

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาถึงผลของเวลาเก็บกักที่มีต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากมันสำปะหลังโดยกระบวนการไร้ออกซิเจนที่มีการควบคุมแบบสองขั้นตอน ระบบดังปฏิกรณ์ที่ใช้ประกอบไปด้วยถังสร้างกรดที่สภาวะเทอร์โมฟิลิก ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนรูปของสารอินทรีย์แขวนลอยให้กลายเป็นสารละลายหรือกรดอินทรีย์โมเลกุลเล็กในปฏิกรณ์ไฮโดรไลซิส และเนื่องจากในกระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพของของเสียที่มีปริมาณของแข็งค่อนข้างสูง ปฏิกรณ์ไฮโดรไลซิสเป็นปฏิกรณ์หลักซึ่งควบคุมอัตราเร็วของการเกิดปฏิกรณ์อื่นๆ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ถังสร้างกรด เพื่อเพิ่มความสามารถในการเกิดปฏิกรณ์ไฮโดรไลซิสให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งถังสร้างกรดดังกล่าวจะทำงานคู่กับถังสร้างก๊าซมีเทนที่สภาวะเมโซฟิลิก (อุณหภูมิห้อง) โดยที่กรดอินทรีย์โมเลกุลเล็ก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดจากขั้นตอนการสร้างกรดจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยงานวิจัยนี้ควบคุมให้มีปริมาณของแข็งที่เข้าสู่ระบบเท่ากับ 4% ในทุกการทดลอง ซึ่งวิเคราะห์ในรูปแบบของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Solid : TS)

การทดลองทั้งหมดแบ่งออกเป็น 4 ส่วนตามวัตถุประสงค์ในการศึกษา ซึ่งประกอบด้วย

การทดลองที่ 1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเริ่มต้นระบบ เพื่อให้สามารถเดินระบบได้ที่เวลาเก็บกักรวมเท่ากับ 20 วัน โดยลดเวลาเก็บกักของถังสร้างก๊าซมีเทนลงเป็นขั้นๆ จาก 40 วัน จนได้เวลาเก็บกักที่ต้องการ (แต่ครั้งที่ทำการลดระยะเวลาเก็บกักจะต้องมีค่าความแตกต่างไม่เกิน 20% เพื่อป้องกันไม่ให้สารอินทรีย์ที่เข้าระบบมีปริมาณสูงเกินไปซึ่งอาจทำให้ระบบล้มเหลวได้) ทำการแปรค่าเวลาเก็บกักในถังสร้างกรดที่ 1 และ 3 วันและถังสร้างก๊าซมีเทนที่ 19 และ 17 วัน

การทดลองที่ 2 การศึกษาผลของเวลาเก็บกักต่อประสิทธิภาพของระบบ โดยใช้ระยะเวลาเก็บกักรวมของระบบเท่ากับ 20 วัน ทำการแปรค่าเวลาเก็บกักในถังสร้างกรดที่ 1, 2 และ 3 วันและถังสร้างก๊าซมีเทนที่ 19, 18 และ 17 วัน

การทดลองที่ 3 การศึกษาผลของเวลาเก็บกักในถังสร้างก๊าซมีเทนเมื่อใช้เวลาเก็บกักในถังสร้างกรด 1 วัน จากการศึกษาผลในการทดลองที่ 2 พบว่าชุดของถังปฏิกรณ์ที่เหมาะสม คือ ชุดที่มีระยะเวลาเก็บกักในถังสร้างกรด 1 วัน และถังสร้างก๊าซมีเทน 19 วัน จึงทำการศึกษาเพิ่มเติมโดยเพิ่มและลดเวลาเก็บกักในถังสร้างก๊าซมีเทนเป็น 25, 14.5 และ 12 วัน

และการทดลองที่ 4 การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบโดยใช้กระบวนการแบบ Single-stage ที่สภาวะ Thermophilic และ Mesophilic ที่เวลาเก็บกัก 20 และ 13 วัน

4.1 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเริ่มต้นระบบ

ในช่วงแรกของการเริ่มต้นระบบ พีเอชของถังสร้างกรดและถังสร้างก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 4.1-4.9 และ 6.6-6.9 โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับจุลชีพกลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 6.5- 7.8 (Speece, 1996) ซึ่งค่าพีเอชของถังสร้างก๊าซมีเทนที่ได้มีค่าค่อนข้างต่ำ เนื่องจากในช่วงแรกทำการเดินระบบโดยไม่มีการเติมด่างเพื่อประเมินศักยภาพในการสร้างก๊าซชีวภาพจากมันสำปะหลัง อย่างไรก็ตามเมื่อการทดลองผ่านไป 20 วัน สภาพด่างในถังสร้างก๊าซมีเทนลดลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงดังรูปที่ 4.1 (ช่วงที่ 1)

การที่ระบบมีค่าพีเอชลดลงเกิดขึ้นจากการที่ระบบได้รับสารอาหารเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาเก็บกักมีค่าลดลง ที่สภาวะดังกล่าวจุลชีพกลุ่มที่สร้างกรดมีอัตราการเจริญเติบโตสูงขึ้น ทำให้การสร้างกรดไขมันระเหยและผลผลิตต่าง ๆ เพิ่มขึ้น ส่งผลให้จุลชีพกลุ่มที่สร้างมีเทนไม่สามารถย่อยสลายกรดไขมันระเหยที่เพิ่มขึ้นได้ทัน ทำให้มีปริมาณกรดไขมันระเหยสะสมเพิ่มขึ้น ซึ่งถ้าระบบไม่มีกำลังบัฟเฟอร์เพียงพอ ค่าพีเอชของระบบที่ลดลงจะมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทน จนอาจทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลงหรือการทำงานของระบบล้มเหลวได้ในที่สุด (สิริรัตน์ และ ปราโมช, 2548) จากปัญหาดังกล่าว จึงแก้ไขโดยทำการศึกษารูปแบบของการเติมด่างเพื่อให้ระบบมีสภาพด่างอย่างเพียงพอและรักษาพีเอชให้มีค่าคงที่

4.1.1 รูปแบบการเติมด่าง

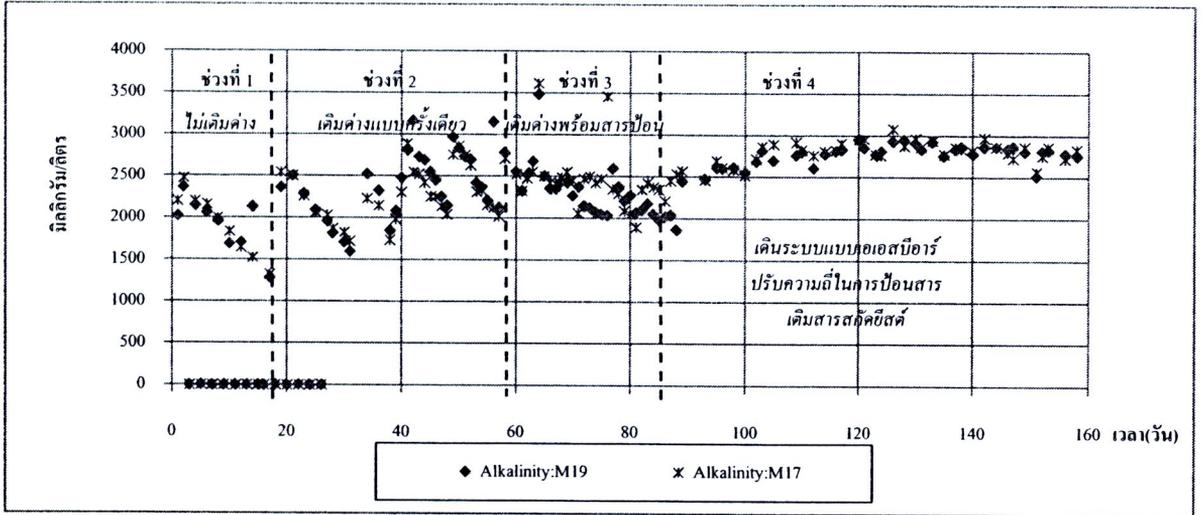
โดยทั่วไปการหมักร่วมเป็นการนำของเสียตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาหมักย่อยภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนซึ่งได้ผลผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ ซึ่งนอกจากจะเป็นการใช้ประโยชน์จากของเสียต่างๆ ได้อย่างคุ้มค่าแล้วยังเป็นการปรับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนให้เหมาะสมเพื่อเอื้อต่อการผลิตก๊าซชีวภาพอีกด้วย

มันสำปะหลังเป็นสารตั้งต้นที่ขาดสภาพด่างเนื่องจากเป็นสารจำพวกคาร์โบไฮเดรต เมื่อนำมาผลิตก๊าซชีวภาพโดยไม่มีการหมักร่วมซึ่งเป็นการนำเอาสารตั้งต้นเพียงชนิดเดียวมาหมักย่อยภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน พบว่ามีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพต่ำเนื่องจากมีสภาพด่างไม่เพียงพอ การนำน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านการบำบัดแล้วมาหมักร่วม ถึงแม้ว่าสามารถเพิ่มค่าสภาพด่างให้แก่ระบบได้แต่เนื่องจากน้ำเสียฟาร์มสุกรที่นำมาใช้เป็นน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วซึ่งมีสภาพด่างประมาณ 1,500 มก. CaCO₃/ล. ยังไม่เพียงพอต่อกระบวนการย่อยไร้อากาศ โดยในช่วงแรกของการทดลองยังไม่ทำการเติมด่างเนื่องจากคาดว่าปริมาณด่างที่ได้จากน้ำเสียฟาร์มสุกรที่ผ่านระบบบำบัด ประกอบ

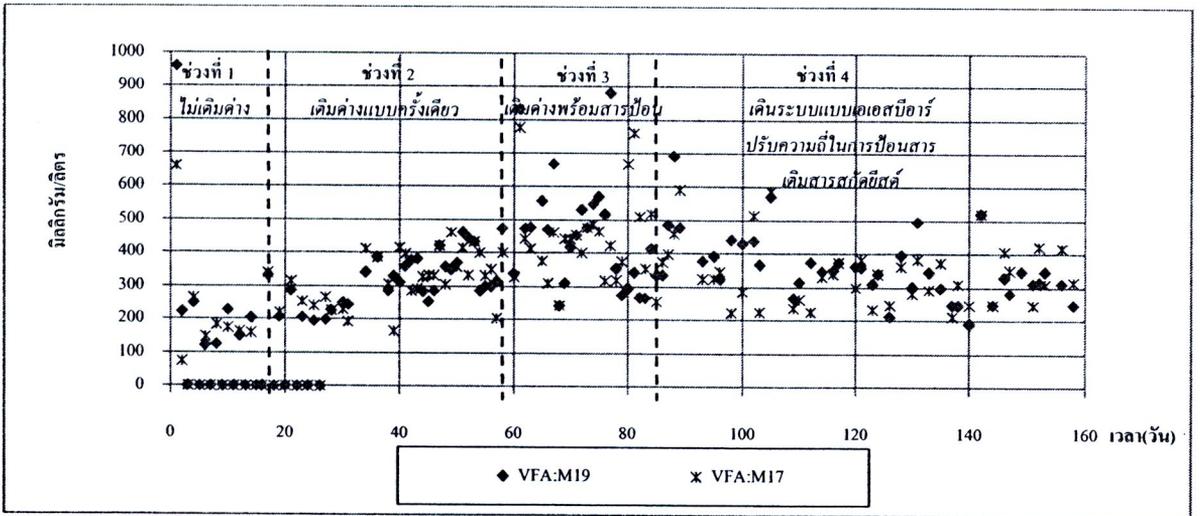
กับการเปลี่ยนรูปของกรดไขมันระเหยไปเป็นก๊าซชีวภาพในถังสร้างก๊าซมีเทนทำให้ได้สภาพสภาพต่างไปคาร์บอนเนตกลับคืนมาดังสมการที่ 4.1



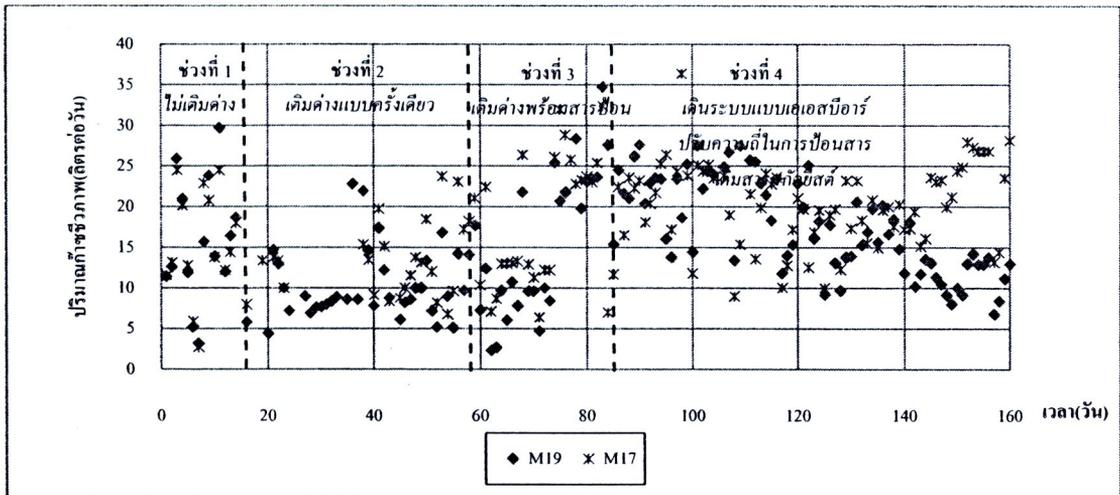
ซึ่งปริมาณต่างที่ได้น่าจะเพียงพอต่อกระบวนการย่อยไร้อากาศ แต่จากผลการทดลองในช่วงแรกที่มีการลดลงของพีเอชและปริมาณต่าง ซึ่งเห็นได้ชัดว่าปริมาณต่างในระบบไม่เพียงพอต่อกระบวนการย่อยไร้อากาศ จึงต้องทำการเติมต่างเพิ่มเพื่อให้ได้ค่าสภาพต่างในระบบตามต้องการ สมมติฐานดังกล่าวสนับสนุนโดย Zhang et al. (2010) ที่ทำการศึกษาผลของการเติมต่างเพื่อเพิ่มความสามารถในการบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกร โดยเปรียบเทียบชุดการทดลองที่เติมต่างและไม่เติมต่าง ซึ่งถึงแม้ว่าน้ำเสียฟาร์มสุกรจะมีสภาพต่างค่อนข้างเพียงพอจากปริมาณแอมโมเนียในโตรเจนที่ค่อนข้างสูง ผลการทดลองยังพบว่า ตัวอย่างที่เติมต่างให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงกว่าชุดการทดลองที่ไม่มีการเติมต่าง งานวิจัยนี้จึงเติมต่างในรูปโซเดียมไบคาร์บอเนตเพื่อให้ระบบมีค่าลัมบัฟเฟอร์ที่เพียงพอซึ่งเอื้อต่อการผลิตก๊าซชีวภาพของระบบ ในช่วงแรกทำการทดลองเติมต่างแบบครั้งคราว โดยควบคุมสภาพต่างในถังสร้างก๊าซมีเทนให้มีค่าเท่ากับ 2,500 มก./CaCO₃/ล. (Metcalf และ Eddy, 2004) แต่สภาพต่างของระบบยังคงมีค่าแปรปรวนค่อนข้างมาก (รูปที่ 4.1 (ช่วงที่ 2)) จึงปรับวิธีในการเติมต่างด้วยการเติมพร้อมสารป้อนเข้าสู่ระบบอย่างสม่ำเสมอในวันที่ 58 ของการทดลอง (แสดงวิธีการคำนวณปริมาณต่างที่ต้องเติมในภาคผนวก ก.) การปรับรูปแบบการเติมต่างทำให้ระบบมีค่าสภาพต่างค่อนข้างคงที่ ซึ่งทำให้ระบบมีสภาพต่างอย่างสม่ำเสมอ(รูปที่ 4.1 (ช่วงที่ 3)) ส่งผลให้ระบบมีเสถียรภาพมากกว่าในการเติมต่างรูปแบบแรกและมีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพที่เพิ่มสูงขึ้นด้วย(รูปที่ 4.3 (ช่วงที่ 3)) อย่างไรก็ตามถึงแม้การเติมต่างเข้าสู่ระบบอย่างสม่ำเสมอพร้อมสารป้อนจะสามารถรักษาค่าสภาพต่างและพีเอชในระบบไว้ได้ แต่ยังคงพบปัญหาของการสะสมตัวของกรดไขมันระเหยโดยสังเกตจากปริมาณกรดไขมันระเหยที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ช่วงที่ 3) โดยปัญหาดังกล่าวคาดว่าอาจเป็นผลมาจากความถี่ของการป้อนสารเข้าสู่ระบบ



รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงของสภาพค่างในระบบ



รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดไขมันระเหยในระบบ



รูปที่ 4.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวัน

4.1.2 ความถี่ในการเติมสารป้อน

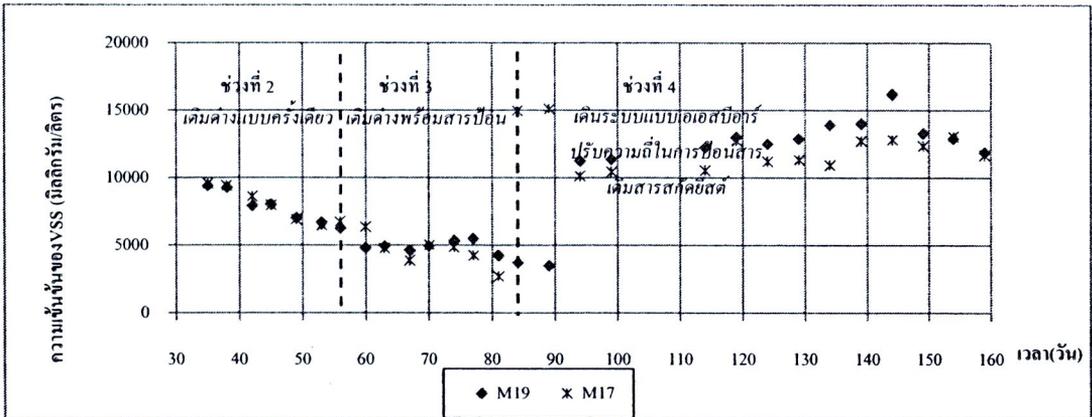
การเริ่มต้นเดินระบบด้วยการป้อนสารเข้าระบบวันละ 1 ครั้ง พบว่าปริมาณกรดไขมันระเหยในระบบเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง อาจเนื่องมาจากเกิดการสะสมตัวของกรดไขมันระเหยที่เกิดจากระบบบำบัดระบบรุกรานอินทรีย์ที่สูงในครั้งเดียว ซึ่งทำให้จุลชีพไม่สามารถนำสารอาหารไปใช้ได้ทันและเนื่องจากสารป้อนมีความเป็นกรดสูงจึงทำให้ระบบมีความเป็นกรดสูงประกอบกับสภาพค่างมีปริมาณลดลง ทำให้ค่าพีเอชของระบบต่ำลง โดยเฉพาะในช่วงแรกหลังจากการเติมสารอาหารเข้าสู่ระบบส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบได้ เนื่องจากพีเอชที่เหมาะสมในถังปฏิกรณ์ควรอยู่ในช่วง 6.5- 7.8 (Hulshoff et al.,1983) ดังนั้นจึงทำการปรับเปลี่ยนการเติมสารป้อนจากเดิมที่ป้อนสารเข้าวันละ 1 ครั้งเป็นป้อนวันละ 2 ครั้ง ผลการทดลองพบว่าระบบมีเสถียรภาพมากขึ้นเนื่องจากปริมาณสารอินทรีย์และกรดไขมันระเหยเข้าสู่ระบบในแต่ละครั้งมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ช่วงที่ 4) ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ *John et al.(2007)* ที่ทำการศึกษาผลของการป้อนสารเข้าสู่ระบบที่ความถี่ต่างๆคือการป้อนสารเข้าระบบวันละ 1, 2, 6 และ 12 ครั้ง พบว่าการป้อนสารเข้าระบบที่ความถี่สูงๆทำให้ระบบมีเสถียรภาพในการเกิดก๊าซชีวภาพมากกว่าการป้อนสารเข้าระบบที่ความถี่ต่ำๆ โดยความถี่ที่เหมาะสมที่สุดคือ การป้อนสารเข้าระบบ 6 ครั้งต่อวัน โดยอาจกล่าวได้ว่ายิ่งเพิ่มจำนวนครั้งในการเติมสารป้อนต่อวัน ระบบจะยังมีเสถียรภาพมากขึ้น อย่างไรก็ตามเนื่องจากการเติมสารป้อนในงานวิจัยนี้ ทำโดยการเติมด้วยมือซึ่งความถี่สูงสุดที่สามารถทำได้ในทางปฏิบัติ คือ 2 ครั้งต่อวัน ซึ่งจากการปรับความถี่ของการเติมสารป้อนจากวันละ 1 ครั้งเป็นวันละ 2 ครั้ง ยังสามารถทำให้ระบบทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพมากขึ้นได้

อย่างไรก็ตามการปรับความถี่ในการป้อนสารเข้าระบบ ยังพบปัญหาเกี่ยวกับปริมาณกรดไขมันที่ยังมีค่าแปรปรวน(รูปที่ 4.2 ช่วงต้นของช่วงที่ 4) ซึ่งอาจมาจากการทำงานที่ผิดปกติของจุลชีพกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน จึงทำการเติมธาตุอาหารรองในรูปของสารสกัดยีสต์เพื่อเพิ่มธาตุอาหารรองในระบบให้เพียงพอต่อความต้องการของจุลชีพกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนในอัตราส่วน 1,500 มิลลิกรัมต่อลิตรของสารป้อน(มันลิน,2538) โดยใช้สารสกัดจากยีสต์เนื่องจากสะดวกต่อการใช้งานและลดระยะเวลาที่ใช้ในการเตรียมสารต่างๆแต่ก็มีข้อจำกัดในเรื่องของปริมาณที่ต้องเติมเนื่องจากต้องใช้สารสกัดยีสต์ในปริมาณมาก ในแง่ของการใช้งานจริงจึงอาจใช้ธาตุอาหารรองในรูปของสารเคมีมากกว่า (Lei Zhang, et al.,2011) หลังจากการเติมสารสกัดยีสต์ดังกล่าว พบว่าปริมาณกรดไขมันระเหยในระบบมีค่าลดลงและเริ่มคงที่ในที่สุด โดยปริมาณของกรดไขมันระเหยที่พบหลังจากการเติมสารสกัดยีสต์มีปริมาณอยู่ในช่วง 300-400 มก. CH_3COOH /ล.

4.1.3 การปรับวิธีการเดินระบบจากระบบกวนสมบูรณ์เป็นระบบเอเอสบีอาร์

การปรับรูปแบบการเติมค่าและการเติมสารป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์สามารถแก้ปัญหาความแปรปรวนของปริมาณค่าและการเพิ่มขึ้นของปริมาณกรดไขมันระเหย อย่างไรก็ตามเมื่อเดินระบบแบบกวนสมบูรณ์ ที่มีการผสมอย่างทั่วถึงโดยทำเติมสารป้อนและระบายของเสียในถังปฏิกรณ์ในขณะที่มีการกวนผสมแล้วพบว่าจุลชีพบางส่วนในระบบหลุดออกไปกับน้ำออก ทำให้จุลชีพในระบบมีปริมาณลดลง (รูปที่ 4.4 (ช่วงที่ 1)) และอาจทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับจุลชีพกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน จึงปรับวิธีการเดินระบบของถังสร้างก๊าซมีเทนมาเป็นแบบเอเอสบีอาร์ในวันที่ 85 ของการทดลอง ซึ่งระบบเอเอสบีอาร์เป็นระบบที่มีความสามารถในการกักเชื้อจุลชีพไว้ในถังได้สูงมากเนื่องจากการทิ้งไว้ให้เกิดการตกตะกอนแล้วจึงทำการดึงเพียงน้ำส่วนใสออกเท่านั้น การสูญเสียจุลชีพออกจากระบบจึงเกิดขึ้นน้อยมาก ทำให้อายุตะกอนในระบบเพิ่มสูงขึ้น โดยปริมาณจุลชีพวิเคราะห์จากความเข้มข้นของVSSในถัง ซึ่งทำการเก็บตัวอย่างขณะที่ถังปฏิกรณ์ทำการกวนผสม

เมื่อเดินระบบแบบเอเอสบีอาร์แล้วพบว่าจุลชีพในถังมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด (รูปที่ 4.4 (ช่วงที่ 2)) โดยจากการคำนวณพบว่าอายุตะกอนเพิ่มจาก 43 ± 9 วันในช่วงเดินระบบกวนสมบูรณ์เป็น 402 ± 121 วันหลังจากปรับรูปแบบการเดินระบบเป็นเอเอสบีอาร์ อายุตะกอนของระบบหมักย่อยไร้อากาศที่ใช้กันทั่วไปมักอยู่ในช่วงไม่น้อยกว่า 40 - 60 วัน (Metcalf และ Eddy, 2004) ซึ่งอายุตะกอนที่ได้จากการเดินระบบแบบเอเอสบีอาร์มีค่าสูงกว่ามาก ทำให้ประสิทธิภาพต่างๆ รวมถึงเสถียรภาพของระบบสูงขึ้นตามไปด้วย

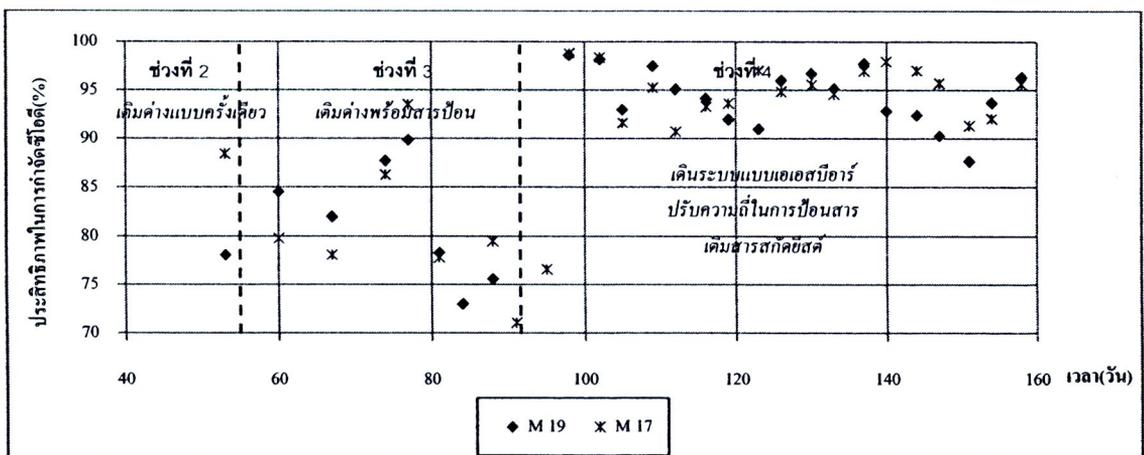


รูปที่ 4.4 ความเข้มข้นของVSSในถังสร้างก๊าซมีเทน*

(ข้อมูลการทดลองแสดงดังภาคผนวก ก. ตาราง ก.9)

*หมายเหตุ : ไม่มีข้อมูลที่วัด ในช่วงที่ 1 ของการทดลอง

หลังจากที่ปรับรูปแบบการเดินระบบดังกล่าวข้อการศึกษารูปแบบการเดิมค่าง ความถี่ในการเดิมสารป้อน และการปรับวิธีการเดินระบบจากระบบกวนผสมเป็นระบบเอเอสบีอาร์ พบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดชีโอดีสูงมากโดยสามารถกำจัดชีโอดีได้สูงถึง 95% ในทุกการทดลอง (แสดงการคำนวณประสิทธิภาพในการกำจัดชีโอดีในภาคผนวก ก.) แสดงดังรูปที่ 4.5 (ช่วงที่ 2) โดยผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผลจากการปรับวิธีในการเดิมค่าง การปรับความถี่ในการป้อนสารเข้าสู่ระบบ และปริมาณจุลินทรีย์ที่เพิ่มสูงขึ้นในถังปฏิกรณ์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดชีโอดีสูงขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพในการกำจัดชีโอดี*

*หมายเหตุ : ไม่มีข้อมูลที่วัด ในช่วงที่ 1 ของการทดลอง

4.2 การศึกษาผลของของเวลาเก็บกักต่อประสิทธิภาพของระบบโดยใช้ระยะเวลาเก็บกักรวมของระบบเท่ากับ 20 วัน

การทดลองเพื่อศึกษาผลของเวลาเก็บกักต่อการสร้างกรดไขมันระเหยและก๊าซชีวภาพจากมันสำปะหลังในถังปฏิกรณ์ระดับห้องปฏิบัติการ ทำการทดลองโดยใช้กระบวนการไร้ออกซิเจนในถังปฏิกรณ์แบบสองขั้นตอน ซึ่งประกอบด้วยถังสร้างกรดในสภาวะเทอร์โมฟิลิกและถังสร้างก๊าซมีเทนที่อุณหภูมิห้อง ทำการป้อนของเสียสู่ระบบ 2 ครั้งต่อ 1 วันหรือทุก 12 ชั่วโมงโดยของเสียที่ผ่านการบำบัดในถังสร้างกรดจะเป็นของเสียที่เติมเข้าสู่ถังสร้างก๊าซมีเทน ทั้งนี้ควบคุมเวลาเก็บกักรวมของระบบให้คงที่ที่ 20 วัน โดยทำการแปรค่าเวลาเก็บกักในถังสร้างกรดและถังสร้างก๊าซมีเทน ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ทั้งนี้ก่อนเติมของเสียเข้าสู่ถังปฏิกรณ์จะทำการระบายของเสียในถังปฏิกรณ์ออกก่อน โดยให้มีปริมาณเท่ากับของเสียที่เติมเข้าไปใหม่

ตารางที่ 4.1 การทำงานและการควบคุมถังสร้างกรดและถังสร้างก๊าซมีเทน

การทดลอง	ถังสร้างกรด			ถังสร้างก๊าซมีเทน		
	เวลาเก็บกัก (วัน)	ปริมาณของเสียที่เติมต่อวัน(ลิตร)	ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีไอคี่ต่อลบ.ม.-วัน)	เวลาเก็บกัก (วัน)	ปริมาณของเสียที่เติมต่อวัน(ลิตร)	ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีไอคี่ต่อลบ.ม.-วัน)*
2 A	1	10	38.08	19	1.05	2.00
2 B	2	5	20.41	18	1.11	2.27
2 C	3	3.3	13.71	17	1.18	2.44

4.2.1 พีเอช

พีเอชเป็นปัจจัยที่สำคัญและมีผลต่อการทำงานของแบคทีเรีย ค่าพีเอชสำหรับการทำงานของระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนต้องอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการทำงานทั้งของแบคทีเรียสร้างกรดและแบคทีเรียสร้างมีเทน โดยช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสมกับการทำงานของแบคทีเรียสร้างกรด คือ 4.0-6.5 ส่วนช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียสร้างมีเทน คือ 6.5-8.2 (Speece, 1996) ถ้าค่าพีเอชสูงหรือต่ำกว่านี้มากจะยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ลดลง

ตารางที่ 4.2 พีเอชของน้ำเข้าและออกจากถังสร้างกรดและถังสร้างก๊าซมีเทนในชุดการทดลองต่างๆ
(ข้อมูลการทดลองแสดงดังภาคผนวก ก. ตาราง ก.2)

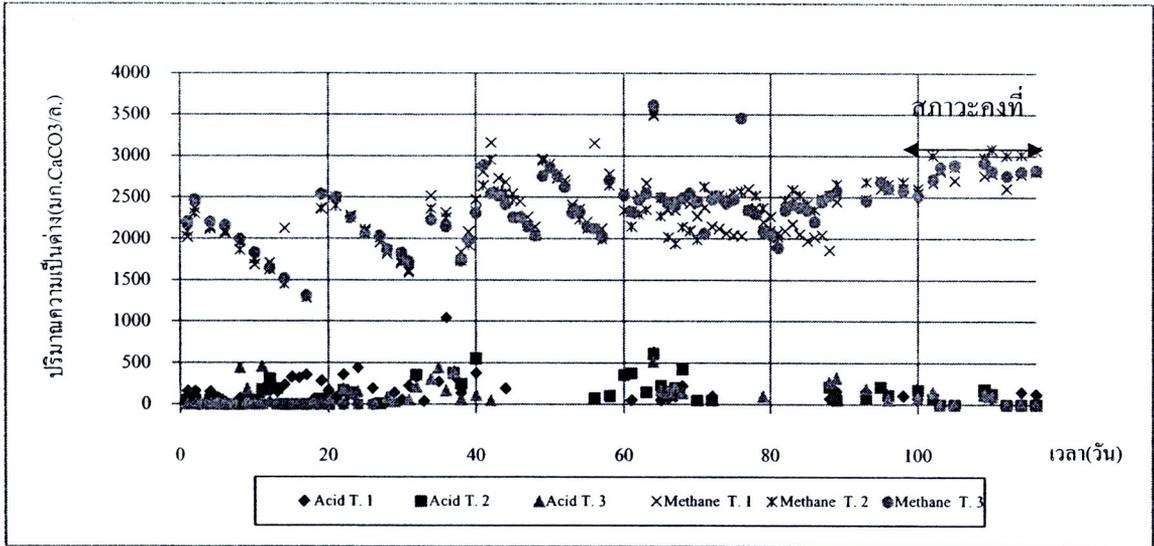
การทดลอง	พีเอชน้ำเข้า ถัง สร้างกรด	พีเอชน้ำออกถังสร้างกรด	พีเอชน้ำออกถังสร้างก๊าซมีเทน
3 A	6.18±0.45	4.56±0.16	6.87±0.04
3 B	6.18±0.45	4.52±0.14	6.91±0.04
3 C	6.18±0.45	4.54±0.07	6.90±0.05

ผลการทดลองพบว่า เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ ค่าพีเอชที่ได้จากถังสร้างกรดที่เวลาเก็บกัก 1, 2 และ 3 วันมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) (ตารางที่ 4.3) โดยมีค่าประมาณ 4.5 และพีเอชในถังสร้างก๊าซมีเทนที่ระยะเวลาเก็บกัก 19 วันมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับที่ระยะเวลาเก็บกัก 18 และ 17 วัน ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงค่าพีเอชน้ำออกจากถังสร้างก๊าซมีเทน โดยเฉลี่ยของชุดการทดลองทั้ง 3 ชุดแล้ว สรุปได้ว่ามีค่าพีเอชที่อยู่ในช่วงเหมาะสม ซึ่งทำให้จุลชีพกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนสามารถทำงานอยู่ในระบบได้

4.2.2 สภาพต่างและกรดไขมันระเหย

4.2.2.1 สภาพต่างที่พบในระบบ

สภาพต่างและปริมาณกรดไขมันระเหยเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากต่อการทำงานของแบคทีเรียในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ถังสร้างก๊าซมีเทนที่ระยะเวลาเก็บกักที่ 19, 18 และ 17 วัน มีค่าสภาพต่างโดยเฉลี่ย คือ $2,710 \pm 95$, $2,916 \pm 162$ และ $2,769 \pm 131$ มก. CaCO_3 /ล. ตามลำดับ ซึ่งชุดการทดลองที่ 2B มีค่าสภาพต่างในระบบสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองอื่นๆอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้สภาพต่างในถังสร้างกรดมีปริมาณเพียงเล็กน้อย คือ ถังสร้างกรดที่ระยะเวลาเก็บกัก 1, 2 และ 3 วันมีค่าสภาพต่างเท่ากับ 102 ± 29 , 140 ± 56 และ 108 ± 33 มก. CaCO_3 /ล. ตามลำดับ ซึ่งค่าสภาพต่างที่พบมีค่าค่อนข้างต่ำเนื่องจากน้ำออกจากถังสร้างกรดมักมีพีเอชอยู่ในช่วง 4.0 - 4.5 โดยสภาพต่างของระบบแสดงดังรูปที่ 4.6



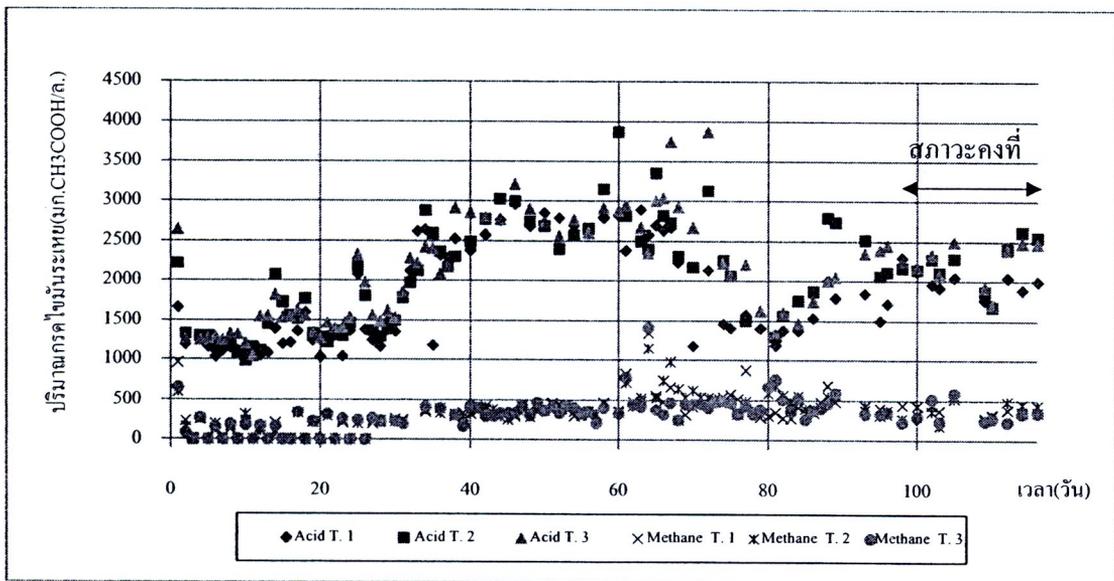
รูปที่ 4.6 สภาพค่างในถังสร้างกรดและสร้างก๊าซมีเทน
(ข้อมูลการทดลองแสดงดังภาคผนวก ก. ตาราง ก.3)

4.2.2.2 ความสามารถในการสร้างกรดไขมันระเหยและปริมาณกรดไขมันระเหยที่พบในถังสร้างกรดที่ระยะเวลาเก็บกักต่างๆ

จากผลการทดลองที่ระยะเวลาเก็บกักต่างๆ พบว่าเมื่อเปรียบเทียบปริมาณกรดไขมันระเหยในสารป้อนที่มีค่าประมาณ 838 ± 118 มก. $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{ล}$. โดยเมื่อป้อนสารเข้าสู่ถังสร้างกรดที่ระยะเวลาเก็บกัก 1, 2 และ 3 วัน พบว่าปริมาณกรดไขมันระเหยมีค่าเท่ากับ $1,969 \pm 171$, $2,211 \pm 289$ และ $2,231 \pm 264$ มก. $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{ล}$. ตามลำดับ โดยเมื่อคำนวณความสามารถในการสร้างกรดไขมันระเหยจากถังสร้างกรดที่ระยะเวลาเก็บกักต่างๆ ปริมาณกรดไขมันระเหยเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสารป้อนเท่ากับ 57%, 62% และ 64% ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ชัดว่าถังสร้างกรดมีความสามารถในการเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้เป็นกรดไขมันระเหยเพิ่มสูงขึ้น (รูปที่ 4.9) โดยจากการที่ให้ความร้อนในถังสร้างกรดอาจเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ถังสร้างกรดทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

เมื่อพิจารณาในช่วงสภาวะคงที่ พบว่าปริมาณกรดไขมันระเหยในถังสร้างกรดมีค่าค่อนข้างแปรปรวน (รูปที่ 4.7) โดยในช่วงสภาวะคงที่ถังสร้างกรดที่เวลาเก็บกัก 1, 2 และ 3 วัน มีปริมาณกรดไขมันระเหยเท่ากับ $1,969 \pm 171$, $2,211 \pm 289$ และ $2,231 \pm 264$ มก. $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{ล}$. ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ทางสถิติแล้วพบว่าปริมาณกรดที่เวลาเก็บกักต่างๆ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P > 0.05$) และในถังสร้างก๊าซมีเทนพบปริมาณกรดไขมันระเหยในช่วงสภาวะคงที่มีค่าระหว่าง 300-500 มก. $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{ล}$. โดยในช่วงสภาวะคงที่ถังสร้างก๊าซมีเทนที่เวลาเก็บกัก 19, 18

และ 17 วัน มีปริมาณกรดไขมันระเหยเท่ากับ 390 ± 85 , 354 ± 112 และ 323 ± 129 มก. $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{ล.}$ ตามลำดับ ซึ่งปกติแล้วปริมาณกรดไขมันระเหยควรมีค่าอยู่ในช่วง 50-500 มก. $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{ล.}$ ซึ่งอาจถือเป็นสัญญาณที่แสดงว่าระบบทำงานได้ดี หากปริมาณของกรดไขมันระเหยรูปของกรดอะซิติกมีค่ามากกว่า 2,000 มก. $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{ล.}$ จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพลดลง และถ้าระบบมีปริมาณกรดไขมันระเหยในรูปของกรดอะซิติกมีค่าตั้งแต่ 8,000-10,000 มก. $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{ล.}$ ขึ้นไป จะส่งผลทำให้เกิดความเป็นพิษต่อระบบโดยตรง (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2549)



รูปที่ 4.7 ปริมาณกรดไขมันระเหยในถังสร้างกรดและสร้างก๊าซมีเทน
(ข้อมูลการทดลองแสดงดังภาคผนวก ก. ตาราง ก.4)

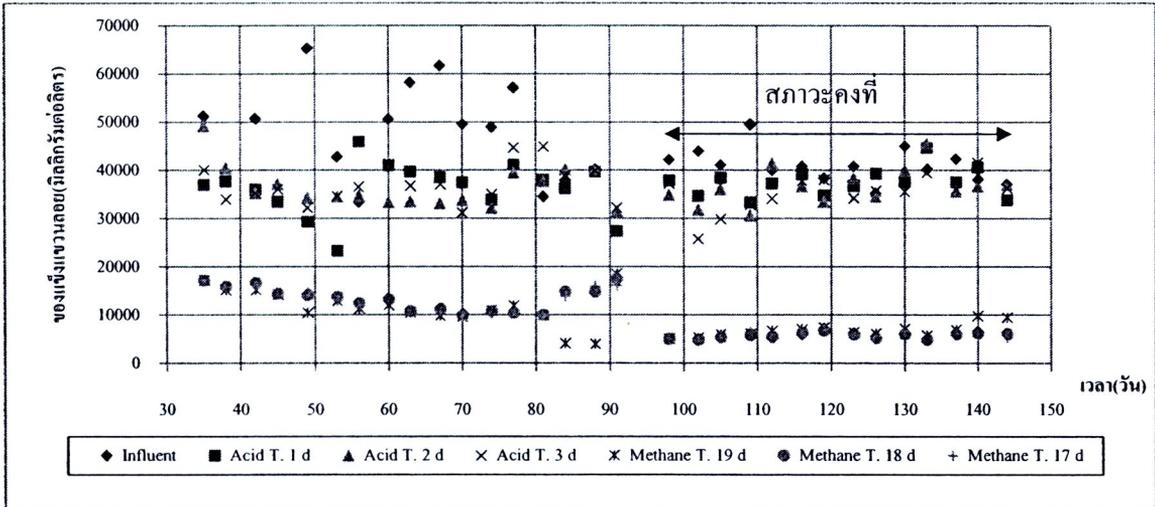
ในบางครั้งการหาปริมาณค่าที่ต้องการจากปริมาณกรดระเหย อาจทำให้การควบคุมระบบทำได้ล่าช้าและไม่สามารถแก้ไขปัญหาได้ทันทั่วทั้งที่ ดังนั้นการประเมินกำลังบัฟเฟอร์ของระบบจึงมีความจำเป็นอย่างมากในการรักษาเสถียรภาพของระบบ ซึ่งกำลังบัฟเฟอร์สามารถคำนวณได้จากสัดส่วนระหว่างปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายและปริมาณค่าที่มีอยู่ในระบบ หากอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพความเป็นด่างในรูปของไบคาร์บอเนต (VFA/ALK) มีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์สูง แต่หากอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าสูงกว่า 0.8 แสดงว่ากำลังบัฟเฟอร์ของระบบมีค่าต่ำมากที่เฝ้าระวังที่จะลดลงได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นต้องมีการรักษาสมดุลของระบบให้มีปริมาณการสร้างกรดไขมันระเหยให้เท่ากับหรือต่ำกว่าอัตราการใช้ไปเพื่อสร้างก๊าซ

มีเทน แต่ถ้ามีการสร้างกรดไขมันระเหยมากเกินไปจะส่งผลให้พีเอชของระบบต่ำเกิดการยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียสร้างมีเทน ซึ่งเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นได้บ่อยในระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน

อัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างในรูปของไบคาร์บอเนตที่พบในถังสร้างก๊าซมีเทนมีค่าอยู่ในช่วง 0.13-0.14 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงให้เห็นว่าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์สูง ซึ่งทำให้สามารถทนต่อความแปรปรวนหรือปริมาณกรดที่เพิ่มขึ้นได้โดยไม่ทำให้ค่าพีเอชเปลี่ยนแปลง

4.2.3 ปริมาณของแข็งทั้งหมด

เมื่อพิจารณาถึงปริมาณของแข็งทั้งหมดในระบบ(ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่เข้าสู่ระบบมีค่าเท่ากับ $39,878 \pm 3,589$ มิลลิกรัมต่อลิตร) พบว่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ออกจากถังสร้างกรดที่มีระยะเวลาเก็บกัก 1, 2 และ 3 วัน มีค่าเท่ากับ $38,623 \pm 3,753$, $38,295 \pm 4,812$ และ $36,614 \pm 2,138$ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ออกจากถังสร้างกรดมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเข้า เท่ากับ 3.15%, 3.97% และ 8.19% ตามลำดับ(รูปที่ 4.8) อาจเป็นผลเนื่องมาจากของแข็งทั้งหมดบางส่วนถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นสารละลายในถังสร้างกรดโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และปริมาณของแข็งแขวนลอยที่ออกจากถังสร้างก๊าซมีเทนที่ระยะเวลาเก็บกัก 19, 18 และ 17 วัน มีค่าเท่ากับ $6,570 \pm 726$, $5,776 \pm 735$ และ $6,012 \pm 784$ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ออกจากถังสร้างก๊าซมีเทนมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเข้า เท่ากับ 83.53%, 85.52% และ 84.92% ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ชัดว่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ออกจากถังสร้างก๊าซมีเทนมีปริมาณน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเข้า เนื่องจากเดินระบบเอเอสบีอาร์ซึ่งเป็นระบบที่ต้องมีช่วงพักเพื่อให้เกิดการตกตะกอนของสารอินทรีย์ในระบบ ดังนั้นของเสียที่ระบายออกจากถังสร้างก๊าซมีเทนจึงมีเพียงแค่น้ำส่วนใสเท่านั้น อาจกล่าวได้ว่าระบบสามารถกำจัดของแข็งทั้งหมดได้สูงถึง 83% ในทุกการทดลอง



รูปที่ 4.8 ปริมาณของแข็งทั้งหมดในถังสร้างกรดและสร้างก๊าซมีเทน
(ข้อมูลการทดลองแสดงดังภาคผนวก ก. ตาราง ก.9)

4.2.4 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี

จากการทดลอง พบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเมื่อลดระยะเวลาเก็บกักลงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์เข้าระบบมากขึ้น แบคทีเรียที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ได้รับปริมาณสารอาหารมากขึ้น ซึ่งแบคทีเรียเหล่านี้เปลี่ยนสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซชีวภาพ ทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ *Ivo และ Jing (2010)* ที่ได้ทำการศึกษาผลของเวลาเก็บกักในถังหมักย่อยไร้อากาศที่สภาวะเทอร์โมฟิลิกและเมโซฟิลิก โดยพบว่าที่ระยะเก็บกักที่สั้นลงทำให้ภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย

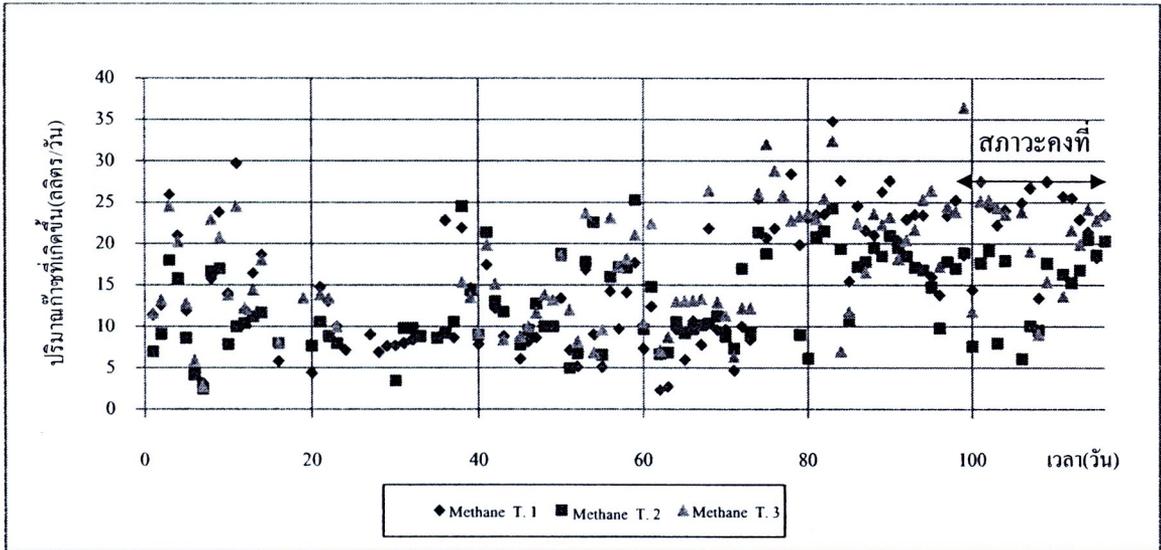
ที่สภาวะคงที่ เมื่อพิจารณาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากถังสร้างก๊าซมีเทนทั้ง 3 ถังซึ่งรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่แตกต่างกันตามระยะเวลาเก็บกักที่ใช้ พบว่า

-ถังสร้างก๊าซมีเทนที่ระยะเวลาเก็บกัก 19 วัน รับภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 2.00 กิโลกรัมซีโอดีต่อลบ.ม.-วัน เกิดก๊าซชีวภาพเท่ากับ 23.1 ± 4.2 ลิตรต่อวัน

-ถังสร้างก๊าซมีเทนที่ระยะเวลาเก็บกัก 18 วัน รับภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 2.27 กิโลกรัมซีโอดีต่อลบ.ม.-วัน เกิดก๊าซชีวภาพเท่ากับ 13.6 ± 5.5 ลิตรต่อวัน

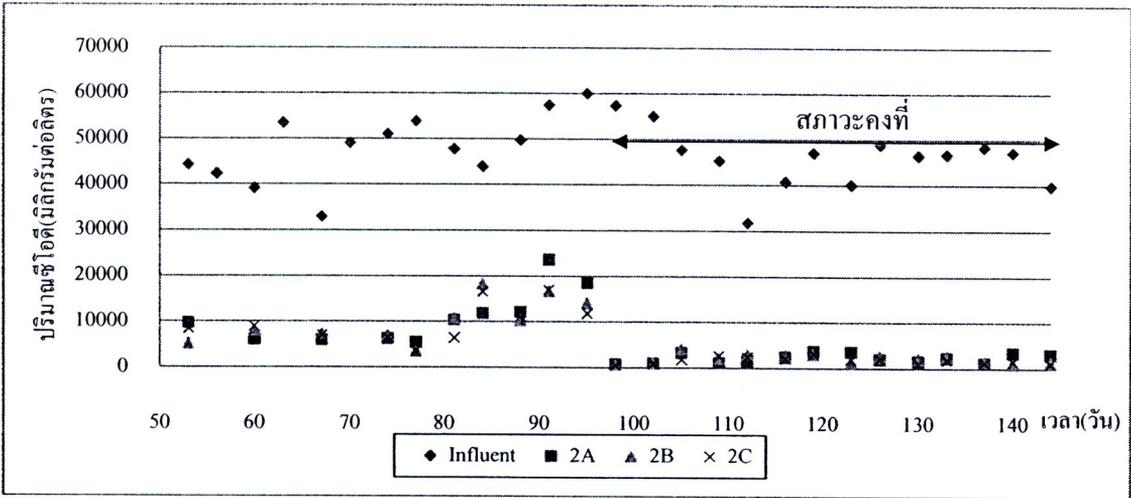
-ถังสร้างก๊าซมีเทนที่ระยะเวลาเก็บกัก 17 วัน รับภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 2.44 กิโลกรัมซีโอดีต่อลบ.ม.-วัน เกิดก๊าซชีวภาพเท่ากับ 23.7 ± 6.4 ลิตรต่อวัน

จากผลการทดลองดังกล่าว ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่ได้จากถังสร้างก๊าซมีเทนที่ระยะเวลาเก็บกัก 17 วันมีค่าสูงกว่าที่ระยะเวลาเก็บกัก 19 และ 18 วัน อาจเนื่องมาจากถังสร้างก๊าซมีเทนที่ระยะเวลาเก็บกักที่ 17 วัน รับภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงกว่าถังอื่นๆ



รูปที่ 4.9 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากชุดการทดลองต่างๆ
(ข้อมูลการทดลองแสดงดังภาคผนวก ก. ตาราง ก.8)

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี จากชุดการทดลอง 2A, 2B และ 2C พบว่า ในช่วงสภาวะคงที่ ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีได้สูงถึง 94% ในทุกการทดลอง (รูปที่ 4.10) โดยค่าซีโอดีในน้ำเข้าถังสร้างก๊าซมีเทนมีค่าต่ำกว่าค่าซีโอดีน้ำเข้าถังสร้างกรดเล็กน้อยโดยมีค่าต่ำลงประมาณ 5-10% เนื่องจากสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ถังสร้างกรด บางส่วนถูกเปลี่ยนรูปไปเป็น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้นภายในถัง ทำให้ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ถังสร้างก๊าซมีเทนต่ำลงตามไปด้วย

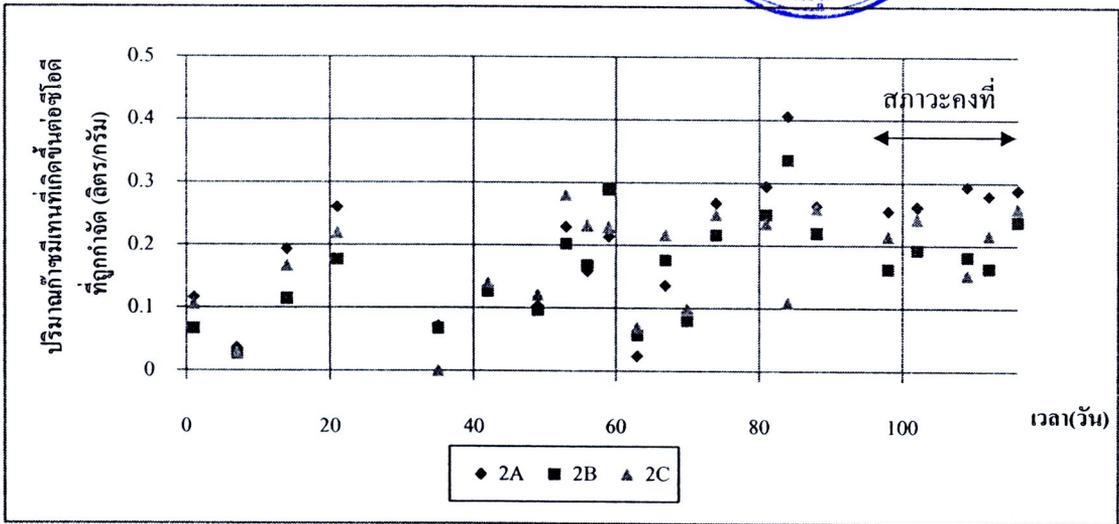


รูปที่ 4.10 ความแปรปรวนของปริมาณซีโอดีในระบบ
(ข้อมูลการทดลองแสดงดังภาคผนวก ก. ตาราง ก.5-7)

ความสามารถในการกำจัดซีโอดีที่สูงมากจากชุดการทดลองต่างๆ อาจเนื่องมาจากจุลชีพกลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทนทำงานได้ดี ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลโดยมีอัตราการใช้ไปของกรดไขมันระเหยเกิดขึ้นใกล้เคียงกับปริมาณก๊าซชีวภาพในระบบที่เกิดขึ้น จึงไม่พบกรดไขมันระเหยสะสมตัวในระบบ ส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีได้สูงและสามารถผลิตก๊าซชีวภาพในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

4.2.5 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดและของแข็งระเหยที่เดิม

ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นเป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของระบบ เนื่องจากก๊าซมีเทนเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยอาศัยจุลชีพสร้างกรดและจุลชีพสร้างมีเทนทำงานร่วมกันอย่างต่อเนื่อง ในช่วงเริ่มต้นระบบชุดการทดลองที่ระยะเวลาเก็บกักต่างๆมีค่าปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดค่อนข้างแปรปรวน แสดงดังรูปที่ 4.11 เมื่อระบบเข้าสู่สถานะคงที่ พบว่า ชุดการทดลอง 2A, 2B และ 2C มีค่าปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดเท่ากับ 0.27 ± 0.02 , 0.19 ± 0.03 และ 0.22 ± 0.04 ลิตรต่อกรัม โดยชุดการทดลอง 2A ให้ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดสูงสุด แต่ไม่แตกต่างจากชุดการทดลอง 2C อย่างมีนัยสำคัญ ($P > 0.05$) (โดยข้อมูลองค์ประกอบก๊าซชีวภาพแสดงดังภาคผนวก ก. ตาราง ก.11) และเมื่อพิจารณาในรูปของปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อของแข็งระเหยที่เดิมของชุดการทดลอง 2A, 2B และ 2C แล้ว พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.27 ± 0.04 , 0.16 ± 0.02 และ 0.13 ± 0.02 ลิตรต่อกรัม ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อซีโอดีที่ถูกกำจัด โดยชุดการทดลอง 2A เป็นชุดการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดเช่นกัน



รูปที่ 4.11 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อซีโอดีที่ถูกกำจัด

เมื่อพิจารณาถึงความสามารถในการสร้างกรดไขมันระเหยจากถังสร้างกรดที่ระยะเวลาเก็บกักต่างๆกันแล้วพบว่ามีความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ การเลือกใช้ระยะเวลาเก็บกักที่สั้นที่สุดจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการออกแบบจริง ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้พบว่าเวลาเก็บกักที่เหมาะสมที่สุดคือ 1 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับที่ระยะเวลาเก็บกัก 2 และ 3 วัน เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อระยะเวลาเก็บกักลดลง ก็จะทำให้ขนาดของถังปฏิกรณ์ที่ใช้เล็กลงไปด้วย ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและดำเนินระบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากพิจารณาถึงระบบการให้ความร้อนในถังสร้างกรดประกอบด้วย

$$HRT = \frac{Volume \text{ ถัง}}{Q} \quad (4.2)$$

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดแล้ว จะเห็นได้ชัดว่าชุดการทดลอง 2A ให้ค่าปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลอง 2B และ 2C ดังนั้นถังสร้างก๊าซมีเทนที่ระยะเวลาเก็บกัก 19 วัน จึงเป็นระยะเวลาเก็บกักที่เหมาะสมที่สุดเมื่อเทียบกับระยะเวลาเก็บกักอื่นๆ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากเสถียรภาพของระบบประกอบด้วยการใช้ค่าเวลาเก็บกักที่สูงกว่าย่อมมีค่าความปลอดภัยมากกว่า

จากผลการทดลองที่ได้โดยพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆแล้ว โดยเฉพาะปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถของระบบในการผลิตก๊าซชีวภาพ อาจ

กล่าวได้ว่าเมื่อใช้เวลาเก็บกักรวมของระบบที่ 20 วัน ระยะเวลาเก็บกักที่เหมาะสมสำหรับถังสร้างกรดและถังสร้างก๊าซมีเทน คือ 1 และ 19 วันตามลำดับ

4.3 การศึกษาผลของเวลาเก็บกักในถังสร้างก๊าซมีเทนเมื่อใช้เวลาเก็บกักในถังสร้างกรด 1 วัน

จากการทดลองในหัวข้อ 4.2 ที่ได้ทำการศึกษาผลของของเวลาเก็บกักต่อประสิทธิภาพของระบบโดยใช้ระยะเวลาเก็บกักรวมของระบบเท่ากับ 20 วัน พบว่า ถังสร้างกรดที่เวลาเก็บกัก 1, 2 และ 3 วัน มีกรดไขมันระเหยในปริมาณใกล้เคียงกัน สรุปได้ว่า ชุดการทดลองที่เหมาะสมที่สุดคือ ชุดการทดลอง 2A ซึ่งมีความสามารถในการผลิตก๊าซมีเทนต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดสูงที่สุด โดยสาเหตุที่ชุดการทดลอง 2B และ 2C มีความสามารถในการผลิตก๊าซมีเทนต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดต่ำกว่าชุด 2A นั้น อาจเนื่องมาจากใช้ระยะเวลาเก็บกักในถังสร้างกรดที่แตกต่างกัน จึงทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อศึกษาผลของเวลาเก็บกักของถังสร้างก๊าซมีเทนต่อประสิทธิภาพในการเกิดก๊าซชีวภาพ โดยทำการเพิ่มและลดระยะเวลาเก็บกักในถังสร้างก๊าซมีเทนให้มีค่าเท่ากับ 25, 14.5 และ 12 วัน เพื่อศึกษาถึงผลของระยะเวลาเก็บกักในถังดังกล่าว และควบคุมให้ถังสร้างกรดที่ทำงานคู่กับถังสร้างก๊าซมีเทนมีระยะเวลาเก็บกัก 1 วันเท่ากันทุกชุดการทดลอง(ตารางที่ 4.4)

การควบคุมเวลาเก็บกักในการเดินระบบมีความสำคัญเนื่องจากถ้าเวลาเก็บกักยาวนานเกินไปก็จะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างเพราะต้องใช้ถังหมักขนาดใหญ่ ในทางตรงกันข้ามหากใช้เวลาเก็บกักสั้นเกินไป แบบที่เรียกก็จะเจริญเติบโตไม่ทันเกิดการหลุดออกจากระบบจำนวนมากซึ่งส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของระบบลดลง

ตารางที่ 4.3 สภาวะการเดินระบบในการศึกษาผลของเวลาเก็บกักต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ

การทดลอง	ถังสร้างกรด			ถังสร้างก๊าซมีเทน		
	เวลาเก็บกัก (วัน)	ปริมาณของเสียที่เติมต่อวัน(ลิตร)	ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์(กก.ซีโอดีต่อลบ.ม.-วัน)	เวลาเก็บกัก (วัน)	ปริมาณของเสียที่เติมต่อวัน(ลิตร)	ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์(กก.ซีโอดีต่อลบ.ม.-วัน)*
3 A	1	10	38.08	25	0.80	1.52
3 B	1	10	38.08	14.5	1.38	2.82
3 C	1	10	38.08	12	1.67	3.45

4.3.1 พิเศษ

จากการทดลอง เมื่อเพิ่มและลดระยะเวลาเก็บกักของถังสร้างก๊าซมีเทนในชุดการทดลองต่างๆ พบว่าพิเศษในน้ำออกจากถังสร้างก๊าซมีเทนในการทดลองที่ศึกษาผลของระยะเวลาเก็บกักนี้

(ตารางที่ 4.5) มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองในหัวข้อ 4.2 ซึ่งค่าพีเอชที่วัดได้ยังคงมีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียทั้งในกลุ่มสร้างกรดและกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน

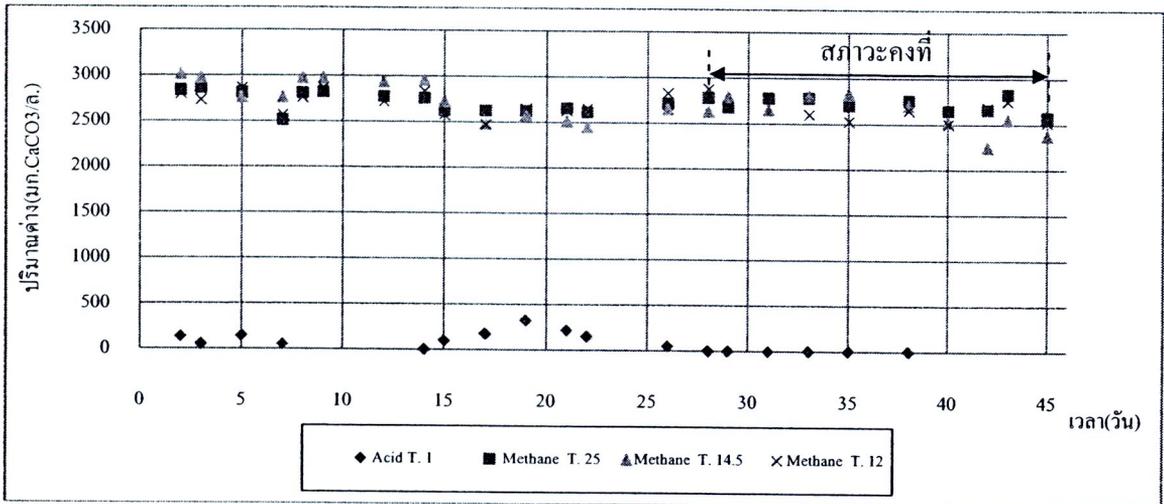
ตารางที่ 4.4 พีเอชของชุดการทดลองต่างๆในการศึกษาผลของระยะเวลาเก็บกักที่เปลี่ยนไป
(ข้อมูลการทดลองแสดงดังภาคผนวก ข. ตาราง ข.1)

การทดลอง	พีเอชน้ำเข้าถังสร้างกรด	พีเอชน้ำออกถังสร้างกรด	พีเอชน้ำออกถังสร้างก๊าซมีเทน
3 A	6.18±0.45	4.55±0.06	6.89±0.04
3 B	6.18±0.45	4.55±0.06	6.90±0.04
3 C	6.18±0.45	4.55±0.06	6.91±0.05

อย่างไรก็ดี ค่าพีเอชที่วัดได้ไม่ใช่สัญญาณล่วงหน้าบ่งชี้ถึงการทำงานล้มเหลวของระบบหมักย่อยแบบไร้อากาศได้ทันที ทั้งนี้เพราะว่าความเสียหายจะเกิดขึ้นกับระบบก่อนที่พีเอชจะลดลง โดยหากไม่ควบคุมพีเอชในระบบให้มีค่าเป็นกลาง การเติบโตของแบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทนก็จะถูกยับยั้งทำให้ระบบล้มเหลวได้ ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงต้องวิเคราะห์ค่าสภาพสภาพต่างควบคู่ไปด้วย

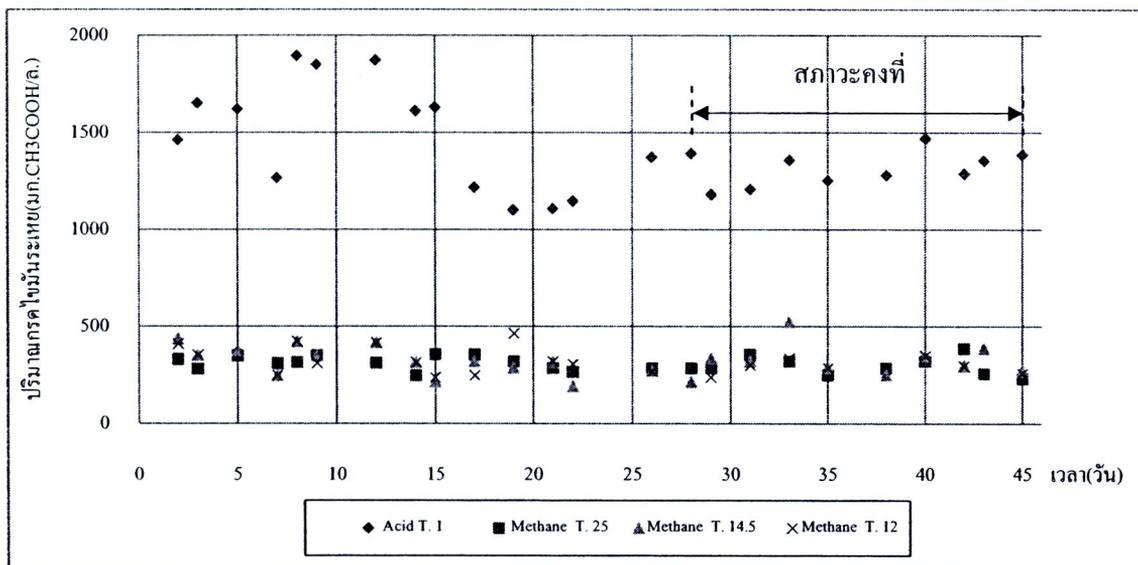
4.3.2 สภาพต่างและกรดไขมันระเหย

จากผลการทดลอง พบว่าปริมาณสภาพต่างในถังสร้างก๊าซมีเทนที่เพิ่มและลดระยะเวลาเก็บกักต่างๆ มีปริมาณอยู่ในช่วง 2,500-3,000 มก. CaCO_3 /ล. โดยเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ ถังสร้างก๊าซมีเทนที่ระยะเวลาเก็บกักที่ 25, 14.5 และ 12 วัน มีค่าสภาพต่างโดยเฉลี่ยเท่ากับ 2,695±99, 2,610±191 และ 2,656 ±123 มก. CaCO_3 /ล. ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ปริมาณสภาพต่างจากการเพิ่มและลดระยะเวลาเก็บกัก
(ข้อมูลการทดลองแสดงดังภาคผนวก ข. ตาราง ข.2)

ปริมาณสภาพต่างที่พบในระบบจากชุดการทดลองต่างๆมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P > 0.05$) โดยปริมาณต่างที่ได้จากการทดลองในหัวข้อการทดลองนี้มีค่าต่ำกว่าการทดลองในหัวข้อการทดลองที่ 4.2 เล็กน้อย โดยในการทดลองที่ทำการศึกษาประสิทธิภาพของระบบที่สภาวะต่างๆ ที่ระยะเวลาเก็บกักของถังสร้างก๊าซมีเทนที่ 19 มีปริมาณต่างเท่ากับ $2,710 \pm 95$ มก. $\text{CaCO}_3/\text{ล.}$ ถึงแม้ว่าระบบจะได้รับสารอินทรีย์ในปริมาณที่เปลี่ยนไปแต่ระบบยังสามารถรักษาสสมดุลจากปริมาณต่างที่มีในระบบไว้ได้โดยปริมาณต่างในระบบอาจมาจากทั้งการเติมในรูปแบบของโซเดียมไบคาร์บอเนตอย่างต่อเนื่องและจากผลของการเปลี่ยนรูปกรดไขมันระเหยเป็นก๊าซชีวภาพซึ่งได้ปริมาณเป็นต่างกลับคืนซึ่งเป็นการรักษาค่าพีเอชให้มีค่าค่อนข้างคงที่ ทำให้ระบบมีเสถียรภาพโดยยังคงมีสภาพต่างและกำลังบัฟเฟอร์ในระบบอย่างสม่ำเสมอ



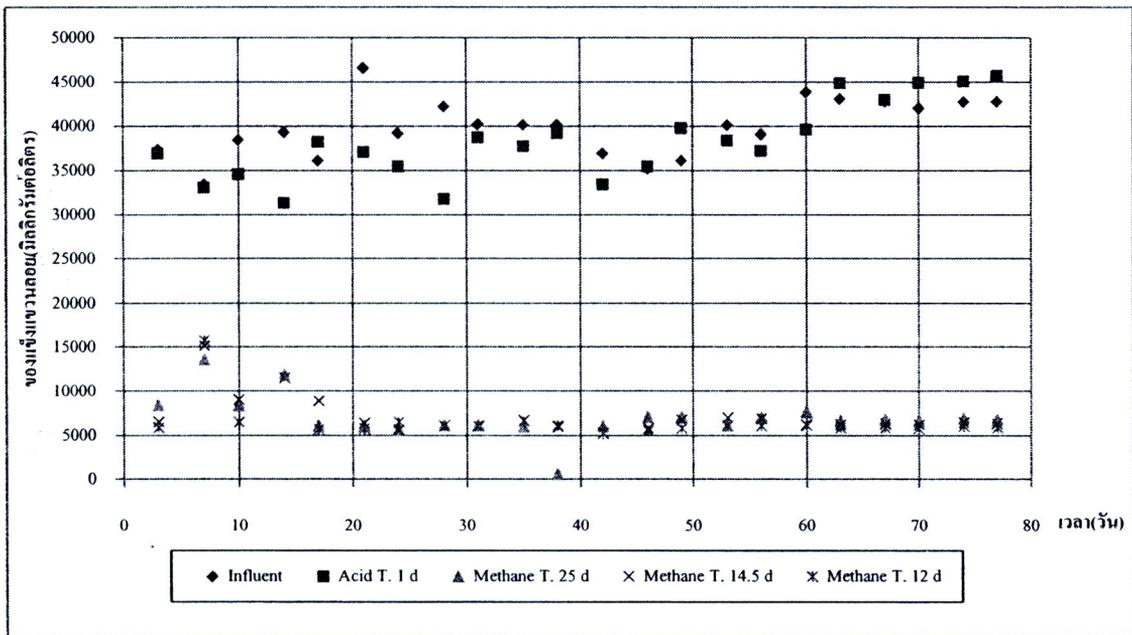
รูปที่ 4.13 ปริมาณกรดไขมันระเหยจากการเพิ่มและลดระยะเวลาเก็บกัก
(ข้อมูลการทดลองแสดงดังภาคผนวก ข. ตาราง ข.3)

เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ ดังสร้างก๊าซมีเทนที่ระยะเวลาเก็บกักที่ 25, 14.5 และ 12 วัน มีปริมาณกรดไขมันระเหยโดยเฉลี่ยเท่ากับ 297 ± 60 , 323 ± 86 และ 289 ± 34 มก. $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{ล}$. ตามลำดับ(รูปที่ 4.13) โดยปริมาณกรดไขมันระเหยในถังสร้างก๊าซมีเทนระยะเวลาเก็บกัก 25, 14.5 และ 12 วัน พบในหัวข้อการทดลองนี้มีค่าต่ำกว่าการทดลองในหัวข้อการทดลองที่ 4.2 ซึ่งมีระยะเวลาเก็บกักในถังสร้างก๊าซมีเทนเท่ากับ 19 วันเช่นเดียวกับปริมาณต่าง โดยในการทดลองที่ทำการศึกษาประสิทธิภาพของระบบที่สภาวะต่างๆในชุดการทดลองที่ระยะเวลาเก็บกักของถังสร้างก๊าซมีเทนที่ 19 วัน มีปริมาณกรดไขมันระเหย 390 ± 85 มก. $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{ล}$. อาจเป็นผลมาจากการที่แบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนทำงานได้ดีขึ้น มีประสิทธิภาพในการนำกรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้นในระบบไปใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงขึ้น และเนื่องด้วยจากการที่เดินระบบเป็นเวลานานโดยใช้ระบบแบบเอสบีอาร์ซึ่งเป็นระบบที่มีความสามารถในการกักเชื้อไว้ในถังปฏิกรณ์ได้สูงมาก ทำให้อายุตะกอนในระบบจึงเพิ่มสูงขึ้น โดยเมื่อนำน้ำตัวอย่างไปวิเคราะห์ปริมาณจุลชีพในถังสร้างก๊าซมีเทนเพื่อนำไปคำนวณหาอายุตะกอนจริงในถังสร้างก๊าซมีเทนซึ่งพบว่าอายุตะกอนในระบบมีค่าสูงถึง 409 ± 121 วัน

4.3.3 ปริมาณของแข็งทั้งหมด

จากผลการทดลอง ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีค่าเท่ากับ $40,779 \pm 3,025$ มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ออกจากถังสร้างกรดที่มีระยะเวลาเก็บกัก 1 วัน มี

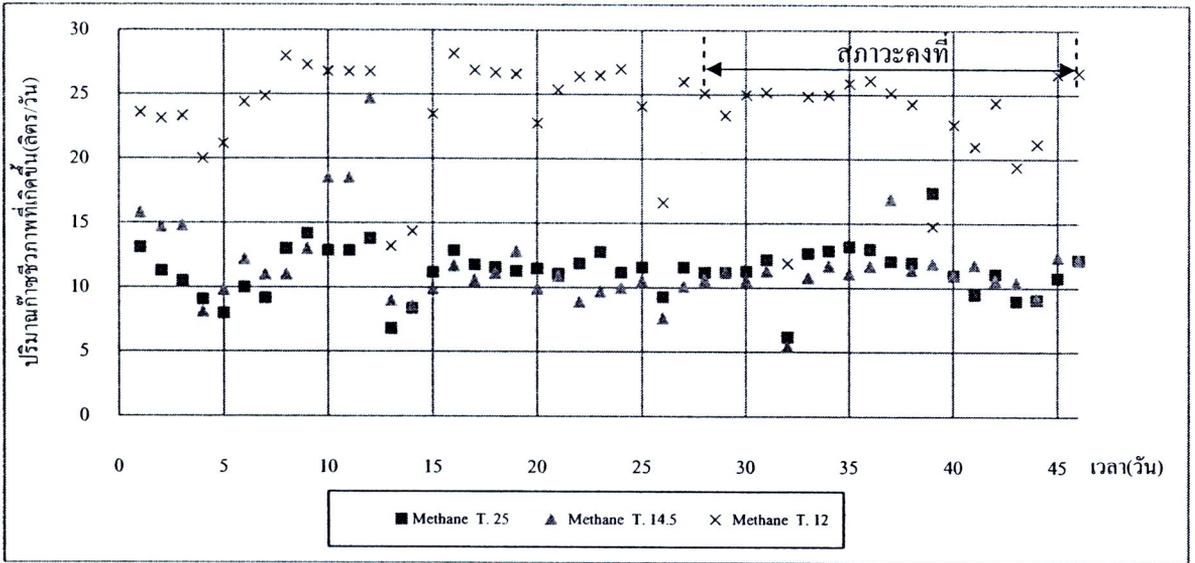
ค่าเท่ากับ $36,216 \pm 2,792$ มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ออกจากถังสร้างกรดมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเข้า เท่ากับ 11.19% (รูปที่ 4.14) และปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ออกจากถังสร้างก๊าซมีเทนที่ระยะเวลาเก็บกัก 25, 14.5 และ 12 วัน มีค่าเท่ากับ $5,217 \pm 2,061$, $6,020 \pm 471$ และ $6,034 \pm 482$ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ออกจากถังสร้างก๊าซมีเทนมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเข้า เท่ากับ 87.21%, 85.24% และ 85.20% ตามลำดับ สรุปได้ว่าระบบสามารถกำจัดของแข็งทั้งหมดได้สูงถึง 85% ในทุกการทดลอง



รูปที่ 4.14 ปริมาณของแข็งทั้งหมดในถังสร้างกรดและถังสร้างก๊าซมีเทน
(ข้อมูลการทดลองแสดงดังภาคผนวก ข. ตาราง ข.6)

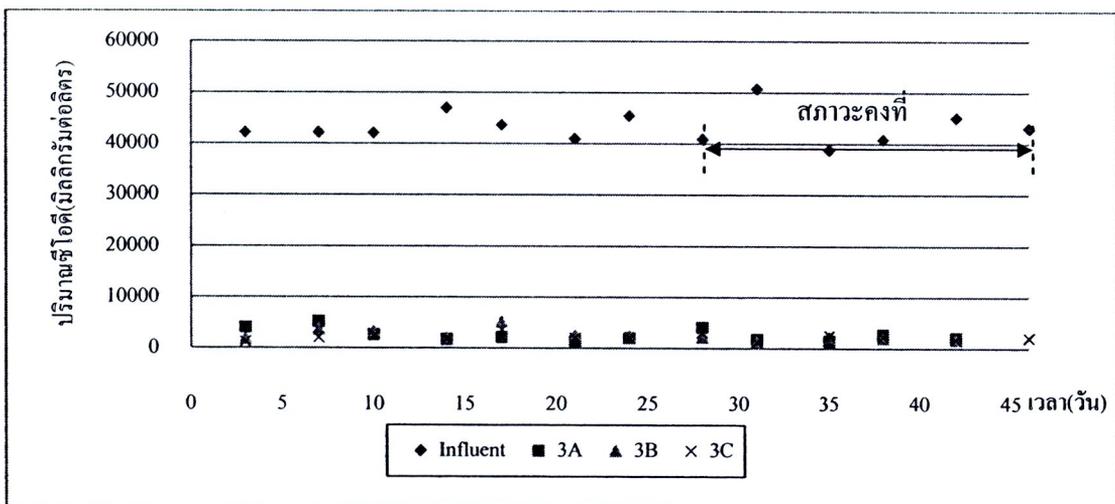
4.3.4 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี

ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในถังสร้างก๊าซมีเทนระยะเวลาเก็บกัก 25, 14.5 และ 2 วัน มีค่าเท่ากับ 11.3 ± 2.5 , 11.2 ± 2.1 และ 23.1 ± 4.0 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.15 ซึ่งเห็นได้ชัดว่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้จากถังสร้างก๊าซมีเทนที่ระยะเวลาเก็บกัก 12 มีค่าเพิ่มสูงขึ้นและมีปริมาณมากกว่าที่ระยะเวลาเก็บกักอื่นๆ



รูปที่ 4.15 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการเพิ่มและลดระยะเวลาเก็บกัก (ข้อมูลการทดลองแสดงดังภาคผนวก ข. ตาราง ข.5)

จากการที่ถังสร้างก๊าซมีเทนที่ระยะเวลาเก็บกัก 12 วัน เป็นชุดการทดลองที่ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองอื่นๆ ซึ่งเป็นผลจากการที่ระบบได้รับสารอาหารในปริมาณมากจึงทำให้ได้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงขึ้นไปด้วย ทั้งนี้ในการศึกษาเพื่อหาประสิทธิภาพที่แท้จริงของระบบในการผลิตก๊าซชีวภาพต้องพิจารณาตัวแปรอื่นๆร่วมด้วย เช่น ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี และปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อซีโอดีที่ถูกกำจัด เป็นต้น

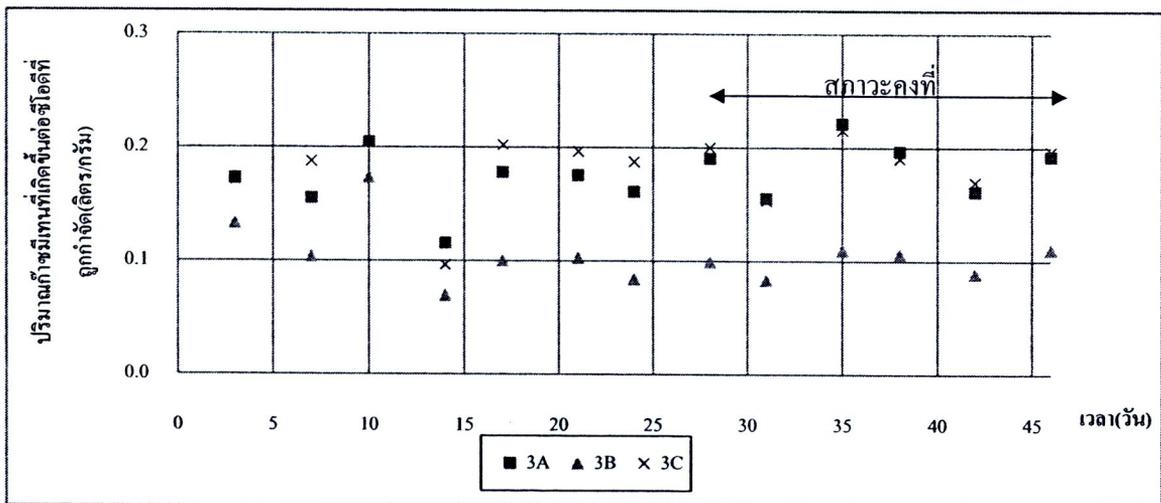


รูปที่ 4.16 ความแปรปรวนของปริมาณซีโอดีในระบบ (ข้อมูลการทดลองแสดงดังภาคผนวก ข. ตาราง ข.4)

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี จากชุดการทดลอง 3A, 3B และ 3C พบว่าความสามารถในการกำจัดซีโอดีในชุดการทดลอง 3A ค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นจาก 93 % เป็น 96 % อาจเนื่องมาจากชุดการทดลอง 3A เป็นชุดการทดลองที่มีการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาเก็บกักจาก 19 วัน เป็น 25 วัน ทำให้ปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบมีปริมาณลดลง และเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง จุลชีพจึงเริ่มปรับตัวกับปริมาณอาหารที่เปลี่ยนไป ระบบจึงค่อยๆมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีได้สูงขึ้นตามปกติ แต่ในชุดการทดลอง 3B และ 3C ที่มีการลดลงของระยะเวลาเก็บกักจาก 18 และ 17 วัน เป็น 14.5 และ 12 วัน ทำให้จุลชีพในระบบได้รับสารอาหารเพิ่มสูงขึ้น เมื่อระบบมีปริมาณจุลชีพมากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีสูงขึ้นตามไปด้วย โดยเมื่อเข้าสู่สภาวะคงที่ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีได้สูงถึง 94% ในทุกการทดลอง(รูปที่ 4.16)

4.3.5 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดและของแข็งระเหยที่เดิม

จากการทดลอง เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ พบว่า ชุดการทดลอง 3A, 3B และ 3C มีค่าปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดเท่ากับ 0.18 ± 0.01 , 0.10 ± 0.01 และ 0.19 ± 0.01 ลิตรต่อกรัมตามลำดับ โดยชุดการทดลอง 3C ให้ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดสูงสุด แต่มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลอง 3A แสดงดังรูปที่ 4.17 และเมื่อพิจารณาในรูปของปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อของแข็งระเหยที่เดิมของชุดการทดลอง 3A, 3B และ 3C แล้ว พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.19 ± 0.02 , 0.10 ± 0.01 และ 0.20 ± 0.02 ลิตรต่อกรัม ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อซีโอดีที่ถูกกำจัด โดยชุดการทดลอง 3C เป็นชุดการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุดเช่นกัน



รูปที่ 4.17 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดเมื่อเวลาเก็บกักเปลี่ยนไป

เมื่อพิจารณาผลของเวลาเก็บกักต่อประสิทธิภาพต่อการเกิดก๊าซชีวภาพแล้ว พบว่าชุดการทดลอง 3C ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองอื่นๆ ถึงแม้ว่าปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดในชุดการทดลอง 3A และ 3C มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อพิจารณาค่าระยะเวลาเก็บกักแล้วพบว่าเวลาเก็บกักในชุดการทดลอง 3C สั้นกว่าชุด 3A แสดงให้เห็นถึงระบบที่มีระยะเวลาเก็บกัก 12 วันสามารถรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้สูงกว่าชุดที่ 1 ซึ่งมีระยะเวลาเก็บกักที่ 25 วัน ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงขึ้น หากทำการเดินระบบโดยใช้อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสม โดยการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบที่ปริมาณมากเกินไปจะทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์ลดลงเนื่องจากแบคทีเรียบางส่วนถูกทำลายไปเพราะสภาพที่ไม่สมดุล ในทางตรงกันข้ามหากมีการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบน้อยเกินไปจะทำให้การใช้ถังหมักไม่เต็มประสิทธิภาพไม่คุ้มค่าในการลงทุนและยังส่งผลให้แบคทีเรียในระบบปรับตัวเข้ากับสภาพสารอินทรีย์ที่มีปริมาณต่ำผลที่ตามมาคือระบบอาจล้มเหลวได้เช่นกัน

ในหัวข้อ 4.2 ที่ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของระบบที่สภาวะต่างๆ ซึ่งพบว่าสภาวะที่มีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงที่สุด คือ ชุดการทดลอง 2A ซึ่งประกอบด้วยถังสร้างกรดที่เวลาเก็บกัก 1 วันและถังสร้างก๊าซมีเทนที่เวลาเก็บกัก 19 วัน ซึ่งมีค่าปริมาณก๊าซมีเทนต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดสูงถึง 0.27 ± 0.02 ลิตรต่อกรัม และเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองในหัวข้อนี้แล้วพบว่าค่าปริมาณก๊าซมีเทนต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดที่ได้สูงกว่าชุดการทดลอง 3C ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.19 ± 0.01 ลิตรต่อกรัม ซึ่งเป็นชุดการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองอื่นในหัวข้อการทดลอง 4.3 สรุปได้ว่าระยะเวลาเก็บกักรวมที่เหมาะสมสำหรับการหมักย่อยแบบไร้อากาศจากถังปฏิกรณ์แบบสองขั้นตอนในงานวิจัยนี้ คือ 20 วัน

4.4 การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบโดยใช้กระบวนการแบบ Single-stage ที่สภาวะ Thermophilic และ Mesophilic ที่เวลาเก็บกักต่างกัน

จากผลการทดลองที่ได้ในหัวข้อ 4.2 และ 4.3 พบว่าระยะเวลาเก็บกักรวมของระบบหมักย่อยแบบไร้อากาศโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบสองขั้นตอนในงานวิจัยนี้ คือ 20 วันและ 13 วัน ตามลำดับ ซึ่งระบบของถังปฏิกรณ์ที่ใช้ประกอบด้วยถังสร้างกรดทำงานที่สภาวะเทอร์โมฟิลิก และถังสร้างก๊าซมีเทนทำงานที่สภาวะเมโซฟิลิก โดยถังปฏิกรณ์แบบสองขั้นตอนที่ใช้มีประสิทธิภาพด้านต่างๆ สูงมาก เช่น เสถียรภาพของระบบ ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น รวมไปถึงการกำจัดซีโอดี เป็นต้น ดังนั้นเพื่อเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบดังกล่าวจึงได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมโดยทำการเดินระบบที่สภาวะอุณหภูมิที่ต่างกัน และเปลี่ยนรูปแบบการดำเนินระบบจากถังปฏิกรณ์แบบสองขั้นตอนเป็นถังปฏิกรณ์แบบหนึ่งขั้นตอน (ตารางที่ 4.6) ซึ่งจากเดิมที่ดำเนินระบบแบบสองขั้นตอน

ที่สภาวะเทอร์โมฟิลิกและเมโซฟิลิกดังกล่าว เปลี่ยนเป็นการใช้ถังปฏิกรณ์แบบหนึ่งขั้นตอนและทดลองแยกในแต่ละสภาวะ โดยใช้ระยะเวลาเก็บกักเท่ากับ 20 วันและ 13 วัน

ตารางที่ 4.5 สภาวะการเดินระบบในการศึกษาผลของเวลาเก็บกักต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ

การทดลอง	ถังปฏิกรณ์ที่ใช้			
	ช่วงอุณหภูมิ	เวลาเก็บกัก (วัน)	ปริมาณของเสียที่เติมต่อวัน(ลิตร)	ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก. ซีไอดีต่อลบ.ม.-วัน)
ST 20	เทอร์โมฟิลิก	20	0.50	1.90
ST 13	เทอร์โมฟิลิก	13	0.77	2.93
SM 20	อุณหภูมิห้อง (25 °C)	20	1.00	1.90
SM 13	อุณหภูมิห้อง (25 °C)	13	1.54	2.93

4.4.1 พีเอช

ค่าพีเอชที่วัดได้จากชุดการทดลองถังปฏิกรณ์แบบสองขั้นตอน(ในถังสร้างก๊าซมีเทน) สภาวะเทอร์โมฟิลิก ที่ระยะเวลาเก็บกัก 20 วัน และชุดการทดลองที่ใช้ถังปฏิกรณ์แบบหนึ่งขั้นตอน มีค่าพีเอชเท่ากับ 6.86 และ 7.30 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าค่าพีเอชที่วัดได้จากชุดการทดลองโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบหนึ่งขั้นตอนมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองที่ใช้ถังปฏิกรณ์แบบสองขั้นตอนอย่างเห็นได้ชัด เนื่องมาจากการทำงานร่วมกันของแบคทีเรียในกลุ่มสร้างกรดและสร้างก๊าซมีเทนที่อาศัยอยู่ในถังปฏิกรณ์เดียวกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากค่าพีเอชที่วัดได้ที่มีสภาวะเป็นกลาง อาจส่งผลให้เกิดการยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดบางส่วนเนื่องจากค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับถังสร้างกรดมักอยู่ในช่วง 4.0-6.5 ทำให้แบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดทำงานได้ไม่เต็มที่ (Speece, 1996)

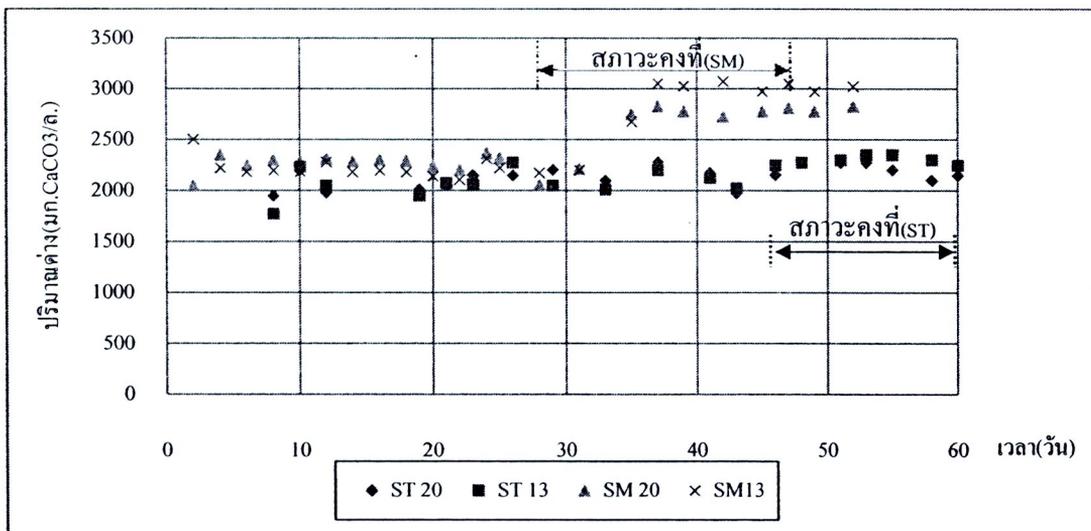
เมื่อพิจารณาพีเอชของชุดการทดลองที่ต่างอุณหภูมิโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบหนึ่งขั้นตอนเช่นเดียวกัน พบว่า ค่าพีเอชที่ได้มีค่าดังตารางที่ 4.7 ซึ่งในชุดการทดลองที่ 1 มีค่าพีเอชสูงกว่าชุดการทดลองที่ 2 เพราะที่อุณหภูมิสูงขึ้นการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะลดต่ำลง จึงทำให้ชุดการทดลองที่อุณหภูมิสูงมีค่าพีเอชสูงขึ้นตามไปด้วย (Speece, 1996)

ตารางที่ 4.6 พีเอชของชุดการทดลองต่างๆในการศึกษาผลของอุณหภูมิและลักษณะถังปฏิกรณ์ที่ใช้ (ข้อมูลการทดลองแสดงดังภาคผนวก ค.และง. ตาราง ค.1 และ ง.1)

การทดลอง	ถังปฏิกรณ์ที่ใช้แบบหนึ่งขั้นตอน	
	ช่วงอุณหภูมิ	พีเอช
ST 20	เทอร์โมฟิลิก	7.30±0.09
ST 13	เทอร์โมฟิลิก	7.31±0.09
SM 20	เมโซฟิลิก	6.86±0.06
SM 13	เมโซฟิลิก	6.85±0.12

4.4.2 ความเป็นด่างและกรดไขมันระเหย

ปริมาณสภาพด่างในระบบมีค่าอยู่ในช่วง 2,000-2,800 มก. CaCO_3 /ล. โดยในชุดการทดลองที่สภาวะเทอร์โมฟิลิกที่ระยะเวลาเก็บกัก 20 และ 13 วัน มีปริมาณด่างในระบบเท่ากับ $2,188 \pm 81$ และ $2,291 \pm 42$ มก. CaCO_3 /ล. ตามลำดับ และชุดการทดลองในสภาวะเมโซฟิลิกที่ระยะเวลาเก็บกัก 20 และ 13 วัน มีปริมาณด่างในระบบเท่ากับ $2,770 \pm 37$ และ $2,625 \pm 426$ มก. CaCO_3 /ล. ตามลำดับ (รูปที่ 4.18)



รูปที่ 4.18 สภาพด่างในระบบ โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบหนึ่งขั้นตอนที่ระยะเวลาเก็บกัก และอุณหภูมิต่างกัน (ข้อมูลการทดลองแสดงดังภาคผนวก ค.และง. ตาราง ค.2 และ ง.2)

อุณหภูมิที่เปลี่ยนไปมีผลต่อการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเมื่ออุณหภูมิของระบบสูงขึ้นทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำได้น้อยลง ทำให้พีเอชของระบบเพิ่มสูงขึ้น

ตามไปด้วย และเมื่อพิจารณาสมการ 4.3 ซึ่งเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน ค่าคงที่ของปฏิกิริยาในการแตกตัว ความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความเข้มข้นของไบคาร์บอเนตไอออน (Speece, 1996)

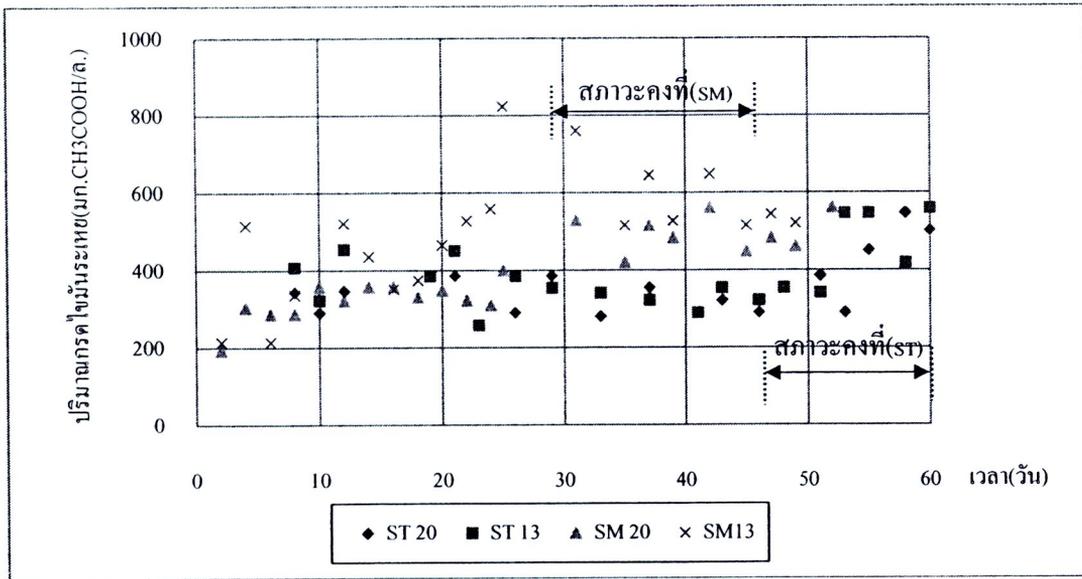
$$[H^+] = \frac{K_1 K_H P_{CO_2}}{[HCO_3^-]} \quad (4.3)$$

ที่อุณหภูมิ 30 C : $K_H(CO_2)$	=	0.186×10^{-4} atm/Mole frac
Solub.	=	1260 mg/l
K_1	=	4.70×10^{-7}
K_w	=	1.47×10^{-7}
Water Vapor Press.	=	31.8 mm Hg

ที่อุณหภูมิ 50 C : $K_H(CO_2)$	=	0.283×10^{-4} atm/Mole frac
Solub.	=	760 mg/l
K_1	=	5.13×10^{-7}
K_w	=	5.47×10^{-7}
Water Vapor Press.	=	92.5 mm Hg

ค่า K_1 และ K_H ขึ้นกับอุณหภูมิ โดยเมื่ออุณหภูมิของระบบเปลี่ยนแปลงไป ทำให้ค่า K_1 และ K_H เปลี่ยนตามไปด้วย ซึ่งที่อุณหภูมิสูงขึ้นค่า K_1 และ K_H จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ความเข้มข้นของสภาพต่างในรูปของไบคาร์บอเนตมีปริมาณน้อยลง จากผลการทดลองที่ได้จึงพบว่าในชุด ST 20 และ ST 13 มีปริมาณค่างน้อยกว่าชุด SM 20 และ SM 13 อย่างเห็นได้ชัด

ในส่วนองปริมาณกรดไขมันระเหยในชุดการทดลองต่างๆ เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่า ปริมาณกรดไขมันระเหยในที่สภาวะเทอร์โมฟิลิกระยะเวลาเก็บกัก 20 และ 13 วัน มีค่าเท่ากับ 403 ± 101 และ 442 ± 107 มก. CH_3COOH /ล.ตามลำดับ และที่สภาวะเมโซฟิลิกระยะเวลาเก็บกัก 20 และ 13 วัน มีปริมาณกรดไขมันระเหยเท่ากับ 445 ± 152 และ 619 ± 101 มก. CH_3COOH /ล.ตามลำดับ โดยปริมาณกรดไขมันระเหยในถังเทอร์โมฟิลิกมีค่าน้อยกว่าในถังเมโซฟิลิก เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจุลชีพกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนมีอัตราในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้นตามไปด้วย จึงนำกรดไขมันระเหยในระบบไปใช้ได้ปริมาณที่มากกว่า ดังนั้นปริมาณกรดไขมันระเหยในถังเทอร์โมฟิลิกเกิดการสะสมตัวในระบบน้อยกว่าถังเมโซฟิลิก (รูปที่ 4.19)

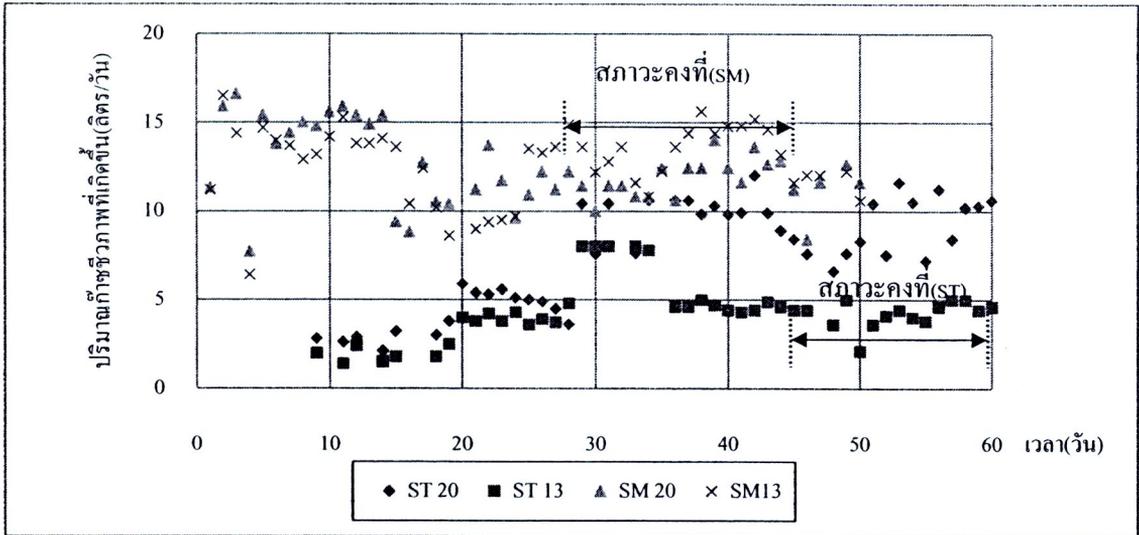


รูปที่ 4.19 ปริมาณกรดไขมันระเหยในระบบโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบหนึ่งขั้นตอนที่ระยะเวลาเก็บกักและอุณหภูมิต่างกัน (ข้อมูลการทดลองแสดงดังภาคผนวก ค.และง. ตาราง ค.2 และ ง.2)

ถึงแม้ว่าปริมาณกรดไขมันระเหยในถังเมโซฟิลิกมีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับการทดลองชุดอื่นๆ แต่เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณกรดไขมันระเหยต่อปริมาณสภาพต่าง (VFA/ALK) ยังมีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสม คือ ไม่เกิน 0.4 แสดงว่าระบบยังมีกำลังบัฟเฟอร์สูงสามารถทนต่อปริมาณกรดที่เกิดขึ้นในระบบได้ จึงทำให้ระบบยังสามารถทำงานได้อย่างปกติ

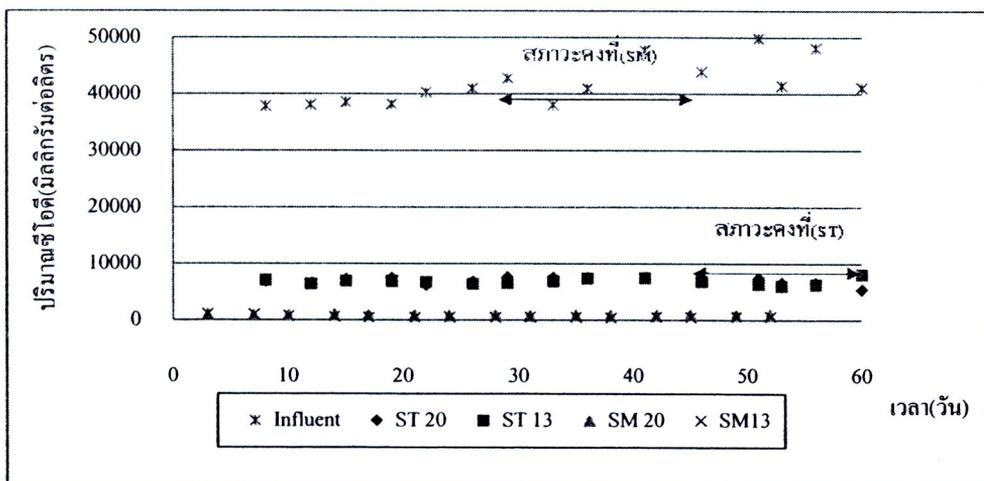
4.4.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี

ปริมาณก๊าซชีวภาพในชุดการทดลอง ST 20 และ ST 13 ในช่วงแรกมีค่าค่อนข้างต่ำแล้วจึงค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนเมื่อเข้าสู่สภาวะคงที่ พบว่า มีปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น 9.11 ± 1.55 และ 4.21 ± 0.70 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ ส่วนชุดการทดลอง SM 20 และ SM 13 มีปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น 11.70 ± 1.02 และ 13.60 ± 1.51 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ (รูปที่ 4.20) ซึ่งในชุดการทดลองที่สภาวะเมโซฟิลิกสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงกว่าชุดการทดลองที่สภาวะเทอร์โมฟิลิกอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาที่สภาวะเมโซฟิลิกมีขนาดใหญ่กว่าถังปฏิกรณ์ที่สภาวะเทอร์โมฟิลิกถึง 2 เท่า ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจึงมีปริมาณสูงขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.20 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากชุดการทดลองเทอร์โมฟิลิกและเมโซฟิลิก (ข้อมูลการทดลองแสดงดังภาคผนวก ค.และง. ตาราง ค.4 และ ง.4)

ผลของอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีปริมาณมากขึ้น เนื่องจากจุลชีพกลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทนสามารถทำงานได้ดีขึ้น และเห็นได้จากชุดการทดลองที่เทอร์โมฟิลิกดังกล่าวมีปริมาณกรดไขมันระเหยในระบบน้อยกว่า แสดงว่าจุลชีพกลุ่มนี้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เห็นได้จากก๊าซชีวภาพที่มีปริมาณสูงกว่าชุดการทดลองที่สภาวะเมโซฟิลิก

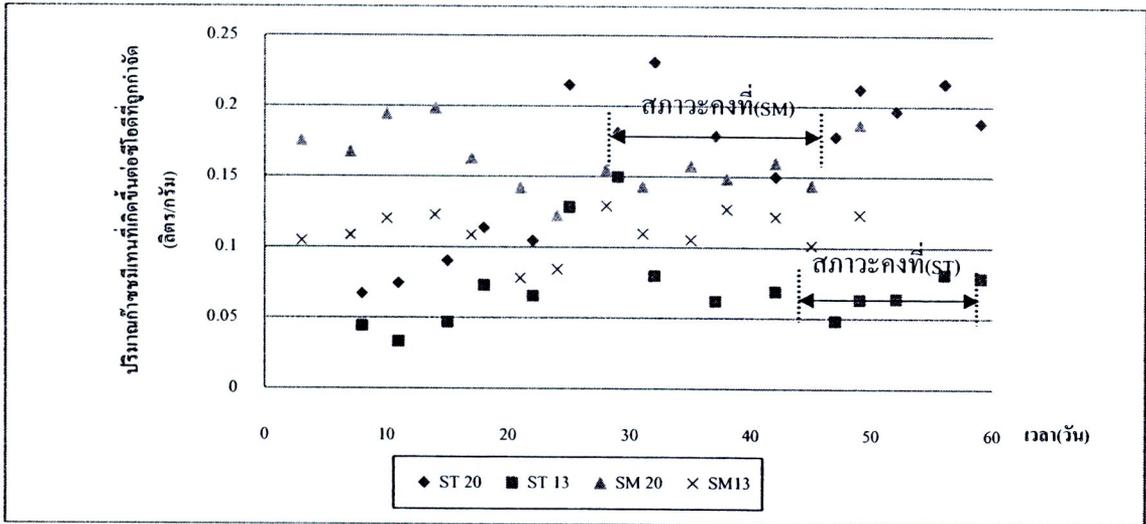


รูปที่ 4.21 ปริมาณซีโอดีจากชุดการทดลองเทอร์โมฟิลิกและเมโซฟิลิกที่ระยะเวลาเก็บกักต่างๆ (ข้อมูลการทดลองแสดงดังภาคผนวก ค.และง. ตาราง ค.3 และ ง.3)

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของชุดการทดลองในหัวข้อการศึกษานี้ พบว่า ภาพรวมของระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีต่ำกว่าชุดการทดลองในหัวข้อศึกษาอื่นๆ ที่กล่าวมาในข้างต้น(รูปที่ 4.21) โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีอยู่ในช่วง 90-93% (ที่สภาวะคงที่) จากการที่ใช้ถังปฏิกรณ์แบบหนึ่งขั้นตอน ซึ่งจุลชีพในระบบทั้งสองกลุ่มต้องอาศัยอยู่ในถังเดียวกัน ส่งผลให้สภาวะโดยรวมของถังปฏิกรณ์ไม่เอื้อต่อการทำงานของจุลชีพกลุ่มใดกลุ่มหนึ่ง โดยเฉพาะ ทำให้จุลชีพแต่ละกลุ่มทำงานได้อย่างไม่เต็มที่เท่าที่ควร ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่ได้จึงต่ำกว่าระบบถังปฏิกรณ์แบบสองขั้นตอนที่มีการแยกถังระหว่างถังสร้างกรดและถังสร้างก๊าซมีเทน ซึ่งเอื้อต่อการทำงานของจุลชีพแต่ละกลุ่ม โดยการควบคุมพีเอชของแต่ละถังให้เหมาะสมตามชนิดของจุลชีพภายในถังนั้นๆ นอกจากนี้ถังปฏิกรณ์แบบสองขั้นตอนนี้ยังมีความเหมาะสมมากในกรณีที่สารป้อนมีลักษณะเป็นของแข็ง ซึ่งอัตราจำกัดความเร็วของการเกิดปฏิกิริยาจะอยู่ในช่วงไฮโดรไลซิส เมื่อใช้ระบบถังปฏิกรณ์แบบสองขั้นตอนโดยใช้ถังสร้างกรดที่สภาวะเทอร์โมฟิลิกกับสารป้อนที่มีลักษณะเช่นนี้ จะช่วยเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายให้เกิดได้เร็วขึ้น ซึ่งทำให้ระบบใช้ระยะเวลาในการหมักย่อยสั้นลงตามไปด้วย

4.4.4 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดและของแข็งระเหยที่เดิม

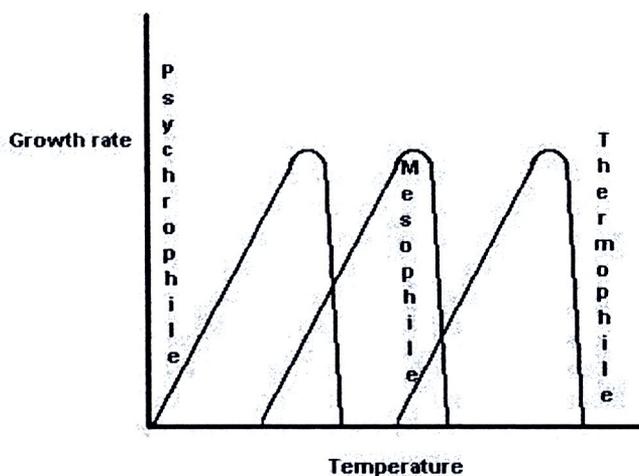
จากการทดลอง เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ พบว่า ถังปฏิกรณ์แบบหนึ่งขั้นตอนที่สภาวะเทอร์โมฟิลิคระยะเวลาเก็บกัก 20 และ 13 วัน มีค่าปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดเท่ากับ 0.20 ± 0.02 และ 0.07 ± 0.01 ลิตรต่อกรัม ตามลำดับ และที่สภาวะเมโซฟิลิก มีค่าปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดเท่ากับ 0.16 ± 0.02 และ 0.12 ± 0.01 ลิตรต่อกรัม ตามลำดับ โดยสภาวะเทอร์โมฟิลิกให้ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดสูงกว่าที่สภาวะเมโซฟิลิกอย่างเห็นได้ชัด ที่ระยะเวลาเก็บกัก 20 วัน แสดงดังรูปที่ 4.22 ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับงานวิจัยของ *Vindis et al. (2009)* ซึ่งได้นำต้นข้าวโพดหมักชนิดต่างๆมาทำการศึกษาผลของสภาวะเทอร์โมฟิลิกและเมโซฟิลิกต่อการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้กระบวนการหมักย่อยไร้อากาศ พบว่าที่สภาวะเทอร์โมฟิลิกสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงกว่าสภาวะเมโซฟิลิกและใช้ระยะเวลาในการหมักย่อยสั้นกว่าถึง 4 เท่า



รูปที่ 4.22 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัดโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบหนึ่ง ขั้นตอนทีละระยะเวลาเก็บกักและอุณหภูมิต่างกัน (ข้อมูลการทดลองแสดงดังภาคผนวก ก. ตาราง ก.2)

ผลการทดลองที่ได้เมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่นแล้ว พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ *Pornpan et al. (2010)* ซึ่งทำการศึกษาการหมักย่อยกากมันสำปะหลังร่วมกับมูลสุกรที่สภาวะไร้อากาศ โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบหนึ่งขั้นตอนที่สภาวะเมโซฟิลิกที่ระยะเวลาเก็บกัก 15 วัน ที่ปริมาณของแฉ่งเข้าสู่ระบบ $5.3 \pm 0.1\%$ มีปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อของแฉ่งระเหยที่เข้าสู่ระบบเท่ากับ 0.208 ± 0.091 มิลลิตรต่อกรัม ซึ่งมีค่าน้อยกว่าชุดการทดลอง SM 20 ซึ่งให้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อของแฉ่งระเหยที่เข้าสู่ระบบ 0.300 ± 0.002 ลิตรต่อกรัม โดยใช้ปริมาณของแฉ่งเข้าสู่ระบบเท่ากับ 4% อาจเนื่องมาจากมันสำปะหลังที่ใช้เป็นสารป้อนและปริมาณของแฉ่งที่เข้าสู่ระบบมีลักษณะแตกต่างกัน

จากการทดลองที่สภาวะเทอร์โมฟิลิกและเมโซฟิลิก เมื่อพิจารณาถึงจุลชีพกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนกลุ่มต่างๆ จุลชีพในกลุ่มเทอร์โมฟิลิกมีอัตราการเจริญเติบโต (Growth rate) สูงกว่าจุลชีพในกลุ่มเมโซฟิลิก (*John Heritage, 2006*) (รูปที่ 4.23) และที่อุณหภูมิต่างกันก็ทำให้ความสามารถในการทำปฏิกิริยาต่างกันตามไปด้วย



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเจริญเติบโตของจุลชีพกลุ่มต่างๆกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป

เมื่อเปรียบเทียบค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ถึงปฏิกรณ์แบบหนึ่งขั้นตอนเช่นเดียวกัน พบว่าที่สภาวะเทอร์โมฟิลิกให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงกว่าที่สภาวะเมโซฟิลิก และต้องการสภาพแวดล้อมที่ต่ำกว่าสภาวะเมโซฟิลิกอีกด้วย การเลือกใช้อุณหภูมิในการหมักย่อยที่สูงขึ้นก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพซึ่งนอกจากจะเป็นการเร่งการเกิดปฏิกิริยาต่างๆแล้วยังเป็นการลดระยะเวลาหมักย่อยรวมไปถึงขนาดของระบบได้ นอกจากนี้ถึงปฏิกรณ์แบบสองขั้นตอนที่ประกอบด้วยถังสร้างกรดที่สภาวะเทอร์โมฟิลิกและถังสร้างก๊าซมีเทนที่สภาวะเมโซฟิลิก น่าจะทำให้ขนาดของระบบดังกล่าวเล็กกว่าระบบที่ประกอบด้วยถังปฏิกรณ์ที่ทำงานที่สภาวะเมโซฟิลิกทั้งสองถังมาก แต่เมื่อพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและการดำเนินระบบแล้วที่สภาวะเทอร์โมฟิลิกมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าระบบที่ทำงานที่สภาวะเมโซฟิลิก เนื่องจากต้องมีการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ถังสร้างกรดและต้องการการดูแล บำรุงรักษาระบบมากเป็นพิเศษ ดังนั้นการดำเนินระบบด้วยถังปฏิกรณ์ที่สภาวะเทอร์โมฟิลิกจึงยังไม่เป็นที่นิยมนักในการหมักย่อยเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพประเทศไทย

จากการศึกษาทดลองในหัวข้อต่างๆที่ได้กล่าวมาข้างต้น เมื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกันระหว่างถังปฏิกรณ์แบบสองขั้นตอนที่ประกอบด้วยถังสร้างกรดสภาวะเทอร์โมฟิลิกและถังสร้างก๊าซมีเทนที่สภาวะเมโซฟิลิก ถึงปฏิกรณ์แบบหนึ่งขั้นตอนสภาวะเทอร์โมฟิลิกและสภาวะเมโซฟิลิก ที่ระยะเวลาเก็บกัก 20 วัน พบว่า ถังปฏิกรณ์ทั้งสามมีค่าปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดเท่ากับ 0.55 ± 0.03 , 0.20 ± 0.02 และ 0.16 ± 0.02 ลิตรต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งถังปฏิกรณ์แบบสองขั้นตอนและถังปฏิกรณ์แบบหนึ่งขั้นตอนสภาวะเทอร์โมฟิลิกให้ค่าดังกล่าวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P > 0.05$) และมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากถังปฏิกรณ์แบบหนึ่งขั้นตอนสภาวะเมโซฟิลิก แต่

เมื่อพิจารณาถึงระยะเวลาเก็บกักที่ 13 วัน ถึงปฏิกรณ์แบบสองชั้นตอนๆ ถึงปฏิกรณ์แบบหนึ่งชั้นตอนสภาวะเทอร์โมฟิลิกและสภาวะเมโซฟิลิก ให้ค่าปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดเท่ากับ 0.37 ± 0.04 , 0.07 ± 0.01 และ 0.12 ± 0.01 ลิตรต่อกรัม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากเวลากักเก็บที่ 20 วันซึ่งมีอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ที่ต่ำกว่าชุดการทดลองที่ใช้ถึงปฏิกรณ์แบบสองชั้นตอนให้ค่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดต่ำกว่าที่ระยะเวลา 20 วันเพียงเล็กน้อย แต่ถึงปฏิกรณ์แบบหนึ่งชั้นตอนทั้งสองสภาวะโดยเฉพาะที่สภาวะเทอร์โมฟิลิกมีค่าดังกล่าวแตกต่างจากที่ระยะเวลาเก็บกัก 20 วันอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าถึงปฏิกรณ์แบบสองชั้นตอนมีความสามารถในการรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้สูงกว่าชุดการทดลองที่ใช้ถึงปฏิกรณ์แบบหนึ่งชั้นตอน โดยปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดของถึงปฏิกรณ์แบบหนึ่งชั้นตอนที่ระยะเวลาเก็บกัก 13 วัน ที่สภาวะเมโซฟิลิกให้ค่าสูงกว่าที่สภาวะเทอร์โมฟิลิก อาจเนื่องมาจากที่สภาวะเมโซฟิลิกระบบมีเสถียรภาพมากกว่า ดังนั้นการปรับลดระยะเวลาเก็บกักของระบบจึงมีผลต่อระบบน้อยกว่าที่สภาวะเทอร์โมฟิลิก

นอกจากนี้การใช้ถึงปฏิกรณ์แบบสองชั้นตอนยังทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากกว่าถึงปฏิกรณ์แบบหนึ่งชั้นตอน สังเกตได้จากที่ระยะเวลาเก็บกักเท่ากันที่ 20 วัน ค่าสภาพค้างของถึงปฏิกรณ์แบบสองชั้นตอนมีค่าประมาณ 2,700-2,900 มก. CaCO_3 /ลิตร ซึ่งมีปริมาณสูงกว่าถึงปฏิกรณ์แบบหนึ่งชั้นตอนที่มีค่าความเป็นอยู่ประมาณ 2,300-2,700 มก. CaCO_3 /ลิตร ทำให้อัตราส่วนระหว่างปริมาณกรดไขมันระเหยต่อปริมาณสภาพค้างในถึงปฏิกรณ์แบบสองชั้นตอนมีค่าต่ำกว่าถึงปฏิกรณ์แบบหนึ่งชั้นตอน ส่งผลให้ระบบมีกำลังบัฟเฟอร์สูงกว่าจึงมีเสถียรภาพมากกว่า จึงอาจกล่าวได้ว่าการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้ระบบหมักย่อยแบบไร้ออกซิเจน โดยใช้ระบบถึงปฏิกรณ์แบบสองชั้นตอนเป็นระบบที่มีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีการแยกถึงสร้างกรดและถึงสร้างก๊าซมีเทนออกจากกันเพื่อเอื้อต่อการทำงานของจุลชีพแต่ละกลุ่มอย่างชัดเจน และมีการให้ความร้อนในถึงสร้างกรดเพื่อเป็นการเร่งปฏิกิริยาในการย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อง่ายต่อการทำงานของจุลชีพที่นำสารอินทรีย์ไปผลิตเป็นก๊าซชีวภาพต่อไป