

## บทที่ 2

### บททวนเอกสาร

#### 2.1 บทนำ

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่มีอยู่ในน้ำเสีย โดยส่วนใหญ่มีแหล่งกำเนิดมาจากของเสียจากมนุษย์และสัตว์ สารเคมีและปุ๋ยที่ใช้ในการเกษตร และจากอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมปุ๋ย อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมผงซักฟอก และอุตสาหกรรมกรดฟอสฟอริก เป็นต้น ฟอสฟอรัสในน้ำเสียมี 3 รูปแบบคือ ออร์โธฟอสเฟต(orthophosphate) โพลีฟอสเฟต(polyphosphate) และฟอสฟอรัสอินทรีย์(organic phosphorus) โดยสองประเภทหลังจะพบมากกว่าร้อยละ 70 ของฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำเสียชุมชน (Metcalf and Eddy, 1991) ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารชนิดหนึ่งที่ก่อให้เกิดปัญหาไฮโทรฟิเคชันได้เมื่อถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำในปริมาณมากโดยไม่ผ่านการบำบัดก่อน เพราะจะทำให้สาหร่ายเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้น้ำในแหล่งน้ำเปลี่ยนสีเป็นสีเขียวหรือสีแดง เรียกว่า สาหร่ายเบ่งบานหรือสะพรั่ง (algal bloom) เมื่อสาหร่ายตายทับถมกันจะทำให้เกิดสภาพน้ำเสีย ดังนั้นจึงต้องมีการกำจัดฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ

#### 2.2 การกำจัดฟอสฟอรัส

การกำจัดฟอสฟอรัสสามารถทำได้ 2 วิธี คือ วิธีทางเคมีและวิธีทางชีวภาพ ซึ่งวิธีการกำจัดฟอสฟอรัสทางเคมีสามารถทำได้โดยการตกตะกอนผลึก(precipitation) ส่วนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพนั้นจะใช้จุลินทรีย์ช่วยในการจับฟอสฟอรัสเข้าสู่เซลล์ และสามารถกำจัดฟอสฟอรัสออกจากระบบโดยการระบายสลัดจ์ส่วนเกินที่มีฟอสฟอรัสเป็นส่วนประกอบออกจากระบบ (Wentzel และคณะ, 1985; Sedlak , 1991; Metcalf & Eddy, 1991; และ Randall และคณะ, 1992)

##### 2.2.1 การกำจัดฟอสฟอรัสทางเคมี

การกำจัดฟอสฟอรัสทางเคมีสามารถทำได้โดยการเติมสารเคมีลงไปในน้ำเสียเพื่อทำให้สารละลายฟอสเฟตจับตัวกับสารเคมีที่เติมลงไปและเกิดเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ จากนั้นจึงทำการ

แยกออกจากน้ำได้โดยดักตะกอนหรือดักกรองต่อไป สารเคมีที่ใช้ได้แก่ เกลือของโลหะและปูนขาว เกลือโลหะที่ใช้กันทั่วไปได้แก่ สารส้ม(เกลือของโลหะอะลูมิเนียม) เพอริกคลอไรด์(เกลือของเหล็ก) ซึ่งอาจมีการใช้โพลีเมอร์ร่วมกับเกลือของโลหะนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัส ส่วนการใช้ปูนขาวนั้นไม่เป็นที่นิยมใช้ เนื่องจากทำให้เกิดสตัคจ์มากเมื่อเทียบกับการใช้เกลือของโลหะและทำให้เกิดปัญหาในการจัดการ การดำเนินงาน และการบำรุงรักษา

นอกจากนี้ยังพบว่า การกำจัดฟอสฟอรัสทางเคมีมีข้อดีน้อยกว่าการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพที่สำคัญคือ มีตะกอนเกิดขึ้นในปริมาณมากทำให้เกิดปัญหาต่อการจัดการ และมีค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับสารเคมีที่จะต้องใส่ ดังนั้นในปัจจุบันการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพจึงได้รับความนิยมมากกว่าการกำจัดฟอสฟอรัสทางเคมี

## 2.2.2 การกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

### 2.2.2.1 หลักการพื้นฐานในการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

การกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพสามารถทำได้โดยการสร้างสภาพแวดล้อมที่ทำให้เกิดการคัดพันธุ์ของแบคทีเรียที่สามารถสะสมฟอสฟอรัสได้เป็นพิเศษ ซึ่งเรียกว่า โพลี-พี แบคทีเรีย (poly-P bacteria) หรือพีเอไอ (phosphate accumulating organisms, PAOs) โดยผ่านกระบวนการแอนแอโรบิก-แอโรบิกจนเกิดการคัดพันธุ์แบคทีเรียชนิดนี้ขึ้น โดยปกติเซลล์จุลินทรีย์จะมีฟอสฟอรัสเป็นส่วนประกอบร้อยละ 1.5 ถึง 2 ของน้ำหนักตัวแห้ง และในการระบายสลัดจ์ส่วนเกินออกจากระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพทั่วไปสามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้เพียงร้อยละ 10 ถึง 30 ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนซีไอคีดต่อฟอสฟอรัสในน้ำเข้า การเก็บรวบรวมสลัดจ์ และวิธีการบำบัด แต่พีเอไอเป็นแบคทีเรียที่สามารถสะสมฟอสฟอรัสไว้ในเซลล์ได้มากกว่าปริมาณที่เซลล์ต้องการใช้ในการเจริญเติบโตหรือที่เรียกว่า “การจับใช้อย่างฟุ่มเฟือย (luxury phosphorus uptake)” โดยพีเอไอสามารถจับใช้ฟอสฟอรัสได้ร้อยละ 4 ถึง 12 ของน้ำหนักตัวแห้ง ทำให้การระบายสลัดจ์ออกจากระบบนี้สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้มากกว่าระบบธรรมดา 2.5 ถึง 4 เท่า (WEF, 1992 อ้างโดย ปริยดา เหล่ารุจิจินดา, 2541)

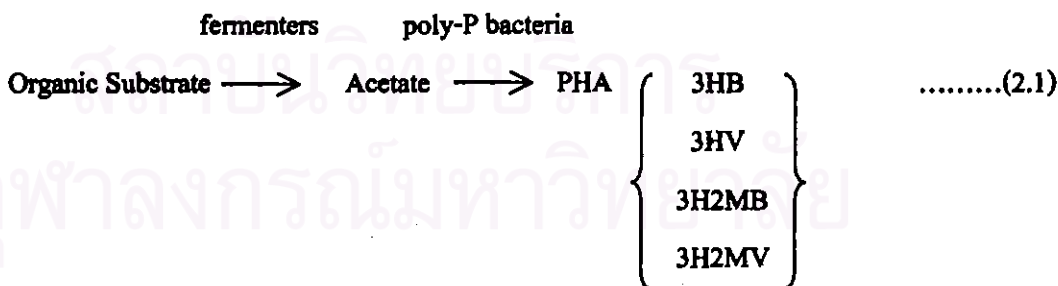
เดิมเชื่อกันว่าแบคทีเรียที่สามารถสะสมฟอสฟอรัสได้เป็นพิเศษนั้นมีอยู่เพียงประเภทเดียว คือ *Acinetobacter* (Fuhs และ Chen, 1975 อ้างโดย ปริยดา เหล่ารุจิจินดา, 2541) แต่จากการศึกษาของ Brodisch และ Joyner (1983) พบว่า *Acinetobacter* ไม่ได้เป็นแบคทีเรียเพียงชนิดเดียวที่สามารถสะสมฟอสฟอรัสได้ แต่ยังมีแบคทีเรียชนิดอื่นอีก คือ *Aeromonas* และ *Pseudomonas* ซึ่งพบในปริมาณที่สูงถึงร้อยละ 50 ของแบคทีเรียชนิดแอโรบิกทั้งหมดในระบบ และกลับพบว่ามีแบคทีเรีย *Acinetobacter* เพียงร้อยละ 15 เท่านั้น ส่วน Randall และคณะ (1992) พบว่าในการกำจัดฟอสฟอรัสมีแบคทีเรียชนิด

*Aeromonas/Vibrio*, *Pseudomonas* และ *Coliform* ในปริมาณที่มากกว่า *Acinetobacter* ซึ่งมีเพียงร้อยละ 5 ของแบคทีเรียทั้งหมดเท่านั้น Kavanaugh และ Randall (1994) ได้ทำการศึกษารายชื่อของแบคทีเรียในกระบวนการกำจัดธาตุอาหารทางชีวภาพ (biological nutrient removal, BNR) พบแบคทีเรีย 4 ชนิดที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ คือ *Aeromonas/Vibrio*, *Pseudomonas*, *Coliform* และ *Acinetobacter* โดยแบคทีเรีย 3 ชนิดแรกถูกพบในปริมาณที่มากกว่า *Acinetobacter* ซึ่งถูกพบเพียงร้อยละ 5 ของจำนวนแบคทีเรียทั้งหมด

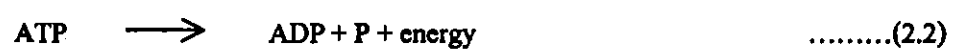
**กลไกการกำจัดฟอสฟอรัสโดยการจับโซ่อย่างพุ่มเพื่อสามารถอธิบายได้ดังนี้**

**ในสถานะแอนแอโรบิก**

ในสถานะแอนแอโรบิกจะเกิดการหมัก (fermentation) เป็นขั้นตอนแรก จุดชีพที่เป็นแฟกัลเททีฟจะเปลี่ยนคาร์บอนอินทรีย์ไปเป็นกรดไขมันระเหยง่าย (volatile fatty acids, VFAs) ชนิดที่มีคาร์บอนน้อยๆ เช่น กรดน้ำส้ม (acetic acid, HAc) หรือกรดไพรูวิก (pyruvic) เป็นต้น ต่อมาแบคทีเรียที่สะสมฟอสฟอรัสได้เป็นพิเศษจะดูดซึมกรดไขมันระเหยง่ายนี้เข้าไปในเซลล์ โดยส่วนหนึ่งจะถูกนำไปใช้ในกระบวนการเมแทบอลิซึมโดยตรง และอีกส่วนหนึ่งจะถูกเก็บสะสมไว้เป็นอาหารสำรองในรูปพหิเอซเอ (poly-β-hydroxyalkanoates, PHAs) ซึ่งอยู่ในรูปของ 3-hydroxybutyrate (3HB), 3-hydroxyvalerate (3HV), 3-hydroxy-2-methylbutyrate (3H2MB), 3-hydroxy-2 methylvalerate (3H2MV) แสดงดังสมการที่ 2.1 (Sato และคณะ, 1992) นอกจากนี้ Chaung และคณะ (1997) ยังพบว่าในพหิเอซเอมี 3HV และ 3HB เป็นองค์ประกอบหลัก



ทั้งนี้แบคทีเรียจะต้องใช้พลังงานจากการย่อยสลาย ATP (adenosine triphosphate) มาใช้ในการสะสมพหิเอซเอ ดังสมการที่ 2.2



จากสมการข้างต้นสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อ ATP สลายตัวจะปล่อยออร์โทฟอสเฟตออกมา นอกเซลล์ เกิดสารประกอบ ADP (adenosine diphosphate) และพลังงานส่วนหนึ่ง ซึ่งก็คือพลังงานที่แบคทีเรียนำไปใช้ในการสะสมพืเอชเอ Wentzel และคณะ (1985) พบว่ากลไกดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้คือ เป็นพิเศษเมื่อใช้กรดไขมันระเหยง่ายชนิดที่มีโมเลกุลน้อยๆ เช่น อะซิเตท

### ในสภาวะแอโรบิก

ในสภาวะแอโรบิก พืเอชเอที่ถูกเก็บสะสมไว้ในเซลล์จะถูกย่อยสลายโดยการดึงเอาออกซิเจนจากภายนอกเซลล์มาใช้ ทำให้เกิดเซลล์ใหม่และพลังงาน พร้อมกับการปล่อยน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ดังสมการที่ 2.3 (Grabriel, 1994 อ้างโดย ปรียดา เหล่ารุจิจินดา, 2541)

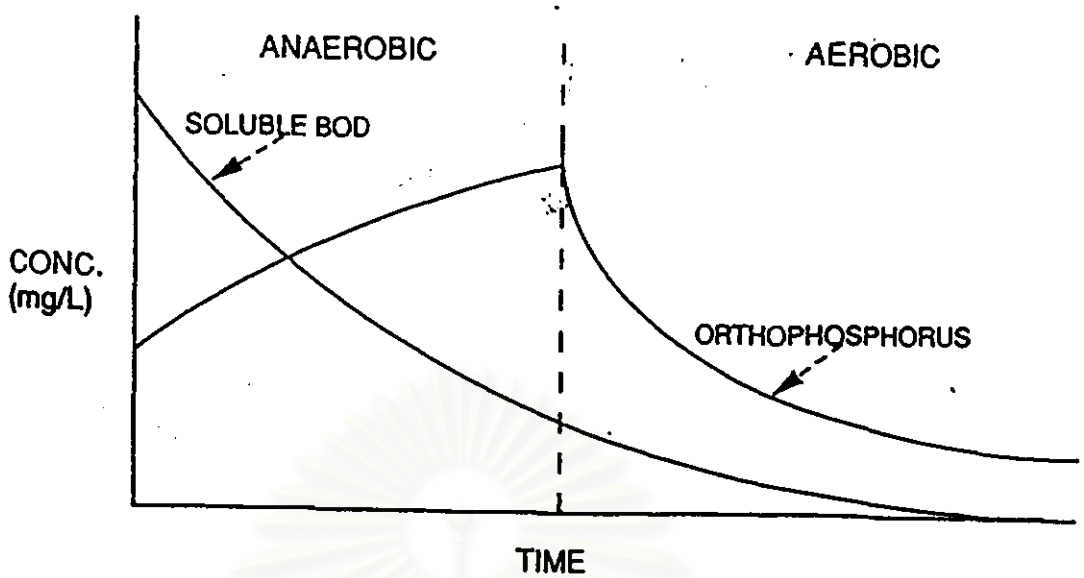


พลังงานใหม่ที่ได้นี้จะถูกใช้ในการดึงออร์โทฟอสเฟตจากนอกเซลล์มารวมกับ ADP ภายในเซลล์ และเก็บสะสมพลังงานไว้ในรูป ATP (ซึ่งเป็นรูปที่มีศักย์พลังงานสูงกว่า) ไว้ใช้ในโอกาสต่อไป ดังสมการที่ 2.4 (Satoh และคณะ, 1992)



ภายใต้สภาวะแอโรบิกที่เกิดขึ้นคือจากสภาวะแอนแอโรบิกนี้จะเกิดการเก็บกักฟอสฟอรัสไว้ในเซลล์มากกว่าปริมาณที่ต้องการสำหรับการเจริญเติบโต จึงมีการกำจัดฟอสฟอรัสเกิดขึ้นดังที่ได้กล่าวมาแล้ว นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียโดยวิธีนี้ยังเป็นการกำจัดคาร์บอนอินทรีย์ในน้ำเสียไปด้วยในขณะเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.1

สถาบันวิจัยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงของฟอสฟอรัสและบีโอดีที่เกิดขึ้นในกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ (Sedlak, 1991)

#### 2.2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการกำจัดฟอสฟอรัส มีอยู่หลายประการดังนี้

##### ก) บีโอดี

Hong และคณะ (1984) อ้าง โดย ปริยดา เหล่ารุจิจินดา (2541) พบว่าควรควบคุมให้อัตราส่วนบีโอดีละลายต่อฟอสฟอรัสละลายไม่ให้ต่ำกว่า 15:1

Sedlak (1991) เสนอว่าอัตราส่วนบีโอดีต่อฟอสฟอรัสควรอยู่ในช่วง 20:1 ถึง 30:1 เพื่อให้ได้ฟอสฟอรัสที่ออกจากระบบมีค่าน้อยกว่า 1 มก./ล.

Randall และคณะ (1992) พบว่าอัตราส่วนบีโอดีต่อฟอสฟอรัสควรมากกว่า 20:1 เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสสูง และฟอสฟอรัสที่ออกจากระบบมีค่าน้อยกว่า 1 มก./ล.

ข) ซีไอดี

Siebritz และคณะ (1983) อ้างโดย ปรีชดา เหล่ารุจิจินดา (2541) พบว่าการกำจัดฟอสฟอรัสจะเกิดขึ้นเมื่อซีไอดีที่ขยอยสลายได้ทางชีวภาพอย่างรวดเร็วมีค่ามากกว่า 25 มก./ถ. และการกำจัดฟอสฟอรัสจะเพิ่มขึ้นตามค่าซีไอดีที่เพิ่มขึ้น

Randall และคณะ (1992) แนะนำให้ใช้อัตราส่วนซีไอดี 50 มก./ถ. ต่อการกำจัดฟอสฟอรัส 1 มก./ถ.

ค) เวลาพักเซลล์เฉื่อยหรือเอสอาร์ที (solids retention time, SRT)

Fukase และคณะ (1982) อ้างโดย Sedlak (1991) พบว่าจากการศึกษาระบบแอนแอโรบิก-แอโรบิกในโรงงานนำร่องที่ใช้บำบัดน้ำเสียชุมชน เมื่ออายุสัปดาห์เพิ่มขึ้นจาก 4.3 วัน เป็น 8 วัน อัตราส่วนซีไอดีต่อฟอสฟอรัสจะเพิ่มจาก 19 เป็น 26 และในขณะที่เดียวกับฟอสฟอรัสในสัปดาห์จะลดลงจากร้อยละ 5.4 เป็น 3.7

WEF (1992) อ้างโดย ปรีชดา เหล่ารุจิจินดา (2541) แนะนำให้ใช้ค่าอายุสัปดาห์ในการออกแบบระบบแยกที่เว็คคัสต์จี้แบบเอชไอเท่ากับ 4-27 วัน

ง) เวลาพักพักน้ำหรือเอชอาร์ที (hydraulic retention time, HRT)

Best (1983) อ้างโดย อ่ำพล เดโชวาณิช (2541) กล่าวว่าเวลากักน้ำที่ใช้ในการออกแบบของสภาพแอนแอโรบิกและแอโรบิกจะอยู่ในช่วง 0.5-1.0 ชั่วโมง และ 3.5-6.0 ชั่วโมงตามลำดับ

Sedlak (1991) กล่าวว่า เวลากักน้ำในสภาพแอโรบิก 1-2 ชั่วโมงก็เพียงพอต่อการจับใช้ฟอสฟอรัสของโทลี-ที แบกทีเรีย

จ) ทีเอช

Matsuo และ Hosobora (1988) อ้างโดย อ่ำพล เดโชวาณิช (2541) พบว่าอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสจะลดลงทีเอชต่ำกว่า 7 และมีค่าสูงสุดทีเอช 7.5-8.5

Sedlak (1991) เสนอว่าระบบจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นทีเอช 7.5-8.0

## ฉ) ไนเตรด

Barnard (1982) อ้างโดย อ่ำพล เตโชวานิชย์ (2541) เสนอว่าอัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนทั้งหมดในช่วงแอนแอโรบิกไม่ควรต่ำกว่า 10:1 เพื่อให้มีผลรบกวนจากไนเตรดน้อยที่สุด

Siebritz และคณะ (1983) อ้างโดย ปรีชดา เหล่ารุจิจินดา (2541) พบว่าปริมาณของซีโอดีในช่วงแอนแอโรบิกจะลดลงถ้ามีการเวียนกลับไนเตรดเข้ามาในถัง โดยซีโอดีจะลดลงเท่ากับ 8.6 มก./ก. ต่อไนเตรด 1 มก./ก.

Randall และคณะ (1992) กล่าวว่าถ้ามีไนเตรดในช่วงแอนแอโรบิก ไนเตรดจะถูกใช้เป็นสารรับอิเล็กตรอน ทำให้ไม่เกิดกระบวนการหมัก การบ่อนอนอินทรีย์ในรูปต่างๆจะไม่ถูกเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหยง่าย ซึ่งทำให้ไม่เกิดการกำจัดฟอสฟอรัส ดังนั้นจึงควรควบคุมไม่ให้มีไนเตรดในช่วงแอนแอโรบิก

## ช) การเติมอะซิเตด

Comeau และคณะ (1986) อ้างโดย อ่ำพล เตโชวานิชย์ (2541) พบว่าการเพิ่มปริมาณอะซิเตดจะทำให้การปลดปล่อยฟอสฟอรัสในช่วงแอนแอโรบิกเพิ่มขึ้น แม้ว่าจะมีไนเตรดอยู่ในระบบบ้างก็ตาม

Satoh และคณะ (1992) พบว่าอัตราส่วนของปริมาณอะซิเตดที่ใช้ต่อพีเอชเอที่สะสมในเซลล์ของแบคทีเรียในช่วงแอนแอโรบิกมีค่าเท่ากับ 15:1

Randall และ Chapin (1994) พบว่าการเติมอะซิเตดในปริมาณไม่เกิน 110 มก./ก. ระบบสามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ดีขึ้นตามปริมาณที่เติมเพิ่มเข้าไปในระบบ แต่ถ้าเติมอะซิเตดเกิน 110 มก./ก. ระบบจะกำจัดฟอสฟอรัสได้น้อยลง และถ้ามีการเติมอะซิเตดในปริมาณที่มากกว่า 195 มก./ก. พบว่าจะไม่เกิดการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

Randall (personal communication, 1996) อ้างโดย ปรีชดา เหล่ารุจิจินดา (2541) กล่าวว่า ในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของกรดอะซิติกสูงจะทำให้การทำงานของระบบกำจัดฟอสฟอรัสล้มเหลว ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการเติมแคลเซียมในน้ำเสีย แต่การทดลองนี้ใช้น้ำเสียที่มีกรดอะซิติกไม่เกิน 400 มก./ก. จึงไม่อาจสรุปได้ว่าการเติมแคลเซียมนี้ควรใช้กับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของกรดอะซิติกสูงเท่าใด

## ข) อุณหภูมิ

Brdjanovic และคณะ (1997) กล่าวว่า ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส การกำจัดฟอสฟอรัสโดยใช้ อะซิเทคเป็นสารอาหารภายใต้สภาวะแอนแอโรบิก-แอโรบิก และมีการทำงานแบบเอสปีอาร์ การกำจัด ฟอสฟอรัสจะเกิดได้ดีที่สุด เมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิต่างๆกัน คือ 5, 10, 20 และ 30 องศาเซลเซียส และ พบว่าอัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในช่วงแอนแอโรบิกจะมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

## ฅ) แมกนีเซียมและ โปแตสเซียม

Yoshitaka และ Katsumi (1988) อ้างโดย ปรีชดา เหล่ารุจิจินดา (2541) พบว่าแมกนีเซียมและ โปแตสเซียมจำเป็นต่อกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ และระบบจะเกิดการยับยั้งการจับใช้ ฟอสฟอรัส ถ้ามีความเข้มข้นของแมกนีเซียมต่ำกว่า 10 มก./ล.

## 2.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบเอสปีอาร์

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอสปีอาร์ เป็นระบบที่มีความคล้ายคลึงกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบเดิม อากาศรุ่นแรก ซึ่งถูกคิดค้นขึ้นโดย Arden และ Lockett ในปี 1914 (Irvine และคณะ 1983) โดยมีรูปแบบการเติมอากาศเป็นแบบ Fill and Draw กล่าวคือ เริ่มต้นจะปล่อยน้ำเสียเข้าถังให้เต็มถึงสี่ก่อกบ แล้วปิดถังและเป่าอากาศลงในถัง แบกที่เร็วจะทำหน้าที่กำจัดสารอินทรีย์ออกจากน้ำเสีย แล้วทิ้งให้เกิด การตกตะกอน ระบายน้ำใสส่วนบนทิ้ง จากนั้นจึงเริ่มต้นการทำงานในวัฏจักรใหม่ต่อไป แต่เนื่องจาก ในสมัยก่อนการทำงานโดยใช้ถังเติมอากาศแบบนี้ไม่สะดวกที่จะใช้กับน้ำเสียที่มีการไหลอย่างต่อเนื่อง ตลอดเวลา ดังนั้นระบบนี้จึงไม่เป็นที่นิยม และถูกแทนที่ด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบไหลอย่างต่อเนื่อง ดังเช่นที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน

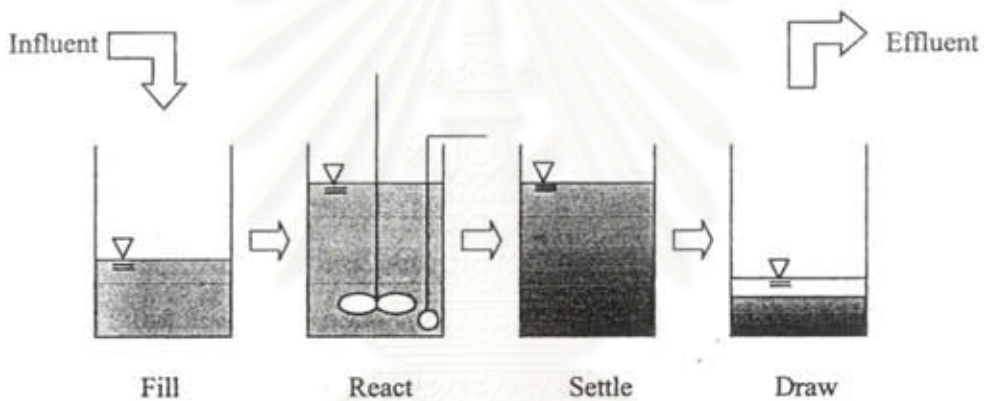
จนกระทั่งในช่วงทศวรรษที่ 1970 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอสปีอาร์ก็กลับมาได้รับความนิยม อีกครั้ง เพราะมีการปรับปรุงรูปแบบระบบจนง่ายต่อการควบคุมการทำงานจากระบบ โดยมีผู้นำเอา ไมโครโปรเซสเซอร์ นิวมาติกวาล์ว โซลินอยด์วาล์ว มอเตอร์วาล์ว เซนเซอร์ควบคุมระดับ เครื่องวัด อัตราการไหล และเครื่องตั้งเวลาอัตโนมัติ มาใช้ในการควบคุมการทำงานจากระบบ (Randall และ คณะ, 1992) ระบบเอสปีอาร์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันถูกปรับปรุงขึ้นใหม่โดย Irvin (1979) อ้างโดย Gardinia (1993) ซึ่งเป็นวิธีบำบัดน้ำเสียแบบแบตช์ (batch) ที่สามารถใช้บำบัดน้ำเสียที่มีสมบัติแปร เปลี่ยนในช่วงเวลาสั้นๆได้ดีกว่าระบบอื่นด้วย แต่อย่างไรก็ตามไม่ได้หมายความว่าระบบเอสปีอาร์จะ ไม่สามารถรับน้ำเสียที่ไหลตลอดเวลา เพราะถ้าหากมีการออกแบบที่เหมาะสมระบบเอสปีอาร์ก็จะ



สามารถบำบัดน้ำเสียที่ไหลตลอดเวลาได้เช่นเดียวกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไหลต่อเนื่อง และจากงานวิจัยของ Irvin (1979) พบว่าระบบเอสบิอาร์ทที่ประกอบไปด้วยถังเติมอากาศจำนวน 3 ใบ จะสามารถควบคุมการทำงานและบำบัดน้ำเสียที่ไหลตลอดเวลาได้ง่ายขึ้น

### 2.3.1 หลักการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอสบิอาร์ท

การทำงานของระบบเอสบิอาร์ทนั้น ขั้นตอนการทำงานทั้งหมดจะเกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์แบบกวนผสมรูปทรงเพียงใบเดียว ซึ่งมีขั้นตอนในการทำงานอยู่ 4 ขั้นตอน คือ เติมน้ำเสีย (fill) เกิดปฏิกิริยา (react) ตกตะกอน (settle) และระบายน้ำใสส่วนบนทิ้ง (draw) ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การทำงานของกระบวนการเอสบิอาร์ท

ในกรณีที่ระบบเอสบิอาร์ทใช้ถังปฏิกรณ์มากกว่า 1 ใบในเวลาเดียวกัน แต่ละใบจะทำหน้าที่ไม่ตรงกัน เพื่อให้สามารถบำบัดน้ำเสียที่ไหลต่อเนื่องตลอดเวลาได้โดยไม่ขาดตอน ลักษณะการทำงานแบบนี้ จะเริ่มจากการปล่อยน้ำเสียเข้าถังปฏิกรณ์ในช่วงเติมน้ำเสียจนเต็มถังแรก ต่อจากนั้นจะเปลี่ยนมาเติมน้ำเสียลงในถังใบที่สองแทน และถังใบแรกจะเริ่มเข้าสู่ช่วงเกิดปฏิกิริยา โดยในช่วงนี้จะมี การเติมอากาศให้กับน้ำเสียตลอดเวลา เมื่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสิ้นสุดลง จะหยุดการเติมอากาศแล้วทิ้งให้ เกิดการตกตะกอน หลังจากนั้นน้ำใสส่วนบนของถังจะถูกระบายทิ้ง ซึ่งโดยปกติจะมีการระบายน้ำทิ้ง ประมาณ 3 ใน 4 ส่วนของถัง ส่วนน้ำที่เหลืออยู่อีก 1 ใน 4 ของถังเป็นส่วนที่มีเซลล์ของจุลชีพตกตะกอนอยู่ จะมีการเติมน้ำเสียลงในถังนี้อีกครั้งเพื่อเริ่มการทำงานในวัฏจักรต่อไป (Metcalf and Eddy, 1991) ส่วนถังปฏิกรณ์ใบอื่นๆจะมีความเหมือนๆกันกับถังใบแรก ต่างกันเพียงแต่มีความเหลื่อมกันของหน้าที่ในถังแต่ละใบเท่านั้น

จุลชีพจะอยู่ในถังปฏิกริยาจนกว่าจะมีการระบายบางส่วนทิ้งไป ซึ่งความถี่และปริมาณการระบายจุลชีพออกไปจะขึ้นอยู่กับปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียและค่าเวลากักเซลล์เฉลี่ย (mean cell residence time, MCRT) โดยระบบที่ได้รับสารอินทรีย์ในปริมาณที่สูง ซึ่งจะผลิตเซลล์ของจุลชีพได้มาก จะต้องมีภาระระบายจุลชีพทิ้งบ่อย ส่วนระบบที่ได้รับสารอินทรีย์ต่ำ ทำให้ผลิตเซลล์ของจุลชีพได้น้อย ก็ไม่ต้องระบายจุลชีพทิ้งบ่อย การระบายจุลชีพมักจะทำในช่วงปลายของการเติมอากาศ เพื่อให้ง่ายต่อการควบคุมการระบายจุลชีพ

ระบบเอสปีอาร์แบบใช้ถังปฏิกริยาใบเฉียวจะเหมาะสำหรับใช้น้ำบัดน้ำเสียที่ไม่ไหลต่อเนื่องตลอดเวลา เช่น น้ำเสียจากชุมชนขนาดเล็กหรือจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารกระป๋อง แต่ถึงจะมีขนาดใหญ่ การควบคุมการทำงานของระบบจะใช้การตั้งเวลาอัตโนมัติ ทำให้ง่ายและสะดวกต่อการทำงานมากขึ้น ส่วนระบบที่ใช้ถังปฏิกริยาหลายใบจะเหมาะสมกับน้ำเสียที่ไหลต่อเนื่องตลอดเวลา

### 2.3.2 ข้อดีและข้อเสียของระบบเอสปีอาร์

ในปัจจุบัน ระบบเอสปีอาร์มีแนวโน้มที่จะได้รับความสนใจมากขึ้น ในการนำมาใช้น้ำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณมาก เนื่องจากระบบนี้มีข้อดีหลายประการดังนี้ (WEF, 1992 และ US.EPA., 1986 อ้างโดย อ่ำพล เตโชวานิชย์, 2541)

1. จากทฤษฎี ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแบคทีเรียมีประสิทธิภาพในการทำงานมากกว่าแบบไหลต่อเนื่อง และสามารถรองรับน้ำเสียที่มีปริมาณมากหรือมีความเข้มข้นสูงในช่วงเวลาสั้นๆ ได้ดีกว่า
2. ระบบมีความยืดหยุ่นในการปรับหน้าที่การทำงานให้เหมาะสมกับความเข้มข้นของน้ำเสียที่เปลี่ยนแปลง
3. ไม่ต้องมีถังตกตะกอนและระบบเวียนสัต์จ้กลับ
4. สามารถดัดแปลงการทำงานของระบบเพื่อให้สามารถกำจัดคาร์บอนอินทรีย์ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ได้โดยไม่ต้องเปลี่ยนแปลงลักษณะของถังปฏิกริยา
5. จากสภาพแวดล้อมในถังที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ทำให้เกิดการคัดพันธุ์ โดยแบคทีเรียชนิดเส้นใย (filamentous bacteria) ที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดการไม่จมตัวของสลัดจ์มักจะถูกคัดออกไปจากระบบนี้

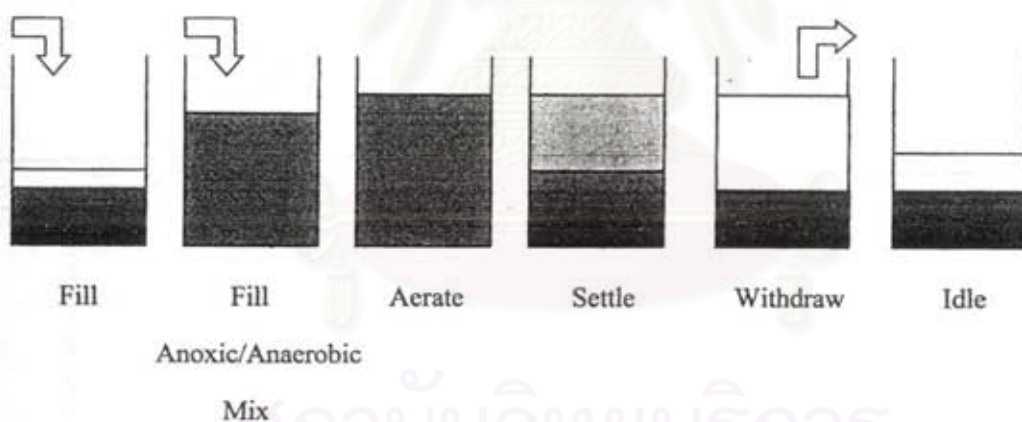
แต่อย่างไรก็ตาม ระบบเอสปีอาร์ก็มีข้อด้อยที่สำคัญบางประการ ดังนี้

1. ถ้าน้ำเสียไหลต่อเนื่องตลอดเวลาในปริมาณที่ไม่คงที่ ระบบเอสปีอาร์แบบใช้ถังหลายใบจะต้องการระบบอัตโนมัติหลายอย่างไม่จำเป็นต้องใช้ในระบบเติมอากาศแบบอื่น

2. ในกรณีที่ใช้ระบบเอสบีอาร์แบบใช้ถังปฏิกริยาใบเคียวจะต้องใช้ถังที่มีขนาดใหญ่
3. ต้องการล้างพักน้ำก่อนเข้าระบบ เพื่อให้การควบคุมการทำงานทำได้ง่ายขึ้น

### 2.3.3 การประยุกต์ใช้ระบบเอสบีอาร์ในการกำจัดฟอสฟอรัส

ในปัจจุบันนี้ ระบบเอสบีอาร์นอกจากจะใช้ในการกำจัดคาร์บอนอินทรีย์แล้ว ยังได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในการกำจัดฟอสฟอรัสและไนโตรเจนอีกด้วย ซึ่งสามารถทำได้โดยการปรับเปลี่ยนขั้นตอนการทำงานของระบบให้มีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม เพื่อทำให้เกิดการกำจัดฟอสฟอรัสและไนโตรเจน โดยขั้นตอนการทำงานของระบบเอสบีอาร์แบบนี้ จะประกอบไปด้วย การรับน้ำเสีย การเกิดปฏิกริยา ซึ่งจะสามารถควบคุมให้เกิดสภาพแอนแอโรบิก แอนอกซิก และแอโรบิก อย่างใดอย่างหนึ่ง การตกตะกอน การระบายน้ำออก และการพัก โดยการกำจัดไนโตรเจนจะเกิดการไนตริฟิเคชันในสภาพแอโรบิก และเกิดการดีไนตริฟิเคชันในสภาพแอนอกซิก ส่วนการกำจัดฟอสฟอรัสจะเกิดจากการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในสภาพแอนแอโรบิก และเกิดการจับใช้ฟอสฟอรัสอย่างฟุ่มเฟือยในสภาพแอโรบิก ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กระบวนการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส โดยใช้ระบบเอสบีอาร์ (Randall และคณะ, 1992)

### 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของออร์โทฟอสเฟตที่มีต่อขั้นตอนแอโรบิกในกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ มีดังนี้

Wentzel และคณะ (1985) ทำการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของการปลดปล่อยและการจับใช้ฟอสฟอรัสในกรณีที่มิต่ออายุสัปดาห์เท่ากับ 8, 10, 15 และ 20 วัน โดยมีผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.4 จากผลการทดลองพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างการปลดปล่อยฟอสฟอรัสและการจับใช้ฟอสฟอรัสเป็น

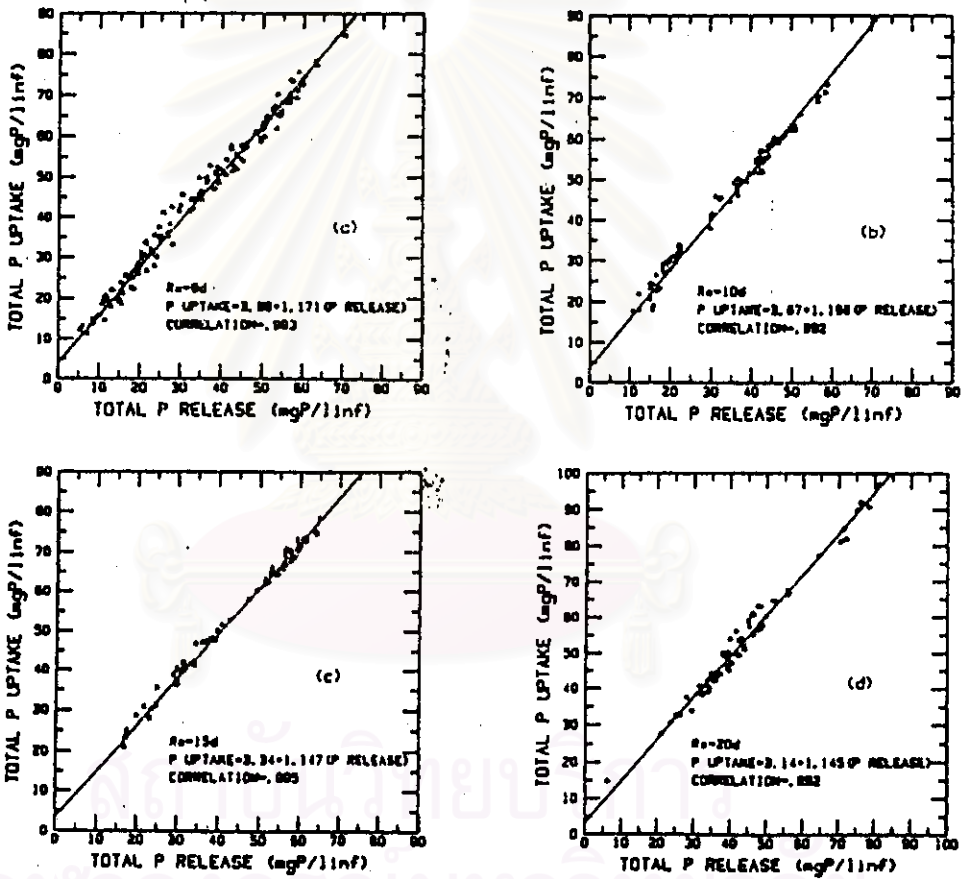
เส้นตรงสำหรับทุกค่าของอายุสัปดาห์ที่ทำการทดลองและกราฟแต่ละเส้นมีความชันใกล้เคียงกันมาก ด้วยเหตุนี้จึงสรุปได้ว่าการกำจัดฟอสฟอรัสจึงมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับการปลดปล่อยฟอสฟอรัสด้วย และพบว่าจุดตัดแกน Y เป็นค่าของฟอสฟอรัสที่ใช้ในกระบวนการเมแทบอลิซึมของจุลชีพทั้งหมด ซึ่งสามารถนำความสัมพันธ์เหล่านี้มาเขียนเป็นสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$P(\text{uptake}) = a' P(\text{release}) + P(\text{metabolic}) \text{ mg P/L influent} \dots\dots\dots(2.5)$$

หรือ  $P(\text{removal}) = P(\text{uptake}) - P(\text{release}) \dots\dots\dots(2.6)$

$$= (a' - 1) P(\text{release}) + P(\text{metabolic}) \dots\dots\dots(2.7)$$

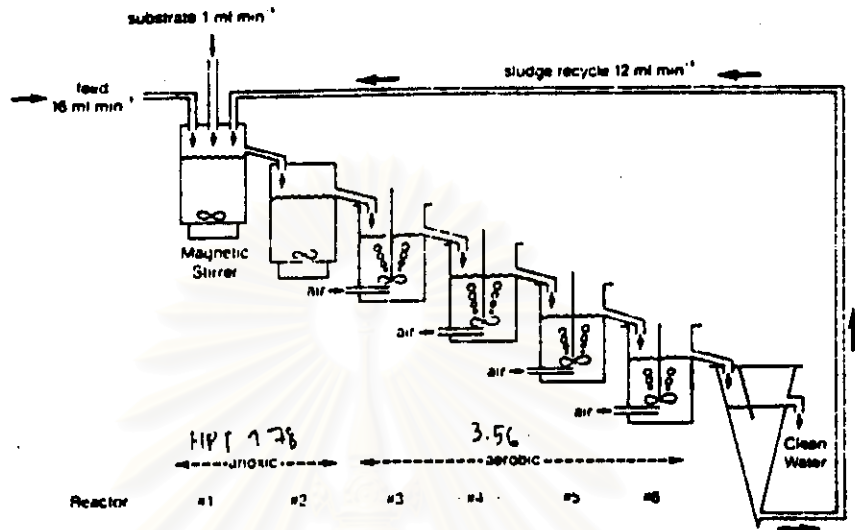
จากกราฟ  $a'$  มีค่าอยู่ระหว่าง 1.145-1.198 และมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่ออายุสัปดาห์ของระบบเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.4 การจับใช้ฟอสฟอรัสทั้งหมดกับการปลดปล่อยฟอสฟอรัสทั้งหมดเมื่อระบบมีค่าอายุสัปดาห์ที่ 8, 10, 15 และ 20 วัน (Wentzel และคณะ, 1985)

Jones และคณะ (1987) ได้ทำการศึกษาผลของการเติมสารอาหารต่อการปลดปล่อยและการจับใช้ฟอสฟอรัส โดยใช้จุดทดลองบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพขนาดปฏิบัติการ ซึ่งมีการทำงานดังแสดงในรูปที่ 2.5 และในการทดลองใช้น้ำเสียดิบจากโรงบำบัดน้ำเสียรวมของเมืองโทรอนโท ประเทศแคนาดา ซึ่ง

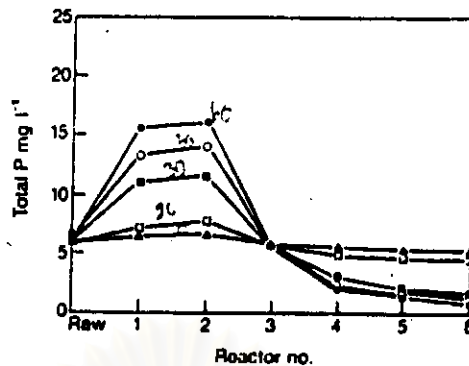
มีค่าซีไอดีประมาณ 250-400 มก./ล. ทีเคเอ็นประมาณ 22-38 มก./ล. และฟอสฟอรัสประมาณ 2-3 มก./ล. ดังนั้นจึงมีการเติมฟอสฟอรัสในรูปของแอมโมเนียมฟอสเฟตเพื่อให้ได้ค่าฟอสฟอรัสตามที่ต้องการคือประมาณ 6 มก./ล.



รูปที่ 2.5 ลักษณะการทำงานของชุดทดลองบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพขนาดปฏิบัติการซึ่งรับน้ำเสียดิบจากโรงบำบัดน้ำเสยรวมของเมืองโทรอนโท ประเทศแคนาดา และมีการเติมสารอาหารเพิ่มให้ระบบด้วย (Jones และคณะ, 1987)

ชุดทดลองประกอบไปด้วยถังแอนอโรบิก 2 ใบ, ถังแอโรบิก 4 ใบ และถังตกตะกอน 1 ใบ โดยถังปฏิกรณ์แต่ละใบมีขนาด 1.5 ลิตร ส่วนถังตกตะกอนมีขนาด 3 ลิตรและมีเวลาดักพักน้ำเท่ากับ 1.8 ชั่วโมง และเพื่อควบคุมให้ค่าเอ็มแอลเอทีเอสในระบบมีค่าอยู่ระหว่าง 1,900-2,800 มก./ล. จะมีการทิ้งสลัดจ์ส่วนเกินที่ถังแอโรบิกใบสุดท้ายวันละ 1 ลิตร ค่าอายุสลัดจ์มีค่าเท่ากับ 9 วัน ในการทดลองนี้กำหนดให้อัตราไหลเข้าของน้ำเสียดิบเท่ากับ 16 มล./นาทึ, อัตราการเติมสารอาหารเท่ากับ 1 มล./นาทึ และมีการเวียนกลับสลัดจ์ 12 มล./นาทึ ซึ่งเมื่อกิดอัตราไหลเข้าของน้ำเสียรวมกับการเวียนกลับสลัดจ์ทำให้เวลาดักพักน้ำของถังปฏิกรณ์แต่ละใบมีค่าเท่ากับ 0.89 ชั่วโมง และก่อนเริ่มทำการทดลองจะมีการเดินระบบให้ทำงานเป็นเวลา 2 สัปดาห์เพื่อให้ระบบปรับตัวและมีเสถียรภาพ

ในการทดลองเพื่อศึกษาผลของการเติมสารอาหารต่อการปลดปล่อยและจับใช้ฟอสฟอรัส จะทำการทดลองเติมโซเดียมอะซิเตดด้วยความเข้มข้นเท่ากับ 0, 20, 30, 50 และ 60 มก.ซีไอดี/ล.ที่ถังแอนอโรบิกถังแรก ซึ่งผลการทดลองวัดค่าฟอสฟอรัสที่ถังปฏิกรณ์แต่ละถังพบว่าเกิดการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในถังแอนอโรบิกทั้งสองถัง และมีการจับใช้ฟอสฟอรัสในถังแอโรบิกทั้ง 4 ถัง ดังแสดงในรูปที่ 2.6

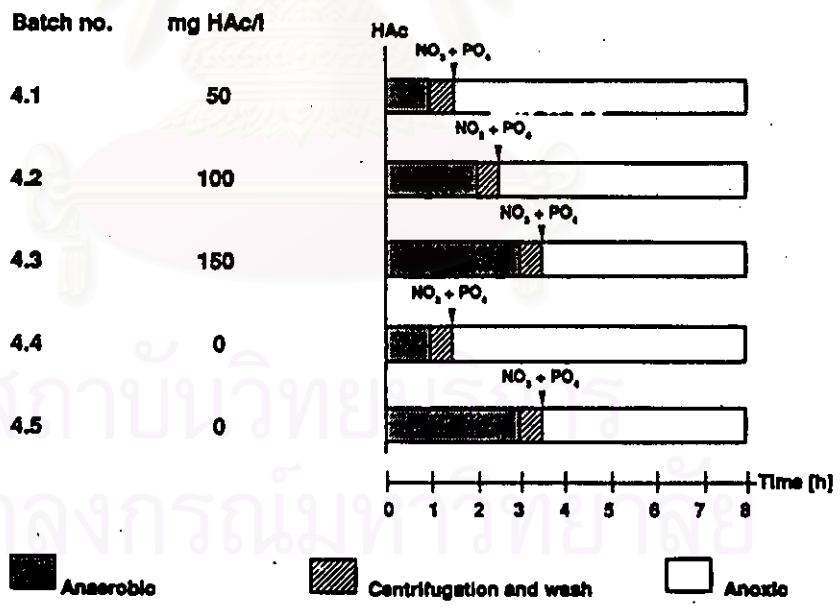


รูปที่ 2.6 การปลดปล่อยและจับใช้ฟอสฟอรัสในถังปฏิกริยาแต่ละใบ ซึ่งมีการเติม ไซเดียมอะซิเตดด้วย ความเข้มข้นเท่ากับ 0, 20, 30, 50 และ 60 มก.ซีโอดี/ล. (โดยแทนด้วยสัญลักษณ์ ▲, □, ■, ○ และ ● ตามลำดับ) (Jones และคณะ, 1987)

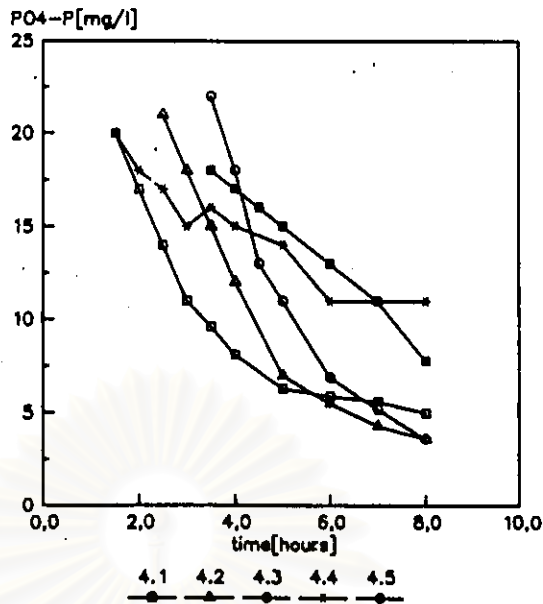
จากรูปที่ 2.6 จะเห็นว่าเมื่อเติมไฮเดียมอะซิเตดในปริมาณเพิ่มขึ้นพบว่าที่ชั้นคอนแอนออกซิกเกิดการปลดปล่อยฟอสฟอรัสมากขึ้นและเกิดการจับใช้ฟอสฟอรัสมากขึ้นที่ชั้นคอนแอโรบิก ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการเติมสารอาหารในปริมาณมากขึ้นทำให้เกิดการกำจัดฟอสฟอรัสได้ดีขึ้น และในกรณีที่ไม่มีการเติมไฮเดียมอะซิเตดพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสมีค่าเพียง 11 เปอร์เซ็นต์ของฟอสฟอรัสในน้ำเข้า (ฟอสฟอรัสในน้ำเข้ามีค่าเท่ากับ 6.1 มก./ล.) แต่หลังจากเติมกรดอะซิติก 60 มก.ซีโอดี/ล.ลงไปพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นเป็น 86 เปอร์เซ็นต์และฟอสฟอรัสในน้ำออกมีค่าน้อยกว่า 1 มก./ล. ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการเติมแหล่งคาร์บอนที่สามารถย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วทำให้เกิดการกำจัดฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้น แต่พบว่า การเพิ่มปริมาณไฮเดียมอะซิเตดที่เดิมจาก 0 เป็น 20 มก.ซีโอดี/ล. ไม่ได้ทำให้การจับใช้ฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นมากนัก และการเพิ่มปริมาณไฮเดียมอะซิเตดที่เดิมจาก 30 เป็น 50 มก.ซีโอดี/ล. (ปริมาณไฮเดียมอะซิเตดเพิ่มขึ้นจากเดิม 66 เปอร์เซ็นต์) ทำให้การจับใช้ฟอสฟอรัสทั้งหมดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยคือจาก 69 เป็น 73 เปอร์เซ็นต์ (ดังนั้นเปอร์เซ็นต์ฟอสฟอรัสที่กำจัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นเพียง 4 เปอร์เซ็นต์) ในการทดลองนี้จึงสรุปว่าปริมาณไฮเดียมอะซิเตดที่เหมาะสมสำหรับกำจัดฟอสฟอรัสคือ 30 มก.ซีโอดี/ล.

Kern-Jespersen และ Henze (1993) ได้ทำการศึกษาการจับใช้ฟอสฟอรัสภายใต้สภาพแอนออกซิกและแอโรบิก โดยได้ทำการทดลองแบบแบดซ์ซึ่งมีการเติมฟอสฟอรัสถึงชั้นคอนแอนแอโรบิก โดยสัณฐานที่ใช้ในการทดลองนำมาจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชน 2 แห่งที่ตั้งอยู่ในเมืองโคเปนเฮเกน ประเทศเดนมาร์ก ซึ่งเป็นโรงงานบำบัดน้ำที่มีการทำงานแบบ BIO-DENITRIPHO™ โดยถังปฏิกริยาที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นถังพลาสติกมีขนาด 2 ลิตรและมีฝาปิดแบบเกลียว และมีการควบคุมอุณหภูมิ

ให้ทั้งที่เท่ากับ 14 องศาเซลเซียสตลอดการทดลอง ซึ่งก่อนทำการทดลองสัปดาห์จะถูกนำไปเติมอากาศเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ขณะทำการเติมอากาศจะเติมฟอสฟอรัสลงไปปริมาณเท่ากับ 10 มก.ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส/ล. หลังจากนั้นนำสัปดาห์ไปทำการหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงเพื่อแยกส่วนที่เป็นน้ำออกและทำการล้างสัปดาห์ด้วยน้ำประปา(หมายเหตุผู้วิจัย : เพื่อลดปริมาณฟิเอชเอที่สะสมในเซลล์ให้เหลือน้อยที่สุด และป้องกันไม่ให้มีฟอสฟอรัสเหลืออยู่ในตัวอย่างที่จะนำมาทำการทดลอง เพราะฟิเอชเอและฟอสฟอรัสเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการทดลองนี้) จากนั้นแบ่งสัปดาห์ใส่ลงในถังปฏิกริยาจำนวน 5 ใบ เติมอะซิเทตลงในถังแต่ละใบด้วยปริมาณที่แตกต่างกัน โดยช่วงเวลาของชั้นคอนแอนเอโรบิกของถังแต่ละใบจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับปริมาณอะซิเทตที่เติม(หมายเหตุผู้วิจัย : เพื่อให้มีปริมาณฟิเอชเอในเซลล์ที่ถูกสร้างขึ้นในชั้นคอนแอนเอโรบิกในปริมาณที่แตกต่างกัน ซึ่งจะมีผลต่อการจับใช้ฟอสฟอรัสที่ชั้นคอนแอนเอโรบิก) หลังสิ้นสุดชั้นคอนแอนเอโรบิกทำการแยกส่วนที่เป็นสัปดาห์และส่วนที่เป็นน้ำออกจากกันโดยใช้เครื่องหมุนเหวี่ยง จากนั้นสัปดาห์จะถูกทำให้แขวนลอยอีกครั้งด้วยการเติมน้ำประปาพร้อมกับการเติมไนเตรดและฟอสฟอรัสในปริมาณเท่ากันทุกถัง(หมายเหตุผู้วิจัย : เพื่อดูผลการจับใช้ฟอสฟอรัสในแต่ละแบคทีเรียที่มีปริมาณฟิเอชเอเริ่มต้นต่างกัน แต่มีปริมาณฟอสฟอรัสเริ่มต้นที่ชั้นคอนแอนเอโรบิกเท่ากัน) ซึ่งวิธีการทดลองของแต่ละแบคทีเรียแสดงในรูปที่ 2.7 และผลการทดลองที่ได้แสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 วิธีการทดลองของชุดทดลองแบบแบคทีเรียซึ่งมีการทำงานแบบแอนเอโรบิก-แอนอกซิก โดยมีการเติมสารอาหารที่ชั้นคอนแอนเอโรบิกและมีช่วงเวลาในการทำงานของชั้นคอนแอนเอโรบิก-แอนอกซิกต่างกัน (Kerr-Jespersen และ Henze, 1993)



รูปที่ 2.8 การจับใช้ฟอสฟอรัสที่ชั้นคอนแอนอกซิกของชุดทดลองแบบแบคทีเรียที่มีการเติมสารอาหารที่ชั้นคอนแอนแอโรบิกและมีช่วงเวลาในการทำงานของชั้นคอนแอนแอโรบิก-แอนอกซิกต่างกัน (Kerm-Jespersen และ Henze, 1993)

จากผลการทดลองในรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่า ชุด 4.1, 4.2 และ 4.3 ซึ่งเป็นชุดที่มีการเติมอะซิเตดเกิดการจับใช้ฟอสฟอรัสมากกว่าชุด 4.4 และ 4.5 ซึ่งไม่ได้เติมอะซิเตด นอกจากนี้เมื่อสังเกตค่าฟอสฟอรัสที่ปลายชั้นคอนแอนอกซิกพบว่าชุด 4.3 และ 4.2 ซึ่งมีการเติมอะซิเตดมากกว่าชุด 4.1 พบว่ามีปริมาณฟอสฟอรัสเหลืออยู่น้อยกว่าชุด 4.1 แสดงว่าปริมาณสารอาหารที่เติมที่ชั้นคอนแอนแอโรบิกมีผลต่อการจับใช้ฟอสฟอรัส(หมายเหตุผู้วิจัย : เพราะมีการเติมอะซิเตดในปริมาณที่มากกว่าจึงมีปริมาณพีเอชเอที่สร้างขึ้นในชั้นคอนแอนแอโรบิกมากกว่า ทำให้สามารถจับใช้ฟอสฟอรัสได้มากกว่าและเร็วกว่าด้วย)

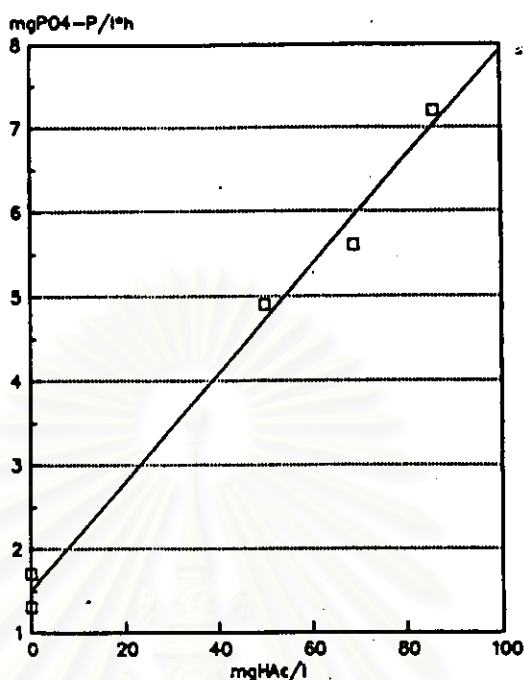
เมื่อเปรียบเทียบในกรณีของชุดทดลองที่มีช่วงเวลาในการทำงานของชั้นคอนแอนแอโรบิก-แอนอกซิกเท่ากัน ทำให้สามารถบอกถึงความแตกต่างของการเติมอะซิเตดต่อการจับใช้ฟอสฟอรัสได้ดังนี้

1. ชุด 4.1 (เติมอะซิเตด 50 มก.อะซิติก/ล.) และชุด 4.4 (ไม่เติมอะซิเตด) พบว่าชุด 4.1 มีการจับใช้ฟอสฟอรัสดีกว่าชุดที่ 4.4 แม้ว่าที่เวลาเริ่มต้นชั้นคอนแอนอกซิกจะมีค่าฟอสฟอรัสเท่ากัน และอัตราการจับใช้ก็มีค่ามากกว่าด้วย โดยสังเกตจากความชันของกราฟที่ลดลงอย่างรวดเร็ว

2. ชุด 4.3 (เติมอะซิเตด 150 มก.อะซิติก/ล.) และชุด 4.5 (ไม่เติมอะซิเตด) พบว่าชุด 4.3 มีการจับใช้ฟอสฟอรัสมากกว่าชุด 4.5 ถึงแม้ว่าชุด 4.3 จะมีค่าฟอสฟอรัสเริ่มต้นที่ชั้นคอนแอนอกซิกสูงกว่า แต่ที่ปลายแอนอกซิกฟอสฟอรัสก็ถูกจับใช้ไปจนมีค่าน้อยกว่าชุด 4.5 และอัตราการจับใช้ของชุด 4.3 ก็มากกว่าชุด 4.5 ด้วย โดยสังเกตจากความชันของกราฟที่ลดลงอย่างรวดเร็ว



นอกจากนี้จากผลการทดลองที่ได้ทำให้สามารถหาอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสที่ขึ้นคอนแอนออกซิกต่อการจับใช้อะซิเตดที่ขึ้นคอนแอนแอโรบิกดังแสดงในรูปที่ 2.9

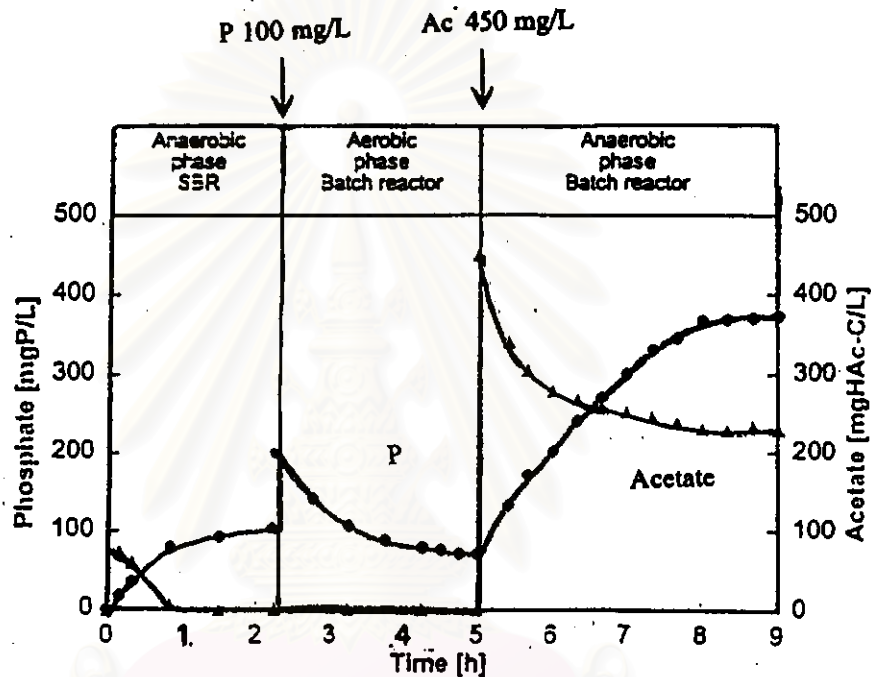


รูปที่ 2.9 อัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสที่ขึ้นคอนแอนออกซิกกับการจับใช้อะซิเตดที่ขึ้นคอนแอนแอโรบิก (Kerm-Jespersen และ Henze, 1993)

จากรูปที่ 2.9 จะเห็นว่ากราฟระหว่างอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสที่ขึ้นคอนแอนออกซิกกับปริมาณอะซิเตดที่ถูกจับใช้ไปที่ขึ้นคอนแอนแอโรบิกมีความสัมพันธ์เป็นกราฟเส้นตรง ซึ่งแสดงว่าถ้ามีการจับใช้อะซิเตดที่ขึ้นคอนแอนแอโรบิกเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสที่ขึ้นคอนแอนออกซิกเพิ่มขึ้นด้วย

Brdjanovic และคณะ (1997) ได้ทำการทดลองโดยใช้สลัดจ์จากจุดสิ้นสุดของขึ้นคอนแอโรบิกมาทำการทดลองแบบแบตช์ ซึ่งระบบมีการทำงานแบบแอโรบิก-แอนแอโรบิก โดยมีการเติมฟอสฟอรัสที่จุดเริ่มต้นของช่วงแอโรบิกจำนวน 100 มก./ล. จากนั้นเติมอากาศต่อเป็นเวลา 2.75 ชั่วโมง ต่อมาสลัดจ์ก็จะผ่านเข้าสู่ขึ้นคอนแอนแอโรบิก และเมื่อเกิดสภาพแอนแอโรบิกอย่างสมบูรณ์จะเติมอะซิเตด 450 มก./ล.ลงไปจนถึงปฏิบัติการ จากนั้นจะมีการสังเกตการปลดปล่อยฟอสฟอรัสและการจับใช้อะซิเตดอีกเป็นเวลามากกว่า 4 ชั่วโมง ซึ่งจากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 2.10 พบว่าในช่วงแอโรบิกที่มีการเติมฟอสฟอรัส 100 มก./ล.มีการจับใช้ฟอสฟอรัส 129 มก./ล.หรือ 80 มก.ฟอสฟอรัส/ก.ชีวมวล ซึ่งสูงกว่าปริมาณของฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับใช้ไปในการทำงานของระบบเอสบิอาร์ปกติประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์(หมายเหตุผู้วิจัย : เห็นได้ว่าการเติมฟอสฟอรัสที่ขึ้นคอนแอโรบิกมีผลทำให้เกิดการจับใช้

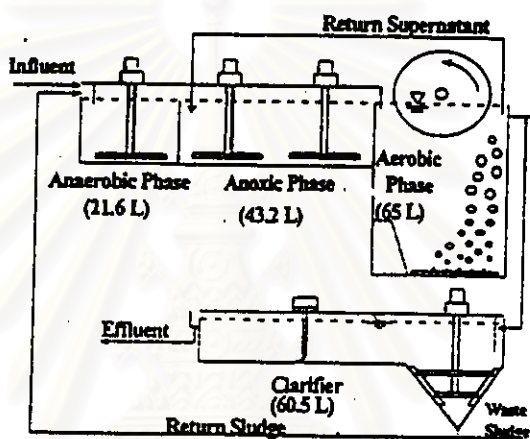
ฟอสฟอรัสได้มากขึ้น ดังนั้นตำแหน่งการเติมฟอสฟอรัสอาจมีผลต่อการจับใช้ฟอสฟอรัสด้วย) จากการสังเกตที่จุดสิ้นสุดของช่วงแอนแอโรบิกที่มีการเติมอะซิเตด 450 มก./ล. มีการจับใช้อะซิเตดเท่ากับ 220 มก./ล.หรือ 138 มก.อะซิเตด/ก.ชีวมวล และมีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสสุทธิ 303 มก./ล.หรือ 189 มก. ฟอสฟอรัส/ก.ชีวมวล และในน้ำออกมีฟอสฟอรัสประมาณ 380 มก./ล. (หมายเหตุของผู้วิจัย : จะพบว่าฟอสฟอรัสที่จุลชีพปลดปล่อยออกมาในช่วงแอนแอโรบิกมีปริมาณมากกว่าที่จุลชีพจับใช้ไปในช่วงแอนโรบิก ที่เป็นเช่นนี้น่าจะมีสาเหตุมาจากการที่จุลชีพจับใช้อะซิเตดที่เติมลงไปเป็นเวลาเริ่มต้นของช่วงแอนแอโรบิก แล้วทำให้เกิดการปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกมาเพิ่มขึ้นอีก)



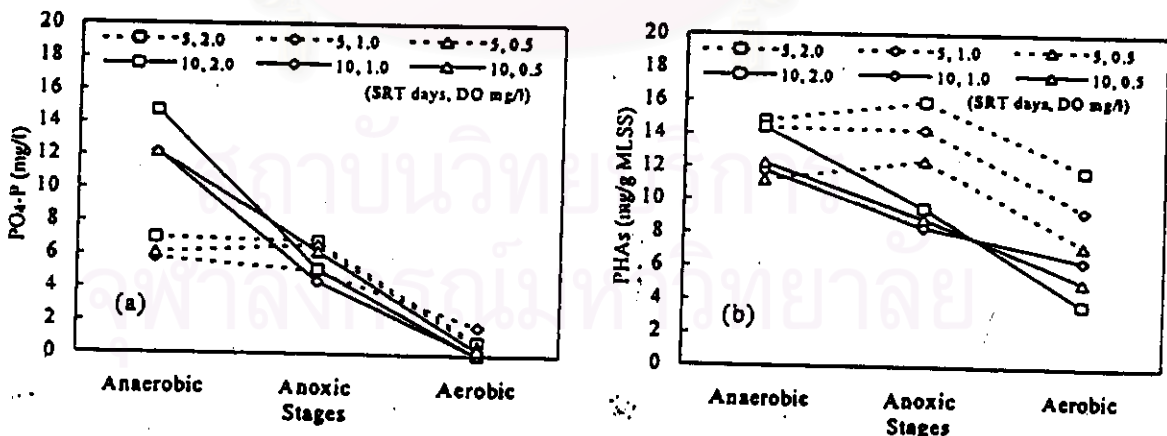
รูปที่ 2.10 ความเข้มข้นของอะซิเตดและฟอสฟอรัสในการทดลองแบบแบคทีเรียที่มีการทำงานแบบแอนโรบิก-แอนแอโรบิกโดยใช้สัณฐานที่นำมาจากจุดสุดท้ายของขั้นตอนแอนแอโรบิกของระบบเอสบีอาร์ (Brdjanovic และคณะ, 1997)

Chaung และคณะ (1997) ได้ทำการทดลองโดยใช้กระบวนการที่มีการทำงานร่วมกันระหว่างระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์-จานหมุนชีวภาพ(biofilm) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.11 และทำการทดลองโดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าอายุสลัดจ์และออกซิเจนละลายที่ค่าต่างๆ โดยมีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในน้ำเข้าเท่ากับ  $5 \pm 0.5$  มก./ล. เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างฟอสฟอรัสกับทีเอชเอ จากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 2.10 แสดงให้เห็นว่าการจับใช้ฟอสฟอรัสมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับการใช้ทีเอชเอในสถานะแอนออกซิกและแอนโรบิกกล่าวคือ ที่ค่าอายุสลัดจ์ 10 วันพบว่าในสถานะแอนออกซิกและแอนโรบิก ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสมีค่าลดลง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นของทีเอชเอในสถานะดังกล่าวที่มีค่าลดลงเช่นเดียวกัน นอกจากนี้อายุสลัดจ์ยังมีผลต่อการกำจัดฟอสฟอรัสและการใช้ทีเอชเออีกด้วย

โดยจากรูปที่ 2.12 จะเห็นว่า เมื่อระบบมีค่าอายุสัปดาห์ 5 วันมีการอธิบายว่าในขั้นตอนแอนอ็อกซิกการจับใช้ฟอสฟอรัสหยุดลง(หมายเหตุของผู้วิจัย : ในขั้นตอนแอนอ็อกซิกไม่มีการจับใช้ฟอสฟอรัสเกิดขึ้นน่าจะเป็นเพราะว่าไม่มีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสที่ขั้นตอนแอนแอโรบิกมากกว่า) และยังทำให้ฟอสฟอรัสไม่สามารถถูกกำจัดออกไปอย่างสมบูรณ์ในขั้นตอนแอโรบิก แต่เมื่อระบบมีค่าอายุสัปดาห์ 10 วันจะมีการจับใช้ฟอสฟอรัสเกิดขึ้นในขั้นตอนแอนอ็อกซิกและแอโรบิก (หมายเหตุของผู้วิจัย : ระบบที่มีค่าอายุสัปดาห์ 5 วันมีการกำจัดฟอสฟอรัสในขั้นตอนแอโรบิกเกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์นั้นน่าจะมีสาเหตุมาจากมีค่าอายุสัปดาห์น้อยเกินไป จึงทำให้ระบบไม่สามารถเกิดกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัส ซึ่งควรจะมีการศึกษาวิจัยในเรื่องนี้ต่อไปในอนาคต)



รูปที่ 2.11 การทำงานร่วมกันของระบบแอกทีเวเต็ดสลัดจ์-งานหมุนชีวภาพ (Chaung และคณะ, 1997)



รูปที่ 2.12 ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสและทีเอชเอในขั้นตอนแอนแอโรบิก แอนอ็อกซิก และแอโรบิก (Chaung และคณะ, 1997)

Liu และคณะ (1997) ได้ทำการศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนฟอสฟอรัสต่อซีโอดี ในน้ำเสียที่มีต่อการทำงานของกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ ซึ่งทำการทดลองโดยใช้กระบวนการเอสบิโอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก โดยใช้ดังปฏิกิริยามีลักษณะเป็นทรงระบอบมี ปริมาตรใช้งาน 1.8 ลิตร ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานดังนี้ เติมน้ำเสยรวมกับขั้นตอนแอนแอโรบิก 50 นาที, ขั้นตอนแอโรบิก 80 นาที และตกตะกอน 50 นาที รวมเวลาในการทำงานทั้งหมดเท่ากับ 3 ชั่วโมง/วัฏจักร และกำหนดให้มีค่าอายุสัทธิค์ 7.5-8 วัน, ปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนประมาณ 3,000-6,000 มก./ล., ปริมาณน้ำเข้าและน้ำที่ทิ้งออกจากระบบใน 1 วัฏจักรเท่ากับ 0.9 ลิตร และควบคุมพีเอชให้มีค่า ประมาณ 7 ถึง 8

น้ำเสยสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองกำหนดให้มีค่าซีโอดีคงที่(ใช้แหล่งคาร์บอนจากกรดอะซิติกและไซเดียมอะซิเตด) แต่เปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสฟอรัสที่เติม(ใช้ในรูป  $KH_2PO_4$ ) เพื่อแปรผันอัตราส่วนฟอสฟอรัสต่อซีโอดี โดยทำการทดลองพร้อมกัน 3 ชุดการทดลองดังนี้

**ถึง I** กำหนดให้น้ำเสยมีอัตราส่วนฟอสฟอรัสต่อซีโอดีเท่ากับ 2/100

**ถึง II** จะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ช่วงคือ

ช่วงที่ 1 กำหนดให้น้ำเสยมีอัตราส่วนฟอสฟอรัสต่อซีโอดีเท่ากับ 20/100

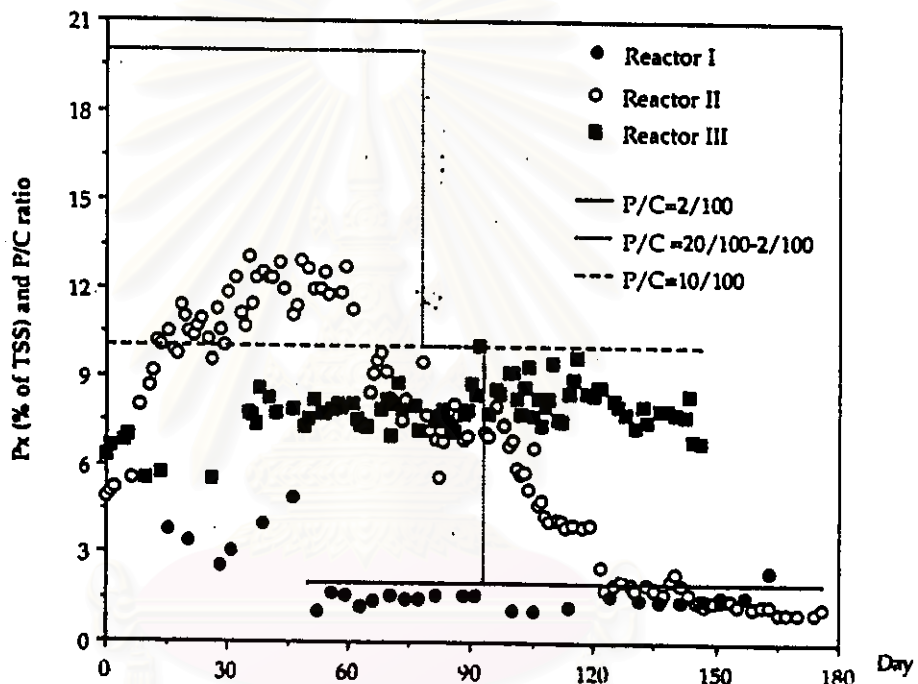
ช่วงที่ 2 ลดปริมาณฟอสฟอรัสที่เติมในน้ำเสยอย่างช้าๆจนมีค่าอัตราส่วนฟอสฟอรัสต่อซีโอดีเหลือเท่ากับ 2/100

**ถึง III** กำหนดให้น้ำเสยมีอัตราส่วนฟอสฟอรัสต่อซีโอดีเท่ากับ 10:100

นอกจากนี้ก่อนเริ่มทำการทดลองจะเดินระบบด้วยการเปลี่ยนแปลงเวลาพักเซลล์เฉื่อยอย่างไ้อย 3 คาเพื่อให้ระบบเข้าสู่สถานะคงตัว และจะทำการเก็บตัวอย่างที่ปลายขั้นตอนแอโรบิกเพื่อหาเปอร์เซ็นต์ของฟอสฟอรัสที่สะสมในเซลล์ โดยผลการทดลองที่ได้แสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ในช่วงเริ่มต้นการทดลองทั้ง 3 ชุดการทดลองมีค่าเปอร์เซ็นต์ของฟอสฟอรัสที่สะสมในเซลล์สูงใกล้เคียงกัน จากผลการทดลองของถึง I ซึ่งมีอัตราส่วนฟอสฟอรัสต่อซีโอดีต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับชุดทดลองอื่นๆ พบว่าเปอร์เซ็นต์ฟอสฟอรัสที่สะสมในเซลล์จากวันที่เริ่มการทดลองซึ่งมีค่าประมาณ 6 เปอร์เซ็นต์ลดลงเหลือน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ประมาณวันที่ 50 และไม่มีการเพิ่มขึ้นอีกตลอดการทดลอง และจากผลการทดลองของถึง II พบว่าในช่วงวันที่ 0-60 (อัตราส่วนฟอสฟอรัสต่อซีโอดีเท่ากับ 20/100)เปอร์เซ็นต์ฟอสฟอรัสที่สะสมในเซลล์มีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับชุดทดลองอื่นๆ โดยมีเปอร์เซ็นต์ฟอสฟอรัสในเซลล์สูงสุดประมาณ 13.5 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อลดปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำเสยลงจนกระทั่งอัตราส่วนฟอสฟอรัสต่อซีโอดีลดลงเหลือเท่ากับ 2/100 ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนฟอสฟอรัสต่อซีโอดีของถึง I พบว่าเปอร์เซ็นต์ฟอสฟอรัสที่สะสมในเซลล์มีค่าค่อยๆลดลงจนมีค่าใกล้เคียงกับถึง I คือมีค่าน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ในช่วงประมาณวันที่ 120 สำหรับผลการทดลองของถึง III ซึ่งมีอัตราส่วนฟอสฟอรัสต่อซีโอดีเท่ากับ 10/100 พบว่าฟอสฟอรัสที่สะสมในเซลล์มีค่าประมาณ 8

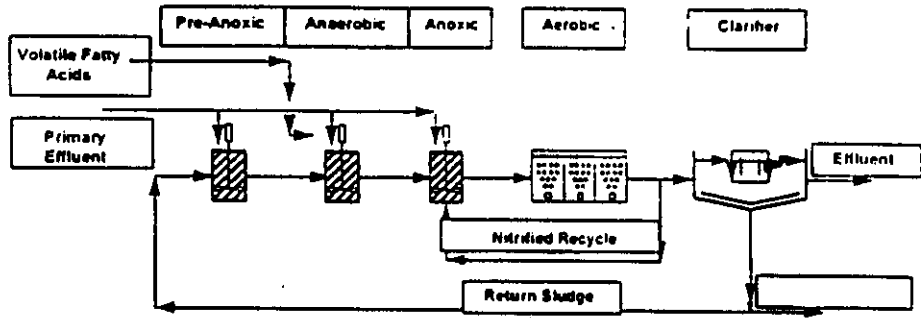
เปอร์เซ็นต์ และเมื่อถึงเกณฑ์ช่วงที่ถึง II มีค่าอัตราส่วนฟอสฟอรัสต่อซีโอดีลดลงใกล้เคียงกับถึง III พบว่าเปอร์เซ็นต์ฟอสฟอรัสที่สะสมในเซลล์มีค่าใกล้เคียงกัน

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าในกรณีที่มีปริมาณสารอาหารเท่ากัน ถ้าน้ำเสียมีปริมาณฟอสฟอรัสสูง (มีสารอาหารจำกัด) จะพบว่าเปอร์เซ็นต์ฟอสฟอรัสที่สะสมในเซลล์มีค่าสูง ซึ่งแสดงว่าจุลินทรีย์ในระบบมีพวกทีเอโอมาก ดังนั้นระบบจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสสูง และในทางกลับกันถ้าน้ำเสียมีปริมาณฟอสฟอรัสต่ำ (หรือมีสารอาหารเกินพอ) จะทำให้จุลินทรีย์มีเปอร์เซ็นต์ฟอสฟอรัสในเซลล์ต่ำ ซึ่งแสดงว่ามีกลุ่มพวกทีเอโอน้อยหรือจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ในระบบจะเป็นพวกจุลินทรีย์ทั่วไป ทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสต่ำ

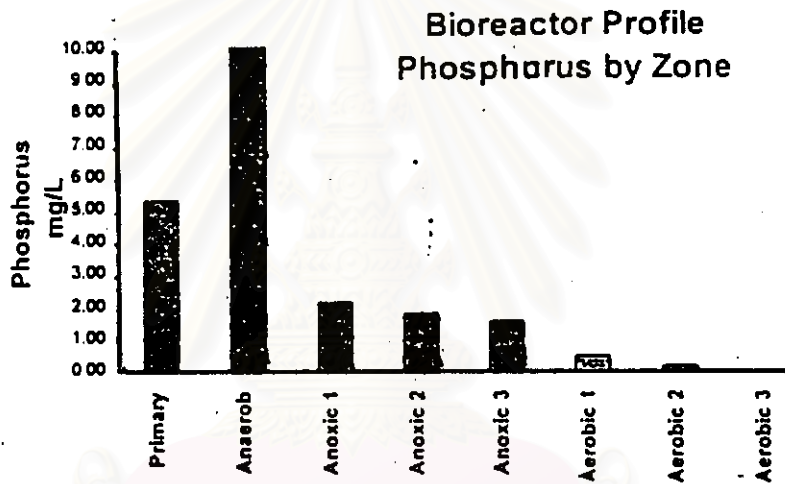


รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนฟอสฟอรัสต่อซีโอดีกับเปอร์เซ็นต์ของฟอสฟอรัสที่สะสมในเซลล์ที่ขึ้นคอนแวนโรบิก (Liu และคณะ, 1997)

Stevens และคณะ (1997) รายงานว่าลักษณะการทำงานของโรงบำบัดที่เวสต์แบงก์ บริติชโคลัมเบีย ประเทศแคนาดา ดังแสดงในรูปที่ 2.14 โดยประกอบไปด้วยถังแวนโรบิก 1 ถัง ถังแวนออกซิก 3 ถัง และถังแวนโรบิก 3 ถัง ซึ่งจะมีการเติมน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นแล้วเข้าสู่ส่วนที่มีสภาพแวนออกซิก พบว่าสามารถเพิ่มการจับใช้ฟอสฟอรัสภายใต้สภาพแวนออกซิกได้อย่างมีนัยสำคัญ และการเติมกรดไฮดรอกซิดเข้าที่ถังแวนโรบิกเป็นการเพิ่มการเก็บสะสมทีเออมิและเก็บสะสมสารอื่นๆเพื่อใช้ในการกำจัดฟอสฟอรัส โดยมีลักษณะโพรไฟล์ของความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในถังปฏิบัติการต่างๆ แสดงในรูปที่ 2.15

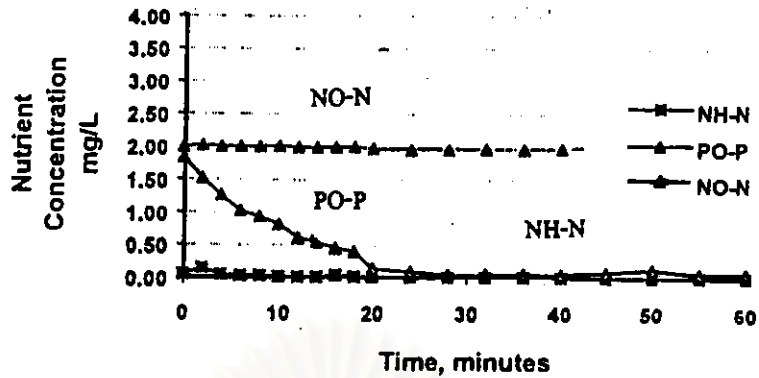


รูปที่ 2.14 ลักษณะการทำงานของโรงบำบัดน้ำเสียที่เวสต์แบงก์ บริติชโคลัมเบีย ประเทศแคนาดา (Stevens และคณะ, 1997)



รูปที่ 2.15 ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในถังปฏิกริยาต่างๆ (Stevens และคณะ, 1997)

นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองโดยทำการเติมฟอสฟอรัสลงไปในสลัดจ์ที่นำมาจากจุดสุดท้ายที่มีการเติมอากาศ จากนั้นทำการเติมอากาศต่อไปอีกเป็นเวลา 60 นาที พบว่าความเข้มข้นของฟอสฟอรัสลดลง(หมายเหตุของผู้วิจัย : แสดงว่ามีการจับใช้ฟอสฟอรัสที่เติมลงไปได้ ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากแบคทีเรียยังมีเอชเอเหลือจากขั้นตอนแอโรบิก และนำมาใช้ในการจับใช้ฟอสฟอรัสที่เติมเข้าไปได้อีก) ดังแสดงในรูปที่ 2.16

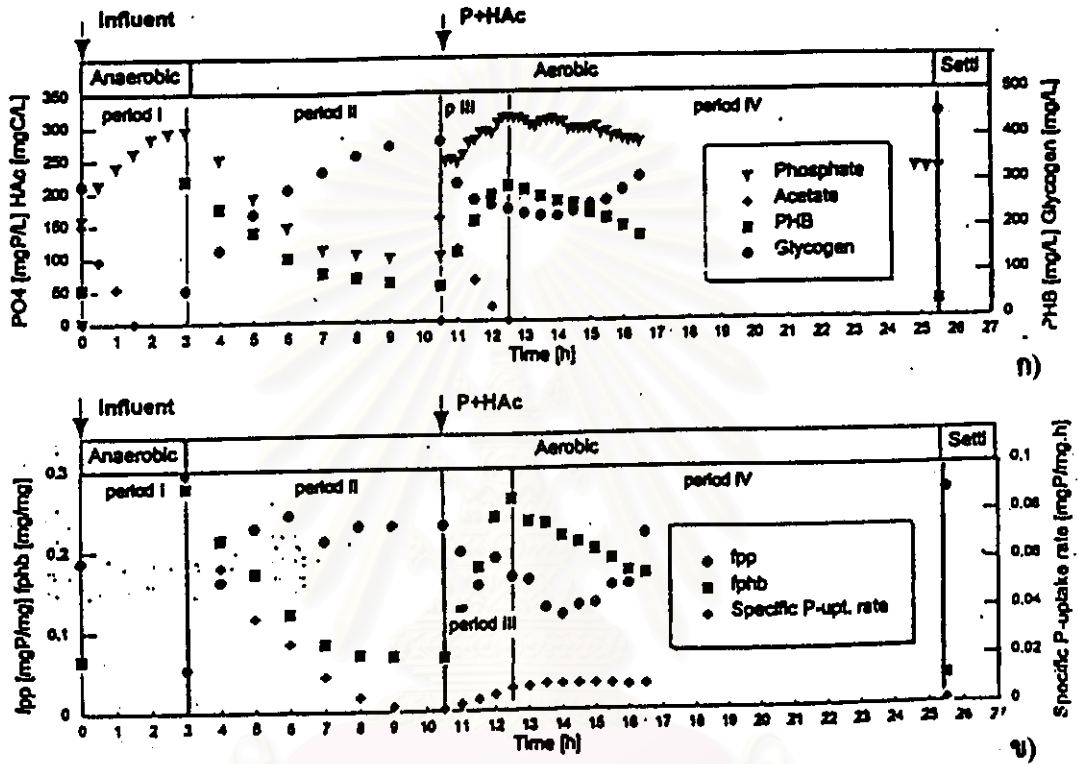


รูปที่ 2.16 การจับใช้ฟอสฟอรัสหลังจากเติมฟอสฟอรัสที่ขึ้นคอนแอโรบิก (Stevens และคณะ, 1997)

นอกจากนี้ Brdjanovic และคณะ (1998) ยังได้ทำการทดลองที่มีการเติมฟอสฟอรัสที่ขึ้นคอนแอโรบิกอีก 2 การทดลอง คือ

สำหรับการทดลองแรก ปริมาณของฟอสฟอรัสที่เวลาเริ่มต้นของช่วงแอนแอโรบิกเท่ากับ 150 มก./ล. และเมื่อเติมอากาศเป็นเวลา 7.5 ชั่วโมงแล้ว จึงมีการเติมฟอสฟอรัสและอะซิเตดอีกเป็นจำนวน 150 มก./ล. หลังจากนั้นเติมอากาศต่อไปอีก 15 ชั่วโมง ซึ่งมีผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 2.17 และตารางที่ 2.1 พบว่า อะซิเตดถูกใช้หมดไปในช่วงแอนแอโรบิก(Period I)ภายในเวลา 90 นาที และในช่วงปลายแอนแอโรบิกมีฟอสฟอรัส 293 มก./ล. ส่วนกลัยโคเจนถูกใช้ไป 228 มก./ล. สำหรับการขนส่งอะซิเตดและเปลี่ยนไปเป็นพีเอชบีเป็นจำนวน 237 มก./ล. โดยในช่วงนี้อัตราส่วนของพีเอชบีต่อชีวมวล ( $f_{PHB}$ ) จะเพิ่มขึ้นขณะที่อัตราส่วนของโพธิฟอสเฟตต่อชีวมวล ( $f_{PO_4}$ ) มีค่าลดลง ในช่วงเวลา 0-7.5 ชั่วโมงของการเติมอากาศ(Period II) พีเอชบีถูกออกซิไดส์ไป 75 เปอร์เซ็นต์เพื่อสร้างเป็นกลัยโคเจนและฟอสเฟตถูกจับใช้ไป 67 เปอร์เซ็นต์โดยจุลชีพ และในช่วงนี้อัตราส่วนของพีเอชบีต่อชีวมวลมีค่าลดลง ขณะที่อัตราส่วนของโพธิฟอสเฟตต่อชีวมวลมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าสูง และมีค่าคงที่ที่จุดสุดท้ายของช่วงนี้ และพบว่าที่จุดดังกล่าวอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสจำเพาะ ( $q_{PO_4}$ ) มีค่าเท่ากับ 0 มก.ฟอสฟอรัส/มก.ชีวมวล-ชม. และอัตราส่วนของเอ็มแอลวีเอสต่อเอ็มแอลเอสเอ็มมีค่าต่ำมากคือ เท่ากับ 0.66 และในช่วงเวลาตั้งแต่ 7.5-15 ชั่วโมงของการเติมอากาศ(Period III) ความเข้มข้นของอะซิเตดและฟอสฟอรัสมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีการเติมสารทั้งสองลงในระบบ และการใช้อะซิเตดในช่วงแอนแอโรบิกทำให้เกิดการปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกสู่สารละลายอีกครั้ง ในช่วงนี้พีเอชบีจะถูกสร้างขึ้นและกลัยโคเจนจะถูกใช้ไป หลังจากอะซิเตดถูกใช้ไปจนหมดโดยจุลชีพ(Period IV) การจับใช้ฟอสฟอรัสเกิดขึ้นอย่างช้าๆและไม่สมบูรณ์ ซึ่งจะเกิดขึ้นในเวลาเดียวกันกับที่มีการสร้างกลัยโคเจนและการใช้พีเอชบี(ความเข้มข้นของกลัยโคเจนเพิ่มขึ้นและความเข้มข้นของพีเอชบีลดลง) และเมื่อถึงจุดสิ้นสุดของการเติมอากาศ

ฟอสฟอรัสถูกจับใช้ไปเพียง 27 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีการอธิบายว่าเป็นเพราะปริมาณของฟิโอบีจังก์ตอัตรา  
การจับใช้ฟอสฟอรัส และพบว่าค่าอัตราส่วนของฟิโอบีคือชีวมวลและอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัส  
จำเพาะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ขณะเดียวกันอัตราส่วนของโพสฟอรัสต่อชีวมวลมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.268  
มก.ฟอสฟอรัส/มก.ชีวมวล



รูปที่ 2.17 (ก) การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ต่างๆในระบบเฮตปีอาร์ที่มีการยึดเวลาการเติมอากาศ  
และมีการเติมอะซิเตดและฟอสฟอรัสที่ขึ้นคอนแอโรบิก และ (ข) ค่าของ  $f_{pp}$ ,  $f_{phb}$  และ  
อัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสจำเพาะของการทดลอง (Brdjanovic และคณะ, 1998)



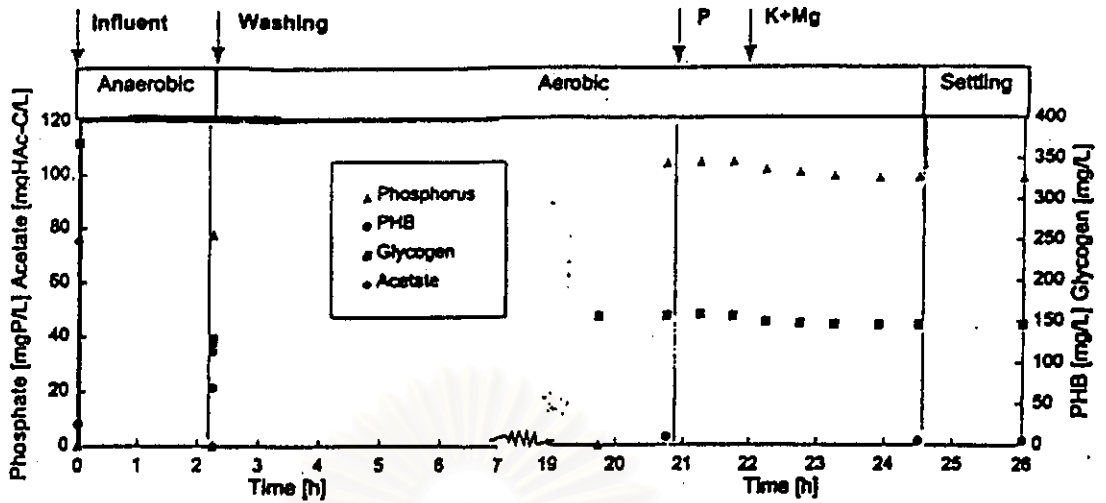
ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของชีวมวลที่ได้จากการทดลองในระบบแอสบิอาร์ที่มีการเติมอะซิเตดและฟอสฟอรัสที่ขั้นตอนแอโรบิก (Brdjanovic และคณะ, 1998)

Parameter	Unit	Start period I	Start period II	Start Period III	Start Period IV	Start period V
MLSS	mg-MLSS/L	2250	1860	2500	2305	2406
MLVSS	mg-MLVSS/L	1550	1605	1650	1685	1530
MLVSS/MLSS	-	0.69	0.86	0.66	0.73	0.64
Ash	mg-Ash/L	700	255	850	620	876
Poly-P	mg-poly-P/L	618	171	763	531	795
Glycogen	mg-glycogen/L	302	74	395	243	450
PHB	mg-PHB/L	75	312	77	294	36
PHV	mg-PHV/L	14	97	15	23	5
PHA	mg-PHA/L	89	409	92	317	41
Active biomass	mg-active-biomass/L	1159	1122	1163	1125	1039
$f_{pp}$ ratio	mg-P/mg-active-biomass/L	0.189	0.053	0.230	0.165	0.268
$f_{phb}$ ratio	mg-PHB/mg-active-biomass	0.065	0.278	0.066	0.261	0.035

หมายเหตุ : Ash = MLSS - MLVSS, poly-P = (MLSS - MLVSS) - MLVSS x 5/95, PHA = PHB + PHV,

active biomass = MLVSS - glycogen - PHA,  $f_{pp}$  = poly-P x 0.35/active biomass,  $f_{phb}$  = PHB/active biomass

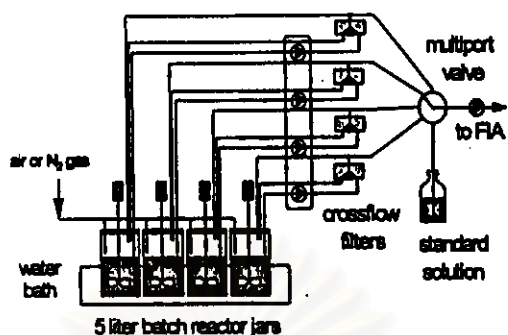
ส่วนอีกการทดลองนั้น เมื่อระบบทำงานผ่านขั้นตอนแอสบิอาร์แล้ว นำสัณฐานจากถังปฏิกริยาไปถึงอะซิเตดและฟอสฟอรัสออก 2 ครั้ง เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีทั้งอะซิเตดและฟอสฟอรัส แล้วทำการเติมสารอาหารที่มีแร่ธาตุต่างๆแต่ไม่มีอะซิเตดและฟอสฟอรัสลงไปแทน จากนั้นทำการเติมอากาศเป็นเวลา 22.5 ชั่วโมง แต่จะมีการเติมฟอสฟอรัสจำนวน 100 มก./ล. ที่เวลา 3 ชั่วโมงก่อนการสิ้นสุดช่วงแอสบิอาร์ และอีก 1 ชั่วโมงต่อมา เติมโปแคสเซียมและแมกนีเซียมอีกอย่างละ 15 มก./ล. จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 2.18 พบว่าการเติมฟอสฟอรัส 100 มก./ล. ที่เวลา 3 ชั่วโมงก่อนการสิ้นสุดช่วงแอสบิอาร์ ทำให้ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นจาก 0 มก./ล. เป็น 103 มก./ล. และหลังจากผ่านไปหนึ่งชั่วโมงความเข้มข้นของฟอสฟอรัสคงที่คือ มีค่าประมาณ 100 มก./ล. ส่วนความเข้มข้นของกลัยโคเจนลดลงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่ากลัยโคเจนไม่สามารถทดแทนพีเอชบีเพื่อใช้ในการจับใช้ฟอสฟอรัสได้ และหลังจากเติม โปแคสเซียมและแมกนีเซียมแล้วก็ยังไม่มีการจับใช้ฟอสฟอรัสเกิดขึ้น



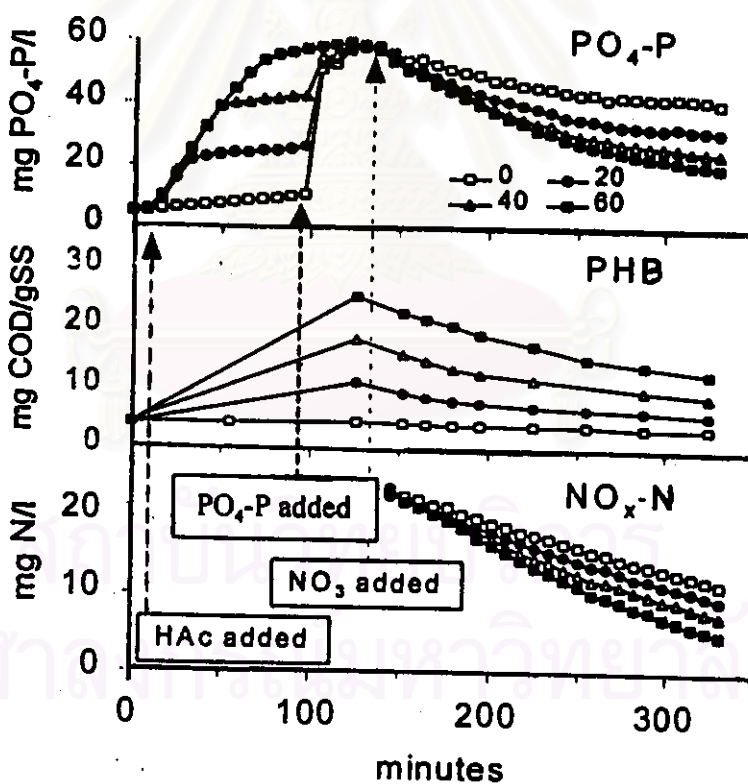
รูปที่ 2.18 ความเข้มข้นของพารามิเตอร์ต่างๆของระบบเอโรบิกที่มีการยึดเวลาการเติมอากาศและการเติมฟอสฟอรัส โปแตสเซียม และแมกนีเซียมในขั้นตอนเอโรบิก (Brdjanovic และคณะ, 1998)

Meinhold และคณะ (1998) ได้ทำการทดลองแบบแบคทีเรียที่มีการทำงานภายใต้สภาพแอนเอโรบิก-แอนอกซิก และมีการเติมฟอสฟอรัสจากภายนอกเพิ่มเข้าไปที่ปลายขั้นตอนแอนเอโรบิกจำนวน 2 ชุดทดลอง โดยในแต่ละชุดทดลองประกอบไปด้วยถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร จำนวน 4 ใบ และมีมอเตอร์ที่ติดใบกวนเพื่อใช้กวนของเหลวผสมในถังปฏิกรณ์ รวมทั้งมีการเติมก๊าซไนโตรเจนไปที่ผิวน้ำด้วยอัตราต่ำเพื่อไล่ออกซิเจน ซึ่งการติดตั้งชุดทดลองแบบแบคทีเรียแสดงดังรูปที่ 2.19 สำหรับสัถ์จที่ใช้ในการทดลองนำมาจากขั้นตอนแอนอกซิกของโรงงานน้ำร่องที่มีการทำงานเป็นแบบ BIODENITRIPHO™ และควบคุมพีเอชให้มีค่า  $7.0 \pm 0.2$  เพื่อป้องกันการตกตะกอนของฟอสฟอรัส

ในชุดทดลองแบบแบคทีเรียชุดแรกมีวิธีการทดลองดังนี้ นำสัถ์จปริมาตร 4 ลิตรมาเติมลงในถังปฏิกรณ์แต่ละใบ จากนั้นทำการกวนของเหลวผสมในถังและเติมก๊าซไนโตรเจนทันทีเพื่อทำให้เกิดสภาพแอนเอโรบิกพร้อมกับเติมอะซิเตดลงไปในถังปฏิกรณ์แต่ละใบด้วยความเข้มข้น 0, 20, 40 และ 60 มก.ซีไอต/ล. จนกระทั่งเกิดการจับใช้อะซิเตดจนหมดและเกิดการปลดปล่อยฟอสฟอรัสอย่างสมบูรณ์ในถังปฏิกรณ์ทุกใบ จากนั้นเติมฟอสฟอรัสให้มีปริมาณเท่ากันทุกถัง แล้วทำให้เกิดสภาพแอนอกซิกด้วยการเติมโซเดียมไนเตรด ( $\text{NaNO}_3$ ) โดยผลการทดลองที่ได้แสดงในรูปที่ 2.20 และตารางที่



รูปที่ 2.19 การติดตั้งชุดทดลองแบบเบดซ์ซึ่งมีการทำงานแบบแอนแอโรบิก-แอนอกซิก (Meinhold และคณะ, 1998)



รูปที่ 2.20 ผลของความแตกต่างของปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในเซลล์ที่ขึ้นคอนแอนแอโรบิกที่มีต่ออัตราการจับไฟฟอสฟอรัสเริ่มต้นที่ขึ้นคอนแอนอกซิก (Meinhold และคณะ, 1998)

ตารางที่ 2.2 อัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสที่ขึ้นคอนแอนออกซิก, อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีในครีทีเคชั่น, อัตราการใช้พีเอชบี และอัตราส่วนการใช้พีเอชบีต่อไนเตรดที่ถูกใช้ไป (Meinhold และ กณะ, 1998)

HAc added	(mg COD/l)	0	20	40	60
P uptake <sup>b)</sup>	Mg P/g-SS.h <sup>b)</sup>	2.4	4.0	4.4	4.7
N-removal <sup>b)</sup>	Mg N/g-SS.h <sup>b)</sup>	1.1	1.3	1.7	1.9
PHB util. Rate <sup>b)</sup>	mg COD/g-SS.h <sup>b)</sup>	0.8	4.7	7.9	8.6
PHB util. Rate <sup>c)</sup>	mg COD/g-SS.h <sup>b)</sup>	0.3	0.7	1.3	2.2
PHB/N <sup>b)</sup>	Mg COD/mg N	0.5	2.6	3.4	3.3
PHB/N <sup>c)</sup>	Mg COD/mg N	0.43	0.96	1.65	2.46

หมายเหตุ : a) SS = 3.7 g/l

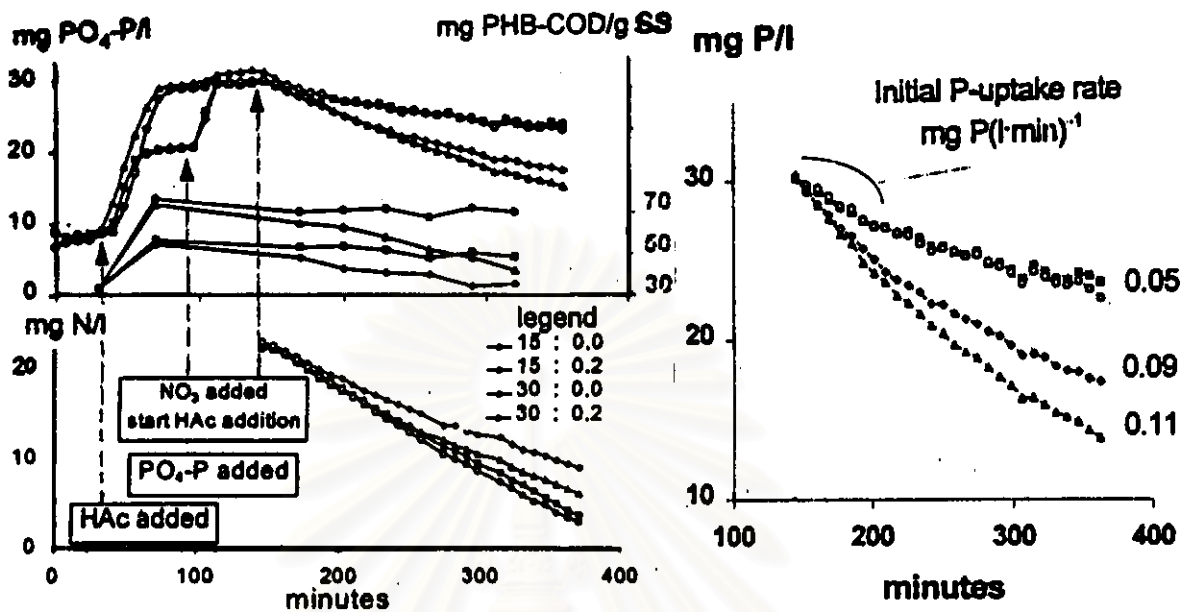
b) 1<sup>st</sup> hour anoxic

c) 200-320 min.

จากผลการทดลองในรูปที่ 2.20 จะเห็นว่าเมื่อเติมอะซิเตดในปริมาณเพิ่มขึ้นพบว่าเกิดการปลดปล่อยฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นและปริมาณพีเอชบีที่สะสมในเซลล์ก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน หลังจากเกิดการปลดปล่อยฟอสฟอรัสอย่างสมบูรณ์ในทุกถังแล้วทำการเติมฟอสฟอรัสให้มีปริมาณฟอสฟอรัสเริ่มต้นเท่ากันทุกถัง จากนั้นเมื่อทำการเติมโซเดียมไนเตรดเพื่อให้เกิดสภาพแอนออกซิกพบว่าเกิดการจับใช้ฟอสฟอรัสขึ้นในทุกถัง โดยพบว่าเมื่อมีการเติมอะซิเตดในปริมาณเพิ่มขึ้นปริมาณพีเอชบีในเซลล์จะเพิ่มขึ้นด้วย และมีปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยขึ้นคอนแอนออกซิกต่ำกว่าชุดทดลองอื่นและมีการใช้ในเตรดในปริมาณที่มากกว่าชุดทดลองอื่นเช่นกัน แสดงว่าถ้าพีเอชบีที่สะสมภายในเซลล์มีค่าเพิ่มขึ้นจะเกิดการจับใช้ฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้น และจากตารางที่ 2.2 พบว่าเมื่อเติมอะซิเตดในปริมาณเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการใช้พีเอชบีมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้อัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสรวมทั้งอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีในครีทีเคชั่นเพิ่มขึ้นด้วย แสดงว่าปริมาณพีเอชบีในเซลล์ที่มากขึ้นจะเพิ่มอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสและอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีในครีทีเคชั่น

สำหรับชุดทดลองแบบแบคซ์ชุดที่ 2 มีการเติมฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยขึ้นคอนแอนแอโรบิกเช่นเดียวกับชุดแรก แต่ในการทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อเปรียบเทียบการจับใช้ฟอสฟอรัสระหว่างกรณีสที่เติมอะซิเตดอย่างค่อนเนื่องด้วยอัตรา 0.2 มก.ซีไอค/ก.-นาทีกับกรณีสที่ไม่เติมอะซิเตด ซึ่งทั้งสองกรณีมีการเติมอะซิเตดในปริมาณเริ่มต้นเท่ากับ 15 และ 30 มก.ซีไอค/ก. ดังนั้นมีดังปฏิกิริยารวมทั้งหมด 4 ถัง และเมื่อเกิดการปลดปล่อยฟอสฟอรัสอย่างสมบูรณ์แล้วก็ทำการเติมฟอสฟอรัสให้มีปริมาณฟอสฟอรัส

เริ่มต้นเท่ากันทุกถัง จากนั้นก็ทำการเติมโซเดียมไนเตรดให้เกิดสภาพแอนอ็อกซิกและเติมอะซิเตดอย่าง ต่อเนื่องลงในถังที่กำหนดไว้ โดยผลการทดลองที่ได้แสดงในรูปที่ 2.21



ก.)

ข.)

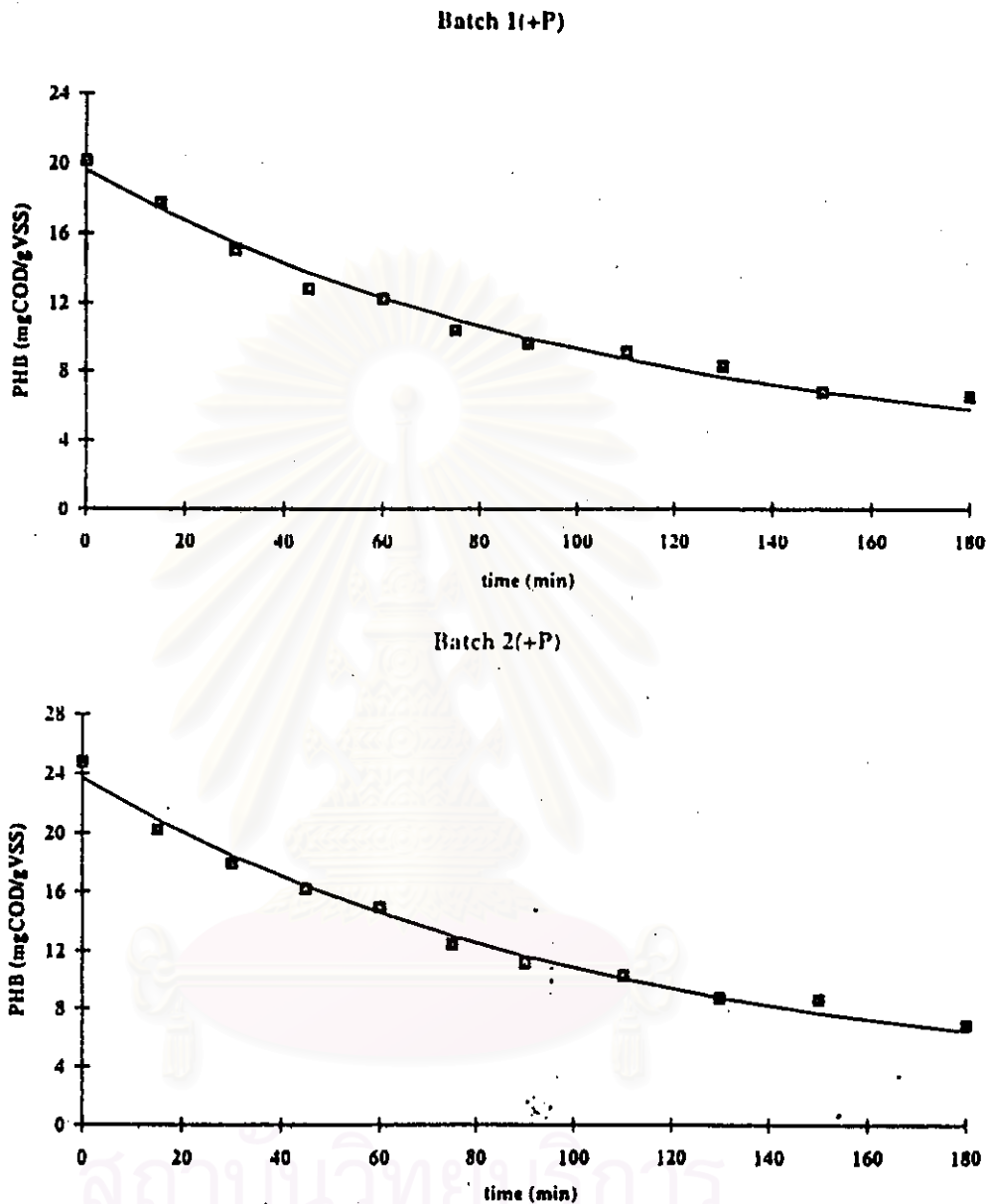
หมายเหตุ : ตัวเลขตัวที่ 1 หมายถึงปริมาณอะซิเตดที่เติมเริ่มต้น  
 ตัวเลขตัวที่ 2 หมายถึงปริมาณอะซิเตดที่เติมอย่างต่อเนื่องที่ขึ้นคอนแอนอ็อกซิก  
 รูปที่ 2.21 ผลของการเติมอะซิเตดอย่างต่อเนื่องที่ขึ้นคอนแอนอ็อกซิกและการมีปริมาณพีเอชบีที่สะสม ในเซลล์ที่ขึ้นคอนแอนแอโรบิกต่างกันที่มีต่อการจับใช้ฟอสฟอรัสที่สภาพแอนอ็อกซิก (Meinhold และคณะ, 1998)

จากรูปที่ 2.21 จะเห็นว่าถังที่เติมอะซิเตดที่ขึ้นคอนแอนแอโรบิก 15 มก./ล.เกิดการปลดปล่อย ฟอสฟอรัสน้อยกว่าถังที่เติมอะซิเตดที่ขึ้นคอนแอนแอโรบิก 30 มก./ล. ดังนั้นจึงต้องมีการเติม ฟอสฟอรัสอีก 15 มก./ล.ในสองถังแรก(15:0.0 และ 15:0.2)เพื่อให้มีปริมาณฟอสฟอรัสเท่ากัน(หมายเหตุผู้วิจัย : เมื่อเติมอะซิเตดในปริมาณแตกต่างกันทำให้เกิดการปลดปล่อยฟอสฟอรัสไม่เท่ากัน ดังนั้น ปริมาณพีเอชบีที่สะสมในเซลล์จึงไม่เท่ากัน โดยแบ่งออกเป็น 2 ค่า ดังแสดงในรูปที่ 2.21 ก.) และหลังจากทำให้เกิดสภาพแอนอ็อกซิกแล้วพบว่า ถังที่ไม่มีการเติมอะซิเตดอย่างต่อเนื่อง(15:0.0 และ 30:0.0)มี ผลการทดลองเหมือนชุดทดลองแบบแบคทีเรียแรกคือ เมื่อมีปริมาณพีเอชบีเริ่มต้นสูงกว่าจะทำให้อัตราการ จับใช้ฟอสฟอรัส, อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีในครีทีเคชัน และอัตราการใช้พีเอชบีมีค่าสูงกว่าด้วย โดยสังเกตจากความชันของกราฟที่มีความชันมากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างถังที่ไม่เติมอะซิเตด กับถังที่เติมอะซิเตดอย่างต่อเนื่อง(เปรียบเทียบระหว่าง 15:0.0 และ 30:0.0 กับ 15:0.2 และ 30:0.2)พบว่า

ดังที่เดิมอะซิเทคอย่างค่อเนื่องมีอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสเริ่มต้นน้อยกว่า(รูปที่ 4.21 ข.) แต่กลับมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันสูงกว่าซึ่งอาจเป็นเพราะมีการเติมแหล่งคาร์บอนเพิ่มให้สำหรับจุลินทรีย์พวกดีไนตริฟายอิงแบคทีเรีย(denitrifying bacteria)ทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันสูงขึ้น และเหตุที่มีอัตราการจับใช้ฟอสฟอรัสต่ำกว่าชุดที่ไม่เติมอะซิเทคอาจเป็นเพราะเกิดการปลดปล่อยฟอสฟอรัสพร้อมกับการจับใช้ฟอสฟอรัส ทำให้การจับใช้ฟอสฟอรัสรวมทั้งระบบมีค่าลดลง

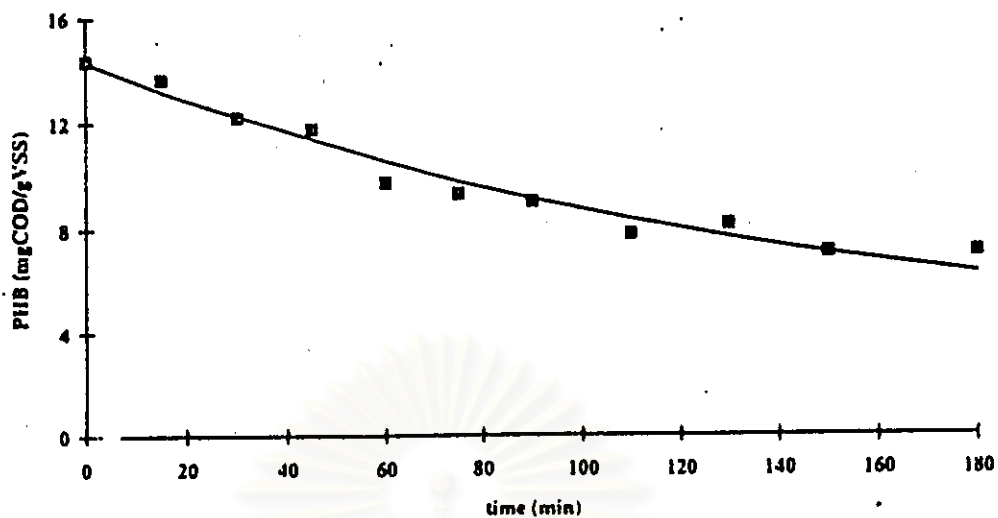
Petersen และคณะ (1998) ได้ทำการทดลองแบบแบคทีเรียเพื่อหาปริมาณของทีเอชบีในเซลล์ที่เทียบกับเวลาในขณะที่มีและไม่มีออร์โธฟอสเฟตในสารละลายทั้งหมด ซึ่งทำการทดลองโดยใช้สถิติที่น่ามาจากดั้งเดิมอากาศของโรงงานนาร์่อง และก่อนที่จะเริ่มทำการทดลองจะนำสถิติไปเติมอากาศตลอดคืนก่อนเพื่อลดปริมาณของทีเอชเอและสารอาหารอินทรีย์ให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ จากนั้นสถิติจะถูกนำแบ่งใส่ลงในขวดทดลองจำนวน 4 ขวด โดยแต่ละขวดมีปริมาตรเท่ากับ 5 ลิตรซึ่งระบบจะมีวัฏจักรการทำงานเป็นแบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก ในตอนเริ่มต้นของช่วงแอนแอโรบิกจะเติมอะซิเทคลงไปเพื่อทำให้มีปริมาณของทีเอชบีมากเพียงพอ และก่อนจะเข้าสู่ขั้นตอนแอโรบิกจะกำจัดออร์โธฟอสเฟตที่ปลดปล่อยออกมาในขั้นตอนแอนแอโรบิกออกจากระบบโดยการตั้งขวดทิ้งไว้ให้เกิดการตกตะกอนและนำน้ำใสส่วนบนไปทิ้ง จากนั้นนำน้ำออกที่นำมาจากโรงงานนาร์่องซึ่งมีความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตต่ำมากจนสามารถตัดทิ้งได้มาเติมแทน โดยจะทำเช่นนี้เป็นจำนวน 3 ครั้งจนความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตในแต่ละขวดมีค่าต่ำกว่า 1 มก.ฟอสฟอรัส/ล. จากนั้นจะทำการทดลองโดยจะเติมออร์โธฟอสเฟต 30 มก.ฟอสฟอรัส/ล. ในขวดที่ 1 และ 2 ส่วนในขวดที่ 3 และ 4 ไม่มีการเติมออร์โธฟอสเฟต จากนั้นทำการเติมอากาศต่อไปอีก 3 ชั่วโมง และมีการเก็บตัวอย่างน้ำวิเคราะห์ทีเอชบีทุกๆ 15-20 นาที จากผลการทดลองสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟของปริมาณทีเอชบีในเซลล์ที่เทียบกับเวลาเมื่อมีออร์โธฟอสเฟตในสารละลาย(มีการเติมออร์โธฟอสเฟต) แสดงดังรูปที่ 2.22 และกราฟของปริมาณทีเอชบีในเซลล์ที่เทียบกับเวลาเมื่อไม่มีออร์โธฟอสเฟตในสารละลาย(ไม่มีการเติมออร์โธฟอสเฟต)แสดงดังรูปที่ 2.23 ซึ่งสามารถนำมาประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของอัตรา(rate coefficient,  $k$ )ได้ โดยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราในขณะที่มีการเติมออร์โธฟอสเฟตเท่ากับ 0.57 และ 0.56 ชม.<sup>-1</sup> เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.565 ชม.<sup>-1</sup> ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราในขณะที่ไม่มีการเติมออร์โธฟอสเฟตเท่ากับ 0.40 และ 0.38 ชม.<sup>-1</sup> เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.39ชม.<sup>-1</sup> ตามลำดับโดยมีค่าแสดงดังตารางที่ 2.3 ดังนั้นสัดส่วนของทีเอชบีที่ต้องการสำหรับการจับใช้ฟอสฟอรัสสามารถคำนวณได้โดยตรงจากค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราเฉลี่ยดังนี้  $(0.565 - 0.39) / 0.565 = 0.30$  ดังนั้นปริมาณของทีเอชบีที่ต้องการใช้สำหรับจับใช้ออร์โธฟอสเฟตจากสารละลายทั้งหมดควรมีค่าประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ของทีเอชบีทั้งหมด และเมื่อนำเอาผลการทดลองมาเขียนกราฟความเข้มข้นของฟอสฟอรัสและปริมาณทีเอชบีในเซลล์ที่เทียบกับเวลาเมื่อมีออร์โธฟอสเฟตในช่วงแอโรบิกดังแสดงในรูปที่ 2.24 และเมื่อไม่มีออร์โธฟอสเฟตในช่วงแอโรบิกดัง

แสดงในรูปที่ 2.25 พบว่าเมื่อมีออร์โธฟอสเฟตในช่วงแอโรบิกจะทำให้อัตราการผลิตของพืเอชบีเพิ่มขึ้น

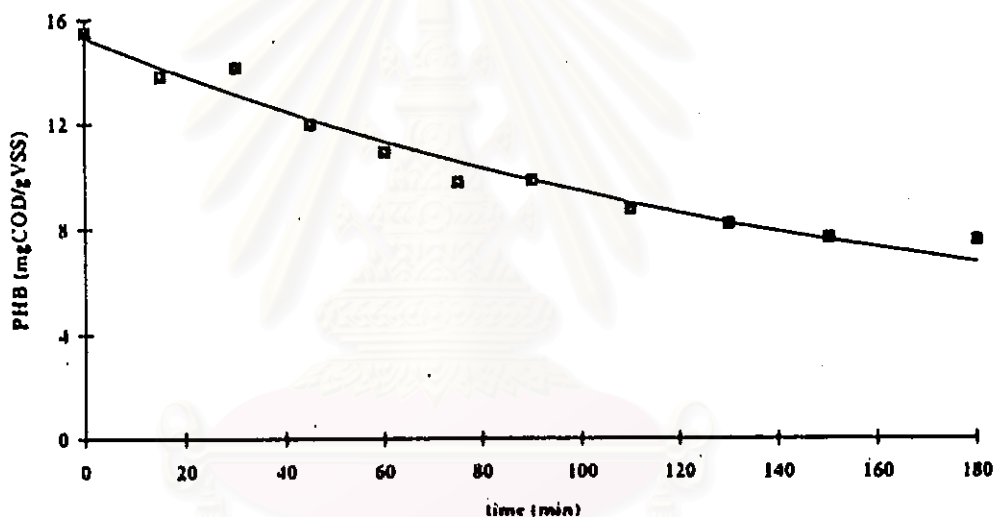


รูปที่ 2.22 ปริมาณของพืเอชบีในเซลล์เทียบกับเวลาเมื่อมีการเติมออร์โธฟอสเฟตในสารละลาย (Petersen และคณะ, 1998)

Batch 3(-P)



Batch 4 (-P)

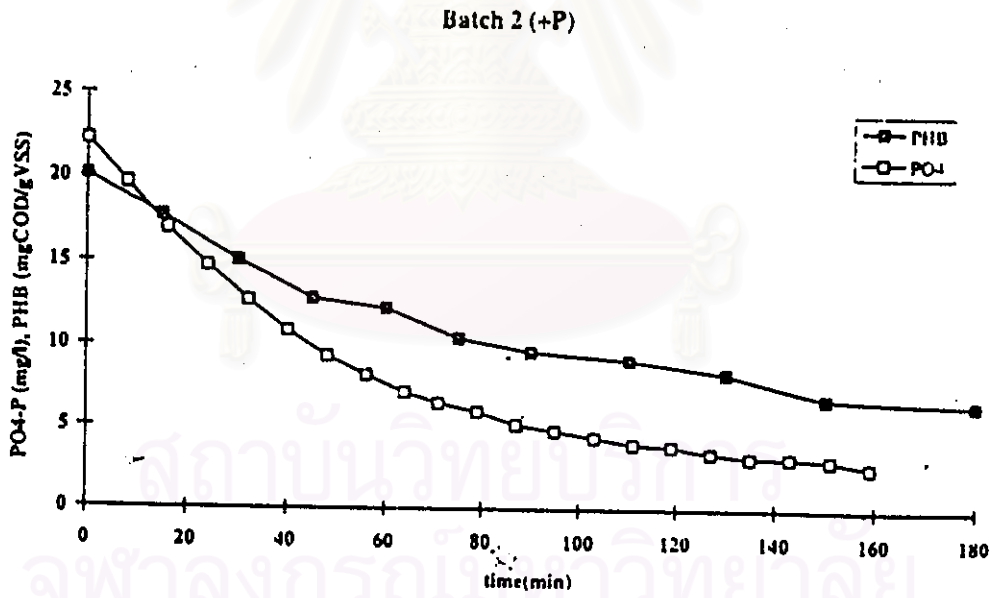
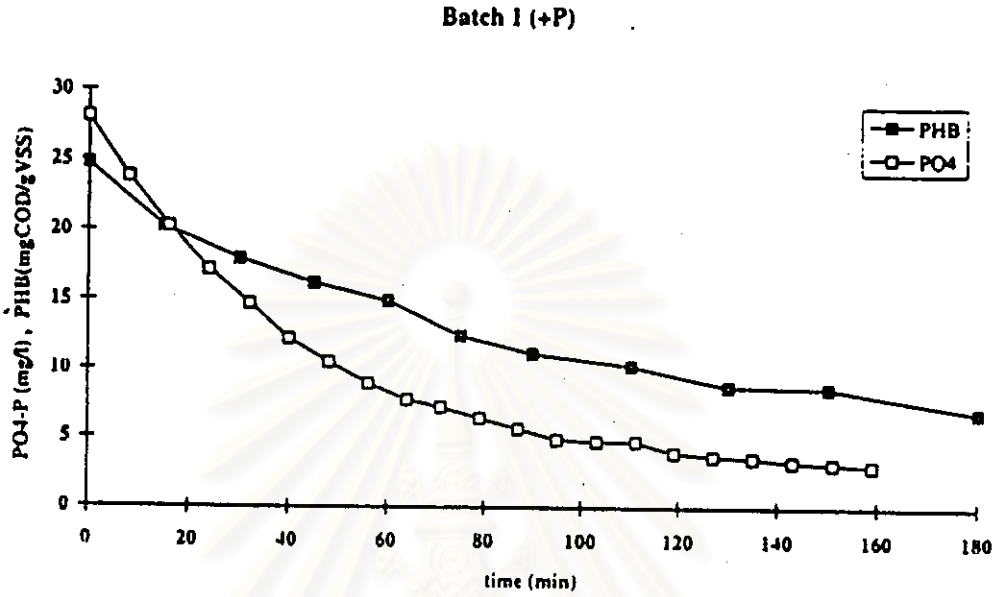


รูปที่ 2.23 ปริมาณของพืเอทบีในเซลล์เทียบกับเวลาเมื่อไม่มีการเติมออร์โทฟอสเฟตในสารละลาย (Petersen และคณะ, 1998)

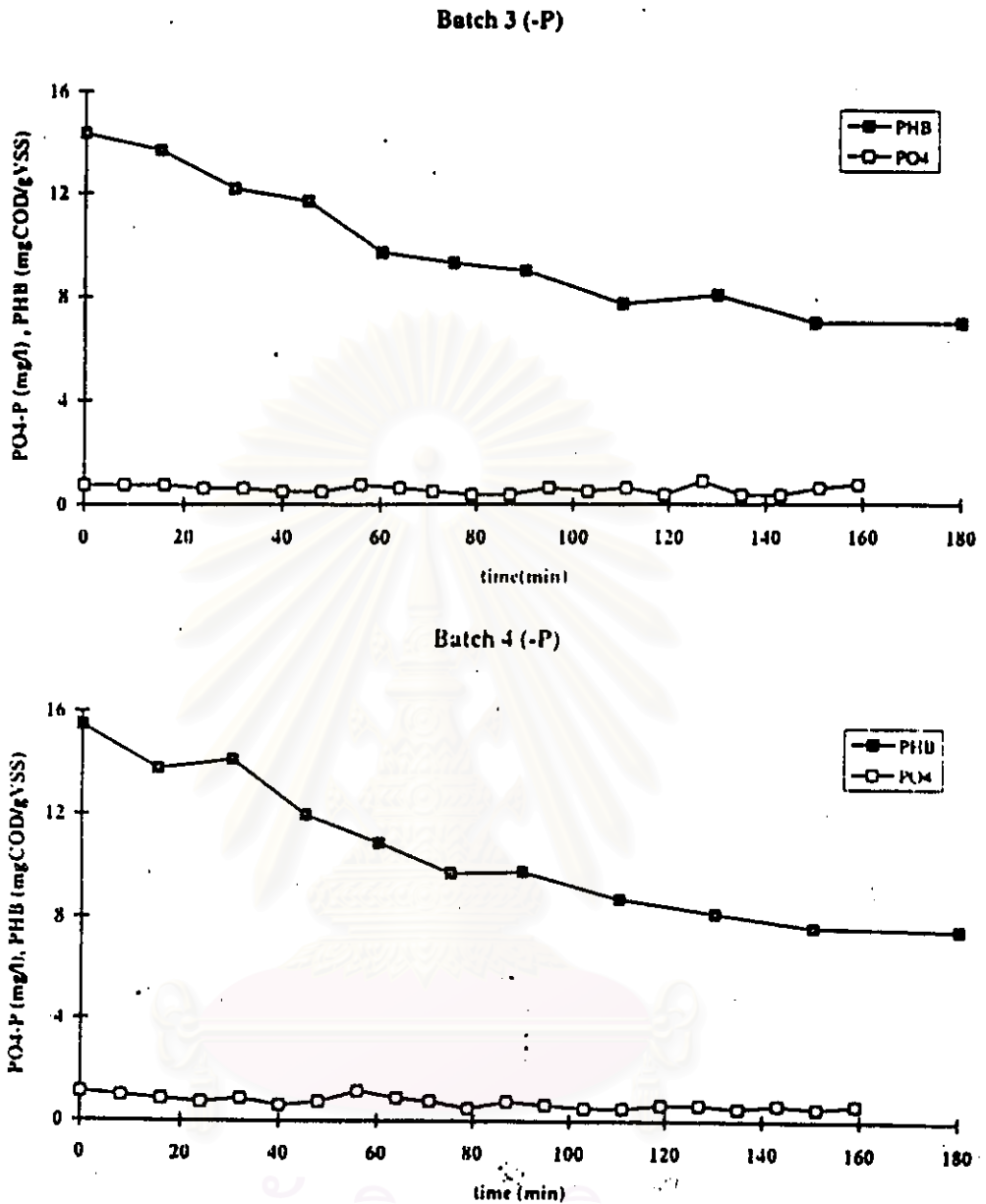
ตารางที่ 2.3 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราในขณะที่มี(+P)และไม่มี(-P)ฟอสเฟตในสารละลายทั้งหมด (Petersen และคณะ, 1998)

Batch	Estimate	95% confidence interval	Unit
1(+P)	0.57	0.52-0.62	$h^{-1}$
2(+P)	0.56	0.51-0.61	$h^{-1}$
3(-P)	0.40	0.35-0.45	$h^{-1}$
4(-P)	0.38	0.33-0.43	$h^{-1}$





รูปที่ 2.24 ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสและปริมาณพอลิเมอร์ในเซลล์เทียบกับเวลาเมื่อมีคอร์ไรโซฟอสเฟต ในช่วงแอโรบิก (Petersen และคณะ, 1998)



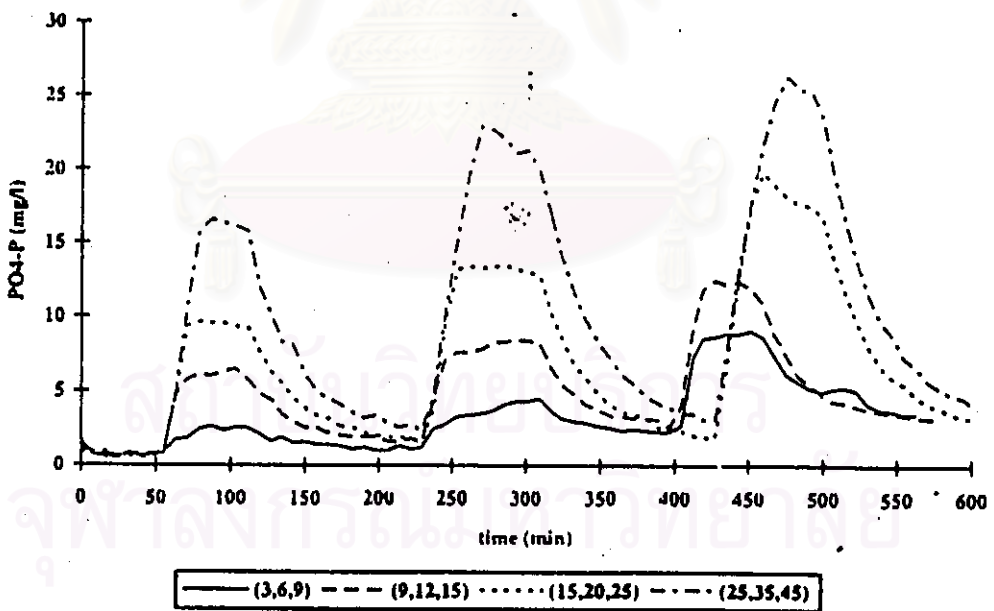
รูปที่ 2.25 ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสและปริมาณทีเอชพีในเซลล์เทียบกับเวลาเมื่อไม่มีออร์โธฟอสเฟตในช่วงแอโรบิก (Petersen และคณะ, 1998)

นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้ฟอสฟอรัสกับปริมาณของทีเอชพีในเซลล์ภายใต้สภาวะแอโรบิก โดยทำการทดลองแบบแบบครึ่งซึ่งมีการทำงานของระบบเป็นแบบแอนแอโรบิก-แอโรบิกติดต่อกัน 3 วัฏจักร จะทำการทดลองโดยนำสัณฐานมาใส่ในขวดทดลองจำนวน 4 ขวด และที่เวลาเริ่มต้นของช่วงแอนแอโรบิกแต่ละช่วงจะเติมอะซิเตตลงไปในช่วงทดลองแต่ละขวดในปริมาณที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.4 เพื่อให้มีปริมาณของทีเอชพีเริ่มต้น

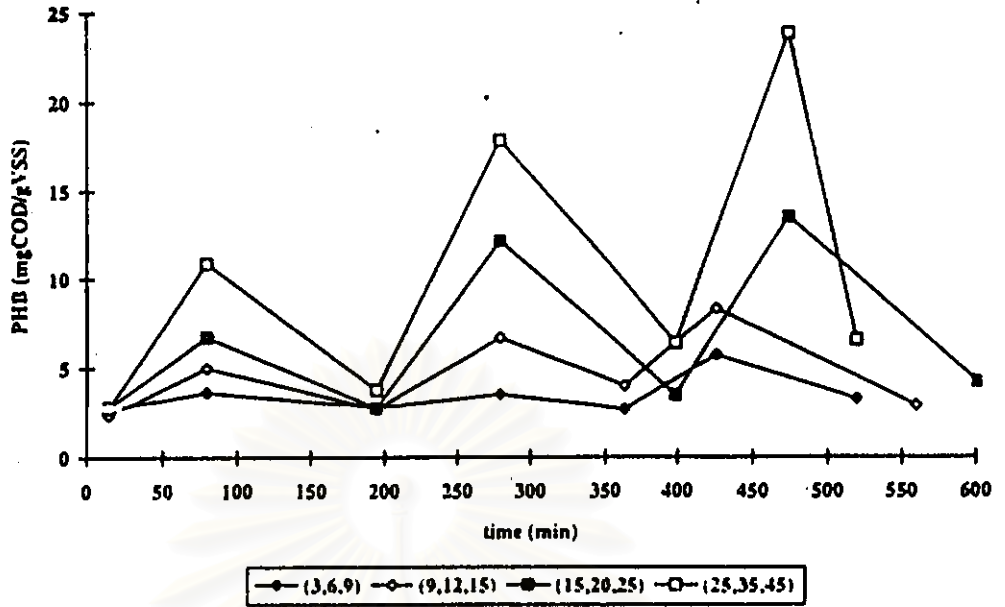
ในสถานะแอโรบิกที่แตกต่างกัน ส่วนเปลี่ยนแปลงการทำงานของระบบจากสภาพแอนแอโรบิกไปเป็นแอโรบิกจะกระทำเมื่อความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่เปลี่ยนแปลงไปมีค่าน้อยมาก ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.26 และ 2.27 แสดงให้เห็นว่าการจับใช้อร์โทฟอสเฟตในขั้นตอนแอโรบิกมีความสัมพันธ์กับปริมาณของทีเอชพีในเซลล์ และเมื่อนำเอาอัตราการจับใช้อร์โทฟอสเฟตเริ่มต้นที่สังเกตได้มาเขียนกราฟเทียบกับความเข้มข้นของทีเอชพีเริ่มต้นดังแสดงในรูปที่ 2.28 พบว่าอัตราการจับใช้อร์โทฟอสเฟตภายใต้สถานะแอโรบิกขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของทีเอชพี และสามารถหาค่าอัตราการจับใช้อร์โทฟอสเฟตสูงสุดและสัมประสิทธิ์ของการอิ่มตัวครึ่งหนึ่ง (half saturation coefficient,  $K_s$ ) ได้ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 การเติมอะซิเตดในแต่ละแบตช์ (Petersen และคณะ, 1998)

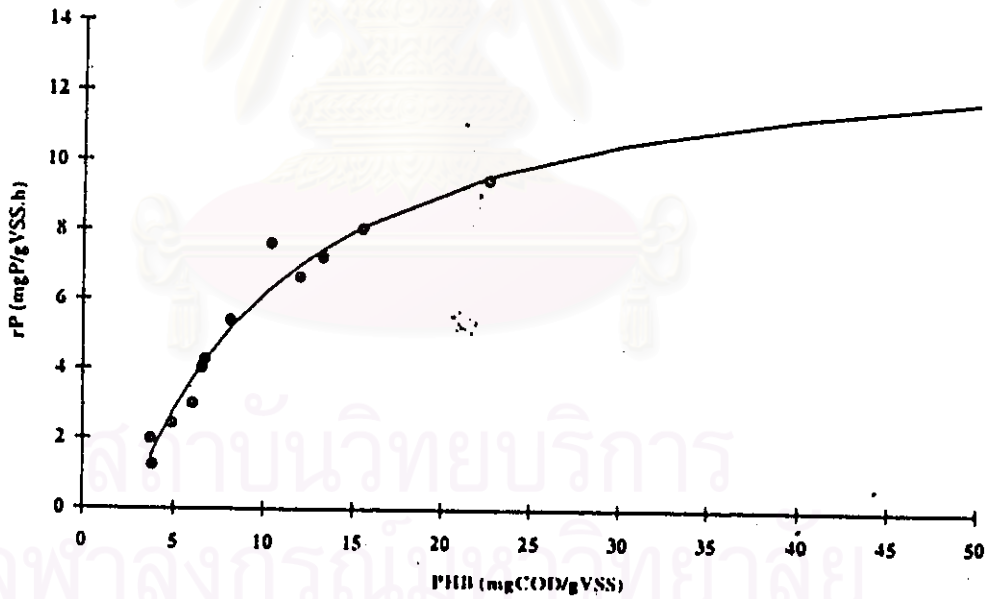
Cycle	Acetate (mg-COD/litre)			
	Batch 1	Batch 2	Batch 3	Batch 4
1	3	9	15	25
2	6	12	20	35
3	9	15	25	45



รูปที่ 2.26 ความเข้มข้นของออร์โทฟอสเฟตสำหรับการทดลองแบบแบตช์ที่มีการเติมอะซิเตดและมีการทำงานของระบบเป็นแบบแอนแอโรบิก-แอโรบิกติดต่อกัน 3 วัฏจักร (Petersen และคณะ, 1998)



รูปที่ 2.27 ความเข้มข้นของพอลิเมอร์ที่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแต่ละช่วงแอนแอโรบิกและแอโรบิก สำหรับการทดลองแบบแบคทีเรียที่มีการเติมอะซิเตด (Petersen และคณะ, 1998)



รูปที่ 2.28 อัตราการจับไอออโรฟอสเฟตเริ่มต้นที่สังเกตได้เทียบกับความเข้มข้นพอลิเมอร์เริ่มต้น (Petersen และคณะ, 1998)

ตารางที่ 2.5 อัตราการจับใช้อร์โธฟอสเฟตสูงสุด( $r_{Pmax}$ )และสัมประสิทธิ์ของการอิ่มตัวครึ่งหนึ่ง (half saturation coefficient,  $K_s$ ) ที่ประมาณได้ (Petersen และคณะ, 1998)

Parameter	Estimate	95% confidence interval	Unit
$r_{Pmax}$	14	11-17	(mg-P/g-VSS)/h
$K_s$	9.5	5.7-13.2	mg-COD/g-VSS



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย