

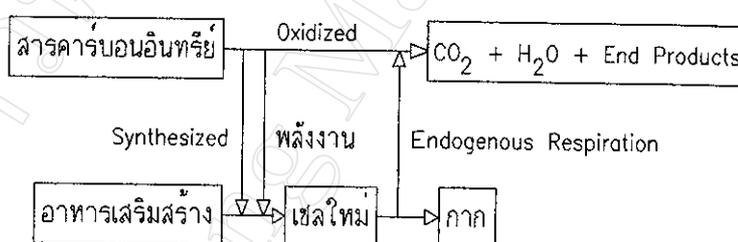
บทที่ 2

ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ขบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยาแบบใช้ออกซิเจน

(Aerobic Biological Wastewater Treatment Process)

การบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยาแบบใช้ออกซิเจน เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์เป็นมลสารหลักทั้งที่อยู่ในรูปของสารละลายและอนุภาคคอลลอยด์โดยอาศัยแบคทีเรียที่ต้องการออกซิเจน (Aerobic Bacteria) ในการกิน ทำลาย ย่อยสลาย ดูดซับ หรือเปลี่ยนรูปสารคาร์บอนอินทรีย์ (Carbonaceous Organic Matter) ที่อยู่ในน้ำเสียไปเป็นก๊าซต่าง ๆ และเนื้อเยื่อคั่งที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.1 จนกระทั่งน้ำเสียมีค่าความสกปรกน้อยลง



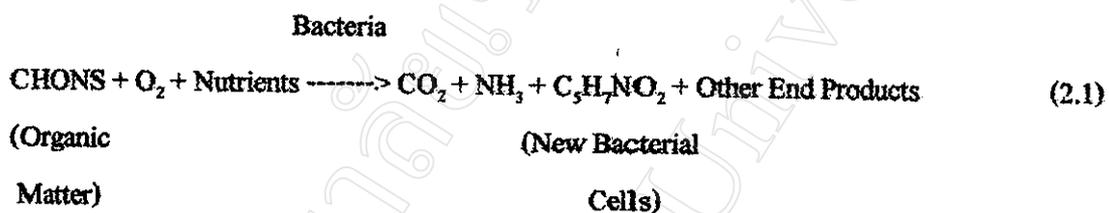
รูปที่ 2.1 การย่อยสลายของสารคาร์บอนอินทรีย์ในน้ำเสียโดยจุลินทรีย์

ที่มา : เกรียงศักดิ์, 2537

แบคทีเรียประเภทที่ใช้ออกซิเจนสามารถแบ่งออกเป็น 2 พวกใหญ่ ๆ คือ แบคทีเรียพวกที่เจริญเติบโตอยู่ในลักษณะแขวนลอยอยู่ในน้ำเสีย ได้แก่ ระบบตะกอนเร่ง, Oxidation Ponds และ Aerated Lagoons เป็นต้น แบคทีเรียพวกที่ติดเกาะกับวัสดุตัวกลางซึ่งอาจอยู่กับที่ (Fixed-Bed) เช่น ระบบโปรยกรอง (Trickling Filter) หรือชนิดเคลื่อนที่ (Moving-Bed) เช่นระบบจานหมุนชีวภาพ (Rotating Biological Contactor)

แบคทีเรียจะใช้ออกซิเจนอิสระในการเผาผลาญสารอินทรีย์ เพื่อให้ได้พลังงานในการดำรงชีวิตและสร้างเซลล์ใหม่ ส่วนสารประกอบต่าง ๆ ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาดังกล่าว จะเป็นสารคงตัวที่ไม่มีกลิ่นเหม็น โดยผลผลิตที่สำคัญได้แก่ น้ำกับคาร์บอนไดออกไซด์ ตามที่ได้แสดงไว้ในสมการที่ 2.1 และ 2.2 (Metcalf & Eddy, 1991) ดังนี้

สำหรับปฏิกิริยา Oxidation และ Synthesis:



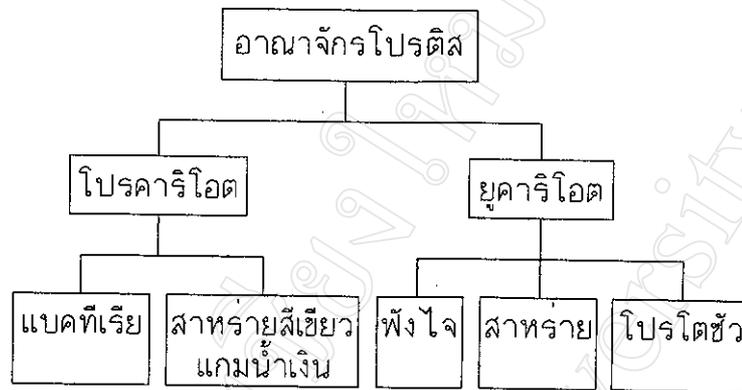
สำหรับปฏิกิริยา Endogeneous Respiration:



สารอินทรีย์ในน้ำเสียประมาณร้อยละ 65 จะถูกจุลินทรีย์ใช้เป็นพลังงานเพื่อการดำรงชีวิตและเจริญเติบโต ส่วนอีกร้อยละ 35 ใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่เพื่อการสืบพันธุ์

2.2 จุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบแผ่นฟิล์มชีวะ

โดยทั่วไปสิ่งมีชีวิตสามารถแบ่งออกตามหลักชีววิทยาได้เป็น 3 จำพวก ได้แก่ พืช สัตว์และโปรติส ซึ่งโปรติสนั้นจะหมายถึงสิ่งมีชีวิตที่เล็กที่สุดที่ลักษณะแตกต่างจากพืชและสัตว์ โดยมีองค์ประกอบทางชีวภาพอย่างง่าย ๆ และมีบทบาทที่สำคัญในขบวนการของการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ โปรติสนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ โปรคาริโอตและยูคาริโอต โดยพวกแรกนั้นจะเป็นจุลินทรีย์ขนาดเล็กและมีส่วนประกอบง่ายกว่าประเภทหลัง จุลินทรีย์ที่จัดอยู่ในประเภทโปรคาริโอตคือ แบคทีเรียทุกชนิดและสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน ส่วนกลุ่มของยูคาริโอต ได้แก่ โปรโตซัว, ฟังไจ และสาหร่ายส่วนใหญ่ ตามที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงการจำแนกประเภทของโปรติส
ที่มา : มั่นสิน, 2525

ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งพบว่าจุลินทรีย์ที่แตกต่างกันมากมายหลายชนิดรวมเป็นองค์ประกอบ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบแผ่นฟิล์มชีวะแล้ว มักจะพบว่าประชากรจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบแผ่นฟิล์มชีวะนั้นมีหลายประเภทยิ่งกว่า นอกจากจะมีโปรติสทั้ง 2 ประเภทแล้ว ยังมีสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในสกุลที่สูงกว่า เช่น นิมาโทด (Nematoda) โรติเฟอร์ (Rotifer) สลัดจ์เวิร์ม (Sludge Worm) และตัวอ่อนของแมลงบางชนิด ลูกโซ่อาหารของระบบนี้จึงยุ่งยากซับซ้อนมากกว่าและความสมบูรณ์ของการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียจึงมีมากกว่าเป็นเหตุให้มวลชีวะที่เหลือจากระบบบำบัดแบบนี้มีน้อยกว่าระบบบำบัดแบบตะกอนแขวนลอย

2.2.1 แบคทีเรีย

แบคทีเรียมักได้ว่าเป็นสิ่งมีชีวิตระดับพื้นฐาน และพบเป็นจำนวนมากในเทอมของจำนวนและน้ำหนักทั้งหมด ซึ่งมีทั้งประเภท Aerobic, Facultative และ Anaerobic โดยแบคทีเรียพวกที่ต้องการออกซิเจนมักเป็นประเภทแกรมลบ มีลักษณะเป็นท่อนเช่น Zoogloea, Pseudomonas, Achromobacter, Alcaligenes และ Flavobacterium ส่วนแบคทีเรียพวกเส้นใย (Filamentous Bacteria) ที่พบบ่อยมีจำพวก Sphaerotilus และ Beggiatoa แต่มักจะปรากฏในจำนวนไม่มากนัก

บทบาทของแบคทีเรียที่พบอยู่ในระดับต่ำของห่วงโซ่อาหาร มีหน้าที่หลักในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำโดยสารอินทรีย์ที่สามารถละลายน้ำได้จะถูกแบคทีเรียกำจัดออกไปอย่างรวดเร็วเมื่อน้ำเสีย

ไหลผ่านฟิล์มชีวะส่วนสารอินทรีย์ในน้ำที่อยู่ในรูปตะกอนขนาดเล็กหรืออนุภาคคอลลอยด์จะถูกทำให้ติดกับฟิล์มชีวะก่อนและได้รับการย่อยภายหลังเพื่อทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์มีขนาดเล็กลงจนเซลล์สามารถนำไปใช้ได้

2.2.2 ฟังไจ

ฟังไจเป็นสิ่งมีชีวิตที่มีประสิทธิภาพสูง ในการเจริญเติบโตแบบยึดติดกับผิววัสดุตัวกลาง และไม่ถูกชะออกง่ายพร้อมกับน้ำเสียที่ไหลผ่าน โดยลักษณะทางกายภาพของไมซีเลียมจะเป็นตัวส่งเสริมให้เกิดการสะสมของอนุภาคบนแผ่นฟิล์มชีวะ จึงเป็นผลให้ฟิล์มชีวะมีความหนามากขึ้น ในที่สุดอาจมีผลทำให้เกิดการอุดตันขึ้นในระบบ การเจริญเติบโตของประชากรฟังไจในฟิล์มชีวะมักไม่ถูกจำกัดโดยสารอาหาร ดังนั้นความหนาของฟิล์มจึงไม่เป็นตัวจำกัดด้วย เนื่องจากส่วนของไฮฟา (Hypha) สามารถยื่นออกมาในชั้นน้ำเสียที่ไหลผ่านบนผิวฟิล์มชีวะ ออกซิเจนจะผ่านเข้าทางไฮฟาสู่ส่วนในของฟิล์มชีวะ โดยขบวนการ Protoplasmic Streaming ภายในไฮฟาเอง ซึ่งแตกต่างจากฟิล์มชีวะที่มีประชากรแบคทีเรียเป็นประชากรหลัก โดยความหนาของฟิล์มจะเป็นตัวจำกัดทำให้ออกซิเจนไม่สามารถแพร่ผ่านเข้าสู่ชั้นในสุดได้ ทำให้เกิดสภาพขาดออกซิเจน เป็นผลทำให้ฟิล์มชีวะนั้นหลุดจากผิววัสดุตัวกลางในเวลาต่อมา

ฟังไจมักจะมีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมต่างๆ ได้ดีกว่าสิ่งมีชีวิตพวกแบคทีเรียมาก เช่น สามารถเจริญเติบโตได้ในน้ำเสียที่มีพีเอชต่ำ หรือน้ำเสียที่มีส่วนประกอบของ Mineral Acid ในปริมาณสูง แต่เมื่อพิจารณาถึงความสามารถในการหาสารตั้งต้นที่เป็นอาหารเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตพบว่ามีความสามารถที่ต่ำกว่าแบคทีเรีย

2.2.3 สาหร่าย

สาหร่ายเป็นสิ่งมีชีวิตที่สามารถสังเคราะห์แสงได้เอง โดยการอาศัยคลอโรพลาสต์ สาหร่ายบางชนิดเป็นพวกเซลล์เดียว แต่บางชนิดเป็นพวกสาหร่ายหลายเซลล์ และมักพบสาหร่ายเจริญเติบโตอยู่บนผิวฟิล์มชีวะที่มีแสงแดดส่องถึงตัวอย่างเช่นในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไปรยกรองและระบบงานหมุนชีวภาพหากกล่าวถึงบทบาทของสาหร่ายต่อระบบบำบัดน้ำเสียชีวแบบฟิล์มครึ่งแล้ว พบว่าแทบไม่มีความสำคัญเมื่อพิจารณาในด้านการกำจัดสารอินทรีย์แต่การเจริญเติบโตของสาหร่ายอาจมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการดำเนินระบบเนื่องจากแผ่นสาหร่ายที่เกิดขึ้นจะมีผลกระทบต่อระบบในด้านการ

กระจายของน้ำเสีย การระบายอากาศและอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดการอุดตันในระบบได้ง่าย สาหร่ายชนิดที่พบมาก ได้แก่ *Chlorella*, *Chlorococcum*, *Phormidium*, *Oscillatoria*, *Stigeoclonium* และ *Ulothrix*

2.2.4 ไพรโตซัว

บทบาทของไพรโตซัวในระบบชีวแบบฟิล์มครึ่ง มีลักษณะเหมือนกับ บทบาทของ ไพรโตซัวในระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนร่งกล่าวคือ มีหน้าที่คอยจับแบคทีเรียเป็นอาหาร ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการลดจำนวนประชากรแบคทีเรีย นอกจากนั้น ไพรโตซัวบางประเภทสามารถใช้สารละลายอินทรีย์ในน้ำเสียเป็นอาหารได้โดยตรงหรือสามารถหาอาหารโดยการจับ ไพรโตซัวอื่นๆ เป็นอาหารอีกด้วย ชนิดของไพรโตซัวที่พบมาก เช่น *Mastigophorea*, *Rhizopodea* และ *Ciliate*

2.2.5 โรติเฟอร์

จากการค้นคว้าเกี่ยวกับ บทบาทของโรติเฟอร์ในระบบบำบัดน้ำเสียของระบบชีวแบบฟิล์มครึ่งยังไม่ชัดเจนนัก แต่ในระบบตะกอนร่ง พบว่าบทบาทของโรติเฟอร์มี 2 ประการคือ ประการแรก ทำหน้าที่เป็นตัวยับยั้งการสร้างนิวเคลียสของแบคทีเรียในการฟอร์มตัวเกิดฟล็อกใหม่ ประการที่สอง มีหน้าที่ในการกำจัดแบคทีเรียที่ไม่ได้อยู่ในรูปฟล็อก โดยโรติเฟอร์เป็นสิ่งมีชีวิตที่มีความสามารถสูงในการจับแบคทีเรียเป็นอาหารนอกจากนี้การเคลื่อนที่ของโรติเฟอร์มักจะดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ ไพรโตซัวหลายชนิด

2.2.6 นิมาโทด

นิมาโทดมักจะอาศัยอยู่ในฟิล์มชีวมากกว่าที่จะอยู่บนผิวฟิล์มหรือบริเวณชั้นน้ำ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าจำนวนประชากรนิมาโทดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาของฟิล์มชีวที่เกิดขึ้น

บทบาทของนิมาโทดในการบำบัดน้ำเสียมี 3 ประการคือ ประการแรกการเจริญเติบโตของนิมาโทดมีผลกระทบต่อจำนวนและความหนาแน่นรวมถึงการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย เนื่องจากนิมาโทดจะคอยจับแบคทีเรียกินเป็นอาหาร ประการที่สองทำหน้าที่เป็นผู้ย่อยสลายสารอินทรีย์ ส่วนประการสุดท้ายถือว่านิมาโทดเป็นสิ่งมีชีวิตที่มีหน้าที่ในการหมุนเวียนพลังงาน และสารอาหารในวงจร

ห่วงโซ่อาหาร แต่อย่างไรก็ตาม บทบาทของนีมาโทดต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบจะมีน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับแบคทีเรีย

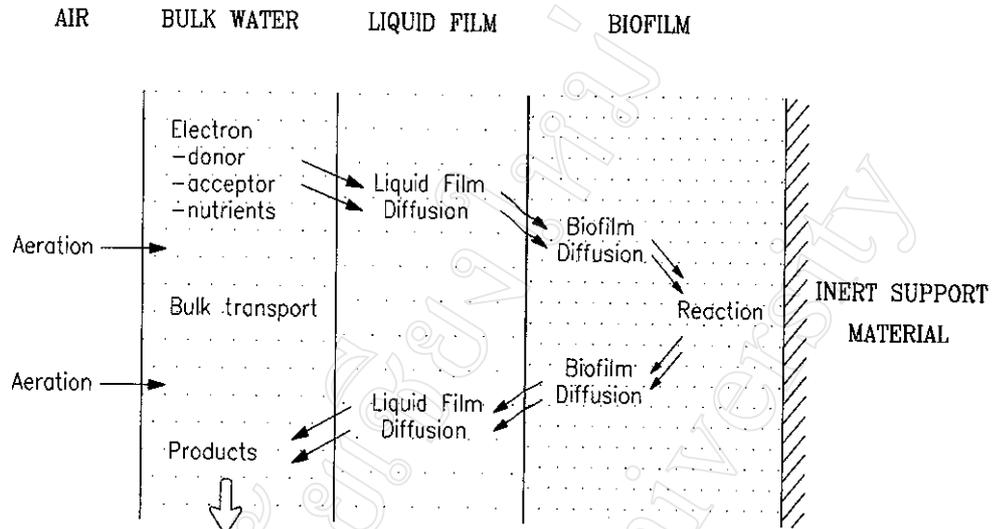
2.3 กลไกในการกำจัดสารอินทรีย์ของฟิล์มชีวะ

การย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียของฟิล์มชีวะเกิดจากจุลินทรีย์พวก Heterotrophic ที่ใช้ออกซิเจนในการดำรงชีวิต ลักษณะโครงสร้างทางกายภาพจะคล้ายฟองน้ำมากกว่าที่จะคล้ายเปลือกของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง โดยกลไกในการกำจัดสารอินทรีย์ของฟิล์มชีวะเกิดจากน้ำเสียที่ไหลผ่านฟิล์มชีวะซึ่งเกาะอยู่บนผิวของวัสดุตัวกลาง โดยสารอินทรีย์ในน้ำเสียจะเคลื่อนที่ผ่านเข้าฟิล์มชีวะเข้าไปยังจุลินทรีย์ที่อยู่ภายในโดยการแพร่ จากนั้นสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของสารละลายก็จะถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์ที่จุลินทรีย์สร้างขึ้น ส่วนสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของอนุภาคคอลลอยด์นั้นจะถูกทำให้รวมตัวเป็นฟลอคค่อนโดยสารโพลีเมอร์ที่มีคุณสมบัติเป็นโคแอกกูแลนต์ที่สร้างขึ้นโดยพวกจุลินทรีย์บางชนิดในฟิล์มชีวะแล้วถูกดูดติดกับผิวของฟิล์มชีวะ หลังจากนั้นจะค่อย ๆ ถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์เช่นเดียวกับสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปสารละลาย

สำหรับขั้นตอนที่สำคัญในการควบคุมฟิล์มชีวะให้อยู่ในสภาพสมดุลย์เป็นดังนี้

- สารอาหารจะแพร่จากชั้นน้ำเข้าสู่ผิวหน้าของฟิล์มชีวะ
- สารอาหารจะถูกนำไปใช้และแพร่เข้าสู่ภายในฟิล์มชีวะ
- จะมีการเจริญเติบโตของมวลชีวภาพ
- การหลุดออกของฟิล์มชีวภาพ

ออกซิเจนที่ถูกจุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์จะถูกขนส่งเข้ามาภายในฟิล์มชีวะโดยการแพร่เข้าสู่ชั้นน้ำ (Liquid Film) และผ่านเข้าไปจนถึงฟิล์มชีวะในที่สุด เมื่อสารอินทรีย์ถูกย่อยสลายแล้ว ผลผลิตของปฏิกิริยา เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ สารโพลีเมอร์ เอนไซม์ ฯลฯ ก็จะถูกส่งออกจากฟิล์มชีวะโดยการแพร่เช่นเดียวกัน ลักษณะการขนส่งสารต่าง ๆ เข้าและออกจากฟิล์มชีวะได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะการขนส่งสารต่าง ๆ ภายในฟิล์มชีวะ

ที่มา : Harremoes, 1978

ความสำคัญของอัตราการขนส่งสัณสเตรดในฟิล์มชีวะทั้ง 2 ชนิด คือ สัณสเตรดที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน (Electron Acceptor) และสัณสเตรดที่ทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (Electron Donor) ถือเป็นบทบาทที่สำคัญต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยาการกำจัดสัณสเตรด ซึ่งอัตราการในขนส่งสัณสเตรดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มข้นของสัณสเตรดเองจึงกล่าวได้ว่าอัตราเร็วของปฏิกิริยาในฟิล์มชีวะจะถูกควบคุม โดยความเข้มข้นของสัณสเตรดทั้ง 2 ชนิด

การตัดสินใจว่าสัณสเตรดชนิดใดจะเป็นตัวจำกัดอัตราเร็วของปฏิกิริยาในฟิล์มชีวะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสัณสเตรดกับสัมประสิทธิ์ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาของสัณสเตรดนั้น โดยสัณสเตรดที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนจะเป็นตัวจำกัดอัตราเร็วของปฏิกิริยา เมื่อ

$$S_a < (K_m/K_d) S_d \quad (2.3)$$

โดยที่ S_a และ S_d แทนความเข้มข้นของสัณสเตรด ที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับและให้อิเล็กตรอนที่ความลึกหนึ่งในฟิล์มชีวะตามลำดับ ส่วน K_m และ K_d แทนสัมประสิทธิ์ของอัตราเร็วครั้งปฏิกิริยาของสัณสเตรดที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับและให้อิเล็กตรอนตามลำดับ

อัตราการแพร่ของออกซิเจนผ่านฟิล์มชีวะนั้นอยู่ในช่วงร้อยละ 50-81 ที่บริเวณผิวด้านนอกของฟิล์ม (Top Layer) และร้อยละ 20-50 ในชั้นที่อยู่ลึกเข้าไป (Bottom Layer) ขึ้นอยู่กับความหนาแน่น (Density), ความพรุน (Porosity) และความลึก (Thickness) ของฟิล์มชีวะ นอกจากนั้นยังพบว่าในฟิล์มชีวะจะมีจำนวนแบคทีเรียอย่างน้อย 300 ล้านตัว/ลบ.ซม.

ความลึกที่มากที่สุดที่ออกซิเจนสามารถแพร่เข้าไปถึงมีค่าอยู่ในช่วง 0.06 - 2.00 มม. และผลการศึกษาของ Trulear and Characklis (1982) พบว่าความหนาของชั้นจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.05-0.30 มม. ออกซิเจนสามารถแพร่ผ่านได้มากกว่า โดยอาจมีค่าความลึกมากที่สุดได้สูงถึง 4 มม. ในตารางที่ 2.1 แสดงความหนาของฟิล์มชีวะที่มีผลต่อความหนาแน่นของแบคทีเรียของถังปฏิกริยาประเภทต่าง ๆ

ตารางที่ 2.1 แสดงประเภทของถังปฏิกริยาและความหนาของฟิล์มชีวะ

ความหนาแน่น (mgTSS/ml)	ความหนาของฟิล์ม ชีวะ (μm)	ประเภท ของถังปฏิกริยา	อ้างอิง
90	<300	Rotating Annular Submerged Drum	Kornegay and Andrews (1970)
37.5	100-3,800	Rotating Tube	Tomlinson and Snaddon (1966)
111	200	Rotating Cylinder	Hoehn and Ray (1973)
20	>200	Rotating Cylinder	Hoehn and Ray (1973)
669	28-183	Submerged- Packed Column	Namkung et al. (1983)

ที่มา : ศิริภรณ์ (2536)

ในการศึกษาหาค่าความหนาแน่นของฟิล์มชีวะนั้น Zhang and Bishop (1994) พบว่าค่า Dry Density เฉลี่ยของฟิล์มชีวะมีค่าเท่ากับ 1.17 มก/ซม³ โดยไม่เปลี่ยนแปลงตามความหนาของฟิล์ม ค่า

Wet Density บริเวณผิวค้ำนอกของฟิล์มมีค่าอยู่ในช่วง 1.001-1.003 ส่วนในชั้นที่อยู่ลึกเข้าไปมีค่าเท่ากับ 1.01-1.02 กรัม/ซม³ ของปริมาณฟิล์มชีวะทั้งหมด ค่าความพรุนในชั้นผิวมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 84-93 และ 58-67 ในชั้นที่อยู่ลึกเข้าไป สำหรับรัศมีของช่องเปิดเฉลี่ย (Mean Pore Radius) มีค่าอยู่ระหว่าง 1.7-2.7 และ 0.3-0.4 μm สำหรับบริเวณชั้นผิวและชั้นที่อยู่ลึกเข้าไป ตามลำดับ Warner and Gujer (1984) และ Rittmann and Manem (1992) พบว่าอัตราส่วนของเซลล์ที่มีชีวิตต่อมวลชีวะทั้งหมด (Viable Cells/Total Biomass) เท่ากับร้อยละ 72-91 และ 31-39 สำหรับบริเวณชั้นผิวและชั้นที่อยู่ลึกเข้าไป

จากที่กล่าวมาแล้วจะเห็นว่าสารอินทรีย์และออกซิเจนนั้นต้องแพร่ผ่านฟิล์มชีวะเข้าไปภายในจึงเป็นเหตุให้ความเข้มข้นของออกซิเจนและสารอินทรีย์บริเวณผิวนอกสุดของฟิล์มชีวะมีมากกว่าส่วนในของฟิล์ม ดังนั้นในการย่อยสลายสารอินทรีย์รวมทั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์บริเวณผิวนอกสุดจึงเกิดได้ดีที่สุดเป็นเหตุให้ฟิล์มชีวะมีความหนาเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการเพิ่มจำนวนของมวลจุลินทรีย์และการสะสมของอนุภาคคอลลอยด์บนแผ่นฟิล์มชีวะ ฟิล์มชีวะที่มีความหนามากจนออกซิเจนไม่สามารถแพร่ผ่านไปถึงส่วนในสุดได้ เป็นเหตุทำให้เกิดสภาพ Anoxic และ Anaerobic ในบริเวณส่วนในสุด และความหนาของฟิล์มชีวะที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ยังทำให้สารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปสารละลายถูกใช้หมดก่อนที่จะแพร่เข้าไปถึงส่วนในสุดจุลินทรีย์ที่อยู่ในบริเวณดังกล่าวจะเกิดสภาพที่ขาดสารอาหารและออกซิเจนโดยการเจริญเติบโตอยู่ในช่วง Endogeneous จนกระทั่งประสิทธิภาพในการยึดเกาะกับวัสดุตัวกลางของจุลินทรีย์หมดไป แผ่นฟิล์มชีวะก็จะหลุดออกจากวัสดุตัวกลาง ภายหลังที่แผ่นชีวะเก่าหลุดออกไปจุลินทรีย์ก็จะสร้างแผ่นฟิล์มชีวะใหม่ขึ้นมาแทนวนเวียนเป็นวัฏจักรเช่นนี้เรื่อยไป

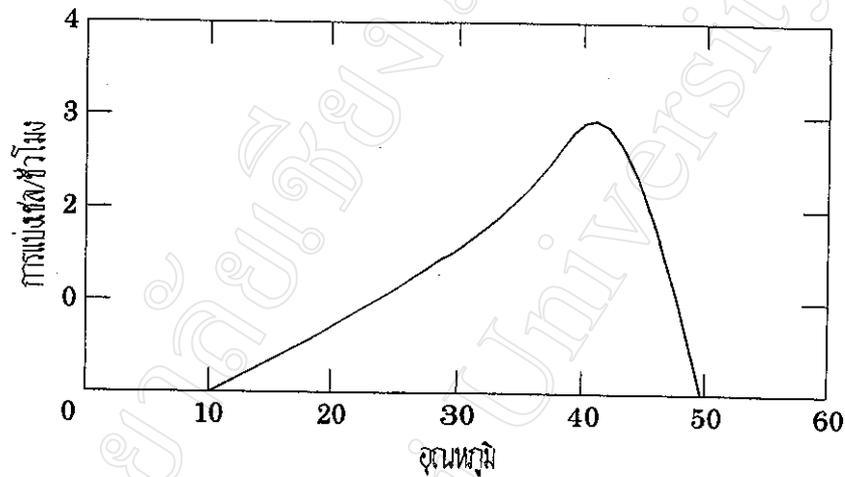
2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบ

ในการทำงานของระบบเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพ จำเป็นจะต้องจัดสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบ ได้แก่

2.4.1 อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเติบโตของแบคทีเรียอัตราการเติบโตของแบคทีเรียต่ำที่อุณหภูมิต่ำ และสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยที่อัตราการเมตาบอลิซึมของแบคทีเรียเพิ่มขึ้นประมาณ 1.5-2.0 เท่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุก 10 °ซ ในช่วง 5-30 °ซ

สำหรับจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยาส่วนใหญ่จะเป็นชนิดที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วงอุณหภูมิปานกลาง (Mesophilic Microorganism) ซึ่งจะอยู่ในช่วง 20-40 °ซ ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ Mesophilic Microorganism

ที่มา : Mara, 1978

ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพของการกำจัดบีโอดีมีความสัมพันธ์ในเทอมของ

$$E_T = E_{20} A_T^{(T-20)} \quad (2.4)$$

โดยที่

- E_T = ประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดีที่อุณหภูมิ T °ซ
- E_{20} = ประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดีที่อุณหภูมิ 20 °ซ
- A_T = ค่าสัมประสิทธิ์ มีค่าอยู่ในช่วง 1.025-1.047
- T = อุณหภูมิของการดำเนินระบบที่ T °ซ

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิยังมีผลต่อการทำงานในถังตกตะกอนชั้นที่สอง พบว่าหากอุณหภูมิต่ำตะกอนจะตกได้ดีกว่าอุณหภูมิสูง และถ้าอุณหภูมิในถังตกตะกอน มีความแตกต่างกันเกิน 2 °ซ จะทำให้เกิดการไหลวนของน้ำเนื่องจากมีความหนาแน่นแตกต่างกัน ซึ่งเรียกว่า Density Current

การสะสมของฟิล์มชีวะในระบบที่ถูกกระทบโดยอุณหภูมิซึ่งมีอิทธิพลต่ออัตราปฏิกิริยาออกซิเดชันและบทบาทของจุลินทรีย์จำพวก Grazers โดยมีผลกระทบรุนแรงเมื่ออุณหภูมิในระบบลดต่ำกว่า 10 °ซ

2.4.2 อาหารเสริม

จุลินทรีย์ต้องการอาหารเสริมในปริมาณที่พอเหมาะซึ่งอาหารเสริมที่สำคัญ ได้แก่ ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ในอัตราส่วน BOD:N:P = 100:5:1 นอกจากนี้ยังต้องมีแร่ธาตุอย่างอื่นอีก เช่น โปแตสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และเหล็ก ซึ่งโดยทั่วไปแร่ธาตุเหล่านี้มีอยู่ในน้ำทิ้งแล้วตามธรรมชาติอย่างเพียงพอ ถ้าอาหารเสริมสร้างไม่พอเพียง จะมีผลกระทบกระเทือนต่อระบบในถังเดิม อากาศ เช่น การขาดไนโตรเจนจะทำให้ราเจริญเติบโตได้เร็วกว่าแบคทีเรีย และราที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นเส้นยาวทำให้ตะกอนไม่เกาะกันและจมตัวได้ยากในถังตกตะกอน

2.4.3 ออกซิเจน

ออกซิเจนเป็นส่วนสำคัญของปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์และเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้ในการสร้างเซลล์ของแบคทีเรียที่ต้องการอย่างน้อยที่สุดที่ต้องควบคุมไว้ในช่วง 1-2 มก/ล ซึ่งปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนนี้ขึ้นกับอุณหภูมิ หากระบบมีอุณหภูมิสูงจุลินทรีย์สามารถทำงานได้มากย่อมต้องการออกซิเจนมาก นอกจากนั้นยังมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะต่อหน่วยปริมาตรวัสดุตัวกลางซึ่งเป็นพื้นที่ในการเกาะติดและเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในฟิล์มชีวะโดยอัตราการแพร่ผ่านของออกซิเจนเข้าสู่ชั้นในฟิล์มชีวะขึ้นกับความเข้มข้นของออกซิเจน รวมถึงส่วนประกอบและความหนาแน่นของฟิล์มชีวะเอง

2.4.4 ระยะเวลา

ระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียภายในถังเติมอากาศ ต้องมากพอเพียงที่จุลินทรีย์จะใช้ในการย่อยสลายมลสารต่าง ๆ หากมีระยะเวลาดำเนินไปสารที่ย่อยยาก ๆ จะถูกย่อยไม่ถึงขั้นสุดท้าย ทำให้ค่า BOD เหลืออยู่ในน้ำเสียมาก

2.4.5 พีเอช

แบคทีเรียสามารถเจริญเติบโตได้ดีที่ค่าพีเอชในช่วง 6.5-8.5 หากค่าพีเอชต่ำกว่า 6.5 ราจะเจริญเติบโตได้ดีกว่าแบคทีเรีย ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบต่ำลง ส่วนค่าพีเอชที่สูงจะส่งผลให้ฟอสฟอรัสแยกตัวออกมาจากน้ำและจุลินทรีย์ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ หากค่าพีเอชมีค่าต่ำหรือสูงมากเกินไปจุลินทรีย์ก็จะตายหมด โดยปกติค่าพีเอชของน้ำเสียชุมชนมักจะอยู่ในช่วง 6-8

2.4.6 สารพิษ

สารพิษสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภทคือ ชนิดเฉียบพลัน (Acute Toxicity) และชนิดออกฤทธิ์ช้า (Chronic Toxicity) โดยชนิดแรกจะทำให้จุลินทรีย์ตายหมดในระยะเวลาไม่กี่ชั่วโมง ส่วนชนิดหลังจะใช้เวลานานและค่อย ๆ ตาย

สารพิษชนิดเฉียบพลันสังเกตได้ง่าย เนื่องจากผลเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วสารพิษจำพวกนี้ได้แก่ ไซยาไนด์ อาร์เซนิก เป็นต้น สารพิษออกฤทธิ์ช้า เช่น ทองแดงและโลหะต่าง ๆ จุลินทรีย์จะสะสมเอาไว้ในเซลล์จนเกิดเป็นพิษและตายในที่สุด นอกจากนี้อาจเกิดจากสารอินทรีย์ก็ได้ เช่น แอมโมเนียซึ่งมีความเข้มข้นสูงเกิน 500 มก/ล หรือหากมีความเค็ม (Salt Concentration) มากกว่า 30,000 มก/ล จะเป็นตัวยับยั้งปฏิกิริยาการดูดซึมในระบบตะกอนเร่ง เป็นต้น

2.4.7 อายุตะกอน (Sludge age, θ)

อายุตะกอนเป็นระยะเวลาเฉลี่ย ที่ตะกอนจุลินทรีย์หมุนเวียนอยู่ในระบบ บางครั้งเรียกว่า Solids Retention Time (SRT.) หรือ Mean Cell Residence Time (MCRT.) เป็นค่าที่สำคัญในการออกแบบและควบคุมการทำงานของระบบและมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าอัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์ (F/M) การควบคุมค่าอายุตะกอนให้มีค่าที่จะทำให้อัตราส่วนของปริมาณอาหารต่อจุลินทรีย์หรือค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์มีค่าคงที่ตามไปด้วย ซึ่งค่าควบคุมเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดคุณภาพของน้ำทิ้ง ดังนั้น

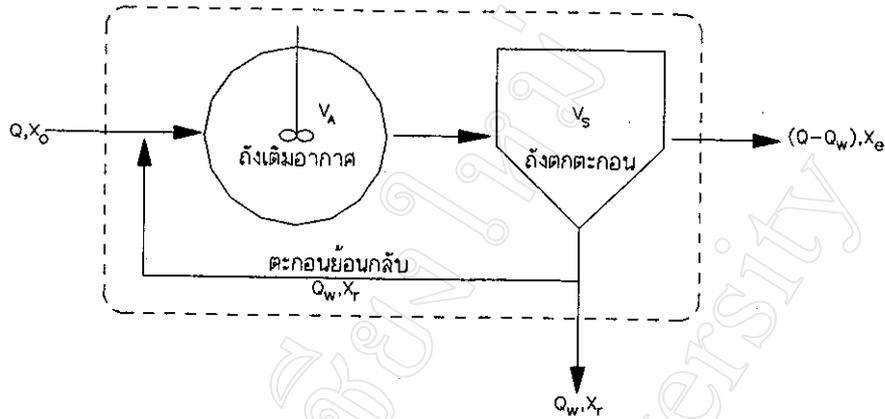
$$\text{อายุตะกอน} = \frac{\text{น้ำหนักของตะกอนจุลินทรีย์ในถังเติมอากาศ}}{\text{น้ำหนักของจุลินทรีย์ที่ออกจากระบบต่อวัน}} \quad (2.5)$$

การควบคุมค่าอายุตะกอนในระบบตะกอนเร่ง โดยการควบคุมอัตราการระบายตะกอน (Wasting rate) จาก Mass Balance ในรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่า

$$\theta_c = \frac{(V_A + V_S)\bar{X}}{Q_w X_r + (Q - Q_w) X_e} \quad (2.6)$$

โดยที่

θ_c	=	อายุตะกอน, วัน
V_A	=	ปริมาตรถังเติมอากาศ, ลบ.ม.
V_S	=	ปริมาตรถังตกตะกอน, ลบ.ม.
\bar{X}	=	ความเข้มข้นเฉลี่ยของตะกอนในถังเติมอากาศ, มก/ล
Q_w	=	อัตราการระบายตะกอน, ลบ.ม./วัน
X_r	=	ความเข้มข้นของตะกอนย้อนกลับ, มก/ล
Q	=	อัตราการไหลของน้ำเสีย, ลบ.ม./วัน
X_e	=	ความเข้มข้นของตะกอนในน้ำทิ้ง, มก/ล



รูปที่ 2.5 แสดงขอบเขตสำหรับหาค่าอายุตะกอนในระบบตะกอนเร่ง
ที่มา : Tchobanoglous G. and Schroeder E.D., 1987

2.4.8 อัตราการบรรทุกชลศาสตร์

อัตราการบรรทุกชลศาสตร์ สามารถแทนอยู่ในรูปของความเร็วของน้ำซึ่งจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการกำจัดมลสารในระบบโดยมลสารรวมทั้งออกซิเจนจะเคลื่อนที่เข้าไปในแผ่นชีวะ โดยการแพร่ซึ่งอัตราการแพร่ผ่านดังกล่าวจะเป็นตัวสำคัญในการที่กำหนดอัตราเร็วของปฏิกิริยาในการกำจัดมลสารดังกล่าวและขึ้นอยู่กับความเร็วของน้ำที่ไหลผ่าน

อัตราการบรรทุกทางชลศาสตร์ของระบบจะขึ้นกับลักษณะทางกายภาพของวัสดุตัวกลางและอัตราการสะสมของเมือกในแผ่นชีวะหากอัตราการบรรทุกทางชลศาสตร์มีมากเกินไปจะส่งผลให้ระดับน้ำในถังปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเนื่องจากอัตราการจ่ายน้ำเข้าถังปฏิกิริยามีมากกว่าความสามารถของน้ำในการผ่านถังปฏิกิริยาได้ ซึ่งจะมีผลกระทบต่อการทำงานของ Malina (1971) รายงานว่าอัตราการบรรทุกทางชลศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับระบบที่ใช้วัสดุตัวกลางเป็นหิน (ในเทอม $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$) ควรมีค่าไม่น้อยกว่า 1.33 เท่าของค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุตัวกลาง (ในเทอม m^2/m^3)

2.4.9 การกวน

ในถังเติมอากาศจำเป็นต้องมีการกวนอย่างทั่วถึง เพื่อให้ความเข้มข้นของออกซิเจน และอาหารผสมกันได้อย่างดี นอกจากนั้นเพื่อป้องกันมิให้ตะกอนจุลินทรีย์ตกตะกอนและจุลินทรีย์จะได้สัมผัสกับน้ำเสียที่ป้อนเข้ามา เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดมลสารตะกอนจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นจะ

สามารถจับตัวกันเป็นฟล็อกที่ดี การกวนที่ถูกต้องจะป้องกันมิให้น้ำเสียเกิดการไหลลัดวงจรซึ่งจะเป็นการเติมอากาศแบบกวนผสมธรรมดาทำให้ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์มีค่าสม่ำเสมอตลอดทั้งปฏิกิริยา

2.4.10 วัสดุตัวกลาง

วัสดุตัวกลางที่ดีควรมีคุณสมบัติกระทบต่อสภาพแวดล้อมและไม่ละลายน้ำ เช่น หิน ถ่านหิน อิฐ ไม้ หรือพลาสติก เป็นต้น นอกจากนี้ต้องมีขนาดสม่ำเสมอเพื่อให้มีช่องว่างเพียงพอสำหรับการถ่ายเทอากาศและไม่อุดตันได้ง่าย ในตารางที่ 2.2 ได้แสดงตัวอย่างวัสดุตัวกลางที่ใช้ในระบบโปรยกรอง

วัสดุตัวกลางธรรมชาติในระบบโปรยกรองในประเทศสหราชอาณาจักร ได้แสดงไว้ตามตารางที่ 2.3 สำหรับวัสดุตัวกลางที่เป็นหินควรมีขนาดระหว่าง 2-4 นิ้ว เนื่องจากมีขนาดที่เหมาะสมของพื้นที่ผิวจำเพาะและช่องว่างระหว่างตัวกลาง เช่น หินขนาด 2 นิ้ว จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 98 ตร.ม./ลบ.ม. และมีอัตราส่วนช่องว่างประมาณร้อยละ 50 ขณะที่หินขนาดเล็กกว่าจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าซึ่งจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดมลสารดีกว่า แต่จะพบปัญหาในเรื่องของการสะสมของฟิล์มชีวะมากเกินไป และเกิดสภาพการอุดตันในระบบ

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุตัวกลางที่ใช้ในระบบ Trickling Filter

วัสดุตัวกลาง	ขนาด (มม.)	น้ำหนัก (กก./ลบ.ม)	พื้นที่ผิว (ตร.ม./ลบ.ม)	ช่องว่าง (ร้อยละ)
Plastic Sheet	600x600x1200	32-96	82-115	94-97
Redwood	1200x1200x500	165	46	76
Granite	25-75	1440	62	46
Granite	100	1440	47	60
Slag	50-75	1090	67	49

ที่มา : McGhee (1991)

ตารางที่ 2.3 แสดงชนิดวัสดุที่สำรวจพบในประเทศสหราชอาณาจักร

ชนิดวัสดุที่สำรวจพบ	ร้อยละที่พบ
Granite	26
Clinker	24
Blast-Furnace Slag	23
Rounded Gravel	6
Limestone and Clinker	6
Limestone	4
Coke	4
Clinker and Gravel	3
Slag and Coke	1
Saggur Chippings	1

ที่มา : Learner(1975)

วัสดุที่สำรวจพบที่เป็นพลาสติกได้รับความนิยมอย่างมาก โดยเริ่มนำมาใช้ตั้งแต่ปลายปี ค.ศ. 1950 เนื่องจากให้อัตราส่วนช่องว่างสูง โดยเฉลี่ยมีค่ามากกว่าร้อยละ 90 และมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 83-330 ตร.ม./ลบ.ม. สามารถรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading) และอัตราบรรทุกชลศาสตร์ (Hydraulic Loading) ได้สูง

ปริมาณของจุลินทรีย์ไวงาน (Active Organisms) จะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้นลักษณะโครงสร้างเป็นแบบเปิดเพื่อลดปัญหาการอุดตันที่เกิดจากการสะสมฟิล์มชีวะที่มากเกินไปมีการระบายอากาศที่ดีเป็นวัสดุเนื้อหยาบปฏิกิริยา มีความคงทนมีรูปร่างลักษณะที่เอื้ออำนวยต่อการกระจายน้ำอย่างทั่วถึงและน้ำหนักเบาจึงสามารถลดค่าใช้จ่ายทางโครงสร้างของระบบ

2.5 จลนศาสตร์จุลินทรีย์ (Kinetic of Microorganisms)

ปัจจัยต่าง ๆ ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น ล้วนเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์รวมไปถึงชนิดของจุลินทรีย์กลุ่มต่าง ๆ และจุลินทรีย์จะเจริญเติบโตได้ก็ขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่อยู่ในระบบเพียงพอต่อการแพร่ขยายพันธุ์และย่อยสลายสารอาหารเช่นเดียวกัน

2.5.1 การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ แสดงได้ในรูปสมการ

$$\gamma_g = \mu X \quad (2.7)$$

โดยที่

γ_g = อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (น้ำหนักต่อปริมาตรต่อเวลา)

μ = อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (ต่อเวลา)

X = ความเข้มข้นของจุลินทรีย์ (น้ำหนักต่อปริมาตร)

2.5.2 การเจริญเติบโตที่สารอาหารจำกัด

Monod พบว่าอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์สารอาหารจำกัดบางชนิดหรือความเข้มข้นของสารอาหาร โดยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับความเข้มข้นของสารอาหารที่จำกัดเป็นดังนี้

$$\mu = \mu_m \cdot S / (K_s + S) \quad (2.8)$$

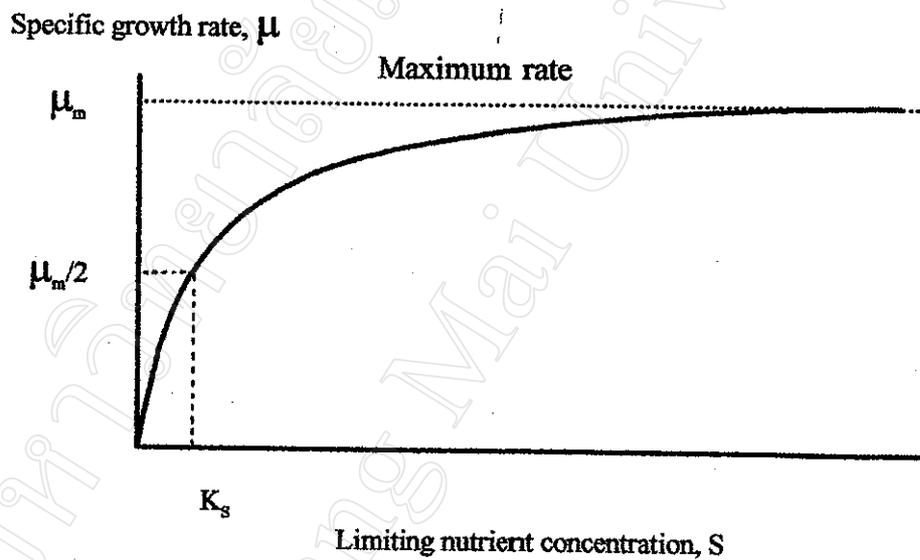
โดยที่

μ_m = อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด (ต่อเวลา)

S = ความเข้มข้นของสารอาหาร (น้ำหนักต่อปริมาตร)

K_s = ความเข้มข้นของสารอาหาร ณ จุดที่อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะเท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด (น้ำหนักต่อปริมาตร)

ผลกระทบของความเข้มข้นของสารอาหารต่ออัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของจุลินทรีย์ แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของจุลินทรีย์กับความเข้มข้นของสารอาหารที่จำกัด (Metcalf & Eddy, 1991)

แทนค่า จากสมการที่ (2.8) ลงในสมการที่ (2.7) จะได้

$$Y_g = \mu_m \cdot XS / (K_s + S) \quad (2.9)$$

2.5.3 การเจริญเติบโตของเซลล์และการใช้ประโยชน์จากสารอาหาร

ในระบบการเจริญเติบโตทั้งแบบ Batch และ Continuous พบว่าส่วนหนึ่งของสารอาหารจะถูกเปลี่ยนไปเป็นเซลล์ใหม่และอีกส่วนหนึ่งจะถูกย่อยสลายเป็นสารอินทรีย์และอนินทรีย์ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเจริญเติบโตกับอัตราการใช้ประโยชน์จากสารอาหารแสดงได้ดังสมการ

$$\gamma_g = -Y\gamma_{su} \quad (2.10)$$

โดยที่

Y = สัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตสูงสุดของจุลินทรีย์
(น้ำหนักต่อน้ำหนัก)

γ_{su} = อัตราการใช้ประโยชน์จากสารอาหาร
(น้ำหนักต่อปริมาตรต่อเวลา)

จากการศึกษาพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตสูงสุดของจุลินทรีย์ (Y) ขึ้นอยู่กับ

- ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ของสารคาร์บอนและแร่ธาตุต่าง ๆ
- ระดับการรวมตัวเป็นสารประกอบของสารอาหาร
- ขบวนการเมตาบอลิซึม
- อัตราการเจริญเติบโต
- ปัจจัยทางกายภาพอื่น ๆ

จากค่าของ γ_g ในสมการที่ (2.9) แทนลงในสมการที่ (2.10) จะได้

$$\gamma_{su} = \mu_m \cdot X_S / Y(K_S + S) \quad (2.11)$$

เมื่อ $k = \mu m/Y$ จะได้

$$\gamma_{su} = -k XS / (K_s + S) \quad (2.12)$$

2.5.4 อิทธิพลของ Endogenous Metabolism

ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยามีจุลินทรีย์ที่มีอายุต่าง ๆ กระจายอยู่ทุกช่วง การพิจารณาถึงอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จะต้องพิจารณาถึงการตายและถูกทำลายเป็นอาหารด้วยซึ่งจะมีผลทำให้ปริมาณจุลินทรีย์น้อยลง โดยเป็นสัดส่วนตามปริมาณจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในระบบ ปริมาณจุลินทรีย์ที่ลดลงนี้เรียกว่า Endogenous Decay โดยสามารถสร้างความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\gamma_d = -k_d X \quad (2.13)$$

โดยที่

γ_d = อัตราการสลายตัวของจุลินทรีย์ (น้ำหนักต่อปริมาตรต่อเวลา)

k_d = สัมประสิทธิ์การสลายตัวของจุลินทรีย์ (ต่อเวลา)

นำสมการที่ (2.9) รวมกับสมการที่ (2.13) จะได้ค่าอัตราการเจริญเติบโตสุทธิ (γ_g') ดังนี้

$$\gamma_g' = \gamma_g + \gamma_d \quad (2.14)$$

$$\gamma_g' = \mu m \cdot XS / (K_s + S) - k_d X \quad (2.15)$$

หรือนำสมการ (2.10) รวมกับสมการ (2.14) จะได้

$$\gamma_g' = -Y \gamma_{su} + k_d X \quad (2.16)$$

ดังนั้น ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสุทธิ (μ') คือ

$$\mu' = \mu_m \cdot XS / (K_s + S) - k_d X \quad (2.17)$$

อิทธิพลของ Endogenous Respiration กับ Net Bacteria Yield สามารถนิยามในรูปของ Observed Yield คือ

$$Y_{obs} = -\gamma g' / \gamma_{su} \quad (2.18)$$

จากอัตราการเจริญเติบโต อัตราการย่อยสลายและสมการของ Monod สามารถนำมาใช้อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง โดยใช้สมการสมดุลของมวลสาร (Mass Balance Equation) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ดังนี้

อัตราการสะสม ของจุลินทรีย์ ในระบบ	=	อัตราของมวล จุลินทรีย์ที่เข้า สู่ระบบ	-	อัตราของมวล จุลินทรีย์ที่ออก จากระบบ	+	อัตราการเกิดสุทธิ ของจุลินทรีย์ ในระบบ
---	---	---	---	--	---	--

หรือเขียนได้เป็น

$$\text{Accumulation} = \text{Inflow} - \text{Outflow} + \text{Net Growth}$$

$$\text{หรือ} \quad V(dx/dt) = QX_o - (Q_w X + Q_e X_e) + V\gamma g' \quad (2.19)$$

ภายใต้การควบคุมให้ระบบอยู่ใน Steady State ($dx/dt = 0$) และสมมติว่าไม่มีจุลินทรีย์ในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ ($X_o = 0$) และ $\gamma g' = -\gamma_{su} - k_d X$ สมการที่ (2.19) สามารถเขียนได้เป็น

$$QwX + QeXe / VX = -Y\gamma_{su} / X - k_d \quad (2.20)$$

$$1/\theta_c = -Y\gamma_{su} / X - k_d \quad (2.21)$$

จากสมการที่ (2.21) เทอม γ_{su} คืออัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (Specific Utilization Rate) แทนด้วย U ดังนั้น จะได้

$$U = -\gamma_{su}/X = S_0 - S / (X\theta) = Q(S_0 - S) / (VX) \quad (2.22)$$

จากสมการที่ (2.21) แทนค่า U ด้วยสมการที่ (2.22) จะได้

$$1/\theta_c = YU - k_d \quad (2.23)$$

และจากสมการที่ (2.22) จะได้

$$U = kS / (K_s + S) \quad (2.24)$$

2.5.5 การหาค่าสัมประสิทธิ์จลนศาสตร์ของจุลินทรีย์ (เกรียงศักดิ์, 2537 และ Metcalf & Eddy, 1991)

ค่าสัมประสิทธิ์จลนศาสตร์ของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียต่าง ๆ ทดลองหาจากการศึกษาถึงปฏิกิริยาแบบกวนผสมหรือไหลต่อเนื่อง เพื่อให้ใกล้เคียงกับสภาพจริงมากที่สุด แต่การควบคุมระบบถึงปฏิกิริยาแบบไหลต่อเนื่องจะมีขั้นตอนมากกว่าถึงปฏิกิริยาแบบเท สิ่งสำคัญในการทดลองคือ การควบคุมปริมาณความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ในถึงปฏิกิริยาให้คงที่สม่ำเสมอ โดยจะต้องถ่ายตะกอนส่วนเกินทิ้งออกจากระบบ เมื่อทำการเดินระบบและควบคุมการทำงานของระบบให้อยู่ในสถานะคงที่ แล้วจึงทำการเก็บข้อมูลจากค่าของ Q , S_0 , S , X แล้วนำมาวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์จลนศาสตร์ ดังนี้

จากสมการ (2.22) และ (2.23) จะได้

$$1/\theta_c = YU - k_d = Y(S_0 - S)/(X\theta) - k_d \quad (2.25)$$

เมื่อนำค่า $1/\theta_c$ และ U มาเขียนกราฟ จะได้กราฟเส้นตรง โดยที่ความลาดชันของเส้นตรงที่ผ่านจุดที่เกิดจากการทดลอง คือค่า Y และระยะตัดแกนตั้งคือค่า k_d ดังที่แสดงในรูปที่ 2.6

จากสมการ (2.24) สามารถจัดให้อยู่ในรูป

$$X\theta / (S_0 - S) = K_s / KS + 1/k \quad (2.26)$$

ค่าของ K_s และ k สามารถหาได้จากการเขียนกราฟระหว่าง $X\theta / (S_0 - S)$ กับค่า $1/S$ โดยที่ความลาดชันของเส้นตรงที่ผ่านจุดที่เกิดจากการทดลอง คือค่า K_s / k และระยะตัดแกนตั้งคือค่า $1/k$ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.7

ค่าสัมประสิทธิ์จลนศาสตร์ของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนร่อนของนักวิจัยหลายท่านได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 2.4

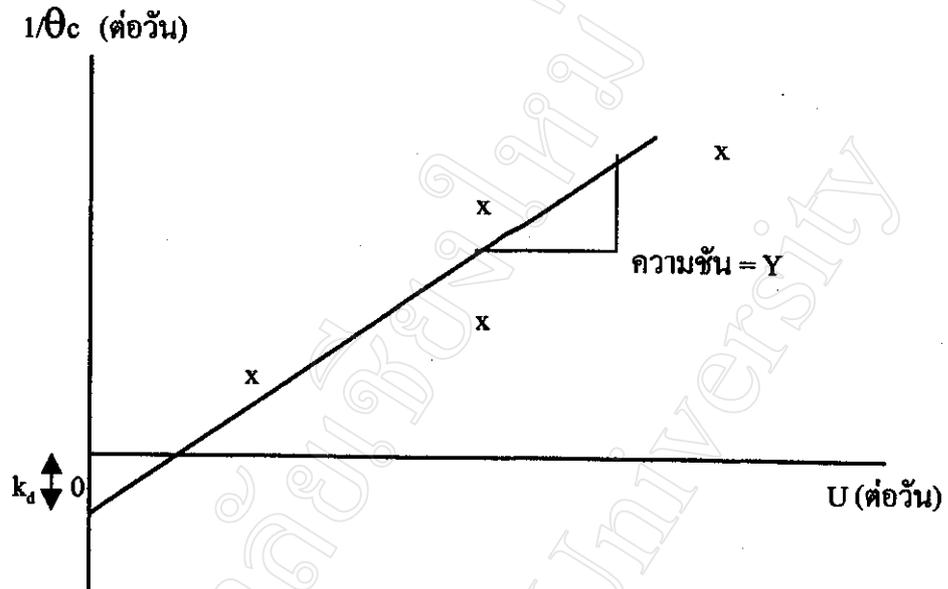
ตารางที่ 2.4 ค่าสัมประสิทธิ์จลนศาสตร์ของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนร่อน

ค่าสัมประสิทธิ์จลนศาสตร์	หน่วย	Metcalf & Eddy (1991)	Qasim (1985)	Gray (1989)	WPCF. & ASCE. (1977)
Y	mg/mg	0.4-0.8 ⁽¹⁾	0.2-0.5	0.35-0.45 ⁽²⁾	0.5-0.7
K_d	d ⁻¹	0.025-0.075	0.03-0.07	0.05-0.10	0.04-0.1
K_s	mg/l	15-70 ⁽³⁾	20-80	25-100	
k	d ⁻¹	2-10	2-8		

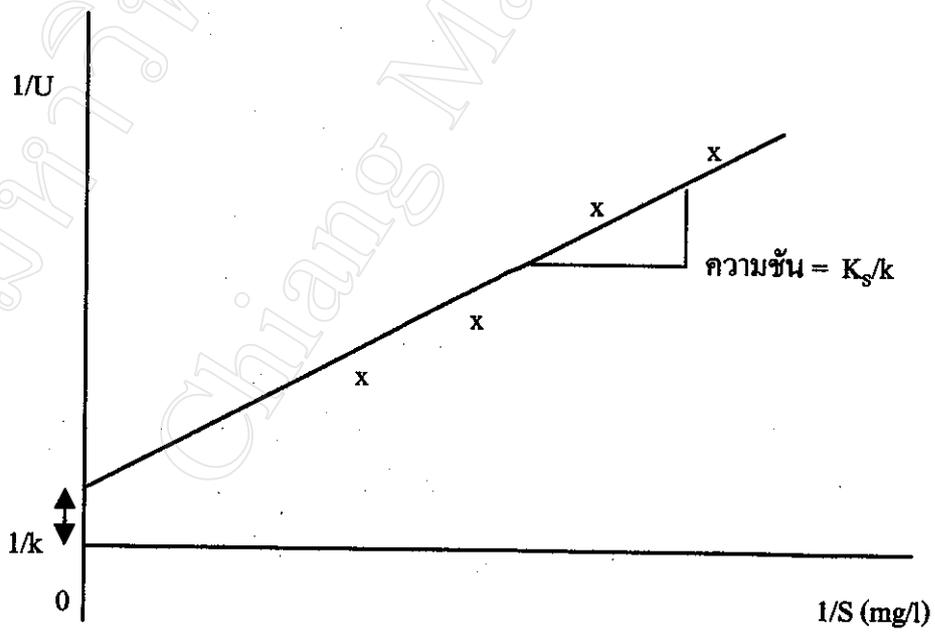
(1) หน่วยเป็น mg VSS/mg BOD

(2) หน่วยเป็น mg VSS/mg COD

(3) หน่วยเป็น mg/l COD



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/\theta_c$ กับค่า U เพื่อหาค่า Y และ k_d



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/U$ กับค่า $1/S$ เพื่อหาค่า K_s และ k

2.6 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 ผลวิจัยการใช้ไบโอรีแอกเตอร์แบบปริมาตรแปรเปลี่ยน

Aya et al. (1988) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ของสารละลาย Skim Milk โดยการ
ใช้ไบโอรีแอกเตอร์แบบปริมาตรแปรเปลี่ยนโดยใช้ถังปฏิกริยาเป็นท่อพลาสติกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง
0.13 เมตร สูง 2.00 เมตร บรรจุวัสดุตัวกลางเป็นตาข่ายพลาสติกร้อยละ 40 ของปริมาตรถังปฏิกริยา
อัตราการไหลเข้าของน้ำเสียควบคุมโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัด
BOD โดยเฉลี่ยร้อยละ 89.9 ที่ภาวะการทำงานของระบบมีค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 1.7
กก.BOD/ม³วัน ขณะที่ประสิทธิภาพในการกำจัด COD เฉลี่ยมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย

2.6.2 ผลวิจัยระบบบำบัดน้ำเสีย Aerated Submerged Filter

Seo (1968) ได้ทำการวิจัยระบบตะกอนเร่งบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยการเติมวัสดุตัวกลาง
ในระบบซึ่งเรียกว่า Attached Growth Activated Sludge Process (AGASP) โดยที่วัสดุตัวกลางดังกล่าว
ทำด้วย Polyvinyl Chloride ที่ค่าอายุของตะกอนเท่ากับ 10 วัน และมีการเปลี่ยนปริมาณวัสดุตัวกลาง
เป็นร้อยละ 5, 10 และ 20 ของปริมาตรถังปฏิกริยาและเปรียบเทียบผลของการใช้ค่าภาระบรรทุกสาร
อินทรีย์ต่าง ๆ กันคือ 0.81, 1.44 และ 3.18 กก.COD/ม³.วัน พบว่า

- AGASP มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียมากกว่าที่ไม่ใช้วัสดุ
ตัวกลาง โดยระบบมีคุณสมบัติของถังปฏิกริยาสามารถรับภาระ-บรรทุกสาร
อินทรีย์ที่สูงขึ้นได้ดี
- AGASP สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอนได้ดี
- ปริมาณของวัสดุตัวกลางที่เหมาะสมที่ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบ
AGASP ได้ดีที่สุดคือร้อยละ 10 ของปริมาตรถังปฏิกริยา

Rusten (1984) ศึกษาผลการบำบัดน้ำทิ้งชุมชน โดยระบบ Aerated Submerged Filter ถึงปฏิ
กริยากว้าง 0.2 เมตร ยาว 0.2 เมตร สูง 1.2 เมตร จำนวน 2 ชุด แต่ละถังบรรจุวัสดุตัวกลางพลาสติกที่มี
พื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 140 และ 250 ม²/ม³ ตามลำดับ พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยทั้ง
สองถังปฏิกริยา อยู่ในช่วงร้อยละ 57-75 ขณะที่ระดับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ เพิ่มขึ้นจาก 5-120

กก.COD/ม³.วัน โดยพบว่าระบบมีค่าอัตราการกำจัดซีโอซีต่อหน่วยปริมาตรมากกว่า 10 กก.COD/ม³.วัน ทั้งสองดังปฏิกิริยา นอกจากนี้วัสดุตัวกลางที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าสามารถรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์และให้อัตราการกำจัดสารอินทรีย์โดยปริมาตรที่สูงขึ้น สำหรับการถ่ายเทออกซิเจนเกิดขึ้นได้ดีในทั้งสองดัง โดยมีปริมาณอากาศที่ระบบต้องการอย่างเพียงพอประมาณ 10-15 ม³/กก.COD เข้าระบบ

Kim and Choi (1986) ทดลองศึกษาระบบบำบัดน้ำเสีย โดยใช้เชื้อเพลิงอัดแท่งของถ่านแอนทราไซต์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.147 เมตร สูง 0.143 เมตร ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 73 ม²/ม³ เป็นวัสดุตัวกลางบรรจุในถังปฏิกิริยา ดำเนินระบบเป็น Submerged Biofilter และหาประสิทธิภาพของระบบในการบำบัดน้ำเสียจากแหล่งต่าง ๆ โดยในการศึกษาน้ำออกจากถังย่อยสลายแบบไร้อากาศที่เวลาเก็บกัก 124.6 ชั่วโมง ปริมาตรตัวกลาง 5,200 ลบ.ม. ค่า BOD น้ำเสียเฉลี่ย 1,700 มก./ล. ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับร้อยละ 94.5 น้ำเสียจากแหล่งชุมชนที่เวลาเก็บกัก 10.6 ชั่วโมง ปริมาตรตัวกลาง 25 ลบ.ม. ค่า BOD น้ำเสียเฉลี่ย 136 มก./ล. ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับร้อยละ 90.4 น้ำเสียจากโรงงานผลิตเครื่องดื่มที่เวลาเก็บกัก 56.0 ชั่วโมง ปริมาตรตัวกลาง 1,400 ลบ.ม. มีค่า BOD น้ำเสียเฉลี่ย 900 มก./ล. ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับร้อยละ 86.7

Mesdaghinia (1986) ทำการศึกษาระบบ Fixed Activated Sludge สำหรับบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยใช้ถังปฏิกิริยาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร สูง 38 เซนติเมตร ภายในถังบรรจุวัสดุตัวกลางที่แตกต่างกันคือพลาสติกและอะลูมิเนียม ที่มีปริมาตรเท่ากับ 135 และ 144 ลบ.ซม. ตามลำดับ ส่วนถังตกตะกอนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร สูง 24 เซนติเมตร พบว่าน้ำที่ผ่านระบบดังกล่าวมีคุณภาพสูง โดยมีค่าความเข้มข้นของ SS, BOD และ COD อยู่ในช่วงประมาณ 3-6, 4-12 และ 35-45 มก./ล ตามลำดับ นอกจากนี้ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญสำหรับการใช้วัสดุตัวกลางที่เป็นพลาสติกหรืออะลูมิเนียมและไม่จำเป็นต้องมีการหมุนเวียนตะกอนในระบบ

Somiya et al. (1986) รายงานผลการศึกษาระบบ Contact Biofilter เพื่อบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยใช้แบบจำลองที่มีความกว้าง 1.0 เมตร ยาว 1.0 เมตร และสูง 5.5 เมตร ประกอบด้วยวัสดุตัวกลาง 2 ชนิด ชนิดแรกเป็น Lionite ที่มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.4 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4-8.5 มม. และค่าความพรุนเท่ากับ 0.366 และชนิดที่สองเป็น Trical Net (PE) ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 42 ม²/ม³ พบว่า

สามารถบำบัดน้ำเสียให้มีค่า BOD และ SS ในน้ำทิ้งได้ต่ำกว่า 20 และ 10 มก/ล ตามลำดับ โดยใช้เวลาเก็บกักในช่วง 1.1-2.1 ชั่วโมง

Hamoda and Abd-El-Bary (1987) ศึกษา ระบบ Multi-Stage Fixed-Film โดยเลือกใช้เซรามิกเป็นวัสดุตัวกลาง แบ่งการทำงานออกเป็น 4 ส่วน แต่ละส่วนมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 0.9 m^2 อุณหภูมิที่ทำการทดลองเท่ากับ $18-22 \text{ }^{\circ}\text{C}$ น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่า COD เท่ากับ 225, 450 และ 900 มก/ล ที่ค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 12.6, 25.2 และ 50.4 $\text{g COD/m}^2\text{-วัน}$ พบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัด COD ในช่วงร้อยละ 88.9-97.0 และการลดค่า COD ส่วนใหญ่เกิดในถังปฏิกริยาส่วนแรก คุณภาพของน้ำทิ้งที่ได้มีค่า COD และ SS น้อยกว่า 30 มก/ล

Gonzalez-Martinez and Duque-Luciano (1992) ศึกษา ระบบ Four-Stage Aerobic Submerged Biofilm Reactor โดยใช้วัสดุตัวกลางชนิด Pall Rings ขนาด 90 มิลลิเมตร ที่มี Surface Area Density เท่ากับ $60 \text{ m}^2/\text{m}^3$ สำหรับบำบัดน้ำเสียชุมชนที่มีความเข้มข้นของ BOD, COD และ $\text{NH}_4\text{-N}$ ที่น้ำเข้าระบบเฉลี่ยในช่วง 73-178, 236-270 และ 4.0-7.3 มก/ล โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ $18-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่ค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ในช่วง 20-75 $\text{g COD/m}^2\text{-วัน}$ พบว่าระบบดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการบำบัด BOD, COD และ $\text{NH}_4\text{-N}$ เท่ากับร้อยละ 94-87, 84-79 และ 85-38 ตามลำดับ โดยที่ขบวนการ Nitrification เกิดขึ้นเกือบสมบูรณ์ตั้งแต่ส่วนแรกของถังปฏิกริยา นอกจากนั้นยังพบว่ากลุ่มตะกอนแม้จะมีจุลินทรีย์พวกเส้นใยแต่ยังสามารถเกาะติดกันได้ดีและตกตะกอนได้ง่าย

Lessel (1994) ทำการวิจัยโดยใช้วัสดุตัวกลางที่เรียกว่า Ring-Race เต็มลงในระบบตะกอนเร่ง ซึ่งพบว่า ปริมาณของวัสดุตัวกลางที่เหมาะสม อยู่ระหว่างร้อยละ 18-28 ของปริมาตรถัง หากใช้ปริมาณวัสดุตัวกลางร้อยละ 26 ของปริมาตรถัง สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนขนาด 250,000 คน พบว่าสามารถลดค่า BOD ได้ต่ำกว่าระบบที่ไม่ใช้วัสดุตัวกลาง โดยระบบมีประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นสำหรับน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วในรูป BOD และ COD เป็นร้อยละ 40 และ 60 ตามลำดับ

ศิราภรณ์ โดเต็ม (2536) ทำการศึกษาการใช้พลาสติกที่ดัดแปลงมาจากจุกขวดน้ำปลาใช้เป็นวัสดุตัวกลางยึดเกาะในระบบตะกอนเร่ง โดยมีปริมาตรร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยใช้น้ำบำบัดน้ำเสีย

ถังเคราะห์ที่มีค่า COD ประมาณ 500 มก/ล ที่ Volumetric Loading เท่ากับ 29.2, 43.8 และ 58.4 lb BOD₅/day/1000 ft³ พบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการลดค่า COD และ SS ได้ร้อยละ 94-85 และ 91-97 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบเลี้ยงตะกอนที่ไม่ใช้วัสดุตัวกลางที่ทำการทดลองควบคู่ไปด้วย และพบว่าปริมาณวัสดุตัวกลางที่เหมาะสมเป็นร้อยละ 5 เมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุตัวกลางมากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพลดลง