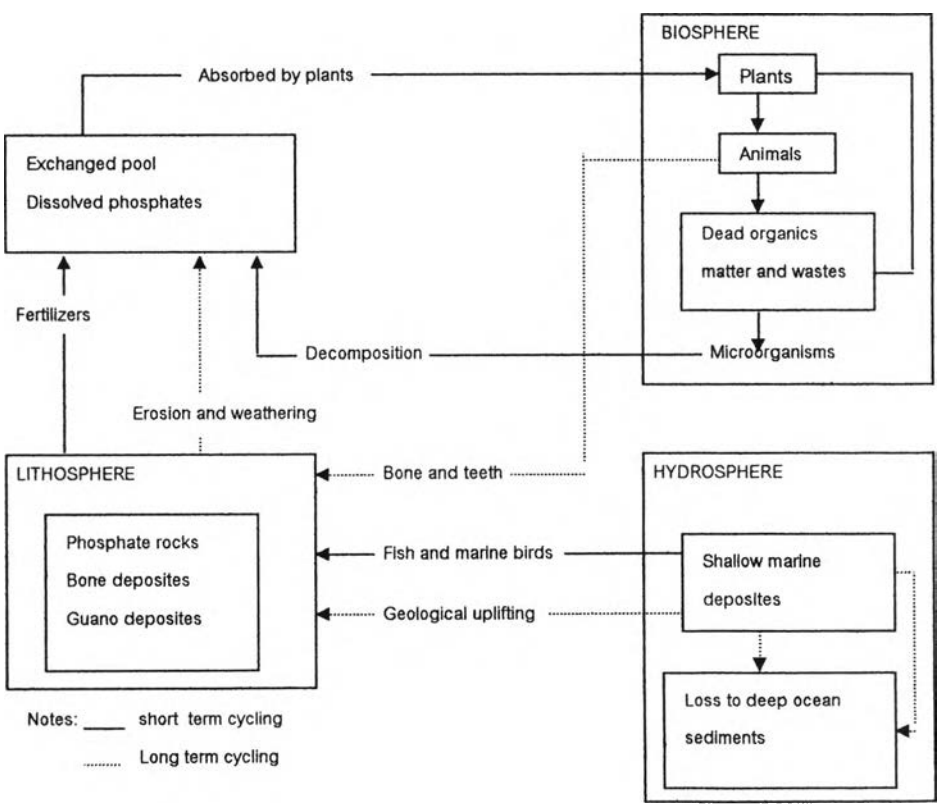
บทที่ 2

ทบทวนเอกสาร

2.1 ความสำคัญของฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่มีความสำคัญต่อระบบนิเวศน์ เพราะเป็นธาตุที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการแปรรูประหว่างเอทีพี (adenosinetriphosphate, ATP) กับ เอดีพี (adenosinediphosphate, ADP) ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานสำหรับปฏิกิริยาเคมีภายในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต และยังเป็นสารประกอบของ RNA และ DNA ในเซลล์สิ่งมีชีวิตอีกด้วย (Mukherjee, 1996) วัฏจักรฟอสฟอรัสเป็นดังรูปที่ 2.1 ในระบบนิเวศน์นั้นฟอสฟอรัสจะปรากฏบนพื้นผิวโลกเป็นหลักโดยจะสะสมในหินและดิน เมื่อเกิดการกัดเซาะโดยธรรมชาติ ฟอสฟอรัสก็จะถูกชะลงสู่แหล่งน้ำในรูปของฟอสเฟต มีการประมาณว่าในแต่ละปีฟอสฟอรัสจะถูกชะลงสู่แหล่งน้ำเป็นปริมาณถึง 20 ล้านตัน (Mukherhee, 1996)



รูปที่ 2.1 วัฏจักรฟอสฟอรัส (Mukherjee, 1996)

ฟอสฟอรัสที่พบในแหล่งน้ำธรรมชาติเกิดจากการชะละลายตามธรรมชาติและการปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำ ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับพืช เมื่อสัตว์กินพืชก็จะได้รับฟอสฟอรัสและนำไปใช้ในการสร้างเปลือก กระดูกและฟัน ดังนั้นเมื่อพืชและสัตว์ตายฟอสฟอรัสก็จะถูกย่อยออกมาและถูกน้ำชะปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำ กิจกรรมการดำรงชีวิตของมนุษย์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้มีฟอสฟอรัสในน้ำเสีย เช่น การบริโภคพืชและสัตว์และขับถ่ายของเสียที่มีฟอสฟอรัสปนออกมา การใช้สารซักฟอกหรือน้ำยาทำความสะอาดที่มีฟอสฟอรัสเป็นส่วนประกอบ เป็นต้น น้ำเสียอุตสาหกรรมบางประเภทมีฟอสฟอรัสปนอยู่เนื่องจากการใช้สารเคมีสำหรับทำความสะอาดที่มีฟอสฟอรัสเป็นส่วนประกอบ การใช้ฟอสฟอรัสเพื่อป้องกันการตกตะกอนในหม้อไอน้ำ และการใช้ฟอสฟอรัสเพื่อป้องกันการกัดกร่อนในวงจรทำความเย็น รวมทั้งอุตสาหกรรมที่ใช้ฟอสฟอรัสในกระบวนการผลิตด้วย เช่น อุตสาหกรรมปุ๋ย อุตสาหกรรมสารซักฟอก และอุตสาหกรรมกรดฟอสฟอริก เป็นต้น ฟอสฟอรัสที่พบในแหล่งน้ำมีอยู่ 3 รูปแบบด้วยกันคือ ออร์โธฟอสเฟต โพลี-ฟอสเฟต และฟอสฟอรัสอินทรีย์ ตารางที่ 2.1 แสดงถึงปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำเสียชุมชน ซึ่งจะเห็นว่าร้อยละ 70 ของฟอสฟอรัสทั้งหมดเป็นอนินทรียสาร

ตารางที่ 2.1 ฟอสฟอรัสในน้ำเสียจากชุมชน

รูปแบบของฟอสฟอรัส	มก./ล.	กรัม/คน/วัน
Total phosphorus, as P	4 - 15	0.6 – 4.5
- Organic phosphorus	0.3 x (Total-P)	0.3 x (Total-P)
- Inorganic phosphorus (ortho-P & poly-P)	0.7 x (Total-P)	0.7 x (Total-P)

อ้างอิง : เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์ (2536)

ถ้าในแหล่งน้ำธรรมชาติโดยเฉพาะแหล่งน้ำนิ่งหรือแหล่งน้ำปิด เช่น อ่างเก็บน้ำ หรือปากแม่น้ำมีฟอสฟอรัสในปริมาณที่มากเกินไป อาจทำให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน ซึ่งเป็นผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมกล่าวคือ ฟอสฟอรัสเป็นอาหารของสาหร่าย เมื่อมีฟอสฟอรัสในปริมาณมากสาหร่ายจะเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว (algal bloom) ในเวลากลางคืนสาหร่ายจะใช้ออกซิเจนในแหล่งน้ำจนทำให้เกิดภาวะขาดแคลนออกซิเจน ส่งผลให้สิ่งมีชีวิตอื่นในแหล่งน้ำรวมทั้งสาหร่ายเองตายลงและทำให้แหล่งน้ำนั้นเน่าเสียในที่สุด

2.2 วิธีการกำจัดฟอสฟอรัส

การกำจัดฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสีย ใช้วิธีการทำให้ฟอสฟอรัสที่ละลายเปลี่ยนรูปเป็นของแข็ง จากนั้นจึงทำการแยกของแข็งดังกล่าวออกจากน้ำเสียด้วยการตกตะกอน วิธีการดังกล่าวแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือวิธีการทางเคมีและวิธีการทางชีวภาพ ดังนี้

2.2.1 วิธีการทางเคมี

การกำจัดฟอสฟอรัสด้วยวิธีการทางเคมีทำได้โดยการเติมสารเคมีลงไปในน้ำเสีย เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำอยู่และรวมตัวกันเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ จากนั้นจึงทำการแยกสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำดังกล่าวออกจากน้ำเสียด้วยการตกตะกอน สารเคมีที่ใช้ได้แก่เกลือของโลหะและปูนขาว แต่โดยทั่วไปไม่นิยมใช้ปูนขาวเนื่องจากทำให้เกิดสลัดจ์มากเมื่อเทียบกับเกลือของโลหะ เกลือของโลหะที่นิยมใช้คือเกลือของเหล็กและอลูมินัม ทั้งนี้อาจมีการเติมโพลีเมอร์ลงไปด้วยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจับตัวของสารประกอบที่เป็นของแข็ง สมการในการเกิดปฏิกิริยาของเกลือโลหะและปูนขาวเป็นดังนี้ (Metcalf & Eddy, 1991)

การตกตะกอนด้วยเกลือของอลูมินัม

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

การตกตะกอนด้วยเกลือของเหล็ก

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

การตกตะกอนด้วยปูนขาว

$$10\,Ca^{+2} + 6\,PO_4^{-3} + 2\,OH^- \longleftrightarrow Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2\downarrow \qquad (2.3)$$

ในผังกระบวนการบำบัดน้ำเสียทั่วไปนั้น ตำแหน่งในการเติมสารเคมีเพื่อกำจัดฟอสฟอรัสมีอยู่หลายจุดด้วยกัน ได้แก่การเติมก่อนถังตกตะกอนขั้นที่ 1 (pre-precipitation) การเติมก่อนถังตกตะกอนขั้นที่ 2 (co-precipitation) และการเติมหลังถังตกตะกอนขั้นที่ 2 (post-

precipitation) ซึ่งการเลือกรูปแบบขึ้นอยู่กับความเหมาะสม ตำแหน่งของการเติมสารเคมีแสดงไว้ในรูปที่ 2.2

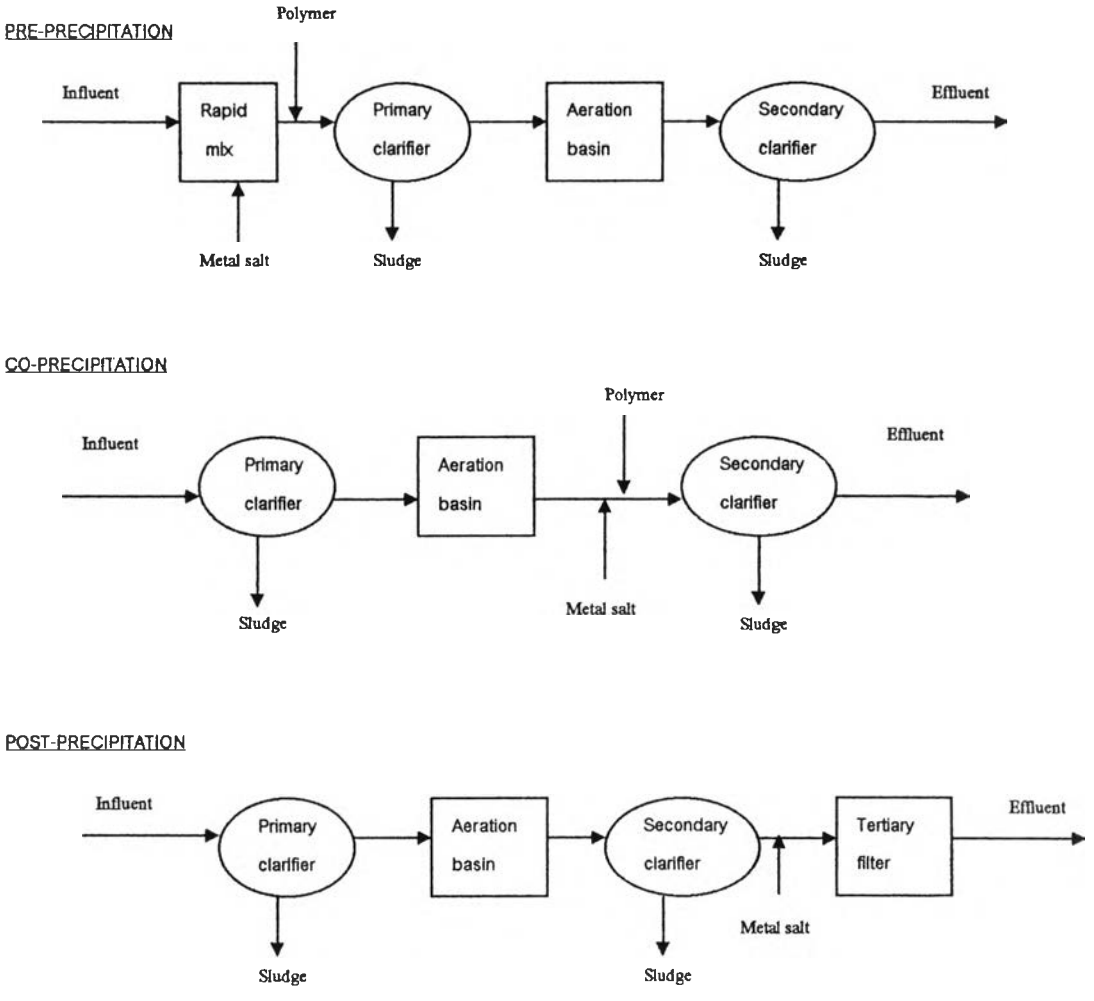
2.2.2 วิธีการทางชีวภาพ

วิธีการทางชีวภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสเป็นการใช้จุลชีพชนิดพิเศษซึ่งสามารถจับใช้ฟอสฟอรัสไว้ในเซลล์ในปริมาณที่มากกว่าความต้องการตามปกติของเซลล์ จุลชีพประเภทนี้จะเจริญเติบโตได้ดีในระบบบำบัดน้ำเสียที่มีสภาพแอนแอโรบิกอยู่ก่อนหน้าสภาพแอโรบิก หรือเรียกว่ากระบวนการแอนแอโรบิก/แอโรบิก ในขั้นตอนแอนแอโรบิกจุลชีพชนิดนี้จะปล่อยฟอสฟอรัสในเซลล์ออกมา ต่อจากนั้นในขั้นตอนแอโรบิกก็จะมีการจับใช้ฟอสฟอรัสกลับเข้าไปใหม่ ซึ่งรวมถึงฟอสฟอรัสที่มีอยู่ในน้ำเสียที่เข้าระบบด้วย กลไกดังกล่าวนี้เรียกว่าการจับใช้ฟอสฟอรัสอย่างฟุ่มเฟือย (luxury phosphorus uptake) ฟอสฟอรัสจะถูกกำจัดออกจากระบบโดยการระบายสลัดจ์ส่วนเกินออกไป กลไกการกำจัดฟอสฟอรัสด้วยวิธีการทางชีวภาพนี้จะกล่าวถึงโดยละเอียดในหัวข้อถัดไป

2.3 หลักการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

ในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพทั่วไปนั้น กลุ่มจุลชีพในระบบจะจับใช้ฟอสฟอรัสเพื่อการสังเคราะเซลล์และการเกิดปฏิกิริยาเคมีภายในเซลล์ โดยปริมาณฟอสฟอรัสภายในเซลล์มีค่าประมาณร้อยละ 1.5 – 2 ของน้ำหนักเซลล์แห้ง ส่วนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพโดยผ่านกระบวนการแอนแอโรบิก/แอโรบิกนั้น กลุ่มจุลชีพในระบบจะมีความแตกต่างออกไป กล่าวคือ กระบวนการแอนแอโรบิก/แอโรบิกจะทำให้เกิดสภาวะที่เอื้อต่อการเจริญเติบโตของจุลชีพกลุ่มหนึ่งซึ่งรู้จักกันโดยทั่วไปว่าพีเอโอ (phosphorus accumulating organisms, PAOs) พีเอโอสามารถจับใช้ฟอสฟอรัสในปริมาณที่มากกว่าที่เซลล์ต้องการตามปกติ หรือเรียกว่า การจับใช้ฟอสฟอรัสอย่างฟุ่มเฟือย ซึ่งทำให้ภายในเซลล์มีปริมาณฟอสฟอรัสอยู่ถึงร้อยละ 4 – 12 ของน้ำหนักเซลล์แห้ง ส่งผลให้เกิดการกำจัดฟอสฟอรัสได้มากกว่าระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพทั่วไป 2.5 – 4 เท่า (WEF and ASCE, 1992)

กลไกการจับใช้ฟอสฟอรัสอย่างฟุ่มเฟือยเป็นดังนี้



รูปที่ 2.2 ตำแหน่งการเติมสารเคมีเพื่อกำจัดฟอสฟอรัส (Metcalf & Eddy, 1991)

สภาพแอนแอโรบิก

ในสภาพแอนแอโรบิกจะเกิดกระบวนการหมักเป็นขั้นตอนแรก สารอินทรีย์ในน้ำเสียจะถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของกรดไขมันระเหยง่ายที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ (short chain volatile fatty acids, SCVFAs) เช่น กรดน้ำส้ม (acetic acid, HAc) ต่อจากนั้นพีเอโอจะดูดซึมกรดไขมันระเหยง่ายดังกล่าวเข้าไปไว้ในเซลล์ โดยส่วนหนึ่งจะถูกนำไปใช้ในกระบวนการคะแทบอลิซึมและอีกส่วนหนึ่งจะถูกเปลี่ยนไปเป็น 3-hydroxybuterate (3HB), 3-hydroxyvalerate (3HV), 3-hydroxy-2-methybyterate (3H2MV) และ 3-hydroxy-2-methyvalerate (3H2MV) ซึ่งเป็นส่วนประกอบของพีเอชเอ (polyhydroxyalkanoate, PHAs) สะสมไว้เป็นอาหารสำรองภายในเซลล์ ดังสมการที่ 2.4

$$\text{substrate} \xrightarrow{\text{fermentation}} \text{acetate \& propionate} \xrightarrow{\text{PAOs}} \begin{matrix}\text{3HB}\\ \text{3HV}\\ \text{3H2MB}\\ \text{3H2MV}\end{matrix} \longrightarrow \text{PHAs} \qquad \text{.....(2.4)}$$

พลังงานที่ใช้ในการดูดซึมและเปลี่ยนรูปวีเอฟเอ (volatile fatty acids, VFAs) ในขั้นตอนนี้ได้จากการสลายเอทีพีที่อยู่ในเซลล์ และเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบเอดีพี โดยมีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกมาพร้อมกับการปลดปล่อยพลังงานด้วย ดังแสดงในสมการที่ 2.5

$$\text{ATP} \longrightarrow \text{ADP} + \text{P} + \text{energy} \qquad \text{.....(2.5)}$$

สภาพแอโรบิก

ในสภาพแอโรบิกพีเอโอจะทำการย่อยสลายพีเอชเอที่เก็บไว้ในเซลล์เกิดเป็นเซลล์ใหม่ น้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และพลังงาน ดังแสดงในสมการ 2.6

$$\text{PHAs} + O_2 \longrightarrow \text{biomass} + H_2O + CO_2 + \text{energy} \qquad \text{.....(2.6)}$$

พลังงานที่ได้จากขั้นตอนนี้จะถูกนำไปรวมกับเอดีพี โดยพีเอโอจะจับใช้ฟอสฟอรัสที่อยู่ในน้ำเข้ามาร่วมในปฏิกิริยาด้วย เกิดเป็นสารประกอบเอทีพีเก็บไว้ในเซลล์ ดังแสดงในสมการที่ 2.7

$$\text{ADP} + \text{P} + \text{energy} \longrightarrow \text{ATP} \qquad \text{.....(2.7)}$$

2.4 ปฏิกิริยาชีวเคมี

ปฏิกิริยาชีวเคมีซึ่งเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนสารคาร์บอนอินทรีย์ไปเป็นพีเอชเอ และการถ่ายเทพลังงานภายในเซลล์นั้น จากการศึกษาในช่วงแรก Comeau และคณะ (1986) สรุปว่าพลังงานที่ใช้ในปฏิกิริยาได้มาจากการสลายตัวของโพลีฟอสเฟต ส่วนเอ็นเอดีเอช (nicotinamide adenine dinucleotide reduced form, NADH) ที่ใช้ในการสร้างพีเอชบี (พีเอชเอที่พบในงานวิจัยช่วงแรกจะอยู่ในรูปของพีเอชบี) นั้นได้มาจากวัฏจักรทีซีเอ (tricarboxylic acid cycle, TCA

cycle) ในขณะที่ Mino และคณะ (1987; อ้างโดย Matsuo และคณะ, 1992) พบว่ากลัยโคเจนมีส่วนสำคัญต่อปฏิกิริยาชีวเคมีภายในเซลล์ เนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานและเป็นตัวผลิตเอ็นเอดีเอชซึ่งใช้ในการสร้างพีเอชบี

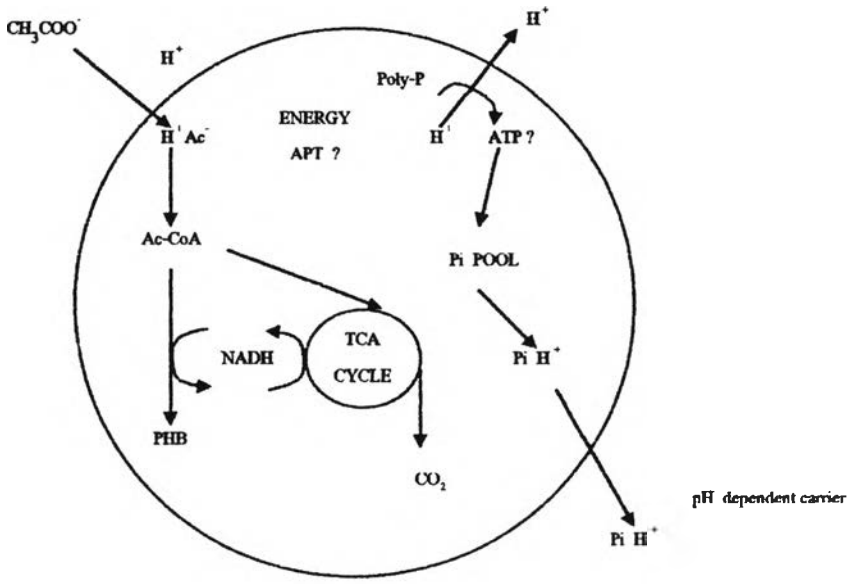
2.4.1 ปฏิกิริยาชีวเคมีตามหลักการของ Comeau

Comeau และคณะ (1986) ได้เสนอแบบจำลองของการเกิดปฏิกิริยาชีวเคมีภายในเซลล์จุลชีพในระบบกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพโดยใช้โพลีฟอสเฟตที่สะสมอยู่ภายในเซลล์เป็นแหล่งพลังงาน ส่วนเอ็นเอดีเอชที่ใช้ในการสร้างพีเอชบีนั้นมาจากวัฏจักรทีซีเอ

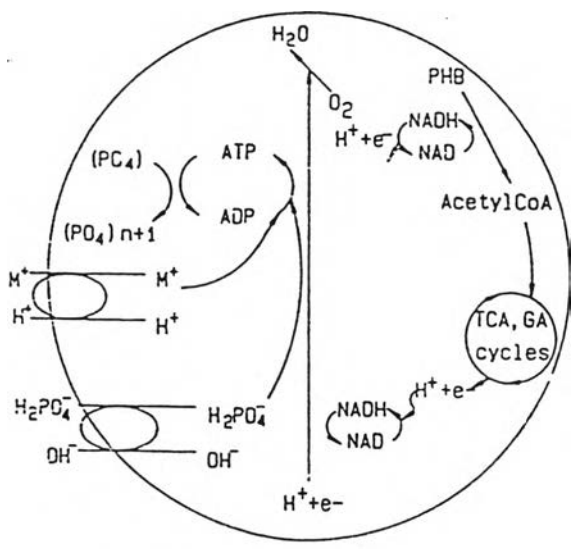
Wentzel และคณะ (1986, อ้างอิงโดย Randall และคณะ, 1992) ได้ดัดแปลงแบบจำลองดังกล่าวโดยเสนอว่าการสังเคราะห์พีเอชบีและการสลายตัวของโพลีฟอสเฟตจะขึ้นอยู่กับปริมาณ เอทีพี/เอดีพี และเอ็นเอดีเอช/เอ็นเอดี ในสภาวะที่เอทีพี/เอดีพีมีค่าต่ำโพลีฟอสเฟตจะเกิดการสลายตัวเพื่อสร้างเอทีพี และเมื่อเอ็นเอดีเอช/เอ็นเอดีมีค่าสูงจะเกิดการรับอิเลคตรอนจากเอ็นเอดีเอชโดยการสร้างพีเอชบีดังแสดงในรูปที่ 2.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเป็นดังนี้

สภาพแอนแอโรบิก

สารคาร์บอนอินทรีย์ในน้ำเสียเช่น กรดอะซิทิก จะถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์ ในขณะเดียวกันโปรตอนจะถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์ด้วยเพื่อรักษาสมดุลของประจุ อะซีเทตที่อยู่ในเซลล์นั้นส่วนหนึ่งจะถูกใช้ในวัฏจักรทีซีเอเพื่อสร้างเอ็นเอดีเอช และอีกส่วนหนึ่งจะถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นอะซิทิลโคเอ (acetyl Co-A) โดยพลังงานที่ใช้ในขั้นตอนนี้ได้มาจากการสลายตัวของโพลีฟอสเฟตและใช้เอทีพีเป็นตัวส่งถ่ายพลังงาน กล่าวคือ เมื่อโพลีฟอสเฟตสลายตัวจะมีฟอสเฟตและพลังงานเกิดขึ้น ทั้งฟอสเฟตและพลังงานนี้จะรวมกับเอดีพีกลายเป็นเอทีพีซึ่งเป็นสารประกอบที่มีพลังงานสูง เมื่อเซลล์ต้องการพลังงานเพื่อการเปลี่ยนรูปอะซิเทต เอทีพีจะเกิดการสลายตัวกลายเป็นเอดีพีและฟอสเฟตอีกครั้งหนึ่ง ฟอสเฟตจะถูกปล่อยออกจากเซลล์พร้อมกับไอออนที่มีประจุบวกชนิดอื่นเช่น โปแตสเซียมไอออน คัลเซียมไอออน หรือแมกนีเซียมไอออนเพื่อรักษาสมดุลประจุภายในเซลล์ อะซิทิลโคเอที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปสร้างเป็นพีเอชบี ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยมีเอ็นเอดีเอชที่ได้จากวัฏจักรทีซีเอทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเลคตรอน สำหรับปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ที่เข้าทำปฏิกิริยานั้น Wentzel และคณะ (1986) ได้ประมาณว่าปริมาณอะซีเทต 2.25 หน่วยที่ถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์นั้นจะถูกแบ่งไปใช้ในวัฏจักรทีซีเอ 0.25 หน่วย และส่วนที่เหลือจะถูกเปลี่ยนไปเป็นพีเอชบีดังแสดงในรูปที่ 2.5



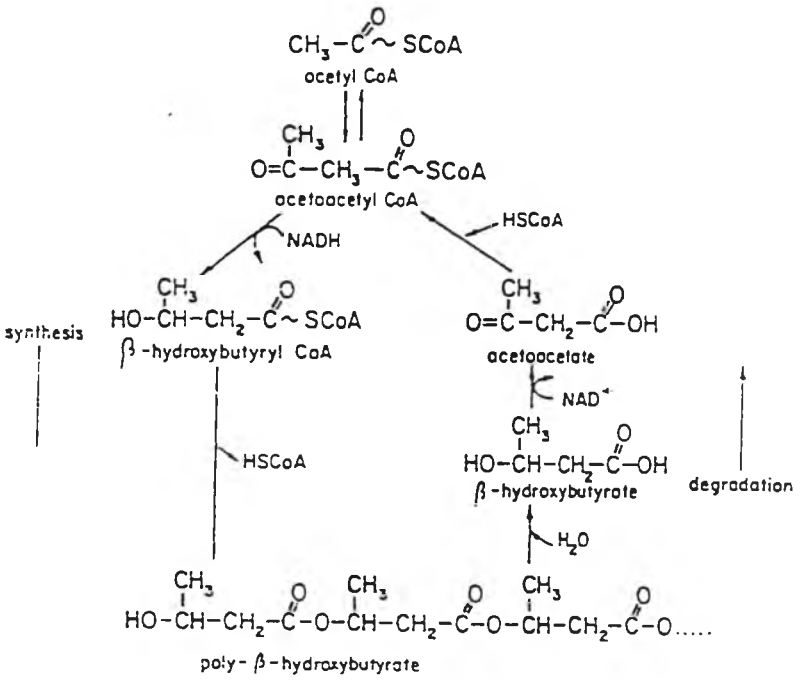
ANAEROBIC PHASE



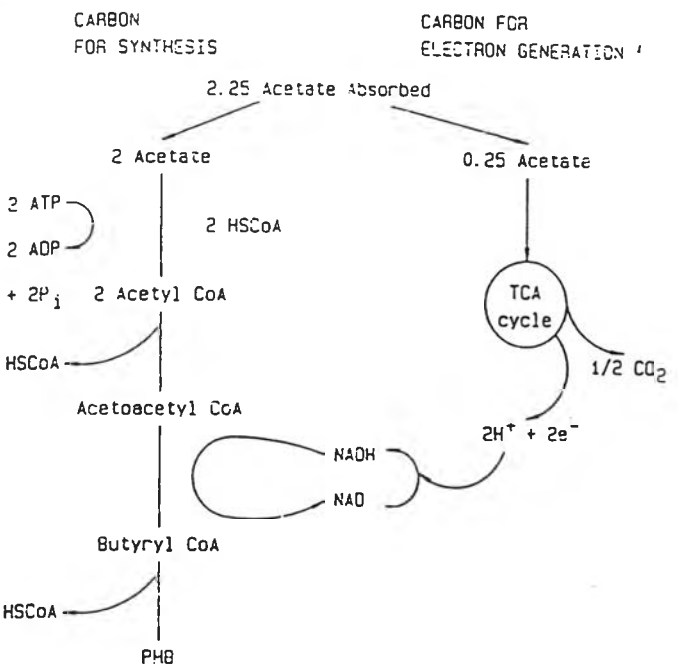
AEROBIC PHASE

รูปที่ 2.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาชีวเคมีภายในเซลล์

ตามหลักการของ Comeau และคณะ (1986, ปรับปรุงโดย Wentzel และคณะ,1986)



รูปที่ 2.4 วิถีทางชีวเคมีในการสร้างพีเอชบี



รูปที่ 2.5 สัดส่วนการใช้อะซีเทตในการสร้างพีเอชบี
และในวัฏจักรทีซีเอ (Wentzel และคณะ, 1986)

สภาพแอโรบิก

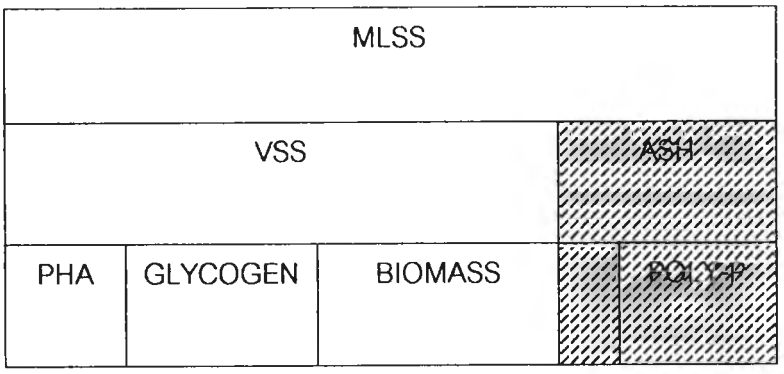
ในสภาพแอโรบิกซึ่งมีออกซิเจนเป็นตัวรับอิเลคตรอน พีเอชบีที่สะสมอยู่ในเซลล์จะถูกย่อยสลายกลายเป็นอะซีทีลโคเอและเข้าสู่วัฏจักรทีซีเอ เอ็นเอดีจะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเลคตรอนชั่วคราวเพื่อส่งผ่านอิเลคตรอนให้แก่ออกซิเจน พลังงานที่เกิดจากการสลายตัวของพีเอชบีจะถูกเก็บไว้ในรูปของเอทีพีโดยเซลล์จะดึงฟอสเฟตเข้าไปในเซลล์เพื่อทำปฏิกิริยากับเอดีพีและเก็บพลังงานดังกล่าวไว้ที่พันธะของฟอสเฟต ในการดึงฟอสเฟตเข้าสู่เซลล์นั้นจะมีไอออนของโลหะอื่นผ่านเข้ามาด้วยเพื่อรักษาสมดุลประจุภายในเซลล์เช่นเดียวกับในสภาพแอนแอโรบิก

2.4.2 ปฏิกิริยาชีวเคมีตามหลักการของ Mino

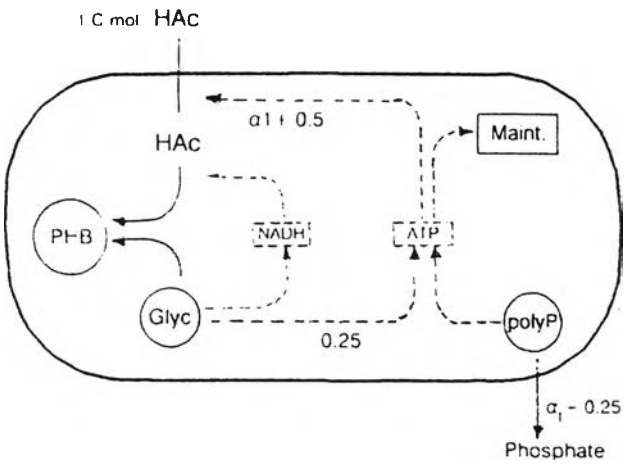
Mino และคณะ (1987; อ้างโดย Matsuo และคณะ, 1992) สรุปว่ากลัยโคเจนมีส่วนสำคัญต่อปฏิกิริยาชีวเคมีภายในเซลล์ เพราะเป็นตัวให้เอ็นเอดีเอชที่ใช้ในการสร้างพีเอชบีผ่านทางวิถีชีวเคมีอีเอ็ม (Embden-Meyerhof pathway,EMP)

Wentzel และคณะ (1991) ได้ปรับปรุงแบบจำลองของ Mino โดยเสนอว่าวิถีชีวเคมีที่เกี่ยวข้องคืออีดีพี (Entner-Doudoroff pathway, EDP) อย่างไรก็ตามความแตกต่างของอีดีพีและอีเอ็มพีคือปริมาณของเอทีพีที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยา ในขณะที่เอ็นเอดีเอชที่ได้นั้นมีค่าไม่ต่างกัน

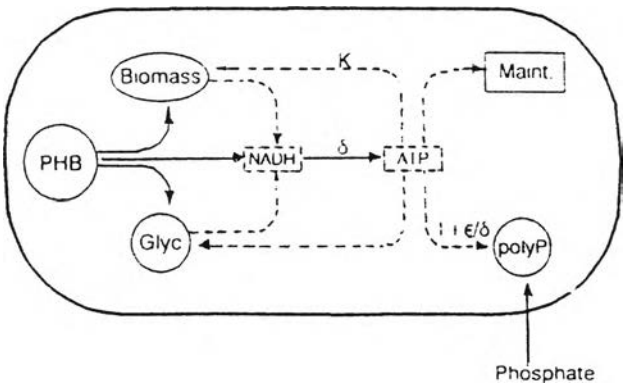
Smolders และคณะ (1994) ได้รวบรวมค่าอัตราส่วนปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยออกมาต่อปริมาณอะซีเทตที่ถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์ พบว่ามีค่าไม่คงที่แต่จะแปรผันอยู่ในช่วง 0.21 - 0.75 P mol/C mol และได้สรุปว่าพลังงานที่ใช้ในปฏิกิริยาชีวเคมีควรจะมาจากแหล่งอื่นด้วยนอกเหนือจากโพลีฟอสเฟตภายในเซลล์ นอกจากนั้นยังพบอีกว่าในสภาพแอนแอโรบิกปริมาณกลัยโคเจนภายในเซลล์จุลชีพจะลดลง ส่วนในสภาพแอโรบิกกลับเพิ่มขึ้น Smolders และคณะ (1995) จึงได้นำหลักการของ Mino มาปรับปรุงเพื่อสร้างแบบจำลองของการเกิดปฏิกิริยาเมแทบอลิซึม โดยได้สรุปส่วนประกอบของเอ็มแอลเอสเอสไว้ดังรูปที่ 2.6 หลักการของ Mino (อ้างโดย Smolders และคณะ, 1994) สรุปได้ว่า กลัยโคเจนซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตตัวหนึ่งที่สะสมอยู่ในเซลล์นั้นมีส่วนสำคัญต่อปฏิกิริยาชีวเคมี เพราะเป็นตัวรักษาสมดุลรีด็อกซ์ (redox balance) ภายในเซลล์และยังเป็นแหล่งพลังงานตัวหนึ่งของเซลล์ด้วย โดยเอ็นเอดีเอชที่ใช้ในปฏิกิริยานั้นได้จากการย่อยสลายกลัยโคเจนภายในเซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งแตกต่างจากทฤษฎีของ Comeau ที่กล่าวว่าเอ็นเอดีเอชได้มาจากวัฏจักรทีซีเอ



รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบในเอ็มแอลเอสเอส



ANAEROBIC PHASE



AEROBIC PHASE

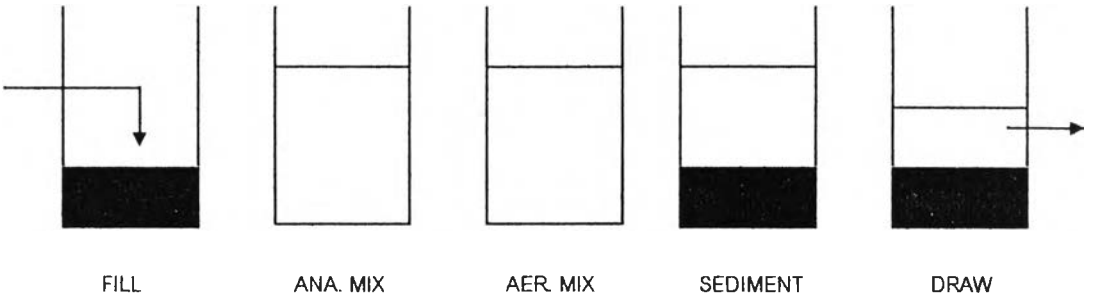
รูปที่ 2.7 กลไกการเกิดปฏิกิริยาชีวเคมีตามหลักการของ Mino (ปรับปรุงโดย Smolders, 1995)

2.5 ถังปฏิกิริยาแบบเอสบีอาร์ (Sequenching Batch Reactor, SBR)

ถังปฏิกิริยาแบบเอสบีอาร์มีรูปแบบการทำงานเป็นแบบแบตช์คือทำหน้าที่ทั้งถังปฏิกิริยาและถังตกตะกอน โดยมีวัฏจักรการทำงานตามลำดับดังนี้คือ รับน้ำเสีย (fill) เกิดปฏิกิริยา (react) ตกตะกอน (sedimentation) ระบายน้ำ(draw) และพัก (idle) เนื่องจากการเติมน้ำเสียเข้าถังจะกระทำเป็นช่วง ๆ ไม่ต่อเนื่อง เดิมจึงนิยมใช้บำบัดน้ำเสียที่ไม่ได้ไหลติดต่อกันตลอดเวลา เช่นน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมหรือชุมชนขนาดเล็ก ต่อมาได้มีการปรับปรุงให้สามารถใช้กับน้ำเสียที่ไหลต่อเนื่องตลอดเวลาได้โดยการเพิ่มถังพักน้ำ หรือเพิ่มจำนวนของเอสบีอาร์โดยแต่ละถังจะทำงานเหลื่อมเวลากัน

การทำงานของระบบที่ประกอบด้วยเอสบีอาร์หลายใบ เริ่มจากน้ำเสียทั้งหมดจะไหลเข้าถังใบที่หนึ่งจนเต็ม จากนั้นน้ำเสียจะถูกเปลี่ยนให้ไหลเข้าถังใบอื่นต่อไปตามลำดับ ถังใบที่หนึ่งเมื่อรับน้ำเสียจนเต็มแล้วจะเข้าสู่ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา จนเมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดลงก็จะเข้าสู่ขั้นตอนการตกตะกอนเพื่อให้เกิดการแยกชั้นของตะกอนกับน้ำใส จากนั้นน้ำใสที่อยู่ตอนบนของถังจะถูกระบายออกไปจนกระทั่งเหลือแต่น้ำตะกอนซึ่งประกอบด้วยจุลชีพจมอยู่ก้นถัง จุลชีพนี้จะถูกพักไว้ในถังจนกว่าจะมีการเติมน้ำเสียอีกครั้งหนึ่ง ถังใบอื่นก็มีลักษณะการทำงานเช่นเดียวกับถังใบแรก ต่างกันก็เพียงการเหลื่อมเวลาการทำงานในถังแต่ละใบเท่านั้น ลักษณะเช่นนี้จะทำให้ระบบที่ประกอบด้วยเอสบีอาร์หลายใบสามารถรับน้ำเสียที่ไหลต่อเนื่องตลอดเวลาได้

การกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพโดยใช้เอสบีอาร์นั้น ในขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาจะถูกควบคุมให้เกิดสภาพแอนแอโรบิกและแอโรบิกติดต่อกัน ลำดับการทำงานเริ่มจากการเติมน้ำเสียเข้าถังพร้อมกับการกวนผสมเพื่อให้น้ำเสียที่เข้ามาสามารถผสมกับเซลล์จุลชีพที่มีอยู่เดิมในถังได้อย่างทั่วถึง จากนั้นจึงเริ่มเข้าสู่สภาพแอนแอโรบิกซึ่งจุลชีพจะดูดซึมสารอาหารพร้อมทั้งปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกมา หลังจากนั้นจึงเติมอากาศเพื่อให้เกิดสภาพแอโรบิกภายในถังซึ่งในขั้นตอนนี้จะมีการจับใช้ฟอสฟอรัสและการออกซิไดซ์คาร์บอนอินทรีย์ที่สะสมอยู่ในเซลล์ เมื่อถึงขั้นตอนการตกตะกอนจะหยุดการเติมอากาศและการกวนผสมเพื่อทำให้เกิดการแยกชั้นของของแข็งกับน้ำ น้ำใสส่วนบนจะถูกระบายออกเหลือเพียงชั้นตะกอนอยู่ก้นถัง การระบายสลัดจ์ส่วนเกินทำได้ทั้งในส่วนปลายของขั้นตอนแอโรบิกหรือในขั้นตอนการพักขึ้นอยู่กับการดำเนินระบบ ลักษณะการทำงานของระบบแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลักษณะการทำงานของเอสบีอาร์ (Stensel,1991)

ข้อดีของเอสบีอาร์

1. ไม่ต้องมีถังตกตะกอนและระบบเวียนสลัดจ์กลับ

2. ระบบมีความยืดหยุ่นในการปรับอัตราส่วนของช่วงเวลาในการเกิดปฏิกิริยา สามารถควบคุมระบบได้ง่าย

3. ลักษณะการทำงานของระบบจะทำให้เกิดสภาพที่ไม่เอื้อต่อการเจริญเติบโตของจุลชีพแบบเส้นใยซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการไม่จมตัวของสลัดจ์

4. ในระบบที่มีการทำงานแบบแอนแอโรบิก/แอโรบิก การใช้เอสบีอาร์จะช่วยลดปัญหาค่าออกซิเจนละลายในถังแอนแอโรบิกอันเนื่องจากการเวียนกลับสลัดจ์ และทำให้เกิดสภาพแอนแอโรบิกอย่างแท้จริง

ข้อด้อยของเอสบีอาร์

1. ต้องมีถังพักน้ำก่อนเข้าระบบเพื่อให้การควบคุมระบบทำได้ง่ายขึ้น

2. ในกรณีของถังใบเดียวต้องใช้ถังขนาดใหญ่

2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดฟอสฟอรัส

2.6.1 ปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์และฟอสฟอรัสที่เข้าระบบ

ในระบบกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพนั้น ลักษณะของน้ำเสียจะเป็นตัวกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยา กล่าวคือ ถ้าในน้ำเสียมีปริมาณฟอสฟอรัสที่ค่อนข้างจำกัด ปริมาณฟอสฟอรัสในเซลล์จุลชีพจะค่อนข้างน้อยและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในสภาพแอนแอโรบิกก็จะน้อยด้วย ดังนั้นสารอินทรีย์ในน้ำเสียจึงถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์ได้น้อย อย่างไรก็ตามแม้สารอินทรีย์จะถูกพีเอโอดูด

ซึมไปใช้เพียงเล็กน้อย ปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์ที่เหลือจะถูกกำจัดในสภาพแอโรบิกโดยจุลชีพชนิดอื่น ซึ่งทำให้น้ำที่ออกจากระบบมีค่าซีโอดีต่ำ

ในทางกลับกันถ้าน้ำเสียมีค่าซีโอดีค่อนข้างจำกัด ซีโอดีเกือบทั้งหมดจะถูกพีเอโอดูดซึมไปใช้เนื่องจากพีเอโอสามารถแย่งสารอาหารในสภาพแอนแอโรบิกได้ดีกว่าจุลชีพกลุ่มอื่น พีเอโอจึงกลายเป็นกลุ่มเด่นในระบบและทำให้มีปริมาณฟอสฟอรัสในเอ็มแอลเอสเอสสูง ส่วนการจับใช้ฟอสฟอรัสนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณซีโอดีเช่นกัน เมื่อปริมาณซีโอดีมีน้อย คาร์บอนอินทรีย์ที่สะสมภายในเซลล์เช่นพีเอชเอย่อมมีปริมาณน้อยตามไปด้วย เกิดการย่อยสลายพีเอชเอน้อย ส่งผลให้การจับใช้ฟอสฟอรัสเกิดขึ้นในปริมาณน้อยนั่นคือระบบจะกำจัดฟอสฟอรัสได้ไม่ดี น้ำที่ออกจากระบบจึงมีฟอสฟอรัสอยู่มาก ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ที่มีจำกัดนี้พิจารณาได้ 2 ทาง โดยอาจเกิดจากปริมาณของคาร์บอนอินทรีย์โดยรวมในน้ำเสียมีน้อยเมื่อเทียบกับฟอสฟอรัส ซึ่งบอกได้จากค่าบีโอดีหรือซีโอดีรวม หรืออีกกรณีหนึ่งแม้ในน้ำเสียจะมีปริมาณคาร์บอนอินทรีย์เพียงพอ แต่สารคาร์บอนอินทรีย์เหล่านั้นไม่อยู่ในรูปที่จุลชีพสามารถเอาไปใช้ได้ง่าย ในกรณีนี้อาจพิจารณาได้จากค่าอัตราส่วนซีโอดี:ฟอสฟอรัส เทียบกับค่าอัตราส่วนบีโอดี:ฟอสฟอรัส กรณีที่ค่าทั้งสองมีความแตกต่างกันมาก เช่น ถ้าอัตราส่วนซีโอดี:ฟอสฟอรัสมีค่าประมาณ 40:1 ในขณะที่ค่าบีโอดี:ฟอสฟอรัสมีค่าน้อยกว่า 20:1 แสดงให้เห็นว่าในสภาวะนั้นสารอินทรีย์ที่จุลชีพสามารถนำไปใช้ได้มีปริมาณน้อย จำเป็นต้องมีกระบวนการหมักเพื่อเปลี่ยนรูปคาร์บอนอินทรีย์ในน้ำเสียให้อยู่ในรูปที่จุลชีพสามารถนำไปใช้ได้ (Randall และคณะ, 1992)

Hong และคณะ (1982; อ้างโดย Stensel,1991) พบว่าในระบบแอนแอโรบิก/แอโรบิกที่มีการกำจัดฟอสฟอรัสได้ดีนั้น อัตราส่วนบีโอดีต่อฟอสฟอรัสที่เข้าระบบต้องไม่น้อยกว่า 15 : 1

Stensel (1991) กล่าวว่าถ้าในน้ำเสียที่เข้าระบบมีอัตราส่วนบีโอดีต่อฟอสฟอรัสอยู่ในช่วง 20:1–30:1 ระบบจะสามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ดีและมีค่าฟอสฟอรัสในน้ำออกต่ำกว่า 1 มก. / ล. และได้สรุปความสัมพันธ์ของภาระซีโอดีต่อเอ็มแอลเอสเอสในถังแอนแอโรบิก โดยใช้ค่าอัตราส่วนดังกล่าวเท่ากับ 0.04, 0.28 และ 0.43 โดยพบว่าถ้าอัตราส่วนซีโอดีต่อเอ็มแอลเอสเอสมีค่าสูงซีโอดีจะถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์ได้ดีกว่า

Randall และคณะ (1992) แนะนำว่าอัตราภาระบีโอดีต่อฟอสฟอรัสต้องมากกว่า 20:1 จึงจะได้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสดีและได้ค่าฟอสฟอรัสในน้ำออกน้อยกว่า 1 มก. / ล.

2.6.2 ซีโอดีที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

Siebritz และคณะ (1983) ได้ศึกษาเกี่ยวกับระบบการกำจัดฟอสฟอรัสพบว่า ในสภาวะแอนแอโรบิกจะเกิดการปลดปล่อยฟอสฟอรัสได้นั้น จะต้องมีแหล่งคาร์บอนที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้อย่างรวดเร็วในปริมาณสูงพอ โดยจะต้องมีปริมาณอย่างน้อย 25 มก.ซีโอดี/ล. ซึ่งแหล่งคาร์บอนที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้อย่างรวดเร็วนี้ได้แก่ อะซีเทต และกลูโคส

Gerbers และคณะ (1986) ได้ทำการศึกษาการกำจัดฟอสฟอรัสโดยใช้คาร์บอนอินทรีย์ต่างชนิดกัน ได้แก่ อะซิเทต โพรไพโอเนต แลคเทต ฟอร์เมต ซิเทรต ซัคซิเนต กลูโคส เอธานอล และเมธานอล พบว่ากรณีที่ใช้อะซิเทตและโพรไพโอเนตนั้น แม้ในสภาวะแอนแอโรบิกยังมีไนเทรตอยู่ก็ปรากฏว่ามีการปลดปล่อยฟอสฟอรัส ส่วนกรณีที่ใช้คาร์บอนอินทรีย์ชนิดอื่นพบว่าจะมีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสก็ต่อเมื่อไนเทรตในสภาวะแอนแอโรบิกถูกรีดิวซ์หมด ซึ่งชี้ให้เห็นว่าคาร์บอนต้องถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้อย่างรวดเร็ว พีเอโอจึงจะสามารถดูดซึมเข้าไปใช้ได้ และไนเทรตที่พบในสภาพแอนแอโรบิกจะทำให้การกำจัดฟอสฟอรัสลดลง

2.6.3 เวลากักเซลล์เฉลี่ยหรือเอ็มซีอาร์ที (Mean Cell Residence Time, MCRT)

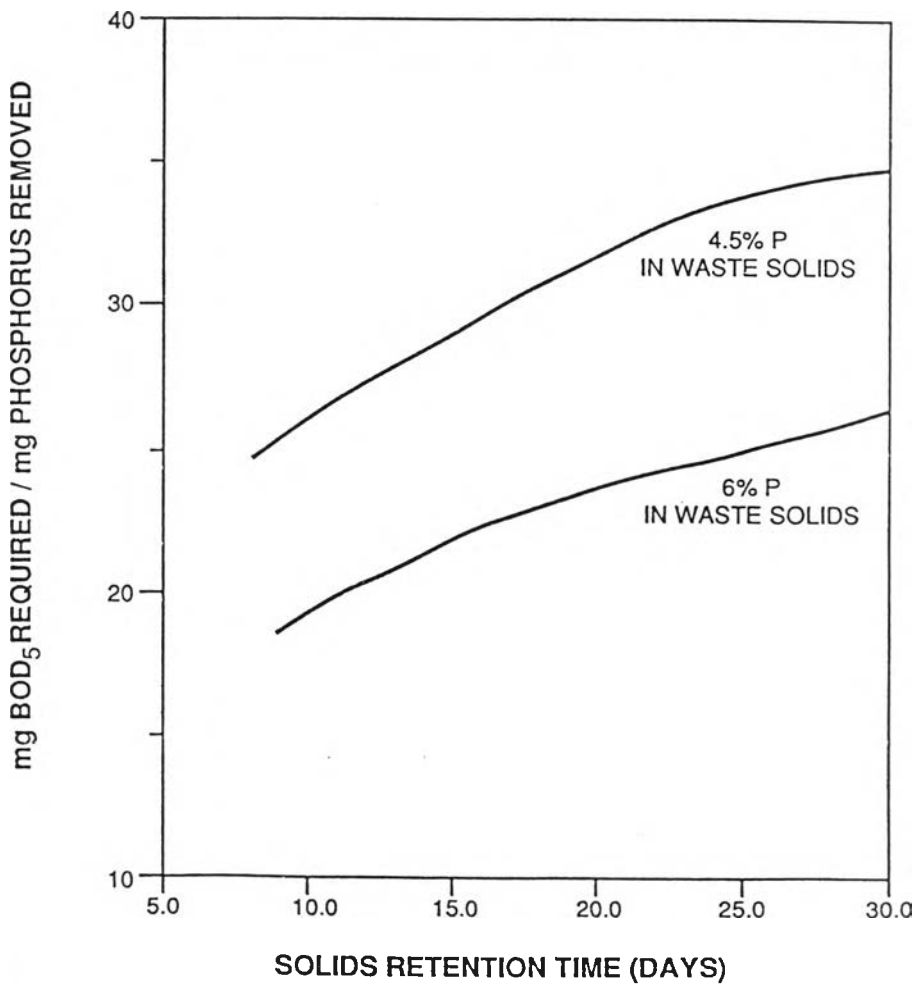
การกำจัดฟอสฟอรัสของระบบอาศัยการระบายสลัดจ์ส่วนเกินซึ่งมีพีเอโอออกจากระบบ ปริมาณสลัดจ์ที่ระบายออกนี้มีความสัมพันธ์กับเวลากักเซลล์เฉลี่ย ดังนั้นการใช้ค่าเวลากักเซลล์เฉลี่ยต่ำจะทำให้เกิดการระบายสลัดจ์ได้มาก แต่ถ้าใช้ค่าต่ำเกินไปอาจเกิดการล้างไล่พีเอโอและส่งผลเสียต่อระบบ

Stensel (1991) พบว่าถ้าเวลากักเซลล์เฉลี่ยเพิ่มขึ้น ความต้องการบีโอดีเพื่อใช้ในการกำจัดฟอสฟอรัส 1 มก. ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย โดยได้รวบรวมผลของเวลากักเซลล์เฉลี่ยที่มีต่ออัตราส่วนบีโอดี/ฟอสฟอรัสที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 จากรูปเมื่อพิจารณาปริมาณฟอสฟอรัสในหน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากับ 4.5% และ 6% พบว่าเมื่อใช้เวลากักเซลล์เพิ่มจาก 10 วันเป็น 30 วัน ความต้องการบีโอดีที่ใช้กำจัดฟอสฟอรัสเพิ่มจาก 25 มก./ล. เป็น 35 มก./ล. และ 19 มก./ล. เป็น 26 มก./ล. ตามลำดับ

Mamais และ Jenkins (1992) ได้ทำการศึกษาผลของเวลากักเซลล์เฉลี่ยที่มีต่อการกำจัดฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิ 13.5 - 20°ซ. พบว่าที่ค่าเอ็มซีอาร์ทีมากกว่า 2.9 วันระบบสามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ดี และจะเกิดการล้างไล่พีเอโอเมื่อเวลากักเซลล์เฉลี่ยของระบบต่ำกว่า 2.9 วัน และ

สรุปว่ากลุ่มจุลชีพในระบบกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพมีอัตราการเจริญเติบโตน้อยกว่ากลุ่มจุลชีพในระบบทั่วไป

Randall และคณะ (1992) กล่าวว่ากระบวนการในการกำจัดฟอสฟอรัสจะคงตัวที่เวลากักเซลล์เฉลี่ย 6 วัน แต่ที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดการรบกวนการกำจัดฟอสฟอรัสโดยกระบวนการไนตริฟิเคชัน เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงแอมโมเนียจะเป็นเปลี่ยนไนเทรตได้ง่าย ไนเทรตจะไปรบกวนการปล่อยฟอสฟอรัสในขั้นตอนแอนแอโรบิก ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสลดลง และได้อ้าง Wenztel และคณะ (1988) ว่าที่เวลากักเซลล์เฉลี่ยน้อยกว่า 3 วัน ระบบจะไม่คงตัว และน้ำทิ้งจะไม่ใส



รูปที่ 2.9 บีโอดีที่ใช้ในการกำจัดฟอสฟอรัสที่เวลากักเซลล์เฉลี่ยต่างๆ

2.6.4 เวลากักพักชลศาสตร์หรือเอชอาร์ที (Hydraulic Retention Time, HRT)

Best (1983) กล่าวว่าเวลากักน้ำที่ใช้ในการออกแบบสภาพแอนแอโรบิกและแอโรบิกจะอยู่ในช่วง 0.5 – 1.0 ชั่วโมงและ 3.5 – 6.0 ชั่วโมงตามลำดับ

Fucase และคณะ (1985) รายงานว่าในสภาพแอโรบิก ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสจะสูงเมื่อใช้เวลากักน้ำสั้น โดยค่าเวลากักน้ำที่เหมาะสมในสภาพแอนแอโรบิกและแอโรบิกเท่ากับ 1.5 ชั่วโมงและ 3.0 ชั่วโมงตามลำดับ ที่ค่าบีโอดีในน้ำเข้าเท่ากับ 100 มก./ล. และเวลากักเซลล์เฉลี่ยเท่ากับ 6 วัน

Metcalf & Eddy Inc. (1991) ได้สรุปพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสรวมทั้งเวลากักน้ำในระบบต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.2

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

Design parameters	Units	Process		
		A/O	Phostrip	SBR
F/M	gBOD /g MLVSS-d	0.2 – 0.7	0.1 – 0.5	0.15 – 0.5
MCRT, θ_c	d	2 – 2.5	10 – 30	
MLSS	mg/l	200 – 4000	600 – 5000	2000 – 3000
Hydraulic retention time,HRT				
- anaerobic zone	h	0.5 – 1.5	8 – 12	1.8 – 3
- aerobic zone	h	1 – 3	4 – 10	1.0 – 4
Return sludge	% of influent	25 - 40	20 – 50	
Internal recycle	% of influent		10 - 20	

Stensel (1991) กล่าวว่าในสภาวะแอนแอโรบิกควรมีเวลากักน้ำเพียงพอสำหรับการหมักเพื่อให้คาร์บอนอินทรีย์เปลี่ยนรูปไปเป็นวีเอฟเอและถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์ โดยเวลาที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 1 – 2 ชั่วโมง

2.6.5 ไนเทรต

Siebritz และคณะ (1983) สรุปว่าถ้ามีไนเทรตเวียนกลับเข้ามาในถังแอนแอโรบิก ความเข้มข้นซีโอดีที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจะมีปริมาณลดลง โดยไนเทรตไนโตรเจน 1 มก. จะทำให้เกิดค่าความเข้มข้นซีโอดีลดลง 8.6 มก. / ล. (Van Hanndel และคณะ, 1981 อ้างโดย Siebritz และคณะ, 1983) และจะไม่เกิดการกำจัดฟอสฟอรัสถ้ามีปริมาณไนเทรตมากในช่วงแอนแอโรบิก เนื่องจากจะเกิดสภาพแอน็อกซิกก่อนที่จะมีการปลดปล่อยฟอสฟอรัส

Cech และ Hartman (1990) ได้แนะนำว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของไนเทรตและไนไทรต์ในขั้นตอนแอนแอโรบิกไม่ควรเกิน 2.5 และ 0.1 มก. ไนโตรเจน/ลิตร ตามลำดับ ซึ่งทั้งไนเทรตและไนไทรต์นี้จะถูกรีดิวซ์ในระหว่างการใช้สารอาหาร (หมายเหตุ : ถ้ามีไนเทรตและไนไทรต์มาก จะเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันขึ้นก่อนโดยสารคาร์บอนอินทรีย์จะถูกใช้ในปฏิกิริยาดังกล่าว และเมื่อเข้าสู่ขั้นตอนแอนแอโรบิก จะเหลือสารคาร์บอนอินทรีย์ที่จะมาสะสมในเซลล์น้อย ทำให้การปลดปล่อยฟอสฟอรัสมีน้อย)

Randall และคณะ (1992) กล่าวว่าถ้ามีไนเทรตอยู่ในสภาพที่กำหนดให้เป็นแอนแอโรบิก ไนเทรตนั้นจะถูกใช้เป็นตัวรับอิเลคตรอนเพราะการใช้ไนเทรตจะให้พลังงานมากกว่าการหมักแบบไร้ออกซิเจน ทำให้ไม่เกิดกระบวนการหมัก นั่นคือบีโอดีละลายจะไม่ถูกเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหยง่ายและจะไม่เกิดการกำจัดฟอสฟอรัสด้วย จึงควรควบคุมระดับไนเทรตในสภาพแอนแอโรบิกให้เท่ากับศูนย์

Barker และ Dold (1996) อ้างถึง Pokethitiyook และคณะ (1992) พบว่าการกำจัดฟอสฟอรัสสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในระบบแอนแอโรบิก/แอโรบิกและในระบบแอนแอโรบิก/แอน็อกซิก โดยที่ในระบบหลังนี้จะมีการเติมไนเทรตเป็นตัวรับอิเลคตรอนสุดท้ายในขั้นตอนแอน็อกซิก ทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันและเกิดการจับใช้ฟอสฟอรัสขึ้น (หมายเหตุ : เนื่องจากมีแบกทีเรียที่เป็นทั้งพีเอโอด้วยและสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันด้วยซึ่งเรียกว่า "ดีเอ็น-พีเอโอ" (denitrification-phosphate accumulating organisms, DN-PAOs)) นอกจากนี้ยังอ้างถึงการ

ศึกษาของ Kern – Jespersen และ Henze (1993) พบว่าในการทดลองเติมอะซีเทตในขั้นตอนแอนแอโรบิกที่เวลาต่าง ๆ จะทำให้เกิดการจับใช้ฟอสฟอรัสขึ้น และเมื่อเติมอะซีเทตมากขึ้นอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย โดยอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสในขั้นตอนแอน็อกซิกจะช้ากว่าในสภาวะแอโรบิก ดังนั้นหากมีไนเทรตในขั้นตอนแอนแอโรบิกจะทำให้เกิดการยับยั้งการปลดปล่อยฟอสฟอรัส เนื่องจากสารคาร์บอนอินทรีย์จะทำปฏิกิริยากับไนเทรตก่อนเกิดปฏิกิริยาการหมัก

2.6.6 ปริมาณแคทไอออน

Comeau และคณะ (1986) ได้รวบรวมผลการศึกษาปริมาณแคทไอออนที่เกี่ยวข้องกับการจับใช้และปลดปล่อยฟอสฟอรัส ดังแสดงในตารางที่ 2.3

Pattarkine และคณะ (1991; อ้างโดย Randall และคณะ, 1992) พบว่าในการกำจัดฟอสฟอรัส 1 โมลนั้น พีเอโอจำเป็นต้องใช้โพแทสเซียมและแมกนีเซียมจำนวน 0.23 และ 0.25 โมล ตามลำดับ

ตารางที่ 2.3 ปริมาณแคทไอออนที่เกี่ยวข้องกับการจับใช้และปลดปล่อยฟอสฟอรัส

Cation/P	แหล่งอ้างอิง				
	1	2	3	4	5
K^{+}/P	0.27	0.23	0.34	0.20	0.23
Mg^{+2}/P	0.26	0.32	0.24	0.28	0.27
Ca^{+2}/P	0.00	0.05	0.06	0.09	0.12
Sum of charges /P	0.79	0.97	0.94	0.94	1.01
Direction of transport	P release	P release	Avg. of P rel. & uptake	P release	P uptake

หมายเหตุ : 1 อ้างอิงจาก Miyamoto-Millis และคณะ (1983)

2 อ้างอิงจาก Arvin และ Kristensen (1985)

3-5 อ้างอิงจาก Comeau และคณะ (1985)

Randall และคณะ (1992) กล่าวว่า ปริมาณโปแตสเซียมและแมกนีเซียมที่พีเอโอต้องการมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณของไอออนดังกล่าวที่มีอยู่ในน้ำเสีย ดังนั้นจึงมีโอกาสน้อยมากที่ไอออนทั้งสองจะเป็นตัวจำกัดการเจริญเติบโตของพีเอโอ ยกเว้นในกรณีน้ำเสียที่มาจากแหล่งกำเนิดเฉพาะ เช่น โรงงานอุตสาหกรรมบางประเภท

2.6.7 อุณหภูมิ

การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการกำจัดฟอสฟอรัสมีข้อสรุปที่ยังไม่ตรงกันนัก นักวิจัยหลายคนพบว่าที่อุณหภูมิต่ำนั้นเหมาะสมสำหรับการกำจัดฟอสฟอรัสมากกว่าที่อุณหภูมิสูง ในขณะที่อีกกลุ่มหนึ่งได้ผลในทางตรงกันข้าม Randall และคณะ (1992) ได้อ้างถึงงานวิจัยของ Kavanaugh (1991) ซึ่งเป็นการศึกษากลุ่มจุลชีพต่างๆ ในระบบบีเอ็นอาร์ (biological nutrient removal, BNR) กล่าวว่าจุลชีพที่สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้มีอยู่หลายชนิด (หมายเหตุ : เรียกโดยรวมว่าเป็นจุลชีพกลุ่มพีเอโอ) และแต่ละชนิดจะเจริญเติบโตได้ดีในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ทั้งนี้จุลชีพที่เป็นกลุ่มเด่นในระบบจะขึ้นอยู่กับเชื้อที่นำมาใช้ในตอนแรกและขึ้นอยู่กับการเดินระบบด้วย การศึกษาถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการกำจัดฟอสฟอรัสจะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Shapiro และคณะ (1967) กล่าวว่าอัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัสจำเพาะ (specific phosphorus release rate,SPRR)เพิ่มขึ้น 5 เท่าเมื่ออุณหภูมิของระบบเพิ่มจาก 10°ซ.เป็น 30°ซ.

Fuh และ Chen (1975) พบว่าการกำจัดฟอสฟอรัสจะเกิดได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 20-30°ซ. และในช่วงอุณหภูมิ 20-24°ซ. เป็นช่วงที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของ *Acinetobater lwoffi* ซึ่งในช่วงอุณหภูมินี้จะเกิดการจับใช้ฟอสฟอรัสมากที่สุด โดยที่อุณหภูมิ 10 และ 37°ซ. การจับใช้ฟอสฟอรัสจะถูกยับยั้ง

Hashimoto และ Furukawa (1984) ได้ศึกษาการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในสภาพแอนแอโรบิกที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 12-28°ซ. และพบว่าการปลดปล่อยฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้น 2.4 เท่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 20°ซ. เป็น 30°ซ.โดยมีเวลากักเซลล์ 2.4-2.6 วัน ซึ่งชี้ให้เห็นว่าที่อุณหภูมิต่ำการเพิ่มเวลาในสภาพแอนแอโรบิกจะทำให้เกิดการปลดปล่อยฟอสฟอรัสมากขึ้น

Hao และ Chang (1987) ได้ทำการศึกษาเชื้อ *Acinetobacter* ชนิดต่าง ๆ โดยพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของ *Acinetobacter 210* และ *Acinetobacter calcoaceticus* คือ 25 และ 35°ซ. ตามลำดับ

Jones และคณะ (1987) ได้ทำการศึกษาการปลดปล่อยฟอสฟอรัสและการจับใช้ฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิ 24°ซ. และ 29°ซ. พบว่าที่ 29°ซ. มีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสมากกว่าถึง 73 เปอร์เซ็นต์ และระบบสามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ดีกว่าที่อุณหภูมิ 24°ซ. ถึง 33 เปอร์เซ็นต์

Mamais และ Jenkins (1992) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ 13-20°ซ. และค่าเวลากักเซลล์ต่ำ ๆ ที่มีต่อการกำจัดฟอสฟอรัส โดยในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวพบว่าถ้าค่าเวลากักเซลล์เฉลี่ยเพิ่มขึ้น ปริมาณฟอสฟอรัสในเอ็มแอลวีเอสเอสจะเพิ่มขึ้น และการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบจะเพิ่มขึ้นด้วย แต่ที่เอ็มซีอาร์ทีน้อยกว่า 2.9 วันจะเกิดการล้างไล่พีเอโอ ซึ่งสรุปได้ว่าในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวจุลชีพในระบบกำจัดฟอสฟอรัสมีการเจริญเติบโตน้อยกว่าในระบบทั่วไป และยังได้ศึกษาอัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัส (phosphorus release rate, PRR) และอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัส (phosphorus uptake rate, PUR) ที่อุณหภูมิ 10-37°ซ. พบว่าอัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัสเริ่มต้น (initial PRR) เพิ่มขึ้นตามค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในช่วง 10-28°ซ. ส่วนอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเช่นกัน โดยค่าที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 28-33°ซ. โดยที่อุณหภูมิ 37°ซ เกิดการยับยั้งการปลดปล่อยฟอสฟอรัส และได้อ้างถึงงานวิจัยของ Preez และคณะ(1978) และ Juni (1978) ว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของ *Acinetobacter spp.* อยู่ในช่วง 29-35°ซ. (หมายเหตุ : การศึกษาค่า PRR และ PUR เป็นการนำสลัดจ์ที่อุณหภูมิคงที่มาทำการศึกษา ข้อสังเกตุประการแรกคือสลัดจ์ที่ใช้ในการศึกษาไม่ได้นำมาจากที่อุณหภูมิเดียวกัน ประการที่สอง การนำสลัดจ์ที่คุ้นเคยกับอุณหภูมิหนึ่งมาทำการศึกษาค่า PRR และ PUR ที่อุณหภูมิต่าง ๆ อาจมีผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย

Randall และคณะ (1992) ได้แสดงค่าโพรไฟล์ของฟอสฟอรัสในระบบบำบัดน้ำเสีย York River Treatment Plant พบว่าที่อุณหภูมิ 20°ซ. อัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัสมีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิ 13.6°ซ.

McClintock และคณะ (1993) ได้ทำการทดลองด้วยระบบ High Rate VIP พบว่าเมื่ออุณหภูมิลดลงการกำจัดฟอสฟอรัสจะลดลง และเมื่อเปรียบเทียบที่เวลากักเซลล์เฉลี่ย 5 และ 15

วันพบว่าที่เวลากักเซลล์เฉลี่ยน้อยจะเกิดผลกระทบมากกว่า โดยระบบที่ใช้เวลากักเซลล์เฉลี่ย 5 วัน ณ อุณหภูมิ 5°ซ. จะเกิดการไล่ล้างพีเอโอ

Brdjanovic และคณะ (1997) ได้ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบระยะสั้น (short term) ที่มีต่อปฏิกิริยาต่าง ๆ ในสภาพแอนแอโรบิกและแอโรบิก โดยนำสลัดจ์จากระบบที่สถานะคงตัวที่อุณหภูมิ 20°ซ. มาทำการทดลองแบบแบตช์ที่อุณหภูมิ 5, 10, 20 และ 30°ซ. ซึ่งผลการศึกษาพบว่าอัตราการการปลดปล่อยฟอสฟอรัสและอัตราการจับใช้อะซีเทตจะแปรผันตามอุณหภูมิ โดยมีค่าสูงสุดที่ 20°ซ. ส่วนอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัส อัตราการใช้พีเอชเอในเซลล์และอัตราการใช้ออกซิเจนจะแปรผันตามอุณหภูมิในช่วง 5-30°ซ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (θ)ในสภาพแอนแอโรบิกเท่ากับ 1.078 และในสภาพแอโรบิกมีค่าเท่ากับ 1.057 (ข้อสังเกตประการแรกคือ ผลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาต่าง ๆ ในสภาพแอนแอโรบิกในช่วง 20-30 °ซ. ยังไม่ชัดเจนนัก แม้จากการทดลองจะสรุปว่าค่าสูงสุดอยู่ที่ 20°ซ. ประการที่สอง ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิใช้การประมาณจากสมการของ Arrhenius โดยใช้ข้อมูลเพียง 3 ค่าซึ่งอาจจะได้ผลที่คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง)

Brdjanovic และคณะ (1998) ได้ทำการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบระยะยาว(long term) ที่มีต่อการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ โดยทำการทดลองเปลี่ยนอุณหภูมิของระบบจาก 20°ซ. เป็น 30, 20, 10 และ 5°ซ. ตามลำดับ และพบว่าการเปลี่ยนอุณหภูมิแบบระยะยาวทำให้จุลชีพในระบบเกิดการเปลี่ยนกลุ่ม อัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัสและอัตราการจับใช้อะซีเทตจะแปรผันตามอุณหภูมิโดยมีค่าสูงสุดที่ 20°ซ. โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเท่ากับ 1.075 และ 1.095 ตามลำดับ ส่วนในสภาพแอโรบิกพบว่าอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัส อัตราการใช้ออกซิเจนและอัตราการใช้พีเอชเอในเซลล์มีค่าแปรผันตามอุณหภูมิในช่วง 5-30°ซ.โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเท่ากับ 1.031, 1.090 และ 1.129 ตามลำดับ (ข้อสังเกตจากงานวิจัย ผู้วิจัยได้ใช้ค่าเวลากักเซลล์เฉลี่ยที่แต่ละอุณหภูมิไม่เท่ากันโดยที่อุณหภูมิ 20 และ 30°ซ. ใช้เวลากักเซลล์เฉลี่ยเท่ากับ 8 วัน เมื่อลดอุณหภูมิของระบบเป็น 10 และ 5 °ซ. ผู้วิจัยใช้ค่าเวลากักเซลล์เฉลี่ยเท่ากับ 16 และ 32 วันตามลำดับ)

ปริยดา เหล่ารุจิจินดา (2541) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิ 5, 15, 25, 35 และ 40°ซ. โดยใช้เชื้อจากโรงบำบัดน้ำเสียสี่พระยาและเติม *Pseudomonas fluorescens* และ *Acinetobacter calcoaceticus* เข้าไปด้วยพบว่าประสิทธิ

ภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสเป็น 100, 100, 100, 72 และ 61 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิสูงขึ้นมีค่าลดลง (ที่อุณหภูมิ 25 และ 35°ซ.ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสลดลงจาก 100 เป็น 72 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแนวโน้มในช่วงอุณหภูมินี้ยังไม่ชัดเจน) และเมื่อพิจารณาค่าฟอสฟอรัสในเอ็มแอลวีเอสเอส พบว่าที่อุณหภูมิ 15°ซ. มีค่าสูงถึง 10.4 และลดลงเป็น 5.5 และ 3.1 ที่อุณหภูมิ 25 และ 35°ซ. ตามลำดับ ผู้วิจัยได้ใช้ปริมาณฟอสฟอรัสในเอ็มแอลวีเอสเอสเป็นตัวบอกปริมาณพีเอโอในระบบ และพบว่าที่อุณหภูมิสูงพีเอโอจะเจริญเติบโตได้ไม่ดีนัก เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิ 15 และ 25°ซ. ระบบสามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ 100 เปอร์เซ็นต์เท่ากัน แต่ปริมาณฟอสฟอรัสในเซลล์ลดลงจาก 10.4 เป็น 5.5 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแม้ปริมาณพีเอโอในระบบจะลดลง แต่พีเอโอในระบบ (ที่ 25°ซ.)ยังสามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้หมด ผลการศึกษาโดยรวมสรุปได้ว่าที่อุณหภูมิต่ำระบบสามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ดีกว่าที่อุณหภูมิสูง