

บทที่ 2

เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สีย้อม

สีย้อม (Dyestuffs) คือ สีชนิดหนึ่งที่ใช้ในการย้อมเส้นใยของผ้า อาจจะเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ก็ได้ มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด สีย้อมบางชนิดละลายน้ำได้ บางชนิดจะไม่สามารถละลายน้ำแต่จะละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ เมื่อนำสีย้อมไปใช้ในกระบวนการย้อมจะทำให้โมเลกุลของสีย้อมซึมผ่านเข้าไปในโมเลกุลของเส้นใยโดยจะทำลายโครงสร้างผลึกของวัตถุนั้นชั่วคราว ซึ่งอาจเกิดพันธะไอออนิก (Ionic Bond) หรือพันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond) กับวัตถุที่ต้องการย้อมโดยตรง สีที่เห็นจากสีย้อมนั้นเกิดจากอิเล็กตรอนในพันธะคู่ซึ่งอยู่ในโมเลกุลของสีย้อมนั้นมีความสามารถดูดกลืนพลังงานในช่วงสเปกตรัมต่างกัน พลังงานแสงที่สายตามองเห็นจะมีความยาวคลื่นช่วง 400 -700 นาโนเมตร สีย้อมที่มีโครงสร้างทางโมเลกุลต่างกันจะมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ กันไปซึ่งสายตาสามารถรับภาพได้ จึงทำให้โมเลกุลสีย้อมต่าง โทนสีกันแสดงสีให้เราเห็นด้วยสายตาออกมาเป็นต่างกันไป ทั้งนี้เราสามารถแบ่งสีย้อมออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

2.1.1 สีย้อมธรรมชาติ

วัสดุที่นิยมนำมาใช้ทำสีย้อมธรรมชาติจะเป็นส่วนต่าง ๆ ของต้นไม้ เช่น เปลือก แก่น ราก ใบ ดอก และ ผล เป็นต้น ซึ่งจะให้สีที่แตกต่างกันไปเช่น เปลือกประดู่ รากข่อย ดอกคำฝอย ให้สีแดง แก่นขนุน ให้สีเหลือง ต้นคราม ต้นหอม ให้สีน้ำเงิน ผลมะเกลือ ให้สีดำ เป็นต้น การทำน้ำสีจะทำได้ 3 วิธี คือ การต้ม การตำและการแช่ ซึ่งขึ้นกับชนิดของวัสดุที่ทำสีย้อม เช่น การย้อมครั้งจะเตรียมน้ำสีโดยการตำ การย้อมครามใช้วิธีการแช่ สำหรับเปลือกไม้ แก่นไม้ ใบไม้และรากไม้ต่าง ๆ จะใช้วิธีการแช่แล้วนำมาต้ม สำหรับการเตรียมน้ำสีโดยการแช่จะต้องหั่นชิ้นวัสดุของสีให้ชิ้นเล็กที่สุดและตากให้แห้ง น้ำสีจะได้ออกมากที่สุดแล้วนำมาแช่เป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนนำมาต้ม การต้มเนื้อวัสดุให้สีเป็นเวลา 30 นาที แต่ถ้าเป็นวัสดุให้สีสดเป็นพวกใบไม้จะต้มเป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้วกรองเอาน้ำสีการย้อมจะนำเส้นใยที่ทำความสะอาดแล้วมาต้มกับน้ำสีเป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้วแช่เส้นใยไว้ในน้ำสี จนกระทั่งน้ำสีเย็นเพื่อให้เส้นใยดูดสีให้เต็มอ้อมแล้วจึงนำออกมาล้างให้สะอาด การย้อมสีธรรมชาติให้มีคุณภาพจะต้องมีการใช้สารประกอบช่วยเพื่อให้เส้นใยดูดสี และติดสี

ดีขึ้น ซึ่งสารประกอบที่ใช้ได้มาจากวัสดุธรรมชาติเช่นกันเช่น ตัวดูดสีจะใช้ใบยูคาลิปตัส ใบกระถิน เป็นต้น ตัวติดสี จะใช้ใบมะขาม เป็นต้น สารประกอบที่ใช้เติมในการย้อมสีธรรมชาติ จะทำให้สีย้อมที่ได้มีสีแตกต่างกันออกไป ซึ่งเป็นเรื่องที่ย้อมต้องศึกษาและทดลองหาว่าสารประกอบใดใช้กับวัสดุให้สีชนิดใด แล้วจะให้สีใดออกมา ซึ่งวัสดุให้สีชนิดหนึ่งสามารถกันคว่ำสร้างสรรคให้สีได้ถึง 3-5 สี นอกจากนี้ ความอ่อนแก่ของสียังแตกต่างกันไปตามฤดูกาล และความอ่อนแก่ของต้นไม้ที่นำมาใช้เป็นวัสดุย้อมสีอีกด้วยซึ่งเป็นเรื่องที่ไม่ได้ควบคุมด้วยสารเคมี หรือ วิธีการใดแต่เป็นการควบคุมด้วยธรรมชาติ

ปัจจุบันสีอินทรีย์สังเคราะห์ (เช่น สีย้อมอะโซ) ถูกใช้อย่างแพร่หลายในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมสารเคมีที่เกี่ยวกับสี รวมทั้งกระบวนการผลิตสีย้อม โดยกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมได้จำแนกสีย้อมตามวิธีใช้ออกเป็น 11 ประเภท คือ

2.1.1.1 สีเอซิด (Acid Dye or Anionic Dye) สีชนิดนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ มีประจุลบละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน กลไกในการติดสีเกิดเป็นพันธะไอออนิกใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง สีเอซิดบางตัวสามารถนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่าน ไนลอน โยขนแกะ ไหม และอะคริลิกได้ดี วิธีการใช้จะนำสีย้อมที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ไปละลายน้ำย้อมที่เป็นกรดหรือเป็นกลาง สีเอซิดไม่ทนการซักไม่ทนเหงื่อ

2.1.1.2 สีไดเร็กต์ (Direct Dye) หรืออาจเรียกว่าสีย้อมฝ้ายสีชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิคที่ทำให้ตัวสีสามารถละลายน้ำได้ดี ประจุลบนิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส สีจะติดเส้นใยได้โดยโมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใย และยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน สีไม่ทนต่อการซักน้ำ ตกง่าย ทนแสง

2.1.1.3 สีเบสิก (Basic or Cationic Dye) สีย้อมชนิดนี้เป็นเกลือของเบสอินทรีย์(Organic Base) ให้ประจุบ ละลายน้ำได้ นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอนและใยอะคริลิกได้ดีในขณะที่ย้อมโมเลกุลของสีส่วนที่มีประจุบจะยึดจับกับโมเลกุลของเส้นใย เป็นสีที่ติดทน ไม่ควรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติเพราะจะไม่ทนการซักและแสง

2.1.1.4 สีดิสเพอร์ส (Disperse Dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำแต่มีสมบัติกระจายได้ดี สามารถย้อมเส้นใยอะซิเตท เส้นใยโพลีเอสเตอร์ ไนลอน และอะคริลิกได้ดี การย้อมจะใช้สารพา (Carrier) เพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใยหรือย้อมโดยใช้อุณหภูมิ และความดันสูงสีดิสเพอร์สเป็นสีที่ทนแสงและการซักฟอกค่อนข้างดี แต่สีจะซีดถ้าถูกควนหรือแก๊สบางชนิด เช่น แก๊สไนตรัสออกไซด์ สีดิสเพอร์สแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม โดยพิจารณาจากเคมีในตัวสีย้อม ได้แก่ สีย้อมอะโซ (Azo Dyes) และสีย้อมแอมมิโน แอนทราควิโนน (Amino Anthraquinone) ซึ่ง

ทั้ง 2 กลุ่มประกอบด้วยอนุพันธ์ของเอทานอลามีน (Ethanalamine; $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2$) หรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกัน

2.1.1.5 สีรีแอคทีฟ (Reactive Dye) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นด่าง สีย้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกไซด์ (OH^-) ของเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสภาวะที่เป็นด่าง กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สีรีแอคทีฟมี 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง 70-75 องศาเซลเซียส และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิต่ำ สีรีแอคทีฟให้สีที่สดใส ทุกสีติดทนในทุกสภาวะ

2.1.1.6 สีอะโซอิก (Azoic Dye) สีย้อมชนิดนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ การที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อน ซึ่งเป็นกระบวนการทำให้รวมตัวเป็นสี (Coupling) แล้วย้อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโปเนนท์จึงจะเกิดเป็นสีได้ สีอะโซอิกใช้ย้อมเส้นใยได้ทั้งเซลลูโลส ไนลอน หรืออะซิเตท สีอะโซอิกเป็นสีที่ทนต่อการซัก แต่ไม่ทนต่อการขัดถู

2.1.1.7 สีแว็ต (Vat Dye) เป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อทำการย้อมต้องเตรียมน้ำย้อมให้ สีแว็ตละลายน้ำโดยให้ทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ สีแว็ตจะถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็นเกลือจึงซึมเข้าไปในเส้นใยได้ เมื่อนำผ้าไปผึ่งในอากาศสีในเส้นใยจะถูกออกซิไดส์เป็นสีแว็ตสีย้อมชนิดนี้มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ สีอินดิโก (Indigoid) และสีแอนทราควินอยด์ (Antraquinoid)

2.1.1.8 สีมอร์แดนต์ หรือ โครม (Mordant or Chrome Dye) สีย้อมชนิดนี้ต้องใช้สารช่วยติดเข้าไปช่วยเพื่อให้เกิดการติดสีบนเส้นใย สารที่ช่วยติดที่ใช้คือ สารประกอบออกไซด์ของโลหะ เช่น โครเมียม ดีบุก เหล็ก อะลูมิเนียม เป็นต้น สีมอร์แดนต์เป็นสีที่มีโมเลกุลใหญ่ซึ่งเกิดจาก สีมอร์แดนต์หลายโมเลกุลจับกับโลหะแล้วละลายน้ำได้จึงทำให้ย้อมได้ง่าย ซึ่งใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและเส้นใยพอลิเอไมด์ได้ดี

2.1.1.9 สีอินเกรน เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ โดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยากับน้ำสีย้อมชนิดนี้ใช้สำหรับย้อมผ้า

2.1.1.10 สีออกซิเดชัน (Oxidation Dye) เป็นสีที่มีละลายน้ำโดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำโดยสีจะติดแน่น อาศัยปฏิกิริยาการตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย ใช้สำหรับย้อมผ้าและขนสัตว์

2.1.1.11 สีซัลเฟอร์ (Sulfur Dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อทำการย้อมต้องรีดิวซ์สี เพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ แต่สีซัลเฟอร์บางชนิดที่ผลิตออกมาจำหน่ายในรูปที่ถูกรีดิ

วซ์จะละลายน้ำได้ นิยมนำสีซัลเฟอร์มาข้อมฝ้าย สีจะติดทน และยังเป็นสีที่มีราคาถูก แต่สีที่อ่อนจะไม่ทนต่อการซัก (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556)

2.1.2 สีข้อมในอุตสาหกรรมฟอกข้อม

ปัจจุบันปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะมลพิษทางน้ำที่เกิดจากการเจริญเติบโตทางอุตสาหกรรมนับทวีความรุนแรงมากขึ้น โดยเฉพาะอุตสาหกรรมสิ่งทอซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่มีการขยายตัวสูง ทำให้มีการพัฒนาทั้งทางด้านกระบวนการผลิตและการแข่งขันที่สูงขึ้นเพื่อเพิ่มปริมาณสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ให้มากขึ้น น้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ต้องใช้ร่วมกับวัตถุดิบในทุกขั้นตอนการผลิต ไม่ว่าจะเป็นการผลิตเส้นใย การปั่น การทอ การดักผ้า และการฟอกข้อมก็ตาม โดยวัตถุดิบที่ใช้ เช่น สีข้อมผ้า สารเคมี เป็นต้น บางชนิดละลายน้ำได้ บางชนิดละลายน้ำไม่ได้ จึงทำให้น้ำมีสภาพที่แปรเปลี่ยนไปที่เราเรียกว่าน้ำเสีย เช่น อุณหภูมิสูงขึ้น มีกลิ่น มีสี ตลอดจนทำให้สิ่งมีชีวิตที่อยู่ในน้ำตาย เนื่องจากมีสารอินทรีย์ในน้ำปริมาณที่สูงทำให้ขาดออกซิเจนและผลกระทบของน้ำเสียนี้ยังเป็นตัวยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ต่าง ๆ ในกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ โดยส่วนมากแล้วมลสารเหล่านี้และสีบางประเภทสามารถบำบัดได้ด้วยวิธีทางกายภาพและทางเคมีทั่ว ๆ ไป แต่มีสีบางประเภทที่ไม่สามารถบำบัดได้ด้วยวิธีการดังกล่าว ซึ่งสีที่ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกข้อมมีหลายชนิด เช่น สีรีแอกทีฟ สีเอซิด สีเบสิก สีไดเร็กซ์ สีเว็ท สีดีสเพอร์ส เป็นต้น จากผลเสียของการมีสีข้อมปนเปื้อนในน้ำทั้งดังกล่าวมาข้างต้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการวางแผนการจัดการสิ่งแวดล้อมของโรงงานเพื่อป้องกันปัญหามลพิษที่แหล่งกำเนิดและช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียขั้นสุดท้าย โดยได้มีการศึกษาเทคโนโลยีที่ใช้ในระบบบำบัด น้ำเสียเพื่อให้ได้คุณภาพน้ำทิ้งที่ได้มาตรฐานตามเกณฑ์ที่กำหนด (พชรวรรณ อึ้งศิริสวัสดิ์ และเฉลิม เรื่องวิริยะชัย, 2559, น. 344)

2.2 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ (Adsorption) เป็นการเคลื่อนย้ายมวลสาร (Mass Transfer) มาสะสม (Accumulation) ที่ผิวหน้าหรือระหว่างผิว โดยให้สารละลายที่มีตัวถูกละลาย (Adsorbate) ไหลสัมผัสกับของแข็งที่เป็นวัสดุดูดซับ (Adsorbent) องค์ประกอบแต่ละชนิดของสารละลายจะมีความสามารถในการกระจายที่ผิวและเกิดแรงดึงดูดกับวัสดุตัวดูดซับได้ต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้าง พื้นที่ผิว และรูพรุนของตัวดูดซับ ประกอบกับความสามารถในการละลายของตัวถูกละลาย (Lyphobic, Solvent Disliking) และความชอบของตัวถูกละลายที่มีต่อวัสดุตัวดูดซับ (Specific affinity) แต่การดูดซับไม่รวมถึงขบวนการตกตะกอนที่พื้นผิว (Surface Precipitation Process) หรือขบวนการโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization Process) ซึ่งหากไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่ากลไก

ที่ทำให้ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลาย เกิดจากการดูดซับ หรือการตกตะกอนที่พื้นผิว หรือขบวนการโพลีเมอร์ไรเซชัน หรือขบวนการอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นที่ผิวแล้ว โดยทั่วไปจะใช้คำว่า Sorption (Danald, 1995)

2.2.1 กลไกการดูดซับ (Adsorption Mechanism)

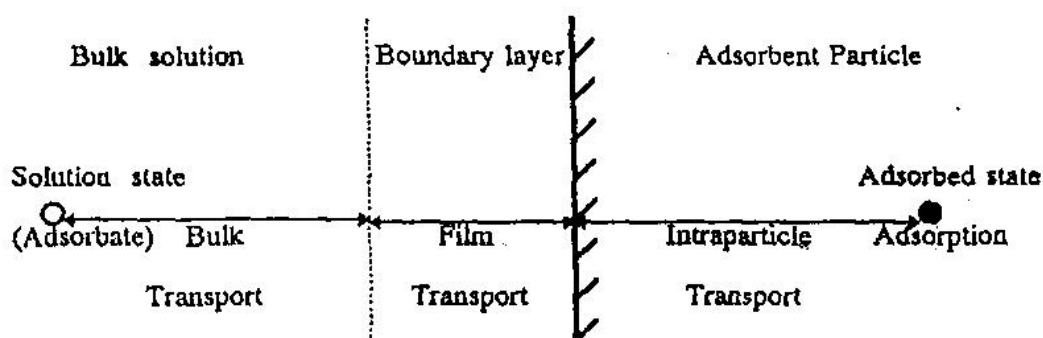
กลไกการดูดซับเป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลายเข้าไปในตัวดูดซับ เกิดขึ้นเป็นขั้นตอนย่อย 4 ขั้นตอนติดต่อกัน (Sanuel and Osman, 1987; McKay, Blair and Gardner, 1983) ดังภาพที่ 2.1

ขั้นตอนที่ 1 (Bulk Transport) เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลาย (Mass Transfer) จากสารละลาย (Bulk Solution) ไปยังผิวฟิล์มน้ำหรือโมเลกุลน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 (Film Transport) เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลาย (Mass Transfer) ข้ามฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 (Intraparticle Transport หรือ Pore Transport) เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลาย (Mass Transfer) เข้าไปภายในรูพรุนของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 4 (Adsorption) เป็นการดูดซับระหว่างตัวถูกละลายกับ Active Sites บนผิวตัวดูดซับ เกิดขึ้นเร็วมากและอาจดูดติดผิวด้วยแรงทางกายภาพและทางเคมี หรือทั้ง 2 แรงพร้อมกัน



ภาพที่ 2.1 ขั้นตอนการเคลื่อนตัวของตัวถูกละลายในขบวนการ Adsorption. ปรับปรุงจาก *The Adsorption of dyes in Chitin intraparticle Diffusion Process* (pp. 1767-1778.), โดย McKay, G., Blair, H.S. and Gardner, J., 1983, *Journal of Applied Polymer Science*.

2.2.2 ลักษณะของการดูดซับ

2.2.2.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) เกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับองค์ประกอบที่ถูกละลาย มีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของ

องค์ประกอบในสารละลาย ทำให้องค์ประกอบยึดติดแน่นบนผิวของตัวดูดซับด้วยแรงทางกายภาพ ได้แก่ แรงทางไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Force) ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับสารที่ไม่มีขั้วหรือกับสารที่มีขั้ว และแรงแวนเดอวาลล์ (Van der Waal's Force)

2.2.2.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption) เกิดจากการสร้างพันธะเคมีบนผิวของตัวดูดซับด้วยการให้และใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ความร้อนที่เกิดหรือต้องใช้ในปฏิกิริยาสูงกว่าการดูดซับทางกายภาพ และการเกิดจะขึ้นกับองค์ประกอบและสถานะแวดล้อมที่เหมาะสม องค์ประกอบบางชนิดที่อุณหภูมิปกติไม่เกิดการดูดซับทางเคมีแต่เมื่อเพิ่ม อุณหภูมิก็สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้โดยการดูดซับจะเกิดบนพื้นผิวเฉพาะบางแห่งเท่านั้น ต่างจากการดูดซับทางกายภาพที่สามารถเกิดได้บนพื้นผิวทั้งหมด การดูดซับแบบนี้ไม่สามารถเกิดการคายการดูดซับ เพราะองค์ประกอบที่ถูกดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบผันกลับไม่ได้ (Danald, 1995)

2.2.3 แรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ

ในการดูดซับตัวถูกละลายจากสารละลาย จะเกิดการดูดซับด้วยแรงทางกายภาพ (Physical Force) และแรงทางเคมี (Chemical Force) โดยแรงทางกายภาพ ได้แก่ แรงแวนเดอวาลล์และแรงไฟฟ้าสถิตย์ เกิดที่บริเวณผิวรอบนอกของสารประกอบ เช่น Ion Exchange ส่วนแรงทางเคมีจะเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดปฏิสัมพันธ์ (Interaction) เกิดเป็นสารประกอบติดผิวตัวดูดซับด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent Bonding) และพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bonding) (Danald, 1995)

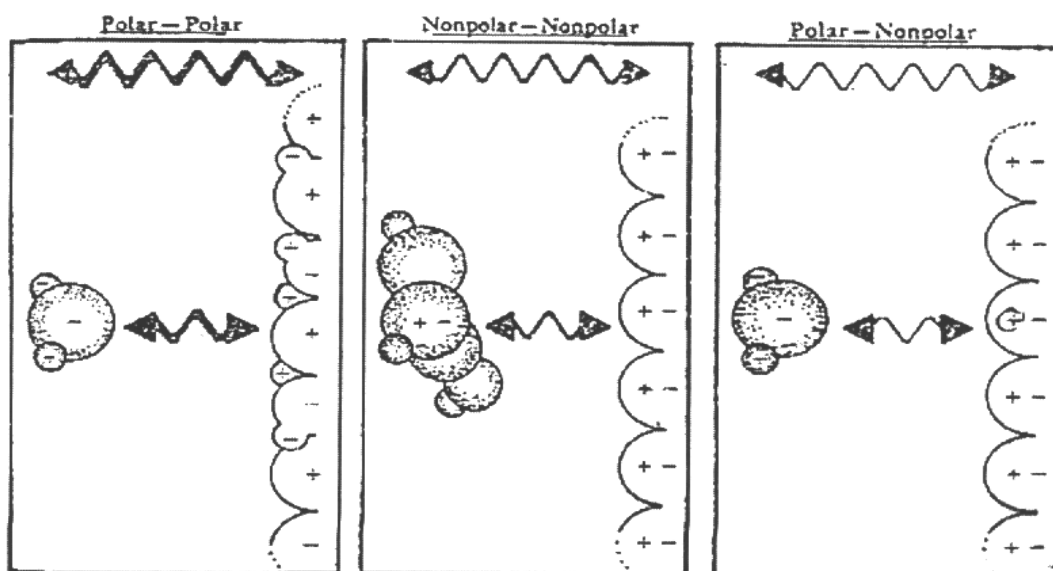
2.2.3.1 แรงแวนเดอวาลล์ (Van der Waal's Force) อะตอมที่อยู่อย่างอิสระหรือโมเลกุลที่อยู่ในสภาพไม่มีขั้ว สามารถเกิดแรงดึงดูดอ่อน ๆ ได้ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างไม่เป็นระเบียบในอะตอมหรือโมเลกุลนั้น ทำให้มีความหนาแน่นของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในแต่ละบริเวณภายในอะตอมหรือโมเลกุลไม่เท่ากันมีผลให้เกิดสภาพขั้วขึ้น (ชิววัฒน์, 2522) และสามารถถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับได้ การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานในการดูดซับต่ำ จึงเป็นการเกาะจับกันด้วยแรงอ่อน ๆ ดังนั้นการคายการดูดซับจะสามารถกระทำได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดีเพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่าย

2.2.3.2 แรงทางไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Force) เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วเข้าด้วยกัน หรือระหว่างสารที่ไม่มีขั้วกับสารที่มีขั้ว ซึ่งการเกาะจับของโมเลกุลชนิดต่าง ๆ เหล่านี้ เกิดจากผล 3 อย่าง (ภาพที่ 2.2) ดังนี้

1) แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วเกิดจากการจัดเรียงโมเลกุล (Orientation Effect) ที่มีขั้ว 2 โมเลกุล คือ ขั้วลบของโมเลกุลหนึ่งกับขั้วบวกของอีก โมเลกุลหนึ่ง ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงกันข้าม

2) แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (Non-polar Molecule) เกิดจากผลของการกระจายตัว (Dispersion Effect) ซึ่งเป็นผลจากการที่โมเลกุลที่ไม่มีขั้วสามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลโมเลกุลได้เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปอยู่ด้านใดด้านหนึ่งมาก และเมื่อมีโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีลักษณะเช่นเดียวกันเข้ามาก็จะเกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกันและมักเป็นแรงที่อ่อน เช่น อินทรีย์สารและถ่านกัมมันต์ ทั้งนี้เนื่องจากอินทรีย์สารส่วนใหญ่ จะเป็น โมเลกุลที่ไม่มีขั้ว

3) แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้วเป็นผลเนื่องมาจากการเหนี่ยวนำ (Induction Effect) โดยโมเลกุลที่มีขั้วเข้ามาอยู่ใกล้โมเลกุลที่ไม่มีขั้ว แล้วเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ตรงกันข้ามซึ่งจะทำให้เกิดการดึงดูดซึ่งกันและกัน



ภาพที่ 2.2 การดูดซับของสารดูดซับด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิต. ปรับปรุงจาก การศึกษาความสามารถในการดูดซับสีของฟางข้าวในระหว่างการย้อมผ้า (น. 14), โดย ประสงค์ ชุ่มใจหาญ และสุพรรณามิถาวร, 2555, กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณลาดกระบัง.

2.2.3.3 แรงทางเคมี เป็นการยึดเหนี่ยวกันระหว่างไอออน กับตัวดูดซับ เนื่องจากการทำ ปฏิกิริยาของหมู่ฟังก์ชัน (Functional Group) ที่ผิวของตัวดูดซับกับไอออนของโลหะหนัก แล้วเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน แรงทางเคมีมีลักษณะดังนี้

1) เป็นพันธะที่เกิดจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน หรือให้อิเล็กตรอนหรือเกิดจากการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน มีผลทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวกันแรงกว่าแรงทางฟิสิกส์

2) ไม่สามารถเปลี่ยนกลับไปกลับมาได้ (Irreversible) เพราะยึดเหนี่ยวด้วยแรงที่มากและมีการจับกันเป็นสารประกอบเคมี

2.2.4 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางเคมีและกายภาพ

การดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ มีความแตกต่างกัน ดังนี้

2.2.4.1 การแยกโมเลกุลที่ถูกดูดซับทางเคมีออกจากตัวดูดซับไม่สามารถทำได้ หรือทำได้ยาก ในขณะที่โมเลกุลซึ่งถูกดูดซับทางกายภาพสามารถแยกออกได้ โดยการเพิ่มอุณหภูมิ หรือลดความดัน

2.2.4.2 ในการดูดซับทางเคมี โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะสร้างพันธะเคมีที่ผิวของตัวดูดซับด้วยการให้และใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน ส่วนการดูดซับทางกายภาพ จะเกิดจากผลของแรงดึงดูดระหว่างขั้วของโมเลกุล และอิทธิพลของการแพร่

2.2.4.3 การดูดซับทางเคมีนั้น โมเลกุลของวัสดุตัวถูกดูดซับจะยึดเกาะผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) และการดูดซับจะหยุดลง เมื่อบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาที่ผิวของวัสดุดูดซับหมดไป ในขณะที่การดูดซับทางกายภาพ ซึ่งเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์นั้น ตัวถูกดูดซับจะยึดเกาะบนผิวเองวัสดุดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer)

2.2.4.4 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ อัตราการดูดซับทางเคมีจะเพิ่มขึ้น แต่อัตราการดูดซับทางกายภาพจะลดลง

2.2.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

ตัวถูกดูดซับจะสามารถเกาะ หรือกระจายที่ผิวของวัสดุดูดซับ ได้มากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุดูดซับ ตัวถูกดูดซับ และสถานะในการดูดซับ โดยมีปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ (วิวรรณ ขจรเกียรติคุณ, 2539)

2.2.5.1 คุณสมบัติของตัวดูดซับ

1) พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน (Surface Area and Pore Structure)
พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับประสิทธิภาพของการดูดซับ โดยพื้นที่ผิวในการดูดซับมากขึ้น ประกอบกับมีโครงสร้างรูพรุนช่วยเพิ่มพื้นที่ในการดูดซับจะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นเพราะขบวนการดูดซับเกิดขึ้นที่พื้นที่ผิวเป็นส่วนใหญ่

2) ขนาดของตัวดูดซับ ในกรณีที่สารดูดซับไม่มีรูพรุน เมื่อขนาดของตัวดูดซับลดลงพื้นที่ผิวในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงขึ้นตามไปด้วย แต่ถ้าสารดูดซับมีรูพรุนมาก ๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน เพราะฉะนั้นในกรณีนี้ความสามารถในการดูดซับจะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของวัตถุ

3) หมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่ผิวหน้า หมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่อยู่บนผิวของวัสดุดูดซับ จะมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ เนื่องจากสามารถยึดเหนี่ยวตัวถูกดูดซับแล้วเกิดเป็นการดูดซับทางเคมีได้

2.2.5.2 คุณสมบัติของวัสดุดูดซับ

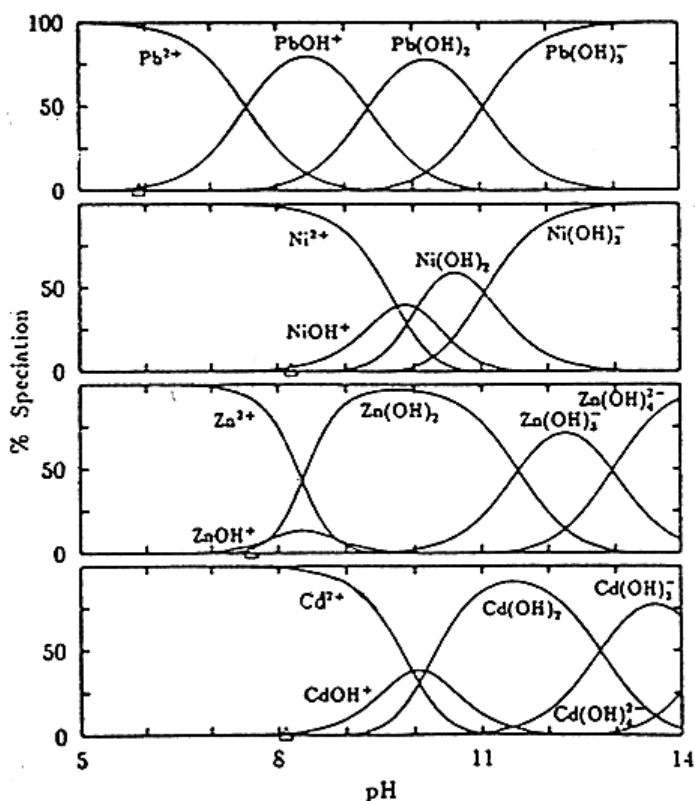
1) ความสามารถในการละลาย ความสามารถในการดูดซับ โมเลกุลของตัวถูกละลายมีความสัมพันธ์กับการละลาย คือถ้าตัวถูกละลายมีความสามารถในการละลายสูง แรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกละลายกับตัวทำละลายมีค่ามาก โมเลกุลของตัวถูกละลายจะถูกแยกออกจากสารละลายไปเกาะติดบนผิวของวัสดุดูดซับได้ยาก ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับไม่สูง ส่วนสารที่ไม่ละลายหรือละลายได้น้อยจะสามารถเกาะติดบนผิววัสดุดูดซับได้ดีกว่า

2) น้ำหนักและขนาดของโมเลกุล เมื่อน้ำหนักและขนาดของตัวถูกละลายเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุล ทำให้ความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายที่เป็นสารอินทรีย์ลดลง และการดูดซับในรูพรุน จะเกิดได้ดีเมื่อตัวถูกละลายมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนเล็กน้อย เพราะตัวถูกละลายสามารถเข้าไปในรูพรุนเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ

2.2.5.3 สภาพในการดูดซับ

1) ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่า pH ของสารละลายมีผลต่อการเปลี่ยนรูป (Species) ของโลหะหนัก เช่น การเปลี่ยนรูปของโลหะหนักกลุ่มประจุบวกสอง (Divalency Ion) ได้แก่ ตะกั่ว (Pb^{2+}) นิกเกิล (Ni^{2+}) สังกะสี (Zn^{2+}) และแคดเมียม (Cd^{2+}) ดังภาพที่ 2.3

2) อุณหภูมิ อุณหภูมิมีผลต่อประสิทธิภาพและอัตราเร็วของการดูดซับ เนื่องจากการยึดเกาะระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกละลายเกี่ยวข้องกับชนิดของพันธะที่ยึดเหนี่ยวกัน ถ้าปฏิกิริยาการดูดซับเป็นชนิดคายความร้อน การดูดซับจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่ถ้าเป็นชนิดดูดความร้อน การดูดซับจะมากขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น และอัตราเร็วของการดูดซับจะแปรผันตามอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อัตราเร็วจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยนั้นไม่มีผลต่อการดูดซับ



ภาพที่ 2.3 การเปลี่ยนรูปของโลหะหนักในกลุ่มประจุบวกสอง ในสารละลายที่มีค่า pH ต่าง ๆ. ปรับปรุงจาก Adsorption of heavy metals by silicon and aluminium oxide surfaces on clay minerals (pp. 267-273), โดย Schuthess, C.P. and Huang, C.P., 1990, *Soil Science American Journal*, 54.

2.2.6.1 ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) (Weber, 1972)

ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นเส้นที่ลากขึ้นมาเพื่อบอกถึงปริมาณการดูดซับสาร หรือไอออนบนผิวของวัสดุดูดซับต่าง ๆ เส้นนี้เกิดจากการลากเส้นต่อกันระหว่างจุดต่าง ๆ ที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารหรือไอออนที่ถูกดูดซับไว้ต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับกับความเข้มข้นของสารหรือไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ โดยทั่วไปการศึกษาการดูดซับมักพบไอโซเทอมใน 5 ลักษณะ ดังภาพที่ 2.4 ซึ่งจำแนกจากลักษณะความโค้งของความชันของเส้นไอโซเทอมในช่วงเริ่มต้น

Type I Isotherm (ภาพที่ 2.4 a) พบมากที่สุดเป็นการดูดซับ โดยที่มีชั้นของตัวถูกดูดซับคลุมที่ผิวของตัวดูดซับได้หนาหนึ่งโมเลกุล (single layer adsorption) พบทั้งการดูดซับทางเคมี และการดูดซับทางฟิสิกส์ จะเป็นปรากฏการณ์การดูดซับของ Microporous powders ซึ่งปริมาณของ

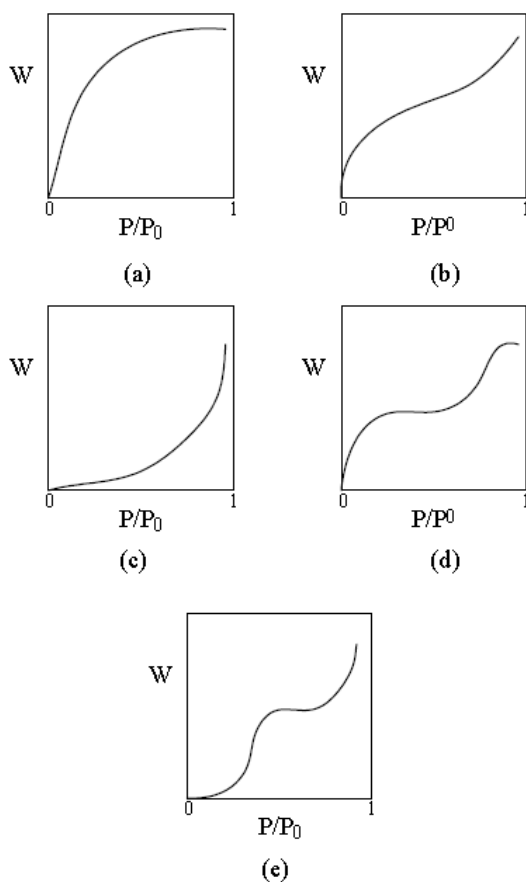
การดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (Relative pressure) ต่ำ ๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูงเข้าใกล้หนึ่ง จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งถ้ามีการดูดซับแบบนี้แสดงว่าผลิตภัณฑ์มีรูพรุนเป็น Microporous และมีปริมาณมากเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวภายนอกของผลิตภัณฑ์

Type II Isotherm (ภาพที่ 2.4 b) พบมากในปรากฏการณ์การดูดซับที่มีชั้นของตัวถูกดูดซับหนาขึ้นเรื่อย ๆ (ปริมาณที่ถูกดูดซับเข้าสู่ค่านันต์) โดยจะเกิดบน Nonporous Powder ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนกว้างกว่า Microporous (1.5 นาโนเมตร) ที่จุดเปลี่ยนกราฟ (Inflection Point or Knee of Isotherm) เกิดขึ้น เมื่อการดูดซับบนพื้นผิวชั้นแรกเกิดเกือบสมบูรณ์แล้ว (เป็น Monolayer เกือบสมบูรณ์) และถ้าเพิ่ม Relative Pressure จะทำการดูดซับเกิดมากกว่า 1 ชั้น ดังนั้นการดูดซับแบบนี้จะเป็นการดูดซับแบบ Multilayer

Type III Isotherm (ภาพที่ 2.4 c) การดูดซับคล้าย Type II แต่การดูดซับของชั้นแรกนั้นให้ความร้อนออกมาน้อยกว่าความร้อนของการควบแน่น เป็นลักษณะเฉพาะของการเกิดความร้อนของการดูดซับ (Heat of Adsorption) มีน้อยกว่าความร้อนของการจับตัวกันของตัวถูกดูดซับที่เป็นของเหลว (The Adsorbate Heat of Liquefaction) ดังนั้นการดูดซับที่เพิ่มขึ้น เกิดเพราะตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยากับชั้นของตัวถูกดูดซับมากกว่าเกิดปฏิกิริยากับผิวของตัวดูดซับ

Type IV Isotherm (ภาพที่ 2.4 d) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดบนตัวดูดซับที่มีรูพรุนประมาณ 15-1,000 อังสตรอม การดูดซับคล้าย Type II สำหรับความหนาของชั้นโมเลกุลชั้นแรก ๆ แต่การดูดซับจะถึงจุดอิ่มตัวเนื่องจากรูพรุนแคปิลารีภายในตัวดูดซับเต็มหมดแล้ว ความชันที่เพิ่มขึ้นเมื่อ Relative Pressure เพิ่มขึ้นชี้ให้เห็นว่าตัวถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนได้มากขึ้น ปรากฏการณ์ที่มีจุดเปลี่ยนของเส้นกราฟนี้เกิดเช่นเดียวกับใน Isotherm Type II คือเกือบเป็น Monolayer สมบูรณ์

Type V Isotherm (ภาพที่ 2.4 e) การดูดซับคล้าย Type III ในช่วงความเข้มข้นต่ำ แต่การดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จะเข้าสู่ค่าสูงสุดหนึ่งเช่นเดียวกับ Type IV เป็นปรากฏการณ์การดูดซับที่เป็นผลจากแรงดึงดูดและตัวดูดซับมีค่าน้อย ๆ โดยขนาดของรูพรุนอยู่ในช่วงประมาณ 15-1,000 อังสตรอม



ภาพที่ 2.4 รูปแบบ Adsorption Isotherm (W : Weight adsorbed ; P0 : adsorbate equilibrium pressure ; P : adsorbate saturated equilibrium pressure ; P/P0 relative pressure). ปรับปรุงจาก การศึกษาความสามารถในการดูดซับสีของฟางข้าวในระหว่างการย้อมผ้า (น.14), โดย ประสงค์ ชุ่มใจหาญ และสุพรรณษา มีถาวร, 2555, กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

2.2.6.2 สมการที่ใช้อธิบายไอโซเทอม

การอธิบายไอโซเทอมของการดูดซับ จะนิยมเปลี่ยนเส้นโค้งให้อยู่ในรูปเส้นตรง แล้วคำนวณหาค่าต่าง ๆ ด้วยสมการเพื่อใช้อธิบายการดูดซับ โดยสมการที่ใช้มีหลายแบบ แต่ที่นิยมใช้และจะอธิบายได้แก่ รูปแบบของสมการ Langmuir Adsorption Isotherm และ Freundlich Adsorption Isotherm

1) Langmuir Adsorption Isotherm (Danald, 1995; ศิริโรจน์ ศรีเกษเพชร, 2543) แบบจำลองนี้พัฒนามาจากแนวความคิดที่ว่า เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้นจำนวนตัวถูกดูดซับ ที่ถูกจับกับตำแหน่ง Binding Sites บนตัวดูดซับก็มากขึ้นขีดขวางการจับของโมเลกุล

อื่น ดังนั้นอัตราการดูดซับจึงเป็นส่วนระหว่างตำแหน่ง Binding Sites ที่ว่างบนตัวดูดซับกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ และที่สถานะสมดุลอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายการดูดซับ ลักษณะการดูดซับจึงเป็นลักษณะ Monomolecular Layer โดยมีสมมติฐาน ดังนี้

1.1) การดูดซับมีลักษณะเป็น Monomolecular Layer คือ มีจำนวนตำแหน่งที่เกิดการดูดซับแน่นอน และเมื่อเกิดการดูดซับแล้ว ไอออนหรือโมเลกุลจะไม่ซ้อนทับซึ่งกันและกัน หรือชั้นของตัวถูกดูดซับมีความหนาเท่ากันหมด

1.2) เมื่อดูดซับแล้ว ตัวถูกดูดซับจะไม่มีการเคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนตำแหน่งกันในพื้นที่ผิวสัมผัส และตัวถูกดูดซับจะไม่มีผลกระทบต่อกัน

1.3) พื้นที่ผิวในการดูดซับมีตำแหน่งและกลไกการดูดซับเหมือนกัน ทำให้โครงสร้างของสารเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นเหมือนกัน เป็น Homogeneous Surface

1.4) พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุก ๆ พื้นที่ของตัวดูดซับ

2) Freundlich Adsorption Isotherm สมการของ Freundlich นี้ตั้งอยู่บนสมมติฐานว่า

2.1) การดูดซับมีลักษณะเป็น monolayer

2.2) ใช้กับกรณีการถ่ายเทพลังงานผ่านพื้นผิวแบบไม่เป็นเนื้อเดียว

2.3) ใช้ได้ดีกับตัวถูกดูดซับที่มีแนวโน้มถูกดูดได้ง่ายและมีความเข้มข้นต่ำถึงปานกลาง สมการของ Freundlich แสดงได้ดังนี้

$$q_e = X / M = KCe^{(1/n)} \quad (2-1)$$

หรือเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรง

$$\log q_e = \log K + (1/n) \log C_e \quad (2-2)$$

โดย

K = Adsorption Capacity (มิลลิกรัม/กรัม)

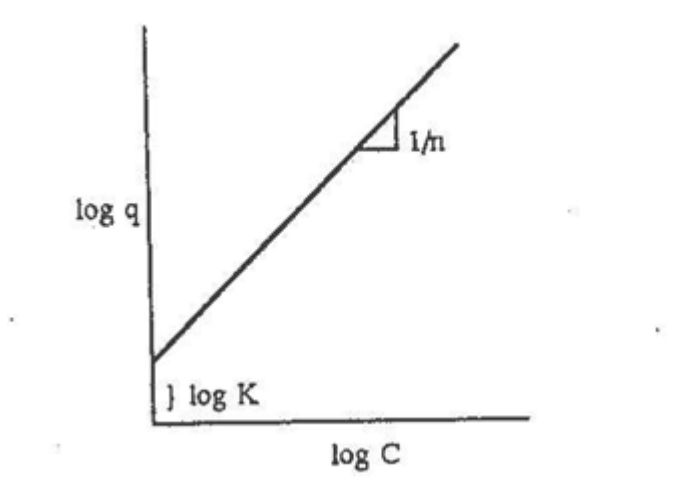
1/n = Adsorption Intensity

X = น้ำหนักของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (มิลลิกรัม)

M = น้ำหนักของตัวดูดซับ (กรัม)

- C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลาย
เมื่ออยู่ใน สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)
- q_e = จำนวนโมเลกุลของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อ
หนึ่งหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับที่ความเข้มข้น C_e

เมื่อนำ ค่า $\log q_e$ กับ $\log C_e$ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ โดยให้ $\log q_e$ เป็นแกน y และ $\log C_e$ เป็นแกน x จะได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ $1/n$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\log K$ (ภาพที่ 2.5) เมื่อ $1/n$ มีค่าเข้าใกล้ 1 หรือมีความชันมากจะแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเพียงเล็กน้อยก็จะมีผลต่ออัตราการดูดซับมาก คือ เมื่อความเข้มข้นต่ำ อัตราการดูดซับก็จะต่ำและจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น แต่เมื่อ $1/n \ll 1$ หรือความชันต่ำมากจนบางครั้งเกือบจะชิดแกน x นั้นแสดงว่า อัตราการดูดซับเมื่อความเข้มข้นต่ำหรือสูงจะไม่แตกต่างกันมากนัก หรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นจะไม่มีผลต่ออัตราการดูดซับ อย่างไรก็ตามจากลักษณะของ Freundlich Isotherm จะสังเกตเห็นว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นเรื่อย ๆ トラบเท่าที่ความเข้มข้นของไอออนหรือโมเลกุลในสารละลายมีสูงขึ้น ซึ่งก็เป็นข้อเสียของสมการ Freundlich ที่สำคัญข้อหนึ่งคือไม่สามารถทำนายการดูดซับสูงสุดได้



ภาพที่ 2.5 ลักษณะของ Freundlich Adsorption Isotherm. ปรับปรุงจาก Adsorption of heavy metals by silicon and aluminium oxide surfaces on clay minerals (pp. 267-273) โดย Schuthess, C.P. and Huang, C.P., 1990, Soil Science American Journal, 54.

2.3 วัสดุดูดซับ

วัสดุดูดซับ คือ วัสดุที่มีรูพรุนมาก มีพื้นที่ผิวสูง ความสามารถในการดูดซับสารต่าง ๆ ได้ดี วัสดุดูดซับที่นิยมใช้ ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ซีโอไลต์ (Zeolite) เป็นต้น (จิรภัทร์ อนันต์ภัทรชัย และพวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกูล, 2559) แต่ก็มีตัวดูดซับชนิดอื่น ๆ ที่ใช้งานได้ดีไม่ต่างจากถ่านกัมมันต์ เช่น เพอร์ไลต์ (Perlite) เบนโทไนท์ (Bentonite)

2.3.1 เบนโทไนท์



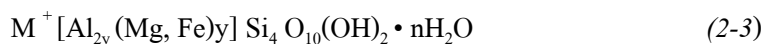
ภาพที่ 2.6 เบนโทไนท์ (<http://www.tewada9.com/bentonite.html>, 2017)

ดินเหนียวเนื้อละเอียดชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยแร่ดินกลุ่มสเมกไทต์ (Smectite Group) เป็นหลัก มีชื่อเรียกว่า เบนโทไนท์สเมกไทต์ เป็นกลุ่มแร่ฟิลโลซิลิเกตที่มีโครงสร้างทางโมเลกุลเป็นแผ่น ประกอบด้วย แร่มอนต์มอริลโลไนต์ไบคัลเคลไลต์นอนโทรไนต์ ซาโปไนต์ และเฮคทอไรต์ ดังภาพที่ 2.6 (เลิศลักษณ์ สุพฤติพานิชย์, 2539)

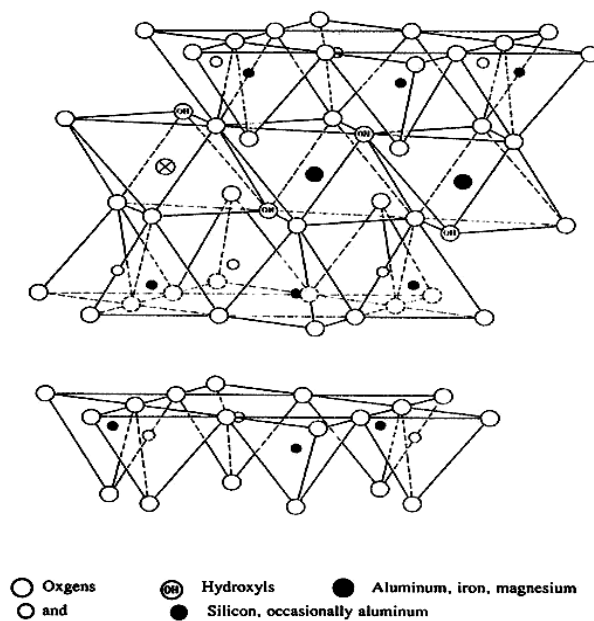
เบนโทไนท์เป็นแร่ดิน (Bentonite Clay) ที่มีคุณสมบัติการพองตัวสูง เมื่อทำละลายกับน้ำ ถูกตั้งชื่อจากสถานที่ ที่มีการขุดขึ้นมาใช้ในเชิงพาณิชย์เป็นครั้งแรก คือที่ ฟอर्टเบนทอน มลรัฐไวโอมิ่ง สหรัฐอเมริกา (Fort Benton, Wyoming USA) ในทางธรณีวิทยา แร่เบนโทไนท์ อยู่ในตระกูลของแร่ดิน มีสัดส่วนจำนวนธาตุองค์ประกอบที่ แตกต่างกันไปตามแหล่งที่พบ ซึ่งทำให้เกิดลักษณะทางกายภาพและทางเคมีที่ไม่ซ้ำกัน ในทางทรัพยากรธรณี แร่เบนโทไนท์ ประกอบด้วย แร่มอนต์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite) เป็นหลัก ปะปนอยู่ร่วมกับแร่ธาตุต่าง ๆ เช่น เฟลด์สปาร์ Feldspar, แคลไซต์ (Calcite) ซิลิกา (Silica) ยิปซัม (Gypsum) ฯลฯ แร่มอนต์มอริลโลไนท์ Montmorillonite

อยู่ในกลุ่มดินสเมคไทต์ (Smectite) ซึ่งรวมถึงแร่ที่มีคุณสมบัติการทำงานคล้ายคลึงกัน เช่น ไบเดลไลต์ (Beidellite) ซาโปไนต์ (Saponite) เฮคโตไรต์ (Hectorite)

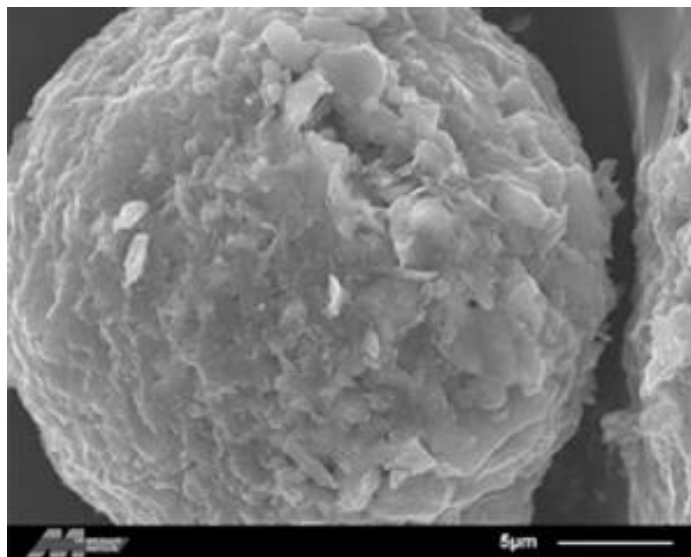
โครงสร้างพื้นฐานของ แร่มอนต์มอริลโลไนต์ คือมีลักษณะเป็นแผ่นหรือเกล็ด ที่มีระนาบฐานที่กว้าง แตกต่างกันในช่วงความยาวที่ 0.2-2.0 ไมครอน (10^{-6} เมตร) และความหนาที่ 6-10 ไมครอน (ชวาล ภักเจริญ และคณะ, 2559) ขนาดเล็ก ๆ ซ้อนกัน 3 ชั้น มีแผ่นกลางเป็นแผ่นของกลุ่มโมเลกุล อลูมิเนียมไฮดรอกซิลโมเลกุลแปดระนาบ Octahedral Aluminum Hydroxyl อยู่ตรงกลางระหว่าง แผ่นของกลุ่มโมเลกุลซิลิโคนออกไซด์ โมเลกุลสี่เหลี่ยมปิรามิด Silicon Oxygen Tetrahedral โดยที่อะตอมของอลูมิเนียมบางส่วน จะถูกแทนที่ด้วยอะตอมของแมกนีเซียม หรืออะตอมของธาตุเหล็ก ซึ่งจะช่วยให้สร้างประจุลบ บนระนาบด้านฐานของโมเลกุลซิลิกา และจะมีการสร้างสมดุลโดยการแลกเปลี่ยนประจุบวกกับแผ่นที่อยู่ติดกันในแร่มอนต์มอริลโลไนต์ตามธรรมชาติ ประจุบวกเหล่านี้มักจะเป็นแคลเซียม โซเดียม หรือแมกนีเซียม ขึ้นอยู่กับสภาพดินฟ้าอากาศและสภาวะแวดล้อมในช่วงเวลาที่ก่อตัว และลักษณะการก่อตัวขึ้นของแร่ ในทางเคมี ดังแสดงในภาพที่ 2.7 และมีรูปร่างดังภาพที่ 2.8 แร่มอนต์มอริลโลไนต์ เขียนเป็นสูตรโมเลกุลได้ดังนี้



โดยที่ M^+ หมายถึง ประจุบวกที่มาทำการแลกเปลี่ยนประจุกัน อาจเป็นได้ทั้ง แคลเซียม หรือ โซเดียม (สุวรรณดี สุขเลิศ, 2560)



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างโมเลกุลแบบเป็นแผ่นของกลุ่มแร่ฟิลโลซิลิเกต. ปรับปรุงจาก หนังสือเบนทอไนท์ (น.1), โดย เลิศลักษณ์ สุพฤติพานิชย์, 2539, ม.ป.ท.



ภาพที่ 2.8 รูปร่างของมอนต์มอริลโลไนต์

ที่มา: [http://nazagroup2008.com/index.aspx?pid=b3313e64-027c-4b27-a1d1-](http://nazagroup2008.com/index.aspx?pid=b3313e64-027c-4b27-a1d1-1ac97b76da40&ctid=c2c051c4-038d-4f8e-ac61-11fb90f7d2e7)

[1ac97b76da40&ctid=c2c051c4-038d-4f8e-ac61-11fb90f7d2e7](http://nazagroup2008.com/index.aspx?pid=b3313e64-027c-4b27-a1d1-1ac97b76da40&ctid=c2c051c4-038d-4f8e-ac61-11fb90f7d2e7)

2.3.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแร่ดินเบนโทไนท์

สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแร่ดินเบนโทไนท์แสดงดังตารางที่ 2.1

2.3.3 การใช้ประโยชน์เบนโทไนท์

ในอาหารเบนโทไนต์ใช้เป็นสารตกตะกอนในไวน์ (Wine) เพื่อให้ไวน์ใส (Clarification) มีประจุบวกในไวน์ และมีความสามารถในการดึงโปรตีนที่ไวต่อความร้อนให้ตกตะกอนออกมา (พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, นิธิยา รัตนานนท์, 2560) การใช้งานในอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มดังนี้ โขเดียมเบนโทไนท์, แคลเซียมเบนโทไนท์ และแคลเซียม-แมกนีเซียมเบนโทไนท์ โขเดียมเบนโทไนท์ เมื่อดูดซับน้ำแล้วสามารถในการพองตัวได้มาก 15-20 เท่า จากปริมาตรเดิมมีสมบัติเป็นตัวหล่อลื่น และกั้นการแพร่ผ่าน โดยนิยมใช้เป็นหัวเจาะโคลน และใช้ดูดหรือยาแนวขอบเขื่อนทำนบ สำหรับแคลเซียมและแคลเซียม-แมกนีเซียมเบนโทไนท์ มีความสามารถในการพองตัวได้น้อยกว่าโขเดียมเบนโทไนท์ดังนั้นจึงนิยมใช้เป็นสารฟอกสี หรือเป็นสารดีเทอร์เจนต์ในการดูดซับน้ำมันจากพืชและสัตว์ นอกจากนี้ยังมีการนำไปตัดแปรโดยทำปฏิกิริยากับกรดได้แอคติเวตเต็ดเคลย์ (Activated Clays) สำหรับใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หรือทำปฏิกิริยากับโซดาไฟเปลี่ยนจากแคลเซียมเป็นโขเดียมเบนโทไนท์ สำหรับประเทศไทย ดินเบนโทไนท์นี้จะพบมากในอำเภอชัยบาดาล จังหวัดลพบุรี เป็นชนิดแคลเซียมเบนโทไนท์ (ราชบัณฑิตยสถาน, 2544)

ตารางที่ 2.1

สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแร่ดินเบนโทไนท์

Chemical compound (on dry basis)	%
Silicon Dioxide (SiO ₂)	46 - 60
Aluminum Oxide (Al ₂ O ₃)	14 - 17
Ferric Oxide (Fe ₂ O ₃)	6 - 8
Sodium Oxide (Na ₂ O)	0.5 - 1.5
Magnesium Oxide (MgO)	1.5 - 3.0
Calcium Oxide (CaO)	1.0 - 2.5
Potassium Oxide (K ₂ O)	0.1 - 1.0
Titanium Dioxide (TiO ₂)	0.2 - 1.5

(ต่อ)

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

Chemical compound (on dry basis)	%
Loss on Ignition (LOI)	7 -12
Moisture Content	8 - 12
Dry particle Size	Min. 75% pass through 200 mesh

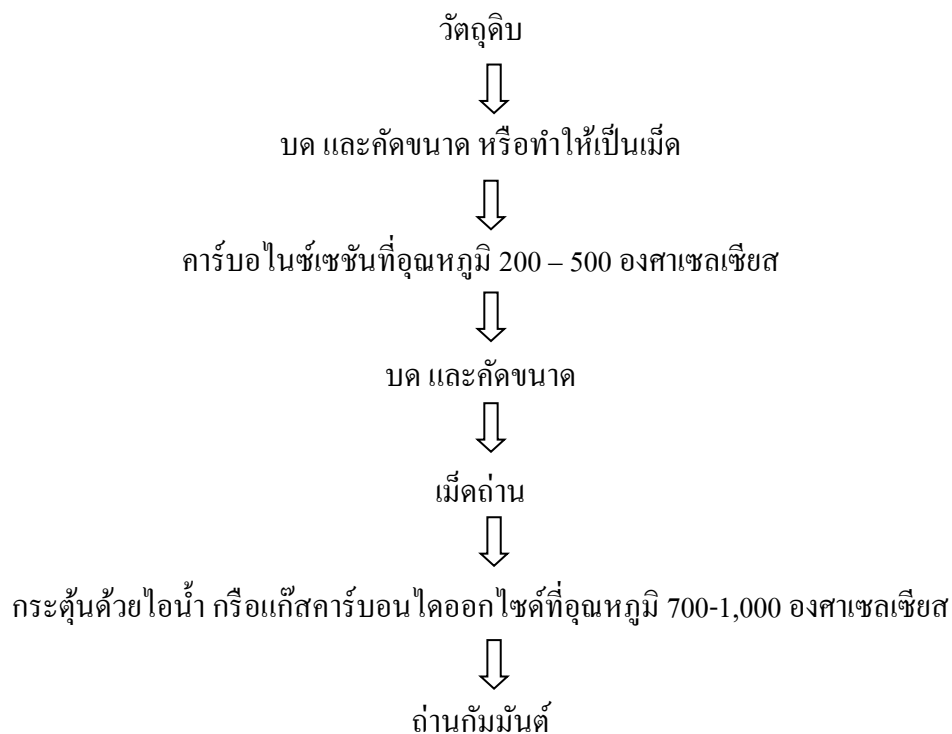
หมายเหตุ. ปรับปรุงจาก “การศึกษาการกำจัดตะกั่ว แคดเมียม และทองแดงโดยใช้แร่ดินเบนโทไนต์, โดย สุพัตรา บุตรเสรีชัย และยุวรัตน์ เงินเย็น, 2554, วารสารการประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา, 12, 315 – 320.

2.4 การกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมี

การกระตุ้น คือ การทำให้คาร์บอนหรือถ่านมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิวและการทำให้ผิวมีความว่องไวมากขึ้น

2.4.1 การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical Activation)

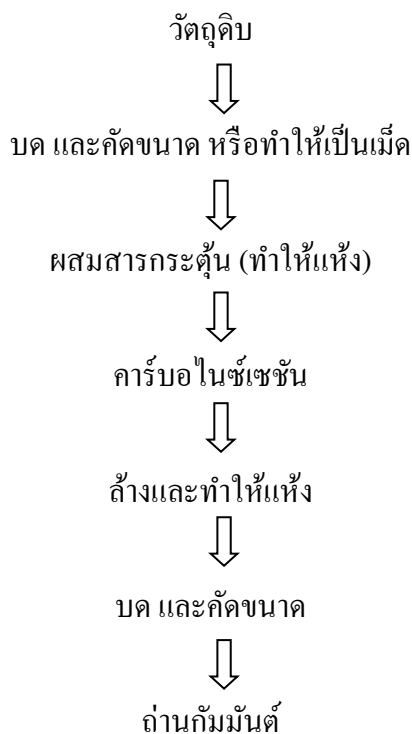
เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์ที่ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การเรียงตัวใหม่ ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านให้สูงขึ้น นิยมใช้แก๊สออกซิไดซ์ต่าง ๆ เช่น ไอน้ำอิมพัลส์ยิ่งยวด (Steam) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) แก๊สออกซิเจน (O₂) และอากาศ (Air) เป็นต้น ร่วมกับการใช้ความร้อน ปฏิริยาการกระตุ้นอาจเกิดจากความร้อนเพียงอย่างเดียวก็ได้ แต่ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงมากถึง 1,200 องศาเซลเซียส แต่พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จะมีคุณภาพต่ำ ปัจจัยที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยวิธีนี้ คือ ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบ คุณสมบัติทางเคมีและอัตราส่วนของแก๊สที่ใช้ อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา ข้อดีของการกระตุ้นทางกายภาพคือ ไม่มีสารเคมีตกค้าง ข้อเสีย คือ ต้องใช้อุณหภูมิสูงต่อการกระตุ้นด้วยสารเคมี (700-1,200 องศาเซลเซียส) ขั้นตอนการกระตุ้นทางกายภาพแสดงดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ

2.4.2 การกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation)

เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยให้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยาเคมีกับพื้นผิวคาร์บอน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งขั้นตอนการกระตุ้นด้วยสารเคมีนั้น แสดงดังภาพที่ 2.10 ข้อดีของวิธีนี้คือ ใช้อุณหภูมิไม่สูงมาก (400-600 องศาเซลเซียส) ข้อเสียคือ มีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ทำให้ต้องเสียเวลา และค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีดังกล่าวเพิ่มขึ้น เครื่องมือที่ใช้ต้องต้านทานการกัดกร่อนได้ สารเคมีที่นิยมใช้เป็นตัวกระตุ้นส่วนใหญ่เป็นสารดูดน้ำ (Dehydrating Agent) ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เป็นต้น (ปริญทร เต็มญาศิริ, 2551)



ภาพที่ 2.10 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี. ปรับปรุงจาก การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากไม้ตอง และไม้หมางู (น.16-21) โดย ปรินทร์ เต็มญาศิลป์, 2551.

2.4.3 การใช้ประโยชน์เบนโทไนด์

ในอาหารเบนโทไนด์ใช้เป็นสารตกตะกอนในไวน์ (Wine) เพื่อให้ไวน์ใส (Clarification) มีประจุบวกในไวน์ และมีความสามารถในการดึง โปรตีนที่ไวต่อความร้อนให้ตกตะกอนออกมา (พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, นิธิยา รัตนาปนนท์, 2560) การใช้งานในอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มดังนี้ โซเดียมเบนโทไนด์, แคลเซียมเบนโทไนด์ และแคลเซียม-แมกนีเซียมเบนโทไนด์ โซเดียมเบนโทไนด์ เมื่อดูดซับน้ำแล้วสามารถในการพองตัวได้มาก 15-20 เท่า จากปริมาตรเดิมมีสมบัติเป็นตัวหล่อลื่น และกันการแพร่ผ่าน โดยนิยมใช้เป็นหัวเจาะโคลน และใช้อุดหรือยาแนวขอบเขื่อนทำนบ สำหรับแคลเซียมและแคลเซียม-แมกนีเซียมเบนโทไนด์ มีความสามารถในการพองตัวได้น้อยกว่าโซเดียมเบนโทไนด์ดังนั้นจึงนิยมใช้เป็นสารฟอกสีหรือเป็นสารดีเทอร์เจนต์ในการดูดซับน้ำมันจากพืชและสัตว์ นอกจากนี้ยังมีการนำไปดัดแปรโดยทำปฏิกิริยากับกรดได้แอคทีเวเตดเคลย์ (Activated Clays) สำหรับใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หรือทำปฏิกิริยากับโซดาไฟเปลี่ยนจากแคลเซียมเป็นโซเดียมเบนโทไนด์ สำหรับประเทศไทย ดินเบนโท

ในที่นี้จะพบมากในอำเภอชัยบาดาล จังหวัดลพบุรี เป็นชนิดแคลเซียมเบนโทไนด์ (ราชบัณฑิตยสถาน, 2544)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 งานวิจัยภายในประเทศ

ปิยภรณ์ วุฒิสถา, ภูวดล โกมณเทียร และปิยนุช คະណະมา (2556, น. 37 - 41) ทำการศึกษาการดูดซับตะกั่วด้วยดินป่าบุ่งป่าทามของจังหวัดมหาสารคาม 4 พื้นที่ คือ ป่าบุ่งป่าทามม่วงใหญ่ วนอุทยานโกสัมพี ป่าบุ่งป่าทามหนองดินบ้าน และป่าบุ่งป่าทามเกาะแก่ง โดยทดลองแบบกะเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการดูดซับ ได้แก่ น้ำหนักดิน 0.1, 0.5, 1 และ 5 กรัม เวลาสัมผัส 30 และ 60 นาที และความเข้มข้นสารละลายตะกั่ว 2, 4, 6, 8 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าความสามารถของดินในการดูดซับตะกั่วแปรผันตามน้ำหนักดิน โดยเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับคือ 30 นาที และความเข้มข้นสารละลายตะกั่วเริ่มต้นที่เหมาะสมคือ 2 mg/L สมการแลงเมียร์สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมของการดูดซับตะกั่วได้ดี เป็นการดูดซับตะกั่วแบบชั้นเดียว โดยประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วของ ดินทั้ง 4 พื้นที่ พบว่า ป่าบุ่งป่าทามม่วงใหญ่ดูดซับตะกั่วได้มากที่สุด รองลงมาคือ ป่าบุ่งป่าทามเกาะแก่ง ป่าบุ่งป่าทาม วนอุทยานโกสัมพี ป่าบุ่งป่าทามหนองดินบ้าน (5.91, 5.90, 5.28 และ 5.21 mg/g ตามลำดับ)

พิเชษฐ หนูหมื่น (2557) ได้ศึกษาการดูดซับสีในน้ำเสียจากกระบวนการทำผ้าบาติกด้วยอิฐมอญบด โดยใช้อิฐมอญบดคัดขนาด 3 ขนาด ได้แก่ 2.0 มิลลิเมตร 0.2 - 0.42 มิลลิเมตร และขนาดเล็กกว่า 0.42 มิลลิเมตร ขนาดเล็กกว่า ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับ โดยใช้ปัจจัยต่าง ๆ ในการเปรียบเทียบ พบว่าอิฐมอญบดขนาดเล็กกว่า 0.42 มิลลิเมตร มีความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อมและโลหะหนักในน้ำทิ้งได้ดีที่สุด และปรับค่าพีเอชของน้ำทิ้งให้เป็นกลางก่อนเข้ากระบวนการทดลองให้ประสิทธิภาพการดูดซับที่ดีกว่าสภาวะปกติของน้ำทิ้งที่มีสภาวะเป็นด่าง อัตราส่วนที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก เช่น ทองแดง ตะกั่ว สังกะสี โครเมียม แคดเมียม ซิลิกา และการบำบัดค่าพีเอช ความขุ่น ค่าการนำไฟฟ้า ซีโอดี บีโอดี ของแข็งแขวนลอย ของแข็งละลายทั้งหมด คือ 1:1 และต้องมีชั้นความหนาของอิฐมอญบดไม่น้อยกว่า 5 เซนติเมตร ประสิทธิภาพของอิฐมอญบดจะลดลงเมื่อมีการใช้ซ้ำ

อรดี ฤทธิชัย และศศิธร มั่นเจริญ (2557) ได้ทำการศึกษากำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกปู เพื่อใช้กำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ พบว่าการ คาร์บอนในเซชันถ่านด้วยการเผาเปลือกปูที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา

90 นาที และกระตุ้นถ่านคาร์บอนในเซชันด้วยซิงค์คลอไรด์ ในอัตราส่วนน้ำหนักแห้งของถ่านต่อซิงค์คลอไรด์ 1:2 ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที เป็นภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์ นอกจากนี้ได้ศึกษาปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับสีเมทิลีนบลู ได้แก่ ปริมาณถ่านกัมมันต์ เวลาเข้าสู่สมดุล ความเป็นกรดต่าง และไอโซเทอมของการดูดซับ จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณถ่านที่เหมาะสมในการดูดซับเท่ากับ 32 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับที่เหมาะสมเท่ากับ 150 นาที ความเป็นกรดต่างเท่ากับ 5.0 และไอโซเทอมของการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากเปลือกปศุสัตว์คล้อย กับ ไอโซเทอมของแลงเมียร์ และเมื่อนำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปประยุกต์ใช้สำหรับการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อม พบว่า สีย้อม ในน้ำทิ้งตัวอย่างมีความเข้มข้นสีลดลงร้อยละ 63.5 – 75.6 ในการบำบัดเพียงครั้งแรก

วิรัชรอง แสงอรุณ (2558, น. 97-110) ได้ทำการศึกษาการดูดซับสีย้อมผ้าด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเปลือกไข่และเปลือกหอยแครง โดยวิธีกระตุ้นทางเคมี เพื่อศึกษาถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นจากเปลือกไข่ผสมเปลือกหอยแครง ซึ่งกระตุ้นทางเคมีการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกไข่ผสมเปลือก หอยแครง เตรียมได้ 2 ขั้นตอน ขั้นแรกคือกระบวนการคาร์บอนในเซชันตามด้วยกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์ ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสภาวะการเตรียมถ่านกัมมันต์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์ จากการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกไข่ผสมเปลือกหอยแครง ได้แก่ อุณหภูมิในการเผาให้เป็นถ่าน 600 องศาเซลเซียส และอัตราส่วน โดยน้ำหนักระหว่างเปลือกไข่ผสมเปลือกหอยแครง 1:3 โดยใช้เวลาในการเผาให้เป็นถ่าน 30 นาที ที่สภาวะดังกล่าวได้ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงสุดเท่ากับ 510.44 มิลลิกรัมต่อกรัม และพื้นที่ผิวจำเพาะ -BET เท่ากับ 717.45 ตารางเมตรต่อกรัม นอกจากนี้ได้นำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นจากเปลือกไข่ผสมเปลือกหอยแครงที่สภาวะที่เหมาะสมมากำจัดสีเมทิลเรดจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการดูดซับ โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับสีเมทิลเรด ที่สภาวะต่าง ๆ ผลการวิจัยพบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีเมทิลเรดได้ดีที่สุด คือ 64,471.79 mg/g ของถ่านกัมมันต์ คิดเป็นร้อยละของการกำจัดสีย้อมเมทิลเรด 64.47 สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับคือ เวลาในการดูดซับ 60 นาที ปริมาณถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัม ความเข้มข้นของสารละลายสีเมทิลเรดเริ่มต้นสูงสุด 300 mg/L และความเป็นกรดต่างของสารละลายสีเมทิลเรดที่สภาวะเป็นกรด

อาทิตย์ อัสวสุจิ (2558) ได้ทำการศึกษาการวิเคราะห์คุณลักษณะของลิโอนาร์ไดต์ และดินแดงจากเหมืองลิกไนต์แม่เมาะจังหวัดลำปาง เป็นตัวดูดซับในการกำจัดสีน้ำทิ้งจากการย้อมผ้า ได้แก่ ลิโอนาร์ไดต์ และดินแดง จากเหมืองแร่ลิกไนต์แม่เมาะจังหวัดลำปาง กำจัดสีย้อม (รีแอคทีฟ เรด พี 8 บี, แอซิเดบลู 5 อาร์, ไคเรคต์ สการ์เล็ต 4 บีเอส, คองโก เรด, และเมทิลออเรนจ์)

ประสิทธิภาพของตัวดูดซับศึกษาด้วยเทคนิคการดูดซับแบบกะภายใต้สภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน โดยการเปลี่ยนตัวแปร เช่น พีเอช ความเข้มข้นเริ่มต้น และเวลาสัมผัส ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด ของลีสיוםบนตัวดูดซับลิโอนาร์ไคต์และดินแดงที่คำนวณได้มีค่า 13.2-70.7 mg/g และ 7.9-58.5 mg/g ตามลำดับ เมื่อนำลิโอนาร์ไคต์ซึ่งอุดมไปด้วยฮิวมิคมากระตุ้นด้วยความร้อนสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกสตีโรคาร์บอนจะถูกคาร์บอนไนซ์ โดยพบว่า การเปลี่ยนแปลงพื้นผิวทางเคมีของลิโอนาร์ไคต์ที่ได้รับการคาร์บอนไนซ์จะส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะการดูดซับ

พชรวรรณ อังศิริสวัสดิ์ และเฉลิม เรื่องวิริยะชัย (2016, น. 343-350) ได้ทำการศึกษาการดูดซับลีสיוםเมทิลลินบลูโดยใช้เปลือกหน่อไม้ เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับลีสיוםเมทิล-ลินบลูในสารละลายโดยใช้เปลือกหน่อไม้ที่อบแห้งเป็นวัสดุดูดซับ ได้แก่ ความเป็นกรด-เบสของสารละลาย (pH 3-9) เวลาในการดูดซับ (5-90 นาที) อัตราเร็วของการเขย่า (100-300 รอบต่อนาที) ปริมาตรตัวดูดซับ (0.10-0.30 กรัม) และความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทิลลินบลู (5-300 mg/L) แล้วตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลลินบลูด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลต-วิเบิลสเปกโทร-โฟโตเมทรี พบว่า ความสามารถในการดูดซับลีสיוםด้วยเปลือกหน่อไม้แห้งมีค่า 29.24 mg/g ที่ พีเอช 7 เมื่อใช้ตัวดูดซับ 0.15 กรัม การดูดซับเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ภายในเวลา 60 นาที เมื่อเขย่าสารผสมอัตราเร็ว 250 รอบต่อนาที ไอโซเทอมของการดูดซับลีสיוםสอดคล้องกับแบบฟรุนดริช ($R^2 = 0.988$) แสดงว่าเปลือกหน่อไม้ที่ผ่านการอบแห้งนี้สามารถประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับในน้ำทิ้งได้อย่างดี

รวินิภา ศรีมูล (2559, น. 419 - 434) ได้ทำการศึกษาการบำบัดลีสיוםในน้ำเสียด้วยกระบวนการดูดซับเพื่อรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการบำบัดลีสיוםในน้ำเสียโดยใช้กระบวนการดูดซับชนิดของลีสיום การดูดซับลีสיוםด้วยถ่านกัมมันต์ การดูดซับลีสיוםด้วยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรม ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ การดูดซับด้วยคอลัมน์ และไอโซเทอมของการดูดซับจากการทดลองสรุปได้ว่า กระบวนการดูดซับด้วยตัวดูดซับที่เหมาะสม เป็นวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดลีสיוםในน้ำเสีย ตัวดูดซับแต่ละชนิดจะมีพฤติกรรมการดูดซับลีสיוםที่แตกต่างกันออกไป เนื่องจากมีปัจจัยหลายประการที่เกี่ยวข้อง การเลือกใช้วัสดุดูดซับควบคู่ควบคู่ไปกับการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับจะช่วยให้การดูดซับเกิดขึ้นได้ดี และช่วยลดปริมาณลีสיוםที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำได้

จักรกฤษณ์ อัมพข และคณะ (2560) ศึกษาสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์จากผักตบชวา โดยการกระตุ้นทางเคมีเพื่อใช้ดูดซับลีสียมรีแอกทีฟแบบลึก 5 วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับด้วย IR-spectra BET-method และภาพ SEM การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับแบบกะ พบว่า การดูดซับเพิ่มขึ้นกับเวลาและเข้าสู่สมดุลที่ 150

นาที่ ค่าพีเอชไม่ส่งผลต่อการดูดซับปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นเริ่มต้นของสีข้อม การคายซับเกิดขึ้นได้โดยใช้ตัวทำละลายอะซิโตนไตรโท นอกจากนี้ผลการทดลองสอดคล้องกับแบบจำลอง การดูดซับอันดับสองเทียม และไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช ส่วนที่ 2 ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับในเบตนิ่ง พบว่า ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของเบตนิ่งและอัตราการไหลเพิ่มขึ้นขณะที่ปริมาณการดูดซับลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นเริ่มต้น จากผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ถ่านกัมมันต์จากผักตบชวาเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมรีแอ็คทีฟแบล็ค 5

2.5.2 งานวิจัยต่างประเทศ

Yuan-feng Hao. และคณะ (2014, pp. 202-207) ได้ศึกษาการเปรียบเทียบสีข้อมโดยใช้เบนโทไนท์ที่มีโครงสร้างเป็นไฮดรอกซีอะลูมิเนียมและความสามารถในการดูดซับสีข้อมในการทดลองแบบเบตนิ่ง ผลการศึกษาพบว่า การแทรกตัวของโพลีเมอร์ไฮดรอกซีอะลูมิเนียมสามารถเพิ่มพื้นผิว และปริมาณรูพรุน อย่างมีนัยสำคัญซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการดูดซับสีข้อม โซเดียมเบนโทไนท์มีความสัมพันธ์ในการดูดซับกับ Basic Fuchsin (BF) และ Basic Green (BG) มากกว่า Turquoise Blue A (ATBA) การดูดซับสีข้อมทั้ง 3 ชนิด ค่าความเป็นกรด – ด่างลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจาก 2-8 กลไกการดูดซับเป็นแบบ Pseudo-second Order และเป็นไอโซเทอมแบบ Freundlich ค่าสหสัมพันธ์คือ ($R^2 > 0.99$) ทฤษฎีทั้ง Henry และ Freundlich อธิบายไอโซเทอมการดูดซับได้ดี ความสามารถของเบนโทไนท์ที่มีโครงสร้างเป็นไฮดรอกซีอะลูมิเนียมในการดูดซับสีข้อม BG > BF > ATBA ตามลำดับ

Assia Benhouria. และคณะ (2015, pp. 621-630) ได้ทำการศึกษากำกัมมันต์แคลเซียม Alginate-bentonite ที่มีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับเมทิลีนบลู โดยเตรียมกำกัมมันต์ 3 ชนิด คือ Bentonite–alginate beads, Activated carbon–alginate beads และ Activated carbon–bentonite–alginate beads (ABA) ในการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู พีเอช (3-11) อุณหภูมิ (30, 40 และ 50 °C) ความเข้มข้นเริ่มต้น (25-500 mg/L) ผลการทดลองพบว่าความสามารถการดูดซับสีของเม็ด ABA ในการดูดซับเมทิลีนบลูเท่ากับ 756.9 mg/g ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยจนวนพลศาสตร์มีกลไกการดูดซับเป็นแบบ Pseudo-second order ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich และเมื่อนำเม็ด ABA นำกลับมาใช้ใหม่แล้วยังสามารถดูดซับได้มากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ แสดงถึงศักยภาพของเม็ด ABA ในการกำจัดสีข้อมแคทไอออนได้

Pelaez-Cid และคณะ (2016, pp. 269-278) ได้ทำการศึกษาการกำจัดสีข้อมสิ่งทอโดยใช้กำกัมมันต์ที่เตรียมจากเศษผักและอัตรลักษณ์ของถ่านที่เตรียมได้ เศษผักที่ใช้มี 3 ชนิดคือ ลำต้นปลีอกโคลี (CarBrocQ) เปลือกลูกแพร์ (CarTunaQ) และเมล็ดสะเดาขาว (CarZapQ) ศึกษา

ประสิทธิภาพในการดูดซับสีเขียว สมดุลของการดูดซับ ใช้ระบบการดูดซับแบบแบทช์ ผลการศึกษาพบว่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่คำนวณได้จากไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir มีค่าตั้งแต่ 131.6 – 312.5 mg/g การยึดติดของสีระหว่าง 277.8 - 500 mg/g ที่อุณหภูมิ 303 K จากการวิจัยแสดงให้เห็นว่าลำดับบล็อกโคลี (CarBroCQ) สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมถ่านกัมมันต์สำหรับดูดซับสีเขียวที่ดีที่สุดในการกำจัดน้ำเสียจากการย้อมผ้า เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการค้า พบว่ามีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันจากพื้นผิว (1025 -1177 m²/g) และปริมาตรรูพรุนสูง (1.06 – 2.16 cm³/g) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 4.1 และ 8.4 nm. ทำการทดสอบการคายการดูดซับและการฟื้นฟูเพื่อทดสอบความสามารถในการนำถ่านกลับมาใช้ใหม่

Belbachir, และคณะ (2017, pp. 105-111) ได้ทำการศึกษาการดูดซับสารละลายสีเขียว Bezathren ด้วยดินเบนโทไนท์ โดยดูดซับสีเขียวสังเคราะห์ Bezathren-Blue, Bezathren-Green และ Bezathren-Red ด้วยโซเดียมเบนโทไนท์ (Bt-Na⁺) ในการกำจัดสีเขียว Bezathren ได้ศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้ พีเอช (pH) ของสารละลาย เวลาในการสัมผัส และอุณหภูมิ จากการทดลองพบว่าโซเดียมเบนโทไนท์สามารถดูดซับได้เร็วที่พีเอชต่ำ ความสามารถในการดูดซับของสารละลายสีเขียว Bezathren-Blue, Bezathren-Green และ Bezathren-Red มีค่าเท่ากับ 35.08 mg/g, 32.88 และ 48.52 mg/g ตามลำดับ ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นแบบ Freundlich และจลนศาสตร์แบบ Pseudo-second Order ผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าโซเดียมเบนโทไนท์สามารถเป็นตัวดูดซับสีเขียว Bezathren จากสารละลายได้ดี

Huang Zhihui (2017, pp. 266-276) ได้ทำการศึกษาการตัดแปรเบนโทไนท์ในการดูดซับสารมลพิษอินทรีย์จากน้ำเสียสีเขียว โดยใช้สารอินทรีย์ตัดแปรเบนโทไนท์จากเฟสน้ำสังเคราะห์ไอออนไนโตรเจนกับ Cetyl Trimethylammonium Bromide (CTAB) ได้ตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีเขียว Rhodamine B (RhB) และ Acid red 1 พบว่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดของการยึดติดที่ 173.5 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 157.4 mg/g สำหรับ RhB และ Acid red 1 ที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสและพีเอช 9 และ 8 ตามลำดับไอโซ-เทอมการดูดซับแบบ Langmuir และจลนศาสตร์แบบ pseudo-second order นอกจากนี้ยังพบว่าคุณสมบัติของตัวอย่างที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี XRD การสแกนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM), Brunauer-Emmett-Teller (BET), การวิเคราะห์สเปกโตรมิเตอร์อินฟราเรดแบบ Fourier (FT-IR) และการวิเคราะห์ Zeta potential ผลการศึกษาพบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาเป็นตัวอย่างถึงคุณสมบัติทางสัณฐานวิทยาและกระบวนการดูดซับที่ดี