

ประสิทธิภาพของกระบวนการทางชีวภาพร่วมกับครอสโฟมีเดียในการกำจัด ก๊าซแอมโมเนียในฟาร์มเลี้ยงไก่แบบกึ่งปิด

Efficiency of a Biological Process Combined Using a Co-immobilized Cross-
Flow System for Ammonia Gas Removal in a Semi-Closed Chicken Farm

ครรชิต เงินคำคง* และ ศิรประภา ชัยเนตร

Khanchit Ngoenkhamkhong* and Siraprapa Chainetr

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

Faculty of Engineering, Rajamagala University of Technology Lanna

นันทน์ภัท เงินคำคง

Nannaphat Ngoenkhamkhong

คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Faculty of Agro-Industry, Chiang Mai University

ชินานาฏ วิทยาประภากร

Chinanat Withayaprapakorn

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

Faculty of Science and Agricultural Technology, Rajamagala University of Technology Lanna

รุ่งนภา เขียววิจิตร

Rungnapha Khiewwijit

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

Faculty of Engineering, Rajamagala University of Technology Lanna

E-mail: kunchit2516@rmutl.ac.th*, Siraprapa@rmutl.ac.th, nsr_manonun@hotmail.com,

chinanat@rmutl.ac.th and Rungnapha@rmutl.ac.th

*Corresponding author

(Received: 17 March 2025, Revised: 28 May 2026, Accepted: 2 June 2026)

<https://doi.org/10.57260/stc.2026.1124>

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซแอมโมเนียด้วยระบบบำบัดกลิ่นแบบชีวภาพในฟาร์มไก่ไข่ โดยพิจารณาความเหมาะสมด้านพื้นที่ติดตั้ง การออกแบบระบบ และปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานในฟาร์ม ผลการศึกษาพบว่า หลังการติดตั้งระบบ อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลมภายในโรงเรือนยังคงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานและไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของไก่ ส่วนคุณภาพน้ำเสียในระบบสเปรย์ตัวกลางพบว่าปริมาณสารอินทรีย์มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจน โดยน้ำที่ผ่านการบำบัดสามารถนำกลับมาใช้หมุนเวียนได้ และมีค่าความเป็นกรดต่างอยู่ในช่วง $6.99 \pm 0.03 - 7.10 \pm 0.00$ ขณะที่จำนวนจุลินทรีย์ในระบบอยู่ในช่วง $0.95 \times 10^7 - 3.68 \times 10^7$ โคโลนีต่อมิลลิลิตร สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดกลิ่น พบว่า ระบบสามารถลดก๊าซแอมโมเนียได้สูงสุดร้อยละ 86.16 ± 0.02 แสดงให้เห็นว่าระบบบำบัดกลิ่นแบบชีวภาพมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้ในฟาร์มไก่ไข่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: กระบวนการทางชีวภาพ ก๊าซแอมโมเนีย ฟาร์มไก่ ครอสโฟมีเดีย

Abstract

This research aimed to investigate the removal efficiency of ammonia gas using a biological odor treatment system in layer chicken farms. The study considered the suitability of installation area, system design, and operational factors related to the farm application. The results indicated that after the system installation, the temperature, humidity, and airflow velocity inside the poultry house remained within the standard ranges and did not adversely affect the performance of chicken production. Regarding to the wastewater quality in the spray media system, the organic matter showed a continuous decreasing trend, indicating the effective biodegradation of organic compounds by aerobic microorganisms. The treated effluent could be recirculated for reuse, with the pH values ranging from $6.99 \pm 0.03 - 7.10 \pm 0.00$. Besides, the microbial population in the system ranged from $0.95 \times 10^7 - 3.68 \times 10^7$ CFU/mL. In addition to the efficiency of odor removal, the system achieved a maximum ammonia gas removal efficiency of $86.16 \pm 0.02\%$. These findings demonstrate that the biological odor treatment system has strong potential for efficient application in layer chicken farms.

Keywords: Biological process, Ammonia gas, Chicken farm, Cross flow media

บทนำ

การเลี้ยงไก่ในประเทศไทยแม้จะเป็นการเลี้ยงเพื่อการบริโภคในประเทศเป็นหลัก ปัจจุบันผลผลิตไข่ไก่ในประเทศไทยมีประมาณวันละ 45 ล้านฟอง มีการให้อาหารที่มีประสิทธิภาพสูงครบตามความต้องการของไก่ไข่ การเลี้ยงไก่ไข่ในโรงเรือนควบคุมอุณหภูมิ ทำให้ไก่ไข่อยู่อย่างสบาย และให้ผลผลิตสูงตามศักยภาพของพันธุ์กรรม และมีการควบคุมป้องกันโรคอย่างเต็มประสิทธิภาพ อีกปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงคือการจัดการด้านสุขาภิบาลเพื่อลดปัจจัยเสี่ยงต่อการเกิดโรคระบาด เช่น โรคไข้หวัดนกที่พบในประเทศไทยและภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้เคยได้รับผลกระทบอย่างกว้างขวางในต้นปี พ.ศ. 2547 ฟาร์มไก่ไข่ที่สร้างใหม่จะต้องได้รับรองมาตรฐานฟาร์มซึ่งต้องมีระบบควบคุมป้องกันโรคเชิงชีวภาพ (Bio-security) ดังนั้นฟาร์มเลี้ยงไก่ไข่ขนาดกลางและขนาดใหญ่ทุกระดับจึงเป็นฟาร์มที่มีระบบการจัดการ เป็นระบบปิดซึ่งส่วนใหญ่เลี้ยงไก่ไข่ในโรงเรือนปิด มีการควบคุมอุณหภูมิด้วยระบบระเหยน้ำ (Evaporative cooling housing) หรือโรงเรือนอีแวป เพราะทำให้การจัดการด้านสุขาภิบาลของฟาร์มไก่ไข่เป็นไปด้วยดี ไม่ทำให้ไก่ไข่มีปัญหาด้านสุขภาพและไม่มีโรคระบาด ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตลดลง (กองแผนงาน กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2566) โรงเรือนไก่ไข่ต้องมีการระบายอากาศภายในโรงเรือนให้หมุนเวียนออกโดยใช้พัดลมระบายอากาศออกทางท้ายเล้า ซึ่งนำพาเอากลิ่นที่เกิดจากมูลไก่ไข่ทั้งก๊าซแอมโมเนีย ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซเหล่านี้จะมีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของไก่ไข่ รวมทั้งสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานในโรงเรือนนั้นด้วย การระบายอากาศออกช่วยให้ก๊าซต่าง ๆ ภายในโรงเรือนลดลง แต่มวลอากาศดังกล่าวหากปล่อยออกโดยไม่ได้รับการบำบัดตกกลิ่นเหม็นลงจะทำให้เกิดผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมทางอากาศทั้งภายในฟาร์มเองและชุมชนล้อมข้าง หากไม่ได้รับการแก้ไขอย่างถูกต้องปัญหาอาจทวีความรุนแรงจนส่งผลให้ฟาร์มไม่สามารถประกอบกิจการในพื้นที่ปัจจุบันต่อไปได้

ระบบบำบัดกลิ่นที่ใช้ในปัจจุบันมีหลายวิธี ได้แก่ วิธีทางเคมี เช่น การสครับด้วยเคมี (Chemical scrubbers) การใช้ความร้อนทำปฏิกิริยา (Thermal oxidation) การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic oxidation) เป็นต้น วิธีทางกายภาพ เช่น การควบแน่น (Condensation) การดูดซับ (Adsorption) เป็นต้น วิธีทางชีวภาพ เช่น การกรองชีวภาพ (Biofilter) การสครับด้วยชีวภาพ (Bio scrubber) เป็นต้น (Shareefdeen & Singh, 2008; Sirianuntapiboon & Chuamkaew, 2007) ซึ่งการบำบัดกลิ่นด้วยวิธีทางชีวภาพนั้นได้รับการยอมรับและสนใจศึกษามากขึ้น เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่ำ และที่สำคัญคือไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจึงเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวาง วิธีการบำบัดกลิ่นที่ดีที่สุดวิธีหนึ่ง คือ การบำบัดทางชีวภาพ มีประสิทธิภาพการกำจัด (Removal efficiency) ของระบบนี้อยู่ระหว่างร้อยละ 85-99 (Potivichayanon, 2005) ดังนั้นในการศึกษาวิจัยจึงเลือกที่จะพัฒนาระบบบำบัดกลิ่นแบบชีวภาพ

ในกระบวนการเลี้ยงทำให้เกิดกลิ่นเหม็นจากหลายปัจจัย อาทิเช่น น้ำที่เกิดจากการล้างทำความสะอาดอุปกรณ์ภายในเล้า สิ่งขับถ่ายทั้งปัสสาวะ มูลไก่และน้ำเสียที่เกิดจากการฉีดล้างทำความสะอาด นอกจากนั้นแล้วกลิ่นอีกส่วนหนึ่งจะออกมาจากพัดลมท้ายเล้าซึ่งเป็นพัดลมระบายอากาศในระบบโรงเรือนแบบปิด ลมเหล่านั้นจะพัดพากลิ่นเหม็นและสิ่งขับถ่ายที่กล่าวไปแล้ว โดยทางฟาร์มจะมีมาตรการในการทำความ

สะอาดภายในโรงเรือนและใช้ลมระบายอากาศออกจากท้ายโรงเรือนไม่ให้เกิดการหมักหมมอยู่ภายในเล้าซึ่งมีมีเทนเป็นองค์ประกอบจะมีผลต่อสุขภาพไก่และผลผลิตไข่โดยรวมได้ อากาศที่ออกมาจากโรงเรือนนำสารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดกลิ่นออกมาด้วย ในส่วนของน้ำเสียและของเสียที่เกิดขึ้น จะถูกรวบรวมและลำเลียงเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศหรือระบบผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อใช้ในการบำบัดและเพิ่มมูลค่าทางพลังงานต่อไป ทำให้ปัญหาเรื่องกลิ่นที่เกิดขึ้นจากของเสียลดลงส่งผลให้สภาพอากาศโดยรอบของฟาร์มดีขึ้น แต่บริเวณในส่วนของท้ายเล้าซึ่งเป็นทิศทางลมที่เกิดจากการระบายจะนำกลิ่นที่หลงเหลือภายในโรงเรือนออกมาด้วย ทำให้บ้านเรือนที่อยู่ท้ายโรงเรือนได้รับผลกระทบจากปัญหากลิ่นเหม็นดังกล่าว โดยเฉพาะก๊าซแอมโมเนียจะเป็นพิษต่อสัตว์ แอมโมเนียในระดับสูงอาจทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงอย่างเด่นชัดหลายประการ เช่น อาการหายใจติดขัด มีผลกระทบต่ออาการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของไก่ไข่ จากรายงานวิจัยของ Alltech (2566) รายงานว่าการได้รับแอมโมเนียตั้งแต่ระยะแรกอาจทำให้เกิดผลกระทบอย่างยาวนาน ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อผลผลิตของไก่รุ่นเพศเมียเมื่อเป็นแม่ไก่ไข่ในภายหลัง ส่วนผลกระทบจากแอมโมเนียต่อสัตว์ปีกทำให้ผลผลิตสัตว์ตกต่ำลงเมื่อมีปริมาณก๊าซแอมโมเนียเกิน 11 ppm และในปัจจุบันฟาร์มเลี้ยงไก่ไข่เกือบทุกรายถูกรบกวนด้วยปัญหากลิ่นเหม็นรบกวน เพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาดังกล่าวทางสิ่งแวดล้อมเรื่องกลิ่นให้ฟาร์มสามารถดำเนินกิจการต่อไป ซึ่งนอกจากจะสามารถบำบัดลดกลิ่นดังกล่าวลงได้ด้วยระบบชีวภาพสามารถทำงานได้ต่อเนื่องลดค่าใช้จ่ายในการเดินระบบเมื่อเทียบกับระบบอื่นแล้ว และยังคงคำนึงถึงการออกแบบระบบและพัฒนาระบบในส่วนของแรงลมระบายออกจากรอบเล้าให้อยู่ในเกณฑ์ที่ไม่ส่งผลกระทบต่อการเลี้ยงในเล้าปิดตามรูปแบบเดิมที่ฟาร์มดำเนินการอยู่ในปัจจุบัน

จากข้อมูลข้างต้น จึงได้ศึกษาแนวทางการจัดการปัญหากลิ่นเหม็นที่ระบายออกจากท้ายโรงเรือนเลี้ยงไก่ไข่แบบปิด โดยมุ่งเน้นการเลือกใช้เทคโนโลยีที่มีความเหมาะสมต่อการใช้งานจริง มีความไม่ซับซ้อน ดูแลรักษาง่าย และมีค่าใช้จ่ายในการเดินระบบต่ำ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบบำบัดก๊าซแอมโมเนียจากโรงเรือนเลี้ยงไก่ไข่แบบกึ่งปิดโดยใช้กระบวนการทางชีวภาพ รวมถึงประเมินประสิทธิภาพของระบบบำบัดในการลดความเข้มข้นของก๊าซแอมโมเนียระบบที่เลือกใช้คือระบบบำบัดกลิ่นแบบชีวภาพ ซึ่งติดตั้งบริเวณท้ายพัดลมระบายอากาศด้านข้างของโรงเรือนในลักษณะสแลน ภายในระบบประกอบด้วยชุดสเปรย์ละอองน้ำที่ควบคุมการทำงานด้วยระบบไฟฟ้า เพื่อควบคุมรอบการพ่นละอองน้ำให้เหมาะสมต่อการดักจับก๊าซแอมโมเนียและรักษาความชื้นของตัวกลางชีวภาพแบบขวาง (Cross flow media) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกลางยึดเกาะของจุลินทรีย์โครสโฟรีเดียช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวต่อปริมาตร ส่งเสริมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ในอากาศ โดยเฉพาะก๊าซแอมโมเนียส่งผลให้ความเข้มข้นของกลิ่นลดลงอย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ ระบบถูกออกแบบให้มีสภาวะที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ ไม่ขึ้นหรือแห้งจนเกินไป เพื่อให้เกิดเสถียรภาพในการบำบัดกลิ่นในระยะยาว แนวทางดังกล่าวสอดคล้องกับนโยบายการพัฒนาประเทศด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม เพื่อส่งเสริมการพัฒนาอย่างยั่งยืน รวมถึงสนับสนุนการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในภาคการเกษตรและชุมชน

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบบำบัดก๊าซแอมโมเนียจากโรงเรือนเลี้ยงไก่ไข่แบบกึ่งปิดโดยใช้กระบวนการทางชีวภาพ
2. เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบบำบัดในการลดความเข้มข้นของก๊าซแอมโมเนีย

ระเบียบวิธีวิจัย

สารเคมี สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ทุกชนิดเป็น Analytical reagent (AR)

ขอบเขตการวิจัย

1. พื้นที่วิจัย บริษัท ฟาร์มครูแดง จำกัด 32/2 หมู่ที่ 5 ตำบลสันกลาง อำเภอสันป่าตอง จังหวัดเชียงใหม่
2. จุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษา ในกระบวนการเริ่มต้นการเดินระบบโดยใช้จุลินทรีย์จากน้ำเสียจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งหรือบ่อเติมอากาศ (Activated sludge) (เสาวลักษณ์ ภูณภาอำพร, 2551) จุลินทรีย์เหล่านี้จะถูกนำมาใช้เป็นหัวเชื้อเบื้องต้น โดยเริ่มจากการขยายเชื้อเพื่อเพิ่มปริมาณ หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้มีปริมาตร 800 ลิตร พร้อมกับเติมกากน้ำตาลผสมน้ำในอัตราส่วน 1:1 ปริมาตร 200 ลิตร ลงในบ่อสเปรย์จุลินทรีย์ จากนั้นจะมีการเติมอากาศโดยใช้ปั๊มเติมอากาศ และใช้เวลาประมาณ 30 วันเพื่อให้เชื้อจุลินทรีย์เติบโตเต็มที่ หลังจากนั้นสามารถเริ่มต้นเดินระบบได้ โดยปั๊มที่ใช้ในการสเปรย์จุลินทรีย์มีอัตราการไหลอยู่ที่ 25 ลิตรต่อนาที เมื่อเดินระบบแล้ว ทุก ๆ 4 เดือน จะต้องมีการเติมน้ำเสียจากบ่อเติมอากาศลงบ่อสเปรย์จุลินทรีย์เพื่อให้ได้ปริมาตรรวม 800 ลิตร (ศิริภรณ์ ชื่นบาล, 2560)
3. ปริมาณการใช้น้ำเสีย มีการใช้น้ำเสียปริมาณ 1,000 ลิตร สำหรับบ่อจุลินทรีย์ โดยการสเปรย์น้ำเสียในบ่อจุลินทรีย์มีอัตราการสเปรย์ที่ 330 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งใช้หัวสเปรย์ จำนวน 3 หัว แต่ละหัวมีอัตราการไหล 110 ลิตรต่อชั่วโมง นอกจากนี้ยังมีการสูญเสียน้ำจากการฉีดยาหรือการตกค้างในระบบท่อประมาณ 100 ลิตร
4. น้ำเสียที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงจุลินทรีย์เริ่มต้น ในการเริ่มต้นระบบบำบัดกลิ่นในรูปของก๊าซแอมโมเนียด้วยกระบวนการชีวภาพ การเตรียมน้ำเสียที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงจุลินทรีย์มีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ใช้ในโครอสโฟรีเดียแสดงค่าในรูปของ BOD (Biochemical oxygen demand) ประมาณ 300 ppm, COD (Chemical oxygen demand) ประมาณ 700 ppm และ TKN (Total kjeldahl nitrogen) ประมาณ 150 ppm
5. รอบการเลี้ยงไก่ ฟาร์มเลี้ยงไก่ไข่มีรอบการเลี้ยงประมาณ 80 สัปดาห์ โดยจะมีการเพาะเลี้ยงไก่ไข่ตั้งแต่สัปดาห์ที่ 18 เป็นต้นไป จำนวนไก่ไข่ที่เลี้ยงอยู่ที่ 7,000 ตัว การให้อาหารจะทำวันละ 2 รอบ ได้แก่ รอบเช้าเวลา 05.00 น. และรอบบ่ายเวลา 13.00 น. การให้น้ำจะมีการติดตั้งท่อให้น้ำที่ไก่สามารถกินได้ตลอดทั้งวัน และในส่วนของการทำงานสะอาด จะมีการล้างมูลไก่ทุกวันในช่วงเช้าระหว่างเวลา 08.00-09.00 น. (โดยมีการใช้น้ำปริมาณ 2,000 ลิตรต่อวัน โดยน้ำที่ล้างจะไหลลงระบบผลิตก๊าซชีวภาพ)

6. คุณลักษณะเฉพาะของตัวกลางที่ใช้ในงานวิจัย ตัวกลางชีวภาพแบบขวาง (Cross flow media) ประกอบจากพลาสติกประเภท RPVC (Rigid polyvinyl chloride) มีลักษณะเป็นลอนไขว้สลับกันไปมา เพื่อช่วยในการยึดเกาะของสารอินทรีย์และแบคทีเรียออกแบบให้มีรอยหยักเพิ่มขึ้น เพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้นเป็นพิเศษ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดเกาะของสารอินทรีย์และแบคทีเรีย ต่าง ๆ ได้ดีขึ้น ช่วยให้เกิดปฏิกิริยาในการย่อยสลายสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และมีความแข็งแรง ทนทาน โดยทุกจุดสัมผัสของชั้น Media จะถูกเชื่อมด้วยกาว PVC BOND ชนิดพิเศษ ทำให้ทนแรงดันน้ำ แรงกระแทกและคลื่นตัวได้ดี สามารถติดตั้งได้ง่ายและประยุกต์ใช้งานทางด้านสิ่งแวดล้อมได้ดี

7. แนวทางการออกแบบและพัฒนาระบบบำบัดกลั่นในรูปของก๊าซแอมโมเนียแบบชีวภาพ การออกแบบระบบบำบัดกลั่นให้เหมาะสมกับกลิ่นเหม็นที่เกิดจากการเลี้ยงไก่ไข่ ควรพิจารณาองค์ประกอบ ดังนี้

7.1 ศึกษาสำรวจพื้นที่ติดตั้ง โดยการประเมินพื้นที่เพื่อให้แน่ใจว่าระบบที่ติดตั้งสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับข้อจำกัดของสถานที่

7.2 วิเคราะห์ขนาดโรงเรือนและพื้นที่หลังโรงเรือน การกำหนดขนาดและตำแหน่งของระบบบำบัดให้สอดคล้องกับขนาดของโรงเรือนและลักษณะของพื้นที่โดยรอบ

7.3 ออกแบบส่วนประกอบของอุปกรณ์ในระบบ การกำหนดชนิดและการจัดวางอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น บ่อสเปรย์จุลินทรีย์ ตัวกลาง ปัม และระบบการไหลของอากาศ เป็นต้น

7.4 ประเมินปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ ได้แก่ การวิเคราะห์ข้อมูลทางวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม เช่น ค่าความเร็วลม ค่าความชื้นสัมพัทธ์ และค่าอุณหภูมิในโรงเรือน โดยการวัดค่าทั้งก่อนและหลังติดตั้งระบบ ช่วยให้สามารถปรับปรุงระบบเพื่อให้บรรลุผลลัพธ์ที่ต้องการและลดผลกระทบต่อสัตว์เลี้ยงในโรงเรือน

7.5 การออกแบบที่ดีและการใช้น้ำเสียจากระบบก๊าซผลิตชีวภาพให้เป็นประโยชน์สามารถช่วยลดต้นทุนและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม พร้อมเพิ่มประสิทธิภาพของระบบบำบัดกลั่นแบบชีวภาพในระยะยาว

8. ปัจจัยที่ควรพิจารณาในการออกแบบระบบบำบัดกลั่นที่เหมาะสมสำหรับฟาร์มไก่

8.1 ลักษณะของปัญหากลิ่นไม่พึงประสงค์ในฟาร์มไก่เกิดจากมูล ปัสสาวะ หรือของเสียที่สะสมและหมักหมม โดยเฉพาะในโรงเรือนที่มีการระบายอากาศไม่เพียงพอ ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและคุณภาพชีวิตของชุมชนโดยรอบ

8.2 องค์ประกอบภายในโรงเรือน การออกแบบระบบบำบัดกลั่นในรูปของก๊าซแอมโมเนียแบบชีวภาพ ควรคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ อัตราการไหลของอากาศภายในโรงเรือน อุณหภูมิภายในโรงเรือน และ ความชื้นสัมพัทธ์ การประเมินปัจจัยเหล่านี้ช่วยให้เลือกและออกแบบระบบบำบัดที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมเฉพาะของฟาร์มได้อย่างมีประสิทธิภาพ

8.3 ลักษณะของระบบบำบัดกลั่นในรูปของก๊าซแอมโมเนียแบบชีวภาพ ระบบบำบัดกลั่นควรลดปัญหากลิ่นโดยไม่กระทบต่อปัจจัยสำคัญภายในโรงเรือน เช่น ความเร็วลม อุณหภูมิ และระดับความชื้น อีกทั้งยังต้องปลอดภัยต่อสุขภาพของสัตว์และสภาพแวดล้อมในโรงเรือน

9. ระยะเวลาในการศึกษา ตั้งแต่วันที่ 10 มีนาคม 2567 – วันที่ 10 มีนาคม 2568

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาคุณภาพน้ำเสียในบ่อจุลินทรีย์ โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่เกิดจากการฉีดพ่นให้มีความชื้น แก้วสตูว์กลางยัดเกาะของจุลินทรีย์ (บ่อจุลินทรีย์) นำไปวิเคราะห์ ได้แก่ pH, TSS, COD, BOD, TKN, และ NO_3^- โดยวิเคราะห์ตัวอย่าง 3 ซ้ำ (APHA, AWWA & WEF, 2007) และทำการตรวจวัดทุก ๆ 5 วัน เป็นเวลา 150 วัน เพื่อให้ทราบถึงความเข้มข้นของความสกปรกที่อยู่ในน้ำ ใช้เป็นแนวทางในการป้องกันหรือบำบัด น้ำเสียดังกล่าวไม่ให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

2. ศึกษาตรวจวัดคุณภาพอากาศภายในโรงเรือนหลังการติดตั้งระบบบำบัดกลิ่นแบบชีวภาพ โดยทำการตรวจวัดคุณภาพอากาศ ได้แก่ ความเร็วลม อุณหภูมิและความชื้น และเป็น Location specific ต้องใช้เครื่องตรวจวัดแบบพกพา ได้แก่ การวัดความเร็วลม (Tasto 410i; Germany) อุณหภูมิ (Testo 925; Germany) และความชื้น (4IN1 Multi-function environment meter; Standard ST-8820 Environment meter USA) ภายในโรงเรือนก่อนและหลังการติดตั้งระบบบำบัดกลิ่นแบบชีวภาพ โดยนำค่าที่ได้ไปเทียบกับมาตรฐานฟาร์มเลี้ยงสัตว์ ของกรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (ณัฐมานันท์ พรหมใบเงิน, 2566)

3. ศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดกลิ่นในรูปของก๊าซแอมโมเนียแบบชีวภาพ โดยทำการวัดกลิ่นในรูปของก๊าซแอมโมเนีย ก่อนเข้าระบบและหลังออกจากระบบบำบัดกลิ่นในรูปของก๊าซแอมโมเนีย (Ammonia gas detector; AR8500 China) และทำการตรวจวัดทุก ๆ 5 วัน เป็นเวลา 150 วัน แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาประสิทธิภาพการลดแอมโมเนียของระบบบำบัด จากสมการที่ (1) (David & Dawson, 2021)

$$\text{ประสิทธิภาพการลดกลิ่นในรูปแอมโมเนีย (ร้อยละ)} = \frac{\text{ปริมาณก๊าซแอมโมเนียก่อนเข้าระบบ} - \text{ปริมาณก๊าซแอมโมเนียออกจากระบบ}}{\text{ปริมาณก๊าซแอมโมเนียก่อนเข้าระบบ}} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ

ปริมาณก๊าซแอมโมเนียก่อนเข้าระบบ = หน่วย (ppm)

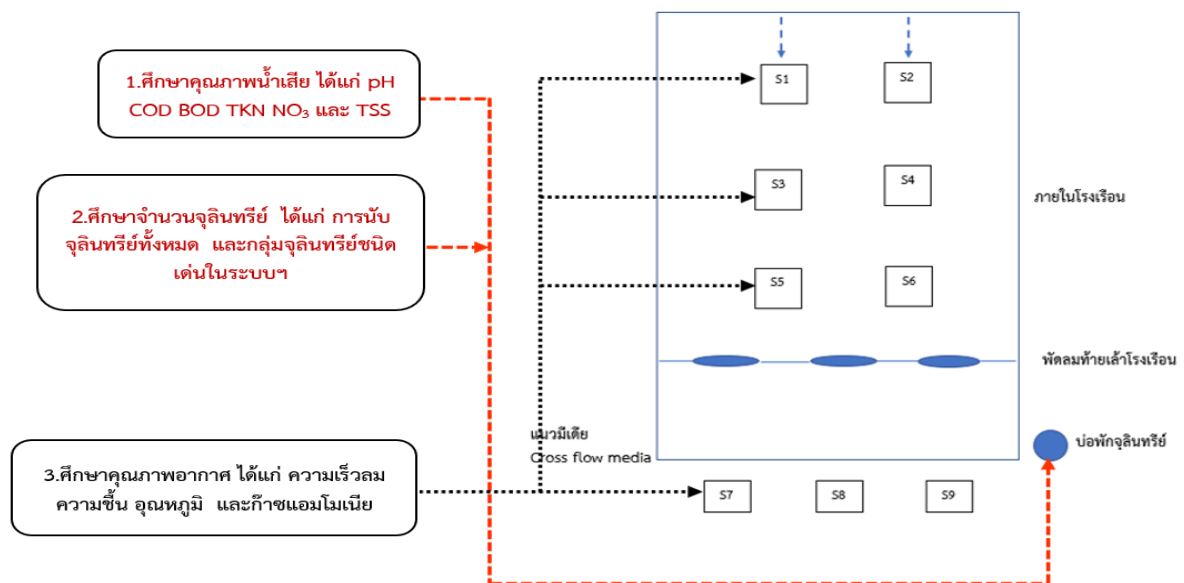
ปริมาณก๊าซแอมโมเนียออกจากระบบ = หน่วย (ppm)

4. ศึกษาการเจริญเติบโตของจำนวนจุลินทรีย์ในระบบบำบัดกลิ่นในรูปของก๊าซแอมโมเนียแบบชีวภาพ (ลดาวัลย์ วัฒนะจีระ, 2558)

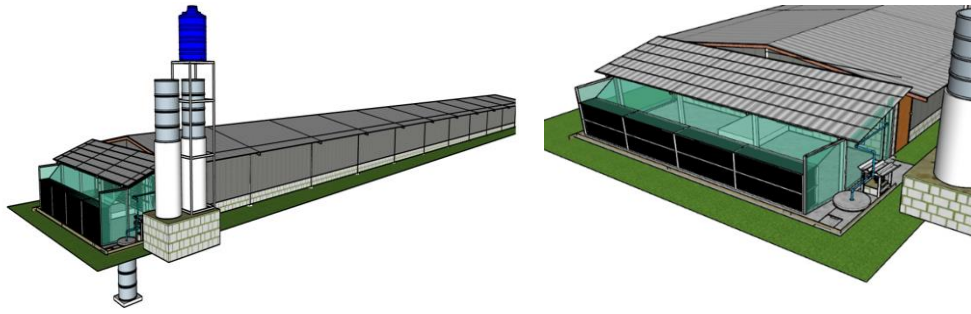
โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียในบ่อจุลินทรีย์ ได้แก่ วิธีตรวจนับจุลินทรีย์มาตรฐาน (Standard plate count method) โดยวิเคราะห์ตัวอย่าง 3 ซ้ำ และทำการตรวจวัดทุก ๆ 5 วัน เป็นเวลา 150 วัน ซึ่งปริมาณจุลินทรีย์เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายถึงสภาวะการทำงานของระบบบำบัด รวมทั้งศึกษากลุ่มจุลินทรีย์ชนิดเด่นในระบบบำบัด (FISH)

5. หลักการทำงานของระบบบำบัดกลิ่นในรูปของก๊าซแอมโมเนียแบบชีวภาพ โดยระบบบำบัดกลิ่นในรูปของก๊าซแอมโมเนีย โดยระบบบำบัดกลิ่นที่ทำการศึกษามีหลักการทำงานโดยจะมีระบบสเปรย์ละอองน้ำ (บ่อจุลินทรีย์) ควบคุมรอบการทำงานผ่านระบบควบคุมไฟฟ้าเพื่อสั่งการทำงานให้พ่นละอองน้ำตามรอบเวลา เพื่อให้ความชื้นกับมีเดียสร้างสภาพที่เหมาะสมไม่ชื้นแฉะหรือแห้งจนเกินไปเอื้อต่อการเจริญเติบโตและเหมาะสม

แก่การทำงานของจุลินทรีย์ กลิ่นที่ถูกระบายออกจากภายในโรงเรือนจะจุลินทรีย์ที่มาพร้อมละอองน้ำจับส่วนมีเดียทำหน้าที่เป็นพื้นที่ยึดเกาะของจุลินทรีย์เลือกใช้ตัวกลางชีวภาพแบบขวาง (Cross flow media) เพื่อเพิ่มพื้นที่ต่อปริมาตรส่งผลให้ช่วยเพิ่มระยะเวลาและปริมาณจุลินทรีย์ ทำให้จุลินทรีย์ทำปฏิกิริยาในการย่อยสลายกลิ่นในรูปแบบก๊าซแอมโมเนีย นอกจากนี้จุลินทรีย์บางส่วนที่หลุดออกจากตัวกลางจะไหลเวียนในระบบทำให้เกิดการย่อยสลายและบำบัดกลิ่นที่เคลื่อนย้ายจากสถานะของของเหลวทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดกลิ่นในรูปแบบของก๊าซแอมโมเนียมีค่าลดลงส่งผลให้กลิ่นบรรเทาลงหรือหายไปมากที่สุด



ภาพที่ 1 แผนภาพอธิบายสัญลักษณ์การตรวจวัดคุณภาพน้ำ จุลินทรีย์ และคุณภาพอากาศ
 S1-S6 คือ จุดตรวจวัดภายในโรงเรือน
 S7-S9 คือ จุดตรวจวัดท้ายโรงเรือนหลังการติดตั้งระบบบำบัดกลิ่นห่างจากระบบ 1 เมตร



ภาพที่ 2 แสดงระบบบำบัดกลิ่นในรูปแบบของก๊าซแอมโมเนียแบบชีวภาพเมื่อดำเนินการติดตั้งเข้ากับโรงเรือนเลี้ยงไก่

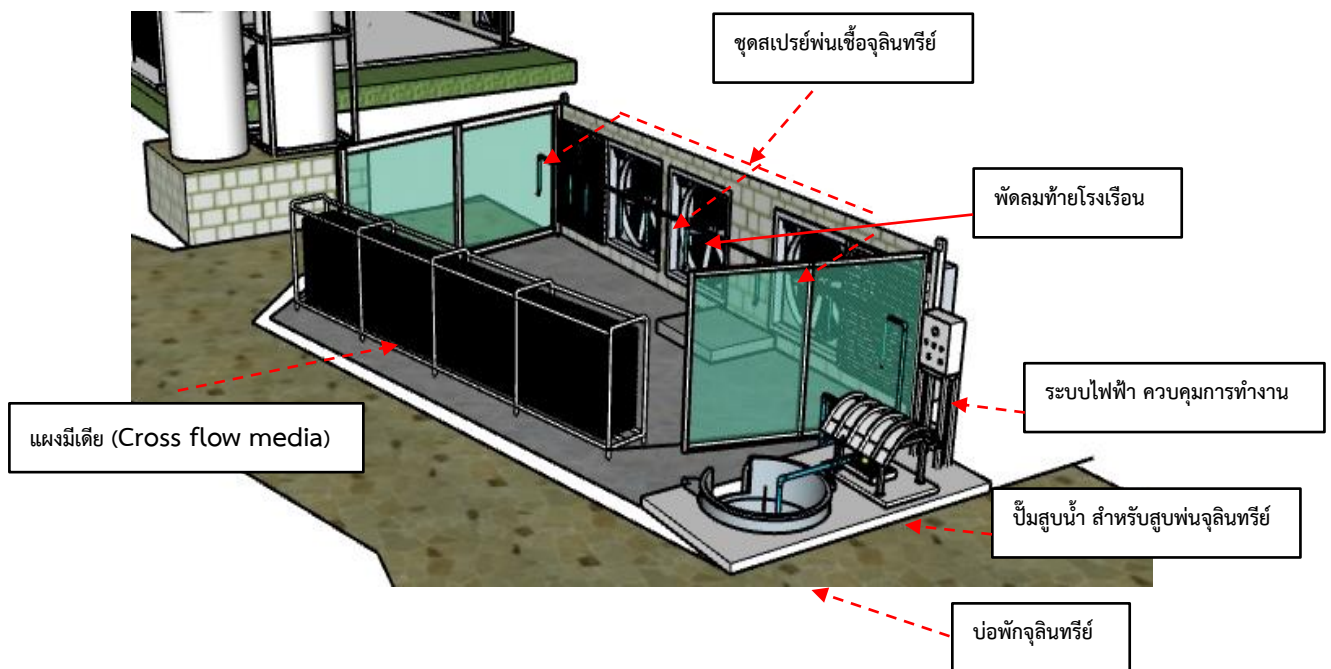
ก) โรงเรือน กว้าง 8.20 เมตร ยาว 67.30 เมตร

ข) มีความยาวของ Cross flow media 8.65 เมตร สูง 1.80 เมตร (13.33 ตารางเมตร) ติดตั้งห่างจากพัดลมท้ายโรงเรือน 4 เมตร ด้านข้างล้อมรอบด้วยสแลม สูง 2.00 เมตร

ค) บ่อสเปรย์จุลินทรีย์ มีขนาด 1,000 ลิตร และบ่อตกตะกอน มีขนาด 80 ลิตร

ง) ระบบปั๊มน้ำ ระบบกรอง และระบบไฟฟ้า

จ) ตัวกลางชีวภาพแบบขวาง (ประเภท RPVC) เชื่อมกาวด้วย PVC BOND ชนิดพิเศษ มีขนาด 500 mm. x 1,000 mm. x 530 mm. มีพื้นที่ผิว 120 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร จำนวน media ที่ใช้ 2.5 ลูกบาศก์เมตร (4 ก้อน/ลบ.ม. ใช้ 10 ก้อน) และมีพื้นที่ผิวที่ใช้ = $120 \times 2.5 = 300$ ตร.ม.

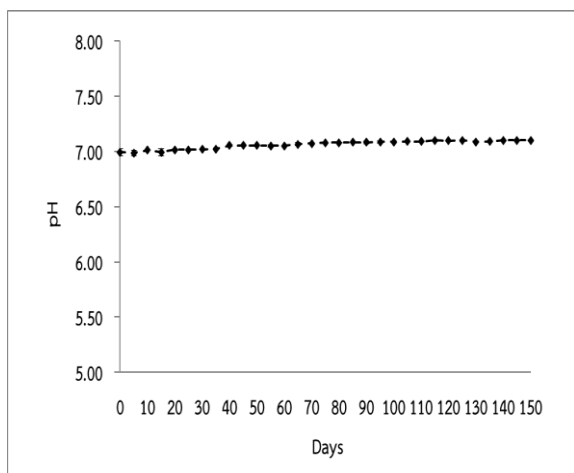


ภาพที่ 3 แผนภาพอธิบายส่วนประกอบของระบบบำบัดกลิ่นในรูปแบบของก๊าซแอมโมเนียแบบชีวภาพ

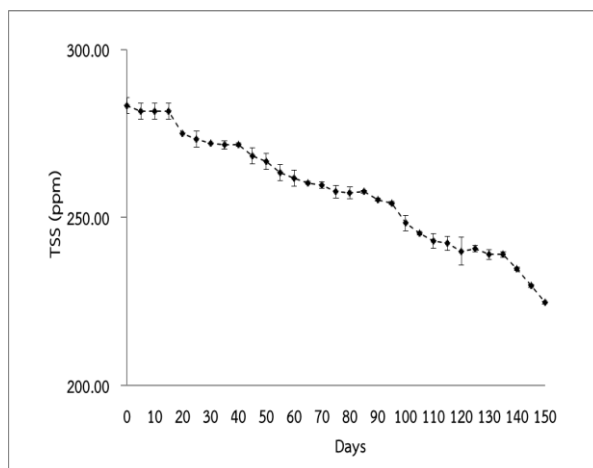
ผลการวิจัย

1. ผลการศึกษาคุณภาพน้ำเสียในบ่อจุลินทรีย์

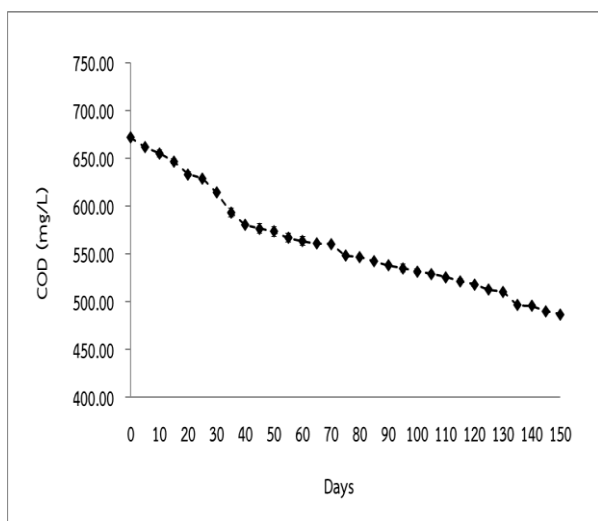
จากการศึกษาคุณภาพน้ำเสียจากบ่อที่ใช้สเปรย์ตัวกลางชีวภาพแบบขวาง (Cross flow media) (ภาพที่ 4-9) ผลการศึกษา พบว่า น้ำเสียในรูปค่า TSS, BOD, COD, TKN และ NO_3^- มีค่าอยู่ในช่วง 224.67 ± 0.47 - 283.33 ± 2.36 , 169.67 ± 0.47 - 251.67 ± 2.36 , 487.00 ± 1.41 - 671.67 ± 2.36 , 107.67 ± 0.47 - 151.00 ± 0.82 และ 4.45 ± 0.01 - 5.01 ± 0.08 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และมีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 6.99 ± 0.03 - 7.10 ± 0.00 และมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 224.67 ± 0.47 , 169.67 ± 0.47 , 487.00 ± 1.41 , 107.67 ± 0.47 และ 4.45 ± 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 150



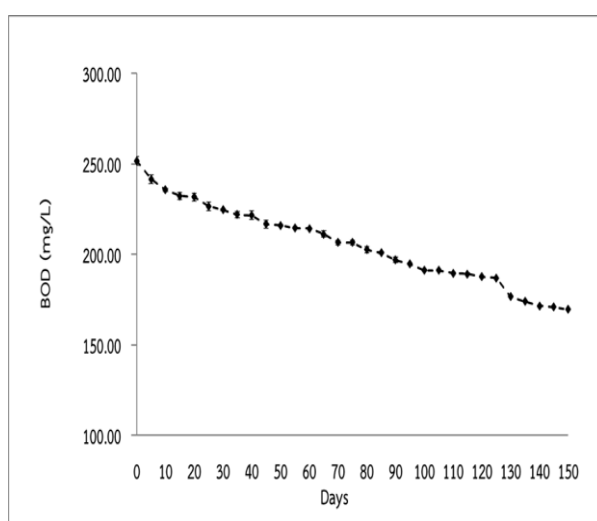
ภาพที่ 4 ค่าความเป็นกรดต่าง
ของบ่อจุลินทรีย์ที่ใช้สเปรย์



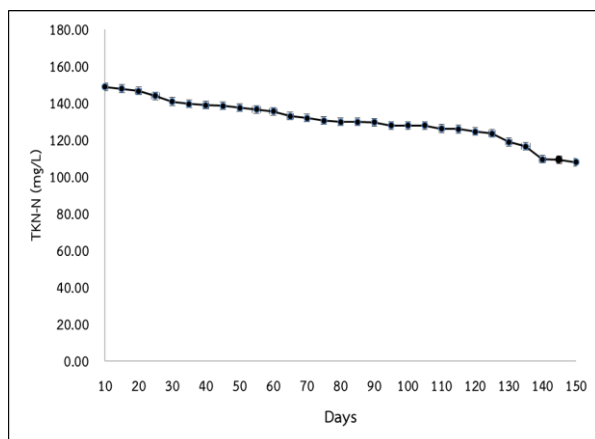
ภาพที่ 5 ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด
ของบ่อจุลินทรีย์ที่ใช้สเปรย์



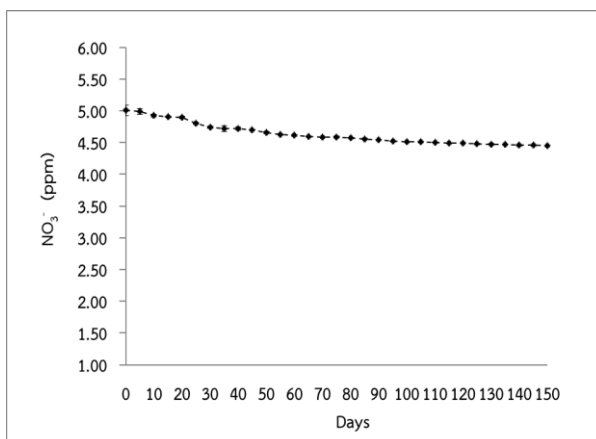
ภาพที่ 6 ปริมาณสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปซีโอดี
ของบ่อจุลินทรีย์ที่ใช้สเปรย์



ภาพที่ 7 ปริมาณสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปบีโอดี
ของบ่อจุลินทรีย์ที่ใช้สเปรย์



ภาพที่ 8 ปริมาณสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปที่เคเอ็นของบ่อจุลินทรีย์ที่ใช้สเปรย์



ภาพที่ 9 ปริมาณไนเตรตของบ่อจุลินทรีย์ที่ใช้สเปรย์

2. ผลการศึกษาตรวจวัดคุณภาพอากาศภายในโรงเรือนหลังการติดตั้งระบบบำบัดกลิ่นแบบชีวภาพ

จากการศึกษาคุณภาพอากาศภายในโรงเรือนภายหลังการติดตั้งระบบบำบัดก๊าซแอมโมเนียแบบชีวภาพ ณ จุดตรวจวัด S1-S6 พบว่า ความเร็วลมเฉลี่ย อุณหภูมิเฉลี่ย และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 2.48 ± 0.04 เมตรต่อวินาที, 28.40 ± 0.17 องศาเซลเซียส และร้อยละ 68.45 ± 0.24 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงมาตรฐานที่เหมาะสมสำหรับฟาร์มไก่ไข่ โดยค่าความเร็วลมมาตรฐานอยู่ในช่วง 2.23–2.63 เมตรต่อวินาที และอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 27–30 องศาเซลเซียส (มนัสนันท์ และคณะ, 2556) ขณะที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมอยู่ในช่วงร้อยละ 50–70 (มานิตย์, 2536) ผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การติดตั้งระบบบำบัดกลิ่นแบบชีวภาพไม่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนและยังคงเหมาะสมต่อการเลี้ยงไก่ไข่ (ณัฐธามณี พรหมใบเงิน, 2566)

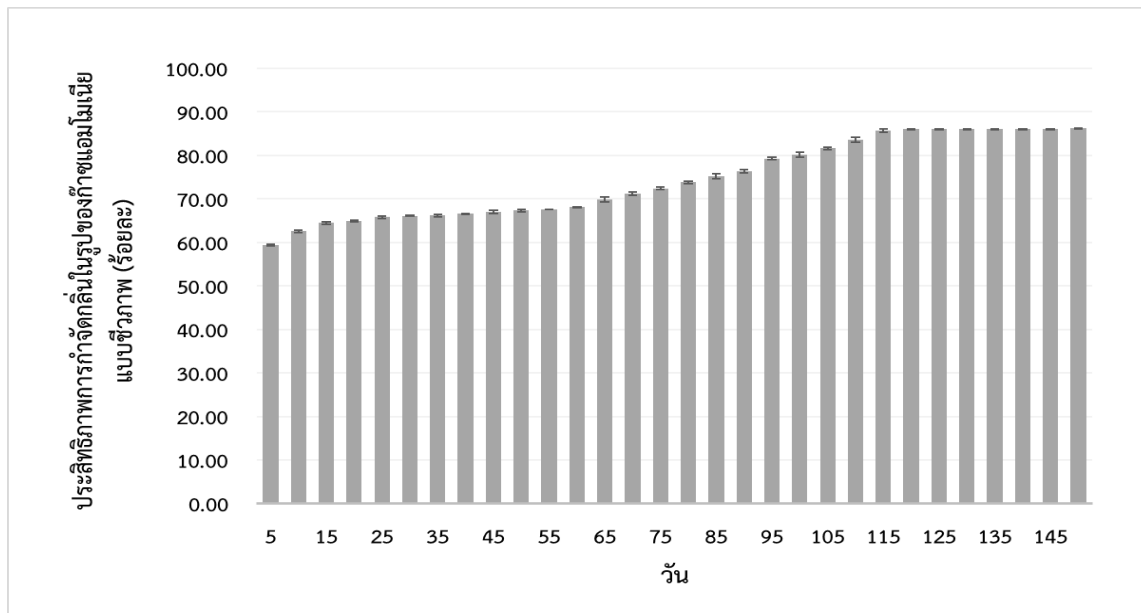
3. ศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดก๊าซแอมโมเนียแบบชีวภาพ

จากตารางที่ 1 (ค่าเฉลี่ยจุดตรวจวัด S1-S6) การศึกษาประสิทธิภาพการลดกลิ่นในรูปของก๊าซแอมโมเนียในฟาร์มเลี้ยงไก่ พบว่า ปริมาณก๊าซแอมโมเนียจากส่วนหัวโรงเรือนถึงท้ายโรงเรือนค่าก๊าซแอมโมเนียจะค่อย ๆ สูงขึ้น เนื่องจากการสะสมของมูลไก่ที่มีการล้างจากหัวโรงเรือนน้ำล้างจะค่อย ๆ ไหลมาส่วนท้ายโรงเรือนและออกไปบ่อบำบัด จึงทำให้มีค่าเพิ่มขึ้น ยังพบว่า ระบบบำบัดกลิ่นแบบชีวภาพมีประสิทธิภาพในการลดกลิ่นในรูปของก๊าซแอมโมเนีย อยู่ในช่วงร้อยละ 59.31 ± 0.18 – 86.16 ± 0.02 จากภาพที่ 10 พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดกลิ่นในรูปของก๊าซแอมโมเนียของระบบบำบัดกลิ่นแบบชีวภาพมีแนวโน้มดีขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป มากที่สุดถึงร้อยละ 86.16 ± 0.02

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพการกำจัดกลิ่นในรูปของก๊าซแอมโมเนียแบบชีวภาพ

วัน	ค่าเฉลี่ย		
	*ก๊าซแอมโมเนียท้ายเล้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)	**ก๊าซแอมโมเนียหลังระบบบำบัด กลิ่นแอมโมเนีย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการลด ก๊าซแอมโมเนีย (ร้อยละ)
0	-	-	-
5	20.23±0.23	8.23±0.06	59.31±0.18
10	20.10±0.00	7.53±0.06	62.52±0.29
15	20.10±0.00	7.13±0.06	64.51±0.29
20	20.13±0.06	7.07±0.06	64.90±0.25
25	20.10±0.00	6.87±0.06	65.84±0.29
30	20.03±0.06	6.80±0.00	66.06±0.10
35	20.20±0.00	6.83±0.06	66.17±0.29
40	20.03±0.06	6.70±0.00	66.56±0.10
45	20.10±0.00	6.63±0.06	67.00±0.29
50	20.10±0.00	6.57±0.06	67.33±0.29
55	20.10±0.00	6.50±0.00	67.66±0.00
60	20.03±0.06	6.40±0.00	68.05±0.09
65	20.00±0.00	6.03±0.12	69.83±0.58
70	20.03±0.06	5.77±0.06	71.21±0.37
75	20.07±0.06	5.53±0.06	72.43±0.26
80	20.00±0.00	5.23±0.06	73.83±0.29
85	20.03±0.06	4.97±0.12	75.21±0.62
90	20.02±0.03	4.73±0.06	76.35±0.31
95	20.05±0.05	4.17±0.06	79.22±0.29
100	20.00±0.00	3.97±0.12	80.17±0.58
105	20.00±0.00	3.67±0.06	81.67±0.29
110	20.03±0.06	3.30±0.10	83.53±0.54
115	20.03±0.06	2.87±0.06	85.69±0.33
120	20.02±0.03	2.80±0.00	86.01±0.02
125	20.02±0.03	2.80±0.01	86.03±0.03
130	20.00±0.05	2.79±0.01	86.03±0.02
135	20.02±0.00	2.78±0.00	86.11±0.02
140	20.00±0.00	2.78±0.01	86.12±0.03
145	20.00±0.00	2.78±0.01	86.12±0.03
150	20.02±0.03	2.77±0.00	86.16±0.02

หมายเหตุ 1. การล้างมูลไก่ภายในโรงเรือนจะทำการล้างทุกวันช่วงเช้าเวลา 08.00-09.00 น. และทำการวัดตัวอย่าง เวลา 18.00 น.
 2. *ค่าเฉลี่ยจุดตรวจวัด S1-S6 ในแต่ละวันภายในโรงเรือนหลังการติดตั้งระบบบำบัดกลิ่น
 3. **ค่าเฉลี่ยจุดตรวจวัด S7-S9 ในแต่ละวันหลังผ่านระบบบำบัดกลิ่น



ภาพที่ 10 ประสิทธิภาพการกำจัดกลิ่นในรูปของก๊าซแอมโมเนียแบบชีวภาพ

4. ศึกษาการเจริญเติบโตของจำนวนจุลินทรีย์ในระบบบำบัดกลิ่นในรูปของก๊าซแอมโมเนียแบบชีวภาพ

การศึกษาถึงจำนวนจุลินทรีย์ในระบบบำบัดกลิ่นในรูปของก๊าซแอมโมเนียแบบชีวภาพ หลังการติดตั้งระบบ ผลการศึกษาพบว่า จุลินทรีย์อยู่ในช่วง 0.95×10^7 - 3.68×10^7 โคโลนีต่อมิลลิลิตร และในวันที่ 150 มีมวลจุลินทรีย์รวมในระบบอยู่ที่ 3,680 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อนำไปคิดอัตราส่วนที่ถูกบำบัดต่อจำนวนจุลินทรีย์ในวันที่ 150 อยู่ที่ 0.000605 มิลลิกรัมแอมโมเนียต่อโคโลนี ถือว่ามีปริมาณจุลินทรีย์ที่เหมาะสม สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Deviny et al., (1999) กล่าวว่าปริมาณจุลินทรีย์ที่เหมาะสมที่อยู่ในระบบควรอยู่ในช่วง 10^7 - 10^9 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ซึ่งปริมาณจุลินทรีย์เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายถึงสภาวะการทำงานของระบบบำบัดกลิ่นในรูปของก๊าซแอมโมเนียแบบชีวภาพ

ผลการศึกษากลุ่มจุลินทรีย์ชนิดเด่นในระบบบำบัดกลิ่นในรูปของก๊าซแอมโมเนียแบบชีวภาพ พบว่าโคโลนีที่พบมีรูปร่างเล็กบาง สีขาวใส ขอบเรียบลักษณะโคโลนีดังกล่าวสามารถสันนิษฐานได้ว่าเป็นจุลินทรีย์ชนิดเด่นกลุ่ม *Nitrosomonas* spp. ที่พบในบ่อบำบัดน้ำเสียชั้นหลัง บริษัท ฟาร์มครูแดง จำกัด (ธนเดช อีรสุทรกุล และ ครรชิต เงินคำคง, 2562) ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่มีบทบาทในกระบวนการไนตริฟิเคชัน ส่วนใหญ่พบจุลินทรีย์ *Nitrosomonas* spp. ในดิน น้ำเสีย และแหล่งน้ำทั่วไป (Henze et al., 2002) และยังพบจุลินทรีย์กลุ่ม *Nitrobacter* spp. ในระบบบำบัด โดยจุลินทรีย์กลุ่มนี้มีหน้าที่สำคัญในการเปลี่ยนไนไตรท์ (NO_2^-) ให้เป็นไนเตรต (NO_3^-) ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญในวงจรไนโตรเจน (Madigan et al., 2019; Prosser, 1986) จากภาพที่ 9 พบว่า ค่าไนเตรตในระบบบำบัดอยู่ที่ 5.01 ± 0.08 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อเวลาผ่านไปจุลินทรีย์กลุ่ม *Nitrobacter* spp. ได้ทำการย่อยสลายไนไตรท์ให้เป็นไนเตรต ทำให้ค่าไนเตรตลดลงเหลือ 4.45 ± 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 150 ซึ่งบ่งชี้ถึงกระบวนการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดกลิ่นในรูปของก๊าซแอมโมเนียแบบชีวภาพ จุลินทรีย์กลุ่ม *Nitrobacter* spp. มักพบในแหล่งธรรมชาติที่มีไนไตรท์เป็น

ส่วนประกอบ เช่น ดินที่มีความชื้นสูง ระบบบำบัดน้ำเสีย และแหล่งน้ำต่าง ๆ โดยเฉพาะในระบบบำบัดที่เน้นการควบคุมคุณภาพน้ำเพื่อการกำจัดแอมโมเนียและไนไตรท์ (Henze et al., 2002 และ Ward et al., 2011) ดังนั้นกระบวนการไนตริฟิเคชันในระบบบำบัดกลั่นในรูปของก๊าซแอมโมเนียแบบชีวภาพ ปริมาณแอมโมเนียที่ถูกบำบัดในระบบทั้งหมดจะถูกเปลี่ยนเป็นไนไตรท์โดยจุลินทรีย์กลุ่ม *Nitrosomonas* spp. และต่อมาถูกเปลี่ยนเป็นไนเตรตโดยจุลินทรีย์กลุ่ม *Nitrobacter* spp. โดยตะกอนของไนเตรต (บ่อตกตะกอน) จะถูกนำไปเป็นวัสดุปรับปรุงดิน เพื่อใส่ต้นไม้ภายในฟาร์ม เพื่อลดปัญหาผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อม

การอภิปรายผล

1. การศึกษาคุณภาพน้ำเสียในบ่อจุลินทรีย์

จากการศึกษาคุณภาพน้ำเสียจากบ่อที่ใช้สเปรย์ พบว่า น้ำเสียในรูปค่า TSS, BOD, COD, TKN และ NO_3^- มีค่าต่ำสุดในวันที่ 150 เท่ากับ 224.67 ± 0.47 , 169.67 ± 0.47 , 487.00 ± 1.41 , 107.67 ± 0.47 และ 4.45 ± 0.01 ppm ตามลำดับ และมีความเป็นกรดต่างอยู่ในช่วง 6.99 ± 0.03 – 7.10 ± 0.00 ซึ่งเป็นสภาพแวดล้อมที่ส่งเสริมให้จุลินทรีย์ทำงานได้ดี สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Lang (2011) พบว่า ค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมต่อการทำงานจุลินทรีย์อยู่ในช่วง 7.50–8.00 และยังพบว่าค่าความเป็นกรดต่างอยู่ในมาตรฐานน้ำทิ้ง ส่วนปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของ BOD, COD, TKN และ NO_3^- มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าปริมาณสารอินทรีย์ถูกย่อยสลายได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยอาศัยจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจน (พรชนก วงศ์ผดุงเกียรติ และ ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา, 2554) ดังนั้นจากผลการศึกษาดังกล่าว ปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของ BOD, COD และ TKN ที่อยู่ในน้ำเสียเหมาะสมกับจุลินทรีย์ที่ใช้สเปรย์ ตัวกลางชีวภาพแบบขวาง (Cross flow media) น้ำเสียที่ใช้ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพราะมีการหมุนเวียนกลับมาใช้ในระบบตลอดเวลา

2. การศึกษาตรวจวัดคุณภาพอากาศภายในโรงเรือนหลังการติดตั้งระบบบำบัดกลั่นแบบชีวภาพ

การออกแบบระบบบำบัดกลั่นในรูปของก๊าซแอมโมเนียแบบชีวภาพ ต้องคำนึงถึงปัจจัยองค์ประกอบต่าง ๆ ก่อนการติดตั้งระบบบำบัดกลั่นในรูปของก๊าซแอมโมเนียแบบชีวภาพ โดยจากการศึกษาความเร็วลมภายในโรงเรือนและท้ายโรงเรือน ก่อนการติดตั้งระบบบำบัดกลั่นในรูปของก๊าซแอมโมเนียแบบชีวภาพ พบว่าภายในโรงเรือนค่าความเร็วลมมีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก ส่วนหลังโรงเรือน มีค่าความเร็วลมค่อนข้างมาก เกิดจากจุดตรวจวัดอยู่ใกล้พัดลม ส่วนอุณหภูมิภายในโรงเรือนจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อย ๆ เมื่ออยู่ห่างจาก Evaporator รวมไปถึงค่าความเร็วลมภายในโรงเรือนมีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก และจากข้อมูลผลการตรวจวัดการทำงานของระบบโรงเรือนแบบ Evaporation ซึ่งประกอบไปด้วยการค่าอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลม ซึ่งใช้เป็นปัจจัยควบคุมบรรยากาศโรงเรือนแบบปิด จะเห็นได้ว่าหลังจากออกแบบระบบบำบัดกลั่นในรูปของก๊าซแอมโมเนียแบบชีวภาพ พบว่า ค่าปัจจัยต่าง ๆ ยังคงมีค่าใกล้เคียงกับก่อนการติดตั้งระบบบำบัด ดังนั้นแล้วการออกแบบระบบบำบัดดังกล่าว ยังช่วยลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมให้กับฟาร์มได้อีกด้วย

3. การศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดกลิ่นในรูปของก๊าซแอมโมเนียแบบชีวภาพ

จากการศึกษาประสิทธิภาพการลดกลิ่นในรูปของก๊าซแอมโมเนียในฟาร์มเลี้ยงไก่ไข่ พบว่า ระบบบำบัดกลิ่นแบบชีวภาพมีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของก๊าซแอมโมเนียมากที่สุดถึงร้อยละ 86.16 ± 0.02 สอดคล้องกับผลการศึกษาของประพันธ์ พงษ์เกียรติกุล และ สาณท ทองสุจริตพันธ์ (2558) พบว่า การกำจัดก๊าซแอมโมเนียในอากาศแบบต่อเนื่องในภาวะคงที่ (Steady state) ด้วยกระบวนการกรองทางชีวภาพ มีประสิทธิภาพในการกำจัดถึงร้อยละ 90.40 ส่วนงานวิจัยของ McGahan (2002) พบว่า การใช้ windbreak วางไว้หลังพัตลมระบบอากาศ ช่วยเพิ่มการกระจายตัวของกลิ่น ทำให้ความเข้มข้นของกลิ่นไม่พึงประสงค์ลดลง โดยผนังกันลมที่สร้างขึ้นจากผ้าใบกันลื่นสามารถลดความเข้มข้นของกลิ่นที่ผู้ที่มีความรู้สึกได้ระหว่างร้อยละ 30-90 และงานวิจัยของ Conti et al., (2021) ได้ศึกษาถึงการลดก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ในฟาร์มสุกร โดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการบำบัดอากาศ โดยใช้เครื่องฟอกกรดแบบเปียก พบว่า เครื่องฟอกกรดแบบเปียกมีประสิทธิภาพในการลดก๊าซแอมโมเนียในโรงเรือนสุกรที่มีการระบายอากาศตามธรรมชาติถึงร้อยละ 80 ส่วนรายงานวิจัยของ เสาวลักษณ์ ภูณภาพพร (2551) พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซแอมโมเนียโดยเครื่องกรองชีวภาพมีประสิทธิภาพในการบำบัดถึงร้อยละ 99, ร้อยละ 100 (Hong & Park, 2005), ร้อยละ 99 (Chen et al., 2005) และร้อยละ 99 (Taghipour et al., 2008) เห็นได้ว่าการใช้ระบบบำบัดกลิ่นแบบชีวภาพในการลดกลิ่นในรูปของก๊าซแอมโมเนียมีประสิทธิภาพ โดยมีการใช้ตัวกลางยึดเกาะของจุลินทรีย์เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตได้ดีและมีประสิทธิภาพในการลดแอมโมเนียในขบวนการไนตริฟิเคชัน โดยการออกซิเดชันแอมโมเนีย (NH_3) ให้เป็นไนไตรท์ (NO_2^-) และเกิดการออกซิเดชันไนไตรท์ (NO_2^-) ให้เป็นไนเตรต (NO_3^-) ถือว่าระบบบำบัดกลิ่นแบบชีวภาพมีประสิทธิภาพ

4. การศึกษาการเจริญเติบโตของจำนวนจุลินทรีย์ในระบบบำบัดกลิ่นในรูปของก๊าซแอมโมเนียแบบชีวภาพ

การศึกษาถึงจำนวนจุลินทรีย์ในระบบบำบัดกลิ่นในรูปของก๊าซแอมโมเนียแบบชีวภาพ หลังการติดตั้งระบบ พบว่า จุลินทรีย์อยู่ในช่วง $0.95 \times 10^7 - 3.68 \times 10^7$ โคโลนีต่อมิลลิลิตร และในวันที่ 150 มีมวลจุลินทรีย์รวมในระบบอยู่ที่ 3,680 ppm เมื่อนำไปคิดอัตราส่วนที่ถูกบำบัดต่อจำนวนจุลินทรีย์ในวันที่ 150 อยู่ที่ 0.000605 มิลลิกรัมแอมโมเนียต่อโคโลนี ถือว่ามีปริมาณจุลินทรีย์ที่เหมาะสม สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Deviny et al., (1999) กล่าวว่าปริมาณจุลินทรีย์ที่เหมาะสมที่อยู่ในระบบควรอยู่ในช่วง $10^7 - 10^9$ โคโลนีต่อมิลลิลิตร ซึ่งปริมาณจุลินทรีย์เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายถึงสภาวะการทำงานของระบบบำบัดกลิ่นในรูปของก๊าซแอมโมเนียแบบชีวภาพ และยังพบความสัมพันธ์ระหว่างการลดกลิ่นในรูปของก๊าซแอมโมเนียกับจุลินทรีย์ พบว่า ในช่วงแรก ๆ จุลินทรีย์จะเข้าสู่ช่วงปรับตัว (Log phase) หลังจากนั้นจุลินทรีย์ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นและเข้าสู่ช่วงเจริญเติบโต (Exponential phase) ทำให้ประสิทธิภาพในการลดแอมโมเนียดีขึ้นตลอดระยะเวลาในการเดินระบบ เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) ซึ่งแสดงถึงการคงที่ของจำนวนประชากรจุลินทรีย์ในระบบ ผลจากการเพิ่มขึ้นของจุลินทรีย์มีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายก๊าซแอมโมเนียที่ป้อนเข้าสู่ระบบบำบัดกลิ่นในรูปของก๊าซแอมโมเนียแบบชีวภาพ ทำให้ประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของ

กลืนในรูปของก๊าซแอมโมเนียมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาผ่านไป (Smith et al., 2020; Zhang et al., 2021) ทั้งนี้กระบวนการดังกล่าวสอดคล้องกับการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดชีวภาพที่เน้นการใช้งาน จุลินทรีย์เป็นปัจจัยหลักในการย่อยสลายสารปนเปื้อน (David & Dawson, 2021)

ส่วนการศึกษากลุ่มจุลินทรีย์ชนิดเด่นในระบบบำบัดกลืนในรูปของก๊าซแอมโมเนียแบบชีวภาพ ผลการศึกษา พบว่า จุลินทรีย์ที่พบส่วนใหญ่มีลักษณะโคโลนีขนาดเล็กบาง สีขาวใส และชอบเรียบ ซึ่งสามารถระบุได้ว่าเป็นจุลินทรีย์กลุ่ม *Nitrosomonas* spp. ซึ่งพบในระบบบำบัดน้ำเสียชั้นหลังของบริษัท ฟาร์มครูแดง จำกัด จุลินทรีย์กลุ่มนี้มีบทบาทสำคัญในกระบวนการไนตริฟิเคชัน โดยทำหน้าที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย (NH_3^+) เป็นไนไตรท์ (NO_2^-) นอกจากนี้ ยังพบจุลินทรีย์กลุ่ม *Nitrobacter* spp. ในระบบบำบัดซึ่งมีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนไนไตรท์ (NO_2^-) ให้เป็นไนเตรต (NO_3^-) ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญในวงจรไนโตรเจน กระบวนการนี้ช่วยให้ปริมาณแอมโมเนียที่เข้าสู่ระบบถูกเปลี่ยนเป็นไนไตรท์โดย *Nitrosomonas* spp. และต่อมาถูกเปลี่ยนเป็นไนเตรตโดย *Nitrobacter* spp. ไนเตรตที่เกิดขึ้นจะถูกกำจัดออกจากระบบผ่านกระบวนการตกตะกอน และตะกอนดังกล่าวสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินสำหรับการเพาะปลูกภายในฟาร์ม เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ผลการศึกษาดังกล่าวบ่งชี้ว่า Mass Balance ของระบบบำบัดกลืนชีวภาพอยู่ในเกณฑ์ที่บ่งชี้ถึงการเปลี่ยนรูปสารในระบบบำบัดที่สมบูรณ์และมีประสิทธิภาพ ส่วนปริมาณน้ำเสียจากบ่อบำบัดชั้นหลังที่นำมาใช้ในบ่อจุลินทรีย์ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากการหมุนเวียนกลับมาใช้ภายในระบบอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ น้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดและถูกใช้ในระบบสเปรย์จะไหลกลับสู่บ่อจุลินทรีย์ ทำให้สามารถควบคุมการแพร่กระจายของจุลินทรีย์ก่อโรคได้อย่างมีประสิทธิภาพ และไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการทางชีวภาพร่วมกับตัวกลางชีวภาพแบบขวางในการกำจัดก๊าซแอมโมเนียในฟาร์มเลี้ยงไก่แบบกึ่งปิด พบว่า การศึกษาการใช้กระบวนการทางชีวภาพในการบำบัดก๊าซแอมโมเนียจากฟาร์มเลี้ยงไก่ พบว่า ระบบบำบัดกลืนแบบชีวภาพร่วมกับตัวกลางชีวภาพแบบขวาง สามารถลดก๊าซแอมโมเนียได้ร้อยละ $59.31 \pm 0.18 - 86.16 \pm 0.02$ โดยอาศัยจุลินทรีย์กลุ่ม *Nitrosomonas* spp. และ *Nitrobacter* spp. ในกระบวนการไนตริฟิเคชัน ส่งผลให้สารอินทรีย์และสารประกอบไนโตรเจนในน้ำเสียมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง และสามารถนำน้ำกลับมาใช้หมุนเวียนในระบบได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้ ระบบไม่รบกวนการระบายอากาศภายในโรงเรือนและยังช่วยลดผลกระทบต่อชุมชนโดยรอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ สะท้อนถึงศักยภาพของระบบบำบัดกลืนชีวภาพในการส่งเสริมการผลิตปศุสัตว์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDGs) ได้แก่ เป้าหมายที่ 6 การจัดการน้ำอย่างยั่งยืน เป้าหมายที่ 12 การผลิตและการบริโภคที่รับผิดชอบ และเป้าหมายที่ 13 การรับมือการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

จากผลการวิจัยมีข้อเสนอแนะที่สำคัญดังนี้

1. ควรมีการศึกษาประสิทธิภาพของระบบในระดับฟาร์มขนาดใหญ่และภายใต้สภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน เพื่อประเมินเสถียรภาพและความเหมาะสมในการใช้งานจริงในระยะยาว
2. ควรศึกษาชนิดและคุณสมบัติของวัสดุตัวกลาง (Media) ที่เหมาะสมต่อการยึดเกาะของจุลินทรีย์ รวมถึงการควบคุมปัจจัยสำคัญ เช่น ความชื้น อัตราการไหลของอากาศ และคุณภาพน้ำหมุนเวียน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการไนตริฟิเคชันและยืดอายุการใช้งานของระบบ
3. ควรมีการติดตามปริมาณจุลินทรีย์และคุณภาพน้ำในระบบอย่างต่อเนื่อง เพื่อป้องกันการสะสมของสารอินทรีย์และรักษาเสถียรภาพของระบบบำบัด ตลอดจนศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และการใช้พลังงาน เพื่อสนับสนุนการประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมอย่างยั่งยืน รวมถึงสามารถต่อยอดสู่ฟาร์มปศุสัตว์ประเภทอื่นที่ประสบปัญหากลิ่นจากก๊าซแอมโมเนียได้ในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2567 คณะวิจัยขอขอบพระคุณที่ให้ทุนสนับสนุนการดำเนินงานในครั้งนี้ และขอขอบคุณหน่วยวิจัยเทคโนโลยีสะอาดและเทคโนโลยีอัจฉริยะเพื่อสิ่งแวดล้อม (Green and smart technology for environmental; GASTE) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

เอกสารอ้างอิง

- กองแผนงาน กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2566). *ร่างยุทธศาสตร์ไก่ไข่ พ.ศ. 2562-2566*.
<https://planning.dld.go.th/index.php/th/yuththsastr-ray-chnid-satw/yuththsastr-ki-phun-meuxng-3>
- ณัฐมานี พรหมใบเงิน. (2566). *การจัดการกลิ่นเหม็นในฟาร์มปศุสัตว์*. กลุ่มมาตรฐานสิ่งแวดล้อมด้านการปศุสัตว์ สำนักพัฒนาระบบและรับรองมาตรฐานสินค้าปศุสัตว์ กรมปศุสัตว์.
<https://certify.dld.go.th/images/training%20documents/2566/data-b/651206b1.pdf>
- ธนเดช ชีระสุนทรกุล และครรชิต เงินคำคง. (2562). *การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์ระบบก๊าซชีวภาพ โดยการปรับปรุงคุณภาพก๊าซด้วยวิธีทางชีวภาพและปรับปรุงระบบบำบัดขั้นหลังเพื่อลดค่าใช้จ่ายและลดผลกระทบสิ่งแวดล้อม*. โปรแกรมสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีและนวัตกรรม (ITAP) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช).
- ประพันธ์ พงษ์เกียรติกุล และ สาณท ทองสุจริตพันธ์. (2558). *การกำจัดกลิ่นแอมโมเนียในอากาศด้วยกระบวนการกรองชีวภาพ*. *วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ*, 1(1), 9-14.
<https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/featkku/article/view/175987>

- พรชนก วงศ์ผดุงเกียรติ และ ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา. (2554). จุลินทรีย์ทางการค้าในกระบวนการบำบัดน้ำเสียโรงงานปลาป่น. *วิศวกรรมสาร มก*, 24 (77), 24-33.
<https://kukr.lib.ku.ac.th/BKN/Detail/info/203049>
- มนัสนันท์ นพรัตน์ไผ่ตรี, อณัญญา ปานทอง และ วรางคณา กิจพิพิธ. (2556). ผลของการจัดการสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนแบบปิดต่อสมรรถนะการผลิตของไก่ไข่รุ่น. *การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล*.
- มานิตย์ เทวรักษ์พิทักษ์. (2536). *การจัดการฟาร์มสัตว์ปีก*. พิมพ์ครั้งที่ 4. ดาวคอมพิวกราฟฟิค เชียงใหม่.
- ลดาวลัย วัฒนะจิระ. (2558). *คู่มือปฏิบัติการตรวจวิเคราะห์ทางจุลชีววิทยาสำหรับสิ่งแวดล้อม : น้ำและของเสีย*. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่.
- ศิราภรณ์ ชื่นบาล. (2560). จุลินทรีย์ช่วยย่อยลดกลิ่นเหม็นจากฟาร์มสัตว์ (สวทช. ภาคเหนือ). คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- เสาวลักษณ์ ภูณภาอำพร. (2551). *ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซแอมโมเนียโดยเครื่องกรองชีวภาพ*. (วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย).
- Alltech. (2566). *วิธีควบคุมระดับแอมโมเนียในเล้าสัตว์ปีก*.
<https://www.alltech.com/th/featureslog/withiikhwbkhumradabaexmomeniyyinelasatwpiik>
- American Public Health Association (APHA), The American Water works Association (AWWA), The Water Environment Federation (WEF). (2007). *Standard Methods for extermination of water and wastewater*. (21st ed.). USA: Washington, DC.
- Chen, Y. X., Yin, J., & Wang, K. W. (2005). Logn-term operation of biofilters for biological removal of ammonia. *Journal of chemosphere*, 58(8), 1023-1030.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.09.052>
- Cont,i A., Costantine, M., Fusi, A., Manzando, A., Guarino, M., & Bacenetti, J. (2021). Environmental Impact of pig production affected by wet acid scrubber as mitigation technology. *Sustainable Production and Consumption*, 28, 580-890.
<https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.06.024>
- David, S. P., & Dawson, C. J. (2021). Use of ammonium sulphate as a Sulphur fertilizer: Implications for ammonia volatilization. *Soil use and Management*, 38(1), 662-534.
<https://doi.org/10.1111/sum.12733>
- Deviny, J., Deshusses, M., & Webster, T. (1999). *Biofiltration for Air Pollution Control*. USA: CRC Press.

- Henze, M., Harrenoes, P., Jansen, J., & Arvin, E. (2002). *Wastewater Treatment Biological and Chemical Processes*. (3rd ed.). Germany Berlin: Springer-Verlag.
- Hong, J. H., & Park, K. J. (2005). Compost biofiltration of ammonia gas from bin composting. *Journal of bioresource technology*, 96(6), 741-745.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.10.008>
- Lang, W. (2011). *Environmental microbiology*. (2nd ed.). Bangkok: Kasetsart University Press.
- Madigan, M. T., Martinko, J. M., Bender, K. S., Buckley, D. H., & Stahl, D. A. (2019). *Brock Biology of Microorganisms*. (15th ed.). UK: Pearson.
- McGahan, E., Kolominskas, C., Bawden, K., & Ormerod, R. (2002). Strategies to reduce odor emissions from meat chicken farm, *Proceeding 2002 Poultry Information Exchange*, Pacifi Air & Environmental, p27-39.
- Potivichayanon, S. (2005). *Removal of hydrogen sulfide by fixed-film bio scrubber*. (Ph.D. Thesis Faculty of Science Mahidol University Bangkok).
- Prosser, J. I. (1986). *Nitrification*. UK: IRL Press. Oxford.
- Shareefdeen, Z., & Singh, A. (2008). *Biotechnology for odor and air pollution control*. Canada: Biorem Technol Inc.
- Sirianuntapiboon, S., & Chuamkaew, C. (2007). Packed cage rotating biological contactor system for treatment of cyanide wastewater. *Bioresource Technol*, 98(2), 266-272.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.01.014>
- Smith, A. P., Johnson, I. R., Schwenke, G., Lam, S. K., Suter, H. C., & Eckard, R. J. (2020). Predicting ammonia volatilization from fertilized used for grazing. *Agricultural and Forest Meteorology*, 287, 107952. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107952>
- Taghipour, H., Shahmansoury, M. R., Bina, B., & Movahdian, H. (2008). Operational parameters in biofiltration of ammonia-contaminated air streams using compost-pieces of hard Plastics filter media. *Chemical Engineering Journal*, 137(2), 198-204.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.04.015>
- Ward, B. B., Arp D. J., & Klotz, M. G. (2011). *Nitrification*. New York: ASM Press. Princeton University, Princeton, USA.
- Zhang, L., Dong, H., Zeng, S., Hu, Z., Hussain, S., & Zhang, X. (2021). An Overview of Ammonia Separation by Ionic Liquids. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60(19), 6908-6924. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c00780>