

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คลอรีน

2.1.1 คุณสมบัติของคลอรีน

คลอรีนที่อุณหภูมิและความดันปกติ จะมีสภาพเป็นก๊าซที่มีสีเขียวตองอ่อน กลิ่นฉุน มีความเป็นพิษอย่างรุนแรงต่อสิ่งมีชีวิต มีสภาพเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำกว่า -15 องศาเซลเซียส อยู่ในอากาศจะเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตทุกชนิด

คลอรีนจะอยู่ในสถานะก๊าซสีเขียว โดยจะเกิดปฏิกิริยากับสารอินทรีย์และอนินทรีย์ได้ โดยสมบัติทางกายภาพและทางเคมีบางประการของคลอรีนคือ

มวลโมเลกุล	70.906	
จุดเดือด	-34.6 องศาเซลเซียส	
จุดเยือกแข็ง	-100.98 องศาเซลเซียส	
ความหนาแน่น	3.214 กรัมต่อลิตร	
ความสามารถในการละลาย	14.6 กรัมต่อลิตร	(WHO,1982)

2.1.2 เคมีในน้ำของคลอรีน

คลอรีนที่ใช้ในโรงงานผลิตน้ำประปาจะอยู่ในรูปต่างๆ ได้แก่ ก๊าซคลอรีน (Cl_2) สารละลาย Calcium hypochlorite [$Ca(OCl)_2$] สารละลาย Sodium hypochlorite (NaOCl) และ Chlorine dioxide (ClO_2)

สารประกอบคลอรีนดังกล่าวเมื่อละลายน้ำจะเกิดปฏิกิริยาในรูปต่างๆ ดังนี้

1) คลอรีนอิสระ (free chlorine) คือ คลอรีนที่อยู่ในรูปกรดไฮโปคลอรัส (HOCl), อนุมูลไฮโปคลอไรท์ (OCl^-) หรือก๊าซคลอรีน (Cl_2) ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



ที่อุณหภูมิปกติ เมื่อเติมคลอรีนลงในน้ำปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้และเสร็จสมบูรณ์ ภายใน 2-3 วินาทีเท่านั้น แต่สารละลายเจือจางและค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ต่ำ ปฏิกิริยาจะเกิดค่อนข้างช้า และมีคลอรีน (Cl_2) หลงเหลืออยู่ในปฏิกิริยาเล็กน้อย

นอกจากนี้ HOCl ยังแตกตัวได้อีก ดังสมการ



ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นได้เร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับค่าพีเอชและอุณหภูมิ ถ้าค่าพีเอชต่ำจะเกิด

HOCl ซึ่งความเป็นพิษสูงกว่า OCl^-

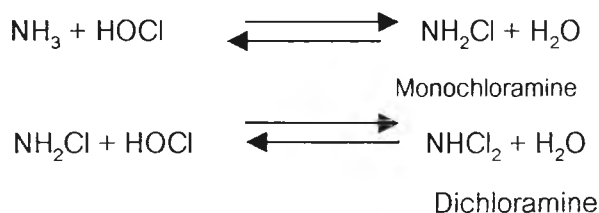
นอกจากนี้ เมื่อใช้ $\text{Ca}(\text{OCl})_2$ หรือ NaClO แทน Cl_2 เมื่อเติมลงไปลงในน้ำจะได้ปฏิกิริยา ดัง

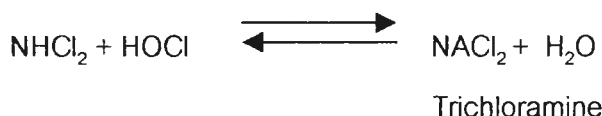


2) คลอรีนรวมตัว (combined chlorine) คือสารคลอรีนที่อยู่ในรูปของสารประกอบอื่นๆ เช่น แอมโมเนีย (NH_3) หรือสารอินทรีย์ไนโตรเจน (organic nitrogen) ซึ่งแอมโมเนียเมื่ออยู่ในน้ำจะมีลักษณะ ดังนี้



เมื่อเติมคลอรีน (Cl_2) หรือ Hypochlorite จะเกิดปฏิกิริยาดังต่อไปนี้

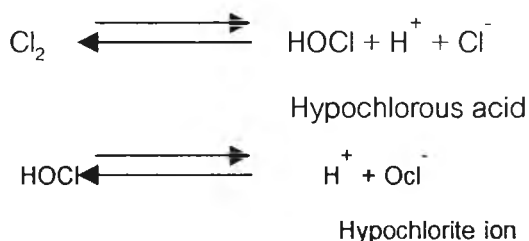




Monochloramine และ Dichloramine จะมีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตมาก ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับพีเอช , เวลา, อุณหภูมิ และอัตราส่วนระหว่างคลอรีนและแอมโมเนีย

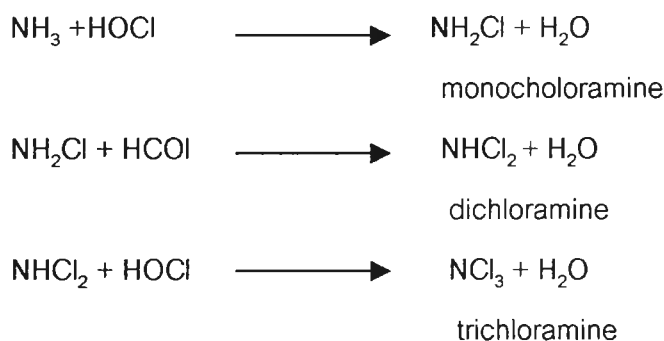
3) คลอรีนตกค้าง (residual chlorine) คือ คลอรีนที่หลงเหลืออยู่ในน้ำภายหลังปฏิกิริยาต่างๆ ในน้ำแล้ว เมื่อทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ต่างๆ ถ้าเหลืออยู่ในสภาพคลอรีนอิสระก็เรียกว่า free chlorine residual ถ้าคลอรีนจำนวนนั้นรวมตัวกันอยู่เป็นรูปของสารประกอบในโตรเจน ก็เรียกว่า combined chlorine residual

คลอรีนอิสระที่เหลือค้าง (Free Chlorine Residual) ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นระหว่างคลอรีนและน้ำ โดยอัตราเร็วและประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ พีเอช และอื่นๆ

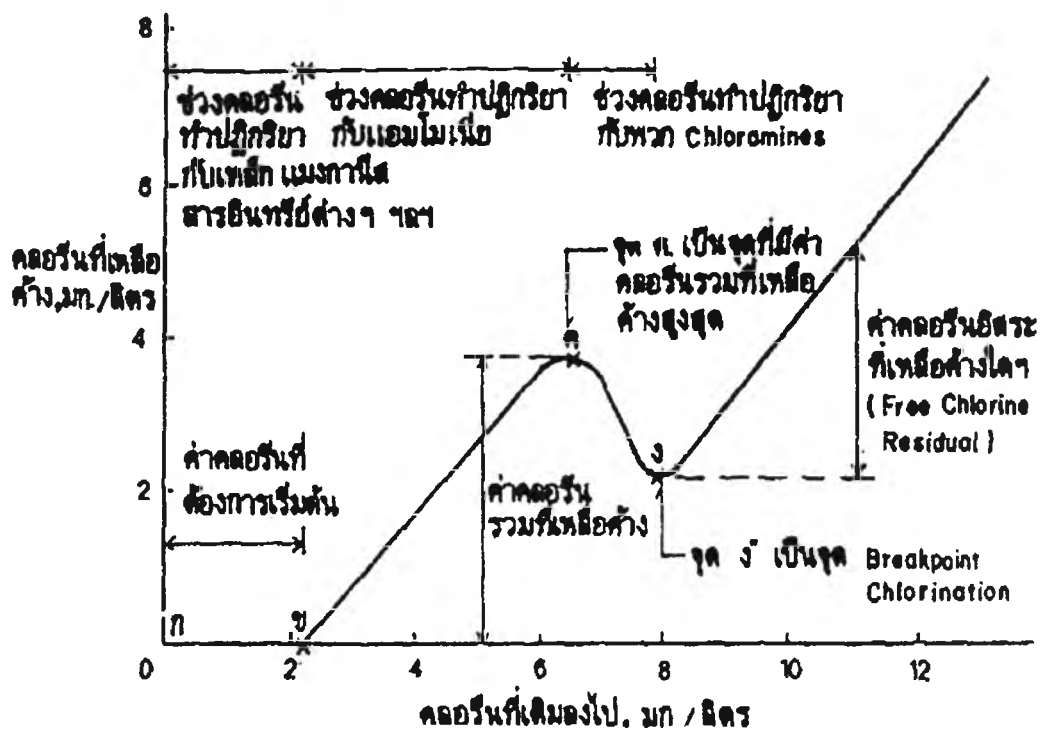


สาร HOCl และ OCl⁻ ที่อยู่ในน้ำประปา ก็คือ คลอรีนอิสระที่เหลือค้างอยู่โดย HOCl จะมีความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคได้มากกว่าของของ OCl⁻ ถึง 40-80 เท่า สาร HOCl จะมีปริมาณมากกว่าของ OCl⁻ เมื่อน้ำมีค่าพีเอชต่ำๆและจะมีปริมาณทั้งสองเท่าเทียมกันเมื่อน้ำมี pH ประมาณ 7.5 ทำให้การฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาจำเป็นต้องพิจารณา ซึ่งน้ำประปามักจะมี pH สูงกว่า 7.0 เสมอ พบว่าการใช้ก๊าซคลอรีนจะมีความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคได้มากกว่าของ OCl⁻

คลอรีนรวมที่เหลือค้าง (Combined Chlorine Residual) คลอรีนได้ทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียเพื่อได้พวก Chloramine และ monochloramine dichloramine และ trichloramine ดังแสดงในปฏิกิริยาเคมีข้างล่างโดยพวก Chloramines นี้จะมีความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาน้อยมาก



จุดเริ่มเกิด Free Chlorine Residual (Breakpoint Chlorination) คลอรีนจะเติมลงไปใ
น้ำประปาด้วยปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อย โดยจะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างคลอรีนกับปฏิกิริยาเคมีระหว่าง
คลอรีนกับแอมโมเนีย ซึ่งทำให้เกิดคลอรีนรวมที่เหลือค้าง (Combined chlorine residual) เพิ่มขึ้น
เรื่อยๆ จนถึงจุด "ค" เมื่อแอมโมเนียถูกทำปฏิกิริยากับคลอรีนจนหมดสิ้นได้เป็นพวก chloramines
ต่างๆซึ่งได้ทำปฏิกิริยากับคลอรีนจนได้เป็นพวก N_2O และก๊าซไนโตรเจน ทำให้ค่า Residual
chlorine ลดลงจากจุด "ค" จนถึงจุด "ง" ซึ่งนิยม เรียกจุด "ง" นี้ว่า Breakpoint Chlorination ดัง
แสดงไว้ในรูป 2.1 จากจุดนี้เมื่อมีการเติมคลอรีนเพิ่มขึ้นอีก จะทำให้เกิดค่าคลอรีนอิสระที่เหลือค้าง
(Free chlorine Residual) ด้วยอัตราเพิ่มขึ้นเท่ากับปริมาณคลอรีนที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ



รูปที่ 2.1 กราฟการเกิด Breakpoint Chlorination (ธงชัย, 2540)

2.1.3 ประโยชน์ของคลอรีน

- 1) ใช้ฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปา, น้ำทิ้งชุมชนและโรงงาน
- 2) ใช้ฟอกขจัดสีในโรงงานกระดาษและโรงงานย้อมผ้า
- 3) ใช้ในระบบหล่อเย็น
- 4) ใช้ในการทำความสะอาดในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ปลา กุ้ง และในอุตสาหกรรมแช่เย็น
- 5) ใช้ในการทำความสะอาดในด้านเกษตรกรรม เช่น ทำความสะอาดโคนมก่อนรีดนม
- 6) ใช้ฆ่าเชื้อโรคในสระว่ายน้ำ และป้องกันไม่ให้สาหร่ายขึ้น
- 7) ใช้สารตั้งต้นการผลิต 1,2-dichloroethane (ethylene dichloride), Chloroethylene (vinyl chloride), Chlorinated ethane solvents, และ 2-chloro-

1-propanol-methylo-xirane (propylove chorohydrin-propylene oxide)
(WHO,1982)

2.1.4 โทษของคลอรีน

คลอรีนเมื่อมีความเข้มข้นจะกัดกร่อนโลหะเกือบทุกชนิดให้ผุพังเร็วกว่าที่ควร ก๊าซคลอรีนเป็นก๊าซพิษเป็นอันตรายแก่อวัยวะของร่างกาย เช่น ตา จมูก ผิวหนัง เมื่อถูกคลอรีนจะอักเสบและบวมพอง ถ้าสูดดมเข้าไปจะเกิดอาการอึดอัด หายใจไม่สะดวก เจ็บคอ และหน้าอก

การเติมคลอรีนลงในน้ำประปาสามารถทำให้ฆ่าเชื้อโรค (Disinfection) ทำให้กำจัดกลิ่นและรสชาติได้ และกำจัดสีออกได้ สารคลอรีนยังสามารถกำจัดพวกแอมโมเนีย เหล็ก แมงกานีส และซัลไฟด์ได้อีกด้วย โดยข้อดีของการใช้คลอรีนในน้ำประปาคือ

- 1) ราคาถูก
- 2) มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคสูง
- 3) สามารถจัดหาได้ง่าย
- 4) ไม่มีอันตรายต่อมนุษย์และสัตว์ขนาดใหญ่ เมื่อมีปริมาณไม่มาก
- 5) คลอรีนสามารถมีหลงเหลือค้างอยู่ในน้ำประปา

แต่ข้อเสียของการใช้คลอรีนในน้ำประปาก็มีดังต่อไปนี้

- 1) จะเกิดสภาพกรด ได้แก่ HCl
- 2) ปริมาณเกลือที่ละลายน้ำเพิ่มขึ้น (Total Dissolved Salts)
- 3) เกิดสารพวก Carcinogenic ซึ่งก่อมะเร็งได้
- 4) ต้องระมัดระวังในความปลอดภัย เกี่ยวกับปริมาณที่เติมลงในน้ำประปาและระบบเติมคลอรีนที่ใช้ก๊าซคลอรีนอาจถึงตาย ถ้าสูดดมปริมาณมากเกินไป

นอกจากนี้คลอรีนยังก่อให้เกิดปัญหากลิ่นและรสในน้ำประปา โดยเกิดปฏิกิริยากับฟีนอล (phenol) ทำให้เกิดสารประกอบคลอโรฟีนอล เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นโดยไม่สมบูรณ์ ดังนั้นในน้ำประปา ระบบท่อส่งน้ำที่ผ่านการเติมคลอรีนจึงมีปัญหาเรื่องกลิ่นและรสได้ง่าย (มันลิน,2540)

2.1.5 การกำจัดคลอรีน

1) การผ่านผงคาร์บอน ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



2) การใช้แสงอุลตราไวโอเล็ต

3) การใช้สารเคมีทำปฏิกริยากับคลอรีน

- ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)
- แอมโมเนีย (NH_3)
- โซเดียมไทโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)

การใช้สาร 4 ชนิดเพื่อให้คลอรีนเปลี่ยนเป็นคลอไรด์ คือ

- Sulfur dioxide (S_2O_3)
- Sodium bisulfite (NaHSO_3)
- Sodium sulfite (Na_2SO_3)
- Sodium bisulfate ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$)

4) การเติมอากาศเพื่อไล่คลอรีนจากน้ำประปา

2. 2 แมงกานีส

2.2.1 แมงกานีสในธรรมชาติ

แมงกานีสมีปรากฏอยู่ทั่วไปในธรรมชาติในแร่ต่างๆ เช่น pyrolusite (MnO_2), Braunitz ($\text{Mn}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), Hausmannite (Mn_3O_4) และ Rhodochrosite (MnCO_3) แร่ที่สำคัญคือ pyrolusite แมงกานีสทั่วไปจะพบในธรรมชาติ แต่จะไม่พบในรูปอิสระ สารประกอบแมงกานีสส่วนมากจะอยู่ในรูปออกไซด์ (pyrolusite, braunitz, manganite, hausmannite), ซัลไฟด์ (manganese blende hausnerite), คาร์บอเนต (manganese spar) และ ซิลิเกต (ใน tephroite, knebelite rhodamite)

น้ำในธรรมชาติมักมีแมงกานีสละลายอยู่ เนื่องจากสาเหตุดังนี้

- 1) เกิดจากการละลายของแร่ธาตุที่มีแมงกานีสผสมอยู่ เช่น น้ำในมหาสมุทรที่มีแร่ธาตุละลายอยู่ เป็นต้น
- 2) เกิดจากการปล่อยน้ำเสียจากเหมืองแร่หรือน้ำเสียจากกระบวนการทำแร่และโลหะ
- 3) เกิดจากการเนาเปื้อนของซากพืชซากสัตว์

แมงกานีสมักพบอยู่ในแหล่งน้ำธรรมชาติและน้ำประปา โดยมักปะปนอยู่กับเหล็กเสมอ แต่ทั่วไปมักมีปริมาณน้อยกว่า แมงกานีสจะพบในน้ำบาดาลมากกว่าน้ำผิวดิน

2.2.2 คุณสมบัติของแมงกานีส

แมงกานีสบริสุทธิ์มีคุณสมบัติที่สำคัญดังนี้

- 1) เป็นโลหะสีขาวหรือเทา คล้ายกับเหล็กมาก แต่แข็งและเปราะกว่า ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี เมื่อทิ้งไว้ในอากาศจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน กลายเป็นแมงกานีสออกไซด์มีสีดำ
- 2) น้ำหนักอะตอม 54.938
- 3) ความหนาแน่น 7.43 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
- 4) จุดหลอมเหลว 1244 องศาเซลเซียส
- 5) จุดเดือด 1962 องศาเซลเซียส
- 6) สามารถละลายได้ในกรดอินทรีย์ต่างๆ

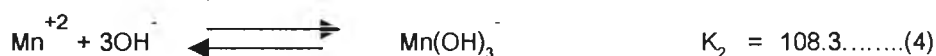
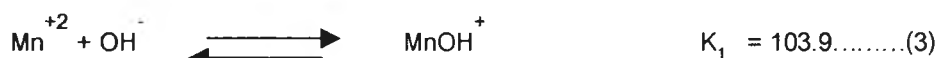
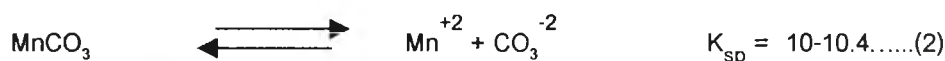
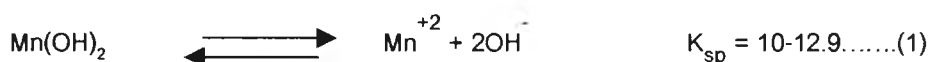
แมงกานีสเป็นโลหะที่แข็งและเปราะถึงแม้ว่าอุณหภูมิปกติ จะไม่ค่อยทำปฏิกิริยากับอากาศ แต่ที่อุณหภูมิสูงขึ้น จะทำปฏิกิริยาได้ดีขึ้น เช่น เมื่อเผาให้ร้อนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน คลอรีน และกำมะถัน และเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำอุ่น จะให้ก๊าซไฮโดรเจน แมงกานีสสามารถละลายได้ในกรดเจือจาง เช่น กรดเกลือ กรดกำมะถัน แล้วเกิดเป็น Mn^{2+} กับก๊าซไฮโดรเจน แมงกานีสเป็นธาตุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา ถ้าอยู่ในรูปของโลหะที่เป็นก้อนจะทำปฏิกิริยาช้า แต่ถ้าเป็นผงจะทำปฏิกิริยาได้ง่าย แมงกานีสมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาคลายคล้ายคลึงกับเหล็กมาก สารประกอบของแมงกานีสมีหลายชนิด โดยแมงกานีสมีเลขออกซิเดชัน +1 ถึง +7 แต่ที่พบมากมักเป็น +2 , +4 , +7 ในรูปของเกลือ แมงกานีสที่มีเลขออกซิเดชัน +2 จะเสถียรที่สุด เช่น

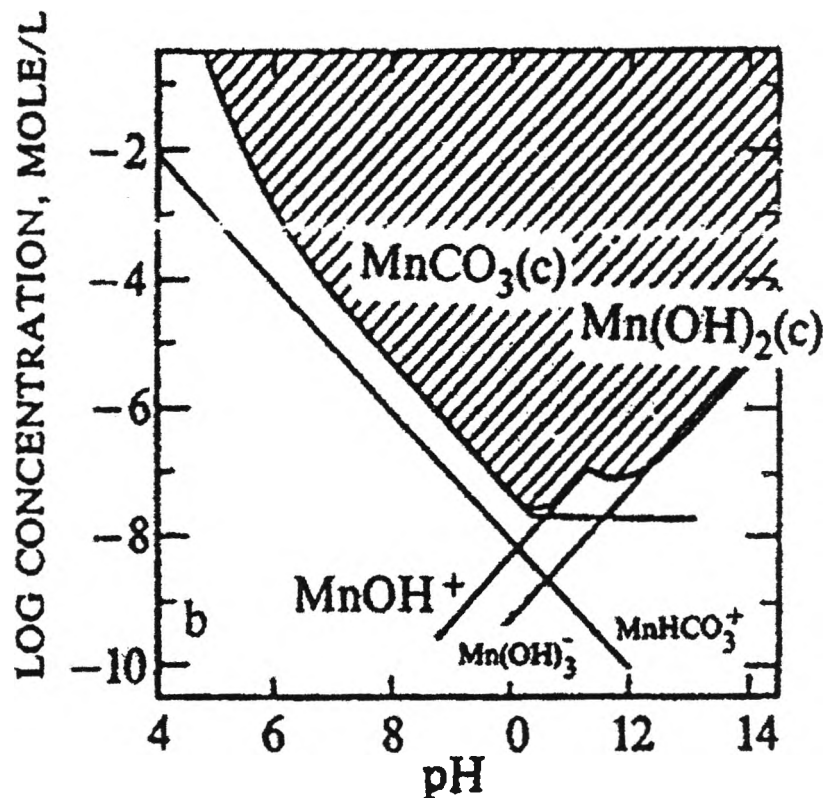
MnCl₂ , MnSO₄ และ Mn(NO₃)₂ แต่ในรูปของออกไซด์ซึ่งมีทั้งหมด 6 ตัว คือ MnO , Mn₃O₄ , Mn₂O₃ , MnO₂ , MnO₃ , และ Mn₂O₇ แมงกานีสไดออกไซด์ (แมงกานีสมีเลขออกซิเดชัน +4) เสถียรที่สุด ออกไซด์ที่พบมากและรู้จักกันดี คือ MnO , Mn₃O₄ , MnO₂ และ Mn₂O₇ ออกไซด์ของแมงกานีสที่มีเลขออกซิเดชันต่ำ เช่น MnO และ Mn₂O₃ มีสมบัติเป็นเบส และออกไซด์ของแมงกานีสที่มีเลขออกซิเดชันสูงขึ้นไปจะมีสมบัติเป็นกรดมากขึ้น นอกจากนี้สารประกอบแมงกานีส เช่น K₂MnO₄ (แมงกานีสมีเลขออกซิเดชัน +6) และเปอร์แมงกานีส เช่น KMnO₄ (แมงกานีสมีเลขออกซิเดชัน +7) ก็เป็นสารประกอบของแมงกานีสที่เสถียร

2.2.3 เคมีของแมงกานีส

เคมีของแมงกานีสในน้ำมีลักษณะคล้ายคลึงกับเหล็ก คือ แมงกานีสจะอยู่ได้หลายสถานะ ดังนี้ คือ Mn(III) , Mn(II) , Mn(IV) , Mn(VI) และ Mn(VII) โดยมากแมงกานีสจะอยู่ในรูปออกไซด์ คาร์บอเนต และไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้น้อย (ประปราย) แต่ที่พบว่าสำคัญต่อเคมีแมงกานีสในธรรมชาติ คือ Mn(II) และ Mn(IV) โดย Mn(VII) จะมีบทบาทสำคัญมากที่สุด ซึ่งแสดงถึงสถานะต่างๆ ของแมงกานีสที่พีเอชและพีอีค่าต่างๆ จะเห็นได้ว่าช่วงพีอีและพีเอชของน้ำธรรมชาติส่วนใหญ่แมงกานีสจะอยู่ในสถานะของ Mn²⁺ (aq) ละลายน้ำที่มีพีเอชเป็นกลางหรือต่ำ ส่วน Mn(OH)₂ ละลายน้ำที่พีเอชสูง แสดงในรูปที่ 2.2 ดังนี้

นั้น ในน้ำธรรมชาติ MnCO₃ จึงเป็นสารประกอบที่พบมากที่สุดในการกำหนดความเข้มข้นของแมงกานีสในน้ำ สมการต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณเกี่ยวกับสารละลายและการตกผลึกของสารประกอบแมงกานีส ดังนี้





รูปที่ 2.2 แสดงการละลายของ Mn (II) ที่ 25 องศาเซลเซียส(มันลิน , 2540)

น้ำผิวดินมักมีเหล็กและแมงกานีสละลายอยู่น้อยกว่าน้ำใต้ดิน ทั้งนี้ น้ำผิวดินมักมีออกซิเจนละลายน้ำอยู่เสมอ ทำให้มีการตกผลึกของเหล็กและแมงกานีส และในที่สุดจะตกตะกอนลงสู่ก้นคลองหรือก้นแม่น้ำหากพื้นดินเกิดการหมักแบบไร้ออกซิเจน เหล็กและแมงกานีสสามารถละลายน้ำได้ใหม่ กรณีเช่นนี้มักเกิดขึ้นกับในอ่างเก็บน้ำหรือบึงขนาดใหญ่ การพลิกตัวของน้ำเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ทำให้น้ำตื้นซึ่งมีแมงกานีสและเหล็กละลายอยู่ เคลื่อนที่ขึ้นสู่ตลิ่ง ดังนั้น ถ้าแหล่งน้ำดิบเป็นอ่างเก็บน้ำ การวางตำแหน่งของปากท่อขนส่งน้ำดิบที่ไม่ถูกต้อง อาจทำให้มีเหล็กและแมงกานีสอยู่ในน้ำประปาปรากฏแก่ผู้ใช้น้ำครั้งคราวดังแสดงในตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงปริมาณแมงกานีสในน้ำดิบเพื่อใช้ในการผลิตน้ำประปาของโรงงานกรองน้ำมหาสวัสดิ์ (กองควบคุมคุณภาพน้ำประปา การประปานครหลวง, 2540)

เดือน	ปี พ.ศ.2542	ปี พ.ศ.2543
ม.ค.	0.56	0.08
ก.พ.	0.35	0.10
มี.ค.	0.04	0.11
เม.ย.	0.04	0.06
พ.ค.	0.07	0.56
มิ.ย.	0.11	0.08
ก.ค.	0.17	0.11
ส.ค.	0.21	0.12
ก.ย.	0	0.09
ต.ค.	0.10	0.01
พ.ย.	0.08	0.09
ธ.ค.	0.08	0.08

2.2.4 ประโยชน์ของแมงกานีส

- 1) ใช้ประโยชน์ในการทำโลหะผสม เช่น ใช้ส่วนผสมในการทำเหล็กกล้า (steel) หรือเหล็กหล่อ (cast iron) เพื่อให้สมบัติบางประการดีขึ้น เช่น เพิ่มความแข็ง ความเหนียว หรือค่าทนต่อการกัดกร่อนของกรดและด่าง
- 2) อุตสาหกรรมผลิตถ่านไฟฉาย ส่วนมากใช้แร่แมงกานีสไดออกไซด์ โดยใช้เป็นตัวดีโพลไรเซอร์ (depolarizer) แร่นี้จะมีแมงกานีสเป็นองค์ประกอบอยู่มากกว่า 72% มีเหล็กปนอยู่ไม่เกิน 2.5% และไม่มีโลหะอย่างอื่นเจือปน เนื้อแร่ด้านไม่มีรูปผลึก

- 3) อุตสาหกรรมเคมีบางประเภท เช่น การทำด่างทับทิม (KMnO_4) หรือการทำสารเคมีที่ใช้ในการฟอกหนัง เป็นต้น
- 5) อุตสาหกรรมการผลิตวัสดุภัณฑ์เคมี ซึ่งจำเป็นต้องใช้แมงกานีสเป็นส่วนประกอบ ได้แก่ การทำสีย้อม สีทาบ้าน ทำปุ๋ยสังเคราะห์ ผสมให้เกิดสีในเครื่องเคลือบเซรามิก และผสม ในการทำอิฐจะทำให้อิฐทนความร้อนสูง
- 6) อุตสาหกรรมยา ใช้ทำยาฆ่าเชื้อรา

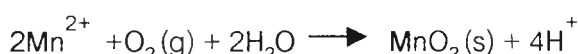
2.2.5. ปัญหาที่เกิดจากแมงกานีส

- 1) ก่อให้เกิดปัญหาการอุดตันท่อขนส่งน้ำ
- 2) ทำให้น้ำมีลักษณะไม่น่าดู และไม่ชวนใช้หรือชวนชิม ซึ่งการดื่มน้ำที่มีปริมาณแมงกานีสไม่มีอันตราย
- 3) ก่อให้เกิดปัญหาในการซักผ้า ทำให้เครื่องสุขภัณฑ์ต่างๆ สกปรกเช่นเกิดคราบสนิม นอกจากนี้และแมงกานีสยังก่อให้เกิดปัญหากับการใช้น้ำในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น โรงงานกระดาษ โรงงานอุตสาหกรรม โรงงานสิ่งทอ เป็นต้น (มันสิน, 2540)
- 4) ทำให้น้ำมีรสในความเข้มข้นต่ำๆ (กรรณิการ์, 2525)

มาตรฐานน้ำดื่มองค์การอนามัยโลกกำหนดไว้ว่า ควรมีแมงกานีสไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร และยอมให้มีแมงกานีสได้สูงสุดเท่ากับ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตรในน้ำประปา (ธงชัย, 2540)

2.2.6 การกำจัดแมงกานีส

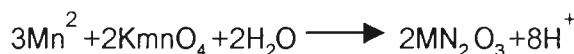
- 1) วิธีเติมอากาศตามด้วยการกรอง หรือการตกตะกอนและการกรอง ซึ่งก็คือทำการเปลี่ยนสภาพเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำการออกซิเดชันด้วยการเติมอากาศ (Aeration)



- 2) วิธีเติม KMnO_4 และคลอรีน หรือคลอรีนไดออกไซด์
การออกซิเดชันด้วยคลอรีน เกิดได้ดีในช่วงพีเอช 8.5-10



การออกซิเดชันด้วยเปอร์แมงกาเนต ออกซิไดซ์แมงกานีสให้อยู่ในรูปออกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำ



การกำจัดด้วยคลอรีนไดออกไซด์ (ClO_2) คลอรีนไดออกไซด์ (ClO_2) ทำปฏิกิริยากับแมงกานีสได้รวดเร็ว ออกซิไดซ์ให้เป็นแมงกานีสไดออกไซด์

3) การกำจัดเหล็กและแมงกานีสด้วยสารพิเศษ

สารพิเศษในที่นี้ได้แก่

- สารแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Resin)
- สารกรองที่เคลือบผิวด้วย MnO_2
- Activated Carbon

การกำจัดด้วยสารแลกเปลี่ยนไอออน การใช้สารแลกเปลี่ยนไอออนในการกำจัดแมงกานีสสามารถกระทำได้เฉพาะในกรณีที่มีสารทั้งสองอยู่ในระดับต่ำ มิฉะนั้นแล้ว อาจเกิดปัญหาหลายอย่างขึ้น เช่น ปัญหาอุดตัน การเสื่อมสภาพของการเปลี่ยนแปลงไอออน เป็นต้น

การกำจัดด้วยทรายเขียว เมื่อผ่านที่มีแมงกานีสในชั้นของ Zeolite หรือทรายเขียวซึ่งเป็นสารแลกเปลี่ยนไอออนที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ แมงกานีสจะเกาะจับเคลือบผิวของ Zeolite ในรูปของ MnO_2 ซึ่งเป็นผลึก แมงกานีสไดออกไซด์จะช่วยในการออกซิไดซ์เหล็ก (II)

และแมงกานีส (II) ให้เป็นผลึกซึ่งสามารถติดค้างอยู่ในชั้นกรอง ในขณะที่ตัวของ MnO_2 จะกลายเป็น Mn_2O_3 ซึ่งสามารถทำให้คืนสู่รูปเดิม (Regeneration) ได้โดยใช้ KMnO_4

ในกรณีที่น้ำดิบได้ผ่านกระบวนการแอโรชันมาก่อน MnO_2 ที่เคลือบบนสารกรองสามารถเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็กหรือแมงกานีสกับออกซิเจนได้ โดยไม่มีอะไรเกิดขึ้นกับ MnO_2 ทำให้ไม่ต้องมีการทำ Regeneration ด้วยสารละลาย KMnO_4

4) การใช้ฟอสเฟต ถ้าน้ำมีองค์ประกอบของแมงกานีส 0.3 มิลลิกรัม/ลิตร เป็นวิธีที่มีราคาถูกและเหมาะสมในการควบคุมสามารถกระทำได้โดยเติมสารโพลีฟอสเฟต (Polyphosphate) เช่น ไตรโพลีฟอสเฟต (Tripolyphosphate) และ เมตาฟอสเฟต (Metaphosphate)

5) การใช้ปูนขาว (Ca(OH)_2) แมงกานีสที่ละลายน้ำ สามารถเปลี่ยนเป็นแมงกานีสที่ไม่ละลายน้ำอย่างรวดเร็วที่พีเอชมากกว่า 9.5



6) การกำจัดด้วยโอโซน (O_3) ปฏิกิริยาระหว่างแมงกานีสและโอโซนแสดงให้เห็นดังสมการต่อไป



พีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วงกว้าง

2.3 สี

สีของน้ำเกิดขึ้นจากสาเหตุใหญ่ 3 ประการคือ

1) เกิดจากการสลายตัวของพวกสารอินทรีย์ต่างๆ เช่น ใบไม้ ใบหญ้า ซากสัตว์ เมื่อสลายตัวจะให้สารพวกแทนนิน กรดฮิวมิกและฮิวเมต ซึ่งมีสีน้ำตาลปนเหลือง หรือสีน้ำชา

2.) เกิดจากอิออนของโลหะในน้ำ เช่น เหล็ก แมงกานีส

3)เกิดจากน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงงานฟอกหนัง โรงงานกระดาษ หรือเกิดจากน้ำทิ้งของฟาร์มต่างๆ

2.3.1 สีของน้ำอาจแบ่งได้ 2 ประเภทคือ

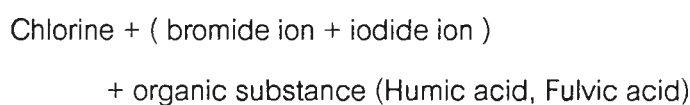
1) สีแท้หรือสีจริง (True Color) หมายถึง สีที่ละลายกลายเป็นเนื้อเดียวกับน้ำ สีแท้เกิดจากสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากประเภทกรดฮิวมิกและกรดฟัลลิก ซึ่งเป็นผลมาจากการย่อยสลายตัวของพืชต่างๆ กรดอินทรีย์เหล่านี้เป็นสารที่มีความคงตัวสูงมาก จนไม่สลายตัวอีกต่อไปแล้ว การกำจัดสีจากน้ำจึงไม่สามารถทำได้โดยง่าย

2) สีปรากฏ (Apparent Color) หมายถึงสีของน้ำที่สามารถกำจัดได้โดยวิธีกายภาพ เช่น ตกตะกอน การกรอง เป็นต้น การกำจัดสีปรากฏออกจากน้ำทำให้เห็นสีที่แท้จริงของน้ำ (มันสีน)

มาตรฐานน้ำดื่มองค์การอนามัยโลกจะต้องมีความเข้มสีในน้ำดื่มไม่เกิน 5 หน่วย โดยอาจยอมรับสูงสุดได้ถึง 50 หน่วย (ธงชัย, 2540)

กรดฮิวมิกเป็นอนุพันธ์สารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในน้ำธรรมชาติ โดยเกิดจากการย่อยสลายพืชและสัตว์และแร่ธาตุในดิน แต่จะไม่แยกตัวเป็นสารประกอบดังเช่นโปรตีน polysaccharide และ

polynucleotides จึงไม่สามารถระบุนิวคลีโอไทด์และโครงสร้างที่แน่ชัด เมื่อลงสู่แหล่งน้ำจะก่อให้เกิดสีเหลือง-สีน้ำตาล ทำให้แหล่งน้ำมีสีที่ไม่น่านำมาบริโภคและอุปโภค และนอกจากนี้ยังจะก่อให้เกิดปัญหาโดยจะทำปฏิกิริยากับคลอรีน ทำให้เกิดอนุพันธ์ของมีเทนซีน อะตอมของไฮโดรเจนจะถูกแทนที่ด้วยอะตอมของคลอรีน โบรมีน และไอโอดีน เกิดเป็นสารประกอบพวกไตรฮาโลมีเทนคือ คลอโรฟอร์ม (CHCl_3) โบรโมไดคลอโรมีเทน (CHBrCl_2), ไดโบรโมคลอโรมีเทน (CHBr_2Cl), โบรโมฟอร์ม (CHBr_3) และไดคลอโรไอโอดีมีเทน ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งคลอโรฟอร์มซึ่งจะพบมากในน้ำดื่ม พวกไตรฮาโลมีเทนจะเกิดขึ้นระหว่างการบำบัดที่ผิวน้ำ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังนี้



trihalomethane + other halogenated compounds

2.3.2 การกำจัดสี

การกำจัดสี นิยมใช้กระบวนการดังต่อไปนี้

- 1) การใช้แอกติเวตเต็ดคาร์บอน
- 2) การแลกเปลี่ยนไอออน
- 3) ขบวนการเยื่อเลือกผ่าน
- 4) วิธีกรอง
- 5) วิธีคลอรีน
- 6) วิธีตกตะกอน

2.4 การดูดติดผิว

การดูดติดผิวเป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือก๊าซให้มาเกาะจับและติดผิวของมัน ปรากฏการณ์เช่นนี้จัดเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass Transfer) จากของเหลวหรือก๊าซมายังโมเลกุล หรือคอลลอยด์

การเกาะจับของโมเลกุลบนผิวของสาร อาจเกิดขึ้นด้วยแรงกายภาพ หรือด้วยแรงเคมีทั้งสองอย่าง

การดูดติดผิวเป็นการดูดซับของสาร เกี่ยวข้องกับการสะสมที่ผิวหน้าของสารสองสภาวะ เช่น ของเหลวและของแข็ง หรือก๊าซและของแข็ง สารที่เกิดการสะสมหรือดูดซับที่ผิวหน้า เรียกว่า สารที่ถูกดูดติดผิวและของแข็งที่ซึ่งมีการดูดซับเกิดขึ้นเรียกว่าสารดูดติดผิว สารดูดติดผิวที่น่าสนใจ ในการทำให้น้ำบริสุทธิ์ประกอบด้วย ถ่านกัมมันต์ สารแลกเปลี่ยนไอออน เป็นต้น

2.4.1 กลไกการดูดติดผิว

เนื่องจากการดูดติดผิวเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass Transfers) จากของแข็งและของเหลวหรือก๊าซและของแข็ง ซึ่งปรากฏการณ์นี้มีขั้นตอนเกิดขึ้น 4 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 Bulk solution transport สารที่ถูกดูดติดผิวจะเคลื่อนที่จากสารละลายสู่ขอบด้านนอกของน้ำที่อยู่ล้อมรอบสารดูดติดผิวการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นโดยการแพร่

ขั้นตอนที่ 2 Film diffusion transport โมเลกุลของสารดูดติดผิวจะแพร่ผ่านชั้นน้ำ (hydrodynamic boundary layer) ที่อยู่ล้อมรอบสารดูดติดผิวเมื่อน้ำเคลื่อนที่ผ่านสารดูดติดผิว ระยะทางในการเคลื่อนที่และเวลาที่เกิดขึ้นของขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับอัตราไหลถ้าอัตราไหลสูงระยะทางสั้น

ขั้นตอนที่ 3 Pore transport หลังจากเคลื่อนที่ผ่านชั้นน้ำ (hydrodynamic boundary layer) สารดูดติดผิวจะเคลื่อนที่ผ่านช่องที่อยู่ภายในสารดูดติดผิวไปสู่บริเวณที่จะเกิดการดูดซับ

ขั้นตอนที่ 4 Adsorption หลังจากมีการเคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่จะมีการดูดซับเกิดขึ้น สารดูดติดผิวทางกายภาพ

ขั้นตอนที่ช้าที่สุด เรียกว่า rate-limiting step ซึ่งควบคุมอัตราการกำจัด ในถัง ปฏิกรที่มีควมดันป่วนสูง film diffusion และ pore diffusion จะควบคุมอัตราการกำจัด film

diffusion จะควบคุมในขั้นต้น หลังจากนั้นเมื่อมีการสะสมของสารดูดติดผิวในช่องภายในสารดูดติดผิว pore diffusion จะควบคุมอัตราการกำจัด

การดูดติดผิวแบ่งเป็น 2 แบบคือ การดูดติดผิวทางกายภาพ (Physical adsorption) ซึ่งเกี่ยวข้องกับกับแรงดึงดูดอย่างอ่อนระหว่างสองโมเลกุล และการดูดติดผิวทางเคมี (Chemisorption) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเกิดพันธะทางเคมีระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวกับผิวหน้าของสารดูดติดผิว

ข้อแตกต่างของการดูดติดผิวทางกายภาพที่แตกต่างจากการดูดติดผิวทางเคมี มีดังต่อไปนี้

1) การดูดติดผิวทางกายภาพไม่เกี่ยวข้องกับการใช้อิเลคตรอนร่วมกันหรือการเคลื่อนย้ายอิเลคตรอน การดูดติดผิวทางกายภาพสามารถย้อนกลับได้ สารถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ออกจากสารดูดซับ (desorption) ที่อุณหภูมิเดียวกัน ส่วนการดูดติดผิวทางเคมีเกี่ยวข้องกับพันธะทางเคมีและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นผันกลับไม่ได้

2) การดูดติดผิวทางกายภาพ ไม่มีความจำเพาะกับบริเวณโมเลกุลของสารดูดติดผิว สามารถดูดติดได้ทั่วทั้งบริเวณผิวหน้าของสารดูดติดผิว ในทางตรงข้ามกัน การดูดติดผิวทางเคมีมีความจำเพาะกับบริเวณที่สามารถดูดติดผิวได้

3) ความร้อนในการดูดติดผิวทางกายภาพ น้อยกว่าการดูดติดผิวทางเคมี ความร้อนในการดูดติดผิวทางกายภาพประมาณ 20 กิโลคาลอรี/โมล สำหรับการดูดติดผิวบนสารดูดติดผิวที่มีโพรงภายในขนาดเล็ก ส่วนความร้อนของการดูดติดผิวทางเคมีอยู่ในช่วง 20-100 กิโลคาลอรี/โมล

2.4.2 ประเภทของสารดูดติดผิว

1) ประเภทสารอินทรีย์ เช่น ดินเหนียว, แมกนีเซียมออกไซด์, ถ่านกระดุก, แอ็คติเวตเต็ดซิลิกา (Activated silica) ฯลฯ มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตาม มีข้อเสียคือ จับโมเลกุลคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด

2) แอ็คติเวตเต็ดคาร์บอน เป็น adsorbent ที่ดีกว่าสารอินทรีย์อื่นๆ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวประมาณ 600-1000 ตารางเมตรต่อกรัม

3) สารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่สารเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นมา เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ มีพื้นที่จำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม แต่มีข้อได้เปรียบ คือสามารถรีเจนอเรตได้ง่ายมากกว่า

2.4.3 ปัจจัยต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการดูดติดผิว

อัตราความเร็วและความสามารถในการดูดติดผิวของคาร์บอนขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆดังต่อไปนี้

1) ความดันป้อน อัตราเร็วในการดูดติดผิวอาจขึ้นอยู่กับกาแพร่ภายนอกและการแพร่ภายใน ซึ่งแล้วความดันป้อนของระบบ ถ้ามีความดันป้อนต่ำฟิล์มซึ่งล้อมรอบสารดูดติดผิวจะมีความหนามาก และอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดติดผิว ดังนั้นการแพร่ภายนอกเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิว ในทางตรงกันข้ามถ้าความดันป้อนสูงจะเกิดฟิล์มบางทำให้การแพร่ภายในเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิว ซึ่งถ้าเพิ่มความเร็วจะทำให้อัตราเร็วของการดูดติดผิวสูงขึ้น เนื่องจากความดันป้อนสูงขึ้น

2) ขนาดและพื้นที่ผิวคาร์บอน มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วของการดูดติดผิวในทางลบคือ อัตราดูดติดผิวเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดคาร์บอน ดังนั้นคาร์บอนผงจึงมีอัตราในการดูดติดผิวมากกว่าคาร์บอนแบบเกร็ด ส่วนพื้นที่ผิวของคาร์บอนนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขีดความสามารถในการดูดติดผิวคือ ถ้าพื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลได้มากกว่า และพื้นที่ผิวส่วนใหญ่มาจากช่องว่างหรือโพรงภายใน ขนาดของคาร์บอน จึงมีบทบาทน้อยในการกำหนดพื้นที่ผิว คาร์บอนทั้งสองแบบจึงมีพื้นที่ผิวช่วยต่อน้ำหนักหน่วยและความสามารถในการดูดติดผิวใกล้เคียงกัน

3) ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดติดผิว เมื่อมีการดูดติดผิวโมเลกุลจะถูกดึงออกจากน้ำ และไปเกาะติดบนผิวของแข็ง สารที่ละลายน้ำได้ (หรือแตกตัวเป็นไอออน) ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่น จึงเป็นสารที่ยากต่อการดูดติดผิว สารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อย มักสามารถเกาะติดคาร์บอนได้ดี แต่ไม่จริงเสมอไป เพราะสารละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดเกาะติดคาร์บอนได้ยาก แต่ในทางตรงกันข้ามการดูดติดผิวอาจเกิดขึ้นได้ง่ายกับสารที่ละลายน้ำได้ดี จึงไม่อาจกล่าวได้ว่ามีความสัมพันธ์อย่างแน่นอนในเชิงปริมาณระหว่างความสามารถในการดูดติดผิว และความสามารถในการละลายน้ำ

4) พีเอช มีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อกรดติดผิวด้วย นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออนเองเป็นไอออนที่สามารถเกาะติดคาร์บอนได้ดี

5) อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดติดผิว กล่าวคืออัตราเร็วเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ และลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการดูดติดผิวจะมีค่าลดลงที่อุณหภูมิสูง และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำเพราะเป็นการดูดติดผิวแบบเิกโซเทอม

2.5 ไอโซเทอมการดูดติดผิว (Adsorption isotherm)

1) ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์

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

โดยที่

X = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดต่อหน่วยน้ำหนักของคาร์บอน; mg/g หรือ moles/g

X_m = ปริมาณของตัวถูกละลายที่มากที่สุดที่ถูกดูดติดเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดี่ยว (Monolayer) ; mg/g หรือ moles/g

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล; mg/g หรือ moles/l

b = ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดติดผิว

เมื่อ X เข้าสู่ X_m และ C_e เข้าสู่สมดุลจากสมการ (1) สามารถเขียนได้เป็น

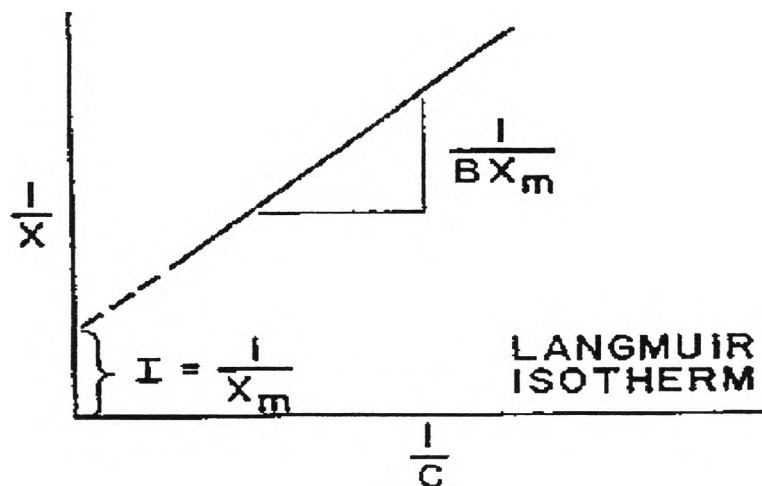
$$C_e/X = (1/bX_m) / (C_e/X_m) \dots\dots\dots(2)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C_e/X กับ C_e ซึ่งเป็นเส้นตรงจะมีความชัน $1/X_m$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/b X_m$ และเมื่อหารด้วย C_e จะได้สมการเส้นตรง

$$1/X = (1/X_m) + (1/C_e)(1/b X_m) \dots\dots\dots (3)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/X$ ระหว่าง $1/C_e =$ ซึ่งเป็นเส้นตรงมีความชัน $1/bX_m$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/X_m$

สมการ (2) และ (3) แสดงดังรูป 2.3



รูปที่ 2.3 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ (valencia และ Gloyna,1972)

2) ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบเบท (BET, Brunauer Emmerett-Teller Adsorption Isoterm)

ไอโซเทอมแบบเบทพัฒนามาจากไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ โดยจากการดูดติดแบบชั้นเดียว เป็นการดูดติดแบบหลายชั้น (Multilayer) ซึ่งแบบจำลองแบบเบทมีพื้นฐานอยู่บนสมมติฐานที่ว่า แต่ละโมเลกุลในชั้นดูดติดผิวชั้นแรก จะเป็นบริเวณที่ซึ่งโมเลกุลชั้นที่สองดูดติด เช่นเดียวกับชั้นต่อไป โดยแสดงดังสมการ

$$X = (X_m \cdot C_e) / (C_s - C_e) [1 + (b-1)C_e / C_s] \dots\dots\dots(4)$$

โดยที่

X= ปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดต่อหน่วยน้ำหนักของคาร์บอน; mg/g หรือ moles/g

X_m=ปริมาณของตัวถูกละลายที่มากที่สุดที่ถูกดูดติดเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว (Monolayer) ; mg/g หรือ moles/g

C_e=ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล; mg/g หรือ moles/l

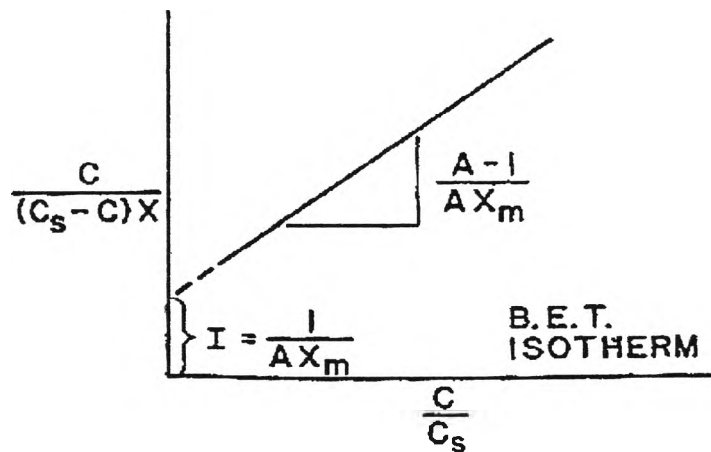
C_s = ความเข้มข้นอิ่มตัวของตัวถูกละลาย; mg/g หรือ moles/l

b= ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดติดผิว

สมการ (4) สามารถเปลี่ยนได้เป็น

$$C_e / X (C_s - C_e) = (1/X_m b) + [(b-1)/ X_m b] (C_e / C_s) \dots\dots\dots(5)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C_e / X (C_s - C_e) กับ C_e / C_s ซึ่งเป็นเส้นตรงที่มีความชัน (b-1)/ X_mb และจุดตัดแกน y เท่ากับ 1/X_m โดยสมการ (5) แสดงดังรูป 2.4



รูปที่ 2.4 ไอโซเทอมการดูดติดแบบเบท (valencia และ Gloyna,1972)

3) ไอโซเทอมการดูดติดแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

สมการการดูดติดผิวแบบฟรอนด์ลิชใช้อย่างแพร่หลายที่สุดในการอธิบายการดูดติดผิวในระบบของเหลว โดยวิธีทางคณิตศาสตร์ ซึ่งมีสมการดังนี้

$$X/m = K C_e^{1/n}$$

โดยที่

X = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดต่อหน่วยน้ำหนักของคาร์บอน; mg/g หรือ moles/g

m = ปริมาณของตัวถูกละลายที่มากที่สุดที่ถูกดูดติดเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดี่ยว (Monolayer) ; mg/g หรือ moles/g

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล; mg/g หรือ moles/l

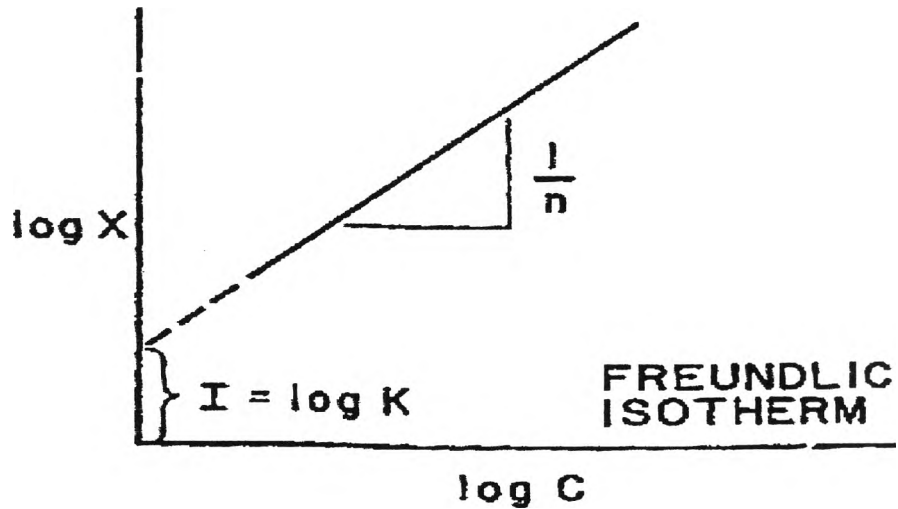
K = ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดติดผิวของคาร์บอน

1/n = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดติดผิว

สมการ (6) สามารถเขียนในรูปแบบลอการิทึม ได้เป็น

$$\log (X/m) = \log K + 1/n \log C_e \dots \dots \dots (7)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง log (X/m) กับ log C_e จะเป็นเส้นตรง ซึ่งมีความชัน 1/n และ log K เป็นจุดตัดแกน y ของ log (X/m) ที่ log C_e = 0 (C_e = 1) โดยแสดงดังรูป 2.5



รูปที่ 2.5 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรอนด์ลิช (valencia และ Gloyna, 1972)

2.6 ถ่านกระดูก (Bone Charcoal)

ถ่านกระดูก คือ สารดูดติดผิวชนิดหนึ่งที่มีประสิทธิภาพและราคาถูก ซึ่งได้จากการบวนการคาร์บอนไนเซชันของกระดูกสัตว์ เช่น กระดูกวัว กระดูกหมู ก้างปลา เป็นต้น โดยอุณหภูมิในการเผาจะขึ้นกับสารที่จะนำไปดูดติด โดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 400 – 1000 องศาเซลเซียส ถ่านกระดูกมีองค์ประกอบ 2 ส่วนใหญ่ๆ คือคาร์บอนและ tricalcium phosphate ซึ่งจะอยู่ในรูปของ hydroxyapatite มากที่สุด ประมาณ 70 – 80 % โดยน้ำหนัก ดังตาราง 2.2 แสดงสมบัติของถ่านกระดูกที่ใช้ในเชิงการค้า Brimac 216, 20/60

ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติถ่านกระดูกเชิงการค้า Brimac 216, 20/60 (Cheung, C.W., Porter, J.F. and McKay, G. ,2000)

คุณสมบัติของถ่านกระดูก	ค่าที่วัดได้
Acid insoluble ash	3 wt.%max
Calcium carbonate	7-9 wt. %
Calcium sulfate	0.1-0.2 wt. %
Carbon content	9-11 wt. %
Calcium hydroxyapatite	70-76 wt. %
Iron as Fe ₂ O ₃	0.3 wt. %

เนื่องจากถ่านกระดูกไม่ได้มีองค์ประกอบของคาร์บอนเพียงอย่างเดียวเท่านั้นเหมือนถ่านกัมมันต์ แต่มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งจะมีคุณสมบัติในการกำจัดได้ทั้งประจุลบและประจุบวก เนื่องจากมีความสามารถในการดูดติดผิวทั้งแบบทางกายภาพ (Physisorption) และแบบทางเคมี (Chemisorption) และในกระบวนการผลิตจะไม่มีการใช้สารเคมีใดๆ ในการผลิตเหมือนการผลิตถ่านกัมมันต์

2.6.1 ประโยชน์ของถ่านกระดูก

- 1) ใช้ในการกำจัดสีในโรงงานน้ำตาล
- 2) ใช้กำจัดโลหะหนักต่างๆ เช่น โครเมียม แคดเมียม สังกะสี อาร์เซนิก ตะกั่ว เป็นต้น โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบกายภาพและทางเคมี
- 3) ใช้กำจัดฟลูออไรด์ คลอรีน

2.7 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุนทรี (2535) ศึกษาประสิทธิภาพในการลดแมงกานีสในน้ำสังเคราะห์โดยการกรองด้วยถ่านกัมมันต์ เมื่อใช้อัตราการกรอง 0.5, 1 และ 2 แกลลอน/ต.ร.ฟุต-นาที่ โดยการกรองคือถ่านกัมมันต์ที่มีความสูง 30 และ 60 เซนติเมตร และใช้ความเข้มข้นของแมงกานีสในน้ำสังเคราะห์ 1 และ 2 มก./ล. ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการลดปริมาณแมงกานีสในน้ำสังเคราะห์ที่ดีที่สุด คือ เมื่อ

ระดับความเข้มข้นของแอมกานีส 1 มก./ล. ความสูงของสารกรอง 60 ซม. และอัตราการกรอง 0.5 แกลลอน/ต.ร.ฟุต-นาที โดยประสิทธิภาพเฉลี่ยร้อยละ 96.35 และสามารถลดปริมาณแอมกานีสให้ค่าแอมกานีสอยู่ในมาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปานครหลวง ได้เป็นเวลา 7 ชม. ซึ่งค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปานครหลวง (ตามคำแนะนำขององค์การอนามัยโลก) กำหนดให้น้ำประปามีค่าแอมกานีสได้สูงสุด 0.1 มก./ล.

Lewis, J. (1995) ศึกษาการใช้ถ่านกระดูกเป็นตัวกรองซ้ำ เพื่อกำจัดสีในการผลิตน้ำเพื่อใช้ในชนบท โดยทำการศึกษาในพื้นที่จริงเป็นเวลา 6 เดือน น้ำที่ผ่านการกรองโดยใช้อัตราการไหลผ่านถ่านกระดูกมีสีและไตรฮาโลมีเทนเป็นที่ยอมรับของมาตรฐานอีซี (EC standard) และพบว่าถ่านกระดูกสามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำดิบอย่างรวดเร็ว

Bhargava, D.S. และ Killedar, D.J. (1995) ศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์ ด้วยถ่านกระดูกทำจาก ก้างปลา โดยทำการทดลองแบบกะ ศึกษาเวลาสัมผัส, ความเข้มข้นเริ่มต้นและปริมาณถ่านกระดูก พบว่าร้อยละการกำจัดฟลูออไรด์มีความสัมพันธ์กับปริมาณถ่านกระดูกและเวลาสัมผัส

สัญญาวัล (2539) ศึกษาความเป็นไปได้ในการลดซีโอดีและสีออกจากรุ่น้ำชะมูลฝอยด้วยกระบวนการดูดติดผิวโดยใช้ถ่านกัมมันต์ ถ่านไม้และถ่านเกลบ ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของการดูดติดผิว การทดลองแบบเบทซ์โดยการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิว และการทดลองแบบต่อเนื่องศึกษาความสามารถในการดูดติดผิว ผลการทดลองพบว่าถ่านไม้ และถ่านเกลบไม่มีความเป็นไปได้ในทางวิศวกรรม เนื่องจากความสามารถในการดูดติดผิวซีโอดีต่ำ ส่วนถ่านกัมมันต์มีความเป็นไปได้ทางวิศวกรรม โดยประสิทธิภาพเริ่มต้นของการลดซีโอดีและสีอยู่ในช่วง 76-89 เปอร์เซ็นต์ และ 37-96 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ในการทดลองที่ชั้นความสูงถ่านกัมมันต์ 1.2 เมตร อัตราการระบรทุกน้ำ 0.15 $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-ชม}$ ความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้น 250 มิลลิกรัม/ลิตร มีความสามารถในการลดซีโอดี และสีสูงสุด โดยมีประสิทธิภาพเริ่มต้นของการลดซีโอดี และสีเท่ากับ 97% และ 96% ตามลำดับ

Maycock, K.R.และคณะ (1996) ศึกษาเปรียบเทียบการกำจัดฟลูออไรด์ในน้ำและน้ำเกลือ พบว่า ความสามารถในการกำจัดฟลูออไรด์ในน้ำด้วยถ่านกระดูกเป็น 110 มิลลิกรัมฟลู

ออไรต์ต่อถ่านกระดูก 100 กรัม และสำหรับน้ำเกลือเป็น 250 มิลลิกรัมฟลูออไรด์ต่อถ่านกระดูก 100 กรัม และศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ Al และ SiO_3 ทั้งในน้ำและน้ำเกลือ ระหว่างถ่านกระดูกและถ่านกัมมันต์ พบว่า Al ทั้งถ่านกระดูกและถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับได้ ส่วนการดูดซับในน้ำเกลือถ่านกระดูกสามารถดูดซับได้เพียงชนิดเดียว SiO_3 พบว่าถ่านกระดูกเท่านั้นที่สามารถดูดซับในสารละลายน้ำเกลือได้

Phatumvanit, P. และ Legeros, R.Z. (1997) ศึกษาถึงถ่านกระดูกที่มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์จากน้ำที่มีฟลูออไรด์สูง ซึ่งจุดมุ่งหมายในการทำการทดลองคือ ศึกษาตัวแปรที่ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์จึงทำการศึกษาโดยการเตรียมถ่านกระดูกโดยการเผาที่อุณหภูมิ 400, 600 และ 800 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการกำจัดฟลูออไรด์จากน้ำธรรมชาติในประเทศไทยที่มีฟลูออไรด์จากน้ำเจือปนอยู่และทำการฟื้นฟูสภาพถ่านกระดูกหลังการใช้งานแล้วด้วยกรดหรือด่าง ผลการทดลองพบว่า ถ่านกระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิต่ำ (น้อยกว่า 600 องศาเซลเซียส) และฟื้นฟูสภาพด้วยด่าง จะทำให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง

Venkata, S. และ Karthikeyan, J. (1997) ศึกษาการกำจัดลิกนินและแทนนินจากน้ำโดยใช้ถ่านกัมมันต์ โดยศึกษาอัตราการดูดซับโดยแปรค่าตัวแปรต่างๆ เช่น ปริมาณถ่านกัมมันต์ และ พีเอชของน้ำ ค่าไอโซเทอมการดูดซับตีความวิเคราะห์โดยใช้ Langmuir adsorption isotherm ในการคำนวณหาความสามารถในการดูดซับ ค่าคงที่ของปฏิกิริยา และอัตราการแพร่ของอนุภาคโดยอัตราการดูดซับจะลดลง เป็นเหตุมาจากปฏิกิริยาที่ย้อนกลับไม่ได้

Dahbi, S. และคณะ (1997) ศึกษาการดูดซับโครเมียมโดยใช้ถ่านกระดูก ปริมาณถ่านกระดูก , พีเอช, ความเข้มข้นของโครเมียม และปริมาตรสารตัวอย่าง ประสิทธิภาพในการกำจัด Cr (VI) ได้มากกว่า 90% ที่เข้มข้น 5 –25 มิลลิกรัม/ลิตร ที่พีเอชเท่ากับ 1 ปริมาณถ่านกระดูก 2 กรัม และเวลาในการเขย่า 30 นาที แต่สามารถกำจัด Cr(II) ได้ เพียง 47% ภายใต้สภาวะเดียวกัน

Raouf, M.W.A. และ Dafullah, A.A.M. (1997) ในการใช้ถ่านกระดูกในการดูดซับ Sb – 124 (III) และ Sb – 124 (V) และ Eu – 152 (III) จากของเสียกัมมันตภาพรังสี พบว่า กลไกการดูด

ชั้น Sb – 124 (III) และ Sb – 124 (V) เป็นการดูดติดผิวแบบกายภาพ: และกลไกการดูดซับของ Eu – 152 (III) เป็นการดูดติดผิวแบบเคมี

อรภัทร (2540) ศึกษาการกำจัดคลอรีนที่หลงเหลืออยู่ในน้ำโดยการดูดซับด้วยคาร์บอนกัมมันต์โดยใช้คาร์บอนกัมมันต์ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ 3 ชนิด ได้แก่ DEO 8/30, PHO 8/30 และ HRO 8/30 โดยความเข้มข้นคลอรีนในน้ำก่อนและหลังบำบัดดูดซับได้ถูกวัดด้วยค่าโออาร์พี (ORP) และสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ สำหรับความเข้มข้นคลอรีนต่ำกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร สมดุลการดูดซับจะเป็นแบบเส้นตรง ค่าคงที่สมดุลการดูดซับสำหรับคาร์บอนกัมมันต์ชนิด DEO 8/30, PHO 8/30 เป็น 0.00166 และ 0.7849 มิลลิกรัมต่อกรัมหนึ่งในล้านส่วน ตามลำดับ จากผลการศึกษาการไหลทะลุของคลอรีนในคอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว พบว่า ความลึกเบตไม่ควรต่ำกว่า 4-5 นิ้ว ในขณะที่ต้องการระยะเวลาที่เก็บในเบตคาร์บอน 2-2.5 นาทีเป็นอย่างน้อย ผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับพารามิเตอร์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการในการออกแบบหอดูดซับโดยใช้ถ่านคาร์บอนกัมมันต์

Daifullah, A.M.M. และคณะ (1998) ศึกษาการใช้ถ่านกระดูกในการดูดซับ 2-Chlorophenol, m-,p-cresols, 4- nitrophenol, 2,4-dichlorophenol และ 2-nitrophenol ในน้ำเสียจากโรงงาน โดยไอโซเทอมการดูดซับอธิบายได้ทั้งแลงมัวร์และฟรุนดลิช

Cheung, C.W และคณะ (2000) ศึกษาการใช้ถ่านกระดูกกำจัดสังกะสีและทองแดงจากน้ำเสียในโรงงาน โดยถ่านกระดูกสามารถดูดทองแดงได้ 0.75 มิลลิโมลต่อถ่าน 1 กรัม และสังกะสี 0.75 มิลลิโมลต่อถ่านกระดูก 1 กรัม ไอโซเทอมการดูดซับเป็นแบบแลงมัวร์-ฟรุนดลิช (L-F) และทดสอบกลไกการดูดซับ (Sorption kinetic) ของการดูดซับซึ่งอธิบายโดย Lagergren pseudo first-order model และ Elovich Kinetic model พบว่า Elovich Kinetic model เหมาะสมและสอดคล้องกับผลการทดลอง

Ayman, R.S. และคณะ (2001) ศึกษาการใช้ถ่านหินกำจัดสีและสารประกอบคลอรีนจากน้ำเสียของโรงงานกระดาษ เผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส และใช้ไอน้ำเป็นตัวกระตุ้น โดยช่วงเวลาที่เหมาะสมในการกระตุ้นคือ 4 ชั่วโมง โดยหากเพิ่มเวลามากเกินไปพื้นผิวจะลดลง และพบว่าถ่านหินที่ถูกกระตุ้นจะดูดสาร methylene blue ได้มากกว่าถ่านหินถึง 10 เท่า และผลการ

ทดลองพบว่าถ่านหินสามารถลดสี, ซีไอดี, บีไอดี ได้มากกว่า 90% โดยใช้ถ่านหินมากกว่า 15000 มิลลิกรัมต่อลิตร นับเป็นการได้ถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพและราคาถูก