

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

5.1 การเริ่มต้น

เนื่องจากการวิจัยในระบบนี้ เป็นเรื่องที่ยังใหม่ จึงยังมีผู้วิจัยไม่มากนัก แม้แต่ในต่างประเทศเองก็ตาม สำหรับประเทศไทย ยังไม่พบว่ามีผู้ทำการศึกษาเรื่องนี้มาก่อน แต่ได้มีการนำระบบนี้มาใช้ โดยสร้างระบบบำบัดน้ำเสีย ของโรงงานสุรากรมสรรพสามิต ซึ่งกลุ่มสุราก็เป็นผู้ดำเนินการทั้งหมด 12 โรงทั่วประเทศ แต่ยังมีปัญหาในการควบคุมระบบ ให้ทำงานได้ตามประสิทธิภาพ (ไทยรัฐ, 7 สิงหาคม 2530, ภาคผนวก ข) และขณะที่งานวิจัยนี้เริ่มต้นก็ได้มี นิสิตชั้นปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาและคณะเดียวกันกับผู้วิจัย ได้ทำการศึกษาวิจัยเพื่อเป็นวิทยานิพนธ์ในหัวข้อที่คล้ายกัน ด้วยการใช้น้ำแบ่ง จากโรงงานทำแบ่งมันสำปะหลัง เป็นสารอาหาร โดยได้ทำการทดลองที่สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์ แห่งประเทศไทย และเสร็จสิ้นการทดลองในเวลาใกล้เคียงกัน

จากสาเหตุที่กล่าวมานี้เองทำให้ การที่จะหาเอกสารเฉพาะ เพื่อค้นคว้าสำหรับงานวิจัยจึงมีจำนวนน้อย การเริ่มต้นของงานวิจัยต้องออกแบบและจัดสร้างอุปกรณ์ต่าง ๆ ขึ้นมาใช้ให้เหมาะสม ดังนั้นในระยะแรกจึงได้ใช้เวลากับอุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ เป็นอย่างมาก และเมื่อได้อุปกรณ์แล้ว หลังจากการเริ่มทดลองก็ยังมีปัญหาอยู่เสมอ ต้องทำการแก้ไข เปลี่ยนแปลง และปรับแก้อุปกรณ์ ตลอดทั้งวิธีการควบคุม โดยเป็นการลองผิดลองถูก จนกระทั่งการควบคุมเป็นไปตามความต้องการ

ระยะเวลา 16 เดือนของการทำงาน จึงได้ใช้เวลากับปัญหาของอุปกรณ์ และการควบคุมระบบ ประมาณปีเศษ และเมื่อทุกอย่างทำงานได้ตามที่ต้องการแล้ว ก็ใช้เวลาอีกประมาณ 3 เดือนเศษ ในการหาข้อมูลที่ต้องการ เหตุที่ใช้เวลาในการเก็บข้อมูลไม่มากนัก เพราะระบบสามารถปรับตัวได้รวดเร็ว การเปลี่ยนแปลงอัตราการให้สารอาหาร ในถังหมักก๊าซ สามารถ



ปรับตัวได้ในระยะเวลาอันสั้น จึงทำให้ได้ข้อมูลตามต้องการ จึงเป็นการแสดงให้เห็นว่า การย่อยสลายแบบไร้อากาศสองขั้นตอนนี้ สามารถทำงานได้ดีเมื่อการควบคุมถูกต้อง

5.2 การทดลองและผลการทดลอง

จากแผนผัง (flow chart) ของการทดลองตามรูปที่ 4.2 จะเห็นว่า ได้ใช้ถังหมักกรด และถังตกตะกอนอย่างละหนึ่งถัง แต่ได้ใช้ถังหมักก๊าซ สองถัง ดังนั้นน้ำที่เข้าสู่ถังหมักก๊าซทั้งสองจะมีคุณสมบัติเหมือนกันในแต่ละชุดการทดลอง

ในการทดลอง ได้ใช้ค่าความเข้มข้นของสารอาหาร ในรูปของ ซีโอดี อยู่ในช่วงประมาณ 5,000 มก/ล เพื่อป้อนเข้าสู่ระบบ โดยใช้ขยะที่เตรียมไว้แล้ว และเก็บอยู่ในตู้เย็น มาทำการเจือจางด้วยน้ำประปา ให้ได้ค่าความเข้มข้นตามต้องการ แล้วจึงใส่ในถัง ที่มีชุดกวน เพื่อให้สารอาหารมีความเข้มข้นสม่ำเสมอ ก่อนที่จะถูกปั๊มส่งสายรัด สูดเข้าสู่ถังหมักกรด ต่อไป สาเหตุที่ใช้ความเข้มข้นของสารอาหาร ในรูปของ ซีโอดี เพียง 5,000 มก/ล เนื่องจากขยะที่ใช้เป็นส่วนใหญ่เป็น พืชผัก ที่ผ่านการสับ และถูกบั่นด้วยเครื่องบั่นมาแล้ว แต่ก็ยังมีเส้นใยอยู่เป็นจำนวนมาก และเมื่อได้ทดลองใช้ความเข้มข้นมากกว่านี้ ปรากฏว่า ไม่สามารถป้อนเข้าสู่ถังหมักกรดได้ด้วย ปั๊มส่งสายรัด อย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ เพราะปัญหาการอุดตัน จึงจำเป็นต้องใช้ค่าความเข้มข้นของ ซีโอดี ของสารอาหารเพียง ประมาณ 5,000 มก/ล เท่านั้น

ในการทดลองได้กำหนดให้ระยะเวลาการหมัก (HRT) ของถังหมักกรดคงที่ ประมาณ 0.88-0.89 วัน โดยมีอัตราการป้อนสารอาหารประมาณ 33.70-33.90 ลิตร/วัน และมีอัตราการจ่ายสารอาหารเท่ากับ 5.15-5.48 กก ซีโอดี/ม³-วัน สาเหตุที่ใช้ค่า HRT นี้ เนื่องจากการทดลองพบว่า ถ้ามี HRT น้อยกว่านี้ ปรากฏว่าการย่อยสลายภายในถังหมักกรด จะล้มเหลว เศษผักที่ใช้เป็นอาหาร จะย่อยไม่ทัน พวกเส้นใยจะสะสมในถังหมักกรด และทำให้ปั๊มหอยโข่งที่ใช้สำหรับการกวน เกิดการอุดตัน จากพวกเส้นใยต่าง ๆ แต่ในขณะเดียวกัน ถ้าให้มี HRT มากเกินไป ปรากฏว่า ค่าของกรดโวลไทล์ภายในถังหมักกรด จะมีน้อยกว่าค่าของกรดโวลไทล์ของสารอาหาร ก่อนเข้าสู่ระบบ ซึ่งแสดงว่า กรดโวลไทล์ถูกใช้ไปภายในถังหมักกรด เกิดเป็นก๊าซขึ้น ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ ดังนั้นจึงได้ใช้ค่า HRT ที่ต่ำที่สุดเพื่อประโยชน์สูงสุดของการ

ทำงานของระบบนี้ และสำหรับถึงหมักก๊าซ จะเปลี่ยนแปลงค่า HRT ทั้งสิ้น 4 ค่า เพื่อที่จะหาประสิทธิภาพของระบบ

ตารางที่ 5.1 แสดงคุณลักษณะต่าง ๆ เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ โดยในชุดการทดลองที่หนึ่ง ให้ถึงหมักก๊าซไบที่หนึ่งมีค่า HRT เฉลี่ย 4.28 วัน และไบที่สองมีค่า HRT เฉลี่ย 10.50 วัน สำหรับชุดการทดลองที่สอง ให้ถึงหมักก๊าซไบที่หนึ่งมีค่า HRT เฉลี่ย 2.61 วัน และไบที่สองมีค่า HRT เฉลี่ย 15.03 วัน และตารางที่ 5.2 จากผลการทดลองของ คักดีชัย โอภาสวัชชัย (2527) ที่ใช้สารอาหารชนิดเดียวกัน แต่ความเข้มข้นของสารอาหารและวิธีทดลองต่างกัน เพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณาสำหรับการเปรียบเทียบกับผลการทดลองครั้งนี้ว่าจะมีประสิทธิภาพต่างกันอย่างไรต่อไป

5.3 การเปลี่ยนแปลงค่าต่าง ๆ ของระบบทั้งหมด

5.3.1 พีเอช, ความเป็นด่าง และกรดโวลาทิลล์

จากรูปที่ 5.1 ถึง รูปที่ 5.4 ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของพีเอช, สภาพความเป็นด่าง และกรดโวลาทิลล์ ของสารอาหารที่อยู่ในถังกวน และในถังปฏิกิริยาต่าง ๆ เมื่อระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลของการทดลอง 4 ค่า คือที่ HRT ของถึงหมักก๊าซเท่ากับ 2.61, 4.28, 10.50 และ 15.03 วัน ตามลำดับ พบว่าค่าพีเอช เปลี่ยนแปลงในทางเพิ่มขึ้น คือค่าพีเอชของสารอาหารเพิ่มขึ้นเมื่อถูกบ้อนเข้าสู่ระบบ ทั้งที่ไม่มีการเติมสารเคมีเพื่อปรับพีเอชแต่อย่างใด ซึ่งสาเหตุมาจาก สารอาหารถูกย่อยสลาย ทำให้เกิดสภาพความเป็นด่างเพิ่มขึ้น โดยจะเห็นได้จากในรูปที่แสดงการเพิ่มขึ้นของความเป็นด่าง

ขณะเดียวกัน กรดโวลาทิลล์ก็เกิดขึ้นเช่นกัน เพราะสารอาหารถูกย่อยสลาย เปลี่ยนเป็นกรดโวลาทิลล์ จากการทดลองในชุดแรกพบว่า กรดโวลาทิลล์ในถังหมักกรดมีมากกว่าในถังกวนที่ใส่สารอาหาร (รูปที่ 5.2 และ 5.3) แต่การทดลองชุดที่สอง กรดโวลาทิลล์ในถังหมักกรด น้อยกว่าในสารอาหารก่อนเข้าสู่ระบบ แสดงว่ากรดโวลาทิลล์ที่เกิดขึ้น ถูกใช้ไปด้วยอัตราที่มากกว่าการเกิด ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับคุณลักษณะของสารอาหารที่ใช้ทดลอง ซึ่งเป็นพวกพืชผักที่มี เส้นใยมาก ดังนั้นการย่อยสลายในขั้นตอนแรก เพื่อเปลี่ยนเป็นกรดโวลาทิลล์จะช้า และ

ตารางที่ 5.1 สรุปค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลอง

| Parameter | # | WASTES | ACID | CLARIFIER | METHANE 1 | METHANE 2 |
|--------------------------------------------------|---|-------------------|---------|-----------|-----------|-----------|
| pH | 1 | 5.20 | 5.28 | 5.50 | 6.77 | 6.89 |
| | 2 | 4.76 | 5.60 | 5.73 | 6.42 | 6.55 |
| Total Alkalinity, as CaCO ₃ , mg/l | 1 | 468.13 | 508.38 | 530.25 | 637.00 | 697.38 |
| | 2 | 369.90 | 520.11 | 521.44 | 659.10 | 753.10 |
| VFA, as CH ₃ COOH, mg/l | 1 | 917.75 | 946.00 | 826.63 | 84.50 | 45.38 |
| | 2 | 729.20 | 579.70 | 571.00 | 90.30 | 43.60 |
| VFA:T-Alk. | 1 | 2.03 | 1.90 | 1.60 | 0.13 | 0.07 |
| | 2 | 2.01 | 1.12 | 1.10 | 0.14 | 0.06 |
| COD COD soluble, mg/l | 1 | 4681.88 | 9732.63 | 2655.25 | 1890.13 | 551.38 |
| | | 1418.75 | 1460.88 | 1245.88 | 218.13 | 125.13 |
| COD COD soluble, mg/l | 2 | 4908.38 | 5915.57 | 2173.57 | 1139.71 | 276.00 |
| | | 1549.38 | 1267.43 | 1273.43 | 253.86 | 99.43 |
| TS, MLSS TVS, MLVSS, mg/l | 1 | | 4875.25 | | 1035.00 | 365.00 |
| | | | 4591.50 | | 905.00 | 295.00 |
| TS, MLSS TVS, MLVSS, mg/l | 2 | 3523.13 | 3585.00 | | 469.50 | 78.00 |
| | | 2811.88 | 3445.00 | | 408.25 | 74.33 |
| NH ₃ -N Organic-N TKN, mg/l | 1 | 47.34 | 73.20 | | 85.98 | 94.67 |
| | | 113.83 | 183.11 | | 66.33 | 22.54 |
| | | 161.17 | 256.31 | | 152.31 | 117.21 |
| NH ₃ -N Organic-N TKN, mg/l | 2 | 71.76 | 94.10 | | 78.85 | 103.33 |
| | | 119.04 | 137.52 | | 42.20 | 18.07 |
| | | 190.81 | 231.62 | | 121.04 | 121.41 |
| Gas volume, l/day | 1 | | | | 9.11 | 4.86 |
| | | % CH ₄ | | | 70.89 | 68.91 |
| | | % CO ₂ | | | 17.58 | 17.21 |
| | | % O ₂ | | | 1.63 | 2.26 |
| | | % N ₂ | | | 9.86 | 11.51 |
| Gas volume, l/day | 2 | | 8.73 | | 10.31 | 1.98 |
| | | % CH ₄ | 55.00 | | 63.33 | 60.77 |
| | | % CO ₂ | | | 16.06 | 16.30 |
| | | % O ₂ | | | 1.33 | 2.37 |
| | | % N ₂ | | | 17.26 | 18.23 |

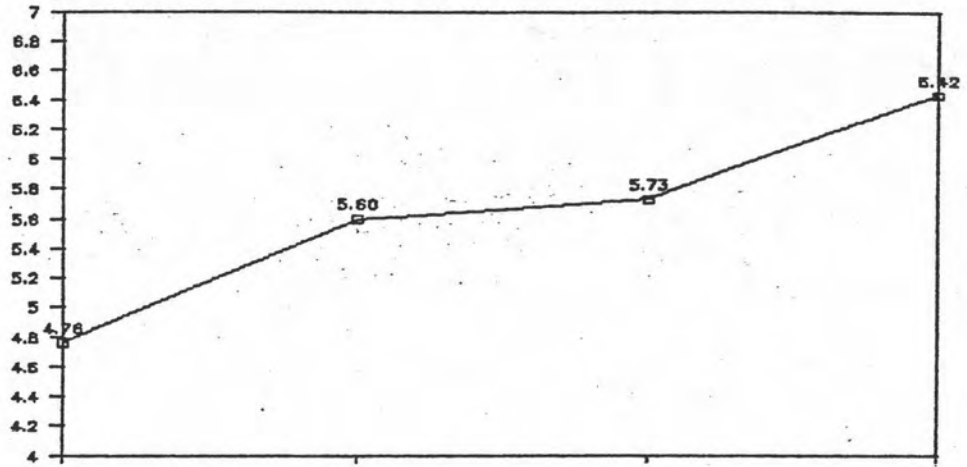
REMARK # 1 METHANE 1 HRT = 4.28 day ACID HRT = 0.89 day
 ===== METHANE 2 HRT = 10.50 day

2 METHANE 1 HRT = 2.61 day ACID HRT = 0.88 day
 METHANE 2 HRT = 15.03 day

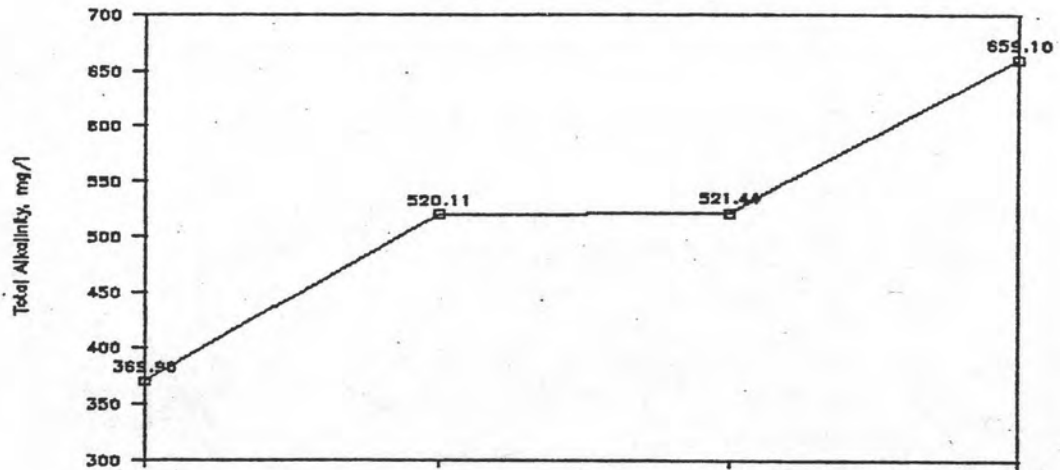
ตารางที่ 5.2 แสดงคุณลักษณะของสลัดจ์ที่ออกจากระบบ ที่ระยะเวลาในการหมักต่าง ๆ
(ผลการทดลองของ คักดิ์ชัย โสภาสวัสดิ์ชัย, 2527)

| พารามิเตอร์ (Parameter) | HRT (วัน) | | |
|------------------------------------------------------|-----------|--------|--------|
| | 10 | 15 | 25 |
| ปริมาตรก๊าซ, ลิตร/วัน (l(STP)/day) | 58.60 | 87.93 | 63.24 |
| % มีเทน (CH ₄) | 51.50 | 58.00 | 62.28 |
| ปริมาตรมีเทน, ลิตร/วัน (lCH ₄ /day) | 30.20 | 51.27 | 39.48 |
| พีเอช (pH) | 7.25 | 7.00 | 7.13 |
| ความเป็นด่าง, มก/ล. (Alkalinity) | 7,634 | 4,852 | 3,916 |
| กรดไขมันไทล์, มก/ล. (Volatile Fatty Acid) | 3,489 | 794 | 376 |
| ของแข็งทั้งหมด, มก/ล. (Total Solid) | 38,850 | 19,800 | 17,222 |
| ของแข็งระเหยทั้งหมด, มก/ล. (Total Volatile Solid) | 29,294 | 12,796 | 10,344 |
| ซีโอดี, มก/ล. (COD) | 49,297 | 31,286 | 20,280 |
| ทีเคเอ็น, มก/ล. (TKN) | 732.67 | 819.33 | 785.50 |
| แอมโมเนีย-ไนโตรเจน, มก/ล. (NH ₃ -N) | 25.67 | 75.60 | 96.97 |

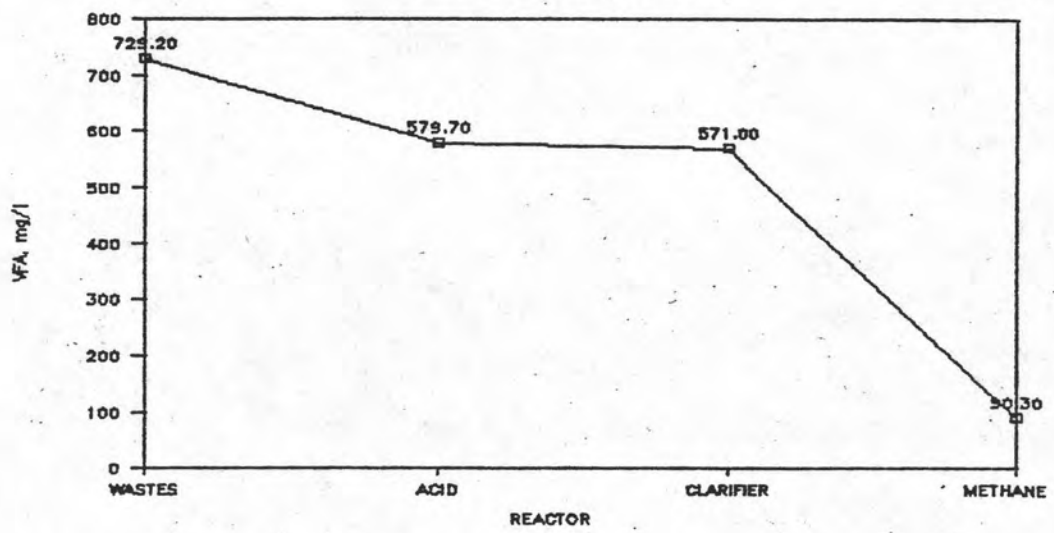
pH



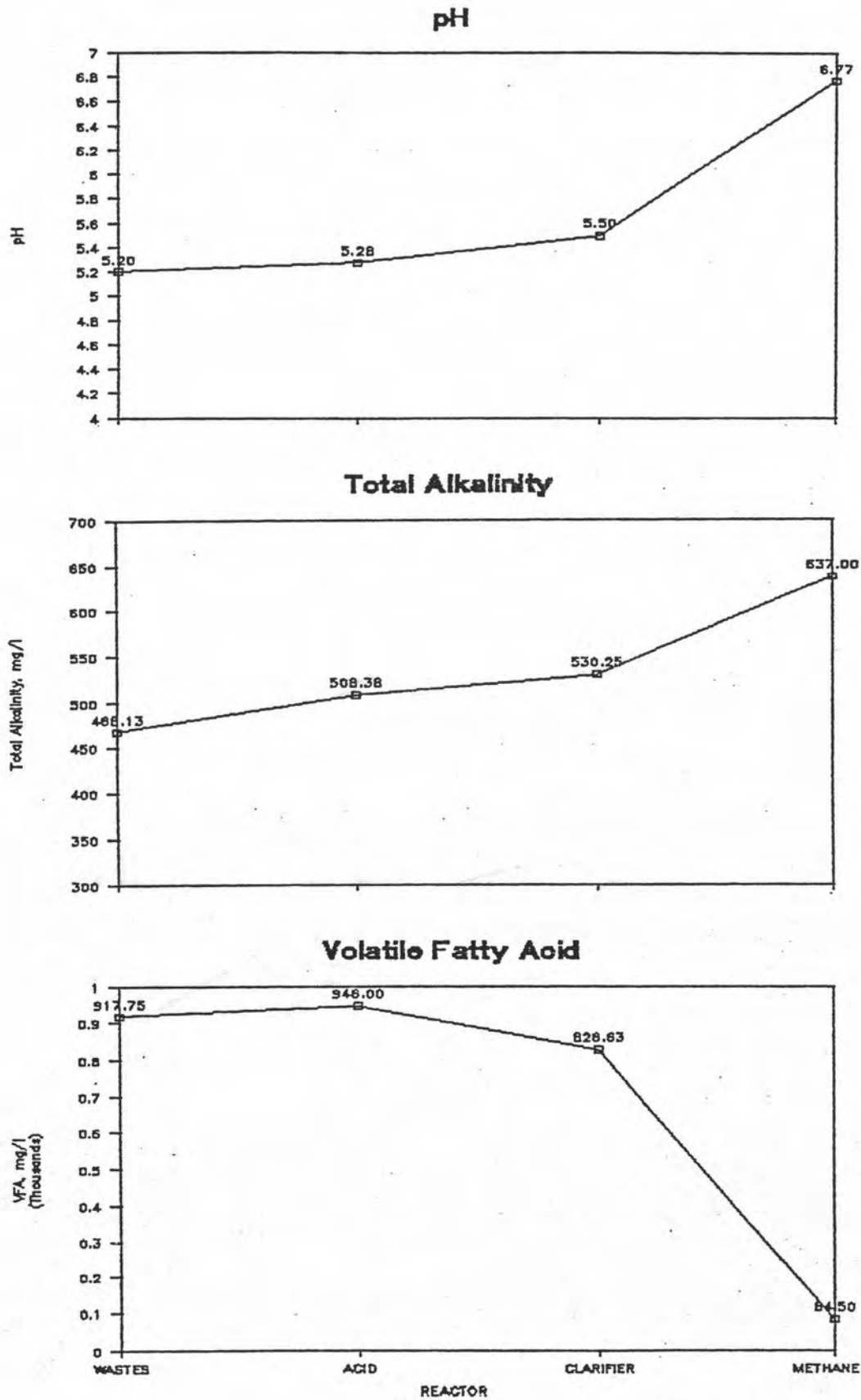
Total Alkalinity



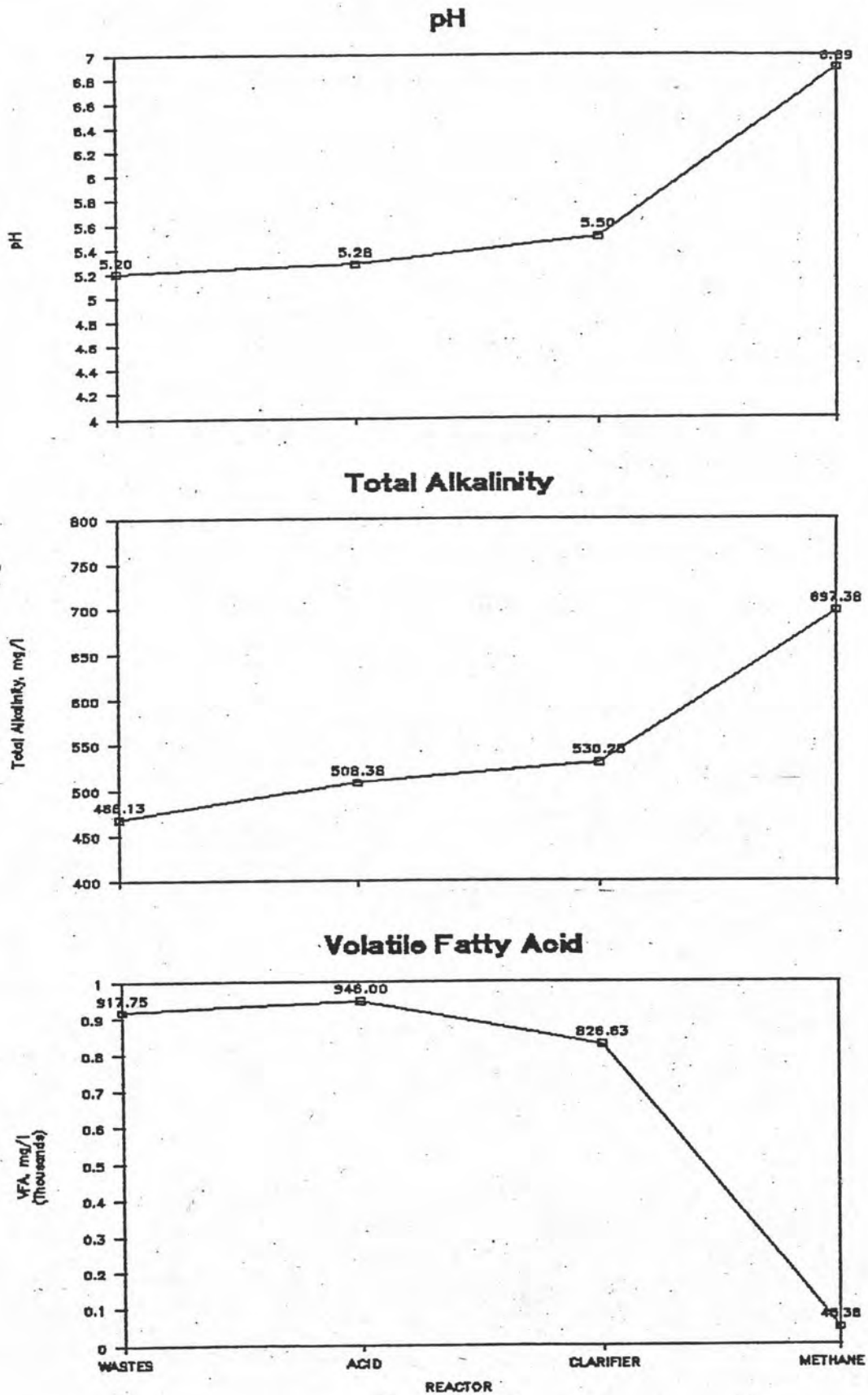
Volatile Fatty Acid



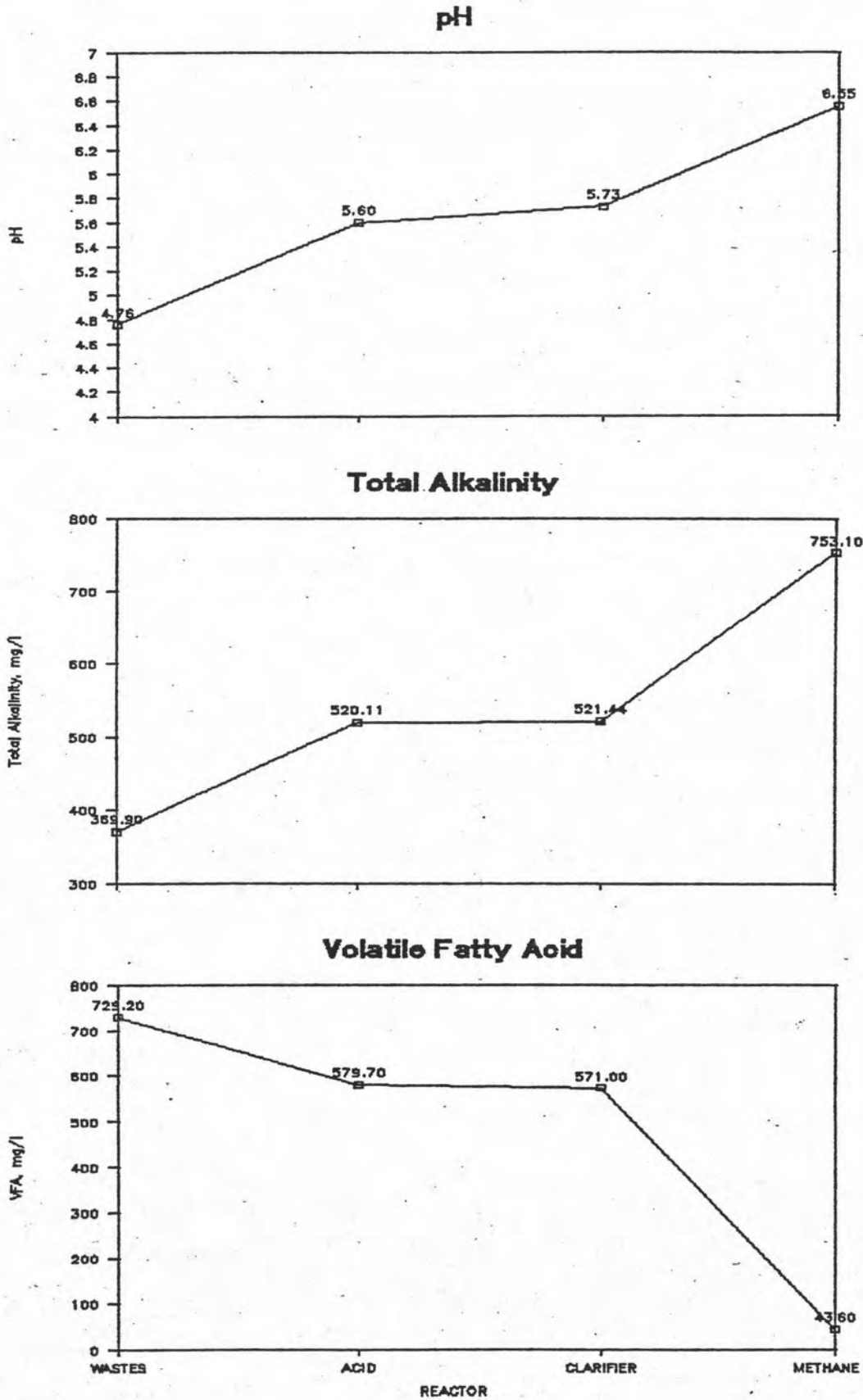
รูปที่ 5.1 การเปลี่ยนแปลงของพีเอช, สภาพความเป็นด่าง และกรดไขมันระเหยง่ายของการทดลองชุดที่สอง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 2.61 วัน



รูปที่ 5.2 การเปลี่ยนแปลงของพีเอช, สภาพความเป็นด่าง และกรดไขมันระเหยง่ายของการทดลองชุดที่หนึ่ง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 4.28 วัน



รูปที่ 5.3 การเปลี่ยนแปลงของพีเอช, สภาพความเป็นด่าง และกรดไขมันอิสระของการทดลองชุดที่หนึ่ง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 10.50 วัน



รูปที่ 5.4 การเปลี่ยนแปลงของพีเอช, สภาพความเป็นด่าง และกรดไขมันอิสระของการทดลองชุดที่สอง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 15.03 วัน

จากการทดลองก็พบว่ามีก๊าซเกิดขึ้นในถังหมักกรด โดยมีเปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งวัดด้วยเครื่อง Orsat Gas Analyzer ได้ 25 % และเมื่อหักค่าเปอร์เซ็นต์ของก๊าซไนโตรเจนซึ่งจะมีประมาณ 20 % (จากการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซอย่างละเอียดด้วยเครื่อง GC-7AG พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ของไนโตรเจนประมาณ 20 % ดังนั้นจะเป็นก๊าซมีเทนประมาณ 55 % ส่วนสาเหตุที่เกิดก๊าซในถังหมักกรดที่พีเอชต่ำ เนื่องจากระบบการทำงานในขั้นตอนแรกนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับการทำงานของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศแบบสัมผัส (anaerobic contact process) เพราะมีการเวียนตะกอนกลับจึงเกิดการสะสมของแบคทีเรียผลิตมีเทนขึ้น

เมื่อพิจารณาค่าพีเอชที่ได้จากการทดลองจะพบว่า ค่าพีเอชของสารอาหารก่อนที่จะถูกบ้อนเข้าสู่ระบบ มีค่าเฉลี่ยต่ำคือ 4.76 และ 5.20 และเมื่อเข้าไปในถังหมักกรดแล้วค่าพีเอชมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการย่อยสลายสารอาหาร ทำให้เกิดสภาพความเป็นด่างเพิ่มขึ้น ค่าพีเอชจึงเป็น 5.28 และ 5.60

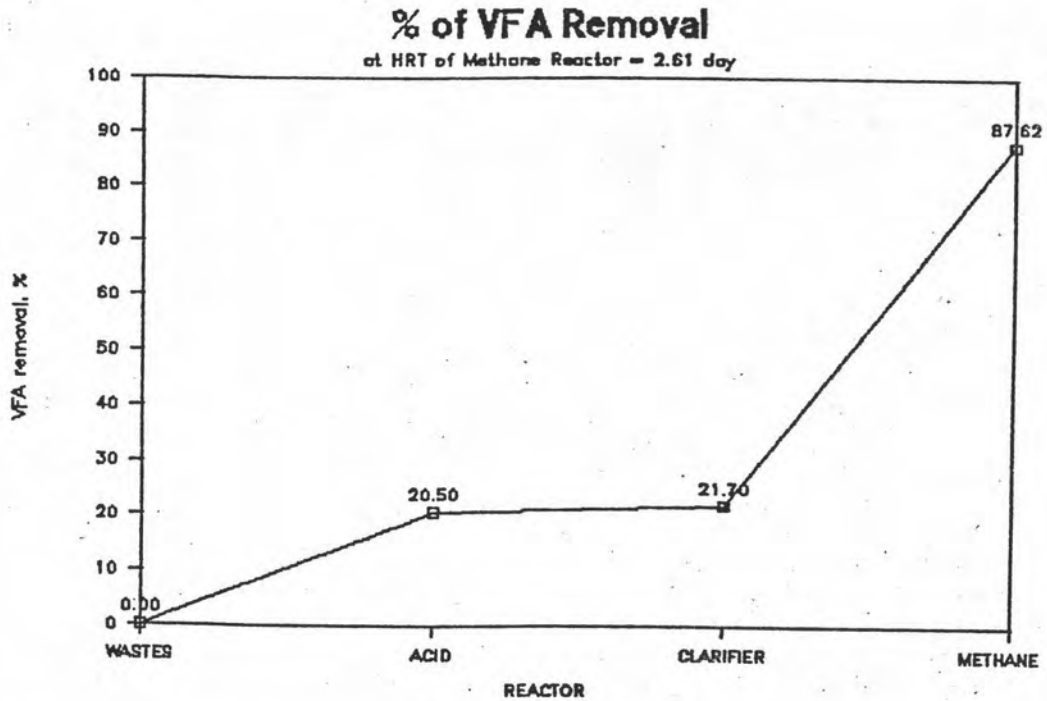
การที่ระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศสองขั้นตอน สามารถปล่อยให้ค่าพีเอชในถังหมักกรดต่ำได้ เพราะต้องการให้เป็นขั้นตอนของการเกิดกรดให้ได้มากที่สุด จึงไม่ต้องกังวลกับค่าพีเอชที่ต่ำ เหมือนในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศขั้นตอนเดียว ทำให้ง่ายแก่การที่จะควบคุม และประหยัดค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี ที่จะใช้ปรับพีเอชอีกทางหนึ่งด้วย และจากผลการทดลองของ Gosh et al. (1975) ก็พบว่าในถังหมักกรดมีค่าพีเอช 5.66-5.86 และจากการทดลองของ Gosh et al. (1982) พบว่าค่าพีเอชในขั้นตอนการสร้างกรดต่ำเพียง 4.7 ซึ่งก็เป็นเครื่องยืนยันว่า ระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศสองขั้นตอน สามารถที่จะปล่อยให้ค่าพีเอชต่ำได้ในขั้นตอนการสร้างกรด

สำหรับการเปลี่ยนแปลงของความเป็นด่าง ซึ่งให้เห็นว่า เมื่อสารอาหารเข้าสู่ระบบ จะถูกย่อยสลายทำให้เกิดสภาพความเป็นด่างเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายโปรตีนเกิดแอมโมเนีย และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะทำปฏิกิริยากันกับน้ำ เป็นแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ และจะทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ช่วยให้พีเอชสูงขึ้น ดังนั้นค่าความเป็นด่างที่เพิ่มมากขึ้นตามลำดับ จึงเป็นตัวชี้ชัดถึงการย่อยสลายสารอาหารที่เพิ่มขึ้น จากการทดลองพบว่าสภาพความเป็นด่างในถังหมักก๊าซมีค่าสูงที่สุด ซึ่งอธิบายได้ว่า หลังจากเกิดการย่อยสลายและเกิดกรดโวลไทล์ และ

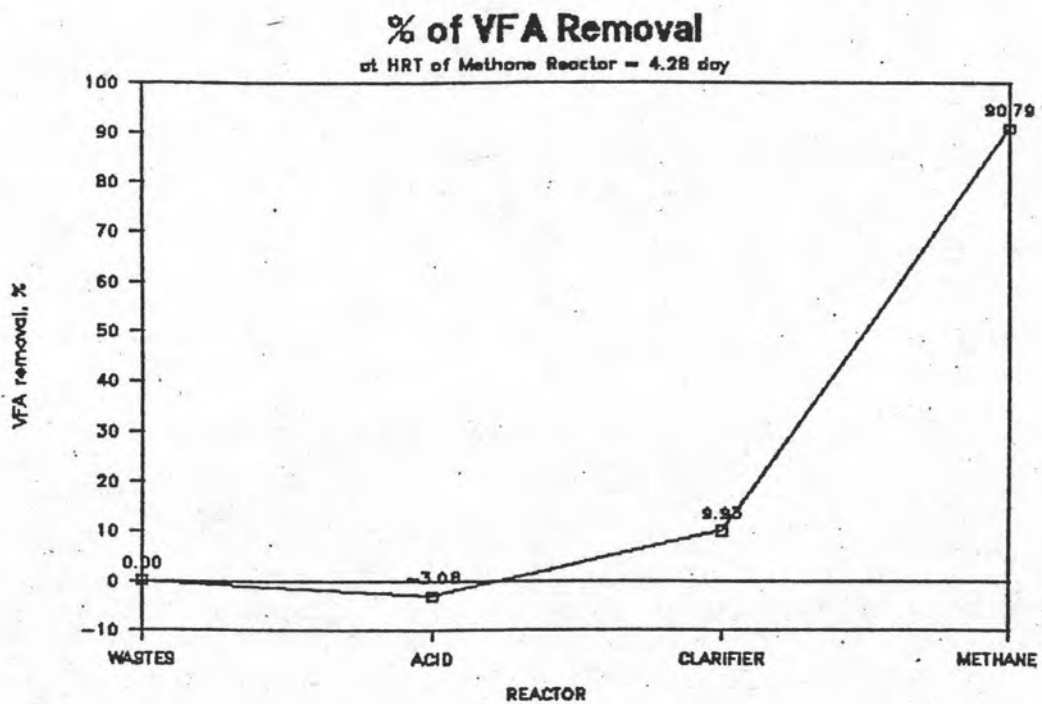
แอมโมเนียขึ้น เมื่อเข้าสู่ถังหมักก๊าซ กรดโวลลาไธล์ถูกใช้ไปเป็นสารอาหาร ของแบคทีเรียพวกที่ผลิตมีเทนมาก ทำให้แอมโมเนียเหลือมากขึ้น และเมื่อทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ก็จะกลายเป็นแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต (สมการที่ (2), บทที่ 3) ดังนั้นความเป็นด่างจึงเพิ่มมากขึ้น

กรดโวลลาไธล์ที่เกิดในถังหมักกรด พบว่าบางส่วนถูกใช้ไป ทำให้มีก๊าซเกิดขึ้น โดยมีเปอร์เซ็นต์ของมีเทนประมาณ 55 % ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่ไม่น่าจะเป็นไปได้ที่แบคทีเรียชนิดผลิตก๊าซมีเทนจะมีในถังหมักกรด ทั้งที่พีเอชต่ำกว่า 6.0 แสดงว่า ในความเป็นจริงแล้วเราไม่สามารถแยกแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มออกจากกันอย่างเด็ดขาด แม้จะมีการจัดสภาพแวดล้อม ให้มีความเหมาะสมกับแบคทีเรียแต่ละชนิดก็ตาม ดังนั้น จึงยังคงมีแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทนอยู่ในถังหมักกรด แต่อาจจะเป็นจำนวนไม่มาก ลักษณะที่เกิดขึ้นนี้อาจจะสันนิษฐานได้ว่า แบคทีเรียชนิดที่ผลิตก๊าซมีเทน ที่มีในถังหมักกรดและสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ในสภาพที่พีเอชต่ำ อาจเนื่องมาจากการสามารถปรับตัว และเนื่องจากการทดลองภายในถังหมักกรดมีการกวนเวียนตะกอนจากถังตกตะกอน จึงทำให้เกิดกระบวนการคล้ายกับระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศแบบล้มผัส เกิดมีการสะสมของแบคทีเรียที่ผลิตมีเทน และมีการปรับตัวทำให้ทำงานได้ จึงมีก๊าซเกิดขึ้น

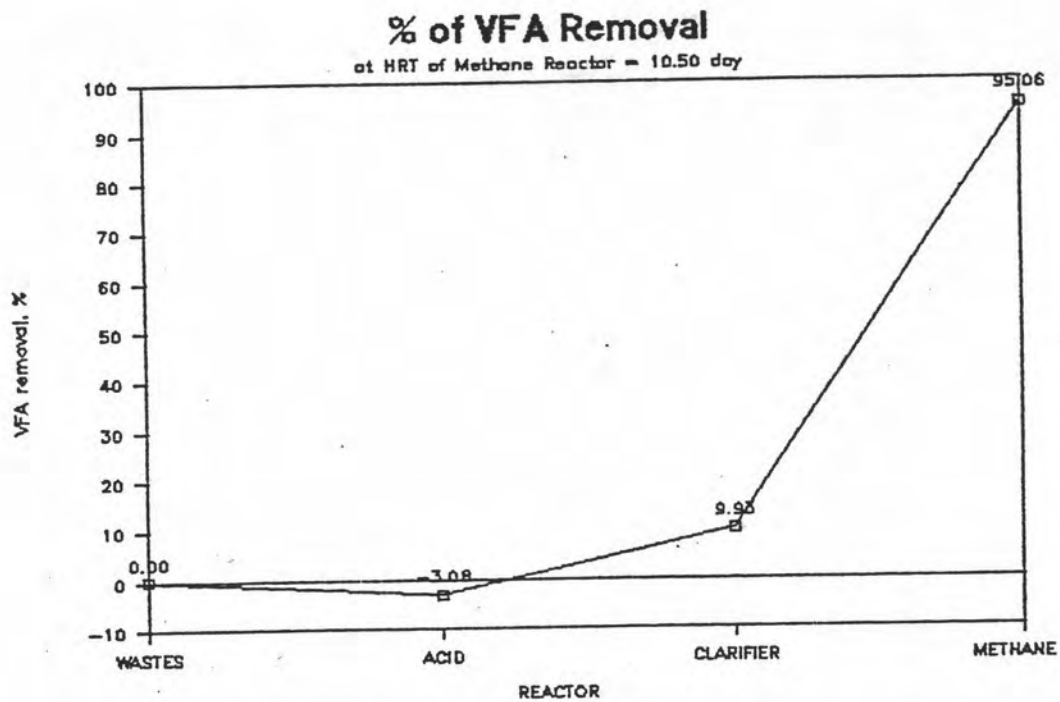
รูปที่ 5.5 ถึง 5.8 แสดงเปอร์เซ็นต์ของการใช้กรดโวลลาไธล์ เริ่มตั้งแต่จากสารอาหาร จนถึงขั้นสุดท้ายภายในถังหมักก๊าซ ที่ HRT ต่าง ๆ พบว่ากรดโวลลาไธล์ถูกใช้ไปมากที่สุดเมื่อเข้าสู่ถังหมักก๊าซ แสดงว่าเป็นระบบการย่อยสลาย แบบสองขั้นตอนจริง จึงทำให้กรดโวลลาไธล์ซึ่งเป็นสารอาหารสำหรับแบคทีเรียพวกผลิตก๊าซมีเทน ถูกใช้ไปในขั้นตอนที่สองเป็นส่วนใหญ่ และจากรูปที่ 5.9 ถึง 5.12 แสดงอัตราส่วนของกรดโวลลาไธล์ ต่อสภาพความเป็นด่าง พบว่าอัตราส่วนมีค่าสูงในช่วงแรก จนถึงภายในถังตกตะกอน คืออยู่ในช่วงระหว่าง 1.10-2.03 ซึ่งต่างจากระบบการย่อยสลายขั้นตอนเดียวที่ McCarty (1964) ได้กล่าวไว้ว่าถ้าอัตราส่วนของกรดโวลลาไธล์ต่อสภาพความเป็นด่างสูงกว่า 0.8 จะทำให้เกิดเป็นพิษ เนื่องจากกรดโวลลาไธล์ได้ แต่การทำงานในระบบสองขั้นตอนนี้ไม่ต้องกังวลกับผลดังกล่าว สำหรับภายในถังหมักก๊าซ อัตราส่วนของกรดโวลลาไธล์ ต่อสภาพความเป็นด่างเหลือเพียง 0.13-0.14 ซึ่งเนื่องจากการ



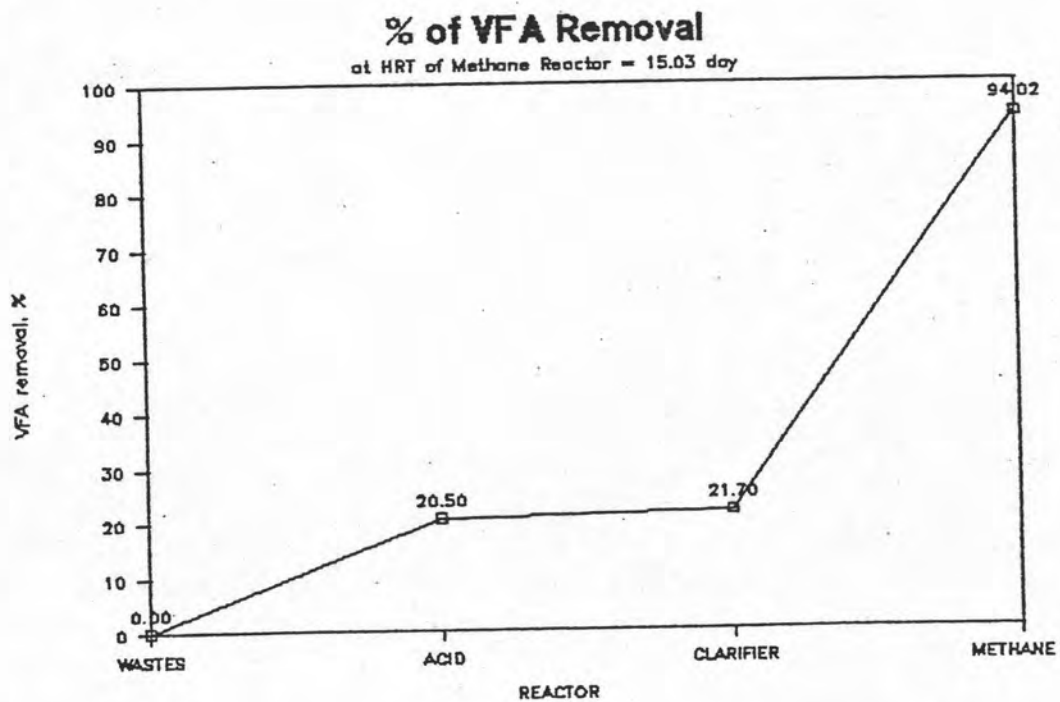
รูปที่ 5.5 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์สะสมของกรดไขมันที่ถูกกำจัดในถังหมักต่าง ๆ ของการทดลองชุดที่สอง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 2.61 วัน



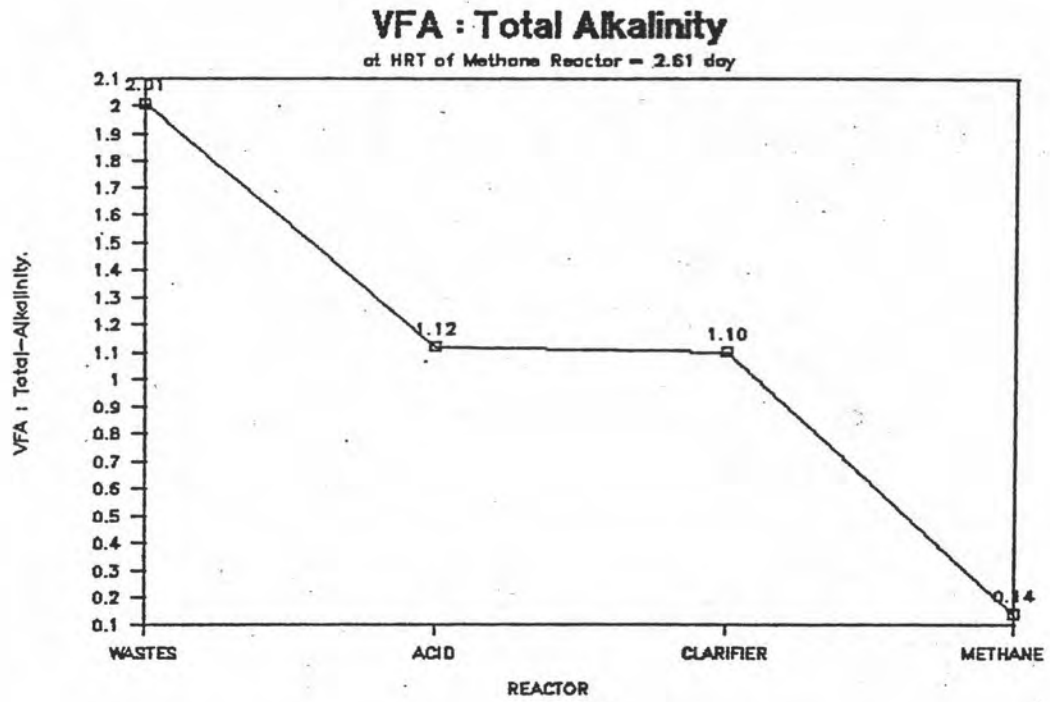
รูปที่ 5.6 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์สะสมของกรดไขมันที่ถูกกำจัดในถังหมักต่าง ๆ ของการทดลองชุดที่หนึ่ง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 4.28 วัน



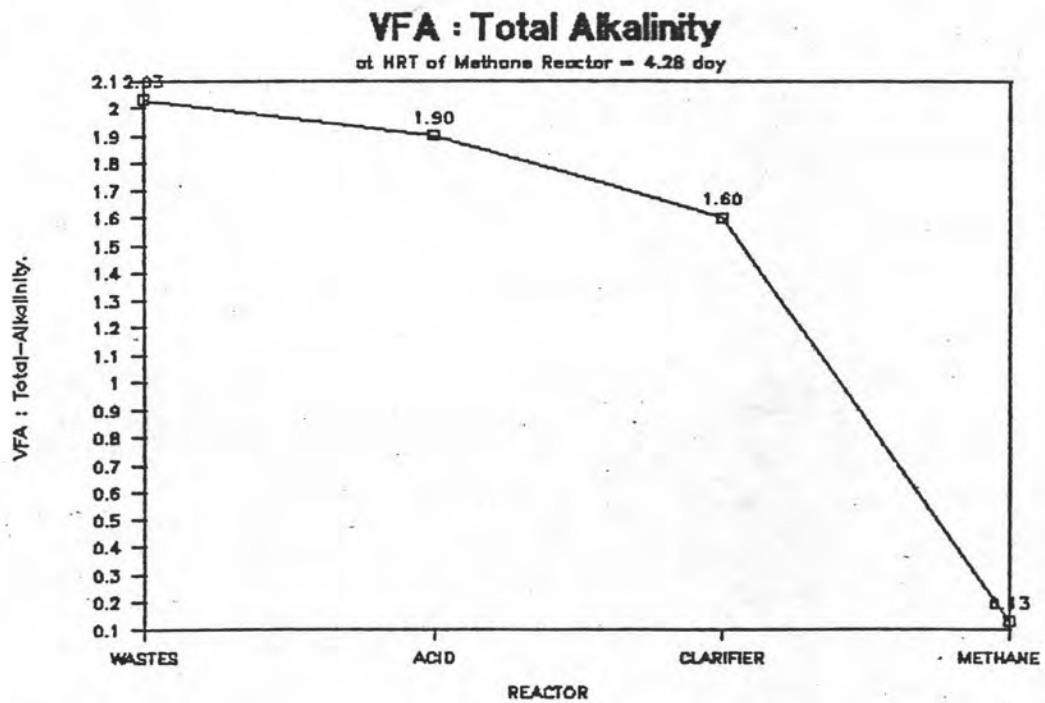
รูปที่ 5.7 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์สะสมของกรดไขมันที่ถูกกำจัดในถังหมักต่าง ๆ ของการทดลองชุดที่หนึ่ง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 10.50 วัน



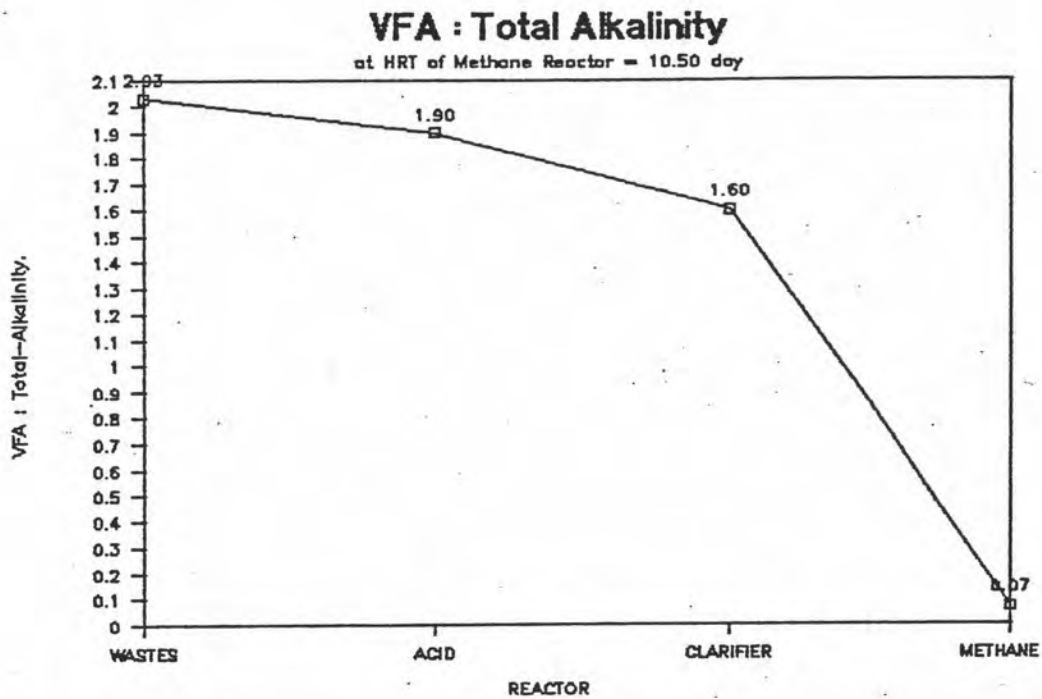
รูปที่ 5.8 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์สะสมของกรดไขมันที่ถูกกำจัดในถังหมักต่าง ๆ ของการทดลองชุดที่สอง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 15.03 วัน



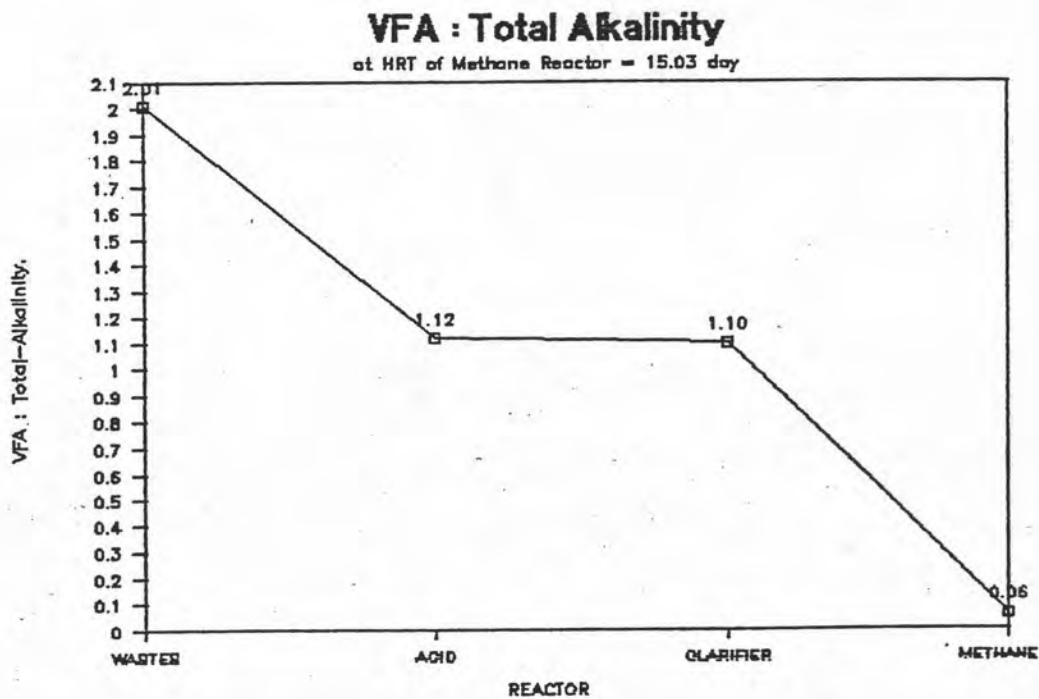
รูปที่ 5.9 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนของกรดไขมันอิสระต่อสภาพความเป็นด่างของการทดลองชุดที่สอง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 2.61 วัน



รูปที่ 5.10 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนของกรดไขมันอิสระต่อสภาพความเป็นด่างของการทดลองชุดที่หนึ่ง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 4.28 วัน



รูปที่ 5.11 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนของกรดไขมันอิสระต่อสภาพความเป็นด่างของการทดลองชุดที่หนึ่ง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 10.50 วัน



รูปที่ 5.12 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนของกรดไขมันอิสระต่อสภาพความเป็นด่างของการทดลองชุดที่สอง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 15.03 วัน

เวลาไหลถูกใช้ไปจนเกือบหมด เป็นการแสดงถึงประสิทธิภาพของการใช้กรดเวลาไหลได้อย่างดี และตารางที่ 5.3 สรุปค่าเปอร์เซ็นต์สะสมของการกำจัด VFA และ COD

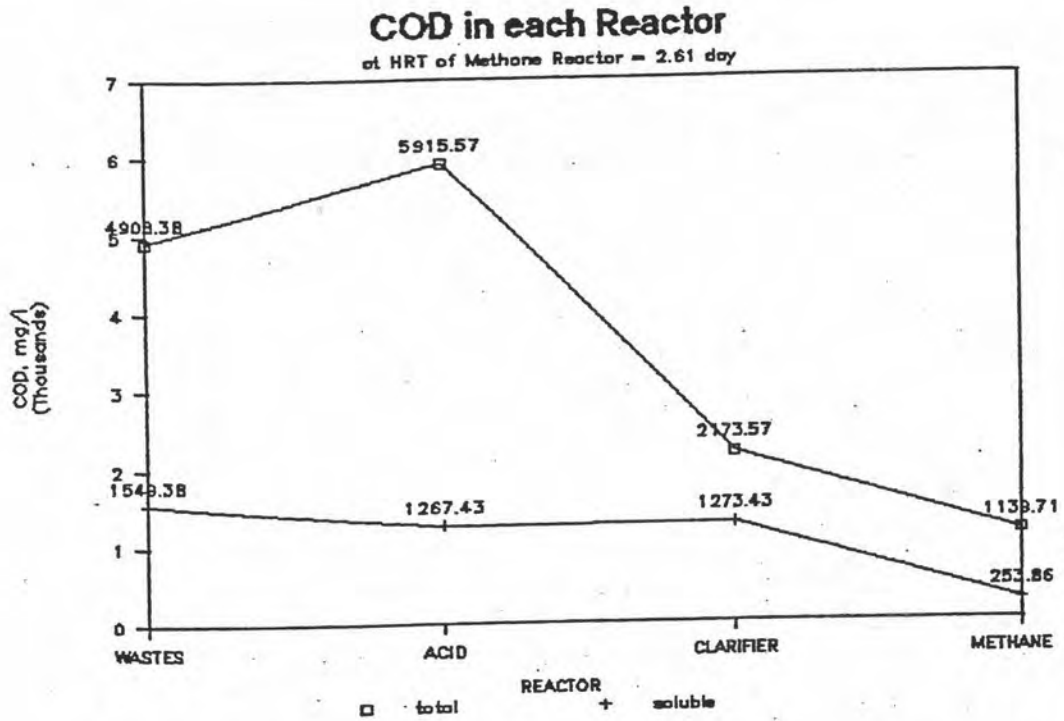
ตารางที่ 5.3 สรุปค่าเปอร์เซ็นต์สะสมของการกำจัดกรดเวลาไหล และซีโอดีภายในถังหมักต่าง ๆ ของระบบ ที่ HRT ต่าง ๆ ของถังหมักก๊าซ

| HRT of Methane Reactor, day | Parameter | WASTES | % Removal from | | |
|-----------------------------|-------------|--------|----------------|-----------|---------|
| | | | ACID | CLARIFIER | METHANE |
| 2.61 | VFA | 0.00 | 20.50 | 21.70 | 87.62 |
| 4.28 | | 0.00 | -3.08 | 9.93 | 90.79 |
| 10.50 | | 0.00 | -3.08 | 9.93 | 95.06 |
| 15.03 | | 0.00 | 20.50 | 21.70 | 94.02 |
| 2.61 | total COD | 0.00 | -20.52 | 55.72 | 76.78 |
| | soluble COD | 0.00 | 18.20 | 17.81 | 83.62 |
| 4.28 | total COD | 0.00 | -107.88 | 43.29 | 59.63 |
| | soluble COD | 0.00 | -2.97 | 12.18 | 84.63 |
| 10.50 | total COD | 0.00 | -107.88 | 43.29 | 88.23 |
| | soluble COD | 0.00 | -2.97 | 12.18 | 91.18 |
| 15.03 | total COD | 0.00 | -20.52 | 55.72 | 94.38 |
| | soluble COD | 0.00 | 18.20 | 17.81 | 93.58 |

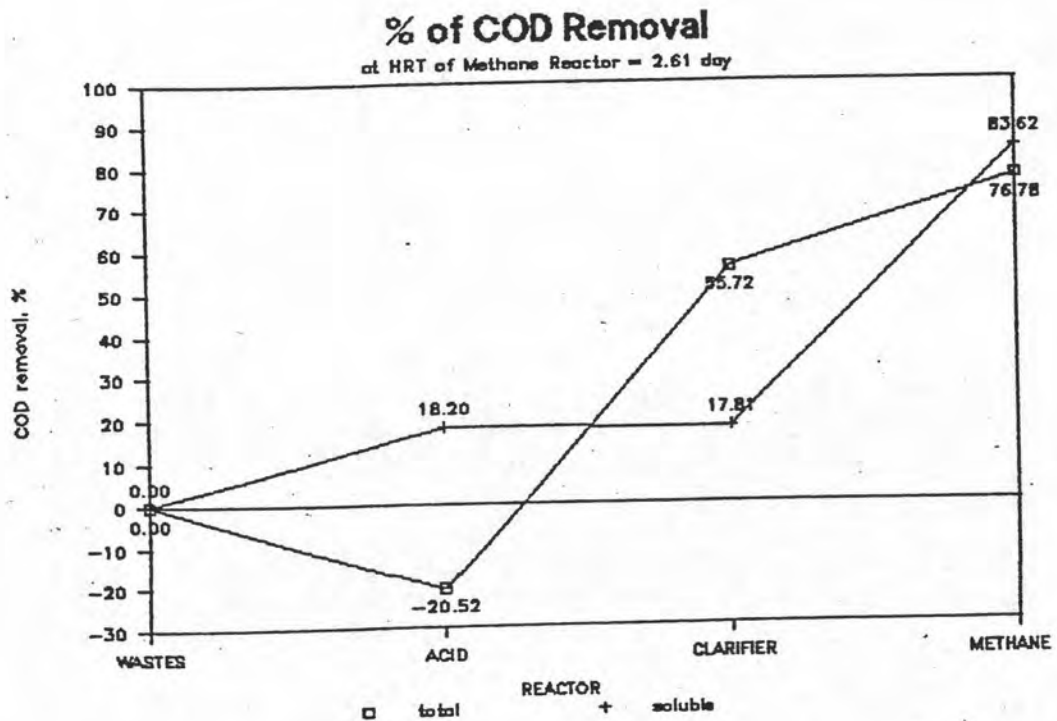
5.3.2 ซีโอดี

จากรูปที่ 5.13 ถึง 5.20 พบว่าซีโอดี ทั้งหมดในถังหมักกรดมีค่าสูงกว่า ซีโอดีของสารอาหารถูกป้อนเข้าสู่ระบบ ซึ่งอธิบายได้ว่า เนื่องจากระบบมีการเวียนตะกอนกลับจากถังตกตะกอน จึงเกิดการสะสมของตะกอน และมวลจุลินทรีย์ภายในถังหมักกรดขึ้น แต่ค่าซีโอดีทั้งหมดในถังตกตะกอน ลดลงอย่างมาก เนื่องจากเก็บตัวอย่างจากส่วนบนของน้ำที่อยู่ในถังตกตะกอน ที่จะถูกป้อนเข้าสู่ถังหมักก๊าซ จึงมีตะกอนอยู่น้อย เพราะตะกอนส่วนใหญ่ตกสู่ก้นถังและถูกเวียนกลับไปหมักกรดใหม่ และจากรูปเห็นว่าค่าซีโอดีทั้งหมดส่วนใหญ่ จะถูกกำจัดในถังหมักก๊าซ

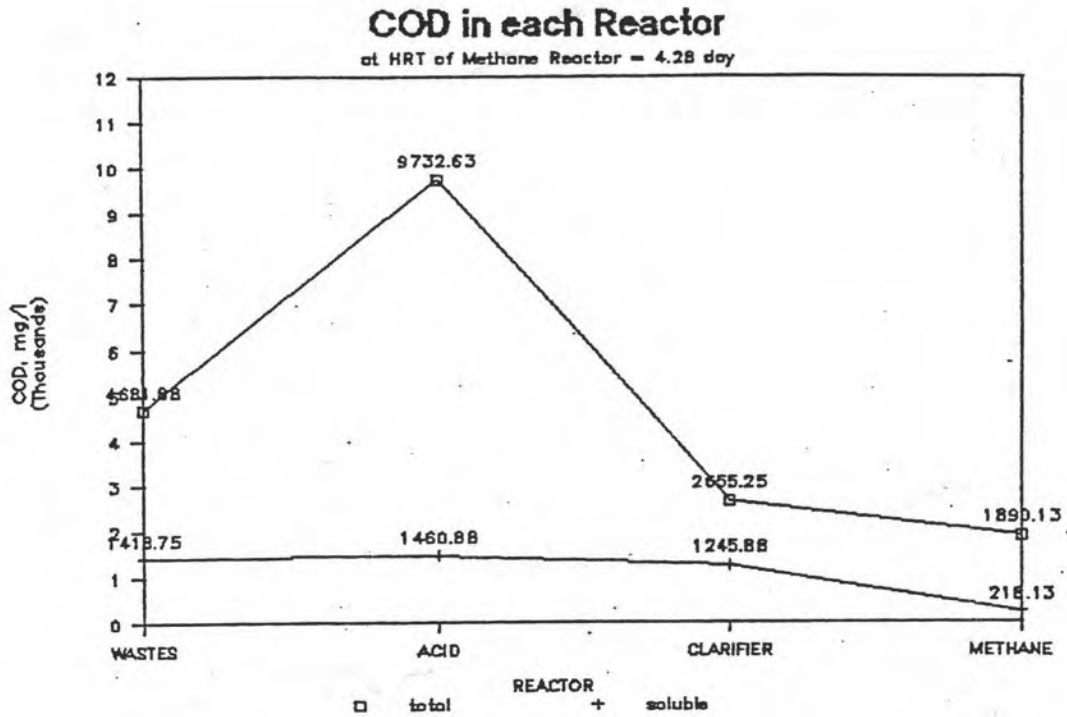
สำหรับค่าซีโอดีละลาย พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ก่อนที่จะเข้าสู่ถังหมักก๊าซ และส่วนใหญ่จะถูกกำจัด เมื่อเข้าสู่ถังหมักก๊าซแล้ว จึงสามารถสรุปได้ว่า การกำจัด



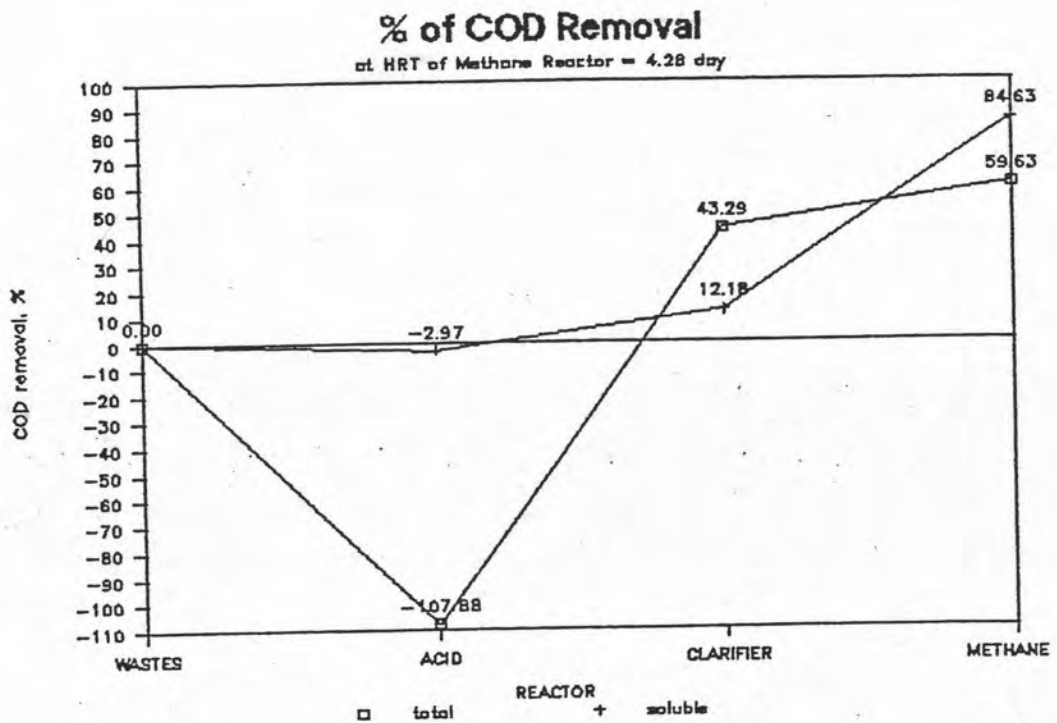
รูปที่ 5.13 การเปลี่ยนแปลงค่า COD ภายในถังหมักต่าง ๆ ของการทดลองชุดที่สอง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 2.61 วัน



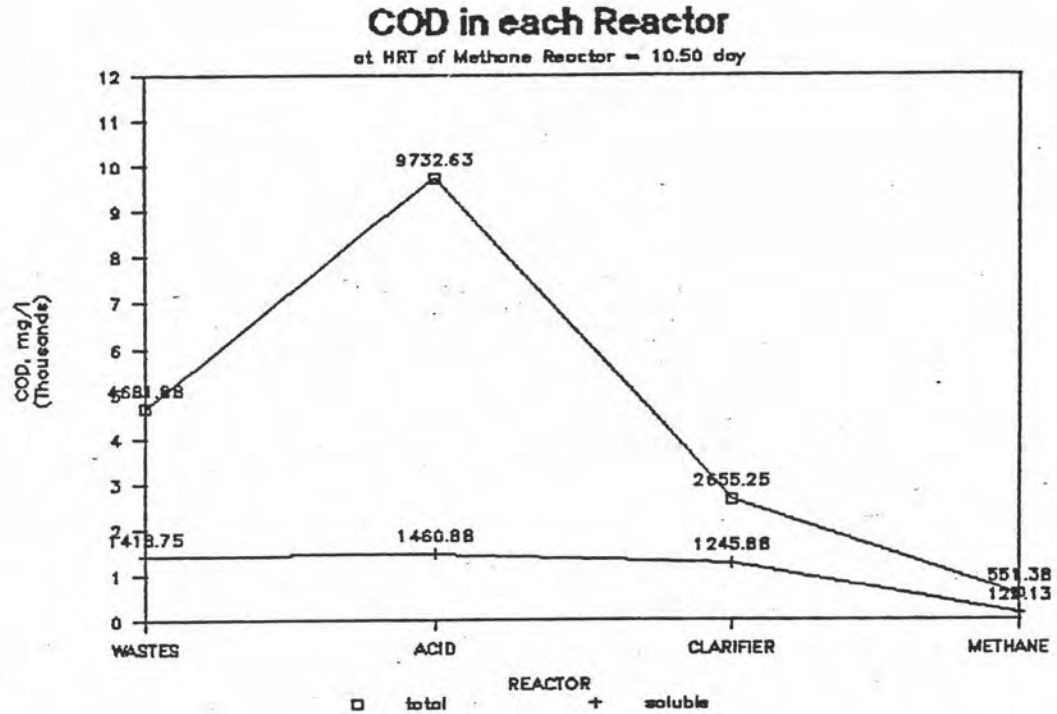
รูปที่ 5.14 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์สะสมของ COD ที่ถูกกำจัด ของการทดลองชุดที่สอง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 2.61 วัน



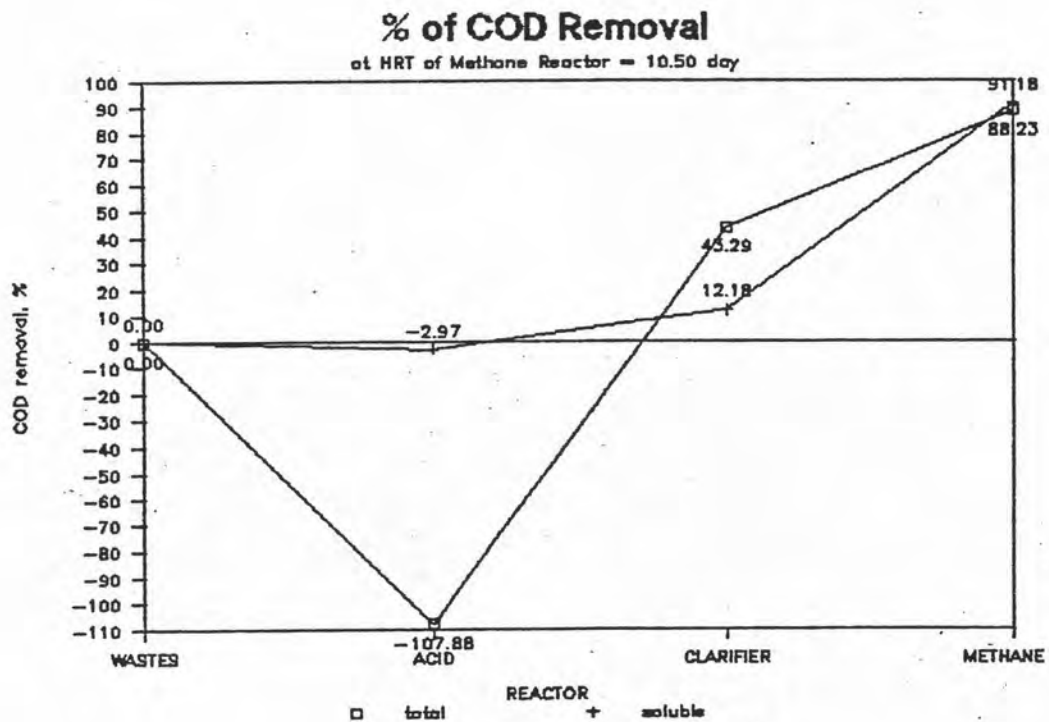
รูปที่ 5.15 การเปลี่ยนแปลงค่า COD ภายในถังหมักต่าง ๆ ของการทดลองชุดที่หนึ่ง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 4.28 วัน



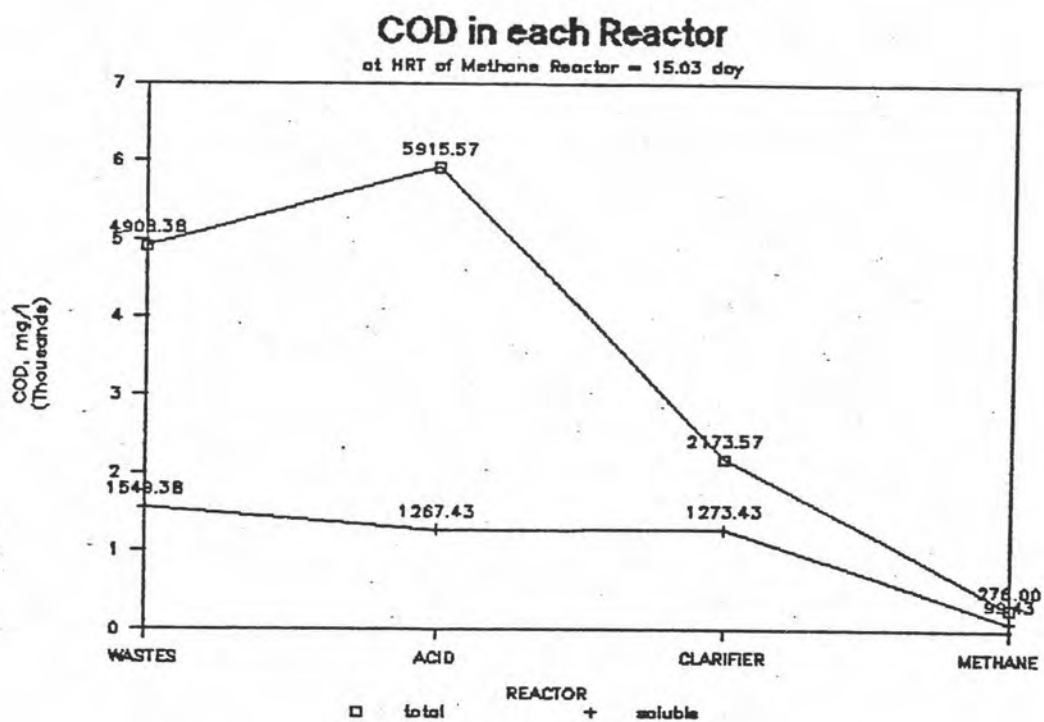
รูปที่ 5.16 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์สะสมของ COD ที่ถูกกำจัด ของการทดลองชุดที่หนึ่ง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 4.28 วัน



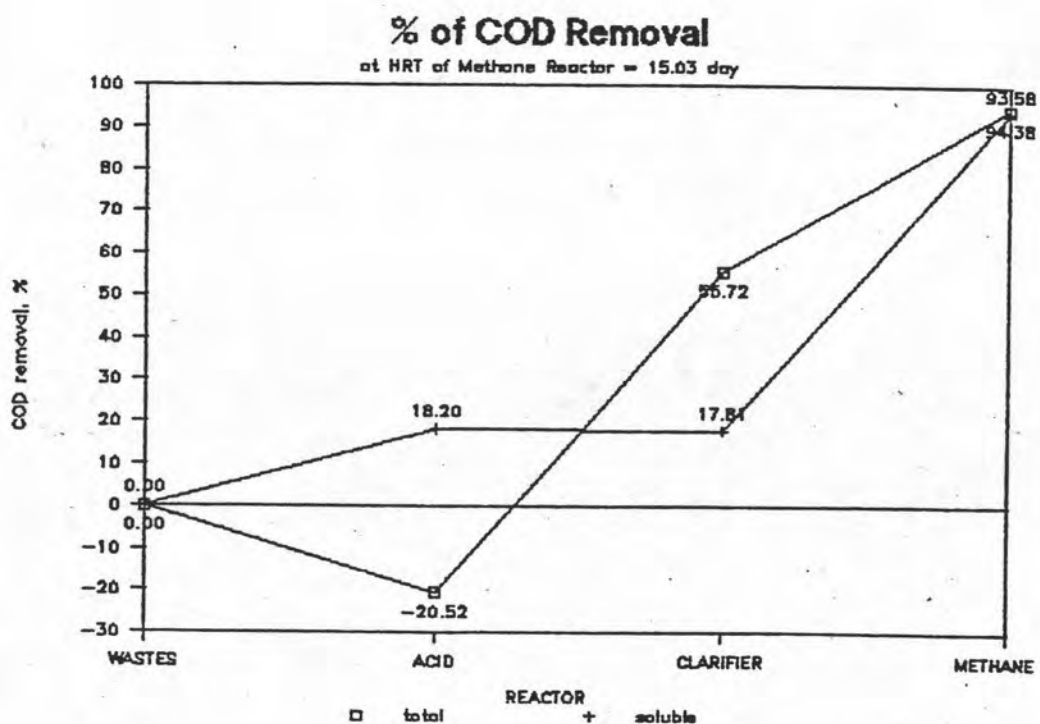
รูปที่ 5.17 การเปลี่ยนแปลงค่า COD ภายในถังหมักต่าง ๆ ของการทดลองชุดที่หนึ่ง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 10.50 วัน



รูปที่ 5.18 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์สะสมของ COD ที่ถูกกำจัด ของการทดลองชุดที่หนึ่ง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 10.50 วัน



รูปที่ 5.19 การเปลี่ยนแปลงค่า COD ภายในถังหมักต่าง ๆ ของการทดลองชุดที่สอง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 15.03 วัน



รูปที่ 5.20 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์สะสมของ COD ที่ถูกกำจัด ของการทดลองชุดที่สอง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 15.03 วัน

ชีโอดีที่แท้จริงนั้นจะเกิดในถังหมักก๊าซ ในถังหมักกรดเป็นการย่อยสลายสารอาหารให้เป็นโมเลกุลเล็ก และเกิดกรดโวลาทิลล์ ชีโอดียังไม่ถูกกำจัด หรือถ้ามีส่วนที่ถูกกำจัด ก็เป็นเพียงส่วนน้อย เมื่อเทียบกับทั้งหมด โดยดูได้จาก ตารางที่ 5.3 สรุปค่าเปอร์เซ็นต์สะสมของการกำจัดชีโอดีภายในถังหมักต่าง ๆ นับตั้งแต่เป็นสารอาหารก่อนถูกบ้อนเข้าสู่ระบบ จนออกจากระบบ

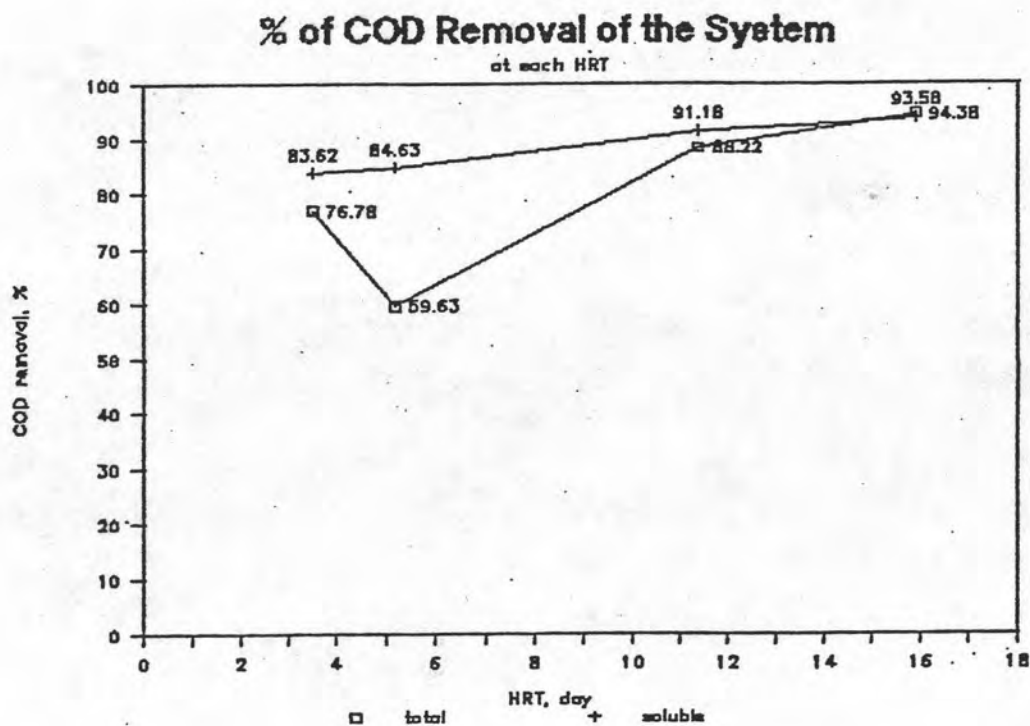
ตารางที่ 5.4 สรุปค่าเปอร์เซ็นต์ ของการกำจัดชีโอดีขั้นสุดท้าย ของระบบที่ HRT รวมต่าง ๆ กัน และแสดงเป็นรูปที่ 5.21 ซึ่งพบว่า ชีโอดีจะถูกกำจัดมากขึ้นเมื่อ HRT นานขึ้น แต่ที่ HRT เท่ากับ 5.17 วัน (HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 4.28 วัน และของถังหมักกรดเท่ากับ 0.89 วัน) เปอร์เซนต์การกำจัดชีโอดีทั้งหมดลดลง สาเหตุเพราะที่จุดนี้ปรากฏว่า MLSS ในถังหมักก๊าซสูงขึ้น (รูปที่ 5.33) คือมีตะกอนออกจากถังหมักก๊าซมากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ค่าชีโอดีทั้งหมดสูงขึ้นด้วย และสำหรับค่าชีโอดีละลายเปอร์เซนต์การกำจัดรวมก็มากขึ้นเมื่อระยะเวลาของ HRT นานขึ้น

ประสิทธิภาพของการกำจัดชีโอดีของระบบ พบว่ามีค่าเปอร์เซ็นต์สูงมาก คืออยู่ระหว่าง 59.63-94.38 % สำหรับชีโอดีทั้งหมด และ 83.62-93.58 % สำหรับชีโอดีละลาย การที่เปอร์เซนต์การกำจัดชีโอดีทั้งหมดมีค่าสูง ส่วนหนึ่งก็เนื่องมาจากว่า พวกตะกอนและเส้นใยที่ถูกย่อยในถังหมักกรด ไม่ได้ถูกบ้อนเข้าถังหมักก๊าซ เพราะตกตะกอนในถังตกตะกอน และถูกเวียนกลับไปย่อยสลายในถังหมักกรดใหม่ ซึ่งพบว่าเมื่อนานเข้าก็จะเกิดมีการสะสมของตะกอนในถังหมักกรด และในถังตกตะกอน ดังนั้นจึงต้องมีการถ่ายตะกอนทิ้ง จากถังตกตะกอนเป็นครั้งคราว สำหรับในถังหมักกรด เมื่อตะกอนสะสมจำนวนมาก ก็ได้ทำการล้างถังหมักกรด แต่ถ้าหากการออกแบบระบบการกวนจนไม่มีขอบพร่องแล้ว ตะกอนในถังหมักกรดควรจะคงที่และสม่ำเสมอ และจะอยู่ในถังตกตะกอนเท่านั้น และการกำจัดตะกอนก็กำจัดจากถังตกตะกอนก็เพียงพอ และตะกอนที่ถูกกำจัดออกจากถังตกตะกอนนี้ สามารถจะนำไปใช้เป็นประโยชน์เป็นปุ๋ยต่อไปได้

อย่างไรก็ตาม สรุปได้ว่า การกำจัดชีโอดีของระบบ มีค่าสูงมาก ในเวลาสั้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรย่อยสลายแบบไร้อากาศอย่างธรรมดา (conventional) ซึ่งต้องมีระยะเวลาการหมักนานกว่านี้มาก

ตารางที่ 5.4 ค่าเปอร์เซ็นต์ของการกำจัดซีโอดีของระบบ ที่ HRT ต่าง ๆ

| COD, mg/l | Influent | | HRT of System, day | | | | |
|-------------|----------|---------|--------------------|---------|--------|--------|-------|
| | | | 3.49 | 5.17 | 11.39 | 15.91 | |
| total COD | # 1 | 4681.88 | Effluent | 1890.13 | 551.38 | | |
| | | | | 1139.71 | | 276.00 | |
| | # 2 | 4908.38 | % remaining | 23.22 | 40.37 | 11.78 | 5.62 |
| | | | % removed | 76.78 | 59.63 | 88.22 | 94.38 |
| soluble COD | # 1 | 1418.75 | Effluent | 218.13 | 125.13 | | |
| | | | | 253.86 | | 99.43 | |
| | # 2 | 1549.38 | % remaining | 16.38 | 15.37 | 8.82 | 6.42 |
| | | | % removed | 83.62 | 84.63 | 91.18 | 93.58 |



รูปที่ 5.21 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของการกำจัด COD ของระบบ ที่ HRT รวมเท่ากับ 3.49, 5.17, 11.39 และ 15.91 วัน

5.3.3 ของแข็งและตะกอนของแข็งในระบบ

ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) ในระบบถังหมักกรดจากการทดลอง พบว่า ส่วนใหญ่เป็นพวกเส้นใย ของพืชผักที่ใช้เป็นสารอาหารซึ่งถูกบ้อนเข้าระบบ และถูกย่อยสลายและ มีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ถ้าหากการบ้อนเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ แต่บางครั้งเมื่อเกิดมีเหตุ ขัดข้องจากการทำงานของปั๊มบ้อนสารอาหาร ทำให้สารอาหารเข้าสู่ระบบมากเกินไป เกิดการ สะสมของพวกเส้นใย ทำให้ระบบการกวน ซึ่งใช้ปั๊มพ้อยไซ่งขนาดเล็กเกิดการอุดตัน ต้องถอด แกะปั๊มออกมาล้างเส้นใยที่อุดตันออก และหยุดบ้อนสารอาหาร หรือบ้อนด้วยอัตราที่น้อยลง เพื่อ ให้มีระยะเวลาการหมักนานขึ้น จนการย่อยสลายกลับสู่ภาวะสมดุลย์ใหม่

ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดภายในถังหมักกรด เมื่อมีการกวนอย่างสม่ำเสมอ จะ อยู่ในช่วงประมาณ 3,000-5,000 มก/ล และค่าเฉลี่ยที่วัดได้คือ 3,523.13 มก/ล โดยเป็น ของแข็งระเหยทั้งหมด 2,811.88 มก/ล แต่ค่าที่ได้นี้ไม่อาจยึดถือเป็นค่าที่ถูกต้องแน่นอน เนื่อง จากคุณลักษณะของสารอาหารที่ใช้ทดลองมีความเปลี่ยนแปลงสูง ไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช ผักที่ถูกบ้อนเข้าสู่ระบบว่า มีเส้นใยมากน้อยเพียงใด และเมื่อทำการทดลองไปได้ระยะหนึ่ง ปรากฏว่ามีการสะสมของตะกอนลอย (scum) เป็นจำนวนมากที่ผิวบน ตะกอนลอยนี้พบว่าจะหนา ขึ้นเรื่อย ๆ ลักษณะของตะกอนลอยนี้ ไม่ใช่พวกเส้นใย แต่เป็นมวลเซลล์ที่เกิดและตาย และสะสม เพิ่มมากขึ้น และถึงแม้ว่า ระบบการกวนที่ใช้ปั๊มพ้อยไซ่งสูบน้ำหมุนเวียน จากกันถังแล้วให้กลับ เข้าที่กลางถัง จะเกิดการกวนที่ทั่วถึง แต่เมื่อตะกอนลอยมีมากขึ้น ก็ไม่มีผลต่อตะกอนลอย และ แม้จะติดใบกวนที่ผิวบนเพื่อตีตะกอนให้แตก ก็มีผลเพียงเล็กน้อย เมื่อความหนาของตะกอนมีมาก

ปัญหาที่ตามมาจากการเกิดตะกอนลอย คือทำให้การไหลของน้ำจากถังกรดไปสู่ ถังตกตะกอนมีปัญหา คือทำให้ไหลไม่สะดวก, ไม่สม่ำเสมอ และบางครั้งเกิดอุดตัน การแก้ไขคือ ต้องกำจัดตะกอนลอยออก เมื่อเกิดการสะสมเป็นจำนวนมาก ด้วยการถ่ายน้ำออกจากถัง และ ทำการล้างตะกอนในถัง จากนั้นจึงสูบน้ำที่ถ่ายออกมากลับเข้าไปในถังใหม่ ซึ่งการกระทำ ดังกล่าว ไม่ได้ทำให้ระบบล้มเหลวแต่อย่างใด และเมื่อสูบน้ำกลับเข้าไปใหม่แล้ว ถังหมักกรดก็ สามารถทำงานได้ตามเดิมทันที

ความสำคัญของจุดนี้ก็คือ เป็นการพิสูจน์อย่างดีว่า ระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศแบบสองขั้นตอน เมื่อทำงานได้แล้วจะไม่เกิดการล้มเหลวจนต้องตั้งต้นใหม่ (start up) ถึงแม้จะมีการถ่ายน้ำในระบบออก (ทำได้เฉพาะในถังหมักกรดเท่านั้น) ซึ่งถ้าเป็นระบบการย่อยสลายแบบขั้นตอนเดียว แบบทั่วไปแล้วการแก้ปัญหา การเกิดสะสมของตะกอนลอยด้วยวิธีที่กล่าวย่อมาไม่ได้ เพราะระบบจะล้มเหลวและต้องตั้งต้นใหม่ เมื่อน้ำถูกถ่ายออกมาสู่อากาศภายนอก

สาเหตุที่ระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศแบบสองขั้นตอน สามารถทำงานต่อได้ แม้จะมีการถ่ายน้ำออกมาเพื่อล้างถังหมักกรด ก็เนื่องจากการย่อยสลาย ถูกแยกออกเป็นสองขั้นตอน คือขั้นตอนที่ทำให้เกิดกรด เกิดในถังหมักกรด และขั้นตอนที่ทำให้เกิดก๊าซเกิดในถังหมักก๊าซ และเนื่องจากขั้นตอนที่ทำให้เกิดกรด เกิดจากจุลินทรีย์พวก facultative anaerobic bacteria ที่สามารถทนต่อสภาพที่มีออกซิเจนได้พอควร และในขั้นตอนนี้จุลินทรีย์มีอัตราการเกิดและใช้สารอาหารอย่างรวดเร็ว ดังนั้น จึงเกิดการสะสมของตะกอนลอยอย่างมากได้ แต่การแก้ไขก็ไม่ได้ทำให้ระบบล้มเหลวแต่อย่างใด

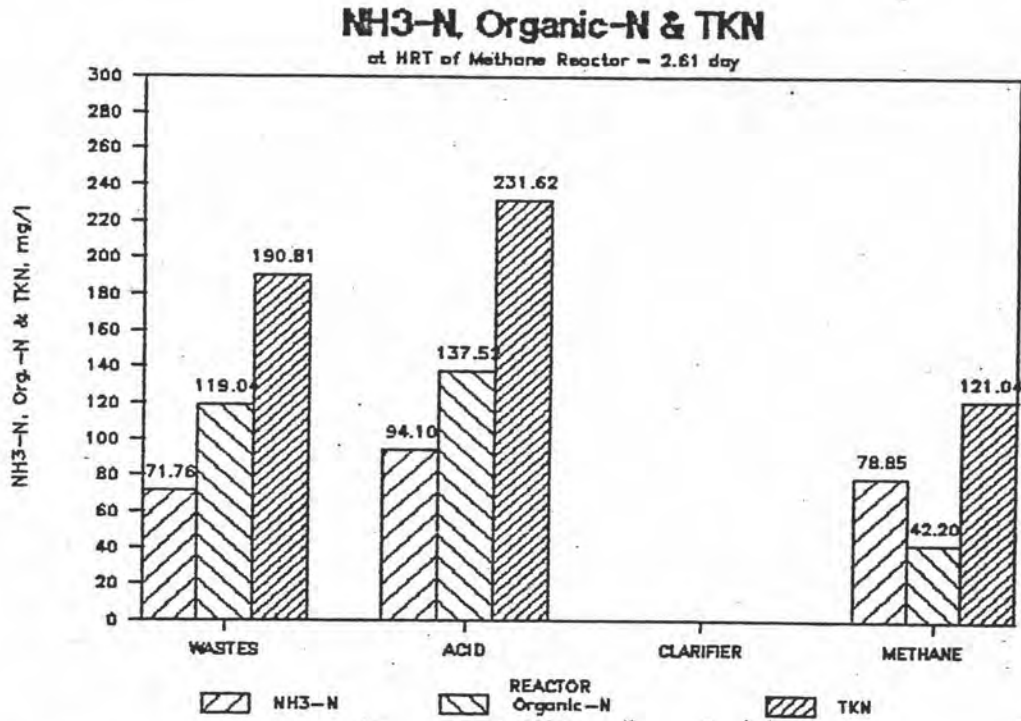
สำหรับตะกอนที่พบในถังหมักก๊าซจะกล่าวถึงในหัวข้อ การเปลี่ยนแปลงภายในถังหมักก๊าซอย่างละเอียด

5.3.4 ไนโตรเจน

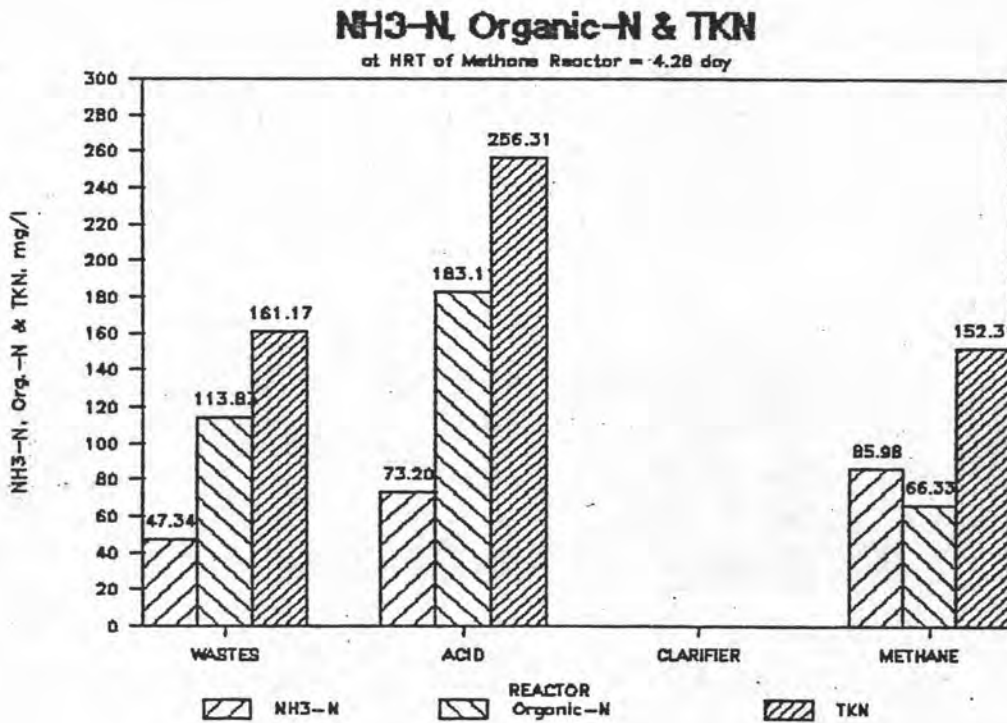
จากผลการทดลอง สรุปว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างนัยสำคัญของ แอมโมเนีย-ไนโตรเจน, อินทรีย์-ไนโตรเจน และไนโตรเจนทั้งหมด ($\text{NH}_3\text{-N}$, Organic-N & Total Kjeldahl Nitrogen [TKN]) ของสารอาหารเมื่อเข้าสู่ระบบภายในถังหมักกรด เพราะมีค่าค่อนข้างคงที่สม่ำเสมอ ตามที่แสดงใน รูปที่ 5.22 ถึง 5.25 พบว่าภายในถังหมักกรดมีค่าสูงขึ้น เพราะการเวียนตะกอนกลับ จึงมีการสะสม แต่ก็อยู่ในระดับที่ค่อนข้างคงที่

5.3.4 ก๊าซ

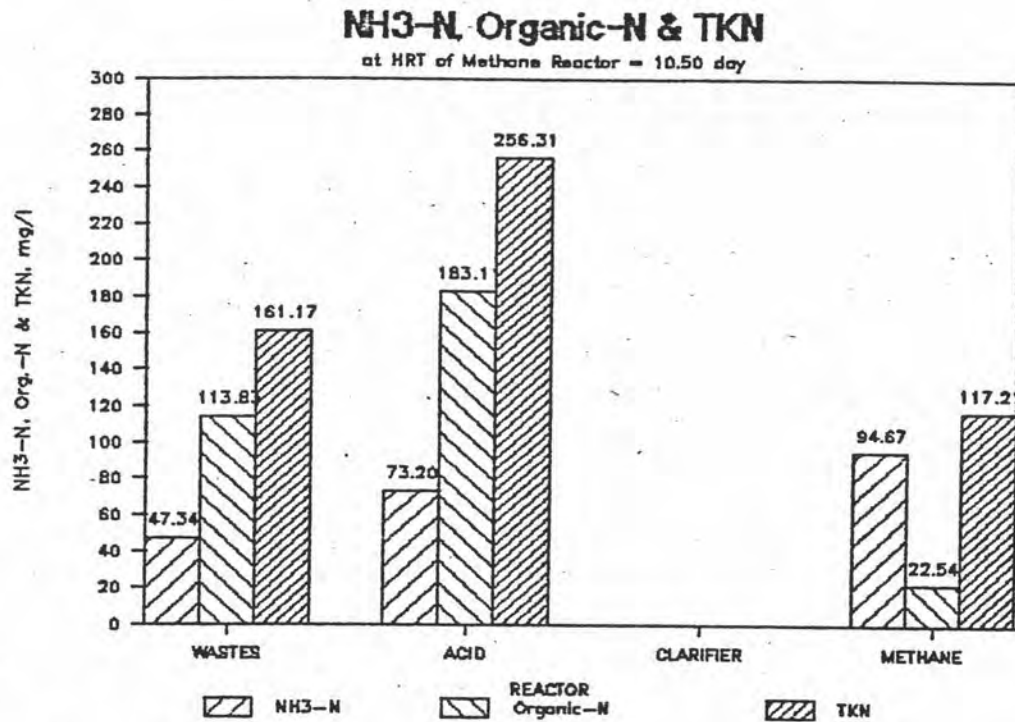
ในระยะแรกของการทดลอง ไม่ได้ทำการวัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นในถังหมักกรด เนื่องจากคาดว่าจะมีไม่มากนัก เพราะไม่น่าจะมีก๊าซเกิดขึ้นได้ ในสภาพแวดล้อมที่ พีเอชต่ำกว่า 6.0 แต่จากการทดลองพบว่ามีก๊าซเกิดขึ้นพอสมควร จึงได้ติดตั้งเครื่องวัดก๊าซเพิ่มขึ้นภายหลัง และได้ใช้เครื่อง Orsat Gas Analyzer วัดค่าเปอร์เซ็นต์ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า



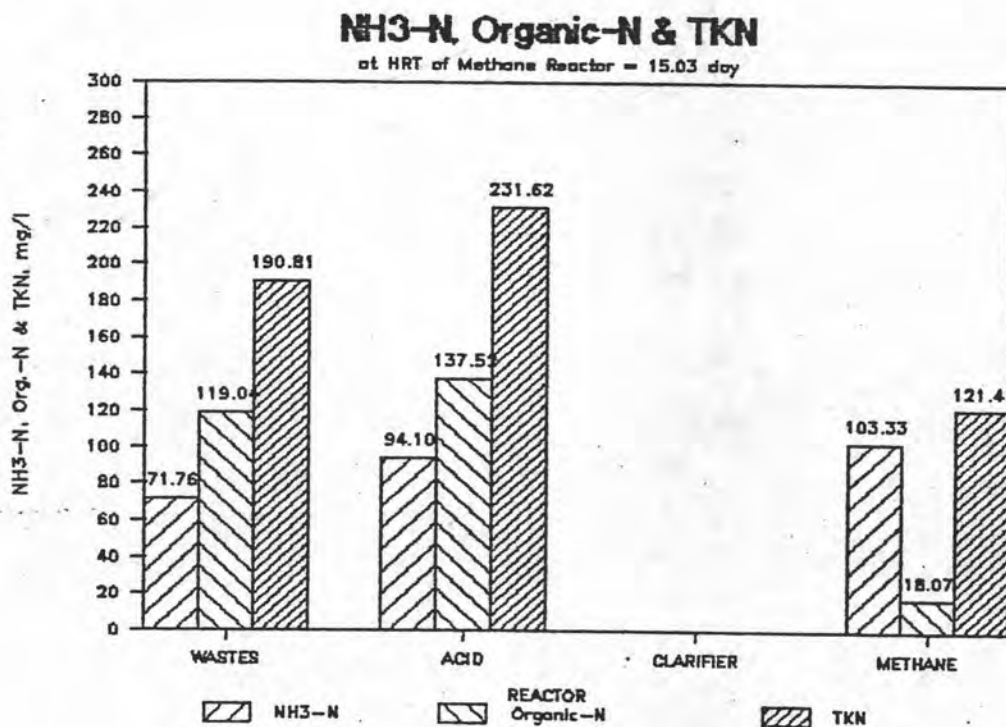
รูปที่ 5.22 การเปลี่ยนแปลงของ NH₃-N, Organic-N และ TKN ในถังหมักต่าง ๆ ของการทดลองชุดที่สอง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 2.61 วัน



รูปที่ 5.23 การเปลี่ยนแปลงของ NH₃-N, Organic-N และ TKN ในถังหมักต่าง ๆ ของการทดลองชุดที่หนึ่ง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 4.28 วัน



รูปที่ 5.24 การเปลี่ยนแปลงของ NH₃-N, Organic-N และ TKN ในถังหมักต่าง ๆ ของการทดลองชุดที่หนึ่ง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 10.50 วัน



รูปที่ 5.25 การเปลี่ยนแปลงของ NH₃-N, Organic-N และ TKN ในถังหมักต่าง ๆ ของการทดลองชุดที่สอง ที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 15.03 วัน

มีประมาณ 25 % ซึ่งเมื่อเทียบกับก๊าซที่เกิดในถังหมักก๊าซที่วัดอย่างละเอียดด้วยเครื่อง GC-7AG พบไนโตรเจนประมาณ 20 % ดังนั้นจากการประมาณจึงสรุปว่า ก๊าซที่เกิดในถังหมักกรด จะเป็น ก๊าซมีเทนประมาณ 55 % (สามารถจุดติดไฟ ให้เปลวไฟสีน้ำเงิน) และมีอัตราการเกิดของก๊าซ ทั้งหมดเท่ากับ 8.73 ลิตร/วัน หรือ 291 ลิตร/ม³ ของถังหมัก

สรุปได้ว่า ระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศแบบสองขั้นตอน มีก๊าซเกิดขึ้นได้ใน ขั้นตอนการสร้างกรดด้วย เพราะระบบการทำงาน มีสภาพคล้ายกับการย่อยสลายแบบไร้อากาศ แบบล้มผัส มีการสะสมของแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทน เพราะการเวียนตะกอนกลับ

5.4 การเปลี่ยนแปลงภายในถังหมักก๊าซที่ระยะเวลาหมักต่าง ๆ

5.4.1 พีเอช, ความเป็นด่าง และกรดโวลไทล์

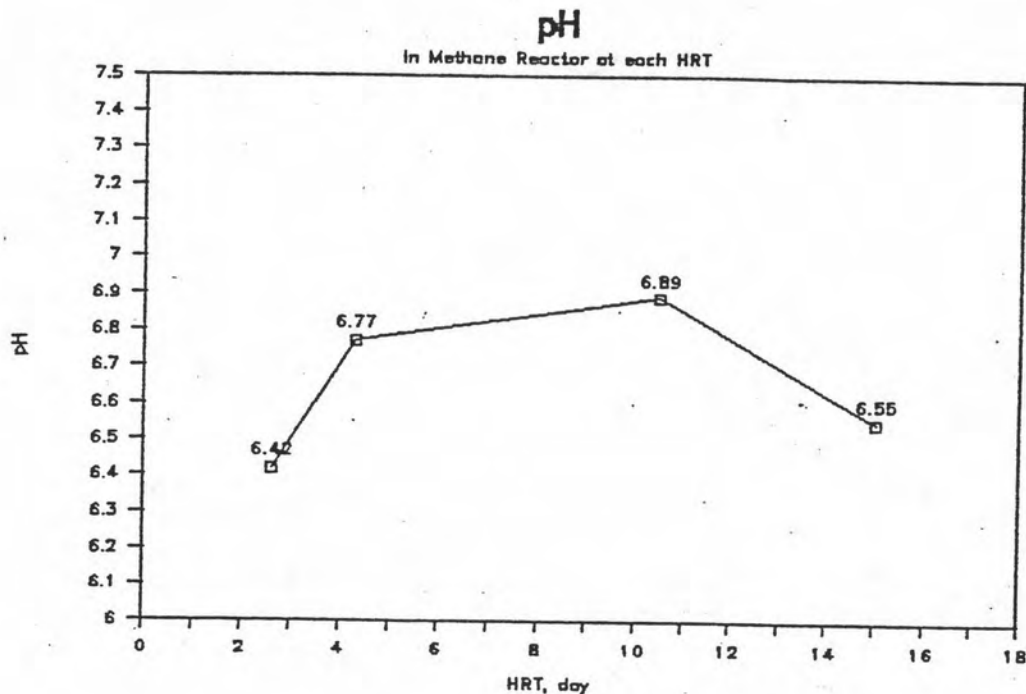
ตารางที่ 5.5 เป็นค่าของตัวแปรต่าง ๆ ในถังหมักก๊าซ ที่ได้จากการทดลอง และ รูปที่ 5.26 ถึง 5.28 แสดงการเปลี่ยนแปลงของพีเอช, ความเป็นด่าง และกรดโวลไทล์ พบว่าค่าพีเอชมีการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 6.42-6.89 และการเปลี่ยนแปลง มีลักษณะที่มีจุด สูงสุดที่ HRT ของถังหมักก๊าซเท่ากับ 10.50-วัน และจากการทดลองปรากฏว่า ค่าพีเอชในถัง หมักก๊าซเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงมากกว่า 6.0 ดังนั้นสรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของพีเอชในถัง หมักก๊าซ อยู่ในช่วงที่แบคทีเรียชนิดที่ผลิตก๊าซมีเทนดำรงชีวิตอยู่ได้ และจากผลการทดลอง แม้- ว่าพีเอช ของถังหมักก๊าซจะเหลือเพียง 6.42 ถังหมักก็ยังสามารถทำงานได้ แสดงว่าระบบแบบสองขั้น ตอนนี้มีประสิทธิภาพสูงมาก เมื่อเทียบกับการย่อยสลายแบบไร้อากาศแบบทั่วไป

การเปลี่ยนแปลงของความเป็นด่าง ในถังหมักก๊าซจากรูปที่ 5.27 พบว่าเมื่อค่า HRT ของถังหมักก๊าซนานขึ้น ความเป็นด่างก็จะเพิ่ม เนื่องจากการย่อยสลายมากขึ้น ทำให้สภาพ ความเป็นด่างมากขึ้น และสัมพันธ์กับค่าของกรดโวลไทล์ตามรูปที่ 5.28 ที่พบว่าเมื่อ HRT นานขึ้น กรดโวลไทล์ก็ถูกย่อยสลายจนเหลือน้อยลง และจากรูปที่ 5.29 อัตราส่วนของกรด โวลไทล์ต่อความเป็นด่าง ลดลงเมื่อ HRT เพิ่มขึ้น

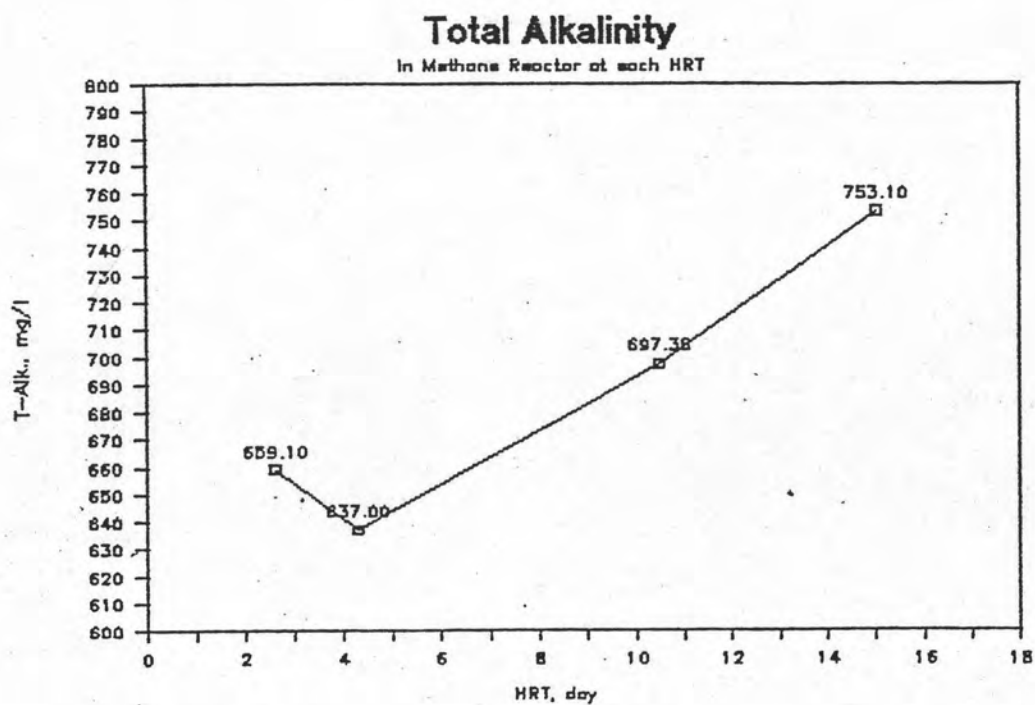


ตารางที่ 5.5 สรุปค่าตัวแปรที่ได้จากการทดลอง ภายในถังหมักก๊าซ ที่ HRT ต่าง ๆ

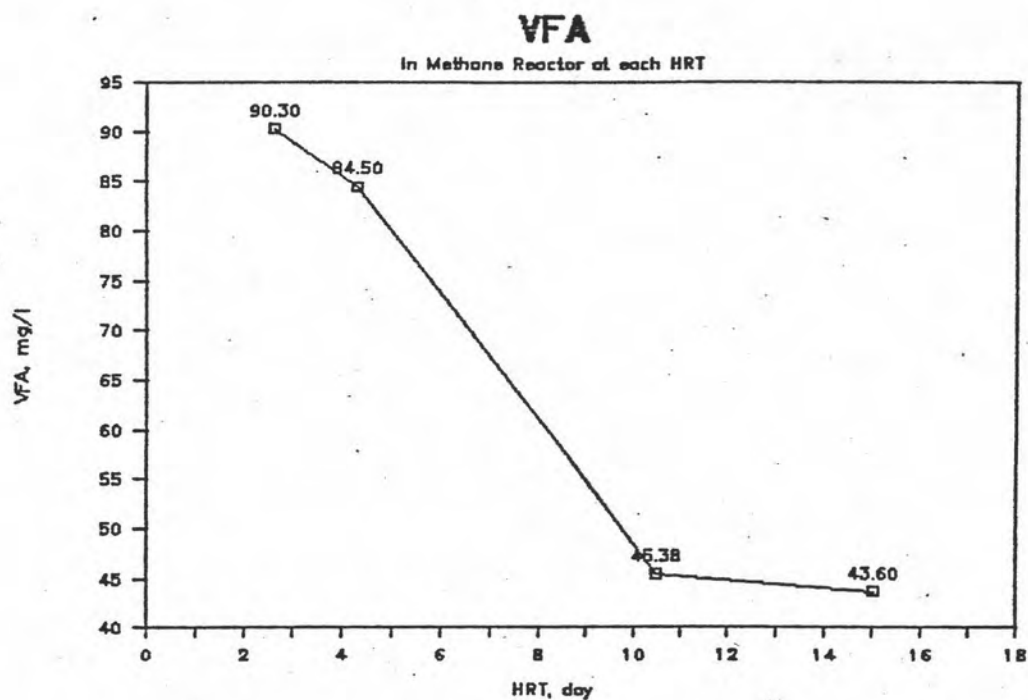
| Parameter | HRT, day | | | |
|--------------------------------------------------|----------|---------|--------|--------|
| | 2.61 | 4.28 | 10.50 | 15.03 |
| Reactor volume, l | 50.00 | 50.00 | 52.30 | 52.30 |
| pH | 6.42 | 6.77 | 6.89 | 6.55 |
| Total Alkalinity, as CaCO ₃ , mg/l | 659.10 | 637.00 | 697.38 | 753.10 |
| VFA, as CH ₃ COOH, mg/l | 90.30 | 84.50 | 45.38 | 43.60 |
| VFA:T-Alk. | 0.14 | 0.13 | 0.07 | 0.06 |
| COD | 1139.71 | 1890.13 | 551.38 | 276.00 |
| COD soluble, mg/l | 253.86 | 218.13 | 125.13 | 99.43 |
| MLSS | 469.50 | 1035.00 | 365.00 | 78.00 |
| MLVSS, mg/l | 408.25 | 905.00 | 295.00 | 74.33 |
| NH ₃ -N | 78.85 | 85.98 | 94.67 | 103.33 |
| Organic-N | 42.20 | 66.33 | 22.54 | 18.07 |
| TKN, mg/l | 121.04 | 152.31 | 117.21 | 121.41 |
| Gas volume, l/day | 10.31 | 9.11 | 4.86 | 1.98 |
| % CH ₄ | 63.33 | 70.89 | 68.91 | 60.77 |
| % CO ₂ | 16.06 | 17.58 | 17.21 | 16.30 |
| % O ₂ | 1.33 | 1.63 | 2.26 | 2.37 |
| % N ₂ | 17.26 | 9.86 | 11.51 | 18.23 |
| CH ₄ volume, l/day | 6.53 | 6.46 | 3.35 | 1.20 |
| GPR, vol/vol-day | 0.206 | 0.182 | 0.093 | 0.038 |
| CH ₄ PR, vol/vol-day | 0.131 | 0.129 | 0.064 | 0.023 |
| l CH ₄ /gm COD removal | | | | |
| total | 0.330 | 0.721 | 0.320 | 0.182 |
| soluble | 0.334 | 0.537 | 0.600 | 0.294 |



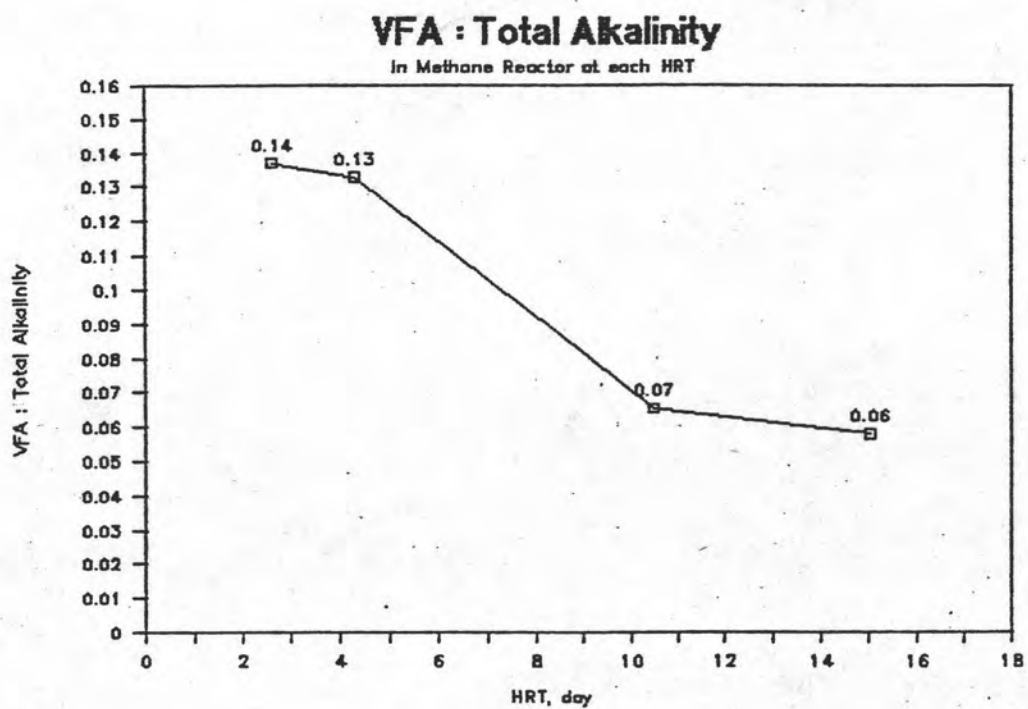
รูปที่ 5.26 การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช ในถังหมักก๊าซที่ HRT ต่าง ๆ กัน



รูปที่ 5.27 การเปลี่ยนแปลงของสภาพความเป็นด่าง ในถังหมักก๊าซที่ HRT ต่าง ๆ กัน



รูปที่ 5.28 การเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันอิสระ ในถังหมักก๊าซที่ HRT ต่าง ๆ กัน



รูปที่ 5.29 อัตราส่วนของกรดไขมันอิสระต่อสภาพความเป็นด่าง ในถังหมักก๊าซ ที่ HRT ของถังหมักก๊าซต่าง ๆ กัน

5.4.2 ซีไอตี

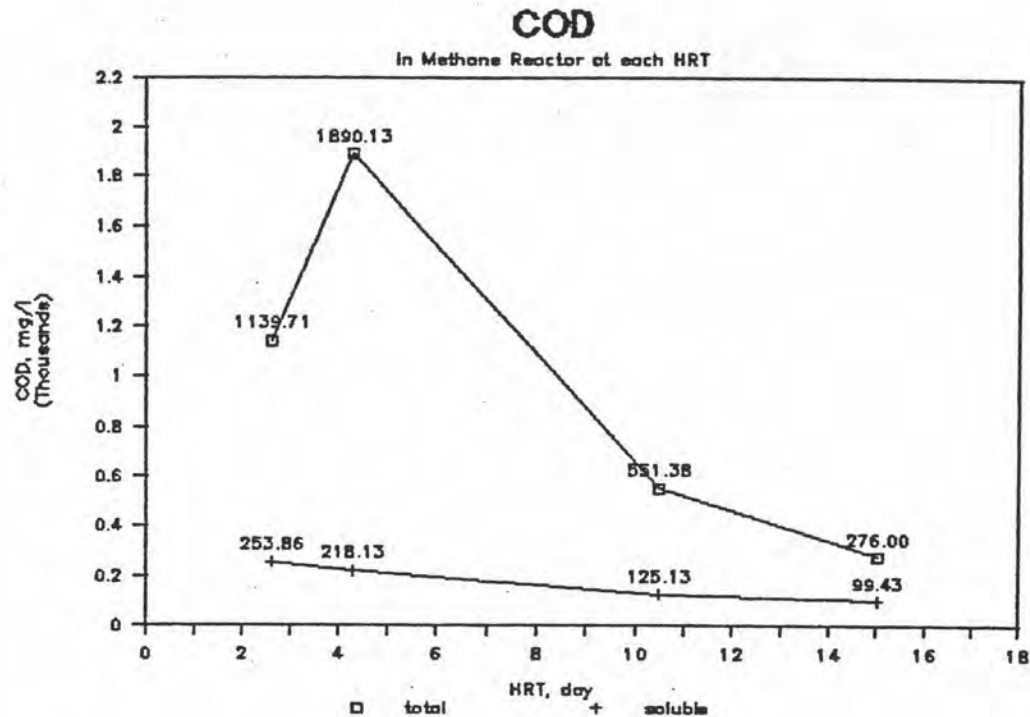
รูปที่ 5.30 แสดงค่าของซีไอตีและซีไอตีละลาย ในถังหมักก๊าซที่ระยะเวลาการหมักต่าง ๆ พบว่าเมื่อ HRT เพิ่มขึ้น ค่าซีไอตีจะเหลือน้อยลง แต่ที่ HRT เท่ากับ 4.28 วัน พบว่าซีไอตีสูงขึ้นเนื่องจากที่จุดนี้ มีตะกอนจุลชีพ (MLSS) เกิดมาก (รูปที่ 5.33) จึงทำให้ซีไอตีทั้งหมดสูงขึ้น สำหรับซีไอตีละลายพบว่ามีค่าลดลงอย่างสม่ำเสมอ เมื่อ HRT เพิ่มขึ้น

การกำจัดซีไอตีในถังหมักก๊าซ เมื่อเทียบกับค่าซีไอตีที่มาจากถังตกตะกอน แสดงไว้ในรูปที่ 5.31 และ 5.32 พบว่าการกำจัดจะมากขึ้นเมื่อ HRT ของถังหมักเพิ่มขึ้น ยกเว้นที่ HRT เท่ากับ 4.28 วัน ตามเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว จากการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ของการกำจัดตามที่ได้แสดงในรูปที่ 5.32 พบว่ามีค่าสูงสำหรับซีไอตีละลาย แต่สำหรับซีไอตีทั้งหมด มีค่าไม่สูงที่ HRT ต่ำ แต่เมื่อ HRT มากขึ้นก็มีค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสูงเช่นกัน

จากผลการทดลองที่ได้ สรุปว่า การกำจัดซีไอตีในระบบส่วนใหญ่จะถูกกำจัดเมื่อเข้าถังหมักก๊าซแล้ว โดยเมื่อเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์การกำจัดซีไอตีของระบบในรูปที่ 5.21 ซึ่งคิดจากค่าซีไอตี ของสารอาหารก่อนเข้าระบบ พบว่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดซีไอตีละลาย ใกล้เคียงกัน แต่เปอร์เซ็นต์การกำจัดซีไอตีทั้งหมดต่างกัน แสดงว่าการกำจัดซีไอตีละลาย ส่วนใหญ่จะถูกกำจัดในถังหมักก๊าซทั้งหมด แต่การกำจัดซีไอตีทั้งหมด เมื่อ HRT ต่ำ บางส่วนถูกกำจัดก่อนเข้าถังหมักก๊าซ เนื่องจากการเวียนตะกอนกลับจากถังตกตะกอนเข้าสู่ถังหมักกรด ซึ่งค่าการกำจัดซีไอตีในขั้นตอนต่าง ๆ นั้น สามารถดูได้จากรูปที่ 5.13 ถึง 5.20

5.4.3 ตะกอนในถังหมัก

รูปที่ 5.33 แสดงตะกอนมวลเซล ที่เกิดในถังหมักก๊าซ ที่ HRT ต่าง ๆ พบว่าเมื่อ HRT นานขึ้น ตะกอนจะลดลง ยกเว้นที่ HRT เท่ากับ 4.28 วัน เกิดตะกอนมากกว่าจุดอื่น ซึ่งแสดงว่าที่จุดนี้มีการผลิตมวลเซลได้มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับที่จุดอื่นแล้ว อาจอธิบายได้ว่าเมื่อ HRT ต่ำมาก ๆ คือที่ 2.61 วัน จะเกิดการล้างออกของมวลเซล และสารอาหารก็ถูกใช้ไปได้ไม่มาก ซึ่งเห็นจากค่าของซีไอตีทั้งหมดว่าถูกกำจัดได้น้อย และเมื่อเพิ่ม HRT ทำให้อาหารถูกใช้ไปมากขึ้น โดยดูได้จากค่าของ ซีไอตีละลายลดน้อยลง แต่ขณะเดียวกัน มวลเซลไม่ได้ถูกล้างออกในอัตราที่สูง ทำให้มีมวลเซลเกิดมากขึ้น จนทำให้เสมือนหนึ่งว่าค่าซีไอตีทั้งหมดใน

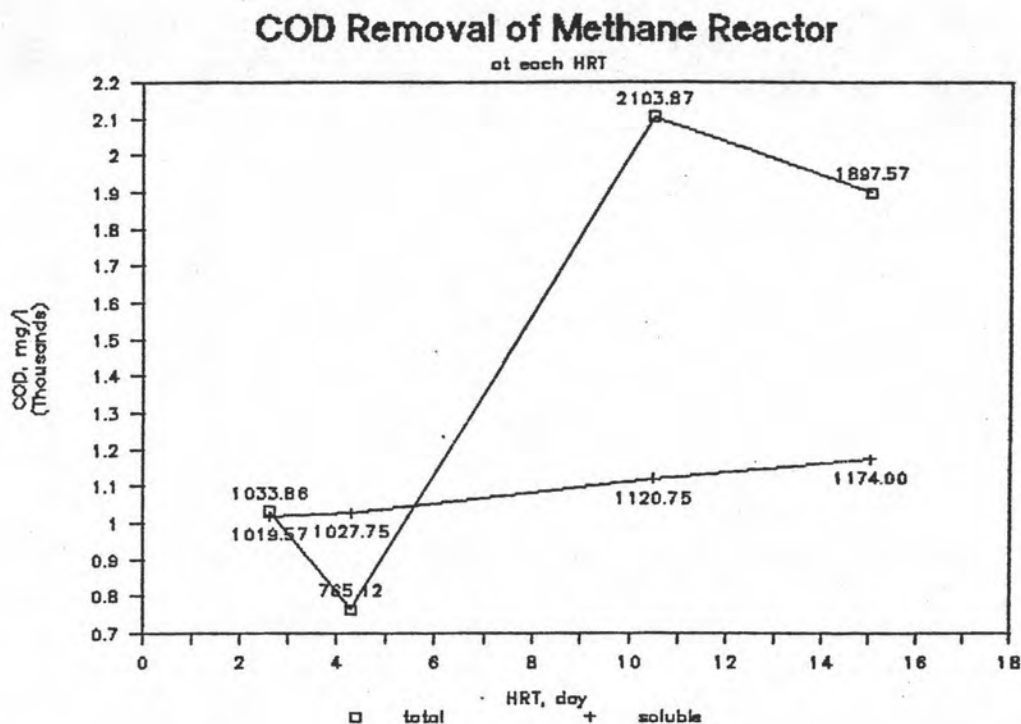


รูปที่ 5.30 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าของ COD ทั้งหมด และ COD ละลาย ในถังหมักก๊าซ ที่ HRT ของถังหมักก๊าซต่าง ๆ กัน

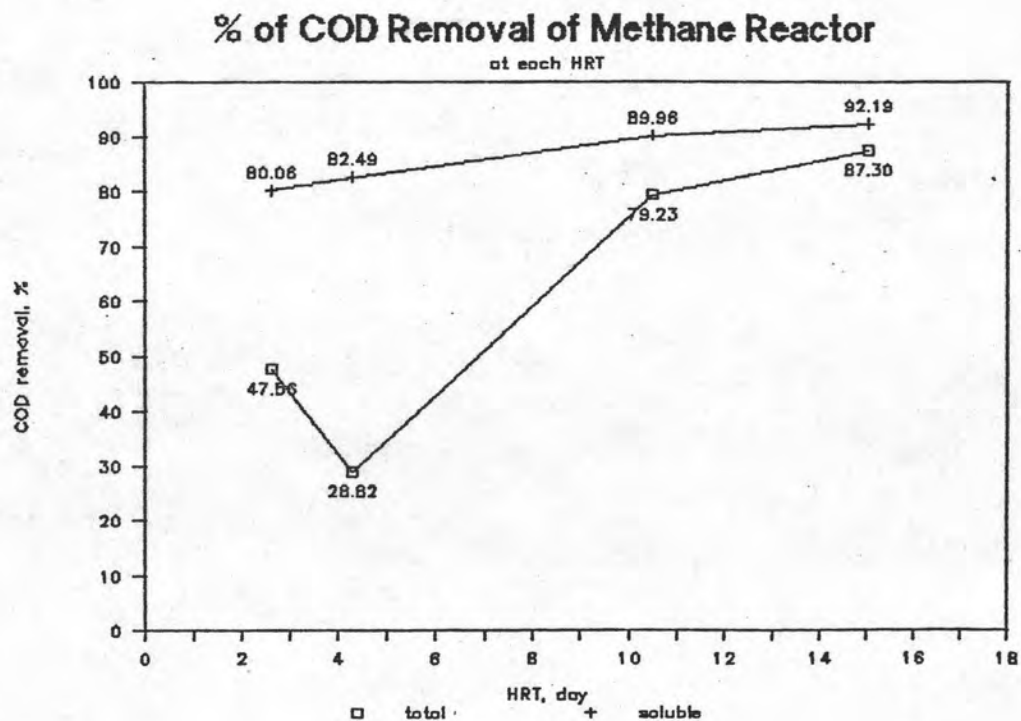
สารอาหารที่เข้าสู่ถังหมักก๊าซมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งที่จริงแล้วค่าซีโอดีทั้งหมดที่วัดได้ มาจากมวลเซลล์ ที่เพิ่มขึ้น และสะสมอยู่ในถังหมัก และเมื่อเพิ่ม HRT ขึ้นอีก ผลปรากฏว่าซีโอดีทั้งหมดลดลง เนื่องจากสารอาหารที่เข้าในถังหมักมีน้อย การเกิดมวลเซลล์จึงน้อยลงด้วย และระยะเวลาการหมักนานขึ้น จึงทำให้กำจัดซีโอดีได้มากขึ้น

5.4.4 ไนโตรเจน

สำหรับในถังหมักก๊าซ การเปลี่ยนแปลงรูปต่าง ๆ ของไนโตรเจนแสดงใน รูปที่ 5.34 พบว่าค่า TKN ก่อนข้างคองที่ในระยะเวลาการหมักต่าง ๆ กัน แต่ต่ำกว่าในถังหมักกรด เนื่องจาก สารอาหารที่ป้อนเข้าสู่ถังหมักก๊าซ มาจากถังตกตะกอน และตะกอนถูกเวียนกลับสู่ถังหมักกรด จึงทำให้ค่า TKN ต่ำกว่าในถังหมักกรด และส่วนหนึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของรูป $\text{NH}_3\text{-N}$ เกิดเป็นก๊าซไนโตรเจนในถังหมักก๊าซขึ้น และพบว่า Organic-N มีค่าลดลง เมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีคือ เมื่อเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ ที่มีองค์ประกอบของพวกโปรตีน จะได้แอมโมเนีย และถ้าเป็นการย่อยสลายที่มีออกซิเจน อย่างเหลือเพื่อ



รูปที่ 5.31 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าของ COD ทั้งหมด และ COD ละลาย ในถังหมักก๊าซ ที่ถูกกำจัดจากถังตกตะกอน ที่ HRT ของถังหมักก๊าซต่าง ๆ กัน



รูปที่ 5.32 แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของ COD ทั้งหมด และ COD ละลาย ในถังหมักก๊าซ ที่ถูกกำจัดจากถังตกตะกอน ที่ HRT ของถังหมักก๊าซต่าง ๆ กัน

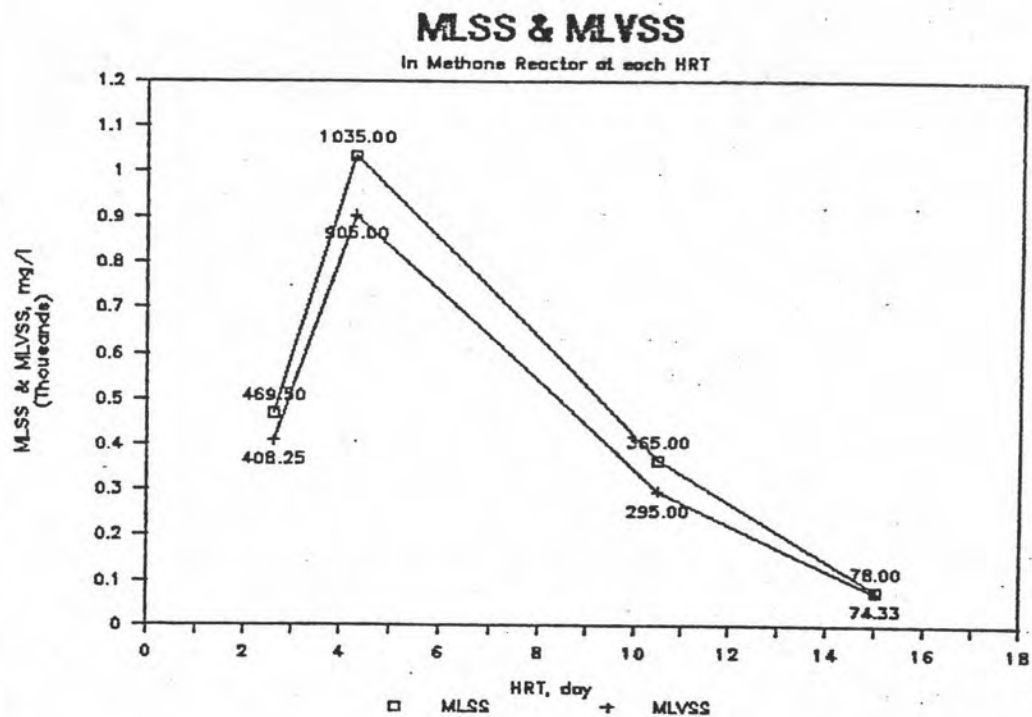
ก็จะได้นิโตรเจน (NO_2) และไนเตรด (NO_3) ตามลำดับ แต่ถ้าระบบขาดออกซิเจน ก็จะมีการรีดักชันจากไนเตรดเป็น ไนไตรท์ แอมโมเนีย และไนโตรเจนตามลำดับ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า Organic-N ถูกย่อยสลายเป็น $\text{NH}_3\text{-N}$ และกลายเป็นก๊าซไนโตรเจน ในที่สุด

5.4.5 ก๊าซ

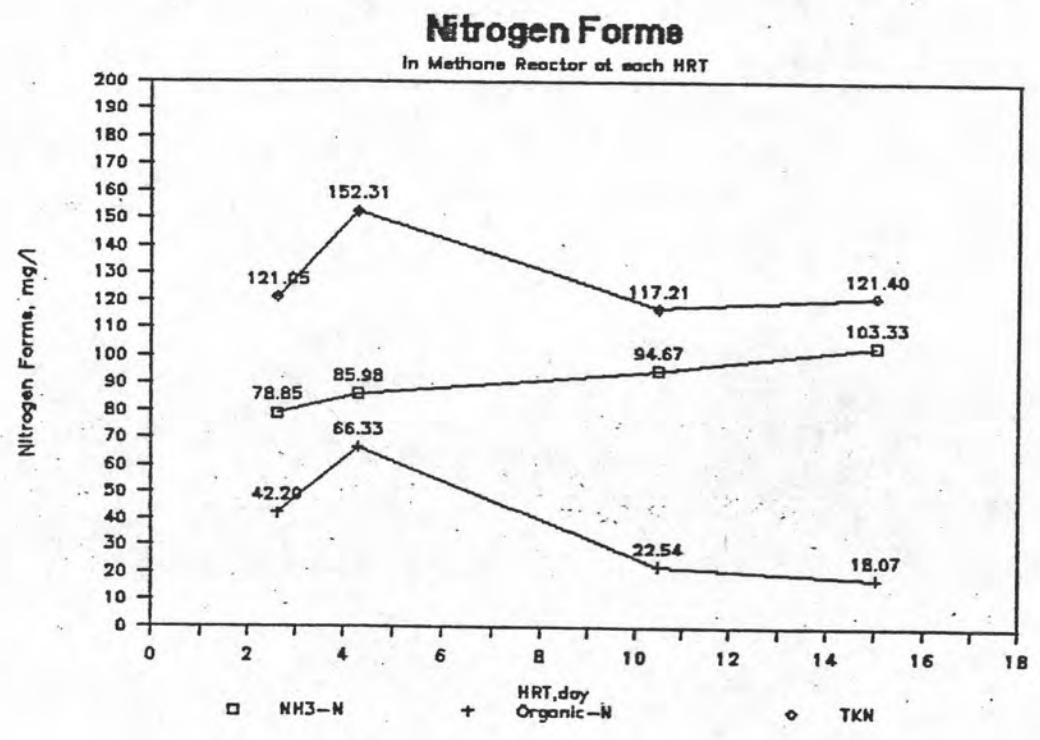
รูปที่ 5.35 และ 5.36 แสดงเปอร์เซ็นต์ของก๊าซต่าง ๆ ที่พบในถังหมักก๊าซ ซึ่งจากการวิเคราะห์อย่างละเอียดด้วยเครื่อง GC-7AG พบว่าก๊าซที่เกิดมากที่สุดคือมีเทน โดยมีค่าสูงสุดคือ 70.89 % ที่ HRT ของถังหมักเท่ากับ 4.28 วัน และต่ำที่สุดคือ 60.77 % ที่ HRT ของถังหมักเท่ากับ 15.03 วัน และพบก๊าซออกซิเจนอยู่เล็กน้อย ซึ่งสาเหตุอาจมาจากการเก็บตัวอย่างไปทดสอบ เกิดการรั่วซึมขึ้น หรืออาจเนื่องจากความบกพร่องของ ระบบการบ้อนสารอาหารเข้าสู่ถังหมักก๊าซ ซึ่งใช้วิธีให้สายของสารอาหารจุ่มอยู่ที่ความลึกระดับหนึ่งในถังตกตะกอน และใช้ปั๊มสายรีดสูบลอาหารเข้าไปในถังหมักก๊าซ บางครั้งเมื่อมีการอุดตันของสายส่งอาหารจากถังหมักกรวดเข้าสู่ถังตกตะกอน ทำให้น้ำในถังตกตะกอนลดต่ำกว่าระดับสายที่จุ่มอยู่ และเมื่อปั๊มบ้อนสารอาหารทำงาน จึงทำให้อากาศถูกสูบลเข้าไปในถังหมักก๊าซได้บางส่วน

รูปที่ 5.37 แสดงอัตราการผลิตก๊าซภายในถังหมักก๊าซที่ HRT ต่าง ๆ กัน โดยการคำนวณ เนื่องจากในการทดลอง ขนาดของถังหมักก๊าซรับน้ำที่มาจากถังตกตะกอนได้ไม่หมด น้ำส่วนหนึ่งจึงปล่อยให้ล้นจากถังตกตะกอน โดยไม่ผ่านการบำบัดจนครบ แต่ในการคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบ จะต้องคำนวณจากน้ำที่เข้าระบบทั้งหมด และผ่านทุกขั้นตอนของการบำบัด จากรูปพบว่าอัตราการผลิตก๊าซมีลักษณะเป็น โค้งคว่ำ มีค่าสูงสุดที่ HRT อยู่ในช่วงประมาณ 6-10 วัน และเมื่อเทียบอัตราการผลิต/ปริมาตรของถังหมัก ตามรูปที่ 5.38 พบว่าเกือบเป็นเส้นตรงที่ HRT ต่ำ อัตราการผลิตจะสูง และลดลงเมื่อ HRT มากขึ้น เนื่องจากเมื่อ HRT มากขึ้น และอัตราการบ้อนสารอาหารคงที่จากถังหมักกรวด ผ่านมาสู่ถังตกตะกอน ทำให้จะต้องมีขนาดของถังหมักก๊าซใหญ่ขึ้น เพื่อให้ได้ HRT ตามต้องการ ดังนั้นอัตราการผลิต/ปริมาตรของถังหมัก จึงลดลง สำหรับ อัตราการผลิตก๊าซมีเทน/ปริมาตรถังหมักก๊าซ พบว่าไม่เป็นเส้นตรงที่มีความชันสม่ำเสมอ เนื่องจากเปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทนลดลงเมื่อ HRT น้อยลง

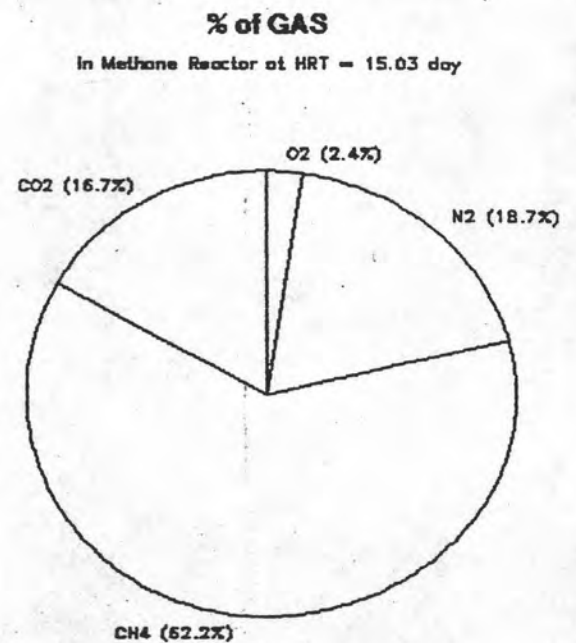
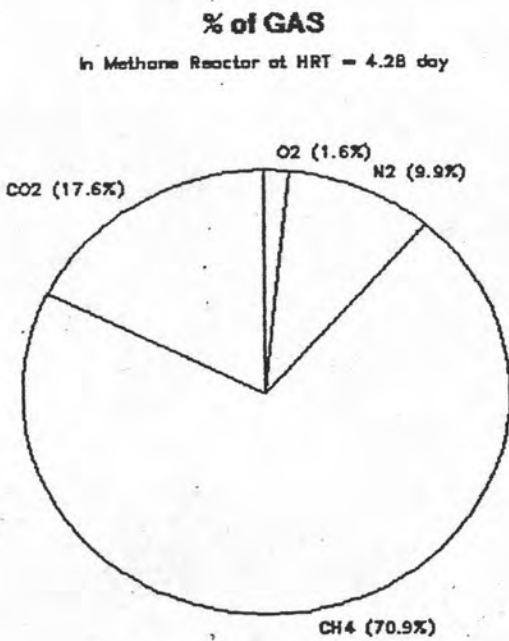
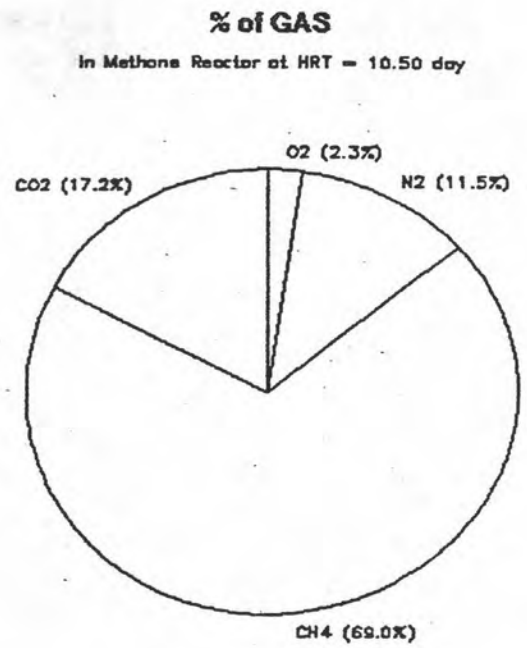
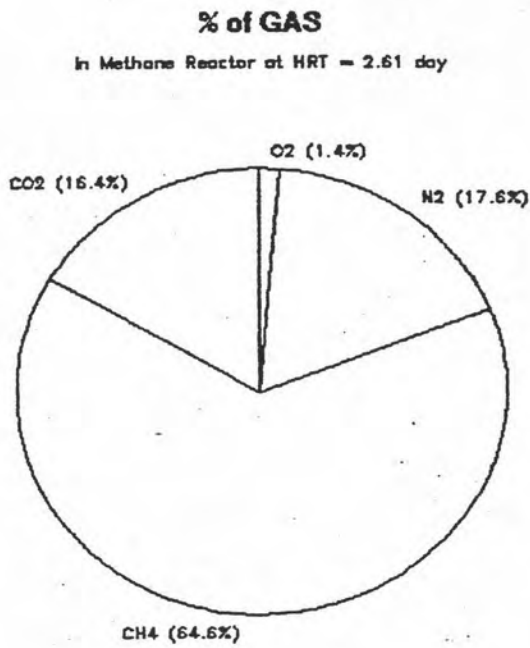
สรุปได้ว่าการผลิตก๊าซในถังหมักก๊าซ จะมีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดในช่วงเวลา



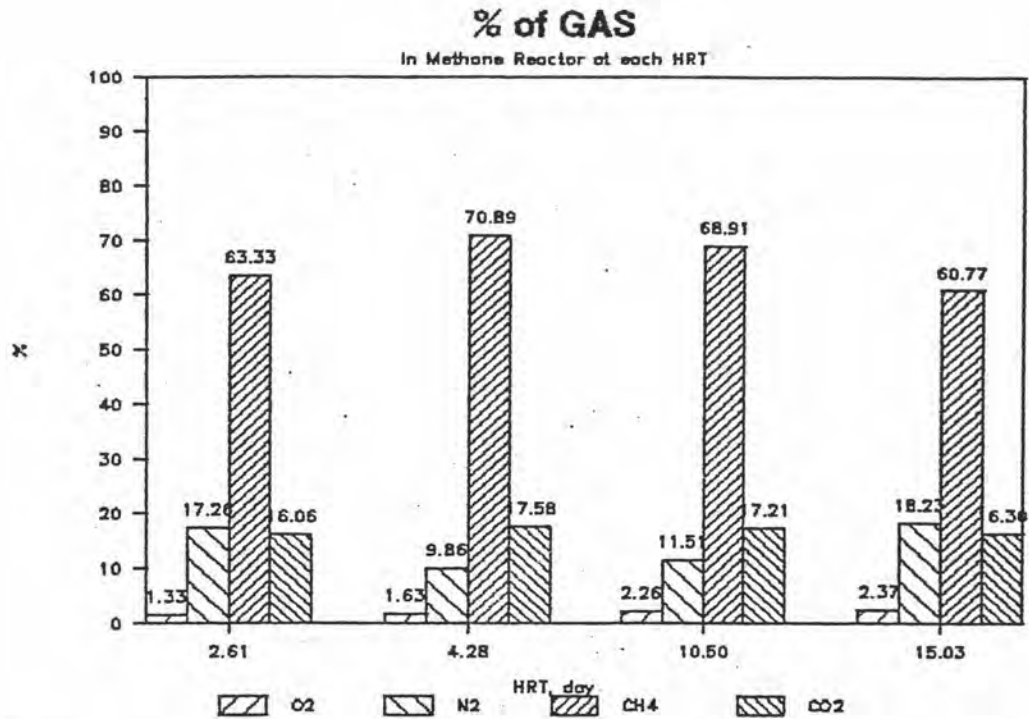
รูปที่ 5.33 ตะกอนมวลเซลล์ที่มีในถังหมักก๊าซ ที่ HRT ของถังหมักก๊าซต่าง ๆ กัน



รูปที่ 5.34 การเปลี่ยนแปลงของ NH₃-N, Organic-N และ TKN ในถังหมักก๊าซ ที่ HRT ของถังหมักก๊าซต่าง ๆ กัน



รูปที่ 5.35 เปรอ์เซ็นต์องค์ประกอบของก๊าซชนิดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในถังหมักก๊าซ ที่ HRT ต่าง ๆ ของถังหมักก๊าซ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-7AG (ค่าเปอร์เซ็นต์ที่แสดงต่างจากค่าจริงในรูปที่ 5.38 เล็กน้อย เนื่องจากการปรับแก้ของพื้นที่กราฟวงกลม)

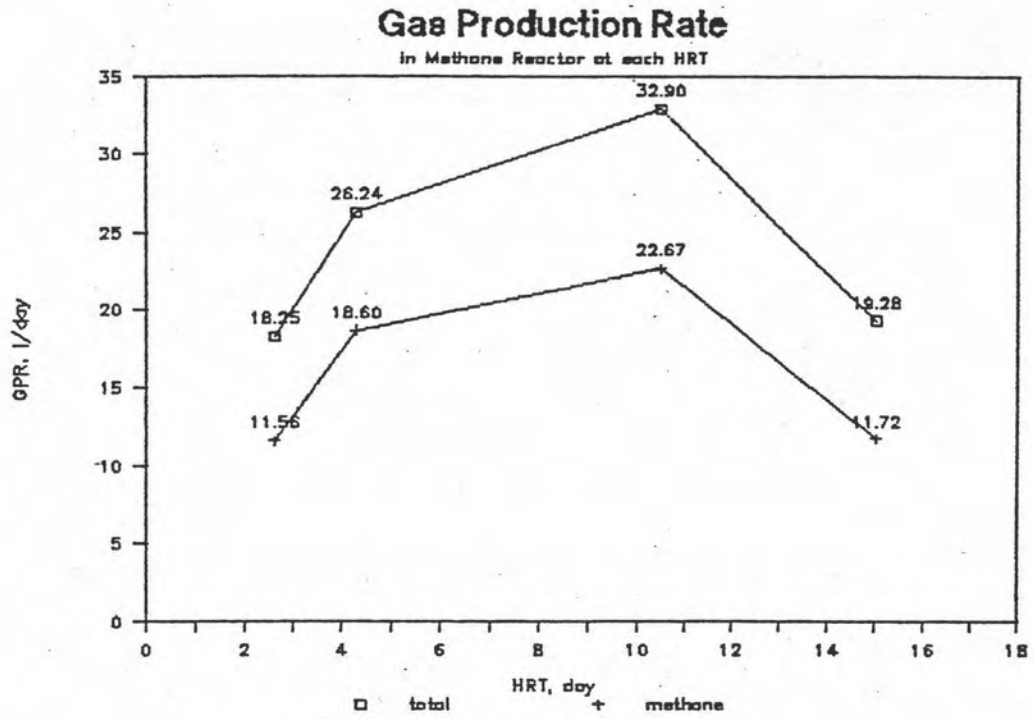


รูปที่ 5.36 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของก๊าซชนิดต่าง ๆ ที่พบในถังหมักก๊าซ ที่ HRT ต่าง ๆ ของถังหมักก๊าซ

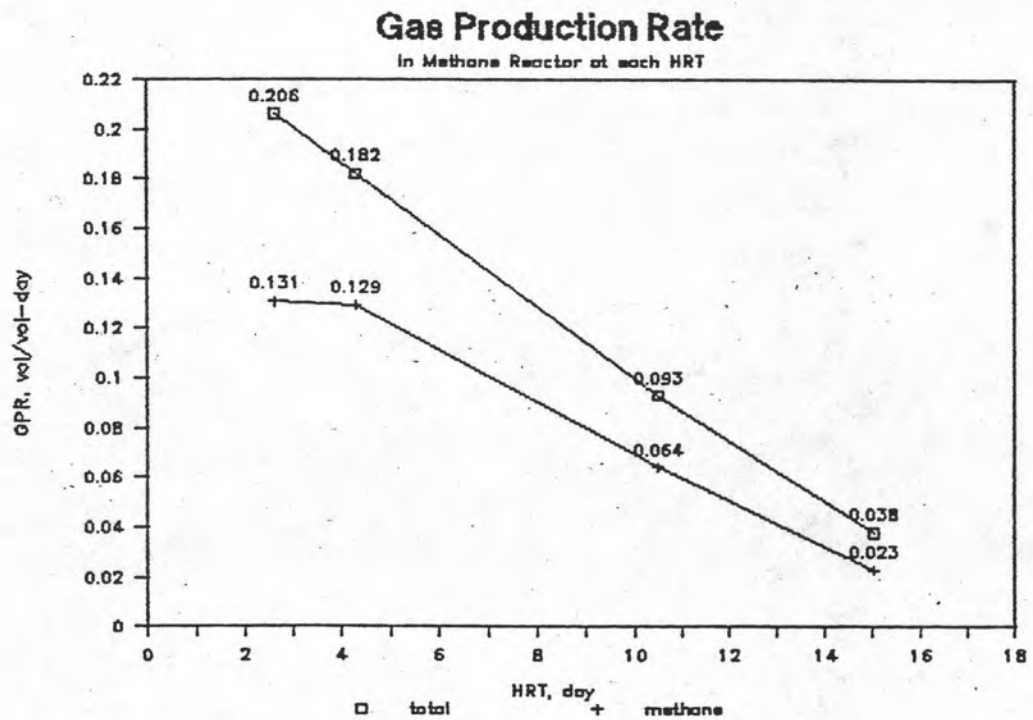
หนึ่ง จากนั้นจะกลับลดลง เมื่อ HRT นานขึ้นและอัตราการผลิตก๊าซ/ปริมาตรของถังหมัก มีค่าลดลงอย่างค่อนข้างสม่ำเสมอ

รูปที่ 5.39 แสดงอัตราการผลิตก๊าซมีเทน ในหน่วยของ ลิตรของมีเทน/กรัมชีโอติที่ถูกใช้ไปในถังหมักก๊าซ โดยคำนวณจากชีโอติที่มาจากถังตกตะกอน พบว่าถ้าคำนวณในรูปของชีโอติทั้งหมด ที่ HRT เท่ากับ 4.28 วัน จะมีค่าสูงถึง 0.721 ลิตรมีเทน/กรัมชีโอติที่ถูกใช้ไป สาเหตุเพราะที่จุดนี้ ค่าชีโอติทั้งหมดถูกใช้ไปน้อย เนื่องจากมีตะกอนเซลล์เกิดขึ้นมาก (รูปที่ 5.33) ทำให้ดูเหมือนว่ามีประสิทธิภาพสูง เมื่อเทียบกับปริมาณก๊าซที่เกิด/กรัมชีโอติที่ถูกใช้ไป ดังนั้นการคำนวณจากค่าชีโอติทั้งหมดในกรณีนี้ จึงไม่สามารถเป็นตัวแทนประสิทธิภาพที่แท้จริงได้ ค่าที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ คือคำนวณจากชีโอติละลาย โดยพบว่ามีค่าสูงสุดมากกว่า 0.600 ลิตรมีเทน/กรัมชีโอติที่ถูกใช้ไป ที่ HRT ประมาณ 6-10 วัน และพบว่ามีความสัมพันธ์กับ อัตราการผลิตมีเทน/วัน ในรูปที่ 5.37

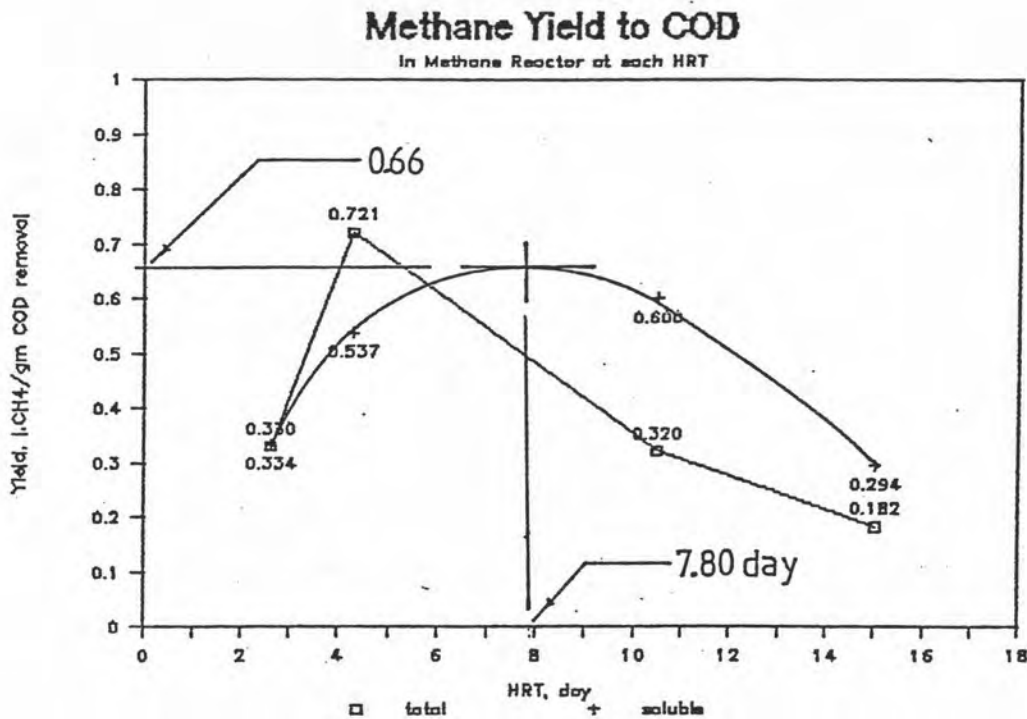
ค่าที่มากกว่า 0.600 ลิตรมีเทน/กรัมชีโอติที่ถูกใช้ไป พบว่าสูงกว่าที่ McCarty



รูปที่ 5.37 อัตราการผลิตก๊าซต่อวันที่ HRT ต่าง ๆ ของถังหมักก๊าซ



รูปที่ 5.38 อัตราส่วนการผลิตก๊าซ ต่อปริมาตรของถังหมักก๊าซ ที่ HRT ต่าง ๆ

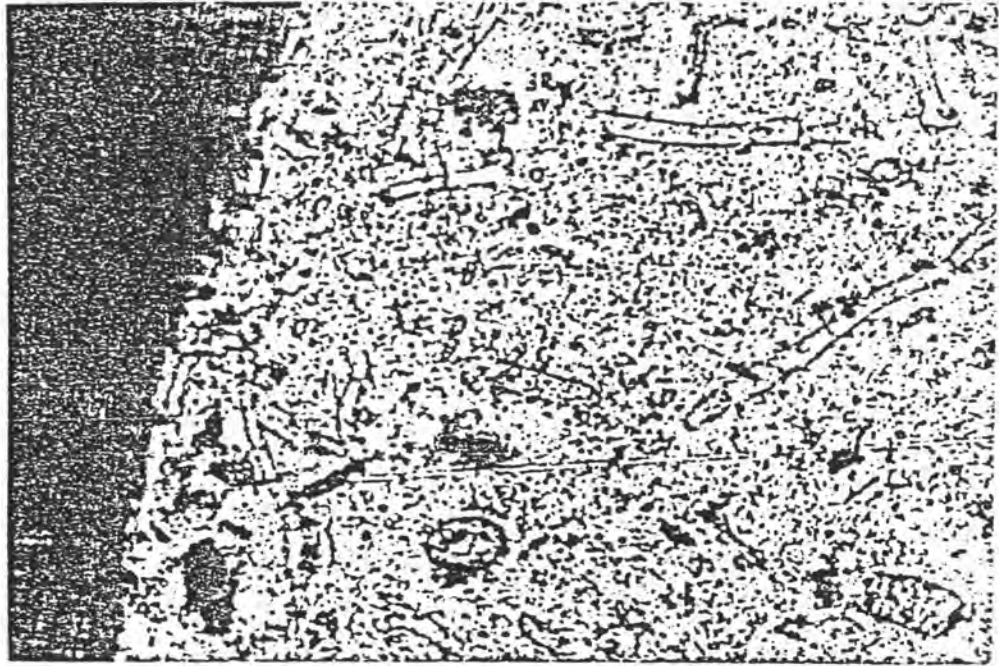


รูปที่ 5.39 อัตราการผลิตก๊าซมีเทน ต่อกรัม COD ที่ใช้ไปในถังหมักก๊าซ ที่ HRT ต่าง ๆ

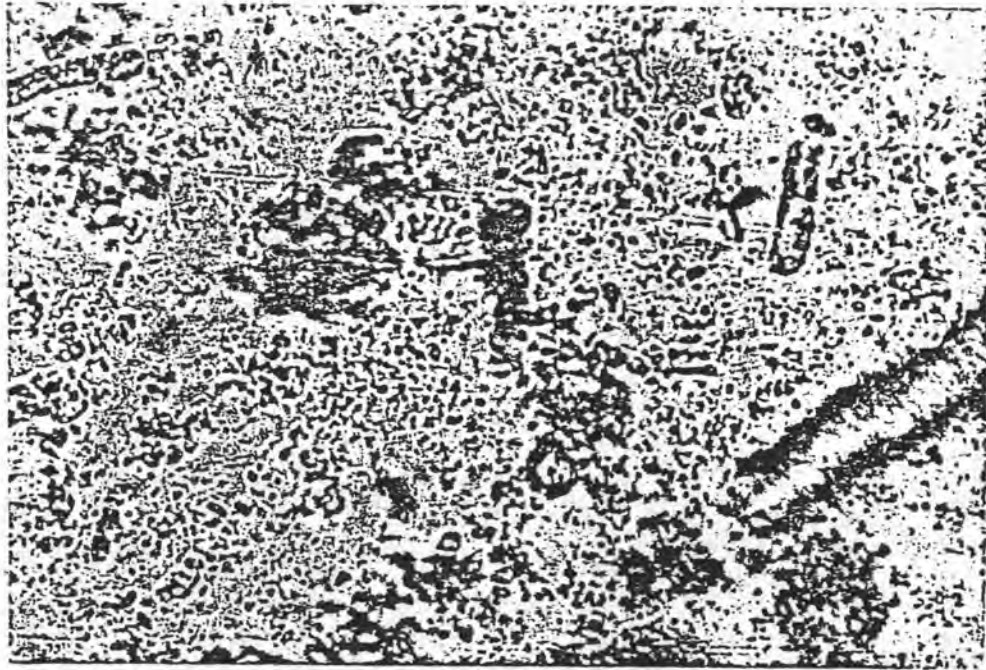
(1964) ทดลองไว้คือ 0.531 ลิตรมีเทน/กรัมซีโอดีที่ถูกใช้ไป แสดงว่าระบบสองขั้นตอนมีประสิทธิภาพสูงกว่าการหมักแบบธรรมดา และสำหรับที่ HRT เท่ากับ 2.61 และ 15.03 วัน มีค่าของอัตราการผลิตต่ำ เนื่องจากการล้างออกเมื่อ HRT ต่ำ และสารอาหารเข้าสู่ถังหมักน้อยเมื่อ HRT สูง

5.5 ตะกอนและแบคทีเรียที่พบในถังหมัก

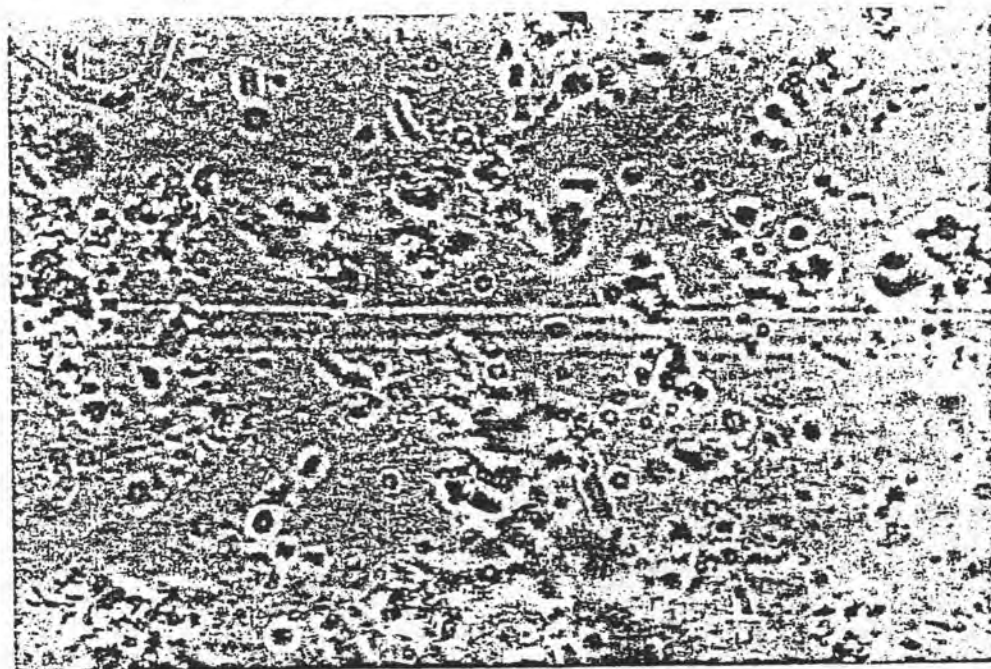
ลักษณะของตะกอนที่พบในถังหมักกรด มีส่วนที่ยังไม่ถูกย่อยสลายอยู่ เป็นจำนวนมาก ส่วนในถังหมักก๊าซ พบตะกอนที่ถูกย่อยสลายแล้ว เกาะกันเป็นกลุ่ม และมีส่วนที่ยังไม่ถูกย่อยสลายอยู่เล็กน้อย สำหรับแบคทีเรียที่พบในถังหมักกรดส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นเส้นเกลียว (spirochete) แต่ในถังหมักก๊าซ แบคทีเรียที่พบ ส่วนใหญ่มีลักษณะกลม (coccus) ลักษณะทั้งหมดแสดงในรูปที่ 5.40 ถึงรูปที่ 5.45



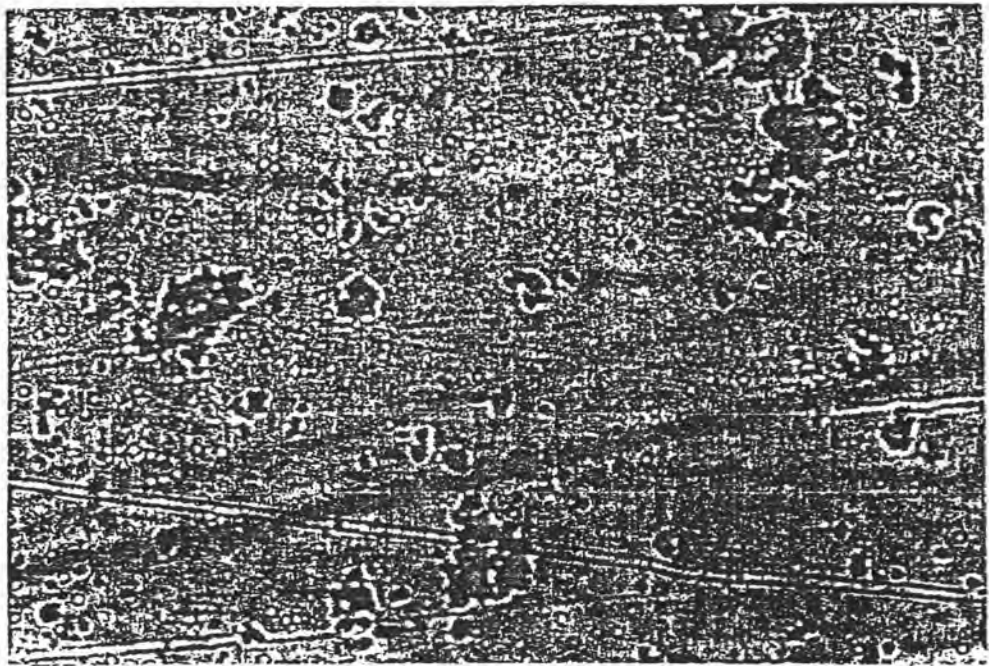
รูปที่ 5.40 ตะกอนที่พบในถังหมักกรด กำลังขยาย 100 เท่า



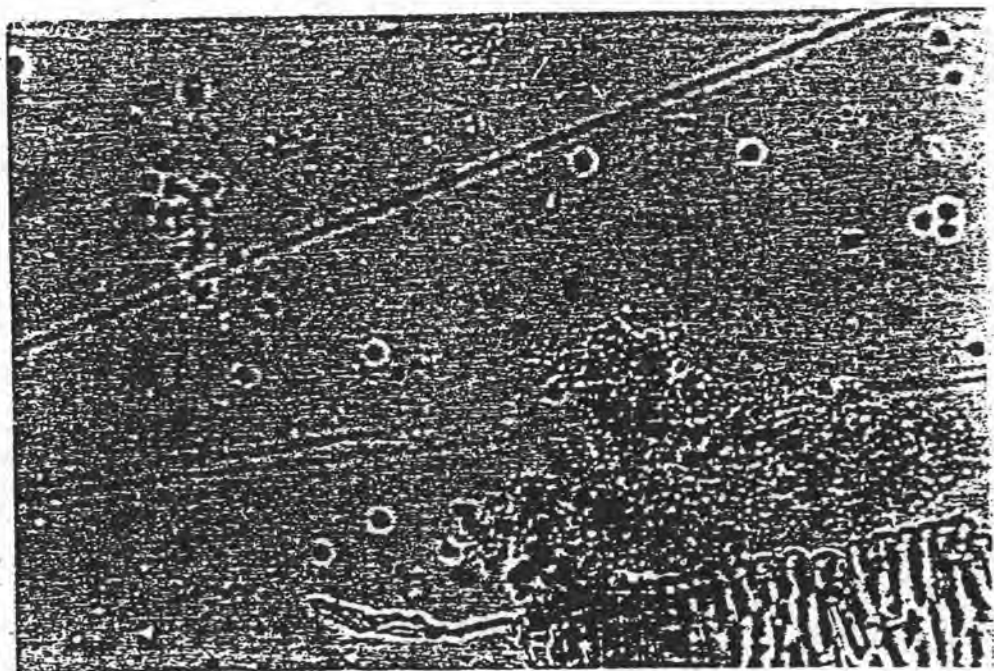
รูปที่ 5.41 ตะกอนและเศษท่อนำอาหารของพืชที่พบในถังหมักกรด กำลังขยาย 400 เท่า



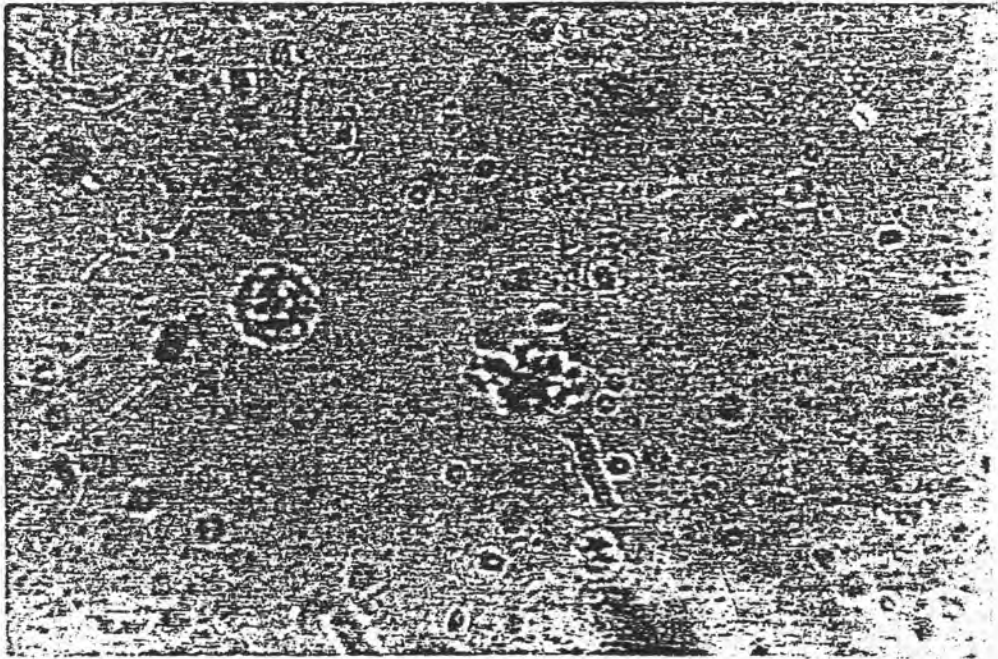
รูปที่ 5.42 แบททีเรียที่พบในถึงหมักกรด กำลังขยาย 1,000 เท่า



รูปที่ 5.43 ตะกอนที่พบในถังหมักก๊าซ กำลังขยาย 100 เท่า



รูปที่ 5.44 ตะกอนและเศษท่ออาหารของพืชที่พบในถังหมักก๊าซ กำลังขยาย 400 เท่า



รูปที่ 5.45 แบคทีเรียที่พบในถังหมักก๊าซ กำลังขยาย 1,000 เท่า

5.6 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผล

ตารางที่ 5.6 เป็นการสรุปผลการวิจัยทั้งหมด ในแต่ละถังที่ HRT ต่าง ๆ และสรุปรวมของระบบ จากผลที่ได้นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ต่าง ๆ ได้คือ

รูปที่ 5.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง HRT กับประสิทธิภาพในการกำจัด COD และ VS ของระบบ พบว่าพฤติกรรมของการกำจัด COD และ VS มีลักษณะเดียวกันคือ เปอร์เซ็นต์การกำจัดจะสูงขึ้นเมื่อ HRT นานขึ้น ยกเว้นที่ HRT เท่ากับ 5.17 วัน มีค่าลดลง เนื่องจากจุดนี้เกิดตะกอนเซลในถังหมักก๊าซมากขึ้น สาเหตุที่การกำจัด COD และ VS มีลักษณะเดียวกันเพราะค่าทั้งสองเป็นค่าของสารอินทรีย์อย่างเดียวกัน ที่วัดในรูปต่างกัน

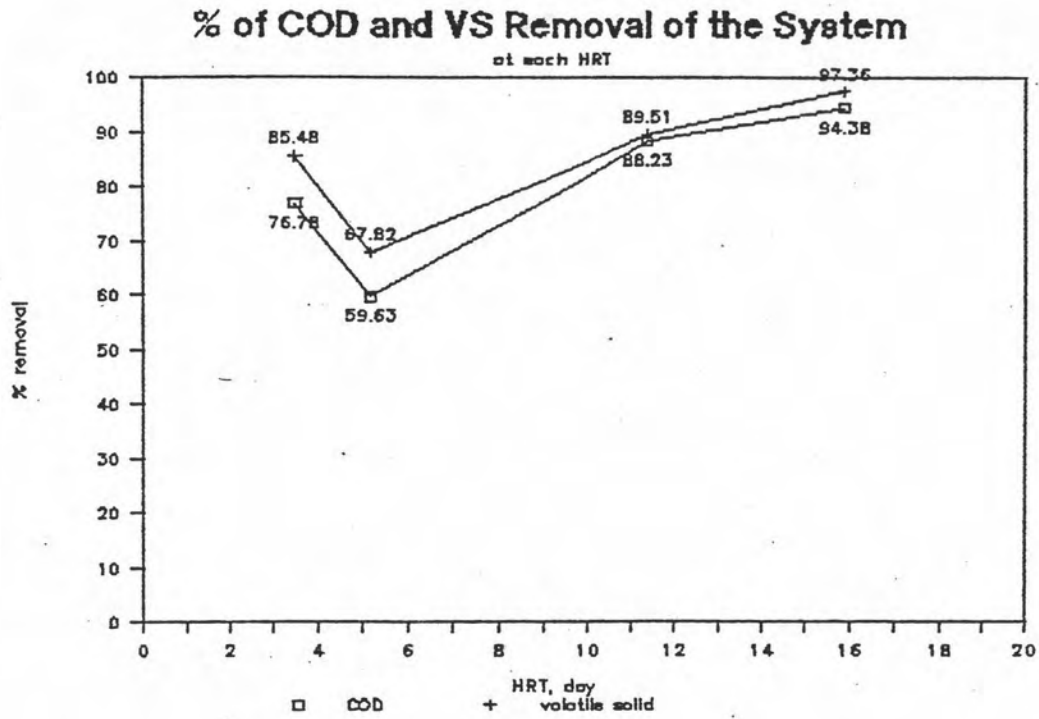
รูปที่ 5.47 แสดงค่าของเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนรวมของระบบ พบว่ามีลักษณะเป็นเส้นโค้ง มีค่าสูงสุด (optimum) ประมาณ 68.00 % ที่ HRT เท่ากับ 7.0 วัน และเปอร์เซ็นต์ของมีเทนจะต่ำเมื่อ HRT น้อย เพราะเกิดการล้างออกของมวลเซล และเมื่อ HRT นานมากเกินไป เปอร์เซ็นต์มีเทนที่ได้ ก็ต่ำเช่นกัน เพราะอัตราการบ้อนสารอาหารจะน้อย และการที่จุลชีพอยู่ในระบบนาน ทำให้ต้องใช้พลังงานในการดำรงชีวิต ดังนั้นสารอินทรีย์ส่วนใหญ่ที่ถูกย่อยสลาย จะถูกนำไปใช้เป็นพลังงาน ซึ่งก็ทำให้การสร้างเซลใหม่มีน้อย (Young & McCarty, 1969)

เมื่อนำค่าของ อัตราการผลิตก๊าซมีเทน/กรัมของแข็งระเหยที่ใส่เข้าไป และส่วนกลับของ HRT มาเขียนกราฟจะได้รูปที่ 5.48 มีลักษณะเป็นเส้นโค้งมีจุดยอดที่ 0.300 ที่ค่า $1/HRT = 0.118$ หรือเท่ากับ 8.47 วัน ซึ่งต่างจากผลการวิจัยของ คักดีชัย (2527) ที่ได้ความสัมพันธ์ของกราฟเป็นเส้นตรง มีจุดตัดที่ 0.63 และเมื่อนำไปหาค่า HRT ก็ได้เท่ากับ 7.01 วัน ตามรูปที่ 5.49 และ 5.50 ความแตกต่างของงานวิจัยทั้งสอง แสดงให้เห็นว่าระบบการหมักแบบไร้อากาศแบบธรรมดา สามารถนำมาเขียนสมการและหาความสัมพันธ์ ในเชิงเส้นได้ แต่การหมักแบบสองขั้นตอนความสัมพันธ์ที่ได้ ไม่เป็นเส้นตรง สาเหตุมาจากการย่อยสลายในถังหมักก๊าซ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่เกิดการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ขึ้นสุดท้ายของระบบ มีลักษณะไม่เป็นเส้นตรง

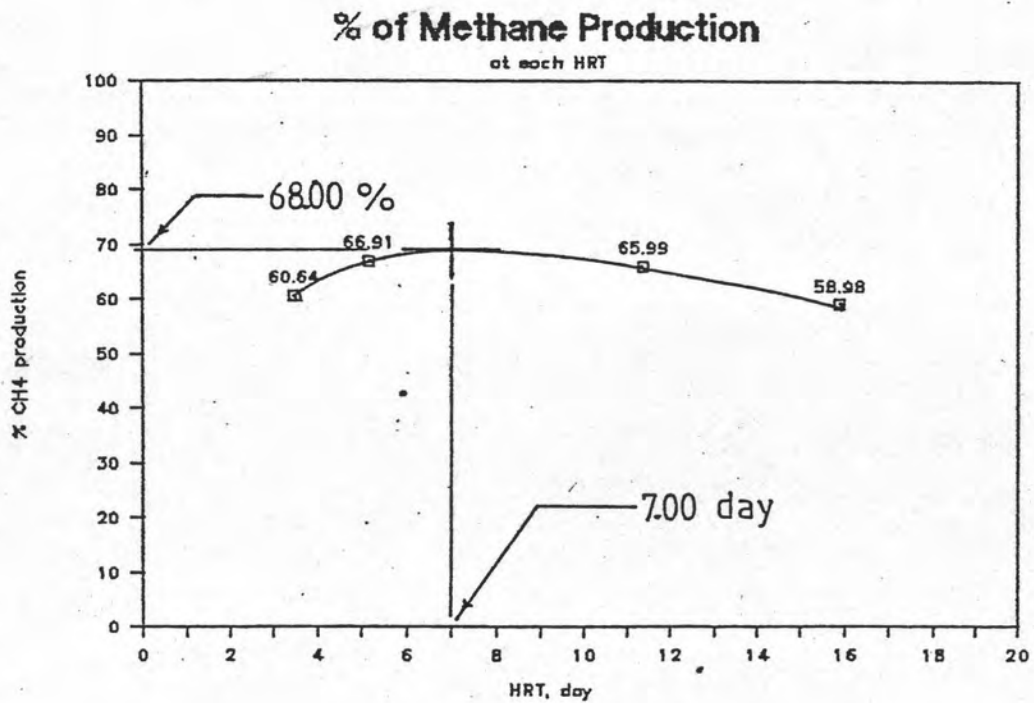
คำอธิบายถึงเหตุผลว่าทำไม ผลที่ได้จากการวิจัยนี้จึงไม่เป็นในทางเชิงเส้น แบบการหมักแบบธรรมดา คือ ในการหมักแบบธรรมดาแบบที่เรียกที่ผลิตกรด และสร้างมีเทนอยู่ร่วมกัน แบบ

ตารางที่ 5.6 สรุปผลการทดลองและการวิเคราะห์ของระบบ

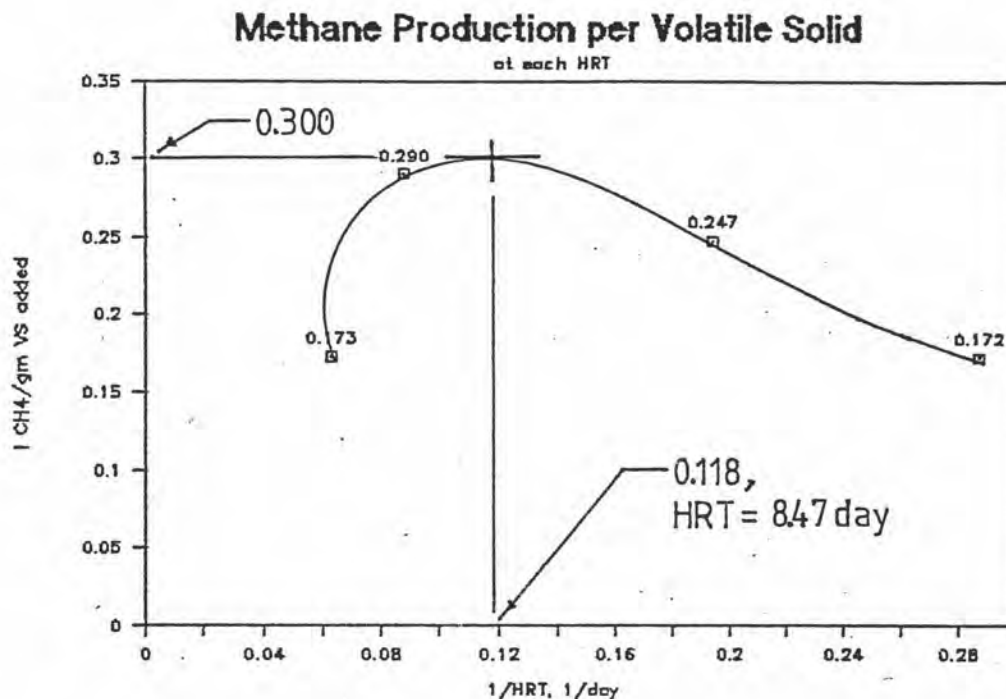
| Parameters | Experiment # 1 | | | Experiment # 2 | | | SYSTEM | | | |
|-----------------------------------|----------------|---------|---------|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | ACID | METHANE | METHANE | ACID | METHANE | METHANE | | | | |
| HRT, day | 0.89 | 4.28 | 10.50 | 0.88 | 2.61 | 15.03 | 3.49 | 5.17 | 11.39 | 15.91 |
| 1/HRT, 1/day | 1.12 | 0.23 | 0.10 | 1.14 | 0.38 | 0.07 | 0.29 | 0.19 | 0.09 | 0.06 |
| feed TS concentration, mg/l | 3523.13 | - | - | 3523.13 | - | - | 3523.13 | 3523.13 | 3523.13 | 3523.13 |
| % removal of TS | | | | | | | 86.67 | 70.62 | 89.64 | 97.79 |
| feed VS concentration, mg/l | 2811.88 | - | - | 2811.88 | - | - | 2811.88 | 2811.88 | 2811.88 | 2811.88 |
| VS loading rate, kg VS/cu.m-day | 3.18 | - | - | 3.18 | - | - | 0.80 | 0.55 | 0.25 | 0.18 |
| % removal of VS | | | | | | | 85.48 | 67.82 | 89.51 | 97.36 |
| feed COD, mg/l | 4681.88 | 2655.25 | 2655.25 | 4908.38 | 2173.57 | 2173.57 | 4908.38 | 4681.88 | 4681.88 | 4908.38 |
| COD loading rate, kg COD/cu.m-day | 5.26 | 0.62 | 0.25 | 5.55 | 0.83 | 0.14 | 1.40 | 0.90 | 0.41 | 0.31 |
| % removal of COD | - | 28.82 | 79.23 | - | 47.56 | 87.30 | 76.78 | 59.63 | 88.23 | 94.38 |
| GPR, l/day | 8.73 | 26.24 | 32.90 | 8.73 | 18.25 | 19.28 | 26.98 | 34.97 | 41.63 | 28.01 |
| % CH ₄ | 55.00 | 70.89 | 68.91 | 55.00 | 63.33 | 60.77 | 60.64 | 66.91 | 65.99 | 58.98 |
| CH ₄ , l/day | 4.80 | 18.60 | 22.67 | 4.80 | 11.56 | 11.72 | 16.36 | 23.40 | 27.47 | 16.52 |
| GPR, vol/vol-day | 0.291 | 0.182 | 0.093 | 0.291 | 0.206 | 0.038 | 0.228 | 0.201 | 0.108 | 0.052 |
| CH ₄ PR, vol/vol-day | 0.160 | 0.129 | 0.064 | 0.160 | 0.130 | 0.023 | 0.138 | 0.134 | 0.071 | 0.031 |
| l CH ₄ /gm VS added | 0.051 | - | - | 0.050 | - | - | 0.172 | 0.247 | 0.290 | 0.173 |
| l CH ₄ /gm COD added | 0.030 | 0.208 | 0.253 | 0.029 | 0.157 | 0.159 | 0.098 | 0.148 | 0.174 | 0.099 |



รูปที่ 5.46 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัด COD และ VS ของระบบที่ HRT ต่าง ๆ



รูปที่ 5.47 เปอร์เซนต์การผลิตก๊าซมีเทนรวมของระบบที่ HRT ต่าง ๆ

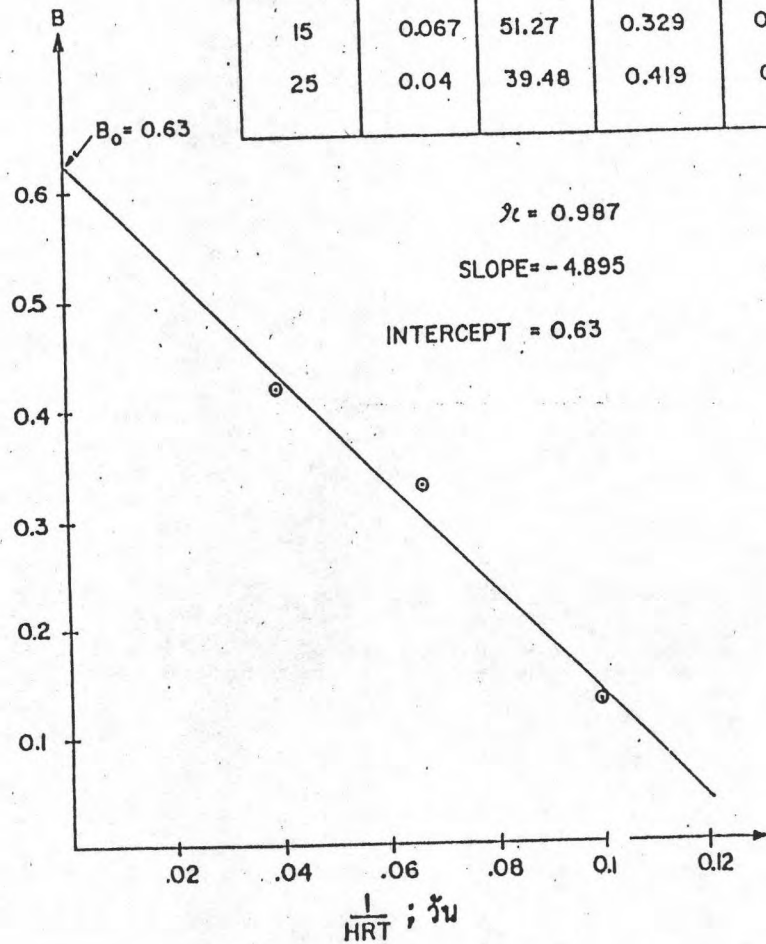


รูปที่ 5.48 ความสัมพันธ์ระหว่าง ลิตรมีเทนต่อกรัมของแข็งระเหยที่ใส่เข้าไป กับ $1/\text{HRT}$

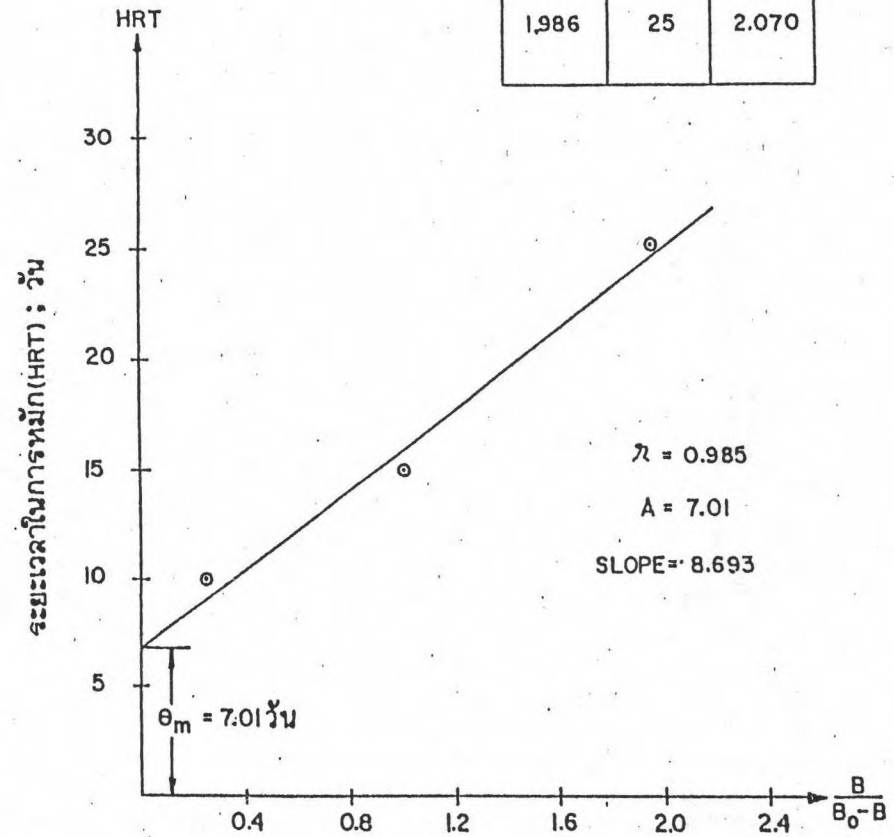
พึ่งพาอาศัยกัน (symbiosis) เมื่อมีสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมทำให้ระบบทำงานได้ เมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น การย่อยสลายของ VS ก็จะมีมากขึ้น ทำให้มีการผลิตมีเทนมากขึ้นสัมพันธ์กัน จึงทำให้ค่าของ ลิตรมีเทน/กรัมของแข็งระเหยที่ใส่เข้าไป เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ แต่สำหรับการย่อยสลายแบบสองขั้นตอน ในถังหมักกรดถูกจัดให้มีสภาพการย่อยสลาย VS ที่จะเกิดกรดสูงสุด (optimum) ให้คงที่ และเป็นสารอาหารที่จะถูกบ้อนเข้าถังหมักก๊าซ ซึ่งปรับค่าระยะเวลาการหมักได้ เมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น ก็จะทำให้อัตราการบ้อนสารอาหารลดลง ซึ่งก็ทำให้ปริมาณแก๊สมีเทนลดลงด้วย เพราะไม่มีความต่อเนื่องของการย่อยสลาย VS ในถังหมักก๊าซที่จะทำให้เป็นสารอาหารอย่างต่อเนื่องสำหรับพวกผลิตมีเทน ดังนั้นผลการทดลองจึงไม่เป็นเส้นตรงอย่างการหมักแบบธรรมดา ซึ่งแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มอยู่ร่วมกันแบบพึ่งพาอาศัยกันดังกล่าวแล้ว และสอดคล้องกับที่ Zeikus (1979) กล่าวไว้ว่า การแยกจุลชีพทั้งสองกลุ่มออกจากกันอย่างเด็ดขาด อาจจะเป็นสิ่งไม่เหมาะสม (บทที่ 3 ทฤษฎี)

รูปที่ 5.51 แสดงอัตราการผลิตแก๊สมีเทนในหน่วยของ ปริมาตร/ปริมาตร-วัน ของ

| HRT | 1/HRT | LCH ₄ /D | LCH ₄ /GV(S(B)) | (θ) |
|-----|-------|---------------------|----------------------------|-------|
| 10 | 0.10 | 30.20 | 0.129 | 0.140 |
| 15 | 0.067 | 51.27 | 0.329 | 0.302 |
| 25 | 0.04 | 39.48 | 0.419 | 0.434 |



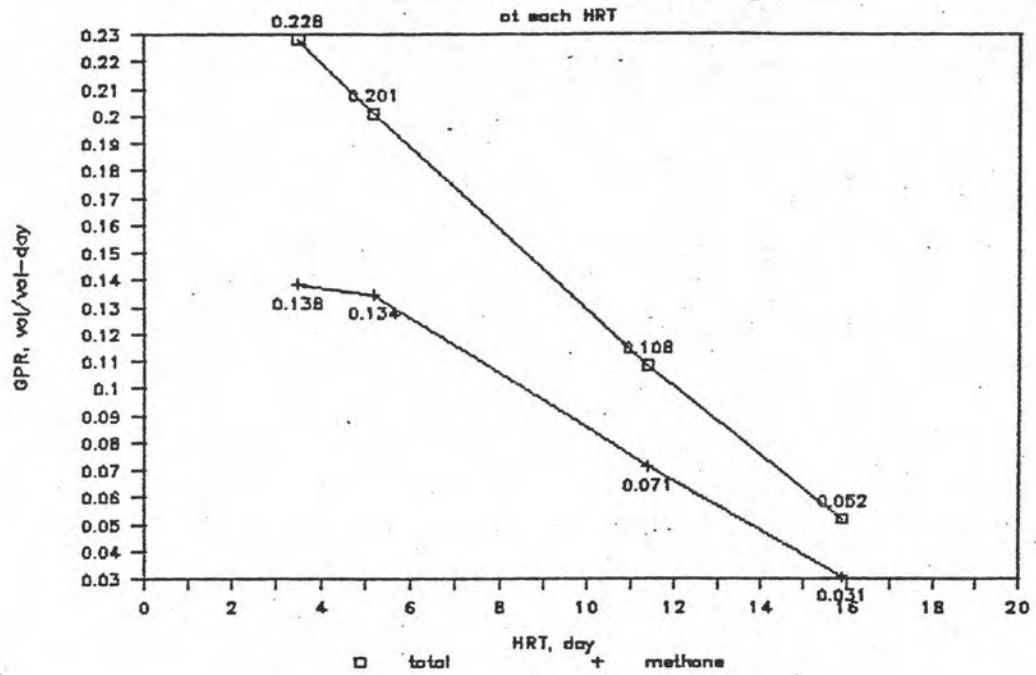
| $(\frac{B}{B_0-B})$ | q | $(\frac{B}{B_0-B})'$ |
|---------------------|----|----------------------|
| 0.255 | 10 | 0.344 |
| 1.093 | 15 | 0.920 |
| 1.986 | 25 | 2.070 |



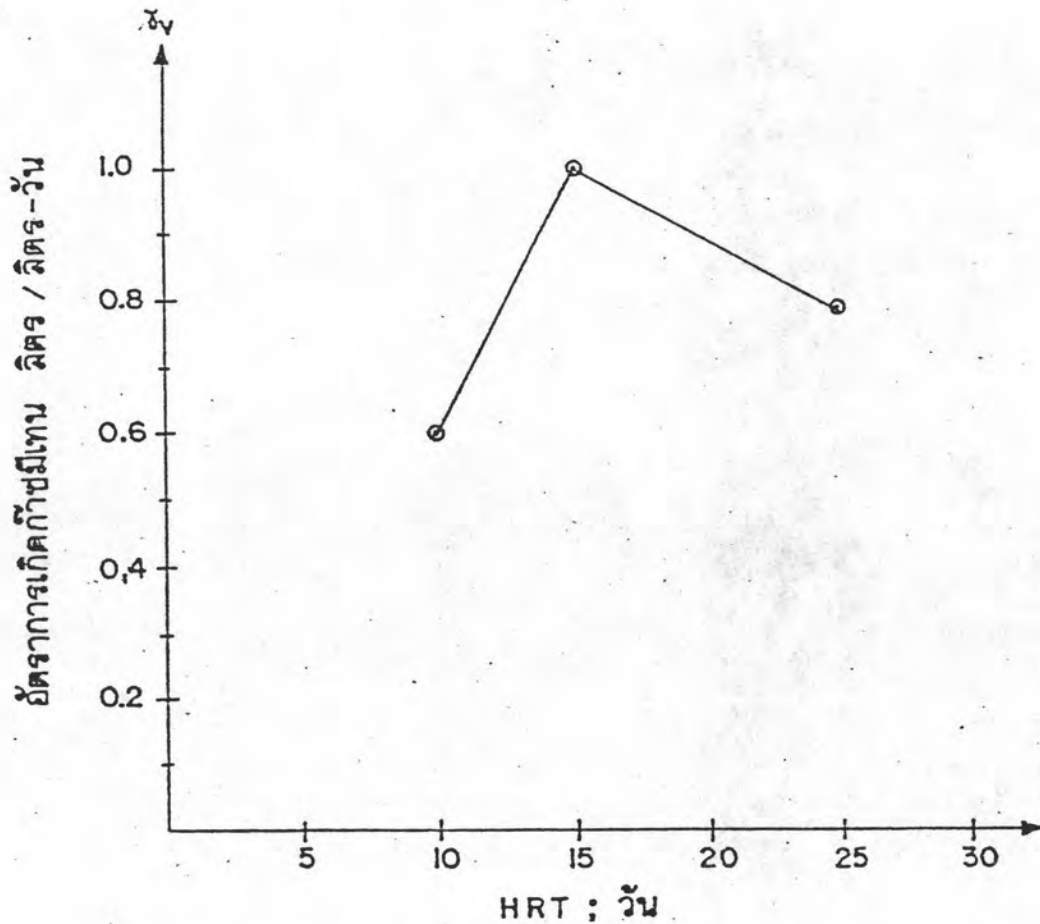
รูปที่ 5.49 ความสัมพันธ์ระหว่าง ลิตรมิเทนต่อกรัมของแข็งระเหยที่ใส่เข้าไป กับ 1/HRT จากงานวิจัยของ คักดีชัย โอภาสวัตชัย (2527)

รูปที่ 5.50 ความสัมพันธ์ระหว่าง HRT กับการเกิดก๊าซ จากงานวิจัยของ คักดีชัย โอภาสวัตชัย (2527)

Gas Production Rate of the System



รูปที่ 5.51 อัตราการเกิดก๊าซต่อปริมาตรของถังหมัก ของระบบที่ HRT ต่าง ๆ



รูปที่ 5.52 อัตราการเกิดก๊าซมีเทนที่ระยะเวลาในการหมัก 10, 15 และ 25 วัน
(การทดลองของ คักดีชัย โภทาสวัสดิ์ชัย, 2527)

ระบบ ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับรูปที่ 5.38 ที่เป็นของถังหมักก๊าซ และเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 5.52 จากงานวิจัยของ คักดีชัย (2527) ปรากฏว่ามีความแตกต่างกันของเส้นกราฟ โดยผลการวิจัยนี้มีลักษณะเป็นเส้นตรง แต่ถ้า HRT ของถังหมักก๊าซลดลงเรื่อย ๆ โดยที่ HRT ของถังหมักกรดคงที่แล้ว ก็จะทำให้อัตราการผลิตก๊าซลดลงเหมือนงานวิจัยของ คักดีชัย

ตารางที่ 5.7 จากผลการวิจัยของ คักดีชัย (2527) แสดงปริมาณของแข็งทั้งหมด และของแข็งระเหยที่ถูกลำลายไป และตารางที่ 5.8 แสดงผลในลักษณะเดียวกัน แต่เป็นของผลการวิจัยการครั้งนี้ จากการเปรียบเทียบตารางทั้งสอง พบว่าการย่อยสลายแบบไร้อากาศสองขั้นตอน โดยภาพรวมมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบธรรมดา แต่การทดลองของ คักดีชัย ใช้ความเข้มข้นของอัตราการบ้อนสารอาหารที่สูงกว่า ค่าซีโอดีที่ใช้บ้อนก็มีถึง 62,524 มก/ล ในขณะที่การวิจัยนี้ ค่าซีโอดีที่บ้อนอยู่ในช่วงประมาณ 5,๒๒๒ มก/ล เนื่องจากข้อจำกัดของระบบบ้อนสารอาหารแบบต่อเนื่องที่ใช้บ่มพ์สายรัด

ตารางที่ 5.9 แสดงค่าตัวเลขของการทดลองของทั้งสองระบบ แต่ไม่สามารถที่จะนำมาเพื่อการเปรียบเทียบกันได้ เนื่องจากความเข้มข้นของอัตราการบ้อนสารอาหารต่างกันอย่างมาก จึงทำให้การทดลองของ คักดีชัย ให้จำนวน ลิตรมีเทน/กรัมของแข็งระเหยที่ใส่เข้าไปและต่อกรัมซีโอดีที่ใส่เข้าไป

สรุปได้ว่า การหมักแบบไร้อากาศสองขั้นตอน น่าจะให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่าการหมักแบบไร้อากาศอย่างธรรมดา เพราะให้ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดค่าต่าง ๆ สูงกว่าด้วยระยะเวลาการหมักที่สั้นกว่า แต่จุดที่จะต้องแก้ปัญหา คือ จะต้องหาทางที่จะเพิ่มอัตราการบ้อนสารอาหาร ให้มีความเข้มข้นมากขึ้น เพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุดในการทำงาน

ตารางที่ 5.7 แสดงปริมาณของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยที่ถูกทำลายไป
(ผลการทดลองของ ศักดิ์ชัย โอภาสวัชชัย, 2527)

| พารามิเตอร์ | Feed TS = 5 % , TVS = 94 % | | |
|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------|-------|
| | 10 | 15 | 25 |
| ระยะเวลาที่ของเหลวอยู่ในระบบ: วัน (Hydraulic Detention Time) | 10 | 15 | 25 |
| อัตราการจ่ายสารอินทรีย์: กก TVS/ม ³ -วัน (Organic Loading Rate) | 4.703 | 3.102 | 1.880 |
| ความเข้มข้นของแข็งทั้งหมดที่ออกจากระบบ: % (Effluent Solid Concentration), | 3.885 | 1.980 | 1.722 |
| ความเข้มข้นของแข็งระเหยที่ออกจากระบบ: % (Volatility of Effluent Solid) | 75.38 | 64.07 | 57.78 |
| ปริมาณของแข็งระเหยที่ถูกทำลายไป: % (Apparent Volatile Solid Reduction) | 37.80 | 73.01 | 78.83 |
| ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ถูกทำลายไป: % (Apparent Total Solid Reduction) | 22.40 | 60.40 | 65.56 |
| ซีโอดีที่ถูกทำลายไป: % (COD Reduction) | 21.16 | 50.28 | 68.67 |

ตารางที่ 5.8 แสดงปริมาณของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยที่ถูกทำลายไป ของการทดลองการหมักแบบไร้อากาศสองขั้นตอน

| พารามิเตอร์ | Feed TS = 3,523.13 mg/l TVS = 2,811.88 mg/l | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|
| | ระยะเวลาที่ของเหลวอยู่ในระบบ: วัน (Hydraulic Detention Time) | 3.49 | 5.17 | 11.39 |
| อัตราการจ่ายสารอินทรีย์: กก TVS/ม ³ -วัน (Organic Loading Rate) | 0.80 | 0.55 | 0.25 | 0.18 |
| ความเข้มข้นของแข็งทั้งหมดที่ออกจากระบบ: % (Effluent Solid Concentration), | 0.05 | 0.10 | 0.04 | 0.01 |
| ความเข้มข้นของแข็งระเหยที่ออกจากระบบ: % (Volatility of Effluent Solid) | 86.95 | 87.44 | 80.82 | 95.29 |
| ปริมาณของแข็งระเหยที่ถูกทำลายไป: % (Apparent Volatile Solid Reduction) | 85.48 | 67.82 | 89.51 | 97.36 |
| ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ถูกทำลายไป: % (Apparent Total Solid Reduction) | 86.67 | 70.62 | 89.64 | 97.79 |
| ซีโอดีที่ถูกทำลายไป: % (COD Reduction) | 76.78 | 59.63 | 88.23 | 94.38 |

ตารางที่ 5.9 การเปรียบเทียบค่าอัตราการเกิดก๊าซต่อของแข็งระเหย และซีโอดีที่ใส่เข้าไป
ของระบบการหมักแบบไร้อากาศขั้นตอนเดียว และสองขั้นตอน

| Parameter | Single-Stage Process | | | Two-Stage Process | | | |
|----------------------------------|----------------------|-------|-------|-------------------|-------|-------|-------|
| | 10 | 15 | 25 | 3.49 | 5.17 | 11.39 | 15.91 |
| Hydraulic Retention | 10 | 15 | 25 | 3.49 | 5.17 | 11.39 | 15.91 |
| % CH ₄ | 51.50 | 58.00 | 62.28 | 60.64 | 66.91 | 65.99 | 58.98 |
| l CH ₄ /gm VS added | 0.128 | 0.329 | 0.420 | 0.173 | 0.290 | 0.247 | 0.172 |
| l/ CH ₄ /gm COD added | 0.097 | 0.246 | 0.316 | 0.098 | 0.148 | 0.174 | 0.099 |