ระบบตรวจวัดและควบคุมอุณหภูมิภายในตู้นึ่งฆ่าเชื้อก้อนวัสดุเพาะเห็ดอัตโนมัติด้วยการสื่อสารบลูทูธ

Automatic Temperature Monitoring and Control System for Mushrooms Substrate Pasteurization by Bluetooth Communication

พรพิมล ฉายแสง[1] ธัญวัฒน์ ลิมปิติ[2] และ ประพัน ลี้กุล[1*]

Pornpimon Chaisaeng[1] Thunyawat Limpiti[2] and Prapan Leekul[1 *]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

[2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

[1]Department of Electrical Engineering, Faculty of Industrial Technology, Rambhai Barni Rajabhat University

[2]Department of Electrical Engineering, School of Engineering and Technology, Walailak University

*Email: prapan.l@rbru.ac.th,

Received: February 28, 2021; Revised: April 28, 2021; Accepted: May 05, 2021

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการตรวจวัดและควบคุมอุณหภูมิภายในตู้นึ่งฆ่าเชื้อก้อนวัสดุเพาะเห็ดอัตโนมัติด้วยการสื่อสารบลูทูธ ระบบแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนตรวจวัดอุณหภูมิและส่วนควบคุมวาล์วแก๊ส ส่วนตรวจวัดทำหน้าที่ตรวจสอบอุณหภูมิแสดงผล และส่งข้อมูลออกอากาศ ส่วนควบคุมทำหน้าที่รับข้อมูลอุณหภูมิผ่านอากาศ วิเคราะห์ผลและควบคุมมอเตอร์สเต็ปเปอร์ ระบบใช้การตรวจวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิล ทำงานร่วมกับโมดูลแปลงสัญญาณแอนะล็อคเป็นดิจิทัล 12 บิต การตรวจวัดอุณหภูมิภายในตู้นึ่งทำซ้ำทั้งหมด 10 ครั้ง และวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ย แสดงผลอุณหภูมิบนหน้าจอโอแอลอีดีพร้อมส่งข้อมูลผ่านโมดูลบลูทูธไปยังส่วนควบคุม ส่วนควบคุมรับข้อมูลอุณหภูมิผ่านโมดูลบลูทูธสื่อสารและประมวลผลด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อาดุยโนนาโน ข้อมูลการตัดสินใจในรูปแบบของสัญญาณควบคุมถูกส่งไปยังบอร์ดขับมอเตอร์ เพื่อควบคุมมอเตอร์สเต็ปเปอร์ในการหมุนวาล์วแก๊สในช่วง –100 ถึง +10 องศา ระบบได้รับการทดสอบทั้งหมด 3 ครั้ง แบ่งออกเป็นการตรวจสอบและปรับวาล์วแก๊สทุกๆ 2 นาที 4 นาทีและ 8 นาที ตามลำดับ ตลอดระยะเวลา 4 ชั่วโมง ช่วงเวลาที่เหมาะสม คือ การตรวจสอบทุกๆ 4 นาที เนื่องจากประหยัดพลังงานในการควบคุมวาล์วแต่ยังคงรักษาระดับอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 95 ถึง 100 องศาเซลเซียส ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ภายในตู้นึ่งฆ่าเชื้อก้อนวัสดุเพาะเห็ด

คำสำคัญ: เห็ด, การนึ่งฆ่าเชื้อ, ระบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ, การควบคุมปริมาณแก๊ส

Abstract

This article presents an automatic temperature monitoring and control system for mushrooms substrate pasteurization with Bluetooth communication. This system consists of 2 major parts: temperature measurement and gas valve control. The first part is to measure, display and then transmit data wirelessly. The latter part is to receive data wirelessly, analyze data and then control stepper motor. The control system uses thermocouple for temperature monitoring that works with a 12-bit analog-to-digital converter module. The temperature inside the pasteurization chamber was repeatedly measured 10 times for calculating average value before displaying on OLED screen and then was wirelessly transmitted via Bluetooth module to the receiver. The received data was proceeded with Arduino nano microcontroller board. The output data was control signal that sent to motor drive board to rotate gas valve in the range of –100 to +10 degrees. The system was tested by measuring and adjusting gas valve every 2, 4 and 8 minutes respectively for 4 hours. The result showed that the optimum checking time was 4 minutes since the valve control was energy saving and the system still effectively maintained the temperature in the 95 to 100 ℃ range. Thus, this system is suitable for applying to destruct the microorganisms in the mushroom substrate pasteurization system.

Keywords: Mushroom, Mushrooms substrate pasteurization, Automatic temperature control, Gas control

1. บทนำ

ผลผลิตเห็ดจากทั่วโลกในแต่ละปีมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีสาเหตุมาจากค่านิยมของผู้บริโภคในปัจจุบันที่ให้ความสำคัญกับสุขภาพเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเห็ดมีคุณค่าทางโภชนาการสูงและมีสรรพคุณทางยา เห็ดเศรษฐกิจที่สำคัญจำแนกออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ เห็ดสำหรับบริโภค เห็ดสำหรับผลิตยา และเห็ดป่า [1] ในปี 2017 มูลค่าทางการตลาดของเห็ดทั่วโลกมีค่าสูงถึง 38.13 พันล้านเหรียญสหรัฐ และมีอัตราการเติบโตของมูลค่าทางการตลาดเพิ่มขึ้น 7.9% ต่อปี [2] ดังนั้นการเพิ่มกำลังการผลิตเห็ดเพื่อรองรับความต้องการของตลาดที่เพิ่มมากขึ้นจึงเป็นสิ่งสำคัญ การเพาะเห็ดเศรษฐกิจเพื่อให้ได้ผลผลิตสูง นอกจากการเพาะในโรงเรือนควบคุมสภาพแวดล้อม การกำจัดสิ่งปนเปื้อนในวัสดุเพาะเห็ดถือเป็นสิ่งสำคัญในกระบวนการผลิต เนื่องจากเป็นปัจจัยที่ทำให้ดอกเห็ดเจริญเติบโตได้รวดเร็ว วัสดุที่นิยมนำมาเพาะเห็ด ได้แก่ ขี้เลื่อยไม้ยางพาราผสมกับรำ น้ำตาลทราย ยิปซัม ปูนขาว และดีเกลือเพื่อเป็นอาหารของเห็ด [3] เมื่อผสมวัสดุทั้งหมดแล้วนำไปบรรจุลงในถุงพลาสติก จากนั้นนำไปผ่านการฆ่าเชื้อก่อนนำไปหยอดเชื้อเห็ดให้เจริญเติบโต [4] ขั้นตอนการฆ่าเชื้อก้อนวัสดุเพาะเห็ดเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญเนื่องจากเป็นการลดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ ศัตรูพืช และโรค [5] ซึ่งสิ่งเหล่านี้ส่งผลให้เชื้อเห็ดใช้เวลาเจริญเติบโตในก้อนวัสดุเพาะนานขึ้น [6] ในกรณีที่การปนเปื้อนสูงเชื้อเห็ดไม่สามารถเจริญเติบโตได้ในก้อนวัสดุเพาะ ทำให้ก้อนวัสดุเพาะที่เชื้อเห็ดไม่สามารถเจริญเติบโตกลายเป็นของเสียในกระบวนการผลิต [7] หรือเกิดโรคจากเชื้อแบคทีเรียในเห็ด [8] ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น ดังนั้นกระบวนการฆ่าเชื้อวัสดุเพาะเห็ดที่มีประสิทธิภาพทำให้เก็บเกี่ยวผลผลิตได้เร็วและมีปริมาณสูง [9] รวมถึงเป็นการลดต้นทุนการผลิต วิธีการฆ่าเชื้อก้อนวัสดุเพาะเห็ดแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ ตู้นึ่งความดันสูง (Autoclave) และตู้นึ่งความดันต่ำ ซึ่งตู้นึ่งทั้ง 2 แบบ ใช้หลักการฆ่าเชื้อในวัสดุเพาะเห็ดด้วยความร้อนจากไอน้ำ ดังนั้นจึงต้องควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมตลอดระยะเวลาการนึ่งฆ่าเชื้อ เนื่องจากความร้อนเป็นปัจจัยสำคัญในการกำจัดจุลินทรีย์ ศัตรูพืช และโรคที่ปนเปื้อนในวัสดุเพาะเห็ด ตู้นึ่งความดันสูงสามารถฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในวัสดุเพาะได้มากและใช้เวลาในการฆ่าเชื้อน้อยกว่าตู้นึ่งความ

ดันต่ำ จึงทำให้เชื้อเห็ดเจริญเติบโตในวัสดุเพาะได้ดี [7] ตู้นึ่งความดันสูงใช้หลักการเพิ่มอุณหภูมิจุดเดือดของไอน้ำให้อยู่ในช่วง 110 ถึง 120 องศาเซลเซียส ด้วยการเพิ่มความดันอากาศภายในตู้ที่ 20 ถึง 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (PSI) ที่อุณหภูมิสูงสามารถทำให้ฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ได้ทั้งหมด [10] ตู้นึ่งความดันสูงสามารถควบคุมอุณหภูมิการฆ่าเชื้อให้คงที่ได้แบบอัตโนมัติ แต่มีราคาสูงและสิ้นเปลืองพลังงาน ดังนั้นการฆ่าเชื้อก้อนวัสดุเพาะด้วยตู้นึ่งความดันต่ำที่มีต้นทุนในการผลิตต่ำ จึงเป็นทางเลือกสำหรับเกษตรกรทั่วไปและได้รับการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย รวมถึงผู้ประกอบการฟาร์มเห็ดขนาดเล็ก เนื่องจากสร้างง่าย ไม่ซับซ้อน และต้นทุนต่ำ ลักษณะของตู้นึ่งความดันต่ำที่ใช้งานโดยทั่วไปถูกออกแบบและสร้างเพื่อลดต้นทุนในหลากหลายรูปแบบ โดยอาศัยหลักการพื้นฐาน คือ ใช้ความร้อนจากไอน้ำที่อุณหภูมิสูงสุด 100 องศาเซลเซียส ได้แก่ เตานึ่งแบบลูกทุ่งซึ่งใช้ถังโลหะขนาด 200 ลิตร ใช้พลังงานจากฟืนเพื่อต้มน้ำให้เดือดกลายเป็นไอ พาความร้อนไปสู่ก้อนวัสดุเพาะเห็ด ใช้เวลาในการนึ่งมากกว่า 3 ชั่วโมง โดยควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 90-100 องศาเซลเซียส ตลอดระยะเวลาการนึ่งด้วยการเติมฟืนอย่างต่อเนื่อง [11] การนึ่งด้วยวิธีการนี้จำกัดปริมาณก้อนเชื้อเห็ดที่นึ่งแต่ละครั้ง และต้องใช้ความระมัดระวังในการควบคุมอุณหภูมิคงที่ตลอดระยะเวลาการนึ่งฆ่าเชื้อ จึงมีโอกาสทำให้เกิดก้อนเชื้อเห็ดที่ฆ่าเชื้อไม่หมดส่งผลให้เชื้อเห็ดที่หยอดลงในวัสดุเพาะไม่เจริญเติบโต นักวิจัยได้พัฒนาเตานึ่งแบบลูกทุ่งด้วยพลังงานจากฟืน โดยออกแบบเตานึ่งฆ่าเชื้อก้อนวัสดุเพาะเห็ดที่สามารถลดการใช้พลังงานเชื้อเพลิงและลดการสูญเสียพลังงานความร้อน [12] ทั้งนี้เตานึ่งที่นำเสนอสามารถตรวจวัดอุณหภูมิได้ และแจ้งเตือนเมื่ออุณหภูมิไม่อยู่ในระดับที่กำหนด คือ 90 ถึง 105 องศาเซลเซียส แต่ยังไม่สามารถควบคุมได้อย่างอัตโนมัติ สำหรับเตานึ่งที่ใช้พลังงานจากฟืน การหาวัตถุดิบเพื่อให้ความร้อนทำได้ยากและเกิดเขม่า ต่อมาจึงมีการพัฒนาตู้นึ่งฆ่าเชื้อวัสดุเพาะเห็ดด้วยพลังงานแก๊สที่สามารถทำได้สะดวกและให้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง ระบบการนึ่งใช้การติดตั้งตู้บรรจุก้อนวัสดุเพาะเห็ดและหม้อผลิตไอน้ำแยกจากกัน สามารถนึ่งฆ่าเชื้อก้อนวัสดุเพาะเห็ดได้จำนวนมากในแต่ละครั้ง [13] การควบคุมอุณหภูมิให้สม่ำเสมอตลอดการนึ่งฆ่าเชื้อต้องอาศัยประสบการณ์และความชำนาญของเกษตกร สำหรับเกษตกรที่ขาดความชำนาญจึงอาจเกิดความเสี่ยงในการนึ่งเพื่อฆ่าเชื้อก้อนวัสดุเห็ด ดังนั้นการควบคุมอุณหภูมิการนึ่งฆ่าเชื้อก้อนวัสดุเพาะเห็ดให้กับตู้นึ่งความดันต่ำด้วยพลังงานแก๊สแบบอัตโนมัติจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตลอดระยะเวลาการนึ่ง ลดปริมาณการสูญเสียของก้อนวัสดุเพาะเห็ด เก็บเกี่ยวผลผลิตได้รวดเร็ว มีปริมาณผลผลิตสูง และใช้พลังงานในการนึ่งฆ่าเชื้ออย่างคุ้มค่า

ในงานนี้จึงนำเสนอการควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติสำหรับตู้นึ่งฆ่าเชื้อก้อนวัสดุเพาะเห็ดความดันต่ำด้วยพลังงานแก๊ส ใช้การตรวจวัดอุณหภูมิภายตู้นึ่ง วิเคราะห์ความเหมาะสมในการปรับระดับความแรงของแก๊ส และควบคุมการหมุนวาล์วเพื่อปรับปริมาณแก๊สให้เหมาะสมอัตโนมัติ โดยเสนอบทนำในส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2 นำเสนอการประยุกต์ใช้ทฤษฎีพื้นฐานของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมาช่วยในการวิเคราะห์การทำงานของระบบจากเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในช่วงการทดสอบ ส่วนที่ 3 นำเสนอโครงสร้างการทำงานระบบตรวจวัดและควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ การสื่อสารข้อมูล การแสดงผล และการควบคุมอุณหภูมิภายในตู้นึ่ง ส่วนที่ 4 นำเสนอระบบต้นแบบที่ได้รับพัฒนา เทอร์โมคัปเปิลสำหรับตรวจวัดอุณหภูมิ หน้าจอแสดงผลโอแอลอีดี (OLED) การสื่อสารผ่านโมดูลบลูทูธ การวิเคราะห์อุณหภูมิและระดับการปรับวาล์วแก๊สของไมโครคอนโทรลเลอร์ ส่วนที่ 5 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานระบบต้นแบบและวิเคราะห์ความสามารถของระบบ และส่วนสุดท้ายสรุปผลการวิจัย

2. หลักการพื้นฐานของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

สถิติสำหรับการวิจัยเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของระบบตรวจวัดและควบคุมอุณหภูมิภายในตู้นึ่งฆ่าเชื้อก้อนวัสดุเพาะเห็ดอัตโนมัติ เป็นการวิเคราะห์ระดับของอุณหภูมิตลอดช่วงเวลาการนึ่งฆ่าเชื้อก้อนวัสดุเพาะเห็ดด้วยการวิเคราะห์เชิงสถิติ ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (Mean) เพื่อเป็นตัวแทนของข้อมูลทั้งหมด และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation: SD) เพื่อใช้ในการแสดงการกระจาย

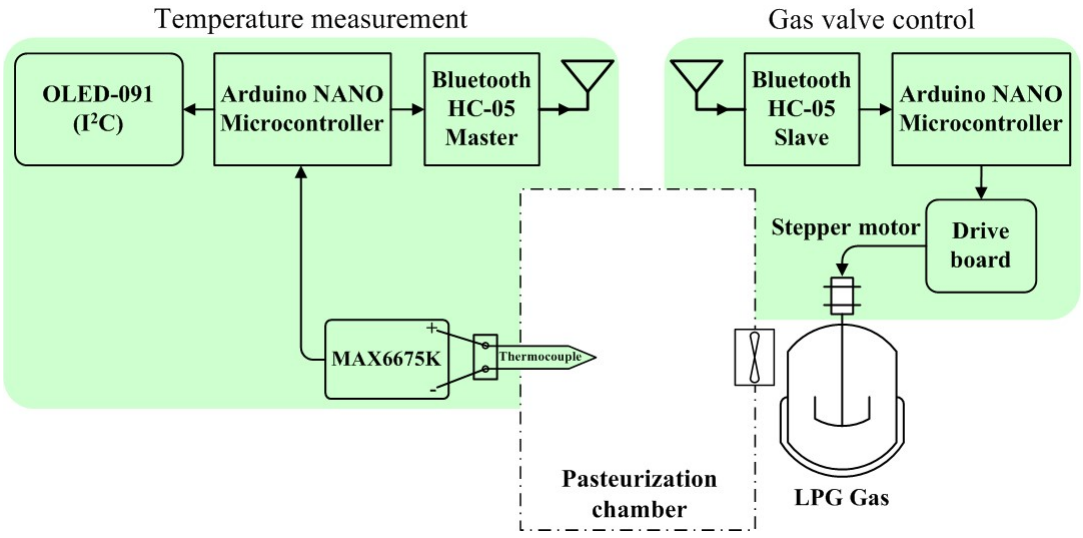
ของข้อมูลอุณหภูมิตลอดช่วงเวลาการนึ่งฆ่าเชื้อ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน สามารถหาได้จากสมการที่ (1) [14]

$$S.D. = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^2}}{n-1} \qquad (1)$$

โดย x_i คือ อุณหภูมิ ณ เวลาใดๆ และ $\overline{x}$ คือ ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดการวัด และ n คือ จำนวนครั้งของการวัดอุณหภูมิ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นการวิเคราะห์ทางสถิติที่ใช้แสดงการกระจายของข้อมูลออกจากค่าเฉลี่ย เพื่อประเมินผลของข้อมูล แสดงความเที่ยงของการวัด และนำไปใช้คำนวณหาช่วงความเชื่อมั่น ซึ่งส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าการกระจายตัวน้อยแสดงได้ว่าข้อมูลทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกัน ในทางกลับกันหากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าการกระจายตัวสูงแสดงถึงข้อมูลทั้งหมดมีค่าแตกต่างกันมาก

3. โครงสร้างของระบบที่นำเสนอ

การควบคุมอุณหภูมิภายในตู้นึ่งฆ่าเชื้อก้อนวัสดุเพาะเห็ดแบ่งการพัฒนาออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) ภาคส่งเป็นส่วนของการตรวจวัดอุณหภูมิ หาค่าเฉลี่ย และแสดงผล 2) ภาครับเป็นส่วนของการวิเคราะห์ข้อมูลและตัดสินใจเพื่อควบคุมวาล์วแก๊ส ระบบส่วนที่ 1 ประกอบด้วยเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิภายในตู้นึ่งฆ่าเชื้อก้อนวัสดุเพาะเห็ดที่มีสามารถตรวจวัดอุณหภูมิได้ในช่วง -50 ถึง 150 องศาเซลเซียส (℃) ข้อมูลอุณหภูมิจากการตรวจวัดได้รับการขยายให้ชัดเจนและเปลี่ยนจากสัญญาณแอนะล็อคเป็นสัญญาณดิจิทัล 12 บิต จากนั้นข้อมูลถูกส่งยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผล และส่งข้อมูลต่อไปยังหน้าจอโอแอลอีดี เพื่อแสดงผลอุณหภูมิ พร้อมทั้งส่งข้อมูลออกไปยังโมดูลบลูทูธ (Master) เพื่อส่งข้อมูลอุณหภูมิแบบไร้สายผ่านอากาศไปยังภาครับ ระบบส่วนที่ 2 ประกอบด้วยโมดูลบลูทูธ (Slave) ทำหน้าที่รับข้อมูลอุณหภูมิจากภาคส่งแล้วส่งต่อไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผลข้อมูล และผลของการตัดสินใจถูกส่งต่อไปยังวงจรขับมอเตอร์สเต็ปเปอร์เพื่อปรับวาล์วแก๊ส โครงสร้างของระบบที่ได้รับการนำเสนอดังแสดงในรูปที่ 1



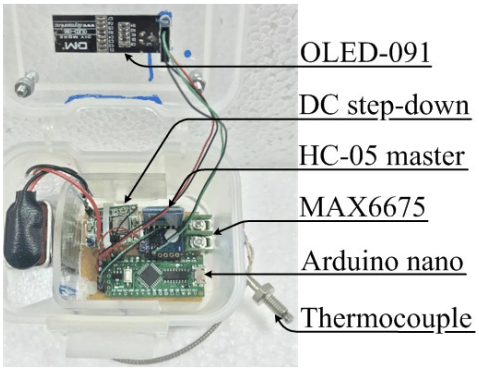
รูปที่ 1 โครงสร้างระบบตรวจวัดและควบคุมอุณหภูมิภายในตู้นึ่งฆ่าเชื้อก้อนวัสดุเพาะเห็ด

ระบบที่ได้รับการนำเสนอเพื่อใช้ในการตรวจวัดความร้อนของอุณหภูมิภายในตู้นึ่งฆ่าเชื้อก้อนวัสดุเพาะเห็ดและปรับอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 95 ถึง 100 องศาเซลเซียส [15] เพื่อทำลายเชื้อจุลินทรีย์ที่ไม่ต้องการ จากนั้นระบบได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อนำไปใช้งานจริง โดยแบ่งออกเป็นภาคส่งที่ได้รับการติดตั้งอยู่ที่ตู้นึ่งก้อนวัสดุเพาะเห็ดและภาครับที่ได้รับการติดตั้งอยู่ที่วาล์วของถังแก๊ส

4. การพัฒนาระบบต้นแบบ

ระบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติภายในตู้นึ่งฆ่าเชื้อก้อนวัสดุเพาะเห็ดอาศัยการตรวจวัดอุณหภูมิภายใน จากนั้นจึงวิเคราะห์อุณหภูมิและตัดสินใจในการควบคุมวาล์วแก๊สเพื่อปรับอุณหภูมิให้เหมาะสม การตรวจวัดควบคุมอุณหภูมิแบ่งออกเป็นภาคส่งและภาครับ โดยภาคส่งประกอบด้วยเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple Type K) โมดูลแปลงสัญญาณแอนะล็อคเป็นดิจิทัล MAX6675 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อาดุยโนนาโน (Arduino Nano v3.0) ใช้ MCU รุ่น ATMEGA328P ได้รับการตั้งค่าอัตราการส่งข้อมูล (Baud rate) ที่ 38400 bayd แสดงผลด้วยหน้าจอโอแอลอีดีขนาด 0.91 นิ้ว ที่ใช้การสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรม (Inter integrated circuit: I^2C) และโมดูลบลูทูธ HC-05_M (Master) ที่มีการตั้งค่าสำหรับการสื่อสารด้วยกำหนดค่า NAME = BTMASTER PSWD = 1234 UART = 38400 ROLE=1 CMODE=1 และกำหนดที่อยู่ของตัวรับ LINK=98D3,71,F6109F ตามลำดับ ภาครับประกอบด้วยและโมดูลบลูทูธ HC-05_S (Slave) ที่ตั้งค่าการสื่อสารจากการกำหนดค่า NAME = BTSLAVE PSWD = 1234 UART = 38400 ROLE = 0 ตามลำดับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อาดุยโนนาโน อัตราการส่งข้อมูลเท่ากับภาคส่ง 38400 bayd บอร์ดขับมอเตอร์ A4988 และมอเตอร์สเต็ปเปอร์ NEMA 17 ขนาด 22 มิลลิเมตร

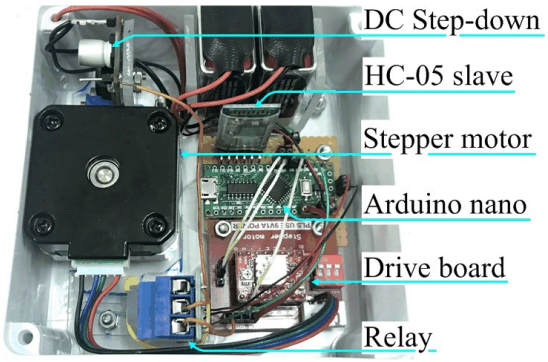
การวัดอุณหภูมิภายในตู้นึ่งฆ่าเชื้อก้อนวัสดุเพาะเห็ดได้ประยุกต์ใช้เซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิล M6 ที่สามารถตรวจวัดอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำในช่วง -50 ถึง 150 องศาเซลเซียส และให้ความละเอียดการวัดที่ 0.25 องศาเซลเซียส จากนั้นต่อขาบวกและขาลบเข้ากับโมดูล MAX6675 เพื่อให้ทำงานร่วมกัน ไฟเลี้ยงของโมดูลที่นำมาใช้งานอยู่ที่ 5 โวลต์ ซึ่งนำมาจากแหล่งจ่ายไฟของบอร์ดอาดุยโนนาโน และจากนั้นจึงได้รับข้อมูลเป็นเอาต์พุตจากโมดูล MAX6675 คือ ระดับอุณหภูมิที่แปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลทั้งหมด 12 บิต ให้ข้อมูลอยู่ในช่วง 0 ถึง 4095 และค่าที่ได้รับถูกส่งต่อไปยังบอร์ดอาดุยโนนาโนด้วยการสื่อสารแบบอนุกรม การวัดอุณหภูมิภายในตู้นึ่งได้รับการควบคุมจากบอร์ดอาดุยโนนาโน การวัดอุณหภูมิถูกทำซ้ำ 10 ครั้ง และนำข้อมูลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้ข้อมูลอุณหภูมิมีความถูกต้องมากที่สุด จากนั้นข้อมูลถูกส่งต่อไปยังหน้าจอโอแอลอีดีเพื่อแสดงผล การส่งข้อมูลไปยังหน้าจอใช้การสื่อสารข้อมูลแบบซิงโครนัส ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในตู้นึ่งได้รับการแสดงผลบนหน้าจอแบบทศนิยมแบบสองตำแหน่ง การส่งข้อมูลออกหน้าจอทำพร้อมกับการส่งข้อมูลไปยังโมดูลบลูทูธ HC-05_M ผ่านพอร์ตอนุกรม (Serial port: TX, RX) เพื่อให้โมดูลบลูทูธของภาคส่งทำการส่งเฉพาะข้อมูลอุณหภูมิด้วยมาตรฐานการสื่อสารบลูทูธ ผ่านอากาศไปยังภาครับ ระบบในส่วนของภาคส่งแสดงดังในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ส่วนตรวจวัดอุณหภูมิภายในตู้นึ่งของภาคส่ง

ภาครับที่ติดตั้งอยู่กับถังแก๊สหุงต้ม (LPG) ใช้โมดูลบลูทูธ HC-05_S ในการทำหน้าที่รับข้อมูลผ่านอากาศ จากนั้นส่งต่อข้อมูลอุณหภูมิด้วยพอร์ตอนุกรม (TX, RX) ไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อาดุยโนนาโน ข้อมูลอุณหภูมิได้รับการประมวลผล ผลการตัดสินใจถูกส่งต่อไปยังบอร์ดขับมอเตอร์เพื่อควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์สเต็ปเปอร์ในการปรับวาล์วแก๊สตามเงื่อนไขที่กำหนด กรณีที่บลูทูธหยุดการเชื่อมต่อ ภาครับยังคงวนซ้ำเพื่อรอรับค่าและเมื่อตรวจสัญญาณที่มีค่าอุณหภูมิส่งมา ระบบจึงเริ่มทำงานและ

ตัดสินใจควบคุมมอเตอร์ ระบบภาครับสำหรับการควบคุมวาล์วแก๊สแสดงดังในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ส่วนควบคุมวาล์วแก๊สของภาครับ

การปรับระดับอุณหภูมิใช้เงื่อนไขในการควบคุม คือ รักษาระดับอุณหภูมิภายในตู้นึ่งฆ่าเชื้อก้อนวัสดุเพาะเห็ดให้อยู่ระหว่าง 95 ถึง 100 องศาเซลเซียส ด้วยการหมุนวาล์วแก๊ส 1 ครั้ง โดยมีองศาในการหมุนแตกต่างกันขึ้นกับอุณหภูมิ ในกรณีที่อุณหภูมิภายในตู้ต่ำกว่า 95 องศาเซลเซียส วาล์วแก๊สได้รับการปรับให้หมุนทวนเข็มนาฬิกาเพื่อเพิ่มอุณหภูมิภายในตู้นึ่ง เมื่ออุณหภูมิมากกว่าหรือเท่ากับ 95 องศาเซลเซียส แต่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 100 องศาเซลเซียส ระบบยังคงทำงานต่อไปโดยไม่ปรับวาล์วแก๊ส และเมื่ออุณหภูมิภายในตู้เกิน 100 องศาเซลเซียส วาล์วแก๊สได้รับการควบคุมด้วยการปรับให้หมุนตามเข็มนาฬิกาเพื่อลดอุณหภูมิภายในตู้นึ่งก้อนเห็ด เงื่อนไขควบคุมองศาการหมุนแบบละเอียดของมอเตอร์สเต็ปเปอร์ในการปรับมุมของแต่ละระดับอุณหภูมิ แสดงดังในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การปรับวาล์วแก๊สเพื่อควบคุมอุณหภูมิภายในตู้นึ่งก้อนวัสดุเพาะ

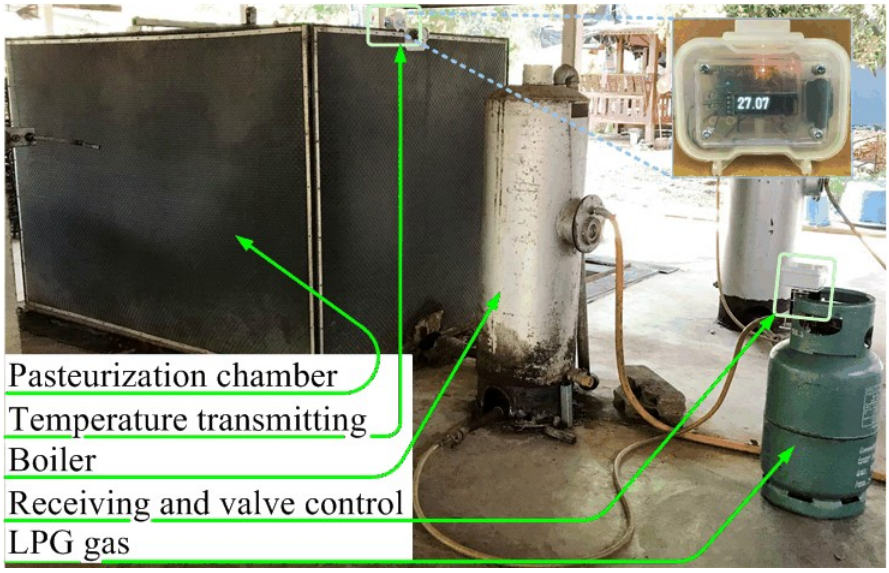
อุณหภูมิ (°C)	รอบการหมุน (มุมองศา)
≤55	-100°
≤70	-70°
≤80	-50°
≤85	-35°
≤90	-20°
<95	-10°
95-100	0°
> 100	+10°

การทดสอบระบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติภายในตู้นึ่งฆ่าเชื้อก้อนวัสดุเพาะเห็ดได้รับการทดสอบ ณ กลุ่มวิสาหกิจชุมชนเพาะเห็ดและแปรรูปเห็ดบ้านไร่เก่า ต.รำพัน อ.ท่าใหม่ จ.จันทบุรี ตู้นึ่งที่ทดสอบมีขนาด กว้างxยาวxสูง ที่ 2x3x2 เมตร บรรจุก้อนเห็ดจำนวน 1,600 ก้อน การนึ่งก้อนเห็ดใช้ความร้อนจากไอน้ำที่ได้รับการต้มจากแก๊สหุงต้มแอลพีจี ใช้เวลาทั้งหมด 4 ชั่วโมง ต่อ 1 ครั้ง เพื่อกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ที่ไม่ต้องการชนิดอื่นๆ ระบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติในส่วนของภาคส่งได้รับการติดตั้งอยู่ตรงกลางด้านหน้าของตู้นึ่งฆ่าเชื้อก้อนวัสดุเพาะเห็ด ติดตั้งหัวเทอร์โมคัปเปิลไว้ด้านในของตู้นึ่งและใช้สายนำสัญญาณเชื่อมต่อออกมายังส่วนตรวจวัดเพื่อทำหน้าที่วัดและวิเคราะห์อุณหภูมิ (Temperature measurement) และในส่วนของภาครับที่มีหน้าที่ประมวลผลและตัดสินใจเพื่อปรับวาล์วในแต่ละระดับขององศาการหมุน (Gas valve control) ได้รับการติดตั้งเข้ากับวาล์วแก๊สหุงต้มทางด้านบนในส่วนหัวของวาล์ว โดยมีหน้าที่ควบคุมปริมาณแก๊สที่ใช้ในการต้มน้ำในหม้อต้ม (Boiler) หม้อต้มมีหน้าที่พ่นไอน้ำที่มีความร้อนเข้าไปภายในตู้นึ่งก้อนเห็ด แสดงดังในรูปที่ 4

ระบบตรวจวัดและควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติที่ได้รับการติดตั้งเข้ากับตู้นึ่งและหัวปรับแก๊สแอลพีจี ได้รับการทดสอบตลอดระยะเวลาในการนึ่งก้อนวัสดุเพาะเห็ดเป็นเวลา 4 ชั่วโมง และได้รับการทดสอบทั้งหมด 3 ครั้ง

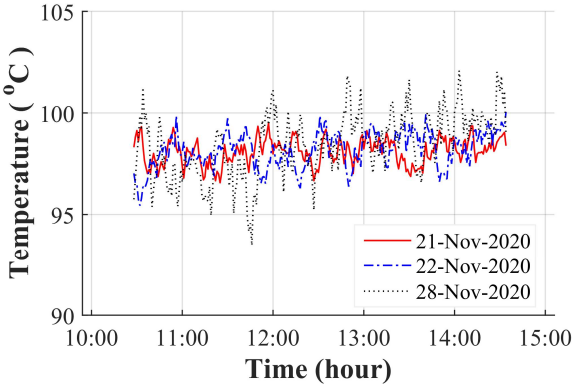
5. การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบ

ระบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติได้รับการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการควบคุมความชื้นภายในตู้นึ่งก้อนเห็ด การทดสอบทำทั้งหมด 3 ครั้ง ของวันที่ 21 22 และ 28 พฤศจิกายน 2563 ตามลำดับ ในแต่ละครั้งใช้เวลาในการทดสอบทั้งหมด 4 ชั่วโมง และทำในช่วงเวลา 10:30 น. ถึง 14:30 น. และการเปิดระบบควบคุมอุณหภูมิภายในตู้นึ่ง ในการทดสอบทำในช่วงที่อุณหภูมิอยู่ที่ 95 ถึง 100 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงตั้งค่าระบบให้ทำงานอัตโนมัติด้วยการตรวจวัดอุณหภูมิและควบคุมความร้อนจากการปรับวาล์วแก๊สที่ให้ความร้อนหม้อต้ม การทดสอบในครั้งแรกทำในวันที่ 21 พ.ย. ใช้ระยะเวลา 4 ชั่วโมง การตรวจวัดอุณหภูมิ ถูกทำทุก ๆ 2 นาที ถ้าความร้อนไม่อยู่ในช่วงที่



รูปที่ 4 ระบบตรวจวัดและควบคุมอุณหภูมิตู้นึ่งฆ่าเชื้อก้อนวัสดุเพาะเห็ดอัตโนมัติ

กำหนด ระบบจึงปรับจากวาล์วแก๊สเพื่อควบคุมความร้อนภายในตู้นึ่งให้อยู่ในช่วง 95 ถึง 100 องศาเซลเซียส การทดสอบในครั้งที่ 2 คือ วันที่ 22 พ.ย. อุณหภูมิได้รับการตรวจวัดในทุกๆ 4 นาที ตลอด 4 ชั่วโมง เมื่ออุณหภูมิอยู่นอกช่วงที่กำหนดระบบจึงหมุนวาล์วแก๊สเพื่อปรับระดับความแรงของแก๊สที่ให้ความร้อนหม้อต้ม เพื่อรักษาอุณหภูมิในตู้นึ่งให้อยู่ในช่วงที่กำหนด ในครั้งที่ 3 การทดสอบถูกทำในวันที่ 28 พ.ย. ความถี่ของระยะเวลาในการตรวจวัดระดับอุณหภูมิใช้เพิ่มขึ้นเป็นการตรวจวัดทุกๆ 8 นาที การทดสอบทำในลักษณะเดียวกับการทดสอบก่อนหน้า คือ เมื่ออุณหภูมิอยู่นอกช่วงที่กำหนดระบบทำการปรับวาล์วแก๊สเพื่อควบคุมความร้อนในตู้นึ่งให้อยู่ในช่วงที่กำหนด การปรับเพิ่มหรือลดระดับความร้อนในแต่ละครั้งใช้พลังงานอยู่ที่ 2.88 วัตต์ จากการทดสอบทั้ง 3 ครั้ง สังเกตได้ว่าการควบคุมความร้อนภายในตู้นึ่งแบบละเอียดที่ความถี่ 2 นาที ต่อการควบคุม 1 ครั้ง ระบบสามารถรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งให้ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงต่ำสุดอยู่ที่ 96.57 และสูงสุดที่ 99.49 องศาเซลเซียส เมื่อลดความถี่ในการตรวจวัดและควบคุมมาเป็น 4 นาที ต่อการตรวจวัด 1 ครั้ง การใช้พลังงานลดลงเมื่อเทียบกับการตรวจวัดแบบละเอียด แต่ยังคงควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่กำหนดได้ คือ อุณหภูมิต่ำสุดอยู่ที่ 95.44 และสูงสุดอยู่ที่ 99.85 องศาเซลเซียส และในการทดสอบครั้งสุดท้าย คือ วันที่ 28 พ.ย. การตรวจวัดและควบคุมอุณหภูมิถูกทำแบบหยาบด้วยการวัดห่างกันครั้งละ 8 นาที ระบบไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในตู้นึ่งให้อยู่ในช่วงที่ต้องได้ตลอดช่วงการทำงาน โดยมีการเปลี่ยนแปลงต่ำสุดที่ 93.61 และสูงสุดอยู่ที่ 102.21 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 การควบคุมอุณหภูมิภายในตู้นึ่งก้อนวัสดุเพาะเห็ด

จากการทดสอบเพื่อควบคุมอุณหภูมิภายในตู้นึ่งฆ่าเชื้อก้อนวัสดุเพาะเห็ดด้วยการปรับความร้อนจากวาล์วแก๊ส

สังเกตได้ว่าการตรวจวัดและควบคุมอุณหภูมิในทุกๆ 4 นาที เป็นช่วงเวลาที่เหมาะสม เนื่องจากประหยัดพลังงานของระบบในการควบคุมวาล์วแก๊ส และสามารถรักษาระดับอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 95 ถึง 100 องศาเซลเซียส ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อพิจารณาถึงความคงที่ของอุณหภูมิตลอดช่วงเวลาที่ใช้ในการนึ่งก้อนเห็ด จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ที่การตรวจสอบและควบคุมอุณหภูมิทุกๆ 2 นาที ให้ค่า SD เพียง 2.33 เมื่อขยายช่วงความถี่ในการตรวจวัดเป็น 4 นาที ค่า SD ที่ได้อยู่ที่ 2.82 และสุดท้ายช่วงความถี่ในการตรวจวัด 8 นาที ค่า SD ที่ได้เบี่ยงเบนมากที่สุด คือ 5.02 ตามลำดับ

6. สรุปผล

ระบบตรวจวัดและควบคุมอุณหภูมิภายในตู้นึ่งฆ่าเชื้อก้อนวัสดุเพาะเห็ดอัตโนมัติ ตรวจวัดอุณหภูมิภายในตู้นึ่งด้วยเทอร์โมคลัปเปิลรุ่น M6 ให้เอาต์พุตเป็นข้อมูลแบบแอนะล็อคและถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิทัลด้วยบอร์ด MAX6675 ข้อมูลดิจิทัลได้รับการประมวลผลด้วยบอร์ดอาดุยโนนาโนและแสดงผลอุณหภูมิบนหน้าจอขนาด 0.91 นิ้ว พร้อมทั้งส่งข้อมูลออกอากาศด้วยโมดูลบลูทูธ (Master) เพื่อส่งข้อมูลไปยังส่วนควบคุมที่ได้รับการติดตั้งอยู่ที่วาล์วแก๊ส ส่วนควบคุมวาล์วรับข้อมูลอุณหภูมิผ่านอากาศด้วยโมดูลบลูทูธ (Slave) ข้อมูลถูกส่งต่อไปยังบอร์ดอาดุยโนนาโนเพื่อวิเคราะห์และตัดสินใจในการควบคุมวาล์วแก๊สในการปรับระดับอุณหภูมิ ระบบได้รับการทดสอบทั้งหมด 3 ครั้ง แบ่งตามระดับความถี่ในการตรวจวัดและควบคุม คือ การวัดทุกๆ 2 4 และ 8 นาที ตามลำดับ ตลอดระยะเวลาการนึ่ง 4 ชั่วโมง ความถี่ในการตรวจวัดที่เหมาะสม คือ การควบคุมอุณหภูมิทุกๆ 4 นาที เนื่องจากประหยัดพลังงานและสามารถรักษาระดับอุณหภูมิภายในตู้นึ่งให้อยู่ในช่วง 95.44 ถึง 99.85 องศาเซลเซียส และมีความแปรปรวนของอุณหภูมิต่ำน้อยเนื่องมีค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 2.82 การนึ่งฆ่าเชื้อก้อนวัสดุเพาะเห็ดจึงทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อเสนอแนะของระบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ คือ เหมาะสำหรับการนำไปใช้งานกับตู้นึ่งความดันต่ำ และใช้พลังงานเชื้อเพลิงจากแก๊สแอลพีจี 1 ถัง ในระยะเวลาสำหรับการนึ่ง 4 ชั่วโมง

7. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับการสนับสนุนการวิจัยจากกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี ประจำปี 2563 เลขที่ 2222/2563

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Grimm, D. and Wosten, H. A. B. “Mushroom cultivation in the circular economy,” *Appl Microbiol Biotechnol,* vol. 102, no. 18, pp.7795–7803, Jul. 2018.

[2] Research and markets. Global Mushroom Market 2018-2026: The market is expected to grow at a CAGR of 7.9%. [Online]. (2018). [Cited January 18, 2021] Available: https://www.researchandmarkets.com/research/zsckhw/global_mushroom?w=5.

[3] Jala, A. “Used composted garbage leaves in mixing with rubber tree sawdust for culturing Phoenix mushroom,” *Thai Science and Technology Journal,* vol.22, no.4, pp.501-506, Oct. – Dec. (in thai)

[4] Sánchez, C. “Cultivation of *Pleurotus ostreatus* and other edible mushrooms,” *Appl Microbiol Biotechnol,* vol. 85, pp.1321–1337, 2010.

[5] Kurtzman, R. H. “Pasteurization of mushroom substrate and other solids,” *African Journal of Environmental Science and Technology,* vol. 4, no.13, pp.936-941, Dec. 2010.

[6] Yang, W. Guo, F. and Wan, Z. “Yield and size of oyster mushroom grown on rice/wheat straw basal substrate supplemented with cotton seed hull,” *Saudi Journal of Biological Sciences*, vol. 20, pp.333–338, Mar. 2013.

[7] Oseni, T.O. Dlamini, S.O. Earnshaw D.M. and Masarirambi, M.T. “Effect of substrate pre-treatment methods on oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) production,”

International Journal of Agriculture & Biology, vol. 14, no. 2, pp.251–255, 2012.

[8] Omokaro, O. and Ogechi, A. A. "Cultivation of mushroom (*Pleurotus ostreatus*) and the microorganisms associated with the substrate used," *E-Journal of Science & Technology (e-JST)*, vol. 8, no. 4, pp.49-59, 2013.

[9] Ali, M. A. Mehmood, M. I. Nawaz, R. Hanif, M. A. and Wasim, R. "Influence of substrate pasteurization methods on the yield of oyster mushroom (*Pleurotus* species)," *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, vol. 44, no. 2, pp.300-303, 2007.

[10] Grow Shiitake and Oyster Mushroom. Set up a mushroom farm. [Online]. (2012). [Cited January 3, 2021]. Available: www.growshiitakemushroom.com/setupshiitakemushroomfarm.html

[11] Rungrudesombatkit, S. and Warichwattana, U. "Performance testing of superheated steam boiler for sterilizing mushroom propagation bag," *Kasem Bundit Engineering Journal*, vol. 6, no. 1, pp.17-30, Jan. – Jun. 2016 (in Thai).

[12] Taisrikhot, B. Soithong, P. and Poorahong, T. "*Cube mushroom steaming oven design and performance,*" The 7th National Conference on Technical Education, 6 November 2014, pp.43-48 (in Thai).

[13] Kanasri, T. "Development performance steam boiler using liquefied petroleum gas stove sterilization of mushroom propagation bag for famers," *Journal of Industrial Technology, Ubon Ratchathani Rajabhat University,* vol. 8, no. 1, pp.1-11, January - June 2018 (in Thai).

[14] Rouaud. M. *Probability, statistics and estimation.* Short Ed., Lulu Press: North Carolina, USA, 2017.

[15] Songtipcharoenkul, A. Sripuna, S. Popradit, A. and Cherdgota, P. "Pattern of knowledge transfer management on the organic mushroom farming of the mushroom cultivation learning site in Eastern," *VRU Research and Development Journal Humanities and Social Science,* vol. 12, no.3, pp.323-333, Sep. – Dec. 2017 (in Thai)