



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์

ความรู้ที่ว่าถ่านเป็นสารดูดติดผิว (adsorbent) และสามารถนำมาใช้งานได้นั้นเกิดขึ้นในศตวรรษที่ 13 ถ่านถูกนำมาใช้ในกระบวนการฟอกน้ำตาล และต่อมาในช่วงปลายศตวรรษที่ 18 มีการสังเกตเห็นความสามารถของถ่านในการกำจัดสีจากของเหลว และในช่วงกลางศตวรรษที่ 19 ประเทศอังกฤษได้ใช้ถ่านในการกำจัดรส และกลิ่นจากน้ำดื่ม จุดเริ่มต้นเหล่านี้นำไปสู่การพัฒนาการผลิตน้ำประปาและการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ถ่านทั้งในชุมชน และอุตสาหกรรม อาทิเช่น โรงงานเหล้าไวน์และเบียร์ โรงงานกระดาษ และเยื่อกระดาษ โรงงานยา โรงงานอาหาร อุตสาหกรรมปิโตรเลียมและปิโตรเคมี เป็นต้น (Cheremisinoff และ Morresi, 1978)

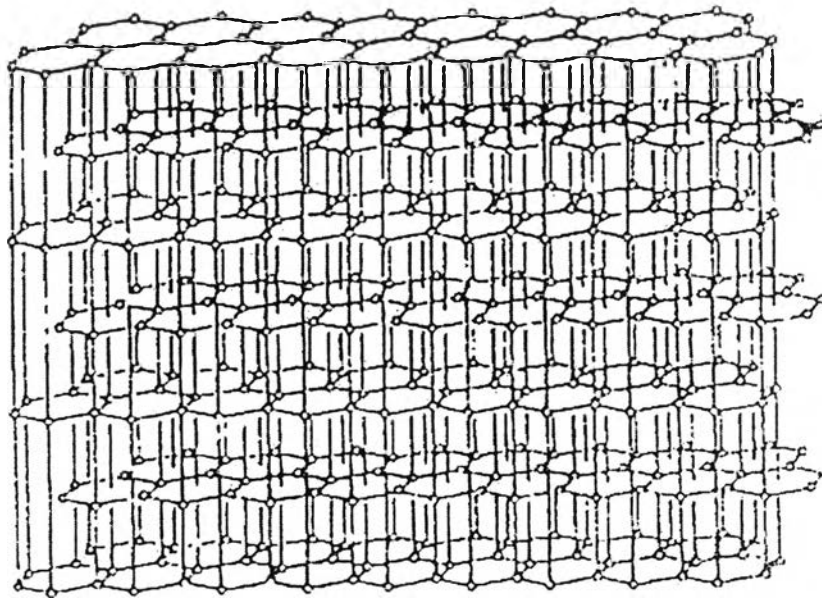
การดูดติดผิวเป็นกระบวนการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำเสีย ที่เป็นทั้งสารอินทรีย์ และอนินทรีย์ โดยอาศัยกลไกทางฟิสิกส์เคมี สำหรับสิ่งเจือปนในน้ำเสียที่กระบวนการดูดติดผิวกำจัดได้หลากหลายเช่น สี กลิ่น บีโอดี ซีโอดี และยาฆ่าแมลง เป็นต้น (Tchobanoglous และ Burton, 1991)

ถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดติดผิวชนิดหนึ่ง ทำจากวัตถุดิบได้หลายชนิด คือ ไม้ชนิดต่างๆ ที่เลื่อย ถ่านหินบิทูมินัส กระดูก กะลามะพร้าว ลิกไนต์ ซากพืช โดยผ่านกระบวนการเพื่อทำให้เกิดรูพรุนจำนวนมากที่ผิวใน ด้านคุณภาพถ่านจะแตกต่างกันไปตามชนิดวัตถุดิบ ถ่านกัมมันต์ที่นิยมใช้สำหรับงานบำบัดน้ำเสียส่วนมาก ทำจากถ่านหิน และถ่านโค้กชนิดต่างๆ เนื่องจากข้อได้เปรียบทางด้านราคา และแหล่งจำหน่าย (มานพ ตีระรัตนสมโภช, 2545)

ถ่านดูดติดผิวแบ่งตามลักษณะทางกายภาพโดยอาศัยขนาดได้เป็น 2 ชนิดคือ ถ่านเม็ด (Granular Activated Carbon) และถ่านผง (Powdered Activated Carbon) เนื่องจากผ่านกระบวนการเพื่อทำให้เกิดรูพรุนจำนวนมากที่ผิวแล้วจึงเรียกว่า ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) สำหรับถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดมีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 0.1 มม. ส่วนถ่านกัมมันต์ชนิดผงมีขนาดเล็กกว่ารูตะแกรงเบอร์ 200 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 75 ไมโครเมตร (Mulligan และ Fox, 1976)

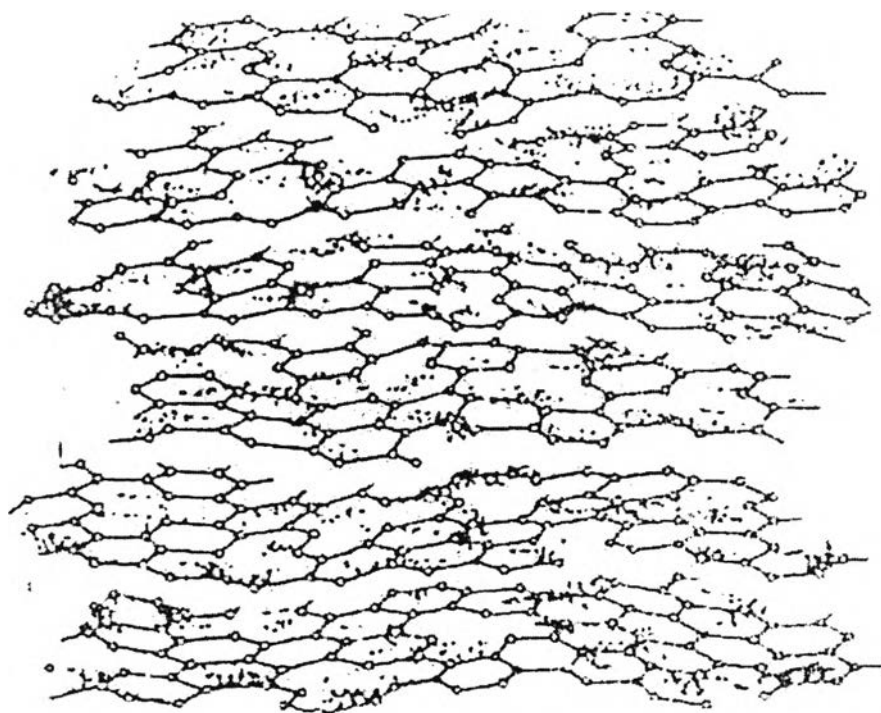
2.1.1 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างเป็นกลุ่มของคาร์บอนซึ่งมีลักษณะคล้ายกราฟิท์ แต่แตกต่างกันที่พื้นที่ผิวภายในของถ่านกัมมันต์ซึ่งมีมากมาย กราφιท์ประกอบด้วยแผ่นชั้นที่ เกิดจากอะตอมของคาร์บอนซึ่งเรียงตัวกันแบบหกเหลี่ยมด้านเท่า (Regular Hexagons) ระยะห่างระหว่างอะตอมของคาร์บอนในแต่ละชั้นมีขนาด 1.42 อังสตรอม โดยในแต่ละชั้นเรียงตัวขนานกันระยะห่างระหว่างชั้นมีขนาด 3.35 อังสตรอม อิเล็กตรอน 3 ใน 4 ตัวของคาร์บอนสร้างพันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond) กับอะตอมที่ติดกัน ขณะที่อิเล็กตรอนตัวที่ 4 เคลื่อนที่ระหว่างโครงสร้างวาเลนซ์ ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุดซึ่งทำได้โดยการทำให้มีรูพรุนหรือโพรงภายในเนื้อคาร์บอนมากเท่าที่จะทำได้อุณหภูมิมีขนาดตั้งแต่ 20-20,000 อังสตรอม ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของกราฟิท์ (Faust และ Aly, 1987)

โครงสร้างของถ่านกัมมันต์แตกต่างจากกราฟิท์ซึ่งมีโครงสร้างประกอบด้วยวงหกเหลี่ยมด้านเท่าของอะตอมคาร์บอนผลสมกัน เส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นคาร์บอนที่สร้างผลึกเล็ก ๆ มีขนาดประมาณ 150 อังสตรอม และระยะทางระหว่างผลึกเล็ก ๆ นี้มีค่าอยู่ระหว่าง 20-50 อังสตรอม ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ (Faust และ Aly, 1987)

2.1.2 สมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์

สมบัติบางประการของสารดูดซับ ที่นำมาใช้สำหรับกำหนดการใช้งานของถ่านกัมมันต์ นั้น ๆ (Cheremisinoff และ Morresi, 1978) คือ

- ก. พื้นที่ผิว (Surface Area) : ใช้กำหนดขีดความสามารถของการดูดติดผิว
- ข. ไอโอดีนนัมเบอร์ (Iodine Number) : ใช้กำหนดความจุของการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ในการดูดติดผิว
- ค. ปริมาตรรูพรุน (Pore Volume) : ใช้กำหนดการดูดติดผิวของโมเลกุล
- ง. ขนาดรูพรุน (Pore Size) : ใช้กำหนดขีดจำกัดในการดูดติดผิว
- จ. ร้อยละของซีเถ้า (Ash Percent) : ระบุปริมาณกากที่เหลือจากการเผา
- ฉ. ความชื้น (Moisture) : ระบุถึงปริมาณน้ำในถ่านกัมมันต์
- ช. ความหนาแน่นเชิงปริมาตร (Bulk Density) : ใช้กำหนดปริมาณถ่านที่ใช้
- ซ. ขนาดประสิทธิผล (Effective Size) : กำหนดสภาพทางชลศาสตร์

ณ. การวิเคราะห์ผ่านตะแกรง (Sieve Analysis) : ใช้ตรวจสอบ และกำหนดการบังคับ การควบคุมระบบ

2.1.3 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์มีมากมายหลายวิธี ซึ่งขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบ และสมบัติ ของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ ซึ่งโดยทั่วไปประกอบด้วย 3 ขั้นตอนดังนี้ (บุญชัย ตระกูลมหชัย, 2536)

2.1.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ

ควรมีคุณสมบัติ ดังต่อไปนี้

- เป็นวัสดุเหลือทิ้ง
- มีปริมาณคาร์บอนสูง
- มีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำ
- มีความสะดวกในการนำมาใช้งาน เช่น ไม่สลายตัวเมื่อเก็บ
- สามารถผลิตถ่านกัมมันต์ที่คุณภาพสูงได้

การผลิตถ่านกัมมันต์สามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรง หรือเริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้ว ก็ได้ และโดยทั่วไป จะนำวัตถุดิบมาบด และคัดขนาดก่อนที่จะนำมาคาร์บอนไนซ์

2.1.3.2 การคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization)

การคาร์บอนไนซ์เป็นกระบวนการไพโรไลซิสรูปแบบหนึ่งที่เผาในที่อับอากาศด้วย อุณหภูมิ 200-500 องศาเซลเซียส มีจุดมุ่งหมายคือเพิ่มร้อยละคาร์บอนให้สูงขึ้น โดยให้ความร้อน แก่วัสดุจนกระทั่งสารปนเปื้อนที่ไม่ใช่คาร์บอนสลายตัวไป การคาร์บอนไนซ์เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดใน กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ เพราะเป็นขั้นตอนเริ่มต้นการเกิดโครงสร้างที่เป็นรูพรุน ถ่านที่ได้ ควรมีลักษณะดังนี้

- มีสีดำตลอด (Uniformly Black)
- เมื่อหักดูส่วนที่หักจะมีผิวมันเงา

- ปลายที่หักจะแหลมคม (Sharp)
- ปราศจากผงฝุ่นและซีเถ้า

ในการพิจารณาภาวะเหมาะสมของการคาร์บอนไนซ์ พบว่าถ่านที่เหมาะสมควรมีปริมาณสารระเหยอยู่ในช่วงร้อยละ 20-25 สำหรับช่วงคาร์บอนไนซ์นั้นถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์จะมีความสามารถในการดูดซับต่ำทั้งนี้เพราะว่าการทำถ่านใช้อุณหภูมิประมาณ 200-500 องศาเซลเซียส ยังคงมีน้ำมันทาร์ตกค้างอยู่ภายในช่องว่าง (Pore) หรือเกาะอยู่ตามผิว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำถ่านไปผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับต่อไป

2.1.3.3 กระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์

วิธีการกระตุ้นเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์ สามารถแบ่งได้ดังนี้

ก. วิธีการกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation) เป็นการให้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารเคมีที่นิยมใช้ ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) และกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ข้อดีของการกระตุ้นด้วยวิธีนี้คือใช้อุณหภูมิต่ำ (350-600 องศาเซลเซียส) แต่มีข้อเสียคือมีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีออก อีกทั้งอุปกรณ์ที่ใช้ต้องเป็นชนิดพิเศษที่ทนการกัดกร่อน

ข. วิธีการกระตุ้นทางฟิสิกส์ (Physical Activation) เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยให้ผิวของคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์ เช่น การจัดเรียงตัวใหม่ ซึ่งทำให้ถ่านเพิ่มความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ก๊าซที่นิยมใช้ในการออกซิไดซ์ได้แก่ ไอน้ำ อิมมัตวียิงยวด คาร์บอนไดออกไซด์ และออกซิเจน โดยใช้ร่วมกับความร้อน ปฏิกิริยาการกระตุ้นอาจเกิดจากความร้อนเพียงอย่างเดียว แต่ต้องอุณหภูมิสูงมาก 1,200 องศาเซลเซียส แต่ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จะมีคุณภาพต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์ ปัจจุบันที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์ คือ

- สมบัติทางเคมีและความเข้มข้นของก๊าซออกซิไดซ์ที่ใช้
- อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา
- ระยะเวลาของปฏิกิริยา
- ชนิดและปริมาณวัสดุที่ใช้

อุณหภูมิที่ใช้ไม่สามารถกำหนดได้แน่นอนแต่ก็ไม่เกิน 1,000 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ใช้ส่วนมากประมาณ 800-900 องศาเซลเซียส

การกระตุ้นคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์ เป็นคาร์บอนไดออกไซด์แพร่ออกจากผิวของคาร์บอน เกิดก๊าซซีพีเคชันบางส่วนของเม็ดถ่านเป็นรูพรุนในโครงสร้างของถ่าน ถ่านจากการคาร์บอนไนซ์ประกอบด้วยรูพรุนเล็ก ๆ จำนวนมาก ซึ่งเกิดจากช่องว่างระหว่างผลึกในการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอม รูพรุนนี้จะถูกอุดตันไว้ด้วยทาร์ที่เกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อนและถูกขัดขวางด้วยอะตอมคาร์บอน

2.2 กระบวนการดูดติดผิวและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล

2.2.1 กระบวนการดูดติดผิว

โดยทั่วไปแล้วปรากฏการณ์ดูดติดผิวเป็นปรากฏการณ์ ระหว่างของเหลว-ของเหลว ของเหลว-ของแข็ง ของแข็ง-ของแข็ง รวมถึง ก๊าซ-ของเหลว แต่การใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดติดผิว สารอินทรีย์ในน้ำเสียนั้นเป็นปรากฏการณ์ระหว่างของแข็งและของเหลว (Tchobanoglous และ Burton, 1991)

การดูดติดผิวของสารประกอบอินทรีย์เกิดจากแรงรวมตัว (binding force) หลายชนิด ระหว่างโมเลกุลของสารอินทรีย์ และพื้นที่ผิวของคาร์บอน ซึ่งแรงทั้งหมดมีแหล่งที่มาจากอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic interaction) การดูดติดผิวที่สำคัญแบ่งเป็น 2 แบบ คือ การดูดติดผิวทางกายภาพ (physisorption) และการดูดติดผิวทางเคมี (chemisorption) (Eckenfelder, 1989) การดูดติดผิวทั้งสองแบบนี้เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าใกล้ และยึดติดกับผิวของของแข็ง สามารถเอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารที่อยู่ในของเหลวได้ (Cheremisinoff และ Morresi, 1978)

การดูดติดผิวทางกายภาพเป็นคุณสมบัติหนึ่งเมื่อโมเลกุลของสารใด ๆ ในของเหลวเคลื่อนตัวมาสมบริเวณผิวของของแข็ง ซึ่งเป็นผลจากแรงดึงดูดของสารดูดติดผิวที่มีต่อโมเลกุลนั้น มากกว่าพลังงานจลน์ (Kinetic energy) ของโมเลกุลสารนั้น โมเลกุลของสารในของเหลวจะเกาะติดกับกับโมเลกุลของของแข็งด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal's force) ส่วนขั้นตอนการดูดซับทางเคมี ซึ่งมีการเรียงตัวของโมเลกุลของของเหลวเป็นชั้น ๆ จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของสารดูดติดผิว และสารถูกดูดติดผิว กลายเป็นสารประกอบเคมีใหม่ ซึ่งเมื่อเกิดแล้วจะคงอยู่ในรูปนั้นไม่สามารถเปลี่ยนกลับไปมาได้ (irreversible) แต่การดูดซับทางกายภาพสามารถแปรสภาพกลับไปมาได้ (reversible) การดูดติดผิวทางเคมีเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารถูกดูดซับ

และสารดูดซับ ซึ่งก่อให้เกิดสารประกอบทางเคมีขึ้น การดูดติดผิวทางเคมีแตกต่างกับการดูดติดผิวทางกายภาพ เนื่องจากการดูดติดผิวแบบชั้นเดียว (monolayer) และไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible) ส่วนการดูดติดผิวทางกายภาพสามารถผันกลับได้ (reversible) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างสารดูดซับ และสารถูกดูดซับ ถ้าหากแรงดึงดูดนั้นอ่อนลงจะเป็นผลให้เกิดการคายสารออก (desorption) ขึ้น นอกจากนี้ Hassler (1963) ยังได้กล่าวเพิ่มเติมว่าการดูดติดผิวทางกายภาพจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การดูดติดผิวทางเคมีเพิ่มขึ้น

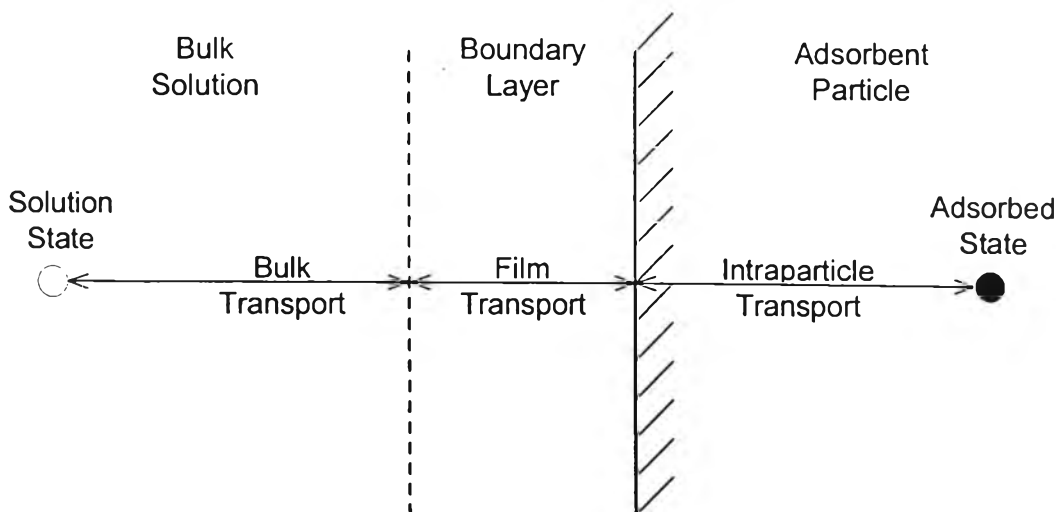
2.2.2 อัตราการถ่ายเทโมเลกุล (Rate of molecular transfer)

อัตราการดูดติดผิวมีความสำคัญอย่างมาก อัตราการดูดติดผิวที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น อัตราการดูดติดผิวจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิว ขั้นตอนในการดูดติดผิวของสารจากสารละลายโดยสารดูดซับที่มีรูพรุนมี 3 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2.3 คือ

2.2.2.1 การขนส่งทั้งก้อน (Bulk transfer) ซึ่งเป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลายในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบาง ๆ ที่ห่อหุ้มสารดูดซับ

2.2.2.2 การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transfer) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบาง ๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม (Film diffusion) จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิวขั้นตอนหนึ่ง

2.2.2.3 การขนส่งภายในอนุภาค (Interparticle transfer) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรง หรือ รูพรุนของสารดูดซับ (pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดติดผิวขึ้นภายในชั้นตอนนี้ จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิวเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของการดูดติดผิวด้วยสารดูดซับ (Eckenfelder, 1989)

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว ประกอบด้วย 6 ขั้นตอน (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2538)

2.3.1 ความปั่นป่วน

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ การแพร่ภายนอก (Film Diffusion) และการแพร่ภายใน (Pore Diffusion) ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูงทำให้การแพร่ (Pore Diffusion) เป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

2.3.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ

อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดซับ และพื้นที่ผิวของสารดูดซับ มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity) ยกเว้นในกรณีที่มีโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมีขนาดใหญ่กว่าช่องว่างของสารดูดซับ

2.3.3 ขนาดของสารที่ถูกดูดติดบนผิวสารดูดซับ

ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในช่องว่างของสารดูดซับ

2.3.4 ความสามารถในการละลายน้ำของสารดูดซับ

เมื่อเกิดการดูดซับโมเลกุลจะถูกดันออกจากน้ำ และเกาะติดบนผิวของของแข็งสารที่ละลายน้ำได้หรือแตกตัวเป็นไอออนได้จะมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำสูงจึงเป็นสารที่ยากในการดูดซับ ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยจะสามารถเกาะติดบนผิวสารดูดซับได้ดี

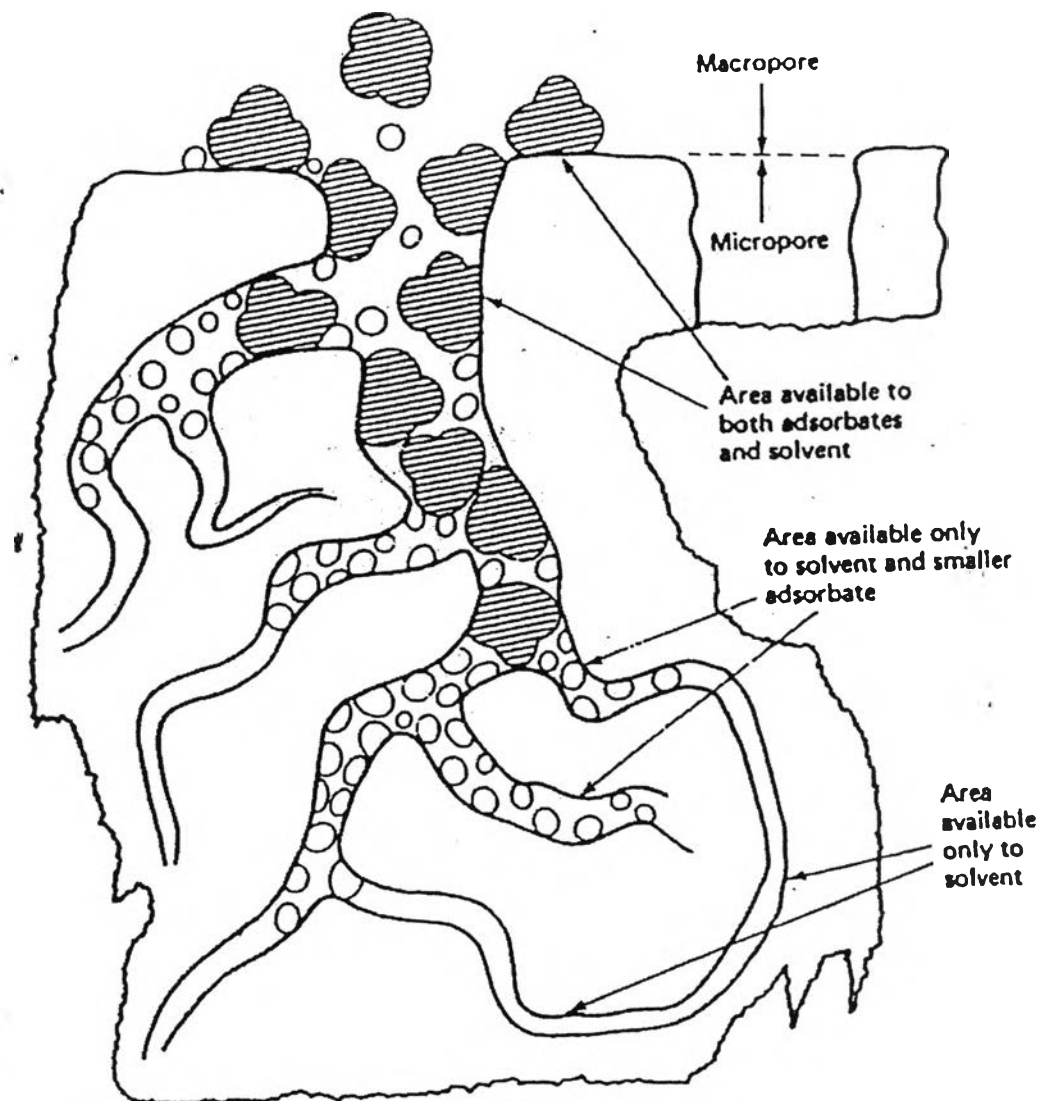
2.3.5 ค่าพีเอช

ค่าพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยที่สำคัญของการดูดซับ เนื่องจากค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของไอออนและการละลายน้ำของสารต่าง ๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อ การดูดซับ

2.3.6 อุณหภูมิ

ในกรณีการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน พบว่าเมื่ออุณหภูมิลดลงความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้นแต่อัตราเร็วในการดูดซับจะลดลง ในทางตรงกันข้ามถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะลดลงแต่อัตราเร็วในการดูดซับจะสูงขึ้น

การดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์สามารถกำจัดสารประกอบอินทรีย์ในน้ำเสียบางส่วนที่ไม่สามารถถูกย่อยสลายทางชีววิทยา ซึ่งอาจมีบางส่วนที่ก่อให้เกิดพิษรวมถึงกลิ่น รส และสีที่ไม่สามารถกำจัดด้วยวิธีทั่วไปได้ สำหรับประสิทธิภาพในการดูดติดผิวสารอินทรีย์ในน้ำเสียของสารดูดซับ ขึ้นกับพื้นที่ผิวของสารดูดซับ ปกติมีค่าพื้นที่ผิวอยู่ในช่วงประมาณ 500-1400 ตารางเมตรต่อกรัมสารดูดซับ รวมถึงลักษณะทางเคมีของผิวถ่านกัมมันต์ซึ่งสัมพันธ์กับแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล เช่น ผิวของถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติเป็นเบสจะส่งผลต่อการดูดติดสีและสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่อิมตัว กล่าวคือความสามารถในการดูดติดผิว จะขึ้นอยู่กับลักษณะของถ่าน และชนิดของสารที่จะถูกดูดติดผิวร่วมกันสำหรับลักษณะโดยทั่วไปของสารดูดซับ เมื่อพิจารณาจากภาพขยายของภาพตัดตามขวาง ดังรูปที่ 2.4 แบ่งรูพรุนออกได้เป็น 2 ขนาด คือ รูพรุนใหญ่ (Macropores) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า $1,000 \text{ \AA}$ ส่วนใหญ่บริเวณผิวนอกของถ่านกัมมันต์ ประกอบไปด้วยรูพรุนใหญ่



รูปที่ 2.4 ภาพตัดขวางถ่านกัมมันต์เม็ด (Cheremisinoff และ Morresi, 1978)

โมเลกุลของสารอินทรีย์ที่เคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของถ่านกัมมันต์จะฟุ้งกระจายเข้าไปในรูพรุนใหญ่ แล้วจึงเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุนขนาดเล็กหากโมเลกุลของสารอินทรีย์นั้นไม่ใหญ่กว่าขนาดรูพรุนเล็ก อัตราการดูดติดผิวจึงถูกควบคุมด้วยอัตราการฟุ้งกระจายของโมเลกุลเข้าไปในรูพรุนของถ่านโดยอัตราการดูดติดผิวนี้อาจแปรผันกลับกันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุล น้ำหนักโมเลกุลและค่าพีเอช แต่จะแปรผันตามกำลังสองของเวลาสัมผัสระหว่างโมเลกุลของสิ่งสกปรกกับสารดูดซับ และความเข้มข้นของสิ่งสกปรกในน้ำเสียที่จะบำบัด (Tchobanoglous และ Burton, 1991)

2.4 การวิเคราะห์กระบวนการดูดติดผิว

ปริมาณของสารถูกดูดติดผิวที่สามารถถูกดูดติดผิวโดยถ่านกัมมันต์เม็ด มีความสัมพันธ์กันทั้งสมบัติและความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิวรวมถึงอุณหภูมิด้วย โดยทั่วไปพิจารณาถึงปริมาณของสารถูกดูดติดผิวที่สามารถถูกดูดติดผิวดังเช่นความสัมพันธ์ของความเข้มข้นที่อุณหภูมิคงที่และผลของความสัมพันธ์นี้ถูกเรียกว่า ไอโซเทอมการดูดติดผิว (adsorptive isotherm) สมการที่ใช้สำหรับบรรยายข้อมูลไอโซเทอมในการทดลองถูกพัฒนาขึ้นมา 3 สมการนี้ โดย Freundlich, Langmuir และ Brunauer, Emmett และ Teller จากทั้ง 3 สมการนี้ ฟรอนด์ลิช ไอโซเทอมจะใช้เป็นเครื่องมือสำหรับบรรยายสมบัติการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในงานบำบัดน้ำและน้ำเสียบ่อยที่สุด (Tchobanoglous และ Burton, 1991)

2.4.1 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

สมการของแลงมัวร์เป็นสมการที่อธิบายการดูดซับแบบชั้นเดียวที่มีสมมติฐานดังนี้

- 1) โมเลกุลถูกดูดติดอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของสารดูดซับ
 - 2) แต่ละพื้นที่ที่ถูกดูดซับจะเกิดการดูดซับเพียงชั้นเดียว
 - 3) พื้นที่ในแต่ละบริเวณจะถูกจำกัดปริมาณของสารที่ถูกดูดซับด้วยสภาพทางเรขาคณิตของพื้นที่ผิวนั้น ๆ
 - 4) พลังงานในการดูดซับจะมีค่าเท่ากันในทุกบริเวณพื้นผิวของสารดูดซับ
- นอกจากนี้โมเลกุลของสารถูกดูดซับ จะไม่เคลื่อนที่ได้อย่างอิสระตลอดพื้นผิวสารดูดซับ หรือ ซ้ำมไปยังโมเลกุลอื่นได้

สมการของแลงมัวร์ แสดงได้ดังนี้
$$X = X_m BC / (1+BC) \quad (2.1)$$

โดยที่ $X = x/m$ หรือปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับ (x) ต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ (m) หน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม หรือ มิลต่อกรัม

X_m = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับ (x) ต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ (m) ที่ต้องการสำหรับความสามารถในการเกิดการดูดซับของแผ่นชั้นเดียว (Monolayer) มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม หรือ มิลต่อกรัม

C = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ภาวะสมดุลย์
มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร

B = ค่าคงที่ของพลังงานในการดูดติดผิว

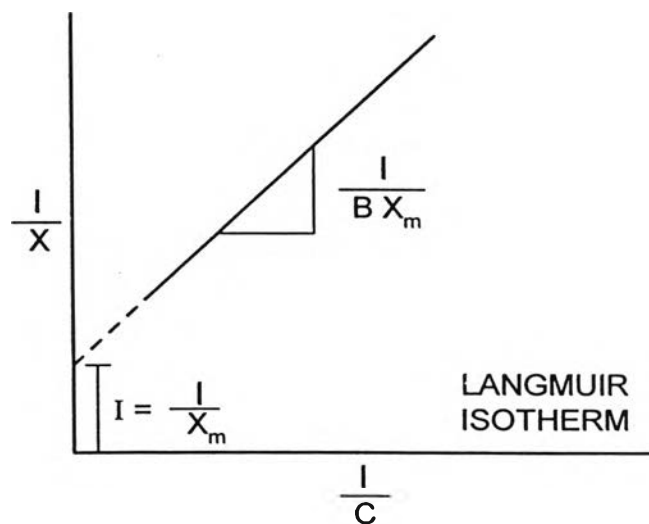
เมื่อ X เข้าใกล้ X_m และ C เข้าใกล้ค่าอนันต์ สมการที่ (2.1) สามารถเขียนได้เป็น

$$C/X = (1/BX_m) + (C/X_m) \quad (2.2)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C/X กับ C จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/X_m$ และมีจุดตัดแกนเท่ากับ $1/BX_m$ สมการเส้นตรงแบบอื่นสามารถเขียนได้โดยนำ C ไปหารสมการที่ (2.2) จะได้สมการ

$$1/X = (1/X_m) + (1/C)(1/BX_m) \quad (2.3)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/X$ กับ $1/C$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/BX_m$ และมีจุดตัดแกนเท่ากับ $1/X_m$ ดังรูปที่ 2.5 เป็นกราฟแสดงไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์



รูปที่ 2.5 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ (Sundstrom และ Klei, 1979)

ลักษณะของรูปไอโซเทอม สามารถบอกได้ว่าการดูดซับในการทดลองได้ผลดีหรือไม่ ซึ่งเราจะใช้การคำนวณจากค่าคงที่ของไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ โดยจะแสดงให้อยู่ในรูปค่าคงที่ของการแยกตัว r (dimension constant separation factor) ซึ่งจะหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ (2.4) (ชลธา และคณะ, 2538) โดยผลของค่า r ที่มีการดูดซับ ดังตารางที่ 2.1

$$r = 1 / (1 + bC) \quad (2.4)$$

โดยที่ C = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

b = ค่าคงที่

ตารางที่ 2.1 แสดงผลของแฟกเตอร์ของการแยกตัวของการแยกตัวจากลักษณะรูป
ไอโซเทอม (ชลธา และคณะ, 2538)

Seperation Factor : r	ลักษณะของไอโซเทอม
$r > 1$	การดูดซับไม่ดี
$r = 1$	การดูดซับคงที่
$0 < r < 1$	การดูดซับดี
$r = 0$	ปฏิกิริยาย้อนกลับได้

2.4.2 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบเบท (BET, Brunauer Emmett and Teller Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมแบบเบท พัฒนามาจากไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ นำมาใช้สำหรับการดูดติดผิวแบบหลายชั้น (multilayer) ซึ่งมีสมมติฐานพื้นฐานของแบบจำลอง คือ แต่ละโมเลกุลในชั้นแรกเป็นแหล่งที่ซึ่งเกิดการดูดติดผิวของโมเลกุลในชั้นที่สองหรือชั้นต่อ ๆ ไปสมการการดูดติดผิวแบบเบท ดังสมการที่ (2.5)

$$X = (X_m BC) / (C_s - C) [1 + (B-1) (C / C_s)] \quad (2.5)$$

โดยที่ X = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ
มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม หรือ โมลต่อกรัม

X_m = ปริมาณของตัวถูกละลายต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับที่ต้องการสำหรับความสามารถในการเกิดการดูดซับเพียงชั้นเดียว
มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม หรือ โมลต่อกรัม

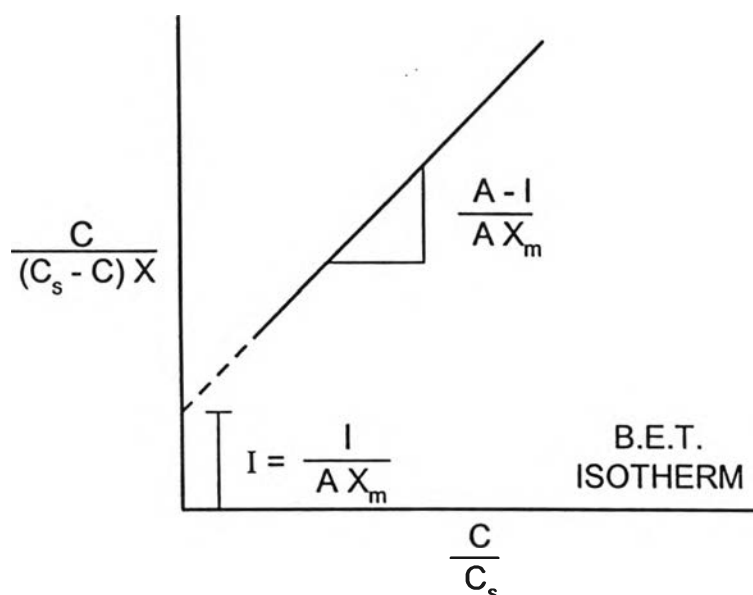
C = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายในสารละลายที่จุดสมดุลมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร

C_s = ความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายในน้ำที่อุณหภูมิหนึ่งๆ
มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร

B = ค่าคงที่ของพลังงานในการดูดติดผิว
สมการที่ (2.5) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$(C/X)(C_s - C) = (1/(X_m A)) + [(A-1)/X_m A](C/C_s) \quad (2.6)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $(C/X)(C_s - C)$ กับ (C/C_s) จะได้เส้นตรงที่มีความชัน $(A-1)/(X_m A)$ และมีจุดตัดแกนเท่ากับ $1/(X_m A)$ ดังรูปที่ 2.6 เป็นกราฟแสดงการดูดติดผิวแบบเบท



รูปที่ 2.6 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบเบท (Sundstrom และ Klei, 1979)

2.4.3 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิชใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการอธิบายการดูดติดผิวในระบบของของเหลว ซึ่งมีสมการดังนี้

$$x/m = K C^{1/n} \quad (2.7)$$

โดยที่ x = จำนวนของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิว มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร
หรือ โมลต่อลิตร

m = น้ำหนักของสารดูดติดผิว มีหน่วยเป็นกรัม

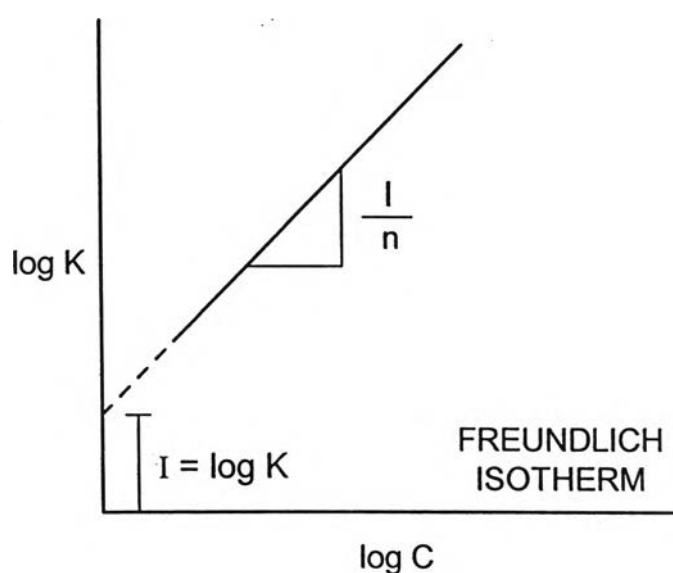
C = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร
หรือ โมลต่อลิตร

$K, 1/n$ = ค่าคงที่ของระบบ

เนื่องจากสมการ Freundlich เป็นฟังก์ชันแบบเอ็กโปเนนเชียล สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังนี้

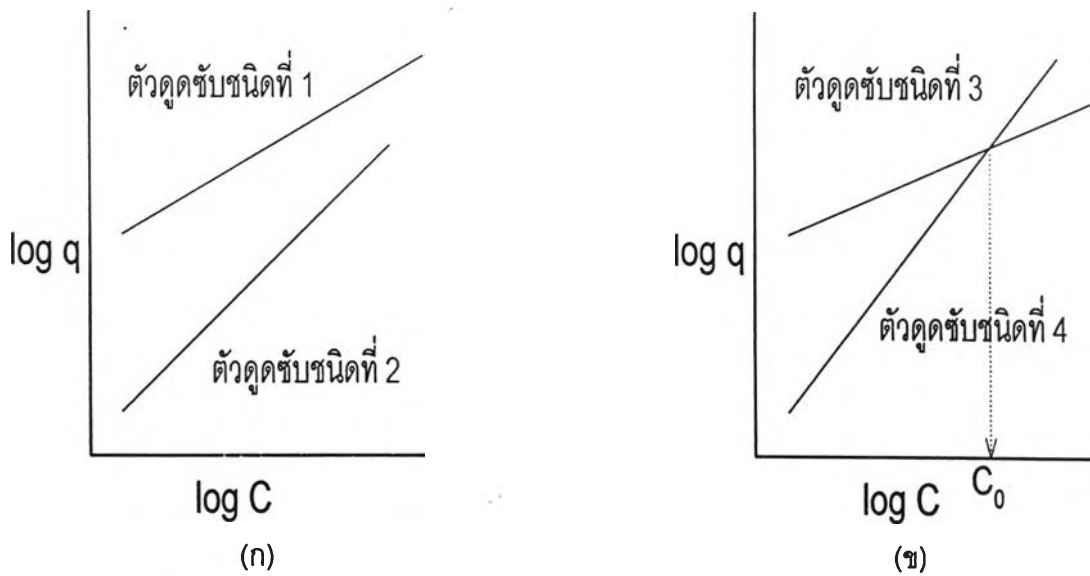
$$\log (X/m) = \log K + (1/n) \log C \quad (2.8)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log (X/m)$ กับ $\log C$ จะได้เส้นตรงซึ่งมีความชันเท่ากับ $1/n$ และมีจุดตัดแกนเท่ากับ $\log K$ เมื่อ $\log C = 0$ ($C = 1$) กราฟไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Freundlich ดังรูปที่ 2.7 ค่า $1/n$ ที่ได้จากการดูดติดผิวของสารประกอบอินทรีย์ด้วยถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่จะมีค่าน้อยกว่า 1 สำหรับค่า $1/n$ ที่เกือบจะเท่ากับ 1 แสดงถึงความจุของการดูดติดผิวที่ดี



รูปที่ 2.7 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Freundlich (Sundstrom และ Klei, 1979)

นอกจากนี้ค่า n ยังใช้เป็นตัวบอกรความสามารถในการดูดซับ และความจุของตัวดูดซับได้อีกด้วย โดยถ้าค่า n มากกว่า 1 หมายความว่าตัวดูดซับที่ใช้สามารถดูดซับตัวถูกละลายได้ดี และถ้าค่า n อยู่ระหว่าง 1 ถึง 10 หมายความว่า การดูดซับนั้นสามารถดำเนินไปด้วยดี ในการพิจารณาเลือกว่าตัวดูดซับชนิดใดมีประสิทธิภาพในการบำบัดมากกว่ากันพิจารณาจากค่าไอโซเทอมได้ ดังรูปที่ 2.8 ก จะเห็นได้ว่า ไอโซเทอมของตัวดูดซับชนิดที่ 1 สูงกว่าตัวดูดซับชนิดที่ 2 ในช่วงความเข้มข้นเดียวกัน ดังรูปที่ 2.8 ข ตัวดูดซับชนิดที่ 3 มีไอโซเทอมสูงกว่าตัวดูดซับชนิดที่ 4 ในช่วงความเข้มข้นที่ต่ำกว่า C_0 แต่ตัวดูดซับชนิดที่ 4 จะสูงกว่าชนิดที่ 3 ในช่วงความเข้มข้นสูงกว่า C_0 ดังนั้นจึงต้องเลือกตัวดูดซับให้เหมาะกับช่วงความเข้มข้นที่ต้องการ ดังรูปที่ 2.8 ข ตัวดูดซับชนิดที่ 4 มีความชันมากกว่าชนิดที่ 3 แสดงว่าถ้าต้องการบำบัดแบบที่มีการไหลต่อเนื่องแล้ว ตัวดูดซับชนิดที่ 4 จะเหมาะสมกว่าชนิดที่ 3 (ชลธา และคณะ, 2538)

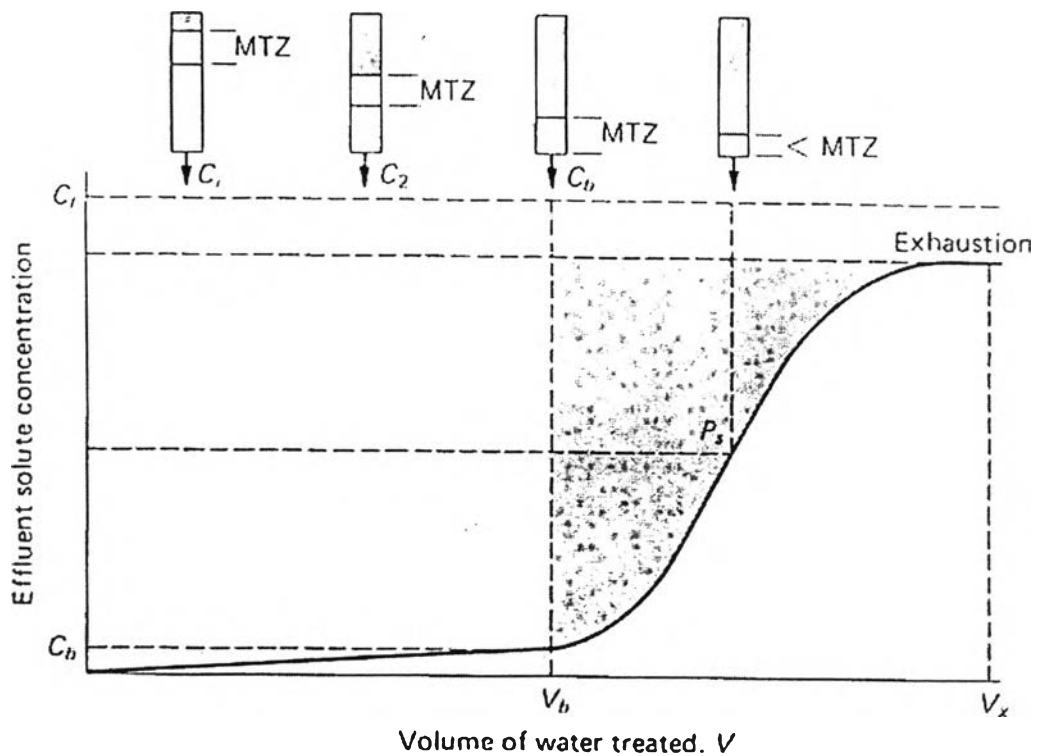


รูปที่ 2.8 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของตัวดูดซับชนิดต่างๆ โดยพิจารณาจากรูปแบบไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนดลิช (ชลธา และคณะ, 2538)

2.5 เขตการถ่ายเทมวล

ในพื้นที่ของชั้นถ่านกัมมันต์เม็ดซึ่งเกิดการดูดติดผิว หรือ ดูดแนบเรียกว่า เขตการถ่ายเทมวล (mass transfer zone) หรือ MTZ ดังรูปที่ 2.9 หลังจากน้ำที่ปนเปื้อนไหลผ่านเข้าไปในขอบเขตของชั้นที่มีความลึกเท่ากับ MTZ ความเข้มข้นของสิ่งปนเปื้อนในน้ำจะถูกลดลงมาที่ค่าต่ำสุดของมัน ถ้าหากเวลาสัมผัสชั้นที่ว่างสั้นเกินไปหรือความยาวของ MTZ มากกว่าความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์เม็ด สิ่งปนเปื้อนที่สามารถกำจัดได้จะไม่ถูกกำจัดไปอย่างสมบูรณ์

ความหนาของ MTZ แปรผันกับอัตราการไหลเพราะว่าการกระจาย การแพร่ และการเกิดร่องในตัวกลางเม็ดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราการไหล

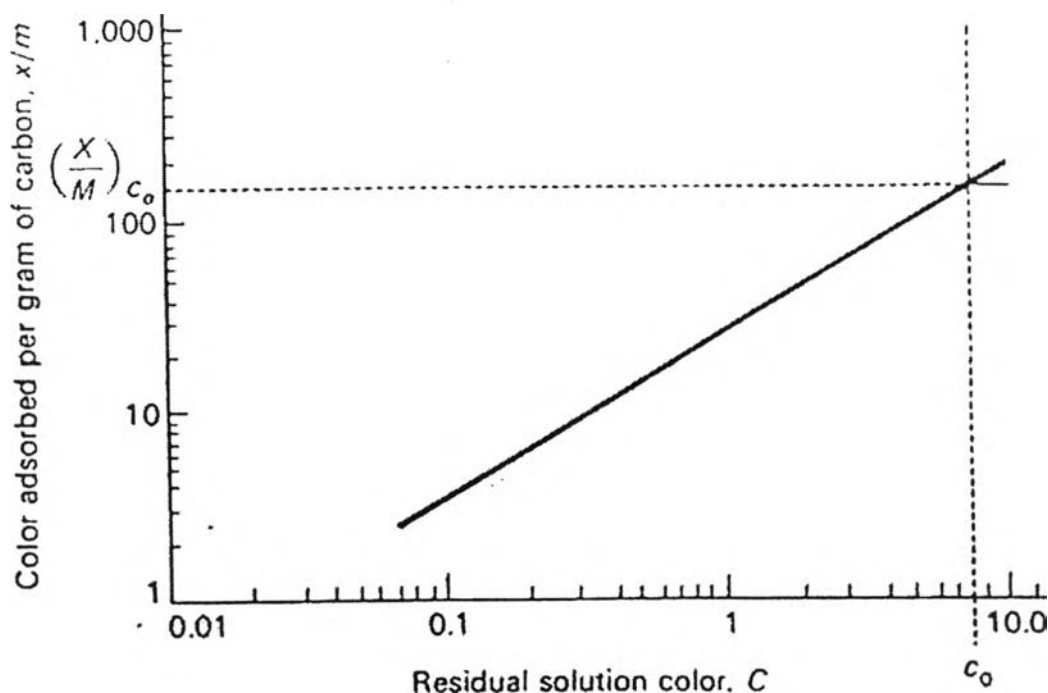


รูปที่ 2.9 กราฟเบรคทวร์จสำหรับถ่านหินกัมมันต์ที่แสดงการเคลื่อนที่ของ MTZ เทียบกับปริมาตรที่ผ่านทั้งหมด (Tchobanoglous และ Burton, 1991)

มีทางเดียวที่จะใช้ความจุที่กั้นคอลัมน์ให้ได้งานด้วย คือ การต่อสองคอลัมน์แบบอนุกรม หรือใช้หลายคอลัมน์ต่อขนาน สำหรับความลึกของชั้น และอัตราการไหลที่เหมาะสมรวมถึงความจุปฏิบัติการของถ่านกัมมันต์จะต้องถูกพิจารณาเพื่อกำหนดขนาด และจำนวนคอลัมน์ที่จำเป็น สำหรับการกำจัดแบบต่อเนื่องทั้งนี้เพราะว่าค่าพารามิเตอร์เหล่านี้กำหนดได้จากการทดสอบคอลัมน์พลวัต (dynamic column test) จึงได้แนะนำว่าควรมีการศึกษาด้วยโรงงานนำร่องก่อน (Tchobanoglous และ Burton, 1991)

2.6 ความจุการดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์ (Tchobanoglous และ Burton, 1991)

ความจุดูดติดผิวของถ่านที่กำหนดประมาณค่าได้จากข้อมูลของไอโซเทอม เมื่อข้อมูลของไอโซเทอมถูกกำหนดลงบนกราฟจะได้ผลไอโซเทอม ดังรูปที่ 2.10 ความจุดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์สามารถประมาณได้จากเส้นแนวตั้งจากจุดสเกลบนแนวอนซึ่งเป็นความเข้มข้นเริ่มต้น C_0 ไปตัดกับเส้นไอโซเทอมแล้วลากเส้นแนวอนไปยังสเกลบนแนวตั้งได้ค่าแสดงปริมาณทั้งหมด โดยน้ำหนักของตัวดูดติดผิวต่อหน่วยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ เมื่อถ่านกัมมันต์อยู่ที่จุดสมดุลกับความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกละลาย $(X/m)C_0$



รูปที่ 2.10 รูปแบบฟรอนต์ลิชไอโซเทอม (Tchobanoglous และ Burton, 1991)

ความจุการดูดติดผิวเบรคทลูจ $(X/m)_0$ ของถ่านกัมมันต์เม็ดในคอลัมน์เต็มมาตราส่วนในงานมีค่าน้อยกว่าความจุการดูดติดผิวทางทฤษฎีที่หาได้จากไอโซเทอม $(X/m)_0$ ของคอลัมน์เดี่ยวสามารถถือได้ว่ามีค่าประมาณร้อยละ 25 ถึง 50 ของความจุทางทฤษฎี $(X/m)_0$

เมื่อรู้ค่า $(X/m)_0$ แล้วสามารถคำนวณหาเวลา t_0 ที่ทำให้เกิดเบรคทลูจได้ดังสมการ

$$(X/m)_0 = (X_0/M_c) = Q(C_i - (C_0/2)) * (t_0/M_c) (8.34 \text{ lb/Mgal. (mg/l)}) \quad (2.9)$$

เมื่อ $(X/m)_0$ = ความสามารถดูดติดผิวที่จุดเบรคทลูจ
หน่วย กรัม ต่อ กรัม หรือ ปอนด์ ต่อปอนด์

X_0 = มวลของสารอินทรีย์ที่ถูกดูดติดในคอลัมน์แบบ GAC ที่จุดเบรคทลูจ
หน่วย กรัม หรือ ปอนด์

M_c = มวลของคาร์บอนในคอลัมน์ หน่วย กรัม หรือ ปอนด์

Q = อัตราการไหล หน่วย เมกกะแกลลอนต่อวัน

- C_i = ความเข้มข้นเริ่มต้น หน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร
 C_o = ความเข้มข้นที่จุดเบรคทฤษฎี หน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร
 t_o = เวลาที่จุดเบรคทฤษฎี หน่วย วัน

ซึ่งเวลาที่จุดเบรคทฤษฎีสามารถหาได้ ดังสมการ

$$t_o = (X/m)_o(M_c) / \left\{ Q(C_i - (C_o/2)) (8.34 \text{ lb/Mgal. (mg/l)}) \right\} \quad (2.10)$$

2.7 โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง ธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่า 5 เท่าตัวขึ้นไป มีอัตราการสลายตัวตามธรรมชาติค่อนข้างช้า จึงทำให้สะสม และตกค้างอยู่ในธรรมชาติได้นาน (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2546) และเป็นธาตุที่มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23 – 92 อยู่ในคาบที่ 4-7 ของตารางธาตุ มีจุดเดือด 2,595 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว 1,083 องศาเซลเซียส ความถ่วงจำเพาะ 8.96 ตัวอย่างของโลหะหนัก เช่น ทองแดง (Cu) ตะกั่ว (Pb) แคดเมียม (Cd) ปรอท (Hg) และ สังกะสี (Zn) เป็นต้น โลหะหนักที่พบมีสถานะเป็นของแข็ง ยกเว้น ปรอทซึ่งเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะ คือ นำไฟฟ้า และความร้อนได้ดี มีความมันวาวเหนียว สามารถตีเป็นแผ่นบาง ๆ ได้ ส่วนคุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญของโลหะ คือ มีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า ดังนั้นโลหะหนักจึงสามารถที่จะรวมกับสารอื่น ๆ กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex compounds) ได้หลายรูปแบบซึ่งมีความเสถียรมากกว่าโลหะอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ (Organometallic compounds) ซึ่งสามารถที่จะถ่ายทอดไปสู่สิ่งมีชีวิตได้โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร (Food chain) โลหะหนักหลายชนิดมีคุณสมบัติเป็นอันตรายร้ายแรง เมื่อเข้าไปสะสมอยู่ในร่างกายของสิ่งมีชีวิต เช่น ทองแดง (Cu) ตะกั่ว (Pb) แคดเมียม (Cd) ปรอท (Hg) และสังกะสี (Zn) เป็นต้น แต่โลหะบางชนิดก็มีประโยชน์ และเป็นธาตุที่จำเป็นต่อมนุษย์ เช่น เหล็ก เป็นต้น โลหะหนักเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะก่อให้เกิดพิษร้ายแรงเพียงใดนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ (อิทธิชัย นพแก้ว, 2539)

- คุณสมบัติของโลหะนั้น ๆ เช่น ความสามารถในการละลาย และรูปแบบของสารประกอบทางเคมี
- ปริมาณที่ได้รับ
- ระยะเวลาที่ได้รับ
- ความแตกต่างของความต้านทานในแต่ละบุคคล

- อายุ
- มาตรการป้องกันในการใช้สารเคมี

2.7.1 เคมีของทองแดง

ทองแดง (Copper) เป็นธาตุที่พบทั่วไปในธรรมชาติอยู่ในรูปของแร่ Chalcopyrite (CuFeS_2), Chalcocite (Cu_2S), Malachite ($\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$) และ Azurite ($\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$) ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของซัลไฟด์ ทั้งในรูปซัลไฟด์ทั่วไปและ Sulfide Mineral ทองแดงเป็นธาตุที่จำเป็นต่อร่างกายมนุษย์และสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม สารประกอบของทองแดงโดยทั่วไปทองแดงจะมีออกซิเดชันสเตท +1 (Cu^+) และ +2 (Cu^{2+}) ซึ่งเรียกว่า Cuprous และ Cupric ตามลำดับ โดย Cu^+ มีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนเป็น Cu^{2+} ซึ่งเป็นรูปที่มีเสถียรภาพมากกว่าเมื่อละลายน้ำอยู่ (จิตตกานต์ สินธุเสก, 2544)

ทองแดงส่วนใหญ่ถูกใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ดังนั้นกระทรวงอุตสาหกรรมจึงได้กำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม ให้มีทองแดงอยู่ไม่เกิน 2 มิลลิกรัมทองแดงต่อลิตร (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 พ.ศ.2539)

2.7.2 ประโยชน์ของทองแดง (จิตตกานต์ สินธุเสก, 2544)

ทองแดงมีคุณสมบัติอ่อน ดัดง่าย นำความร้อน และไฟฟ้าได้ดี ทนต่อการกัดกร่อน ทองแดงเป็นธาตุที่จำเป็นต่อปฏิกิริยาของเอนไซม์ต่าง ๆ (Enzymatic Reaction) ในร่างกายมนุษย์และสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ทองแดงส่วนใหญ่ถูกใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้แก่ การนำไปทำ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และผลิตภัณฑ์ไฟฟ้า ใช้ในงานก่อสร้างอาคาร อุปกรณ์ และ เครื่องจักร และใช้ในส่วนของประกอบของยาปราบศัตรูพืช ในงานทำเม็ดสีในอุตสาหกรรมเส้นใย และเซรามิก เป็นต้น

2.7.3 พิษของทองแดง (จิตตกานต์ สินธุเสก, 2544)

ความผิดปกติเนื่องจากมีระดับทองแดงสะสมอยู่ในร่างกายมากทำให้เกิดโรค Wilson Disease ได้ และในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุร่างกายได้รับทองแดงเข้าไปมากจะเกิดอาการเป็นพิษ เจ็บพลัน คือ คลื่นไส้ อาเจียน ท้องร่วง ปัสสาวะเป็นเลือด ความดันโลหิตต่ำ และอาจ

ทำให้เสียชีวิต ถ้ามีความเข้มข้นของทองแดงในดินสูง จะเป็นพิษต่อพืช ไปทำลายปลายยอดของ ต้นไม้ไม่ให้งอกงาม

2.8 การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2546)

กระบวนการที่ใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียมียหลายวิธี การพิจารณาจะเลือกใช้วิธีใด ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในหลาย ๆ ด้าน ดังนี้คือ

- คุณสมบัติของน้ำเสียก่อนบำบัด
- คุณภาพของน้ำที่ต้องการ
- พื้นที่ที่ต้องการใช้ในการบำบัด
- ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย
- ความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่

ซึ่งสามารถสรุปวิธีการกำจัดโลหะหนักพอสังเขปได้ดังนี้

2.8.1 การดูดติดผิว (Adsorption)

เป็นกระบวนการในการกำจัดมลทินสารที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับโมเลกุลของสารไป เกาะจับ และติดอยู่บนผิวหน้าของของแข็ง หรือ ของเหลว และสารดูดติดผิวที่นิยมใช้ ได้แก่ ถ่าน กัมมันต์ และเรียกโมเลกุลหรืออิออนที่ไปเกาะนั้นว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ซึ่งสามารถพบได้ที่ ผิวสัมผัสระหว่าง ก๊าซ-ของแข็ง ก๊าซ-ของเหลว ของเหลว-ของแข็ง ของเหลว-ของเหลว และของแข็ง-ของแข็ง

การดูดติดผิวง่ายต่อการควบคุม ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง และระบบมีความทนทาน ต่อสารพิษ ซึ่งจะมีผลกระทบอย่างมากต่อระบบชีวภาพ ต้องการพื้นที่ใช้สอยน้อย ไม่มีกลิ่นเหม็น ไม่มีผลกระทบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพีเอช อุณหภูมิหรือปริมาณสารอินทรีย์ที่ไม่คงที่ ใช้เงินลงทุน ต่ำ ไม่มีสลัดจ์ และระบบมีความยืดหยุ่นสูง สามารถเพิ่ม หรือ ลดขนาดของระบบได้ง่าย

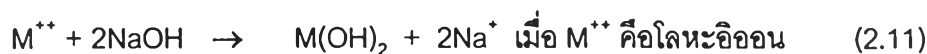
การดูดติดผิวนี้สามารถนำมาใช้กำจัดโลหะหนักได้เช่น ถังคาร์บอนแบบเกล็ดสามารถ กำจัดปรอท และเงินได้หมด และยังสามารถลดความเข้มข้นของโลหะอื่นๆ เช่น ทองแดง ตะกั่ว เป็นต้น จนถึงระดับที่ยอมให้มีได้ในน้ำดื่ม

2.8.2 การตกตะกอนผลึกทางเคมี (Chemical Precipitation)

เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมานานแล้ว ทำได้โดยการเติมสารเคมีลงในน้ำทิ้งเพื่อทำปฏิกิริยากับโลหะหนักที่ละลายอยู่เกิดตะกอนแยกออกจากกันได้ ซึ่งการตกตะกอนผลึกด้วยสารเคมีมีหลายวิธีด้วยกัน แต่ที่นิยมคือการตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ (Hydroxide Precipitation) และการตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ (Sulfide Precipitation)

2.8.2.1 การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์

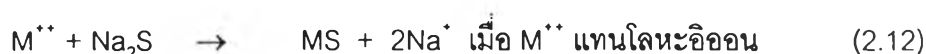
การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์จัดเป็นการตกตะกอนแบบดั้งเดิม ทำโดยการเติมปูนขาว หรือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เมื่อเกิดปฏิกิริยา ดังสมการ 2.11

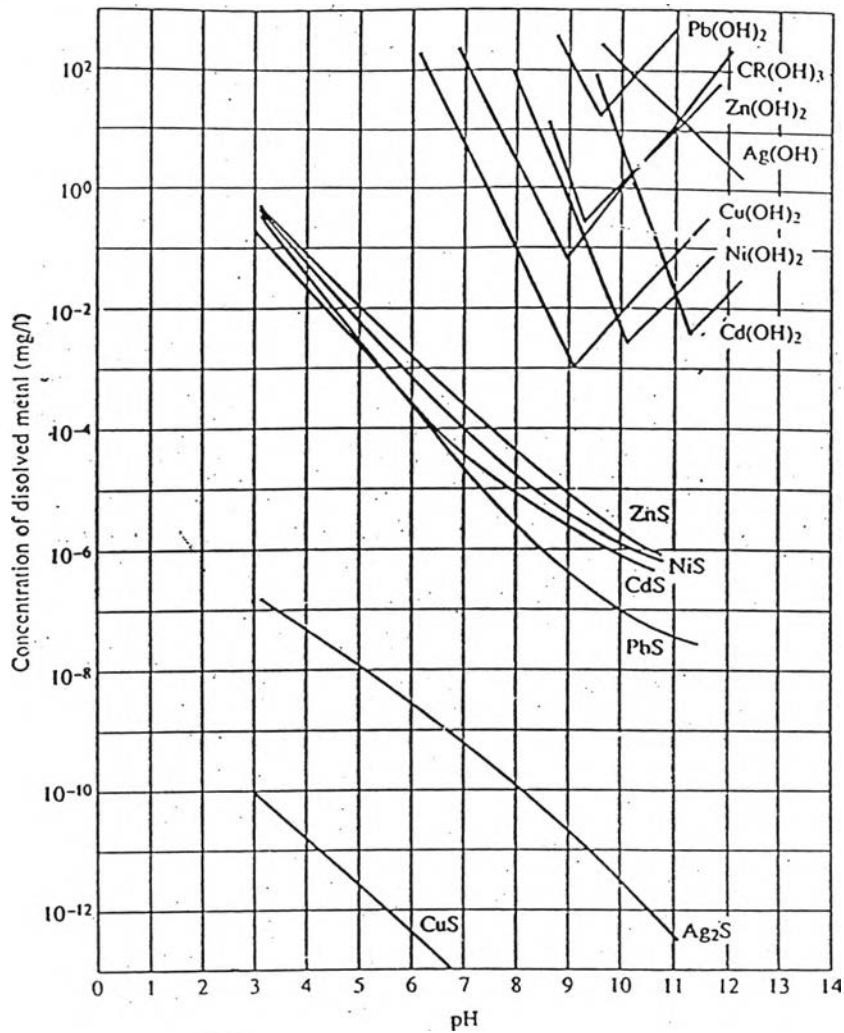


โดยทั่วไปความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ ($\text{M}(\text{OH})_2$) ในสารละลายจะลดลงเมื่อพีเอชสูงขึ้น และจะละลายได้ต่ำสุดที่ค่าพีเอชหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า Isoelectric point และสามารถละลายกลับได้อีก หากทำการเพิ่มพีเอชขึ้นเรื่อย ๆ ดังรูปที่ 2.13 และพบว่าความสามารถในการละลายต่ำสุดของโลหะทางทฤษฎีมีความแตกต่างกับทางปฏิบัติมาก เนื่องจากผลของสารเชิงซ้อน (Complexing agent) อุณหภูมิ และค่าความแรงทางไอออน (Ionic strength)

2.8.2.2 การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์

การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ จะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้ไฮดรอกไซด์ในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียอุตสาหกรรม โดยสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอน ได้แก่ โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) โซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ (NaHS) หรือ เฟอรัสซัลไฟด์ (FeS) (ดังรูปที่ 2.11)





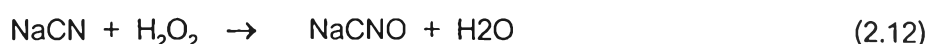
รูปที่ 2.11 การตกตะกอนผลึกของโลหะหนักชนิดต่างๆ ในรูปไฮดรอกไซด์ และซัลไฟด์ (Eckenfelder, 2000)

2.8.3 ปฏิกริยาออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and reduction reaction)

เป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะโดยการเติมสารเคมีลงในน้ำเสีย เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันกับโลหะหนักที่ต้องการกำจัดทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชันของโลหะหนัก เช่น การเปลี่ยนโครเมียม (Cr^{+6}) เป็นโครเมียม (Cr^{+3}) ซึ่งจะช่วยลดความเป็นพิษ และช่วยให้กำจัดได้ง่ายขึ้น

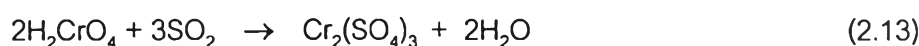
2.8.3.1 ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction)

ปฏิกิริยาออกซิเดชันนิยมใช้สำหรับบำบัดของเสียทั้งที่เป็นและไม่เป็นอันตรายโดยจัดว่าเป็นเทคนิคที่ปลอดภัย และสามารถควบคุมหรือติดตามผลได้สะดวก ส่วนใหญ่ใช้กับของเสียที่เป็นของเหลว สำหรับสารเคมีที่ใช้เป็นตัวทำให้เกิดออกซิเดชัน เรียกว่า ตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing agents) ได้แก่ ออกซิเจน โอโซน เปอร์แมงกานेट เป็นต้น เช่น การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนไซยาไนด์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยน CN^- เป็น CN^+ ดังสมการที่ 2.12



2.8.3.2 ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction)

ส่วนใหญ่ใช้ในการบำบัดของเสียอันตราย เช่น การรีดิวซ์โครเมียม (Cr^{6+}) เป็นโครเมียม (Cr^{3+}) ซึ่งมีความเป็นพิษน้อยกว่า ดังสมการที่ 2.13 และสามารถตกตะกอนในรูป $Cr(OH)_3$ ที่ไม่ละลายน้ำและกำจัดออกได้ง่าย สำหรับสารเคมีที่ใช้เป็นตัวทำให้เกิดรีดักชันเรียกว่า ตัวรีดิวซ์ (Reducing agents) ได้แก่ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ไอร์ออน(II)ซัลเฟต ($FeSO_4$) เป็นต้น ดังสมการที่ 2.13



2.8.4 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) เป็นวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายซึ่งไม่ต้องทำการสร้างตะกอนแข็งในการกำจัดโลหะหนักต่างๆ แต่เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Resin) ที่มีประจุเหมือนกับที่มีอยู่ในสารละลายกับไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิด มีความชอบ หรือ ถูกดูดซับ โดย เรซินไม่เท่ากันหรือเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างของแข็งแต่อย่างใด วิธีการนี้มีข้อดีคือเมื่อทำการฟื้นฟูสภาพเรซิน จะได้น้ำที่มีความเข้มข้นของโลหะหนัก หรือ สารประกอบโลหะสูงมาก อาจนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ก็มีข้อจำกัดในเรื่องค่าใช้จ่าย เนื่องจากเรซินสังเคราะห์มีราคาแพงมาก ดังนั้นวิธีการนี้จึงเหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักในน้ำต่ำหรือมีความเข้มข้นเทียบเท่า

ปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนต ไม่เกิน 2,500 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 0.05 กรัมสมมูลย์ต่อลิตร

การแลกเปลี่ยนไอออน หรือ การแลกเปลี่ยนไอออนแบบผันกลับ (Reversible) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นระหว่างไอออนในน้ำ หรือ สารละลายที่ต้องการกำจัดกับไอออนในสารที่เป็นของแข็งซึ่งมีอยู่ 2 ชนิด คือ

- 1) สารของแข็งที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cationic exchanger) หรือ เรซิน (Resin) โดยทั่วไปเป็นโพลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีการเชื่อมโยง (Crosslinked) ระหว่างโมเลกุลของโพลิเมอร์ และหมู่ $-COOH$ หรือ $-SO_3H$ ในโมเลกุล ซึ่งสามารถแลกเปลี่ยนไฮโดรเจนไอออน (H^+) กับไอออนบวกที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำ เช่น โลหะหนักชนิดต่างๆ
- 2) สารของแข็งที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนลบ (Anionic exchanger) สารของแข็งนี้เป็นเรซินเช่นกัน และมีหมู่ $-N^+H_3OH^-$ หรือ $-N^+R_3OH^-$ ในโมเลกุลของ เรซิน ซึ่งสามารถแลกเปลี่ยนไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) กับไอออนลบที่มีอยู่ในน้ำ

เทคนิคนี้อาศัยหลักการของความสามารถในการดูดจับของไอออนกับเรซินที่แตกต่างกัน โดยหมู่ฟังก์ชันของเรซินจะถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงข้ามเหมาะสำหรับการกำจัดโลหะหนักปริมาณน้อยแต่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง ข้อจำกัดคือ ต้องทำการกำจัดสารปนเปื้อนชนิดอื่น ๆ ออกก่อนที่จะเข้าถึงเรซิน และยังมีค่าใช้จ่ายในการลงทุน และ ดำเนินการสูง

2.8.5 การรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse osmosis : RO)

ระบบนี้เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ไฮเพอร์ฟิลเตรชัน (Ultrafiltration) เป็นกระบวนการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียด้วยการกรองผ่านแผ่นเยื่อกึ่งซึมได้ผ่านได้ (Semi-permeable membrane) ที่ความดันสูงกว่าความดันออสโมติก (Osmotic pressure) (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2543) โดยแผ่นเยื่อนี้ทำจากสารเซลลูโลสอะซิเตต และโพลีเอไมด์ ซึ่งจะยอมให้ตัวทำละลายผ่านได้เท่านั้น จึงเหลือเพียงสารที่ต้องการกำจัดที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น ทำให้น้ำทิ้งที่มีคุณภาพ แต่มีข้อจำกัดคือแผ่นเยื่อต้องสามารถทนต่อแรงดันสูง ๆ ได้ และต้องมีการบำบัดขั้นต้นก่อนด้วยการปรับพีเอช แยกสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์ ที่แรงและกรองสารแขวนลอยออกก่อนนอกจากนี้อาจมีปัญหาคาบของแผ่นเยื่อด้วย

2.8.6 การระเหย (Evaporation)

เป็นการทำให้สารมีความเข้มข้นสูงขึ้นโดยการระเหยเอาน้ำออก ทำให้ความเข้มข้นของน้ำเสียสูงขึ้นหรือกลายเป็นกากตะกอน พลังงานที่ใช้ทำให้เกิดความร้อนมาจากเชื้อเพลิง การถ่ายเทความร้อนหรือใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์ ซึ่งมีทั้งการระเหยที่บรรยากาศธรรมดา (Atmospheric evaporation) และการระเหยภายใต้สภาวะสูญญากาศ (Vacuum evaporation) วิธีการนี้ใช้ได้กับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักสูง และต้องใช้ต้นทุนในการดำเนินการสูง น้ำเสียที่ทำจากบำบัดด้วยวิธีนี้ต้องผ่านการบำบัดมาก่อน วิธีนี้เหมาะสำหรับน้ำที่ความเข้มข้นโลหะหนักสูง สามารถนำไปใช้งานร่วมกับการแลกเปลี่ยนไอออน แต่จะทำให้ต้นทุนการดำเนินการสูง

2.8.7 อิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis)

เป็นการแยกไอออนออกจากสารละลายด้วยไฟฟ้าร่วมกับการใช้แผ่นเยื่อสำหรับไอออน แต่ละชนิด (Ion selective membrane) ซึ่งกลไกการทำงานของระบบเป็นลักษณะของการแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกับการสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยระบบประกอบด้วยขั้วเซลล์ประจุบวก และลบ ซึ่งมีแผ่นเยื่อดังกล่าว ที่ทำหน้าที่จับสารปนเปื้อนที่มีประจุบวก แต่จะปล่อยให้สารที่มีประจุลบ ผ่านไปได้ ความบริสุทธิ์ของไอออน ขึ้นกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านแผ่นเยื่อสำหรับน้ำเสียก่อนเข้าระบบจะต้องนำไปผ่านระบบที่สามารถกำจัดหรือแยกตะกอนเล็ก ๆ และสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ออกจากน้ำเสียก่อนเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเยื่อ ข้อดีของเทคนิคนี้คือสามารถกำหนดชนิดไอออนที่ต้องการได้ แต่เป็นเทคนิคที่ต้องใช้ทุนในการก่อสร้าง และดำเนินการสูง

2.8.8 การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า (Electrolytic Recovery)

วิธีการนี้เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าซึ่งจะลดปริมาณไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายให้อยู่ในรูปของธาตุที่ขั้วคาโทด (ขั้วบวก) และเกิดออกซิเจนที่ขั้วแอโนด (ขั้วลบ) ตลอดเวลา วิธีนี้เหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะสูงแต่วิธีนี้มักไม่นิยมเนื่องจากสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสูงมาก

2.9 การผลิตแป้งมันสำปะหลัง (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2540)

มันสำปะหลังเป็นพืชที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย เป็นพืชที่มีการเพาะปลูกมากเป็นอันดับสามรองจากข้าว ข้าวโพด ประมาณร้อยละ 97 ของผลผลิตจากมันสำปะหลัง (หัวมันสด) ถูกส่งเข้าโรงงานทำการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังมากมายหลายชนิด เช่น มันสำปะหลังแห้งหรือมันเส้น มันสำปะหลังอัดเม็ด หรือ มันสำปะหลังแท่ง และ แป้งมันสำปะหลัง เป็นต้น สำหรับกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังนั้น จากการศึกษาพบว่ามีกรรมวิธีในการผลิตแป้งมันสำปะหลังอยู่ 2 แบบ ด้วยกันคือ

2.9.1 กรรมวิธีการผลิตแป้งมันสำปะหลังแบบเก่า

กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังวิธีนี้จะทำการแยกแป้งออกจาก ทำให้ได้แป้งที่มีคุณภาพไม่ดีนัก เรียกแป้งที่ผลิตตามกรรมวิธีนี้ว่า Tapioca Flour มีขั้นตอนการผลิตแบ่งเป็น 9 ขั้นตอนด้วยกัน คือ

- ก่อนทำการแปรรูปต้องชั่งน้ำหนักและวัดร้อยละของแป้ง
- ตัดหัวและส่วนของลำต้นที่มากับหัวมันสดทั้งก่อนส่งเข้าเครื่องปอกเปลือก
- ปอกเปลือกชั้นนอกของหัวมันสดออก แล้วแช่หัวมันสดในบ่อเพื่อล้างหัวมันให้สะอาด
- นำหัวมันสดที่ล้างสะอาดแล้วเข้าเครื่องสับ และม่ให้ละเอียดแล้วปล่อยให้เนื้อเยื่อที่ได้ตกตะกอนในน้ำ ในขั้นนี้จะได้เป็นของเหลวซึ่งประกอบไปด้วยแป้งน้ำ และกากมันปนกันอยู่
- กรองของเหลวที่ได้ เพื่อแยกน้ำแป้ง และกากมันออกจากกัน ซึ่งกากมันที่ได้ยังมีเปอร์เซ็นต์แป้งอยู่บ้างจึงสามารถนำไปทำอาหารสัตว์ได้
- ทำให้แป้งตกตะกอนซึ่งอาจใช้วิธีตกตะกอนในถังไม้ หรือ ตกตะกอนบนโต๊ะ ซึ่งมีลักษณะเป็นอ่าวตื้นๆ พื้นเรียบ หรือ อาจจะใช้เยี่ยงเล็กน้อยกันขวางไว้เป็นช่องๆ เมื่อปล่อยให้แป้งไหลอย่างช้าๆ จากตอนบน เม็ดแป้งก็จะตกตะกอนไปเรื่อย ๆ
- แป้งชั้นที่ได้จะถูกนำมาผึ่งแดดให้แห้ง
- นำแป้งที่แห้งสนิทมาบดให้ละเอียด
- บรรจุกระสอบหรือถุง

2.9.2 กรรมวิธีการผลิตแป้งมันสำปะหลังแบบใหม่

เป็นกรรมวิธีการผลิตแป้งมันสำปะหลังที่โรงงานขนาดใหญ่ และขนาดกลางใช้กันอยู่ โดยใช้ระบบแรงเหวี่ยง มีการใช้เครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ทันสมัย มีการไม่ด้วยลูกม่ และแยกโปรตีนโดยเครื่อง Decanter เสร็จแล้วแยกน้ำแป้งด้วยเครื่อง Centrifuge และอบแห้งด้วยเตาน้ำมันได้แป้งบริสุทธิ์ คุณภาพดี และใช้เวลาในการผลิตน้อย แป้งที่ได้เรียกว่า "Tapioca Starch" หรือ "Raw Starch" หรือ "Native Starch" ทั้งหมดจะมีขั้นตอนการผลิต 9 ขั้นตอนด้วยกัน คือ

- ชั่งน้ำหนักและวัดร้อยละของแป้ง
- ส่งเข้าเครื่องร่อนดินทรายออก
- ส่งเข้าเครื่องปอกเปลือกและล้างในเครื่องเดียวกัน
- นำหัวมันสดที่ล้างสะอาดแล้วนำเข้าเครื่องม่ละเอียด ส่งเข้าเครื่องแยกกากออกจากน้ำแป้ง กากของหัวมันที่ได้จะถูกส่งไปยังลานตาก
- นำน้ำแป้งที่ได้มาฟอกด้วยน้ำกำมะถัน เพื่อฟอกและขจัดยางมันให้น้ำแป้งบริสุทธิ์ขึ้น
- แยกน้ำแป้งออกจากแป้งโดยใช้เครื่องสลัดแห้งระบบแรงเหวี่ยง
- อบให้แห้งด้วยความร้อนโดยใช้ท่อลมร้อน
- แป้งที่อบแห้งแล้วจะถูกนำมาตีให้แตกตัวออกเป็นผง
- นำแป้งที่แห้งสนิทและแตกตัวเป็นผงแล้ว เข้าเครื่องร่อนเอาส่วนที่หยาบออกไปและบรรจุถุงจำหน่าย

2.9.3 ขอบเสียจากการผลิตแป้งมันสำปะหลัง

2.9.3.1 มลพิษทางน้ำ

เนื่องจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังมีการใช้น้ำในปริมาณมาก จึงเกิดน้ำเสียจำนวนมากตามมา ซึ่งการผลิตแป้งมันสำปะหลังจะเกิดน้ำเสียจากขั้นตอนการผลิต เช่น น้ำล้างหัวมัน และน้ำจากเครื่องแยกแป้ง ส่วนการจัดการน้ำเสียของโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังส่วนมาก จะใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อผึ่ง หรือ บ่อเปิดตามธรรมชาติ

2.9.3.2 กากของเสีย

กากของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ได้แก่ เศษเหง้า และเปลือกมันสำปะหลัง รวมทั้งดิน ทราย และกากมันของเสียเหล่านี้มีสารอินทรีย์เป็น

องค์ประกอบหลัก ดังนั้นของเสียเหล่านี้จึงสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ ในรูปของปุ๋ย อาหารสัตว์ และการเพาะเห็ด ซึ่งปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปริมาณของเสียของโรงงาน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548)

ของเสีย	ค่าต่ำสุด - สูงสุด	เฉลี่ย
น้ำเสีย (ลูกบาศก์เมตรต่อตันแป้ง)	8.10 - 37.11	19.03
เศษเหง้าและเปลือก (ตันต่อตันแป้ง)	0.14 - 0.63	0.27
กากมัน (ตันต่อตันแป้ง)	1.00 - 2.22	1.54

2.9.3.3 มลพิษทางอากาศ

มลพิษทางอากาศที่เกิดจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง จะเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง และส่วนผลิตน้ำกำมะถัน ซึ่งจะเกิดสารมลพิษจำพวกก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และฝุ่นเขม่า

2.9.4 มลพิษทางเสียง

เนื่องจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังมีการใช้เครื่องจักร อุปกรณ์ขนาดใหญ่จำนวนมากทำให้เกิดปัญหาเสียงดัง ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพของพนักงาน ซึ่งโรงงานส่วนใหญ่มีมาตรการป้องกัน โดยกำหนดให้คนงานใส่เครื่องป้องกัน

2.9.5 มลพิษทางกลิ่น

โรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง มีแหล่งกำเนิดกลิ่นเหม็นที่สำคัญ ได้แก่ บริเวณเตรียมน้ำกำมะถัน ซึ่งจะมีกลิ่นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และ ที่บอบำบัดน้ำเสีย จะมีกลิ่นเหม็นของก๊าซที่สร้างโดยจุลินทรีย์ รวมทั้งกลิ่นเหม็นจากกองกากมันสำปะหลังสด

2.9.6 การทำสมุดคู่มือสาร

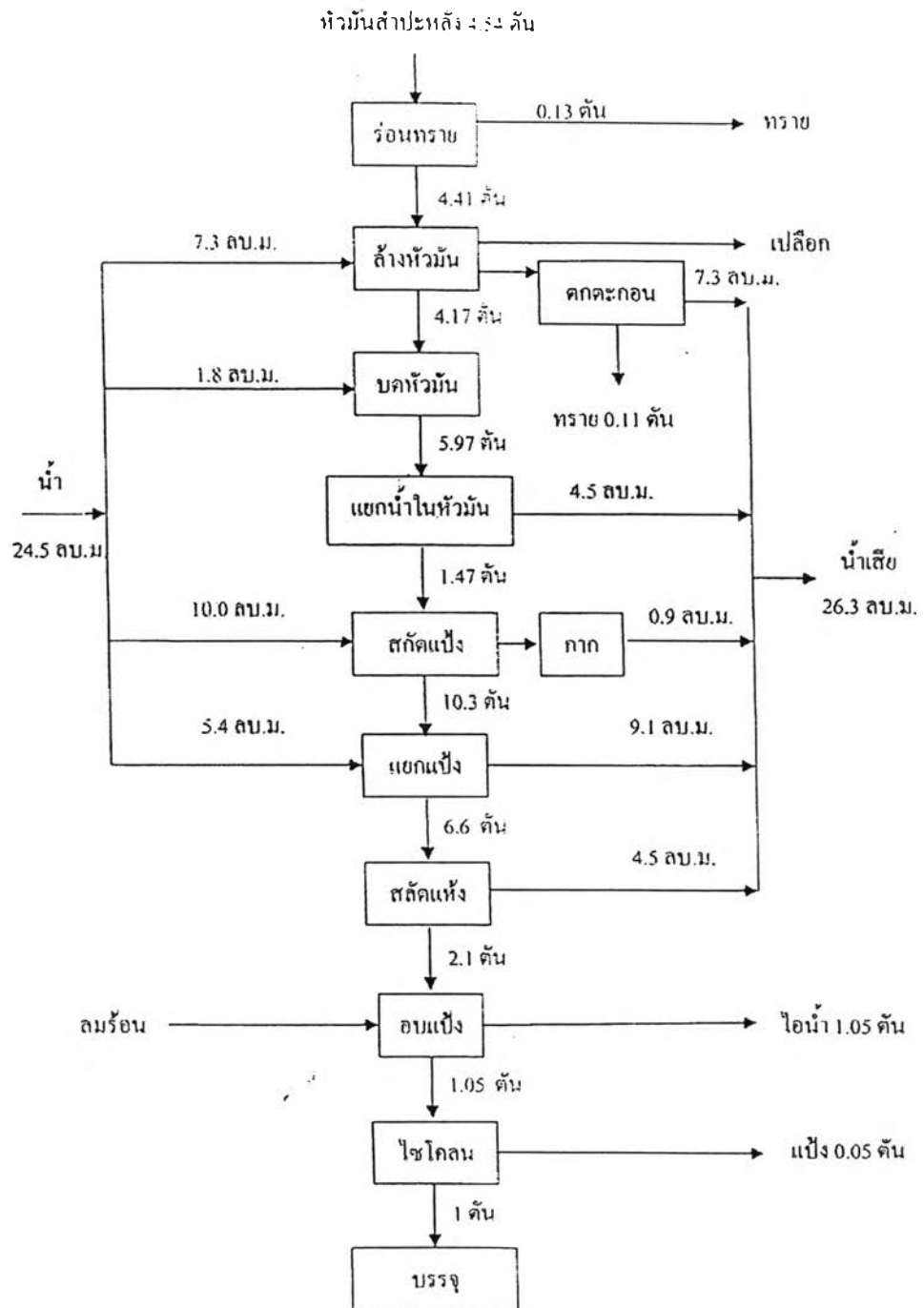
ในกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ตลอดทั้งกระบวนการใช้เวลาทั้งสิ้นประมาณ 1 ชั่วโมง สำหรับแผนผังแสดงกรรมวิธีผลิต และข้อมูลสมุดคู่มือสารทั้งกระบวนการผลิต

ดังรูปที่ 2.12 จากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง พบว่ามีการใช้น้ำ น้ำมันเชื้อเพลิง ไฟฟ้า และ สารละลายกรดเท่านั้น ส่วนของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต ได้แก่ น้ำเสีย และกากของเสีย ที่มาจากหัวรากมันสำปะหลังที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตนั่นเอง สมดุลมวลสารของการผลิตแป้งมันสำปะหลัง แบบมาตรฐานได้ ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมดุลกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังแบบมาตรฐาน
(กระบวนการผลิตที่มีการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่)

สถานะ	ชนิดของวัสดุ	มวล (กก.ต่อตันแป้ง)	ปริมาณแปงที่สูญเสียน้ำ (กก.ต่อตันแป้ง)
ผลผลิตในรูปของแข็ง (มวลสารแห้ง)	กากมันสำปะหลัง	60	5
	แป้งมันสำปะหลัง	200-220	-
	รวม	260-280	5
ของเสียที่เป็นของแข็ง (มวลสารแห้ง)	เศษดินทราย	20	-
	เศษดินทราย จากGrit chamber	25	-
	เศษรากมันสำปะหลัง	10	2
	เศษเปลือกมันสำปะหลัง	30	-
	รวม	85	2
ของเหลว	น้ำทิ้งจากการล้าง รากมัน Fruit-water (ใช้ Decanter)	1,600	6
	น้ำทิ้งจากการทำให้ น้ำแป้งแห้ง	1,200	2
	รวม	3,800	28
ไอน้ำ	ไอน้ำจากการอบแป้ง	230	3
	ซิลเฟอร์ไดออกไซด์	2.2	-
	รวม	232.2	3
	รวมทั้งหมด	4,377.2-4,397.2	38

ที่มา: สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (2548)



รูปที่ 2.12 สมดุลมวลสารของกระบวนการผลิตแป้งมันล่าปะหลัง (กล้าณรงค์ และคณะ, 2542)

จากตารางที่ 2.5 พบว่าแบ่งสูญเสียจากกระบวนการผลิตมี 4 รูปแบบคือ กากมัน เปลือกน้ำทิ้ง และไอน้ำ จึงสรุปได้ว่าแบ่งจะสูญเสียจากกระบวนการผลิตในน้ำทิ้งมากที่สุด รองลงมาคือสูญเสียไปกับกากมัน และไอน้ำ ตามลำดับ ซึ่งปัจจุบันพบว่าโรงงานส่วนใหญ่ มีการหมุนเวียนน้ำเสียในกระบวนการผลิต และไม่ได้ใช้ดีแคนเตอร์แล้ว นอกจากนั้นยังมีการใช้ไซโคลน และตุ๊กกรองฝุ่นในการลดแบ่งสูญเสียไปกับลมร้อนได้ดี และแบ่งที่ดักได้ยังสามารถขายเป็นแบ่งคุณภาพรอง (เกรดสอง) ได้ ส่วนการสูญเสียแบ่งไปกับกากมัน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548)

2.10 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.10.1 งานวิจัยเกี่ยวกับสารดูดซับที่ผลิตจากเปลือกมันสำปะหลัง

Horsfall และคณะ (2003) ความสามารถดูดติดผิวจากเปลือกมันสำปะหลังที่ไม่ถูกกระตุ้นและกระตุ้นด้วยกรด) เพื่อกำจัดโลหะหนัก (Cu^{+2} และ Zn^{+2}) ออกจากสารละลายอิออนเดี่ยว และน้ำเสียที่สำรวจ โดยการทดลองทั้งหมดใช้สารละลายของอิออนโลหะผสมของ $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ และ ZnCl_2 ที่ 10 มิลลิโมลาร์ พบว่าความสามารถดูดติดผิวของอิออนโลหะ 2 ตัวของเสียจากเปลือกมันสำปะหลังแบบไม่ถูกกระตุ้น และที่ถูกกระตุ้นเป็น 71.3 และ 85.2 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับทองแดง ส่วนสังกะสี 43.4 และ 58.1 มิลลิกรัมต่อกรัม ในสารละลายอิออนเดี่ยว สำหรับในน้ำเสีย ความสามารถดูดติดผิวจากเปลือกมันสำปะหลังสำหรับทองแดง ชนิดที่ไม่ถูกกระตุ้นและกระตุ้นด้วยกรด มีค่าเท่ากับ 40.1 และ 59.7 มิลลิกรัมต่อกรัม และสำหรับสังกะสี มีค่าเท่ากับ 38.6 และ 38.7 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ความสามารถดูดติดผิวใช้อิออนโลหะในน้ำเสียบางที่ต่ำกว่าในสารละลายอิออนเดี่ยว เนื่องจากการแข่งขันของอิออนโลหะที่มีขนาดประจุแตกต่างกันบนที่ยึดติด ความสามารถดูดติดผิวของอิออนโลหะบนพื้นที่มวลชีวภาพได้เพิ่มขึ้นพร้อมกับการกระตุ้นด้วยกรด การศึกษาการดูดติดผิวที่ภาวะสมดุล พบว่าขอบเขตของการใช้โลหะมีค่าเพิ่มขึ้นโดยไทโอเลชัน (Thiolation) ทางเคมี ของเสียจากเปลือกมันสำปะหลังทำให้มีมัดด้วย อิออนโลหะเพื่อการฟื้นคืนสภาพโลหะ โดยการบำบัดกรดให้เจือจาง และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่

กิริณา (2547) ศึกษาใช้สารดูดซับที่ผลิตจากเปลือกมันสำปะหลังในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีแดง สารดูดซับที่ใช้ในการวิจัยมีวิธีการเตรียมต่างกัน 3 แบบ คือ 1) เผาเปลือกมันสำปะหลังให้เป็นถ่านที่อุณหภูมิ 500°C เวลา 1 ชั่วโมง 2) กระตุ้นด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริก ที่อุณหภูมิ 350°C เวลา 3 ชั่วโมง แขนสารละลาย NaHCO_3 และ 3) กระตุ้นด้วย

สารละลายกรดฟอสฟอริก ที่อุณหภูมิ 350°C เวลา 3 ชั่วโมง และล้างด้วยน้ำร้อน ศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของสารดูดซับ ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้สารดูดซับกำจัด สีย้อมรีแอกทีฟ ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดติดผิว โดยเปลี่ยนแปลงค่า พีเอช เวลาสัมผัส ปริมาณของสารดูดซับ และเพื่อหาประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของสารดูดซับ โดยทำการทดสอบ ไอโซเทอมของสารดูดซับ และทำการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร ทำการป้อนน้ำเสียแบบไหลลง ที่มีชั้นสารดูดซับ 0.3 เมตร และมีเวลาสัมผัสถึงเปล่า 10, 20 และ 30 นาที ตามลำดับ

จากการทดลองการเตรียมสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลังโดยการกระตุ้นด้วย สารละลายกรดฟอสฟอริก สภาวะที่เหมาะสมคือ ที่อุณหภูมิ 350°C เวลา 3 ชั่วโมง ล้างสารละลาย กรดด้วยน้ำร้อน ได้ผลิตภัณฑ์สารดูดซับร้อยละ 34.18 และสารดูดซับที่ได้มีสมบัติ คือ ร้อยละของ เถ้า 4.8 ค่าการดูดซับไอโอดีน คือ 473 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิว 354.99 ตารางเมตรต่อกรัม และ ปริมาตรโพรง 0.26 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม จากผลการทดลองแบบแบดซ์พบว่า ที่ pH 3 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมได้ดีที่สุด คือ ร้อยละ 94 จากการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิว แบบแลงมัวร์ และฟรุนดลิช พบว่าการดูดติดผิวของสารดูดซับสามารถอธิบายได้ด้วยรูปแบบ ไอโซเทอมทั้ง 2 แบบ ที่ค่า r^2 ใกล้เคียงกันคือ 0.9297 และ 0.9408 ตามลำดับ และความสามารถ ในการดูดซับสีคือ 270.27 มิลลิกรัมต่อกรัม จากการทดลองแบบต่อเนื่อง สามารถกำจัด สีย้อมในน้ำเสียก่อนเบรคทอร์จ สภาวะที่เหมาะสมของสีรีแอกทีฟแดงที่เวลาสัมผัส 30 นาที เท่ากับ 1,150 ปริมาตรเบด

2.9.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดทองแดง

Potgieter และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาการใช้ดินเหนียวพาลิโกลอสไกต์ จากทาง จังหวัดตอนเหนือของแอฟริกาใต้ ซึ่งเป็นสารดูดซับเพื่อกำจัดโลหะไอออนของทองแดง นิกเกิล โครเมียม และ ตะกั่ว จากสารละลายที่อยู่ในสภาวะละลายน้ำ โดยศึกษาโดยวิธีแบบแบดซ์ ที่ อุณหภูมิห้อง ผลการดูดซับเหมาะสมกับไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช และแลงมัวร์ ซึ่งมีค่า R^2 มีค่า เท่ากับ 0.953 และ 0.994 ตามลำดับ ความสามารถดูดติดผิวสูงสุด จากไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ มีค่าเท่ากับ 62.1, 33.4, 58.5 และ 30.7 mg/g ของทองแดง นิกเกิล โครเมียม และตะกั่ว ตามลำดับ พีเอชที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 7 ที่อุณหภูมิห้อง ขนาดดินเหนียวที่ใช้ มีค่าเท่ากับ 125 ไมโครเมตร

Pan และคณะ (2003) ได้ศึกษาความสามารถในการดูดซับทองแดง (Cu^{2+}) โดยใช้เถ้าตะกอนของโสโครก (Sewage sludge ash; SSA) เป็นสารดูดซับ พบว่าลักษณะการดูดติดผิวของ SSA รวมทั้ง พื้นที่ผิวจำเพาะ ความสามารถแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Cation-exchange capacity; CEC) และพีเอชของประจุที่เป็นศูนย์ของ SSA เนื่องจากไอโซเทอมการดูดติดผิวของ SSA กับน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ทดสอบไอออนทองแดง จากผลการทดลองค่า CEC และ pH_{ZPC} ของ SSA มีค่าเท่ากับ 24.1-25.7 meq/100 g. และ 3.1-3.4 มีค่าใกล้เคียงกับของเถ้าลอย (Fly ash) ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสีย การทดสอบดูดติดผิวของ SSA ในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าไอโซเทอมที่เหมาะสมคือ โมเดลแบบแลงมัวร์ การดูดติดผิวทองแดงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 3.2-4.1 mg./g. กลไกเพื่อกำจัดทองแดงโดย SSA ใช้ Electrostatic attraction, Surface complex formation และ CEC การตกตะกอนของคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์เกิดขึ้นเพียงแคंपริมาณของ SSA มีค่าเท่ากับ 30-40 กรัมต่อลิตร และพีเอชที่สมดุล มีค่ามากกว่า 6.2 คล้ายคลึง เถ้าลอย และ ซีโลหะเตาหลอม และ SSA นำกลับมาใช้ใหม่เป็นสารดูดซับเพื่อกำจัดทองแดงและมีประสิทธิภาพการกำจัดมากกว่าร้อยละ 98

Schmuhl และคณะ (2001) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับทองแดง (Cu^{2+}) และโครเมียม (Cr^{6+}) ด้วยโคโตแซน จากการทดลอง พบว่า ความเร็วรอบในการเขย่ามีผลต่อการดูดซับทองแดง แต่ไม่มีผลต่อการดูดซับโครเมียม พีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียมเท่ากับ 5 ในขณะที่ทองแดงพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับจะอยู่ในช่วงพีเอช 3 ถึง 5 การดูดซับทองแดงสามารถอธิบายด้วย Freundlich Isotherm ในขณะที่การดูดซับโครเมียมสามารถอธิบายด้วย Langmuir Isotherm

Stefanova (2001) ได้ทำการศึกษาการดูดซับทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี ในสารละลายโดยดินมาร์ลที่ผ่านการกระตุ้นด้วยการเผาที่ 750 องศาเซลเซียส พบว่า ผลกระทบของความเข้มข้นสารละลายโลหะหนักแรกเริ่ม เวลาสัมผัส พีเอช และอุณหภูมิสารละลาย จากการทดลองแบบแบตช์ พบว่าจลนศาสตร์ของการกำจัดไอออนโลหะขึ้นกับอัตราส่วนสารถูกดูดซับต่อสารดูดซับ ที่ความเข้มข้นไอออนต่ำ ๆ ไอโซเทอมการดูดซับสอดคล้องโมเดลแบบแลงมัวร์ ขณะที่อัตราส่วนสารถูกดูดซับต่อสารดูดซับที่มีความเข้มข้นไอออนสูง ไอโซเทอมการดูดซับสอดคล้องโมเดลแบบ ฟรุนดลิช ค่าพีเอช มีผลต่อบริเวณขอบของการดูดซับ ซึ่งสามารถกำจัดไอออนโลหะได้จากการ ตกตะกอนและเกิดสารประกอบที่ผิว จากการสังเกต พบว่าอุณหภูมิที่ดีที่สุดคือ 40 องศาเซลเซียส จากการศึกษาพบว่าดินมาร์ลที่ถูกปรับปรุงสภาพด้วยความร้อนสามารถกำจัดไอออนโลหะในสารละลายในช่วงความเข้มข้นกว้างได้

Zoumpoulakis และ Simitzis (2001) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการกำจัดโลหะหนัก โดยใช้วัสดุแลกเปลี่ยนไอออนที่ผลิตขึ้นมาจากเมล็ดมะกอก โดยนำเมล็ดมะกอกมาทำการไฮโดรไลซิส ในสภาวะที่เป็นด่าง (alkaline hydrolysis) ได้เป็น Kraft lignin (KRL) และหากนำ KRL มาทำการ hydroxymethylated โดยสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ จะได้เป็น KRLH สำหรับ Novolac resin (N) สามารถสังเคราะห์ได้จากฟีนอล และฟอร์มัลดีไฮด์ภายใต้สภาวะกรด นอกจากนี้ถ้านำ KRL หรือ KRLH มารวมกับฟีนอลต่อฟอร์มัลดีไฮด์ ในระหว่างการโพลีเมอร์ไรเซชัน จะได้เป็น N-KRL หรือ N-KRLH ผลิตภัณฑ์จากการโพลีเมอร์ไรเซชัน (N,N-KRL, N-KRLH) ได้มาจากการซัลโฟเนต โดย H_2SO_4 เข้มข้นในอัตราส่วน 1 : 3 w/w (-S1) หรือ 1:6 w/w (-S2) มี H_2SO_4 มากเกินพอจากนั้นคลอสลึงค์ด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ ดังนั้นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่จะใช้ในการทดลองคือ N-S1, N-S2, N-KRL-S1, N-KRL-S2, N-KRLH-S1 และ N-KRLH-S2 จากการศึกษาพบว่าเมล็ดมะกอกที่ผ่านการปรับสภาพที่อัตราส่วน H_2SO_4 1:6 w/w (-S2) มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่าเมล็ดมะกอกที่ผ่านการปรับสภาพโดยที่อัตราส่วน 1:3 w/w (-S1) และพบว่า N-KRL-S2 และ N-KRLH-S2 มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน 2.6 และ 2.7 มิลลิอิกิววาเลนซ์ต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่า N-S2 ที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน 2.4 มิลลิอิกิววาเลนซ์ต่อกรัม ทั้งที่อัตราเดียวกันและที่อัตราเร็วกว่าการศึกษาความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนโลหะ โดยไอออนโลหะที่ทำการศึกษาคือ Co^{2+} Ni^{2+} และ Cu^{2+} พบว่าวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนสามารถกำจัด Co^{2+} ได้มากที่สุด เมื่อทำการเปรียบเทียบ N-KRL-S2 และ N-KRLH-S2 กับสารแลกเปลี่ยนไอออนสังเคราะห์ (Phenolic Resin) พบว่ามีคุณสมบัติใกล้เคียงกับ Phenolic Resin

Beker และคณะ (1999) ได้ทำการศึกษาการกำจัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจาก Hydroxyethyl cellulose ในการกำจัดโลหะหนัก ได้แก่ โคบอลต์ ทองแดง และสังกะสีในน้ำเสีย จากการทดลองแบบแบตช์ และคอลัมน์ พบว่า เรซินมีการบวมตัวเฉลี่ยร้อยละ 75.94 และมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน เท่ากับ 2.57 มิลลิอิกิววาเลนซ์ต่อกรัม ของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ดังนั้นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ได้สามารถนำไปใช้ได้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียได้และจากการศึกษาแบบคอลัมน์พบว่าการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดนี้มีข้อดีคือ มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนทั้งหมดสูงและเป็นสารเคมีที่คงสภาพดี

Bunnaul (1999) ได้ทำการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์เพื่อใช้กำจัดสารหนู วัตถุประสงค์ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์คือกะลามะพร้าว และแกลบ โดยวิธีการกระตุ้นด้วยสารเคมี คือ โซเดียมคลอไรด์ และเพอริคลอไรด์ เตรียมโดยการแช่วัตถุดิบในสารละลายอิมมัตวของ

โซเดียมคลอไรด์ และ เฟอร์ริกคลอไรด์ ปล่อยทิ้งไว้ข้ามคืน จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไร้ก๊าซออกซิเจน พบว่าสารหนูจะถูกดูดซับโดย ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์ จะดีกว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ และ เปรียบเทียบการเลือกใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากแกลบจะใช้ปริมาณสารเคมีน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวและจากการทดลองการดูดซับแบบต่อเนื่องโดยใช้ถ่านกัมมันต์จาก แกลบที่กระตุ้นด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์ พบว่าขีดความสามารถในการดูดซับ As^{3+} เท่ากับ 0.48 มิลลิกรัมต่อกรัม และ As^{5+} เท่ากับ 0.82 – 1.02 มิลลิกรัมต่อกรัม

Marshall และคณะ (1999) ได้ทำการศึกษาการใช้เปลือกถั่วเหลืองที่ปรับสภาพด้วย กรดซิตริก ในการกำจัดทองแดง โดยการนำเปลือกถั่วเหลืองมาสกัดด้วย 0.1 นอร์มัล NaOH จากนั้นทำการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกที่ความเข้มข้น 0.1-1.2 โมลาร์ พบว่า เปลือกถั่วเหลืองที่ ปรับสภาพด้วยกรดซิตริกความเข้มข้น 0.6 โมลาร์ และมากกว่า มีความสามารถในการดูดซับ มากกว่า 1.7 มิลลิโมลทองแดงต่อกรัมของเปลือกถั่วเหลือง ซึ่งสูงกว่าของเปลือกถั่วเหลืองที่ไม่ปรับ สภาพ (0.39 มิลลิโมลต่อกรัม) เนื่องจากการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกจะเพิ่มหมู่คาร์บอกซิล ให้กับเปลือกถั่วเหลือง ดังนั้นเปลือกถั่วเหลืองที่ปรับสภาพด้วยกรดซิตริกมีความเหมาะสมในการ นำไปใช้กำจัดทองแดงออกจากน้ำเสีย

Wu และคณะ (1999) ได้ทำการศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อการดูดซับทองแดง (Cu^{2+}) ของ ไคโตแซนในสารละลายที่มีสารคีเลต (Chelating Agents) โดยใช้สารคีเลต 4 ชนิด ได้แก่ อีดีทีเอ (EDTA), กรดทาทาริก (Tartaric Acid), กรดซิตริก (Citric Acid) และโซเดียมกลูโคเนต (Sodium Gluconate) โดยจำนวนโมลของสารคีเลตที่เติมลงไปจะเท่ากับจำนวนโมลของทองแดงที่อยู่ใน น้ำล้าง (Equimolar) ความเข้มข้นของทองแดงที่ใช้ในการทดลองจะอยู่ระหว่าง 0.3-4.5 โมลต่อ ลิตร โดยทดลองในช่วงพีเอช 2-10 โดยรักษาอุณหภูมิให้คงที่ที่ 25 องศาเซลเซียส ผลการทดลอง ความสามารถในการดูดซับสูงสุดมีค่าดังนี้

- 0.59 โมลทองแดงต่อกิโลกรัมไคโตแซน เมื่อใส่อีดีทีเอที่พีเอช 3.1-4.2
- 4.29 โมลทองแดงต่อกิโลกรัมไคโตแซน เมื่อใส่ทาทาริกที่พีเอช 5.0-6.0
- 2.60 โมลทองแดงต่อกิโลกรัมไคโตแซน เมื่อใส่ซิตริกที่พีเอช 5.0-5.8
- 2.48 โมลทองแดงต่อกิโลกรัมไคโตแซน เมื่อใส่โซเดียมกลูโคเนตที่พีเอช 5.2-5.8

Ngah and Isa (1998) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับทองแดง (Cu^{2+}) ของ ไคโตแซนโดยเปรียบเทียบกับเรซิน 2 ชนิดที่นิยมใช้ในการกำจัดทองแดงในสารละลาย ได้แก่

Zerolite 225 และ Dowex A-1 เรซินทั้งสามชนิดนั้นนำมาทดลองกำจัดทองแดงในสารละลายที่มีความเข้มข้นของทองแดง 100 ppm. ที่ช่วงพีเอช 2-10 จากการทดลองพบว่าพีเอชจะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับทองแดงของเรซินทั้งสามชนิด ความสามารถในการดูดซับสูงสุดของเรซิน แต่ละชนิดมีค่าดังนี้

4,700 ไมโครกรัมทองแดง ต่อกรัมไคโตแซน ที่พีเอช 6.2

440 ไมโครกรัมทองแดง ต่อกรัม Zerolite 225 ที่พีเอช 4.1

2.3 ไมโครกรัมทองแดง ต่อกรัม Dowex A-1 ที่พีเอช 8.6

Inoue และคณะ (1997) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติการดูดซับทองแดง (Cu^{2+}) สังกะสี (Zn^{2+}) นิกเกิล (Ni^{2+}) ตะกั่ว (Pb^{2+}) อลูมิเนียม (Al^{3+}) และเหล็ก (Fe^{3+}) ด้วยไคโตแซนที่มีการปรับปรุงคุณภาพด้วยอีดีทีเอ (EDTA) และ ดีพีทีเอ (DPPA) ผลการทดลองพบว่าไคโตแซนทั้งสองชนิดสามารถดูดซับตะกั่วออกจากสารละลายที่มีการปะปนของสังกะสีที่พีเอชต่ำได้ดี เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติในการดูดซับโลหะหนักกับ Phosphonamidic Acid-type Chelating Resin ซึ่งเป็นเรซินที่นิยมใช้ในการดูดซับโลหะหนักพบว่าไคโตแซนที่มีการปรับปรุงคุณภาพทั้งสองชนิดจะมีความสามารถในการดูดซับดีกว่า ความสามารถในการดูดซับตะกั่วของไคโตแซนที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพทั้งสองชนิดมีค่าดังนี้ 1.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมแห้งของไคโตแซนชนิดอีดีทีเอ และ 1.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมแห้งของไคโตแซน ชนิดดีพีทีเอ

Reed และคณะ (1996) ได้ทำการศึกษาผลของ pH, เวลาสัมผัส และอัตราการไหลการบรรจุต่อพื้นที่ตัดขวางคอลัมน์ของการกำจัดตะกั่วโดยถ่านกัมมันต์แบบเม็ด พบว่าตะกั่วจะถูกกำจัดมากขึ้นเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น สำหรับตะกั่วความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลาสัมผัสสูงสุดจะอยู่ในช่วง 6-7 นาที ในขณะที่ตะกั่วความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จะใช้เวลาน้อยกว่า 10 นาที และผลของอัตราการไหลการบรรจุที่ 4.9 และ 9.8 เมตรต่อชั่วโมง จะมีค่าต่ำสุดสำหรับตะกั่วความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ตะกั่วความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จะถูกกำจัดได้ดีกว่าเล็กน้อยที่อัตราการไหลการบรรจุสูงกว่า

Omar และคณะ (1993) ได้ทำการศึกษาการนำ bambara nut และแกลบ มาใช้ในการกำจัดไอออนโลหะหนัก ได้แก่ นิกเกิล และทองแดง โดยวัสดุที่นำมาใช้ต้องนำไปตากแห้ง จากนั้นบด และคัดขนาด ให้มีขนาดประมาณ 400 ไมโครเมตร ผลการศึกษา พบว่า ระยะเวลาสัมผัสที่ดูดซับไอออนโลหะหนักได้ดีที่สุด คือ 120 นาที โดยมีความสามารถสูงสุดในการดูดซับทองแดง

เท่ากับ 6.8 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร สำหรับผลของชนิดโลหะหนักที่มีต่อการดูดซับ พบว่า ทองแดง ถูกดูดซับได้ดีกว่านิกเกิล และการดูดซับของวัสดุจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของโลหะหนัก เพิ่มขึ้น

Tan และคณะ (1993) ได้ทำการวิจัยโดยใช้กากมะพร้าวและเม็ดปาล์มที่ผ่านกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม มากำจัดโครเมียมออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการทดลองทั้งแบบ Batch Test และแบบ Column Test โดยนำวัสดุไปอบที่อุณหภูมิ 100 เซลเซียส และบดให้มีขนาดอยู่ในช่วง 0.3–0.85 มิลลิลิตร นำไปต้มในน้ำกลั่นประมาณ 0.5-1 ชั่วโมง แล้วนำไปกวนใน NaOH 1.5 โมลาร์ แล้วล้างออกด้วย HNO_3 2 โมลาร์ และล้างด้วยน้ำกลั่นตามลำดับแล้วอบให้แห้ง ในการวิจัยได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดโครเมียม โดยทำการทดลองแบบ Batch Test ส่วนแบบ Column Test ศึกษาอิทธิพลของความสูงของวัสดุที่ใช้ระดับการรีเจนเนอเรชั่นพบว่า 20 นาที่แรกสามารถกำจัดโครเมียมได้ถึงร้อยละ 80 และจะลดลงจนไม่สามารถกำจัดได้อีกเมื่อเวลาผ่านไป อิทธิพลของพีเอช พบว่าช่วงพีเอชของกากมะพร้าวคือ 1.5-5 และเม็ดปาล์มอยู่ในช่วง 1.5-3 สามารถกำจัดได้ร้อยละ 70 และที่อัตราไหลเดียวชั้นความสูงที่มากกว่าสามารถกำจัดได้ดีกว่า เนื่องจากปริมาณวัสดุมากกว่าการรีเจนเนอเรชั่นใช้ NaOH 0.05 โมลาร์ หรือ HNO_3 0.1 โมลาร์

Maranon และSastra (1992) ได้วิจัยการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้กากแอปเปิ้ลจากกระบวนการผลิตน้ำแอปเปิ้ลโดยทดลองเปรียบเทียบระหว่างกากแอปเปิ้ลที่ไม่ได้ปรับสภาพกับที่ได้ปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี คือ phosphatation reaction ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดโลหะหนัก คือ พีเอช อัตราการไหล อิทธิพลของสารละลายคอมเพล็กซ์โดยการเติม EDTA ลงในน้ำเสียสังเคราะห์ น้ำเสียสังเคราะห์โลหะที่ศึกษาคือ ทองแดงและนิกเกิล และศึกษาการกำจัดโลหะหนักในทะเลโดยเปรียบเทียบระหว่างเรซินแบบ Cation Resin (Amberlite IR-120) กับกากแอปเปิ้ลที่ปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมีน้ำทะเลคาร์เบียน โลหะที่ศึกษาคือ ทองแดง นิกเกิล แคลเซียมและปรอท พบว่า พีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักของกากแอปเปิ้ลที่ไม่ได้ปรับสภาพ คือ มากกว่า 3.5 สามารถกำจัดทองแดงและนิกเกิลได้ ร้อยละ 99 อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที ส่วนกากแอปเปิ้ลที่ได้ปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมีว่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักของกากแอปเปิ้ลที่ไม่ได้ปรับสภาพ คือ มากกว่า 2.5 สามารถกำจัดทองแดงและนิกเกิลได้ร้อยละ 99 อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที ในกรณีของน้ำเสียผสมระหว่างทองแดงและนิกเกิล และที่เติม EDTA พีเอชที่เหมาะสมคือ 5 สำหรับอัตราการไหลพบว่ากากแอปเปิ้ลที่ได้ปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี คือ phosphatation reaction สามารถรับอัตราการไหลที่สูงได้โดยประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไม่ลดลง ส่วนการศึกษาเทียบระหว่างเรซินแบบ Cation Resin (Amberlite IR-120) กับกากแอปเปิ้ลที่ปรับสภาพ พบว่ากากแอปเปิ้ลที่

ปรับสภาพมีความสามารถกำจัดทองแดงได้ดีกว่าเรซินสังเคราะห์ ส่วนนิกเกิลแคดเมียมและตะกั่ว เรซินแบบสังเคราะห์สามารถกำจัดได้ดีกว่ากากแอปเปิ้ลที่ปรับสภาพ

Maranon และ Sastra (1991) ได้วิจัยการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้กากแอปเปิ้ล จากกระบวนการผลิตน้ำแอปเปิ้ล ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดโลหะหนัก คือ ขนาดของวัสดุ การปรับสภาพกากแอปเปิ้ลด้วยกระบวนการทางเคมี และความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ น้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักที่ศึกษาคือ ทองแดง และนิกเกิล กระบวนการทางเคมีที่ใช้คือ phosphatation reaction(P-AR) และ Crosslinking and Xanthation Reaction (CLX-AR) พบว่า P-AR มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนทองแดง 1.6 meq/g และกากแอปเปิ้ลที่ไม่ได้ปรับสภาพมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนทองแดง 0.4 meq/g ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนนิกเกิลและสังกะสี ทองแดงของ P-AR และ CLX-AR และกากแอปเปิ้ลที่ไม่ได้ปรับสภาพเท่ากับ 1.1, 0.6, และ 0.3 meq/g และพบว่ากากแอปเปิ้ลที่มีขนาด 0.2-0.4 mm. มีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักได้ดีกว่าขนาด 0.4-0.63 mm. ส่วนการศึกษาด้านกระบวนการทางเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพกากแอปเปิ้ลพบว่า กากแอปเปิ้ลที่ปรับสภาพประมาณ 2 และ 5.8 เท่ากากแอปเปิ้ลที่ปรับสภาพด้วย phosphatation reaction สามารถกำจัดโลหะหนักได้ดีกว่าแบบ Crosslinking and Xanthation Reaction และกากแอปเปิ้ลที่ไม่ได้ปรับสภาพ สำหรับอิทธิพลของความเข้มข้นของโลหะหนักพบว่าเมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้น ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักจะลดลง

สำหรับการทดลองแบบคอลัมน์จะทำการศึกษาผลของความสูงของชั้นวัสดุ และอัตราการไหลของน้ำเสีย จากผลการทดลองอิทธิพลของความสูงชั้นวัสดุ พบว่า เมื่อความสูงเพิ่มขึ้น สามารถกำจัดทองแดงออกได้มากขึ้นคือ ที่ความสูง 15 เซนติเมตร Breakthrough Curve เท่ากับ 20 และ 16 ปริมาตรเบด ตามลำดับ โดยควบคุมอัตราการไหลเท่ากับ 20 มิลลิลิตรต่อกรัม ส่วนในการศึกษาผลจากอัตราการไหล พบว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ความสามารถในการกำจัดทองแดงจะลดลง

นิธิรัชต์ สงวนเดือน (2545) ได้ทำการศึกษาถึงความสามารถและประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากขังข้าวโพด เปลือกถั่วเหลือง และก้านดอกทานตะวัน ชนิดไม่ปรับสภาพ ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ร้อยละ 5 และปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ ร้อยละ 37 ความเข้มข้นของโลหะหนัก (นิกเกิล ทองแดง และสังกะสี) ที่ทำการศึกษาได้แก่ 5 10 20 และ 50 มก./ล. โดยทำการทดลองแบบแบตช์

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลือง มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักมากที่สุด รองลงมา คือ ก้านดอกทานตะวัน และซังข้าวโพด ตามลำดับ ผลของการปรับสภาพทางเคมีไม่ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักเพิ่มมากขึ้น เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำการศึกษาสามารถกำจัดทองแดง ได้มากกว่า สังกะสี และนิกเกิล ตามลำดับ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักดีที่สุด ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักในน้ำเสีย 5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักจะลดลง กลไกหลักในการกำจัดโลหะหนัก คือการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนของโลหะหนักในน้ำเสีย และอาจเกิดการดูดติดผิวประกอบด้วย กลไกการดูดติดผิวเป็นตามโมเดลของ แลงมัวร์ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลือง และก้านดอกทานตะวัน ชนิดไม่ปรับสภาพมีแนวโน้มสามารถนำมาใช้ ทดแทนเรซินสังเคราะห์ได้ โดยมีความสามารถทั้งหมดในการแลกเปลี่ยนไอออน เท่ากับ 5.4 และ 4.5 meq./g. ตามลำดับ

ลลิตา นิตศนจารกุล (2544) ได้ทำการวิจัยการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร คือเปลือกทุเรียนและเปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์ ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้เกลือแกง ผลการทดลองพบว่า วัสดุดูดซับที่ผ่านการแช่ในสารละลายอิมมิตัวของเกลือแกงเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการอบแห้ง แล้วนำมาเผากระตุ้น อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผากระตุ้น คือ 800 °C จะให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงสุดของถ่านเปลือกทุเรียน เท่ากับ 567 มิลลิกรัม/กรัม ส่วนถ่านเปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์เท่ากับ 532 มิลลิกรัม/กรัม มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียสูงกว่าร้อยละ 90 ที่พีเอชของน้ำเสียตั้งแต่ 4 ถึง 9 และจากการทดลองหาไอโซเทอร์มการดูดติดผิวแบบฟรุนดิช พบว่าถ่านเปลือกทุเรียนมีความสามารถในการดูดติดผิวตะกั่วสูงกว่าถ่านเปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์

ขวัญเนตร สบายใจ (2542) ได้ทำการศึกษากำจัดโลหะทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวา โดยการปรับสภาพด้วยสีย้อม 2 ชนิด คือ Reactive Red 31 และ Direct Blue 71 กับที่ไม่ได้ปรับสภาพ จากทดลองแบบแบดซ์ พบว่า การปรับสภาพด้วยสีย้อม 2 ชนิดคือ Reactive Red 31 และ Direct Blue 71 ที่ความเข้มข้น 0.002 และ 0.001% ตามลำดับ ทำให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้น พบว่าผักตบชวามีความสามารถในการแลกเปลี่ยนทองแดงมากกว่าสังกะสี และนิกเกิล จากการทดลองกับน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบสังกะสี พบว่าสามารถกำจัดสังกะสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ไชยันต์ ไชยยะ (2542) ได้ศึกษาปัจจัยการผลิตเม็ดดูดซับ โดยผลิตจากการปริมาณ สัตส่วนโดยน้ำหนักระหว่างกากกาแฟผงกับดินที่ 80:20 และมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4 มิลลิเมตร เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ พบว่า สามารถดูดซับไอออนโลหะหนักต่าง ๆ ได้ภายในเวลา 30 นาที เมื่อวิเคราะห์ค่า ปริมาณการดูดซับสูงสุด เหมาะสมสำหรับโมเดลแบบแลงมัวร์ พบว่าเม็ดดูดซับสามารถดูดซับ ไอออนแคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว สังกะสี และนิกเกิล ได้ปริมาณการดูดซับสูงสุดที่ 39.52, 31.15, 19.53, 13.39 และ 11.00 มิลลิกรัมไอออนโลหะต่อกรัมเม็ดดูดซับ ตามลำดับ สำหรับการศึกษากลไกการดูดซับโดยใช้สารละลายไอออนแคดเมียม พบว่า ค่าปริมาณการดูดซับ สูงสุดมีค่าน้อยลงเมื่อค่าพีเอชลดลง และมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งเป็นการดูดซับทาง กายภาพ ดูดซับลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ที่ค่าพีเอชต่ำ ๆ มากกว่าร้อยละ 95 ของโครเมียมถูก ดูดซับโดยดินที่เผาที่ 300 องศาเซลเซียส โดยใส่ตัวดูดซับ 1 กรัม กับโครเมียมเข้มข้น 1 มิลลิกรัม ต่อลิตร การดูดซับนี้สอดคล้องโมเดลฟรุนดลิช

วิศรุต โลจนานนท์ (2542) ได้ทำการวิจัยตัวดูดซับชนิดถ่านถูกเตรียมขึ้นโดยการนำเปลือก ถั่วลิสงมาผ่านขั้นตอนการเพิ่มพื้นที่ผิวด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริก ที่ความเข้มข้นร้อยละ 20, 30, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที หรือใช้ สารละลายกรดฟอสฟอริก 30% โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 150, 200, 250 และ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที หรือเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการเผา 15, 30, 60, 90 และ 120 นาที จากผลการ ทดลองพบว่าที่สภาวะ ความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริก 60% โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เวลาในการเผา 120 นาที ตัวดูดซับชนิดถ่านที่มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด เท่ากับ 986 ตารางเมตรต่อกรัมของตัวดูดซับ ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของ ไอเบนซีนที่สภาวะเจือจาง บนตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจะถูกวัดโดยวิธีโครมาโทกราฟี ที่อุณหภูมิ 180-220 องศาเซลเซียส ค่าคงที่สมดุลการดูดซับที่วัดได้จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงขึ้น ส่วนปริมาณ ความร้อนของการดูดซับไอเบนซีนบนตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมมีค่าประมาณ 70-90 กิโลจูล ต่อโมล

ชฎิล ฉายรัศมี, เมธิ ชลไมตรี และสุนทรี เฟื่องฟู (2541) ได้ศึกษาการดูดซับโลหะหนัก ในน้ำเสียด้วยวัสดุชีวมวลที่เหลือทิ้งจากการเกษตรที่ผ่านการคาร์บอนในเซชัน คือ กากเมล็ดกาแฟ ชั่งข้าวโพด ชานอ้อย และแกลบ และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักของ วัสดุชีวมวลที่ผ่านการคาร์บอนในเซชัน และขึ้นรูปด้วยดินเหนียว นำวัสดุที่ได้ไปดูดซับทองแดง

สังกะสี ตะกั่ว นิกเกิล และแคดเมียม พบว่า กากเมล็ดกาแฟมีความสามารถในการดูดซับมากที่สุด ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลประมาณ 90 นาที ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักหลังขึ้นรูปด้วยดินเหนียวกับก่อนขึ้นรูปด้วยดินเหนียวมีค่าใกล้เคียงกัน แต่การขึ้นรูปด้วยดินเหนียวจะมีความแข็งแรงมากกว่า และพบว่าเม็ดดูดซับที่มีขนาดเล็กมีประสิทธิภาพในการดูดซับมากกว่าขนาดใหญ่

พิธี กระสินธุ์ (2539) ได้ทำการวิจัยการกำจัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดลิกโน-เซลลูโลสฟออสเฟอไรต์ไฮดรอกไซด์ที่ทำจากผักตบชวา โดยนำผักตบชวามาปรับสภาพด้วยสารละลายฟออสเฟอไรต์ไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 2 5 10 20 30 และ 37% (V/V) พบว่า การปรับสภาพโครงสร้างผักตบชวากับฟออสเฟอไรต์ไฮดรอกไซด์ 5% ให้ประสิทธิภาพดีในการกำจัดไอออนของโลหะหนัก โดยวิธีการทดลองแบบคอลัมน์ จากผลการทดลองพบว่า ความสามารถทั้งหมดในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยฟออสเฟอไรต์ไฮดรอกไซด์ 5% เท่ากับ 1.0962 0.6932 และ 1.0375 meq/g สำหรับไอออนของทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ตามลำดับ นอกจากนี้ พบว่าการแลกเปลี่ยนไอออนของทองแดงมีค่าสูงกว่าไอออนของนิกเกิล และสังกะสี หลังจากคอลัมน์หมดประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน ไอออนของโลหะสามารถนำกลับมาใช้ใหม่โดยการใช้ 0.5 N HCl ประมาณ 1 bed volume หลังการล้างคอลัมน์ด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน สามารถนำคอลัมน์กลับมาใช้ใหม่ได้โดยไม่มีผลกระทบต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน ค่าสัมประสิทธิ์สหพันธ์ของ Pearson สำหรับไอออนของโลหะทองแดง นิกเกิล และสังกะสี คือ -0.85, -1.00 และ -0.78 ตามลำดับ จากค่าสัมประสิทธิ์ข้างต้น พบว่า เมื่อลดความเข้มข้นของสารละลายที่มีไอออนของโลหะหนักลง จะมีผลให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้น สำหรับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบสังกะสี พบว่าคอลัมน์ชนิดนี้สามารถกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียชุบโลหะได้อย่างมีประสิทธิภาพ