

เครื่องนับจำนวนฟองก๊าซในกระบวนการหมักโดยใช้ Arduino ควบคุม

Gas Bubble Counters in the Fermentation Process by using Arduino Controller

มงคล วรรณประภา (Mongkol Wannaprapa) *

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอ เครื่องนับจำนวนฟองก๊าซในกระบวนการหมักที่ได้สร้างขึ้นนี้ ประกอบด้วย หลอดแก้วรูปทรงตัว S ซึ่งทำหน้าที่ลำเลียงน้ำหรือฟองที่ได้จากกระบวนการหมักในถังหมัก ให้ไหลผ่านและป้องกันไม่ให้ไหลย้อนกลับไปยังถังได้อีกครั้ง โดยมี Photo sensor เป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งบนหลอดแก้วรูปทรงตัว S ทำหน้าที่ตรวจจับจำนวนฟองก๊าซที่เคลื่อนที่ผ่านหลอดแก้ว สัญญาณการนับจำนวนจาก Photo sensor นี้ จะถูกขยายสัญญาณที่ OP-Amp ก่อน จากนั้นสัญญาณนี้จะถูกส่งต่อไปหน่วยประมวลผลที่ไม่โครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 พร้อมแสดงผลการนับจำนวนออกทาง Seven-segment 4 หลัก และสามารถเก็บบันทึกข้อมูลการนับจำนวนฟองก๊าซได้ เครื่องนับจำนวนฟองก๊าซนี้ยังมีภาคของการตั้งค่าจำนวนนับที่ต้องการและมีการแจ้งเตือนด้วยเสียงที่ Buzzer ในกรณีเสร็จสิ้นการทำงาน นอกจากนี้ยังได้ทดสอบหาความถูกต้องแม่นยำและประสิทธิภาพของเครื่องที่ได้พัฒนาขึ้นนี้พบว่าเครื่องนับจำนวนฟองก๊าซสามารถนับจำนวนฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการหมักแปรผันโดยตรงกับปริมาตรของเอทิลแอลกอฮอล์ ได้อย่างมีประสิทธิภาพดี

คำสำคัญ : เครื่องนับจำนวนฟองก๊าซ กระบวนการหมัก

Abstract

This research presents a gas bubble counter in the fermentation process consisting of an S-shaped glass tube, which allow fluids out and prevent them from flowing back into a fermentation tank. Photo sensor mounted on the S-shaped glass tube detects number of gas bubbles passing through. Counting signals from photo sensor are amplified and analyzed by OP-Amp and Arduino Mega 2560 microcontroller, respectively, showing counting data out on Seven-segment 4-bit and further recording. This equipment has a past that can be set a count to desired value and also has an alarm sound at the end of work (Buzzer). Accuracy and efficiency of gas bubble counter have been tested. It was found that number of carbon dioxide (CO₂) bubbles is directly proportional to the amount of ethyl alcohol (C₂H₅OH), indicating that this equipment can measure gas bubble effectively.

Keywords: Gas Bubble Counters, Fermentation Process

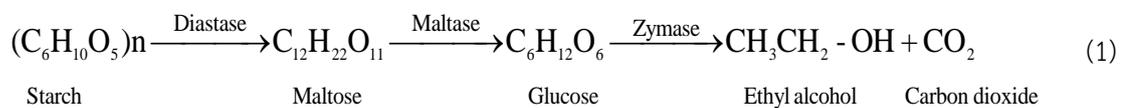
* รองศาสตราจารย์ ดร. อาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
Email, W.mongkol2011@gmail.com โทร 086-814-6327

บทนำ

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติแล้วได้ก๊าซเป็นผลิตภัณฑ์นั้นมีมากมายหลายชนิด ซึ่งในการตรวจวัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถใช้บ่งชี้ถึงประสิทธิภาพในการดำเนินไปของปฏิกิริยาได้ในการนำหลักการดังกล่าวนี้มาประยุกต์ใช้กับงานด้านชีวภาพ เช่น การศึกษาการเติบโตของสิ่งมีชีวิตกลุ่ม autotroph ซึ่งเป็นกลุ่มที่สามารถสร้างอาหารได้เองนั้นมีปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องคือกระบวนการออกซิโดคาร์โบไฮเดรทหรือสารประกอบอื่นที่มีความคล้ายคลึงกันเพื่อสร้างเป็นพลังงาน ทั้งนี้ปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในสภาพมีออกซิเจน (Aerobic) และปราศจากออกซิเจน (Anaerobic) โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันมักเกิดขึ้นกับน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (Monosaccharide) คือน้ำตาลกลูโคส เป็นส่วนใหญ่ ซึ่ง (Buchner, E., 1897)

กระบวนการหมัก ในสิ่งมีชีวิตบางกลุ่มมีความจำเพาะของการดำรงชีวิตในสภาพที่ปราศจากออกซิเจน ได้แก่ พวกจุลินทรีย์ประเภท ยีสต์ รวมทั้งราและแบคทีเรียบางชนิด ซึ่งกระบวนการสร้างพลังงานของสิ่งมีชีวิตเหล่านี้เป็นการใช้สารอินทรีย์มาเป็นตัวรับไฮโดรเจนหรืออิเล็กตรอนในขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการแทนการใช้ ออกซิเจน นักจุลชีววิทยาเรียกกระบวนการเช่นนี้ว่า กระบวนการหมัก (Fermentation) (Buchner, E., 1897)

ปัจจุบันเป็นที่ทราบกันว่าอุตสาหกรรมผลิตเอธิลแอลกอฮอล์นั้นเกิดจากกระบวนการหมักโดยอาศัยกลไกการทำงานของเอนไซม์จากยีสต์ในการเปลี่ยนแปลงให้เป็นน้ำตาลมอลโตสและกลูโคสด้วยเอนไซม์ไดเอสเทสและมอลเตส ตามลำดับ จากนั้นเอนไซม์ไซเมสจะเปลี่ยนกลูโคสไปเป็นเอธิลแอลกอฮอล์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ (1)



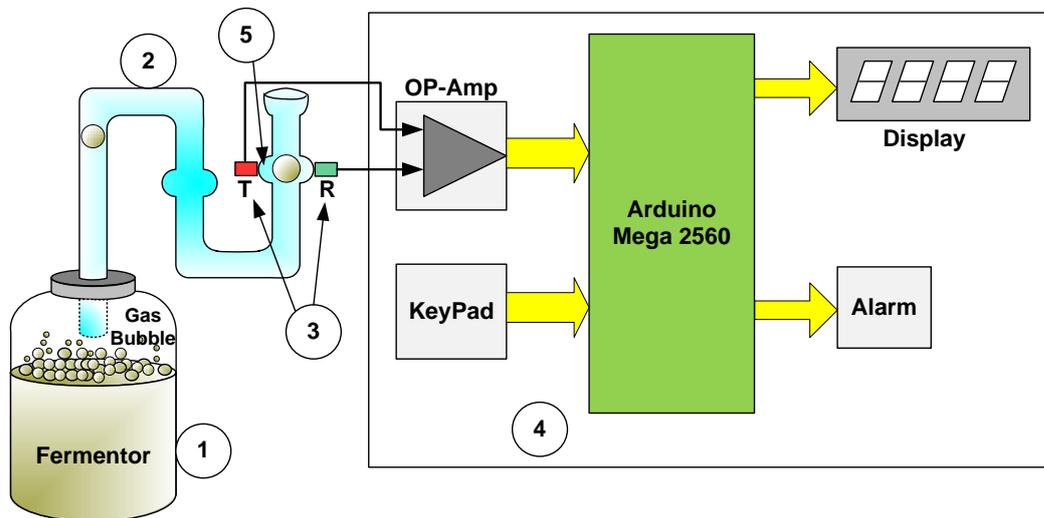
กระบวนการหมักลักษณะนี้จะได้แอลกอฮอล์ประมาณ 12 – 15 เปอร์เซ็นต์ สำหรับกระบวนการที่สมบูรณ์น้ำตาลกลูโคส 1 โมเลกุล จะแตกตัวเป็นเอธิลแอลกอฮอล์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่เท่ากันอย่างละ 2 โมเลกุล ดังสมการที่ (2)



ในการตรวจวัดจำนวนฟองก๊าซที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของกระบวนการหมักและแนวโน้มของปริมาณผลิตภัณฑ์แอลกอฮอล์ที่ได้ เนื่องจากค่าเฉลี่ยของจำนวนฟองก๊าซที่นับได้นั้นเป็นสัดส่วนของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความสัมพันธ์กับปริมาตรของเอธิลแอลกอฮอล์ กล่าวคือถ้าสามารถวัดจำนวนฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ก็จะสามารถทราบปริมาณของแอลกอฮอล์ที่เกิดจากกระบวนการหมักได้นั่นเอง ซึ่งเป็นไปตามสมการปฏิกิริยาทางเคมีที่ (2)

วิธีวิจัย

1. โครงสร้างเครื่องนับจำนวนฟองก๊าซสำหรับกระบวนการหมักนี้ ประกอบด้วยส่วนสำคัญๆ 5 ส่วน ได้แก่ 1) ถังหมักหรือแก้วทดลอง 2) หลอดแก้วรูปตัว S 3) เซ็นเซอร์ (Sensor) และ 4) วงจรประมวลผลนับจำนวนฟองก๊าซ 5) กระจาปะาะแก้วทรงกลม ดังในรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างของเครื่องนับจำนวนฟองก๊าซสำหรับกระบวนการหมักที่ได้พัฒนาขึ้น
จากรูปที่ 1 โครงสร้างของเครื่องนับจำนวนฟองก๊าซสำหรับกระบวนการหมัก ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้:

- หมายเลข 1 ถังหมักหรือแก้วทดลองที่มีฝาปิดสนิทและเจาะรูสำหรับใส่หลอดแก้วรูปตัว S ด้านบน
- หมายเลข 2 หลอดแก้วรูปทรงคล้ายตัว S เป็นทางผ่านของฟองก๊าซ
- หมายเลข 3 เซ็นเซอร์ ใช้เป็น Photo sensor ชนิด Opto-diode ทำหน้าที่เป็นเซ็นเซอร์ในการตรวจนับจำนวนฟองก๊าซที่เกิดขึ้นในกระบวนการหมัก ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนคือ
 - 3.1 ตัวส่งแสง (Transmitter: T)
 - 3.2 ตัวรับแสง (Receiver: R)
- หมายเลข 4 วงจรประมวลผลนับจำนวนฟองก๊าซประกอบด้วย 5 ส่วนสำคัญๆ ดังนี้
 - 4.1 คีย์ (Keypad) เป็นส่วนที่ป้อนข้อมูล และตัวเลขจำนวนฟองก๊าซที่ต้องการจะนับ
 - 4.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 เป็นหน่วยควบคุมหลัก ซึ่งทำหน้าที่ดังนี้
 - เป็นภาครับสัญญาณเข้าจาก เซ็นเซอร์ Photo sensor
 - เป็นภาคส่งสัญญาณที่รับจาก Photo sensor แล้วส่งต่อไปแสดงผลจำนวนนับฟองที่ Seven-segment
 - เป็นภาคส่งสัญญาณออกไปยัง Buzzer เพื่อส่งเสียงแจ้งเตือนเมื่อเสร็จสิ้นการทำงาน
 - 4.3 ออปแอมป์ (OP-Amp) เพื่อขยายสัญญาณที่ได้รับจาก Photo sensor
 - 4.4 ภาคแสดงผล (Display) ใช้เป็น Seven-segment 4 หลักทำหน้าที่แสดงผลของการนับจำนวนฟองก๊าซ
 - 4.5 ใช้ Buzzer เป็นภาคสัญญาณแจ้งเตือนเมื่อทำงานเสร็จสิ้น

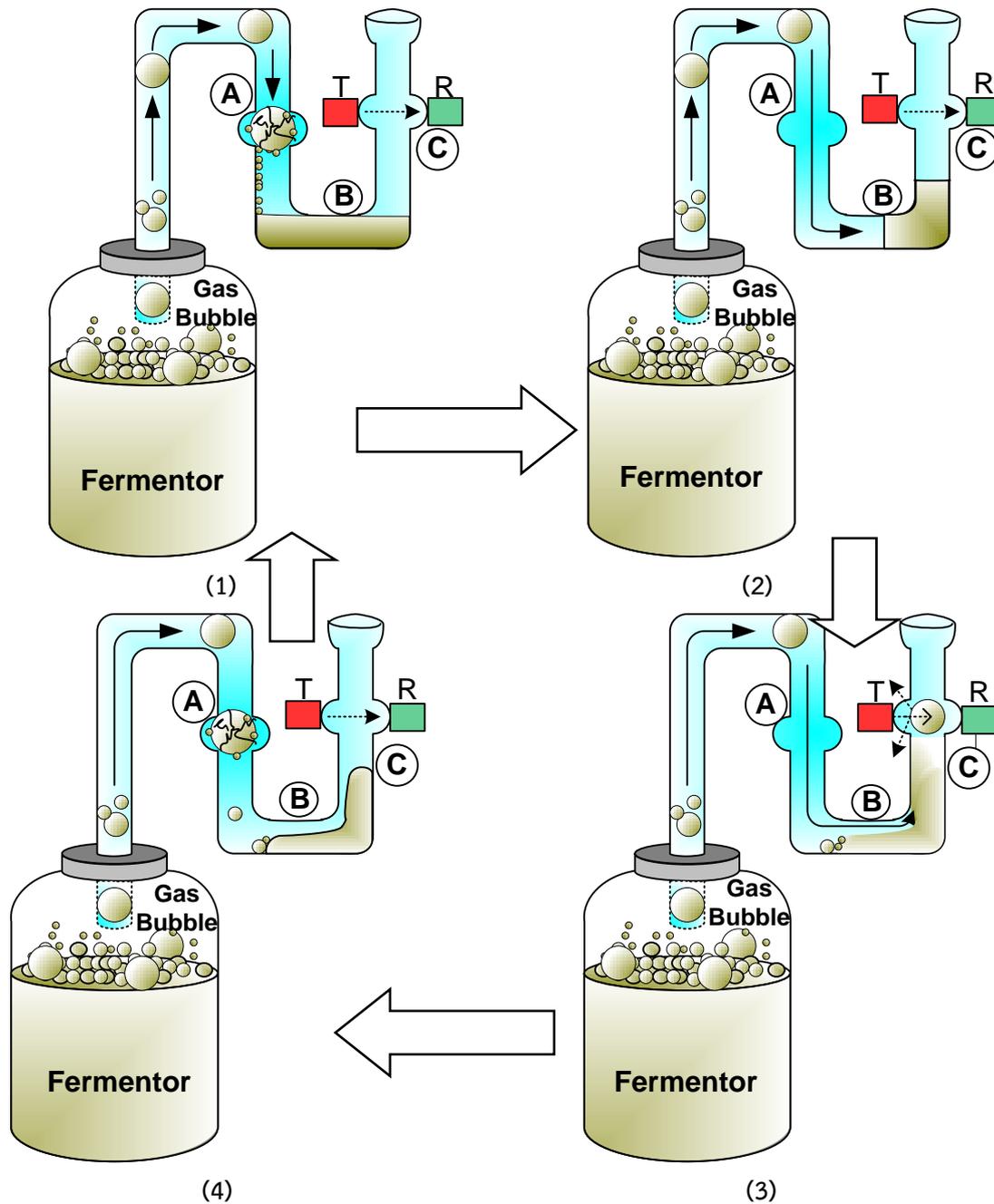
หมายเลข 5 กระเปาะแก้วทรงกลม ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวบังคับให้เกิดฟองก๊าซเป็นรูปทรงกลมที่มีขนาดฟองก๊าซ โดยเฉลี่ยแต่ละฟองใกล้เคียงกันกับขนาดของกระเปาะแก้วทรงกลมและมี Photo sensor ติดตั้งอยู่

2. หลักการของเครื่องนับจำนวนฟองก๊าซ

เครื่องนับจำนวนฟองก๊าซนี้เริ่มรับค่าจำนวนนับฟองที่ต้องการผ่านคีย์ Keypad จากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 จะรอรับสัญญาณการนับจำนวนฟองก๊าซจาก Photo sensor ที่ติดตั้งบนชุดอุปกรณ์หลอดแก้วรูปตัว S ซึ่งเป็นหลอดแก้วบังคับฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักให้เคลื่อนที่ต่อไปยังกระเปาะแก้วทรงกลมซึ่งในส่วนนี้จะมีฟองก๊าซขนาดเล็กสะสมอยู่เป็นจำนวนมากเพียงพอที่สามารถรวมตัวกันใหม่กลายเป็นฟองก๊าซขนาดใหญ่ใกล้เคียงกับขนาดของกระเปาะแก้วทรงกลมเกิดเป็นฟองก๊าซจำนวน 1 ฟองใหม่ขึ้น ดังนั้นขนาดของกระเปาะแก้วทรงกลมนี้จึงทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวกำหนดขนาดของฟองก๊าซแต่ละฟองที่เกิดขึ้นนั่นเอง โดยตำแหน่งนี้มี Photo sensor ทำหน้าที่นับจำนวนฟองก๊าซที่เกิดขึ้นในแต่ละฟองจะถูกสร้างเป็นสัญญาณการตรวจจับฟองก๊าซแต่ละฟองที่เกิดขึ้นแล้วส่งต่อไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 จากนั้นสัญญาณนี้จะถูกนับและเปรียบเทียบกับค่าจำนวนนับที่ตั้งไว้ พร้อมแสดงผลการนับจำนวนฟองก๊าซที่ได้ออกทาง Seven-segment เมื่อได้ค่าครบตามจำนวนที่ต้องการไมโครคอนโทรลเลอร์นี้จะสั่งให้ Buzzer ส่งเสียงแจ้งเตือนขึ้นเมื่อเสร็จสิ้นการทำงาน นอกจากนี้เครื่องนับจำนวนฟองก๊าซนี้ยังสามารถเก็บและบันทึกข้อมูลการนับจำนวนฟองก๊าซได้

ขั้นตอนการเกิดฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการหมักจนกระทั่งถูกนับจำนวนฟองก๊าซด้วย Photo sensor ที่กระเปาะแก้วทรงกลมในหลอดแก้วรูปตัว S แบ่งรายละเอียดได้เป็น 4 ขั้นตอนดังรูปที่ 2 เริ่มต้นโดยใส่หลอดแก้วรูปตัว S ลงในถังหมัก (แก้วทดลอง) ที่ปิดฝาสนิท เมื่อเริ่มต้นกระบวนการหมักภายในถังหมักจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีจนกระทั่งมีฟองก๊าซเกิดขึ้น ซึ่งฟองก๊าซนี้คือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จากนั้นฟองก๊าซเหล่านี้จะเคลื่อนที่ต่อไปรวมกันที่ตำแหน่ง (A) ฟองก๊าซเหล่านี้จะเกิดการแตกตัวกลายเป็นของเหลวเรียกว่าเอซิลแอลกอฮอล์ไหลลงไปตามส้อมรวมตัวกันในหลอด ณ ตำแหน่งที่ (B) ดังรูป 2 ขั้นตอน (1) โดยปฏิกิริยาทางเคมีภายในถังหมักยังคงดำเนินต่อไปเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รอบใหม่อย่างต่อเนื่องแล้วแตกตัวเคลื่อนที่ไปสะสมรวมกันระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ใหม่กับเอซิลแอลกอฮอล์ปริมาณเดิมที่ตำแหน่ง (A) และตำแหน่ง (B) อีกครั้งจนเกิดมีแรงดันภายในหลอดแก้วมากกว่าบรรยากาศภายนอกหลอดแก้ว ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และเอซิลแอลกอฮอล์เหล่านี้จะถูกดันให้เคลื่อนต่อไปจากตำแหน่ง (B) ไปสะสมจนเกือบถึงตำแหน่ง (C) เหนือตำแหน่ง (C) นี้เล็กน้อยมีกระเปาะแก้วทรงกลม ณ ตำแหน่งนี้มี Photo sensor ติดตั้งอยู่ประกอบด้วย ตัวส่งแสง (Transmitter: T) ตัวรับแสง (Receiver: R) เพื่อทำหน้าที่คอยตรวจนับจำนวนฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งในขณะนี้ยังไม่มีฟองก๊าซเกิดขึ้นภายในกระเปาะแก้วทรงกลมเลย จึงทำให้แสงที่ส่งมาจากตัวส่งแสง T ของ Photo sensor สามารถส่งแสงผ่านไปยังตัวรับแสง R ได้ ซึ่งเรียกสถานะนี้ว่า สถานะ “ON” หมายความว่ายังไม่เกิดฟองก๊าซขึ้นดังในรูปที่ 2 ขั้นตอน (2) ในเวลาต่อมาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และเอซิลแอลกอฮอล์ ซึ่งถูกสะสมจนมีปริมาณมากพอและเกิดฟองก๊าซขนาดเล็กๆ ขึ้นมาใหม่อีกครั้งพร้อมเคลื่อนที่ไปรวมกันภายในกระเปาะแก้วทรงกลม (ใกล้ตำแหน่ง (C)) เกิดกลายเป็นฟองก๊าซใหม่ขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดกระเปาะทรงกลมจำนวน 1 ฟอง ซึ่งฟองก๊าซฟองนี้จะไปบังแสงที่ส่งมาจากตัวส่งแสง T จนทำ

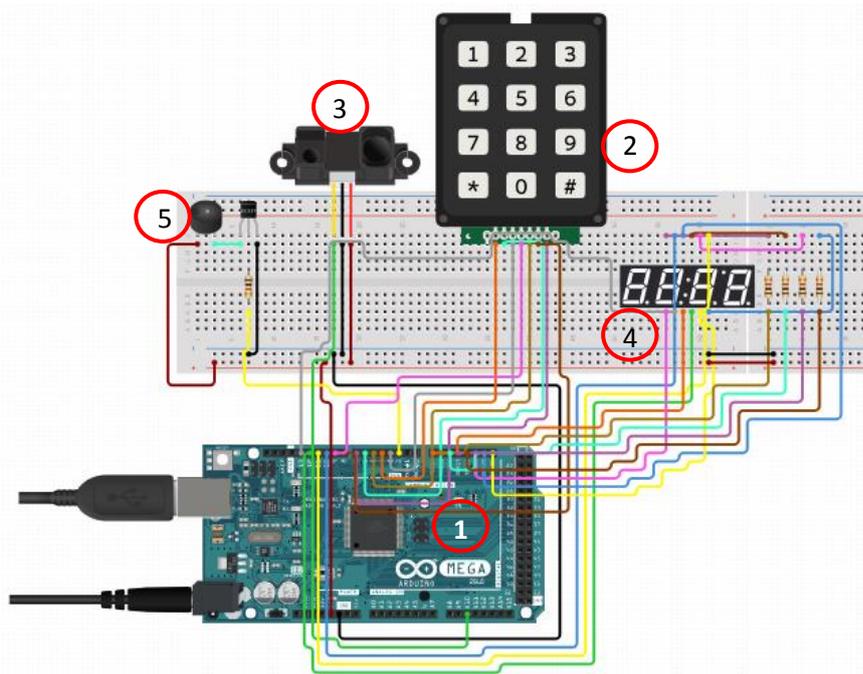
ให้แสงนี้ไม่สามารถส่งต่อไปถึงตัวรับแสง R ได้ ซึ่งเรียกสถานะนี้ว่า สถานะ “OFF” ทำให้เกิดสัญญาณขึ้นที่ตำแหน่งนี้ และเรียกสัญญาณนี้ว่า สัญญาณการนับจำนวนฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในหลอดแก้ว ดังในรูปที่ 2 ขั้นตอน (3) จากนั้นกระบวนการหมักยังคงดำเนินการต่อไปจนกระทั่งเกิดมีฟองก๊าซในรอบใหม่ขึ้นอีกครั้ง แล้วเคลื่อนที่ไปจนได้สัญญาณการนับจำนวนฟองก๊าซอย่างต่อเนื่องต่อไปจนเข้าสู่สภาวะอิมพัลส์ของกระบวนการหมัก ซึ่งสภาวะแบบนี้จะอัตราการเกิดฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในจำนวนคงที่ และเสร็จสิ้นกระบวนการหมักต่อไป ดังรูปที่ 2 ขั้นตอน (4) จากเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นดังกล่าวในข้างต้นนี้สามารถนำไปประยุกต์ เพื่อคำนวณหาปริมาณของเอซิลแอลกอฮอล์ที่เกิดจากการหมักตามสมการ (2) คือ $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_2H_5-OH + 2CO_2$ ต่อไปได้



รูปที่ 2 กระบวนการเกิดฟองก๊าซภายในหลอดแก้วทดลองรูปตัว S มี 4 ขั้นตอนและถูกนับจำนวนฟองก๊าซ

3. หลักการทำงานของวงจรควบคุมการนับจำนวนฟองก๊าซ

วงจรมับจำนวนฟองก๊าซ ประกอบด้วยวงจรส่วนสำคัญ ๆ ดังนี้: วงจรควบคุมหลักใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 ในการควบคุมการนับจำนวนฟองก๊าซผ่านทางเซ็นเซอร์ Photo Sensor และสามารถแสดงผลของการนับจำนวนที่ตัวแสดงผล Seven-segment จำนวน 4 หลัก โดยมีคีย์ KeyPad ใช้เป็นตัวตั้งค่าการนับจำนวนที่ต้องการ เมื่อการนับครบตามจำนวนนับที่ตั้งไว้ สัญญาณการนับที่เสร็จสิ้นนี้จะถูกส่งผ่านไปยัง Buzzer ซึ่งทำหน้าที่ส่งเสียงดังเตือนเมื่อเสร็จสิ้นการทำงาน และจำนวนการนับนี้ยังสามารถเก็บและบันทึกค่าการนับจำนวนฟองก๊าซได้ ดังในรูปวงจรควบคุมหลักที่ 3 และรูป Schematics ที่ 4 ตามลำดับ



รูปที่ 3 วงจรควบคุมหลัก Arduino Mega 2560 (Roboplan Technologies Ltd., 2016)

หมายเลข 1 Arduino Mega 2560

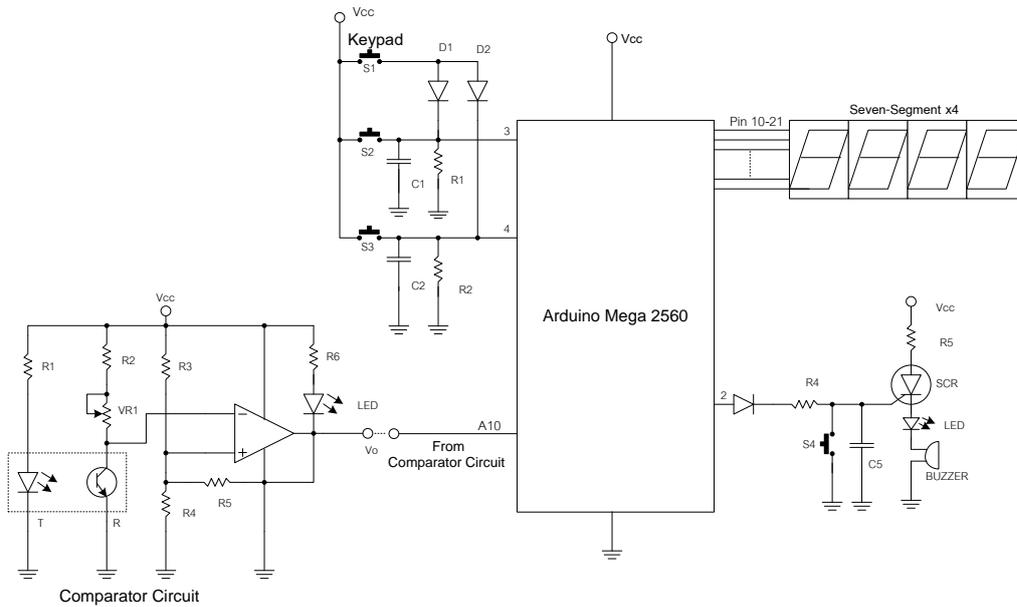
หมายเลข 2 Keypad 4X3

หมายเลข 3 Photo sensor: Opto-diode ประกอบด้วย ตัวส่งแสง (Transmitter: T) และตัวรับแสง (Receiver: R)

หมายเลข 4 Display: Seven-segment 4 หลัก

หมายเลข 5 Buzzer

นอกจากนี้รายละเอียดของวงจรควบคุมเครื่องนับจำนวนฟองก๊าซซึ่งวงจรภายใน Schematics แสดงได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 Schematics วงจรควบคุมหลักของเครื่องนับจำนวนฟองก๊าซ (Lovine, J., 2000)

4. ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมควบคุมวงจรหลัก

กำหนด Pin ในตัวควบคุมหลัก Arduino Mega 2560 (Wilcher, D., 2012) ดังนี้:

// Include Libraries

#include "Arduino.h"

#include "Keypad.h"

#include "SevSeg.h"

#include "Buzzer.h"

Keypad: #define KEYPAD_PIN_COL1 3, COL2 4, COL3 5

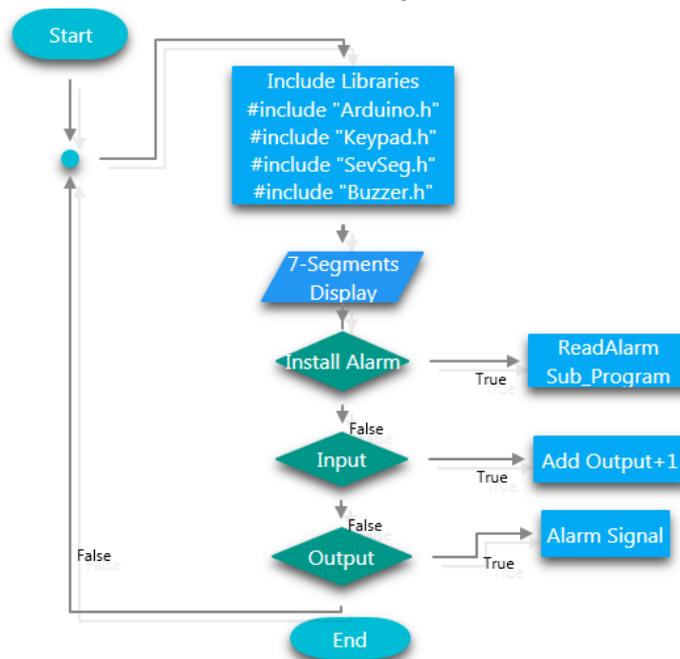
#define KEYPAD_PIN_ROW1 6, ROW2 7, ROW3 8 และ ROW4 9

Photo sensor: #define IRPSENSOR_PIN_VOUT A10

Seven-segment: #define S7SEG_PIN_A10, B11, C12, D13, E19, F20, G21, DECIMAL 14,
 DIG1 15, DIG1 15, DIG2 16, DIG3 17 และ DIG4 18

Buzzer: #define BUZZER_PIN_SIG 2

โปรแกรมจะเริ่มทำการรับค่า Alarm หรือค่าจำนวนนับจำนวนฟองก๊าซที่ต้องการป้อนผ่านทางคีย์ KeyPad ค่านี้จะถูกส่งผ่านไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 ซึ่งเป็นหน่วยควบคุมและประมวลผลหลัก เพื่อควบคุมให้ Photo sensor ทำการนับจำนวนฟองก๊าซที่ต้องการ พร้อมทั้งแสดงผลการนับจำนวนฟองก๊าซออกทาง Seven-segment 4 หลัก เมื่อจำนวนนับได้ครบตามจำนวนที่ต้องการแล้ว จำนวนนับนี้ จะถูกส่งต่อไปยัง Buzzer ซึ่งทำให้เกิดเสียงดังแฉิ่งเตือนขึ้น จากนั้นโปรแกรมจะวนกลับมาตรวจสอบสถานะและรอรับค่าอินพุตใหม่อีกในครั้งต่อไปดังขั้นตอน Flow chart ในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมนับจำนวนฟองก๊าซ (Blum, J., 2013)

ผลการศึกษา

การศึกษาทดลองการเกิดจำนวนฟองก๊าซในกระบวนการหมักครั้งนี้ ผู้ศึกษาได้ควบคุมปัจจัย 2 ประการ คือควบคุมสภาวะอุณหภูมิอยู่ที่ 25°C และควบคุมสภาวะความเข้มแสงสว่าง 4 ระดับ ได้แก่ สภาวะห้องมืด สภาวะห้องปิดไฟปกติ สภาวะห้องเปิดไฟปกติและสภาวะกลางแจ้ง

1. การทดลองหาความแม่นยำการตรวจนับฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของเซ็นเซอร์กักอัตราการเกิดจำนวนฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ภายใต้สภาวะควบคุมปัจจัยอุณหภูมิการหมักที่อุณหภูมิห้องปกติ 25°C และสภาวะห้องเปิดไฟปกติ

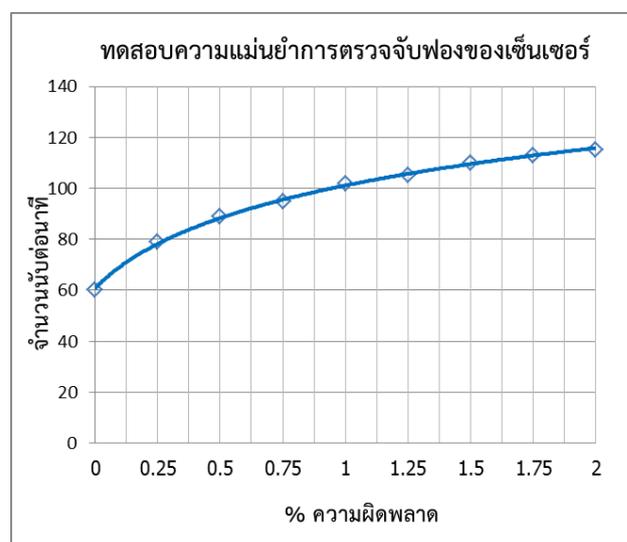
การทดลองในกรณีนี้ใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดจำนวนฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ภายใต้อุณหภูมิห้องปกติ 25°C และสภาวะห้องเปิดไฟปกติเปรียบเทียบกับการใช้มนุษย์สังเกตนับจำนวนฟองก๊าซด้วยสายตา (X_t) กับใช้เครื่องนับจำนวนฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยความไวการนับของเซ็นเซอร์ (X_m) (Pumphrey, B., C. Julien., 1996) พบว่า ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ (Relative error) หรือเปอร์เซ็นต์ผิดพลาด (Percent error) คือเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดได้จากค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เปรียบเทียบกับค่าจริงสามารถคำนวณได้จากสมการ (3)

$$\% \text{ ความผิดพลาด (Percent error)} = \left| \frac{X_m - X_t}{X_t} \right| \times 100$$

(3)

โดยที่ $\varepsilon = X_m - X_t$ คือผลต่างค่าที่วัดได้จากค่าจริง X_m คือค่าที่วัดได้จากเซ็นเซอร์
 X_t คือค่าจริงด้วยสายตา ตามลำดับ

ผลการทดลองหาค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดการตรวจจับฟองโดยวัดความไวต่อการนับจำนวนฟอง
ก๊าซของเซ็นเซอร์ Photo sensor ดังผลกราฟในรูปที่ 6



รูปที่ 6 กราฟทดสอบความแม่นยำโดยใช้เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของเซ็นเซอร์
กับอัตราค่าเฉลี่ยของการเกิดจำนวนฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเวลา

จากผลการทดลองพบว่าเครื่องนับจำนวนฟองก๊าซนี้สามารถนับฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ใน
ภาพรวมถูกต้อง และแม่นยำดีมากอยู่ในช่วงระหว่างจำนวนฟองก๊าซ 1 – 60 ฟองต่อนาที ในกรณีอัตราค่าเฉลี่ย
ของการเกิดจำนวนฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเวลาเพิ่มมากขึ้น เริ่มมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเกิดขึ้นตาม
แนวโน้มของกราฟที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเฉลี่ยร้อยละ 1 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเครื่องนับจำนวนฟองก๊าซที่ถูกควบคุมด้วย
Arduino Mega 2560 โดยใช้ Photo sensor เป็นตัวตรวจนับจำนวนฟองก๊าซที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้สามารถนับ
จำนวนฟองก๊าซแทนการนับของมนุษย์ได้

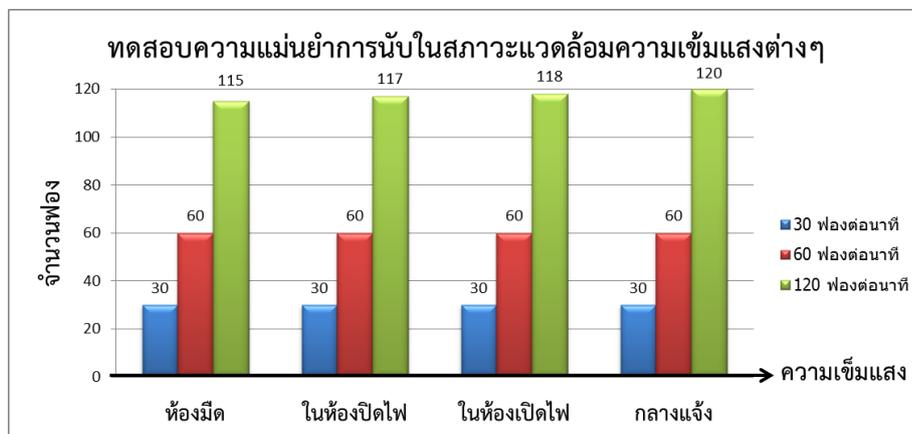
2. การทดลองความแม่นยำของการตรวจนับจำนวนฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นกับความเข้มของ
แสงสว่างแบ่งเป็น 4 ระดับ ได้แก่ สภาวะห้องมืด สภาวะห้องปิดไฟปกติ สภาวะห้องเปิดไฟปกติ และสภาวะ
กลางแจ้ง ส่วนอุณหภูมินั้นแปรไปตามสภาวะแวดล้อมนั้นซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ 25°C - 30°C โดยแบ่งช่วงอัตรา
เวลาของการนับจำนวนฟองก๊าซเป็น 3 ระยะ ดังนี้คือ

1) ระยะเริ่มต้นการหมัก เป็นเวลาการเริ่มกระบวนการหมัก โดยทำการทดลองซ้ำ 20 ครั้ง คิดเป็นอัตราค่าเฉลี่ยการนับจำนวนฟองก๊าซต่อเวลา = 30 ฟองต่อนาที

2) ระยะกลางของการหมัก เป็นขั้นตอนการหมักอยู่ในช่วงระดับการเกิดฟองก๊าซที่ปานกลางโดยทำการทดลองซ้ำ 20 ครั้ง คิดเป็นอัตราค่าเฉลี่ยการนับจำนวนฟองก๊าซต่อเวลา = 60 ฟองต่อนาที

3) ระยะเกิดฟองมาก เป็นขั้นตอนการหมักช่วงการเกิดฟองก๊าซมาก โดยทำการทดลองซ้ำ 20 ครั้ง คิดเป็นอัตราค่าเฉลี่ยการนับจำนวนฟองก๊าซต่อเวลา = 120 ฟองต่อนาที (ในอนาคตจะได้ทำการทดลองเพื่อหาจำนวนการเกิดฟองก๊าซจุดสูงสุดและจุดอิมิตัวต่อไป)

การทดลองในกรณีนี้ใช้หาผลกระทบของความเข้มแสงสว่างที่มีผลต่อความแม่นยำในการนับจำนวนฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือไม่ ผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังกราฟในรูปที่ 7



รูปที่ 7 กราฟทดสอบความแม่นยำของเซ็นเซอร์ระหว่างอัตราค่าเฉลี่ยการนับจำนวนฟองก๊าซต่อเวลากับความเข้มของแสงสว่าง

จากการทดลองพบว่า ผลกราฟที่ได้ในช่วงระหว่างอัตราค่าเฉลี่ยของการนับจำนวนฟองก๊าซต่อเวลาที่ 30-60 ฟองต่อนาที ค่าความเข้มแสงจะไม่มีผลต่อการนับจำนวนฟองก๊าซ เมื่ออัตราค่าเฉลี่ยของการนับจำนวนฟองก๊าซต่อเวลาที่ 120 ฟองต่อนาที ค่าความเข้มแสงเริ่มส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของอัตราเฉลี่ยการนับจำนวนฟองก๊าซ โดยในสภาวะค่าความเข้มแสงที่ปกติอัตราเฉลี่ยการนับจำนวนฟองก๊าซมีความถูกต้องดี เมื่อค่าความเข้มแสงมีค่าลดลงจะทำให้อัตราการนับจำนวนฟองก๊าซมีความผิดพลาดสูงขึ้นตามลำดับ ดังนั้นค่าความเข้มแสงเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราค่าเฉลี่ยของการนับจำนวนฟองก๊าซต่อเวลาที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมัก กล่าวคือค่าความถูกต้องของอัตราค่าเฉลี่ยของการนับจำนวนฟองก๊าซต่อเวลาจะแปรผันโดยตรงกับค่าความเข้มแสง

จากผลการทดสอบความแม่นยำการนับจำนวนทั้ง 2 การทดลองนี้ สามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพการนับจำนวนฟองก๊าซที่ถูกต้องนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยดังนี้คือ ความไวต่อการตอบสนองของตัวประมวลผลหลัก Arduino Mega 2560 และการใช้ชนิดของเซ็นเซอร์ ซึ่งในที่นี้เลือกใช้ Photo sensor ในทำนองเดียวกันความเข้มแสงสว่างเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการนับจำนวนความถูกต้องด้วย

สรุปผล

ในบทความนี้ได้นำเสนอ หลักการทำงานของเครื่องนับจำนวนฟองก๊าซในระบบการหมักโดยใช้ Arduino ควบคุม และได้ทดสอบความแม่นยำการนับจำนวนฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากระบบการหมัก ซึ่งสามารถสรุปได้เป็น 2 ประการคือ ประการที่หนึ่ง เครื่องนับจำนวนฟองก๊าซนี้สามารถนับจำนวนฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นได้และสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อหาปริมาณของเอธิลแอลกอฮอล์ที่เกิดจากระบบการหมักตามสมการที่ (2) ต่อไปได้ และประการที่สอง ต้องคำนึงถึง 2 ปัจจัยหลักที่ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของอัตราการนับจำนวนฟองก๊าซที่ถูกตรวจจับคือ 1) ความไวของตัวควบคุมหลักในที่นี้ใช้ Arduino Mega 2560 โดยมี Photo sensor เป็นตัวตรวจจับจำนวนฟองก๊าซ 2) ความเข้มแสงสว่างมีผลต่อประสิทธิภาพการนับจำนวนที่ความถูกต้องด้วยซึ่งปรากฏว่าเครื่องนี้สามารถนำใช้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพดี

ในอนาคตยังสามารถนำเครื่องนับจำนวนฟองก๊าซมาประยุกต์ใช้เพื่อตรวจหาก๊าซที่เกิดจากปฏิกิริยาต่างๆ ของสิ่งมีชีวิต เช่น พืชหรือจุลินทรีย์บางกลุ่มที่ต้องการใช้ออกซิเจนเพื่อการหายใจ เพื่อใช้ในการประเมินอัตราการเติบโตโดยพิจารณาอัตราการหายใจโดยการวัดปริมาณออกซิเจนที่พืชใช้ไป หรือปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่พืชปล่อยออกมา นอกจากนี้ยังสามารถพัฒนาต่อไปเป็นชุดอุปกรณ์เพื่อใช้ในระบบการหมักเพื่อตรวจวัดปริมาณก๊าซออกซิเจนที่จำเป็นต่อระบบเพาะเลี้ยงหรือปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากระบบการหมัก เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยรามคำแหงที่ให้การสนับสนุนในการวิจัย และขอขอบคุณบริษัท Roboplan Technologies Ltd. ณ ที่นี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

ภาษาต่างประเทศ

- Blum, J., 2013. Exploring Arduino: Tools and Techniques for Engineering Wizardry. John Wiley & Sons, Inc., Indianapolis, Indiana.
- Buchner, E. 1897. For his biochemical researches and his discovery of cell-free fermentation. Munich Germany.
- Enger, E.D., J.R. Kormelink, F.C. Ross, and R.J. Smith, 1994. Concepts in Biology. Seventh Edition. Wm. C. Brown Publishers, Iowa.
- Hopkins, W.G., 1999. Introduction to Plant Physiology. John Wiley & Sons. Inc., New York.
- Lovine, J., 2000. PIC Microcontroller Project Book. McGraw-Hill., New York.
- Premthongsuk P., S. Chadcham and P. Pradujprom., 2017 Development of the Next Item Selection Procedure Using Hurwicz Criterion and Item Exposure Control for Computerized Adaptive. Veridian E-journal Science and Technology Silpakorn University Current Vol 4 No 6: pp. 32-50.
- Pumphrey, B., C. Julien., 1996. An Introduction to Fermentation. New Brunswick Scientific. (UK) Ltd, Canada.
- Roboplan Technologies Ltd., 2016. Available from: <https://www.circuito.io/app?components> [Accessed 21 July 2018], Israeli.
- Stanbury, P.F, A. Whitaker, and S.J. Hall, 2016. Principles of Fermentation Technology 3rd Edition. Butterworth-Heinemann, in Oxford UK.
- Streitwieser, A., Jr., Clayton, H. Heathcock, 1981. Introduction to Organic Chemistry 2nd Edition, Macmillan Publishing Co., Inc., New York.
- Wilcher, D., 2012. Learn Electronics with Arduino. Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. KG., New York.