

## บทที่ 2

### แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้เป็นการปรับปรุงลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดสละพันธุ์สุมาลี เหลือทิ้งเพื่อนำมาใช้กำจัดไอออนตะกั่ว (II) ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยมีเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

#### 2.1 ตะกั่ว

ตะกั่ว เป็นโลหะหนักที่มีลักษณะอ่อนทำให้หลอมเหลวได้ง่าย และสามารถพิมพ์แบบออกมาเป็นรูปร่างต่าง ๆ ได้ดี จึงนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย มีการนำตะกั่วมาใช้ตั้งแต่สมัยโบราณ ในปัจจุบันก็ยังมีการใช้ตะกั่วในงานต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย ภาวะตะกั่วเป็นพิษเป็นโรคที่พบได้บ่อยในประเทศไทย อาการของตะกั่วเป็นพิษเป็นอาการที่เกิดขึ้นกับอวัยวะหลายระบบ และคล้ายกับอาการของโรคอื่น ๆ

ในสภาวะปกติตะกั่วจะมีสถานะเป็นของแข็ง สีน้ำเงินปนเทา มีความวาวแบบโลหะ ทึบแสง มีความอ่อนตัวค่อนข้างสูง สามารถตัด รีดหรือตีขึ้นรูปได้ง่าย ตะกั่วเป็นโลหะอ่อนที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ ขยายตัวได้มากเมื่อได้รับความร้อน มีความหล่อลื่นในตัวเอง ทนทานต่อการกัดกร่อน สามารถผสมกับโลหะต่าง ๆ เป็นโลหะผสม (Alloys) ได้หลายชนิด สารประกอบของตะกั่วส่วนมากไม่ละลายน้ำ หรือละลายในน้ำได้เล็กน้อย แต่ละลายได้ดีในกรดไนตริก (Nitric Acid,  $\text{HNO}_3$ ) และกรดกำมะถัน (Sulfuric Acid,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) ที่ร้อน โดยทั่วไปมีสีขาวหรือไม่มีสี แต่ออกไซด์ของตะกั่วจะมีสีเหลืองหรือสีส้ม ส่วนไดออกไซด์มีสีเทาหรือดำ

##### 2.1.1 การได้รับตะกั่วเข้าสู่ร่างกาย

เมื่อตะกั่วเข้าสู่ร่างกายจะส่งผลกระทบต่อร่างกาย ซึ่งวิธีการได้รับตะกั่วเข้าสู่ร่างกาย มีดังต่อไปนี้

1) ระบบทางเดินอาหาร การได้รับตะกั่วผ่านระบบทางเดินอาหารเกิดจากการกินอาหาร หรือน้ำดื่มที่มีการปนเปื้อนตะกั่วเป็นหลัก ตะกั่วจะผ่านลงสู่ลำคอ กระเพาะอาหาร และลำไส้ โดยตะกั่วจะถูกละลายได้มากที่กระเพาะอาหาร เพราะมีกรดน้ำย่อยเข้าช่วย หากตะกั่วมีความเข้มข้นมากจะทำให้เยื่อในระบบต่าง ๆ ระคายเคืองเกิดการอักเสบเป็นแผล และมีอาการคลื่นไส้ อาเจียน หลังจากนั้นจะถูกดูดซึมเข้ากระแสเลือดที่ลำไส้เล็กส่วนต้น และบางส่วนจะหลุดปะปนออกมากับอุจจาระ

2) ทางการหายใจ การได้รับตะกั่วเข้าสู่ร่างกายทางการหายใจมักได้รับตะกั่วในรูปไอตะกั่ว และฝุ่นตะกั่ว ซึ่งจะผ่านเข้ายังปอดโดยตรง หากไอตะกั่วมีความเข้มข้นมากจะทำให้ลำคออักเสบ มีอาการไอ แน่น และปวดแสบหน้าอก หายใจลำบาก จากนั้นตะกั่วจะเข้าสู่กระแสเลือด และแพร่เข้าสู่อวัยวะต่าง ๆ

3) ทางผิวหนัง เนื่องจากตะกั่วละลายน้ำได้น้อย ดังนั้น การซึมผ่านผิวหนังหากไม่มีน้ำเข้าช่วย จะซึมผ่านได้ยาก ตะกั่วอินทรีย์สามารถดูดซึมผ่านผิวหนังได้ แต่ตะกั่วอนินทรีย์จะถูกดูดซึมเฉพาะ

บริเวณที่มีบาดแผลเท่านั้น เพราะมีน้ำเหลืองหรือเลือดเข้าช่วย โดยทั่วไปการสัมผัสกับตะกั่วอนินทรีย์ จะไม่เกิดอันตราย แต่ในบางรายที่มีภูมิไวต่อตะกั่วมักเกิดอาการแพ้เกิดผื่นแดง มีอาการปวดร้อน

### 2.1.2 พิษของตะกั่ว

ตะกั่วสามารถเข้าสู่ร่างกายได้หลายทาง ทั้งจากการหายใจ การกิน และทางผิวหนัง ขึ้นอยู่กับลักษณะและรูปแบบของตะกั่วที่ได้รับ เมื่อตะกั่วซึมเข้าสู่กระแสเลือดแล้วจะถูกส่งผ่านไปยังส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย ทำให้สามารถพบตะกั่วได้ในทุก ๆ ส่วนของร่างกาย ทั้งเนื้อเยื่ออ่อน ได้แก่ ไชกระดูก ระบบประสาท ไต และตับ เป็นต้น รวมทั้งเนื้อเยื่อแข็ง ได้แก่ กระดูก เส้นผม เล็บ และฟัน เป็นต้น ซึ่งส่วนใหญ่จะสะสมอยู่ในกระดูกสูงถึงร้อยละ 90 (คณะแพทยศาสตร์โรงพยาบาล รามาธิบดี มหาวิทยาลัยมหิดล ศูนย์พิษวิทยารามาธิบดี, ม.ป.ป.)

นอกจากนี้ยังมีแหล่งอื่น ๆ อีกจำนวนมากที่อาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดภาวะตะกั่วเป็นพิษ ได้แก่ การทำงานในสนามยิงปืน ยาสมุนไพรรักษาโรคที่ทำได้ด้วยตะกั่ว ผลิตภัณฑ์จากแบตเตอรี่ และอาหารที่มีตะกั่วปนเปื้อน ตะกั่วที่ใช้เป็นตัวพิมพ์หนังสือ สีที่ทาของใช้ของเด็ก เป็นต้น ดังนั้นจึงมีวิธีการบำบัดตะกั่วในโรงงานอุตสาหกรรมหลายวิธี เช่น การแลกเปลี่ยนไอออน การใช้เคมี-เชิงไฟฟ้า และการสกัดด้วยตัวทำละลาย เป็นต้น วิธีที่ได้รับความนิยมคือวิธีการดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ ซึ่งใช้ต้นทุนและพลังงานต่ำกว่า มีคุณสมบัติในการดูดซับสูง

## 2.2 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ เป็นถ่านที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและมีรูพรุนขนาดเล็กอยู่ภายในเป็นจำนวนมาก ถ่านกัมมันต์เกิดจากการนำเอาวัสดุธรรมชาติที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบมาผ่านกระบวนการก่อกัมมันต์ แล้วทำให้วัสดุค่านั้นมีโครงสร้างรูพรุน และมีพื้นที่ผิวภายในที่จำเพาะสูงขึ้น ซึ่งโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์จะมีลักษณะคล้ายรังผึ้ง โดยถ่านกัมมันต์นั้นจะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ร้อยละ 87-90 และมีธาตุอื่น ๆ เช่น ไฮโดรเจน (Hydrogen, H) ออกซิเจน (Oxygen, O) กำมะถัน (Sulfur, S) และไนโตรเจน (Nitrogen, N) เป็นองค์ประกอบด้วย ปริมาณที่พบจะมีมากหรือน้อยเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับวัตถุดิบ นอกจากนี้แล้ว ธาตุเหล่านี้อาจเกิดขึ้นได้อีกในขั้นตอนการเตรียมถ่านกัมมันต์

### 2.2.1 ประเภทของถ่านกัมมันต์ตามลักษณะทางกายภาพ

ในปัจจุบันสามารถผลิตถ่านกัมมันต์ออกมาได้หลายรูปแบบ ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของถ่านกัมมันต์ตามลักษณะทางกายภาพ (สุคนทิพย์ เถาว์โมลา, 2561 : 10-11) ได้ดังนี้

1) ถ่านกัมมันต์แบบผง (Powdered Activated Carbon; PAC) ถ่านกัมมันต์ที่ถูกบดจนมีขนาดที่สามารถผ่านตะแกรงร่อนขนาด 60 เมช (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 250 ไมโครเมตร) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99

2) คาร์บอนแบบเกล็ดหรือเม็ด (Granular Activated Carbon; GAC) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ทำจากวัตถุดิบที่เป็นเม็ด หรือเป็นถ่านกัมมันต์แบบผงที่นำมาเติมตัวประสานแล้วถูกอัดเป็นเม็ด

3) ถ่านกัมมันต์แบบอัดแท่ง (Extruded Activated Carbon) เป็นถ่านที่นำมาขึ้นรูปเป็นแท่งทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.8–55 มิลลิเมตร

4) ถ่านกัมมันต์เคลือบอนุภาค (Impregnated Carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ชนิดพิเศษที่เติมโมเลกุลสารอนินทรีย์ลงไปโครงสร้าง เช่น โลหะเงิน (Silver, Ag) ไอโอดีน (Iodine, I<sub>2</sub>) ไอออนบวกจำพวกไอออนอะลูมิเนียม (Aluminum Ion, Al<sup>3+</sup>) แมงกานีส (Manganese Ion, Mn<sup>2+</sup>) สังกะสี (Zinc Ion, Zn<sup>2+</sup>) เหล็ก (Iron Ion, Fe<sup>3+</sup>) ลิเทียม (Lithium Ion, Li<sup>+</sup>) แคลเซียม (Calcium Ion, Ca<sup>2+</sup>) เป็นต้น

### 2.2.2 การจำแนกรูพรุนของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่มีรูพรุนขนาดตั้งแต่ 20 อังสตรอม ถึง 20,000 อังสตรอม โดยปกติวัสดุรูพรุน สามารถจำแนกขนาดรูพรุนได้เป็น 3 ประเภท ตามข้อกำหนดของสหภาพเคมีบริสุทธิ์และเคมีประยุกต์ระหว่างประเทศ (International Union of Pure and Applied Chemistry; IUPAC) ดังนี้

- 1) ไมโครพอร์รัส (Microporous) เป็นรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 นาโนเมตร
- 2) เมโซพอร์รัส (Mesoporous) เป็นรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 2 – 50 นาโนเมตร
- 3) แมโครพอร์รัส (Macroporous) เป็นรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 50 นาโนเมตร

เนื่องจากวิธีการเตรียมที่แตกต่างกันขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์จึงมีความแตกต่างกันจากคุณสมบัติของรูพรุนที่อยู่ภายในของถ่าน เช่น พื้นที่ผิวของรูพรุน (Pore Surface Area) ปริมาตรของรูพรุน (Pore Volume) และการกระจายขนาดรูพรุน (Pore Size Distribution) ทำให้ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับสูงมาก จึงถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในงานด้านสิ่งแวดล้อม เพื่อกำจัดสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ออกจากแก๊สและของเหลว ถ่านกัมมันต์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน เช่น ใช้ในกระบวนการทำสารเคมีให้บริสุทธิ์หรือในกระบวนการนำสารเคมีกลับมาใช้ใหม่ ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดี เหมาะสมแก่การใช้งาน และมีราคาไม่แพงมาก ทำให้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย

### 2.2.3 วัตถุดิบสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์

วัตถุดิบที่นำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์นั้น จะต้องมีการคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ โดยอาจเป็นวัตถุดิบจากธรรมชาติหรือจากการสังเคราะห์ก็ได้ วัตถุดิบที่นิยมนำมาผลิตถ่านกัมมันต์ในระดับอุตสาหกรรม คือ ถ่านพีท ถ่านหิน ถ่านลิกไนต์และไม้ เนื่องจากให้ผลผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีความสามารถในการดูดซับสูง และมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก โดยทั่วไปวัตถุดิบที่นำมาผลิตถ่านกัมมันต์ ควรเป็นวัตถุดิบที่มีปริมาณสารระเหยต่ำ มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง มีราคาถูกและหาได้ง่าย มีคุณสมบัติคงที่

### 2.2.4 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

โดยทั่วไปกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์จากชีวมวล ส่วนใหญ่ผลิตโดยกระบวนการ 2 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เป็นการเผาวัตถุดิบให้เป็นถ่านคาร์บอนหรือที่เรียกว่า การคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) เป็นการเผาเพื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนและสร้างรูพรุนเริ่มต้น กระบวนการคาร์บอนไนเซชันเป็นการไพโรไลซิส (Pyrolysis) ซึ่งเกิดขึ้นในที่ที่ไม่มีอากาศ ขั้นตอนการคาร์บอนไนเซชันจัดว่าเป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญมากที่สุดในการผลิตถ่านกัมมันต์ เนื่องจากระหว่างการเผาคาร์บอนไนเซชัน จะเริ่มมีการสร้างโครงสร้างของรูพรุนเริ่มต้น ธาตุและองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอนรวมถึง

สารระเหยต่าง ๆ เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และน้ำ จะถูกกำจัดออกจากโครงสร้างของ วัสดุคิบในรูปของแก๊สและน้ำมันทาร์ จากนั้นจะได้ถ่านคาร์บอนซึ่งมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึก ที่ไม่เป็นระเบียบมีทาร์อยู่คิบในช่องว่างระหว่างโครงสร้างผลึก ทำให้ส่วนประกอบของถ่านคาร์บอนที่ได้ จะมีอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไฮโดรเจน และคาร์บอนต่อออกซิเจนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งขั้นตอนของ กระบวนการคาร์บอนไนเซชันแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

- 1) การสูญเสียน้ำออกจากโครงสร้างที่ช่วงอุณหภูมิ 27-197 องศาเซลเซียส
- 2) การไพโรไลซิสโดยการเกิดแก๊สและน้ำมันทาร์ในโครงสร้างที่ช่วงอุณหภูมิ 197-497 องศาเซลเซียส
- 3) การเกาะตัวกันของโครงสร้างถ่านคาร์บอน โดยในช่วงนี้น้ำหนักของวัสดุคิบ จะลดลงไปมากที่ช่วงอุณหภูมิ 497-847 องศาเซลเซียส

ขั้นตอนที่ 2 คือกระบวนการกระตุ้นเพื่อเพิ่มโครงสร้างรูพรุนของตัวดูดซับ (Ahmed, 2016; Maneerung et al., 2015) ทำให้ถ่านคาร์บอนมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น มีพื้นที่ผิวในการ เกิดปฏิกิริยาทางเคมีเพิ่มขึ้น โดยทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไปและเกิดส่วนที่มีอำนาจในการดูดซับ ขึ้นมาแทน อีกทั้งยังเป็นการกำจัดอินทรีย์ หรืออนินทรีย์วัตถุต่าง ๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจาก บริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ การกระตุ้นถ่านกัมมันต์ทำได้ 2 วิธีคือการกระตุ้นทางกายภาพ และการกระตุ้นทางเคมี มีรายละเอียดดังนี้

- 1) การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical Activation) เป็นวิธีการเพิ่มปริมาณรูพรุนและพื้นที่ผิว โดยเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification Reaction) ด้วยแก๊สที่ช่วงอุณหภูมิ 700-1,000 องศาเซลเซียส แก๊สที่ใช้โดยทั่วไป คือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และอากาศ โดยอาจใช้ชนิดใดชนิดหนึ่ง หรือแก๊สผสมก็ได้ ซึ่งคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากับแก๊สที่ใช้ในการกระตุ้น แล้วเกิดเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แพร่ออกจากผิวของถ่านคาร์บอน การเกิดแก๊สซิฟิเคชันจะทำให้บางส่วนของเม็ดถ่านคาร์บอนเกิดเป็น รูพรุนขึ้นในโครงสร้างของถ่านคาร์บอน หลังจากการคาร์บอนไนเซชันจะได้คาร์บอนที่ประกอบ ไปด้วยรูพรุนเล็ก ๆ จำนวนมาก ซึ่งรูพรุนนี้มักจะถูกบรรจุไว้ด้วยทาร์ที่เกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อน และถูกขวางด้วยคาร์บอนอสัณฐาน การกระตุ้นจึงเป็นการเปิดรูพรุนที่ถูกปิดเอาไว้และเป็นการสร้าง รูพรุนขึ้นมาใหม่ กระบวนการกระตุ้นในทางกายภาพนี้อาจมีกระบวนการผลิตที่ต่างกันไปซึ่งขึ้นอยู่กับ ลักษณะของวัสดุคิบตัวอย่าง

- 2) การกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation) เป็นกระบวนการกระตุ้นโดยใช้ สารเคมีเป็นตัวกระตุ้น สารเคมีที่ถูกนำมาใช้ส่วนใหญ่จะเป็นสารละลายกรด หรือเกลือของ โลหะ เช่น ซิงค์คลอไรด์ (Zinc Chloride,  $ZnCl_2$ ) กรดฟอสฟอริก โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide, KOH) โพแทสเซียมซัลเฟต (Potassium Sulfate,  $K_2SO_4$ ) โพแทสเซียม คาร์บอเนต (Potassium Carbonate,  $K_2CO_3$ ) เป็นต้น โดยนำวัสดุคิบหรือถ่านคาร์บอนไปแช่ใน สารเคมีก่อนนำไปเผากระตุ้น วัสดุคิบหรือถ่านคาร์บอนจะดูดซับเอาสารละลายนั้น เข้าไปแทรกตัวอยู่ ตามรูพรุนบนผิววัสดุคิบหรือถ่านคาร์บอน เมื่อนำไปเผากระตุ้นที่อุณหภูมิสูงประมาณ 450-900 องศา เซลเซียส จะเกิดการสลายตัวของสารประกอบเหล่านั้นเป็นแก๊สระเหยออกไป ทำให้เกิดรูพรุน จำนวนมาก การกระตุ้นทางเคมีมีข้อได้เปรียบที่สำคัญสองประการ ประการที่หนึ่งคือ เป็น กระบวนการที่ใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าการกระตุ้นทางกายภาพ และประการที่สองคือ ผลผลิตคาร์บอน

จากการกระตุ้นทางเคมีมีแนวโน้มสูงกว่าวิธีอื่น ทำให้เกิดรูพรุนในถ่านกัมมันต์มากขึ้น แต่การกระตุ้นทางเคมีมีข้อเสียคือ สารเคมีที่ใช้มีราคาแพง การล้างเอาสารเคมีที่ตกค้างออกทำได้ยาก และอาจเป็นพิษต่อร่างกาย

### 2.2.5 ลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์

ลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่สำคัญ ได้แก่

- 1) ไอโอดีนนัมเบอร์ (Iodine Number) เนื่องจากไอโอดีนถูกถ่านดูดซับได้ดี จึงนำมาใช้ ในการวัดการดูดซับของถ่านกัมมันต์โดยระบุในหน่วยมิลลิกรัมของไอโอดีนต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 1 กรัม
- 2) ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (Methylene Blue Index) สามารถบอกความสามารถในการดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดกลาง ทำให้เมทิลีนบลูถูกใช้เป็นตัวแทนของสารที่มีโมเลกุลขนาดกลาง

### 2.2.6 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์ที่สำคัญ ได้แก่

- 1) ใช้ในอุตสาหกรรมการทำหน้ากากป้องกันแก๊สพิษ
- 2) ใช้แยกแก๊สโซลีนออกจากแก๊สธรรมชาติ และกำจัดสิ่งเจือปนออก
- 3) ใช้แยกไอระเหยตัวทำละลายที่ใช้แล้วเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่
- 4) ใช้ดูดซับกลิ่นจากอากาศ ในเครื่องปรับอากาศ
- 5) ใช้ดูดซับกัมมันตภาพรังสีจากปฏิกิริยานิวเคลียร์
- 6) ใช้ในทางการแพทย์ อุตสาหกรรมอาหาร เครื่องดื่ม แอลกอฮอล์เคมีและยา
- 7) ใช้ทำน้ำดื่มให้บริสุทธิ์ และบำบัดน้ำเสีย
- 8) ใช้แยกโลหะออกจากสารละลายที่ต้องการ

### 2.2.7 ค่ามาตรฐานการผลิตถ่านกัมมันต์

ค่ามาตรฐานการผลิตถ่านกัมมันต์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์ ตามมาตรฐานเลขที่ มอก.900-2547 ซึ่งกำหนดในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (2547) ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่ามาตรฐานการผลิตถ่านกัมมันต์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์

คุณลักษณะ	ชนิดของถ่านกัมมันต์			
	ชนิดผง	ชนิดอัดเม็ด	ชนิดเม็ด	ชนิดแท่ง
ค่าไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม) ไม่น้อยกว่า	600	600	600	600
ความชื้น (ร้อยละ) ไม่น้อยกว่า	8	8	8	8
ความหนาแน่นปรากฏ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) ไม่น้อยกว่า	0.20	0.20	0.20	0.20

## 2.3 กระบวนการดูดซับ

กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process) คือ กระบวนการที่เกิดขึ้นจากแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ โดยแรงกระทำดังกล่าวแบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่ แรงทางกายภาพ

และแรงทางเคมี เพราะฉะนั้นกระบวนการการดูดซับจึงจำแนกออกเป็น 2 ประเภท ตามชนิดของแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับดังนี้

### 2.3.1 การดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) คือ การดูดซับหรือการดึงตัวถูกดูดซับไว้บนพื้นผิวของตัวดูดซับด้วยแรงกายภาพชนิดใดชนิดหนึ่ง หรือหลายชนิดร่วมกัน แรงกายภาพของการดูดซับประเภทนี้ ได้แก่ แรงดึงดูดระหว่างขั้วของตัวถูกดูดซับกับขั้วบนผิวตัวดูดซับ แรงดึงดูดระหว่างประจุของตัวถูกดูดซับ (ไอออน) กับประจุบนผิวตัวดูดซับ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลตัวถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ เป็นต้น ลักษณะสำคัญของการดูดซับประเภทนี้ เกิดขึ้นได้ดี ณ อุณหภูมิต่ำ และจะเกิดได้ดีขึ้น ณ อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งบนผิวของตัวดูดซับโดยตรง และเกิดขึ้นบนชั้นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับ โดยไม่จำกัดจำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่ซ้อนทับกัน และเรียกรูปการดูดซับแบบนี้ว่า การดูดซับหลายชั้น (Multilayer Adsorption)

### 2.3.2 การดูดซับทางเคมี

การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption) คือการเกิดพันธะทางเคมี หรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับในลักษณะเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี การดูดซับประเภทนี้จึงต้องการพลังงานกระตุ้นเช่นเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมีทั่วไป ดังนั้นการดูดซับจึงมักเกิดขึ้นได้ดีหรือเกิดขึ้นได้เร็ว ณ อุณหภูมิสูง ๆ โดยการดูดซับจะเกิดขึ้นเฉพาะบนผิวของตัวดูดซับเท่านั้น นั่นคือ การดูดซับทางเคมีจะไม่เกิดบนชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่บนผิวของตัวดูดซับ การดูดซับทางเคมีนี้จึงเกิดขึ้นได้เพียงชั้นเดียวเท่านั้น เรียกรูปการดูดซับประเภทนี้ว่าการดูดซับชั้นเดียว (Monolayer Adsorption)

## 2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

อัตราเร็วและความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

### 2.4.1 ความปั่นป่วน

อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับแผ่นการแพร่หรือรูพรุนการแพร่ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบถ่านกัมมันต์จะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคสำคัญต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาถ่านกัมมันต์ ซึ่งการแพร่จะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้าม ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูงทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา และทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าไปหาถ่านกัมมันต์ได้เร็ว ส่วนรูพรุนการแพร่จะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ดังนั้นอัตราเร็วในการดูดซับของถ่านกัมมันต์แบบผงจึงขึ้นอยู่กับรูพรุนการแพร่ เพราะระบบถ่านกัมมันต์แบบผงมักมีความปั่นป่วนสูง แต่อัตราเร็วในการดูดซับของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดมักขึ้นอยู่กับแผ่นการแพร่

### 2.4.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์

คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของถ่านกัมมันต์ คือ ขนาดและพื้นที่ผิว ขนาดของถ่านกัมมันต์มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วของการดูดซับในทางลบ กล่าวคือ อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของถ่านกัมมันต์ ดังนั้นถ่านกัมมันต์แบบผงจึงมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าถ่านกัมมันต์แบบ

เกล็ด ส่วนพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์นั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมสามารถดูดซับโมเลกุลได้มากกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวน้อย เนื่องจากพื้นที่ผิวส่วนใหญ่ของถ่านกัมมันต์มาจากช่องว่างหรือโพรงภายใน

#### 2.4.3 ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของถ่านกัมมันต์

เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้นโมเลกุลจะถูกดึงออกจากน้ำแล้วไปเกาะติดบนผิวของของแข็ง สารที่ละลายน้ำได้หรือแตกตัวเป็นไอออนได้ ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่น จึงยากต่อการดูดซับ สารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อยจึงสามารถเกาะติดผิวถ่านกัมมันต์ได้ง่าย ซึ่งในทางตรงกันข้ามการดูดซับอาจเกิดขึ้นได้ง่ายกับสารที่ละลายน้ำได้ดี ซึ่งไม่สามารถบอกได้อย่างชัดเจนว่าความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับ และความสามารถในการละลายน้ำเป็นอย่างไร

#### 2.4.4 ขนาดของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของถ่านกัมมันต์

ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญต่อการดูดซับมาก โดยส่วนใหญ่เกิดขึ้นในโพรงของถ่านกัมมันต์ จากการวิจัย พบว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุด เมื่อสารมีขนาดเล็กกว่าโพรงเล็กน้อย เพราะแรงดึงดูดระหว่างสารและถ่านกัมมันต์จะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในโพรงก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจะถูกดูดเข้าไปเช่นเดียวกัน

#### 2.4.5 ค่าความเป็นกรด-เบส

ความเป็นกรด-เบส (pH) ของสารละลายมีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออน และการละลายน้ำของสารต่าง ๆ จึงทำให้มีผลกระทบต่อ การดูดซับด้วย นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออนก็สามารถเกาะติดผิวถ่านกัมมันต์ได้ดี

#### 2.4.6 อุณหภูมิ

อุณหภูมิมิทธิพลต่ออัตราเร็วและความสามารถในการดูดซับ อัตราเร็วเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มของอุณหภูมิ และอัตราเร็วลดลงตามการลดของอุณหภูมิ แต่ความสามารถในการดูดซับจะแปรผกผันกับอุณหภูมิ

#### 2.4.7 ระยะเวลาในการดูดซับ

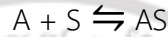
ระยะเวลาในการดูดซับจะต้องมีมากพอที่การดูดซับนั้นจะเข้าสู่สภาวะสมดุล ซึ่งเป็นเวลาที่อัตราการดูดซับ (Rate of Adsorption) เท่ากับอัตราการคาย (Rate of Desorption) ความสามารถในการดูดซับจะมีค่ามากที่สุด จากนั้นจะมีค่าคงที่เมื่อเวลาที่ใช้เพิ่มขึ้น

### 2.5 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับที่นิยมใช้ คือ สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-1<sup>st</sup> Order) และปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-2<sup>nd</sup> Order) ซึ่งเป็นสมการจลนพลศาสตร์ที่ใช้อธิบายการดูดซับที่ผิวของสารดูดซับ นอกจากนี้ยังพบขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุนของสารดูดซับมีส่วนสำคัญในขั้นตอนการดูดซับ ดังนั้นสมการการแพร่ภายในรูพรุน (Intraparticle Diffusion) จึงเป็นอีกสมการจลนพลศาสตร์ที่นำมาอธิบายจลนพลศาสตร์การดูดซับด้วย (วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ, 2558 : 11-13)

### 2.5.1 สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม

จากสมมติฐานการดูดซับของตัวถูกดูดซับ บนพื้นผิวตัวดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Electrostatic Interaction) ระหว่างผิวตัวดูดซับ และโมเลกุลตัวถูกดูดซับ เป็นการดูดซับทางเคมี สามารถคำนวณหาอัตราเร็วในการดูดซับได้โดยใช้ สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับจากปฏิกิริยาการดูดซับ



โดยที่ A คือ ตัวถูกดูดซับ

S คือ ตัวดูดซับ

AS คือ สารประกอบที่เกิดจากการดูดซับ (Adsorbed Compound)

สามารถเขียนสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม ได้ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1 (q_e - q_t) \quad (2.1)$$

โดยที่  $k_1$  คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (ต่อนาที)

$q_t$  คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$q_e$  คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ (2.1) โดยมีขอบเขตตั้งแต่  $t = 0$  จนถึง  $t = t$  และตั้งแต่  $q_t = 0$  จนถึง  $q_t = t$  จะได้สมการ คือ

$$\log \frac{q_e}{q_e - q_t} = -\frac{k_1}{2.303} t \quad (2.2)$$

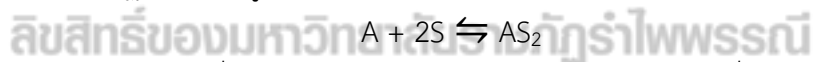
จัดสมการให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น จะได้

$$\log (q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (2.3)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\log (q_e - q_t)$  กับ  $t$  จะได้ความชันเท่ากับ  $-k_1/2.303$  และได้จุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $\log q_e$

### 2.5.2 สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

สมการจลนพลศาสตร์สำหรับอธิบายการดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับที่นิยมอีกสมการหนึ่งคือสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม บนสมมติฐานการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าและการดูดซับทางเคมีที่มีผลมาจากตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา (Active Site) จากปฏิกิริยาการดูดซับ



สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียมสามารถเขียนอัตราเร็วการดูดซับได้ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad (2.4)$$

โดยที่  $k_2$  คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (ต่อนาที)

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ (2.4) โดยมีขอบเขตตั้งแต่  $t = 0$  จนถึง  $t = t$  และตั้งแต่  $q_t = 0$  จนถึง  $q_t = t$  จะได้สมการ คือ

$$\frac{1}{q_e - q_t} = \frac{1}{q_e} - k_2 t \quad (2.5)$$



จัดสมการให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น จะได้

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (2.6)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $t/q_t$  กับ  $t$  จะได้ความชันเท่ากับ  $1/q_e$  และได้จุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $1/k_2 q_e^2$

## 2.6 สมดุลของการดูดซับ

การวิเคราะห์สมดุลของการดูดซับ (Adsorption Equilibrium) อาศัยความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลของมวลสาร ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายในวัฏภาค (Phase) ของเหลวกับความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนวัฏภาคของแข็ง ความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้เขียนเป็นกราฟไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) ซึ่งอธิบายถึงการกระจายตัวของตัวถูกละลายระหว่างวัฏภาคของเหลว และของแข็ง โดยอัตราการกระจายตัวนี้สามารถวัดได้ที่จุดสมดุลและจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายหรือคุณสมบัติของตัวถูกละลาย

เมื่อเกิดการดูดซับโมเลกุลตัวถูกละลายจะเข้าครอบครองทุกตำแหน่งที่เกิดการดูดซับจนเต็มทุกตำแหน่ง และจะทำให้แรงดึงดูดของผิวตัวดูดซับนั้นอ่อนลง แต่อาจยังคงสามารถดูดซับโมเลกุลตัวถูกละลายต่อไปได้ก่อให้เกิดเป็นชั้นที่สอง สาม และสี่ต่อไปเรื่อยๆ หรืออาจจะมีการดูดซับชั้นที่สองก่อนชั้นแรกจะเต็มและในบางตำแหน่งอาจจะดูดซับต่อหลายชั้นซ้อนสูงขึ้น รูปร่างของไอโซเทอร์มการดูดซับจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับ และปริมาณของสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ

สมการที่นำมาใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลของกระบวนการดูดซับมีหลายกระบวนการโดยเฉพาะในระบบของเหลว-ของแข็ง ได้แก่ ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอนด์ลิช (Freundlich Adsorption Isotherm) และไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

### 2.6.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอนด์ลิช

แบบจำลองไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอนด์ลิช นิยมใช้มาก เนื่องจากมีความถูกต้องสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีการดูดซับที่ใช้กับสารละลายที่ค่อนข้างเจือจาง มีสมมติฐานของการดูดซับที่ว่า พื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (พื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะขรุขระ) พื้นผิวและพลังงานมีการกระจายตัวเป็นเลขชี้กำลัง แสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.7)

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (2.7)$$

โดยที่  $q_e$  คือ ปริมาณการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$K_F$  คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ (ลิตรต่อกรัม)

$n$  คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ

จัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ (2.8)

$$\ln(q_e) = \ln(K_F) + \frac{1}{n} \ln(C_e) \quad (2.8)$$

เมื่อเขียนกราฟเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(C_e)$  กับ  $\ln(q_e)$  จะสามารถหาค่า  $1/n$  และ  $\ln(K_F)$  ได้จากความชันและจุดตัดแกน  $y$  ตามลำดับ

จากสมการการดูดซับแบบพหุนคติข ความสามารถในการดูดซับพิจารณาจากความชันของกราฟระหว่าง  $\ln(C_e)$  กับ  $\ln(q_e)$  ถ้าเส้นกราฟที่ได้มีค่าความชันมาก (ค่า  $n$  น้อย) แสดงว่า การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่ความเข้มข้นสูง ๆ หรือการดูดซับเกิดได้ไม่ดีที่ความเข้มข้นต่ำ ๆ โดยทั่วไป ถ่านกัมมันต์ที่ให้ค่าความชันมากจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูง

### 2.6.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์

แบบจำลองไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ จะอธิบายกลไกการดูดซับบน พื้นผิวของตัวดูดซับตามสมมติฐาน ดังนี้

- 1) การดูดซับมีลักษณะเป็นแบบชั้นเดียว คือมีจำนวนตำแหน่งที่เกิดการดูดซับ แน่นอน และเมื่อเกิดการดูดซับแล้วไอออนหรือโมเลกุลจะไม่ซ้อนทับกัน
- 2) เมื่อดูดซับตัวถูกดูดซับจะไม่มีการเคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนตำแหน่งกันในพื้นที่ ผิวสัมผัส และตัวถูกดูดซับจะไม่มีผลกระทบต่อกัน
- 3) พื้นที่ผิวในการดูดซับมีตำแหน่งและกลไกการดูดซับเหมือนกัน ทำให้โครงสร้าง สารเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นเหมือนกัน

4) พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุก ๆ พื้นที่ตัวดูดซับ

โดยแสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.9)

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2.9)$$

โดยที่  $q_e$  คือ ปริมาณการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$q_m$  คือ ปริมาณการดูดซับสูงสุด (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$K_L$  คือ ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

จัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ (2.10)

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L q_m} + \frac{1}{q_m} (C_e) \quad (2.10)$$

เมื่อเขียนกราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $C_e$  กับ  $C_e/q_e$  จะเห็นได้ว่า ค่าความชันเท่ากับ  $1/q_m$  และจุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $1/K_L q_m$

ข้อดีของการใช้แบบจำลองไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ ได้แก่ สมการแลงเมียร์เป็นสมการง่าย ๆ แบบจำลองเป็นแบบพื้นฐานทางฟิสิกส์และสามารถนำมาใช้งานได้ในช่วงที่กว้าง

ข้อจำกัดของการใช้แบบจำลองไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ ได้แก่ พลังงานของการดูดซับเป็นอิสระจากระดับการควบคุม แรงที่ใช้ในการดึงดูดเป็นแรงอ่อน ๆ ที่สามารถ ผั่นกลับได้ และจะใช้ได้ในกรณีที่ผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียวเท่านั้น

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กิตติพัฒน์ รัตนวิจิตร และ จิณณวัตร สุขเกษม (2560 : 24) ศึกษาการดูดซับไอออนตะกั่ว (II) ในน้ำเสียด้วยถ่านกัมมันต์จากเมล็ดสละพันธุ์สุมาลี คาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยปริมาตร อัตราส่วนระหว่างถ่านต่อสารกระตุ้น 1:1 โดยมวล เผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 1 ชั่วโมง ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีความชื้นร้อยละ  $5.32 \pm 0.06$  ค่าการดูดซับไอโอดีน เท่ากับ  $1,566.56 \pm 9.15$  มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู เท่ากับ  $5.69 \pm 0.02$  มิลลิกรัมต่อกรัม ถ่านกัมมันต์มีปริมาณการดูดซับไอออนตะกั่ว (II) สูงสุดที่  $27.87 \pm 0.23$  มิลลิกรัมต่อกรัมและเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลา 30 นาที

ชนิษฐา หทัยสมิทธิ์ และคนอื่น ๆ (2560 : 87-100) ศึกษาการประยุกต์ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide,  $TiO_2$ ) เคลือบบนถ่านกัมมันต์เพื่อบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยการวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนานวัตกรรมไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนถ่านกัมมันต์ ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมไว้แล้วนำไปอบที่ 105 องศาเซลเซียส และเผาที่ 500 องศาเซลเซียส ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้ค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 799 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าการดูดซับเมทิลีนบลูเท่ากับ 130 มิลลิกรัมต่อกรัม

ณัฐธิดา ซาครแก้ว และ ปรัชญา ฉายาขวลิต (2563 : 31) ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับและการดูดซับไอออนตะกั่ว (II) ในน้ำเสียด้วยถ่านกัมมันต์จากเมล็ดสละพันธุ์สุมาลี โดยการเผาและการกระตุ้นในขั้นตอนเดียวด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริก ความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยปริมาตร อัตราส่วนระหว่างเมล็ดสละแห้งต่อสารกระตุ้น 1:1 โดยมวลต่อปริมาตร ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ ความชื้น ร้อยละ  $6.66 \pm 0.38$  ค่าการดูดซับไอโอดีน เท่ากับ  $655.20 \pm 18.73$  มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู เท่ากับ  $1.20 \pm 0.01$  มิลลิกรัมต่อกรัม ถ่านกัมมันต์มีปริมาณการดูดซับไอออนตะกั่ว (II) สูงสุดที่ 2.32 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลา 25 นาที จลนพลศาสตร์ของการดูดซับสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเทียมโดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 0.9995 และสมมูลการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดลิชโดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 0.9734

ธีรดิษฐ์ โพธิ์ตันติมงคล และ ปิยธิดา อูระชื่น (2560 : 191-209) ศึกษาการกำจัดไอออนตะกั่ว (II) ในน้ำเสียอุตสาหกรรมโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม โดยการแช่ในกรดฟอสฟอริกเข้มข้นร้อยละ 85 โดยปริมาตร ในอัตราส่วนระหว่างไม้มะขามและกรดฟอสฟอริก 1:3 เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีค่าการดูดซับไอโอดีน เท่ากับ 725 มิลลิกรัมต่อกรัม และถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามมีการดูดซับไอออนตะกั่ว (II) ในสารละลายมีประสิทธิภาพค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 5 เวลาในการปั่นกววน 60 นาที ปริมาณในการดูดซับ 2.0 กรัมต่อลิตร จลนพลศาสตร์การดูดซับเข้ากันได้ดีตามแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมโดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 1.000 ไอโซเทอร์มของการดูดซับสอดคล้องไปตามสมการแลงเมียร์โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 1.000 และค่าการดูดซับไอออนตะกั่ว (II) สูงสุดที่ในสารละลายของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม เท่ากับ 19.06 มิลลิกรัมต่อกรัม มีค่าร้อยละของการกำจัดสารตะกั่วในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตสีทาอาคารและบ้านเรือน เท่ากับ  $100.00 \pm 0.00$  และ  $12.68 \pm 0.11$  ตามลำดับ

เสาวภา ไวยสุศรี (2559 : 475-486) ศึกษาคุณสมบัติการดูดซับฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธ-ฟอสเฟตด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate,  $\text{CaCO}_3$ ) จากเปลือกไข่ไก่และแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide,  $\text{CaO}$ ) จากเปลือกไข่ไก่เผา พบว่าปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับ เมื่อใช้แคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ไก่เป็นตัวดูดซับคือความเป็นกรด-เบส เริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 1 เวลาในการดูดซับ 180 นาที และปริมาณตัวดูดซับ 2.0 กรัม โดยประสิทธิภาพในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตมากกว่าร้อยละ 80 ส่วนการใช้แคลเซียมออกไซด์ จากเปลือกไข่ไก่เผาเป็นตัวดูดซับ พบว่าความเป็นกรด-เบส เริ่มต้นอยู่ในช่วง 4-11 เวลาในการดูดซับ 30 นาทีและปริมาณตัวดูดซับ 0.1 และ 0.5 กรัม ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตมากกว่าร้อยละ 97 และพบว่าการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ไก่เป็นตัวดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอนดิช และแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่เผาเป็นตัวดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ ในการศึกษาความสามารถในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารและโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเหล็ก โดยการใช้สภาวะที่เหมาะสมจากการศึกษาน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ พบว่าผลการทดลองมีความสอดคล้องกันโดยประสิทธิภาพในการดูดซับมากกว่าร้อยละ 73 และ 99 เมื่อใช้แคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ไก่และแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่เผาเป็นตัวดูดซับตามลำดับ

Danish et al. (2014 : 167-178) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงจากเมล็ดอินทผลัม (Date Stone) โดยการกระตุ้นด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริก ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นและอุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนเซชัน เพื่อเตรียมถ่านกัมมันต์จากเมล็ดอินทผลัม พบว่าความเข้มข้นของสารที่กระตุ้นและอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นหรือเผาคาร์บอนเซชันส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพพื้นที่ผิว และผลผลิตของถ่านกัมมันต์อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งใช้เวลาการกระตุ้นครั้งที่ 120 นาที เนื่องจากพบว่าเวลาที่ใช้ในการเผาคาร์บอนเซชันที่นานเกิน 45 นาที ถึง 120 นาที ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกายภาพและลักษณะของพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ นอกจากนี้ยังพบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีพื้นที่ผิวสูงสุดที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริก ร้อยละ 50 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิกระตุ้น 900 องศาเซลเซียส ซึ่งพื้นที่ผิวของถ่านเพิ่มขึ้นจาก 216 ตารางเมตรต่อกรัม ถึง 1,214 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่อเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริกเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1.7 ถึง 50 โดยปริมาตร ตามลำดับ

Demiral and Gundor (2016 : 103-113) ศึกษาการดูดซับทองแดงโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากขานอ้อยซึ่งถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นใช้วิธีการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียวด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริก ในอัตราส่วนของสารละลายกรดฟอสฟอริกต่อขานอ้อย 1:1 2:1 3:1 และ 5:1 โดยมวล โดยใช้อุณหภูมิการคาร์บอนเซชันที่ 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าอัตราส่วนที่ 5:1 ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนที่ดีที่สุดเท่ากับ 1,455 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.88 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งสามารถดูดซับทองแดงได้สูงสุดเท่ากับ 43.47 มิลลิกรัมต่อกรัม

Jalu, Chamada and Kasirajan, (2021 : 100193) ศึกษาการใช้อนุภาคนาโนแคลเซียมออกไซด์สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่เพื่อกำจัดไอออนตะกั่ว (II) ออกจากสารละลายในน้ำ พบว่าที่ความเข้มข้นของไอออนตะกั่ว (II) 75.46 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 6.94 โดยปริมาตร

ตัวดูดซับเท่ากับ 0.838 กรัม ระยะเวลาในการดูดซับ 101.97 นาที สามารถดูดซับไอออนตะกั่ว (II) สูงสุดเท่ากับร้อยละ 99.07 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเทียมโดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 0.9982 และสมการการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 0.9963

Rehman et al. (2019 : 19968-19981) ศึกษาการดูดซับไอออนตะกั่ว (II) โดยใช้อนุภาคนาโนของเฟอร์รัส-เฟอร์ริกออกไซด์ (Ferrous-Ferric Oxide,  $Fe_3O_4$ ) ทิน (IV) ออกไซด์ (Tin(IV) Oxide,  $SnO_2$ ) และไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่ามีความสามารถในการดูดซับสูงสุด เท่ากับ 53.33 47.21 และ 65.65 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งไอออนตะกั่ว (II) ถูกดูดซับในรูปแบบไฮเดรต (Hydrated Form)

Vernersson et al. (2002 : 95-104) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ โดยการกระตุ้นด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริก โดยศึกษาผลของอุณหภูมิในการกระตุ้นระหว่าง 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของสารละลายกรดฟอสฟอริกต่อวัตถุดิบคือ 1.5:1 2:1 2.5:1 โดยมวล และใช้เวลาการกระตุ้น 0 ถึง 1 ชั่วโมง พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีพื้นที่ผิวอยู่ระหว่าง 690 ถึง 1,330 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของสารละลายกรดฟอสฟอริกต่อวัตถุดิบจาก 1.5:1 เป็น 2:1 โดยมวล จะทำให้ถ่านกัมมันต์มีปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้นและโครงสร้างรูพรุนเป็นแบบรูพรุนขนาดกลาง แต่เมื่ออัตราส่วนของกรดต่อวัตถุดิบเพิ่มขึ้นเป็น 2.5:1 โดยมวล ทำให้ปริมาตรรูพรุนลดลงเนื่องจากปริมาณกรดที่มากเกินไปได้เข้าไปทำลายโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์