บทที่ 5

การเกิด BULKING

การเกิดบัลกิ้ง (bulking) เป็นปัญหาที่สำคัญที่เกิดขึ้นในการเดินระบบบำบัดน้ำเสียแบบจุลินทรีย์แขวนลอยที่มีการเติมอากาศ (aerobic suspended growth microorganisms) โดยทำให้ตะกอนมีความสามารถในการตกตะกอนได้ยาก จนกระทั่งไม่สามารถแยกส่วนที่เป็นน้ำใสออกจากตะกอนได้โดยใช้ถังตกตะกอน ผลที่ตามมาคือ ไม่สามารถควบคุมค่าอายุตะกอน (sludge age) ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ควบคุมการทำงานของระบบได้ จนเป็นเหตุให้ระบบล้มเหลวในที่สุด

5.1 สาเหตุของการเกิดบัลกิ้ง

การเกิดบัลกิ้งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ บัลกิ้งที่ไม่ได้เกิดจากจุลินทรีย์จำพวกเส้นใย (nonfilamentous bulking) และบัลกิ้งที่เกิดจากจุลินทรีย์จำพวกเส้นใย (filamentous bulking) โดยการเกิดบัลกิ้งส่วนใหญ่มักจะมีสาเหตุมาจากจุลินทรีย์จำพวกเส้นใย การเกิดบัลกิ้งทั้งสองชนิดสามารถตรวจสอบได้ง่าย โดยใช้กล้องจุลทรรศน์

1. บัลกิ้งที่ไม่ได้เกิดจากจุลินทรีย์จำพวกเส้นใย (nonfilamentous bulking) เป็นการเกิดบัลกิ้งที่ไม่ค่อยได้พบเห็นกันบ่อยนัก สาเหตุของการเกิดบัลกิ้งโดยจุลินทรีย์ที่ไม่ใช่พวกเส้นใยนี้ ยังเป็นที่ไม่แน่ชัด โดยเชื่อว่าเกิดจากการที่จุลินทรีย์ผลิตสารโปรโตพลาสซึมภายนอกออกมามากเกิน ในถังเติมอากาศที่มีเวลากักน้ำนาน ๆ โดยตะกอนที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นเมือกหรือเจล (jelly-like) ซึ่งในบางครั้งเรียกว่า ไฮดรัส (hydrous)

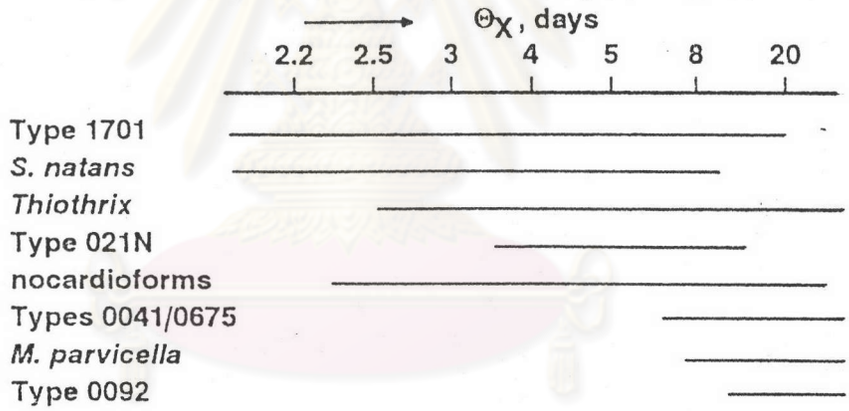
2. บัลกิ้งที่เกิดจากจุลินทรีย์จำพวกเส้นใย (filamentous bulking) เป็นปัญหาสำคัญที่มักพบกันมาก ได้มีการพบจุลินทรีย์จำพวกเส้นใยที่เป็นสาเหตุให้เกิดบัลกิ้งในระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ไม่ต่ำกว่า 30 ชนิด Eikelboom (1977) สาเหตุที่ทำให้จุลินทรีย์จำพวกเส้นใยเติบโตเป็นจุลินทรีย์หลักในระบบบำบัดจนเกิดบัลกิ้งขึ้นมีหลายสาเหตุด้วยกัน สาเหตุของการเกิดบัลกิ้งเนื่องจากแบคทีเรียแบบเส้นใยบางชนิด แสดงไว้ในตารางที่ 5.1

Jenkins (1993) ได้จำแนกปัจจัย (factors) ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จำพวกเส้นใยในกระบวนการแอกทิเวเตดสลัดจ์เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ ปัจจัยทั่วไป (general factors) และปัจจัยจำเพาะ (specific factors)

5.1.1 ปัจจัยทั่วไปได้แก่

- ค่าอายุตะกอน (sludge age) หรือปริมาณสารอาหารต่อจุลินทรีย์ (F/M)
- รูปแบบของถังเติมอากาศ (aeration basin configuration)
- การมีส่วนที่ไม่เติมอากาศ (แอนแอโรบิกหรือแอนนอกซิก) ที่บริเวณส่วนต้นของถังเติมอากาศ (initial unareated zone) ซึ่งมีตะกอนจุลินทรีย์เวียนกลับ และน้ำเสียผสมเข้าด้วยกัน

Wanner (1994) กล่าวว่า ค่าอายุตะกอนเป็นตัวแปรพื้นฐานตัวหนึ่งที่สำคัญ ในการคัดเลือกพันธุ์ของจุลินทรีย์ตัวอย่างเช่น เมื่อลดค่าอายุตะกอนของระบบลง จุลินทรีย์จำพวกโตช้า (slow growing) เช่น จุลินทรีย์จำพวกเส้นใยบางจำพวกดังแสดงในรูป 5.1 จะไม่สามารถเติบโตได้ทัน(washout) ในทางกลับกัน เมื่อมีการเพิ่มค่าอายุตะกอนของระบบขึ้น จะเป็นการเสริมสร้างโอกาสให้จุลินทรีย์จำพวกโตช้าให้สามารถเกิดขึ้นได้ในระบบ ตัวอย่างเช่น ไนตริฟายอิงแบคทีเรีย (nitrifying bacteria) เป็นต้น



รูปที่ 5.1 แสดงช่วงค่าอายุตะกอนที่สามารถพบจุลินทรีย์จำพวกเส้นใยชนิดต่าง ๆ ได้ (Wanner,1994)

5.1.2 ปัจจัยจำเพาะ (specific factors) เช่น

- ความเข้มข้นของออกซิเจนละลาย (DO concentration)
- ความเข้มข้นของอาหารเสริม (nutrients concentration)
- ค่าพีเอช (pH)
- ความเข้มข้นของซัลไฟด์ (sulfide concentration)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- ชนิดและธรรมชาติของสารอินทรีย์เช่นละลายน้ำหรือเป็นอนุภาค หรือสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายหรือยาก
- การเกิดเซลล์ที่พื้นผิว(seeding from surface) เนื่องจากจุลินทรีย์เส้นใยบางชนิด

ดังที่ได้กล่าวในตอนต้น จุลินทรีย์จำพวกเส้นใยมีความสามารถเจริญเติบโตได้ดีในหลายสภาวะด้วยกัน เช่น ที่ค่าปริมาณสารอาหารต่อจุลินทรีย์สูงและต่ำเกินไป (high and low F/M) ค่าออกซิเจนละลายที่สูงหรือต่ำเกินไป (high and low DO) ค่าพีเอชที่สูงหรือต่ำไป (high and low pH) การขาดสารอาหารเสริม (nutrient deficiency) เป็นต้น ดังนั้น การแก้ปัญหาบัลกิ้งจึงจำเป็นต้องทราบถึงที่มาของปัญหา เพื่อให้การแก้ไขเป็นไปอย่างถูกต้อง ตารางที่ 5.1 แสดงตัวอย่างสภาวะต่าง ๆ ที่เป็นสาเหตุให้จุลินทรีย์จำพวกเส้นใยแต่ละชนิดเจริญเติบโตได้ดี

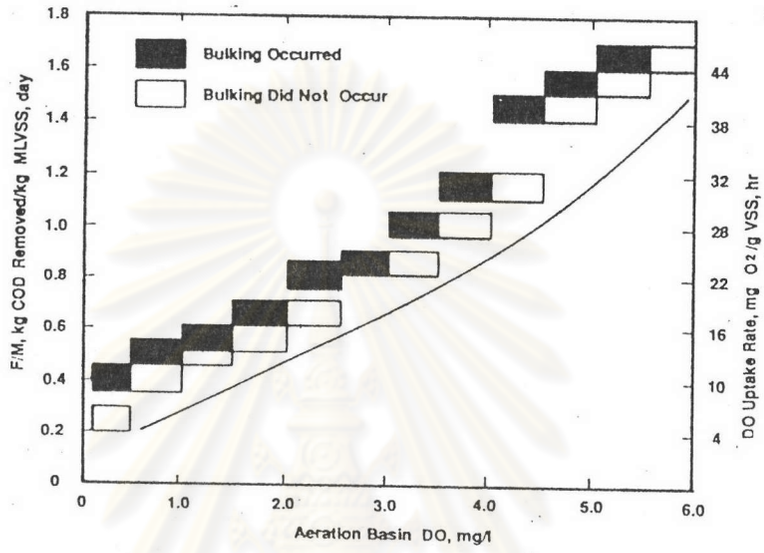
ตารางที่ 5.1 สาเหตุการเกิดบัลกิ้งโดยจุลินทรีย์จำพวกเส้นใยที่สภาวะต่าง ๆ กัน

สภาวะ	ชนิดจุลินทรีย์เส้นใยที่พบ
Low DO	type 1701 , S.natans , H.hydrossis
Low F/M	M.parvicella , H.hydrossis , Nocardia sp. type 021N , 0041 , 0675 , 0092 , 0581 0961 , 0803
Septic waste water/sulfide	Thiothrix sp. , Beggiatoa and type 021N
Nutrient deficiency	Thiothrix sp. , S.natans , type 021N and possibly H.hydrossis and type 0041 and 0675
Low pH	fungi

ที่มา : Jenkin et al.,(1984)

Palm et.al,(1980) อ้างถึงใน Jenkin et.al,(1993) กล่าวว่า การเกิดสภาวะที่มีออกซิเจนละลายน้ำต่ำในถังเติมอากาศในกระบวนการแอกทิเวเตดสลัดจ์ เป็นสาเหตุหนึ่งที่สามารถทำให้ระบบบำบัดเกิดบัลกิ้งได้โดยจุลินทรีย์เส้นใยบางชนิดได้ โดยพบว่า ค่าความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำที่ต้องการให้มี เพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของ *S.natans* (เป็นแบคทีเรียเส้นใยที่เขาทำการศึกษา) เป็นฟังก์ชั่นของค่า F/M โดยที่ค่า F/M สูง ๆ จำเป็นต้องมีค่าออกซิเจนละลายน้ำที่สูงด้วย รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความเข้มข้นออกซิเจนละลายน้ำ (DO concentration) กับค่า F/M ที่ทำให้เกิดบัลกิ้งในแอกทิเวเตดสลัดจ์ที่มีการกวนสมบูรณ์ (completely mixed)

Randall และคณะ (1992) กล่าวว่า การเปลี่ยนแปลงเพียง 5-10% โดยมวลขององค์ประกอบในตะกอนจุลินทรีย์จากพวกที่ไม่ใช่เส้นใย(nonfilamentous) เป็นพวกเส้นใย (filamentous) สามารถทำให้เกิดบัลกิ้งได้ นอกจากนี้ การเกิดบัลกิ้งก็ยังมีความสัมพันธ์กับการมีสารอาหารละลายในถังออกซิก (oxic reactor) โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับสารอาหารละลายจำพวกโมเลกุลต่ำ ๆ



รูปที่ 5.2 แสดงค่าความเข้มข้นออกซิเจนละลายน้ำและ F/M ที่ก่อให้เกิดบัลกิ้งได้ (Palm et al.,1980)

5.2 หลักการควบคุมการเกิดบัลกิ้งโดยใช้ถังคัดพันธุ์ (selectors)

Chudoba (1973b) ได้ศึกษาถึงทฤษฎีจลนพลศาสตร์ (kinetic Theory) ของการคัดพันธุ์ในกลุ่มจุลินทรีย์แบบเชื้อผสม (mixed culture) บนสมการพื้นฐานของโมโนด์ และกล่าวว่า การยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เส้นใยสามารถทำได้โดยการใช้ถังคัดพันธุ์ (selector)

เมื่อพิจารณาจากสมการของโมโนด์ (Monod's Equation)

$$\mu = \frac{\mu m S}{Ks+S} \qquad (5.1)$$

จากสมการที่ 5.1 จะพบว่า ในสภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารสูง ๆ หรือ S >> Ks สมการที่ 5.1 อาจเขียนได้ว่า

$$\mu = \mu m \qquad (5.2)$$

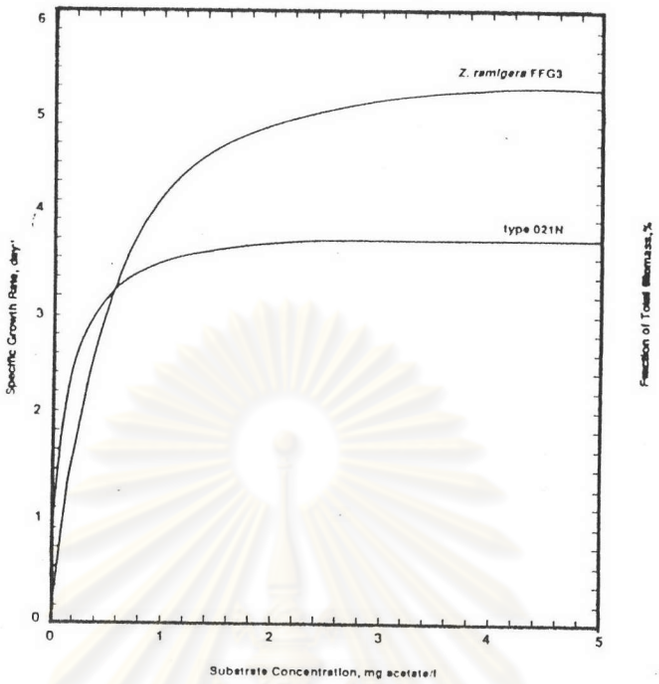
นั่นก็คือ อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (μ) ของจุลินทรีย์ที่ค่าความเข้มข้นของสารอาหารสูง ๆ จะขึ้นอยู่กับค่าอัตราการเจริญเติบโตสูงสุด (μm) โดยจะมีค่าเท่ากับอัตราการเจริญเติบโตสูงสุดของจุลินทรีย์นั้น ๆ และนอกจากนี้ ในสภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารต่ำ ๆ หรือ $S << Ks$ สมการที่ 5.1 อาจเขียนได้ว่า

$$\mu = \frac{\mu m S}{Ks} \qquad (5.3)$$

จากสมการที่ 5.3 นี้ จะเห็นได้ว่า ที่ค่าความเข้มข้นสารอาหารต่ำ ๆ ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะจะขึ้นอยู่กับค่า Ks ทั้งนี้ เนื่องจากค่า μm และ Ks เป็นค่าคงที่ของการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ มีค่าที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นกับชนิดของจุลินทรีย์และลักษณะของสารอาหาร ซึ่งได้แก่ ชนิดขององค์ประกอบของสารอาหารนั้น ๆ และค่าความเข้มข้นของสารอาหาร ดังนั้น ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะนอกจากจะขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ แล้ว ยังมีความสัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นของสารอาหารอีกด้วย

Chudoba (1985) กล่าวว่า จุลินทรีย์ชนิดเส้นใยจะมีค่า μm และ Ks ต่ำกว่าจุลินทรีย์แบบสร้างฟล้อค นั่นคือ เมื่อนำค่าพารามิเตอร์จลน์ทั้งสองค่า คือ μm และ Ks ของแบคทีเรียชนิดสร้างฟล้อคและแบคทีเรียแบบเส้นใย มาสร้างความสัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นของสารอาหารตามสมการของโมโนด์ และเขียนเป็นรูปกราฟ จะได้รูปกราฟที่มีลักษณะเดียวกันกับรูปที่ 5.3 และกล่าวว่า การใช้ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ในระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ที่มีค่าความเข้มข้นสารอาหารต่ำ ๆ และสามารถบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง จะต้องมีจุลินทรีย์จำพวกเส้นใยอยู่เสมอ ในทางตรงข้ามถ้าต้องการลดปริมาณจุลินทรีย์เส้นใยลงก็จำเป็นต้องสร้างสภาวะให้มีค่าความเข้มข้นของสารอาหารสูง ๆ ภายในถังเติมอากาศ ทั้งนี้ น้ำที่ผ่านการบำบัดก็จะมีคุณภาพต่ำ การนำข้อดีของการไหลแบบพลักโฟล์ว (plug Flow) มาใช้กล่าวคือ มีการเกิดสภาพความแตกต่างของความเข้มข้นของสารอาหาร (substrate concentration gradient) ขึ้นตามความยาวของตัวถัง จะเป็นการช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จำพวกเส้นใยได้

Van Niekerk et al., (1987) ได้แยกแบคทีเรียชนิด *Zoogloea ramigera* ซึ่งเป็นแบคทีเรียแบบสร้างฟล้อค (floc forming bacteria) กับ Type 021N ซึ่งเป็นแบคทีเรียแบบเส้นใย (filamentous) นำมาทดลองเลี้ยงโดยใช้อะซีเตด (acetate) เป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอนในแบบจำลองของกระบวนการแอกทิเวเตดสลัดจ์ และได้สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างอัตราการเติบโตจำเพาะ (specific growht rate) ของ *Z.ramigera* และ Type 021N ที่ค่าความเข้มข้นของสารอาหารต่าง ๆ กัน ดังแสดงในรูปกราฟที่ 5.3 โดยจากกราฟจะเห็นได้ว่า ที่ค่าความเข้มข้นสารอาหารต่ำ ๆ แบคทีเรีย Type 021N จะมีค่าอัตราการเติบโตจำเพาะสูงกว่า *Z.ramigera* ในทางกลับกัน ที่ค่าความเข้มข้นสารอาหารสูง ๆ *Z.ramigera* จะมีอัตราการเติบโตจำเพาะที่สูงกว่า



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงอัตราการเติบโตจำเพาะของ *Z.ramigera* และ Type 021N ที่ค่าความเข้มข้นของอะซิเตตต่าง ๆ กัน (Van Niekerk,et al.,1988)

Chudaba (1985) ได้กล่าวถึง หลักพื้นฐานประการหนึ่งในการควบคุมการเกิดตะกอนไม่จมตัว (sludge bulking) ว่า กลุ่มจุลินทรีย์ที่สามารถสะสม (accumulate) หรือใช้สารอาหารได้มากที่สุดภายในถังคัดพันธุ์ (selector) หรือบริเวณส่วนที่เป็นทางเข้าของน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัดและมีเวลาอย่างเพียงพอในการเผาผลาญสารอาหาร (exhaustion) ที่สะสมไว้ จะเป็นกลุ่มจุลินทรีย์หลักในระบบ (dominant)

5.3 ชนิดและรูปแบบของถังคัดพันธุ์

ถังคัดพันธุ์สามารถแบ่งออกตามลักษณะของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของคาร์บอนได้เป็น 3 ประเภทคือ

1. ถังคัดพันธุ์แบบแอโรบิก (aerobic selector)
2. ถังคัดพันธุ์แบบแอนอคซิก (anoxic selector)
3. ถังคัดพันธุ์แบบแอนแอโรบิก (anaerobic selector)

5.3.1 ถังคัดพันธุ์แบบแอโรบิก (aerobic selector)

ถังคัดพันธุ์แบบแอโรบิก หรือเรียกได้อีกชื่อหนึ่งว่า ถังคัดพันธุ์แบบออกซิก (oxic selector) เป็นถังคัดพันธุ์ที่มีการเติมอากาศภายในถัง กลไกหลักที่สำคัญ ในการกำจัดสารอาหารละลายจะเป็นการหายใจแบบแอโรบิก (aerobic respiration) และการเก็บสารอาหารไว้ในเซลล์ (storage products) โดยพลังงานที่ต้องใช้ในการเก็บสารอาหารละลายเป็นแหล่งคาร์บอนภายในเซลล์ จะเป็นพลังงานส่วนหนึ่งที่ได้มาจากกระบวนการหายใจแบบแอโรบิก (aerobic respiration)

Tomlinson (1976) ได้แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า SVI กับค่าภาระบรรทุกอินทรีย์สาร (organic loading) ของถังเติมอากาศส่วนต้น (aerated initial contact zone) ดังในรูปที่ 5.4 ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าที่ค่า (F/M)i ที่มากกว่า 3 kg BOD_5/kg MLVSS-day จะให้ค่า SVI ที่ใกล้เคียง หรือต่ำกว่า 150 ml/g

Jenkins (1993) แนะนำถึง การใช้ถังคัดพันธุ์แบบแอโรบิกว่า ควรมีการตัวถังเป็นถังย่อย ๆ (compartments) อย่างน้อย 3 ถัง โดยขนาดของแต่ละถังควรกำหนดจากค่าภาระบรรทุกซีโอดี (COD load) โดยมีค่าดังนี้

– ถังใบแรกควรมีค่าภาระบรรทุกซีโอดี	12	kg COD/kg MLSS-day
– ถังใบที่ 2 ควรมีค่าภาระบรรทุกซีโอดี	6	kg COD/kg MLSS-day
– ถังใบที่ 3 ควรมีค่าภาระบรรทุกซีโอดี	3	kg COD/kg MLSS-day

ทั้งนี้ ควรหลีกเลี่ยงการใช้ค่าภาระบรรทุกอินทรีย์สารที่สูงกว่าค่าดังกล่าว โดยเฉพาะเมื่อใช้กับน้ำเสียที่มีอินทรีย์สารที่ย่อยสลายได้ง่าย(readily available organic matter) เนื่องจากอาจทำให้เกิดน้ำตะกอนที่มีความหนืดสูงได้ (viscous activated sludge)

5.3.2 ถังคัดพันธุ์แบบแอนอคซิก (anoxic selector)

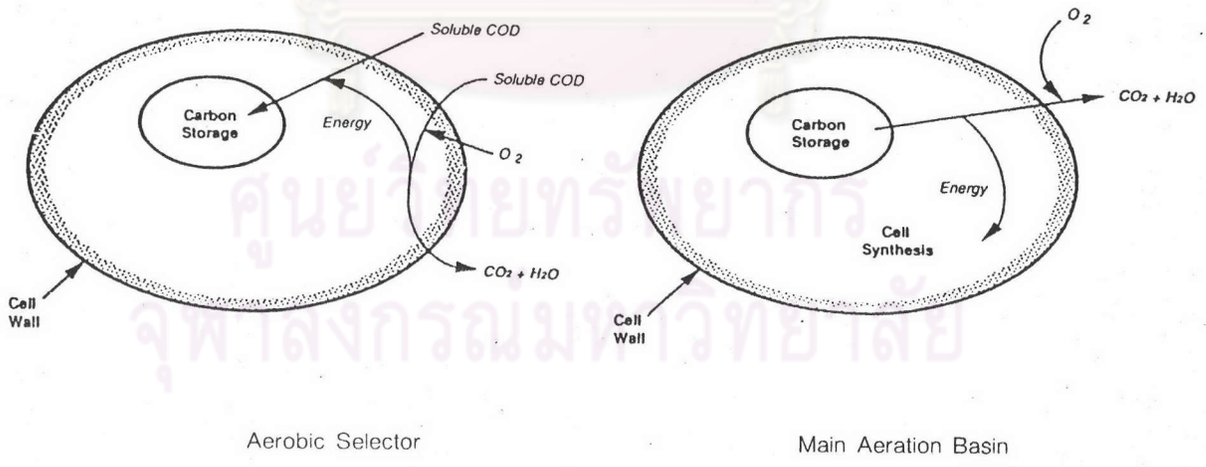
ถังคัดพันธุ์แบบแอนอคซิกเป็นถังที่มีสภาวะไร้ออกซิเจนละลาย แต่มีปริมาณไนเตรต (nitrate) ที่มากเพียงพอที่จะก่อให้เกิดกระบวนการเมแทบอลิซึม (metabolism) ขึ้น กลไกหลักที่สำคัญในการกำจัดสารอาหารละลายคือ การเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชั่น (denitrification) และการเก็บสารอาหารไว้ในเซลล์ ส่วนพลังงานที่ต้องการใช้ในการเก็บสารอาหารละลายเพื่อให้ในรูปของแหล่งคาร์บอนภายในเซลล์ เป็นพลังงานที่เกิดจากกระบวนการเมแทบอลิซึม (metabolism) โดยมีไนเตรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนซึ่งก็คือ ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชั่น นั่นเอง

5.3.3 ถังคัดพันธุ์แบบแอนแอโรบิก (anaerobic selector)

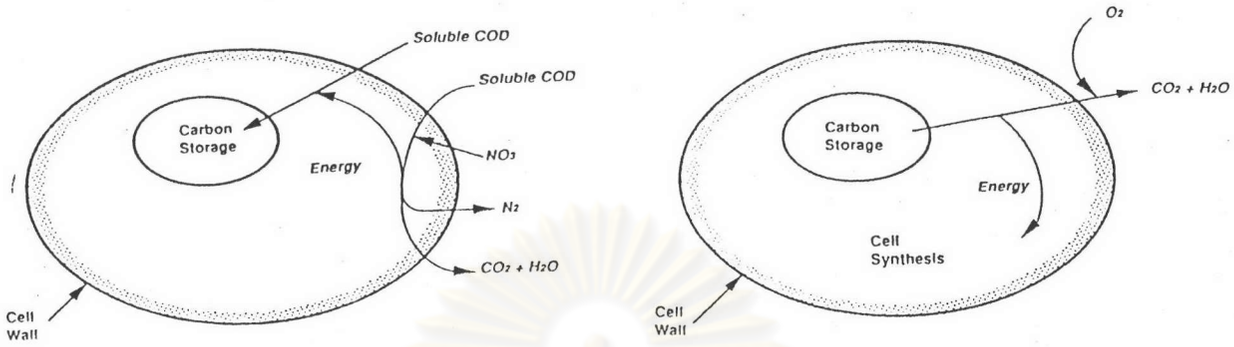
เป็นถังคัดพันธุ์ที่มีสภาวะไร้ออกซิเจนละลายและไนเตรต ดังนั้น จึงเป็นสภาวะที่มีศักยภาพในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่น–รีดักชั่น ต่ำกว่าถังคัดพันธุ์ทั้งสองแบบแรก และไม่สามารถเกิดกระบวนการแมเทบอลิซึมภายในเซลล์ได้ กลไกหลักที่สำคัญ ในการกำจัดสารอาหารละลายคือ การเก็บสารอาหารละลายไว้ภายในเซลล์ในรูปของผลิตภัณฑ์เก็บ (storage products) เพียงอย่างเดียว โดยพลังงานที่ใช้ในการเก็บรักษาสารอาหารละลายไว้ ในรูปของแหล่งคาร์บอนภายในเซลล์ ก็จะแตกต่างจากถังคัดพันธุ์สองแบบแรกที่กล่าวมาแล้วคือ พลังงานที่ใช้จะได้จากการสลายพันธะของสารประกอบโพลีฟอสเฟตภายในเซลล์ หรือกล่าวได้ว่าเป็นแหล่งพลังงานสะสมภายในเซลล์ ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3

Jenkins (1993) กล่าวว่า ขนาดของถังคัดพันธุ์แบบแอนแอโรบิกควรจะถูกกำหนดจากอัตราการดูดกลืนสารอินทรีย์ละลายและปลดปล่อยออร์โธฟอสเฟต สำหรับน้ำเสียจากชุมชน โดยทั่วไปแล้วมักจะมีเวลากักน้ำอยู่ในช่วง 0.75 – 2.0 ชั่วโมง

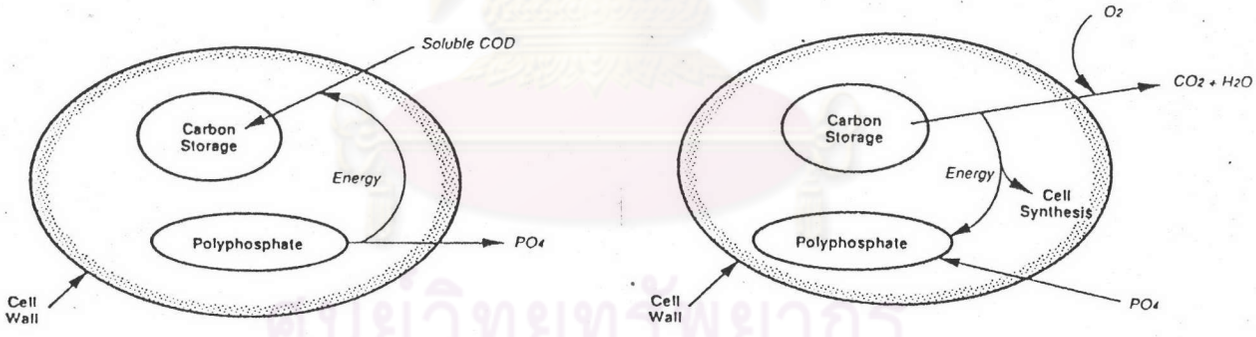
จะเห็นได้ว่าถังคัดพันธุ์ทั้งสามชนิดมีความแตกต่างที่สำคัญคือ มีศักยภาพในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่น–รีดักชั่น (oxidation–reduction potential , ORP) ที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.4 , 5.5 และ 5.6



รูปที่ 5.4 กลไกการดูดกลืนสารอาหาร (uptake mechanism)
ของถังคัดพันธุ์แบบแอโรบิก (Jenkins,1993)



รูปที่ 5.5 กลไกการดูดกลืนสารอาหาร (uptake mechanism) ของถังคัดพันธุ์แบบแอนอคซิก (Jenkins,1993)



รูปที่ 5.6 กลไกการดูดกลืนสารอาหาร (uptake mechanism) ของถังคัดพันธุ์แบบแอนอคซิก (Jenkins,1993)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย