บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แหล่งที่มาของน้ำเสีย

เนื่องจากน้ำเสียมีคุณสมบัติแตกต่างกันไปตามแหล่งกำเนิดทำให้สามารถแยกออกได้ 3 ประเภทใหญ่ ๆ ดังต่อไปนี้ (ศูนย์การศึกษาและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อมสถาบันสิ่งแวดล้อมไทย, 2547)

น้ำเสียชุมชน หมายถึง น้ำเสียต่าง ๆ ที่เกิดจากกิจกรรมประจำวันของประชาชนที่อาศัยอยู่ในชุมชน รวมทั้งร้านค้า ตลาด โรงแรม อาคารชุด ตลอดจนที่ทำการต่าง ๆ น้ำเสียที่ระบายออกมาจะมีเศษอาหาร สบู่ สารซักฟอกและอุจจาระและปัสสาวะปนอยู่ เนื่องจากชุมชนส่วนใหญ่ยังไม่มีระบบบำบัดน้ำเสีย หรือที่มีอยู่ก็ยังไม่ได้มาตรฐาน น้ำเสียส่วนนี้มักถูกปล่อยลงสู่แม่น้ำ ลำคลอง แล้วเกิดการเน่าเสียส่งกลิ่นเหม็น ทำให้ออกซิเจนในน้ำมีปริมาณลดน้อยลง เกิดผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของพืชและสัตว์น้ำ อีกทั้งยังทำให้เชื้อโรคที่อาจปนมาแพร่กระจายเป็นอันตรายต่อผู้ใช้อีกด้วย

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม หมายถึง น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเกิดขึ้นได้หลายจุดในกระบวนการผลิต เริ่มต้นจากน้ำที่นำมาใช้ล้างวัตถุดิบ น้ำที่ผ่านเข้ามาในกระบวนการผลิต น้ำที่นำมาล้างเครื่องใช้ไม้สอยเมื่อการผลิตสิ้นสุดลง ตลอดจนน้ำที่ใช้ล้างพื้น นอกจากนี้ยังมีน้ำหล่อเย็นที่มีการปนเปื้อนน้อย น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไปตามประเภทของโรงงาน บางประเภทให้น้ำเสียเป็นกรด บางประเภทก็เป็นด่าง บ้างก็มีสารอินทรีย์ บ้างก็มีสารอนินทรีย์ บ้างก็มีสารพิษ บ้างก็มีสี บ้างก็มีความขุ่น บ้างก็มีของเสียหลายชนิดปะปนกันเป็นต้น

น้ำเสียจากการเกษตรกรรม หมายถึง น้ำเสียที่เกิดจากการเพาะปลูกพืชและการเลี้ยงสัตว์ น้ำเสียจากการปลูกพืชจะมียาฆ่าแมลง ยาฆ่าวัชพืชและปุ๋ยปนมาเป็นส่วนใหญ่ ส่วนน้ำเสียจากการเลี้ยงสัตว์จะประกอบด้วยสารอินทรีย์เป็นหลักเพราะมีเศษอาหารตกค้างและมูลสัตว์ซึ่งล้วนเป็นสารอินทรีย์ทั้งสิ้น

จากการสำรวจของสำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติเกี่ยวกับน้ำเสียชุมชนและปัญหามลพิษทางน้ำในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ในปี พ.ศ. 2530 สรุปค่าปริมาณความสกปรกที่เกิดจากการดำเนินชีวิตของคนในอาคารประเภทต่าง ๆ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมมูลประชากรและลักษณะน้ำเสียชุมชน

กิจกรรม	ปริมาณ น้ำเสีย	ปริมาณบีโอดี	บีโอดี	ลักษณะน้ำเสีย (มก./ล.)		
				ของแข็งแขวนลอย	น้ำมันและไขมัน	ทีเคเอ็น(ไนโตรเจน)
อาคารชุดและบ้านพัก	520 ลิตร/วัน-ห้อง,หลัง	48 ลิตร/วัน-ห้อง,หลัง	151*	63*	473*	33*
โรงแรม	1061 ลิตร/วัน-ห้อง	123 กรัม/วัน-ห้อง	190	84	563	23
หอพัก	78 ลิตร/วัน-ห้อง	76 กรัม/วัน-ห้อง	723**	660**	377**	329**
โรงพยาบาล	800 ลิตร/วัน-เตียง	94 กรัม/วัน-เตียง	238	87	631	15
ภัตตาคาร	25 ลิตร/วัน-ตร.ม.	53 กรัม/วัน-ตร.ม.	1759	913	1570	63
ตลาด	69 ลิตร/วัน-ตร.ม.	21 กรัม/วัน-ตร.ม.	1172	660	897	76
ห้างสรรพสินค้า	4.6 ลิตร/วัน-ตร.ม.	0.27 กรัม/วัน-ตร.ม.	81	61	577	66
สำนักงาน	2.54 ลิตร/วัน-ตร.ม.	0.09 กรัม/วัน-ตร.ม.	180	158	450	44

ที่มา : ธงชัย พรรณสวัสดิ์ (2530)

หมายเหตุ * หมายถึง บำบัดแล้วบางส่วน

** หมายถึง น้ำเสียจากส้วม

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ลักษณะของน้ำเสีย

น้ำเสีย (Wastewater) คือ น้ำที่ผ่านการใช้งานในกิจกรรมต่าง ๆ และได้รับการปนเปื้อนจากสารปนเปื้อน หรือสารมลพิษไม่ว่าจะเป็นสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ โลหะหนัก เชื้อโรค ไขมัน น้ำมัน ความร้อน สารอาหารของพืช สี และความขุ่น เป็นต้น ทั้งที่อยู่ในรูปสารละลายและสารแขวนลอย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม,2545) เมื่อน้ำเสียเหล่านี้ถูกปล่อยออกมาปนเปื้อนกับแหล่งน้ำตามธรรมชาติไม่ว่าจะเป็นแหล่งน้ำใต้ดิน แหล่งน้ำผิวดิน หรือทะเลและชายฝั่ง จะก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำและปัญหาต่อสุขภาพอนามัยขึ้น ซึ่งผลกระทบที่เกิดขึ้นจะเกิดตามสารที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย กรมควบคุมมลพิษ (2537) ได้แบ่งลักษณะของน้ำเสียซึ่งได้รับการปนเปื้อนจากมลสารต่าง ๆไว้ดังนี้

1. ลักษณะน้ำเสียทางกายภาพ (Physical characteristic of wastewater)

ลักษณะน้ำเสียทางกายภาพ ประกอบด้วย ปริมาณของแข็งในน้ำ กลิ่น อุณหภูมิ สี ความขุ่น ซึ่งแต่ละลักษณะจะมีความสัมพันธ์กันมากน้อยไม่เท่ากัน ข้อมูลแต่ละลักษณะเหล่านี้สามารถนำมาใช้ในกระบวนการออกแบบ ตรวจสอบ และประเมินความผิดปกติของระบบบำบัดน้ำเสีย นอกจากนี้ยังมีผลต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำอีกด้วย

ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solids) แบ่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่

ก. สารแขวนลอย (Suspended solid) หมายถึง ของแข็งที่ไม่ละลายน้ำและสามารถแขวนลอยในน้ำได้

ข. ตะกอนหนัก (Settleable solids) หมายถึง ของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ ตะกอนมีขนาดใหญ่มีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าน้ำสามารถตกตะกอนในน้ำได้

ค. ของแข็งละลายน้ำ (Dissolved solids) หมายถึง ของแข็งที่ละลายน้ำได้ เมื่ออยู่ในน้ำทำให้เกิดสภาพน้ำหนักซึ่งส่งผลกระทบต่อการดำเนินชีวิตของสัตว์น้ำ และการนำไปใช้ประโยชน์

กลิ่น (Oder) กลิ่นของน้ำเสียเป็นก๊าซที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย โดยก๊าซส่วนใหญ่เป็นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ก๊าซไข่เน่า) ซึ่งเกิดจากแบคทีเรียชนิดที่ไม่ใช้ออกซิเจนทำการเปลี่ยนสภาพซัลเฟตเป็นซัลไฟด์ ส่วนสารอื่นๆ ที่ทำให้เกิดกลิ่นในสภาพที่ไร้ออกซิเจนของน้ำเสีย ได้แก่ Organic sulfides, Organic amines phosphorous และ Organic acids เป็นต้น

อุณหภูมิ (Temperature) น้ำเสียที่ถูกปล่อยออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยส่วนใหญ่จะมีอุณหภูมิสูงกว่าปกติ เนื่องมาจากกระบวนการหล่อเย็นระบบหม้อไอน้ำ หรือกระบวนการผลิต เมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะทำให้สภาพแวดล้อมนั้น ๆ เปลี่ยนแปลงไปดังนี้

ก. ปริมาณออกซิเจนละลายในแหล่งน้ำลดลงกว่าปกติ เนื่องจากค่าอิ่มตัวของออกซิเจนละลายในน้ำลดลงเมื่อน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น

ข. ปฏิกิริยาชีวเคมีของจุลินทรีย์ในแหล่งน้ำจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งจะทำให้เกิดการใช้ออกซิเจนในแหล่งน้ำสูงขึ้นด้วย

ค. การเจริญเติบโตของพืชที่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำสูงขึ้นกว่าปกติ

สี (Color) โรงงานหลายประเภท เช่น โรงงานกระดาษ โรงงานฟอกย้อม มักจะมีปัญหาเรื่องของสีในน้ำเสีย นอกจากนี้การเกิดสาหร่ายปริมาณมาก ๆ ในแหล่งน้ำจะทำให้เกิดปัญหาเรื่องสีในน้ำ สีของน้ำในแหล่งน้ำมีผลเสียทำให้แหล่งน้ำนั้นไม่น่าดู และยังกั้นขวางแสงแดดไม่ให้ส่องลงมาใต้ผิวน้ำ ทำให้การสังเคราะห์ของสาหร่ายสีเขียวลดลง

ความขุ่น (Turbidity) คือสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำที่กั้นหรือขวางแสงแดดไม่ให้ส่องทะลุลงใต้ผิวน้ำได้ ทำให้การสังเคราะห์แสงของสาหร่ายสีเขียวลดลง น้ำที่มีความขุ่นสูงจะทำให้ยากต่อการกรองน้ำในโรงงานผลิตน้ำประปา และต้องใช้ปริมาณคลอรีนมากกว่าปกติในการฆ่าเชื้อโรค เนื่องจากคลอรีนบางส่วนจะทำปฏิกิริยากับสารแขวนลอยในน้ำ

2. ลักษณะน้ำเสียทางเคมี (Chemical characteristic of wastewater)

ลักษณะน้ำเสียทางเคมีจะประกอบด้วยเชิงทางอินทรียสารและเชิงทางอนินทรียสาร ดังต่อไปนี้

สารอินทรีย์ (Organic matters) หมายถึงสารประกอบที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักทั้งที่ได้มาจากธรรมชาติและสังเคราะห์ขึ้น เช่น ไขมัน คาร์โบไฮเดรต โปรตีน เป็นต้น แต่สารประกอบบางชนิดที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบแต่ ไม่จัดเป็นสารอินทรีย์ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ เกลือคาร์บอเนต และเกลือ ไบคาร์บอเนต เป็นต้น สารอินทรีย์สามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ สารอินทรีย์ ที่จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ (Biodegradable organics) สารอินทรีย์ที่จุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายได้ (Non-biodegradable organics) เช่น กรดแทนนิค กรดลิกนิน เซลลูโลส เป็นต้น และประเภทสุดท้ายได้แก่ Trace organics ที่เป็นสารอินทรีย์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ขึ้นเพื่อใช้ในจุดประสงค์ต่าง ๆ และมักชะล้างลงสู่แหล่งน้ำ สารอินทรีย์เหล่านี้ มักจะเจือปนปริมาณน้อยแต่มีอันตรายต่อผู้ได้รับ ตัวอย่างของสาร Trace organics ที่สำคัญได้แก่ สารซักล้าง (Detergents) สารปราบศัตรูพืช (Pesticides) สารประกอบไฮโดรคาร์บอนจากการฆ่าเชื้อด้วยคลอรีน (Chlorination hydrocarbon) ฟีนอล (Phenol) สารอินทรีย์เป็นปัญหาหลักของมลพิษทางน้ำ เนื่องจากเป็นสารที่ส่วนใหญ่สามารถถูกย่อยสลายได้ทางชีววิทยา ทำให้มีความต้องการใช้ออกซิเจน ถ้าในแหล่งน้ำมีปริมาณสารอินทรีย์มากเกินไป ก็จะทำให้จุลินทรีย์นำออกซิเจนที่ละลาย

อยู่ในน้ำมาใช้จนทำให้ปริมาณออกซิเจนขาดแคลน ส่งผลให้แหล่งน้ำอยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจนและเน่าเหม็น

ก. บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand, BOD) หมายถึง ปริมาณออกซิเจนที่แบคทีเรียใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในเวลา 5 วัน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร ค่าบีโอดีเป็นค่าที่ใช้บอกถึงผลกระทบของน้ำเสียที่มีผลต่อปริมาณออกซิเจนละลายโดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และเป็นค่าที่มีความสำคัญอย่างมากในการออกแบบและควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ โดยใช้บ่งบอกถึงค่าภาระอินทรีย์ (Organic loading) ใช้ในการหาประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสีย และใช้ในการตรวจสอบคุณภาพน้ำตามแหล่งน้ำต่าง ๆ

ข. ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD) หมายถึง ปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการใช้เพื่อออกซิเดชั่นสารอินทรีย์ในน้ำให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ค่าซีโอดีมักมีค่าสูงกว่าบีโอดี เนื่องจากซีโอดีไม่สามารถแยกความแตกต่างระหว่างสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายทางชีวภาพและสารที่ยากต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ ค่าซีโอดีมีความสำคัญในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้ง การควบคุมระบบบำบัดน้ำเสีย การตรวจสอบคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำเช่นเดียวกับค่าบีโอดี และยังใช้ในการประเมินค่าบีโอดีคร่าว ๆ ได้ด้วย

ค. ทีโอซี (Total Organic Carbon, TOC) หมายถึง ปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในน้ำประกอบด้วยอนินทรีย์คาร์บอน (Inorganic carbon) ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ ไบคาร์บอเนต และคาร์บอเนตในน้ำ และอินทรีย์คาร์บอน (Organic carbon)

สารอนินทรีย์ (Inorganic matters) สารอนินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียทั่ว ๆไปได้แก่ พีเอช คลอไรด์ ความเป็นด่าง ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ โลหะหนัก และก๊าซละลายน้ำ สารอินทรีย์บางชนิดมีส่วนช่วยกระบวนการบำบัดน้ำเสียเป็นไปได้ด้วยดี ในขณะที่สารอินทรีย์บางชนิดอาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้

พีเอช (pH) หมายถึงค่าความเข้มข้นของอนุภาคไฮโดรเจนไอออน (H^+) โดยเป็นค่าแสดงถึงความเป็นกรด-เบส ของน้ำเสียนั้น ๆ เป็นค่าที่มีประโยชน์มากต่อการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการทางชีวภาพ และวิธีการทางเคมี เช่น น้ำเสียที่มีค่าเป็นกลางจะมีความเหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการทางชีวภาพเพราะจุลินทรีย์จะทำงานได้ดีในช่วง pH 6-8 เท่านั้น

ความเป็นด่าง (Alkalinity) หมายถึง ปริมาณด่างที่มีอยู่ในน้ำ โดยทั่วไปเป็นผลมากจากไฮดรอกไซด์ ไบคาร์บอเนต และคาร์บอเนต ค่าความเป็นด่างจะมีความสัมพันธ์กับค่าพีเอช และมีประโยชน์ต่อการบำบัดน้ำเสีย เช่น การเลือกตำแหน่งสำหรับการเติมสารเคมีไปในระบบบำบัดน้ำ

เสียให้มีประสิทธิภาพสูงสุดเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน

ไนโตรเจน (Nitrogen) สารประกอบไนโตรเจนที่เกี่ยวข้องกับน้ำเสียแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน เช่น โปรตีน กรดอะมิโน และสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน เช่น แอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท สารประกอบไนโตรเจนรูปต่าง ๆ มีความสัมพันธ์กัน โดยสามารถเปลี่ยนรูปกลับไปมาได้โดยปฏิกิริยาชีวเคมีของแบคทีเรีย ไนโตรเจนเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสะอาดของน้ำ โดยการตรวจสอบคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำธรรมชาติ ถ้าพบสารประกอบไนโตรเจนในรูปอินทรีย์ไนโตรเจน และแอมโมเนียไนโตรเจนในปริมาณมาก อาจแสดงว่าในแหล่งน้ำนั้นมีความสกปรกและมีการปนเปื้อน นอกจากนี้ในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ ปริมาณของไนโตรเจนทั้งหมดจะต้องมีเพียงพอสำหรับการเจริญของแบคทีเรีย ซึ่งอัตราส่วนที่เหมาะสมของ BOD: N คือ 100: 5

ฟอสฟอรัส (Phosphorous) ฟอสฟอรัสเป็นสารอาหารที่สำคัญสำหรับสิ่งมีชีวิตในการสร้างเซลล์ใหม่ อยู่ในรูปของสารประกอบ 3 ชนิด คือ ออโธฟอสเฟต อินทรีย์ฟอสเฟต และคอนเดนส์ฟอสเฟตหรือโพลีฟอสเฟตประเภทต่าง ๆ การมีฟอสฟอรัสในน้ำเสียที่เหมาะสมจะทำให้ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ การปล่อยน้ำทิ้งที่มีฟอสฟอรัสลงในแหล่งน้ำอาจกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืชน้ำอย่างรวดเร็วเกิดเป็นปรากฏการณ์ยูโทฟิคเคชัน (Eutrophication) ทำให้เกิดปัญหาในแหล่งน้ำนั้นได้ โดยปริมาณฟอสฟอรัสที่จำเป็นต่อการเจริญของสาหร่ายในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพมีอัตราส่วนที่เหมาะสมของ BOD:P เท่ากับ 100:1 ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจน และอัตราส่วนที่เหมาะสมของ BOD:P เท่ากับ 100:0.2 ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน

โลหะหนัก (Heavy metals) โลหะหนักที่มีอยู่ในน้ำเสียมีอยู่หลายชนิด เช่น แคดเมียม โครเมียม ทองแดง เหล็ก ตะกั่ว แมงกานีส ปรอท นิกเกิล สังกะสี เป็นต้น โลหะหนักบางชนิดจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตหากมีอยู่ในปริมาณที่พอเหมาะ เช่น โครเมียม ทองแดง เหล็ก แต่โลหะบางชนิดก็เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต เช่น แคดเมียม ปรอท นิกเกิล เป็นต้น

3. ลักษณะน้ำเสียทางชีวภาพ

แบคทีเรีย (Bacteria) คือจุลินทรีย์ที่เป็นเซลล์เดียวมีขนาดเล็กที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่ามีผนังหุ้มเซลล์ 2 ชั้น ไม่มีเยื่อหุ้มนิวเคลียส ส่วนใหญ่ไม่มีคลอโรฟิลล์ พบอยู่ทั่วไปในสิ่งแวดล้อม ร่างกายของคนและสัตว์ มีรูปร่างหลายแบบ เช่น รูปแท่ง รูปกลม รูปขดเป็นวง การดำรงชีพของแบคทีเรียต้องใช้พลังงานและสารประกอบต่าง ๆ ทั้งในรูปของสารอินทรีย์และ

สารอนินทรีย์ ธาตุที่สำคัญในสารประกอบคือ คาร์บอน โดยแบคทีเรียสามารถแบ่งตามแหล่งคาร์บอนที่ได้มาเป็น 2 ประเภท คือ

ก. ออโทโทรฟิกแบคทีเรีย (Autotrophic bacteria หรือ Autotroph) เป็นแบคทีเรียที่สร้างอาหารเองได้ โดยได้แหล่งคาร์บอนจากคาร์บอนไดออกไซด์และได้พลังงานจากแสงอาทิตย์ หรือการออกซิเดชันของสารอินทรีย์

ข. เฮเทอโรโทรฟิกแบคทีเรีย (Heterotrophic bacteria หรือ Heterotroph) เป็นแบคทีเรียที่ไม่สามารถสร้างอาหารเองได้ โดยได้แหล่งคาร์บอนมาจากสารอินทรีย์

การเจริญของแบคทีเรีย หมายถึง การแบ่งเซลล์ทำให้มีปริมาณเพิ่มขึ้น การบำบัดน้ำเสียโดยใช้กิจกรรมของแบคทีเรียจำเป็นจะต้องให้แบคทีเรียมีการเจริญสูงสุดเพื่อให้การบำบัดน้ำเสียมีประสิทธิภาพสูง แบคทีเรียต้องการอาหารและสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมเพื่อการเจริญ แบคทีเรียจะเจริญได้ดีในสภาวะพีเอชเป็นกลาง และอุณหภูมิที่เหมาะสม

แบคทีเรียสามารถแบ่งตามความต้องการออกซิเจนได้ 3 ประเภท คือ

ก. แอโรบิกแบคทีเรีย (Aerobic bacteria) คือ แบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจนอิสระเป็นองค์ประกอบในการเจริญ

ข. แอนแอโรบิกแบคทีเรีย (Anaerobic bacteria) คือ แบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนอิสระเป็นองค์ประกอบในการเจริญ

ค. แฟคคัลเททีฟแบคทีเรีย (Facultative bacteria) คือแบคทีเรียที่สามารถเจริญเติบโตได้ทั้งในสภาพที่มีและไม่มีออกซิเจนอิสระ

รา (Fungi) เป็นจุลินทรีย์ที่มีหลายเซลล์ มีคลอโรฟิลล์ ลักษณะทั่วไปมักเป็นเส้นยาว ๆ และมีนิวเคลียสหลายอัน ราสามารถเจริญได้ดีกว่าแบคทีเรียในสภาวะที่พีเอชต่ำ หรือมีปริมาณไนโตรเจนน้อย สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์พวกคาร์โบไฮเดรตได้ดี และยังสามารถย่อยสารที่มีโครงสร้างซับซ้อนได้ดีกว่าแบคทีเรีย ราสืบพันธ์โดยการสร้างสปอร์ รามีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสีย เช่น ระบบโปรยกรอง เป็นต้น

สาหร่าย (Algae) เป็นพืชชั้นต่ำที่มีคลอโรฟิลล์ สามารถสังเคราะห์แสงได้ไม่มีส่วนที่เป็นราก ลำต้น ใบ ที่แท้จริง มีขนาดตั้งแต่เล็กมากประกอบด้วยเซลล์เดียว ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าต้องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ สาหร่ายมีบทบาทในระบบบำบัดน้ำเสียบางระบบ เช่น ระบบบ่อผึ่ง เป็นต้น

โปรโตซัว (Protozoa) เป็นจุลินทรีย์ที่มีเซลล์เดียว มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า มีขนาดใหญ่กว่าแบคทีเรีย บางชนิดอยู่เป็นกลุ่ม (Colony) เซลล์มักมีรูปร่างคงที่ มีนิวเคลียสเห็นได้ชัดเจน

บทบาทของโปรโตซัวในระบบบำบัดน้ำเสียนั้นไม่ค่อยเด่นชัด ส่วนมากจะกินแบคทีเรียทั้งที่มีชีวิตและตายแล้ว

ไวรัส (Virus) เป็นสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กที่สุด ไม่มีลักษณะเป็นเซลล์ ดำรงชีวิตแบบปรสิต สามารถทำให้เกิดโรคแก่คน สัตว์ และพืช บทบาทของไวรัสในระบบบำบัดน้ำเสียนั้นมีน้อย ไวรัสจะสามารถทำลายเซลล์ของแบคทีเรียซึ่งทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสียอาจจำแนกออกเป็นประเภทต่าง ๆ ตามขั้นตอนดังนี้

1. **ระบบบำบัดขั้นปฐมภูมิ (Primary treatment)** เป็นกระบวนการทางกายภาพในการแยกสารต่าง ๆ ออกจากน้ำเสีย เช่น การกำจัดสิ่งปนเปื้อนออกจากน้ำเสีย อาศัยหลักการตกตะกอนหรือการทำให้ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ ขั้นตอนนี้สามารถลดปริมาณของแข็งแขวนลอยออกจากน้ำเสียได้ประมาณ 60 % และสามารถลดค่าความสกปรกในรูปของบีโอดีได้ประมาณ 35 % แต่สามารถลดปริมาณมลสารที่อยู่ในรูปของสารละลายได้ หน่วยบำบัดที่จัดอยู่ในระบบบำบัดขั้นปฐมภูมิ ได้แก่ ตะแกรงดักขยะ ถังดักตะกอนทราย ถังดักไขมัน ถังปรับสภาพน้ำเสียและถังตกตะกอนขั้นต้น เป็นต้น

2. **ระบบบำบัดขั้นทุติยภูมิ (Secondary treatment)** เป็นการกำจัดสารอินทรีย์และสารแขวนลอยขนาดเล็กออกจากน้ำเสีย อาจเป็นกระบวนการทางชีวภาพหรือกระบวนการทางเคมี สำหรับกระบวนการบำบัดทางชีวภาพนั้น มักมีประสิทธิภาพในการลดค่าบีโอดี (BOD_5) และของแข็งแขวนลอยได้ประมาณ 85 % ถ้ามีการเติมอากาศที่เพียงพอ อาจทำให้เกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) ที่เปลี่ยนสารประกอบแอมโมเนียไปเป็นสารประกอบไนไตรท์และไนเตรทได้อย่างสมบูรณ์ แต่ไม่สามารถลดปริมาณธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ตลอดจนโลหะหนักในน้ำเสียได้ ยกเว้น ระบบบำบัดทางชีวภาพบางระบบที่สามารถลดปริมาณธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้ เช่น ระบบ Modified Ludzack-Ettinger (MLE) ที่สามารถกำจัดธาตุอาหารไนโตรเจนได้เพียงอย่างเดียว หรือระบบ University of Cape Town หรือ Virginia Initiative Plant (UCT/VTP) ที่สามารถกำจัดได้ทั้งธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัส เป็นต้น

3. **ระบบบำบัดขั้นตติยภูมิ (Tertiary treatment)** เป็นการกำจัดสารแขวนลอยและสิ่งเจือปนอื่น ๆ ที่หลงเหลือจากการบำบัดขั้นทุติยภูมิ เช่น การกำจัดธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสีย ทั้งนี้ รวมถึงการปรับปรุงคุณภาพน้ำให้มีคุณภาพดีขึ้นจนสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้ (Reuse) หรือผ่านค่ามาตรฐานที่เข้มงวด เช่น การลดความเข้มสีโดยใช้ถ่าน

กัมมันต์ (Activated carbon) การลดความเข้มข้นของโลหะหนักบางชนิดโดยใช้การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange) เป็นต้น

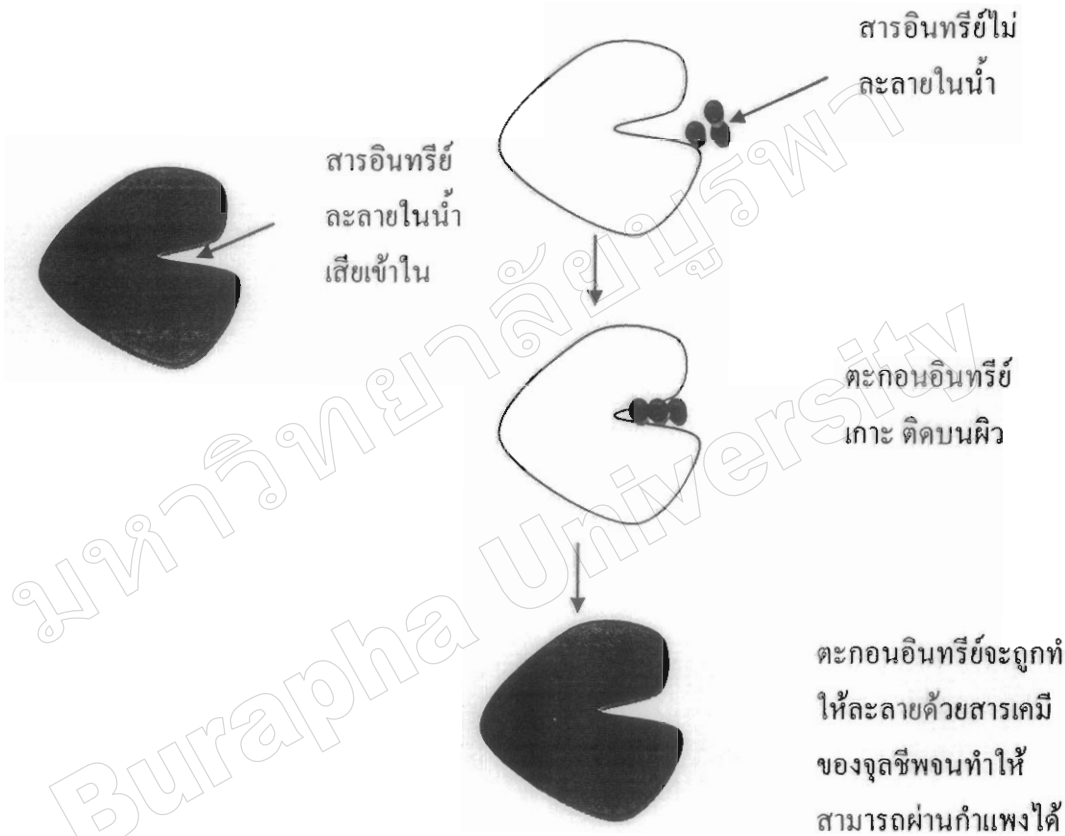
ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวจเต็ดสลัดจ์

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์ (2543) อธิบายเกี่ยวกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวจเต็ดสลัดจ์ (Activated Sludge, AS) ว่าเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในหลายประเทศซึ่งจะประกอบไปด้วยถังเติมอากาศและถังตกตะกอน กระบวนการในการบำบัดจะอาศัยจุลินทรีย์ที่มีปริมาณมากพอในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย จุลินทรีย์จะลอยอยู่ในตะกอนของถังเติมอากาศ ซึ่งมักใช้เครื่องจักรทำหน้าที่ให้จุลินทรีย์ลอยอยู่ภายในถังตลอดเวลาเติมอากาศ การควบคุมจำนวนจุลินทรีย์ให้ได้ตามต้องการ ต้องมีระบบแยกน้ำใสออกจากน้ำสลัดจ์ จึงนิยมใช้ถังตกตะกอนในการแยกน้ำทิ้งออกจากสลัดจ์ เพื่อปล่อยน้ำทิ้งที่ใสไหลล้นออกจากถังตกตะกอนส่วนบริเวณก้นถังตกตะกอนที่มีความเข้มข้นของน้ำสลัดจ์จำนวนมาก มักจะนำกลับมาสู่ถังเติมอากาศเพื่อช่วยในการควบคุมจำนวนจุลินทรีย์ในถังเติมอากาศได้ ถ้าพบว่าสลัดจ์มีมากเกินความต้องการก็อาจสูบกลับถ่ายจากก้นถังตกตะกอนหรือถังเติมอากาศโดยตรง แล้วจึงนำสลัดจ์ส่วนเกินนี้ไปบำบัดและกำจัดทิ้งต่อไป น้ำทิ้งที่ผ่านการกำจัดสารอินทรีย์จะบ่งชี้ในรูปของ Chemical Oxygen Demand (COD) ซึ่งจะบำบัดได้มากถึง 90 %

การศึกษาระบบ Activated sludge ต้องพิจารณาถึงรายละเอียดของจุลินทรีย์ โดยศึกษาถึงการเจริญของจุลินทรีย์ อายุจุลชีพหรืออายุสลัดจ์ และความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจุลินทรีย์กับการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การเจริญของจุลินทรีย์ในถังเติมอากาศแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ
   1.1 ขั้นโยกย้าย (Transfer step) เริ่มจากสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำเสียถูกดูดซับผ่านผนังเซลล์ (Cell wall) ของจุลินทรีย์เข้าภายในเซลล์ ซึ่งสารอินทรีย์จะถูกย่อยสลาย ส่วนสารที่ไม่ละลาย (ตะกอนอินทรีย์) จะถูกดูดซับอยู่บนผิวของผนังเซลล์ และในที่สุดก็จะถูกดูดซับเข้าภายในเซลล์และถูกย่อยสลายไปในที่สุด (ภาพที่ 2-1)
   1.2 ขั้นแปรเปลี่ยน (Conversion step) เมื่อสารอินทรีย์เข้าไปภายในจุลินทรีย์จึงเกิดกระบวนการย่อยสลายหรือกระบวนการแปรเปลี่ยน ทำให้เกิดการเพิ่มของจำนวนเซลล์ และกระบวนการออกซิเดชั่น เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงาน

1.3 ขั้นเกิดฟล็อค (Floc step) คือจุลินทรีย์ที่ถูกกวนในถังเติมอากาศ แล้วจับตัวกันเป็นลักษณะคอลลอยด์ จนได้ขนาดที่มีลักษณะคล้ายวุ้น ฟล็อคที่เกิดขึ้นจะมีน้ำหนักเพียงพอที่จะเกิดการตกตะกอนภายในถังตกตะกอนได้ ดังแสดงดังภาพที่ 2-2



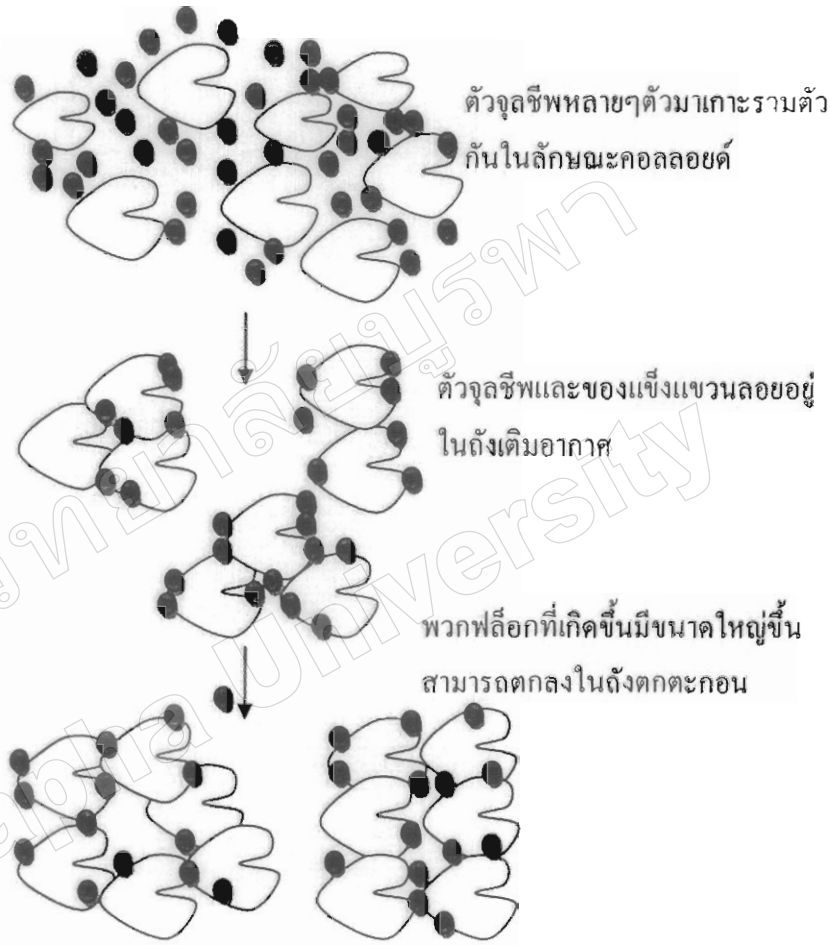
ภาพที่ 2-1 ขั้นโยกย้ายสารอินทรีย์ผ่านเข้าภายในเซลล์ (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2543, หน้า 6)

2. อายุจุลินทรีย์หรืออายุสลัดจ์ (Sludge Age)

อายุจุลินทรีย์ในระบบ Activated Sludge หรือเรียกว่า Mean Cell Residence Time (MCRT) คือ ระยะเวลาที่จุลินทรีย์อยู่ในระบบ ซึ่งคำนวณโดยหารน้ำหนักของของแข็งแขวนลอยในถังเติมอากาศด้วยน้ำหนักของแข็งแขวนลอยที่ระบายออกจากระบบในแต่ละวันอายุของจุลินทรีย์มีผลโดยตรงกับคุณภาพของน้ำทิ้งที่ออกจากระบบบำบัด ถ้าจุลินทรีย์มีอายุน้อยเกินไปจุลินทรีย์จะไม่มีเวลาเพียงพอในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียทำให้ได้คุณภาพน้ำทิ้งต่ำ ในทางกลับกันถ้าจุลินทรีย์มากเกินไปทำให้จุลินทรีย์บางส่วนตายลงเรื่อย ๆ เมื่อพิจารณาที่การตกตะกอนพบว่า

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

จุลินทรีย์ที่มีอายุน้อยมีอัตราการเจริญสูง แต่การตกตะกอนไม่ดีเนื่องจากจุลินทรีย์อยู่กันอย่างกระจัดกระจาย ถ้าจุลินทรีย์มีอายุมาก จะเชื่องช้ามีการตกตะกอนได้ดีในถังตกตะกอน



ภาพที่ 2-2 การทำนายการรวมกลุ่มของแบคทีเรียด้วยการสร้างสะพานข้ามโพลีแซคคาไรด์และกฎของประจุบวกในการเกาะบนชีวโพลีเมอร์และกิจกรรมในตำแหน่งเกาะของแลคติน (Higgins & Novak, 1997c)

ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจุลินทรีย์กับการย่อยสลายสารอินทรีย์การวิเคราะห์หาจำนวนจุลินทรีย์ในระบบ มีความสัมพันธ์กับการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียเป็นอย่างมาก เนื่องจากค่าความสกปรก (ในรูป BOD) มากหรือน้อย จะมีผลต่อจำนวนจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นหรือลดลง นอกจากนั้นถ้าจุลินทรีย์มีจำนวนมากจะทำให้มีการย่อยสลายสารอินทรีย์ในอัตราที่สูงตามไปด้วย แต่ต้องพิจารณาถึงอายุสลัดจ์ควบคู่กันไป

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

จุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวเต็ทสลัดจ์นั้นจะมีความหลากหลายของจุลินทรีย์สูงมาก จุลินทรีย์ที่สามารถพบได้ทั่วไปจะมีทั้งกลุ่มของโปรคาริโอต (Prokaryotes) และยูคาริโอต (Eukaryotes) เชื้อรา (Fungi) ก็เป็นจุลินทรีย์อีกประเภทที่มีบทบาทสำคัญในระบบแอคติเวเต็ทสลัดจ์เพราะเป็นตัวช่วยในการสร้างกลุ่มก้อนของจุลินทรีย์ที่ถูกเรียกว่า ฟล็อค (flocc) โดยมีกลไกของการเชื่อมโยงกลุ่มฟล็อคเล็ก ๆ จนเป็นกลุ่มใหญ่ขึ้น อีกทั้งยังเป็นส่วนที่ร่วมสร้างสารโพลีเมอร์และประจุทางไฟฟ้า สายพันธุ์ของจุลินทรีย์ยังแตกต่างกันไปตามประเภทของอาหารที่ได้รับและจุลินทรีย์ที่เข้ามาพร้อมกับน้ำเสียอีกด้วย (Rittman & McCarty, 2001) แบคทีเรียที่มักพบในระบบแอคติเวเต็ทสลัดจ์จะเป็นสมาชิกของจำพวก *Pseudomonas sp.*, *Zooglea sp.*, *Achromobacter sp.*, *Flavobacterium sp.*, *Nocardia sp.*, *Bdellovibro sp.*, *Mycobacterium sp.* และไนตริฟายแบคทีเรียที่สำคัญสองตัว คือ *Nitrosomonas sp.*และ *Nitrobacter sp.* และยังมีการพบจำพวกรูปแบบเส้นใยที่พบได้บ่อย (Filamentous bacteria) เช่น *Sphaertilus, Beggiatoa*, *Thiothix*, *Lecicothrix*, และ *Geotrichum* (Tchobanoglous et al., 1991)

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Integrated Fixed Film Activated Sludge (IFAS)

Johnson et al. (2006) ได้อธิบายเกี่ยวกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Integrated Fixed Film Activated Sludge (IFAS) ว่าเป็นระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพซึ่งผสมระหว่างระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวเต็ทสลัดจ์กับระบบบำบัดน้ำเสียแบบตรึงฟิล์ม โดยการจำแนกตัวกลางจะแบ่งเป็นตัวกลางเคลื่อนที่ (Moving media) และ ตัวกลางที่ยึดติดกับที่ (Fixed film media) โดยปกติมักมีการติดตั้งตัวกลางลงในถังเติมอากาศของระบบบำบัดน้ำเสีย ปัจจุบันระบบบำบัดน้ำเสียแบบ IFAS นี้ใช้อย่างแพร่หลายในประเทศสหรัฐอเมริกา กลุ่มประเทศยุโรปและแถบเอเชียในหลายๆประเทศ เพื่อนำมาแก้ไขปัญหาของระบบบำบัดน้ำเสีย เช่น อุณหภูมิที่ต่ำทำให้จุลินทรีย์เจริญได้ไม่ดี หรือกรณีที่มีปริมาณสารอินทรีย์และไนโตรเจนเข้าระบบบำบัดน้ำเสียเพิ่มขึ้นแต่ไม่ได้มีการออกแบบล่วงหน้ามาเพื่อรองรับปริมาณสารอินทรีย์และไนโตรเจน การแก้ไขปัญหาโดยทั่วไปนั้นจะทำการเพิ่มปริมาณของจุลินทรีย์ในระบบให้สูงขึ้น ทั้งนี้ หากระบบมีจุลินทรีย์แขวนลอยเพิ่มสูงขึ้นแต่ถังเติมอากาศไม่ได้ถูกออกแบบไว้เพื่อรองรับปริมาณการเพิ่มขึ้นของสารอินทรีย์หรือมีพื้นที่อย่างจำกัด ทำให้ไม่สามารถรองรับปริมาณการเพิ่มขึ้นของจุลินทรีย์ได้ ซึ่งอาจจะส่งผลสู่ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียให้มีประสิทธิภาพลดลงและส่งผลต่อคุณภาพน้ำทิ้งได้ ระบบไบโอฟิล์มที่ถูกผสมผสานเข้ามาในถังเติมอากาศของระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวเต็ทสลัดจ์นั้น ทำให้ปริมาณของจุลินทรีย์ในระบบสูงขึ้น และจุลินทรีย์ที่ยึดเกาะอยู่บนตัวกลางมีความหนาแน่นสูง ดังนั้น ค่าอายุตะกอนสลัดจ์ (Sludge age) หรือค่า Solid Retention Time (SRT) ของจุลินทรีย์บนผิวตัวกลางจึง

มีค่าสูง จุลินทรีย์ที่มากขึ้นทำให้สามารถกำจัดสารอินทรีย์และธาตุอาหารไนโตรเจนในน้ำเสียได้มากขึ้น มีการศึกษา (ดุจนภา คำเพชร์, 2548) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียของจุลินทรีย์แบบเคลื่อนที่โดยอิสระและจุลินทรีย์แบบที่มีตัวกลางยึดเกาะในระบบบำบัดน้ำเสียจำลองแบบ SCAS SBR และ BSC ตัวกลางที่นำมาศึกษาคือ โรล์ม้วนผม ออกซิบอล ไม้ไผ่ ไม้ระกำรังบวบ และหลอด ทำการทดลอง 100 วัน โดยควบคุมค่า MLSS แต่ละระบบให้อยู่ระหว่าง 1500-2000 มิลลิกรัมต่อลิตร ศึกษาพารามิเตอร์คือ ค่าซีโอดี ชีวมวล แอมโมเนีย-ไนโตรเจน ไนไตร์ท-ไนโตรเจน ไนเตรท-ไนโตรเจน และ ออโธฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส จากผลการศึกษาพบว่า ระบบบำบัดน้ำเสียแบบ SCAS SBR และ BSC สามารถบำบัดซีโอดีเฉลี่ยได้ประมาณ 98 %, 94 % และ 95 % ตามลำดับ ส่วนการบำบัดไนโตรเจนพบว่า ระบบบำบัดน้ำเสียแบบ SCAS และ SBR ไม่สามารถบำบัดค่าไนโตรเจนได้ และจากการทดลองพบว่าตัวกลางแต่ละชนิดมีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียแตกต่างกัน ชนิดของตัวกลางที่เหมาะสมสำหรับการยึดเกาะของจุลินทรีย์มากที่สุดคือรังบวบ ซึ่งมีปริมาณของจุลินทรีย์ที่เจริญบนตัวกลางมากที่สุด และ (นิสุสนา บินนิมะ, 2549) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยจุลินทรีย์แบบยึดเกาะตัวกลางชนิดเส้นใยไนล่อนโดยระบบเลี้ยงตะกอน เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียแบบมีและไม่มีตัวกลางเชือกไนลอน โดยใช้น้ำเสียชุมชนที่มี BOD เข้าระบบเฉลี่ย 120 mg/L และอัตราส่วน BOD : COD ในน้ำทิ้งเฉลี่ยเท่ากับ 0.603 โดยทำการศึกษาในการควบคุม F/M ratio 0.2-0.9 kg COD/kg MLSS.day และค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์อยู่ระหว่าง 0.6-2.7 kg BOD/m^3.day ผลจากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของระบบเลี้ยงตะกอนแบบมีและไม่มีตัวกลางเส้นเชือกแบบมี และไม่มีเชือกไนลอน ปรากฏว่าที่ค่า F/M ratio เท่ากับ 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.9 kg COD/kg MLSS.day ระบบเลี้ยงตะกอนแบบมีตัวกลางเส้นเชือกไนล่อนมีประสิทธิภาพในการบำบัด BOD, COD และ SS อยู่ระหว่าง 76.18-96.90 %, 75.76-92.85% และ 64.32-95.98% ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพการบำบัดดังกล่าวจะสูงกว่าระบบเลี้ยงตะกอนแบบไม่มีตัวกลางเส้นเชือกไนล่อนซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัด BOD, COD และ SS อยู่ระหว่าง 68.67-94.96 %, 68.11-89.57% และ 56.66-90.33%

กลไกการเกิดไบโอฟิล์ม

(ณฐนนท์ ตราชู, 2551) ได้กล่าวถึงกลไกการเกิดไบโอฟิล์ม ดังนี้

1. อาหารที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบไหลผ่านผิวของบริเวณที่จะเกิดเป็นไบโอฟิล์ม ทำให้ผิวนั้นได้รับการปรับสภาพ (Conditioning film) กลายเป็นพื้นที่ผิวที่มีความเหมาะสมต่อการก่อตัวของไบโอฟิล์ม

2. แบคทีเรียซึ่งมีอยู่ทั่วไปเกาะติดบนผิวที่ถูกปรับสภาพ (Attachment on conditioned film) ปัจจัยหลายอย่างส่งผลต่อการเกาะติดของจุลินทรีย์บน Conditioned film เช่น pH และอุณหภูมิของผิว อัตราการไหล ปริมาณอาหาร เวลา ช่วงอายุของเชื้อ และความไม่ชอบน้ำ (Surface hydrophobicity) แบคทีเรียจะเกาะผิวโดยใช้ Fimbriae, Pili, Flagella โดย Exopolysaccharides (EPS) เป็นสารที่เป็นเมือกที่ทำให้จุลินทรีย์เกาะกันได้ด้วยแรงหลายแบบ ไม่ใช่เฉพาะคุณสมบัติความเป็นเมือกเท่านั้น เช่นแรงไฟฟ้าสถิตย์ แรงจากพันธะโคเวเลนซ์ พันธะไฮโดรเจน แรงยึดเหนี่ยวที่เกิดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วสองโมเลกุลขึ้นไป และ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำ การเกาะกันในระยะแรกไม่แข็งแรงนักอาจจะหลุดได้ถ้ามีกระแสน้ำไหลแรง ๆ (reversible attachment) ต่อมาจะค่อย ๆ เพิ่มความแข็งแรงมากขึ้น (Irreversible attachment)

3. ขั้นต่อมาเมื่อเริ่มปักหลักได้ เซลล์ที่ได้รับบาดเจ็บและอดอาหารจะพักรักษาตัว เริ่มมีการสังเคราะห์กรดไขมันและโปรตีน จากนั้นแบคทีเรียเริ่มมีการแบ่งตัวและสร้างเป็น Microcolonies (กลุ่มจุลินทรีย์ที่เกิดจากการแบ่งตัวของเซลล์แรก ๆ ที่เกาะติด) ฉะนั้นเซลล์ที่อยู่ใน Microcolony เดียวกันจึงจัดได้ว่าเป็นญาติกัน มีความคล้ายคลึงทางพันธุกรรมมากที่สุด ขั้นนี้จุลินทรีย์จะสร้างสารจำพวกคาร์โบไฮเดรตที่มีคุณสมบัติเป็นเมือก (EPS) ขึ้นมาปกคลุมตัวมันเองไว้

4. เมื่อเวลาผ่านไประยะเวลาหนึ่ง Microcolony ที่มีจำนวนจุลินทรีย์มากและมีความหนามากจะมีบางส่วนที่หลุดลอกออกมา โดยเฉพาะบริเวณที่มีการไหลของของเหลวตลอดจะมีการหลุดลอกอยู่เสมอ

สารประกอบภายนอกเซลล์

การเกิดตะกอนของระบบแอคติเวเต็ทสลัดจ์ ในปี ค.ศ. 1952 McKinney ได้เสนอทฤษฎีของการเกิดฟล็อคขึ้น โดยนำเสนอว่าฟล็อค คือ กลุ่มของแบคทีเรียที่เข้ามารวมกลุ่มกันในรูปแบบของแคปซูลแบคทีเรียโดยเกิดจากปฏิสัมพันธ์โดยตรงของสารเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างเซลล์ของแบคทีเรียที่อยู่ติดกัน การดูดซับของประจุบวกจากเกลือที่แตกต่างกัน ทำให้ลดแรงประจุสุทธิบนผิวของเซลล์แบคทีเรีย ทำให้เซลล์สามารถเข้ามาใกล้กันได้มากขึ้น McKinney (1952) และ Tezuka (1969) ยังเสนอว่าตะกอนชีวภาพหรือฟล็อคของแบคทีเรียที่อยู่นอกแคปซูลของแบคทีเรียหรือจุลินทรีย์ประเภทโคดเดี่ยว จุลินทรีย์ประเภทนี้จะค่อย ๆ เข้าใกล้กันเรื่อย ๆ จนสามารถกลายเป็นแคปซูลของแบคทีเรียได้ในที่สุด

ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ เซลล์จุลินทรีย์ สารประกอบภายนอกเซลล์ตลอดจนฟล็อคของสลัดจ์ จะมีประจุเป็นลบเนื่องจากการมีหมู่ฟังก์ชั่นของไอออนประจุลบ (Horan & Eccles, 1986; Morgan et al., 1990; Sutherland, 1997; Kieding & Nielsen, 1997; Liu

et al., 2004) ที่ความเป็นกรด-เบสที่เป็นกลาง (Busch & Stumn, 1968; Morgan et al., 1990; Pavoni et al., 1972) ดังนั้น หากสามารถปรับเปลี่ยนประจุบนผิวฟล็อคด้วยแคลเซียมและแมกนีเซียม ก็จะช่วยทำให้เกิดไบโอฟิล์มได้รวดเร็วขึ้น และหากเมื่อพิจารณาถึงสัดส่วนของโปรตีนต่อคาร์โบไฮเดรตที่อยู่ในสารประกอบภายนอกเซลล์ พบว่า คาร์โบไฮเดรตนั้นมีหมู่ที่เป็นประจุลบอยู่ ได้แก่ หมู่คาร์บอกซิลและหมู่ฟอสเฟต ส่วนโปรตีนมีหมู่ที่มีประจุบวก ได้แก่ หมู่อะมิโน ซึ่งถ้าสัดส่วนของโปรตีนมีมากพอจนถึงระดับที่เหมาะสมจะทำให้ปรับสภาพแรงทางประจุไฟฟ้าให้เป็นกลางได้ซึ่งคุณสมบัตินี้ก็อาจจะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการกระตุ้นให้เกิดไบโอฟิล์มได้ง่าย (Liao et al., 2001) Durmaz and Sanin (2003) ศึกษาอัตราส่วนระหว่างคาร์โบไฮเดรตต่อโปรตีน พบว่า เมื่ออัตราส่วนของอาหารต่อจุลินทรีย์ (F/M Raito) เพิ่มขึ้นจะทำให้คาร์โบไฮเดรตในโครงสร้างของ ฟล็อคสูงขึ้นและประจุลบบนฟล็อคก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งถ้าสามารถปรับนำมาใช้ในการสร้างไบโอฟิล์มได้

Dunne and Burd (1992) ศึกษาการเพิ่มของแคลเซียม แมกนีเซียม EDTA และ pH ที่มีต่อการเกาะติดบนพลาสติกของแบคทีเรีย *Staphylococus epidermidis* จำนวน 5 สายพันธุ์ พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของแมกนีเซียมมากกว่า 16 μM และความเข้มข้นของแคลเซียมมากกว่า 128 μM จะเพิ่มการเกาะติดบนพลาสติกของแบคทีเรียทั้งหมด แต่การเพิ่มความเข้มข้นมากกว่า 8 μM จะลดการเกาะติดของแบคทีเรียทุกสายพันธุ์ นอกจากนั้น ค่า pH ระหว่าง 5-6 จะลดการเกาะติด เมื่อเปรียบเทียบกับการเกาะติดที่ค่า pH เท่ากับ 7 อย่างไรก็ตาม การเพิ่มค่า pH เป็น 8 จะทำให้การเกาะติดของแบคทีเรียจำนวน 2 สายพันธุ์เพิ่มสูงขึ้น (Giaouris et al., 2005) การศึกษาผลกระทบของ pH ต่อการฟอร์มไบโอฟิล์มบนผิวหน้าของสแตนเลสสตีลโดยใช้ Salmonella Enteric Entertidis PT4 ที่ pH 4.5, 5.5, 6.5 และ 7.5 จากการศึกษาพบว่าการฟอร์มไบโอฟิล์มบนผิวหน้าของของสแตนเลสสตีลจะเกิดขึ้นหลังจาก 7 วัน ซึ่งเป็นอิสระจาก pH (Ramli et al., 2012) ศึกษาสภาวะแวดล้อมที่มีผลกระทบต่อการการสร้างไบโอฟิล์มของ *Burkholderia pseudomallei* โดยทำการศึกษาที่ค่า pH 5, 6.9, 7.2, 8 และ 9 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และ 37 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่า การฟอร์มของไบโอฟิล์มจะเกิดได้ดีที่สุดที่ pH 7.2 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส การศึกษาของ Lee and Rittmann (2003) ศึกษาผลของ pH และการตกตะกอน ของแบคทีเรียกลุ่มออโตโทฟิกแบคทีเรียที่ทำให้เกิดดีไนตริฟิเคชั่นโดยใช้เมมเบรนไบโอฟิล์มรีแอกเตอร์ พบว่า pH สูงสุดที่ทำให้กลุ่มออโตโทฟิกแบคทีเรียเกิดดีไนตริฟิเคชั่นอยู่ในช่วง 7.7-8.6 และ pH ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดที่ 8.4 และจะมีอัตราการกำจัดไนเทรตลดลงเมื่อ pH มากกว่า 8.6 ซึ่งเป็นผลให้เกิดการสะสมของไนเทรตเพิ่มขึ้น pH ที่เหมาะสมต่อการเกิดไนตริฟิเคชั่นอยู่ระหว่าง 7-8 (Jones & Paskins, 1982; Painter & Loveless, 1983; Antoniou et al., 1990) สำหรับไนโตโซโมแนส pH ที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 7.9-

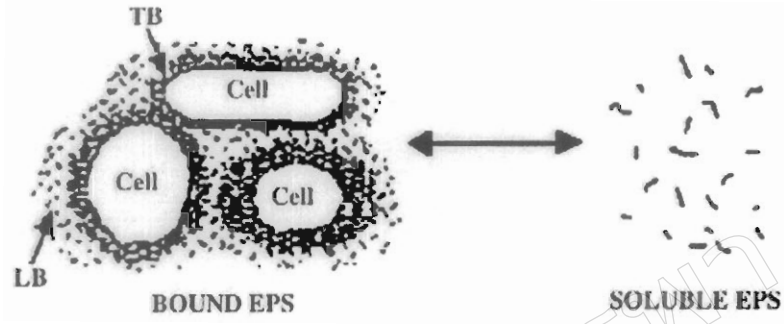
8.2 ในขณะที่ ไนโตแบคเตอร์ pH ที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 7.2-7.6 (Alleman, 1984). การศึกษาของ (Ruiz et al.,2003) ได้ทดลองการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชั่นและการสะสมของไนไตรท์ในโตรเจนในระบบบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียมสูงจากผลการทดลองพบว่า pH ที่เกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชั่นได้สมบูรณ์จะอยู่ในช่วง 6.45-8.95 แต่ pH ที่ต่ำกว่า 6.45 และ สูงกว่า 8.95 จะยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชั่น โดย pH ในช่วง 6.5-9 ยังเป็น pH ที่เหมาะสมสำหรับการเจริญของจุลินทรีย์ จึงนำมาใช้ใช้ออกในการออกแบบการทดลองโดย เลือก pH ที่ใช้ในการทดลองในครั้งนี้คือ 6.5,7.5 และ 8.5

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดไบโอฟิล์ม

สารประกอบภายนอกเซลล์ (Extracellular Polymeric Substance, EPS) เป็นสารที่มีมวลโมเลกุลสูง (MW>10,000) ถูกผลิตโดยจุลินทรีย์ในบางสภาวะ เช่น ชีวโพลีเมอร์จากการสังเคราะห์ทางชีวภาพ การดูดซับสารประกอบอินทรีย์ (เซลลูโลส, กรดฮิวมิค เป็นต้น) การเผาผลาญหรือสลายผลิตผลที่ได้จากกิจกรรมสลายสารอีกที สารประกอบภายนอกเซลล์เป็นจุดเด่นของแบคทีเรียและสามารถพบได้ทั่วไปบนพื้นผิวของฟล็อค (Morgan et al.,1990; Urbain et al., 1993; Frolund et al., 1996) โดย Li and Ganczarczyk (1991) พบว่า EPS เป็นส่วนประกอบหลักของฟล็อคในระบบบำบัดน้ำเสียแบบเติมอากาศ เช่น ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบแอคติเวเต็ทสลัดจ์ สารประกอบภายนอกเซลล์เป็นตัวช่วยแบคทีเรียเพื่อสร้างผิวสัมผัสและช่วยป้องกันเซลล์จากการถูกกลืนกิน (Phagocytosis) การถูกล่า (Predation) เซลล์แห้งจากการสูญเสียน้ำ (Desication) และการเกิดสารพิษภายใน (Endotoxin) EPS เองยังช่วยรักษาแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานสำรองสำหรับจุลินทรีย์อีกด้วย

สารประกอบภายนอกเซลล์ได้ถูกจัดออกเป็นสองประเภท ภาพที่ 2-3 คือ Bound EPS ทำหน้าที่ช่วยยึดเกาะระหว่างกลุ่มฟล็อคเล็ก ๆ ช่วยยึดเซลล์ให้อยู่ติดกัน ช่วยยึดสารอินทรีย์ เป็นต้น และ Soluble EPS เป็นส่วนที่ไม่ได้ถูกยึดติดอยู่กับเซลล์หรือฟล็อค มีลักษณะเป็นคอลลอยด์หรือเป็นของเหลวละลายน้ำ (Gehr & Henry, 1983; Higgins & Novak, 1997a; Higgins & Novak, 1997b; Higgins & Novak, 1997c; Nielsen & Jahn,1997; Laspidou & Rittman, 2002) โดย Soluble EPS ง่ายที่จะสกัดออกมาเพื่อตรวจวัดแต่ Bound EPS จะยากต่อการสกัดมากกว่า อย่างไรก็ตามปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคนิคและวิธีการต่าง ๆ เพื่อนำมาใช้ในการสกัดสาร Bound EPS มากขึ้น นอกจากนั้น ยังพบว่าในฟล็อคเองยังมีสารประกอบภายนอกเซลล์ที่แตกต่างกันอยู่อีก โดยมีสารประกอบภายนอกเซลล์ที่จะเกาะติดแน่น (Tight bound EPS, TB) กับเซลล์ของจุลินทรีย์ และ

สารประกอบภายนอกเซลล์ที่เกาะติดแบบหลวม (Loosely bound EPS, LB) ซึ่งอยู่ห่างออกมาจากเซลล์ของจุลินทรีย์



ภาพที่ 2-3 ประเภทของสารประกอบภายนอกเซลล์เมื่อพิจารณาจากสถานะการละลาย (Nielsen & Jahn, 1997)

การสกัดและการวิเคราะห์สารประกอบภายนอกเซลล์นั้น พบว่า สารประกอบภายนอกเซลล์มีโปรตีน คาร์โบไฮเดรต กรดนิวคลีอิค (Frieman et al., 1999; Pavoni et al., 1972; Urbain et al., 1993; Jorand et al., 1995; Bura et al., 1998) เป็นองค์ประกอบหลัก และยังมีองค์ประกอบของไขมัน (Goodwin & Forster, 1985) สารประกอบฮิวมิค (Frolund et al., 1996; Wilen et al., 2003b) นอกจากนั้น ยังพบสารประกอบโพลีเมอร์อื่น ๆ เช่น กลุ่ม ไกลโคโปรตีน (Horan & Eccles, 1986; Jorand et al., 1995) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม มีรายงานวิจัยจำนวนมาก ระบุว่า สารโพลีแซคคาไรด์เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของสารประกอบภายนอกเซลล์ (Pavoni et al.,1972; Goodwin & Forter,1985; Horan & Eccles, 1986; Morgan et al.,1990; Friedman et al.,1996; Bejar et al.,1998) แต่บางรายงานวิจัย พบว่า โปรตีนเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของสารประกอบ EPS (Brown & Lester,1980; Urbain et al.,1993; Higgins & Novak, 1997a; Higgins & Novak, 1997b; Bura et al., 1998; Jorand et al.,1998; Wilen et al., 2003b) นอกจากนี้คุณสมบัติของสารประกอบภายนอกเซลล์ยังมีจุด Isoelectric Point ใกล้เคียงกับของจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ โดยอยู่ที่ pH ต่ำมาก ๆ คือ อยู่ระหว่าง pH 2-4 (Tenney & Stumn, 1965) และเป็นที่สังเกตได้ว่าที่ Isoelectric point ของโปรตีนอยู่ที่ pH 5-8 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารประกอบส่วนใหญ่ย่อมเป็นสารประกอบอื่นมีมากกว่าโปรตีนแน่นอน โดยกลุ่มที่มี Isoelectric point ต่ำ ๆ จะเป็นกลุ่มกลูตามิคแอซิด ลิปิด และ มูโคโพลีแซคคาไรด์ที่อยู่บนผิวของจุลินทรีย์

การศึกษาส่วนประกอบของสารประกอบภายนอกเซลล์ได้มีการศึกษาทั้งในห้องทดลองและจากการเก็บตัวอย่างจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานหรือระบบบำบัดของทางเทศบาล จากการศึกษาของระบบแอคติเวเต็ทสลัดจ์ที่สภาวะคงตัวในห้องทดลอง พบว่า มีโปรตีนเป็นส่วนประกอบหลัก ตามด้วยสารโพลีแซคคาไรด์และ DNA ตามลำดับ ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวเต็ทสลัดจ์ของโรงงานไวน์ พบว่า มีปริมาณโปรตีนมากถึง 70 mg/g-VSS แต่ DNA อยู่ที่ 6 mg/g-VSS ส่วนระบบบำบัดแบบแอคติเวเต็ทสลัดจ์ของเทศบาล พบว่า มีปริมาณโปรตีนต่ำอยู่ที่ 40 mg/g-VSS แต่พบว่าปริมาณ DNAในระดับสูง ส่วนระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานกระดาษและจากกลุ่มอุตสาหกรรมปิโตรเคมี พบว่า มีปริมาณ DNA อยู่ที่ 11-17 mg/g-VSS ซึ่งตัวอย่างถูกเก็บในสภาวะระบบบำบัดน้ำเสียแบบคงตัว (Sponza, 2003)

ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตสารประกอบภายนอกเซลล์

ปัจจัยต่าง ๆ ที่สำคัญต่อการสร้างสารประกอบภายนอกเซลล์ ได้แก่

1. ชนิดและปริมาณของอาหาร

ชนิดของอาหารมีผลต่อชนิด สังคมของจุลินทรีย์ การเผาผลาญอาหาร รวมทั้งการผลิตสารประกอบภายนอกเซลล์ด้วย Sponza (2003) ทำการทดลองเปรียบเทียบอาหารโดยใช้น้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบแตกต่างกันภายใต้สภาวะคงตัว พบว่า มีสัดส่วนของโปรตีนอยู่ในสารประกอบภายนอกเซลล์ที่ใช้น้ำเสียจากโรงงานไวน์ น้ำเสียชุมชน น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมและน้ำเสียจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี นอกจากนั้น สารประกอบภายนอกเซลล์จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์ (F/M Ratio) (Jang et al.,2007)

2. ปริมาณธาตุอาหาร

สารประกอบภายนอกเซลล์สามารถถูกจุลินทรีย์ย่อยเพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานได้ ธาตุอาหารที่สำคัญ คือ ธาตุอาหารฟอสฟอรัสและไนโตรเจน สารประกอบภายนอกเซลล์มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นโดยเฉพาะปริมาณคาร์โบไฮเดรตเมื่อน้ำเสียขาดธาตุอาหารฟอสฟอรัส (Bura et al., 1998; Hoa et al., 2003) Dumaz and Sanin (2001) พบว่าสารประกอบภายนอกเซลล์จะมีปริมาณโปรตีนมากขึ้นแต่คาร์โบไฮเดรตลดลงเมื่อสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนอยู่ที่ 5 แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนมากขึ้นเป็น 40 พบว่า ปริมาณของโปรตีนลดลงแต่ปริมาณคาร์โบไฮเดรตมากขึ้น ส่วนนักวิจัยท่านอื่น พบว่า ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวเต็ทสลัดจ์ที่มีน้ำเสียเข้าสู่ระบบที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำมีแนวโน้มของการผลิตสารประกอบภายนอกเซลล์ที่สัดส่วนโปรตีนต่อคาร์โบไฮเดรตสูง (Bura et al., 1998)

3. ช่วงระยะเวลาของการเจริญเติบโต

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา
ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

สารประกอบภายนอกเซลล์นั้น จะพบมากในช่วงที่จุลินทรีย์มีการเจริญเติบโต (Growth phase) และจะลดลงเมื่อถึงช่วงคงที่ (Stationary phase) จึงสามารถคิดได้ว่าคาร์บอนที่ถูกใช้ไปบางส่วนย่อมเกิดเป็นสารประกอบภายนอกเซลล์ด้วย เมื่อถึงช่วงตาย (Dead phase) นั้น เซลล์จุลินทรีย์ที่มีชีวิตจะสามารถผลิตสารประกอบภายนอกเซลล์ลดลง จึงทำให้สารประกอบภายนอกเซลล์ลดลงจนกระทั่งพบว่าไม่เกิดการผลิตเพิ่มอีกเลย (Pavoni et al., 1972; Busch & Stumn,1968) ดังนั้น ปริมาณสารประกอบภายนอกเซลล์จากแต่ละช่วงของการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มีปริมาณแตกต่างกัน ดังนั้น จึงมีความสัมพันธ์กับการเดินระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวเต็ทสลัดจ์ที่มีการควบคุมอายุสลัดจ์ จากการทบทวนงานวิจัย พบว่า ค่าอายุสลัดจ์และการผลิตสารประกอบภายนอกเซลล์มีความสัมพันธ์สอดคล้องกัน (Chao & Keinath,1979; Sesay & Sanin, 2004) นอกจากนี้ ยังมีรายงานว่าเมื่อเพิ่มอายุสลัดจ์ ทำให้ผลรวมของสารประกอบภายนอกเซลล์ลดลงอย่างมีนัย (Gulas et al.,1979; Sheintuch et al..1986; Wilen et al.,2003b) อย่างไรก็ตาม Liao et al.(2001) รายงานผลการวิจัยที่ขัดแย้งว่าการผลิตสารประกอบภายนอกเซลล์เป็นอิสระจากอายุสลัดจ์ โดยพบว่า ค่าอายุในช่วง 4 ถึง 20 วันมีผลต่อการผลิตสารประกอบภายนอกเซลล์โดยรวมเพียงเล็กน้อยแต่มีนัยกับสัดส่วนของปริมาณคาร์โบไฮเดรตและโปรตีน โดยสัดส่วนของโปรตีนต่อคาร์โบไฮเดรตจะเพิ่มขึ้นในช่วง 4 และ 12 วันและเริ่มลดลงเมื่อ 16 และ 20 วัน มีความเป็นไปได้ว่าที่อายุสลัดจ์อายุต่ำ ๆ นั้น จุลินทรีย์ไม่ได้ใช้เป็นแหล่งคาร์บอนทั้งหมดในการเจริญเติบโต สารอาหาร (Substrates) ที่มีคาร์บอนอยู่เกินพอสามารถถูกเก็บไว้ในเซลล์และสามารถสะสมในสารประกอบภายนอกเซลล์ได้ทันที แต่ว่าที่ค่าอายุสูง ๆ ทำให้อัตราส่วนปริมาณอาหารต่อจุลินทรีย์ (F/M Ratio) ต่ำลง ส่งผลให้ปริมาณการสะสมคาร์โบไฮเดรตในเซลล์ลดลงแสดงให้เห็นว่าเป็นคาร์บอนที่สามารถใช้ได้ทันที

343340