

การกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการดูดติดผิว โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวและซังข้าวโพด

Lead Removal from Synthetic Wastewater by Adsorption Process Using Activated Carbon from Coconut Shell and Corncob

คำนำ

ปัจจุบันประเทศไทยได้มีการขยายเขตอุตสาหกรรมมากขึ้น ทั้งนี้เป็นผลทำให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนของมลพิษในแหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งเพิ่มความเสี่ยงและความถี่ในการเกิดมากขึ้นเรื่อยๆ ตัวอย่างเช่น ในปี 2535 เกิดปัญหาน้ำเสียของลำน้ำพองซึ่งทำให้ปลาและสัตว์น้ำตายเป็นจำนวนมาก ซึ่งเกิดจากการรั่วไหลของกากน้ำตาลจากโรงงานน้ำตาลในจังหวัดขอนแก่น และในฤดูแล้งปีเดียวกัน ได้เกิดการเน่าเสียของลำน้ำพองอีกครั้งเนื่องจากการปล่อยของน้ำเสียของโรงงานผลิตเอี๊ยะกระดาษขนาดใหญ่ จึงได้มีการร่างพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ.2535 ขึ้นมา เพื่อใช้ควบคุมโรงงานไม่ให้ปล่อยมลพิษลงสู่แม่น้ำลำคลองเกินกว่าที่กำหนด ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันอันตรายต่อสุขภาพของคนในเขตที่พักอาศัยบริเวณใกล้โรงงานที่ปล่อยมลพิษ จึงควรหาทางป้องกันและควบคุมมลพิษในแหล่งน้ำที่ใช้เพื่อการอุปโภคบริโภคของประชาชนบริเวณรอบๆ โรงงาน

ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว มีหลายวิธี แต่วิธีที่สะดวก ราคาถูกและมีประสิทธิภาพ คือ กระบวนการดูดติดผิว (adsorption process) ซึ่งเป็นการบำบัดทางกายภาพเคมี โดยสารตัวกลางที่นิยมใช้ในการดูดติดผิวได้แก่ ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ทั้งชนิดผงและชนิดเกล็ด เนื่องจากถ่านกัมมันต์เป็นตัวกลางที่มีประสิทธิภาพในการดูดติดผิวสูงและการผลิตถ่านกัมมันต์เป็นขั้นตอนที่ใช้เทคโนโลยีที่ไม่ยุ่งยากและมีต้นทุนต่ำ

กะลามะพร้าวและซังข้าวโพดเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่หาได้ง่ายตามพื้นที่ชนบททั่วไป และมีคุณสมบัติที่สามารถผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ได้ โดยเฉพาะกะลามะพร้าวซึ่งเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นสูงจึงเหมาะสมในการผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ หากสามารถนำวัตถุดิบทั้งสองชนิดมาใช้เป็นตัวกลางในกระบวนการบำบัดน้ำเสียได้ก็จะช่วยลดปริมาณของเสียหรือวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรได้อีกทางหนึ่ง

ในการวิจัยครั้งนี้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว และซังข้าวโพดโดยการเผาและกระตุ้นทางเคมีด้วย โซเดียมคลอไรด์ (เกลือแกง) ภายใต้การควบคุม ปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่างๆ ได้แก่ เวลา, อุณหภูมิ และอัตราส่วนโดยน้ำหนักวัตถุดิบต่อสารกระตุ้น เพื่อ ใช้ประโยชน์ในการดูดซับฟิวดะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์และทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ฟิวดะกั่วของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตขึ้นในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ดะกั่ว รวมทั้งการประเมินต้นทุนการ ผลิตถ่านกัมมันต์ที่ได้ เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด เพื่อศึกษาความเป็นไป ได้ในการที่จะนำวัตถุดิบที่เหลือใช้ทางการเกษตรมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวและซังข้าวโพด โดยใช้โซเดียมคลอไรด์(เกลือแกง) เป็นสารกระตุ้น
2. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับฟิวดะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์ที่ เตรียมจากกะลามะพร้าวและซังข้าวโพด เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด
3. เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับฟิวดะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัม มันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวและซังข้าวโพดกับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด
4. เพื่อประเมินต้นทุนการผลิตของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวและซังข้าวโพด เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด

ขอบเขตการวิจัย

1. เตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว และซังข้าวโพด โดยใช้โซเดียมคลอไรด์(เกลือ แกง)เป็นสารกระตุ้น
2. สารเคมีโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้ในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ เป็นเกลือแกงที่มีจำหน่ายตาม ท้องตลาด

3. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์โดยแยกการทดลองเผาวัตถุดิบที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส เวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง อัตราส่วนโดยน้ำหนักวัตถุดิบต่อเกลือแกง 1:0, 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4

4. ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดติดผิวตะกั่วของถ่านกัมมันต์ดังนี้ โดยทำการทดสอบแบบไม่ต่อเนื่อง (batch test)

5. การประเมินต้นทุนการผลิต เป็นการประเมินราคาค่าใช้จ่ายในระดับห้องปฏิบัติการ

การตรวจเอกสาร

การดูดติดผิว

การดูดติดผิว (adsorption) เป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือก๊าซ ให้มาเกาะจับและติดบนผิวของมัน โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์เรียกว่า สารที่ถูกดูดติดผิวหรือสิ่งสกปรก (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของ adsorbate เรียกว่า สารที่ดูดติดผิว (adsorbent) (มันสิน, 2527)

1. กลไกการดูดติดผิว (adsorption)

การดูดติดผิวของสารประกอบอินทรีย์จะเกิดจากแรงดึงดูด (attractive force) ระหว่างโมเลกุลของสารอินทรีย์และพื้นผิวของสารดูดติดผิว ซึ่งแรงดึงดูดทั้งหมดจะเกิดจากปฏิกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic interaction) โดยกลไกการดูดติดผิวจะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวเข้าไปใกล้สารดูดติดผิว ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดเอาชนะพลังงานจลน์ของสารที่ถูกดูดติดผิว กระบวนการดูดติดผิวจึงเกิดขึ้น การดูดติดผิวแบ่งเป็น 2 แบบที่สำคัญ คือการดูดติดผิวทางกายภาพ (physisorption) และการดูดติดผิวทางเคมี (chemisorption)

การดูดติดผิวทางกายภาพ เกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals force) ซึ่งเป็นผลจากการรวมกันของแรงที่เกิดจากการแพร่ (dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic Force) โมเลกุลของสารที่ถูกดูดติดผิวจะถูกยึดติดแบบกายภาพกับสารดูดติดผิว การดูดติดผิวนี้เป็นการดูดติดหลายชั้น (multi-layers) ซึ่งในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารที่ถูกดูดติดผิวจะติดอยู่กับชั้นโมเลกุลสารที่ถูกดูดติดผิวในชั้นก่อนหน้า โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดติดผิว และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย การดูดติดผิวทางกายภาพทั่วไปจะเกิดที่อุณหภูมิต่ำและให้พลังงานต่ำ การย้อนกลับของกระบวนการดูดติดผิวทางกายภาพขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างสารดูดติดผิวและโมเลกุลของสารที่ถูกดูดติดผิว ถ้ามีแรงดึงดูดน้อยการหลุดออกของโมเลกุลสารที่ถูกดูดติดผิวจะสามารถเกิดขึ้นได้

การดูดติดผิวทางเคมี เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารดูดติดผิวและสารที่ถูกดูดติดผิว ซึ่งโดยทั่วไปเป็นผลมาจากการเปลี่ยนรูปของสารที่ถูกดูดติดผิวทำให้เกิดเป็นสารประกอบทางเคมี

รูปแบบการเกิดสารประกอบทางเคมีแตกต่างกับปฏิกิริยาเคมีทั่วไป โดยที่อะตอมบนผิวของสารดูดซับยังคงรักษาลักษณะดั้งเดิมบนพื้นผิวนั้นไว้ การดูดซับประเภทนี้จึงมีความหนาของชั้นสารดูดซับเพียงชั้นเดียวและไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับเองได้ แต่จะมีความแข็งแรงมากกว่าการดูดซับทางกายภาพ เนื่องจากการจับตัวทางเคมีสร้างสารประกอบใหม่ที่ผิวของสารดูดซับ การดูดซับทางเคมีจะเกิดที่อุณหภูมิสูง เพราะปฏิกิริยาทางเคมีจะเกิดอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงมากกว่าอุณหภูมิต่ำ

2. อัตราการดูดซับ (rate of adsorption)

อัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้ (มันสิน, 2527)

2.1 พีเอช อัตราการดูดซับจะเร็วและมากขึ้นเมื่อพีเอชลดลง เนื่องจากมีไฮโดรเจนไอออนเพิ่มขึ้น และไฮโดรเจนไอออนยังสามารถเกาะติดผิวคาร์บอนได้ ทำให้คาร์บอนมีสภาพเป็นกลาง (neutralized) เสมอ และเนื่องจากคาร์บอนมีสภาพเป็นนอนโพลาร์ (non polar) ค่อนข้างลบเล็กน้อย จึงทำให้โมเลกุลนอนโพลาร์ของสารในน้ำ มาเกาะที่ผิวของคาร์บอนได้ดี

2.2 อุณหภูมิ อัตราเร็วของการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการดูดซับจะมีค่าลดลงที่อุณหภูมิสูง และจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาการดูดซับเป็นแบบ exothermic

2.3 จำนวนของคาร์บอนอะตอมของสารอินทรีย์ ถ้ามีคาร์บอนมากการดูดซับจะมากขึ้น

2.4 ขนาดและพื้นที่ผิว ขนาดของคาร์บอนมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วของการดูดซับในทางตรงข้าม กล่าวคือ อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของคาร์บอน ดังนั้นคาร์บอนผงจึงมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าคาร์บอนเกล็ด ส่วนพื้นที่ผิวของคาร์บอนนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขีดความสามารถในการดูดซับ (adsorptive capacity) นั่นคือ คาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลได้มากกว่าคาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวน้อย อนึ่งเนื่องมาจากพื้นที่ผิวส่วนใหญ่ของคาร์บอนได้มาจากช่องว่างหรือโพรงภายใน ขนาดของคาร์บอนจึงมีบทบาทน้อยในการกำหนดพื้นที่ผิวคาร์บอนแบบผงและแบบเกล็ดจึงมีพื้นที่ผิวดอหน่วยน้ำหนักใกล้เคียงกัน ซึ่งหมายความว่ามีความสามารถในการดูดซับใกล้เคียงกัน แต่อัตราเร็วต่างกัน

2.5 ขนาดของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของคาร์บอน การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อสารที่ถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่าโพรงเล็กน้อย ทั้งนี้เพราะแรงระหว่างสารและคาร์บอนจะมีมากที่สุดถ้าสารที่ถูกดูดซับมีขนาดใหญ่กว่าจะไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนได้ ทำให้การดูดซับต่ำลง

ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่มีความพรุน (porosity) สามารถผลิตได้จาก ถ่านหิน ถ่านโค้ก ถ่านไม้ กะลามะพร้าว หรือ ถ่านแกรไฟต์ ความพรุนที่เพิ่มขึ้นเป็นผลเนื่องมาจากการกระตุ้นด้วยสารเคมีหรือการกระตุ้นทางกายภาพ ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างผลึกของถ่านเพิ่มขึ้น การกระตุ้นที่เหมาะสมจะได้รูพรุนเป็นจำนวนมาก ทำให้ถ่านมีพื้นที่ผิวภายใน (internal surface area) เพิ่มขึ้น ทำให้สามารถดูดซับผิวสีและกลิ่นได้มากกว่าถ่านธรรมดา (มันสิน, 2538)

ถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งออกตามลักษณะรูปร่างได้ 2 ประเภท คือ ประเภทผง (powder) และประเภทเม็ด (granular) หรือเกล็ด (pellet) สำหรับประเภทเป็นเม็ดหรือเกล็ดนี้อาจเตรียมได้จากถ่านคาร์บอนที่ทำมาจากวัตถุดิบต่างๆ เช่น ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว ถ่านไม้ ถ่านโค้ก ฯลฯ มาบดให้เป็นเม็ดเล็กๆ หรืออาจได้จากการเอาถ่านกัมมันต์ชนิดผงมาอัดด้วยเครื่องอัดให้เป็นเม็ด

ถ่านกัมมันต์ประเภทผง นิยมใช้สำหรับการฟอกสีในของเหลว ดูดกลิ่นและสีของสารละลายได้หลายชนิด ใช้ในการทำให้น้ำตาลบริสุทธิ์ ใช้ในอุตสาหกรรมไขมันและน้ำมัน ทำให้ไขมันหรือน้ำมันปราศจากสีหรือสีอ่อนลง ช่วยในการกำจัดสารอินทรีย์ที่ไม่ต้องการออกจากสารละลายในกระบวนการชุบโลหะ ใช้ในการกำจัดกลิ่นของน้ำประปา ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำอัดลมหรือน้ำหวานบรรจุขวด นอกจากนี้ถ่านกัมมันต์ยังใช้ในอุตสาหกรรมประเภทอื่นๆ อีก เช่น ผงชูรส เครื่องดื่มประเภทไวน์และเบียร์ ขี้ผึ้ง พลาสติก และในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู เป็นต้น

ส่วนถ่านกัมมันต์ประเภทเม็ดและเกล็ด นิยมใช้สำหรับการทำก๊าซให้บริสุทธิ์หรือการทำให้ตัวทำละลายที่ใช้แล้วบริสุทธิ์ (solvent recovery) และในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมยาง อุตสาหกรรมยาสีงเคราะห์ อุตสาหกรรมฟิล์มโปร่งใส อุตสาหกรรมการพิมพ์ อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ นอกจากนี้ยังเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการปฏิกิริยาของก๊าซและใช้เป็นวัสดุทำหน้ากักป้องกันก๊าซและไอพิษต่างๆ

1. วัสดุที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์

โดยทฤษฎีแล้วอินทรียวัตถุทุกชนิดสามารถนำมาทำถ่านกัมมันต์ได้ แต่คุณสมบัติของถ่านและความสามารถในการดูดซับของถ่านที่ได้จะแตกต่างกันไป โดยทั่วไปแล้วอินทรียวัตถุที่มีความหนาแน่นสูงเมื่อทำการเผาจะได้พื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าอินทรียวัตถุที่มีความหนาแน่นต่ำ นอกจากนี้อุณหภูมิ, เวลาและอัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบในการผลิต มีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์

จากการศึกษาพบว่า การผลิตถ่านกัมมันต์สามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรงหรือเริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้วก็ได้ วัตถุดิบที่ใช้มีการพิจารณาจากอินทรียวัตถุ (องค์ประกอบคาร์บอนและไฮโดรเจน) เป็นส่วนใหญ่สามารถแบ่งเป็นชนิดต่างๆ(Davidson et al, 1968) ได้แก่ พวกเซลลูโลสที่มาจากพืช เช่น แกลบ กะลามะพร้าว จี้เลื่อย ฆานอ้อย ชังข้าวโพด เป็นต้น พวกถ่านหิน เช่น ลิกไนต์ พีท เป็นต้น และวัตถุดิบที่มาจากสัตว์ เช่น กระดูก เป็นต้น โดยวัสดุที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ได้ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 วัสดุบางชนิดที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์

วัสดุที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์		
ฆานอ้อย	เมล็ดคาแฟ	หินน้ำมัน
สาหร่ายและวัชพืช	เมล็ดฝ้าย	ลูกพีท
กระดูก	แก่นผลไม้	ถ่านปิโตรเลียม
แป้ง	กราไฟท์	โปแตสเซียมเฟอร์โรไซยาเนต
ธัญพืช	ของเสียจากโรงเหล้า	ของเสียจากโรงกระดาษ
ถ่าน	ของเสียจากโรงฟอกหนัง	รำข้าว
กะลามะพร้าว	ลิกนิน	ยาง
เปลือกถั่ว	ลิกไนต์	จี้เลื่อย
ชังข้าวโพด	กากน้ำตาล	ไม้

ที่มา: Faust และ Aly (1987)

2. คุณสมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์

ในการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ในการบำบัดน้ำเสีย จำเป็นที่จะต้องเลือกถ่านที่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานแต่ละประเภท โดยลักษณะคุณสมบัติที่เหมาะสมของถ่านกัมมันต์มีดังนี้ (Cheremisinoff and Ellerbusch, 1987)

2.1 พื้นที่ผิว (surface area) โดยทั่วไปถ่านที่มีพื้นผิวมากจะมีความสามารถในการดูดซับสูง

2.2 ความหนาแน่นประจักษ์ (apparent density) ใช้ในการประเมินความสามารถในการฟื้นฟูสภาพของถ่าน (carbon regeneration)

2.3 ความหนาแน่นก้อน (bulk density) ใช้ในการประเมินปริมาณของถ่านในแต่ละการใช้งาน

2.4 ขนาดใช้งาน (effective size), เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (mean particle diameter) และสัมประสิทธิ์ของความเสมอกัน (uniformity coefficient) ใช้ในการประเมินภาวะทางชลศาสตร์ (hydraulic conditions) ของถังดูดซับ (adsorption column)

2.5 ปริมาตรรูพรุน (pore volume) ใช้ในการประเมินการดูดซับโมเลกุลในน้ำเสีย

2.6 ซีฟแอนาไลซิส (sieve analysis) เป็นตัวตรวจสอบ Plant-Handling Effects ของถ่าน

2.7 แอบริชัน นัมเบอร์ (abrasion number) ใช้ในการประเมินความคงทนต่อการขัดสี

2.8 ปริมาณร้อยละของเถ้า (% ash) บอกถึงปริมาณเถ้าของถ่านกัมมันต์

2.9 ความชื้น (% moisture) บอกถึงปริมาณน้ำในถ่านจากการผลิต

2.10 ไอโอดีนนัมเบอร์ (iodine number) เป็นตัวบ่งชี้ที่สำคัญในการประเมินความสามารถของถ่านในการดูดซับสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และความสามารถในการฟื้นฟูสภาพของถ่านดูดซับ (carbon regeneration)

2.11 โมลาสนัมเบอร์ (molasses number) เป็นตัวกำหนดความสามารถของถ่านในการดูดซับสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง

2.12 ขนาดของรูพรุน (pore size) เป็นตัวกำหนดความสามารถในการดูดซับโมเลกุลจำเพาะบางชนิด

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมได้กำหนดมาตรฐานของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตในประเทศ ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์ แสดงดังตารางที่ 2

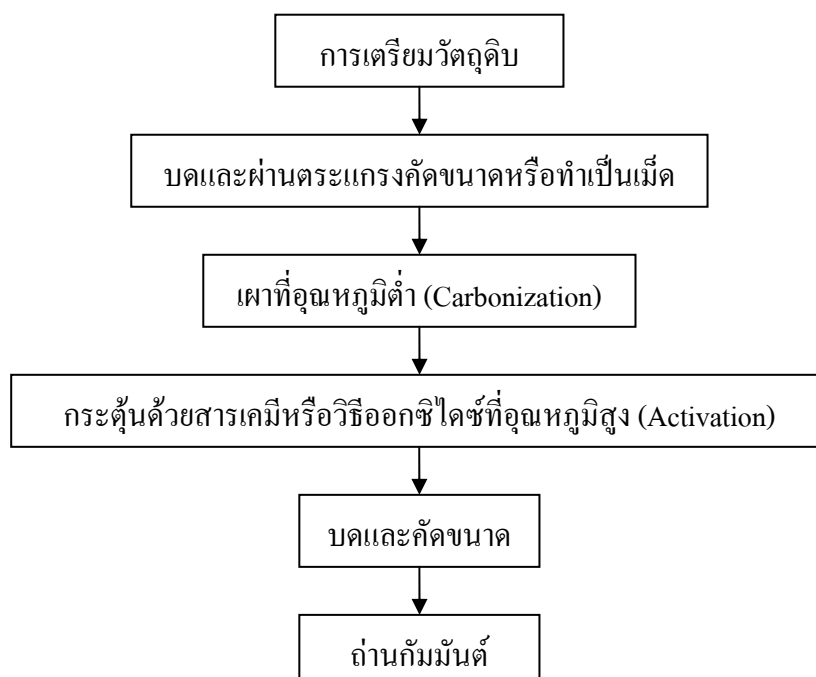
ตารางที่ 2 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์ (มอก. 90-2532)

คุณสมบัติ	ค่าที่กำหนด	
	ถ่านกัมมันต์แบบเม็ด	ถ่านกัมมันต์แบบผง
ค่าไอโอดีน	ไม่น้อยกว่า 600	ไม่น้อยกว่า 600
ความหนาแน่นปรากฏ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.20-0.75	0.20-0.75
ความชื้น	ไม่เกินร้อยละ 8	N/A
ความแข็ง	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 70	N/A

ที่มา: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2532)

3. กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ในปัจจุบันมีมากมายหลายวิธี แต่โดยทั่วไปกระบวนการผลิตมีกรรมวิธีดังภาพที่ 1 ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอน



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์โดยทั่วไป

ที่มา: สถิตดา (2544)

ขั้นตอนที่ 1 การเผาที่อุณหภูมิต่ำ (carbonization) เป็นการเผาวัตถุดิบให้เป็นถ่าน โดยใช้ อุณหภูมิประมาณ 400 - 500 องศาเซลเซียส เพื่อขับไล่ธาตุต่างๆที่ไม่ใช่คาร์บอนออกไป

ขั้นตอนที่ 2 การกระตุ้น (activation) เป็นการนำถ่านที่ได้จากขั้นตอนแรกมาเพิ่มคุณภาพ และคุณสมบัติในการดูดติดผิวให้ดีขึ้น

การกระตุ้นเป็นการเพิ่มคุณภาพและคุณสมบัติในการดูดติดผิวให้ดีขึ้น โดยการเพิ่มพื้นที่ผิว โดยทำให้สารมีรูพรุนมากขึ้น สารจำพวกถ่านหรือถ่านกัมมันต์จัดเป็นพวก ออสถฐาน (amorphous carbon) แต่มีรูปลักษณะของผลึกอยู่บ้าง สารออสถฐานนี้ประกอบด้วยแผ่นแบนราบที่เกิดจากการ จัดเรียงตัวของอะตอมของคาร์บอนเป็นรูปหกเหลี่ยมด้านเท่า (hexagonal lattice) แต่ละอะตอมจะ จับกันด้วยพันธะโควาเลนต์ (covalent linkage) มีลักษณะคล้ายผลึกกราฟไฟต์แต่การจัดเรียงตัวเป็น ระเบียบน้อยกว่า โดยทั่วไปผลึกเหล่านี้จะเปลี่ยนขนาดและรูปร่างตามอุณหภูมิที่เผา (carbonization) นอกจากนี้รูปร่างอะตอมของคาร์บอนยังเปลี่ยนตามส่วนประกอบและโครงสร้างของวัตถุดิบอีก ด้วย โดยปกติการกระตุ้นแบ่งได้เป็น 2 วิธีใหญ่ๆ คือ

3.1 วิธีกระตุ้นทางเคมี (chemical activation)

คือการเติมสารอินทรีย์ (สารกระตุ้น) ลงไปผสมกับวัตถุดิบ ที่เป็นสารอินทรีย์ (วัตถุดิบหรือถ่าน) ก่อนการคาร์โบไนเซชัน โดยเมื่อแช่วัตถุดิบไว้ในสารกระตุ้น สารประกอบที่ เหลือตกค้างบนผิวถ่านบางส่วนจะละลายออกจากถ่าน จากนั้นถ่านจะดูดติดผิวสารกระตุ้นเข้าไป แทรกอยู่ตามรูพรุนของถ่าน เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงสารอินทรีย์เหล่านี้จะไม่สลายตัว แต่ สามารถล้างได้ด้วยกรดหรือน้ำ ทำให้ผิวคาร์บอนมีอิสระในการดูดติดผิวสารอื่นได้ สารกระตุ้นที่ นิยมใช้แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สารเคมีที่นิยมใช้เป็นสารกระตุ้นในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีทางเคมี

สารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้นในการผลิตถ่านกัมมันต์	
กรดบอริก (H_3BO_3)	โปตัสเซียมไธโอไซยาเนต ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_3$)
แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2)	แมงกานีสคลอไรด์ (MnCl_2)
แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CaOH)	แมงกานีสซัลเฟต (MnSO_3)
แคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}(\text{PO}_3)_2$)	กรดไนตริก (HNO_3)
ไซยาไนด์ (CN^-)	โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)
ปูนโดโลไมต์ ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
เฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_2)	โซเดียมซัลเฟต (NaSO_4)
กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4)	กรดซัลฟูริก (H_2SO_4)
โพแทสเซียมซัลไฟด์ (K_2S)	ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl_2)

ที่มา: Yehaskel (1978)

สารเคมีที่นิยมใช้ในการกระตุ้น นิยมใช้สารประกอบของโปแตสเซียมหรือโซเดียม เช่น โปแตสเซียมคาร์บอเนต โพแทสเซียมซัลไฟด์ และการกระตุ้นโดยใช้สารดูดน้ำ (dehydrating agent) เช่น สารในกลุ่มโลหะคลอไรด์ เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ซิงค์คลอไรด์ กรดฟอสฟอริก เป็นต้น (ลลิตา, 2544)

เมื่อนำเอาวัตถุดิบที่ทำเป็นถ่านกัมมันต์ มาผสมกับสารประกอบที่มีไอออนของ โปแตสเซียมหรือโซเดียม ไอออนเหล่านี้จะแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นของผลึกแกรไฟต์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูง โมเลกุลของน้ำ ก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะหลุดออก ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์

ปฏิกิริยาที่เกิดในการกระตุ้นด้วยสารประกอบโซเดียมหรือโปแตสเซียม มีดังนี้



โดยที่ X คือ ไอออนของโปแตสเซียม (K^+) หรือ ไอออนของโซเดียม (Na^+)

วิธีการกระตุ้นทางเคมี แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

แบบที่ 1 ผสมวัตถุดิบกับสารเคมีโดยตรงแล้วให้ความร้อนเพื่อทำให้เป็นถ่าน พร้อมๆกับการกระตุ้น

แบบที่ 2 ให้ความร้อนกับวัตถุดิบจนเป็นถ่านก่อน เติมสารเคมีแล้วให้ความร้อนเพื่อทำการกระตุ้นอีกครั้ง

ข้อดีของการกระตุ้นทางเคมีคือใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นไม่สูงมาก (400-600 องศาเซลเซียส) ได้รูปพรุนที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ แต่มีข้อเสีย คือ มีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ จึงจำเป็นต้องล้างสารเคมีออกจากถ่านกัมมันต์ก่อนทุกครั้ง และถ้าสารเคมีเหล่านี้มีคุณสมบัติเป็นสารกัดกร่อน อาจทำให้เครื่องมือที่ใช้เกิดการกัดกร่อนได้ แต่สำหรับเกลือแกง เป็นสารที่มีคุณสมบัติดูดน้ำได้ มีราคาถูก หาซื้อได้ตามท้องตลาด และไม่ก่อให้เกิดสารพิษตกค้าง จึงเหมาะสำหรับเป็นสารกระตุ้นที่ดี (ดำรง และอภิสิทธิ์, 2533)

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวิธีการกระตุ้นทางเคมี คือ

- 1) ชนิดของถ่านกัมมันต์ ถ่านกัมมันต์จะมีคุณภาพแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับโครงสร้างของวัตถุดิบ
- 2) วิธีในการกระตุ้น เช่น ชนิดและปริมาณของสารกระตุ้น อุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้น

3.2 วิธีการกระตุ้นทางกายภาพ (physical activation)

เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่ผิวคาร์บอน ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านให้สูงขึ้น เนื่องจากรูปพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้น และมีพื้นที่ผิวมากขึ้น ก๊าซออกซิไดซ์ที่นิยมใช้เช่น ไอน้ำ ออมตวียังยวด ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซออกซิเจน เป็นต้น ร่วมกับการใช้ความร้อน หรือปฏิกิริยาการกระตุ้นอาจเกิดจากความร้อนเพียง

อย่างเดียว แต่ต้องใช้อุณหภูมิสูงมากถึง 1,200 องศาเซลเซียส แต่พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีคุณภาพต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์

ข้อดีของการกระตุ้นแบบนี้ คือ ไม่มีสารตกค้างหลังจากการกระตุ้น จึงสามารถนำถ่านที่ได้ไปใช้งานได้ทันที เพราะไม่มีปัญหาในการล้างสารเคมีที่เหลือในการตกค้าง ส่วนข้อเสียคือต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าแบบกระตุ้นด้วยสารเคมี (700 – 1,200 องศาเซลเซียส)

4. ไอโซเทอมการดูดติดผิว (Adsorption Isotherm)

การทดลองเพื่อหาความสามารถในการดูดติดผิวของถ่าน (adsorption capacity) ทำได้หลายวิธี เช่น การหาไอโซเทอมการดูดติดผิว (adsorption isotherm test), การหาค่าไอโอดีนัมเบอร์ (iodine number test) และการหาโมลาสันัมเบอร์ (molasses number test) เป็นต้น แต่วิธีที่ใช้โดยทั่วไปคือ การหาไอโซเทอมการดูดติดผิว

ในกระบวนการดูดติดผิว ความเข้มข้นของสารละลายจะมีผลต่อตัวถูกละลายบนผิวของของแข็ง เมื่อขบวนการดูดติดผิวเกิดขึ้น ตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวมีแนวโน้มที่จะคายตัวออกไปสู่สารละลาย จนกระทั่งอัตราของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวมีค่าเท่ากับอัตราการคายออกเข้าสู่สภาวะคงที่หรือ สมดุลการดูดติดผิว (adsorption equilibrium) ปริมาณการดูดติดผิวที่จุดสมดุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายเพิ่มขึ้น ในการแสดงปริมาณของสารละลายที่ถูกดูดติดผิวต่อปริมาณของสารดูดติดผิว เป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นที่จุดสมดุลในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ เรียกว่า ไอโซเทอมดูดติดผิว (adsorption isotherm)

การดูดติดผิวของโมเลกุลสามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้



เมื่อ A แทนสารที่ถูกดูดติดผิว (adsorbate)

B แทนสารดูดติดผิว (adsorbent)

A.B เป็นสารประกอบที่ถูกดูดติดผิว (adsorbed compounds)

บนผิวของสารที่ถูกดูดซับจะเกิดแรงทางเคมี เช่น พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) แรงระหว่างขั้ว (dipole-dipole force) และแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) ถ้าเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับคือ เมื่อถ่านกัมมันต์ดูดซับสารประกอบจำนวนมาก ๆ โมเลกุลจะถูกสะสมบนผิวจนกระทั่งถึงจุดสมดุล คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า (adsorption) เท่ากับ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหลัง (desorption) และจะไม่เกิดการสะสมบนผิวเพิ่มขึ้นอีก

หนึ่งในลักษณะที่สำคัญของสารดูดซับ คือ ปริมาณการสะสมของสารที่ถูกดูดซับ โดยเมื่ออุณหภูมิคงที่สมดุลของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับ ต่อหน่วยของสารดูดซับ แทนด้วย q_e และสมดุลของความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลาย แทนด้วย C_e จะเรียกว่าไอโซเทอมการดูดซับ (adsorption isotherm) การวิเคราะห์ไอโซเทอมการดูดซับได้มีผู้วิเคราะห์ไว้ 3 กลุ่ม คือ สมการฟรอนด์ลิช (Freundlich adsorption isotherm), สมการแลงมัวร์ (Langmuir adsorption isotherm) และสมการ BET (Brunauer Emmett – Teller adsorption isotherm) แต่ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ สมการฟรอนด์ลิช

สมการฟรอนด์ลิชเป็นสมการที่ได้จากการทดลองที่มีประโยชน์มาก เพราะสามารถอธิบายการดูดซับได้อย่างแม่นยำ ซึ่งมีสมการดังนี้

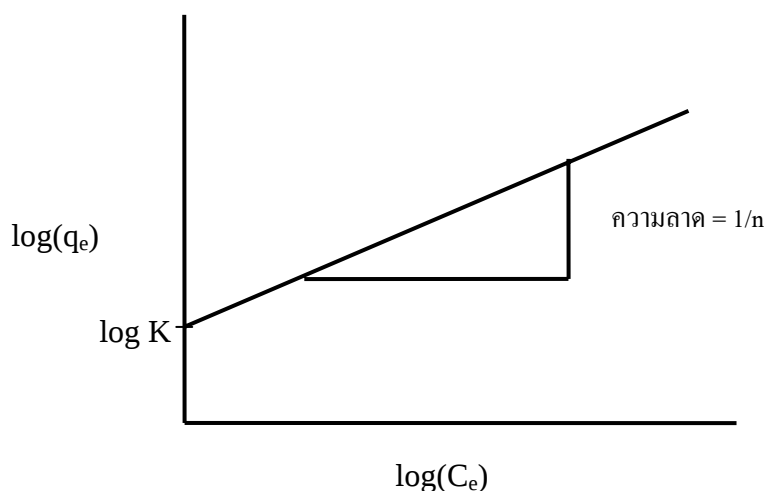
$$q_e = KC_e^{1/n} \quad (5)$$

เขียนเป็นสมการเส้นตรงได้ว่า

$$\log q_e = \log K + 1/n \log C_e \quad (6)$$

เมื่อ q_e =	จำนวนสารที่ถูกดูดซับ ต่อ สารที่ดูดซับ หรือ โมลของสารที่ถูกดูดซับ ต่อ สารที่ดูดซับ
C_e =	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่จุดสมดุล หน่วย โมลต่อลิตร หรือ มิลลิกรัมต่อลิตร
K =	ความสามารถในการดูดซับของสารที่ดูดซับของถ่านกัมมันต์
$1/n$ =	ฟังก์ชันความแข็งแรงในการดูดซับ

เมื่อนำค่า q_c และ C_c มาเขียนในกราฟ $\log - \text{scale}$ จะได้เป็นเส้นตรงโดยความชันของกราฟจะเป็นค่า $1/n$ และจุดตัดแกน q_c ที่ $\log C_c = 0$ ($C_c = 1$) เป็นค่า $\log K$ ตัวอย่างกราฟแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งเป็นการเขียนกราฟในกระดาษ $\log - \log$ เทอม K และ C_c คงที่ ค่าที่น้อยลงของ $1/n$ จะบอกถึงการเพิ่มความแข็งแรงของพันธะการดูดติดผิว กรณี $1/n$ มีขนาดน้อยมากความสามารถในการดูดติดผิวจะเป็นอิสระต่อค่า C_c เส้นกราฟไอโซเทอมจะอยู่ในแนวนอน โดยที่ค่า q_c คงที่ เรียกว่า irreversible และในกรณีที่ $1/n$ มีค่ามาก พันธะการเกาะติดมีค่าน้อย ค่า q_c จะเปลี่ยนไป แม้ว่าค่า C_c จะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้ค่า $1/n$ ที่ได้จากการดูดติดผิวของสารประกอบอินทรีย์ด้วยถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่จะมีค่าเข้าใกล้ 1 ซึ่งแสดงถึงความจุของการดูดติดผิวที่ดี และจะเกิด ณ จุดที่มีความเข้มข้นที่จุดสมดุลมีค่าสูง หาก $1/n$ มีค่าน้อยกว่า 1 มาก ๆ จะแสดงถึงความจุของการดูดติดผิวที่ลดลง ณ จุดที่มีความเข้มข้นที่จุดสมดุลมีค่าต่ำ สมการของฟรุนดลิช ยังกล่าวถึงความจุของการดูดติดผิวเป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่จุดสมดุลด้วย ดังนั้นค่าความจุที่สูงขึ้นจะแสดงถึงการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นที่จุดสมดุล (Faust และ Aly, 1987)



ภาพที่ 2 กราฟสำหรับสมการของฟรุนดริช

ตะกั่ว (Pb)

ตะกั่ว (Pb) เป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่มของธาตุเรฟิเซนเตอ์ฟ โดยมีเลขอะตอม 82 มวลอะตอม 207.19 มีจุดหลอมเหลวที่ 324.4 องศาเซลเซียส จุดเดือดที่ 1,740 องศาเซลเซียส มีเลขออกซิเดชันคือ 2+ และ 4+ แต่โดยส่วนใหญ่จะมีเลขออกซิเดชันเท่ากับ 2+ ตะกั่วเป็นโลหะที่อ่อน สามารถทุบ

รีด หลอมง่าย ทนต่อการผุกร่อนได้ดี ทนต่อการดัดรูป และกรดไฮโดรคลอริก ไม่ละลายในน้ำ แต่ละลายได้อย่างช้าๆ ในกรดไนตริก และละลายได้บ้างในสารประกอบอะซิเตรท (Harrison and Lexen, 1981; Parker, 1993)

1. แหล่งกำเนิด

ตะกั่วเป็นธาตุที่มีการกระจายทั่วไปในธรรมชาติ ที่เปลือกโลกมีตะกั่วโดยเฉลี่ยประมาณ 10 ถึง 15 ส่วนในล้านส่วน (part per million ; ppm) แต่ปรากฏเป็นธาตุอิสระน้อยมาก ตะกั่วที่พบในเปลือกโลกจึงอยู่ในรูปสารประกอบเป็นสินแร่ต่างๆ เช่น galena (PbS), cerussite (PbCO₃), anglesite (PbSO₄), minium (Pb₃O₄), wulfenite (PbMnO₄) และ crocite (PbCrO₄) เป็นต้น หรือพบตะกั่วรวมอยู่กับโลหะอื่นๆ เช่น ทองแดง สังกะสี เงิน และแคดเมียม ตะกั่วในธรรมชาติมีแหล่งกำเนิดมาจากหินประเภทต่างๆ เช่น หินอัคนี หินชั้น และหินแปร เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบตะกั่วในดิน พืช น้ำ อากาศ โดยในดินมีปริมาณตะกั่วตั้งแต่ 1.5 ถึง 189 ส่วนในล้านส่วน สำหรับในพืชมีปริมาณตะกั่วประมาณ 0.5 ถึง 3 ส่วนในล้านส่วน ในน้ำประมาณ 13.1 ส่วนในพันล้านส่วน (part per billion ; ppb) ในอากาศประมาณ 36 ไมโครกรัมต่อลิตร

2. การนำมาใช้ประโยชน์

ตะกั่วถูกนำมาใช้ประโยชน์ ใน 2 รูปแบบ คือ ในรูปของโลหะ โดยใช้ทำขั้วไฟฟ้าในแบตเตอรี่ ทำสายเคเบิล และในรูปสารประกอบทางเคมี เช่น เป็นสารผสมเพื่อเพิ่มค่าออกเทนในน้ำมันเบนซิน ทำเม็ดสี ทำพลาสติก เป็นต้น นอกจากนี้ตะกั่วยังถูกนำมาใช้ในปุ๋ยและสารเคมีที่ใช้ในการเพิ่มผลผลิตและปราบศัตรูพืช และนำมาเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมต่างๆ ไป เช่น ทำโลหะผสมทองแดง ทองบรอนซ์ ฟิวส์ ลูกปืน หมึกพิมพ์ เครื่องเคลือบ สีทาบ้าน เป็นต้น

3. การแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม

ตะกั่วสามารถแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมได้จากธรรมชาติ โดยการพังทลายของเปลือกโลก และการเกิดภูเขาไฟ และจากการกระทำของมนุษย์ เช่น การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงรถยนต์ ทำให้เกิดไอที่มีสารประกอบตะกั่วสู่บรรยากาศแล้วเกิดการสะสมในดิน และในน้ำ การทิ้งกากตะกอนของน้ำเสีย มูลสัตว์ การใช้ปุ๋ย สารกำจัดศัตรูพืช แบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ และขยะมูลฝอยลงสู่ดิน ทำให้เกิด

การแพร่กระจายของตะกั่วลงสู่ดิน และแหล่งน้ำ นอกจากนี้การใช้ตะกั่วในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การทำเหมืองและการถลุงแร่ การทำแบตเตอรี่ ทำให้เกิดฝุ่น ควัน และน้ำเสียที่มีตะกั่วปะปนอยู่ สิ่งเหล่านี้เมื่อปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมย่อมทำให้เกิดการปนเปื้อน และสะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้ โดยเฉพาะในบริเวณที่มีการทำการเกษตรในเมืองและชุมชนที่มีการจราจรหนาแน่น และบริเวณใกล้เคียงโรงงานอุตสาหกรรม

4. ความเป็นพิษ

ตะกั่วสามารถเข้าสู่ร่างกายโดยผ่านทางอากาศ และการรับประทานอาหารและน้ำ ซึ่งเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะกระจายไปอยู่ในอวัยวะต่างๆ เช่น สมอง ปอด ตับ ม้าม และมากที่สุดคือที่กระดูก ซึ่งจะอยู่ในร่างกายได้ยาวนานถึง 16 ถึง 27 ปี และจะก่อให้เกิดพิษแก่ระบบต่างๆ เลือดอาจเกิดอาการอ่อนเพลียและเป็นลมง่าย ระบบประสาท โดยตะกั่วเป็นพิษต่อเซลล์ประสาททำให้สมองบวม และทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ประสาท เกิดอาการปวดศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียน ชัก เดินเซ นอนไม่ค่อยหลับ อารมณ์แปรปรวนแปร เชื่องซึม ความจำเสื่อม ระบบไต ทำให้เกิดภาวะไตวาย และไตพิการ ระบบสืบพันธุ์ ทำให้อสุจิของเพศชายและไข่ของเพศหญิงผิดปกติ เป็นหมัน เป็นต้น การที่ตะกั่วทำให้เกิดความเป็นพิษได้เนื่องจากตะกั่วสามารถป้องกันการเกิดฮีโมโกลบิน (hemoglobin) ของร่างกาย โดยไปขัดขวางการสังเคราะห์สารที่เป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตฮีโมโกลบินเรียกว่า prophyryns และยังสามารถขัดขวางการทำงานของเอนไซม์บางชนิดที่มีหมู่ -SH อยู่ด้วย เช่น โคเอ็นไซม์ เอ เป็นต้น (พรพิมล, 2542)

5. การบำบัดโลหะหนักตะกั่วในน้ำเสีย

การบำบัดโลหะหนักตะกั่วในน้ำเสียมีหลายวิธีด้วยกัน ซึ่งสามารถสรุปหลักการโดยย่อดังนี้

5.1 การตกตะกอนผลึกทางเคมี (chemical precipitation) เป็นการเปลี่ยนสภาพของไอออนของโลหะหนักตะกั่วที่ละลายอยู่ในรูปของสารละลาย เป็นสารที่อยู่ในสภาพที่ไม่ละลาย โดยการเติมสารเคมีผสมกับน้ำเสียให้ทั่วถึง สารเคมีที่นิยมใช้ได้แก่ สารส้ม, ปูนขาว, เฟอริกคลอไรด์, เฟอริกซัลเฟต เป็นต้น ซึ่งเมื่อผสมเข้ากันดีแล้วจะเกิดการจับตัวกันระหว่างสารเคมีกับสารละลาย ทำให้สามารถแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียได้ เช่น $Pb(OH)_2$ เป็นต้น การเกิดการตกตะกอนผลึกให้

ได้ผลดีต้องพิจารณาค่าพีเอช หลังจากการเกิดปฏิกิริยาแล้ว โดยทั่วไปต้องมีค่าพีเอชสูงกว่า 7 จึงจะได้ผลดี

5.2 การดูดซับด้วยถ่าน (carbon adsorption) เป็นการบำบัดโลหะหนักตะกั่วที่ละลายอยู่ในน้ำเสียโดยใช้หลักการดูดซับด้วยถ่าน ถ่านที่ใช้มี 2 ประเภท คือ แบบเป็นเม็ด (granular carbon) และแบบเป็นผง (powdered carbon) ซึ่งนิยมเรียกรวมกันว่า activated carbon โดยจะทำการเผาวัตถุดิบ เช่น กะลามะพร้าว, ไม้อื่นๆ หรือถ่านทั่วไป ที่อุณหภูมิสูง เพื่อให้ได้พื้นที่ผิวของถ่านมากๆ โดยทั่วไปพื้นที่ผิวถ่านจะมีขนาดตั้งแต่ 500 ถึง 1,500 ตารางเมตรต่อกรัม

5.3 ออสโมซิสผันกลับ (reverse osmosis) เป็นการแยกโลหะหนักตะกั่วจากน้ำเสียโดยการกรองผ่านแผ่นเยื่อกรองแบบเยื่อซึมกึ่งผ่านได้ (semipermeable membrane) ณ ความดันที่สูงกว่าความดันออสโมซิส เพื่อเยื่อกรองจะยอมให้เฉพาะโมเลกุลของน้ำไหลผ่าน โดยปกติจะมีขนาดความดันตั้งแต่ความดันบรรยากาศจนถึง 6,900 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร แผ่นเยื่อกรองที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ เซลลูโลสอะซิเตท และไนลอน

5.4 การแยกด้วยไฟฟ้าและเยื่อกรอง (electrodialysis) เป็นการแยกไอออนของโลหะหนักตะกั่วออกจากน้ำเสียด้วยกระแสไฟฟ้าและเยื่อกรองแบบ permeable membrane ที่มีอยู่ 2 ชนิด คือ เยื่อกรองประจุบวกจะจับสารปนเปื้อนที่มีประจุลบ และปล่อยสารที่มีประจุลบผ่านไปได้ แต่โมเลกุลของน้ำจะอยู่ช่องตรงกลางไหลผ่านออกไปได้ยาก

5.5 การใช้วิธีธรรมชาติ (natural treatment) เป็นทั้งวิธีการทางกายภาพ เคมีและชีววิทยา ประกอบกัน มาปรับสภาพน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ให้ลดน้อยลง โดยนำน้ำเสียมาผ่านพื้นที่ชุ่มน้ำซึ่งประกอบด้วยน้ำ ดิน พืช จุลินทรีย์ และบรรยากาศ โลหะหนักตะกั่วจะถูกจับไว้โดยอาศัยการดูดซับ การตกผลึก และการแลกเปลี่ยนประจุ โดยทั่วไปจะต้องมีค่าพีเอชของน้ำเสียหรือบริเวณพื้นที่บำบัดน้ำเสียมากกว่า 7 จึงจะได้ประสิทธิภาพของการบำบัดอยู่ในระดับสูง แต่ถ้าค่าพีเอชต่ำกว่า 7 จะเกิดปัญหาโดยโลหะหนักจะละลายปนกับน้ำออกจากระบบได้

เกลือ

มีชื่อทางเคมีว่าโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เป็นสารประกอบที่มีประโยชน์ และใช้กันมากในครัวเรือนและในอุตสาหกรรม โดยทั่วไปถ้าแบ่งเกลือออกตามแหล่งที่มา จะแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. เกลือทะเล หรือเกลือสมุทร

เป็นเกลือที่ผลิตจากน้ำทะเล โดยการทำนาเกลือ ซึ่งจะทำในพื้นที่บริเวณชายทะเลพื้นดินเป็นดินเหนียว สามารถเก็บกักน้ำได้ดี จังหวัดที่มีลักษณะภูมิประเทศเหมาะแก่การทำนาเกลือ ได้แก่ สมุทรสาคร สมุทรปราการ เพชรบุรี สมุทรสงคราม ฉะเชิงเทรา และชลบุรี (กรมเศรษฐกิจการพาณิชย์, 2521) วิธีการทำนาเกลือ จะทำการสูบน้ำหรือปล่อยน้ำเกลือเข้านา แล้วตากแดดให้น้ำเกลือเข้มข้นจนกระทั่งตกผลึกกลายเป็นเกลือที่พื้นนาเกลือ แล้วจึงทำการเก็บผลึกเกลือที่ได้โดยใช้เวลารวมประมาณ 45 วัน

2. เกลือสินเธาว์

เป็นเกลือที่ได้จากเกลือที่มีอยู่ในดิน ผลิตกันมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ๆ ผลิตได้จากการตากแดดน้ำเกลือจากบ่อน้ำเกลือผิวดิน หรือบ่อน้ำเกลือใต้ดิน และการต้มเกลือที่ค้างอยู่กับดินด้วยน้ำ

นอกจากจะประกอบด้วยโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ก็มีแร่ธาตุอื่นๆ เจือปนอยู่ เช่น แคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4), แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4), แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl) (กรมเศรษฐกิจการพาณิชย์, 2521)

เกลือมีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ประมาณร้อยละ 26.395 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส แต่อาจจะละลายได้มากขึ้นบ้างเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่เมื่อเย็นลงเกลือบางส่วนก็จะตกผลึก และจะเหลือเกลือละลายอยู่ในสารละลายอิ่มตัวในสารละลายอิ่มตัวร้อยละ 22.6 โดยน้ำหนัก

3. การทำให้เกลือบริสุทธิ์ (Refinery)

3.1 น้ำเกลือละลายกับน้ำสะอาดใหม่

3.2 ใช้สารละลายเพื่อตกตะกอน หรือแยกอนุมูลของสิ่งเจือปน เช่น แคลเซียม, แมกนีเซียม และซัลเฟตออกเสียก่อน

3.3 ตกผลึกเกลือใหม่อีกครั้งโดยใช้ความร้อนที่ควบคุมได้ (ลลิตา, 2544)

หลักการวิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยวิธีการของ BET

จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยเครื่อง high speed gas analyzer ค่าพื้นที่ผิวทั้งหมด (total surface area) และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) จะถูกคำนวณให้โดยอัตโนมัติ เมื่อทราบค่าน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งใช้หลักการวัดพื้นที่ผิวที่นิยมใช้กันมากคือวิธีการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET method) ซึ่งได้หาความสัมพันธ์ระหว่างความดันและน้ำหนักสารที่ถูกดูดซับไว้ได้ดังนี้

$$\frac{1}{W((P/P_0) - 1)} = \frac{1}{W_M C} + \frac{C-1}{W_M C} \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (7)$$

เมื่อ W คือ น้ำหนักของก๊าซที่ถูกดูดซับ ณ ความดันสัมพัทธ์ P/P_0

W_m คือ น้ำหนักของก๊าซที่ถูกดูดซับจนปกคลุมพื้นที่ผิวทั้งหมดเพียงชั้นเดียว

(monolayer)

C คือ ค่าคงที่ของ BET ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานที่ใช้ในการดูดซับแบบชั้นเดียวบวกถึงแรงกระทำระหว่างตัวดูดซับ (adsorbent) และตัวถูกดูดซับ (adsorbate)

ก๊าซที่ใช้ในการวิเคราะห์พื้นที่ผิว คือ ก๊าซไนโตรเจนซึ่งจะจำกัดค่าความดันสัมพัทธ์ในช่วง 0.05 - 0.35 ส่วนค่าคงที่ C สำหรับไนโตรเจนจะมีค่าเท่ากับ 50 - 250 เมื่อทำการพล็อตกราฟระหว่าง $1/(W((P/P_0) - 1))$ กับ P/P_0 ตามสมการของ BET จะพบว่าความชันของกราฟและจุดตัดแกน Y หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{ความชัน} \quad S = (C - 1) / W_M C \quad (8)$$

$$\text{จุดตัดแกน y} \quad i = 1 / W_M C \quad (9)$$

ดังนั้นจึงสามารถหาค่า W_M ได้จากความชันและจุดตัดแกน y ของกราฟดังนี้

$$W_M = 1/(S + i) \quad (10)$$

และจะสามารถคำนวณพื้นที่ผิวทั้งหมดได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{พื้นที่ผิวทั้งหมดของตัวอย่าง} = W_M N A_{cs} / M \quad (11)$$

เมื่อ N คือ เลขอะโวกาโด (Avogadro's number) เท่ากับ 6.23×10^{23} โมเลกุลต่อโมล

M คือ น้ำหนักโมลของตัวถูกดูดซับ

A_{cs} คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวถูกดูดซับ สำหรับออกซิเจนที่ 77 K มีค่าเท่ากับ $16.2 \text{ \AA}^2$

ซึ่งพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวอย่างจะหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{พื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ} \quad S = S_t / W \quad (11)$$

เมื่อ S คือ พื้นที่ผิวจำเพาะ

W คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ (น้ำหนักของตัวอย่างที่ทำการวัดพื้นที่ผิว)

A_{cs} คือ พื้นที่ผิวหน้าตัดของตัวถูกดูดซับ สำหรับไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K มีค่าเท่ากับ

$$16.2 \text{ \AA}^2$$

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เกศรา และคณะ (2531) ได้ทดลองผลิตถ่านกัมมันต์จากพีช (peat) โดยใช้วิธีกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ในครุชีเบิลกราฟไฟต์ที่ให้ความร้อนด้วยเตาเผา (muffle furnace) และวิธีกระตุ้นด้วยไอน้ำอิมมิดิอิ่งยวดในเตาเผาแบบหมุน (rotary kiln) พบว่าการใช้ซิงค์คลอไรด์ อัตราส่วน 1:4 กระตุ้นที่ 600 องศาเซลเซียสที่เวลามากกว่า 0.5 ชั่วโมง จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพเทียบเท่ากับถ่านกัมมันต์ในทางการค้า คือ ค่าการดูดซับไอโอดีน 1,200 ถึง 1,300 มิลลิกรัมต่อกรัม, ค่าการดูดซับไอโอดีนเมทิลีน 200 ถึง 300 มิลลิกรัมต่อกรัม, พื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 1,200 ถึง 1,500 ตารางเมตรต่อกรัม และค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ร้อยละ 49 ถึง 54 เปอร์เซ็นต์

ดำรง และอภิสิทธิ์ (2533) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้โซเดียมคลอไรด์ (เกลือแกง) เป็นสารกระตุ้นในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวและขี้เลื่อย จากการทดลองพบว่า ทั้งอุณหภูมิและอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเกลือต่อวัตถุดิบมีผลโดยตรงต่อคุณภาพถ่านกัมมันต์ที่ได้ โดยสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเกลือแกงต่อกะลามะพร้าว เท่ากับ 3:1 และอุณหภูมิเท่ากับ 800 องศาเซลเซียส ส่วนสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยนั้นจะมีอุณหภูมิสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเกลือแกงต่อขี้เลื่อยสูงกว่า 5:1 และเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นที่เหมาะสมที่สุดคือ 60 นาที ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกะลามะพร้าวและขี้เลื่อย มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงสุด มีค่าเท่ากับ 640 และ 542 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ

พลัญ (2544) ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวโดยกระตุ้นด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริก เพื่อนำมาใช้ในการดูดซับโลหะโครเมียม (VI) ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากอุตสาหกรรม จากการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์คือ การเผาให้เป็นถ่านที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาทีและการเผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีค่าการดูดซับไอโอดีนนัมเบอร์เท่ากับ 1,050 มิลลิกรัมต่อกรัม มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 975 ตารางเมตรต่อกรัม ช่วงพีเอชของสารละลายโครเมียม (VI) ที่ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับได้ดีที่สุดคือ 2.5 และสามารถดูดซับโครเมียม (VI) ได้ 69.80 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ถ่านกัมมันต์อ้างอิง YAO 12/40 สามารถดูดซับโครเมียม (VI) ได้เพียง 56.96 เปอร์เซ็นต์

พงศธร (2538) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากขี้ข้าวโพดโดยใช้วิธีกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ รวมทั้งศึกษาคุณสมบัติและการใช้งานของถ่านกัมมันต์ที่ผลิต พบว่าขี้ข้าวโพดสามารถที่จะเปลี่ยนเป็นถ่านกัมมันต์ได้ พบว่า ขี้ข้าวโพดสามารถที่จะเปลี่ยนเป็นถ่านกัมมันต์ได้เมื่อถูกกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ที่อัตราส่วน 1:2 อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลาการเผา 180 นาที มีปริมาณร้อยละของผลผลิตคือ 62.82 ค่าไอโอดีน 800 – 900 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการฟอกสี เมธิลีนบลู 120 – 180 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิว 1,000 ตารางเมตรต่อกรัม ประสิทธิภาพการฟอกสีปานกลาง

พงศ์ศักดิ์ (2539) ศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตถ่านกัมมันต์จากขี้ข้าวโพดโดยใช้เกลือแกงในการกระตุ้น ทำการทดลองโดยการเผาขี้ข้าวโพดและทำการกระตุ้นด้วยเกลือแกงให้เป็นถ่านกัมมันต์ไปพร้อมๆกัน กำหนดตัวแปรในการทดลอง 3 ตัวแปร คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของขี้ข้าวโพดต่อเกลือแกง อุณหภูมิ และเวลาในการเผาโดยใช้ค่าไอโอดีนนับเบอร์เป็นตัวชี้วัดคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตถ่านกัมมันต์จากขี้ข้าวโพดโดยใช้เกลือแกงเป็นสารกระตุ้นคือ ใช้อัตราส่วนขี้ข้าวโพดต่อเกลือแกงเท่ากับ 1:2 อุณหภูมิในการเผา 800 องศาเซลเซียส เวลาเผานาน 60 นาที ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาในสภาวะนี้มีลักษณะทางกายภาพใกล้เคียงกับข้อกำหนดของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 900-2532) คือ ค่าไอโอดีนนับเบอร์ 621.37 มิลลิกรัมต่อกรัม ความชื้น 3.38 เปอร์เซ็นต์ และความแข็ง 68 เปอร์เซ็นต์

ลลิตา (2544) ศึกษาความสามารถในการดูดซับฟิโวลีนในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกทุเรียนและเปลือกมะม่วงหิมพานต์ ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้โซเดียมคลอไรด์ (เกลือแกง) ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมที่ใช้ในการเผาวัตถุดิบให้เป็นถ่านพร้อมกับการกระตุ้นคือ 800 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุดิบต่อเกลือแกงที่เหมาะสม คือ 1:0 สำหรับถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิด โดยถ่านเปลือกทุเรียน และถ่านเปลือกมะม่วงหิมพานต์ มีค่าไอโอดีนนับเบอร์สูงสุดเท่ากับ 567 และ 532 มิลลิกรัมต่อกรัม พีเอช ของน้ำเสียเริ่มต้นตั้งแต่ 4 ขึ้นไป พบว่าถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิด มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียสูงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ผลของเวลาสัมผัสพบว่า สมดุลของการดูดซับฟิโวลีนสำหรับถ่านทั้งสองชนิดคือ 10 นาที ผลของการหาไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช แสดงให้เห็นว่าถ่านเปลือกทุเรียนมีความสามารถในการดูดซับฟิโวลีนสูงกว่าถ่านเปลือกมะม่วงหิมพานต์

สุนิษฐ์ (2544) ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วและปรอทจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยการเปรียบเทียบถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาปาล์มและกะลามะพร้าวโดยใช้โซเดียมคลอไรด์

ไรด์เป็นสารกระตุ้นกับถ่านกัมมันต์ที่จำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไป ผลการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว มีค่าไอโอดีน 532.29 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิว 492.4200 ตารางเมตรต่อกรัม สามารถดูดติดผิวตะกั่วและปรอท ได้ 8.37 และ 5.52 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาปาล์ม มีค่าไอโอดีน เท่ากับ 486.45 มิลลิกรัมต่อกรัม มีพื้นที่ผิว 385.9073 ตารางเมตรต่อกรัม สามารถดูดติดผิวตะกั่วและปรอท ได้ 2.53 และ 1.63 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนถ่านกัมมันต์ที่จำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไป สามารถดูดติดผิวตะกั่วและปรอท ได้ 50.18 และ 19.95 มิลลิกรัมต่อกรัม

Namasivayam and Kadirvelu (1999) ศึกษาการดูดติดผิวโลหะปรอท (II) ในน้ำเสียสังเคราะห์ ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว (coirpith) ที่เตรียมโดยวิธีทางเคมี โดยใช้เวลาลัมผัส ความเข้มข้นของสารละลายปรอท ปริมาณสารดูดติดผิว และพีเอช ต่างๆ พบว่า ค่าสมมูลของการดูดติดผิวอยู่ที่ 10, 25, 30 และ 40 นาที ที่ความเข้มข้นของสารละลายปรอท 10, 20, 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และพบว่าการดูดติดผิวของถ่าน เท่ากับ 154 มิลลิกรัมของปรอทต่อกรัมของถ่านกัมมันต์ การดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อ พีเอช เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 2 ถึง 5 และจะคงที่จนถึง พีเอช 11