ลักษณะของน้ำเสียและฟางข้าวในระบบหมักร่วมแบบไร้อากาศ

Characteristics of Wastewater and Rice Straw in an Anaerobic Co-Digestion System

พันธ์ทิพย์ กล่อมเจ๊ก[1]

Pantip Klomjek[1]

Received: 9 January 2015 ; Accepted: 18 March 2015

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาลักษณะของน้ำเสียและฟางข้าวที่ผ่านการหมักจากกระบวนการหมักร่วมระหว่างน้ำเสียจากฟาร์มสุกรและฟางข้าวภายใต้สภาวะไร้อากาศ โดยเปรียบเทียบผลของการเตรียมฟางข้าวก่อนหมักที่แตกต่างกัน 3 ลักษณะ คือฟางข้าวที่ตัดให้มีขนาดยาว 7-8 cm ฟางข้าวที่ตัดให้มีขนาดยาว 7-8 cm ที่แช่ด้วย NaOH และฟางข้าวที่ไม่ผ่านขั้นตอนการเตรียมใดๆ และระยะเวลาการหมักที่แตกต่างกัน คือ 2, 4, 6, 8 และ 10 wk ต่อลักษณะของน้ำเสียและฟางข้าวที่ผ่านการหมัก ผลการศึกษาพบว่าสารอินทรีย์ในน้ำเสียและฟางข้าวถูกย่อยสลายผ่านกระบวนการย่อยที่เกิดในระบบ น้ำเสียที่ผ่านระบบการหมักร่วมมีค่าสารอินทรีย์ซึ่งบ่งชี้ด้วยค่า BOD_5 และ COD และค่าไนโตรเจนสูงขึ้น โดยมีค่า BOD_5, COD และ TKN ระหว่าง 416.6-1,255.3, 1,520.0-2,600.0 และ 200.0-308.6 mg/L ตามลำดับ ทั้งนี้รูปแบบการเตรียมฟางข้าวส่งผลต่อความแตกต่างของค่าสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟางข้าวที่ผ่านการหมัก พบว่ามีค่าอินทรียวัตถุ ธาตุอาหารไนโตรเจน และฟอสฟอรัสสูงขึ้น โดยมีค่าระหว่าง 28.6-346.3, 0.68-4.15 และ 0.06-0.48 % ตามลำดับ และมีค่าโพแทสเซียมและ C/N ratio ลดลง โดยมีค่าระหว่าง 0.10-0.36 % และ 34.4:1-198.7:1 ตามลำดับ โดยระยะเวลาในการหมักจะส่งผลต่อคุณลักษณะโดยส่วนใหญ่ของฟางข้าวหลังการหมัก

คำสำคัญ: ระบบหมักแบบไร้อากาศ น้ำเสียฟาร์มสุกร ฟางข้าว ระยะเวลาการหมัก วัสดุปรับปรุงดิน

Abstract

This research investigated the characteristics of wastewater and digested rice straw in a co-digestion system between swine wastewater and rice straw under anaerobic conditions. Effect of rice straw preparation in 3 different types, rice straw cut into 7-8 cm, rice straw cut into 7-8 cm and soaked with NaHO and rice straw without preparation, and effect of different digestion period, 2, 4, 6, 8 and 10 wk, on characteristics of wastewater and digested rice straw were evaluated. The results showed that organic compounds in wastewater and rice straw decomposed via digestion processes occurring in the system. Organic matter and nitrogen in digested wastewater were higher than those in raw wastewater. BOD_5, COD and TKN of digested wastewater were 416.6-1,255.3, 1,520.0-2,600.0 and 200.0-308.6 mg/L, respectively in which different rice straw preparation showed effect on organic matter indicating with BOD_5 and COD of wastewater. The composition analysis of digested rice straw showed that organic matter, nitrogen and phosphorus of the rice straw increased while potassium and C/N ratio decreased. Organic matter, nitrogen, phosphorus, potassium and C/N ratio of digested rice straw were 28.6-346.3 %, 0.68-4.15 %, 0.06-0.48 %, 0.10-0.36 % and 34.4:1-198.7:1, respectively. The result indicated that different digestion periods showed significant effect on most of characteristics of digested rice straw.

Keywords: anaerobic digestion system, swine wastewater, rice straw, digestion period, soil conditioner

---

[1] *ผู้ช่วยศาสตราจารย์, คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000 pantipk@nu.ac.th*

[1] *Assistant Professor, Faculty of Agriculture Natural Resources and Environment, Naresuan University, Tapho Subdistrict, Muang District, Phitsanulok 65000, Thailand. pantipk@nu.ac.th*

บทนำ

ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกข้าวรวมหลายสิบล้านไร่ และมีรอบของการเพาะปลูกเกือบตลอดทั้งปี ซึ่งการทำนานั้นนอกจากจะได้ผลผลิตเป็นข้าวเปลือกแล้วยังมีวัสดุประเภทฟางข้าวเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ขณะที่ปัจจุบันมีการนำฟางข้าวไปใช้ประโยชน์ไม่มากนัก ดังนั้นฟางข้าวส่วนใหญ่จึงกลายเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีปริมาณมากและเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง และพบว่าการจัดการฟางข้าวด้วยวิธีการที่ไม่เหมาะสมยังก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการจัดการด้วยการเผาซึ่งจะส่งผลเสียทั้งต่อคุณสมบัติทางกายภาพและความอุดมสมบูรณ์ของดินและยังก่อให้เกิดปัญหาหมอกควันซึ่งในปัจจุบันเป็นปัญหาที่มีความรุนแรงและส่งผลกระทบอย่างกว้างขวาง และแม้หน่วยงานรัฐจะมีการประชาสัมพันธ์ ทำความเข้าใจและมีมาตรการหลายประการเพื่อลดการเผาฟางข้าวของเกษตรกร แต่ปัญหาจากการเผาฟางข้าวยังคงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เนื่องจากการเผาเป็นวิธีการที่อาจกล่าวได้ว่าไม่มีค่าใช้จ่าย ง่ายและสะดวกต่อเกษตรกรในการจัดการฟางข้าวก่อนการเพาะปลูกในรอบถัดไป ดังนั้น การนำเสนอแนวทางในการจัดการฟางข้าวด้วยวิธีการที่ง่าย สะดวก และก่อให้เกิดประโยชน์ต่อเกษตรกร จึงเป็นแนวทางเลือกหนึ่งที่มีโอกาสนำไปสู่การปฏิบัติและสามารถช่วยลดปัญหาจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทฟางข้าวได้จริง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงการนำฟางข้าวซึ่งมี องค์ประกอบหลักเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยาก เข้าสู่ระบบการหมักร่วมกับน้ำเสียจากฟาร์มสุกรในสภาพไร้อากาศ ซึ่งในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ (Anaerobic digestion) จะมีจุลินทรีย์ 2 กลุ่มหลัก คือกลุ่มแบคทีเรียที่ผลิตกรดอินทรีย์ และกลุ่มแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทน ร่วมกันทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารอินทรีย์อย่างเป็นลำดับขั้นตอน โดยทำให้สารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่กลายเป็นสารอินทรีย์โมเลกุลเล็ก แล้วจึงถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดอินทรีย์ และกรดอะซิติก และเปลี่ยนไปเป็นก๊าซชีวภาพ ตามลำดับ[1] ทั้งนี้ข้อดีของระบบหมักแบบไร้อากาศในการบำบัดของเสีย คือ มีค่าใช้จ่ายไม่สูงเนื่องจากไม่ต้องเติมออกซิเจนให้กับระบบ และระบบมีความสามารถในการรองรับภาระสารอินทรีย์ในปริมาณสูง โดยอาศัยการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์หลากหลายชนิดที่มีอยู่ในของเสียในการย่อยสลายสารอินทรีย์[2] นอกจากนั้น กระบวนการหมักยังก่อให้เกิดผลพลอยที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ ทั้งในรูปของพลังงานและในรูปของธาตุอาหารพืช[3]

วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัยในครั้งนี้มีดังนี้ คือ

เพื่อศึกษาผลของวิธีการเตรียมฟางข้าวในการหมักร่วมกับน้ำเสียจากฟาร์มสุกรในระบบหมักแบบไร้อากาศต่อคุณลักษณะของน้ำเสียและฟางข้าวจากระบบหมัก

เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาในการหมักร่วมระหว่างฟางข้าวกับน้ำเสียจากฟาร์มสุกรในระบบหมักแบบไร้อากาศต่อคุณลักษณะของน้ำเสียและฟางข้าวจากระบบหมัก

เพื่อนำผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางอย่างง่ายในการจัดการฟางข้าวและน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่เกษตรกรสามารถดำเนินการได้และสามารถได้รับประโยชน์จากผลพลอยได้จากการดำเนินการในรูปของน้ำทิ้งที่มีธาตุอาหารพืชและในรูปของวัสดุปรับปรุงดิน

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการศึกษา

เตรียมหน่วยทดลองระบบหมักแบบไร้อากาศจากถังพลาสติกขนาด 6 L ที่มีฝาปิดสนิท ต่อท่อระบายแก๊สออกจากระบบ นำฟางข้าวและน้ำเสียจากกิจกรรมการเลี้ยงสุกรของเกษตรกรรายย่อยซึ่งโดยส่วนใหญ่จะถูกระบายลงสู่บ่อรวบรวมน้ำเสียโดยไม่ผ่านการบำบัด ลงหมักในระบบภายใต้สภาพไร้อากาศด้วยสัดส่วนการหมัก 1:1 ของค่าของแข็งระเหยของวัสดุหมักร่วม[4] และจากผลการวิเคราะห์ค่าของแข็งระเหยสามารถคำนวณเป็นสัดส่วนโดยน้ำหนักได้เท่ากับฟางข้าว 5 g ต่อปริมาณ น้ำเสีย 1 g (1 L) ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการหมักวัสดุหมักร่วมทั้งหมดคือฟางข้าว 22.5 g ร่วมกับน้ำเสีย 4.5 L ลงในแต่ละระบบหมัก โดยสิ่งทดลองที่ทำการศึกษาเปรียบเทียบคือผลของการเตรียมฟางข้าวที่แตกต่างกัน คือ (1) ฟางข้าวที่ผ่านการเตรียมทางกายภาพโดยตัดให้มีความยาว 7-8 cm[5] (2) ฟางข้าวที่ผ่านการเตรียมทางกายภาพและเคมีโดยตัดให้มีความยาว 7-8 cm และแช่ด้วยโซดาไฟ[6] (2% NaOH) เป็นเวลา 72 hr[7] แล้วผึ่งให้แห้งเป็นเวลา 24 hr ก่อนหมัก และ (3) ฟางข้าวที่ไม่ผ่านการเตรียมด้วยรูปแบบใดๆ และระยะเวลาในการหมักที่แตกต่างกันคือ 2, 4, 6, 8 และ 10 wk ต่อคุณลักษณะของน้ำเสียและฟางข้าวภายหลังการหมัก โดยทำการศึกษาแบบ Single factor experiment และวางแผนการทดลองแบบ CRD ด้วยหน่วยทดลองจำนวน 2 ซ้ำ (duplication)

เก็บตัวอย่างน้ำเสียและฟางข้าวก่อนและหลังหมักตามระยะเวลาศึกษาที่กำหนด นำตัวอย่างน้ำเสียไปวิเคราะห์ค่าดัชนีคุณภาพน้ำด้วยวิธีวิเคราะห์ที่กำหนดตาม Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater[8] ได้แก่ ค่าดัชนีบ่งชี้ปริมาณสารอินทรีย์ BOD_5 และ COD ด้วยวิธี Azide modification method และ Closed reflux method ค่าไนโตรเจน (TKN) ด้วยวิธี Kjeldahl method ค่าของแข็ง

แขวนลอย (TSS) ด้วยวิธี Gravimetric method และตรวจวัด pH ด้วย pH meter และทำการวิเคราะห์คุณลักษณะฟางข้าว ได้แก่ วิเคราะห์ค่าความชื้น (Moisture) ด้วยวิธี Oven drying method ปริมาณอินทรียวัตถุ (OM) ด้วยวิธี Digestion and Titration ปริมาณธาตุอาหารหลักไนโตรเจน (Total N) ด้วยวิธี Kjeldahl method ค่าฟอสฟอรัส (Total P_2O_5) ด้วยวิธี Spectrophotometric molybdovanadophosphate และค่าโพแทสเซียม (Total K_2O) ด้วยวิธี Flame photometric method ตามวิธีวิเคราะห์ของกลุ่มวิจัยเกษตรเคมี[9] และคำนวณค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) นำผลการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติของคุณลักษณะ น้ำเสียและฟางข้าวที่ได้จากระบบหมักเมื่อใช้รูปแบบการเตรียมฟางข้าวแตกต่างกันและเมื่อใช้ระยะเวลาในการหมักแตกต่างกันด้วยสถิติ Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญ 95%

ผลการศึกษา

คุณลักษณะของน้ำเสียก่อนและหลังการหมัก

ผลการวิเคราะห์น้ำเสียก่อนหมัก พบน้ำเสียมีค่า BOD_5, COD, TKN, TSS และ pH เท่ากับ 366.6, 680, 236.6, 201.0 mg/L และ 7.65 ตามลำดับ และเมื่อผ่านการหมักร่วมกับฟางข้าวที่มีรูปแบบการเตรียมฟางข้าวแตกต่างกันในระบบหมักแบบไร้อากาศด้วยระยะเวลาหมักที่แตกต่างกัน พบค่า BOD_5, COD, TKN, TSS และ pH ของน้ำเสียมีค่าระหว่าง 416.6-1,255.3, 1,520.0-2,600.0, 200.0-308.6, 52.5-184.5 mg/L และ 6.69-9.77 ตามลำดับ ขณะที่ ค่า BOD_5, COD, TKN, TSS และ pH ของน้ำเสียที่ผ่านการหมักจากระบบหมักแบบไร้อากาศด้วยระยะเวลาหมักที่แตกต่างกันโดยไม่มีวัสดุหมักร่วม มีค่าระหว่าง 383.3-780.6, 960.0-1,780.0, 246.4-326.9, 27.0-59.0 mg/L และ 7.36-9.81 ตามลำดับ (Table 1)

คุณลักษณะของฟางข้าวก่อนและหลังการหมัก

ผลการวิเคราะห์ฟางข้าวก่อนหมัก พบฟางข้าวมีค่า Moisture, OM, Total N, Total P_2O_5, Total K_2O และค่า C/N ratio เท่ากับ 1.52, 207.3, 0.62, 0.06, 0.26 % และ 193.5:1 ตามลำดับ ขณะที่ฟางข้าวทั้งหมดที่มีรูปแบบการเตรียมฟางแตกต่างกันที่ผ่านการหมักร่วมกับน้ำเสียจากฟาร์มสุกรในระบบหมักแบบไร้อากาศด้วยระยะเวลาการหมักที่แตกต่างกัน มีค่า Moisture, OM, Total N, Total P_2O_5, Total K_2O และค่า C/N ratio ระหว่าง 2.4-16.4, 228.6-346.3, 0.68-4.15, 0.06-0.48, 0.10-0.36 % และ 34.4:1-198.7:1 ตามลำดับ (Table 2)

Table 1 Characteristics of wastewater of anaerobic co- fermentation system[1].

Water quality indicators (unit)/ Ferment period	Concentration in effluent of anaerobic co- fermentation system[2]				*p*-value
	Wastewater+Rice straw without preparing	Wastewater+Rice straw prepared by cut	Wastewater+Rice straw prepared by cut and NaOH	Wastewater without rice straw	
BOD_5 (mg/L)					
2 wk	611.0±65.7Bc	452.2±21.7Cc	1,044.4±2.8Ad	391.6±4.8Cd	0.015
4 wk	711.7±29.9Bbc	505.6±5.6Cc	1,088.9±5.6Ac	437.2±10.3Dd	0.015
6 wk	747.3±27.3Babc	622.2±44.7Cb	1,136.1±7.3Ab	511.1±24.7Dc	0.019
8 wk	812.6±22.9Bab	724.1±38.6Cab	1,206.3±16.4Aa	633.3±21.6Db	0.021
10 wk	914.8±81.4Ba	820.8±35.4BCa	1,210.6±19.8Aa	730.7±25.2Ca	0.008
p-value	0.017	0.009	0.009	0.007	
COD (mg/L)					
2 wk	1626.7±26.7Bb	1,546.7±26.7Bd	2,186.7±26.7Ad	1,066.7±70.6Cc	0.017
4 wk	1,700.0±11.5Bb	1.686.7±6.7Bc	2,280.0±23.1Ac	1,226.7±53.3Cc	0.021
6 wk	1,780.0±30.6Bb	1,776.7±34.8Bb	2,363.3±21.9Ab	1,413.3±17.6Cb	0.025
8 wk	1,805.0±35.5Bb	1,840.0±11.6Bb	2,420.0±11.6Ab	1,446.7±21.9Cb	0.024
10 wk	1,986.3±86.5Ba	2,477.5±23.9Aa	2,575.0±21.8Aa	1,640.0±69.8Ca	0.003
p-value	0.009	0.007	0.007	0.008	

Water quality indicators (unit)/ Ferment period	Concentration in effluent of anaerobic co- fermentation system[2]				*p*-value
	Wastewater+Rice straw without preparing	Wastewater+Rice straw prepared by cut	Wastewater+Rice straw prepared by cut and NaOH	Wastewater without rice straw	
2 wk	62.8±8.2Ca	163.8±11.6Aa	95.8±5.6Ba	34.5±5.8Da	0.016
4 wk	67.5±7.3Ca	162.2±10.7Aa	101.7±3.6Ba	46.7±5.2Ca	0.016
6 wk	61.7±4.9Ca	160.7±10.2Aa	103.5±9.8Ba	43.2±3.2Ca	0.015
8 wk	66.2±7.8Ba	150.2±17.5Aa	130.3±14.0Aa	47.0±4.0Ba	0.024
10 wk	71.9±8.0Ba	136.5±9.7Aa	135.5±8.4Aa	52.5±3.3Ba	0.007
p-value	0.896	0.529	0.056	0.235	
TKN(mg/L)					
2 wk	255.7±2.5Ab	209.5±5.5Bd	248.3±1.9Aa	251.1±2.5Ad	0.037
4 wk	257.4±5.6Ab	237.3±5.1Ac	255.6±4.7Aa	260.2±1.1Acd	0.078
6 wk	258.4±6.6Ab	255.3±6.8Ab	252.9±5.6Aa	267.0±2.1Ac	0.281
8 wk	274.2±3.1Aa	272.7±3.2Aa	291.3±14.9Aa	297.4±4.1Ab	0.268
10 wk	284.9±2.7Ba	284.9±1.9Ba	268.6±3.0Ca	311.8±5.2Aa	0.005
p-value	0.019	0.007	0.062	0.007	
pH					
2 wk	6.9±0.0Ac	6.9±0.0Aa	7.6±0.8Aa	8.4±0.7Aa	0.183
4 wk	7.1±0.0Ab	7.0±0.0Aa	7.1±0.0Aa	8.3±0.7Aa	0.053
6 wk	7.1±0.0Ab	7.5±0.4Aa	8.1±0.8Aa	7.5±0.0Aa	0.173
8 wk	7.3±0.1Ca	7.2±0.1Ca	7.5±0.1Ba	7.7±0.0Aa	0.030
10 wk	7.2±0.1Aab	7.7±0.6Aa	7.5±0.2Aa	8.1±0.5Aa	0.095
p-value	0.024	0.056	0.243	0.111	

[1/] Sample size (n) = 3.

[2/] Mean in the same row followed by the same letters (capital letter) are not significantly different at $p^3 0.05$.

Mean in the same column followed by the same letters (small letter) are not significantly different at $p^3 0.05$.

Table 2 Characteristics of rice straw of anaerobic co- fermentation system[1].

Parameters (unit)/ Digestion period	Characteristics of rice straw of anaerobic co- fermentation system[2]			*p*-value
	Rice straw without preparing	Rice straw prepared by cut	Rice straw prepared by cut and NaOH	
OM (%)				
2 wk	231.0±1.2Ac	237.5±5.1Aa	253.8±4.5Aa	0.067
4 wk	241.3±4.6Bbc	288.8±10.8Aa	261.7±3.1Ba	0.032
6 wk	260.5±5.4Ab	254.6±10.1Aa	287.1±5.1Aa	0.061
8 wk	265.2±1.2Ab	270.0±6.3Aa	291.2±20.2Aa	0.237
10 wk	292.4±16.2Aa	280.6±7.7Aa	311.8±32.8Aa	0.707
p-value	0.012	0.061	0.161	

Parameters (unit)/ Digestion period	Characteristics of rice straw of anaerobic co- fermentation system[2]			*p*-value
	Rice straw without preparing	Rice straw prepared by cut	Rice straw prepared by cut and NaOH	
2 wk	0.74±0.03Ad	0.86±0.07Ac	2.09±0.05Ab	0.050
4 wk	1.43±0.27Ac	1.87±0.04Ab	2.64±0.41Ab	0.059
6 wk	1.84±0.16Abc	1.90±0.02Ab	2.70±0.34Ab	0.061
8 wk	2.26±0.15Ab	2.36±0.17Aa	3.55±0.23Aa	0.065
10 wk	2.88±0.18Ba	2.21±0.09Ca	3.99±0.11Aa	0.027
p-value	0.011	0.016	0.038	
Total P_2O_5 (%)				
2 wk	0.09±0.01Bc	0.06±0.00Bc	0.14±0.02Ac	0.027
4 wk	0.10±0.01Abc	0.10±0.00Ab	0.17±0.00Ac	0.065
6 wk	0.12±0.01Abc	0.11±0.00Ab	0.23±0.03Abc	0.051
8 wk	0.13±0.00Ab	0.15±0.01Aa	0.33±0.08Aab	0.051
10 wk	0.18±0.03Ba	0.13±0.01Ba	0.37±0.03Aa	0.039
p-value	0.014	0.011	0.018	
Total K_2O (%)				
2 wk	0.17±0.01Aa	0.17±0.00Aa	0.22±0.01Aa	0.063
4 wk	0.15±0.02Aa	0.14±0.02Aa	0.23±0.01Aa	0.066
6 wk	0.21±0.01Aa	0.17±0.01Aa	0.23±0.02Aa	0.051
8 wk	0.19±0.01Aa	0.18±0.03Aa	0.22±0.06Aa	0.875
10 wk	0.17±0.02Aa	0.15±0.03Aa	0.33±0.03Aa	0.061
p-value	0.189	0.654	0.155	
C/N ratio (per 1)				
2 wk	182.8±8.6Aa	174.4±3.8Aa	70.4±1.7Aa	0.061
4 wk	105.3±19.2Ab	89.6±.8Ab	60.4±9.4Aa	0.113
6 wk	83.9±8.8Abc	77.7±2.3Abc	55.0±0.8Aa	0.066
8 wk	68.6±4.7Ac	67.2±5.7Ac	47.9±3.9Aa	0.066
10 wk	59.0±2.4ABc	74.2±5.4Ac	45.6±5.6Ba	0.027
p-value	0.019	0.028	0.068	

[1/] Sample size (n) = 3.

[2/] Mean in the same row followed by the same letters (capital letter) are not significantly different at $p^3 0.05$.

Mean in the same column followed by the same letters (small letter) are not significantly different at $p^3 0.05$.

วิจารณ์และสรุปผล

คุณลักษณะของน้ำเสีย

ผลจากการตรวจวิเคราะห์พบว่าสารอินทรีย์ในน้ำเสียภายหลังการหมักซึ่งบ่งชี้ด้วยค่า BOD_5 และ COD มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำเสียก่อนหมัก โดยพบมีค่าสูงที่สุดในน้ำเสียจากระบบหมักที่มีการเตรียมฟางข้าวด้วยการตัดและแช่ด้วยสารละลายด่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และพบว่าน้ำเสียที่มีระยะเวลาในการหมัก 10 wk มีค่าสารอินทรีย์สูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับน้ำเสียที่มีระยะเวลาหมักที่สั้นกว่า (Table 1) ทั้งนี้เนื่องจากจุลินทรีย์ในระบบหมักได้ย่อยสาร

อินทรีย์โมเลกุลใหญ่ทั้งในน้ำเสียและฟางข้าวให้มีขนาดโมเลกุลที่เล็กลง เช่น การย่อยไขมัน โปรตีน และคาร์โบไฮเดรต ให้เป็นกรดไขมัน กรดอะมิโน และน้ำตาล ตามลำดับ ซึ่งทั้งหมดยังคงเป็นสารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลที่เล็กลง และทำให้เกิดการผสมกันของสารอินทรีย์จากฟางข้าวและน้ำเสีย รวมถึงสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กในน้ำเสียทั้งหมดเกิดการผสมกันอย่างทั่วถึงและเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) มากขึ้น จึงทำให้ค่าสารอินทรีย์ใน น้ำเสียที่ผ่านการหมักมีค่าสูงขึ้น ซึ่งรวมถึงน้ำเสียที่ผ่านการหมักโดยไม่ได้เติมฟางข้าวลงในระบบหมักด้วย โดย น้ำเสียที่หมักร่วมกับฟางข้าวที่ผ่านการเตรียมโดยการตัดและแช่ด้วยสารละลายด่างนั้น มีค่า BOD_5 และ COD ในน้ำเสียสูงที่สุดและแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้เนื่องจากการตัดฟางข้าวและแช่ด้วยสารละลายด่างจะทำให้เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากในฟางข้าว[10] ถูกย่อยสลายได้ง่ายขึ้น ทั้งนี้หากทำการหมักด้วยระยะเวลาที่ยาวนานขึ้น สารอินทรีย์ขนาดโมเลกุลเล็กที่เกิดขึ้นนี้มีโอกาสที่จะเกิดการย่อยสลายและเปลี่ยนรูปไปเป็นก๊าซ ซึ่งจะทำให้สารอินทรีย์ในน้ำเสียมีค่าลดลง ดังนั้นการหมักแบบไร้อากาศจึงเป็นกระบวนการหนึ่งในการปรับปรุงคุณภาพน้ำเสีย

การตรวจวัดค่าไนโตรเจนในรูป TKN ในน้ำเสียหลังหมัก พบว่ามีค่าสูงขึ้นทั้งในน้ำเสียจากการหมักร่วมกับฟางข้าวและในน้ำเสียจากระบบหมักที่ไม่มีวัสดุหมักร่วม เช่นเดียวกับค่า BOD_5 และ COD ทั้งนี้เนื่องจากค่า TKN เป็นผลรวมของค่าสารอินทรีย์ไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจน การย่อยสลายสารอินทรีย์ไนโตรเจนโมเลกุลใหญ่ทั้งจากฟางข้าวและในน้ำเสียเองไปเป็นสารอินทรีย์ไนโตรเจนโมเลกุลเล็กซึ่งบางส่วนอาจถูกเปลี่ยนไปเป็นแอมโมเนียไนโตรเจนซึ่งเกิดขึ้นได้ทั้งในสภาพที่มีออกซิเจนหรือไม่มีออกซิเจนเช่นในระบบหมักนั้น จะเพิ่มค่า TKN ให้กับน้ำเสียและเพิ่มไนโตรเจนให้กับฟางข้าวด้วย โดยรวมแล้วพบว่าระยะเวลาหมักที่เพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้จุลินทรีย์มีเวลาในการย่อยสลายยาวนานขึ้นนั้นมีผลให้ค่า TKN ในน้ำเสียมีค่าสูงขึ้น ขณะที่รูปแบบการเตรียมฟางข้าวไม่ส่งผลต่อค่า TKN ในน้ำเสีย อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Table 1)

เนื่องจากของแข็งแขวนลอยซึ่งรวมถึงสารอินทรีย์แขวนลอยในน้ำเสียบางส่วนได้ถูกย่อยสลายให้มีขนาดเล็กลงจนไม่สามารถกรองไว้ได้ด้วยกระดาษกรอง ขณะที่ฟางข้าวในระบบหมักนั้นส่วนที่มีน้ำหนักเบาจะลอยอยู่ด้านบนของระบบและฟางข้าวส่วนที่ถูกย่อยจนเป็นตะกอนจะตกอยู่ที่พื้นของระบบ ดังนั้นน้ำเสียที่ผ่านการหมักซึ่งเป็นส่วนน้ำใส (Supernatant) หรือ น้ำเสียที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ จึงมีค่า TSS ลดลง โดยพบว่าระยะเวลาของการหมักที่ทำการศึกษาไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อค่า TSS อย่างไรก็ตามจะพบว่าน้ำเสียจากระบบหมักที่มีการเตรียมฟางด้วยการตัดจะมีค่า TSS สูงกว่าระบบอื่น (Table 1) เนื่องจากการตัดจะทำให้ฟางข้าวเกิดการแยกตัวปะปนอยู่ในน้ำเสียมากขึ้น ขณะที่ฟางข้าวที่ไม่ได้ตัดจะมีลักษณะรวมกันเป็นกลุ่มก้อนลอยอยู่ด้านบน ส่วนฟางข้าวที่ตัดและแช่ในสารละลายด่างจะถูกย่อยสลายลดขนาดและเกิดเป็นตะกอนได้มากกว่า

ค่า pH ของน้ำเสียทั้งก่อนและหลังหมักมีค่าไม่แตกต่างกันนัก โดยพบมีค่าเป็นกลางถึงเป็นด่างเล็กน้อย ทั้งนี้ โดยรวมแล้วจะพบว่า pH ของน้ำเสียจากระบบหมักที่มีการเตรียมฟางข้าวแตกต่างกัน และรวมถึง pH ของน้ำเสียที่มีระยะเวลาในการหมักแตกต่างกันนั้นส่วนใหญ่มีค่าไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้ ค่า pH ที่ตรวจพบในน้ำเสียทั้งหมดมีค่าอยู่ภายใต้เกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ซึ่งกำหนดค่า pH เท่ากับ 5.5-9.0 และรวมถึง ค่า TSS ของน้ำเสียที่ผ่านการหมัก ซึ่งเกณฑ์มาตรฐานกำหนดให้มีค่าไม่เกิน 200 mg/L สำหรับฟาร์มที่มีจำนวนสุกรตั้งแต่ 50 ถึงน้อยกว่า 500 ตัว[11]

คุณลักษณะของฟางข้าว

ผลการตรวจวัดค่าความชื้นของฟางข้าวที่ได้จากระบบหมักภายหลังการผึ่งฟางไว้เป็นเวลา 48 hr พบฟางข้าวมีค่าความชื้นสูงขึ้นเมื่อเทียบกับฟางข้าวก่อนหมัก โดยมีค่าความชื้นอยู่ภายใต้เกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ตามประกาศกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548 ซึ่งกำหนดให้มีค่าไม่เกิน 35%[12] ทั้งนี้รูปแบบการเตรียมฟางข้าวไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อเปอร์เซ็นต์ความชื้นของฟางข้าวเช่นเดียวกับระยะเวลาของการหมัก ยกเว้นในระบบหมักที่มีการเตรียมฟางข้าวด้วยการตัดและแช่ด้วยสารละลายด่างซึ่งพบว่าระยะเวลาหมักที่นานขึ้นจะทำให้ค่าความชื้นของฟางข้าวมีค่าสูงขึ้น ค่า OM ของฟางข้าวทั้งหมดภายหลังการหมัก มีค่าสูงกว่าค่า OM ของฟางข้าวก่อนหมัก ทั้งนี้หากการหมักในระบบหมักแบบไร้อากาศเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์สารอินทรีย์จะถูกย่อยลดขนาดและถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปก๊าซในที่สุด ซึ่งในกระบวนการดังกล่าวนี้ต้องการ จุลินทรีย์หลายกลุ่มในการย่อยสลายสารอินทรีย์อย่างเป็นลำดับขั้นและมีความเกี่ยวเนื่องเชื่อมโยงกัน การตรวจพบค่า OM ของฟางข้าวในปริมาณสูงบ่งชี้ได้ถึงการย่อยสลายของฟางข้าวในระบบที่ยังเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ ประกอบกับการหมักฟางข้าวร่วมกับน้ำเสียจากฟาร์มสุกรซึ่งเป็นน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนสารอินทรีย์จาก ของเสียจากตัวสุกรและเศษอาหาร ซึ่งสารอินทรีย์เหล่านี้สามารถตกตะกอนและสามารถถูกดูดซับไว้กับฟางข้าวได้จึงทำให้ค่า OM ของฟางข้าวจากทุกระบบการหมักมีค่าสูงขึ้นและมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างฟางข้าวจากระบบหมักที่มีรูปแบบการเตรียมฟางข้าวที่แตกต่างกัน และระหว่างฟาง

ข้าวที่มีระยะเวลาในการหมักที่แตกต่างกัน ยกเว้นในระบบหมักที่ฟางข้าวไม่ผ่านการเตรียมฟาง ซึ่งพบว่าระยะเวลาหมักที่นานขึ้นจะทำให้ค่า OM ของฟางข้าวสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Table 2) เนื่องจากฟางข้าวมีเวลาในการดูดซับสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียได้นานขึ้น ทั้งนี้ ค่า OM ของฟางข้าวจากระบบหมัก แม้จะมีค่าไม่น้อยกว่า 30% ตามเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ตามประกาศกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548 แต่อย่างไรก็ตาม จากผลการวิเคราะห์ที่พบฟางข้าวจากระบบหมักมีค่า OM สูง ซึ่งหมายถึงการย่อยสลายสารอินทรีย์ในฟางข้าวยังเกิดได้ไม่สมบูรณ์ และหากนำไปใช้ในรูปของวัสดุบำรุงดินจะส่งผลกระทบต่อพืชได้[12] ทั้งนี้การเพิ่มระยะเวลาในการหมักจะทำให้ฟางข้าวเกิดการย่อยสลายได้มากขึ้น

ค่า Total N ของฟางข้าวที่ผ่านการหมักพบมีค่าสูงกว่าฟางข้าวก่อนหมัก เนื่องจากฟางข้าวได้รับ NH^{+}_{4}-N, NO^{-}_{3}-N และ Organic N จากน้ำเสียที่หมักร่วม ซึ่งเป็นน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่มีไนโตรเจนในรูป TKN ปนเปื้อนอยู่ถึง 236.6 mg/L การศึกษาเปรียบเทียบพบว่ารูปแบบการเตรียมฟางข้าวไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อ ค่า Total N ของฟางข้าวที่ผ่านการหมักเป็นระยะเวลา 2-8 wk ส่วนฟางข้าวที่ผ่านการหมักเป็นเวลา 10 wk จะพบค่า Total N สูงที่สุดในระบบหมักที่มีการเตรียมฟางโดยการตัดและแช่ด้วยสารละลายด่าง ในขณะที่ระยะเวลาหมักที่นานขึ้นจะส่งผลให้ค่า Total N ของฟางข้าวภายหลังการหมักจากทุกระบบการเตรียมฟางมีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Table 2) ทั้งนี้ เนื่องจากไนโตรเจนในน้ำเสียมีเวลาในการสัมผัสและมีโอกาสถูกดูดซับไว้กับฟางข้าวมากขึ้น นอกจากนั้น ยังพบว่าฟางข้าวภายหลังการหมักเป็นระยะเวลาตั้งแต่ 4 wk ขึ้นไป จากทุกระบบการเตรียมฟางมีค่า Total N ไม่น้อยกว่า 1% ตามมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ตามประกาศกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548[12] ทั้งนี้ แม้ไนโตรเจนจะเป็นธาตุที่สำคัญต่อจุลินทรีย์ในกระบวนการหมัก แต่อย่างไรก็ตาม หากเกิดการสะสมไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนีย จะทำให้ค่า pH สูงขึ้น และหากมีค่าสูงเกิน 8.5 จะเป็นพิษต่อแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทน (Methanogenic bacteria) ในกระบวนการหมักได้[13]

ค่าเฉลี่ย Total P_2O_5 ของฟางข้าวที่ผ่านการหมักเป็นระยะเวลาตั้งแต่ 2 wk ขึ้นไป จากทุกระบบการเตรียมฟาง มีค่าสูงกว่าค่า Total P_2O_5 ของฟางข้าวก่อนหมัก และพบว่ามีค่าสูงขึ้นตามระยะเวลาหมักอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Table 2) เช่นเดียวกับค่า Total N ทั้งนี้เนื่องจากฟางข้าวได้รับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียที่หมักร่วม โดยกรมควบคุมมลพิษ[11] ได้ระบุว่าน้ำเสียจากฟาร์มสุกร จะมีฟอสฟอรัสในรูปฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) ปนเปื้อนอยู่ระหว่าง 8.0-17.0 mg/L อย่างไรก็ตาม ค่า Total P_2O_5 ของฟางข้าวภายหลังการหมักยังคงมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ตามประกาศกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548 ที่กำหนดให้มีค่าไม่น้อยกว่า 0.5%[12] โดยพบว่าฟางข้าวที่ผ่านการเตรียมด้วยการตัดและแช่สารละลายด่างมีแนวโน้มในการดูดซับฟอสฟอรัสได้ดีกว่าการเตรียมฟางในรูปแบบอื่น (Table 2)

ค่าเฉลี่ย Total K_2O ของฟางข้าวที่ผ่านการหมักเกือบทั้งหมด มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่า Total K_2O ของฟางข้าวก่อนหมัก โดยพบว่าฟางข้าวจากระบบหมักที่มีการเตรียมฟางด้วยการตัดและแช่ด้วยสารละลายด่างจะมีค่า Total K_2O สูงกว่าฟางข้าวจากระบบที่มีการเตรียมฟางรูปแบบอื่นเมื่อมีระยะเวลาในการหมักเท่ากัน แต่อย่างไรก็ตามพบว่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่ระยะเวลาในการหมักไม่ส่งผลต่อค่า Total K_2O ของฟางข้าวเช่นกัน (Table 2) ทั้งนี้การลดลงของค่า Total K_2O ของฟางข้าว เกิดขึ้นได้จากการนำไปใช้ของจุลินทรีย์และจากการสูญเสียให้กับน้ำเสียที่หมักร่วมกันภายในระบบ โดยค่า Total K_2O ของฟางข้าวทั้งก่อนและภายหลังการหมักมีค่าต่ำกว่า 0.5% ที่กำหนดไว้สำหรับมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ตามประกาศกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548[12]

ค่า C/N ratio ของฟางข้าวที่ผ่านการหมักเกือบทั้งหมดมีค่าลดลง เมื่อเทียบกับค่า C/N ratio ของฟางข้าวก่อนหมักซึ่งมีค่าสูงถึง 193.5:1 แม้จะพบว่าฟางข้าวจากระบบหมักที่มีการเตรียมฟางด้วยการตัดและแช่ด้วยสารละลายด่าง มีค่า C/N ratio ต่ำกว่าฟางข้าวจากระบบที่มีการเตรียมฟางรูปแบบอื่น แต่อย่างไรก็ตามพบว่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ยกเว้นฟางข้าวที่ผ่านการหมักเป็นระยะเวลา 10 wk ขณะที่พบว่าระยะเวลาหมักที่นานขึ้น จะทำให้ค่า C/N ratio ของฟางข้าวภายหลังการหมักทั้งหมดมีค่าลดลงและเกือบทั้งหมดมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Table 2) ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่าไนโตรเจนของฟางข้าวตามระยะเวลาการหมัก โดยการลดลงของ ค่า C/N ratio ของฟางข้าวภายหลังการหมักนี้เป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของค่าไนโตรเจนของฟางข้าวเป็นหลัก ซึ่งแม้ค่าสารอินทรีย์คาร์บอนของฟางข้าวภายหลังการหมักจะมีค่าสูงขึ้นแต่พบว่าเพิ่มสูงขึ้นไม่มากนักเมื่อเทียบต่อปริมาณไนโตรเจน จึงทำให้ค่า C/N ratio ของฟางข้าวหลังหมักมีค่าลดต่ำลง โดยค่า C/N ratio ของฟางข้าวทั้งก่อนและภายหลังการหมักมีค่าสูงกว่า 20:1 ที่กำหนดไว้สำหรับมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ตามประกาศกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548[12]

จากผลการศึกษา สรุปได้ว่าฟางข้าวซึ่งมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ขนาดโมเลกุลใหญ่และย่อยสลายยาก สามารถถูกย่อยสลายได้ในการหมักร่วมกับน้ำเสียจากฟาร์มสุกรในสภาพไร้อากาศ โดยจะถูกย่อยสลายเป็นสารอินทรีย์

โมเลกุลเล็กเช่นเดียวกับสารอินทรีย์ในน้ำเสีย โดยพบว่าฟางข้าวจากระบบหมักที่มีการเตรียมฟางข้าวด้วยการตัดและแช่ด้วยสารละลายด่างจะเกิดการย่อยสลายได้ดีกว่าระบบอื่น ขณะที่ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียมีค่าลดลง ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์แขวนลอย การตกตะตอนของของแข็งแขวนลอย และการดูดซับของของแข็งแขวนลอยติดอยู่กับฟางข้าวที่หมักร่วมอยู่ในระบบ ค่าไนโตรเจนของน้ำเสียมีค่าสูงขึ้นตามระยะเวลาการหมักที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากการเพิ่มขึ้นของค่าอินทรีย์ไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำเสียจากการย่อยสลายอินทรีย์สารในน้ำเสียและฟางข้าว ขณะที่ ธาตุไนโตรเจน และฟอสฟอรัสของฟางข้าวหลังการหมักมีค่าสูงขึ้นเช่นกัน ซึ่งเกิดจากการดูดซับธาตุอาหารที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย โดยระยะเวลาหมักที่นานขึ้นจะทำให้ค่าไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของฟางข้าวสูงขึ้น ขณะที่รูปแบบของการเตรียมฟางไม่ส่งผลชัดเจนนักต่อปริมาณธาตุอาหารในฟางข้าว ค่า C/N ratio ของฟางข้าว มีค่าลดลงตามระยะเวลาการหมัก ซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของค่าไนโตรเจนเป็นหลัก จากผลการศึกษาจะพบว่าเมื่อทำการหมักร่วมระหว่างฟางข้าวและน้ำเสียจากฟาร์มสุกรในสภาพไร้อากาศนั้น การย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้น จะทำให้ฟางข้าวมีคุณลักษณะเปลี่ยนแปลงไป และทำให้สารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียเกิดการย่อยสลายและเปลี่ยนรูปด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตาม พบว่ากระบวนการหมักที่เกิดขึ้นภายในระยะเวลาที่ทำการศึกษานั้น สารอินทรีย์ส่วนใหญ่ยังไม่เกิดการย่อยสลายจนถึงขั้นตอนของการเปลี่ยนรูปไปเป็นสารอนินทรีย์ ดังนั้นการศึกษาต่อยอดด้วยระยะเวลาของการหมักที่ยาวนานขึ้นจะทำให้ทราบถึงผลจากกระบวนการหมักที่สมบูรณ์ ซึ่งจะนำไปสู่การนำระบบการหมักร่วมแบบไร้อากาศไปสู่การประยุกต์ใช้ในการจัดการน้ำเสียและวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทฟางข้าวได้อย่างเหมาะสมต่อไป

กิตติประกาศ

ผู้ศึกษาขอขอบคุณมหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณ และขอขอบคุณคณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ที่ให้การสนับสนุนห้องปฏิบัติการ และอำนวยความสะดวกอื่น จนการศึกษาวิจัยในครั้งนี้สามารถสำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

1. Abbasi T, Tauseef SM, Abbasi SA. Anaerobic digestion for global warming control and energy generation-an overview. Renew Sust Energ Rev 2012;16:3228-42.
2. สุบัณฑิต นิ่มรัตน์. จุลชีววิทยาน้ำเสีย. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2548.
3. Feng H, Qu GF, Ning P, Xiong XF, Jia LJ, Shi YK et al. The resource utilization of anaerobic fermentation residue. Procedia Environ Sci 2011;11:1092-99.
4. Parameswaran P, Rittmann BE. Feasibility of anaerobic co-digestion of pig waste and paper sludge. Bioresour Technol 2012;124:163-8.
5. Mussoline W, Esposito G, Lens P, Giordano A. Design considerations for a farm-scale biogas plant based on pilot-scale anaerobic digesters loaded with rice straw and piggery wastewater. Biomass Bioenergy 2012;46:469-78.
6. Chen X, Zhang Y, Gu Y, Liu Z, Shen Z, Chu H et al. Enhancing methane production from rice straw by extrusion pretreatment. Appl Energy 2014;122:34-41.
7. สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัย เชียงใหม่. โครงการศึกษาการเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสุกร ในรูปแบบการหมักย่อยร่วมโดยถังปฏิกรณ์ UASB และ CSTR เพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ. เชียงใหม่: สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัย เชียงใหม่; 2552.
8. APHA, AWWA, WPCF. Standard methods for the examination of water and wastewater, 18th ed. Washington D.C: American Public Health Association; 1992.
9. กลุ่มวิจัยเกษตรเคมี. คู่มือวิธีการวิเคราะห์ปุ๋ยอินทรีย์. กรุงเทพฯ: สำนักวิจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์; 2551.
10. Lim JS, Manan ZA, Alwi SRW, Hashim H. A review on utilization of biomass from rice industry as a source of renewable energy. Renew Sustainable Energy Rev 2012;16:3084-94.
11. กรมควบคุมมลพิษ. คู่มือการเลือกใช้ การดูแลและบำรุงรักษาระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรตามแบบมาตรฐานกรมปศุสัตว์. กรุงเทพฯ: กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม; 2546.
12. นรีลักษณ์ ชูวรเวช. เรื่องควรรู้เกี่ยวกับปุ๋ยอินทรีย์. กรุงเทพฯ: สำนักวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร; 2548.
13. Hartmann H, Ahring B.K. Strategies for the anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: an overview. Water Sci Technol 2006;53:7-22.