PBRU SCIENCE JOURNAL
2024.21(2) : 1-14

การออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการหมักไวน์

A Design of Temperature Control System in Wine Fermentation Process

ประภาวรรณ แพงศรี[1] และพรรณวิภา แพงศรี[2] *

Prapawan Pangsri[1] and Phanwipa Pangsri[2]*

[1]*คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์*

[2]*คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์*

[1] *Faculty of Industrial Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage*

[2] *Faculty of Science and Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage*

***Corresponding author; E-mail:** phanwipa@vru.ac.th

Received: 19 April 2024 /Revised: 29 May 2024 /Accepted: 05 September 2024

บทคัดย่อ

ปัจจุบันไวน์ได้รับความสนใจจากผู้บริโภคเป็นอย่างมากเนื่องจากไวน์มีประโยชน์ต่อสุขภาพโดยไวน์จะกระตุ้นน้ำย่อยของร่างกาย การผลิตไวน์ผลิตจากองุ่นและผลไม้อื่น ๆ โดยมีการควบคุมกระบวนการหมักภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ซึ่งมีผลต่อคุณภาพด้าน สี กลิ่นและรสชาติของไวน์ วัตถุประสงค์งานวิจัยนี้เพื่อศึกษาและออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิแบบ Proportional Integral Derivative Control (PID) ในกระบวนการหมักไวน์ จากการศึกษาโดยทำการหมักไวน์ในสภาวะที่มีการควบคุมอุณหภูมิ 20-25 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงจาก 2.85 เป็น 2.70 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดลดลงจาก 20.00 เหลือ 4.91 องศาบริกซ์ และปริมาณแอลกอฮอล์เท่ากับ 9.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ในระยะเวลา 10 วัน จากการศึกษาระบบควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการหมักไวน์พบว่าระบบควบคุมอุณหภูมิความเสถียรและข้อมูลอยู่ในขอบเขตการควบคุม กระบวนการหมักใช้ระยะเวลาในการหมักเพื่อให้เกิดการใช้น้ำตาลและผลิตเป็นแอลกอฮอล์ใช้ระยะเวลาสั้น และให้ผลผลิตของไวน์ที่มีปริมาณแอลกอฮอล์สูง ดังนั้นการศึกษานี้จึงเป็นแนวทางในการจำลองถังหมักไวน์ที่ควบคุมอุณหภูมิได้ เพื่อต่อยอดและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมครัวเรือนหรือวิสาหกิจชุมชนได้

คำสำคัญ: ไวน์ กระบวนการหมักไวน์ ระบบควบคุมอุณหภูมิ แผนภูมิควบคุม

Abstract

Wine is currently gaining a lot of attention from consumers because of its health benefits. Wine stimulates the body's digestive juices. Wine production is made from grapes and other fruits. The fermentation process is controlled under appropriate conditions that affect the quality, color, aroma and taste of the wine. Therefore, this research focused on the study and design of a temperature control system by using Proportional Integral Derivative Control (PID) in the wine fermentation process. From this study of wine fermentation under controlled temperature conditions at 20-25 C°. It was found that pH decreased from 2.85 to 2.70, the total soluble solids decreased from 20.00 to 4.91°Brix and the alcohol content was 9.5 % (v/v) in 10 days. The temperature control system in the wine fermentation process showed that the fermentation process was stability and temperature data was under control limit. The process takes a short time to use sugar and produce alcohol and produce wine with a high alcohol content. Therefore, this study is a guideline for simulating wine fermentation tanks and can be applied in household industries or community enterprises.

Keywords: Wine, Fermentation process, Temperature control system, Control chart

บทนำ

ไวน์เป็นเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ที่ได้จากการหมักน้ำองุ่นด้วยยีสต์โดยผ่านกระบวนการหมักที่อาศัยการทำงานของยีสต์เปลี่ยนน้ำตาลเป็นแอลกอฮอล์ และมีผลพลอยได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีการควบคุมกระบวนการหมักภายใต้สภาวะที่เหมาะสม จากกระบวนการดังกล่าวประเทศไทยเป็นประเทศที่ผลไม้หลายชนิด ดังนั้นจึงมีการนำผลไม้ เช่น องุ่น สับปะรด กระเจี๊ยบ ลูกหม่อน เงาะ เป็นต้น มาแปรรูปเป็นน้ำผลไม้หรือไวน์ผลไม้ ไวน์ผลไม้มีการศึกษาโดยนำผลไม้ตามฤดูกาล ผลไม้ในท้องถิ่นรวมถึงสมุนไพรต่างๆ มาเป็นวัตถุดิบในการผลิต มีการนำวัสดุเหลือทิ้งของผลไม้จากกระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์อีกทางหนึ่ง เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับวัตถุดิบ ปัจจุบันมีการศึกษาผลิตไวน์ผลไม้โดยนำผลไม้ในท้องถิ่นมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตและศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไวน์ เช่น ชนิดของวัตถุดิบ สูตร ปริมาณหัวเชื้อ ที่เหมาะสม ในการผลิตไวน์ผลไม้ในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อนำไปต่อยอดให้กับชุมชน เช่น ไวน์สละ สละเป็นผลไม้ที่ปลูกมากในภาคใต้ เนื้อสละมีรสชาติหวานอมเปรี้ยว โดยศึกษาอัตราส่วนของเนื้อสละและชนิดของยีสต์ที่ใช้ในการผลิตไวน์ ซึ่งการใช้เนื้อสละ 100 กรัมต่อลิตร หมักด้วยยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* K1-V1116 ปริมาณ 0.5 กรัมต่อลิตร หมักที่อุณหภูมิห้อง จะให้ผลิตภัณฑ์ไวน์เป็นที่ยอมรับทาง

ประสาทสัมผัสของผู้ทดลองชิมสูงสุด[1] นอกจากนั้นมีการนำน้ำตาลสดผสมกระชายดำหมักด้วยยีสต์ *S. cerevisiae* สายพันธุ์มาตรฐานและยีสต์ที่แยกจากน้ำตาลเมา พบว่ายีสต์สายพันธุ์แยกจากน้ำตาลเมา YAP 3-6 ที่มีปริมาณเชื้อเริ่มต้น 6 เปอร์เซ็นต์ สามารถผลิตปริมาณแอลกอฮอล์สูงที่สุดคิดเป็น 8.30 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตรต่อปริมาตร) ซึ่งผลิตได้มากกว่าสายพันธุ์ YAP 3-3 และสายพันธุ์มาตรฐาน *S. cerevisiae* TISTR 5049^{T} สามารถผลิตปริมาณแอลกอฮอล์ได้ 7.50 และ 6.83 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ[2] ปัจจุบันไวน์ได้รับความสนใจจากผู้บริโภคเป็นอย่างมากเนื่องจากไวน์มีประโยชน์ต่อสุขภาพโดยไวน์จะกระตุ้นน้ำย่อยของร่างกาย ทำให้เกิดความอยากอาหารเพิ่มมากขึ้น รักษาโรคความดันโลหิตต่ำ ทำให้หลอดเลือดหัวใจไม่ตีบตัน เป็นต้น[3] จากประโยชน์ดังกล่าวมีการใช้วัตถุดิบผลไม้ในท้องถิ่น เช่น ลูกหม่อนซึ่งศึกษาถึงสารสำคัญที่มีคุณสมบัติในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ พบว่าผลลูกหม่อนสดมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกมีค่าเท่ากับ 3,247 mg GAE/100 กรัม และแอนโทไซยานินมีค่าเท่ากับ 57.60 มิลลิกรัมต่อกรัม จากคุณสมบัติดังกล่าวจึงนำมาผลิตไวน์ โดยผสมแก่นตะวันพบว่าไวน์แก่นตะวันผสมลูกหม่อนในอัตราส่วน 1:3 ทำการหมักวัดปริมาณแอลกอฮอล์ได้ 13 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำได้เท่ากับ 14 องศาบริกซ์ ค่าสีของไวน์ สีแดงม่วง[3] นอกจากผลไม้แล้วกระเจี๊ยบแดงเป็นพืชที่สามารถนำมาผลิตเป็นยาสมุนไพรเพื่อรักษาโรคเนื่องจากกระเจี๊ยบมีสรรพคุณช่วยลดไขมันในเส้นเลือด ลดความดันโลหิต ต้านเชื้อแบคทีเรีย[4] จากคุณสมบัติดังกล่าวกระเจี๊ยบแดงจึงนิยมนำมาผลิตเครื่องดื่มและอาหาร เช่น ชา ไซรัป แยม เยลลี่ น้ำสมุนไพร และอีกทางเลือกนำมาผลิตไวน์กระเจี๊ยบซึ่งเป็นแปรรูปผลิตผลทางการเกษตรเพื่อเพิ่มมูลค่าผลผลิตทางการเกษตรได้ในอนาคต จากกระบวนการผลิตไวน์จะมีการควบคุมกระบวนการหมักภายใต้สภาวะที่เหมาะสม หากกระบวนการหมักอุณหภูมิที่สูงเกินไปอาจมีผลต่อคุณภาพด้าน สี กลิ่นและรสชาติของไวน์ ซึ่งในการผลิตไวน์อุณหภูมิระหว่างการหมักเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อกระบวนการเมแทบอลิซึมของยีสต์และส่งผลต่ออัตราการเติบโตของเซลล์ยีสต์[5] จากเหตุผลดังกล่าวจะเห็นว่ากระบวนการหมักไวน์ควรมีการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในค่าที่เหมาะสม จากแนวคิดในการออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิในงานด้านต่าง ๆ เช่น การใช้ระบบควบคุมอุณหภูมิในโรงเรือนปลูกผักและเมล่อนเพื่อให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพ[6,7] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาและออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการหมักไวน์เพื่อควบคุมคุณภาพของกระบวนการและผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยังเป็นแนวทางในการนำไปต่อยอดการผลิตในระดับชุมชนได้

วิธีดำเนินการวิจัย

ผู้วิจัยกำหนดขอบเขตการศึกษาเน้นที่กระบวนการหมักเนื่องจากเป็นกระบวนการที่สำคัญในการผลิตไวน์จึงจำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิซึ่งเป็นตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไวน์ เนื่องจากในระดับอุตสาหกรรมจะใช้เครื่องหรือถังหมักไวน์ขนาดใหญ่ซึ่งมีมูลค่าสูง ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการจำลองถังหมักไวน์เพื่อใช้

ในครัวเรือนหรือวิสาหกิจชุมชนและควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

1. การออกแบบและสร้างระบบควบคุมอุณหภูมิสำหรับกระบวนการหมักไวน์

1.1 การควบคุมความเย็น

ในการทดลองนี้ใช้กล่องโฟมขนาด กว้างxยาวxสูง 45x60x31 เซนติเมตร เพียงพอสำหรับใส่ขวดหมักไวน์ ขนาด 2 ลิตร การทำความเย็นใช้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเพลเทียร์ (Peltier) สามารถนำมาควบคุมการทำความเย็นด้วยพลังงานไฟฟ้าเหมาะกับการทำความเย็นในพื้นที่ขนาดเล็กและเหมาะสำหรับการนำไปใช้งานในการหมักไวน์ในระดับชุมชน โดยแผ่นทำความเย็นใช้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเพลเทียร์ รุ่น TEC1-12706 ขนาด 12 VDC 72 W หลักการทำงานเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปในแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเพลเทียร์ สารกึ่งตัวนำชนิด P-N Type ภายในแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเพลเทียร์ ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำ N Type จะมีประจุส่วนมากเป็นอิเล็กตรอน (Electron) จะมีขั้วเป็นลบ ส่วนสารกึ่งตัวนำ P Type จะมีประจุส่วนมากเป็นโฮล (Hole) จะมีขั้วเป็นบวก ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิบนแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเพลเทียร์โดยด้านบนจะเย็นส่วนด้านล่างจะร้อน[8] (Figure 1)

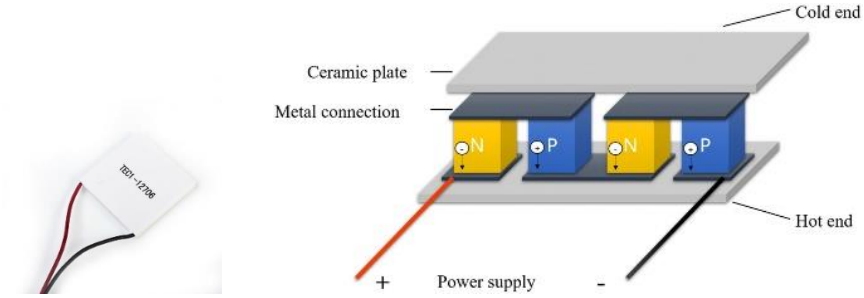

Figure 1 Thermoelectric cooler peltier

1.2 ทฤษฎีระบบการควบคุมอุณหภูมิ

การควบคุมแบบวงปิด (Closed Loop Control) โดยมีหลักการคือใช้ค่าผิดพลาด (Error) ของระบบควบคุมที่ได้มาจากค่าที่ตั้งไว้นำค่าผิดพลาดมาคำนวณจนได้ผลลัพธ์และนำไปควบคุมระบบจนกระทั่งค่าผิดพลาดเข้าสู่ศูนย์ ในการทดลองนี้เลือกใช้การควบคุมแบบวงปิดแบบ Proportional Integral Derivative Control (PID) เนื่องจากเป็นระบบควบคุมแบบ PID ที่ใช้งานในอุตสาหกรรมที่มีการใช้ควบคุมอุณหภูมิอย่างกว้างขวางและมีความน่าเชื่อถือ เมื่อนำระบบควบคุมแบบ PID มาเขียนโปรแกรมลงในชุดควบคุมความความเย็นอัตโนมัติ ซึ่งมีหลักการคือลดค่าผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของระบบควบคุมแบบ PID ตามองค์ประกอบ 3 ส่วนคือ ค่า P (Proportional control) เป็นการควบคุมตอบสนองความเร็วในการควบคุมอุณหภูมิ ค่า I (Integral control)

เป็นการควบคุมเพื่อลดค่าความผิดพลาดเมื่อสถานะคงตัวของระบบให้ค่าผิดพลาดน้อยลง และค่า D (Derivative control action) เป็นการควบคุมเพิ่มเสถียรภาพระบบมากขึ้นด้วยการเพิ่มค่าความหน่วงให้กับระบบ (Figure 2) ระบบควบคุมแบบ PID ค่า $\tau(t)$ คือ Input หรือค่าเป้าหมาย (set point) ที่ตั้งค่าไว้ y(t) คือค่าของตัวแปรกระบวนการ และ e(t) คือค่าคลาดเคลื่อน (error) สามารถคำนวณได้จากค่า $\tau(t) - y(t)$ การทำงานตามกระบวนค่า error จะถูกนำมาคำนวณแบบวนลูปเพื่อส่งค่าควบคุมระบบ u(t) วนลูปซ้ำจนกระทั่งค่าผิดพลาดเข้าใกล้ศูนย์ การปรับแต่งระบบให้สามารถตอบสนองได้รวดเร็วและมีเสถียรภาพสามารถทำได้จากการปรับแต่งค่า Kp คือ ค่า Proportional Gain, Ki คือ ค่า Integral Gain, Kd คือ ค่า Derivative Gain ดังนั้น Kp, Ki, Kd ทำให้ค่า output y(t) เข้าสู่ค่า Input set point $\tau(t)$ ได้อย่างถูกต้องและตอบสนองภายในเวลาที่เหมาะสม[9]

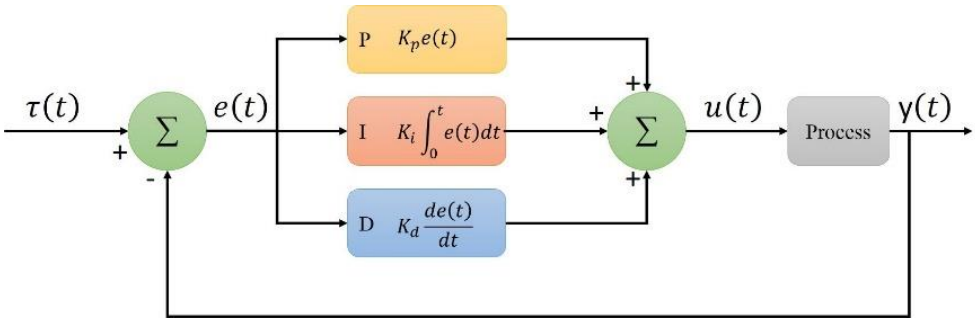

Figure 2 Block diagram of PID control system

จากทฤษฎีการควบคุมแบบวงปิดแบบ PID นำมาประยุกต์ใช้งานด้วยการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา C++ ลงในไมโครคอนโทลเลอร์ Arduino Uno R3 ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่นำมาประมวลผลระบบควบคุม โดยในการทดลองนี้นำมาใช้ควบคุมอุปกรณ์ทำความเย็นแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเพลเทียร์ รุ่น TEC1-2706 ที่ใช้ไฟฟ้าชนิดกระแสตรงขนาด 12 โวลต์และมีกำลังทำความเย็นภายในกล่อง 60 วัตต์ จึงสามารถทำความเย็นได้ตามอุณหภูมิที่ต้องการ แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเพลเทียร์พร้อมชุดพัดลมจ่ายความเย็นติดตั้งภายในกล่องโฟมและพัดลมระบายความร้อนอยู่ด้านนอก มีการตรวจจับสัญญาณอุณหภูมิภายในกล่องโฟมโดยใช้เซนเซอร์ ชนิด Thermister NTC 10K ค่าอุณหภูมิจะส่งไปประมวลผลที่ไมโครคอนโทลเลอร์ และส่งค่าผลลัพท์ (Output) ไปยังชุดขับ Pulse Width Modulation (PWM) เพื่อควบคุมการทำความเย็นแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเพลเทียร์ที่ติดตั้งในกล่องโฟมจนกระทั่งได้อุณภูมิที่ต้องการ โดยใช้ค่าปรับแต่งจากการทดลองด้วยสัดส่วน Kp:30, Ki:5 และ Kd: 0.5 ให้กับชุดทำความเย็นให้เหมาะสมเพื่อความคุมอุณภูมิให้ได้ตามที่ตั้งค่าไว้แบบอัตโนมัติและแสดงผลสถานะการควบคุมอุณหภูมิผ่านจอ LCD (Figure 3)

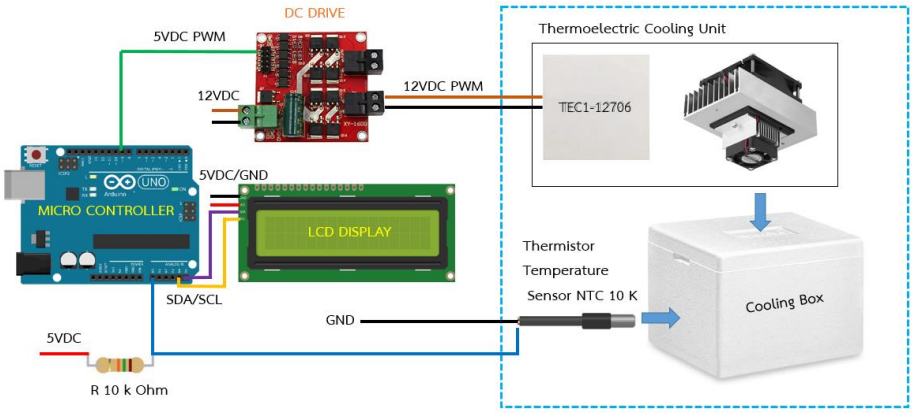

Figure 3 PID cooling control system diagram

2. การทดลองใช้ระบบควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการหมักไวน์

จำลองกระบวนการผลิตไวน์กระเจี๊ยบ โดยนำกระเจี๊ยบแห้งมาล้างให้สะอาด จากนั้นนำมาต้มโดยใช้กระเจี๊ยบ 100 กรัมต่อน้ำ 500 มิลลิลิตร ต้มในน้ำเดือดนาน 10 นาที กรองเนื้อกระเจี๊ยบออกด้วยผ้าขาวบาง[10] ปรับปริมาตรให้ได้ 1.50 ลิตร จากนั้นเติมน้ำตาลทรายเพื่อปรับค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ให้อยู่ที่ช่วง 20 องศาบริกซ์ จากนั้นนำไปฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที[4] เมื่อเตรียมเรียบร้อยแล้ว ทิ้งไว้ให้เย็น เทลงในถังหมักขนาด 2.0 ลิตร เติมหัวเชื้อยีสต์สำเร็จรูปลงไปโดยเลือกใช้เชื้อยีสต์สำเร็จรูปทางการค้า *S. cerevisiae* EC-1118 ใช้หัวเชื้อเริ่มต้น 1 กรัมต่อลิตร[1] ทำการบ่มเป็นระยะเวลา 10 วัน ในระบบควบคุมอุณหภูมิที่สร้างเสร็จเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบ (Figure 4 และ Figure 5)

(a) (b)

Figure 4 (a) Wine fermentation (b) Wine fermentation in cooling box

(a) (b)

(c)

Figure 5 (a) PID cooling control (b) Thermoelectric cooling unit (c) LCD display

3. การเก็บข้อมูลผลการทดลอง

3.1. ผลการทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิ

การทดสอบการทำงานของระบบโดยควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 20-25 องศาเซลเซียส จึงตั้งค่าอุณหภูมิในระบบที่ 22.50 องศาเซลเซียสเพื่อให้เหมาะกับสภาวะการหมัก และเก็บค่าอุณหภูมิโดยใช้การเก็บข้อมูลผ่าน Serial interface โดยใช้โปรแกรม excel จากนั้นยืนยันผลอุปกรณ์ในการอ่านค่าอุณหภูมิในระบบทำความเย็นด้วยค่าอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์และเทอร์โมเซนต์เซอร์ด้วยการทดสอบทางสถิติเพื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิในระบบทำความเย็น โดยเก็บข้อมูลอย่างละ 15 ค่า เพื่อทำการทดสอบสมมติฐานว่าค่าที่อ่านได้ในระบบจากทั้งสองอุปกรณ์มีความแตกต่างกันหรือไม่โดยมีสมมติฐาน ดังนี้

$$H_0: \mu = 22.50$$

$$H_1: \mu \neq 22.50$$

จากนั้นเก็บข้อมูลของระบบและนำข้อมูลมาสร้างแผนภูมิควบคุม แผนภูมิ Individual Moving Range (I-MR) เพื่อประเมินว่ากระบวนการอยู่ในการควบคุมผ่านการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของกระบวนการด้วยข้อมูลที่ต่อเนื่อง ค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนของชุดข้อมูลจะคำนวณจากพิสัยเคลื่อนที่ (Moving Range, MR) กำหนดค่า n = 2 ของข้อมูลที่ติดกัน[11]

3.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีระหว่างการหมักไวน์

วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีระหว่างการหมักไวน์โดยการวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยใช้พีเอชมิเตอร์ วิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total soluble solid, TSS) โดยใช้ Hand refractometer วิเคราะห์ปริมาณแอลกอฮอล์โดยใช้เครื่อง Hydrometer[12]

ผลการวิจัย

ผลการทดลองระบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ จากการออกแบบไดอะแกรม นำมาติดตั้งระบบควบคุมอุณหภูมิในกล่องโฟม โดยวัดค่าอุณหภูมิด้วยเทอร์โมเซนต์เซอร์และเก็บข้อมูลผ่านระบบคอมพิวเตอร์ เนื่องจากค่าที่ต้องการควบคุมอยู่ในช่วง 20-25 องศาเซลเซียส และระบบจะเข้าสู่ค่าอุณหภูมิเป้าหมายที่ 22.50 องศาเซลเซียส ผลของอุณหภูมิจะแสดงด้วยจอ LCD ผลการทดลองพบว่าระบบควบคุมอุณหภูมิจะทำงานแบบอัตโนมัติ โดยอุณหภูมิเริ่มต้น 29.43 องศาเซลเซียส จะปรับอุณหภูมิหาค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้ คือ 22.50 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นข้อมูลช่วงค่าที่ 1 ถึง 10 จากนั้นระบบระบบจะควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 22.50±2.50 องศาเซลเซียส และเก็บค่าข้อมูลตัวอย่าง 50 ค่า ด้วย excel เพื่อให้เห็นการควบคุมอุณหภูมิของระบบแสดง (Table 1) และกราฟ (Figure 6)

Table 1 Temperature data in fermentation process control

Period	Temperature (°C)	Period	Temperature (°C)
1	29.43	26	22.18
2	28.25	27	22.27
3	27.16	28	21.92
4	26.18	29	22.27
5	25.39	30	21.92
6	24.87	31	22.10
7	24.26	32	22.18
8	23.65	33	22.10
9	23.30	34	22.27
10	22.90	35	22.53
11	22.79	36	22.27
12	22.27	37	22.18
13	22.50	38	21.92
14	22.35	39	22.18
15	22.35	40	22.18
16	22.01	41	22.01
17	22.01	42	22.18
18	22.27	43	21.92
19	22.01	44	22.10
20	22.61	45	22.01
21	22.53	46	21.84
22	22.10	47	22.18
23	21.75	48	21.92
24	21.84	49	22.18
25	22.18	50	22.18

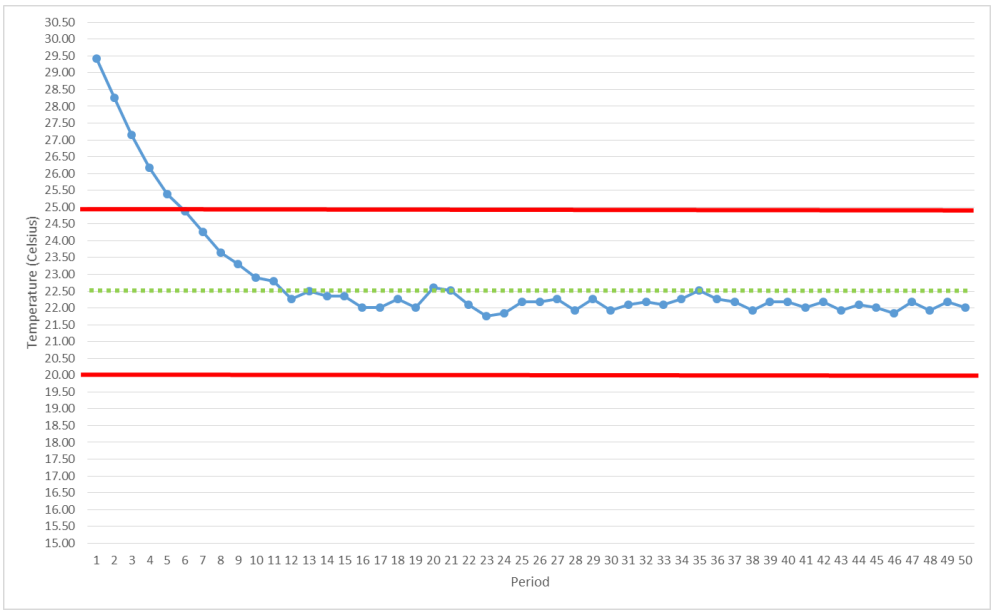

Figure 6 Temperature trend

ผลการทดสอบทางสถิติเพื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิในระบบควบคุมความเย็นด้วยข้อมูลจากเทอร์โมมิเตอร์ (Temp in) และเทอร์โมเซนต์เซอร์ (Temp out) มีความแตกต่างกันหรือไม่โดยใช้การทดสอบด้วย t-test ได้ผลดังนี้ (Figure 7) ผลการทดสอบสมมติฐานจาก Figure 7 พบว่าค่า p-value = 0.526 หมายความว่าไม่ปฏิเสธ H_0 สรุปว่าค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์ I สองชนิดมีค่าไม่แตกต่างกัน ดังนั้น ค่าข้อมูลที่อ่านจากจอ LCD จึงมีความน่าเชื่อถือ และผลทดสอบการทำงานของระบบควบคุมเพื่อติดตามความเสถียรของกระบวนการ (Process Stability) โดยใช้แผนภูมิควบคุม I-MR ซึ่งพิจารณาจากค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนของข้อมูลที่บันทึกได้จาก (Figure 8) พบว่าไม่มีจุดใดอยู่นอกขีดจำกัดการควบคุมและแต่ละจุดแสดงรูปแบบการกระจายตัวแบบสุ่ม สรุปได้ว่าเป็นกระบวนการที่เสถียรและอยู่ในขอบเขตการควบคุม

Two-Sample T-Test and CI: Temp in, Temp out

```
Two-sample T for Temp in vs Temp out

             N     Mean  StDev  SE Mean
Temp in     15   22.173  0.616     0.16
Temp out    15   22.280  0.167    0.043


Difference = μ (Temp in) - μ (Temp out)
Estimate for difference:  -0.107
95% CI for difference:  (-0.456, 0.243)
T-Test of difference = 0 (vs ≠): T-Value = -0.65  P-Value = 0.526
```

Figure 7 Result of hypothesis test

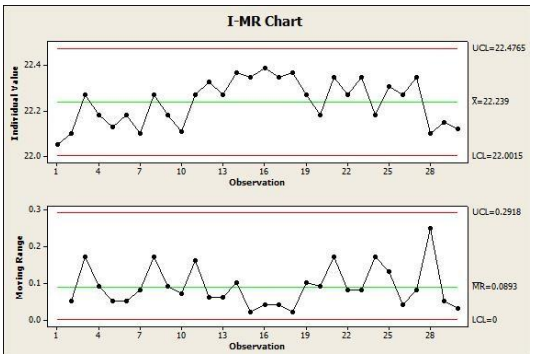

Figure 8 Process monitoring by I-MR Control chart

ผลการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีระหว่างการหมักไวน์ จากการศึกษาการหมักไวน์กระเจี๊ยบโดยใช้เชื้อยีสต์ *S. cerevisiae* EC-1118 ทำการหมักที่มีการควบคุมอุณหภูมิ 20-25 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 10 วัน เก็บตัวอย่างเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของไวน์ด้วยการวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง วิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด วิเคราะห์ปริมาณแอลกอฮอล์ จากผลการศึกษาพบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างในกระบวนการหมักมีค่าลดลงจาก 2.85 เป็น 2.70 การลดลงของค่าความเป็นกรดด่างเป็นผลมาจากปริมาณกรดที่เพิ่มขึ้นระหว่างที่ยีสต์ย่อยสลายน้ำตาลและผลิตแอลกอฮอล์ไปพร้อม ๆ กับการสร้างกรดเพิ่มขึ้นในระหว่างการหมัก[13] จากการศึกษาองค์ประกอบของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำระหว่างกระบวนการหมักไวน์พบว่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ระหว่างกระบวนการหมักเป็นระยะเวลา 10 วัน ปริมาณของแข็งที่ละลายได้มีค่าลดลงจาก 20 องศาบริกซ์ เหลือ 4.91 องศาบริกซ์ เนื่องจากกิจกรรมของยีสต์เปลี่ยนน้ำตาลไปเป็นแอลกอฮอล์ดัง Figure 9 ส่วนผลการวิเคราะห์ปริมาณแอลกอฮอล์พบว่าในช่วงแรกปริมาณแอลกอฮอล์ยังไม่สามารถวัดค่าได้ เนื่องจากยีสต์ยังไม่มีการผลิตแอลกอฮอล์ และเมื่อทำการหมัก 7 วัน ทำการวัดปริมาณแอลกอฮอล์พบว่ามีค่าเท่ากับ 7.60 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรและในวันที่ 10 จะมีปริมาณแอลกอฮอล์เท่ากับ 9.50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรจากการทดลองทำให้ทราบว่ามีกิจกรรมของยีสต์ในการเปลี่ยนน้ำตาลไปเป็นแอลกอฮอล์ เมื่อใช้เวลาในการหมักมากขึ้นปริมาณแอลกอฮอล์ค่อย ๆ สูงขึ้น พร้อม ๆ กับปริมาณของแข็งที่ละลายได้และค่าความเป็นกรด-ด่างลดลง

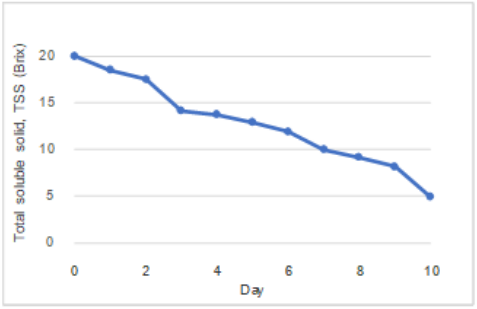

Figure 9 Total soluble solid of Roselle Wine

อภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษาการหมักไวน์กระเจี๊ยบโดยใช้ยีสต์ *S. cerevisiae* EC-1118 ทำการหมักที่มีการควบคุมอุณหภูมิ 20-25 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 10 วัน เก็บตัวอย่างเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของไวน์ พบว่าเมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าลดลง เกิดจากปริมาณกรดอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการทำงานของยีสต์ในระหว่างที่ยีสต์มีการย่อยสลายน้ำตาลจะทำการผลิตแอลกอฮอล์ไปพร้อมกับการสร้างกรดเพิ่มขึ้นในระหว่างการหมัก[9] และในระหว่างกระบวนการหมักจนถึงวันที่ 10 ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดจะมีค่าลดลงจาก 20 องศาบริกซ์ เหลือ 4.91 องศาบริกซ์ สอดคล้องกับการศึกษาการผลิตไวน์สละโดยเชื้อ *S. cerevisiae* EC-1118 เมื่อหมักเป็นเวลา 10 วัน ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดจะมีค่าลดลงเหลือ 5.0-6.0 องศาบริกซ์[1] ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (TSS) ที่ลดลง นอกจากนี้ปริมาณแอลกอฮอล์ที่ได้ยังสอดคล้อง

กับงานวิจัยที่ทำการศึกษาการผลิตไวน์จากกระเจี๊ยบและกระเจี๊ยบผสมผลไม้อื่น ๆ ด้วยยีสต์ *S. cerevisiae* ในสภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิในการหมัก 10-15 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 14 วัน พบว่าไวน์ Roselle Sweet Wine มีปริมาณแอลกอฮอล์เท่ากับ 9.22 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้เท่ากับ 5.04 องศาบริกซ์[14] จากผลการทดลองศึกษาระบบควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการหมักไวน์พบว่ากระบวนการหมักใช้ระยะเวลาในการหมักเพื่อให้เกิดการใช้น้ำตาลและผลิตเป็นแอลกอฮอล์ใช้ระยะเวลาสั้นกว่าการหมักที่อุณหภูมิห้องซึ่งใช้ระยะเวลาประมาณ 2-4 สัปดาห์ เนื่องจากมีการควบคุมอุณหภูมิระหว่างการหมักไวน์ในช่วงที่เหมาะสมต่อการหมักไวน์คือ 20-25 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลา 10 วัน ให้ผลผลิตของไวน์ที่มีปริมาณแอลกอฮอล์สูงสอดคล้องกับปริมาณแอลกอฮอล์ของเทเบิ้ลไวน์ซึ่งเป็นไวน์ที่แรงแอลกอฮอล์ตามธรรมชาติที่เกิดจากการหมักไม่ต่ำกว่า 7 และไม่สูงกว่า 15 ดีกรี (ร้อยละโดยปริมาตร) และไวน์ผลไม้มีปริมาณแอลกอฮอล์ไม่เกิน 15 ดีกรี (ร้อยละโดยปริมาตร) ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไวน์[15]

จากแนวคิดในการออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิในงานด้านต่าง ๆ เช่น ในด้านการเกษตรได้นำระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นมาใช้ในโรงเรือนเพาะเห็ดพบว่าระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและเห็ดให้ผลผลิตเป็นอย่างดี[16] และยังนำระบบนี้แสดงผลผ่านสมาร์ทโฟนพบว่าระบบสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตามค่าที่กำหนดที่ช่วง 26-27 องศาเซลเซียส ซึ่งเหมาะสมกับการเพาะปลูกเห็ดนางฟ้า[17] และระบบนี้นำมาเพาะปลูกเห็ดฟางโดยปรับอุณหภูมิและความชื้นให้เหมาะสม พบว่าเห็ดฟางมีผลผลิตที่มากขึ้น จึงทำให้ผู้เพาะปลูกมีรายได้ที่มากขึ้น[18] ในโรงเรือนเมล่อนสามารถใช้ระบบควบคุมอุณหภูมิเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิให้เหมาะสมกับการปลูกเมล่อน ผลการวิจัยพบว่าระบบที่ทำขึ้นสามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมได้[19] การออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิยังสามารถประยุกต์เพื่อแก้ไขปัญหาชุมชนที่มีการเลี้ยงไก่และฟักไข่ขาย จึงนำระบบนี้มาทดลองควบคุมอุณหภูมิด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ 37 องศาเซลเซียส และระดับความชื้นที่ 66-69 เปอร์เซ็นต์ เป็นค่าที่เหมาะสมในตู้ฟักไข่ พบว่าค่าที่ได้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด[20] หรือในฟาร์มเลี้ยงพ่อแม่พันธุ์กุ้งก้ามแดงได้นำระบบนี้ไปใช้ในการควบคุมคุณภาพน้ำด้วยการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 25-29 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่าง ในช่วง 7-9 และออกซิเจนในน้ำมีค่ามากกว่า 4 ppm ซึ่งควบคุมแบบอัตโนมัติให้มีค่าที่เหมาะสมเพราะปัจจัยเหล่านี้ส่งผลต่อการเติบโตของกุ้ง ผลการทดลองพบว่าระบบสามารถปรับค่าปัจจัยให้อยู่ในค่าที่เหมาะสมกับการเติบโตของกุ้ง[21] ในการผลิตไวน์ข้าวมีการออกแบบระบบการควบคุมอุณหภูมิโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการปรับค่าอุณหภูมิอัตโนมัติ[22] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ที่มีการควบคุมอุณหภูมิซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการหมักไวน์และเป็นการควบคุมคุณภาพของกระบวนการและผลิตภัณฑ์ไวน์ ดังนั้นจะเห็นว่าระบบควบคุมอุณหภูมิแบบอัตโนมัติสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ ได้

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างระบบควบคุมอุณหภูมิแบบอัตโนมัติในกระบวนการหมักไวน์ ซึ่งเป็นกระบวนการสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยระบบที่สร้างสามารถควบคุมอุณหภูมิการหมักในช่วงที่เหมาะสมคือ 20-25 องศาเซลเซียส และมีการเก็บข้อมูลอุณภูมิอย่างต่อเนื่องเพื่อควบคุมกระบวนการโดยใช้แผนภูมิควบคุม ผลวิจัยพบว่าเมื่อมีการใช้ระบบควบคุมอุณหภูมิในระดับที่เหมาะสมและผลการตรวจติดตามพบว่าระบบมีความเสถียร ทำให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพโดยมีผลทำให้ระยะเวลาในการหมักไวน์สั้นลง และให้ผลผลิตคือปริมาณแอลกอฮอล์ที่ได้มีปริมาณสูง ดังนั้น จึงเป็นแนวทางในการนำระบบควบคุมอุณหภูมิไปต่อยอดการผลิตที่ต้องการผลิตในปริมาณที่มากขึ้นและสามารถนำแนวคิดนี้ไปประยุกต์ในงานด้านอื่น ๆ ที่ต้องการควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้

เอกสารอ้างอิง

1. วาสนา สุโยธา, สุรศักดิ์ บุญรุ่ง. การศึกษาอัตราส่วนเนื้อสละและชนิดของยีสต์ที่เหมาะสมต่อการผลิตไวน์.วารสารเกษตรพระจอมเกล้า 2564;39:156-64.
2. ณัฏฐ์นรี เอกระ, ณิชนันท์ บุญมาก,อำนาจ ภักดีโต. การหมักไวน์น้ำตาลสดผสมกระชายดำของ *Saccharomyces cerevisiae* สายพันธุ์มาตรฐานและยีสต์ที่แยกจากน้ำตาลเมา. วารสารเกษตรพระวรุณ 2558;12:41-8.
3. นุจรี สอนสะอาด, นิราภรณ์ ทองปลิว, พรทิพา ทองแม้น. การผลิตไวน์ผสมจากแก่นตะวันและหม่อน. รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติ “ราชมงคลสุรินทร์วิชาการ ครั้ง ที่ 8” “วิจัยเพื่อประเทศ ไทย 4.0” 22 - 23 ธันวาคม 2559. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์. สุรินทร์: 2559.
4. ประภาพันธ์ ศิริขันธ์แสง, ณัฐมล แสนโคตร, ละอองทิพย์ ชุ่มเสนา. การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและทางประสาทสัมผัสของไวน์กระเจี๊ยบและไวน์กระเจี๊ยบผสมลูกหม่อน. วารสารวิจัย 2563;13:111-19.
5. Margean A, Padureanu V, Calefariu G. The Influence of Fermentation Temperature on White Wine Characteristics. Proceedings of ICMS2019&COMEC2019. 21-22 November 2019. Brasov Romania. 2019.
6. ขจรศักดิ์ พงศ์ธนา, ชัยวัฒน์ สากุล. โรงเรือนแบบไฮโดรโปนิกส์ที่มีระบบการควบคุมแบบอัตโนมัติโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์. วารสารราชมงคลกรุงเทพ 2562;12:65-77.
7. เอกรัฐ ชะอุ่มเอียด, เดือนแรม แพ่งเกี่ยว. การควบคุมความชื้นในดินสำหรับโรงเรือนเมล่อน. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย 2562;11:269-78.
8. จิรายุสวัฒ ประสม, สิทธิโชค สืบแต่ตระกูล, ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์. การศึกษาคุณลักษณะของการทำความเย็นแบบเทอร์โมอิเล็กทริก. รายงานการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 33

วันที่ 2-5 กรกฎาคม พ.ศ. 2562; อุดรธานี: 2562.

9. Pacco HC. Simulation in the temperature parameters control in the yogurts manufacturing process. Procedia Comput Sci 2023;217:286-95.
10. Alobo AP, Offonry SU. Characteristics of coloured wine produced from Roselle (*Hibiscus sabdariffa*) calyx extract. J Inst Brew 2009;115:91-4.
11. กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ. กรุงเทพ: สำนักพิมพ์ ส.ส.ท; 2549.
12. Pambianchi D. Modern Home Winemaking, A Guide to Making Consistently Great Wines. Canada: Véhicule Press; 2021.
13. Chanprasartsuk O, Pheanudomkitlert K, Toonwai D. Pineapple wine fermentation with yeasts isolated from fruit as single and mixed starter cultures. As J Food Ag-Ind 2012;5:104-11.
14. Gaharwar AM, Ughade JD, Madake M, Lokhande C, Nagarkar R. Study on preparation of roselle and fruits blended roselle wine using yeast *Saccharomyces cerevisiae*. J Pharmacogn Phytochem 2018;7:1338-41.
15. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไวน์. มอก. 2089-2544. กรุงเทพฯ; 2544.
16. ศุภวุฒิ ผากา, สันติ วงศ์ใหญ่, อดิศร ถมยา. การพัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเห็ดในโรงเพาะเห็ดบ้านทุ่งบ่อแป้น ตำบลปงยางคก อำเภอห้างฉัตร จังหวัดลำปาง. วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง 2557;7:58-69.
17. อัษฎางค์ บุญศรี, นิวดี คลังสีดา, จารุกิตติ์ พิบูลนฤดม, ธัญญลักษณ์ บุตรศรีเพชร, เพ็ญนภา ทองแฉล้ม การพัฒนาระบบควบคุมความชื้นและอุณหภูมิในโรงเรือนเพาะเห็ดนางฟ้าด้วยระบบสมาร์ทโฟน. การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 4 ด้านนวัตกรรมเพื่อการเรียนรู้และสิ่งประดิษฐ์ประจำปี 2563; 17 ธันวาคม 2563 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. ปทุมธานี: 2563
18. พิทักษ์ คล้ายชม, อภิศักดิ์ พรมฝาย, ไพโรจน์ นะเที่ยง, นุภากร พร้อมมูล, วัชรินทร์ วัฒนเชษฐ์, ณัฏฐพล พิศพันธุ์. การพัฒนาระบบควบคุมสภาพแวดล้อมอัตโนมัติสำหรับโรงเพาะเห็ดฟางบนพื้นฐานของอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง วารสารเทคโนโลยีและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ 2565;5:25-39.
19. วิเชียร ดวงสีเสน. การพัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิภายในโรงเรือนปลูกเมล่อน. สักทอง วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สทวท.) 2565;9:39-50.
20. ทวีลาภ เสาร์ประโคน, บารมี หรีกประโคน, จักรมงคล แป้นประโคน, วิสิทธิ์ ลุมชะเนาว์. การออกแบบและสร้างชุดควบคุมตู้ฟักไข่ด้วยระบบไมโครคอนโทรลเลอร์. วารสารวิชาการคณะ

เทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ 2563:2:67-73.

21. ธเนศ ตั้งจิตเจริญเลิศ, ธัญภพ ศิริมาศเกษม, อิสรี ศรีคุณ, ศักดิ์ศรี แก่นสม, กวีพจน์ วรเนตรสุทธิกุล. ระบบควบคุมคุณภาพน้ำแบบอัตโนมัติสำหรับเพาะเลี้ยงพ่อแม่พันธุ์กุ้งก้ามแดง. วารสารวิจัยราชภัฏพระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 2563;15:111-21.

22. Shengyi Z, Xinming W. The Design of Temperature Control System for Rice Wine Fermentation. Proceedings of the 2nd International Conference on Systems Engineering and Modeling (ICSEM-13); 21-22 April 2013; Beijing: 2013