

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิจารณ์

4.1 การดำเนินการทดลอง

ก่อนเริ่มเดินระบบได้นำเชื้อมาจากถังยูเอเอสบีที่เลี้ยงเป็นเม็ดมาแล้วประมาณ 3.4 ลิตร แบ่งเป็น 3 ส่วนเท่า ๆ กัน ใส่ในถังยูเอเอสบีทั้ง 3 ถัง (ลักษณะของถังยูเอเอสบีที่ใช้ในการทดลอง ได้แสดงไว้แล้วในบทที่ 3) จากนั้นได้นำน้ำตาลเป็นสารอาหารเพียงอย่างเดียวป้อนให้ระบบเพื่อให้เชื้อได้ฟื้นตัวก่อน เนื่องจากเชื้อขาดอาหารเป็นเวลานาน โดยการเพิ่มน้ำตาลที่ละน้อย เริ่มต้นจากซีโอดีประมาณ 150 จนถึง 500 มก./ล. ในระยะนี้ใช้เวลาประมาณ 2 เดือน จากนั้นจึงเริ่มผสมน้ำชะมูลฝอยเพิ่มให้แก่เชื้อเพื่อให้เชื้อคุ้นเคยกับน้ำเสีย โดยเพิ่มน้ำชะมูลฝอยให้แก่ระบบทีละน้อย โดยคิดเป็นซีโอดีประมาณ 100 ถึง 300 มก./ล. และใช้เวลาเก็บกักน้ำเป็น 1 วัน เท่ากับเวลาเก็บกักที่ใช้ในการทดลองจริง ช่วงนี้ใช้เวลาอีกประมาณ 2 เดือน แล้วจึงเริ่มทำการทดลอง ในช่วงแรก จะทำการทดลองเปลี่ยนค่าอัตราส่วนซีโอดีน้ำชะมูลฝอยต่อซีโอดีน้ำตาล 2 ค่า คือ 1:1 และ 1:2 โดยเจือจางน้ำชะมูลฝอยประมาณ 12 เท่า ให้มีค่าซีโอดีประมาณ 500 มก./ล. และเติมน้ำตาลทรายคิดเป็นซีโอดีเท่ากับ 500 และ 1,000 มก./ล. ในการทดลองที่มีการเติมน้ำตาลจะใช้ถังยูเอเอสบี 2 ถัง ส่วนอีกถังหนึ่งจะใช้เป็นชุดควบคุม คือใช้บำบัดน้ำชะมูลฝอยอย่างเดียวที่ซีโอดีประมาณ 500 มก./ล. การทดลองในช่วงแรกนี้จะใช้เวลาประมาณ 5 เดือน ซึ่งระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว หลังจากนั้นได้ทำการทดลองในช่วงที่ 2 ต่อไป โดยยังคงใช้ถังยูเอเอสบีที่ไม่มีการเติมน้ำตาลในช่วงแรกเป็นชุดควบคุมตามเดิม(ป้อนน้ำชะมูลฝอยอย่างเดียว) ทั้งนี้เพราะน้ำชะมูลฝอยที่เก็บมาในช่วงที่ 2 นี้ อาจมีลักษณะสมบัติคลาดเคลื่อนไปจากช่วงแรก ส่วนถังยูเอเอสบีที่ใช้ทำการทดลองที่อัตราส่วนซีโอดีน้ำชะมูลฝอยต่อซีโอดีน้ำตาล 1:1 และ 1:2 จะใช้ทำการทดลองที่อัตราส่วนซีโอดีน้ำชะมูลฝอยต่อซีโอดีน้ำตาลเท่ากับ 1:3 และ 1:4 ตามลำดับ แผนภาพแสดงระยะเวลาที่ทำการทดลองตลอดช่วงแสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดประมาณ 14 เดือน โดยเริ่มจากเดือนมกราคม พ.ศ. 2542 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2543 ช่วง 5 เดือนแรกเป็นการเริ่มเดินระบบ และหลังจากนั้นจึงเริ่มทำการทดลองและวิเคราะห์ผลตามลำดับ ลำดับการทดลองสามารถสรุปได้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ระยะเวลาการทำวิจัย

ลำดับการทดลอง	พ.ศ. 2542												พ.ศ. 2543	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2
เริ่มเดินระบบ	██████████													
การทดลองครั้งที่ 1 (RUN1)														
- ชูดควบคุม						██████████	██████████	██████████	██████████					
- อัตราส่วนซีโอดีน้ำชะมูลฝอยต่อซีโอดีน้ำตาล 1:1						██████████	██████████	██████████	██████████					
- อัตราส่วนซีโอดีน้ำชะมูลฝอยต่อซีโอดีน้ำตาล 1:2						██████████	██████████	██████████	██████████					
การทดลองครั้งที่ 2 (RUN2)														
- ชูดควบคุม											██████████	██████████	██████████	██████████
- อัตราส่วนซีโอดีน้ำชะมูลฝอยต่อซีโอดีน้ำตาล 1:1											██████████	██████████	██████████	██████████
- อัตราส่วนซีโอดีน้ำชะมูลฝอยต่อซีโอดีน้ำตาล 1:2											██████████	██████████	██████████	██████████

ตารางที่ 4.2 สรุปลำดับการทดลอง

ชุดการทดลอง	อัตราส่วนซีโอดีน้ำชะมูลฝอยต่อซีโอดีน้ำตาล	ซีโอดีน้ำชะมูลฝอย	ซีโอดีน้ำตาล	รวม
ชูดควบคุม	1:0	500	0	500
R 1:1	1:1	500	500	1,000
R 1:2	1:2	500	1,000	1,500
R 1:3	1:3	500	1,500	2,000
R 1:4	1:4	500	2,000	2,500

หมายเหตุ เนื่องจากมีถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีอยู่ 3 ถัง ดังนั้นจึงแบ่งชุดการทดลองเป็น 2 ช่วง โดยให้ชูดควบคุมทำการทดลองต่อเนื่องกันทั้ง 2 ช่วง ส่วน R1:1 กับ R1:2 ทำพร้อมกัน R1:3กับR1:4 ทำพร้อมกัน



4.1.1 ลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอยที่ใช้ในการทดลอง

น้ำชะมูลฝอยที่ใช้ในการทดลองได้นำมาจากสถานฝังกลบมูลฝอยของเทศบาลอำเภอ ไทรน้อย ตั้งอยู่ที่อำเภอไทรน้อย จังหวัดนนทบุรี สถานฝังกลบแห่งนี้ได้ดำเนินงานมาแล้ว ประมาณ 13 ปี และยังใช้งานอยู่ เมื่อเก็บน้ำชะมูลฝอยมาแล้ว ได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะ สมบัติ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 เนื่องจากตลอดการทดลองได้เก็บน้ำชะมูลฝอยมาทั้งหมด 5 ครั้ง ในแต่ละครั้งจะทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติเพื่อเป็นตัวแทนของน้ำชะมูลฝอยในครั้งนั้น ๆ จำนวนตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับความยากง่ายของวิธีวิเคราะห์ รวมถึงความจำเป็นที่ จะต้องใช้การเจือจางก่อนทำการวิเคราะห์และความเข้มข้นของพารามิเตอร์นั้น ๆ เช่น ค่าซีไอดี จะต้องวิเคราะห์หลายครั้ง โดยทำการเจือจาง 100 เท่า 2-3 ครั้ง และใช้ปริมาณน้ำตัวอย่าง หลายค่า ได้แก่ 2, 3 และ 5 มล. เมื่อถึงขั้นตอนที่จะต้องไทเทรต ก็จะสังเกตได้ว่าตัวอย่างใด สามารถไทเทรตได้หรือไม่ได้ จากนั้นก็ทำการไทเทรตให้ได้ค่าที่เชื่อถือได้ แล้วนำค่าซีไอดีที่หาได้ มาเฉลี่ยกัน ก็จะได้ค่าตัวแทนของการเก็บน้ำครั้งนั้น ๆ ส่วนค่าพารามิเตอร์อื่น ค่าใดวิเคราะห์ได้ ง่าย เสียค่าใช้จ่ายน้อยและเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมระบบ ก็จะใช้จำนวนตัวอย่างมากและ วิเคราะห์หลายครั้ง เช่นค่าพีเอช ส่วนพารามิเตอร์ที่การวิเคราะห์ยุ่งยาก และไม่มีผลแก่ระบบ มากนัก ก็จะวัดเพียงครั้งเดียวต่อการเก็บน้ำชะมูลฝอยหนึ่งครั้ง ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ใน ตารางจึงแสดงเป็นช่วงระหว่างค่าน้อยที่สุดถึงมากที่สุดในการเก็บน้ำชะมูลฝอยทั้งหมด 5 ครั้ง

จากตารางที่ 4.3 มีข้อสังเกตดังนี้คือ น้ำชะมูลฝอยที่สถานฝังกลบแห่งนี้ มีค่าซีไอดีค่อนข้างสูง ในขณะที่ค่าบีไอดีมีค่าต่ำ เมื่อคิดเป็นอัตราส่วนบีไอดีต่อซีไอดีจะได้ค่าประมาณ 0.1 หรือกล่าวได้ว่า ค่าซีไอดีสูงกว่าค่าบีไอดี ประมาณ 10 เท่า นั้นแสดงให้เห็นว่า ในน้ำชะมูลฝอย มีสารอินทรีย์ที่ไม่ให้ค่าบีไอดีอยู่เป็นอันมาก ซึ่งถ้าจะเปรียบเทียบกับค่าบีไอดีบ่งถึงปริมาณสาร อินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่าย น้ำชะมูลฝอยก็คงจะมีสารอินทรีย์ชนิดที่ย่อยสลายง่ายอยู่น้อย และมี สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากอยู่ค่อนข้างมาก

เมื่อพิจารณาค่าบีไอดีและค่ากรดไขมันระเหยเปรียบเทียบกับกัน จะเห็นได้ว่าขัดแย้งกัน กล่าวคือ หากแปลงค่ากรดไขมันระเหยจาก 1,200 มก./ล. as CaCO_3 เป็น as CH_3COOH ก็จะได้ค่าเท่ากับ 1,440 มก./ล. และจากสมการการหาค่าซีไอดีของกรดอะซิติก จะได้ว่ากรดอะซิติก 1 กรัม จะให้ซีไอดีประมาณ 1.1 กรัม และประมาณเท่ากับค่าบีไอดีด้วย ดังนั้นกรดไขมันระเหย ในตารางที่ 4.3 นี้ จะมีค่าเทียบเท่าบีไอดี 1,600 มก./ล. ขัดแย้งกับค่าบีไอดีในตารางซึ่งมีค่าไม่

ถึง 700 มก./ล. ที่เป็นเช่นนี้ ก็เพราะวิธีการวัดกรดไขมันระเหยใช้การไทเทรตซึ่งมีจุดยุติไม่แน่นอน ทำให้การวัดผิดพลาดได้ง่าย เช่น ในน้ำที่มีซิลไฟด์ไอออน เมื่อเติมกรดลงไปจะกลายเป็นไฮโดรเจนซิลไฟด์ซึ่งเป็นก๊าซหนีออกจากน้ำ แต่การทำปฏิกิริยาของกรดกับซิลไฟด์ไม่ได้เกิดทั่วถึงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นกรดที่เติมลงไปและยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาจะทำให้พีเอชลดลง เมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นไฮโดรเจนไอออนถูกใช้ไป พีเอชก็จะกลับสูงขึ้นมาอีก ทำให้สังเกตจุดยุติได้ยาก

ตารางที่ 4.3 ลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอยที่สถานฝังกลบอำเภอน้อย จังหวัดนนทบุรี

ลักษณะสมบัติ	หน่วย	ค่าระหว่าง
พีเอช	-	7.9 – 8.2
ซีโอดี	มก./ล.	4,500-6,530
บีโอดี 5 วัน	มก./ล.	420-650
ทีเคเอ็น	มก./ล.	1,980-2,870
ไนเตรต	มก. ไนเตรต-ไนโตรเจน/ล.	3.06-4.41
ไนไตรต์	มก. ไนไตรต์-ไนโตรเจน/ล.	0.76-1.43
ฟอสฟอรัสทั้งหมด	มก./ล.	4.7-6.5
สภาพต่าง	มก./ล. หินปูน	7,500-8,000
กรดไขมันระเหย	มก./ล. หินปูน	1,200
สี	เอสยู	630-1,170
เหล็ก	มก./ล.	0.95-1.03
นิกเกิล	มก./ล.	0.28-0.42
ของแข็งแขวนลอย	มก./ล.	180-320

4.2 ผลการทดลองและการวิจารณ์

การแสดงผลการทดลองและการวิจารณ์ จะนำเสนอรวมกันไปทั้ง 5 อัตราส่วนซีโอดีน้ำชะมูลฝอยต่อซีโอดีน้ำตาล ในแต่ละพารามิเตอร์จะมีกราฟอยู่ 6 กราฟ เหมือนมี 6 การทดลอง แต่ในความเป็นจริงแล้วชุดควบคุมของการทดลองทั้ง 2 ครั้ง ถือเป็นชุดการทดลองเดียวกัน แต่เพื่อให้ง่ายแก่การเขียนกราฟและการอภิปราย จึงต้องทำเช่นนั้น ผลการทดลองทั้งหมดแสดง

ด้วยค่าเฉลี่ยตัวแปรต่าง ๆ ที่สถานะคงตัว ส่วนการวิจารณ์ผลการทดลองจะรวมอยู่ในแต่ละพารามิเตอร์

4.2.1 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัด

จากตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยค่าซีโอดีในน้ำเข้าของชุดควบคุมเท่ากับ 501 และ 490 มก./ล. ซึ่งเป็นซีโอดีที่ได้จากน้ำชะมูลฝอยล้วน ๆ แต่มีการเจือจางมาประมาณ 12 เท่า ส่วนค่าซีโอดีของการทดลองที่อัตราส่วนซีโอดีน้ำชะมูลฝอยต่อซีโอดีน้ำตาลเท่ากับ 1:1 1:2 1:3 และ 1:4 มีน้ำเข้าเท่ากับ 1,023 1,525 1,926 และ 2,560 มก./ล. ส่วนค่าซีโอดีในน้ำออกของชุดการทดลองควบคุมเท่ากับ 445 และ 462 มก./ล. ส่วนซีโอดีของชุดการทดลองที่มีอัตราส่วนซีโอดีน้ำชะมูลฝอยต่อซีโอดีน้ำตาลเป็น 1:1 1:2 1:3 และ 1:4 มีค่าเท่ากับ 459 462 559 และ 591 มก./ล. ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.1

จากผลการทดลองจะพบว่า การทดลองในชุดควบคุมสามารถลดซีโอดีได้ประมาณ 50 - 60 มก./ล. นั้นแสดงว่าในน้ำชะมูลฝอยมีสารอินทรีย์ที่ย่อยง่ายอยู่น้อย ส่วนในชุดการทดลองอื่น ๆ ที่มีการเติมน้ำตาลพบว่าระบบสามารถลดซีโอดีได้ประมาณ 560 1,060 1,370 และ 1,970 มก./ล. สำหรับการเติมน้ำตาลให้ระบบเป็น 1 2 3 และ 4 เท่าของซีโอดีน้ำชะมูลฝอย ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.2 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าปริมาณซีโอดีที่สามารถลดได้เป็นส่วนหนึ่งของซีโอดีที่ย่อยสลายได้ง่ายจากน้ำตาลที่เติมเป็นส่วนใหญ่ เมื่อพิจารณาถึงน้ำออกมีแนวโน้มของค่าซีโอดีเพิ่มขึ้นตามซีโอดีในน้ำเข้า อาจเนื่องจากเวลากักของระบบคงที่ (1 วัน) แต่ภาวะซีโอดีจากน้ำตาลสูงขึ้น

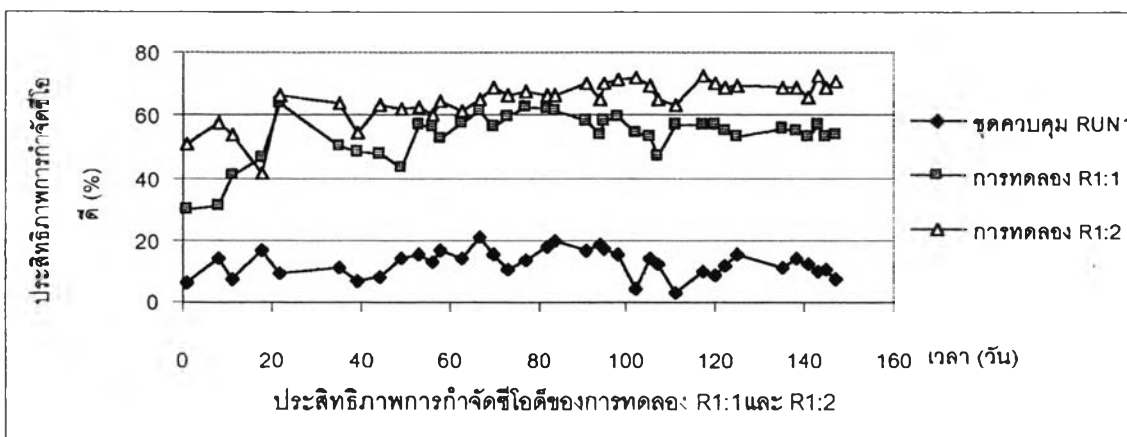
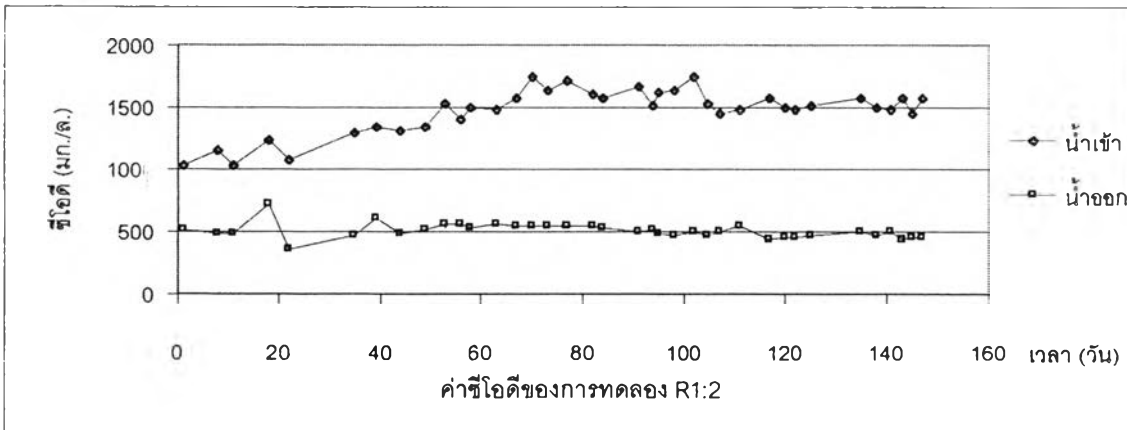
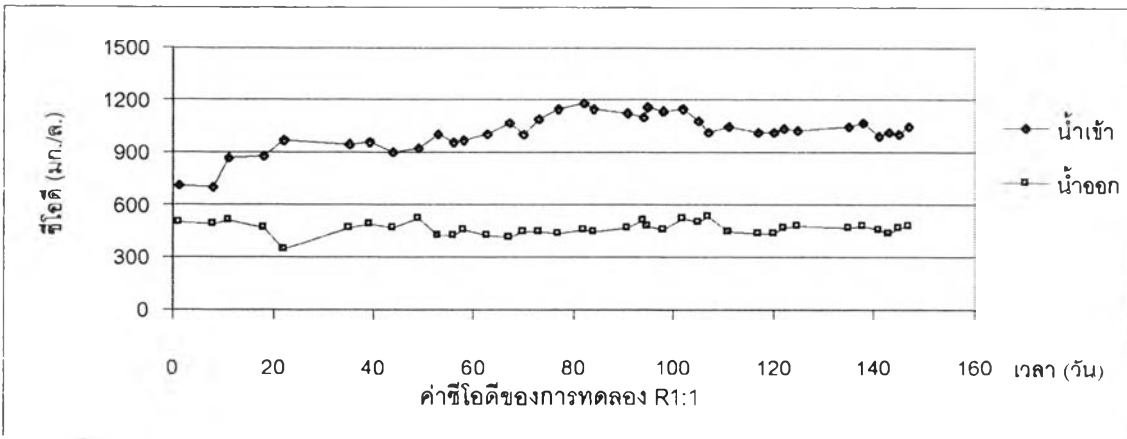
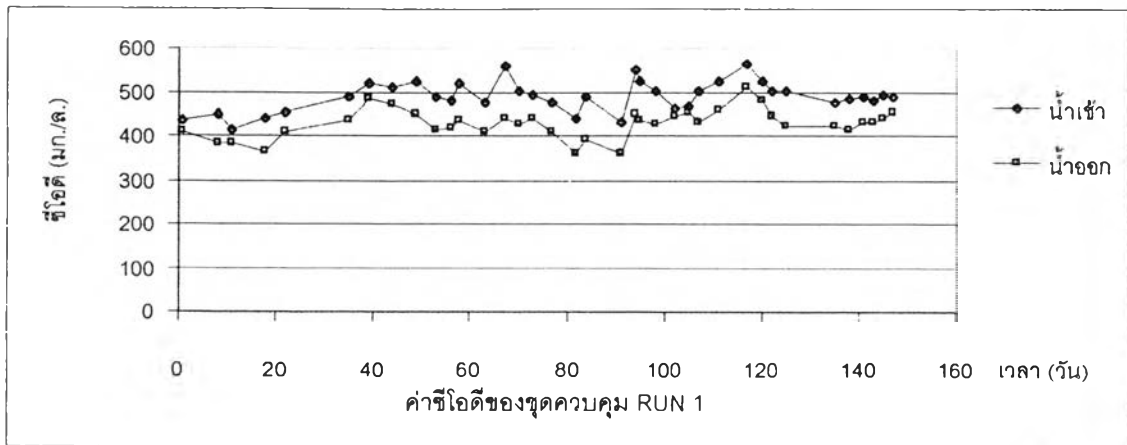
ผลการทดลองที่ได้จากการวิจัยมีข้อที่น่าสนใจดังนี้ ลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอยมีค่าซีโอดีสูงในขณะที่ค่าบีโอดีต่ำ นั้นแสดงให้เห็นว่าในน้ำชะมูลฝอยมีสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากเป็นองค์ประกอบอยู่ เมื่อนำน้ำชะมูลฝอยมาทำการทดลองจึงไม่สามารถลดซีโอดีให้ต่ำลงจากซีโอดีเริ่มต้นได้ แม้จะมีการเติมสารอาหารร่วมซึ่งในที่นี้ใช้น้ำตาลทราย ซึ่งน้ำตาลทรายก็จัดเป็นสารอินทรีย์ย่อยง่ายสำหรับแบคทีเรียในระบบไร้อากาศทั้งพวกสร้างกรดและสร้างมีเทน อย่างไรก็ตามผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ ตามปริมาณน้ำตาลที่เติมให้แก่ระบบ ซึ่งการคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (ค่าประสิทธิภาพการกำจัด ซีโอดีแสดงในตารางที่ 4.4) คำนวณโดยเทียบกับซีโอดีเข้าทั้งหมด ไม่ได้มีการแยกว่าเป็นซีโอดีจากส่วนใด และเมื่อดูถึงซีโอดีในน้ำออกแล้วก็จะเห็นได้ว่ายังมีค่าสูงกว่าซีโอดีในน้ำ

เข้าในส่วนของน้ำชะมูลฝอย ตัวอย่างเช่น ในการทดลองที่ให้อัตราส่วนซีโอดีของน้ำชะมูลฝอยต่อซีโอดีน้ำตาลเป็น 1:4 มีค่าซีโอดีน้ำเข้าเท่ากับ 2,560 มก./ล. แบ่งเป็นซีโอดีน้ำตาลประมาณ 2,000 มก./ล. และซีโอดีน้ำชะมูลฝอยประมาณ 500 มก./ล. ในขณะที่ซีโอดีน้ำออกเท่ากับ 591 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับร้อยละ 77 จะเห็นได้ว่าน้ำออกยังคงสูงกว่าน้ำเข้า ส่วนของ น้ำชะมูลฝอย แม้ในการทดลองที่มีการเติมน้ำตาลเป็น 1 2 และ 3 เท่า ก็เป็นในทำนองเดียวกัน จึงกล่าวได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงนั้นเนื่องจาก ระบบกำจัดน้ำตาลได้เพียงอย่างเดียว แต่ไม่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำชะมูลฝอยได้ สาเหตุคงเนื่องมาจากน้ำชะมูลฝอยประกอบด้วยสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากซึ่งแสดงในรูปซีโอดี ซึ่งสารอินทรีย์นี้อาจจะเห็นเป็นสีหรือไม่มีสีก็

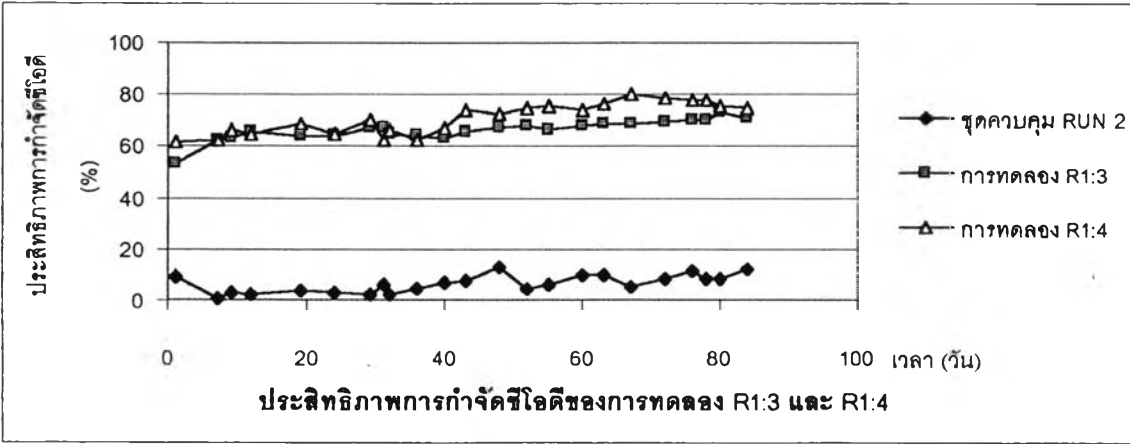
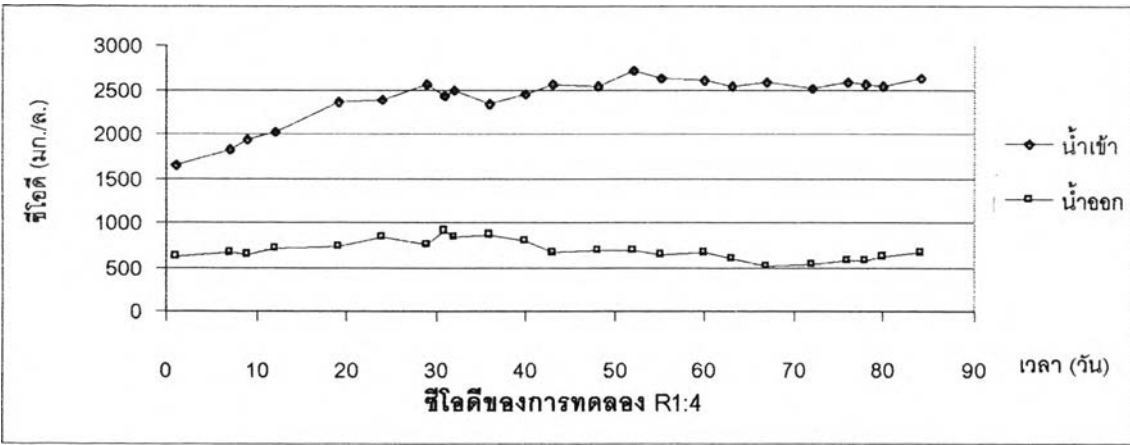
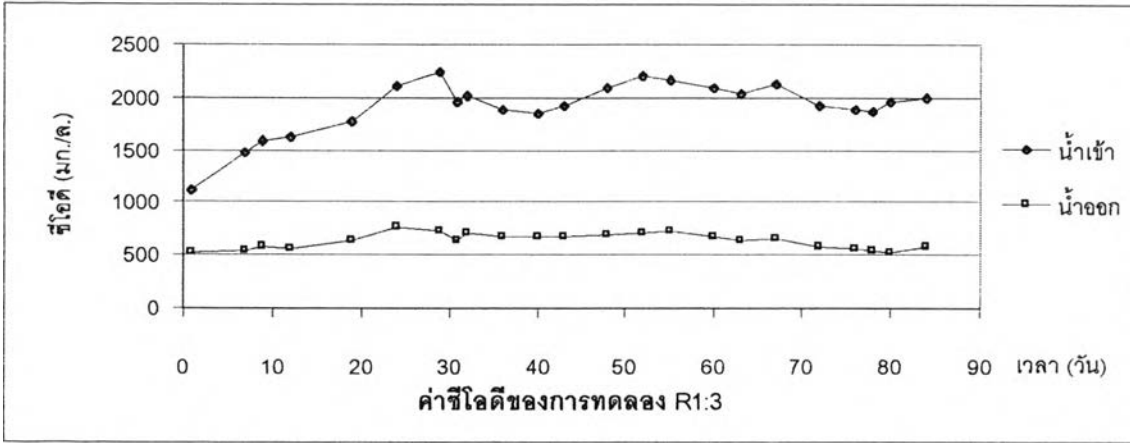
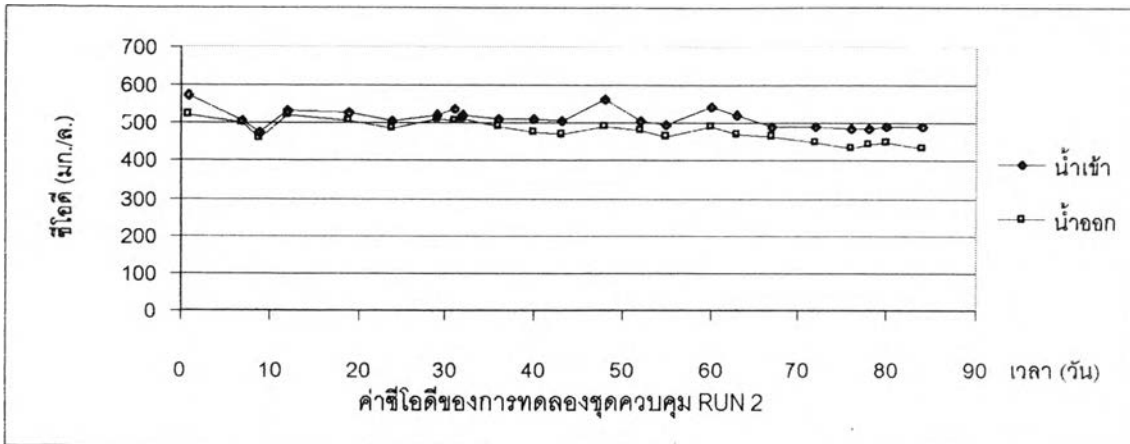
ได้ ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของชุดการทดลองที่มีอัตราส่วนซีโอดีน้ำชะมูลฝอยต่อซีโอดีน้ำตาลเป็น 1:2 1:3 และ 1:4 ไม่แตกต่างกันมาก และทุกอัตราส่วนมีซีโอดีของน้ำออกมากกว่าซีโอดีน้ำเข้าของชุดควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากมีซีโอดีน้ำตาลเหลืออยู่ในระบบ แสดงถึงเวลาที่ของระบบที่ใช้อัตราส่วนซีโอดีน้ำเสียขยะต่อซีโอดีน้ำตาลเป็น 1:2 1:3 และ 1:4 น่าจะไม่เพียงพอ

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยซีโอดีที่สภาวะคงตัวของทุกชุดการทดลอง

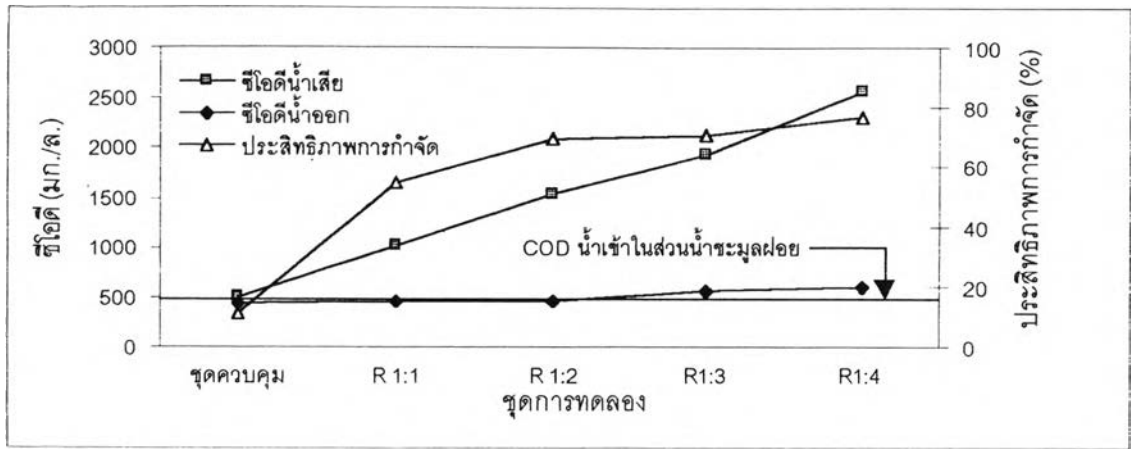
พารามิเตอร์		อัตราส่วนซีโอดีน้ำชะมูลฝอยต่อซีโอดีน้ำตาลทราย					
		1:0	1:1	1:2	1:0	1:3	1:4
ซีโอดีน้ำเข้า (มก./ล.)	เฉลี่ย	501	1023	1525	490	1926	2560
	N	10	10	10	5	5	5
	SD	27	23	47	4	55	43
ซีโอดีน้ำออก (มก./ล.)	เฉลี่ย	445	459	462	442	559	591
	N	10	10	10	5	5	5
	SD	29.51	18.51	23.68	9.90	21.94	44.99
ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (ร้อยละ)	เฉลี่ย	11	55	70	10	71	77
	N	10	10	10	5	5	5
	SD	2.45	1.53	2.01	1.88	1.30	1.49



รูปที่ 4.1 ค่าซีโอดีตลอดการทดลองและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี



รูปที่ 4.1 ค่าซีไอดีตลอดการทดลองและประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี (ต่อ)



รูปที่ 4.2 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในแต่ละชุดการทดลอง

จากรูปที่ 4.1 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของแต่ละชุดการทดลอง เข้าสู่สถานะคงตัวเร็วมาก แต่ก็ยังไม่สามารถลดซีโอดีของน้ำชะมูลฝอยได้มาก อย่างไรก็ตามผู้วิจัยยังคงเดินระบบต่อไป ทั้งนี้คาดว่าในระยะยาวแบคทีเรียจะปรับตัวต่อน้ำชะมูลฝอยและสามารถที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีได้เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเดินระบบต่อไปอีกนานพอควร พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีไม่ได้เพิ่มขึ้น นั่นแสดงว่าระบบเข้าสู่สถานะคงตัวตั้งแต่ตอนเริ่มเดินระบบได้ไม่นาน

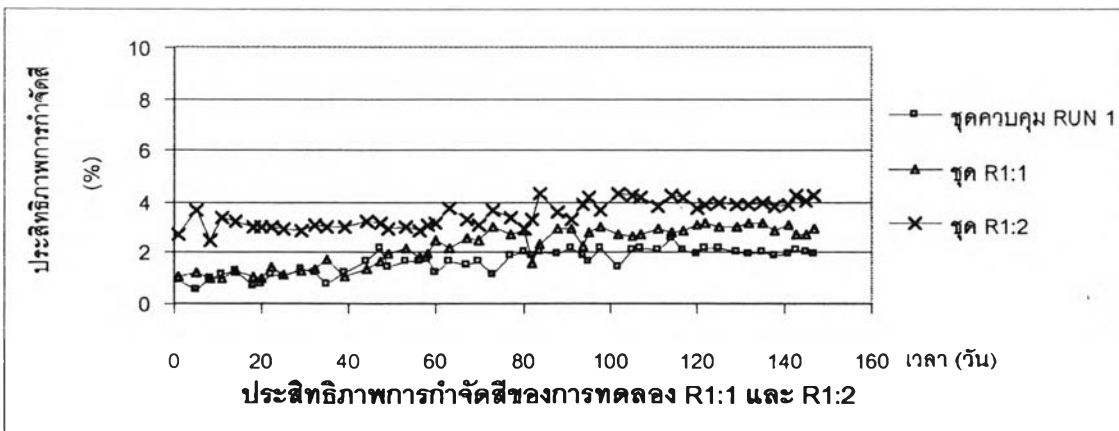
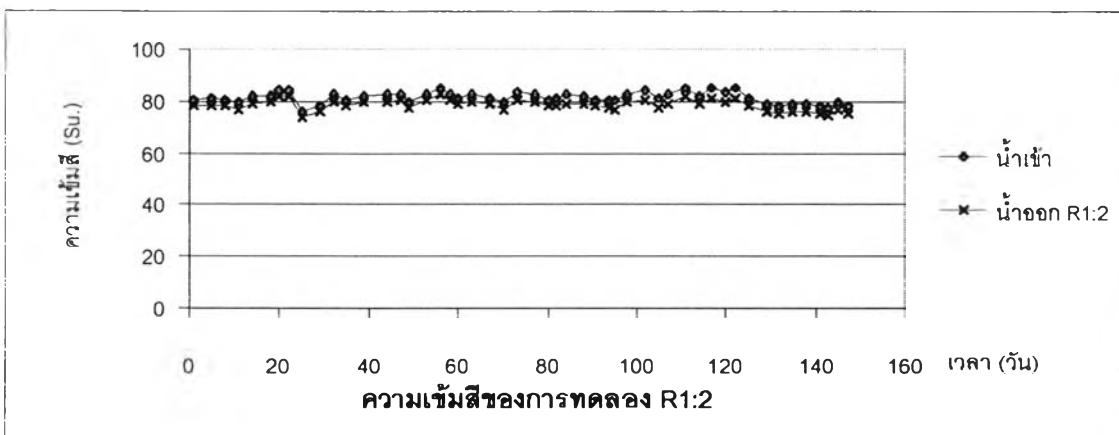
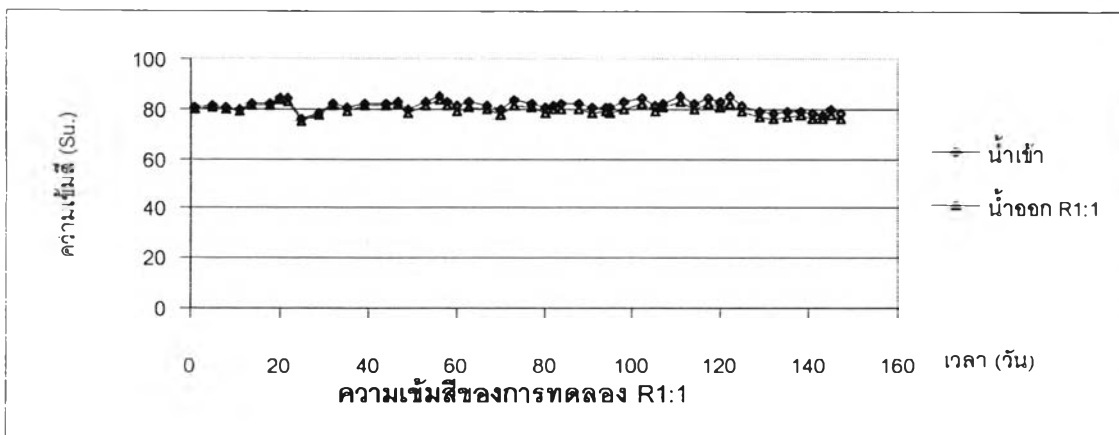
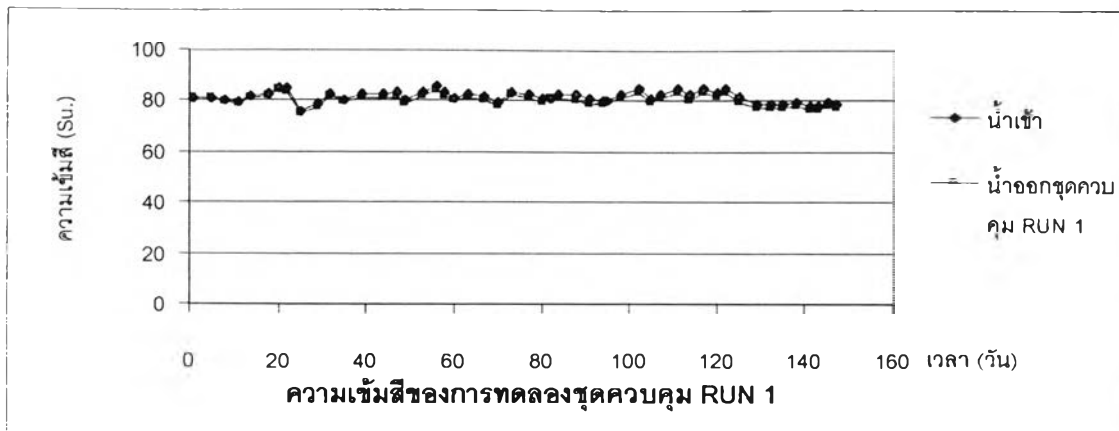
4.2.2 สีและประสิทธิภาพการกำจัด

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.5 และ รูปที่ 4.3 พบว่าความเข้มสีในน้ำเข้าเฉลี่ยของชุดการทดลองในช่วงแรกและช่วงที่ 2 เท่ากับ 79.72 และ 81.14 เอสยู ตามลำดับ ในการเตรียมน้ำก่อนเข้าระบบจะต้องเจือจางน้ำชะมูลฝอยให้มีซีโอดีประมาณ 500 มก./ล. และสีซึ่งอยู่ในน้ำชะมูลฝอยเท่านั้นก็จะถูกเจือจางไปด้วย ส่วนน้ำประปาและน้ำตาลไม่ให้สี ดังนั้นค่าความเข้มสีในน้ำเข้าทั้งสามถังยูเอเอสบีของแต่ละช่วงการทดลอง มีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกันมาก ส่วนค่าความเข้มสีในน้ำออกของทุกการทดลองมีค่าไม่ต่างกันมากนัก โดยชุดควบคุมเท่ากับ 78 และ 79.59 เอสยู ส่วนในการทดลองที่มีการเติมน้ำตาลเป็น 1 2 3 และ 4 เท่า ของน้ำชะมูลฝอย (ในรูปของซีโอดี) สามารถวัดสีในน้ำออกได้เป็น 77.34 76.52 77.24 และ 75.56 เอสยู ตามลำดับ พบว่าความเข้มสีของน้ำออกมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยตามปริมาณน้ำตาลที่เติมเข้าไป แต่เมื่อมองถึงวิธีการวัดสีแล้ว ก็สามารถบอกได้ว่าค่าความเข้มสีที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเช่นนี้อาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนของการวัดสี ถ้าหากว่าต้องการค่าที่ละเอียดมากกว่านี้อาจต้องใช้วิธีอื่น หรือปรับปรุงการวัดให้แม่นยำยิ่งขึ้น

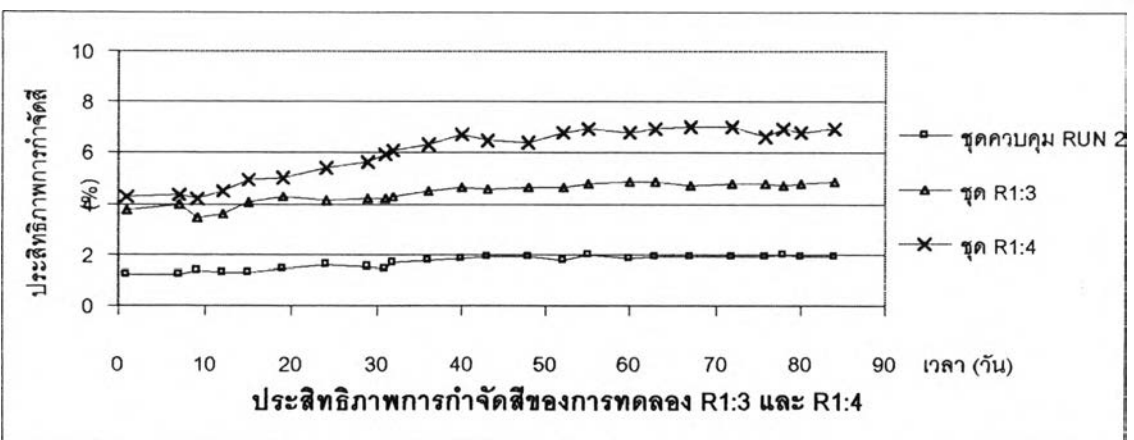
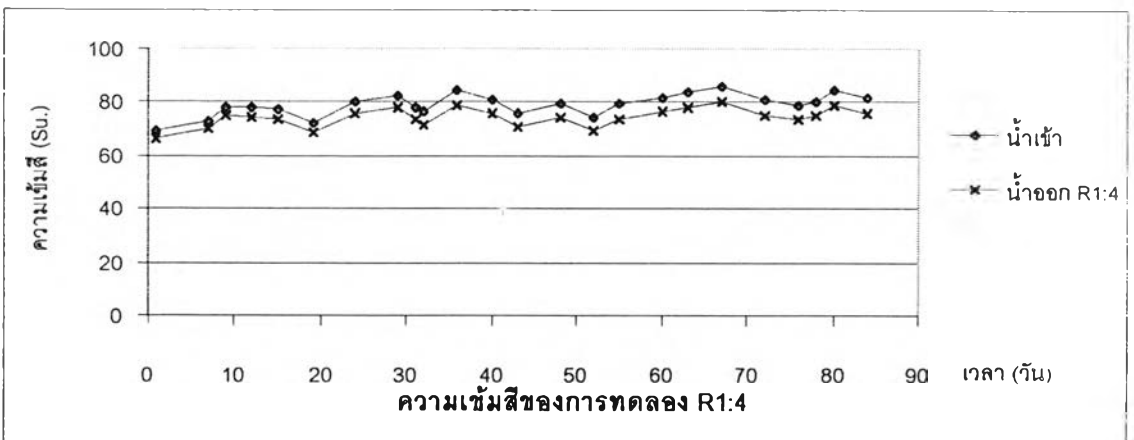
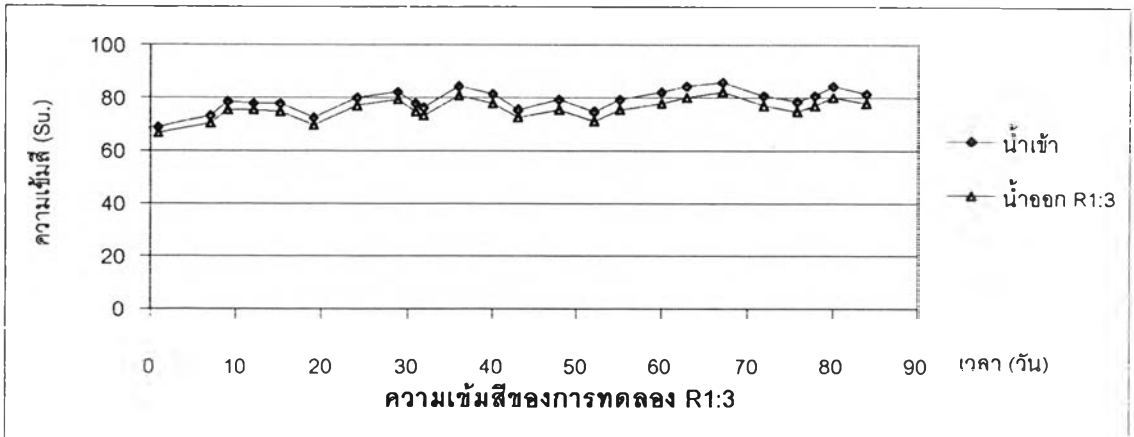
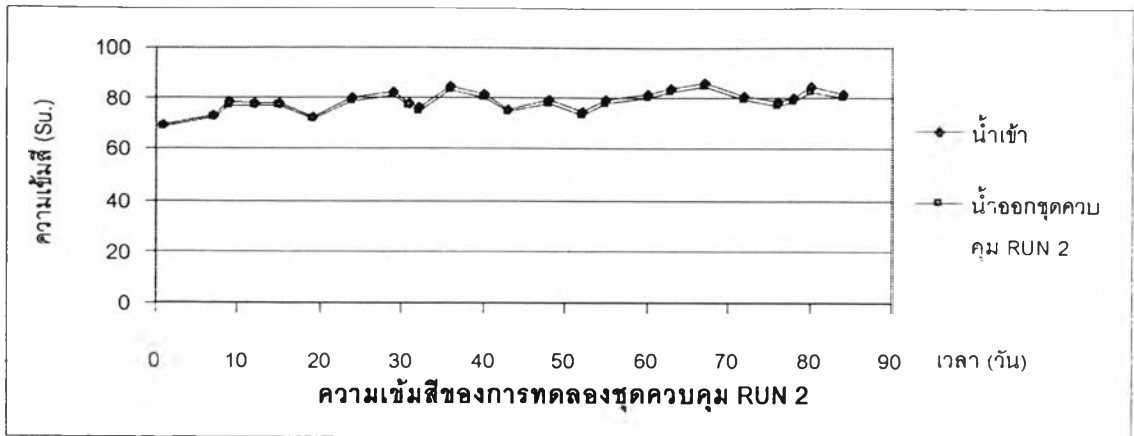
เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการกำจัดสีแล้ว พบว่าการกำจัดสีเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเติมน้ำตาลให้แก่ระบบเพิ่มขึ้น กล่าวคือมีค่าร้อยละ 2.98 4.01 4.81 และ 6.88 สำหรับชุดควบคุมมีประสิทธิภาพการกำจัดสีมีเพียงร้อยละ 2.03 และ 1.91 เท่านั้น นั้นแสดงว่าการเพิ่มซีโอดีจากน้ำตาลช่วยในการลดสีได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น หรือมองอีกแง่หนึ่งคือสีในน้ำชะมูลฝอยเป็นสารที่ย่อยยาก แม้การใช้โคเมตาบอลิสมก็ไม่อาจทำให้แบคทีเรียย่อยสลายน้ำชะมูลฝอยได้ แต่สีที่ลดลงเล็กน้อยก็อาจเกิดจาก สีถูกดูดติดผิวที่เม็ดแบคทีเรีย แต่ในระบบยูเอเอสบีไม่มีการทิ้งเชื้อ ทำให้เชื้อที่ดูดติดสีเอาไว้แล้ว ไม่ออกไปนอกระบบและไม่สามารถรับสีได้อีก ต้องอาศัยเซลล์ที่เกิดใหม่เท่านั้นซึ่งในระบบไร้อากาศมีเซลล์ใหม่เกิดขึ้นน้อยจึงทำให้เก็บสีได้น้อยตามไปด้วย

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นสีที่สภาวะคงตัวของทุกการทดลอง

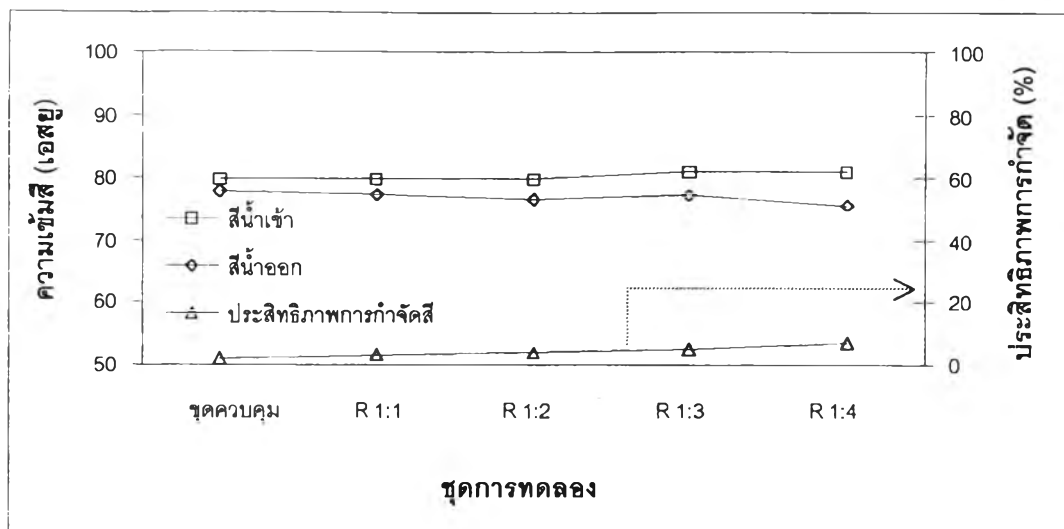
พารามิเตอร์		อัตราส่วนซีโอดีน้ำชะมูลฝอยต่อซีโอดีน้ำตาลทราย					
		1:0	1:1	1:2	1:0	1:3	1:4
ความเข้มข้นน้ำเข้า (เฮสยู)	เฉลี่ย	79.72	79.72	79.72	81.14	81.14	81.14
	n	10	10	10	5	5	5
	SD	2.13	2.13	2.13	2.11	2.11	2.11
ความเข้มข้นน้ำออก (เฮสยู)	เฉลี่ย	78	77.34	76.52	79.59	77.24	75.56
	n	10	10	10	5	5	5
	SD	2.03	2.02	2.10	2.07	2.00	1.96
ประสิทธิภาพการกำจัดสี (ร้อยละ)	เฉลี่ย	2.03	2.98	4.01	1.91	4.81	6.88
	N	10	10	10	5	5	5
	SD	0.107	0.18	0.16	0.03	0.04	0.15



รูปที่ 4.3 ความชื้นและประสิทธิภาพการกำจัด



รูปที่ 4.3 ความชื้นสัมพัทธ์และประสิทธิภาพการกำจัด (ต่อ)



รูปที่ 4.4 สีและประสิทธิภาพการกำจัดสีในแต่ละชุดการทดลอง

4.2.3 ปริมาณก๊าซทั้งหมด

การเติมซีโอดีในรูปของน้ำตาลลงในน้ำชะมูลฝอยก่อนเข้าระบบ ในอัตราส่วนซีโอดีน้ำชะมูลฝอยต่อซีโอดีน้ำตาลต่าง ๆ กัน จะส่งผลโดยตรงต่อปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ อัตราการผลิตก๊าซ และสัดส่วนของก๊าซ โดยมีรายละเอียดดังแสดงต่อไปนี้

1) ปริมาณก๊าซ

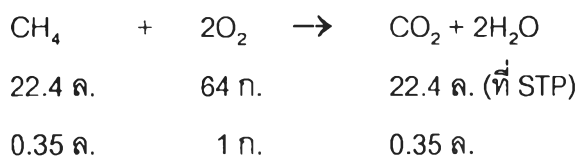
จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าปริมาณก๊าซตลอดการทดลอง มีค่าไม่ผันผวนมากนัก นอกจากการทดลองที่อัตราส่วนซีโอดีน้ำชะมูลฝอยต่อซีโอดีน้ำตาลเป็น 1:2 ในช่วง 100 - 130 วัน ปริมาณก๊าซตกลงไปบ้างในขณะที่ค่าซีโอดีไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ทั้งนี้ก็อาจเนื่องมาจากว่าเครื่องมือวัดปริมาณก๊าซมีการรั่วซึม แต่ก็ได้แก้ไขซึ่งก็ทำให้เก็บก๊าซทั้งหมดมีปริมาณมากขึ้น และเมื่อพิจารณาปริมาณก๊าซของทุกชุดการทดลองพบว่า การทดลองชุดควบคุมไม่สามารถวัดปริมาณก๊าซได้ ส่วนชุดการทดลองอื่นที่มีการเติมน้ำตาลในสัดส่วนซีโอดีน้ำชะมูลฝอยต่อซีโอดี

น้ำตาลเท่ากับ 1:1 1:2 1:3 และ 1:4 หรือคิดเป็นปริมาณซีโอดีที่กำจัดได้เท่ากับ 564 1,063 1,367 และ 1,969 มก./ล. ตามลำดับ สามารถวัดปริมาณก๊าซทั้งหมดได้เท่ากับ 351 749 1,350 และ 1,856 มล./วัน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.6

อาจกล่าวได้ว่า ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น จะสัมพันธ์กับปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัด คือเมื่อปริมาณการกำจัดซีโอดีสูงขึ้น ทำให้ปริมาณก๊าซเพิ่มขึ้นด้วย ในชุดควบคุมไม่สามารถวัดปริมาณก๊าซทั้งหมดได้ หรืออาจมีก๊าซเกิดเพียงเล็กน้อย ซึ่งบ่งชี้ว่าน้ำชะมูลฝอยยากแก่การย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีวะ ส่วนปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นมากในการทดลองอื่น ๆ ที่มีการเติมน้ำตาลซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่ายสำหรับแบคทีเรีย

2) อัตราการผลิตก๊าซ

จากตารางที่ 4.6 การทดลองชุดควบคุมไม่มีการผลิตก๊าซ ส่วนชุดการทดลองที่กำจัดซีโอดีได้เท่ากับ 564 1,063 1,367 และ 1,969 มก./ล. จะมีอัตราการผลิตก๊าซเท่ากับ 0.25 0.28 0.40 และ 0.38 มล./มก.ซีโอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าชุดการทดลองที่มีการผลิตก๊าซได้ปริมาณน้อยก็จะมีอัตราการผลิตก๊าซได้น้อยลงตามลำดับ สาเหตุเนื่องมาจากซีโอดีที่ถูกใช้ไป 1 กรัมสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ 0.35 ลิตรและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.35 ลิตร (ที่สภาวะมาตรฐาน) ดังแสดงในสมการหาค่าซีโอดีของก๊าซมีเทน

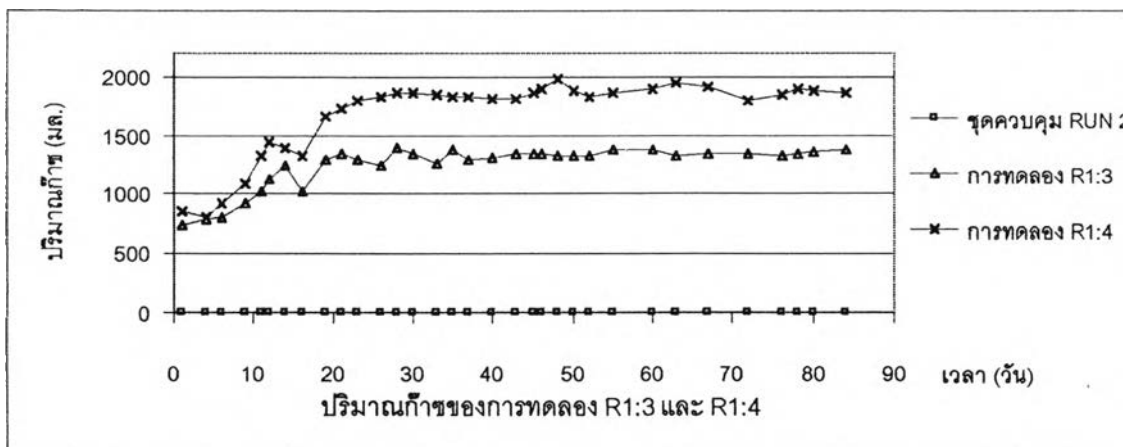
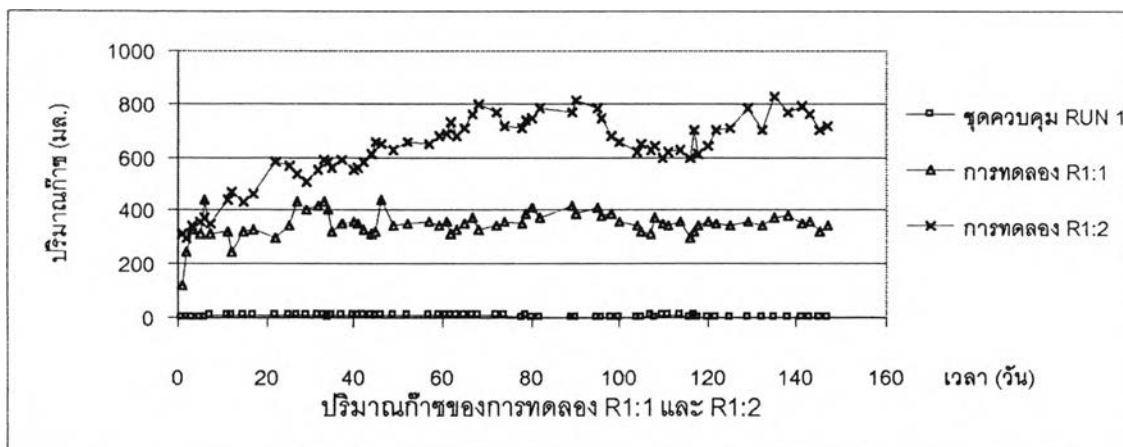


แต่เนื่องจากมีเทนละลายน้ำได้น้อยมาก ($K_h = 1.36 \times 10^{-3}$ โมล/ลิตร-บรรยากาศ) ในขณะที่คาร์บอนไดออกไซด์สามารถละลายน้ำได้มากกว่า ($K_h = 3.46 \times 10^{-2}$ โมล/ลิตร-บรรยากาศ) นอกจากนั้นยังแตกตัวเป็นไบคาร์บอเนตได้ด้วย ($K_a = 4.45 \times 10^{-7}$) ดังนั้น เมื่อปริมาณก๊าซน้อย คาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นน้อย คาร์บอนไดออกไซด์เกือบทั้งหมดจึงอยู่ในรูปละลายน้ำ แต่เมื่อปริมาณก๊าซต่อวันเพิ่มขึ้น คาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายน้ำเริ่มอิ่มตัวทำให้คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นอยู่ในวัฏภาคก๊าซเพิ่มขึ้น ในขณะที่ก๊าซมีเทนมีปริมาณอยู่ใกล้เคียง

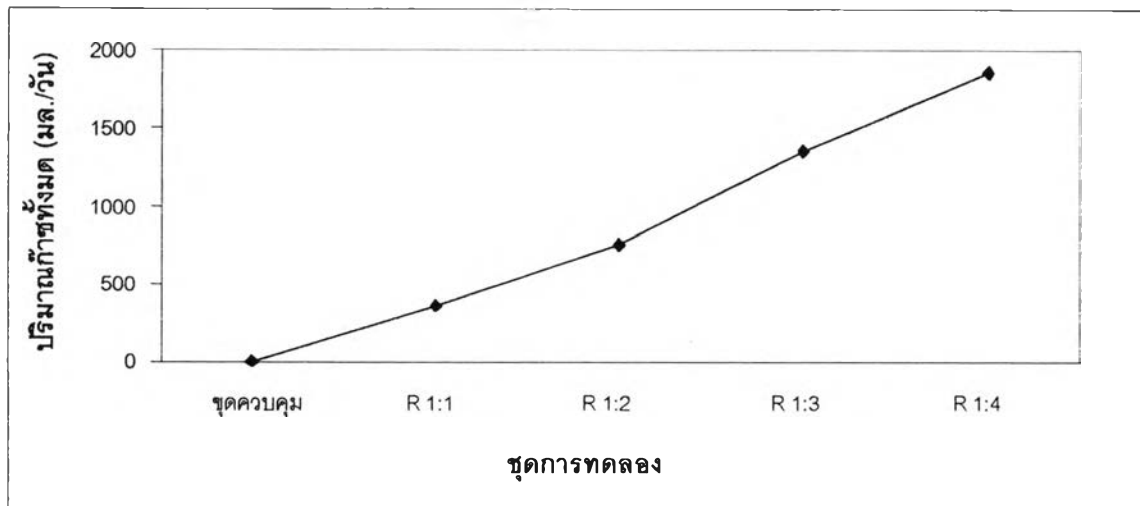
ตามเดิมเพราะละลายน้ำได้น้อยเหมือนเดิม ดังนั้นเมื่อซีโอดีเข้าระบบเพิ่มขึ้นก็จะยิ่งทำให้คาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคก๊าซเพิ่มขึ้น อัตราการผลิตก๊าซจึงเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยปริมาณก๊าซทั้งหมดที่สภาวะคงตัวของทุกการทดลอง

พารามิเตอร์	อัตราส่วนซีโอดีน้ำระเหยต่อซีโอดีน้ำตาลทราย						
		1:0	1:1	1:2	1:0	1:3	1:4
ปริมาณก๊าซทั้งหมด (มล.)	เฉลี่ย	0	351	748.5	0	1350	1856
	N	10	10	10	10	10	10
	SD	0	17.29	45	0	22	43
ร้อยละของก๊าซมีเทน			86	80		78	72
ร้อยละของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์			14	20		22	28



รูปที่ 4.5 ปริมาณก๊าซทั้งหมดตลอดการทดลอง



รูปที่ 4.6 ปริมาณก๊าซทั้งหมดในแต่ละชุดการทดลอง

แต่เนื่องจากมีเทนละลายน้ำได้น้อยมาก ($K_n = 1.36 \times 10^{-3}$ โมล/ลิตร-บรรยากาศ) ในขณะที่คาร์บอนไดออกไซด์สามารถละลายน้ำได้มากกว่า ($K_n = 3.46 \times 10^{-2}$ โมล/ลิตร-บรรยากาศ) นอกจากนั้นยังแตกตัวเป็นไบคาร์บอเนตได้ด้วย ($K_a = 4.45 \times 10^{-7}$) ดังนั้น เมื่อปริมาณก๊าซน้อย คาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นน้อย คาร์บอนไดออกไซด์เกือบทั้งหมดจึงอยู่ในรูปละลายน้ำ แต่เมื่อปริมาณก๊าซต่อวันเพิ่มขึ้น คาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายน้ำเริ่มอิ่มตัวทำให้คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นอยู่ในวัฏภาคก๊าซเพิ่มขึ้น ในขณะที่ก๊าซมีเทนมีปริมาณอยู่ใกล้เคียงตามเดิมเพราะละลายน้ำได้น้อยเหมือนเดิม ดังนั้นเมื่อซีโอดีเข้าระบบเพิ่มขึ้นก็จะยิ่งทำให้คาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคก๊าซเพิ่มขึ้น อัตราการผลิตก๊าซจึงเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย

3) สัดส่วนก๊าซมีเทน

สำหรับสัดส่วนของก๊าซมีเทน จะหาได้เฉพาะการทดลองที่สามารถวัดปริมาณก๊าซเท่านั้น ซึ่งก็คือ การทดลองที่มีการเติมน้ำตาลเพิ่มให้ระบบ ส่วนในชุดควบคุมไม่สามารถวัดปริมาณก๊าซได้ แต่ก็ไม่ได้หมายความว่าไม่มีก๊าซเกิดขึ้น แต่อาจมีก๊าซเกิดขึ้นน้อยจนละลายน้ำหมดหรือวัดไม่ได้ด้วยเครื่องวัดปริมาณก๊าซ ส่วนในชุดการทดลองที่กำจัดซีโอดีได้เท่ากับ 564 1,063 1,367 และ 1,969 มก./ล. ก็จะมีสัดส่วนก๊าซมีเทนต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 86:14 80:20 78:22 และ 72:28 ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่า เมื่อระบบกำจัดซีโอดีเพิ่มขึ้น ทำให้สัดส่วน

ของก๊าซมีเทนลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเหตุผลเดียวกันกับที่ได้อธิบายมาก่อนหน้านี้ กล่าวคือ ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นนั้นจะประกอบด้วยก๊าซหลัก ๆ 2 ชนิด คือ ก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และโดยปกติก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีความสามารถละลายน้ำสูงกว่าก๊าซมีเทน ดังนั้นชุดการทดลองที่มีค่าซีไอดีต่ำก็จะเกิดปริมาณก๊าซทั้งหมดต่ำ ทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนใหญ่ละลายอยู่ในน้ำและทำให้สัดส่วนของก๊าซมีเทนในวัฏภาคก๊าซสูง ส่วนชุดการทดลองที่มีปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นสูง ซึ่งจะทำให้ปริมาณก๊าซที่ละลายน้ำเป็นสัดส่วนที่น้อย เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณก๊าซในวัฏภาคก๊าซ (เนื่องจากความสามารถการละลายน้ำของก๊าซมีค่าจำกัด) จึงทำให้สัดส่วนของก๊าซมีเทนในวัฏภาคก๊าซต่ำกว่า

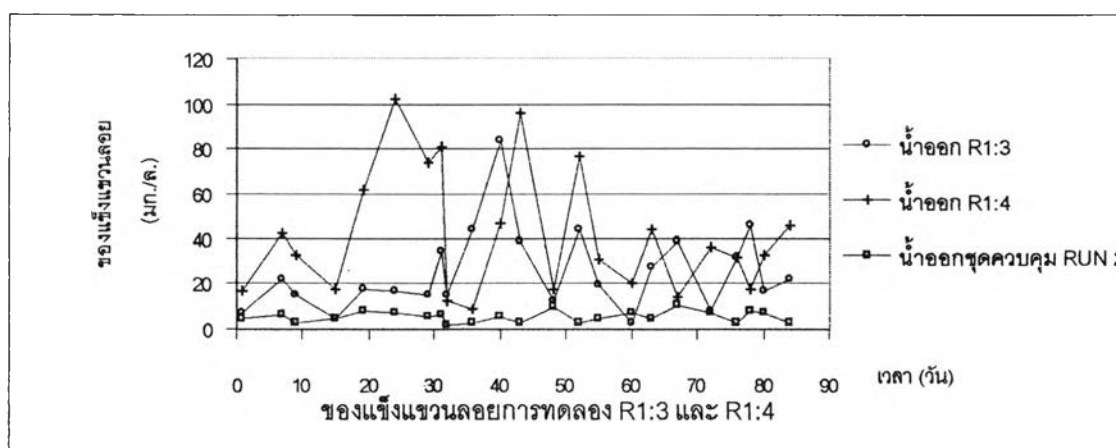
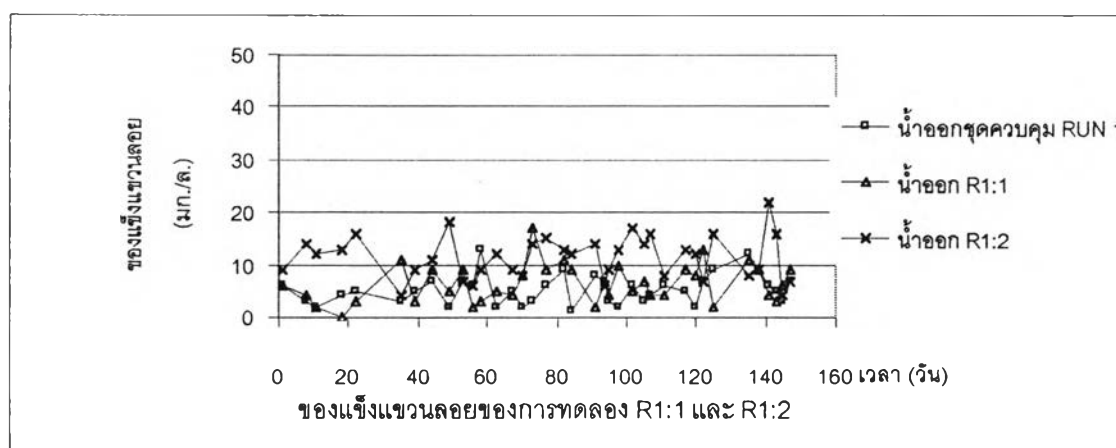
4.2.4 ของแข็งแขวนลอย

จากตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าของแข็งแขวนลอยตลอดการทดลองของทุกชุดการทดลอง มีค่าไม่ค่อนจะคงที่นัก ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อทำการทดลอง ซึ่งอาจจะเก็บน้ำในขณะที่ มีก๊าซผุดขึ้นมาพอดีทำให้เม็ดสลัดจ์มีการฟุ้ง หรืออุปกรณ์แยกสามสถานะมีตะกอนไปตกค้างอยู่มากและไม่ได้ทำความสะอาด ก็จะทำให้ค่าของแข็งแขวนลอยสูงขึ้นมา ชุดการทดลองที่มีการเติมซีไอดีน้ำตาลสูงขึ้น ทำให้ของแข็งแขวนลอยในน้ำออกมีค่าสูงขึ้น คือชุดการทดลองที่มีอัตราส่วนซีไอดีน้ำชะมูลฝอยต่อซีไอดีน้ำตาล 1:1 1:2 1:3 และ 1:4 จะมีของแข็งแขวนลอยในน้ำออกเท่ากับ 6 11 25 และ 42 มก./ล. ในขณะที่การทดลองชุดควบคุมมีของแข็งแขวนลอยในน้ำออกประมาณ 6 มก./ล. จะเห็นได้ว่าของแข็งแขวนลอยมีความสัมพันธ์ปริมาณน้ำตาลที่เติมให้ระบบ กล่าวคือเมื่อป้อนน้ำตาลให้แก่ระบบมากขึ้น ทำให้ระบบมีการผลิตก๊าซมากขึ้น จะทำให้เกิดการฟุ้งของเม็ดสลัดจ์ที่มีขนาดเล็กซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมากบริเวณตอนบนของถังปฏิกรณ์ เม็ดสลัดจ์ขนาดเล็กนี้จึงหลุดออกไปกับน้ำออก ซึ่งมีผลให้ของแข็งแขวนลอยในน้ำออกสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.8

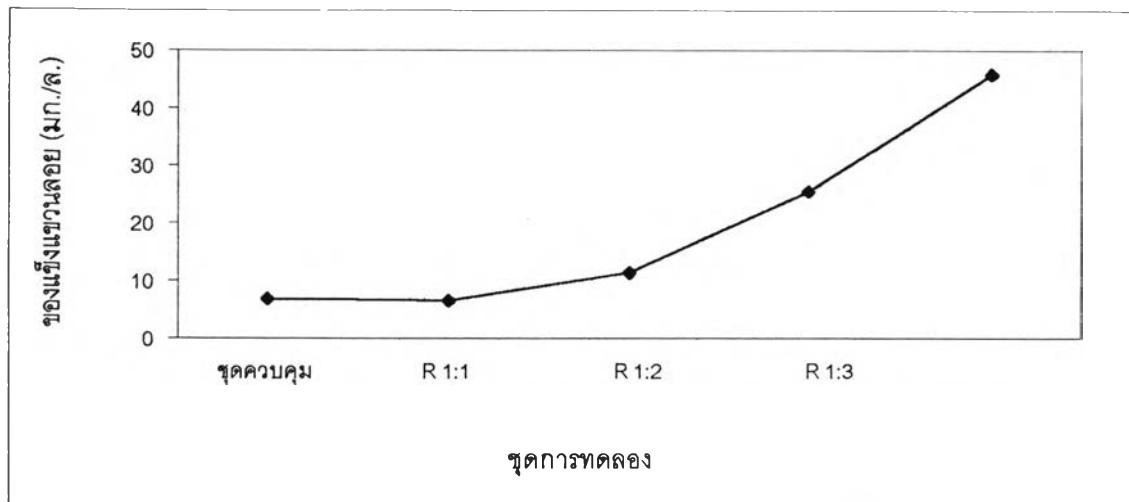
ส่วนประเด็นอื่นที่มีผลแก่ของแข็งแขวนลอย นอกจากปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น ก็คือความเร็วไหลขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 0.053 เมตรต่อชั่วโมง นับว่าค่อนข้างช้า น่าจะมีผลน้อยหรืออาจจะไม่มีผลเลยเมื่อนำไปเทียบกับกรณีอื่น ส่วนอีกกรณีหนึ่งก็คือ เมื่อป้อนน้ำเสียที่มีซีไอดีสูงมาก ๆ ให้ระบบ ทำให้สภาพน้ำในถังยูเอเอสบีมีลักษณะเหนียว และมีก๊าซเกิดขึ้นมาก ก็ จะสังเกตเห็นกลุ่มสลัดจ์จับตัวเป็นก้อน ลอยขึ้นจากชั้นสลัดจ์ หรือบางทีสลัดจ์ทั้งชั้นอาจยกตัวลอยขึ้นก็ได้ ซึ่งถ้าเกิดเหตุการณ์เช่นว่านี้ก็ทำให้น้ำออกมีของแข็งแขวนลอยมาก

ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยของแข็งแขวนลอยในน้ำออกที่สภาวะคงตัวของทุกการทดลอง

พารามิเตอร์	อัตราส่วนซีโอติน้ำชะมูลฝอยต่อซีโอติน้ำคาลทราย						
		1:0	1:1	1:2	1:3	1:4	
ของแข็งแขวนลอยในน้ำออก (มก./ล.)	เฉลี่ย	7	6	11	5	25	46
	N	10	10	10	5	5	5
	SD	2.99	3.57	5.46	3	15	10



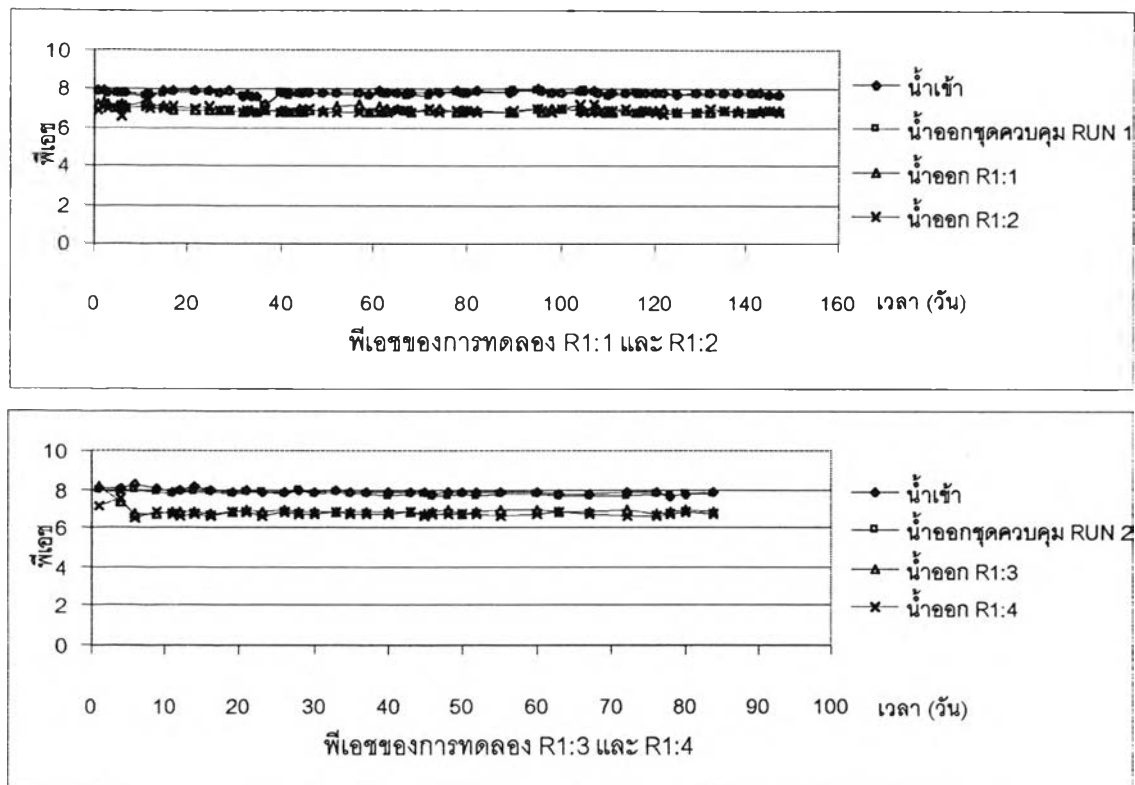
รูปที่ 4.7 ของแข็งแขวนลอยตลอดการทดลอง



รูปที่ 4.8 ของแข็งแขวนลอยในแต่ละชุดการทดลอง

4.2.5 พีเอช

จากตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าพีเอชของน้ำเข้าของทุกการทดลอง มีค่าค่อนข้างคงที่คือประมาณเท่ากับ 7.8-8.1 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอย ในตารางที่ 4.3 มีค่าพีเอชเท่ากับ 8.2-9 จะพบว่าแม้มีการเจือจางน้ำเสียประมาณ 12 เท่า ก็ไม่อาจทำให้ค่าพีเอชลดต่ำมากนัก ส่วนค่าพีเอชในน้ำออกพบว่า สำหรับการทดลองชุดควบคุม มีค่าเท่ากับ 7.7 ซึ่งในระหว่างการทดลองอาจมีค่าพีเอชในน้ำออกสูงกว่าหรือต่ำกว่าน้ำเข้าเล็กน้อย ส่วนการทดลองที่อัตราส่วนซีโอดีน้ำชะมูลฝอยต่อซีโอดีน้ำตาลทราย 1:1 1:2 1:3 และ 1:4 พีเอชในน้ำออกจะต่ำกว่ากว่าน้ำเข้า เหตุผลก็คือในระบบไร้อากาศ จะมีแบคทีเรีย 2 ชนิด คือพวกสร้างกรด และอีกพวกหนึ่งคือพวกสร้างมีเทน แบคทีเรียพวกสร้างกรดจะทำให้พีเอช ลดลง อย่างไรก็ตามปัจจัยที่ทำให้พีเอชเปลี่ยนแปลง ยังมีค่าสภาพต่างและสภาพกรดอีก ซึ่งจะอธิบายต่อไปในหัวข้อ 4.2.5

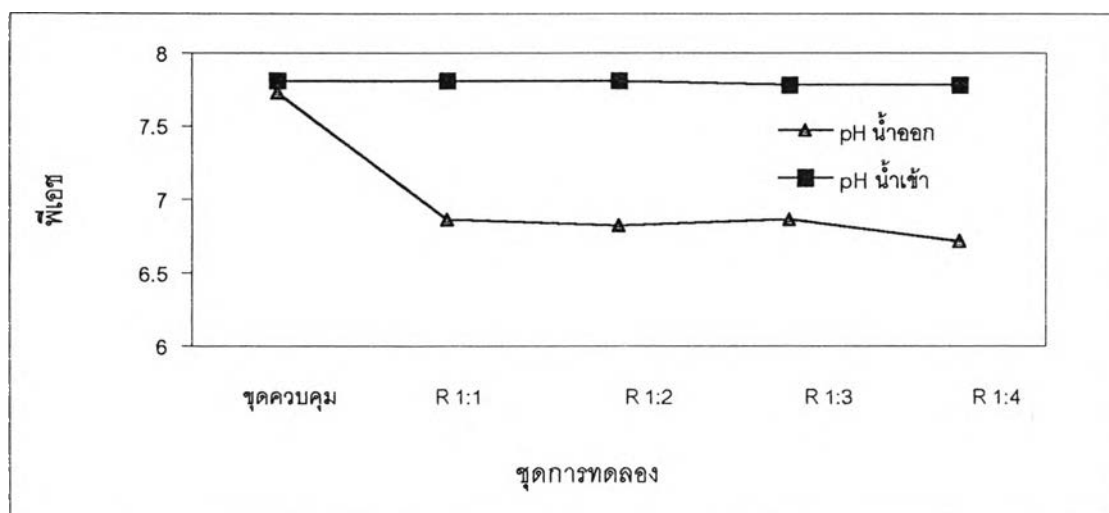


รูปที่ 4.9 ค่าพีเอชตลอดการทดลอง

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าพีเอชของน้ำออกแต่ละการทดลอง เมื่อใส่น้ำตาลให้ระบบเพิ่มขึ้นทำให้น้ำออกมีค่าพีเอชลดลงตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 โดยในชุดการทดลองที่มีอัตราส่วนซีโอดีน้ำชะมูลฝอยต่อซีโอดีน้ำตาลเป็น 1:4 จะมีค่าพีเอชในน้ำออกต่ำสุดเท่ากับ 6.72 ส่วนชุดการทดลองที่มีอัตราส่วนซีโอดีน้ำชะมูลฝอยต่อซีโอดีน้ำตาลเป็น 1:1 1:2 และ 1:3 จะมีค่าพีเอชในน้ำออกใกล้เคียงกันคือเท่ากับ 6.87 6.83 และ 6.87 ตามลำดับ ปัจจัยที่มีความสำคัญต่อค่าพีเอชคือความเข้มข้นของบัพเฟอร์ด้วย ซึ่งในระบบนี้ก็จะหมายถึงปริมาณสภาพต่าง

ตารางที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยพีเอชที่สภาวะคงตัวของทุกชุดการทดลอง

พารามิเตอร์		อัตราส่วนซีโอติน้ำชะมูลฝอยต่อซีโอติน้ำตาลทราย					
		1:0	1:1	1:2	1:0	1:3	1:4
พีเอชน้ำเข้า	เฉลี่ย	7.87	7.81	7.81	7.29	7.79	7.79
	N	10	10	10	10	5	5
	SD	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.06
พีเอชน้ำออก	เฉลี่ย	7.73	6.87	6.83	7.7	6.87	6.72
	N	10	10	10	5	5	5
	SD	0.05	0.05	0.07	0.06	0.06	0.08



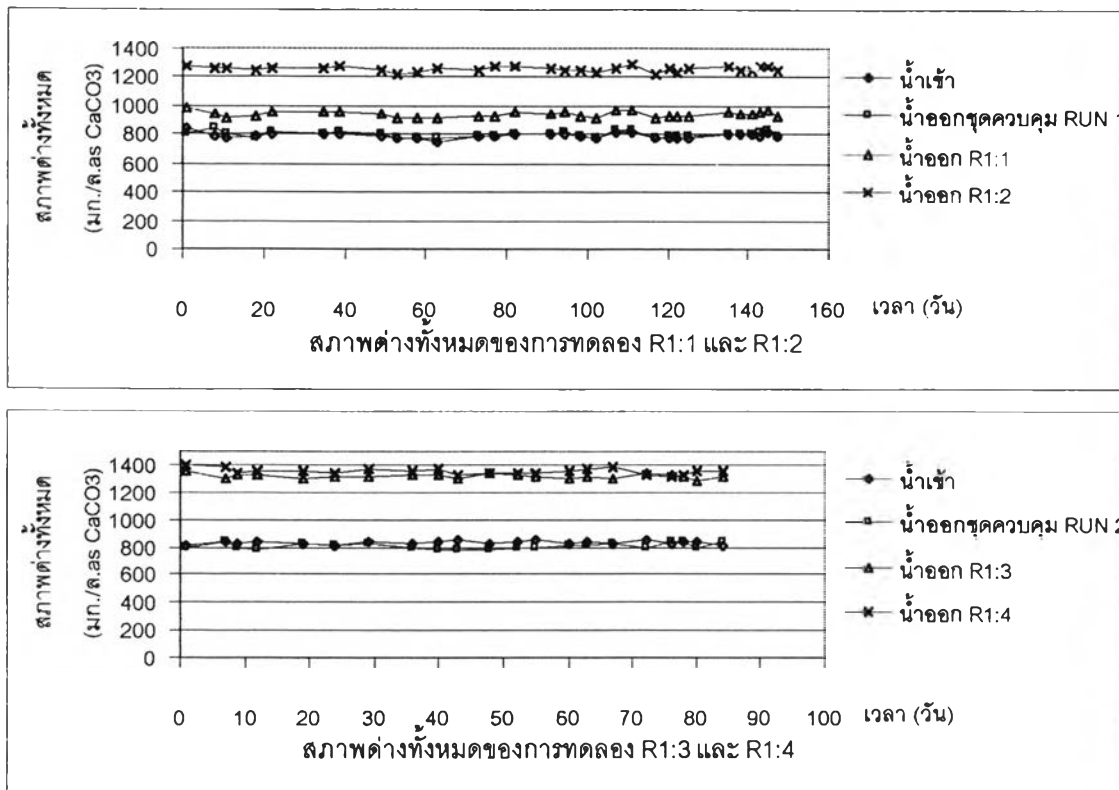
รูปที่ 4.10 พีเอชของน้ำออกในแต่ละการทดลอง

4.2.6 สภาพต่างทั้งหมด

จากตารางที่ 4.3 พบว่าค่าสภาพต่างในน้ำชะมูลฝอยมีค่าค่อนข้างสูง คือประมาณ 7,000 ถึง 8,500 มก./ล.หินปูน เมื่อเจือจาง เพื่อเตรียมน้ำเข้าระบบและซีโอติของน้ำชะมูลฝอย เท่ากับ 500 มก./ล. จึงทำให้สภาพต่างในน้ำเข้ามีค่าค่อนข้างสูงคือเฉลี่ยประมาณ 800 มก./ล.หินปูน ดังตารางที่ 4.4 ดังนั้นจึงไม่ต้องเติมสารเคมีเพื่อเป็นบัฟเฟอร์ให้กับระบบอีก แต่ก็ต้องขึ้นอยู่กับ

กับปริมาณซีโอดีของน้ำตาลที่กำจัดด้วย ถ้าระบบต้องกำจัดน้ำตาลมาก ๆ สภาพต่างที่มีก็อาจไม่พอที่จะรักษาพีเอชไม่ให้ต่ำเกินไปได้ แต่ในงานวิจัยนี้มีการกำจัดซีโอดีไม่เกิน 2,000 มก./ล. ดังนั้นสภาพต่างที่มีอยู่ในน้ำเข้า จึงเพียงพอที่ไม่ทำให้ระบบมีพีเอชต่ำเกินไป ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และทำให้สภาพต่างในน้ำออกมีค่าเพิ่มสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.11 พบว่าน้ำออกจะมีสภาพต่างสูงกว่าน้ำเข้าตลอดช่วงการทดลอง ส่วนการทดลองชุดควบคุมที่มีสภาพต่างไม่แตกต่างจากน้ำเข้ามากนัก ทั้งนี้เนื่องจากชุดควบคุมมีการกำจัดซีโอดีน้อย ส่วนชุดการทดลองอื่นที่มีการเติมน้ำตาลเพิ่มเข้าไป จะเห็นได้ว่าน้ำออกมีสภาพต่างสูงกว่าน้ำเข้าตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลอง คือในการทดลองที่มีอัตราส่วนซีโอดีน้ำชะมูลฝอยต่อซีโอดีน้ำตาลเป็น 1:1 1:2 1:3 และ 1:4 น้ำออกจะมีค่าสภาพต่างเท่ากับ 939 1,254 1,318 1,335 มก./ล.หินปูน ตามลำดับ เมื่อพิจารณาถึงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของสภาพต่างในน้ำออก เมื่อเปรียบเทียบกับในแต่ละชุดการทดลองแสดงในรูปที่ 4.12 ก็จะได้เห็นว่า เมื่อป้อนน้ำเสียที่น้ำเข้ามีซีโอดีเพิ่มขึ้น หรือมีความหมายว่าระบบกำจัดซีโอดีได้มากขึ้น น้ำออกก็มีสภาพต่างเพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อป้อนซีโอดีจากน้ำตาลมากขึ้นถึงระดับหนึ่งคือประมาณตั้งแต่ 1,000 ถึง 2,000 มก./ล. น้ำออกจะมีสภาพต่างใกล้เคียงกันคือประมาณ 1,300 มก./ล.หินปูน

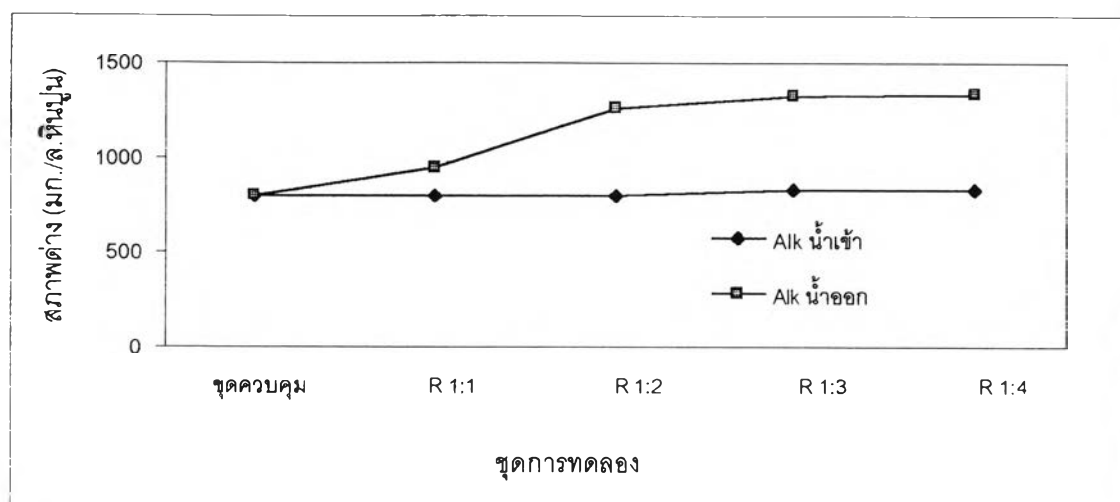
ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า พีเอช และค่าสภาพต่าง จะมีความสัมพันธ์กับปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัด กล่าวคือ ถ้าซีโอดีที่ถูกกำจัดมีค่ามากขึ้นก็จะทำให้สภาพต่างในน้ำออกมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่วนพีเอชที่เปลี่ยนแปลงก็ขึ้นอยู่กับสภาพกรดและสภาพต่าง ความสัมพันธ์ระหว่างซีโอดีที่ถูกกำจัดและสภาพต่าง รวมถึงสภาพกรดและค่าพีเอช สามารถอธิบายได้ด้วยการทำงานของแบคทีเรีย กลุ่มต่าง ๆ ในระบบ



รูปที่ 4.11 สภาพต่างตลอดการทดลอง

ตารางที่ 4.9 ค่าเฉลี่ยสภาพต่างทั้งหมดที่สภาวะคงตัวของทุกชุดการทดลอง

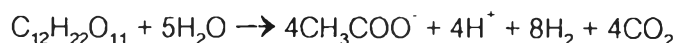
พารามิเตอร์		อัตราส่วนซีโอติน้ำชะมูลฝอยต่อซีโอติน้ำตาลทราย					
		1:0	1:1	1:2	1:0	1:3	1:4
สภาพต่างทั้งหมดน้ำเข้า (มก./ล. นินปุณ)	เฉลี่ย	793	793	793	830	830	830
	N	10	10	10	5	5	5
	SD	16.4	16.4	16.4	18.4	18.4	18.4
สภาพต่างทั้งหมดน้ำออก (มก./ล. นินปุณ)	เฉลี่ย	799	939	1254	820	1318	1335
	N	10	10	10	5	5	5
	SD	15.6	15.6	16.8	20.9	20.2	21.3



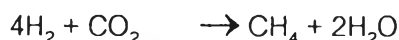
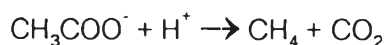
รูปที่ 4.12 สภาพต่างของน้ำออกในแต่ละการทดลอง

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้น้ำตาลทรายเป็นสารอาหารร่วม จึงพิจารณาการทำงานของแบคทีเรียเฉพาะในกรณีที่มีการเติมน้ำตาลทราย ขั้นตอนแรกซีโอดีจากน้ำตาลทรายซึ่งเป็นส่วนที่ถูกย่อยสลายได้ง่าย จะเกิดไฮโดรไลซิสให้โมเลกุลเล็กลง จากนั้นจะถูกกลุ่มแบคทีเรียสร้างกรดขนส่งเข้าสู่เซลล์ และย่อยสลายจนกระทั่งได้กรดอินทรีย์ระเหยง่าย กับก๊าซไฮโดรเจนซึ่งแตกตัวมาจากกรดอินทรีย์บางส่วนเป็นผลิตภัณฑ์ โดยก๊าซไฮโดรเจนจะถูกใช้โดยแบคทีเรียสร้างมีเทนที่บริเวณไฮโดรเจนหรือแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (Sulfate Reducing Bacteria; SRB) ในกรณีที่มีซัลเฟตในระบบด้วย ส่วนในงานวิจัยนี้ใช้น้ำประปาในการเตรียมน้ำเสีย ซึ่งน้ำประปามีซัลเฟตอยู่ประมาณ 30 – 50 มก./ล. ส่วนน้ำชะมูลฝอยน่าจะมีซัลเฟตอยู่บ้างแต่มีในปริมาณน้อย (การวัดซัลเฟต อธิบายไว้ตอนท้ายของหัวข้อนี้) จึงสันนิษฐานว่าน่าจะมีแบคทีเรียกลุ่มนี้ในระบบด้วย ส่วนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดขึ้น ถ้าเป็นกรดอะซิติกจะถูกใช้ต่อโดยแบคทีเรียสร้างมีเทน แต่ถ้าเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่ายอื่น ๆ ที่ไม่ใช่กรดอะซิติก จะถูกใช้โดยแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติก (Acetogenic Bacteria) ก่อนแล้วแบคทีเรียสร้างมีเทนจึงใช้กรดอะซิติกที่ถูกสร้างขึ้นนั้นต่อไป ผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายของระบบ จึงเป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ (และอาจมีไฮโดรเจนซัลไฟด์อีกเล็กน้อย) จะเห็นได้ว่าขั้นตอนการทำงานของแบคทีเรียอาจแบ่งเป็นขั้นตอนใหญ่ ๆ ได้ 2 ขั้น คือ ขั้นตอนการสร้างกรดและขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทน

ในขั้นตอนการสร้างกรด น้ำตาลทรายถูกย่อยสลายเป็นกรดอะซิติก ดังแสดงในสมการต่อไปนี้



ส่วนในขั้นตอนการสร้างมีเทน กรดอะซิติกและไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะถูกย่อยสลายดังแสดงตามสมการต่อไปนี้



จากทั้ง 4 สมการที่แสดงข้างต้น จะเห็นได้ว่าขั้นตอนการสร้างกรดจะทำให้สภาพต่างทั้งหมดลดลง เนื่องจากกรดอะซิติกที่เกิดขึ้น แยกตัวให้ไฮโดรเจนไอออน ซึ่งเป็นส่วนที่ทำลายสภาพต่าง สังเกตได้จากสมการสภาพต่างซึ่งเป็นผลรวมของ ไฮดรอกไซด์ คาร์บอเนต ไบคาร์บอเนต หักออกด้วยไฮโดรเจนไอออน ส่วนคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะแยกตัวให้ไฮโดรเจนไอออน และไบคาร์บอเนต ซึ่งเป็นทั้งสภาพต่างและสภาพกรด จึงหักล้างกันไปเมื่อคิดแบบเปรียบเทียบ เมื่อพิจารณาสภาพกรดก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นในขั้นตอนการสร้างกรดนี้ด้วย จากไฮโดรเจนไอออนของกรดอะซิติก และของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การแยกตัวของกรดอะซิติกจะขึ้นอยู่กับสภาพต่างด้วย และเมื่อนำค่าพีเอชมาพิจารณารวมด้วย ซึ่งจากการทดลองมีค่าพีเอชสูงกว่า 6.7 และมีสภาพต่างมาก ดังนั้นกรดอะซิติกที่เกิดขึ้นก็จะถูกสะเทินด้วยสภาพต่าง กลายเป็นเกลือของกรดแล้วแยกตัวให้ไฮโดรเจนไอออนดังสมการข้างต้น

ในขั้นตอนการสร้างมีเทนจากอะซิเตต จะต้องดึงไฮโดรเจนไอออนมา 1 ตัว ต่อการสร้างมีเทน 1 โมล ซึ่งอาจดึงจากผลผลิตของขั้นตอนการสร้างกรด หรืออาจดึงจากไฮโดรเจนไอออนที่อยู่ในน้ำ ที่เกิดจากการแยกตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ และการแยกตัวของน้ำ ดังนั้นสภาพต่างจะมีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่สภาพกรดถูกทำลายจากไฮโดรเจนไอออนที่ถูกใช้ไป เป็นการทำให้สมดุลของไอออนในระบบเสียไป ผลรวมของทั้งสองขั้นตอนก็คือการเพิ่มขึ้นของสภาพต่างในขณะที่สภาพกรดก็ถูกเพิ่มขึ้นไปด้วยพร้อม ๆ กัน แต่สภาพกรดเพิ่มมากกว่า แม้ว่าในขั้นตอนการสร้างมีเทนสภาพกรดจะลดลงบ้าง แต่ก็เป็นส่วนน้อย ดังนั้นสภาพต่างน้ำออกจึงมีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่พีเอชน้ำออกกลับมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง

การวิเคราะห์ปริมาณซัลเฟตที่ใช้ ใช้วิธีวัดความขุ่น มีหลักการคือ ให้แบเรียมคลอไรด์ทำปฏิกิริยากับซัลเฟตที่ละลายอยู่ในน้ำ ได้เป็นแบเรียมซัลเฟตซึ่งไม่ละลายน้ำ กลายเป็นความขุ่นอยู่แล้วนำไปวัดด้วยเครื่องวัดความขุ่น ในการทดลองจริงจะต้องมีขั้นตอนมากกว่านี้แต่จะไม่กล่าวถึง และจะต้องทำกราฟมาตรฐานก่อน โดยใช้สารละลายมาตรฐานซัลเฟต ใส่ผงแบเรียมซัลเฟตลงไปให้มากเกินพอ จนเกิดความขุ่น แล้วนำไปวัดความขุ่น จากนั้นให้เขียนกราฟระหว่างซัลเฟตกับความขุ่น จนได้เป็นเส้นตรง ส่วนการวัดซัลเฟตในน้ำเสีย ก็ทำเช่นเดียวกับการทำกราฟมาตรฐาน แต่หลังจากอ่านค่าความขุ่นแล้วให้นำไปอ่านค่าซัลเฟตจากกราฟมาตรฐานที่ทำให้ ในการทดลองหาปริมาณซัลเฟตในน้ำประปา นี้ ได้หาประมาณ 10 ครั้ง ส่วนการวัดซัลเฟตในน้ำชะมูลฝอยไม่อาจใช้วิธีวัดความขุ่นได้ เนื่องจากในน้ำชะมูลฝอยมีสีค่อนข้างมาก จึงไปรบกวนการวัดความขุ่น อย่างไรก็ตามได้ทดลองเติมแบเรียมคลอไรด์ลงในน้ำชะมูลฝอย และสังเกตด้วยตาเปล่า มองเห็นว่ามี ความขุ่นเกิดขึ้นน้อย อย่างไรก็ตามการทดลองหาปริมาณซัลเฟตตามคู่มือวิเคราะห์น้ำมีวิธีที่ยุ่งยากกว่านี้มากและจะไม่กล่าวถึง

4.2.7 ไออาร์พี

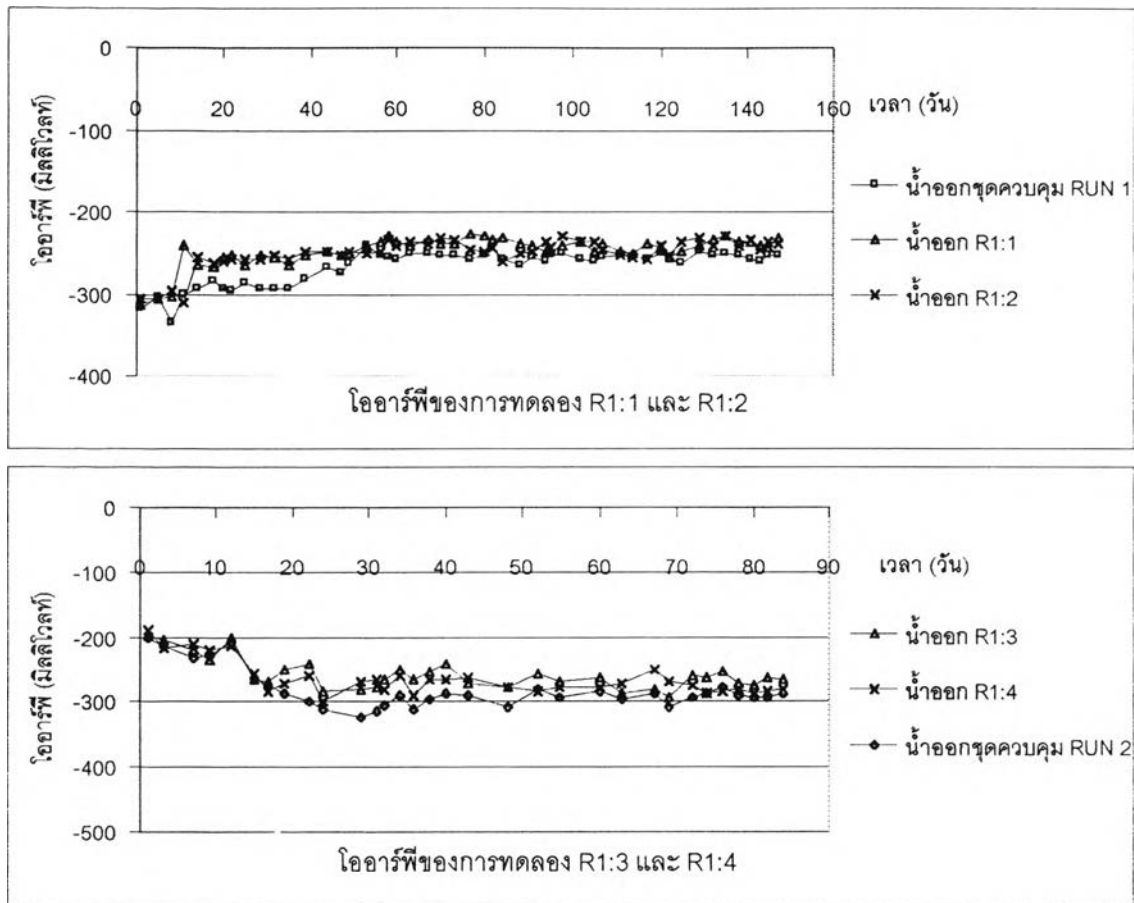
ไออาร์พีเป็นการวัดศักย์ไฟฟ้าในน้ำ สามารถบอกค่าแนวโน้มของระบบว่ามีแนวโน้มให้หรือรับอิเล็กตรอน ด้วยการแสดงค่าเป็นบวกเมื่อระบบมีแนวโน้มรับอิเล็กตรอน ส่วนเป็นลบระบบมีแนวโน้มให้อิเล็กตรอน โดยทั่วไปแล้วในระบบไร้อากาศที่มีซัลเฟตอยู่ด้วย จะได้ผลผลิตหลักคือซัลไฟด์ไอออนซึ่งเป็นไอออนลบ นั้นหมายความว่าหากในน้ำออกมีซัลไฟด์มาก ก็น่าจะวัดค่าไออาร์พีได้ติดลบมากขึ้น รวมทั้งไฮโดรเจนที่ละลายน้ำก็จะทำให้วัดค่าไออาร์พีเป็นลบด้วย จากการทดลองพบว่าค่าไออาร์พีในน้ำออกของทุกการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อการวัดอยู่ในช่วงเวลาเดียวกัน กล่าวคือ การทดลองที่ใช้อัตราส่วนซีโอติน้ำชะมูลฝอยต่อซีโอติน้ำตาลเป็น 1:1 และ 1:2 วัดไออาร์พีได้ประมาณ -250 มิลลิโวลต์ ส่วนการทดลองที่อัตราส่วน 1:3 และ 1:4 นั้นวัดไออาร์พีได้ประมาณ -260 และ -280 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ จากรูปที่ 4.13 จะเห็นว่า การทดลองชุดควบคุมมีค่าไออาร์พีสูงกว่าการทดลองที่มีการเติมน้ำตาล อยู่เล็กน้อย ในการวัดไออาร์พีโดยใช้หัววัด(Probe) จุ่มลงในน้ำออกที่เก็บมาจากถังยูเอเอสบี ตัวเลขที่อ่านได้จากหน้าจอจะไม่คงที่ในทีเดียว โดยจะลดลงเรื่อย ๆ อย่างช้า ๆ ได้เคยทดลองวัดจนกว่าตัวเลขจะนิ่ง พบว่าต้องใช้เวลา 20 – 30 นาที ดังนั้นน้ำออกที่เก็บมาจากถังอื่น ก็จะต้องตั้งรอ ซึ่งอาจทำให้ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์หนีออกไปได้ ตามความเป็นจริงแล้วการวัดไออาร์พี ไม่ควรเก็บน้ำออกมาจาก

ถังยูเอเอสบี ควรใช้หัววัดจุ่มแช่อยู่ตอนบนของถัง จะถูกต้องกว่า แต่ในทางปฏิบัติแล้วไม่อาจทำเช่นนั้นได้ เพราะเครื่องวัดไออาร์พีที่ใช้เป็นแบบตั้งโต๊ะ จะต้องใช้ไฟฟ้าจากปลั๊กไฟ ซึ่งไม่สะดวกในการเคลื่อนย้าย ดังนั้นหากวัดทั้งน้ำออกทั้งสามถังพร้อมกัน ก็อาจได้ค่าใกล้เคียงกว่านี้ ส่วนในการทดลองที่มีอัตราส่วนซีโอดีน้ำชะมูลฝอยต่อซีโอดีน้ำตาลเป็น 1:3 มีค่าไออาร์พีเป็นลบน้อยกว่าชุดควบคุมและการทดลองที่อัตราส่วน 1:4 แต่ก็ไม่มากนัก ซึ่งในการวัดไออาร์พีจะเป็นการวัดแนวโน้มรวมของระบบ ดังกล่าวมาแล้ว มิใช่ของสารใดสารหนึ่ง และการที่ค่าแตกต่างกันเพียงประมาณ 20 มิลลิโวลท์ ก็ถือว่าไม่แตกต่างกันมาก เพราะอาจยังอยู่ในช่วงแกว่งคือยังไม่นิ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าไออาร์พีของการทดลองที่อัตราส่วนซีโอดีน้ำชะมูลฝอยต่อซีโอดีน้ำตาลเป็น 1:1 และ 1:2 กับ 1:3 และ 1:4 จะเห็นได้ว่า สองอัตราส่วนแรกมีค่าเป็นลบน้อยกว่า สองอัตราส่วนหลัง ที่มีการกำจัดซีโอดีสูงกว่า เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการทดลองที่มีการเติมน้ำตาลกับชุดควบคุม จะเห็นได้ว่า ชุดควบคุมมีค่าไออาร์พีติดลบมากกว่า ทั้งนี้ก็เพราะค่าพีเอชของชุดควบคุมสูงกว่า ทำให้มีผลแก่อิอาร์พีเป็นลบมากขึ้นด้วย

ตารางที่ 4.10 ค่าเฉลี่ยไออาร์พีน้ำออกที่สภาวะคงตัวของทุกชุดการทดลอง

พารามิเตอร์	อัตราส่วนซีโอดีน้ำชะมูลฝอยต่อซีโอดีน้ำตาลทราย						
		1:0	1:1	1:2	1:0	1:3	1:4
ไออาร์พีน้ำออก	เฉลี่ย	-254.8	-239.4	-238.9	-288.4	-265.2	-283.2
	N	10	10	10	5	5	5
	SD	4.19	8.03	6.8	6.69	8.14	3.11





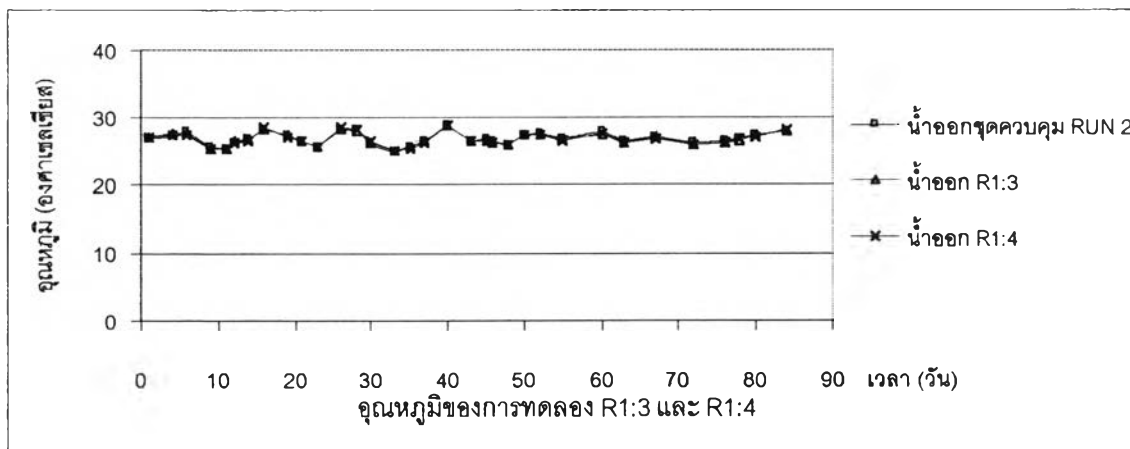
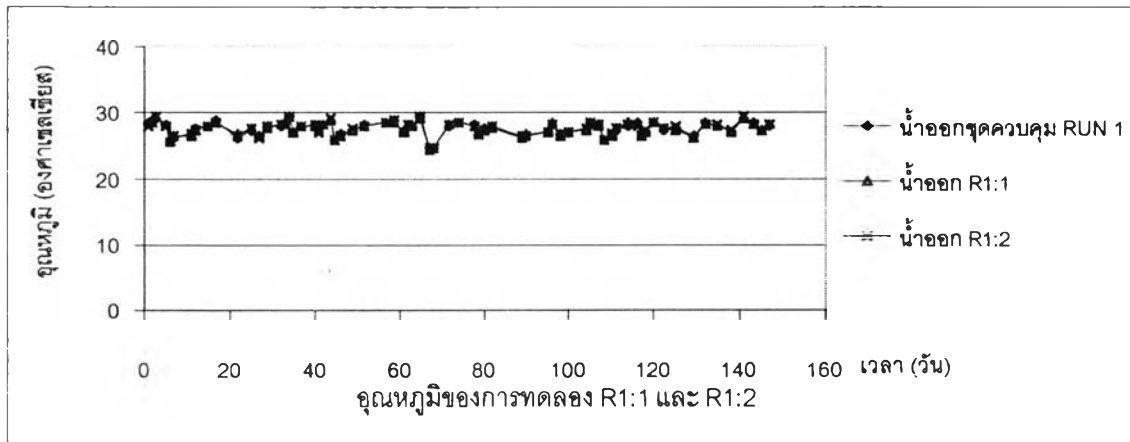
รูปที่ 4.13 ไออาร์พีตลอดการทดลอง

4.2.8 อุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.14 พบว่าตลอดการทดลอง อุณหภูมิไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักทั้งในน้ำเข้าและน้ำออก แม้ช่วงฤดูหนาวคือประมาณตั้งแต่กลางเดือนธันวาคม 2542 ถึงต้นเดือนมกราคม 2543 อุณหภูมิอากาศลดต่ำลงเหลือประมาณ 22 องศาเซลเซียส ได้มีการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่จุลชีพ โดยการฉายไฟจากหลอดไฟที่มีกำลังประมาณ 500 วัตต์ 2 ดวง ทำให้อุณหภูมิไม่ลดต่ำตามสภาวะอากาศ และเมื่อดูถึงการทำงานของระบบ พบว่าแม้อุณหภูมิจะลดต่ำลงไปบ้างก็ไม่ทำให้ระบบ มีความผิดปกติอย่างเด่นชัด โดยดูจากการทดลองเมื่อมีอุณหภูมิต่ำประมาณ 24 องศาเซลเซียส ระบบก็ยังกำจัดซีโอดีได้ประมาณร้อยละ 70 สำหรับการทดลองที่ใช้อัตราสวนซีโอดีน้ำชะมูลฝอยต่อซีโอดีน้ำตาลเป็น 1:2

ตารางที่ 4.11 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิน้ำออกที่สภาวะคงตัวของทุกชุดการทดลอง

พารามิเตอร์	อัตราส่วนซีโอดีน้ำชะมูลฝอยต่อซีโอดีน้ำตาลทราย						
		1:0	1:1	1:2	1:0	1:3	1:4
อุณหภูมิน้ำออก (องศาเซลเซียส)	เฉลี่ย	27.82	27.82	27.93	26.96	26.8	26.8
	N	10	10	10	5	5	5
	SD	0.82	0.8	0.83	0.77	0.76	0.91



รูปที่ 4.14 อุณหภูมิตลอดการทดลอง

4.3 สมดุลซีโอดีในระบบ

เป็นการวัดความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้ทำการทดลอง โดยอาศัยความสัมพันธ์ของซีโอดีที่เปลี่ยนไปอยู่ในรูปต่าง ๆ เมื่อผ่านเข้าสู่ระบบยูเอเอสบี ซึ่งมีดังต่อไปนี้ ซีโอดีในน้ำเสียเข้าระบบ จะถูกแบกที่เรียนนำไปใช้ในการสร้างเซลและการหายใจ แต่ซีโอดีที่ถูกใช้ในการหายใจมีมากกว่าซีโอดีที่ใช้ในการสร้างเซลมาก เมื่อซีโอดีถูกย่อยสลายก็จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปก๊าซมีเทน ซึ่งให้ซีโอดี 4 มก. ต่อก๊าซมีเทน 1 กรัม ส่วนซีโอดีที่เหลือก็อยู่ในน้ำออก ดังที่ได้กล่าวมาสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{COD}_{\text{in}} = \text{soluble COD}_{\text{eff}} + \text{CH}_4_{\text{gas}} \text{ COD} + \text{COD}_{\text{acc}}$$

เมื่อ

COD_{in} = ซีโอดีทั้งหมดก่อนในน้ำเสียเข้าระบบ

$\text{soluble COD}_{\text{eff}}$ = ซีโอดีละลายในน้ำออกจากระบบ

$\text{CH}_4_{\text{gas}} \text{ COD}$ = ซีโอดีในรูปก๊าซมีเทน

COD_{acc} = ซีโอดีที่เปลี่ยนเป็นเซลแบกที่เรียน

ค่าซีโอดีทั้งหมดในน้ำเสียเข้าสู่ระบบและซีโอดีละลายในน้ำออก สามารถหาได้ง่ายและใช้เวลาไม่นาน ด้วยวิธีไทเทรต แม้ว่าจะมีสารรบกวนคือไฮดรอกไซด์ที่ละลายน้ำเช่น ซัลไฟด์และคลอไรด์ แต่ก็สามารถกำจัดสิ่งรบกวนได้ด้วยการปรับพีเอชในน้ำตัวอย่างเพื่อไล่ออกไฮดรอกไซด์ในรูปไฮโดรซัลไฟด์ออกไป และเติมปรอทซัลเฟตในปริมาณที่เพียงพอเพื่อยับยั้งคลอไรด์ ส่วนซีโอดีในรูปก๊าซมีเทนมีอยู่ด้วยกัน 2 รูปคือ มีเทนในสถานะก๊าซและมีเทนละลายน้ำ ทั้ง 2 รูปไม่สามารถวัดโดยตรงได้ แต่สามารถคำนวณได้ โดยมีเทนในสถานะก๊าซจะต้องวัดปริมาตรก๊าซทั้งหมดและวัดร้อยละของก๊าซมีเทน และใช้กฎของก๊าซคำนวณออกเป็นโมล ส่วนมีเทนละลายน้ำคำนวณโดยให้กฎของเฮนรี ค่าซีโอดีที่ใช้สมดุลซีโอดีสุดท้ายคือซีโอดีที่เปลี่ยนเป็นเซลไม่สามารถวัดได้ จึงนำไปรวมกับซีโอดีส่วนที่ตรวจสอบไม่ได้

การตรวจสอบความน่าเชื่อถือได้ของข้อมูล จะใช้ซีโอดีที่เปลี่ยนไปและตรวจสอบได้เปรียบเทียบกับซีโอดีในน้ำเข้าระบบ ซึ่งจะเรียกว่า % COD recovery อย่างไรก็ตามซีโอดีที่เปลี่ยนไปเป็นเซลมีค่าน้อยเนื่องจากเป็นระบบไร้อากาศ จึงสามารถตัดทิ้งได้ จะได้สมการ % COD recovery ดังนี้

$$\% \text{ COD recovery} = \frac{\text{soluble COD}_{\text{off}} + \text{CH}_4 \text{ gas COD} + \text{COD}_{\text{acc}}}{\text{COD}_{\text{in}}}$$

แต่ซีไอดีในรูปก๊าซมีเทนในสถานะก๊าซจะหาได้จาก

$$\text{CH}_4 \text{ gas COD} = \frac{\text{Total gas volume} \times \% \text{CH}_4 \times 16,000 \times 4}{24.7 \times Q}$$

เมื่อ

Total gas volume	= ปริมาตรก๊าซทั้งหมด (ลิตร)
% CH ₄	= ร้อยละของก๊าซมีเทน
24.7	= ปริมาตรก๊าซ 1 โมล ที่ 25 °C (ลิตร)
Q	= อัตราไหลผ่านระบบต่อวัน (ลิตร)
16,000	= น้ำหนักของมีเทน 1 โมล (มก.)
4	= ซีไอดีของก๊าซมีเทน 1 กรัม (กรัม)

แต่ซีไอดีในรูปก๊าซมีเทนที่ละลายน้ำจะหาได้จาก

$$\text{soluble CH}_4\text{-COD} = K_{\text{h CH}_4} \times \text{Partial Pressure of CH}_4 \times 16,000 \times 4$$

เมื่อ

K _h	= ค่าคงที่ของเฮนรี 1.24×10 ⁻³ (โมล/ลิตร)
Partial Pressure of CH ₄	= ความดันพาร์เชียลของก๊าซมีเทน (สัดส่วนก๊าซมีเทน)

ตัวอย่างการคำนวณ

- ในชุดการทดลองที่ใช้อัตราส่วนซีไอดีน้ำชะมูลฝอยต่อซีไอดีน้ำตาลเท่ากับ 1:2 หรือมีซีไอดีน้ำเข้าเท่ากับ 1,000 มก./ล. มีข้อมูลดังต่อไปนี้

1. ซีโอดีน้ำเข้า	1023	มก./ล.
2. ซีโอดีน้ำออก	459	มก./ล.
3. ปริมาณก๊าซทั้งหมด	351	มล./วัน
4. สัดส่วนก๊าซมีเทน	86	%

จากสมการ %COD recovery จะต้องคำนวณค่าซีโอดีที่เปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทนทั้งในสถานะก๊าซและสถานะก๊าซละลายน้ำ

ค่าซีโอดีจากก๊าซมีเทนในสถานะก๊าซ จากสูตรข้างต้นจะได้

$$\begin{aligned} \text{CH}_{4 \text{ gas}} \text{ COD} &= \frac{0.351 \times 0.86 \times 16,000 \times 4}{24.7 \times 2.5} \\ &= 312.56 \quad \text{มก./ล.} \end{aligned}$$

ค่าซีโอดีจากก๊าซมีเทนละลายน้ำ จากสูตรจะได้

$$\begin{aligned} \text{soluble CH}_4\text{-COD} &= (1.24 \times 10^{-3}) \times 0.86 \times 16,000 \times 4 \\ &= 68.30 \quad \text{มก./ล.} \end{aligned}$$

จากสมการ %COD recovery จะได้

$$\% \text{ COD recovery} = \frac{\text{soluble COD}_{\text{eff}} + \text{CH}_{4 \text{ gas}} \text{ COD} + \text{COD}_{\text{acc}}}{\text{COD}_{\text{in}}}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ COD recovery} &= \frac{459 + (312.56 + 68.30)}{1023} \times 100 \\ &= 82.16 \% \end{aligned}$$

ค่า %COD recovery ของการทดลองชุดอื่นก็สามารถคำนวณได้ในลักษณะเดียวกัน คือมีค่าเท่ากับร้อยละ 75.2 88.9 และ 79.4 สำหรับการทดลองที่มีอัตราส่วนซีโอดีน้ำชะมูลฝอยต่อซีโอดีน้ำตาลเป็น 1:2 1:3 และ 1:4 ยกเว้นในชุดควบคุม ไม่สามารถหาค่า %COD recovery ได้ เนื่องจากก๊าซที่เกิดขึ้นมีน้อยและในช่วงที่ระบบคงตัวยังวัดปริมาณก๊าซไม่ได้อีกด้วย

อย่างไรก็ตาม จากสมการ %COD recovery จะต้องวัดค่าซีโอดีละลายในน้ำออก แต่ในความเป็นจริง ของแข็งที่หลุดออกไปจากระบบก็มีผลแก่การหาค่า %COD recovery ด้วย ซึ่งสามารถวัดได้เมื่อทำการทดลองหาค่าซีโอดีทั้งหมดในน้ำออก และอาจทำให้ค่า %COD recovery เพิ่มมากขึ้นถึงร้อยละ 90 ถึง 95 ก็ได้

4.4 แบบจำลองทำนายการเปลี่ยนแปลงมวลสารในระบบ

มวลสารที่เข้าในระบบและออกจากระบบ ย่อมมีการเปลี่ยนแปลงจากสาเหตุหลายๆ อย่างที่มีความสัมพันธ์กันอยู่ การหาสมดุลของซีโอดีในระบบ ก็เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถบอกถึงความสัมพันธ์ในระบบที่ ใช้ข้อมูลคือค่าซีโอดีทั้งในน้ำเข้าและน้ำออกเป็นพื้นฐาน ทำให้ทราบได้ว่าการทำการทดลองนั้นมีความถูกต้องน่าเชื่อถือเพียงใด ส่วนการใช้สมดุลของมวลสารในระบบ จะใช้ข้อมูลมากขึ้นกว่าการสมดุลของซีโอดี ซึ่งทำให้เราทราบถึงสภาพความเป็นไปของระบบ และอธิบายถึงความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้แม่นยำใกล้เคียงความเป็นจริง แต่การใช้ข้อมูลมากก็ต้องทำการทดลองมากด้วยซึ่งการทดลองที่ซับซ้อนก็อาจก่อให้เกิดความผิดพลาด และยังเป็นข้อจำกัดของการใช้แบบจำลองอีกด้วย ข้อมูลที่ว่านี้ก็คือสัดส่วนของก๊าซแต่ละชนิดที่เก็บได้จากระบบจะต้องวัดด้วยเครื่องจีซี (GC, Gas Chromatography) ซึ่งมีขั้นตอนที่ยุ่งยาก กล่าวคือต้องเก็บก๊าซใส่ภาชนะที่ปิดฝาปิดสนิทเพื่อป้องกันอากาศข้างนอกเข้าไปปะปน ด้วยความระมัดระวังเนื่องจากก๊าซไม่มีสีจึงสังเกตด้วยตาเปล่าไม่ได้ จากนั้นจะต้องเตรียมก๊าซความเข้มข้นมาตรฐานคือทราบความเข้มข้นแน่นอน นำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบกับก๊าซที่ต้องการทราบส่วนประกอบและปริมาณ การวิเคราะห์จะต้องนำส่งเจ้าหน้าที่ให้วิเคราะห์แทนเรา ซึ่งอาจเกิดข้อผิดพลาดที่เราไม่อาจทราบได้ อย่างไรก็ตามข้อมูลที่นำมาใช้ในแบบจำลองสมดุลมวลสารก็คือพารามิเตอร์ต่างๆ นั่นเองก็ยังมีข้อจำกัด ดังนั้นเราต้องมีสมมติฐานเพื่อปรับข้อมูลให้เข้ากับแบบจำลองได้

4.4.1 สมมติฐานเบื้องต้น

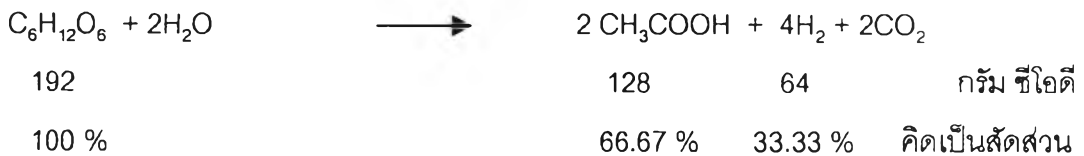
ในกระบวนการไร้ออกซิเจนสารอินทรีย์จะถูกย่อยสลายด้วยแบคทีเรีย 2 กลุ่ม โดยผ่านขั้นตอนการสร้างกรดและสร้างมีเทน สารอินทรีย์ขนาดใหญ่จะถูกย่อยสลายด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิส แล้วผ่านเข้าสู่วิถีไกลโคไลซิส เปลี่ยนสารอินทรีย์ให้อยู่ในรูปของกรดอะซิติก ระหว่างนี้จะได้ผลิตภัณฑ์อีกอย่างหนึ่งคือไฮโดรเจน ซึ่งทั้งสองอย่างนี้จะถูกใช้โดยแบคทีเรียสร้างมีเทนหรือแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตกรณีที่มีซัลเฟตอยู่ในระบบด้วย แต่แบคทีเรียทั้งสองจะใช้กรดอะ

- ไฮโดรเจน



ไฮโดรเจน 4 โมเลกุลจะให้ซีโอดี 64 กรัม

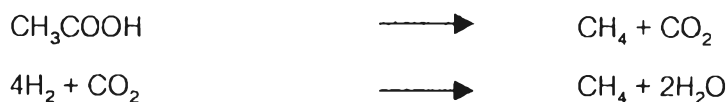
ดังนั้นจากสมการการย่อยสลายกลูโคสคิดในรูปซีโอดีจะได้



ดังนั้นสมมติฐานที่จะใช้ก็คือ ซีโอดีจากน้ำตาล 100 % จะถูกย่อยสลายเป็นกรดอะซิติกประมาณ 70 % และไฮโดรเจนประมาณ 30 % หรือคิดเป็นโมลจะได้รับการย่อยสลายซีโอดีกลูโคส 1 โมล จะให้ซีโอดีกรดอะซิติก 2/3 โมล และซีโอดีไฮโดรเจน 1/3 โมล และคาร์บอนไดออกไซด์ 1/3 โมล ซึ่งจะนำไปคิดรวมในแบบจำลองด้วย

- การใช้ซีโอดีของแบคทีเรียสร้างมีเทน

แบคทีเรียสร้างมีเทนจะใช้กรดอะซิติกและไฮโดรเจนสร้างมีเทนตามสมการ



จากสมการทั้งสองเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงมวลสารจะได้ว่า

แบคทีเรีย	สารอาหาร	มวลสารที่เปลี่ยนไป (โมล)		
		ซีโอดี	คาร์บอนไดออกไซด์	มีเทน
แบคทีเรียสร้างมีเทน	ไฮโดรเจน	-2	-1	+1
	กรดอะซิติก	-2	+1	+1

สมมติให้ระบบมีซีโอดีเริ่มต้นเท่ากับ 2C โมล ระบบรวมจะให้คาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ $0.3(-C) + 0.7(+C) = 0.4C$ โมล ดังนั้นถ้าซีโอดีเริ่มต้น C โมลจะได้คาร์บอนไดออกไซด์ 0.2C โมล ในทำนองเดียวกันจะได้มีเทนเท่ากับ $(0.3+0.7) \times 0.5C = 0.5C$ โมล

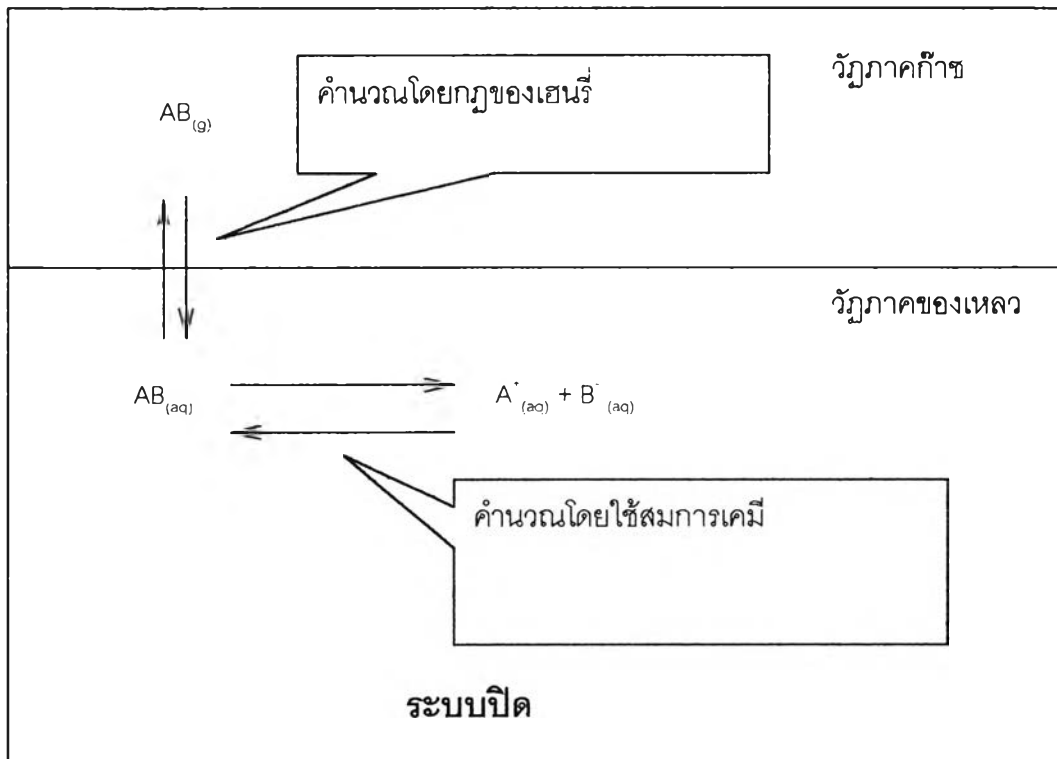
จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดจะเห็นได้ว่าซีโอดีที่ผ่านระบบจะเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทนซึ่งเป็นก๊าซ แต่ในระบบจริงก๊าซทั้งสองไม่ได้อยู่ในสถานะก๊าซทั้งหมด แต่จะละลายน้ำได้บางส่วนและก๊าซที่ละลายน้ำอาจมีการแตกตัวได้ต่อไปอีก

- การละลายน้ำของก๊าซชีวภาพ

จากหัวข้อที่แล้วจะเห็นได้ว่าการย่อยสลายซีโอดีผ่านแบคทีเรียสร้างมีเทนมีก๊าซเกิดขึ้นสองชนิดคือก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ถ้าในระบบมีซิลเฟตก็จะมีแบคทีเรียรีดิวซ์ซิลเฟตทำให้ได้ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยซึ่งจะไม่นำมาพิจารณาในที่นี้เพราะจากการทดลองน้ำชะมูลฝอยมีซิลเฟตน้อย ก๊าซที่เกิดขึ้นทั้งหมดนี้รวมเรียกว่าก๊าซชีวภาพ ไม่ได้อยู่ในสถานะก๊าซจริง ๆ ทั้งหมดเพราะสารอินทรีย์ที่เข้าในระบบอยู่ในรูปสารละลายและแบคทีเรียก็สร้างก๊าซในน้ำด้วย ดังนั้นต้องนำสมดุลของก๊าซในน้ำมาพิจารณาด้วย จึงทำให้ก๊าซจะอยู่ใน 3 รูปดังนี้ คือ

1. สถานะก๊าซลอยอยู่เหนือน้ำและหนีออกนอกระบบไม่ได้
2. ก๊าซละลายน้ำที่ไม่แตกตัวหรือแตกตัวได้ไม่หมด
3. ไอออนของก๊าซที่แตกตัวในน้ำ

ก๊าซทั้งสามรูปแสดงในรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าก๊าซทั้ง 3 รูปมีความสัมพันธ์กัน จะแบ่งอธิบายเป็น 2 ข้อคือ ก๊าซที่อยู่ในสถานะก๊าซกับก๊าซละลายน้ำจะอธิบายรวมกันด้วยกฎของเฮนรี่ ส่วนไอออนของก๊าซที่แตกตัวอธิบายได้โดยใช้สมการสมดุลของการแตกตัว



รูปที่ 4.15 ก๊าซในสถานะต่าง ๆ เหนือน้ำในระบบปิด (อนุตร, 2542)

- กฎของเฮนรี่

กฎของเฮนรี่กล่าวว่าความสามารถในการละลายน้ำของก๊าซขึ้นอยู่กับความดันพาร์เชียล (partial pressure) ในบรรยากาศเหนือน้ำ สามารถคำนวณได้ตามสมการ

เมื่อ

$$C^* = K_h P^*$$

C^* = ความเข้มข้นของก๊าซที่ละลายน้ำ (โมล/ล.)
 K_h = ค่าคงที่การละลายของเฮนรี่ (โมล/ล.-บรรยากาศ)
 P^* = ความดันพาร์เชียลของก๊าซนั้น (บรรยากาศ)

ค่า K_h เป็นค่าคงที่บอกถึงความสามารถในการละลายน้ำของก๊าซขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซ อุณหภูมิ และ ionic strength ค่า K_h ของก๊าซบางชนิดแสดงในตารางที่ 4.12

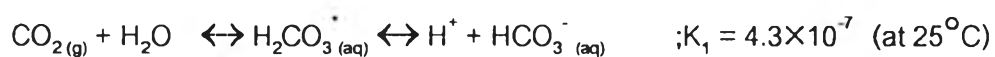
ตาราง 4.12 ค่าคงที่ K_h ของก๊าซต่าง ๆ (10^4 โมล/ล.-บรรยากาศ) (มันลีน ตันซูลเวสม์, 2537)

T, °C	Air	CO ₂	CO	C ₂ H ₆	H ₂	H ₂ S	CH ₄	NO	N ₂	O ₂
0	12.9	764	15.8	44.2	9.62	2,070	24.8	32.9	10.5	21.8
10	10.1	535	12.6	29.4	8.75	1,520	18.7	25.5	8.33	17.0
20	8.38	392	10.4	21.2	8.14	1,150	14.8	21.1	6.93	13.8
30	7.20	299	8.96	16.3	7.63	914	12.4	17.9	6.03	11.7
40	6.40	239	7.98	13.2	7.40	748	10.7	15.8	5.35	10.4
50	5.88	197	7.30	11.1	7.28	630	9.64	14.2	4.92	9.46
60	5.50	163	6.77	9.85	7.28	540	8.88	13.3	4.63	8.85
70	5.30		6.58	8.93	7.30	467	8.34	12.7	4.44	8.40
80	5.20		6.58	8.40	7.37	412	8.15	12.4	4.41	8.10
90	5.15		6.57	8.10	7.40	386	8.04	12.3	4.41	7.98
100	5.20		6.57	8.03	7.46	376	7.93	12.2	4.41	7.93

- การแตกตัวเป็นไอออนของก๊าซละลายน้ำ

ก๊าซชีวภาพที่จะได้นำมาพิจารณาคือก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ก๊าซมีเทนละลายน้ำแล้วจะไม่แตกตัว ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แต่เพียงอย่างเดียว

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เมื่ออยู่ในน้ำจะรวมตัวกับน้ำเป็นกรดคาร์บอนิกแล้วแตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออนและไบคาร์บอเนตไอออนตามสมการ



ค่า K_1 และ K_2 คือค่าคงที่การแตกตัวครั้งที่ 1 และ 2 ตามลำดับจะสังเกตได้ว่าค่า K_2 มีค่าน้อยกว่า K_1 มาก หมายความว่า การแตกตัวครั้งที่ 2 เกิดขึ้นน้อยจึงไม่นำมาคิดในแบบจำลอง

4.4.2 การสร้างสมการแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงมวลสารในระบบ

จากสมมติฐานที่ได้กล่าวในหัวข้อข้างต้น สรุปได้ว่าซีโอดีที่เข้าในระบบถูกใช้โดยแบคทีเรียสร้างมีเทน เปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทนจะอยู่ในสถานะก๊าซและก๊าซละลายน้ำแต่ละลายน้ำได้น้อย ส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะอยู่ในสถานะก๊าซและก๊าซละลายน้ำที่มีการแตกตัว ดังนั้นในการคำนวณสมดุลของมวลสารจะต้องทราบค่าเหล่านี้ทั้งหมด แต่การทดลองทำได้เพียงการวิเคราะห์หาค่าซีโอดีน้ำเข้าและน้ำออก อุณหภูมิและพีเอชเท่านั้น ส่วนพารามิเตอร์อื่นใช้การคำนวณแล้วนำมาคิดสมดุล ขั้นตอนการคำนวณมีดังนี้

1. วิเคราะห์ค่าซีโอดีที่เปลี่ยนไปในระบบ

สมมติให้	ซีโอดีที่ถูกกำจัด	= C	โมล
	มีเทนทั้งหมด	= CH ₄ .Total	โมล
	มีเทนสถานะก๊าซ	= CH ₄ .gas	โมล
	คาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมด	= CO ₂ .Total	โมล
	คาร์บอนไดออกไซด์สถานะก๊าซ	= CO ₂ .gas	โมล
	คาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำ		
	อยู่ในรูปกรดคาร์บอนิก	= H ₂ CO _{3(aq)}	โมล
	ไนโตรเจนสถานะก๊าซ	= N ₂ .gas	โมล
	ไนโตรเจนทั้งหมด	= N ₂ .Total	โมล
	ปริมาณก๊าซรวม	= TotalGas	โมล

จากสมมติฐาน การกำจัดซีโอดี C โมล จะให้คาร์บอนไดออกไซด์ในขั้นตอนการสร้างกรด C/3 โมลกับ 0.2C โมล ในขั้นตอนการสร้างมีเทน ส่วนมีเทนได้ทั้งหมด 0.5C โมล

2. วิเคราะห์แตกตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำ

ก๊าซมีเทนเมื่อละลายน้ำแล้วไม่แตกตัว แต่จะนำไปคิดการละลายด้วยกฎของเฮนรีในหัวข้อต่อไป ส่วนคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อละลายน้ำจะกลายเป็นกรดคาร์บอนิกแตกตัวให้ไบคาร์บอเนตไอออนและไฮโดรเจนไอออนโดยมีค่าคงที่การแตกตัว, K_{CO_2} เป็นดังนี้

$$K_{CO_2} = \frac{[H^+][HCO_3^-]}{[H_2CO_{3(aq)}}]$$

แต่ $pH = -\text{LOG} [H^+]$
 ดังนั้น $[H^+] = 10^{-pH}$
 แทนค่าจะได้

$$K_{CO_2} = \frac{10^{-pH} \times (HCO_3^-)}{H_2CO_{3(aq)}}$$

แต่ $CO_2\text{-Total} = HCO_3^- + H_2CO_{3(aq)} + CO_2\text{-gas}$
 ดังนั้น $HCO_3^- = CO_2\text{-Total} - H_2CO_{3(aq)} - CO_2\text{-gas}$
 แทนค่า HCO_3^- ในสมการ K_{CO_2}
 จะได้

$$K_{CO_2} = \frac{10^{-pH} \times (CO_2\text{-Total} - H_2CO_{3(aq)} - CO_2\text{-gas})}{H_2CO_{3(aq)}}$$

$$H_2CO_{3(aq)} = \frac{10^{-pH}/K_{CO_2}}{1 + 10^{-pH}/K_{CO_2}} \times (CO_2\text{-Total} - CO_2\text{-gas})$$

3. หาปริมาณก๊าซที่ละลายน้ำจากกฎของเฮนรี

ในวัฏภาคก๊าซประกอบด้วยก๊าซมีเทน $CH_4\text{-gas}$ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ $CO_2\text{-gas}$ และก๊าซไนโตรเจน $N_2\text{-gas}$ ดังนั้นในน้ำจะมีก๊าซทั้งสามละลายอยู่ แต่ต้องคำนวณจากก๊าซแต่ละชนิดแล้วนำมารวมกันภายหลัง การละลายน้ำของก๊าซขึ้นอยู่กับความดันพาร์เซี่ยลของก๊าซนั้นซึ่งมีค่าเป็นสัดส่วนระหว่างปริมาณก๊าซนั้น(คิดเป็นโมล)กับปริมาณก๊าซรวม

$$\text{ความดันพาร์เซี่ยลของก๊าซมีเทน} = \frac{CH_4\text{-gas}}{CH_4\text{-gas} + CO_2\text{-gas} + N_2\text{-gas}}$$

$$\text{ความดันพาร์เซี่ยลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์} = \frac{CO_2\text{-gas}}{(CH_4\text{-gas} + CO_2\text{-gas} + N_2\text{-gas})}$$

$$\text{ความดันพาร์เชียลของก๊าซไนโตรเจน} = \frac{N_2.\text{gas}}{(CH_4.\text{gas} + CO_2.\text{gas} + N_2.\text{gas})}$$

- การละลายน้ำของก๊าซมีเทน

จากกฎของเฮนรี

$$CH_{4(aq)} = K_{h-CH_4} \times \frac{CH_4.\text{gas}}{(CH_4.\text{gas} + CO_2.\text{gas} + N_2.\text{gas})}$$

$$\text{แต่ } CH_{4.Total} = CH_{4(aq)} + CH_4.\text{gas}$$

$$CH_{4.Total} - CH_4.\text{gas} = K_{h-CH_4} \times \frac{CH_4.\text{gas}}{(CH_4.\text{gas} + CO_2.\text{gas} + N_2.\text{gas})} \quad \text{..... (I)}$$

จัดรูปใหม่จะได้

$$(CH_4.\text{gas} + CO_2.\text{gas} + N_2.\text{gas}) = K_{h-CH_4} \times \frac{CH_4.\text{gas}}{(CH_{4.Total} - CH_4.\text{gas})} \quad \text{..... (II)}$$

เนื่องจากค่า $CH_4.\text{gas} + CO_2.\text{gas} + N_2.\text{gas}$ หมายถึงก๊าซทั้งหมดในบรรยากาศ แต่แสดงในรูปมีเทนสถานะก๊าซ ดังนั้นในปริมาณก๊าซในสมการอื่นจะต้องปรับให้อยู่ในรูปของมีเทนสถานะก๊าซทั้งหมดเพื่อให้ง่ายแก่การคำนวณ

- การละลายน้ำของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

จากกฎของเฮนรี จะได้

$$H_2CO_{3(aq)} = K_{h-CO_2} \times \frac{CO_2.\text{gas}}{(CH_4.\text{gas} + CO_2.\text{gas} + N_2.\text{gas})}$$

แทนค่า $H_2CO_{3(aq)}$ จากสมการการแตกตัวของกรดคาร์บอนิก จะได้

$$\frac{10^{-pH}/K_{CO_2} \times (CO_2.Total - CO_2.gas)}{1 + 10^{-pH}/K_{CO_2}} = \frac{K_{h-CO_2} \times CO_2.gas}{(CH_4.gas + CO_2.gas + N_2.gas)} \quad \text{..... (III)}$$

แทนค่า $(CH_4.gas + CO_2.gas + N)$ จากสมการ (II) จะได้

$$\frac{10^{-pH}/K_{CO_2} \times (CO_2.Total - CO_2.gas)}{1 + 10^{-pH}/K_{CO_2}} = \frac{K_{h-CO_2} \times CO_2.gas \times (CH_4.Total - CH_4.gas)}{K_{h-CH_4} \times CH_4.gas}$$

จัดรูปใหม่โดยให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปก๊าซไปรวมกัน จะได้

$$\frac{10^{-pH}/K_{CO_2} \times CO_2.Total}{1 + 10^{-pH}/K_{CO_2}} = \left\{ \frac{10^{-pH}/K_{CO_2} + \frac{K_{h-CO_2}}{K_{h-CH_4}} \times \frac{(CH_4.Total - CH_4.gas)}{CH_4.gas}}{1 + 10^{-pH}/K_{CO_2}} \right\} \times CO_2.gas$$

$$CO_2.gas = \frac{10^{-pH}/K_{CO_2} \times CO_2.Total}{1 + 10^{-pH}/K_{CO_2}}$$

$$\left\{ \frac{10^{-pH}/K_{CO_2} + \frac{K_{h-CO_2}}{K_{h-CH_4}} \times \frac{(CH_4.Total - CH_4.gas)}{CH_4.gas}}{1 + 10^{-pH}/K_{CO_2}} \right\} \quad \text{..... (IV)}$$

- การละลายน้ำของก๊าซไนโตรเจน

จากกฎของเฮนรี่

$$N_{2(aq)} = \frac{K_{h-N_2} \times N_2.gas}{(CH_4.gas + CO_2.gas + N_2.gas)}$$

$$\text{แต่ } N_2 \cdot \text{Total} = N_{2(aq)} + N_{2 \cdot \text{gas}}$$

$$N_2 \cdot \text{Total} - N_{2 \cdot \text{gas}} = \frac{K_{h-N_2} \times N_{2 \cdot \text{gas}}}{(\text{CH}_4 \cdot \text{gas} + \text{CO}_2 \cdot \text{gas} + N_2 \cdot \text{gas})} \quad \text{..... (V)}$$

แทนค่า $(\text{CH}_4 \cdot \text{gas} + \text{CO}_2 \cdot \text{gas} + N_2 \cdot \text{gas})$ จากสมการที่ (II) จะได้

$$N_2 \cdot \text{Total} - N_{2 \cdot \text{gas}} = \frac{K_{h-N_2} \times N_{2 \cdot \text{gas}} \times (\text{CH}_4 \cdot \text{Total} - \text{CH}_4 \cdot \text{gas})}{K_{h-CH_4} \times \text{CH}_4 \cdot \text{gas}}$$

$$N_{2 \cdot \text{gas}} = \frac{N_2 \cdot \text{Total}}{\frac{K_{h-N_2}}{K_{h-CH_4}} \times \frac{(\text{CH}_4 \cdot \text{Total} - \text{CH}_4 \cdot \text{gas})}{\text{CH}_4 \cdot \text{gas}} + 1} \quad \text{..... (VI)}$$

เนื่องจากในบรรยากาศมีก๊าซไนโตรเจนประมาณ 78 % และถึงยูเอเอสบีไม่มีการใช้ในโตรเจนดังนั้นไนโตรเจนที่ละลายน้ำอยู่ในน้ำเข้า จึงกลายเป็นไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำออก

ดังนั้น

$$N_2 \cdot \text{Total} = K_{h-N_2} \times 0.78$$

ค่าตัวเลข 0.78 คือ ความดันพาร์เชียลของไนโตรเจนในอากาศ

การคำนวณจะใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนำมาเปลี่ยนหน่วยให้เป็นโมลและให้อยู่ในรูปที่สามารถแทนค่าได้ในสมการก๊าซละลายน้ำ ซึ่งเป็นสมการที่มีความซับซ้อนจึงต้องใช้วิธีลองผิดลองถูก(trial & error) ด้วยการสมมติค่าปริมาณมีเทนสถานะก๊าซแล้วหาค่าปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมด ก๊าซมีเทนทั้งหมด และก๊าซไนโตรเจนทั้งหมด นำมารวมกันจะต้องได้เท่ากับ 1 ถ้าไม่ได้ให้สมมติใหม่จนกว่าจะใกล้เคียงที่สุด เราสามารถใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปจำพวก สเปรดชีต (spread sheet) เช่นไมโครซอฟเอกเซล (MS.EXCEL) ช่วยในการ

คำนวณให้มีความรวดเร็วยิ่งขึ้นกว่าการคิดด้วยมือ รายละเอียดจะได้แสดงในตัวอย่างการคำนวณต่อไป

4.4.3 ตัวอย่างการคำนวณ

- ใช้ข้อมูลของการทดลองที่อัตราส่วนซีโอดีน้ำชะมูลฝอยต่อซีโอดีน้ำตาลเป็น 1:4

1. ซีโอดีน้ำเข้า = 2,560 มก./ล.
2. ซีโอดีน้ำออก = 591 มก./ล.
3. พีเอชน้ำออก = 6.72
4. สภาพด่างน้ำเข้า = 830 มก./ล. หินปูน

ค่าคงที่ต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

- $K_{CO_2} = 4.30 \times 10^{-7}$
- $K_{h-CO_2} = 3.46 \times 10^{-2}$ โมล/ล.-บรรยากาศ
- $K_{h-CH_4} = 1.36 \times 10^{-3}$ โมล/ล.-บรรยากาศ
- $K_{h-N_2} = 6.48 \times 10^{-4}$ โมล/ล.-บรรยากาศ

- รายละเอียดการคำนวณ

1. คำนวณการใช้ซีโอดี

$$\begin{aligned}
 \text{ซีโอดีที่ถูกกำจัด} &= 2,560 - 591 \\
 &= 1,969 \quad \text{มก./ล.} \\
 &= 1,969 / 32,000 \\
 &= 0.06153 \quad \text{โมล} \\
 \text{ซีโอดีย่อยสลายได้กรดอะซิติก} &= 2/3 \times 0.06153 \\
 &= 0.04102 \quad \text{โมล} \\
 \text{ซีโอดีย่อยสลายได้ไฮโดรเจน} &= 1/3 \times 0.06153 \\
 &= 0.02051 \quad \text{โมล}
 \end{aligned}$$

2. คำนวณปริมาณสารที่เกิดขึ้น

- คาร์บอนไดออกไซด์

คาร์บอนไดออกไซด์จากการย่อยสลายโดยแบคทีเรียสร้างมีเทน

$$= 0.2 \times 0.06153$$

$$= 0.0123 \quad \text{โมล}$$

คาร์บอนไดออกไซด์จากสภาพต่าง

$$= 830 \quad \text{มก./ล.หินปูน}$$

$$= 830/50,000$$

$$= 0.0166 \quad \text{โมล}$$

คาร์บอนไดออกไซด์จากขั้นตอนสร้างกรด

$$= 1/3 \times 0.06153$$

$$= 0.0205 \quad \text{โมล}$$

จะได้คาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมด (CO₂.Total)

$$= 0.0123 + 0.0166 + 0.0205$$

$$= 0.04942 \quad \text{โมล}$$

- มีเทน

มีเทนจากการกำจัดซีโอดี

$$= 0.5 \times 0.0615$$

$$= 0.03077 \quad \text{โมล}$$

- ไนโตรเจนทั้งหมด

$$N_2.\text{Total} = K_{n-N_2} \times 0.78$$

$$= 6.48 \times 10^{-4} \times 0.78$$

$$= 0.0005054$$

3. นำค่าต่างๆ แทนลงในสมการตามลำดับดังนี้

- ก๊าซมีเทนละลายน้ำตามสมการที่ (I)

$$CH_4.\text{gas} + CO_2.\text{gas} + N_2.\text{gas} = K_{h-CH_4} \times \frac{CH_4.\text{gas}}{(CH_4.\text{Total} - CH_4.\text{gas})}$$

$$= \frac{1.36 \times 10^{-3} \times CH_4.\text{gas}}{(0.03077 - CH_4.\text{gas})}$$

..... (VII)

- คาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำและแตกตัวตามสมการที่ (IV)

แทนค่า พีเอช ค่าคงที่ ก๊าซมีเทนทั้งหมด และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมด
จะได้

$$\text{CO}_2.\text{gas} = \frac{10^{-6.72}/4.3 \times 10^{-7} \times 0.04942}{1 + 10^{-6.72}/4.3 \times 10^{-7}}$$

$$\left\{ \frac{10^{-6.72}/4.3 \times 10^{-7}}{1 + 10^{-6.72}/4.3 \times 10^{-7}} + \frac{3.46 \times 10^{-2} \times (0.03077 - \text{CH}_4.\text{gas})}{1.36 \times 10^{-3} \times \text{CH}_4.\text{gas}} \right\}$$

..... (VIII)

- ไนโตรเจนละลายน้ำและแตกตัวตามสมการที่ (VI)

$$\text{N}_2.\text{gas} = \frac{\text{N}_2.\text{Total}}{\frac{K_{h-\text{N}_2}}{K_{h-\text{CH}_4}} \times \frac{(\text{CH}_4.\text{Total} - \text{CH}_4.\text{gas})}{\text{CH}_4.\text{gas}} + 1}$$

แทนค่าไนโตรเจนทั้งหมด ค่าคงที่ และมีเทนทั้งหมดจะได้

$$\text{N}_2.\text{gas} = \frac{0.0005054}{\left\{ \frac{6.48 \times 10^{-4}}{1.36 \times 10^{-3}} \times \frac{(0.03077 - \text{CH}_4.\text{gas})}{\text{CH}_4.\text{gas}} + 1 \right\}}$$

$$\text{N}_2.\text{gas} = \frac{0.0005054}{\left\{ 0.476 \times \frac{(0.03077 - \text{CH}_4.\text{gas})}{\text{CH}_4.\text{gas}} + 1 \right\}}$$

..... (IX)

4. แก๊สการหาปริมาณก๊าซ

สมการที่ต้องแก้คือ (VII) (VIII) และ (IX) เริ่มด้วยสมมติ CH_4 .gas หรือ N_2 .gas หรือ CO_2 .gas แต่ในที่นี้สมมติ CH_4 .gas เพราะได้จัดสมการไว้แล้ว จากนั้นแทนในสมการ(VIII)จะได้ CO_2 .gas และแทนในสมการ (IX) จะได้ N_2 . Gas

จากการสมมติ CH_4 .gas เท่ากับ 0.025 โมลได้ผลดังนี้

$$\text{CO}_2\text{.gas} = 0.002457 \text{ โมล}$$

$$\text{N}_2\text{.gas} = 0.0004554 \text{ โมล}$$

นำค่าทั้งสามไปหาความดันพาร์เชียลในสมการ (I) (III) และ (V) ได้ผลดังนี้

$$\text{ความดันพาร์เชียลของก๊าซมีเทน} = 424 \%$$

$$\text{ความดันพาร์เชียลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์} = 43 \%$$

$$\text{ความดันพาร์เชียลของก๊าซไนโตรเจน} = 8 \%$$

รวมผลแล้วไม่ได้ 100 % จะต้องสมมติใหม่จนกว่าจะได้

ผลสุดท้ายได้ดังนี้

$$\text{ก๊าซมีเทน} = 0.0300 \text{ โมล} \quad \text{เท่ากับ} \quad 730 \text{ มล.} \quad \text{คิดเป็นร้อยละ} \quad 64$$

$$\text{ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์} = 0.016 \text{ โมล} \quad \text{เท่ากับ} \quad 391 \text{ มล.} \quad \text{คิดเป็นร้อยละ} \quad 34$$

$$\text{ก๊าซไนโตรเจน} = 0.0005 \text{ โมล} \quad \text{เท่ากับ} \quad 12 \text{ มล.} \quad \text{คิดเป็นร้อยละ} \quad 1$$

$$\text{ปริมาตรก๊าซรวม} = 1137 \text{ มก./ล.น้ำเสีย}$$

แต่ในการทดลอง ใช้อัตราการป้อนน้ำเสีย 2.5 ลิตรต่อวัน

$$\text{ดังนั้น ปริมาตรก๊าซรวม} = 2,842 \text{ มล.}$$

$$\text{แต่ การทดลองวัดก๊าซได้} = 1,856 \text{ มล.}$$

จะเห็นว่าผลที่คำนวณได้จากแบบจำลองกับที่วัดได้จริงมีความแตกต่างกันอย่างมาก

พิจารณาแล้วจึงตั้งสมมติฐานเพิ่มดังนี้

1. ซีโอดีที่เข้าระบบเปลี่ยนไปเป็นเซลของแบคทีเรียพวกสร้างกรดเท่ากับร้อยละ 20
2. ซีโอดีที่เข้าระบบเปลี่ยนไปเป็นเซลของแบคทีเรียพวกสร้างมีเทนเท่ากับร้อยละ 10

รวมแล้วซีโอดีที่เปลี่ยนเป็นเซลแบคทีเรียมีค่าประมาณร้อยละ 30 ซึ่งน่าจะครอบคลุมความผิดพลาดเรื่องการวัดซีโอดีในน้ำออกที่วัดเป็นซีโอดีละลายแทนการวัดซีโอดีทั้งหมด ดังนั้นจึงคิดซีโอดีตั้งต้นก่อนเปลี่ยนก๊าซในรูปต่างๆ เพียงร้อยละ 70 ของซีโอดีที่กำจัดได้ทั้งหมด(ซีโอดีน้ำเข้าลบซีโอดีน้ำออก) จากนั้นคำนวณใหม่ได้ผลดังนี้

ก๊าซมีเทน = 0.02062 โมล เท่ากับ 504 มล. คิดเป็นร้อยละ 64
 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ = 0.0096 โมล เท่ากับ 235 มล. คิดเป็นร้อยละ 34
 ก๊าซไนโตรเจน = 0.0005 โมล เท่ากับ 12 มล. คิดเป็นร้อยละ 1
 ปริมาตรก๊าซรวม = 752 มก./ล.น้ำเสีย

แต่ในการทดลองใช้อัตราการป้อนน้ำเสีย 2.5 ลิตรต่อวัน

ดังนั้น ปริมาตรก๊าซรวม = 1,880 มล.

จากการทดลองวัดก๊าซได้เฉลี่ย = 1,856 มล. คิดเป็นร้อยละ 98.8

จะเห็นได้ว่าการปรับแก้ให้ซีโอดีลดลงไปร้อยละ 30 ทำให้แบบจำลองใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น การทดสอบผลการทดลองด้วยแบบจำลองแสดงในตารางที่ 4.13

แม้ว่าการใช้แบบจำลองจะได้พยายามนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณเพื่อให้ได้ผลที่ใกล้เคียงความเป็นจริงที่สุดแล้วก็ตาม แต่ก็ยังมีบางอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณร่วมด้วยคือ ซีโอดีที่เปลี่ยนเป็นเซลล์แบคทีเรีย และซีโอดีจากของแข็งแขวนลอยในน้ำออก (การทดลองวัดซีโอดีน้ำออกเป็นซีโอดีละลายเท่านั้น) ดังนั้นถ้าต้องการให้ผลการคำนวณถูกต้องมากขึ้นจะต้องนำซีโอดีที่เปลี่ยนเป็นแบคทีเรีย และวัดซีโอดีในน้ำออกเป็นค่าซีโอดีทั้งหมด การใช้แบบจำลองทดสอบข้อมูลแสดงในตารางที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าการทดลองชุดควบคุมไม่สามารถวัดปริมาณก๊าซได้แต่จากการทดสอบด้วยแบบจำลองจะเห็นว่ามีการเกิดขึ้นแต่ก็เพียงเล็กน้อย น่าจะชี้มน้ำออกตามรอยต่อของระบบเก็บก๊าซ ส่วนการทดลองอื่น ๆ ที่มีก๊าซเกิดขึ้นมากความผิดพลาดก็จะลดลงเพราะถ้าระบบมีก๊าซหนีไปเล็กน้อยก็ไม่มีผลกระทบต่อผลส่วนใหญ่

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลที่ได้จากแบบจำลอง

การทดลอง	Partial pressure			Total Volume			Alkalinity		
	CH ₄	CO ₂	N ₂	Model	Real	%	Model	Real	%
ควบคุม	39.05	1.94	59.01	13	0	0	801	799	1.00
R1:1	77.42	15.61	6.97	404	351	86.88	889	939	105.6
R1:2	75.83	20.71	3.46	854	748	87.59	1077	1254	116.4
ควบคุม**	207.85	2.15	110	-0.68	0	0	829	820	98.9
R1:3	70.31	22.05	2.64	1130	1350	119.4	1099	1318	119.9
R1:4	67.07	31.32	1.61	1880	1856	98.72	1464	1335	91.19

หมายเหตุ * ชุดควบคุมของการทดลองครั้งที่ 1

**ชุดควบคุมของการทดลองครั้งที่ 2

4.5 กระบวนการโคเมตาบอลิซึมในหลุมฝังกลบมูลฝอยและในถังยูเอเอสบี

จากผลการทดลองพบว่า ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถบำบัดน้ำชะมูลฝอยได้ โดยพิจารณาจากค่าซีโอดี และสี ซึ่งไม่ลดลงในน้ำออก แม้ว่าจะมีการเติมน้ำตาลเพื่อเป็นสารอาหารร่วมแล้วก็ตาม แต่ปริมาณน้ำตาลที่เติมเข้าไปก็จำกัดอยู่ที่ความเข้มข้นซีโอดีเป็น 1 – 4 เท่า ของซีโอดีน้ำชะมูลฝอย ซึ่งน้ำชะมูลฝอยน่าจะเป็นสารย่อยยากสำหรับแบคทีเรียสร้างกรดและสร้างมีเทน ในระบบยูเอเอสบี แต่การที่สารอินทรีย์จะกลายเป็นสารย่อยยากได้อย่างไร และเหตุใดแบคทีเรียในระบบไร้อากาศไม่สามารถย่อยสลายน้ำชะมูลฝอยได้ ต้องพิจารณาจากสภาพความเป็นไปในหลุมฝังกลบมูลฝอยและในถังยูเอเอสบี

4.5.1 สภาพในหลุมฝังกลบมูลฝอย

เมื่อมีการนำมูลฝอยมาเทรวมกันในหลุมฝังกลบ แล้วมีการกลบทับด้วยดิน หรือนำมูลฝอยมาเทมสูงขึ้นเรื่อย มูลฝอยที่อยู่ภายในหลุมฝังกลบ หรืออยู่ลึกเข้าไปจากผิวหน้า จะเกิดสภาพไร้อากาศ น้ำชะมูลฝอยที่เกิดขึ้น ทั้งจากตัวมูลฝอยเองและจากน้ำภายนอก ก็จะอยู่ในสภาวะไร้อากาศด้วย ดังนั้นน้ำชะมูลฝอยจึงถูกย่อยสลายผ่านกลไกต่าง ๆ ซึ่งก็คือไฮโดรไลซิส การหมัก การสร้างกรด และการสร้างมีเทน อย่างไรก็ตามสภาพเริ่มแรกของระบบไร้อากาศในหลุมขยะ ที่อาจจะไม่มีเชื้อสำหรับย่อยสลายน้ำชะมูลฝอยได้ แต่เมื่อเวลาผ่านไปเป็นเวลานาน แบคทีเรียทุกกลุ่มที่มีความสัมพันธ์กันก็จะเกิดขึ้น และอาจเกิดการคัดพันธุ์ด้วยอาหาร แต่ในหลุมขยะก็ย่อมที่จะมีอาหารหลายอย่าง ซึ่งแบคทีเรียอาจนำไปเป็นสารอาหารร่วม ตามทฤษฎีของโคเมตาบอลิซึม ยิ่งไปกว่านั้นในหลุมฝังกลบยังมีระยะเวลาที่ยาวนานเป็นปีหรือหลายสิบปี เช่นหลุมฝังกลบมูลฝอยที่เก็บน้ำมาทดลอง มีอายุมาแล้วกว่า 13 ปีและยังใช้งานอยู่ อายุของหลุมฝังกลบก็เปรียบได้กับเวลาเก็บกักน้ำ ดังนั้นปฏิบัติการการย่อยสลายก็อาจเกิดได้อย่างสมบูรณ์ และเข้าสู่สถานะคงตัวแล้ว และการที่หลุมฝังกลบแห่งนี้ยังใช้งานอยู่ ก็เปรียบเสมือนกับการเติมสารอาหารใหม่ ๆ ให้แก่แบคทีเรียระบบไร้อากาศ เป็นผลให้แบคทีเรียมีอยู่หลากหลายสายพันธุ์ตามชนิดของอาหาร และมีความสามารถที่จะย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยยากได้

ผลสุดท้ายก็คือ น้ำชะมูลฝอยที่ออกมาจากหลุมขยะ น่าจะมีความคงตัวสูง ด้วยเหตุผลดังกล่าวมาแล้ว

4.5.2 สภาพในถังยูเอเอสบี

ในถังยูเอเอสบีเป็นระบบไร้อากาศ ที่มีแบคทีเรียเกาะกลุ่มกันอย่างหนาแน่น ซึ่งเป็นระบบที่ได้เปรียบระบบไร้อากาศแบบอื่น ในข้อที่ว่า มีแบคทีเรียจำนวนมาก สามารถกักเซลล์ไว้ในถังได้อย่างดี เพราะเมื่อดเชื้อจะหนักและรวมตัวอยู่ตอนล่างของถัง ยังมีอุปกรณ์แยกสามสถานะด้วย ก็ยังรักษาเชื้อไว้ได้ดียิ่งขึ้น เมื่อมีการเติมน้ำตาลเพื่อเป็นสารอาหารร่วมให้แก่แบคทีเรีย ก็เป็นการเพิ่มความสามารถให้แบคทีเรีย แต่ก็ใช้สารอาหารชนิดเดียว ดังนั้นแบคทีเรียที่ใช้ น้ำตาลทรายเป็นสารอาหารก็ควรมีอยู่ในระบบค่อนข้างมาก แบคทีเรียที่ใช้สารอาหารอื่นก็อาจมีอยู่จำกัดส่วนเวลาเก็บกักซึ่งใช้เวลาเพียง 1 วัน เมื่อเทียบกับสภาพในหลุมฝังกลบขยะที่มีระยะเวลายาวนานกว่ามาก สารอินทรีย์ที่ซับซ้อนก็อาจถูกย่อยสลายไปได้

จากที่กล่าวมา ในสองหัวข้อข้างต้นนี้ จะเห็นได้ว่าสภาพของหลุมฝังกลบขยะและถังยูเอเอสบีก็มีสภาพใกล้เคียงกัน แต่ในหลุมฝังกลบจะมีข้อได้เปรียบคือ มีสารอาหารที่หลากหลายซึ่งหมายความว่าไปถึงแบคทีเรียที่หลากหลายตามไปด้วย อีกข้อหนึ่งคือหลุมฝังกลบมีเวลาเก็บกักยาวนานกว่าถังยูเอเอสบีมาก ถึงหลายร้อยหลายพันเท่า ส่วนถังยูเอเอสบีมีข้อได้เปรียบคือแบคทีเรียมีการอัดตัวกันแน่นมาก สารอินทรีย์ที่เข้ามาในระบบก็จะถูกกำจัดออกไปเป็นอันมากอย่างรวดเร็ว เมื่อเปรียบเทียบแล้ว สารอินทรีย์ที่อยู่ในหลุมฝังกลบขยะก็น่าจะถูกกำจัดด้วยแบคทีเรียในระบบไร้อากาศ จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงตัว ดังนั้นน้ำชะมูลฝอยที่เก็บมาทำการทดลองก็น่าที่จะมีความคงตัว และไม่สามารถย่อยสลายได้อีกด้วยสภาพไร้อากาศของยูเอเอสบี ซึ่งการทดลองก็ได้ยืนยัน ด้วยผลของซีไอดีและสีที่ไม่อาจกำจัดได้มากนักดังนั้นขั้นตอนโคเมตาบอลิสมจึงไม่น่าจะเกิดขึ้นในถังยูเอเอสบี