

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการทดลอง

ในตอนต้นของการทดลอง ได้เลี้ยงเชื้อในถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีโดยใช้น้ำตาลทรายเป็นสารอาหาร ความเข้มข้นซีไอดี 500 มก./ล. อัตราการไหล 8 ลิตรต่อวัน เวลาที่กักน้ำประมาณ 9 ชั่วโมง ความเข้มข้นซิลเฟตเป็น 42, 84 และ 840 มก./ล. เป็นเวลาประมาณ 3 - 4 เดือน เพื่อให้เชื้อที่นำมาเลี้ยงชินกับน้ำเสีย โดยในระหว่างนี้ได้เก็บตัวอย่างน้ำไปวิเคราะห์ด้วยเพื่อดูความเป็นไปของระบบ แต่ผลในช่วงนี้ไม่ได้นำมาแสดง เนื่องจากใช้เพื่อดูความเป็นไปของระบบและเพื่อการควบคุมระบบเท่านั้น อีกทั้งในช่วงแรกนี้ ยังมีปัญหาเนื่องจากการวิเคราะห์หาซิลเฟต ที่เกิดจากการไม่สามารถทำกราฟมาตรฐานได้ วิธีการวิเคราะห์หาซิลเฟตที่เลือกใช้ก็คือ Turbidimetric Method โดยมีวิธีการคือเติมสารเคมีเพื่อปรับสภาพน้ำตัวอย่าง จากนั้นจึงเติมแบเรียมคลอไรด์ แบเรียมที่เติมลงไปจะทำปฏิกิริยากับซิลเฟตเกิดเป็นตะกอนแบเรียมซิลเฟตสีขาวขุ่น เมื่อวัดความขุ่นของน้ำตัวอย่าง และนำค่าความขุ่นที่ได้มาเทียบกับกราฟมาตรฐานที่ทำขึ้นก็จะวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นซิลเฟตได้ แต่การทำกราฟมาตรฐานซึ่งควรเป็นเส้นตรงกลับไม่ได้เป็นเส้นตรง การแก้ปัญหาก็คือเปลี่ยนสารเคมีใหม่มาใช้ตาม Standard Method และเลือกใช้ช่วงการวัดค่าความขุ่นให้เหมาะสม ที่ความขุ่นต่ำ(ความเข้มข้นซิลเฟตต่ำ)ก็เลือกช่วงความขุ่น 0 - 10 NTU ส่วนที่ความขุ่นสูง(ความเข้มข้นซิลเฟตสูง)ก็เลือกช่วงความขุ่นที่สูงขึ้นคือ 0 - 100 NTU ซึ่งก็ทำให้กราฟมาตรฐานที่ได้เป็นเส้นตรง ปัญหาต่อมาก็คือเรื่องการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งจะต้องดักจับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยสารละลายซิงค์อะซิเตต (ZnAc) ก่อน แล้วจึงนำซิงค์ซัลไฟด์ที่ดักจับไว้ได้มาวิเคราะห์หาปริมาณซัลไฟด์ในก๊าซทั้งหมด เพื่อการดักจับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ทำให้ต้องปรับปรุงส่วนตกตะกอนของถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีด้วยการต่อส่วนตกตะกอนให้สูงขึ้น เพื่อให้ถังปฏิกรณ์มีความดัน (head) ที่เพียงพอ อีกปัญหาหนึ่งที่เป็นปัญหาสำคัญก็คือ ในการทดลองที่ 2 ซึ่งใช้อะซิเตตเป็นสารอาหาร เมื่อเติมอะซิเตตเข้าระบบทำให้พีเอชสูงขึ้นถึง 8.5 - 8.8 เชื้อแบคทีเรียถูกยับยั้งการเจริญเติบโต ทำให้ต้องเสียเวลาเพื่อทำให้เชื้อแบคทีเรียฟื้นตัวระยะหนึ่ง สาเหตุที่พีเอชของน้ำออกเพิ่มขึ้นจะกล่าวโดยละเอียดอีกครั้งในหัวข้อ 4.2

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ชุด แต่ละชุดใช้แหล่งคาร์บอนที่ต่างกัน คือ น้ำตาลทรายและอะซิเตตซึ่งเติมในปริมาณเทียบเท่ากับซีไอดี 500 มก./ล. และในชุดการทดลองเดียวกัน จะแปรค่าความเข้มข้นรีดเฟตเป็น 42, 84 และ 840 มก./ล. คิดเป็นอัตราส่วนซีไอดีต่อรีดเฟตเท่ากับ 12, 6 และ 0.6 ตามลำดับ ผลการทดลองจึงจำแนกออกตามชุดการทดลองและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ

ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดประมาณ 20 เดือน โดยเริ่มการทดลองตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ 2541 ถึง กันยายน 2542 ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยหลังจากเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียในการทดลองที่ 2 เสร็จสิ้นแล้ว การทดลองที่เพิ่มเติมเข้ามาก็คือ การลงเดินโลหะหนักให้กับระบบโดยเลือกเติมในถังปฏิกรณ์ที่มีค่าอัตราส่วนซีไอดีต่อรีดเฟตต่ำสุด คือ 0.6 ซึ่งเป็นถังปฏิกรณ์ที่สร้างรีดไฟได้สูงสุด ความสามารถในการรับโลหะหนักจึงมีค่ามากที่สุด

ตารางที่ 4.1 ขั้นตอนของการทำวิจัย

ลำดับการทดลอง	2541												2542															
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10							
เริ่มเดินระบบ	██████████																											
การทดลองที่ 1						██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████																	
จัดเตรียมอุปกรณ์และศึกษาวิธีการเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย												██████████	██████████	██████████	██████████													
เลี้ยงเชื้อแบคทีเรียในการทดลองที่ 1																██████████	██████████											
การทดลองที่ 2																												
เลี้ยงเชื้อแบคทีเรียในการทดลองที่ 2																						██████████						
เติมโลหะหนัก																						██████████						

4.1.1 การทดลองที่ 1

การทดลองที่ 1 เป็นชุดการทดลองที่ใช้น้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอน โดยความเข้มข้นของน้ำตาลในน้ำเลี้ยงสังเคราะห์เทียบเท่ากับซีไอดี 500 มก./ล. แปรค่าความเข้มข้นรีดเฟตเป็น 42, 84 และ 840 มก./ล.

ในการทดลองที่ 1 ถึงปฏิกรณ์ที่มีรีดเฟตในน้ำเข้าเท่ากับ 12 มก./ล. เมื่อคำนวณค่าความเข้มข้นของรีดเฟตที่ถูกใช้ไปเทียบกับรีดเฟตที่เกิดขึ้น (แสดงรายละเอียดในหัวข้อ 4.1 (4) และ 4.2) ปรากฏว่ารีดเฟตที่เกิดขึ้นมากกว่ารีดเฟตที่หายไป จึงได้ทำการทดลองใหม่เฉพาะในถังปฏิกรณ์นี้และเก็บผลเป็นเวลา 2 สัปดาห์ เพื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้ในการทดลองแรกกับค่าใหม่ที่ได้จากการทดลองหลัง และวิเคราะห์หาสาเหตุของความผิดพลาด การอภิปรายผลการทดลองจึงใช้ผลจากการทดลองที่เพิ่มขึ้น

ผลการทดลองในการทดลองที่ 1 จำแนกตามตัวแปรต่าง ๆ แสดงดังต่อไปนี้

1) อุณหภูมิ

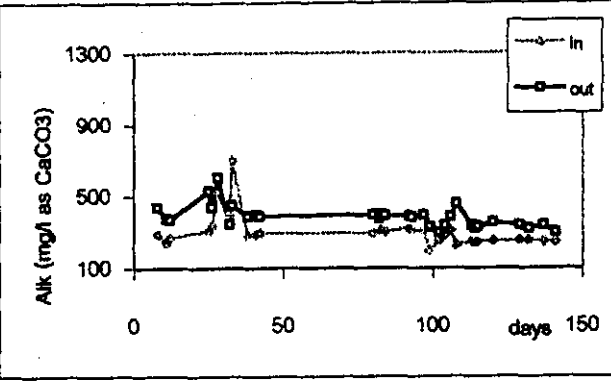
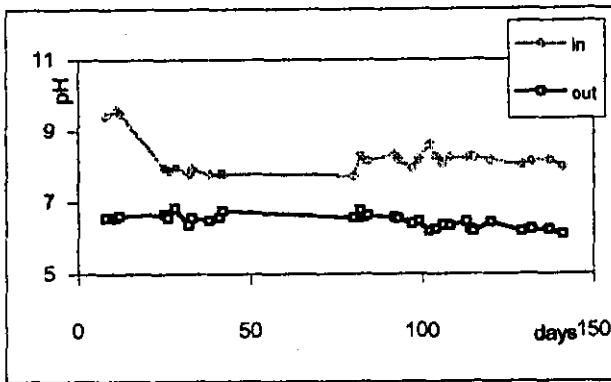
ในถังปฏิกรณ์ที่ความเข้มข้นรีดเฟตเท่ากับ 42, 84 และ 840 มก./ล. ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิเฉลี่ยในน้ำเสียที่เข้าระบบเท่ากับ 28.6, 28.6 และ 28.3 องศาเซลเซียส ส่วนอุณหภูมิเฉลี่ยน้ำออกเท่ากับ 28.8, 28.9 และ 28.9 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิน้ำเสียและน้ำออกของทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์มีความแตกต่างกันน้อยมาก โดยอุณหภูมิในน้ำออกจะสูงกว่าน้ำเข้าอยู่เล็กน้อย อยู่ในช่วงระหว่าง 0.2 - 0.6 องศาเซลเซียส

2) พีเอชและสภาพต่าง

พีเอชของน้ำในถังปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นรีดเฟตเท่ากับ 42, 84 และ 840 มก./ล. ลดลงจาก 8.11, 8.15 และ 8.22 ไปเป็น 6.30, 6.37 และ 6.84 แต่ค่าสภาพต่างกลับเพิ่มขึ้นจาก 250, 273 และ 271 มก./ล. as CaCO_3 เป็น 344, 400 และ 838 มก./ล. as CaCO_3 ตามลำดับ ข้อมูลของพีเอชและสภาพต่างทั้งหมดตลอดการทดลองนี้แสดงในรูปที่ 4.1

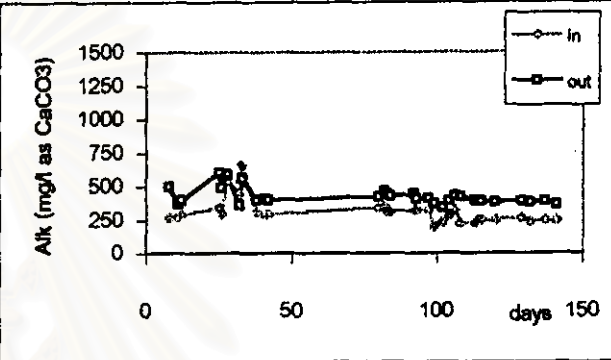
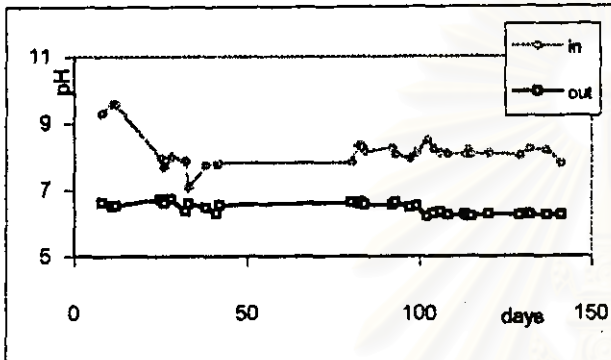
3) ซีไอดีและประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี

ค่าซีไอดีเฉลี่ยในน้ำเสียที่เตรียมสำหรับถังปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นรีดเฟตเท่ากับ 42, 84 และ 840 มก./ล. มีค่าเป็น 516, 521 และ 520 มก./ล. ส่วนน้ำออกจากระบบมีค่าซีไอดีเฉลี่ยเท่ากับ 55, 40 และ 55 มก./ล. ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีคิดเป็นร้อยละ 89.4, 92.3 และ 89.5 ตามลำดับ ค่าซีไอดีและประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีคิดเทียบเป็นร้อยละของน้ำเสียเข้าระบบตลอดการทดลองนี้แสดงดังรูปที่ 4.2



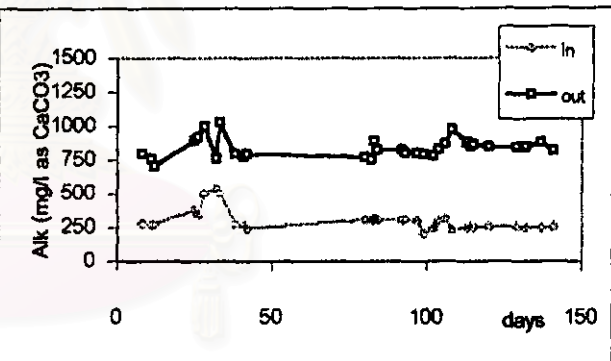
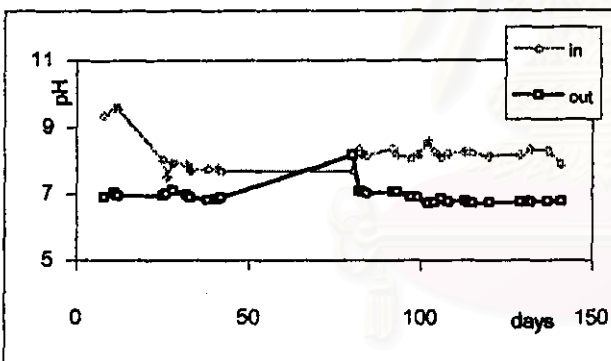
(น) พีเอชของถังปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นซัลเฟตเท่ากับ 42 มก./ล.

(ง) สภาพต่างของถังปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นซัลเฟตเท่ากับ 42 มก./ล.



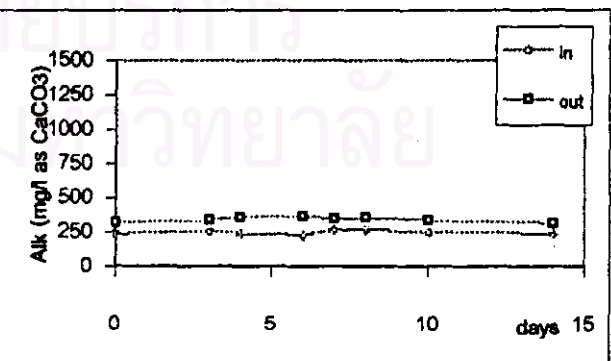
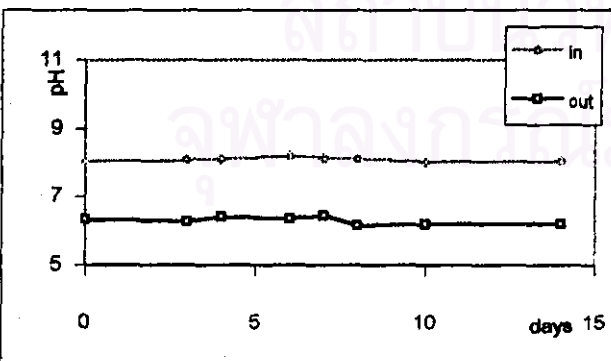
(ค) พีเอชของถังปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นซัลเฟตเท่ากับ 84 มก./ล.

(จ) สภาพต่างของถังปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นซัลเฟตเท่ากับ 84 มก./ล.



(ฉ) พีเอชของถังปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นซัลเฟตเท่ากับ 840 มก./ล.

(ช) สภาพต่างของถังปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นซัลเฟตเท่ากับ 840 มก./ล.



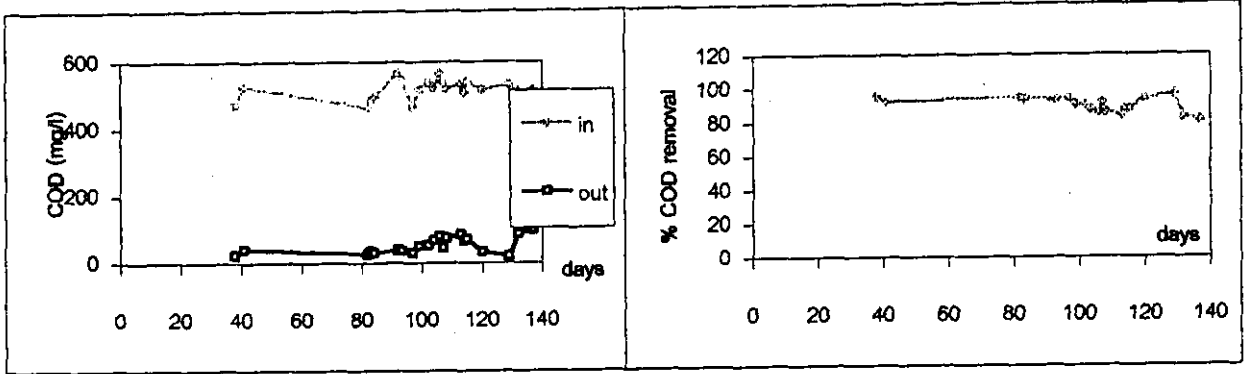
(ซ) พีเอชของถังปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นซัลเฟตเท่ากับ 42 มก./ล.

(ญ) สภาพต่างของถังปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นซัลเฟตเท่ากับ 42 มก./ล.

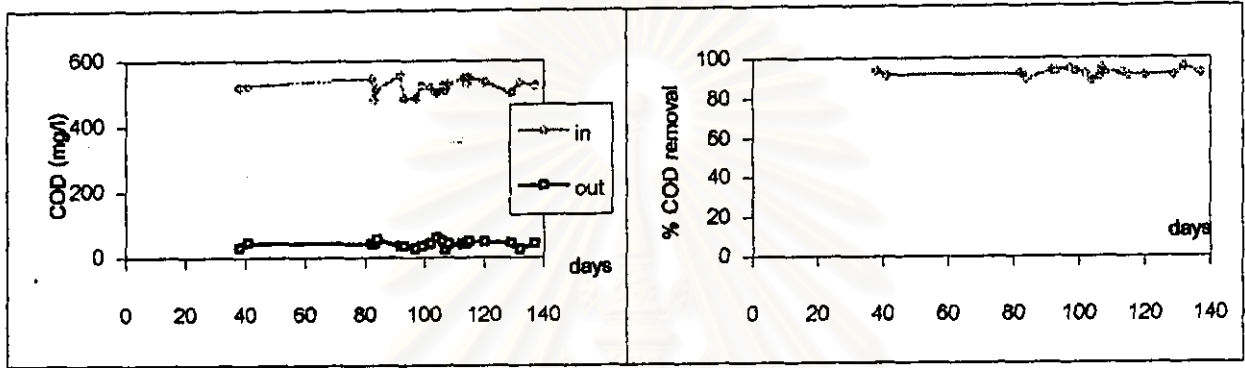
(ทดลองเพิ่ม)

(ทดลองเพิ่ม)

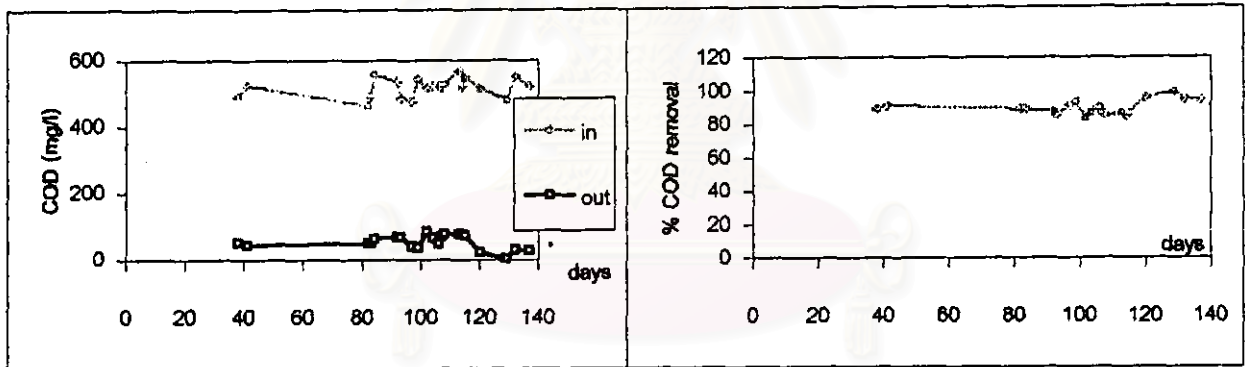
รูปที่ 4.1 พีเอชและสภาพต่างในการทดลองที่ 1



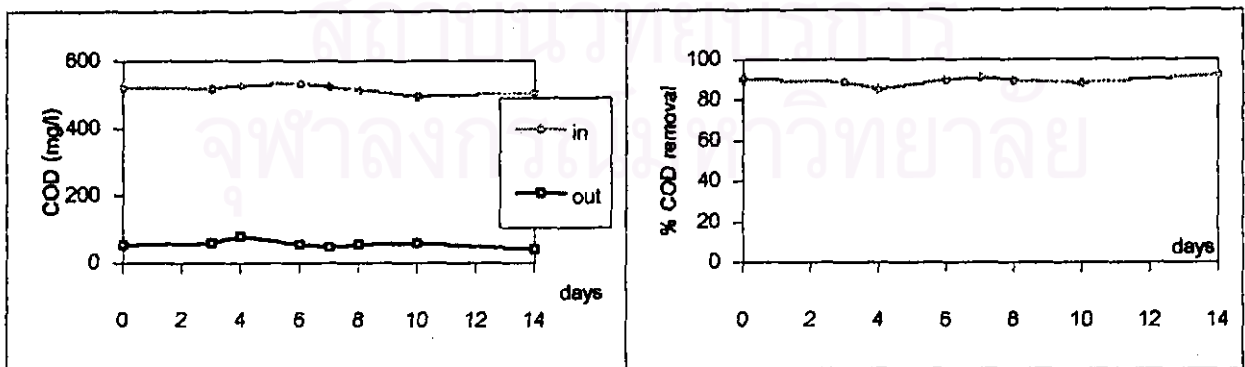
(ก) ตั้งปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นขี้เลื่อยเท่ากับ 42 มก./ล.



(ข) ตั้งปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นขี้เลื่อยเท่ากับ 84 มก./ล.



(ค) ตั้งปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นขี้เลื่อยเท่ากับ 840 มก./ล.



(ง) ตั้งปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นขี้เลื่อยเท่ากับ 42 มก./ล. (ทดลองเพิ่ม)

รูปที่ 4.2 จีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในการทดลองที่ 1

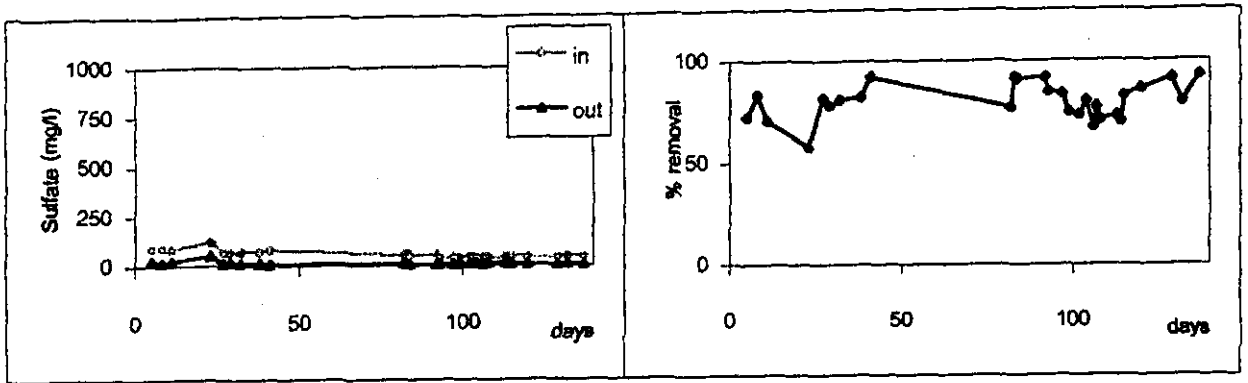
4) ซัลเฟตและประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟต

ความเข้มข้นซัลเฟตเฉลี่ยในน้ำออกมีค่าเท่ากับ 4, 11.5 และ 283 มก./ล. ประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 90, 87 และ 66 สำหรับถังปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นซัลเฟตน้ำเข้าเป็น 42, 84 และ 840 ตามลำดับ ความเข้มข้นซัลเฟตในน้ำเสียและน้ำออก รวมทั้งประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตตลอดการทดลองนี้ แสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าในแต่ละถังปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นซัลเฟตในน้ำเข้าต่างกัน ประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตก็ต่างกันออกไป ในถังปฏิกรณ์ที่ค่าความเข้มข้นของซัลเฟตต่ำหรืออัตราส่วนซีไอต่อซัลเฟตสูง ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีก็จะสูงตามไปด้วย แต่ในถังปฏิกรณ์ที่ค่าความเข้มข้นซัลเฟตสูงหรืออัตราส่วนซีไอต่อซัลเฟตต่ำ ประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตจะมีค่าต่ำ

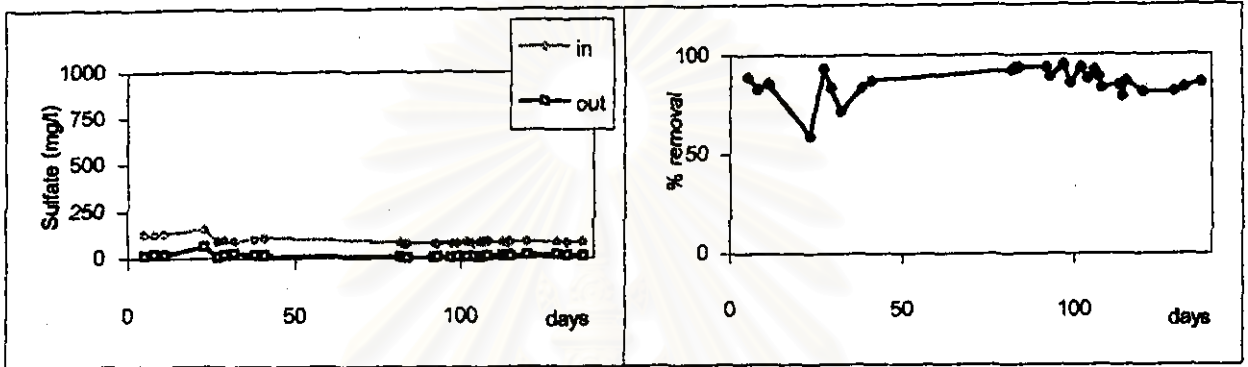
ในการทดลองที่ 1 นี้ ต้องเดินระบบและวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำในถังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตในน้ำเข้า 42 มก./ล. เพิ่มขึ้นอีก 2 สัปดาห์ เนื่องจากซัลเฟตที่ถูกใช้ไปโดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจะเปลี่ยนเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ ดังสมการในสมการข้างล่างนี้



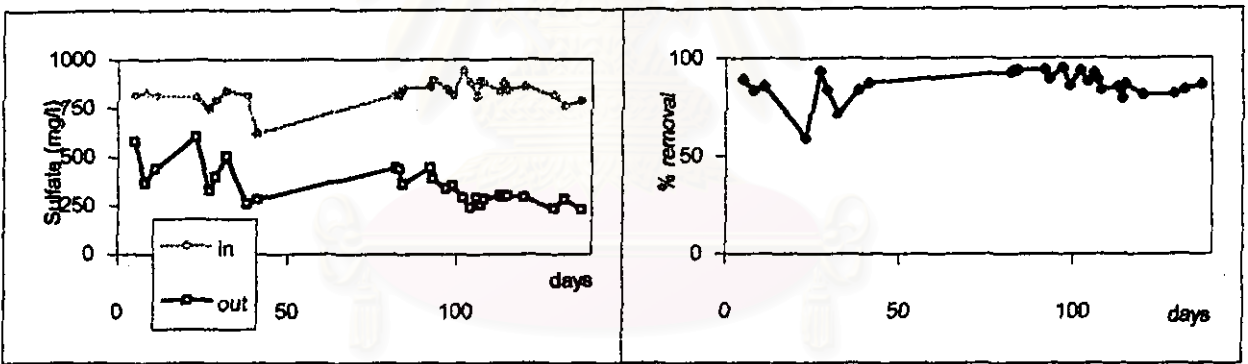
จากสมการจะเห็นได้ว่า ซัลเฟต 1 โมลให้ซัลไฟด์ 1 โมล หรือซัลเฟต 96 กรัมให้ซัลไฟด์ 32 กรัม ดังนั้นซัลไฟด์ 1 กรัมที่เกิดขึ้นจะมาจากซัลเฟต 3 กรัม แต่ในถังปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นซัลเฟตในน้ำเข้าเป็น 42 มก./ล. มีซัลไฟด์เกิดขึ้นเฉลี่ย 13 มก./ล. ดังนั้นซัลเฟตในน้ำออกควรลดลงอย่างน้อย 39 มก./ล. แต่ซัลเฟตที่ลดลงจริงกลับลดลงเพียง 34 มก./ล. แสดงว่าเกิดความผิดพลาดขึ้นในระหว่างการทดลอง เมื่อทำการทดลองซ้ำ พบว่าซัลเฟตลดลงจาก 43 มก./ล. เป็น 4 มก./ล. และเกิดซัลไฟด์ขึ้น 13 มก./ล. ซึ่งตรงตามทฤษฎี เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองของถังปฏิกรณ์นี้ที่ทำการเติมกับผลการทดลองเดิมพบว่า ค่าตัวแปรต่าง ๆ ไม่แตกต่างกันมากนักยกเว้นค่าความเข้มข้นของซัลเฟตในน้ำออก จากตอนแรกที่เคยวัดได้ถึง 9 มก./ล. กลับลดลงเหลือ 4 มก./ล. จึงคาดว่า การทดลองในตอนแรกอาจมีความผิดพลาดในขั้นตอนการวิเคราะห์หาซัลเฟตในน้ำออก และสันนิษฐานว่ามีสาเหตุเนื่องมาจากการวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของซัลเฟตโดยใช้วิธีวัดความขุ่น ซึ่งต้องเติมสารเคมีคือ 'สารละลายบัพเฟอร์' เพื่อปรับสภาพน้ำ ในขั้นตอนนี้น้ำน้ำออกมีความเข้มข้นของซัลไฟด์สูง น้ำจะขุ่นทั้งที่ยังไม่ได้เติมแบเรียมคลอไรด์ ดังนั้นก่อนเติมแบเรียมคลอไรด์เพื่อสร้างตะกอน ต้องวัดความขุ่นของน้ำก่อน จากนั้นวัดความขุ่นหลังเติมแบเรียมคลอไรด์แล้ว นำความขุ่นหลังเติมแบเรียมคลอไรด์ลบด้วยความขุ่นก่อนเติม จากนั้นนำค่าความขุ่นที่ได้ไปเทียบกับกราฟมาตรฐานแล้วจึงได้ความเข้มข้นซัลเฟตออกมา ซึ่งในน้ำออกของถังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตใน



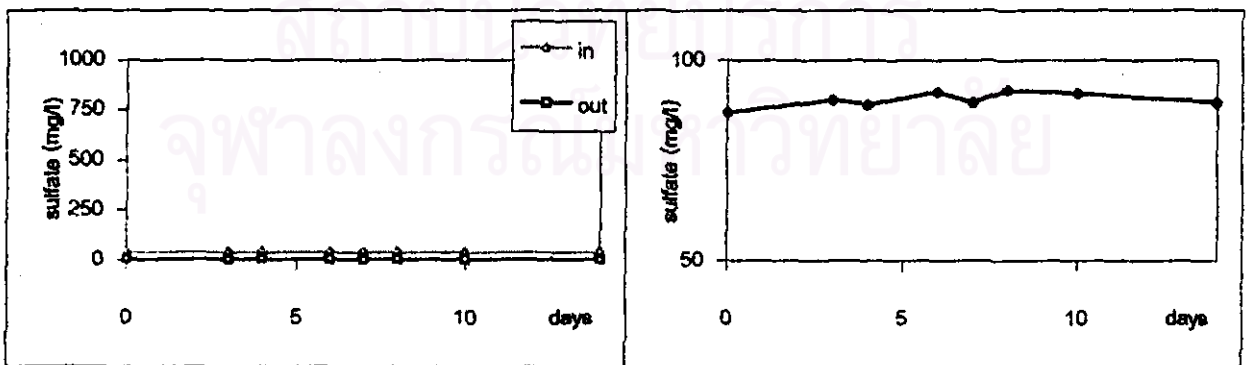
(ก) ถึงปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นซัลเฟตเท่ากับ 42 มก./ล.



(ข) ถึงปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นซัลเฟตเท่ากับ 84 มก./ล.



(ค) ถึงปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นซัลเฟตเท่ากับ 840 มก./ล.



(ง) ถึงปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นซัลเฟตเท่ากับ 42 มก./ล. (ทดลองเพิ่ม)

รูปที่ 4.3 ความเข้มข้นซัลเฟตและประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตในภากรทดลองที่ 1

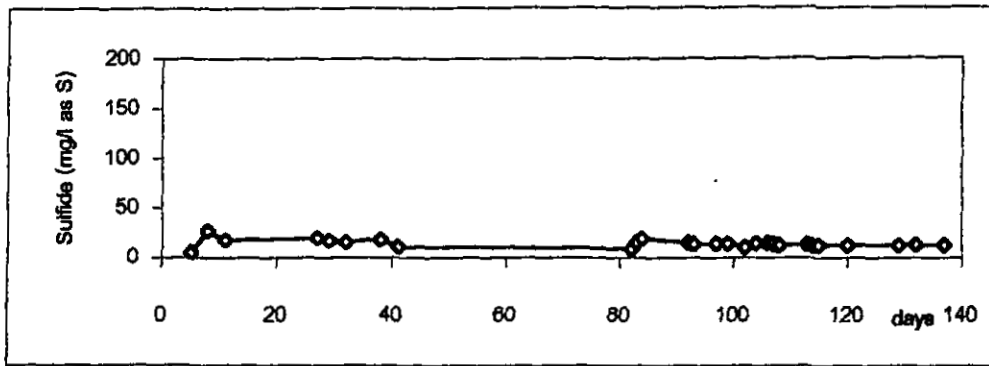
น้ำเข้าเป็น 84 และ 840 มก./ล. หลังเติมสารเคมีในน้ำออกจะปรากฏตะกอนขาวขุ่นขึ้นในน้ำอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะในน้ำออกของถังปฏิกรณ์ที่มีซิลเฟตในน้ำเข้า 840 มก./ล. ซึ่งมีซิลไฟด์ละลายอยู่สูง แต่ในน้ำออกของถังปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นซิลเฟต 42 มก./ล. แม้จะเติมสารเคมีลงไปก็ไม่ปรากฏตะกอน ดังนั้นการวัดค่าความขุ่นจึงวัดเพียงรอบเดียวโดยไม่วัดความขุ่นก่อนเติมแบเรียมคลอไรด์ ค่าความเข้มข้นซิลเฟตที่วัดได้มีค่าตั้งแต่ 3 - 14 มก./ล. แต่ในการทดลองที่ทำซ้ำขึ้น ในการวัดซิลเฟตที่ความเข้มข้นต่ำ ๆ (< 10 มก./ล.) จะใช้ 'สารละลายบิฟเฟอริมี' แทน และจะวัดค่าความขุ่นก่อนเติมแบเรียมคลอไรด์ทุกครั้ง ความขุ่นที่วัดได้มีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 14 NTU และเมื่อนำค่าความขุ่นหลังเติมแบเรียมคลอไรด์ลบกับค่าความขุ่นก่อนเติม มาเทียบกับกราฟมาตรฐาน จะได้ค่าความเข้มข้นของซิลเฟตอยู่ในช่วง 3 - 5 มก./ล. แสดงว่าการวัดค่าความขุ่นก่อนเติมแบเรียมคลอไรด์มีผลต่อการวิเคราะห์หาความเข้มข้นซิลเฟตแม้ความขุ่นที่วัดได้จะมีค่าน้อยก็ตาม ดังนั้นในการคำนวณสมมูลมวลของซีโอไซด์และซิลเฟอริในหัวข้อ 4.2 จะนำค่าที่วัดได้จากการทดลองที่ทำซ้ำมาใช้ เนื่องจากได้ปรับแก้ข้อผิดพลาดในการวิเคราะห์ซิลเฟตเรียบร้อยแล้ว

5) ซิลไฟด์

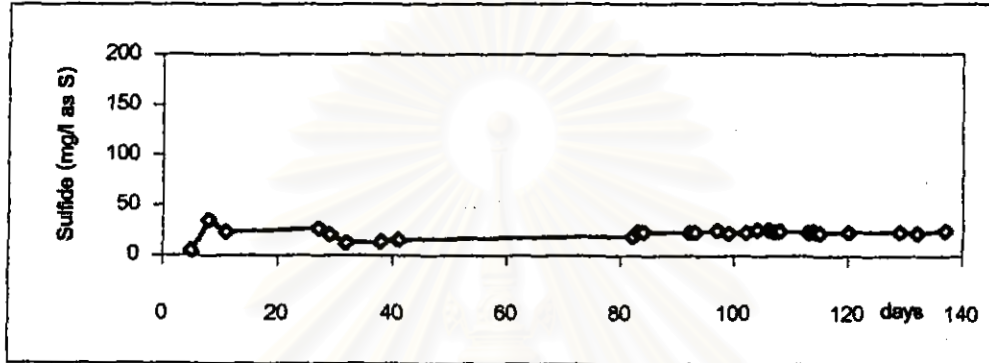
ความเข้มข้นของซิลไฟด์เฉลี่ยในน้ำออกที่วัดได้จากถังปฏิกรณ์ที่มีซิลเฟตในน้ำเข้าเป็น 42, 84 และ 840 มก./ล. มีค่าเท่ากับ 13, 24 และ 176 มก./ล. ตามลำดับ ค่าความเข้มข้นของซิลไฟด์ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ตลอดการทดลองนี้ แสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ความเข้มข้นของซิลไฟด์ในแต่ละถังปฏิกรณ์มีค่าต่างกัน ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นซิลเฟตในน้ำเข้าของแต่ละถังปฏิกรณ์ โดยค่าความเข้มข้นของซิลไฟด์ในน้ำออกจะแปรผันไปในทางเดียวกับความเข้มข้นซิลเฟตในน้ำเข้า กล่าวคือถ้าถังปฏิกรณ์ใดที่มีซิลเฟตในน้ำเข้าสูง ค่าความเข้มข้นซิลไฟด์ของถังปฏิกรณ์นั้นจะมีค่าสูง แต่ถังปฏิกรณ์ใดที่มีซิลเฟตในน้ำเข้าต่ำ ค่าความเข้มข้นซิลไฟด์ของถังปฏิกรณ์นั้นจะมีค่าต่ำ

6) ไออาร์พี

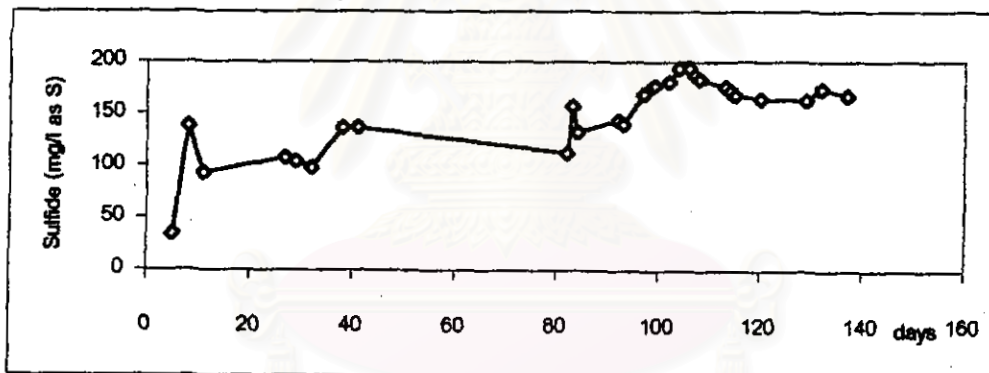
ค่าไออาร์พีของถังปฏิกรณ์ที่มีซิลเฟตในน้ำเข้าเท่ากับ 42, 84 และ 840 มก./ล. มีค่าเท่ากับ - 310, - 331 และ - 384 มิลลิโวลต์ตามลำดับ ค่าไออาร์พีในถังปฏิกรณ์ตลอดการทดลองนี้ แสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งจากจะเห็นได้ว่า ในถังปฏิกรณ์เดียวกัน ได้กราฟที่มีแนวโน้มเป็นเส้นตรงขนานแกนนอน 2 เส้น ทั้งนี้เนื่องมาจากในช่วงแรกของการทดลอง (วันที่ 0 ถึง 83) และช่วงหลังของการ



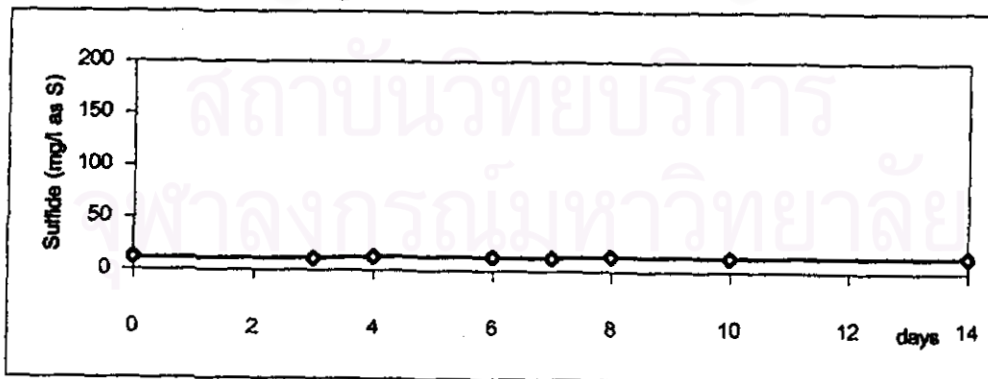
(ก) ถึงปฏิกิริยาที่มีความเข้มข้นซัลไฟด์เท่ากับ 42 มก./ล.



(ข) ถึงปฏิกิริยาที่มีความเข้มข้นซัลไฟด์เท่ากับ 84 มก./ล.

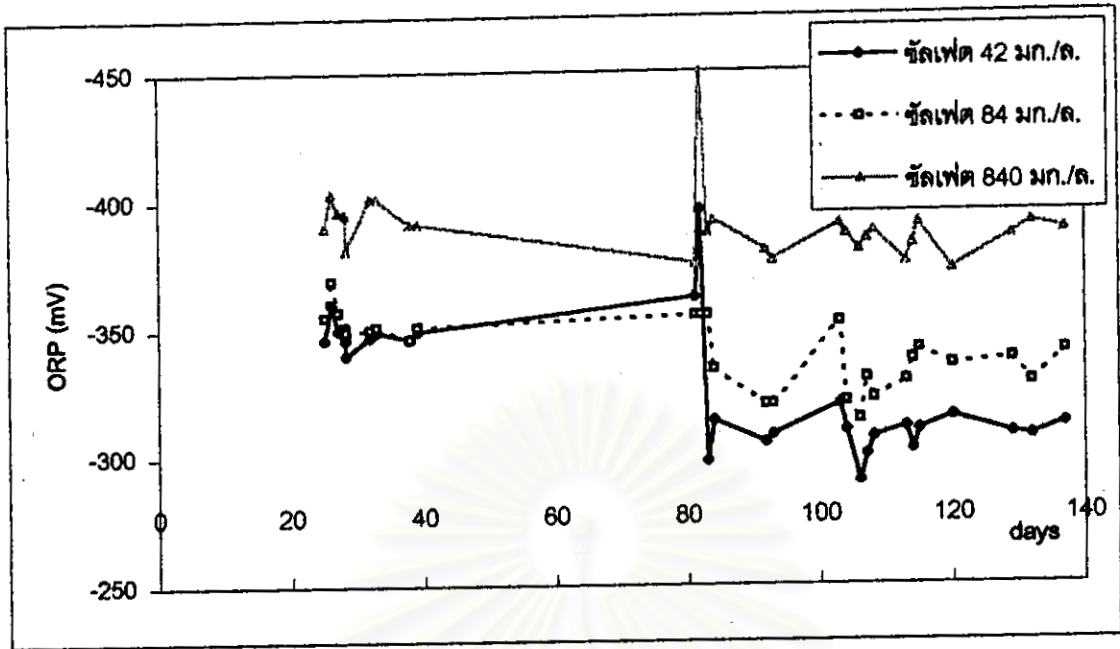


(ค) ถึงปฏิกิริยาที่มีความเข้มข้นซัลไฟด์เท่ากับ 840 มก./ล.

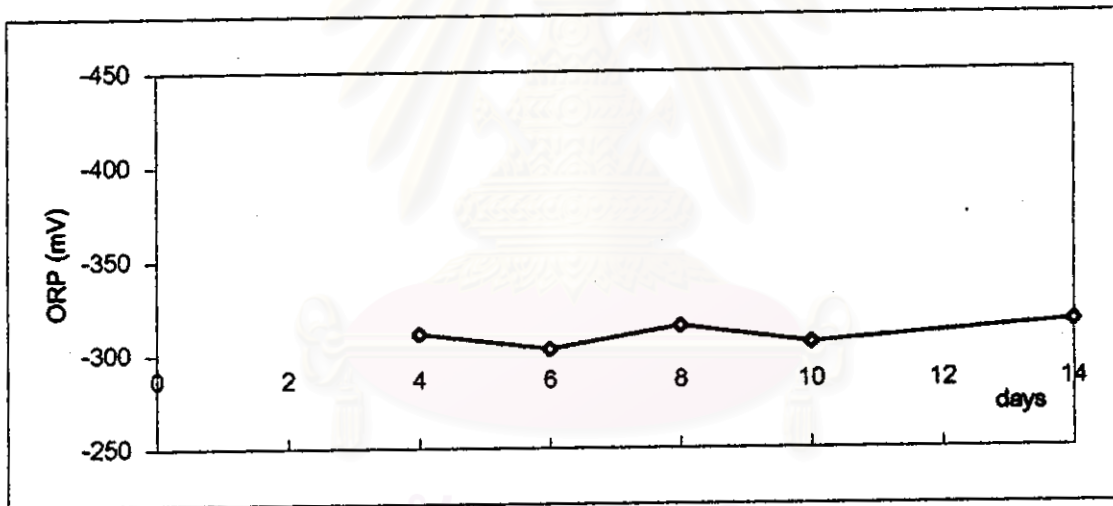


(ง) ถึงปฏิกิริยาที่มีความเข้มข้นซัลไฟด์เท่ากับ 42 มก./ล. (ทดลองเพิ่ม)

รูปที่ 4.4 ซัลไฟด์น้ำออกในการทดลองที่ 1



(ก) ค่าไออาร์พีในถังปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นเหล็กต่าง ๆ



(ข) ค่าไออาร์พีในถังปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นเหล็กเท่ากับ 12 (ทดลองเพิ่มเติม)

รูปที่ 4.5 ค่าไออาร์พีในถังปฏิกรณ์ต่าง ๆ ในการทดลองที่ 1

ทดลอง (วันที่ 83 เป็นต้นไป) ใช้เครื่องวัดไออาร์ทีคนละเครื่องกัน ทำให้ค่าไออาร์ทีที่วัดได้ในการทดลองช่วงหลังมีค่าต่ำกว่า แต่ค่าไออาร์ทีที่วัดจากเครื่องเดียวกันจะมีค่าค่อนข้างคงที่ ซึ่งเมื่อดูค่าไออาร์ทีเฉลี่ยแล้ว พบว่าในถังปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นขัลเฟตต่ำสุดคือ 42 มก./ล. ค่าไออาร์ทีจะมีค่าสูงที่สุด (ลบน้อยสุด) ส่วนถังที่มีความเข้มข้นขัลเฟตสูงสุดคือ 840 มก./ล. มีค่าไออาร์ทีต่ำสุด (ลบสูงสุด)

7) ปริมาณก๊าซทั้งหมดและสัดส่วนของก๊าซ

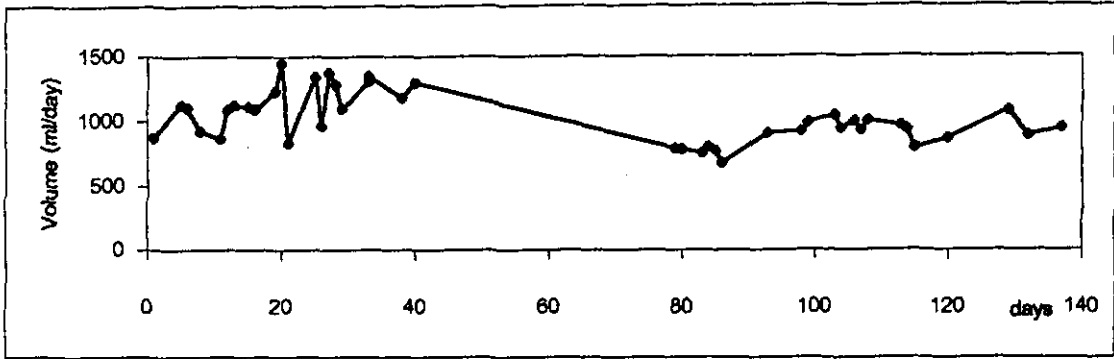
ปริมาณก๊าซทั้งหมดตลอดการทดลองของแต่ละถังปฏิกรณ์แสดงดังรูปที่ 4.6 ปริมาณก๊าซเฉลี่ยในแต่ละวันของถังปฏิกรณ์ที่มีขัลเฟตในน้ำเข้า 42, 84 และ 840 มก./ล. มีค่าเท่ากับ 1005, 886 และ 101 มล. สัดส่วนของก๊าซมีเทน: ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับ 94.2:5.8, 93.5:6.5 และ 88.2:11.8 ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เฉลี่ยในแต่ละวันเท่ากับ 4.7, 7.6 และ 2.2 มก. และอัตราการผลิตก๊าซ 0.273, 0.230 และ 0.027 มล./มก.ซีไอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นขัลเฟตในน้ำเข้ามีผลทำให้ปริมาณก๊าซทั้งหมด สัดส่วนของก๊าซมีเทนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ และอัตราการผลิตก๊าซลดลง

8) ของแข็งแขวนลอยและของแข็งทั้งหมด

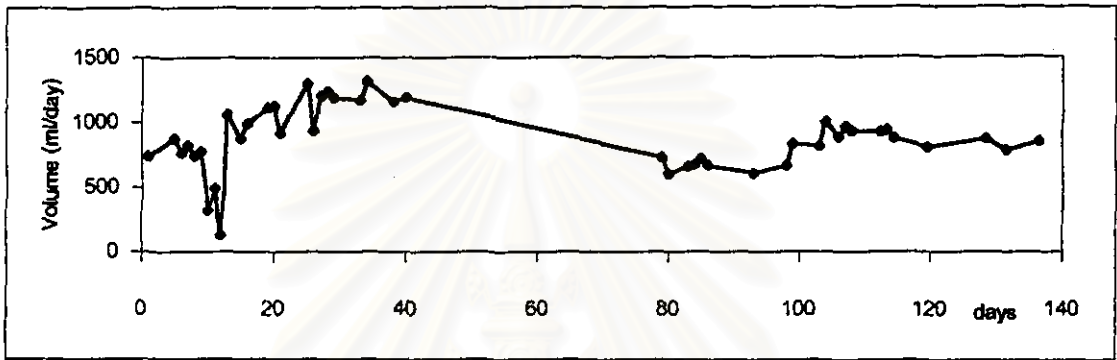
ค่าของแข็งแขวนลอยและของแข็งทั้งหมดตลอดการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.7 โดยถังปฏิกรณ์ที่มีขัลเฟตในน้ำเข้าเป็น 42, 84 และ 840 มก./ล. มีค่าของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยเท่ากับ 13, 11 และ 5 มก./ล. ค่าของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 647, 619 และ 1609 มก./ล. ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าของแข็งแขวนลอยมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นขัลเฟตในน้ำเข้าเพิ่มขึ้น ส่วนของแข็งทั้งหมดจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นขัลเฟตในน้ำเข้า

9) ปริมาณแบคทีเรียในระบบ

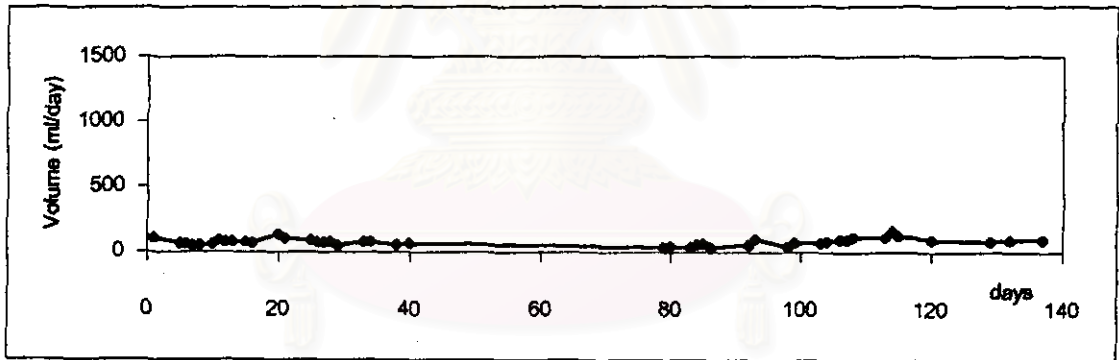
เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 1 นำเชื้อแบคทีเรียในแต่ละถังปฏิกรณ์มาเพาะเลี้ยง พบว่าแบคทีเรียสร้างมีเทนในถังปฏิกรณ์ที่มีขัลเฟตในน้ำเข้าเป็น 42, 84 และ 840 มก./ล. มีค่าเท่ากับ 4.57×10^0 , 4.46×10^0 และ 3.12×10^0 cfu g VSS⁻¹ และมีแบคทีเรียวิคิวซ์ขัลเฟตเท่ากับ 2.14×10^0 , 2.75×10^0 และ 4.26×10^0 cfu g VSS⁻¹ คิดเป็นสัดส่วนแบคทีเรียสร้างมีเทนต่อแบคทีเรียวิคิวซ์ขัลเฟตเท่ากับ 68:32, 62:38 และ 42:58 หรือ 1:0.47, 1:0.61 และ 1:1.38 ตามลำดับ



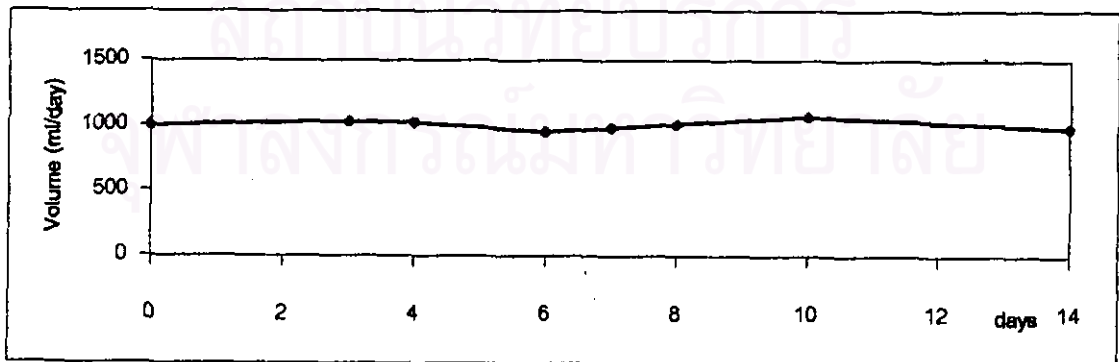
(ก) ถึงปฏิกิริยามีความเข้มข้นซีลเฟดเท่ากับ 42 มก./ล.



(ข) ถึงปฏิกิริยามีความเข้มข้นซีลเฟดเท่ากับ 84 มก./ล.

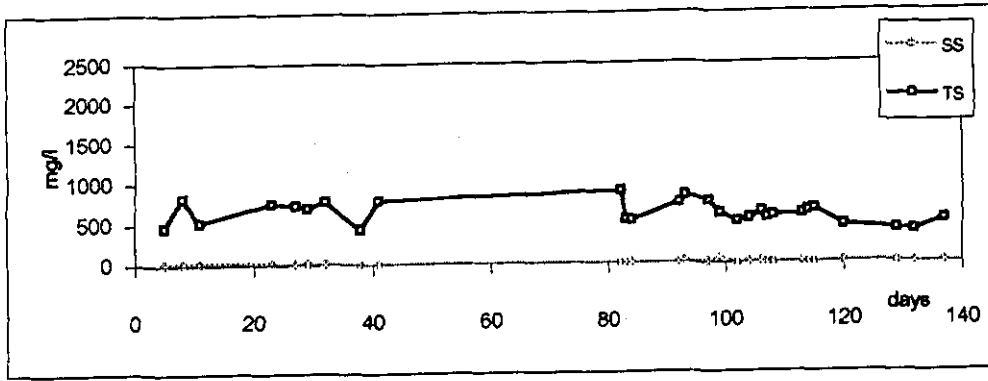


(ค) ถึงปฏิกิริยามีความเข้มข้นซีลเฟดเท่ากับ 840 มก./ล.

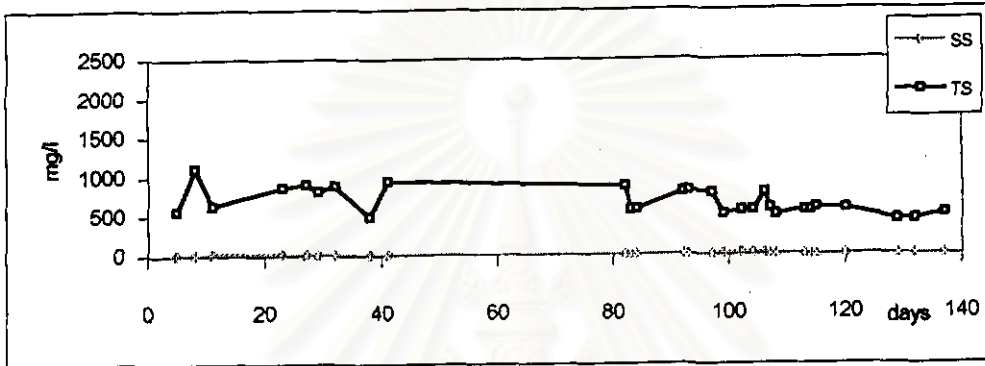


(ง) ถึงปฏิกิริยามีความเข้มข้นซีลเฟดเท่ากับ 42 มก./ล. (ทดลองเพิ่ม)

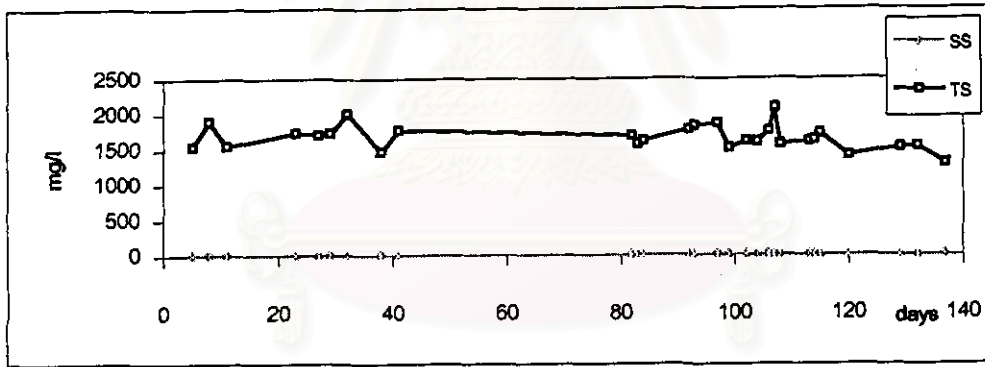
รูปที่ 4.6 ปริมาณก๊าซในแต่ละวันในการทดลองที่ 1



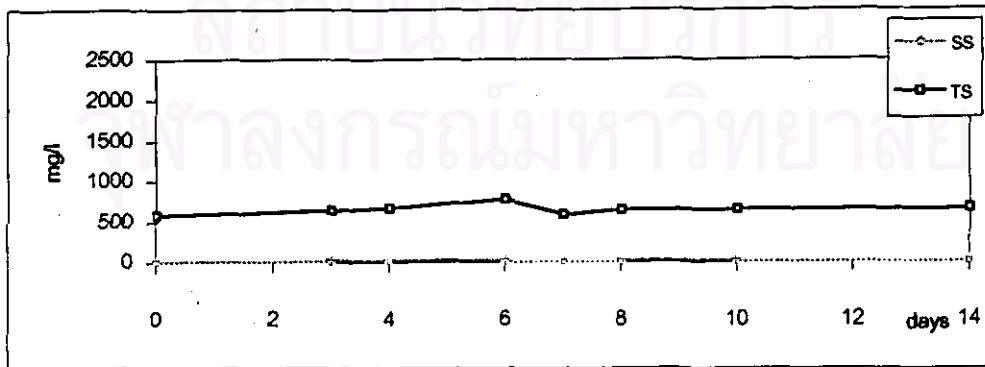
(ก) ถึงปฏิกิริยาที่มีความเข้มข้นซีลเฟดเท่ากับ 42 มก./ล.



(ข) ถึงปฏิกิริยาที่มีความเข้มข้นซีลเฟดเท่ากับ 84 มก./ล.



(ค) ถึงปฏิกิริยาที่มีความเข้มข้นซีลเฟดเท่ากับ 840 มก./ล.



(ง) ถึงปฏิกิริยาที่มีความเข้มข้นซีลเฟดเท่ากับ 42 มก./ล. (ทดลองเพิ่ม)

รูปที่ 4.7 ปริมาณของแข็งแขวนลอยและของแข็งทั้งหมดในการทดลองที่ 1

ซึ่งจะเห็นได้ว่า ปริมาณแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นซัลเฟตในน้ำเข้าเพิ่มขึ้น ตรงกันข้ามกับปริมาณแบคทีเรียสร้างมีเทนซึ่งมีแนวโน้มลดลง

การวัดปริมาณแบคทีเรียดังแสดงในบทที่ 3 จำเป็นต้องใช้สมาธิ ความรอบคอบ และความชำนาญอย่างสูง เพื่อให้ผลที่ได้ออกมาถูกต้องแม่นยำ ซึ่งในการทดลองนี้แม้ผู้ทำการวิจัยจะได้ศึกษาวิธีการทดลองมาอย่างละเอียด แต่ก็ไม่อาจมั่นใจได้เต็มที่ว่าตัวเลขที่ได้มานั้นถูกต้องแม่นยำ เนื่องจากในหลาย ๆ การทดลอง หลอดทดลองบางหลอดที่เลี้ยงเชื้อที่มีความเข้มข้นสูงกว่ากลับนับจำนวน colony ได้น้อยกว่าในหลอดทดลองที่มีเชื้อเจือจางกว่า จึงจำต้องตัดค่าที่วัดได้จากหลอดทดลองนั้นทิ้ง และพยายามหาค่าเฉลี่ยจากหลอดทดลองที่เหลืออยู่ ซึ่งบางครั้งจำนวนแบคทีเรียที่นับได้จากหลอดทดลองที่เลี้ยงแบคทีเรียคนละความเข้มข้นกันก็มีค่าแตกต่างกันมาก ค่าที่ได้ออกมาจึงเป็นค่าเฉลี่ยที่มีความแปรปรวนสูงมาก แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยที่ได้มาอาจเป็นตัวแทนที่ไม่ดีนัก และการใช้สารอาหารเพียงอย่างเดียวในการเลี้ยงแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต คือ โซเดียมแลกเตต ยังอาจทำให้วัดค่าปริมาณแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตได้ไม่ถูกต้องนัก เพราะแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตก็มีอยู่หลายสปีชีส์ แต่ละสปีชีส์ก็ใช้สารอาหารได้ไม่เหมือนกัน เช่น แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตในจีแนส *Desulfobacter* ส่วนใหญ่ใช้อะซิเตตเป็นสารอาหารแต่ไม่สามารถใช้แลกเตตได้, จีแนส *Desulfovibrio* ใช้ได้ทั้งแลกเตตและไฮโดรเจนแต่ไม่ใช้อะซิเตต หรือจีแนส *Desulfococcus* ซึ่งบางสปีชีส์ใช้แลกเตตได้ บางสปีชีส์ก็ใช้แลกเตตไม่ได้ เป็นต้น อีกทั้งยังมีความชอบสารอาหารแต่ละอย่างไม่เท่ากัน การใช้แลกเตตอย่างเดียวในการเลี้ยงและระบุปริมาณแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจึงอาจผิดพลาดได้ นอกจากนี้ผู้วิจัยก็ไม่ได้นับจำนวนแบคทีเรียในตอนเริ่มต้นของการทดลองที่ 1 ทำให้ไม่อาจทราบถึงอิทธิพลของการทดลองที่ 1 ที่มีต่อปริมาณแบคทีเรียในระบบ ข้อบกพร่องเหล่านี้อาจทำให้ผลที่ออกมาขาดความน่าเชื่อถือลงไปบ้าง แต่ผลที่ออกมาก็ยังสามารถแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มในการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแบคทีเรียเมื่อระบบมีการเปลี่ยนสภาพแวดล้อมได้ดี ซึ่งในกรณีนี้สภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนไปก็คือความเข้มข้นของซัลเฟตเข้าระบบที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงและชนิดของสารอาหารที่เปลี่ยนไปนั่นเอง

จากผลการทดลองทั้งหมดที่ได้แสดงมาข้างต้น สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.2 และ 4.3 โดยตารางที่ 4.2 จะแสดงถึงค่าเฉลี่ยของตัวแปรที่สภาวะคงตัว, จำนวนตัวอย่างที่นำมาเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ในทุกถังปฏิกรณ์ ส่วนตารางที่ 4.3 แสดงแต่เฉพาะข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพิ่มเติมในถังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตในน้ำเข้าเท่ากับ 42 มก./ล.เท่านั้น

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่าง ๆ จากการทดลองที่ 1

ตัวแปร			ความเข้มข้นซัลเฟตในน้ำเข้า (มก./ล.)					
			42		84		840	
			นำเลี้ยง	นำออก	นำเลี้ยง	นำออก	นำเลี้ยง	นำออก
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เฉลี่ย	28.6	28.8	28.6	28.9	28.3	28.9	
	n=19 SD	0.6	0.7	0.6	0.7	1.3	0.7	
พีเอช	เฉลี่ย	8.19	6.37	8.15	6.37	8.22	6.84	
	n=19 SD	0.14	0.19	0.15	0.16	0.14	0.14	
สภาพต่าง (มก./ล. as CaCO ₃)	เฉลี่ย	272	358	273	400	271	838	
	n=19 SD	36	41	43	30	34	50	
ซีโอไซด์ (มก./ล.)	เฉลี่ย	519	53	521	40	520	55	
	n=19 SD	29	24	22	10	29	22	
ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอไซด์ (%)	เฉลี่ย	-	89.8	-	92.3	-	89.5	
	n=19 SD	-	4.4	-	1.8	-	4.1	
ซัลเฟต (มก./ล.)	เฉลี่ย	43	9	86	11.5	847	283	
	n=14 SD	2.6	3.3	4.1	4.2	46.5	35.6	
ประสิทธิภาพการใช้ซัลเฟต (%)	เฉลี่ย	-	79	-	87	-	66	
	n=14 SD	-	7.8	-	4.8	-	4.6	
ซัลไฟด์ (มก./ล. as S)	เฉลี่ย	-	13	-	23.8	-	176	
	n=14 SD	-	1.2	-	1.1	-	10.2	
ไออาร์พี (มิลลิโวลต์)	เฉลี่ย	-	-308	-	-331	-	-384	
	n=15 SD	-	7.1	-	10.2	-	6.1	
ปริมาณก๊าซทั้งหมด (มิลลิลิตร)	เฉลี่ย	-	945	-	886	-	101	
	n=12 SD	-	81	-	67	-	24	
สัดส่วนของก๊าซ: มีเทน (%)	เฉลี่ย	-	90.2	-	93.5	-	88.2	
	n=5 SD	-	1.55	-	1.48	-	2.34	
คาร์บอนไดออกไซด์ (%)	เฉลี่ย	-	9.8	-	6.5	-	11.8	
	n=5 SD	-	1.55	-	1.48	-	2.34	
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (มก./วัน as S)	เฉลี่ย	-	4.1	-	7.6	-	2.2	
	n=10 SD	-	0.23	-	0.19	-	0.51	
ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	เฉลี่ย	-	5	-	11	-	5	
	n=12 SD	-	4	-	10	-	4	
ของแข็งทั้งหมด (มก./ล.)	เฉลี่ย	-	539	-	619	-	1609	
	n=12 SD	-	86.6	-	87.3	-	194.3	
ปริมาณแบกทีเรีย (cfu g VSS ⁻¹ x 10 ³)	MPB	-	4.57	-	4.46	-	3.12	
	SRB	-	2.14	-	2.75	-	4.26	

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่าง ๆ ในการทดลองที่ 1 ซึ่งทำการทดลองเพิ่มเติม

ตัวแปร			น้ำเสีย	น้ำออก
อุณหภูมิ		เฉลี่ย	27.7	28.9
(องศาเซลเซียส)	n=8	SD	0.5	0.3
พีเอช		เฉลี่ย	8.11	6.30
	n=8	SD	0.06	0.10
สภาพต่าง		เฉลี่ย	250	344
(มก./ล. as CaCO ₃)	n=8	SD	15	20
ซีโอดี		เฉลี่ย	516	55
(มก./ล.)	n=8	SD	12	12
ประสิทธิภาพการ		เฉลี่ย	-	89.4
กำจัดซีโอดี (%)	n=8	SD	-	2.2
ซัลเฟต		เฉลี่ย	43	4
(มก./ล.)	n=8	SD	1.7	0.7
ประสิทธิภาพการ		เฉลี่ย	-	90.0
ใช้ซัลเฟต (%)	n=8	SD	-	1.8
ซัลไฟด์		เฉลี่ย	-	13
(มก./ล. as S)	n=8	SD	-	1.0
ไออาร์พี		เฉลี่ย	-	-310
(มิลลิโวลต์)	n=3	SD	-	6
ปริมาณก๊าซทั้งหมด		เฉลี่ย	-	1005
(มิลลิลิตร)	n=8	SD	-	37
สัดส่วนของก๊าซ: มีเทน (%)		เฉลี่ย	-	94.2
	n=4	SD	-	0.62
คาร์บอนไดออกไซด์ (%)		เฉลี่ย	-	5.8
	n=4	SD	-	0.62
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (มก./ล. as S)		เฉลี่ย	-	4.7
	n=4	SD	-	0.19
ของแข็งแขวนลอย		เฉลี่ย	-	13
(มก./ล.)	n=8	SD	-	5
ของแข็งทั้งหมด		เฉลี่ย	-	647
(มก./ล.)	n=8	SD	-	59

4.1.2 การทดลองที่ 2

การทดลองที่ 2 เป็นชุดการทดลองที่ใช้อะซิเตตเป็นแหล่งคาร์บอน โดยความเข้มข้นของอะซิเตตในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบเท่ากับซีไอดี 500 มก./ล. แปรความเข้มข้นของซัลเฟตเป็น 42, 84 และ 840 มก./ล. เช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 ผลการทดลองในการทดลองที่ 2 จำแนกตามตัวแปรต่าง ๆ แสดงดังต่อไปนี้

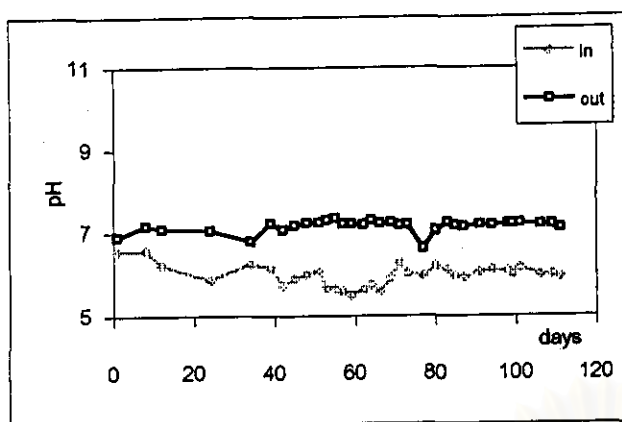
1) อุณหภูมิ

ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิในน้ำเสียที่ออกจากระบบมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยเพิ่มขึ้นจาก 28.0, 28.0 และ 27.9 องศาเซลเซียส เป็น 28.8, 28.5 และ 28.8 องศาเซลเซียส ในดังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตในน้ำเข้าเป็น 42, 84 และ 840 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า อุณหภูมิในการทดลองที่ 2 ทั้งในน้ำเสียและน้ำออกมีค่าแทบไม่ต่างกันกับการทดลองแรก

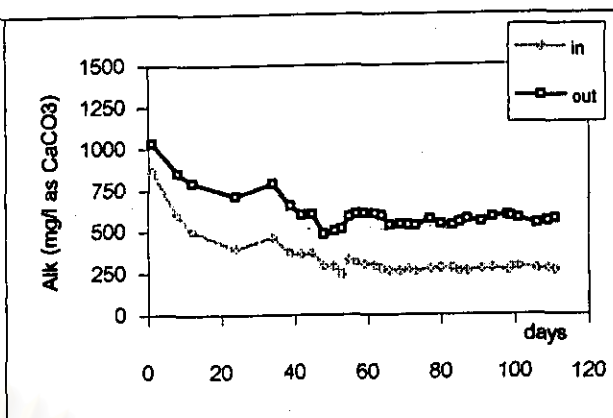
2) พีเอชและสภาพต่าง

พีเอชและสภาพต่างของน้ำออกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำเสียเข้าระบบทุกดังปฏิกรณ์ โดยพีเอชมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 5.91, 5.86 และ 5.29 เป็น 7.17, 7.18 และ 7.33 ส่วนสภาพต่างมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 283, 281 และ 228 เป็น 559, 582 และ 1,117 มก./ล. ในดังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตในน้ำเข้าเป็น 42, 84 และ 840 ตามลำดับ ข้อมูลของพีเอชและสภาพต่างทั้งหมดตลอดการทดลองนี้ แสดงในรูปที่ 4.8

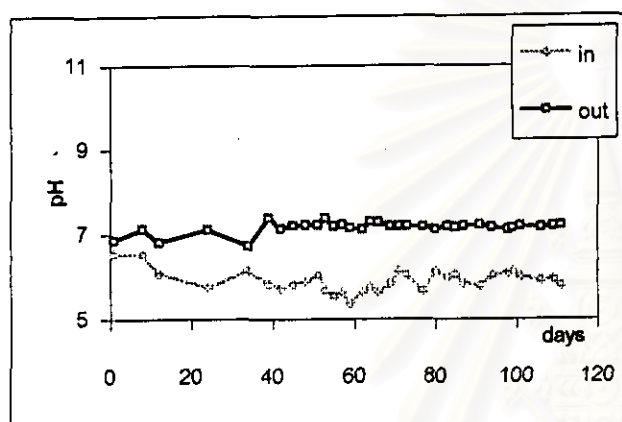
ในการทดลองที่ 2 นี้ เดิมใช้สารอาหารเป็นโซเดียมอะซิเตตเติมให้กับระบบและเติมต่างในน้ำเสียเข้าระบบเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 น้ำเสียเข้าระบบมีพีเอชประมาณ 8.2 แต่เมื่อวัดพีเอชน้ำออกกลับได้ค่าประมาณ 8.5 - 8.8 แบกที่เรียกผลิตก๊าซลดลงกว่า 70 % (ผลการทดลองช่วงนี้ไม่ได้นำมาแสดงไว้) จึงต้องหยุดการทดลองไว้ระยะหนึ่ง ลดซีไอดีเข้าระบบลง เปลี่ยนสารอาหารโดยใช้น้ำตาลเป็นสารอาหารร่วมกับกรดอะซิติก พยายามปรับพีเอชของน้ำเสียเข้าระบบเพื่อให้ได้พีเอชน้ำออกไม่เกิน 7.2 จากนั้นจึงลดน้ำตาลลงและเพิ่มสัดส่วนของกรดอะซิติกพร้อมทั้งเพิ่มซีไอดีเข้าระบบให้มากขึ้น ขั้นตอนนี้กินเวลาประมาณ 2 - 3 เดือน แบกที่เรียกจึงกลับมาทำงานได้เหมือนเดิม หลังจากระบบเข้าที่แล้วจึงป้อนกรดอะซิติกให้กับระบบ โดยเติมกรดอะซิติกเข้มข้น 3.7 - 4



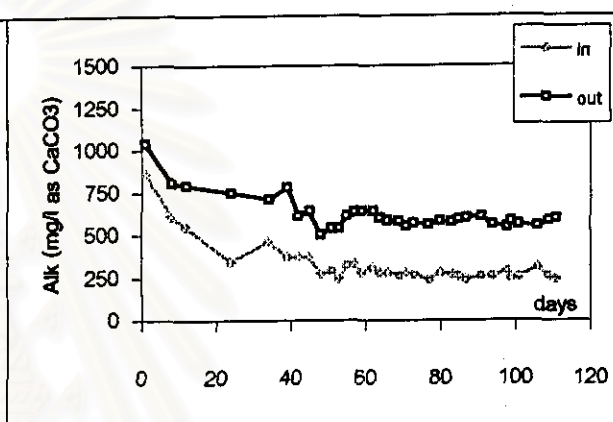
(ก) พีเอชของถังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตในน้ำเข้าเท่ากับ 42 มก./ล.



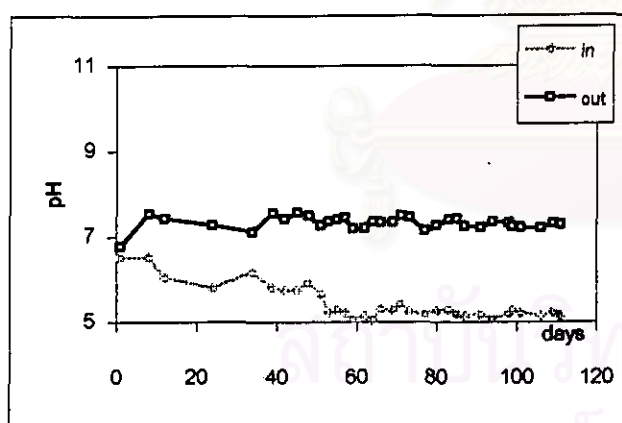
(ข) ความเป็นด่างของถังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตในน้ำเข้าเท่ากับ 42 มก./ล.



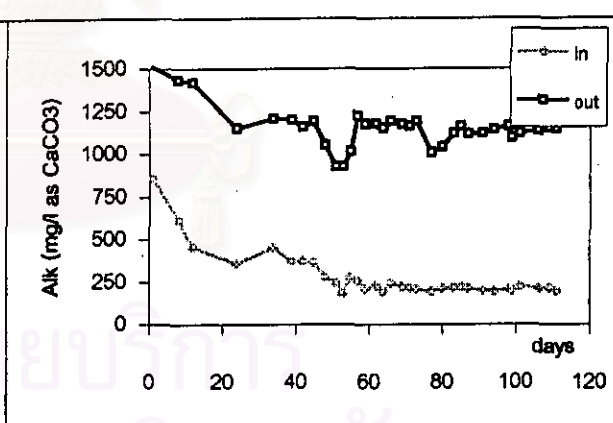
(ค) พีเอชของถังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตในน้ำเข้าเท่ากับ 84 มก./ล.



(ง) ความเป็นด่างของถังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตในน้ำเข้าเท่ากับ 84 มก./ล.



(จ) พีเอชของถังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตในน้ำเข้าเท่ากับ 840 มก./ล.



(ฉ) ความเป็นด่างของถังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตในน้ำเข้าเท่ากับ 840 มก./ล.

รูปที่ 4.8 พีเอชและสภาพต่างในการทดลองที่ 2

มล. ลงในน้ำ 8 ลิตร ปริมาตรของกรดอะซิติกที่เติมให้กับระบบเพื่อให้ได้ซีไอดี 500 มก./ล. เปลี่ยนไปตามเวลา คาดว่าเป็นเพราะกรดอะซิติกเข้มข้นที่ใช้ลดต่ำลง การเตรียมน้ำเสียจึงต้องตรวจสอบค่าซีไอดีเข้าระบบทุกวัน การเติมกรดอะซิติกลงในน้ำประปาทำให้พีเอชลดต่ำลงจนมีค่าประมาณ 3 จึงต้องเติมด่างในรูปของโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับโซเดียมไบคาร์บอเนตอีกจำนวนหนึ่งจนปรับพีเอชน้ำเข้าได้ 5.9 สำหรับถังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตในน้ำเข้าเป็น 42 และ 84 ส่วนในถังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตในน้ำเข้าเป็น 840 มก./ล. น้ำเข้ามีพีเอชเป็น 5.3

3) ซีไอดีและประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี

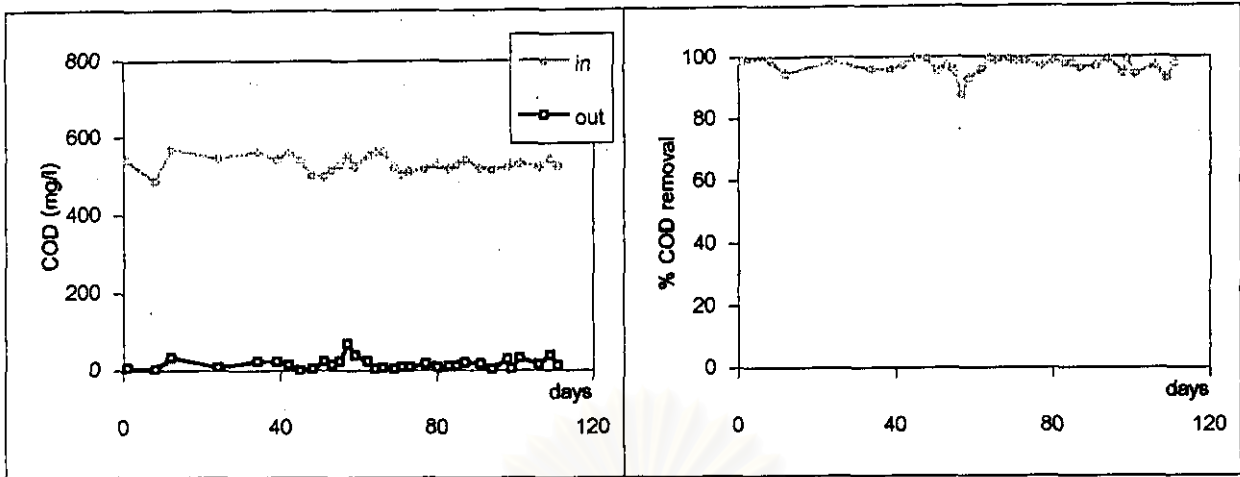
ในถังปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นซัลเฟตในน้ำเข้าเท่ากับ 42, 84 และ 840 มก./ล. ซีไอดีเฉลี่ยของน้ำเสียมีค่าเท่ากับ 529, 524 และ 524 มก./ล. ซีไอดีเฉลี่ยของน้ำออกมีค่าเท่ากับ 17, 15 และ 34 มก./ล. มีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีเฉลี่ยเท่ากับ 96.8, 97.2 และ 93.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ค่าซีไอดีและประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีคิดเทียบเป็นร้อยละของน้ำเสียเข้าระบบตลอดการทดลองนี้แสดงดังรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีมีค่าค่อนข้างสูงและซีไอดีในน้ำออกก็มีค่าต่ำมากในทุก ๆ ถังปฏิกรณ์ ซึ่งได้ผลที่ใกล้เคียงกับการทดลองที่ 1

4) ซัลเฟตและประสิทธิภาพการใช้ซัลเฟต

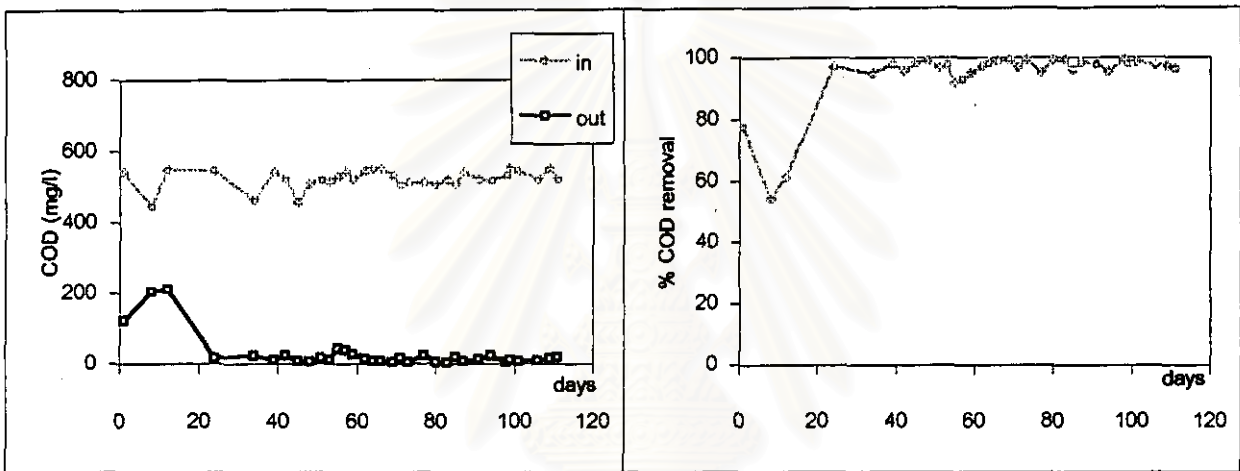
ซัลเฟตเฉลี่ยที่เข้าระบบมีค่าเท่ากับ 43, 83 และ 843 มก./ล. ซัลเฟตเฉลี่ยในน้ำออกมีค่าเท่ากับ 9, 15 และ 239 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 80, 83 และ 72 สำหรับถังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตในน้ำเข้าเป็น 42, 84 และ 840 มก./ล. ตามลำดับ ค่าความเข้มข้นซัลเฟตในน้ำเสียและน้ำออก รวมทั้งประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตตลอดการทดลองนี้แสดงในรูปที่ 4.10

5) ซัลไฟด์

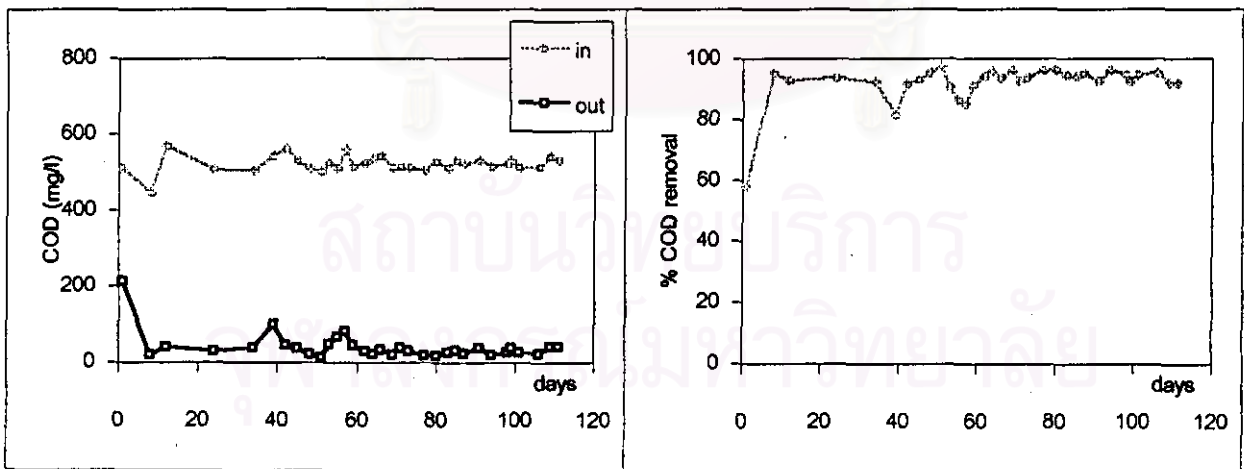
ความเข้มข้นของซัลไฟด์เฉลี่ยในน้ำออกที่วัดได้จากถังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตในน้ำเข้าเป็น 42, 84 และ 840 มก./ล. มีค่าเท่ากับ 11.5, 22.4 และ 200 มก./ล. ตามลำดับ ค่าความเข้มข้นของซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ตลอดการทดลองนี้ แสดงในรูปที่ 4.11 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ความเข้มข้นซัลไฟด์ในการทดลองที่ 2 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อซัลเฟตในน้ำเข้ามีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับการทดลองแรก



(ก) ถึงปฏิบัติการที่มีความเข้มข้นซีลเฟต 42 มก./ล.

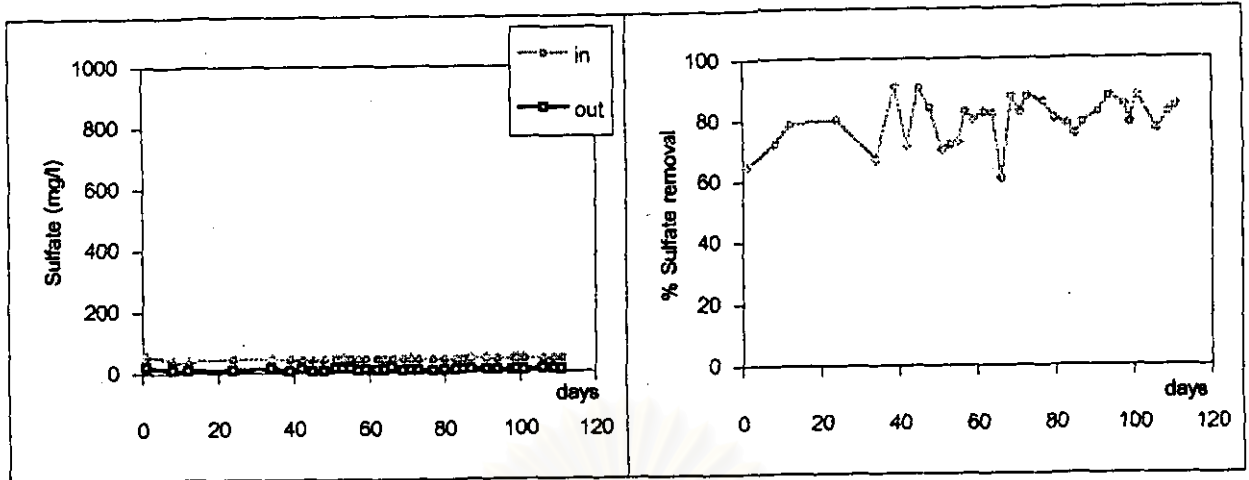


(ข) ถึงปฏิบัติการที่มีความเข้มข้นซีลเฟต 84 มก./ล.

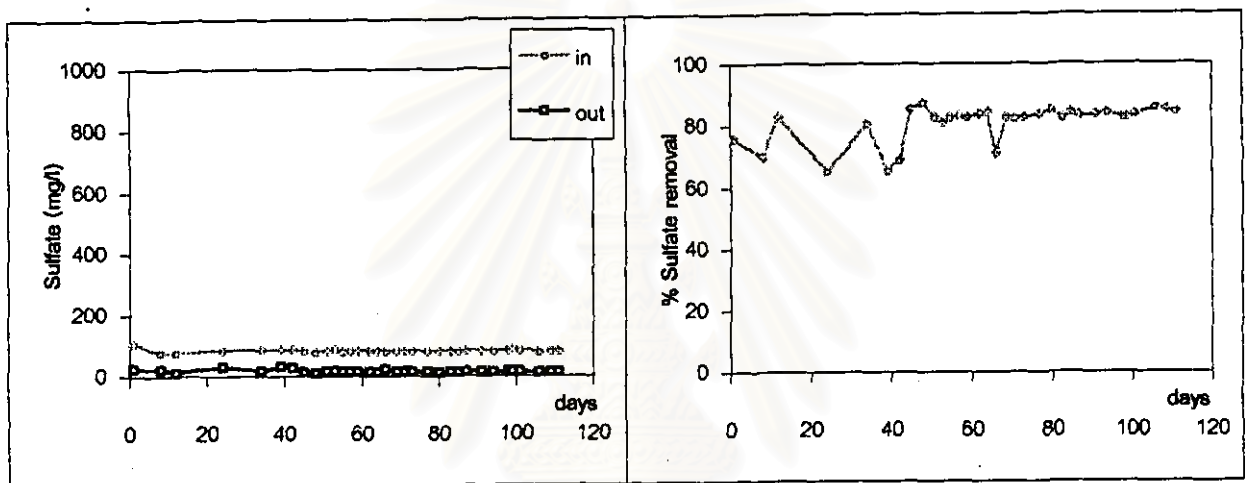


(ค) ถึงปฏิบัติการที่มีความเข้มข้นซีลเฟต 840 มก./ล.

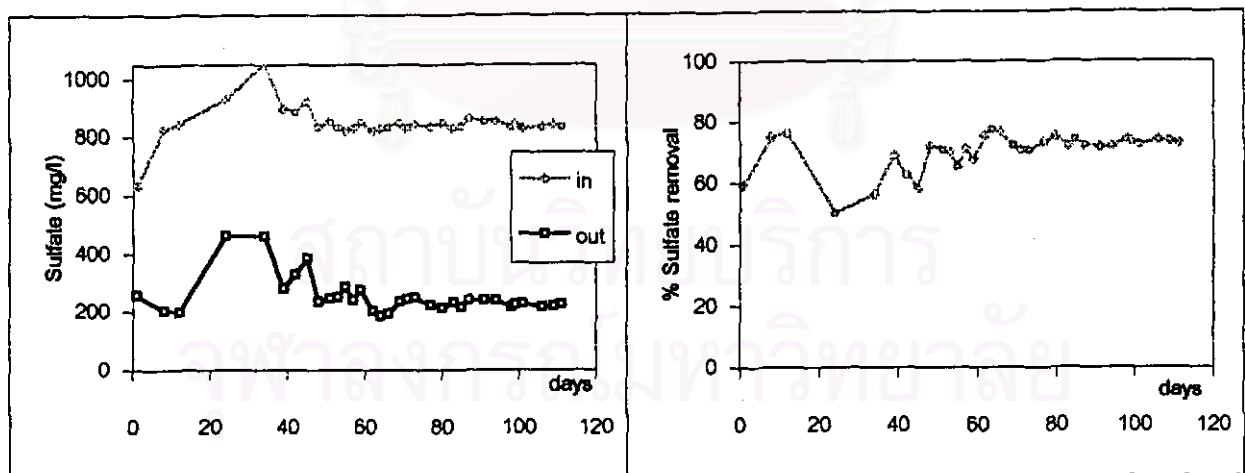
รูปที่ 4.9 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในในการทดลองที่ 2



(ก) ดังปฏิกิริยาที่มีความเข้มข้นซัลเฟตเท่ากับ 42 มก./ล.

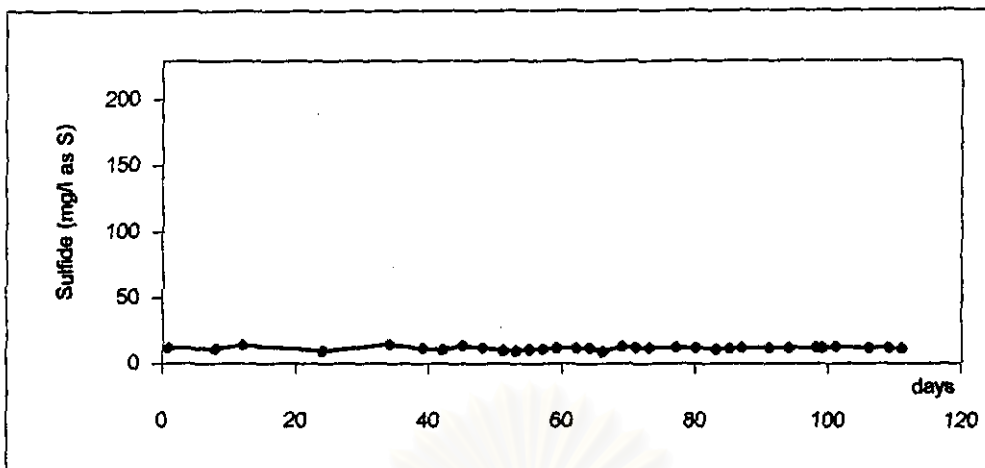


(ข) ดังปฏิกิริยาที่มีความเข้มข้นซัลเฟตเท่ากับ 84 มก./ล.

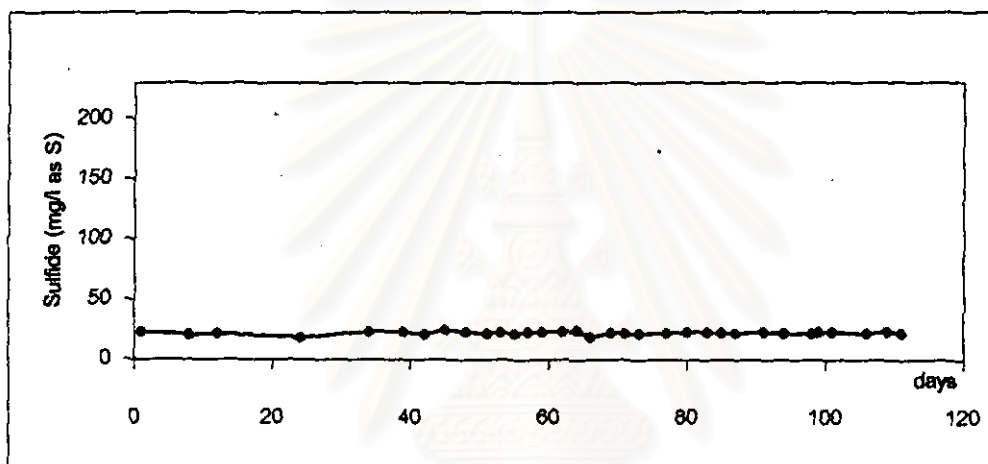


(ค) ดังปฏิกิริยาที่มีความเข้มข้นซัลเฟตเท่ากับ 840 มก./ล.

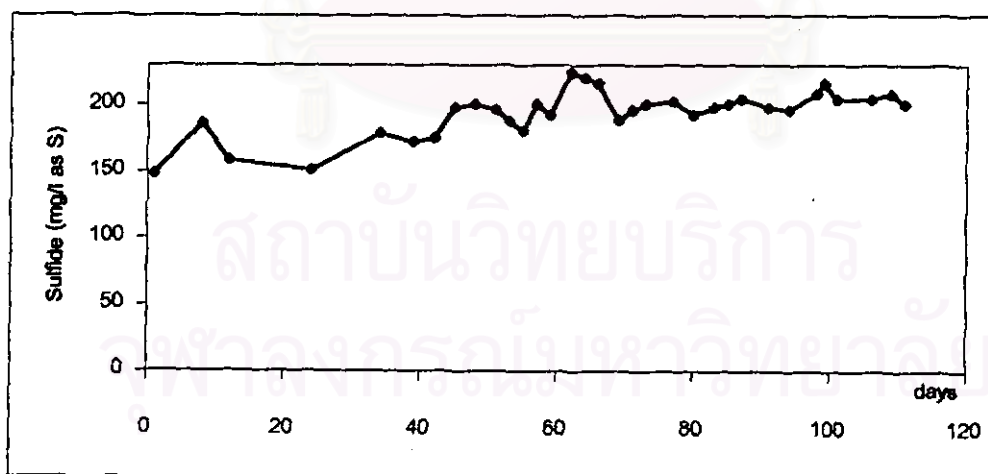
รูปที่ 4.10 ซัลเฟตและประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตในการทดลองที่ 2



(ก) ถึงปฏิบัติการที่มีความเข้มข้นซัลเฟตเท่ากับ 42 มก./ล.



(ข) ถึงปฏิบัติการที่มีความเข้มข้นซัลเฟตเท่ากับ 84 มก./ล.



(ค) ถึงปฏิบัติการที่มีความเข้มข้นซัลเฟตเท่ากับ 840 มก./ล.

รูปที่ 4.11 ซัลไฟด์น้ำออกในการทดลองที่ 2

6) ไออาร์พี

ค่าไออาร์พีของถังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตในน้ำเข้าเท่ากับ 42, 84 และ 840 มก./ล. มีค่าเท่ากับ - 315, - 327 และ - 406 มิลลิโวลต์ตามลำดับ ค่าไออาร์พีในถังปฏิกรณ์ตลอดการทดลองนี้แสดงในรูปที่ 4.12 พิจารณาค่าไออาร์พีในการทดลองที่ 2 พบว่าค่าไออาร์พีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อซัลเฟตในน้ำเข้าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับการทดลองแรก

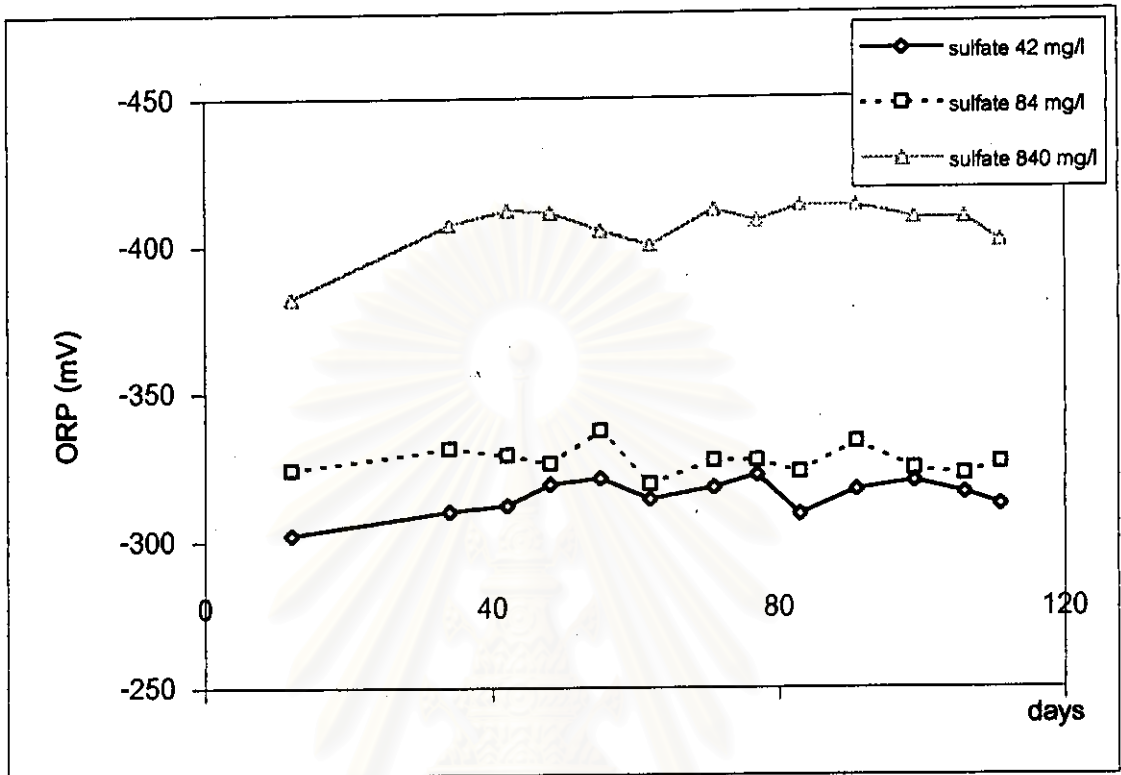
7) ปริมาณก๊าซทั้งหมดและสัดส่วนของก๊าซ

ปริมาณก๊าซเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตในน้ำเข้าเท่ากับ 42, 84 และ 840 มก./ล. เท่ากับ 1350, 1254 และ 0 มิลลิลิตร สัดส่วนของก๊าซมีเทน: ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับ 90.1:9.9 ,88.6:11.4 และ 89.2: 10.8 ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เฉลี่ยในแต่ละวันเท่ากับ 2.4 และ 4.0 มก. และ อัตราการผลิตก๊าซ 0.333, 0.308 และ 0 มล./มก.ซีไอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ ปริมาณก๊าซทั้งหมดตลอดการทดลองของแต่ละถังปฏิกรณ์แสดงดังรูปที่ 4.13

ในถังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตในน้ำเข้าเท่ากับ 840 มก./ล. พบว่าไม่ผลิตก๊าซเลย ทั้งนี้ในการวิเคราะห์ตอนแรกไม่ได้เก็บตัวอย่างก๊าซไปวิเคราะห์ เนื่องจากไม่สามารถวัดปริมาณก๊าซทั้งหมดต่อวันได้ แต่จากการวิเคราะห์หาสมมูลซีไอดีซึ่งจะอธิบายโดยละเอียดในหัวข้อ 4.2 พบว่าการขาดข้อมูลในส่วนของก๊าซทำให้ข้อมูลที่ได้มีระดับความน่าเชื่อถือลดลง อีกทั้งยังมีความเป็นไปได้ว่าแม้จะผลิตก๊าซได้น้อย แต่ก็ยังมีความดันพาร์เชียลเหนือน้ำ ซึ่งอาจมีผลให้ก๊าซที่เกิดขึ้นละลายน้ำได้เกือบทั้งหมด จึงได้นำก๊าซที่เก็บไว้ไปวิเคราะห์เพิ่มเพื่อหาสัดส่วนของก๊าซ

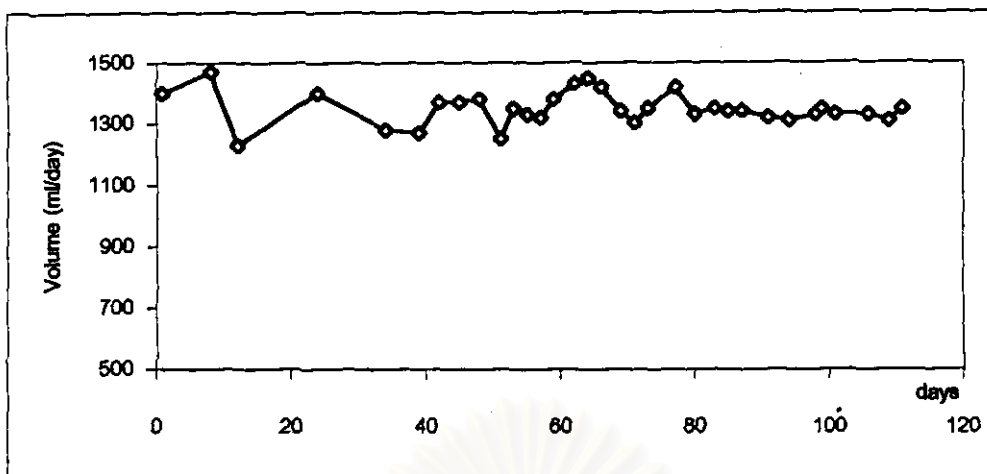
8) ของแข็งแขวนลอยและของแข็งทั้งหมด

ค่าของแข็งแขวนลอยและของแข็งทั้งหมดตลอดการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.14 โดยถังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตในน้ำเข้า 42, 84 และ 840 มก./ล. มีค่าของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยเท่ากับ 27, 47 และ 5 มก./ล. ค่าของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 693, 799 และ 1578 มก./ล. ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำออกมีแนวโน้มไม่แน่นอน แต่ค่าของแข็งทั้งหมดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อซัลเฟตในน้ำเข้าเพิ่มขึ้น ซึ่งผลที่ได้เป็นเช่นเดียวกับในการทดลองที่ 1

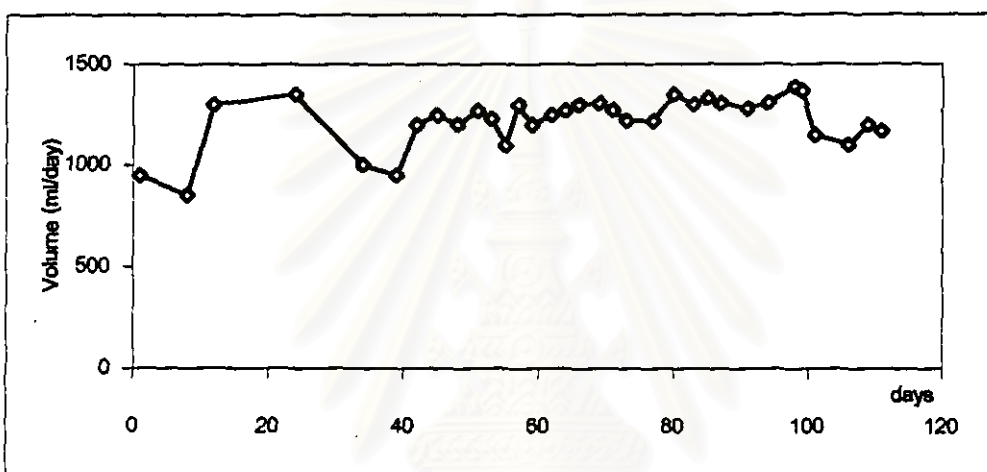


รูปที่ 4.12 ค่าโออาร์พีในถังปฏิกรณ์ต่าง ๆ ในการทดลองที่ 2

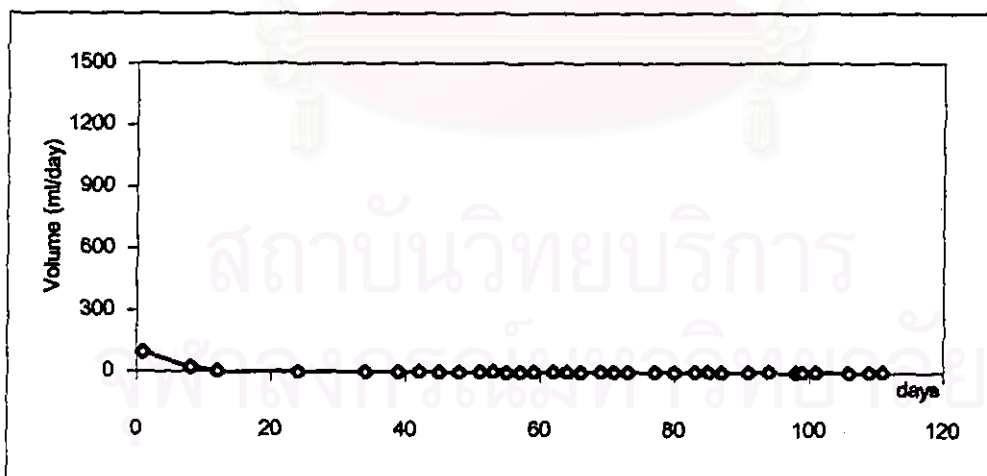
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) ถึงปฏิกิริยามีความเข้มข้นซีลเฟดเท่ากับ 42 มก./ล.

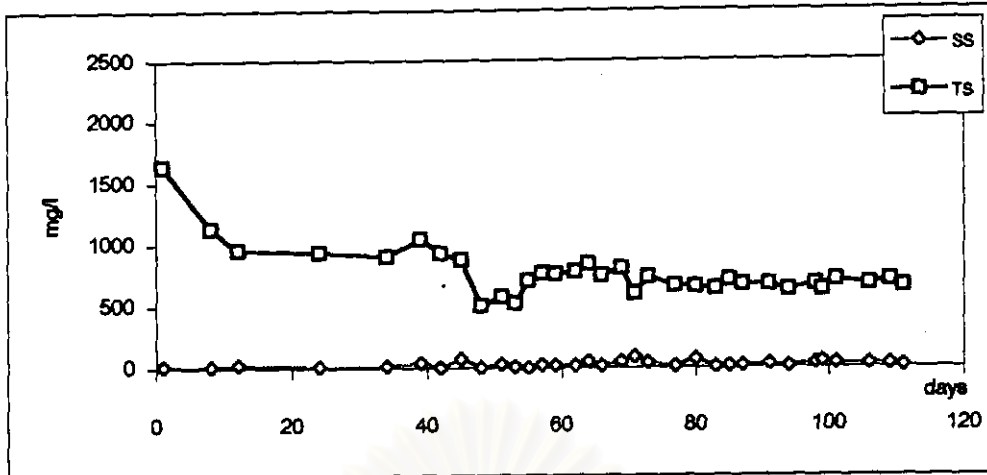


(ข) ถึงปฏิกิริยามีความเข้มข้นซีลเฟดเท่ากับ 84 มก./ล.

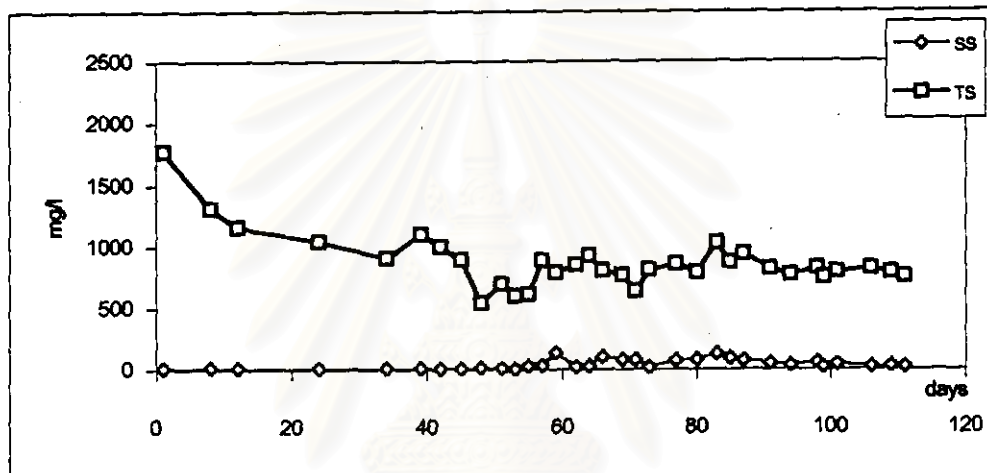


(ค) ถึงปฏิกิริยามีความเข้มข้นซีลเฟดเท่ากับ 840 มก./ล.

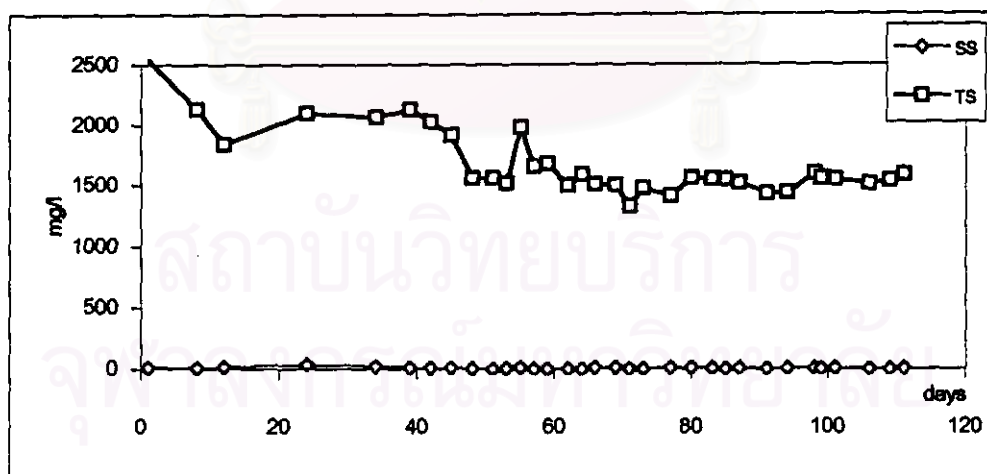
รูปที่ 4.13 ปริมาณก๊าซในแต่ละวัน ในการทดลองที่ 2



(ก) ดังปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นซีลเฟดเท่ากับ 42 มก./ล.



(ข) ดังปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นซีลเฟดเท่ากับ 84 มก./ล.



(ค) ดังปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นซีลเฟดเท่ากับ 840 มก./ล.

รูปที่ 4.14 ปริมาณของแข็งแขวนลอยและของแข็งทั้งหมดในการทดลองที่ 2

9) ปริมาณแบคทีเรียในระบบ

แบคทีเรียสร้างมีเทนในถังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตในน้ำเข้าเป็น 42, 84 และ 840 มก./ล. มีค่าเท่ากับ 4.54×10^8 , 4.21×10^8 และ 2.68×10^8 cfu g VSS⁻¹ และมีแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเท่ากับ 2.01×10^8 , 2.73×10^8 และ 4.33×10^8 cfu g VSS⁻¹ คิดเป็นสัดส่วนแบคทีเรียสร้างมีเทนต่อแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเท่ากับ 69:31, 61:39 และ 38:62 ตามลำดับ พบว่าแบคทีเรียสร้างมีเทนมีจำนวนมากกว่าแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต ที่ความเข้มข้นซัลเฟตในน้ำเข้าเท่ากับ 42 และ 84 มก./ล. แต่มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ส่วนที่ซัลเฟตในน้ำเข้าเท่ากับ 840 มก./ล. แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตมีปริมาณมากกว่า และสัดส่วนของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซัลเฟตเข้าระบบที่เพิ่มขึ้น

ผลการทดลองของการทดลองที่ 2 ทั้งหมดที่ได้แสดงมาข้างต้น สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.4 โดยตารางที่ 4.4 จะแสดงถึงค่าเฉลี่ยของตัวแปรที่สภาวะคงตัว, จำนวนตัวอย่างที่นำมาเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ในทุกถังปฏิกรณ์

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่าง ๆ จากการทดลองที่ 2 (ใช้อะซิเตตเป็นสารอาหาร)

ตัวแปร			ความเข้มข้นซัลเฟตในน้ำเข้า (มก./ล.)					
			42		84		840	
			น้ำเสีย	น้ำออก	น้ำเสีย	น้ำออก	น้ำเสีย	น้ำออก
อุณหภูมิ	เฉลี่ย	28.0	28.8	28.0	28.5	27.9	28.8	
(องศาเซลเซียส)	n=27 SD	0.53	0.6	0.62	0.75	0.62	0.53	
พีเอช	เฉลี่ย	5.91	7.17	5.86	7.18	5.29	7.33	
	n=27 SD	0.21	0.13	0.20	0.06	0.22	0.11	
สภาพต่าง	เฉลี่ย	283	559	281	582	228	1117	
(มก./ล. as CaCO ₃)	n=27 SD	30.5	33.3	35.2	34.7	47.0	77.2	
ซีโอไซด์	เฉลี่ย	529	17	524	15	524	34	
(มก./ล.)	n=27 SD	18	15	20	10	16	16	
ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอไซด์	เฉลี่ย	-	96.8	-	97.2	-	93.5	
(%)	n=27 SD	-	2.7	-	1.9	-	2.8	
ซัลเฟต	เฉลี่ย	43	9	83	15	843	239	
(มก./ล.)	n=27 SD	1.2	3.0	2.2	3.5	20.7	40.3	
ประสิทธิภาพการใช้ซัลเฟต	เฉลี่ย	-	80	-	82	-	72	
(%)	n=27 SD	-	6.7	-	3.9	-	4.1	

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่าง ๆ จากการทดลองที่ 2 (ใช้อะซิเตตเป็นสารอาหาร) (ต่อ)

ตัวแปร	ความเข้มข้นซัลเฟตในน้ำเข้า (มก./ล.)							
	42		84		840			
	น้ำเสีย	น้ำออก	น้ำเสีย	น้ำออก	น้ำเสีย	น้ำออก		
ซัลไฟด์	เฉลี่ย	-	11.5	-	22.4	-	200	
(มก./ล. as S)	n=27	SD	-	1.0	-	1.1	-	11.1
ไออาร์ที	เฉลี่ย	-	-315	-	-327	-	-406	
(มิลลิโวลต์)	n=27	SD	-	5.7	-	4.8	-	8.4
ปริมาณก๊าซทั้งหมด	เฉลี่ย	-	1350	-	1254	-	0	
(มิลลิลิตร)	n=27	SD	-	43	-	74	-	0
สัดส่วนของก๊าซ มีเทน (%)	เฉลี่ย	-	90.1	-	88.6	-	89.2	
	n=	SD						
คาร์บอนไดออกไซด์ (%)	เฉลี่ย	-	9.9	-	11.4	-	10.8	
	n=	SD						
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (มก./วัน as S)	เฉลี่ย	-	2.4	-	4.0	-	-	
	n=	SD						
ของแข็งแขวนลอย	เฉลี่ย	-	27	-	47	-	5	
(มก./ล.)	n=27	SD	-	22	-	38	-	4
ของแข็งทั้งหมด	เฉลี่ย	-	693	-	799	-	1578	
(มก./ล.)	n=27	SD	-	98	-	116	-	161
ปริมาณแบคทีเรีย	MPB		4.54		4.21		2.68	
($\times 10^8$ cfu g VSS ⁻¹)	SRB		2.01		2.73		4.33	

4.2 สมดุลมวลของสารในระบบ

4.2.1 สมดุลมวลของซีโอดี

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.7 สมดุลมวลของซีโอดีทำให้เราทราบถึงความน่าเชื่อถือของข้อมูลโดยดูจากค่า % recovery ของข้อมูล นอกจากนั้นยังทำให้เราทราบสัดส่วนการใช้ซีโอดีของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียสร้างมีเทนได้ โดยดูจากค่าเปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอน

จากข้อมูลในตารางที่ 4.3 ซึ่งเป็นข้อมูลของการทดลองที่ 1 ถึงปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตในน้ำเข้าเท่ากับ 42 มก./ล. อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบ 8 ลิตร/วัน

ซีโอดีเข้า	516	มก./ล.
ซีโอดีออก	55	มก./ล.
ซัลเฟตเข้า	43	มก./ล.
ซัลเฟตออก	4	มก./ล.
ก๊าซทั้งหมดต่อวัน	1005	มล.
สัดส่วนของก๊าซมีเทน	94.2	%

จากสมการ 2.7

$$\% \text{ COD recovery} = \frac{[\Delta \text{SO}_4^{2-}\text{-COD} + \text{soluble organic COD} + \text{soluble CH}_4\text{-COD} + \text{CH}_{4\text{ gas}} \text{ COD}] \times 100}{\text{COD}_{\text{in}}}$$

$$\begin{aligned} \Delta \text{SO}_4^{2-}\text{-COD} &= (\text{ซัลเฟตเข้า} - \text{ซัลเฟตออก}) \times 2/3 \\ &= (43 - 4) \times 2/3 \\ &= 26 \text{ มก./ล.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{soluble organic COD} &= \text{ซีโอดีออก} \\ &= 55 \text{ มก./ล.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{soluble CH}_4 &= K_{\text{hCH}_4} \times \text{Partial Pressure of CH}_4 \\ &= 12.4 \times 10^{-4} \times 0.942 \\ &= 0.00117 \text{ โมล/ล.} \\ &= 18.7 \text{ มก./ล.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{soluble CH}_4 - \text{COD} &= 18.7 \times 4 \\ &= 74.8 \text{ มก./ล.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{CH}_{4\text{ gas}} &= \text{partial pressure of CH}_4 \times \text{Total Volume} \\ &= 0.942 \times 1005 / 8 \\ &= 118.34 \text{ มล./ล. น้ำเสีย} \\ &= 118.34/24.7/1000 \text{ โมล/ลิตร} \\ &= 0.00479 \text{ โมล/ลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 76.64 \text{ มก./ล.} \\
\text{CH}_4\text{COD} &= 76.64 \times 4 \\
&= 306.6 \text{ มก./ล.} \\
\% \text{ COD recovery} &= (26 + 55 + 74.8 + 306.6) / 516 \\
&= 89.61 \%
\end{aligned}$$

จากสมการ 2.8 และ 2.9

$$\% \text{ electron flow to MPB} = (\text{CH}_4\text{-COD}) / (\text{CH}_4\text{-COD} + \Delta\text{SO}_4^{2-}\text{-COD}) \text{ _____ (2.8)}$$

$$\% \text{ electron flow to SRB} = (\Delta\text{SO}_4^{2-}\text{-COD}) / (\text{CH}_4\text{-COD} + \Delta\text{SO}_4^{2-}\text{-COD}) \text{ _____ (2.9)}$$

$$\% \text{ electron flow to MPB} = (306.6 + 74.8) / (306.6 + 74.8 + 26) = 93.6\%$$

$$\% \text{ electron flow to SRB} = 26 / (306.6 + 74.8 + 26) = 6.4 \%$$

ค่า % recovery และ %electron flow ของข้อมูลทั้งหมดจากการทดลองแรกสามารถหาได้ด้วยวิธีการคำนวณแบบเดียวกัน ดังนั้นเมื่อนำข้อมูลในตารางที่ 4.2 และ 4.3 มาคำนวณ จะได้ผลสรุปดังนี้คือ ในถังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตในน้ำเข้าเท่ากับ 42 มก./ล. ซีโอดีที่เข้าระบบเท่ากับ 516 มก./ล. ซีโอดีในน้ำออก 55 มก./ล. ระบบสามารถเปลี่ยนรูปซีโอดีในรูปสารอินทรีย์ให้เป็นก๊าซมีเทนได้เทียบเท่ากับซีโอดี 306.6 มก./ล. เป็นมีเทนละลายน้ำเทียบเท่ากับซีโอดี 74.8 มก./ล. หรือเท่ากับก๊าซมีเทน 28.9 มล./ล. และใช้ซีโอดี 26 มก./ล. ในการรีดิวซ์ซัลเฟต แต่ซีโอดีที่เข้าสู่ระบบบางส่วนขาดหายไป คิดเป็นค่า % recovery ได้ 89.61 % แยกที่เรียสร้างมีเทนมีสัดส่วนการใช้ซีโอดี 93.6 % ส่วนแยกที่เรียรีดิวซ์ซัลเฟตมีสัดส่วนการใช้ซีโอดี 6.4 % ในถังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตในน้ำเข้าเท่ากับ 84 มก./ล. ซีโอดีเข้าระบบเท่ากับ 521 มก./ล. ซีโอดีในน้ำออก 40 มก./ล. ระบบสามารถเปลี่ยนรูปซีโอดีในรูปสารอินทรีย์ให้เป็นก๊าซมีเทนได้เทียบเท่ากับซีโอดี 268.3 มก./ล. เป็นมีเทนละลายน้ำเทียบเท่ากับซีโอดี 74.2 มก./ล.หรือเท่ากับก๊าซมีเทน 28.6 มล./ล. และใช้ซีโอดี 49.7 มก./ล. ในการรีดิวซ์ซัลเฟต แต่ซีโอดีที่เข้าสู่ระบบบางส่วนขาดหายไป คิดเป็นค่า % recovery ได้ 82.96 % แยกที่เรียสร้างมีเทนมีสัดส่วนการใช้ซีโอดี 97.3 % ส่วนแยกที่เรียรีดิวซ์ซัลเฟตมีสัดส่วนการใช้ซีโอดี 12.7 % และในถังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตในน้ำเข้า 840 มก./ล. ซีโอดีเข้าระบบเท่ากับ 520 มก./ล. ซีโอดีในน้ำออก 55 มก./ล. ระบบสามารถเปลี่ยนรูปซีโอดีในรูปสารอินทรีย์ให้

เป็นก๊าซมีเทนได้เทียบเท่ากับซีไอดี 29.0 มก./ล. เป็นมีเทนละลายน้ำเทียบเท่ากับซีไอดี 70.0 มก./ล.หรือเท่ากับก๊าซมีเทน 27.0 มล./ล. และใช้ซีไอดี 376 มก./ล.ในการรีดิวซ์ซัลเฟต แต่ซีไอดีที่วิเคราะห์ได้มีค่ามากกว่าซีไอดีที่เข้าสู่ระบบเล็กน้อย คิดเป็นค่า % recovery ได้ 101.9 % แยกที่- เรียงสร้างมีเทนมีสัดส่วนการใช้ซีไอดี 20.8 % ส่วนแยกที่เรียรีดิวซ์ซัลเฟตมีสัดส่วนการใช้อิเล็กทรอนิกส์ 79.2 % ผลการคำนวณทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่า % recovery ในการทดลองที่ 1 ซึ่งใช้น้ำตาลทรายเป็นสารอาหาร

ความเข้มข้นของซัลเฟตในน้ำเข้า	ซีไอดี (มก./ล.)		ซัลเฟต (มก./ล.)		ก๊าซทั้งหมดต่อวัน (มล.)	% มีเทน	ซัลเฟต-ซีไอดี (มก./ล.)	ซีไอดีจากมีเทนละลายน้ำ		ก๊าซมีเทน - ซีไอดี (มก./ล.)	% recovery	% electron flow	
	เข้า	ออก	เข้า	ออก				มก./ล.	มล./ล.			MPB	SRB
42	516	55	43	4	1005	94.2	26	74.8	28.9	306.6	89.61	93.6	6.4
84	521	40	86	11.5	886	93.5	49.7	74.2	28.6	268.3	82.96	87.3	12.7
840	520	55	847	283	101	88.2	376	70.0	27.0	29.0	101.9	20.8	79.2

จากตารางที่ 4.4 นำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองที่ 2 มาคำนวณหาสมมูลมวลของซีไอดีและหาค่า % recovery รวมทั้งเปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กทรอนิกส์ ได้ผลสรุปดังนี้ จะได้ผลสรุปดังนี้คือ ในถังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตในน้ำเข้าเท่ากับ 42 มก./ล. ซีไอดีที่เข้าระบบเท่ากับ 529 มก./ล. ซีไอดีในน้ำออก 17 มก./ล. ระบบสามารถเปลี่ยนรูปซีไอดีในรูปสารอินทรีย์ให้เป็นก๊าซมีเทนได้เทียบเท่ากับซีไอดี 394 มก./ล. เป็นมีเทนละลายน้ำเทียบเท่ากับซีไอดี 71.5 มก./ล.หรือเท่ากับก๊าซมีเทน 27.6 มล./ล. และใช้ซีไอดี 22.7 มก./ล.ในการรีดิวซ์ซัลเฟต แต่ซีไอดีที่เข้าสู่ระบบบางส่วนขาดหายไป คิดเป็นค่า % recovery ได้ 95.5 % แยกที่เรียงสร้างมีเทนมีสัดส่วนการใช้ซีไอดี 95.4 % ส่วนแยกที่เรียรีดิวซ์ซัลเฟตมีสัดส่วนการใช้อิเล็กทรอนิกส์ 4.6 % ในถังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตในน้ำเข้าเท่ากับ 84 มก./ล. ซีไอดีเข้าระบบเท่ากับ 524 มก./ล. ซีไอดีในน้ำออก 15 มก./ล. ระบบสามารถเปลี่ยนรูปซีไอดีในรูปสารอินทรีย์ให้เป็นก๊าซมีเทนได้เทียบเท่ากับซีไอดี 359.9 มก./ล. เป็นมีเทนละลายน้ำเทียบเท่ากับซีไอดี 70.3 มก./ล.หรือเท่ากับก๊าซมีเทน 27.1 มล./ล. และใช้ซีไอดี 45.3 มก./ล.ในการรีดิวซ์ซัลเฟต แต่ซีไอดีที่เข้าสู่ระบบบางส่วนขาดหายไป คิดเป็นค่า % recovery ได้ 93.6 % แยกที่เรียงสร้างมีเทนมีสัดส่วนการใช้ซีไอดี 90.5 % ส่วนแยกที่เรียรีดิวซ์ซัลเฟตมีสัดส่วนการใช้อิเล็กทรอนิกส์ 9.5 % และในถังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตในน้ำเข้าเท่ากับ 840 มก./ล. ซีไอดีเข้าระบบเท่ากับ 524 มก./ล. ซีไอดีในน้ำออก 34 มก./ล. เป็นมีเทนละลายน้ำเทียบเท่ากับซีไอดี 70.8 มก./ล.หรือเท่ากับก๊าซมีเทน 27.3 มล./ล. ใช้ซีไอดี 402.7 มก./ล. ในการรีดิวซ์ซัลเฟต ซีไอดีที่เข้าสู่

ระบบบางส่วนขาดหายไป คิดเป็นค่า % recovery ได้ 96.9 % แบกที่เรียสร้างมีเทนมีสัดส่วนการใช้ชีโอดี 85 % แบกที่เรียรีดิคาร์ซีลเฟตมีสัดส่วนการใช้ชีโอดี 15 % ผลการคำนวณทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่า % recovery ในการทดลองที่ 2 ซึ่งใช้ชีโอดีเป็นสารอาหาร

ความเข้มข้นของ ชีโอดีใน น้ำเข้า	ชีโอดี (มก./ล.)		ชีโอดี (มก./ล.)		ก๊าซ ทั้งหมด ต่อวัน (มล.)	% มีเทน	ชีโอดี- ชีโอดี (มก./ล.)	ชีโอดีจาก มีเทน ละลายน้ำ		ก๊าซมีเทน - ชีโอดี (มก./ล.)	% recovery	% electron flow	
	เข้า	ออก	เข้า	ออก				มก./ล.	มล./ล.			MPB	SRB
42	529	17	43	9	1350	90.1	22.7	71.5	27.6	394	95.5	95.4	4.6
84	524	15	83	15	1254	88.6	45.3	70.3	27.1	360	93.6	90.5	9.5
840	524	34	843	239	0	89.2	402.7	70.8	27.3	0	96.9	15.0	85.0

สำหรับถึงปฏิกรณ์ที่มีชีโอดีในน้ำเข้าเท่ากับ 840 มก./ล. ไม่สามารถหาปริมาณก๊าซในแต่ละวันได้ ทำให้ไม่นำก๊าซที่เก็บจากถังปฏิกรณ์นี้ไปวิเคราะห์หาสัดส่วนของก๊าซในตอนแรก แต่การหาค่า % COD recovery ที่ไม่นำเอาก๊าซมีเทนละลายน้ำมาคิดจะได้เพียง 83 % เท่านั้น จึงนำเอาก๊าซที่เก็บไว้ไปลองวิเคราะห์หาสัดส่วนของก๊าซแล้วนำมาคำนวณจึงได้ผลดังตารางที่ 4.6 จากการวิเคราะห์หาสัดส่วนของก๊าซได้และได้ค่า % recovery เพิ่มขึ้น จึงสันนิษฐานว่าก๊าซที่เกิดขึ้นในแต่ละวันมีปริมาณน้อยมาก ดังนั้นปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจึงไม่สามารถดันเครื่องวัดปริมาตรก๊าซแบบแทนที่น้ำให้ยกขึ้นมาได้ แม้ว่าเหนือน้ำจะมีก๊าซอยู่ก็ตาม

จากค่า % recovery ของทั้งสองการทดลอง จะเห็นได้ว่าในทุก ๆ การทดลองแม้จะมีค่าสูงกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามจุดอ่อนอย่างหนึ่งในการทำวิจัยก็คือ ไม่สามารถหาปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกเปลี่ยนเป็นเซลล์แบกที่เรียได้ ดังนั้น ค่า % recovery ที่ได้ในทุกการทดลองจึงน้อยกว่าความเป็นจริงเสมอ แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้ระบบยูเอเอสบีซึ่งแบกที่เรียในระบบเป็นแบกที่เรียไม่ใช้ออกซิเจน ถ้าพิจารณาถึงชีวเคมีของแบกที่เรียประเภทนี้ จะเห็นได้ว่าแบกที่เรียประเภทนี้ได้พลังงานจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ค่อนข้างต่ำ ผลผลิตก๊าศที่ได้แม้จะเป็นสารประกอบที่ค่อนข้างเสถียรแต่ก็เป็นสารประกอบที่มีระดับพลังงานค่อนข้างสูง ไม่ว่าจะเป็นกรดอินทรีย์, มีเทน หรือไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งถ้าหากเปรียบเทียบกับแบกที่เรียประเภทที่ใช้ออกซิเจนแล้วจะเห็นได้อย่างชัดเจน กล่าวคือ แบกที่เรียประเภทที่ใช้ออกซิเจนได้พลังงานจากการย่อยสลายกลูโคส 1 โมเลกุลเทียบเท่ากับ 38 ATP แต่ถ้าเป็นแบกที่เรียประเภทไร้ออกซิเจนแล้ว จะได้พลังงานจากการย่อย

สลายกลูโคส 1 โมเลกุลเป็นกรดไพรูวิก 2 เทียบเท่ากับ 2 ATP ได้พลังงานจากการย่อยสลายกรดไพรูวิก 2 โมเลกุลเป็นกรดอะซิติก 2 โมเลกุลอีก 2 ATP และได้พลังงานจากการย่อยสลายกรดอะซิติก 2 โมเลกุลเป็นมีเทนอีก 2 ATP และถ้ารวมไฮโดรเจนอีก 4 โมเลกุลซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนด้วยแล้ว ถ้าถูกย่อยสลายเป็นมีเทนก็จะได้พลังงานอีก 1 ATP ซึ่งจะได้พลังงานรวมเพียง 7 ATP เท่านั้น พลังงานส่วนนี้ยังถูกใช้โดยแบคทีเรียหลายชนิด ดังนั้นค่าอีลด์ของแบคทีเรียประเภทนี้จึงมีค่าต่ำ ประมาณ 10 % ของสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายเท่านั้นที่ถูกเปลี่ยนเป็นเซลล์ ดังนั้น แม้ค่า % recovery ที่หาได้จะมีความบกพร่องในเรื่องสารอินทรีย์ที่ถูกเปลี่ยนเป็นเซลล์อยู่ด้วย แต่ก็ยังเป็นค่าที่บอกถึงความน่าเชื่อถือของข้อมูลได้ดีพอสมควร

4.2.2 สมดุลมวลของซัลเฟอร์

ค่า % sulfur recovery ก็เป็นอีกพารามิเตอร์หนึ่งซึ่งช่วยแสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือของข้อมูล แต่เป็นการมองในแง่ของซัลเฟอร์ที่เข้าและออกจากระบบเพียงอย่างเดียว โดยไม่คำนึงถึงซิโอดีที่เข้าระบบ

จากข้อมูลในตารางที่ 4.3 ซึ่งเป็นข้อมูลของการทดลองที่ 1 ดังปฏิกรณ์ที่มีอัตราส่วนซิโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 12 อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบ 8 ลิตร/วัน

ซัลเฟตเข้า	43	มก./ล.
ซัลเฟตออก	4	มก./ล.
ซัลไฟด์ทั้งหมด	13	มก./ล. ในรูปซัลไฟด์
	39	มก./ล. ในรูปซัลเฟต
ซัลไฟด์ในรูปก๊าซ	4.7	มก./วัน ในรูปซัลไฟด์
	0.59	มก./ล. ในรูปซัลไฟด์
	2.35	มก./ล. ในรูปซัลเฟต

จากสมการ 2.11 ในหัวข้อ 2.7.2

$$\% \text{ sulfur recovery} = (\text{SO}_4^{2-}{}_{\text{out}} + \text{S}^{2-} + \text{HS}^- + \text{H}_2\text{S}_{(\text{aq})} + \text{H}_2\text{S}_\text{g}) / \text{SO}_4^{2-}{}_{\text{in}} \quad (2.11)$$

โดย $\text{S}^{2-} + \text{HS}^- + \text{H}_2\text{S}_{(\text{aq})} = \text{Total Sulfide}$

$$\begin{aligned} \% \text{ sulfur recovery} &= (4 + 39 + 2.35)/43 \\ &= 105.5 \% \end{aligned}$$

ด้วยวิธีการคำนวณแบบเดียวกัน ค่า % recovery ที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตต่าง ๆ เมื่อนำข้อมูลของการทดลองที่ 1 จากตาราง 4.2 และ 4.3 จะได้ผลสรุปดังนี้คือ ในถังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตเข้าระบบ 42 มก./ล. ซัลเฟตในน้ำออกเท่ากับ 4 มก./ล. ระบบเปลี่ยนรูปซัลเฟตให้เป็นซัลไฟด์ ได้เป็นซัลไฟด์ทั้งหมดในน้ำออกวัดในรูปของซัลเฟต 39 มก./ล. และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์วัดในรูปซัลเฟต 2.35 มก./ล. แต่ซัลเฟอร์ที่วัดได้มีมากกว่าที่เข้าสู่ระบบ คิดเป็น % recovery ได้ 105.5 % ในถังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตเข้าระบบ 84 มก./ล. ซัลเฟตในน้ำออก 11.5 มก./ล. ระบบเปลี่ยนรูปซัลเฟตให้เป็นซัลไฟด์ ได้เป็นซัลไฟด์ทั้งหมดในน้ำออกวัดในรูปของซัลเฟต 71.4 มก./ล. และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์วัดในรูปซัลเฟต 3.8 มก./ล. แต่ซัลเฟอร์ที่วัดได้มีมากกว่าที่เข้าสู่ระบบ คิดเป็น % recovery ได้ 100.8 % และในถังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตเข้าระบบ 840 มก./ล. ซัลเฟตในน้ำออก 283 มก./ล. ระบบเปลี่ยนรูปซัลเฟตให้เป็นซัลไฟด์ ได้เป็นซัลไฟด์ทั้งหมดในน้ำออกวัดในรูปของซัลเฟต 528 มก./ล. และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์วัดในรูปซัลเฟต 1.1 มก./ล. แต่ซัลเฟอร์ที่วัดได้มีน้อยกว่าที่เข้าสู่ระบบ คิดเป็น % recovery ได้ 95.9 % ผลการคำนวณทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่า % recovery ของซัลเฟอร์ในการทดลองที่ 1 ซึ่งใช้น้ำตาลทรายเป็นสารอาหาร

ความเข้มข้นซัลเฟต (มก./ล.)		ซัลไฟด์ทั้งหมด (มก./ล.)		ซัลไฟด์ในรูปก๊าซ (มก./ล.)		% sulfur recovery
เข้า	ออก	ในรูปซัลไฟด์	ในรูปซัลเฟต	ในรูปซัลไฟด์	ในรูปซัลเฟต	
42	4	13	39	0.59	2.35	105.5
84	11.5	23.8	71.4	0.95	3.8	100.8
840	283	176	528	0.275	1.1	95.9

จากตารางที่ 4.7 จะเห็นว่า % sulfur recovery ในการทดลองที่ 1 มีค่าใกล้เคียง 100 % มาก ($\pm < 5\%$) แสดงให้เห็นถึงความผิดพลาดในการวิเคราะห์หาปริมาณซัลเฟตและซัลไฟด์ที่มีไม่มาก ข้อมูลที่ได้มีระดับความน่าเชื่อถือสูง

ด้วยวิธีการคำนวณแบบเดียวกัน ค่า % recovery ที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตต่าง ๆ เมื่อนำข้อมูลของการทดลองที่ 2 จากตาราง 4.4 ได้ผลสรุปดังนี้คือ ในถังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตในน้ำเข้าเท่ากับ 42 มก./ล. ซัลเฟตในน้ำออกเท่ากับ 9 มก./ล. ระบบเปลี่ยนรูปซัลเฟตให้เป็นซัลไฟด์ ได้เป็นซัลไฟด์ทั้งหมดในน้ำออกวัดในรูปของซัลเฟต 34.5 มก./ล. และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์วัดในรูปซัลเฟต 0.9 มก./ล. แต่ซัลเฟอร์ที่วัดได้มีมากกว่าที่เข้าสู่ระบบ คิดเป็น % recovery ได้ 103.3 % ในถังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตเข้าระบบเท่ากับ 84 มก./ล. ซัลเฟตในน้ำออก 15 มก./ล. ระบบเปลี่ยนรูปซัลเฟตให้เป็นซัลไฟด์ ได้เป็นซัลไฟด์ทั้งหมดในน้ำออกวัดในรูปของซัลเฟต 67.2 มก./ล. และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์วัดในรูปซัลเฟต 1.5 มก./ล. แต่ซัลเฟอร์ที่วัดได้มีมากกว่าที่เข้าสู่ระบบ คิดเป็น % recovery ได้ 100.8 % และในถังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตเข้าระบบ 843 มก./ล. ซัลเฟตในน้ำออกเท่ากับ 239 มก./ล. ระบบเปลี่ยนรูปซัลเฟตให้เป็นซัลไฟด์ ได้เป็นซัลไฟด์ทั้งหมดในน้ำออกวัดในรูปของซัลเฟต 600 มก./ล. ส่วนก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ไม่สามารถวัดได้ ซัลเฟอร์ที่วัดได้มีน้อยกว่าที่เข้าสู่ระบบ คิดเป็น % recovery ได้ 99.5 % ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่า % recovery ของซัลเฟอร์ในการทดลองที่ 2 ซึ่งใช้อะซิเตดเป็นสารอาหาร

ความเข้มข้นซัลเฟต (มก./ล.)		ซัลไฟด์ทั้งหมด (มก./ล.)		ซัลไฟด์ในรูปก๊าซ (มก./ล.)		% sulfur recovery
เข้า	ออก	ในรูปซัลไฟด์	ในรูปซัลเฟต	ในรูปซัลไฟด์	ในรูปซัลเฟต	
42	9	11.5	34.5	0.3	0.9	103.3
84	15	22.4	67.2	0.5	1.5	100.8
840	239	200	600	-	-	99.5

จากตารางที่ 4.8 จะเห็นว่า % sulfur recovery ในการทดลองที่ 2 มีค่าใกล้เคียง 100 % มาก แสดงให้เห็นถึงความผิดพลาดในการวิเคราะห์หาปริมาณซัลเฟตและซัลไฟด์ที่มีไม่มาก ข้อมูลที่ได้มีระดับความน่าเชื่อถือสูง แม้ในถังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตในน้ำเข้าเท่ากับ 840 มก./ล. จะไม่สามารถวัดค่าซัลไฟด์ในรูปก๊าซได้ก็ตาม แต่เมื่อผลดูจากการทดลองที่ 1 และการทดลองที่ 2 ที่ความเข้มข้นซัลเฟตอื่น ซัลไฟด์ในรูปก๊าซมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับซัลเฟตที่เข้าสู่ระบบ จึงสันนิษฐานว่าซัลไฟด์ในรูปก๊าซไม่น่ามีผลต่อ % sulfur recovery ที่คำนวณได้นัก

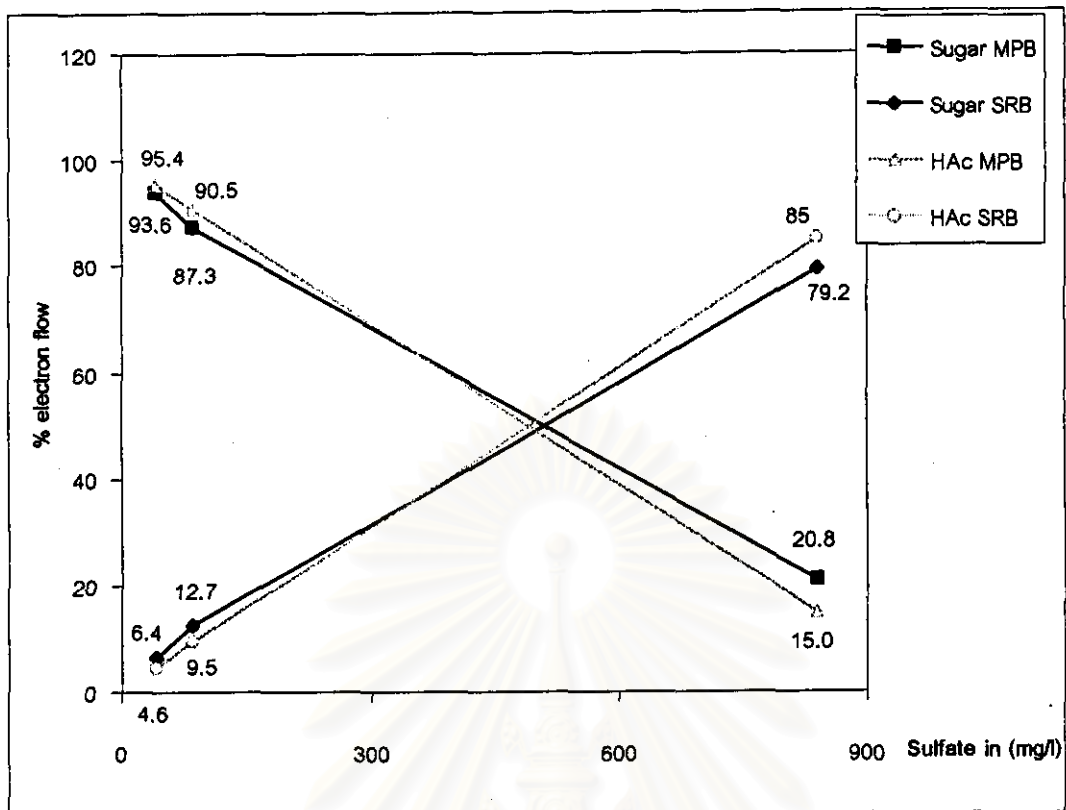
4.3 ผลของชนิดสารอาหารและความเข้มข้นซัลเฟตที่เปลี่ยนแปลง

4.3.1 อุณหภูมิ

การเปลี่ยนแปลงชนิดของสารอาหารและความเข้มข้นของซัลเฟตเป็นสาเหตุที่ทำให้ตัวแปรต่าง ๆ ในระบบมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงให้เห็นแล้วในหัวข้อ 4.1 และ 4.2 แต่ตัวแปรเพียงตัวเดียวที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของสารอาหารหรือความเข้มข้นซัลเฟตก็คือ อุณหภูมิ ซึ่งจะเห็นได้ว่าทั้ง 2 การทดลองอุณหภูมิน้ำออกมีค่าสูงกว่าน้ำเข้าเล็กน้อย สันนิษฐานได้ว่าพลังงานที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเมตาบอลิซึมภายในเซลล์ของแบคทีเรีย ส่วนหนึ่งสูญเสียไปในรูปของพลังงานความร้อน แม้พลังงานส่วนที่สูญเสียไปนี้จะมีสัดส่วนไม่มากนักแต่ก็อาจเป็นผลให้อุณหภูมิในน้ำออกเพิ่มขึ้นได้เล็กน้อย ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 แบคทีเรียมีช่วงการทำงานที่เหมาะสมอยู่ 2 ช่วง คือ พวก Mesophilic Bacteria ที่ทำงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 30 – 40 องศาเซลเซียส และพวก Thermophilic Bacteria ที่ทำงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 45 – 55 องศาเซลเซียส แบคทีเรียในถังปฏิกรณ์ส่วนใหญ่จึงน่าจะเป็นพวก Mesophilic ถึงแม้ว่าอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์จะไม่ใช่อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดต่อการทำงาน แบคทีเรียก็ยังคงทำงานได้ นอกจากนั้นอุณหภูมียังมีผลต่อความสามารถในการละลายน้ำของก๊าซและความสามารถในการแตกตัวเป็นไอออนในน้ำอีกด้วย เนื่องจากค่าคงที่ของเฮนรีและค่าคงที่ในการแตกตัวเป็นไอออนของสารต่าง ๆ แปรตามอุณหภูมิ ดังอธิบายในหัวข้อ 3.6 แต่การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมียู่ในช่วงแคบ ๆ จนแทบถือได้ว่าคงที่ ผลของอุณหภูมิจึงมีต่อการทำงานของแบคทีเรีย, ผลต่อการละลายน้ำของก๊าซ และผลต่อการแตกตัวเป็นไอออนจึงมีน้อยมากและไม่นำมาพิจารณาได้

4.3.2 สัดส่วนการใช้ซีโอไลต์

ความเข้มข้นของซัลเฟตที่เข้าระบบมีอิทธิพลต่อสัดส่วนการใช้ซีโอไลต์ของแบคทีเรียสร้างมีเทนและแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเป็นอย่างมาก และสัดส่วนการใช้ซีโอไลต์ที่เปลี่ยนไปนี้เองที่เป็นสาเหตุให้ตัวแปรต่าง ๆ ในระบบเปลี่ยนไป ซึ่งสัดส่วนการใช้ซีโอไลต์สามารถดูได้จากเปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอนของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียสร้างมีเทน ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และ 4.8 และรูปที่ 4.15 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นซัลเฟตในน้ำเข้าเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอนไปยังแบคทีเรียสร้างมีเทนมีค่าลดลงพร้อมกับการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอนไปยังแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของซัลเฟตส่งผลต่อการใช้ซีโอไลต์ของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียสร้างมีเทนอย่างชัดเจน



รูปที่ 4.15 เปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอนที่แต่ละความเข้มข้นของซัลเฟตและสารอาหาร

การพิจารณาถึงผลของความเข้มข้นซัลเฟตที่มีต่อการใช้สารอาหารของแบคทีเรียโดยทั่วไปต้องแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงอัตราส่วนซีโอติต่อซัลเฟตสูง (มากกว่า 0.67) ซึ่งเป็นช่วงที่มีซีโอติมากเกินไปสำหรับแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต ในขณะที่มีซัลเฟตอยู่อย่างจำกัด และช่วงอัตราส่วนซีโอติต่อซัลเฟตต่ำ (น้อยกว่า 0.67) อันเป็นช่วงที่มีซัลเฟตมากเกินไปแต่มีซีโอติอยู่จำกัดสำหรับแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.5.2 และ 2.5.3 ว่า แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตมีความสามารถในการเจริญเติบโตได้ดีกว่าแบคทีเรียสร้างมีเทนเมื่อพิจารณาจากปัจจัยทางเทอร์โมไดนามิกส์และโคเนติก ดังนั้นในช่วงที่มีซัลเฟตอยู่อย่างจำกัด คือที่ความเข้มข้นซัลเฟตในน้ำเข้า 42 และ 84 มก./ล. (อัตราส่วนซีโอติต่อซัลเฟตเท่ากับ 12 และ 6) การเจริญเติบโตของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจะขึ้นอยู่กับการมีอยู่ของปริมาณซัลเฟตที่มีอยู่เป็นสำคัญ การเพิ่มปริมาณซัลเฟตหรือการลดอัตราส่วนซีโอติต่อซัลเฟตสูงจึงมีผลให้แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเจริญเติบโตได้ดีขึ้น เปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอนหรือสัดส่วนการใช้ซีโอติโดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจึงเพิ่มขึ้น แต่ในช่วงที่อัตราส่วนซีโอติต่อซัลเฟตต่ำ (น้อยกว่า 0.67) อันเป็นช่วงที่ซัลเฟตมีอยู่มากเกินไปแต่มีซีโอติอยู่อย่างจำกัด คือที่ความเข้มข้นซัลเฟตในน้ำเข้าเท่ากับ 840 มก./ล. (อัตราส่วนซีโอติต่อซัลเฟตเท่ากับ 0.6) แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตซึ่งมีความสามารถในการเจริญเติบโตได้ดีกว่าสามารถเจริญเติบโต

ได้ดีขึ้นเนื่องจากไม่ถูกจำกัดจากซิลเฟต ซีโอดีจะกลายเป็นตัวจำกัดการเจริญเติบโตแทน ทำให้การ
แข่งขันเพื่อแย่งใช้ซีโอดีกับแบกทีเรียสร้างมีเทนจึงเกิดขึ้นอย่างรุนแรง แต่จากความสามารถในการ
ใช้สารอาหารของแบกทีเรียรีดิวซ์ซิลเฟตที่ดีกว่า แบกทีเรียรีดิวซ์ซิลเฟตจึงมีส่วนในการใช้ซีโอดี
เพิ่มขึ้นมากกว่าที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซิลเฟตสูง แต่อย่างไรก็ตาม แม้จะมีปัจจัยหลายประการที่ช่วย
สนับสนุนแบกทีเรียรีดิวซ์ซิลเฟตให้เอาชนะแบกทีเรียรีดิวซ์ซิลเฟตในการแย่งใช้ซีโอดี แต่แบกทีเรีย
รีดิวซ์ซิลเฟตก็ไม่สามารถแย่งใช้ซีโอดีได้ทั้งหมด 100 % ซีโอดีส่วนหนึ่งยังคงถูกใช้โดยแบกทีเรีย
สร้างมีเทน ดังนั้นแม้ว่าปัจจัยทางเทอร์โมไดนามิกส์และโคเนติกจะแสดงว่าแบกทีเรียรีดิวซ์ซิลเฟต
สามารถเจริญเติบโตได้ดีกว่า แต่ความแตกต่างทางเทอร์โมไดนามิกส์และโคเนติก ระหว่าง
แบกทีเรียทั้งสองพวกไม่ได้แตกต่างกันอย่างมากมาย ไม่เหมือนกับกรณีของการมีออกซิเจนหรือมี
ไนเตรตอยู่ในระบบที่ค่าทางเทอร์โมไดนามิกส์และโคเนติกมีค่าสูงกว่าหลายเท่า ดังนั้นการมีซิล-
เฟตอยู่ในระบบอยู่มากเกินพออาจทำให้แบกทีเรียสร้างมีเทนใช้ซีโอดีได้น้อยลงมากแต่ก็เป็นการ
ยากที่จะทำให้แบกทีเรียสร้างมีเทนไม่สามารถใช้ซีโอดีเลย ซึ่งในงานวิจัยหลายต่อหลายงานก็ยังคง
พบ activity ของแบกทีเรียสร้างมีเทนอยู่แม้จะมีซิลเฟตมากเกินพอก็ตาม (Smul และ Verstraete;
1999, Omil และคณะ; 1997, Omil และคณะ; 1996, Callado และ Foresti; 1992)

เมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนชนิดของสารอาหาร พบว่าสัดส่วนการใช้ซีโอดีโดยแบกทีเรียทั้ง
สองชนิดมีแนวโน้มที่แปลกออกไป โดยการเปลี่ยนชนิดของสารอาหารในถังปฏิกรณ์ที่มีซิลเฟตเข้า
42 และ 84 มก./ล. พบว่าการใช้ซีโอดีของแบกทีเรียรีดิวซ์ซิลเฟตมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย จาก 6.4
และ 12.7 % เหลือ 4.6 และ 9.5 % ตามลำดับ แต่ในถังปฏิกรณ์ที่มีซิลเฟต 840 มก./ล. สัดส่วน
การใช้ซีโอดีของแบกทีเรียรีดิวซ์ซิลเฟตกลับมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 79.2 % เป็น 85 % ดังแสดงในรูปที่
4.15 การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอาจถือได้ว่าเล็กน้อย แต่ก็บ่งชี้ถึงแนวโน้มอันเกิดจากการเปลี่ยน
ชนิดของสารอาหารได้

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 แบกทีเรียรีดิวซ์ซิลเฟตสามารถย่อยสลายกรดอินทรีย์บาง
ตัวที่มีคาร์บอนอะตอมไม่สูง ให้เป็นกรดอะซิติกหรือย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ได้ เป็น
คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ตัวอย่างของการย่อยสลายกรดอินทรีย์แสดงในรูปที่
2.20 ซึ่งแบกทีเรียรีดิวซ์ซิลเฟตสามารถย่อยสลายแลกเตตให้เป็นอะซิเตตได้ แต่ในถังปฏิกรณ์ยังมี
แบกทีเรียอีกกลุ่มหนึ่งที่เรียกว่าแบกทีเรียสร้างกรดอะซิติกซึ่งมีความสามารถในการใช้น้ำตาลหรือ
กรดอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ ซึ่งตัวอย่างกระบวนการเฟอร์เมนเตชันของแบกทีเรียสร้างกรดอะซิติก
แสดงในรูปที่ 2.8 ดังนั้นในขั้นตอนของการสร้างกรดอะซิติกจึงเกิดการแข่งขันกันระหว่างแบกที-
เรียสร้างกรดอะซิติกทั่วไปกับแบกทีเรียรีดิวซ์ซิลเฟตเพื่อแย่งใช้ซีโอดีในระบบ และถ้าพิจารณาถึง

ขั้นตอนกระบวนการย่อยสลายกลูโคสด้วยวิถีไกลโคไลซิส ดังแสดงในรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่าการสร้าง NADH เกิดขึ้น ซึ่งแบคทีเรียจะเปลี่ยน NADH เป็น NAD^+ เพื่อนำ NAD^+ กลับไปใช้ใหม่โดยผ่านกระบวนการสร้างก๊าซไฮโดรเจน แต่เมื่อเปลี่ยนมาใช้อะซิเตตเป็นสารอาหาร หากเราพิจารณาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นการย่อยสลายอะซิเตตโดยแบคทีเรียสร้างมีเทนดังแสดงในหัวข้อ 2.3.2 โดยมีรายละเอียดแสดงดังรูปที่ 2.15 หรือปฏิกิริยาการย่อยสลายอะซิเตตโดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตดังแสดงในหัวข้อ 2.4.2 โดยมีรายละเอียดแสดงดังรูปที่ 2.22 และ 2.24 จะพบว่าไม่มีขั้นตอนการสร้างกรดอินทรีย์หรือมีไฮโดรเจนเกิดขึ้นในขั้นตอนใด ๆ เลย แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนชนิดของสารอาหารจากน้ำตาลทรายมาเป็นอะซิเตตทำให้แบคทีเรียสร้างกรดอะซิติก, แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตกลุ่มที่ย่อยสลายไม่สมบูรณ์ และแบคทีเรียที่บริโภคไฮโดรเจน ไม่มีบทบาทในการใช้ซิโอดี และดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนท้ายของหัวข้อ 4.2.1 ว่า แบคทีเรียประเภทไม่ใช้ออกซิเจนได้พลังงานจากการย่อยสลายกลูโคส 1 โมเลกุลเป็นกรดไพรูวิก 2 โมเลกุล เทียบเท่ากับ 2 ATP ได้พลังงานจากการย่อยสลายกรดไพรูวิก 2 โมเลกุลเป็นกรดอะซิติก 2 โมเลกุลอีก 2 ATP และได้พลังงานจากการย่อยสลายกรดอะซิติก 2 โมเลกุลเป็นมีเทนอีก 2 ATP และถ้ารวมไฮโดรเจนอีก 4 โมเลกุลซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนด้วยแล้ว ถ้าถูกย่อยสลายเป็นมีเทนก็จะได้พลังงานอีก 1 ATP ซึ่งจะได้พลังงานรวมทั้งหมด 7 ATP จะเห็นได้ว่าแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดและแบคทีเรียกลุ่มที่บริโภคไฮโดรเจนมีส่วนการใช้พลังงานรวมกันถึง 5 ส่วนจาก 7 ส่วน ดังนั้นผลของการหมักบทบาทของแบคทีเรียสร้างกรดและแบคทีเรียบริโภคไฮโดรเจนประการแรกก็คือ ซิโอดีที่ถูกใช้โดยแบคทีเรียกลุ่มที่บริโภคอะซิเตตจะเพิ่มสูงขึ้น เพราะซิโอดีที่เติมให้กับระบบ 0.5 กก./ลบ.ม.-วันจะถูกใช้โดยแบคทีเรียกลุ่มที่บริโภคอะซิเตตโดยตรง

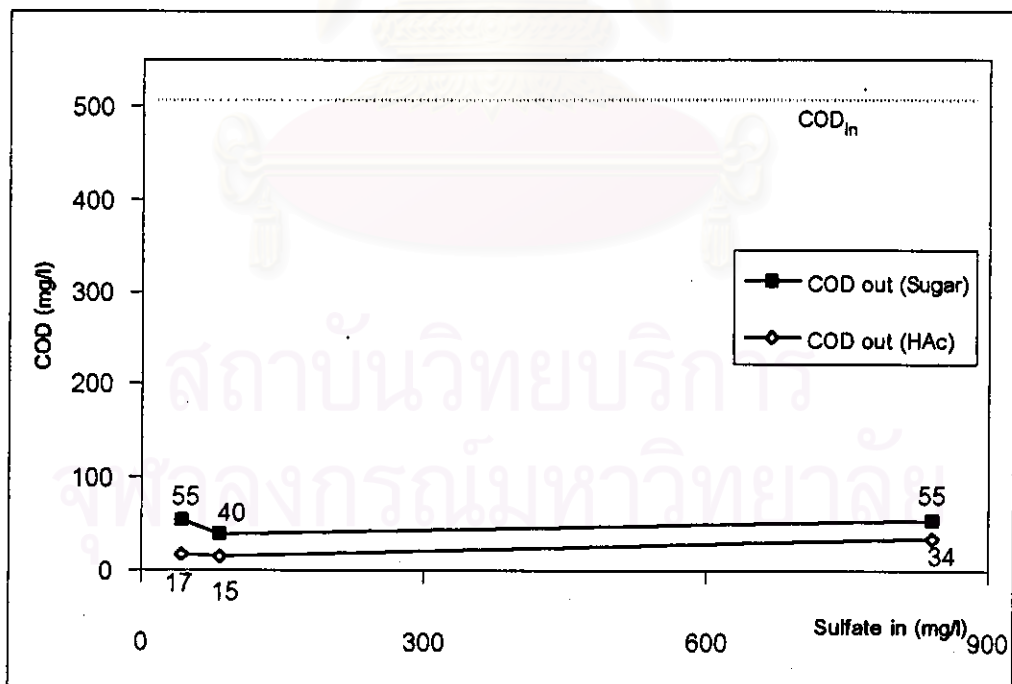
พิจารณาเฉพาะแบคทีเรียที่บริโภคไฮโดรเจนในระบบด้วยกัน ถ้าแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตมีส่วนการใช้ซิโอดีมากกว่าแบคทีเรียสร้างมีเทน การหมักบทบาทของแบคทีเรียทั้ง 2 กลุ่มดังกล่าวอาจทำให้สัดส่วนการใช้ซิโอดีของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตลดลงได้ ดังจะเห็นได้จากการลดลงของเปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอนของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตที่ความเข้มข้นซัลเฟต 42 และ 84 มก./ล. ดังแสดงในรูปที่ 4.15 แต่ในกรณีของถังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตในน้ำเข้า 840 มก./ล. กลับพบว่าแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตมีการใช้ซิโอดีในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอธิบายไม่ได้ด้วยเหตุผลข้างต้น แสดงว่าต้องมีเหตุผลอื่นที่มีอิทธิพลเหนือกว่ามาทำให้แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตใช้ซิโอดีได้ในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น สาเหตุหลักประการแรกที่ทำให้แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตใช้ซิโอดีได้มากขึ้นสันนิษฐานว่าน่าจะมาจากในกรณีที่มีซัลเฟตมากเกินไป แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตไม่ถูกจำกัดจากความเข้มข้นซัลเฟต ดังนั้นเมื่อซิโอดีในรูปอะซิเตตเพิ่มมากขึ้น ด้วยความสามารถในการใช้สารอาหารที่เหนือกว่าแบคทีเรียสร้างมีเทนจึงทำให้แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตใช้ซิโอดีที่เพิ่มขึ้นได้มากกว่า

เปอร์เซ็นต์การไหลอิเล็กทรอนิกส์ของแบกที่เรียรีดิวิซ์ซัลเฟตจึงเพิ่มสูงขึ้น ด้วยเหตุผลเดียวกัน ในกรณีที่ใช้ซีโอดีมากเกินไปและซัลเฟตเป็นตัวจำกัดการเจริญเติบโต แบกที่เรียรีดิวิซ์ซัลเฟตของทั้งสอง การทดลองใช้ซีโอดีได้ในปริมาณที่ใกล้เคียงกันเพราะซัลเฟตในระบบที่ถูกใช้ไปใกล้เคียงกันมาก แต่เมื่อซีโอดีในรูปอะซิเตตเพิ่มขึ้น แบกที่เรียสร้างมีเทนก็จะใช้ซีโอดีส่วนนี้ได้เพิ่มขึ้น ทำให้เปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กทรอนิกส์ของแบกที่เรียสร้างมีเทนเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นเหตุผลอีกประการหนึ่ง นอกเหนือจากการหมักบวมบาทของแบกที่เรียกลุ่มบิริโคาไฮโดรเจน สาเหตุหลักประการที่สอง สันนิษฐานว่าในการทดลองแรกที่ความเข้มข้นซัลเฟต 840 มก./ล. สลัดจ์ตอนล่างของถังปฏิกรณ์มีลักษณะเป็นเม็ด ซึ่งเป็นไปได้ว่าความเข้มข้นของซัลเฟตอาจมีค่าต่ำเนื่องจากเกรเดียนท์ของความเข้มข้น ในขณะที่ซีโอดีจากกรดอินทรีย์ที่ผลิตโดยแบกที่เรียสร้างกรดซึ่งอยู่รอบนอกของเม็ดสลัดจ์ อาจเกิดขึ้นมาก และผ่านเข้าสู่แกนกลางเม็ดของเม็ดสลัดจ์ได้ เป็นเหตุให้แบกที่เรียสร้างมีเทนอาศัยอยู่ได้ในแกนกลางของเม็ดสลัดจ์ แบกที่เรียสร้างมีเทนจึงใช้ซีโอดีได้ส่วนหนึ่ง ในขณะที่สลัดจ์ในการทดลองที่ 2 ไม่พบลักษณะที่เป็นเม็ดในตอนล่างของถังปฏิกรณ์ จึงไม่เกิดเกรเดียนท์ความเข้มข้นของซัลเฟตหรือเกิดการจำกัดของซัลเฟตเนื่องจากเกรเดียนท์ลดลง แบกที่เรียสร้างมีเทนจึงสูญเสียข้อได้เปรียบและทำให้แบกที่เรียรีดิวิซ์ซัลเฟตใช้ซีโอดีได้มากขึ้น โดยไม่เกี่ยวกับแบกที่เรียบิริโคาไฮโดรเจนในระบบ เพราะในงานวิจัยที่ผ่านมาหลายต่อหลายงาน (Lovley, 1982 อ้างถึงใน Visser, 1994; Visser, 1994; Omil, 1997) ต่างก็ได้ผลสรุปที่ตรงกันว่าไฮโดรเจนในระบบถูกใช้โดยแบกที่เรียรีดิวิซ์ซัลเฟตทั้งหมดในกรณีที่มีซัลเฟตมากเกินไป นอกจากนั้นในกรณีที่มีซัลเฟตมากเกินไป แบกที่เรียรีดิวิซ์ซัลเฟตสามารถแข่งขันกับแบกที่เรียสร้างกรดอะซิติกได้ ทำให้กรดอินทรีย์ที่เกิดจากการย่อยสลายน้ำตาลทรายส่วนใหญ่ถูกย่อยสลายเป็นอะซิเตตและไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยไม่มีไฮโดรเจนเกิดขึ้น ไฮโดรเจนจึงไม่น่าจะเป็นสารอินเทอร์มีเดียที่สำคัญ

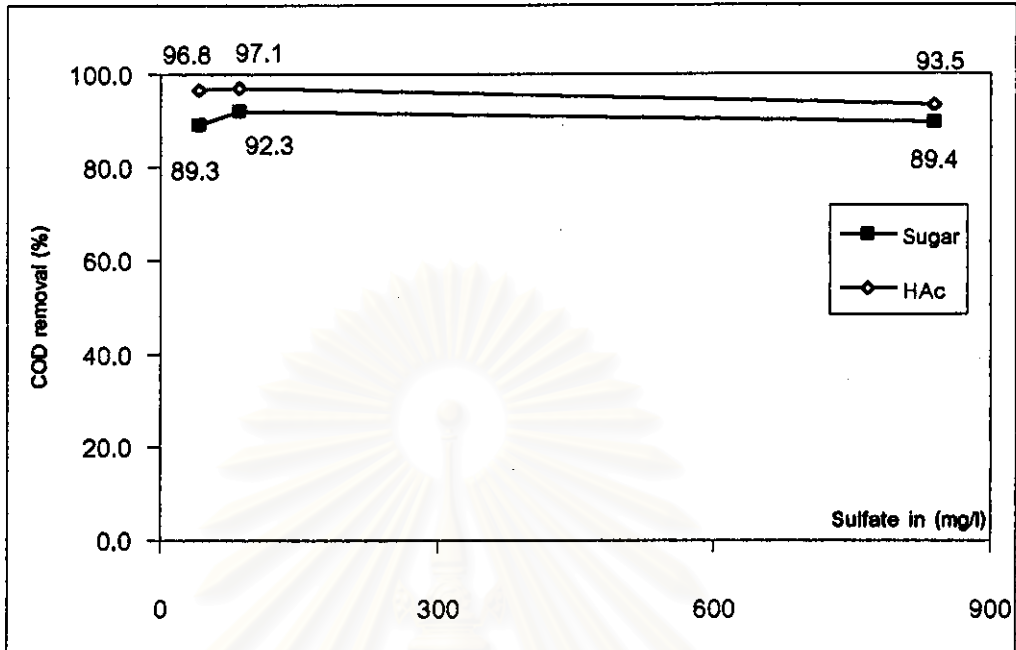
สาเหตุรองลงมาที่อาจมีผลทำให้เปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กทรอนิกส์เปลี่ยนแปลงไป ได้แก่พีเอชในระบบที่เพิ่มสูงขึ้นในการทดลองที่ 2 เพราะในการทดลองที่ 2 พีเอชน้ำออกเพิ่มขึ้นเป็น 7.33 เมื่อเทียบกับการทดลองแรกซึ่งพีเอชในระบบเป็น 6.84 ซึ่งจากงานวิจัยของ Visser และคณะ (1993b อ้างถึงใน Visser, 1994; 11) ได้กล่าวไว้ว่าที่พีเอชสูงขึ้นกระบวนการซัลเฟตรีดักชันจะกลายเป็นกระบวนการที่โดดเด่น แต่ยิ่งพีเอชเข้าใกล้ค่าพีเอชที่เป็นกลางแบกที่เรียสร้างมีเทนก็สามารถแข่งขันกับแบกที่เรียรีดิวิซ์ซัลเฟตได้มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ส่วนสาเหตุอีกประการหนึ่งอาจมาจากปริมาณซัลไฟด์ทั้งหมดที่สูงขึ้นจาก 176 มก./ล. เป็น 200 มก./ล. ซึ่งอาจทำให้แบกที่เรียสร้างมีเทนถูกยับยั้งมากขึ้นในการทดลองที่ 2 แต่เหตุผลที่กล่าวมาทั้งหมดยังเป็นเพียงข้อสันนิษฐานเท่านั้น อาจมีเหตุผลอื่นที่ตักว่าหรืออธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ชัดเจนกว่า แต่ยังเป็นสิ่งที่ต้องศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

4.3.3 ซีไออดีและประสิทธิภาพการกำจัดซีไออดี

จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 ดังแสดงในหัวข้อ 4.1 พบว่าค่าซีไออดีในน้ำออกมีค่าอยู่ระหว่าง 17 - 55 มก./ล. ประสิทธิภาพการกำจัดซีไออดีมีค่าสูงโดยอยู่ระหว่าง 89.4 - 97.2 % ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 4.16 และ 4.17 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่าซีไออดีเฉลี่ยของน้ำเสียเข้าระบบ, ค่าซีไออดีเฉลี่ยในน้ำออก และประสิทธิภาพการกำจัดซีไออดีในแต่ละถังปฏิกรณ์ มีค่าใกล้เคียงกันมากแม้ว่าความเข้มข้นซัลเฟตในน้ำเสียจะเปลี่ยนแปลงไป ทั้งในชุดการทดลองเดียวกันหรือต่างชุดการทดลอง โดยประสิทธิภาพการกำจัดซีไออดีที่ต่ำสุดยังมีค่าสูงถึง 89 เปอร์เซ็นต์แม้จะเป็นระบบไม่ใช้ออกซิเจน ทั้งนี้เนื่องจากภาวะบรรทุกลสารอินทรีย์มีค่าต่ำ คือมีค่าประมาณ 0.5 กก. ซีไออดี/ลบ.ม. - วันเท่านั้น เมื่อน้ำเสียเข้าสู่ระบบยูเอเอสบีซึ่งเป็นระบบที่สามารถกักเซลล์ของแบคทีเรียให้อยู่ในระบบได้เป็นจำนวนมากโดยไม่หลุดไปกับน้ำออก ปริมาณอาหารที่เข้ามาเมื่อเทียบกับจำนวนเซลล์แบคทีเรียที่มีอยู่จึงมีค่าต่ำ แบคทีเรียในระบบจึงสามารถกินสารอินทรีย์ที่เข้ามาในระบบได้ทัน ดังนั้นระบบจึงมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง สามารถลดค่าซีไออดีให้มีค่าต่ำได้ ซึ่งสาเหตุที่ทำให้แบคทีเรียในระบบทำงานได้เป็นอย่างดีนั้น เป็นเพราะระบบทำงานอยู่ในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม ไม่ว่าจะเป็นอุณหภูมิและพีเอชที่ถูกควบคุมให้ไม่สูงหรือต่ำจนเกินช่วงการ



รูปที่ 4.16 ค่าซีไออดีที่ความเข้มข้นซัลเฟตต่าง ๆ



รูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่ความเข้มข้นซัลเฟตต่าง ๆ

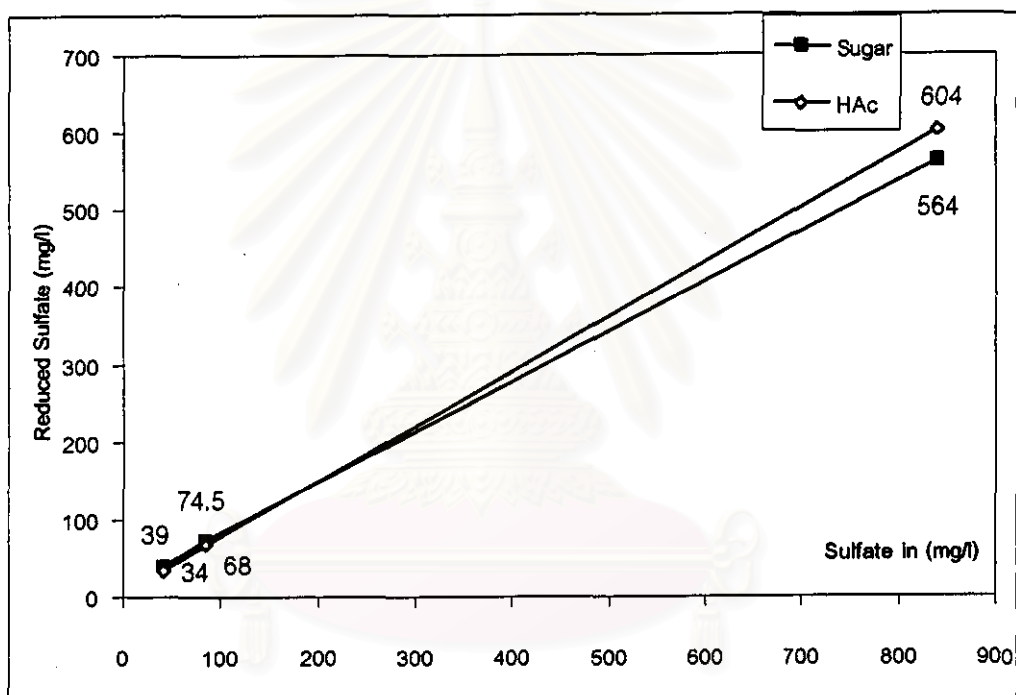
ทำงานที่ดี มีการเติมธาตุอาหารที่จำเป็นอย่างครบถ้วน เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส หรือโลหะหนักที่จำเป็น เป็นต้น นอกจากนั้นประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่สูงยังมีสาเหตุมาจากการคิดประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีจากซีโอดีละลายที่ใส่ซัลไฟด์ออกแล้ว ดังนั้นตะกอนแขวนลอย, ซัลไฟด์ หรือซีโอดีจากก๊าซละลายน้ำจึงไม่ส่งผลกระทบต่อซีโอดีที่นำมาคิดแต่อย่างใด นอกจากนั้น เมื่อพิจารณาซีโอดีในน้ำออกพร้อมกับเปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอนแล้ว พบว่าแม้แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจะเป็นแบคทีเรียกลุ่มหลักในการใช้ซีโอดีก็ไม่ได้ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีลดลงแต่ประการใด แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการใช้ซีโอดีของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตได้เป็นอย่างดี

4.3.4 ซัลเฟตและซัลไฟด์

เนื่องจากซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นทั้งในการทดลองที่ 1 และ 2 มาจากซัลเฟตที่ถูกรีดิวซ์ ดังนั้นจึงอภิปรายทั้งซัลเฟตและซัลไฟด์รวมในหัวข้อเดียวกัน แต่การพิจารณาสามารถแยกออกตามตัวแปรต่าง ๆ ได้เป็น

1) ปริมาณซัลเฟตที่ถูกรีดิวซ์

ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น การเพิ่มความเข้มข้นซัลเฟตในน้ำเข้าจะทำให้แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตสามารถแย่งใช้ซัลไฟด์ได้มากขึ้น ซัลไฟด์จึงถูกนำไปใช้ในการรีดิวซ์ซัลเฟตให้เป็นซัลไฟด์ได้มากขึ้น ปริมาณซัลเฟตที่ถูกรีดิวซ์สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.18 ซึ่งจะช่วยให้แสดงถึงผลกระทบของความเข้มข้นซัลเฟตเป็นอย่างดี โดยจะเห็นได้ว่าปริมาณซัลเฟตที่ถูกรีดิวซ์มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นซัลเฟตเพิ่มขึ้น



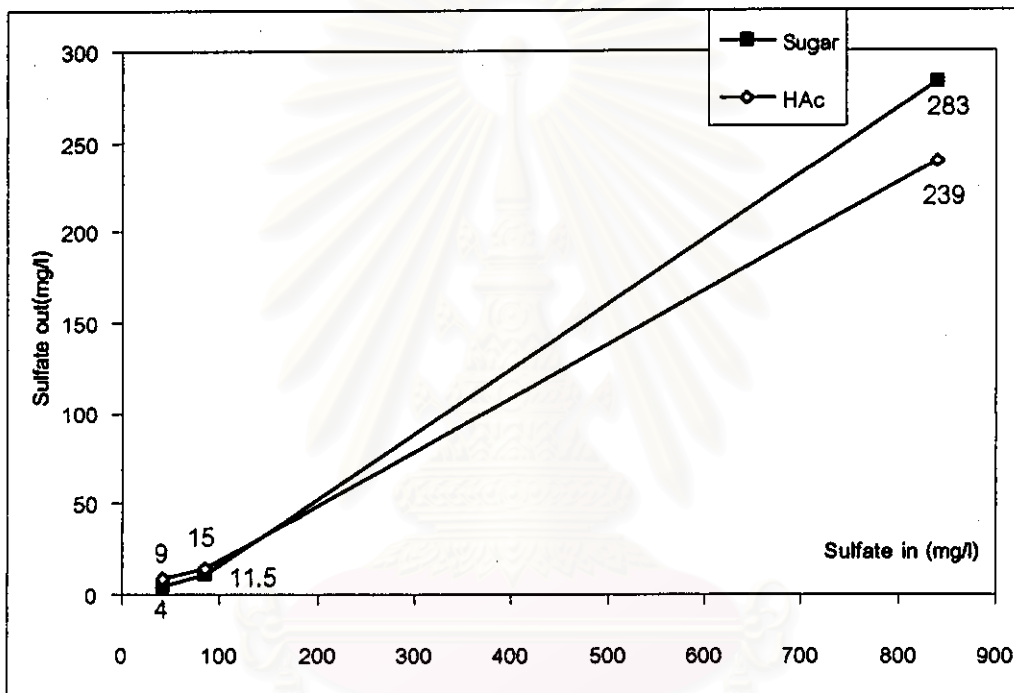
รูปที่ 4.18 ปริมาณซัลเฟตที่ถูกรีดิวซ์ที่ความเข้มข้นซัลเฟตต่าง ๆ

พิจารณาถึงชนิดของสารอาหารที่เปลี่ยนไป พบว่าการเปลี่ยนสารอาหารจากน้ำตาลเป็นอะซิเตตที่มีผลต่อปริมาณซัลเฟตที่ถูกรีดิวซ์เพียงเล็กน้อย โดยปริมาณซัลเฟตที่ถูกรีดิวซ์ที่ความเข้มข้นซัลเฟต 42 และ 84 มก./ล. มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณซัลเฟตเพิ่มขึ้น แต่ลดลงในปริมาณที่น้อยจนอาจถือได้ว่าไม่มีนัยสำคัญ ส่วนที่ความเข้มข้นซัลเฟต 840 มก./ล. ปริมาณซัลเฟตที่ถูกรีดิวซ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เหตุผลที่ปริมาณซัลเฟตที่ถูกรีดิวซ์เพิ่มขึ้นเป็นเช่นเดียวกับที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.4.3 กล่าวคือ การเปลี่ยนสารอาหารเป็นอะซิเตตทำให้ซัลไฟด์ที่ถูกใช้โดยแบคทีเรียบริเวณอะซิเตตเพิ่มขึ้น และที่ความเข้มข้นซัลเฟตสูงแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตมีซัลเฟต

ไม่จำกัด จึงสามารถใช้ซีโอดีรีดิวซ์ซัลเฟตได้มากขึ้น ปริมาณซัลเฟตที่ถูกรีดิวซ์จึงมีค่าเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อย

2) ปริมาณซัลเฟตในน้ำออก

ถ้ามองถึงปริมาณซัลเฟตในน้ำออก จะพบว่าเมื่อปริมาณซัลเฟตในน้ำเข้าเพิ่มขึ้น ปริมาณซัลเฟตในน้ำออกก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม ดังแสดงในรูปที่ 4.19

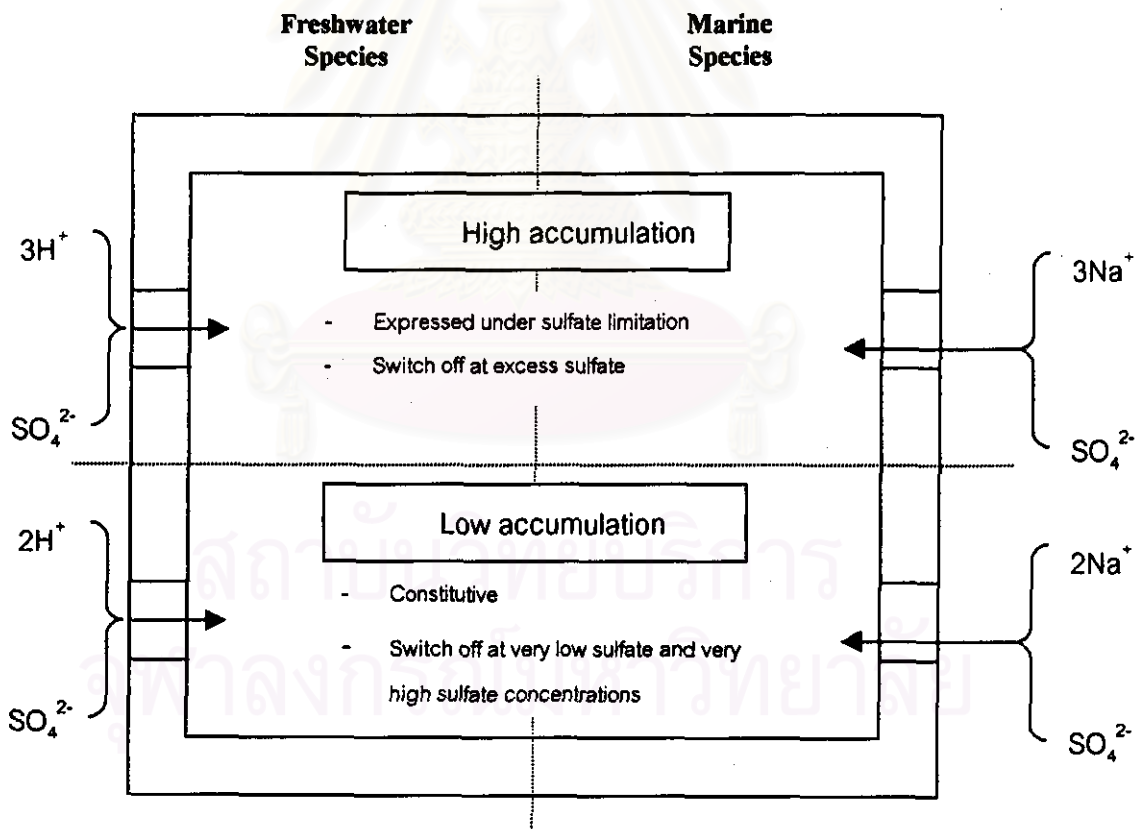


รูปที่ 4.19 ปริมาณซัลเฟตในน้ำออกที่ความเข้มข้นซัลเฟตต่าง ๆ

รูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นว่ายิ่งเพิ่มปริมาณซัลเฟตให้กับระบบหรือยิ่งลดอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตลง ปริมาณซัลเฟตในน้ำออกก็จะยิ่งมากขึ้น การพิจารณาต้องแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตน้อยกว่า 0.67 ซึ่งเป็นช่วงที่ซัลเฟตในระบบมีมากเกินไป ทำให้ซีโอดีถูกใช้หมดก่อนซัลเฟต การรีดิวซ์ซัลเฟตจะเกิดขึ้นได้มากหรือน้อยจึงขึ้นอยู่กับซีโอดีเป็นสำคัญ ดังนั้นในช่วงนี้ซัลเฟตจะต้องเหลือออกมามากเป็นปกติ แต่ในช่วงที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตมีมากกว่า 0.67 อันเป็นช่วงที่ซีโอดีในระบบมีมากเกินไปสำหรับแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต ทั้ง ๆ ที่แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตมีความสามารถในการใช้ซีโอดีได้ดีกว่าแบคทีเรียสร้างมีเทน แต่ก็ไม่สามารถแย่งใช้ซีโอดีมารีดิวซ์ซัลเฟตจนความเข้มข้นของซัลเฟตเป็นศูนย์ได้ แม้ว่าจะเพิ่มอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต

ให้มากขึ้น ก็ยังคงมีซัลเฟตในน้ำออกเหลืออยู่เสมอ ซึ่งในงานวิจัยหลาย ๆ งานก็แสดงผลที่คล้ายคลึงกัน ยกตัวอย่างเช่น Isa Z และคณะ (1986a และ b), Harada และคณะ (1994) และ Fang, H.H.P. และคณะ (1997) เป็นต้น ในขณะนี้ยังไม่สามารถหาเหตุผลที่ชัดเจนมาอธิบายการเพิ่มขึ้นของซัลเฟตในน้ำออกได้ แต่สันนิษฐานว่าความเข้มข้นของซัลเฟตในน้ำออกจะเหลืออยู่ปริมาณหนึ่งเสมอ ปริมาณที่เหลืออยู่นี้เป็นปริมาณต่ำสุดที่แบคทีเรียจะดึงเข้าไปใช้ภายในเซลล์ได้ และเมื่อปริมาณซัลเฟตในระบบเพิ่มขึ้น แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจะใช้ซัลเฟตในปริมาณที่มากขึ้นแต่ก็จะใช้ในลักษณะที่ฟุ่มเฟือยมากขึ้นด้วย

การขนส่งซัลเฟตเข้าสู่เซลล์ในขณะที่มีซัลเฟตมากเกินไปในขณะที่มีซัลเฟตมีอยู่อย่างจำกัดจะแตกต่างกันค่อนข้างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 การขนส่งซัลเฟตเข้าสู่เซลล์ (Heribert Cypionka; *Sulfate-reducing Bacteria*, 1995, p.162)

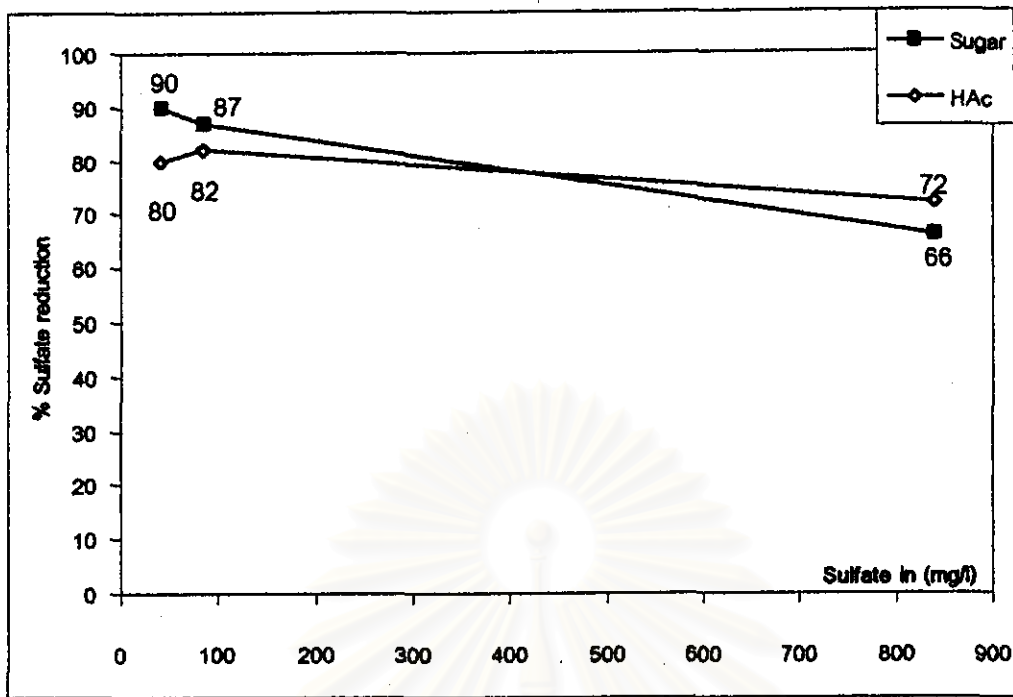
จากรูปที่ 4.20 จะเห็นว่า กรณีที่มีซัลเฟตในระบบอย่างจำกัด การดึงซัลเฟตเข้าสู่เซลล์ 1 อีออนจะเกิดขึ้นพร้อมกับการดึงไฮโดรเจนอีออนเข้าสู่เซลล์ 3 อีออน ซึ่งการดึงสารเข้าสู่เซลล์จำเป็นต้องใช้พลังงาน พลังงานที่ใช้ในการดึงซัลเฟตเข้าสู่เซลล์สามารถดูได้จากการโปรตอนที่น่าหายไป เพราะปริมาณโปรตอนรอบ ๆ เซลล์แสดงให้เห็นถึงพลังงานที่เซลล์เก็บสะสมไว้ในรูปของ proton motive force ถ้าโปรตอน 3 ตัวสามารถสร้าง ATP ได้ 1 ATP แสดงว่าการดึงซัลเฟตเข้าสู่เซลล์ต้องใช้พลังงานเท่ากับ 1 ATP แต่ในกรณีที่มีซัลเฟตมีอยู่มากเกินพอ ซัลเฟตถูกดึงเข้าสู่เซลล์พร้อมกับโปรตอนเพียง 2 ตัว แสดงว่าพลังงานที่ใช้ในการดึงซัลเฟตเข้าสู่เซลล์ในกรณีนี้มีค่าเพียง $2/3$ ATP หรือใช้พลังงานเพียง $2/3$ เท่าของกรณีที่มีซัลเฟตจำกัด แต่การอธิบายปริมาณซัลเฟตในน้ำออกที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณซัลเฟตด้วยเหตุผลที่ว่าแบกทีเรียใช้ซัลเฟตหุ้มเพียงขึ้น อาจเป็นเหตุผลที่ไม่ดีนัก แต่ก็พอจะทำให้เห็นภาพได้อย่างคร่าว ๆ ว่าปริมาณซัลเฟตในระบบมีผลต่อพลังงานที่ใช้ในการดึงซัลเฟตเข้าสู่เซลล์จริง ส่วนเหตุผลที่แท้จริงนั้นยังคงต้องศึกษาต่อกันต่อไป

จากผลข้างต้นทำให้เราพอจะสรุปได้ว่า การใช้แบกทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตโดยมีจุดประสงค์หลักเพื่อลดปริมาณซัลเฟตให้เหลือต่ำมากด้วยระบบชีวะแบบไร้อากาศไม่สามารถทำได้ เพราะนอกจากซัลเฟตในน้ำออกจะมีค่าสูงขึ้นตามซัลเฟตที่เข้าแล้ว ซัลเฟตที่น่าหายไปถูกเปลี่ยนไปเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งไฮโดรเจนซัลไฟด์เกือบทั้งหมดก็ยังละลายอยู่ในน้ำ ดังจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 4.3.5 ทำให้ต้องเกิดปัญหาการกำจัดซัลไฟด์ที่ละลายน้ำต่อไปอีก

3) แอปอร์เซ็นต์ซัลเฟตรีดักชัน

ถ้าเรามองในแง่ของความเข้มข้นซัลเฟตที่เปลี่ยนไปที่มีผลต่อแอปอร์เซ็นต์ซัลเฟตรีดักชัน พบว่าแอปอร์เซ็นต์ซัลเฟตรีดักชันมีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลงเมื่อความเข้มข้นซัลเฟตเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.21

การพิจารณาต้องแบ่งออกเป็น 2 ช่วงเช่นเดิม ช่วงแรกคือที่ความเข้มข้นซัลเฟตเท่ากับ 42 และ 84 มก./ล. ซึ่งเป็นช่วงที่ซัลเฟตจำกัด การเพิ่มขึ้นของซัลเฟตในน้ำเข้าทำให้แอปอร์เซ็นต์ซัลเฟตรีดักชันมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ถ้าไม่พิจารณาค่าแอปอร์เซ็นต์ซัลเฟตรีดักชันที่ความเข้มข้นซัลเฟต



รูปที่ 4.21 เปอร์เซนต์ซัลเฟตรีดักชันที่ความเข้มข้นซัลเฟตต่าง ๆ

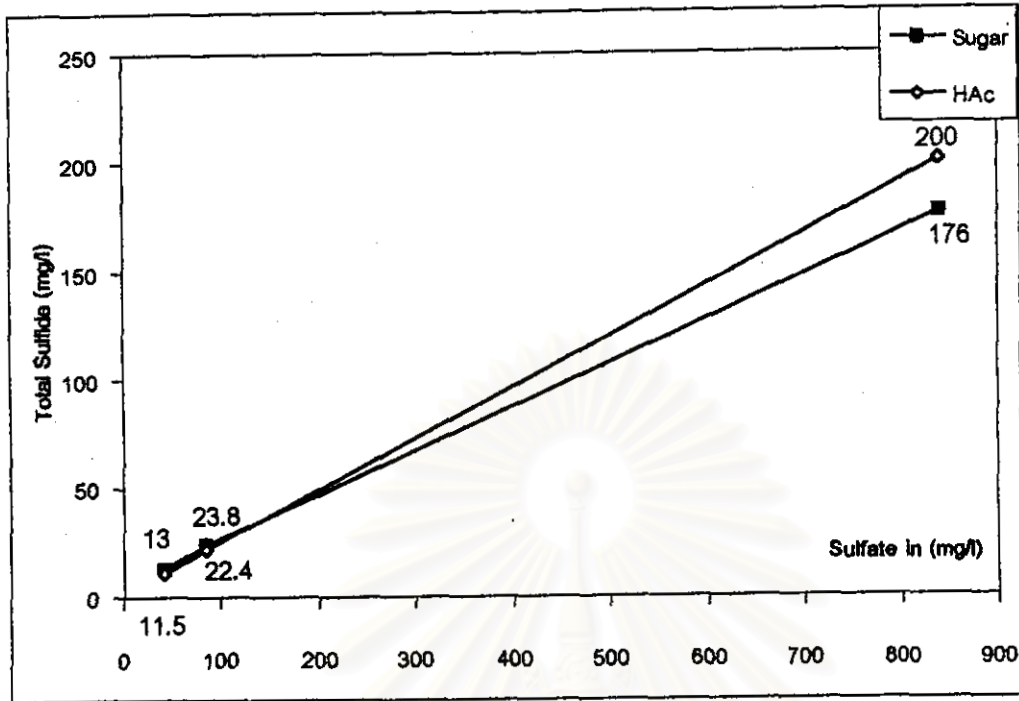
84 มก./ล. ในการทดลองที่สองซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม การลดลงหรือเพิ่มขึ้นของเปอร์เซนต์ซัลเฟตรีดักชันมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้นในช่วงที่มีซีโอติมากเกินพอ ซึ่งอาจมองว่าไม่แตกต่างกันก็ได้ และจากเปอร์เซนต์ซัลเฟตรีดักชันที่ยังคงมีค่าสูง 80 - 90 เปอร์เซนต์ใกล้เคียงกันในขณะที่ซัลเฟตเข้าระบบเพิ่มขึ้น แสดงว่าแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตสามารถแข่งขันซีโอติกับแบคทีเรียกลุ่มอื่นในระบบได้ดีขึ้นเมื่อมีซัลเฟตในระบบมากขึ้น แต่ในช่วงที่ซัลเฟตมีมากเกินพอคือที่ความเข้มข้นซัลเฟต 843 มก./ล. พบว่าเปอร์เซนต์ซัลเฟตรีดักชันมีค่าลดลงมากเมื่อเทียบกับที่ความเข้มข้นซัลเฟต 42 และ 84 มก./ล. แต่ในกรณีนี้ การลดลงของเปอร์เซนต์ซัลเฟตรีดักชันไม่ได้แสดงว่าแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตทำงานได้แย่ง แต่เป็นเพราะซัลเฟตมีมากเกินพอ ซีโอติเป็นตัวจำกัดการทำงานของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต ดังนั้น แม้แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจะใช้ซีโอติในระบบได้ทั้งหมดก็ไม่ทำให้ซัลเฟตในน้ำออกเป็นศูนย์ได้ ซัลเฟตส่วนที่มากเกินพอก็ยังคงมากเกินพออยู่ ทำให้มีซัลเฟตส่วนเกินในน้ำออกมากขึ้น เป็นเหตุให้วัดเปอร์เซนต์ซัลเฟตรีดักชันได้ลดลง ดังนั้นในกรณีที่มีซัลเฟตอยู่มากเกินพอ การดูถึงการทำงานของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตควรจะดูจากปริมาณซัลเฟตที่ถูกใช้ไปต่อซีโอติหรือเปอร์เซนต์การไหลของอิเล็กตรอนจะดีกว่าการพิจารณาจากเปอร์เซนต์ซัลเฟตรีดักชัน

ถ้ามองถึงผลจากการเปลี่ยนแปลงสารอาหาร พบว่าสารอาหารที่เปลี่ยนไปมีผลต่อเปอร์เซ็นต์ซัลเฟตริกซ์ชันไม่มากนัก โดยในช่วงที่ซีไอตีมากเกินพอ พิจารณาถึงการทดลองแรกที่ใช้น้ำตาลทรายเป็นสารอาหาร น้ำตาลทรายจะถูกเปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์ก่อน ทำให้แบคทีเรียรีดิวิวัลเฟตกลุ่มที่สามารถใช้กรดอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ได้ ใช้ซีไอตีได้ก่อนแบคทีเรียสร้างมีเทน การเปลี่ยนสารอาหารจากน้ำตาลทรายเป็นอะซิเตตทำให้แบคทีเรียกลุ่มนี้หมดบทบาทลง นอกจากนี้แบคทีเรียรีดิวิวัลเฟตกลุ่มที่บริโภคไฮโดรเจนซึ่งถือว่าเป็นผู้บริโภคไฮโดรเจนในระบบ (Omil และคณะ, 1997; Mizuno และคณะ, 1994; Visser, 1994; Robinson และ Tiedje, 1984; Lovley และคณะ, 1982) ก็หมดบทบาทในการแย่งใช้ซีไอตีด้วยเช่นกัน จึงอาจเป็นเหตุที่ทำให้เปอร์เซ็นต์ซัลเฟตริกซ์ชันลดต่ำลงเล็กน้อย ส่วนในช่วงที่ซัลเฟตมากเกินพอ การเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์เซ็นต์ซัลเฟตริกซ์ชันอธิบายได้ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.3.2 คือการเปลี่ยนสารอาหารเป็นอะซิเตตทำให้แบคทีเรียรีดิวิวัลเฟตมีซีไอตีให้ใช้มากขึ้น จึงสามารถรีดิวิวัลเฟตได้มากกว่าเดิม เปอร์เซ็นต์ซัลเฟตริกซ์ชันจึงเพิ่มสูงขึ้น

4) ปริมาณซัลไฟด์ทั้งหมด

ปริมาณซัลไฟด์ทั้งหมดสัมพันธ์กับปริมาณซัลเฟตที่ถูกรีดิวิวัลอย่างแนบแน่น เพราะปริมาณซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในระบบก็คือปริมาณซัลเฟตที่ถูกรีดิวิวัลไปนั่นเอง ถ้าพิจารณาถึงผลจากความเข้มข้นของซัลเฟต พบว่าการเพิ่มขึ้นของซัลเฟตในน้ำเข้าทำให้สัดส่วนการใช้ซีไอตีของแบคทีเรียรีดิวิวัลเฟตเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ปริมาณซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นเพิ่มขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.22

และถ้าพิจารณาถึงผลจากการเปลี่ยนแปลงชนิดของสารอาหาร พบว่าการเปลี่ยนชนิดสารอาหารจากน้ำตาลทรายเป็นอะซิเตตจะได้ผลในลักษณะเดียวกันกับปริมาณซัลเฟตที่ถูกรีดิวิวัล เหตุผลที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงปริมาณซัลไฟด์อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนสารอาหารก็เป็นเหตุผลเดียวกัน คือ ซีไอตีมากเกินพอ ความเข้มข้นของซัลไฟด์ทั้งหมดใกล้เคียงกันมากจนอาจถือได้ว่าไม่มีนัยสำคัญ เพราะซัลเฟตเป็นตัวจำกัดการใช้สารอาหาร ดังนั้นแม้ซีไอตีที่แบคทีเรียรีดิวิวัลเฟตสามารถใช้ได้จะเพิ่มมากขึ้นก็ไม่ทำให้ซัลไฟด์เพิ่มขึ้นแต่ประการใด ตรงข้ามกับช่วงที่ซัลเฟตมากเกินพอ เมื่อซีไอตีที่แบคทีเรียรีดิวิวัลเฟตสามารถใช้ได้เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ซัลเฟตถูกรีดิวิวัลเพิ่มขึ้น และได้ปริมาณซัลไฟด์เพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 4.22 ซัลไฟด์ทั้งหมดในน้ำออกที่ความเข้มข้นของซัลเฟตต่าง ๆ

5) สัดส่วนของซัลไฟด์ในรูปต่าง ๆ

จากข้อมูลในตาราง 4.2, 4.3 และ 4.4 ทำให้เราทราบถึงปริมาณซัลไฟด์ละลายน้ำไม่แตกตัวได้ โดยคำนวณจาก

$$[H_2S_{(aq)}]/TS = (1 + K_1/10^{-pH})^{-1}$$

ค่า K_1 คือค่าคงที่ของการแตกตัวของไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายน้ำที่ไม่แตกตัว ซึ่งมีค่าเท่ากับ 9.77×10^{-8} ที่ 25°C

ในการทดลองที่ 1:

ที่ความเข้มข้นซัลเฟตเท่ากับ 42 มก./ล. พีเอชเฉลี่ยในน้ำออกเท่ากับ 6.30

$$\begin{aligned} [H_2S_{(aq)}] &= (1 + 9.77 \times 10^{-8} / 10^{-6.3})^{-1} \times 13 \\ &= 0.837 \times 13 \end{aligned}$$

$$= 10.88 \text{ มก./ล. as S}$$

ในน้ำออกมีซัลไฟด์ละลายน้ำไม่แตกตัวคิดเป็น 83.7 % ของซัลไฟด์ทั้งหมด

ที่ความเข้มข้นซัลเฟตเท่ากับ 84 มก./ล. พีเอชเฉลี่ยในน้ำออกเท่ากับ 6.37

$$\begin{aligned} [\text{H}_2\text{S}_{(\text{aq})}] &= (1 + 9.77 \times 10^{-8} / 10^{-6.37})^{-1} \times 23.8 \\ &= 0.814 \times 23.8 \\ &= 19.36 \text{ มก./ล. as S} \end{aligned}$$

ในน้ำออกมีซัลไฟด์ละลายน้ำไม่แตกตัวคิดเป็น 81.4 % ของซัลไฟด์ทั้งหมด

และที่ความเข้มข้นซัลเฟตเท่ากับ 840 มก./ล. พีเอชเฉลี่ยในน้ำออกเท่ากับ 6.84

$$\begin{aligned} [\text{H}_2\text{S}_{(\text{aq})}] &= (1 + 9.77 \times 10^{-8} / 10^{-6.84})^{-1} \times 176 \\ &= 0.597 \times 176 \\ &= 105 \text{ มก./ล. as S} \end{aligned}$$

ในน้ำออกมีซัลไฟด์ละลายน้ำไม่แตกตัวคิดเป็น 59.7 % ของซัลไฟด์ทั้งหมด

ในการทดลองที่ 2:

ที่ความเข้มข้นซัลเฟตเท่ากับ 42 มก./ล. พีเอชเฉลี่ยในน้ำออกเท่ากับ 7.17

$$\begin{aligned} [\text{H}_2\text{S}_{(\text{aq})}] &= (1 + 9.77 \times 10^{-8} / 10^{-7.17})^{-1} \times 11.5 \\ &= 0.409 \times 11.5 \\ &= 4.7 \text{ มก./ล. as S} \end{aligned}$$

ในน้ำออกมีซัลไฟด์ละลายน้ำไม่แตกตัวคิดเป็น 40.9 % ของซัลไฟด์ทั้งหมด

ที่ความเข้มข้นซัลเฟตเท่ากับ 84 มก./ล. พีเอชเฉลี่ยในน้ำออกเท่ากับ 7.18

$$\begin{aligned}
 [\text{H}_2\text{S}_{(aq)}] &= (1 + 9.77 \times 10^{-8} / 10^{-7.18})^{-1} \times 22.4 \\
 &= 0.403 \times 22.4 \\
 &= 9.04 \text{ มก./ล. as S}
 \end{aligned}$$

ในน้ำออกมีซัลไฟด์ละลายน้ำไม่แตกตัวคิดเป็น 40.3 % ของซัลไฟด์ทั้งหมด

และที่ความเข้มข้นซัลเฟตเท่ากับ 840 มก./ล. พีเอชเฉลี่ยในน้ำออกเท่ากับ 7.33

$$\begin{aligned}
 [\text{H}_2\text{S}_{(aq)}] &= (1 + 9.77 \times 10^{-8} / 10^{-7.33})^{-1} \times 200 \\
 &= 0.324 \times 200 \\
 &= 65 \text{ มก./ล. as S}
 \end{aligned}$$

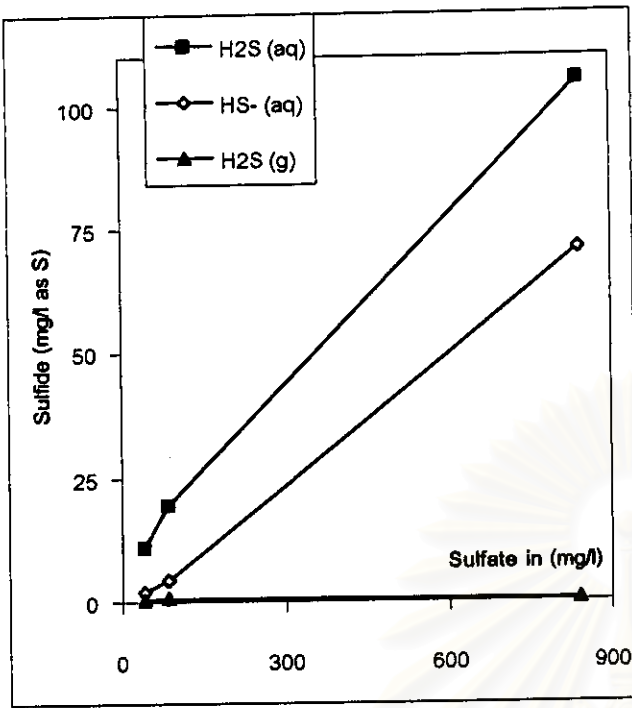
ในน้ำออกมีซัลไฟด์ละลายน้ำไม่แตกตัวคิดเป็น 32.4 % ของซัลไฟด์ทั้งหมด

จากข้อมูลที่คำนวณได้ ทำให้เราทราบถึงปริมาณซัลไฟด์ในรูปต่าง ๆ ที่อยู่ในระบบ ที่ความเข้มข้นซัลเฟตหนึ่ง ๆ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.9

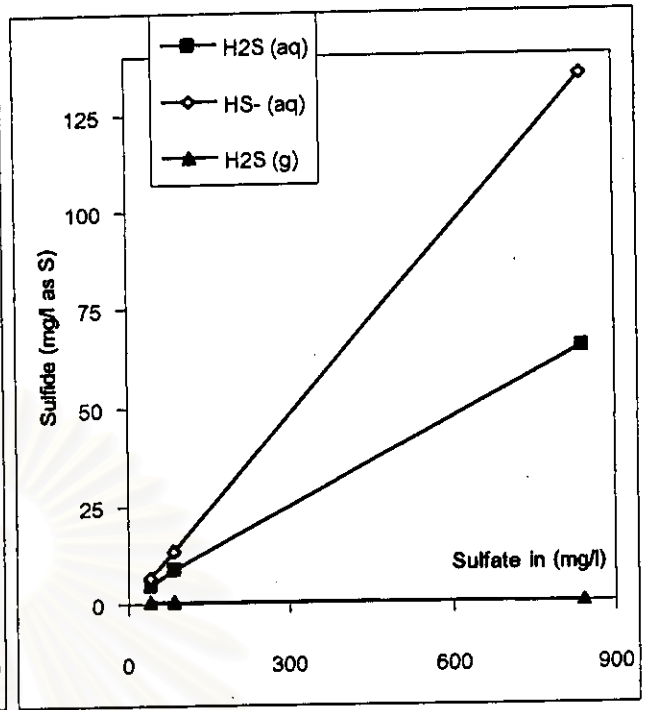
ตารางที่ 4.9 ความเข้มข้นของซัลไฟด์ในรูปต่าง ๆ

ความเข้มข้นซัลเฟต (มก./ล.)	การทดลองที่ 1			การทดลองที่ 2		
	$\text{H}_2\text{S}_{(aq)}$ (มก./ล. as S)	$\text{HS}^-_{(aq)}$ (มก./ล. as S)	$\text{H}_2\text{S}_{(g)}$ (มก./ล. as S)	$\text{H}_2\text{S}_{(aq)}$ (มก./ล. as S)	$\text{HS}^-_{(aq)}$ (มก./ล. as S)	$\text{H}_2\text{S}_{(g)}$ (มก./ล. as S)
42	10.88	2.12	0.51	4.7	6.8	0.3
84	19.36	4.44	0.95	9.04	13.36	0.5
840	105	71	0.28	65	135	0

ข้อมูลจากตารางที่ 4.9 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.23 และ 4.24

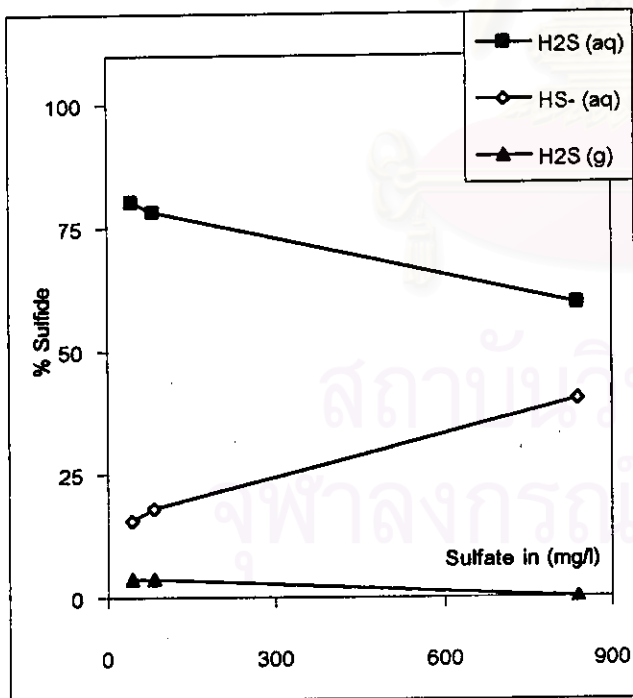


ก. การทดลองที่ 1

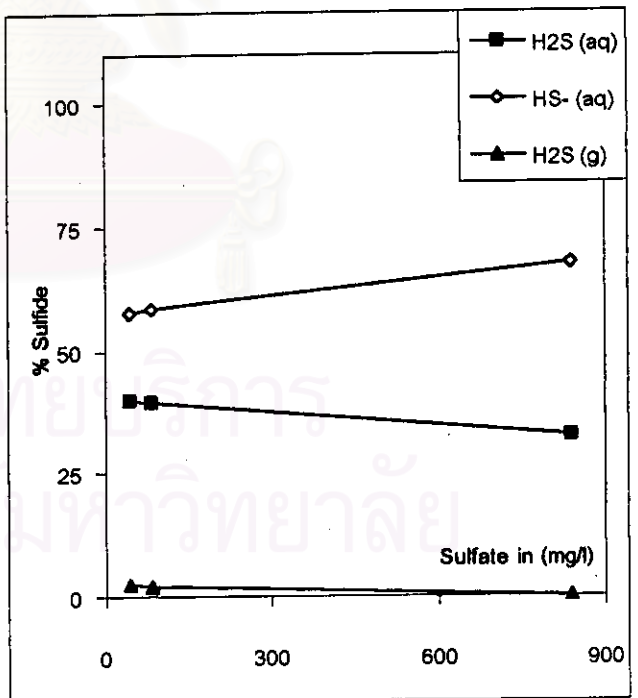


ข. การทดลองที่ 2

รูปที่ 4.23 ซัลไฟด์ในรูปแบบต่าง ๆ ที่แต่ละความเข้มข้นซัลเฟต



ก. การทดลองที่ 1



ข. การทดลองที่ 2

รูปที่ 4.24 เปอร์เซ็นต์ซัลไฟด์ในรูปแบบต่าง ๆ ที่แต่ละความเข้มข้นซัลเฟตหนึ่ง ๆ

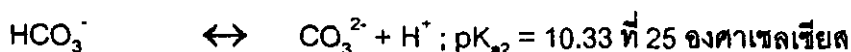
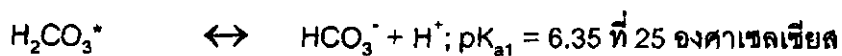
จากรูปที่ 4.23 จะเห็นได้ถึงผลของซัลเฟตในน้ำเข้าที่มีต่อซัลไฟด์ในรูปแบบต่าง ๆ ยิ่งความเข้มข้นซัลเฟตเพิ่มขึ้น ก็ยิ่งทำให้ซัลไฟด์ละลายน้ำทั้งที่แตกตัวและไม่แตกตัวเพิ่มสูงขึ้น อันเป็นผลมาจากปริมาณซัลไฟด์ทั้งหมดที่เพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของซัลเฟต จะทำให้สัดส่วนของซัลไฟด์ละลายน้ำที่ไม่แตกตัว ($\text{H}_2\text{S}^{\text{aq}}$) ต่อซัลไฟด์ละลายน้ำที่แตกตัว (HS^-) เปลี่ยนไป โดยซัลไฟด์ละลายน้ำที่ไม่แตกตัวจะมีสัดส่วนลดลงตามความเข้มข้นซัลเฟตที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นทำให้แบกทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตใช้ซัลไฟด์ได้มากขึ้น และปฏิกิริยารีดิวซ์ซัลเฟตที่เกิดขึ้นเพิ่มสภาพต่างให้กับระบบ เป็นผลให้ระบบมีพีเอชเพิ่มขึ้นเมื่อซัลไฟด์ต่อซัลเฟตลดลง (อธิบายโดยละเอียดในหัวข้อ 4.5) พีเอชที่เพิ่มขึ้นนี้เองที่ทำให้ซัลไฟด์ละลายน้ำแตกตัวได้มากขึ้น ส่วนปริมาณซัลไฟด์หรือเปอร์เซ็นต์ซัลไฟด์ที่อยู่ในรูปก๊าซจะเห็นได้ว่ามีค่าน้อยมากจนแทบไม่มีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบที่ซัลเฟตในน้ำเข้าสูง เพราะมีปริมาณก๊าซเกิดขึ้นน้อยมาก

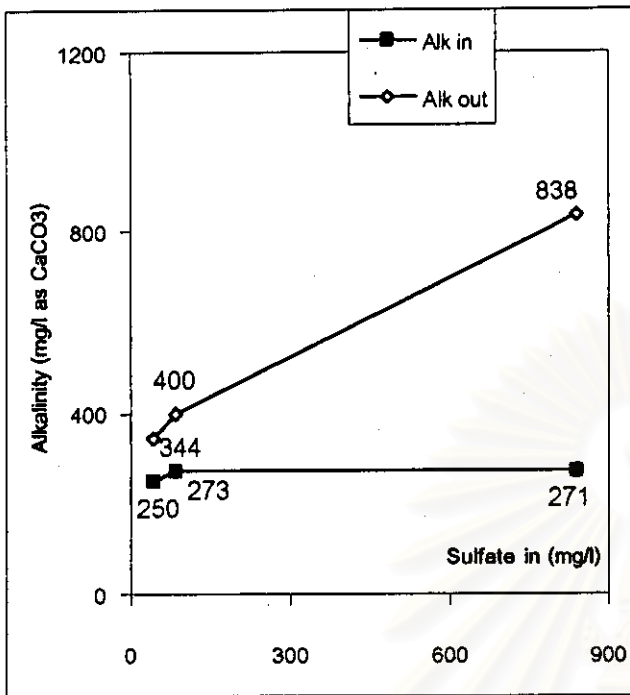
จากค่าสัดส่วนระหว่างซัลไฟด์ละลายน้ำที่ไม่แตกตัวกับไบซัลไฟด์ในน้ำดังแสดงในรูปที่ 4.23 และ 4.24 พบว่าการเปลี่ยนชนิดของสารอาหารจากน้ำตาลเป็นอะซิเตตทำให้สัดส่วนซัลไฟด์ละลายน้ำที่ไม่แตกตัวลดลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากการใช้อะซิเตตเป็นสารอาหารไม่มีขั้นตอนของการสร้างกรด แต่มีการเพิ่มขึ้นของสภาพต่างจากการทำงานของแบกทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบกทีเรียสร้างมีเทน (ดังแสดงในหัวข้อ 4.3.5) พีเอชของระบบจึงเพิ่มขึ้นทำให้ซัลไฟด์ละลายน้ำได้มากขึ้น

4.3.5 พีเอชและสภาพต่าง

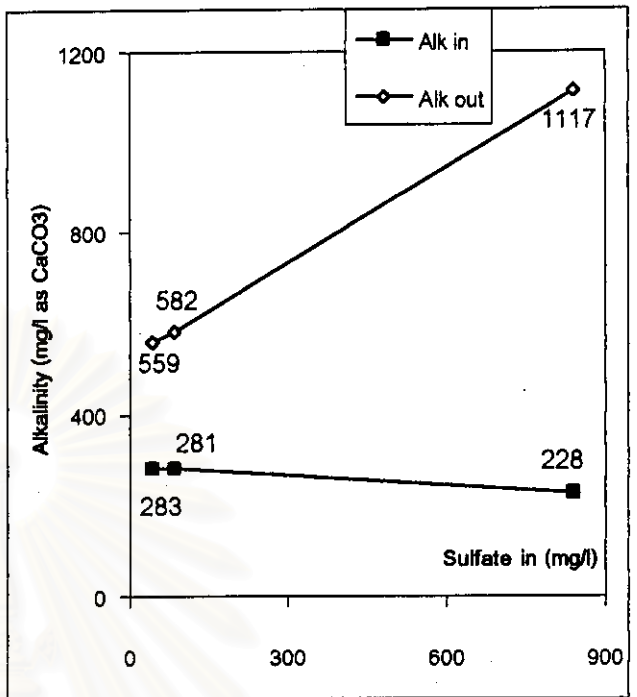
ณ อัตราส่วนซัลไฟด์ต่อซัลเฟตหนึ่ง ๆ สภาพต่างออกจากระบบจะมีค่าสูงกว่าสภาพต่างเข้าระบบเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 4.25 ส่วนพีเอชของน้ำเสียและน้ำออกแสดงดังรูปที่ 4.6

พิจารณาถึงพีเอชและสภาพต่างของน้ำเสียเข้าระบบก่อน พบว่าน้ำเข้ามีพีเอชสูงเนื่องจากการเติมต่างในรูปโซเดียมไบคาร์บอเนตในน้ำเข้าเพื่อรักษาระดับพีเอชในถังปฏิกรณ์ไม่ให้ต่ำเกินไป ซึ่งแสดงดังสมการข้างล่างนี้



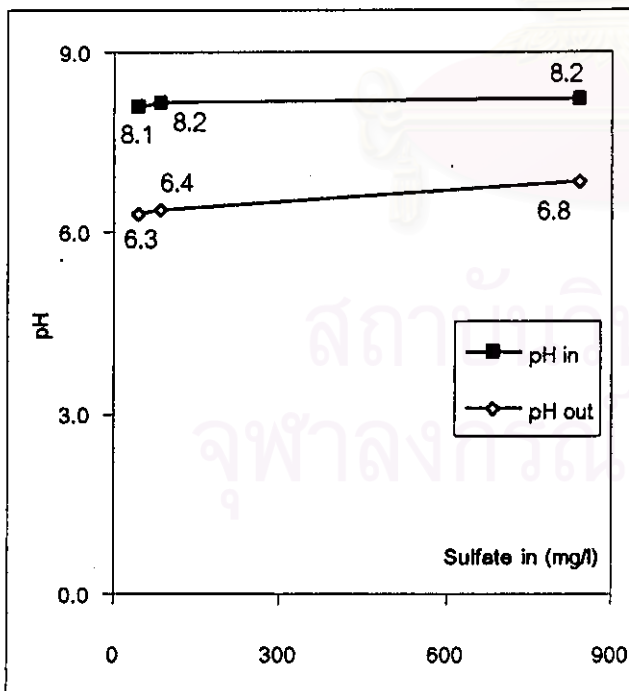


ก. การทดลองที่ 1

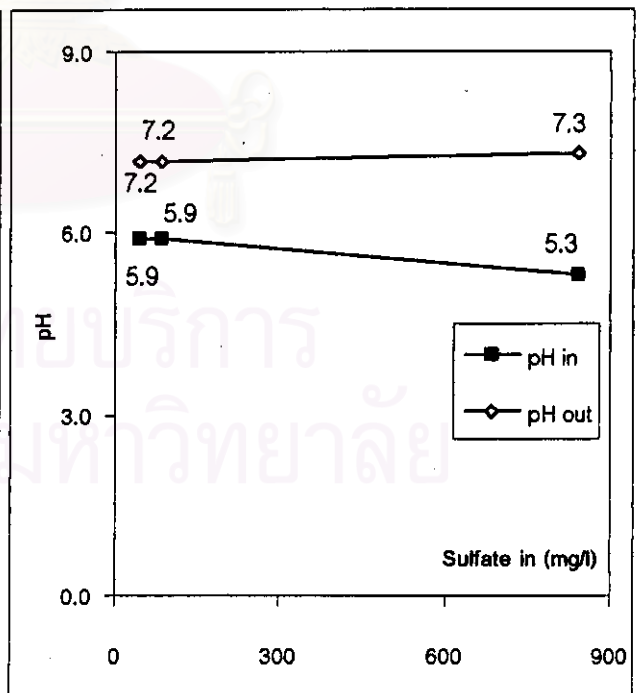


ข. การทดลองที่ 2

รูปที่ 4.25 สภาพต่างในน้ำเสียและน้ำออกที่ความเข้มข้นซัลเฟตต่าง ๆ



ก. การทดลองที่ 1



ข. การทดลองที่ 2

รูปที่ 4.26 พีเอชในน้ำเสียและน้ำออกที่ความเข้มข้นซัลเฟตต่าง ๆ

ยกตัวอย่างการทดลองที่ 1 ในถังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตในน้ำเข้า 84 มก./ล. ซึ่งเดิมต่างในรูปโซเดียมไบคาร์บอเนตลงในน้ำประปา คิดเป็นความเข้มข้นเท่ากับ 273 มก./ล. หินปูน

สมมติว่าน้ำประปามีสภาพต่างและสภาพกรดน้อยมาก และมีพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7
 $\text{CaCO}_3 = 273 \text{ มก./ล.}$ เทียบเท่ากับ $\text{NaHCO}_3 = 273/50,000 = 5.46 \times 10^{-3} \text{ โมล/ล.}$

ในบรรยากาศ คาร์บอนไดออกไซด์มีความดันพาร์เชียล = $10^{-3.5}$ บรรยากาศ

$$[\text{H}_2\text{CO}_3^*] \cong [\text{CO}_{2(\text{aq})}] = K_{\text{H}} P_{\text{CO}_2} = 10^{-1.5} \times 10^{-3.5} = 10^{-5} \text{ โมล/ล.}$$

พิจารณา $[\text{HCO}_3^-]$:

$$K_{a1} = \frac{[\text{H}^+][\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}_2\text{CO}_3^*]}$$

$$[\text{HCO}_3^-] = K_{a1} \times [\text{H}_2\text{CO}_3^*] / [\text{H}^+]$$

$$[\text{HCO}_3^-] = 10^{-6.35} \times 10^{-5} / [\text{H}^+]$$

$$[\text{HCO}_3^-] = 10^{-11.35} / [\text{H}^+]$$

พิจารณา $[\text{CO}_3^{2-}]$:

$$K_{a2} = \frac{[\text{H}^+][\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{HCO}_3^-]}$$

$$[\text{CO}_3^{2-}] = K_{a2} \times [\text{HCO}_3^-] / [\text{H}^+]$$

$$[\text{CO}_3^{2-}] = 10^{-10.33} \times 10^{-11.35} / [\text{H}^+]^2$$

$$[\text{CO}_3^{2-}] = 10^{-21.68} / [\text{H}^+]^2$$

สมดุลมวลของอ็อกอน:

$$[\text{Na}^+] + [\text{H}^+] = [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-]$$

$$5.46 \times 10^{-3} + [\text{H}^+] = 10^{-11.35} / [\text{H}^+] + 2 \times 10^{-21.68} / [\text{H}^+]^2 + 10^{-14} / [\text{H}^+]$$

$$5.46 \times 10^{-3} \times [\text{H}^+]^2 + [\text{H}^+]^3 = 10^{-11.35} \times [\text{H}^+] + 2 \times 10^{-21.68} + 10^{-14} \times [\text{H}^+]$$

$$[H^+]^3 + 5.46 \times 10^{-3} [H^+]^2 - (10^{-11.26} + 10^{-14}) [H^+] - 2 \times 10^{-21.66} = 0$$

แก้สมการได้ $[H^+] = 9.01 \times 10^{-10}$ โมล/ล. ดังนั้นพีเอชของน้ำโดยประมาณเท่ากับ 9.05 โดยในน้ำจะมี:

$$[H_2CO_3^*] = 10^{-6} \text{ โมล/ล.}$$

$$[HCO_3^-] = 4.96 \times 10^{-3} \text{ โมล/ล.}$$

$$[CO_3^{2-}] = 2.57 \times 10^{-4} \text{ โมล/ล.}$$

รวมคาร์บอเนตทั้งหมด 5.22×10^{-3} โมล/ล. จากที่เติมลงไปเป็นรูปไบคาร์บอเนต 5.46×10^{-3} โมล/ล. แสดงให้เห็นว่าบางส่วนของไบคาร์บอเนตที่เติมลงไปกลายเป็นคาร์บอเนตไดออกไซด์หนีออกสู่อากาศได้

จากการคำนวณข้างต้นทำให้ทราบว่า การเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตลงในน้ำที่มีพีเอชเป็นกลางจะทำให้พีเอชของน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณกรดคาร์บอนิกหรือปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำที่ไม่แตกตัวในน้ำถูกควบคุมด้วยความดันพาร์เซิลของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ ซึ่งปกติก็มีค่าประมาณ 10^{-3} โมล/ล.เสมอ ไบคาร์บอเนตที่เติมลงไปจึงแตกตัวเป็นคาร์บอเนตได้มากกว่า ทำให้สภาพต่างของน้ำเพิ่มขึ้นมากกว่าสภาพกรดและทำให้พีเอชสูงขึ้น แต่การคำนวณไม่ได้คำนวณถึงสภาพต่างของน้ำก่อนเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต และยังไม่ได้คิดถึงผลของอิออนต่าง ๆ ที่อยู่ในน้ำ ดังนั้นการคำนวณจึงอาจผิดพลาดจากความเป็นจริงไปบ้าง

พิจารณาถึงการทำงานของแบคทีเรียในระบบไฮดรอกซิเจน ไนโตรเจนของการทดลองที่ 1 ซึ่งใช้น้ำตาลทรายเป็นสารอาหาร แบคทีเรียชนิดแรกที่มักพบมากในการใช้ไฮโดรค็อกซ์คือแบคทีเรียสร้างกรด แบคทีเรียกลุ่มนี้ทำหน้าที่เปลี่ยนน้ำตาลทรายเป็นกรดอินทรีย์ด้วยการปล่อยเอนไซม์ออกนอกเซลล์เพื่อช่วยเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำตาลทราย ทำให้น้ำตาลอยู่ในรูปที่สามารถดึงเข้าสู่เซลล์ได้ น้ำตาลเมื่อถูกขนส่งเข้าสู่เซลล์จะถูกย่อยสลายผ่านกระบวนการเฟอร์เมนเทชันได้กรดอินทรีย์เป็นผลิตภัณฑ์ กรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นส่วนหนึ่งจะแตกตัวให้ไฮโดรเจนอิออนกับเกลือของกรด ไฮโดรเจนอิออนที่เกิดจากการแตกตัวของกรดทำให้สภาพกรดเพิ่มขึ้นและลดสภาพต่างลง ส่วนการแตกตัวของกรดจะเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นกับปริมาณสภาพต่างที่เข้าระบบ ถ้าสภาพต่างเข้าระบบมากปฏิกิริยาระหว่างกรดอินทรีย์กับต่างในน้ำเสียก็จะเกิดขึ้นมาก ผลของปฏิกิริยาก็จะเกิดเกลือของกรดมาก แต่ถ้าสภาพต่างในน้ำเสียมีอยู่น้อย กรดจะอยู่ในรูปกรดละลายน้ำที่ไม่

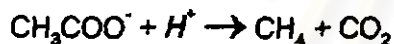
แตกตัวมากกว่าที่อยู่ในรูปของเกลือ ทั้งกรดและเกลือของกรดเองจะถูกย่อยสลายต่อไปโดยแบคทีเรียสร้างมีเทนและแบคทีเรียรีดิคัลซัลเฟต เมื่อพิจารณาถึงพีเอชในน้ำออกที่มีพีเอชเฉลี่ยมากกว่า 6.3 ในการทดลองแรก จากน้ำเข้าซึ่งมีพีเอชประมาณ 8.1 แสดงว่ากรดอะซิติกที่เกิดขึ้นทำปฏิกิริยากับค่างในน้ำเสียที่เข้าระบบเป็นเหตุให้พีเอชของระบบลดลง แต่ค่าพีเอชที่มากกว่า 6.3 ยังแสดงให้เห็นผลของปฏิกิริยาการเปลี่ยนรูปกรดไขมันระเหยว่าจะได้อะซิเตดเป็นผลิตภัณฑ์ มากกว่ากรดอะซิติก โดยพิจารณาจากค่าคงที่การแตกตัวของกรดอะซิติกที่มีค่าเท่ากับ 1.8×10^{-5}

$$K_a = 1.8 \times 10^{-5} = [H^+][Ac^-]/[HAc]$$

$$[Ac^-]/[HAc] = 1.8 \times 10^{-5} / 10^{-8.3}$$

$$[Ac^-]/[HAc] = 36$$

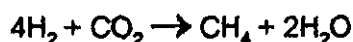
นั่นคือ ที่พีเอช 6.3 ในระบบจะมีอะซิเตดมากกว่ากรดอะซิติกถึง 36 เท่า อะซิเตดที่เกิดขึ้นถ้าถูกใช้ต่อไปโดยแบคทีเรียสร้างมีเทนจะได้ก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ ตามสมการข้างล่างนี้



จากสมการ จะเห็นได้ว่ามีเทนมีไฮโดรเจนอะตอม 4 ตัว แต่อะซิเตดมีไฮโดรเจนอะตอมเพียง 3 ตัว ดังนั้นการสร้างมีเทนจากอะซิเตดจำเป็นต้องดึงไฮโดรเจนอีกอันมาจากระบบ 1 ตัวเพื่อใช้ในการสร้างมีเทน ไฮโดรเจนอีกอันที่ถูกดึงมาใช้ในการสร้างมีเทนนี้เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้พีเอชของระบบเปลี่ยนแปลงไป ไฮโดรเจนอีกอันในระบบมีที่มาจากหลายแหล่ง ได้แก่ กรดอะซิติกแตกตัวให้ไฮโดรเจนอีกอัน, ไบคาร์บอเนตอีกอันแตกตัวให้คาร์บอเนตอีกอันและไฮโดรเจนอีกอัน และน้ำแตกตัวให้ไฮดรอกไซด์อีกอันและไฮโดรเจนอีกอัน ซึ่งในความเป็นจริงเราไม่สามารถระบุได้ว่าไฮโดรเจนอีกอันที่ถูกดึงไปใช้นั้นมาจากแหล่งใด เพราะเราจะทราบได้แต่เพียงว่าแต่ละแหล่งให้ไฮโดรเจนเท่าใดจากค่าคงที่ของการแตกตัวของสารแต่ละชนิด เราทราบถึงปริมาณไฮโดรเจนอีกอันทั้งหมดในระบบจากค่าพีเอช ดังนั้นเราจึงทราบเพียงแต่จะมีการดึงไฮโดรเจนในระบบไปใช้โดยไฮโดรเจนอีกอันเหล่านั้นมีที่มาจากหลาย ๆ แหล่งเท่านั้น

เมื่อไฮโดรเจนในระบบถูกดึงไปใช้ในการสร้างก๊าซมีเทนพร้อม ๆ กับการย่อยสลายอะซิเตด จะทำให้สมดุลของระบบเปลี่ยนแปลงไป สารที่เป็นบัฟเฟอร์ในระบบจะแตกตัวให้ไฮโดรเจนอีกอันออกมาเพิ่มขึ้นเพื่อรักษาสมดุล ซึ่งบัฟเฟอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้ก็คือ โซเดียมไบคาร์บอเนต ทำให้

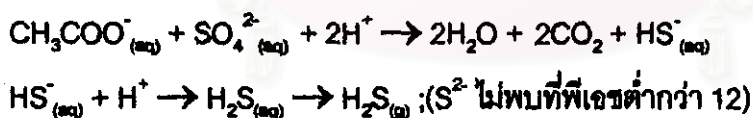
ในระบบมีพีเอชไม่สูงมากเกินไป แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของสภาพต่างในน้ำเสียที่อาจต้องมีการเติมในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อรักษาระดับพีเอชไม่ให้สูงหรือต่ำจนเกินไป เพราะถ้ามีการดึงไฮโดรเจนออกซิเจนไปใช้ในโดยระบบบีโอฟีโอรอยู่ไม่พอเพียง สิ่งที่เกิดขึ้นก็คือการเพิ่มขึ้นของปริมาณไฮดรอกไซด์ออกซิเจนที่อาจทำให้พีเอชของระบบสูงอย่างรวดเร็วจนระบบล้มเหลวได้ ส่วนปฏิกิริยาการสร้างมีเทนจากไฮโดรเจนจะเกิดขึ้นตามสมการข้างล่างนี้



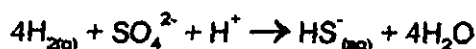
จากสมการข้างบน คาดว่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกใช้ในปฏิกิริยาได้จากคาร์บอนไดออกไซด์อิสระที่ละลายอยู่ในน้ำ ดังนั้นการสร้างมีเทนจากไฮโดรเจนจึงมีส่วนช่วยในการลดความดันพาร์เชียลของคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบลงบางส่วน และมีส่วนช่วยลดสภาพกรดลงได้บางส่วนด้วย

ในทำนองเดียวกัน ในการทดลองที่ 2 ซึ่งใช้อะซิเตตเป็นสารอาหารก็จะเกิดปฏิกิริยาในลักษณะเดียวกันเกิดขึ้น แต่จะไม่เกิดการลดลงของสภาพต่างหรือการเพิ่มขึ้นของสภาพกรดที่มาจากกรดดอินทรีย์ เพราะการใช้อะซิเตตเป็นสารอาหารไม่มีการสร้างกรดอินทรีย์

แต่นอกจากการเปลี่ยนอะซิเตตเป็นมีเทนแล้ว ทั้งสองการทดลองจะมีปฏิกิริยาอีกปฏิกิริยาหนึ่งเกิดขึ้นด้วยคือ ปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันโดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต ถ้าพิจารณาในกรณีที่มีสารอาหารเป็นอะซิเตตหรือกรดอะซิติก ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นดังสมการ



จะเห็นได้ว่าแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตดึงไฮโดรเจนออกซิเจนในระบบไปใช้ในปฏิกิริยาการรีดิวซ์ซัลเฟต ซึ่งก็เป็นเช่นเดียวกับกรณีของการสร้างมีเทน แต่ปฏิกิริยารีดิวซ์ซัลเฟตจะดึงไฮโดรเจนออกซิเจนจากระบบมากกว่าปฏิกิริยาการสร้างมีเทน นอกจากนั้นไบซัลไฟด์ออกซิเจนที่เกิดขึ้นยังเกิดปฏิกิริยารวมตัวกับไฮโดรเจนออกซิเจนเกิดเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายน้ำได้อีก ดังนั้นปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันจึงทำให้สภาพต่างเพิ่มขึ้นมากกว่าปฏิกิริยาการสร้างมีเทน และถ้าพิจารณาในกรณีที่ไฮโดรเจนเป็นสารอาหาร ปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันจะเกิดขึ้นดังสมการต่อไปนี้



จากสมการจะเห็นได้ว่า ปฏิกริยาซัลเฟตรีดักชันที่ใช้ไฮโดรเจนก็เป็นปฏิกริยาที่เพิ่มสภาพต่างคล้ายกับกรณีการใช้อะซิเตตเป็นสารอาหาร ดังนั้นปฏิกริยาซัลเฟตรีดักชันจึงเป็นสร้างสภาพต่างให้กับระบบ

พิจารณาถึงผลของความเข้มข้นซัลเฟตในน้ำเสียที่มีผลต่อพีเอชและสภาพต่าง พบว่าสภาพต่างเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นซัลเฟต ดังแสดงในรูปที่ 4.25 ในทำนองเดียวกัน พีเอชของระบบก็มีแนวโน้มเพิ่มตามความเข้มข้นของซัลเฟต แม้ที่ความเข้มข้นซัลเฟต 42 และ 84 มก./ล. จะไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ที่ความเข้มข้นซัลเฟต 840 มก./ล. พีเอชน้ำออกเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในการทดลองแรก ส่วนการทดลองที่ 2 มีพีเอชน้ำเข้าต่ำกว่าแต่พีเอชน้ำออกกลับเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับความเข้มข้นซัลเฟตอื่น ดังแสดงในรูปที่ 4.26 ผลการทดลองทั้งหมดสามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลที่อภิปรายมาก่อนหน้านี้ร่วมกับเหตุผลเดียวกับหัวข้อ 4.3.2 และ 4.3.3 กล่าวคือ เมื่อความเข้มข้นซัลเฟตเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตแย่งใช้ซิไอดีได้มากขึ้น ปริมาณซัลเฟตที่ถูกรีดิวซ์จึงเพิ่มสูงขึ้น ยิ่งซัลเฟตถูกรีดิวซ์เพิ่มขึ้นก็ยิ่งแสดงให้เห็นว่ามีปฏิกริยารีดิวซ์ซัลเฟตเกิดมากขึ้นด้วย แต่ปฏิกริยารีดิวซ์ซัลเฟตเป็นปฏิกริยาที่ช่วยสร้างสภาพต่างให้กับระบบ ดังนั้นสภาพต่างและพีเอชของระบบจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นซัลเฟตเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มขึ้นของซัลเฟตในช่วงซิไอดีมากเกินพอ คือ ที่ซัลเฟต 42 และ 84 มก./ล. แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตใช้ซิไอดีได้อย่างจำกัด ปฏิกริยาหลักที่เกิดขึ้นคือปฏิกริยาการสร้างมีเทน ดังนั้นสภาพต่างแม้จะเพิ่มขึ้นก็ไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน แต่ในกรณีที่ซัลเฟตมากเกินพอหรือที่ซัลเฟต 840 มก./ล. ปฏิกริยาหลักที่ความเข้มข้นซัลเฟตนี้ก็คือปฏิกริยาซัลเฟตรีดักชัน เพราะแบคทีเรียสร้างมีเทนมีส่วนการใช้ซิไอดีน้อยกว่าแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตมาก ดังที่กล่าวมาแล้วว่าปฏิกริยารีดิวซ์ซัลเฟตดึงไฮโดรเจนออกนำไปใช้ในปฏิกริยามากกว่าปฏิกริยาสร้างมีเทน ดังนั้นเมื่อคิดต่อซิไอดีที่ถูกกำจัดเท่า ๆ กันแล้ว สภาพต่างและพีเอชในระบบที่เกิดปฏิกริยารีดิวซ์ซัลเฟตเป็นหลักจะมีค่าสูงกว่าระบบที่เกิดปฏิกริยาสร้างมีเทนเป็นหลัก สภาพต่างที่ความเข้มข้นซัลเฟต 840 มก./ล. จึงมีค่าสูงสุดและสูงมากกว่าที่ความเข้มข้นซัลเฟตอื่นมาก

พิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงสารอาหารที่มีต่อพีเอชและสภาพต่าง ในการทดลองแรกเตรียมน้ำเสียโดยให้น้ำตาลทรายและเติมต่างในรูปโซเดียมไบคาร์บอเนต สภาพต่างในน้ำเสียมีค่าประมาณ 270 มก./ล. พีเอชประมาณ 8.1 พบว่าน้ำออกในทุกความเข้มข้นซัลเฟตมีพีเอชลดลงแต่กลับมีสภาพต่างสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะในการย่อยสลายน้ำตาลทราย แบคทีเรียสร้างกรดจะผลิตกรดอินทรีย์ขึ้นมาทำให้สภาพกรดเพิ่มขึ้น แต่สภาพต่างในน้ำเข้าจะทำปฏิกริยากับกรดอะซิติกที่

เกิดขึ้นทำให้อะซิติกส่วนหนึ่งเปลี่ยนเป็นอะซิเตต ดังแสดงมาแล้วก่อนหน้านี้ โดยที่พีเอช 6.3 ในระบบจะมีอะซิเตตมากกว่าอะซิติกถึง 36 เท่า อะซิเตตที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะถูกใช้โดยแบคทีเรียรีดิทิวซ์ซัลเฟตหรือแบคทีเรียสร้างมีเทนก็ตามก็จะทำให้สภาพต่างเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นอะซิติกหรืออะซิเตตที่ถูกใช้โดยแบคทีเรียรีดิทิวซ์ซัลเฟตจะทำให้สภาพต่างเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน พีเอชและสภาพต่างของน้ำออกจึงเป็นผลรวมของขั้นตอนการสร้างกรดและขั้นตอนการย่อยสลายอะซิเตตและไฮโดรเจน ซึ่งในการทดลองแรกนี้สภาพกรดที่สร้างขึ้นในขั้นตอนการสร้างกรดมีค่ามากกว่าสภาพต่างในขั้นตอนการย่อยสลายอะซิเตตและไฮโดรเจน ทำให้พีเอชน้ำออกลดลง แต่สภาพต่างที่เพิ่มขึ้นในขั้นตอนการย่อยสลายอะซิเตตและไฮโดรเจนจะทำให้วัดสภาพต่างในน้ำออกได้เพิ่มขึ้น ส่วนในการทดลองที่ 2 ที่ความเข้มข้นซัลเฟต 42 และ 84 มก./ล มีพีเอชเฉลี่ยประมาณ 5.9 ณ ที่พีเอชนี้ สัดส่วนของอะซิเตตต่ออะซิติก สามารถคำนวณได้จากค่าคงที่การแตกตัวของกรดอะซิติก โดยค่าคงที่การแตกตัวของกรดอะซิติกมีค่าเท่ากับ 1.8×10^{-5}

$$1.8 \times 10^{-5} = [\text{Ac}][\text{H}^+]/[\text{HAc}]$$

$$[\text{HAc}]/[\text{Ac}] = [\text{H}^+]/(1.8 \times 10^{-5})$$

$$[\text{HAc}]/[\text{Ac}] = 10^{-5.9}/(1.8 \times 10^{-5})$$

$$[\text{Ac}]/[\text{HAc}] = 14.3$$

นั่นคือที่พีเอช 5.9 ในน้ำเสียมีอะซิเตตมากกว่ากรดอะซิติก 14.3 เท่า ส่วนที่ความเข้มข้นซัลเฟตเป็น 840 มก./ล. พีเอชเฉลี่ยของน้ำเสียเป็น 5.3 ซึ่งที่พีเอชนี้มีอะซิเตตมากกว่าอะซิติกเพียง 3.6 เท่า การพิจารณาจึงต้องแยกเป็น 2 ช่วง คือที่ซีโอดีมากเกินพอและซัลเฟตมากเกินพอ ในช่วงที่ซีโอดีมากเกินพอ ปฏิกริยาหลักที่เกิดขึ้นคือปฏิกริยาสร้างมีเทน อะซิเตตส่วนใหญ่จึงถูกย่อยสลายเป็นมีเทน ทำให้ทั้งพีเอชและสภาพต่างในระบบเพิ่มสูงขึ้น ส่วนที่ซัลเฟตมากเกินพอปฏิกริยาหลักเป็นปฏิกริยาซัลเฟตรีดักชัน การย่อยสลายอะซิเตตก็ทำให้พีเอชและสภาพต่างเพิ่มขึ้นเช่นกันแต่เพิ่มขึ้นมากกว่า เพราะการใช้อะซิเตตโดยแบคทีเรียรีดิทิวซ์ซัลเฟตจะดึงไฮโดรเจนออกจากระบบมาใช้มากกว่าแบคทีเรียสร้างมีเทน

กล่าวโดยสรุปแล้ว ในการทดลองที่ 1 พีเอชน้ำออกมีค่าลดลงแต่สภาพต่างมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนในการทดลองที่ 2 พีเอชน้ำออกมีค่าเพิ่มขึ้นและสภาพต่างมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยค่าสภาพต่างในการทดลองที่ 2 มีค่าสูงกว่าในการทดลองแรก ผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของสารอาหารที่เปลี่ยนไปที่มีต่อการทำงานของระบบ ส่วนเหตุผลหลักที่ทำให้ผลการทดลองทั้งสองแตกต่างกันแสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 สาเหตุที่ทำให้พีเอชและสภาพต่างในการทดลองที่ 1 และ 2 ต่างกัน

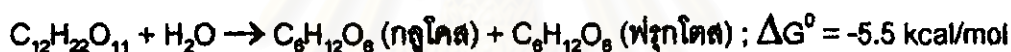
ซีไอดีมากเกินพอ	การทดลองที่ 1	การทดลองที่ 2
สิ่งที่พบ	พีเอชน้ำออกกอลลง แต่สภาพต่างเพิ่มขึ้น	พีเอชน้ำออกและสภาพต่างเพิ่มขึ้นมากกว่าการทดลองแรก
- เหตุผล	<ol style="list-style-type: none"> 1. น้ำตาลถูกหมักให้เปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์ ทำให้สภาพกรดเพิ่มขึ้นและลดสภาพต่างลง 2. การย่อยสลายอะซิเตดเป็นมีเทน ระบบดึงไฮโดรเจนออกซิเจนไปใช้สร้างมีเทน ทำให้สภาพกรดลดลงและสภาพต่างเพิ่มขึ้น 3. การย่อยสลายอะซิเตดเป็นซัลไฟด์ ระบบดึงไฮโดรเจนออกซิเจนไปใช้ ทำให้สภาพกรดลดลงและสภาพต่างเพิ่มขึ้น (ส่วนน้อย) 4. คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการเปลี่ยนย่อยสลายอะซิเตดเป็นก๊าซมีเทนหรือซัลไฟด์ ละลายน้ำทำให้สภาพกรดเพิ่มขึ้น (ส่วนน้อย) 5. การย่อยสลายไฮโดรเจนเป็นมีเทนหรือซัลไฟด์ ทำให้สภาพกรดอันเกิดจากคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง (มีผลน้อย) <p>สภาพกรดจากข้อ 1 และ 4 มีมากกว่าสภาพต่างในข้อ 2, 3 และ 5 ดังนั้นสภาพต่างจึงเพิ่มขึ้นแต่ที่เอชกลับลดลง</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการย่อยสลายอะซิเตดเป็นก๊าซมีเทนและซัลไฟด์ละลายน้ำทำให้สภาพกรดเพิ่มขึ้น (ส่วนน้อย) 2. การย่อยสลายอะซิเตดเป็นมีเทน ระบบดึงไฮโดรเจนออกซิเจนไปใช้สร้างมีเทน ทำให้สภาพกรดลดลงและสภาพต่างเพิ่มขึ้น (ส่วนน้อย) 3. การย่อยสลายอะซิเตดเป็นซัลไฟด์ ระบบดึงไฮโดรเจนออกซิเจนไปใช้ ทำให้สภาพกรดลดลงและสภาพต่างเพิ่มขึ้น <p>สภาพต่างจากข้อ 2 และ 3 มีมากกว่าสภาพกรดจากข้อ 1 ที่เอชจึงเพิ่มขึ้น</p> <p>สภาพต่างไม่ถูกทำลายเนื่องจากไม่มีกระบวนการเปลี่ยนน้ำตาลเป็นกรดอินทรีย์แบบการทดลองแรก ทำให้สภาพต่างในการทดลองที่ 2 มีค่ามากกว่า</p>
ซัลเฟตมากเกินพอ	การทดลองที่ 1	การทดลองที่ 2
สิ่งที่พบ	พีเอชน้ำออกกอลลง (แต่ยังมากกว่าช่วงซีไอดีมากเกินพอ) และสภาพต่างเพิ่มขึ้น (มากกว่าช่วงซีไอดีมากเกินพอ)	พีเอชและสภาพต่างเพิ่มขึ้นมากกว่าการทดลองแรก
- เหตุผล	<p>ปฏิกิริยาสร้างมีเทนเกิดขึ้นเป็นส่วนน้อย</p> <p>ปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยารีดิวซ์ซัลเฟต โดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เพิ่มสภาพต่างให้กับระบบได้มากกว่าปฏิกิริยาการสร้างมีเทน</p>	<p>เกิดปฏิกิริยารีดิวซ์ซัลเฟตขึ้นมากกว่าการทดลองแรก (ดูจากซัลไฟด์น้ำออกในการทดลองที่ 2 มีค่ามากกว่า) และไม่มีปฏิกิริยาการสร้างกรดอินทรีย์เกิดขึ้น</p>

ข้อสันนิษฐานข้างต้นได้มาจากการพิจารณาจากข้อมูลและแนวโน้มของกราฟ อย่างไรก็ตาม ถ้าต้องการข้อมูลในเชิงตัวเลขเพื่อใช้เป็นเหตุผลในการสนับสนุนข้อสมมติฐานต่าง ๆ เราสามารถคำนวณสภาพต่างที่เพิ่มขึ้นอย่างคร่าว ๆ ได้ดังนี้

การใช้น้ำตาลทรายเป็นสารอาหาร

น้ำตาลทรายที่ใช้ในการทดลองคือ น้ำตาลซูโครส มีชื่อทางเคมีคือ O- α -D-Glucopyranosyl-(1 \rightarrow 2)- β -D-fructofuranoside ชื่อเคมีแบบย่อคือ Glucose- α (1 \rightarrow 2)-fructose สูตรเคมีคือ $C_{12}H_{22}O_{11}$

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำตาลทรายคือ



ปฏิกิริยารวมของการย่อยสลายน้ำตาลทรายเป็นกรดอะซิติกและไฮโดรเจนคือ



น้ำตาลทราย 1 โมล เทียบเท่ากับซีไอดี 384 ก. (100%)

อะซิติก 4 โมล เทียบเท่ากับซีไอดี 256 ก. (66.6%)

ไฮโดรเจน 8 โมล เทียบเท่ากับซีไอดี 128 ก. (33.3%)

ยกตัวอย่างจากข้อมูลในตารางที่ 4.2 ที่ความเข้มข้นซีลเฟตเท่ากับ 84 มก./ล. ซีไอดีเข้าระบบ 521 มก./ล. ซีไอดีออกจากระบบ 40 มก./ล. สภาพต่างเข้าระบบ 273 มก./ล. as $CaCO_3$ สภาพต่างในน้ำออก 400 มก./ล. as $CaCO_3$ ที่เขมน้ำออกเท่ากับ 6.37 สัดส่วนการใช้ซีไอดีโดยแบกที่เรียสร้างมีเทน 87.3 % และแบกที่เรียรีดิวัซซีลเฟต 12.7 %

ขั้นที่ 1 การสร้างกรดอินทรีย์

- หาปริมาณซีไอต์ที่ถูกเปลี่ยนรูปเป็นกรด
ซีไอต์ที่ถูกกำจัด = $521 - 40 = 481$ มก./ล.
- หาปริมาณกรดที่เกิดขึ้น
ซีไอต์ที่ถูกกำจัดเปลี่ยนรูปเป็นซีไอต์ในรูปกรดอะซิติก = $481 \times 0.667 = 321$ มก./ล.
คิดเป็นกรดอะซิติก = $321/64,000 = 0.005$ ไมล
- หาปริมาณไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการสร้างกรด
ซีไอต์ที่ถูกกำจัดเปลี่ยนรูปเป็นซีไอต์ในรูปไฮโดรเจน = $481 \times 0.333 = 160$ มก./ล.
คิดเป็นไฮโดรเจน = $160/16,000 = 0.01$ ไมล
- หาสภาพกรดที่เกิดขึ้น

จากที่เอาน้ำออกที่เท่ากับ 6.37 และจากค่าคงที่การแตกตัวของกรดอะซิติกที่มีค่าเท่ากับ 1.8×10^{-5}

$$K_a = 1.8 \times 10^{-5} = [H^+][Ac^-]/[HAc]$$

$$[Ac^-]/[HAc] = 1.8 \times 10^{-5} / 10^{-8.3}$$

$$[Ac^-]/[HAc] = 42$$

อะซิเตดมีค่ามากกว่ากรดอะซิติกถึง 42 เท่า

ดังนั้นสมมติว่ากรดอะซิติกแตกตัวเป็นอะซิเตดและไฮโดรเจนอิออนทั้งหมด

ไฮโดรเจนอิออนในระบบจึงเพิ่มขึ้น 0.005 ไมล

เทียบเท่ากับสภาพกรด $0.005 \times 50,000 = 250$ มก./ล. as $CaCO_3$

จากสมการ 4.1 ซีไอต์ 384 ก. ทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ 4 ไมล

แต่ซีไอต์ที่ถูกกำจัดเท่ากับ 481 มก./ล.

ดังนั้น จะเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้น = $481 \times 4 / 384,000 = 0.005$ ไมล/ล.

แต่สัดส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศเหมือนน้ำมีเพียง 6.5 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น แสดงว่าส่วนใหญ่ของคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่ในน้ำในรูปที่ไม่แตกตัว จึงสมมติว่าคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำทั้งหมดเพื่อให้สะดวกต่อการคำนวณ

$$\begin{aligned} \text{สภาพกรดที่เพิ่มขึ้นจากคาร์บอนไดออกไซด์} &= 0.005 \times 50,000 \\ &= 250 \text{ มก./ล. CaCO}_3 \end{aligned}$$

$$\therefore \text{สภาพกรดทั้งหมดที่เพิ่มขึ้น} = 250 + 250 = 500 \text{ มก./ล. CaCO}_3$$

- หาสภาพต่างที่เปลี่ยนไป

สภาพต่างเข้าระบบ 273 มก./ล. as CaCO₃

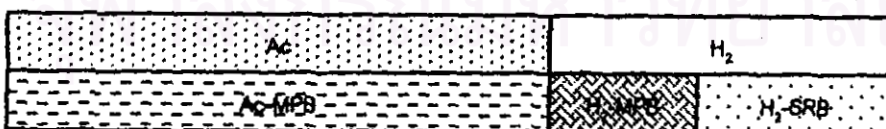
แต่สภาพกรดจากไฮโดรเจนซัลไฟด์จะทำให้สภาพต่างลดลง

สภาพต่างลดลงเป็น = 273 - 250 = 23 มก./ล. as CaCO₃

ขั้นที่ 2 สมมติฐานการใช้สารอาหารโดยแบคทีเรีย

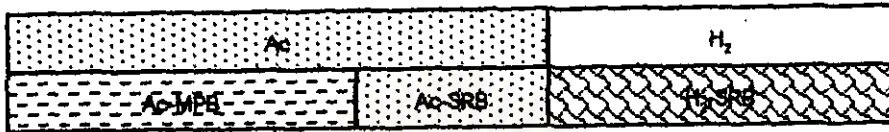
เนื่องจากสารอาหารในระบบมีอยู่ 2 ชนิด คือไฮโดรเจนและอะซิเตต ทำให้เราจำเป็นต้องสมมติสัดส่วนของสารอาหารแต่ละชนิดที่แบคทีเรียใช้เพื่อให้เราสามารถคำนวณต่อไปได้ สมมติฐานที่นำมาใช้เป็นเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.6.1 คือ แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจะใช้ไฮโดรเจนก่อนแบคทีเรียสร้างมีเทน ลำดับของการใช้สารอาหารตามสมมติฐานนี้ก็คือ

- ถ้าซีไอโอติจากไฮโดรเจนในระบบมีมากกว่าซีไอโอติที่ถูกใช้โดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต
 - แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตใช้ไฮโดรเจน
 - แบคทีเรียสร้างมีเทนใช้ไฮโดรเจนส่วนที่เหลือ
 - แบคทีเรียสร้างมีเทนใช้อะซิเตตทั้งหมด



รูปที่ 4.27 สัดส่วนการใช้สารอาหารในกรณีที่มีซีไอโอติจากไฮโดรเจนมากกว่าซีไอโอติที่ถูกใช้โดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต

- ถ้าซีไอดีจากไฮโดรเจนมีน้อยกว่าซีไอดีที่ถูกใช้โดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต
 - แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตใช้ไฮโดรเจน
 - แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตใช้อะซิเตต
 - แบคทีเรียสร้างมีเทนใช้อะซิเตตส่วนที่เหลือ
- ดังแสดงในรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 สัดส่วนการใช้สารอาหารในกรณีที่มีซีไอดีจากไฮโดรเจนน้อยกว่าซีไอดีที่ถูกใช้โดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต

ขั้นที่ 3 การเปลี่ยนกรดอินทรีย์เป็นมีเทนและซัลไฟด์

- สัดส่วนการใช้ซีไอดีของแบคทีเรียสร้างมีเทนและแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต

แบคทีเรียสร้างมีเทนมีสัดส่วนการใช้ซีไอดี 87.3 %

$$= 0.873 \times 481$$

$$= 420 \text{ มก./ล.}$$

แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตมีสัดส่วนการใช้ซีไอดี 12.7 %

$$= 0.127 \times 481$$

$$= 61 \text{ มก./ล.}$$

- หาปริมาณซีไอดีที่ถูกใช้โดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียสร้างมีเทน

ซีไอดีในรูปไฮโดรเจนในระบบทั้งหมดมีอยู่ 160 มก./ล. มากกว่าซีไอดีที่ถูกใช้โดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตซึ่งเท่ากับ 61 มก./ล.

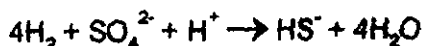
ดังนั้น แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตใช้ซีไอดีในรูปไฮโดรเจน 61 มก./ล.

แบคทีเรียสร้างมีเทนใช้ซีไอดีในรูปไฮโดรเจน = $160 - 61 = 99$ มก./ล.

แบคทีเรียสร้างมีเทนใช้ซีไอดีในรูปอะซิเตต = $420 - 99 = 321$ มก./ล.

- ผลของการใช้ซัลไฟต์โดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต

จากสมการการใช้ไฮโดรเจนโดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต



ไฮโดรเจน 4 โมลหรือซัลไฟต์จากไฮโดรเจน 64 ก. จะดึงไฮโดรเจนออกจากระบบไป 1 โมล ทำให้สภาพต่างเพิ่มขึ้น 1 โมลหรือ 50 ก. as CaCO_3 และสภาพกรดลดลง 1 โมล หรือ 50 ก. as CaCO_3 ด้วย

ดังนั้น ถ้าแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตใช้ไฮโดรเจน 61 มก./ล.

สภาพต่างเพิ่มขึ้น = $61 \times 50/64 = 48$ มก./ล. as CaCO_3

สภาพกรดลดลง = $61 \times 50/64 = 48$ มก./ล. as CaCO_3

- ผลของการใช้ซัลไฟต์โดยแบคทีเรียสร้างมีเทน

กรณีไฮโดรเจน

จากสมการการใช้ไฮโดรเจนโดยแบคทีเรียสร้างมีเทน



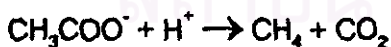
ไฮโดรเจน 4 โมลหรือซัลไฟต์ในรูปไฮโดรเจน 64 ก. ดึงคาร์บอนไดออกไซด์จากระบบ 1 โมล สมมติว่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้มาจากคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำที่ไม่แตกตัว ดังนั้นสภาพกรดจะลดลง 1 โมลหรือ 50 ก. as CaCO_3

ดังนั้นถ้าแบคทีเรียสร้างมีเทนใช้ไฮโดรเจน 99 มก./ล.

สภาพกรดจะลดลง = $99 \times 50/64 = 77$ มก./ล.

กรณีอะซิเตต

จากสมการการใช้อะซิเตตของแบคทีเรียสร้างมีเทน



อะซิเตต 1 โมลหรือซัลไฟต์ในรูปอะซิเตต 64 ก. ดึงไฮโดรเจนออกจากระบบไป 1 โมลหรือ 50 ก. as CaCO_3 เป็นการเพิ่มสภาพต่าง 50 ก. as CaCO_3 และลดสภาพกรด 50 ก. as CaCO_3 ในขณะเดียวกันก็สร้างคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมล สมมติว่าละลายน้ำเป็นคาร์บอนไดออกไซด์อิสระทั้งหมด สภาพกรดจะเพิ่มจากคาร์บอนไดออกไซด์อีก 50 ก. as CaCO_3 ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้ก็คือการเพิ่มขึ้นของสภาพต่าง 50 ก. as CaCO_3 ถ้าแบคทีเรียสร้างมีเทนใช้อะซิเตต 321 มก./ล.

สภาพต่างเพิ่มขึ้น = $321 \times 50/64 = 251$ มก./ล. as CaCO_3

- หาสภาพต่างที่เปลี่ยนไป

ในขั้นตอนการเปลี่ยนกรดอินทรีย์เป็นมีเทนและซัลไฟด์ พบว่า

H₂ - SRB ทำให้ สภาพต่าง + 48 มก./ล. as CaCO₃

สภาพกรด - 48 มก./ล. as CaCO₃

H₂ - MPB ทำให้ สภาพกรด - 77 มก./ล. as CaCO₃

Ac - MPB ทำให้ สภาพต่าง + 251 มก./ล. as CaCO₃

ดังนั้น สภาพต่างเพิ่มขึ้น = 251 + 48 = 299 มก./ล. as CaCO₃

และสภาพกรดลดลง = 48 + 77 = 125 มก./ล. as CaCO₃

เมื่อมองรวมทั้งกระบวนการแล้ว พบว่า

สภาพต่างน้ำเข้า 273 มก./ล. as CaCO₃

ในขั้นตอนการสร้างกรดอินทรีย์

สภาพต่างลดลง 250 มก./ล. as CaCO₃

สภาพกรดเพิ่มขึ้น 500 มก./ล. as CaCO₃

ในขั้นตอนการเปลี่ยนกรดอินทรีย์เป็นมีเทนและซัลไฟด์

สภาพต่างเพิ่มขึ้น 299 มก./ล. as CaCO₃

สภาพกรดลดลง 125 มก./ล. as CaCO₃

ผลลัพธ์ที่ได้คือ

สภาพต่างเพิ่มขึ้น = -250 + 299 = 49 มก./ล. as CaCO₃

สภาพต่างในน้ำออก = 49 + 273 = 322 มก./ล. as CaCO₃

สภาพกรดเพิ่มขึ้น = 500 - 125 = 375 มก./ล. as CaCO₃

การใช้กรดอะซิติกเป็นสารอาหาร

การใช้กรดอะซิติกเป็นสารอาหารแตกต่างจากการใช้น้ำตาลเป็นสารอาหารตรงที่ การใช้น้ำตาลเป็นสารอาหารจะมีขั้นตอนการสร้างกรดอินทรีย์ แต่การใช้กรดอะซิติกไม่มีขั้นตอนนี้ ตัวอย่างการคำนวณมาจากข้อมูลในตารางที่ 4.4 ที่ความเข้มข้นซัลเฟตเท่ากับ 84 มก./ล.

จากข้อมูลในตารางที่ 4.4 ที่ความเข้มข้นซัลเฟตเท่ากับ 84 มก./ล. ซีไอดีเข้าระบบ 524 มก./ล. ซีไอดีออกจากระบบ 15 มก./ล. สภาพต่างเข้าระบบ 281 มก./ล. as CaCO₃ สภาพต่างใน

น้ำออก 582 มก./ล. as CaCO_3 พีเอชน้ำเข้า 5.86 พีเอชน้ำออกเท่ากับ 7.18 สัดส่วนการใช้ซีโอติ โดยแบกที่เรียสร้างมีเทน 90.5 % และแบกที่เรียรีดิวัชซิลเฟต 9.5 %

ซีโอติที่ถูกกำจัด = $524 - 15 = 509$ มก./ล.

ซีโอติที่ถูกกำจัด 509 มก./ล. เทียบเท่ากับกรดอะซิติก $509/64,000 = 0.00795$ โมล/ล.

จากพีเอชน้ำเข้าที่เท่ากับ 5.86 และจากค่าคงที่การแตกตัวของกรดอะซิติกที่มีค่าเท่ากับ 1.8×10^{-5}

$$K_a = 1.8 \times 10^{-5} = [\text{H}^+][\text{Ac}^-]/[\text{HAc}]$$

$$[\text{Ac}^-]/[\text{HAc}] = 1.8 \times 10^{-5} / 10^{-5.86}$$

$$[\text{Ac}^-]/[\text{HAc}] = 13$$

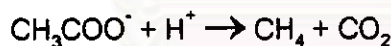
$$(x)/(0.00795 - x) = 13$$

$$x = 0.00739$$

ในน้ำเข้ามีอะซิติก 0.00057 โมล/ล. มีอะซิเตต 0.00739 โมล/ล. มีอะซิติกไม่ถึง 8 % ของ อะซิเตต ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการคำนวณจึงสมมติว่าซีโอติทั้งหมดในน้ำเสียเป็น อะซิเตต

ซีโอติถูกใช้โดยแบกที่เรียสร้างมีเทน 90.5 % = $509 \times 0.905 = 461$ มก./ล.

จากสมการการใช้อะซิเตตของแบกที่เรียสร้างมีเทน

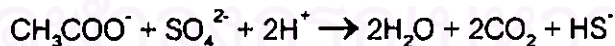


ผลที่ได้คือ การเพิ่มขึ้นของสภาพต่าง 50 มก./ล.ต่อซีโอติ 64 มก.

$$\text{ดังนั้น ในขั้นนี้สภาพต่างเพิ่มขึ้น} = 461 \times 50/64 = 360 \text{ มก./ล. as } \text{CaCO}_3$$

ซีโอติถูกใช้โดยแบกที่เรียรีดิวัชซิลเฟต 9.5 % = 48 มก./ล.

จากสมการการใช้อะซิเตตของแบกที่เรียรีดิวัชซิลเฟต



ไฮโดรเจนไอออนที่ถูกดึงไปใช้ 2 โมลต่อซีโอติ 64 ก. ทำให้สภาพต่างเพิ่มขึ้นและสภาพกรด ลดลง 100 ก. as CaCO_3 ส่วนคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น 2 โมล สมมติว่าละลายน้ำได้ เป็นคาร์บอนไดออกไซด์อิสระทั้งหมด สภาพกรดจะเพิ่มขึ้น 100 ก. as CaCO_3 ผลลัพธ์ก็คือการเพิ่มขึ้นของสภาพต่าง 100 ก. as CaCO_3

$$\text{ในขั้นนี้ สภาพต่างเพิ่มขึ้น} = 48 \times 100/64 = 75 \text{ มก./ล. as } \text{CaCO}_3$$

เมื่อมองรวมทั้งหมดแล้ว พบว่า

สภาพต่างเข้าระบบ 281 มก./ล. as CaCO_3

สภาพต่างเพิ่มขึ้น = $360 + 75 = 435$ มก./ล. as CaCO_3

สภาพต่างออกจากระบบ = $281 + 435 = 716$ มก./ล. as CaCO_3

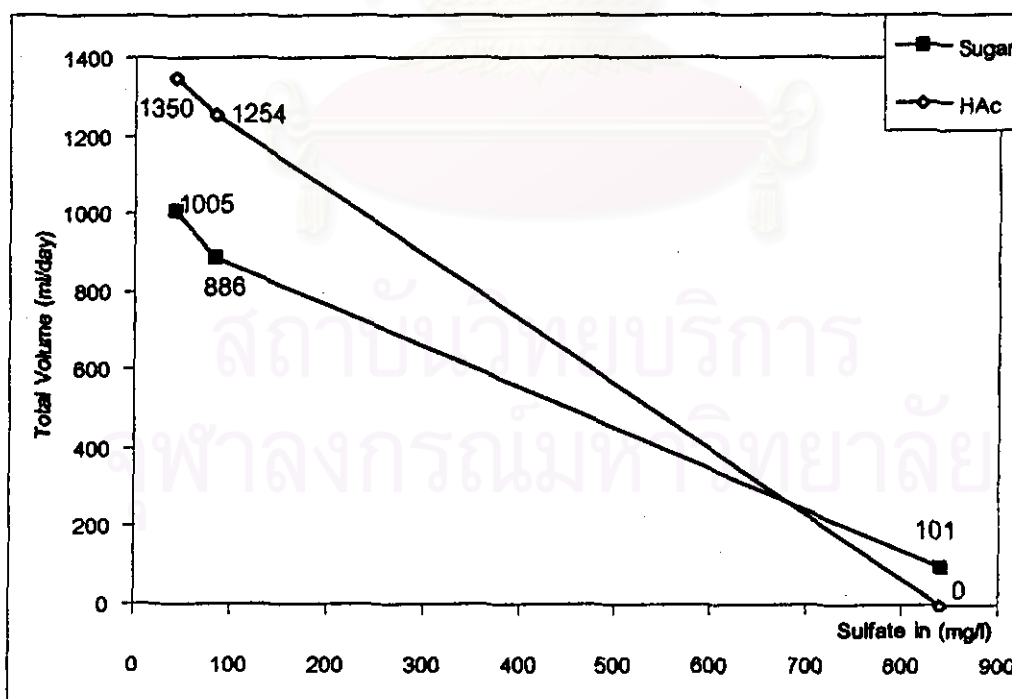
การคำนวณที่ทำขึ้นเป็นเพียงการคำนวณอย่างหยาบ ๆ เท่านั้น เพราะไม่ได้นำเอาผลจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่หนีออกสู่บรรยากาศมาคิด โดยสมมติว่าคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำทั้งหมด อีกทั้งยังไม่ได้นำเอาการดึงไฮโดรเจนออกซอนของไบคาร์บอเนตไปสร้างไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เพิ่มสภาพต่างให้ระบบ การคำนวณทำขึ้นโดยมีจุดประสงค์เพียงเพื่อยืนยันข้อสันนิษฐานที่ใช้อธิบายผลการทดลองทั้งในการทดลองที่ 1 และ 2 โดยกรณีของการใช้น้ำตาลเป็นสารอาหาร ในขั้นตอนการสร้างกรดอินทรีย์ เกิดการลดลงของสภาพต่างและการเพิ่มขึ้นของสภาพกรดในระบบ ต่อมาในขั้นตอนการย่อยสลายกรดอินทรีย์สภาพกรดในระบบลดลงในขณะที่สภาพต่างเพิ่มขึ้น ได้ผลลัพธ์รวมคือทั้งสภาพต่างและสภาพกรดต่างก็เพิ่มขึ้น แต่สภาพกรดเพิ่มขึ้นมากกว่าเป็นผลให้พีเอชลดลงจากเดิม ส่วนในกรณีของการใช้อะซิเตตเป็นสารอาหาร การคำนวณก็แสดงให้เห็นถึงสภาพต่างในน้ำออกที่เพิ่มขึ้นไม่ว่าจะถูกย่อยสลายด้วยแบคทีเรียชนิดใด ส่วนสภาพกรดที่เพิ่มขึ้นจากคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำเมื่อเทียบกับสภาพกรดที่ลดลงจากไฮโดรเจนออกไซด์ที่ถูกดึงไปใช้จะมีค่าน้อยกว่า ทำให้โดยรวมแล้วสภาพกรดไม่เพิ่มขึ้นหรืออาจลดลงได้ ทำให้พีเอชในน้ำออกเพิ่มสูงขึ้น

4.3.6 การผลิตก๊าซ

พิจารณาถึงผลของความเข้มข้นซัลเฟตในน้ำเข้า จะพบว่าเมื่อความเข้มข้นซัลเฟตมีผลทำให้ปริมาณก๊าซทั้งหมด สัดส่วนของก๊าซมีเทนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ และอัตราการผลิตก๊าซลดลง ทั้งนี้เพราะการเพิ่มความเข้มข้นซัลเฟตเป็นเหตุให้แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตมีบทบาทมากขึ้นในการใช้ซีโอดี ระบบจึงผลิตก๊าซมีเทนน้อยลงและผลิตไฮโดรเจนซัลไฟด์มากขึ้น แต่ไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นละลายน้ำได้ดีกว่ามีเทนมาก ดังนั้นปริมาณก๊าซทั้งหมด สัดส่วนของก๊าซมีเทน และอัตราการผลิตก๊าซจึงลดลงเมื่ออัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตลดลง ส่วนการเปลี่ยนแปลงสารอาหารคาดว่าจะมีผลทำให้ปริมาณซีโอดีที่ถูกใช้โดยแบคทีเรียสร้างมีเทนเพิ่มขึ้น ทำให้ผลิตก๊าซได้เพิ่มขึ้น รายละเอียดทั้งหมดสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

1) ปริมาตรก๊าซต่อวัน

ก๊าซที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายซีโอติโดยแบคทีเรียสร้างมีเทน คือ ก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนก๊าซที่ได้จากการย่อยสลายซีโอติโดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต คือ คาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ถ้าระบบผลิตก๊าซมีเทนมาก แสดงว่าแบคทีเรียสร้างมีเทนแย่งใช้ซีโอติในระบบได้มาก ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ผลิตขึ้นก็จะน้อยไปด้วย ในทางกลับกันถ้าระบบผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มาก แสดงว่าแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตมีแย่งใช้ซีโอติได้มาก ทำให้ก๊าซมีเทนที่ผลิตได้น้อยลง ก๊าซต่าง ๆ จะมีสมบัติหลายอย่างต่างกันไปตามชนิดของก๊าซ ถ้ามองในแง่ของการละลายน้ำของก๊าซ พบว่าก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายน้ำได้ดีที่สุดในกลุ่ม และก๊าซที่ละลายอยู่ในน้ำยังสามารถแตกตัวให้อิออนได้ด้วย ปริมาณซัลไฟด์ละลายน้ำแสดงดังรูปที่ 4.23 ส่วนก๊าซที่มีความสามารถในการละลายน้ำรองลงมาก็คือคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซมีเทนเรียงตามลำดับ จากความสามารถในการละลายน้ำของก๊าซที่แตกต่างกันนี้เองที่ทำให้ปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้นไม่เท่ากันแม้จะผลิตก๊าซในจำนวนโมลที่เท่ากันก็ตาม ดังนั้นถ้าระบบผลิตก๊าซมีเทนมาก ปริมาตรก๊าซที่วัดได้ก็จะมากเพราะก๊าซที่เกิดขึ้นละลายน้ำได้น้อย ส่วนใหญ่จึงเหลืออยู่ในวัฏภาคก๊าซ แต่ถ้าระบบผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มากขึ้น ปริมาตรก๊าซที่วัดได้จะมีค่าลดลง เพราะก๊าซละลายน้ำมากขึ้น ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นซัลเฟตจะทำให้ปริมาตรก๊าซที่ผลิตได้ต่อวันมีค่าลดลงด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.29

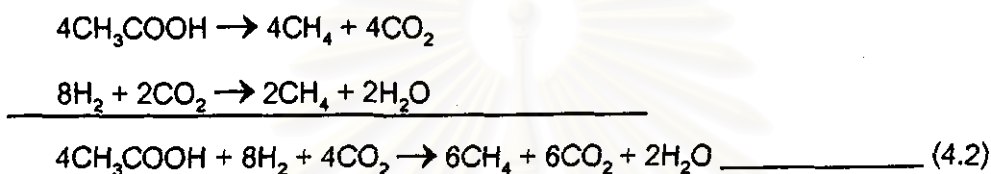


รูปที่ 4.29 ปริมาตรก๊าซทั้งหมดต่อวันที่อัตราภาวะบรรทุกลสารอินทรีย์ 4 กก.ซีโอติ/ลบ.ม.-วัน

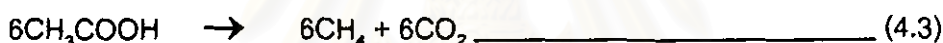
ถ้ามองถึงการเปลี่ยนชนิดของสารอาหารที่มีผลต่อปริมาณการผลิตก๊าซต่อวัน พบว่าการเปลี่ยนสารอาหารจากน้ำตาลเป็นอะซิเตตทำให้ปริมาณก๊าซต่อวันและอัตราการผลิตก๊าซมีค่าสูงขึ้นที่ความเข้มข้นซัลเฟต 42 หรือ 84 มก./ล. ซึ่งอยู่ช่วงที่ซีโอติมากเกินพอ แต่มีค่าลดต่ำลงที่ความเข้มข้นซัลเฟต 840 มก./ล. ซึ่งอยู่ในช่วงที่ซัลเฟตมากเกินพอ สิ่งที่ใช้อธิบายปริมาณก๊าซที่เปลี่ยนไปก็คือการใช้สารอาหารของแบกทีเรีย ดังสมการ 4.1



ในช่วงที่ซีโอติมากเกินพอ ปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นคือปฏิกิริยาการสร้างมีเทน



พิจารณาในรูปของซีโอติ น้ำตาลทราย 1 โมลเทียบเท่ากับกรดอะซิติก 6 โมล



จากสมการที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 พบว่า ถ้าปริมาณซีโอติที่ถูกกำจัดมีค่าใกล้เคียงกัน ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจะไม่แตกต่างกันมากนัก ไม่ว่าจะใช้น้ำตาลทรายหรืออะซิเตตเป็นสารอาหารก็ตาม ซึ่งขัดแย้งกับผลการทดลองที่ผลิตก๊าซได้เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปลี่ยนมาใช้อะซิเตตเป็นสารอาหาร ข้อสันนิษฐานก็คือ ในกรณีที่ใช้ น้ำตาลทรายเป็นสารอาหาร น้ำตาลทรายต้องถูกแบกทีเรียสร้างกรดย่อยสลายให้เป็นกรดอินทรีย์ก่อน จึงจะถูกใช้ต่อได้โดยแบกทีเรียสร้างมีเทนหรือแบกทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต ทำให้ซีโอติส่วนหนึ่งลดลงจากการนำไปใช้เพื่อการดำรงชีพและการเจริญเติบโตของแบกทีเรียสร้างกรด ซีโอติที่ถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซจึงน้อยกว่าในกรณีใช้อะซิเตตเป็นสารอาหารซึ่งสามารถใช้ซีโอติในการผลิตก๊าซได้มากกว่า

แต่ในกรณีที่ซัลเฟตมากเกินพอ การเปลี่ยนสารอาหารเป็นอะซิเตตกลับทำให้ก๊าซที่ผลิตได้ลดลงจนไม่อาจตรวจวัดได้ ซึ่งไม่อาจอธิบายได้ด้วยเหตุผลต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น จึงน่าจะมีสาเหตุอื่นเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย

ข้อสันนิษฐานแรก พิจารณาการทดลองที่ใช้ น้ำตาลที่มีความเข้มข้นซัลเฟต 840 มก./ล. ซึ่งผลิตก๊าซได้ 101 มล./วัน เทียบกับการทดลองที่ใช้อะซิเตตที่มีการผลิตก๊าซเป็นศูนย์ แสดงว่าก๊าซที่

วัดได้จากการทดลองแรกส่วนหนึ่งมาจากการย่อยสลายไฮโดรเจนเป็นมีเทน เพราะถ้าก๊าซส่วนใหญ่ในการทดลองแรกมาจากการย่อยสลายอะซิเตดโดยแบคทีเรียสร้างมีเทน การเปลี่ยนสารอาหารเป็นอะซิเตดก็ไม่น่าจะส่งผลต่อปริมาณก๊าซที่ผลิตได้มากถึงเพียงนี้ จึงสันนิษฐานว่าก๊าซส่วนหนึ่งในการทดลองแรกมาจากการใช้ไฮโดรเจนโดยแบคทีเรียสร้างมีเทน แม้ว่าที่ความเข้มข้นซัลเฟตสูงหรือซัลเฟตมากเกินไป แบคทีเรียสร้างมีเทนที่เจริญเติบโตด้วยไฮโดรเจนจะเจริญเติบโตและแย่งใช้สารอาหารสู่แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตไม่ได้ แต่ก็ยังสามารถดำรงชีพอยู่ได้และแย่งใช้ซีโอดีได้บางส่วน การเปลี่ยนไปใช้อะซิเตดเป็นสารอาหารทำให้แบคทีเรียสร้างมีเทนที่บริเวณไฮโดรเจนหมดบทบาท ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้จึงมาจากแบคทีเรียสร้างมีเทนที่ใช้อะซิเตดที่พยายามรักษาสัดส่วนการใช้ซีโอดีเอาไว้เพียงกลุ่มเดียว ทำให้ปริมาตรก๊าซต่อวันลดต่ำลง อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมาก่อนหน้านี้ (Lovley, 1982 อ้างถึงใน Visser, 1994; Visser, 1994; Omil, 1997) ต่างก็รายงานตรงกันว่าไฮโดรเจนในระบบทั้งหมดถูกใช้โดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตในกรณีที่มีซัลเฟตมากเกินไป ทำให้ขัดแย้งกับข้อสันนิษฐานที่กล่าวมาข้างต้น

ข้อสันนิษฐานที่ 2 จากหัวข้อ 4.3.2 ข้อสันนิษฐานอีกประการหนึ่งก็คือ การทดลองที่ 2 ในช่วงซัลเฟตมากเกินไป ทั้งหมดของสลัดจ์ในถังปฏิกรณ์มีลักษณะเป็นผงมากกว่าเป็นเม็ด ทำให้แบคทีเรียสร้างมีเทนที่อาจอาศัยอยู่ได้ในแกนกลางของเม็ดสลัดจ์ทำงานได้ด้อยลง เป็นเหตุให้การทดลองที่ 2 ปริมาณก๊าซน้อยลงจนวัดไม่ได้

ข้อสันนิษฐานทั้ง 2 ประการที่กล่าวมาข้างต้นสามารถใช้อธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นได้ดีพอสมควร แต่ยังไม่สามารถตรวจสอบได้ว่าข้อสันนิษฐานใดจริงหรือเท็จ หรือเท็จทั้งคู่ ทั้งนี้เพราะยังขาดข้อมูลหลายประการที่ต้องศึกษาวิจัยเพิ่มเติม แต่ไม่ว่าข้อเท็จจริงจะเป็นเช่นข้อสันนิษฐานข้างต้นหรือไม่ สิ่งที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในช่วงซัลเฟตมากเกินไปก็คือ ซีโอดีส่วนที่เพิ่มขึ้นจากการหมดบทบาทของแบคทีเรียสร้างกรดถูกใช้โดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตมากกว่าแบคทีเรียสร้างมีเทน เพราะถ้าแบคทีเรียสร้างมีเทนใช้ซีโอดีที่เพิ่มขึ้นนี้ได้ ปริมาณก๊าซต่อวันก็ไม่น่าจะลดลงจนตรวจวัดไม่ได้ และถ้าพิจารณาตารางที่ 4.5 และ 4.6 ประกอบ พบว่าแบคทีเรียสร้างมีเทนในการทดลองแรกใช้ซีโอดีในการผลิตมีเทน 99 มก./ล. โดยคิดเป็นมีเทนละลายน้ำเทียบเท่ากับซีโอดี 70 มก./ล. เป็นก๊าซมีเทน 29 มก./ล. ส่วนในการทดลองที่ 2 แบคทีเรียสร้างมีเทนใช้ซีโอดีในการผลิตมีเทน 70.8 มก./ล. ซึ่งอยู่ในรูปละลายน้ำทั้งหมด จะเห็นได้ว่าในการทดลองที่ 2 ยังมีการผลิตมีเทนอยู่แต่ซีโอดีที่ถูกใช้ในการผลิตมีเทนลดน้อยลง

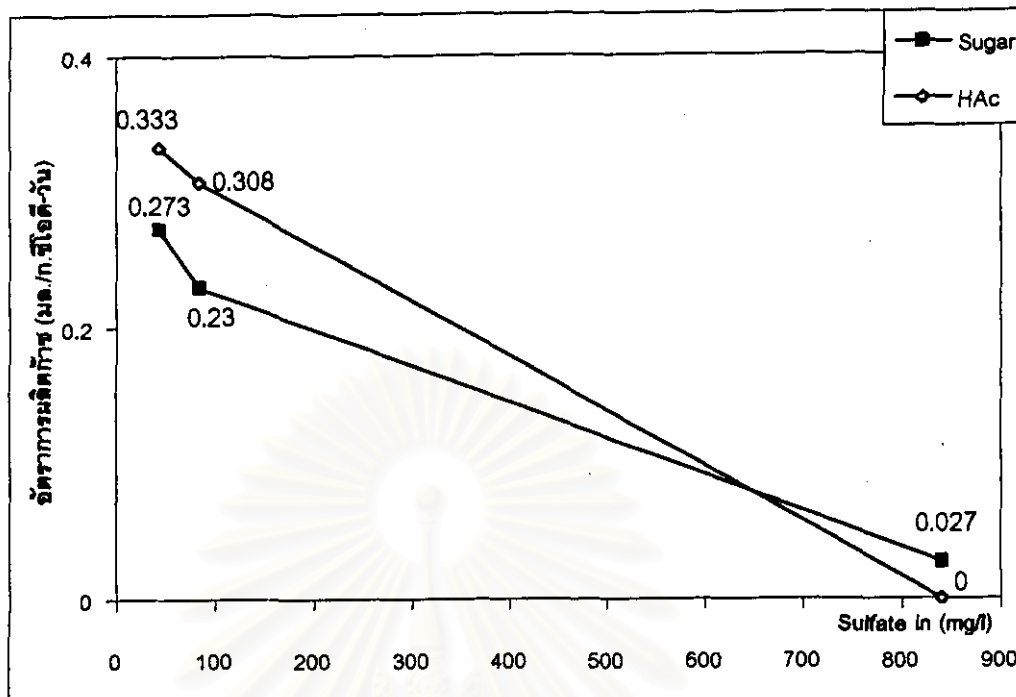
อย่างไรก็ตาม จากเปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอนที่ชี้ให้เห็นว่าเกิดก๊าซมีเทนขึ้นในระบบ ถึงแม้ว่าก๊าซมีเทนจะละลายน้ำได้ทั้งหมด การวัดปริมาณก๊าซได้เท่ากับศูนย์เป็นสิ่งที่เป็นไปได้ยากมาก ทั้งนี้เพราะก๊าซในโตรเจนที่ละลายอยู่ในน้ำเสียเข้าระบบและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในการย่อยสลายสารอินทรีย์รวมกันแล้วต้องมีปริมาตรอยู่ปริมาณหนึ่ง จึงอาจเป็นไปได้ว่าเกิดความผิดพลาดขึ้นในการวัดปริมาณก๊าซ เช่น การรั่วของก๊าซออกจากสายยาง, เครื่องวัดก๊าซ หรือวาล์วที่ต่อเข้าเครื่องวัดก๊าซ เป็นต้น ทำให้ความน่าเชื่อถือของปริมาณก๊าซต่อวันที่ได้จากถังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตเข้า 840 มก./ล. ในการทดลองที่ 2 มีค่าลดลง

2) อัตราการผลิตก๊าซ

ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ในแต่ละวันจะมากหรือน้อยนอกจากจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของซัลเฟตดังที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว ยังขึ้นอยู่กับปริมาณซีโอไลท์ที่เข้าระบบในแต่ละวันด้วย ณ ความเข้มข้นซัลเฟตเดียวกัน ถ้าเพิ่มซีโอไลท์ที่เข้าสู่ระบบให้มากขึ้น ปริมาณก๊าซที่วัดได้ในแต่ละวันจะมีแนวโน้มมากขึ้นตามไปด้วย ด้วยเหตุผลที่ปริมาตรต่อวันไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นซัลเฟตเพียงอย่างเดียว การกล่าวถึงปริมาณก๊าซต่อวันจำเป็นต้องบอกอัตราภาวะบรรทุกสารอินทรีย์กำกับไว้ด้วยเสมอ แต่เราสามารถให้พารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งคืออัตราการผลิตก๊าซมาช่วยสื่อความหมายให้ชัดเจนขึ้นและสามารถนำอัตราการผลิตก๊าซในการทดลองต่าง ๆ มาใช้เปรียบเทียบกันได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงภาวะบรรทุกสารอินทรีย์มากนัก

ถ้าพิจารณาจากปฏิกิริยาการสร้างมีเทนจากกรดอะซิติก ซีโอไลท์ 64 ก.จะให้ก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างละ 1 โมล ในขณะที่ปฏิกิริยารีดิวซ์ซัลเฟตด้วยกรดอะซิติก ซีโอไลท์ 64 ก. จะให้ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1 โมลและคาร์บอนไดออกไซด์ 2 โมล ถ้าดูแต่เฉพาะจำนวนโมลของก๊าซที่เกิดขึ้นอัตราการผลิตก๊าซจากปฏิกิริยารีดิวซ์ซัลเฟตน่าจะมีค่ามากกว่า แต่จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เกือบทั้งหมดที่เกิดขึ้นอยู่ในรูปละลายน้ำในขณะที่ก๊าซมีเทนละลายน้ำได้น้อย อัตราการผลิตก๊าซจากปฏิกิริยารีดิวซ์ซัลเฟตจึงมีค่าต่ำกว่าอัตราการผลิตก๊าซจากปฏิกิริยาสร้างมีเทนมาก ซึ่งในการวัดอัตราการผลิตก๊าซในระบบจะวัดออกมาเป็นค่าเฉลี่ยของสองปฏิกิริยานี้ ดังนั้นความเข้มข้นของซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการผลิตก๊าซก็ต่ำลงไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.30

ส่วนการเปลี่ยนแปลงชนิดของสารอาหารก็ส่งผลต่ออัตราการผลิตก๊าซเช่นเดียวกับที่ส่งผลต่อปริมาณก๊าซต่อวันด้วยเหตุผลในทำนองเดียวกัน อย่างไรก็ตาม มีข้อน่าสังเกตอยู่ว่าปริมาณซีโอไลท์



รูปที่ 4.30 อัตราการผลิตก๊าซที่ความเข้มข้นซัลเฟตต่าง ๆ

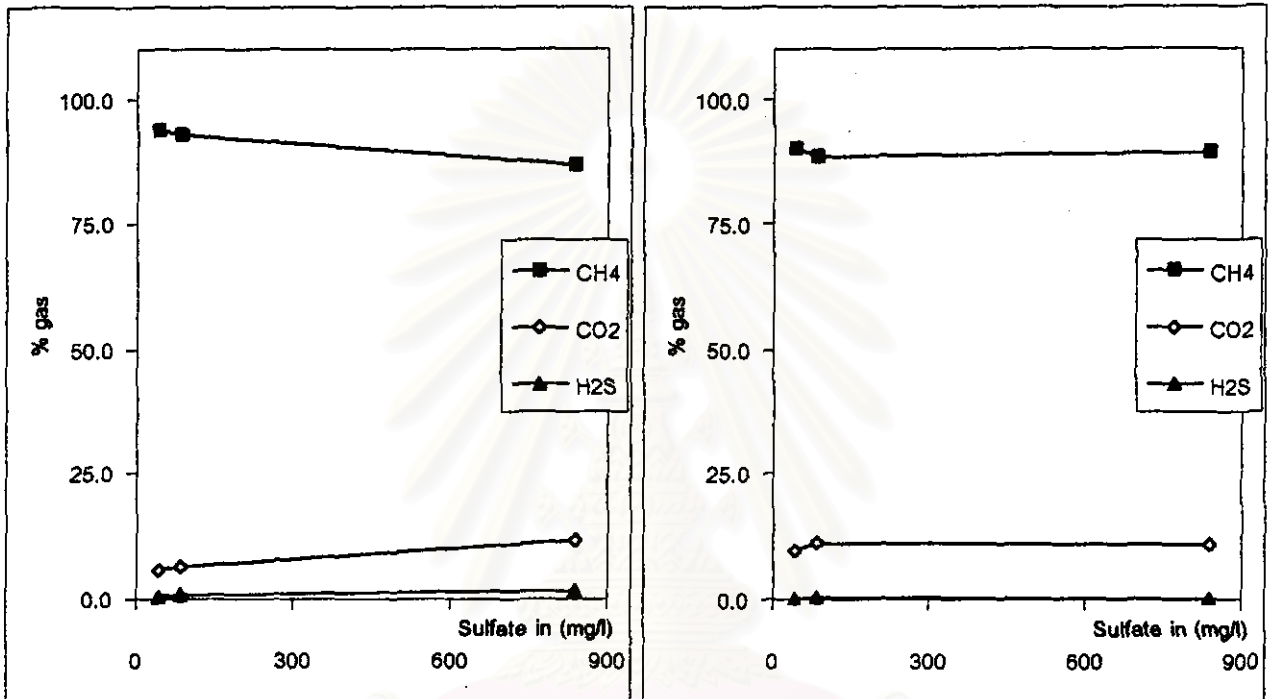
ที่ถูกกำจัดที่นำมาใช้คำนวณหาอัตราการผลิตก๊าซสำหรับการทดลองแรก ส่วนหนึ่งมาจากการแบกที่เรียสร้างกรคนำไปใช้ในการดำรงชีวิตและเจริญเติบโต ซึ่งซีโอดีส่วนนี้ผลิตก๊าซขึ้นน้อยกว่าในซีโอดีที่ถูกใช้โดยแบกที่เรียสร้างมีเทน ทำให้ในการทดลองที่ 2 มีอัตราการผลิตก๊าซสูงกว่า (ยกเว้นที่ความเข้มข้นซัลเฟต 840 มก./ล.) จึงตั้งข้อสังเกตว่า ถ้าไม่นำซีโอดีที่ถูกกำจัดโดยแบกที่เรียสร้างกรคนำมาคิด อาจทำให้อัตราการผลิตก๊าซของทั้งสองการทดลองใกล้เคียงกันก็เป็นได้

3) สัดส่วนของก๊าซมีเทน

การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นซัลเฟตในน้ำเข้าทำให้ระบบผลิตก๊าซมีเทนลดลงและผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นสัดส่วนของก๊าซมีเทนน่าจะมีแนวโน้มลดลงตามซัลเฟตที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสัดส่วนของก๊าซแต่ละชนิดที่แต่ละความเข้มข้นซัลเฟตแสดงดังรูปที่ 4.31 ซึ่งพบว่าสัดส่วนของก๊าซมีเทนมีแนวโน้มลดลงจริงตามความคาดหมาย แต่การลดลงของเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนกลับลดลงแบบไม่มีนัยสำคัญมากนัก ทั้งนี้เป็นเพราะก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายน้ำได้มาก ทำให้สัดส่วนในวัฏภาคก๊าซน้อยมาก ๆ จนแทบไม่มีนัยสำคัญแต่ประการใด การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของก๊าซจึงอยู่ที่สัดส่วนระหว่างก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า โดยความเข้มข้นของ

ซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้สัดส่วนก๊าซมีเทนมีแนวโน้มลดลง สัดส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มีแนวโน้มสูงขึ้นในทั้งสองการทดลอง

พิจารณาการเปลี่ยนชนิดของของสารอาหาร พบว่าเมื่อเปลี่ยนมาใช้อะซิเตต สัดส่วนของก๊าซมีเทนที่ความเข้มข้นซัลเฟต 42 และ 84 มก./ล. ในการทดลองที่ 2 มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย และเพิ่มขึ้นที่ความเข้มข้นซัลเฟต 840 มก./ล.เล็กน้อยเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.31



ก. การทดลองที่ 1

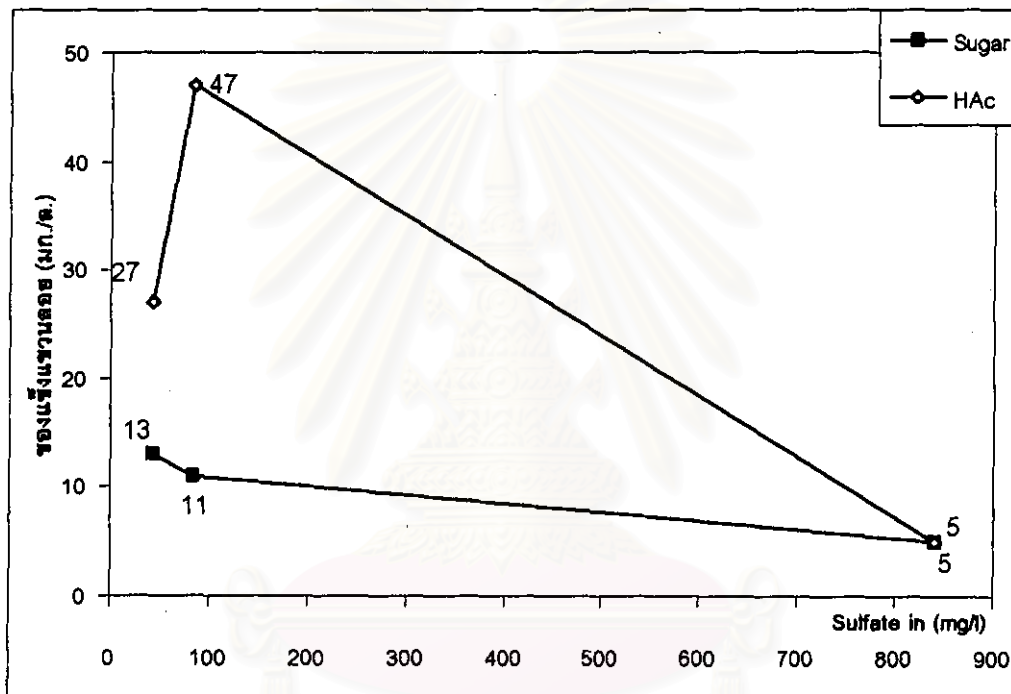
ข. การทดลองที่ 2

รูปที่ 4.31 สัดส่วนของก๊าซที่ความเข้มข้นซัลเฟตต่าง ๆ

พิจารณาที่ความเข้มข้นซัลเฟต 42 และ 84 มก./ล. ตามที่ได้สันนิษฐานไว้ว่าการใช้น้ำตาลเป็นสารอาหาร แบกที่เรียสร้างกรดจะดึงซัลไฟด์ไปใช้ส่วนหนึ่ง ปริมาณก๊าซที่ได้จึงน้อยลง แต่แบกที่เรียสร้างมีเทนจะผลิตก๊าซมีเทนในจำนวนโมลที่เท่ากับคาร์บอนไดออกไซด์ ถ้าปริมาณก๊าซที่ผลิตมากขึ้น คาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคก๊าซก็จะมีปริมาณมากขึ้นด้วย การเปลี่ยนมาใช้อะซิเตตเป็นสารอาหารจึงน่าจะทำให้สัดส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น แต่ว่าพร้อมกันนั้น การใช้อะซิเตตก็ทำให้พีเอชเพิ่มขึ้นด้วย คาร์บอนไดออกไซด์จึงละลายน้ำได้มากขึ้น ผลของทั้งสองส่วนนี้รวมกันจะทำให้สัดส่วนของก๊าซเปลี่ยนไปเล็กน้อย อีกทั้งผลการวิเคราะห์ก๊าซได้มาจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC การส่งตัวอย่างไปวิเคราะห์ห่างกันหลายเดือน มีการเตรียมก๊าซมาตรฐานใหม่ เราอาจ

4.3.7 ของแข็งแขวนลอย

ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำออกมีแนวโน้มแปรผันตามปริมาณก๊าซต่อวันที่เกิดขึ้น เนื่องจากความปั่นป่วนที่เกิดจากก๊าซที่หนีออกจากน้ำจะเป็นปัจจัยหลักในการพาเซลล์แบคทีเรียให้หลุดออกไปกับน้ำออก เพราะความเร็วไหลขึ้นถูกกำหนดให้คงที่ ประมาณเท่ากับ 0.0167 ม./ชม. เท่ากันทุกถังปฏิกรณ์ แต่ปริมาณก๊าซต่อวันแปรผกผันกับความเข้มข้นซัลเฟต ด้วยเหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.3.2 และ 4.3.3 ดังนั้นซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ของแข็งแขวนลอยในน้ำออกมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.32



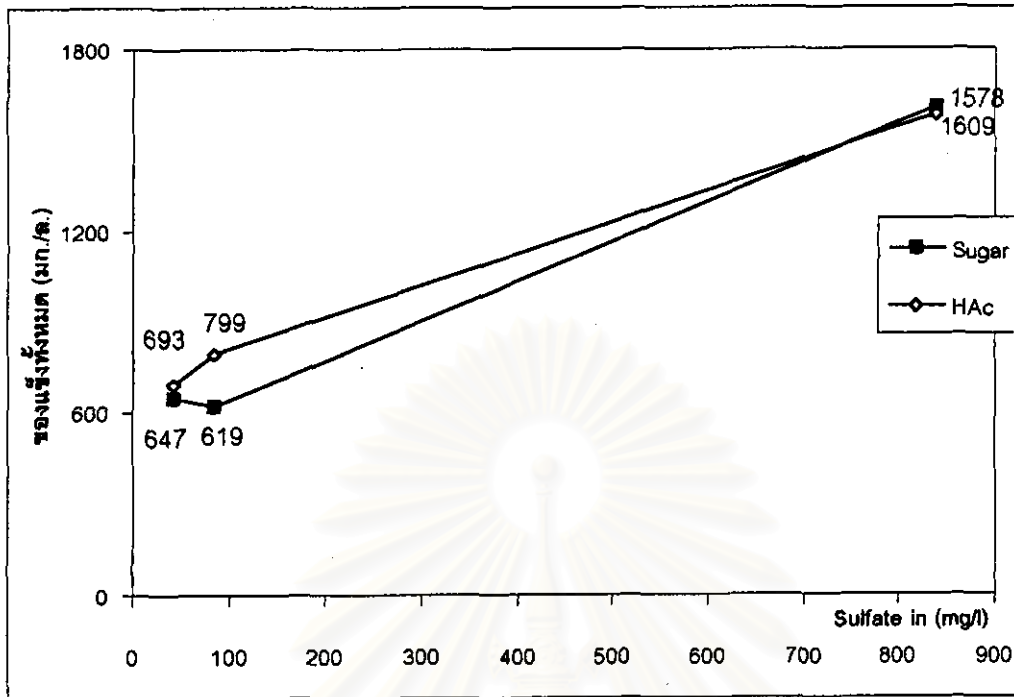
รูปที่ 4.32 ของแข็งแขวนลอยในน้ำออกที่อัตราส่วนซีโอติต่อซัลเฟตต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.32 ในการทดลองที่สองพบว่าแนวโน้มไม่เป็นไปตามที่คาดไว้ เนื่องจากค่าของแข็งแขวนลอยในการทดลองที่ใช้อะซิเตดเป็นสารอาหารที่ความเข้มข้นซัลเฟต 84 มก./ล. มีค่าสูงกระโดดขึ้นมา ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมของระบบ เช่น การเปลี่ยนสารอาหาร และความผิดพลาดจากการควบคุมระบบในช่วงเริ่มต้นการทดลองที่สองซึ่งปล่อยให้พีเอชของระบบเพิ่มขึ้นถึง 8.5 จนอาจทำให้การเกาะตัวของเมดแบคทีเรียเปลี่ยนไป อีกทั้งปริมาณก๊าซที่ได้ในการทดลองทั้งสองนี้ใกล้เคียงกัน ความผิดพลาดจากการเก็บตัวอย่างจึงอาจเป็นอีกประการหนึ่งที่ต้องนำมาพิจารณา และถ้าเราตัดค่าจากการทดลองนี้ทิ้ง แนวโน้มปริมาณของแข็งแขวนลอยก็มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นซัลเฟตที่เปลี่ยนไปตามที่คาดการณ์ไว้จริง



ค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำฝนที่ตกในพื้นที่ศึกษา ซึ่งพบว่าค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำฝนที่ตกในพื้นที่ศึกษา มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตรต่อวัน หรือเท่ากับ 540 มม./ปี ซึ่งค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำฝนที่ตกในพื้นที่ศึกษา มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตรต่อวัน หรือเท่ากับ 540 มม./ปี ซึ่งค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำฝนที่ตกในพื้นที่ศึกษา มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตรต่อวัน หรือเท่ากับ 540 มม./ปี

การกระจายตัวของปริมาณน้ำฝนในพื้นที่ศึกษา พบว่าปริมาณน้ำฝนที่ตกในพื้นที่ศึกษา มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตรต่อวัน หรือเท่ากับ 540 มม./ปี ซึ่งค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำฝนที่ตกในพื้นที่ศึกษา มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตรต่อวัน หรือเท่ากับ 540 มม./ปี



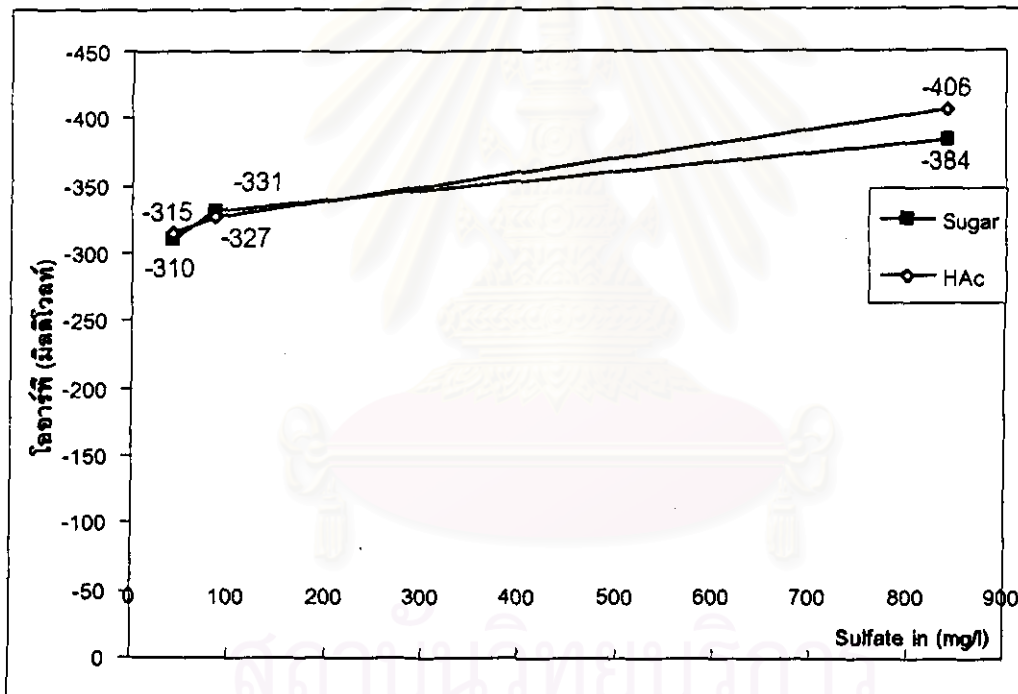
รูปที่ 4.33 ของแข็งทั้งหมดที่ความเข้มข้นซัลเฟตต่าง ๆ

4.3.8 โออาร์พี

ค่าโออาร์พีเป็นค่าที่วัดความต่างศักย์ของระบบโดยการวัดความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วมาตรฐาน 2 ขั้ว คือ แพลทตินัมซึ่งเป็นขั้วเฉื่อยกับขั้วซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ ในระหว่างการวัดค่าโออาร์พีของระบบ ขั้วมาตรฐานซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์จะทำหน้าที่เป็นทั้งตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอน ถ้าขั้วมาตรฐานซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์รับอิเล็กตรอนมากกว่าให้อิเล็กตรอน กระแสไฟฟ้าจะไหลจากขั้วซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ไปยังขั้วแพลทตินัม ความต่างศักย์ที่อ่านได้จะมีค่าเป็นบวก ถ้าขั้วมาตรฐานซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ให้อิเล็กตรอนมากกว่ารับอิเล็กตรอน ศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้จะมีค่าเป็นลบ ค่าโออาร์พีจึงสามารถบอกได้ว่าระบบมีแนวโน้มให้หรือรับอิเล็กตรอน โดยจะมีค่าเป็นบวกถ้าระบบมีแนวโน้มรับอิเล็กตรอน และจะมีค่าเป็นลบเมื่อระบบมีแนวโน้มให้อิเล็กตรอน สารต่าง ๆ ที่มีอยู่ในระบบจะเป็นตัวกำหนดค่าโออาร์พี กล่าวคือ ระบบอาจมีทั้งสารออกซิไดส์และสารรีดิวซ์อยู่ร่วมกัน เมื่อวัดค่าโออาร์พีออกมาค่าที่ได้จะเป็นค่ารวมของระบบ ไม่ได้เป็นค่าเฉพาะเจาะจงของสารหนึ่งสารใด แต่สารทั้งหมดในระบบจะมีผลต่อค่าโออาร์พี

เนื่องจากผลของปฏิกิริยารีดิวซ์ซัลเฟตและปฏิกิริยาสังเคราะห์มีเทนคือ ไฮโดรเจนซัลไฟด์, มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายน้ำได้ดีที่สุด โดยมีคาร์บอนไดออกไซด์และ

มีเทนละลายน้ำได้รองลงมา การวัดค่าไออาร์พีเป็นการวัดศักยภาพไฟฟ้าของระบบที่เป็นวัฏภาคของเหลว ดังนั้นเฉพาะสารที่ละลายอยู่ในน้ำเท่านั้นที่มีผลต่อค่าไออาร์พี แต่จากความดันพาร์เซิลของก๊าซมีเทนที่มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุดแต่ละอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต ดังนั้นมีเทนที่ละลายน้ำอยู่จะมีค่าใกล้เคียงกัน ด้วยเหตุนี้มีเทนจึงไม่มีผลต่อค่าไออาร์พีเท่าใดนัก สารที่ทำให้ค่าไออาร์พีแตกต่างกันไปที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตต่างกันจึงน่าจะเป็นซัลไฟด์ในระบบมากที่สุด ทั้งที่ในรูปของไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายน้ำไม่แตกตัวและไบซัลไฟด์ เพราะซัลไฟด์เป็นสารรีดิวซ์ที่มีอำนาจในการรีดิวซ์ค่อนข้างสูง ละลายอยู่ในน้ำได้มาก และมีค่าแตกต่างกันออกไปในแต่ละอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต ดังจะเห็นได้ว่าความเข้มข้นซัลเฟตที่ลดลงจะทำให้ทั้งซัลไฟด์ทั้งหมดที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้น และค่าไออาร์พีก็ติดลบมากขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 ค่าไออาร์พีที่ความเข้มข้นซัลเฟตต่าง ๆ

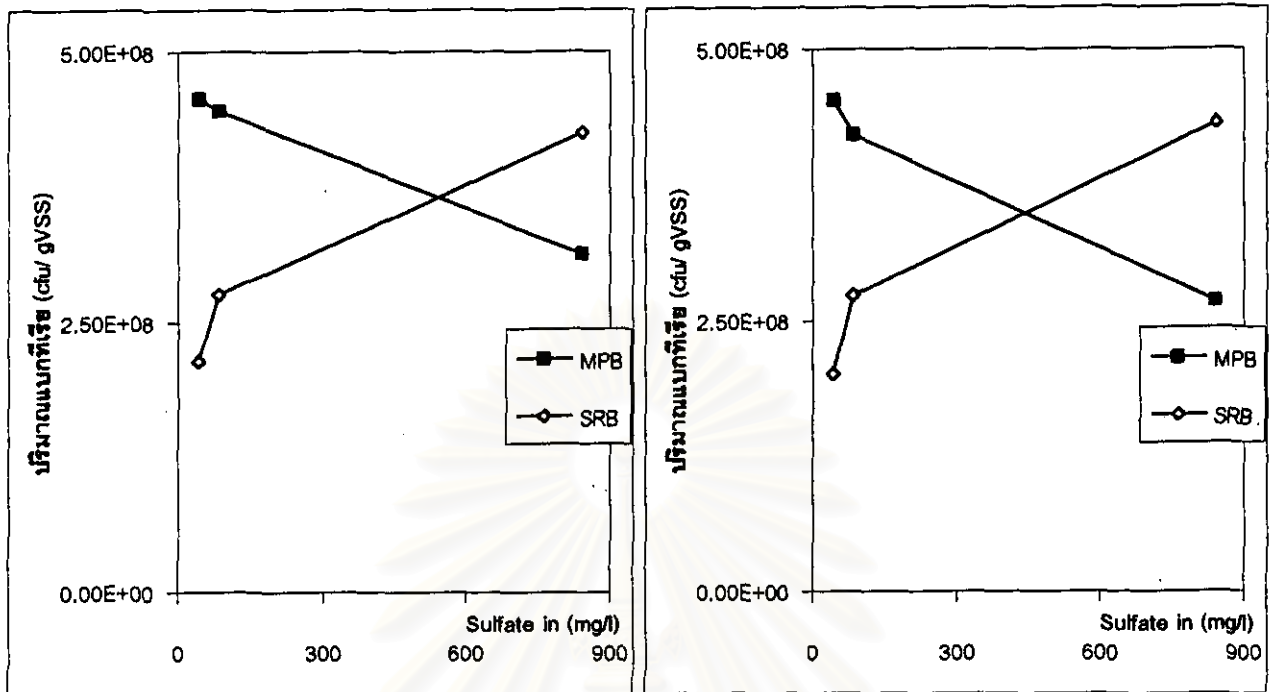
พิจารณการเปลี่ยนสารอาหารที่ความเข้มข้นซัลเฟต 42 และ 84 มก./ล. ซึ่งทำให้ปริมาณซัลไฟด์ลดลงเล็กน้อย ก็พบว่าค่าไออาร์พีก็ติดลบลดลงเล็กน้อยเช่นกัน ในขณะที่ปริมาณซัลไฟด์ที่ความเข้มข้นซัลเฟต 840 มก./ล. จะเพิ่มขึ้นค่อนข้างมาก ทำให้ค่าไออาร์พีติดลบมากขึ้น

4.3.9 ปริมาณแบกทีเรีย

เนื่องจากความเข้มข้นซัลเฟตมีผลโดยตรงต่อการใช้ซีโอติของแบกทีเรีย แบกทีเรียที่แย่งใช้ซีโอติได้มากก็จะเจริญเติบโตได้มากกว่า การเพิ่มความเข้มข้นของซัลเฟตจึงมีผลทำให้แบกทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและแบกทีเรียสร้างมีเทนมีแนวโน้มลดลง แต่ปริมาณแบกทีเรียในระบบไม่ได้ดูแต่เพียงสัดส่วนการใช้สารอาหาร แต่ยังขึ้นอยู่กับค่ายิลด์และปริมาณของแบกทีเรียในตอนเริ่มต้นด้วยซึ่งจะมีผลต่อระยะเวลาการเข้าสู่ภาวะคงตัว โดยค่ายิลด์จะมีผลต่อปริมาณการเพิ่มของแบกทีเรีย ส่วนปริมาณแบกทีเรียในตอนเริ่มต้นจะมีผลต่อระยะเวลาการเข้าสู่ภาวะคงตัว ในการทดลองนี้สำหรับกรณีของความเข้มข้นซัลเฟต 42 และ 84 มก./ล. เชื้อแบกทีเรียที่นำมาเลี้ยงเป็นเชื้อที่เป็นเม็ดแล้วและเคยถูกเลี้ยงด้วยน้ำเสียที่มีซัลเฟตมาก่อน (จากน้ำเสียที่เตรียมด้วยน้ำประปาซึ่งมีซัลเฟตเข้มข้นประมาณ 30 - 50 มก./ล.) การเข้าสู่ภาวะคงตัวจึงใช้เวลาไม่นานนัก แต่ที่ความเข้มข้นซัลเฟต 840 มก./ล. ต้องใช้ระยะเวลาค่อนข้างนาน แต่ระยะเวลานับจากการเริ่มเดินระบบจนสิ้นสุดในการทดลองแรกใช้เวลานานถึง 9 เดือน ตัวแปรต่าง ๆ จึงมีค่าคงที่ จึงเชื่อว่าระบบเข้าสู่ภาวะคงตัว ปริมาณแบกทีเรียก็มีความเปลี่ยนแปลงน้อยแล้ว

ปริมาณแบกทีเรียสร้างมีเทนในระบบมีแนวโน้มแปรผกผันกับความเข้มข้นซัลเฟต ดังแสดงในรูปที่ 4.35 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัดส่วนและปริมาณของแบกทีเรียสร้างมีเทนมีค่าลดลงตามความเข้มข้นซัลเฟตดังที่คาดไว้จริง

ส่วนการเปลี่ยนชนิดของสารอาหาร มีผลให้ปริมาณแบกทีเรียสร้างมีเทนในระบบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ความเข้มข้นซัลเฟต 42 และ 84 มก./ล. และมีแนวโน้มลดลงที่ความเข้มข้นซัลเฟต 840 มก./ล. ดังแสดงในรูปที่ 4.35 ซึ่งก็อธิบายได้จากข้อสันนิษฐานที่ว่า การเปลี่ยนชนิดของสารอาหารมีผลให้แบกทีเรียสร้างมีเทนและแบกทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตมีซีโอติให้ใช้เพิ่มขึ้น โดยในช่วงซีโอติมากเกินพอ ซีโอติที่เพิ่มขึ้นถูกใช้โดยแบกทีเรียสร้างมีเทน แบกทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจะใช้ซีโอติที่เพิ่มขึ้นแทน ทำให้ปริมาณแบกทีเรียสร้างมีเทนเพิ่มขึ้นที่ อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ปริมาณแบกทีเรียเป็นสิ่งที่ต้องใช้ความชำนาญและระมัดระวังสูง การเจือจางเพื่อนับจำนวนก็เป็นเรื่องที่อาจเกิดความผิดพลาดได้มาก ผลการนับจำนวนเองก็มีความแตกต่างในเชิงตัวเลขที่ไม่มากนักและอาจมองได้ว่าไม่มีนัยสำคัญแต่อย่างใด ยกเว้นที่ความเข้มข้นซัลเฟต 840 มก./ล. ซึ่งปริมาณแบกทีเรียสร้างมีเทนลดลงค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับที่อัตราส่วนอื่น การเปลี่ยนแปลงชนิดของสารอาหารจึง



ก. การทดลองที่ 1

ข. การทดลองที่ 2

รูปที่ 4.35 ปริมาณแบคทีเรียที่ความเข้มข้นซัลเฟตต่าง ๆ

ไม่ได้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงจำนวนแบคทีเรียมากนัก แต่จะมีผลต่อการทำงานของแบคทีเรียมากกว่า และเป็นที่น่าสังเกตว่า ที่ความเข้มข้นซัลเฟต 840 มก./ล. ในการทดลองที่สองซึ่งเปลี่ยนมาใช้อะซิเตตเป็นสารอาหาร พบว่าวัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นไม่ได้แต่ก็ยังพบแบคทีเรียสร้างมีเทน ในปริมาณที่ลดลงจากเดิม ซึ่งที่ความเข้มข้นซัลเฟตนี้มีสัดส่วนการใช้รีโอติโดยแบคทีเรียสร้างมีเทนเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าแม้แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจะมีความสามารถมากกว่าในการเจริญเติบโตและการใช้สารอาหาร ก็ยังคงมีแบคทีเรียสร้างมีเทนในระบบอยู่ เพียงแต่การทำงานอาจด้อยประสิทธิภาพลง และแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตก็ไม่สามารถใช้รีโอติได้ทั้งหมด 100 เปอร์เซ็นต์ ข้อสันนิษฐานที่อธิบายว่าเพราะเหตุใดแบคทีเรียสร้างมีเทนยังคงทำงานอยู่ได้ ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.3.2

4.3.10 ลักษณะการเกาะตัวของเม็ดแบคทีเรีย

ลักษณะการเกาะตัวของเม็ดแบคทีเรียเป็นสิ่งที่ไม่สามารถแสดงออกมาได้ในทางตัวเลข แต่สามารถสังเกตดูได้ด้วยตาเปล่า ซึ่งจะพบว่าที่อัตราส่วนซีโอติต่อซัลเฟตเท่ากับ 0.6 แบคทีเรียใน

ระบบมีลักษณะเป็นผงเกือบทั้งหมด ส่วนที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซิลเฟต 12 และ 6 บริเวณตอนล่างมีลักษณะเห็นเป็นเม็ดได้ชัดเจน แต่เม็ดจะมีขนาดเล็กลงตามความสูงที่เพิ่มขึ้นจนมีลักษณะเป็นผงที่ตอนบนสุด ผลการสังเกตดังกล่าวจึงน่าจะสอดคล้องกับงานของ Alphenaar และคณะ (1993) ที่กล่าวว่าในถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีที่มีกระบวนการซิลเฟตรีดักชันเป็นกระบวนการหลัก แแบกที่เรียบริตวิธซิลเฟตไม่สามารถสร้างเม็ดสลัดจ์ขึ้นมาได้เองโดยไม่มีแบกที่เรียสร่างมีเทน สลัดจ์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นฟล็อกเท่านั้น ข้อเสนอพื้นฐานเกี่ยวกับสลัดจ์ที่มีลักษณะเป็นเพียงฟล็อกที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซิลเฟตต่ำนั้นน่าจะเป็นเพราะ การที่มีแบกที่เรียบริตวิธซิลเฟตอยู่มากทำให้ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ต่อวันมีค่าน้อย แแบกที่เรียที่อยู่ในสภาพแวดล้อมแบบนี้ได้ไม่จำเป็นต้องเกาะกันเป็นเม็ดสลัดจ์ นอกจากนี้ความสามารถในการเกาะติดของแบกที่เรียบริตวิธซิลเฟตอาจมีค่าน้อยกว่าแบกที่เรียสร่างมีเทน แต่ก็ยังมีความสามารถในการเกาะติดเพียงพอที่จะอยู่ในระบบได้

4.4 การควบคุมระดับการเกิดซิลเฟตรีดักชัน

ระดับการเกิดซิลเฟตรีดักชันสามารถวัดได้จากประสิทธิภาพการกำจัดซิลเฟตของระบบ ถ้าระบบใดมีประสิทธิภาพการกำจัดซิลเฟตสูง ก็แสดงว่าระบบนั้นมีระดับการเกิดซิลเฟตรีดักชันที่สูง แต่ในการพิจารณาระดับการเกิดซิลเฟตรีดักชัน จำเป็นต้องแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงที่ซิลเฟตเป็นตัวจำกัดการเจริญเติบโต และช่วงที่ซิลเฟตมากเกินไป ทั้งนี้เพราะในช่วงที่ซิลเฟตมากเกินไป การใช้ซีโอดีของแบกที่เรียบริตวิธซิลเฟตถูกจำกัดโดยซีโอดีในระบบ ซิลเฟตมีมากพออยู่แล้ว การเติมซิลเฟตให้กับแบกที่เรียเพิ่มขึ้นก็ไม่ได้ช่วยให้การทำงานของแบกที่เรียบริตวิธซิลเฟตดีขึ้นแต่ประการใด ซีโอดีที่ถูกใช้โดยแบกที่เรียบริตวิธซิลเฟตจึงเพิ่มขึ้นน้อยมากหรือไม่เพิ่มขึ้นตามซิลเฟตที่เพิ่มขึ้น แต่ปริมาณซิลเฟตที่เพิ่มขึ้นกลับทำให้ระดับการเกิดซิลเฟตรีดักชันลดลง ส่วนในช่วงที่ซิลเฟตเป็นตัวจำกัดการเจริญเติบโต ซิลเฟตในระบบเกือบทั้งหมดจะถูกใช้โดยแบกที่เรียบริตวิธซิลเฟตเพราะแบกที่เรียบริตวิธซิลเฟตมีความสามารถในการใช้ซีโอดีได้ดีกว่าแบกที่เรียสร่างมีเทน ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของซิลเฟตจึงส่งผลกระทบต่อระดับการเกิดซิลเฟตรีดักชันโดยตรง

ปัจจัยหนึ่งที่ต้องนำมาพิจารณาด้วยก็คือ ความเข้มข้นต่ำสุดของซิลเฟตในระบบที่แบกที่เรียบริตวิธซิลเฟตสามารถนำไปใช้ได้ ดังนั้นแม้จะมีซีโอดีมากเกินไป ซิลเฟตก็จะไม่ถูกรีดิวซ์ทั้งหมด แต่จะมีส่วนหนึ่งหลุดไปกับน้ำออกเสมอ และความเข้มข้นต่ำสุดนี้ก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อซิลเฟตเข้าระบบเพิ่มขึ้นด้วย ดังจะเห็นได้จากการทดลองแรก ช่วงที่ซีโอดีมากเกินไป เมื่อซิลเฟตเข้าระบบเพิ่มจาก 42 เป็น 84 มก./ล. ซิลเฟตในน้ำออกเพิ่มขึ้นจาก 4 มก./ล. เป็น 11.5 มก./ล.

จากตารางที่ 4.11 ผู้วิจัยได้นำเอาตัวเลข 0.265 คูณกับปริมาณซัลเฟตในน้ำเข้า(มก./ล.) ได้เป็นปริมาณซัลไฟด์ละลายน้ำ(มก./ล.) ซึ่งจะเห็นได้ว่า ที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตสูง ๆ (มากกว่า 3) ปริมาณซัลไฟด์ที่ได้จากการคูณตัวเลข 0.265 กับซัลเฟตน้ำเข้าจะใกล้เคียงกับซัลไฟด์ที่ได้ในงานจริงมาก แต่เมื่อใดก็ตามที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตลดลงเข้าใกล้ 0.67 ซัลไฟด์ที่ได้จากการคูณตัวเลข 0.265 ก็ยิ่งแตกต่างจากงานจริงมากขึ้น เนื่องจากที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเข้าใกล้ 0.67 แบกที่เรียบริตซ์ซัลเฟตกับแบกที่เรียสร้างมีเทนจะแย่งใช้สารอาหารกันอย่างรุนแรง แบกที่เรียประเภทใดจะเป็นฝ่ายใช้ซีโอดีในระบบได้เท่าใดต้องดูปัจจัยอื่น ๆ นอกเหนือจากอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตประกอบด้วย ซัลไฟด์ที่สร้างขึ้นจึงไม่ได้เป็นส่วนโดยตรงกับซัลเฟตที่เข้าระบบ ทำให้ค่าตัวเลข 0.265 ไม่เหมาะสมที่จะใช้ในกรณีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตต่ำกว่า 2 หรือ 3 นอกจากนี้ ข้อจำกัดประการหนึ่งของการใช้ตัวเลข 0.265 ก็คือใช้ได้ในช่วงพีเอช 6 - 7.5 เท่านั้น เนื่องงานวิจัยนี้และงานวิจัยอื่นที่อ้างถึงในตารางที่ 4.11 ทำขึ้นในช่วงพีเอชที่เหมาะสมต่อการทำงานของแบกที่เรียสร้างมีเทนเพื่อศึกษาการแข่งขันของแบกที่เรียสร้างมีเทนและแบกที่เรียริตซ์ซัลเฟต ดังนั้นอาจใช้ตัวเลขนี้ไม่ได้กับถังสร้างกรด (fermentation tank) ที่พีเอชน้ำออกต่ำ

4.5 การกำจัดโลหะหนัก

การทดลองเติมนิกเกิลเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักของระบบ เป็นการทดลองที่ทำเพิ่มเติมขึ้นภายหลังจากสิ้นสุดการทดลองเกือบทั้งหมดแล้ว โดยการเติมนิกเกิลให้กับระบบจะค่อย ๆ เพิ่มความเข้มข้นนิกเกิลในน้ำเข้าให้มากขึ้นเรื่อย ๆ เป็นระยะเวลาานาน 2 เดือน ความเข้มข้นของนิกเกิลที่สูงสุดจะสูงคือ 175 มก./ล. ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.12

สาเหตุที่เลือกนิกเกิลเป็นตัวทดสอบเนื่องจากนิกเกิลเป็นโลหะหนักที่หาได้ง่ายในห้องปฏิบัติการ อีกทั้งผู้วิจัยไม่ได้วิเคราะห์ความเข้มข้นโลหะหนักเอง จึงเลือกโลหะหนักที่ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์บ่อยครั้งในช่วงเวลาที่ศึกษาการกำจัดโลหะหนัก โดยการวิเคราะห์ได้ให้คุณภาณุต่วนเทศ นิสิตระดับปริญญาโทซึ่งศึกษาเกี่ยวกับนิกเกิลเป็นผู้วิเคราะห์ให้ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.11 ซึ่งพบว่า การเติมโลหะหนักนิกเกิลให้กับถังปฏิกรณ์ที่มีซัลเฟตในน้ำเข้า 840 มก./ล. เพิ่มขึ้นจะทำให้ความเข้มข้นในน้ำออกของนิกเกิลเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งอธิบายได้ด้วยค่า K_{10} หรือค่าคงที่การละลายของนิกเกิลซัลไฟด์ กล่าวคือ ซัลไฟด์ที่ผลิตได้มีค่าค่อนข้างคงที่เนื่องจากทำงานในสภาวะคงตัวและไม่มีการเปลี่ยนแปลงซีโอดีหรือความเข้มข้นซัลเฟตมากนัก สิ่งที่เปลี่ยนแปลงคือความเข้มข้นของนิกเกิลที่เพิ่มสูงขึ้น แต่ผลคูณของความเข้มข้นระหว่างซัลไฟด์และนิกเกิลในน้ำมีค่าคงที่ ดังนั้นนิกเกิลที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้นิกเกิลในน้ำออกเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนผลของสารอาหารที่มีต่อ

ตารางที่ 4.12 ความเข้มข้นของนิกเกิลในน้ำออก

สารอาหาร: น้ำตาลทราย						
ซีโอดีเข้า (มก./ล.)	ซีโอดีออก (มก./ล.)	ซัลเฟตเข้า (มก./ล.)	ซัลเฟตออก (มก./ล.)	ซัลไฟด์ (มก./ล.)	นิกเกิล (มก./ล.)	
					เข้า	ออก
521	37	834	295	165	20	0.29
517	25	851	282	170	20	0.28
527	42	816	254	174	20	0.29
517	27	843	293	153	40	0.30
523	27	811	292	147	40	0.54
522	29	813	281	132	75	0.37
523	34	844	257	139	75	0.37
536	35	860	284	87	175	0.78
517	21	843	299	83	175	0.80
สารอาหาร: อะซิเตด						
ซีโอดีเข้า (มก./ล.)	ซีโอดีออก (มก./ล.)	ซัลเฟตเข้า (มก./ล.)	ซัลเฟตออก (มก./ล.)	ซัลไฟด์ (มก./ล.)	นิกเกิล (มก./ล.)	
					เข้า	ออก
507	39	834	245	182	20	0.39
503	19	848	238	184	20	0.34
524	46	821	249	176	20	0.37
510	28	848	242	174	40	0.39
500	43	816	251	162	40	1.07
514	25	822	217	154	75	1.27
508	14	836	223	160	75	0.88
524	28	848	225	108	175	1.09
516	27	843	231	103	175	1.09

การกำจัดนิกเกิล พบว่าในถังปฏิกรณ์ที่ใช้อะซิเตดเป็นสารอาหารมีประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักต่ำกว่า ทั้งที่พีเอชของถังปฏิกรณ์ที่ใช้อะซิเตด (≈ 7.26) มากกว่าถังที่ใช้น้ำตาลทราย (≈ 6.76) สันนิษฐานว่าเกิดจากขั้นตอนการเตรียมน้ำเสีย พีเอชน้ำเข้าของถังที่ใช้น้ำตาลทรายมีค่าประมาณ 8.2 แต่พีเอชน้ำเข้าของถังที่ใช้อะซิเตดมีค่าประมาณ 5.3 ซึ่งพีเอชน้ำเข้าที่ 8.2 อาจทำให้นิกเกิล

บางส่วนอยู่ในรูปของตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ นิกเกิลที่เข้าระบบจริงอาจไม่เท่ากับที่คาดไว้ในตอนแรก จึงทำให้นิกเกิลในน้ำออกต่ำกว่าที่ควรเป็น

อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาว่าในระบบมีซัลไฟด์มากเกินไป จากค่า K_{sp} ของนิกเกิล จะพบว่านิกเกิลในระบบจะมีอยู่น้อยมากและไม่น่าจะตรวจพบได้ แต่ในน้ำออกกลับตรวจพบนิกเกิลอยู่ ทั้งนี้เพราะค่า K_{sp} บอกถึงความเข้มข้นสูงสุดที่สารจะละลายน้ำอยู่ได้และเป็นค่าที่จุดสมดุล แต่ไม่ได้บอกถึงอัตราในการตกตะกอนผลึกของสาร จึงเป็นไปได้ว่าเวลาก็กในระบบยังมีค่าน้อยเกินไป ทำให้การตกตะกอนของโลหะนิกเกิลยังไม่เข้าสู่สมดุล หากต้องการความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำออกที่น้อยกว่านี้อาจจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณซัลไฟด์หรือเพิ่มเวลาก็กให้ยาวนานขึ้น

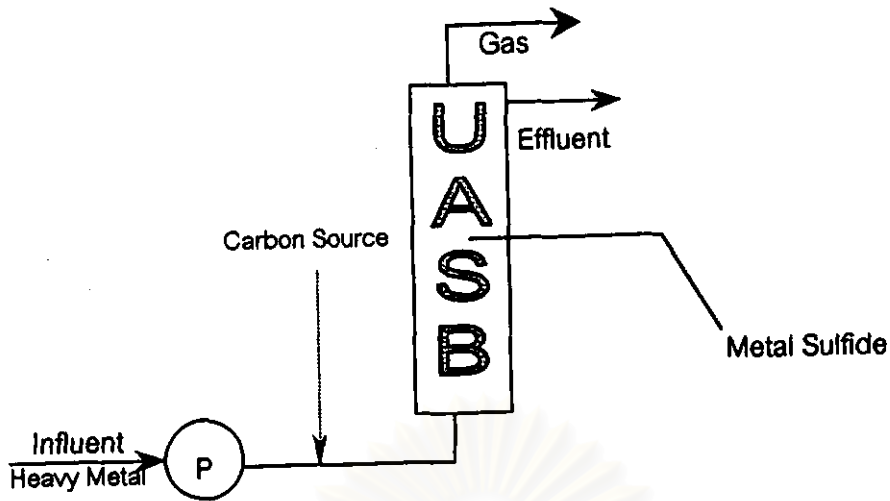
พิจารณาในแง่ของความเป็นพิษของโลหะหนัก พบว่าการเติมโลหะหนักไม่รบกวนการทำงานของระบบแต่อย่างใด ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอติและรีดิวซ์ซัลเฟตยังมีค่าเท่าเดิม ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักอยู่ระหว่าง 97 - 99 เปอร์เซ็นต์ แต่การเพิ่มปริมาณโลหะหนักมีแนวโน้มทำให้ปริมาณโลหะหนักในน้ำออกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยความเข้มข้นโลหะหนักสูงสุดคือ 175 มก./ล. สามารถลดลงได้เหลือเพียง 1.1 มก./ล.

4.6 แนวทางการประยุกต์ใช้

เนื่องจากเป้าหมายของการสร้างซัลไฟด์ก็คือการนำซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นไปตกตะกอนโลหะหนัก แต่การใช้งานจริงยังเป็นสิ่งที่ต้องศึกษากันให้มากขึ้น เนื่องจากความรู้ที่มีอยู่ ณ ปัจจุบันนี้ยังไม่สามารถตอบคำถามต่าง ๆ ได้ทั้งหมด อีกทั้งการออกแบบก็ยังขาดข้อมูลอยู่อีกมาก แต่ผู้วิจัยใคร่ขอเสนอระบบกำจัดโลหะหนักอย่างคร่าว ๆ ไว้เพื่อเป็นแนวทางในการใช้งานต่อไปในอนาคต

- การใช้ระบบยูเอเอสบีกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยตรง

แนวคิดของระบบนี้แสดงดังรูปที่ 4.36

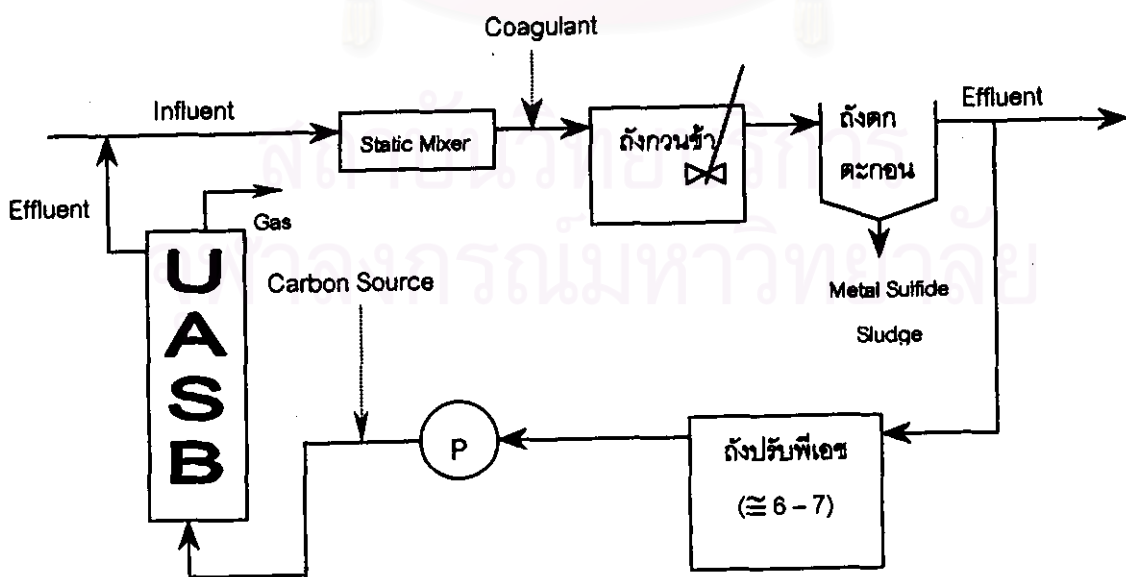


รูปที่ 4.36 การใช้ระบบยูเอเอสบีกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยตรง

ระบบนี้มีข้อดีที่สามารถดักจับตะกอนซัลไฟด์ให้อยู่ในระบบได้โดยตรง กลไกการดักจับซัลไฟด์มีทั้งการดูดติดผิวทางเคมี การกรอง และการตกตะกอนผลึก ไม่จำเป็นต้องมีระบบกำจัดตะกอนต่อ แต่อาจต้องสร้างระบบที่มีขนาดใหญ่เพื่อให้ได้เวลากักที่เหมาะสม และอาจมีผลกระทบจากการสะสมของโลหะหนักในระบบ

- การใช้น้ำออกจากระบบยูเอเอสบีที่มีซัลไฟด์ในการตกตะกอนโลหะหนัก

แนวคิดของระบบนี้แสดงดังรูปที่ 4.37

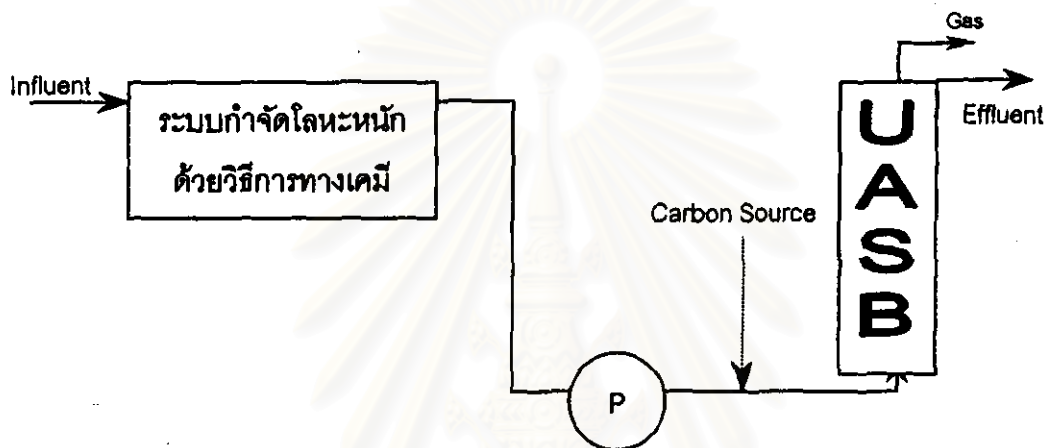


รูปที่ 4.37 ตัวอย่างการนำซัลไฟด์ในน้ำออกจากระบบยูเอเอสบีมาใช้กำจัดโลหะหนัก

ระบบนี้มีข้อดีที่สามารถหลีกเลี่ยงการสะสมของโลหะหนักในระบบได้ แต่ต้องมีระบบกำจัดตะกอนซิลไฟด์ต่อซึ่งอาจมีความยุ่งยากมากขึ้นในการจัดการ

- การใช้ระบบยูเอเอสบีร่วมกับระบบบำบัดทางเคมี

แนวคิดของระบบนี้แสดงดังรูปที่ 4.38



รูปที่ 4.38 ตัวอย่างการใช้ระบบยูเอเอสบีร่วมกับระบบบำบัดทางเคมี

แนวความคิดของการใช้ระบบนี้ก็เพื่อเป็นระบบกำจัดโลหะหนักที่อาจกำจัดได้ไม่หมดด้วยระบบบำบัดทางเคมี หรือใช้เพื่อเป็นระบบบำบัดขั้นสุดท้ายหรือรองสุดท้ายเพื่อให้แน่ใจว่ามีโลหะหนักในน้ำออกต่ำกว่ามาตรฐาน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย