

การบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตนม โดยใช้แบคทีเรียสังเคราะห์แสง ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ แบบมีเมมเบรนจมตัว

Treatment of Dairy Wastewater Using Photosynthetic Bacteria in Submerged Membrane Bioreactor

คำนำ

น้ำทิ้งจากโรงงานผลิตนมมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์เข้มข้น และไขมันซึ่งย่อยสลายยากอยู่มาก ระบบบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตนมจึงจำเป็นต้องเป็นระบบที่สามารถรองรับสารอินทรีย์และไขมันในปริมาณสูงได้ การบำบัดแบบไร้อากาศ (anaerobic wastewater treatment) เป็นวิธีหนึ่งที่เหมาะสม แต่ระบบนี้จำเป็นต้องใช้พื้นที่มากเนื่องจากต้องการระยะเวลาเก็บกักนาน และระบบที่กำลังเป็นที่นิยมใช้อยู่ได้แก่ ยูเอสบี (upflow anaerobic sludge blanket: UASB) ซึ่งเป็นระบบที่ให้ประสิทธิภาพสูงแต่การควบคุมยาก ส่วนการบำบัดแบบใช้อากาศด้วยระบบแอกติเวเตดสลัดจ์ (activated sludge) ก็เป็นที่นิยมแพร่หลายมักจะประสบปัญหาตะกอนลอยเนื่องจากไขมันที่ย่อยสลายยาก ทำให้การบำบัดไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร

แบคทีเรียสังเคราะห์แสง (photosynthetic bacteria) เป็นกลุ่มหนึ่งของจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดีภายใต้สภาวะไร้อากาศ หากมีการกวนภายในถังจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดและโอกาสในการสัมผัสแสงและน้ำเสียของจุลินทรีย์ ทั้งนี้หากอาศัยการแยกตะกอนจุลินทรีย์โดยใช้เมมเบรน (membrane) แบคทีเรียสังเคราะห์แสงจะถูกกักไว้ภายในถังปฏิกรณ์ ระบบจึงสามารถรับปริมาณสารอินทรีย์ได้เพิ่มขึ้น นอกจากนั้นยังช่วยประหยัดพื้นที่ในการสร้างถังตกตะกอน และไม่เกิดปัญหาเรื่องตะกอนจมตัวยากอีกด้วย

การวิจัยในครั้งนี้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตนมในสภาวะไร้อากาศโดยใช้แบคทีเรียสังเคราะห์แสงในการย่อยสลาย และเมมเบรนเป็นตัวแยกน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วออกจากตะกอน ซึ่งเป็นการช่วยลดพื้นที่ในการสร้างถังตกตะกอน สามารถขจัดปัญหาเรื่องการตกตะกอนยาก และยังส่งผลให้ระบบสามารถรับปริมาณสารอินทรีย์ได้สูงขึ้นด้วย

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตนม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
2. เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ของการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตนม โดยแบคทีเรียสังเคราะห์แสง (photosynthetic bacteria) ทำการทดลองด้วยระบบจำลองในห้องปฏิบัติการ (lab scale) ด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบมีเมมเบรนจมตัว
3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพ และสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตนม โดยการทำแบบจำลองใช้ปฏิกิริยาสังเคราะห์แสงของแบคทีเรีย ชนิด purple non-sulfur และเลี้ยงประชากรจุลินทรีย์ในระบบถังปฏิกรณ์แบบมีเมมเบรนจมตัว

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

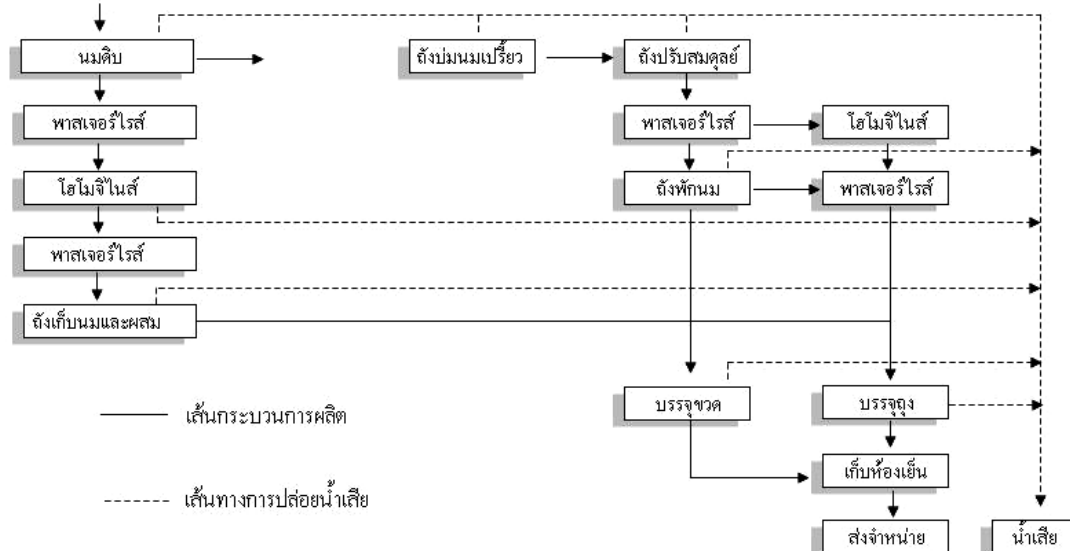
1. การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการใช้แบคทีเรียสังเคราะห์แสงกลุ่ม PnSB ในการบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตนม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
2. ค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ ใช้ในการออกแบบและควบคุมระบบ
3. สามารถนำระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้แสงอาทิตย์โดยแบคทีเรียสังเคราะห์แสง ร่วมกับการใช้เมมเบรน เพื่อเป็นระบบต้นแบบสำหรับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตนม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การตรวจเอกสาร

1. กระบวนการผลิตและคุณลักษณะน้ำเสียจากโรงงานผลิตนม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โรงงานผลิตนมมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ตั้งอยู่ที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต บางเขน ผลิตนมสดปรุงแต่งพาสเจอร์ไรส์ และนมเปรี้ยว มีอัตราการผลิต 10-14 ตันต่อวัน ในการผลิตนมพาสเจอร์ไรส์คือนมโคที่ผ่านกรรมวิธีฆ่าเชื้อด้วยความร้อนไม่ต่ำกว่า 63 องศาเซลเซียส และคงที่อยู่ที่อุณหภูมินี้ไม่น้อยกว่า 30 นาที หรือทำให้ร้อนไม่ต่ำกว่า 72 องศาเซลเซียส และคงที่อยู่ที่อุณหภูมินี้ไม่น้อยกว่า 16 วินาที แล้วทำให้เย็นลงทันทีที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ทั้งนี้จะผ่านกรรมวิธีทำนมสดให้เป็นเนื้อเดียวกันหรือไม่ก็ได้ โดยนำนมโคดิบมาจากสหกรณ์โคนมหนองโพ อสค แลพฟาร์มโคนม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อผ่านกระบวนการผลิตแล้วนำมาบรรจุในบรรจุภัณฑ์ขนาด 200 ซีซี และบรรจุขวดพลาสติก 250 ซีซี เก็บในห้องเย็น ถังนึ่งนมที่ผลิตออกมาจะบรรจุลงถาดพลาสติก ถาดละ 18 ถัง แล้วนำไปเก็บในห้องเย็นอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสรอการจำหน่ายต่อไป (ทองยศ, 2535) ภาพที่ 1 แสดงกระบวนการผลิตนมของโรงงานผลิตนม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นมสดจากหนองโพ อลล.
และฟาร์ม
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการผลิตและแหล่งน้ำเสียของโรงงานผลิตนม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ที่มา: สุชาติ (2538)

1.1 การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตนม

น้ำเสียจากกระบวนการผลิตนมมีทั้งสารอินทรีย์ทั่วไป และน้ำมันและไขมันเป็นองค์ประกอบด้วยซึ่งเป็นสารที่ย่อยสลายได้ยากเมื่อเปรียบเทียบกับสารอินทรีย์อื่นๆ ซึ่งระบบทั่วไปที่โรงงานมักใช้ในการบำบัดน้ำเสียประเภทนี้คือ ระบบแอกติเวเตดสลัดจ์ ระบบนี้ไม่สามารถย่อยสลายน้ำมันและไขมันซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของน้ำเสียประเภทนี้ได้เพียงพอ อีกทั้งน้ำมันและไขมันยังก่อให้เกิดปัญหาตะกอนลอย ขึ้นกับระบบแอกติเวเตดสลัดจ์อีกด้วย ซึ่งมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง (สุชาติ, 2538)

น้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีน้ำมันและไขมันเป็นองค์ประกอบนั้น เป็นปัญหาในการบำบัดเนื่องจากน้ำมันและไขมันเหล่านี้เป็นสารที่ย่อยสลายได้ยาก และจากการศึกษาของ Loehr and Roth (1968) พบว่าน้ำมันและไขมันสามารถย่อยสลายได้เพียงร้อยละ 23-52 ของสารอินทรีย์ทั้งหมดในน้ำเสีย

น้ำมันและไขมันก่อให้เกิดปัญหาแก่กระบวนการบำบัดน้ำเสียของระบบแอกติเวเตดสลัดจ์ ซึ่งน้ำเสียเหล่านี้มักมาจากโรงงานที่มีผลิตภัณฑ์ประเภทอาหาร น้ำมันและไขมันเหล่านี้เป็นสารไตรกลีเซอไรด์ (triglycerides) มีแหล่งกำเนิดจากพืชและสัตว์ (Suwasa, 1990)

กระบวนการย่อยสลายไตรกลีเซอไรด์ในระบบแอกติเวเตดสลัดจ์มี 2 ขั้นตอน คือ การไฮโดรไลซิส (hydrolysis) และการออกซิเดชัน (oxidation) ในขั้นตอนแรกไตรกลีเซอไรด์ จะถูกไฮโดรไลซิส โดยเอนไซม์ไลเปส (lypase) กลายเป็นกรดไขมันอิสระ ขั้นตอนที่สอง กรดไขมันอิสระเหล่านี้ถูกออกซิไดซ์จนกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และ น้ำ น้ำมันและไขมันถูกย่อยสลายได้ช้าเมื่อเทียบกับสารอินทรีย์อื่นๆ ในการบำบัดแบบแอกติเวเตดสลัดจ์ (Hsu *et al.*, 1983) จากการศึกษาของ Novak and Kraus (1972) พบว่าในระบบแอกติเวเตดสลัดจ์อัตราการย่อยสลายสูงสุดสำหรับกรดไขมันอิ่มตัวที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ 16-18 ตัว นั้นช้ากว่าการย่อยสลายของกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบที่เท่ากันอย่างเห็นได้ชัด

2. แบคทีเรียสังเคราะห์แสง

สิ่งมีชีวิตที่สามารถสังเคราะห์แสงได้พบได้ทั่วไปในธรรมชาติ พบมากในแหล่งน้ำที่แสงสามารถส่องถึงและบนหน้าดิน และสามารถดำรงชีวิตในสภาวะไร้อากาศได้ มีรงควัตถุคือแบคทีริโอคลอโรฟิลล์ (bacteriochlorophyll) และ คาโรทีนอยด์ (carotenoid) การสังเคราะห์แสงนั้นพบได้ในสิ่งมีชีวิต 3 จำพวกคือ แบคทีเรียสังเคราะห์แสง สาหร่าย และพืช (Staley, 1989)

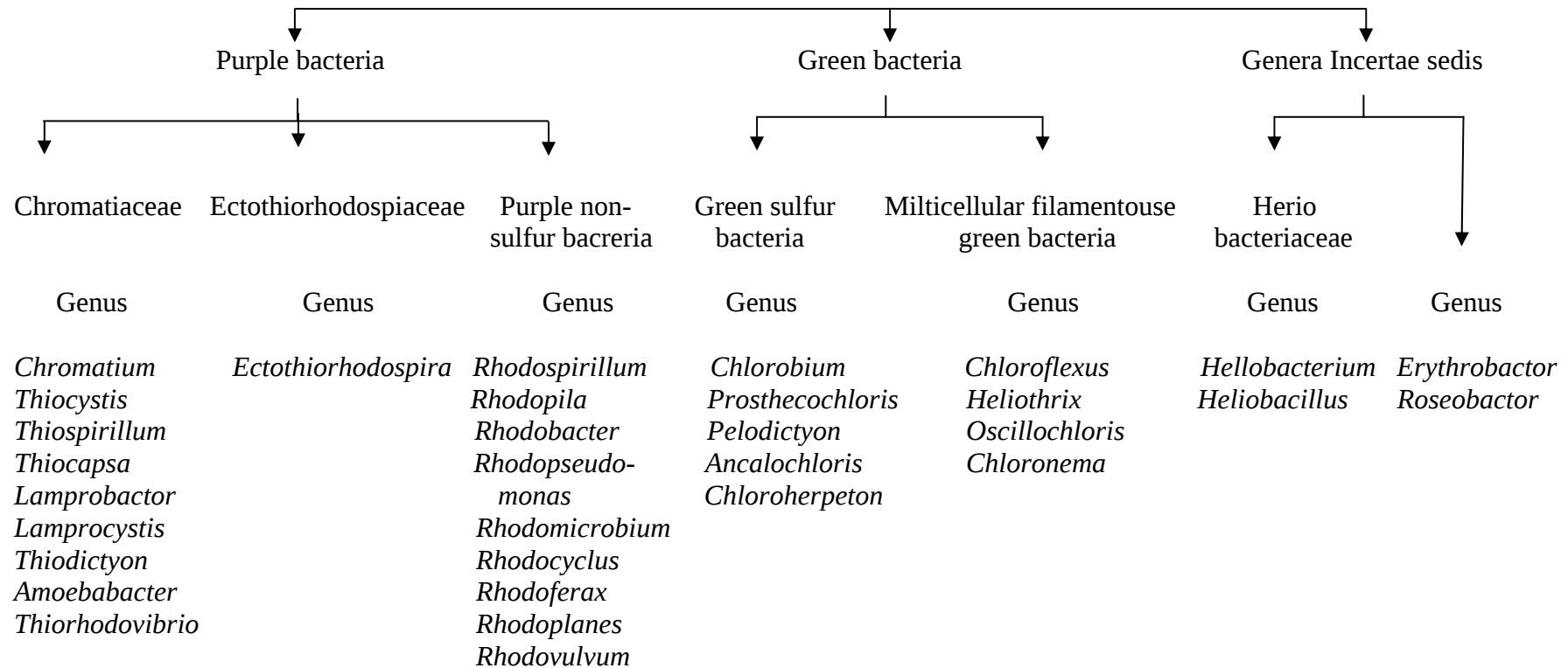
purple non-sulfur bacteria (PnSB) เป็นแบคทีเรียสังเคราะห์แสงจำพวกหนึ่งพบได้ทั่วไปในสิ่งแวดล้อมทั้งในน้ำจืด น้ำเค็ม และตามหน้าดินที่มีความชื้น สามารถดำรงชีวิตได้ดีในน้ำ หรือสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของเหลว มีออกซิเจนละลายอยู่ต่ำ PnSB ตามแหล่งน้ำจะไม่ส่งผลกระทบต่อเกิดการเปลี่ยนสีของแหล่งน้ำ (color bloom) ในขณะที่หากแหล่งน้ำใดมีแบคทีเรียสังเคราะห์แสงพวก purple sulfur bacteria (PSB) อยู่จะทำให้แหล่งน้ำมีสีแดง PnSB เจริญเติบโตในที่แสงส่องถึงและเป็นสภาวะไร้อากาศ (Staley, 1989) สาเหตุที่เรียกแบคทีเรียชนิดนี้ว่า “non-sulfur” เนื่องจากไม่สามารถใช้ซัลไฟด์เป็นตัวให้อิเล็กตรอนในกระบวนการรีดักชันคาร์บอนไดออกไซด์ในการสร้างเซลล์ได้ (Madigan *et al.*, 2000)

PnSB จำแนกอยู่ในพวก anoxygenic phototrophic bacteria และแบ่งออกเป็น 9 จินัส แสดงในภาพที่ 2 (Sasikala and Ramana, 1995)

2.1 ลักษณะโครงสร้าง (Morphology)

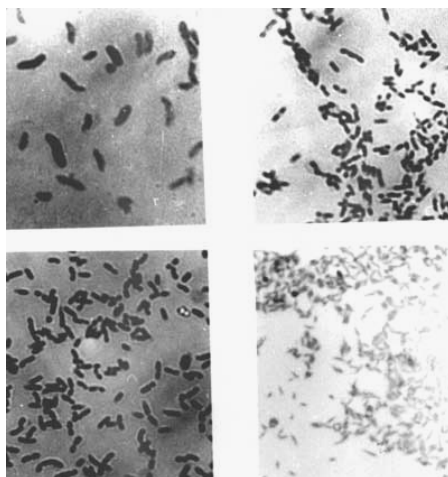
แบคทีเรียสังเคราะห์แสงเป็นสิ่งมีชีวิตเซลล์เดี่ยว ที่ทั้งรูปร่างแบบทรงกลม แบบแท่ง สั้นยาว และแบบเกลียว แสดงดังภาพที่ 3 แบคทีเรียสังเคราะห์แสงในกล้องจุลทรรศน์ แสดงให้เห็นรูปร่างของเซลล์ เคลื่อนที่โดยใช้แฟลกเจลล่า (flagella) เซลล์ติดแกรมลบ มีรงควัตถุประกอบด้วยแบคทีรีโอคลอโรฟิลล์ (bacteriochlorophyll) และแคโรทีนอยด์ (carotenoid) ซึ่งสีของเซลล์เป็นสีเหลืองอมน้ำตาล (yellowish – brown) บางเซลล์เป็นสีแดง แบคทีเรียสังเคราะห์แสงเจริญเติบโตภายใต้สภาวะไร้อากาศ เมื่อให้แสงสว่างแก่เซลล์จะเกิดการสังเคราะห์แสงแบบใช้แสง (photosynthetic metabolism) (Zhou and Xie, 1987) และสามารถตรึงไนโตรเจนได้ ตารางที่ 1-3 แสดงลักษณะโครงสร้างของแบคทีเรียสังเคราะห์แสง PnSB ภาพที่ 4 แสดงภาพผ่านกล้องจุลทรรศน์ของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงกลุ่ม PnSB

Anoxygenic Phototrophic Bacteria



ภาพที่ 2 การจำแนกแบคทีเรียในกลุ่ม anoxygenic phototrophic bacteria

ที่มา: Sasikala and Ramana (1995)



ภาพที่ 3 รูปร่างของแบคทีเรียสังเคราะห์แสง แสดงผลผ่านกล้องจุลทรรศน์
ที่มา: Muriel E Rhodes Roberts (2002)

แบคทีเรียสังเคราะห์แสงกลุ่ม PnSB



ภาพที่ 4 แบคทีเรียสังเคราะห์แสงกลุ่ม PnSB แสดงผลผ่านกล้องจุลทรรศน์
ที่มา: Honda (2005)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของแบคทีเรียกลุ่ม phototrophic สปีชีส์ *Rhodospirillum* และแบคทีเรียในกลุ่ม PnSB

Genus	<i>Rhodospirillum</i>		<i>Phaeospirillum</i>		<i>Rhodociata</i>	<i>Rhodovibrio</i>		<i>Rhodospira</i>	<i>Roseo- spirillum</i>	<i>Roseospira</i>	<i>Rhodo- thalsassium</i>	<i>Rhodopila</i>
Species	<i>Rsp. rubrum</i>	<i>Rsp. photo- metricum</i>	<i>Phs. Fulvum</i>	<i>Phs. molis- chianum</i>	<i>Rdi. centenaria</i>	<i>Rhv. salinarum</i>	<i>Rhv. sodomensis</i>	<i>Rhv. trueperi</i>	<i>Reo. pavum</i>	<i>Rhv. mediosalina</i>	<i>Rts. salexigens</i>	<i>Rpi. globiformis</i>
Charateristics												
Cell diameter (um)	0.8-0.1	1.1-11.5	0.5-0.7	0.7-1.0	1.0-2.0	0.8-0.9	0.6-0.7	0.6-0.8	0.4-0.6	0.8-1.0	0.6-0.7	1.6-1.8
ICM	Vescicle	Stacks	Stacks	Stacks	Lamelle	Vescicle	Vescicle	Vescicle	Lamelle	Vescicle	Lamelle	Vescicle
Motility	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Color	Red	Brown	Brown	Brown	Pink	Red	Pink	Beige	Pink	Pink	Red	Purple-red
Vitamin required	b	n	paba	aa	b,B ₁₂	c, n	c, n	b, t, pan	o	t, paba, n	glu	b, paba
Aerobic dark growth	+	-	-	-	+	+	+	-	+	(+)	+	(+)
Oxidation of sulfide	+	-	-	-	o	-	o	+	+	+	-	-
Salt requirement	None	None	None	None	None	4-6% (3-24)	10-14% (8-18)	2% (0.5-5)	1-2	4-7% (0.5-1.5)	6-8% (5-20)	None
Optimal temperature	30-35	25-30	25-30	30	40-45	42	35-40	25-30	30	30-35	40	30-35
Optimal pH	6.8-7.0	6.5-7.5	7.3	7.3	6.8	7.5-8.0	7.0	7.0-7.5	7.9	7.0	6.6-7.4	4.8-5.0
Habitat	Fresh water	Fresh water	Fresh water	Fresh water	Fresh water warm samplings	Saltern	Salt lakes	Marine sediments	Marine sediments	Salty springs	Saltern	Fresh water acidic springs

ที่มา: Imhoff (2001)

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของแบคทีเรียในกลุ่ม phototrophic สีปัสั *Rhodopseudomonas* และแบคทีเรียในกลุ่ม PnSB

Genus	<i>Rhodopseudomonas</i>			<i>Rhodoblastus</i>	<i>Rhodoplasmas</i>		<i>Blastochloris</i>	<i>Rhodomicrobium</i>	<i>Rhodobium</i>		
Species	<i>Rps. palustris</i>	<i>Rps. julia</i>	<i>Rps. aryptolactis</i>	<i>Rbl. acidophilus</i>	<i>Rpl. roseus</i>	<i>Rpl. elegans</i>	<i>Blc. viridis</i>	<i>Blc. sulfoviridis</i>	<i>Rmi. vanniellii</i>	<i>Rbi. arientis</i>	<i>Rbi. marinum</i>
Charateristics											
Cell diameter (um)	0.6-0.9	1.0-1.5	1	1.0-1.3	1	0.8-1.0	0.6-0.9	0.5-0.9	1.0-1.2	0.7-0.9	0.7-0.9
Type of budding	Tube	Sessile	Sessile	Sessile	Sessile	Tube	Tube	Sessile	Tube	Sessile	Sessile
Rosett formation	+	+	+	-	-	+	+	-	Large cell aggregates	+/-	-
Internal membrane system	Lamellae	Lamellae	Lamellae	Lamellae	Lamellae	Lamellae	Lamellae	Lamellae	Lamellae	Lamellae	Lamellae
Motility	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Color of cultures	Brown-red to red	Pink	o	Red to orange red	Pink	Pink	Green to olive-green	olive-green	Orange-brown to red	Pink to red	Pink to red
Bacteriochlorophyll	a	a	a	a	a	a	b	b	a	a	a
Sail requirement	None	o	None	None	None	None	None	None	None	4-5%	1-5%
Optimum pH	6.9	6	6.8-7.2	5.5-6.0	7.0-7.5	7.0	6.5-7.0	7.0	6	7.0-7.5	6.9-7.1
Optimum temperature	30-37	25-35	40	25-30	30	30-35	25-30	28-30	30	30-35	25-30
Aerobic dark growth	+	+	+	+	+	+	(+)	(+)	+	+	(+)
Denitrification	+/-	-	o	-	+	+	-	-	o	+	-
Photoautotrophic growth with	H ₂ , TS, Sulfide	Sulfide, S ⁰	-	H ₂	TS	TS	-	TS, Sulfide	H2, Sulfide	TS	Sulfide
Vitamin required	Paba (biotin)	None	B ₁₂ , niacin, paba	None	Niacin	Thiamin, paba	Biotin, paba	Biotin, paba	None	Biotin, paba	o
Utilization of: Benzoate	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Citrate	+/-	-	o	+	+	+	+/-	-	-	-	+/-
Formate	-	+	o	+	-	-	-	-	+/-	-	+
Tartate	-	-	o	-	+	+	-	-	-	-	-
Glucose	-	+	-	-	-	-	(+)	+	-	+	+
Thiosulfate	+	o	o	-	+	+	-	+	-	+	-
Hydrogen	o	+	+	+	-	o	-	+	-	+	+
Thiosulfate	-	-	-	-	+	o	+	+	+	+	+
Sulfide	+	+	o	-	-	-	-	+	+	-	(+)
Mol% G+C of DNA	64.8-66 (Bd)	63.5	68.8	62.2-66.8(Bd)	66.8 (HPLC)	9.6-69.7 (HPLC)	66.3-71.4 (Bd)	67.8-68.4 (Bd)	61.8-63.8 (Bd)	65.2-65.7 (HPLC)	62.4-64.4 (HPLC)

ที่มา: Imhoff (2001)

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของแบคทีเรียในกลุ่ม phototrophic สปีชีส์ *Rhodobacter* และแบคทีเรียในกลุ่ม PnSB

Genus	<i>Rhodobacter</i>					<i>Rhodobaca</i>		<i>Rhodovulum</i>				
Species	<i>Rba.</i> <i>azotoformans</i>	<i>Rba.</i> <i>blasticus</i>	<i>Rba.</i> <i>capsulatus</i>	<i>Rba.</i> <i>sphaeroides</i>	<i>Rba.</i> <i>veldkampii</i>	<i>Rhb.</i> <i>bogoriensis</i>	<i>Rhv.</i> <i>strictum</i>	<i>Rhv.</i> <i>sulphidophilum</i>	<i>Rhv.</i> <i>adriaticum</i>	<i>Rhv.</i> <i>euryhalinum</i>	<i>Rhv.</i> <i>iodosum</i>	<i>Rhv.</i> <i>robiginosum</i>
Characteristics												
Cell diameter (um)	0.6-0.1	0.6-0.8	0.5-1.2	2.0-2.5	0.6-0.8	0.8-1.0	0.6-1.0	0.6-0.9	0.5-0.8	0.7-1.0	0.5-0.8	0.5-0.8
Motility	+	-	+	+	-	+	+	+	-	+	-	-
Internal membrane system	Vesicle	Lamelle	Vesicle	Vesicle	Vesicle	Vesicle	Vesicle	Vesicle	Vesicle	Vesicle	Vesicle	Vesicle
Cell division	Binary fission	Budding	Binary fission	Binary fission	Binary fission	Binary fission	Binary fission	Binary fission	Binary fission	Binary fission	Binary fission	Binary fission
NaCl required (%)	-a	-	-a	-a	-	1-2	0.8-1.0	1-6	2.5-7.5	0.5-1.2	2.5-5	2.5-5
Sulfate assimilated	+	+	+	+	-	o	+	+	-	-	-	-
Oxidation product of sulfide	S ⁰	-	S ⁰	S ⁰	S ⁰ / sulfate	o	sulfate	sulfate	S ⁰ / sulfate	S ⁰ / sulfate	+	+
Aerobic dark growth	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+
Vitamin required	b, n, t	b, n, t, B ₁₂	t, (b, n)	b, t, n	b, pabe, t	b, n, [B ₁₂]	b, pabe, t	b, n, pabe, t	b, t	b, n, pabe, t	b, n	b, n, B12
Utilization of: formate	+	-	+	-	-	-	+	+	+	+/-	-	-
Citrate	o	+	+/-	+	-	-	+	-	-	-	-	-
Tartate	-	-	-	+	-	o	(+)	-	-	-	o	o
Mannitol	+	+	+/-	+	-	+	-	+/-	-	+/-	+	+
Glycerol	+	+	-	+	-	o	-	+	+	+	-	-
Ethanol	o	-	-	+	-	-	-	+/-	+	+/-	-	-
Hydrogen	o	+	+	+	-	o	-	+	-	+	+	+
Thiosulfate	-	-	-	-	+	o	+	+	+	+	+	+
Ferrous iron	o	o	o	o	o	o	o	-	-	-	+	+
Mol% G+C of DNA	59.5-70.2 (HPLC)	65.3 (Bd)	65.5-66.8 (Bd)	68.4-69.9 (Bd)	54.4-67.5 (Tm)	58-59	57.3-67.7 (HPLC)	66.3-66.6 (HPLC)	52.1-68.6 (Tm)	64.9-66.7 (Tm)	66 (HPLC)	69 (HPLC)

ที่มา: Imhoff (2001)

2.1 การสันดาป (Metabolism)

โดยทั่วไปคาร์บอนที่จุลินทรีย์ใช้ในการสร้างเซลล์ได้จากสารอินทรีย์ และคาร์บอนไดออกไซด์จึงแบ่งจุลินทรีย์ออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ จุลินทรีย์ที่ใช้สารอินทรีย์ในการสร้างเซลล์เรียกว่าเฮเทอโรโทรป (heterotroph) และจุลินทรีย์ที่ใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในการสร้างเซลล์เรียกว่าออโตโทรป (autotroph)

การเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารอินทรีย์ภายในเซลล์ เป็นขบวนการเจริญพันธุ์ ซึ่งต้องการพลังงาน จุลินทรีย์พวกออโตโทรปต้องการพลังงานในการสร้างเซลล์มากกว่าจุลินทรีย์พวกเฮเทอโรโทรป

แหล่งพลังงานที่จำเป็นในการสร้างเซลล์ได้จาก แสงอาทิตย์ หรือ ปฏิกิริยาเคมี จุลินทรีย์ที่ใช้แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานเรียกโฟโตโทรป (phototroph) จุลินทรีย์พวกนี้อาจเป็นเฮเทอโรโทรป เช่น ซัลเฟอร์แบคทีเรีย (sulphur bacteria) หรือเป็นออโตโทรป เช่น สาหร่าย หรือแบคทีเรียที่สามารถสังเคราะห์แสงได้ ส่วนจุลินทรีย์ที่ได้รับพลังงานเคมีจากปฏิกิริยาเคมีเรียกคีโมโทรป (chemotroph) ซึ่งอาจเป็นเฮเทอโรโทรป เช่น โปรโตซัว รา และแบคทีเรียส่วนใหญ่ หรือเป็น ออโตโทรป เช่น ไนตริฟายอิงแบคทีเรีย (nitrifying bacteria)

2.2 การสังเคราะห์แสง (photosynthesis)

กระบวนการสังเคราะห์แสงเป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงให้เป็นพลังงานในพันธะเคมี ซึ่งอยู่ในรูปของพลังงานพันธะฟอสเฟตของอะดีโนซีนไตรฟอสเฟต (ATP) (Stainer, 1961) พลังงานแสงจะถูกดูดซึมโดยหนึ่งโมเลกุลของตัวดูดซึมซึ่งก็คือเอนดีน และพลังงานต่อเอนดีนต้องเหมาะสมกับความยาวคลื่นที่ใช้ในการสังเคราะห์แสง รังสีของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงดูดซับแสงได้ดีในช่วง 800-900 นาโนเมตร (Sokatch, 1969)

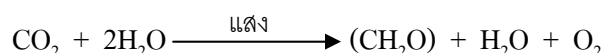
โดยส่วนใหญ่แบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงโดยใช้แหล่งคาร์บอนจากสารอนินทรีย์ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ แต่แบคทีเรียจำพวกแบคทีเรียสังเคราะห์แสงที่มีรงควัตถุสีม่วงสามารถใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอนหลักในการสังเคราะห์แสง ดังนั้น แบคทีเรียสังเคราะห์แสงเป็นแบคทีเรีย

ชนิดโฟโตเฮเทอโรโทป (photoheterotrophs) หรือ โฟโตออร์กานโนโทป (photoorganotrophs) (Suwasa, 1990)

สิ่งมีชีวิตที่สามารถสังเคราะห์แสงได้แบ่งได้ 3 กลุ่ม โดยแบ่งตามแหล่งที่ให้ไฮโดรเจน เพื่อใช้ในการทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับปฏิกิริยาการสังเคราะห์แสง

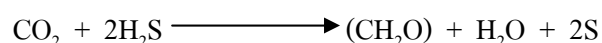
2.2.1 Hydrogen donor : H₂O

พืชทุกชนิดและสาหร่ายบางชนิดใช้น้ำ (H₂O) เป็นตัวให้ไฮโดรเจนในกระบวนการสังเคราะห์แสง (hydrogen donor) ใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอนในการสร้างเซลล์



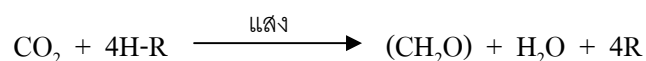
2.2.2 Hydrogen donor : H₂S

กรีนแบคทีเรีย (green bacteria) และ PSB มีแบคทีเรียคลอโรฟิลล์เป็นรงควัตถุแทนที่คลอโรฟิลล์ของพืช ไม่สามารถใช้น้ำเป็นตัวให้ไฮโดรเจนในกระบวนการสังเคราะห์แสงแต่ใช้ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) แทน



2.2.3 Hydrogen donor : Organic compound

PnSB ไม่สามารถใช้ได้ทั้งน้ำ และไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นตัวให้ไฮโดรเจนในกระบวนการสังเคราะห์แสง แต่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่ต้องการย่อย



2.3 รังควัตถุ (pigment)

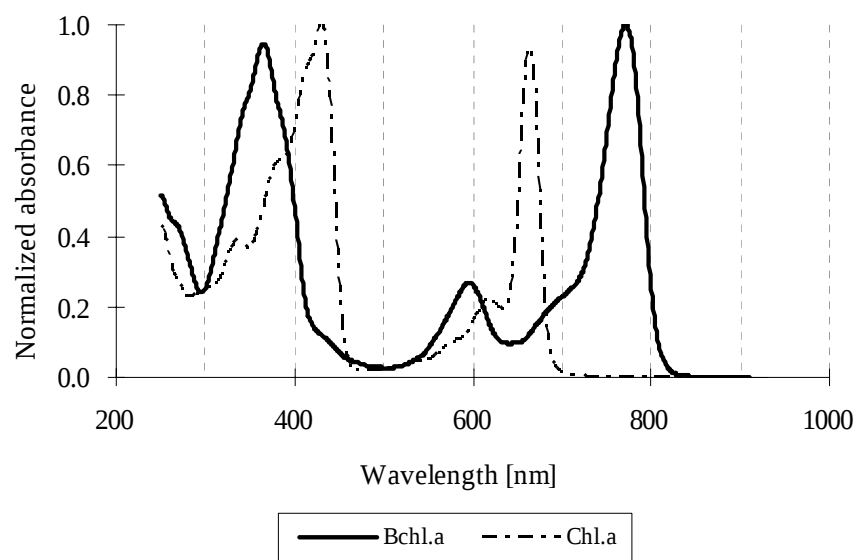
การสังเคราะห์แสงในสภาวะที่ไม่มีอากาศของแบคทีเรียในอาหารที่มีสารอินทรีย์ ซึ่งมีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบจะมีการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้ดี ทั้งนี้กระบวนการสังเคราะห์แสงจะเกิดขึ้นได้ต้องมีคลอโรฟิลล์เป็นตัวดูดกลืนพลังงานจากแสง (Suwasa, 1990)

คลอโรฟิลล์มี 2 ลักษณะ คือ คลอโรฟิลล์ เอ มีสีน้ำเงินแกมเขียว ($C_{55}H_{72}N_4O_5Mg$) และคลอโรฟิลล์ บี สีเขียวแกมเหลือง ($C_{55}H_{70}N_4O_6Mg$) รังควัตถุทั้ง 2 ชนิดนี้ต่างกันที่หมู่เมทิล (CH_3) (Frobisher, 1974)

โครงสร้างของคลอโรฟิลล์ เอ พบได้ในพืชชั้นสูง และพวกสาหร่าย มีสีเขียว เพราะดูดกลืนแสงสีแดง สีน้ำเงิน และสะท้อนสีเขียวมาสู่ตาคน (Brock, 1974)

แบคทีเรียสังเคราะห์แสงมีรงควัตถุที่มีโครงสร้างแตกต่างจากคลอโรฟิลล์ของพืช (chlorophyll) ซึ่งเรียกว่า bacteriochlorophyll ($C_{55}H_{74}O_6N_4Mg$) อยู่ในแบคทีเรียจำพวกแบคทีเรียสังเคราะห์แสงที่มีรงควัตถุสีม่วง (purple photosynthetic bacteria) ซึ่งดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรด (Frobisher, 1974) การดูดกลืนแสงของคลอโรฟิลล์พืชกับ คลอโรฟิลล์ของแบคทีเรียแตกต่างกันดังแสดงในภาพที่ 5

แคโรทีนอยที่อยู่ในแบคทีเรียแตกต่างจากที่อยู่ในพืชหรือสาหร่าย แคโรทีนอยที่อยู่ในแบคทีเรียจำพวกแบคทีเรียสังเคราะห์แสงที่มีรงควัตถุสีม่วงประกอบไปด้วยสารในกลุ่มเมทอกซี (methoxy) ดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 400 และ 800 นาโนเมตร ดังตารางแสดงสีของแคโรทีนอย (Kondrat, 1963)



ภาพที่ 5 แสดงการดูดกลืนแสงของรงควัตถุ Bchl.a และ Chl.a

ที่มา: ดัดแปลงจาก Oelze (1992) and Lichtenthaler (1987)

ตารางที่ 4 สีของแคโรทีนอยในแบคทีเรียกลุ่มแบคทีเรียที่มีรงควัตถุสีม่วง purple bacteria

แคโรทีนอย	สี
Lycopene	Brown-orange
P-841	Purple-orange
Spheroidene	Yellow
Spheroidenon	Red-purple
Spirilloxanthin	Purple
Rhodopene	Brown-orange
Rhodovibrin	Purple-orange
OH-Y	Yellow
P-512	Dark-purple
OH-R	Purple-orange
Demethylated spirilloxanthin	Purple

ที่มา: (Kondrat, 1963)

2.4 แหล่งคาร์บอน (carbon source)

ภายใต้สภาวะไร้อากาศและมีแสงจุลินทรีย์ใช้สารอินทรีย์เป็นตัวให้อิเล็กตรอน และเป็นแหล่งคาร์บอนในการสร้างเซลล์ (Stainer et al., 1970 and Nakajima et al., 1997) สารอินทรีย์ที่จุลินทรีย์ใช้ เช่น กรดอินทรีย์ กรดอะมิโน แอลกอฮอล์ และคาร์โบไฮเดรต (Imhoff, 2001) การศึกษาของ Shipman et al. (1975) ใช้กรดมาลิกเป็นอาหารเลี้ยงเชื้อให้แก่แบคทีเรีย PnSB สปีชีส์ *Rps.gelatinosa* พบว่าน้ำหนักแห้งของมวล PnSB เพิ่มขึ้น โดยมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของกรดมาลิกที่ให้เป็นสารอาหาร อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของกรดมาลิกที่มากกว่า 0.6% จะส่งผลการสังเคราะห์สารอาหาร ไม่มีประสิทธิภาพ

จากการศึกษาของ Nakajima et al. (1997) ใช้กรดไขมันระเหย (Volatile fatty acid : VFA) 5 ชนิด คือ sodium acetate ($\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) sodium propionate ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COONa}$) sodium-n-butyrate ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{COONa}$) n-valeric acid ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{COOH}$) และ sodium n-caproate ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{COONa}$) เป็นสารอาหาร พบว่า acetate เป็นสารอาหารที่ให้อัตราการเจริญเติบโตสูงสุด ส่วนสารอาหาร n-valeric acid และ sodium n-caproate ให้อัตราการเจริญเติบโต น้อยมากเมื่อเทียบกับกรดไขมันระเหยชนิดอื่นๆ

นอกจากนี้แบคทีเรียยังสามารถใช้กรดไขมัน แอลกอฮอล์ ไดคาร์บอกซิลิก (carboxylic) กรดอินทรีย์ คาร์โบไฮเดรต และสารอะโรมาติก (aromatic) เช่น พวобенซีน (benzene) เป็นแหล่งคาร์บอนได้อีกด้วย บางสปีชีส์สามารถใช้ไทโอซัลเฟต (thiosulfate) และสารอนินทรีย์เป็นตัวให้อิเล็กตรอนได้ด้วย ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอนพื้นฐานในการสร้างเซลล์ แบคทีเรียกลุ่มนี้คือ purple sulphur และ green bacteria (Madigan et al., 2000)

2.5 ออกซิเจน (oxygen)

PnSB เป็นแบคทีเรียสังเคราะห์แสงชนิดเดียวที่สามารถอยู่ในสภาวะมีอากาศได้ และสามารถเจริญเติบโตได้ในสภาวะที่มีอากาศแต่ไร้แสงใช้พลังงานจากกระบวนการหายใจ (respiration metabolism) *Rs. Fulvum*, *Rs. Molischianum*, *Rs. Photometricum* และ *Rps. Viridis* อยู่รอดได้ในสภาวะมีอากาศและมีไม่มีแสง แต่ก็ไม่ใช่สภาวะที่เหมาะสมสำหรับแบคทีเรียกลุ่มนี้ ดังนั้นเมื่อทำการเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียกลุ่มนี้จึงมักเลี้ยงในสภาวะไร้อากาศและมีแสงเท่านั้น

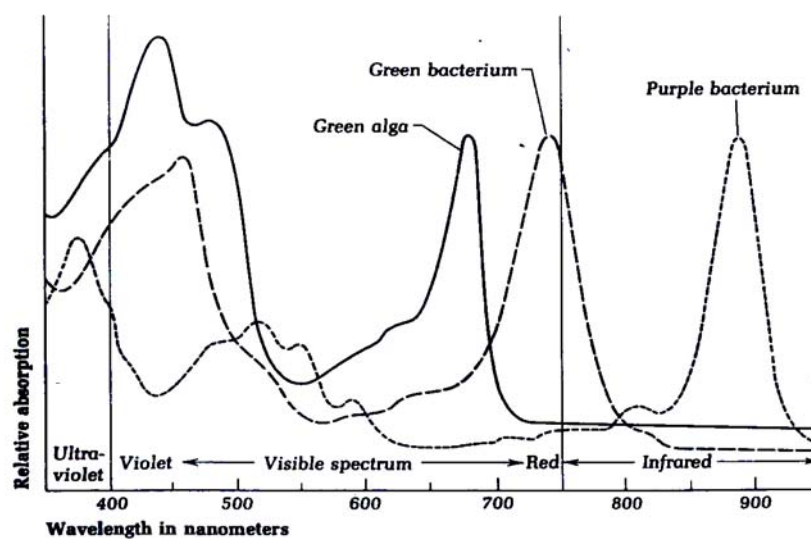
Noparatnaraporn *et al.* (1983) ทำการศึกษารูปแบบการเจริญเติบโตและการใช้สารอาหารซึ่งก็คือแป้ง ของแบคทีเรียกลุ่ม *Rps. gelatinosa* โดยมี 2 สภาวะคือ สภาวะไร้อากาศในที่มืด กับสภาวะมีอากาศในที่มืด ผลการทดลองพบว่ามีการเจริญเติบโต และการใช้สารอาหารเหมือนกัน ในขณะที่เวลาที่ใช้ในการเจริญเติบโตถึงขั้นสูงสุดนั้นใช้เวลาต่างกัน และการศึกษาของ Izu *et al.* (2001) พบว่าหากมีการควบคุมค่า oxidation-reduction potential (ORP) ให้ต่ำกว่า -200 มิลลิโวลต์ โดยใช้การเติมอากาศนั้น ทำให้แบคทีเรียกลุ่ม PnSB เจริญเติบโตมากกว่าแบคทีเรียอื่นๆ ในระบบ

2.6 แสง (Light)

PnSB สามารถเจริญเติบโตได้ทั้งในสภาวะที่มี และไม่มีอากาศเนื่องจากสามารถใช้ออกซิเจนในกระบวนการหายใจได้ แต่อย่างไรก็ตามสามารถเจริญเติบโตได้ดีในที่ที่มีแสง (Stiffler and Gest, 1954) Prasertsan *et al.* (1993) ทำการศึกษาเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย PnSB ที่ความเข้มแสงในช่วง 1000-5000 ลักซ์ พบว่าในสภาวะไร้อากาศในที่ที่มีแสงอัตราการเจริญเติบโตของ PnSB มีค่าสูงสุด จึงสรุปได้ว่าแสงเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตและการผลิตรงควัตถุ (Kobayashi and Kurata, 1978) การเจริญเติบโตในที่ที่มีแสงนั้นจะมีการสร้างรงควัตถุมากกว่าในที่มืด (Kim *et al.*, 1999) เมื่อให้ความเข้มแสงมากขึ้นการเจริญเติบโตและการสร้างรงควัตถุก็เกิดมากขึ้นแบคทีเรียโคลอโรฟิลล์จึงมีปริมาณมากด้วยความเข้มแสงที่มากขึ้นแล้วไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตหรือการสร้างรงควัตถุคือความเข้มแสงอิ่มตัว (Sawada and Roger, 1977)

รงควัตถุของแบคทีเรียที่มีรงควัตถุสีม่วงดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรด ซึ่งต่างจากรงควัตถุของสาหร่ายและพืชทั่วไป ดังแสดงในภาพที่ 6 (Stainer, 1970) หากใช้หลอดอินฟราเรดความยาวคลื่น 800-1000 นาโนเมตร แก่ระบบจะช่วยลดการเจริญเติบโตของสาหร่ายในระบบได้ เนื่องจากรงควัตถุของสาหร่ายดูดกลืนแสงในช่วง 675-685 นาโนเมตร (Van Niel, 1944)

การใช้หลอดอินฟราเรดทำให้การเจริญเติบโตของแบคทีเรียดีกว่าการใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ เนื่องจากหลอดอินฟราเรดให้ความเข้มแสงมากกว่าและให้แสงในช่วงความยาวคลื่นที่ใกล้เคียงกับความต้องการของแบคทีเรียแต่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายและพืชอื่นๆ (Sawada and Rogers, 1977)



ภาพที่ 6 การดูดกลืนแสงของ green algae, green bacterium และ purplebacterium
ที่มา: Stainer et al. (1970)

ได้ทำการเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้าง, รงควัตถุ, การใช้ออกซิเจน, ตัวให้อิเลคตรอน, แหล่งคาร์บอน, สารอาหาร และอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องของ PnSB, PSB และ กรีนซัลเฟอร์แบคทีเรีย (green sulfur bacteria) เพื่อให้เห็นความแตกต่างของแบคทีเรียทั้ง 3 กลุ่ม ไว้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 คุณสมบัติของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงกลุ่ม purple and green photosynthetic bacteria

Microorganisms	Purple non-sulfur bacteria (Athiorhodaceae)	Purple sulfur bacteria (Thiodaceae)	Green sulfur bacteria (Chlorobacteriaceae)
Morphology	Rods and spirilla	Spherical, rods and spirilla; motile and nonmotile	Short rods, motile and nonmotile
Non spore – forming; Gram – negative;			
Pigments	Bacteriochlorophyll and acyclic carotenoids, lycopene derivatives		Bacterioviridine and monocyclic carotenoids of the γ -carotene type
Oxygen evolution during photosynthesis	None	None	None
H – donors	Organic compounds, H ₂ (sulfur compounds)	H ₂ S and other sulfur compounds, H ₂ , and organic compounds	H ₂ S and other sulfur compounds, H ₂ , (organic compounds)
Carbon sources	Organic compounds and CO ₂		CO ₂ , organic compounds
Vitamin requirements	Some vitamins of Group B	None (B ₁₂)	None
Relation to oxygen	Strict anaerobes and facultative aerobes	Strict anaerobes	
Growth in the dark	Facultative aerobes in the presence of O ₂	None	None
H ₂ photoproduction	Yes	Yes	Yes
N ₂ fixation	Yes	Yes	Yes

ที่มา: Kondrat (1963)

3. การบำบัดน้ำเสียโดยแบคทีเรียสังเคราะห์แสง

แบคทีเรียสังเคราะห์แสงมีบทบาทในการบำบัดน้ำเสีย ทั้งน้ำเสียชุมชน (Somiya *et al.*, 1987) และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม (Nishigawa *et al.*, 1987) ของเสียจากสิ่งปฏิกูล (Kitamura *et al.*, 1987) ของเสียจากโรงงานแปรรูปถั่วเหลือง (Shi *et al.*, 1987) และสิ่งขับถ่ายของ วัว (Yu, 1987) จากการศึกษาของ Kitamura *et al.* (1984) พบว่าแบคทีเรียสังเคราะห์แสงกลุ่ม PnSB สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างรวดเร็วในสภาวะไร้อากาศ (BOD ประมาณ 8000-20000 mg/l)

Shi *et al.* (1987) ได้ทำการศึกษาข้อดีของระบบการบำบัดโดยใช้แบคทีเรียสังเคราะห์แสง เช่น รับปริมาณน้ำเสียที่มีความสกปรกได้มาก ใช้พื้นที่ในการสร้างระบบบำบัดน้อย การลงทุนและการควบคุมระบบถูก ควบคุมดูแลระบบง่าย วิธีนี้จึงเป็นวิธีที่ให้ผลคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์และมีประสิทธิภาพสูง ฉะนั้นการบำบัดน้ำเสียทั้งน้ำเสียชุมชนและน้ำเสียอุตสาหกรรมจะพบว่ามีการใช้แบคทีเรียสังเคราะห์แสงในการบำบัดน้ำเสียซึ่งเป็นวิธีการที่เกิดตะกอนน้อย ซึ่งกากตะกอนที่ได้สามารถนำไปทำเป็นอาหารสัตว์ได้ หรือนำไปทำปุ๋ยได้ ในการนำไปเป็นอาหารสัตว์สัตว์นั้นยังสามารถเพิ่มการผลิตไข่ในไก่ได้ และในการทำปุ๋ยให้แฉะขึ้นสั้มยังเพิ่มปริมาณและคุณภาพของผลสั้มได้ (Kobayashi and Tchan, 1973)

Somiya *et al.* (1988) ใช้ PnSB ทำให้ไม่เคลื่อนที่ด้วย Ca-alginate ในการบำบัดน้ำเสียชุมชน พบว่าสามารถลดซีโอดี (COD) ได้ประมาณร้อยละ 80 ซึ่งมีระยะเวลาเก็บกัก 6 ชั่วโมง มีพื้นที่สัมผัส 180 ตร.ม.ต่อลบ.ม. นอกจากนั้นตะกอนที่เกิดขึ้นก็ไม่ต้องกำจัดสามารถนำไปเป็นอาหารปลาได้ และจากการศึกษาของ Sawayama *et al.* (1998) รายงานว่า *Rb. capsulatus* เมื่อถูกทำให้ไม่เคลื่อนที่ในมีเดียที่ทำจากเซลลูโลส และเลี้ยงในสภาวะมีแสง สามารถกำจัดแอมโมเนียและฟอสฟอรัสในน้ำเสียได้ดี

Nakajima *et al.* (2001) ใช้ *Rb. sphaeroides* ในการบำบัดน้ำเสียมีการเจริญเติบโตแบบโฟโตเฮเทอโรโทปพบว่าสามารถเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นโพรตีนและพอลิไฮดรอกซีอัลคานอยด์ (polyhydroxyalkanoate; PHA) เก็บไว้ในเซลล์ได้ซึ่งเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในทางเกษตรกรรมและทางอุตสาหกรรม

4. ค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ของการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียสังเคราะห์แสงกลุ่ม PnSB

การดำรงชีวิตของจุลินทรีย์เป็นปรากฏการณ์ที่สลับซับซ้อน ซึ่งประกอบด้วยเหตุการณ์ต่างๆ หลายอย่างที่เกิดขึ้นพร้อมกัน เหตุการณ์อันแรกคือการใช้สารอาหาร (substrate) ที่มีการเติบโตของจุลินทรีย์ตามมา เหตุการณ์ทั้งสองอย่างนี้มีความสัมพันธ์กันอย่างใกล้ชิด เพราะเซลล์จะได้พลังงานและคาร์บอนเพื่อสร้างเซลล์ใหม่มาจากสารอาหารต่างๆ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการย่อยสลายสารอาหารและอัตราการเจริญเติบโตของเซลล์สามารถแทนด้วยเทอมของอัตราการเพิ่มของจุลินทรีย์ (yield coefficient, Y) ถ้าไม่มีแหล่งพลังงานจากภายนอกอยู่เลยเซลล์จะใช้แหล่งพลังงานสะสมอยู่ภายในเซลล์ เช่น ไกลโคเจน, ไขมัน และพอลิเอชบี (polyhydroxybutyrate; PHB) เป็นต้น เพื่อสร้างพลังงานในการดำรงชีวิตทำให้มวลของเซลล์ลดลง ถ้ามีจุลินทรีย์หลายชนิดปะปนอยู่ร่วมกันเซลล์ที่อยู่ในตระกูลต่ำกว่าจะเป็นอาหารของเซลล์ในตระกูลสูง ลักษณะนี้ทำให้มวลชีวภาพลดลง เซลล์บางตัวเมื่อเติบโตถึงที่สุดแล้วก็ต้องตาย ผลดังกล่าวทำให้มวลชีวภาพบางส่วนเท่านั้นที่มีชีวิต และทำงานได้โดยปกติแล้วมวลชีวภาพส่วนที่มีชีวิตเท่านั้นที่มีความสำคัญ อย่างไรก็ตามเซลล์ที่ตายแล้วก็มีความสำคัญเหมือนกัน เนื่องจากมันสามารถปล่อยสารต่างๆ ภายในตัวให้กับสิ่งแวดล้อม และอาจเป็นสารอาหารสำหรับเซลล์ตัวอื่นที่มีชีวิตอยู่ (มันสิน, 2523)

สมการของโมนอด (Monod's equation) ได้ทำการทดลองศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของจุลินทรีย์ โดยการให้สารอินทรีย์เป็นสารอาหารแก่จุลินทรีย์จากนั้นติดตามการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของเซลล์ในเวลาต่างๆ โดยโมนอดได้สร้างสมการที่ใช้แทนความสัมพันธ์ระหว่างสารอาหาร (S) และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (μ) ไว้ดังนี้ (มันสิน, 2523)

$$\mu = \frac{\mu_m S}{K_s + S} \quad (1)$$

$$\mu = \frac{dX}{Xdt} = \frac{\mu_m S}{K_s + S} \quad (2)$$

สมการโมนอคเป็นจุดเริ่มต้นของจลศาสตร์ของระบบชีวเคมีที่มีแบคทีเรียเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการย่อยสลายสารอินทรีย์ และในปฏิกิริยาที่มีการเปลี่ยนรูปของสารอินทรีย์ (มันสิน, 2523)

สมการของมิเชลิสเมนเตน (Michaelis-Menten) ใช้สำหรับจลนพลศาสตร์ของเอนไซม์ ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับสมการของโมนอค สมการของมิเชลิสเมนเตนแสดงดังนี้ (มันสิน, 2523)

$$U = \frac{kS}{K_m + S} \quad (3)$$

$$U = -\frac{dS}{Xdt} \quad (4)$$

4.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์จลศาสตร์ของระบบการบำบัดสารอินทรีย์ด้วยแบคทีเรีย
ถังแควะหึ่งแสง โดยการทดลองเดินระบบแบบแบตช์ (batch)

การเดินระบบแบบทีแบตช์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ต้องทำการวัดการเปลี่ยนแปลงของสารอาหารและมวลจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์เทียบกับเวลาแล้วนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์จากสมการของมิเชลิสเมนเตน และสมการของโมนอค

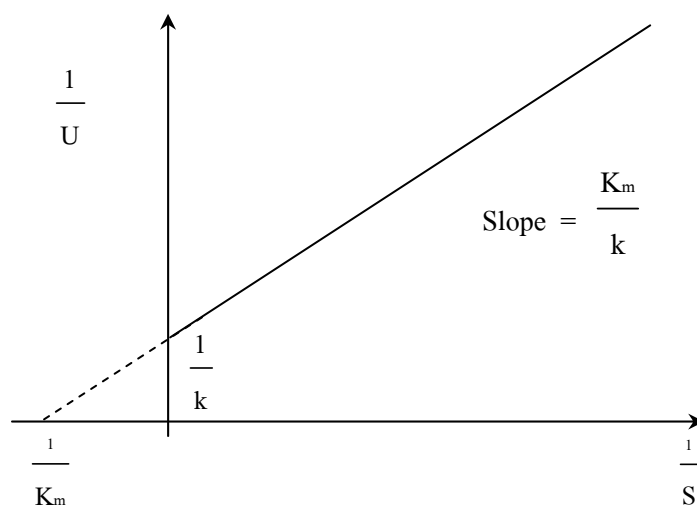
4.1.1 ค่าความเข้มข้นของสารอาหารเมื่ออัตราการย่อยสลายสารอาหารเท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราการย่อยสลายสูงสุด (substrate concentration when the rate of utilization is half the maximum rate: K_m) และค่าคือ อัตราการย่อยใช้สารอาหารสูงสุดของจุลินทรีย์ (maximum rate of substrate utilization: k)

ใช้สมการของมิเชลิสเมนเตน (สมการที่ 3) มาจัดรูปสมการเส้นตรง $y = mx + c$ ใหม่ดังนี้

$$U = \frac{kS}{K_m + S}$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{S} \times \frac{K_m}{k} + \frac{1}{k} \quad (5)$$

จากสมการที่ 4 สามารถนำมาพล็อตกราฟเส้นตรงได้ดังนี้



ภาพที่ 7 แสดงการคำนวณค่า K_m และค่า k จากสมการของมิเชลิสเมนเดน

ที่มา: ดัดแปลงจาก Steve (2006)

จากกราฟจุดตัดแกน X คือค่า $1/K_m$ และความชันของกราฟคือค่า K_m/k ดังนั้นค่า K_m หาได้จากสมการ

$$K_m = \text{ความชันกราฟ} \times k \quad (6)$$

ค่า k หาได้จากสมการ

$$k = \frac{1}{\text{จุดตัดแกน Y}} \quad (7)$$

4.1.2 ค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (yield coefficient : Y) และอัตราการตายของจุลินทรีย์ (decay rate : k_d)

$$\frac{F}{M} = \frac{(S_0 - S)}{Xdt} = \frac{dS}{Xdt} \quad (8)$$

$$\theta_c = \frac{X}{dX/dt} \quad (9)$$

จากสมการที่ 2 จะได้

$$\theta_c = \frac{1}{\mu} \quad (10)$$

$$\frac{1}{\theta_c} = Y\mu - k_d \quad (11)$$

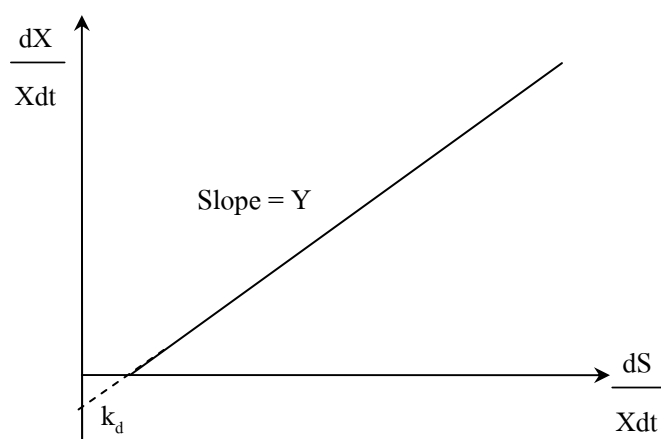
จากสมการที่ 8-10 นำมาเขียนความสัมพันธ์ตามสมการที่ 11 ได้ดังนี้

$$\frac{dX}{dt} = Y \frac{dS}{dt} - k_d X \quad (12)$$

นำสมการที่ 11 หารด้วย X ตลอด เพื่อจัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง $y = mx + c$

$$\frac{dX}{Xdt} = Y \frac{dS}{Xdt} - k_d \quad (13)$$

จากสมการที่ 12 นำมาพล็อตกราฟได้ดังนี้



ภาพที่ 8 แสดงการคำนวณค่า Y และค่า k_d

ที่มา: คัดแปลงจาก Tom and Paul (1996)

จากกราฟจุดตัดแกน Y คือค่า k_d และความชันของกราฟคือค่า Y

4.1.3 ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของจุลินทรีย์ (maximum specific growth rate: μ_m) และค่าความเข้มข้นของสารอาหารเมื่อมีการอัตราการย่อยสลายเท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราการย่อยสลายสูงสุด (half velocity coefficient: K_s)

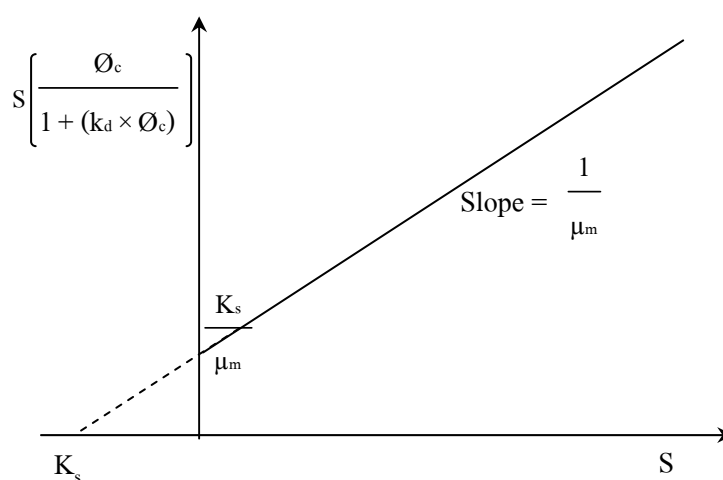
จากสมการที่ 2, 4, 9 และ 12 นำมาหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{\theta_c} &= YU - k_d \\
 &= \mu - k_d \\
 &= \frac{\mu_m S}{K_s + S} - k_d
 \end{aligned} \tag{14}$$

นำมาจัดสมการให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง $y = mx + c$ ดังนี้

$$S \left[\frac{\theta_c}{1 + (k_d \times \theta_c)} \right] = \frac{1}{\mu_m \times S} + \frac{K_s}{\mu_m} \quad (15)$$

จากสมการที่ 14 นำมาพล็อตกราฟได้ดังนี้



ภาพที่ 9 แสดงการคำนวณค่า K_s และค่า μ_m

ที่มา: ดัดแปลงจาก Tom and Paul (1996)

จากกราฟความชันกราฟคือค่า $1/\mu_m$ และจุดตัดแกน Y คือค่า K_s/μ_m ค่า μ_m และค่า K_s สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\mu_m = \frac{1}{\text{ความชันกราฟ}} \quad (16)$$

$$K_s = \text{จุดตัดแกน Y} \times \mu_m \quad (17)$$

4.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ของระบบการบำบัดสารอินทรีย์ด้วยแบคทีเรีย
สังเคราะห์แสง โดยการทดลองเดินระบบแบบเอสบีอาร์ (sequencing batch reactor: SBR) และใช้
ไมโครเมมเบรนแบบแผ่นแยกน้ำออกจากตะกอนจุลินทรีย์

การหาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์โดยการเดินระบบแบบเอสปีอาร์สมการที่นำมา
คำนวณใช้สมการของโมนอด

4.2.1 อัตราการใช้สารอาหารสูงสุด และความเข้มข้นของสารอาหารที่ครั้งหนึ่ง
ของอัตราการเจริญเติบโตสูงสุด

$$\frac{dX}{dt} = QX_o - [Q_w X_w + Q_e X_e] + V[r_g] \quad (18)$$

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

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

$$\frac{(Q_w X_w + Q_e X_e)}{VX} = -Y \frac{dS}{Xdt} - k_d \quad (20)$$

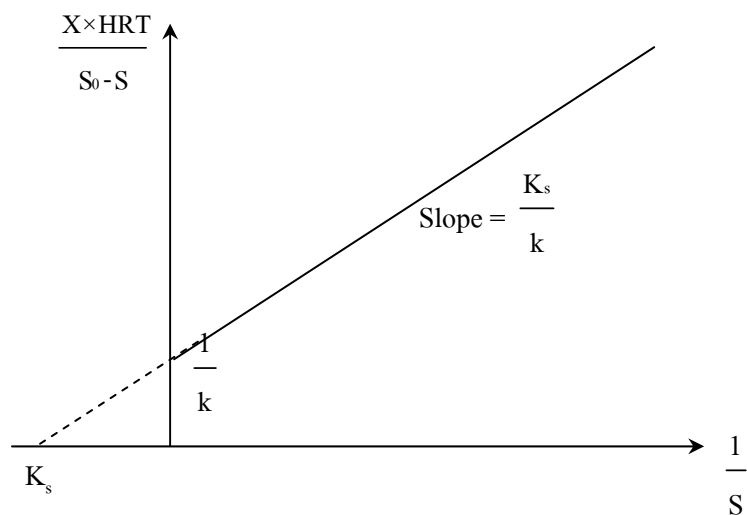
$$\frac{dS}{dt} = \frac{-Q(S_o - S)}{V} = \frac{-(S_o - S)}{HRT} \quad (21)$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{-kXS}{K_s + S} \quad (22)$$

จัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง $y = mx + c$ ดังนี้

$$\frac{X \times HRT}{S_o - S} = \left[\frac{K_s}{k} \times \frac{1}{S} \right] + \frac{1}{k} \quad (23)$$

นำสมการมาพล็อตกราฟได้ดังนี้



ภาพที่ 10 แสดงการคำนวณค่า K_s และค่า k

ที่มา: คัดแปลงจาก Tom D. and Paul A. (1996)

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

$$K_s = \text{ความชันกราฟ} \times k \quad (24)$$

$$k = \frac{1}{\text{จุดตัดแกน Y}} \quad (25)$$

4.2.2 ค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (yield coefficient, Y) และอัตราการตายของจุลินทรีย์ (decay rate, k_d)

สมการที่ใช้คำนวณเป็นสมการเดียวกับการหาค่าค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และอัตราการตายของจุลินทรีย์ของการทดลองแบบแบตช์

5. การใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบมีเมมเบรนในการบำบัดน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสียแบบใช้ถังตกตะกอนทำให้อัตราการบำบัดช้าเพราะหากตะกอนมีขนาดเล็กและความหนาแน่นต่ำจะตกตะกอนได้ช้า วิธีหนึ่งที่น่าสนใจในการแก้ปัญหาคือการใช้เครื่องหมุนเหวี่ยง ซึ่งปรากฏว่ามีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและการดำเนินการสูง

การประยุกต์ใช้ถังชีวภาพ (bioreactor) ร่วมกับเมมเบรนประสบความสำเร็จในการใช้บำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมตั้งแต่ปี 1970 (Goldsmith *et al.*, 1974) การใช้เมมเบรนแยกน้ำกับตะกอนทำให้มวลสารในระบบไม่สูญหายไปกับน้ำและคุณภาพของน้ำที่ออกจากระบบมีคุณภาพดีกว่าระบบธรรมดา ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบมีเมมเบรนสามารถลดต้นทุนการก่อสร้างอันเนื่องมาจากราคาที่ดินเพราะเป็นระบบที่ต้องการพื้นที่น้อย อีกทั้งระบบนี้ไม่ต้องมีการบำบัดตะกอนอีกด้วย ซึ่งช่วยลดค่าใช้จ่ายในการเดินระบบเป็นอย่างมาก (Morimoto *et al.*, 1988)

6. การบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศโดยใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบมีเมมเบรน

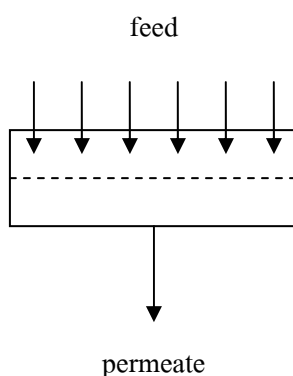
ในการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศมักเป็นถังปฏิกรณ์ถังเดียวไม่มีการหมุนเวียนตะกอนจุลินทรีย์ ดังนั้นค่าอายุตะกอนกับค่าระยะเวลาเก็บกักจึงเท่ากัน ซึ่งเป็นการจำกัดค่าภาระสารอินทรีย์และปริมาณสารอินทรีย์ในระบบ (Pillay *et al.*, 1994) การใช้เมมเบรนเป็นการช่วยให้การควบคุมอายุตะกอนจุลินทรีย์และระยะเวลากักเก็บไม่ขึ้นต่อกัน การประยุกต์ใช้ระบบนี้จึงนำมาใช้กับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสารอินทรีย์สูง เช่น น้ำเสียของกระบวนการกลั่นไวน์ (Ross *et al.*, 1990) น้ำเสียโรงงานน้ำมันปาล์ม (Fakhru'l-Razi and Noor, 1999) และน้ำเสียโรงงานผลิตนม (Li *et al.*, 1985) และน้ำเสียชุมชน (Wen *et al.*, 1999)

การใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบมีเมมเบรนในระบบการบำบัดแบบไร้อากาศนำไปใช้กับระบบถังกรองไร้อากาศ (anaerobic filter) และระบบยูเอเอสบี (upflow anaerobic sludge blanket: UASB) เติมน้ำค่าภาระสารอินทรีย์ที่ให้แก่ระบบเท่ากับ 10 (กก.ซีโอดี ต่อลูกบาศก์เมตร ต่อวัน) น้ำเสียที่ออกจากระบบมีคุณภาพสูงเนื่องจากไม่มีตะกอนจุลินทรีย์ปนออกไปกับน้ำเสีย (Ross *et al.*, 1990) การนำระบบนี้ไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียโรงงานกลั่นไวน์โดยใช้เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration) ทำให้ค่าภาระสารอินทรีย์ของระบบเพิ่มจาก 4 เป็น 11 กก.ซีโอดี ต่อลูกบาศก์เมตร ต่อวัน (Ross *et al.*, 1990) และเพิ่มการบำบัดไขมันสัตว์ (grease) ได้ร้อยละ

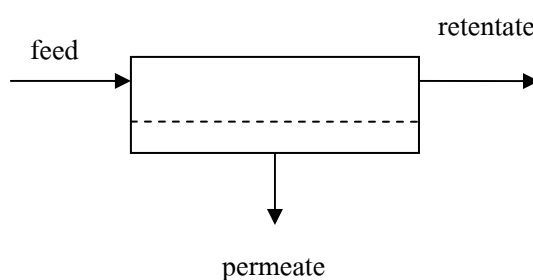
37-99 (Hogetsu *et al.*, 1992) ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบมีเมมเบรนสามารถเพิ่มได้ถึง 50,000 มก.วีเอสเอส ต่อลิตร (Ince *et al.*, 1995)

7. การอุดตันของเมมเบรน

กระบวนการกรองของเมมเบรนมีเส้นทางการไหลของของเหลว 3 ทาง คือ ของเหลวที่เข้าสู่เมมเบรน (feed), ของเหลวที่ผ่านการกรอง (permeate) และของเหลวที่ถูกกักกัน (retentate) หากในกระบวนการกรองไม่มีของเหลวที่ถูกกักไว้เรียกว่าการกรองแบบเดดเอนด์ (dead-end) หรือ ฟูลโฟลว์ (full flow) ดังภาพที่ 11 หากการกรองมีเส้นทางการไหลของของเหลวทั้ง 3 ทางเรียกว่าการกรองแบบครอสโฟลว์ (cross-flow) ดังภาพที่ 12 การกรองในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบเมมเบรนนั้นเป็นการกรองแบบเดดเอนด์ การกรองแบบนี้จะมีโอกาสเกิดการอุดตันของเมมเบรนสูงแบบการอุดตันนี้มีทั้งแบบที่ล้างทำความสะอาดได้ และแบบที่เป็นการอุดตันถาวร การอุดตันถาวรมักเกิดจากอนุภาคคอลลอยด์ไปอุดตันภายในรูพรุนของเมมเบรน อนุภาคคอลลอยด์นี้หากไปอุดตันที่ผิวเมมเบรนเป็นการอุดตันแบบชั่วคราวสามารถทำความสะอาดได้ การอุดตันนี้มีความสัมพันธ์กับค่าอัตราการกรองวิกฤติ (critical flux) ของเมมเบรน (Howell, 1995) การควบคุมอัตราการกรองของเมมเบรนมักควบคุมให้ต่ำกว่าค่าอัตราการกรองวิกฤติ ค่านี้จึงจำเป็นสำหรับการออกแบบและควบคุมระบบเมมเบรน การอุดตันที่ผิวเมมเบรนนี้เกิดจากอนุภาคของแข็งไปเกาะที่ผิวเมมเบรนจนเกิดเป็นชั้นเจลขึ้นที่ผิวเมมเบรน แต่ชั้นเจลนี้มีขีดจำกัดความหนาของชั้นเจลได้ในระดับหนึ่ง ซึ่งไม่สามารถหนากว่านี้ได้หากความดันที่ให้แก่เมมเบรนคงที่ค่าหนึ่งจึงเป็นสาเหตุให้อัตราการกรองของเมมเบรนมีค่าคงที่ที่ความดันนั้นๆ เรียกอัตราการกรองนี้ว่าอัตราการกรองคงที่ (constant flux) (Marcel, 1997)



ภาพที่ 11 แสดงการกรองของเหลวผ่านเมมเบรนแบบ dead-end
ที่มา: ดัดแปลงจาก Marcel (2000)



ภาพที่ 12 แสดงการกรองของเหลวผ่านเมมเบรนแบบ cross flow
ที่มา: ดัดแปลงจาก Marcel (2000)

Kimura (1991) ได้ทำการศึกษาการทำความสะอาดเมมเบรนแต่ละชนิดสำหรับระบบบำบัดแบบไร้อากาศของน้ำเสียชนิดต่างๆ พบว่าส่วนใหญ่เมมเบรนจะถูกทำความสะอาดโดยการล้างด้วยน้ำที่ไหลพุ่ง (flushing) ในระยะเวลานั้นๆ หรือการล้างย้อน (backwashing) แต่บางครั้งการควบคุมระบบที่ใช้เมมเบรนแบบแผ่น (plate and frame) มักเดินระบบในระยะยาวโดยไม่มีการทำความสะอาดเมมเบรน และหากพบว่าเมมเบรนไม่สามารถกรองได้ (Choo and Lee, 1996) หรือค่าฟลูเอชเปลี่ยน (Cadi *et al.*, 1994) แสดงว่าเกิดชั้นเจลของจุลินทรีย์ขึ้นที่ผิวเมมเบรน