

การบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี และกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

Leachate Treatment by Coagulation and Activated Carbon Adsorption Process

คำนำ

การกำจัดมูลฝอยในปัจจุบันที่ถูกลุกลักษณะมีด้วยกัน 3 วิธี ได้แก่ การฝังกลบ การเผาด้วยเตาเผาและการหมักทำปุ๋ย ซึ่งวิธีการฝังกลบเป็นวิธีการกำจัดมูลฝอยที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการลงทุนและการดำเนินการต่ำกว่าวิธีอื่นๆ นอกจากประโยชน์ทางด้านความประหยัดแล้ว วิธีการฝังกลบยังลดผลกระทบจากสิ่งแวดล้อม โดยมูลฝอยถูกย่อยสลายภายใต้สถานที่ที่ถูกควบคุม จนมีการเปลี่ยนรูปมูลฝอยเป็นสารคงตัว อย่างไรก็ตามหากไม่มีการดูแลและควบคุมการดำเนินการฝังกลบที่ดี อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ โดยเฉพาะน้ำชะมูลฝอย (Leachate) ซึ่งเกิดจากน้ำฝนที่ตกลงในบริเวณหลุมฝังกลบ การซึมผ่านของน้ำใต้ดินและความชื้นของมูลฝอย โดยน้ำชะมูลฝอยมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์และสารที่มีความเป็นพิษในปริมาณสูง ซึ่งอาจก่อให้เกิดการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการบำบัดน้ำชะมูลฝอยก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม

การบำบัดน้ำชะมูลฝอยสามารถบำบัดโดยวิธีทางชีวภาพ (Biological treatment) วิธีทางกายภาพ (Physical treatment) วิธีทางเคมี (Chemical treatment) หรือแบบผสมผสาน (Combination treatment) โดยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของมูลฝอยที่นำมาฝังกลบ อายุของสถานที่ฝังกลบและฤดูกาล ซึ่งโดยทั่วไปน้ำชะมูลฝอยที่เกิดจากสถานที่ฝังกลบที่มีอายุน้อย ส่วนใหญ่ประกอบด้วยสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่ายเหมาะสำหรับวิธีการบำบัดทางชีวภาพ แต่ในกรณีที่สถานที่ฝังกลบที่มีอายุมาก น้ำชะมูลฝอยประกอบด้วยสารอินทรีย์เชิงซ้อนที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยาก จึงเหมาะที่จะบำบัดโดยวิธีทางกายภาพและเคมี จากการศึกษาของวีรวรรณ (2530) พบว่า การบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยวิธีทางชีวภาพ ได้แก่ ระบบตะกอนเร่ง (Activated sludge) และระบบแผ่นหมุนชีวภาพ (Rotating biological contactor) มีประสิทธิภาพในการบำบัด BOD COD และสีอยู่ในเกณฑ์ต่ำ เนื่องจากองค์ประกอบของน้ำชะมูลฝอยเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนยากแก่การย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ โดยมีอัตราส่วนของ BOD:COD ต่ำ ไม่เหมาะกับการบำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพ ดังนั้นการบำบัด

น้ำชะมูลฝอยที่มีอัตราส่วนของ BOD:COD ต่ำ ด้วยกระบวนการทางกายภาพและเคมีจึงเป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้น (Pretreatment) ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำชะมูลฝอยให้มีความเหมาะสมที่จะนำไปบำบัดต่อด้วยวิธีทางชีวภาพ

กระบวนการตกตะกอนทางเคมี (Coagulation) และกระบวนการดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการบำบัดทางกายภาพและทางเคมีวิธีหนึ่งที่ใช้ในการบำบัดน้ำชะมูลฝอย โดยใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดขั้นต้น (Pretreatment) หรือการบำบัดขั้นที่ 3 (Tertiary treatment) เพื่อเป็นการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งก่อนหรือหลังจากผ่านกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ ทำให้คุณภาพน้ำทิ้งดีขึ้น รวมทั้งวิธีการบำบัดดังกล่าวยังสามารถเดินระบบได้ง่ายและมีการใช้วัสดุอุปกรณ์ที่หาได้ง่าย ซึ่งจากการศึกษาของอริชัย (2539) พบว่า ในการกำจัดโครเมียมและปรอทจากน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านบ่อเก็บกักโดยวิธีการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ถึงแม้จะมีประสิทธิภาพดี แต่มีข้อเสียที่สำคัญคือ เกิดการอุดตันที่ผิวหน้าของชั้นถ่านกัมมันต์ เนื่องจากปริมาณสารแขวนลอยที่มีอยู่ในน้ำชะมูลฝอย จึงควรที่จะมีการตกตะกอนด้วยสารเคมีก่อนเข้าสู่การบำบัดด้วยถ่านกัมมันต์ ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาการบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมีและกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของระบบและเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำชะมูลฝอย รวมทั้งใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบระบบบำบัดน้ำชะมูลฝอยที่เหมาะสมต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของสารสร้างตะกอนที่เลือกใช้ในการบำบัดน้ำชะมูลฝอย โดยพิจารณาปริมาณสารสร้างตะกอนและค่า pH ที่เหมาะสมในการตกตะกอน
2. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำชะมูลฝอยโดยกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์
3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมีร่วมกับกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์
4. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพและค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำชะมูลฝอยทั้ง 3 วิธี

ขอบเขตของการวิจัย

1. น้ำชะมูลฝอยที่ใช้ในการวิจัยเป็นน้ำชะมูลฝอยจากสถานที่ฝังกลบมูลฝอยเทศบาลเมืองปทุมธานี ซึ่งตั้งอยู่ที่หมู่ 4 ตำบลบ่อเงิน อำเภอลาดหลุมแก้ว จังหวัดปทุมธานี
2. ศึกษาสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำชะมูลฝอย ได้แก่ อลูมิเนียมซัลเฟต เพอร์ริกคลอไรด์และโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์
3. สร้างแบบจำลองคอลัมน์ (Pilot column test) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว สูง 1 ม. เพื่อใช้ในการกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์อย่างต่อเนื่อง โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดน้ำชะมูลฝอย ได้แก่ ความสูงชั้นถ่านที่ระยะเท่ากับ 0.2, 0.5 และ 0.8 ม. และอัตราน้ำล้นผิวต่างๆ คือ 0.02, 0.03 และ 0.04 ลบ.ม./ตร.ม.-นาที่
4. ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการวิจัยผลิตจากกะลามะพร้าว
5. การวิเคราะห์คุณภาพน้ำในงานวิจัยเพื่อศึกษาการบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมีและกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ ศึกษาเพียงพารามิเตอร์ที่อยู่ในขอบเขตความสามารถของระบบที่จะบำบัด ได้แก่ สี ความขุ่น ของแข็งแขวนลอยและซีโอดี

การตรวจเอกสาร

น้ำชะมูลฝอย

น้ำชะมูลฝอยเป็นผลมาจากกระบวนการเปลี่ยนรูปของมูลฝอยทางกายภาพ เคมีและชีวภาพ โดยมีน้ำเป็นตัวร่วมในปฏิกิริยา ในการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดกลไกทางกายภาพ 3 ระยะ ได้แก่ การย่อยสลายของแข็ง (Solid phase) การเกิดของเหลว (Liquid phase) และการเกิดก๊าซ (Gas phase) โดยของเหลวที่เกิดขึ้นมีปริมาณของสารอินทรีย์ทั้งในรูปของสารละลายหรือสารแขวนลอยและอออนของสารอนินทรีย์ปนเปื้อนในปริมาณสูง

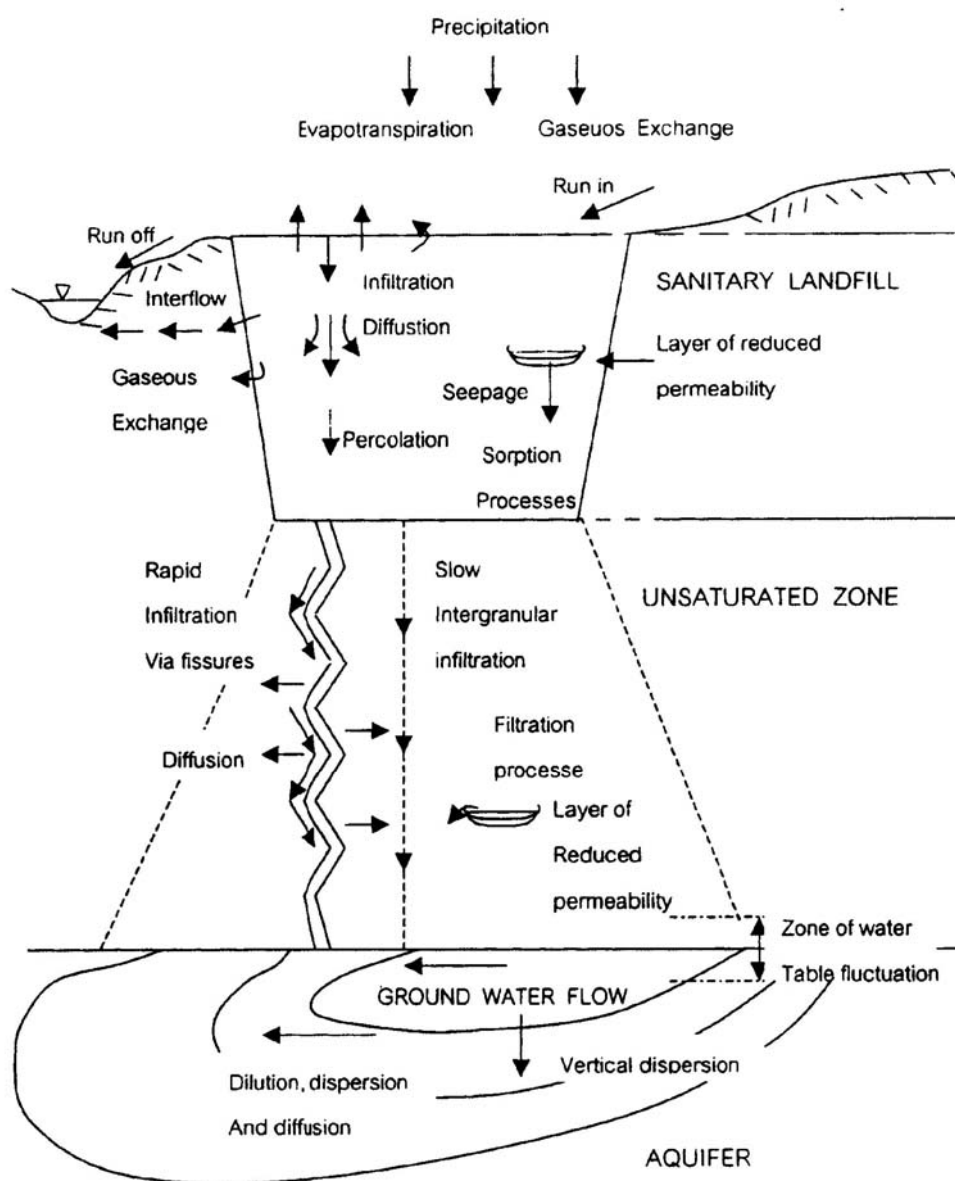
1. การเกิดน้ำชะมูลฝอย

น้ำชะมูลฝอยเกิดขึ้นจากการไหลซึมของของเหลวผ่านชั้นฝังกลบมูลฝอยและชะเอาสารละลายและสารแขวนลอยต่างๆ ออกมากับของเหลว ซึ่งโดยทั่วไปของเหลวที่ซึมผ่านเข้าสู่หลุมฝังกลบมาจากแหล่งภายนอก ได้แก่ น้ำฝน น้ำผิวดิน น้ำใต้ดินและน้ำจากระบบระบายน้ำภายใน เป็นต้น (Lema *et al.*, 1988) ดังแสดงในภาพที่ 1

น้ำฝนที่ตกลงมาบริเวณหลุมฝังกลบมูลฝอยส่วนหนึ่งกลายเป็นน้ำผิวดิน (Surface runoff) หลังจากที่ผ่านมาการระเหย การคายน้ำของดินและพืช ส่วนที่เหลือจะถูกเก็บกักไว้ในชั้นดินจนกระทั่งความชื้นที่สะสมในชั้นดินเกิดความจุสนาม (Field capacity) ของดิน น้ำจะซึมลงสู่ชั้นของมูลฝอย โดยของเหลวที่ซึมลงมาจะถูกสะสมอยู่ในชั้นของมูลฝอยจนกระทั่งถึงค่าความจุสนามของมูลฝอย น้ำเหล่านี้จะชะละลายสารต่างๆ ออกจากมูลฝอยและซึมลงไปสะสมที่พื้นใต้หลุมฝังกลบมูลฝอย เรียกว่า น้ำชะมูลฝอย (Leachate) (Dass *et al.*, 1977)

2. ลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอย

น้ำชะมูลฝอยจากสถานที่ฝังกลบมูลฝอยประกอบด้วยสารละลายต่างๆ ซึ่งบางชนิดก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมได้ โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของน้ำชะมูลฝอยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ส่วนประกอบของมูลฝอยที่นำมาฝังกลบ การควบคุมดูแลระบบ สภาพอุทกธรณีวิทยา สภาพภูมิอากาศ สภาพภูมิประเทศ กระบวนการย่อยสลายมูลฝอยและอายุของหลุมฝังกลบลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอยจากสถานที่ฝังกลบมูลฝอยมีดังนี้ (Johansen and Carlson, 1976)



ภาพที่ 1 การเกิดน้ำชะมูลฝอย

ที่มา: Christensen *et al.* (1992)

2.1 สารประกอบอินทรีย์ เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ในน้ำชะมูลฝอยชุมชน โดยสารประกอบอินทรีย์ในน้ำชะมูลฝอยจากมูลฝอยชุมชนในสถานที่ฝังกลบมูลฝอยสามารถจำแนกได้ 2 ชนิด คือ

2.1.1 สารอินทรีย์จากการย่อยสลายมูลฝอยชุมชนทางชีวภาพ ซึ่งองค์ประกอบส่วนใหญ่ ได้แก่ เศษอาหาร กระดาษและใบไม้ เป็นต้น

2.1.2 สารอินทรีย์ที่พบในปริมาณน้อย โดยมาจากมูลฝอยทางเคมี ได้แก่ คราบน้ำมัน สารละลายต่างๆ และยาฆ่าแมลง เป็นต้น

2.2 ซัลเฟต (Sulfate) เมื่อระยะเวลาการฝังกลบมูลฝอยนานขึ้น พบว่าปริมาณซัลเฟตจะมีค่าลดลง เนื่องจากจุลินทรีย์จะเปลี่ยนซัลเฟตไปเป็นซัลไฟด์ในช่วงก่อนถึงระยะการผลิตมีเทน ซึ่งในระยะการผลิตมีเทนจะเหลือปริมาณซัลเฟตเพียงเล็กน้อย

2.3 คลอไรด์ (Chloride) จากการตรวจวัดสถานที่ฝังกลบมูลฝอยที่มีอายุมากกว่า 15 ปี พบว่าปริมาณคลอไรด์จะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของสถานที่ฝังกลบมูลฝอย แต่อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของคลอไรด์จะลดลงในระยะยาว เนื่องจากเกิดการชะละลายออกมากับน้ำชะมูลฝอย

2.4 ไบคาร์บอเนต (Bicarbonate) ปริมาณไบคาร์บอเนตจะเพิ่มขึ้นตามเวลา ซึ่งในช่วงระยะการผลิตกรด (Acid phase) น้ำชะมูลฝอยจะมีค่าความสกปรกในรูป COD สูงมาก ในขณะที่ pH มีค่าต่ำอยู่ในช่วง 5-5.5 และ Ehrig (1983) พบว่าการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาพไร้อากาศในสถานที่ฝังกลบมูลฝอยจะทำให้มีไบคาร์บอเนตเกิดขึ้น

2.5 โซเดียม (Sodium) โพแทสเซียม (Potassium) และแอมโมเนียไนโตรเจน (Ammonia nitrogen) โดย Ehrig (1983) พบว่าสถานที่ฝังกลบมูลฝอยที่มีอายุมากกว่า 15 ปี ไม่มีความแตกต่างของปริมาณสารดังกล่าวในช่วงระยะการผลิตกรดและระยะการผลิตมีเทนแต่อย่างใด

2.6 แคลเซียม (Calcium) และแมกนีเซียม (Magnesium) ความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมมีค่าสูงในช่วงระยะการผลิตกรด ซึ่งโดยส่วนใหญ่แคลเซียมและแมกนีเซียมจะแลกเปลี่ยนกับแอมโมเนียและโพแทสเซียมในดินกลบทับรายวัน และสาเหตุหนึ่งที่ทำให้แคลเซียมใน

น้ำชะมูลฝอยมีปริมาณสูงขึ้นคือ การไม่ละลายน้ำของแคลเซียมเนื่องจากไบคาร์บอเนตมีค่าต่ำ ส่วนในช่วงระยะการผลิตมีเทนพบว่า แคลเซียมและแมกนีเซียมจะมีความเข้มข้นลดลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของไบคาร์บอเนตและค่า pH

2.7 โลหะหนัก (Heavy metals) ได้แก่ แมงกานีส แคลเซียม คอปเปอร์และนิเกิล มีแนวโน้มที่จะลดลงตามปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียม โดยในช่วงระยะการผลิตกรดพบว่า โลหะหนักสามารถละลายได้ดีเนื่องจากค่า pH ลดต่ำลง ส่วนในช่วงระยะการผลิตมีเทน ปริมาณกรดอินทรีย์มีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ค่า pH และค่าความเป็นด่างสูงขึ้น ทำให้โลหะหนักละลายได้น้อยลงส่งผลให้ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะมูลฝอยลดต่ำลงด้วย และอีกสาเหตุหนึ่ง คือ โลหะหนักดังกล่าวจะตกตะกอนในรูปของซัลไฟด์ เนื่องจากเกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนในช่วงระยะการผลิตกรดของซัลเฟต

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อลักษณะสมบัติและปริมาณของน้ำชะมูลฝอย ได้แก่ ลักษณะมูลฝอยที่ฝังกลบ สภาพภูมิอากาศ สภาพภูมิประเทศ สภาพอุทกธรณีวิทยา คุณสมบัติของดิน วัสดุกลบทับชั้นสุดท้าย และสถานะต่างๆ ภายในหลุมฝังกลบ เช่น กระบวนการทางชีวภาพและทางเคมี ความชื้น อุณหภูมิ ค่า pH และอายุของสถานที่ฝังกลบมูลฝอย โดยปัจจัยที่ทำให้เกิดความแตกต่างของลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอยมาจากลักษณะทางกายภาพของมูลฝอย เช่น การบดมูลฝอยให้เป็นชิ้นเล็กๆ การบดอัดมูลฝอยและปริมาณความชื้นในมูลฝอย และ Tchobanoglous *et al.* (1993) ได้สรุปลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอยโดยเปรียบเทียบระหว่างสถานที่ฝังกลบมูลฝอยใหม่กับสถานที่ฝังกลบมูลฝอยเก่า ดังรายละเอียดในตารางที่ 1

3. ผลกระทบน้ำชะมูลฝอยต่อสิ่งแวดล้อม

ปัจจุบันการกำจัดมูลฝอยในประเทศไทยมีปัญหาด้านการจัดการน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากสถานที่ฝังกลบมูลฝอย เนื่องจากส่วนใหญ่ไม่มีระบบบำบัดน้ำเสียหรือมีการใช้ระบบบ่อฝัง (Oxidation pond) ในการบำบัดน้ำเสียแต่ไม่ได้มีการออกแบบอย่างถูกต้องให้เพียงพอกับปริมาณและลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่เกิดขึ้น ทำให้ไม่สามารถลดค่าความสกปรกในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพการปล่อยน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านการบำบัดแล้วแต่ยังไม่ได้มาตรฐานน้ำทิ้งออกสู่สิ่งแวดล้อมจะเป็นการแพร่กระจายความสกปรกและสารพิษต่างๆ ที่มีอยู่ในมูลฝอยลงสู่แหล่งน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน ซึ่งเป็นแหล่งน้ำสำคัญในการนำไปใช้ประโยชน์เพื่อการอุปโภค-บริโภคและการเกษตรกรรม จึงอาจ

ส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์และจากการศึกษาคุณภาพน้ำบาดาลจากบ่อสังเกตการณ์จำนวน 3 จุด ของ General Electric Company (1975) โดยจุดแรกคือ บริเวณเหนือสถานที่ฝังกลบมูลฝอย ซึ่งเป็นตัวแทนคุณภาพน้ำก่อนการปนเปื้อนจากน้ำชะมูลฝอย จุดที่ 2 บริเวณสถานที่ฝังกลบมูลฝอย และจุดสุดท้ายอยู่ทางด้านท้ายน้ำ ซึ่งเป็นบริเวณที่อยู่ใกล้เคียงกับสถานที่ฝังกลบมูลฝอย โดยพบการปนเปื้อนของน้ำชะมูลฝอยลงสู่ น้ำบาดาลดังรายละเอียดในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอยจากสถานที่ฝังกลบใหม่กับสถานที่ฝังกลบเก่า

พารามิเตอร์	สถานที่ฝังกลบใหม่ (น้อยกว่า 2 ปี)		สถานที่ฝังกลบเก่า (มากกว่า 10 ปี)
	ช่วงที่พบ (มก./ล.)	ค่าทั่วไป (มก./ล.)	(มก./ล.)
BOD ₅	2,000-30,000	10,000	100-200
TOC	1,500-20,000	6,000	80-160
COD	3,000-60,000	18,000	100-500
Total suspended solids	200-2,000	500	100-400
Organic nitrogen	10-800	200	80-120
Ammonia nitrogen	10-800	200	20-40
Nitrate	5-40	25	5-10
Total phosphorus	5-100	30	5-10
Ortho phosphorus	4-80	20	4-8
Alkalinity as CaCO ₃	1,000-10,000	3,000	200-1,000
pH	4.5-7.5	6.0	6.6-7.5
Total hardness as CaCO ₃	300-10,000	3,500	200-500
Calcium	200-3,000	1,000	100-400
Magnesium	50-1,500	250	50-200
Chloride	200-3,000	500	100-400
Sulfate	50-1,000	300	20-50
Total iron	50-1,200	60	20-200

ที่มา: Tchobanoglous *et al.* (1993)

ตารางที่ 2 การปนเปื้อนของน้ำชะมูลฝอยลงสู่แหล่งน้ำบาดาลใกล้เคียง

พารามิเตอร์	หน่วย	ก่อนการปนเปื้อน	บริเวณฝังกลบมูลฝอย	บริเวณใกล้เคียง
pH	-	7.2	6.7	7.3
COD	มก./ล.	20	1,863	71
Total dissolved solids	มก./ล.	636	6,712	1,506
Total hardness	มก./ล.	570	4,960	820
Sodium	มก./ล.	30	806	316
Chloride	มก./ล.	18	1,710	248

ที่มา: General Electric Company (1975)

จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าน้ำชะมูลฝอยมีโอกาที่จะปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้ ซึ่งอาจก่อให้เกิดผลกระทบด้านต่างๆ ดังนี้

3.1 ผลกระทบต่อแหล่งน้ำธรรมชาติ

น้ำชะมูลฝอยมีส่วนประกอบของสารต่างๆ ทั้งสารพิษและสารอินทรีย์ในปริมาณสูง จึงอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อแหล่งน้ำธรรมชาติดังนี้

3.1.1 การลดลงของออกซิเจนในแหล่งน้ำ (Oxygen depletion in stream water) น้ำชะมูลฝอยมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูงมาก ซึ่งจากการศึกษาของ Ou (1989) พบว่า น้ำชะมูลฝอยจากสถานที่ฝังกลบมูลฝอยอ่อนนุ่มหลังจากผ่านบ่อหมักไร้อากาศมีค่า BOD อยู่ในช่วง 286-555 มก./ล. เมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะมีผลต่อปริมาณออกซิเจนในแหล่งน้ำ ซึ่งทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลงเนื่องจากถูกนำไปใช้ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์

3.1.2 ความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ (Toxic to stream life) น้ำชะมูลฝอยส่วนใหญ่มีสารพิษที่เกิดจากการชะล้างเอาสารพิษจากมูลฝอยที่นำมาฝังกลบ ได้แก่ มูลฝอยติดเชื้อจากโรงพยาบาลและมูลฝอยอันตรายจากบ้านเรือน เช่น กระจกยาฆ่าแมลง หลอดไฟและถ่านไฟฉาย เป็นต้น ซึ่งจะทำให้เกิดผลกระทบโดยตรงต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำและจุลินทรีย์ในกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ

3.1.3 ทศนียภาพในแหล่งน้ำ เนื่องจากน้ำชะมูลฝอยส่วนใหญ่มีสีน้ำตาลเข้มหรือสีดำ และการบำบัดน้ำชะมูลฝอยโดยวิธีทางชีวภาพเพียงอย่างเดียวไม่สามารถลดความเข้มข้นของสีลงได้มาก เพราะน้ำชะมูลฝอยมีอิวมิก กรดฟัลวิคและลิกนินเป็นองค์ประกอบ ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากทางชีวภาพ

3.2 ผลกระทบต่อทรัพยากรดิน

น้ำชะมูลฝอยสามารถไหลซึมผ่านชั้นดินที่ไม่มีการบดอัดได้เป็นอย่างดีและสามารถกระจายสารมลพิษได้ทั้งในแนวราบและแนวดิ่ง นอกจากนี้ดินบางชนิดยังมีคุณสมบัติเป็นตัวกรองที่ดีจึงสามารถดูดซับสิ่งสกปรกและสารพิษต่างๆ ได้ เช่น โลหะหนักที่สะสมไว้ในชั้นดิน

3.3 ผลกระทบต่อมนุษย์

3.3.1 สุขภาพอนามัยของมนุษย์ น้ำชะมูลฝอยที่ปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน อาจก่อให้เกิดผลกระทบโดยตรงต่อมนุษย์เมื่อนำน้ำจากแหล่งที่ปนเปื้อนไปอุปโภค-บริโภค

3.3.2 การใช้ประโยชน์ของมนุษย์ เนื่องจากน้ำชะมูลฝอยมีองค์ประกอบของสารต่างๆ ในปริมาณสูงและอาจตกค้างในธรรมชาติได้ เช่น ในดินและน้ำ ซึ่งมีผลต่อการนำทรัพยากรธรรมชาติเหล่านี้มาใช้ประโยชน์ เช่น เพื่อการอุปโภค-บริโภค การเกษตรกรรม การประมงและการพักผ่อนหย่อนใจ เป็นต้น

4. การบำบัดน้ำชะมูลฝอย

ลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอยประกอบด้วยสารที่มีโครงสร้างซับซ้อนและสารพิษปนเปื้อนสูง โดยเฉพาะน้ำชะมูลฝอยจากสถานที่ฝังกลบมูลฝอยที่มีอายุการใช้งานนานหลายปี ดังนั้นในการบำบัดน้ำชะมูลฝอยเพื่อให้คุณภาพน้ำทิ้งมีคุณภาพดีอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ซึ่งอาจต้องใช้วิธีการบำบัดร่วมกันหลายวิธี

การเลือกวิธีการบำบัดน้ำชะมูลฝอยให้เหมาะสมขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอยและอายุของสถานที่ฝังกลบมูลฝอย ซึ่งใช้เป็นข้อกำหนดพื้นฐานในการเลือกวิธีการบำบัดที่เหมาะสมใน

การกำจัดสารปนเปื้อนต่างๆ และโดยทั่วไปแล้ววิธีการบำบัดน้ำชะมูลฝอยที่นิยมใช้ ได้แก่ วิธีการชีวภาพ เคมี กายภาพและการใช้ร่วมกันหลายวิธี มีรายละเอียดดังนี้

4.1 การบำบัดน้ำชะมูลฝอยโดยวิธีการชีวภาพ

วิธีนี้นิยมใช้ลดปริมาณสารอินทรีย์ที่วัดในรูป BOD และ COD โดยให้ประสิทธิภาพสูงมากในการบำบัดถึง 60-80 % การบำบัดน้ำชะมูลฝอยโดยวิธีการชีวภาพจะอาศัยจุลินทรีย์ในการลดปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำ โดยจุลินทรีย์จะใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งอาหารสำหรับผลิตพลังงานและการเจริญเติบโต สารอินทรีย์ที่เหมาะสมใช้เป็นอาหารส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน โมเลกุลเล็กต่ำและง่ายต่อการย่อยสลาย สำหรับน้ำชะมูลฝอยจากสถานที่ฝังกลบมูลฝอยใหม่ที่มีอัตราส่วนของ BOD:COD สูง โดย Johansen and Carlson (1976) พบว่าอัตราส่วน BOD:COD ของน้ำชะมูลฝอยที่มีค่าสูง เนื่องจากมีสารอินทรีย์ที่ง่ายต่อการย่อยสลายสูง แสดงให้เห็นว่ามีความเหมาะสมในการบำบัดด้วยวิธีการชีวภาพ ส่วนน้ำชะมูลฝอยจากสถานที่ฝังกลบมูลฝอยเก่าที่มีอัตราส่วนของ BOD:COD ต่ำ เป็นผลมาจากมีสารอินทรีย์ที่ง่ายต่อการย่อยสลายต่ำ ดังนั้นน้ำชะมูลฝอยจากสถานที่ฝังกลบมูลฝอยที่มีอายุการใช้งานนานจึงไม่เหมาะสำหรับการบำบัดด้วยวิธีการชีวภาพเพียงอย่างเดียว เนื่องจากประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำ (น้อยกว่า 50 %) และต้องใช้การบำบัดทางเคมี/กายภาพร่วมด้วย เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดจนได้คุณภาพน้ำทิ้งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

4.2 การบำบัดน้ำชะมูลฝอยโดยวิธีการเคมี/กายภาพ

การบำบัดน้ำชะมูลฝอยโดยวิธีการเคมี/กายภาพ ได้แก่ การตกตะกอนทางเคมี การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์และการแลกเปลี่ยนไอออน เป็นต้น นิยมใช้สำหรับบำบัดน้ำชะมูลฝอยจากสถานที่ฝังกลบมูลฝอยเก่า (Christensen *et al.*, 1992) ซึ่งมีปริมาณสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่ายต่ำ มีอัตราส่วนของ BOD:COD น้อยกว่า 0.2 โดยใช้เป็นระบบบำบัดขั้นต้น แต่ในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีการชีวภาพเพื่อบำบัดน้ำชะมูลฝอยจากสถานที่ฝังกลบมูลฝอยใหม่ให้ได้คุณภาพน้ำทิ้งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน นอกจากนี้ยังมีการนำวิธีดังกล่าวไปใช้ในการบำบัดขั้นสุดท้ายสำหรับสถานที่ฝังกลบมูลฝอยใหม่

4.3 การบำบัดน้ำชะมูลฝอยแบบผสมผสาน

เนื่องจากลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอยมีโครงสร้างที่ซับซ้อนและมีสารประกอบต่างๆปนเปื้อนในปริมาณสูง ทำให้การใช้ระบบบำบัดทางชีวภาพเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอสำหรับการบำบัดน้ำชะมูลฝอย ดังนั้นการบำบัดน้ำชะมูลฝอยแบบผสมผสานระหว่างการบำบัดทางชีวภาพและทางเคมี/กายภาพร่วมกัน สามารถลดค่าความสกปรกในน้ำชะมูลฝอยจนได้คุณภาพน้ำทิ้งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

การเลือกใช้ระบบบำบัดน้ำชะมูลฝอยประเภทใดขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอย คุณภาพน้ำทิ้งที่ต้องการเทคโนโลยีที่มีและความชำนาญของบุคลากร ตลอดจนอายุของสถานที่ฝังกลบมูลฝอยก็อาจใช้คาดการณ์ลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอยและระบบบำบัดน้ำชะมูลฝอยที่เลือกใช้ได้ (ตารางที่ 3 แสดงการบำบัดน้ำชะมูลฝอยโดยวิธีต่างๆ)

ตารางที่ 3 การบำบัดน้ำชะมูลฝอยโดยวิธีต่างๆ สำหรับสถานที่ฝังกลบมูลฝอยใหม่และเก่า

Age of Fill	COD (มก./ล.)	Biological Treatment	Chemical Precipitation (mass lime dose)	Chemical Oxidation $\text{Ca}(\text{ClO})_2$	O_3	Reverse Osmosis	Activated Carbon	Ion Exchange Resin
Young (<5 ปี)	>10,000	Good	Poor	Poor	Poor	Fair	Poor	Poor
Medium (5-10 ปี)	500-10,000	Fair	Fair	Fair	Fair	Good	Fair	Fair
Old (>10 ปี)	<500	Poor	Poor	Fair	Fair	Good	Good	Fair

ที่มา: Chian and de Walle (1976)

กระบวนการสร้างตะกอน

1. ทฤษฎีของกระบวนการสร้างตะกอน

กระบวนการสร้างตะกอน (Coagulation) หมายถึง กระบวนการในการทำให้คอลลอยด์มารวมตัวกันเป็นฟล็อก ซึ่งเกิดขึ้นจากการเติมสารสร้างตะกอนลงไปในน้ำที่มีสารแขวนลอยซึ่งเป็นสาเหตุทำให้น้ำมีความขุ่นและสี โดยอนุภาคคอลลอยด์มีค่าอยู่ในช่วง 10^{-3} ถึง 10^{-6} มม. อนุภาคต่างๆ เหล่านี้เกิดจากสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ซึ่งในการเติมสารสร้างตะกอนเพื่อเป็นการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ จากนั้นอนุภาคต่างๆ จึงเคลื่อนที่เข้าใกล้กันและรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้นและตกตะกอนลงมาในกระบวนการตกตะกอน (Sedimentation) หรือการกรอง (Filtration) หรือทั้งสองวิธี โดยกระบวนการสร้างตะกอนประกอบด้วย 2 ขั้นตอน มีรายละเอียด ดังนี้ (มันสิน, 2542)

1.1 การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ (Destabilization) สามารถกระทำได้โดยอาศัยกลไก 4 แบบ คือ

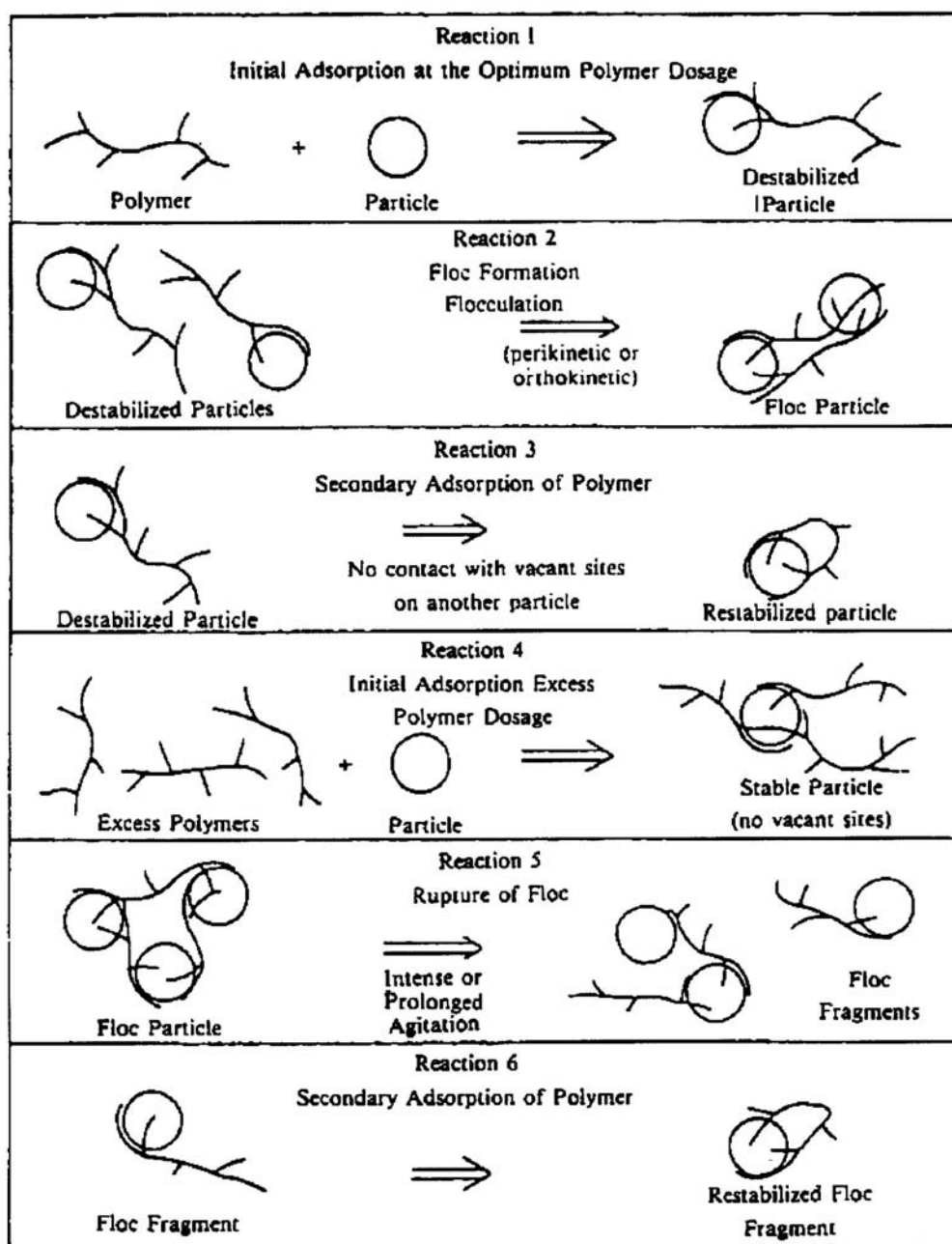
1.1.1 การลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse layer) โดยการเพิ่มจำนวนไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามกับประจุของอนุภาค ซึ่งเป็นการเพิ่มความหนาของ Counter ion ในชั้นกระจาย ทำให้ชั้นกระจายมีความหนาลดลงและค่า Zeta potential ลดลงด้วย จึงเป็นการทำลายเสถียรภาพทางไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์

1.1.2 การดูดติด (Adsorption) และการทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ (Charge neutralization) โดยใส่สารเคมีบางชนิดที่มีประจุไฟฟ้าตรงกันข้ามกับอนุภาคคอลลอยด์ และดูดติดผิวได้ ซึ่งมีผลในการลดศักย์ไฟฟ้าและทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์

1.1.3 การใช้ผลึกสารอินทรีย์เพิ่มน้ำหนักและขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ ทำการเติมสารประกอบเกลือของโลหะบางชนิดลงไปในน้ำในปริมาณที่เพียงพอจะเกิดการตกผลึกอย่างรวดเร็ว โดยอนุภาคคอลลอยด์อาจเป็นแกนในของผลึกเหล่านี้ ซึ่งเป็นการเพิ่มขนาดหรือนำหนักให้กับอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้อนุภาคคอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพและเกิดการตกตะกอนได้ เช่น การใส่สารส้มจะทำให้เกิดผลึก $Al(OH)_3$ ซึ่งเป็นผลึกสารที่ไม่ละลายน้ำ กลไกแบบนี้จึงเรียกว่าเป็น Sweep coagulation หรือการห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ไว้ในผลึกสารประกอบที่สร้างขึ้น

1.1.4 การใช้สารอินทรีย์โพลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์ (Polymer bridging) สารอินทรีย์โพลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นสามารถใช้เป็นสารตกตะกอนในการกำจัดอนุภาคคอลลอยด์ได้ โดยสารเหล่านี้มีขนาดใหญ่มากและอาจมีประจุบวก ลบ หรือไม่มีประจุก็ได้ ในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยสารอินทรีย์โพลิเมอร์สามารถอธิบายได้ด้วยโมเดลที่เรียกว่า Polymer bridging ดังแสดงในภาพที่ 2 กล่าวคือ โมเลกุลของสารอินทรีย์โพลิเมอร์สามารถเกาะติดบนอนุภาคคอลลอยด์ได้หลายตำแหน่งดังแสดงในปฏิกิริยาที่ 1 การเกาะติดอาจเป็นผลเนื่องมาจากประจุที่ต่างกันของโพลิเมอร์และคอลลอยด์ หรือเป็นแรงของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างประจุที่เหมือนกันของโพลิเมอร์และคอลลอยด์ อนุภาคที่มีโพลิเมอร์เกาะติดอยู่โดยมีปลายอิสระสำหรับการเกาะบนอนุภาคอื่น ถือได้ว่าเป็นอนุภาคที่สูญเสียเสถียรภาพแล้ว (Destabilized particle) อนุภาคดังกล่าวสามารถจับตัวกับอนุภาคอื่นได้ โดยมีโพลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อม (ปฏิกิริยาที่ 2) การต่อเชื่อมด้วยโพลิเมอร์จะเกิดขึ้นได้เมื่อมีโพลิเมอร์และตำแหน่งว่างบนผิวอนุภาค ถ้าปลายอิสระของโพลิเมอร์ไม่มีที่จะเกาะจับบนอนุภาคอื่น ปลายอิสระก็จะเกาะจับบนอนุภาคเดิม (ปฏิกิริยาที่ 3) ทำให้เสียผลประโยชน์ 2 ประการ คือ ทำให้ไม่มีปลายอิสระไว้จับกับอนุภาคอื่น และทำให้มีตำแหน่งว่างบนอนุภาคสำหรับยึดเกาะน้อยลง อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกสารโพลิเมอร์ยึดเกาะหลายตำแหน่งจนไม่มีปลายอิสระ และไม่มีที่ว่างเรียกว่า อนุภาคที่มีเสถียรภาพกลับคืนมาใหม่ การใช้โพลิเมอร์มากเกินไปอาจก่อให้เกิดผลเสียได้ เพราะโพลิเมอร์หลายโมเลกุลจะไปเกาะอยู่บนอนุภาคคอลลอยด์จนกระทั่งไม่มีที่ว่างบนอนุภาคสำหรับเป็นที่จับของปลายอิสระของโพลิเมอร์ที่อยู่บนอนุภาคอื่นๆ (ปฏิกิริยาที่ 4) การกวนน้ำแรงเกินไปหรือนานเกินไปทำให้เกิดผลเสียได้ เนื่องจากฟลอคที่เกิดขึ้นแล้วแตกออกเป็นส่วนตัว (ปฏิกิริยาที่ 5) และอาจทำให้โพลิเมอร์เกาะจับบนอนุภาคเดิม เสถียรภาพของคอลลอยด์จึงกลับคืนมาใหม่อีก (ปฏิกิริยาที่ 6)

1.2 การทำให้อนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่มากระทบกันหรือสัมผัสกันให้มากที่สุด (Transport of colloidal particles) เมื่ออนุภาคคอลลอยด์ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วการสร้างโอกาสสัมผัสระหว่างอนุภาคย่อมเกิดขึ้นได้ง่าย และหลังการสัมผัสควรเกาะติดกันแน่นเป็นกลุ่มก้อนเรียกว่า ฟลอค (Flocculation)



ภาพที่ 2 กลไกการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์แบบต่อเชื่อมด้วยโพลีเมอร์
ที่มา: Sumual and Osman (1983)

2. การเลือกใช้สารสร้างตะกอน

สารสร้างตะกอน (Coagulant) มีหน้าที่หลักคือ การทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ และทำให้ตะกอนยึดเหนี่ยวกันแข็งแรงขึ้น เพื่อไม่ให้ฟล็อกที่เกิดขึ้นต้องแตกตัวออก ซึ่งในปัจจุบัน สารสร้างตะกอนแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ (มันสิน, 2542)

2.1 กลุ่มที่มีอลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบหรืออลูมิเนียมโคแอกกูแลนต์

เมื่อเติมสารสร้างตะกอนกลุ่มที่มีอลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบหรืออลูมิเนียมโคแอกกูแลนต์ลงในน้ำ จะทำให้โมเลกุลแตกตัวเป็นอลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) และสารประกอบเชิงซ้อน (Complex ion) จำนวนมาก ซึ่งเกิดจากการไฮโดรไลซิสของอลูมิเนียม โดยอลูมิเนียมโคแอกกูแลนต์ที่ใช้กันอยู่มีหลายชนิด ได้แก่

2.1.1 Aluminum sulfate [$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$] หรือสารส้ม (Alum) เป็นสารสร้างตะกอนที่นิยมใช้มากที่สุด สารส้มที่ใช้ส่วนใหญ่อยู่ในรูป Filter alum [$Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$] เป็นสารที่จัดว่าเป็นเกลือกรด ดังนั้นจึงสามารถกัดกร่อนโลหะได้ ละลายน้ำได้ดี ซึ่งอาจใช้ในรูปแบบของแข็งหรือสารละลายได้

2.1.2 Liquid alum มี Water-soluble alumina (Al_2O_3) ประมาณ 5.8-8.5 % และราคาสูงกว่าชนิดแรก

2.1.3 Sodium aluminate ประกอบด้วย Al_2O_3 โดยสามารถทำให้อยู่ตัวได้ด้วย NaOH สารชนิดนี้ไม่ใช่เพียงชนิดเดียวแต่ยังใช้ร่วมกับสารส้มเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพมากขึ้น

2.1.4 Activated silica นิยมใช้ร่วมกับสารส้ม จะทำให้เกิดการตกตะกอนได้เร็วขึ้นและจัดเป็น Coagulant aid ของสารส้ม

2.2 กลุ่มที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบหรือไอออนโคแอกกูแลนซ์

เมื่อเติมไอออนโคแอกกูแลนซ์ลงในน้ำจะทำให้เกิดการแตกตัวเช่นเดียวกับอลูมิเนียมโคแอกกูแลนซ์ แต่สามารถทำงานภายใต้ค่า pH ที่ต่ำกว่าอลูมิเนียมโคแอกกูแลนซ์และทำงานในช่วง pH ที่กว้างกว่า คือ อยู่ในช่วงระหว่าง 4-11 นอกจากนี้ $\text{Fe(OH)}_3\text{.floc}$ หนักกว่า $\text{Al(OH)}_3\text{.floc}$ ทำให้ตกตะกอนได้เร็วกว่า โดยไอออนโคแอกกูแลนซ์ที่ใช้กันอยู่ ได้แก่

2.2.1 Ferrous sulfate (FeSO_4) โดยจะทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดเป็น Fe(OH)_3 ในสถานะที่มีค่า pH สูง ถ้าค่า pH ต่ำกว่า 8.5 จึงต้องมีการเติมปูนขาวลงไปด้วยดังสมการ (1) และ (2) ซึ่งโดยทั่วไป FeSO_4 นิยมใช้ร่วมกับปูนขาวในการกำจัดความกระด้างและการตกตะกอนเหล็กและแมงกานีส

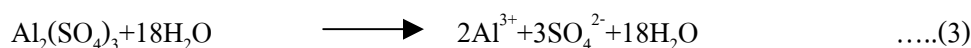


2.2.2 Ferric sulfate [$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$] ละลายได้ดีในน้ำอุ่นและทำปฏิกิริยากับค่าความเป็นด่างในน้ำหรือปูนขาวที่เติมลงไปเกิดเป็น $\text{Fe(OH)}_3\text{.floc}$

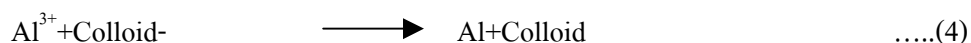
2.2.3 Ferric chloride (FeCl_3) มีฤทธิ์กัดกร่อน ถ้ามีความเข้มข้นอยู่ด้วย FeCl_3 จะทำปฏิกิริยากับค่าความเป็นด่างในน้ำเกิดเป็น Fe(OH)_3

สำหรับการวิจัยในครั้งนี้สารสร้างตะกอนที่เลือกพิจารณา ได้แก่ อลูมิเนียมซัลเฟต เฟอริกคลอไรด์และโพลิออลูมิเนียมคลอไรด์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

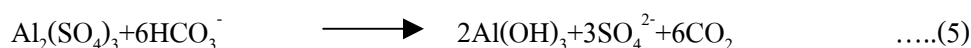
1. อลูมิเนียมซัลเฟต (Aluminum sulphate, [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$]) หรือสารส้ม (Alum) เป็นสารสร้างตะกอนที่นิยมใช้ มีทั้งแบบเป็นสารละลายและเป็นผงหรือเม็ด มีสีเขียวอ่อนจนถึงสีครีม สารส้มละลายน้ำได้ดีเมื่ออยู่ในรูปสารละลาย โดยมีฤทธิ์เป็นกรดและสามารถกัดกร่อนเหล็กหรือคอนกรีตได้ เมื่อใส่สารส้มในน้ำ สารส้มจะสลายตัวให้ Al^{3+} ดังสมการ (3)



Al^{3+} สามารถดึงประจุลบของคอลลอยด์ออกไปได้ ซึ่งทำให้อนุภาคอยู่ในสภาพไร้ประจุและสามารถรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ได้ดังสมการ (4)



ถ้าในน้ำมีค่าความเป็นด่างอยู่ เมื่อเติมสารส้มลงไปจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการ (5)



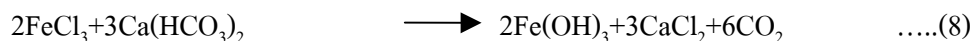
โดย Aluminium hydroxide floc [$\text{Al}(\text{OH})_3$] มีลักษณะเป็นเม็ดตะกอนคล้ายวุ้น ซึ่งจะรวมกับอนุภาคอื่นที่มีประจุบวกเกิดเป็นตะกอนที่มีประจุบวก สามารถไปดึงประจุลบของอนุภาคคอลลอยด์ออก ทำให้อนุภาคคอลลอยด์สามารถรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ ทำให้ได้น้ำใส ดังสมการ (6) และ (7)



$\text{Al}(\text{OH})_3$ ที่เหลืออยู่ สามารถทำปฏิกิริยากับอนุภาคประจุลบอื่นๆ ได้ เช่น ซัลเฟต (SO_4^{2-})

พริกานต์ (2539) พบว่าเมื่อใช้สารส้มในการบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยวิธีโคแอกกูเลชัน ค่า pH ที่เหมาะสมอยู่ในช่วงระหว่าง 7.5–8.5 และเกรียงศักดิ์ (2541) ระบุว่าค่า pH ที่เหมาะสมในการเกิดโคแอกกูเลชันโดยใช้สารส้ม คือ อยู่ในช่วงระหว่าง 4.0–7.0

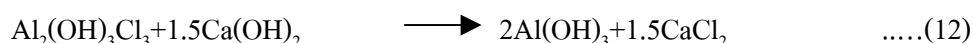
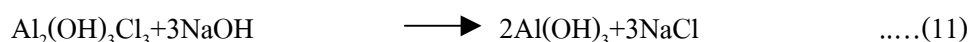
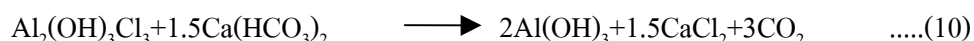
2. เฟอริกคลอไรด์ (Ferric chloride, $[\text{FeCl}_3]$) มี 3 สถานะ คือ ของเหลว ของแข็งที่ไม่มีน้ำ (Anhydrous) และเป็นผลึกน้ำ โดยมีปฏิกิริยาค้ำยกับอลูมิเนียมซัลเฟต กล่าวคือ เมื่อใส่ FeCl_3 ลงในน้ำที่มีค่าความเป็นด่างสามารถเกิดปฏิกิริยาดังสมการ (8) และ (9)



$\text{Fe}(\text{OH})_3$ สามารถรวมกับอนุภาคอื่นที่มีประจุบวกและเกิดเป็นตะกอนที่มีประจุบวก โดยตะกอนนี้สามารถไปดึงประจุลบของอนุภาคคอลลอยด์ออก ทำให้คอลลอยด์สามารถรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ได้ โดยมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นคล้ายกับปฏิกิริยาของอลูมิเนียมซัลเฟต

สุรพล (2528) ระบุว่าค่า pH ที่เหมาะสมสำหรับการเกิดโคแอกกูเลชัน โดยใช้เฟอร์ริกคลอไรด์มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 5.0-8.5 พิศานต์ (2539) ศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารสร้างตะกอนในการบำบัดน้ำเสียจากกองขยะอ่อนนุช โดยพบว่าค่า pH ที่เหมาะสมจากการใช้เฟอร์ริกคลอไรด์อยู่ในช่วงระหว่าง 7.5-8.0 และเกรียงศักดิ์ (2541) ระบุว่าในการทำโคแอกกูเลชันด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์ ค่า pH ที่เหมาะสมอยู่ในช่วงระหว่าง 3.5-6.5 และ ที่ pH สูงกว่า 8.5

3. โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminum chloride, PAC) เป็นสารสร้างตะกอนที่อยู่ในกลุ่มอลูมิเนียมโคแอกกูแลนต์ เตรียมขึ้นจากอลูมิเนียมที่เป็น Al_2O_3 ทำปฏิกิริยากับ HCl ที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้รวมตัวเป็น AlCl_3 หลังจากนั้นจะทำปฏิกิริยากับเบสที่อุณหภูมิและความดันสูง เพื่อให้รวมตัวเป็นอลูมิเนียมโพลิเมอร์ สูตรโดยทั่วไปคือ $\text{Al}_n(\text{OH})_m\text{Cl}_{3-n-m}$ โดยมีอำนาจในการสร้างตะกอนและการรวมตัวของตะกอนสูง ทำให้การตกตะกอนเป็นไปอย่างรวดเร็วกว่าสารส้มและสามารถใช้งานในช่วงที่ pH หรืออุณหภูมิกว้างกว่าสารสร้างตะกอนอื่นๆ ได้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีดังนี้



$\text{Al}(\text{OH})_3$ ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำได้เหมือนกับปฏิกิริยาของสารส้ม

สุรพล (2528) ระบุว่า การเกิดโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์สามารถเกิดขึ้นได้ดีที่ pH อยู่ในช่วง 6.0-9.0 และพริกานต์ (2539) พบว่าเมื่อใช้โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารสร้างตะกอนในการบำบัดน้ำชะมูลฝอยจากกองขยะอ่อนนุช ค่า pH ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 6.5-8.0

3. ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการสร้างตะกอน

กระบวนการสร้างตะกอนสามารถดำเนินการไปได้อย่างมีประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้ (มันสิน, 2542)

3.1 ชนิดของคอลลอยด์ในน้ำ เนื่องจากคอลลอยด์ในน้ำเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ที่มีสภาพเป็นประจุบวกหรือลบ หรือเป็นคอลลอยด์ประเภทไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) สามารถถูกกำจัดออกจากน้ำได้ง่ายกว่าประเภทชอบน้ำ (Hydrophilic) หากทราบชนิดของคอลลอยด์จะช่วยให้การตัดสินใจเลือกสารสร้างตะกอนได้อย่างเหมาะสม

3.2 อุณหภูมิ มีผลต่อปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น โดยเมื่ออุณหภูมิลดลง ทำให้ความหนืด (Viscosity) ของน้ำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการตกตะกอนของฟล็อกช้าลง เพราะมีแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นเนื่องจากความหนืดของน้ำเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ค่า pH จะเปลี่ยนแปลงไปเมื่ออุณหภูมิจึงมีการเปลี่ยนแปลง โดยจะมีผลมากในกรณีใส่สารเคมีช่วยตกตะกอนในปริมาณต่ำ และเมื่ออุณหภูมิลดลงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ของสารเคมีในน้ำลดลงด้วย

3.3 ค่าความเป็นด่างของน้ำ ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ต้านทานการเปลี่ยนแปลงค่า pH เพื่อให้ปฏิกิริยาในการกำจัดอนุภาคคอลลอยด์มีประสิทธิภาพมากขึ้น สำหรับสารสร้างตะกอน บางชนิดได้แก่ อลูมิเนียมซัลเฟตและเกลือของเหล็ก ซึ่งเป็นกรดเมื่อเติมลงไปในการบำบัดน้ำทำให้ไปลดค่าความเป็นด่างในน้ำ มีผลทำให้น้ำมีฤทธิ์กัดกร่อนได้

3.4 ค่า pH สารที่ใช้ในการตกตะกอนแต่ละชนิดจะให้ประสิทธิภาพดีที่สุดที่ค่า pH ที่แตกต่างกัน การเติมสารสร้างตะกอนลงในน้ำที่ไม่อยู่ในช่วงค่า pH ที่เหมาะสม นอกจากจะทำให้เปลืองสารเคมีที่ใช้แล้วยังทำให้คุณภาพน้ำไม่ดีเท่าที่ควรและกระบวนการตกตะกอนเกิดขึ้นไม่ดี

3.5 ชนิดและปริมาณของสารสร้างตะกอน สารสร้างตะกอนแต่ละชนิดมีความเหมาะสมในการทำลายอนุภาคคอลลอยด์ได้แตกต่างกัน รวมทั้งยังต้องคำนึงถึงปริมาณที่ใช้ ลักษณะของกลุ่มตะกอนที่เกิดขึ้น ความเร็วในการตกตะกอน ความยากง่ายในการใช้งานและราคา

3.6 กลี้อของสารอนินทรีย์ ในน้ำเสียส่วนใหญ่พบเกลืออนินทรีย์ละลายอยู่ ซึ่งมีผลต่อช่วงค่า pH ที่เหมาะสม กล่าวคือ ทำให้ช่วงค่า pH กว้างขึ้น ระยะเวลาที่จับตัวเป็นตะกอนนานขึ้นและปริมาณสารช่วยสร้างตะกอนใช้มากขึ้น

3.7 ระดับความขุ่นในน้ำ หมายถึง ปริมาณอนุภาคคอลลอยด์ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ โดยน้ำที่มีอนุภาคคอลลอยด์แขวนลอยอยู่เป็นจำนวนมากจะใช้สารสร้างตะกอนในปริมาณที่น้อยกว่าและสามารถตกตะกอนได้ดีกว่า เนื่องจากมีโอกาสเข้าสัมผัสมากกว่าน้ำที่มีอนุภาคคอลลอยด์น้อยกว่า

3.8 เวลาสัมผัสและความเร็วมวลน้ำ การทำให้สารเคมีละลายน้ำได้อย่างทั่วถึงเพื่อให้เกิดการสร้างตะกอนจำเป็นต้องกวนน้ำ เพื่อให้เกิดความปั่นป่วนอย่างรวดเร็วในเวลาสั้นๆ รวมทั้งสารเคมีกระจายตัวออกไปทำปฏิกิริยากับคอลลอยด์ได้อย่างทั่วถึงและเป็นการช่วยประหยัดเวลาด้วย ดังนั้นถ้าใช้การกวนน้ำที่รุนแรงมากเท่าใดก็ช่วยประหยัดเวลามากขึ้นเท่านั้น ในทางตรงข้ามเมื่อต้องการให้เกิดการรวมตัวของตะกอนที่เกิดขึ้น เพื่อให้มีโอกาสดำรงตัวกันมากที่สุด ซึ่งโดยทั่วไปใช้เวลาในการกวนเร็วในช่วง 30-90 วินาที และการกวนช้าใช้เวลาอยู่ในช่วง 30-60 นาที

4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้สารสร้างตะกอนในการบำบัดน้ำชะมูลฝอย

Ho *et al.* (1974) ศึกษาการบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี โดยใช้สารส้ม เพอร์ริคโครไรด์ ปูนขาวและโซเดียมซัลเฟต พบว่าน้ำชะมูลฝอยมีค่า COD ที่เข้าระบบเท่ากับ 9,100 มก./ล. เมื่อใช้ปริมาณสารส้ม 1,000 มก./ล. สามารถลดค่า COD ได้ 5.3 % และสามารถลดสีจากสีน้ำตาลดำลงไปเป็นสีเหลืองเข้ม เมื่อใช้ปริมาณเพอร์ริคโครไรด์ 1,000 มก./ล. สามารถลดค่า COD ได้ 16.3 % และลดปริมาณเหล็กลงได้ 98 % เมื่อใช้ปริมาณปูนขาวและโซเดียมซัลเฟตพบว่าลดค่าปริมาณเหล็กและสีได้ดี ส่วนการลดค่า COD และของแข็งสามารถลดได้น้อย

Chain and deWalle (1976) ศึกษากระบวนการบำบัดทางเคมี พบว่ากระบวนการทางเคมีเหมาะสมกับน้ำเสียจากกองขยะที่มีอายุการฝังกลบนาน มีอัตราส่วนของ BOD:COD ต่ำ หรือเหมาะกับการบำบัดขั้นต้นก่อนบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพ

ธรรมนัสและหทัยรัตน์ (2528) ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากกองขยะอ่อนนุช โดยใช้วิธีการตกตะกอนด้วยสารส้ม พบว่าค่า pH ที่เหมาะสมที่สุดในการตกตะกอนด้วยสารส้มมีค่าเท่ากับ 5.5 และทำการปรับ pH ของน้ำเสียจากกองขยะที่มีค่า pH ประมาณ 8 ให้มี pH ต่ำลงก่อนที่จะเติมสารส้มทำให้เกิดผลดีคือ สามารถลดค่าสีลงได้และได้ผลดีมากเมื่อปรับ pH น้ำชะมูลฝอยให้มีค่าอยู่ในช่วง 5.5–6.5 ทำให้ลดสีลงได้ประมาณ 90 % นอกจากนี้ได้ศึกษาผลกระทบจากการใช้สารโพลิเมอร์ในการตกตะกอนน้ำชะมูลฝอยด้วยสารส้ม พบว่าทั้ง Cationic anionic และ Nonionic polymer ให้ผลในการกำจัดสีและ COD ได้น้อย แต่จะให้ผลดีในแง่ของการรวมกลุ่มตะกอน เกิดเป็นกลุ่มก้อน (Floc) ได้ใหญ่ขึ้นและตกตะกอนได้เร็วขึ้น จึงสามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยได้ดี

Ehrig (1986) ศึกษาการบำบัดน้ำชะมูลฝอยโดยวิธีทางเคมี พบว่าสามารถกำจัด COD ได้ 50 % สำหรับน้ำชะมูลฝอยที่มีอัตราส่วนของ BOD:COD มีค่าต่ำ โดยใช้เกลือของ Fe และ Al เป็นสารสร้างตะกอน และค่า pH ที่ได้อยู่ในช่วง 4.5–5.5

กฤษณ์ (2530) ทำการทดลองการกำจัดสีของน้ำเสียจากกองขยะหนองแขมโดยกระบวนการทางเคมี สารสร้างตะกอนที่ใช้คือ ปูนขาว เฟอริกคลอไรด์ สารส้มและพิกคลิ่ง เวสต์ (Pickling waste) ซึ่งเป็นสารที่ได้จากกระบวนการผลิตเหล็ก มีค่า pH ประมาณ 1–2 มีองค์ประกอบหลักคือ เฟอริกคลอไรด์และกรดไฮโดรคลอริก พบว่าสารส้มมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูงสุด ซึ่งสารส้มปริมาณ 1,500 มก./ล. สามารถลดสีจาก 2,500 หน่วยของสี ลดลงเหลือ 100 หน่วยของสี นอกจากนี้ยังให้คำแนะนำว่าการกำจัดสีของน้ำเสียจากกองขยะซึ่งไม่ทำการเจือจางก่อนนั้นพบว่าไม่เหมาะสมเนื่องจากน้ำเสียยังคงมีปริมาณความเข้มข้นของสีเหลืออยู่สูงในระหว่างการทำจาร์เทสต์และทำให้เกิดฟองและตะกอนมาก

สุธีและคณะ (2532) ดำเนินการศึกษากำจัดสีของน้ำเสียจากกองขยะหนองแขมโดยวิธีทางเคมี พบว่าเมื่อนำน้ำเสียจากกองขยะที่มีสีน้ำตาลเข้มมาทำการกำจัดสีด้วยการเติมสารเคมีในชนิดและปริมาณต่างๆ ภายใต้การปรับ pH ต่างๆ นั้น ไม่สามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้เกิดฟองและฝ้าไข (Scum) ในปริมาณสูง เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีของสารเคมีกับน้ำเสียจึงทำการเจือจาง

ให้มีปริมาณอยู่ในช่วงประมาณ 3,000 หน่วยของสี จึงสามารถทำการกำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง ซึ่งยังใช้ปริมาณสารส้ม 1,500 มก./ล. โดยไม่ต้องปรับ pH และค่า pH ที่เหมาะสมมีค่าอยู่ในช่วง 5.5–6.0

พืรกานต์ (2539) ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารสร้างตะกอนในกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากกองขยะอ่อนนุช โดยพิจารณาคัดเลือกสารเคมีเพื่อเป็นสารสร้างตะกอนคือ สารส้ม เพอร์ริคโคลไรด์และโพลิออลูมิเนียมคลอไรด์ จากการศึกษาพบว่าเพอร์ริคโคลไรด์เป็นสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัดน้ำเสียจากกองขยะอ่อนนุช โดยสามารถกำจัดสี ความขุ่น COD และ BOD ได้ 92.71 %, 84.50 %, 37.44 % และ 33.09 % ตามลำดับ ซึ่งปริมาณเพอร์ริคโคลไรด์ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 800–1,200 มก./ล.

การดูดติดผิว

การดูดติดผิว (Adsorption) เป็นความสามารถของสารในการดึง โมเลกุลหรือคอลลอยด์ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือก๊าซให้ไปสัมผัสและเกาะติดบนผิวของมัน ลักษณะเช่นนี้จึงถือว่าเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass transfer) จากของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของของแข็ง การเกาะจับของโมเลกุลบนผิวของสารที่เป็นของแข็งและของเหลว นั้น โมเลกุลหรือคอลลอยด์จะไปเกาะติดอยู่บนผิวของของแข็ง เรียกว่า “สารถูกดูดติดผิว (Adsorbate)” ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับตัวของสารถูกดูดซับเรียกว่า “สารดูดติดผิว (Adsorbent)”

1. การเคลื่อนย้ายโมเลกุล

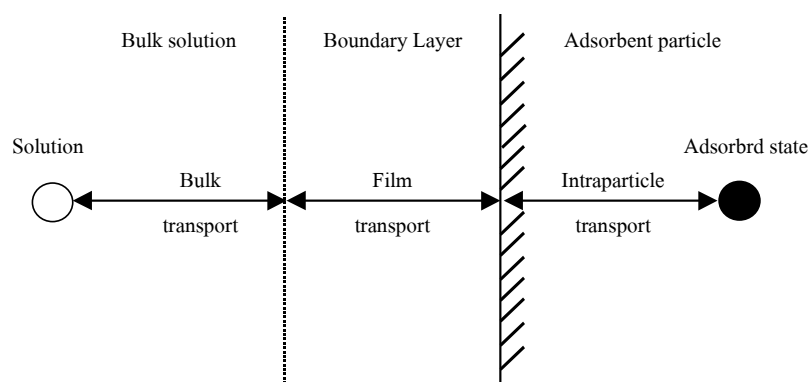
อัตราการดูดติดผิวมีความสำคัญมากโดยที่อัตราการดูดติดผิวอย่างรวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น อัตราการดูดติดผิวจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่เกิดช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนในการจำกัดอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล โดยแบ่งกลไกที่สำคัญในการดูดติดผิวได้ 4 ขั้นตอน ดังภาพที่ 3 มีรายละเอียดดังนี้ (Eckenfelder, 1981)

1.1 การเคลื่อนที่ของของเหลวทั้งก้อน (Bulk solution transport) สารถูกดูดติดผิวจะเคลื่อนที่จากสารละลายสู่ด้านนอกของน้ำที่อยู่ล้อมรอบสารดูดติดผิว ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่โดยการแพร่และเป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นได้เร็วที่สุด

1.2 การเคลื่อนที่บริเวณฟิล์มใกล้ผิวสารดูดติดผิว (Film diffusion transport) โมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวจะแพร่ผ่านชั้นน้ำ (Hydrodynamic boundary layer) ที่อยู่ล้อมรอบสารดูดติดผิวเมื่อน้ำเคลื่อนที่ผ่านสารดูดติดผิว โดยระยะทางในการเคลื่อนที่และเวลาที่เกิดขึ้นของขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการไหล ถ้าอัตราการไหลสูงจะส่งผลให้ระยะทางสั้นลง ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิวขั้นตอนนี้

1.3 การกระจายภายในโพรงของสารดูดติดผิว (Pore transport) หลังจากการเคลื่อนที่ผ่านชั้นน้ำแล้ว สารถูกดูดติดผิวจะเคลื่อนที่ผ่านช่องที่อยู่ภายในสารดูดติดผิวไปสู่บริเวณที่จะเกิดการดูดซับ การเคลื่อนที่แบบนี้จะเคลื่อนที่ได้ช้าทำให้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิวเช่นเดียวกัน

1.4 การเกาะติดทางกายภาพ (Adsorption) หลังจากมีการเคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่จะมีการดูดซับเกิดขึ้น และถูกดูดติดผิวทางกายภาพ ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ได้ค่อนข้างเร็ว



ภาพที่ 3 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารดูดติดผิว

ที่มา: Eckenfelder (1981)

สำหรับขั้นตอนการดูดซับที่เกิดขึ้นที่ช้าที่สุดเรียกว่า Rate limiting step ซึ่งควบคุมอัตราการกำจัดในถังปฏิกรณ์ที่มีความปั่นป่วนสูง ในขั้นตอน Film diffusion transport และ Pore transport จะควบคุมอัตราการกำจัด โดยขั้นตอน Film diffusion transport จะควบคุมในขั้นต้น หลังจากนั้นเมื่อมีการสะสมของสารถูกดูดซับในช่องภายในสารดูดซับขั้นตอน Pore transport จะควบคุมอัตราการกำจัด

2. แรงดึงดูดที่ผิว

การดูดซับบนผิวของของแข็งเกิดจากแรงดึงดูดที่สำคัญ 3 ประเภท คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (Electrical force) ระหว่างสารละลายและสารดูดซับ แรงวานเดอร์วาลส์ (Vander waals force) หรือแรงดูดซับทางกายภาพ (Physical force) และแรงดูดซับทางเคมี (Chemical force) (Christensen *et al.*, 1992) ในกระบวนการดูดซับพบว่า แรงจากความต่างศักย์ไฟฟ้ามีความสำคัญเฉพาะการดูดซับพวกไอออน ในขณะที่แรงดึงดูดอีก 2 ประเภทดังกล่าวมีบทบาทสำคัญสำหรับการดูดซับสารที่เป็นโมเลกุล มีรายละเอียดดังนี้ (Cheremisinoff and Ellerbusch, 1978)

2.1 แรงดูดซับทางกายภาพ เกิดจากแรงวานเดอร์วาลส์ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion) และแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) โมเลกุลของสารดูดซับจะยึดติดกันทางกายภาพกับโมเลกุลของสารดูดซับ การดูดซับในลักษณะนี้เป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multi-layered) กล่าวคือ ในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นโมเลกุลสารดูดซับในชั้นก่อนหน้า โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับและจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย การดูดซับทางกายภาพขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ การจัดเรียงตัวของวงโมเลกุล (Orientation) การกระจายตัว (Dispersion) และการเหนี่ยวนำ (Induction) สำหรับโมเลกุลที่มีขั้วแรงดึงดูดจะเกิดจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุล ซึ่งเป็นแรงดึงดูดที่เกิดจากโมเลกุลที่มีขั้วสองโมเลกุล คือ ขั้วลบของโมเลกุลหนึ่งดึงดูดกับขั้วบวกของโมเลกุลหนึ่ง ส่วนโมเลกุลที่ไม่มีขั้วในการดูดซับจะเกิดจากการกระจายตัวหรือเกิดการสั่นของอิเล็กตรอนรอบๆ นิวเคลียสของอะตอม ทำให้เกิดพลังงานของระบบลดลง ระบบจึงมีความเสถียรขึ้นทำให้โมเลกุลสามารถเข้ามาเกาะติดกันได้ ส่วนการย้อนกลับของกระบวนการนี้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างสารดูดซับและโมเลกุลของสารถูกดูดซับ ถ้ามีแรงดึงดูดน้อยการหลุดออกของโมเลกุลสารถูกดูดซับจะสามารถเกิดขึ้นได้

2.2 แรงดูดติดผิวทางเคมี เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารถูกดูดติดผิวและสารดูดติดผิวซึ่งโดยทั่วไปเป็นผลมาจากการเปลี่ยนรูปของสารถูกดูดติดผิวทำให้เกิดเป็นสารประกอบทางเคมีขึ้น รูปแบบการเกิดสารประกอบทางเคมีแตกต่างจากปฏิกิริยาเคมีทั่วไป โดยที่อะตอมบนผิวของสารดูดติดผวยังคงรักษาลักษณะดั้งเดิมบนพื้นผิวนั้นไว้ การดูดติดผิวประเภทนี้จะมี ความหนาของชั้นสารดูดติดผิวเพียงชั้นเดียว (Monolayered) และไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับเองได้ (Irreversible) แต่จะมีความแข็งแรงมากกว่าการดูดติดผิวทางกายภาพ เนื่องจากการจับตัวทางเคมีสร้างสารประกอบใหม่ที่ผิวของสารดูดติดผิว การดูดติดผิวทางเคมีจะเกิดที่อุณหภูมิสูง เพราะปฏิกิริยาเคมีจะเกิดอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงมากกว่าอุณหภูมิต่ำ โดยเกิดพลังงานอยู่ในช่วง 30-100 Kcal/mol

3. ประเภทของสารดูดติดผิว

มันสิน (2542) ได้จำแนกสารดูดติดผิวออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

3.1 สารอนินทรีย์ ได้แก่ ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ถ่านกระดูก (Bone char) แอคติเวตเตดซิลิกา (Activated silica) ถ่านฟิตและซีโอโลย เป็นต้น โดยสารธรรมชาติมีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 50-2,000 ตร.ม./กรัม แต่สารสังเคราะห์มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตาม สารดูดติดผิวประเภทนี้มีข้อเสีย คือ การจับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์มีข้อจำกัดมาก

3.2 ถ่านกัมมันต์ เป็นสารดูดติดผิวที่ดีกว่าสารอนินทรีย์ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 600-1,000 ตร.ม./กรัม วัสดุที่ใช้ในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์มีหลายชนิด เช่น ถ่านหิน กระดูกสัตว์ กะลามะพร้าวและเมล็ดในของผลไม้บางชนิด เป็นต้น

3.3 สารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange resin) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ โดยมีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 300-500 ตร.ม./กรัม ซึ่งมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ แต่มีข้อได้เปรียบคือ สามารถรีเจนเนอเรชั่น (Regeneration) ได้ง่ายกว่ามากและสารรีเจนเนอเรนต์ส่วนใหญ่มีราคาถูก เช่น เกลือแกง

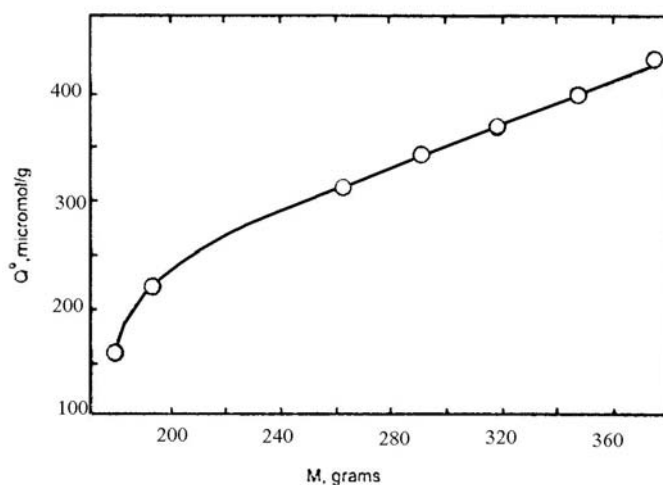
4. ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว

4.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดติดผิว

ความสามารถในการดูดติดผิวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะและอัตราการดูดติดผิวเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดสารดูดติดผิว โดยกลไกการดูดติดผิวภายนอกของสารดูดติดผิวที่ไม่มีโพรงนั้น อัตราการดูดติดผิวเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดติดผิว ส่วนสารดูดติดผิวที่มีโพรง อัตราการเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นผิวภายในโพรงถูกควบคุมโดยความต้านทานภายนอกที่เรียกว่า การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transport) ดังนั้นอัตราการดูดติดผิวมีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดติดผิว ในทางตรงกันข้ามถ้าการเคลื่อนที่ภายในเป็นตัวควบคุม อัตราการดูดติดผิว อัตราการดูดติดผิวเป็นสัดส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดติดผิว

4.2 ลักษณะของสารดูดติดผิว

ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดติดผิว ซึ่งการดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของสารดูดติดผิวในตัวทำละลายลดลง เนื่องจากในการดูดติดผิวสารดูดติดผิวจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย ซึ่งในที่นี้คือ น้ำ โดยสารดูดติดผิวที่ละลายน้ำได้ดี หรือแตกตัวเป็นไอออนได้ดีจะมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำสูงจึงเป็นการยากในการดูดติดผิว ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำ หรือละลายได้น้อยจะสามารถดูดติดผิวได้ดี นอกจากความสามารถในการละลายแล้ว ขนาดโมเลกุลของสารดูดติดผิวยังมีความสัมพันธ์กับการดูดติดผิว ซึ่งถ้าอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมกลไกแล้ว ความสามารถในการดูดติดผิวจะแปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของตัวละลาย แสดงดังภาพที่ 4 อัตราการดูดติดผิวของ Sulfonate alkylbenzenes ซึ่งมีขนาดโมเลกุลต่างๆ กัน โดยเมื่อน้ำหนักโมเลกุลมีขนาดมากขึ้น ความสามารถในการดูดติดผิวจะลดลง เมื่อการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นตัวควบคุมอัตราการดูดติดผิว (Weber, 1972)



ภาพที่ 4 น้ำหนักโมเลกุลของตัวละลายที่มีผลต่ออัตราการดูดติดผิว

ที่มา: Weber (1972)

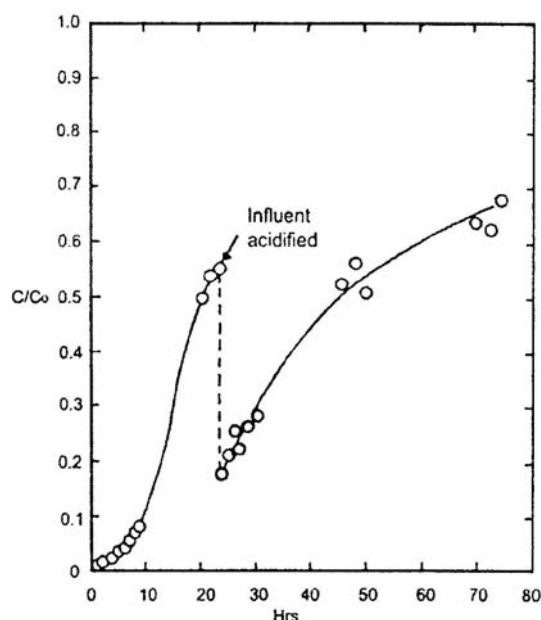
4.3 ค่า pH

ค่า pH มีอิทธิพลต่อการดูดติดผิวเนื่องจากไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกซิลไอออน สามารถถูกดูดติดอย่างแข็งแรง การดูดติดไอออนอื่นๆ จึงมีผลกระทบมาจากค่า pH ของสารละลาย นอกจากนี้ค่า pH ยังมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ภาพที่ 5 แสดงผลกระทบของค่า pH ในการดูดติดผิวของถังดูดติดผิวแบบแท่ง โดยป้อนสารละลาย Sulfonate alkylbenzenes ที่ pH ปกติเข้าสู่ระบบจนกระทั่งอัตราส่วนของน้ำออกและน้ำเข้ามีค่าเท่ากับ 0.55 ซึ่งที่ค่านี้ได้ทำการปรับ pH น้ำเข้าจนเหลือ 2.5 ผลจากการลด pH ทำให้ความสามารถในการดูดติดผิว เพิ่มขึ้นและความเข้มข้นของสารในน้ำออกลดลงอย่างรวดเร็ว (Weber, 1972)

4.4 ความปั่นป่วน

อัตราเร็วในการดูดติดผิวขึ้นอยู่กับกระบวนการแพร่ภายนอกและการแพร่ภายใน ซึ่งขึ้นกับความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบสารดูดติดผิวจะมีความหนามาก ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดติดผิว ดังนั้นการแพร่ภายนอกเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิว ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูงจะเกิดฟิล์มบางๆ ทำให้การแพร่ภายในเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิว ความปั่นป่วนในถังดูดติดผิว คือ

ความเร็วของน้ำที่ผ่านถึงต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัด ซึ่งตามทฤษฎีถ้าเพิ่มความเร็วจะทำให้อัตราเร็วในการดูดซับสูงขึ้น เนื่องจากความปั่นป่วนสูงขึ้น



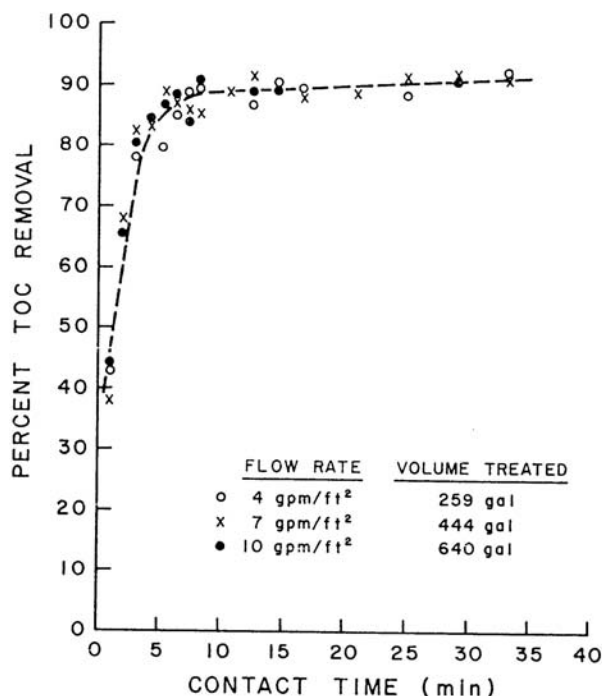
ภาพที่ 5 ค่า pH ที่มีผลต่อการดูดซับของถังดูดซับแบบแท่ง
ที่มา: Weber (1972)

4.5 อุณหภูมิ

การดูดซับโดยทั่วไปเป็นกระบวนการคายความร้อน (Exothermic) ดังนั้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่อัตราเร็วในการดูดซับจะลดลง ในทางตรงข้ามเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลง แต่อัตราเร็วในการดูดซับจะสูงขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมิจะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ โดยเปลี่ยนความสามารถในการละลาย เช่น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิซึ่งโดยปกติจะทำให้ความสามารถในการละลายสูงขึ้น มีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลงด้วย (Weber, 1972)

4.6 เวลาสัมผัส (Contact time)

เวลาสัมผัสเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดติดผิวและอายุการใช้งานของสารดูดติดผิว ซึ่ง Lee *et al.* (1983) พบว่าเวลาสัมผัส และความเข้มข้นของสารอิมิกเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่ออายุการใช้งานของชั้นคาร์บอน โดยถ้าเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นและความเข้มข้นของน้ำเข้าลดลง ทำให้อายุการใช้งานของชั้นคาร์บอนนานขึ้น เวลาสัมผัสที่ใช้ในการลดสารอินทรีย์ในน้ำเสียขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ เช่น พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดติดผิว ลักษณะและขนาดของรูพรุน ชนิดและขนาดโมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวในสารละลาย และชนิดของคาร์บอน Susumu (1991) กล่าวว่า เวลาสัมผัสถึงเปล่า (Empty Bed Contact Time, EBCT) ของถ่านกัมมันต์ควรมีค่าอยู่ในช่วง 7.5-30 นาที โดยเวลาน้อยจะใช้เมื่อกำจัดสารอินทรีย์สังเคราะห์ที่สามารถดูดติดผิวได้ง่าย และเวลานานจะใช้ในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ดีและดูดติดผิวได้ยาก ซึ่งเวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดติดผิวเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ถ้าหากเวลาสัมผัสเลยจากช่วงนี้แล้วจะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดติดผิว แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมผัสกับประสิทธิภาพการดูดติดผิว

ที่มา: Valencia and Gioyna (1972)

ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นถ่านที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับพิษสูง สามารถดูดซับสารที่อยู่ในสภาพของก๊าซและของเหลวได้ จึงมีประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น การทำให้น้ำบริสุทธิ์ อุตสาหกรรมเคมี ยาและน้ำดื่ม โดยใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับและฟอกสี นอกจากนี้ถ่านกัมมันต์ยังใช้ในการกำจัดน้ำเสียและมลภาวะต่างๆ ถ่านกัมมันต์ผลิตขึ้นจากการเผา (Carbonization) วัตถุดิบที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ โดยเฉพาะวัตถุดิบที่มีแหล่งกำเนิดจากพืช เช่น ถ่านหิน พีท ลิกไนต์ แกลบ ชี้อเลื้อยและกะลามะพร้าว เป็นต้น ซึ่งจะได้ถ่านและหลังจากนั้นจึงนำมากระตุ้น (Activation) จนได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพในการดูดซับพิษสูง (กรรณิการ์ และคณะ, 2541)

1. โครงสร้างถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างเป็นกลุ่มของคาร์บอน ซึ่งมีลักษณะคล้ายแกรไฟต์ (Graphite) แต่แตกต่างกันที่พื้นที่ผิวภายในที่มีจำนวนมากในถ่านกัมมันต์ และการจัดเรียงอะตอมที่ไม่เป็นระเบียบ ซึ่งเกิดจากในระหว่างกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน โดยโครงสร้างนี้เป็นไมโครคริสตัลไลต์ (Microcrystallites) ประกอบด้วยวงหกเหลี่ยมด้านเท่าของอะตอมคาร์บอนผสมกัน เส้นผ่าศูนย์กลางของแผ่นชั้นคาร์บอนที่สร้างไมโครคริสตัลไลต์มีขนาดประมาณ $150 \text{ \AA}$ และระยะห่างระหว่างไมโครคริสตัลไลต์มีค่าอยู่ในช่วง $20\text{-}50 \text{ \AA}$

ในกระบวนการเตรียมถ่านกัมมันต์จะทำให้เกิดช่องว่างภายในของไมโครคริสตัลไลต์ โดยโครงสร้างที่ขอบของแผ่นชั้นจะเปลี่ยนไป เป็นผลมาจากลักษณะของวัสดุและกระบวนการเตรียมถ่านกัมมันต์ กลุ่มของวงที่เปลี่ยนไป มีผลกระทบต่อระยะทางของแผ่นชั้นที่ติดกันและลักษณะการดูดซับพิษของคาร์บอน และเนื่องจากกระบวนการออกซิเดชันบนชั้นคาร์บอนเป็นแบบสุ่ม ดังนั้นโครงสร้างของถ่านกัมมันต์เมื่อเทียบกับแกรไฟต์แล้วค่อนข้างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการคาร์บอนไนเซชันและอุณหภูมิในกระบวนการกระตุ้น

2. ลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์

ลักษณะสมบัติโดยทั่วไปที่ใช้ในการพิจารณาเลือกใช้ถ่านกัมมันต์ ได้แก่ ลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมี โดยลักษณะสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของถ่านกัมมันต์ดังแสดงในตารางที่ 4 ส่วนลักษณะสมบัติทางเคมีที่ทำให้ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับพิษแต่ละชนิดแตกต่างกัน ได้แก่ กลุ่มฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ ซึ่งประกอบด้วยกลุ่ม Carboxyl Phenolic hydroxyl Quinone type Normal lactones Fluorescein type lactones Carboxylic acid anhydrides และ Cyclic peroxide โดยหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์มีผลต่อความจุของการดูดซับพิษ เช่น กลุ่ม Carboxylic ทำให้ความจุของการดูดซับพิษฟีนอลลดลง

ตารางที่ 4 ลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์ในท้องตลาด

Physical Properties and Specifications	มาตรฐาน อุตสาหกรรม (มอก.) ¹	Calgon Filtrisorb 300 ²	Westvaco Nuchar WV-L ²	ถ่านกัมมันต์ ที่ใช้ใน การศึกษา ³
Surface area, m ² /g	-	950-1,050	1,000	950
Apparent density, g/cm ³	Min.0.36	0.48	0.48	0.5-0.52
Real density, g/cm ³	-	2.1	2.1	-
Partical density, g/cm ³	-	1.3-1.4	1.4	-
Effective size	-	0.8-0.9	0.85-1.05	-
Uniformity coefficient	-	1.9	1.8	-
Pore volume, cm ³ /g	-	0.85	0.85	-
Mean partical size, mm		1.5-1.7	1.5-1.7	-
Iodine number	Min.600	900	950	Min.750-850
Abrasion no.	Min.70	70	70	-
Ash content, %	-	8	7.5	Max.8
Moisture, %	Max.8	2	2	4

ที่มา: 1 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2532)

2 U.S.EPA (1973)

3 ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการศึกษาของบริษัทวอเตอร์ แอ็ชเวจ จำกัด (2549)

3. ประเภทของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ถ่านกัมมันต์แบบผงและถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด มีรายละเอียดดังนี้ (มันสิน, 2542)

3.1 ถ่านกัมมันต์แบบผง (Power activated carbon, PAC) มีขนาดอยู่ในช่วง 10-50 μm หรือน้อยกว่า การเติมถ่านกัมมันต์แบบผงสามารถเติมพร้อมกับการเติมสารสร้างตะกอนได้ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วจะรวมอยู่กับตะกอนแขวนลอยในน้ำกลายเป็นฟล็อก ซึ่งสามารถแยกออกจากน้ำได้โดยการตกตะกอนหรือการกรอง ดังนั้นถ่านกัมมันต์แบบผงจึงนิยมเติมก่อนกระบวนการตกตะกอนหรือการกรอง

3.2 ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (granular activated carbon, GAC) มีขนาดใกล้เคียงกับเม็ดทรายที่ใช้ในการกรองน้ำ มีความแข็ง แต่เปราะและเบากว่าทราย โดยถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดสามารถบรรจุถังให้น้ำไหลผ่านในลักษณะคล้ายกับการกรองน้ำได้ ระยะเวลาสัมผัสระหว่างน้ำเสียกับถ่านกัมมันต์อยู่ในช่วง 10-30 นาที น้ำเสียก่อนที่จะเข้าถังบรรจุถังต้องกำจัดตะกอนแขวนลอยออกให้มากที่สุดก่อน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการอุดตันของถ่านกัมมันต์ลดลงเนื่องจากถูกอุดตันเร็วเกินไป

การวิจัยในครั้งนี้จะใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว ซึ่งเป็นถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดมีคุณสมบัติคือ กะลามะพร้าวเมื่อเผาเป็นถ่านแล้วจะเกิดรูพรุนจำนวนมาก โดยรูพรุนเหล่านี้มีขนาดเล็กมาก เมื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงจะลุกไหม้อย่างรวดเร็วให้ความร้อนสูงแต่หมดเร็ว จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน แต่เนื่องจากรูพรุนในถ่านกะลามะพร้าวมีขนาดเล็กและละเอียดมากจึงมีคุณสมบัติในการดูดซับสิ่งสกปรกต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี ถ่านกะลามะพร้าวมีลักษณะแข็งแรงแป่นเป็นมัน หลังจากนำไปบดเป็นเม็ดเล็กๆ แล้ว เมื่อนำไปกระตุ่นจะได้ถ่านกัมมันต์เม็ดที่มีความแข็งแรงสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่ทำจากวัสดุชนิดอื่นๆ ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบในการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่อไป สำหรับในการเผากะลามะพร้าวให้เป็นถ่านนั้นสามารถทำการเผาในที่อับอากาศ กล่าวคือ ให้อากาศเข้าไปได้ไม่มาก โดยส่วนที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจนออกซิเจน จะมีการสลายแยกตัว ก๊าซบางส่วนของคาร์บอนและสารอื่นๆ จะกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์คาร์บอนมอนอกไซด์ กรดน้ำส้ม น้ำมันดิบและเมธานอล เหลือแต่ถ่านที่จับตัวอยู่ในโครงสร้างคล้ายแกรไฟต์

4. การดูดซับแบบคอลัมน์

การดูดซับแบบคอลัมน์ที่มีการให้อัตราการไหลของของเหลวที่จะมีข้อดีอย่างเห็นได้ชัดกว่าการใช้แบบเท (Batch) เนื่องจากอัตราการดูดซับขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลาย ซึ่งความเข้มข้นของตัวถูกละลายจะสัมผัสชั้นของคาร์บอนในคอลัมน์อย่างต่อเนื่อง

4.1 การดูดซับแบบไหลต่อเนื่อง

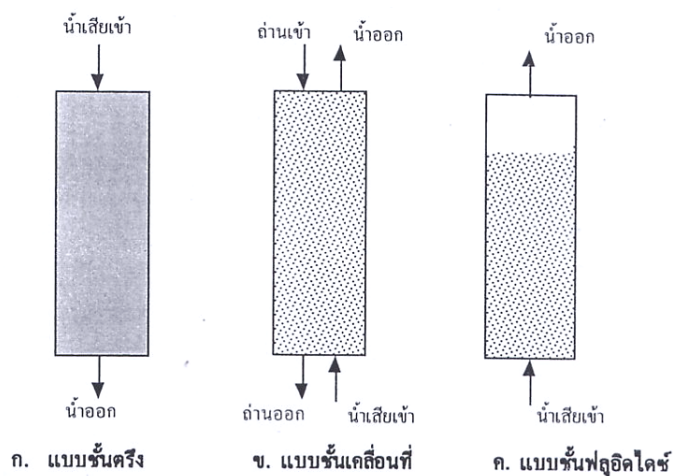
ระบบการดูดซับแบบไหลต่อเนื่องนิยมใช้กับปริมาณน้ำเสียจำนวนมาก ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบ แสดงดังภาพที่ 7 มีรายละเอียดดังนี้ (เกรียงศักดิ์, 2542)

4.1.1 แบบชั้นตรึง (Fixed bed) ระบบการดูดซับแบบนี้ให้น้ำเสียไหลลงผ่านชั้นคาร์บอนที่อยู่กับที่ ไม่มีการเคลื่อนที่ขึ้นลง โดยลักษณะการดูดซับเริ่มเกิดขึ้นบริเวณส่วนบนของระบบ จากนั้นบริเวณการดูดซับจะค่อยๆ เคลื่อนลงเกิดขึ้นในส่วนล่างของชั้นจนกระทั่งหมดสภาพการดูดซับที่ส่วนล่างของชั้น แสดงดังภาพที่ 8 บริเวณที่การดูดซับเริ่มทำงานไม่ได้ประสิทธิภาพ (จุด Cc) เรียกว่า จุดเริ่มหมดสภาพ (Breakpoint) และหลังจากบริเวณนี้ต่อไปเป็นเส้นโค้งยกสูงขึ้น คือ การดูดซับจะค่อยๆ หมดสภาพจนไม่สามารถบำบัดน้ำเสียได้ เรียกเส้นโค้งนี้ว่า Breakthrough curve และเมื่อถึงจุด Cd ซึ่งเป็นจุดที่เรียกว่า จุดหมดสภาพ (Exhaustion point)

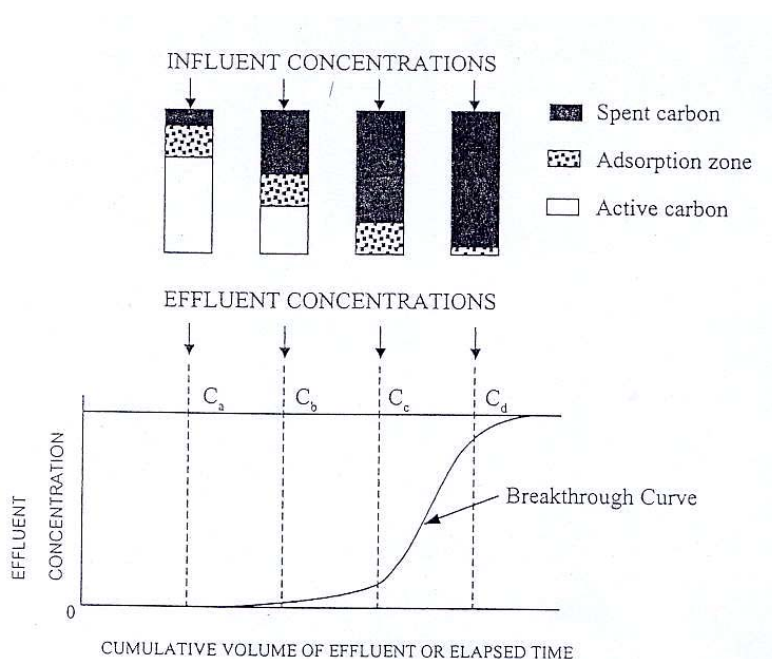
4.1.2 แบบชั้นเคลื่อนที่ (Moving bed) ระบบนี้ให้น้ำเสียไหลขึ้นพร้อมกับมีการเปลี่ยนสารดูดซับจากบริเวณส่วนล่างของถัง ซึ่งจะหมดสภาพก่อน ระบบมีประสิทธิภาพค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่ไม่นิยมใช้กับการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากต้องควบคุมการดูแลการเคลื่อนย้ายสารดูดซับออกมาอย่างต่อเนื่อง และสม่ำเสมอทั่วหน้าตัดของถัง ระบบแบบชั้นเคลื่อนที่มีใช้กันในงานแยกก๊าซไฮโดรคาร์บอนของโรงงานปิโตรเลียม

4.1.3 แบบชั้นฟลูอิดไดซ์ (Fluidized bed) ระบบนี้น้ำเสียไหลขึ้นด้วยความเร็วสูงมากพอให้สารดูดซับเกิดการแขวนลอยในระบบได้ แต่ต้องไม่ทำให้สารดูดซับลอยขึ้นมาจนหลุดออกจากชั้นดูดซับ ในการควบคุมระบบให้มีประสิทธิภาพอย่างสม่ำเสมอต้องเติมสารดูดซับใหม่เข้าจากด้านล่างของถัง และถ่ายสารดูดซับเก่าออกจากด้านล่างของถัง ระบบนี้มีค่าใช้จ่ายสูง

กว่าระบบแบบชั้นตรง แต่มีข้อดีที่สามารถรับปริมาณน้ำเสียไหลเข้าได้มากกว่าและเลือกใช้สารดูดติดผิวที่มีขนาดเล็กกว่าได้ โดยไม่เกิดปัญหาการสูญเสียความดันสูงเกินไปในระบบ



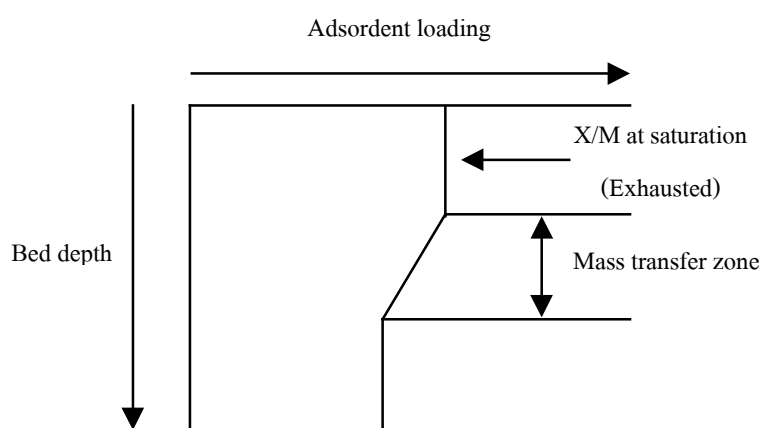
ภาพที่ 7 การดูดติดผิวแบบไหลต่อเนื่อง
ที่มา: เกรียงศักดิ์ (2542)



ภาพที่ 8 ลักษณะการดูดติดผิวแบบไหลต่อเนื่องในชั้นตรง
ที่มา: Clark and Lykins (1989)

4.2 เขตการถ่ายเทมวล

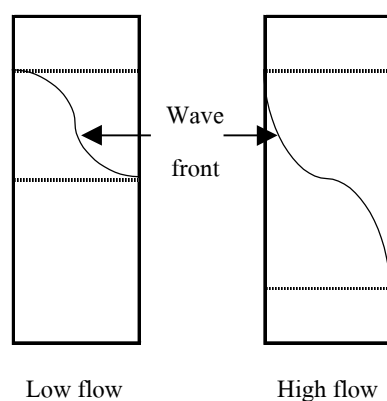
เมื่อน้ำมีสารปนเปื้อนไหลผ่านชั้นของสารดูดซับ การถ่ายเทมวล (Mass transfer zone, MTZ) เกิดขึ้นจากการดูดซับอย่างต่อเนื่องของตัวถูกละลายในชั้นคาร์บอน ดังภาพที่ 9 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับบนสารดูดซับกับความลึกของชั้นคาร์บอน



ภาพที่ 9 เขตการถ่ายเทมวลในถังดูดซับแบบแบ่ง

ที่มา: Faust and Aly (1987)

ตัวถูกละลายจะถูกดูดซับอย่างรวดเร็วในชั้นบนของคาร์บอนจนกระทั่งปริมาณการดูดซับเข้าสู่สมดุลที่จุดนี้ สารดูดซับที่ชั้นบนจะหมดสภาพการใช้งาน การดูดซับจะเกิดขึ้นต่อไปในชั้นคาร์บอนที่อยู่ต่ำลงมา ในเขตที่สารปนเปื้อนเปลี่ยนสภาพจากของเหลวมาอยู่ในสถานะที่ถูกดูดซับนี้เรียกว่า เขตการถ่ายเทมวล ซึ่งความลึกของขอบเขตการถ่ายเทมวลขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ ชนิดของสารที่ถูกดูดซับ ลักษณะของสารดูดซับและปัจจัยทางชลศาสตร์ โดย Bernardin (1976) พบว่า เมื่อสารละลายเคลื่อนที่ผ่านชั้นคาร์บอนด้วยอัตราการไหลที่เร็วจะทำให้เขตการถ่ายเทมวลกว้าง ส่งผลให้เกิดการหลุดรอดของสารปนเปื้อนในน้ำออกจากระบบอย่างรวดเร็ว ซึ่งในทางตรงกันข้ามหากสารละลายเคลื่อนที่ผ่านชั้นคาร์บอนอย่างช้าๆ จะทำให้เกิดการสะสมตัวของสารปนเปื้อนที่ละน้อยจนกระทั่งเกิดการหลุดรอดของสารนั้นในน้ำออก ในกรณีนี้คาร์บอนจะถูกใช้ประโยชน์ในการดูดซับอย่างเต็มที่ ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 เขตการถ่ายเทมวลของอัตราการไหลที่ต่างกัน

ที่มา: Bernardin (1976)

4.3 การเลือกใช้ลักษณะของน้ำไหลผ่านคอลัมน์

เสริมพลและไชยยุทธ (2524) แบ่งประเภทการเลือกใช้ลักษณะของน้ำไหลผ่านคอลัมน์ออกเป็น 2 รูปแบบ คือ

4.3.1 แบบไหลลงข้างล่าง (Down flow) ให้น้ำไหลผ่านโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity) แต่เมื่อคาร์บอนหมดประสิทธิภาพต้องทำการฟื้นฟูสภาพใหม่ทั้งคอลัมน์

4.3.2 แบบไหลขึ้นข้างบน (Up flow) ต้องใช้พลังงานในการดันน้ำให้ไหลผ่านชั้นคาร์บอนขึ้นข้างบน ซึ่งมีข้อดีคือ สามารถฟื้นฟูสภาพของชั้นคาร์บอนที่หมดสภาพแล้วได้เป็นระยะๆ โดยนำออกทางด้านล่างของคอลัมน์

4.4 ข้อพิจารณาในการออกแบบระบบการดูดติดผิวแบบคอลัมน์

การออกแบบระบบการดูดติดผิวแบบคอลัมน์มีข้อในการพิจารณาดังนี้ (เสริมพลและไชยยุทธ, 2524)

- 1) ลักษณะการไหลของน้ำผ่านคอลัมน์ เป็นแบบไหลลงข้างล่าง (Down flow) หรือแบบไหลขึ้นข้างบน (Up flow)
- 2) การใช้คอลัมน์หน่วยเดียว หรือหลายหน่วยต่อแบบอนุกรมหรือขนาน
- 3) ถ้าเลือกให้น้ำไหลลงข้างล่างจะไหลด้วยแรงดัน (Pressure) หรือไหลด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity)
- 4) ถ้าเลือกให้น้ำไหลขึ้นข้างบนจะให้สารดูดซับแบบอัดแน่น (Packed bed) หรือแบบขยายตัวได้ (Expanded bed) เมื่อมีน้ำไหลผ่าน
- 5) ลักษณะของถังที่บรรจุและชนิดของวัสดุที่ใช้ทำถัง

5. การฟื้นฟูสภาพของถ่านกัมมันต์เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ (Carbon Regeneration)

เมื่อพิจารณาทางด้านเศรษฐศาสตร์แล้ว การนำถ่านกัมมันต์ที่เสื่อมสภาพแล้วกลับมาใช้ใหม่ได้อีกซึ่งจะช่วยลดต้นทุนที่จะต้องซื้อถ่านกัมมันต์ใหม่มาทดแทน การฟื้นฟูสภาพของถ่านกัมมันต์โดยอาศัยกระบวนการกำจัดสิ่งสกปรกที่ถูกดูดซับไว้ออกไป ถ่านกัมมันต์ก็จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับได้ สามารถนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ได้อีก กระบวนการที่สามารถฟื้นฟูสภาพของถ่านกัมมันต์ทำได้หลายวิธี ได้แก่ กระบวนการทางความร้อน กระบวนการทางเคมี และกระบวนการทางชีวภาพ โดยกระบวนการที่ใช้แพร่หลาย คือ กระบวนการทางความร้อน โดยอาศัยเตาเผาซึ่งมีทั้งแบบ Multiple Hearth และ Rotary Kiln ในการเผาไหม้ให้โมเลกุลของสิ่งสกปรกระเหยออกมาและถูกเผาไหม้ มีขั้นตอนดังนี้ (มันสิน, 2542)

- 1) ถ่านกัมมันต์ที่เสื่อมสภาพจะถูกรวมน้ำเป็นของเหลวข้น แล้วถูกนำเข้าสู่กระบวนการฟื้นฟูสภาพ
- 2) แยกน้ำออกจากถ่านกัมมันต์โดยการอบให้แห้ง ใช้เวลาประมาณ 15 นาทีเป็นอย่างน้อย

3) นำถ่านกัมมันต์ที่แยกน้ำแล้วส่งเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิในช่วง $870-980^{\circ}\text{C}$ ภายใต้บรรยากาศที่มีการควบคุมปริมาณออกซิเจนและความชื้น ขั้นตอนนี้เป็นสร้างปฏิกิริยาไพโรไลซิส เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกในรูพรุนของถ่านกัมมันต์และสร้างปฏิกิริยาออกซิเดชันให้กับสารที่เหลือจากปฏิกิริยาไพโรไลซิส สิ่งสกปรกที่ถูกเผาจะกลายเป็นก๊าซ ซึ่งต้องระบายทิ้งออกจากเตาเผา โดยระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสและออกซิเดชันเท่ากับ 5 และ 10 นาที ตามลำดับ

4) เมื่อถ่านกัมมันต์ออกจากเตาเผาขณะร้อนจัด จะถูกทำให้เย็นโดยการจุ่มลงในน้ำ (Water quenching)

5) เมื่อถ่านกัมมันต์ในถังจุ่มเย็นตัวลงแล้ว นำไปล้างแยกเศษถ่านออก จากนั้นเก็บไว้เตรียมใช้งานได้เลย

6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ถ่านกัมมันต์ในการบำบัดน้ำชะมูลฝอย

Cook and Foree (1974) ศึกษาการบำบัดน้ำชะมูลฝอยโดยผ่านถ่านกัมมันต์แบบคอลัมน์ โดยใช้เวลา 15 นาที และทำการตกตะกอนด้วยปูนขาวในขั้นต้นก่อน พบว่าสามารถลด COD ได้ 81 % โดยน้ำชะมูลฝอยมีค่า COD เริ่มต้นเท่ากับ 3,290 มก./ล. แต่เนื่องจากน้ำชะมูลฝอยมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง ความสามารถในการดูดซับมีต่ำและมีสารแขวนลอยปนอยู่ ทำให้เกิดปัญหาในการใช้วิธีการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ อย่างไรก็ตามการใช้ถ่านกัมมันต์บำบัดน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านการบำบัดด้วยบ่อเติมอากาศมาแล้ว โดยทำการบำบัดแบบเท ทำให้สามารถกำจัดสีและสารแขวนลอยได้ดี แต่เนื่องจากน้ำชะมูลฝอยมีสารอินทรีย์ละลายน้ำและสารอินทรีย์ทั้งหมดที่มีความเข้มข้นสูง ซึ่งการบำบัดด้วยกระบวนการดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์จะให้ประสิทธิภาพดีกว่า

Ho *et al.* (1974) ศึกษาการใช้ถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb 400 ในการบำบัดน้ำชะมูลฝอย โดยเดินระบบแบบเทพบว่า เมื่อใช้ถ่านกัมมันต์ 16,000 มก./ล. มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสีและกลิ่น โดยลด COD ได้ 34 % เมื่อน้ำชะมูลฝอยมีค่า COD เริ่มต้น 4,920 มก./ล. และทดลองโดยใช้ถังดูดซับแบบคอลัมน์พบว่า ลดค่า COD ได้ 59 % จากน้ำชะมูลฝอยที่มีค่า COD เริ่มต้น 7,213 มก./ล. ซึ่งใช้เวลา 45 นาที สามารถสรุปได้ว่าการใช้ถ่านกัมมันต์ในการบำบัดน้ำชะมูลฝอยสามารถลด COD ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อใช้ถ่านกัมมันต์อย่างน้อย 4,000 มก./ล. และมีประสิทธิภาพในการบำบัดเหล็กได้มากกว่า 60 %

Chain and de Walle (1976) กล่าวว่า การบำบัดน้ำชะมูลฝอยโดยทั่วไปใช้ถ่านกัมมันต์ในปริมาณสูง การกำจัด COD ของระบบแบบเทมีประสิทธิภาพอยู่ในช่วงระหว่าง 34-85 % และการใช้ถักตักผิวแบบคอลลัมน์มีประสิทธิภาพในการลด COD อยู่ในช่วง 59-74 % ในการบำบัดน้ำชะมูลฝอยจากสถานที่ฝังกลบมูลฝอยใหม่พบว่า การใช้ถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพต่ำ เนื่องจากน้ำชะมูลฝอยมีปริมาณของกรดไขมันระเหยได้จำนวนมาก ซึ่งเหมาะสมในการบำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพ ส่วนสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดโดยถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่เป็นสารที่คล้ายกรดฟัลวิก (Fulvic-like material) ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 500-10,000 โดยน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นเมื่ออายุของสถานที่ฝังกลบมูลฝอยเพิ่มขึ้น การใช้ถ่านกัมมันต์บำบัดน้ำชะมูลฝอยเหมาะสำหรับการบำบัดน้ำชะมูลฝอยที่มีความคงตัวทางชีวภาพ ในการศึกษาการบำบัดน้ำชะมูลฝอยจากสถานที่ฝังกลบเก่าที่มีอัตราส่วนของ BOD:COD เท่ากับ 0.04 พบว่าถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการลด COD สูงถึง 85 % ความเข้มข้นของ COD ที่บริเวณผิวหน้ามีค่าสูงถึง 0.17 มก.COD/มก.ถ่านกัมมันต์ ซึ่งมีค่าสูงกว่าการบำบัดน้ำชะมูลฝอยที่มีกรดไขมันระเหยได้เป็นจำนวนมาก

Martin and Iwugo (1982) ศึกษาผลกระทบของค่า pH และสารแขวนลอยในการกำจัดสารอินทรีย์ออกจากน้ำและน้ำเสีย โดยใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับ พบว่าของแข็งแขวนลอยที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า 200 มก./ล. ไม่มีผลต่อการดูดซับของสารอินทรีย์ด้วยถ่านกัมมันต์ แต่ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่มีค่ามากกว่า 500 มก./ล. ส่งผลกระทบต่อกระบวนการดูดซับทั้งด้านของอัตราเร็วในการดูดซับและความจุของการดูดซับ สำหรับผลกระทบจากค่า pH พบว่าการดูดซับของสารอินทรีย์มีประสิทธิภาพที่ค่า pH ต่ำประมาณ 3-5 และที่ค่า pH สูงประมาณ 10-11 ส่วนค่า pH ในช่วง 7-8 ไม่เกิดประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดี

Chang (1988) ศึกษาวิธีการบำบัดสีจากน้ำชะมูลฝอยที่สถานที่ฝังกลบมูลฝอยอ่อน พบว่าปริมาณถ่านกัมมันต์ 20 มก./ล. ที่ค่า pH ของน้ำชะมูลฝอยเท่ากับ 8 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสี COD TKN TP แคลเซียม โครเมียมและปรอทได้ 94 %, 75 %, 25 %, 77 %, 80 %, 90 % และ 70 % ตามลำดับ โดยใช้เวลาสัมผัส 30 นาที

สัญญาวัล (2539) ศึกษาความเป็นไปได้ในการลด COD และสีออกจากน้ำชะมูลฝอยด้วยกระบวนการดูดซับผิวโดยใช้ถ่านกัมมันต์รุ่น Filtrasorb 300 ถ่านไม้และถ่านเกลบ พบว่าถ่านไม้และถ่านเกลบไม่มีความเป็นไปได้ทางวิศวกรรม เนื่องจากความสามารถในการดูดซับ COD และสีต่ำ ส่วนถ่านกัมมันต์มีความเป็นไปได้ทางวิศวกรรม เนื่องจากความสามารถในการลด COD และ

ลืออยู่ในช่วง 78-89 % และ 37-97 % ตามลำดับ ในการทดลองที่ชั้นถ่านสูงเท่ากับ 1.2 ม. ซึ่งเป็นค่าสูงสุดในการทดลอง อัตราการระบรทุกทางน้ำ 0.15 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ซึ่งเป็นค่าต่ำสุดในการทดลอง และความเข้มข้น COD เริ่มต้น 250 มก./ล. ซึ่งเป็นค่าต่ำสุดในการทดลอง พบว่ามีความสามารถในการลด COD และสีได้สูงสุด โดยมีประสิทธิภาพเริ่มต้นในการลด COD และสีเท่ากับ 97 % และ 96 % ตามลำดับ นอกจากนี้ในกระบวนการดูดซับมีความสามารถในการลดสารแขวนลอยในน้ำชะมูลฝอยก่อนเข้าสู่ระบบถังดูดซับ โดยใช้กระบวนการทางเคมี เพื่อลดการ อดตันที่เกิดจากสารแขวนลอยและเพิ่มความสามารถในการดูดซับ

สุนันทา (2543) วิจารณ์บำบัดน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านบ่อฝังของโรงบำบัดอ่อนนุชโดยขบวนการดูดซับด้วยแอคทิเวตเต็ดคาร์บอนแบบคอลัมน์ พบว่าที่อัตราน้ำล้นผิวต่ำสุดในการทดลองเท่ากับ 0.0083 ลบ.ม./ตร.ม.-นาท (เมื่อทดลองที่อัตราน้ำล้นผิวเท่ากับ 0.0083, 0.0111 และ 0.0167 ลบ.ม./ตร.ม.-นาท) ปรับค่า pH ของน้ำชะมูลฝอยเริ่มต้นเท่ากับ 5 (เมื่อทดลองปรับค่า pH ของน้ำชะมูลฝอยเริ่มต้นเท่ากับ 5, 7 และ 9) และความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์สูงสุดในการทดลองเท่ากับ 80 ซม. (เมื่อทดลองที่ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์เท่ากับ 20, 50 และ 80 ซม.) มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD และฟอสเฟตสูงสุด และมีอายุการใช้งานนานที่สุด โดยในช่วงแรกสามารถกำจัด COD และฟอสเฟตได้ 85 % และ 36 % ตามลำดับ

ศิริพรรณ (2544) ศึกษาความสามารถของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตในประเทศไทย เพื่อกำจัดความสกปรกของน้ำชะมูลฝอยซึ่งวัดในรูป COD และสี โดยใช้ถ่านกัมมันต์ 3 ชนิด ได้แก่ ถ่านกัมมันต์จากไม้ กะลามะพร้าวและลิกไนต์ พบว่าถ่านกัมมันต์จากไม้มีความเหมาะสมมากที่สุดในการกำจัด COD และสีในน้ำชะมูลฝอย รวมทั้งราคาถ่านต่อปริมาณสารถูกดูดซับที่กำจัดได้ต่ำสุดด้วย ส่วนปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อระยะเวลาใช้งานถ่านในการดูดซับ COD แบบต่อเนื่อง ได้แก่ ความลึก อัตราการระบรทุกผิวและความเข้มข้นสารถูกดูดซับ โดยที่ความลึกชั้นถ่านเท่ากับ 1.2 ม. ซึ่งเป็นความลึกถ่านสูงสุดในการทดลองมีระยะเวลาใช้งานนานที่สุด รวมทั้งอัตราการระบรทุกผิว 0.3 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. และความเข้มข้น COD เริ่มต้นของน้ำชะมูลฝอยเท่ากับ 500 มก./ล. ซึ่งเป็นค่าต่ำสุดในการทดลอง มีระยะเวลาใช้งานนานที่สุด สำหรับการศึกษาการดูดซับแบบต่อเนื่องพบว่าสภาวะที่มีประสิทธิภาพการกำจัดสีดีที่สุดคือ ที่อัตราการระบรทุกผิวเท่ากับ 0.3 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. และความเข้มข้นสีเริ่มต้นของน้ำชะมูลฝอย 2,267 Pt-Co ซึ่งเป็นค่าต่ำสุดที่ใช้ในการทดลองและประสิทธิภาพในการกำจัดสีมีค่าสูงในช่วง 0-24 ชั่วโมงแรก โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีอยู่ในช่วง 98.50-81.56 %