ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียจากโรงเรือนเลี้ยงสุกรด้วยระบบน้ำโปรยกรองตามกระแสการไหลของอากาศในวัสดุตัวกลางแบบยึดติด

Ammonia Removal Efficiency from Pig Houses by Horizontal Bio-trickling Air Scrubber

ธีรวิทย์ ปูผ้า[1*], จิริสุดา สินธุศิริ[1], ศุภณัฐ เจี๊ยบนา[1], วรพจน์ กนกกันฑพงษ์[2]

[1]คณะสาธารณสุขศาสตร์และสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

[2]คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[*]Email: tpoopa@gmail.com

บทคัดย่อ

การกำจัดแอมโมเนียด้วยระบบ Horizontal Bio-trickling Air Scrubber (HBAS) ด้วยวิธีการใช้น้ำดักจับตามทิศทางการไหลของกระแสอากาศ ภายใต้การทดสอบในโรงเรือนเลี้ยงสุกร 4 สภาวะการทดลอง เก็บตัวแอมโมเนียต่อเนื่อง 20 สัปดาห์ พบว่าความเข้มข้นและภาระบรรทุกแอมโมเนียที่เกิดภายในโรงเรือนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.2-18.8 ppm และ 7.3-1,375 g/h ตามลำดับ ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียทั้ง 4 การทดลองอยู่ระหว่าง 42.7-51.1% โดยอัตราการใช้น้ำมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย ทั้งนี้รูปแบบการบำบัดแอมโมเนียมีความผันผวนตลอดช่วงอายุการเลี้ยงสุกรซึ่งการทดลองต้องมีการปรับปรุงให้สมบูรณ์มากขึ้น

คำสำคัญ : ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย การดักจับด้วยน้ำ โรงเรือนเลี้ยงสุกร

Abstract

The horizontal bio-trackling air scrubber (HBAS) by air scrubbed co-current system is the means for ammonia removal. The method has been tested under 4 fluctuating pig houses conditions. The ammonia samples are collected regularly for 20 weeks. The study shows that the ranges of ammonia concentration and ammonia loading rate in pig houses are 0.2-18.8 ppm and 7.3-1,375 g/h, respectively. Additionally, the removal efficiency of these 4 conditions varies between 42.7-51.1% where the scrub water rate affects the efficiency. The fluctuating ammonia removal patterns that are found through pig farming age suggest that the study requires the improvement.

Keywords : Ammonia removal efficiency, Water scrub, Pig house

บทนำ

จากการเพิ่มขึ้นของประชากรและการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจที่ขยายตัวขึ้นทำให้ต้องมีการผลิตอาหารให้เพียงพอต่อความต้องการ สำหรับประเทศไทยในปี พ.ศ. 2559 มีปริมาณการผลิตสุกร 14.54 ล้านตัว เพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2558 ร้อยละ 6.52 (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2560) โดยตลอดหลายปีที่ผ่านมาความต้องการเนื้อสุกรที่มากขึ้น ทำให้ต้องเพิ่มการผลิตเนื้อสุกรให้เพียงพอต่อความต้องการ กระแสการเลี้ยงสุกรแบบฟาร์มขนาดใหญ่ ความหนาแน่นของสุกรสูงที่อาจมีสุกรได้มากกว่า 10,000 ตัวต่อฟาร์ม โดยที่แต่ละโรงเรือนอาจมีจำนวนสุกรมากกว่า 800-900 ตัว และด้วยวิธีการจัดการโรงเรือน เทคโนโลยีการเลี้ยงแบบใหม่ รวมถึงการผลิตอาหารสัตว์ที่มีคุณภาพสูงขึ้น ในอนาคตอาจจะสามารถเลี้ยงด้วยความหนาแน่นที่สูงกว่าในปัจจุบัน และด้วยจำนวนสุกรที่เพิ่มขึ้นเป็นเหตุให้ปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะปัญหามลพิษอากาศอันเนื่องมาจากกลิ่นและก๊าซที่สุกรขับถ่ายออกมาจากโรงเรือนสุกรก็สูงขึ้นไปด้วย ในฟาร์มสุกรแบบระบบปิดอากาศที่ระบายออกจากโรงเรือนสู่บรรยากาศจะมีความเข้มข้นของกลิ่นและก๊าซต่าง ๆ สูงมาก จากการศึกษาองค์ประกอบของสารเคมีในกลิ่นจากโรงเรือนสุกร พบเป็นกลุ่มของสารอินทรีย์ระเหยง่ายจำพวกกลุ่มคีโตน (ketone) กลุ่มกรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid) กลุ่มแอลกอฮอล์ (alcohol) กลุ่มอะโรเมติกไฮโดรคาร์บอน (aromatic hydrocarbon) เช่น ฟีนอล สไตรีน โทลูอีน และอัลดิไฮด์ รวมถึงก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ มีเทน และแอมโมเนีย เป็นต้น (Blazy et al., 2015) โดยเฉพาะก๊าซแอมโมเนียที่ปล่อยออกมานั้นมีสามารถส่งผลต่อคุณภาพน้ำทำให้น้ำมีปริมาณไนโตรเจนและไนเตรทสูง ซึ่งน้ำที่มีไนโตรทสูงนี้เป็นสาเหตุก่อให้เกิดปรากฏการณ์สาหร่ายบานสะพรั่ง (eutrophication) และแอมโมเนียยังถูกพิจารณาให้เป็นสารตั้งต้นที่จะก่อให้เกิดสารมลพิษอากาศตัวอื่น ๆ ตามมา (Erisman and Schaap, 2004) ในแต่ละปีทั้งโลกมีการปลดปล่อยแอมโมเนียออกมาถึง 22.7 Tg NH_3 โดยส่วนใหญ่มีแหล่งกำเนิดจากภาคการเกษตรถึง ร้อยละ 39 (Galloway et al., 2004) สำหรับภาพรวมของทั้งโลกการปลดปล่อยแอมโมเนียการจากผลิตสุกรคิดเป็นร้อยละ 15 ของการปศุสัตว์ทั้งหมด จากการศึกษาพบว่าปริมาณแอมโมเนียที่ปล่อยออกมาจากการเลี้ยงสุกรมีปริมาณ 79.2 กรัมแอมโมเนียต่อวัน และมีความเข้มข้นอยู่ระหว่าง 649 -3,751 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง ต่อน้ำหนักสุกรมีชีวิต 500 กิโลกรัม (Misselbrook et al., 2000) โดยความเข้มข้นที่ตรวจวัดจากโรงเรือนอยู่ระหว่าง 5-18 ppm ซึ่งยังไม่เกินค่า TLV แต่ก็สูงกว่าระดับที่ถือว่าปลอดภัย (Olivier et al., 1998) นอกจากนี้กลิ่นของแอมโมเนียยังสร้างความรำคาญให้แก่ผู้เลี้ยงสุกร และชุมชนโดยรอบอีกด้วย

ในปัจจุบันเทคโนโลยีในการจัดการปัญหากลิ่นและก๊าซจากโรงเรือนเลี้ยงสุกรคือ การทำความสะอาดก๊าซที่ปล่อยออกมาจากโรงเรือนเลี้ยงสุกร (exhaust air cleaning) หนึ่งในเทคโนโลยีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือ วิธีการ air scrubber โดยการโปรยของเหลวผ่านอากาศที่จะระบายออกเพื่อดูดกลืนก๊าซที่ต้องการกำจัด ทั้งนี้อาจมีการใช้ตัวกลาง (media) และจุลินทรีย์ยึดเกาะร่วมในการบำบัดหรือไม่ก็ได้ ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียด้วยกระบวนการ Horizontal Bio-trickling Air Scrubber (HBAS) อาศัยหลักการบำบัดทางกายภาพด้วยวิธี air scrubber โดยใช้น้ำสเปรย์ในแนวนอนขนาดกับทิศทางการไหลของอากาศและการใช้ตัวกลางพลาสติกร่วมโดยพิจารณาถึงปัจจัยอัตราการใช้น้ำสำหรับสเปรย์และพื้นที่ติดตั้งตัวกลางเพื่อกำจัดแอมโมเนียที่ออกมาจากโรงเรือนเลี้ยงสุกร ซึ่งเป็นต้นแบบการกำจัดแอมโมเนียจากโรงเรือนเลี้ยงสุกรด้วยวิธีการใหม่สำหรับการจัดการปัญหากลิ่นจากการเลี้ยงสุกรในประเทศไทย

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียจากฟาร์มหมูด้วยระบบ Horizontal Bio-trickling Air Scrubber (HBAS) ได้ออกแบบการทดลองในฟาร์มสุกรแห่งหนึ่งกำลังการเลี้ยงประมาณ 35,000 ตัว มีปริมาณสุกร 900-1,000 ตัวต่อโรงเรือน ทำการเก็บข้อมูลความเข้มข้นของแอมโมเนียต่อเนื่องทุกวันตลอดช่วงอายุสุกรตั้งแต่เข้าโรงเรือนจนกระทั่งจับสุกรจำหน่าย (อายุการเลี้ยง 20 สัปดาห์) โดยศึกษาปัจจัยอัตราการใช้น้ำในการดูดกลืนแอมโมเนีย และพื้นที่หน้าตัดของตัวกลางพลาสติกที่ติดตั้ง

กลไกการกำจัดแอมโมเนียของระบบอาศัยหลักการที่ก๊าซแอมโมเนียจะละลายลงในหยดน้ำที่สเปรย์แล้วเปลี่ยนเป็นสารละลายแอมโมเนียมและกระบวนการไนตริฟิเคชันโดยจุลินทรีย์ที่จะเปลี่ยนให้เป็นไนเตรทต่อไป ดังสมการ

$$NH_3(g) + H_2O(l) \leftrightarrow NH_3(aq) + H_2O(l) \leftrightarrow NH_4^+(aq) + OH^-(aq) \quad (1)$$

$$NH_4^+(aq) + OH^-(aq) + 1.5O_2(g) \rightarrow NO_2^-(aq) + H^+(aq) + 2H_2O(l) \quad (2)$$

$$NO_2^-(aq) + H^+(aq) + 2H_2O(l) + 0.5O_2(g) \rightarrow NO_3^-(aq) + H^+(aq) + 2H_2O(l) \quad (3)$$

ระบบโรงเรือนเลี้ยงสุกรและการออกแบบการทดลอง

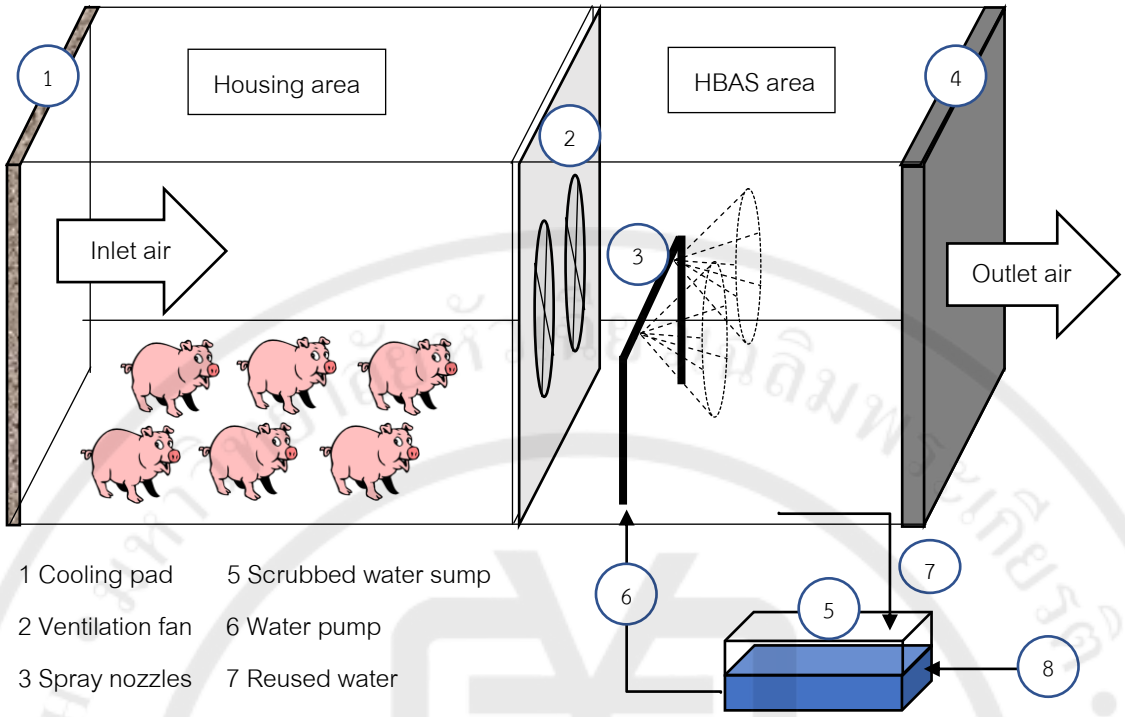
โรงเรือนที่นำมาออกแบบการทดลองปรับปรุงจากโรงเรือนที่เลี้ยงในระบบปิดหรือระบบอีแวป (evaporative cooling system) อากาศที่เข้าโรงเรือนจะควบคุมอุณหภูมิโดยการแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำด้วยแผ่นรังผึ้ง (cooling pad) อากาศจะถ่ายเทจากด้านหน้าโรงเรือนไปด้านท้ายด้วยพัดลมระบายอากาศจำนวน 7 ชุด โดยอัตราการระบายอากาศจะสัมพันธ์กับการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในโรงเรือน (ประมาณ 20-25 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับช่วงอายุของสุกร) โรงเรือนมีความกว้างประมาณ 10 เมตร และยาวประมาณ 100 เมตร ก๊าซแอมโมเนียที่ระบายออกมาจะผ่านระบบ HBAS ที่ติดตั้งอยู่ด้านท้ายโรงเรือน ซึ่งมีความยาวของส่วนนี้ 8 เมตร โดยวัสดุตัวกลางพลาสติกที่ใช้มีลักษณะเป็นแผงรังผึ้งหนา 0.4 เมตร และพื้นที่ติดตั้ง 36 ตารางเมตร ดังรูปที่ 1 อัตราการสเปรย์น้ำประมาณ 40 ลิตรต่อนาที ทั้งนี้น้ำที่ใช้สำหรับสเปรย์จะไม่มีการระบายทิ้งแต่จะเติมน้ำใหม่เพื่อทดแทนน้ำบางส่วนที่ระเหยออกไปจากระบบออกแบบสภาวะการทดลองออกเป็น 4 สภาวะ (โรงเรือนละ 1 สภาวะ) ได้แก่

1. ใช้วัสดุตัวกลางพลาสติกติดตั้งท้ายระบบเต็มพื้นที่ และควบคุมอัตราการสเปรย์น้ำโดยเปิดน้ำ 60 วินาที และปิดน้ำ 30 วินาที (60/30s, A)

2. ใช้วัสดุตัวกลางพลาสติกติดตั้งท้ายระบบเต็มพื้นที่ และควบคุมอัตราการสเปรย์น้ำโดยเปิดน้ำ 30 วินาที และปิดน้ำ 30 วินาที (30/30s, A)

3. ใช้วัสดุตัวกลางพลาสติกติดตั้งท้ายระบบครึ่งหนึ่งของพื้นที่ และควบคุมอัตราการสเปรย์น้ำโดยเปิดน้ำ 60 วินาทีและปิดน้ำ 30 วินาที (60/30s, A/2)

4. ใช้วัสดุตัวกลางพลาสติกติดตั้งท้ายระบบครึ่งหนึ่งของพื้นที่ และควบคุมอัตราการสเปรย์น้ำโดยเปิดน้ำ 30 วินาทีและปิดน้ำ 30 วินาที (30/30s, A/2)



1 Cooling pad 5 Scrubbed water sump

2 Ventilation fan 6 Water pump

3 Spray nozzles 7 Reused water

4 Plastic Media 8 Fresh water

จุดเก็บตัวอย่าง

เก็บตัวอย่างก๊าซแอมโมเนีย 3 จุด ได้แก่ จุดที่อากาศเข้าโรงเรือน (inlet air) จุดท้ายโรงเรือนก่อนพัดลมระบายอากาศ และจุดที่อากาศระบายออกจากระบบ HBAS (outlet air) วันละ 2 ครั้ง เช้าเวลา 9.00 น. และเย็นเวลา 16.00 น.

เครื่องมือและอุปกรณ์

เก็บตัวอย่างก๊าซแอมโมเนียด้วยเครื่องเก็บตัวอย่างก๊าซในบรรยากาศชนิดพกพา Aeroqual รุ่น 200

สถิติที่ใช้ในงานวิจัยและการแปรผล

การคำนวณอัตราภาระบรรทุกของแอมโมเนีย (loading rate) ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนีย (removal efficiency (%)) ดังสมการ

$$NH_3 \text{ loading rate } (g/h) = Q \times NH_3 \text{concentration} \quad (4)$$

$$NH_3 \text{ removal efficiency}(\%) = [[\,NH_3\text{inf} - NH_3\text{eff}]/NH_3\text{eff}] \times 100 \quad (5)$$

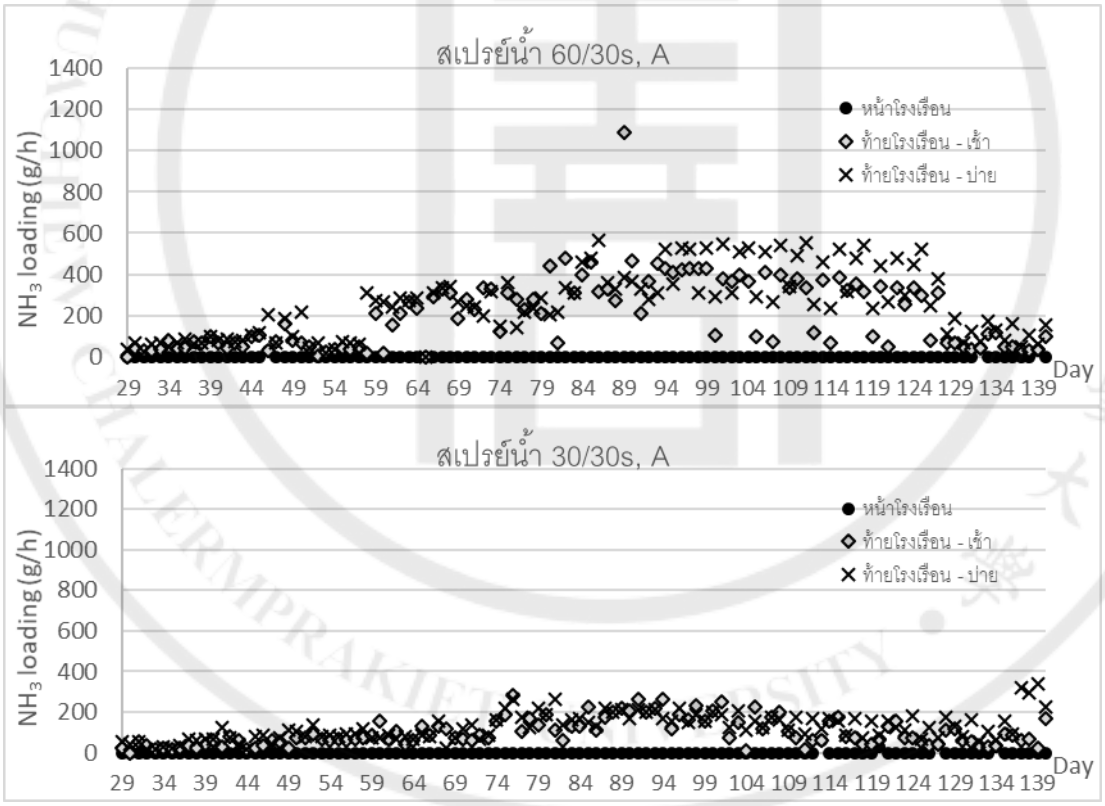
สำหรับการทดสอบความแตกต่างของประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนีย ใช้สถิติ Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 90%

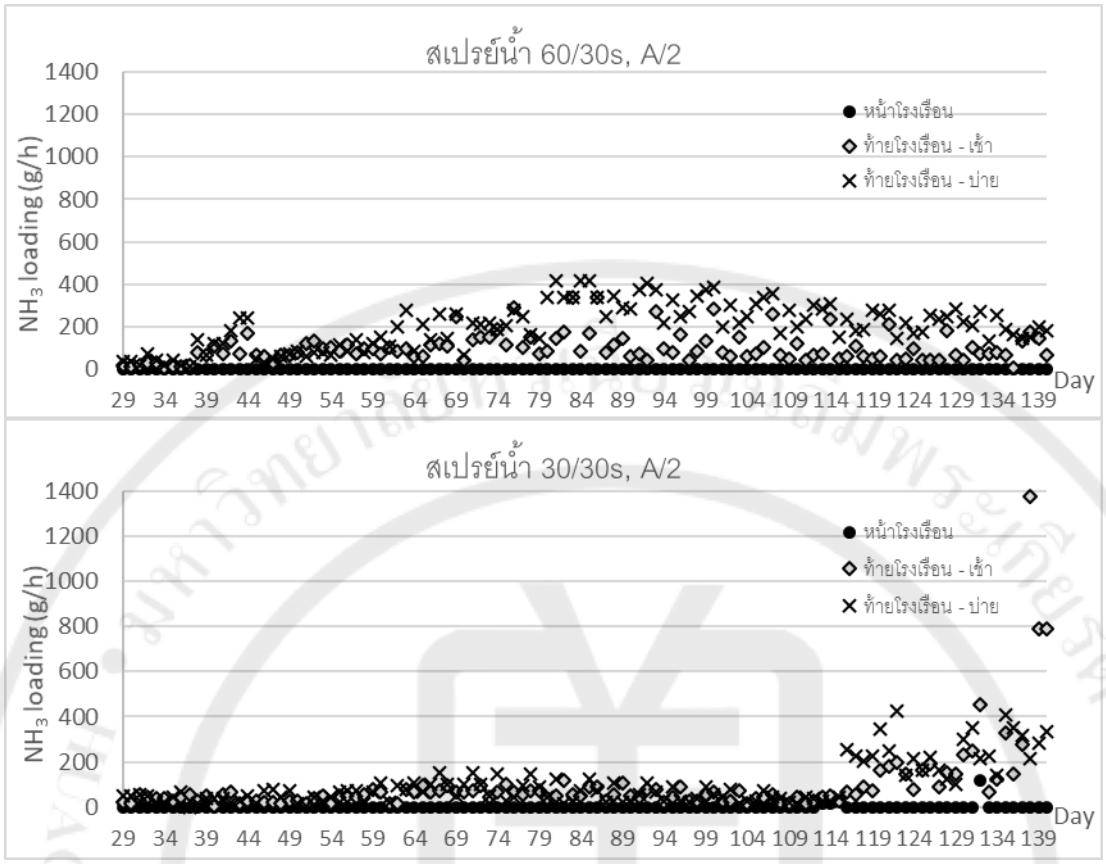
ผลการวิจัย

ภาพรวมผลการวิจัย

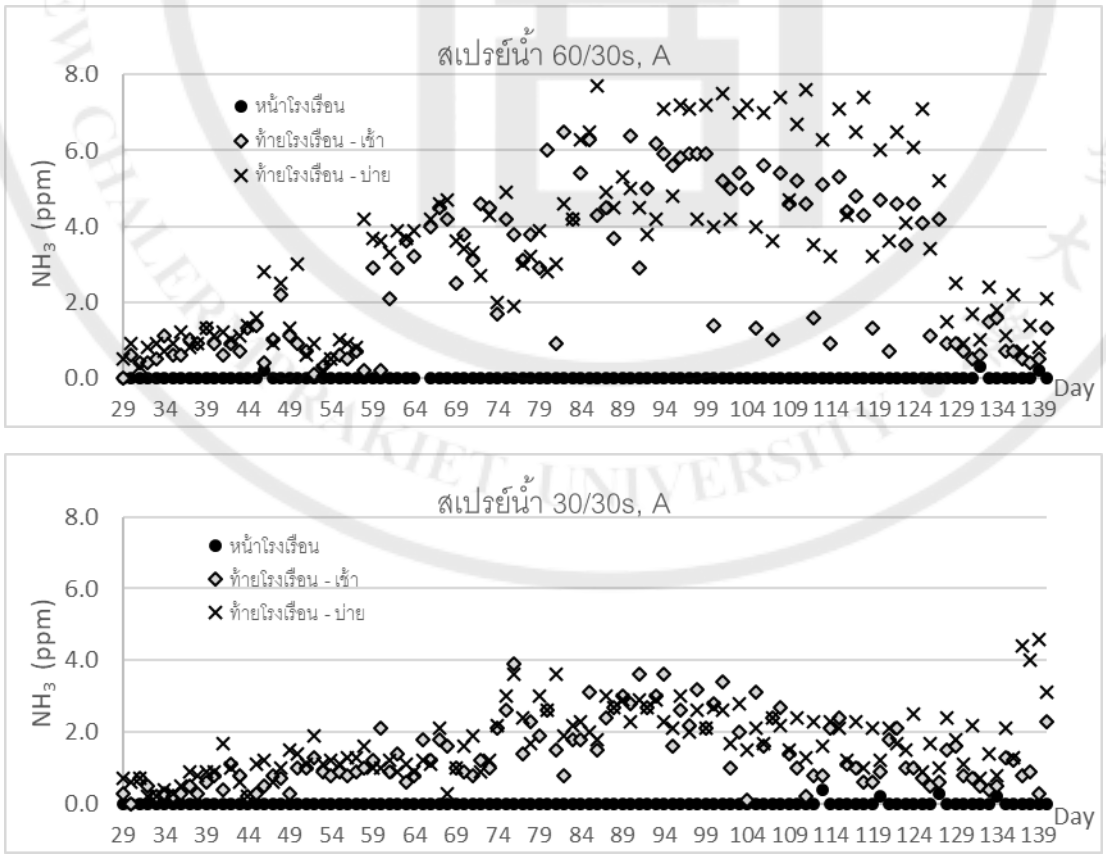
ผลการวิจัยความเข้มข้นของก๊าซแอมโมเนียภายในโรงเรือนเลี้ยงสุกร ดำเนินการเก็บตัวอย่างสุกรที่มีอายุการเลี้ยงในโรงเรือนตั้งแต่สัปดาห์ที่ 5 จนถึงสัปดาห์ที่ 20 คิดเป็นการเก็บข้อมูลต่อเนื่อง 112 วัน จากข้อมูลสรุปได้ว่าไม่มีแอมโมเนียในบรรยากาศที่เข้ามาในโรงเรือนเลี้ยงสุกร เนื่องจากทั้ง 4 สภาวะการทดลองตรวจไม่พบปริมาณแอมโมเนียบริเวณด้านหน้าโรงเรือนตลอดอายุการเลี้ยงสุกร สำหรับภาพรวมความเข้มข้นของก๊าซแอมโมเนียบริเวณท้ายโรงเรือนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุของสุกร และพบว่าบริเวณท้ายโรงเรือนมีความเข้มข้นของแอมโมเนียและภาระบรรทุกแตกต่างกันไประหว่าง 0.2- 18.8 ppm และ 7.3-1,375 g/h ตามลำดับ สำหรับความเข้มข้นและภาระบรรทุกแอมโมเนียภายบริเวณท้ายโรงเรือนสภาวะการทดลองที่ 1, 2, 3 และ 4 มีค่าอยู่ในช่วง 0.1-14.9 ppm 7.7-1,089.8 g/h, 0.1-4.6 ppm 7.3-336.4 g/h, 0.1-5.7 ppm 7.3-416.9 g/h และ 0.1-18.8 ppm 7.3-1,375 g/h ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่าภาระบรรทุกแอมโมเนียมีค่าเกินกว่า 1,000 g/h เพียง 3 ตัวอย่าง เท่านั้น รายละเอียดแสดงในรูปที่ 1 และ 2 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาของ Roland et al. (2012) ที่ภาระบรรทุกแอมโมเนียอยู่ระหว่าง 54-219 g/h

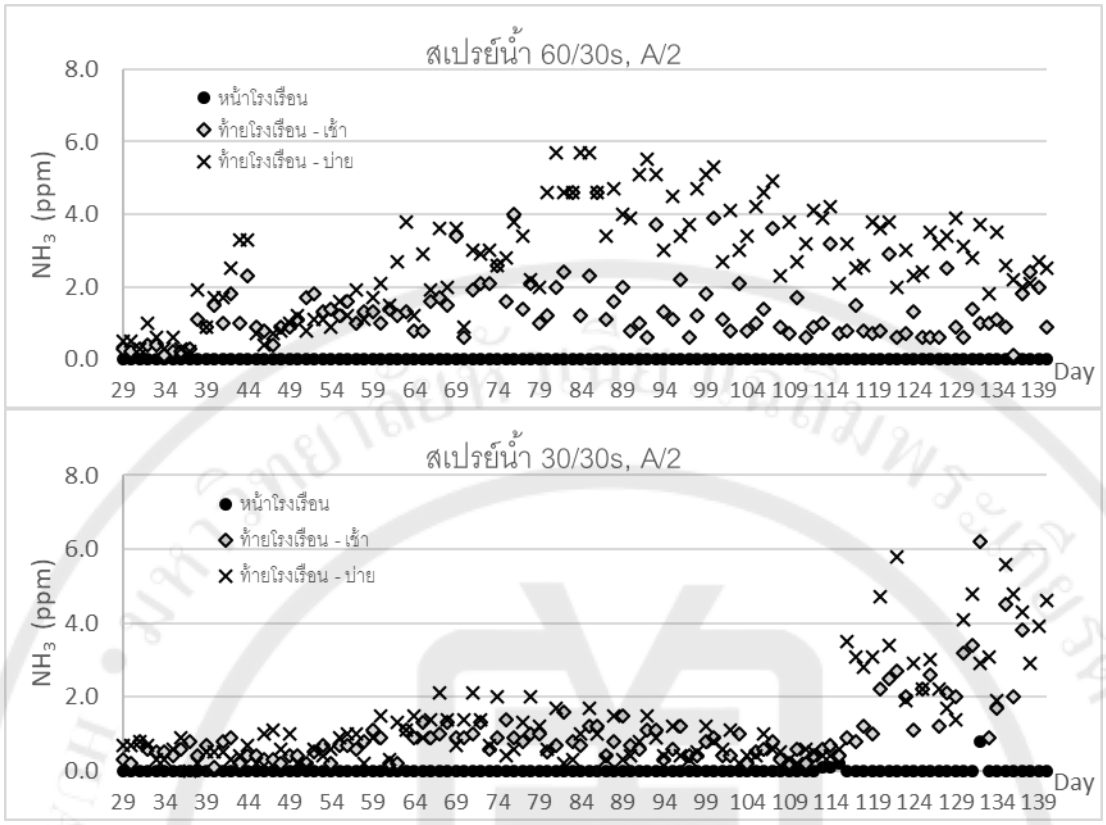
รูปที่ 1 ภาระบรรทุกแอมโมเนีย (g/h) หน้าและท้ายโรงเรือน





รูปที่ 2 ความเข้มข้นแอมโมเนีย (ppm) หน้าและท้ายโรงเรือน





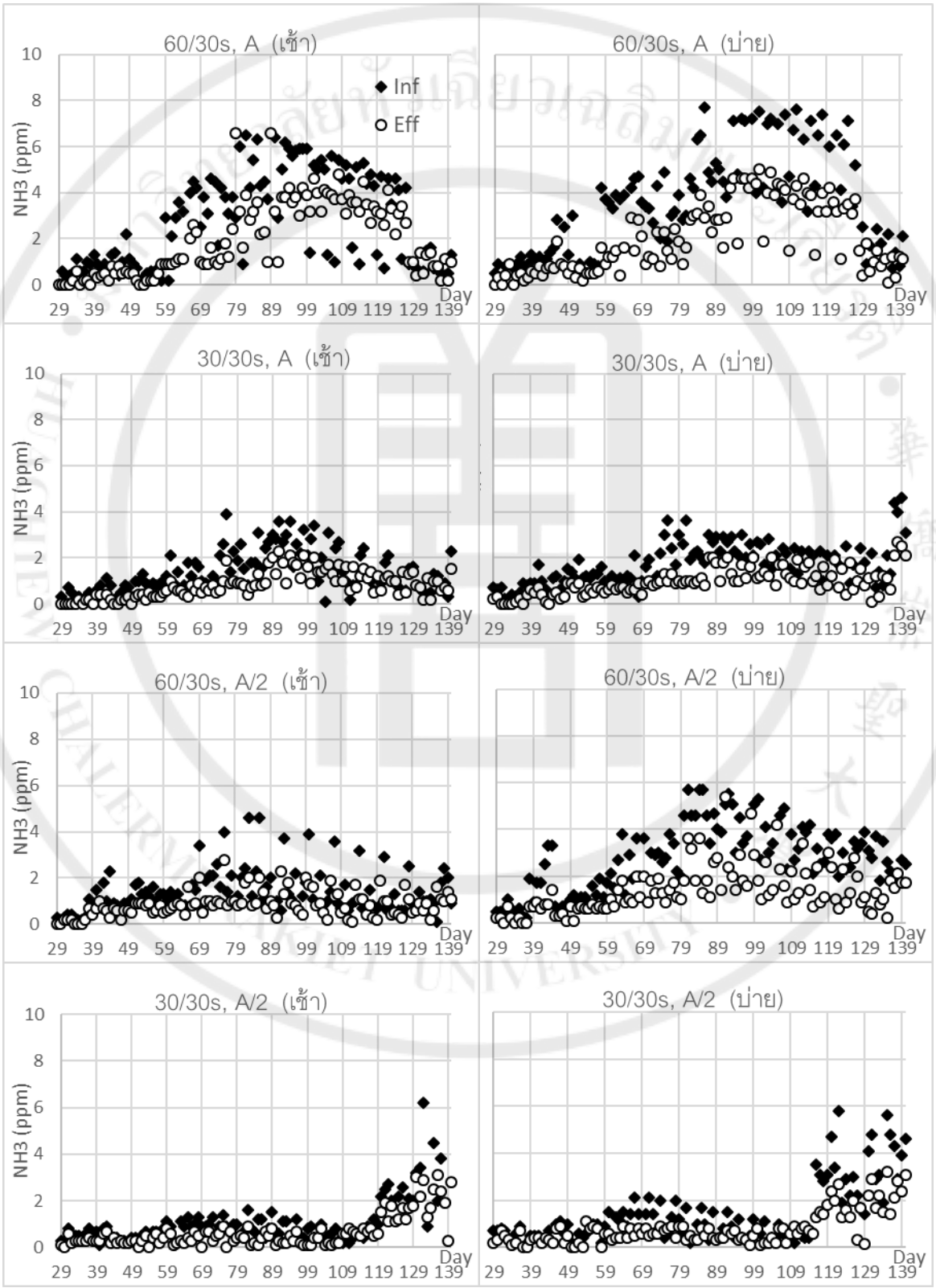
ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซแอมโมเนีย

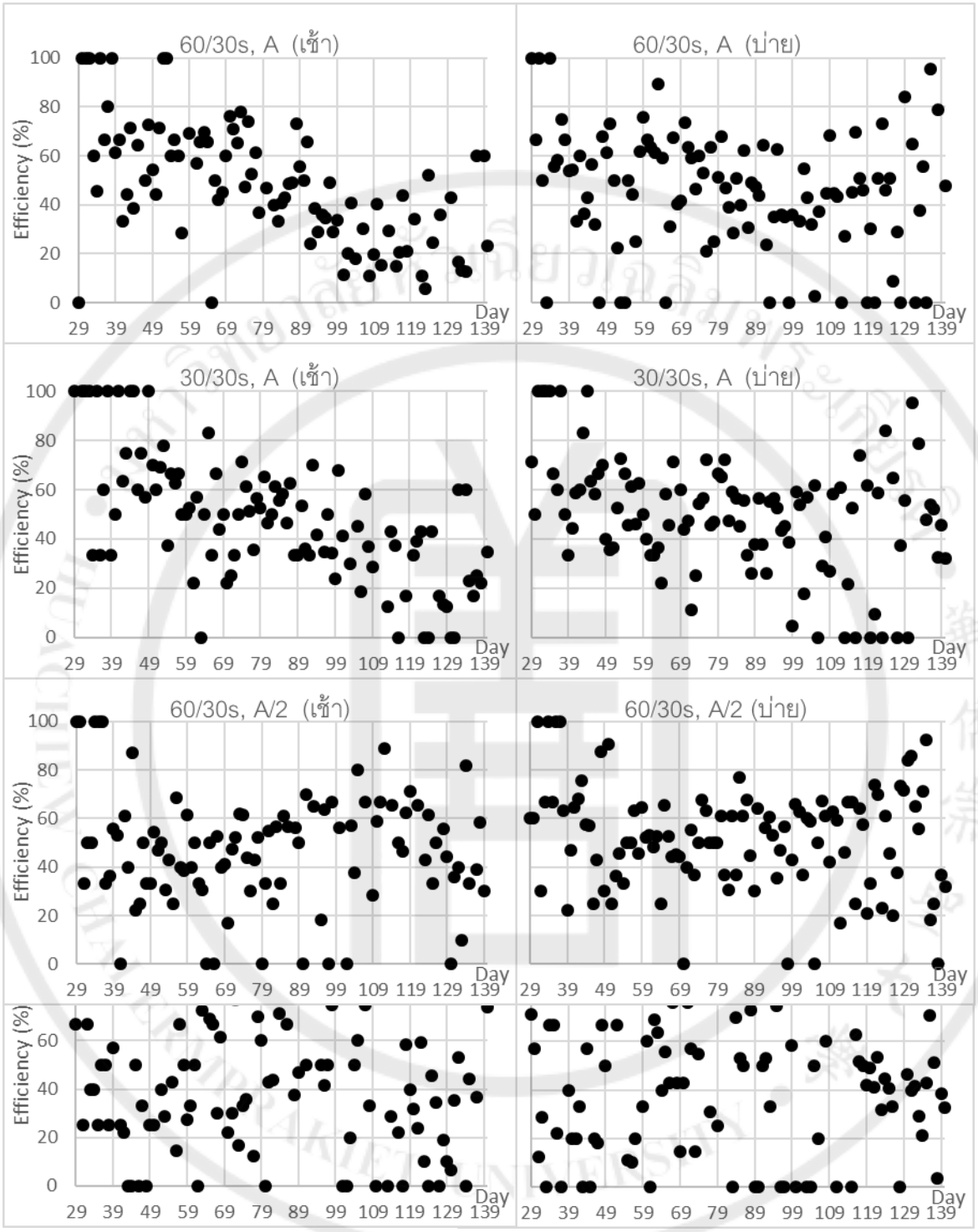
เนื่องจากการทดลองนี้ทำการออกแบบการทดลองและตรวจวัดในโรงเรือนเลี้ยงสุกรที่ใช้งานจริง ดังนั้นจึงไม่สามารถควบคุมความเข้มข้นของแอมโมเนียที่เข้าระบบให้คงที่ได้ความเข้มข้นของแอมโมเนียที่เข้าระบบทั้ง 4 สภาวะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.2-7.7 ppm ในส่วนของความเข้มข้นของแอมโมเนียที่ออกจากระบบมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0 ppm และสูงสุด 6.6 ppm รายละเอียดความเข้มข้นแอมโมเนียที่ออกจากระบบแสดงในรูปที่ 3

ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียด้วยระบบ HBAS พิจารณาจากร้อยละการบำบัดแอมโมเนียที่เข้าสู่ระบบ HBAS (ความเข้มข้นท้ายโรงเรือน, NH_3 inf) และแอมโมเนียที่ออกจากระบบ HBAS (ความเข้มข้นที่ออกนอกโรงเรือน, NH_3 eff) เมตร พบว่ามีประสิทธิภาพอยู่ระหว่าง 0-100% และประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียเฉลี่ยประมาณ 45% เปรียบเทียบกับการศึกษาของ Ogawa et al. (2011) และ Roland et al. (2012) มีประสิทธิภาพเท่ากับ 55-95% และ 95.2-97.9% ตามลำดับ จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าการทดลองที่ 3 มีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียดีที่สุด ค่าเฉลี่ยช่วงเวลาเช้า-บ่ายเท่ากับ 46.9 -51.1% รองลงมา ได้แก่ การทดลองที่ 2 (48.3-49.6%) และ 1 (48.1-45.3%) ตามลำดับ โดยการทดลองที่ 4 มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด (44.0-42.7%) สำหรับประสิทธิภาพการบำบัดเทียบกับอายุของสุกรแนวโน้มพบว่า ประสิทธิภาพจะสูงเมื่อสุกรอายุน้อย โดยจะเห็นได้จากพบค่าประสิทธิภาพ 100% ในช่วงนี้ เนื่องจากปริมาณความเข้มข้นในโรงเรือนไม่มากต่างจากช่วงที่สุกรอายุมากขึ้นความเข้มข้นก็จะมากเพิ่มขึ้นด้วย (เห็นได้จากไม่พบค่าประสิทธิภาพ 100%) นอกจากนี้รูปแบบของประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียไม่เป็นไปตามอัตราภาระบรรทุกแอมโมเนียที่เกิดขึ้นภายในโรงเรือน รวมถึงช่วงเวลาเช้าหรือบ่ายที่ทำการตรวจวัด ทั้งนี้ประสิทธิภาพการบำบัดแสดงในรูปที่ 4

เมื่อนำประสิทธิภาพการบำบัดมาวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี LSD ที่ระดับความเชื่อมั่น 90% พบว่าที่สภาวะการทดลองที่ 3, 2 และ 1 ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

รูปที่ 4 ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย





อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

การทดสอบการบำบัดแอมโมเนียจากโรงเรือนเลี้ยงสุกรด้วยระบบ HBAS ผลการทดลองมีประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยประมาณ 45% และพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดขึ้นอยู่กับอัตราการใช้น้ำที่ใช้ดักจับ โดยพิจารณาจากสภาวะการทดลองที่ 3 และ 4 ทั้งสองการทดลองได้ลดพื้นที่ติดตั้งวัสดุตัวกลางลงครึ่งหนึ่ง แต่เมื่อลดอัตราการใช้น้ำลง (การ

ทดลองที่ 4) มีผลทำให้ประสิทธิภาพลดลงและมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ต่างจากการทดลองที่ 2 ที่ลดการใช้น้ำแต่ไม่ได้ลดพื้นที่ติดตั้งวัสดุตัวกลางผลของประสิทธิภาพไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้หากทางฟาร์มเลี้ยงสุกรต้องการนำไปใช้กับทุกโรงเรือนสามารถเลือกการออกแบบโดยการลดพื้นที่ติดตั้งวัสดุตัวกลาง ซึ่งจะส่งผลต่อค่าใช้จ่ายที่ลดลง (ราคาวัสดุตัวกลางคิดเป็น 80% ของระบบ) แต่ทั้งนี้ต้องไม่ลดอัตราการใช้น้ำดักจับแอมโมนีย

กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) สำหรับทุนวิจัยและบริษัท อเมริกันมาร์เก็ตติ้ง จำกัด (AMCOVET) ในการเอื้อเฟื้อสถานที่ฟาร์มสุกรในการติดตั้งชุดการทดลองและการสนับสนุนทุนร่วมในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร. *สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. สถานการณ์สินค้าเกษตรที่สำคัญและแนวโน้มปี 2560*. รายงานประจำปี 2560.

Blazy, V., Guardia, A., Benoist, J. C., Daumoin M., Guiziou F., Lemasle M., et al. (2015). Correlation of chemical composition and odor concentration for emissions from pig slaughterhouse sludge composting and storage. *Chemical Engineering Journal*, (276), 398-409.

Erisman, J. W., & Schaap, M. (2004). The need for ammonia abatement with respect to secondary PM reductions in Europe. *Environmental Pollution*, (129), 159-163.

Galloway, J. N., Dentener, F. J., Capone, D. G., Boyer, E. W., Howarth, R. W., Seitzinger, S. P., et al. (2004). Nitrogen cycles: past, present, and future. *Biogeochemistry*, (70), 153-226.

Misselbrook, T. H., Van der Weerden, T. J., Pain, B. F., Jarvis, S. C., Chambers, B. J., Smith, K .A., et al. (2000). Ammonia emission factors for UK agriculture. *Atmospheric Environment,* (34), 871-880.

Ogawa, H., Dahl, P. G., Suzuki, T., Kai, P., & Takai, H. (2011). A microbiological-based air cleaning system using a two-step process for removal of ammonia in discharge air from a pig rearing building. *Biosystems engineering,* (109), 108-119.

Olivier, J. G. J., Bouwman, A. F., Van der Hoek, K. W., & Berdowski, J. J. M. (1998). Global air emission inventories for anthropogenic sources of NOx, NH_3 and N_2O in 1990. *Environmental Pollution,* (102), 135-148.

Roland, W. M., Johan P. M. P., & Nico, W. M. O. (2012). Biotrickling filter for the treatment of exhaust air from a pig rearing building: Ammonia removal performance and its fluctuations. *Biosystems engineering*, (113), 242-252.