเมียม ปรอท นิกเกิล เหล็ก เป็นต้น
- (2) กำจัดสารกัมมันตภาพรังสีในดิน เช่น พลูโตเนียม ยูเรเนียม
- (3) กำจัดฟลูออไรด์ในแหล่งน้ำธรรมชาติและการทำน้ำดื่ม
- (4) ฟอกสีในน้ำเสีย
- (5) บำรุงชีวภาพในการเกษตร
- (6) อาหารเสริมสำหรับเลี้ยงสัตว์
- (7) สารปรับปรุงคุณสมบัติของดิน

2.7.6 หมูและกระดูกหมู (Swine and Bone of Swine)

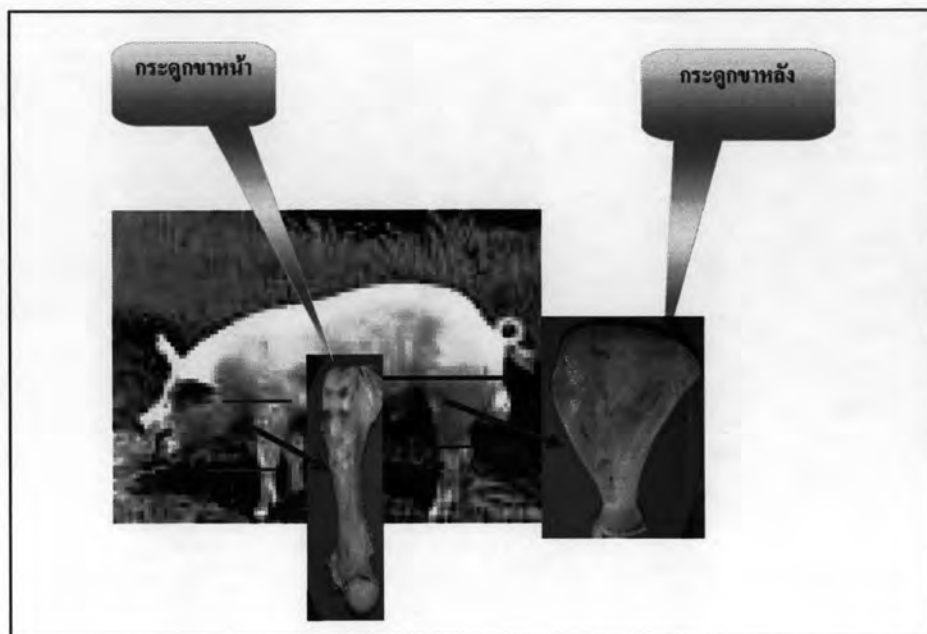
ประมาณการปริมาณกระดูกหมูที่สามารถนำมาเตรียมสารดูดซับต่อปี ปี 2548 มีการเลี้ยงหมูทั่วประเทศรวม 8,174,526 ตัว หมูหนึ่งตัวจะต้องเลี้ยงนาน 5-6 เดือนจึงจะมีน้ำหนักประมาณ 90-100 กิโลกรัม(กรมปศุสัตว์, 2549)และนำไปขาย กระดูกหมูที่นำมาเตรียมสารดูดซับสำหรับงานวิจัยนี้คือกระดูกขาทั้งสี่ข้างตรงส่วนที่ติดกับลำตัว(ภาพที่ 2.19) มีน้ำหนักรวมประมาณ 1.6-1.8 กิโลกรัมต่อหมูหนึ่งตัว คิดเป็นน้ำหนักกระดูกหมูส่วนที่นำมาเตรียมสารดูดซับได้ประมาณ 13,000 - 15,000 ตันต่อปี

* Tanzania : Challenges and Successes of water defluoridation, 2004,

<http://www.scienceinAfrica.co.za/2004/july/fluoride.htm>. (11 ธันวาคม 2547)

Phatumvanit P และ Legeros RZ, 1997. ศึกษาการใช้ถ่านกระดูกกำจัดฟลูออไรด์ในน้ำธรรมชาติในประเทศไทย

มณฑล กงปิ่น, 2542. การกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำบริโภค. อุบลรัตน์ วิริชวัฒน์, 2544. การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้ถ่านกระดูก. และ สุภกิจ พัฒนเดชะ, 2545. การใช้ถ่านกระดูกกำจัดตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสีย



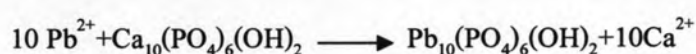
ภาพที่ 2.19 กระดูกขาหน้าและกระดูกขาหลังของหมูที่นำมาเตรียมสารดูดซับ

2.8 การทบทวนวรรณกรรม (Review Literature)

2.8.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์จากกระดูกและถ่านกระดูกสัตว์ในด้าน สิ่งแวดล้อม

Biomin ร่วมกับมหาวิทยาลัยเวอร์จิเนีย (www.biomininc.com) ได้ศึกษาวิจัยนำถ่านกระดูก (bone char) เป็นสารดูดติดผิวในการกำจัดโลหะหนักเปรียบเทียบกับสารดูดซับซีโอไลต์ (zeolite) และดินเหนียวอินทรีย์ออยซอร์บ (oil sorb organoclay) ในการดูดซับโลหะแคดเมียม ทองแดง นิกเกิล สังกะสี ตะกั่ว และโครเมียม (Cr^{+3}) พบว่า ถ่านกระดูกมีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดโลหะดังกล่าว คือ สามารถกำจัดโลหะทั้ง 6 ชนิดในปริมาณสูงสุดต่อน้ำหนักของสารดูดซับ (Biomin, State of the Art Water Filtration Media, 11 Dec 2004, www.biomininc.com) (ตารางที่ 2.5- ตารางที่ 2.6)

การกำจัดโลหะหนักของถ่านกระดูกเกิดจากการทำปฏิกิริยาของโลหะไอออนกับแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ เกิดเป็นโลหะไฮดรอกซีอะพาไทต์ตามสมการ โลหะคือตะกั่วจะเข้าแทนที่แคลเซียมในโครงสร้างของกระดูก



ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบการกำจัดโลหะหนักของถ่านกระดูกสัตว์ ซีโอไลท์ และดินเหนียวอินทรีย์
ออยล์ซอร์บในสารละลายที่มีโลหะหนักหกชนิดผสมกัน

ชนิดสารดูดซับ	สารดูดซับ : โลหะหนัก (ร้อยละของน้ำหนักของสารดูดซับ)						รวม
	แคดเมียม (Cd)	โครเมียม (Cr ³⁺)	ทองแดง (Cu)	นิกเกิล (Ni)	สังกะสี (Zn)	ตะกั่ว (Pb)	
ถ่านกระดูกสัตว์	0.53	1.54	1.11	0.18	0.41	0.41	4.37
ซีโอไลท์	0.08	0.14	0.30	0.23	0.104	0.05	0.067
ดินเหนียวอินทรีย์ออยล์ซอร์บ	0.004	0.02	0.01	0.002	0.003	0.01	0.04

ที่มา : www.biomininc.com (11 ธันวาคม 2547)

ผลการทดลองในตารางที่ 2.5 มาจากการทดลองของมหาวิทยาลัยเวอร์จิเนีย เพื่อหา
ความจุ (capacity) ของสารดูดซับแต่ละชนิดในการดูดซับโลหะหนัก โดยวิธีแลกเปลี่ยนไอออน (ion
exchange) โดยโลหะทั้ง 6 ชนิดผสมกันและละลายจนอิ่มตัวในน้ำแล้วผ่านน้ำนี้ไปยังคอลัมน์ที่มีสาร
ดูดซับแต่ละชนิด

ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบการกำจัดโลหะหนักของถ่านกระดูกสัตว์ ซีโอไลท์และดินอินทรีย์
(ออยล์ซอร์บ)ในสารละลายของโลหะแต่ละชนิด

ชนิดสารดูดซับ	ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับ (ร้อยละของน้ำหนักของสารดูดซับ)						
	แคดเมียม (Cd)	โครเมียม (Cr ³⁺)	ทองแดง (Cu)	นิกเกิล (Ni)	สังกะสี (Zn)	ตะกั่ว (Pb)	เหล็ก (Fe)
ถ่านกระดูกสัตว์	6.4	1.45	4.25	1.0	2.90	6.82	1.70
ซีโอไลท์	4.79	0.12	1.64	0.17	0.90	4.79	0.60
ออยล์ซอร์บ	0.08	0.03	0.06	0.06	0.06	0.23	0.14

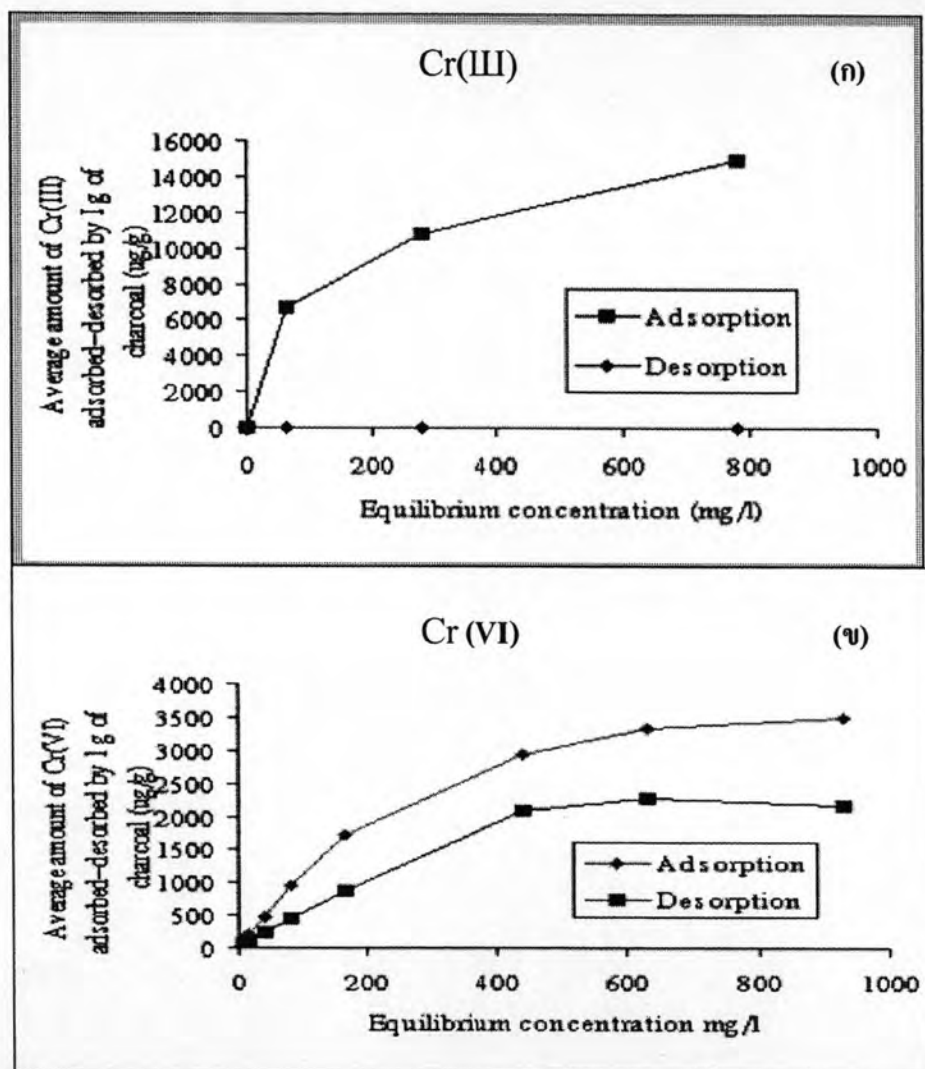
ที่มา : www.biomininc.com (11 ธันวาคม 2547)

ตารางที่ 2.6 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะแต่ละชนิดของถ่านกระดูกโดยใช้สารละลาย
ของโลหะแต่ละชนิดผ่านไปยังคอลัมน์ที่บรรจุสารดูดซับแต่ละชนิด

จะเห็นว่าถ่านกระดูกมีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดโลหะทั้ง 7 ชนิดทั้งการทดลอง
กำจัดโลหะหนักแยกชนิดและการรวมโลหะทั้ง 6 ชนิดในสารละลายเดียวกันแล้วผ่านไปยังคอลัมน์ที่

บรรจุสารดูดซับ รวมทั้งในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เป็นน้ำกระด้างแล้วผ่านสารละลายโลหะหนักแต่ละตัว ผ่านคอลัมน์บรรจุถ่านกระดูก

Pulford (2001) ได้ศึกษาการดูดซับโครเมียม ไอออน 2 ชนิด Chromium(III) และ Chromium (VI) โดยใช้สารดูดซับประเภทถ่านกระดูกจากธรรมชาติ (natural bone charcoal) และพบว่า Chromium (VI) ถูกดูดซับได้ไม่ดีและหลุดออกจากสารดูดซับได้ง่ายกว่า Chromium(III) ผลการทดลอง ภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 ผลการศึกษาการดูดซับโครเมียม ไอออน Chromium (III) (ก) และไอออน Chromium (VI)(ข) ด้วยถ่านกระดูกจากธรรมชาติ

Ko และคณะ (2004) มหาวิทยาลัยฮ่องกง ประเทศฮ่องกง ได้ศึกษาการกำจัดไอออนแคดเมียม ทองแดง และสังกะสีในน้ำเสียด้วยถ่านกระดูก และศึกษาระบบสมดุลของไอโซเทอมแบบแลงมัวร์และแบบซิปส์ (Sips Isotherm) พบว่าไอโซเทอมแบบซิปส์เหมาะสมกว่าการอธิบายด้วยไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ โดยนำค่าความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองของไอออนโลหะแต่ละคู่มาวิเคราะห์ร่วมกับสมการไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ คือ Cu-Zn Cu-Cd และ Cd-Zn binary equilibrium experimental dat

Mouflih, Aklil and Sebti (2004) ศึกษาการใช้สารดูดซับตัวใหม่คือฟอสเฟตที่ถูกกระตุ้น (Activated Phosphate: AP) ในการกำจัดสารตะกั่วในสารละลาย โดยศึกษาเปรียบเทียบกับสารดูดซับฟอสเฟตที่ได้จากธรรมชาติ(Natural Phosphate: NP) พบว่าการกำจัดตะกั่วถึงสภาวะสมดุลใน 3 ชั่วโมงและ 1 ชั่วโมงตามลำดับที่ พีเอช 2-6 และพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วได้สูงสุดที่ พีเอช 2-3 สำหรับNP. และที่ พีเอช 3-4 สำหรับ AP. โดยสามารถกำจัดตะกั่วได้ 115.34 และ155.04 มิลลิกรัม ต่อ 1 กรัมสารดูดซับ ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ไอโซเทอมการดูดซับเป็นแบบแลงมัวร์

Mjengera and Mkongo (2003) ประเทศแทนซาเนีย ได้ศึกษาการกำจัดสารฟลูออไรด์ในน้ำใต้ดินและน้ำผิวดินด้วยถ่านกระดูกร่วมกับวิธีใช้สารส้มและปูนขาวโดยการใช้คอลัมน์ พบว่าสามารถกำจัดสารฟลูออไรด์เหลือ 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตรจากความเข้มข้นของสารฟลูออไรด์เริ่มต้น 12.0 มิลลิกรัมต่อลิตรร่วมกับการใช้สารส้มและปูนขาวในปริมาณมากเกินไป และสรุปผลจากการศึกษาว่าวิธีนี้เหมาะสมกับพื้นที่ของประเทศแทนซาเนียที่มีน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินที่มีสารฟลูออไรด์ในปริมาณสูง ทั้งเป็นวิธีที่ง่าย ราคาถูก และหาวัสดุได้ง่าย

Cheung และคณะ (2001) มหาวิทยาลัยฮ่องกง ได้ศึกษาสมดุลของการดูดติดผิวและจลศาสตร์ของแคดเมียมไอออนในสารละลายโดยใช้ถ่านกระดูก พบว่า ไอโซเทอมการดูดติดผิวเป็นแบบแลงมัวร์และไบ-แลงมัวร์ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นมาอธิบายกลไกการดูดติดผิวและจลศาสตร์ของแคดเมียมไอออนบนถ่านกระดูก กลไกที่เกี่ยวข้องคือการแลกเปลี่ยนไอออน(ion exchange) การดูดติดผิวทางกายภาพ(physical adsorption)บนผิวที่ต่างกัน ดังนั้นจึงเอาโมเดลไบ-แลงมัวร์มาอธิบายจะเหมาะสมกว่า อัตราการกำจัดไอออนแคดเมียมขึ้นกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแคดเมียมและปริมาณถ่านกระดูกที่ใช้

Dahbi, Azzi and Guardia (1999) ได้ศึกษาการใช้ถ่านกระดูกกำจัดโครเมียมในรูป Cr^{+6} ด้วยการกระตุ้นด้วยกรดและด่างเปรียบเทียบกับสารดูดซับของถ่านกระดูกที่ไม่ผ่านกระตุ้น พบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลาย Cr^{+6} ระหว่าง 5-25 มิลลิกรัมต่อลิตรและที่พีเอชเท่ากับ 1 สามารถกำจัด

โครเมียมได้มากกว่าร้อยละ 90 โดยใช้เวลาสัมผัส 30 นาที ใช้ถ่าน 2 กรัม ส่วนการกระตุ้นด้วยกรดหรือด่างไม่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม Cr^{+6}

Sameer, Fawzi and Fadel (1998) มหาวิทยาลัยจอร์แดนได้ค้นพบสารดูดซับตัวใหม่จากกระดูกสัตว์ที่ใช้งานแล้วจากร้านขายเนื้อสัตว์ นำมาล้างทำความสะอาดและอบที่ 80 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง พบว่าสามารถกำจัดทองแดงและนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 10-100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 0.325 และ 0.123 มิลลิโมลต่อกรัม ตามลำดับ โดยสามารถกำจัดโลหะทั้งสองได้ร้อยละ 86.7 และ 31.8 ตามลำดับ และพบว่าเมื่อปริมาณสารดูดซับเพิ่มขึ้นจะสามารถกำจัดโลหะทั้งสองได้ปริมาณมากขึ้น สามารถกำจัดทองแดงได้จนกระทั่งเหลือปริมาณทองแดงน้อยกว่าปริมาณที่ควบคุมตามกฎหมายสิ่งแวดล้อม ไอโซเทอมของการกำจัดทองแดงและนิกเกิลเป็นแบบฟรอนติคซ์ Irvine และ Knowles (1997) ได้ศึกษาการกำจัดโลหะหลายชนิด เช่น สังกะสี ทองแดง นิกเกิล โครเมียม ตะกั่วและอลูมิเนียมด้วยถ่านกระดูก พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดเป็นร้อยละ 73.91, มากกว่า 78.57, มากกว่า 96.84, 41.86, 66.67 และ 70 ตามลำดับ ที่ระดับความเข้มข้นของสารเริ่มต้นที่ 0.023, 0.014, 0.095, 0.086, 0.015 และ 2.8 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

Maycock, Ulan and Moser (1996) ได้ทดลองใช้ถ่านกระดูกกำจัดอลูมิเนียม ตะกั่ว แมงกานีส และนิกเกิลในน้ำเกลือโดยใช้น้ำเกลือ 100 มิลลิลิตร ผสมกับถ่านกระดูก 1.5 กรัม ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 70 ชั่วโมง พบว่าสามารถกำจัดโลหะดังกล่าวได้แม้ความเข้มข้นของน้ำเกลือจะเพิ่มสูงขึ้นก็ไม่กระทบต่อการ ดูดซับโลหะ

Traina และคณะ (1993). ได้ศึกษาพบว่าไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นสารตกตะกอนชนิดหนึ่งซึ่งสามารถจับไอออนของตะกั่วและเกิดการตกตะกอนเป็นเลดไฮดรอกซีอะพาไทต์ตามสมการปฏิกิริยาในกระบวนการเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ทั้งนี้พีเอชเป็นปัจจัยสำคัญที่จะต้องควบคุมให้ต่ำมากเพียงพอที่จะละลายอะพาไทต์ คือ พีเอช (5-6) แต่จะต้องไม่ต่ำมากจนไปยับยั้งการเกิดไฮดรอกซีไพโรมอร์ไฟท์ (hydroxyl-pyromorphite) (Review Paper Environment)

<http://www.perebar.bam.dc/Pereopen/pdf> (12 ธันวาคม 2547)



และยังพบว่าไฮดรอกซีอะพาไทต์สามารถตกตะกอนโลหะอื่นๆ หรือใช้ในการกำจัดโลหะอื่น เช่น อลูมิเนียม ทองแดง แคลเซียม สังกะสี และเหล็กได้ด้วย

Brown และคณะ (1992) ได้ศึกษาการใช้ถ่านไม้ ถ่านลิกไนต์ ถ่านกระดูกสัตว์และถ่านกัมมันต์ ชนิดต่าง ๆ 17 ชนิด ในการกำจัดแคดเมียม ทองแดงและตะกั่ว ในน้ำเสียพบว่าถ่านกระดูกมีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการกำจัดแคดเมียมปริมาณมากกว่า 100 กรัมต่อถ่านกระดูก 1 กิโลกรัม

Azab and Peterson (1989) ได้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมโดยใช้สารดูดติดผิวทางชีวภาพชนิดต่าง ๆ รวมทั้งกระดูกสัตว์ โดยใช้สารละลายแคดเมียม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ผ่านคอลัมน์ที่บรรจุสารดูดติดผิวแต่ละชนิดที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส พบว่ากระดูกสัตว์สามารถกำจัดแคดเมียมได้มากกว่าร้อยละ 90 ที่ พีเอช 5.2

Yoshiharu, Tamotsu and Masahide (1987) ได้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียของถ่านกระดูกกับถ่านกัมมันต์ โดยใช้สารละลายของโปแตสเซียมไดโครเมตความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที พบว่าพีเอชเท่ากับ 1 ถ่านกระดูกสามารถกำจัดโครเมียมได้สูงสุดที่ร้อยละ 54 เมื่อพีเอชน้อยกว่า 3.5 โครเมียม (Cr^{6+}) จะเปลี่ยนเป็นโครเมียม (Cr^{3+}) ซึ่งเป็นสภาวะเริ่มต้นที่โครเมียมจะถูกกำจัดด้วยถ่านกระดูกได้ดี

Yamaguchi and Nebekura, (1974). ใช้ถ่านกระดูกดำ(bone black)ในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียพบว่าที่พีเอชน้อยกว่า 4 สามารถกำจัดแคดเมียมได้ดี ทั้งนี้ได้ใช้วิธีกำจัดโลหะโดยการตกตะกอนบางส่วนร่วมด้วย

จักรพงษ์ แสนชัย (2548) ได้ศึกษาการใช้ถ่านกระดูกที่ถูกกระตุ้นด้วยเกลือสังกะสี (ซิงค์คลอไรด์) ในการกำจัดสารตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าถ่านกระดูกที่คาร์บอนไนซ์ที่ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมงและผ่านการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ มีคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น พื้นที่ผิว ขนาดและปริมาตรของโพรงแตกต่างจากถ่านกระดูกที่ไม่ผ่านการกระตุ้น ทั้งประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณสารตะกั่วเพิ่มขึ้นประมาณ 1 เท่า แต่ประสิทธิภาพการกำจัดสารแคดเมียมลดลงประมาณ 3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกระดูกที่ไม่ผ่านการกระตุ้น(ศุภกิจ พัฒนเดชะ, 2545) ถ่านกระดูกที่ผ่านการกระตุ้นสามารถกำจัดตะกั่วและแคดเมียมได้ 1,002 และ 22 มิลลิกรัม ต่อ 1 กรัมของสารดูดซับ ตามลำดับ ส่วนถ่านกระดูกที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้นสามารถกำจัดสารตะกั่วและแคดเมียม 617.5 และ 68 มิลลิกรัมต่อ 1 กรัม ของสารดูดซับ ตามลำดับ

สุชาดา สุทธิพิบูลย์ (2547) ศึกษาการกำจัดตะกั่วโดยใช้ถ่านกระดูกเผาที่ 900 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมงและกระตุ้นด้วยกรดและด่าง 0.1 โมลาร์ พบว่าการกระตุ้นถ่านกระดูกด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารตะกั่วจากน้ำเสียโรงงานผลิตแท่งตะกั่วได้ดีกว่าถ่านกระดูกที่กระตุ้นด้วยกรด โดยสามารถกำจัดตะกั่วได้ 401.65 มิลลิกรัม ต่อ 1 กรัมของถ่านกระดูกที่พีเอช 6 สำหรับไอโซเทอมในการดูดซับตะกั่วเป็นแบบฟรุนดลิชและแลงมัวร์

ศุภกิจ พัฒนเดชะ (2545) ศึกษาการใช้ถ่านกระดูกวัวกำจัดตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานโดยการทดลองแบบแบดซ์และแบบคอลัมน์ ผลการทดลองแบบแบดซ์พบว่ากำจัดตะกั่วได้ดีที่สุดเมื่อเผากระดูกที่ 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่พีเอชเท่ากับ 4 มีประสิทธิภาพการดูดซับ 100% ที่ความเข้มข้นของตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพ การกำจัดลดลงเหลือ 99-96% ที่ความเข้มข้นของตะกั่ว 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าไอโซเทอมของตะกั่วอยู่ที่ 617.5 มิลลิกรัมต่อกรัมของถ่านกระดูก ในการดูดซับความเข้มข้นของตะกั่ว 100 มิลลิกรัมต่อลิตรเวลาที่เหมาะสมอยู่ที่ 48 ชั่วโมง สามารถกำจัดตะกั่วได้ร้อยละ 96.04 ที่อุณหภูมิการเผากระดูก 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง สำหรับการกำจัดแคดเมียม ใช้อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง สามารถกำจัดได้ 100% ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 6 และเมื่อความเข้มข้นเป็น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดแคดเมียมได้ร้อยละ 98.95 ที่พีเอช 6 ค่าไอโซเทอม 68 มิลลิกรัมต่อกรัมของกระดูก เวลาที่เหมาะสมคือ 48 ชั่วโมง เมื่อคาร์บอนในซีที่ 400 องศาเซลเซียสที่ความเข้มข้นแคดเมียม 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 5 สามารถกำจัดแคดเมียมได้ร้อยละ 100

อุบลรัตน์ วาริษวัฒน์ (2544) ศึกษาการใช้ถ่านกระดูกวัวกำจัดตะกั่วแคดเมียม และโครเมียม โดยเผาที่อุณหภูมิ 600 800 และ 1,000 องศาเซลเซียส นาน 8 10 และ 12 ชั่วโมง โดยการทดลองแบบแบดซ์ แบบคอลัมน์ เพื่อหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกระดูก และหาสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะทั้ง 3 ชนิด ได้ผลสรุปว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมถ่านกระดูกคือ 600 องศาเซลเซียส โดยเวลาในการเผา ไม่มีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะ สามารถกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้นสูงสุด 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเป็น 5 สามารถกำจัดตะกั่วได้ 458.55 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่านกระดูก ส่วนแคดเมียมความเข้มข้นของสารละลาย 40 มิลลิกรัมที่พีเอชเป็น 6 สามารถกำจัดแคดเมียมได้ 29.80 มิลลิกรัมต่อกรัมของถ่านกระดูก ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วเป็นแบบฟรอนด์ลิช ส่วนไอโซเทอมการดูดซับของแคดเมียมเป็นแบบแลงมัวร์ การทดลองแบบคอลัมน์พบว่าประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมที่ความเข้มข้น 10 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

สมชาย พิษณุชยานนท์ (2540) ได้ศึกษาการใช้ถ่านกระดูกกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยผ่านคอลัมน์ที่ชั้นความสูงต่าง ๆ กัน ด้วยอัตราการกรอง 41.3 มิลลิตรต่ออนาที พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วสูงสุดที่ร้อยละ 96.2 ที่ความเข้มข้นของตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความสูงของชั้นสารกรองเป็น 50 เซนติเมตร และประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของชั้นสารกรองเพิ่มขึ้นที่ระดับความเข้มข้นของสารตะกั่วที่เท่ากัน

มณฑล กงปิ่น (2542) ได้ศึกษาการใช้ถ่านกระดูกกำจัดฟลูออไรด์ในน้ำบริโภค โดยการศึกษาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์ของเราชนิดแลกเปลี่ยนประจุลบ

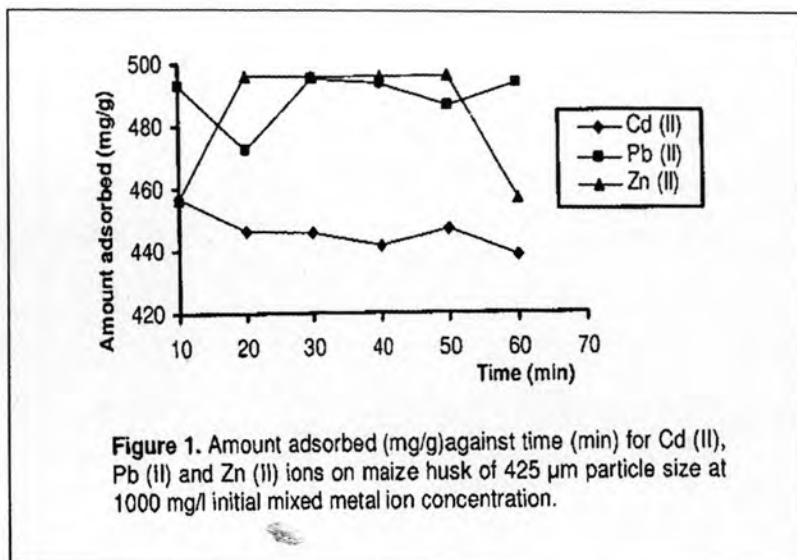
(Anionic exchange resin) โดยการเตรียมถ่านกระดูกสัตว์เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส พบว่าการกำจัดฟลูออไรด์ในน้ำขึ้นกับค่าพีเอช อุณหภูมิ และสารเจือปนอื่นในน้ำ โดยการใช้ถ่านกระดูกสัตว์และเรซิน อย่างละ 5 กรัม บรรจุในคอลัมน์ ให้น้ำไหลผ่านคอลัมน์แบบไหลจากล่างขึ้นบน และจากบนลงล่างในเวลา 22 วัน พบว่าความสามารถในการกำจัดฟลูออไรด์ของเรซินและถ่านกระดูกเป็น 22.30 และ 4.77 มิลลิกรัม ฟลูออไรด์ต่อกรัมของสารดูดซับตามลำดับ เรซินมีความสามารถในการกำจัดฟลูออไรด์เป็น 4.675 เท่าของถ่านกระดูกสัตว์

มณฑล คงปิ่น และ ละอองดาว นามศรีพันธ์ (2542) ได้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์ในน้ำฟลูออไรด์สังเคราะห์ โดยเตรียมโซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) เข้มข้น 20.0 มิลลิกรัม ต่อลิตร และใช้สารดูดซับ คือ ถ่านกระดูก เรซินแลกเปลี่ยนประจุลบและถ่านกัมมันต์โดยการทดลองแบบแบดจ์พบว่าถ่านกัมมันต์สามารถลดปริมาณฟลูออไรด์ได้ลงครึ่งหนึ่งในช่วง 5 นาทีแรก และคงที่ตลอดช่วงการทดลอง 200 นาที ส่วนถ่านกระดูกสัตว์สามารถลดปริมาณฟลูออไรด์ลงต่ำกว่าระดับมาตรฐาน (0.7 มิลลิกรัมต่อลิตร) ตั้งแต่นาทีที่ 20 เป็นต้นไปและปริมาณฟลูออไรด์ลดต่ำกว่ามาตรฐานในระดับคงที่ตั้งแต่ นาทีที่ 60 เป็นต้นไป สำหรับเรซินแลกเปลี่ยนประจุลบมีความสามารถในการกำจัดฟลูออไรด์ใกล้เคียงกับถ่านกระดูกสัตว์

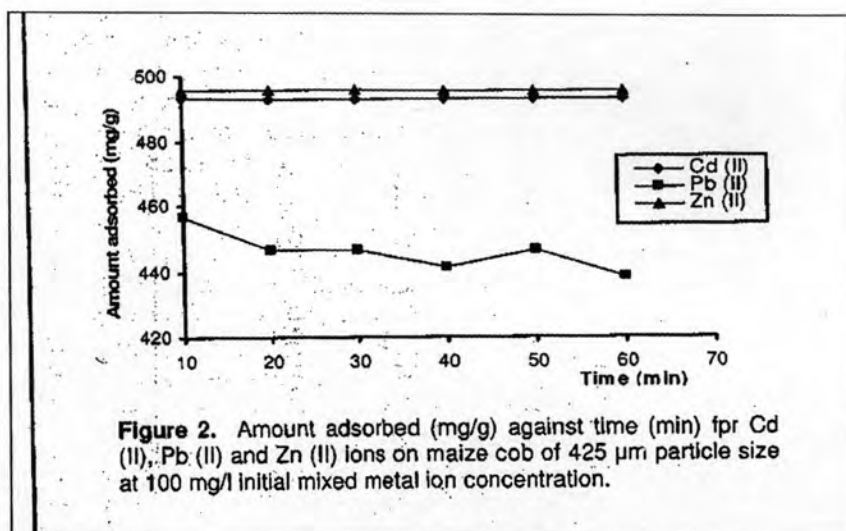
2.8.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดโลหะหนักด้วยถ่านกัมมันต์

Montanher, Oliveira and Rollemberg (2005) มหาวิทยาลัยเอสตาดีว เดอมารินกา (Estadual de Maringa) ประเทศบราซิล ได้ศึกษาการใช้แกลบ (rice bran) เป็นสารดูดซับในการกำจัดโลหะหนักจากสารละลาย เพื่อหาฟังก์ชันนัล กรุ๊ปที่เป็นไปได้ที่เกี่ยวข้องกับโลหะหนัก โดยศึกษา binding capacity และ metal affinity สมดุลการดูดซับเป็นแบบฟรุนดลิช

Igwe, Ogunewe and Abia (2005) มหาวิทยาลัยอะเบีย ประเทศไนจีเรีย ศึกษาการใช้สารดูดซับจากซังข้าวโพด (maize cob) และเปลือกข้าวโพด (husk cob) ในการกำจัดไอออน ตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสีในน้ำเสีย พบว่าเปลือกข้าวโพดสามารถกำจัดไอออนของโลหะทั้งสามชนิดที่ผสมอยู่ในสารละลายเดียวกันที่ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ขนาดอนุภาคของสารดูดซับ 425 ไมครอน สามารถกำจัดไอออนตะกั่วและแคดเมียมได้ 495 และ 455 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ใน 10 นาทีแรก (ภาพที่ 2.21) สำหรับซังข้าวโพดขนาดอนุภาค 425 ไมครอนที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรของไอออนโลหะทั้งสามชนิดผสมกัน สามารถกำจัดตะกั่วและแคดเมียมได้ 458 และ 459 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับใน 10 นาทีแรก(ภาพที่ 2.22)



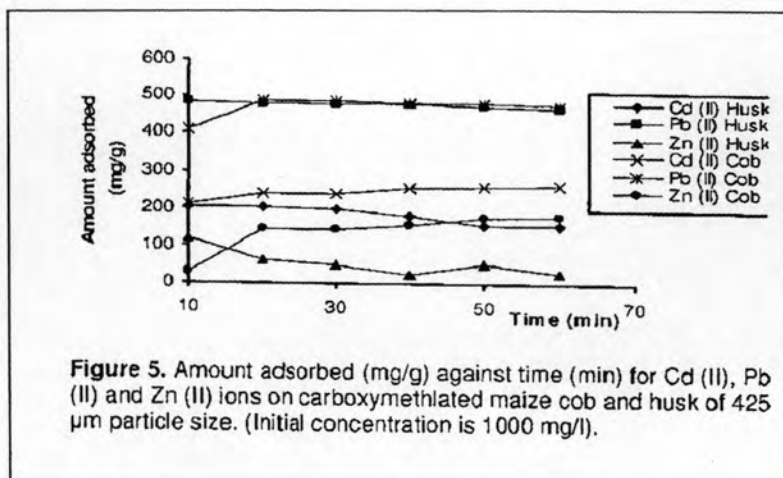
ภาพที่ 2.21 ปริมาณ โลหะที่ถูกกำจัดกับเวลาสัมผัสของสารดูดติดผิวเปลือกข้าวโพด



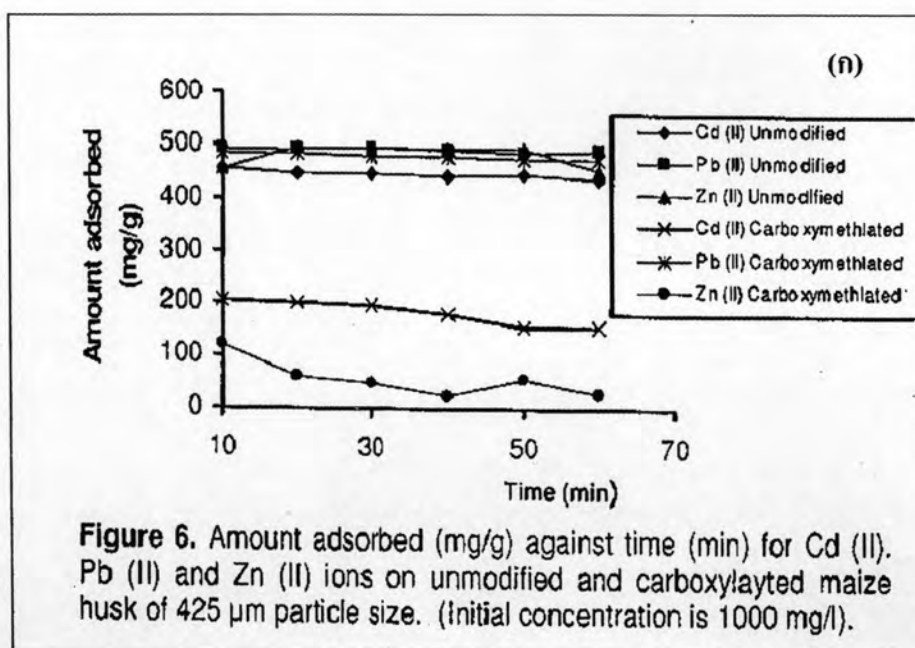
ภาพที่ 2.22 ปริมาณ โลหะที่ถูกกำจัดกับเวลาสัมผัสของสารดูดติดผิวซังข้าวโพด

และเมื่อนำซังข้าวโพดและเปลือกข้าวโพดผ่านกระบวนการคาร์บอกซิเมทิลเลชัน (carboxy methylation) ด้วยสารละลายอินทรีย์ พบว่าประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของสารละลายโลหะทั้งสามชนิดลดลงเนื่องจากชั้นของสารคาร์บอกซิเมทิลไปกั้นที่ผิวของสารดูดติดผิว ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการแพร่กระจายของไอออนโลหะไปยังพื้นผิวของสารดูดติดผิว โดยได้เปรียบเทียบ

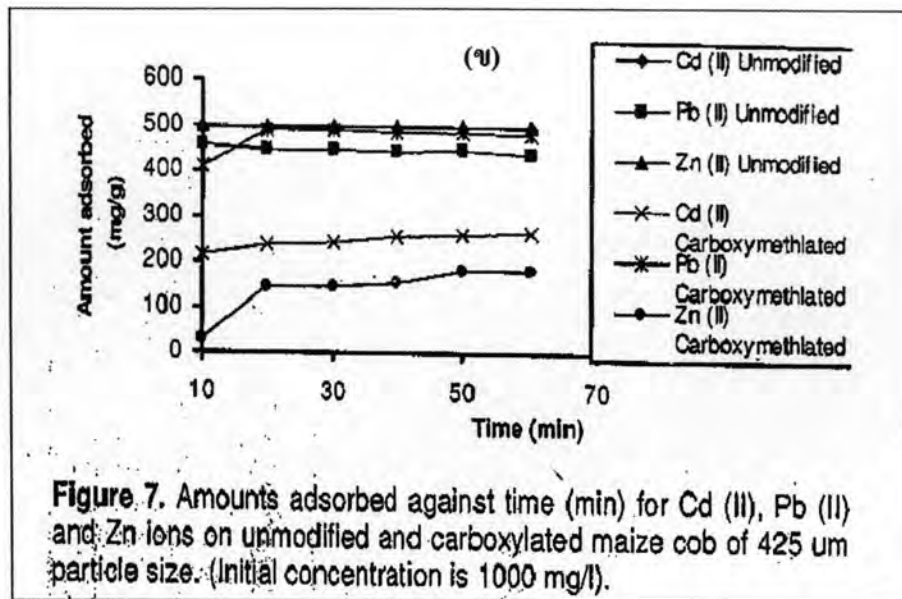
ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะทั้งสามชนิดก่อนและหลังการผ่านกระบวนการดัดแปลง(modification) ด้วยสารละลายอินทรีย์ (ภาพที่ 2.23 และ ภาพที่ 2.24)



ภาพที่ 2.23 ปริมาณ โลหะที่ถูกกำจัดกับเวลาสัมผัสของสารดูดติดผิวซังข้าวโพดและเปลือกข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการดัดแปลงด้วยสารอินทรีย์



ภาพที่ 2.24(ก) ปริมาณโลหะที่ถูกกำจัดกับเวลาสัมผัสของสารดูดติดผิวเปลือกข้าวโพดที่ไม่ผ่านกระบวนการดัดแปลงด้วยสารอินทรีย์



ภาพที่ 2.24(ข) ปริมาณโลหะที่ถูกกำจัดกับเวลาสัมผัสของสารดูดติดผิวซังข้าวโพดที่ไม่ผ่านกระบวนการตัดแปลงด้วยสารอินทรีย์

Chan-Jun and Jung-hoen (2005) มหาวิทยาลัย คองกู ประเทศเกาหลี ได้ศึกษาการกำจัดไอออนแคดเมียม(Cd^{2+}) ตะกั่ว(Pb^{2+}) ทองแดง(Cu^{2+}) และแมงกานีส(Mn^{2+}) ด้วยสารดูดติดผิว เคริดแลน (curdlan)* ผสมกับถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายของกรดและด่าง และควบคุมขนาดโพรงของสารดูดติดผิวให้อยู่ในช่วงที่ต้องการ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของแคดเมียม ตะกั่ว ทองแดง และแมงกานีสเป็น 41, 72, 161 และ 75 มิลลิกรัมต่อกรัมของสารดูดติดผิวตามลำดับ ผลจากการวิจัยนี้ สรุปว่าสามารถพัฒนาสารดูดติดผิวในการกำจัดไอออนของโลหะหนักในพืชสมุนไพร (oriental herbs) ที่ใช้ในการผลิตยาพื้นบ้าน (traditional oriental medicine)

Mehmet and Arzu (2004) มหาวิทยาลัยไฟราท (Firat University) ประเทศตุรกี ได้ศึกษาการกำจัดไอออนตะกั่วในสารละลายด้วยสารดูดติดผิวจากแร่ไซเคอร์ไรท์(siderite) โดยการทดลองแบบแบตช์ เพื่อศึกษาปัจจัยที่เอื้อ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่ว อุณหภูมิ และปริมาณของสารดูดติดผิวที่ใช้ พบว่าประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดไอออนตะกั่วเป็นร้อยละ 99.6 ที่ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส พีเอช 2.97

* Curdlan เป็นสาร 1,3- β -D-glucan ซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลชนิดเส้นไม่มีกิ่งก้านสาขา (unbranched linear) ได้จากกระบวนการหมักจุลินทรีย์ชนิด *Alcaligenes faecalis*. Curdlan ไม่ละลายในน้ำเย็น แต่เกิดเป็นเจลที่ยืดหยุ่นได้เมื่อให้ความร้อน <http://en.wikipedia.org/wiki/curdlan> , 25 January 2006)

เป็นเวลา 180 นาที โดยใช้สารดูดติดผิว 10 กรัมต่อลิตร รูปแบบการดูดติดผิวเป็นแบบแลงมัวร์และ ฟรุנדลิช สามารถกำจัดตะกั่วได้ 10.32, 12.45 และ 14.06 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 25, 30 และ 35 องศาเซลเซียสตามลำดับ

Aklil, Mouflish and Sebti (2004) มหาวิทยาลัย Hassan11 ประเทศโมร็อกโก ได้ศึกษาการใช้แคลไซน์ฟอสเฟต(calcined phosphate) ในการกำจัดไอออนของโลหะหนัก ตะกั่ว ทองแดง และสังกะสี โดยการทดลองแบบแบทช์ ประสิทธิภาพการกำจัดที่พีเอช 5 เป็น 85.6, 29.8 และ 20.6 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ที่พีเอช 2-3 เกิดตะกอนของ เลด ฟลูออโรโมรไฟต์(lead fluoromorphite) ไอโซเทอมการดูดติดผิวเป็นแบบแลงมัวร์และฟรุנדลิช ผลการศึกษาสรุปว่า ฟอสเฟตจากธรรมชาติราคาถูก เหมาะสมที่จะเตรียมเป็นสารดูดติดผิวในการกำจัดโลหะหนักในน้ำ และน้ำเสีย

Miluse และคณะ (2004) มหาวิทยาลัยเทคนิคเชคซ์(Czech Technical University) ประเทศสาธารณรัฐเชคซ์(Czech Republic) ได้ศึกษาการใช้ ได้ศึกษาการใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นสารดูดติดผิวในการกำจัดไอออนของทองแดง(Cu^{2+}) สังกะสี(Zn^{2+}) ตะกั่ว(Pb^{2+}) แคดเมียม(Cd^{2+}) นิกเกิล(Ni^{2+}) โคบอลต์(Co^{2+})และเหล็ก(Fe^{2+}) โดยการทดลองแบบคอลัมน์ พบว่าประสิทธิภาพการดูดติดผิว ขึ้นกับอัตราการไหลและรูปแบบของกราฟที่สภาวะสมดุลของการดูดติดผิว ประสิทธิภาพการกำจัด ได้ผลดีที่ความเข้มข้นของโลหะหนักต่ำ

Chandra และคณะ (2004) สถาบันเคมีเทคโนโลยี ประเทศอินเดีย ได้ศึกษาการกำจัด ตะกั่วที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำธรรมชาติ น้ำในลำธาร จากน้ำเสียของอุตสาหกรรมด้วยสารดูดติดผิวที่ เตรียมจากเปลือกไม้ตระกูล Hemidesmus indicus หรือ อินเดียย ชาร์ซาพาริลลา(indian sarsaparilla) ทำการทดลองแบบแบทช์ ศึกษาปัจจัย เวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะ ปริมาณ สารดูดติดผิวที่ใช้ ผลของไอออนโลหะบนผิวของสารดูดติดผิว และการฟื้นฟูสภาพสารดูดติดผิวด้วย กรดไนตริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ โดยใช้คอลัมน์ ล้าง 3 รอบ

Farajzadeh and Monji (2004) มหาวิทยาลัย Urmia ประเทศอิหร่าน ได้ศึกษาการ กำจัดไอออนของโครเมียม (Cr^{3+})ปรอท(Hg^{2+}) ตะกั่ว(Pb^{2+}) แคดเมียม(Cd^{2+}) ทองแดง(Cu^{2+}) และ นิกเกิล(Ni^{2+}) โดยใช้รำข้าวของข้าวสาลีเป็นสารดูดติดผิว พบว่าสมดุลของการดูดติดผิวอยู่ที่ 10 นาที สำหรับไอออนของโลหะทุกตัว ประสิทธิภาพการกำจัดเป็น 93, 70, 62, 21, 15 และ 12 มิลลิกรัมต่อ กรัมตามลำดับ และสามารถกำจัดไอออนของโลหะทุกตัว(ยกเว้นนิกเกิล) ได้มากกว่าร้อยละ 82 ใน ขั้นตอนเดียว การศึกษานี้ไม่ได้ศึกษากลไกในการกำจัดโลหะหนัก แต่กลไกการกำจัดโลหะค่อนข้าง ซับซ้อน ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน complexation and size exclusion

Min และคณะ (2004) มหาวิทยาลัยวิสคอนซิน สหรัฐอเมริกา ได้ศึกษาการใช้เส้นใยของพืชจำพวกสน (juniper fiber) ในการกำจัดแคดเมียมไอออนในน้ำ โดยกระตุ้นสารดูดติดผิวด้วยสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 โมล พบว่ากลุ่มสารคาร์บอกซิลเลท ไอออนมีผลต่อการกำจัดแคดเมียม ไอออน การกระตุ้นด้วยด่างทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะลดลง แต่เกิด pseudo-second-order kinetic model ที่เหมาะสมกับการดูดติดผิวแคดเมียม ไอออน ความสามารถในการดูดติดผิวแคดเมียม ไอออนเพิ่มขึ้นและแข็งแรง โดยสามารถกำจัดแคดเมียม ไอออนเพิ่มขึ้น 9.18-29.54 มิลลิกรัมต่อกรัม สามารถถึงสภาวะสมดุลเร็วขึ้นที่ความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมในน้ำที่เกิดจากพายุฝน (storm water runoff) การทดลองแบบแบทช์ไอโซเทอมการดูดติดผิวเป็นแบบแลงมัวร์มากกว่าแบบฟรุนดลิช

Youssef, Nabarawy and Samra (2004) มหาวิทยาลัยมานซัวร์า (Mansoura University) ประเทศอียิปต์ ศึกษาการใช้ถ่านกัมมันต์จากซังข้าวโพด (corn-stalks) ในการกำจัดไอออนของแคดเมียม (Cd^{2+}) การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้นย่อยสลายซังข้าวโพด ที่อุณหภูมิ 180-200 องศาเซลเซียส และกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ที่ 600 องศาเซลเซียส ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิว 700-900 ตารางเมตรต่อกรัม การดูดติดผิวของแคดเมียม ไอออน ขึ้นอยู่กับเคมีของผิวของถ่านกัมมันต์มากกว่าที่จะขึ้นกับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ ถ้ามีโซเดียม ไอออนในสารละลายของแคดเมียมจะทำให้ความสามารถในการดูดติดผิวแคดเมียม ไอออนลดลง และในสภาวะที่มีโซเดียม ไอออน ความเข้มข้นสูงๆจะไปยับยั้งการดูดติดผิวแคดเมียม ไอออน กระบวนการกำจัดแคดเมียม ไอออน ขึ้นกับกลไกหลายชนิดซึ่งค่อนข้างซับซ้อน เช่น การแลกเปลี่ยนไอออนบวก และบางส่วนผ่านกระบวนการแพร่กระจายผ่านโพรงเล็กๆ (partially by pore diffusion)

Kadirvelu, Thamaraiselvi and Namasivayam (2001) ได้ศึกษาการกำจัดโลหะหนักทองแดง ปรอท ตะกั่ว แคดเมียมและนิกเกิล ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกาบมะพร้าวที่กระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดง ปรอท ตะกั่ว แคดเมียมและนิกเกิล ได้ ร้อยละ 73, 100, 100, 100 และ 92 ที่พีเอช 5.0, 3.5, 4.0, 4.0 และ 3.3 ตามลำดับ

Chen and Wang (2000) ได้ศึกษาทดลองใช้ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 200 ชนิดเม็ดในการกำจัดทองแดง สังกะสีและตะกั่ว โดยการทดลองแบบต่อเนื่องพบว่าค่า Breakthrough time ของถ่านกัมมันต์จะมีค่ามากขึ้น เมื่อพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าสู่ระบบมีค่าสูงขึ้น โดยสามารถกำจัดทองแดงได้ดีที่สุด รองลงมาคือตะกั่วและสังกะสีตามลำดับ นอกจากนี้ได้ศึกษาการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 200 ที่ใช้แล้วด้วยสารละลายกรดไนตริกและสารละลายของด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ และหลังการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วสามารถนำถ่านกัมมันต์นั้นมากำจัดโลหะที่ทำการทดลองได้อีก

Reed, Jamil and Thomas (1996) ได้ศึกษาการใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดกำจัดตะกั่วในน้ำเสียทั้งแบบแบคทีเรียและแบบคอลัมน์พบว่า การกำจัดตะกั่วจะเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชของสารละลายตะกั่วมีค่าเพิ่มขึ้น โดยใช้สารละลายตะกั่วเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าคงที่การดูดซับของถ่านกัมมันต์เท่ากับ 8 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้ได้ศึกษาการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้งานแล้วด้วยสารละลายของกรดและด่างพบว่าสามารถล้างตะกั่วที่ติดอยู่ที่ผิวถ่านกัมมันต์ให้หลุดออกมาสู่สารละลายได้

Tatsuyama and Egawa (1975) ใช้ถ่านกัมมันต์เตรียมจากผงไม้โดยไม่มีกระบวนการกระตุ้นในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย พบว่าการดูดซับโลหะแคดเมียม (Cd^{+2}) เป็น 9.18 มิลลิกรัม และ 71.6 มิลลิกรัมต่อกรัมของผงดูดซับชนิดผงไม้ (wood flour) และผงเปลือกไม้ (bark powder) ตามลำดับ

Huang and Ostovic (1975) (อ้างใน Cheremisinoff, 1978) ใช้ถ่านกัมมันต์ 3 ชนิด คือ Filtrasorb 400, Nuchar 72 และ Nuchar C-190-N ในการกำจัดแคดเมียม (Cd^{+2}) จากสารละลายพบว่าพีเอชและความเข้มข้นของแคดเมียมในสารละลาย ปริมาณและชนิดของถ่านกัมมันต์มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียม พบว่าถ่านกัมมันต์ต่างชนิดกันสามารถกำจัดแคดเมียมได้สูงสุดที่พีเอชต่างกัน โดยใช้ถ่านกัมมันต์ 10 กรัมต่อลิตร พบว่า Nuchar C-190 N, Nuchar 722 และ Filtrasorbs 400 มีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมของสารละลาย 100 มิลลิลิตร ในเวลา 20 ± 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส สามารถกำจัดแคดเมียมได้สูงสุดที่ 5×10^{-5} ไมโครโมลต่อกรัมที่พีเอช 6-7, และมากกว่า 9 และเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ พบว่าสามารถกำจัดแคดเมียมได้เพิ่มขึ้น ถ่านกัมมันต์ต่างชนิดกันสามารถกำจัดแคดเมียมได้สูงสุดที่พีเอชต่างกัน โดยใช้ถ่านกัมมันต์ 10 กรัมต่อลิตร พบว่า Nuchar C-190 N, Nuchar 722 และ Filtrasorbs 400 มีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมของสารละลาย 100 มิลลิลิตร ในเวลา 20 ± 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส สามารถกำจัดแคดเมียมได้สูงสุดที่ 5×10^{-5} ไมโครโมลต่อกรัมที่พีเอช 6-7, และมากกว่า 9 และเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ พบว่าสามารถกำจัดแคดเมียมได้เพิ่มขึ้น

Tominaga, Mimon and Okuda (1974) เตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์และถ่านหิน (brown coal) โดยการกระตุ้นด้วยด่าง (3% NaOH) แล้วให้ความร้อนที่ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และกรองล้างให้สะอาดด้วยน้ำกลั่น 5 ครั้ง แล้วผสมถ่านที่เตรียมไว้กับน้ำปรับพีเอชให้ได้เท่ากับ 3 ด้วย 3% ของกรดเกลือ แล้วกรองทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 ถึง 110 องศาเซลเซียส จะได้ถ่านหินที่เป็นด่าง แล้วนำไปกำจัดแคดเมียมที่ความเข้มข้น 10 พีพีเอ็ม โดยใช้คอลัมน์ที่บรรจุถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ โดยใช้อัตราการป้อนสารละลาย 50 มิลลิลิตรต่อนาที หลังจากการทดลอง 1 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมได้ร้อยละ 100 คือน้ำที่ออกมาจากคอลัมน์ตรวจไม่พบแคดเมียม

Yamaguchi and Nebekura (1974) เตรียมถ่านกัมมันต์จากผงไม้ซีกคาร์ ขนาด 16-20 เมช โดยต้มกับสารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5% เป็นเวลา 30 นาที เพื่อเปลี่ยนไม้ให้เป็น

เซลลูโลส พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้สามารถลดปริมาณแคดเมียมในสารละลายจาก 8.7 พีพีเอ็ม ให้เหลือ 0.4 พีพีเอ็ม

Netzer and Wikinson (1974) ได้ศึกษาการกำจัดโลหะหนักด้วยคาร์บอนกัมมันต์ที่ทำจากยางรถยนต์ พบว่าสามารถกำจัดโลหะประเภท Trace Metals เช่น ตะกั่ว แคดเมียม โครเมียม โคบอลต์ อลูมิเนียม ทองแดง เหล็ก แมงกานีส พรอท นิกเกิล โลหะเงินและสังกะสีจากสารละลาย นอกจากนี้ Saito (1976) ใช้ถ่านกัมมันต์และถ่านหินที่ผ่านการซัลโฟเนชันในการกำจัดทองแดง แคดเมียม เหล็กจากน้ำเสีย พบว่าสามารถกำจัดไอออนของทองแดง (Cu^{2+}) ได้ร้อยละ 98 โดยการสกัดแบบขั้นตอนเดียว (One-stage Extraction) และสามารถลดได้ 0.08 ส่วนในล้านส่วน (พีพีเอ็ม) ภายหลังจากการสกัดแบบ 2 ขั้นตอน (Two-stage Extraction) จากสารละลายเริ่มต้นที่มีทองแดงเข้มข้น 312 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะด้วยคาร์บอนกัมมันต์มีนัยสำคัญอย่างมาก

Yuki and Ohsaki (1973) ได้เตรียมถ่านกัมมันต์สำหรับกำจัดแคดเมียมและโลหะหนักชนิดอื่น โดยเตรียมถ่านกัมมันต์ชนิดผงขนาด 100 เมช ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนจากทอส์ฟิลท์ ร้อยละ 95 และสังกะสี ร้อยละ 5 ผสมกับผงถ่านทาร์พีทช์ ร้อยละ 20 เป็นตัวประสาน (binder) และกากน้ำตาลโมลาสส์ และทำเป็นท่อนเล็ก ๆ หรือเพเลตให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 2 มิลลิเมตร แล้วนำส่วนผสมนี้ไปเผาด้วยโรตารีคลิน ที่อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 160 นาที เพื่อให้เกิดคาร์บอน ในเซชัน

วราภรณ์ ภิญโญ, อภินพัส รุจิวัตรา และ Sontag (2548) ได้ศึกษาความสามารถและจลศาสตร์ในการกำจัดนิกเกิล ตะกั่วและแคดเมียมไอออนของซีโอไลด์ชนิดโซเดียมเอ็กซ์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยด้วยวิธีแบบคอลัมน์ที่ความเข้มข้นของโลหะแต่ละชนิดเป็น 10, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 7 เวลาสัมผัส 2 ชั่วโมง พบว่าซีโอไลด์ชนิดโซเดียมเอ็กซ์เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้ดีที่สุดสำหรับไอออนโลหะทั้งสามชนิด ไอโซเทอมของการแลกเปลี่ยนไอออนเป็นแบบแลงมัวร์ สามารถกำจัดตะกั่วและแคดเมียมได้มากกว่าร้อยละ 90 และร้อยละ 99 ตามลำดับ

วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา และคณะ (2547) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้ศึกษาการกำจัดไอออนโลหะ ตะกั่ว(Pb^{2+}) แคดเมียม(Cd^{2+}) ทองแดง(Cu^{2+}) สังกะสี(Zn^{2+}) และนิกเกิล(Ni^{2+}) ด้วยสารดูดซับผิวเตรียมจากกากกาแฟผสมกับดินเหนียว (coffee residues binding with clay ; C-C adsorbent) พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับได้แก่ อุณหภูมิของการไพโรไลซิส อัตราส่วนโดยน้ำหนักของกากกาแฟและดินเหนียว ขนาดของอนุภาค อุณหภูมิที่ใช้คือ 500 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของกากกาแฟต่อดินเหนียวเป็น 80 ต่อ 20 ขนาดอนุภาคของสารดูดซับผิวเท่ากับ 4 มิลลิเมตร เป็นสภาวะการเตรียมสารดูดซับผิวที่เหมาะสม ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักเป็นแบบแลงมัวร์ ดังนี้ $\text{Cd}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Ni}^{2+}$ ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียม

เพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น ช่วงพีเอชที่ศึกษาคือพีเอช 8-10 อุณหภูมิ 30-80 องศาเซลเซียส การหาฟังก์ชันนัลกรุปด้วย FTIR พบว่ามีกรุปไฮดรอกซิล คาร์บอกซิล และเอมีน ขนาดของโพรงของสารดูดซับเป็นโพรงขนาดกลางสำหรับสารดูดซับชนิดเม็ด

หทัยกาญจน์ เบญจวิทย์ธรรม (2547) ได้ศึกษาการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านไม้แดงและถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้แดงที่กระตุ้นด้วยเกลือแกง ถ่านไม้สามารถกำจัดแคดเมียมได้ 4.91 และ 3.09 มิลลิกรัมต่อกรัมของถ่านไม้ และถ่านไม้ที่ถูกกระตุ้น ตามลำดับประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมร้อยละ 29.08 ถ่านไม้มีพื้นที่ผิว 256.57 ตารางเมตรต่อกรัมและขนาดโพรง 1722.12 อังสตรอม ส่วนถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นแล้วมีพื้นที่ผิว 167.33 ตารางเมตรต่อกรัมและขนาดโพรง 7659.88 อังสตรอม ไอโซเทอมการดูดซับเป็นแบบฟรุนดลิช

เกสินี ดันติสุวรรณกุล (2547) ศึกษาการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยสารดูดซับที่เตรียมจากดินเหนียวและกากซีเมนต์ของโรงงานน้ำยางข้นโดยเผาที่ 500 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง สามารถดูดซับตะกั่วและแคดเมียมได้ร้อยละ 88.26 และ 97.23 หรือ 42.098, 47.195 มิลลิกรัมต่อกรัมของสารดูดซับ และที่พีเอชเท่ากับ 3 และ 4 ตามลำดับ เวลาสัมผัสที่เหมาะสม 2 ชั่วโมง ไอโซเทอมการดูดซับของโลหะทั้งสองเป็นแบบฟรุนดลิช และได้ศึกษาการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับด้วยน้ำกลั่นและกรดเกลือ 5% สามารถล้างตะกั่วออกมาได้ร้อยละ 1.85 และ 29 ตามลำดับ และร้อยละ 0.34 และ 15.23 ตามลำดับ สำหรับแคดเมียม

ปนัดดา คำรัตน์ (2545) ได้ศึกษาประสิทธิภาพถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากซีเมนต์ของโรงงานน้ำยางข้นในการกำจัดตะกั่วและปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 พบว่าถ่านกัมมันต์จากกากซีเมนต์ที่กระตุ้นด้วยเกลือแกงมีค่าไอโอดีน นัมเบอร์ 510 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่าน และมีพื้นที่ผิว 566.39 ตารางเมตรต่อกรัม สามารถกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรที่พีเอช 4 ได้ 116.18 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่าน ส่วน Filtrasorb 300 สามารถกำจัดตะกั่วได้ 11.07 มิลลิกรัมต่อกรัม ไอโซเทอมการดูดซับของตะกั่วเป็นแบบฟรุนดลิช สำหรับการทดลองแบบคอลัมน์ด้วยอัตราการไหล 3 ลิตรต่อชั่วโมงที่ขึ้นความสูง 30 เมตรของถ่านกัมมันต์สามารถกำจัดตะกั่วได้ดีที่สุดเท่ากับ 5865.58 BV.

มานพ ติระรัตนสมโภช (2545) ศึกษาการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์จากซีเมนต์ที่กระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์และซิงค์คลอไรด์ โดยใช้ตัวกระตุ้นอัตราส่วน 1 ต่อ 1 เผาที่ 800 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง สำหรับโซเดียมคลอไรด์ และซิงค์คลอไรด์ เป็นตัวกระตุ้นอัตราส่วน 1 ต่อ 1 เผาที่ 700 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วสูงสุดสำหรับการทดลองแบบถังดูดซับเท่ากับ 209.17 และ 829.5 ลิตรสำหรับถ่านที่กระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ และซิงค์คลอไรด์ ตามลำดับที่ความลึกถ่าน 120 เซนติเมตร

ลลิตา นิตฺสนจารุกุล (2544) ได้ศึกษาการกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการดูดซับผิวโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร คือ เปลือกทุเรียนและเปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์โดยการกระตุ้นด้วยสารเคมีเกลือแกงเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้น และทดสอบหาปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับผิว คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง เวลาสัมผัส และปริมาณถ่านเพื่อทดสอบหาไอโซเทอมการดูดซับผิวแบบฟรุนดลิชซ์โดยใช้การทดลองแบบเบดซ์และแบบต่อเนื่อง การเตรียมถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยเกลือแกงที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุติดต่อเกลือแกงที่เหมาะสมที่ทำให้ถ่านมีค่าไอโอได้นัมเบอร์สูงสุด คือ 1:0 โดยมีค่าไอโอได้นัมเบอร์สำหรับเปลือกทุเรียนและเปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์ตามลำดับคือ 1567 และ 532 มิลลิกรัมของไอโอได้นต่อกรัมของถ่านกัมมันต์ ตามลำดับ พีเอชที่เหมาะสมคือ 2-9 โดยที่พีเอชมากกว่า 4 ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วของสารทั้งสองมีมากกว่า 90% ขึ้นไป เวลาที่เหมาะสมในการดูดซับผิวเท่ากับ 10 นาที ถ่านเปลือกทุเรียนมีความสามารถในการดูดซับผิวสูงกว่าถ่านเปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์ ผลของไอโซเทอมการดูดซับผิวเป็นแบบฟรุนดลิชซ์ สำหรับการทดลองการกรองแบบต่อเนื่องโดยใช้ถ่านเปลือกทุเรียนพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วได้ 94.01, 58.85, 50.98 และ 47.06 BV ชั้นความสูงของถ่าน 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตรตามลำดับ

ประภตุ เลิศจรสร่วมดี (2539) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยสารดูดซับซีลีอัส ฟางข้าวและขุยมะพร้าว พบว่าขุยมะพร้าวที่ความเข้มข้น 50 ส่วนในล้านส่วน ปริมาณ 0.20 กรัมสามารถกำจัดปรอทและตะกั่วได้ร้อยละ 80 และ 78 ตามลำดับ โดยขุยมะพร้าวมีความสามารถในการกำจัดตะกั่วและปรอทดีกว่าซีลีอัสและฟางข้าว และสารดูดซับทั้งสามชนิดสามารถกำจัดโลหะทั้งสองได้เกือบร้อยละ 100 ที่ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วจากโรงงานแบตเตอรี่เป็น 0.3-0.7 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.8.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้ว

Saeed และ Iqbal, (2003) ประเทศปากีสถาน ได้ศึกษาการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับ black gram husk (*Cicer arietinum*) ที่ใช้กำจัดสารละลายแคดเมียมเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยสารละลายกรดเกลือเข้มข้น 0.1 M โดยการทดลองแบบคอลัมน์ พบว่าสามารถฟื้นฟูสภาพสารดูดซับได้ร้อยละ 99.89

Miguel, Lambert and Graham (2001) ได้ศึกษาการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดที่ใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำดื่มและน้ำเสียจากอุตสาหกรรม โดยใช้ความร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-60 นาที แล้วทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพในแต่ละสภาวะ ได้แก่ น้ำหนักคาร์บอนที่สูญเสีย (weight losses) ความหนาแน่นปรากฏ (apparent density) ความพรุน (porosity) พื้นที่ผิว

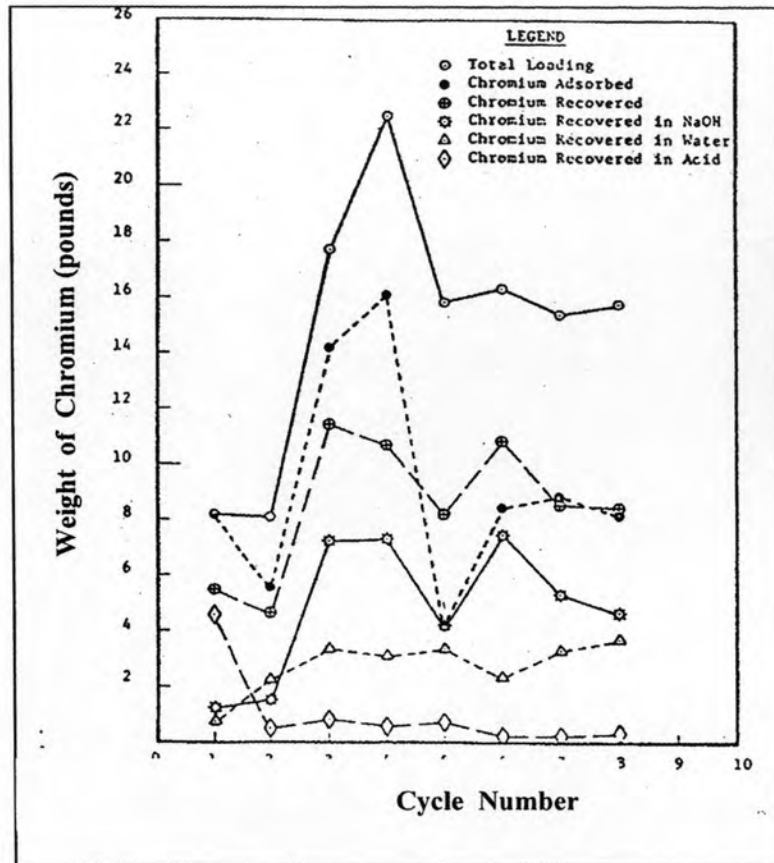
(surface area) และลักษณะการดูดซับผิวสารละลาย (aqueous adsorption characteristics) พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ใช้งานแล้วสามารถฟื้นฟูสภาพดีที่สุดในอุณหภูมิการเผาที่ 800 องศาเซลเซียส

Christoffersen และคณะ, (1991) ได้ศึกษาการฟื้นฟูสภาพถ่านกระตุ้นที่ใช้ในการกำจัดสารฟลูออไรด์โดยใช้คอลัมน์ด้วยสารละลายแคดเมียมคลอไรด์และโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โดยปรับพีเอชให้เป็น 3 ถ่านกระตุ้นที่ใช้ฟื้นฟูสภาพเป็นชนิดผงละเอียดมาก ระหว่างการฟื้นฟูสภาพล้างด้วยสารละลายกรดเกลือเจือจาง พบว่าการฟื้นฟูสภาพถ่านกระตุ้นได้ผลดีมาก การสูญเสียน้ำหนักถ่านมีน้อยมาก

Smithson (1978) (อ้างใน Cheremisionoff, 1978) ว่า U.S. EPA. และบริษัทในเครือมีความประสงค์ที่จะพัฒนาระบบการกำจัดโครเมียมโดยวิธีอิเล็กโทรเฟลตดั่งอย่างประหยัดที่สุด จึงได้ศึกษาการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการกำจัดโครเมียม โดยการทดลองฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายของกรดและด่างพบว่า การฟื้นฟูสภาพโดยใช้สารละลายของด่างให้ผลดีกว่าการฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายของกรด

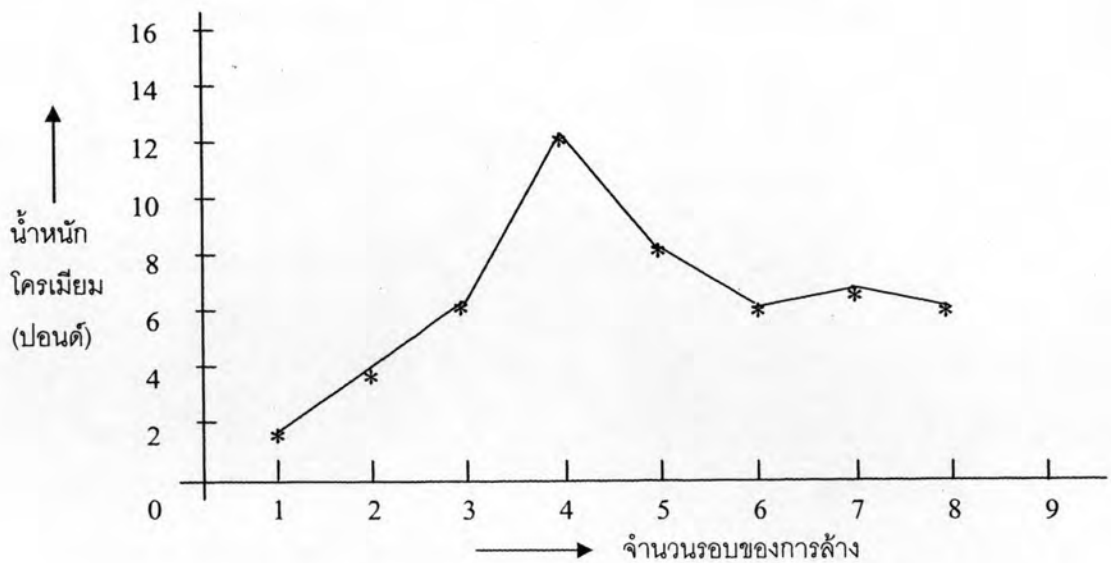
การศึกษาใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้นผ่านลงในน้ำ 30 แกลลอน ด้วยอัตราเร็ว 200 มิลลิลิตรต่อนาที ไปยังคอลัมน์ที่บรรจุถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วจนกระทั่งพีเอชเป็น 3 แล้วนำสารละลายที่ออกมาจากคอลัมน์กลับเข้าไปในคอลัมน์ใหม่ ทำเช่นนี้ภายใน 60 นาที แล้วนำสารละลายที่ออกมาจากคอลัมน์ไปวิเคราะห์หาปริมาณของโครเมียม

การทดลองฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 20% ซึ่งมีสารละลายซีเลตติ้ง (chelating agent) อยู่ด้วย 500 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 30 แกลลอน ไปยังคอลัมน์ที่บรรจุถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วและต้องการฟื้นฟูสภาพโดยวิธีไหลจากบนลงล่าง (upflow) ภายหลัง 1 ชั่วโมง ปล่อยน้ำในคอลัมน์ออกเก็บไว้ในแทงค์และเป่าถ่านกัมมันต์ในทิศทางจากข้างล่างขึ้นข้างบน (downflow) ด้วยอากาศเป็นเวลา 18 ชั่วโมง แล้วนำสารละลายด่างที่เก็บไว้กลับมาล้างใหม่เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำสารละลายด่างที่ออกมาจากคอลัมน์ไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียม ต่อจากนั้นล้างคอลัมน์ด้วยน้ำประปา 30 แกลลอน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และนำสารละลายที่ออกมาไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมได้ผลการทดลองตามภาพที่ 2.25 โดยการล้างซ้ำ 8 รอบ (cycle) และสรุปว่าการล้างรอบที่ 4 จะมีปริมาณโครเมียมในสารละลายสูงที่สุด ส่วนรอบที่ 1-3 ปริมาณโครเมียมที่หลุดออกมาในสารละลายเพิ่มขึ้นตามลำดับและท้ายๆ (รอบที่ 6-8) ปริมาณโครเมียม จะถูกล้างออกในปริมาณที่ค่อนข้างคงที่ (ภาพที่ 2.26)



ที่มา : Chermisinoff F, P.N., 1978 หน้า 902

ภาพที่ 2.25 ปริมาณโครเมียมที่ถูกดูดซับและปริมาณโครเมียมที่เหลือในสารละลายของการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ด้วยน้ำ กรด และด่าง



ที่มา : Chermisinoff, 1978: 903

ภาพที่ 2.26 ปริมาณโครเมียมที่เหลืออยู่ในสารละลายของการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้ว

วารุณี ศุภเสวตหิรัญ (2542) ศึกษาการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วที่ใช้ในการดูดซับ กรดน้ำส้ม(acetic acid)ในอุตสาหกรรมยาง โดยการฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีทางเคมีด้วยสารละลายของด่าง โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดหรือเม็ดที่ใช้ชื่อทางการค้า “BPL” ขนาด 4x10 เมช จากการทดลองพบว่าสารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปริมาณ 17 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อ 10 กรัมของถ่านกัมมันต์ ในเวลาที่ใช้ 30 และ 60 นาที ตามลำดับ เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้ว หากใช้สารละลายของ โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จำนวน 11 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้ว 10 กรัม ในเวลา 15 นาที และพบว่าหากความเข้มข้นของสารละลายด่างที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วสูงเกินไป ที่ความเข้มข้นร้อยละ 25 ประสิทธิภาพของการฟื้นฟูสภาพจะต่ำลง โดยการวัดค่าไอโอไดน นัมเบอร์

สุภิรักษ์ สิริสิทธิโชติ (2539) ได้ศึกษาการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่อิ่มตัวด้วยสาร อินทรีย์ในวัฏภาคของเหลวกลับมาใช้งานใหม่ โดยใช้สารลดแรงตึงผิวในการรวมตัวกับสารอินทรีย์ที่ ผิวนอกของถ่านกัมมันต์ที่ใช้งานจนหมดสภาพแล้วเพื่อเกิดเป็นรูปไมเซลล์(Micellization) สารอินทรีย์จะ หลุดออกมาจากผิวถ่านกัมมันต์ไปอยู่ในสารละลายลดแรงตึงผิว(Solubilization)มากกว่าอยู่ในสภาวะ ปกติ การศึกษาโดยใช้ถ่านกัมมันต์ดูดซับสารอินทรีย์ คือ ฟีนอลจนอิ่มตัว และเมื่อถ่านกัมมันต์ หมดคุณสมบัติในการดูดซับแล้ว จึงใช้สารอินทรีย์ลดแรงตึงผิว คือ โซเดียมโคเดคซิลซัลเฟตในการ ฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ ซึ่งสามารถคืน สภาพถ่านกัมมันต์ได้ร้อยละ 26