

### บทที่ 3

#### ผลการทดลอง

#### 3.1 องค์ประกอบและลักษณะจำเพาะต่างๆ ของน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการหมักกรดมะนาว

น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการหมักกรดมะนาว ซึ่งนำมาจากโครงการวิจัยเกี่ยวกับการหมักกรดมะนาวของสถาบันเทคโนโลยีชีวภาพและวิศวกรรมพันธุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยน้ำเสียนี้จะได้ออกมาหลังจากผ่านกระบวนการหมักกรดมะนาวในถังหมักขนาด 300 ลิตร ที่อุณหภูมิ 28 - 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 96 ชั่วโมง แล้วนำน้ำหมักที่ได้มาหมุนเหวี่ยงแยกตะกอนเคลือบเซลล์เชื่อมซีเตรตออกจากน้ำหมัก ซึ่งน้ำเสียนี้มีสีเหลืองใสและมีกลิ่นเฉพาะตัว ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบและสมบัติจำเพาะต่างๆ ของน้ำเสีย ดังแสดงในตารางที่ 3.1

#### 3.2 การบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการหมักกรดมะนาวในระดับห้องทดลอง

ในการทดลองนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ

##### 3.2.1 ระบบบำบัดยูเอเอสบีแบบสองขั้นตอน ( Two-phase UASB )

ในช่วงเริ่มต้นการทดลองมีแนวความคิดที่จะใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบยูเอเอสบี ( Upflow Anaerobic Sludge Blanket; UASB ) ชนิดสองขั้นตอน เพื่อบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการหมักกรดมะนาวให้มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด โดยใช้ถังหมักกรด ( Acid Reactor; AR ) ซึ่งมีปริมาตรการใช้งาน 2.8 ลิตร และถังหมักมีเทน ( Methane Reactor; MR ) ซึ่งมีปริมาตรการใช้งาน 14.3 ลิตร ในการเริ่มต้นเดินระบบ ( Start-up ) จะใช้ตะกอนแบคทีเรียเริ่มต้นจากระบบยูเอเอสบี ของบริษัททอมฤตบริเวอรี่ จำกัด เติมลงไป ในถังหมักทั้งสองถังเพื่อให้ได้ค่า MLSS ประมาณ 30,000 มิลลิกรัม/ลิตร และทำการป้อนน้ำเสียเข้าไปในระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 0.53 กิโลกรัมซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน อัตราการไหลในถังหมักกรดและถังหมักมีเทนเท่ากันคือ 1.87 ลิตร/วัน ซึ่งจะทำให้มีระยะเวลาเก็บน้ำเสียในถังหมักกรดและถังหมักมีเทนเท่ากับ 1.50 และ 7.65 วันตามลำดับ รวมระยะเวลาทั้งหมดในการกัก

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบและสมบัติจำเพาะต่างๆ ของน้ำเสีย

|                           |      |                 |
|---------------------------|------|-----------------|
| Temperature               | °C   | 28 - 30         |
| pH                        |      | 4.5 - 5.2       |
| COD                       | mg/l | 35,000 - 80,000 |
| BOD <sub>5</sub>          | mg/l | 22,000 - 51,000 |
| Total solid               | mg/l | 80,000 - 83,000 |
| Dissolved Solid           | mg/l | 78,500 - 79,500 |
| Suspended Solid           | mg/l | 600 - 1,500     |
| Volatile Suspended Solid  | mg/l | 550 - 1,350     |
| Fixed Suspended Solid     | mg/l | 50 - 150        |
| Volatile Fatty acid (VFA) | mg/l | 3,000 - 8,000   |
| Alkalinity (ALK)          | mg/l | 700 - 1,400     |
| Glucose                   | g/l  | 0 - 20          |
| Total Nitrogen            | mg/l | 0               |
| Calcium (Ca)              | mg/l | 2,800 - 3,200   |
| Phosphorus (P)            | mg/l | 2 - 8           |
| Potassium (K)             | mg/l | 0.01 - 0.10     |
| Sodium (Na)               | mg/l | 5 - 35          |

เก็บน้ำเสียในระบบเท่ากับ 9.15 วัน ทำการควบคุมอุณหภูมิในถังหมักให้คงที่ที่ 37 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่าในช่วงเริ่มต้นของการเดินระบบ น้ำเสียที่ออกมาจากถังหมักกรดมีปริมาณสารอินทรีย์เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จนถึง 2,720 มิลลิกรัม/ลิตร ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์ต่ำมากจนถึง 25.88 % รวมทั้งค่าความเป็นกรด-ด่างในถังหมักกรดลดลงจนถึง 6.20 และปริมาณกรดไขมันระเหยในถังหมักสูงขึ้นคือเท่ากับ 1,300 มิลลิกรัม/ลิตร ( น้ำเสียที่ป้อนเข้าไปในระบบมีปริมาณกรดไขมันระเหยประมาณ 500 มิลลิกรัม/ลิตร ) และมีค่าสภาพความเป็นต่างประมาณ 350 มิลลิกรัม/ลิตร และมีค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณกรดไขมันระเหยต่อค่าสภาพความเป็นต่างสูงถึง 3.30 ซึ่งในช่วงนี้ น้ำเสียที่ออกมาจากถังหมักกรดจะมีกลิ่นเหม็นเปรี้ยวมาก และมีลักษณะขาวขุ่น ส่วนน้ำเสียที่ออกมาจากถังหมักมีเทนจะมีลักษณะใสและไม่มีการเหม็นเปรี้ยว และมีปริมาณสารอินทรีย์เพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ คือประมาณ 400 มิลลิกรัม/ลิตร และมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์ประมาณ 80 % ( ประสิทธิภาพรวมในการลดปริมาณสารอินทรีย์ของระบบประมาณ 90 % ) ส่วนค่าความเป็นกรด-ด่างที่ออกมาจากถังหมักมีเทน มีค่าประมาณ 7.50 และมีปริมาณกรดไขมันระเหยคงที่ คือประมาณ 50 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าสภาพความเป็นต่างประมาณ 425 มิลลิกรัม/ลิตร อัตราส่วนระหว่างปริมาณกรดไขมันระเหยต่อค่าสภาพความเป็นต่างมีค่าคงที่ประมาณ 0.10 - 0.15 ในการทดลองนี้ไม่ได้ทำการวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและปริมาณสารแขวนลอย ส่วนในช่วงหลังของการเดินระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์นี้มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์ในถังหมักกรดเพิ่มขึ้นอย่างมากคือประมาณ 75 % และน้ำเสียที่ออกมาจากถังหมักกรดมีปริมาณสารอินทรีย์ลดลงเหลือประมาณ 900 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียมีค่าเพิ่มขึ้นคือประมาณ 7.80 ปริมาณกรดไขมันระเหยของน้ำเสียที่ออกมาจากระบบลดลงอย่างมากเหลือประมาณ 250 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าสภาพความเป็นต่าง 360 มิลลิกรัม/ลิตร และมีค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณกรดไขมันระเหยต่อค่าสภาพความเป็นต่างเท่ากับ 0.68 ซึ่งแสดงว่าระบบในช่วงนี้อยู่ในภาวะที่มีเสถียรภาพดี และน้ำเสียที่ออกมาจากถังหมักกรดไม่มีการเหม็นเปรี้ยว ส่วนน้ำเสียที่ออกมาจากถังหมักมีเทนมีปริมาณสารอินทรีย์ 100 มิลลิกรัม/ลิตร และมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์เท่ากับ 88 % ( ประสิทธิภาพรวมในการลดปริมาณสารอินทรีย์ของระบบประมาณ 97 % ) ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ออกมาจากถังหมักมีเทนจะมีค่าสูงขึ้นคือประมาณ 8.3 ส่วนปริมาณกรดไขมันระเหยค่าสภาพความเป็นต่าง และอัตราส่วนระหว่างปริมาณกรดไขมันระเหยต่อค่าสภาพความเป็นต่างจะมีค่าคงที่เท่ากับในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ ซึ่งแสดงว่าสภาพภายในถังหมักมีเทนค่อนข้างคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ดังแสดงในภาคผนวกตารางที่ ค.1 และรูปที่ ค.1 - ค.6

จากผลการทดลองดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่าสภาพการทำงานภายในถังหมักกรดในช่วงท้ายของอัตราการป้อนสารอินทรีย์นี้มีสภาพคล้ายในถังหมักมีเทน กล่าวคือมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์สูง ค่าความเป็นกรด-ด่างในระบบเป็นกลาง ( ประมาณ 7 - 8 ) และมีปริมาณกรดไขมันระเหยต่ำประมาณ 250 มิลลิกรัม/ลิตร ประกอบกับเมื่อพิจารณาองค์ประกอบและสมบัติจำเพาะต่างๆ ของน้ำเสีย พบว่าน้ำเสียมีปริมาณกรดไขมันระเหยในปริมาณสูงอยู่แล้ว ( 3,000 - 8,000 มิลลิกรัม/ลิตร ) รวมทั้งมีน้ำตาลกลูโคสอยู่ในน้ำเสียปริมาณต่ำ ( 0 - 20 กรัม/ลิตร ) จึงไม่จำเป็นต้องมีถังหมักกรดเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาการสร้างกรดอินทรีย์ในถังหมักกรดก่อน ดังนั้นจึงมีแนวความคิดที่จะใช้ระบบบำบัดยูเอเอสบีแบบขั้นตอนเดียวแทนระบบบำบัดยูเอเอสบีแบบสองขั้นตอนที่ทำการทดลองอยู่นี้ เนื่องจากเมื่อดูแนวโน้มแล้วระบบบำบัดยูเอเอสบีแบบขั้นตอนเดียวก็สามารถที่จะบำบัดน้ำเสียชนิดนี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นการประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ ติดตามและควบคุมดูแลระบบ

### 3.2.2 ระบบบำบัดยูเอเอสบีแบบขั้นตอนเดียว ( Single-phase UASB )

ทำการทดลองในถังหมักมีเทนเพียงถังเดียว โดยเริ่มทำการทดลองที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 0.62 กิโลกรัมซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน โดยทำการเจือจางน้ำเสียให้มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ประมาณ 4,700 มิลลิกรัม/ลิตร อัตราการไหล 1.87 ลิตร/วัน และมีระยะเวลาการกักเก็บน้ำเสียในถังหมักเท่ากับ 7.65 วัน ทำการควบคุมอุณหภูมิภายในถังหมักให้คงที่ที่ 37 องศาเซลเซียส สาเหตุที่ต้องใช้ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ต่ำในการเริ่มต้นระบบก็เพื่อให้ตะกอนแบคทีเรียในถังหมักได้ทำความคุ้นเคยกับน้ำเสียและภาวะในการทำงาน และเมื่อระบบเข้าสู่ภาวะคงตัวแล้วจึงทำการเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ให้สูงขึ้นไปอีก ซึ่งค่าเฉลี่ยของครรชนิต่างๆ ของระบบหมักที่ทำการทดลองที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ แสดงในตารางที่ 3.2 และประสิทธิภาพของระบบหมักที่ทำการทดลองที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ แสดงในตารางที่ 3.3 รายละเอียดของผลการทดลองจะได้กล่าวถึงต่อไป

#### 3.2.2.1 อัตราการป้อนสารอินทรีย์และระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสีย

ในการทดลองนี้จะทำการเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ขึ้นเรื่อยๆ โดยในช่วงแรกของการทดลองได้เริ่มจากน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ต่ำประมาณ 4,700 มิลลิกรัม/ลิตร โดยทำการเจือจางน้ำเสียด้วยน้ำปราศจากไอออน ( D.I. water ) เพื่อให้ได้ความเข้มข้นของสารอินทรีย์

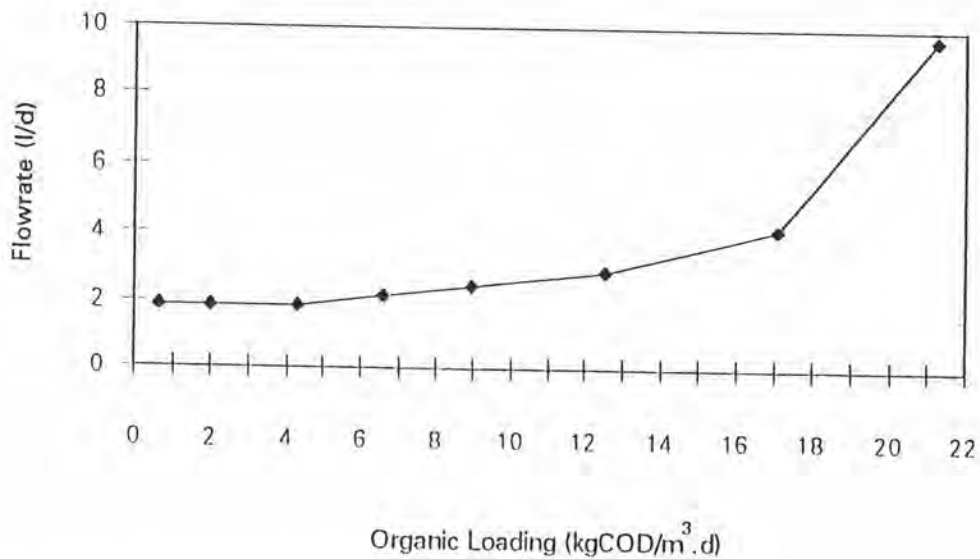
ตารางที่ 3.2 ค่าเฉลี่ยตรวจวัดต่างๆ ของระบบหมักที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ  
ภายใต้ภาวะคงตัว

| Organic Loading      |                  | kgCOD/m <sup>3</sup> .d | 0.62  | 1.99   | 4.26   | 6.61   | 8.93   | 12.55  | 17.06   | 21.27  |
|----------------------|------------------|-------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|
| Feed                 | COD              | mg/l                    | 4,714 | 15,299 | 32,583 | 43,771 | 52,114 | 61,714 | 59,286  | 31,286 |
|                      | pH               |                         | 5.91  | 5.70   | 5.07   | 4.60   | 4.55   | 4.57   | 4.63    | 4.91   |
|                      | VFA              | mg/l                    | 812   | 2,112  | 3,797  | 6,099  | 6,633  | 4,581  | 7,601   | 3,528  |
|                      | ALK              | mg/l                    | 227   | 676    | 955    | 1,049  | 1,116  | 851    | 1,404   | 836    |
|                      | VFA/ALK          |                         | 3.58  | 3.12   | 3.98   | 5.82   | 5.95   | 5.38   | 5.42    | 4.24   |
|                      | SS               | mg/l                    | 426   | 679    | 966    | 2,144  | 2,426  | 1,871  | 2,757   | 1,276  |
| UASB                 | Average Flowrate | l/d                     | 1.87  | 1.87   | 1.87   | 2.16   | 2.45   | 2.88   | 4.11    | 9.73   |
|                      | HRT              | days                    | 7.65  | 7.65   | 7.65   | 6.62   | 5.84   | 4.97   | 3.48    | 1.47   |
|                      | COD              | mg/l                    | 263   | 617    | 819    | 2,804  | 3,931  | 2,023  | 5,074   | 15,526 |
|                      | pH               |                         | 8.33  | 7.82   | 7.73   | 7.65   | 7.69   | 7.61   | 7.24    | 6.26   |
|                      | VFA              | mg/l                    | 78    | 26     | 51     | 136    | 124    | 76     | 341     | 6,010  |
|                      | ALK              | mg/l                    | 515   | 775    | 704    | 1,385  | 1,390  | 1,309  | 1,197   | 2,540  |
|                      | VFA/ALK          |                         | 0.15  | 0.03   | 0.07   | 0.10   | 0.09   | 0.06   | 0.29    | 2.10   |
|                      | SS               | mg/l                    | 100   | 223    | 179    | 2,741  | 5,213  | 2,731  | 5,933   | 4,344  |
|                      | Gas Production   | ml/d                    | 2,169 | 11,769 | 26,280 | 45,046 | 59,107 | 87,078 | 112,814 | 75,050 |
|                      | CH <sub>4</sub>  | %                       | 90.00 | 78.24  | 67.50  | 67.84  | 66.87  | 67.84  | 67.60   | 49.05  |
|                      | CO <sub>2</sub>  | %                       | 1.28  | 16.99  | 19.90  | 20.99  | 21.86  | 22.28  | 24.13   | 40.99  |
|                      | Other gasses     | %                       | 8.72  | 4.77   | 12.60  | 11.17  | 11.27  | 9.88   | 8.27    | 9.97   |
| Time to steady state |                  | days                    | 25    | 25     | 21     | 21     | 20     | 18     | 20      | 9      |

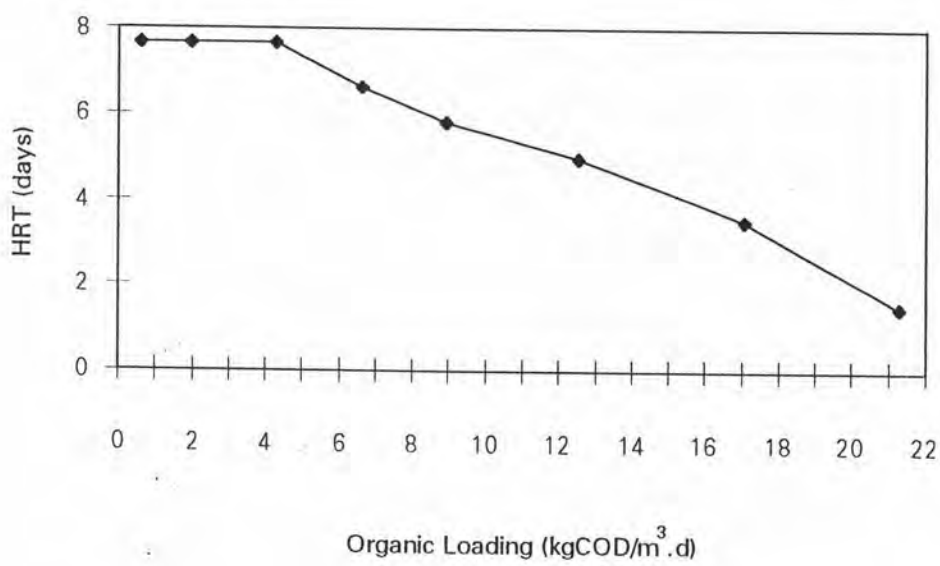
ตารางที่ 3.3 ประสิทธิภาพของระบบหมักที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ  
ภายใต้ภาวะคงตัว

|  |        |        |        |        |        |        |        |        |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Organic Loading kgCOD/m <sup>3</sup> .d  | 0.62   | 1.99   | 4.26   | 6.61   | 8.93   | 12.55  | 17.06  | 21.27  |
| Biogas Yield:                            |        |        |        |        |        |        |        |        |
| m <sup>3</sup> /kgCOD fed                | 0.2461 | 0.4138 | 0.4318 | 0.4768 | 0.4436 | 0.4876 | 0.4643 | 0.2430 |
| m <sup>3</sup> /kgCOD removed            | 0.2608 | 0.4316 | 0.4430 | 0.5096 | 0.5013 | 0.5075 | 0.5077 | 0.4849 |
| m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> reactor.d | 0.1473 | 0.8230 | 1.8377 | 3.1502 | 4.1333 | 6.0898 | 7.8891 | 5.2483 |
| Methane Yield:                           |        |        |        |        |        |        |        |        |
| m <sup>3</sup> /kgCOD fed                | 0.2215 | 0.3234 | 0.2915 | 0.3232 | 0.3098 | 0.3308 | 0.3142 | 0.1282 |
| m <sup>3</sup> /kgCOD removed            | 0.2346 | 0.3375 | 0.2990 | 0.3453 | 0.3352 | 0.3443 | 0.3436 | 0.2374 |
| m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> reactor.d | 0.1365 | 0.6431 | 1.2405 | 2.1363 | 2.7639 | 4.1320 | 5.3365 | 2.7831 |
| COD Removal %                            | 94.41  | 95.91  | 97.49  | 93.59  | 92.45  | 96.72  | 91.40  | 50.63  |

ในน้ำเสียตามต้องการ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการให้แบคทีเรียในถังหมักคุ้นเคยกับน้ำเสียที่ป้อนเข้าไปเสียก่อน จากนั้นจึงทำการเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์โดยเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่เข้าระบบเป็น 15,200 และ 32,600 มิลลิกรัม/ลิตร ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 1.99 และ 4.26 กิโลกรัมชีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ตามลำดับ โดยควบคุมอัตราการไหลให้คงที่เท่ากับ 1.87 ลิตร/วัน ดังนั้นระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสียในระบบจึงเท่ากับ 7.65 วัน ทั้งนี้เพื่อต้องการให้แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนเจริญได้ดี เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มนี้มีอัตราการเจริญเติบโตต่ำจึงต้องใช้ระยะเวลานานในการเพิ่มจำนวน หลังจากนั้นจึงทำการเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์โดยการเพิ่มอัตราการไหล (ไม่เจือจางน้ำเสีย) ในขณะที่ความเข้มข้นของสารอินทรีย์เท่ากับประมาณ 43,800 52,100 61,700 59,300 และ 31,300 มิลลิกรัม/ลิตร ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 6.61 8.93 12.55 17.06 และ 21.27 กิโลกรัมชีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ตามลำดับ ซึ่งจะทำให้ระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสียของระบบลดลงอย่างมากจาก 7.65 เป็น 6.62 5.84 4.97 3.48 จนเหลือ 1.47 วัน ในที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และ 3.2



รูปที่ 3.1 อัตราการไหลของน้ำเสียที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ

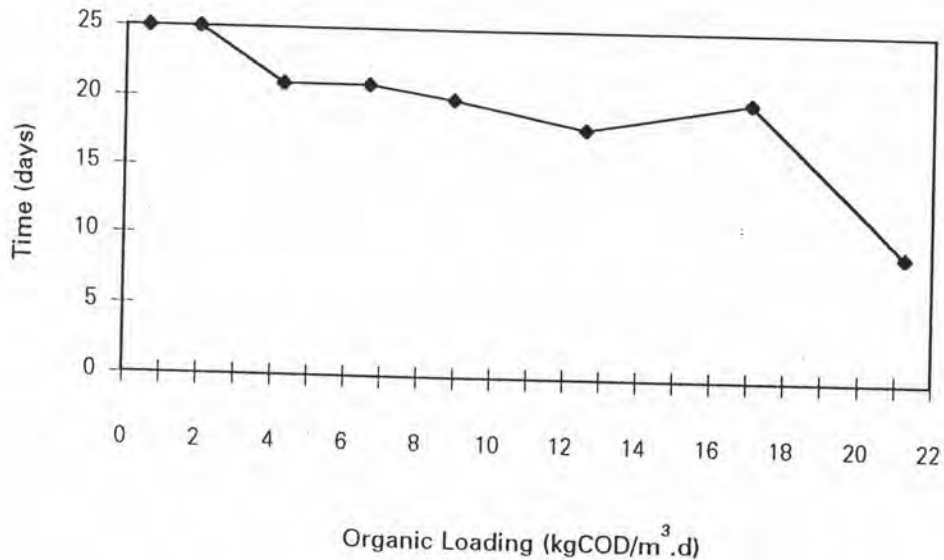


รูปที่ 3.2 ระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสียในระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ

3.2.2.2 ระยะเวลาที่ระบบเข้าสู่ภาวะคงตัว

จากผลการทดลองที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ พบว่า ในช่วงแรกของการทดลอง จะต้องใช้ระยะเวลานานจนกว่าระบบจะเข้าสู่ภาวะคงตัว เนื่องจากแบคทีเรียในระบบโดยเฉพาะแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนต้องใช้ระยะเวลานานในการปรับตัวให้คุ้นเคยกับภาวะแวดล้อมของระบบ เช่น อุณหภูมิและสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ซึ่งถ้าหากว่ามีการเปลี่ยนแปลงของภาวะแวดล้อมเหล่านี้มาก แบคทีเรียในระบบจะต้องใช้ระยะเวลาในการปรับตัวยาวนานกว่าระบบจะเข้าสู่ภาวะคงตัว และที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่สูงขึ้นพบว่า ระยะเวลาที่ระบบจะเข้าสู่ภาวะคงตัวลดลงดังแสดงในรูปที่ 3.3 เนื่องจากแบคทีเรียในระบบซึ่งได้แก่แบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดและแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน สามารถปรับตัวให้เข้ากับภาวะแวดล้อมของระบบได้ดีขึ้นและเพิ่มปริมาณมากขึ้น การพิจารณาว่าระบบเข้าสู่ภาวะคงตัวนั้นจะดูจากประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์และอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพซึ่งจะคงที่





รูปที่ 3.3 ระยะเวลาที่ระบบเข้าสู่ภาวะคงตัวที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ

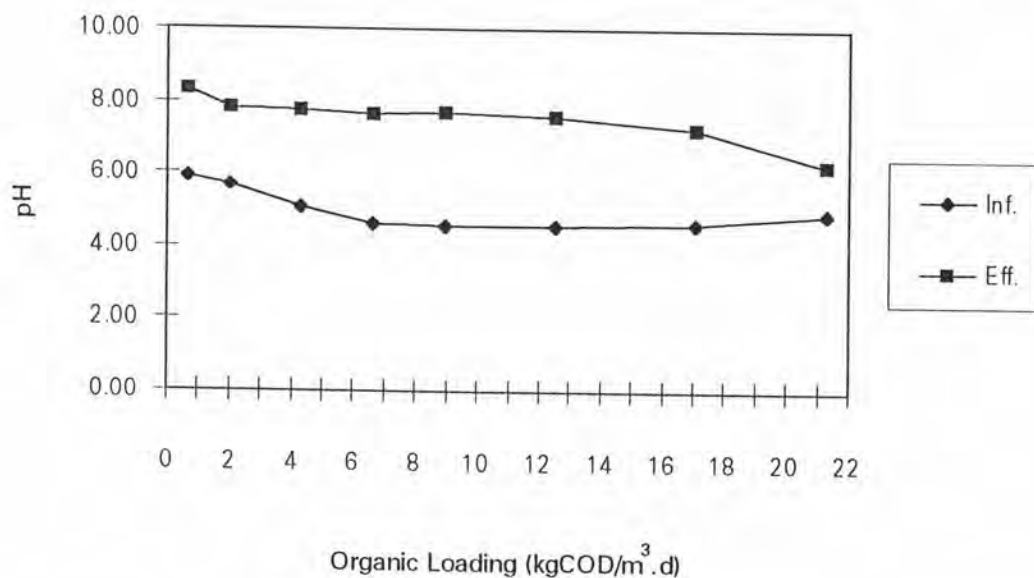
### 3.2.2.3 ค่าความเป็นกรด-ด่างในระบบ

ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบตลอดการทดลองจะอยู่ในช่วง 4.5 - 6.0 เนื่องจากน้ำเสียที่ได้จากการหมักกรดมะนาวในแต่ละครั้งจะไม่ค่อยคงที่ โดยจะแตกต่างกันไปตามภาวะของการหมักซึ่งจะทำให้มีผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสีย น้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำเนื่องจาก มีกรดไขมันระเหยในปริมาณสูงและมีค่าสภาพความเป็นด่างต่ำ ส่วนน้ำเสียที่ออกจากระบบจะมีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงกว่าน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบทุกอัตราการป้อนสารอินทรีย์ เนื่องจากปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำเสียลดต่ำลงเพราะกรดบางส่วนถูกใช้ไปในการเกิดปฏิกิริยาการผลิตก๊าซชีวภาพ

รูปที่ 3.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียที่ออกจากระบบมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ให้สูงขึ้น เนื่องจากมีกรดไขมันระเหยสะสมอยู่ในระบบมากขึ้น ในขณะที่ค่าสภาพความเป็นด่างของระบบต่ำ โดยที่พบว่าในช่วงแรกของการทดลองค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียที่ออกจากระบบมีค่าสูงคือประมาณ 8.33 และ

ลดลงเป็น 7.82 7.73 7.65 7.69 7.61 7.24 จนกระทั่งลดลงต่ำสุดที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 6.26 เท่านั้น ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 21.27 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ซึ่งเป็นช่วงที่ระบบเสียสมดุลเนื่องจากเสถียรภาพของระบบหมักลดลง โดยพิจารณาจากปริมาณกรดไขมันระเหยในระบบที่เพิ่มขึ้นมาก ( ปริมาณกรดไขมันระเหยมีค่าประมาณ 6,000 มิลลิกรัม/ลิตร ) และค่าสภาพความเป็นด่างต่ำ

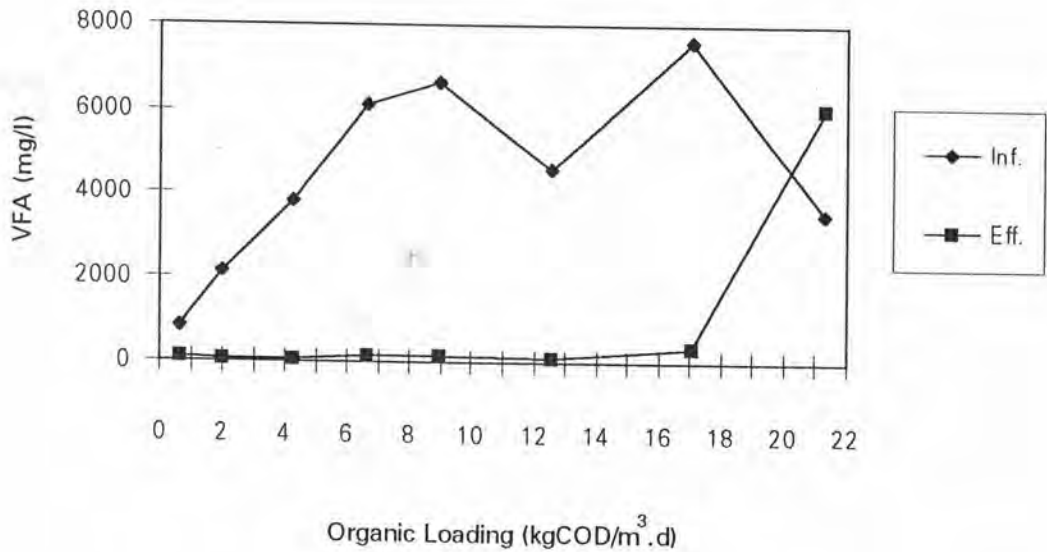
จากผลการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียในระบบหมักจะเป็นปฏิภาคกับปริมาณกรดไขมันระเหย กล่าวคือถ้าในระบบมีปริมาณกรดไขมันระเหยในปริมาณต่ำจะทำให้ระบบมีค่าความเป็นกรด-ด่างสูง และในทางตรงกันข้ามถ้าในระบบมีกรดไขมันระเหยในปริมาณสูงจะทำให้ระบบมีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ เนื่องจากสภาพความเป็นด่างซึ่งเปรียบเสมือนตัวรักษาสมดุลความเป็นกรด-ด่างในระบบต่ำ ดังนั้นปัจจัยสำคัญที่มีผลโดยตรงต่อค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียในระบบคือ ปริมาณกรดไขมันระเหย จากผลการทดลองพบว่าปริมาณกรดไขมันระเหยมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบอย่างมากทุกช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์



รูปที่ 3.4 ค่าความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ

### 3.2.2.4 ปริมาณกรดไขมันระเหยในระบบ

กรดไขมันระเหย ( Volatile Fatty Acid; VFA ) ในระบบย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนนั้นได้จากขั้นตอนของปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เป็นกรดอินทรีย์โดยแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรด และกรดอินทรีย์เหล่านี้จะถูกนำไปใช้ต่อไปโดยแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนในขั้นตอนของปฏิกิริยาการผลิตก๊าซชีวภาพ จะเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ต่ำ ( 4,700 มิลลิกรัม/ลิตร ) จะมีปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำเสียประมาณ 800 มิลลิกรัม/ลิตร และเมื่อความเข้มข้นของสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นเป็น 60,000 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาณกรดไขมันระเหยเพิ่มขึ้นเป็น 7,600 มิลลิกรัม/ลิตร ( ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ) ซึ่งแสดงว่าปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ในระบบหมักโดยทั่วๆ ไปพบว่าปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำเสียที่มีค่าสูงมาก ( มากกว่า 2,500 มิลลิกรัม/ลิตร ) จะมีผลไปยังการเจริญของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน และทำให้เสถียรภาพของระบบลดลง รวมทั้งประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงด้วย แต่ระบบที่ใช้ในการทดลองนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดกรดไขมันระเหยสูงมาก ถึงแม้จะมีค่าสภาพความเป็นด่างต่ำก็ตาม แต่ระบบก็ยังสามารถรักษาระดับค่าความเป็นกรด-ด่าง ให้สูงกว่า 7 ไปได้ เสถียรภาพของระบบและประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพสูงด้วย รูปที่ 3.5 แสดงปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ โดยที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 0.62 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ประสิทธิภาพในการกำจัดกรดไขมันระเหยเท่ากับ 90.41 % เนื่องจากในช่วงนี้เป็นช่วงที่แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนซึ่งจะนำกรดอินทรีย์ไปใช้ในขั้นตอนการผลิตก๊าซชีวภาพกำลังปรับตัวให้เข้ากับภาวะในการทำงาน และอัตราการเพิ่มจำนวนแบคทีเรียยังน้อยอยู่ แต่เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ให้สูงขึ้น พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดกรดไขมันระเหยสูงขึ้นเป็น 97-98 % ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 1.99 - 12.55 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนสามารถปรับตัวให้เข้ากับภาวะการทำงานได้ดีขึ้น ถึงแม้จะมีปริมาณแบคทีเรียที่หลุดออกจากระบบ ( wash out ) ในปริมาณมากก็ตาม เนื่องจากอัตราการเพิ่มจำนวนแบคทีเรียมากกว่าอัตราที่แบคทีเรียหลุดออกจากระบบ ส่วนที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 17.06 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดกรดไขมันระเหยลดลงเล็กน้อยคือจาก 98.00 % เป็น 95.51 % เนื่องจากระบบเริ่มมีประสิทธิผลลดลง จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำเสียที่ออกจากระบบจะต่ำกว่าปริมาณกรดไขมันระเหย

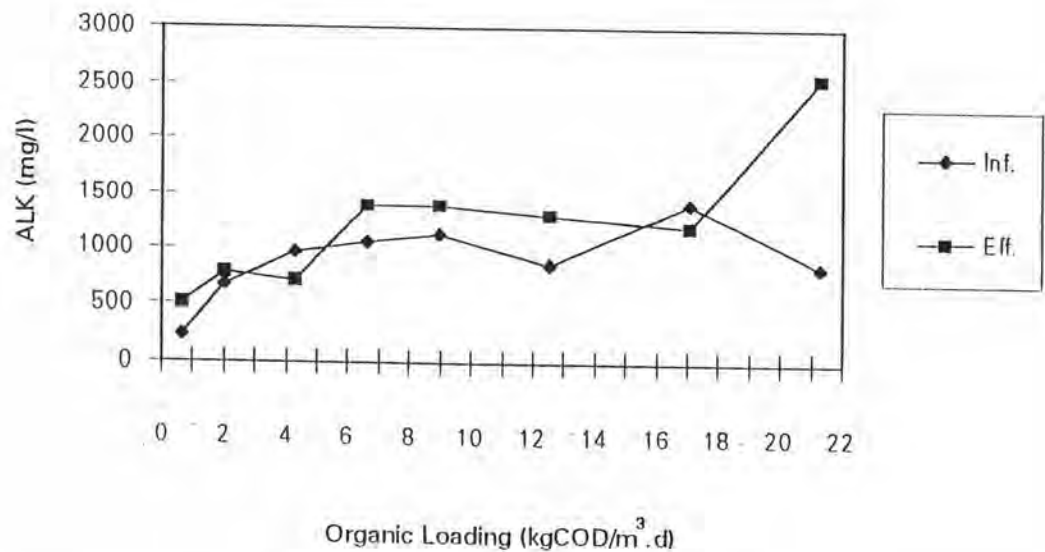


รูปที่ 3.5 ปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ

ในน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบมาก แต่ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 21.27 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ปริมาณกรดไขมันระเหยที่ออกจากระบบ ( 6,010 มิลลิกรัม/ลิตร ) มีค่ามากกว่า ปริมาณกรดไขมันระเหยที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ( 3,500 มิลลิกรัม/ลิตร ) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบเริ่มเข้าสู่ภาวะเสียสมดุลและมีประสิทธิภาพลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน เนื่องจากกรดไขมันระเหยที่สะสมอยู่ในระบบมีปริมาณที่สูงมาก ซึ่งจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน ทำให้แบคทีเรียกลุ่มนี้อ่อนแอและตายลงอย่างมาก โดยจะเห็นได้จากมีตะกอนแบคทีเรียหลุดออกจากระบบในปริมาณสูง ( SS = 4,300 มิลลิกรัม/ลิตร ) อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพลดลง สัดส่วนของมีเทนในก๊าซชีวภาพลดลงอย่างมาก ( จาก 67 % เหลือเพียง 49 % ) นอกจากนี้ที่ภาวะอัตราการป้อนสารอินทรีย์สูงๆ และระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสียในระบบต่ำลง แบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดจะเข้ามามีบทบาทในการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เป็นกรดอินทรีย์เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่การนำเอากรดอินทรีย์ไปใช้ในการสร้างก๊าซชีวภาพโดยแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนลดลง ซึ่งทำให้ปริมาณและการทำงานของแบคทีเรียทั้งสองชนิดในระบบไม่สมดุลกัน จึงทำให้ปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำเสียที่ออกจากระบบสูงมาก

### 3.2.2.5 ค่าสภาพความเป็นด่างของระบบ

ค่าสภาพความเป็นด่าง ( Alkalinity ) ของระบบ เปรียบเสมือนตัวรักษาความสมดุล ความเป็นกรด-ด่าง ในระบบ กล่าวคือ ถ้าค่าสภาพความเป็นด่างสูงจะทำให้ระบบสามารถรักษา ระดับค่าความเป็นกรด-ด่างให้คงที่ไว้ได้ถึงแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดไขมันระเหยก็ ตาม ค่าสภาพความเป็นด่างสัมพันธ์กับสารแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต ซึ่งเกิดจากการรวมตัว ระหว่างแอมโมเนียที่ได้จากการย่อยสลายโปรตีนกับคาร์บอนไดออกไซด์ จากผลการทดลองพบว่า น้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีค่าสภาพความเป็นด่างค่อนข้างต่ำ คือประมาณ 200 - 1,400 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าสภาพความเป็นด่างของน้ำเสียที่ออกจากระบบก็ค่อนข้างต่ำและไม่คงที่ เช่นเดียวกัน กล่าวคือมีค่าประมาณ 500 - 1,400 มิลลิกรัม/ลิตร ( ซึ่งโดยทั่วไปค่าสภาพความเป็นด่างที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 1,000 - 3,000 มิลลิกรัม/ลิตร ) ซึ่งค่าสภาพความเป็นด่างของ น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบอาจจะมากกว่าหรือน้อยกว่าค่าสภาพความเป็นด่างของน้ำเสียที่ออกจาก ระบบก็ได้ไม่แน่นอน ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งแสดงค่าสภาพความเป็นด่างของน้ำเสียที่เข้าและ ออกจากระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ การที่น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่าสภาพความ เป็นด่างค่อนข้างต่ำอาจเนื่องมาจากในน้ำเสียที่ได้จากกระบวนการหมักกรดมะนาวนั้นไม่มีสาร ประกอบไนโตรเจนเหลืออยู่เลย ( ไนโตรเจน เท่ากับ 0 % ) เพราะเนื่องจากภาวะในการหมักกรด มะนาวนั้น จุลินทรีย์จะสามารถผลิตกรดมะนาวได้ก็ต่อเมื่อปริมาณไนโตรเจนในอาหารได้ถูกใช้ ไปจนหมดเพื่อการเจริญของจุลินทรีย์ ( McKay, Maddox and Brooks, 1994 ) และแหล่ง ไนโตรเจน ( ยูเรีย ) ที่เติมลงไปเพื่อใช้เป็นสารอาหารในการเติบโตของแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มใน ระบบมีปริมาณน้อย ( 2.2 % เท่านั้น ) ถ้าสภาพความเป็นด่างของระบบหมักต่ำจะมีผลทำให้ เสถียรภาพของระบบต่ำตามไปด้วยและค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียในระบบจะลดลงได้ง่าย เมื่อปริมาณกรดไขมันระเหยเพิ่มขึ้นอย่างกระทันหัน กล่าวคือที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 21.27 กิโลกรัมซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงอย่างมากจาก 7.24 เป็น 6.26 เมื่อปริมาณกรดไขมันระเหยเพิ่มขึ้นจาก 340 มิลลิกรัม/ลิตร เป็น 6,000 มิลลิกรัม/ลิตร ถึงแม้ ว่าระบบจะพยายามที่จะรักษาสมดุลไว้โดยการเพิ่มค่าสภาพความเป็นด่างให้สูงขึ้น จาก 1,200 มิลลิกรัม/ลิตร เป็น 2,500 มิลลิกรัม/ลิตร ก็ตาม ซึ่งทำให้ค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณกรด ไขมันระเหยต่อค่าสภาพความเป็นด่าง ( VFA/ALK ) เท่ากับ 2.10 ซึ่งมีผลทำให้เสถียรภาพของ ระบบต่ำ แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนอ่อนแอและตายลงซึ่งทำให้ตะกอนแบคทีเรียหลุดออกจาก ระบบในปริมาณมาก ( นาฏนดา ธรินทร์วรคุปต์, 2537 ) ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสาร อินทรีย์และอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงอย่างมากจนทำให้ระบบล้มเหลวได้

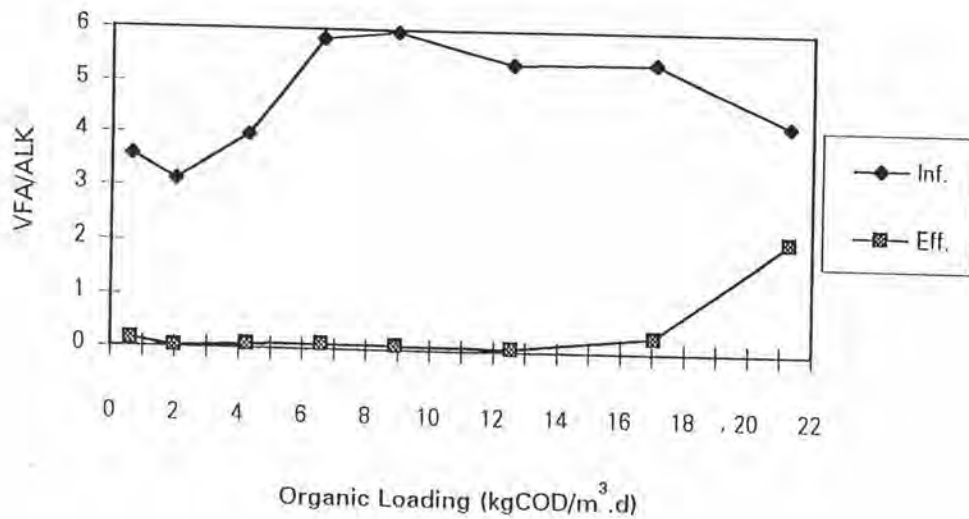


รูปที่ 3.6 ค่าสภาพความเป็นด่างของน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ

### 3.2.2.6 อัตราส่วนระหว่างปริมาณกรดไขมันระเหยต่อค่าสภาพความเป็นด่าง (VFA/ALK)

อัตราส่วนระหว่างปริมาณกรดไขมันระเหยต่อค่าสภาพความเป็นด่างจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงเสถียรภาพของระบบได้ดี กล่าวคือ ถ้าอัตราส่วนนี้มีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่าระบบมีความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์สูง และระบบอยู่ในภาวะที่มีเสถียรภาพสูง การเพิ่มของอัตราส่วนนี้เป็นสัญญาณของการเสถียรภาพของระบบและแสดงว่าความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์ลดน้อยลง แต่ถ้าอัตราส่วนนี้สูงกว่า 0.8 แสดงว่าระบบกำลังอยู่ในภาวะที่เสถียรภาพต่ำ ค่าความแตกต่างจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยของปริมาณกรดไขมันระเหย จากผลการทดลองพบว่าน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีอัตราส่วนระหว่างปริมาณกรดไขมันระเหยต่อค่าสภาพความเป็นด่างสูงมาก ( $> 0.8$ ) ที่ทุกอัตราการป้อนสารอินทรีย์ โดยจะมีค่าอยู่ระหว่าง 3.12 - 5.95 เนื่องจากในน้ำเสียนี้อัตราส่วนกรดไขมันระเหยปริมาณสูงมาก และมีค่าสภาพความเป็นด่างต่ำดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งจะทำให้ไม่เหมาะสมต่อการบำบัด เนื่องจากจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน แต่จากผลการทดลองพบว่า ระบบหมักนี้มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณสาร

อินทรีย์ และลดปริมาณกรดไขมันระเหยได้สูงมาก กล่าวคือน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจะมีอัตราส่วนระหว่างปริมาณกรดไขมันระเหยต่อค่าสภาพความเป็นด่างต่ำมาก ดังในรูปที่ 3.7 ซึ่งแสดงอัตราส่วนระหว่างปริมาณกรดไขมันระเหยต่อค่าสภาพความเป็นด่างของน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ โดยที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 0.62 กิโลกรัมซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน อัตราส่วนนี้มีค่า 0.15 เนื่องจากตะกอนแบคทีเรียอยู่ในภาวะที่กำลังปรับตัวทำ ความคุ้นเคยกับน้ำเสียและภาวะในการทำงานของระบบ แต่ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 1.99 - 12.55 กิโลกรัมซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ระบบหมักอยู่ในภาวะสมดุล เสถียรภาพของระบบจะสูงมาก ปริมาณกรดไขมันระเหยที่สะสมอยู่ในระบบมีค่าต่ำ อยู่ในช่วง 30 - 140 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าสภาพความเป็นด่างของน้ำเสียที่ออกจากระบบจะอยู่ในช่วง 700 - 1,400 มิลลิกรัม/ลิตร ดังนั้นอัตราส่วนระหว่างปริมาณกรดไขมันระเหยต่อค่าสภาพความเป็นด่างจึงมีค่าอยู่ในช่วง 0.03 - 0.10 และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.03 ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 1.95 กิโลกรัมซีไอดี/ลูกบาศก์ เมตร-วัน ส่วนที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 17.06 กิโลกรัมซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน อัตราส่วนระหว่างปริมาณกรดไขมันระเหยต่อค่าสภาพความเป็นด่างสูงขึ้นเล็กน้อย คือมีค่าประมาณ 0.29 ซึ่งแสดงว่าระบบมีเสถียรภาพลดลง และมีความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์ลดลงด้วย เนื่องจากมีกรดไขมันระเหยที่สะสมอยู่ในระบบปริมาณสูงขึ้น ( ประมาณ 340 มิลลิกรัม/ลิตร ) และที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 21.27 กิโลกรัมซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน อัตราส่วนระหว่างปริมาณกรดไขมันระเหยต่อค่าสภาพความเป็นด่างมีค่าสูงมาก คือมีค่าประมาณ 2.10 ซึ่งเป็นค่าที่สูงสุดของการทดลองนี้ ซึ่งแสดงว่าระบบอยู่ในภาวะเสียสมดุล เสถียรภาพของระบบต่ำมาก เนื่องจากมีกรดไขมันระเหยสะสมอยู่ในระบบในปริมาณที่สูงมาก ( ประมาณ 6,000 มิลลิกรัม/ลิตร ) ค่าความเป็นกรด-ด่าง ลดต่ำลง ซึ่งจะมีผลไปยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน ทำให้การทำงานของแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มไม่สมดุลกัน ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์และประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงอย่างมาก สัดส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น

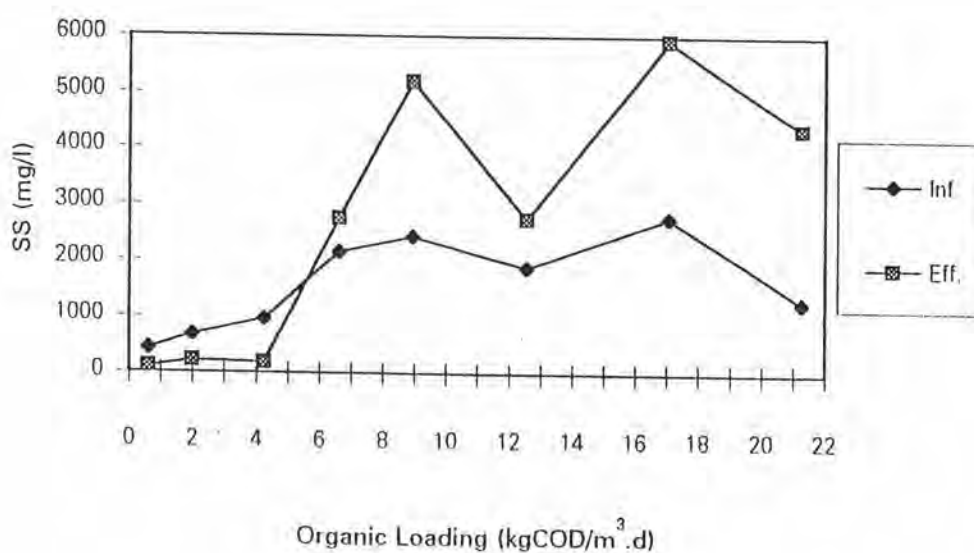


รูปที่ 3.7 อัตราส่วนระหว่างปริมาณกรดไขมันระเหยต่อค่าสภาพความเป็นด่างของน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ

### 3.2.2.7 ปริมาณของแข็งแขวนลอยในระบบทั้งหมด

ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่หลุดออกจากระบบสามารถบ่งชี้ให้เห็นถึงปริมาณตะกอนแบคทีเรียในระบบ เนื่องจากของแข็งแขวนลอยที่หลุดออกจากระบบส่วนใหญ่เป็นตะกอนแบคทีเรีย รูปที่ 3.8 แสดงปริมาณของแข็งแขวนลอยของน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ จากผลการทดลองจะเห็นว่าปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีค่าอยู่ระหว่าง 430 - 2,800 มิลลิกรัม/ลิตร ในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 0.62-4.26 กิโลกรัมซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน พบว่าปริมาณของแข็งแขวนลอยที่หลุดออกมาจากระบบมีค่าต่ำมาก SS ประมาณ 100 - 220 มิลลิกรัม/ลิตร ( ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีค่ามากกว่าปริมาณของแข็งแขวนลอยที่หลุดออกมาจากระบบที่ทุกอัตราการป้อนสารอินทรีย์ ) ซึ่งในช่วงนี้อัตราการไหลของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบจะคงที่เท่ากับ 1.87 ลิตร/วัน ในขณะที่ความเข้มข้นของปริมาณสารอินทรีย์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าในช่วงนี้ปริมาณสารอินทรีย์ไม่มีผลต่อปริมาณตะกอนแบคทีเรียที่หลุดออกมา





รูปที่ 3.8 ปริมาณของแข็งแขวนลอยของน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ

จากระบบ และเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์เป็น 6.61 - 21.27 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน พบว่าปริมาณของแข็งแขวนลอยที่หลุดออกมาจากระบบมีค่าเพิ่มขึ้นสูงมาก ( ประมาณ 2,700 - 6,000 มิลลิกรัม/ลิตร ) และปริมาณของแข็งแขวนลอยที่หลุดออกมาจากระบบมีค่าสูงสุดเท่ากับ 6,000 มิลลิกรัม/ลิตร ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 17.06 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน โดยที่ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีค่าต่ำกว่าปริมาณของแข็งแขวนลอยที่หลุดออกจากระบบที่ทุกอัตราการป้อนสารอินทรีย์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์นี้ อัตราการไหลของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบ และปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบเพิ่มมากขึ้นประกอบกับอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นอย่างมากด้วย ซึ่งมีผลทำให้มีตะกอนแบคทีเรียฟุ้งกระจายและหลุดออกจากระบบมากขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองอาจกล่าวได้ว่าในช่วงนี้ อัตราการไหลและปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีผลกระทบต่อ การหลุดออกจากระบบของตะกอนแบคทีเรีย ถึงแม้ว่าในช่วงนี้จะมีปริมาณตะกอนแบคทีเรียหลุดออกจากระบบในปริมาณมากก็ตาม แต่ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์ ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ และเสถียรภาพของระบบยังคงสูงอยู่ ( ยกเว้นที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 21.27 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ซึ่งระบบเข้าสู่ภาวะเสียสมดุล ) ซึ่งแสดงว่าในระบบยัง

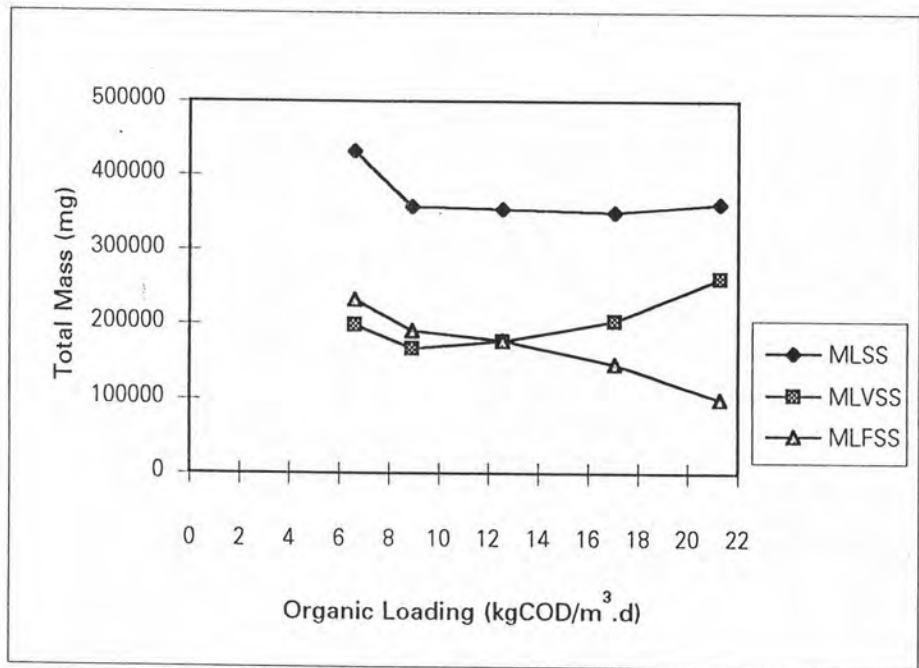
มีปริมาณตะกอนแบคทีเรียในปริมาณสูงอยู่ ( อัตราการเติบโตของแบคทีเรียสูงกว่าอัตราการหลุดออกจากระบบของแบคทีเรีย ) ดังจะได้อธิบายต่อไป

### 3.2.2.8 ปริมาณตะกอนแบคทีเรียภายในถังหมัก

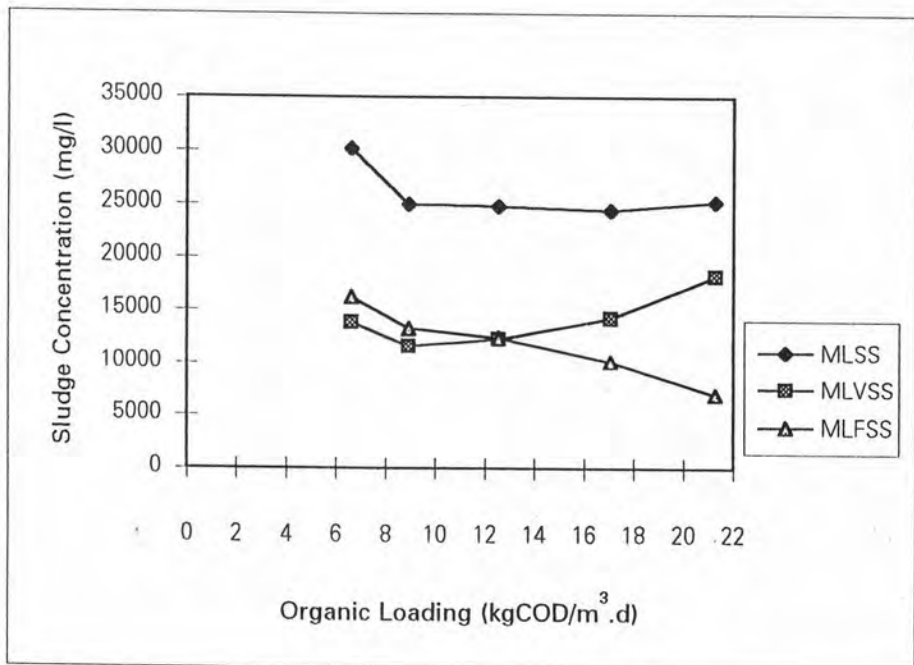
ปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมักมีความสำคัญอย่างมากต่อประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์ และประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ กล่าวคือ ยิ่งในระบบมีปริมาณตะกอนแบคทีเรียมากเท่าใด ก็จะทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดีขึ้นเท่านั้น จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าในช่วงเริ่มต้นเดินระบบนั้น ลักษณะตะกอนแบคทีเรียมีสีดำ ร่วน เป็นตะกอนเบา ฟุ้งกระจาย และยังไม่พบตะกอนแบคทีเรียลักษณะเม็ด ความสูงของตะกอนแบคทีเรียประมาณ 50 เซนติเมตร ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 0.62 - 4.26 กิโลกรัมซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร - วัน ลักษณะตะกอนแบคทีเรียในถังหมักไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงมากนักเนื่องจากอัตราการป้อนสารอินทรีย์ยังต่ำอยู่ รวมทั้งความสูงของชั้นตะกอนแบคทีเรียก็ไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงคือ มีความสูงประมาณ 45 - 50 เซนติเมตร เนื่องจากในช่วงนี้ตะกอนแบคทีเรียที่หลุดออกจากถังหมักมีปริมาณต่ำ ( ค่าปริมาณของแข็งแขวนลอยของน้ำเสียที่ออกจากระบบมีค่าต่ำ ดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.2.2.7 ) แต่ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 6.61 กิโลกรัมซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร - วัน พบว่าปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียที่ออกจากระบบมีค่าสูงมากขึ้น ( SS ประมาณ 2,700 มิลลิกรัม/ลิตร ) และเริ่มสังเกตเห็นตะกอนแบคทีเรียเข้มข้นที่อยู่บริเวณก้นถังหมักเป็นลักษณะตะกอนเม็ดบ้างแล้ว โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 - 2 มิลลิเมตร ซึ่งตะกอนแบคทีเรียลักษณะเม็ดนี้ส่วนใหญ่มีสีดำ และมีสีเทา สีขาว บ้างเล็กน้อย รวมถึงมีตะกอนแบคทีเรียที่หลุดออกมาจากถังหมักซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ดขนาดประมาณ 0.1 - 0.5 มิลลิเมตรปนอยู่ด้วย และพบว่าความสูงของชั้นตะกอนเข้มข้นลดลงเหลือประมาณ 37 เซนติเมตร เนื่องจากในช่วงนี้มีปริมาณของแข็งแขวนลอยหลุดออกจากระบบมากขึ้น ปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมักเหลือประมาณ 30,200 มิลลิกรัม/ลิตร ดังในตารางที่ 3.4 ซึ่งแสดงปริมาณตะกอนแบคทีเรียทั้งหมดและที่ระดับความสูงต่าง ๆ ของถังหมักที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ และรูปที่ 3.9 และ 3.10 ซึ่งแสดงปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมักที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ ( ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 0.62 - 4.26 กิโลกรัมซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ไม่ได้ทำการวัดปริมาณตะกอนแบคทีเรียทั้งหมดในถังหมัก ) รวมทั้งสังเกตเห็นตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตรซึ่งเกาะติดอยู่ตามบริเวณด้านข้างของผนังของถังหมักในปริมาณมาก และที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 8.93 - 17.06 กิโลกรัมซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน พบว่าตะกอน

ตารางที่ 3.4 ปริมาณตะกอนแบบคทีเรียที่ระดับความสูงต่างๆ ของถังหมักที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ  
( แสดงข้อมูลที่ภาวะคงตัวของแต่ละอัตราการป้อนสารอินทรีย์ )

| Height<br>(cm)        | Organic Loading (kgCOD/m <sup>3</sup> .d) |                    |                     |         |                    |                     |         |                    |                     |         |                    |                    |         |                    |                    |
|-----------------------|---|--------------------|---------------------|---------|--------------------|---------------------|---------|--------------------|---------------------|---------|--------------------|--------------------|---------|--------------------|--------------------|
|                       | 6.61                                      |                    |                     | 8.93    |                    |                     | 12.55   |                    |                     | 17.06   |                    |                    | 21.27   |                    |                    |
|                       | MLSS                                      | MLVSS              | MLFSS               | MLSS    | MLVSS              | MLFSS               | MLSS    | MLVSS              | MLFSS               | MLSS    | MLVSS              | MLFSS              | MLSS    | MLVSS              | MLFSS              |
| 40                    | 25,865                                    | 16,489<br>[63.75%] | 9,376<br>[36.25%]   | 15,850  | 10,741<br>[67.77%] | 5,109<br>[32.23%]   | 17,285  | 12,349<br>[71.44%] | 4,936<br>[28.56%]   | 21,459  | 17,569<br>[81.87%] | 3,890<br>[18.13%]  | 40,512  | 30,749<br>[75.90%] | 9,763<br>[24.10%]  |
| 30                    | 79,330                                    | 42,196<br>[53.19%] | 37,134<br>[46.81%]  | 17,898  | 11,664<br>[65.17%] | 6,234<br>[34.83%]   | 38,956  | 26,319<br>[67.56%] | 12,637<br>[32.44%]  | 55,438  | 39,334<br>[70.59%] | 16,104<br>[29.05%] | 57,778  | 43,596<br>[75.45%] | 14,182<br>[24.55%] |
| 20                    | 87,390                                    | 44,691<br>[51.14%] | 42,699<br>[48.86%]  | 111,167 | 55,241<br>[50.14%] | 54,926<br>[49.86%]  | 86,754  | 46,179<br>[53.26%] | 40,575<br>[46.77%]  | 67,467  | 43,536<br>[64.53%] | 23,931<br>[35.47%] | 84,088  | 60,141<br>[71.52%] | 23,947<br>[28.48%] |
| 15                    | 97,230                                    | 46,534<br>[47.86%] | 50,696<br>[52.14%]  | 114,830 | 54,580<br>[47.53%] | 60,250<br>[52.47%]  | 97,480  | 44,977<br>[46.14%] | 52,503<br>[53.83%]  | 85,477  | 44,031<br>[51.51%] | 41,446<br>[48.49%] | 87,840  | 62,187<br>[70.80%] | 26,653<br>[29.20%] |
| 10                    | 129,805                                   | 54,700<br>[42.14%] | 75,105<br>[57.86%]  | 125,272 | 58,100<br>[46.38%] | 67,172<br>[53.62%]  | 118,136 | 52,996<br>[44.86%] | 65,140<br>[55.14%]  | 101,476 | 46,130<br>[45.46%] | 55,327<br>[54.54%] | 93,781  | 63,741<br>[67.97%] | 30,040<br>[32.03%] |
| 5                     | 186,710                                   | 55,154<br>[29.54%] | 131,556<br>[70.46%] | 182,131 | 60,692<br>[33.32%] | 121,438<br>[66.68%] | 177,684 | 66,241<br>[37.28%] | 111,443<br>[62.72%] | 167,794 | 78,377<br>[46.71%] | 89,417<br>[53.29%] | 95,403  | 65,975<br>[69.15%] | 29,428<br>[30.85%] |
| Total Weight (mg)     | 431,392                                   | 198,626            | 232,766             | 357,544 | 166,961            | 190,583             | 354,440 | 176,581            | 177,859             | 349,817 | 204,045            | 145,772            | 361,003 | 261,250            | 99,753             |
| Average Weight (mg/l) | 30,167                                    | 13,890             | 16,277              | 25,003  | 11,676             | 13,327              | 24,786  | 12,348             | 12,438              | 24,463  | 14,269             | 10,194             | 25,245  | 18,269             | 6,976              |

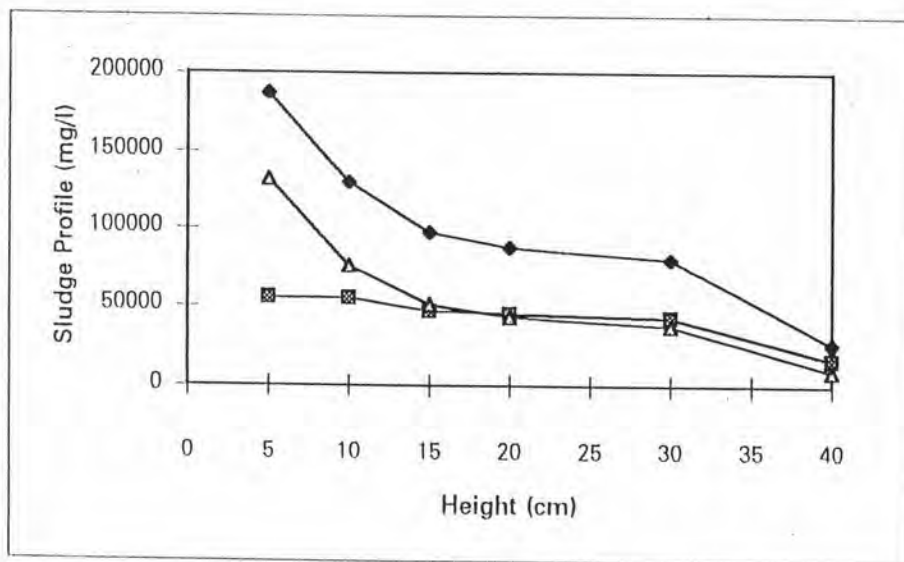


รูปที่ 3.9 ปริมาณตะกอนแบคทีเรียทั้งหมดในถังหมักที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ

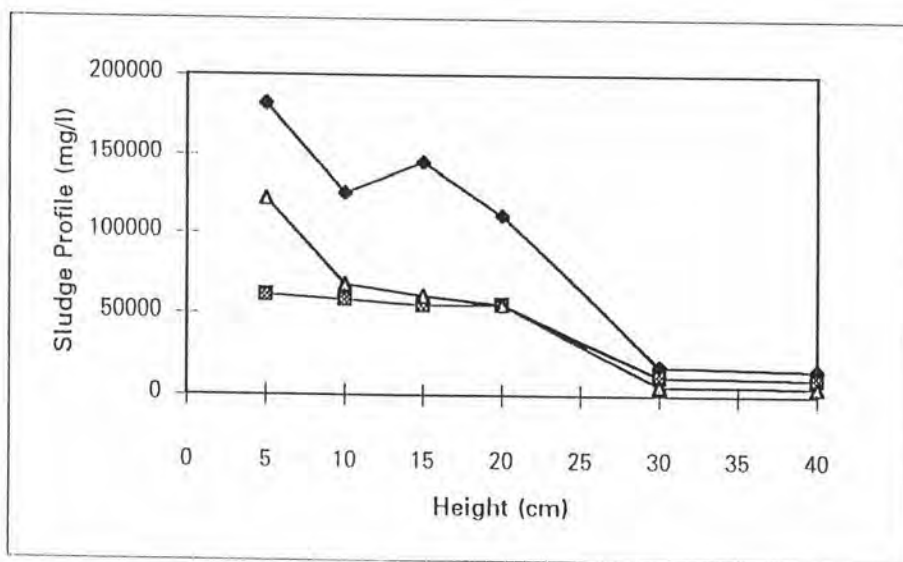


รูปที่ 3.10 ความเข้มข้นตะกอนแบคทีเรียโดยเฉลี่ยในถังหมักที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ

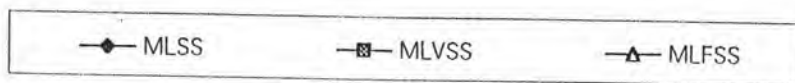
แבקที่เรียลักษณะเม็ดมีปริมาณเพิ่มขึ้น และมีขนาดใหญ่ขึ้น ( ขนาด 1 - 5 มิลลิเมตร ) และ ความสูงของชั้นตะกอนเข้มน้ลดลงเพียงเล็กน้อย คือเหลือประมาณ 35 เซนติเมตร แต่ปริมาณ ตะกอนแบคทีเรียภายในถังหมักลดลงอย่างมากคือเหลือเพียง 24,500 - 25,000 มิลลิกรัม / ลิตร ดังแสดงในตารางที่ 3.4 เนื่องจากในช่วงนี้ระบบมีอัตราการป้อนสารอินทรีย์และอัตราการไหลของ น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบเพิ่มมากขึ้น รวมทั้งอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพก็เพิ่มสูงขึ้นมาก ซึ่งจะมีผลทำให้ เกิดการฟุ้งกระจายของตะกอนแบคทีเรีย และทำให้ตะกอนแบคทีเรียหลุดออกจากระบบได้ง่ายขึ้น ซึ่งดูได้จากปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียที่ออกจากระบบมีค่าสูงมาก ( 2,700 - 6,000 มิลลิกรัม/ลิตร ) และพบว่ามีตะกอนแบคทีเรียสีเทา และ สีขาวในปริมาณมากขึ้น ซึ่งจะอยู่ทาง ด้านล่างของถังหมัก ส่วนที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 21.27 กิโลกรัมซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน พบว่าตะกอนแบคทีเรียยังคงหลุดออกจากถังหมักในปริมาณมาก ( SS ประมาณ 4,300 มิลลิกรัม /ลิตร ) และตะกอนแบคทีเรียที่อัดตัวกันแน่นบริเวณก้นถังหมักจะถูกทำให้ฟุ้งกระจายและถูกพัด พาขึ้นมาด้านบน ซึ่งอาจจะเป็ผลเนื่องมาจากมีอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบมากขึ้นและ ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในระบบมีปริมาณสูงขึ้น ประกอบกับในช่วงนี้มีกรดไขมันระเหย สะสมในระบบปริมาณสูงมาก ( 6,000 มิลลิกรัม/ลิตร ) ซึ่งมีผลทำให้แบคทีเรียบางส่วนอ่อนแอ และตายลง เมื่อมาพิจารณาถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของชั้นตะกอนแบคทีเรียและองค์ ประกอบของตะกอนแบคทีเรียในถังหมัก จะเห็นได้ว่ามีปริมาณตะกอนเข้มน้มากที่บริเวณก้นถัง หมัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงความสูงจากก้นถังหมักถึงที่ระดับความสูง 5 - 10 เซนติเมตร และ จะลดลงเมื่อความสูงของถังหมักเพิ่มขึ้น ดังในรูปที่ 3.11 ซึ่งแสดงปริมาณตะกอนแบคทีเรียที่ ระดับความสูงต่าง ๆ ในถังหมักที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาการย่อย สลายสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพส่วนใหญ่จะเกิดในช่วงตะกอนเข้มน้ และยังพบอีกว่า ตะกอนแบคทีเรียบริเวณก้นถังจะประกอบด้วยสารอินทรีย์ ( MLVSS ) ซึ่งได้แก่เซลล์ของแบคทีเรีย ในปริมาณน้อย และมีปริมาณสารอนินทรีย์ ( MLFSS ) ซึ่งได้แก่เกลือของโลหะต่าง ๆ เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณมาก และสัดส่วนของ MLVSS จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามความสูง ของถังหมัก ในทางกลับกันค่า MLFSS จะลดลงเรื่อย ๆ ตามความสูงถังหมัก ซึ่งหมายความว่า ตะกอนสารอนินทรีย์ส่วนใหญ่จะตกตะกอนและอยู่ในบริเวณก้นถังหมัก ส่วนในบริเวณที่สูงขึ้นมา จะเกิดการสร้างเซลล์แบคทีเรียขึ้นมามากและมีการสะสมของสารอนินทรีย์ในปริมาณน้อย และ ยังสังเกตพบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่า MLVSS ที่ระดับความสูงเดียวกันที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ ต่าง ๆ พบว่า มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งอาจเป็นเพราะว่าเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มมา กขึ้นก็จะให้ตะกอนแบคทีเรียมีการแบ่งตัวเพิ่มจำนวนมากขึ้นด้วย



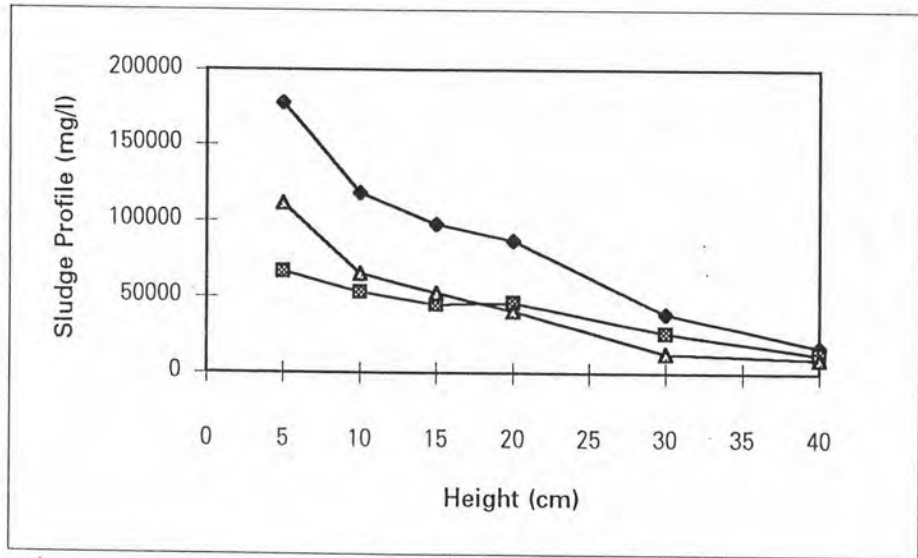
อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 6.61 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน



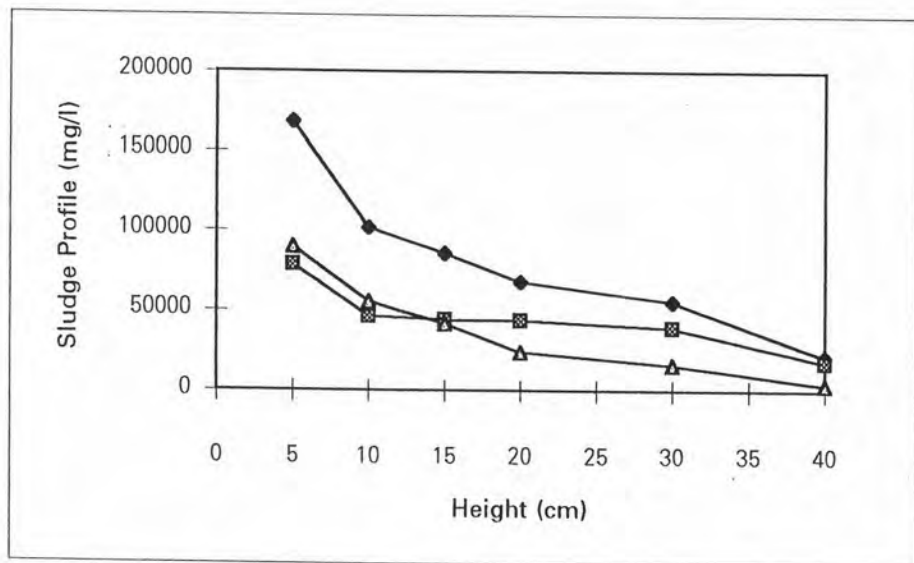
อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 8.93 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน



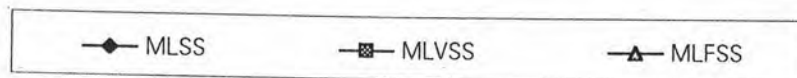
รูปที่ 3.11 ความเข้มข้นตะกอนแบบคทีเรียที่ระดับความสูงต่างๆ ในถังหมักที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ ( แสดงข้อมูลที่ภาวะคงตัวของแต่ละอัตราการป้อนสารอินทรีย์ )



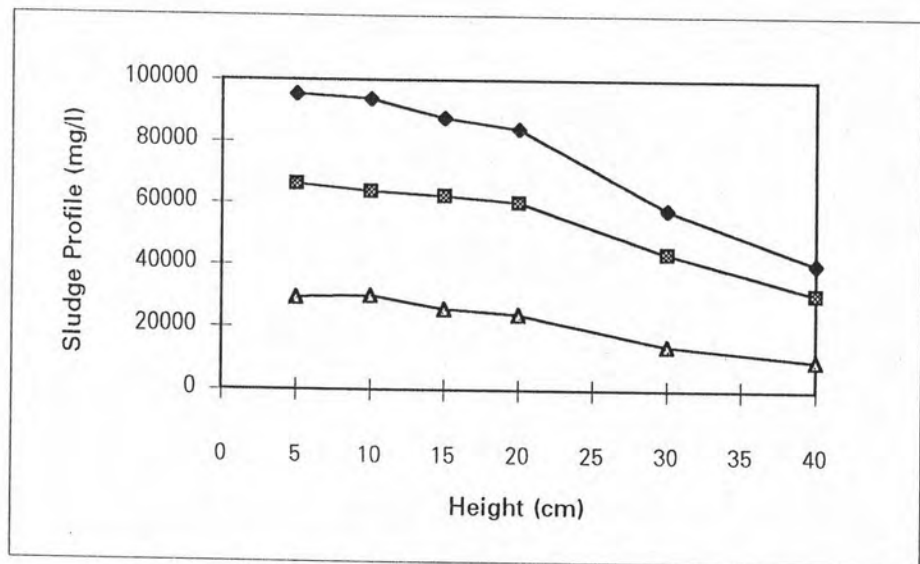
อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 12.55 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน



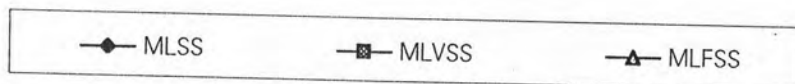
อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 17.06 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน



รูปที่ 3.11 ( ต่อ ) ความเข้มข้นตะกอนแบคทีเรียที่ระดับความสูงต่างๆ ในถังหมักที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ ( แสดงข้อมูลที่ภาวะคงตัวของแต่ละอัตราการป้อนสารอินทรีย์ )



อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 21.27 กิโลกรัมซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน

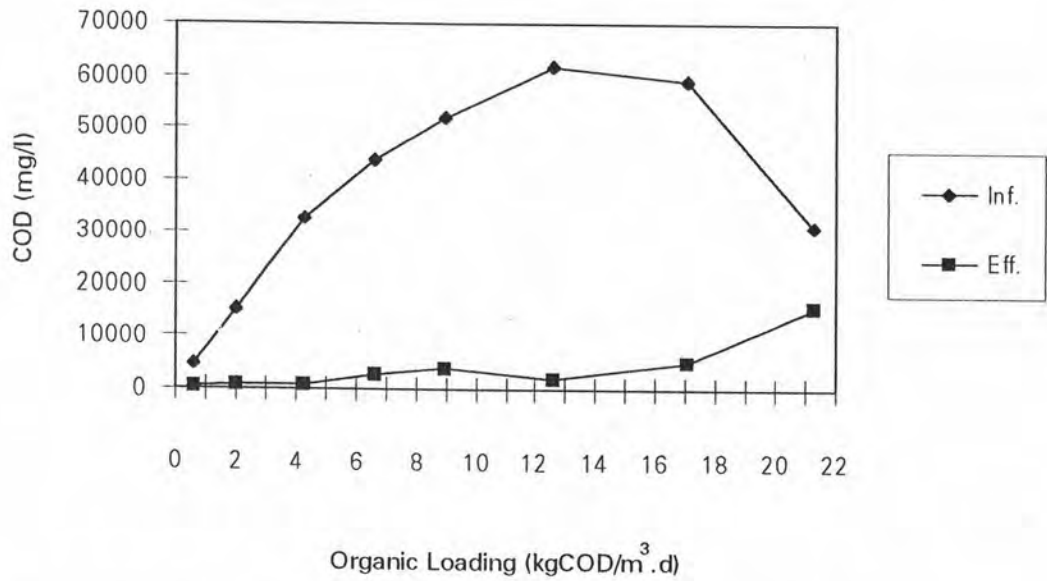


รูปที่ 3.11 ( ต่อ ) ความเข้มข้นตะกอนแบคทีเรียที่ระดับความสูงต่างๆ ในถังหมักที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ ( แสดงข้อมูลที่ภาวะคงตัวของแต่ละอัตราการป้อนสารอินทรีย์ )

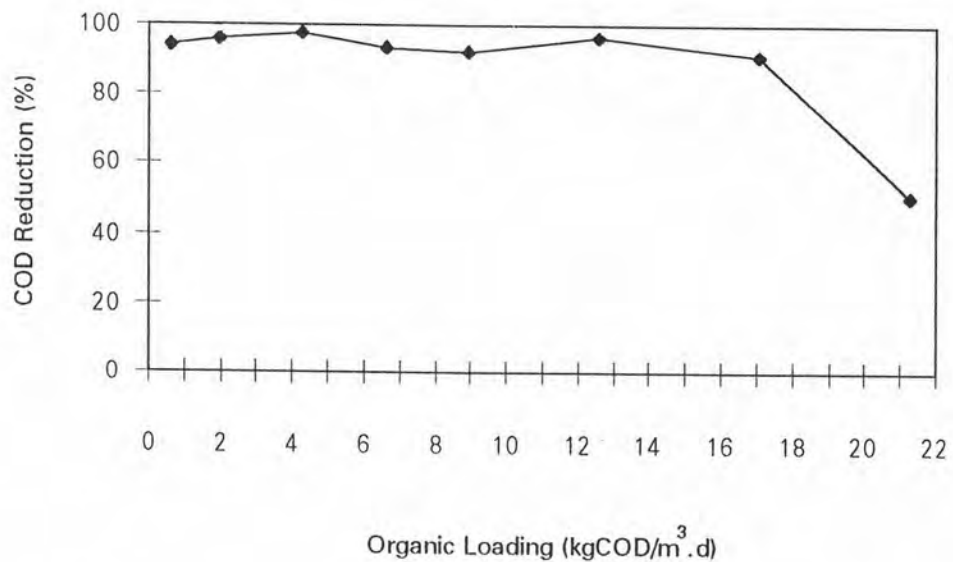


### 3.2.2.9 ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์

รูปที่ 3.12 แสดงค่า COD ของน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ ส่วนรูปที่ 3.13 แสดงประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์ในรูป COD ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ ซึ่งประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์สามารถพิจารณาได้จากค่า COD ที่ลดลง ( % COD Reduction ) ค่า COD ที่ลดลงสำหรับระบบนี้จะอยู่ในช่วง 91.40 - 97.49 % โดยที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 0.62 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์เท่ากับ 91.40 % เนื่องจากเป็นช่วงแรกของการทดลอง ดังนั้นแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มในระบบจึงต้องใช้ระยะเวลาในการปรับตัวให้คุ้นเคยกับภาวะการทดลองและยังมีปริมาณต่ำ แต่เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์เป็น 1.99 และ 4.26 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน พบว่าประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นเป็น 95.91 % และ 97.49 % ตามลำดับ ซึ่งเป็นประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์ที่สูงที่สุดในการทดลองนี้ เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดและกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนสามารถปรับตัวให้เข้ากับภาวะแวดล้อมในระบบได้แล้วและมีปริมาณมากขึ้น โดยที่อัตราการเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียมีมากกว่าอัตราการหลุดออกจากระบบ ( SS ประมาณ 180 - 200 มิลลิกรัม/ลิตร ) และเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์เป็น 6.61 และ 8.53 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน พบว่าประสิทธิภาพของระบบลดลงเป็น 93.59 % และ 92.45 % ตามลำดับ เนื่องจากมีกรดไขมันระเหยสะสมในระบบสูงขึ้น รวมทั้งมีปริมาณตะกอนแบคทีเรียหลุดออกจากระบบมากขึ้นด้วย ( SS ประมาณ 2,700 - 5,200 มิลลิกรัม/ลิตร ) ซึ่งประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์นั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณตะกอนแบคทีเรียในระบบ และเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์เป็น 12.55 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ปรากฏว่าประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์กลับเพิ่มขึ้นเป็น 96.72 % ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบนั้นมีกรดไขมันระเหยน้อยลง ( จาก 6,600 มิลลิกรัม/ลิตร เหลือเพียง 4,600 มิลลิกรัม/ลิตร ) ถึงแม้จะมีปริมาณสารอินทรีย์มากก็ตาม ซึ่งมีผลทำให้ปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำเสียที่ออกจากระบบลดลงด้วย จากผลการทดลองดังกล่าวจึงเป็นการยืนยันว่าปริมาณกรดไขมันระเหยมีผลต่อประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์ และเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์เป็น 17.06 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์ลดลงอีกเป็น 91.40 % เนื่องจากมีปริมาณ



รูปที่ 3.12 ค่า COD ของน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ



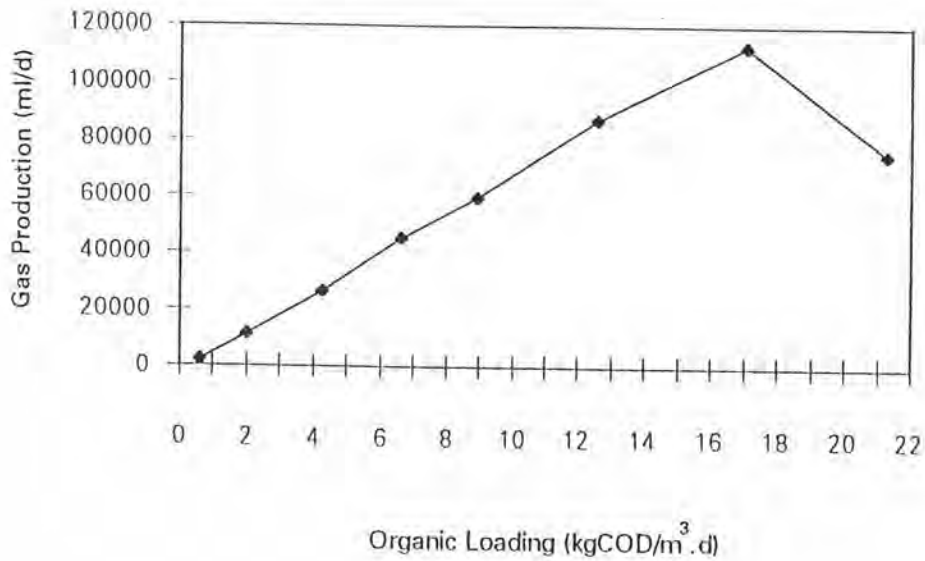
รูปที่ 3.13 ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์ในรูป COD ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ

กรดไขมันระเหยในน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบมากขึ้น ( 7,600 มิลลิกรัม/ลิตร ) และมีตะกอนแบคทีเรียหลุดออกจากระบบในปริมาณมากด้วย ( SS ประมาณ 5,900 มิลลิกรัม/ลิตร ) เนื่องจากอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของระบบสูงมาก ( 113,000 มิลลิลิตร/วัน ) ซึ่งมีผลทำให้แบคทีเรียฟุ้งกระจายและหลุดออกจากระบบได้ง่าย และเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์เป็น 21.27 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ซึ่งเป็นอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่สูงที่สุดในการทดลองนี้พบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์ลดลงอย่างมากคือเหลือเพียง 50.63 % เนื่องจากอัตราการไหลของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบสูงมาก ( 9.73 ลิตร/วัน ) ซึ่งมีผลทำให้ระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสียในระบบลดน้อยลงมาก ( 1.47 วัน ) รวมทั้งมีปริมาณกรดไขมันระเหยสะสมอยู่ในระบบสูงมาก ( 6,000 มิลลิกรัม/ลิตร ) และทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างลดต่ำลงคือเท่ากับ 6.26 ซึ่งทำให้เกิดภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและเป็นพิษต่อแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนทำให้แบคทีเรียกลุ่มนี้อ่อนแอตายลงและหลุดออกจากระบบในที่สุด โดยสังเกตได้จากอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจะต่ำลงอย่างมาก และสัดส่วนของมีเทนในก๊าซชีวภาพต่ำลงไปมากเช่นกัน ( จาก 76.60 % เหลือเพียง 49.05 % ) และสัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพสูงขึ้น ( จาก 24.13 % เพิ่มเป็น 40.99 % ) ซึ่งแสดงว่าภาวะในถังหมักที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์นี้ทำให้แบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดซึ่งมีบทบาทในการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เป็นกรดอินทรีย์และมีอัตราการเจริญเติบโตสูงกว่าแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนสามารถปรับตัวได้เร็วกว่าและทำงานในภาวะที่มีปริมาณกรดไขมันระเหยสูงเช่นนี้ได้ ในขณะที่แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนหลุดออกจากระบบ

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ของระบบนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญ 2 ประการ คือ ปริมาณแบคทีเรียในระบบและปริมาณกรดไขมันระเหยที่สะสมอยู่ในระบบ

### 3.2.2.10 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

ในการทดลองนี้จะทำการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในระบบโดยใช้เครื่องวัดก๊าซ ( Gas Meter ) และทำการเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวันด้วยหลอดสุญญากาศและนำไปหาองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ได้ โดยการนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี ( Gas Chromatography: GC ) ซึ่งพบว่าก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นประกอบด้วยก๊าซมีเทนเป็นส่วนใหญ่ และยังมีคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน ส่วนก๊าซอื่นๆ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ พบว่าเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ( Braun and Huss, 1982 )



รูปที่ 3.14 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ

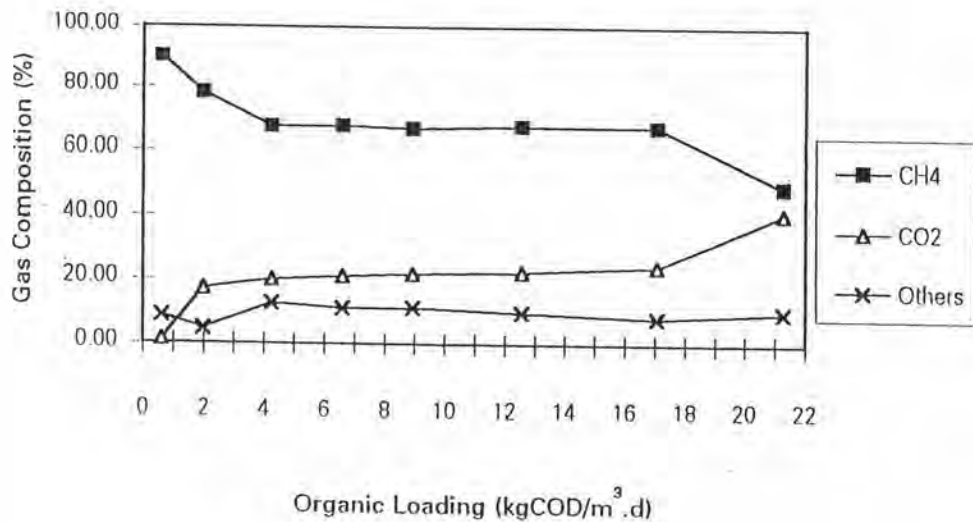
จากผลการทดลองพบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในระบบมีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ซึ่งแสดงปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ โดยที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 0.62 กิโลกรัมชีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน พบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในระบบมีปริมาณน้อย (ประมาณ 2,200 มิลลิลิตร/วัน) เนื่องจากเป็นช่วงเริ่มต้นเดินระบบ แบคทีเรียต้องใช้เวลาในการปรับตัวโดยเฉพาะแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนเพื่อให้คุ้นเคยกับภาวะในการทำงานของระบบ และปริมาณตะกอนแบคทีเรียในระบบยังมีจำนวนน้อยอยู่ หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์เป็น 1.99 ไปจนถึง 17.06 กิโลกรัมชีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน พบว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากระบบเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยที่อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจะเพิ่มเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่าในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 1.99 - 17.06 กิโลกรัมชีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน เป็นช่วงที่แบคทีเรียมีการเพิ่มจำนวนขึ้นเรื่อยๆอย่างรวดเร็ว ( ถึงแม้ว่าจะมีตะกอนแบคทีเรียบางส่วนหลุดออกจากระบบในปริมาณสูงก็ตามโดยดูจากค่า SS เพิ่มจาก 220 เป็น 5,900 มิลลิกรัม/ลิตร ) ทำให้มีปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมักเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มสูงขึ้น ประกอบกับมีปริมาณสาร

อินทรีย์และกรดไขมันระเหยในน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบมากขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ในขั้นตอนการสร้างกรดและสร้างก๊าซมีเทนได้ดีขึ้น จึงทำให้ได้ก๊าซชีวภาพเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย โดยที่อัตราการเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 0.62 - 17.06 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ค่อนข้างคงที่ ( โดยพิจารณาจากความชันของกราฟในรูปที่ 3.14 ) ทั้งนี้เนื่องจากในระบบมีปริมาณตะกอนแบคทีเรียเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์มากขึ้น อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดคือ 112,800 มิลลิลิตร/วัน ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 17.06 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน และเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์เป็น 21.27 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน พบว่า อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงอย่างมาก ( เหลือเพียง 75,050 มิลลิลิตร/วัน ) ทั้งนี้เนื่องจากระบบเริ่มเข้าสู่ภาวะเสถียรสมดุล เพราะมีการสะสมของกรดไขมันระเหยในระบบสูงขึ้น ( 6,000 มิลลิกรัม/ลิตร ) ซึ่งทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง ลดลง จนถึงระดับที่เป็นพิษต่อแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน ทำให้อัตราการหลุดออกจากระบบของแบคทีเรียเพิ่มมากขึ้น ( SS ประมาณ 4,300 มิลลิกรัม/ลิตร ) ปริมาณตะกอนแบคทีเรียในระบบลดต่ำลง ทำให้การทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนมีประสิทธิภาพลดลง ดังจะเห็นได้จากสัดส่วนของมีเทนในก๊าซชีวภาพลดลงจาก 67.60 % เหลือเพียง 49.05 % เท่านั้น

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพขึ้นกับปริมาณตะกอนแบคทีเรียในระบบโดยเฉพาะในช่วงเริ่มต้นการทำงานของระบบ แต่เมื่อแบคทีเรียสามารถปรับตัวให้เข้ากับภาวะในการทำงานของระบบได้แล้ว ( คือมีอัตราการเพิ่มจำนวนมากกว่าอัตราการหลุดออกจากระบบของแบคทีเรีย ) การเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบจะช่วยเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพได้ เนื่องจากเป็นการเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ซึ่งเป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพนั่นเอง

### 3.2.2.11 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้

องค์ประกอบหลักของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ส่วนใหญ่เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซมีเทน และมีก๊าซอื่น ๆ บ้างเล็กน้อย ซึ่งอัตราส่วนระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ : ก๊าซมีเทน สำหรับระบบหมักโดยทั่วไปประมาณ 2 : 3 ซึ่งปริมาณและสัดส่วนองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจะขึ้นอยู่กับปริมาณและประสิทธิภาพในการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนในระบบเป็นหลัก โดยที่ปริมาณของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนในระบบนั้นจะขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสียและปริมาณกรดไขมันระเหยในระบบเป็นสำคัญ รูปที่ 3.15 แสดงองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพซึ่งผลิตได้จากระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ จากผลการทดลองพบว่าสัดส่วนของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ในระบบมีค่าสูงสุดถึง 90.00 % ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์



รูปที่ 3.15 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพซึ่งผลิตได้จากระบบที่อัตราการผลิตอินทรีย์ต่างๆ

0.62 กิโลกรัมชีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน และมีค่าต่ำสุดถึง 49.05 % ที่อัตราการผลิตอินทรีย์ 21.27 กิโลกรัมชีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน สัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผลิตได้สูงสุดถึง 40.99 % ที่อัตราการผลิตอินทรีย์ 21.27 กิโลกรัมชีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน และต่ำสุดถึง 1.28 % ที่อัตราการผลิตอินทรีย์ 0.62 กิโลกรัมชีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการผลิตอินทรีย์เพิ่มขึ้น ที่อัตราการผลิตอินทรีย์ 0.62 กิโลกรัมชีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน พบว่าสัดส่วนของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพเท่ากับ 90.00 % และสัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพเท่ากับ 1.28 % ทั้งนี้เนื่องจากระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสียในระบบยาวนานเพียงพอ และมีปริมาณกรดไขมันระเหยในระบบต่ำ อีกทั้งปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบยังมีน้อย ทำให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่ำ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระหว่างปฏิบัติการสร้างกรดอินทรีย์และปฏิบัติการสร้างก๊าซมีเทนจะถูกนำไปใช้เพื่อการสร้างก๊าซมีเทนด้วย จึงทำให้มีสัดส่วนที่เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพต่ำ และเมื่อเพิ่มอัตราการผลิตอินทรีย์เป็น 1.99 กิโลกรัมชีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน พบว่าสัดส่วนของมีเทนในก๊าซชีวภาพน้อยลง แต่สัดส่วน

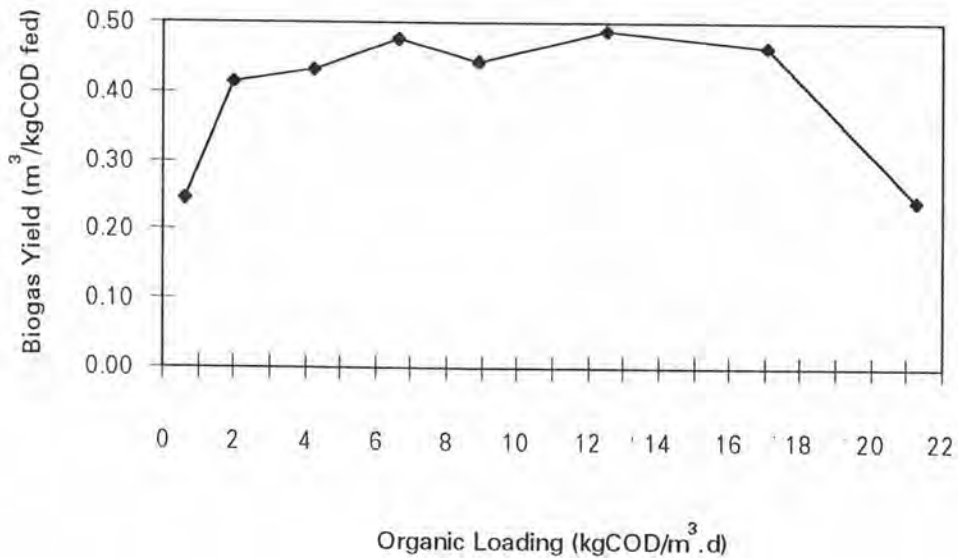
ของคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพมากขึ้นคือ 78.28 % และ 16.99 % ตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์สูงขึ้นทำให้ปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบมากขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาการสร้างกรดอินทรีย์มากขึ้น ดังนั้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผลิตได้จึงเพิ่มสูงขึ้นด้วย และที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 4.26 - 17.06 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน พบว่าสัดส่วนของมีเทนในก๊าซชีวภาพค่อนข้างคงที่โดยไม่ขึ้นกับอัตราการป้อนสารอินทรีย์คือประมาณ 66.87 % - 67.84 % ทั้งนี้เพราะว่าแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดและแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนสามารถปรับตัวให้เข้ากับภาวะการทำงานของระบบได้อย่างดี และเพิ่มจำนวนมากขึ้น รวมทั้งการทำงานของแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มนี้อยู่ในภาวะสมดุล ถึงแม้ว่าจะมีปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบมากขึ้นก็ตาม และเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์เป็น 21.27 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน พบว่าสัดส่วนของมีเทนในก๊าซชีวภาพลดต่ำลงอย่างมากคือเหลือเพียง 49.05% ในทางตรงกันข้ามสัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากคือเท่ากับ 40.99 % อธิบายได้ว่าเนื่องจากมีปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบมากขึ้นประกอบกับระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสียในระบบลดลงอย่างมาก ( 1.47 วัน ) ซึ่งมีผลทำให้การทำงานของแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มเสียสมดุล โดยที่แบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดซึ่งสามารถปรับตัวได้ดีกว่าแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนเริ่มเข้ามามีบทบาทในการย่อยสลายสารอินทรีย์เกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนการสร้างกรดมากขึ้น ทำให้มีการสะสมของกรดไขมันระเหยในระบบมากขึ้น ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างลดลง ซึ่งสภาพการทำงานของระบบในขณะนี้คล้ายกับในถังหมักกรด ทำให้มีผลไปลดอัตราการเจริญเติบโตและยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน ซึ่งมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการนำเอากรดอินทรีย์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ในขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทนลดลง รวมทั้งปริมาณตะกอนแบคทีเรียที่หลุดออกจากระบบมีปริมาณมาก จึงทำให้ระบบเข้าสู่ภาวะล้มเหลวได้

### 3.2.2.12 ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ

ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ ( Biogas Yield ) ในที่นี้จะแยกพิจารณาเป็น 3 แบบ คือ

( ก ) พิจารณาเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ

เป็นสิ่งที่บอกให้ทราบว่าหนึ่งหน่วยของสารอินทรีย์ที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบจะให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซชีวภาพมากน้อยเท่าใด รูปที่ 3.16 แสดงประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยพิจารณาเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ พบว่าที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 0.62 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพต่ำ



รูปที่ 3.16 ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยพิจารณาเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ

เนื่องจากอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่ำ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่แบคทีเรียอยู่ในช่วงของการปรับตัวให้เข้ากับภาวะการทำงานของระบบ ในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 1.99 -17.06 กิโลกรัมซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน พบว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นด้วย และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.4876 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัมซีไอดีที่ป้อนเข้าสู่ระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 12.55 กิโลกรัมซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มสูงขึ้น อัตราการไหลสูงขึ้น ทำให้ปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบมีปริมาณมากขึ้น รวมทั้งแบคทีเรียทั้งสองชนิดที่ทำหน้าที่ผลิตก๊าซชีวภาพจากปฏิกิริยการย่อยสลายสารอินทรีย์ คือแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรด ( ให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน ) และแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน ( ให้ก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ) ทำงานร่วมกันอยู่ในภาวะสมดุล ( สังเกตดูจากสัดส่วนของมีเทนในก๊าซชีวภาพค่อนข้างคงที่ ) และมีปริมาณของตะกอนแบคทีเรียมากขึ้นด้วย รวมทั้งช่วงนี้ระบบมีเสถียรภาพสูง คือมีปริมาณกรดไขมันระเหยสะสมในระบบต่ำ ถึงแม้ในช่วงนี้จะมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้น แต่ไม่เป็นสัดส่วนกับปริมาณสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพไม่คงที่ และที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 21.27 กิโลกรัมซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงอย่าง

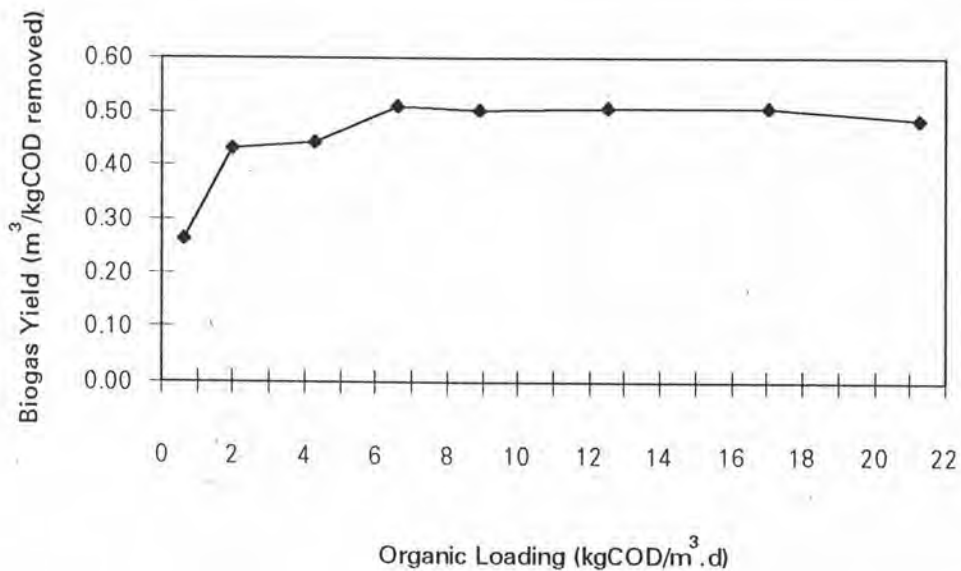


มาก ( จาก 0.4643 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัมซีไอดีที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 17.06 กิโลกรัมซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน เหลือเพียง 0.2430 ลูกบาศก์เมตร/ กิโลกรัมซีไอดีที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ) ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์นี้มีภาวะไม่เหมาะสมกับการทำงานของแบคทีเรียในระบบ กล่าวคือ ระบบมีอัตราการไหลสูง ทำให้ระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสียในระบบลดลงเหลือเพียง 1.47 วัน และมีปริมาณกรดไขมันระเหยสะสมอยู่ในระบบสูงมาก ( 6,000 มิลลิกรัม/ลิตร ) ซึ่งแสดงว่าสารอินทรีย์ส่วนใหญ่ถูกย่อยสลายไปเป็นกรดอินทรีย์มากกว่าถูกนำไปใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ รวมทั้งตะกอนแบคทีเรียที่หลุดออกจากระบบมีปริมาณสูง ( SS ประมาณ 4,300 มิลลิกรัม/ลิตร ) ซึ่งมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนลดลงอย่างมาก ( โดยดูจากสัดส่วนของมีเทนในก๊าซชีวภาพเหลือเพียง 49.05 % เท่านั้น )

จากผลการทดลองที่ได้กล่าวได้ว่า ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการทำงานของแบคทีเรียในถังหมักเป็นสำคัญ ซึ่งประสิทธิภาพในการทำงานของแบคทีเรียนั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณตะกอนแบคทีเรียในระบบ ระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสียในระบบ และปริมาณกรดไขมันระเหยที่สะสมอยู่ในระบบด้วย

(ข) พิจารณาเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด

เป็นสิ่งที่บอกให้ทราบว่าปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกใช้ไปหนึ่งหน่วยจะให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซชีวภาพเท่าใด รูปที่ 3.17 แสดงประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยพิจารณาเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ โดยที่ช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 0.62 - 4.26 กิโลกรัมซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจะมีแนวโน้มเหมือนกับประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพเมื่อพิจารณาเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ คือ ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 0.62 กิโลกรัมซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน จะมีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพต่ำ และจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์สูงขึ้น และในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 6.61 - 17.06 กิโลกรัมซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจะคงที่ ( อยู่ในช่วง 0.5013 - 0.5096 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัมซีไอดีที่ถูกกำจัด ) โดยที่ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพในช่วงนี้จะไม่ขึ้นกับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ ทั้งนี้อาจกล่าวได้ว่าในช่วงนี้ระบบมีเสถียรภาพสูง มีปริมาณกรดไขมันระเหยสะสมอยู่ในระบบต่ำ และโดยเฉพาะอย่างยิ่งการทำงานของแบคทีเรียทั้ง 2 กลุ่มอยู่ในภาวะสมดุล ( โดยดูจากสัดส่วนของมีเทนในก๊าซชีวภาพค่อนข้างคงที่ คือประมาณ 67 % ) และเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์เป็น 21.27 กิโลกรัมซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน พบว่าประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงเพียงเล็กน้อย ( เท่ากับ 0.4849 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัมซีไอดีที่ถูกกำจัด ) ทั้งๆ ที่ประสิทธิภาพในการ

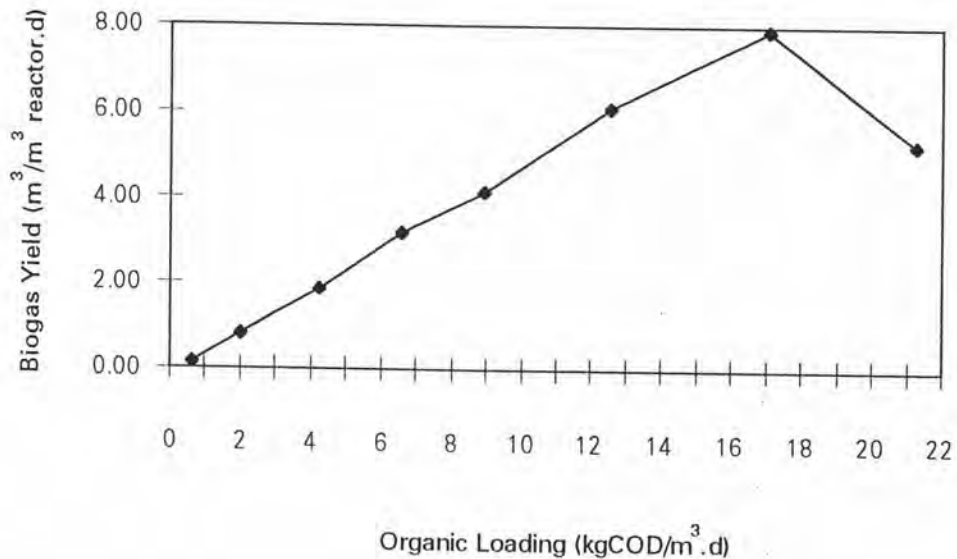


รูปที่ 3.17 ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยพิจารณาเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ

ลดปริมาณสารอินทรีย์ลดลงอย่างมาก ( เหลือเพียง 50.63 % ) แต่อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพไม่ได้ลดลงตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากมีปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบมากขึ้น รวมทั้งอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบสูงขึ้น ( 9.73 ลิตร/วัน ) ทำให้ระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสียในระบบลดลง จึงมีผลทำให้แบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดซึ่งสามารถปรับตัวได้ดีกว่าและมีอัตราการเจริญเติบโตเร็วกว่าแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนเข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างมากในการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ ซึ่งจะได้กรดอินทรีย์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยา ซึ่งสามารถสังเกตได้จากปริมาณกรดไขมันระเหยที่สะสมอยู่ในระบบเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน ( มากถึง 6,000 มิลลิกรัม/ลิตร ) และสัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพสูงขึ้นมาก ( ประมาณ 40.99 % )

(ค) พิจารณาเทียบกับปริมาตรของถังหมัก

กรณีนี้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพขึ้นอยู่กับอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบ ซึ่งมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงของอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ รูปที่ 3.18 แสดงประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยพิจารณาเทียบกับปริมาตรของถังหมักที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ จากผลการทดลองจะเห็นว่าประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ



รูปที่ 3.18 ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยพิจารณาเทียบกับปริมาตรของถังหมักที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ

มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจาก 0.62 - 17.06 กิโลกรัมซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน โดยพบว่าประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 7.891 ลูกบาศก์เมตร/ลูกบาศก์เมตรของถังหมัก-วัน ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 17.06 กิโลกรัมซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน และเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ขึ้นเป็น 21.27 กิโลกรัมซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน พบว่าประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจะลดต่ำลงมาก ( เหลือประมาณ 5.2483 ลูกบาศก์เมตร/ลูกบาศก์เมตรของถังหมัก-วัน ) ซึ่งสามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกันกับอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

### 3.2.2.13 ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทน

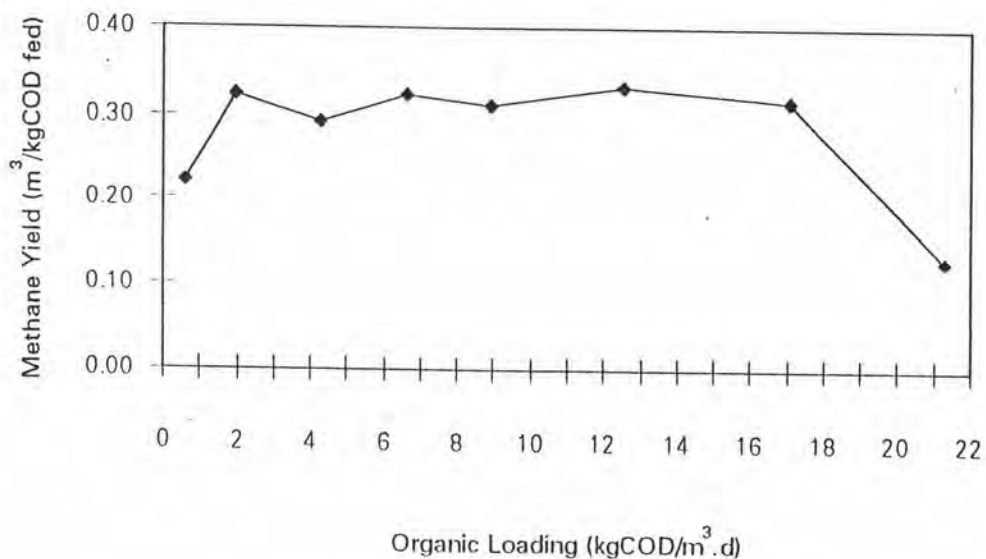
ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทน ( Methane Yield ) ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนในระบบเป็นสำคัญ โดยที่ประสิทธิภาพในการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนขึ้นกับปริมาณตะกอนแบคทีเรียในระบบ ระยะเวลาการกักเก็บน้ำเสียในระบบ และปริมาณกรดไขมันระเหยที่สะสมอยู่ในระบบด้วย ซึ่งในที่นี้จะแยกพิจารณาเป็น 3 กรณีเช่นกันคือ

## (ก) พิจารณาเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ

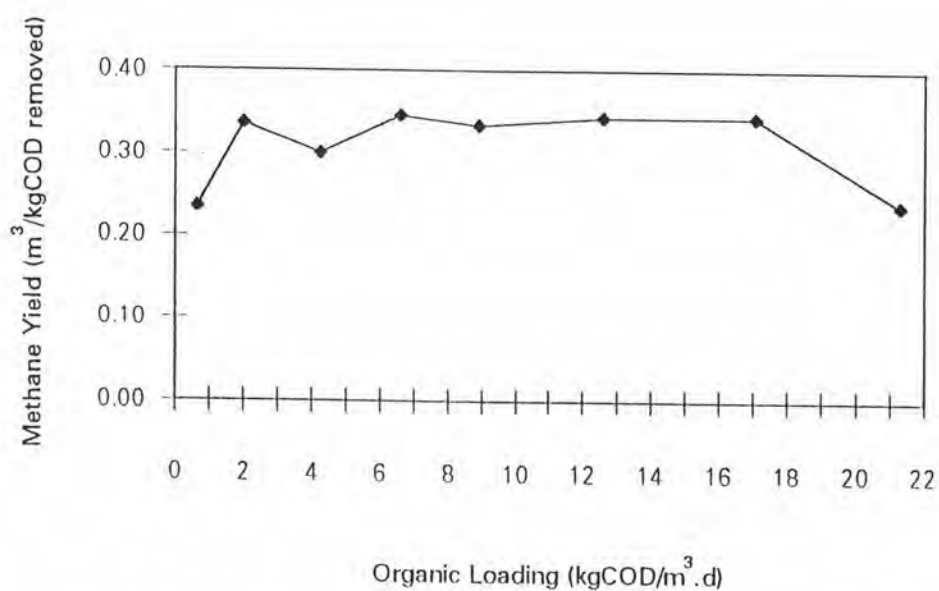
แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ รูปที่ 3.19 แสดงประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทน โดยพิจารณาเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ จากผลการทดลองพบว่าในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 0.62 - 17.06 กิโลกรัมซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนจะไม่คงที่ และไม่ขึ้นอยู่กับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกันกับประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพในหัวข้อ 3.2.2.12 (ก) และประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.3308 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัมซีไอดีที่ป้อนเข้าสู่ระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 17.06 กิโลกรัมซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน และเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์เป็น 21.27 กิโลกรัมซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน พบว่าประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนลดลงอย่างมาก ( เหลือเพียง 0.1282 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัมซีไอดีที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ) เนื่องจากอัตราการไหลสูงขึ้น ระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสียในระบบลดลง ปริมาณตะกอนแบคทีเรียในระบบลดลง รวมทั้งมีปริมาณกรดไขมันระเหยที่สะสมอยู่ในระบบสูงมาก ทำให้ภาวะการทำงานของระบบไม่เหมาะสมต่อการเจริญของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนลดลง ดังจะเห็นได้จากสัดส่วนของมีเทนในก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ลดลงจากประมาณ 67.60 % เหลือเพียง 49.05 % เท่านั้น

## (ข) พิจารณาเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด

รูปที่ 3.20 แสดงประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนโดยพิจารณาเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าแนวโน้มของประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 0.62 - 17.06 กิโลกรัมซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน เป็นเช่นเดียวกับประสิทธิภาพในหัวข้อ 3.2.2.12 (ข) ทั้งนี้เนื่องจากประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์ของระบบในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์นี้จะสูงมาก ( มากกว่า 90 % ) รวมทั้งสัดส่วนของมีเทนในก๊าซชีวภาพในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์นี้ค่อนข้างคงที่ ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.3453 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัมซีไอดีที่ถูกกำจัด ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 6.61 กิโลกรัมซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน และเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์เป็น 21.27 กิโลกรัมซีไอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนลดลงจาก 0.3436 เหลือเพียง 0.2374 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัมซีไอดีที่ถูกกำจัด ซึ่งสามารถอธิบายได้ ในทำนองเดียวกันกับประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนในหัวข้อ 3.2.2.12 (ก)



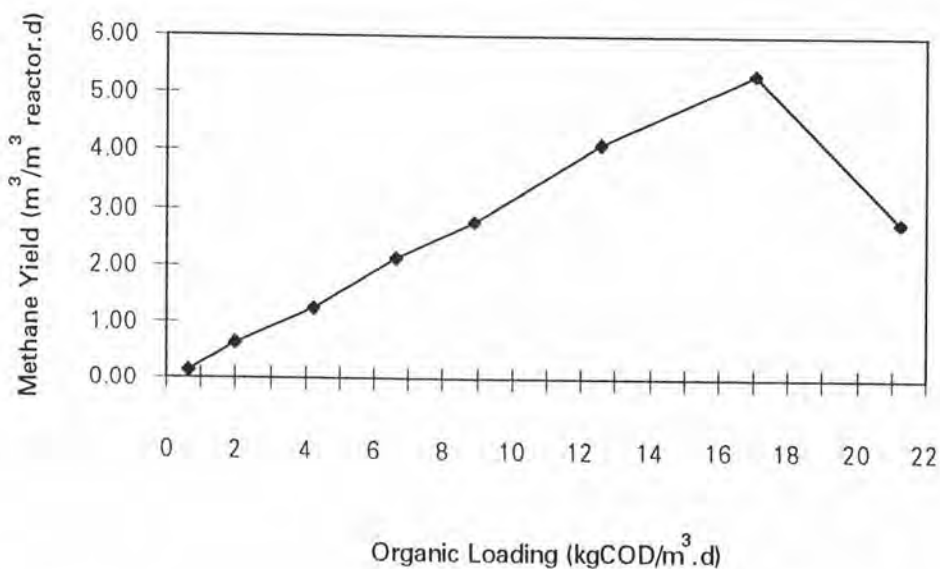
รูปที่ 3.19 ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนโดยพิจารณาเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ



รูปที่ 3.20 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนโดยพิจารณาเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ

(ค) พิจารณาเทียบกับปริมาณของถังหมัก

ในกรณีนี้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนจะขึ้นอยู่กับอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ รูปที่ 3.21 แสดงประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนโดยพิจารณาเทียบกับปริมาณของถังหมักที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ จากผลการทดลองพบว่าในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 0.62 - 17.06 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์สูงขึ้น ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนมีค่าสูงสุดเท่ากับ 5.3365 ลูกบาศก์เมตร/ลูกบาศก์เมตรของถังหมัก-วัน ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 17.06 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน และเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ให้สูงขึ้นเป็น 21.27 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน พบว่าประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนลดลงอย่างมาก ( จาก 5.3365 เหลือเพียง 2.7831 ลูกบาศก์เมตร/ลูกบาศก์เมตรของถังหมัก-วัน ) เนื่องจากอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงอย่างมาก ( จาก 112,814 มิลลิลิตร/วัน เหลือเพียง 75,050 มิลลิลิตร/วัน ) และสัดส่วนของมีเทนในก๊าซชีวภาพลดลงอย่างมากเช่นกัน ( จาก 67.60 % เหลือเพียง 49.05 % เท่านั้น ) ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกันกับอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ



รูปที่ 3.21 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนโดยพิจารณาเทียบกับปริมาณของถังหมักที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ

### 3.2.2.14 เสถียรภาพของระบบ

เสถียรภาพของระบบหมักขึ้นอยู่กับการรักษาสมดุลในการทำงานระหว่างแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มในระบบ คือแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดและแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน สิ่งที่แสดงว่าเสถียรภาพของระบบลดลงคือ มีปริมาณกรดไขมันระเหยที่สะสมอยู่ในระบบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และการลดลงของก๊าซผลิตภัณฑ์ ซึ่งสาเหตุที่ทำให้เสถียรภาพของระบบลดลงได้แก่ อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่สูงเกินไป (overloading) การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างกะทันหัน และการที่แบคทีเรียในระบบไม่คุ้นเคยกับสภาพของน้ำเสีย จากการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ทำให้อัตราเร็วในการที่ระบบจะเข้าสู่ภาวะคงตัวลดลงด้วย (Kroeker, Schutte, Sparling, and Lapp, 1979)

จากผลการทดลองพบว่าที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 0.62 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ซึ่งเป็นช่วงเริ่มต้นการทำงานของระบบ พบว่าเสถียรภาพของระบบยังต่ำอยู่ เนื่องจากแบคทีเรียในระบบต้องการเวลาในการปรับตัวให้เข้ากับภาวะในการทำงานของระบบ รวมทั้งปริมาณตะกอนแบคทีเรียในระบบมีน้อย จึงทำให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่ำ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ขึ้นเป็น 1.99 - 17.06 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน เสถียรภาพของระบบเพิ่มขึ้นโดยสังเกตได้จากอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่สูงขึ้นอย่างมาก ซึ่งจะแปรผันตรงกับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ และระบบมีความสามารถในการรักษาสมดุลความเป็นกรด-ด่างสูง เนื่องจากมีปริมาณกรดไขมันระเหยที่สะสมอยู่ในระบบต่ำมาก (26 - 341 มิลลิกรัม/ลิตร) ส่วนค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบจะเปลี่ยนแปลงไม่มากนักและยังคงอยู่ในช่วงที่เป็นกลาง ซึ่งเป็นภาวะที่เหมาะสมแก่การทำงานของแบคทีเรียในระบบ และสามารถสังเกตได้จากสัดส่วนของมีเทนในก๊าซชีวภาพซึ่งจะคงที่ประมาณ 67% โดยไม่ขึ้นกับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ และมีปริมาณตะกอนแบคทีเรียในระบบเพิ่มมากขึ้น ถึงแม้จะมีตะกอนแบคทีเรียหลุดออกจากระบบในปริมาณสูงก็ตาม (SS ประมาณ 2,731 - 5,933 มิลลิกรัม/ลิตร) เนื่องจากอัตราการเจริญของแบคทีเรียมากกว่าอัตราที่แบคทีเรียหลุดออกจากระบบ

สำหรับที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 21.27 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ซึ่งเป็นอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่สูงสุดของการทดลองนี้ เสถียรภาพของระบบหมักลดลงอย่างมากโดยพิจารณาจากปริมาณกรดไขมันระเหยที่สะสมอยู่ในระบบสูงมาก (ประมาณ 6,000 มิลลิกรัม/ลิตร) ซึ่งทำให้อัตราความเป็นกรด-ด่างของระบบลดลงอย่างมาก (เหลือเพียง 6.26) ซึ่งมีผลไปยับยั้งการเจริญและลดประสิทธิภาพการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน ซึ่งมีผลทำให้การทำงานของแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มเสียสมดุล โดยสามารถสังเกตได้จากสัดส่วนของมีเทนในก๊าซชีวภาพลดลง

อย่างมาก และประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจนดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งมีผลทำให้ระบบเข้าสู่ภาวะเสียสมดุลและล้มเหลวได้ในที่สุด

### 3.2.2.15 ภาวะที่เหมาะสมของระบบ

ภาวะที่เหมาะสมของระบบหมักจะพิจารณาจากประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์ของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบ รวมทั้งอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและสัดส่วนของมีเทนในก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ และเสถียรภาพของระบบหมักเป็นสำคัญ

#### 3.2.2.15.1 ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการลดปริมาณสารอินทรีย์

พิจารณาจากภาวะที่ให้ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์ที่สูงที่สุด คือที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 4.26 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ซึ่งมีอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบ 1.87 ลิตร/วัน ระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสียในระบบ 7.65 วัน และมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์เท่ากับ 97.49 % ให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ 26,280 มิลลิลิตร/วัน ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.4318 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัมซีโอดีที่ป้อนเข้าสู่ระบบ หรือ 0.4430 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด หรือ 1.8377 ลูกบาศก์เมตร/ลูกบาศก์เมตรของถังหมัก-วัน ส่วนประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.2915 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัมซีโอดีที่ป้อนเข้าสู่ระบบ หรือ 0.2990 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด หรือ 1.2405 ลูกบาศก์เมตร/ลูกบาศก์เมตรของถังหมัก-วัน

แต่อย่างไรก็ตาม จากระยะเวลาการกักเก็บน้ำเสียในระบบยาวนานถึง 7.65 วัน ซึ่งเป็นไปได้ยากในการนำไปใช้ในสภาพการทำงานจริง ดังนั้นในทางปฏิบัติ อาจจะใช้ช่วงอื่นๆ ที่มีระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสียในระบบสั้นกว่าแทน ซึ่งมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์ไม่แตกต่างกันมากนักเช่นที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 12.55 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน มีระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสียในระบบ 4.97 วัน มีประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณสารอินทรีย์ 96.72 % หรือที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 17.06 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ซึ่งมีระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสียในระบบ 3.48 วัน ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ 91.40 % ซึ่งอัตราการป้อนสารอินทรีย์ทั้งสองช่วงนี้ จะให้ประสิทธิภาพในการผลิตชีวภาพสูงกว่าด้วย



### 3.2.2.15.2 ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ

พิจารณาจากภาวะที่ให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดคือ ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 12.55 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ 0.4876 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัมซีโอดีที่ป้อนเข้าสู่ระบบ หรือ 0.5075 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด หรือ 6.0898 ลูกบาศก์เมตร/ลูกบาศก์เมตรของถังหมัก-วัน และมีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.3308 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัมซีโอดีที่ป้อนเข้าสู่ระบบ หรือ 0.3443 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด หรือ 4.1320 ลูกบาศก์เมตร/ลูกบาศก์เมตรของถังหมัก-วัน โดยมีสัดส่วนของมีเทนในก๊าซชีวภาพเท่ากับ 67.84% และมีสัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้เท่ากับ 22.28 %