

บทที่ 4

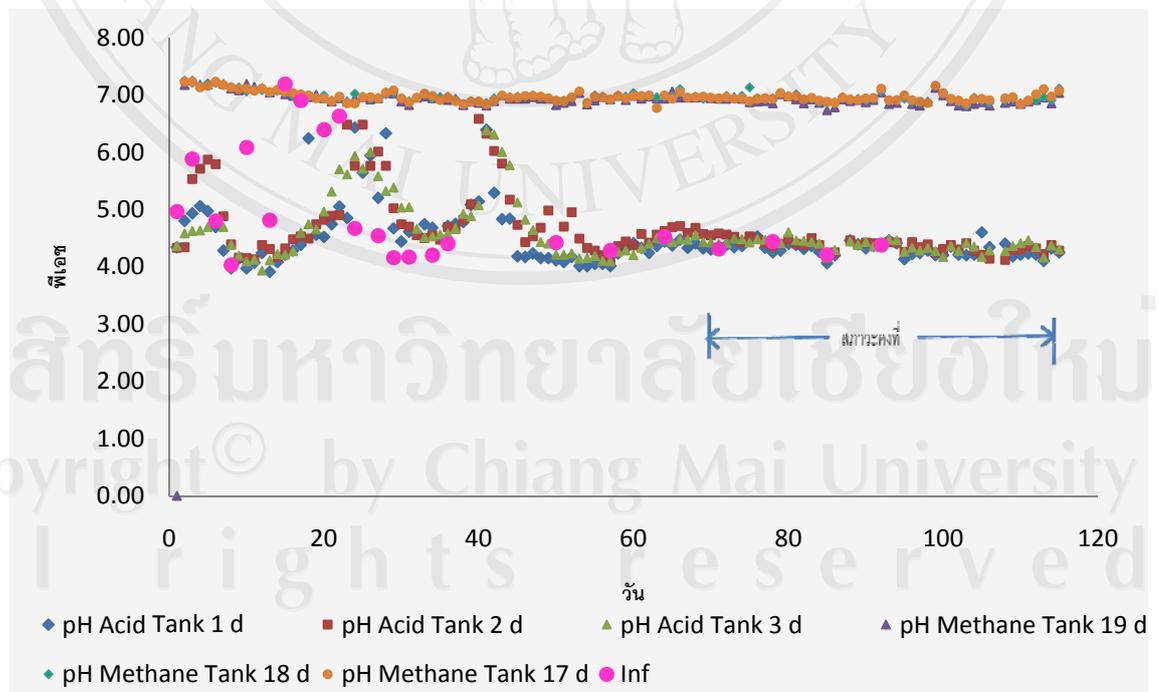
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดลองเพื่อศึกษาผลของเวลาเก็บกักต่อการสร้างกรดไขมันระเหยและก๊าซชีวภาพจากต้นข้าว โปดหมักในถังปฏิกรณ์ระดับห้องปฏิบัติการ แสดงได้ดังต่อไปนี้

4.1 การทดลองส่วนที่ 1 : ผลของเวลาเก็บกักต่อประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ CSTR แบบสองขั้นตอนภายใต้สภาวะ Thermophilic-Mesophilic

4.1.1 พีเอช

พีเอชของสารป้อนเข้าสู่ระบบมีค่าอยู่ในช่วง 4.03-7.19 ค่าพีเอชของน้ำออกจากถังสร้างกรดเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่มีค่าอยู่ในช่วง 4.01-4.60, 4.12-4.95 และ 4.09-4.60 ที่เวลาเก็บกัก 1, 2 และ 3 วันตามลำดับ และค่าพีเอชของน้ำออกจากถังสร้างมีเทนเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่มีค่าอยู่ในช่วง 6.73-7.12, 6.81-7.15 และ 6.77-7.16 ที่เวลาเก็บกัก 19, 18 และ 17 วันตามลำดับ (รูปที่ 4.1)

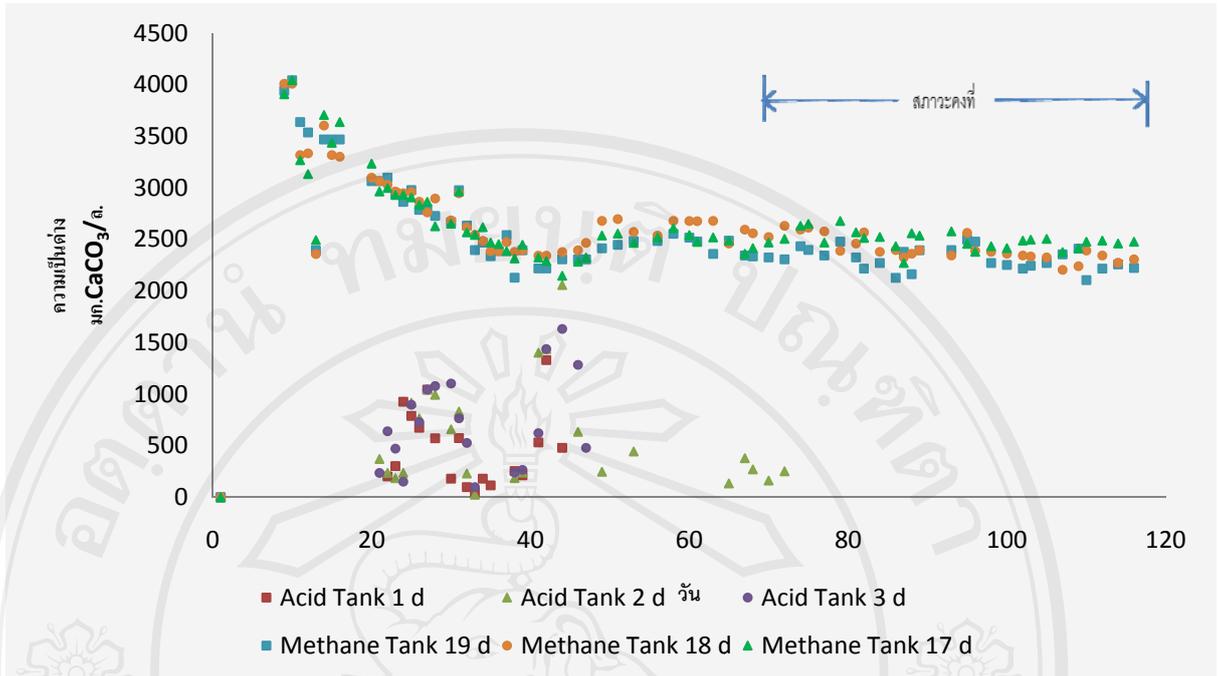


รูปที่ 4.1 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งจากระบบตลอดระยะเวลาการทดลองของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3

จากผลของค่าพีเอช จะเห็นได้ว่าค่าพีเอชของถังสร้างกรดในช่วงแรกของการทดลองมีความแปรปรวนสูง ทั้งนี้เนื่องมาจากสารป้อนเข้าระบบมีค่าพีเอชไม่สม่ำเสมอเนื่องจากพีชหมักที่ใช้มีลักษณะสมบัติแตกต่างกัน กล่าวคือ พีชหมักที่อยู่ในถังเก็บส่วนบนจะมีลักษณะแห้งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงทำให้ของเหลวที่เกิดขึ้นไหลลงส่วนล่างจึงไม่ค่อยมีสภาพเป็นกรด เมื่อนำพีชหมักส่วนนี้ซึ่งมีค่าความเป็นกรดต่ำ (พีเอช 5.8-7.2) มาใช้จึงส่งผลต่อการทำงานของแบคทีเรียสร้างกรดที่ไม่สามารถปรับตัวได้ทัน เนื่องจากพีเอชที่เหมาะสมสำหรับแบคทีเรียสร้างกรดมีค่าอยู่ในช่วง 4.5-5.5 เมื่อสารป้อนมีพีเอชมากกว่าช่วงที่เหมาะสม แบคทีเรียจึงเกิดการยับยั้ง ดังนั้นจึงทำการควบคุมค่าพีเอชของสารป้อนเข้าระบบให้มีค่าคงที่มากขึ้น โดยกำจัดพีชหมักส่วนบนปริมาณประมาณร้อยละ 20 ของปริมาตรถังซึ่งเป็นพีชหมักส่วนที่มีลักษณะแห้งทิ้งไป ส่งผลให้ค่าพีเอชของสารป้อนในถังสร้างกรดเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ ส่วนการวิเคราะห์ค่าพีเอชในถังสร้างมีเทนของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 โดยผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติโดยวิธี One-way ANOVA พบว่ามีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% คือมีค่า 6.93 ± 0.10 , 6.98 ± 0.09 และ 6.97 ± 0.09 ตามลำดับ ค่าพีเอชดังกล่าวอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการทำงานของแบคทีเรีย โดยค่าพีเอชจากการทดลองสอดคล้องกับรายงานซึ่งพบว่าแบคทีเรียในกระบวนการสร้างมีเทนของกระบวนการบำบัดแบบไร้ออกซิเจนจะสามารถทำงานได้ดีในช่วงค่าพีเอชประมาณ 7.0 (Kim et al, 2003a,b; Yu and Fang, 2002) โดยอัตราการเติบโตของแบคทีเรียในกระบวนการสร้างมีเทนจะลดลงอย่างมากเมื่อค่าพีเอชมีค่าต่ำกว่า 6.6 (Mosey และ Fernandes, 1989)

4.1.2 ความเป็นด่างและปริมาณกรดไขมันระเหย

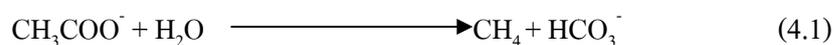
ค่าความเป็นด่างของสารป้อนเข้าระบบอยู่ในช่วง 0-81 มก. CaCO_3 /ล. ค่าความเป็นด่างของน้ำออกจากถังสร้างกรดเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่มีค่าอยู่ในช่วง 0, 0-443 และ 0 มก. CaCO_3 /ล. ที่เวลาเก็บกัก 1, 2 และ 3 วันตามลำดับ และค่าความเป็นด่างของน้ำออกจากถังสร้างมีเทนเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่มีค่าอยู่ในช่วง 2,104-2,554, 2,204-2,696 และ 2,270-2,677 มก. CaCO_3 /ล. ที่เวลาเก็บกัก 19, 18 และ 17 วันตามลำดับ (รูปที่ 4.2)

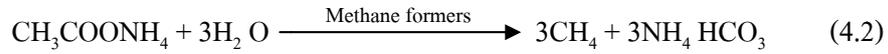


รูปที่ 4.2 ปริมาณต่างไปคาร์บอนเนตตลอดระยะเวลาการทดลองของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3

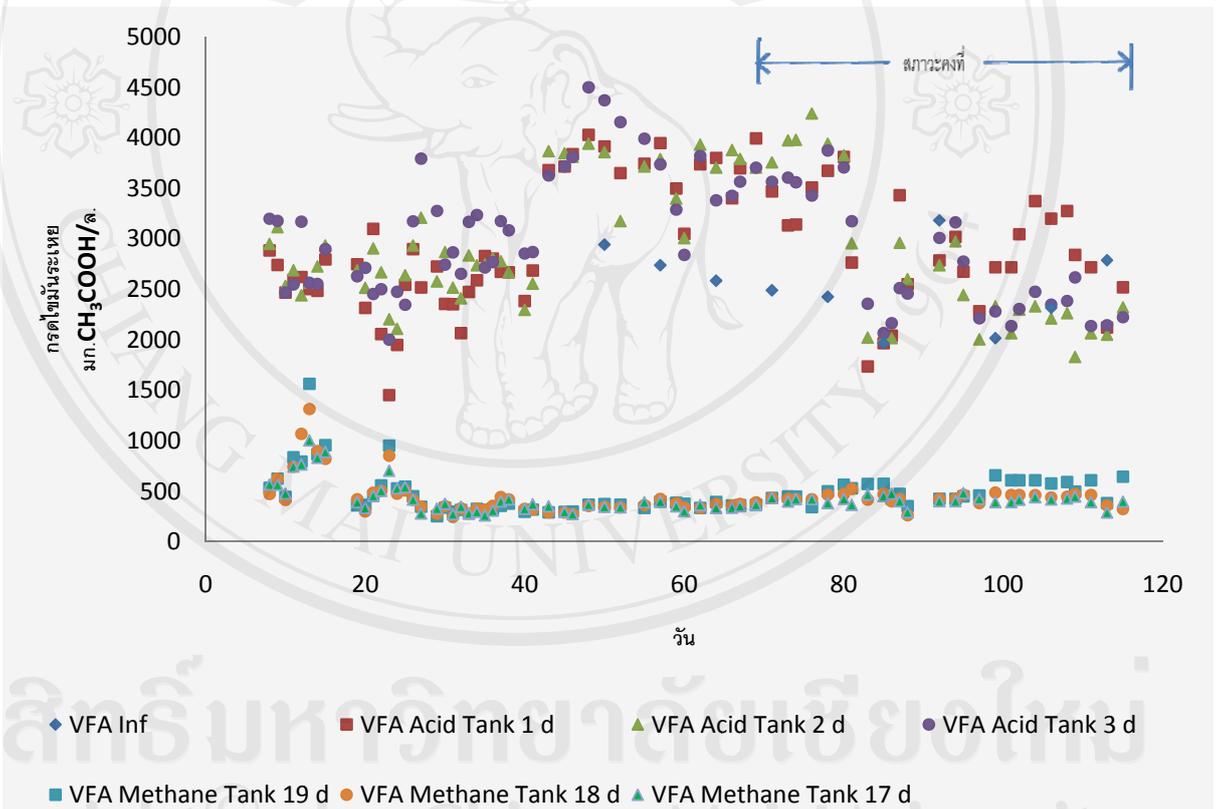
เมื่อพิจารณาปริมาณต่างในระบบ พบว่าค่าความเป็นต่างในถังสร้างกรดในช่วงแรกมีปริมาณที่ไม่คงที่โดยมีความแปรปรวนสูง ซึ่งเป็นผลมาจากสารป้อนเข้าระบบที่มีค่าพีเอชไม่สม่ำเสมอตามที่อธิบายในหัวข้อ 4.1.1 โดยหลังจากควบคุมพีเอชในน้ำเข้าระบบให้คงที่แล้วพบว่าในถังสร้างกรดแทบไม่พบค่าความเป็นต่าง ส่วนในถังสร้างมีเทนพบค่าความเป็นต่างในช่วงแรกมีค่าสูงแล้วจึงค่อยๆ ลดลงจนเข้าสู่สถานะคงที่ โดยค่าความเป็นต่างที่มีค่าสูงในช่วงแรกนี้น่าจะเป็นผลมาจากเชื้อตั้งต้นที่ใช้

จะเห็นได้ว่า ความเป็นต่างมีค่าเพิ่มขึ้นในถังสร้างมีเทน ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการเปลี่ยนรูปของกรดไขมันระเหยไปเป็นก๊าซชีวภาพในถังสร้างก๊าซมีเทนทำให้ได้สภาพความเป็นต่างไปคาร์บอนเนตกลับคืนมา (ดังสมการที่ 4.1) ประกอบกับสารป้อนมีปริมาณของไนโตรเจนอย่างเพียงพอจึงทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์อย่างสมบูรณ์ทำให้เกิดแอมโมเนียมไปคาร์บอนเนต ซึ่งเป็นบัฟเฟอร์ที่ทำปฏิกิริยากับกรดไขมันระเหย ทำให้เกิดแอมโมเนียมอะซิเตท ($\text{CH}_3\text{COONH}_4$) ซึ่งแอมโมเนียมอะซิเตทนี้จะถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียสร้างมีเทน เกิดเป็นก๊าซมีเทนและแอมโมเนียมไปคาร์บอนเนต (ดังสมการที่ 4.2) โดยแอมโมเนียมไปคาร์บอนเนตนี้เองทำให้เกิดค่าความเป็นต่างขึ้นในถังสร้างมีเทน





ปริมาณกรดไขมันระเหยของสารป้อนเข้าระบบอยู่ในช่วง 1,964-3,182 มก. $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{ล}$. ปริมาณกรดไขมันระเหยของน้ำออกจากถังสร้างกรดเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่มีค่าอยู่ในช่วง 2,119-3,372, 1,827-2,973 และ 2,135-3,162 มก. $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{ล}$. ที่เวลาเก็บกัก 1, 2 และ 3 วันตามลำดับ และปริมาณกรดไขมันระเหยของน้ำออกจากถังสร้างมีเทนเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่มีค่าอยู่ในช่วง 381-655, 321-485 และ 286-479 มก. $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{ล}$. ที่เวลาเก็บกัก 19, 18 และ 17 วันตามลำดับ (รูปที่ 4.3)

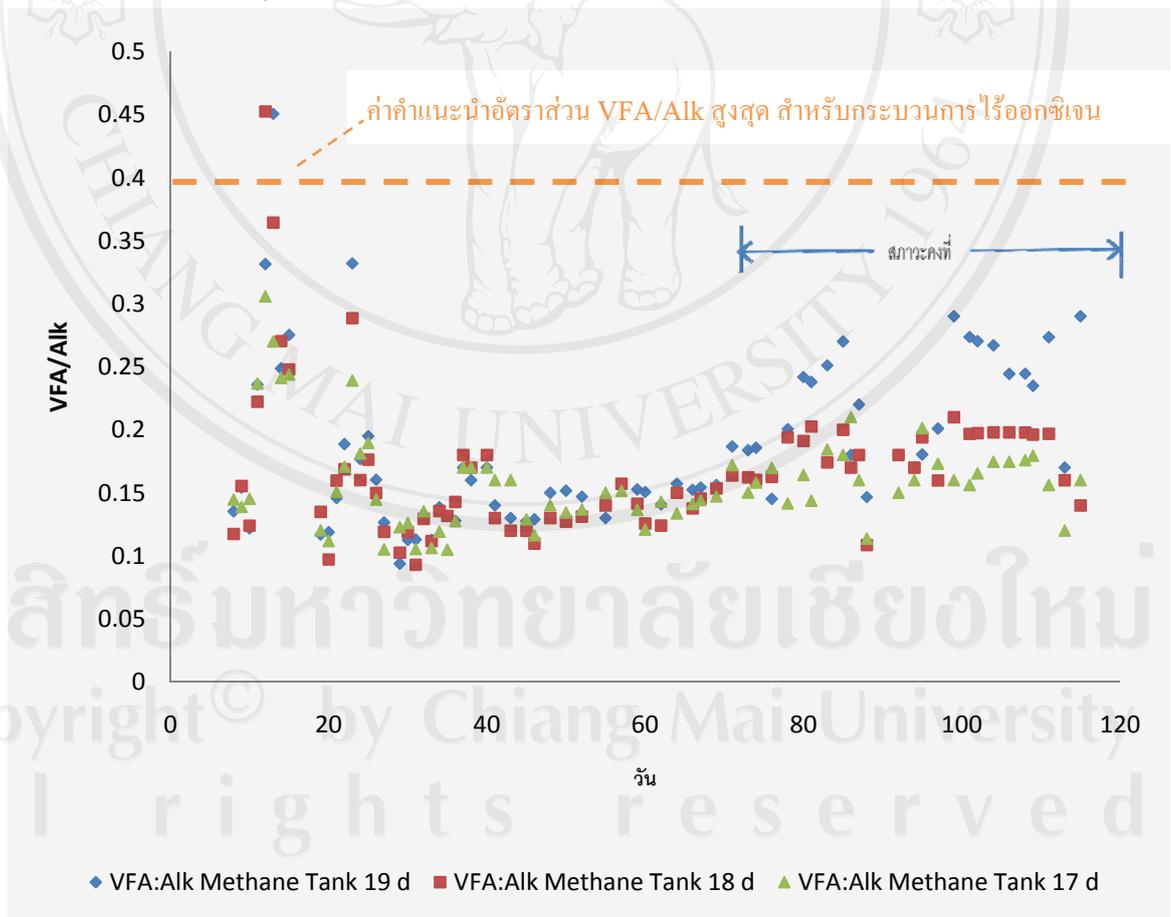


รูปที่ 4.3 ปริมาณกรดไขมันระเหยตลอดระยะเวลาการทดลองของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3

เมื่อพิจารณาปริมาณกรดไขมันระเหยในระบบ พบว่าปริมาณกรดไขมันระเหยในถังสร้างกรดมีความแปรปรวน ส่วนปริมาณกรดไขมันระเหยในถังสร้างมีเทนมีค่าค่อนข้างคงที่ จากการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันระเหยในช่วงสภาวะคงที่จากถังสร้างกรดของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ผลจากการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันระเหยทางสถิติโดยวิธี One-way ANOVA พบว่าในถัง

สร้างกรด ชุดการทดลองที่ 2 และ 3 มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ส่วนชุดการทดลองที่ 1 พบว่ามีค่าสูงกว่าชุดการทดลองที่ 2 และ 3 อย่างมีนัยสำคัญ และจากการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันระเหยในถังสร้างมีเทน พบว่ามีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

การประเมินปริมาณค่าที่ต้องเติมจากสัดส่วนระหว่างปริมาณกรดไขมันระเหยและปริมาณค่าที่มีอยู่ในระบบช่วยแก้ปัญหาการสะสมของกรดไขมันระเหย ที่จะทำให้พีเอชลดลงถ้าระบบไม่มีสภาพบัฟเฟอร์เพียงพอ โดยถ้าอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพความเป็นด่างในรูปของไบคาร์บอเนต (VFA/Alk) มีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์สูง หากอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าสูงกว่า 0.8 แสดงว่ากำลังบัฟเฟอร์ของระบบมีค่าต่ำมาก พีเอชสามารถที่จะลดลงได้อย่างรวดเร็ว จากการทดลองพบว่า อัตราส่วนระหว่างปริมาณกรดไขมันระเหยและปริมาณค่าที่มีอยู่ในระบบของถังสร้างมีเทนในช่วงสภาวะคงที่มีค่าอยู่ในช่วง ในช่วง 0.13-0.29, 0.11-0.21 และ 0.11-0.21 ที่เวลาเก็บกัก 19, 18 และ 17 วันตามลำดับ โดยมีค่าน้อยกว่า 0.4 (รูปที่ 4.4) แสดงว่าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์สูง จึงไม่จำเป็นต้องเติมค่าให้แก่ระบบ



รูปที่ 4.4 อัตราส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพความเป็นด่างในรูปของไบคาร์บอเนต (VFA/Alk) ตลอดระยะเวลาการทดลองของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3

4.1.3 องค์ประกอบกรดไขมันระเหยในถังสร้างกรด

จากผลของปริมาณกรดไขมันระเหยในถังสร้างกรดที่แสดงในหัวข้อ 4.1.2 ที่พบว่า ปริมาณกรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้นในถังสร้างกรดที่ชุดการทดลองที่ 1 (เวลาเก็บกัก 1 วัน) มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้ที่เวลาเก็บกัก 2 และ 3 วัน อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามนอกจากปริมาณกรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้น องค์ประกอบของกรดไขมันระเหยเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกปัจจัยหนึ่งในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของถังสร้างกรด จากการวิเคราะห์องค์ประกอบกรดไขมันระเหยจากถังสร้างกรดของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 พบว่ามีค่าเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งเห็นได้ว่า กรดอะซิติกเป็นองค์ประกอบหลัก สอดคล้องกับการรายงานของ Wang et al, 1999 ที่ใช้วิธีการแตกตัวด้วยอัลตราโซนิก ร่วมกับการบำบัดโดยการให้ความร้อนและการแช่แข็ง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยการบำบัดขั้นต้น พบว่ากรดอะซิติกมักมีความเข้มข้นสูงกว่ากรดไขมันตัวอื่นในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน แต่กรดโพโรไฟอีนิกและกรดบิวทิริกกลับเป็นตัวยับยั้ง Methanogens จากการวิเคราะห์องค์ประกอบกรดไขมันระเหยในช่วงสภาวะคงที่จากถังสร้างกรดของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 (ตารางที่ 4.1) ผลจากการวิเคราะห์ปริมาณกรดอะซิติกทางสถิติโดยวิธี One-way ANOVA พบว่าชุดการทดลองที่ 1 และ 2 มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แต่ปริมาณกรดอะซิติกที่ได้ในชุดการทดลองที่ 3 มีค่าน้อยกว่าอย่างมีนัยสำคัญ สอดคล้องกับ Bouallagui et al, 2004 ได้ทำการทดลองโดยใช้เศษผักและผลไม้บำบัดด้วยกระบวนการไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนโดยถังปฏิกรณ์ ASBR ดำเนินการภายใต้สภาวะ Mesophilic ทำการแปรค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ในถังสร้างกรด ซึ่งกำหนดให้ระยะเวลาเก็บกักคงที่ แล้วพบว่า ถังสร้างกรดที่มีค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงสุด ซึ่งมีค่า 10 ± 0.03 gCOD/L.d มีปริมาณกรดอะซิติกสูงสุด จึงสรุปว่ากรดอะซิติกเป็นผลิตภัณฑ์หลักในสภาวะที่ค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูง เนื่องจากกระบวนการสร้างมีเทนส่วนใหญ่ต้องการใช้กรดอะซิติกเป็นสารตั้งต้น การเปลี่ยนรูปของกรดยูริกในข้าวโพดหมักเป็นกรดอะซิติกแสดงให้เห็นถึงการทำงานของแบคทีเรียสร้างกรดในถังสร้างกรด ประกอบกับจากการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันระเหยแล้วพบว่าถังสร้างกรดของชุดการทดลองที่ 1 มีปริมาณกรดไขมันระเหยสูงสุด ซึ่งระยะเวลาเก็บกักของชุดการทดลองที่ 1 บ่งบอกถึงขนาดของถังปฏิกรณ์ที่เล็กกว่าชุดการทดลองที่ 2 เป็นเท่าตัว ดังนั้น ระยะเวลาเก็บกัก 1 วันในถังสร้างกรดของชุดการทดลองที่ 1 จึงเป็นระยะเวลาเก็บกักที่เหมาะสมที่สุดสำหรับถังสร้างกรด

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบกรดไขมันระเหยในถังสร้างกรด
(วัดจากตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่าง ในช่วงสภาวะคงที่)

การทดลองที่	องค์ประกอบกรดไขมันระเหย			
	Acetic acid (ppm)	Propionic acid (ppm)	Isobutyric acid (ppm)	Butyric acid (ppm)
1 ถังสร้างกรด เวลาเก็บกัก 1 วัน	1731.5±203.7	15.5±6.7	2.6±2.7	10.4±1.7
2 ถังสร้างกรด เวลาเก็บกัก 2 วัน	1811.9±156.1	15.8±1.9	ตรวจไม่พบ	5.0±2.5
3 ถังสร้างกรด เวลาเก็บกัก 3 วัน	1140.5±93.2	14.0±3.9	ตรวจไม่พบ	10.6±7.0

4.1.4 ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS)

ของแข็งของสารป้อนเข้าระบบ มีค่าอยู่ในช่วง 35,483 - 46,341 มก./ล. ส่วนค่าของแข็งทั้งหมดของน้ำออกจากถังสร้างกรดเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่มีค่าอยู่ในช่วง 31,130 - 42,100, 29,307 - 42,712 และ 24,140 - 43,117 มก./ล. ที่เวลาเก็บกัก 1, 2 และ 3 วันตามลำดับ และค่าของแข็งทั้งหมดของน้ำออกจากถังสร้างมีเทนเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่มีค่าอยู่ในช่วง 3,106 - 6,212, 3,404 - 6,152 และ 2,596 - 6,989 มก./ล. ที่เวลาเก็บกัก 19, 18 และ 17 วันตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งรวม ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ และประสิทธิภาพในการกำจัด TS
ของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3

ชุดการทดลอง	ถังสร้างกรด		ถังสร้างก๊าซมีเทน		ประสิทธิภาพในการกำจัด TS (%)
	เวลาเก็บกัก (วัน)	การบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ของแข็งระเหยต่อลิตร-วัน)	เวลาเก็บกัก (วัน)	การบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ของแข็งระเหยต่อลิตร-วัน)	
1	1	36.6	19	1.7	89.6±2.1
2	2	17.3	18	1.8	90.4±1.8
3	3	12.2	17	1.9	89.7±2.9

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ที่สภาวะคงที่ ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติโดยวิธี One-way ANOVA พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งนี้เนื่องมาจากการระเหยของเสียจากถังสร้างมีเทน เป็นการระเหยของเสียเฉพาะส่วนน้ำด้านบน (Supernatant) ที่มีปริมาณตะกอนอยู่น้อย

4.1.5 ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด (TVS)

ของแข็งระเหยของสารป้อนเข้าระบบ มีค่าอยู่ในช่วง 30,161 - 40,278 มก./ล. ส่วนค่าของแข็งระเหยทั้งหมดของน้ำออกจากถังสร้างกรดเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่มีค่าอยู่ในช่วง 29,662 - 37,374, 24,911 - 36,943 และ 28,762 - 38,171 มก./ล. ที่เวลาเก็บกัก 1, 2 และ 3 วันตามลำดับ และค่าของแข็งระเหยทั้งหมดของน้ำออกจากถังสร้างมีเทนเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่มีค่าอยู่ในช่วง 1,600 - 3,727, 1,550 - 3,692 และ 1,650 - 4,725 มก./ล. ที่เวลาเก็บกัก 19, 18 และ 17 วันตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหย ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ และประสิทธิภาพในการกำจัด TVS ของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3

ชุดการทดลอง	ถังสร้างกรด		ประสิทธิภาพในการกำจัด TVS ในถังสร้างกรด (%)	ถังสร้างก๊าซมีเทน		ประสิทธิภาพในการกำจัด TVS ของระบบ (%)
	เวลาเก็บกัก (วัน)	การบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ของแข็งระเหยต่อลิตร-วัน)		เวลาเก็บกัก (วัน)	การบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ของแข็งระเหยต่อลิตร-วัน)	
1	1	36.61	11.0±7.8	19	1.71	93.4±1.7
2	2	17.28	14.0±9.3	18	1.76	93.9±2.2
3	3	12.19	11.5±10.0	17	1.92	93.2±2.8

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยในถังสร้างกรดของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ที่สภาวะคงที่ ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติโดยวิธี One-way ANOVA พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จะเห็นได้ว่า มีการกำจัดของแข็งระเหย

ในถังสร้างกรด โดยเกิดจากการที่แบคทีเรียสร้างกรดเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์บางส่วนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ค่าปริมาณของแข็งระเหยลดลงเล็กน้อย

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ที่สภาวะคงที่ ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติโดยวิธี One-way ANOVA พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ในระบบมีค่าไม่แตกต่างกัน

4.1.6 ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS)

ของแข็งแขวนลอยของสารป้อนเข้าระบบ มีค่าอยู่ในช่วง 7,710 - 26,372 มก./ล. ส่วนค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดของน้ำออกจากถังสร้างกรดเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่มีค่าอยู่ในช่วง 14,980 - 25,362, 17,957 - 22,131 และ 16,983 - 22,131 มก./ล. ที่เวลาเก็บกัก 1, 2 และ 3 วันตามลำดับ และค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดของน้ำออกจากถังสร้างมีเทนเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่มีค่าอยู่ในช่วง 1,358 - 2,379, 1,033 - 3,086 และ 1,756 - 2,050 มก./ล. ที่เวลาเก็บกัก 19, 18 และ 17 วันตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ และประสิทธิภาพในการกำจัด TSS ของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3

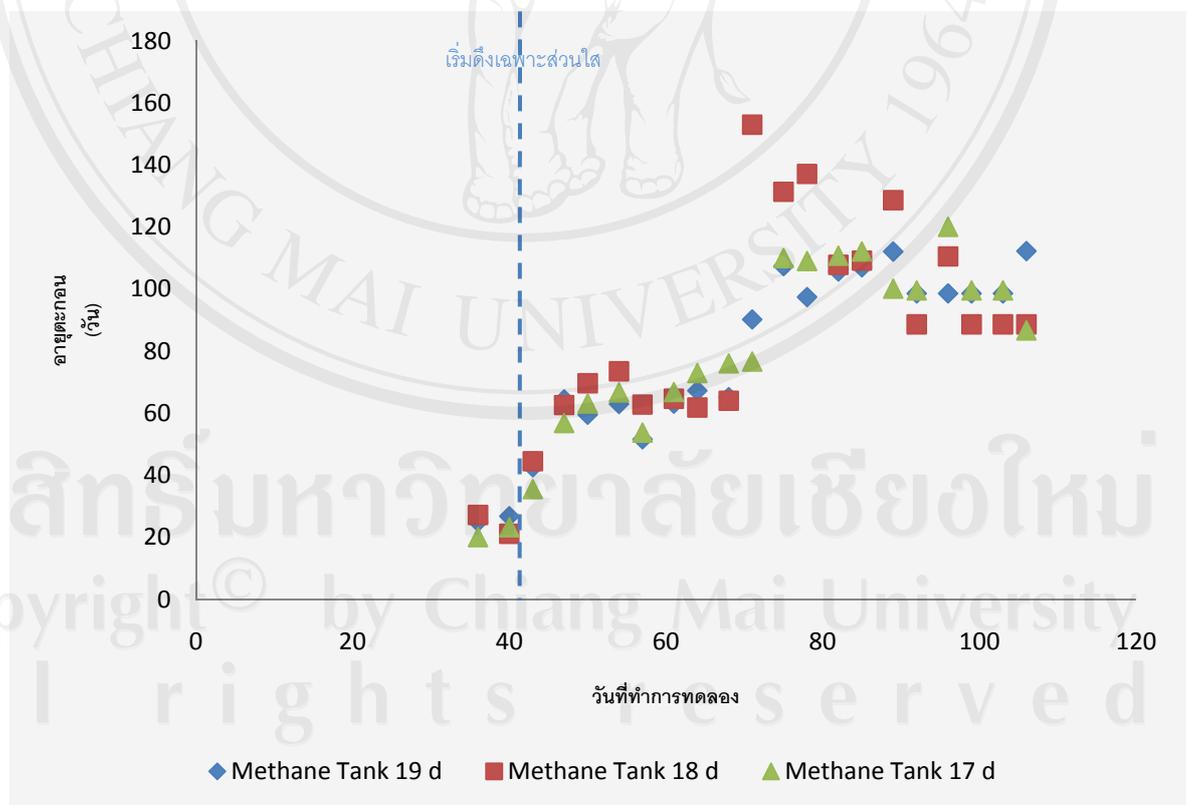
ชุดการทดลอง	ถังสร้างกรด		ถังสร้างก๊าซมีเทน		ประสิทธิภาพในการกำจัด TSS (%)
	เวลาเก็บกัก (วัน)	การบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ของแข็งระเหยต่อลิตร-วัน)	เวลาเก็บกัก (วัน)	การบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ของแข็งระเหยต่อลิตร-วัน)	
1	1	36.6	19	1.7	88.3±5.0
2	2	17.3	18	1.8	88.3±4.3
3	3	12.2	17	1.9	89.1±4.2

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ที่สภาวะคงที่ ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติโดยวิธี One-way ANOVA พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.1.7 ของแข็งแขวนลอยระเหย (TVSS)

ของแข็งแขวนลอยระเหยของสารป้อนเข้าระบบ มีค่าอยู่ในช่วง 14,426 - 25,444 มก./ล. ส่วนค่าของแข็งแขวนลอยระเหยของน้ำออกจากถังสร้างกรดเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่มีค่าอยู่ในช่วง 7,357 - 23,725, 7,436 - 21,874 และ 9,989 - 10,036 มก./ล. ที่เวลาเก็บกัก 1, 2 และ 3 วันตามลำดับ และค่าของแข็งแขวนลอยระเหยของน้ำออกจากถังสร้างมีเทนเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่มีค่าอยู่ในช่วง 500 - 996, 842 - 1,112 และ 756 - 1,050 มก./ล. ที่เวลาเก็บกัก 19, 18 และ 17 วันตามลำดับ ค่าของแข็งแขวนลอยระเหยในถังสร้างมีเทนเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่มีค่าอยู่ในช่วง 8,496 - 10,392, 9,185 - 11,228 และ 9,344 - 10,693 มก./ล. ที่เวลาเก็บกัก 19, 18 และ 17 วันตามลำดับ โดยค่าของแข็งแขวนลอยระเหยในถังสร้างมีเทนแสดงถึงปริมาณเชื้อในถังสร้างมีเทน

ในการระบายน้ำออกจากถังสร้างมีเทนในช่วงแรกของการทดลอง ทำโดยการปิดอุปกรณ์กวน แล้วระบายน้ำออกทันที ก่อให้เกิดการชะแบกที่เร็ว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและเสถียรภาพให้แก่ระบบจึงทำการเพิ่มอายุตะกอนให้แก่ระบบโดยการระบายน้ำออกจากถังสร้างมีเทนเฉพาะส่วนด้านบนที่ไม่มีตะกอน ซึ่งส่งผลให้อายุตะกอนสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.5

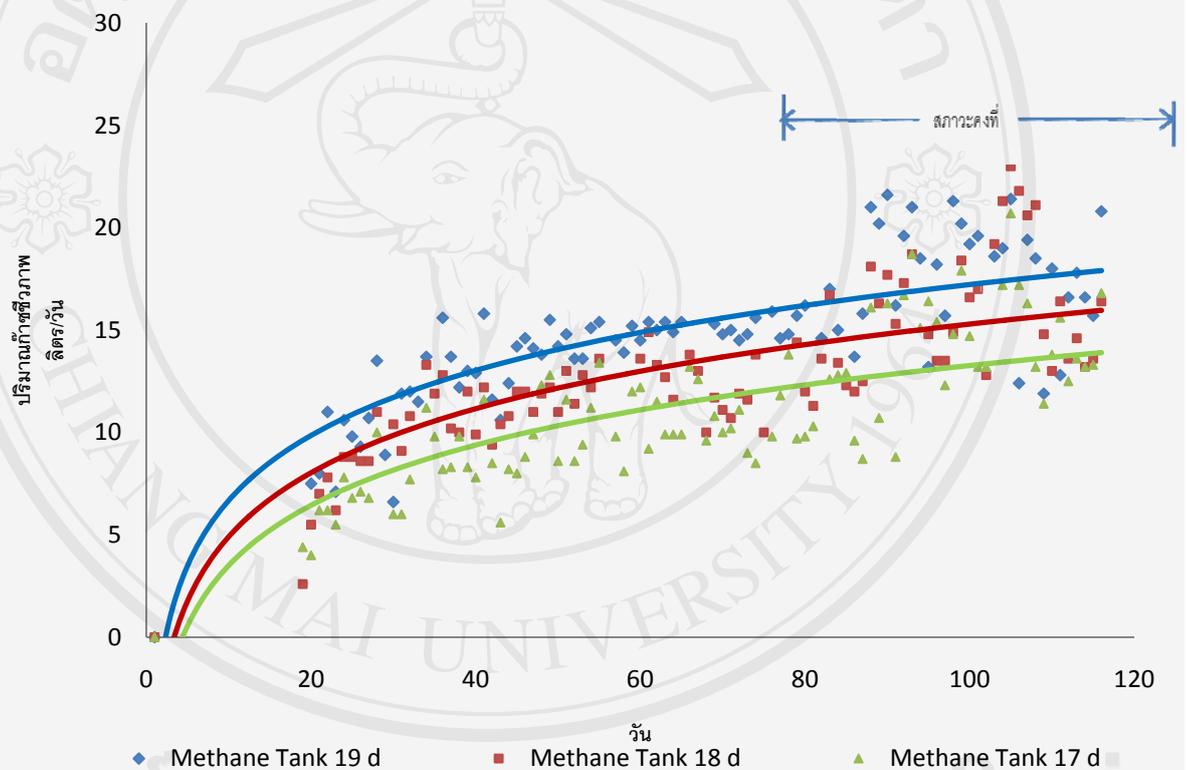


รูปที่ 4.5 อายุตะกอนของถังสร้างมีเทนของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3

ตลอดระยะเวลาการทดลอง

4.1.8 ปริมาณก๊าซชีวภาพและองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ

ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น เป็นการวัดปริมาณที่ได้จาก 3 ชุดการทดลอง โดยวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในถังสร้างมีเทนที่เวลาเก็บกัก 19, 18 และ 17 วัน ตามลำดับ ซึ่งปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากถังสร้างมีเทนมีค่าอยู่ในช่วง 6.6-21.6, 2.6-23.0 และ 4-20.7 ล./ว. ที่เวลาเก็บกัก 19, 18 และ 17 วันตามลำดับ เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากถังสร้างมีเทนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 16.5 ± 2.5 , 14.6 ± 3.1 และ 12.6 ± 2.9 ล./ว. ที่เวลาเก็บกัก 19, 18 และ 17 วันตามลำดับ (รูปที่ 4.6)

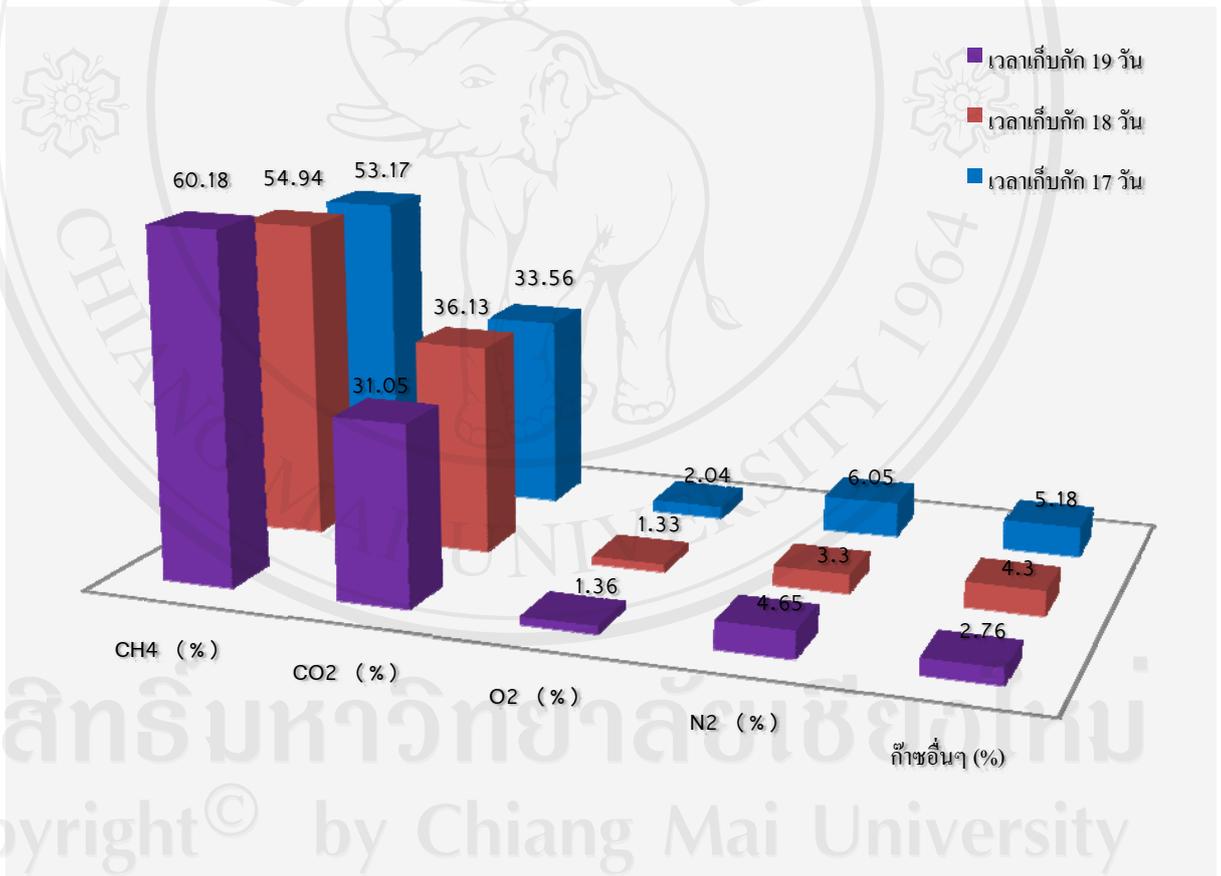


รูปที่ 4.6 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากถังสร้างมีเทนของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ตลอดระยะเวลาการทดลอง

การวิเคราะห์ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น ในช่วงแรกของการทดลอง พบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีความแปรปรวน แล้วจึงมีแนวโน้มสูงขึ้นจนเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ในวันที่ 50 ของการทดลอง โดยพบว่า ที่เวลาเก็บกัก 19 วัน มีปริมาณก๊าซชีวภาพสูงสุดในช่วงสภาวะคงที่ ดังรูปที่ 3 อาจเป็นผลมาจากระยะเวลาเก็บกัก 19 วัน เป็นระยะเวลาเก็บกักที่เหมาะสมสำหรับถังสร้างมีเทน กล่าวคือ ระยะเวลาเก็บกักเป็นตัวกำหนดอัตราภาวะบรรทุกระบบที่เวลาเก็บกัก

ลดลง อัตราการะบรทุกสารอินทรีย์มีค่าสูงขึ้น หากทำการลดระยะเวลาเก็บกักมากเกินไปอาจทำให้แบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทนเจริญเติบโตไม่ทัน เกิดการชะงักที่เรียบางส่วนเนื่องจากถูกทำลายเพราะสภาพที่ไม่สมดุล ซึ่งเห็นได้จากปริมาณก๊าซชีวภาพจากถังสร้างมีเทนที่เวลาเก็บกัก 19 วัน มีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากถังสร้างมีเทนที่เวลาเก็บกัก 18 วัน และ 17 วัน อย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$)

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพโดยเฉลี่ยของการทดลองชุดที่ 1, 2 และ 3 พบว่าประกอบด้วยก๊าซมีเทน $60.2 \pm 10.8\%$, $54.9 \pm 4.3\%$ และ $53.2 \pm 3.7\%$ ตามลำดับ โดยทั้ง 3 การทดลองมีองค์ประกอบก๊าซมีเทนที่เป็นไปตามลักษณะขององค์ประกอบก๊าซชีวภาพโดยทั่วไป ซึ่งประกอบด้วยก๊าซมีเทน 48-65%, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 36-41%, ก๊าซไนโตรเจน ไม่เกิน 17% ก๊าซออกซิเจน ไม่เกิน 1% ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 32-169 ppm และก๊าซอื่นๆ (Rasi et al, 2007) (รูปที่ 4.7)

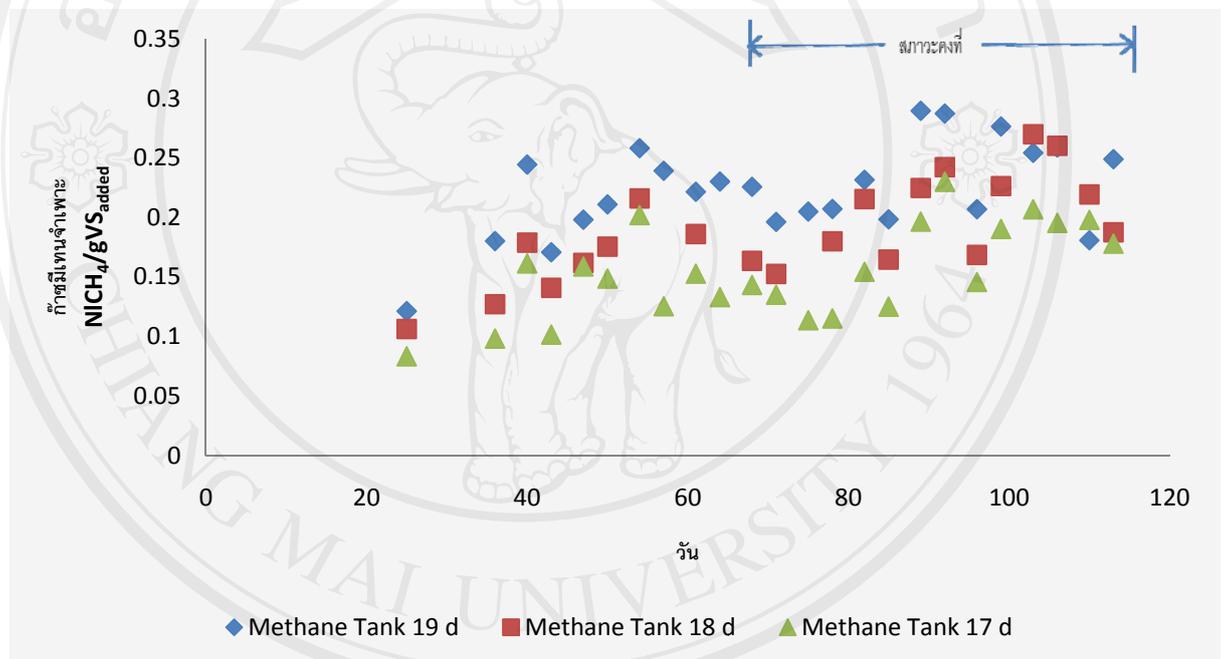


รูปที่ 4.7 องค์ประกอบก๊าซชีวภาพโดยเฉลี่ยจากถังสร้างมีเทนของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3

4.1.9 ปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนจำเพาะ

เมื่อพิจารณาการเกิดก๊าซมีเทนจำเพาะของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ที่สถานะคงที่ โดยผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติโดยวิธี One-way ANOVA พบว่าการเกิดก๊าซมีเทนจำเพาะที่ได้

จากถังสร้างมีเทนที่เวลาเก็บกัก 19 วัน มีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากถังสร้างมีเทนที่เวลาเก็บกัก 18 วัน และ 17 วัน อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.249 ± 0.032 , 0.182 ± 0.088 และ 0.174 ± 0.035 $\text{NICH}_4/\text{gVS}_{\text{added}}$ ตามลำดับ เห็นได้ว่าถังสร้างมีเทนของชุดการทดลองที่ 1 ให้ปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนจำเพาะสูงสุด แสดงให้เห็นว่าเวลาเก็บกัก 19 วันน่าจะเป็นขอบเขตของระยะเวลาเก็บกักที่เหมาะสมของถังสร้างมีเทน กล่าวคือ เมื่อให้ระยะเวลาเก็บกักต่ำกว่า 19 วัน ภายใต้สภาวะที่ทำการทดลอง จะทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพต่ำลง โดยสังเกตได้จากการทดลองชุดที่ 2 และ ชุดที่ 3 ที่มีปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนจากถังสร้างมีเทนที่ต่ำกว่า (รูปที่ 4.8)



รูปที่ 4.8 ปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนจำเพาะจากถังสร้างมีเทนของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3

เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองของ Amon et al, 2007 ซึ่งใช้ข้าวโพดหมักทำการทดลองโดยกระบวนการไร้ออกซิเจนแบบขั้นตอนเดียว ในสภาวะ Mesophilic พบว่าใช้ระยะเวลาเก็บกัก 70-80 วัน ได้ปริมาณก๊าซมีเทน 0.289 ± 0.011 $\text{NICH}_4/\text{gVS}_{\text{added}}$ ซึ่งค่าเวลาเก็บกักดังกล่าวมากกว่าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถึง 4 เท่า โดยปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นซึ่งมีค่าสูงกว่าปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นสูงสุดของการศึกษาครั้งนี้เพียงเล็กน้อย โดยอาจเป็นผลมาจากความแตกต่างของลักษณะสมบัติของต้นข้าวโพดหมักที่ใช้ในการทดลอง อีกทั้งสายพันธุ์และระยะเวลาเก็บเกี่ยวยังสามารถส่งผลกระทบต่อปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพได้อีกด้วย (Emiliano et al, 2010) ซึ่งการทดลองดังกล่าวอาจเลือกใช้ข้าวโพดสายพันธุ์ที่สำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพโดยตรง และเลือกระยะเวลาเก็บ

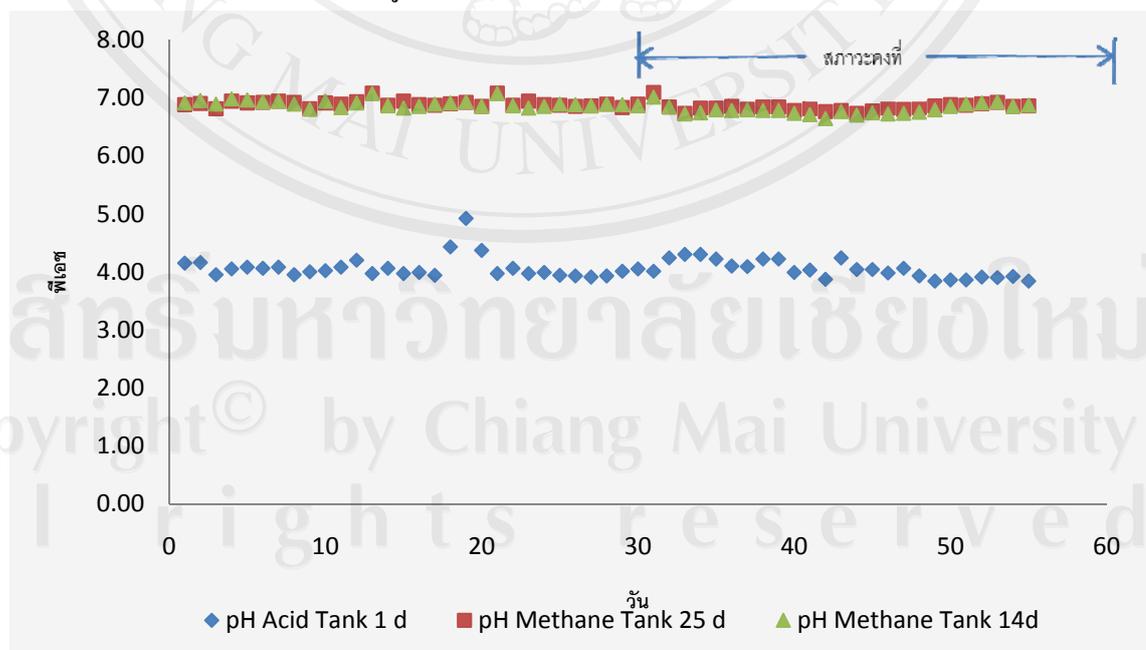
เกี่ยวข้องที่เหมาะสมกับการผลิตก๊าซชีวภาพ จึงทำให้ได้ปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนสูงกว่าการทดลองครั้ง
นี้

4.2 การทดลองส่วนที่ 2 : ผลของเวลาเก็บกักในถังสร้างมีเทนต่อประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ CSTR แบบสองขั้นตอนภายใต้สภาวะ Thermophilic-Mesophilic ที่ใช้เวลาเก็บกักของถังสร้างกรด เท่ากับ 1 วัน

จากการทดลองในส่วนที่ 1 ซึ่งสรุปได้ว่า ถังสร้างกรดที่เวลาเก็บกัก 1 วัน เป็นสภาวะ
ที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตก๊าซชีวภาพจากต้นข้าวโพดหมัก ส่วนในถังสร้างมีเทนนั้นพบว่า
ระยะเวลาเก็บกัก 19 วัน ให้ปริมาณก๊าซมีเทนจำเพาะสูงสุด ในการทดลองส่วนที่ 2 นี้ จึงเป็น
การศึกษาเพื่อหาผลของเวลาเก็บกักต่อความสามารถในการสร้างก๊าซชีวภาพของถังสร้างมีเทนที่
เวลาเก็บกักของถังสร้างกรดคงที่ที่ 1 วัน โดยแปรค่าเวลาเก็บกักในถังสร้างมีเทนเท่ากับ 14 และ 25
วัน

4.2.1 พีเอช

พีเอชของสารป้อนเข้าสู่ระบบมีค่าอยู่ในช่วง 4.13-5.69 ค่าพีเอชของน้ำออกจากถัง
สร้างกรดที่เวลาเก็บกัก 1 วันเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่มีค่าอยู่ในช่วง 3.81- 4.10 และค่าพีเอชของ
น้ำออกจากถังสร้างมีเทนเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่มีค่าอยู่ในช่วง 6.81-7.15 และ 6.77-7.16 ที่เวลา
เก็บกัก 25 และ 14 วันตามลำดับ (รูปที่ 4.9)

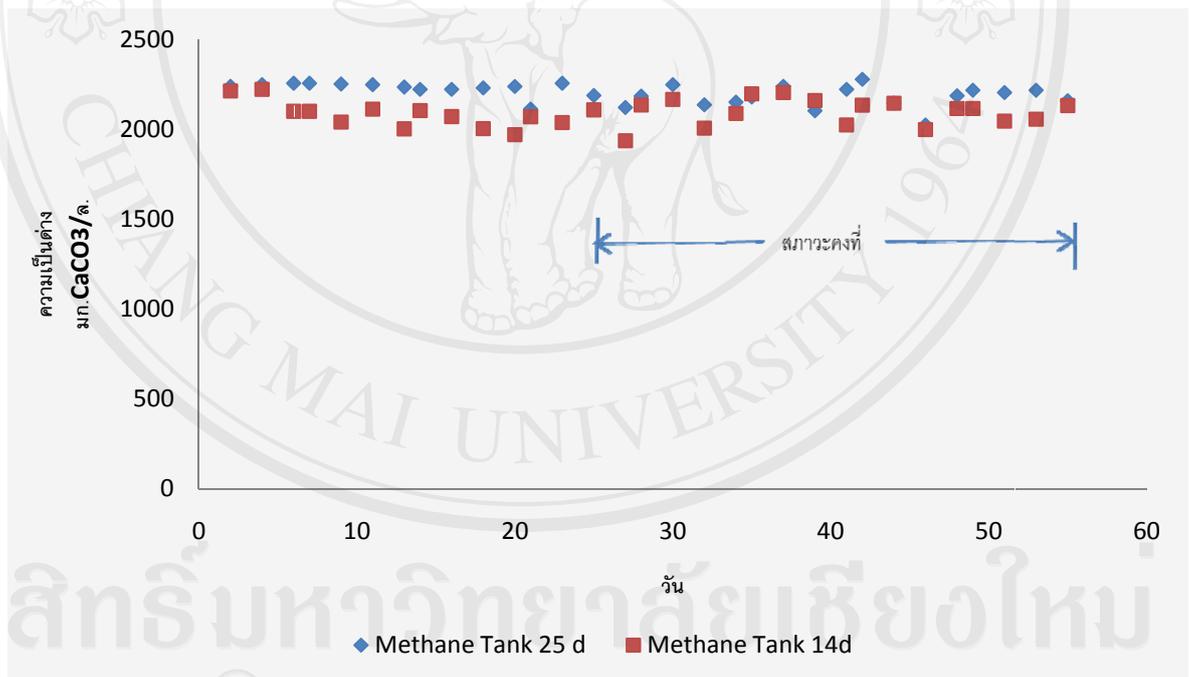


รูปที่ 4.9 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งจากระบบตลอดระยะเวลาการทดลองของชุดการทดลองที่ 4 และ 5

จะเห็นได้ว่าค่าพีเอชของน้ำออกจากถังสร้างกรดมีค่าค่อนข้างคงที่ เนื่องจากได้ทำการควบคุมค่าพีเอชของสารป้อนเข้าระบบให้มีความแปรปรวนต่ำ ส่งผลให้ค่าพีเอชของน้ำในถังสร้างกรดมีสถานะค่อนข้างคงที่ ส่วนการวิเคราะห์ค่าพีเอชในถังสร้างมีเทนของชุดการทดลองที่ 4 และ 5 โดยผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติโดยวิธี Student t-test พบว่ามีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% คือมีค่า 6.84 ± 0.07 และ 6.80 ± 0.07 ตามลำดับ

4.2.2 ความเป็นต่างและปริมาณกรดไขมันระเหย

จากการวิเคราะห์ค่าความเป็นต่างไม่พบค่าความเป็นต่างของสารป้อนเข้าระบบ และไม่พบค่าความเป็นต่างของน้ำออกจากถังสร้างกรดเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ และค่าความเป็นต่างของน้ำออกจากถังสร้างมีเทนเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่มีค่าอยู่ในช่วง 2,023-2,278 และ 1,936-2,222 มก. CaCO_3 /ล.ที่เวลาเก็บกัก 25 และ 14 วันตามลำดับ (รูปที่ 4.10)

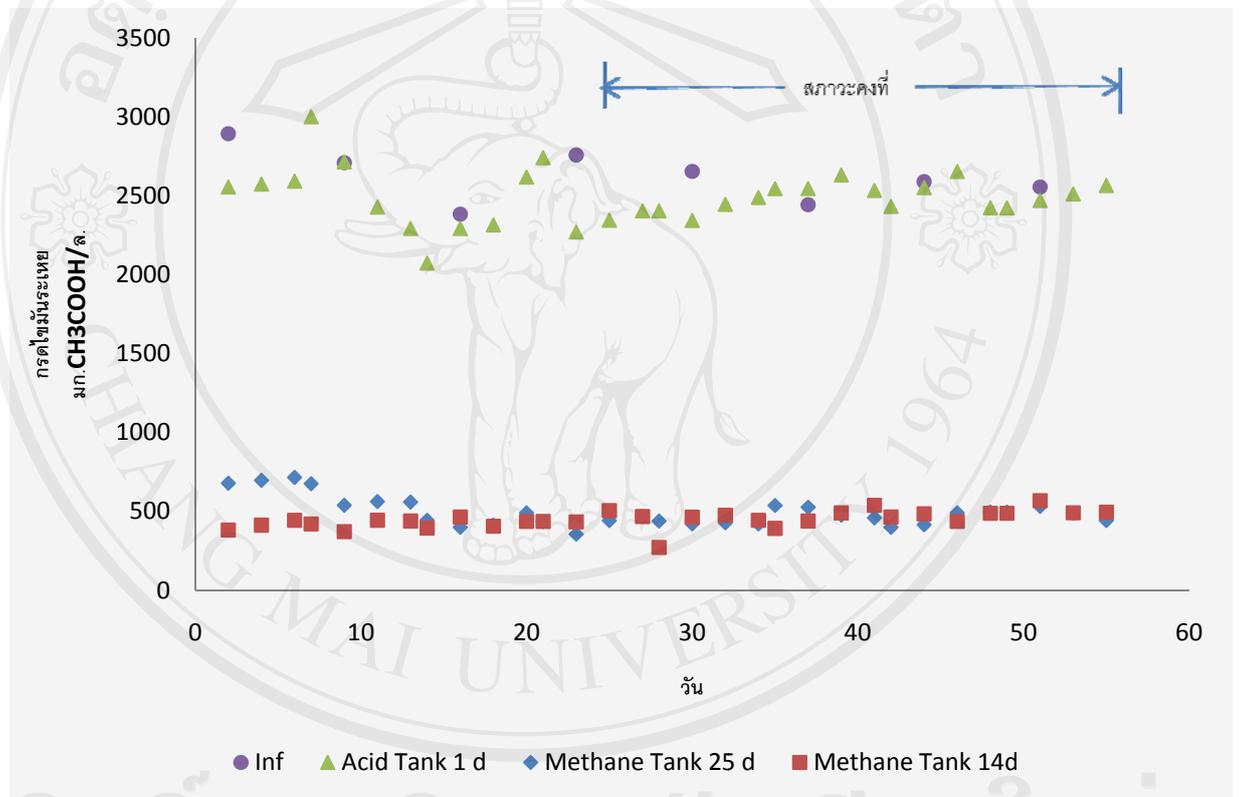


รูปที่ 4.10 ปริมาณต่างไปคาร์บอนเนตตลอดระยะเวลาการทดลองของชุดการทดลองที่ 4 และ 5

เมื่อพิจารณาปริมาณต่างในระบบ พบว่าค่าความเป็นต่างในถังสร้างกรดและถังสร้างมีเทนมีค่าค่อนข้างคงที่ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการควบคุมค่าพีเอชเข้าระบบไม่ให้ความแปรปรวน

มากนัก จึงทำให้สามารถรักษาค่าพีเอชในระบบให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการทำงานของแบคทีเรียในแต่ละถัง

ปริมาณกรดไขมันระเหยของสารป้อนเข้าระบบอยู่ในช่วง 2,383-2,893 มก. $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{ล}$. ปริมาณกรดไขมันระเหยของน้ำออกจากถังสร้างกรดเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่มีค่าอยู่ในช่วง 2,073-3,000 มก. $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{ล}$. ที่เวลาเก็บกัก 1 วัน และปริมาณกรดไขมันระเหยของน้ำออกจากถังสร้างมีเทนเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่มีค่าอยู่ในช่วง 356-716 และ 272-568 มก. $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{ล}$. ที่เวลาเก็บกัก 25 และ 14 วันตามลำดับ (รูปที่ 4.11)



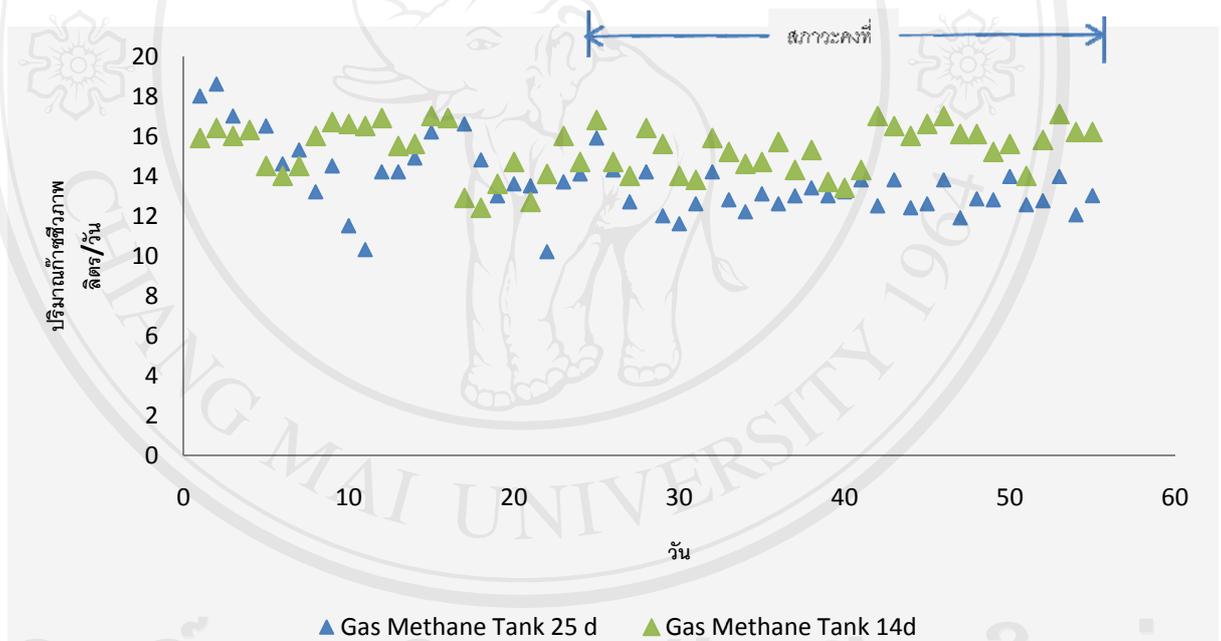
รูปที่ 4.11 ปริมาณกรดไขมันระเหยตลอดระยะเวลาการทดลองของชุดการทดลองที่ 4 และ 5

เมื่อพิจารณาปริมาณกรดไขมันระเหยในระบบเมื่อเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่าปริมาณกรดไขมันระเหยในถังสร้างกรดมีความแปรปรวนไม่มากนัก ส่วนปริมาณกรดไขมันระเหยในถังสร้างมีเทนมีค่าค่อนข้างคงที่ จากการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันระเหยในช่วงสภาวะคงที่จากถังสร้างมีเทนของชุดการทดลองที่ 4 และ 5 ผลจากการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันระเหยทางสถิติโดยวิธี

Student t-test พบว่าในถังสร้างมีเทน ชุดการทดลองที่ 4 และ 5 มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.2.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพ

ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น เป็นการวัดปริมาณที่ได้จาก 2 ชุดการทดลอง โดยวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในถังสร้างมีเทนที่เวลาเก็บกัก 25 และ 14 วัน ตามลำดับ ซึ่งปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากถังสร้างมีเทนมีค่าอยู่ในช่วง 10.3-18.6 และ 12.4-17.1 ล./ว. ที่เวลาเก็บกัก 25 และ 14 วันตามลำดับ เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากถังสร้างมีเทนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 13.08 ± 0.90 และ 15.41 ± 1.10 ล./ว. ที่เวลาเก็บกัก 25 และ 14 วันตามลำดับ(รูปที่ 4.12)



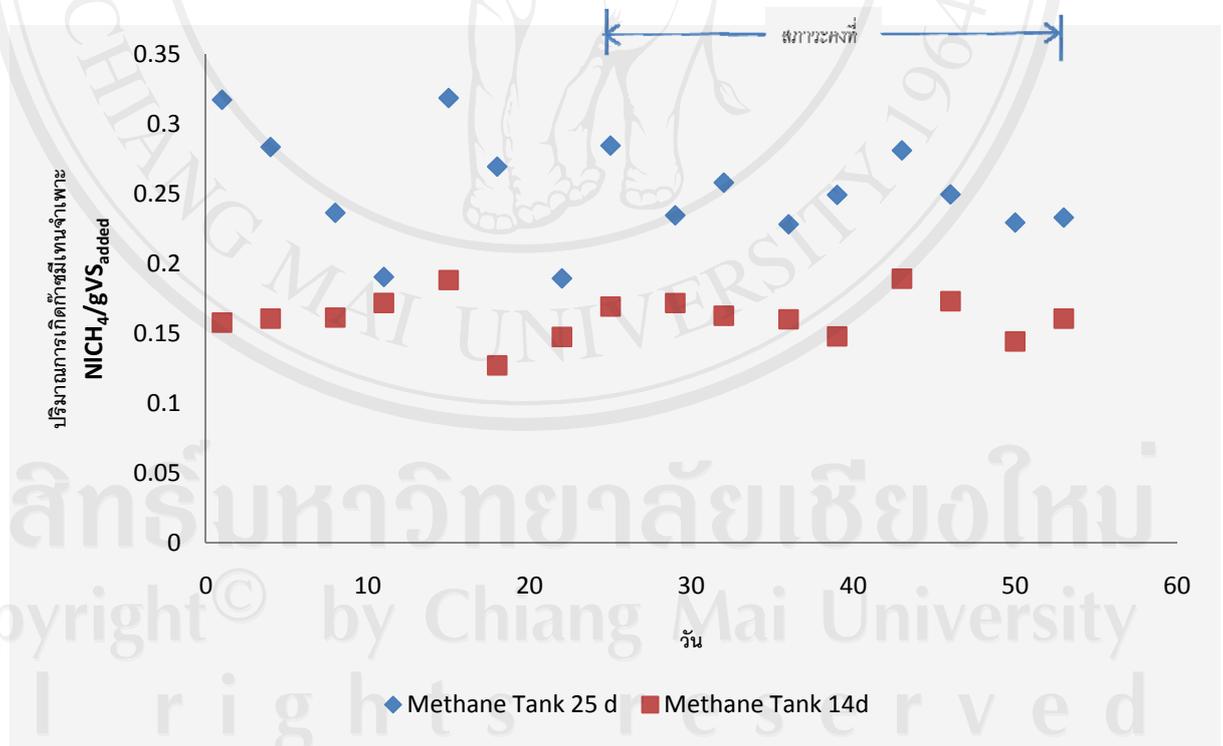
รูปที่ 4.12 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการทดลองของชุดการทดลองที่ 4 และ 5

การวิเคราะห์ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น พบว่า แนวโน้มปริมาณก๊าซชีวภาพในถังสร้างมีเทนที่ระยะเวลาเก็บกัก 25 วัน(ชุดการทดลองที่ 4) มีแนวโน้มลดลงในช่วงแรกแล้วจึงมีแนวโน้มเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ในวันที่ 25 ของการทดลอง โดยถังสร้างมีเทนที่ระยะเวลาเก็บกัก 25 วันนี้เป็นการนำถังสร้างมีเทนที่ระยะเวลาเก็บกัก 19 วัน(จากชุดการทดลองที่ 1) มาทำการปรับเพิ่มระยะเวลาเก็บกักซึ่งทำให้อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ในระบบลดลง จึงส่งผลให้ปริมาณก๊าซชีวภาพในระบบลดลงในช่วงแรกของการทดลอง ส่วนแนวโน้มปริมาณก๊าซชีวภาพในถังสร้าง

มีเทนที่ระยะเวลาเก็บกัก 14 วัน(ชุดการทดลองที่ 5) ซึ่งเป็นการนำถังสร้างมีเทนที่ระยะเวลาเก็บกัก 17 วัน(จากชุดการทดลองที่ 3) มาทำการปรับลดระยะเวลาเก็บกัก โดยปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ เมื่อพิจารณาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของชุดการทดลองที่ 4 และ 5 ที่สถานะคงที่ โดยผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติโดยวิธี Student t-test พบว่า ปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนที่ได้จากถังสร้างมีเทนที่เวลาเก็บกัก 14 วัน มีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากถังสร้างมีเทนที่เวลาเก็บกัก 25 วัน อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.2.4 ปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนจำเพาะ

เมื่อพิจารณาปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นของชุดการทดลองที่ 4 และ 5 ที่สถานะคงที่ โดยผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติโดยวิธี Student t-test พบว่า ปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนที่ได้จากถังสร้างมีเทนที่เวลาเก็บกัก 25 วัน มีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากถังสร้างมีเทนที่เวลาเก็บกัก 14 วัน อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.230 ± 0.021 , และ 0.165 ± 0.011 $\text{NICH}_4/\text{gVS}_{\text{added}}$ ตามลำดับ (รูปที่ 4.13)



รูปที่ 4.13 ปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนจำเพาะตลอดระยะเวลาการทดลองของชุดการทดลองที่ 4 และ 5

ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติโดยวิธี Student t-test พบว่า ปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนจำเพาะจากถังสร้างมีเทนที่เวลาเก็บกัก 14 วัน มีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากถังสร้างมีเทนที่เวลาเก็บกัก 25 วัน อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการลดระยะเวลาเก็บกักมากเกินไปอาจทำให้แบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทนเจริญเติบโตไม่ทัน เกิดการชะแบกที่เรียบางส่วนเนื่องจากถูกทำลายเพราะสภาพที่ไม่สมดุล ส่วนถังสร้างมีเทนที่ระยะเวลาเก็บกัก 25 วัน มีค่าปริมาณก๊าซมีเทนจำเพาะที่เกิดขึ้นต่ำกว่าชุดการทดลองที่ 1 (ถังสร้างมีเทนที่ระยะเวลาเก็บกัก 19 วัน กับถังสร้างกรดที่มีระยะเวลาเก็บกัก 1 วัน) อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ที่ระยะเวลาเก็บกัก 19 วัน ($0.249 \pm 0.032 \text{ NICH}_4/\text{gVS}_{\text{added}}$) เป็นค่าที่เหมาะสมซึ่งทำให้ปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนจำเพาะมีค่าสูงสุด เมื่อทำงานร่วมกับถังสร้างกรดที่ระยะเวลาเก็บกัก 1 วัน แต่ทั้งนี้เนื่องจากช่วงเวลาที่ทำการทดลองของการทดลองส่วนที่ 1 และการทดลองส่วนที่ 2 อยู่ในช่วงเวลาต่างกัน ถังสร้างมีเทนจึงเป็นการเดินระบบที่สภาวะอุณหภูมิต่างกัน จึงอาจส่งผลต่อปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนจำเพาะได้ ที่ระยะเวลาเก็บกัก 25 วัน มีปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนจำเพาะไม่แตกต่างจาก ที่ระยะเวลาเก็บกัก 19 วันมากนัก เนื่องจาก หากระบบทำการย่อยสลายสารอินทรีย์จนมาถึงช่วงเวลาหนึ่งแล้ว การเพิ่มระยะเวลาเก็บกักอาจไม่ส่งผลให้มีปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนสูงขึ้นได้

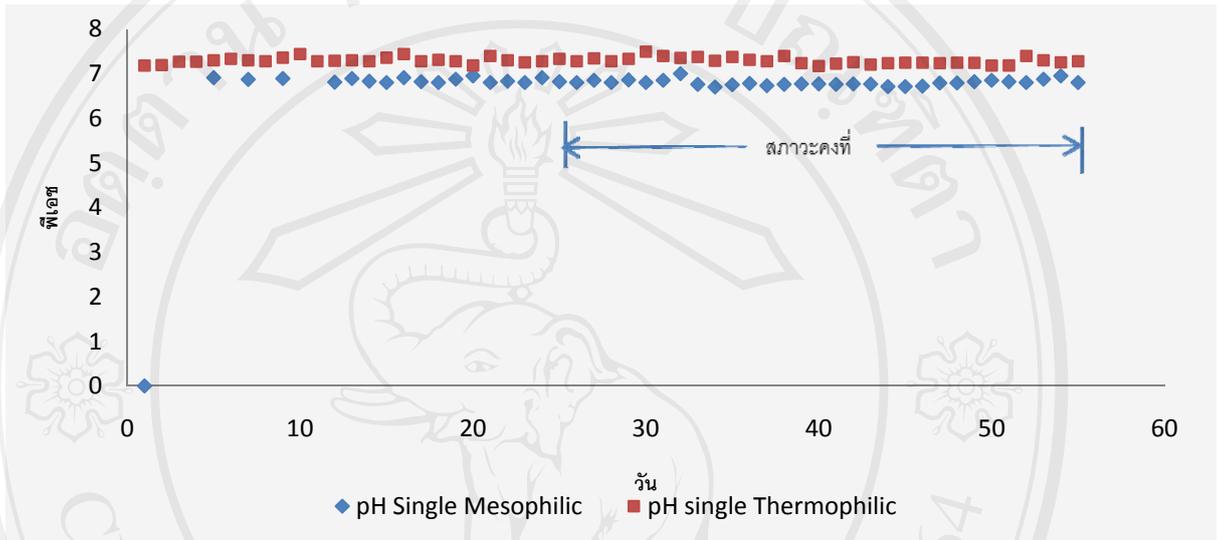
4.3 การทดลองส่วนที่ 3 : ผลของเวลาเก็บกักต่อประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ CSTR แบบขั้นตอนเดียว

เนื่องจากพบว่าค่าเวลาเก็บกักที่เหมาะสมสำหรับถังสร้างกรดที่สภาวะ Thermophilic และถังสร้างมีเทนที่สภาวะ Mesophilic คือ 1 วัน และ 19 วันตามลำดับ โดยมีค่าเวลาเก็บกักรวมของระบบ คือ 20 วัน การทดลองส่วนนี้จึงเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ CSTR แบบขั้นตอนเดียว โดยกำหนดให้มีระยะเวลาเก็บกักเท่ากัน คือ 20 วัน เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างสภาวะ Mesophilic (อุณหภูมิห้อง) กับสภาวะ Thermophilic (อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส) กับการทดลองส่วนที่ 1 (ซึ่งมีระยะเวลาเก็บกักรวมของระบบ เท่ากับ 20 วัน เช่นกัน)

ทั้งนี้กำหนดให้ ถัง SM คือ ถังปฏิกรณ์ CSTR แบบขั้นตอนเดียว สภาวะ Mesophilic
ถัง ST คือ ถังปฏิกรณ์ CSTR แบบขั้นตอนเดียว สภาวะ Thermophilic

4.3.1 พีเอช

ค่าพีเอชของน้ำออกจากถัง SM มีค่าอยู่ในช่วง 6.7-7.0 โดยเมื่อเข้าสู่สภาวะคงที่แล้วมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 6.79 ± 0.06 ส่วนค่าพีเอชของน้ำออกจากจากถัง ST มีค่า อยู่ในช่วง 7.17-7.49 โดยเมื่อเข้าสู่สภาวะคงที่แล้วมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 7.27 ± 0.07 (รูปที่ 4.14)

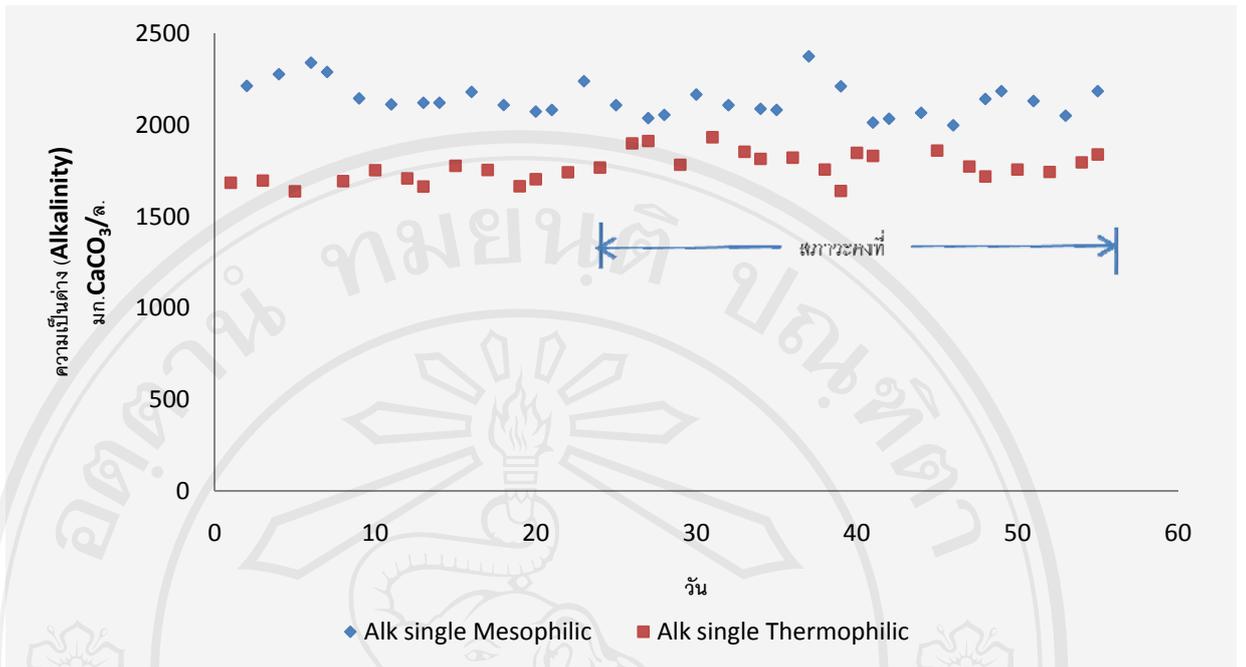


รูปที่ 4.14 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งจากระบบตลอดระยะเวลาการทดลองของชุดการทดลองที่ 6 และ 7

เมื่อทำการการวิเคราะห์ค่าพีเอชระหว่างถัง SM และ ถัง ST แล้วพบว่า ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติโดยวิธี Student t-test พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยถัง ST มีค่าพีเอชที่สูงกว่าอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นนั้นส่งผลต่อการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำลง ทำให้พีเอชของระบบเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย (Speece, 1996)

4.3.2 ความเป็นด่างและปริมาณกรดไขมันระเหย

ความเป็นด่างของน้ำออกจากจากถัง SM มีค่าอยู่ในช่วง 1,998-2,375 มก. CaCO_3 /ล. โดยเมื่อเข้าสู่สภาวะคงที่แล้วมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ $2,119 \pm 103$ มก. CaCO_3 /ล. ส่วนค่าความเป็นด่างของน้ำออกจากถัง TM มีค่า อยู่ในช่วง 1,637-1,933 มก. CaCO_3 /ล. โดยเมื่อเข้าสู่สภาวะคงที่แล้วมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ $1,799 \pm 62$ มก. CaCO_3 /ล.(รูปที่ 4.15)



รูปที่ 4.15 ปริมาณค่าไบคาร์บอเนตตลอดระยะเวลาการทดลองของชุดการทดลองที่ 6 และ 7

เมื่อพิจารณาค่าความเป็นด่างในระบบ โดยผลจากการวิเคราะห์ค่าความเป็นด่างทางสถิติโดยวิธี Student t-test พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยถึง SM มีค่าความเป็นด่างสูงกว่าถึง ST แสดงให้เห็นว่า ที่สภาวะ Thermophilic มีค่าความเป็นด่างต่ำกว่าที่สภาวะ Mesophilic ซึ่งอาจเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นนั้นมีผลต่อการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำลง การเพิ่มอุณหภูมิทำให้สภาพด่างในรูปของไบคาร์บอเนตมีปริมาณน้อยลง ดังสมการ 4.4 ซึ่งเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน ค่าคงที่ของปฏิกิริยาในการแตกตัว ความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความเข้มข้นของไบคาร์บอเนตไอออน (Speece, 1996)

$$[H^+] = \frac{K_1 K_H P_{CO_2}}{[HCO_3^-]} \quad (4.4)$$

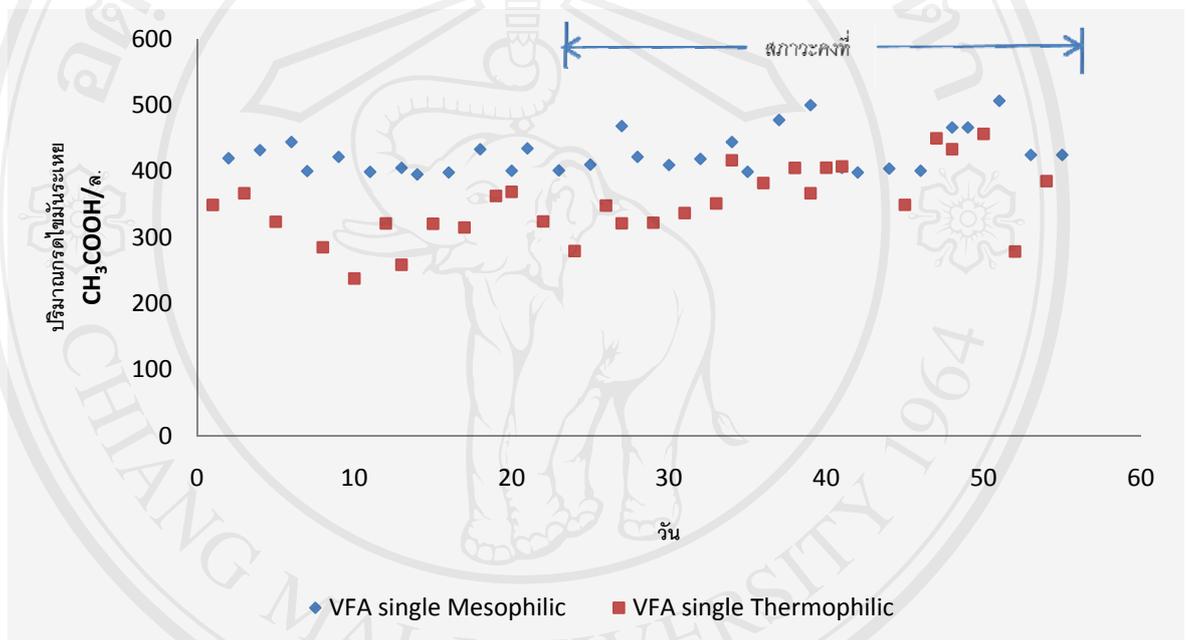
กำหนดให้:

K_1	=	10^{-6} for Ionic Strength of 0.2
K_H	=	0.48×10^{-6} for Ionic Strength of 0.0
K_H	=	สัมประสิทธิ์การละลาย; 0.0246

$$P_{CO_2} = \text{Partial Pressure of } CO_2$$

โดยค่า K_1 และ K_H แปรผกผันกับอุณหภูมิ โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่า K_1 และ K_H จะมีค่าลดลง ทำให้ความเข้มข้นของค่าความเป็นด่างในรูปของไบคาร์บอเนตมีปริมาณน้อยลง

ปริมาณกรดไขมันระเหยของน้ำออกจากถัง SM มีค่าอยู่ในช่วง 395-506 มก. $CH_3COOH/ล.$ โดยเมื่อเข้าสู่สภาวะคงที่แล้วมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 438 ± 40 มก. $CH_3COOH/ล.$ ส่วนปริมาณกรดไขมันระเหยของน้ำออกจากถัง ST มีค่า อยู่ในช่วง 238-456 มก. $CH_3COOH/ล.$ โดยเมื่อเข้าสู่สภาวะคงที่แล้วมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 387 ± 48 มก. $CH_3COOH/ล.$ (รูปที่ 4.16)



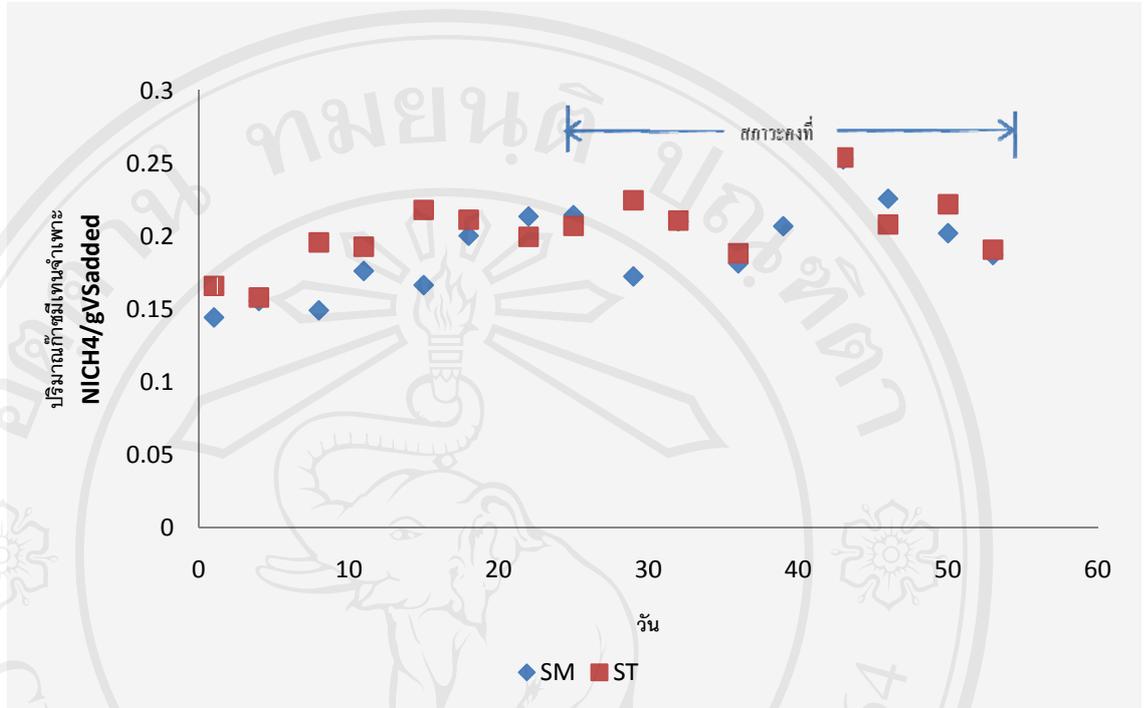
รูปที่ 4.16 ปริมาณกรดไขมันระเหยตลอดระยะเวลาการทดลองของชุดการทดลองที่ 6 และ 7

ผลจากการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันระเหยทางสถิติโดยวิธี Student t-test พบว่าในถังสร้างมีเทน ชุดการทดลองที่ 6 (ถัง SM) และ ชุดการทดลองที่ 7 (ถัง ST) มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยถัง SM มีปริมาณกรดไขมันระเหยที่สูงกว่า ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากที่สภาวะ Thermophilic สามารถเร่งอัตราการทำปฏิกิริยาของแบคทีเรียสร้างมีเทนได้ ดังนั้นการนำกรดไขมันระเหยไปใช้จึงมีมากกว่าที่สภาวะ Mesophilic

4.3.3 ปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนจำเพาะ

เมื่อพิจารณาปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนจำเพาะของชุดการทดลองที่ 6 และ 7 ที่สภาวะคงที่ โดยผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติโดยวิธี Student t-test พบว่า ปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนจำเพาะ

ที่ได้จากถัง SM มีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากถัง ST อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.209 ± 0.026 และ 0.218 ± 0.029 $\text{NiCH}_4/\text{gVS}_{\text{added}}$ ตามลำดับ



รูปที่ 4.17 ปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนจำเพาะตลอดระยะเวลาการทดลองของชุดการทดลองที่ 6 และ 7

เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนจำเพาะ พบว่า ถัง SM มีปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนจำเพาะน้อยกว่าถัง ST ซึ่งสอดคล้องกับ Gannoun et al, 2007 ทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบการบำบัดของเสียจากปาล์มน้ำมันด้วยกระบวนการย่อยแบบไม่ใช้อากาศระหว่างที่สภาวะ Thermophilic (55°C) และ Mesophilic (37°C) พบว่า ที่สภาวะ Thermophilic มีปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนจำเพาะที่สูงกว่าที่สภาวะ Mesophilic ทั้งนี้เนื่องจากจุลินทรีย์ที่ทำงานภายใต้สภาวะ Thermophilic มีค่าทางจลศาสตร์ (Growth rate) ที่เหนือกว่าเชื้อที่ทำงานภายใต้สภาวะ Mesophilic (Speece, 1996)

ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ CSTR แบบขั้นตอนเดียว โดยกำหนดให้มีระยะเวลาเก็บกักเท่ากัน คือ 20 วัน เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างสภาวะ Mesophilic (อุณหภูมิห้อง) กับสภาวะ Thermophilic (อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส) และการทดลองส่วนที่ 1 ซึ่งเป็นระบบแบบ 2 ขั้นตอนที่มีระยะเวลาเก็บกักรวมของระบบ เท่ากับ 20 วัน เช่นกัน พบว่าถัง SM และ ถัง ST มีปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนจำเพาะต่ำกว่าชุดการทดลองที่ 1 น่าจะเป็นผลมาจากที่สภาวะ Thermophilic สามารถเร่งปฏิกริยา Hydrolysis ซึ่งเป็นขั้นตอนจำกัดอัตราการเกิดปฏิกริยาสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุที่อยู่ในรูปของแข็ง ทำให้วัสดุที่ผ่านจากขั้นตอน

แรกมายังขั้นตอนที่สองมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน จึงส่งผลให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาของ Methanogens ตามไปด้วย ประกอบกับการแยกกระบวนการ Hydrolysis หรือ Acidification ออกจากกระบวนการ Acetogenesis หรือ Methanogenesis โดยทั้งสองกระบวนการนี้มีสภาพที่เหมาะสมในสถานะที่แตกต่างกัน (โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าพีเอช) การแยกแบคทีเรียทั้ง 2 ออกจากกัน จะทำให้สามารถควบคุมความเป็นกรด-ด่างในแต่ละถังให้เหมาะสมกับแบคทีเรียในแต่ละกลุ่มได้ดี จึงส่งผลให้ระบบแสดงประสิทธิภาพได้เต็มที่กว่าเมื่อเทียบกับถังปฏิกรณ์ธรรมาแบบขั้นตอนเดียว

4.4 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากงานวิจัยนี้กับงานวิจัยต่างๆ

ตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของถังปฏิกรณ์ที่ใช้ รวมถึงค่าที่ใช้ในการเดินระบบและค่าปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนจำเพาะที่ได้จากการผลิตก๊าซชีวภาพจากต้นข้าวโพดของงานวิจัยต่างๆ

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบผลที่ได้จากงานวิจัยนี้กับงานวิจัยต่างๆ

งานวิจัยของ	รูปแบบถังปฏิกรณ์	ระยะเวลาเก็บกัก (วัน)	ส่วนของข้าวโพดที่ใช้	พันธุ์ข้าวโพด	% TS	อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ gVS/L.d	ปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนจำเพาะ $NICH_4/gVS_{added}$
Amon et al, 2007	ขั้นตอนเดียว (Mesophilic)	70-80	ทั้งต้น	Tonal (milk ripeness)	19.4	1.30	0.344±0.006
				Tonal (wax ripeness)	29.8		0.283±0.005
				Tonal (full ripeness)	43.1		0.280±0.011
				LZM 600 (milk ripeness)	18.0		0.313±0.021
				LZM 600 (wax ripeness)	28.2		0.326±0.016
				LZM 600 (full ripeness)	43.0		0.287±0.008
				PR34G13 (milk ripeness)	19.4		0.366±0.026
				PR34G13 (wax ripeness)	30.2		0.302±0.007
PR34G13 (full ripeness)	52.9	0.268±0.0042					
Klimiuk et al, 2010	ขั้นตอนเดียว (Mesophilic)	60	ทั้งต้น	BBCH 89 (early-mid)	8.0	1.30	0.33±0.13
Forster et al, 2007	ขั้นตอนเดียว (Mesophilic)	60	ทั้งต้น		30.0 (w/w)		0.11
Emiliano et al, 2010	ขั้นตอนเดียว (Thermophilic)		ทั้งต้น	Blixsen	37.4±1.1 (w/w)		0.35±0.01 0.39±0.01

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบผลที่ได้จากงานวิจัยนี้กับงานวิจัยต่างๆ (ต่อ)

งานวิจัยของ	รูปแบบถังปฏิกรณ์	ระยะเวลาเก็บกัก (วัน)	ส่วนของข้าวโพดที่ใช้	พันธุ์ข้าวโพด	% TS	อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ gVS/L.d	ปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนจำเพาะ $\text{NICH}_4/\text{gVS}_{\text{added}}$
Vindis et, al 2009	ชั้นตอนเดียว (Thermophilic)	35	ทั้งต้น	NK PAKO	4.5	36.6 ในถังสร้างกรด	0.344
				PR 34N43			0.277
				RAXXIA			0.319
	ชั้นตอนเดียว (Mesophilic)	35	ทั้งต้น	NK PAKO	4.5	36.6 ในถังสร้างกรด	0.229
PR 34N43	0.179						
RAXXIA	0.200						
งานวิจัยนี้	สองชั้นตอน (Thermophilic-Mesophilic)	ถังสร้างกรด 1 ถึงสร้างมีเทน 19	ทั้งต้น	CP	4.5	36.6 ในถังสร้างกรด 1.7 ในถังสร้างมีเทน	0.249 ± 0.032
							ถังสร้างกรด 2 ถึงสร้างมีเทน 18
	สองชั้นตอน (Thermophilic-Mesophilic)	ถังสร้างกรด 3 ถึงสร้างมีเทน 17	ทั้งต้น	CP	4.5	12.2 ในถังสร้างกรด 1.9 ในถังสร้างมีเทน	0.174 ± 0.035
							ถังสร้างกรด 1 ถึงสร้างมีเทน 25
	สองชั้นตอน (Thermophilic-Mesophilic)	ถังสร้างกรด 1 ถึงสร้างมีเทน 14	ทั้งต้น	CP	4.5	36.6 ในถังสร้างกรด 2.6 ในถังสร้างมีเทน	0.165 ± 0.011
							ชั้นตอนเดียว (Thermophilic)
	ชั้นตอนเดียว (Mesophilic)	20	ทั้งต้น	CP	4.5	1.83	0.209 ± 0.026

งานวิจัยที่ทำเพื่อศึกษาการผลิตมีเทนจากต้นข้าวโพดส่วนใหญ่ทำในถังปฏิกรณ์แบบชั้นตอนเดียว โดยจากงานวิจัยของ Amon et al, 2007 และ Vindis et al, 2009 แสดงให้เห็นว่า สายพันธุ์ข้าวโพดส่งผลต่อค่าปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนจำเพาะ รวมถึงช่วงเวลาในการเก็บเกี่ยวที่ส่งผลต่อปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนจำเพาะเช่นกัน ดังนั้น ในการเปรียบเทียบปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนจำเพาะที่ได้จากการทดลองจึงต้องคำนึงสายพันธุ์ข้าวโพด และช่วงเวลาในการเก็บเกี่ยวด้วย

สอดคล้องกับการทดลองของ Emiliano et,al 2010 ที่สรุปไว้ว่าการเก็บเกี่ยวในช่วงตั้งต้น(Whole Plant)ให้ปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนจำเพาะสูงที่สุด

การกำหนดค่าร้อยละของของแข็งทั้งหมดของระบบที่เหมาะสมนั้น ต้องคำนึงถึงความสามารถในการกวนผสมของถังปฏิกรณ์ด้วย ค่าของร้อยละของของแข็งทั้งหมดในระบบจึงควรเป็นค่าที่ทำให้การกวนผสมในถังปฏิกรณ์เป็นไปอย่างสมบูรณ์และมีปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสูงสุด ดังนั้น การทดลองต่างๆจึงมีการกำหนดค่าร้อยละของของแข็งทั้งหมดที่แตกต่างกันเพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะสมบัติของข้าว โพลแต่ละชนิดและเหมาะสมกับอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ค่าร้อยละของของแข็งทั้งหมดของการทดลองจึงเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อค่าปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนจำเพาะเช่นกัน

การทดลองในสภาวะที่แตกต่างกันส่งผลต่อปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนจำเพาะ โดยที่สภาวะ Thermophilic ให้ปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนจำเพาะสูงกว่าที่สภาวะ Mesophilic ซึ่งสอดคล้องกับ Vindis et al, 2009 ที่ใช้ข้าวโพลหมักในการทดลองโดยใช้ถังหมักย่อยขนาดเล็ก ดำเนินการที่สภาวะต่างกัน แล้วพบว่าสภาวะ Thermophilic ให้ปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนจำเพาะสูงกว่าที่สภาวะ Mesophilic เช่นกัน ทั้งนี้ ในการพิจารณาเพื่อเลือกระบบที่ใช้ในการดำเนินการ จึงควรพิจารณาถึงรายจ่ายที่ต้องใช้ในการดำเนินการระบบ ซึ่งระบบที่ดำเนินการที่สภาวะ Thermophilic นั้น พบว่ามีค่าใช้จ่ายสูงกว่าการดำเนินการระบบที่สภาวะ Mesophilic ฉะนั้นจึงควรพิจารณาว่าปริมาณก๊าซที่ได้สูงขึ้นจากระบบที่ดำเนินการที่สภาวะ Thermophilic นั้นอาจไม่คุ้มค่ากับพลังงานที่เสียไปในการดำเนินระบบ ซึ่งต้องให้ความร้อนกับถังปฏิกรณ์ที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้น ระบบถังปฏิกรณ์แบบสองชั้นตอนจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ทำให้ปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนจำเพาะสูงกว่าระบบถังปฏิกรณ์แบบชั้นตอนเดียวที่สภาวะ Mesophilic อีกทั้งยังใช้พลังงานในการให้ความร้อนแก่ระบบน้อยกว่าระบบถังปฏิกรณ์แบบชั้นตอนเดียวที่ดำเนินการที่สภาวะ Thermophilic

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาต่างๆ พบว่าปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนจำเพาะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น สายพันธุ์ข้าวโพล ระยะเวลาเก็บเกี่ยว ร้อยละของของแข็งทั้งหมด สภาวะในการดำเนินการ ฯลฯ ดังนั้นความแตกต่างของปัจจัยต่างๆย่อมส่งผลต่อปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนจำเพาะในแต่ละการทดลองด้วย

4.5 ตัวอย่างลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว

ตัวอย่างลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดโดยถังปฏิกรณ์จากการทดลองส่วนที่ 1 ชุดการทดลองที่ 1 แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ลักษณะสมบัติของน้ำที่ผ่านการบำบัดจากการทดลองส่วนที่ 1 ชุดการทดลองที่ 1

พารามิเตอร์	ค่า
%TS	0.4
%VS	0.2
pH	6.91±0.07
Alkalinity (มก.CaCO ₃ /ล.)	2,346±117
VFA (มก.CH ₃ COOH/ล.)	464±101
TCOD(มก./ล.)	3,082±1,069
FCOD(มก./ล.)	851±165
TSS(มก./ล.)	2,100±134
VSS(มก./ล.)	1,399±346

จากตัวอย่างลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากถังปฏิกรณ์ที่ได้จากการทดลอง เห็นได้ว่า ยังคงมีความสกปรกค่อนข้างสูง จึงไม่สามารถปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อมได้ ซึ่งจากลักษณะสมบัติดังตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าน้ำเสียดังกล่าวมีลักษณะสมบัติที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพได้ เช่น สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุตั้งต้นร่วมกับชีวมวลทางการเกษตรที่มีค่าความเป็นด่างต่ำเพื่อใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ต่อไป