



บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

ในการทดลองนี้ใช้เวลารวมทั้งสิ้น 384 วัน โดยเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ขึ้น จาก 0.25 ไปจนถึง 13.05 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ข้อมูลการทดลองที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ค. โดยการทดลองแต่ละอัตราการป้อนสารอินทรีย์ได้ทำการเก็บข้อมูลจนกระทั่งระบบหมักเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state) การพิจารณาว่าระบบหมักเข้าสู่สภาวะคงตัวเมื่อประสิทธิภาพการลดปริมาณสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพคงที่

ในการอภิปรายผลการทดลองนั้นจะพิจารณาเป็น 3 ช่วงด้วยกัน ดังนี้

ช่วงที่ 1 อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 0.25-2.03 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน

ช่วงที่ 2 อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 2.03-10.02 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน (หลังจากตะกอนแบคทีเรียเพิ่มลงในถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบี)

ช่วงที่ 3 อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 10.95-13.05 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน (หลังจากเพิ่มอัตราส่วนการรีไซเคิลจาก 1:1 เป็น 3:1)

เนื่องจากในช่วงเริ่มต้นการทดลอง คือ ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 0.25-2.03 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน นั้น ตะกอนแบคทีเรียในถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีไม่จับตัวเป็นตะกอนหนัก ทำให้มีตะกอนแบคทีเรียบางส่วนหลุดติดออกมาพร้อมกับน้ำกากส่าที่ออกจากระบบ (effluent) หรือที่เรียกว่า wash out ทำให้ปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมักลดลงตลอดเวลา จึงต้องทำการเติมตะกอนแบคทีเรียใหม่เข้าไป เพื่อให้ระบบทำงานต่อไปได้โดยควบคุมอัตราการป้อนสารอินทรีย์คงที่ที่ 2.03 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วันแล้ว จึงเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ขึ้นไปเป็น 2.98, 6.38, 8.20 และ 10.02 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ตามลำดับ ซึ่งที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 10.02 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน พบว่าในน้ำกากส่าที่ออกจากระบบมีปริมาณกรดไขมันระเหยสูง

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยครรชนี่ต่าง ๆ ของระบบหมัก ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ  
ภายใต้สภาวะคงตัว

Organic Loading		kg COD/m <sup>3</sup> .d	0.49	1.01	2.03	2.03*	2.90	6.30	8.20	10.02	10.95	13.05
Recycle Ratio			1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	3:1	3:1
Feed	COD	mg/l	9,250	18,000	39,960	41,870	60,110	61,120	66,240	58,100	63,500	60,660
	VFA	mg/l	98	180	350	350	450	617	545	650	680	650
	pH		5.00	4.6-4.7	4.70	4.70	4.70	4.40	4.60	4.80	4.80	4.70
	ALK	mg/l	510	670	1,880	1,670	2,380	1,850	1,880	2,780	2,600	1,480
	SS	mg/l	120-300	300	300-1,500	-	1,700-3,600	2,400	2,300	4,000	5,500	5,870
Time to react steady state		days	30	34	44	36	32	31	36	36	30	47
Anaerobic Filter	Average Flowrate	l/d	-	4.00	3.36	3.33	3.47	6.99	9.12	11.97	23.69	30.75
	Hydraulic Retention Time		-	1.7 d.	2.02 d.	2.04 d.	1.96 d.	23.3 h.	17.9 h.	13.6 h.	6.9 h.	5.3 h.
	Organic Loading	kg COD/m <sup>3</sup> .d	-	7.68	14.02	15.72	22.06	46.50	67.30	77.97	143.65	193.28
	Average Temperature	°C	-	55.54	55.54	55.54	55.54	55.54	55.54	55.54	55.52	55.52.5
	COD	mg/l	5,410	9,300	19,030	21,950	29,880	32,830	37,370	33,130	35,480	40,120
	VFA	mg/l	250	490	810	440	1,190	2,250	4,775	4,250	3,520	4,750
	pH		7.20	7.4-7.6	7.7-7.8	7.80	7.7-8.0	7.7-7.8	7.50	7.50	7.50	6.8-6.9
	ALK	mg/l	1,620	3,020	6,190	7,070	9,180	9,190	9,420	9,980	10,300	7,640
	SS	mg/l	200-600	540	1,300	1,700	2,000	1,400-2,200	2,000	2,570	5,560	4,180
	Gas Production	ml/d	-	11,000	8,860	11,590	13,440	24,340	23,450	24,720	34,020	37,615
	CO <sub>2</sub>	%	-	50.56	62.90	55.38	71.25	79.82	93.23	90.60	81.44	89.21
	CH <sub>4</sub> and others	%	-	49.44	37.10	44.62	28.75	20.18	6.77	9.40	18.56	10.79
	UASB	Average Flowrate	l/d	-	6.20	3.81	2.43	2.26	4.31	7.43	11.59	24.37
Hydraulic Retention Time		d	-	5.6	9.2	14.4	15.5	8.1	4.7	3.0	1.4	1.2
Organic Loading		kg COD/m <sup>3</sup> .d	-	1.65	2.07	1.52	1.93	4.04	7.93	10.97	24.70	32.12
Average Temperature		°C	-	55.53.52	55.54.52	55.54.53	55.54.53	55.54.50	55.54.53	55.54.53.5	56.55.52.5	55.54.52.5
COD		mg/l	4,690	8,120	16,780	22,350	26,360	29,360	34,120	30,490	33,810	36,770
VFA		mg/l	100	210	390	230	490	996	3,000	2,580	2,660	3,980
pH			7.3	7.6-7.7	7.9-8.0	8	8.2-8.3	8.0-8.1	8.1-8.3	8.2-8.3	8.3	7.7-7.9
ALK		mg/l	1,650	3,110	5,170	6,220	7,310	8,010	8,790	9,350	9,970	8,380
SS		mg/l	1,700-1,900	3,050	1,800	4,100	2,300	3,200	4,600	4,800	5,100	3,750
Gas Production		ml/d	1,390	2,200	670	930	1,890	7,200	13,560	19,670	25,380	27,320
CO <sub>2</sub>		%	22.38	24.67	22.77	29.19	29.37	29.78	28.97	34.51	36.58	37.37
CH <sub>4</sub> and others		%	77.62	75.33	77.23	70.81	70.63	70.22	71.03	65.49	63.42	62.63
Total Sludge		mg	691,470	445,070	206,620	705,160	824,760	1,118,720	1,320,720	1,341,150	1,257,130	1,014,570
Average Sludge		mg/l	19,750	12,720	5,900	20,140	23,560	31,960	37,730	38,310	35,910	28,980
Total Hydraulic Retention Time		d	-	7.3	11.2	16.4	17.5	9.1	5.4	3.6	1.7	1.4

หมายเหตุ \* อัตราการป้อนสารอินทรีย์หลังจากเติมตะกอนแบคทีเรียเพิ่ม

\*\* อัตราส่วนการรีไซเคิล หมายถึง อัตราส่วนของปริมาณน้ำกากส่า  
ที่ออกจากถังหมักยูเอสบีที่สูบกลับมาใช้ต่อปริมาณน้ำกากส่าที่ป้อนเข้า  
สู่ระบบ

\*\*\* เป็นก๊าซมีเทนเป็นส่วนใหญ่ ที่เหลือคือ ความชื้น และไฮโดรเจนซัลไฟด์

ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพของระบบหมักภายใต้สภาวะคงตัวที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ

Organic Loading		kg COD/m <sup>3</sup> .d	0.49	1.01	2.03	2.03	2.98	6.38	8.20	10.02	10.95	13.05
Recycle Ratio			1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	3:1	3:1
Anaerobic Filter	Biogas Yield :											
	m <sup>3</sup> /kg COD fed <sup>a</sup>	-	0.14511	0.05068	0.07067	0.06228	0.05199	0.03382	0.03058	0.02682	0.02031	
	m <sup>3</sup> /kg COD removed <sup>b</sup>	-	0.96091	0.27125	0.32908	0.36646	0.35905	0.25165	0.22870	0.64422	2.12457	
	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> reactor.d <sup>c</sup>	-	1.6176	1.0088	1.7044	1.9765	3.5794	3.4485	3.6353	5.0029	5.5316	
	Methane and others gas Yield :											
	m <sup>3</sup> /kg COD fed <sup>a</sup>	-	0.07174	0.01880	0.03153	0.01790	0.01049	0.00229	0.00287	0.00498	0.00219	
	m <sup>3</sup> /kg COD removed <sup>b</sup>	-	0.47508	0.10063	0.14684	0.10536	0.07246	0.01704	0.02150	0.11957	0.22924	
m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> reactor.d <sup>c</sup>	-	0.79976	0.37427	0.76051	0.56824	0.72233	0.23347	0.34172	0.92855	0.59686		
COD Removal	%	22.38	28.79	32.92	31.64	30.89	27.43	25.53	25.21	13.95	6.14	
UASB	Biogas Yield :											
	m <sup>3</sup> /kg COD fed <sup>a</sup>	-	0.02382	0.00856	0.02279	0.04322	0.07682	0.05313	0.04639	0.02553	0.02016	
	m <sup>3</sup> /kg COD removed <sup>b</sup>	-	0.81220	0.35504	-	1.74877	3.57311	3.40609	3.47184	5.38881	1.13890	
	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> reactor.d <sup>c</sup>	0.03971	0.06286	0.01914	0.02657	0.05400	0.20571	0.38743	0.56200	0.72514	0.78057	
	Methane and others gas Yield :											
	m <sup>3</sup> /kg COD fed <sup>a</sup>	-	0.01795	0.00661	0.01614	0.03053	0.05384	0.03774	0.03038	0.01619	0.01263	
	m <sup>3</sup> /kg COD removed <sup>b</sup>	-	0.61183	0.27420	-	1.23516	2.50904	2.41934	2.27371	3.41758	0.71329	
m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> reactor.d <sup>c</sup>	0.03083	0.04735	0.01478	0.01882	0.03814	0.14445	0.27519	0.36805	0.45989	0.48887		
COD Removal	%	13.31	12.69	11.82	-	11.78	10.57	8.70	7.96	4.71	8.35	
Total Biogas Yield	m <sup>3</sup> /kg COD fed <sup>a</sup>	-	0.16893	0.05924	0.09346	0.10550	0.12881	0.08695	0.07697	0.05235	0.04047	
	m <sup>3</sup> /kg COD removed <sup>b</sup>	-	1.77311	0.62630	-	2.11523	3.93216	3.65774	3.70055	6.03303	3.26347	
	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> reactor.d <sup>c</sup>	-	1.68050	1.02797	1.73098	2.03047	3.78513	3.83596	4.19729	5.72808	6.31219	
Total Methane and others gas Yield	m <sup>3</sup> /kg COD fed <sup>a</sup>	-	0.08969	0.02541	0.04767	0.04843	0.06443	0.04003	0.03326	0.02117	0.01482	
	m <sup>3</sup> /kg COD removed <sup>b</sup>	-	1.08690	0.37484	-	1.34051	2.58150	2.43638	2.29521	3.53715	0.94254	
	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> reactor.d <sup>c</sup>	-	0.84711	0.38906	0.77932	0.60638	0.86678	0.50866	0.70977	1.38843	1.08573	
Total COD Removal	%	49.30	54.89	58.01	46.82	56.15	51.96	48.49	47.52	46.76	39.38	

หมายเหตุ

- <sup>a</sup> คิดเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ของน้ำกากส่าที่เตรียมได้
- <sup>b</sup> คิดเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ลดลงของทั้งระบบ
- <sup>c</sup> คิดเทียบกับปริมาตรรวมของถังหมักกรดและถังหมักมีเทน (คิดเป็นปริมาตรรวม 41.8 ลิตร)

ดังนั้นเพื่อลดปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำอากาศที่ออกจากระบบ จึงทำการเพิ่มอัตราส่วนการรีไซเคิลจาก 1:1 เป็น 3:1 ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 10.95 และ 13.05 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ตารางที่ 4.1 แสดงค่าเฉลี่ยครุภัณฑ์ต่าง ๆ ของระบบหมักที่ทดลองที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ และตารางที่ 4.2 แสดงประสิทธิภาพของระบบหมักที่ทดลองที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ รายละเอียดของผลการทดลองจะได้กล่าวถึงต่อไป

#### 4.1 อัตราการป้อนสารอินทรีย์ และระยะเวลาการกักเก็บน้ำอากาศ

ในการทดลองจะทำการเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ขึ้นเรื่อย ๆ โดยคำนวณจากอัตราการป้อนสารอินทรีย์ของทั้งระบบเทียบกับปริมาณของถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีเป็นหลัก (ดังได้แสดงการคำนวณไว้ในภาคผนวก ข.) เมื่อพิจารณาอัตราการป้อนสารอินทรีย์ของแต่ละถังหมักพบว่า อัตราการป้อนสารอินทรีย์สำหรับถังหมักกรดแบบตัวกลางกรอง สูงกว่าอัตราการป้อนสารอินทรีย์สำหรับถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีประมาณ 4.2-11.5 เท่า การที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์แตกต่างกันเป็นช่วงค่อนข้างกว้างทั้ง ๆ ที่ปริมาณถังหมักกรดแบบตัวกลางกรองน้อยกว่าปริมาณถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีเพียง 5.2 เท่าเท่านั้นเป็นเพราะในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ของทั้งระบบ 2.03-6.38 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน อัตราการไหลของน้ำอากาศเข้าสู่ถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีต่ำกว่าอัตราการไหลเข้าสู่ถังหมักกรดแบบตัวกลางกรองมาก (อัตราการไหลเข้าสู่ถังหมักกรดแบบตัวกลางกรอง สูงกว่าถึง 4.7-8.5 เท่า) ในขณะที่ช่วงอื่น ๆ มีอัตราการไหลที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งการที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์สำหรับถังหมักกรดสูงกว่านี้ก็เพื่อจะทำให้แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนที่มีอัตราการเจริญเติบโตต่ำ ถูก wash out ออกจากถังหมักกรดไป

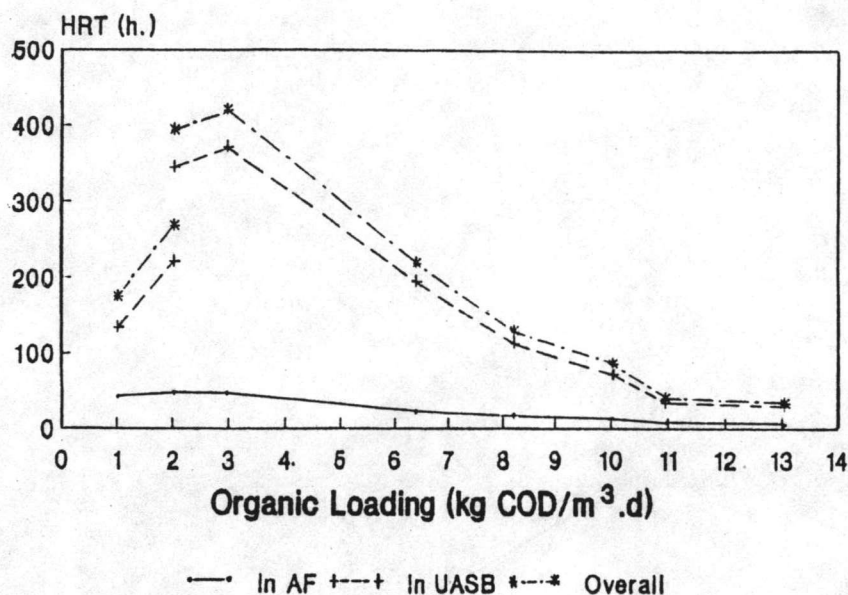
จากการทดลองจะเห็นได้ว่า ถังหมักกรดแบบตัวกลางกรอง สามารถรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ได้สูงถึง 46.50 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน จึงเริ่มมีการสะสมของกรดไขมันระเหยในน้ำอากาศที่ออกจากระบบเพิ่มสูงมากกว่า 2,500 มก./ล. ในขณะที่ถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ได้เพียง 4.04 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน เท่านั้น

พิจารณาระยะเวลากักเก็บน้ำอากาศในถังหมัก ในช่วงแรกของการทดลองได้เริ่มจากน้ำอากาศที่มีความเข้มข้นต่ำประมาณ 9,250 มก./ล. และเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ขึ้นโดย

การเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำากาส่าที่เข้าระบบเป็น 18,000, 39,600, 41,870 และ 60,110 มก./ล. ตามลำดับ โดยควบคุมอัตราการไหลเข้าสู่ถังหมักกรดแบบตัวกลางกรอง ลดลงเล็กน้อยจากประมาณ 4.0 ลิตร/วัน เป็น 3.5 ลิตร/วัน ดังนั้นระยะเวลาที่เก็บน้ำากาส่า ในถังหมักกรดแบบตัวกลางกรองในช่วงนี้จึงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 1.7 เป็น 2.0 วัน เมื่อทำการ เพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์โดยการเพิ่มอัตราการไหล ในขณะที่ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ในน้ำากาส่าคงที่ที่ประมาณ 60,000 มก./ล. ทำให้ระยะเวลาที่เก็บน้ำากาส่าลดลงจาก 1.96 วันเหลือเพียง 5.3 ชม. ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 13.05 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน

สำหรับถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีนั้น อัตราการไหลของน้ำากาส่าที่เข้าสู่ถังหมักถูก ควบคุมโดยระดับน้ำในถังตกตะกอน ซึ่งจะสัมพันธ์กับอัตราการไหลของน้ำากาส่าที่เข้าสู่ถังหมักกรด แบบตัวกลางกรองด้วย พบว่าอัตราการไหลเฉลี่ยในช่วงแรกลดลงจาก 6.20 เหลือ 2.26 ลิตร/วัน ซึ่งการลดลงนี้มีผลต่อระยะเวลาที่เก็บในถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีมากกว่าการลดลง ของอัตราการไหลในถังหมักกรดแบบตัวกลางกรอง เนื่องจากมีขนาดถังหมักใหญ่กว่าถังหมักกรด ถึงประมาณ 5 เท่า ดังนั้นระยะเวลาที่เก็บน้ำากาส่าในถังหมักจึงเพิ่มขึ้นอย่างมากจาก 5.6 วันเป็น 9.2, 14.4 และ 15.5 วันตามลำดับ ทำให้ระยะเวลาที่เก็บน้ำากาส่าของ ทั้งระบบเพิ่มขึ้นด้วยจาก 7.3 วัน เป็น 11.2, 16.4 และ 17.5 วัน ซึ่งเป็นระยะเวลาที่เก็บ ที่นานที่สุดในช่วงของการทดลอง และเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์โดยการเพิ่มอัตราการไหล พบว่าระยะเวลาที่เก็บน้ำากาส่าในถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีลดลงจาก 15.5 วันเหลือเพียง 1.2 วัน ทำให้ระยะเวลาที่เก็บน้ำากาส่าของระบบหมักลดลงอย่างมากด้วยจาก 17.5 วัน เหลือ 1.4 วัน ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 13.05 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ในที่สุด

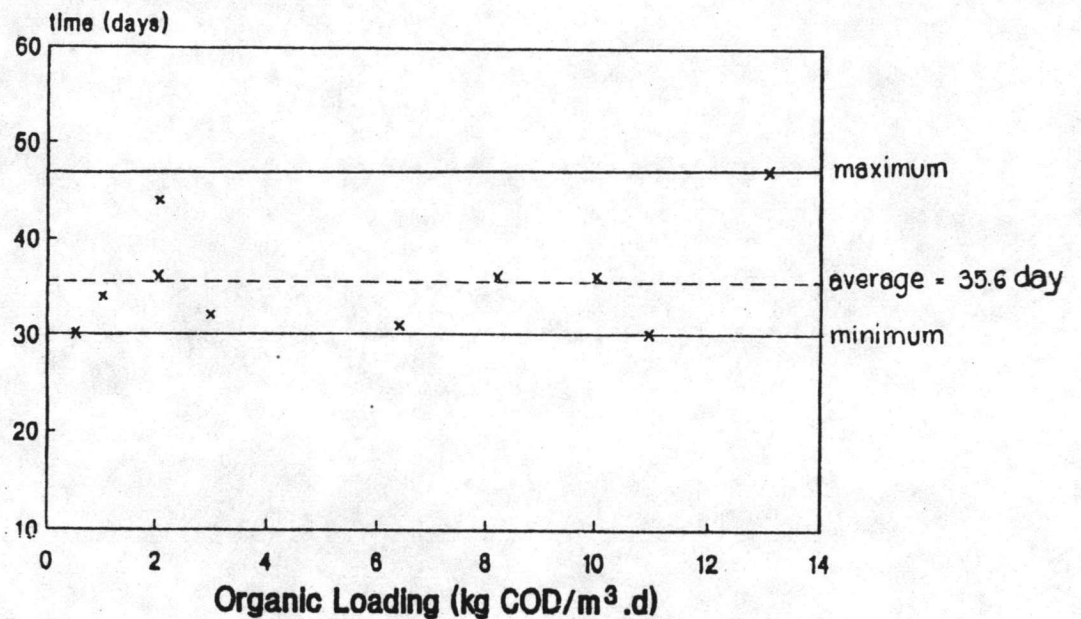
จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าระยะเวลาที่เก็บน้ำากาส่าในถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบี มีระยะเวลาในการกักเก็บนานกว่า ทั้งนี้เนื่องจากต้องการให้น้ำในถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีมี ปริมาณแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนอยู่สูง ซึ่งแบคทีเรียกลุ่มนี้มีอัตราการเติบโตต่ำ จึงต้องใช้เวลาด นานในการเพิ่มจำนวน ดังนั้นระยะเวลาที่เก็บน้ำากาส่าในระบบหมักนี้จึงขึ้นกับระยะเวลา ที่เก็บน้ำากาส่าในถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบี ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ระยะเวลาที่เก็บน้ำกากส่าในระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ

#### 4.2 ระยะเวลาที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว

ตลอดช่วงของการทดลองพบว่า ระยะเวลาที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state) ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ โดยเฉลี่ย 35.6 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวนี้มีค่าแปรเปลี่ยนมากขึ้นกับการที่ระบบถูกรบกวนโดยการเปลี่ยนแปลงสิ่งแวดล้อมเช่น อุณหภูมิ หรือความแตกต่างของความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบในแต่ละวัน ซึ่งถ้าหากว่ามีการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมเหล่านี้มาก แบคทีเรียในระบบต้องใช้เวลาในการปรับตัวยาวนานกว่าระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัว



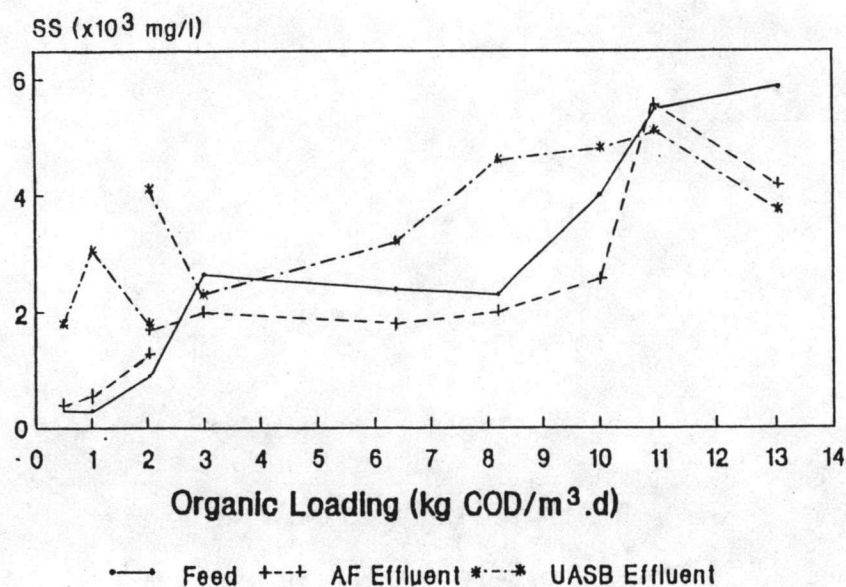
รูปที่ 4.2 ระยะเวลาที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ

#### 4.3 ปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมัก

ปริมาณแบคทีเรียมีความสำคัญมากต่อระบบหมักก๊าซชีวภาพ กล่าวคือ ยิ่งในระบบมีปริมาณแบคทีเรียมากเท่าใด ก็จะทำให้เกิดการย่อยสลายได้ดีขึ้น ผลที่ตามมา คือ ได้ผลิตภัณฑ์ก๊าซชีวภาพมากขึ้นด้วย

##### 4.3.1 ปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมักกรด

ปริมาณของตะกอนแบคทีเรียในถังหมักประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเมือกเกาะบนผิวตัวกลาง และส่วนที่จมตัวอยู่ที่ก้นถัง โดยในการทดลองนี้ไม่ได้ทำการวิเคราะห์วัดปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมักนี้ ทั้งนี้เนื่องจากต้องหยุดการทดลองเพื่อนำตะกอนแบคทีเรียทั้งหมดมาวิเคราะห์ ซึ่งจะทำให้แบคทีเรียบางส่วนตายลงไปได้ ปริมาณตะกอนแบคทีเรียอาจกล่าวได้ว่ามีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณตะกอนแบคทีเรียที่ล้นออกจากถังหมัก ดังนั้นจึงได้ทำ



รูปที่ 4.3 ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำกากส่าที่เข้าสู่ระบบและในน้ำกากส่าที่ออกจากระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ

การวิเคราะห์ในรูปปริมาณตะกอนแขวนลอย (SS) พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์สูงขึ้น ค่า SS ในน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักกรดแบบตัวกลางกรองเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 0.49-2.03 กก.ซีไอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ที่อัตราการไหล 3.3-4 ลิตร/วัน SS เพิ่มขึ้นอย่างมากจาก 200 เป็น 1,700 มก./ล. อธิบายได้ว่าในช่วงเริ่มต้นระบบนี้ เป็นช่วงของการสร้างเมือกแบคทีเรียบนตัวกลางที่ใส่ไว้ในถังหมัก และเป็นช่วงที่แบคทีเรียในระบบปรับตัวให้เข้ากับสภาวะการทำงานที่อุณหภูมิสูงและความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำกากส่าที่เพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้แบคทีเรียบางส่วนตายลงไป ทำให้ปริมาณตะกอนที่ฟุ้งกระจายมีอยู่มากและหลุดออกจากถังหมัก หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์จาก 2.03 ไปจนถึง 10.02 กก.ซีไอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน พบว่า SS ในน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักกรดค่อนข้างคงที่ประมาณ 2,000 มก./ล. ซึ่งในช่วงนี้ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (COD) ในน้ำกากส่าที่เข้าระบบคงที่ประมาณ 47,500 มก./ล. (ค่าเฉลี่ยระหว่างค่า COD ของน้ำกากส่าที่ออกจาก



ระบบและน้ำากาส้ำที่เข้าระบบ) ในขณะที่อัตราการใช้เพิ่มขึ้นจาก 3.47 ไปจนถึง 11.97 ลิตร/วัน นั้นแสดงว่าใน 2 ช่วงแรกนี้อัตราการใช้ไม่มีผลต่อปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมักกรด ปัจจุบันที่มีส่วนสำคัญต่อปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมัก คือ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำากาส้ำที่เข้าระบบ และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการรีไซเคิลจาก 1:1 เป็น 3:1 พบว่า SS ของน้ำากาส้ำที่ออกจากถังหมักกรดเพิ่มขึ้นจาก 2,500 เป็น 5,500 มก./ล. เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนการรีไซเคิลเป็นการเปลี่ยนสภาวะในการทำงาน ทำให้แบคทีเรียต้องมีการปรับตัวอีกครั้ง ประกอบกับอัตราการใช้ที่เพิ่มขึ้นจาก 11.97 เป็น 23.69 ลิตร/วัน และอัตราการใช้สารอินทรีย์สำหรับถังหมักกรดเพิ่มขึ้นอย่างมากจาก 77.97 เป็น 143.65 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน จึงทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของตะกอนแบคทีเรียในถังหมัก อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มอัตราการใช้สารอินทรีย์ขึ้นอีกเป็น 193.28 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน พบว่า SS ลดลงเหลือ 4,180 มก./ล.

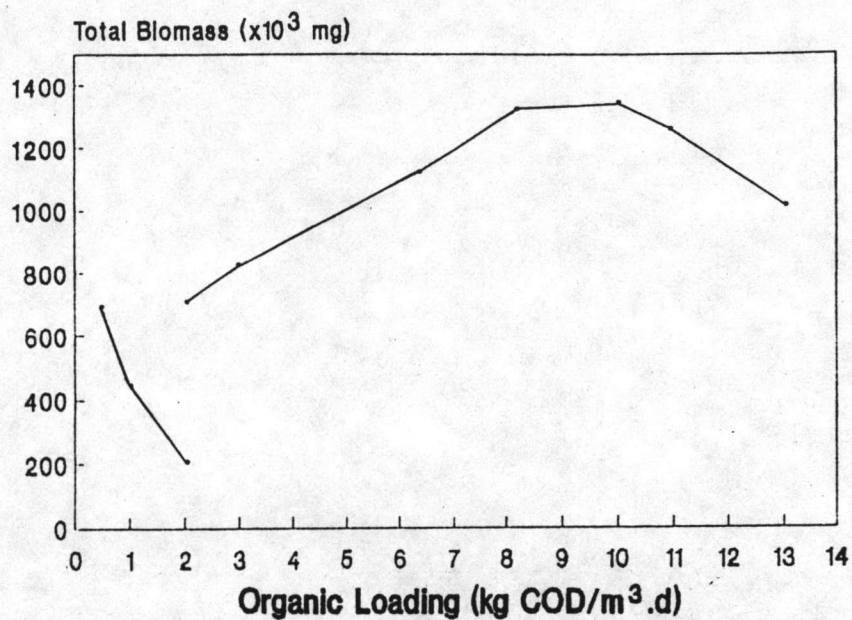
ถึงแม้ว่าจะมีตะกอนแบคทีเรียหลุดออกจากถังหมักไปเป็นปริมาณมาก แต่พบว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (คิดเป็น มล./วัน) จากถังหมักกรดแบบตัวกลางทรงมิได้ลดลงเลย นั้นแสดงว่าระบบมีประสิทธิภาพในการเพิ่มจำนวนแบคทีเรียสูง เมื่ออัตราการใช้สารอินทรีย์สูงขึ้น จากข้อมูลเหล่านี้สามารถกล่าวได้ว่า ถังหมักแบบตัวกลางทรงนี้ มีประสิทธิภาพในการกักเก็บตะกอนแบคทีเรียในถังหมักสูง และแบคทีเรียในระบบนั้นสามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาวะในการทำงานที่มีการเปลี่ยนแปลงได้เป็นอย่างดี

#### 4.3.2 ปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมักมีเทน

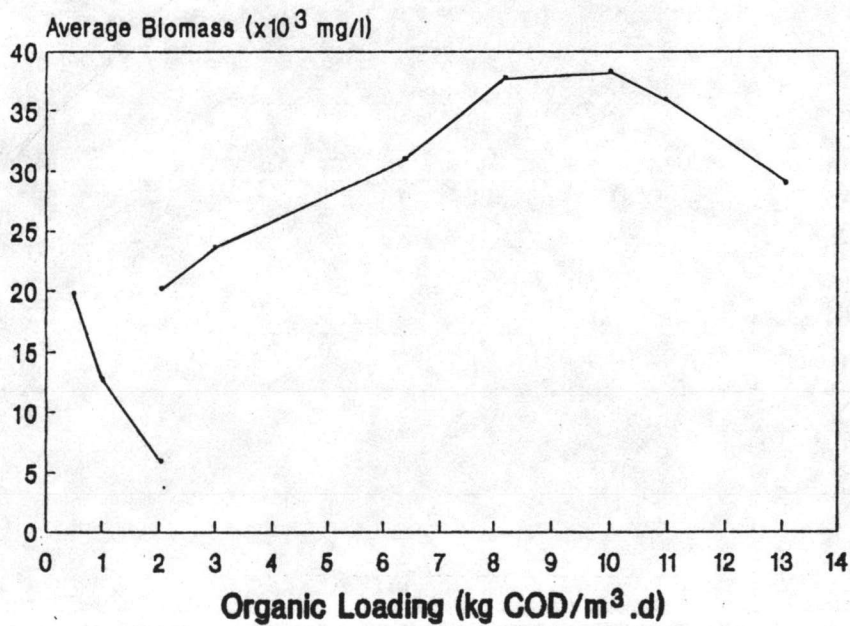
ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณตะกอนแบคทีเรียทั้งหมด และที่ระดับต่าง ๆ ในถังหมักยูเอเอสบีที่อัตราการใช้สารอินทรีย์ต่าง ๆ รูปที่ 4.4 และ 4.5 แสดงปริมาณตะกอนในถังหมักมีเทนที่อัตราการใช้สารอินทรีย์ต่าง ๆ ในช่วงเริ่มต้นที่อัตราการใช้สารอินทรีย์ 0.49-2.03 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน พบว่าปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมักลดลงเรื่อย ๆ ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงนี้เป็นช่วงที่แบคทีเรียปรับตัวให้เข้ากับสภาวะในการทำงานและสภาพของน้ำากาส้ำที่ป้อน ซึ่งเห็นได้ว่า ในช่วงนี้ค่า SS ของน้ำที่ออกจากถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีค่อนข้างสูง (SS ประมาณ 1,700-3,000 มก./ล.) ทั้งนี้เนื่องจากตะกอนแบคทีเรียที่นำมาใช้เป็นตะกอนเก่า เก็บไว้นาน จึงเป็นแบคทีเรียที่ตายแล้วส่วนใหญ่ ในช่วงนี้อัตราการเติบโตของแบคทีเรีย

ตารางที่ 4.3 ปริมาณตะกอนแบบคทีเรียกับความสูงของถังหมักที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์  
ต่าง ๆ (แสดงข้อมูลที่สภาวะคงตัวของแต่ละอัตราการป้อนสารอินทรีย์)

Height cm.	Organic Loading (kg COD/m .d)																			
	0.49		1.01		2.03				2.98		6.38		8.20		10.02 (R=1:1)		10.95 (R=3:1)		13.05 (R=3:1)	
	15 days	48 days	63 days	84 days	104 days	137 days	151 days	173 days	208 days	230 days	262 days	280 days	294 days	313 days	330 days	349 days	357 days	383 days		
135	870	490	1,015	790	840	6,400	3,650	3,150	2,480	4,810	4,300	3,760	4,540	5,460	4,740	5,370	4,910	3,580		
130	1,050	390	685	790	820	6,350	3,510	3,510	2,770	5,820	4,930	3,700	4,410	5,770	4,360	5,070	4,840	3,700		
120	910	410	910	735	860	6,570	3,670	3,340	3,040	5,400	4,790	3,900	4,860	5,620	4,840	4,790	5,100	3,810		
110	1,210	1,050	810	645	1,063	6,740	3,650	3,070	2,880	5,150	4,830	4,170	4,950	5,610	5,000	4,220	5,010	3,710		
100	1,270	470	890	730	845	6,380	3,320	3,420	3,420	4,980	4,640	4,030	4,140	5,520	4,960	4,060	5,030	3,720		
90	1,170	720	980	705	970	6,290	3,500	3,100	3,340	5,670	5,090	4,000	4,360	6,000	5,080	4,380	5,150	4,180		
80	1,030	410	990	675	855	6,480	3,590	2,850	3,190	5,860	4,680	4,070	4,920	5,750	5,000	4,400	4,920	3,880		
70	1,040	500	1,090	750	965	6,550	3,640	3,100	2,990	6,370	5,290	4,140	4,660	6,380	5,440	4,620	4,860	4,150		
60	1,110	560	1,015	720	1,025	6,870	3,730	3,280	3,420	11,010	5,360	4,420	4,320	5,820	5,200	4,500	5,080	4,010		
50	820	450	1,000	755	930	6,570	4,860	3,450	50,760	106,640	5,350	4,390	4,660	6,000	5,410	4,280	4,360	4,070		
40	1,040	340	1,110	695	790	42,520	48,560	88,420	88,180	112,540	8,840	4,790	5,580	6,120	4,920	4,560	4,360	4,010		
30	9,340	820	1,405	740	800	35,740	51,240	69,480	96,980	111,840	157,140	35,800	22,260	9,070	5,100	4,160	4,540	3,820		
25	5,540	880	1,350	930	1,125	31,260	27,020	92,620	91,720	110,980	205,800	246,800	321,160	197,440	5,120	4,640	4,700	4,040		
20	11,520	690	1,500	1,085	1,080	48,400	76,480	86,020	84,200	119,000	223,860	256,540	221,440	219,620	5,140	5,120	4,580	47,480		
15	97,580	21,690	17,230	2,390	1,320	63,100	38,080	52,280	102,520	140,540	199,720	244,180	221,520	212,340	276,740	128,320	29,540	230,380		
10	264,320	271,690	152,580	9,940	3,930	100,960	158,800	87,680	133,200	122,540	188,780	235,140	233,100	240,320	275,820	252,640	246,600	247,960		
5	192,860	237,880	170,020	119,910	117,320	76,320	133,840	108,180	162,360	234,240	197,760	236,420	228,400	232,120	324,120	276,100	290,400	265,000		
<b>Total Weight mg</b>	691,500	649,000	445,000	210,800	202,500	657,100	753,200	824,800	1,118,700	1,403,900	1,237,500	1,216,700	1,465,600	1,358,700	1,155,600	922,600	845,100	1,014,600		
<b>Average SS mg/l</b>	19,800	18,500	12,700	6,100	5,800	18,800	21,500	23,600	32,000	40,100	35,400	34,800	41,900	38,800	33,000	26,400	24,100	29,000		



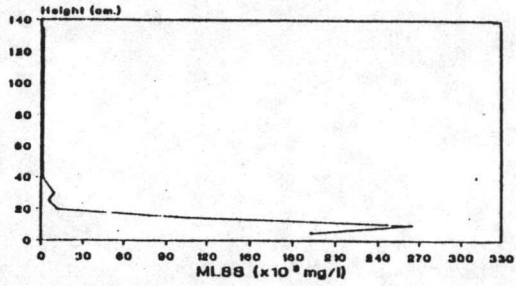
รูปที่ 4.4 ปริมาณตะกอนแบคทีเรียทั้งหมดในถังหมักมีเทนแบบ UASB ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ



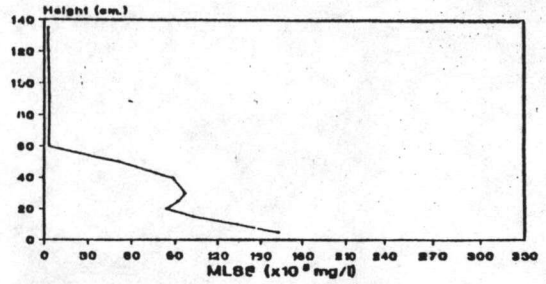
รูปที่ 4.5 ปริมาณตะกอนแบคทีเรียโดยเฉลี่ยในถังหมักมีเทนแบบ UASB ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ

ต่ำกว่าอัตราการที่ตะกอนแบคทีเรียหลุดออกจากถังหมัก จึงจำเป็นต้องเติมตะกอนแบคทีเรียลงไปอีกจำนวนหนึ่งเพื่อรักษาประสิทธิภาพในการทำงาน หลังจากเติมตะกอนแบคทีเรียลงไปใหม่แล้วพบว่า SS เพิ่มขึ้นจากประมาณ 2,000 เป็น 4,100 มก./ล. อธิบายได้ในลักษณะเดียวกับช่วงแรก คือ ตะกอนยังไม่จับตัวเป็นตะกอนหนัก แต่หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ขึ้นจาก 2.98 ไปจนถึง 10.02 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมักเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จาก 820,000 ไปจนถึง 1,340,000 มก./ล. (หรือมีปริมาณตะกอนโดยเฉลี่ยเพิ่มจาก 20,140 ไปถึง 33,310 มก./ล. ตามลำดับ) ซึ่งเป็นปริมาณตะกอนที่สูงที่สุดในช่วงการทดลอง ถึงแม้ว่าปริมาณตะกอนที่หลุดออกจากถังหมักจะเพิ่มมากกว่าช่วงแรกก็ตาม (SS ประมาณ 2,300 - 4,800 มก./ล.) นั้นแสดงว่าในช่วงนี้อัตราการเพิ่มปริมาณของแบคทีเรียในถังหมักสูงกว่าปริมาณแบคทีเรียที่ถูก การหลุดออกไป ออกไป จึงทำให้ปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมักเพิ่มขึ้นตลอดเวลา และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการรีไซเคิลจาก 1:1 เป็น 3:1 ซึ่งเป็นผลให้อัตราการไหลเข้าสู่ถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีเพิ่มขึ้นจาก 11.69 เป็น 24.37 ลิตร/วัน และอัตราการป้อนสารอินทรีย์สำหรับถังหมักมีเทนเพิ่มขึ้นจาก 10.97 เป็น 24.70 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมักลดลง และ SS ในน้ำากสาที่ออกจากถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีปริมาณกรดไขมันระเหยสะสมสูงกว่า 2,500 มก./ล. ทำให้แบคทีเรียบางส่วนอ่อนแอและตายลง ประกอบกับอัตราการไหลและปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น ทำให้มีตะกอนแบคทีเรียฟุ้งกระจายและหลุดออกจากถังหมักมากขึ้น และเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์สำหรับถังหมักมีเทนเป็น 32.12 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ปริมาณตะกอนลดลงอีก เนื่องมาจากมีปริมาณกรดไขมันระเหยสะสมสูงซึ่งเป็นพิษต่อแบคทีเรียในถังหมักมีเทน ประกอบกับอัตราการไหลที่สูงขึ้น ทำให้ในช่วงนี้อัตราการเติบโตของแบคทีเรียน้อยกว่าอัตราการที่แบคทีเรียหลุดออกจากถังหมัก

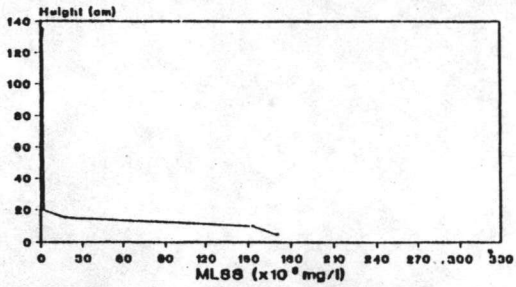
พิจารณาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของชั้นตะกอนในถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบี ดังแสดงในรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่ามีปริมาณตะกอนเข้มข้นมากที่บริเวณก้นถังหมัก ในช่วงความสูงจากก้นถังหมัก 5-50 ซม. และลดลงเมื่อความสูงของถังหมักเพิ่มขึ้น ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซส่วนใหญ่จะเกิดในช่วงตะกอนเข้มข้นนี้ ความสูงของชั้นตะกอนเข้มข้นนี้มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไป ในช่วงแรกที่เติมตะกอนแบคทีเรียลงไปนั้น (ทั้งใน



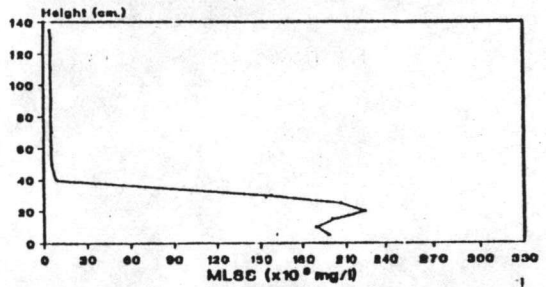
Organic Loading 0.49 kg COD/m<sup>3</sup>.d



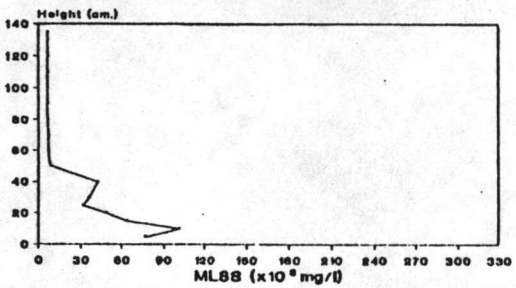
Organic Loading 6.38 kg COD/m<sup>3</sup>.d



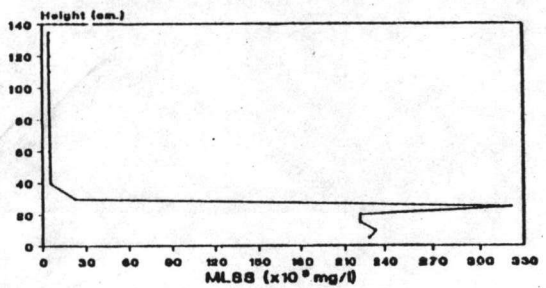
Organic Loading 1.01 kg COD/m<sup>3</sup>.d



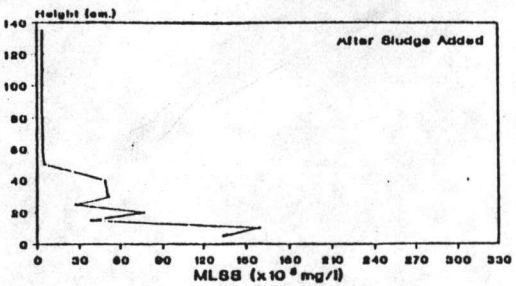
Organic Loading 8.20 kg COD/m<sup>3</sup>.d



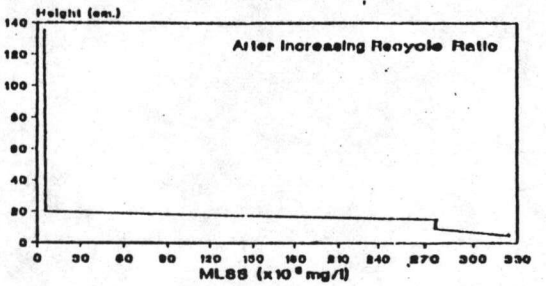
Organic Loading 2.03 kg COD/m<sup>3</sup>.d



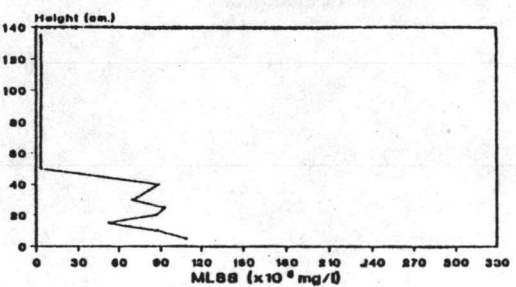
Organic Loading 10.02 kg COD/m<sup>3</sup>.d



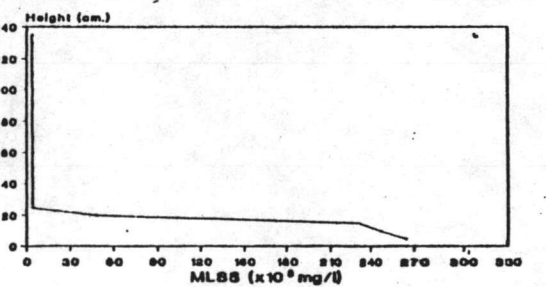
Organic Loading 2.03 kg COD/m<sup>3</sup>.d



Organic Loading 10.95 kg COD/m<sup>3</sup>.d



Organic Loading 2.98 kg COD/m<sup>3</sup>.d



Organic Loading 13.05 kg COD/m<sup>3</sup>.d

รูปที่ 4.6 ปริมาณตะกอนในถังหมักยูเอเอสกับความสูงของถังหมักที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ (แสดงข้อมูลที่สภาวะคงตัวของแต่ละอัตราการป้อนสารอินทรีย์)

ช่วงเริ่มต้นระบบและที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 2.03 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน) ลักษณะตะกอนมีสีดำ, ร่วน ยังไม่พบตะกอนเม็ด เป็นตะกอนเบา ฟุ้งกระจาย ความสูงของชั้นตะกอนเข้มข้นในช่วงนี้ประมาณ 30 ซม. เมื่อเวลาผ่านไปเนื่องจากมีปริมาณตะกอนหลุดออกจากถังหมักไปเป็นจำนวนมาก เหลือปริมาณตะกอนเพียง 30 % ของปริมาณเมื่อเริ่มต้นเดินระบบ ทำให้ความสูงของชั้นตะกอนเข้มข้นลดลงเหลือเพียง 5 ซม. เท่านั้น คิดเป็นปริมาณตะกอนเฉลี่ยในถังหมัก 5,800 มก./ล. จึงทำการเติมตะกอนใหม่ลงไป ความสูงของชั้นตะกอนเข้มข้นเมื่อเริ่มเติมนี้เป็น 40 ซม. หลังจากนั้นพบว่าตะกอนแบคทีเรียมีการเติบโตเพิ่มจำนวนขึ้นตลอดเวลา ทำให้ความเข้มข้นของตะกอนแบคทีเรียเพิ่มขึ้น แต่ลักษณะตะกอนยังเป็นตะกอนเบาที่ฟุ้งกระจาย จึงทำให้ความสูงของชั้นตะกอนเข้มข้นสูงถึง 50 ซม. คิดเป็นปริมาณตะกอนเฉลี่ยในถังหมัก 40,100 มก./ล. ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 8.20 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน และที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์นี้เริ่มพบว่า ลักษณะตะกอนทั้งในส่วนชั้นตะกอนเข้มข้น และที่หลุดออกจากถังหมักมีตะกอนเม็ดปนอยู่ด้วย ขนาดเม็ดตะกอนที่ได้จากการวัดโดยประมาณเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มม. เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ขึ้นไปอีก พบว่าตะกอนมีการจับตัวดีขึ้น ความสูงของชั้นตะกอนเข้มข้นลดลงเหลือ 25 ซม. ในขณะที่ความเข้มข้นของตะกอนสูงขึ้น และมีค่าสูงสุด 41,900 มก./ล. ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 10.02 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการรีไซเคิลซึ่งเป็นผลให้อัตราการไหลของน้ำากาส่งขึ้น พบว่าความสูงของชั้นตะกอนเข้มข้นลดลงเหลือ 15 ซม. ความเข้มข้นของตะกอนในถังหมักโดยเฉลี่ยลดลงเหลือประมาณ 25,000-29,000 มก./ล. เนื่องจากตะกอนบางส่วนหลุดออกไปจากถังหมัก

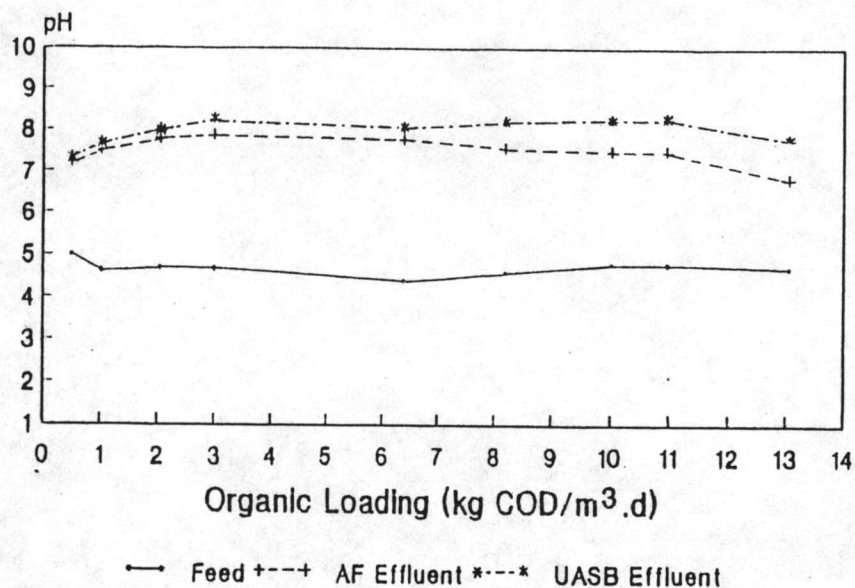
จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า การสร้างตะกอนแบคทีเรียชนิดเม็ดในถังหมักมีเทนสำหรับระบบหมักที่ทดลองนี้ ต้องใช้ระยะเวลาชานานถึงประมาณ 8 เดือนจึงเริ่มสังเกตเห็นว่ามีตะกอนเม็ดเกิดขึ้น นอกจากนี้อัตราการไหลของน้ำากาส่งเข้าสู่ถังหมักก็เป็นปัจจัยสำคัญในการกักเก็บตะกอนในถังหมักด้วย การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของตะกอนแบคทีเรียในถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีนั้น จะมีผลต่อประสิทธิภาพการลดปริมาณสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพ ดังจะได้อธิบายต่อไป

#### 4.4 ความเป็นกรด-ด่างในระบบหมัก

ค่าพีเอช ของน้ำกากส่าที่เข้าและออกจากระบบตลอดช่วงของการทดลอง ค่อนข้างคงที่ โดยค่าพีเอช ของน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักกรดแบบตัวกลางกรองจะมีค่าสูงขึ้นกว่าค่าพีเอชของน้ำกากส่าที่เข้าสู่ระบบแม้จะมีปริมาณกรดไขมันระเหยสูงกว่าก็ตาม เนื่องจากส่วนของการรีไซเคิลน้ำกากส่าที่ออกจากระบบกลับมาสวมกับน้ำกากส่าที่จะป้อนเข้าสู่ระบบ (เพื่อเป็นการปรับค่าพีเอชไม่ให้ต่ำเกินไปจนเป็นพิษต่อแบคทีเรียในถังหมักกรด) และเนื่องจากในน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักกรดแบบตัวกลางกรอง มีสภาพความเป็นด่างซึ่งเปรียบเสมือนตัวรักษาสมดุลความเป็นกรดด่างในระบบหมักสูงกว่า ส่วนค่าพีเอชของน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีสูงกว่าค่าพีเอช ในน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักกรดแบบตัวกลางกรองเล็กน้อย เนื่องจากปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำกากส่าต่ำลงเพราะกรดบางส่วนถูกใช้ไปในการเกิดปฏิกิริยาการผลิตก๊าซ

รูปที่ 4.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชของน้ำกากส่าที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ พบว่า ค่าพีเอชของน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักกรดแบบตัวกลางกรองอยู่ในช่วง 7.2-8.0 โดยในช่วงแรกมีการเพิ่มขึ้นจาก ค่าพีเอช เท่ากับ 7.2 ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 0.49 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ไปจนถึงค่าพีเอชประมาณ 7.8 ในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 2.98-6.28 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน และลดลงเล็กน้อยเป็น 7.5 ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 8.20-10.02 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน หลังจากเพิ่มอัตราส่วนการรีไซเคิลเป็น 3:1 พบว่า ระบบยังสามารถรักษาระดับค่าพีเอชเท่ากับ 7.5 ไว้ได้ แต่ที่เพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 13.05 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน (อัตราการป้อนสารอินทรีย์สำหรับถังหมักกรดเท่ากับ 193.28 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน) ซึ่งเป็นช่วงที่ระบบเริ่มเสถียร ค่าพีเอชลดต่ำลงเหลือ 6.8-6.9 เท่านั้น เนื่องจากปริมาณกรดไขมันระเหยเพิ่มขึ้นมาก (ปริมาณกรดมากกว่า 2,500 มก./ล.) ในขณะที่สภาพความเป็นด่างในน้ำกากส่าลดลง

สำหรับค่าพีเอชของน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบี พบว่า แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงเหมือนกับการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ของน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักกรดแบบตัวกลางกรอง แต่มีค่าสูงกว่าเล็กน้อย คือ ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 7.3-8.3 และที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์สูงสุด 13.05 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ค่าพีเอชลดลงจาก 8.3 เหลือ 7.8 เนื่องจาก



รูปที่ 4. 7 ค่า พีเอช ในน้ำกากส่าที่เข้าสู่ระบบและน้ำกากส่าที่ออกจากระบบที่ อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ

เสถียรภาพของระบบหมักลดลงโดยพิจารณาจากปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำกากส่าสูงขึ้น และสภาพความเป็นด่างที่ลดลง

การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช ของน้ำกากส่าในระบบหมักนี้มีแนวโน้มเช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพความเป็นด่างจากถังหมักทั้งสอง นอกจากนี้ปัจจัยที่มีผลโดยตรงต่อค่าพีเอชของน้ำกากส่า คือปริมาณกรดไขมันระเหย จากการทดลองพบว่าเมื่อผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชบ้างเล็กน้อยในช่วงแรกที่สภาพความเป็นด่างของน้ำกากส่ายังต่ำอยู่ แต่เมื่อสภาพความเป็นด่างของน้ำกากส่าสูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันของปริมาณกรดไขมันระเหย (เช่นที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 8.20 กก.ซีไอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ปริมาณกรดไขมันระเหยเพิ่มขึ้นจาก 2,250 มก./ล. เป็น 4,775 มก./ล.) จะมีผลทำให้ค่าพีเอชลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (ค่าพีเอชลดลงจาก 7.8 เป็น 7.5)

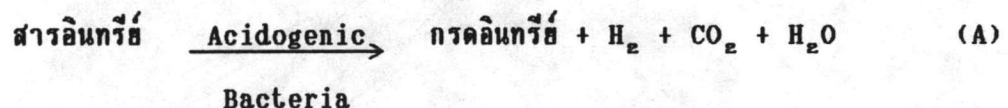




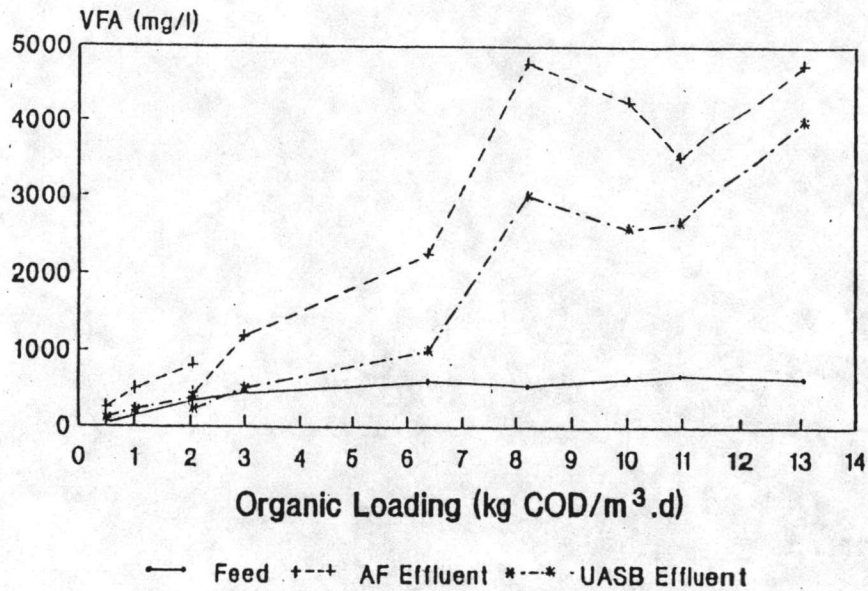
#### 4.5 ปริมาณกรดไขมันระเหยในระบบหมัก

กรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acid; VFA) ในระบบย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนนั้น ได้จากขั้นตอนการสร้างกรดอินทรีย์โดยแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดในถังหมักกรด และจะถูกนำไปใช้ต่อโดยแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนในขั้นตอนการผลิตก๊าซชีวภาพรูปที่ 4.8 แสดงปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักกรดและถังหมักมีเทนที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ จะเห็นได้ว่า ที่ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ต่ำ 9,250 มก./ล. ปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำกากส่าเพียง 98 มก./ล. และเมื่อความเข้มข้นของสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 60,000 มก./ล. ปริมาณกรดไขมันระเหยสูงขึ้นเป็น 545-680 มก./ล. (ดังแสดงในตารางที่ 4.1) แสดงว่าปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำกากส่าที่เข้าสู่ระบบขึ้นกับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำกากส่า

ปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นในถังหมักกรด สามารถแสดงได้ดังสมการ (A)



จากผลการทดลองพบว่า ในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 0.49-2.03 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ในถังหมักกรดแบบตัวกลางกรองมีปริมาณกรดไขมันระเหยเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณสารอินทรีย์ซึ่งเป็นสารตั้งต้นสูงขึ้น เกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนการสร้างกรดมากขึ้น ได้ผลิตภัณฑ์ คือ กรดไขมันระเหยมากขึ้น อย่างไรก็ตามอัตราการเพิ่มปริมาณกรดไขมันระเหยในช่วงนี้เพิ่มขึ้นไม่มากนักเมื่อเทียบกับในช่วงที่ 2 (ในช่วงแรกปริมาณกรดไขมันระเหยเพิ่มขึ้น 2.3-2.7 เท่าของปริมาณกรดไขมันระเหยที่เข้าระบบ ขณะที่ในช่วงที่ 2 เพิ่มขึ้น 2.6-8.8 เท่า) เนื่องจากในช่วงแรกนี้เป็นช่วงที่แบคทีเรียปรับตัวให้เข้ากับสภาวะในการทำงาน อัตราการเพิ่มจำนวนแบคทีเรียยังน้อยกว่าอัตราการที่แบคทีเรียหลุดออกจากถังหมัก ทำให้ปริมาณแบคทีเรียในถังหมักน้อยกว่าในช่วงที่ 2 ประกอบกับเสถียรภาพของระบบยังต่ำอยู่ (ดูจากค่าสภาพความเป็นด่าง (ALK) ต่ำ) ส่วนในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 2.03-10.02



รูปที่ 4.8 ปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำกากส่าที่เข้าสู่ระบบและในน้ำกากส่าที่ออกจากระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ

กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน พบว่า ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 2.03 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน นั้น ปริมาณกรดไขมันระเหยลดลงจากช่วงแรกถึงประมาณ 46 % (จาก 810 มก./ล. เหลือ 440 มก./ล.) ในขณะที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์และปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำกากส่าที่เข้าระบบคงที่ เนื่องจากมีปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมักลดลงเพราะมีการหลุดออกจากถังหมักสูงกว่าในช่วงแรก หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์เป็น 2.98 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน โดยเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำกากส่าที่เข้าสู่ระบบจาก 41,870 เป็น 60,110 มก./ล. พบว่าปริมาณกรดไขมันระเหยเพิ่มเป็น 1,190 มก./ล. (เพิ่มขึ้นจากเดิม 2.7 เท่า) และเพิ่มขึ้นอีกเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์สูงขึ้น (ในขณะที่ปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบคงที่ประมาณ 60,000 มก./ล.) ปริมาณกรดไขมันระเหยสูงสุดเท่ากับ 4,775 มก./ล. ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 8.20 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน หลังจากเพิ่มอัตราส่วนการรีไซเคิลจาก 1:1 เป็น 3:1 ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 10.95 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ปริมาณกรดไขมันระเหยลดลงเหลือ 3,520 มก./ล.

เนื่องจากในถังหมักกรดมีปริมาณแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนสูงมากขึ้น ซึ่งมาจากการนำน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักมีเทนกลับมารีไซเคิล และที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 13.05 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ปริมาณกรดไขมันระเหยสูงขึ้นอีกเป็น 4,750 มก./ล. ใกล้เคียงกับปริมาณกรดไขมันระเหยสูงสุด ซึ่งที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ในระบบเริ่มมีประสิทธิภาพลดลง มีปริมาณกรดไขมันระเหยสะสมสูงขึ้นในขณะที่การนำไปใช้ลดลง เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนอ่อนแอลงอย่างมาก จะเห็นได้ว่าปริมาณตะกอนที่หลุดออกจากถังหมักสูง, ค่าพีเอชลดลง, เสถียรภาพของระบบลดลง เป็นผลให้ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซลดลง

อาจกล่าวได้ว่า ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมัก ได้แก่ อัตราการป้อนสารอินทรีย์ ซึ่งมีผลต่อการเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ในถังหมัก โดยปริมาณกรดไขมันระเหยเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น และที่สำคัญที่สุด คือ ปริมาณและการทำงานที่สมดุลกันของแบคทีเรียทั้งสองชนิดในถังหมัก จากการทดลอง พบว่า มีปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักกรดสูงมากกว่า 4,000 มก./ล. ขณะที่ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซต่ำ (ดังจะได้อธิบายต่อไป) แสดงว่าปริมาณกรดอินทรีย์ที่เกิดจากปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์มีมากกว่าปริมาณกรดที่ถูกนำไปใช้ผลิตก๊าซชีวภาพมาก เป็นการยืนยันว่าในช่วงของการทดลองนั้นสภาวะในถังหมักแบบตัวกลางกรอง ซึ่งทำหน้าที่เป็นถังหมักกรดในระบบนี้เหมาะสำหรับการเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนการสร้างกรดอินทรีย์ สำหรับการเพิ่มอัตราส่วนการรีไซเคิลนั้น มีผลช่วยลดปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้ยังทำให้ปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมักลดต่ำลงอีกด้วย

เมื่อพิจารณาผลจากถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบี พบว่า แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบี เป็นไปในทำนองเดียวกับ การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักกรดแบบตัวกลางกรอง เนื่องจากแบคทีเรียในถังหมักมีเทน ได้ใช้กรดอินทรีย์จากถังหมักกรดเป็นอาหารในปฏิกิริยาการสร้างก๊าซชีวภาพ ในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 0.49-2.03 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน พบว่าเมื่อปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำกากส่าที่ได้จากถังหมักกรดแบบตัวกลางกรองเพิ่มขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพในการนำกรดอินทรีย์ไปใช้ลดลงจาก 60 % เหลือ 52 % ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 0.49 และ 2.03 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ตามลำดับ ซึ่งเป็นช่วงที่แบคทีเรียมีการปรับตัวและยัง

มีการหลุดออกจากถังหมักสูงอยู่ สำหรับในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 2.98-6.38 กก.ซีไอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักกรดแบบตัวกลางกรองเป็น 1,190 และ 2,250 มก./ล. ตามลำดับ พบว่า ประสิทธิภาพในการนำกรดอินทรีย์ไปใช้เพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับเมื่อมีปริมาณกรดไขมันระเหยต่ำ ๆ ในช่วงแรก แต่หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ขึ้นอีกเป็น 8.20 และ 10.02 กก.ซีไอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำกากส่าที่ได้จากถังหมักกรดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 2,250 มก./ล. เป็น 4,775 และ 4,250 มก./ล. ตามลำดับ พบว่าประสิทธิภาพในการนำเอากรดอินทรีย์ไปใช้ลดลงอย่างมากจาก 56 % เหลือเพียง 37 % และ 39 % ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณกรดไขมันระเหยที่สูงขึ้นทำให้เป็นพิษต่อการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน (สังเกตได้จากมีตะกอนแบคทีเรียหลุดออกจากถังหมักมากกว่า 4,000 มก./ล.) ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนลดลง ดังจะเห็นได้จากสัดส่วนของมีเทนในก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ลดลงจาก 70 % เหลือ 65 % ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 10.02 กก.ซีไอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการรีไซเคิลจาก 1:1 เป็น 3:1 พบว่าไม่มีผลต่อการลดลงของปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำกากส่า โดยประสิทธิภาพในการใช้กรดอินทรีย์ยังคงลดลงอีกเหลือเพียง 24 % และ 16 % ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 10.95 และ 13.05 กก.ซีไอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ตามลำดับ แสดงว่าในช่วงนี้ประสิทธิภาพในการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนลดลง เนื่องจากมีปริมาณกรดไขมันระเหยสะสมในน้ำกากส่าที่เข้าสู่ถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีสูงขึ้น สภาวะในถังหมักไม่เหมาะสมสำหรับแบคทีเรียในถังหมักมีเทน ทำให้แบคทีเรียตายลงและหลุดออกจากถังหมักสูง (SS = 5,100 มก./ล.) ดังจะเห็นได้จากสัดส่วนของมีเทนในก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ในช่วงนี้ลดลงเหลือเพียง 63 % และ 62 % ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 10.95 และ 13.95 กก.ซีไอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ตามลำดับ

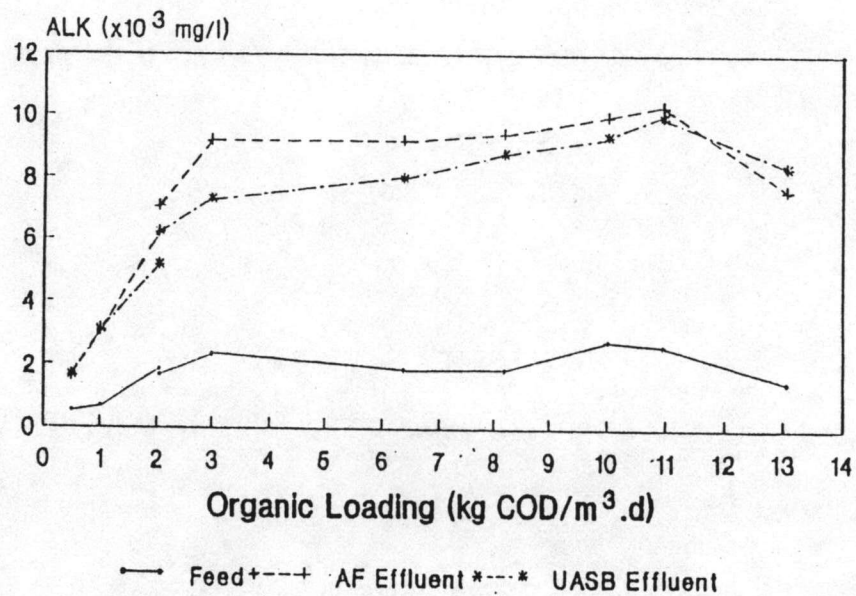
จากผลการทดลองที่ได้ จะเห็นได้ว่าการทำงานของแบคทีเรียในถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีขึ้นกับปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำกากส่าที่เข้าสู่ถังหมักอย่างมาก โดยเมื่อปริมาณกรดไขมันระเหยที่เข้าสู่ถังหมักเพิ่มขึ้นมากกว่า 2,250 มก./ล. พบว่าการทำงานของแบคทีเรียในถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีเริ่มแยลง อัตราการที่แบคทีเรียหลุดออกจากถังหมักเพิ่มสูงขึ้น ผลคือทำให้ปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำกากส่าที่ออกจากระบบสูงขึ้นอย่างมากจาก 990 มก./ล. เป็นประมาณ 2,500-3,900 มก./ล. นอกจากนี้เนื่องจากที่สภาวะอัตราการป้อนสารอินทรีย์สูง ๆ

และระยะเวลาในการกักเก็บน้ำกากส่าในถังหมักต่ำลง แบททีเรียกลุ่มสร้างกรดจะเข้ามามีบทบาทในการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เป็นกรดอินทรีย์เพิ่มขึ้น ในขณะที่การนำเอากรดอินทรีย์ไปใช้โดยแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนลดลง จึงทำให้ปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำกากส่าที่ออกจากระบบสูงมาก

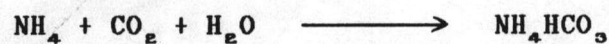
#### 4.6 สภาพความเป็นด่างของระบบหมัก

เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ ค่าสภาพความเป็นด่าง (Alkalinity) ของน้ำกากส่าที่เข้าสู่ระบบมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำกากส่าเพิ่มขึ้น และที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 2.98 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ซึ่งความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ประมาณ 60,000 มก./ล. ค่าสภาพความเป็นด่างมีค่าค่อนข้างคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ส่วนค่าความเป็นด่างของน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักทั้งสอง พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 10.95 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ค่าสภาพความเป็นด่างในน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักกรดและถังหมักมีเทนเป็น 10,300 และ 9,970 มก./ล. ตามลำดับ และมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์เป็น 13.05 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ทั้งนี้เนื่องจากมีปริมาณกรดไขมันระเหยสะสมสูงขึ้น (VFA 4,750 มก./ล.) ประกอบกับแบคทีเรียในระบบอ่อนแอลง มีอัตราการ wash out สูง เป็นผลให้เสถียรภาพของระบบลดลง และทำให้ pH ของระบบลดลงด้วยในที่สุด

ค่าสภาพความเป็นด่างที่ออกจากถังหมักกรดแบบตัวกลางกรองสูงกว่าในน้ำกากส่าที่ป้อนเข้าสู่ระบบประมาณ 1.8-3.7 เท่า และสภาพความเป็นด่างในน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักมีเทนแบบขุเอเอสบีเล็กน้อย เนื่องจากการรีไซเคิลน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักมีเทนกลับมาใช้เจือจางน้ำกากส่าก่อนเข้าระบบ ค่าสภาพความเป็นด่างในน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักทั้งสองมีค่าอยู่ในช่วง 1,600-10,000 มก./ล. ซึ่งโดยทั่วไปค่าสภาพความเป็นด่างที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 1,000-3,000 มก./ล. การที่ค่าสภาพความเป็นด่างในระบบหมักที่ทดลองค่อนข้างสูงนั้น เนื่องจากสารแอมโมเนียมาไบคาร์บอเนต ซึ่งเกิดจากการรวมตัวระหว่างแอมโมเนียมาจากการย่อยสลายโปรตีนกับคาร์บอเนตออกไซด์ ดังสมการ (สุเมธ ชวเดช, 2529)



รูปที่ 4.9 ค่าสภาพความเป็นด่างในน้ำกากส่าที่เข้าสู่ระบบและในน้ำกากส่าที่ออกจากระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ



ค่าสภาพความเป็นด่างมีผลต่อเสถียรภาพของระบบหมัก โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในกรณีที่มีปริมาณกรดไขมันระเหยในระบบเพิ่มขึ้น เช่น จากการทดลองที่อัตราการป้อนสาร 8.20 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ค่าสภาพความเป็นด่างของน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักกรดสูงถึง 9,420 มก./ล. ปริมาณกรดไขมันระเหยเพิ่มขึ้นจาก 2,250 มก./ล. เป็น 4,775 มก./ล. แต่ค่าพีเอช เปลี่ยนแปลงน้อยมาก คือ ลดลงจาก 7.7-7.8 เป็น 7.5 เท่านั้น ซึ่งอยู่ในช่วงที่เป็นกลางทำให้การทำงานของระบบยังคงดำเนินต่อไปได้โดยไม่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรียในระบบหมัก

#### 4.7 ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์

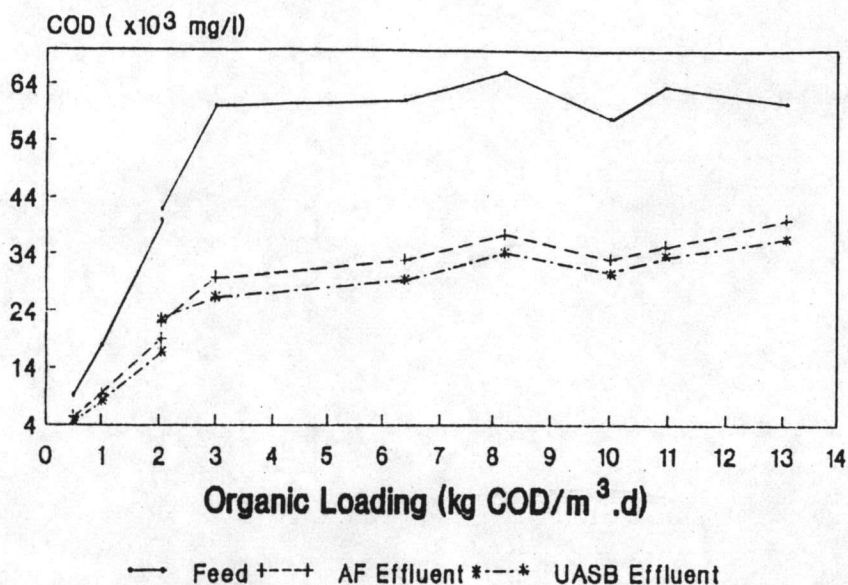
รูปที่ 4.10 แสดงค่า COD ของน้ำากาส่งที่ป้อนเข้าสู่ระบบ และน้ำากาส่งที่ไหลออกจากถังหมักทั้งสองที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ ประสิทธิภาพการลดปริมาณสารอินทรีย์ในรูป COD โดยถังหมักกรด ถังหมักมีเทน และทั้งระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ ได้แสดงในรูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์ สามารถพิจารณาได้จากค่า COD ที่ลดลง (% COD reduction) ค่า COD ที่ลดลงสำหรับระบบนี้อยู่ในช่วง 39.38-58.01 % เมื่อคิดเทียบกับค่า COD ที่ลดลงทั้งหมดของระบบ (ซึ่งเกิดจากการทำงานของแบคทีเรียในถังหมักทั้งสอง) พบว่า ที่อัตราส่วนการรีไซเคิล 1:1 ค่า COD 34-40 % ลดลงหลังจากผ่านถังหมักกรดแบบตัวกลางกรอง, 9-20 % ลดลงหลังจากผ่านถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบี และ 50 % ลดลงเนื่องจากการเจือจางโดยส่วนรีไซเคิล ในทำนองเดียวกันที่อัตราส่วนการรีไซเคิล 3:1 ค่า COD 10-19 % ลดลงหลังจากผ่านถังหมักกรด, 5-14 % ลดลงหลังจากผ่านถังหมักมีเทน และ 75 % ลดลงเนื่องจากการเจือจางโดยส่วนรีไซเคิล เมื่อเปรียบเทียบค่า COD ที่ลดลงหลังจากผ่านถังหมักกรดและถังหมักมีเทนพบว่า ในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 0.49-10.95 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ค่า COD หลังจากผ่านถังหมักกรดสูงกว่าประมาณ 3.9 เท่า เนื่องจากมีการควบคุมให้อัตราการป้อนสารอินทรีย์สำหรับถังหมักกรดสูง (7.68-193.28 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน) และระยะเวลาพักเก็บสั้น (ลดลงจาก 2.04 วัน เหลือ 5.3 ชม.) ในสภาวะเช่นนี้ทำให้แบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดซึ่งมีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายสารอินทรีย์และมีอัตราการเติบโตสูงกว่าแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน สามารถทำงานได้ดี ในขณะที่แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนหลุดออกจากถังหมัก ดังจะเห็นได้จากปริมาณมีเทนในก๊าซชีวภาพที่ได้จากถังหมักกรดแบบตัวกลางกรองต่ำ 6-49 % เมื่อเทียบกับปริมาณมีเทนที่ได้จากถังหมักมีเทน 62-77 % (ดังแสดงในตารางที่ 4.1) ซึ่งมีระยะเวลาพักเก็บที่ช้านานกว่า อย่างไรก็ตามแม้ว่าแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนจะหลุดออกไปจากถังหมักกรด แต่ก็ยังมีบางส่วนที่ยังคงเหลืออยู่บ้าง และส่วนหนึ่งมาจากการสูบน้ำากาส่งที่ออกจากระบบกลับเข้าสู่ถังหมักกรด ซึ่งจะมีตะกอนแบคทีเรียจากถังหมักมีเทนติดมาด้วย ทำให้ในก๊าซชีวภาพที่ได้จากถังหมักกรดแบบตัวกลางกรอง มีสัดส่วนที่เป็นมีเทนอยู่ด้วยสำหรับที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 13.05 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ค่า COD ที่

ลดลงหลังจากผ่านถึงหมักกรดต่ำกว่าหลังจากผ่านถึงหมักมีเทนเล็กน้อย เนื่องจากมีปริมาณกรดไขมันระเหยสะสมสูง (VFA 4,800 มก./ลิตร) ประกอบกับช่วงนี้เสถียรภาพของระบบลดลง ทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของแบคทีเรียในถังหมักลดลง ในขณะที่แบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดเริ่มมีบทบาทในส่วนของถังหมักมีเทน

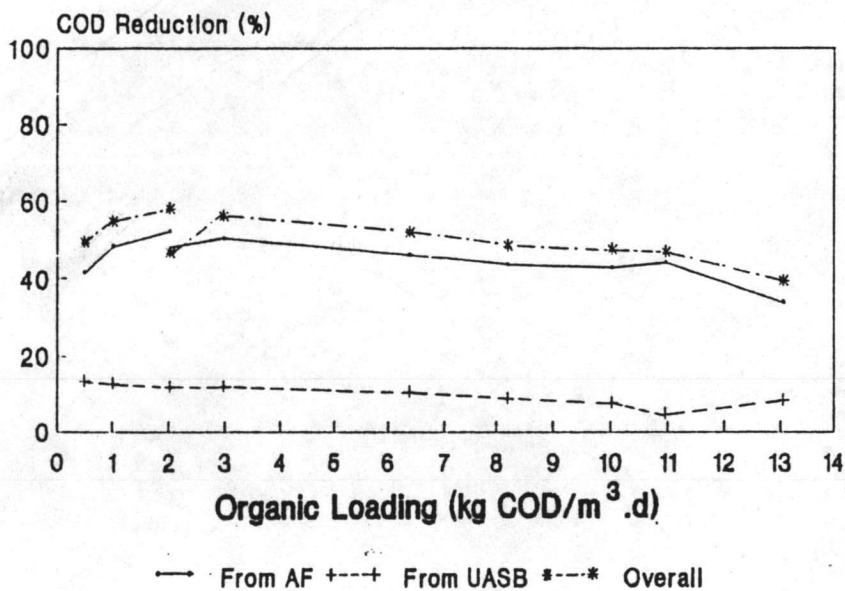
พิจารณาค่า COD ที่ลดลงเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์สูงขึ้น พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ขึ้นเรื่อย ๆ จาก 1.01 ถึง 2.03 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ระยะเวลาที่เก็บน้ำกากส่าในถังหมักประมาณ 2 วัน พบว่าค่า COD ที่ลดลงหลังจากผ่านถึงหมักกรดแบบตัวกลางกรอง เพิ่มขึ้น (จาก 28.79 % ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 1.01 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ไปเป็น 32.92 % ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 2.03 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน) แสดงว่าช่วงนี้มีการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดี เนื่องจากในช่วงแรกแบคทีเรียมีการเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนเซลล์ได้อย่างรวดเร็ว จึงมีการใช้สารอินทรีย์สูงขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการลดสารอินทรีย์สูงขึ้นด้วย จากนั้นเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์จาก 2.03 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ไปจนถึง 10.02 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน พบว่าประสิทธิภาพการลดสารอินทรีย์ลดลงเล็กน้อย (เกือบคงที่) แสดงว่าประสิทธิภาพการลดสารอินทรีย์ในช่วงนี้ไม่ขึ้นกับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการรีไซเคิลจาก 1:1 เป็น 3:1 พบว่าประสิทธิภาพการลดสารอินทรีย์ลดลงอย่างเห็นได้ชัดจาก 25.2 % เป็น 13.95 % ทั้งนี้เนื่องจากเหตุผลหลายประการ คือ อัตราการไหลของน้ำกากส่าเข้าสู่ถังหมักกรดสูงขึ้น ทำให้ระยะเวลาที่เก็บในถังหมักลดลง ประกอบกับมีปริมาณตะกอนแบคทีเรียที่ถูก wash out สูงขึ้นด้วย แสดงว่าอัตราส่วนการรีไซเคิลไม่ช่วยให้ประสิทธิภาพการลดสารอินทรีย์ของแบคทีเรียในถังหมักกรดดีขึ้น และที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 13.05 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ซึ่งเป็นช่วงที่ระบบเสถียรสมดุล มีปริมาณกรดไขมันระเหยสูง ค่าสภาพความเป็นด่างลดลงอย่างมาก ทำให้ประสิทธิภาพการลดสารอินทรีย์ลดลงเหลือเพียง 6.14 %

สำหรับถังหมักมีเทน ในช่วงแรกที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 0.49-2.03 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน พบว่า ประสิทธิภาพการลดปริมาณสารอินทรีย์ลดลงจาก 12.7 % เป็น 11.8 % เนื่องจากในช่วงแรกนี้ตะกอนแบคทีเรียในถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีหลุดออกจากถังหมักไปเป็นปริมาณมาก ทำให้ปริมาณตะกอนแบคทีเรียที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 2.03 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน เหลือประมาณ 30 % ของตะกอนเริ่มต้น ทำให้ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์ลดลง แต่





รูปที่ 4.10 ค่า COD ในน้ำกากส่าที่เข้าสู่ระบบและในน้ำกากส่าที่ออกจากระบบที่อัตราการผลิตปุ๋ยอินทรีย์ต่าง ๆ



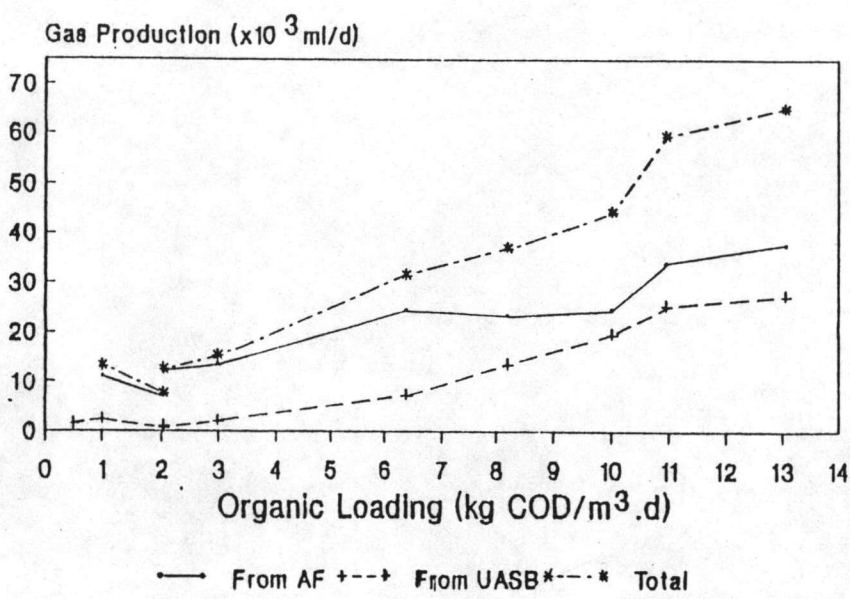
รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพการกำจัด COD ของระบบที่อัตราการผลิตปุ๋ยอินทรีย์ต่าง ๆ

อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับผลของการลดลงของปริมาณตะกอนต่อประสิทธิภาพการลดสารอินทรีย์กับประสิทธิภาพการผลิตก๊าซนั้น พบว่าปริมาณตะกอนมีผลกระทบต่อปริมาณก๊าซมากกว่าอย่างเห็นได้ชัดเจนมากกว่า (ดังจะได้กล่าวถึงต่อไป) หลังจากเติมตะกอนใหม่ลงในถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบี แล้วพบว่า ค่า COD ของน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักมีเทนมีค่าสูงกว่าในน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักเล็กน้อส เป็นผลมาจากมีปริมาณตะกอนที่หลุดออกจากถังหมักสูง หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์จาก 2.03 ไปจนถึง 10.02 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ประสิทธิภาพการลดสารอินทรีย์มีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ ประมาณ 8-12 % และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการรีไซเคิลจาก 1:1 เป็น 3:1 อัตราการไหลของน้ำกากส่าเข้าสู่ถังหมักทั้งสองสูงขึ้น ทำให้ตะกอนแบคทีเรียหลุดออกจากถังหมักสูง ปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมักมีเทนลดลง ทำให้ประสิทธิภาพการลดสารอินทรีย์ลดลงเหลือ 4.7 % แต่ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 13.05 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ประสิทธิภาพการลดสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นเป็น 8.4 % แสดงว่าสภาวะในถังหมักมีเทนที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์นี้ แบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดในถังหมักมีเทนสามารถปรับตัวได้เร็วกว่าและสามารถทำงานในสภาวะที่มีปริมาณกรดไขมันระเหยสูงเช่นนี้ ได้ดีกว่าแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพในการใช้สารอินทรีย์ของแบคทีเรียในถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีต่ำกว่าในถังหมักกรดประมาณ 2.6-3.0 เท่า เนื่องจากปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นในถังหมักมีเทนเป็นการนำเอากรดอินทรีย์ไปใช้สร้างก๊าซมากกว่าการย่อยสลายสารอินทรีย์

#### 4.8 ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ

ดังได้กล่าวมาแล้วว่า ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณตะกอนแบคทีเรียในระบบ สำหรับในการทดลองนี้ทำการเก็บก๊าซที่เกิดขึ้นจากถังหมักทั้งสองผ่านสารละลาย NaCl ซึ่งทำหน้าที่ดูดความชื้นออกจากก๊าซ เพื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซแบบออร์แอส องค์ประกอบก๊าซที่วิเคราะห์ได้คือ คาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนที่เหลือไม่ได้ทำการวิเคราะห์ แต่คาดว่าน่าจะเป็นก๊าซมีเทนเป็นส่วนใหญ่ ส่วนก๊าซอื่น ๆ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ พิจารณาว่าเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย (Braun and Huss, 1982) ดังนั้นการรายงานผลการทดลองเกี่ยวกับองค์ประกอบก๊าซที่จะกล่าวถึงต่อไป พิจารณาว่าก๊าซที่เกิดขึ้นมีองค์ประกอบเป็นก๊าซ



รูปที่ 4.12 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากถังหมักกรด, ถังหมักมีเทน และปริมาณโดยรวมทั้งระบบ ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ

คาร์บอนไดออกไซด์ กับก๊าซมีเทนและอื่น ๆ

4.8.1 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ ได้จากปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ในขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทน จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้จากถังหมักกรดแบบตัวกลางกรองสูงกว่าที่ได้จากถังหมักมีเทนแบบยูเอสบีที่ทุกอัตราการป้อนสารอินทรีย์ ดังแสดงในรูปที่ 4.12

การเปลี่ยนแปลงของอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ในช่วงแรกที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 1.01-2.03 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากถังหมักกรดลดลงจาก 11,000 มล./วันเหลือ 6,860 มล./วัน ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 1.01 และ 2.03 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ตามลำดับ เนื่องจากเป็นช่วงของการเริ่มต้นระบบ แบคทีเรียต้องใช้เวลาในการปรับตัว ซึ่งพบว่าปริมาณตะกอนแบคทีเรียในน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักกรดสูง จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ลดลง ก๊าซที่เกิดจากปฏิกิริยาจึงลดลง หลังจากนั้นเมื่อ

เพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์จาก 2.03 ไปจนถึง 10.02 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน พบว่าอัตราการผลิตก๊าซจากถังหมักกรดเพิ่มขึ้นจนถึง 13,440 มล./วัน ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 2.98 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน และคงที่ในช่วงประมาณ 24,000 มล./วัน ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ในช่วง 6.38-10.02 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน อธิบายได้ว่าในช่วงที่ 2 นี้แบคทีเรียมีการเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างรวดเร็ว ถึงแม้ว่าแม้จะมีตะกอนแบคทีเรียบางส่วนหลุดออกจากถังหมักในปริมาณสูงก็ตาม (SS ประมาณ 2,000 มก./ลิตร) จึงทำให้ปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมักสูง ประกอบกับมีปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ถังหมักสูงขึ้น เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดีขึ้น ทำให้ได้ก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น จนถึงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 6.38 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ซึ่งอัตราการผลิตก๊าซเริ่มคงที่โดยไม่ขึ้นกับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ ทั้งนี้เนื่องจากการสะสมของกรดไขมันระเหยสูงกว่า 2,000 มก./ล. ซึ่งไปยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการรีไซเคิลจาก 1:1 เป็น 3:1 พบว่า อัตราการผลิตก๊าซในถังหมักกรดเพิ่มขึ้นจากเดิม 24,720 มล./วัน เป็น 34,020 และ 37,615 มล./วัน ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์สำหรับถังหมักกรด 10.95 และ 13.05 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนการรีไซเคิลจาก 1:1 เป็น 3:1 นั้น เป็นการช่วยเจือจางน้ำากสำหรับป้อนเข้าถังหมักกรด ช่วยเพิ่มการกวนผสมในถังหมัก นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มปริมาณตะกอนแบคทีเรียในระบบอีกด้วย ส่วนอัตราการป้อนสารอินทรีย์สำหรับถังหมักกรดที่เพิ่มขึ้นจาก 77.97 เป็น 143.65 และ 193.28 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน (คิดเทียบกับความจุของถังหมักกรด) ทำให้ปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ถังหมักเพิ่มขึ้น สารอินทรีย์ถูกย่อยสลายมากขึ้น ทำให้ก๊าซที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าระยะเวลาในการกักเก็บจะลดลงเหลือเพียง 6.9 และ 5.3 ชม. ตามลำดับ

สำหรับการเปลี่ยนแปลงในถังหมักมีเทนพบว่า ในช่วงแรกที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 1.01-2.03 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ซึ่งเป็นช่วงที่ปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสปีลดลงเหลือเพียงประมาณ 30 % ของปริมาณตะกอนตอนเริ่มต้นนั้น อัตราการผลิตก๊าซในถังหมักมีเทนก็ลดลงถึงประมาณ 70 % คือจาก 2,200 มล./วัน เหลือเพียง 670 มล./วัน ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 1.01 และ 2.03 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเป็นช่วงที่แบคทีเรียใช้เวลาในการปรับตัวโดยเฉพาะแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน ทำให้มีปริมาณตะกอนแบคทีเรียหลุดออกจากถังหมักมีเทนสูง เป็นผลให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซลดลง

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเติมตะกอนแบคทีเรียลงไปอีกดังได้กล่าวมาแล้ว หลังจากเติมตะกอนลงในถังหมักมีเทนแล้วพบว่า อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 2.03-10.02 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน เป็นช่วงที่แบคทีเรีย เป็นช่วงที่แบคทีเรียมีการเติบโตเพิ่มจำนวนขึ้นเรื่อย ๆ (แม้จะมีปริมาณตะกอนแบคทีเรียที่หลุดออกจากถังหมักสูงขึ้นก็ตามโดยดูจากค่า SS เพิ่มจาก 2,300 เป็น 4,800 มก./ล.) ทำให้มีปริมาณแบคทีเรียในถังหมักสูงขึ้นเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น ประกอบกับปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำกากส่าที่เข้าสู่ถังหมักมีเทนเพิ่มขึ้น เกิดปฏิกิริยาการสร้างก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น จึงทำให้ได้ก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น โดยอัตราการเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 2.03-6.38 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ต่ำกว่าในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 6.38-10.02 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน (พิจารณาจากความชันของกราฟในรูปที่ 4.12) ทั้งนี้เนื่องจากถังหมักมีเทนมีปริมาณตะกอนแบคทีเรียเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดคือ 19,670 มล./วัน ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 10.02 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน และอัตราส่วนการรีไซเคิล 1:1 ซึ่งตรงกับช่วงที่มีปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมักสูงที่สุดด้วย เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการรีไซเคิลจาก 1:1 เป็น 3:1 พบว่าอัตราการผลิตก๊าซเพิ่มขึ้นจากเดิม 19,670 มล./วัน เป็น 25,380 และ 27,320 มล./วัน ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 10.95 และ 13.05 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ตามลำดับ เนื่องมาจากอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น และปริมาณสารอินทรีย์และกรดไขมันระเหยที่เข้าสู่ถังหมักเพิ่มขึ้น แต่อัตราการเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซในช่วงนี้น้อยกว่าในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 6.38-10.02 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน เนื่องจากอัตราการป้อนสารอินทรีย์สูงเกินไป, ระยะเวลาที่เก็บน้ำกากส่าในถังหมักลดลง จากเดิม 3.0 วันเหลือ 1.4 และ 1.2 วัน ตามลำดับ, มีปริมาณกรดไขมันระเหยในระบบสูงขึ้น และปริมาณตะกอนแบคทีเรียต่ำลง ทำให้การทำงานของแบคทีเรียในถังหมักมีเทนลดประสิทธิภาพลง ดังจะเห็นได้จากสัดส่วนของมีเทนในก๊าซที่ได้จากถังหมักมีเทนลดลงจาก 65.5 % เหลือ 63.4 % และ 62.6 % ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 10.95 และ 13.05 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ตามลำดับ

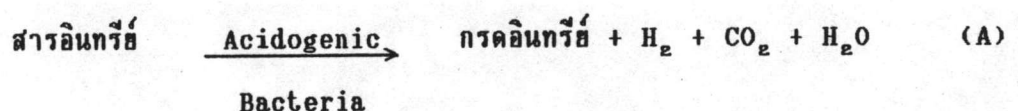
จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพขึ้นกับปริมาณตะกอนแบคทีเรียในระบบอย่างมาก (เห็นได้ชัดในกรณีของถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบี) โดยเฉพาะในช่วงเริ่มต้น

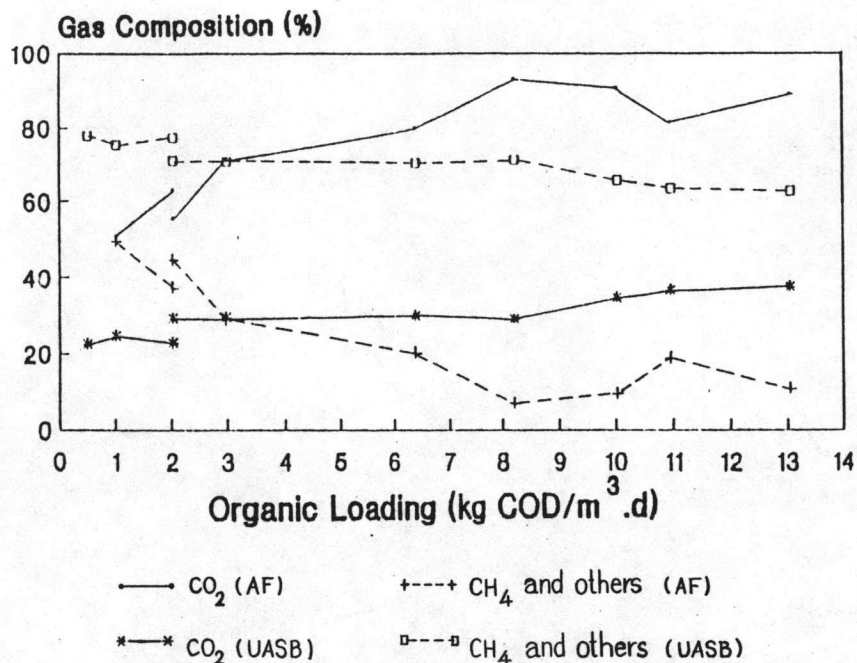
การทำงานของระบบ แต่เมื่อแบคทีเรียสามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาวะในการทำงานได้แล้ว (คือมีอัตราการเพิ่มจำนวนมากกว่าอัตราการ wash out ออกจากระบบ) การเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบจะช่วยเพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ โดยการเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบ ส่วนการเพิ่มอัตราส่วนการรีไซเคิลนั้นจะช่วยเพิ่มปริมาณก๊าซโดยการทำให้อัตราไหลของน้ำกากส่าที่เข้าระบบเพิ่มขึ้น ช่วยในการกวนผสมและทำให้ก๊าซชีวภาพที่ได้ออกขึ้นสู่ส่วนเก็บด้านบนได้ง่ายขึ้น

#### 4.8.2 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้

องค์ประกอบหลักของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซมีเทน ปริมาณและสัดส่วนองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพขึ้นกับปริมาณและประสิทธิภาพในการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนในระบบเป็นหลัก รูปที่ 4.13 แสดงองค์ประกอบก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากถังหมักกรดและถังหมักมีเทนที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ ในส่วนของถังหมักกรดแบบตัวกลางกรอง ซึ่งควบคุมสภาวะในการทำงานให้มีอัตราการป้อนสารอินทรีย์สูง ๆ (สูงกว่าในถังหมักมีเทนแบบ ยูเอเอสบี 4.7-11.5 เท่า) และระยะเวลาที่เก็บน้ำกากส่าในถังหมักสั้น ทำให้แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนซึ่งมีอัตราการเติบโตช้ากว่าแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรด หลุดออกจากถังหมักไปเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นในถังหมักกรดแบบตัวกลางกรองจึงมีแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดเป็นหลัก จึงทำให้องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากถังหมักกรด มีสัดส่วนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับก๊าซชีวภาพที่ได้จากถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีที่ทุก ๆ อัตราการป้อนสารอินทรีย์ และในทางกลับกันสัดส่วนของมีเทนในก๊าซชีวภาพที่ได้จากถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีสูงกว่า แสดงว่าในถังหมักมีเทนนี้มีแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งนอกจากจะให้สัดส่วนของมีเทนที่สูงกว่าแล้ว ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในถังหมักมีเทน ยังถูกนำไปใช้โดยแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนอีกต่อหนึ่ง จึงทำให้มีสัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ (ดังแสดงในสมการ (C))

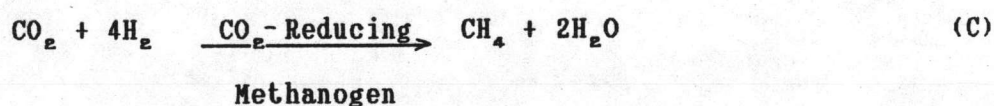
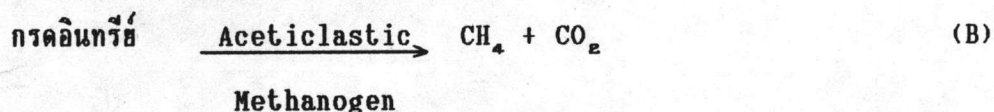
ปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นในถังหมักกรดแบบ ตัวกลางกรอง :





รูปที่ 4.13 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ได้จากถังหมักกรดและถังหมักมีเทนที่อัตราการผลิตอินทรีย์ต่าง ๆ

ปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นในถังหมักมีเทนแบบ ฮูเอเฮสปี :



ซึ่งอัตราส่วนระหว่าง CO<sub>2</sub>:CH<sub>4</sub> สำหรับระบบหมักโดยทั่วไปประมาณ 2:3 (Schroeder, 1977) สำหรับถังหมักกรดแบบตัวกลางกรองเมื่ออัตราการผลิตอินทรีย์เพิ่มขึ้นจาก 1.01 เป็น 2.03 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน พบว่าสัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นจาก 50.56 % เป็น 62.90 % ในช่วงนี้แบคทีเรียในถังหมักมีการเติบโตเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็ว ปริมาณ

แบคทีเรียที่หลุดออกจากถังหมักยังต่ำอยู่ประกอบด้วยมีปริมาณสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบสูงขึ้น การย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นกรดอินทรีย์เพิ่มขึ้นทำให้ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น และยังพบอีกว่าในช่วงนี้มีสัดส่วนที่เป็นมีเทนสูงอยู่เนื่องจากระยะเวลาที่เก็บน้ำกากส่าในถังหมักยาวนานพอ และปริมาณกรดไขมันระเหยยังไม่สูงนัก ทำให้แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนที่มีอยู่ในถังหมักและแบคทีเรียบางส่วนจากถังหมักมีเทนที่ติดมากับน้ำกากส่าส่วนที่รีไซเคิลเข้าสู่ถังหมักกรดยังคงอยู่และเติบโตได้ดีในถังหมักกรด เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ขึ้นอีกเรื่อย ๆ จาก 2.03-10.02 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน พบว่าสัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงประมาณ 91 % ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 8.20-10.02 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน อธิบายได้ว่าสัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ถังหมักเพิ่มขึ้น เกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนการสร้างกรดมากขึ้น มีการสะสมของปริมาณกรดไขมันระเหยในระบบเพิ่มขึ้น ประกอบกับระยะเวลาที่เก็บสั้นลง เป็นผลไปลดอัตราการเติบโตและยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน ดังนั้นในถังหมักกรดแบบตัวกลางทรง จึงมีแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดเป็นส่วนใหญ่ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการรีไซเคิลจาก 1:1 เป็น 3:1 สัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพลดลงเหลือ 81.44 % ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 10.95 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน และกลับเพิ่มขึ้นอีกเป็น 89.21 % (ใกล้เคียงกับสัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเปลี่ยนอัตราส่วนการรีไซเคิล) ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 13.05 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน การที่สัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงในช่วงแรกหลังจากเพิ่มอัตราส่วนการรีไซเคิลนั้น เนื่องจากมีการเพิ่มของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนที่อยู่ในน้ำที่ล้นออกจากถังหมักมีเทนซึ่งนำกลับมารีไซเคิล ประกอบกับอัตราการไหลที่สูงขึ้น และปริมาณกรดไขมันระเหยสะสมลดลงเนื่องจากการถูกเจือจาง และที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 13.05 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน สภาวะต่าง ๆ ในถังหมักกรด ได้แก่ ค่าสภาพความเป็นด่างลดลง, ค่าพีเอชลดลงและปริมาณกรดไขมันระเหยสูงขึ้นมาก จึงทำให้แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนในถังหมักอ่อนแอลงอย่างมากทำให้สัดส่วนของมีเทนในก๊าซที่ผลิตจึงลดลงอีก

ส่วนในถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบี พบว่าสัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพในช่วงแรกก่อนเติมตะกอนแบคทีเรียใหม่ลงในถังหมัก มีค่าอยู่ในช่วง 22-24 % และหลังจากเติมตะกอนแบคทีเรียแล้ว สัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นและคงที่ที่ 29 % ในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 2.03-8.20 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน จึงเห็นได้



ว่าสัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพที่ได้จากถังหมักมีเทนแบบ ยูเอเอสบี น้อยกว่าที่ได้จากถังหมักกรดแบบตัวกลางกรอง ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในถังหมักมีเทน คือ การนำเอากรดอินทรีย์ไปใช้เพื่อสร้างก๊าซมีเทน ส่วนคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการสร้างก๊าซมีเทนและปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ ซึ่งมีเกิดขึ้นบ้างเล็กน้อยในถังหมักมีเทนดังกล่าวจะเห็นได้จากประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์สำหรับถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีประมาณ 4-12 % จะถูกนำไปใช้เพื่อสร้างก๊าซมีเทนด้วย (ดังสมการ (B) และ (C)) จึงทำให้มีสัดส่วนที่เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพต่ำ เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ขึ้นเป็น 10.02 กก.ซีไอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ระยะเวลาที่กักเก็บน้ำกากส่าในถังหมักมีเทน 3.0 วัน พบว่าสัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพสูงขึ้นเป็น 34.51 % แสดงว่าที่สภาวะนี้แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนเริ่มอ่อนแอลง และถูก wash out เพิ่มสูงขึ้น (SS = 4,800 มก./ล.) ประกอบกับปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำกากส่าที่เข้าสู่ถังหมักสูงถึง 4,250 มก./ล. การนำเอากรดอินทรีย์ในน้ำกากส่าไปใช้โดยแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนลดลง (จาก 48-60 % เหลือเพียง 39 %) หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการรีไซเคิลจาก 1:1 เป็น 3:1 ระยะเวลาที่กักเก็บน้ำกากส่าในถังหมักลดลงเหลือ 1.4 และ 1.2 วัน ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 10.95 และ 13.05 กก.ซีไอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ตามลำดับ ปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมักมีเทนลดลง เป็นผลให้ประสิทธิภาพในการนำเอากรดอินทรีย์และคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ลดลง ปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำกากส่าที่ออกจากถังหมักมีเทนสูง แบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดซึ่งสามารถปรับตัวได้ดีกว่าเริ่มเข้ามามีบทบาทในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ทำให้สัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเป็น 36.58 % และ 37.87 % ตามลำดับ

ปริมาณแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนในถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบี ขึ้นกับระยะเวลาในการกักเก็บ และปริมาณกรดไขมันระเหยเป็นสำคัญ จากผลการทดลองพบว่าที่ระยะเวลาที่กักเก็บต่ำกว่า 4.7 วัน ปริมาณกรดไขมันระเหยมากกว่า 2,500 มก./ลิตร จะทำให้ประสิทธิภาพและปริมาณของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนต่ำลง เป็นผลให้ได้ก๊าซมีเทนต่ำลงด้วย จากผลการทดลอง พบว่า ในถังหมักทั้งสองมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น โดยในส่วนของถังหมักกรดแบบตัวกลางกรอง สัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้สูงที่สุดถึง 93.23 % (คิด

เป็นสัดส่วนของมีเทนและก๊าซอื่น ๆ 6.77 %) ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 8.20 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน และอัตราส่วนการรีไซเคิล 1:1 ส่วนในถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีสัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ต่ำสุด 22.77 % (คิดเป็นสัดส่วนของมีเทนและก๊าซอื่น ๆ 77.23 %) ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 2.03 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน และอัตราส่วนการรีไซเคิล 1:1

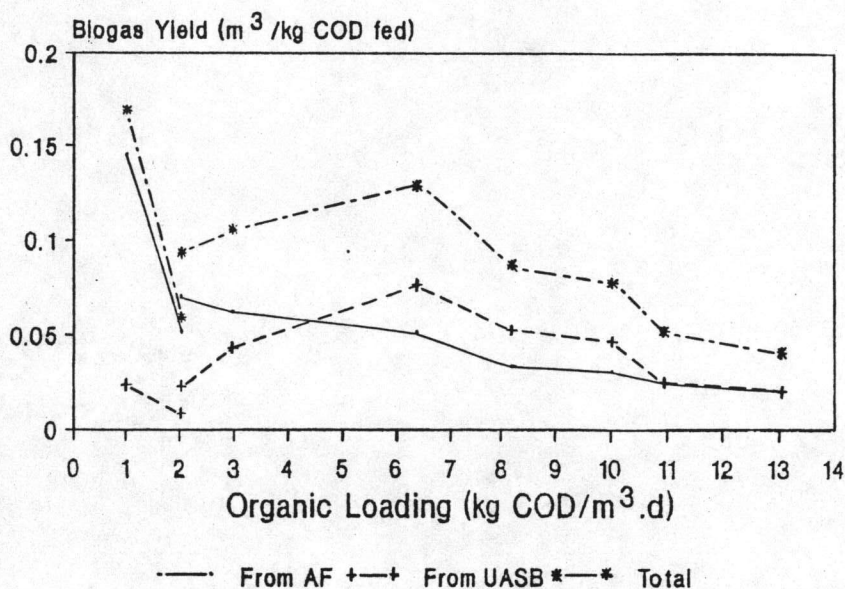
#### 4.8.3 ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ

ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ (Biogas Yield) ในที่นี้แยกพิจารณาเป็น 3 แบบ คือ เทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ถังหมัก ( $\text{COD} \times$  อัตราการไหลของน้ำกากส่าเข้าสู่ถังหมัก), เทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด ( $(\text{COD}_{\text{in}} - \text{COD}_{\text{out}}) \times$  อัตราการไหลของน้ำกากส่าเข้าสู่ถังหมัก) และเทียบกับปริมาตรของถังหมัก

##### (ก) พิจารณาเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ถังหมัก

เป็นสิ่งที่บอกให้ทราบว่าใน 1 หน่วยของสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบจะให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซชีวภาพมากน้อยเท่าใด รูปที่ 4.14 แสดงประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากถังหมักกรดและถังหมักมีเทนเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ พบว่าในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 1.01-2.03 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน นั้น ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของถังหมักทั้งสองลดลง เนื่องจากอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการที่แบคทีเรียอยู่ในช่วงของการปรับตัวให้เข้ากับสภาวะในการทำงานของระบบ และหลังจากเติมตะกอนแบคทีเรียใหม่ลงในถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีแล้ว อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นด้วย แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการผลิตก๊าซจากถังหมักกรดเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ขึ้นจาก 2.03 ไปจนถึง 10.02 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น

พิจารณาในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 2.03-6.38 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ในถังหมักกรดแบบตัวกลางกรองภายใต้สภาวะที่มีปริมาณกรดไขมันระเหยต่ำ (440-2,250 มก./ล.) และระยะเวลาพักเก็บ 1-2 วัน มีแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ผลิตก๊าซจากปฏิกิริยาชีวเคมี 2 ชนิด คือแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรด (ให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์) และแบคทีเรียกลุ่ม



รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ โดยพิจารณาเทียบกับ กก.ชีโอดี ที่ป้อนเข้าระบบ

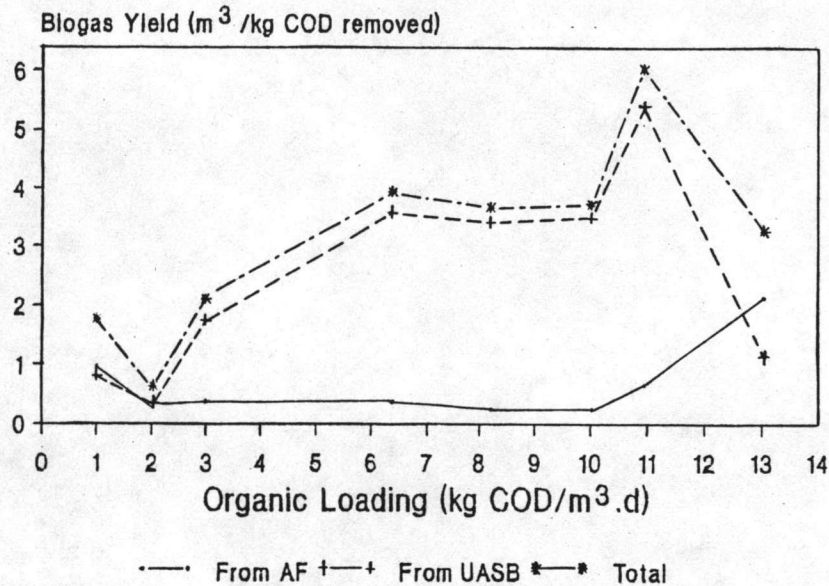
สร้างมีเทน (ให้ก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์) ซึ่งจะสังเกตได้ว่าในช่วงนี้ยังมีสัดส่วนของมีเทนในก๊าซชีวภาพสูงอยู่ (20-44 %) ดังนั้นสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ถังหมักจึงถูกนำไปใช้ในการผลิตก๊าซได้มาก อย่างไรก็ตามเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์สูงขึ้น, อัตราการไหลเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ถังหมักสูงขึ้นอย่างมาก อัตราการผลิตก๊าซสูงขึ้นแต่ไม่เป็นสัดส่วนกับปริมาณสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซลดลง ทั้งนี้เนื่องจากระยะเวลาพักเก็บที่ลดลง และปริมาณกรดไขมันระเหยที่สูงขึ้นเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่ม เช่นที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 8.20-13.05 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ระยะเวลาพักเก็บ 5.3-17.9 ชม. ปริมาณกรดไขมันระเหย 4,250-4,775 มก./ล.) ทำให้ปริมาณและประสิทธิภาพในการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนลดลงอย่างมาก สัดส่วนของมีเทนในก๊าซชีวภาพเหลือเพียง 6-10 % เท่านั้น และยิ่งทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดลดลงอีกด้วย

ในส่วนของถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีหลังจากเติมตะกอนแบคทีเรียใหม่ลงไปแล้วพบว่า เมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซเพิ่มขึ้นด้วยสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณตะกอนในถังหมัก ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซสำหรับถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบี มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.077 ม./กก.ชีโอดี ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 6.38 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน หลังจากนั้นจึงลดลงเมื่อมีการเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์เนื่องจากมีปริมาณกรดไขมันระเหยที่เข้าสู่ถังหมักมีเทนสูงมากกว่า 2,500 มก./ล. ทำให้แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนอ่อนแอลง และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของถังหมักทั้งสองพบว่า ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซสำหรับถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีสูงกว่าเล็กน้อย

จากผลการทดลองที่ได้กล่าวไว้ว่า ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับถังหมักทั้งสอง ขึ้นกับประสิทธิภาพในการทำงานของแบคทีเรียในถังหมักเป็นสำคัญ ซึ่งประสิทธิภาพในการทำงานของแบคทีเรียดังนั้นขึ้นกับปริมาณตะกอนแบคทีเรียในถังหมัก, ระยะเวลาที่เก็บน้ำกากส่าในถังหมัก และปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำกากส่าด้วย

#### (ข) พิจารณาเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด

เป็นสิ่งที่บอกถึงว่าสารอินทรีย์ที่ถูกใช้ไป 1 หน่วยได้เป็นก๊าซชีวภาพเท่าใด รูปที่ 4.15 แสดงประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพต่อสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ ในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 1.01-2.03 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน เป็นช่วงที่แบคทีเรียมีการปรับตัวให้เข้ากับสภาวะการทำงาน ทำให้ปริมาณตะกอนแบคทีเรียต่ำลง ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซสำหรับถังหมักทั้งสองจึงลดลง ส่วนช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 2.03-10.02 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน (หลังจากเติมตะกอนแบคทีเรียใหม่ลงในถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบี) ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซสำหรับถังหมักกรดแบบตัวกลางกรองลดลงเรื่อย ๆ เมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น แสดงว่าสารอินทรีย์ส่วนใหญ่ถูกย่อยสลายไปเป็นกรดอินทรีย์มากกว่านำไปใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ จะเห็นได้จากมีปริมาณกรดไขมันระเหยเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการรีไซเคิลจาก 1:1 เป็น 3:1 ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 10.95 และ 13.05 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน พบว่าประสิทธิภาพการผลิตก๊าซเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เป็น



รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ  
พิจารณาเทียบกับ กก.ชีโอดี ที่ถูกกำจัด

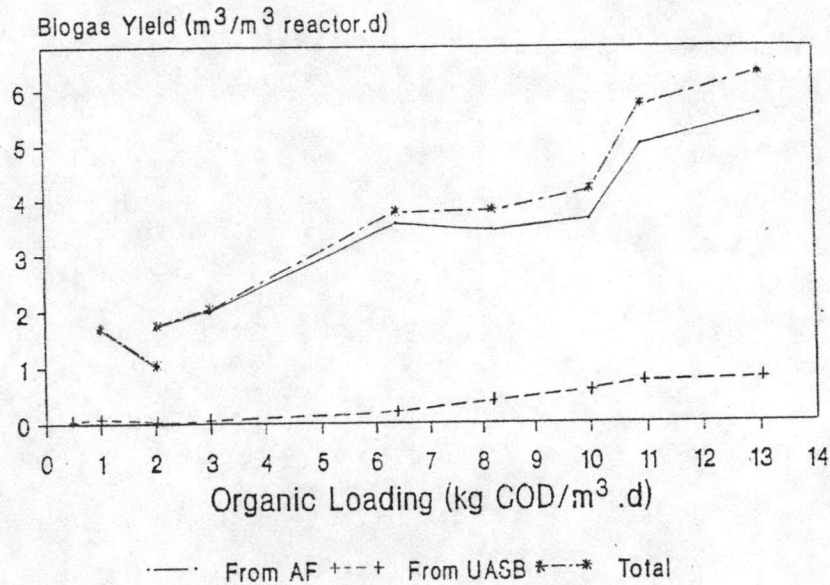
ผลมาจากการนำตะกอนแบคทีเรียจากถังหมักมีเทนกลับมารีไซเคิลเพิ่มขึ้น ประกอบกับ ประสิทธิภาพการลดปริมาณสารอินทรีย์ลดลง แต่อัตราการผลิตก๊าซไม่ลดลงตามไปด้วย

ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซสำหรับถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีหลังจากเติมตะกอนใหม่ลงไป มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยประสิทธิภาพการผลิตก๊าซสำหรับถังหมักมีเทนในช่วงนี้สูงกว่าประสิทธิภาพสำหรับถังหมักกรดถึง 4.8-15.2 เท่า การที่เป็นเช่นนี้เป็นสิ่งยืนยันได้อีกประการหนึ่งว่าในถังหมักกรดแบบตัวกลางกรอง เกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ไปเป็นกรดอินทรีย์เป็นหลัก จะเห็นได้ว่าปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดสูงและมีปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำอากาศที่ออกจากถังหมักกรดแบบตัวกลางกรองสูง แต่ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซต่ำ ขณะที่ในถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนการสร้างก๊าซเป็นหลัก โดยพบว่าปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดต่ำกว่าในถังหมักกรด ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซกลับสูงกว่าถึง 4.8-15.2 เท่า โดยประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซสูงสุดเท่ากับ  $3.57 \text{ ม.}^3 / \text{กก.ชีโอดี}$

ที่ถูกกำจัด ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 6.38 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน และเมื่อเพิ่มอัตราส่วน การรีไซเคิลเป็น 3:1 ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 10.95-13.05 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซสำหรับถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากอัตรา การไหลที่สูงขึ้น, อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่สำหรับถังหมักมีเทนสูงถึง 32.12 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน, ระยะเวลาที่เก็บลดลง ซึ่งมีผลไปยังการทำงานของแบคทีเรียในถังหมักมีเทนเป็นอย่างมาก ทำให้ประสิทธิภาพในการใช้กรดอินทรีย์ของแบคทีเรียในถังหมักลดลง เป็นผลให้ปริมาณกรดไขมัน ระเหยในน้ำกากส่าที่ออกจากระบบสูงถึง 3,980 มก./ล.

(ค) พิจารณาเทียบกับปริมาตรของถังหมัก

ในการนี้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซขึ้นอยู่กับอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ในแต่ละถังหมัก มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงของอัตราการผลิตก๊าซ จากผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่าประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซเมื่อเทียบกับปริมาตรของถังหมักสำหรับ ถังหมักกรดแบบตัวกลางกรองสูงกว่าสำหรับถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีมาก ที่อัตราการป้อนสาร อินทรีย์เดียวกัน แสดงว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนการสร้างก๊าซในถังหมักมีเทนแบบ ยูเอเอสบีช้ากว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาในถังหมักกรดแบบตัวกลางกรอง (ซึ่งให้ก๊าซคาร์บอนได- ออกไซด์เป็นส่วนใหญ่) มาก ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซสำหรับถังหมักทั้งสอง หลังจากเติม ตะกอนแบคทีเรียใหม่ลงในถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีแล้ว มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อน สารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจาก 2.03 ไปถึง 13.05 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน อธิบายได้ในทำนองเดียวกับ การเพิ่มขึ้นของอัตราการผลิตก๊าซ



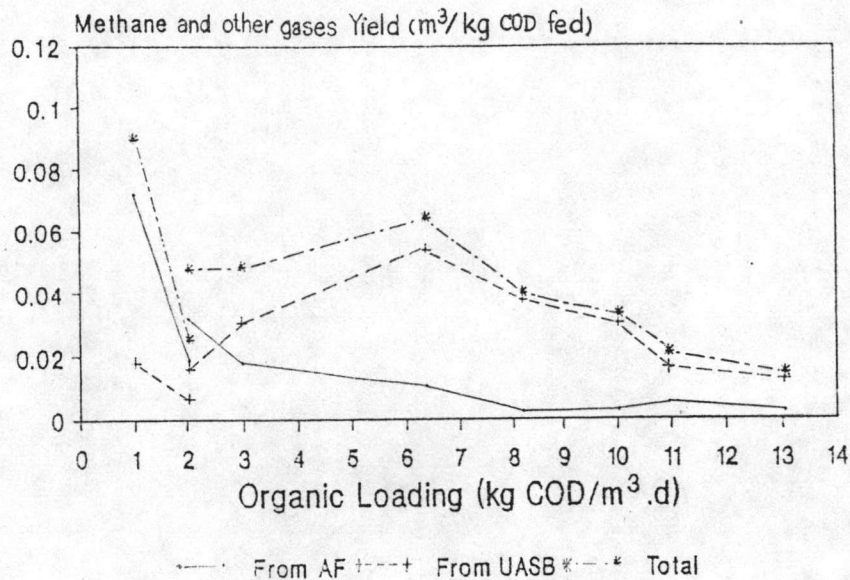
รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพพิจารณาเทียบกับปริมาณถังหมัก  
ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ

#### 4.8.4 ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทน

เนื่องจากสัดส่วนของมีเทนและก๊าซอื่น ๆ ในก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้นี้ไม่ได้ได้จากการวิเคราะห์ปริมาณมีเทนโดยตรง แต่ได้จากการคำนวณจากปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ ดังนั้นประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนของระบบที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้จะจึงเป็นค่าประสิทธิภาพโดยประมาณเท่านั้น ในที่นี้จะแยกพิจารณาเป็น 3 กรณีเช่นเดียวกัน

##### (ก) พิจารณาเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ถังหมัก

แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ ดังรูปที่ 4.17 แสดงประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนต่อปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าระบบ ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ โดยในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์  $1.01-2.03 \text{ กก.ชีโอดี}/\text{ม.}^3\text{-วัน}$  ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซ



รูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนต่อปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าระบบ  
ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ

มีเทนสำหรับถังหมักทั้งสองลดลง อธิบายได้ในทำนองเดียวกับประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ  
ในหัวข้อ 4.5.3 (ก)

หลังจากเติมตะกอนแบคทีเรียใหม่ลงในถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีแล้ว  
เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ขึ้น ที่ช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 2.03-10.02 กก.ชีโอดี/  
ม.<sup>3</sup>-วัน ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสำหรับถังหมักกรดแบบตัวกลางกรองลดลงเรื่อย ๆ  
เนื่องจากมีปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำอากาศสูงขึ้น ทำให้แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนในถังหมัก  
กรดมีปริมาณและประสิทธิภาพลดลง และในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 10.95-13.05  
กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสำหรับถังหมักกรดแบบตัวกลางกรองเพิ่ม  
ขึ้นเพียงเล็กน้อยเป็น 0.005 ม.<sup>3</sup>/กก.ชีโอดี ที่ป้อนเข้าสู่ถังหมัก ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์  
10.95 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน แม้อัตราการผลิตก๊าซ (มล./วัน) จะเพิ่มขึ้นอย่างมากก็ตาม  
เนื่องจากมีปริมาณกรดไขมันระเหยสะสมอยู่สูง ทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของแบคทีเรีย



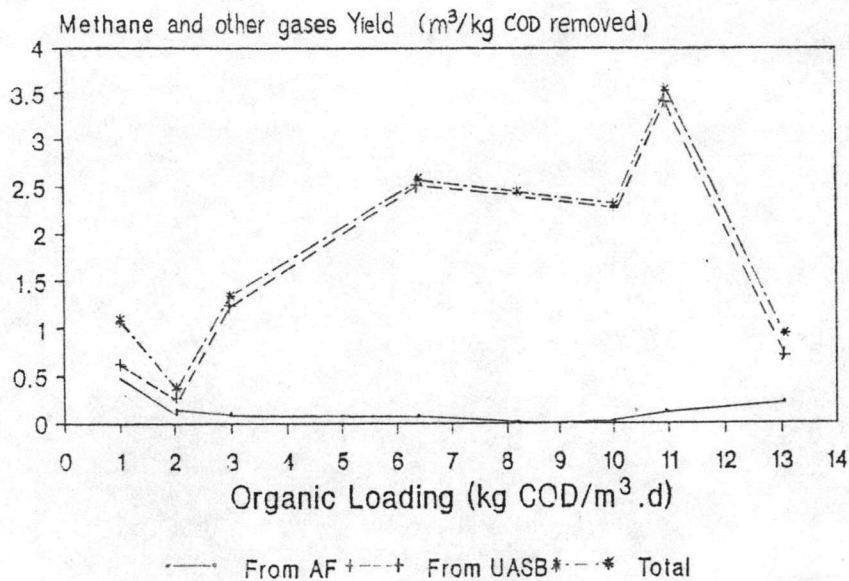
กลุ่มสร้างมีเทนลดลง ประกอบกับอัตราการไหลสูงถึง 30.75 ล./วัน ซึ่งทำให้มีปริมาณตะกอนแบบที่เรี่ยถูก wash out สูง (SS = 4,180 มก./ลิตร)

ส่วนประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสำหรับถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบี หลังจากเติมตะกอนใหม่ลงไปพบว่ามีความไว้มเพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.054 ม.<sup>3</sup>/กก.ชีโอดีที่ป้อนเข้าสู่ถังหมัก ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 6.38 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน จากนั้นจะลดลงเล็กน้อยเหลือ 0.030 ม.<sup>3</sup>/กก.ชีโอดี ที่ป้อนเข้าสู่ถังหมักที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 10.02 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน เนื่องจากมีปริมาณกรดไขมันระเหยสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 996 มก./ล. เป็น 3,000 และ 2,580 มก./ล. ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 8.20 และ 10.02 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ตามลำดับ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของแบบที่เรี่ยกลุ่มสร้างมีเทนลดลง แต่เนื่องจากในช่วงนี้มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณตะกอนแบบที่เรี่ยในถังหมักสูง เป็นการชดเชยกับแบบที่เรี่ยในส่วนที่เสียไป จึงทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนลดลงไม่มากนัก และที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 10.95-13.05 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนลดลงอย่างมากจนเห็นได้ชัด จาก 0.030 ม.<sup>3</sup>/กก.ชีโอดี ที่ป้อนเข้าสู่ถังหมัก เหลือเพียง 0.016 และ 0.013 ม.<sup>3</sup>/กก.ชีโอดี ที่ป้อนเข้าสู่ถังหมัก ตามลำดับ อธิบายได้ในลักษณะเดียวกัน คือ อัตราการไหลสูงขึ้น, ปริมาณตะกอนแบบที่เรี่ยในถังหมักลดลง, ปริมาณกรดไขมันระเหยสูงขึ้น และระยะเวลาที่เก็บที่สั้นลง ทำให้ประสิทธิภาพของแบบที่เรี่ยกลุ่มสร้างมีเทนลดลง ดังจะเห็นได้จากสัดส่วนของมีเทนในก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ในช่วงนี้ลดลงจากประมาณ 70 % เหลือเพียง 63 % และ 62 % ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 10.95 และ 13.05 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสำหรับถังหมักทั้งสองพบว่า ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสำหรับถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีสูงกว่าประมาณ 5.1-16.5 เท่าในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 6.38-13.05 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ดังนั้นประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนรวมของทั้งระบบจึงขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพการผลิตก๊าซของถังหมักมีเทนเป็นหลัก

(ข) พิจารณาเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด

รูปที่ 4.18 แสดงประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนต่อปริมาณสารอินทรีย์



รูปที่ 4.18 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ  
พิจารณาเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด

ที่ถูกกำจัด แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มสูงขึ้น คล้ายคลึงกับประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพในข้อ 4.8.4 (ก) โดยประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสำหรับถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีสูงกว่าประสิทธิภาพของถังหมักกรดที่ทุก ๆ อัตราการป้อนสารอินทรีย์ ในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 2.98-6.38 กก.ชีโอดี/ $\text{m}^3$ -วัน สูงกว่าประมาณ 11.7-34.6 เท่า และในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 8.20-10.02 กก.ชีโอดี/ $\text{m}^3$ -วัน สูงกว่าประมาณ 106-142 เท่า และในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 10.95-13.05 กก.ชีโอดี/ $\text{m}^3$ -วัน สูงกว่าประมาณ 3 และ 29 เท่า ตามลำดับ

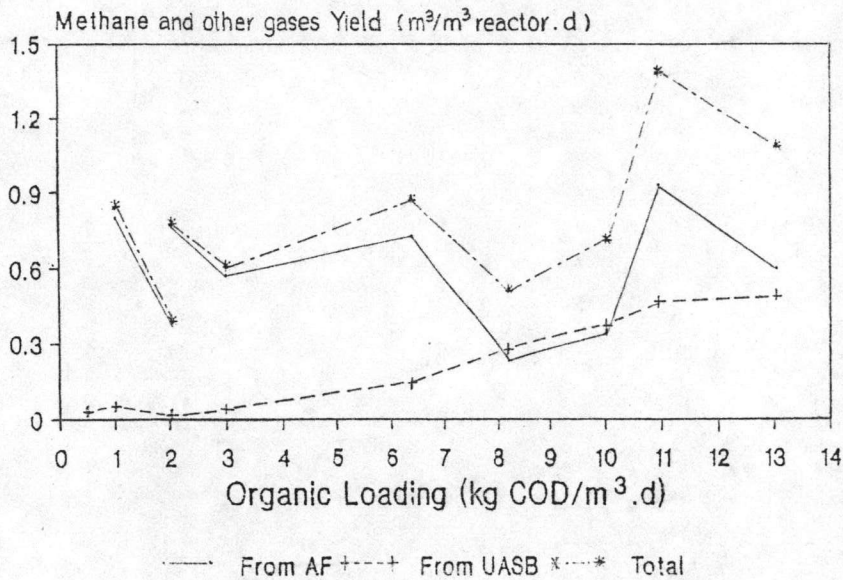
หลังจากเติมตะกอนแบคทีเรียใหม่ลงในถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีแล้ว ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสำหรับถังหมักกรดแบบตัวกลางกรอง เมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นพบว่าแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ จาก 0.15  $\text{m}^3/\text{กก.ชีโอดี}$  ที่ถูกกำจัด จนต่ำสุดที่ 0.017  $\text{m}^3/\text{กก.ชีโอดี}$  ที่ถูกกำจัด ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 8.20 กก.ชีโอดี/ $\text{m}^3$ -วัน

และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการรีไซเคิลเป็น 3:1 เนื่องจากมีอัตราการผลิตก๊าซสูงขึ้น ส่วนถึงหมักมีเทนแบบยูเอเอสบี แนวโน้มของประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นจาก 1.24 ม.<sup>3</sup>/กก.ชีโอดี ที่ถูกกำจัด จนสูงสุดที่ 2.51 ม.<sup>3</sup>/กก.ชีโอดี ที่ถูกกำจัด ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 6.38 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน จากนั้นจึงลดลงเล็กน้อยเหลือ 2.27 ม.<sup>3</sup>/กก.ชีโอดี ที่ถูกกำจัด ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 13.05 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน เนื่องจากมีปริมาณกรดไขมันระเหยสะสมในน้ำกากส่าที่เข้าสู่ถึงหมักสูงขึ้น เป็นผลไปยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนในถังหมัก และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการรีไซเคิลเป็น 3:1 พบว่าที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 10.95 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นถึง 50 % เนื่องจากประสิทธิภาพการลดปริมาณสารอินทรีย์ในถังหมักมีเทนลดลงอย่างมาก เหลือเพียง 4 % ในขณะที่อัตราการผลิตก๊าซเพิ่มขึ้น

(ค) วิจารณ์เกี่ยวกับปริมาณของถังหมัก

ขึ้นกับอัตราการผลิตก๊าซและองค์ประกอบของก๊าซที่ผลิตได้ ในส่วนของถังหมักกรดแบบตัวกลางกรองหลังจากเติมตะกอนแบคทีเรียลงในถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีแล้วพบว่าประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลง ไม่ขึ้นกับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนต่ำสุดเท่ากับ 0.23 ม.<sup>3</sup>/ปริมาตรถังหมัก-วัน ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 8.20 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ซึ่งตรงกับช่วงที่มีสัดส่วนของมีเทนในก๊าซชีวภาพต่ำสุด และเป็นช่วงที่มีการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันระเหยสูง (จาก 2,250 มก./ล. เป็น 4,775 มก./ล.) ส่วนประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสำหรับถังหมักกรดแบบตัวกลางกรองสูงสุดเท่ากับ 0.93 ม.<sup>3</sup>/ปริมาตรถังหมัก-วัน ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 10.95 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน และที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์สูงสุด 13.05 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ซึ่งเป็นช่วงที่เสถียรภาพของระบบแย่งลง ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนกลับลดลงอีกเหลือเพียง 0.60 ม.<sup>3</sup>/ปริมาตรถังหมัก-วัน

วิจารณ์ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทน สำหรับถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีหลังจากเติมตะกอนแบคทีเรียใหม่ลงไปแล้ว พบว่า มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการผลิตก๊าซที่เพิ่มขึ้น โดยสัดส่วนของมีเทนในก๊าซชีวภาพ



รูปที่ 4.19 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนต่อปริมาณถังหมักที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ

ที่ผลิตได้ค่อนข้างคงที่ในช่วง 60-70 % โดยประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซสำหรับถังหมักมีเทนสูงสุดเท่ากับ  $0.49 \text{ m}^3/\text{ปริมาณถังหมัก} \cdot \text{วัน}$  ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์สูงสุด  $13.05 \text{ กก. ซีโอดี}/\text{m}^3 \cdot \text{วัน}$  และอัตราการผลิตก๊าซสูงสุด  $27,320 \text{ มล.}/\text{วัน}$

#### 4.9 เสถียรภาพ (Stability) ของระบบหมัก

เสถียรภาพของระบบหมักขึ้นกับการรักษาสมดุลการทำงาน ระหว่างแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดและกลุ่มสร้างมีเทน สิ่ง que แสดงว่าเสถียรภาพของระบบลดลง คือ มีปริมาณกรดไขมันระเหยเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และการลดลงของก๊าซผลิตภัณฑ์ ซึ่งสาเหตุที่ทำให้เสถียรภาพของระบบลดลง ได้แก่ อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่สูงเกินไป (over loading), การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างกระทันหัน และการที่แบคทีเรียในระบบไม่คุ้นเคยกับสภาพของน้ำเสีย จากการ

เปลี่ยนแปลงเหล่านี้ทำให้อัตราเร็วที่ระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัวลดลงด้วย (Kroeker et al., 1979)

จากการทดลองพบว่า ในช่วงเริ่มต้นการทำงานของระบบ (อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 0.49-2.03 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน) แบคทีเรียในระบบต้องการเวลาในการปรับตัวให้เข้ากับสภาวะในการทำงาน ซึ่งในช่วงนี้แบคทีเรียถูก wash out สูง ทำให้อัตราการผลิตก๊าซต่ำ แสดงว่าในช่วงนี้เสถียรภาพของระบบยังต่ำอยู่ อย่างไรก็ตาม หลังจากเติมตะกอนแบคทีเรียใหม่ลงในถังหมักมีเทนแบบชูเอเอสบีแล้ว (ในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 2.03-10.95 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน) ซึ่งเป็นช่วงที่แบคทีเรียมีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ระบบหมักมีเสถียรภาพดีมาก มีความสามารถในการรักษาสมดุลความเป็นกรด-เบสในระบบสูง (สภาพความเป็นด่างในน้ำกากส่าที่ออกจากระบบ 6,220-9,970 มก./ล.) แม้ในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 8.20-10.95 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ซึ่งมีปริมาณกรดไขมันระเหยสูงก็ตาม (ปริมาณกรดไขมันระเหยประมาณ 2,580-3,000 มก./ล.) จึงทำให้ค่าพีเอชของระบบเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก และยังคงอยู่ในช่วงที่เป็นกลาง ซึ่งเป็นผลดีต่อแบคทีเรียในระบบ ผลกระทบของปริมาณกรดไขมันระเหยต่อประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพน้อย โดยจะพบว่าแม้จะมีปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำกากส่าที่เข้าสู่ถังหมักมีเทนแบบชูเอเอสบี สูงถึง 4,250 มก./ล. ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 10.02 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ระบบยังให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากถังหมักมีเทนสูงสุด

สำหรับที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 13.05 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ซึ่งเป็นอัตราการป้อนสารอินทรีย์สูงสุดของระบบนี้ เสถียรภาพของระบบหมักลดลงโดยพิจารณาจากสภาพความเป็นด่างที่ลดลง และปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำกากส่าที่ออกจากระบบสูงถึง 3,980 มก./ล. เป็นผลให้ค่าพีเอชของระบบและประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซลดลงอย่างเห็นได้ชัด ดังได้กล่าวมาแล้ว ในช่วงนี้แบคทีเรียอ่อนแอจนทำให้ต้องใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวยาวนานถึง 47 วัน และยิ่งพบอีกว่า ในระหว่างช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 13.05 กก.ซีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ระบบมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมากกว่าในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์อื่น ๆ อีกด้วย



#### 4.10 สภาวะที่เหมาะสมของระบบหมัก

สภาวะที่เหมาะสมของระบบหมัก พิจารณาจากประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์จากน้ำเสียที่เข้าระบบ, อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและสัดส่วนของมีเทนในก๊าซที่ผลิตได้ และเสถียรภาพของระบบหมักเป็นสำคัญ ในที่นี้จะไม่พิจารณาในช่วงก่อนการเติมตะกอนแบคทีเรียลงในถังหมักมีเทนแบบ ฮูเอเอสบี ซึ่งถือว่าเป็นช่วงของการเริ่มต้นของระบบหมัก

##### 4.10.1 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการลดปริมาณสารอินทรีย์

พิจารณาจากสภาวะที่ให้ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์สูงสุด คือ ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 2.98 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ระยะเวลาพักเก็บน้ำกากส่าในระบบ 17.5 วัน ให้อัตราการผลิตก๊าซรวมทั้งระบบ 15,330 มล./วัน ประสิทธิภาพในการลดสารอินทรีย์เท่ากับ 56.15 % ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับถังหมักกรดแบบตัวกลางกรองเท่ากับ 0.062 ม.<sup>3</sup>/กก.ชีโอดี ที่ป้อนเข้าสู่ถังหมัก หรือ 0.37 ม.<sup>3</sup>/กก.ชีโอดี ที่ถูกกำจัด หรือ 1.98 ม.<sup>3</sup>/ปริมาตรถังหมัก-วัน และสำหรับถังหมักมีเทนแบบฮูเอเอสบีเท่ากับ 0.077 ม.<sup>3</sup>/กก.ชีโอดี ที่ป้อนเข้าสู่ถังหมัก หรือ 3.57 ม.<sup>3</sup>/กก.ชีโอดี ที่ถูกกำจัด หรือ 0.21 ม.<sup>3</sup>/ปริมาตรถังหมัก-วัน ส่วนประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสำหรับถังหมักกรดแบบตัวกลางกรองเท่ากับ 0.018 ม.<sup>3</sup>/กก.ชีโอดี ที่ป้อนเข้าสู่ถังหมัก หรือ 0.11 ม.<sup>3</sup>/กก.ชีโอดี ที่ถูกกำจัด หรือ 0.57 ม.<sup>3</sup>/ปริมาตรถังหมัก-วัน และสำหรับถังหมักมีเทนแบบฮูเอเอสบี เท่ากับ 0.031 ม.<sup>3</sup>/กก.ชีโอดี ที่ป้อนเข้าสู่ถังหมัก หรือ 1.24 ม.<sup>3</sup>/กก.ชีโอดี ที่ถูกกำจัด หรือ 0.038 ม.<sup>3</sup>/ปริมาตรถังหมัก-วัน

อย่างไรก็ตาม จากระยะเวลาพักเก็บที่ยาวนานถึง 17.5 วัน ซึ่งเป็นไปได้ยากในการนำไปใช้งานในสภาวะจริง ดังนั้นในทางปฏิบัติอาจเลือกใช้ช่วงอื่น ๆ ที่มีระยะเวลาพักเก็บสั้นกว่าแทน เช่น ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 8.20 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ระยะเวลาพักเก็บ 5.4 วัน ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ 48.49 % หรือที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 10.02 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ระยะเวลาพักเก็บ 3.6 วัน ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ 47.52 % ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซสูงกว่าด้วย

#### 4.10.2 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ

พิจารณาจากสภาวะที่ให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด คือที่ อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 6.38 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ สำหรับถังหมักกรดแบบตัวกลางกรองเท่ากับ 0.052 ม.<sup>3</sup>/กก.ชีโอดี ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ หรือ 0.36 ม.<sup>3</sup>/กก.ชีโอดี ที่ถูกกำจัด หรือ 3.58 ม.<sup>3</sup>/ปริมาตรถังหมัก-วัน และสำหรับถังหมัก มีเทนแบบยูเอเอสบีเท่ากับ 0.077 ม.<sup>3</sup>/กก.ชีโอดี ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ หรือ 3.57 ม.<sup>3</sup>/กก.ชีโอดี ที่ถูกกำจัด หรือ 0.21 ม.<sup>3</sup>/ปริมาตรถังหมัก-วัน ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนสำหรับถังหมัก กรดแบบตัวกลางกรองเท่ากับ 0.010 ม.<sup>3</sup>/กก.ชีโอดี ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ หรือ 0.072 ม.<sup>3</sup>/กก.ชีโอดี ที่ถูกกำจัด หรือ 0.72 ม.<sup>3</sup>/ปริมาตรถังหมัก-วัน และสำหรับถังหมักมีเทนแบบ ยูเอเอสบี เท่ากับ 0.054 ม.<sup>3</sup>/กก.ชีโอดี ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ หรือ 2.51 ม.<sup>3</sup>/กก.ชีโอดี ที่ ถูกกำจัด หรือ 0.14 ม.<sup>3</sup>/ปริมาตรถังหมัก-วัน สัดส่วนของมีเทนในก๊าซที่ผลิตได้จากถังหมัก กรดแบบตัวกลางกรองและถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีเท่ากับ 20.2 % และ 70.22 % ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์<sup>1</sup>ซึ่งมีข้อจำกัดที่ต้องใช้ระยะเวลาที่กักเก็บยาวนานถึง 9.1 วัน เช่นกัน

#### 4.11 ประสิทธิภาพของระบบหมักและความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน

ประสิทธิภาพของระบบตัวกลางกรอง-ยูเอเอสบี แบบอนุทมิสูง ชนิดสองชั้นตอน ในการบำบัดน้ำกากสำเมื่อเทียบกับระบบอื่น ๆ ในงานวิจัยที่ผ่านมา แสดงในตารางที่ 4.4 เมื่อ พิจารณาเปรียบเทียบกับระบบยูเอเอสบีแบบชั้นตอนเดี่ยวที่อนุทมิสูง (อะเคือ บุญศิริ, 2536) ในการบำบัดน้ำกากสำระดับห้องปฏิบัติการที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์เดียวกัน ได้ดังนี้

- การเริ่มต้นการทำงานของระบบ พบว่า ระบบทั้งสองจำเป็นต้องมีการเติมตะกอน แบนคที่เรีลลงในถังหมักยูเอเอสบีเพื่อรักษาประสิทธิภาพของระบบ เมื่อดำเนินการทดลองไปได้ระยะเวลาหนึ่งเนื่องจากมีการ wash out สูงกว่าการเพิ่มจำนวนแบคทีเรียในถังหมัก
- ระยะเวลาที่กักเก็บน้ำกากสำในระบบ พบว่า ระบบหมักที่ทดลองใช้ระยะเวลา กักเก็บต่ำกว่า คือสำหรับระบบชั้นตอนเดี่ยวใช้เวลา 9-42 วัน ส่วนในระบบหมักที่ทดลองใช้เวลา

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบหมักยูเอเอสบีแบบขึ้นตอนเดียวที่อุณหภูมิสูง กับระบบหมักที่ทดลองในการบำบัดน้ำกากส่า

		ระบบสองขั้นตอนที่ทดลอง			ระบบขั้นตอนเดียว
		ถังหมักกรด	ถังหมักมีเทน	ทั้งระบบ	แบบอุณหภูมิสูง
ถังหมัก		ตัวกลางกรอง	ยูเอเอสบี	-	ยูเอเอสบี*
ปริมาตรใช้งาน	ม. <sup>3</sup>	0.0068	0.036	0.0418	0.036
ความเข้มข้นสารอินทรีย์ (COD)	มก./ล.	60,000	33,100	60,000	113,280
อุณหภูมิ	°ซ	55	55	55	55
อัตราการป้อนสารอินทรีย์	กก.ซีไอดี/ม. <sup>3</sup> -วัน	143.7	24.7	11.0	10.1
ระยะเวลาพักเก็บ	วัน	(13.6 ชม.)	3	3.6	8 10
อัตราส่วนการรีไซเคิล		-	-	1 1	1 1
ปริมาณกรดอินทรีย์ในน้ำกากส่า					
ที่ออกจากระบบ	มก./ล.	4,260	2,580	2,580	490
ประสิทธิภาพการลดสารอินทรีย์	%	26.2	8.0	47.5	44.0
ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซ	ม. <sup>3</sup> /กก.ซีไอดี ที่ป้อน	0.031	0.046	0.077	0.089
	ม. <sup>3</sup> /กก.ซีไอดี ที่ถูกกำจัด	0.23	3.47	3.7	0.226
อัตราการผลิตก๊าซ	ลิตร/วัน	26	19	44	36
	ม. <sup>3</sup> /ปริมาตรถังหมักวัน	3.64	0.56	4.2	1.003
สัดส่วนของก๊าซมีเทนและอื่น ๆ	%	9.4	66	33.4	61

หมายเหตุ \* เป็นระบบขั้นตอนเดียวระดับห้องปฏิบัติการ (อะเคื่อ บุญศิริ, 2536)

เพียง 1.4-17.5 วันเท่านั้น ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบที่เห็นได้ชัดเจนของระบบสองขั้นตอน

- ปริมาณกรดไขมันระเหย (VFA) ในน้ำกากส่าที่ออกจากระบบ พบว่า ระบบแบบขั้นตอนเดียวให้ปริมาณ VFA ในน้ำกากส่าที่ออกจากระบบต่ำกว่าโดยเฉพาะในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์สูงกว่า 6 กก.ซีไอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ขึ้นไป อย่างไรก็ตาม แม้ว่าในระบบหมักที่ทดลองจะมีปริมาณ VFA ในน้ำกากส่าเพิ่มสูงกว่า 2,500 มก./ล. ก็ตาม แต่พบว่าอัตราการผลิตก๊าซและปริมาณตะกอนในถังหมักยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 10.95 กก.ซีไอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน



- เสถียรภาพของระบบหมักพบว่า การเปลี่ยนแปลงค่าสภาพความเป็นด่างและค่าพีเอช มีแนวโน้มเดียวกัน สำหรับระบบหมักแบบขึ้นตอนเดียวกัน เมื่อปริมาณ VFA เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ประสิทธิภาพการลดสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซลดลงอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ประสิทธิภาพในระบบสองขั้นตอนลดลงเพียงเล็กน้อย

- ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซ เมื่อคิดรวมทั้งระบบพบว่าระบบสองขั้นตอนมีประสิทธิภาพสูงกว่า แต่เมื่อคิดเทียบเฉพาะในส่วนถังหมักยูเอเอสบี พบว่า ประสิทธิภาพสำหรับระบบสองขั้นตอนต่ำกว่าประมาณ 2 เท่า ทั้งนี้เนื่องจากในน้ำกากส่าที่เข้าสู่ถังหมักมีเทนมีปริมาณ VFA สูง ซึ่งมีผลไปยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียบางส่วนในถังหมัก ประกอบกับระยะเวลาที่เก็บน้ำกากส่าในถังหมักต่ำกว่า พิจารณาเทียบกับระบบ pilot-plant (Suoza et.al, 1992) ซึ่งใช้ระยะเวลาที่เก็บ 10.8 วัน และให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซสูงกว่าด้วย)

- อัตราการป้อนสารอินทรีย์สูงสุด, ปริมาณมีเทนในก๊าซที่ได้ และประสิทธิภาพการลดสารอินทรีย์ สำหรับระบบทั้งสองไม่แตกต่างกันมากนัก อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซสำหรับระบบทั้งสองคือ 6 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน

พิจารณาเปรียบเทียบกับระบบสองขั้นตอนแบบอนุกรมที่ทดลองใช้บำบัดน้ำกากส่า โรงงานผลิตสุรา จ.ฉะเชิงเทรา, บุรีรัมย์ และอุดรธานี ซึ่งใช้ถังหมักกรดขนาดความจุ 450 ม.<sup>3</sup> ทำหน้าที่เป็นถังตกตะกอน และถังหมักมีเทนแบบยูเอเอสบีความจุ 350 ม.<sup>3</sup> (คิดเป็นอัตราส่วนปริมาตรถังหมักกรดต่อถังหมักมีเทนเท่ากับ 1:6.7) ดังนี้

- การเริ่มต้นการทำงานของระบบหมัก พบว่ามีตะกอนจากถังหมักยูเอเอสบีหลุดออกจากถังหมักเป็นปริมาณมากเช่นเดียวกัน

- ปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำกากส่าที่ออกจากระบบหมัก (VFA) พบว่าระบบหมักแบบอนุกรมให้ปริมาณ VFA ในน้ำกากส่าที่ออกจากระบบต่ำกว่า คืออยู่ในช่วงประมาณ 100-950 มก./ล. เท่านั้น

- อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของระบบทั้งสอง พบว่าระบบหมักแบบอนุกรมสูงสามารถรับสารอินทรีย์ได้สูงกว่า คือสามารถทำงานได้ดีในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 6.4-10.0 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน ในขณะที่ระบบหมักที่อนุกรมปานกลางสามารถรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ได้ดีในช่วง 2.6-4.2 กก.ชีโอดี/ม.<sup>3</sup>-วัน เท่านั้น

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบหมักชนิดสองขั้นตอนแบบอนุหมักปานกลาง  
กับระบบหมักที่ทดลองในการบำบัดน้ำกากส่า

		ระบบหมักที่ทดลอง	ระบบหมักสองขั้นตอน แบบอนุหมักปานกลาง *
ปริมาณถังหมัก			
ถังหมักกรด	ม. <sup>3</sup>	ตัวกลางทรง 0.0068	ถังตะกอน 450
ถังหมักมีเทน	ม. <sup>3</sup>	บูเออตปี 0.036	บูเออตปี 3,000
ความเข้มข้นสารอินทรีย์ที่ใช้	มก./ล.	58,000-66,000	51,000-61,000
อุณหภูมิ	°C	55	อุณหภูมิห้อง
อัตราการป้อนสารอินทรีย์	กก.ชีไอดี / ม. <sup>3</sup> วัน	6.4-10.0	2.6-4.2
ระยะเวลาเก็บ	วัน	3.6-9.1	14-22
ปริมาณกรดอินทรีย์ในน้ำกากส่า ที่ออกจากระบบ	มก./ล.	990-3,000	100-950
ประสิทธิภาพการลดสารอินทรีย์	%	47-56	50-65
ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซ	ม. <sup>3</sup> /กก.ชีไอดี ที่ป้อน	0.03-0.06	0.14-0.44
	ม. <sup>3</sup> /กก.ชีไอดี ที่ถูกกำจัด	2.3-2.6	0.26-0.68
สัดส่วนของก๊าซมีเทนและอื่น ๆ	%	65-70	61-70

หมายเหตุ \* เป็นระบบหมักชนิดสองขั้นตอนแบบ full-scale ที่ทดลองใช้ในโรงงาน  
ผลิตสุรา จ.ฉะเชิงเทรา, บุรีรัมย์ และอุดรดิตต์ (Chavadej and  
Chattrakoon, 1991)

- ประสิทธิภาพการลดปริมาณสารอินทรีย์ พบว่าระบบหมักแบบอนุหมักปานกลางให้  
ประสิทธิภาพการลดปริมาณสารอินทรีย์ 50-65 % ซึ่งสูงกว่าในระบบแบบอนุหมักสูงที่ให้ประสิทธิภาพ  
อยู่ในช่วง 47-56 %
- ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซ พบว่าระบบหมักแบบอนุหมักปานกลางให้ประสิทธิภาพการ  
ผลิตก๊าซสูงกว่าระบบหมักแบบอนุหมักสูง แต่สัดส่วนของมีเทนในก๊าซที่ผลิตได้จากถังหมักมีเทน  
ใกล้เคียงกัน คือประมาณ 65-70 %
- ระบบหมักแบบอนุหมักปานกลางนั้น ถังหมักกรดทำหน้าที่เป็นถังตกตะกอน เพื่อลด  
ปริมาณตะกอนที่หลุดออกจากถังหมักมีเทน ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์และ  
การผลิตก๊าซส่วนใหญ่จึงเน้นที่ส่วนของถังหมักมีเทน อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงระยะเวลา

กักเก็บน้ำอากาศในถังหมักมีเทน พบว่า ระบบหมักแบบอุณหภูมิปานกลางใช้ระยะเวลาเก็บชว  
นานถึง 14-22 วัน มากกว่าระยะเวลาเก็บน้ำอากาศในระบบแบบอุณหภูมิสูงถึง 2.4-3.9  
เท่า

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบหมักทั้งสามที่กล่าวมาแล้ว พบว่าระบบหมัก  
ยูเอเอสบีแบบอุณหภูมิสูง ชนิดขึ้นตอนเดียว และระบบหมักแบบสองขึ้นตอน ที่อุณหภูมิปานกลาง ให้  
ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซสูงกว่าระบบหมักที่ทดลอง ในขณะที่ใช้ระยะเวลาเก็บชวานานกว่า  
ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า ระยะเวลาเก็บน้ำอากาศในถังหมักเป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่มีผลต่อ  
ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซด้วย

พิจารณาถึงการทำงานของระบบหมักที่ทดลอง จากผลการทดลองที่ได้ พบว่า ปริมาณ  
VFA ในน้ำอากาศที่ออกจากถังหมักกรดสูงกว่าในน้ำอากาศที่ออกจากถังหมักมีเทน แสดงว่าหลัง  
จากผ่านถังหมักกรดแล้ว สารอินทรีย์ถูกนำไปใช้ในการผลิตกรดอินทรีย์เป็นส่วนใหญ่ ประสิทธิภาพ  
การลดสารอินทรีย์สำหรับถังหมักกรดสูงกว่าถังหมักมีเทน ซึ่งสอดคล้องกับหลักการทำงานของ  
ระบบหมักแบบสองขึ้นตอนที่ต้องการให้ในถังหมักกรดเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนการสร้างกรดเป็นส่วน  
ใหญ่ โดยการควบคุมให้อัตราการป้อนสารอินทรีย์สำหรับถังหมักกรดสูงกว่าถังหมักมีเทนมาก  
ผลที่ตามมาคือ ได้ก๊าซชีวภาพที่มีองค์ประกอบเป็นคาร์บอนไดออกไซด์สูง อย่างไรก็ตาม เมื่อ  
พิจารณาถึงอัตราการผลิตก๊าซจากถังหมักทั้งสองพบว่า อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในถังหมักกรดสูง  
กว่าในถังหมักมีเทนที่ทุก ๆ อัตราการป้อนสารอินทรีย์ แสดงว่า เกิดปฏิกิริยาการสร้างกรด  
อินทรีย์และการสร้างก๊าซชีวภาพในถังหมักกรด ได้รวดเร็วกว่าในถังหมักมีเทนมาก และจากการ  
พิจารณาเปรียบเทียบระบบหมักที่ทดลอง กับระบบหมักแบบขึ้นตอนเดียว ที่อุณหภูมิสูง และระบบหมัก  
แบบสองขึ้นตอน ที่อุณหภูมิปานกลางพบว่า ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซ (คิดเทียบกับกก.ชีโอดี ที่ป้อน)  
ของระบบหมักแบบสองขึ้นตอน ที่อุณหภูมิปานกลาง สูงกว่าอีก 2 ระบบ เป็นไปได้ว่าที่อุณหภูมิ  
55 °C นี้ไม่เหมาะสมกับการทำงานของแบคทีเรียที่นำมาใช้

สำหรับการนำระบบหมักแบบสองขึ้นตอน ที่อุณหภูมิสูงนี้ไปใช้งานในระดับอุตสาหกรรมนั้น  
ต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ในการใช้งานด้วย กล่าวคือ ถ้าต้องการลดปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสีย  
ให้มากที่สุด ควรให้ความสำคัญกับสภาวะต่าง ๆ ที่เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียใน  
ถังหมักกรด ใช้ถังหมักกรดที่มีขนาดใหญ่กว่าถังหมักมีเทน และใช้ระยะเวลาเก็บน้ำอากาศใน

ดังหมักยาวนานขึ้น (ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า การใช้ระยะเวลาที่เก็บยาวนาน จะให้
 ประสิทธิภาพการลดปริมาณสารอินทรีย์สูงกว่า) ในทางกลับกัน ถ้าต้องการปริมาณก๊าซชีวภาพ
 ที่มีสัดส่วนของก๊าซมีเทนสูง ควรให้ความสำคัญกับสภาวะต่าง ๆ ในการทำงานของแบคทีเรีย
 ขนาดของถังหมัก, อัตราการไหลของน้ำกากส่าที่จะเข้าสู่ถังหมัก และระยะเวลาที่เก็บน้ำกากส่า
 ในถังหมักมีเทนมากกว่าในถังหมักกรด ซึ่งจากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซของ
 ระบบหมักที่ทดลองกับระบบอื่น ๆ ในงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซของระบบ
 หมักที่ทดลอง (คิดเทียบกับกก.ชีโอดี ที่ป้อน) ต่ำกว่า เหตุผลหนึ่งอาจเนื่องมาจาก การใช้ระยะเวลา
 ที่เก็บสั้นเกินไป และถ้าต้องการให้ได้ทั้งประสิทธิภาพการลดปริมาณสารอินทรีย์และการ
 ผลิตก๊าซสูง ต้องพิจารณาถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับขนาดของถังหมักทั้งสอง เพื่อให้ทำงาน
 ได้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่ต้องการ สำหรับระบบหมักที่ทดลองใช้อัตราส่วนปริมาตรถังหมักกรด
 ต่อถังหมักมีเทนเป็น 1:5.1 ซึ่งพบว่าในส่วน of ถังหมักกรดสามารถทำงานได้ตามเป้าหมาย
 แต่ในส่วน of ถังหมักมีเทนยังคงให้อัตราการผลิตก๊าซที่ต่ำอยู่ ดังนั้นในการใช้งานจริงอาจเปลี่ยน
 อัตราส่วนของปริมาตรของถังหมักโดยให้ถังหมักมีเทนใหญ่ขึ้นกว่านี้ ซึ่งจะทำได้ระยะเวลา
 ที่เก็บน้ำกากส่าในถังหมักมีเทนยาวนานขึ้น หรือลดขนาดของถังหมักกรด ซึ่งอัตราส่วนของ
 ปริมาตรถังหมักที่เหมาะสมจะเป็นเท่าใดนั้นควรจะมีการศึกษาต่อไป