

วารสารวิศวกรรม และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

Journal of Engineering and Industrial Technology,
Kalasin University

ปีที่ 1 ฉบับที่ 1 (2023)

มกราคม - กุมภาพันธ์ 2566

ISSN 2985 0274 (Print)

ISSN 2985 0282 (Online)



กำหนดการเผยแพร่

วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University

ปีที่ 1 ฉบับที่ 1 (มกราคม – กุมภาพันธ์ 2566)

Vol. 1 No. 1 (January – February 2023)

ISSN 2985-0274 (Print)

ISSN 2985-0282 (Online)

วัตถุประสงค์

จัดทำขึ้นโดยคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ เพื่อเผยแพร่บทความวิจัย (Research Article) และบทความวิชาการ (Academic Article) เปิดรับทั้งบทความภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ที่มีคุณภาพในด้านวิศวกรรมศาสตร์ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม และอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง และเพื่อส่งเสริมและเป็นแหล่งในการเผยแพร่ผลงานวิจัยและบทความวิชาการที่เป็นองค์ความรู้ เทคโนโลยีและนวัตกรรมที่ทันสมัย นอกจากนี้ยังเป็นสื่อกลางแลกเปลี่ยนความรู้และแนวคิดทางวิชาการ ของบุคลากรทั้งภายในและนอกสถาบัน โดยมีขอบเขตของวารสาร ดังนี้

- วิศวกรรมทั่วไป (General Engineering)
- วิศวกรรมอุตสาหกรรมและวิศวกรรมการผลิต (Industrial and Manufacturing Engineering)
- วิศวกรรมเครื่องกล (Mechanical Engineering)
- เทคโนโลยีสื่อและประยุกต์ใช้ (Media Technology and Application)
- สถาปัตยกรรม (Architecture)

เงื่อนไขการตีพิมพ์

บทความที่ส่งเข้ามายังวารสารจะได้รับการประเมินคุณภาพของผลงานทางวิชาการโดยหัวหน้ากองบรรณาธิการ (Editor in Chief) ถ้าบทความมีคุณภาพที่อาจได้รับการตีพิมพ์ หัวหน้ากองบรรณาธิการจะมอบหมายให้บรรณาธิการประจำเรื่อง (Section editor) เป็นผู้พิจารณาและดำเนินการส่งบทความให้ผู้ประเมินบทความ (Peer reviewers) ซึ่งเป็นผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้อง จำนวนอย่างน้อย 3 ท่าน ซึ่งบทความที่ถูกส่งไปยังผู้ประเมินจะเป็นแบบปกปิดรายชื่อทั้งผู้เขียนบทความ และผู้ประเมิน (Double -Blinded Review) เมื่อผู้ประเมินบทความส่งข้อคิดเห็นมายังบรรณาธิการประจำเรื่อง บทความที่ถูกประเมินจะได้รับการตัดสินใจจากกองบรรณาธิการโดยอาศัยความคิดเห็นของผู้ประเมินเสียงข้างมาก ดังนี้ ยอมรับให้ตีพิมพ์โดยไม่มีการแก้ไข (Accept Submission) บทความมีการแก้ไข (Revisions Required) และ ปฏิเสธการตีพิมพ์บทความ (Decline Submission)

ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ จิระพันธ์ ห้วยแสน

รองศาสตราจารย์ ดร.สุพรรณ สุตสนธิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิษุทธิ์ จันทะรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิมพ์ลิขิต แก้วหานาม

ศาสตราจารย์ ดร.ระพีพันธ์ ปิตาคะโส

ดร.วิจิตรา โพธิสาร

อธิการบดีมหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

รองอธิการบดีมหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

รองอธิการบดีมหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์

บรรณาธิการ

ดร.สรายุทธ จิตะภาส

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สฤติพงศ์ เสงี่ยมศักดิ์

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ดร.สวลี อุดรา

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

รองศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์ ปัตติยะ

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

รองศาสตราจารย์ ดร.ชูพงษ์ ทองคำสมุทร

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

รองศาสตราจารย์ ดร.สุนทร สุทธิปาก

มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

รองศาสตราจารย์ ดร.ธัญญา ประเมษฐานวัฒน์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ วิทยาเขตปทุมธานี

รองศาสตราจารย์ ดร.สกุลดล วรรณปะเข

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ วิทยาเขตปทุมธานี

รองศาสตราจารย์ ดร.สัจจากาจ จอมโนนเขวา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย เหลาหา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

วิทยาเขตขอนแก่น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิศานาถ แก้ววินิต

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดวงดาว วัฒนกลาง

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์ แสงผ่อง

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิศณุ ชัยจิตวิมลกุล

มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัลยา กิตติเลิศไพศาล

มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

รองศาสตราจารย์ ดร.เกตุร ดวงอุปมา

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นรงค์ วิชาพา

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มณฑนา ทองสุพล

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปิยณัฐ โตอ่อน

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ดร.อัจฉรา ชุมพล

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ดร.วรพจน์ สมมูล

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ดร.ไทยทัศน์ สุดสวนสี

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ทีมจัดการบทความและรูปแบบ

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นรงค์ วิชาพา

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกตุร ดวงอุปมา

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่ร้อยตรี อนุชา ศรีบุรัมย์

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

4. ดร.อัจฉรา ชุมพล

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

5. ดร.สวลี อุดรา

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

6. นางสาวนภัทรธิดา พรหมดีราช

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ออกแบบปกวารสาร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพนธ์ เนียมসা

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

กำหนดการเผยแพร่ :

ปีละ 6 ฉบับ

ฉบับที่ 1 มกราคม - กุมภาพันธ์

ฉบับที่ 2 มีนาคม - เมษายน

ฉบับที่ 3 พฤษภาคม - มิถุนายน

ฉบับที่ 4 กรกฎาคม - สิงหาคม

ฉบับที่ 5 กันยายน - ตุลาคม

ฉบับที่ 6 พฤศจิกายน – ธันวาคม

สำนักงาน

กองบรรณาธิการวารสาร "วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์"

"Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University"

คณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

62/1 ถนนเกษตรสมบูรณ์ ต.กาฬสินธุ์ อ.เมือง จ.กาฬสินธุ์ 46000

บรรณาธิการ

ดร.สรายุทธ ชูติธาส

โทร: 088-574-2199

Email: jeit@ksu.ac.th

ISSN 2985-0274 (Print)

ISSN 2985-0282 (Online)

บทบรรณาธิการ

วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ฉบับปฐมฤกษ์ ปีที่ 1 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – กุมภาพันธ์ ปีพุทธศักราช 2566 จัดทำขึ้นตามเป้าหมายและยุทธศาสตร์ของการดำเนินงานตามแนวทางการพัฒนาและขับเคลื่อนของมหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ซึ่งวารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่บทความวิจัย (Research Article) และบทความวิชาการ (Academic Article) ที่มีคุณภาพในด้านวิศวกรรมศาสตร์ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม และอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อส่งเสริมและเป็นแหล่งในการเผยแพร่ผลงานวิจัยและบทความวิชาการที่เป็นองค์ความรู้ เทคโนโลยีและนวัตกรรมที่ทันสมัย สนับสนุนให้คณาจารย์ นักวิชาการ และผู้ทรงคุณวุฒิในด้านวิศวกรรมศาสตร์ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม และอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องเสนอผลงานวิชาการ นอกจากนี้ยังเป็นสื่อกลางแลกเปลี่ยนความรู้และแนวคิดทางวิชาการของบุคลากรทั้งภายในและนอกสถาบัน

ในโอกาสนี้ขอขอบพระคุณอย่างสูงสำหรับผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง รวมทั้งผู้เขียนบทความทุกท่านที่ส่งบทความมาลงตีพิมพ์เผยแพร่และขอขอบพระคุณผู้อ่านทุกท่าน หวังเป็นอย่างยิ่งว่าผู้อ่านทุกท่านจะได้รับประโยชน์จากผลงานทางวิชาการในวารสารฉบับนี้

ดร.สรายุทธ จิตะภาส

บรรณาธิการ

สารบัญ (Content)

	หน้า
กองบรรณาธิการ	II
บทบรรณาธิการ	IV
บทความวิชาการ	
การประยุกต์ใช้ชุดอุปกรณ์ตรวจจับการเคลื่อนไหวเชิงแม่เหล็กไฟฟ้า สู่การสร้างแอนิเมชันแบบสามมิติในภาคอุตสาหกรรม นวตกร โพธิสาร	1-9
บทความวิจัย	
ระบบถังหมักไร้อากาศแบบสองขั้นตอนโดยใช้ความร้อน จากพลังงานแสงอาทิตย์ ไทยทัศน์ สุดสวนสี ศุภกิจ เคิกศิริ และวรรณรพ ชันธิรัตน์	10-22
การออกแบบและศึกษาระบบรดน้ำต้นกระบองเพชรอัตโนมัติ พลังงานแสงอาทิตย์ วันดี พัดแก้ว ทรงพล ครุฑอินทร์ วราภรณ์ วโรรส และอามิณห์ หล้าวงศ์	23-33

บทความวิชาการ (Academic Article)

การประยุกต์ใช้ชุดอุปกรณ์ตรวจจัดการเคลื่อนไหวเชิงแม่เหล็กไฟฟ้าสู่การสร้างแอนิเมชัน แบบสามมิติในภาคอุตสาหกรรม

นวัตร โพธิสาร^{1,*}

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต คณะเทคโนโลยีการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: nawuttagnorn@gmail.com โทรศัพท์: 086-6382433

(รับบทความ: 23 มกราคม 2566; แก้ไขบทความ: 12 กุมภาพันธ์ 2566; ตอรับบทความ: 14 กุมภาพันธ์ 2566)

บทคัดย่อ

บทความวิชาการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้ชุดอุปกรณ์ตรวจจัดการเคลื่อนไหวเชิงแม่เหล็กไฟฟ้าสู่การสร้างแอนิเมชันแบบสามมิติในภาคอุตสาหกรรมโดยใช้ชุดอุปกรณ์ตรวจจัดการเคลื่อนไหวเชิงแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวัดค่าความเฉื่อย ซึ่งมีข้อดี คือ ราคาที่สามารถเข้าถึงได้ในระดับสตูดิโอขนาดเล็ก มีขั้นตอนการใช้งานไม่ซับซ้อน แต่มีข้อจำกัด คือ ระบบจะมีความอ่อนไหวเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กและโลหะ ซึ่งมีผลต่อการทำงานของเซนเซอร์ ชุดอุปกรณ์ตรวจจัดการเคลื่อนไหว ประกอบด้วย เคสสำหรับชาร์ตไฟตัวเซนเซอร์ อุปกรณ์รับส่งสัญญาณ ชุดสายรัดข้อมือ ตัวเซนเซอร์ติดตามตัวนักแสดง และถุงมือสำหรับติดตามนิ้ว ผลการศึกษาการประยุกต์ใช้งาน ดังนี้ 1. เชื่อมต่อระบบโมชันแคปเจอร์กับชุดอุปกรณ์ 2. เปิดเครื่องใช้งานเซนเซอร์ 3. เชื่อมต่อตัวรับส่งสัญญาณกับซอฟต์แวร์ 4. คาลิเบรตเซนเซอร์กับสภาพแวดล้อม 5. ตั้งค่าอินเทอร์เน็ต และ 6. วางตำแหน่งสายรัดเซนเซอร์ให้กับนักแสดง สำหรับความสมบูรณ์ของข้อมูลการเคลื่อนไหวมี่ความจำเป็นต้องตกแต่งข้อมูลก่อนนำไปใช้งาน กล่าวโดยสรุปการพัฒนาแอนิเมชันแบบสามมิติในภาคอุตสาหกรรมสามารถใช้ชุดอุปกรณ์ตรวจจัดการเคลื่อนไหวเชิงแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวัดค่าความเฉื่อยได้ เนื่องจากชุดอุปกรณ์มีศักยภาพในการตรวจจัดการเคลื่อนไหวและมีราคาไม่สูงมาก ผู้ประกอบการหรือสถาบันการศึกษาสามารถจัดซื้อจัดหาได้

คำสำคัญ: ชุดอุปกรณ์ตรวจจัดการเคลื่อนไหว เชิงแม่เหล็กไฟฟ้า แอนิเมชันแบบสามมิติ ภาคอุตสาหกรรม

การอ้างอิงบทความ: นวัตร โพธิสาร, "การประยุกต์ใช้ชุดอุปกรณ์ตรวจจัดการเคลื่อนไหวเชิงแม่เหล็กไฟฟ้าสู่การสร้างแอนิเมชันแบบสามมิติในภาคอุตสาหกรรม," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 1, ฉบับที่ 1, หน้า 1-9, 2566.

บทความวิชาการ (Academic Article)

Applying Electromagnetic Motion Capture Equipment to Create Industrial 3D Animations

Nawuttagorn Potisarn^{1,*}

¹ Department of Multimedia Technology, Faculty of Management Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Surin Campus

* Corresponding Author: nawuttagorn@gmail.com, Tel: 086-6382433

(Received: January 23, 2023; Revised: February 12, 2023; Accepted: February 14, 2023)

Abstract

This academic article aims to study applying motion capture equipment to create industrial 3D animations by electromagnetic motion capture systems of the type of inertial motion capture. There are advantages to the price, which is suitable for a small studio and does not require complicated steps to use. However, there are limitations to the system, which is sensitive to magnetic fields and metals and affects the operation of the sensor. The motion capture system consists of a charging case and a sensor, a transceiver device, a full harness set, tracking sensors for an actor, and finger-tracking gloves. The results of the study are as follows: 1. connect the devices to the motion capture system, 2. turn on the sensor, 3. connect the transceiver device to the software, 4. calibrate the sensor to the environment, 5. set up ethernet, and 6. set the position of the sensor harness on the performer. For the integrity of the movement data, it is necessary to edit the data before use. In conclusion, creating industrial 3D animation can use electromagnetic motion capture as a type of inertial motion capture. The equipment has the potential to capture motion data and is not expensive to purchase or procure for entrepreneurs or educational institutions.

Keywords: Motion Capture, Electromagnetic, 3D Animations, Industrial

Please cite this article as: N. Potisarn, "Applying Electromagnetic Motion Capture Equipment to Create Industrial 3D Animations," *The Journal of Engineering and Industrial Technology*, KSU, vol. 1, no. 1, pp. 1-9, 2023

บทความวิชาการ (Academic Article)

1. บทนำ

การจับการเคลื่อนไหว หรือโมชันแคปเจอร์ (Motion Capture) หรือเรียกสั้น ๆ ว่าโมแคป (MoCap) เป็นอุปกรณ์ตรวจจับการเคลื่อนไหวที่นักออกแบบคอมพิวเตอร์กราฟิก 3 มิติใช้จับการเคลื่อนไหวท่าทางของนักแสดงตามหลักกายวิภาคศาสตร์สำหรับมนุษย์ นำมาใช้สร้างการเคลื่อนไหวให้กับตัวละคร 3 มิติ (3D Character) ให้มีการเคลื่อนไหวที่มีความสมจริง [1] โดยใช้หลักการทางคณิตศาสตร์และวิทยาการคำนวณ เทคโนโลยีและระบบอุปกรณ์จับการเคลื่อนไหวที่นำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมโทรทัศน์ อุตสาหกรรมแอนิเมชัน อุตสาหกรรมเกม อุตสาหกรรมภาพยนตร์ หรือแม้กระทั่งในวงการแพทย์ เพื่อใช้ในการติดตามและบันทึกการเคลื่อนไหวของคน [2] ปัจจุบัน MoCap ที่ใช้ในระดับอุตสาหกรรมและมีจำหน่ายในท้องตลาดทั่ว ๆ ไป อาจแบ่งได้ 4 ประเภท ได้แก่ 1) การจับการเคลื่อนไหวเชิงกล (Mechanical MoCap) เป็นการใช้ Analog Sensor หรือ เซนเซอร์ทางกล หรือ Servo Motor ที่จับองศาการเคลื่อนที่ของ Joint ตำแหน่งต่าง ๆ ของข้อต่อในตำแหน่งที่สร้างขึ้น [3] 2) การจับการเคลื่อนไหวเชิงแสง (Optical MoCap) เป็นการใช้กล้องอินฟราเรดจับการเคลื่อนที่ของจุดสะท้อนแสงหรือตำแหน่งมาร์คเกอร์ที่ติดบนตัวนักแสดงสะท้อนกับมายิงกล้องและส่งไปยังซอฟต์แวร์ระบบ [4] 3) ระบบการตรวจจับการเคลื่อนไหวเชิงแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic MoCap) เป็นการใช้กล้องและจุดมาร์คเกอร์จำนวนมาก เปลี่ยนมาเป็นการจับการเคลื่อนไหวในรูปแบบของการใช้เซนเซอร์ IMUs (Inertial Measurement Units) เป็นหน่วยวัดการเคลื่อนไหว [5] และ 4) ระบบการตรวจจับการเคลื่อนไหวด้วยระบบปัญญาประดิษฐ์ (AI MoCap) เป็นการนำภาพวิดีโอแต่ละเฟรมมาวิเคราะห์การเคลื่อนไหวด้วยระบบ AI [6] หรือเป็นการนำ Video

มาใช้แทนอุปกรณ์ MoCap [7] อย่างไรก็ตามแม้ว่า MoCap จะมีลักษณะเป็นอย่างไรก็ตามแต่เทคนิคการตรวจจับการเคลื่อนไหวจะมีความมุ่งหมายเดียวกันคือการจับการเคลื่อนไหวของคน แล้วส่งข้อมูลไปยังซอฟต์แวร์ระบบเพื่อประมวลผลต่อไป

สำหรับในภาคอุตสาหกรรมมีงานวิจัยที่พบแนวโน้มการประยุกต์ใช้ MoCap ที่ใช้เซนเซอร์แบบวัดค่าความเฉื่อย (Inertial Sensors) จากการสำรวจข้อมูลตั้งแต่ปี 2558 เป็นต้นมา พบว่า มีการใช้ MoCap ที่มีเซนเซอร์ IMUs มากที่สุดถึง 49.2% เมื่อเทียบกับ MoCap ประเภทอื่น โดยถูกนำมาใช้ในด้านการศึกษา การก่อสร้าง หุ่นยนต์ และยานยนต์ ส่วนภาคอุตสาหกรรมที่มีการวิจัยมากที่สุด คือ ด้านสุขภาพและความปลอดภัยสูงถึง 64.4% เมื่อเทียบกับอุตสาหกรรมด้านอื่น ๆ อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะมีแนวโน้มการเลือกใช้งาน MoCap แบบวัดค่าความเฉื่อยเพิ่มมากขึ้น แต่ปัญหาที่ท้าทายที่สุด คือ ความก้าวหน้าในด้านอัลกอริธึมการเรียนรู้ของเครื่องมือจะเป็นการเพิ่มขีดความสามารถของระบบ MoCap [8] จากการสำรวจข้อมูลทำให้เกิดความเชื่อมั่นในศักยภาพของชุดอุปกรณ์ตรวจจับการเคลื่อนไหวแบบวัดค่าความเฉื่อย ดังนั้น ในบทความนี้จึงมุ่งเน้นเกี่ยวกับรายละเอียดเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้

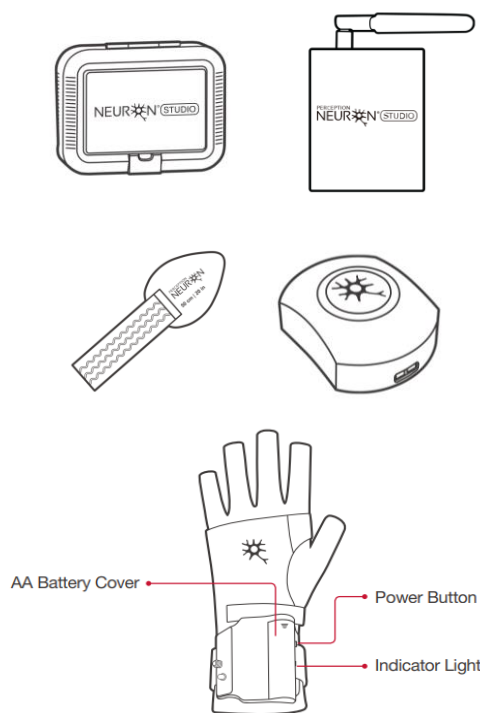
2. ชุดอุปกรณ์ตรวจจับการเคลื่อนไหวด้วยระบบการตรวจจับการเคลื่อนไหวเชิงแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวัดค่าความเฉื่อย (Inertial Mocap)

บทความนี้จะกล่าวถึงชุดตรวจจับการเคลื่อนไหวเชิงแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นแบบวัดค่าความเฉื่อย ซึ่งเป็นระบบการตรวจจับการเคลื่อนไหวโดยใช้หลักการวัดค่าความเฉื่อยทางฟิสิกส์ร่วมกับการใช้ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคหรือเมมส์ (Micro-electromechanical systems: MEMS) ประกอบด้วย มาตรการเร่ง (Accelerometer) ไจโรสโคป (Gyroscope) และเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก (Magnetometer) [5] ชุด

บทความวิชาการ (Academic Article)

อุปกรณ์ประกอบด้วย เซนเซอร์ติดตามชุดของนักแสดงแบบเต็มตัว รวมถึงการใช้ถุงมือ ผ่านระบบเครือข่ายแบบไร้สาย (Wirelessly) และส่งออกข้อมูลที่มีความแม่นยำสูงด้วยอัลกอริทึมเพื่อรวบรวมข้อมูลไปประมวลผลยังซอฟต์แวร์ระบบ ข้อดี คือ ราคาที่เข้าถึงได้ในระดับสตูดิโอขนาดเล็กหรือโครงการที่ไม่ใหญ่มาก ขั้นตอนการใช้งานไม่ซับซ้อนสามารถ Stream การเคลื่อนไหวได้เลย และมีระยะเวลาของแต่ละขั้นตอนรวดเร็วมากขึ้น แต่พบข้อจำกัดในการทดสอบความผิดพลาดของการจับการเคลื่อนไหวด้วยหน่วยวัดความเฉื่อย (Inertial Measurement Units) [9] ระบบจะมีความอ่อนไหวเกี่ยวกับสนามแม่เหล็ก ซึ่งสถานที่ที่ต้องพยายามหลีกเลี่ยงแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก และโลหะต่างๆ ที่จะไปรบกวนการทำงานของระบบ Sensor นอกจากนี้ระบบพลังงานสำหรับการ Stream ผ่านระบบ WiFi อาจจำเป็นต้องมี Power Bank ที่ซ่อนในชุดของนักแสดงเพื่อไม่ให้เซนเซอร์ทำงานผิดพลาดจากพลังงานที่ลดต่ำลง [5] ตัวอย่างชุดตรวจจับการเคลื่อนไหวเชิงแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวัดค่าความเฉื่อย ของผลิตภัณฑ์ Noitom

จากรูปที่ 1 ชุดตรวจจับการเคลื่อนไหวเชิงแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวัดค่าความเฉื่อย ประกอบด้วย เคสสำหรับชาร์ตไฟตัวเซนเซอร์ อุปกรณ์รับส่งสัญญาณ ชุดสายรัดทั้งตัว ตัวเซนเซอร์ติดตามตัวนักแสดง และถุงมือ PNS เป็นถุงมือสำหรับติดตามนิ้วสำหรับการใช้งาน เนื่องจากชุดอุปกรณ์มีเซนเซอร์ระบบมีเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก ดังนั้นอาจได้รับผลกระทบจากการรบกวนของสนามแม่เหล็กจากสภาพแวดล้อม จึงมีข้อควรปฏิบัติ ดังนี้



รูปที่ 1 ชุดตรวจจับการเคลื่อนไหวเชิงแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวัดค่าความเฉื่อยของผลิตภัณฑ์ Noitom
ที่มา: Noitom [5]

- 1) ผู้ใช้งานต้องใช้เซนเซอร์ในสภาพแวดล้อมที่มีการรบกวนทางแม่เหล็กลดน้อยที่สุด โดยสามารถใช้แอปแมกนีโตมิเตอร์ (Magnetometer App) เพื่อวัดการรบกวนของสนามแม่เหล็กในสภาพแวดล้อม โดยตั้งเกณฑ์ไว้ที่ระหว่าง 40 ถึง 50 ไมโครเทสลา
- 2) การใช้งานระบบ Perception Neuron Studio Inertial System ในตำแหน่งที่มีการรบกวนของสนามแม่เหล็กแรงสูง ให้ใช้โหมดป้องกันคลื่นแม่เหล็ก (Anti-mag mode) ที่อยู่ในซอฟต์แวร์ และการใช้งานในอุณหภูมิสูงสุดของอุปกรณ์ไม่เกิน 60 องศาเซลเซียสและค่าความชื้นสูงสุดไม่เกิน 80% เพื่อไม่ให้เกิดการควมแน่น

บทความวิชาการ (Academic Article)

3. การเตรียมชุดอุปกรณ์ตรวจจับการเคลื่อนไหวด้วยระบบการตรวจจับการเคลื่อนไหวเชิงแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวัดค่าความเฉื่อย

ชุดอุปกรณ์ตรวจจับการเคลื่อนไหวด้วยระบบการตรวจจับการเคลื่อนไหวเชิงแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวัดค่าความเฉื่อย มีอุปกรณ์ติดตั้งสะดวก สามารถใช้งานง่าย และข้อมูลการเคลื่อนไหวสามารถใช้งานกับซอฟต์แวร์ที่ใช้สำหรับทำแอนิเมชันได้หลากหลาย สำหรับการเตรียมชุดอุปกรณ์และสภาพแวดล้อม [5] ดังนี้

3.1 การเชื่อมต่อระบบ MoCap

ทั้งการติดตั้งซอฟต์แวร์ และการเปิดใช้งานซอฟต์แวร์ด้วย Axis Studio License Dongle เข้ากับคอมพิวเตอร์ การเรียกใช้โปรแกรม Axis Studio และการเปิดใช้งานเซนเซอร์

3.2 การเปิดเครื่องใช้งานเซนเซอร์

เมื่อเซนเซอร์เปิดอยู่ไฟแสดงสถานะ LED จะเริ่มกะพริบไฟสีด้วยความถี่ มีทั้งหมด 5 ความถี่ที่แตกต่างกัน เราควรให้ความสนใจกับไฟแสดงสถานะ LED สีที่จะสอดคล้องกับความถี่ของตัวรับส่งสัญญาณเพื่อเชื่อมต่อกับโปรแกรม Axis Studio

3.3 การเชื่อมต่อตัวรับส่งสัญญาณกับโปรแกรม Axis Studio

ตัวรับส่งสัญญาณสามารถตั้งค่าผ่าน USB ในโหมดนักแสดงคนเดียว หรืออีเทอร์เน็ตสำหรับโหมดนักแสดงหลายคน เคล็ดลับ คือ ตัวรับส่งสัญญาณมีจำหน่ายในร้านค้าออนไลน์ทั่วไป การเพิ่มอุปกรณ์ผ่านอีเทอร์เน็ต ผู้ใช้สามารถขยายความครอบคลุมสำหรับการตั้งค่านักแสดงคนเดียวหรือสร้างการตั้งค่าเครือข่ายแบบแยกส่วนสำหรับโหมดนักแสดงหลายคน การเปิดใช้งานเราเตอร์ด้วย DHCP และอุปกรณ์สวิตช์ POE การตั้งค่า USB เมื่อเชื่อมต่อตัวรับส่งสัญญาณ

เข้ากับคอมพิวเตอร์เป็นครั้งแรก จำเป็นต้องกำหนดค่าที่อยู่ IP สำหรับอินเทอร์เฟซไดเรกต์เครือข่ายระยะไกล (RNDIS) ของตัวรับส่งสัญญาณ

3.4 การตั้งค่าอีเทอร์เน็ต (Ethernet)

หากใช้ตัวรับส่งสัญญาณตั้งแต่สองตัวขึ้นไปพร้อมกัน ให้ใช้สวิตช์ที่ไม่มีการจัดการ และเปิดใช้งาน DHCP เราเตอร์เพื่อซิงโครไนซ์ข้อมูลกับตัวรับส่งสัญญาณ ดังนี้

- 1) เชื่อมต่อสาย Ethernet จากพีซีเข้ากับเราเตอร์
- 2) ต่อสาย Ethernet จากเราเตอร์เข้ากับสวิตช์
- 3) เชื่อมต่อสาย Ethernet จากตัวรับส่งสัญญาณไปยังสวิตช์ และ 4) เมื่อเชื่อมต่อตัวรับส่งสัญญาณสำเร็จแล้ว จะปรากฏอยู่ในซอฟต์แวร์

3.5 การปรับเทียบเซนเซอร์กับสภาพแวดล้อม

การปรับเทียบเซนเซอร์กับสภาพแวดล้อมจะเป็นการปล่อยให้เซนเซอร์อยู่ในตำแหน่งจาง เชื่อมต่อกับ Axis Studio ด้วย Quick Connect การปรับ Magnetic Calibration เพื่อช่วยให้เซนเซอร์ปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อม ดังนี้

- 1) การปรับเทียบแม่เหล็กอย่างง่าย (Simplified Magnetic Calibration) Go to Main Menu --> Magnetic Calibration --> Simplified หากเซนเซอร์ไม่ผ่าน ให้ลอง Calibrate ใหม่
- 2) การปรับเทียบแม่เหล็กแบบมาตรฐาน (Standard Magnetic Calibration) Go to Main Menu --> Magnetic Calibration --> Standard
- 3) การปรับเทียบด้วยท่าทาง (Posture calibration) การปรับเทียบด้วยท่าทาง โดยตรวจสอบให้แน่ใจว่าโครงกระดูกบนหน้าจอถูกต้อง ถ้าหากลองเอียงเซนเซอร์ในตำแหน่ง โครงกระดูกควรเอียงไปในทิศทางเดียวกันด้วย

บทความวิชาการ (Academic Article)

3.6 การวางตำแหน่งสายรัดและเซนเซอร์ให้กับนักแสดง (Strap Placement)

โดยวางตำแหน่งเซนเซอร์ให้กับนักแสดง และใช้สายรัดความยาวที่เหมาะสมกับหุ่นนักแสดง ดังรูปที่ 2 รวมไปถึงการใส่ถุงมือเซนเซอร์ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 การเตรียมชุดอุปกรณ์ตรวจจับการเคลื่อนไหว



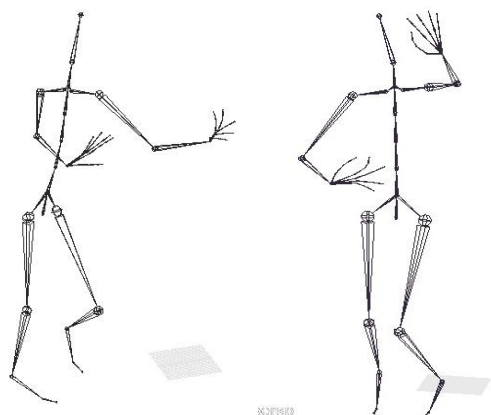
รูปที่ 3 การตรวจจับการเคลื่อนไหวด้านนาฏศิลป์ด้วยชุดอุปกรณ์เชิงแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวัดค่าความเฉื่อย

4. ความจำเป็นของการตกแต่งข้อมูลเพื่อความสะดวกของข้อมูลการเคลื่อนไหว

สาเหตุที่ส่งผลต่อข้อมูลที่ไม่สมบูรณ์ อาจเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ เช่น การถูกรบกวนของสัญญาณแม่เหล็ก ความแม่นยำอัลกอริทึมของซอฟต์แวร์ หรือข้อผิดพลาดของหน่วยวัดความเฉื่อย (IMU Drift Error) เป็นต้น ทำให้ข้อมูลการเคลื่อนไหวที่ได้ไม่สมจริง โดยพบว่าในงานวิจัยที่ต้องการแก้ไขข้อมูลการเคลื่อนไหว (Motion Editing) และเสนอรูปแบบ

ข้อมูลการเคลื่อนไหวชิ้นใหม่ (Motion Reconstruction) แบบอัตโนมัติโดยการแสดงผลข้อมูลแบบวิซวลไลเซชัน (Data Visualization) [10] การแก้ไขปัญหาด้วยอัลกอริทึม (Algorithm) [11] สามารถแก้ไขข้อมูลการเคลื่อนไหวด้วยอินเทอร์เฟซตามไทม์ไลน์ (Timeline-based Interface) [12] ดังนั้นข้อมูลที่ได้จึงควรมีการตกแต่งข้อมูล (Edit Data) ซึ่งการตกแต่งข้อมูล หมายถึง กระบวนการแก้ไขข้อมูลของแกน X, Y, Z กรณีข้อมูลที่ได้จากตัวเซนเซอร์ ทั้ง 17 จุด หรือรวมถุงมือทั้งสองข้างจำนวน 31 จุด มีบางจุดที่เซนเซอร์มีข้อผิดพลาดเล็กน้อยไม่สามารถจับการเคลื่อนไหวได้ดีหรือมีสัญญาณข้อมูลอ่อน จะใช้วิธีการชดเชยข้อมูลด้วยการตกแต่งข้อมูลให้เกิดความสมบูรณ์ ประกอบด้วย หน้าต่างแก้ไขข้อมูลจะอนุญาตให้สามารถแก้ไขจุดตำแหน่งที่ต้องการรวมถึงการแสดงผลข้อมูล เมื่อแก้ไขข้อมูลแล้วสามารถให้ซอฟต์แวร์ประมวลผลข้อมูลชุดใหม่ และล้างข้อมูลดิบของการจับการเคลื่อนไหวเดิม และเมื่อตกแต่งข้อมูลเรียบร้อยแล้วก็สามารถส่งออกข้อมูลได้ (Export Settings) การส่งออกข้อมูล หมายถึง กระบวนการกำหนดคุณสมบัติของไฟล์ข้อมูลที่จะทำการส่งออกไปใช้งาน การกำหนดช่วงเฟรม (Frame Range) กำหนดอัตราเฟรมต่อวินาที (FPS) เลือกการตั้งค่าโครงกระดูก (Skeleton) ว่าจะส่งข้อมูลไปใช้สำหรับซอฟต์แวร์ของบุคคลที่สามที่จะนำข้อมูล MoCap ไปใช้ รวมถึงชุดข้อมูลที่ได้จากถุงมือ การตรวจสอบข้อมูลว่ามีความถูกต้อง การตรวจสอบข้อมูลจากการแก้ไข รวมถึงโปรไฟล์ขนาดร่างกายของนักแสดงที่กำหนด สำหรับชนิดไฟล์ (File Type) ตามที่ต้องการให้โปรแกรมส่งออกข้อมูลควรเลือกไฟล์ชนิด FBX เนื่องจากสามารถนำไปใช้ได้กับโปรแกรมที่หลากหลายขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน ซึ่งในการทำแอนิเมชันแบบสามมิติ ไฟล์ FBX จะส่งข้อมูลกระดูก (Skeleton) ที่มีข้อมูลของแกน X, Y, Z ของตัวละคร ลักษณะข้อมูลกระดูก ดังรูปที่ 4

บทความวิชาการ (Academic Article)



รูปที่ 4 ลักษณะข้อมูลกระดูก(Skeleton)ของตัวละคร

จากรูปที่ 4 เมื่อให้โปรแกรมรันแบบต่อเนื่อง พบว่า ลักษณะข้อมูลกระดูกมีความสมบูรณ์และพร้อมสำหรับการนำข้อมูลการเคลื่อนไหวไปใช้งานกับซอฟต์แวร์ของบุคคลที่สามกับตัวละคร 3 มิติได้

5. แนวทางการพัฒนาแอนิเมชันแบบ 3 มิติด้วยชุดอุปกรณ์ตรวจจับการเคลื่อนไหว

หากโครงการมีข้อจำกัดในด้านงบประมาณสามารถเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีราคาเหมาะสม ซึ่งในงานวิจัย [13] ได้วิเคราะห์ความแม่นยำของชุดอุปกรณ์ตรวจจับการเคลื่อนไหวทั้งเชิงแม่เหล็กไฟฟ้าและเชิงแสง โดยพบว่า แม้ระบบเชิงแสงจะมีแนวโน้มที่จะเกิดสัญญาณรบกวนน้อยกว่าระบบเชิงแม่เหล็กไฟฟ้า แต่อัตราเฟรมที่ต่ำกว่าและการส่งสัญญาณแบบต่อเนื่องของระบบเชิงแม่เหล็กไฟฟ้าจะช่วยให้การติดตามการเคลื่อนไหวเป็นไปอย่างราบรื่น อย่างไรก็ตาม ความแม่นยำก็ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างตัวส่งและตัวรับจำนวนตัวรับที่ใช้งาน และการรบกวนของแม่เหล็กไฟฟ้า ด้วยอุปกรณ์ที่มีราคาเหมาะสมจึงพบการพัฒนาแอนิเมชันแบบสามมิติด้วยชุดอุปกรณ์ตรวจจับการเคลื่อนไหวเพิ่มมากขึ้น อาทิ ด้านการฝึกฝนสมรรถนะกีฬา ด้านนาฏศิลป์ ด้านแอนิเมชัน ด้านเกม และด้านการศึกษา เป็นต้น [14-15] สำหรับ

แนวทางการพัฒนาแอนิเมชันแบบ 3 มิติด้วยชุดอุปกรณ์ตรวจจับการเคลื่อนไหว ดังนี้

1. กำหนดวัตถุประสงค์ของโครงการ โดยต้องกำหนดประเภทของเนื้อหาที่จะนำเสนอ เช่น งานด้านศิลปวัฒนธรรม ด้านวิทยาศาสตร์สุขภาพ หรือด้านการศึกษา เป็นต้น

2. ออกแบบตัวละครที่เหมาะสมกับเนื้อหาและประเภทของสื่อ เช่น แอนิเมชัน เกม สื่อเทคโนโลยีความจริงเสริม สื่อเทคโนโลยีความจริงเสมือน หรือจักรวาลนฤมิต เป็นต้น

3. จัดหาเครื่องมือชุดอุปกรณ์ตรวจจับการเคลื่อนไหวที่เหมาะสมกับงบประมาณที่ได้รับจัดสรร

4. จัดหาทีมผู้เชี่ยวชาญด้านเทคนิคการใช้งานชุดอุปกรณ์ตรวจจับการเคลื่อนไหวและนักแสดงที่มีความเชี่ยวชาญ

5. บันทึกข้อมูลการเคลื่อนไหว โดยจำเป็นต้องใช้ดองเกิ้ล (Dongle) ที่มาจากบริษัทผลิตชุดอุปกรณ์ตรวจจับการเคลื่อนไหว และส่งออกข้อมูลเป็นไฟล์นามสกุล *.FBX ซึ่งเป็นข้อมูลที่เหมาะสมกับโปรแกรมสำหรับการผลิตงานแอนิเมชัน

6. แก้ไขข้อมูลการเคลื่อนไหวให้เกิดความสมบูรณ์มากที่สุด

7. นำข้อมูลการเคลื่อนไหวไปใช้กับตัวละคร 3 มิติ โดยการบันทึกไฟล์ *.FBX สามารถมีองค์ประกอบแบบต่างๆ ได้ เช่น Skeleton, Meshes, NURBS, Geometry, Cameras, Lights, Texture, Rigging เป็นต้น

8. นำตัวละคร 3 มิติ ไปใช้กับการจัดสภาพแวดล้อม เพื่อเพิ่มความเสมือนจริง ขั้นตอนนี้เรียกว่า Shading, Lighting, Rendering หากเป็นงานแอนิเมชันส่วนใหญ่จะนิยมเรนเดอร์เป็นภาพนิ่งแบบต่อเนื่องกันสำหรับนำภาพเคลื่อนไหวไปคอมโพสิตหรือนำไปตัดต่อก็จะถือว่าเสร็จสิ้นกระบวนการ

บทความวิชาการ (Academic Article)

6. บทสรุป

การสร้างแอนิเมชันแบบสามมิติในภาคอุตสาหกรรม ไม่ว่าจะเป็นการจัดทำสื่อประสมเพื่อใช้ในการจัดการเรียนการสอน การดูแลคุณภาพ การอนุรักษ์ศิลปวัฒนธรรม หรือการสร้างการเคลื่อนไหวของตัวละครเพื่อสร้างภาพยนตร์ หรือเกมนั้น หากผู้ประกอบการหรือสถาบันการศึกษามีงบประมาณสูงในการสร้าง ก็สามารถใช้ชุดอุปกรณ์ตรวจจับการเคลื่อนไหวเชิงแสงได้ แต่หากมีข้อจำกัดในงบประมาณ การใช้ชุดอุปกรณ์ตรวจจับการเคลื่อนไหวด้วยระบบการตรวจจับการเคลื่อนไหวเชิงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นแบบวัดค่าความเฉื่อยก็เป็นทางออกที่ดี ราคาที่สามารถเข้าถึงได้และมีขั้นตอนการใช้งานไม่ซับซ้อน ผู้ประกอบการหรือสถาบันการศึกษาควรมีการศึกษาคูณสมบัติด้านเทคนิคของชุดอุปกรณ์ รวมไปถึงการมีบุคลากรที่มีทักษะการใช้งานหรือสามารถเรียนรู้การทำงานของระบบได้

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณชุดอุปกรณ์ตรวจจับการเคลื่อนไหวสาขาวิชาเทคโนโลยีมีเดีย คณะเทคโนโลยีการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์ และขอขอบคุณชุดอุปกรณ์ตรวจจับการเคลื่อนไหวสาขาวิชา สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] ดัชนีรัตน์ ต้นเจริญ, "เทคโนโลยีการตรวจจับการเคลื่อนไหวและการประยุกต์ใช้งาน," *วารสารปัญญาวิวัฒน์*, ปีที่ 3, ฉบับที่ 1, หน้า 113-122, 2554.
- [2] นันทน์ภัส สุจิมา, "คอมพิวเตอร์กราฟิกส์ในงานภาพยนตร์โดยเทคนิค Motion Capture," *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยฟาร์อีสเทอร์น*, ปีที่ 1, ฉบับที่ 2, หน้า 41-44, 2551.

- [3] เบญญา พัฒนาพิภพ, "การพัฒนาภาพเคลื่อนไหว 3 มิติ ด้วยเทคโนโลยีตรวจจับการเคลื่อนไหวสำหรับฝึกท่ามวยไทยพื้นฐาน," *วารสารวิชาการนวัตกรรมสื่อสารสังคม*, ปีที่ 9, ฉบับที่ 2, หน้า 52-63, 2564.
- [4] Motion Analysis, "Motion Capture for Broadcast," [Online]. Available: <https://motionanalysis.com/broadcast>. [Accessed: 15 May 2022].
- [5] Noitom, "Perception Neuron Studio System," [Online]. Available: <https://neuronmocap.com/perception-neuron-studio-system>. [Accessed: 15 May 2022].
- [6] G. Rogez, P. Weinzaepfel and C. Schmid, "LCR-Net++: Multi-Person 2D and 3D Pose Detection in Natural Images," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 42, no. 5, pp. 1146-1161, 2020.
- [7] Z. Cao, G. Hidalgo, T. Simon, S. E. Wei and Y. Sheikh, "OpenPose: Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation Using Part Affinity Fields," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 43, no. 1, pp. 172-186, 2021.
- [8] M. Menolotto, D. S. Komaris, S. Tedesco, B. O'Flynn and M. Walsh, "Motion Capture Technology in Industrial Applications: A Systematic Review," *Sensors (Basel)*, vol. 20, no. 19, 5687, 2020.
- [9] S. Park and S. Yoon, "Validity Evaluation of an Inertial Measurement Unit (IMU) in Gait Analysis Using Statistical Parametric

บทความวิชาการ (Academic Article)

- Mapping (SPM)," *Sensors*, vol. 21, no. 11, 3667, 2021.
- [10] B. Chakravarthi, A. K. Patil, J. Y. Ryu, A. Balasubramanyam and Y. H. Chai, "Scenario-Based Sensed Human Motion Editing and Validation Through the Motion-Sphere," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 28295-28307, 2022.
- [11] H. L. Bartlett and M. Goldfarb, "A Phase Variable Approach for IMU-Based Locomotion Activity Recognition," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 65, no. 6, pp. 1330-1338, 2018.
- [12] N. Pantuwong, "A Novel Direct Manipulation Technique for Motion-Editing Using a Timeline-Based Interface," *ECTI Transactions on Computer and Information Technology*, vol. 12, no. 2, pp. 165-175, 2018.
- [13] U. A. Urbanczyk, A. Bonfiglio, A. H. McGregor and A. M. J. Bull, "Comparing Optical and Electromagnetic Tracking Systems to Facilitate Compatibility in Sports Kinematics Data," *International Biomechanics*, vol. 8, no. 1, pp. 75-84, 2021.
- [14] Q. Nian and J. Liu, "Motion Capture Based on Intelligent Sensor in Snow and Ice Sports," *Wireless Communications and Mobile Computing*, pp. 1-12, 2021.
- [15] นวัณกร โพธิสาร และเนติรัฐ วีระนาคินทร์, "การพัฒนาชุดการเคลื่อนไหวด้วยโมชันแคปเจอร์สำหรับการสอนนาฏศิลป์ ในรูปแบบออนไลน์ ของนักศึกษาระดับปริญญาตรี," *วารสารวิชาการ*

เทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏ
สุรินทร์, ปีที่ 7, ฉบับที่ 2, หน้า 28-41, 2565.

ระบบถังหมักไร้อากาศแบบสองขั้นตอนโดยใช้ความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์

ไทยทัศน์ สุดสวนสี^{1,*}, ศุภกิจ เคิกศิริ¹ และ วรรณรพ ชันธิรัตน์¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: thaithat.su@ksu.ac.th โทรศัพท์: 091-5166444

(รับบทความ 20 มกราคม 2566; แก้ไขบทความ: 12 กุมภาพันธ์ 2566; ตอรับบทความ: 16 กุมภาพันธ์ 2566)

บทคัดย่อ

ปัญหาขยะเป็นปัญหาที่สำคัญในประเทศไทยเนื่องจากมีปริมาณที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี การแก้ปัญหาหนึ่งที่จะช่วยลดปริมาณขยะลงได้คือการนำมาใช้ประโยชน์ในรูปของพลังงานทางเลือกได้แก่ก๊าซชีวภาพ งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากขยะชุมชนด้วยระบบถังหมักไร้อากาศแบบสองขั้นตอนให้ความร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ โดยได้ทำการทดลอง 2 การทดลองคือการทดลองหาความสัมพันธ์ของปริมาณก๊าซชีวภาพกับปริมาณขยะเศษอาหารที่ป้อนเข้าระบบในแต่ละวัน และการทดลองศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลของการหมักอยู่ในพาราโบลาโดมกับหมักในโรงเรือน ผลของการทดลอง หมักก๊าซชีวภาพตามปริมาณการป้อนขยะเศษอาหารที่แตกต่างกันปรากฏว่าเมื่อดำเนินระบบโดยใช้ปริมาณขยะเศษอาหาร 0.5, 1, 1.5 และ 2 kg/d มีปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดเฉลี่ย 1.340, 1.592, 1.801 และ 1.927 L/d ตามลำดับ และเมื่อดำเนินระบบไปจนครบระยะเวลา 30 วัน สามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดได้ 20.41, 23.57, 26.34 และ 28.33 L ตามลำดับ อีกส่วนเป็นการทดลองศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลของการหมักอยู่ในพาราโบลาโดมกับหมักในโรงเรือน ผลของการทดลองปรากฏว่าค่าปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยต่อวันของการหมักในโรงเรือนและพาราโบลาโดมอยู่ที่ 1.59 และ 1.72 L ตามลำดับ และมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในโรงเรือนและในพาราโบลาโดมอยู่ที่ 23.57 และ 25.58 L ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการทดลองในพาราโบลาโดมให้ค่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่สูงกว่าในโรงเรือน โดยที่การทดลองในพาราโบลาโดมสามารถทำให้เกิดปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยต่อวันเพิ่มขึ้นมากกว่าทดลองในโรงเรือน คิดเป็น 8.17% และ ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยสะสมตลอดการทดลองเพิ่มขึ้น คิดเป็น 8.52%

คำสำคัญ: ก๊าซชีวภาพ ขยะเศษอาหาร พาราโบลาโดม พลังงานแสงอาทิตย์

การอ้างอิงบทความ: ไทยทัศน์ สุดสวนสี, ศุภกิจ เคิกศิริ และ วรรณรพ ชันธิรัตน์, "ระบบถังหมักไร้อากาศแบบสองขั้นตอนโดยใช้ความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 1, ฉบับที่ 1, หน้า 10-22, 2566.

The Two-Stage Anaerobic Digestion System Using Solar Heat Energy

Thaithat Sudsuansee^{1,*}, Supakit Sergsiri² and Wanrop Khanthirat³

^{1,2,3} Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University

* Corresponding Author: thaithat.su@ksu.ac.th, Tel: 091-5166444

(Received: January 20, 2023; Revised: February 12, 2023; Accepted: February 16, 2023)

Abstract

Garbage is a major problem in Thailand and the quantity is increasing every year. The way to help reduce waste is to convert it into alternative energy such as biogas. This research aims to study biogas production from municipal waste using a two-stage anaerobic digester system heated by solar energy. Two experiments were performed, the first to find the relationship between the amount of biogas and the amount of food waste fed into the system with volume of 0.5 kg, 1 kg, 1.5 kg and 2 kg per day. And a second experiment to compare the results of fermentation in parabolic dome and in greenhouses. The results of the experiment showed that, when the system was fed 0.5, 1, 1.5 and 2 kg of food waste per day, the average total biogas content were 1.340, 1.592, 1.801 and 1.927 liters per day, respectively. And when the system has been implemented until the 30-day period, the results show that the feeding amount of food waste 0.5, 1, 1.5 and 2 kg per day. It can produce the highest accumulated biogas at 20.41, 23.57, 26.34 and 28.33 liters respectively. Another study was conducted to compare the effect of fermentation in parabolic domes and in greenhouses. The results of the experiment showed that the average daily biogas content of fermentation in the greenhouse and parabolic domes was 1.59 and 1.72 liters, respectively, and the accumulated biogas content in the houses and in the parabolic domes was 23.57 and 25.58 liters, respectively. It can be seen that the experiments in the parabolic dome yielded higher biogas content than in greenhouses. In the parabolic dome, average daily biogas content was 8.17% higher than in the greenhouse experiment, and the average accumulated biogas content throughout the experiment was 8.52% higher than in the greenhouse experiment.

Keywords: Biogas Food waste Parabolic dome Solar energy

Please cite this article as: T. Sudsuansee, S. Sergsiri, and W. Khanthirat, "The Two-Stage Anaerobic Digestion System Using Solar Heat Energy," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, KSU*, vol. 1, no. 1, pp. 10-22, 2023.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

การผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธี anaerobic digestion เป็นวิธีหนึ่งที่เหมาะสมที่สุดในการลดปริมาณขยะอินทรีย์ [1] ข้อดีของมันเป็นคือการหมักก๊าซที่มีประสิทธิภาพ ต้นทุนต่ำ และก่อให้เกิดมลภาวะน้อย การหมักก๊าซแบบ 2-stage anaerobic digestion เป็นการหมักที่มีความเสถียรของระบบ และได้ปริมาณก๊าซมีเทนในปริมาณสูง [2] เนื่องจากเป็นระบบที่สร้างสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมให้กับแบคทีเรียแต่ละประเภท ได้แก่ แบคทีเรียพวกสร้างกรด acidogenic bacteria กับแบคทีเรียพวกสร้างก๊าซมีเทน methane forming bacteria จึงทำให้กระบวนการหมักสามารถควบคุมระบบได้ง่าย มีความเสถียร และมีต้นทุนต่ำ และได้ปริมาณก๊าซมีเทนสูง อย่างไรก็ตามอุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการหมักก๊าซชีวภาพ จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าหากมีการควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมคือในช่วง thermophilic ($50 - 60^{\circ}\text{C}$) [3] จะทำให้เกิดประสิทธิภาพโดยรวมของระบบสูงกว่าการหมักในช่วง Mesophilic ($30-40^{\circ}\text{C}$) [4] อย่างไรก็ตามหากกำหนดอุณหภูมิที่สูงเกินความจำเป็นจะเกิดการสิ้นเปลืองพลังงาน การควบคุมที่ยาก และมีความเสี่ยงสูงที่ระบบอาจจะล้มเหลว [2] ประกอบกับสภาพอากาศโดยรวมของประเทศไทยแล้ว การหมักในช่วง mesophilic จะมีความเหมาะสมมากกว่าในช่วง thermophilic โดยจากงานวิจัยของ Schober et al. [5] พบว่าที่อุณหภูมิ 37°C จะให้ปริมาณก๊าซสูงกว่าอุณหภูมิต่างๆในช่วง mesophilic เดียวกัน โดยมีปริมาณก๊าซที่ได้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิ 50°C ในช่วง thermophilic โดยสภาพอากาศของประเทศไทยเป็นประเทศที่มีแสงแดดตลอดทั้งปี ซึ่งเหมาะแก่การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ดังนั้นการนำเอาพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ในกระบวนการหมักก๊าซชีวภาพเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับระบบ จึงเป็นวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจ

เพราะการใช้ประโยชน์จากพลังงานจากแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นพลังงานที่สะอาดและสามารถนำมาใช้ได้อย่างไม่มีหมด

โรงเรือนทรงพาราโบลาโดมเป็นเทคโนโลยีที่ถูกนำมาใช้ในการอบแห้งโดยใช้ความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ ถูกพัฒนาขึ้นโดย Janjai et al. [6,7] และได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย โดยส่วนใหญ่นำไปใช้ในกระบวนการอบแห้งอาหาร โครงสร้างมีลักษณะเป็นทรงพาราโบลา หลังคาถูกคลุมด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนต แสงอาทิตย์สามารถส่องผ่านเข้ามาภายในโดมได้ แต่รังสีความร้อนผ่านออกไปได้น้อย จึงทำให้เกิดผลเรือนกระจก (greenhouse effect) ภายในโดม และทำให้อุณหภูมิภายในสูงขึ้น และมีระบบควบคุมอุณหภูมิติดตั้งสำหรับกรณีความร้อนภายในโดมสูงเกินไป พัดลมระบายความร้อนจะทำงานเพื่อรักษาระดับของอุณหภูมิ มีการทดลองอบแห้งกล้วยตากด้วยพาราโบลาโดม โดยสามารถอบแห้งกล้วยน้ำว่าสุกได้ครั้งละ $1,000\text{ kg}$ ด้วยขนาดของโดม เท่ากับ 7.5×20 ตารางเมตร และพาราโบลาโดมยังสามารถนำไปอบแห้งในผลิตภัณฑ์ต่างๆได้อีกหลายชนิด เช่น ผักและผลไม้อบแห้ง สมุนไพรและเครื่องเทศ ผลิตภัณฑ์จากข้าวและธัญพืช เมล็ดกาแฟ ใบชา [8] ดังผลการวิจัยเกี่ยวกับประสิทธิภาพของโรงเรือนทรงพาราโบลาโดมในงานวิจัยดังกล่าว การประยุกต์ใช้โรงเรือนทรงพาราโบลาโดมสำหรับใช้ในการการเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการหมักก๊าซชีวภาพ ซึ่งข้อดีของการใช้โรงเรือนทรงพาราโบลาโดมมาช่วยในการหมักก๊าซชีวภาพคือ สามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงของอุณหภูมิ Mesophilic เพราะโรงเรือนทรงพาราโบลาโดมมีคุณสมบัติช่วยเพิ่มอุณหภูมิภายในของระบบให้สูงขึ้นจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านเข้ามาในโดม จึงทำให้ภายในโดมอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในตอนเช้าที่พระอาทิตย์ขึ้น ในกรณีที่อุณหภูมิเกิน 50°C พัดลมจะทำงานเพื่อระบายความร้อนออกจากโดม ทำ

บทความวิจัย (Research Article)

ให้สามารถรักษาระดับของอุณหภูมิไม่ให้สูงเกินค่าที่กำหนด อีกทั้งในตอนเย็นและตอนกลางคืน ความร้อนภายในโดมจะถูกชะลอไม่ให้สูญเสียออกไปจากระบบเร็ว จากผลของเรือนกระจก ส่งผลทำให้อุณหภูมิภายในระบบไม่ต่ำเกินไป และมีอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดทั้งวันอยู่ในเกณฑ์ที่สูงกว่าระบบที่ไม่ได้ใช้พาราโบลาโดมหรือระบบที่ติดตั้งอยู่ในอาคาร ซึ่งวิธีนี้เป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการหมักโดยรวมของระบบ และสามารถเพิ่มปริมาณก๊าซมีเทนจากกระบวนการหมักได้ ดังนั้นการนำเอาเทคโนโลยีโรงเรือนแบบพาราโบลาโดมช่วยในกระบวนการหมักก๊าซชีวภาพจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากวิธีการที่เสนอสามารถเป็นแนวทางหนึ่งในการจัดการทรัพยากรที่มีอยู่ให้เกิดประสิทธิภาพ เกิดประโยชน์ต่อชุมชน และสิ่งแวดล้อม

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปริมาณการป้อนขยะเศษอาหารเข้าระบบที่แตกต่างกันและศึกษาผลของอุณหภูมิเฉลี่ยภายในระบบหมักก๊าซชีวภาพแบบสองขั้นตอนให้สูงขึ้นจากการประยุกต์ใช้ร่วมกับโรงเรือนทรงพาราโบลาโดม โดยการดำเนินงานวิจัยเป็นการทดสอบการหมักก๊าซชีวภาพโดยเปรียบเทียบผลระหว่างการผลิตในโรงเรือนทรงพาราโบลาโดมกับการหมักในโรงเรือนในอาคาร ทั้งนี้ผู้วิจัยคาดหวังว่างานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับชุมชนหรือในระดับครัวเรือนได้ในระยะต่อไป

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการย่อยก๊าซชีวภาพ

การเกิดของก๊าซชีวภาพนี้เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์หรือของเสียต่าง ๆ โดยอาศัยการทำงานของกลุ่มแบคทีเรียหลายชนิดต่อเนื่องกันในสภาพที่ไร้อากาศ ภายใต้อุณหภูมิที่เหมาะสม โดยที่สารอินทรีย์ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีน จะถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียหลายชนิด เพื่อเปลี่ยนสารอินทรีย์ไปเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายคือ ก๊าซมีเทนและก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งก๊าซทั้งสองชนิดเป็นองค์ประกอบหลักของก๊าซชีวภาพ

2.1.1 ปฏิกริยาชีวเคมีของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียสามารถแบ่งได้ 4 ขั้นตอน คือ

2.1.1.1 กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากขยะอินทรีย์

กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากขยะอินทรีย์เกิดจากการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์หลายชนิดสามารถสรุปได้ 4 ขั้นตอน ดังนี้

1) ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

การย่อยสลายสารอินทรีย์มีโครงสร้างซับซ้อนให้กลายเป็นสารอินทรีย์เชิงเดี่ยว เช่น การย่อยสลายแป้งให้อยู่ในรูปของน้ำตาล การย่อยสลายไขมันให้อยู่ในรูปของกรดไขมัน และการย่อยสลายโปรตีนให้อยู่ในรูปของกรดอะมิโน เป็นต้น ขั้นตอนนี้สามารถเกิดขึ้นได้ภายนอกเซลล์แบคทีเรียโดยอาศัยเอนไซม์ที่แบคทีเรียปล่อยออกมาใช้ในการย่อยสลายดังกล่าว

2) การสร้างกรดไขมัน (Acidogenesis)

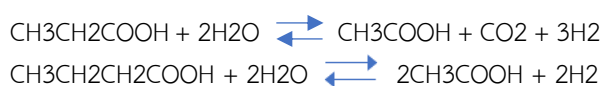
การย่อยสลายสารอินทรีย์เชิงเดี่ยวให้กลายเป็นกรดระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid) ผลผลิตของขั้นที่ 1 จะถูกแบคทีเรียสร้างกรดดูดซึมเข้าไปภายในเซลล์ เพื่อไปใช้เป็นอาหารและถูกเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหย เช่น กรดอะซิติก กรดบิวไทริก กรดโพรไพโอนิก เป็นต้น และผลิตไฮโดรเจนกับคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาด้วยกระบวนการทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างการย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลเล็กและชนิดของผลผลิตที่ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการ คือ ชนิดของซับสเตรต และความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น เช่น กรดไขมันชนิดยาวถูกย่อยสลายกลายเป็นอะซิติกและไฮโดรเจน ภายใต้สภาวะที่ความดันของไฮโดรเจนมีค่าต่ำ แต่จะย่อยสลายกลายเป็นกรดบิวไทริกและกรดโพรไพโอนิกเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลสูง น้ำตาลถูกย่อยสลายเป็นกรดอะซิติก ไฮโดรเจนและ

บทความวิจัย (Research Article)

คาร์บอนไดออกไซด์โดยผ่านวิธี Embden-Meyerhof ภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เซียลต่ำ หากไฮโดรเจนมีความดันพาร์เซียลสูง ผลผลิตที่ได้ คือ กรดอะซิติก กรดไพรูวอิก กรดบิวไทริก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ แบคทีเรียที่มีบทบาทในการสร้างกรดไขมันระเหยคือกลุ่ม Clostridium ซึ่งมีเมตาบอลิซึมหลายแบบ จึงสามารถใช้สารอาหารทั้งที่เป็นพวกแป้งหรือโปรตีนได้ ผลปฏิกิริยาที่ได้มีหลายชนิด เช่น กรดบิวไทริก กรดอะซิติก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน เอทานอล บิวทานอล อะซีโตน เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีแบคทีเรียในกลุ่ม Propionic bacterium ที่ผลิตกรดไพรูวอิก และกรดอะซิติกจากกรดแลกติก

3) การสร้างกรดอะซิติกจากกรดไขมันระเหยอื่นๆ (Acetogenesis)

การเปลี่ยนกรดระเหยง่ายให้กลายเป็นกรดอะซิติกหรือเกลืออะซิเตตซึ่งเป็นสารตั้งต้นหลักในการผลิตมีเทน แบคทีเรียอะซิโตจีนิค (แบคทีเรียสร้างอะซิเตต) มีบทบาทสำคัญในการเป็นตัวเชื่อมระหว่างขั้นตอนการสร้างกรดและขั้นตอนในการสร้างมีเทน แบคทีเรียสร้างมีเทนนั้นต้องการสารตั้งต้นเฉพาะเจาะจงมาก ได้แก่ กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ไฮโดรเจน เมทานอล และเมทิลามีน (Methylamine) กรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมไม่อาจใช้เป็นข้อเสตรทในการผลิตมีเทนได้โดยตรง แบคทีเรียอะซิโตจีนิค (ที่ผลิตไฮโดรเจนได้ด้วย) มีความสามารถในการย่อยสลายกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ กรดอะซิติก และไฮโดรเจนภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เซียลต่ำกว่า 2×10^{-3} บรรยากาศ และต่ำกว่า 9×10^{-3} บรรยากาศสำหรับการย่อยสลายกรดบิวไทริก และกรดไพรูวอิก ตามลำดับ



ขั้นตอนที่ 3 นี้จะเกิดขึ้นได้เฉพาะในสภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เซียลต่ำเท่านั้น กรดไขมันระเหยไม่สามารถย่อยสลายกลายเป็นกรดอะซิติก ภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เซียลสูง

4) การสร้างมีเทน (Methanogenesis)

กรดอะซิติกและไฮโดรเจนจะถูกแบคทีเรียใช้สร้างก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน



2.1.2 การย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน (two-stage anaerobic digestion)

ระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน [2]

สภาพแวดล้อมที่เหมาะสม (optimum condition) กับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียพวกสร้างกรด และแบคทีเรียพวกสร้างก๊าซมีเทนมีความแตกต่างกัน เช่น แบคทีเรียพวกสร้างกรดเจริญได้ดีที่ pH ต่ำ และระยะเวลาเก็บกักน้อยซึ่งจะไปยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียพวกสร้างก๊าซมีเทน ทำให้จุลินทรีย์ทั้งสองกลุ่มทำงานได้ไม่เต็มที่ ประสิทธิภาพของระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบขั้นตอนเดียวต่ำจึงได้มีการพัฒนาระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนขึ้น โดยวิธีการแยกกลุ่มจุลินทรีย์ทั้งสองออกจากกัน และจัดให้มีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในแต่ละกลุ่มเพื่อให้จุลินทรีย์ในแต่ละกลุ่มนั้นสามารถที่จะทำงานได้อย่างเต็มที่ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบ ทำให้ระบบสามารถทำงานได้ดียิ่งขึ้น [9] วิธีการที่ใช้ในการแยกกลุ่มจุลินทรีย์มีหลายวิธี เช่น การแยกด้วยเมมเบรน (membrane separation) การควบคุมจลศาสตร์ (kinetic control) และการควบคุม pH (pH control) แต่วิธีที่นิยมใช้คือการควบคุมจลศาสตร์รวมกับการควบคุม pH

บทความวิจัย (Research Article)

ระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนประกอบด้วยถึงปฏิกิริยาสองถึงแยกจากกันโดยเรียงต่อกันแบบอนุกรม ถึงหนึ่งสำหรับการสร้างกรด ขณะที่อีกถึงหนึ่งสำหรับการสร้างก๊าซมีเทน โดยที่สภาพแวดล้อมในถังใบแรกจะมีสภาพที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียพวกสร้างกรด ขณะที่ถังใบที่สองซึ่งรับผลผลิตมาจากถังใบแรก ออกแบบให้เกิดสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับแบคทีเรียพวกสร้างก๊าซมีเทน

กรดอินทรีย์ระเหยเป็นผลผลิตหลักของขั้นตอนแรก ดังนั้นการควบคุม pH ในขั้นตอนที่สองเป็นสิ่งจำเป็น เมื่อความสามารถของบัฟเฟอร์เกินขีดจำกัด การควบคุมในถังหมักก๊าซมีเทนอาจทำได้โดยการทำให้สารอินทรีย์ที่จะเข้าถังหมักเป็นกลางโดยการปรับ pH หรือให้มีการเวียนกลับของส่วนเกินที่ออกจากขั้นตอนที่สอง

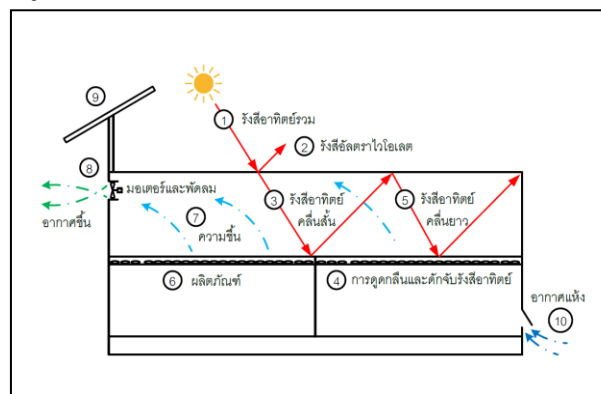
2.2 ระบบการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

โรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เป็นวิธีอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก (Solar greenhouse) ที่กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) [7,8] กระทรวงพลังงาน ให้การสนับสนุนการลงทุนติดตั้งใช้งานเป็นโรงอบแห้งที่ออกแบบรูปพาราโบลา สามารถใช้อบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานหลัก

2.2.1 หลักการทำงานของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

โรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกอาศัยหลักการของปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect) ดังแสดงในรูปที่ 1 กล่าวคือรังสีอาทิตย์ที่ทะลุผ่านชั้นโอโซนเข้ามายังชั้นบรรยากาศโลก ในจุดที่ 1 ประกอบด้วยรังสีอาทิตย์หลากหลายความยาวคลื่น เมื่อเคลื่อนผ่านมายังบริเวณแผ่นกระจกหรือพลาสติกใส ที่ใช้สร้างหลังคาครอบโรงอบแห้ง จะเกิดการสะท้อนรังสี

อัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet, UV) ในจุดที่ 2 ออกไปแต่รังสีอาทิตย์คลื่นสั้น (Short wavelength) จะสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ภายในโรงเรือนได้ในจุดที่ 3 เกิดการกระทบและดูดกลืน (Absorption and trapped) กับวัสดุต่าง ๆ ที่อยู่ในโรงอบแห้งในจุดที่ 4 ทำให้รังสีอาทิตย์คลื่นสั้นมีพลังงานลดลง กลายเป็นรังสีอาทิตย์คลื่นยาว (Long wavelength) และกลายเป็นรังสีความร้อนหรือรังสีอินฟราเรด (Infrared) นั้นเองซึ่งรังสีความร้อนดังกล่าวไม่สามารถเดินทางผ่านแผ่นกระจกหรือพลาสติกใส ออกมาสู่ภายนอกได้ในจุดที่ 5 ทำให้อากาศภายในเรือนกระจกร้อนขึ้น และถ่ายเทความร้อนไปยังผลิตภัณฑ์ในจุดที่ 6 ทำให้เกิดการระเหยของน้ำในตัวผลิตภัณฑ์ออกสู่อากาศในจุดที่ 7 อากาศขึ้นดังกล่าวจะไหลออกจากโรงอบแห้ง โดยมีพัดลมดูดอากาศช่วยในการระบายอากาศขึ้นในจุดที่ 8 ซึ่งโดยส่วนมากจะใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์หรือโซลาร์เซลล์ในจุดที่ 9 และอากาศที่มีอุณหภูมิและความชื้นต่ำจากภายนอกจะถูกดูดเข้าไปยังโรงอบแห้งแทนที่อากาศขึ้นในจุดที่ 10



รูปที่ 1 แผนภาพการทำงานของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ [10]

3. วิธีการดำเนินงาน

3.1 ขั้นตอนการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพ

บทความวิจัย (Research Article)

1) ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รวบรวมองค์ความรู้เพื่อนำมาพัฒนาเป็นองค์ความรู้ที่สามารถนำไปใช้กับงานวิจัยนี้

2) ทำการออกแบบเครื่องต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการและทำการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำงานของเครื่อง ในการออกแบบเครื่องต้นแบบ ผู้วิจัยมีแนวคิดนำระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกมาประยุกต์ใช้กับระบบถังหมักไร้อากาศแบบสองขั้นตอน ดังรูปที่ 2 หลักการทำงานของระบบเมื่อแสงจากดวงอาทิตย์แผ่รังสีเข้ามาที่ระบบให้ความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์(พาราโบลาโดม)จะเกิดความร้อนสะสมอยู่ภายในระบบ ในขณะที่ระบบถังหมักไร้อากาศแบบสองขั้นตอนที่อยู่ภายในโดม จะนำความร้อนผ่านถังหมักที่ทำจากโลหะนำความร้อนและทนกรดทนสารเคมี ทำให้ขยะที่อยู่ภายในถังได้รับความร้อนจนมีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งเป็นการช่วยในการเร่งปฏิกิริยาให้เกิดก๊าซมีเทนได้เร็วขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพดีขึ้น ลดเวลาในการหมักลง ได้ปริมาณก๊าซนำไปใช้งานมากขึ้น



รูปที่ 2 ระบบการผลิตถังหมักก๊าซชีวภาพไร้อากาศแบบสองขั้นตอนให้ความร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

3) ทำการสร้างเครื่องต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการ

4) ทำการทดสอบค่าตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ

5) ในการทดลองผู้วิจัยออกแบบตารางผลการทดลองโดยกำหนดตัวแปรที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณก๊าซมีเทน ได้แก่ อุณหภูมิของระบบ (operating temperature), ปริมาณสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบ (Loading), ระยะเวลาการกักเก็บสารอินทรีย์ในถังหมัก (Retention time)

6) จากนั้นทำการแปรผันค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องเพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่จะได้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงสุด

7) สรุปผลการทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการ

3.2 แผนการทดลอง

ในการศึกษาครั้งนี้จะทำการทดลอง 2 ขั้นตอน โดยการทดลองในแต่ละขั้นตอนการทดลองจะแบ่งแยกออกจากกันอย่างชัดเจน สำหรับในขั้นตอนที่ 1 เป็นการศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ของปริมาณก๊าซชีวภาพกับปริมาณขยะเศษอาหารที่ป้อนเข้าระบบ และในขั้นตอนที่ 2 จะเป็นการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลของการหมักอยู่ในพาราโบลาโดมกับหมักในพื้นที่โล่งโดยมีระยะเวลาการหมักอยู่ที่ 30 วัน

การทดลองตอนที่ 1 การศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ของปริมาณก๊าซชีวภาพกับปริมาณขยะเศษอาหารที่ป้อนเข้าระบบในแต่ละวัน โดยมีปริมาณ 0.5, 1, 1.5 และ 2 kg/d

การทดลองตอนที่ 2 การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลของการหมักอยู่ในพาราโบลาโดมกับหมักในพื้นที่โล่งโดยมีระยะเวลาการหมักอยู่ที่ 30 วัน

3.3 วิธีการทดลอง

การทดลองตอนที่ 1 การศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ของปริมาณก๊าซชีวภาพกับปริมาณขยะ

บทความวิจัย (Research Article)

เศษอาหารที่ป้อนเข้าระบบในแต่ละวัน โดยมีปริมาณ 0.5, 1, 1.5 และ 2 kg/d

ช่วงที่ 1 การเริ่มเดินระบบ

1) การเริ่มต้นดำเนินระบบในการทดลองขั้นตอนนี้ ใช้การเริ่มต้นเติมมูลหมูลงในถังผลิตก๊าซ 20 kg ผสมกับน้ำ 40 L แล้วปิดฝาถังทิ้งไว้ให้เกิดการหมักเป็นเวลาประมาณ 3 วัน

2) หลังจากดำเนินการครบ 3 วัน แล้วจึงเริ่มเติมมูลหมู 20 kg ลงในถังผลิตกรด และขยะอินทรีย์ 15 kg จากนั้นเติมน้ำจนได้ปริมาตร 100 L ปิดฝาถังแล้วทิ้งไว้จนเกิดการผลิตกรด ซึ่งใช้เวลาประมาณ 1 วัน จากนั้นจะเริ่มเดินระบบในช่วงที่ 2 คือการเติมขยะอินทรีย์ในแต่ละวัน

ช่วงที่ 2 การเติมเศษอาหารในแต่ละวัน

1) การจัดเตรียมขยะอินทรีย์โดยการคัดแยกสิ่งแปลกปลอมที่ไม่สามารถย่อยสลายได้หรือย่อยสลายได้ยาก ส่วนเศษอาหารเมื่อแยกสิ่งปลอมปนออกไปแล้วจะทำการสับให้มีขนาดเล็กลงเพื่อให้ง่ายต่อการย่อยสลายก่อนนำไปเติมลงในถังผลิตกรด จากนั้นทำการชั่งขยะที่เตรียมแล้วมา 0.5, 1, 1.5 และ 2 kg ผสมกับน้ำในอัตราส่วน 1:1 เพื่อปรับอัตราส่วนปริมาณของแข็งให้ได้ประมาณ 10 % หรือให้เนื้อขยะกับน้ำมีสัดส่วนเท่า ๆ กัน

2) เติมขยะอินทรีย์ในถังผลิตกรด หลังจากระบบมีการหมักเพื่อผลิตกรดในถังผลิตกรดแล้วเริ่มเติมขยะอินทรีย์ที่ผ่านการคัดแยกและเตรียมแล้วเข้าไปในถังผลิตกรด จากนั้นทำการกวนผสมเศษอาหารภายในถังผลิตกรดเพื่อให้เศษอาหารที่เติมลงไปใหม่ผสมกันกับเศษอาหารเดิม โดยใช้การกวน

3) ปล่อยน้ำหมักขยะอินทรีย์จากถังผลิตกรดไปยังถังผลิตก๊าซ หลังจากกวนผสมเศษอาหารในถังผลิตกรดให้เข้ากันแล้ว ก็ระบายน้ำหมักจากถังผลิตกรดไปยังถังผลิตก๊าซ โดยการเปิดวาล์วซึ่งน้ำหมักจะไหลไปยังถังผลิตก๊าซ

4) การหมุนเวียนคลุกเคล้าตะกอนในถังผลิตก๊าซ (โดยใช้อุปกรณ์การกวน) ปล่อยให้เครื่องกวนทำงานประมาณ 10 นาทีเพื่อให้ขยะอินทรีย์มีโอกาสสัมผัสกับจุลินทรีย์มากขึ้น

5) การระบายน้ำหมักออกจากถังผลิตก๊าซ เมื่อระบายน้ำหมักจากถังผลิตกรดเข้าสู่ถังผลิตก๊าซแล้วก็ทำการปล่อยน้ำหมักออกจากถังผลิตก๊าซเพื่อรักษาระดับน้ำภายในถังผลิตก๊าซให้เท่าเดิม

การทดลองตอนที่ 2 การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลของการหมักอยู่ในพาราโบลาโดมกับหมักในพื้นที่โล่งโดยมีระยะเวลาการหมักอยู่ที่ 30 วัน

ดำเนินการคัดเลือกปริมาณขยะเศษอาหารที่ได้จากการทดลองที่ 1 มาทำการทดลองหมักก๊าซชีวภาพในสถานะที่แตกต่างกัน

สถานะที่ 1 เป็นการหมักในโรงเรือน อุณหภูมิเฉลี่ยในการหมักในแต่ละวันจะอยู่ประมาณ 26 – 32 °C

สถานะที่ 2 เป็นการหมักในพาราโบลาโดม ซึ่งอุณหภูมิเฉลี่ยในการหมักในแต่ละวันจะอยู่ประมาณ 37 – 42 °C

โดยขั้นตอนของการหมักของทั้งสองสถานะจะเหมือนกัน และมีปริมาณของขยะเศษอาหารที่ป้อนในแต่ละวันเท่ากัน หลังจากทำการหมักตามระยะเวลาแล้ว จึงนำผลมาเปรียบเทียบปริมาณของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้เพื่อนำมาวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น

4. ผลการดำเนินงาน

4.1 การศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ของปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้น (total gas production)

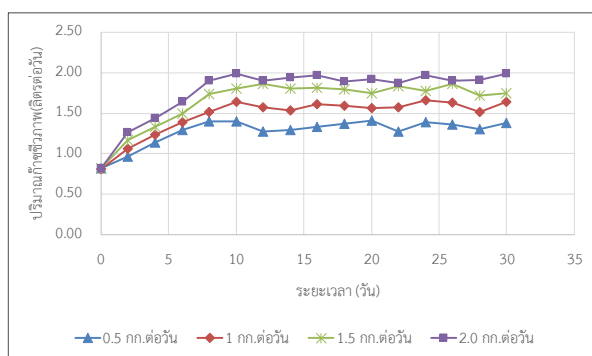
ในรูปที่ 3 แสดงถึงปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น โดยมีปริมาณขยะเศษอาหารที่ป้อนเข้าระบบในแต่ละวัน 0.5, 1, 1.5 และ 2 กก.ต่อวัน (kg/d) ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดได้จากการแทนที่น้ำ โดยวัดปริมาตรน้ำที่ถูกแทนที่ในแต่ละวัน คิดเป็นค่าเฉลี่ยของก๊าซ

บทความวิจัย (Research Article)

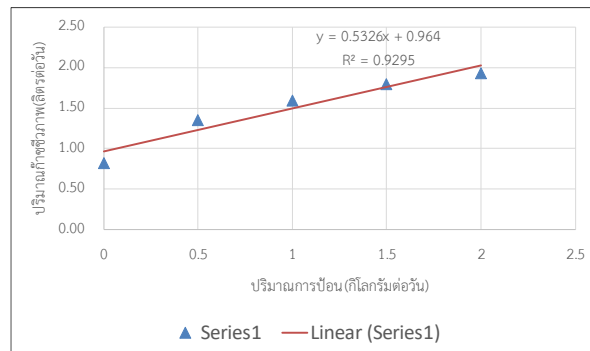
ชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวันภายใต้สภาวะการทดลอง (room condition) พบว่า เมื่อดำเนินระบบโดยใช้ปริมาณขยะเศษอาหาร 0.5 kg/d มีปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดเฉลี่ย 1.340 L/d เมื่อดำเนินระบบโดยใช้ปริมาณขยะเศษอาหาร 1 kg/d มีปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดเฉลี่ย 1.592 L/d เมื่อดำเนินระบบโดยใช้ปริมาณขยะเศษอาหาร 1.5 kg/d มีปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดเฉลี่ย 1.801 L/d เมื่อดำเนินระบบโดยใช้ปริมาณขยะเศษอาหาร 2 kg/d มีปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดเฉลี่ย 1.927 L/d แสดงดังตารางที่ 1 และในรูปที่ 4 เมื่อนำปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นตลอดการทดลองมาเขียนความสัมพันธ์กับปริมาณขยะเศษอาหารที่ป้อนเข้าระบบต่อวัน พบว่า ได้สมการความสัมพันธ์ คือ $y = 0.5326x + 0.964$

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยความสัมพันธ์ของปริมาณขยะเศษอาหารที่ป้อนเข้าระบบต่อวัน กับ ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น

ปริมาณขยะเศษอาหารที่ป้อนเข้าระบบต่อวัน	ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น (L/d)
0.5 kg/d	1.340
1 kg/d	1.592
1.5 kg/d	1.801
2 kg/d	1.927



รูปที่ 3 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นตลอดการทดลอง



รูปที่ 4 ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยต่อวันที่ปริมาณการป้อน 0.5, 1, 1.5, 2 kg/d

ผลการวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพสะสมในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพเมื่อดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่องแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมตลอดการทดลอง (ระยะเวลาทดลอง 30 วัน)

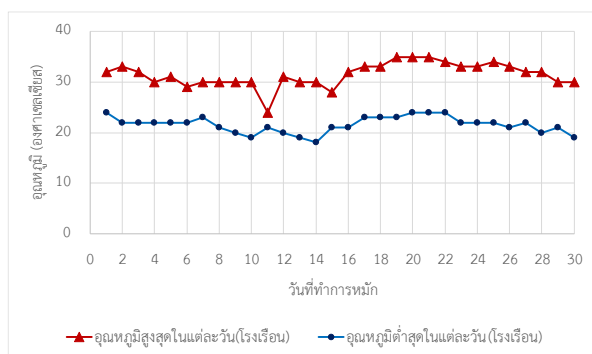
ปริมาณขยะเศษอาหารที่ป้อนต่อวัน	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (l)
0.5 kg/d	20.41
1 kg/d	23.57
1.5 kg/d	26.34
2 kg/d	28.33

4.2 การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลของการหมักอยู่ในพาราโบลาโดม

4.2.1 การศึกษาอุณหภูมิในระบบ

สภาพอากาศทั่วไปในช่วงการทดลองในเดือนพฤศจิกายน เป็นช่วงฤดูหนาว ทำให้ภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีอากาศเย็นทั่วไปเกือบตลอดเดือน ซึ่งผู้วิจัยทำการทดลองที่บริเวณพื้นที่บริหารจัดการขยะและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ อำเภอมือง จังหวัดกาฬสินธุ์ โดยในรูปที่ 5 แสดงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในแต่ละวันของโรงเรือน โดยกราฟแสดงช่วงของอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดในแต่ละวัน

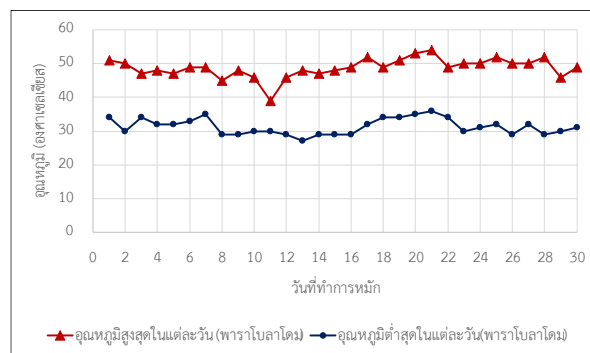
บทความวิจัย (Research Article)



รูปที่ 5 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในแต่ละวันของโรงเรียน

ในกรณีทำการทดลองในพาราโบลาโดม ผู้วิจัยได้ทำการวัดอุณหภูมิในพาราโบลาโดมและบันทึกผล โดยผลที่ได้แสดงในรูปที่ 6 แสดงช่วงอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดในแต่ละวัน และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลต่างของอุณหภูมิระหว่างในโรงเรียนกับในพาราโบลาโดม ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยในโรงเรียนมีอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยอยู่ที่ 31.47 °C และมีอุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ยอยู่ที่ 21.57 °C และในพาราโบลาโดมมีอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยอยู่ที่ 48.8 °C และมีอุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ยอยู่ที่ 31.33 °C ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 17.33 °C และผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำสุดอยู่ที่ 9.76 °C จะสังเกตเห็นว่าผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดมีค่ามากกว่าผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำสุด ทั้งนี้เนื่องจากในตอนกลางวันพาราโบลาโดมมีความสามารถสร้างความร้อนที่ได้จากพลังงานแสงอาทิตย์ได้มาก ส่งผลให้ในตอนกลางวันอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดของพาราโบลาโดมจึงขึ้นไปได้ถึง 48.8 °C แต่ในทางตรงกันข้าม ในตอนกลางคืนไม่มีแสงอาทิตย์พาราโบลาโดมจึงไม่สามารถสร้างความร้อนจากแสงอาทิตย์ได้ จึงอาศัยการกักเก็บพลังงานความร้อนที่อยู่ในโดมไว้ได้ส่วนหนึ่ง ทำให้ในตอนกลางคืนผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยจึงแตกต่างกันน้อยกว่าในตอนกลางวัน จึงสรุปได้ว่าเมื่อระบบที่ใช้หมักด้วยพาราโบลาโดมจะทำให้อุณหภูมิภายในระบบ มีอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยเพิ่มขึ้นคิดเป็น

55.06% และมีอุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 45.25%



รูปที่ 6 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในแต่ละวันของพาราโบลาโดม

ตารางที่ 3 ตารางเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างในโรงเรียนกับพาราโบลาโดม

การทดลองใน	อุณหภูมิ สูงสุด เฉลี่ย (°C)	อุณหภูมิ ต่ำสุด เฉลี่ย (°C)	ผลต่าง ของช่วง อุณหภูมิ (°C)
โรงเรียน	31.47	21.57	9.9
พาราโบลาโดม	48.80	31.33	17.47
ผลต่างอุณหภูมิ	17.33	9.76	

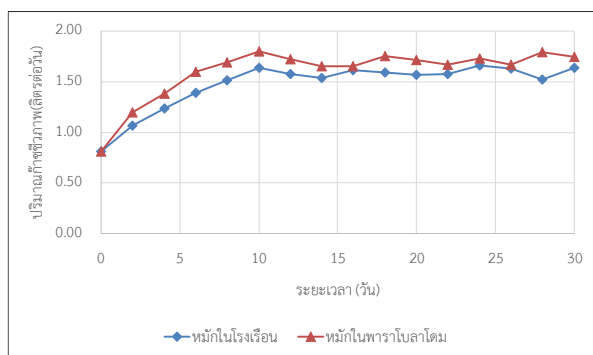
4.2.2 การศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้

ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยทำการทดลองหมักก๊าซชีวภาพในสถานที่แตกต่างกันระหว่างในโรงเรียนกับในพาราโบลาโดม โดยมีระยะเวลาในการหมัก 30 วัน และมีอัตราการป้อนขยะเศษอาหารเท่ากัน คือ วันละ 1 kg ผลการทดลองสามารถแสดงดังรูปที่ 7 โดยในช่วงเริ่มต้นจนถึงวันที่ 8 ระบบมีปริมาณก๊าซที่เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากปริมาณจุลินทรีย์ที่เพิ่มมากขึ้นจนถึงระดับหนึ่งที่เกิดการเสถียร คือหลังจากวันที่ 8 ไปแล้วระบบจะมีแนวโน้มเข้าสู่สภาวะที่ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพค่อนข้างคงที่ โดยค่าปริมาณก๊าซชีวภาพ

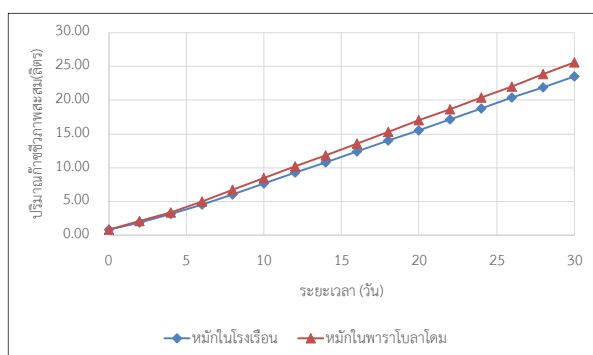
บทความวิจัย (Research Article)

เฉลี่ยต่อวันของการหมักในโรงเรือนอยู่ที่ 1.59 L และค่าปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยต่อวันของการหมักในพาราโบลาโดมอยู่ที่ 1.72 L

ในรูปที่ 8 แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพที่สะสมตลอดการทดลองเป็นระยะเวลา 30 วัน เปรียบเทียบระหว่างทดลองในโรงเรือนกับในพาราโบลาโดม ผลปรากฏว่าปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในโรงเรือนอยู่ที่ 23.57 L และปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในพาราโบลาโดมอยู่ที่ 25.58 L ซึ่งจะเห็นได้ว่าการทดลองในพาราโบลาโดมให้ค่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่สูงกว่าในโรงเรือน ทั้งนี้เนื่องจากผลของอุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยในพาราโบลาโดมมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงกว่าในโรงเรือน ทำให้มีการเร่งการทำปฏิกิริยาของแบคทีเรียกับขยะเศษอาหารและทำให้เกิดก๊าซชีวภาพที่เร็วขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณที่สูงขึ้น โดยในตารางที่ 4 แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของการทดลองนี้



รูปที่ 7 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ในแต่ละวัน



รูปที่ 8 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมตลอดการทดลอง

จากผลการทดลองเปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่ทดลองหมักในโรงเรือนกับในพาราโบลาโดมปรากฏว่าปริมาณก๊าซที่ได้จากพาราโบลาโดมเพิ่มมากขึ้นจากโรงเรือนจากผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยหากคิดเป็นเปอร์เซ็นต์แล้วปรากฏว่าการทดลองในพาราโบลาโดมสามารถทำให้เกิดปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยต่อวันเพิ่มขึ้นมากกว่าทดลองในโรงเรือน คิดเป็น 8.17% และ ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยสะสมตลอดการทดลองเพิ่มขึ้น คิดเป็น 8.52%

ตารางที่ 4 แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยต่อวัน

การทดลองใน	ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยต่อวัน (L)	ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยสะสมตลอดการทดลอง (L)
โรงเรือน	1.59	23.57
พาราโบลาโดม	1.72	25.58
ผลต่าง	0.13	2.01

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลอง 2 การทดลองคือการทดลองหาความสัมพันธ์ของปริมาณก๊าซชีวภาพกับปริมาณขยะเศษอาหารที่ป้อนเข้าระบบในแต่ละวัน โดยมีปริมาณ 0.5, 1, 1.5 และ 2 kg/d และการทดลองศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลของการหมักอยู่ในพาราโบลาโดมกับหมักในโรงเรือน ผลของการทดลองปรากฏว่าเมื่อดำเนินระบบโดยใช้ปริมาณขยะเศษอาหาร 0.5, 1, 1.5 และ 2 kg/d มีปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดเฉลี่ย 1.340, 1.592, 1.801 และ 1.927 L/d ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณขยะที่ป้อนเข้าในแต่ละวัน โดยมีความสัมพันธ์เท่ากับ $y = 0.5326x +$

บทความวิจัย (Research Article)

0.964 และเมื่อดำเนินระบบไปจนครบระยะเวลา 30 วัน ผลปรากฏว่าที่ปริมาณการป้อนขยะเศษอาหาร 0.5, 1, 1.5 และ 2 kg/d สามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดได้ 20.41, 23.57, 26.34 และ 28.33 L ตามลำดับ

สำหรับการทดลองศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลของการหมักอยู่ในพาราโบลาโดมกับหมักในโรงเรือน ผลของการทดลองปรากฏว่าในช่วงเริ่มต้นจนถึงวันที่ 8 ระบบมีปริมาณก๊าซที่เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากปริมาณจุลินทรีย์ที่เพิ่มมากขึ้นจนถึงระดับหนึ่งที่เกิดการเสถียร คือหลังจากวันที่ 8 ไปแล้วระบบจะมีแนวโน้มเข้าสู่สภาวะที่ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพค่อนข้างคงที่ โดยค่าปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยต่อวันของการหมักในโรงเรือนอยู่ที่ 1.59 L และค่าปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยต่อวันของการหมักในพาราโบลาโดมอยู่ที่ 1.72 L และมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในโรงเรือนอยู่ที่ 23.57 L และปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในพาราโบลาโดมอยู่ที่ 25.58 L ซึ่งจะเห็นได้ว่าการทดลองในพาราโบลาโดมให้ค่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่สูงกว่าในโรงเรือน ทั้งนี้เนื่องจากผลของอุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยในพาราโบลาโดมมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงกว่าในโรงเรือน ทำให้มีการเร่งการทำปฏิกิริยาของแบคทีเรียกับขยะเศษอาหารและทำให้เกิดก๊าซชีวภาพที่เร็วขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณที่สูงขึ้นโดยที่การทดลองในพาราโบลาโดมสามารถทำให้เกิดปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยต่อวันเพิ่มขึ้นมากกว่าทดลองในโรงเรือน คิดเป็น 8.17% และ ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยสะสมตลอดการทดลองเพิ่มขึ้น คิดเป็น 8.52%

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการดำเนินการทดลองผู้วิจัยได้พบปัญหาและอุปสรรคในการทดลองเนื่องจากในตอนเริ่มต้นระบบยังไม่มีจุลินทรีย์ที่ใช้หมักขยะเศษอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงต้องใช้เวลามากขึ้นเพื่อจุลินทรีย์ให้มีปริมาณมากพอที่จะสามารถเริ่มต้นระบบได้ ผู้วิจัยจึง

แนะนำให้ใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์ในการดำเนินการเริ่มต้นระบบสำหรับนำไปใช้งานในชุมชน อีกประการหนึ่งคือการนำก๊าซชีวภาพที่ได้จากการหมักไปใช้งาน ควรใช้อุปกรณ์สำหรับอัดก๊าซเข้าถังบรรจุก๊าซก่อนแล้วค่อยนำไปใช้งาน ทั้งนี้เนื่องจากก๊าซที่อยู่ในถังเก็บก๊าซเป็นก๊าซที่มีแรงดันต่ำ และยังไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ ดังนั้นหากใช้อุปกรณ์อัดก๊าซเข้าถังบรรจุก๊าซแล้ว ก็จะเป็นการสะดวกแก่การนำไปใช้งานในครัวเรือนต่อไป

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] วรชมล ลีลาพิทักษ์, "การศึกษาการจัดการระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักไร้อากาศจากขยะมูลฝอยชุมชนแบบเปียกและแห้ง: กรณีศึกษาเทศบาลนครราชสีรา และเทศบาลตำบลสูงเนิน จังหวัดนครราชสีมา," วิทยานิพนธ์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, กรุงเทพฯ, 2563.
- [2] อรวรรณ วัฒนยมนาพร, "การหมักร่วมของขยะเศษอาหารกับกากตะกอนน้ำเสียชุมชนโดยใช้ถังหมักไร้อากาศแบบสองขั้นตอนสำหรับผลิตก๊าซชีวภาพ," วิทยานิพนธ์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2553.
- [3] M. Kim, Y. H. Ahn and R. E. Speece, "Comparative process stability and efficiency of anaerobic digester: mesophilic vs. thermophilic," *Water Research*, vol. 38, pp. 3645-3650, 2002.
- [4] J. H. Ahn and C. F. Forster, "The effect of temperature variations on the performance of mesophilic and thermophilic anaerobic filters treating a simulated papermill wastewater," *Process Biochemistry*, vol. 37, pp. 589-594, 2002.
- [5] G. Schober, J. Schafer, U. Schmid-Staiger and W. Trosch, "One and two-stage digestion of solid organic waste," *Water*

บทความวิจัย (Research Article)

- Research*, vol. 33, no. 3, pp. 854-860, 1999.
- [6] S. Janjai and B. K. Bala, "Solar drying technology," *Food Engineering Reviews*, vol. 4, pp. 16-54, 2012.
- [7] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.), *คู่มือโครงการสนับสนุนการลงทุนติดตั้งใช้งานระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์*, พิมพ์ครั้งที่ 1, นครปฐม: บริษัท เพชรเกษมพรินติ้ง กรู๊ป จำกัด, 2562.
- [8] S. Janjai, P. Intawee, J. Kaewkiewa, C. Sritus and V. Khamvongsa, "A large-scale solar greenhouse dryer using polycarbonate cover: Modeling and testing in a tropical environment of Lao People's Democratic Republic," *Renewable Energy*, vol. 36, pp. 1053-1062, 2011.
- [9] O. Ince, "Performance of a two-phase anaerobic digestion system when treating dairy wastewater," *Water Research*, vol. 32, no. 9, pp. 2707-2713, 1998.
- [10] Y. A. Cengel and A. J. Ghajar, *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*, 5th Edition. McGraw-Hill Higher Education, New York, 2014.
- [11] H. Bouallagui, R. B. Cheikh, L. Marouani and M. Hamdi, "Mesophilic biogas production from fruit and vegetable waste in a tubular digester," *Bioresource Technology*, pp. 1-5, 2002.
- [12] D. Deublein and A. Steinhauser, *Biogas from Waste and Renewable Resources*, Weinheim: Wiley-VCH, 2011.
- [13] M. H. Gerardi, *The Microbiology of Anaerobic Digesters*, Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [14] D. Kondusamy and A. S. Kalamdhad, "Pre-treatment and anaerobic digestion of food," *Journal of Environmental Chemical*, vol. 2, pp. 1821-1830, 2014.
- [15] C. Zheng, H. Su and T. T. Baeyens, "Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production," *Renewable Sustain Energy Review*, vol. 38, pp. 383-392, 2014.
- [16] K. Karim, R. Hoffman, K. K. Thomas and M. H. Al-Dahhan, "Anaerobic digestion of animal waste: Effect of mode of mixing," *Water Research*, vol. 39, no. 15, pp. 3597-3606, 2005.

การออกแบบและศึกษาระบบรดน้ำต้นกระบองเพชรอัตโนมัติพลังงานแสงอาทิตย์

วันดี พัดแก้ว¹, ทรงพล ครูชอินทร์¹, วราภรณ์ วโรส^{1,*} และอามิณห์ หล้าวงศ์¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: warapon.wa@ksu.ac.th

(รับบทความ: 23 มกราคม 2566; แก้ไขบทความ: 14 กุมภาพันธ์ 2566; ตอรับบทความ: 18 กุมภาพันธ์ 2566)

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาและออกแบบระบบรดน้ำต้นกระบองเพชรอัตโนมัติพลังงานแสงอาทิตย์ โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่ออำนวยความสะดวกให้เกษตรกรผู้ปลูกกระบองเพชร และสามารถวัดความชื้นของดินได้ นอกจากนี้ยังสามารถสั่งเปิด-ปิดน้ำผ่านสมาร์ตโฟนแอปพลิเคชัน BLYNK SERVER ได้ และไม่จำเป็นต้องเข้าสวนบ่อยครั้งไม่ว่าจะอยู่ที่ไหนที่มีสัญญาณอินเทอร์เน็ต และยังเป็นการนำเอาไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ผ่านโซล่าเซลล์มาปรับใช้ในการทำโครงการนี้ด้วย การทดลองของตัวระบบจากการออกแบบสอบถามความพึงพอใจของการด้านการรักษาความปลอดภัยของข้อมูลในระบบมีค่าเฉลี่ย 4.22 อยู่ในเกณฑ์ดีมาก ผลการตอบแบบสอบถามด้านคุณภาพของตัวระบบมีค่าเฉลี่ย 4.83 อยู่ในเกณฑ์ดีมากที่สุด ผลของการการทำงานตามฟังก์ชันการทำงานมีค่าเฉลี่ย 4.60 อยู่ในเกณฑ์ดีมากที่สุด ผลการทดสอบพบว่า การทำงานของตัวระบบรดน้ำต้นกระบองเพชรอัตโนมัติพลังงานแสงอาทิตย์มีการแสดงค่าที่วัดออกมาได้อย่างแม่นยำ และสั่งเปิด-ปิดน้ำผ่านแอปพลิเคชัน Blynk ได้อย่างแม่นยำ ทำให้ทำงานตามจุดประสงค์ที่ผู้ทดสอบตั้งไว้ตามเป้าหมาย

คำสำคัญ: โซล่าเซลล์ สมาร์ตโฟนแอปพลิเคชัน ระบบรดน้ำ ต้นกระบองเพชร

การอ้างอิงบทความ: วันดี พัดแก้ว และคณะ, "การศึกษาและออกแบบระบบรดน้ำต้นกระบองเพชรอัตโนมัติพลังงานแสงอาทิตย์," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 1, ฉบับที่ 1, หน้า 23-33, 2566.

Design and Study Cactus Automatic Solar Watering System

Wandee Padkaw¹, Songphon khutain², Warapon Warorot^{3,*}, Amin Lawong⁴

^{1,2,3,4} Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University

* Corresponding Author: warapon.wa@ksu.ac.th

(Received: January 23, 2023; Revised: February 14, 2023; Accepted: February 18, 2023)

Abstract

The study and design of a cactus automatic solar watering system is the focus of this project. The goal is to help cactus growers and measure soil moisture. Furthermore, the water can be turned on and off using the BLYNK Server smartphone app, eliminating the need to visit the garden on a regular basis wherever there is an internet connection. It also uses electricity from solar energy through solar cells to be used in this project. The system experiment from the design of the data security satisfaction inquiry in the system had an average of 4.22 very good. The average quality of the system survey was 4.83, which was the highest. Functionality has a net positive effect of 4.60. The test results showed that the operation of the solar cactus watering system is accurately displayed and that the system can be turned on and off.

Keywords: Solar cells, Smartphone application, Watering system, Cactus

Please cite this article as: W. Padkaw, et al., "Design and Study of Cactus Automatic Solar Watering System," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, KSU*, vol. 1, no. 1, pp. 23-33, 2023.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

กระบองเพชรเป็นพืชอวบน้ำชนิดหนึ่ง ที่นิยมเลี้ยงเป็นไม้ประดับในอาคาร ออฟฟิศหรือในที่โล่งแจ้ง ผู้คนนิยมเลี้ยงเพราะมีหน้าตาน่ารัก ลำต้นเล็กจิ๋ว วิธีเลี้ยงกระบองเพชรก็ไม่ยาก อีกทั้งยังมีดอกหลากสีเพิ่มความสวยงามสบายตาให้อีกด้วย สรรพคุณทางสมุนไพรของกระบองเพชรคือ ช่วยควบคุมการอยากอาหารและดักจับไขมัน ลดการดูดซึมไขมันในร่างกาย ลดคอเลสเตอรอลและระดับไตรกลีเซอไรด์และสารสกัดของกระบองเพชรยังแก้อาหารเมาค้างได้อีกด้วย [1] พร้อมทั้งมีอีกหลายบุคคลเลือกทำอาชีพเกษตรกรการปลูกกระบองเพชรเป็นการหา รายได้เสริม หรือทำเป็นงานประจำซึ่งกระบองเพชรมีหลากหลายสายพันธุ์ราคาเริ่มต้นตั้งแต่หลักสิบบางต้นถึงหลักแสนบาท ก็มีขึ้นอยู่ต้นสีต่างจะราคาสูงขึ้นรวมถึงลวดลายและชนิดพันธุ์ที่ค่อนข้างหายากทำให้ต้นมีราคาสูงมากขึ้นไปอีก เช่นสายพันธุ์ยิมโนเขียวและสายพันธุ์ยิมโนดำ และสามารถเพาะเลี้ยงในสภาพอากาศประเทศไทยได้ ต้นกระบองเพชรสายพันธุ์ยิมโนดำที่ราคาสูงอยู่ในปัจจุบันนี้

การดูแลต้นกระบองเพชรเป็นเรื่องที่สำคัญเพราะต้นกระบองเพชรต้องมีการดูแลรดน้ำเพื่อให้ต้นกระบองเพชรสามารถเจริญเติบโตได้ดี และยังขาดบุคคลที่จะมารดน้ำให้สม่ำเสมอทำให้ต้นกระบองเพชรแห้งขาดน้ำเป็นสาเหตุหลักที่ต้นกระบองเพชรเกิดการเหี่ยวตายหรือถาวรน้ำในปริมาณน้ำมากไปก็ทำให้เกิดรากเน่าตายได้เช่นเดียวกัน ในปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีสังคมไทยกำลังเข้าสู่ยุคของเทคโนโลยีและได้นำเทคโนโลยีมาปรับใช้กับการทำงานหลากหลายเพื่ออำนวยความสะดวกของงาน อีกทั้งในปัจจุบันคนไทยได้ให้ความสำคัญกับเทคโนโลยีใหม่ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่ออำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวัน นอกจากนี้ในปัจจุบัน ผู้คนนิยมความสะดวกสบาย

ผู้จัดทำโครงการจึงเห็นความสำคัญการรดน้ำต้นกระบองเพชรจึงได้สร้างระบบรดน้ำต้นกระบองเพชรพลังงานแสงอาทิตย์ขึ้นมา เพื่ออำนวยความสะดวกให้เกษตรกรผู้ปลูกกระบองเพชรและสามารถวัดความชื้นของดินได้ นอกจากนั้นยังสามารถตั้งเวลารดน้ำผ่านสมาร์ทโฟนแอปพลิเคชัน BLYNK SERVER ได้ และไม่ต้องจำเป็นต้องเข้าสวนบ่อยครั้งไม่ว่าจะอยู่ที่ไหนที่มีสัญญาณอินเทอร์เน็ต และยังเป็นการนำเอาพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีวันหมดมาปรับใช้ในการทำโครงการนี้อีกด้วย

ข้อดีของระบบรดน้ำต้นกระบองเพชรพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถแสดงผลแบบออนไลน์ ผ่านโทรศัพท์ได้และสามารถควบคุมการเปิด-ปิดของน้ำได้ รวมถึงดูค่า อุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณน้ำ การไหลของน้ำ การตั้งเวลาเปิด-ปิดน้ำแบบอัตโนมัติผ่านโปรแกรม APP BLYNK ราคาไม่สูง ซึ่งหาซื้ออุปกรณ์ได้ง่ายตามท้องตลาด

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ

1. เพื่อออกแบบและสร้างชุดควบคุมระบบรดน้ำต้นกระบองเพชรอัตโนมัติพลังงานแสงอาทิตย์
2. เพื่อทดลองใช้งานระบบการรดน้ำของเกษตรกรระบบรดน้ำต้นกระบองเพชร
3. เพื่อหาประสิทธิภาพการทำงานของระบบรดน้ำต้นกระบองเพชรอัตโนมัติพลังงานแสงอาทิตย์

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ต้นแคคตัส

ลักษณะของต้นแคคตัส จะเปิดปากใบเฉพาะกลางคืนปกติแล้วต้นไม้ส่วนใหญ่จะเปิดปากใบตอนกลางวันเพื่อสังเคราะห์แสง โดยดูดอกคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปและปล่อยออกซิเจนออกมาซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการคายน้ำและสูญเสียน้ำไปในปริมาณมาก [2] ดังนั้นเพื่อความอยู่รอดแคคตัสจึงต้องใช้อีกหนึ่งวิธีคือ การเผาผลาญกรด (Crassulacean Acid Metabolism หรือ CAM)

บทความวิจัย (Research Article)

กระบวนการที่ช่วยให้เปิดปากใบได้เฉพาะเวลากลางคืน เพื่อลดการสูญเสียน้ำนั่นเอง ยกเว้นบางฤดู เช่น ในช่วงที่อากาศร้อนมาก ๆ แคลคัสอาจจะปิดปากใบไว้ทั้งกลางวันและกลางคืน หรือเข้าสู่ช่วงระยะพักตัว ที่ทำให้ต้นหยุดการเจริญเติบโต

แคลคัส นับเป็นพืชที่พิเศษมากเพราะมีการลดรูปใบเป็นหนาม แฉกยังมีหลายแบบ เช่น ตรง โค้ง แฉก และเล็กเหมือนเข็ม เป็นขนฟูเหมือนแปรง ยาวเหมือนผม กลม หรือแม้กระทั่งเป็นตะขอ ซึ่งหนามเหล่านี้เป็นวิวัฒนาการที่ช่วยให้อยู่รอดและเติบโตได้ วิธีการดูแลต้นแคลคัสมีวิธีดังต่อไปนี้ [3]

1. การให้น้ำ แคลคัสทนแล้งได้ดี จึงควรให้น้ำประมาณ 2-3 ครั้งต่อสัปดาห์ ไม่ควรรดน้ำมากเกินไป เพราะอาจจะทำให้รากเน่าได้

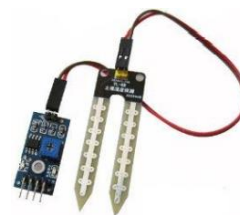
2. มีแสงสว่างที่เพียงพอ แต่ไม่ควรให้โดนแดดจัด เพราะอาจจะทำให้ผิวไหม้และเปลี่ยนสีได้

3. เลือกดินที่ระบายน้ำได้ดี ไม่ควรใช้ดินที่อุ้มน้ำ ในการปลูกแคลคัส เพราะการเก็บกักน้ำไว้ในดินเป็นเวลานานจะทำให้รากเน่าเปื่อยได้

4. อุณหภูมิที่พอเหมาะ อยู่ที่ประมาณ 27-32 องศาเซลเซียส หรือแม้กระทั่งในช่วงหน้าร้อนที่อุณหภูมิสูงถึง 35-40 องศาเซลเซียส ก็ไม่มีปัญหาสำหรับแคลคัสที่ปลูกกัน

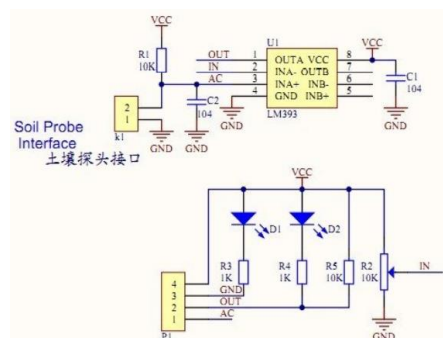
2.2 การวัดค่าความชื้นในดิน

อุปกรณ์สำหรับการวัดค่าความชื้นในดินเรียกว่า Soil moisture sensor เซ็นเซอร์วัดความชื้นในดิน [4] (Soil Moisture Sensor) ดังรูปที่ 1 ใช้วัดความชื้นในดิน หรือใช้เป็น เซ็นเซอร์น้ำ สามารถต่อใช้งานกับไมโครคอนโทรลเลอร์โดยใช้อนาล็อกอินพุต อ่านค่าความชื้น หรือเลือกใช้สัญญาณดิจิตอลที่ส่งมาจากโมดูล สามารถปรับความไวได้ด้วยการปรับ Trimpot



รูปที่ 1 Soil moisture [4]

หลักการทำงานของการทำงานจะต้องเสียบแผ่น PCB สำหรับวัดลงดิน เพื่อให้วงจรแบ่งแรงดันทำงานได้ครบวงจร จากนั้นจึงใช้วงจรเปรียบเทียบแรงดันโดยใช้ไอซีออปแอมป์เบอร์ LM393 เพื่อวัดแรงดัน เปรียบเทียบกันระหว่างแรงดันที่วัดได้จากความชื้นในดิน [5] กับแรงดันที่วัดได้จากวงจรแบ่ง แรงดันปรับค่าโดยใช้ Trimpot หากแรงดันที่วัดได้จากความชื้นของดินมีมากกว่าก็จะทำให้วงจรปล่อยลอจิก 1 ไปที่ขา D0 แต่หากความชื้นในดินมีน้อย ลอจิก 0 จะถูกปล่อยไปที่ขา D0ขา A0 เป็น ขาที่ต่อโดยตรงกับวงจรที่ใช้วงความชื้นในดิน ซึ่งให้ค่าแรงดันออกมาตั้งแต่ 0 – 5 V (ในทางอุดมคติ) โดยหากความชื้นในดินมีมาก แรงดันที่ปล่อยออกไปก็จะน้อยตามไปด้วย ในลักษณะของการ แปรผกผันกลับ



รูปที่ 2 โครงสร้างภายในและหลักการทำงานของเครื่องวัดความชื้นในดิน [5]

2.3 การเก็บรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล

คณะผู้จัดทำออกแบบแบบประเมินคุณภาพของระบบรดน้ำกระบองเพชรอัตโนมัติพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อจัดทำระบบรดน้ำกระบองเพชร

บทความวิจัย (Research Article)

จากนั้นนำแบบประเมินที่ได้ให้ประชาชนผู้ที่อยู่อาศัย รวมถึงเจ้าของและผู้ใช้งานประเมินคุณภาพและประสิทธิภาพของระบบรดน้ำกระบองเพชรพลังงานแสงอาทิตย์ จำนวน 10 ท่าน คณะผู้จัดทำเก็บรวบรวมข้อมูล และนำข้อมูลมาวิเคราะห์การใช้งาน

2.3.1 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ข้อมูลนำผลจากการประเมินคุณภาพที่ประชาชนผู้ที่อยู่อาศัยและเจ้าของสวนแต่ละท่านได้ให้ข้อมูล มาทำการวิเคราะห์ โดยกำหนดคุณภาพ ดังนี้

5 หมายถึง ดีมาก, 4 หมายถึง ดี, 3 หมายถึง ปานกลาง, 2 หมายถึง พอใช้ และ 1 หมายถึง ปรับปรุง

ซึ่งสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติจะใช้ค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) (S.D) โดยมีสูตรและมีความหมายดังนี้

การหาค่าเฉลี่ยของระดับคะแนนความคิดเห็น โดยใช้สูตร

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{N} \quad (1)$$

เมื่อ x = ระดับคะแนนความคิดเห็นในแต่ละหัวข้อ

$\bar{x}$ = ค่าเฉลี่ยระดับคะแนนความคิดเห็น

N = จำนวนเจ้าของสวน

การวัดผลกระจายข้อมูลโดยทั่วไปใช้สูตรเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยใช้สูตร

$$S.D = \frac{\sqrt{\sum x^2 - (\sum X^2)}}{N(N-1)} \quad (2)$$

เมื่อ S.D. = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระดับคะแนนความคิดเห็น

x = ระดับคะแนนความคิดเห็นในแต่ละข้อ

N = จำนวนเจ้าของสวน

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบรดน้ำต้นกระบองเพชรอัตโนมัติ

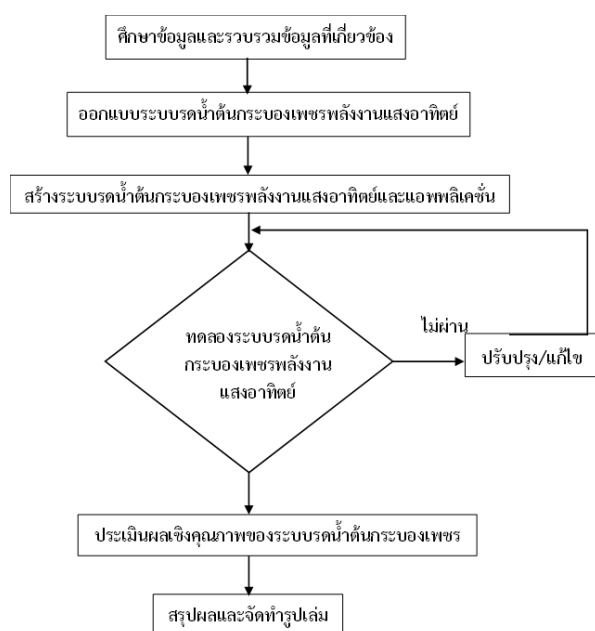
ชื่องานวิจัย	วัตถุประสงค์	วิธีการวิจัย	ผลงานงานวิจัย	เอกสารอ้างอิง
เครื่องรดน้ำต้นไม้อัตโนมัติ	เพื่อตอบสนองความต้องการของส่วนบุคคลที่ต้องการความสะดวกในชีวิตประจำวัน	รับค่าความชื้นและ อุณหภูมิผ่านตัวเซ็นเซอร์เข้ามาประมวลผลโดยตัวไมโครคอนโทรลเลอร์	พบว่า เครื่องรดน้ำต้นไม้อัตโนมัติสามารถทำงานได้จริงตามที่ออกแบบไว้ทุกประการ	สุปรียา มะโนมัน และไพสิฐ มูลเพิ่ม [6]
ระบบรดน้ำแปลงผักอัตโนมัติ	เพื่อหาประสิทธิภาพการทำงานของระบบรดน้ำแปลงผักอัตโนมัติ	ผ่านระบบเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินและส่ง สัญญาณข้อมูลกลับไปยังตัวรับแบบไร้สายโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมการทำงาน	ไม่สามารถนำไปใช้งานกับแปลงเกษตรที่มีระยะห่างเกิน 30 เมตร ทำให้ไม่สามารถรับส่งข้อมูลการสื่อสาร	คุณตษ์ แซ่ม้า และสุรัชย์ แซ่จ้าว [7]
ระบบรดน้ำอัตโนมัติผ่านเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย	เพื่อพัฒนาระบบรดน้ำอัตโนมัติผ่านเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย	ต้องการวัดระยะของงานระบบ รดน้ำอัตโนมัติแบบมีสิ่งกีดขวางโดยการส่งเปิด-ปิดวาล์วน้ำ	ผลการวัดระยะของงานระบบ รดน้ำอัตโนมัติแบบมีสิ่งกีดขวางโดยการส่งเปิด-ปิดวาล์วน้ำระยะ 20-120 เมตร ระบบสามารถทำงานได้	นราธิป ทองปาน และธนาพัฒน์ เทียงภักดิ์ [8]

บทความวิจัย (Research Article)

ชื่องานวิจัย	วัตถุประสงค์	วิธีการวิจัย	ผลงานงานวิจัย	เอกสารอ้างอิง
ระบบรดน้ำกระเทียมอัตโนมัติด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และควบคุมผ่านสมาร์ตโฟน	ศึกษาประสิทธิภาพการควบคุมเวลาการทำงานของระบบ	การพัฒนาระบบให้น้ำกระเทียมอัตโนมัติด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ได้น้ำระบบเซลล์แสงอาทิตย์มาผลิตกำลังไฟฟ้า เพื่อสำรองพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลด และวงจรควบคุมระบบให้น้ำกระเทียมอัตโนมัติ	การทำงานของระบบรดน้ำกระเทียมอัตโนมัติด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และควบคุมผ่านสมาร์ตโฟน ได้มีการทำงานผ่านบอร์ดควบคุมที่มีการเขียน	อาทิตย์ยา แน่น แทน และเอก ราช พรนราหัสดีกุล [9]

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

การออกแบบและการสร้างระบบรดน้ำต้นกระบองเพชรอัตโนมัติพลังงานแสงอาทิตย์ โดยมีวิธีการและขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 ศึกษาข้อมูลและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

ผู้ดำเนินโครงการได้ลงพื้นที่ศึกษาข้อมูลของกลุ่มเกษตรกรที่ปลูกต้นกระบองเพชรในพื้นที่ หมู่ที่ 6 บ้านชาด นาโก ตำบลนาโก อำเภอกุฉินารายณ์ จังหวัดกาฬสินธุ์ พื้นที่ศึกษา ซึ่งมีการเพาะเลี้ยงต้นกระบองเพชรหลากหลายสายพันธุ์ และมีโรงเรือนขนาดไม่ใหญ่มาก และมีวางขายตามช่องทางออนไลน์

และส่งให้ลูกค้าที่สั่ง ได้แก่ ลูกค้าทั่วไป และกลุ่มนักเรียนนักศึกษา หรือผู้ที่สนใจเริ่มต้นปลูกกระบองเพชร ในจังหวัดกาฬสินธุ์และต่างจังหวัด

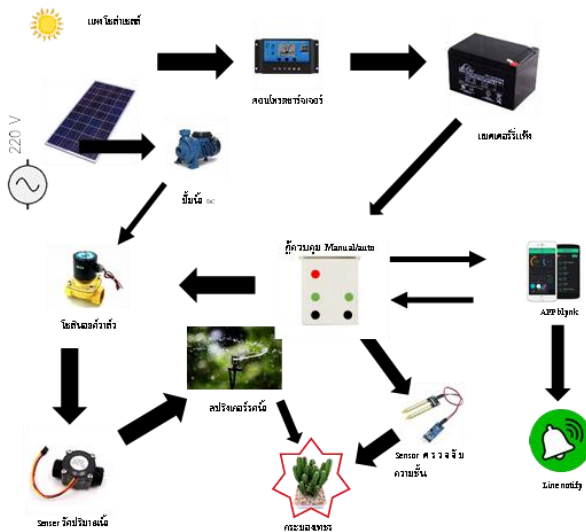
3.2 ออกแบบระบบรดน้ำกระบองเพชรอัตโนมัติพลังงานแสงอาทิตย์

ในการการออกแบบและสร้างระบบรดน้ำกระบองเพชรอัตโนมัติพลังงานแสงอาทิตย์ ผู้ดำเนินโครงการได้ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ถึงความเป็นไปได้ในการสร้างเครื่องมือ โดยการออกแบบและสร้างระบบรดน้ำกระบองเพชรพลังงานแสงอาทิตย์ มีจำนวน 3 แบบประกอบด้วย ชุดกล่องควบคุม Manual/Auto ชุดพลังงานแสงอาทิตย์ และแอปพลิเคชัน Blynk ในการออกแบบระบบผู้ดำเนินโครงการได้ทำการศึกษาปัญหาและความต้องการจากกลุ่มผู้ปลูกกระบองเพชรและค้นคว้ารูปแบบและหลักการทำงานของระบบรดน้ำจากงานวิจัยต่างๆ โดยมีส่วนประกอบต่างๆของระบบรดน้ำกระบองเพชรอัตโนมัติพลังงานแสงอาทิตย์มีดังรูปที่ 4

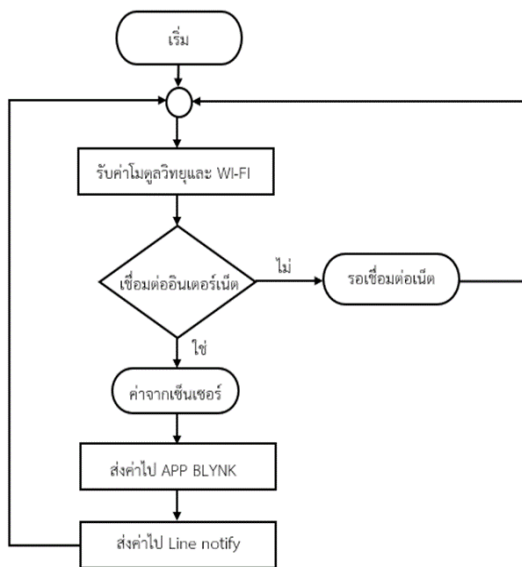
3.3 การทำงานระบบรดน้ำต้นกระบองเพชรอัตโนมัติพลังงานแสงอาทิตย์

การทำงานของระบบรดน้ำกระบองเพชรอัตโนมัติพลังงานแสงอาทิตย์จะมีขั้นตอนการทำงานตั้งแต่เริ่มการทำงานส่งไปรับค่าโมดูลวิทยุ WI-FI และเชื่อมต่อสัญญาณอินเทอร์เน็ตผ่านค่าเซ็นเซอร์วัดความชื้นของดินและส่งค่าที่ได้ไปยัง APP BLYNK และแจ้งเตือนผ่าน Line notify ดังภาพแสดงในรูปที่ 5

บทความวิจัย (Research Article)

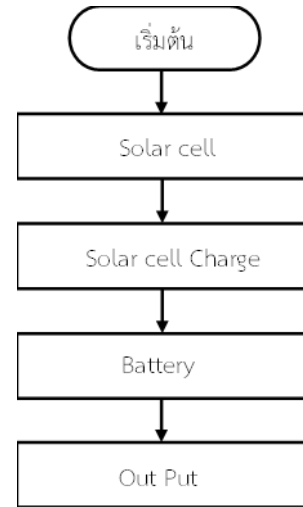


รูปที่ 4 ระบบรดน้ำกระบองเพชรอัตโนมัติ



รูปที่ 5 ไตรอะแกรมการทำงานของระบบรดน้ำต้นกระบองเพชรอัตโนมัติพลังงานแสงอาทิตย์

การทำงานของระบบโซล่าเซลล์จะเริ่มตั้งแต่รับแสงแดดมากระทบต่อแผงโซล่าเซลล์ทำให้เกิดพลังงานความร้อนจะส่งผ่าน Solar cell Charge เพื่อทำหน้าที่ในการชาร์จแล้วส่งพลังงานที่ได้ไปเก็บประจุไว้ในแบตเตอรี่และจะทำซ้ำๆ เวียนไป ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ขั้นตอนการทำงานของระบบ โซล่าเซลล์

3.4 ทดลองระบบรดน้ำต้นกระบองเพชรอัตโนมัติพลังงานแสงอาทิตย์

การทดลองการเลือกใช้หัวฉีดสปริงเกอร์แต่ละชนิดซึ่งจะประกอบไปด้วยแบบที่ 1 คือแบบหัวพ่นหมอก และแบบที่ 2 คือ มินิสปริงเกอร์แบบใบ B น้ำพุ่งสูง ซึ่งมีการปล่อยน้ำเป็นเวลา 2 นาที 5 นาทีและใช้เซ็นเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำอยู่ที่เท่าไรผลการทดลองโดยมีการทดลอง 2 วัน

การทดลองการเลือกใช้หัวฉีดสปริงเกอร์แต่ละชนิดซึ่งจะประกอบไปด้วยแบบที่ 1 คือแบบหัวพ่นหมอก และแบบที่ 2 คือ มินิสปริงเกอร์แบบใบ B น้ำพุ่งสูง ซึ่งมีการปล่อยน้ำเป็นเวลา 2 นาที 5 นาทีวัดค่าความชื้นของดินโดยใช้เซ็นเซอร์วัดความชื้นของดินผลการทดลองโดยมีการทดลอง 2 วัน

4. ผลการศึกษา

4.1 การทดลองระบบรดน้ำต้นกระบองเพชรอัตโนมัติพลังงานแสงอาทิตย์

การทดลองการเลือกใช้หัวฉีดสปริงเกอร์แต่ละชนิดซึ่งจะประกอบไปด้วยแบบที่ 1 คือแบบหัวพ่นหมอก และแบบที่ 2 คือ มินิสปริงเกอร์แบบใบ B น้ำพุ่งสูง ซึ่งมีการปล่อยน้ำเป็นเวลา 2 นาที 5 นาทีและใช้เซ็นเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำอยู่ที่เท่าไรผลการทดลองโดยมีการทดลอง 2 วัน

บทความวิจัย (Research Article)

การทดลองโดยมีการทดลอง 3 ครั้งทำการทดสอบในระหว่างวันที่ 9-10 กรกฎาคม 2565 ได้จัดทำผลการทดลองในช่วงเวลาแสดงดังในตารางที่ 2

การทดลองการเลือกใช้หัวฉีดสปริงเกอร์แต่ละชนิดซึ่งจะประกอบไปด้วยแบบที่ 1 คือแบบหัวพ่นหมอก และแบบที่ 2 คือ มินิสปริงเกอร์แบบใบ B น้ำพุ่งสูง ซึ่งมีการปล่อยน้ำเป็นเวลา 2 นาที 5 นาทีวัดค่าความชื้นของดินโดยใช้เซ็นเซอร์วัดความชื้นของดินผลการทดลองโดยมีการทดลอง 2 วันทำการทดสอบในระหว่างวันที่ 9-10 กรกฎาคม 2565 ได้จัดทำผลการทดลองในช่วงเวลาแสดงดังในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ผลการทดลองวัดปริมาณน้ำของระบบรดน้ำต้นกระบองเพชรอัตโนมัติ

วัน/เดือน/ปี	เวลา (นาฬิกา)	แบบ	ลักษณะหัวฉีดสปริงเกอร์	ระยะเวลา (นาที)	ปริมาณน้ำ (ลิตร)
09/07/65	07.00	แบบที่ 1	แบบหัวพ่นหมอก	2 นาที	4
	19.00			5 นาที	20
10/07/65	07.00	แบบที่ 2	แบบมินิสปริงเกอร์ใบ B	2 นาที	8
	19.00			5 นาที	40

ตารางที่ 3 ผลการทดลองวัดค่าความชื้นดินของระบบรดน้ำต้นกระบองเพชรอัตโนมัติ

วัน/เดือน/ปี	เวลา (นาฬิกา)	แบบ	ลักษณะหัวฉีดสปริงเกอร์	ระยะเวลา (นาที)	ความชื้นดิน (%)	
					ก่อน	หลัง
09/07/65	07.00	แบบที่ 1	แบบหัวพ่นหมอก	2 นาที	39	52
	19.00			5 นาที	38	70
10/07/65	07.00	แบบที่ 2	แบบมินิสปริงเกอร์ใบ B	2 นาที	38	56
	19.00			5 นาที	65	80

การทดลองการเลือกใช้หัวฉีดสปริงเกอร์แต่ละชนิดซึ่งจะประกอบไปด้วยแบบที่ 1 คือแบบหัวพ่นหมอก แบบที่ 2 คือมินิสปริงเกอร์แบบใบ B น้ำพุ่งสูง ซึ่งมีการปล่อยน้ำเป็นเวลา 2 นาที 5 นาทีและทำการ

วัดค่าอุณหภูมิภายในโรงเรือนโดยใช้ DHT 11 ในการวัดค่าอุณหภูมิผลการทดลองโดยมีการทดลอง 2 วันทำการทดสอบในระหว่างวันที่ 9-10 กรกฎาคม 2565 ได้จัดทำผลการทดลองในช่วงเวลาแสดงดังในตารางที่ 4

การทดลองการเลือกใช้หัวฉีดสปริงเกอร์แต่ละชนิดซึ่งจะประกอบไปด้วยแบบที่ 1 คือหัวพ่นหมอก 1 ทางและแบบที่ 2 คือมินิสปริงเกอร์แบบใบ B น้ำพุ่งสูง ซึ่งมีการปล่อยน้ำเป็นเวลา 2 นาที 5 นาทีและทำการสรุปผลค่าเฉลี่ยโดยมีการทดลอง 3 ครั้งทำการทดสอบในระหว่างวันที่ 9-10 กรกฎาคม 2565 ได้จัดทำผลการทดลองในช่วงเวลาแล้วที่ผ่านมาแสดงดังในตารางที่ 5

ตารางที่ 4 ผลการทดลองวัดอุณหภูมิภายในโรงเรือน

วัน/เดือน/ปี	เวลา (นาฬิกา)	แบบ	ลักษณะหัวฉีดสปริงเกอร์	ระยะเวลา (นาที)	อุณหภูมิภายในโรงเรือน (°C)	
					ก่อน	หลัง
09/07/65	07.00	แบบที่ 1	แบบหัวพ่นหมอก	2 นาที	28	27
	19.00			5 นาที	28	27
10/07/65	07.00	แบบที่ 2	แบบมินิสปริงเกอร์ใบ B	2 นาที	29	28
	19.00			5 นาที	28	27

ตารางที่ 5 สรุปผลการทดลองค่าเฉลี่ยของระบบรดน้ำต้นกระบองเพชรอัตโนมัติพลังงานแสงอาทิตย์

วัน/เดือน/ปี	เวลา (นาฬิกา)	แบบ	ลักษณะหัวฉีดสปริงเกอร์	ระยะเวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ย		
					ปริมาณน้ำ (ลิตร)	ความชื้น (%)	อุณหภูมิ (°C)
09/07/65	07.00	แบบที่ 1	แบบหัวพ่นหมอก	2 นาที	4	45	27
	19.00			5 นาที	20	54	27
10/07/65	07.00	แบบที่ 2	แบบมินิสปริงเกอร์ใบ B	2 นาที	8	47	27
	19.00			5 นาที	40	72	27

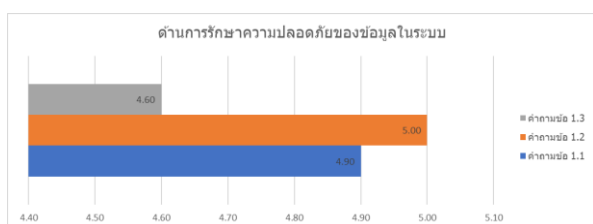
บทความวิจัย (Research Article)

4.4 ประเมินผลเชิงคุณภาพของระบบรดน้ำ กระบอกเพชรอัตโนมัติพลังงานแสงอาทิตย์

ประชาชนและผู้ปลูกกระบอกเพชร ได้แก่ เกษตรกร ผู้ปลูกกระบอกเพชร บ้านชาดนาโก ต.นาโก อําเภอกุฉินารายณ์ จังหวัดกาฬสินธุ์ จำนวน 10 คน ด้วยวิธีเลือกแบบเจาะจง เฉพาะกลุ่มเกษตรกรที่ปลูกกระบอกเพชร โดยใช้การวิจัย คือ ค่าเฉลี่ย และ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานโดยกำหนดเกณฑ์ในการแปลความหมายค่าเฉลี่ยประเมินความพึงพอใจของผู้ทดลองใช้ระบบรดน้ำกระบอกเพชรพลังงานแสงอาทิตย์ในการทำโครงการ การวิเคราะห์ข้อมูลจากแบบสอบถามโดยการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยคำตอบ เพื่อหาจุดด้อยของโครงการและนำไปปรับปรุงในข้อที่เป็นจุดด้อย ดังแสดงในตารางที่ 6-8 และรูปที่ 7-9 กำหนดในเกณฑ์ดังนี้

ตารางที่ 6 ผลการด้านการรักษาความปลอดภัยของข้อมูลในระบบ

รายการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบรดน้ำกระบอกเพชร	ระดับความพึงพอใจ						เกณฑ์
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	
ด้านคุณภาพของตัวระบบ							
1.1 การกระจายตัวของน้ำที่รดต้นกระบอกเพชร	0	0	3	6	1	3.80	มาก
1.2 รดน้ำแล้วดินไม่กระเด็นออกจากกระถาง	0	0	3	7	0	3.70	มาก
1.3 สภาพของดินมีความชุ่มชื้นต่อต้นกระบอกเพชร	0	0	1	0	9	4.80	มากที่สุด
1.4 ความพอใจโดยรวมต่อการใช้ระบบรดน้ำต้นกระบอกเพชร	0	0	0	2	8	4.60	มากที่สุด
เฉลี่ย						4.22	มาก

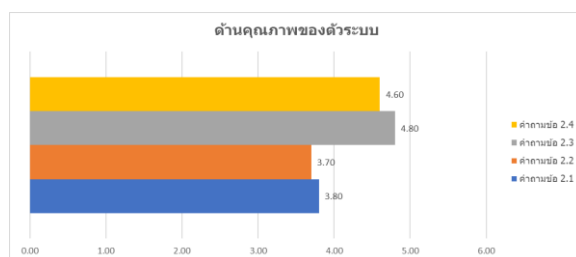


รูปที่ 7 แสดงผลของข้อมูลจากแบบสอบถามด้านการรักษาความปลอดภัยของข้อมูล

สรุป ผลของการด้านคุณภาพของตัวระบบของข้อมูลในระบบมีค่าเฉลี่ย 4.22 อยู่ในเกณฑ์ดีมาก แต่จะมีข้อที่ 1.2 รดน้ำแล้วดินไม่กระเด็นออกจากกระถางมีการแสดงผลของข้อมูลจะมีคะแนนอยู่ที่ 3.70 ซึ่งผู้จัดทำจะนำไปแก้ไข ปรับปรุง

ตารางที่ 7 ผลการด้านคุณภาพของตัวระบบของข้อมูลในระบบ

รายการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบรดน้ำกระบอกเพชร	ระดับความพึงพอใจ						เกณฑ์
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	
ด้านการรักษาความปลอดภัยของข้อมูลในระบบ							
2.1 มีความปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน	0	0	0	1	9	4.90	มากที่สุด
2.2 การจัดสรรรหัส TOKEN	0	0	0	0	10	5.00	มากที่สุด
2.3 การกำหนดรหัสผู้ใช้ และรหัสผ่านในการตรวจสอบผู้เข้าใช้ระบบ	0	0	2	0	8	4.60	มากที่สุด
เฉลี่ย						4.83	มากที่สุด



รูปที่ 8 แสดงผลของข้อมูลจากแบบสอบถามด้านด้านคุณภาพของตัวระบบ

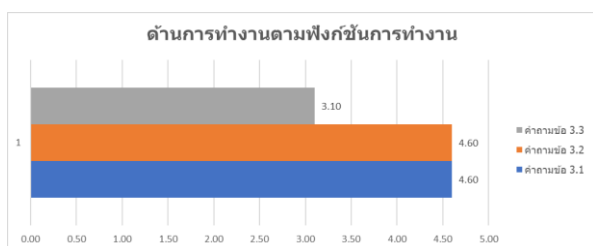
สรุป ผลของการด้านคุณภาพของตัวระบบมีค่าเฉลี่ย 4.83 อยู่ในเกณฑ์ดีมากที่สุด แต่จะมีข้อที่ 2.3 การกำหนดรหัสผู้ใช้ และรหัสผ่านในการตรวจสอบผู้เข้าใช้ระบบ แสดงผลของข้อมูลจะมีคะแนนอยู่ที่ 4.60 ซึ่งผู้จัดทำจะนำไปแก้ไข ปรับปรุง

บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 8 ผลการด้านการทำงานตามฟังก์ชันการทำงาน

รายการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบรดน้ำกระบองเพชร	ระดับความพึงพอใจ						
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	เกณฑ์
ด้านการทำงานตามฟังก์ชันการทำงาน							
3.1 การใช้คำสั่งต่างๆของเมนูมีความสะดวก	0	0	1	2	7	4.60	มากที่สุด
3.2 โปรแกรมที่สร้างมีความครอบคลุมกับการใช้งานจริง	0	0	2	0	8	4.60	มากที่สุด
3.3 ความเร็วในการทำงานของโปรแกรม APP BLYNK	0	3	5	0	2	3.10	ปานกลาง
เฉลี่ย						4.37	มาก

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยตั้งแต่ 4.51- 5.00 มากที่สุด , 3.51 – 4.50 มาก, 2.51 – 3.50 ปานกลาง, 1.51 – 2.50 ระดับน้อย, น้อยกว่า 1.0 ควรปรับปรุงอย่างยิ่ง



รูปที่ 9 แสดงผลของข้อมูลจากแบบสอบถามด้านการทำงานตามฟังก์ชันการทำงาน

สรุป ผลของการการทำงานตามฟังก์ชันการทำงานมีค่าเฉลี่ย 4.60 อยู่ในเกณฑ์ดีมากที่สุด แต่จะมีข้อที่ 3.3 ความเร็วในการทำงานของโปรแกรม APP BLYNK มีการ แสดงผลของข้อมูลจะมีคะแนนอยู่ที่ 3.10 ซึ่งผู้จัดทำจะนำไปแก้ไขปรับปรุง

5 สรุปผลการทดลอง

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการทดลองวัดปริมาณน้ำของระบบรดน้ำต้นกระบองเพชร, ค่าความชื้นดินของระบบรดน้ำต้นกระบองเพชรโดยใช้เซ็นเซอร์วัดความชื้นของดิน และค่าอุณหภูมิภายในโรงเรือน การทดลองนี้ได้เลือกใช้หัวฉีดสปริงเกอร์แต่

ละชนิดซึ่งจะประกอบไปด้วยแบบที่ 1 คือแบบหัวพ่นหมอก และแบบที่ 2 แบบมินิสปริงเกอร์ใบ B โดยผลการทดลองพบว่าแบบที่1หัวพ่นหมอกระยะเวลาในการรดน้ำ 2 และ 5 นาทีโดยมีปริมาณน้ำคือ 4 และ 20 ลิตร ค่าความชื้น 52 และ 70 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิ 27 และ 27 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ผลการทดลองในแบบที่ 2 มินิสปริงเกอร์ใบ B ระยะเวลาในการรดน้ำ 2 และ 5 นาที โดยมีปริมาณน้ำคือ 8 และ 40 ลิตร ค่าความชื้น 56 และ 80 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิ 28 และ 27 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

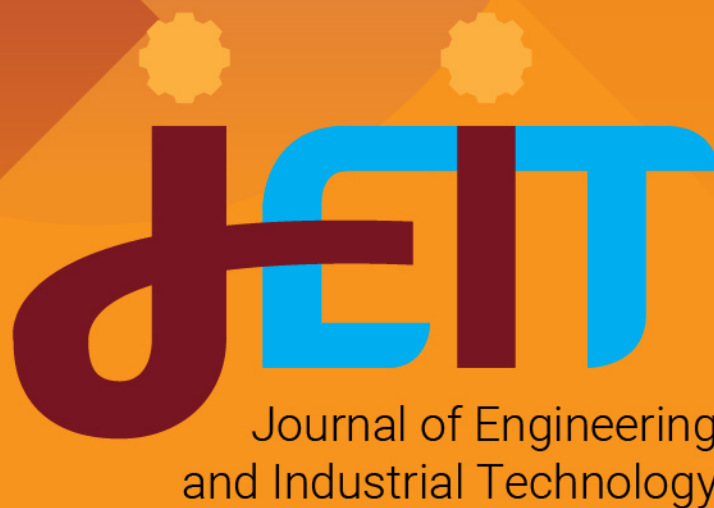
ผลการสอบถามด้านการรักษาความปลอดภัยของข้อมูลในระบบพบว่ามีค่าเฉลี่ย 4.22 อยู่ในเกณฑ์ดีมาก แต่จะมีข้อที่ 2.2 รดน้ำแล้วดินไม่กระเด็นออกจากระถางมีการแสดงผลของข้อมูลจะมีคะแนนอยู่ที่ 3.70 ผลการสอบถามด้านคุณภาพของตัวระบบมีค่าเฉลี่ย 4.83 อยู่ในเกณฑ์ดีมากที่สุด แต่จะมีข้อที่ 1.3 การกำหนดรหัสผู้ใช้ และรหัสผ่านในการตรวจสอบผู้เข้าใช้ระบบ แสดงผลของข้อมูลจะมีคะแนนอยู่ที่ 4.60 และผลของการการทำงานตามฟังก์ชันการทำงานมีค่าเฉลี่ย 4.60 อยู่ในเกณฑ์ดีมากที่สุด แต่จะมีข้อที่ 3.3 ความเร็วในการทำงานของโปรแกรม APP BLYNK มีการ แสดงผลของข้อมูลจะมีคะแนนอยู่ที่ 3.10

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] รัชฎาพร อุ่นศิริไย, "ฤทธิ์ทางชีวภาพ ชีวปริมาณออกฤทธิ์ และการเข้าถึงชีวภาพของสารสกัดกระบองเพชร," วิทยานิพนธ์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2555.
- [2] อติศร กระแสชัย, "การคัดเลือกพันธุ์แคคตัสสำหรับการปลูกเลี้ยงบนที่สูง," มุลนิธิโครงการหลวง, 2550.
- [3] ภาพล ศุภนันทนานนท์, *รวมพันธุ์ใหม่แคคตัสและไม้อวบน้ำ*, สำนักพิมพ์บ้านและสวน, 2562.

บทความวิจัย (Research Article)

- [4] ภัคพงษ์ อุบลเลิศ และ โชคชัย ลิมประเสริฐ, "เครื่องวัดความชื้นในดิน," ปรินิพนธ์, มหาวิทยาลัยสยาม, 2561.
- [5] ภาณุภูมิ พันธุ์จันทร์, "การพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดินด้วยวิธีเก็บประจุไฟฟ้า แบบหลายระดับ," ปรินิพนธ์, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 2565.
- [6] สุปรียา มะโนมัน และ ไพสิฐ มูลเพิ่ม, "เครื่องรดน้ำต้นไม้อัตโนมัติ," ปรินิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2553.
- [7] คณุตม์ แซ่ม้า และ สุรัชย์ แซ่จำว, "ระบบรดน้ำแปลงผักอัตโนมัติ," ปรินิพนธ์อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ, 2561.
- [8] นราธิป ทองปาน และ ธนาพัฒน์ เทียงภักดิ์, "ระบบรดน้ำอัตโนมัติผ่านเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย," วารสารวิชาการการจัดการเทคโนโลยีสารสนเทศและนวัตกรรม, คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม, ปีที่ 3, ฉบับที่ 1, หน้า 35-43, 2559.
- [9] อาทิตยา แน่นแน่น, เอกกราช พรนราหัสดีกุล, ณัฐกิตติ์ จินา และ สัญญา พันธุ์แพง, "ระบบรดน้ำกระเทียมอัตโนมัติด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และควบคุมผ่านสมาร์ทโฟน," ใน เอกสารการประชุมวิชาการระดับชาติวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ครั้งที่ 1, หน้า 1-8, 2564.
- [10] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, "การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์," [ออนไลน์]. Available: https://webkc.dede.go.th/testmax/sites/default/files/คู่มือการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์_BLN_0.pdf. [เข้าถึงเมื่อ: 11 กุมภาพันธ์ 2565].
- [11] สุวิทย์ กิระวิทยา และคณะ, การใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์และเซนเซอร์ในการสร้างนวัตกรรม, บริษัท ไทยบริดจสโตน จำกัด, 2562.
- [12] กฤษฎา แก้วผุดผ่อง, โสมมรัตน์ พิบูลย์มณี และ ปิยวัฒน์ ชนวนาร, "การพัฒนาระบบตรวจวัดอุณหภูมิห้องเซิร์ฟเวอร์ด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตเพื่อสรรพสิ่ง," ใน การประชุมวิชาการระดับชาติ PULINET ครั้งที่ 10, มหาวิทยาลัยทักษิณ, 2563.
- [13] บุญฤทธิ์ ภูพิพัฒน์ และ มงคลธรรม สุดใจ, "อุปกรณ์แจ้งเตือนความผิดปกติของเครื่องจักรผ่านแอปพลิเคชันไลน์ V.2," วิทยาลัยเทคนิคจันทบุรี, 2563.
- [14] เดชฤทธิ์ มณีธรรม, คัมภีร์การใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino, บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน), 2560.



วารสารวิศวกรรม และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

Journal of Engineering and Industrial Technology,
Kalasin University

กองบรรณาธิการวารสาร
"วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์"
"Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University"

คณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
62/1 ถนนเกษตรสมบูรณ์ ต.กาฬสินธุ์ อ.เมือง จ.กาฬสินธุ์ 46000
โทร: 088-574-2199 Email: jeit@ksu.ac.th