

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### คุณลักษณะของเศษอาหารและหญ้าแฝก

จากการวิเคราะห์คุณลักษณะของเศษอาหาร (Food waste) และหญ้าแฝก (Vetiver grass) โดยวิเคราะห์พารามิเตอร์ของ pH ค่าซีโอดี (tCOD) ของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด (Total Volatile Solid : TVS) ของแข็งทั้งหมด (Total Solid : TS), ค่าความเป็นด่าง (alkalinity) ไนโตรเจน (Total kjeldahl nitrogen ) และฟอสฟอรัส (Total phosphorus) แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณลักษณะของเศษอาหารและหญ้าแฝก

Parameter	Food Waste		Vertiver Grass
	Original	Dilution with water 90 % (v/w)	
pH	7.1±0.03	7.06±0.05	7.26±0.05
tCOD (g/l)	435.60±3.56	103.96±1.86	8.53±0.20
TVS (g/l)	1208.33 ±3.78	66.33±2.65	7.53±0.32
TS (g/l)	1427.08±0.25	53.96±0.85	7.53±0.25
Alkalinity (mg CaCO <sub>3</sub> /l)	2694.02±10.13	2780.12±20	3316.16±20.81
TKN (mg/l)	168.15±0.58	54.8±0.88	171.36±0.88
TP (mg/l)	25.65±0.89	11.23±0.38	34.1±0.32

ผลของตารางที่ 4.1 พบว่าเศษอาหารมีค่าของ tCOD TVS และ TS มีปริมาณความเข้มข้นที่ค่อนข้างสูงมากจึงเหมาะสมที่นำไปผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งจากการที่เศษอาหารมีค่าความเข้มข้นสูงและมีลักษณะข้นมาก จึงต้องทำการเจือจางด้วยน้ำ 90 % v/w ก่อน (เช่น ใช้เศษอาหาร 100 กรัม ต่อน้ำ 900 มิลลิลิตร)

และการทดลองได้วิเคราะห์องค์ประกอบของหญ้าแฝกในรูปของ เซลลูโลส และลิกนิน (ตารางที่ 4.2) ซึ่งจากตารางจะเห็นว่าหญ้าแฝกมีปริมาณของ เฮมิเซลลูโลส สูงถึง ร้อยละ 35 และมีปริมาณเซลลูโลสสูงเช่นกันร้อยละ 31 ขณะที่ปริมาณลิกนินแค่เพียงร้อยละ 5 เท่านั้น ลิกนินอยู่ในปริมาณที่ต่ำจึงไม่น่าจะไปขัดขวางการผลิตก๊าซมีเทนของจุลินทรีย์

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของหญ้าแฝก

Material	Hemicellulose (%)	Cellulose (%)	Lignin (%)	Others (%)
หญ้าแฝก	35	31	5	29

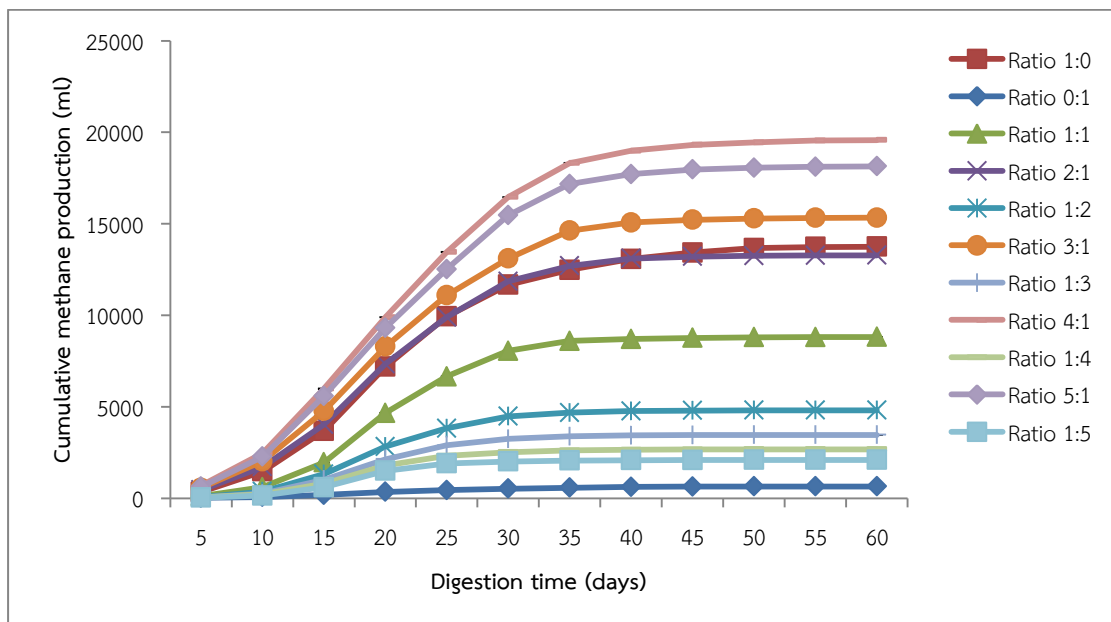
#### การศึกษาเพื่อหาอัตราส่วนของเศษอาหารต่อหญ้าแฝกต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ

การวิจัยได้ศึกษาอัตราส่วนของเศษอาหารต่อหญ้าแฝก ในอัตราส่วน 1:0 , 0 : 1, 1:1 , 2:1, 1:2, 3:1, 1:3, 4:1,1:4, 5:1 และ 1:5 ต่อปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ ซึ่งจากภาพ 4.1 พบว่าปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนสะสม (cumulative methane production) ที่ผลิตได้ในระยะเวลาการย่อยสลาย (digestion time) ทั้งหมด 60 วัน เมื่อใช้อัตราเศษอาหารต่อหญ้าแฝก 4: 1 สามารถผลิต CH<sub>4</sub> ได้สูงที่สุด (19,576.00 มิลลิลิตร) และมีผลผลิต CH<sub>4</sub> (specific methane yield) สูงสุดเมื่อเทียบกับการใช้เศษอาหารต่อหญ้าแฝกที่อัตราส่วนอื่น ๆ โดยมี specific methane yield สูงถึง 0.280 V/g VS<sub>removed</sub> ส่วนการใช้เศษอาหารอย่างเดียว (1:0) และหญ้าแฝกอย่างเดียว (0:1) สามารถผลิต CH<sub>4</sub> ได้เพียง 13,753.33 มิลลิลิตรและ 648.66 มิลลิลิตร ตามลำดับ และได้ specific methane yield เท่ากับ 0.180 และ 0.109 V/g VS<sub>removed</sub> ซึ่งผลการวิจัยยังพบว่า การใช้ปริมาณเศษอาหารต่อหญ้าแฝก 4:1 สามารถผลิต CH<sub>4</sub> เพิ่มขึ้น 29.74 % หรือ 1.42 เท่า และเพิ่มเป็น 96.68 % หรือ 30.17 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับใช้เศษอาหารเพียงอย่างเดียว (1:0) และหญ้าแฝกเพียงอย่างเดียว (0:1) ตามลำดับ และจากกราฟจะเห็นว่าสัดส่วนของการผสมเศษอาหารสูงขึ้นจะทำให้แนวโน้มของการเกิดก๊าซ CH<sub>4</sub> เพิ่มขึ้น (Hero et al., 2004 ; Haider et al., 2015) แต่อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนของ 5:1 มีก๊าซมีเทนต่ำกว่าอัตราส่วน 4 :1 อาจเนื่องจากมีภาระบรรทุกสารอินทรีย์มากเกินไปที่ระบบจะรองรับได้

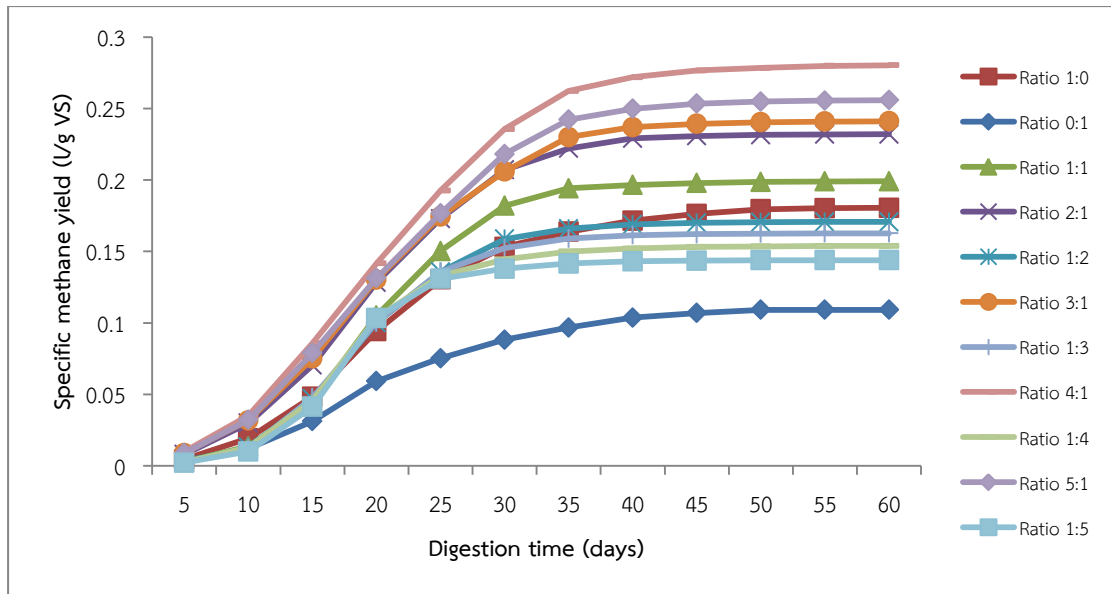
จากที่กล่าวแล้วอัตราส่วนของเศษอาหารต่อหญ้าแฝกที่ 4:1 ที่ specific methane yield สูงสุดเมื่อปริมาณ C/N 28.12 (ตารางที่ 4.3) ซึ่งผลการวิจัยดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของนักวิจัยหลายคนที่ยืนยันว่าค่า C/N ที่มีเหมาะสมจะอยู่ในช่วง 20 ถึง 30 (Haider et al., 2015) และจะเห็นว่าแนวโน้มของ C/N เพิ่มขึ้น มี specific methane yield แนวโน้มลดลง การที่ค่า C/N ต่ำ

หมายถึงมีปริมาณไนโตรเจนค่อนข้างสูง จะมีการสะสมของแอมโมเนียส่งผลให้พีเอชสูงกว่า 8.5 ซึ่งจะไปขัดขวางการที่จุลินทรีย์ที่จะไปผลิตก๊าซมีเทน ขณะที่ ถ้าค่า C/N สูง หมายถึงปริมาณไนโตรเจนต่ำ จะทำให้มีการใช้ไนโตรเจนหมดไปอย่างรวดเร็วในระบบบำบัดทำให้ไนโตรเจนไม่เพียงพอในระบบบำบัดส่งผลให้ specific methane yield ต่ำ (Wang et al., 2011; Haider et al., 2015)

จากภาพที่ 4.2 พบว่า ปริมาณของ  $\text{CH}_4$  ที่ผลิตได้ที่ อัตราส่วนเศษอาหารต่อหญ้าแฝก 1:0 , 0 : 1, 1:1 , 2:1, 1:2, 3:1, 1:3, 4:1,1:4, 5:1 และ 1:5 ระยะเวลาการย่อยสลาย 40 วัน ปริมาณ  $\text{CH}_4$  ผลิตได้ร้อยละ 95.06 , 94.96, 98.6, 98.7, 98.96,98.28, 99.16, 96.99, 98.86, 97.6, 99.46 ตามลำดับ ของปริมาณ  $\text{CH}_4$  ที่ผลิตได้ทั้งหมด และพบว่าปริมาณ  $\text{CH}_4$  ที่ผลิตได้หลังวันที่ 40 ถึง 60 วัน มีปริมาณน้อยมาก



ภาพที่ 4.1 ปริมาณก๊าซมีเทนที่ผลิตได้เมื่ออัตราส่วนเศษอาหารต่อหญ้าแฝกแตกต่างกัน



ภาพที่ 4.2 ผลผลิตก๊าซมีเทน (specific methane yield) เมื่ออัตราส่วนเศษอาหารต่อหญ้าแฝกแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.3 อัตราส่วนของคาร์บอนและไนโตรเจนของอัตราส่วนเศษอาหารต่อหญ้าแฝกที่แตกต่างกัน

อัตราส่วน	C/N
1:0	19.54
0:1	45.03
1:1	32.28
2:1	31.08
3:1	30.05
4:1	28.12
5:1	27.02
1:2	34.15
1:3	35.32
1:4	36.22
1:5	37.30

ตารางที่ 4.4 ผลผลิตก๊าซมีเทนเมื่ออัตราส่วนเศษอาหารต่อหญ้าแฝกแตกต่างกัน

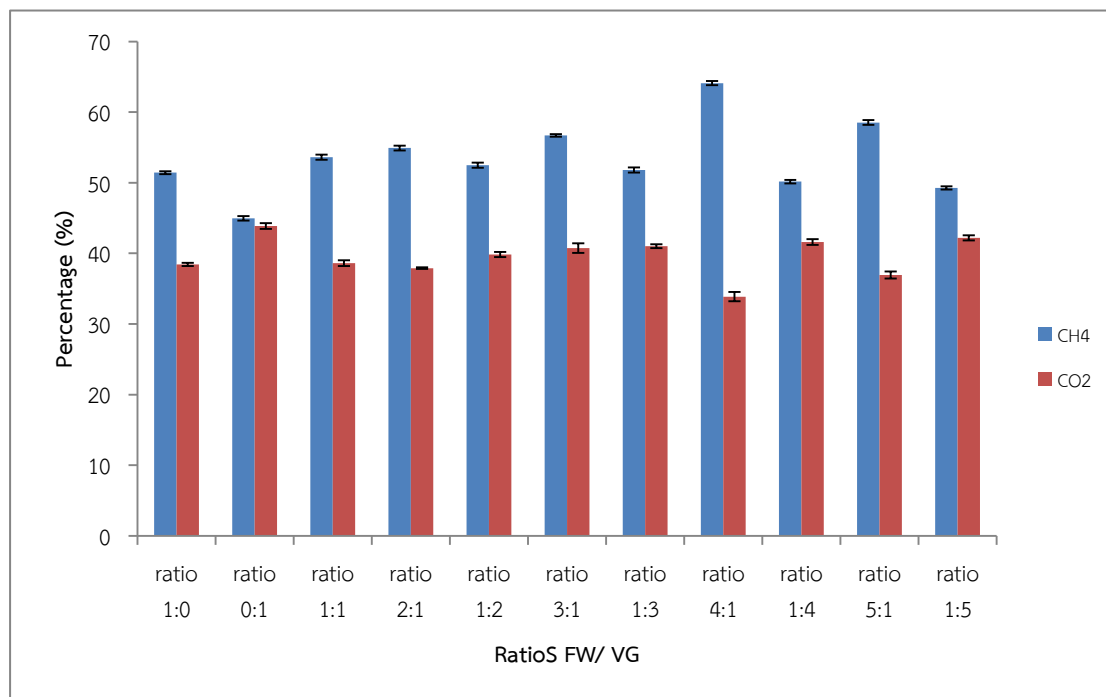
Ratios	Cumulative methane production (ml)	Specific methane yield (l/g VS)
1:0	13753.33	0.180
0:1	648.66	0.109
1:1	8816.33	0.199
2:1	13276.67	0.232
1:2	4811.33	0.170
3:1	15332	0.241
1:3	3465.33	0.162
4:1	19576	0.280
1:4	42678.33	0.153
5:1	18137.67	0.255
1:5	2094.67	0.143

#### การวิเคราะห์หาค่าประกอบของก๊าซชีวภาพ

การวิเคราะห์หาค่าประกอบก๊าซมีเทนด้วย Gas Chromotography เมื่อคิดเป็นร้อยละของ CH<sub>4</sub> จากก๊าซชีวภาพทั้งหมด ของทุกอัตราส่วนของอาหารต่อเศษหญ้า แสดงดังภาพที่ 4.3 จากกราฟพบว่าที่อัตราส่วนของเศษอาหารต่อหญ้าแฝกที่ 4:1 มีร้อยละของปริมาณ CH<sub>4</sub> สูงสุดสูงถึงร้อยละ 64.10±0.3 ส่วนการใช้เศษอาหารอย่างเดียว (1:0) มีร้อยละ CH<sub>4</sub> ที่ผลิตได้ ร้อยละ 51.43±0.20 ส่วนการใช้หญ้าแฝกเพียงอย่างเดียว (0:1) มีร้อยละของการเกิด CH<sub>4</sub> ร้อยละ เพียง 45.3 ±0.30 ขณะที่อัตราส่วนอื่น ๆ เช่น 1:1, 2:1,3:1,5:1, 1:2,2:1, 1:3, 1:4 และ 1:5 มีการผลิต CH<sub>4</sub> เท่ากับร้อยละ 53.6±0.36, 54.91±0.35, 56.7±0.20,58.53±0.35,52.5±0.36, 51.8±0.35,50.16±0.25 และ 49.26±0.20 ซึ่งผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yong et al. (2015) ที่ใช้เศษอาหารหมักร่วมกับซังข้าวในระบบการย่อยสลายในสภาวะแบบไร้ออกซิเจน พบว่า ถ้าใช้ซังข้าวเดี่ยว (อัตราส่วนอาหารต่อซังข้าว 0:5) จะมีปริมาณ CH<sub>4</sub> เพียงร้อยละ 52.43 แต่เมื่อใช้เศษอาหารอย่างเดียว (5:0) ปริมาณ CH<sub>4</sub> ร้อยละ 57.35 และเศษอาหารผสมกับซังข้าวในอัตรา 5:1 จะมีปริมาณ CH<sub>4</sub> เพิ่มขึ้นเป็น 67.62%

การวิจัยของ Panyadee et al. (2013) ที่ผลิต CH<sub>4</sub> จากการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของเศษอาหารรวมกากมะขามป้อมพบว่า ที่ระยะเวลาเวลากักเก็บ (HRT) 40 วัน ถ้าใช้เศษมะขามป้อม

อย่างเดียว จะมีปริมาณ  $\text{CH}_4$  เพียงร้อยละ 42.73 แต่เมื่อใช้เศษอาหารอย่างเดียว และ เศษอาหารผสมกับกากมะขามป้อมจะมีปริมาณ  $\text{CH}_4$  เพิ่มขึ้นเป็น ร้อยละ 53.75 และ 54.63 ตามลำดับ



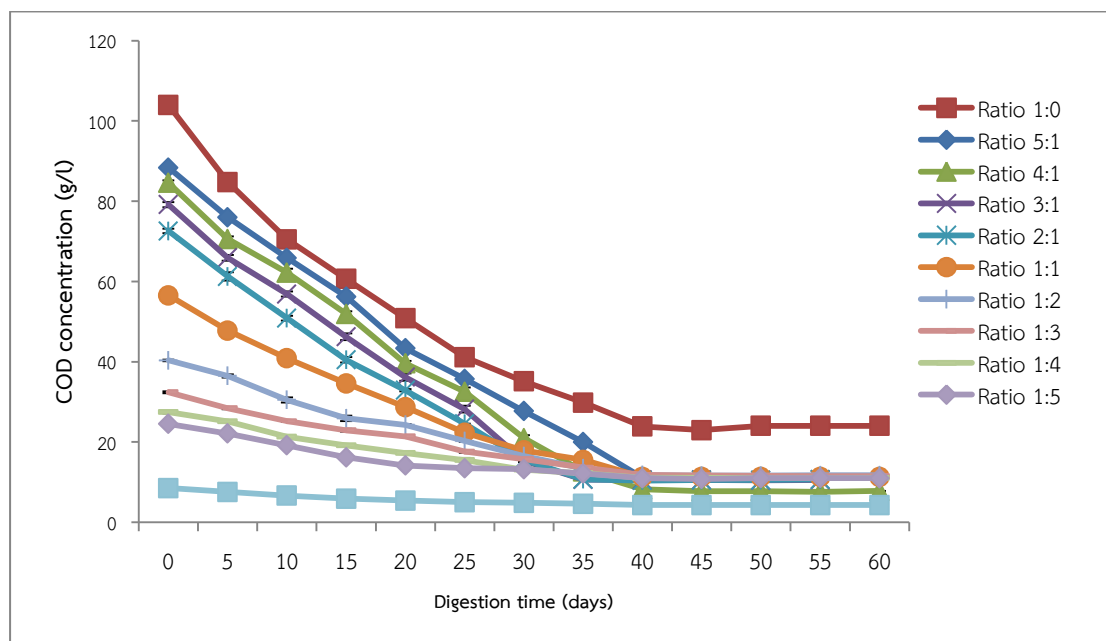
ภาพที่ 4.3 ปริมาณขององค์ประกอบก๊าซชีวภาพที่อัตราส่วนอาหารต่อหญ้าแฝกแตกต่างกัน

## เสถียรภาพของระบบ (stability system)

### 1. ประสิทธิภาพการบำบัด COD

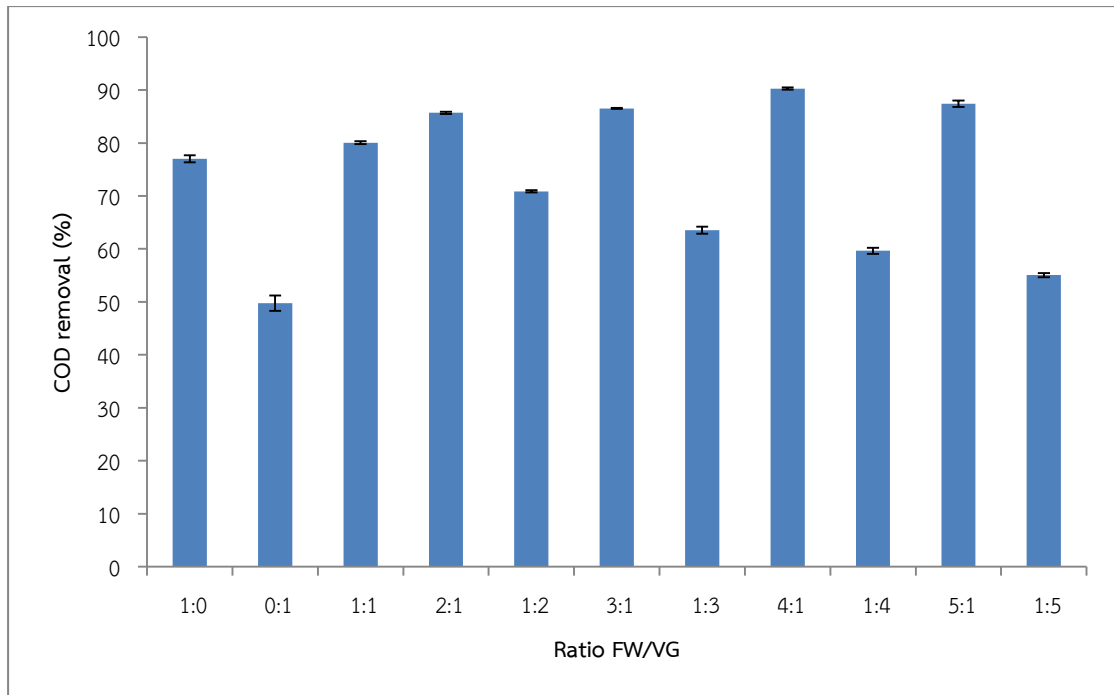
ภาพที่ 4.4 แสดงปริมาณ  $\text{COD}_T$  กับระยะเวลาการย่อยสลายเมื่ออัตราส่วนของเศษอาหารต่อหญ้าแฝกแตกต่างกัน ได้แก่ 1:0 , 0 : 1, 1:1 , 2:1, 1:2, 3:1, 1:3, 4:1,1:4, 5:1 และ 1:5 ซึ่งจากกราฟพบว่า เมื่อระยะเวลาย่อยสลายเป็น 40 วัน ระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ (steady state) โดยผลการทดลองพบว่าค่าเฉลี่ย COD ขาเข้า (Influent) ของอัตราส่วน 1:0 , 0 : 1, 1:1 , 2:1, 1:2, 3:1, 1:3, 4:1,1:4, 5:1 และ 1:5 เท่ากับ  $103.96 \pm 1.83$ ,  $8.53 \pm 0.20$ ,  $56.54 \pm 0.44$ ,  $72.56 \pm 0.56$ ,  $40.34 \pm 0.19$ ,  $79.14 \pm 0.63$ ,  $32.4 \pm 0.21$ ,  $84.56 \pm 0.64$ ,  $27.49 \pm 0.38$ ,  $88.35 \pm 0.57$ ,  $24.50 \pm 0.18$  g/l และ ค่าเฉลี่ย COD ขาออกเท่ากับ  $23.89 \pm 0.27$ ,  $4.28 \pm 0.02$ ,  $11.27 \pm 0.06$ ,  $10.71 \pm 0.1$ ,  $11.75 \pm 0.07$ ,  $10.66 \pm 0.11$ ,  $11.81 \pm 0.22$ ,  $8.22 \pm 0.12$ ,  $11.09 \pm 0.03$ ,  $11.11 \pm 0.45$ ,  $11.01 \pm 0.01$  g/l ตามลำดับ ซึ่งเมื่อคำนวณประสิทธิภาพของการบำบัด COD ที่ระยะเวลาย่อยสลาย 40 วัน (ภาพที่ 4.5) พบว่า การบำบัด COD จะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่ออัตราส่วนอาหารต่อเศษหญ้าแฝก 4:1 โดยมีค่าสูงถึง  $90.27 \pm 0.02$  % ขณะที่ เมื่อใช้เศษอาหารอย่างเดียว 1:0 และหญ้าแฝกอย่างเดียวที่ 0:1 มี

ประสิทธิภาพการบำบัด COD เพียง  $77.01 \pm 0.65\%$  และ  $49.74 \pm 1.46\%$  ส่วนอัตราเศษอาหารต่อหญ้าแฝก ที่อัตรา 1:1, 2:1, 3:1, 5:1, 1:2, 1:3, 1:4, 1:5 มีค่าเท่ากับ  $80.06 \pm 2.62\%$ ,  $85.68 \pm 0.19\%$ ,  $86.53 \pm 0.07\%$ ,  $87.41 \pm 0.6\%$ ,  $70.86 \pm 0.20\%$ ,  $63.54 \pm 0.65\%$ ,  $59.64 \pm 0.55\%$ ,  $55.05 \pm 0.39\%$  ตามลำดับ



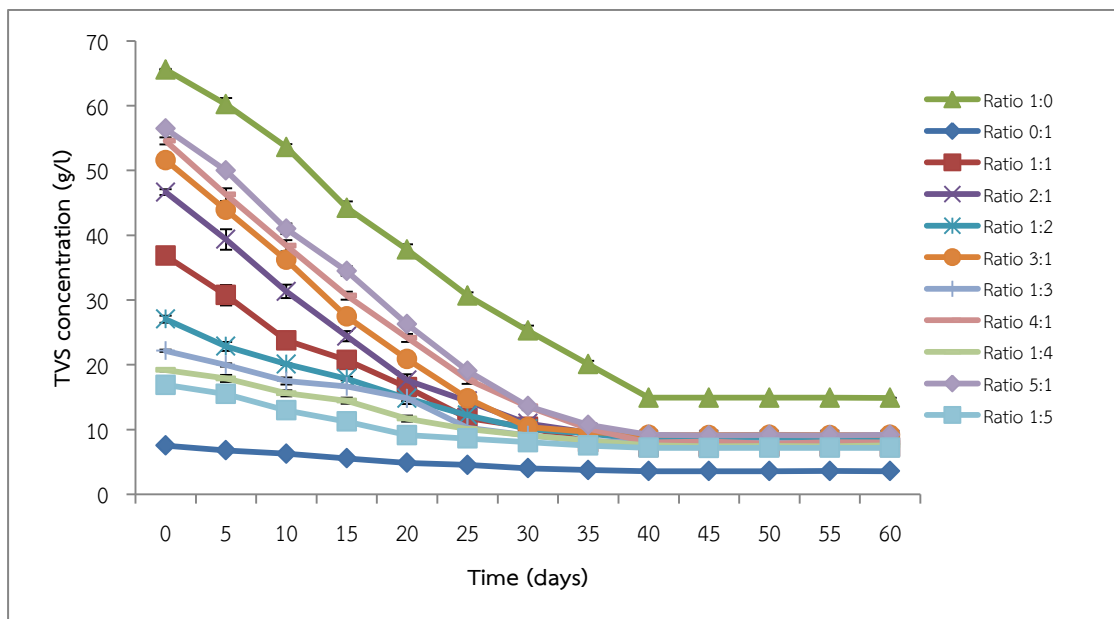
ภาพที่ 4.4 ความเข้มข้นของ COD ในระบบบำบัดเมื่ออัตราส่วนของเศษอาหารต่อหญ้าแฝกที่แตกต่างกัน

จากผลการวิจัยพบว่า เมื่ออัตราส่วนอาหารต่อเศษหญ้าแฝก 4:1 จะมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่าการใช้เศษอาหารอย่างเดียว (1:0) 1.17 เท่า และมีประสิทธิภาพการบำบัด COD สูงกว่า การใช้หญ้าแฝกอย่างเดียว (0:1) 1.81 เท่า และจากภาพจะเห็นว่า เมื่ออัตราส่วนของเศษอาหารสูงขึ้น มีแนวโน้มการบำบัด COD สูงขึ้น ซึ่งจะเห็นว่ามีความสัมพันธ์กับ specific methane yield ที่เกิดขึ้น โดย specific methane yield เพิ่มสูงขึ้นเมื่อประสิทธิภาพการบำบัด COD เพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน (Chen et al., 2016) และการทดลองยังพบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนของหญ้าแฝกเพิ่มสูงขึ้น จาก 1:1 1:2 1:3 1:4 และ 1:5 ค่าการบำบัด COD มีแนวโน้มลดลง และส่งผลให้ specific methane yield มีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการวิจัยอื่น ๆ ที่ TS สูง (25%) จะขัดขวางการเกิด  $\text{CH}_4$  (Chen et al., 2014)

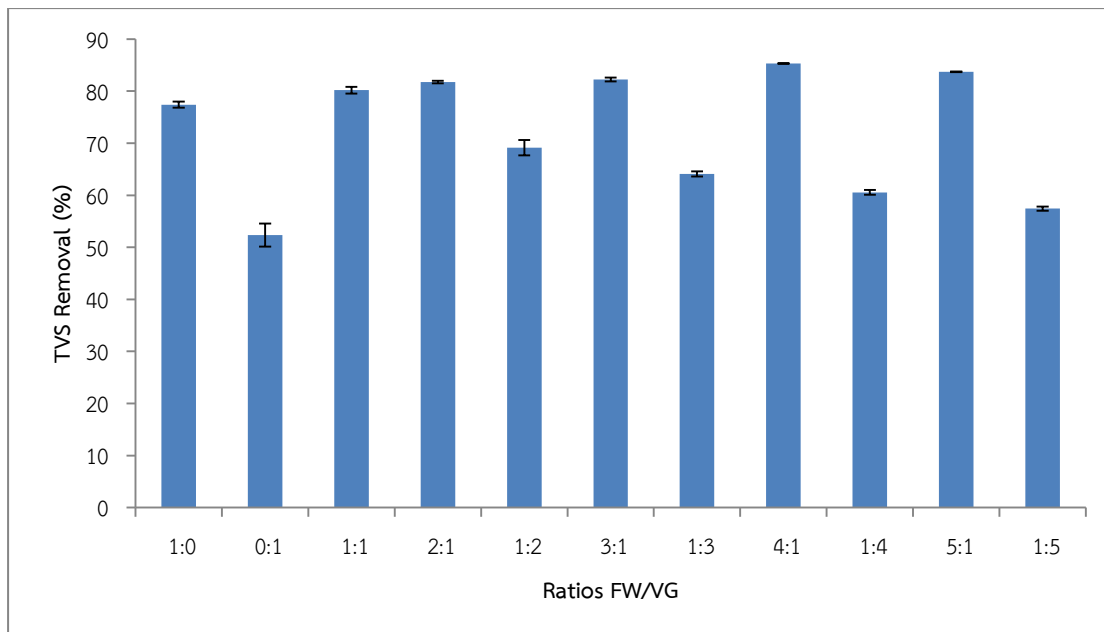


ภาพที่ 4.5 ประสิทธิภาพการบำบัด COD ในระบบบำบัดเมื่ออัตราส่วนของเศษอาหารต่อหญ้าแฝกที่แตกต่างกัน

## 2. ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด (Total volatile solid:TVS)



ภาพที่ 4.6 ความเข้มข้นของ TVS ในระบบบำบัดเมื่ออัตราส่วนของเศษอาหารต่อหญ้าแฝกที่แตกต่างกัน



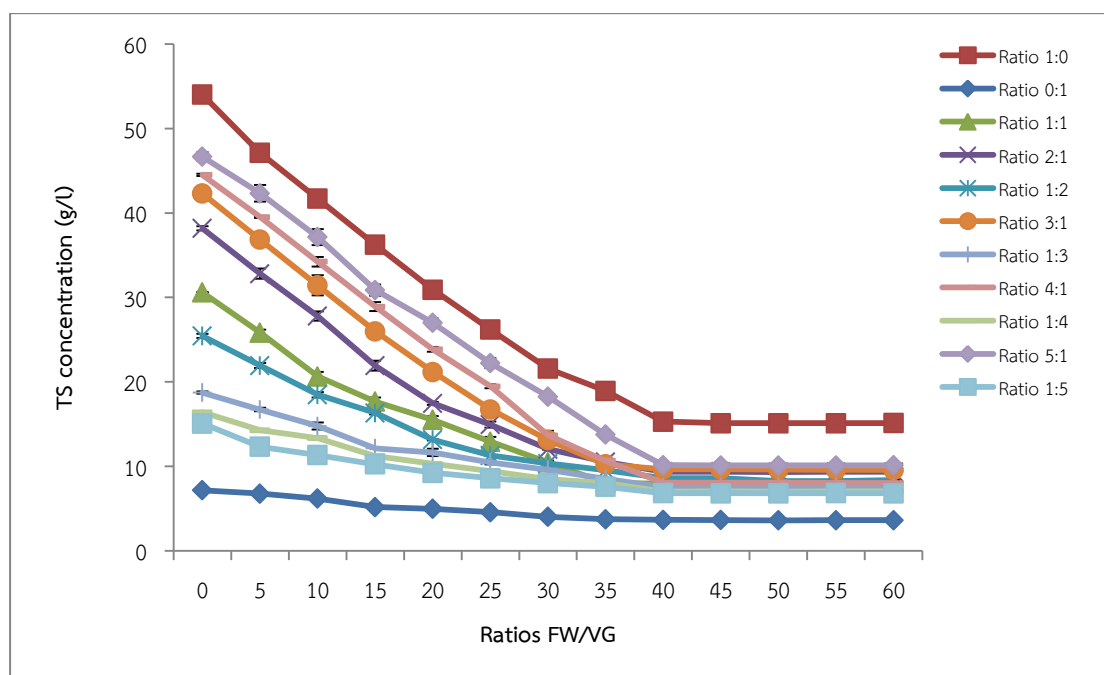
ภาพที่ 4.7 ประสิทธิภาพการบำบัดของ TVS ในระบบบำบัดเมื่ออัตราส่วนของเศษอาหารต่อหญ้าแฝกที่แตกต่างกัน

จากภาพที่ 4.6 จะเห็นว่า ที่อัตราส่วนเศษอาหารต่อหญ้าแฝกเฉลี่ยขาเข้า (Influent) แตกต่างกัน โดยที่อัตราส่วน 1:0, 0:1, 1:1, 2:1, 3:1, 4:1, 5:1, 1:2, 1:3, 1:4, 1:5 มีค่าเฉลี่ยของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด (TVS) ขาเข้าเท่ากับ  $65.58 \pm 0.09$ ,  $7.54 \pm 0.25$ ,  $38.83 \pm 0.63$ ,  $46.65 \pm 0.46$ ,  $51.57 \pm 0.29$ ,  $54.57 \pm 0.53$ ,  $56.44 \pm 0.31$ ,  $27.04 \pm 0.52$ ,  $22.15 \pm 0.17$ ,  $19.18 \pm 0.17$ ,  $16.90 \pm 0.33$  g/l ตามลำดับ และเมื่อระยะเวลาย่อยสลาย เป็น 40 วัน ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ (steady state) และพบว่าค่าเฉลี่ยของ TVS ขาออก มีค่าเท่ากับ  $14.91 \pm 0.01$ ,  $3.58 \pm 0.07$ ,  $7.3 \pm 0.20$ ,  $8.50 \pm 0.002$ ,  $9.16 \pm 0.14$ ,  $8.00 \pm 0.10$ ,  $9.18 \pm 0.8$ ,  $8.34 \pm 0.26$ ,  $7.95 \pm 0.06$ ,  $7.57 \pm 0.08$ ,  $7.19 \pm 0.13$  g/l สำหรับอัตราส่วนเศษอาหารต่อหญ้าแฝก 1:0, 0:1, 1:1, 2:1, 3:1, 4:1, 5:1, 1:2, 1:3, 1:4, 1:5 ตามลำดับ และจากภาพที่ 4.7 พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัด TVS ของอัตราส่วนเศษอาหารต่อหญ้าแฝก 4:1 สูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ  $85.31 \pm 0.70$  % ขณะที่เมื่อใช้เศษอาหารอย่างเดียว 1: 0 ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ  $77.26 \pm 0.02$  % และเมื่อใช้หญ้าแฝกอย่างเดียว 0: 1 มีค่าการบำบัดเฉลี่ยเท่ากับ  $52.33 \pm 2.22$  % ส่วนที่อัตรา 1:1, 2:1, 3:1, 5:1, 1:2, 1:3, 1:4, 1:5 มีค่าเท่ากับ  $80.17 \pm 0.63$  %,  $81.74 \pm 0.21$ ,  $82.22 \pm 0.38$ ,  $83.73 \pm 0.05$ ,  $69.11 \pm 1.48$ ,  $64.10 \pm 0.48$ ,  $60.53 \pm 0.44$  และ  $57.43 \pm 0.30$  % ตามลำดับ

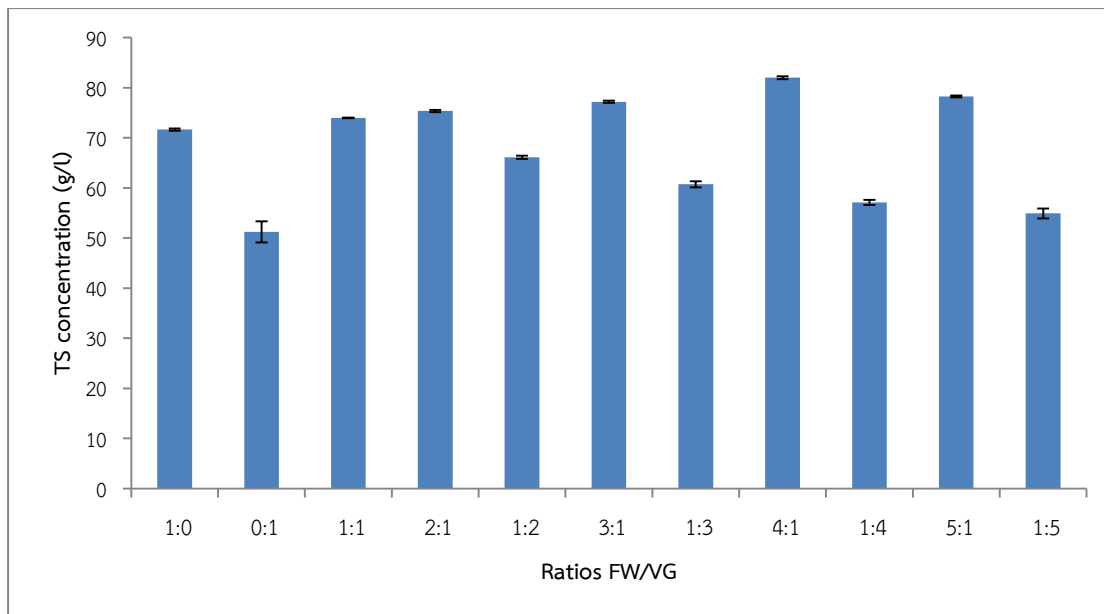
จากภาพที่ 4.7 พบว่าการบำบัด ของ TVS ที่อัตราส่วน เศษอาหารต่อหญ้าแฝก 4:1 มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด ขณะที่ อัตราส่วน 1: 0 ประสิทธิภาพการบำบัดของ TVS ต่ำสุด ซึ่งจะเห็นว่ามีความสัมพันธ์กับ specific methane yield ที่เกิดขึ้น โดย specific methane yield เพิ่ม

สูงขึ้นเมื่อประสิทธิภาพการบำบัด TVS เพิ่มสูงขึ้น และโดย specific methane yield ลดลงเมื่อประสิทธิภาพการบำบัด TVS มีแนวโน้มลดลง ซึ่งก็สอดคล้องกับการวิจัยของ Haider et al. (2015) และ Li et al. (2010) และจากภาพที่ 4.7 ยังพบว่า การบำบัด TVS ที่อัตราส่วน เศษอาหารต่อหญ้า แผลก 4:1 มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่า 1.10 และ 1.63 เท่าของการใช้เศษอาหารอย่างเดียว (1:0) และหญ้าแผลกอย่างเดียว 0:1 ตามลำดับ และจากภาพที่ 4.6 และ 4.7 ยังพบว่า การใช้สัดส่วนของเศษอาหารเพิ่มสูงขึ้น (4:1) มีแนวโน้มการบำบัด TVS เพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจาก เศษอาหารส่วนใหญ่ 75 % ประกอบด้วยสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่ายทางชีวภาพ (biodegradable organic matter) (Nagao et al., 2012) ผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับรายงานวิจัยของนักวิจัยหลายคนพบว่า ประสิทธิภาพการบำบัด TVS เพิ่มสูงขึ้นเมื่อ การใช้สัดส่วนของอาหารสูงขึ้น (Haider et al., 2015; Brown and Li, 2013 ; Dai et al., 2013)

### 3. ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solid : TS)



ภาพที่ 4.8 ความเข้มข้นของ TS ในระบบบำบัดเมื่ออัตราส่วนของเศษอาหารต่อหญ้าแผลกที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.9 ประสิทธิภาพการบำบัดของ TS ในระบบบำบัดเมื่ออัตราส่วนของเศษอาหารต่อหญ้าแฝกที่แตกต่างกัน

จากภาพที่ 4.8 จะเห็นว่า เมื่อระยะเวลาการย่อยสลายเพิ่มขึ้น ปริมาณ TS ลดลง โดยที่อัตราส่วนเศษอาหารต่อหญ้าแฝกเฉลี่ยขาเข้า (Influent) แตกต่างกัน โดยที่อัตราส่วน 1:0, 0:1, 1:1, 2:1, 3:1, 4:1, 5:1, 1:2, 1:3, 1:4, 1:5 มีค่าเฉลี่ย TS ขาเข้าเท่ากับ  $54.01 \pm 0.09$ ,  $7.18 \pm 0.15$ ,  $30.59 \pm 0.08$ ,  $38.18 \pm 0.25$ ,  $42.30 \pm 0.25$ ,  $44.49 \pm 0.13$ ,  $46.65 \pm 0.51$ ,  $25.45 \pm 0.26$ ,  $18.74 \pm 0.12$ ,  $16.4 \pm 0.16$ ,  $15.08 \pm$  g/L ตามลำดับ และเมื่อระยะเวลาย่อยสลาย เป็น 40 วัน ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ (steady state) และพบว่าค่าเฉลี่ยของ TS ขาออก มีค่าเท่ากับ  $15.30 \pm 0.12$ ,  $3.67 \pm 0.01$ ,  $7.96 \pm 0.01$ ,  $9.37 \pm 0.13$ ,  $9.65 \pm 0.05$ ,  $8.06 \pm 0.04$ ,  $10.16 \pm 0.04$ ,  $8.62 \pm 0.01$ ,  $7.54 \pm 0.04$ ,  $7.03 \pm 0.03$ ,  $6.83 \pm 0.01$  g/L สำหรับอัตราส่วนเศษอาหารต่อหญ้าแฝก 1:0, 0:1, 1:1, 2:1, 3:1, 4:1, 5:1, 1:2, 1:3, 1:4, 1:5 ตามลำดับ และจากภาพที่ 4.9 พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัด TS ของอัตราส่วนเศษอาหารต่อหญ้าแฝก 4:1 สูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ  $82.00 \pm 0.29$  % ขณะที่เมื่อใช้เศษอาหารอย่างเดียว 1: 0 มีค่าเพียงเท่ากับ  $71.65 \pm 0.22$  % และเมื่อใช้หญ้าแฝกอย่างเดียว 0: 1 ประสิทธิภาพการบำบัดเฉลี่ยเท่ากับ  $51.22 \pm 2.13$  % ส่วนที่อัตรา 1:1, 2:1, 3:1, 5:1, 1:2, 1:3, 1:4, 1:5 มีค่าเท่ากับ  $73.95 \pm 0.71$  %,  $75.35 \pm 0.22$ ,  $77.17 \pm 0.23$ ,  $78.22 \pm 0.18$ ,  $66.10 \pm 0.33$ ,  $60.71 \pm 0.60$  และ  $54.91 \pm 0.99$  ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.9 พบว่าการบำบัด ของ TS ที่อัตราส่วน เศษอาหารต่อหญ้าแฝก 4:1 มี ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด ( $82.00 \pm 0.29$ %) ขณะที่การใช้เศษอาหารอย่างเดียวที่อัตรา 1:0 ประสิทธิภาพลดลง ( $71.65 \pm 0.22$  %) และการใช้หญ้าแฝกอย่างเดียวที่อัตราส่วน 0: 1 ค่าการบำบัด

ของ TS ต่ำสุด ( $51.22 \pm 2.13$  %) ซึ่ง การบำบัด TS ที่อัตราส่วน เศษอาหารต่อหญ้าแฝก 4:1 มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่า 1.14 และ 1.60 เท่าของการใช้เศษอาหารอย่างเดียว (1:0) และหญ้าแฝกอย่างเดียว 0:1 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการบำบัด TVS พบว่ามีประสิทธิภาพการบำบัดต่ำกว่า TVS ทุก ๆ อัตราส่วนของเศษอาหารต่อหญ้าแฝก แต่แนวโน้มการบำบัดเหมือนกัน (Haider et al. , 2015) และพบว่าประสิทธิภาพการบำบัด TS เพิ่มสูงขึ้นเมื่อ การใช้สัดส่วนของอาหารสูงขึ้น (Haider et al., 2015; Brown and Li, 2013 ; Dai et al., 2013) และเมื่อศึกษาความสัมพันธ์กับผลผลิตก๊าซมีเทน (specific methane yield) ที่เกิดขึ้น พบว่าผลผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มสูงขึ้นเมื่อประสิทธิภาพการบำบัด TS เพิ่มสูงขึ้น ( Haider et al. , 2015 ; Li et al, 2010)

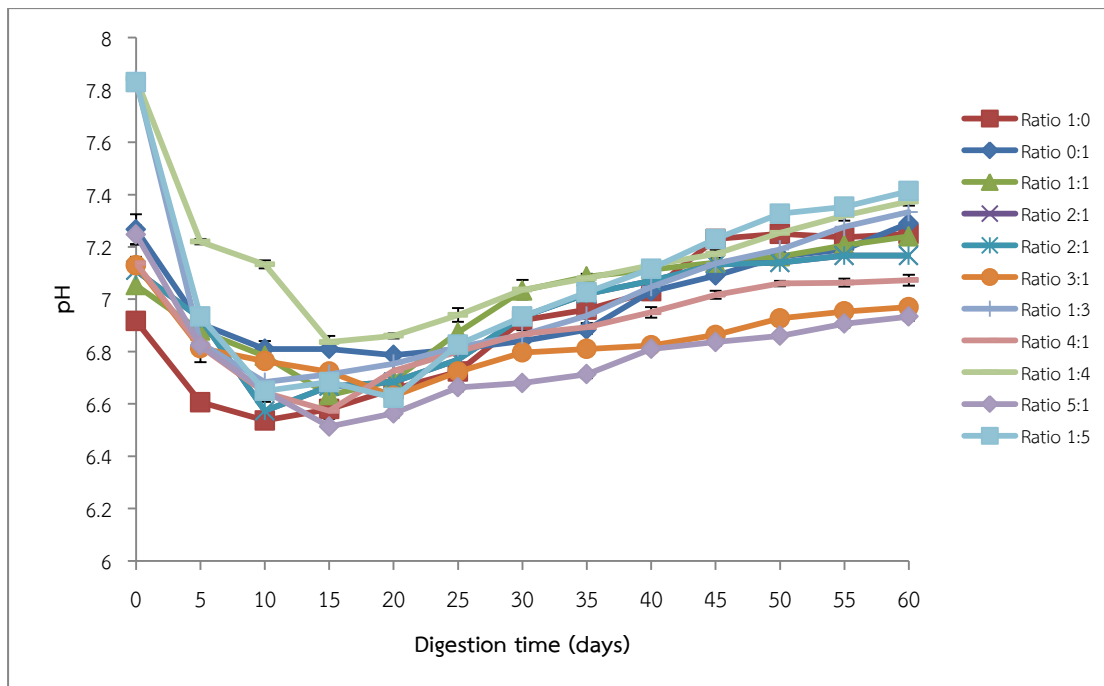
#### 4. การเปลี่ยนแปลงของพีเอช

จากการทดลองจะเห็นว่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการทดลองของทุกอัตราส่วนอาหารต่อหญ้าแฝก อยู่ในช่วง 6.53-7.43 (ภาพที่ 4.10 ) ซึ่งจัดเป็นช่วงที่เหมาะสมที่จุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้และเหมาะสมต่อการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนเพราะการผลิตก๊าซชีวภาพจะเกิดได้ดีที่พีเอช 6.5-8 (Panyadee et al., 2013; Wu et al., 2016) ถ้าพีเอชต่ำกว่า 6.5 หรือสูงกว่า 8 การผลิตก๊าซมีเทนจะถูกยับยั้ง

และจากกราฟพบว่า พีเอชของทุกอัตราส่วนจะลดลงเล็กน้อยจากพีเอชเริ่มต้น จนถึงวันที่ 15 และเริ่มเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่วันที่ 20 และการลดลงของพีเอชในถึงที่อัตราส่วนของเศษอาหารมากกว่าหญ้าแฝก เช่น 1:0, 1:1, 2:1 , 3:1, 4:1 และ 5:1 เมื่อเปรียบเทียบกับถึงที่มีอัตราส่วนของหญ้ามามากกว่าเศษอาหาร เช่น อัตราส่วน 1:2, 1:3 1:4 และ 1:5 และ 0 : 1 การลดลงของพีเอชเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ กรดไขมันระเหยง่าย (VFAs) แต่อย่างไรก็ตามการลดลงของพีเอชก็ยังสูงกว่าพีเอช 6.5 (Li et al., 2014) ซึ่งจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนสามารถดำรงชีวิตได้

ถึงที่มีอัตราส่วนของหญ้าแฝกมากกว่าอาหาร เช่น 1:2 1:3 1:4 และ 1:5 และ 0:1 การลดลงของพีเอชจะน้อยกว่าอัตราส่วนที่ใช้เศษอาหารมากเนื่องจากปริมาณ กรดไขมันระเหยง่าย (VFAs) เกิดขึ้นต่ำ

การทดลองครั้งนี้เนื่องจากค่าพีเอชอยู่ในช่วงที่เหมาะสม จุลินทรีย์สามารถสร้างมีเทนได้ จึงไม่ต้องปรับพีเอช Lin et al. (2011) ได้ทำการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารกับเศษผลไม้และผัก และพบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนการหมักที่เหมาะสม พีเอชในการเดินระบบก็อยู่ในช่วงที่เหมาะสมไม่ต้องปรับพีเอช เช่นกัน

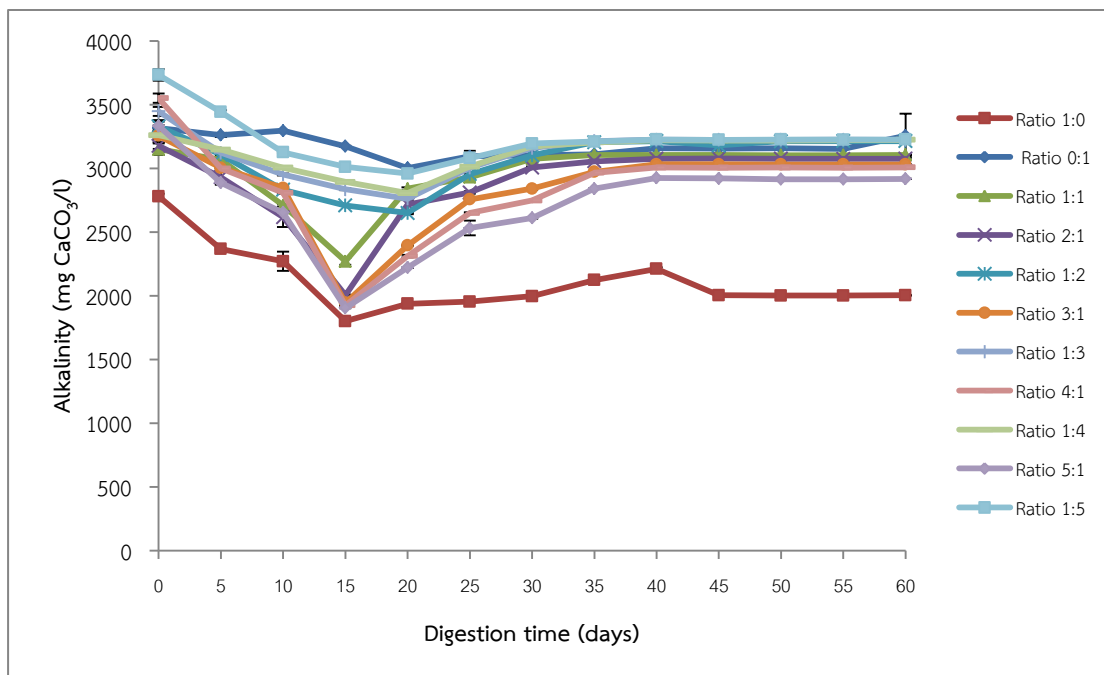


ภาพที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงของพีเอชเมื่ออัตราส่วนของเศษอาหารต่อหญ้าแฝกแตกต่างกัน

## 5. ปริมาณความเป็นด่างทั้งหมด ( Total alkalinity)

จากผลการทดลอง ภาพที่ 4.11 พบว่าปริมาณความเป็นด่างทั้งหมด (Total alkalinity) ที่พบในทุกเงื่อนไขการทดลอง เริ่มต้น อยู่ในช่วง  $2780 \pm 20 - 3733.33 \pm 45.09$  mg CaCO<sub>3</sub> /l และเริ่มลดลงสูงสุดเมื่อระยะเวลาการย่อยสลาย เป็น 15 วัน สำหรับถึงปฏิบัติการที่มีอัตราส่วนอาหารต่อหญ้าแฝก 1:0 , 1:1, 2:1, 3:1, 4:1 และ 5:1 โดยมีค่าเท่ากับ  $1801 \pm 1.73, 2270 \pm 26.45, 2005 \pm 3.6, 1945 \pm 5.00, 2311.33 \pm 10.01, 1905 \pm 5.00$  mgCaCO<sub>3</sub> /l และลดลงสูงสุดในวันที่ 20 สำหรับ ถึงปฏิบัติการที่มีอัตราส่วนอาหารต่อหญ้าแฝก 1:2, 1:3 1:4 และ 1:5 โดยมีค่าเท่ากับ  $2650 \pm 5.00, 2761.66 \pm 10.40, 2805 \pm 5.00, 2959 \pm 2.64, 3002 \pm 2.64$  mgCaCO<sub>3</sub> /l และหลังจากนั้นค่าความเป็นด่างทั้งหมดค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งแนวโน้มการลดลงและเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับค่าพีเอช ทั้งนี้เนื่องจาก เกิดการย่อยสลายในถังปฏิบัติการจะได้เป็น กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (VFA) และแอมโมเนีย ทำให้ค่าความเป็นด่างทั้งหมดลดลงและหลังจากนั้นค่าความเป็นด่างทั้งหมดค่อย ๆ เพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (VFAs) จะถูกใช้เป็นสารอาหารของจุลินทรีย์พวกสร้างมีเทนทำให้แอมโมเนียเหลือมากขึ้นและเมื่อทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำจะกลายเป็นแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตหรือสภาพต่างไบคาร์บอเนตสภาพต่างก็เลยเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าถังปฏิกริยานั้นเกิดระบบบำบัดเฟอร์โดยจะช่วยป้องกันจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทนให้สามารถทนต่อการกรด

อินทรีย์ระเหยที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งจากการทดลองจะเห็นว่าค่าปริมาณความเป็นด่างทั้งหมดของระบบ ตั้งแต่วันที่ 5- วันที่ 40 อยู่ในช่วง  $1801 \pm 1.73-3442.33 \pm 15.04$  mgCaCO<sub>3</sub>/l ซึ่งจะเห็นว่าอยู่ในช่วง 1000-5000 mgCaCO<sub>3</sub> /l ซึ่งเป็นช่วงที่ระบบมีเสถียรภาพที่ดี (Panyadee et al., 2013)



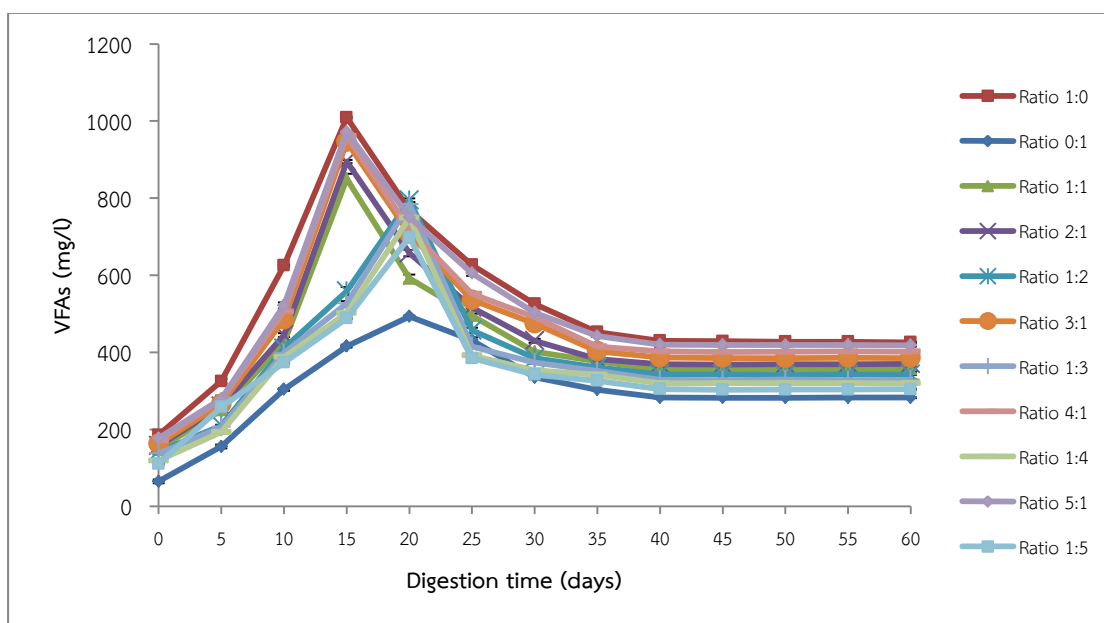
ภาพที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงความเป็นด่างทั้งหมดเมื่ออัตราส่วนของเศษอาหารต่อหญ้าแฝกแตกต่างกัน

## 6. ปริมาณของกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid, VFAs)

จากผลการทดลองภาพที่ 4.12 พบว่าปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ที่วัดในรูปกรดอะซิติก (CH<sub>3</sub>COOH) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาการย่อยสลายเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นตั้งแต่เริ่มต้นจนถึง 15 วัน สำหรับอัตราส่วน 1:0, 1:1, 2:1, 3:1, 4:1 และ 5:1 โดยมีค่าเท่ากับ  $1009.00 \pm 2.12$ ,  $850 \pm 13.07$ ,  $895 \pm 4.36$ ,  $895 \pm 4.36$ ,  $976 \pm 3.60$ ,  $961.33 \pm 2.30$ ,  $972 \pm 2.64$  mg/l หลังจากนั้น ปริมาณ VFAs จะค่อยๆ ลดลงจนถึงช่วงที่เหมาะสมที่ไม่ไปขัดขวางเสถียรภาพของระบบบำบัด สำหรับอัตราส่วนเศษอาหารต่อหญ้าแฝกที่ 1:2, 1:3, 1:4, 1:5 และ 0:1 ค่า VFAs เพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงวันที่ 20 โดยมีค่าเท่ากับ  $794.66 \pm 4.72$ ,  $784.33 \pm 4.04$ ,  $749.00 \pm 3.60$ ,  $698.66 \pm 3.21$  และ  $493.00 \pm 2.64$  mg/l ตามลำดับ และหลังจากนั้นปริมาณ VFAs จะค่อยๆ ลดลง เนื่องจากจุลินทรีย์ย่อยสลายกรดไขมันอินทรีย์ระเหยง่ายเพื่อเป็นเป็นก๊าซมีเทน จากผลการทดลองจะเห็นว่า ปริมาณ VFAs ของอัตราส่วนเศษอาหารต่อหญ้าแฝก 1:0 สูงกว่าอัตราส่วนอื่น ๆ ทั้งนี้เนื่องจากมี

สัดส่วนของเศษอาหารสูงกว่าในเงื่อนไขการทดลองอื่น ๆ (Haider et al., 2015) ส่วนปริมาณ VFA ของอัตราส่วน 5:1, 4:1, 3:1, 2:1, 1:1, 1:2, 1:3, 1:4, 1:5 และ 0:1 น้อยลงตามลำดับ

จากการทดลองจะเห็นว่าปริมาณ VFAs ของระบบทุกเงื่อนไขการทดลองไม่เกิน 5000 มิลลิกรัม/ลิตร แสดงว่าระบบไม่มีการสะสมกรดอินทรีย์ระเหยที่ไปยับยั้งการสร้างก๊าซมีเทน ถ้า VFAs เกิน 5000 มิลลิกรัม/ลิตรจะไปยับยั้งจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซมีเทน (Haider et al., 2015)



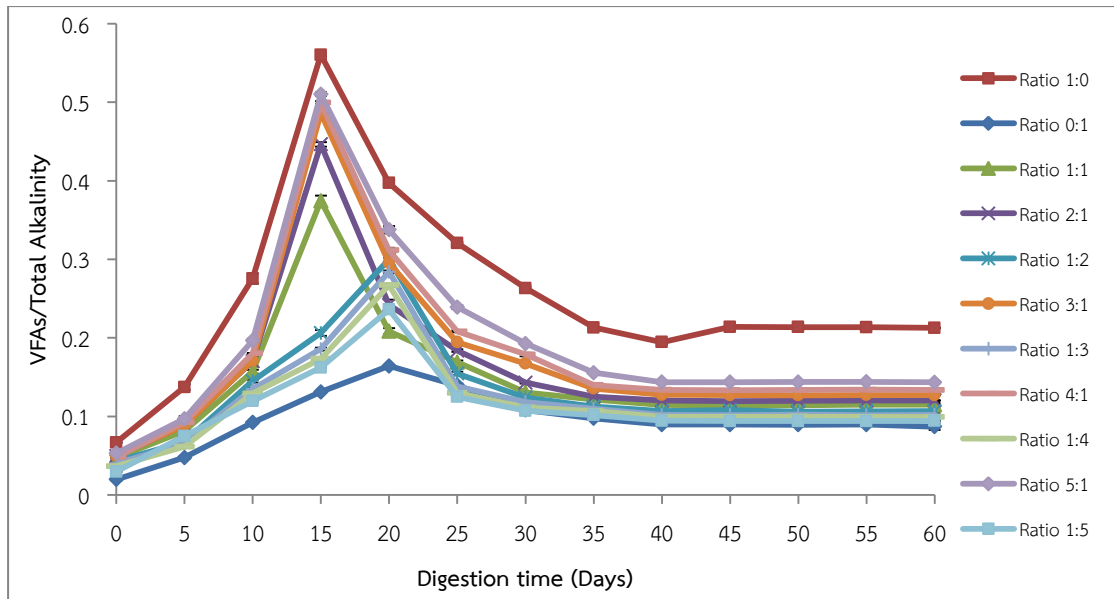
ภาพที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายเมื่ออัตราส่วนของเศษอาหารต่อหญ้าแฝกแตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาถึงอัตราส่วนของ VFA/ Total Alkalinity (ตารางที่ 4.5) พบว่าสัดส่วนของทุกเงื่อนไขอัตราส่วนเศษอาหารต่อหญ้าแฝกในวันที่ 40 ของการย่อยสลายที่ระบบอยู่ในสภาวะคงที่ (steady state) มีอัตราส่วนของ VFA/Alkalinity อยู่ในช่วง  $0.0895 \pm 0.0007$  -  $0.1944 \pm 0.0027$  ซึ่งจัดว่าระบบบำบัดมีเสถียรภาพที่ดี (stability) เพราะระบบบำบัดแบบไร้อากาศ (anaerobic digestion) อัตราส่วนเศษอาหารต่อหญ้าแฝกไม่ควรเกิน 0.4 (Kafle and Kim, 2013) และจะเห็นว่าการใช้เศษอาหารอย่างเดียว (1:0) มีค่าของ VFA/Alkalinity สูงกว่าทุกอัตราส่วน สอดคล้องกับงานวิจัยวิจัยหลายท่านที่พบว่าการใช้เศษอาหารอย่างเดียวจะให้อัตราของ VFA/Alkalinity สูงสุด (อรรรรณ วัฒนยมนาพร, 2553)

ตารางที่ 4.5 อัตราส่วนของ VFA/ Total Alkalinity ในการย่อยสลายวันที่ 40 โดย  
เงื่อนไขอัตราส่วนของเศษอาหารต่อหญ้าแฝกแตกต่างกัน

Ratio	VFAs/Total Alkalinity
1:0	0.1944±0.0027
0:1	0.0895±0.0007
1:1	0.1144±0.0015
2:1	0.1201±0.0005
3:1	0.1274±0.0005
4:1	0.1338±0.0005
5:1	0.1435±0.0005
1:2	0.1066±0.0007
1:3	0.1018±0.0006
1:4	0.0992±0.0005
1:5	0.0944±0.0004

ถ้าพิจารณาค่า VFA/Alkalinity ตั้งแต่เริ่มต้นการทดลองถึงวันที่ 60 ของระยะเวลาการย่อยสลาย (ภาพที่ 4.13) จะเห็นว่าอัตราส่วน VFA/Alkalinity สูงสุด ในวันที่ 15 สำหรับอัตราส่วนเศษอาหารต่อหญ้าแฝก ที่ 1:0, 1:1, 2:1, 3:1, 4:1, 5:1 ส่วนที่อัตราส่วน 1:2, 1:3, 1:4, 1:5 และ 0:1 VFA/Alkalinity สูงสุด ในวันที่ 20 จากนั้นค่อยๆ ลดลง และจากกราฟจะเห็นว่าส่วนใหญ่แล้วแทบทุกอัตราส่วนอัตราส่วนของ VFA/Alkalinity ไม่เกิน 0.4 แสดงให้เห็นว่าระบบบำบัดมีเสถียรภาพที่ดี ยกเว้น การย่อยสลายของวันที่ 15 ของอัตราส่วนเศษอาหารต่อหญ้าแฝก 1:0, 2:1, 3:1, 4:1 และ 5:1 มีอัตราส่วนของ VFA/Alkalinity เกิน 0.4 แต่ไม่เกิน 0.8 แสดงว่าระบบยังไม่ล้มเหลว (อรรวรรณ วัฒนยมนาพร, 2553) และเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการย่อยสลาย 60 วัน อัตราส่วนของ VFA/Alkalinity ลดลงในทุกถังปฏิกรณ์ และ VFA มีปริมาณค่อนข้างต่ำเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการย่อยสลาย 60 วันค่า VFAs อยู่ในช่วง  $282.66 \pm 1.15$ - $426 \pm 1.41$  แสดงว่า VFA ส่วนใหญ่ถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนทำให้ VFA ที่เหลือมีค่าความเข้มข้นต่ำ (Haider et al., 2015)



ภาพที่ 4.13 VFA/ Total Alkalinity เมื่ออัตราส่วนเศษอาหารต่อหญ้าแฝกแตกต่างกัน