บทที่ 2

ทบทวนเอกสาร

2.1 บทนำ

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่มีความสำคัญต่อระบบนิเวศน์ เพราะเป็นธาตุที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการแปรรูปพลังงาน เช่น เป็นสารประกอบของ DNA และ RNA ซึ่งตามปกติแล้วในแหล่งน้ำจะมีฟอสฟอรัสเป็นปริมาณน้อย (เปี่ยมศักดิ์ มานะเศวต, 2524) โดยวัฏจักรของฟอสฟอรัสเป็นดังรูปที่ 2.1 ฟอสฟอรัสจะปรากฏในระบบนิเวศน์บนพื้นผิวโลกเป็นหลักโดยจะสะสมในหิน และเมื่อหินถูกกัดเซาะโดยธรรมชาติ ก็จะเกิดการปลดปล่อยฟอสฟอรัสปนออกมากับน้ำในรูปของฟอสเฟต และฟอสเฟตจะถูกพืชใช้เพื่อเป็นธาตุอาหาร ดังนั้นเมื่อสัตว์กินพืชก็จะได้รับฟอสฟอรัสจากพืชนำไปใช้ในการสร้างเปลือก กระดูก และฟัน ต่อจากนั้นเมื่อพืชและสัตว์ตาย ฟอสฟอรัสก็จะถูกย่อยออกมาแล้วปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำในที่สุด

ฟอสฟอรัสที่พบในน้ำเสียจะอยู่ใน 3 รูปแบบ คือ ออร์โธฟอสเฟต โพลีฟอสเฟต และฟอสฟอรัสอินทรีย์ สองรูปแบบแรกจัดเป็นอนินทรียสาร โดยออร์โธฟอสเฟต ตัวอย่างเช่น PO_4^{3-}, HPO_4^{2-}, $H_2PO_4^-$ และ H_3PO_4 เป็นฟอสฟอรัสรูปแบบที่ใช้ในกระบวนการเมตาบอลิซึม ส่วนโพลีฟอสเฟตเป็นการรวมฟอสฟอรัสตั้งแต่สองโมเลกุล หรือมากกว่ากับอะตอมของออกซิเจน หรือไฮโดรเจน โดยโพลีฟอสเฟตสามารถเกิดไฮโดรไลซิสแล้วเปลี่ยนรูปไปเป็นออร์โธฟอสเฟต แต่ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสนี้ค่อนข้างช้า และสำหรับฟอสเฟตอนินทรีย์นั้นก็จะพบในน้ำเสียจากโรงงาน

ตารางที่ 2.1 ฟอสฟอรัสในน้ำเสียจากแหล่งชุมชน

รูปแบบของฟอสฟอรัส	มก./ล.	กรัม/คน/วัน
ฟอสฟอรัสทั้งหมด (as P)	4-15	0.6-4.5
- ฟอสฟอรัสอินทรีย์	0.3 * ฟอสฟอรัสทั้งหมด	0.3 * ฟอสฟอรัสทั้งหมด
- ฟอสฟอรัสอนินทรีย์ (Ortho-P และ Poly-P)	0.7 *ฟอสฟอรัสทั้งหมด	0.7 * ฟอสฟอรัสทั้งหมด

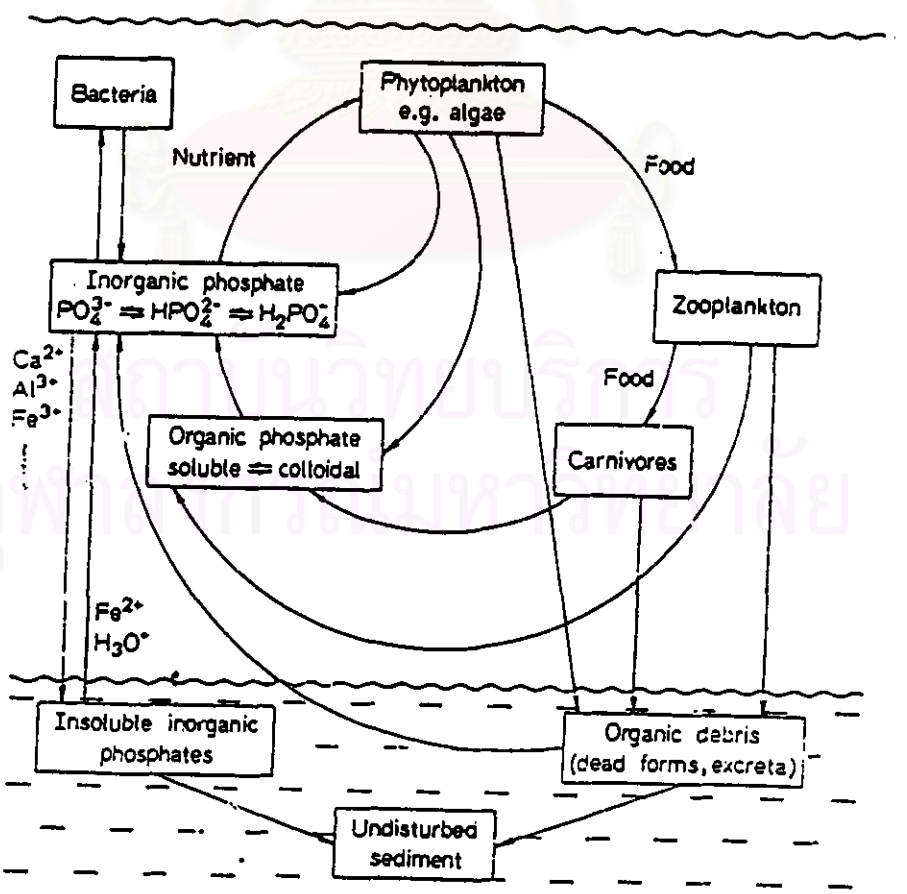
อ้างอิง : เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์ (1991)

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อุตสาหกรรมหรือในสลัดจ์มากกว่าน้ำเสียจากชุมชน ทั้งนี้ฟอสฟอรัสในแต่ละแบบในน้ำเสียจากที่อยู่อาศัยมีปริมาณดังแสดงในตารางที่ 2.1 โดยจะเห็นว่าร้อยละ 70 ของฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำเสียจัดเป็นอนินทรียสาร

โดยฟอสฟอรัสในน้ำเสียส่วนใหญ่มีแหล่งกำเนิดมาจากของเสียจากมนุษย์และสัตว์ จากอุตสาหกรรมที่ใช้กระบวนการทางชีวภาพ เช่นอุตสาหกรรมอาหาร และอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมปุ๋ย อุตสาหกรรมผงซักฟอก (ซึ่งมีการเติมฟอสเฟตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์) อุตสาหกรรมกรดฟอสฟอริก เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการใช้ฟอสฟอรัสในโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อป้องกันการตกตะกอนในหม้อไอน้ำ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และใช้ป้องกันการกัดกร่อนในวงจรทำความเย็น (cooling circuit) ยึกด้วย

ในปัจจุบัน บางประเทศมีกฎหมายควบคุมการเติมฟอสฟอรัสลงในผลิตภัณฑ์ผงซักฟอก เช่น มลรัฐเวอร์จิเนียและแมรีแลนด์ของประเทศสหรัฐอเมริกา ก็ได้ออกกฎหมายห้ามในกรณีนี้ตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคม ค.ศ.1988 และ 1 ธันวาคม ค.ศ. 1985 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในแหล่งน้ำลดลงถึงร้อยละ 32



รูปที่ 2.1 วัฏจักรฟอสฟอรัส (WEF, 1998)

ฟอสฟอรัสมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมคือทำให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน เนื่องจากฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารของสาหร่าย ดังนั้นถ้าพบในแหล่งน้ำ สาหร่ายก็จะเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว (algal bloom) ทำให้แหล่งน้ำเน่าเสียและมีของแข็งแขวนลอยเป็นปริมาณสูง นอกจากนี้ยังทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายในแหล่งน้ำลดลงด้วย เนื่องจากปริมาณสาหร่ายที่มีมากจากการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วนี้ ทำให้ในเวลากลางคืนสาหร่ายจะใช้ออกซิเจนที่มีในแหล่งน้ำจนทำให้เกิดการขาดแคลนออกซิเจนในแหล่งน้ำ

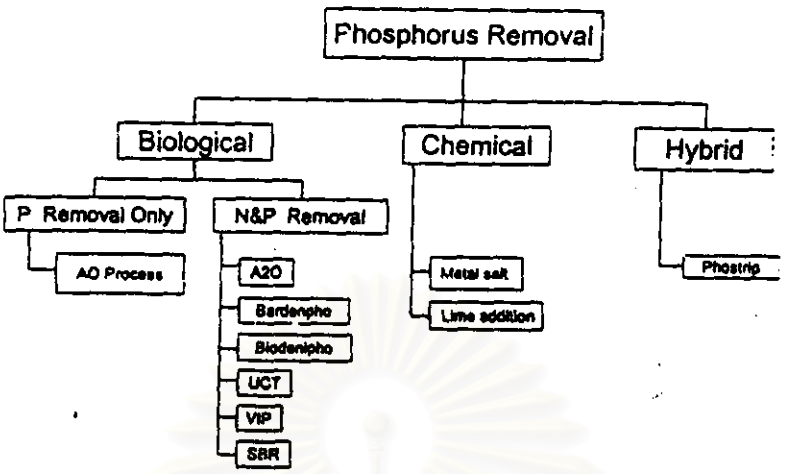
การกำจัดฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสียโดยทั่วไปจะเกี่ยวข้องกับการทำให้ฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำมารวมตัวกับของแข็งหรือเป็นของแข็ง แล้วทำการแยกอนุภาคของของแข็งออกอีกทีหนึ่งด้วยการตกตะกอน การกรองหรือกระบวนการอื่นๆ โดยการกำจัดฟอสฟอรัสนั้นสามารถทำได้โดยวิธีการใดวิธีหนึ่งดังต่อไปนี้

- กำจัดฟอสฟอรัสด้วยวิธีทางเคมีโดยการเติมเกลือของโลหะหรือปูนขาว โดยประสิทธิภาพของการกำจัดแบบนี้จะขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัย คือ สมมูลเคมีระหว่างฟอสฟอรัสสภาวะที่เป็นของแข็งและของเหลว และประสิทธิภาพของการกำจัดของแข็ง

- การกำจัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการทางชีวภาพ โดยปรกติแล้วเซลล์ของจุลชีพจะมีฟอสฟอรัสเป็นส่วนประกอบ 1.5-2.5% ของของแข็งระเหยง่าย แต่สำหรับกระบวนการอีบีพีอาร์ (Enhanced Biological Phosphorus Removal, EBPR) จุลชีพสามารถสะสมฟอสฟอรัสได้ในปริมาณที่มากกว่าความต้องการของเซลล์ โดยประสิทธิภาพของการกำจัดแบบนี้ ขึ้นอยู่กับปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมได้ในเซลล์ของแบกทีเรีย และความสามารถในการแยกตัวของของแข็งจากระบบ

- กระบวนที่ใช้กำจัดมลพิษทั้งหมดออกจากน้ำ เช่น กระบวนการอาร์โอ หรือการกรองนาโน ก็สามารถใช้ในการกำจัดฟอสฟอรัสได้เช่นกัน แต่เนื่องจากการบำบัดด้วยแผ่นเยื่อกรองมักมีราคาแพงจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาเป็นการกำจัดหลัก อย่างไรก็ตามการใช้แผ่นเยื่อกรองด้วยวัตถุประสงค์อื่น เช่น การกำจัดของแข็งทั้งหมด จะทำให้เกิดการกำจัดฟอสฟอรัสเป็นผลพลอยได้ด้วย

ดังนั้นกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่การกำจัดทางเคมีและการกำจัดทางชีวภาพ ซึ่งในรูปที่ 2.2 แสดงภาพรวมพื้นฐานแบบคร่าวๆ



รูปที่ 2.2 ภาพรวมของรูปแบบกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัส (WEF, 1998)

2.2 การกำจัดฟอสฟอรัส

2.2.1 วิธีทางเคมี

วิธีนี้จะกำจัดฟอสฟอรัสโดยการเติมสารเคมีลงไปในน้ำเสียเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้ฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำจับตัวกับสารเคมีที่เติมลงไปและเกิดเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ แยกตัวจากน้ำได้โดยการตกตะกอน สารเคมีที่ใช้สำหรับการกำจัดฟอสฟอรัสนั้นมีทั้งเกลือของโลหะและปูนขาว ซึ่งโดยทั่วไปเกลือของโลหะที่ใช้ คือ เกลือของเหล็กและอลูมินัม ซึ่งอาจจะมีการใช้โพลีเมอร์ร่วมกับเกลือของโลหะนี้ในการเพิ่มประสิทธิภาพ การกำจัดฟอสฟอรัสด้วยวิธีนี้ มีข้อดี คือ สามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย แต่ผลเสียก็คือทำให้เกิดสลัดจ์เป็นปริมาณมาก ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการจัดการ การดำเนินการ และการบำรุงรักษาสูง สมการในการกำจัดฟอสฟอรัสโดยเกลือของโลหะและปูนขาวเป็นดังนี้

การตกตะกอนด้วยเกลืออลูมินัม

$$Al^{+3} + H_nPO_4^{n-3} \longrightarrow AlPO_4 + nH^+ \qquad (2.1)$$

การตกตะกอนด้วยเกลือของเหล็ก

$$Fe^{+3} + H_nPO_4^{n-3} \longrightarrow FePO_4 + nH^+ \qquad (2.2)$$

การตกตะกอนด้วยปูนขาว

$$10Ca^{+2} + 6PO_4^{3-} + 2OH^- \longrightarrow \underset{\text{hydroxyappatite}}{Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2} \quad \text{----------(2.3)}$$

เนื่องจากกระบวนการที่กล่าวมาก่อให้เกิดสลัดจ์เป็นปริมาณมาก ดังนั้นจึงต้องผ่านการดกตะกอน เช่น ผ่านกระบวนการทำให้ใสในถังสัมผัสหรือในชั้นสลัดจ์ เพื่อลดภาระต่อตัวกรอง ก็จะทำให้การกำจัดฟอสฟอรัสแบบนี้ได้ผลดีขึ้น

2.2.2 วิธีทางชีวภาพ

วิธีทางชีวภาพนี้เป็นการกำจัดฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสียโดยใช้จุลชีพชนิดพิเศษที่สามารถจับใช้ฟอสฟอรัสได้มากกว่าจุลชีพในกระบวนการบำบัดทั่วๆไป ซึ่งกระบวนการที่ทำให้เกิดการจับใช้ฟอสฟอรัสอย่างฟุ่มเฟือย (luxury uptake) นี้ น้ำเสียจะผ่านกระบวนการแอนแอโรบิกก่อนแล้วจึงผ่านกระบวนการแอโรบิกในขั้นต่อไป ซึ่งทำให้เกิดการคัดพันธุ์ของแบกทีเรียชนิดพิเศษที่ใช้ในการกำจัดฟอสฟอรัส ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการแอนแอโรบิก/แอโรบิก กลไกการกำจัดฟอสฟอรัสโดยกระบวนการทางชีวภาพแบบนี้จะกล่าวในหัวข้อต่อไป

2.3 หลักการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพทั่วไป จะเกิดการใช้ฟอสฟอรัสเพื่อการสังเคราะห์เซลล์พร้อมๆกับการออกซิไดส์สารคาร์บอนอินทรีย์ ฟอสฟอรัสที่ต้องการจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานภายในและกลายเป็นส่วนประกอบของเซลล์ ในเซลล์ของจุลชีพทั่วไปประกอบด้วยฟอสฟอรัส 1.5-2.5% ของน้ำหนักเซลล์แห้งซึ่งสามารถทำให้กำจัดฟอสฟอรัสได้เพียง 10-30% ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างสารอาหารและฟอสฟอรัส รวมถึงสภาพปฏิบัติการอื่นๆด้วย ในขณะที่การกำจัดฟอสฟอรัสโดยผ่านกระบวนการแอนแอโรบิก/แอโรบิก ทำให้ระบบมีการคัดพันธุ์ของจุลชีพชนิดพิเศษที่มีความสามารถในการสะสมฟอสฟอรัสได้มากกว่าจุลชีพทั่วไปหรือที่เรียกว่าพีเอโอ (Polyphosphate Accumulating Organisms, PAOs) โดยในสภาวะที่เกิดขึ้นนี้แบกทีเรียจะสามารถสะสมฟอสฟอรัสได้ถึง 4 - 12% ของน้ำหนักเซลล์แห้ง ซึ่งจะทำให้การกำจัดฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้น 2.5 - 4 เท่าของระบบบำบัดทั่วไป (WEF, 1992)

แบกทีเรียชนิดที่สามารถสะสมฟอสฟอรัสได้มากเป็นพิเศษนั้นเดิมเชื่อว่ามีอยู่เพียงประเภทเดียว คือ Acinetobacter (Fuhs and Chen, 1975) แต่จากการศึกษาต่อมาโดย Karin และคณะ (1983) พบว่า Acinetobacter ไม่ใช่แบกทีเรียเพียงชนิดเดียวที่สามารถสะสมฟอสฟอรัสได้ ยังมีแบกทีเรียชนิดอื่นอีกคือ Aeromonas และ Pseudomonas ซึ่งมีจำนวนมากกว่าร้อยละ 50 ของแบกทีเรียชนิดแฟคัลเททีฟทั้งหมดในระบบ โดยแบกทีเรีย Acinetobacter มีจำนวนเพียงร้อยละ 15 เท่านั้น

ต่อมา Kavanaugh และ Randall (1994) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับชนิดของแบกทีเรียที่มีความสำคัญต่อกระบวนการกำจัดชาตุอาหารทางชีวภาพ (BNR) พบแบกทีเรีย 4 ชนิดที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพคือ Aeromonas/Vibrio, Coliform, Pseudomonas และ Acinetobacter โดยแบกทีเรีย 3 ชนิดแรกถูกพบในปริมาณมากกว่า และพบแบกทีเรีย Acinetobacter เพียงร้อยละ 5 ของจำนวนแบกทีเรียทั้งหมดในระบบเท่านั้น

กลไกการกำจัดฟอสฟอรัสโดยการจับใช้อย่างฟุ่มเฟือยนั้นสามารถอธิบายได้ดังนี้

สภาพแอนแอโรบิก

ในสภาพแอนแอโรบิก ซึ่งหมายถึงสภาพที่ไม่มีทั้งออกซิเจนและสารรับอิเล็กตรอนอื่นๆ เช่น ไนเทรตหรือซัลเฟต จะเกิดกระบวนการหมักเป็นขั้นตอนแรก โดยจุลชีพจะเปลี่ยนสารอินทรีย์ละลายไปเป็นกรดไขระเหยง่าย (volatile fatty acids, VFAs) ชนิดที่มีจำนวนคาร์บอนน้อยๆเช่น กรดน้ำส้ม (acetic acid, Hac) และกรดโพรไพโอนิก หลังจากนั้นพีเอโอจะดูดซึมกรดไขระเหยง่ายดังกล่าวเข้าไปในเซลล์ โดยส่วนหนึ่งจะถูกนำไปใช้ในกระบวนการแมเทบอลิซึมและอีกส่วนหนึ่งจะเปลี่ยนเป็น 3-hydroxybuterate (3-HB), 3-hydroxyvalerate (3-HV), 3-hydroxy-2-methybuterate (3H2MB) ซึ่งเป็นสารอินเทอร์มิเดียท และจะรวมเป็นพีเอชเอ (polyhydroxyalkanoate, PHA) เพื่อสะสมไว้เป็นอาหารสำรองแสดงดังสมการที่ 2.4 (Satoh และคณะ, 1992)

$$\text{Substrate} \xrightarrow{\text{fermenters}} \text{Acetate} \xrightarrow{\text{poly-P bacteria}} \begin{matrix}\text{3HB}\\ \text{3HV}\\ \text{3H2MB}\\ \text{3H2MV}\end{matrix} \longrightarrow \text{PHA} \qquad (2.4)$$

ทั้งนี้แบกทีเรียจะต้องใช้พลังงานจากการย่อยสลาย ATP (adenosinetriphosphate) มาใช้ในการสร้างพีเอชเอดังสมการที่ 2.5

$$ATP \longrightarrow ADP + PO_4^{3-} + Energy \qquad (2.5)$$

เมื่อ ATP สลายตัวจะเกิดการปลดปล่อยออร์โธฟอสเฟตออกนอกเซลล์ เกิดสารประกอบ ADP (adenosinediphosphate) และพลังงานส่วนหนึ่ง Wentzel (1985) พบว่ากลไกดังกล่าวจะเกิดได้ดีเป็นพิเศษเมื่อใช้กรดไขมันโมเลกุลน้อยๆ เช่น กรดอะซิติก

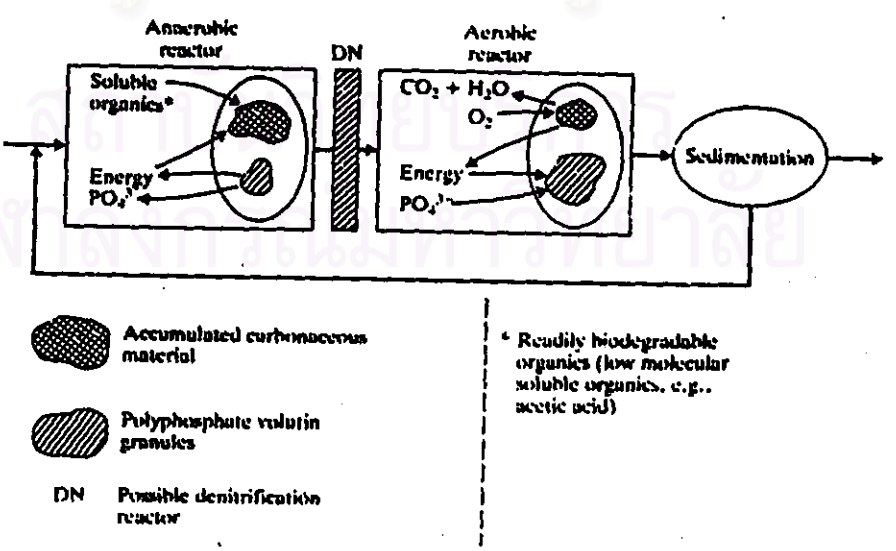
สภาพแอโรบิค

ออกซิเจนทำให้การย่อยสลายพีเอชเอเกิดเป็นเซลล์ใหม่ พลังงาน น้ำ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น ดังสมการที่ 2.6 (Grabriel, 1994)

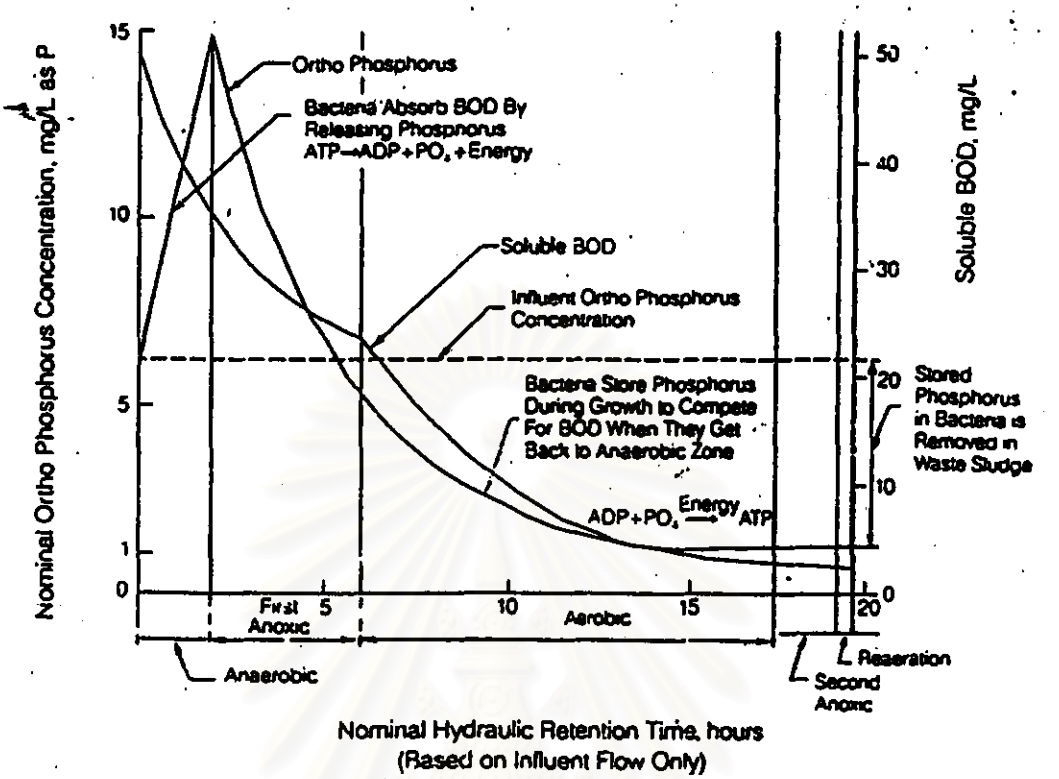
$$PHA + O_2 \longrightarrow Energy + biomass + H_2O + CO_2 \qquad (2.6)$$

โดยพลังงานใหม่นี้จะถูกใช้ในการจับออร์โธฟอสเฟตจากนอกเซลล์มารวมกับ ADP ภายในเซลล์และเก็บสะสมพลังงานไว้ในรูป ATP ไว้ใช้ในโอกาสต่อไป ดังสมการที่ 2.7 (Satoh และคณะ, 1992)

$$ADP + PO_4^{3-} + Energy \longrightarrow ATP \qquad (2.7)$$



รูปที่ 2.3 กลไกการกำจัดฟอสฟอรัสภายใต้สภาวะแอนแอโรบิกและแอโรบิก (Eckenfelder, 1989)



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงของปีโอดีละลายและฟอสฟอรัสที่เกิดขึ้นในระบบกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ (WEF, 1992)

กระบวนการที่เกิดขึ้นนี้จะสวนทางกับกระบวนการที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะแอนแอโรบิก โดยในสภาวะแอโรบิกนี้จะเกิดการจับใช้ฟอสฟอรัสเพื่อสร้างพลังงานในปริมาณที่มากกว่าความต้องการใช้เพื่อสร้างเซลล์ใหม่

2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

1) ซีโอดีที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

Buchan (1982) อ้างโดย Nicholls และคณะ (1985) ได้ทำการทดลองและพบว่า Acinetobacter ที่อยู่ในระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์สามารถเจริญเติบโตและสะสมฟอสฟอรัสได้ดีในถังหมักสลัดจ์เบื้องต้น ภายใต้สภาวะแอโรบิก ซึ่งมีกรดไขระเหยง่ายเป็นอาหาร

Siebritz และคณะ (1983) ได้ศึกษาเกี่ยวกับระบบการกำจัดฟอสฟอรัสพบว่า ในสภาวะแอนแอโรบิกจะเกิดการปลดปล่อยฟอสฟอรัสได้นั้นจะต้องมีแหล่งคาร์บอนที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้อย่างรวดเร็วในปริมาณสูงพอ โดยจะต้องมีปริมาณอย่างน้อย 25 มก.ซีโอดี/ล. ซึ่งแหล่ง

คาร์บอนที่สารถย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วนี้ได้แก่ อะซิเตต กลูโคส (หมายเหตุ : อย่างไรก็ตามจากความรู้ในปัจจุบันพบว่าไม่น่าจะใช้กลูโคส เนื่องจากจีเอโอ (Glucose Accumulating Organisms, GAOs) จะดึงไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ดีกว่า จึงทำให้ไม่เกิดกรดไขระเหยง่ายที่จะสะสมในรูปพีเอชเอ โดยแบกทีเรียที่สามารถกำจัดฟอสฟอรัส ดังนั้นประสิทธิภาพจึงน่าจะลดลง) จึงชี้ให้เห็นว่าหากในระบบมีซีโอดีที่สามารถย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วทางชีวภาพมาก ก็ทำให้สามารถปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกมาได้มากขึ้น ส่งผลให้การกำจัดฟอสฟอรัสดีขึ้นด้วย

Ekama และ Marais (1984) ได้ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียชุมชนที่ประเทศแอฟริกาใต้ พบว่าการใช้ซีโอดีในกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ มีค่าประมาณ 50-59 มก./ล. ต่อ มก./ล. ของฟอสฟอรัสที่ถูกกำจัด

2) อัตราภาระบีโอดี

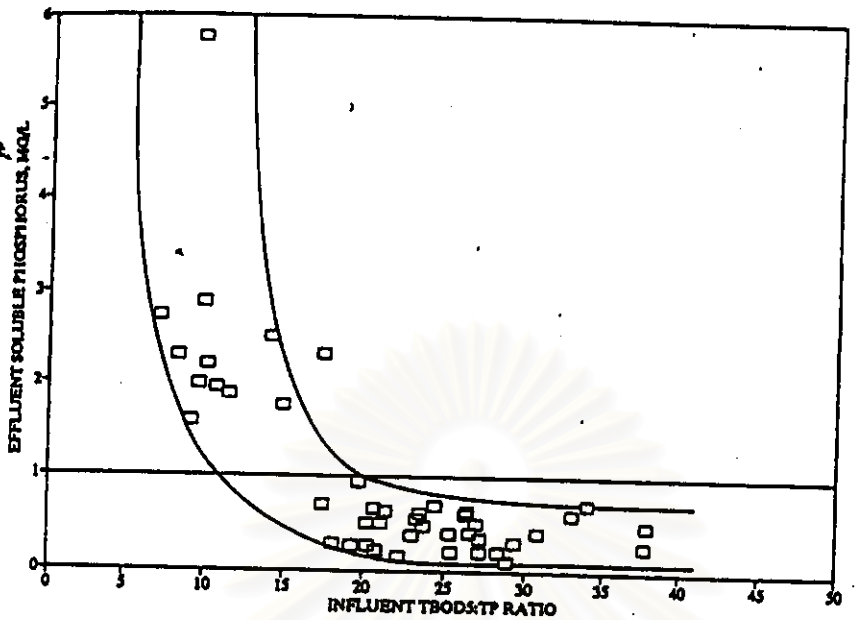
Fukase และคณะ (1985) พบว่าการกำจัดฟอสฟอรัสที่ดีต้องควบคุมภาระบีโอดีให้ต่ำกว่า 2.0 กก.บีโอดี/กก.เอ็มแอลเอสเอส-วัน และอัตราส่วนบีโอดีต่อเอ็มแอลเอสเอสในถังแอนแอโรบิกให้ต่ำกว่า 0.1 กก.บีโอดี/กก.เอ็มแอลเอสเอส เนื่องจากบีโอดีที่เข้าสู่ระบบส่วนใหญ่จะถูกกำจัดในช่วงแอนแอโรบิก และจะมีบีโอดีบางส่วนถูกเก็บในเซลล์ในรูปของพีเอชเอ ดังนั้นภาระบีโอดีและอัตราส่วนบีโอดีต่อเอ็มแอลเอสเอสจึงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในช่วงแอนแอโรบิกในกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัส หรือกล่าวได้ว่าภาระบีโอดีที่เข้าถังแอนแอโรบิกต้องไม่เกินอัตราการใช้บีโอดี และอัตราส่วนบีโอดีต่อเอ็มแอลเอสเอสต้องไม่เกินความสามารถของแบกทีเรียที่จะเก็บสะสมบีโอดีไว้ในเซลล์ (หมายเหตุ : ตัวเลขที่แสดงเป็นผลจากการทดลอง โดยตัวเลขค่าอัตราส่วนบีโอดีต่อเอ็มแอลเอสเอสในถังแอนแอโรบิกที่แสดงนี้ ในภายหลังพบว่าไม่น่าจะถูกต้อง เนื่องจากการทดลองนี้ทำที่เวลากักเซลล์เฉลี่ยต่ำ คือ 1.8 วัน จึงทำให้เกิดการล้างไล่ (wash out) เอ็มแอลเอสเอสในถังแอนแอโรบิกขึ้น)

Randall และคณะ (1992) กล่าวว่าอัตราส่วนบีโอดีต่อฟอสฟอรัสต้องมากกว่า 20:1 จึงจะได้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสดี และมีค่าฟอสฟอรัสในน้ำออกน้อยกว่า 1 มก./ล. ดังรูปที่ 2.5

3) การเติมอะซิเตต

Comeau และคณะ (1986) พบว่าการเพิ่มปริมาณอะซิเตตจะทำให้การปลดปล่อยฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้น โดยจะเพิ่มเป็นสัดส่วนกับปริมาณอะซิเตตที่เพิ่มและยังมีผลให้อัตราการเกิดดีไนตริฟิเคชันเพิ่มขึ้นด้วย

Winter (1989) สรุปว่าการเติมอะซิเตตจะช่วยเพิ่มอัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัส โดยการ



รูปที่ 2.5 ผลของอัตราส่วน $TBOD_5$:TP ต่อปริมาณฟอสฟอรัสละลายในน้ำออกของระบบบีพีอาร์ (Randall และคณะ, 1992)

เติมอะซิเทต 30 มก./ล. มีผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสสูงขึ้นร้อยละ 200 เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติมอะซิเทต

Abu-gharara และ Randall (1991) พบว่ากรดอะซิติกเป็นแหล่งคาร์บอนที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสสูงสุดเมื่อเทียบกับกรดอินทรีย์ต่างๆ เช่น กรดโพรไพโอนิก กรดบิวทายริก

Randall และ Chapin (1994) พบว่าการเติมอะซิเทตในปริมาณไม่เกิน 110 มก./ล. มีผลให้ระบบสามารถกำจัดฟอสฟอรัสดีขึ้นเรื่อยๆตามปริมาณที่เพิ่ม แต่เมื่อเพิ่มปริมาณอะซิเทตขึ้นอีก ระบบจะกำจัดฟอสฟอรัสได้น้อยลงและเมื่อปริมาณอะซิเทตมากกว่า 195 มก./ล. พบว่าจะไม่เกิดการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพเลย

4) เวลากักเซลล์เฉลี่ยหรือเอ็มซีอาร์ที

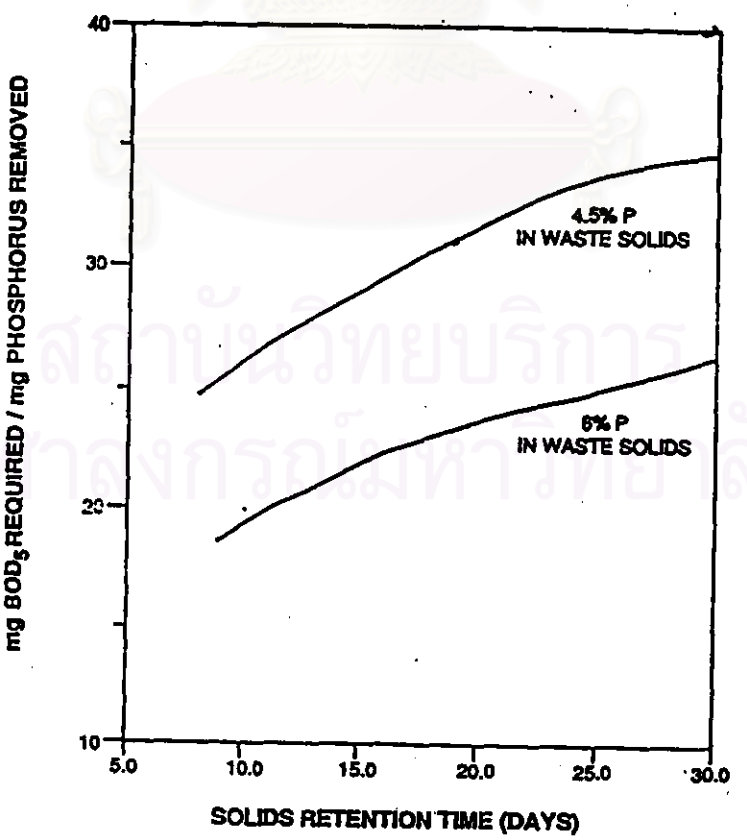
Sedlak (1991) ได้รวบรวมผลของเวลากักเซลล์และอัตราส่วนบีโอดีต่อฟอสฟอรัสที่ต้องการ ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งเมื่อเวลากักเซลล์เฉลี่ยเพิ่มขึ้น ความต้องการบีโอดีที่จะใช้ในการกำจัดฟอสฟอรัส 1 มก. ก็เพิ่มขึ้นด้วย โดยที่ปริมาณฟอสฟอรัสเมื่อคิดเป็นน้ำหนักแห้งเท่ากับ 4.5% พบว่าเมื่อใช้เวลากักเซลล์เพิ่มจาก 10 วันเป็น 30 วัน ความต้องการบีโอดีที่จะใช้ในการกำจัดฟอสฟอรัสเพิ่มจาก 25 มก./ล.เป็น 35 มก./ล.

Shao และคณะ (1992) รายงานว่าที่อุณหภูมิ 23 °ซ การลดลงของเวลากักเซลล์เฉลี่ยจาก 3 วันเป็น 1.5 วัน จะทำให้ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งเพิ่มขึ้นจาก 0.4 มก./ล. เป็น 3.1 มก./ล. เนื่องจากที่เวลากักเซลล์เฉลี่ย 1.5 วัน ไม่เกิดการปลดปล่อยฟอสฟอรัส เพราะเกิดการล้างไล่ฟีฮโด จึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง นอกจากนี้การจัดการสลัดจ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการแอนแอโรบิกจะถูกจำกัดโดยค่าเวลากักเซลล์เฉลี่ยนั้นด้วย

Randall และคณะ (1992) พบว่ากระบวนการในการกำจัดฟอสฟอรัสจะคงตัวที่เวลากักเซลล์เฉลี่ย 6 วัน แต่ที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดการรบกวนการกำจัดฟอสฟอรัสโดยกระบวนการไนตริฟิเคชัน เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงแอมโมเนียจะถูกเปลี่ยนเป็นไนเทรตได้ง่าย ไนเทรตจะไปรบกวนการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในขั้นตอนแอนแอโรบิก ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสลดลง และได้อ้างถึง Wentzel และคณะ (1988) ว่าที่เวลากักเซลล์เฉลี่ยน้อยกว่า 3 วัน ระบบจะไม่คงตัว และน้ำทิ้งจะไม่ใส

5) เวลากักพักชลศาสตร์หรือเอชอาร์ที (hydraulic retention time, HRT)

Best (1983) กล่าวว่า เวลากักน้ำที่ใช้ในการออกแบบสภาพแอนแอโรบิกและแอโรบิกจะอยู่ในช่วง 0.5-1.0 ชั่วโมง และ 3.5-6.0 ชั่วโมงตามลำดับ



รูปที่ 2.6 ความต้องการบีโอดีเพื่อกำจัดฟอสฟอรัส 1 มก. ที่เวลากักเซลล์เฉลี่ยต่างๆ (Sedlak, 1991)

Fukase และคณะ (1985) รายงานว่าในสภาพแอโรบิก ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสจะสูงเมื่อใช้เวลากักน้ำสั้น โดยค่าเวลากักน้ำที่เหมาะสมในสภาพแอโรบิกและแอนแอโรบิกเท่ากับ 3.0 ชั่วโมง และ 1.5 ชั่วโมงตามลำดับ ที่ค่าบีโอดีในน้ำเข้าเท่ากับ 100 มก./ล. และเวลากักเซลล์เฉลี่ยเท่ากับ 6 วัน

Okada และคณะ (1991) กล่าวว่าควรมีเวลากักน้ำในสภาพแอนแอโรบิกให้เพียงพอเพื่อผลดีของการสะสมตัวของพีเอโอ

Sedlak (1991) กล่าวว่าเวลากักน้ำในสภาพแอโรบิก เพียง 1-2 ชั่วโมงก็เพียงพอต่อการจับใช้ฟอสฟอรัสของพีเอโอ

Metcalf & Eddy Inc. (1991) ได้สรุปพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบกระบวนการในการกำจัดฟอสฟอรัส รวมทั้งเวลากักน้ำในสำหรับระบบต่างๆ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การออกแบบโดยทั่วไปสำหรับกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ (Metcalf & Eddy Inc., 1991)

Design parameter	Units	Process		
		A/O	Phostrip	SBR
F/M ratio	g BOD/g MLVSS-d	0.2-0.7	0.1-0.5	0.15-0.5
MCRT, θc	Day	2-25	10-30	
MLSS	Mg/l	200-4000	600-5000	2000-3000
Hydraulic retention time	Hour			
- Anaerobic zone		0.5-1.5	8-12	1.8-3
- Aerobic zone		1-3	4-10	1.0-4
Return Activated Sludge	% of influent	25-40	20-50	
Internal Recycle	% of influent		10-20	

6) อุณหภูมิ

Mamais และ Jenkins (1992) กล่าวว่า อัตราการเจริญเติบโตสูงสุดในการกำจัดฟอสฟอรัสจะขึ้นกับอุณหภูมิ โดยในช่วงอุณหภูมิ10-30°ซ การลดลงของอุณหภูมิทุกๆ 10°ซ จะส่งผลให้อัตราการเจริญเติบโตลดลง 1.5-1.7 เท่า และจากการทดลองในระบบแบตช์ชี้ให้เห็นว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 28-33 °ซ

Vincenneau และคณะ (1985) อ้างโดย Sedlak (1991) พบว่าการกำจัดฟอสฟอรัสที่ 5 °ซ จะได้ผลดีกว่าที่ 15°ซ หรือมากกว่า โดยความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งมีค่าเท่ากับ 0.9 มก./ล.

Barnard และคณะ (1985) และ Kang และคณะ (1985) รายงานว่าสามารถกำจัดฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิ 9°ซ ด้วยประสิทธิภาพที่ดี (ประมาณ 90%) ณ โรงงานในประเทศสหรัฐอเมริกาและแคนาดา

7) ไนเทรตและไนไทรต์

Barnard และคณะ (1982) พบว่าในสภาพแอนแอโรบิก ไนเทรตจะมีผลยับยั้งการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ ดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยงการเกิดไนตริฟิเคชัน แต่หากจำเป็นต้องเกิดก็ควรลดปริมาณของไนเทรตลงเพื่อให้อัตราดีไนตริฟิเคชันต่ำ โดยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนทั้งหมดที่เหมาะสมคือไม่ต่ำกว่า 10:1

Siebritz และคณะ (1983) สรุปว่าความเข้มข้นซีโอดีที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพในถังแอนแอโรบิกจะมีปริมาณลดลงถ้ามีการเวียนกลับไนเทรตเข้ามาในถัง โดยไนเทรตไนโตรเจน 1 มก. จะทำให้ค่าความเข้มข้นซีโอดีลดลง 8.6 มก./ล. (Van Haandel และคณะ, 1981 อ้างโดย Siebritz และคณะ, 1983) และจะไม่เกิดการกำจัดฟอสฟอรัสถ้ามีถ้ามีปริมาณไนเทรตมากในช่วงแอนแอโรบิก เนื่องจากจะเกิดสภาพแอนอกซิกก่อนที่จะมีการปลดปล่อยฟอสฟอรัส (หมายเหตุ:ปัจจุบันนี้พบว่า มีแบคทีเรียที่เป็นทั้งพีเอโอด้วยและสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันด้วย ซึ่งเรียกว่า "ดีเอ็น-พีเอโอ" (denitrification-phosphate accumulating organisms, DN-PAOs)

Ceoh และ Hartman (1990) ได้แนะนำว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของไนเทรตและไนไทรต์ในขั้นตอนแอนแอโรบิกไม่ควรเกิน 2.5 และ 0.1 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ซึ่งทั้งไนเทรตและไนไทรต์นี้จะถูกรีดิวซ์ในระหว่างการใช้สารอาหาร (หมายเหตุ:ถ้ามีไนเทรตหรือไนไทรต์มาก จะใช้สารคาร์บอนอินทรีย์ในการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันไปก่อน แล้วจึงเข้าสู่ขั้นตอนแอนแอโรบิก ซึ่งจะทำให้เหลือสารคาร์บอนอินทรีย์น้อยที่จะมาสะสมในเซลล์ และจะทำให้มีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสน้อย)

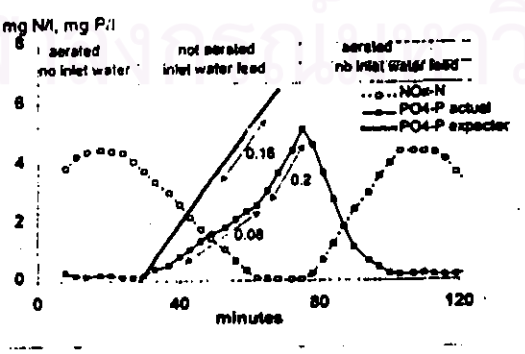
Randall และคณะ (1992) กล่าวว่าถ้ามีไนเทรตอยู่ในสภาพที่กำหนดให้เป็นแอนแอโรบิก ไนเทรตนั้นจะถูกใช้เป็นตัวรับอิเล็กตรอน เพราะการใช้ไนเทรตจะให้พลังงานมากกว่าการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน ทำให้ไม่เกิดกระบวนการหมัก นั่นคือบีโอดีละลายจะไม่ถูกเปลี่ยนเป็นกรดไขระเหยง่าย (VFAs) และจะไม่เกิดการกำจัดฟอสฟอรัสด้วย จึงควรควบคุมระดับไนเทรตในสภาพแอนแอโรบิกให้เท่ากับศูนย์

Kuba และคณะ (1994) สรุปว่าการปลดปล่อยฟอสฟอรัสจะลดลงถ้ามีไนเทรตอยู่ในระบบ เนื่องจากดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียจะใช้สารอาหาร เช่น อะซิเทต สำหรับกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ก่อนที่จะใช้สำหรับการปลดปล่อยฟอสฟอรัส

Barker และ Dold (1996) อ้างถึง Pokethitiyook และคณะ (1992) พบว่าการกำจัดฟอสฟอรัสสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในระบบแอนแอโรบิก/ออกซิก และในระบบแอนแอโรบิก/แอนออกซิก โดยที่ในระบบหลังนี้จะมีการเติมไนเทรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนสุดท้ายในขั้นตอนแอนออกซิก ทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันและเกิดการจับใช้ฟอสฟอรัสขึ้น (หมายเหตุ:เนื่องจากเกิดดีเอ็น-พีเอโอ) นอกจากนี้ยังอ้างถึงการศึกษาของ Kerrn-Jespersen และ Henze (1993) พบว่าในการทดลองเติมไนเทรตในขั้นตอนแอนแอโรบิกที่เวลาต่างๆจะทำให้เกิดการจับใช้ฟอสฟอรัสขึ้น และเมื่อเติมอะซิเทตมากขึ้นอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย โดยอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสในปฏิกิริยาแอนออกซิกจะช้ากว่าในสภาพแอโรบิก ดังนั้นหากมีไนเทรตในขั้นตอนแอนแอโรบิกจะทำให้เกิดการยับยั้งการปลดปล่อยฟอสฟอรัส เนื่องจากสารคาร์บอนอินทรีย์จะทำปฏิกิริยากับไนเทรตก่อนเกิดปฏิกิริยาการหมัก

Meinhold และคณะ (1998) อ้างถึง Einfeldt (1992) ว่าทำการทดลองโดยเติมไนเทรตลงในตอนเริ่มขั้นตอนแอนแอโรบิก แล้วสังเกตความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟอสฟอรัสและไนเทรตที่เปลี่ยนแปลงพบว่าเป็นดังรูปที่ 2.7 ซึ่งสรุปว่า ถ้ามีไนเทรตในขั้นตอนแอนแอโรบิกก็จะเกิดการจับใช้ฟอสฟอรัสของดีเอ็น-พีเอโดพร้อมกับการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของพีเอโอ ซึ่งถ้าไนเทรตหมดก็จะเกิดการปลดปล่อยฟอสฟอรัสอย่างเดียวทำให้มีอัตราการปลดปล่อยสุทธิสูงขึ้น

Yoshitaka และ Katsumi (1988) กล่าวว่าไนไทรต์ที่น้อยกว่า 5 มก./ล. ในรูปไนโตรเจนไม่มีผลต่อการจับใช้ฟอสฟอรัส แต่ที่ปริมาณมากกว่า 58.7 มก./ล. ในรูปไนโตรเจนจะเกิดการยับยั้งการจับใช้ฟอสฟอรัส ความรุนแรงของการยับยั้งจะขึ้นกับพีเอชของระบบด้วยโดยที่พีเอชต่ำจะรุนแรงกว่าที่พีเอชสูง



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของปริมาณฟอสเฟตในระบบเมื่อมีการเติมไนเทรตที่ขั้นตอนแอนแอโรบิก (Meinhold และคณะ, 1998)

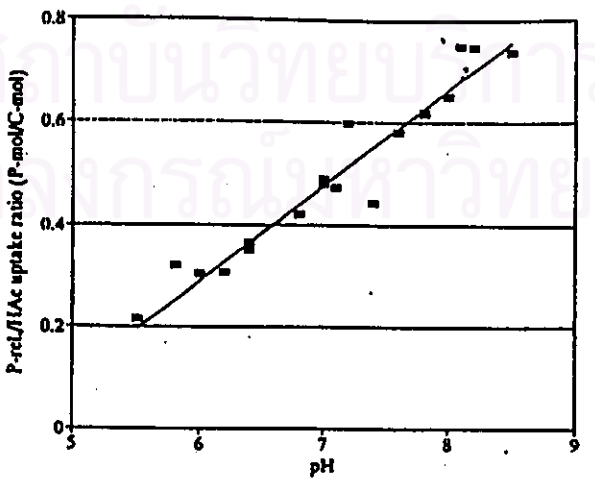
8) พีเอช

Smolder และคณะ (1994) พบว่า การปลดปล่อยฟอสฟอรัสในช่วงแอนแอโรบิกจะเป็น pH - dependent ต่อการจับใช้สับสเทรตภายใต้สภาวะแอนแอโรบิก แต่ไม่ได้แนะนำค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการจับใช้อะซิเทต นอกจากนี้ยังพบว่าที่พีเอชต่ำการจับใช้อะซิเทตจะใช้พลังงานน้อยกว่าที่พีเอชสูง ซึ่งจะส่งผลให้มีการจับใช้ฟอสฟอรัสได้น้อยที่พีเอชต่ำนั่นเอง ส่วนผลของพีเอชต่อมวลจุลชีพยังไม่มีการศึกษา ความสัมพันธ์ของพีเอชกับอัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัสต่อการจับใช้อะซิเทตดังรูปที่ 2.8 และการปลดปล่อยฟอสฟอรัสที่พีเอชต่างๆ ดังรูปที่ 2.9

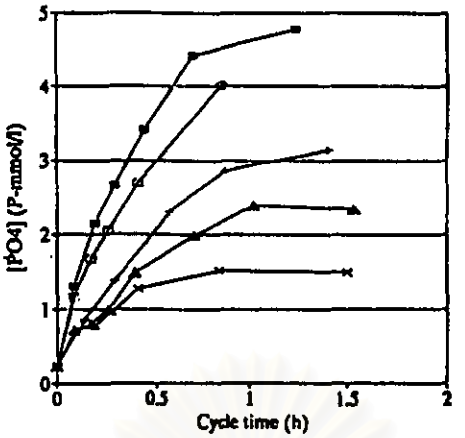
Liu และคณะ (1996) พบว่าค่าพีเอชที่เป็นกรดให้ผลทางลบต่อทั้งการปลดปล่อยฟอสฟอรัสและการจับใช้อะซิเทต ส่วนค่าพีเอชที่เป็นด่างจะมีผลยับยั้งการจับใช้อะซิเทตแต่จะกระตุ้นการปลดปล่อยฟอสฟอรัสมากขึ้นกว่ากรณีพีเอชเป็นกรด และจากการทดลอง (โดยมีฟอสฟอรัสในสลัดจ์ร้อยละ 12) พบว่าที่พีเอช 7.3±0.5 เป็นค่าพีเอชที่เหมาะสมที่สุดต่อการจับใช้อะซิเทต หรือการทำงานทำงานของจุลชีพกลุ่มพีเอไอ โดยที่ค่าพีเอชสูงกว่า 7.5 จะทำให้การจับใช้อะซิเทตต้องการพลังงานมากขึ้น

Kuba และคณะ (1997) ได้ศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดีพีบี (Denitrifying Phosphorus Removing Bacteria, DPB) ที่สภาวะแอนแอโรบิก โดยนำสลัดจ์จากระบบแอนแอโรบิก-แอนอกซิก ซึ่งมีระยะเวลาแอนแอโรบิกและแอนอกซิกเท่ากับ 2 และ 3.5 ชั่วโมง และรับน้ำเสียที่ใช้ซีโอดีจากอะซิเทต 400 มก./ล. และฟอสฟอรัส 15 มก./ล. โดยพบว่า

1) ที่ค่าพีเอชระหว่าง 6-7.5 อัตราส่วนของการปลดปล่อยฟอสฟอรัสต่อปริมาณอะซิเทตที่ใช้ (P/C ratio) มีค่าเพิ่มขึ้นตามพีเอชที่สูงขึ้น



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ของพีเอชกับอัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัสต่อการจับใช้อะซิเทต (Smolder และคณะ, 1994)



P-release at different pH values with a constant initial acetate concentration of 6 C-mmol/L, MLSS 3.2 g/L. pH 5.5 (×), pH 6.4 (▲), pH 7.0 (+), pH 7.8 (□), and pH 8.2 (■).

รูปที่ 2.9 ค่าฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยที่ค่าพีเอชต่างๆ (Smolder และคณะ, 1994)

2) ที่ค่าพีเอชมากกว่า 7.5 พบว่าอัตราส่วนของการปลดปล่อยฟอสฟอรัสต่อปริมาณอะซิเทตที่ใช้ลดลง ต่อมาเมื่อนำสลัดจ์ดังกล่าวไปบ่มที่พีเอช 2 พบว่ามีปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยเพิ่มขึ้นจากเดิม ซึ่งเหตุการณ์ดังกล่าวอาจมีสาเหตุจากการที่พีเอชสูงขึ้น แล้วทำให้ฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยออกมาตกตะกอน จึงทำให้เวลาที่วิเคราะห์ฟอสฟอรัสละลายในขั้นตอนแอนแอโรบิกแล้วเห็นว่าลดลง

2.5 โมเดลทางชีวเคมีในการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

Smolder และคณะ (1995) ได้กล่าวถึง กระบวนการกำจัดในสภาวะแอนแอโรบิกและแอโรบิก ว่ามีกระบวนการทางชีววิทยาดังนี้

- ภายใต้สภาวะแอนแอโรบิก อะซิเทตจะถูกนำเข้าสู่เซลล์แล้วแปลงเป็นพีเอชบีโดยได้พลังงานจากการปลดปล่อยออร์โธฟอสเฟต และจากการแปลงกลัยโคเจนไปเป็นพีเอชบี (0.25 mol ATP/C-molHAc) ซึ่งพลังงานที่ใช้ในการนำอะซิเทตเข้าสู่เซลล์ยังขึ้นอยู่กับพีเอชด้วย โดยในระหว่างสภาวะแอนแอโรบิกนี้พลังงานที่ใช้ในการบำรุงรักษาเซลล์จะได้มาจากการย่อยสลายโพลีฟอสเฟต และในการแปลงอะซิเทตไปเก็บในรูปพีเอชบีจะใช้ NADH จากการย่อยสลายกลัยโคเจน

- และภายใต้สภาวะแอโรบิกนี้ พีเอชบีจะถูกใช้สำหรับการสร้างมวลจุลชีพ การจับใช้ฟอสฟอรัส การสังเคราะห์กลัยโคเจน และการบำรุงรักษาเซลล์ ซึ่งจำเป็นต้องใช้ ATP จากการ catabolism ของพีเอชบีด้วย โดยในการแปลงพีเอชบีไปเป็นมวลจุลชีพและกลัยโคเจน มีการสร้าง

$NADH_2$ ในปริมาณที่มากเกินพอซึ่งจะถูกออกซิไดส์สำหรับการ Oxidative Phosphorylation สำหรับโมเดลภายใต้สภาวะแอนแอโรบิกและแอโรบิกของ Smolder และคณะ (1995) แสดงอยู่ในรูปที่ 2.10

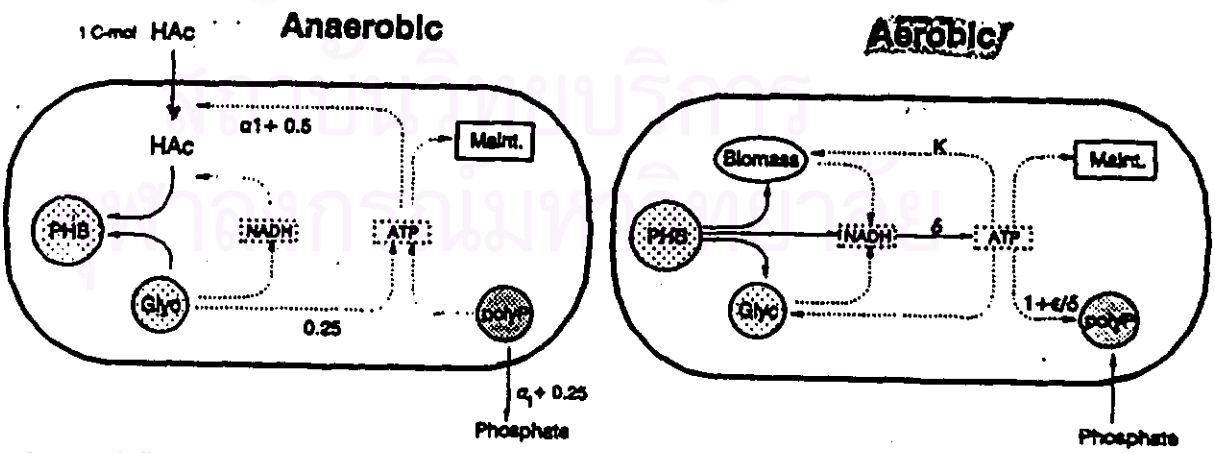
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Siebritz และคณะ (1983) ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพในกระบวนการแอกทิเวเต็ดสลัดจ์แบบสลัดจ์เดี่ยวที่มีปฏิกิริยาในตริฟิเคชัน-ดีในตริฟิเคชันเกิดขึ้น ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยและจับใช้เมื่อใช้สับสเทรตที่ย่อยสลายได้ง่ายปริมาณต่างๆกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.11 และสรุปว่า

1. การปลดปล่อยฟอสฟอรัสจะเกิดเมื่อมีค่าอาร์บีซีโอดีในถังแอนแอโรบิกอย่างน้อย 25 มก.ซีโอดี/ล.

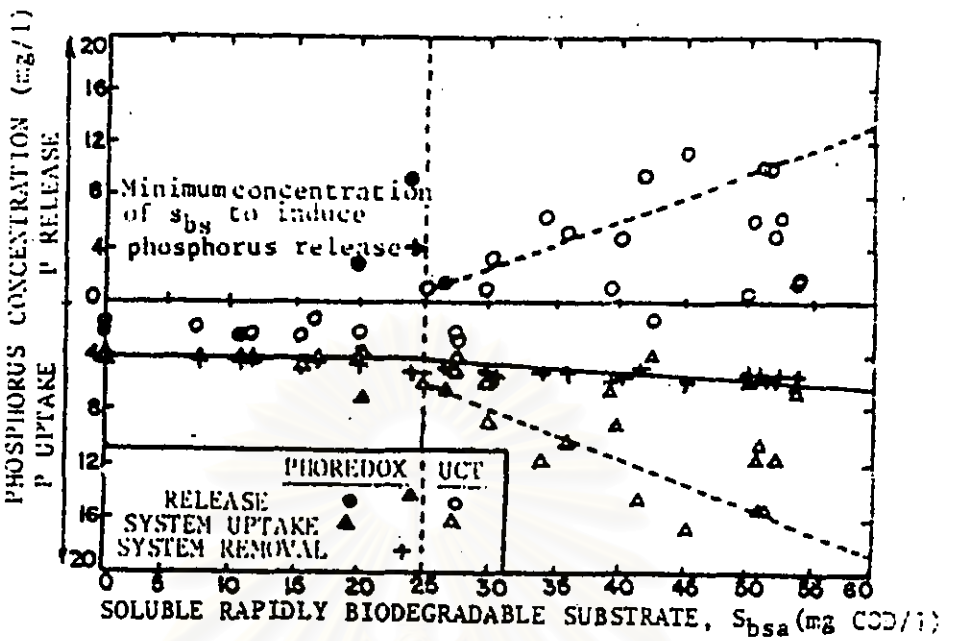
2. การปลดปล่อยฟอสฟอรัสจะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อค่าอาร์บีซีโอดีเพิ่มขึ้นมากกว่า 25 มก.ซีโอดี/ล. หรือกล่าวได้ว่าการปลดปล่อยฟอสฟอรัสเพิ่มสูงขึ้นตามค่า (S_{bs} - 25) ที่เพิ่มขึ้น

3. การจับใช้ฟอสฟอรัสจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้นตามค่า (S_{bs} - 25)



รูปที่ 2.10 โมเดลของการเมแทบอลิซึมภายใต้สภาวะแอนแอโรบิกและแอโรบิกของ Smolder และคณะ (1995)

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างการปลดปล่อย การจับใช้ฟอสฟอรัสและปริมาณสารอาหารที่ค่าต่างๆ (Siebritz และคณะ, 1983)

Sherrard และ Hawkins (1985) กล่าวว่าการกำจัดฟอสฟอรัสจะได้ผลดีเมื่อมีค่าอัตราส่วนซีโอดีต่อฟอสฟอรัสสูงและดำเนินการที่อายุสลัดจ์ซึ่งในการทดลองคือที่ประมาณ 3 วัน (หมายเหตุ: ในการทดลองนี้น่าจะเป็นการกำหนดให้ค่าซีโอดีคงที่แล้วแปรค่าฟอสฟอรัส ซึ่งจากการทดลองที่กล่าวว่ามีค่าอัตราส่วนซีโอดีต่อฟอสฟอรัสสูง น่าจะเป็นกรณีของการมีค่าฟอสฟอรัสจำกัด ทำให้ในน้ำออกมีค่าฟอสฟอรัสต่ำ)

Wentzel และคณะ (1985) ได้ทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยและจับใช้ โดยทดลองที่ค่าอายุสลัดจ์ต่างๆดังนี้ 8, 10, 15 และ 20 วัน และพบว่าปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยและจับใช้มีความสัมพันธ์กันเป็นแบบสมการเส้นตรงดังนี้

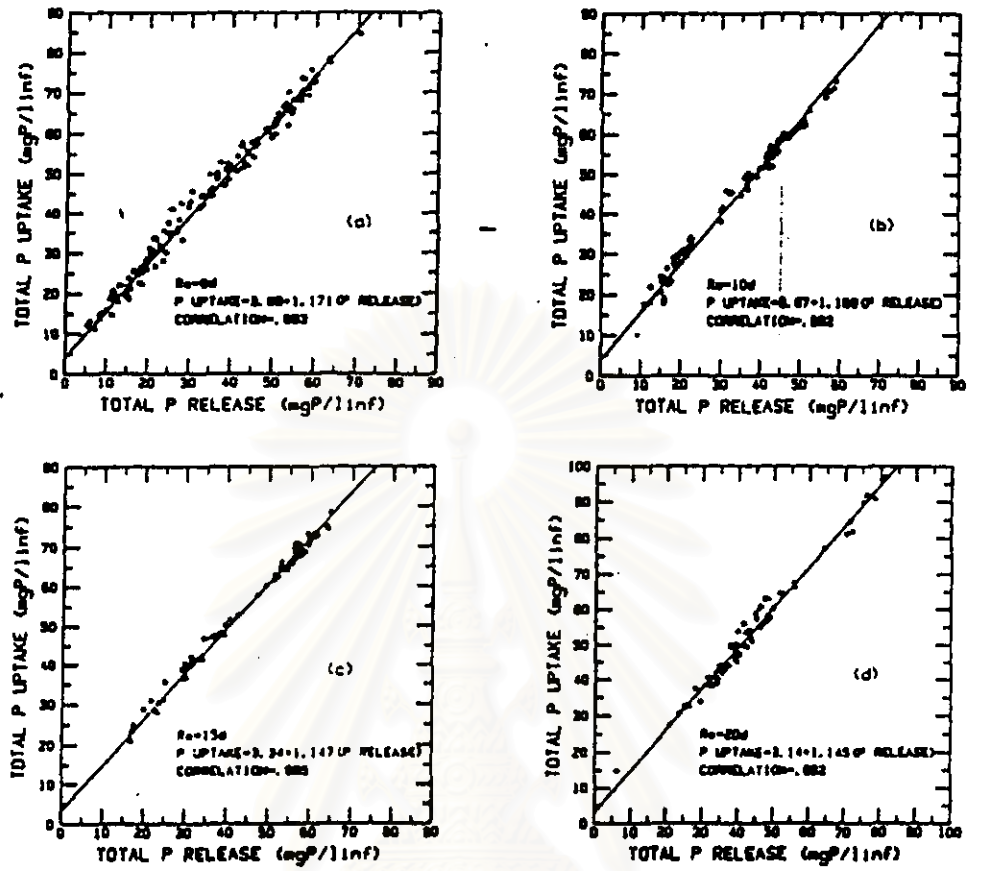
$$P(\text{uptake}) = a'P(\text{release}) + P(\text{metabolic}) \qquad \text{mgP/l influent}$$

หรือ

$$P(\text{removal}) = P(\text{uptake}) - P(\text{release})$$

$$= (a' - 1)\,P(\text{release}) + P(\text{metabolic})$$

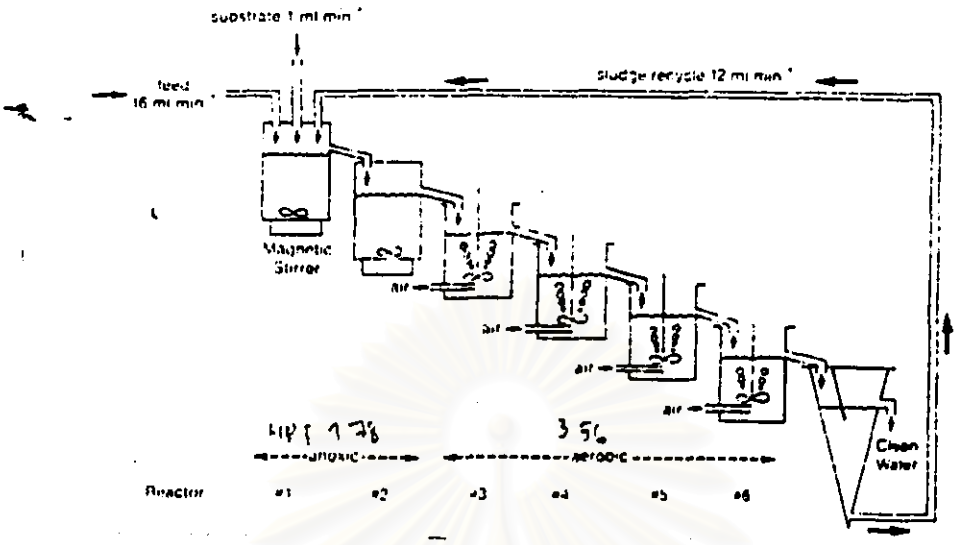
โดย P(metabolic) เป็นค่าฟอสฟอรัสที่ต้องการสำหรับนำไปใช้ในกระบวนการเมแทบอลิซึม และจากค่าทางสถิติพบว่า a' มีค่าอยู่ระหว่าง 1.145-1.198 โดย a' มีค่าต่ำลงเมื่ออายุสลัดจ์สูงขึ้น รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยและจับใช้ที่อายุสลัดจ์ต่างๆ



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ของปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยและจับใช้ภายใต้การทดลองที่ค่าอายุสลัดจ์ต่างๆ คือ (a) 8, (b) 10, (c) 15 และ (d) 20 วัน (Wentzel และคณะ, 1985)

Jones และคณะ (1987) ได้ทดลองศึกษาผลของการเติมสารอาหารซึ่งในที่นี้ใช้โซเดียมอะซิเทตที่ปริมาณต่างๆคือ 0, 20, 30, 40 และ 60 มก.ซีโอดี/ล. ต่อการปลดปล่อยและจับใช้ฟอสฟอรัสของระบบที่มีการดำเนินการดังรูปที่ 2.13 ซึ่งผลการทดลองแสดงอยู่ในรูปที่ 2.14 ซึ่งสรุปได้ว่าถ้าใช้โซเดียมอะซิเทตซึ่งเป็นอาร์บีซีโอดีคือสามารถนำไปใช้ได้เลยเป็นปริมาณที่มากกว่า ก็จะเกิดการปลดปล่อยและจับใช้ฟอสฟอรัสได้มากกว่า โดยถ้าไม่มีการเติมโซเดียมอะซิเทตเลย จะกำจัดฟอสฟอรัสได้เพียง 11% แต่ถ้าเติมโซเดียมอะซิเทตเป็นปริมาณ 60 มก./ล.จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มเป็น 86% และมีฟอสฟอรัสในน้ำออกน้อยกว่า 1 มก./ล

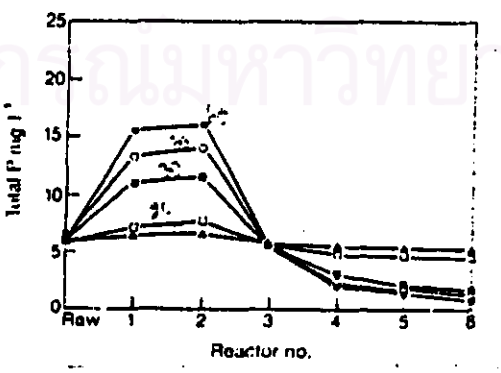
Stevens และคณะ (1997) ได้ทำการศึกษาที่ Westbank Plant ประเทศแคนาดาซึ่งเริ่มด้วยถังแอนอกซิกก่อนสำหรับกำจัดไนเทรตของแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ที่เวียนกลับ ตามด้วยถังแอนแอโรบิกซึ่งแบ่งรับน้ำเสียมาส่วนหนึ่งพร้อมทั้งรับน้ำใสจากถังหมักเบื้องต้นที่มีกรดไขระเหยง่ายด้วยและถัง



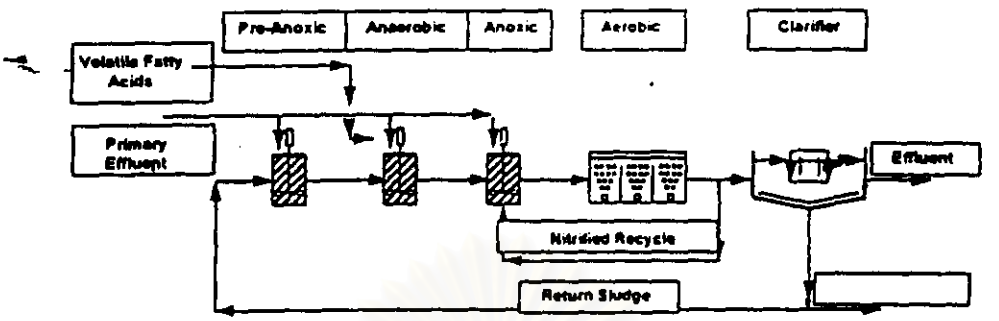
รูปที่ 2.13 ลำดับขั้นของการเดินระบบที่มีถังปฏิกิริกรณ์ขนาด 1.5 ลิตร/ถัง; เวลากักพัก 0.89 ชั่วโมง/ถัง; อัตราการเวียนกลับ 0.75; เติมแอลเอสเอส 1900-2800 มก./ลิตร (Jones และคณะ, 1987)

นอนอกซิกซึ่งรับน้ำเสียและน้ำสลัดจ์จากถังเติมอากาศดังแสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งพบว่าสามารถเกิดการกำจัดฟอสฟอรัสได้ดีที่ถังแอนอกซิก โพรไฟล์ฟอสฟอรัสที่ถังต่างๆของระบบแสดงในรูปที่ 2.16

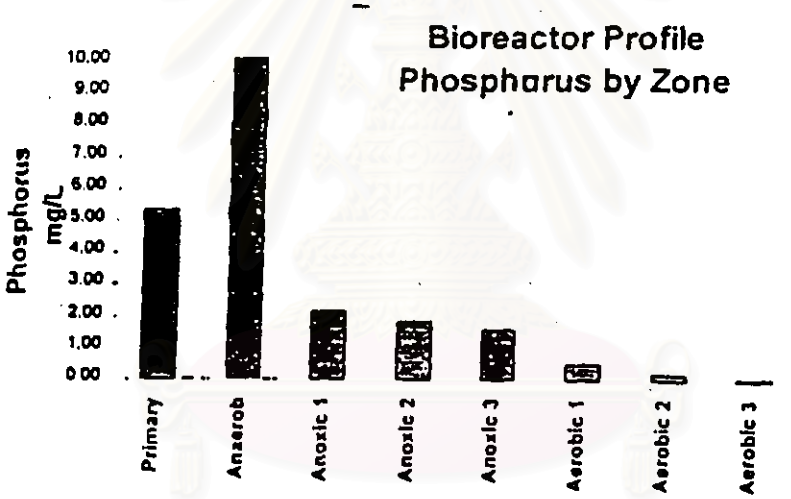
Stevens และคณะจึงได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาความสามารถของน้ำสลัดจ์ที่ปลายขั้นตอนแอโรบิกว่าจะสามารถจับใช้ฟอสฟอรัสที่เติมเข้าไปเพิ่มได้หรือไม่เมื่อทำการเติมอากาศต่อไปอีก โดยผลการทดลองแสดงในรูปที่ 2.17 พบว่าฟอสฟอรัสสามารถถูกจับใช้ต่อไปได้อีกจนหมดเมื่อเวลาผ่านไปเพียง 20 นาที



รูปที่ 2.14 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยและจับใช้ภายใต้ปริมาณโซเดียมอะซิเทตต่างๆที่ใช้ : (▲), (□), (■), (○) และ (●) แทน 0, 20, 30, 50 และ 60 มก.ซีโอดี/ล.(Jones และคณะ, 1987)



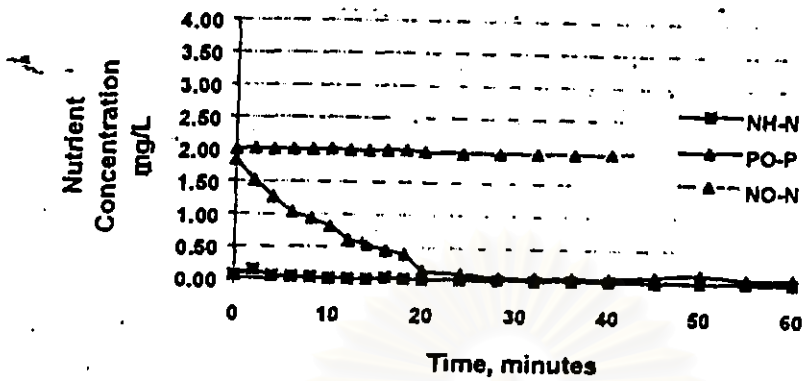
รูปที่ 2.15 ขั้นตอนการเดินระบบของ Westbank Plant (Stevens และคณะ, 1997)



รูปที่ 2.16 โพรไฟล์ฟอสฟอรัสที่ตำแหน่งต่างๆของระบบ (Stevens และคณะ, 1997)

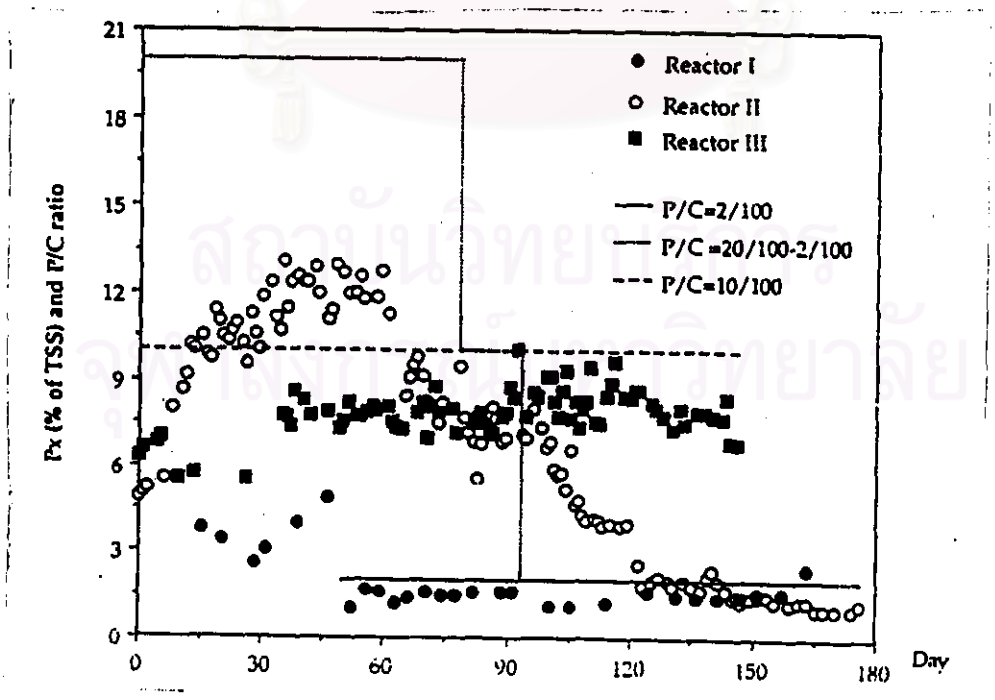
Liu และคณะ (1997) ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างฟอสฟอรัสและคาร์บอนที่ใช้เลี้ยงระบบแอนแอโรบิก/แอโรบิก ซึ่งคาร์บอนที่ใช้ในการทดลองนี้คือโซเดียมอะซิเทต ในการทดลองนี้ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างฟอสฟอรัสและคาร์บอนที่มีต่อปริมาณฟอสฟอรัสในเซลล์ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.18

ในการทดลองนี้แบ่งเป็น 3 ถังปฏิกรณ์ คือ ถังแรกใช้อัตราส่วนระหว่างฟอสฟอรัสและคาร์บอนเป็น 2:100 ส่วนถังที่ 2 ในช่วงแรกใช้อัตราส่วน 20:100 จนกระทั่งถึงวันที่ 50 ของการเดินระบบจึงเริ่มลดอัตราส่วนลงเหลือ 2:100 และถังที่ 3 ใช้อัตราส่วน 10:100 ตลอดการทดลอง ซึ่งผล



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของธาตุอาหาร และเวลาในการเติมอากาศที่ผ่านไป (Stovens และคณะ, 1997)

การทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้ คือ ที่อัตราส่วนระหว่างฟอสฟอรัสและคาร์บอนเป็น 2:100 จะมีฟอสฟอรัสในเซลล์เหลือเพียง 2% เนื่องจากกรณีนี้เกิดการจำกัดโพลีฟอสเฟตในเซลล์ทำให้พีเอโอมีแหล่งพลังงานน้อยสำหรับการจับใช้ฟอสฟอรัส ในทางตรงข้ามจีเอโอซึ่งไม่ถูกจำกัดโดยแหล่งพลังงานนี้ สามารถที่จะใช้อะซิเทตได้ดีอย่างดีแล้วเก็บเป็นพีเอชเอในรูปไขมัน 3HV โดยจะไม่มีการปลด



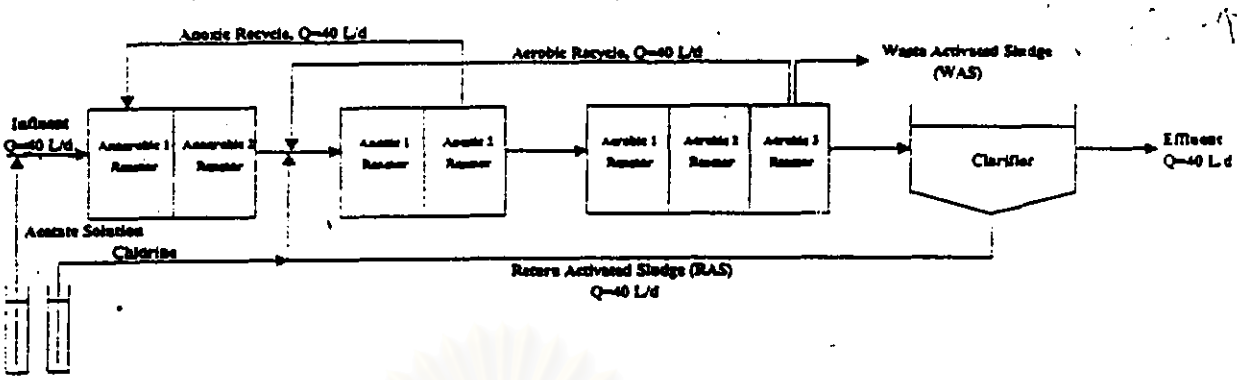
รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนฟอสฟอรัสและคาร์บอนและปริมาณฟอสฟอรัสในเซลล์ของการทดลองต่างๆ (Liu และคณะ, 1997)

ปล่อยออร์โธฟอสเฟตในขั้นตอนแอโรบิก ต่อมาเมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างฟอสฟอรัสและคาร์บอนขึ้น ทำให้มีเปอร์เซ็นต์ของฟอสฟอรัสในเซลล์เพิ่มขึ้นเป็น 6% และสัดส่วนของพีเอโอก็เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งจะทำให้อัตราส่วนระหว่างออร์โธฟอสเฟตที่ปลดปล่อยต่ออะซิเทตที่ใช้ไปเพิ่มมากขึ้นและพีเอโอก็ใช้อะซิเทตอย่างรวดเร็ว ในกรณีที่อัตราส่วนระหว่างฟอสฟอรัสและคาร์บอนเพิ่มมากกว่า 10:100 พีเอโอใช้อะซิเทตแล้วไปเก็บเป็นพีเอชบีได้ดีมีอัตราส่วนระหว่างออร์โธฟอสเฟตที่ปลดปล่อยต่ออะซิเทตที่ใช้ไปเพิ่มขึ้นอีกและมี 3 HB เป็นส่วนประกอบมากขึ้นด้วย

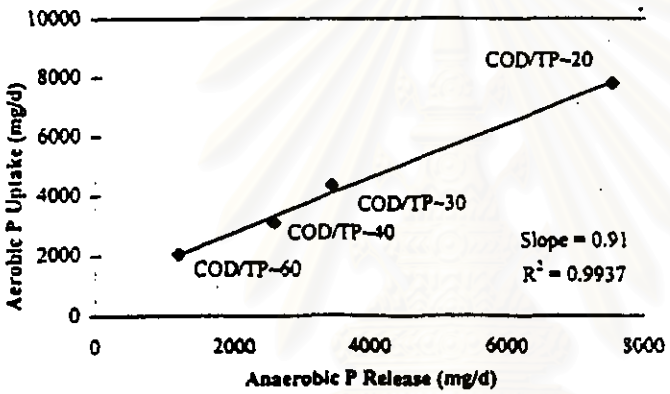
Punrattanasin และ Randall (1997) ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างซีโอดีต่อฟอสฟอรัสที่มีต่อพฤติกรรมของกระบวนการกำจัดสารอาหารโดยใช้กระบวนการยูซีทีซึ่งมีขั้นตอนการทำงานดังภาพที่ 2.19 โดยในการทดลองนี้ควบคุมให้ค่าซีโอดีมีค่าคงที่คือ 400 มก./ล. แล้วแปรค่าฟอสฟอรัสที่ป้อนเข้าระบบเพื่อให้ได้อัตราส่วนเป็น 20:1, 30:1, 40:1 และ 60:1 ซึ่งผลที่ได้พบว่าปริมาณฟอสฟอรัสที่กำจัดได้ลดลงเมื่ออัตราส่วนนี้มีค่ามากขึ้น จากที่กำจัดได้ 15มก./วันที่อัตราส่วน 20 เป็น 4.3 มก./วันที่อัตราส่วน 60 อย่างไรก็ตามอาจจะเป็นผลจากการที่มีฟอสฟอรัสที่จะกำจัดได้ลดลงเมื่ออัตราส่วนมีค่าสูงขึ้นซึ่งมีผลต่อการใช้ประโยชน์จากฟอสฟอรัส และปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำออกลดลงเมื่อมีค่าอัตราส่วนดังกล่าวเพิ่มขึ้น จาก 6.6 มก./ล.(อัตราส่วน 20) เป็น 2.2 มก./ล. (อัตราส่วน 60)

ได้ทำการดุลมวลเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่แท้จริงของฟอสฟอรัสในแต่ละการทดลอง โดยฟอสฟอรัสจะถูกปลดปล่อยในขั้นตอนแอนแอโรบิกและจับใช้ในขั้นตอนแอโรบิกที่อัตราส่วน 20 จะเกิดการปลดปล่อยและจับใช้มากที่สุดส่วนที่อัตราส่วน 60 จะตรงข้ามคือเกิดการปลดปล่อยและจับใช้น้อยที่สุด และยังพบว่าการจับใช้ฟอสฟอรัสเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการปลดปล่อยในขั้นตอนแอนแอโรบิกซึ่งแสดงผลในรูปที่ 2.20

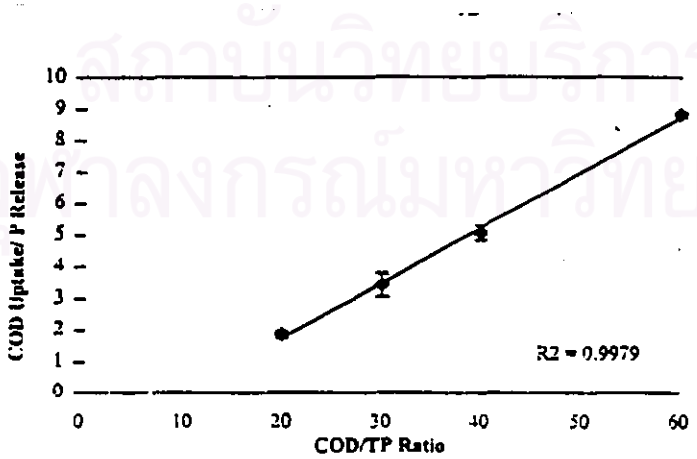
นอกจากนี้ยังศึกษาผลของอัตราส่วนนี้ที่มีต่อการผลิตและนำไปใช้ของพีเอชบี โดยพบว่าจะมีปริมาณพีเอชบีในขั้นตอนแอนแอโรบิกสูงถ้ามีการใช้พีเอชบีสูง ก็เนื่องจากซีโอดีจะถูกแปลงเข้าไปเก็บเป็นพีเอชบี และปริมาณพีเอชบีที่ลดลงสูงก็มีผลต่อการจับใช้ฟอสฟอรัสในขั้นตอนแอโรบิกเช่นกัน เนื่องจากทำให้มีพลังงานมากในการจับใช้ฟอสฟอรัสเข้ามาสร้างเป็นโพลีฟอสเฟตในเซลล์ อย่างไรก็ตามพบว่าปริมาณพีเอชบีที่ผลิตได้ถูกควบคุมโดยปริมาณซีโอดีในระบบ โดยพีเอชบีจะเพิ่มเมื่อมีอัตราส่วนซีโอดีต่อฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้น รูปที่ 2.21 แสดงอัตราส่วนซีโอดีที่ใช้ต่อฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยของการทดลองที่อัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 2.19 ขั้นตอนแสดงการเดินระบบเอสบีอาร์ (Punrattanasin และ Randall, 1997)



รูปที่ 2.20 ปริมาณฟอสฟอรัสที่จับใช้และปลดปล่อยเฉลี่ย ที่อัตราส่วนซีโอดีต่อฟอสฟอรัสต่างๆ (Punrattanasin และ Randall, 1997)

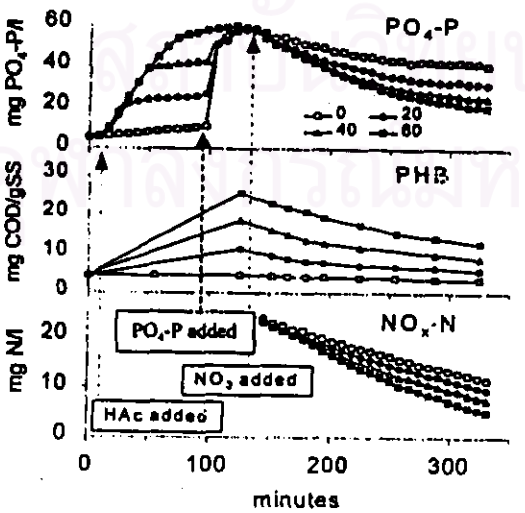


รูปที่ 2.21 อัตราส่วนเฉลี่ยของซีโอดีที่ใช้และฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยในขั้นตอนแอนแอโรบิกที่อัตราส่วนซีโอดีต่อฟอสฟอรัสต่างๆ (Punrattanasin และ Randall, 1997)

Meinhold และคณะ (1998) ทำการทดลองเติมสับสเตรตที่ความเข้มข้นต่างๆกันที่มีต่อขั้นตอนแอนอกซิกของกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัส โดยทำการทดลองที่ค่าซีโอดี 0, 20, 40 และ 60 มก./ล. ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 2.22 โดยชุดที่มีซีโอดีสูงก็จะปลดปล่อยฟอสฟอรัสได้สูง หลังจากนั้นเพื่อจะศึกษาการจับใช้ฟอสฟอรัสในขั้นตอนแอนอกซิก จึงเติมฟอสฟอรัสลงไปในชุดทดลองที่มีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสน้อยเพื่อไม่ให้มีผลต่อการศึกษาการจับใช้ฟอสฟอรัส โดยผลพบว่าชุดทดลองที่มีซีโอดีสูงก็จะจับใช้ฟอสฟอรัสได้ดีกว่าและมีอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสเบื้องต้นสูงกว่าเช่นกัน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับปริมาณพีเอชบีในเซลล์ด้วย

Stephens และ Stensel (1998) กล่าวว่าเมื่อมีค่าซีโอดีที่เติมในระบบต่ำ ก็จะทำให้มีการสร้างพีเอชบีน้อย ซึ่งจะทำให้มีการจับใช้ฟอสฟอรัสได้น้อยเนื่องจากมีแหล่งพลังงานน้อย และยังทำให้กลัยโคลเจนถูกออกซิไดส์ระหว่างขั้นตอนแอโรบิกได้ด้วยเพื่อการบำรุงรักษาเซลล์ ซึ่งทำให้เหลือปริมาณน้อยลงในขั้นตอนแอโรบิก และพีเอชบีก็ต้องถูกออกซิไดส์ในปริมาณที่มากกว่าเดิมเพื่อสร้างกำลังของกลัยโคลเจน ซึ่งจะส่งผลให้การกำจัดฟอสฟอรัสได้ผลไม่ดี

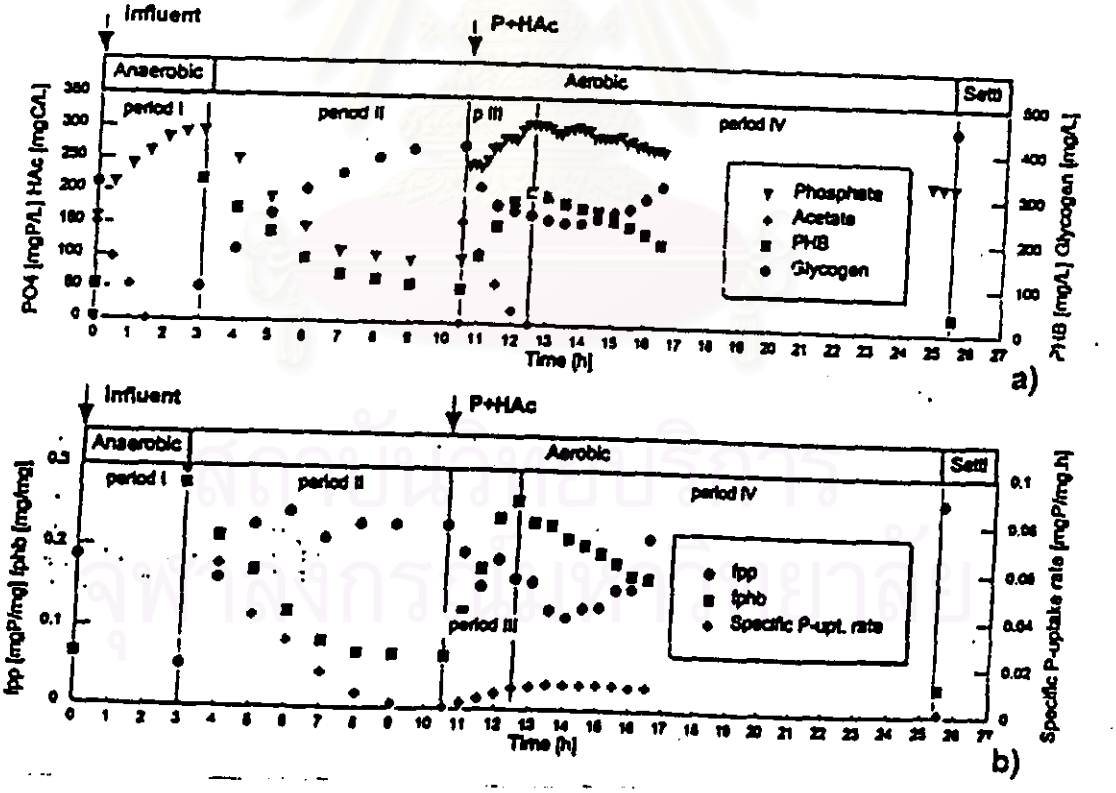
Brdjanovic และคณะ (1998) ได้ศึกษาผลจากการยืดเวลาการเติมอากาศที่มีต่อการกำจัดฟอสฟอรัส โดยทำการทดลองแบบแบตช์เติมกรดอะซิติกในตอนเริ่มระบบ 150 มก.คาร์บอน/ล. และฟอสฟอรัส 150 มก.ฟอสฟอรัส/ล. แล้วจึงเข้าสู่ขั้นตอนแอนแอโรบิกเป็นเวลา 3 ชั่วโมงและเข้าขั้นตอนแอโรบิก หลังจากผ่านการเติมอากาศไป 7.5 ชั่วโมง ก็เติมกรดอะซิติกและฟอสฟอรัสเป็นปริมาณเท่าเดิมอีกครั้ง แล้วเติมอากาศต่อไปอีก 15 ชั่วโมง (รวมเป็นเติมอากาศทั้งหมด 22.5 ชั่วโมง)



รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์ของผลการทดลองที่ได้กับความเข้มข้นสับสเตรตที่ใช้ (Meinhold, 1998)

จากการทดลองแสดงดังในรูปที่ 2.23 พบว่า ในคาบที่ 1 มีการใช้กรดอะซิติกหมดตั้งแต่ 90 นาทีแรก และเกิดการปลดปล่อยฟอสฟอรัสมากถึง 293 มก.ฟอสฟอรัส/ล. มีการใช้กลัยโคเจนเพื่อเป็นแหล่งพลังงานสำหรับการเคลื่อนย้ายอะซิเตทไปเก็บในรูปพีเอชบี พบว่าอัตราส่วนพีเอชบีต่อมวลจุลชีพ (fphb) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนโพลีฟอสเฟตต่อมวลจุลชีพ (fpp) ลดลง

สำหรับในคาบที่ 2 ซึ่งเป็นช่วงแรกของการเติมอากาศ พีเอชบีถูกออกซิไดส์มากถึง 75% มีการสร้างกลัยโคเจนขึ้น และมีการเก็บโพลีฟอสเฟตประมาณ 67% ไว้ในมวลจุลชีพ ซึ่งเมื่อมีการใช้พีเอชบีไป ค่า fphb จะลดลงและค่า fpp เพิ่มขึ้น จนเกือบคงที่ที่ปลายคาบที่ 2 ค่าอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสจำเพาะมีค่าเท่ากับ 0 และได้อัตราส่วนเด็มแคลวีเอสเอสต่อเด็มแอลเอสเอสต่ำมากคือ 0.66



รูปที่ 2.23 (a) ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องของการยืดเวลาเติมอากาศในระบบแบตช์ของการทดลองชุดแรก, (b) ค่าพลวัตของอัตราส่วน fphb, fpp และอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสจำเพาะระหว่างการทดลอง (Brdjanovic และคณะ, 1998)

ส่วนในภาพที่ 3 มีการเติมกรดอะซิติกและฟอสฟอรัสเพิ่มลงไป พบว่าในช่วง 2 ชั่วโมงแรก มีการจับใช้อะซิเทตและปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกสู่ภายนอก พีเอชบีถูกสร้างขึ้นและกลัยโคลเจนถูกใช้ไป และหลังจากที่ใช้อะซิเทตไปหมดแล้ว ก็เริ่มมีการจับใช้ฟอสฟอรัสอย่างช้าๆ พร้อมทั้งใช้พีเอชบีและสร้างกลัยโคลเจนทดแทน โดยพบว่าในคาบที่ 4 มีการจับใช้ฟอสฟอรัสเพียง 7% จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง ค่า fphb มีค่าเข้าใกล้ 0 และ fpp มีค่าสูงมาก

สำหรับการทดลองที่ 2 เติมกรดอะซิติกตอนเริ่มระบบ 7.5 มก.คาร์บอน/ล. แล้วนำน้ำสลัดจ์จากปลายขั้นตอนแอนแอโรบิกมาทำการหมุนเหวี่ยงและนำสลัดจ์ที่แยกตัวมาล้างด้วยน้ำ 2 ครั้งเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีฟอสฟอรัสตกค้าง แล้วทำการเติมอากาศต่อไปเป็นเวลา 22.25 ชั่วโมง โดยก่อนจะสิ้นสุดการทดลองเป็นเวลา 3 ชั่วโมงได้เติมฟอสฟอรัสเพิ่มเข้าไป 100 มก.ฟอสฟอรัส/ล. ในช่วงนี้มีการวัดค่าฟอสฟอรัสและกลัยโคลเจนอย่างละเอียด และหลังจากที่เติมฟอสฟอรัสไปแล้ว 1 ชั่วโมง ก็เติมโพแทสเซียม 15 มก.โพแทสเซียม/ล. และแมกนีเซียม 30 มก.แมกนีเซียม/ล. ผลการทดลองแสดงอยู่ในรูปที่ 2.24 พบว่าไม่มีฟอสฟอรัสและอะซิเทตเหลือค้างอยู่หลังจากล้างเซลล์ และหลังจากที่เติมฟอสฟอรัสเพิ่มเข้าไป 1 ชั่วโมง พบว่าค่ากลัยโคลเจนและฟอสฟอรัสเทบไม่มีการเปลี่ยนแปลง และพีเอชบีที่วัดหลังจากเติมฟอสฟอรัสไปก็เหลืออยู่น้อยมาก

จากการทดลองข้างต้นสามารถสรุปได้ว่ากลัยโคลเจนที่มีอยู่ในขั้นตอนแอโรบิกไม่สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานสำหรับการจับใช้ฟอสฟอรัสได้ โดยจะใช้เพื่อการบำรุงรักษาเซลล์เท่านั้น และการจับใช้ฟอสฟอรัสยังขึ้นกับความสามารถในการสะสมปริมาณโพลีฟอสเฟตในเซลล์ของแบคทีเรียด้วย

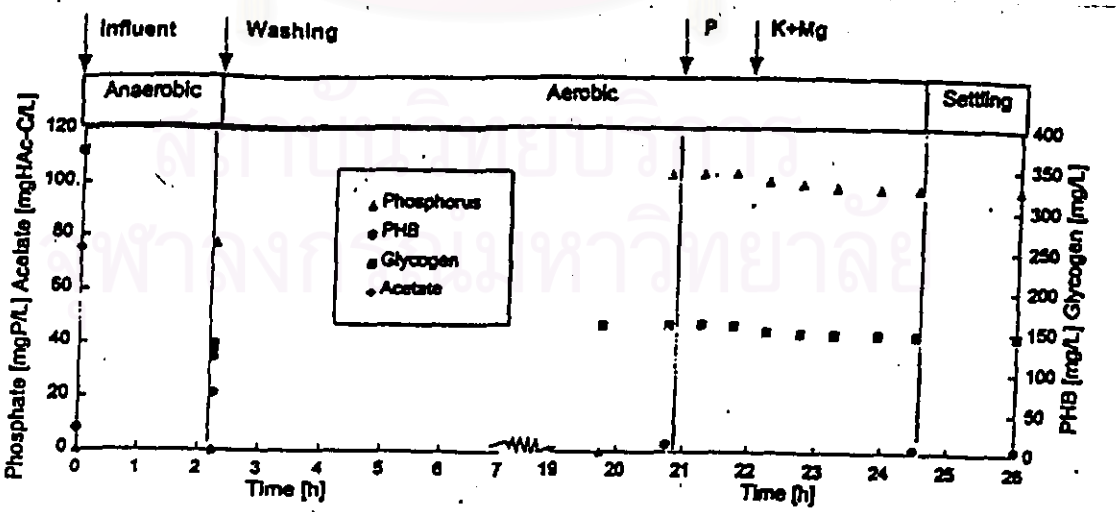


Fig. 3. Concentration of relevant parameters during "prolonged" SBR cycle of experiment E3.

รูปที่ 2.24 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องระหว่างการยืดเวลาการเติมอากาศของระบบแบตช์ในการทดลองที่ 2 (Brdjanovic และคณะ, 1998)

2.7 กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบเอสบีอาร์ (Sequencing Batch Reactor, SBR)

2.7.1 ความเป็นมาของระบบเอสบีอาร์

ระบบเอสบีอาร์เป็นระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพที่ใช้ถังปฏิกรณ์เพียงใบเดียวทำหน้าที่เป็นทั้งถังปฏิกิริยาและถังตกตะกอนในการบำบัดน้ำเสีย โดยไม่ต้องมีถังตกตะกอนแยกต่างหากเหมือนกระบวนการแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ แต่ถังปฏิกิริยาในกระบวนการเอสบีอาร์จะทำหน้าที่เป็นทั้งถังเลี้ยงแบกทีเรียเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียและถังตกตะกอนไปในตัว ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบเติมอากาศรุ่นแรกที่คิดค้นโดย Arden และ Lockett ในปี ค.ศ. 1914 (อ้างโดย Irvine และคณะ, 1983) โดยระบบดังกล่าวจะเป็นแบบ Fill and Draw มีการทำงานดังนี้ คือ ปล่อยให้น้ำเสียไหลเข้าถังจนเต็มแล้วทำการเติมอากาศเพื่อให้แบกทีเรียที่อยู่ภายในถังใช้ในการบำบัดน้ำเสียจนกระทั่งความสกปรกลดลง ต่อจากนั้นจึงปิดเครื่องเติมอากาศเพื่อปล่อยให้สลัดจ์จมตัวจนได้น้ำใสส่วนบน หลังจากนั้นจึงปล่อยน้ำใสส่วนนี้ทิ้งไปเหลือไว้แต่สลัดจ์ที่จมตัวอยู่ก้นถัง แต่เนื่องจากในสมัยนั้นการใช้ระบบถังเติมอากาศแบบนี้ไม่เหมาะที่จะใช้กับน้ำเสียไหลต่อเนื่อง จึงมีการพัฒนาระบบให้มีถังตกตะกอนเพื่อให้สลัดจ์จมตัวแล้วเวียนกลับมาใช้ในถังเติมอากาศ ทำให้ระบบสามารถรับน้ำเสียได้อย่างต่อเนื่อง ดังเช่นระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ที่ใช้กันอยู่เป็นส่วนใหญ่ในปัจจุบัน แต่ในการใช้ระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ก็มีข้อเสียที่ว่าต้องใช้บุคลากรที่มีความรู้ความสามารถในการควบคุมดูแลระบบซึ่งมีความยุ่งยากกว่าระบบเอสบีอาร์

หลังจากนั้นในช่วงทศวรรษที่ 1970 ระบบเอสบีอาร์ก็กลับมาเป็นที่สนใจอีกครั้ง โดยได้รับการปรับปรุงรูปแบบของระบบ มีการนำไมโครโพรเซสเซอร์มาใช้ในการควบคุมระบบรวมถึงการใช้นิวมาติกวาวล์ ไซลินอยด์วาวล์ มอเตอร์ไรสด์วาวล์ เซนเซอร์ควบคุมระดับ เครื่องวัดอัตราการไหล และเครื่องตั้งเวลาอัตโนมัติด้วย (Randall และคณะ, 1992) ระบบเอสบีอาร์แบบเดิมถูกศึกษาและปรับปรุงใหม่โดย Irvine (1979) (อ้างโดย Gardinia, 1993) จนสามารถทำงานได้เป็นที่น่าพอใจ ซึ่งระบบใหม่นี้สามารถใช้งานได้กับน้ำเสียที่มีสมบัติแปรเปลี่ยนในระยะเวลาสั้นๆ ได้ดีกว่าระบบอื่นด้วย

2.7.2 หลักการทำงานของระบบเอสบีอาร์

ระบบเติมอากาศแบบเอสบีอาร์เป็นระบบที่แตกต่างจากระบบทั่วไปที่ใช้กัน โดยระบบเอสบีอาร์นี้จะเป็นวิธีบำบัดน้ำเสียแบบแบตช์ ส่วนแบบอื่นทั่วไปจะเป็นวิธีบำบัดแบบต่อเนื่องกัน อย่างไรก็ดีไม่ได้หมายความว่าระบบเอสบีอาร์จะไม่สามารถใช้กับแหล่งน้ำเสียที่ไหลตลอดเวลา เพราะ

ต้นที่จริงหากออกแบบได้เหมาะสม ระบบจะสามารถบำบัดน้ำเสียได้เช่นเดียวกับระบบที่ทำงานติดต่อกันตลอดเวลา งานวิจัยโดย Irvine (1979) พบว่าการใช้ถังเติมอากาศจำนวน 3 ใบ จะทำให้การควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียที่ไหลต่อเนื่องทำงานได้ง่ายขึ้น

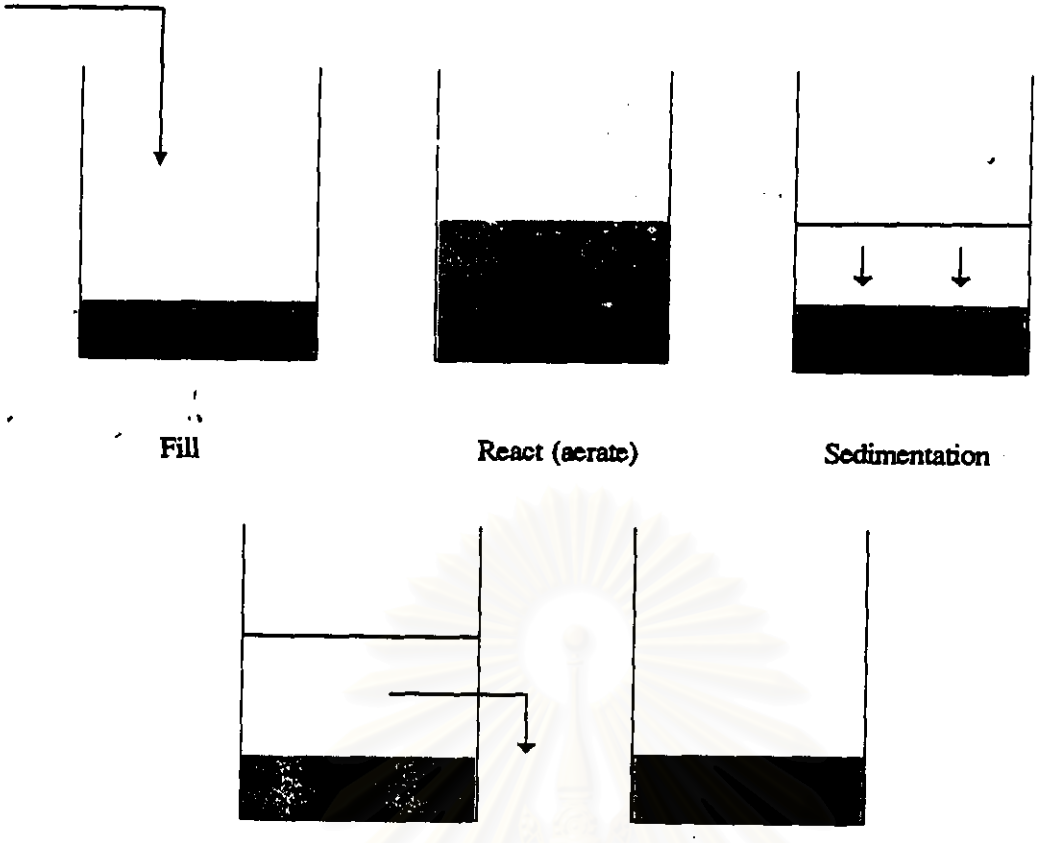
ระบบแอสบีอาร์จะทำการบำบัดน้ำเสียทีละถัง โดยไม่ต้องใช้ถังตกตะกอนแยก ถังเติมอากาศแต่ละใบจะทำหน้าที่ 5 อย่าง คือ รับน้ำเสีย (Fill) เกิดปฏิกิริยา (React) ตกตะกอน (Sedimentation) ระบายน้ำ (Draw) และพัก (Idle) ในกรณีที่ระบบใช้ถังมากกว่า 1 ใบ ณ เวลาหนึ่งๆถังแต่ละใบจะทำหน้าที่ไม่ตรงกัน ทั้งนี้เพื่อให้สามารถบำบัดน้ำเสียที่ไหลติดต่อกันได้โดยไม่ขาดตอน

ลักษณะการทำงานของระบบที่ประกอบด้วยถัง 3 ใบจะเป็นดังนี้ เริ่มจากถังใบที่ 1 จะอยู่ในระยะรับน้ำเสีย โดยน้ำเสียทั้งหมดจะไหลเข้าสู่ถังนี้จนเต็ม จากนั้นน้ำเสียก็จะถูกเติมในถังใบที่ 2 ต่อไป ในขณะที่น้ำเสียในถังใบแรกจะเข้าสู่ระยะเกิดปฏิกิริยา โดยขณะที่เติมน้ำเสียนี้จะมีการเติมอากาศแก่น้ำเสียในถังตลอดเวลา จนเมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดลงก็จะเลิกเติมอากาศเพื่อให้น้ำนิ่งและเกิดการตกตะกอน จากนั้นน้ำใสที่อยู่ตอนบนของถังจะถูกระบายออกไป เหลือน้ำตะกอนส่วนหนึ่งในระบบซึ่งเป็นส่วนที่มีจุลชีพตกตะกอนอยู่ก้นถัง จุลชีพนี้จะถูกพักไว้ในถังจนกว่าจะมีการเติมน้ำลงในถังใบนี้อีกครั้ง ถังใบที่ 2 และ 3 ก็มีลักษณะการทำงานเช่นเดียวกับถังใบแรกต่างกันเพียงการเหลื่อมกันในหน้าที่ของถังแต่ละใบ ในรูปที่ 2.25 แสดงถึงขั้นตอนการทำงานของระบบแอสบีอาร์ ดังนั้นการจัดเวลาให้ถูกต้องด้วยระบบควบคุมอัตโนมัติแบบต่างๆ จะทำให้ถังทั้ง 3 ใบสามารถรับน้ำเสียที่ไหลต่อเนื่องตลอดเวลาได้ ทั้งๆที่ถังแต่ละใบทำงานผลัดกันทีละครั้ง

จุลชีพจะอยู่ในถังแต่ละใบจะมีการระบายบางส่วนทิ้งไป ซึ่งความถี่และปริมาณของการระบายจุลชีพทิ้งจะขึ้นอยู่กับปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียและค่าเวลากักเซลล์เฉลี่ย (MCRT) ระบบใดได้รับสารอินทรีย์มากและผลิตจุลชีพได้มากก็ต้องระบายจุลชีพทิ้งบ่อย เช่น อาจต้องระบายทิ้งทุกวงจรการทำงาน แต่ระบบที่ได้รับสารอินทรีย์ต่ำ ผลิตจุลชีพได้น้อย ก็ไม่จำเป็นต้องระบายทิ้งบ่อย

ส่วนระบบเอสบีอาร์ที่ใช้ถังใบเดียวจะเหมาะกับน้ำเสียที่ไม่ได้ไหลติดต่อกันตลอดเวลา เช่น น้ำเสียจากชุมชนขนาดเล็กหรือโรงงานอุตสาหกรรมกระป๋อง การควบคุมระบบนี้ทำได้ง่าย (แต่ถังจะมีขนาดใหญ่) โดยใช้ระบบตั้งเวลาอัตโนมัติสำหรับปิดเปิดมอเตอร์หรือวาวล์ ทำให้สามารถลดการใช้แรงงานได้

ส่วนระบบที่ใช้ถังหลายใบจะเหมาะกับน้ำเสียที่ไหลทั้งวัน ความยากง่ายในการควบคุมขึ้นกับสภาวะการไหลของน้ำเสีย ความสกปรกของน้ำเสีย รวมทั้งมาตรฐานน้ำออกที่ต้องการ



รูปที่ 2.25 ขั้นตอนการทำงานของระบบเอสบีอาร์ (Randall และคณะ, 1992)

2.7.3 ระบบเอสบีอาร์ในการกำจัดฟอสฟอรัส

ในการกำจัดฟอสฟอรัสโดยระบบเอสบีอาร์ ขั้นตอนการทำงานของระบบจะประกอบด้วย การรับน้ำเสีย การเกิดปฏิกิริยาในสองสภาวะ คือ สภาวะแอนแอโรบิกและออกซิก การตกตะกอน การระบายน้ำออก และการพัก ดังแสดงในรูปที่ 2.26 ซึ่งจุดประสงค์ของขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาต่างๆมีดังนี้ (Randall และคณะ, 1992)

ก. ช่วงแอนแอโรบิก เพื่อให้เกิดการปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกมาและแปลงคาร์บอนอินทรีย์ให้ไปสะสมภายในเซลล์ในรูปของพีเอชเอ

ข. ช่วงออกซิก เกิดการจับใช้ฟอสฟอรัส ออกซิไดส์คาร์บอนอินทรีย์ที่สะสมอยู่ในรูปพีเอชเอภายในเซลล์

ส่วนการตกตะกอนเป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นภายหลังการทำปฏิกิริยา เพื่อทำให้เกิดการแยกชั้นของของแข็งกับน้ำ ซึ่งจะได้น้ำใสส่วนบนแล้วจึงเข้าสู่ขั้นตอนการระบายน้ำทิ้ง โดยทั่วไปหลังจากระบายน้ำทิ้งแล้วจะเหลือน้ำประมาณร้อยละ 25 ของทั้งหมด (Metcalf&Eddy Inc., 1991)

2.7.4 ข้อดีและข้อเสียของระบบเอสบีอาร์ (US.EPA., 1986 และ WEF, 1992)

ข้อดีของระบบเอสบีอาร์

1. จากสภาพแวดล้อมในระบบที่เปลี่ยนไปตามเวลา ทำให้เกิดการคัดพันธุ์ซึ่งจะช่วยป้องกันการไม่จมตัวของสลัดจ์อันเกิดจากการเจริญเติบโตของแบกทีเรียชนิดเส้นใย (filamentous bacteria) ซึ่งมักถูกคัดออกไปจากระบบนี้

2. ไม่ต้องมีถังตกตะกอนและระบบเวียนกลับสลัดจ์ ทำให้ไม่มีปัญหาทางกายภาพเกี่ยวกับการใช้ถังตกตะกอน เช่น ปัญหาการไหลลัดวงจร (short circuit) เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำในถังกับน้ำที่เข้ามา หรือปัญหาประสิทธิภาพของอุปกรณ์กวาดสลัดจ์ไปที่หลุมเก็บสลัดจ์ เป็นต้น

3. ตามทฤษฎี ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของระบบแบตช์ย่อมดีกว่าแบบไหลต่อเนื่อง สามารถรองรับน้ำเสียในกรณีที่มีปริมาณมากหรือมีความเข้มข้นสูงในช่วงเวลาสั้นๆได้ดี

4. สามารถดัดแปลงหน้าที่การทำงานให้สามารถกำจัดคาร์บอนอินทรีย์ ไนโตรเจน หรือฟอสฟอรัสได้โดยไม่ต้องปรับปรุงโครงสร้างถัง

5. มีความยืดหยุ่นในการปรับระยะเวลาในแต่ละหน้าที่การทำงาน ให้เหมาะสมกับความเข้มข้นของน้ำเสียที่แปรเปลี่ยน

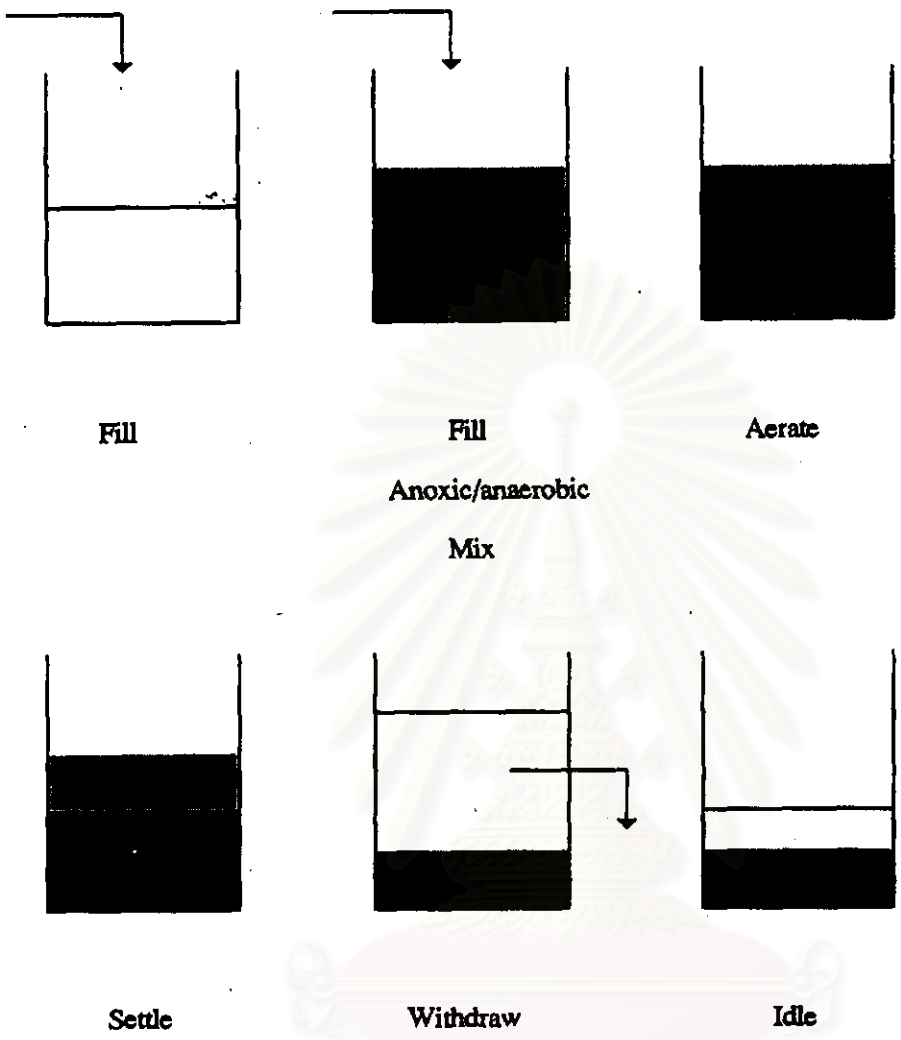
6. ในการเดินระบบในช่วงแรกของการใช้งาน ปริมาณน้ำเสียอาจน้อยกว่าที่ออกแบบไว้มาก สามารถปรับระดับน้ำในถังให้เหมาะกับปริมาณน้ำเสียได้

ข้อเสียของระบบเอสบีอาร์

1. ถ้าน้ำเสียไหลติดต่อกันตลอดวันในปริมาณที่ไม่คงที่ การควบคุมดูแลระบบเอสบีอาร์แบบหลายถังจะต้องการระบบอัตโนมัติหลายอย่างที่ไม่จำเป็นต้องมีในระบบเติมอากาศแบบอื่น

2. ในกรณีที่ใช้ถังใบเดียว ต้องใช้ถังขนาดใหญ่มาก

3. อาจมีปัญหาหารอุดตันของอุปกรณ์เติมอากาศในช่วงตกตะกอนและระบายน้ำใส ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของอุปกรณ์เติมอากาศด้วย



รูปที่ 2.26 ระบบเอสบีอาร์ในกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัส (Randall และคณะ, 1992)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย