

## อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ที่ผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียมูลโคนมสูงสุด ภายในฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

### Organic Loading Rate for Maximum Biogas Production from Dairy Cattle Manure Wastewater at Suranaree University of Technology

ศักรินทร์ พงษ์ศักดิ์ (Sakkarin Pongsak)<sup>1\*</sup> ธันชนก พรดอน (Thunchanok Porndon)\*

ฉัตรดา เพ็ญชัย (Chatlada Piasai)\* ดร.นิตยา บุญเทียน (Dr.Nittaya Boontian)\*\*

โมฮัมหมัด เพดรี (Mohamad Padri)\*\*\*

(Received: June 6, 2019; Revised: August 22, 2019; Accepted: August 24, 2019)

#### บทคัดย่อ

การหาอัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate, OLR) ที่ผลิตแก๊สชีวภาพสูงสุดจากน้ำเสีย มูลโคนม ที่ความเข้มข้น 3.00%TS ค่า OLR ที่ศึกษา 2.00 2.50 3.00 3.50 และ 4.00 kg.COD/m<sup>3</sup>-day (2.37 2.84 3.58 4.86 และ 6.03 kg.VS/m<sup>3</sup>-day) ระยะเวลาเก็บกัก (Hydraulic Retention Time) 48 วัน ทำการทดลองแบบกะ (Batch test) เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติ One-way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่าปริมาณแก๊สชีวภาพมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (α < 0.05) เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติ Tukey's พบว่า OLR 4.00 kg.COD/m<sup>3</sup>-day (6.03 kg.VS/m<sup>3</sup>-day) เป็นค่าที่แตกต่างแต่ปริมาณแก๊สชีวภาพน้อยที่สุด จึงเลือก OLR ที่ 2.00 kg.COD/m<sup>3</sup>-d (2.37 kg.VS/m<sup>3</sup>-day) ที่ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) 25.32 และ C : N : P ที่ 100 : 2.20 : 0.10 เนื่องจากสามารถผลิตแก๊สชีวภาพสูงสุด 79.80 m<sup>3</sup>/kg.COD (29.71 m<sup>3</sup>/kg.VS) จากน้ำเสียมูลโคนมน้อยที่สุด และประสิทธิภาพการกำจัดออกซิเจนละลาย (Soluble Chemical Oxygen Demand) สูงสุด (77.87%)

#### ABSTRACT

This study was aimed to determine the optimum Organic Loading Rate (OLR) for biogas production from dairy cattle manure wastewater at concentration 3.00 % TS. OLR was varied from 2.00 2.50 3.00 3.50 and 4.00 kg.COD/m<sup>3</sup>-day (2.37 2.84 3.58 4.86 and 6.03 kg.VS/m<sup>3</sup>-day) with 48-days Hydraulic Retention Time in batch test experiment. Statistical analysis of One-way ANOVA at the 95% confidence level revealed that biogas volume was significantly different (α < 0.05). Tukey's test displayed that OLR 4.00 kg.COD/m<sup>3</sup>-day (6.03 kg.VS/m<sup>3</sup>-day) had minimum biogas volume production. The result suggested that the OLR of 2.00 kg.COD/m<sup>3</sup>-day (2.37 kg.VS/m<sup>3</sup>-day) at carbon-to-nitrogen ratio (C/N ratio) 25.32 and C : N : P at 100 : 2.2 : 0.1 could produce optimum biogas volume of 79.80 m<sup>3</sup>/kg.COD (29.71 m<sup>3</sup>/kg.VS) from dairy cattle manure wastewater and the efficiency of Soluble Chemical Oxygen Demand removal up to 77.87%.

คำสำคัญ: น้ำเสียมูลโคนม อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ แก๊สชีวภาพ

**Keywords:** Biogas, Dairy cattle manure wastewater, Organic loading rate

<sup>1</sup>Corresponding author: n.boontian@sut.ac.th

\*นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

\*\*ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

\*\*\*นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## บทนำ

อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate, OLR) เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ เนื่องจากการป้อนปริมาณของสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบอย่างเหมาะสมนั้นจะทำให้เกิดการย่อยสลายแบบสมบูรณ์ และทำให้เกิดความสมดุลของสารอินทรีย์กับจุลินทรีย์ (Food per Microorganism, F/M ratio) ค่าที่เหมาะสมกับระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศอยู่ที่  $0.20 - 0.60 \text{ day}^{-1}$  ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการบำบัดและการผลิตแก๊สชีวภาพ [1] กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพแบบไม่ใช้อากาศต้องอาศัยแบคทีเรียในกลุ่มผลิตกรด (Acid-forming bacteria) ย่อยสลายสารอินทรีย์ในขั้น Hydrolysis ผลที่ได้คือกรดไขมันที่ระเหยง่าย (Volatile Fatty Acids, VFAs) ในรูป แอซิเตต (Acetate) โดยแบคทีเรียกลุ่มผลิตแก๊สมีเทน (Methane-producing bacteria) สามารถนำมาใช้ผลิตแก๊สชีวภาพได้ในขั้น Methanogenesis [2] ค่า C : N : P ที่เหมาะสมในระบบผลิตแก๊สชีวภาพคือ  $100 : 1.1 : 0.2$  [3] และ ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ที่เหมาะสมคือ  $8 - 30$  แต่อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพคือประมาณ 23 [4] ถ้าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงมาก ไนโตรเจนจะถูก Methane-producing bacteria นำไปใช้เพื่อเสริมโปรตีนให้ตัวเองและจะหมดอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ได้แก๊สน้อยแต่ถ้าหาก C/N Ratio ต่ำมาก ๆ ก็จะทำให้ไนโตรเจนมีมากและไปเกาะกันเป็นแอมโมเนีย แอมโมเนียจะไปเพิ่มค่า pH ซึ่งถ้าหากค่า pH สูงถึง 8.5 ก็จะเริ่มเป็นพิษกับ Methane-producing bacteria ทำให้มีจำนวนลดลง [4]

โดยการศึกษางานวิจัยอื่น ๆ พบว่ามีการใช้ค่า OLR ที่ต่างกันดังนี้ Castrillon [5] ศึกษาอิทธิพลของ OLR และระยะเวลาเก็บกัก (Hydraulic Retention Time, HRT) ต่อการบำบัดมูลโคนมในถังปฏิกรณ์แบบ Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) ศึกษา OLR ที่ 8.63 5.22 4.19 4.32 3.68 และ 2.35  $\text{kg.COD/m}^3\text{-day}$  และที่ HRT 5.30 7.30 8.90 10.60 16 และ 22 วัน ตามลำดับ พบว่า OLR 2.35  $\text{kg.COD/m}^3\text{-day}$  ที่ HRT 22.50 วัน ค่า C/N ratio คือ 28 ค่า C : N : P คือ  $100 : 3.57 : 0.27$  มีปริมาณแก๊สชีวภาพสูงสุดที่  $0.39 \text{ m}^3/\text{kg.COD}$  แก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) 68.30% การกำจัด COD สูงสุด 75.50% ซึ่งทดลองในระบบ UASB เช่นเดียวกับ Yetilmezsoy [6] ศึกษาแบบจำลองแบบเส้นเพื่อประเมินประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์แบบ UASB ที่ทำการบำบัด น้ำเสียจากมูลสัตว์ ขนาดถังปฏิกรณ์ 15.70 l ค่า C/N ratio คือ 8 ค่า C : N : P คือ  $100 : 12.66 : 3.2$  ที่ C/N ratio 8.00 พบว่าที่ OLR 3.79  $\text{kg.COD/m}^3\text{-day}$  การกำจัด COD สูงสุด 90% ปริมาณแก๊สชีวภาพสูงสุดที่  $0.45 \text{ m}^3/\text{kg.COD}$  ซึ่งมีปริมาณแก๊สชีวภาพใกล้เคียงกันกับ Riggo [7] โดยใช้ค่า OLR ที่เหมาะสมเท่ากับ 2.65  $\text{kg.COD/m}^3\text{-day}$  (2.75  $\text{kg.VS/m}^3\text{-day}$ ) ทำการทดลองแบบกะ ปริมาตรถังปฏิกรณ์ 128 l ปริมาณแก๊สชีวภาพ  $0.40 \text{ m}^3/\text{kg.VS}$  การกำจัด COD สูงสุด 63.30% ในการศึกษาการผลิตพลังงานจากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศของการหมักร่วมของ มูลโค ถากมะกอก และกากแอปเปิ้ล ตามลำดับ โดยใช้สัดส่วน 75% : 15% : 10% ตามลำดับ ศึกษาที่ 7.33%TS HRT 40 วัน ค่า C/N ratio คือ 90.59 ทำการทดลองแบบกะเช่นเดียวกับ Sutarut [8] การพัฒนาถังผลิตแก๊สชีวภาพจากขยะอินทรีย์ ใช้เศษอาหารและมูลโคผสมมูลสุกรเป็นขยะอินทรีย์ ขนาดถังปฏิกรณ์ 1,000 l พบว่า OLR ที่เหมาะสมอยู่ที่ 2.42  $\text{kg.COD/m}^3\text{-day}$  HRT 20 วัน ศึกษาที่ 4%TS ค่า C/N ratio คือ 100.15 ปริมาณแก๊สชีวภาพ  $0.28 \text{ m}^3/\text{kg.VS}$  ( $0.08 \text{ m}^3/\text{kg.COD}$ ) ประสิทธิภาพการกำจัด COD 57.45% หลังจากนั้นได้ทำการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous) ขนาดถังปฏิกรณ์ 1,000 l ค่า C/N ratio คือ 100.15 ค่า OLR ที่เหมาะสม 3.61  $\text{kg.COD/m}^3\text{-day}$  HRT 38 วัน ปริมาณแก๊สชีวภาพ  $0.63 \text{ m}^3/\text{kg.VS}$  ( $0.12 \text{ m}^3/\text{kg.COD}$ ) ประสิทธิภาพการกำจัด COD 65.83% โดยที่ค่า OLR ใน การทดลองมีค่าใกล้เคียงกับ Rico [9] ทำการศึกษาย่อยสลายแบบ ไม่ใช้อากาศของส่วนที่เป็นของเหลวของมูลโคที่ OLR ต่าง ๆ ในโรงงานต้นแบบเพื่อผลิตแก๊สชีวภาพ ทำการทดลองด้วยระบบ CSTR ที่ OLR 2.00 2.10 3.50 และ 4.50  $\text{kg.VS/m}^3\text{-day}$  ตามลำดับ ทดลองที่ HRT 10 12.50 16.70 และ 20 วัน ตามลำดับ พบว่าที่ OLR 3.50  $\text{kg.VS/m}^3\text{-day}$  HRT

12.50 วัน ที่ C : N : P ที่ 100 : 6.45 : 1.92 และ C/N ratio ที่ 15.51 มีประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพสูงสุดที่ 0.35  $\text{m}^3/\text{kg.VS}$  ประสิทธิภาพการกำจัด COD 42.16% ในการทดลองระบบ CSTR เช่นเดียวกันยังใช้ค่า OLR ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Sinbuahtong [10] ศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนจากหญ้าเนเปียร์หมักร่วมกับมูลโค ศึกษาอัตราส่วน หญ้าเนเปียร์ : มูลโคเข้มข้น 20% : น้ำ พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 10% : 10% : 80% ค่า OLR ที่เหมาะสม 3.30  $\text{kg.COD}/\text{m}^3\text{-day}$  HRT 40 วัน ทำการทดลองแบบ Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR) ขนาดถังปฏิกรณ์ 5.00 ลิ อัตราการป้อนอาหาร 125 ml/day ปริมาณแก๊สชีวภาพ 0.34  $\text{m}^3/\text{kg.COD}$  การกำจัด COD สูงสุด 65.00% และยังใกล้เคียงกับ Wang [11] เพื่อพิจารณาปรับปรุงการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของมูลโค ฟางข้าวโพดและเศษผักและผลไม้ค่า OLR ที่ศึกษา 2.52 2.61 และ 2.63  $\text{kg.VS}/\text{m}^3\text{-day}$  ตามลำดับ ค่าเหมาะสมอยู่ที่ 2.52  $\text{kg.VS}/\text{m}^3\text{-day}$  ศึกษาที่ 6%TS ทำการทดลองแบบ CSTR ค่า C/N ratio คือ 50 ปริมาณแก๊สชีวภาพ 0.20  $\text{m}^3/\text{kg.VS}$  ซึ่งมีปริมาณแก๊สชีวภาพทำนองเดียวกันกับ Risberg [12] ปริมาณแก๊สชีวภาพ 0.21  $\text{m}^3/\text{kg.VS}$  ศึกษา OLR ที่เหมาะสมอยู่ที่ 2.80  $\text{kg.VS}/\text{m}^3\text{-day}$  การกำจัด COD 65.00% ศึกษาฟางข้าวที่ผ่านการบำบัดและไม่ผ่านการบำบัดด้วยไอน้ำหมักร่วมกับมูลโค HRT 25 วัน ทำการทดลองแบบ CSTR ปริมาตรถังปฏิกรณ์ 5 ลิ ศึกษาที่ C/N ratio เท่ากับ 30.00 พบว่าการย่อยด้วยฟางข้าวที่ผ่านการบำบัดด้วยไอน้ำให้ผลผลิตใกล้เคียงกันฟางข้าวที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดเนื่องจากการบำบัดด้วยไอน้ำของฟางข้าวไม่ได้เพิ่มผลผลิตก๊าซ และงานวิจัยของ Rintala [13] ทำการศึกษาการย่อยสลายร่วมของหญ้าหมักและมูลโคในระบบ CSTR โดยการหมุนเวียนของของแข็งที่ผ่านการบำบัดด้วยอัลคาไล ปรับด้วยสารเคมี NaOH ค่า OLR ที่เหมาะสมอยู่ที่ 2.00  $\text{kg.VS}/\text{m}^3\text{-day}$  HRT 20 วัน การกำจัด COD 46.00% ใช้ค่า OLR น้อยกว่าแต่ปริมาณแก๊สชีวภาพใกล้เคียงกันมาก ส่วนงานวิจัยของ Arikani [14] ศึกษา OLR ที่เหมาะสมอยู่ที่ 2.60  $\text{kg.VS}/\text{m}^3\text{-day}$  ในการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการผลิตแก๊สมีเทนจากเครื่องย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่บำบัดมูลโค ที่อุณหภูมิ 22 27 และ 35 °C ทำการทดลองแบบเครื่องย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบ เอฟเอส (Field-Scale, FS) พบว่าที่ 35 °C ที่ HRT 17 วัน ที่ C : N : P ที่ 100 : 5.57 : 0.98 และ C/N ratio ที่ 17.94 มีปริมาณแก๊สชีวภาพ 0.23  $\text{m}^3/\text{kg.VS}$  การกำจัดสูงสุด COD 80.00%

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าที่ OLR ต่างกันส่งผลให้เกิดปริมาณแก๊สชีวภาพที่แตกต่างกัน และนอกจากนี้ค่า OLR ยังไม่มีค่าที่เฉพาะเจาะจงสำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียมูลโคนม งานวิจัยนี้จึงศึกษาค่า OLR ที่สามารถผลิตแก๊สชีวภาพสูงสุดและมีประสิทธิภาพการกำจัด COD สูงสุด จากน้ำเสียมูลโคนมภายในฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงระบบผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียมูลโคนม

## วัตถุประสงค์การวิจัย

อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate) ที่สามารถผลิตแก๊สชีวภาพสูงสุดและมีประสิทธิภาพการกำจัด COD สูงสุด จากน้ำเสียมูลโคนมภายในฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## วิธีศึกษา

- 1) ศึกษาคุณลักษณะทางเคมีของมูลโคนม Acid-forming bacteria และ Methane-producing bacteria

เก็บมูลโคนมจากฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยเก็บตัวอย่างมูลโคสดไม่เกิน 6 ชั่วโมง พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์มูลโคสดได้แก่ COD VFAs Alkalinity ของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS) ของแข็งระเหยง่าย (Total volatile solids, TVS) ไนโตรเจน (Total Kjeldahl Nitrogen, TKN) และฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total phosphorus, TP) แสดงดังตารางที่ 1 ความถี่ในการวิเคราะห์ตัวอย่างมูลโคนมจำนวน 1 ครั้ง โดยทำซ้ำ 3 ตัวอย่าง วิเคราะห์ผลตาม Standard method for examination of water and wastewater (APHA) [15]

**ตารางที่ 1** ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของน้ำเสียมูลโคนม

| Parameter                               | result     |
|-----------------------------------------|------------|
| COD (mg/l)                              | 95,586.67  |
| VFAs (mg/l)                             | 5,194.80   |
| TS (mg/l)                               | 108,216.67 |
| TVS (mg/l)                              | 81,500.00  |
| TKN (mg/l)                              | 140.00     |
| TP (mg/l)                               | 18.91      |
| Alkalinity (mg/l as CaCO <sub>3</sub> ) | 15,000.00  |

จาก ตารางที่ 1 การวิเคราะห์มูลโคนม พบว่า COD มีค่า 95,586.67 mg/l ในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์ในรูป COD เป็นก๊าซมีเทนด้วยปฏิกิริยาชีวเคมีแบบไร้ออกซิเจนเป็นสารที่มีโมเลกุลเล็กในรูป VFAs ด้วย Acid-forming bacteria [16] ต่อมาค่า VFAs 5,194.80 mg/l มีความสำคัญในการตรวจสอบสมดุลของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ อยู่ในรูปของ Acetic acid Propionic acid และ Lactic acid และอื่น ๆ ผลผลิตเหล่านี้เป็นสารตัวกลางส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศของแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดอีกทั้งยังเป็นสารอาหารให้ Methane-producing bacteria คือ Acetic acid [17] ต่อมา TVS 81,500.00 mg/l ซึ่งมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง ค่า TVS เป็นส่วนของแข็งที่เป็นสารอินทรีย์จะเป็นตัวชี้วัดย่อยสลายของสารอินทรีย์ไปเป็นแก๊สชีวภาพ ถ้าค่า TVS สูงแสดงว่าการเปลี่ยนไปเป็นแก๊สชีวภาพมีโอกาสเกิดขึ้นค่อนข้างง่าย เนื่องจากมูลโคนมเข้มข้นของค่า TVS มีความเหมาะสมต่อการผลิตแก๊สชีวภาพ พารามิเตอร์ควบคุมระบบที่สำคัญคือ Alkalinity จะเป็นตัวควบคุมการทำงานของระบบผลิตแก๊สชีวภาพเพราะมีแนวโน้มจะเป็นกรดได้ง่ายมีค่าประมาณ 1,000 – 5,000 mg/l as CaCO<sub>3</sub> และ VFAs ที่ถูกสร้างจาก Acid-forming bacteria ซึ่งจะถูกนำไปใช้โดย Methane-producing bacteria ถ้าระบบมีค่ามากเกินไปจะทำให้ pH ลดลง ทำให้อันตรายต่อ Methane-producing bacteria โดย pH ในระบบผลิตแก๊สชีวภาพควรมีค่า pH 7 ค่า VFAs/Alkalinity ในระบบผลิตแก๊สชีวภาพควรมีน้อยกว่า 0.4 [18] และอัตราส่วน COD : N : P ที่เหมาะสมคือ 100 : 1 : 0.20 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์อยู่ที่ 0.34 และ 100 : 0.15 : 0.02 ตามลำดับ [16] อีกทั้ง TKN 140 mg/l ถ้ามีค่าสูงจะถูก Methane-producing bacteria นำไปใช้เพื่อเสริมโปรตีนให้เซลล์และจะหมดอย่างรวดเร็ว ทำให้ได้แก๊สชีวภาพน้อยลง [4] พารามิเตอร์ในระบบต้องอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตแก๊สชีวภาพ

แบคทีเรียที่ใช้ในระบบผลิตแก๊สชีวภาพมี 2 ประเภท (1) Acid-forming bacteria นำมาแบคทีเรียมาจากบ่อหมักสภาวะกรด และ (2) Methane-producing bacteria นำมาจากบ่อผลิตแก๊สชีวภาพ โดยทำการศึกษาลักษณะทางเคมีของแบคทีเรียทั้ง 2 ประเภท ซึ่ง Acid-forming bacteria เป็นกลุ่มแบคทีเรียในกลุ่มผลิตกรด แบ่งได้เป็น 2 กลุ่มดังนี้ Acidogenic bacteria และ Acitogenic Bacteria ซึ่งจะย่อยสลายสารอินทรีย์ให้อยู่ในรูป VFAs พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ได้แก่ COD มีค่า 7,466.67 mg/l และ VFAs มีค่า 3,584.41 mg/l ตามลำดับ ส่วน Methane-producing bacteria ซึ่งจะทำหน้าที่เปลี่ยน Acetate ไปเป็น CO<sub>2</sub> และ CH<sub>4</sub> พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ ปริมาณสารอินทรีย์ระเหย (Mixed Liquid Volatile Suspended Solids, MLVSS) มีค่า 9,656.67 mg/l แต่ละพารามิเตอร์วิเคราะห์จำนวน 3 ครั้ง วิเคราะห์ผลตาม APHA [15]

## 2) ออกแบบชุดการทดลอง วิธีการทดลองและการวิเคราะห์ตัวอย่าง

ใช้ถังพลาสติกแข็งแรงรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด 5 ลิ มีสายยางซิลิโคนเชื่อมต่อถังหมักแก๊สชีวภาพกับอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาตรของแก๊สที่ผลิตได้ด้วยหลักการแทนที่น้ำ แสดงดัง ภาพที่ 1



ภาพที่ 1 การทดลองแบบกะ ที่ effective volume 5 ลิ ระยะเวลาเก็บกัก 48 วัน และใน 1 เซตประกอบด้วย 3 แกลงลอน :

Biogas reactor, Water tank and Storage tank

ผสมมูล โคขุนกับ Acid-forming bacteria หาค่า 3.00%TS ค่า SCOD เท่ากับ 11,735.11 mg/l และค่า OLR คือ 2.00 2.50 3.00 3.50 และ 4.00 kg.COD/m<sup>3</sup>-day ตามลำดับ ค่า F/M ratio 0.25 0.33 0.42 0.52 และ 0.62 day<sup>-1</sup> ตามลำดับ แสดงดัง ตารางที่ 2 ค่า F/M ratio ที่เหมาะสมกับระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศอยู่ที่ 0.20 – 0.60 day<sup>-1</sup> ทำให้เกิดประสิทธิภาพผลิตแก๊สชีวภาพสูงสุด [1] ค่าที่ C/N ratio ที่ OLR ต่าง ๆ คือ 25.32 29.96 30.61 32.20 และ 32.97 ตามลำดับ และ C : N : P 100 : 2.2 : 0.1 100 : 2.2 : 0.1 100 : 1.6 : 0.09 100 : 0.2 : 0.01 และ 100 : 0.1 : 0.08 ตามลำดับเมื่อ ได้สัดส่วนที่เหมาะสมนำมาหมักรวมกัน และวัดค่า VFAs ไม่น้อยกว่า 2,000 mg/l เมื่อได้แล้วนำมาปรับ pH 7 นำ Methane-producing bacteria มาผสมให้เข้ากันแบบสมบูรณ์ โดยการทดลองแบบกะมีการเติมน้ำเสียมูลโคขุนเพียงครั้งเดียวตลอดระยะเวลาในการเดินระบบ โดยทำการทดลองทั้งสิ้น 5 ชุดการทดลอง แต่ละชุดการทดลองทำ 5 ซ้ำ เพื่อความแม่นยำ ระยะเวลาในการเก็บกักรวมทั้งสิ้น 48 วัน

ตารางที่ 2 OLR กับความสัมพันธ์ที่ F/M ratio ต่าง ๆ

| OLR<br>(kg.COD/m <sup>3</sup> -d) | OLR<br>(kg.VS/m <sup>3</sup> -d) | F/M ratios<br>(day <sup>-1</sup> ) |
|-----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| 2.00                              | 2.37                             | 0.25                               |
| 2.50                              | 2.84                             | 0.33                               |
| 3.00                              | 3.58                             | 0.42                               |
| 3.50                              | 4.86                             | 0.52                               |
| 4.00                              | 6.03                             | 0.62                               |

## ผลการวิจัย

### 1) การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบ

ประสิทธิภาพในการเดินระบบผลิตแก๊สชีวภาพที่ OLR ต่าง ๆ ทำการวัดพารามิเตอร์ของตัวอย่างน้ำเข้าและออกจากระบบ ซีโอดีละลายน้ำ (Soluble Chemical Oxygen Demand, SCOD) TKN TS TP Alkalinity และ pH ความถี่

ในการวิเคราะห์ตัวอย่างพารามิเตอร์น้ำเสียมูลโคนมที่เข้าและออกจากระบบ จำนวน 2 ครั้ง โดยทำซ้ำ 3 ตัวอย่าง แต่ละพารามิเตอร์ วิเคราะห์ผลตาม APHA แสดงดัง ตารางที่ 3

**ตารางที่ 3** พารามิเตอร์น้ำเสียมูลโคนมที่เข้าและออกจากระบบ ที่ HRT 48 วัน ผลผลิตแก๊สชีวภาพที่ OLR 2.00 2.50 3.00 3.50 และ 4.00 kg.COD/m<sup>3</sup>-day.

| Efficiency (%)                             | OLR = 2.00* | OLR = 2.50* | OLR = 3.00* | OLR = 3.50* | OLR = 4.00* |
|--------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| SCOD                                       | 77.87       | 59.36       | 38.34       | 34.27       | 29.19       |
| TKN                                        | 87.73       | 70.81       | 69.82       | 67.74       | 63.35       |
| TS                                         | 84.72       | 83.67       | 82.75       | 83.64       | 85.11       |
| TP                                         | 20.64       | 39.97       | 39.31       | 50.71       | 53.45       |
| Alkalinity<br>(mg/l as CaCO <sub>3</sub> ) | 2,848.00    | 2,918.00    | 3,152.00    | 3,426.00    | 3,464.00    |
| pH                                         | 7.27        | 7.34        | 7.44        | 7.61        | 7.64        |

\*หน่วย kg.COD/m<sup>3</sup>-day

จาก ตารางที่ 3 นำประสิทธิภาพไปทดสอบทางสถิติ One-Way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เพื่อหาข้อมูลที่แตกต่างกันมีนัยสำคัญ (sig < 0.05) จากนั้นต้องทำการวิเคราะห์ค่าทางสถิติ Tukey's ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เพื่อบ่งชี้ข้อมูลที่แตกต่างกัน ใช้โปรแกรม IBM SPSS Statistics V.16 การกำจัด SCOD ที่ OLR ต่าง ๆ มีค่าแตกต่างกัน การกำจัด SCOD สูงสุด 77.87% การกำจัด TKN ที่ OLR ต่าง ๆ มีค่าแตกต่างกัน พบว่าการกำจัด TKN สูงสุด 87.73% การกำจัด TP ที่ OLR ต่าง ๆ มีค่าแตกต่างกันพบว่าสูงสุดอยู่ในช่วง 50.71 – 53.45% การกำจัด TS ที่ OLR ต่าง ๆ ไม่มีค่าแตกต่างกัน การกำจัดสูงสุดอยู่ที่ 82.75 – 85.11% พบว่าที่ OLR 2.00 kg.COD/m<sup>3</sup>-day (2.37 kg.VS/m<sup>3</sup>-day) มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัด SCOD สูงสุด 77.87% ประสิทธิภาพการกำจัด TKN สูงสุด 87.73% ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดพารามิเตอร์อื่น ๆ มีค่าสูงแต่ไม่แตกต่างกัน เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัด COD ที่ทำการทดลองแบบกะ เมื่อ OLR ที่สูงขึ้นจะมีประสิทธิภาพการกำจัด COD ที่ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยต่าง ๆ

เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัด COD กับงานวิจัยอื่น ๆ พบว่าที่ทำการทดลองแบบกะเมื่อ OLR ที่สูงขึ้นจะมีประสิทธิภาพการกำจัด COD ที่ลดลง จะเห็นได้ว่า OLR ในงานวิจัยนี้มีค่าต่ำกว่างานวิจัยอื่น ๆ แต่ประสิทธิภาพการกำจัด COD สูงกว่าในการทดลองแบบกะเหมือนกัน ส่วนการทดลองแบบต่อเนื่องจะใช้ OLR ที่สูงขึ้น เนื่องจากระบบจะมีการรองรับ OLR ได้สูงกว่า การกำจัด COD ก็จะสูงตามไปด้วย จากการกวนผสมตลอดการหมักจะทำให้แบคทีเรียสามารถย่อยสารอินทรีย์ได้ดีย่อมจะมีประสิทธิภาพสูงกว่า แสดงดังตารางที่ 4 และ ตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่าที่ OLR ต่างกันก็จะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด COD ต่างกัน จากงานวิจัยนี้ ที่ 2.00 kg.COD/m<sup>3</sup>-day (2.37 kg.VS/m<sup>3</sup>-day) มีสัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ พบว่า งานวิจัยนี้มีค่าสัดส่วนที่เหมาะสมมากกว่างานวิจัยอื่น ๆ ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัด COD สูงและมีปริมาณแก๊สชีวภาพที่สูง แสดงดังตารางที่ 4 และ ตารางที่ 5





ตารางที่ 4 ผลของการศึกษาเมื่อเปรียบเทียบความสัมพัทธ์กับงานวิจัยต่าง ๆ ที่หน่วย kg.COD/m<sup>3</sup>-day

| Researcher          | System          | Optimum OLR<br>kg.COD/m <sup>3</sup> -day | COD removal<br>(%) | C:N:P              | C/N ratio | Biogas Volume                                               |
|---------------------|-----------------|-------------------------------------------|--------------------|--------------------|-----------|-------------------------------------------------------------|
| This study          | Batch           | 2.00                                      | 77.87              | 100 : 2.20 : 0.10  | 25.32     | 29.71 m <sup>3</sup> /kg.VS (79.80 m <sup>3</sup> /kg.COD)  |
| This study          | Batch           | -                                         | 59.36              | 100 : 2.20 : 0.01  | 29.96     | 24.40 m <sup>3</sup> /kg.VS (116.07 m <sup>3</sup> /kg.COD) |
| This study          | Batch           | -                                         | 38.34              | 100 : 1.60 : 0.09  | 30.61     | 19.73 m <sup>3</sup> /kg.VS (107.18 m <sup>3</sup> /kg.COD) |
| This study          | Batch           | -                                         | 29.19              | 100 : 0.02 : 0.01  | 32.30     | 17.61 m <sup>3</sup> /kg.VS (152.05 m <sup>3</sup> /kg.COD) |
| This study          | Batch           | -                                         | 34.27              | 100 : 0.10 : 0.08  | 32.97     | 13.06 m <sup>3</sup> /kg.VS (70.16 m <sup>3</sup> /kg.COD)  |
| Ormaechea [28]      | IBR             | 5.41                                      | 80.70              | 100 : 1.68 : 1.35  | 59.49     | 56.50 m <sup>3</sup> /kg.VS                                 |
| Riggo [7]           | Batch           | 2.65                                      | 63.30              | -                  | 90.59     | 0.40 m <sup>3</sup> /kg.VS                                  |
| Sinbuathong et [10] | CSTR            | 3.30                                      | 65.00              | -                  | -         | 0.34 m <sup>3</sup> /kg COD                                 |
| Nikolaeva et [26]   | AFBRs           | 4.40                                      | 82.10              | -                  | -         | -                                                           |
| Liu et [27]         | IC Reactor      | 3.50                                      | 70-80              | -                  | 2.40      | 0.34-0.80m <sup>3</sup> /kgCOD                              |
| Sutarut [8]         | Batch           | 2.42                                      | 57.45              | -                  | 100.15    | 0.28 m <sup>3</sup> /kg.VS                                  |
| Sutarut [8]         | Semi-continuous | 3.61                                      | 65.83              | -                  | 100.15    | 0.63 m <sup>3</sup> /kg.VS                                  |
| Lee [20]            | Two stage       | 4.16                                      | 89.00              | 100 : 2.67 : 0.20  | 37.5      | -                                                           |
| Dareioti [21]       | Two stage       | 5.50                                      | 75.00-85.00        | 100 : 6.44 : 1.09  | 15.52     | 0.31 m <sup>3</sup> /kg.COD                                 |
| Yetilmezsoy [6]     | UASB            | 3.79                                      | 90.00              | 100 : 12.66 : 3.20 | 8         | 0.45 m <sup>3</sup> /kg COD                                 |
| Venkata [25]        | AnSBR           | 2.40                                      | 64.70              | -                  | -         | -                                                           |
| Castrillon [23]     | CSTR            | 3.68                                      | 69.70              | 100 : 0.01 : 0.01  | -         | 0.20 m <sup>3</sup> /kg.COD                                 |
| Castrillón [5]      | UASB            | 2.35                                      | 75.50              | 100 : 3.57 : 0.20  | 28        | 0.39 m <sup>3</sup> /kg COD                                 |



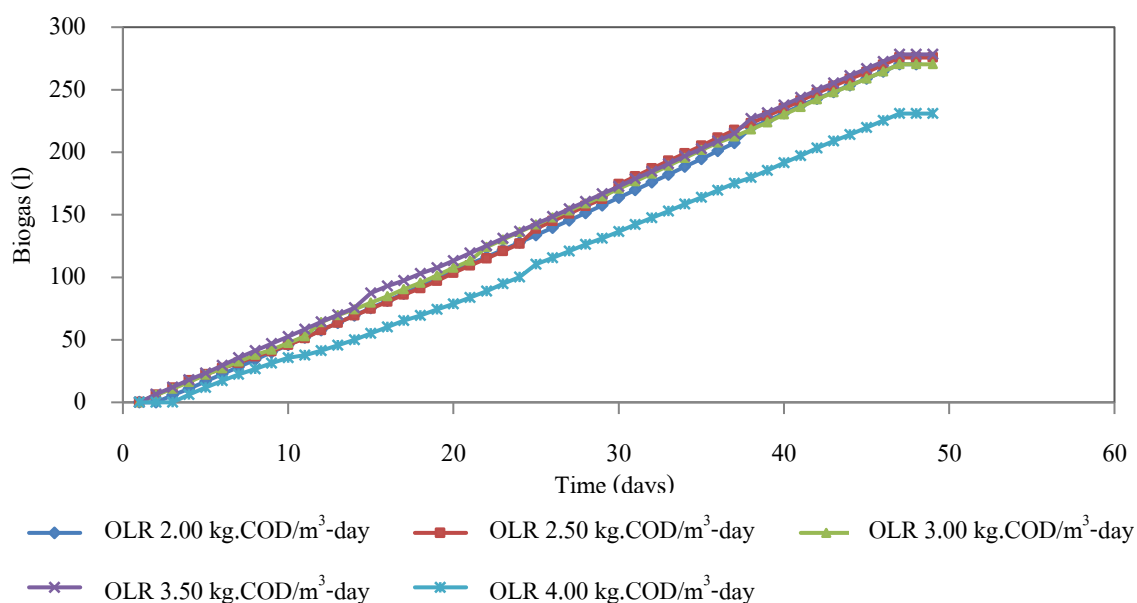
ตารางที่ 5 ผลของการศึกษาเมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์กับงานวิจัยต่าง ๆ ที่หน่วย kg.VS/m<sup>3</sup>-day

| Researcher   | System          | Optimum OLR<br>kg.VS/m <sup>3</sup> -day | COD removal<br>(%) | C:N:P             | C/N ratio | Biogas Volume                                               |
|--------------|-----------------|------------------------------------------|--------------------|-------------------|-----------|-------------------------------------------------------------|
| This study   | Batch           | 2.37                                     | 77.87              | -                 | -         | 29.71 m <sup>3</sup> /kg.VS (79.80 m <sup>3</sup> /kg.COD)  |
| This study   | Batch           | -                                        | 59.36              | -                 | -         | 24.40 m <sup>3</sup> /kg.VS (116.07 m <sup>3</sup> /kg.COD) |
| This study   | Batch           | -                                        | 38.34              | -                 | -         | 19.73 m <sup>3</sup> /kg.VS (107.18 m <sup>3</sup> /kg.COD) |
| This study   | Batch           | -                                        | 29.19              | -                 | -         | 17.61 m <sup>3</sup> /kg.VS (152.05 m <sup>3</sup> /kg.COD) |
| This study   | Batch           | -                                        | 34.27              | -                 | -         | 13.06 m <sup>3</sup> /kg.VS(70.16 m <sup>3</sup> /kg.COD)   |
| Wang [11]    | CSTR            | 2.52                                     | -                  | -                 | -         | 0.20 m <sup>3</sup> /kg.VS                                  |
| Soheil [22]  | CSTR            | 2.00                                     | 80.00              | -                 | -         | 268.00 m <sup>3</sup> /kg.VS                                |
| Montoya [19] | UASB            | 6.20                                     | 72.20              | -                 | -         | -                                                           |
| Riggo [7]    | Batch           | 2.75                                     | 63.30              | -                 | -         | 0.40 m <sup>3</sup> /kg.VS                                  |
| Lindner [31] | CSTR            | 4.90                                     | -                  | -                 | -         | 500.00 m <sup>3</sup> /kg.COD                               |
| Lindner [31] | Two stage       | 2.20                                     | -                  | -                 | -         | 554 m <sup>3</sup> /kgVS                                    |
| Arikan [14]  | Continuous      | 2.60                                     | 80.00              | 100 : 5.57 : 0.98 | 17.94     | 0.23 m <sup>3</sup> /kg.VS                                  |
| Fred et [32] | Semi-continuous | 2.00                                     | -                  | -                 | -         | 0.47 m <sup>3</sup> -day                                    |
| Risberg [12] | CSTR            | 2.80                                     | 65.00              | -                 | -         | 0.21 l/kg.VS                                                |
| Rintala [13] | CSTR            | 3.84                                     | 46.00              | -                 | -         | -                                                           |
| Rico et [9]  | CSTR            | 3.50                                     | 42.16              | -                 | -         | 0.35 m <sup>3</sup> /kg.VS                                  |
| Fang [24]    | CSTR            | 1.70                                     | 60.00              | -                 | -         | -                                                           |
| Comino [30]  | Batch           | 5.15                                     | -                  | -                 | -         | 0.48 m <sup>3</sup> /kg VS                                  |
| Liden [33]   | Semi-continuous | 2.00                                     | 50.00              | -                 | -         | -                                                           |



จากตารางที่ 4 และตารางที่ 5 งานวิจัยนี้ได้สัดส่วน C/N ratio และ C : N : P ที่ OLR 2.00 2.50 3.00 3.50 และ 4.00 kg.COD/m<sup>3</sup>-day (2.37 2.84 3.58 4.86 และ 6.03 kg.VS/m<sup>3</sup>-day) ตามลำดับ ที่ C/N ratio 25.32 29.96 30.61 32.20 และ 32.97 ตามลำดับ และ C : N : P ที่ 100 : 2.20 : 0.10 100 : 2.20 : 0.10 100 : 1.60 : 0.09 100 : 0.20 : 0.01 และ 100 : 0.10 : 0.08 ตามลำดับ สำหรับค่า C : N : P ที่เหมาะสมในระบบผลิตแก๊สชีวภาพคือ 100 : 1.10 : 0.20 [3] และ ค่า C/N ratio ที่เหมาะสมคือ 8 – 30 แต่อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพคือประมาณ 23 [4] จากงานวิจัยนี้พบว่าที่ OLR 2.00 kg.COD/m<sup>3</sup>-d (2.37 kg.VS/m<sup>3</sup>-day) ที่ C/N ratio 25.32 และ C : N : P 100 : 2.20 : 0.10 มีค่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานในการผลิตแก๊สชีวภาพและยังมีประสิทธิภาพการกำจัด SCOD สูงสุดอีกด้วย เมื่อทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ พบว่า ในการทดลองแบบกะ เมื่อใช้ค่า C/N ratio ที่มากจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัด COD ลดลง ในการทดลองค่า C/N ratio และค่า C : N : P มีค่าที่สูงและประสิทธิภาพการกำจัด COD ก็สูงตามไปด้วย จะเห็นได้ว่าที่ OLR ต่างกันก็จะทำให้ค่า C/N ratio และค่า C : N : P แตกต่างกันอีกด้วย

ในการเดินระบบผลิตแก๊สชีวภาพต้องทำการวัดปริมาณที่เกิดขึ้น ที่ OLR 2.00 2.50 3.00 3.50 4.00 kg.COD/m<sup>3</sup>-day ทำการวัดปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมจนกว่าค่าคงที่ ทำการเดินระบบสิ้นสุดที่ระยะเวลา 48 วัน แสดงดังตารางที่ 4 และตารางที่ 5 ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมที่ OLR ต่าง ๆ แสดงดัง ภาพที่ 2 พบว่าปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมที่ HRT 48 วัน ค่า OLR ที่ 2.00 kg.COD/m<sup>3</sup>-d (2.37 kg.VS/m<sup>3</sup>-day) เป็น OLR เหมาะสมที่สุดเนื่องจากมีปริมาณแก๊สชีวภาพสูงสุด คือ 79.80 m<sup>3</sup>/kg.COD (29.71 m<sup>3</sup>/kg.VS) เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ พบว่าที่การทดลองแบบกะ พบว่างานวิจัยนี้มีปริมาณแก๊สชีวภาพสูงกว่าการทดลองในระบบแบบกะเหมือนกันและ OLR ใกล้เคียงกัน ส่วนการทดลองแบบต่อเนื่องเมื่อทำการเปรียบเทียบกับพบว่า ปริมาณแก๊สชีวภาพมีค่าสูงเนื่องจากการเติมสารอินทรีย์อย่างต่อเนื่องในระบบผลิตแก๊สชีวภาพ ระบบสามารถรองรับ OLR ได้สูง ทำให้ Methane-producing bacteria สามารถย่อยสารอินทรีย์ได้แบบต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพสูง จะเห็นได้ว่าที่ OLR จะใกล้เคียงกันในระบบแบบต่อเนื่อง ปริมาณแก๊สชีวภาพที่ได้ย่อมมีผลแตกต่างกัน เนื่องจาก HRT ที่ต่างกัน ความเข้มข้น ปริมาตรถังปฏิกรณ์ และระบบบำบัดที่นำมาใช้



ภาพที่ 2 แสดงปริมาณแก๊สชีวภาพสะสม ที่ระยะเวลาเก็บกัก 48 วัน

จากภาพที่ 2 แสดงปริมาณแก๊สชีวภาพสะสม ที่ HRT 48 วัน พบว่า ที่ OLR 2.00 kg.COD/m<sup>3</sup>-day (2.37 kg.VS/m<sup>3</sup>-day) มีปริมาณแก๊สสะสม 270 l ที่ OLR 2.50 kg.COD/m<sup>3</sup>-day (2.84 kg.VS/m<sup>3</sup>-day) มีปริมาณแก๊สสะสม 275 l ที่ OLR 3.00 kg.COD/m<sup>3</sup>-day (3.58 kg.VS/m<sup>3</sup>-day) มีปริมาณแก๊สสะสม 270 l ที่ OLR 3.50 kg.COD/m<sup>3</sup>-day (4.86 kg.VS/m<sup>3</sup>-day) มีปริมาณแก๊สสะสม 278 l ที่ OLR 4.00 kg.COD/m<sup>3</sup>-day (6.03 kg.VS/m<sup>3</sup>-day) มีปริมาณแก๊สสะสม 236 l เมื่อนำไปทดสอบทางสถิติ ใช้โปรแกรม IBM SPSS Statistics V.16 การวิเคราะห์ทางสถิติโดย One-Way ANOVA พบว่ามีปริมาณแก๊สชีวภาพที่ OLR 5 ค่า แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ (sig < 0.05) จากนั้นต้องทำการวิเคราะห์ทางสถิติโดย Tukey's เพื่อหา OLR ที่เหมาะสม การวิเคราะห์ทางสถิติโดย Tukey's พบว่าที่ OLR 2.00 kg.COD/m<sup>3</sup>-d (2.37 kg.VS/m<sup>3</sup>-day) มีปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมไม่แตกต่างจาก OLR อื่น ๆ และใช้มูลโคนมน้อยที่สุดแต่ปริมาณแก๊สชีวภาพสูงสุดไม่แตกต่างกับค่าอื่น ๆ

## อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

การศึกษาอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR) ที่ส่งผลต่อปริมาณการผลิตแก๊สชีวภาพสูงสุดจากน้ำเสียมูลโคนมภายในฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ศึกษาที่ 3.00%TS ค่า OLR ที่ศึกษา 2.00 2.50 3.00 3.50 และ 4.00 kg.COD/m<sup>3</sup>-day (2.37 2.84 3.58 4.86 และ 6.03 kg.VS/m<sup>3</sup>-day) ตามลำดับ ที่ C/N ratio 25.32 29.96 30.61 32.20 และ 32.97 ตามลำดับ และ C : N : P ที่ 100 : 2.20 : 0.10 100 : 2.20 : 0.10 100 : 1.60 : 0.09 100 : 0.20 : 0.01 และ 100 : 0.10 : 0.08 ตามลำดับ ทำการทดลองแบบกะ ระยะเวลา 48 วัน จากการทดสอบทางสถิติ One-Way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในกรณีที่ข้อมูลแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (sig < 0.05) ใช้โปรแกรม IBM SPSS Statistics V.16 เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติ Tukey's พบว่า OLR 4.00 kg.COD/m<sup>3</sup>-day (6.03 kg.VS/m<sup>3</sup>-day) เป็นค่าที่แตกต่างแต่ปริมาณแก๊สชีวภาพน้อยที่สุด จึงเลือก OLR ที่ 2.00 kg.COD/m<sup>3</sup>-d (2.37 kg.VS/m<sup>3</sup>-day) ที่ C/N ratio 25.32 และ C : N : P 100 : 2.20 : 0.10 เป็น OLR ที่ผลิตแก๊สชีวภาพสูงสุดจากน้ำเสียมูลโคนม ปริมาณแก๊สชีวภาพสูงสุดคือ 79.80 m<sup>3</sup>/kg.COD (29.71 m<sup>3</sup>/kg.VS) ใช้มูลโคนมน้อยที่สุด ก่อให้เกิดของเสียน้อยที่สุด และมีการกำจัด SCOD สูงสุด (77.87%)

## เอกสารอ้างอิง

1. Chantamas N. Effect of velocity gradient and organic loading rate on wastewater treatment from palm oil mill using ASBR system. Master of Science in Environmental Science, Chulalongkorn University. 2009. Thai.
2. Srinuch W. Nutrients digestion and changes in the rumen production of dairy cows receiving mixed food containing sweet corn stew, marinated as a rough food source. Maejo University, Chiang Mai. 2009. Thai.
3. Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Biogas production from Waste of livestock and industrial plants, source : [http://www2.dede.go.th/km\\_ber/Attach/Biogaspresent.pdf](http://www2.dede.go.th/km_ber/Attach/Biogaspresent.pdf), August 22<sup>th</sup>, 2010. Thai.
4. Tangtaveewat S. Biogas production from dung and food waste For household use, source : [www.clinictech.most.go.th/online/techlist/attachFile/20111261832311.pdf](http://www.clinictech.most.go.th/online/techlist/attachFile/20111261832311.pdf). 2004.
5. Castrillon L, Vazquez I, Sastre H. The influent of hydraulic residence time on treatment of cattle manure in UASB reactors. Waste Manage. Res. 19: 436 – 441. 2001.
6. Yetilmezsoy K, Sakar S. Development of empirical models for performance evaluation of UASB reactors treating poultry manure wastewater under different operational conditions. J. Hazard Mater. 153: 532-543. 2008.

7. Riggo V, Comino E, Rosso M. Energy production from anaerobic co-digestion processing of cow slurry, olive pomace and apple pulp. *Renewable Energy*. 83: 1043-1049. 2015.
8. Sutarut P, Chobboon S, Vitjitsombroon N, Dechana A. The Development of Bio-gas Generating Tank from Organic Waste. Office of the Higher Education Commission Under the project to promote research in higher education. 2011. Thai.
9. Rico C, Rico JL, Tejero I, Munoz N, Gomez B. Anaerobic digestion of the liquid fraction of dairy manure in Pilot plant for biogas production: Residual methane yield of digestate. *Waste Manage*. 31: 2167–2173. 2011.
10. Sinbuathong N, Sawanon S, Sangsri P, Leunprasert S. Methane Production from Napier Grass by Co-digestion with cow dung. *Energy Solutions to Combat Global Warming*. 33: 169-180. 2014.
11. Wang X, Li Z, Bai X, Zhou X, Cheng S, Gao R, Sun J. Study on improving anaerobic co-digestion of cow manure and corn straw by fruit and vegetable waste: Methane production and microbial community in CSTR process. *Bioresour. Technol*. 249: 290-297. 2017.
12. Risberg K, Sun L, Leven L, Horn SJ, Schnurer A. Biogas production from wheat straw and manure – Impact of pretreatment and process operating parameters. *Bioresour. Technol*. 149: 232–237. 2013.
13. Rintala J, Jagadabhi PS, Lehtomaki A. CO-digestion of grass silage and cow manure in a CSTR by recirculation of alkali treated solids of the digestate. *Environ. Technol*. 29(10): 1085–1093. 2012.
14. Arkan OA, Mulbry W, Lansing S. Effect of temperature on methane production from field-scale anaerobic digesters treating dairy manure, *Waste Manage*. 43: 108–113. 2015.
15. APHA, AWWA, WPCF, Eaton AD, Franson M, Ann H. Standard methods for the examination of water and wastewater, 20th ed. Washington DC : USA. 2005.
16. Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Study and demonstrate the production of biogas from biomass, source : <http://webkc.dede.go.th/testmax/node/197>.
17. Racho P. Study process anaerobic treatment system and biogas production, Environmental Laboratory. School of Environmental, Institute Engineering, Suranaree University of Technology. 2018. Thai.
18. Wannakomol A. Biogas production from shrimp farming wastes. Research at Suranaree University of Technology. 2014. Thai.
19. Montoya ACV, Mazareli RC, Silva DC, Oliveira RA, Leite VD. Dairy manure wastewater in serial UASB reactors for energy recovery and potential effluent reuse. *Braz. J. Chem. Eng*. 34(4): 971-983. 2017.
20. Lee DY, Ebie Y, Xu K, Li Y, Inamori Y. Continuous H<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> production from high-solid food waste in the twostage thermophilic fermentation process with the recirculation of digester sludge. *Bioresour. Technol*. 101: 42-47. 2010.
21. Dareioti MA, Kornaros M. Anaerobic mesophilic co-digestion of ensiled sorghum, cheese whey and liquid cow manure in a two-stage CSTR system. *Bioresour. Technol*. 175: 553–562. 2009.
22. Soheil AN, Mohammadi M, Najafpour D, Lahijani P. Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production. *Renewable Sustainable Energy Rev*. 79: 308-322. 2017.

23. Castrillon L, Fernandez-Nava Y, Maranon E, Ormaechea P, Quiroga G, Valero S. Biogas from cattle manure as an alternative energy source. Chemical Engineering and Environmental Technology Department. University Technology Institute of Asturias. University of Oviedo. 2007. Spain.
24. Fang C, Boe K, Angelidaki L. Anaerobic co-digestion of desugared molasses with cow manure; focusing on sodium and potassium inhibition. *Bioresour. Technol.* 102(2): 1005-1011. 2010.
25. Venkata SM, Babu VL, Sarma PN. Anaerobic biohydrogen production from dairy wastewater treatment in sequencing batch reactor : Effect of organic loading rate. *Enzyme. Microb. Technol.* 41: 506-515. 2007.
26. Nikolaeva SN, Hernandez EPS, Borja R. Dairy Wastewater Treatment by Anaerobic Fixed bed Reactors from Laboratory to pilot-scale plant : A case study in Costa Rica Operating at Ambient Temperature. *Int. J. Environ. Res.* 7: 759-766. 2013.
27. Liu ZG, Zhou XF, Zhang YL, Zhu HG. Enhanced anaerobic treatment of CSTR-digested effluent from chicken manure: the effect of ammonia inhibition. *Waste. Manag.* 32: 137-143. 2012.
28. Ormaechea P, Castrillon L, Suaraz-Pena B, Megido L, Fernandez-Nava Y, Negral L, Maranon E, Rodriguez-Iglesias J. Enhancement of biogas production from cattle manure pretreated and /or co-digested at pilot-plant scale. Characterization by SEM. *Renewable Energy.* 126: 897-904. 2018.
29. Chuypanang S, Onthong U. Banana peel utilization for biogas and fertilizer production. Research Government Budget Grant, Faculty of Science, Thaksin University. 2013.
30. Comino E, Rosso M, Riggo V. Investigation of increasing organic loading rate in the co-digestion of energy crops and cow manure mix. *Bioresour. Technol.* 101: 3013-3019. 2010.
31. Lindner J, Zielonka S, Oechsner H, Lemmer A. Is the continuous two-stage anaerobic digestion process well suited for all substrates?. *Bioresour. Technol.* 200: 470-476. 2015.
32. Fred OA, Wendong T. Anaerobic co-digestion of food waste and dairy manure: Effects of food waste particle size and organic loading rate. *J. Environ. Manage.* 133: 268-274. 2013.
33. Liden G, Alvarez Rene. Low temperature anaerobic digestion of mixtures of llama, cow and sheep manure for improved methane production. researchers, research outputs (e.g. publications), projects and units at Lund University. 2008.
34. Jirawat C. Effect of Retention Time on Biogas Production in high rate Anaerobic Digestion of Fruit Canning Wastes. Master of Engineering, Environmental Engineering Faculty of Engineering, Chiang Mai University. 2003. Thai.
35. Yingchon U. The increase in efficiency of biogas production from treated cassava pulp by zero valent iron ( $\text{Fe}^0$ ). Master's thesis Suranaree University of Technology. 2017. Thai.