

การประยุกต์ใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบมีแผ่นกรองจมตัวในการบำบัดน้ำเสีย

โรงงานผลิตกระดาษ

Application of Submerged Filter Bioreactor for Paper Mill Wastewater Treatment

คำนำ

อุตสาหกรรมผลิตกระดาษเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้น้ำในกระบวนการผลิตมากเป็นอันดับสาม รองจากอุตสาหกรรมผลิตโลหะและสารเคมี โดยปริมาณน้ำที่ใช้จะแตกต่างกันไปตามชนิดของ กระดาษที่ผลิตซึ่งสูงถึง 30 - 100 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน โดยน้ำส่วนใหญ่ใช้ในกระบวนการล้างและ ผสมเยื่อกระดาษจึงทำให้น้ำเสียจากอุตสาหกรรมประเภทนี้มีมลพิษปนเปื้อนสูงทั้งจากเยื่อกระดาษ ในขั้นตอนการล้างวัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ขัดแต่งกระดาษ ซึ่งพบว่าในโรงงานบางแห่งอาจมีค่า ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) ของน้ำเสียสูงถึง 11,000 มิลลิกรัมต่อลิตรซึ่งส่งผลกระทบต่อ สิ่งแวดล้อมอย่างมาก จึงจำเป็นต้องบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำเพื่อลดผลกระทบที่จะเกิดขึ้น โดยกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ ระบบแอกติเวเตดสลัดจ์แบบทั่วไป (Conventional Activated Sludge) ร่วมกับการตกตะกอนขั้นต้นเพื่อแยกเยื่อกระดาษขนาดใหญ่ออก แต่อุปสรรคสำคัญในการเดินระบบ คือ การเกิดปัญหาตะกอนลอย (Bulking Sludge) ซึ่งเกิดจาก แบคทีเรียเส้นใย (Filamentous Bacteria) เพิ่มจำนวนขึ้นจนเป็นแบคทีเรียที่มีจำนวนมากในระบบ (Predominant Organism) ภายใต้อาหารที่สิ่งแวดล้อมและคุณลักษณะของน้ำเสียที่เหมาะสม เช่น การบรรทุกสารอินทรีย์ต่ำ (Low Organic Loading) หรือสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ (F/M Ratio) ต่ำ การขาดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ปริมาณออกซิเจนละลายในถังเติมอากาศต่ำ และการมีสารประกอบที่ย่อยสลายได้ง่ายในน้ำเสีย เป็นต้น เมื่อเกิดโครงสร้างของตะกอนจุลินทรีย์ที่มี แบคทีเรียเส้นใยอยู่มากเกิน (Open Floc Structure) จะทำให้ความเร็วในการตกตะกอนลดลงทั้งในถัง ตกตะกอน (Sedimentation Tank) และถังเพิ่มความหนาแน่น (Thickener) โดยสามารถวิเคราะห์การ เกิดตะกอนลอยได้จากค่าดัชนีปริมาณตะกอน (Sludge Volume Index, SVI) ภาวะตะกอนลอยถูก กำหนดให้เกิดขึ้นเมื่อค่าดัชนีปริมาณตะกอน มากกว่า 150 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งการเกิดตะกอนลอย ยังผลให้ความหนาแน่นของตะกอนในระบบการจัดการตะกอนและในระบบหมุนเวียนตะกอนในถัง เติมอากาศต่ำลง และมีปริมาณของแข็งแขวนลอย (Suspended Solid) และบีโอดี (Biochemical

Oxygen Demand) ในน้ำทิ้งจากระบบบำบัดสูงขึ้นเนื่องจากแผ่นตะกอนได้หลุดออกไปจากถังตกตะกอนชั้นที่สอง

ดังนั้นการแก้ปัญหาการเกิดตะกอนลอยในระบบแอกติเวเตดสลัดจ์ที่มีสถานะแวดล้อมเหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียเส้นใยจึงเป็นสิ่งที่มีความจำเป็น ซึ่งสังเกตได้จากผลงานวิจัยหลายฉบับได้ศึกษาวิธีการควบคุมการเกิดตะกอนลอย เช่น การควบคุมพีเอชในถังเดิมอากาศ การเพิ่มอัตราการเติมอากาศ และไม่ให้ระดับสารอาหารมีความเข้มข้นต่ำเกินไปโดยการใช้บ็อคคัพพันธุ์จุลินทรีย์ (Selector) แต่ก็พบว่ายังมีข้อจำกัดในการควบคุมการเกิดแบคทีเรียเส้นใย โดยเฉพาะอุตสาหกรรมผลิตกระดาษที่มีการนำน้ำจากกระบวนการรีดตะกอนกลับเข้าระบบเป็นปริมาณมาก และยังมีแป้งซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่ายในน้ำเสีย จากแนวความคิดการประยุกต์ใช้แผ่นกรองร่วมกับถังปฏิกรณ์ขนาดเล็กในการกักเชื้อจุลินทรีย์ไว้ในถังโดยไม่ต้องอาศัยถังตกตะกอนชั้นที่สองจึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหาที่เกิดจากแบคทีเรียเส้นใยโดยไม่ต้องกำจัดพร้อมทั้งยังมีความยืดหยุ่นในการรับน้ำที่มีค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ไม่คงที่ และคุณภาพน้ำที่ได้จะมีค่าสารแขวนลอยและบีโอดีคิ่งต่ำ แต่เนื่องจากยังไม่มีการศึกษาถึงระบบบำบัดที่ใช้แบคทีเรียเส้นใยในการย่อยสลายและขาดข้อมูลในการออกแบบและเดินระบบ ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการวิจัย เรื่อง “การประยุกต์ใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบมีแผ่นกรองจมตัวในการบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตกระดาษ” นี้ขึ้นเพื่อศึกษาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์และประสิทธิภาพรวมถึงสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสม เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการพิจารณาในการออกแบบระบบและเป็นทางเลือกหนึ่งในแก้ปัญหาลอยเกิดจากแบคทีเรียเส้นใยในระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกติเวเตดสลัดจ์

วัตถุประสงค์

1. เพื่อทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ของการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตกระดาษ โดยแบคทีเรียชนิดเส้นใย (Filamentous Bacteria) ที่เจริญเติบโตในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบมีแผ่นกรองจมตัว (Submerged Filter Bioreactor, SFBR)
2. เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดและกำหนดสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมของระบบถังปฏิกรณ์แบคทีเรียเส้นใย แบบมีเยื่อกรองจมตัวในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษ

ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาทดลองหาอัตราการเจริญเติบโตและอัตราการย่อยสลายสารอาหารของแบคทีเรียชนิดเส้นใย ในการย่อยสลายนํ้าทิ้งจากโรงงานผลิตรกระดาษ บริษัท คิมเบอร์ลี-คล้าค ประเทศไทย จำกัด ด้วยระบบการย่อยสลายโดยใช้แบคทีเรียชนิดเส้นใย โดยทำการทดลองด้วยระบบจำลองในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Scale) แบบมีแผ่นกรองจมตัว (Submerged Filter) และป้อนนํ้าเสียแบบเป็นลำดับสลับเนื่อง (Sequencing Batch) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ ได้แก่ อัตราการเพิ่มของจุลินทรีย์ (Yield Coefficient, Y) อัตราการใช้สารอาหารสูงสุดต่อหน่วยน้ำหนักจุลินทรีย์ (Maximum Rate of Substrate Utilization per Unit Weight of Microorganisms, k) อัตราการตายจุลินทรีย์ (Microorganism Decay Coefficient, k_d) ค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในนํ้าเสียที่มีการย่อยสลายเท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราสูงสุด (Half Velocity Coefficient, K_s) และอัตราการเติบโตสูงสุดสุทธิของจุลินทรีย์ (The Maximum Net Growth Rate per Unit Mass, μ_m)

2. ศึกษาทดลองหาสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ ระยะเวลาเก็บกัก (Hydraulic Retention Time, HRT) และอายุตะกอน (Sludge Retention Time, SRT) ที่เหมาะสมเทียบกับประสิทธิภาพในการลดบีโอดี รวมถึงค่าความเข้มข้นตะกอนจุลินทรีย์ และค่าฟลักซ์จำเพาะ (Specific Flux) ที่เหมาะสมในการเดินระบบ โดยมีพารามิเตอร์ที่ตรวจวัดในระหว่างการศึกษ ได้แก่ อุณหภูมิ, พีเอช, ของแข็งจมตัว (Sludge Volume, SV_{30}), ดัชนีปริมาณตะกอน (Sludge Volume Index, SVI), ปริมาณออกซิเจนละลาย (Dissolved Oxygen, DO), บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand), ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand), ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอย (Suspended Solid, SS), ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยระเหย (Volatile Suspended Solid, VSS) และค่าฟลักซ์

การตรวจเอกสาร

1. อุตสาหกรรมกระดาษ

อุตสาหกรรมผลิตกระดาษเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้น้ำในกระบวนการผลิตมากเป็นอันดับสามรองจากอุตสาหกรรมผลิตโลหะและสารเคมี โดยปริมาณน้ำที่ใช้จะแตกต่างกันไปตามชนิดของกระดาษที่ผลิตซึ่งสูงถึง 30 - 100 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน ขึ้นอยู่กับคุณภาพของกระดาษที่ต้องการผลิตและความทันสมัยของเครื่องจักร โดยน้ำที่ใช้ส่วนใหญ่จะใช้ในกระบวนการล้างเยื่อกระดาษ (Pulp Washing) และผสมเยื่อกระดาษ (Pulp Mixing) ทำให้น้ำเสียจากอุตสาหกรรมประเภทนี้มีมลพิษปนเปื้อนสูงทั้งจากเยื่อกระดาษในขั้นตอนการล้างวัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ขัดแต่งกระดาษ ซึ่งพบว่าในโรงงานบางแห่งอาจมีค่าซีโอดีของน้ำเสียสูงถึง 11,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (Thompson and Forster, 2003)

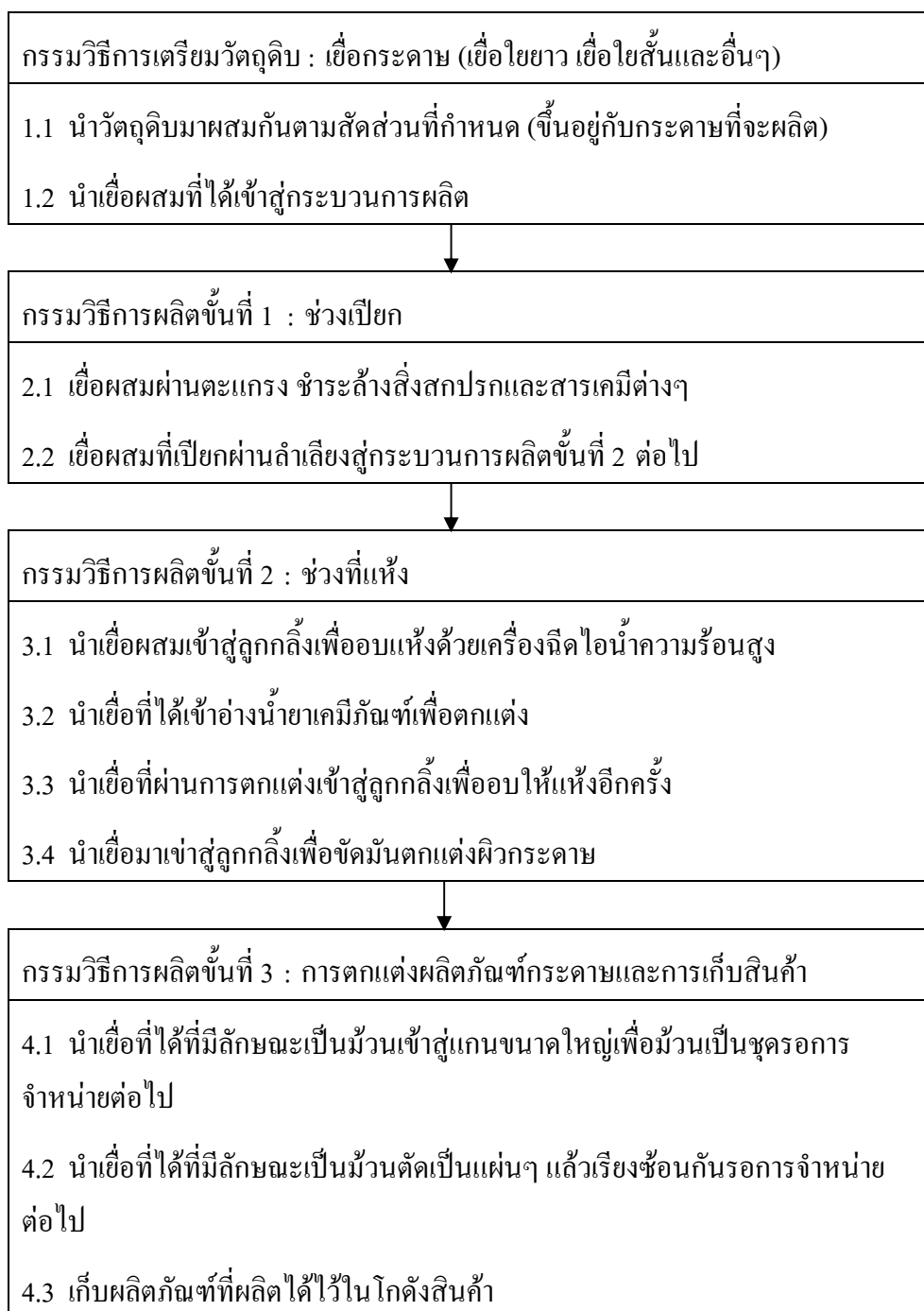
อุตสาหกรรมกระดาษเป็นอุตสาหกรรมต่อเนื่องมาจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ โดยเป็นการใช้เยื่อกระดาษมาผลิตเป็นกระดาษชนิดต่าง ๆ และเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจซึ่งสามารถทดแทนการนำเข้าได้อย่างมาก อัตราการบริโภคกระดาษของคนไทยโดยเฉลี่ยมีประมาณ 40 กิโลกรัมต่อคนต่อปี และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกปี (กลุ่มงานบริการส่งออก 4, 2545)

1.1 กระบวนการผลิตกระดาษ

ไม้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตกระดาษ ซึ่งประกอบไปด้วย เซลลูโลส ประมาณ 45 เปอร์เซ็นต์ เฮมิเซลลูโลส ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ ลิกนิน ประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ลิกนินเป็นสารเชื่อมเยื่อเซลลูโลสเข้าด้วยกัน และสารประกอบอื่นๆ อีกประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ เช่น เรซิน ไขมัน เป็นต้น อุตสาหกรรมกระดาษมีกระบวนการผลิตหลัก ๆ ที่สำคัญคือ กระบวนการเตรียมเยื่อกระดาษ (Pulping Process) กระบวนการฟอกเยื่อกระดาษ (Bleaching Process) และการสร้างกระดาษ (Paper Manufacturing) ซึ่งประกอบด้วยการบีบอัดกระดาษ และการเป่าแห้ง (Simon and Bruce, 2003)

กระบวนการเตรียมเยื่อกระดาษ เป็นกระบวนการแยกกลินิน เรซิน และไขมันออกจากเยื่อเซลลูโลส วิธีที่นิยมใช้เป็นวิธีทางเคมี (Chemical Pulping) โดยการให้ความร้อนในโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซัลไฟด์ ซึ่งสามารถแยกกลินินได้ดีกว่าแบบใช้วิธีการบด (Mechanical Pulping) แต่ในอุตสาหกรรมกระดาษที่ต้องการผลิตกระดาษที่มีความอ่อนนุ่มจะใช้วิธีให้ความร้อนในกรดซัลฟูริกแทน ซึ่งจะให้เยื่อกระดาษที่มีลักษณะอ่อนนุ่มมากกว่าแบบแรก เมื่อทำการแยกกลินินและเรซินออกจากเยื่อกระดาษบางส่วนแล้วขั้นตอนต่อมาเป็นการนำเยื่อกระดาษมาทำให้มีความบริสุทธิ์และสะอาดมากยิ่งขึ้น โดยเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการฟอกเยื่อกระดาษ ซึ่งเป็นการใช้สารออกซิไดซ์ที่รุนแรง (Strong Oxidants) เช่น คลอรีนไดออกไซด์ ออกซิเจน โอโซน หรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แต่พบว่าการใช้ก๊าซคลอรีนในการฟอกเยื่อนั้นมีผลทำให้เกิดสารประกอบโพลีคลอรีนซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง จึงไม่นิยมใช้ในปัจจุบัน เมื่อได้เยื่อที่พร้อมจะนำมาผลิตกระดาษแล้ว ก็จะเข้าสู่กระบวนการในส่วนสุดท้าย คือ การบีบอัดและเป่าแห้ง เยื่อกระดาษที่ผ่านเข้ากระบวนการนี้จะถูกบีบอัดด้วยแม่พิมพ์ที่ทำด้วยไนลอนหรือโพลีเอสเตอร์ ซึ่งในขั้นตอนนี้สามารถลดความชื้นในกระดาษได้ประมาณ 50 – 60 เปอร์เซ็นต์ และเข้าสู่กระบวนการอบแห้งเพื่อที่จะลดความชื้นในกระดาษขั้นสุดท้ายให้เหลือเพียง 2 – 6 เปอร์เซ็นต์ เมื่อได้กระดาษที่มีความชื้นต่ำแล้วอาจมีการปรับปรุงคุณภาพกระดาษด้วยการเคลือบผิวหน้ากระดาษ (Coating) ด้วยวิธีที่หลากหลายตามแต่ละชนิดของกระดาษที่ผลิต เช่น การใช้แป้งเคลือบผิวหน้ากระดาษเพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการพิมพ์ หรืออาจเพิ่มรงควัตถุและสารเพิ่มแรงยึดเกาะเพื่อให้กระดาษมีสีและมีความเหนียวมากยิ่งขึ้น แล้วจึงผ่านขั้นตอนสุดท้าย คือ ขั้นตอนการม้วนและตัดเพื่อรอการจำหน่ายต่อไป (Simon and Bruce, 2003)

บริษัท คิมเบอร์ลี-คล้าค ประเทศไทย จำกัด มีกระบวนการผลิตหลัก ๆ ที่สำคัญ ดังนี้ นำเยื่อกระดาษซึ่งเตรียมมาจากกระดาษรีไซเคิลที่ผ่านกระบวนการนำหมึกออก (De-inking Process) เริ่มด้วยการตีเยื่อจากกระดาษที่รับมา แล้วจึงทำการล้างเพื่อแยกสิ่งสกปรกออก เมื่อแยกสิ่งสกปรกออกแล้วนำเยื่อมากำจัดหมึกและล้างหมึก หลังจากนั้นนำเยื่อมาฟอก เพื่อให้ได้เยื่อกระดาษซึ่งเป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษ ตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น นำวัตถุดิบเยื่อมาผสมกันทั้งเยื่อใยสั้นและเยื่อใยยาว ผ่านเยื่อที่ผสมแล้วเข้าไปยังตะแกรงชำระล้างสิ่งสกปรก และสารเคมีต่าง ๆ นำเยื่อที่ผสมแล้วผ่านเข้าสู่ลูกกลิ้งอบแห้ง ผ่านอ่างน้ำยาเติมสารเคมี ผ่านเข้าสู่ลูกกลิ้งอบแห้ง ชัดมันและตกแต่งผิวเข้าเครื่องม้วนตัดรอการจำหน่าย ตามรายละเอียดในภาพที่ 1 สำหรับรายละเอียดการผลิตในแต่ละชนิดของกระดาษ เช่น กระดาษพิมพ์เขียน กระดาษแข็ง กระดาษกล่อง กระดาษอนามัย เป็นต้น จะมีกระบวนการผลิตที่พิเศษแตกต่างกันตามชนิดของผลิตภัณฑ์



ภาพที่ 1 กระบวนการผลิตกระดาศ

ที่มา: กลุ่มงานบริการส่งออก 4 (2545)

1.2 ลักษณะน้ำเสียโรงงานผลิตกระดาษ

ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษ มีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ ได้แก่ ส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ และส่วนที่เป็นสารอนินทรีย์ ตามรายละเอียด ดังนี้

1.2.1 เชื้อกระดาษ เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตกระดาษ โดยทั่วไปจะมีส่วนเส้นใยผสมอยู่ประมาณร้อยละ 70 – 95 ของน้ำหนักกระดาษ ส่วนของเส้นใยนี้ได้จากพืชชนิดต่าง ๆ ทั้งเยื่อไม้สั้น และเยื่อไม้ยาว เชื้อกระดาษเป็นสารประกอบชีวโมเลกุลในรูปลิกโนเซลลูโลส ซึ่งเป็นสารประกอบโครงสร้าง ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในปริมาณที่แตกต่างกันตามชนิดของพืช โดยที่ไม้เนื้อแข็ง (Hardwood) เส้นใยมีลักษณะเล็ก มีความยาวประมาณ 1 มิลลิเมตร กว้างประมาณ 10 – 20 ไมครอน ใช้ทำเยื่อไม้สั้น จะประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส สูงกว่าลิกนิน ในขณะที่ไม้เนื้ออ่อน (Softwood) เส้นใยมีลักษณะหยาบ มีความยาวประมาณ 3 มิลลิเมตร กว้างประมาณ 20 – 40 ไมครอน ใช้ทำเยื่อไม้ยาว จะมีปริมาณลิกนินสูงกว่า (สุนีย์, 2544)

เชื้อกระดาษส่วนใหญ่จะปนเปื้อนมากับน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตในขั้นตอนของการล้างเชื้อกระดาษ และการฟอกเชื้อกระดาษ ในโรงงานที่ใช้กระดาษรีไซเคิลเป็นวัตถุดิบจะทำให้มีปริมาณลิกนินปนมากับน้ำเสียน้อย เพราะผ่านการกำจัดลิกนินมาก่อนแล้วไม่เหมือนกับโรงงานที่ใช้ไม้เป็นวัตถุดิบโดยตรงซึ่งมีปริมาณลิกนินสูง ทำให้สามารถใช้ระบบย่อยสลายทางชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า เนื่องจากลิกนินเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยาก แต่จากงานวิจัยของ Thomson and Forster (2003) พบว่า โรงงานผลิตกระดาษที่เปลี่ยนวัตถุดิบจากเชื้อกระดาษดิบมาเป็นกระดาษรีไซเคิล ดังเช่นการใช้กระดาษลูกฟูกมีผลทำให้เกิดสภาวะตะกอนลอยสูงขึ้นและตะกอนตกช้าอย่างทันที เนื่องจากมีสารโบรอนเป็นองค์ประกอบของกาวที่ใช้ในกระดาษ

1.2.2 สารอินทรีย์ละลายน้ำ โดยส่วนใหญ่เป็น แป้ง โพลีแซคคาไรด์ และลิกนิน ซึ่งมาจากเนื้อไม้และเยื่อไม้ จากกระบวนการเตรียมเยื่อ การฟอกเยื่อ และการเคลือบผิวกระดาษ ซึ่งจะปนมากับน้ำที่ใช้ล้างเยื่อและสารละลายที่ใช้ในการฟอกและขัดแต่งเยื่อ ผลกระทบของสารอินทรีย์เหล่านี้มีผลต่อระบบ คือ ถ้ามีปริมาณแป้ง หรือโพลีแซคคาไรด์มากซึ่งเป็นสารที่ย่อยสลายง่ายยังผลให้ระบบเกิดสภาวะตะกอนลอยได้ ส่วนถ้ามีปริมาณลิกนินมากทำให้ระบบมีประสิทธิภาพไม่ดีเท่าที่ควร หรือต้องใช้เวลาในการบำบัดนานขึ้น

1.2.3 ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และเกลือ ซึ่งสามารถหลุดออกจากเชื้อกระดาษด้วยสารออกซิไดซ์ ในกระบวนการฟอกเยื่อ ปริมาณของสารเหล่านี้ล้วนมีผลการการเดินระบบ เช่น ถ้ามีปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสน้อยเกินไปอาจทำให้เกิดสภาวะตะกอนลอยในระบบได้

1.2.4 สารเคมี สารเคมีหลักๆ ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติกระดาษในกระบวนการผลิต ได้แก่ ดินขาว (Kaolin Clay) ไททาเนียมไดออกไซด์ และแคลเซียมคาร์บอเนต รวมเรียกว่าตัวเติม (Filler) เพื่อปรับผิวกระดาษ เพิ่มความขาว และยังใช้ สารส้มและชันสน ไซฟี่ ขางมะตอย อัลคิลคีทีนไดเมอร์ (Alkyl Ketene Dimer, AKD) เป็นสารด้านการซึมน้ำ (Sizing – agent) อีกทั้งยังใช้ แป้ง และพอลิอะคริลเอไมด์ (Polyacrylamide) เป็นสารเพิ่มความเหนียว (นิรนาม, 2548)

ในกระบวนการเตรียมเยื่อและฟอกเยื่อใช้สารเคมี ได้แก่ โซเดียมซัลไฟด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ กรดซัลฟูริก และสารประกอบคลอรีน กรณีของสารที่ใช้ในกระบวนการให้ความร้อนในการเตรียมเยื่อ เช่น โซเดียมซัลไฟด์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งป้อนมาด้านล่างเชื้อเพลิงให้ความร้อน สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ส่วนสารประกอบคลอรีนจะเกิดขึ้นเมื่อกระบวนการผลิตใช้ก๊าซคลอรีนฟอกเยื่อ โดยจะทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์เกิดสารประกอบฮาโลเจนซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งขึ้น (Simon and Bruce, 2003)

บริษัท คิมเบอร์ลี-คล๊าค ประเทศไทย มีองค์ประกอบของน้ำเสียส่วนใหญ่ เป็นเยื่อกระดาษ ซึ่งป้อนมากับน้ำเสียถึงร้อยละ 71.35 โดยมาจากกระบวนการแยกสิ่งสกปรก และกระบวนการล้างหมึกถึงร้อยละ 38 และ 36 ตามลำดับ

2. การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษ

จากคุณลักษณะน้ำทิ้งโรงงานผลิตกระดาษที่มีเยื่อกระดาษซึ่งเป็นสารประกอบชีวโมเลกุลขนาดใหญ่ปนเปื้อนมากับน้ำทิ้งปริมาณมาก และสารเคมีในกระบวนการผลิตเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษจึงนิยมใช้ระบบบำบัดทางชีววิทยาหรืออาจใช้ร่วมกับระบบบำบัดด้วยเคมี เช่น การตกตะกอนด้วยเคมี แต่พบว่า การใช้ระบบบำบัดทางชีววิทยา โดยเฉพาะระบบแอกติเวตเตดสลัดจ์ ร่วมกับการตกตะกอนขั้นแรกเพื่อนำเอาเยื่อกระดาษกลับไปใช้ใหม่ เป็นระบบที่นิยมที่สุด

2.1 การย่อยสลายเยื่อกระดาษ

เยื่อกระดาษถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียด้วยเอนไซม์ต่างชนิดกันตามแต่ละองค์ประกอบของเยื่อกระดาษ ดังนี้

2.1.1 การย่อยสลายเซลลูโลสของแบคทีเรีย เซลลูโลสมีโครงสร้างทางเคมีประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสเชื่อมกันด้วยพันธะเบต้ากลูโคสิดิก (β - 1,4 glycosidic Linkage) ทำมุม 180° ตามแนวแกนของลูกโซ่ ในแต่ละสายลูกโซ่เซลลูโลส จะเชื่อมกันด้วยพันธะไฮโดรเจนทั้งภายในและภายนอกโมเลกุล (Intra- and Inter-molecular Hydrogen Bond) เป็นผลทำให้เกิดโครงสร้างในลักษณะเส้นใย (Fibrous) โดยประกอบทั้งลักษณะแบบผลึก (Crystalline) และแบบรูปร่างแบบอสัณฐาน (Amorphous)

เซลลูโลสเป็นสารอินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่แบคทีเรียไม่สามารถดูดซึมผ่านผนังเซลล์ได้ ดังนั้นจึงต้องใช้เอนไซม์ที่ปล่อยออกมานอกเซลล์ในการย่อยสลายสารประกอบเซลลูโลสจนเป็นน้ำตาลขนาดเล็กที่สามารถผ่านผนังเซลล์ได้เพื่อใช้เป็นพลังงานในกระบวนการเมตาบอลิซึมซึ่งประกอบด้วยเอนไซม์หลายชนิดย่อยสลายแบบทำงานร่วมกัน (Synergism) โดยที่เอนไซม์ชนิดแรกคือ เอนโดกลูคาเนส (Endo-1,4- β -glucanase, EGI) ทำหน้าที่ตัดพันธะเบต้ากลูโคสิดิกในลักษณะสุ่ม จำเพาะต่อโครงสร้างแบบไม่แน่นอน เอนไซม์ชนิดที่สองคือ เอกโซกลูคาเนส (Exo-1,4- β -glucanase, CBH) ทำหน้าที่ตัดพันธะเบต้ากลูโคสิดิกจากปลายลูกโซ่ โดยมีความจำเพาะกับโครงสร้างผลึก จนได้น้ำตาลเซลโลไบโอส และเอนไซม์สุดท้ายคือ เบต้ากลูโคสิดาส (1,4- β -glucosidase) ทำหน้าที่ย่อยน้ำตาลโอลิโกแซ็กคาไรด์ ได้เป็นน้ำตาลกลูโคส

2.1.2 การย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสของแบคทีเรีย เฮมิเซลลูโลสมีลักษณะโครงสร้างที่หลากหลาย เป็นสารประกอบโพลีเมอร์ ซึ่งประกอบด้วย ไซโลส (D-xylose), อาราบิโนส (L-arabinose), แมนโนส (D-mannose), กาแลคโตส (D-galactose) และ กรดกลูคาโรนิก (D-glucuronic acid) ในลักษณะโครงสร้างแบบลูกโซ่เส้นตรงและลูกโซ่แขนง

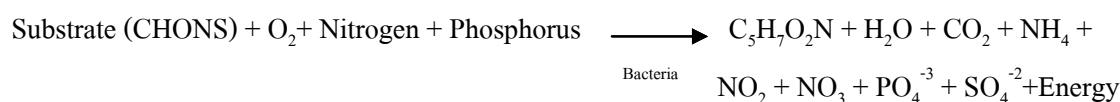
เอนไซม์ในการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มเอนไซม์ย่อยสลายไซแลน (Xylanolytic Enzyme) และกลุ่มเอนไซม์ย่อยสลายแมนแนน (Mannan Degrading Enzyme) เอนไซม์ในกลุ่มย่อยสลายไซแลนจะประกอบด้วยเอนไซม์หลาย ทำหน้าที่

ย่อยไซเลนได้น้ำตาลไซโลส เป็นผลผลิตสุดท้าย โดยที่เอนไซม์ไซโลลิเดส (β -xylosidase) ทำหน้าที่เปลี่ยนจากสารประกอบที่ประกอบด้วยน้ำตาล 2 โมเลกุล (Dimer) และมากกว่า ซึ่งเรียกว่า โอลิโกเมอร์ไปเป็นน้ำตาลไซโลส ส่วนเอนไซม์ในกลุ่มย่อยสลายแมนแนน (Mannan Degrading Enzyme) ทำการย่อยสารประกอบโพลีแซ็กคาไรด์ (Heteropolysaccharide) ที่มีน้ำตาลแมนโนส ต่อเชื่อมเป็นแกนกลาง

2.1.3 การย่อยสลายลิกนินของแบคทีเรีย ลิกนินเป็นสารประกอบโพลิเมอร์ที่มีลักษณะ 3 มิติแบบไม่แน่นอน ประกอบด้วยสารประกอบโมโนเมอร์ (Monomer) ที่มีลักษณะเป็นสารประกอบอะโรมาติก (Aromatic Compound) ในแบคทีเรียจะมีเอนไซม์ที่จำเพาะต่อส่วนประกอบของลิกนินที่แตกต่างกันตามแต่ละสายพันธุ์ ซึ่งพบว่าเป็นส่วนที่ใช้เวลาในการย่อยสลายนานที่สุด (สุนีย์, 2544)

2.2 ระบบแอคติเวตเตดสลัดจ์

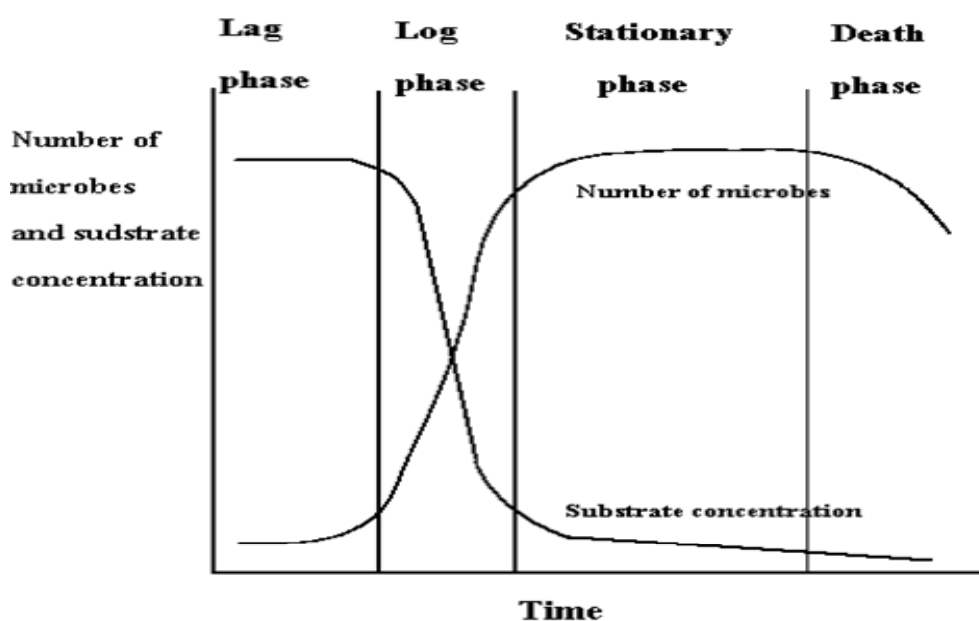
ระบบแอคติเวตเตดสลัดจ์เป็นระบบที่นิยมใช้กันมากในการบำบัดน้ำเสียโรงงานกระดาษ โดยอาศัยจุลินทรีย์ที่มีปริมาณมากพอในถังเดิมอากาศสำหรับการย่อยสลายหรือแปรสภาพสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้เป็น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และอื่น ๆ ทำให้สารอินทรีย์ที่เป็นสารมลพิษ (Pollutants) เปลี่ยนหรือแปรสภาพไป ไม่ก่อให้เกิดการเน่าเสียจนเป็นปัญหาที่เรียกว่า มลภาวะ (Pollution) ตามปฏิกิริยาชีวเคมี ดังนี้ (เกรียงศักดิ์, 2543; Hanel, 1988)



จุลินทรีย์ในระบบจะขยายพันธุ์เพิ่มปริมาณขึ้นในลักษณะแขวนลอย (Suspended Growth) โดยทั่วไปในถังเดิมอากาศจะมีระบบกวน เพื่อให้จุลินทรีย์หรือน้ำตะกอนจุลินทรีย์แขวนลอยอยู่ในถังเดิมอากาศตลอดเวลา การควบคุมจำนวนจุลินทรีย์ในระบบให้เป็นไปตามที่ต้องการ จำเป็นต้องมีระบบแยกน้ำใสออกจากน้ำตะกอนจุลินทรีย์ ซึ่งนิยมใช้ถังตกตะกอนทำหน้าที่แยกน้ำที่ออกจากน้ำตะกอนจุลินทรีย์ เพื่อปล่อยน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วไหลล้นออกจากถังตกตะกอนซึ่งจะมีปริมาณสารอินทรีย์ลดต่ำลง หรือค่าบีโอดีต่ำลง ทำให้น้ำทิ้งจากระบบมีคุณภาพดีขึ้น ส่วนบริเวณก้นถังตกตะกอนที่มีความเข้มข้นของสลัดจ์มาก จะถูกนำกลับสู่ถังเดิมอากาศเพื่อควบคุมจำนวนจุลินทรีย์ในถัง

เดิมอากาศ หรือสบู่ออกเมื่อมีปริมาณสัณฐานมากเกินไปจนความต้องการ ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ นี้ เป็นไปตามหลักการสมดุลของมวล (เกรียงศักดิ์, 2543)

2.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกับการทำลายสารอินทรีย์ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียกับปริมาณของสารอาหารที่ถูกย่อยสลาย เทียบกับระยะเวลาการเดิมอากาศ (Contact Time) ของถังปฏิกรณ์แบบไม่ต่อเนื่อง (Batch Reactor) ได้ดัง ภาพที่ 2 (Sunstrom and Klei, 1979) ถ้าระยะเวลาที่ตะกอนอยู่ในระบบนานขึ้นการเจริญเติบโตของแบคทีเรียจะใกล้เคียงกับการตาย ทำให้จำนวนแบคทีเรียในระบบคงที่ในช่วงสภาวะคงตัว (Stationary Phase) ซึ่งเกิดตะกอนส่วนเกินน้อย แต่ในระบบแอกติเวตเตดสลัดจ์แบบทั่วไปลักษณะการเจริญเติบโตจะอยู่ในช่วงการย่อยสารอาหารอย่างฟุ่มเฟือย (Log Phase) ทำให้เกิดตะกอนจุลินทรีย์มาก



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ กับปริมาณสารอินทรีย์ที่เป็นสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลาย

ที่มา: ดัดแปลงจาก Sundstrom and Klei (1979)

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ กับอัตราการย่อยสลายตัวของสารอินทรีย์ที่เป็นสารอาหาร ดังนี้ (เสริมพล และ ไชยยุทธ, 2524)

อัตราการเจริญเติบโตสุทธิ = อัตราการสร้างเซลล์ - อัตราการตาย

$$\frac{dX}{dt} = Y \left(\frac{dS}{dt} \right) - k_d X \quad (1)$$

จากสมการที่ (1) หาทังสมการด้วย X

$$\frac{dX}{dt} = Y \left(\frac{dS}{Xdt} \right) - k_d \quad (2)$$

$$\text{กำหนดให้ } \theta_c = \frac{X}{(dX/dt)} \quad (3)$$

$$U = \frac{(dF/dt)}{X} \quad (4)$$

แทน สมการ (3) และ (4) ในสมการ (2)

$$\frac{1}{\theta_c} = Y \cdot U - k_d \quad (5)$$

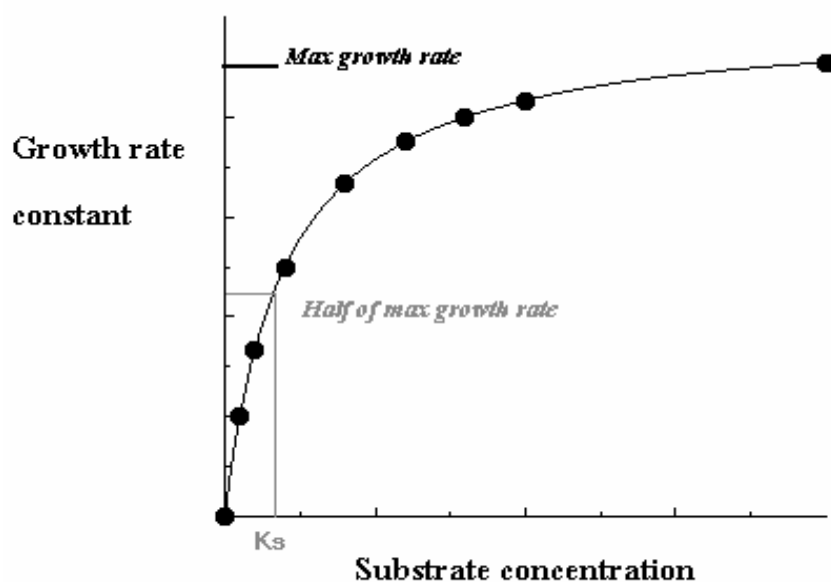
สมการที่ (5) เป็นสมการพื้นฐานที่ใช้ในการศึกษา และออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยาแบบต่าง ๆ ตัวแปรที่สำคัญที่สุด ได้แก่ อายุตะกอน (Sludge Age, θ_c) และสัดส่วนสารอาหารต่อจำนวนจุลินทรีย์ (F/M Ratio, U) ทั้งนี้ประสิทธิภาพของกระบวนการบำบัดทางชีววิทยาจะถูกควบคุมโดยค่าอายุตะกอน หรือค่าสัดส่วนสารอาหารต่อจำนวนจุลินทรีย์ ตัวใดตัวหนึ่ง แต่จากการศึกษาพบว่าการวัดค่าอายุตะกอนง่ายกว่าการวัดเพื่อหาค่าสัดส่วนสารอาหารต่อจำนวนจุลินทรีย์ ดังนั้น ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมการทำงานและประสิทธิภาพของระบบควรเป็นอายุตะกอน

ความสัมพันธ์ของอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่อหน่วยน้ำหนักของ

จุลินทรีย์ กับความเข้มข้นของสารอาหารที่มีจำกัด ได้ดังสมการ และภาพที่ 3 (เสริมพล และ ไชยยุทธ, 2524)

$$\frac{dF}{dt} = \frac{kXS}{K_s + S} \quad (6)$$

$$k = \frac{(dF/dt)}{X} \quad (7)$$



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการย่อยสลายสารอาหารต่อหน่วยน้ำหนักของจุลินทรีย์กับ
ความเข้มข้นของสารอาหารที่มีจำกัด

ที่มา: คัดแปลงจาก เสริมพล และ ไชยยุทธ (2524)

2.2.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์จลศาสตร์ของระบบ โดยการทดลองเดินระบบแบบต่อเนื่องเป็น
ลำดับสืบเนื่อง (Sequencing Batch Reactor, SBR)

การหาค่าสัมประสิทธิ์จลศาสตร์โดยการเดินระบบแบบต่อเนื่องสมการที่นำมา
คำนวณใช้สมการของโมนอด

ก. อัตราการใช้สารอาหารสูงสุด (Maximum Rate of Substrate Utilization, k)
 และความเข้มข้นของสารอาหารที่ครึ่งหนึ่งของอัตราการเจริญเติบโตสูงสุด (Half Velocity Coefficient, K_s)

$$\frac{dX}{dt} = QX_0 - [Q_w X_w + Q_e X_e] + V[r_g] \quad (8)$$

$$r_g = -Y \left(\frac{dS}{dt} \right) - k_d X \quad (9)$$

$$\text{สภาวะคงตัว (Steady state)} \quad \frac{dX}{dt} = 0$$

$$\frac{[Q_w X_w + Q_e X_e]}{VX} = -Y \left(\frac{dS}{Xdt} \right) - k_d \quad (10)$$

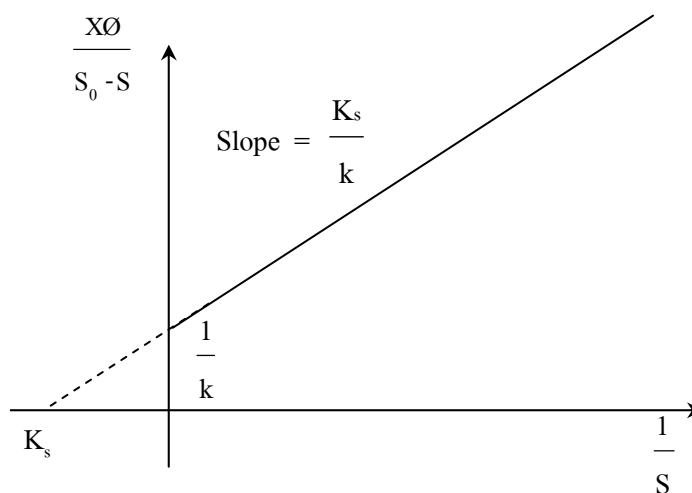
$$\frac{dS}{dt} = \frac{-Q(S_0 - S)}{V} = \frac{-(S_0 - S)}{\theta} \quad (11)$$

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{kXS}{K_s + S} \quad (12)$$

จากสมการที่ (11) และ (12) จัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง $y = mx + c$ ดังนี้

$$\frac{X\theta}{S_0 - S} = \left(\frac{K_s}{K} \right) \left(\frac{1}{S} \right) + \left(\frac{1}{k} \right) \quad (13)$$

นำสมการมาพล็อตกราฟได้ตามภาพที่ 4 ดังนี้



ภาพที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(X)(\emptyset)/(S_0-S)$ กับ $1/S$ ในรูปสมการเส้นตรง
ที่มา: ดัดแปลงจาก Steve (2006)

จากกราฟจุดตัดแกน Y คือ $1/k$ และความชันกราฟคือ K_s/k ดังนั้นค่า K_s และ k คำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$K_s = (\text{ความชันกราฟ})(k) \quad (14)$$

$$k = \frac{1}{\text{จุดตัดแกน Y}} \quad (15)$$

ข. ค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Yield Coefficient, Y) และ อัตราการตายของจุลินทรีย์ (Decay Rate, k_d)

$$\frac{F}{M} = \frac{(S_0 - S)}{Xdt} = \frac{dS}{Xdt} \quad (16)$$

$$\emptyset_c = \frac{X}{(dX/dt)} \quad (17)$$

จากสมการที่ (5) $\frac{1}{\theta_c} = Y \cdot U - k_d$

$$\theta_c = \frac{1}{\mu} \quad (18)$$

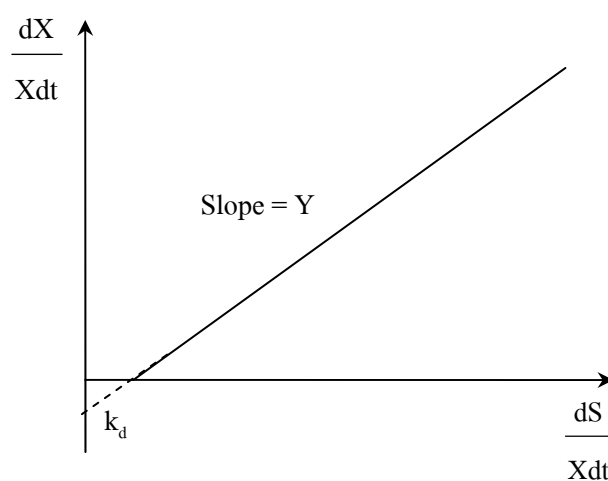
จากสมการที่ (16) – (18) นำมาเขียนความสัมพันธ์ ได้ดังนี้

$$\frac{dX}{dt} = Y \frac{dS}{dt} - k_d X \quad (19)$$

นำสมการที่ (19) หารด้วย X ตลอด เพื่อจัดให้อยู่ในรูปสมการ $y = mx + c$

$$\frac{dX}{Xdt} = Y \frac{dS}{Xdt} - k_d \quad (20)$$

จากสมการที่ (20) นำมาเขียนกราฟตามภาพที่ 5 ได้ดังนี้



ภาพที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dX/(Xdt)$ กับ $dS/(Xdt)$ ในรูปสมการเส้นตรง

ที่มา: ดัดแปลงจาก Tom and Paul (1996)

จากกราฟจุดตัดแกน Y คือค่า k_d และความชันของกราฟคือค่า Y

ก. ค่าสัมประสิทธิ์อัตราการเจริญเติบโตสุทธิของจุลินทรีย์ (Maximum Specific Growth Rate, μ_m) เป็นค่าของผลคูณระหว่างอัตราการใช้อาหารสูงสุด (k) กับสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Y)

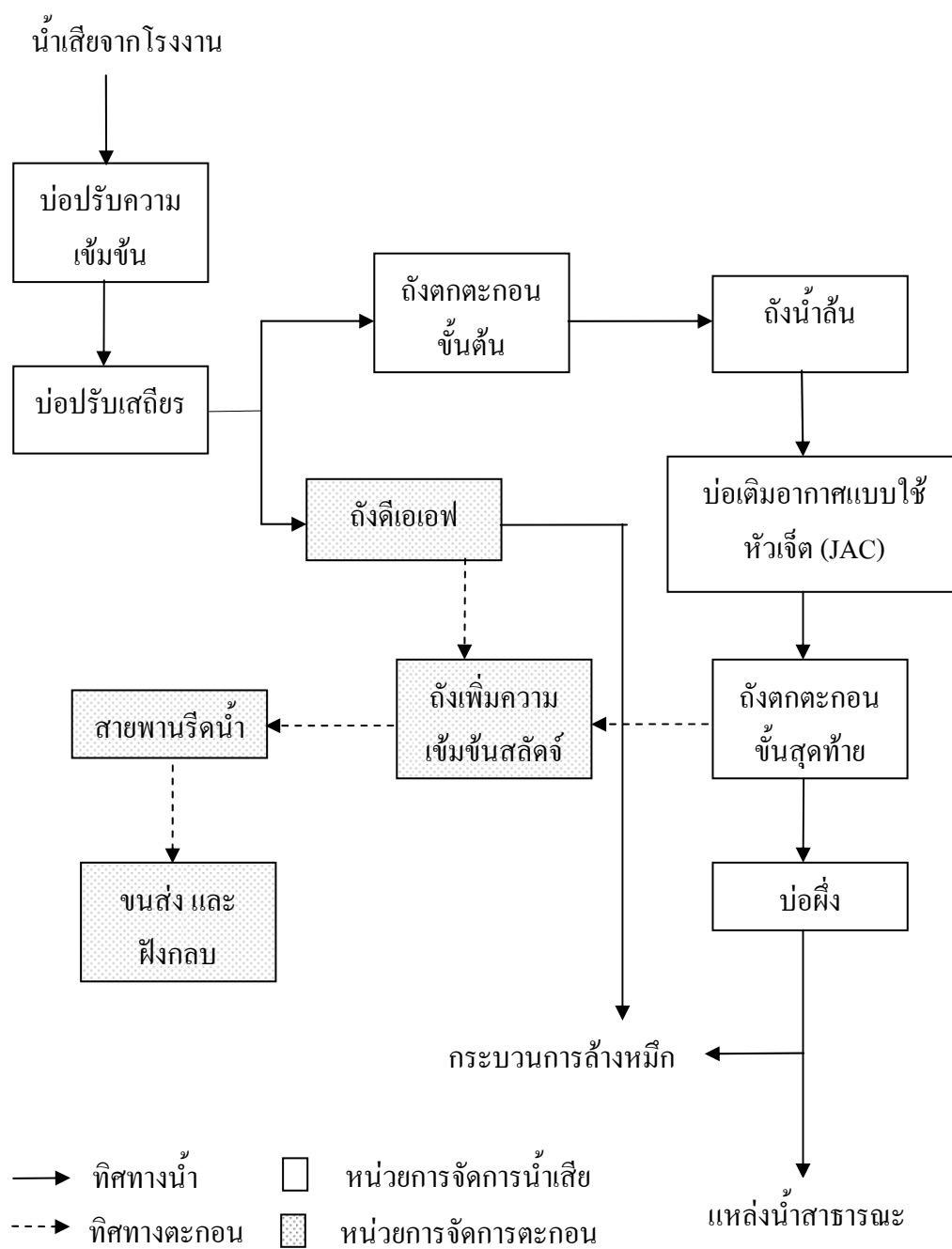
2.2.3 กระบวนการการเกิดตะกอนจุลินทรีย์ของระบบแอกติเวตเตดสลัดจ์ การเกิดตะกอนในระบบแอกติเวตเตดสลัดจ์ จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในถังเดิมอากาศ และบางส่วนในถังตกตะกอน เป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นโยกย้าย (Transfer Step) ขั้นแปรเปลี่ยน (Conversion Step) และขั้นรวมตะกอน (Flocculation Step)

ในขั้นแรก สารอินทรีย์ที่ละลายน้ำในน้ำเสียได้ดูดซึมเข้าสู่ผนังเซลล์ของจุลินทรีย์เข้าไปภายในเซลล์ ส่วนสารอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำจะถูกดูดมาติดผนังเซลล์ และส่งน้ำย่อย (Enzyme) ออกมาเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของโมเลกุลที่เล็กพอที่จะซึมผ่านเข้าไปในเซลล์เพื่อใช้เป็นสารอาหารได้ ในขั้นตอนนี้จะใช้เวลาประมาณ 15 – 30 นาที เมื่อสารอินทรีย์ถูกย่อยให้มีโมเลกุลเล็กลงและสามารถละลายน้ำผ่านเข้าไปในเซลล์ได้แล้ว ก็จะถูกจุลินทรีย์ทำการเปลี่ยนรูปโดยกระบวนการย่อยสลาย (Oxidation or Catabolism) ซึ่งหมายถึงปฏิกิริยาที่มีการเติมออกซิเจนแล้วได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ พลังงาน และอื่น ๆ และกระบวนการสังเคราะห์ (Synthesis or Anabolism) ซึ่งหมายถึง การสร้างเซลล์ใหม่ กระบวนการทั้งสองนี้รวมเรียกว่า กระบวนการเมตาบอลิซึม (Metabolism Process) เมื่อสารอินทรีย์ที่เข้าไปในตัวจุลินทรีย์แล้วจึงย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อแบ่งตัวให้จุลินทรีย์มีจำนวนมากขึ้น ดังนั้นในช่วงเริ่มต้นของการบำบัดน้ำเสีย ตัวจุลินทรีย์ต้องเรียนรู้ที่จะปล่อยเอนไซม์ให้เหมาะสมกับสารอินทรีย์ชนิดนั้น ๆ (Acclimation) สำหรับขั้นที่สาม เป็นการรวมตัวกันของตะกอนจุลินทรีย์ โดยจุลินทรีย์ในถังเดิมอากาศจะจับตัวกันเป็นตะกอนที่ใหญ่ขึ้นเป็นกลุ่มก้อน (Floc) ซึ่งตกตะกอนได้ดีกว่าเซลล์เดี่ยว ทำให้สามารถแยกออกจากน้ำที่บำบัดแล้วได้ง่าย (เกรียงศักดิ์, 2543)

2.3 ระบบบำบัดน้ำเสียและการจัดการตะกอนของโรงงานผลิตกระดาษ บริษัท คิมเบอร์ลี-คลาล์ค ประเทศไทย จำกัด

ระบบบำบัดน้ำเสียของบริษัท คิมเบอร์ลี-คล้าค ประเทศไทย จำกัด เป็นระบบแอกติเวตเตดสลัดจ์แบบทั่วไป (Conventional Activated Sludge) ร่วมกับระบบดีเอเอฟ (Dissolved Air Flotation) ซึ่งเป็นการแยกสลัดจ์แบบทำชั้นสลัดจ์ (Sludge Thickening) ขั้นแรกน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเข้าสู่ถังเพิ่มความเข้มข้น (Concentration Tank) ก่อนเข้าสู่ถังปรับเสถียร (Equalization Tank) แล้วจึงแยกเข้าสู่หน่วยบำบัดแอกติเวตเตดสลัดจ์ ซึ่งผ่านถังตกตะกอนขั้นแรกเพื่อตกตะกอนเชื้อโรคขนาดใหญ่ แล้วจึงผ่านไปยังถังไหลล้นผิว (Overflow Tank) เพื่อเข้าสู่ถังสัมผัสอากาศแบบหัวเจ็ต (Jet Aeration Contactor, JAC) เติมน้ำให้แบคทีเรียย่อยสลายสารอินทรีย์ และทำการตกตะกอนฟล็อกด้วยถังตกตะกอนขั้นสุดท้ายเพื่อให้ได้น้ำใสไหลล้นผิวถังก่อนไหลเข้าบ่อฝังเพื่อระบายออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะ น้ำจากบ่อปรับเสถียรอีกส่วนหนึ่งแยกเข้าสู่ระบบดีเอเอฟ ซึ่งถูกใช้เพื่อทำให้ตะกอนลอยออกจากน้ำใสด้วยอากาศละลาย โดยอากาศจะถูกอัดอยู่ภายในน้ำและถูกปล่อยผ่านหัวฉีดให้ผสมกับตะกอน เมื่อลดแรงดันอากาศจะกลายเป็นฟองขนาดเล็กเกาะจับกับตะกอน ทำให้ตะกอนลอยตัวขึ้นบนผิวน้ำข้างบนซึ่งมีตะกอนเข้มข้นถูกกวาดออกไปอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งสามารถเพิ่มความเข้มข้นของตะกอนจาก 1 เปอร์เซ็นต์เป็น 6 เปอร์เซ็นต์ น้ำใสที่จากระบบดีเอเอฟจะถูกนำไปใช้ใหม่ในกระบวนการล้างหมักทั้งหมด ส่วนน้ำใสที่ได้จากระบบแอกติเวตเตดสลัดจ์บางส่วนถูกกลัมนำไปใช้ใหม่ในกระบวนการล้างหมัก การรีดตะกอน การล้างเชื้อ และล้างทำความสะอาดพื้น น้ำใสส่วนที่เหลือจะเก็บกักไว้ในบ่อฝังก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะ

ตะกอนจากระบบดีเอเอฟและตะกอนส่วนเกินจากระบบแอกติเวตเตดสลัดจ์ ถูกรวบรวมเพื่อทำให้เข้มข้นขึ้นด้วยถังทำชั้น (Thickener) ด้วยการตกตะกอนซึ่งสามารถเพิ่มความเข้มข้นได้ประมาณ 2 – 3 เปอร์เซ็นต์ ก่อนเข้าสู่การรีดตะกอนด้วยเครื่องรีดน้ำสลัดจ์แบบสายพานรีดน้ำ (Belt Press) โดยสลัดจ์จะถูกป้อนเข้าสู่ถังปรับสภาพเพื่อเติมโพลิเมอร์ชนิดประจุบวกเพื่อลดอนุภาคประจุลบของสลัดจ์ เพื่อให้สลัดจ์จับตัวกันและแยกตัวออกจากน้ำได้ง่าย แล้วจึงป้อนเข้าสู่เครื่องรีดน้ำที่มีสายพานผ้ากรองเคลื่อนผ่านลูกกลิ้ง ตะกอนที่ผ่านการทำชั้นหรือแยกน้ำออกแล้วจะถูกนำไปฝังกลบ ส่วนน้ำจากระบบบำบัดที่ผ่านการใช้ในการรีดตะกอนก็จะถูกส่งกลับไปยังระบบบำบัดอีกครั้งหนึ่งตามรายละเอียดที่แสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ระบบบำบัดน้ำเสียและการจัดการตะกอน

ที่มา: บริษัท คิมเบอร์ลี-คล้าค ประเทศไทย จำกัด (2548)

3. ปัญหาสถานะตะกอนลอยของการบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตกระดาษ

โดยทั่วไปในระบบแอกติเวเตตสลัดจ์มีกลุ่มของจุลชีพหลัก ได้แก่ แบคทีเรีย ฟังไจ โปรโตซัว โรติเฟอร์ และนีมาโตดา เป็นจุลชีพที่ทำให้เกิดตะกอนฟล็อก แต่ในการควบคุมระบบแอกติเวเตตสลัดจ์ ปัญหาที่พบบ่อยที่สุด คือ ปัญหาตะกอนลอย (Bulking Sludge) อันเกิดจากเชื้อราหรือแบคทีเรียที่เป็นเส้นใย (Filamentous Fungi or Bacteria) แต่ส่วนใหญ่จะเกิดจากแบคทีเรียเส้นใยมากกว่า ในกรณีการเกิดปัญหาตะกอนลอยของระบบบำบัดในโรงงานกระดาษ เกิดขึ้นจากสาเหตุใหญ่ ๆ 2 ส่วน คือ สาเหตุจากการเดินระบบ เช่น ค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่ำ (Low Organic Loading Rate) เนื่องจากการนำน้ำจากกระบวนการรีดตะกอนกลับเข้าระบบเป็นปริมาณมาก ดังเช่นในกรณีโรงงานบริษัท คิมเบอร์ลี-คล๊าก ประเทศไทย จำกัด และ ค่าปริมาณออกซิเจนละลายในถังเติมอากาศต่ำ (Low Dissolved Oxygen) และอีกทั้งยังเกิดจากคุณลักษณะของน้ำเสียเอง เช่น ขาดไนโตรเจนหรือฟอสฟอรัส น้ำเสียมีแป้ง (มันสิน, 2544) และกรดไขมันระเหย ซึ่งเป็นสารอาหารที่ย่อยสลายง่าย (Readily Biodegradable Substrate) รวมถึงการมีสารประกอบซัลเฟอร์ในน้ำเสีย (Thompson *et al.*, 2001)

สถานะตะกอนลอยเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างตะกอนจากตะกอนแบบอัดแน่น (Compact Floc) ซึ่งเกิดจากแบคทีเรียสร้างฟล็อก (Floc – former) ไปเป็นตะกอนแบบที่มีโครงสร้างเปิด (Open Floc) ซึ่งเกิดจากระบบมีแบคทีเรียเส้นใยเป็นจุลินทรีย์ที่มีจำนวนมากในระบบ (Predominant Organism) จากโครงสร้างตะกอนในลักษณะนี้ ทำให้ความเร็วในการตกตะกอนลดลง เพราะน้ำสามารถไหลผ่านตะกอนลักษณะนี้ได้ดีกว่าตะกอนแบบอัดแน่น (Eikelboom, 2000)

ดัชนีที่นิยมใช้ในการบอกถึงภาวะตะกอนลอย คือ ดัชนีปริมาณตะกอน (Sludge Volume Index, SVI) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้วัดความสามารถในการตกตะกอนและการอัดตัวของสลัดจ์ โดยทั่วไปสลัดจ์ของจุลชีพสร้างฟล็อกควรมีค่าดัชนีปริมาณตะกอนประมาณ 75 – 150 มิลลิตรต่อกรัม ถ้าสลัดจ์มีค่าดัชนีปริมาณตะกอนต่ำกว่า 75 มิลลิตรต่อกรัม มักเป็นสลัดจ์ที่ประกอบด้วยแบคทีเรียเชลลิสระ ถึงแม้ว่าจะตกตะกอนได้เร็วแต่ก็จะทิ้งตะกอนขุ่นไว้เป็นจำนวนมาก สำหรับสลัดจ์ที่มีค่าดัชนีปริมาณตะกอน สูงกว่า 150 มิลลิตรต่อกรัม มักเป็นสลัดจ์ที่มีปัญหาตะกอนลอย แต่การตรวจภาวะตะกอนลอยที่ดีกว่าควรตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์เพื่อดูจำนวนของแบคทีเรียเส้นใยด้วย (มันสิน, 2544)

ภาวะตะกอนลอยมักเกิดจากแบคทีเรียเส้นใยซึ่งยังคงความสามารถในการบำบัดน้ำเสียได้เหมือนเช่นปกติ แต่จะมีค่าอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์สูงสุดต่อหน่วยน้ำหนัก (μ_m) และค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่จุดซึ่งมีอัตราการย่อยสลายสารอาหารเท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราสูงสุด (K_s) ต่ำกว่าแบคทีเรียสร้างฟล็อก ทำให้ที่ระดับสารอาหารต่ำ แบคทีเรียเส้นใยมีอัตราการเจริญเติบโตและกินอาหารได้เร็วกว่าแบคทีเรียสร้างฟล็อก (Chudoba *et al.*, 1973)

เมื่ออัตราการจมตัวของสลัดจ์ลงสู่ก้นของถังตกตะกอนช้ากว่าอัตราการที่สลัดจ์เข้าสู่ถังตกตะกอนเป็นอันมาก ผลที่เกิดขึ้น คือ ชั้นสลัดจ์ในถังตกตะกอนจะสะสมตัวและสูงขึ้นจนถึงขอบเวียร์น้ำล้น และออกไปกับน้ำทิ้ง ทำให้น้ำทิ้งมีความสกปรกสูง นอกจากนี้การสูญเสียสลัดจ์ยังทำให้ไม่สามารถควบคุมปริมาณสลัดจ์ในระบบ (ควบคุมอายุตะกอน) ทำให้ระบบล้มเหลวได้ (มันสิน, 2544) เนื่องจากปริมาณสลัดจ์ที่ถูกสูบกลับไปสู่อ่างเติมอากาศนั้นน้อยเกินไป

3.1 สาเหตุของการเกิดภาวะตะกอนลอย

มีงานวิจัยหลายฉบับที่ศึกษาสาเหตุของการเกิดภาวะตะกอนลอย ดังนี้

3.1.1 ปริมาณออกซิเจนละลายต่ำเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดภาวะตะกอนลอย (Ingol และ Heukelekian, 1940) และการเจริญเติบโตของแบคทีเรียเส้นใยที่เกิดจากปริมาณออกซิเจนละลายต่ำ (Low DO Filamentous Organisms) มีความสัมพันธ์กับค่าสัดส่วนสารอาหารกับประชากรจุลินทรีย์ที่ต่ำในถังเติมอากาศแบบกวนสมบูรณ์ (Completely Mixed Aeration Tank) เนื่องจากความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์สูง (Palm *et al.*, 1980; Sezgin and Jenkin, 1978) แบคทีเรียเส้นใยที่พบจากสาเหตุนี้ ได้แก่ *S. natan*, *H. hydrossis* และ Type 1701

จากการศึกษาของ Gilberte and Jean (2003) พบว่า การทำให้ระบบขาดออกซิเจนอย่างรุนแรงในช่วงเวลาหนึ่งไม่มีผลต่อการเกิดสภาวะตะกอนลอยของระบบแอกติเวเตดสลัดจ์ และถ้าทำให้ระบบขาดออกซิเจนเล็กน้อยอย่างต่อเนื่องมีผลให้เกิดแบคทีเรียเส้นใยแต่ยังไม่มีผลต่อค่าดัชนีปริมาณตะกอน แต่ถ้าทำให้ระบบขาดออกซิเจนอย่างรุนแรงและต่อเนื่อง ทำให้ระบบมีแบคทีเรียเส้นใยหลากหลายชนิด และเกิดสภาวะตะกอนลอยอย่างเฉียบพลัน

3.1.2 อัตราการเกิดภาวะตะกอนลอยขึ้นอยู่กับชนิดของคาร์โบไฮเดรตและความเข้มข้นของคาร์โบไฮเดรตที่สูงขึ้น (Smit, 1932) โดยเฉพาะถ้ามีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูงร่วมกับปริมาณออกซิเจนละลายต่ำจะทำให้เกิดภาวะตะกอนลอยที่มากขึ้น (Ingol and Heukelekian, 1940) นอกจากนี้ยังพบว่าแหล่งคาร์บอน (Organic Carbon Source) ที่แตกต่างกัน ทำให้ปริมาณและชนิดของแบคทีเรียเส้นใยที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน (Kohno, 1987)

3.1.3 การขาดไนโตรเจน (Ammonia – nitrogen) และฟอสฟอรัส (Orthophosphorus) ยังผลทำให้เกิดภาวะตะกอนลอยได้ (Ingol and Heukelekian, 1940) แบคทีเรียเส้นใยที่พบจากสาเหตุนี้ได้แก่ *Thiothrix* sp., *S. natan*, *H. hydrossis*, Type 021N, Type 0041 และ Type 0675

3.1.4 สัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ต่ำ เป็นอีกสาเหตุหนึ่งของการเกิดภาวะตะกอนลอย (Strom and Jenkins, 1984) แบคทีเรียเส้นใยที่พบจากสาเหตุนี้ได้แก่ *M. parvicella*, *H. hydrossis*, *Nocardia* sp., Types 021N, 0041, 0675, 0092, 0581, 0961 และ Type 0803

3.1.5 ภาระสารอินทรีย์เข้าระบบอย่างฉับพลัน (Organic Shock Loads) ทั้งในสถานะที่มีปริมาณออกซิเจนละลายสูง และสถานะที่มีปริมาณออกซิเจนละลายต่ำ เนื่องจากระบบรับสารอาหารเกินกว่าที่แบคทีเรียสร้างฟล็อกจะย่อยสลายได้ทัน (Sezgin and Jenkins, 1978)

3.1.6 ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ (Completely Mixed Reactor) ทำให้เกิดภาวะตะกอนลอยได้มากกว่าถังปฏิกรณ์แบบอื่น (Pasveer, 1969) เนื่องจากเป็นระบบที่ป้อนน้ำเสียเข้าเท่ากันทุกจุดทั่วทั้งถัง ทำให้ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เข้าถังต่อเวลาดำกว่าการป้อนน้ำเสียแบบทีละครั้ง (Batchwise) ซึ่งจะสามาถช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียเส้นใยได้ (Houtmeyers *et al.*, 1987; Kohno, 1987)

3.1.7 อายุตะกอนสูง เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดภาวะตะกอนลอยได้ เพราะสัดส่วนอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์น้อยลง (Chudoba *et al.*, 1973)

3.2 การแก้ปัญหาภาวะตะกอนลอย

การแก้ปัญหาภาวะตะกอนลอยสามารถทำได้ทั้งแบบชั่วคราว และแบบถาวร ดังนี้

3.2.1 การแก้ปัญหาแบบชั่วคราว (Short Term Solution)

เพื่อที่จะกำจัดแบคทีเรียเส้นใยสามารถทำได้ทั้งวิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมี วิธีทางกายภาพ ได้แก่ การปรับอัตราการสูบกลับตะกอนให้เร็วขึ้น และการใช้ใบกวาดบนถังตกตะกอน ส่วนวิธีทางเคมี ส่วนใหญ่จะใช้คลอรีน หรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อกำจัดแบคทีเรียเส้นใย

3.2.2 การแก้ปัญหาแบบถาวร (Long Term Solution)

เป็นการป้องกันไม่ให้เกิดแบคทีเรียเส้นใยเกิดขึ้น โดยรักษาสภาวะในการเดินระบบให้เหมาะสมต่อแบคทีเรียชนิดสร้างฟล็อกมากกว่าแบคทีเรียเส้นใย จนทำให้แบคทีเรียชนิดสร้างฟล็อกเจริญเติบโตได้รวดเร็วและมีจำนวนมากจนเป็นส่วนประกอบสำคัญของระบบ สภาวะที่ต้องรักษาให้เหมาะสม ได้แก่ สัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์, พีเอช, ปริมาณออกซิเจนละลาย, ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัส และที่สำคัญ คือ ต้องไม่ให้อัตราสารอาหารมีความเข้มข้นต่ำเกินไป (Low Organic Loading) (มันสิน, 2544)

นอกจากนี้ยังมีการใช้บ็อคคัพพันท์ (Selector) ในการป้องกันการเกิดแบคทีเรียเส้นใย โดยอาศัยหลักการที่ว่า ใช้ถังใบแรกให้รับน้ำเสียที่มีภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงสุด จนกระทั่งมีแบคทีเรียสร้างฟล็อกเป็นตัวหลัก ก่อนผ่านไปยังถังเดิมอากาศใบต่อไป (Chudoba *et al.*, 1973) จากงานวิจัยที่ทำการทดลองใช้บ็อคคัพพันท์แบบเดิมอากาศ (Aerobic Selector) ป้องกันการเกิดแบคทีเรียเส้นใยชนิด Type 0041 และ Type 1701 ที่เกิดกับโรงงานน้ำตาล พบว่าสามารถลดค่าดัชนีปริมาณตะกอนประมาณ 300 – 600 มิลลิตรต่อกรัม เป็น 60 – 90 มิลลิตรต่อกรัม (Prend and Kroil, 1998) และยังมีงานวิจัยที่ทำการทดลองเปรียบเทียบการใช้บ็อคคัพพันท์แบบต่าง ๆ เพื่อป้องกันการเกิดแบคทีเรียเส้นใย Type 0041 และ Type 0065 ที่เกิดกับโรงงานแปรรูปอาหารที่มีค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงถึง 1,500 กิโลกรัมต่อวัน และมีค่าดัชนีปริมาณตะกอนในบ่อเดิมอากาศสูงถึง 230 มิลลิตรต่อกรัม พบว่าการใช้บ็อคคัพพันท์แบบแอนน็อกซิก (Anoxic Selector) สามารถลดค่าดัชนี

ปริมาณตะกอนเหลือประมาณ 170 มิลลิตรต่อกรัม ภายใน 3 สัปดาห์ และการใช้บ่อคัดพันธุ์แบบเดิม อากาศ สามารถลดค่าดัชนีปริมาณตะกอนเหลือประมาณ 79 มิลลิตรต่อกรัม ภายใน 2 สัปดาห์ โดยมี สภาพการเดินระบบที่เหมาะสม คือ ควบคุมค่าการระบรทุกให้อยู่ในช่วง 1.8 – 2.7 กิโลกรัมบีโอดี ต่อกิโลกรัมตะกอนต่อวัน เพื่อควบคุมค่าดัชนีปริมาณตะกอนให้อยู่ในช่วง 80 – 120 มิลลิตรต่อกรัม (Nakhla and Lugowski, 2003)

การแก้ปัญหาโดยการเปลี่ยนลักษณะการป้อนน้ำเสีย (Feed Pattern) ก็เป็นอีกวิธี หนึ่งที่ใช้ในการป้องกันการเกิดแบคทีเรียเส้นใย เช่น การใช้ถังเติมอากาศแบบปลั๊กโฟลว์ (Plug Flow) และการป้อนน้ำเสียแบบเป็นช่วง ๆ อย่างไม่ต่อเนื่อง (Intermittent Feed) เพื่อให้มีระดับ สารอาหารสูงในขณะเริ่มแรก หรือช่วงต้นถัง

4. แนวทางการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีตัวกรองในการบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตกระดาษ

แบคทีเรียเส้นใยที่เกิดภาวะตะกอนลอย สามารถกลายเป็นจุลชีพหลักในระบบได้หลาย สาเหตุด้วยกัน ซึ่งมีทั้งสาเหตุที่สามารถควบคุมได้และควบคุมไม่ได้ อีกทั้งยังเกิดจากแบคทีเรียเส้น ใยหลายชนิดด้วยกัน ซึ่งมีวิธีการควบคุมต่างกันตามสภาวะแวดล้อมที่ทำให้เกิดแบคทีเรียเส้น ใยนั้น ๆ ทำให้เกิดความยุ่งยากในการป้องกันไม่ให้เกิดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียเส้นใย ซึ่งต้องใช้ ค่าใช้จ่ายสูงทั้งในการลงทุน เช่น การสร้างบ่อคัดพันธุ์ การเปลี่ยนรูปแบบการป้อนน้ำเสีย การติดตั้ง ไบโกลวดตะกอน ฯลฯ หรือการปรับปรุงการเดินระบบ เช่น เพิ่มปริมาณออกซิเจนละลาย เพิ่มอัตรา การสูบตะกอนกลับ เพิ่มการเติมไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ฯลฯ อีกทั้งยังเป็นการยากในการป้องกัน การเกิดแบคทีเรียเส้นใยที่เกิดจากคุณลักษณะของน้ำเสียเอง ได้แก่ การมีสารประกอบที่ย่อยสลายง่าย การมีสารประกอบซัลเฟอร์ เป็นต้น ดังนั้นการนำเทคโนโลยีตัวกรองมาประยุกต์ใช้เป็นหน่วยแยก ตะกอนจุลินทรีย์ออกจากน้ำจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่นำมาใช้แก้ไขปัญหาภาวะตะกอนลอย ดังเช่นใน งานวิจัยที่ทำการทดลอง แก้ปัญหาการเกิดแบคทีเรียเส้นใยชนิด *actinomyces* ในระบบ แอควีเวเตตสแต็คจ์ของระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ด้วยการใช้โมดูลเยื่อกรองแบบจุ่ม (Submerged Membrane Module) จุ่มในถังเติมอากาศเพื่อแก้ไขปัญหา พบว่า ระบบมีกำลังผลิต 32 ลูกบาศก์เมตร ต่อวัน และได้คุณภาพน้ำทิ้งตามมาตรฐาน (Takemura *et al.*, 1999) แต่เนื่องด้วยเยื่อกรองมีราคาต่อ พื้นที่สูง จึงมีงานวิจัยของ Fuchs *et al.* (2004) ได้ประยุกต์ใช้แผ่นกรอง (Filter) แทนเยื่อกรอง ถึงแม้ว่าคุณภาพของน้ำทิ้งด้อยกว่าการใช้เยื่อกรองแต่ก็คงประ โยชน์ในการคัดแยกตะกอนอย่าง สมบูรณ์ ซึ่งช่วยให้สามารถเพิ่มความเข้มข้นของตะกอนในระบบ ยังผลให้ขนาดถังและระยะเวลาใน

การบำบัดน้ำเสียลดลง โดยน้ำที่ออกจากระบบมีปริมาณสารแขวนลอยต่ำกว่า 12 มิลลิกรัมต่อลิตร ซีไออยู่ระหว่าง 25 - 45 มิลลิกรัมต่อลิตร บีไอต่ำกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีอัตราการกรองสูงเท่ากับ 150 ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง และมีความดันผ่านแผ่นกรอง (Transfilter Pressure) ต่ำมาก โดยใช้หลักการในการเดินระบบและควบคุมการอุดตันเช่นเดียวกันกับการใช้เยื่อกรองในช่วงไมโครฟิลเตรชัน และอุตสาหกรรมฟิลเตรชันซึ่งนิยมใช้ในถังปฏิกรณ์แบบมีเยื่อกรองจมตัว แต่ที่แตกต่างกัน คือ การใช้เยื่อกรองขนาดรูพรุนน้อยกว่า 0.05 ไมครอน (Nonporous membrane) ได้แก่ กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน และรีเวอร์สออสโมซิส ซึ่งสามารถแยกสารละลายได้ด้วยกลไกการแพร่ (Solution-diffusion mechanism) (Mulder, 2000)

4.1 การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเยื่อกรอง

4.1.1 กระบวนการกรองด้วยเยื่อกรองและหลักการทำงาน

กระบวนการกรองไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration Process) เป็นกระบวนการทางกายภาพ อาศัยแรงดันที่ต่ำเป็นแรงขับเคลื่อนให้ของเหลวผ่านช่องว่างของเยื่อกรอง ในการแยกอนุภาคแขวนลอยที่มีขนาดอยู่ในช่วง 0.01 – 10 ไมครอนเมตร รวมทั้งแบคทีเรียและจุลินทรีย์อื่นๆ ออกจากของเหลว กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน เป็นกระบวนการที่สำคัญกระบวนการหนึ่ง เนื่องจากมีอัตราการผลิตน้ำสูงกว่ากระบวนการเยื่อกรองแบบอื่นที่ความดันเดียวกัน เช่น อุลตราฟิลเตรชัน นาโนฟิลเตรชัน และรีเวอร์สออสโมซิส น้ำที่ผ่านการกรองมีคุณภาพดีกว่าน้ำที่ได้จากกระบวนการแยกทั่วไป เช่น การตกตะกอน การเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง การกรองทราย เป็นต้น นอกจากนี้สารมลพิษในน้ำส่วนใหญ่ จะมีขนาดอยู่ในช่วง 0.05 – 10 ไมครอนเมตร ทำให้สามารถกำจัดได้โดยกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน เนื่องจากขนาดของอนุภาคดังกล่าวอยู่ในช่วงค่าที่กำหนดของไมโครฟิลเตรชันพอดี

กลไกการทำงานของกระบวนการไมโครฟิลเตรชันจะแตกต่างจากกระบวนการกรองแบบธรรมดา (Conventional Filtration) คือ ในระบบการกรองแบบธรรมดา เมื่อปล่อยให้ น้ำไหลผ่านชั้นกรองอนุภาคแขวนลอยจะถูกกำจัดโดยจะติดค้างอยู่ที่ผิวหน้าของสารกรอง (Surface Filtration) หรือติดค้างในชั้นกรอง (Indepth Filtration) ส่วนในไมโครฟิลเตรชัน อนุภาคแขวนลอยหรือสารอินทรีย์จะถูกกำจัดโดยติดค้างอยู่ในช่องว่างของเยื่อกรอง เรียกกลไกนี้ว่า กลไกการแยกสารแบบคัดขนาดอนุภาค (Sieve Mechanism)

การสะสมของอนุภาคบริเวณผิวหน้าเยื่อกรองจะเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคที่ต้องการคัดแยกไม่สามารถผ่านเยื่อกรองได้ และไม่สามารถย้อนกลับไปในกระแสน้ำ เป็นผลทำให้สารละลายสารแขวนลอยและสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กๆ สะสมอยู่ที่ผิวหน้าเยื่อกรอง ทำให้เกิดการอุดตัน (Fouling) กระบวนการที่ทำให้เกิดการอุดตัน ได้แก่

ก. การอุดตันเนื่องจากอนุภาคหรือสารแขวนลอย

อนุภาคหรือสารแขวนลอยที่ทำให้เกิดการอุดตันของเยื่อกรอง ส่วนใหญ่คือ ดิน เลน และเหล็กที่มากับน้ำดิบ สารประกอบเหล็กที่ก่อให้เกิดการอุดตันคือ เฟอริกไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) ซึ่งเป็นตะกอนและจะตกตะกอนอยู่บนผิวเยื่อกรอง การจะกำจัดเหล็กในสภาพของตะกอน Fe^{3+} ให้อยู่ในสภาพที่ละลายน้ำ Fe^{2+} โดยการลดพีเอชของน้ำ ในขณะที่ระบบไมโครฟิลเตรชัน ที่มีการใช้เยื่อกรองชนิดเส้นใยกลวง (Hollow Fibre Module) พบว่าอนุภาคที่เล็กที่สุดที่ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการอุดตันมีขนาดประมาณ 45 ไมโครเมตร และอนุภาคที่มีผลต่อการอุดตันของไมโครฟิลเตรชันมากที่สุดมีขนาด 0.1 ไมโครเมตร (Babel and Takizawa, 2000)

ข. การอุดตันเนื่องจากสารอินทรีย์

สารอินทรีย์ในน้ำบางส่วนจะก่อตัวและเกิดเป็นชั้นเมือก (Gel Layer) บริเวณผิวหน้าเยื่อกรองสารละลายบางส่วนจะถูกกักตัวอยู่ในช่องเยื่อกรอง ทำให้เยื่อกรองเกิดการอุดตัน

จากรายงานการวิจัย พบว่าหลังจากกระบวนการรวมตะกอนโดยใช้แม่น้ำ Seine เป็นแหล่งน้ำดิบ ยังพบว่าอนุภาคที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อย เช่น โพลีแซคคาไรด์ในน้ำซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการอุดตัน (Lahoussine *et al.*, 1990)

ค. การอุดตันเนื่องจากสารอนินทรีย์

โดยทั่วไปการอุดตันเนื่องจากสารอนินทรีย์จะเป็นปัญหาสำหรับรีเวอร์สออสโมซิส และนาโนฟิลเตรชัน เนื่องจากสารอนินทรีย์สามารถผ่านไมโครฟิลเตรชันไปได้ยกเว้นแมงกานีสออกไซด์ (MnO_2) และเหล็กออกไซด์ (FeO_2)

ง. การอุดตันเนื่องจากจุลินทรีย์และสาหร่าย

จุลินทรีย์ในน้ำดิบสามารถเจริญเติบโตได้บนเยื่อกรอง ซึ่งหากปล่อยให้เกิดขึ้นจะเป็นปัญหาทำให้เยื่อกรองถูกทำลาย

จากรายงานการวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการอุดตันเนื่องจากจุลินทรีย์บนเยื่อกรองระบบไมโครฟิลเตรชันชนิดเส้นใยแบบกลวง พบว่าการควบคุมการอุดตันจากจุลินทรีย์ได้โดยใช้ก๊าซโอโซน 0.435 มิลลิกรัมโอโซนต่อลิตร ชัดคู่กับผิวเยื่อกรองเป็นเวลา 20 วินาทีทุกๆ ชั่วโมง สามารถยืดเวลาในการผลิตน้ำให้นานขึ้น ก่อนที่จะทำความสะอาดเยื่อกรองด้วยสารเคมี (Takizawa *et al.*, 1995)

การใช้ความดันผ่านเยื่อกรอง (Transmembrane Pressure) ที่ต่ำและคงที่ และใช้ความเร็วตัดขวาง (Cross Flow Velocity) สูง มากกว่า 6 เมตรต่อวินาที ในระบบเยื่อกรองซึ่งสามารถป้องกันการอุดตันเนื่องจากจุลินทรีย์ได้ (Gekas and Hallstrom, 1990)

4.1.2 ถึงปฏิบัติการชีวภาพแบบมีเยื่อกรองจมตัว

การบำบัดน้ำเสียโดยใช้การกรองด้วยเยื่อกรองนั้นไม่จำเป็นต้องมีถังตกตะกอน การใช้ถึงปฏิบัติการชีวภาพแบบแยกตะกอนด้วยแผ่นกรองมีวัตถุประสงค์เพื่อไม่ให้ตะกอนแขวนลอยและแบคทีเรียออกไปกับน้ำทิ้ง (Cho *et al.*, 1999; Takamura *et al.*, 1999) ขณะที่คุณสมบัติของน้ำเสียที่เข้าระบบมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ในการเกิดตะกอนพบว่าการทำงานของแผ่นกรอง ช่วยให้สามารถเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์ในถังมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นระหว่าง 20,000 – 40,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมากกว่าระบบแอกติเวตเต็ดสลัดจ์ธรรมดา (Krauth and Staab, 1993) จึงสามารถควบคุมค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรแบคทีเรียต่างๆ ได้ ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพการบำบัดสูง นอกจากนี้ถึงปฏิบัติการชนิดนี้ยังสามารถลดตะกอนแขวนลอยออกไปกับน้ำทิ้งได้โดยขึ้นอยู่กับขนาดรูพรุนของแผ่นเยื่อกรอง (Smith and Talcott, 1969) นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มขีดความสามารถในการรองรับการเปลี่ยนแปลงของลักษณะของน้ำทิ้งที่เข้าสู่ระบบด้วย และตะกอนส่วนเกินที่เกิดจากระบบถึงปฏิบัติการแบบมีเยื่อกรองมีน้อยกว่าระบบธรรมดา เนื่องจากแบคทีเรียเจริญเติบโตอยู่ในช่วงอัตราการเจริญเติบโตและอัตราการตายใกล้เคียงกัน (Stationary Phase)

ถึงปฏิกรณ์ชีวภาพแบบมีเชื้อกรงมีการควบคุมระบบที่แตกต่างจากระบบแอกติเวเตดสลัดจ์ และมีข้อดีมากกว่าเมื่อเทียบกับระบบแอกติเวเตดสลัดจ์ ได้แก่

- 1) ใช้พื้นที่ในการก่อสร้างน้อยกว่า เพราะไม่ต้องสร้างถังตกตะกอน และสามารถเดินระบบที่สัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ต่ำๆ และความเข้มข้นตะกอนสูงๆ ได้ ทำให้ถึงปฏิกรณ์มีขนาดเล็กกว่าระบบแอกติเวเตดสลัดจ์ ที่ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากัน
- 2) มีความสามารถในการแยกของแข็งออกจากน้ำได้ดีกว่า โดยที่น้ำออกจากระบบมีปริมาณของแข็งแขวนลอยคงที่
- 3) สามารถรองรับจุลินทรีย์เกือบทุกชนิดได้
- 4) เพิ่มความสามารถในการรับภาระที่เพิ่มขึ้นกะทันหันได้ (Shock Loading) เนื่องจาก ระบบมีความเข้มข้นตะกอนจุลินทรีย์สูง
- 5) ลดเวลาในการเก็บกักน้ำในระบบ ทำให้มีอัตราการบำบัดสูงกว่าระบบแอกติเวเตดสลัดจ์ธรรมดา
- 6) เกิดตะกอนส่วนเกินน้อยเนื่องจากเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์ที่มีอายุมาก
- 7) มีอายุตะกอนนานทำให้เกิดจุลินทรีย์พวกที่ย่อยสลายออร์แกนิกในโตรเจน (Nitrifying Bacteria) ซึ่งจะเปลี่ยนออร์แกนิกในโตรเจน ในไนโตรท์ เป็นไนเตรต

4.2 การประยุกต์ใช้เชื้อกรงเพื่อแก้ปัญหาที่เกิดจากแบคทีเรียเส้นใย

4.2.1 ประสิทธิภาพของระบบ

การบำบัดน้ำเสียแบบใช้ถังตกตะกอนทำให้อัตราการบำบัดช้าเพราะหากระบบมีตะกอนมีอายุนานเกินไป ทำให้ตะกอนมีขนาดเล็กและความหนาแน่นต่ำจะตกตะกอนได้ช้า วิธีหนึ่ง

ที่นำมาใช้ในการแก้ปัญหาคือการใช้เครื่องหมุนเหวี่ยง ซึ่งปรากฏว่ามีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและการดำเนินการสูง

การประยุกต์ใช้ถังชีวภาพ ร่วมกับแผ่นเยื่อกรองประสบความสำเร็จในการใช้บำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมตั้งแต่ปี 1970 (Goldsmith *et al.*, 1974) การใช้เยื่อกรองแยกน้ำกับตะกอนทำให้มวลสารในระบบไม่สูญหายไปกับน้ำและคุณภาพของน้ำที่ออกจากระบบมีคุณภาพดีกว่าระบบธรรมดา ถึงปฏิกรณ์ชีวภาพแบบมีเยื่อกรองสามารถลดต้นทุนการก่อสร้างอันเนื่องมาจากราคาที่ดินเพราะเป็นระบบที่ต้องการพื้นที่น้อย อีกทั้งระบบนี้ไม่ต้องมีการบำบัดตะกอนอีกด้วย ซึ่งช่วยลดค่าใช้จ่ายในการเดินระบบเป็นอย่างมาก (Morimoto *et al.*, 1988)

เนื่องจากแบคทีเรียเส้นใยจะมีอัตราการย่อยสลายสารอาหารต่ำและค่อนข้างคงที่เมื่อเทียบกับแบคทีเรียชนิดสร้างฟล็อก ยกเว้นในกรณีที่มีความเข้มข้นของสารอาหารต่ำ ดังนั้นการใช้แผ่นเยื่อกรองเพื่อกักแบคทีเรียเส้นใยไว้ในระบบเพื่อเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยรวมดีขึ้น ด้วยระบบขนาดเล็ก และใช้ระยะเวลาบำบัดที่สั้นกว่า ทำให้น้ำผ่านการบำบัดมีคุณภาพตามมาตรฐาน เพราะไม่มีการหลุดลอดของตะกอนจุลินทรีย์ออกไปจากระบบ

4.2.2 การอุดตันของเยื่อกรองในถังปฏิกรณ์

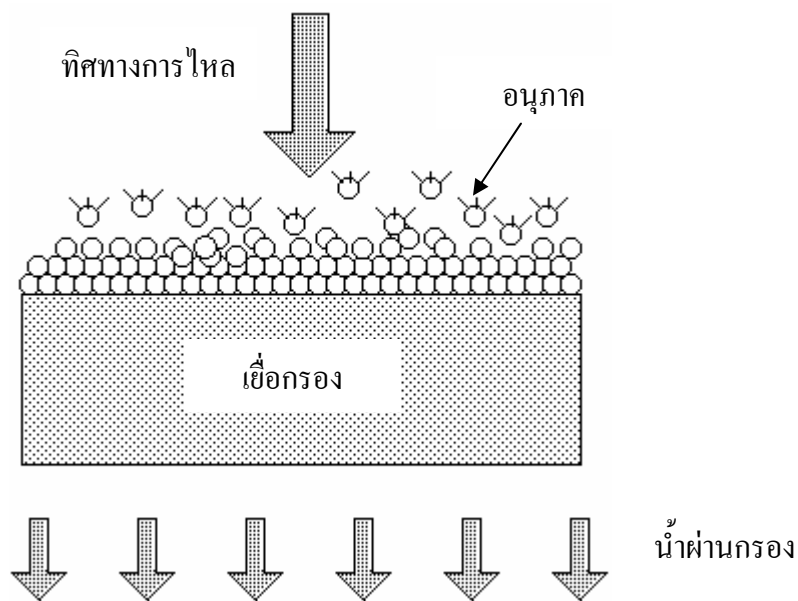
การอุดตัน (Fouling) หมายถึง การลดลงของอัตราการกรองผ่านเยื่อกรอง (Flux Decline) หรือการเพิ่มขึ้นของความดันผ่านเยื่อกรอง (Transmembrane Pressure) ตามเวลาอย่างสังเกตได้ ซึ่งเกิดจากสาเหตุหลายประการ ได้แก่ การสะสมของตัวถูกละลายบริเวณผิวหน้าเยื่อกรอง (Concentration Polarisation) การดูดซับตัวถูกละลายในรูพรุนของเยื่อกรอง (Adsorption) การเกิดชั้นเมือกบริเวณผิวหน้าเยื่อกรอง (Gel Layer) และการอุดตันในรูพรุนของเยื่อกรอง (Pore-blocking) ซึ่งตัวถูกละลายจะมีขนาดเท่าๆ กับรูพรุนของเยื่อกรอง (Mulder, 2000)

การทำงานของเยื่อกรองที่ลดลงเนื่องมาจากการอุดตันซึ่งเป็นสาเหตุมาจากการเกาะติดที่ผิวเยื่อกรองของสารอินทรีย์ การตกตะกอนของสารที่ละลายได้น้อย และการเกาะติดของเซลล์จุลินทรีย์ที่ผิวของเยื่อกรอง (Choo and Lee, 1996) ในระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบมีเยื่อกรอง ความเข้มข้นของมวลสารชีวภาพที่สูง และขนาดของอนุภาคที่ต่ำ มีผลให้ความสามารถในการ

ทำงานของเยื่อกรองลดลง จากผลการศึกษาพบว่า การเกิดตะกอนที่มีขนาดเล็กหรือมีรูปร่างที่ไม่เหมาะสมนั้นเป็นสาเหตุของการอุดตันทำให้การซึมผ่านเยื่อกรองล้มเหลว การควบคุมระบบ แอคติเวเตดสลัดจ์จึงส่งผลต่ออัตราการกรองของเยื่อกรอง (Takao *et al.*, 1999)

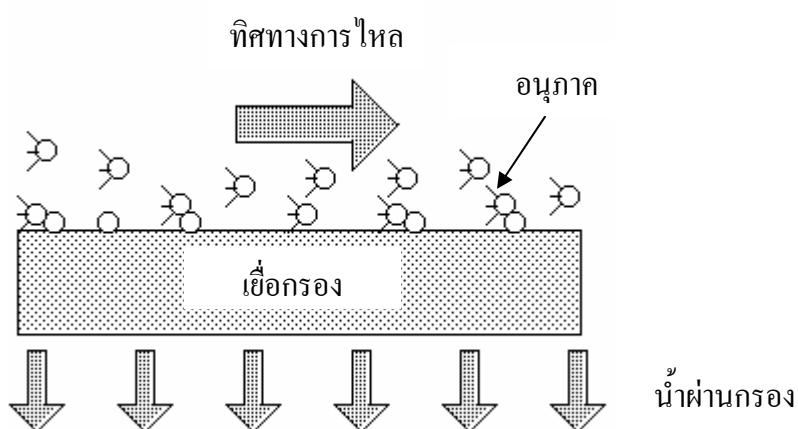
4.2.3 การควบคุมการอุดตันและการเดินระบบของถังปฏิกรณ์แบบมีเยื่อกรองจมตัว

กระบวนการกรองของเยื่อกรองมีเส้นทางการไหลของของเหลว 3 ทาง คือ ของเหลวที่เข้าสู่เมมเบรน (Feed) ของเหลวที่ผ่านการกรอง (Permeate) และของเหลวที่ถูกกักกัน (Retentate) หากในกระบวนการกรองไม่มีของเหลวที่ถูกกักไว้เรียกว่าการกรองแบบปลายตัน (Dead-end) ดังภาพที่ 7 หากการกรองมีเส้นทางการไหลของของเหลวทั้ง 3 ทางเรียกว่าการกรองแบบตัดขวาง (Cross-flow) ดังภาพที่ 8 การกรองในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบมีเยื่อกรองจมตัวนั้นเป็นการกรองแบบปลายตัน การกรองแบบนี้จะมีโอกาสเกิดการอุดตันของเยื่อกรองสูง การอุดตันนี้มีทั้งแบบที่ล้างทำความสะอาดได้และแบบที่เป็นการอุดตันถาวร การอุดตันถาวรมักเกิดจากอนุภาค คอลลอยด์ไปอุดตันภายในรูพรุนของเยื่อกรอง แต่ถ้าหากอุดตันแค่บริเวณผิวเยื่อกรองก็สามารถทำความสะอาดได้ การอุดตันนี้มีความสัมพันธ์กับค่าฟลักซ์วิกฤติ (Critical Flux) ของเยื่อกรอง (Howell *et al.*, 1995) การควบคุมอัตราการกรองของเยื่อกรองมักควบคุมให้ต่ำกว่าค่าอัตราการกรองวิกฤติ ค่านี้จึงจำเป็นสำหรับการออกแบบและควบคุมระบบเยื่อกรอง



ภาพที่ 7 การกรองของเหลวผ่านเมมเบรนแบบปลายตัน

ที่มา : ดัดแปลงจาก National metal finishing resource center (2006)



ภาพที่ 8 การกรองของเหลวผ่านเมมเบรนแบบตัดขวาง

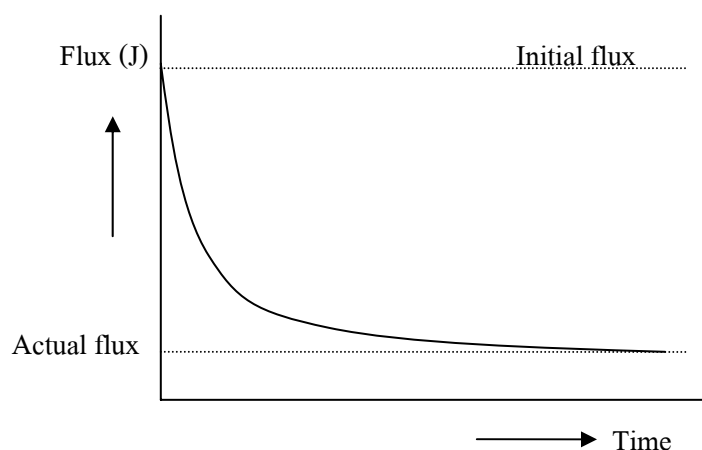
ที่มา: ดัดแปลงจาก National metal finishing resource center (2006)

ก. การเดินระบบแบบต่อเนื่องตามค่าฟลักซ์แท้จริง (Actual Flux)

ค่าฟลักซ์วิกฤต หมายถึง ค่าอัตราการกรองต่อพื้นที่ผิวเยื่อกรองสูงสุดที่ถ้าเดินระบบที่ค่าฟลักซ์ต่ำกว่าค่าฟลักซ์วิกฤต ค่าความดันสูญเสียตามเวลาจะคงที่หรือเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย แต่ถ้าเดินระบบที่ค่าฟลักซ์สูงกว่าค่าฟลักซ์วิกฤต ค่าความดันสูญเสียตามเวลาจะสูงขึ้นอย่าง

สังเกตได้ (Field *et al.*, 1995) แต่ในการเดินระบบเพื่อเพิ่มอัตราการกรองโดยเพิ่มค่าความดันที่ควบคุม จะเดินระบบด้วยค่าฟลักซ์แท้จริงเพื่อควบคุมการอุดตัน

ค่าฟลักซ์แท้จริง (Actual Flux) หมายถึง ค่าอัตราการกรองต่อพื้นที่ผิวเยื่อกรองที่คงที่หรือเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยที่ค่าความดันผ่านชั้นกรองค่าใดค่าหนึ่ง เมื่อเยื่อกรองอุดตันจากอนุภาคคอลลอยด์จนไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอนุภาคบริเวณผิวหน้าเยื่อกรองหรืออยู่ในสภาวะคงตัว (Mulder, 2000) ดังที่แสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับเวลาในการกรอง

ที่มา: Mulder (2000)

โรงงานผลิตกระดาษ VHP ugchelen ในเนเธอร์แลนด์ ใช้เยื่อกรองชนิดอัลตราฟิลเตรชันที่มีรูพรุนขนาด 0.04 ไมโครเมตร กรองหลังจากการบำบัดจากถังปฏิกรณ์ชีวภาพขนาด 200 ลูกบาศก์เมตร ปรากฏว่า สามารถเดินระบบได้ด้วยค่าฟลักซ์เท่ากับ 120 ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง ความเร็วการไหลผ่านเยื่อกรองเท่ากับ 3.5 เมตรต่อวินาที โดยใช้ค่าความดันเท่ากับ 3.5 บาร์ และค่าความเข้มข้นตะกอนจุลินทรีย์ เท่ากับ 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีปริมาณการเกิดสลัดจ์น้อยกว่า 0.02 กิโลกรัมต่อวัน (Simon and Bruce, 2003) ส่วนโรงงานผลิตแผ่นไฟเบอร์ บริษัท kronospan ใช้แผ่นกรอง 55 แผ่นหลังจากผ่านการรวมตะกอนที่ถังรวมตะกอนแล้ว ปรากฏว่า สามารถเดินระบบได้ด้วยค่าอัตราการกรองเฉลี่ย เท่ากับ 30 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ที่ความดัน 6 บาร์ แต่ต้องมีการล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศเป็นประจำ

รายงานของ Fuchs *et al.* (2004) ใช้แผ่นกรองรูปพรรณขนาด 30 ไมครอนแทนเยื่อกรองเป็นหน่วยคัดแยกของเหลวออกจากตะกอนในการบำบัดน้ำเสียชุมชน ปรากฏว่า สามารถเดินระบบด้วยค่าฟลักซ์ 50 – 150 ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง และมีความดันผ่านแผ่นกรองที่เปลี่ยนแปลงระหว่าง 3 – 20 มิลลิบาร์ ปริมาณสารแขวนลอยออกจากระบบน้อยกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีปริมาณสารแขวนลอยเข้าระบบ 11 – 234 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีร้อยละ 85.4 – 95.5

จากแนวความคิดการเป่าอากาศโดยใช้หัวฉีด หากเพิ่มการเป่าอากาศจะมีผลทำให้อัตราการกรองเพิ่มขึ้นขนาดของถังปฏิกิริยาที่จะเล็กลงตามไปด้วย การเคลื่อนที่ของน้ำตัดกับผิวเยื่อกรองนั้นทำให้เกิดการเสียดสีกันขึ้นตะกอนที่ติดอยู่ที่ผิวเยื่อกรองจะหลุดทำให้ไม่เกิดการอุดตันหรือการอุดตันเกิดขึ้นน้อย แต่อัตราการเติมอากาศก็ต้องควบคุมให้เหมาะสมด้วยเพราะหากมีการเป่าอากาศมากเกินไปจะทำให้สูญเสียพลังงานโดยไร้ประโยชน์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาที่พบว่าการใช้เยื่อกรองแบบจมตัวสำหรับถังปฏิกรณ์แบบมีเยื่อกรองต้องมีการเป่าอากาศให้เป็นฟองเพื่อให้เยื่อกรองเกิดการสั่นสะเทือนด้วยอัตราเป่าอากาศ 0.06 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตรต่อวินาทีโดยการเป่าอากาศด้วยความดัน 100 มิลลิปาสกาล (Takemura *et al.*, 1999)

ข. การเดินระบบแบบเอสปีอาร์ตามค่าความเข้มข้นตะกอนจุลินทรีย์สูงสุด

ระบบเอสปีอาร์เป็นระบบที่ใช้ถังเติมอากาศ ทำหน้าที่ทั้งการเติมอากาศเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์และทำหน้าที่แยกสลัดจ์ภายในถังเดียวกัน ซึ่งต่างจากการเดินระบบแบบไหลต่อเนื่อง ซึ่งจำเป็นต้องมีบ่อเก็บกักน้ำเสียขนาดใหญ่เพื่อควบคุมให้น้ำเสียเข้าสู่ระบบอย่างสม่ำเสมอ (สุธา, 2545) ระบบเอสปีอาร์สามารถเดินระบบได้โดยนำสลัดจ์ออกน้อยมาก อายุตะกอนนาน เดินระบบที่สัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ต่ำๆ ได้

ในการประยุกต์ใช้เยื่อกรองกับระบบเอสปีอาร์ เพื่อคัดแยกตะกอนออกจากของเหลว นอกจากจะพิจารณาค่าฟลักซ์แท้จริงที่ใช้ในค่าความเข้มข้นตะกอนนั้นๆ แล้วยังจำเป็นต้องพิจารณาถึงค่าความเข้มข้นตะกอนสูงสุดที่สามารถสูบน้ำออกจากเยื่อกรองโดยไม่อุดตัน เนื่องจากค่าความเข้มข้นตะกอนจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อสูบน้ำออก