

วารสาร

วิทยาศาสตร์ และ เทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ปีที่ 41 ฉบับที่ 4 กรกฎาคม - สิงหาคม 2565

JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
MAHASARAKHAM UNIVERSITY
INDEXED IN

ISSN (Print Edition) : 1686-9664
ISSN (Online Edition) : 2586-9795

DOAJ
DIRECTORY OF
OPEN ACCESS
JOURNALS

EBSCOhost

TGI
ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย
Thai Journal Citation Index Centre

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

วัตถุประสงค์

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นแหล่งเผยแพร่ผลงานทางวิชาการที่มีคุณภาพของนักวิชาการทั้งในและต่างประเทศ โดยเผยแพร่บทความวิจัย (research article) บทความปริทัศน์ (review article) ในสาขาวิชาต่าง ๆ ได้แก่ คณิตศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ เกษตรศาสตร์ แพทยศาสตร์ วิทยาศาสตร์สุขภาพ และสหวิทยาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

เจ้าของ

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
สำนักงานกองบรรณาธิการ
กองส่งเสริมการวิจัยและบริการวิชาการ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150
โทรศัพท์ภายใน 1754 โทรศัพท์โทรสาร 0-4375-4416

ที่ปรึกษา

อธิการบดีมหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ ไข่มไผ่
ศาสตราจารย์ ดร.วิชัย บุญแสง
ศาสตราจารย์ ดร.พีระศักดิ์ ศรีนิเวศน์

บรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา ประเทพา

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ ประมวล
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ศาสตราจารย์ ดร.ศิริธร ศิริอมรพรรณ
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ ดร.วรพล เองวานิช
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.วัลยา สุทธิขำ
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ทวีศักดิ์ บุญเกิด
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.ละออสรี เสนาะเมือง
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.ปราณี อานเป็รื่อง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.นิวัฒน์ เสนาะเมือง
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ศาสตราจารย์ ดร.วงศา เล้าหศิริวงศ์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.สุนันท์ สายกระสุน
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.สุวรรณา บุญยະสีพรณ
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ขวัญใจ กนกเมธากุล
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

รองศาสตราจารย์ ดร.ฉันทนา อารมย์ดี
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญจง ขาวสิทธิวงษ์
สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.พรเทพ ถนนแก้ว
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.นฤมล แสงประดับ
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.อรวิชัย กุ่มพล
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต บุญปก
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์เทอดศักดิ์ คำเหม็ง
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ยืน ภู่วรรณ
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ศิริเกษม ศิริลักษณ์
มหาวิทยาลัยแคว้น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพรัตน์ พุทธกาล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุชา เพ็ชรชนะ
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสกสรร สุขะเสนา
มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัลย์พร ทองเจริญบัวงาม
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อลงกรณ์ ละม่อม
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ ดร.ณัฐพล ภูมิพันธุ์
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมนึก พ่วงพรพิทักษ์
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ เกษิขกร ดร.รักษิณดา วัฒนาลัย
มหาวิทยาลัยสยาม
Dr.Adrian Roderick Plant
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

เลขานุการ

ฉวีวรรณ อรรถเศรษฐิจ

ผู้ช่วยเลขานุการ

พัทรวีไล รุ่งวิสัย
จิรวัฒน์ ภูสีฤทธิ์

กำหนดเผยแพร่

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

บทความและความคิดเห็นในวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม เป็นความคิดเห็นของผู้เขียน กองบรรณาธิการไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป และบทความในวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สงวนสิทธิ์ตามกฎหมายไทย การจะนำไปเผยแพร่ต้องได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากกองบรรณาธิการเท่านั้น

บทบรรณาธิการ

เมื่อ 40-50 ปีก่อน ชาวบ้านจะพากันออกไปหาแมลงจิ้งหรีด ตามหัวไร่ปลายนานา หรือ ริมป่า เมื่อถึงฤดูไม้ทิ้งใบและเริ่มแตกใบใหม่ อุปกรณ์ที่เตรียมไปก็จะมีตะเกียงเจ้าพายุ ถี้อเสื้อไปคนละผืน ปูเสื่อไว้ใต้ต้นไม้ จากนั้นก็จุดตะเกียง ใช้ไม้ตีไปตามกิ่งไม้หรือขึ้นไปเขยิบบนต้น แมลงจิ้งหรีดที่มากินใบไม้อ่อนก็จะตกลงมา และบินมาเล่นไฟ แล้วตกลงบนเสื่อ ทำไปสัก 2-3 ต้น ก็ได้แมลงจิ้งหรีดพอรับประทาน จะเห็นได้ว่า แต่เดิมแมลงจิ้งหรีด อยู่ในวิถีชีวิตตามฤดูกาล เป็นแหล่งอาหาร แหล่งโปรตีนของชาวบ้านในชนบทจนถึงปัจจุบัน และขณะนี้ทั่วโลกก็หันกลับมาให้ความสำคัญกับแมลง ในฐานะแหล่งโปรตีนอนาคต แหล่งใหม่ และได้รับความนิยมมากขึ้น

แมลงจิ้งหรีดเป็นแมลงปีกแข็งขนาดกลาง รูปร่างป้อม วงจรชีวิตเป็นหนอนอยู่ใต้ดินบางชนิดอาศัยในขอนไม้ผุ เข้าสู่ระยะดักแด้ และเป็นตัวเต็มวัยในช่วงต้นฤดูฝนของทุกปี ตัวเต็มวัยอาศัยอยู่ในดินตามรากของต้นไม้ โดยขุดรู ตามรากไม้ทำเป็นที่อยู่อาศัย ซึ่งรูของแมลงจิ้งหรีดจะมีลักษณะให้เห็นเป็นขุยดินปิดปากรูไว้เพื่อป้องกันศัตรูจากภายนอกและหลบภัย ในตอนกลางวันแมลงจิ้งหรีดจะหลบซ่อนอยู่ในรู และจะออกหากินในตอนกลางคืนจะออกหากินโดยบินขึ้นไปเกาะกินใบอ่อนของต้นไม้ ชอบกินใบมะขามอ่อน ใบต้ว ใบส้มเสี้ยว ใบสะเดา และใบอ่อนต้นไม้อื่นๆ ทั่วไป

แมลงจิ้งหรีด ที่พบในประเทศไทยมีประมาณ 17 ชนิด เช่น ด้วงกุกลาบ (*Adoretus compressus* (Weber, 1801) แมลงจิ้งหรีดขาว (*Adoretus* spp.) แมลงจิ้งหรีดเขียวแอปเปิล (*Anomala dimidiata* (Hope, 1831) แมลงจิ้งหรีดแดงอกทอง (*Anomala diversipennis* Arrow, 1917) แมลงจิ้งหรีดเขียวธรรมดา *Anomala grandis* (Hope, 1840) เป็นต้น

ดังนั้นเพื่อให้วิถีชีวิตและภูมิปัญญาของคนไทยเลือนหายไป วารสารมหาวิทยาลัยมหาสารคาม ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จึงขอเสนอและถ่ายทอด ข้อมูลเกี่ยวกับแมลงจิ้งหรีดเบื้องต้น นอกเหนือจากสารงานวิจัยด้านต่างๆ ที่ปรากฏในเล่ม และหวังว่าจะเป็นประโยชน์กับทุกท่าน

รศ.น.สพ.ดร. วรพล เองวานิช

ผู้ช่วยบรรณาธิการ



สารบัญ

Biological Science

การเหนี่ยวนำยีสต์ *Moniliella* sp. BCC25224 ให้กลายพันธุ์ด้วยรังสียูวีและเอธิลมีเทนซัลโฟเนต (EMS) เพื่อการผลิตเอริทริทอล 175

Mutagenesis induction of *Moniliella* sp. BCC25224 using combination of UV and ethyl methanesulfonate (EMS) for erythritol production

ชัมย์พร สุวรรณเพ็ชร, วิรัตน์ วาณิชศรีรัตนนา
Chamiporn Suwanapetch, Wirat Vanichsiratana

สีย้อมจากรงควัตถุพืชสำหรับย้อมสีละอองเรณู 184

Plant pigment dyes for pollen staining

ชูเทพ พรรณศรี, ภาสกร บุญชาติ
Chuthep Phannasri, Pasakorn Bunchalee

Computer and Information Technology

การเปรียบเทียบการตรวจสอบจำนวนฟองก๊าซระหว่างตัวควบคุม Raspberry Pi และ Arduino สำหรับกระบวนการหมัก 192

Comparison between Raspberry Pi and Arduino controller of gas bubble monitoring for a fermentation process

มงคล วรรณประภา
Mongkol Wannaprapa

Engineering

การออกแบบและการสร้างเครื่องอัดกลีบกระดาษแบบกึ่งอัตโนมัติด้วยระบบนิวแมติก 203

Design and fabrication of a semi-automatic paper petal compression machine with a pneumatic system

เจษฎา แพรกนันทะ, มณฑล ชูโชนาค
Jetsada Phraeknanthoe, Monthon Chuchonak

ผลกระทบของอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อนำไอระเหยต่อสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอนวงจรมัดปิดภายใต้สภาวะสุญญากาศ 217

Effect of the length to inner diameter ratio of vapor tube on the performance of a vacuum closed loop thermosyphon

สราวุฒิ สิริเกษมสุข, ธนาพล สุขชนะ
Sarawut Sirikasemsuk, Thanaphol Sukchana

การเหนี่ยวนำยีสต์ *Moniliella* sp. BCC25224 ให้กลายพันธุ์ด้วยรังสียูวีและเอทิลเมทิลซัลโฟเนต (EMS) เพื่อการผลิตเอริทริทอล

Mutagenesis induction of *Moniliella* sp. BCC25224 using combination of UV and ethyl methanesulfonate (EMS) for erythritol production

ชัมย์พร สุวรรณเพชร^{1*}, วิรัตน์ วาณิชศรีรัตนา¹
Chamiporn Suwanapetch^{1*}, Wirat Vanichsritatana¹

Received: 26 March 2022 ; Revised: 26 April 2022 ; Accepted: 3 May 2022

บทคัดย่อ

เอริทริทอลคือสารให้ความหวานพลังงานต่ำที่ไม่ส่งผลต่อระดับน้ำตาลในเลือดผลิตจากการหมักกลูโคสด้วยยีสต์ *Moniliella* sp. (ยีสต์ผ่านการรับรองให้ใช้ในอาหาร) โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงและคัดเลือกยีสต์สายพันธุ์ *Moniliella* sp. ให้ผลิตเอริทริทอลสูง ด้วยการเหนี่ยวนำให้เกิดการกลายพันธุ์ในยีสต์ *Moniliella* sp. BCC25224 โดยใช้สารเคมีเอทิลเมทิลซัลโฟเนต (EMS) ร่วมกับฉายแสงรังสียูวีเป็นเวลา 15, 30 และ 60 นาที จากการศึกษาพบว่าสามารถคัดเลือกยีสต์ *Moniliella* sp. BCC25224-M13 ที่สามารถผลิตเอริทริทอล (erythritol production) สูงกว่าสายพันธุ์ดั้งเดิม 1.2 เท่า (44.2 gL^{-1}) ในระดับฟลัสก์ โดยสามารถผลิตเอริทริทอล (erythritol production), ให้ผลได้ของเอริทริทอล (erythritol yield) และมีประสิทธิภาพการผลิตเอริทริทอล (yield coefficients) ในระดับถังหมักขนาด 10 ลิตร เท่ากับ $103.5 \text{ กรัมต่อลิตร}$, 56.9% และ $0.59 \text{ กรัมเอริทริทอล/กรัมกลูโคส}$ ตามลำดับ ดังนั้นการศึกษานี้จึงเป็นการพัฒนาและปรับปรุงยีสต์สายพันธุ์ *Moniliella* sp. และได้ *Moniliella* sp. BCC25224-M13 เป็นทางเลือกในการผลิตเอริทริทอล

คำสำคัญ: เอริทริทอล *Moniliella* sp. กระบวนการหมัก การชักนำการกลายพันธุ์

Abstract

Erythritol is a safe, non-caloric and non-insulinemic sweetener present in various foods. It can be produced from glucose as substrate via fermentation with *Moniliella pollinis* (a safe and suitable food-grade osmophilic yeast). This study aims to screen high erythritol producing *Moniliella* sp. strains via mutagenesis. The candidate producer, *Moniliella* sp. BCC25224, was mutated sequentially by UV irradiation and immersion in ethyl methyl sulphonate (EMS) for 15, 30, and 60 min. The mutant named *Moniliella* sp. BCC25224-M13 was selected based on the highest levels of erythritol production at flask scale (44.2 gL^{-1}) which was 1.2-fold improved compared with its wild parent. In a 10-L bioreactor, the erythritol production, erythritol yield and yield coefficients by BCC25224-M13 were 103.5 gL^{-1} , 56.9% and 0.59 gg^{-1} , respectively. This study revealed that *Moniliella* sp. BCC25224 could be used as a parent to produce mutants for superior erythritol production, such as *Moniliella* sp. BCC25224-M13.

Keywords: Erythritol, *Moniliella* sp., Fermentation, Mutagenesis

¹ ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

¹ Biotechnology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Chatuchak, Bangkok, 10900, Thailand

*Corresponding author: e-mail: fagiwiv@ku.ac.th

Introduction

Erythritol is a unique member of the polyol family which has sweetening organoleptic properties of 70% relative to sucrose (Rzechonek *et al.*, 2018). Erythritol can therefore be used to produce no-sugar added, reduced-sugar, or sugar-free alternatives in food, beverages and pharmaceutical products. The ingestion of erythritol has many benefits which include zero-calories, non-insulinemic, non-cariogenic, non-acidogenic, non-laxative, anti-oxidative properties and increases in malabsorption of fructose (Jacqz-Aigrain *et al.*, 2015, den Hartog *et al.*, 2010, Moon *et al.*, 2010).

Industrial production of erythritol via fermentation utilizes glucose or hydrolyzed wheat or corn starch as substrate for microbial activity. Microbial strains such as *Aureobasidium* sp. (Guo *et al.*, 2016), *Moniliella* sp. (Lin *et al.*, 2010), *Trichosporonoides* sp. and *Yarrowia lipolytica* (Xiaoyan *et al.*, 2017) have been studied for erythritol production (Rzechonek *et al.*, 2018). *Moniliella* sp. and *Yarrowia* sp. were proven to be safe for use in food processing (Rzechonek *et al.*, 2018). Nevertheless, the search for strains of *Moniliella* sp. and *Yarrowia* sp. for high erythritol yield and productivity are key for commercial production, and process conditions (Rakicka-Pustuřka *et al.*, 2020). In screening and isolating of novel erythritol producing organisms, pollen, honey, beehives, preserved fruits, dry fruit and sugarcane factory's soil have served as sources (Lin *et al.*, 2001).

However, one sure way for screening and isolating superior microbes for a metabolite of interest is by genetic engineering and mutation via UV radiation or chemical mutagenesis by using ethyl methanesulfonate (EMS) (Park *et al.*, 2019, Yan *et al.*, 2021). The widely used technique is mutagenesis followed by selection because of lower cost and sophistication of processes involved. Mutation selection is an efficient and rapid way to obtain desirable traits in crop plants and microbes (Yan *et al.*, 2021) 2021.

UV mutagenesis technique has been applied to isolate yeasts for specific products such as for improved aroma production. Despite obtaining new strains by UV mutagenesis, they are designated as genetically modified organisms (GMO) by the European

Union legislation (Article 2 of EU Directive 2001/18/EC). Meanwhile, such organisms do not undergo strict regulation relative to other altering genetic modification techniques in producing GMO because of the long-standing safety record (Dederer & Hamburger, 2022). Random mutagenesis by UV emission revealed that a mutant of *Aureobasidium pullulans* CGMCC3.0837 (ER 35) produced more erythritol than parent strains by 50.92% (Guo *et al.*, 2016). In other instance, EMS was used to obtain a *Candida magnoliae* mutant with minimum by-product production (Ghezelbash *et al.*, 2014). The interaction of UV mutagenesis and chemical mutagenesis to obtain high production of erythritol is still an ongoing study.

Moniliella species are regarded as efficient erythritol producers. However, mutagenesis techniques are still applied to screen for superior desired traits among living organism. In this study, a sequential mutagenesis of UV radiation and EMS was applied on *Moniliella* sp. BCC25224 strain to obtain mutants capable of high erythritol production.

Materials and methods

Chemicals

Yeast extract was purchased from DIFCO (Detroit, MI, USA). Corn steep liquor was obtained from Friendship Corn Starch Co., Ltd. (Thailand). Soy bean flour was obtained from Win Change Industries Co., Ltd. (Thailand). Ethyl methyl sulphonate (EMS) was purchased from Sigma-Aldrich. All chemicals used were reagent grade.

Experimental designs

The research design used was completely randomized design (CRD). The strains was treatment and each treatment was performed in triplicate. The analyst data were dry cell weight, glucose consumption, erythritol production and erythritol yield.

Moniliella sp. BCC25224 cultivation and multiplication

Moniliella sp. BCC25224 used in this study was obtained from the BIOTEC Culture Collection (BCC), National Center for Genetic Engineering and Biotechnology, Thailand. *Moniliella* sp. BCC25224 was streaked on glucose yeast extract (GYE) agar (300 gL⁻¹,

glucose; 10 gL⁻¹, yeast extract, and 20 gL⁻¹ of agar) to obtain single colonies. After, cell multiplication of *Moniliella* sp. BCC25224 was carried out in a 100-mL of glucose yeast extract broth in 500-mL flasks in a shaking incubator at 200 rpm at 30°C for 5 days before use (Lin *et al.*, 2010, Burschaper *et al.*, 2002).

Mutagenesis of *Moniliella* sp. BCC25224 via UV and EMS

The mutagenesis protocol was modified from Savergave *et al.* (2011). The culture broth was centrifuged at 4,000 x g for 10 minutes and the cells were washed twice with sterile saline. Five milliliter of cell suspension (1 x 10⁶ cell mL⁻¹) was irradiated by Philips 30W G30 T8 lamp at wavelength 254 nm for 3 minutes at a distance of 20 cm. The cell suspension was then treated with 20 µL EMS at a final concentration of 4 µLmL⁻¹ and incubated for three different periods (15, 30 and 60 minutes). The EMS was inactivated by adding 0.5 mL of sterile sodium thiosulfate (50 gL⁻¹). The treated cell suspension was washed twice with sterile saline before spread plating on the GYE agar medium. The plated media were incubated at 30°C for 7 days (Guo *et al.*, 2016).

Mutated colonies that survived were picked up and cultivated in GYE broth medium for 2 days at 30°C and 200 rpm for the erythritol production test. The inoculum (20 gL⁻¹) was transferred into 100-mL GYE broth and incubated at 30°C, at 200 rpm mechanical shaker for 5 days. The fermented broth was centrifuged at 4,000 x g for 10 min at 4°C, the supernatant was then filtered through 0.45 µm nylon filter before erythritol analysis via HPLC. The strain with the highest erythritol production and highest glucose consumption were compared with the parent strain and chosen (Ghezelbash *et al.*, 2014, Lin *et al.*, 2010) for further investigation in a 10 L jar fermenter.

Production of erythritol in fermenters

Moniliella sp. BCC25224 and selected mutant strains were grown in a 10 L B. E. Marubishi fermenter containing 5 L broth (200 gL⁻¹ glucose and 13 gL⁻¹ soybean flour, pH 5.3) with agitation speed of 350 rpm and aeration rate of 0.7 vvm at 30°C. Broth samples were harvested and analyzed every 11 or 12 hours for 9 days to calculate the dry cell weight, erythritol concentration, glucose consumption, erythritol yield, yield coefficients and productivity.

Physico-chemical analysis of fermented broth High performance liquid chromatography analytical methods (HPLC)

The filtrate supernatants were analyzed for glucose and erythritol by HPLC under isocratic conditions a refractive index detector (Waters 2414) at 30°C, using an amino column APS-2 Hypersil column. The column was kept at 30°C with a mobile phase constituting of water and acetonitrile (25:75 v/v) at a flow rate of 1 mL min⁻¹.

Dry cell weight analytical methods

Culture broth were centrifuged at 5,000 x g for 15 minutes. The cultured cells were wash twice with sterile distilled water and dried to constant weight in a hot air oven at 105°C (Ghezelbash *et al.*, 2014). The dry cell weight (DCW) was calculated using the following equations.

Statistical analysis

All data were analysed for ANOVA using SPSS program. The results are means ± S.D. for triplicate experiments and significantly different at 99% (p<0.01)

Results and discussion

Mutagenesis

The synergistic effect of UV irradiation and EMS on *Moniliella* sp. BCC25224 in screening for superior erythritol production was investigated. The sequential treatment of *Moniliella* sp. BCC25224 by UV, and immersion in EMS for 15, 30, and 60 min resulted in 3%, 1% and 0% survival of *Moniliella* sp. BCC25224, respectively. Surviving colonies were inoculated in GYE medium and then further analyzed by HPLC. Screening of mutants via culturing in broth for erythritol production and glucose utilization resulted in the selection of three mutants that were *Moniliella* sp. BCC25224-M13, BCC25224-M14 and BCC25224-M15 that produced more erythritol than parent cells (Table 1). A total of 138 survivor mutant colonies were analyzed of which 97.8% produced erythritol at lower amount than did the parent strain (3.8 - 9.3 gL⁻¹).

Mutant strains increased in cell mass because of an increase in glucose consumption (Table 1) hence greater metabolic activity increased cell multiplication led to higher erythritol production. Statistically, *Moniliella* sp.

BCC25224-M13 varied significantly ($p < 0.01$) relative to the parent culture. The mutant BCC25224-M14 and BCC25224-M15 produced less erythritol lower than BCC25224-M13 with low glucose consumption (Table 1). Nevertheless, BCC25224-M14 and BCC25224-M15 had similar erythritol yields which were higher than that of BCC25224-M13. The relatively low erythritol yield of BCC25224-M13 was attributed to the high cell mass production during fermentation.

Candida magnolia mutant were generated by ultraviolet and EMS chemical mutagenesis (Ghezlbash *et al.*, 2014). The mutant named 12-2 gave a 2.4-fold and 2.2 fold increased in erythritol production (20.32 gL^{-1}) and yield (10.99%) from 200 gL^{-1} glucose compared to the parent strain. The glucose consumption of parent and mutant was 84.87% and 92.41%, respectively. PCR product of the mutant revealed a minor change in the sequence of genes involved in a production pathway which can lead to a significant increase in protein translation.

Aureobasidium sp SN-124A successfully mutated with UV irradiation and NTG treatment (Ishizuka *et al.*, 1989). The mutant produced erythritol with 47.6% yield on a medium containing 22.5% glucose compared to 41.8% yield obtained from parent strain. The erythritol

concentration produced reached 164.8 gL^{-1} with the mutant while the parent was 110 gL^{-1} .

Chemical mutagenesis of *Moniliella* sp. 440 by N-methyl-N'-nitro-N-nitrosoguanidine (NTG) resulted in N61188-12 mutant which produced two times more erythritol (237.8 gL^{-1}) than parent strain in fermentation medium comprise of 400 gL^{-1} glucose and 10 gL^{-1} yeast extract (Lin *et al.*, 2010). Although the mutant strain consumed the glucose completely for efficient erythritol production with 55.6% yield, the cell density (A_{660}) was lower than parent strain (26.1 and 56.8). The high erythritol production and yield was attributed to the low by-product production e.g. glycerol and ribitol. Glucose concentration produces osmotic stress on biomass and erythritol formation (Jeya *et al.*, 2009).

Although, the improvement in erythritol production of the *Moniliella* sp. BCC25224 in this study was achieved by mutagenesis, the production performance of the mutant was lower than the other erythritol-producing strains. The low production efficiency probably resulted from the small number of cells. Anyway, *Moniliella* sp. BCC25224-M13 was further examined for cell growth and erythritol formation in batch fermentation and compared with the parent strain to confirm the mutagenesis achievement.

Table 1 Erythritol production of wild type strain and derived mutant at flask scale (Volume of flask) after 5 days of fermentation

Strain	Dry cell weight (gL^{-1})	Glucose consumption (%)	Erythritol production (gL^{-1})	Erythritol yield (%)
<i>Moniliella</i> sp. BCC25224 (Parent)	13.2 ± 1.0^b	74.0 ± 7.8^b	35.1 ± 3.5^b	24.7 ± 3.7^b
<i>Moniliella</i> sp. BCC25224-M13	18.0 ± 2.0^a	98.7 ± 2.3^a	44.2 ± 0.1^a	25.6 ± 0.1^b
<i>Moniliella</i> sp. BCC25224-M14	17.6 ± 1.3^a	77.7 ± 0.3^b	39.1 ± 0.1^b	28.7 ± 1.2^a
<i>Moniliella</i> sp. BCC25224-M15	16.7 ± 0.6^a	78.2 ± 0.9^b	38.8 ± 0.1^b	28.4 ± 0.7^a

Mean values with different letters in columns indicates a significant difference ($p < 0.01$)

Results are means \pm S.D. for triplicate experiments.

Up-scale production of erythritol in 10 L fermenter

A batch fermentation was carried out for both *Moniliella* sp. BCC25224 and *Moniliella* sp. BCC25224-M13 mutant strain in a 10-L jar fermenter to observe the cell growth, glucose utilization, erythritol production pattern, and especially for erythritol production efficiency. The cell growth, glucose consumption and erythritol production rate should indicate the ideal conditions for the further fed-batch operation. The parent *Moniliella* sp.

BCC25224 and *Moniliella* sp. BCC25224-M13 produced erythritol during cell growth (Figure 1 and 2) and fermentation which indicated that erythritol is a primary metabolite (Sanchez & Demain, 2008). Erythritol is also synthesised during the exponential phase of growth and synthesis is an integral part of the normal growth process. The cells showed continuous growth throughout the cultivation period (216 hours) but during the stationary phase growth could not be clearly determined.

In the first 48 hours of the fermentation, dry cell weight value was interfered with by the soy bean flour. *Moniliella* sp. BCC25224 showed a higher growth rate than the mutant strain after 143 hours ($0.15 \text{ gL}^{-1}\text{h}^{-1}$ and $0.07 \text{ gL}^{-1}\text{h}^{-1}$). Erythritol formation of the parent and mutant began at 23 hours with different production rates. Glucose was completely consumed by parent and mutant strain after fermentation for 216 and 204 hours respectively, which reflected the lower dry cell weight of the mutant. The pH of fermentation broth of both strains decreased from 5.4 to 4.0 after 48 hours and continued to decrease with the lowest pH value of 3.5 at 95 hours. The rate of growth and of substrate consumed reflected the cell's ability to respond to the environment (Figure 1 and 2). High glucose concentration caused inhibition of cell growth and synthesis of erythritol. Our results agreed with Kobayashi *et al.* (2013) who reported erythritol production in response to oxidative stress and altered redox balance by *Moniliella megachiliensis*.

For the parent strain, the erythritol production, erythritol yield, yield coefficients and volumetric production rate were 86.6 gL^{-1} , 46.7%, 0.47 gg^{-1} with $0.40 \text{ gL}^{-1}\text{h}^{-1}$, respectively. While *Moniliella* sp. BCC25224-M13 produced 103.5 gL^{-1} erythritol; 56.9%, erythritol yield; 0.59 gg^{-1} , yield coefficients, and $0.47 \text{ gL}^{-1}\text{h}^{-1}$ volumetric production rate. The effect of UV and EMS immersion was maintained in *Moniliella* sp. BCC25224-M13 as a 1.2-fold increase in erythritol production and yield was observed (Table 2).

The productivity of *Moniliella* sp. BCC25224-M13 were compared with that of other microorganisms which have been reported previously to produced erythritol (Table 2). *Moniliella* sp. BCC25224-M13 showed similar higher values in terms of erythritol yield and yield coefficients when compared to most other strains cultivated in traditional batch culture. However, erythritol production and productivity is lowest which was similar to the results at flask scale.

Focusing on simple batch culture (Table 2), *Pseudozyma tsukubaensis* gave the highest erythritol production, erythritol yield, yield coefficients and productivity. In addition, Jeya *et al.*, (2009) reported the dry cell weight after fermentation for 36 hours was 25.2 gL^{-1} which was higher than with *Moniliella* sp. BCC25224-M13 (13.9 gL^{-1} at 216 hours). Thus, increasing the cell formation during fermentation should result in higher erythritol production.

In the case of fed-batch fermentation, the erythritol productivity was higher than batch fermentation because the batch culture at high glucose level inhibited the maximum volumetric productivity (Rzechonek *et al.*, 2018, Jeya *et al.*, 2009). Maintaining a glucose concentration during fermentation can increase erythritol production and dry cell weight (Jeya *et al.*, 2009). Also, *Moniliella* sp. BCC25224-M13 should maintain the glucose content at 100 gL^{-1} during the exponential phase of growth (Figure 2).

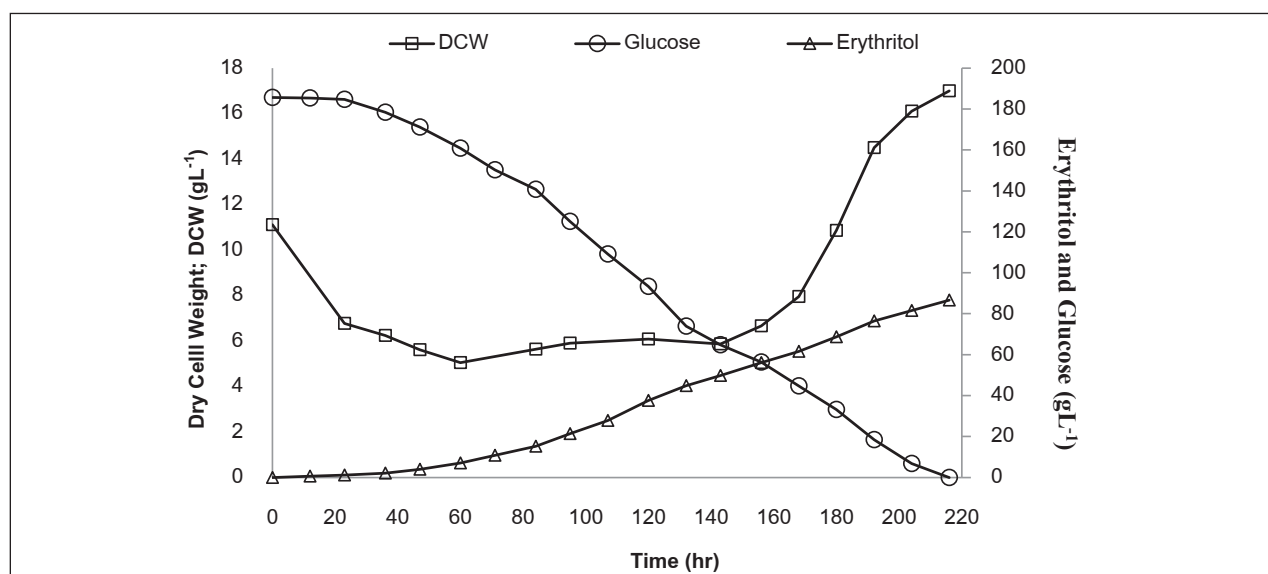


Figure 1 Biomass and erythritol production of *Moniliella* sp. BCC25224 parent strain in 10 L jar fermenter (200 gL^{-1} glucose with 13 gL^{-1} soybean flour)

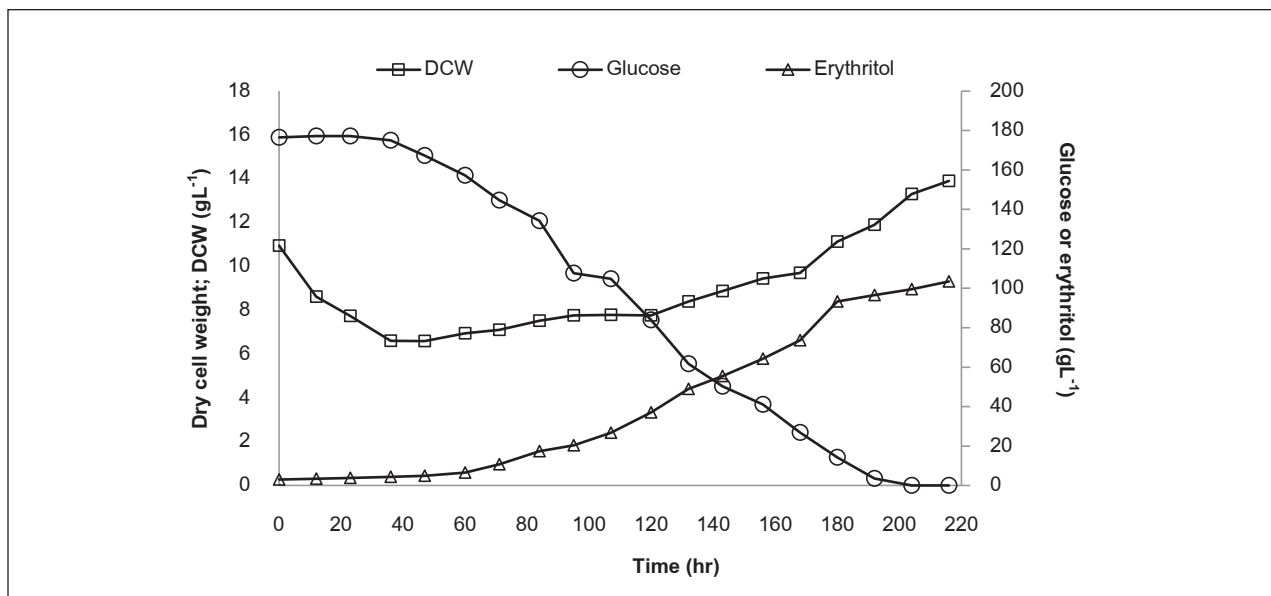


Figure 2 Biomass and erythritol production of *Moniliella* sp. BCC25224-M13 mutant strain in 10 L jar fermenter (200 gL⁻¹ glucose with 13 gL⁻¹ soybean flour)

Table 2 Erythritol productivity comparison of producing strains in various reactor operation types using glucose as substrate

Strain	Operation type	Erythritol production (gL ⁻¹)	Erythritol yield (%)	Yield coefficients (gg ⁻¹)	Productivity (gL ⁻¹ h ⁻¹)	Reference
<i>Aureobasidium</i> sp. (mutant SN-124A)	Batch	170.0	37.7	N.A.*	1.82	Rzechonek <i>et al.</i> (2018)
<i>Candida magnoliae</i>	Fed-batch	200.0	43.0	N.A.*	1.2	Rzechonek <i>et al.</i> (2018)
<i>Candida magnoliae</i>	Two-stage Fed-batch	187.0	41.0	N.A.*	2.8	Rzechonek <i>et al.</i> (2018)
<i>Candida magnolia</i> JH110 (mutant)	Fed-batch	200.0	43.0	N.A.*	1.2	Rzechonek <i>et al.</i> (2018)
<i>Torula</i> sp.	Fed-batch	192.0	48.0	N.A.*	2.26	Rzechonek <i>et al.</i> (2018)
<i>Trichosporon</i> sp.	Batch, Stirred tank	138.0	46.0	0.49	1.23	Park <i>et al.</i> (1998) ; Jeya <i>et al.</i> (2009)
<i>Trichosporon</i> sp.	Fed-batch, Stirred tank	316.8 ^a	44.0	0.51	1.33	Park <i>et al.</i> (1998)
<i>Moniliella megachiliensis</i> sp. 440 mutant (mutant N53199-12)	Batch, Stirred tank	152.4	43.6	N.A.*	0.65	Rzechonek <i>et al.</i> (2018)
<i>Moniliella</i> 618A-01	Fed-batch, Stirred tank	100.0	39.3	N.A.*	0.19 ^a	Hirata <i>et al.</i> (1999)
<i>Moniliella</i> 278-3 (or <i>Moniliella</i> sp. 166-2)	Batch, Stirred tank	111.0	37.0	0.37 ^a	0.77 ^a	Lin <i>et al.</i> (2001)
<i>Moniliella</i> sp. N61188-12 (mutant)	Batch, Stirred tank	142.0	40.5 ^a	N.A.	1.18 ^a	Lin <i>et al.</i> (2010)
<i>Moniliella</i> sp. N61188-12 (mutant)	Fed-batch, Stirred tank	189.4	48.0	N.A.*	0.80	Lin <i>et al.</i> (2010)

Table 2 Erythritol productivity comparison of producing strains in various reactor operation types using glucose as substrate (cont.)

Strain	Operation type	Erythritol production (gL ⁻¹)	Erythritol yield (%)	Yield coefficients (gg ⁻¹)	Productivity (gL ⁻¹ h ⁻¹)	Reference
<i>Moniliella tomentosa</i> var <i>pollinis</i>	Batch, Stirred tank	90.0	36.1	0.35	0.59 ^a	Burschapers <i>et al.</i> (2002a)
<i>Moniliella tomentosa</i> var <i>pollinis</i>	Fed-batch, Stirred tank	170.0	38.8	N.A.*	1.62 ^a	Burschapers <i>et al.</i> (2002a)
<i>Moniliella tomentosa</i> var <i>pollinis</i>	Batch, Airlift tower loop	105.0	62.0	0.40	N.A.*	Burschapers <i>et al.</i> (2002b)
<i>Moniliella tomentosa</i> var <i>pollinis</i>	Fed-batch, Airlift tower loop	175.0	54.0	0.39	N.A.*	Burschapers <i>et al.</i> (2002b)
<i>Moniliella</i> Mutant HAT 101	Batch, Airlift tower loop	150.0	65.0	0.57	N.A.*	Burschapers <i>et al.</i> (2002b)
<i>Moniliella</i> Mutant HAT 101	Fed-batch, Airlift tower loop	175.0	70.0	0.58	N.A.*	Burschapers <i>et al.</i> (2002b)
<i>Pseudozyma tsukubaensis</i>	Batch, Stirred tank	243	61.0	N.A.*	1.65	Jeya <i>et al.</i> (2009)
<i>Pseudozyma tsukubaensis</i> KN75	Fed-batch, Stirred tank	245	61.0	N.A.*	2.86	Jeya <i>et al.</i> (2009)
<i>Moniliella</i> sp. BCC25224	Batch, Stirred tank	86.6	46.7	0.47	0.40	this study
<i>Moniliella</i> sp. BCC25224-M13 (mutant)	Batch, Stirred tank	103.5	56.9	0.59	0.47	this study

Moniliella, *Trichosporonoides* and *Aureobasidium* sp. were thought to be synonymous

^a calculation estimation

* not available

Conclusions

In this study, *Moniliella* sp. BCC25224 was subjected to UV and EMS mutagenesis. The mutant *Moniliella* sp. BCC25224-M13 produced a higher erythritol concentration and erythritol yield during fermentation with glucose as substrate than in *Moniliella* sp. BCC25224. Sequential random mutagenesis through UV irradiation and EMS treatments were achieved and obtained a potential candidate mutant for erythritol production. Attempts at further erythritol improvement should study process operation to optimize biomass and erythritol production. Erythritol production and productivity should increase influence of osmotic pressure or the glucose concentration regulation.

References

- Burschapers, J., Schustolla, D., Schugerl, K., Roper, H. & Troostembergh, J.C.de. (2002). Engineering aspects of the production of sugar alcohols with the osmophilic yeast *Moniliellatomentosa* var *pollinis*. Part I. Batch and fed-batch operation in stirred tank. *Process Biochemistry*, 38, 497-506. DOI:10.1016/S0032-9592(02)00178-4
- Burschapers, J., Schustolla, D., Schugerl, K., Roper, H. & Troostembergh, J.C.de. (2002). Engineering aspects of the production of sugar alcohols with the osmophilic yeast *Moniliella tomentosa* var *pollinis* Part 2. *Batch and fed-batch operation in bubble column and airlift*, *Process Biochemistry*, 38, 559-570. DOI:10.1016/S0032-9592(02)00179-6

- Dederer, H-G. & Hamburger, D. (2022). Are genome-edited micro-organisms covered by Directive 2009/41/EC?-implications of the CJEU's judgment in the case C-528/16 for the contained use of genome-edited micro-organisms. *Journal of Law and the Biosciences*, 31, 9. doi: 10.1093/jlb/lisab033. eCollection Jan-Jun 2022.
- den Hartog, G.J.M., Booths, A.W., Adam-Perrot, A., Brouns, F., Verkooijen, I.W.C.M., Weseler, A.R., Haenen, G.R.M.M. & Bast, A. (2010). Erythritol is a sweet antioxidant. *Nutrition*, 26, 449-58. doi: 10.1016/j.nut.2009.05.004. Epub 2009 Jul 24.
- Hirata, Y., Igarashi, K., Ezaki, S. & Atomi, H. (1999). High-level production of erythritol by strain 618A-01 isolated from pollen. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 87, 630-635.
- Ghezalbash, G.R., Nahvi, I. & Malekpour, A. (2014). Erythritol production with minimum By-product using *Candida magnoliae* mutant. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 50, 292-296. DOI:10.1134/S000368381403003X
- Guo, J., Li, J., Chen, Y., Guo, X. & Xiao, D. (2016). Improving Erythritol Production of *Aureobasidium pullulans* from Xylose by Mutagenesis and Medium Optimization. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 180, 717-727. doi: 10.1007/s12010-016-2127-3.
- Ishizuka, H., Wako, K., Kasumi, T. & Sasaki, T. (1989). Breeding of a mutant of *Aureobasidium* sp. with high erythritol production. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 68, 10.1016/0922-338x (89) 90003-2.
- Jacqz-Aigrain, E., Kassai, B., Cornu, C., Cazaubiel, J. M., Housez, B., Cazaubiel, M., Prevel, J-M., Bell, M., Boileau, A. & Decock, P. (2015). Gastrointestinal tolerance of erythritol-containing beverage in young children: a double-blind, randomised controlled trial. *European Journal of Clinical Nutrition*, 69, 746-51. DOI:10.1038/ejcn.2015.4
- Jeya, M., Lee, K-M., Tiwari, M. K., Kim, J-S., Gunasekaran, P., Kim, S-Y., Kim, I-W. & Lee, J-K. (2009). Isolation of a novel high erythritol-producing *Pseudozyma tsukubaensis* and scale-up of erythritol fermentation to industrial level. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 83, 225-231. doi: 10.1007/s00253-009-1871-5.
- Kobayashi, Y., Yoshida, J., Iwata, H., Koyama, Y., Kato, J., Ogihara, J. & Kasumi, T. (2013). Gene expression and function involved in polyol biosynthesis of *Trichosporonoides megachiliensis* under hyper-osmotic stress. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 115, 645-50. doi: 10.1016/j.jbiosc.2012.12.004. Epub 2013 Jan 5.
- Lin, S-J., Wen, C-Y., Wang, P-M., Huang, J-C, Wei, C-L., Chang, J-W. & Chu, W-S. (2010). High-level production of erythritol by mutants of osmophilic *Moniliella* sp. *Process Biochemistry*, 45, 973-979, https://doi.org/10.1016/j.procbio.2010.03.003
- Lin, S-J., Wen, C-Y., Liao, J-C. & Chu, W-S. (2001). Screening and production of erythritol by newly isolated osmophilic yeast-like fungi. *Process Biochemistry*, 36, 1249-1258. https://doi.org/10.1016/S0032-9592 (01) 00169-8
- Moon, H.J., Jeya, M., Kim, I-M. & Lee, J-K. (2010). Biotechnological production of erythritol and its applications. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 86, 1017-1025. DOI: 10.1007/s00253-010-2496-4
- Park, Y-K., Korpys, P., Kubiak, M., Celinska, E., Soudier, P., Trebule, P., Larroude, M., Rossignol, T. & Nicaud, J-M. (2019). Engineering the architecture of erythritol-inducible promoters for regulated and enhanced gene expression in *Yarrowia lipolytica*. *FEMS Yeast Research*, 1, 19. doi: 10.1093/femsyr/foy105.
- Park, J., Seo, B., Kim, J. & Park, Y. (1998). Production of erythritol in fed-batch cultures of *Trichosporon* sp. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 86, 577-580. https://doi.org/10.1016/S0922-338X (99) 80010-5.
- Rakicka-Pustułka, M., Mirończuk, A.M., Celińska, E., Biały, W. & Rymowicz, W. (2020). Scale-up of the erythritol production technology - Process simulation and techno-economic analysis. *Journal of Cleaner Production*, 257, 120533. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120533
- Rzechonek, D.A., Dobrowolski, A., Rymowicz, W. & Mironczuk, A.M. (2018). Recent advances in biological production of erythritol. *Critical Reviews in Biotechnology*, 38, 620-633. https://doi.org/10.1080/07388551.2017.1380598

- Savergave, L., Gadre, R.V., Vaidya, B.K. & Narayanan, K. (2011). Strain improvement and statistical media optimization for enhanced erythritol production with minimal by-products from *Candida magnoliae* mutant R23. *Biochemical Engineering Journal*, 55, 92-100. DOI:10.1016/j.bej.2011.03.009
- Sanchez, S. & Demain, A.L. (2008). Metabolic regulation and overproduction of primary metabolites. *Microbial Biotechnology*, 1, 283-319. doi: 10.1111/j.1751-7915.2007.00015.x
- Xiaoyan, L., Xinjun, Y., Jinshun, Lv., Jiaying, Jun, X., Zhen, W., Tong, Z. & Yuanfang, D. (2017). A cost-effective process for the coproduction of erythritol and lipase with *Yarrowia lipolytica* M53 from waste cooking oil. *Food and Bioprocess Processing*, 103, 86-94. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.03.002>
- Yan, W., Deng, X.W., Yang, C. & Tang, X. (2021). The Genome-Wide EMS Mutagenesis Bias Correlates With Sequence Context and Chromatin Structure in Rice. *Frontiers in Plant Science*, 12, 579675. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.579675>

สีย้อมจากรงค์ควัตถุพืชสำหรับย้อมสีละอองเรณู

Plant pigment dyes for pollen staining

ชูเทพ พรรณศรี¹, ภาสกร บุญชาติ²

Chuthep Phannasri¹, Pasakorn Bunchalee²

Received: 27 August 2021 ; Revised: 21 February 2022 ; Accepted: 5 May 2022

บทคัดย่อ

ที่ผ่านมาการศึกษาสีย้อมธรรมชาติเพื่อย้อมโครงสร้างต่างๆ ของพืช ยังจำกัดเฉพาะในเนื้อเยื่อและโครโมโซม ละอองเรณูประกอบด้วยสารอินทรีย์ที่แตกต่างจากโครงสร้างของพืชที่กล่าวมา การวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะคัดเลือกพืชและตัวทำละลายที่เหมาะสม ในการสกัดสีย้อมธรรมชาติเพื่อใช้ย้อมละอองเรณู จากการสกัดสีย้อมในดอกอัญชัน (*Clitoria ternatea* L.) ดอกหางนกยูงฝรั่ง (*Delonix regia* (Bojer ex Hook.) Raf.) เปลือกผลแก้วมังกร (*Hylocereus undatus* (Haw.) Britton & Rose) และเปลือกผลมังคุด (*Garcinia mangostana* L.) ด้วยอัตราส่วน พืช 1 กรัม ต่อน้ำหรือเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 ปริมาณ 10 มิลลิลิตร เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นทำการระเหยตัวทำละลาย และผ่านกระบวนการแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศ แล้วนำสีย้อมธรรมชาติย้อมละอองเรณูของชบา (*Hibiscus rosa-sinensis* L.) พบว่า สีย้อมที่สกัดจากดอกหางนกยูงฝรั่งและเปลือกผลแก้วมังกรด้วยน้ำกลั่น มีประสิทธิภาพดีใกล้เคียงกับสีย้อมซาฟราทิน โอ เนื่องจากย้อมละอองเรณูติดสีชมพู และสีย้อมมีความโปร่งแสง ซึ่งทำให้เห็นรูปร่างของหนาม ลวดลายบนผนังชั้นนอกชั้น ความหนาของชั้นนอกชั้น และลักษณะของช่องเปิดได้ชัดเจนกว่าละอองเรณูที่ไม่ย้อมสี ส่วนสีย้อมที่สกัดจากพืชทั้งสี่ชนิดด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 มีประสิทธิภาพต่ำถึงพอใช้ในการย้อมสี ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้สกัดรงควัตถุเพื่อทำเป็นสีย้อมละอองเรณู

คำสำคัญ: สีย้อมธรรมชาติ การย้อมสีละอองเรณู ละอองเรณู การสกัดรงควัตถุ

Abstract

The pollen-staining efficiency of natural dyes has been tested only in plant tissues and chromosomes, but still has not been investigated in pollen. The organic compounds of pollen are different from those of other plant structures. Therefore, this research aims to select plants and solvents that are suitable for natural dye extraction for pollen staining. The flowers of *Clitoria ternatea* L. and *Delonix regia* (Bojer ex Hook.) Raf. and pericarps of *Hylocereus undatus* (Haw.) Britton & Rose, and *Garcinia mangostana* L. were extracted with distilled water or 95 percent ethyl alcohol at a ratio of 1:10 (weight/volume) and soaking for 72 h. Then the samples were filtered, evaporated, and vacuum freeze-dried. Pollen of *Hibiscus rosa-sinensis* L. was used to test the efficiency of natural dyes. The results showed that the natural dye extracted with distilled water from flowers of *D. regia* and pericarps of *H. undatus* had efficiency similar to safranin O for pollen staining, in regard to color of the stain and also transparency. In addition, the shape and size of exine sculpturing, ornamentation, aperture, and pollen wall thickness were seen more clearly than in unstained pollen. On the other hand, the natural dyes were extracted from these plants with 95 percent ethyl alcohol have low to moderate efficiency in pollen staining. Thus, it is not suitable for use as a solvent for pigment extraction.

Keywords: natural dyes, pollen staining, pollen, pigment extraction

¹ นักวิทยาศาสตร์, ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ต.ขามเรียง อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ต.ขามเรียง อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150

¹ Scientist, Department of Biology, Faculty of Science, Mahasarakham University, Maha Sarakham, Thailand, 44150

² Assistant Professor, Department of Biology, Faculty of Science, Mahasarakham University, Maha Sarakham, Thailand, 44150

* Corresponding author: e-mail: pasakorn.b@msu.ac.th

บทนำ

โดยทั่วไปแล้วเซลล์เนื้อเยื่อ และโครงสร้างขนาดเล็กของพืชไม่มีสี ดังนั้นการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงส่วนใหญ่จำเป็นต้องใช้การย้อมสี เพื่อให้สามารถสังเกตเห็นโครงสร้างต่างๆ ได้อย่างชัดเจนมากขึ้น (วันเพ็ญแก้วพุก, 2015) แต่เนื่องจากเซลล์พืชแต่ละชนิดประกอบด้วยสารประกอบที่แตกต่างกัน เช่น เซลล์พาราไคมะประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และเพคติน เป็นหลัก เซลล์คอลเลนิมาประกอบด้วยเซลลูโลส และเพคตินเป็นหลัก ส่วนเซลล์สเคอเรนคิมาผนังเซลล์ปฐมภูมิประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และเพคติน ส่วนผนังเซลล์ทุติยภูมิประกอบด้วยเซลลูโลส และอาจมีหรือไม่มีลิกนินเป็นองค์ประกอบ (เทียมใจคมกฤต, 2542) จึงทำให้สีย้อมแต่ละชนิดย้อมติดเซลล์และเนื้อเยื่อพืชได้แตกต่างกัน เช่น สีซาฟรานิน โอ (Safranin O) ย้อมติดสารประกอบพวกลิกนิน ซูเบอร์ริน คิวติน และนิวเคลียสสีฟาสกรีน เอฟซีเอฟ (Fast Green FCF) ย้อมติดโครงสร้างพืชที่มีเซลลูโลส เพคติน และไซโทพลาสซึม เป็นต้น โดยทั่วไปสีย้อมทางชีวภาพถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ สีย้อมธรรมชาติ (natural dye) ซึ่งสกัดได้จากสิ่งมีชีวิตทั้งพืช สัตว์ จุลินทรีย์ และแร่ธาตุ และสีย้อมสังเคราะห์ (synthetic dye) ซึ่งเกิดจากการสังเคราะห์ทางเคมีและนิยมใช้ในห้องปฏิบัติการ เช่น สีซาฟรานิน โอ (Johansen, 1940) เนื่องจากมีความจำเพาะต่อผนังเซลล์ทุติยภูมิ และนิวเคลียส (มานิต คิตอยู่, 2552) อย่างไรก็ตามสีชนิดนี้เป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง การก่อให้เกิดโรคมะเร็ง และการกลายพันธุ์ (Robinson *et al.*, 2001 ; Azimvand *et al.*, 2018) นอกจากนี้ยังมีราคาแพงและเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม หากมีการทิ้งแบบผิดวิธี (มานิต คิตอยู่, 2552 ; จินตรา เล็กประยูร และคณะ, 2553 ; รุจิรา ทองศรีสุข และคณะ, 2560) จากผลกระทบที่เกิดขึ้นปัจจุบันจึงมีการศึกษาสีย้อมธรรมชาติและวิธีสกัดที่เหมาะสมเพื่อนำมาใช้ทดแทนสีสังเคราะห์เพิ่มมากขึ้น เช่น จินตรา เล็กประยูร และคณะ (2553) ศึกษาการสกัดแอนโทไซยานินจากผลหม่อน ผลหว่า ผลแก้วมังกร และใบกะหล่ำปลีม่วงด้วยตัวทำละลาย 3 ชนิด พบว่าผลของหม่อนสดที่นำมาสกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกร้อยละ 0.1 ในเมทานอลอัตราส่วน 1:1 สามารถย้อมติดสีโครโมโซมได้ดีที่สุด วันเพ็ญแก้วพุก (2558) ทำการศึกษาสารสกัดและการเตรียมสีย้อมธรรมชาติจากดอกกระเจี๊ยบแดง ดอกอัญชัน เปลือกแก้วมังกร เปลือกมังคุด และเปลือกมะเขือม่วง เพื่อใช้ย้อมสีโครโมโซมปลายรากหอมและเปรียบเทียบกับสีย้อมคาร์บอิลฟุกซิน พบว่าสีย้อมที่สกัดจากดอกกระเจี๊ยบด้วยน้ำกลั่นที่อัตราส่วน 1:2 (กรัม/มิลลิลิตร) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ติดสีโครโมโซมได้ดีและมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับสีคาร์บอิลฟุกซิน นอกจากนี้ รุจิรา ทองศรีสุข และคณะ (2560) ศึกษาการสกัดสีย้อมจากข้าวโพดหวานสีม่วง ด้วย

ตัวทำละลาย 3 ชนิด เพื่อนำมาใช้ศึกษาการแบ่งเซลล์ไมโทซิสของเซลล์รากหอม โดยนำข้าวโพดหวานสีม่วงมาสกัดด้วยน้ำอัตราส่วน 1:1 และอบให้แห้ง และเมื่อนำมาละลายด้วยกรดซิตริก ความเข้มข้นร้อยละ 45 (pH 2) สามารถย้อมสีโครโมโซมของเซลล์รากหอมได้ดีที่สุด และสามารถใช้ทดแทนสีออร์แกนิกได้เช่นเดียวกับกับ จิตภา บุญพันธ์ และคณะ (2562) ศึกษาการสกัดสารแอนโทไซยานินจาก เปลือกมังคุด อัญชัน กะหล่ำปลีม่วง และมะม่วงหาวมะนาวโห่ โดยใช้ตัวทำละลาย 5 ชนิด เพื่อใช้ในการย้อมสีโครโมโซมจากปลายรากหอม พบว่าสารสกัดจากมะม่วงหาวมะนาวโห่ทั้งแบบสดและแห้ง ที่สกัดด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 มีค่าเฉลี่ยความพึงพอใจสูงสุดไม่เพียงเท่านี้ สุกัญญา แยมสรवल (2558) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติสีย้อมธรรมชาติจากพืชกลุ่มที่ให้สารแอนโทไซยานินคือ ข้าวเหนียวดำ และกะหล่ำปลีม่วง และกลุ่มที่ให้สารเบทาเลนคือ เปลือกแก้วมังกรและผลผักปลัง โดยสกัดด้วยตัวทำละลายคือ น้ำในอัตราส่วน 1:1 (กรัม/มิลลิลิตร) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่ารังควัตถุจากข้าวเหนียวดำและเปลือกแก้วมังกรสามารถนำมาใช้ย้อมเนื้อเยื่อพืชทั้งของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและพืชใบเลี้ยงคู่ได้ โดยมีค่าความพึงพอใจไม่แตกต่างจากการใช้สีซาฟรานิน โอ เพื่อให้เห็นประสิทธิภาพของสารสีจากพืชที่ใช้เป็นสีย้อม ฉันทนา รุ่งพิทักษ์ไชย และคณะ (2555) ได้รวบรวมรายชื่อพืชที่ให้สีย้อมและส่วนของพืชที่นำมาสกัดสีย้อม ดังนี้ สารสีที่สกัดได้จากใบอินา ดอกอัญชัน เหง้าขมิ้น ใบกระท้อน กลีบดอกเข็มแดง ใบประดับเฟื่องฟ้าสีชมพู ใบมังคุด ผลหว่า เยื่อหุ้มเมล็ดคำสด และกลีบดอกเทียนบ้านสามารถย้อมสีเนื้อเยื่อส่วนลำต้นและกิ่งกระสังได้ ส่วนสารสีที่สกัดได้จากผลหว่า ผลหม่อน ดอกคำฝอย ดอกชบา และใบเตยหอม สามารถย้อมสีโครโมโซมในเซลล์รากหอมได้จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นได้ว่า รอบตัวเรามีพืชหลายชนิดที่มีสารสี และสามารถนำมาสกัดเป็นสีย้อมได้ และยังมีอีกเป็นจำนวนมากที่ยังไม่มีการศึกษาประสิทธิภาพในการใช้เป็นสีย้อม เช่นเดียวกับกับการทดสอบประสิทธิภาพของสีย้อมที่จะนำไปย้อมโครงสร้างต่างๆ ของพืช ซึ่งยังจำกัดอยู่เฉพาะในส่วนของเนื้อเยื่อและโครโมโซม แต่ยังคงขาดในส่วนของเราเอง ซึ่งจำเป็นต้องใช้สีย้อมในการศึกษาลักษณะทางสัณฐานเช่นกัน ของเราเองเป็นเซลล์ที่มีโครงสร้างและสารประกอบที่แตกต่างจากโครงสร้างอื่นๆ ของพืช กล่าวคือมีผนัง 2 ชั้น ได้แก่ ผนังชั้นนอกหรือชั้นเอกซัน (exine) ประกอบด้วยสารสปอโรพอลเลนิน (sporopollenin) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของผนังชั้นนี้ และสารพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharids) นอกจากนี้ของเราเองของพืชบางชนิดยังมีสารไกลโคคาลิก (glycocalyx) เป็นส่วนประกอบเช่นกัน ส่วนผนังชั้นใน หรือชั้นอินทีน (intine) ประกอบด้วยเซลลูโลสเป็นหลัก (Moore *et al.*, 1991)

ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อคัดเลือกพืชที่มีรควัตถุซึ่งมีประสิทธิภาพในการย้อมละอองเรณู และตัวทำละลายที่เหมาะสมในการสกัดรควัตถุจากพืชสำหรับใช้เป็นสีย้อมในการศึกษาลักษณะทางสัณฐานของละอองเรณู นอกจากนี้ยังเป็นการลดการใช้สีย้อมสังเคราะห์ ซึ่งเป็นอันตรายต่อผู้ใช้และสิ่งแวดล้อม และลดค่าใช้จ่ายในการซื้อสีสังเคราะห์ที่มีราคาแพง

วิธีดำเนินการวิจัย

นำดอกอัญชัน (*Clitoria ternatea* L.) ดอกหางนกยูงฝรั่ง (*Delonix regia* (Bojer ex Hook.) Raf.) เปลือกผลแก้วมังกร (*Hylocereus undatus* (Haw.) Britton & Rose) และเปลือกผลมังคุด (*Garcinia mangostana* L.) มาอบให้แห้งด้วยเครื่องอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จนตัวอย่างแห้งสนิท จากนั้นนำตัวอย่างพืชแต่ละชนิดมาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบด แล้วนำไปทำการสกัดรควัตถุจากพืชทั้งสี่ชนิดด้วยตัวทำละลาย 2 ชนิด คือ น้ำกลั่น และเอทิลแอลกอฮอล์ ร้อยละ 95 ในอัตราส่วน 1:10 (พืช 1 กรัม: น้ำหรือเอทิลแอลกอฮอล์ 10 มิลลิลิตร) โดยการแช่ตัวอย่างในตัวทำละลายเป็นเวลา 72 ชั่วโมง แล้วทำการกรองรควัตถุที่สกัดได้ด้วยผ้าขาวบาง และกระดาษกรองเบอร์ 1 ตามลำดับ ทำการระเหยตัวทำละลายด้วยเครื่องระเหยสูญญากาศ (rotary evaporator) แล้วนำรควัตถุที่สกัดได้ผ่านขั้นตอนการทำแห้งด้วยการแช่เยือกแข็งแบบสูญญากาศ (vacuum freeze dry) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อรักษาคุณสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมี โดยขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้นนี้ดัดแปลงจากวิธีการของจิตาภา บุญพันธ์ และคณะ (2562) จากนั้นทำการเตรียมสีย้อมจากรควัตถุที่สกัดได้ด้วยการละลายในน้ำกลั่น หรือเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 ในอัตราส่วน 1:1 (ผงรควัตถุ 1 กรัม: ตัวทำละลาย 1 มิลลิลิตร) เพื่อนำไปทดสอบประสิทธิภาพการย้อมสีละอองเรณูของชบา (*Hibiscus rosa-sinensis* L.) แล้วนำไปเปรียบเทียบกับละอองเรณูที่ไม่ได้ย้อมสี และละอองเรณูที่ย้อมด้วยสีชาฟรานิน โอ ที่เตรียมด้วยน้ำกลั่นเป็นชุดควบคุม เพื่อใช้เป็นมาตรฐานในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสีย้อมจากพืชทั้งสี่

ชบาเป็นพืชที่ไม่ทราบแน่ชัดเรื่องถิ่นกำเนิดว่ามาจากที่ใด (Khan *et al.*, 2017) แต่ด้วยการที่พืชถูกนำมาปลูกเป็นไม้ประดับและพบเห็นได้โดยทั่วไป มีละอองเรณูขนาดใหญ่มาก คือ 135-170 ไมโครเมตร มีรูปร่างกลม มีช่องเปิดแบบรูกระจายรอบละอองเรณู และมีหนามยื่นออกมาจากชั้นหลังคารอบละอองเรณู (Hayat, 2009) ด้วยลักษณะทางสัณฐานที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าละอองเรณูของพืชชนิดนี้มีความเหมาะสมสำหรับการนำมาทดสอบการย้อมสี เนื่องจากทำให้ผู้วิจัยสามารถสังเกตและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการติด

สีย้อมของโครงสร้างต่างๆ ตั้งแต่ส่วนของหนาม ผนังละอองเรณู ไปจนถึงช่องเปิด ได้เป็นอย่างดี

โดยทั่วไปสีที่นิยมใช้ย้อมเพื่อศึกษาโครงสร้างของละอองเรณูคือ ชาฟรานิน โอ เนื่องจากเมื่อนำมาย้อมละอองเรณูแล้ว สีมีความโปร่งแสง ไม่มีตะกอน และทำให้เห็นโครงสร้างต่างๆ ได้ชัดเจนขึ้น แต่เนื่องด้วยสีย้อมที่ใช้ในการย้อมละอองเรณูครั้งนี้สกัดจากพืช จึงมีความแตกต่างจากสีย้อมสังเคราะห์ ผู้วิจัยจึงได้กำหนดเกณฑ์เปรียบเทียบประสิทธิภาพ ดังนี้ 1. ความโปร่งแสงหรือทึบแสงของสีย้อมเมื่อเปรียบเทียบกับละอองเรณูที่ไม่ย้อมสี และละอองเรณูที่ย้อมด้วยสีชาฟรานิน โอ 2. ความชัดเจนของโครงสร้างต่างๆ ของละอองเรณู เมื่อเปรียบเทียบกับละอองเรณูที่ไม่ย้อมสี และละอองเรณูที่ย้อมด้วยสีชาฟรานิน โอ [โดยเกณฑ์ในข้อนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 4 ระดับ คือ ระดับดี (มีประสิทธิภาพเทียบเท่าหรือใกล้เคียงกับสีชาฟรานิน โอ) ระดับพอใช้ (มีประสิทธิภาพต่อยกกว่าสีชาฟรานิน โอ แต่ดีกว่าการไม่ย้อมสี) ระดับต่ำ (มีประสิทธิภาพไม่แตกต่างจากการไม่ย้อมสี) และระดับไม่ดี (มีประสิทธิภาพต่อยกกว่าการไม่ย้อมสี)] และ 3. ตะกอนที่แขวนลอยอยู่ในสีย้อม

ผลการวิจัย

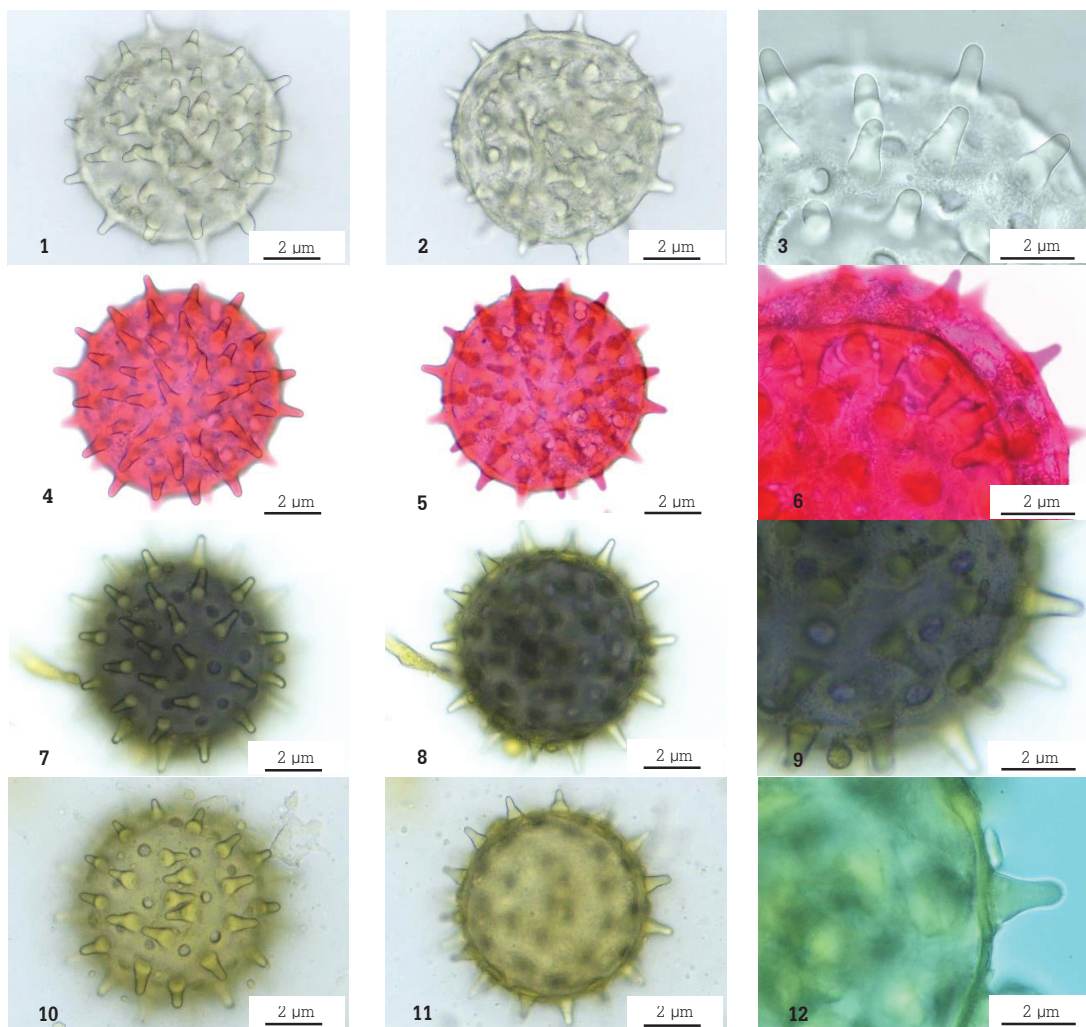
จากการสกัดรควัตถุในดอกอัญชัน ดอกหางนกยูงฝรั่ง เปลือกผลมังคุด และเปลือกผลแก้วมังกร ด้วยตัวทำละลาย 2 ชนิด คือ น้ำกลั่น และเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 พบว่าสีย้อมที่ได้มีสีแตกต่างกัน และเมื่อนำไปย้อมละอองเรณูชบา เพื่อเปรียบเทียบกับละอองเรณูที่ไม่ย้อมสี (Figure 1.1-1.3) และละอองเรณูที่ย้อมด้วยสีชาฟรานิน โอ (Figure 1.4-1.6) ให้ผลดังนี้ 1. สีย้อมจากดอกอัญชันที่สกัดด้วยน้ำกลั่นมีสีม่วง ย้อมละอองเรณูติดสีม่วงอ่อน และละอองเรณูมีลักษณะทึบแสง สามารถสังเกตโครงสร้างต่างๆ ได้ในระดับต่ำ (Figure 1.7-1.9) ส่วนสีย้อมที่สกัดด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 มีสีเขียวเหลือง ย้อมละอองเรณูติดสีเหลืองอำพัน และละอองเรณูมีลักษณะขุ่นมัว สามารถสังเกตโครงสร้างต่างๆ ได้ในระดับไม่ดี (Figure 1.10-1.12) 2. สีย้อมจากดอกหางนกยูงฝรั่งที่สกัดด้วยน้ำกลั่นมีสีแดงเข้ม ย้อมละอองเรณูติดสีชมพู และละอองเรณูมีลักษณะโปร่งแสง สามารถสังเกตโครงสร้างต่างๆ ได้ในระดับดี (Figure 1.13-1.15) ส่วนสีย้อมที่สกัดด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 มีสีเหลือง ย้อมละอองเรณูติดสีเหลืองอำพันอ่อน ละอองเรณูมีลักษณะโปร่งแสง สามารถสังเกตโครงสร้างต่างๆ ได้ในระดับพอใช้ (Figure 1.16-1.18) 3. สีย้อมจากเปลือกผลแก้วมังกรที่สกัดด้วยน้ำกลั่นมีสีชมพูม่วง ย้อมละอองเรณูติดสีชมพู และละอองเรณูมีลักษณะโปร่งแสง สามารถสังเกตโครงสร้างต่างๆ ได้ในระดับดี (Figure 1.19-1.21) ส่วนสีย้อมที่สกัดด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95

มีสีน้ำตาลแดง และย้อมละอองเรณูติดสีชมพูจางมาก สามารถสังเกตโครงสร้างต่างๆ ได้ในระดับต่ำถึงพอใช้ (Figure 1.22-1.24) และ 4. สีข้อมจากเปลือกผลมังคุดที่สกัดด้วยน้ำกลั่นมีสีม่วงชมพู ย้อมละอองเรณูติดสีเหลืองอำพัน และละอองเรณูมีลักษณะขุ่นมัว สามารถสังเกตโครงสร้างต่างๆ ได้ในระดับไม่ดี

(Figure 1.25-1.27) ส่วนสีข้อมที่สกัดด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 มีสีน้ำตาลแดง ย้อมละอองเรณูติดสีเหลืองอำพันอ่อน และละอองเรณูมีลักษณะโปร่งแสง สามารถสังเกตโครงสร้างต่างๆ ได้ในระดับพอใช้ (Figure 1.28-1.30) (Table 1)

Table 1 Color and efficiency of natural dyes from 4 plants by using 2 solvents for extraction

Plants & part for extraction	Color of natural dyes by using 2 solvents for extraction		Color & appearance of stained pollen and efficiency of natural dyes			
	Distilled water	95% ethyl alcohol	Pollen stain with natural dyes & dissolve in distilled water		Pollen stain with natural dyes & dissolve in 95% ethyl alcohol	
			Color of pollen	Efficiency of natural dyes	Color of pollen	Efficiency of natural dyes
<i>Clitoria ternatea</i> (flower)	light purple	yellowish-green	light purple, opaque color	bad	amber color, turbidity	low
<i>Delonix regia</i> (flower)	deep red	yellow	pink, transparency	high	amber color, transparency	moderate
<i>Hylocereus undatus</i> (pericarp)	purple-pink	reddish brown	pink, transparency	high	very light amber color	low-moderate
<i>Garcinia mangostana</i> (pericarp)	pinkish-purple	reddish brown	amber color, turbidity	bad	light amber color, transparency	moderate



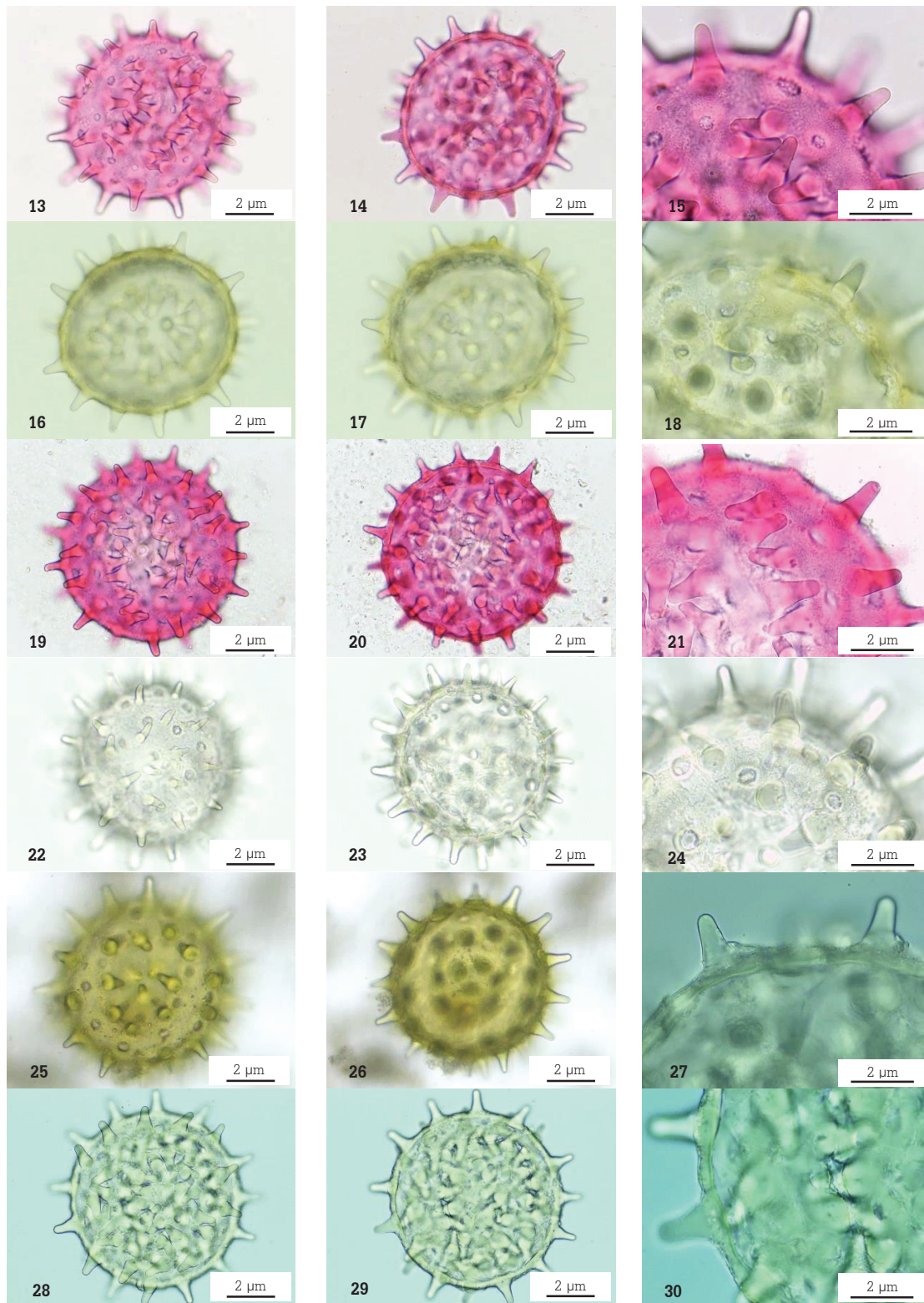


Figure 1 Pollens of *Hibiscus rosa-sinensis*: (1-3) unstained pollens, (4-6) stain with safranin O, (7-9) stain with natural dye from flower of *C. ternatea* and dissolve in distilled water, (10-12) stain with natural dye from flower of *C. ternatea* and dissolve in 95% ethyl alcohol, (13-15) stain with natural dye from flower of *D. regia* and dissolve in distilled water, (16-18) stain with natural dye from flower of *D. regia* and dissolve in 95% ethyl alcohol, (19-21) stain with natural dye from pericarp of *H. undatus* and dissolve in distilled water, (22-24) stain with natural dye from pericarp of *H. undatus* and dissolve in 95% ethyl alcohol, (25-27) stain with natural dye from pericarp of *G. mangostana* and dissolve in distilled water, (28-30) stain with natural dye from pericarp of *G. mangostana* and dissolve in 95% ethyl alcohol (magnification of figures 1, 2, 4, 5, 7, 8, 10, 11, 13, 14, 16, 17, 19, 20, 22, 23, 25, 26, 28 & 29 are 100 times, and figure 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27 & 30 are 400 times).

สรุปและวิจารณ์ผล

ผลการวิจัยครั้งนี้แสดงให้เห็นว่า รงควัตถุจากดอกอัญชัน ดอกหางนกยูงฝรั่ง เปลือกผลมังคุด และเปลือกผลแก้วมังกร ที่สกัดด้วยตัวทำละลาย 2 ชนิด คือ น้ำกลั่น และเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 มีประสิทธิภาพในการย้อมสีละอองเรณูได้แตกต่างกัน ดังนี้ 1. สีย้อมที่สกัดด้วยน้ำกลั่น พบว่า 1.1 สีย้อมจากดอกหางนกยูงฝรั่งและเปลือกผลแก้วมังกรมีประสิทธิภาพในระดับดี ใกล้เคียงกับการย้อมละอองเรณูด้วยสีย้อมซาฟรานิน โอ เนื่องจากละอองเรณูติดสีชมพู และยังคงความโปร่งแสงทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างต่างๆ ซึ่งรวมถึงรูปร่างของหนาม ลวดลายบนผนังชั้นนอกชั้น ความหนาของชั้นนอกชั้น และลักษณะของช่องเปิดได้ชัดเจนกว่าละอองเรณูที่ไม่ได้ย้อมสีอย่างชัดเจน 1.2 สีย้อมจากดอกอัญชันมีประสิทธิภาพในระดับไม่ดี เนื่องจากละอองเรณูติดสีม่วงอ่อน และมีลักษณะทึบแสง จึงทำให้การสังเกตโครงสร้างต่างๆ ของละอองเรณูได้ต่ำกว่าละอองเรณูที่ไม่ย้อมสี 1.3 สีย้อมจากเปลือกผลมังคุดมีประสิทธิภาพในระดับไม่ดี เนื่องจากละอองเรณูติดสีเหลืองอำพัน และมีลักษณะขุ่นมัวและมีตะกอนในสีย้อม จึงทำให้การสังเกตโครงสร้างต่างๆ ของละอองเรณูได้ต่ำกว่าละอองเรณูที่ไม่ย้อมสี 2. สีย้อมที่สกัดจากพืชทั้ง 4 ชนิด ด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 มีผลการทดสอบประสิทธิภาพอยู่ในระดับต่ำถึงพอใช้ ดังนี้ 2.1 สีย้อมจากดอกอัญชันมีประสิทธิภาพในระดับต่ำ เนื่องจากละอองเรณูติดสีเหลืองอำพัน และมีลักษณะขุ่นมัว จึงทำให้การสังเกตโครงสร้างต่างๆ ของละอองเรณูได้ต่ำกว่าละอองเรณูที่ไม่ย้อมสี 2.2 สีย้อมจากดอกหางนกยูงฝรั่งมีประสิทธิภาพในระดับพอใช้ เนื่องจากละอองเรณูติดสีเหลืองอำพันอ่อน และมีลักษณะโปร่งแสง จึงทำให้การสังเกตโครงสร้างต่างๆ ของละอองเรณูได้ชัดเจนกว่าละอองเรณูที่ไม่ย้อมสีเพียงเล็กน้อย 2.3 สีย้อมจากเปลือกผลแก้วมังกรมีประสิทธิภาพในการย้อมในระดับต่ำถึงพอใช้ เนื่องจากละอองเรณูติดสีน้อยมาก จนแทบไม่แตกต่างจากละอองเรณูที่ไม่ย้อมสี จึงทำให้การสังเกตโครงสร้างต่างๆ ของละอองเรณูไม่ชัดเจน 2.4 สีย้อมจากเปลือกผลมังคุดมีประสิทธิภาพในการย้อมในระดับพอใช้ เนื่องจากละอองเรณูติดสีเหลืองอำพันอ่อน และมีลักษณะโปร่งแสง แตกต่างจากละอองเรณูที่ไม่ย้อมสีเพียงเล็กน้อย จึงทำให้การสังเกตโครงสร้างต่างๆ ของละอองเรณูชัดเจนกว่าละอองเรณูที่ไม่ย้อมสีเพียงเล็กน้อย

หากสังเกตสีย้อมจากพืชทั้ง 4 ชนิด ที่สกัดได้จากตัวทำละลายน้ำกลั่นและเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 พบว่ามีสีต่างกัน ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัย เช่น ประสิทธิภาพในการสกัดสารของตัวทำละลาย ความโปร่งแสงของตัวอย่างพืชที่นำมาสกัด อุณหภูมิที่ใช้ในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง (Yoshikazu *et al.*, 2008) เป็นต้น และ

เนื่องด้วยการวิจัยครั้งนี้ไม่ได้ทำการศึกษาตัวแปรเหล่านี้ จึงไม่สามารถระบุได้ว่าสีย้อมที่สกัดได้จากพืชและตัวทำละลายที่ต่างกัน เกิดจากปัจจัยใด ซึ่งเป็นประเด็นหนึ่งที่มีความน่าสนใจสำหรับการต่อยอดงานวิจัยในอนาคต เพราะข้อมูลที่ได้อาจมีประโยชน์ต่อการพัฒนาประสิทธิภาพของสีย้อมธรรมชาติ เพื่อย้อมละอองเรณูต่อไป

หากเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา ผลการทดลองครั้งนี้ยังแสดงให้เห็นว่า สารสีที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้เป็นสีย้อมละอองเรณู ประกอบด้วยรงควัตถุ 2 กลุ่ม ได้แก่ สารแอนโทไซยานิน (anthocyanin) และสารเบทาเลน (betalain) โดยสารแอนโทไซยานินเป็นรงควัตถุที่พบในพืชที่มีสีม่วงแดง ไปจนถึงสีน้ำเงิน ซึ่งพบได้ทั้งในดอกอัญชัน เปลือกผลมังคุด (ยุพาพร ผลขจรศักดิ์, 2547 ; จิตภา บัญพันธ์ และคณะ, 2562) และดอกหางนกยูงฝรั่ง (Felix *et al.*, 2008) ซึ่งละลายได้ดีในเมทิลแอลกอฮอล์ เอทิลแอลกอฮอล์ และน้ำตามลำดับ (ยุพาพร ผลขจรศักดิ์, 2547 ; จิตภา บัญพันธ์ และคณะ, 2562) และปัจจัยที่มีผลต่อความคงตัวของสารแอนโทไซยานิน คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ แสง และเวลาการเก็บ (ยุพาพร ผลขจรศักดิ์, 2547 ; Yoshikazu *et al.*, 2008) ส่วนสารเบทาเลนเป็นรงควัตถุที่มีสีสดใส พบในพืชที่มีสีแดงและสีเหลือง และเป็นสารที่มีความคงตัวมากกว่าสารแอนโทไซยานิน โดยสีของสารเบทาเลนจะไม่เปลี่ยนแปลงตามความเป็นกรด-ด่าง (Yoshikazu *et al.*, 2008) ซึ่งสารเบทาเลนสามารถพบได้ในพืชกลุ่มบานไม่รู้โรย (amaranth) และกระบองเพชร (cactus) เช่น พบในเปลือกผลแก้วมังกร (วิภาดา สอนงราษฎร์ และคณะ, 2552 ; สุกัญญา แยมสรวล, 2558) ผลการศึกษาครั้งนี้ยังเป็นการรายงานเพื่อเพิ่มเติมข้อมูลจากการศึกษาที่ว่า สีย้อมที่ได้จากเปลือกผลแก้วมังกรที่สกัดด้วยน้ำกลั่น สามารถใช้ย้อมสีเนื้อเยื่อพืชทั้งใบเลี้ยงเดี่ยวและใบเลี้ยงคู่ (สุกัญญา แยมสรวล, 2558) ได้แล้ว ยังสามารถใช้ย้อมสีละอองเรณูได้ด้วยเช่นกัน

จากข้อมูลข้างต้น หากเปรียบเทียบเฉพาะสีย้อมที่สกัดจากดอกหางนกยูงฝรั่งและเปลือกผลแก้วมังกร ด้วยตัวทำละลายคือน้ำกลั่นและเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 เพื่อทำสีย้อมละอองเรณูพบว่า น้ำกลั่นมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกว่าเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 อย่างชัดเจน เนื่องจากละอองเรณูติดสีได้ดีกว่า (Table 1) ซึ่งน้ำกลั่นเป็นตัวทำละลายที่มีขี้ขาว ต่างจากเอทิลแอลกอฮอล์ที่เป็นตัวทำละลายที่มีขี้ขาว (Pandey & Tripathi, 2014) ยิ่งไปกว่านั้นการทดลองครั้งนี้ยังแสดงให้เห็นว่า สีย้อมธรรมชาติที่เหมาะสมในการนำมาสกัดด้วยน้ำกลั่น เพื่อย้อมสีละอองเรณูชบา คือ รงควัตถุจากเปลือกผลแก้วมังกร ซึ่งอยู่ในกลุ่มสารเบทาเลน โดยมีความคงตัวกว่ารงควัตถุจากดอกหางนกยูงฝรั่ง ซึ่งมีสารแอนโทไซยานิน

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าสีย้อมจากดอกหางนกยูงฝรั่ง และเปลือกผลแก้วมังกรที่สกัดด้วยน้ำกลั่น จะมีประสิทธิภาพในการย้อมละอองเรณูอยู่ในระดับดีเหมือนกัน แต่การสกัดสารสีจากดอกหางนกยูงฝรั่งนั้นทำได้ง่ายกว่าเปลือกผลแก้วมังกร เนื่องจากกลีบดอกของดอกหางนกยูงฝรั่งเมื่อนำมาบด จะไม่ยุ่ยจนยากต่อการกรองเหมือนกับเปลือกผลแก้วมังกร ซึ่งตะกอนจากเปลือกผลแก้วมังกรจะทำให้ประสิทธิภาพในการสังเคราะห์โครงสร้างต่างๆ ของละอองเรณูลดลง ดังนั้นพืชที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสกัดเป็นสีย้อมธรรมชาติ สำหรับใช้ย้อมละอองเรณูของชบาในการวิจัยครั้งนี้คือ ดอกหางนกยูงฝรั่งที่สกัดด้วยน้ำกลั่น

จากข้อมูลที่กำลังกล่าวมาทั้งหมดจะเห็นได้ว่า พืชหลายชนิดที่มีสารแอนโทไซยานิน และสารเบทาเลน สามารถนำมาใช้ทำเป็นสีย้อมละอองเรณูได้ ถึงแม้จะมีคุณสมบัติแตกต่างกันไปบ้าง ซึ่งอาจเกิดจากชนิดพืชที่นำมาสกัดสีย้อม กระบวนการเตรียม และตัวทำละลายที่ใช้ก็ตาม และที่ผ่านมายังไม่มีรายงานการศึกษา ทั้งในเรื่องของชนิดพืชและชนิดของรงควัตถุที่นำมาสกัดเป็นสีย้อมละอองเรณู รวมถึงตัวทำละลายที่เหมาะสมในการสกัดสีย้อมละอองเรณู งานวิจัยนี้จึงเปรียบเสมือนเป็นจุดเริ่มต้น เพื่อพัฒนาการสกัดสารสีจากพืชในการย้อมสีละอองเรณูสำหรับผู้สนใจในอนาคต ต่อไป

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยครั้งนี้ เป็นเพียงการศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาชนิดของพืช และชนิดของตัวทำละลายรงควัตถุจากพืชที่เหมาะสม ในการนำมาทำสีย้อมละอองเรณู และเนื่องด้วยยังไม่มีรายงานเกี่ยวกับการใช้สีย้อมธรรมชาติในการย้อมสีละอองเรณู ดังนั้นจึงขาดข้อมูลที่จะใช้อ้างอิงในการวางแผนการทดลอง และงานวิจัยที่ใกล้เคียงที่สุดคือ การศึกษาการย้อมสีโครงสร้างอื่นๆ ของพืช ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีต่างจากละอองเรณู ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้ตัวทำละลายเพียงสองชนิด คือ น้ำกลั่น และเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับความเป็นไปได้ของงานวิจัยการย้อมสีละอองเรณูด้วยสีย้อมจากธรรมชาติ แต่อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยมีข้อคิดเห็นว่า ควรมีการศึกษาตัวทำละลายที่หลากหลายมากขึ้น ทั้งในเชิงชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลาย นอกจากนี้ควรมีการศึกษาผลของอุณหภูมิในขั้นตอนการสกัดสีย้อม ค่าความเป็นกรด-ด่าง ของสีย้อม เพื่อให้ได้สีย้อมที่มีความเหมาะสมกับการย้อมละอองเรณูของพืช และช่วยอธิบายการติดสีของละอองเรณูได้ และควรมีการใช้ตัวอย่างสปอร์และละอองเรณูจากพืชหลากหลายกลุ่ม เช่น พืชไม่มีท่อลำเลียง พืชไม่มีเมล็ด พืชเมล็ดเปลือย เป็นต้น นอกจากนี้ยังควรใช้ละอองเรณูที่มีลวดลายบนผนังที่แตกต่างกัน เพื่อให้สามารถ

เปรียบเทียบประสิทธิภาพของสีย้อมที่ได้จากพืชและตัวทำละลายแต่ละชนิดได้ดียิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ภายใต้โครงการทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อพัฒนาองค์กรและพัฒนาบุคลากร ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ และศูนย์วิจัยและการศึกษาบรรพชีวินวิทยา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม เป็นอย่างยิ่งที่สนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือในห้องปฏิบัติการสำหรับงานวิจัยเป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- จิตภา บุญพันธ์, อสิริย์ ปั่นก้อง และธีรารัตน์ แซ่มชัยพร. (2562). การสกัดสีธรรมชาติจากพืชกลุ่มแอนโทไซยานิน เพื่อใช้ในการย้อมสีโครโมโซมจากปลาสร้อยหอม. *งานประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 11 ประจำปี พ.ศ. 2562* (หน้า 28-33). มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม.
- จินตรา เล็กประยูร, นวลจันทร์ มัจฉริยกุล และศิริลักษณ์ เอี่ยมธรรม. (2553). สารสกัดแอนโทไซยานินจากพืชเพื่อใช้เป็นสีย้อมโครโมโซม: แหล่งที่มา ความเข้มข้น และโครงสร้างทางเคมี. *การประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 7 ประจำปี พ.ศ.2553* (หน้า 1615-1623). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ฉันทนา รุ่งพิทักษ์ไชย, ลักขณา รักขพันธ์ และอลภา ทองไชย. (2555). สีย้อมเซลล์ที่สกัดจากดอกกระเจียบแดง (*Hibiscus sabdariffa* L.). *รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ ประจำปีงบประมาณ 2555*. มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา.
- เทียมใจ คมกฤต. (2555). *กายวิภาคของพฤษภ* (พิมพ์ครั้งที่ 4). สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- มานิต คิดอยู่. (2552). สีย้อมธรรมชาติจากฝางสำหรับการศึกษาเซลล์และเนื้อเยื่อพืช. *วารสารพฤกษศาสตร์ไทย*, 1 (2), 61-69.
- ยุพาพร ผลาจรศักดิ์. (2547). *การสกัดและความคงตัวของแอนโทไซยานินที่สกัดได้จากเปลือกมังคุด*. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- รุจิรา ทองศรีสุข, ยอดชาย ช่วยเงิน, อลงกลด แทนออมทอง และสายัญ พันธุ์สมบูรณ์. (2560). การประยุกต์ใช้สีธรรมชาติจากข้าวโพดหวานสีม่วง (*Zea mays saccharata*) ในการศึกษาการแบ่งเซลล์ไมโทซิสของพืช. *วารสารวิทยาศาสตร์ คชสาร*, 39(2), 34-44.
- ลาวัลย์ รักสัตย์. (2539). *ละอองเรณู*. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.

- วันเพ็ญ แก้วพุก. (2558). การศึกษาสารสกัดสีธรรมชาติจากพืชเพื่อการย้อมสีโครโมโซม สำหรับห้องปฏิบัติการชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม. *การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ครั้งที่ 7 ประจำปี พ.ศ.2558* (หน้า 1434-1442). มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม.
- วิภาดา สนนงราชภัฏ, วิภาวี ขำวิจิตร, วารินทร์ ยางเดิม, ปริญญาพร เซอร์ชาญ และพัชราภรณ์ สารเสนา. (2552). การสกัดสีจากเปลือกแก้วมังกร. *วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.*, 2(1), 9-16.
- สุกัญญา แยมสรवल. (2558). การศึกษาคุณสมบัติการเป็นสีย้อมธรรมชาติจากพืชเพื่อการย้อมสีเนื้อเยื่อพืชสำหรับห้องปฏิบัติการชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม. *การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ครั้งที่ 7 ประจำปี พ.ศ.2558* (หน้า 1425-1433). มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม.
- Azimvand, J., Didehban, Kh. & Mirshokraie, S.A. (2018). Safranin-O removal from aqueous solutions using lignin nanoparticle-g-polyacrylic acid adsorbent: Synthesis, properties, and application. *Adsorption Science & Technology*, 36(7-8), 1422-1440.
- Cooper-Driver, G.A. (2001). Contributions of Jeffrey Harborne and co-workers to the study of anthocyanins. *Journal of Phytochemistry*, 56(3), 229-236.
- Felix, A., Yves, F.L., Emmanuelle, M., Paul, L., Augustin, A., Georges, A. N'zi & Emile, M.G. (2008). Anthocyanin Characterization of Pilot Plant Water Extracts of *Delonix regia* Flowers. *Molecules*, 13, 1238-1245.
- Hayat, M.Q. (2009). Pollen morphology of 14 species of *Abutilon* and *Hibiscus* of the family Malvaceae (sensu stricto). *Journal of Medicinal Plants Research*, 3(11), 921-929.
- Khan, I.M., Rahman, R., Mushtaq, A. & Rezui, M. (2017). *Hibiscus rosa-sinensis* L. (Malvaceae) : Distribution, Chemistry and Uses. *International Journal of Chemical and Biochemical Sciences*, 12, 147-151.
- Johansen, D.A. (1940). *Plant microtechnique*. McGraw-Hill Book Company Inc.
- Moore, P.D., Webb, J.A. & Collinson, M.E. (1991). *Pollen analysis*. (2nd ed.). Blackwell Scientific Publications.
- Pandey, A. & Tripathi, S. (2014). Concept of standardization, extraction and pre phytochemical screening strategies for herbal drug. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 2(5), 115-119.
- Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R. & Nigam, P. (2001). Remediation of Dyes in Textile Effluent: A Critical Review on Current Treatment Technologies with a Proposed Alternative. *Bioresource Technology*, 77, 247-255.
- Yoshikazu, T., Nobuhiro, S. & Akemi, O. (2008). Biosynthesis of plant pigments: anthocyanins, betalains and carotenoids. *The Plant Journal*, 54, 733-749.

การเปรียบเทียบการตรวจสอบจำนวนฟองก๊าซระหว่างตัวควบคุม Raspberry Pi และ Arduino สำหรับกระบวนการหมัก

Comparison between Raspberry Pi and Arduino controller of gas bubble monitoring for a fermentation process

มงคล วรณประภา^{1*}

Mongkol Wannaprapa^{1*}

Received: 21 January 2022 ; Revised: 4 March 2022 ; Accepted: 23 March 2022

บทคัดย่อ

ตัวควบคุมสองประเภทคือ Raspberry Pi3 B และ Arduino mega 2560 ถูกใช้ในเครื่องนับจำนวนฟองก๊าซที่ใช้อุปกรณ์ตรวจจับด้วยแสงเพื่อระบุความก้าวหน้าของการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการหมัก ได้ทำการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมและสภาวะการเปิดไฟ-ปิดไฟแสงสว่างที่เหมาะสมของเครื่องนับจำนวนฟองก๊าซ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนับของชุดตัวควบคุมการนับจำนวนฟองก๊าซที่ควบคุมโดยตัวควบคุมเหล่านี้ในสภาวะที่เหมาะสม พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 20-25 องศาเซลเซียส และทำการนับเมื่อเปิดไฟแสงสว่าง นอกจากนี้ยังพบว่าในสภาวะที่เหมาะสมนี้ มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของอุปกรณ์ในการนับจำนวนฟองก๊าซเพิ่มขึ้นตามอัตราการเกิดของจำนวนฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในกระบวนการหมัก ซึ่งเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุดของคอนโทรลเลอร์ Raspberry Pi3 B คือ 1.5% ในขณะที่ Arduino mega 2560 อยู่ที่ 2.25% ที่อัตราฟองก๊าซ 135 ฟองต่อนาที การเปลี่ยนแปลงของอัตราการเกิดฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีความสอดคล้องกับการเปลี่ยนที่น้ำจะเกิดขึ้นในกระบวนการหมัก ข้อมูลที่ได้จากจำนวนฟองก๊าซที่นับโดยเครื่องนับจำนวนฟองก๊าซนี้สามารถนำไปใช้เพื่อบ่งบอกแนวโน้มของปริมาณเอทิลแอลกอฮอล์ที่ผลิตจากกระบวนการหมักซึ่งสอดคล้องกับความก้าวหน้าของการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการหมักและอัตราการเติบโตของยีสต์

คำสำคัญ: ราชเบอร์รี่พาย อาดูยโน ตัวควบคุม การตรวจสอบจำนวนฟองก๊าซ กระบวนการหมัก

Abstract

Two types of controller, Raspberry Pi3 B and Arduino mega 2560, were used in a gas bubble counter equipped with a photo sensor for indicating progress of a fermentation process. The optimum temperature and switching on/off of the light conditions of the gas bubble counter were studied and the counting performance of the gas bubble counter controlled by these controllers at optimum conditions were compared. It was found that the optimum temperature was 20-25 °C with turning on the light. It was also found that at optimum conditions, the percentage error of this gas counting device increased with increase of the rate of carbon dioxide gas bubbles produced in the fermentation process. The maximum percentage error of Raspberry Pi3 B controller was 1.5%, while Arduino mega 2560 was 2.25% at bubble rate of 135 bubbles/ minute. In addition, the change of rate of number of carbon dioxide bubbles corresponded to the change that would happen in the fermentation process. Information of the number of gas bubbles counted by the gas bubble counter can also be used to indicate the trend of the amount of ethyl alcohol produced by the fermentation process, which corresponds to the progress of fermentation process and also to the yeast growth rate.

Keywords: Raspberry Pi, Arduino, Controller, Gas Bubble Monitoring, Fermentation Process

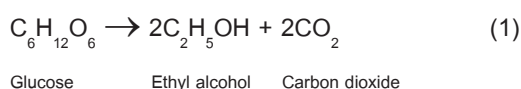
¹ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพมหานคร 10240

¹ Associate Professor, Lecturer in Department of Electronics Technology, Faculty of Science, Ramkhamhaeng University, Bangkok, 10240 Thailand

* Corresponding author: E-mail: W.mongkol2011@gmail.com, wmongkol@rumail.ru.ac.th

Introduction

It is already known that ethyl alcohol can be produced by a fermentation process using anaerobic microorganisms, where yeast is widely used. Yeast converts glucose or fructose sugar to alcohol as a main product and carbon dioxide as a by-product. Theoretically, ethyl alcohol will be obtained at about 50% from the amount of sugar used. One molecule of glucose is degraded into 2 molecules of ethyl alcohol and 2 molecules of carbon dioxide gas. The conversion of glucose to alcohol is shown in the following reaction equation (Buchner, 1897) (Enger, *et al.*,1994) (Hopkins,1999).



Practically, as the fermentation produces many kinds of by-products such as flavoring agents, so a lower value of ethyl alcohol would be obtained. In general, this process produces about 12-15 percent ethyl alcohol for the complete process. In the fermentation process, the number of gas bubbles relates to the number of carbon dioxide molecules and is proportional to the amount of ethyl alcohol. Therefore measuring of the number of carbon dioxide gas bubbles produced in such a reaction can demonstrate the amount of ethyl alcohol product obtained and the trend of the efficiency of the fermentation process (Stanbury, *et al.*, 2016) (Streitwieser, *et al.*, 1981).

In fermentation, the yeast grows rapidly during the first 2-3 days, after that it will slow down until the growth rate is equal to the death rate. However, the amount of ethyl alcohol still increases, while the amount of sugar will reduce, whereas the flavoring agents are created as shown in figure 1. In this period, therefore, the fermentation keeps going even if the yeast has stopped increasing in number. The fermentation temperature affects to the growth rate of yeast, which increases as temperature increases from 10 to 25 °C, and fermentation time (Surathai, 2010).

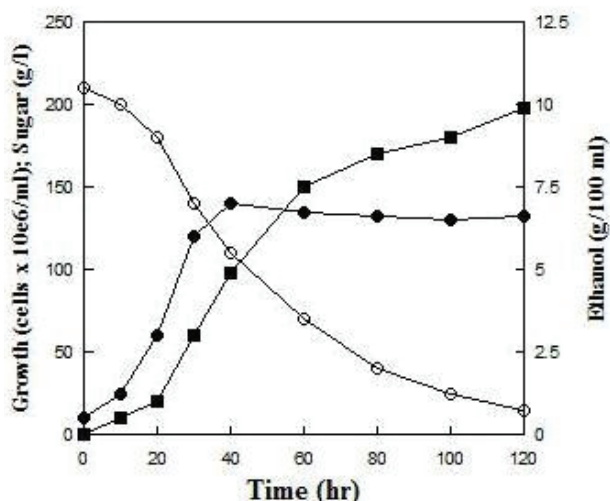


Figure 1 Alcohol fermentation by yeast: yeast (round, solid), alcohol (square solid), and sugar (round, transparent)

The pattern of the growth cycle of microorganisms (Bacterial/Yeast) can be divided into 4 phases: Lag phase; the first phase in which microorganisms begin to find new food and adapt to their environment. Exponential or log phase; a period in which the microbes have increased to the greatest number and have a constant rate of cell division. Stationary phase; a period in which the microorganism has a fixed number, indicating that the microorganism is not increasing in number, and a death phase or decline phase; the last phase in which the microorganisms die (Pornchalermpong, 2019). The pattern of the growth cycle of microorganisms (Bacterial/Yeast) is shown in figure 2.

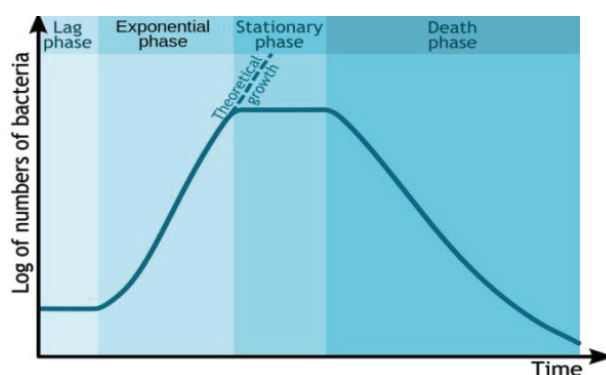
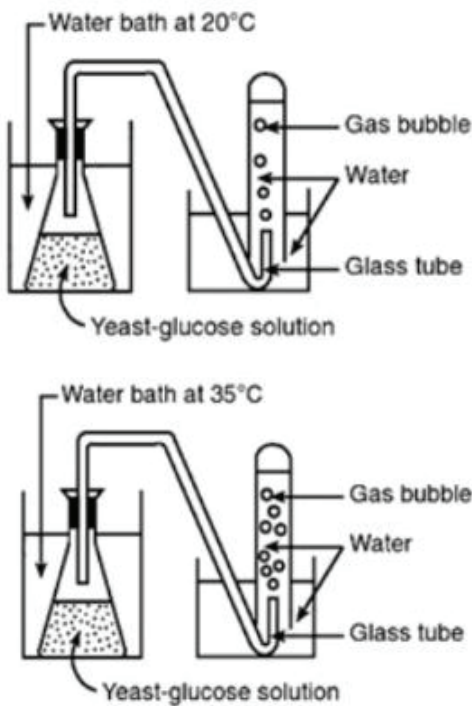


Figure 2 Microorganism: hypothetical Bacterial/Yeast growth curve (Komorniczak, 2012)

The methods of fermentation can be classified in to 2 main types, bottom yeast and top yeast fermentation. The bottom yeast fermentation is a fermentation process taking place at the bottom of the fermentation tank at a temperature of 10-15°C. After fermentation, yeast strains

such as *Saccharomyces carlsbergensis* will precipitate at the bottom of the fermentation tank. While, the top yeast fermentation is a fermentation process taking place at the top of the fermentation tank at a temperature of 28-32°C, but can also take place at a temperature of 15-21°C. The yeast species used in this type of fermentation is *Saccharomyces cerevisiae* (Pornchalermpong, 2019). Yeast can grow at 2-40°C, but the production of fermentation will decrease if temperature is higher than 35°C (Phoonsiri, 1999).

Malbrough (2019) investigated the effect of temperature on respiration of yeast at 20°C and 35°C by observing the number of CO₂ gas bubble released from the tube as shown in figure 3. It was reported that total number of CO₂ bubble released from the tube at 35°C was higher than at 20°C.



Data Table

Time (minutes)	Total Number of Bubbles Released	
	20°C	35°C
5	0	5
10	5	15
15	15	30
20	30	50
25	45	75

Figure 3 Experimental set up and result of Malbrough's experiment (Malbrough, 2019).

Mulier *et al.* (2009) used a diode laser emitting at 2.68 μm to measure CO₂ concentration above a glass poured with a sparkling liquid using spectrometer to measure CO₂ concentrations above it such as above beer or champagne as shown in figure 4. The results were presented and compared to a model describing the flux of CO₂ discharging from glasses due to the contribution of bubbles.

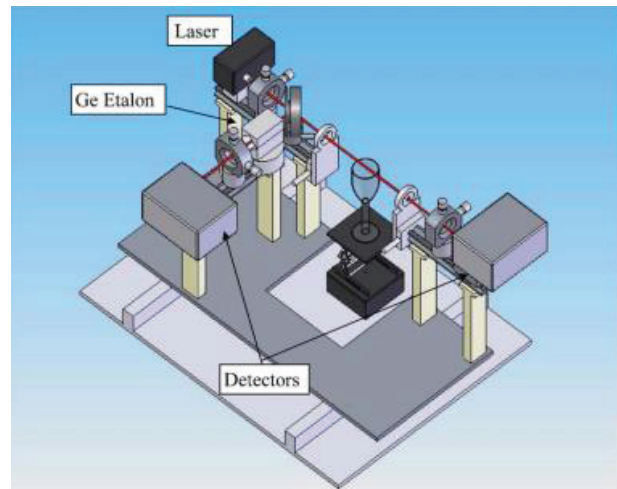


Figure 4 Experimental set up of CO₂ concentrations by infrared laser spectrometer. (Mulier *et al.*, 2009)

Bowler *et al.* (2021) use an ultrasonic sensor to predict alcohol concentration during beer fermentation by using a low-cost ultrasonic sensor combined with machine learning to predict the alcohol concentration during beer fermentation as shown in figure 5. This research demonstrated the potential for a non-invasive sensor to monitor beer fermentation by using inline sensors. This would remove the need for time-consuming manual operation and provide real-time evaluation of the fermenting media.

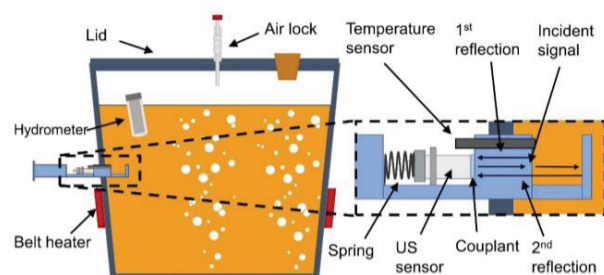


Figure 5 Experimental apparatus and measured US wave reflections (Bowler, *et al.*, 2021)

Conventionally, beer fermentation is typically monitored by periodic sampling and off-line analysis. Since CO₂ produced from fermentation relates to the amount of alcohol produced and also relates to the fermentation process as shown in equation (1) ; if the amount of CO₂ produced can be determined as a real-time measurement, so the amount of alcohol produced could be traced and progress of the fermentation reaction could be monitored. The author has proposed a gas bubble counter to monitor CO₂ produced by using a photo sensor technique integrated with a controller (Wannapraba, 2018 ; Wannapraba, 2020). A further study on comparison of two controllers was conducted in this work.

Design and Experiment

The experimental setup for a gas bubble counter consisted of 4 important functional parts: 1) fermenter or experiment glass with shielding to protect from outside light 2) S-shaped glass tube with 2 spherical bulbs 3) photo sensor (photo transmitter (T) and photo receiver (R)), and 4) the processing cycle counts gas bubbles as shown in figure 6.

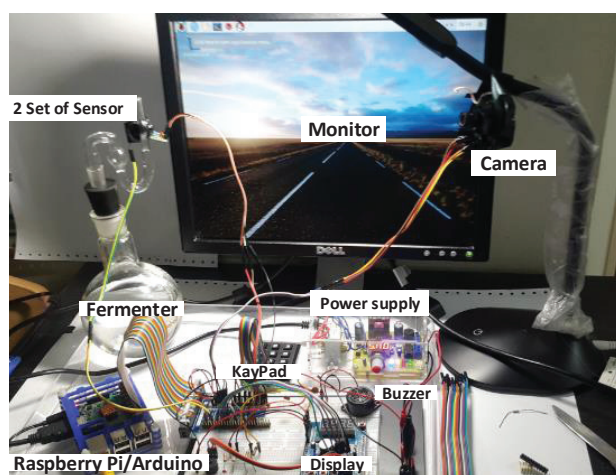
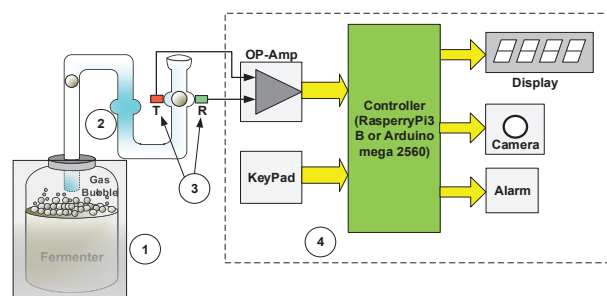


Figure 6 The structure of the gas bubble counter for the fermentation process (Wannapraba, 2020)

The photo sensor consisted of a photo transmitter diode and a photo receiver diode. The photo transmitter transmitted light at 940 nm. infrared wavelength and the photo receiver received the light transmitted from the transmitter. When there was a gas bubble obstructing this light, the receiver could not detect the light. This criterion was used as an indicator for counting the gas bubble.

The controllers used in this research were Raspberry Pi3 B and Arduino mega 2560. Raspberry Pi is a small single-board computer processor with speeds ranging from 700 MHz to 1.4 GHz and for Pi3 model B is called an “Embedded Computer”. The Arduino mega 2560 is a microcontroller having a speed of 16 MHz. The schematic circuit of the Raspberry Pi 3 model B and Arduino mega 2560 are shown in figure 7.

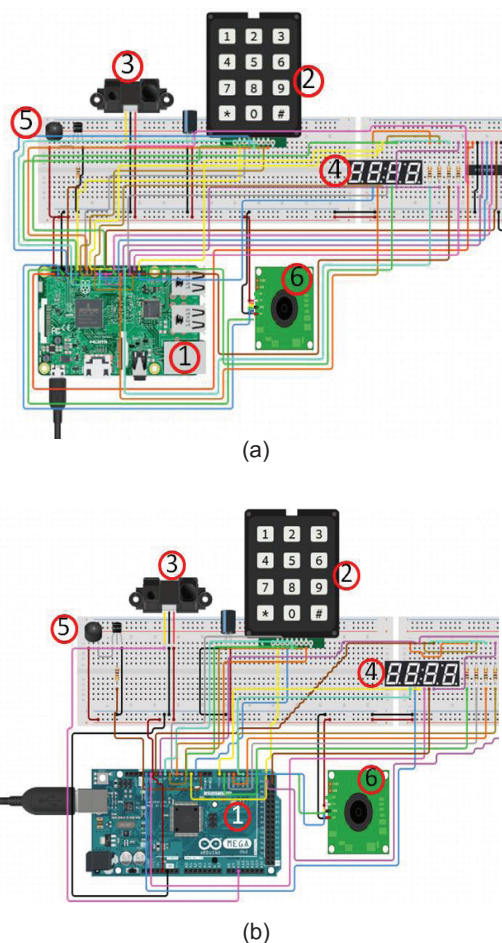


Figure 7 (a) Schematic circuit of Raspberry Pi 3 model B, (b) Schematic circuit of Arduino mega 2560: (1) Raspberry Pi 3 Model B / Arduino mega 2560, (2) KeyPad 4x3, (3) Photo sensor: Opto-diode consists of Transmitter: T and Receiver: R, (4) Display: Seven-segment 4 digits, (5) Buzzer and (6) Camera (Roboplan Technologies Ltd., 2016)

The operation of the gas bubble counter runs as the following steps. First, the bubble number value input from KeyPad is received. Then the Raspberry Pi3 B/Arduino mega 2560 computer processor controller will wait for the signal to count the gas bubbles from the photo sensor installed on the S-shaped glass tube. When each gas bubble was detected, the photo sensor generated a signal and then forward it to the Raspberry Pi3 B/Arduino mega 2560. This signal was counted and compared to the set count value which shows on the display. The result of counting of the number of gas bubbles was shown on a 4-digit 7-segment display. This process will rerun by returning to check the status and waiting for new input value as shown in figure 7. When finishing the task, the controller turned on the buzzer to generate an alarm sound. In addition, this gas bubble counter could also store images during the passage of gas bubbles through the camera, to bring the real time image to compare the bubble count with the gas bubble counter and record number of the gas bubble counted. The operating steps of the bubble counter are shown in figure 8.

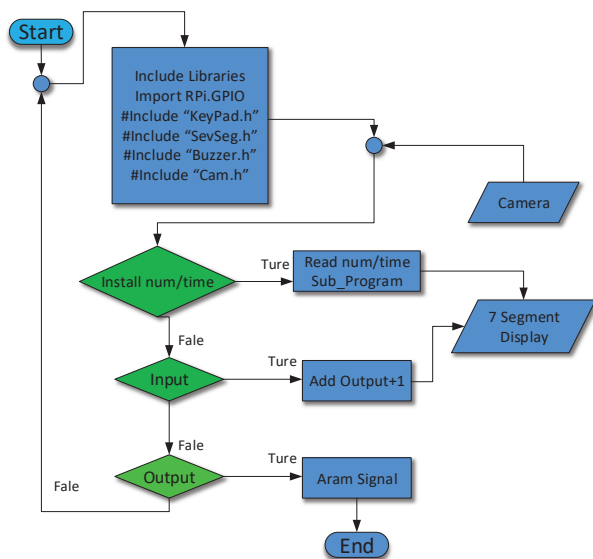


Figure 8 Operating steps of gas bubble counter program (Blum, 2013).

When fermentation takes place, the carbon dioxide will be produced as gas bubbles and then flows in to the S-shape glass tube equipped with the sensor at the spherical glass bulb. The bubble will break up in the first spherical glass bulb resulting in accumulation of ethyl alcohol carried by the bubble's wall as shown in figure 9 (1). As more carbon dioxide is produced and generates high pressure, this gas can push through the ethyl alcohol accumulated at the bottom of S-shape tube and reforms as a gas bubble in the second spherical glass bulb where the sensor is installed as shown in figure 9 (2). This reforming gas bubble is nearly the same size as the second spherical glass bulb and will attenuate the light received by a light's receiver (R) ; this status is called "OFF" as shown in figure 9 (3). A signal will be generated at this criterion and this signal is called "the carbon dioxide bubble count" as shown in figure 9 (3). When there is no gas bubble present inside the spherical glass bulb, the light of the photo sensor's transmitter (T) is able to pass through the spherical glass to the sensor's receiver (R) as shown in figure 9 (4). This status is called "ON" which means the gas bubble does not occur as shown in figures 7 (1), 9 (2) and 9 (4). The bubble formation and bubble detection are shown in figure 9.

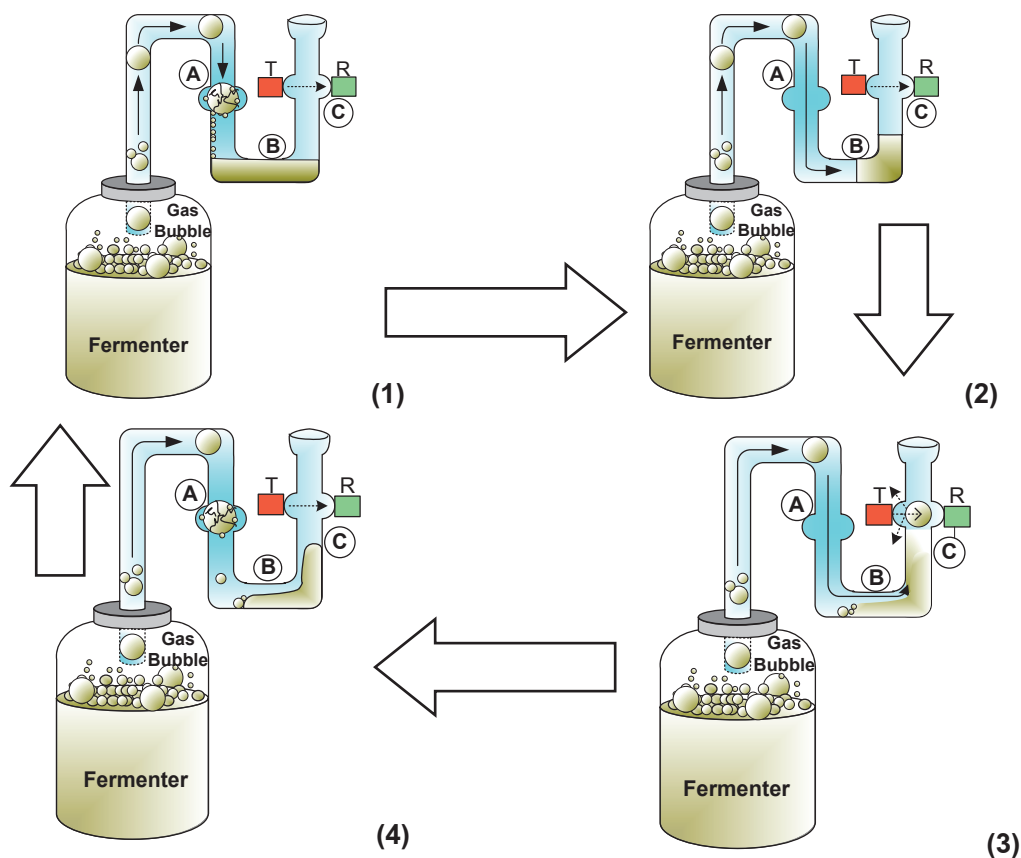


Figure 9 The process of gas bubbles forming inside the S-shaped glass tube and the gas bubble detection: (A) first spherical glass bulb, (B) accumulation of gas and liquid at the bottom, (C) sensor of transmitter T and receiver R installed at second spherical glass bulb (Wannaprapa, 2018)

Top fermentation was used in this research. Two sets of transmitter and sensor were installed at the second spherical glass bulb. One set was connected to Arduino

mega 2560 and the other was connected to Raspberry Pi3 B as shown in figure 10.

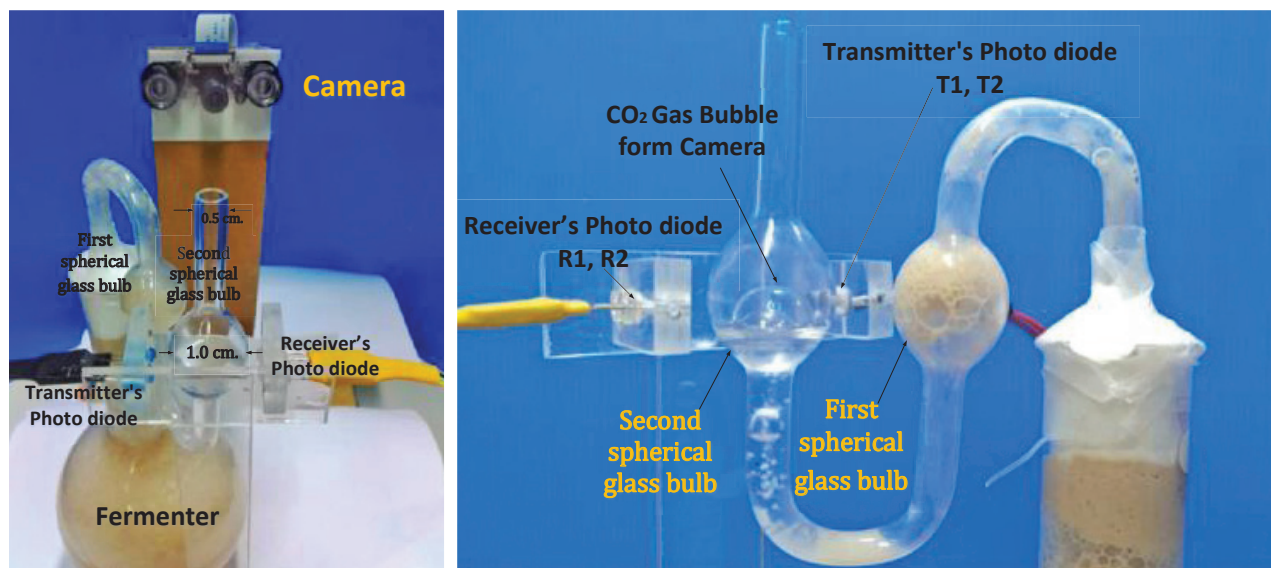


Figure 10 Installation of 2 sets of photo sensor (Opto-diode: T1, T2, R1 and R2 respectively) and CO₂ bubble foaming at spherical glass bulb

A camera equipped with a video recorder was installed at the second spherical glass bulb to record bubble images for further counting by humans. The human counting was conducted by counting the number of gas bubbles obtained from a prerecorded video at 1/10 time of normal speed to achieve accuracy on counting the bubble. The average rates of bubble gas counted by gas bubble counter controlled by Raspberry Pi3 B and controlled by Arduino mega 2560 (Lovine, 2000) were compared to the human counting. The average rate of bubble was calculated from counting the number of gas bubble in every 1 minute for 20 times. This experiment was conducted at temperature range of 15-35°C as the temperature optimum for yeast growth is in the range of 15-21°C (Pornchalermpong, 2019). The experimental period was 15 days for yeasts that grow substantially in the first 2-3 days of fermentation and good fermentation should have a large number of yeast (Surathai, 2010). The investigation of the effect of conditions of ambient light on detection accuracy of gas bubble counting were conducted by turning the light on and off. An experiment to determine accuracy on counting the rate of carbon dioxide bubble of the gas bubble counter compared to human counting was also carried out.

Results and Discussions

The results of the average rate of carbon dioxide bubble counted by the gas bubble counter controlled by the Raspberry Pi3 B, Arduino mega 2560 and by human counting at controller ambient temperature range of 15-35°C at Exponential or log phase are shown in figure 11.

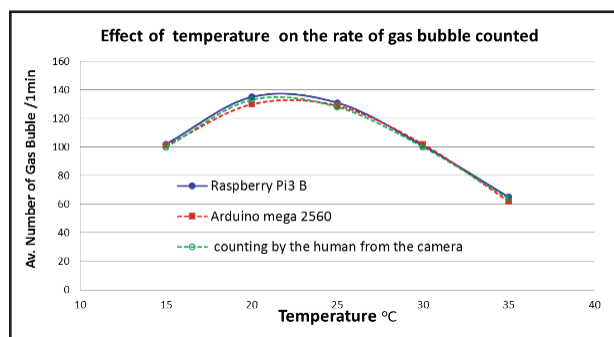
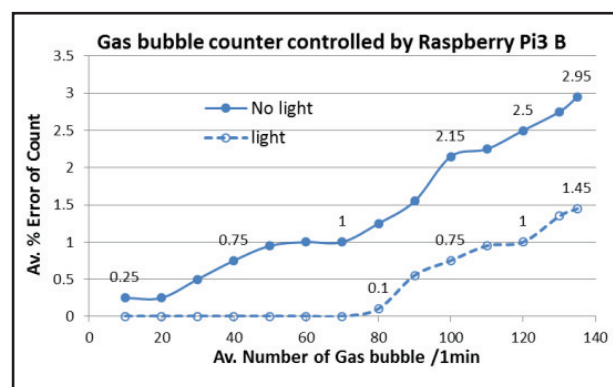


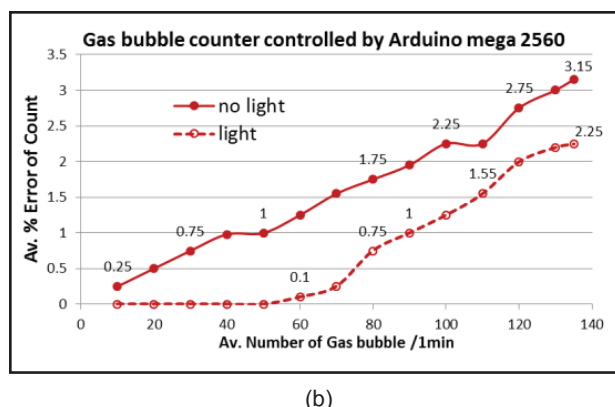
Figure 11 The rate of carbon dioxide bubbles counted at ambient temperature of controller at temperature range of 15-35°C at Exponential or log phase

From figure 11, the average rate of carbon dioxide bubble counted from gas counter controlled by the Raspberry Pi3 B, mega Arduino 2560, and human counting at exponential or log phase increased with increasing temperature and then decreased with further increase of temperature. The maximum average rate of carbon dioxide bubble counted was shown at temperature of 20-25°C for those three methods. However, temperature range in this experiment (15-35°C) also affected to the growth rate of yeast. Since the growth rate of yeast increases with increase of temperature from 10 to 25°C (Surathai, 2010), while it decreases as temperature higher than 35 °C (Phoonsiri, 1999). Therefore, in this case, the tendency of the rate of gas bubble formation was not due to the counting performance of those two controllers alone, but also corresponded to growth rate of the yeast. It can be concluded that at the ambient temperature of 20-25°C is the optimum temperature for these two controllers was when the highest rate of gas bubbles was obtained.

The percentage errors of results of counting the average rate of gas bubble of gas bubble counter controlled by Arduino mega 2560 and controlled by Raspberry Pi3 B at bubble rate of 0-140 bubbles/minute with the ambient light turning on and turning off are shown in figure 12 (a) and 12 (b) respectively (Pumphrey & Julien, 1996).



(a)



(b)

Figure 12 Percentage errors on counting the average rate of gas bubble of gas counter controlled by (a) Raspberry Pi3 B and (b) Arduino mega 2560 at light turning on and turning off

$$\text{Percentage error} = \left| \frac{X_m - X_t}{X_t} \right| \times 100 \quad (2)$$

Where X_m the number is counted by the sensor and X_t is actual count by human respectively.

Referce to figure 12 (a) and 12 (b) indicates that with ambient light turning on, the percentage error on counting of gas bubble counter controlled by both Arduino mega 2560 and Raspberry Pi3 B did not present problems at low bubble rate and then gradually increase as increase of bubble rate, while with ambient light turning off the percentage error of those two controllers showed at even low bubble rate and gradually increase as increase of bubble rate. This could be caused by when the light was turned on, it enhanced contrast of the gas bubble resulting in higher efficiency of the receiver corresponding to Compomax's article (Compomax, 2022). It can be concluded that the optimum ambient light for these two controllers is with the light turning on.

The comparison of the percentage error on counting the average rate of gas bubble of the gas bubble counter controlled by Arduino mega 2560 and controlled by Raspberry Pi3 B at bubble rate of 0-140 bubbles/minute with the ambient light turning on is shown in figure 13.

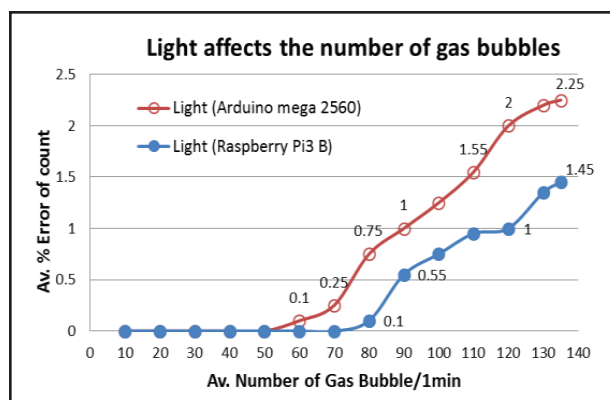


Figure 13 Percentage errors on counting of the gas bubbles controlled by Arduino mega 2560 and controlled by Raspberry Pi3 B with ambient light turning on (Pumphrey & Julien, 1996)

Referring to figure 13, at low bubble rate of 10-50 bubbles/minute; there was no percentage error on counting bubble of the gas bubble counter controlled by both Raspberry Pi3 B and Arduino mega 2560. The percentage error of bubble counted by the gas bubble counter is controlled by Arduino mega 2560 gradually increased with increased bubble rate starting from a bubble rate of 50 bubbles/ minute to the maximum value of 2.25% at bubble rate of 135 bubbles/minute. While, the percentage error of bubbles counted is controlled by Raspberry Pi3 B gradually increased as increase of bubble rate starting from bubble rate of 80 to the maximum value of 1.45% at bubble rate of 135 bubbles/ minute. These indicated that Raspberry Pi3 B controller provided lower percentage error than the Arduino mega 2560 controller. In other words, Raspberry Pi3 B controller provided higher accuracy than Arduino mega 2560 controller.

The results of the average rate of carbon dioxide bubbles generated from the fermentation process counted by the gas bubble counter controlled by the Raspberry Pi3 B, Arduino mega 2560 and by humans counting from the image obtained by camera conducted during the fermentation period of 1-15 days are shown in figure 14.

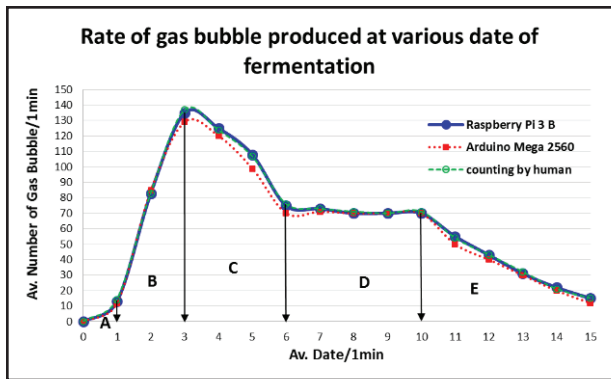


Figure 14 The average rate of carbon dioxide bubble generated from the fermentation process during the average period of 1-15 days/1minute at 25°C counted by the gas bubble counter controlled by Raspberry Pi3 B, Arduino mega 2560, and by human counting (Komorniczak, 2012)

Referring to figure 14, it was found that during 0-1 days of fermentation (A), the average rate of gas bubble generated was 0 to 10 bubbles/minute. This is the beginning of the fermentation reaction corresponding to the first phase or “lag phase” in which microorganisms begin to find new food and environment. During 1-3 days of fermentation (B), the average rate of gas bubble generated significantly increased up to 130-135 bubbles/minute. This indicated that the reaction took place rapidly and was generating a number of gas bubbles, which corresponded to the “exponential phase” or “log phase”. During 3-6 days of fermentation (C), the average rate of bubbles generated gradually decreased from 135 to 70 bubbles/minute. This would be the transition from exponential or log phase to stationary phase. The reason that there are still more gas bubbles produced than there should be as in stationary phase (70 bubbles/minute) might be due to the accumulation of a lot of gas in the fermenter that could not be released; as a result, pressure was developed inside the system. The other explanation would be the exit of the gas was too small and unable to allow gas flow through it (tube size diameter was 0.5 cm). After that, during 6-10 days of fermentation (D), the average rate of gas bubbles generated remained steady at 70 bubbles/minute, which corresponded to “stationary phase” of fermentation. Finally, during 10-15 days of fermentation (E), the average rate of gas bubbles generated drastically decreased to 10 bubbles/minute, which corresponded to “death phase or decline phase”.

A comparison of the percentage error on the average rate of gas bubbles counted by the gas bubble counter controlled by Raspberry Pi3 B and controlled by Arduino mega 2560 is shown in figure 15.

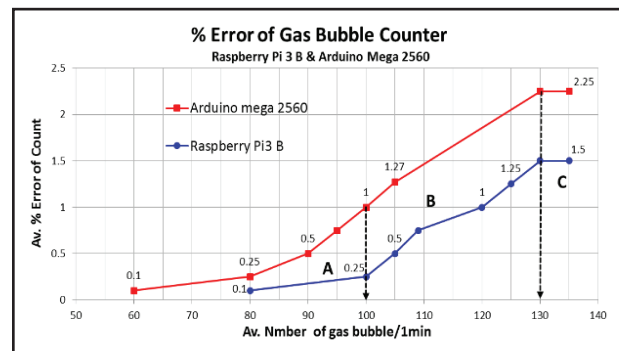


Figure 15 Comparison of percentage error of the gas bubble counter from fermentation process in the range of 60-135 bubbles/minute of the gas bubble counter controlled by Raspberry Pi3 B and controlled by Arduino mega 2560

From figure 15, it is seen that the percentage error on counting of the average rate of gas bubble by the gas bubble counter controlled by two types of controller; Raspberry Pi3 B and Arduino mega 2560, can be divided into 3 regions. In region “A”, where the fermentation was starting with the average gas bubble rate of 60-100 bubbles/minute, the percentage error of gas bubble counter controlled by Arduino mega 2560 showed a bubble rate of 60 bubbles/minute at 0.1% and increased as bubble rate increased up to 1% at bubble rate of 100 bubbles/minute. However, the error of gas the bubble counter controlled by Raspberry Pi3 B showed a bubble rate of 80 bubbles/minute at 0.1% and increased with increased bubble rate up to 0.25% at bubble rate of 100 bubbles/minute. In this region, the percentage error of the Arduino mega 2560 was higher than Raspberry Pi3 B throughout of the region. In region “B”, where the fermentation was proceeding, the average gas bubble rate was 100-130 bubbles/minute, the percentage error of gas bubble counter controlled by Arduino mega 2560 was 1% at bubble rate of 100 bubbles/minute and increased with increase of the bubble rate up to 2.25% at bubble rate of 130 bubbles/minute. However, the percentage error of the gas bubble counter controlled by Raspberry Pi3 B was 0.25% and increased as bubble rate increased up to 1.5% at a bubble rate of 100 bubbles/minute and 130 bubbles/

minute, respectively. In this region, the percentage error of the Arduino mega 2560 was higher than the Raspberry Pi3 B throughout of the region. In region "C", where the fermentation was at the highest rate with the average gas bubble rate range of 130-135 bubbles/minute, the percentage error of gas bubble counter controlled by both Arduino mega 2560 and Raspberry Pi3 B remained constant at 2.25% and 1.5%, respectively. This indicated that Raspberry Pi3 B controller provided less percentage error than did the Arduino mega 2560 controller. Theoretically, the accuracy of these two controllers should be not much different. However, the error on counting of these controllers would be due to the performance of the photo sensors (transmitters and receivers) used in this work as, even though they are the same model, they were produced in different lots. This leads to the conclusion that the Raspberry Pi3 B controller is more suitable to be used in gas bubble counter than Arduino mega 2560 controller.

Conclusion

The optimum condition for both gas bubble counter controlled by Raspberry Pi3 B controller and by Arduino mega 2560 controller is at temperature of 20-25°C with ambient light turning on. The Raspberry Pi3 B controller provides lower average percentage error than Arduino mega 2560 controller at the working conditions stated above. In conclusion, the gas bubble counter controlled by Raspberry Pi3 B controller is suitable for use in counting carbon dioxide gas produced in order to monitor progress of fermentation. Moreover, the method of counting the average rate of CO₂ gas bubble generated can be used to trace increases of alcohol produced and the growth rate of yeast in the fermentation process. In the future, the gas bubble counter can be applied to detect gas generated by other reactions in close system to monitor the reaction progress such as chemical reactions that produces gas.

Acknowledgement

Thank you to Ramkhamhaeng University for supporting experiment facilities for research and thank you to Roboplan Technologies Ltd., for schematics circuit software.

References

- Blum, J. (2013). *Exploring arduino: tools and techniques for engineering wizardry*. John Wiley & Sons, Inc.
- Bowler, A., Escrig J., Pound M. & Watson, N. (2021). Predicting alcohol concentration during beer fermentation using ultrasonic measurements and machine learning. *Fermentation*, 7, 34.
- Buchner, E. (1897). *For his biochemical researches and his discovery of cell-free fermentation*. Munich Germany.
- Compomax. (2022). *Basics of Photoelectric Sensing*. <http://www.compomax.co.th/product/basics-of-photoelectric-sensing/>
- Enger, E.D., Kormelink, J.R., Ross, F.C. & Smith, R.J. (1994). *Concepts in biology* (7th ed). Wm. C. Brown Publishers.
- Hopkins, W.G. (1999). *Introduction to plant physiology*. John Wiley & Sons. Inc.
- Komorniczak, M. (2012). *Microorganism: hypothetical Bacterial/Yeast growth curve*. https://commons.wikimedia.org/wiki/User:M.Komorniczak#/media/File:Bacterial_growth_en.svg.
- Lovine, J. (2000). *PIC microcontroller project book*. McGraw-Hill.
- Malbrough, M. (2019). *Energy Relationships: Biochemical pathway*. <https://slideplayer.com/slide/3922619/>.
- Mulier, M., Zeninari, V., Joly, L., Decarpenterie, T., Parvitte, B., Jeandet, P. & Liger-Belair, G. (2009). Development of a compact CO₂ sensor based on near infrared laser technology for enological applications. *Appl Phys B*, 94, 725-733.
- Phoonsiri, A. (1999). *Fuzzy Logic Control of Fed-Batch of Saccharomyces cerevisiae TISTR B5020, Unpublished master's thesis*. Prince of Songkla University.
- Pornchalermpong, P. (2019). *Generation time*. <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1543/generation-time>.
- Pumphrey, B. & Julien, C. (1996). *An introduction to fermentation*. New Brunswick Scientific. (UK) Ltd.
- Roboplan Technologies Ltd. (2016). *Schematic circuit of Raspberry Pi*. <https://www.circuito.io/app?components>

- Stanbury, P.F., Whitaker, A. & Hall, S.J. (2016). *Principles of Fermentation Technology* (3rd Edition). Butterworth-Heinemann.
- Streitwieser, A., Clayton, Jr. & Heathcock, H. (1981). *Introduction to organic chemistry* (2nd Edition). Macmillan Publishing Co., Inc.
- Surathai. (2010). *Yeast & wine fermentation*. <https://surathai.wordpress.com/2010/06/12/yeastwine/>.
- Wannaprapa, M. (2020). A Newly Developed Gas Bubble Counter using Raspberry Pi Controller for Fermentation Process. *Journal of Science and Technology Mahasarakham University. MSU*, 3(3), 251-257
- Wannaprapa, M. (2018). Gas Bubble Counters in the Fermentation Process by using Arduino Controller. *Veridian E-journal Science and Technology Silpakorn University*, 6, 62-73.

การออกแบบและการสร้างเครื่องอัดกลีบกระดาษแบบกึ่งอัตโนมัติด้วยระบบนิวแมติก

Design and fabrication of a semi-automatic paper petal compression machine with a pneumatic system

เจษฎา แพรกนันทโฮ^{1*}, มณฑล ชูโชนาค¹
Jetsada Phraeknanthoe^{1*}, Monthon Chuchonak¹

Received: 20 December 2021 ; **Revised:** 22 March 2022 ; **Accepted:** 26 April 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบและการสร้างเครื่องอัดกลีบกระดาษแบบกึ่งอัตโนมัติด้วยระบบนิวแมติก เพื่ออัดกลีบกระดาษสำหรับใช้ทำดอกไม้ประดิษฐ์ ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการกำหนดลักษณะการทำงานของเครื่องอัดกลีบกระดาษ การเขียนแผนผังลำดับขั้นการทำงาน การออกแบบวงจรนิวแมติกและวงจรไฟฟ้า การคำนวณหาและการเลือกขนาดของอุปกรณ์นิวแมติก และการศึกษาสภาวะการอัดกลีบกระดาษที่เหมาะสมและลักษณะรอยย่นของกลีบกระดาษ โดยเครื่องอัดกลีบสามารถอัดกลีบได้พร้อมกันครั้งละ 4 ตำแหน่ง วัสดุที่ใช้ทดลองคือกระดาษ 55 และ 65 gsm ที่ตัดเป็นรูปกลีบดอก การทดลองทำโดยนำกลีบกระดาษจำนวน 6, 8, 10, 12, 14, และ 16 แผ่น ม้วนเป็นทรงกระบอกกลวง โดยกลีบกระดาษ 4 ม้วนที่มีจำนวนกลีบเท่ากันจะถูกอัดพร้อมกันที่ความดันใช้งาน 0.6 MPa ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าเครื่องอัดกลีบสามารถอัดกลีบกระดาษ 55 gsm ให้มีรอยย่นที่ค่อนข้างชัดเจนและสม่ำเสมออยู่ในช่วง 6 ถึง 14 แผ่นต่อม้วน ในขณะที่กลีบกระดาษ 65 gsm อยู่ในช่วง 6 ถึง 12 แผ่นต่อม้วน

คำสำคัญ: การออกแบบและการสร้าง นิวแมติก เครื่องอัดกลีบกระดาษ กึ่งอัตโนมัติ

Abstract

This research presents the design and fabrication of a semi-automatic paper petal compression machine with a pneumatic system to crease paper petals for making artificial flowers. The description comprises the procedures of defining operating characteristics for the machine, drawing its function diagram, designing the pneumatic circuit and the electrical circuit, calculating and choosing the dimensions of pneumatic components, and studying optimum paper petal compression conditions and appearances of creases on the paper petals. The machine can be used to compress the paper petals in four positions at the same time. The experimental materials were the paper of 55 and 65 gsm which was cut in the petal shape. The experiments were done by rolling 6, 8, 10, 12, 14, and 16 pieces of paper petals into hollow cylinders of which four rolls of those with the same number of paper petals were compressed simultaneously at the operating pressure of 0.6 MPa. The results showed that the machine could be used to compress the paper petals of 55 gsm to provide quite noticeable and consistent creases in the range of 6 to 14 pieces per roll, while the paper petals of 65 gsm were in the range of 6 to 12 pieces per roll.

Keywords: Design and Fabrication, Pneumatic, Paper Petal Compression Machine, Semi-Automatic

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพมหานคร 10120

¹ Department of Mechanical and Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep Nanglinchi Road, Thungmahamek, Sathon, Bangkok, 10120

* Corresponding author: e-mail: jetsada.p@mail.rmutk.ac.th

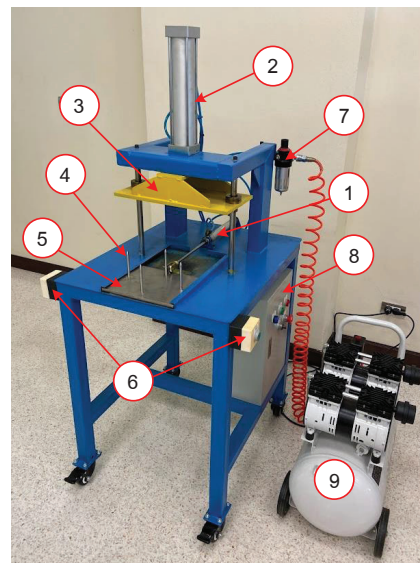
บทนำ

ในปัจจุบันมีการใช้กระดาษอัดกลีบกันอย่างแพร่หลายทั่วทั้งประเทศไทย โดยวิธีการอัดกลีบกระดาษส่วนใหญ่ทำโดยใช้แรงงานมนุษย์ ซึ่งก่อให้เกิดการเมื่อยล้า เพราะต้องใช้แรงในการกดอัดเป็นเวลานาน ส่งผลให้จำนวนของกระดาษอัดที่ได้ มีปริมาณน้อย ดังนั้นเพื่อประหยัดแรงงาน และเวลาในการผลิต จึงได้มีนักวิจัยทำการศึกษาและสร้างเครื่องอัดกลีบกระดาษ ได้แก่ อำนวย (อำนวย ทองคำ, 2556) ได้ทำการศึกษาออกแบบพัฒนาเครื่องผลิตดอกไม้จันทน์โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นกำลัง เพื่อตัดกระดาษให้มีรูปทรงเป็นกลีบดอกไม้จันทน์ ในขณะที่วรพงศ์ และคณะ (วรพงศ์ บุญช่วยแทน, 2558 ; วรพงศ์ บุญช่วยแทน และคณะ, 2560) ได้สร้างเครื่องอัดกลีบดอกไม้ประดิษฐ์และศึกษาความสามารถในการผลิต โดยมีกระบอกสูบลมเป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนแผ่นอัดเพื่ออัดกระดาษให้เกิดรอยย่น พบว่าให้ผลลัพธ์เป็นที่พึงพอใจ โดยงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นได้มุ่งเน้นถึงการศึกษาและการสร้างเครื่องอัดกลีบกระดาษ ปริมาณการผลิต และเวลาในการผลิต แต่ไม่ได้นำเสนอเกี่ยวกับรายละเอียดของระบบและวงจรการทำงานของเครื่องอัดกลีบมากนัก ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงเกิดแนวคิดที่จะนำเสนอการออกแบบและสร้างเครื่องอัดกลีบกระดาษแบบกึ่งอัตโนมัติที่ใช้ระบบนิวแมติกเป็นต้นกำลัง เนื่องจากระบบนิวแมติกเป็นระบบที่มีต้นทุนในการสร้างต่ำ สามารถปรับความเร็วและหน่วงเวลาในการอัดของกระบอกสูบได้ สามารถทำงานได้ต่อเนื่อง ช่วยเพิ่มผลผลิตลดการใช้แรงงาน และยังสามารถออกแบบให้ระบบทำงานในลักษณะกึ่งอัตโนมัติได้ด้วย นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นแนวทางให้ผู้สนใจหรือกลุ่มวิสาหกิจชุมชนที่มีความต้องการสร้างเครื่องอัดกลีบกระดาษแบบกึ่งอัตโนมัติเพื่อผลิตกลีบกระดาษสำหรับทำดอกไม้ประดิษฐ์ หรือเพื่อทดแทนเครื่องจักรแบบดั้งเดิม สามารถนำขั้นตอนที่นำเสนอในบทความนี้ไปสร้างเครื่องอัดกลีบกระดาษต่อได้

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ทางผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการนำเสนอแนวทางการออกแบบและการสร้างเครื่องอัดกลีบกระดาษแบบกึ่งอัตโนมัติด้วยระบบนิวแมติก เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานมีหน้าที่บรรจุกระดาษเข้ากับเครื่องอัดกลีบ กดสั่งให้เครื่องอัดกลีบทำงาน และนำกระดาษออกหลังการอัดกลีบ (สร้างรอยย่น) เสร็จสิ้น โดยมุ่งเน้นนำเสนอวิธีการกำหนดลักษณะการทำงานของเครื่องอัดกลีบกระดาษ การเขียนแผนผังลำดับขั้นการทำงาน การออกแบบวงจรนิวแมติก และวงจรไฟฟ้าสำหรับเครื่องอัดกลีบกระดาษแบบกึ่งอัตโนมัติ รวมถึงการคำนวณหาและการเลือกขนาดของอุปกรณ์นิวแมติก

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการศึกษา

เครื่องอัดกลีบกระดาษแบบกึ่งอัตโนมัติด้วยระบบนิวแมติก แสดงใน Figure 1 ซึ่งประกอบด้วย (1) กระบอกสูบลม 1A (pneumatic cylinder 1A) ทำหน้าที่บังคับให้ชุดป้อนกระดาษเคลื่อนที่ในแนวนอนระหว่างตำแหน่งบรรจุกระดาษกับตำแหน่งอัดกลีบ, (2) กระบอกสูบลม 2A (pneumatic cylinder 2A) ทำหน้าที่อัดกลีบกระดาษ ซึ่งปลายก้านสูบจะยึดติดกับแท่นอัดกลีบ, (3) แท่นอัดกลีบ ทำหน้าที่เป็นแท่นอัดกลีบกระดาษที่ม้วนเป็นทรงกระบอกกลวง (hollow cylinder) ซึ่งสวมไว้ที่แกนอัดกลีบเพื่อทำให้กลีบกระดาษเกิดรอยย่น, (4) แกนอัดกลีบ จำนวน 4 แกน ทำหน้าที่เป็นแกนสำหรับสวมกลีบกระดาษม้วน, (5) ชุดป้อนกระดาษ ประกอบด้วยแกนอัดกลีบ 4 แกน ซึ่งติดตั้งบนฐานชุดป้อนกระดาษ (แผ่นสแตนเลส), (6) สวิตช์ปุ่มกด (push button switch) มีจำนวน 2 ตัว ซึ่งติดตั้งไว้ที่ด้านซ้ายและด้านขวาของเครื่องอัดกลีบด้านละ 1 ตัว ทำหน้าที่เป็นสวิตช์สั่งการทำงานของเครื่องอัดกลีบ โดยต้องกดสวิตช์พร้อมกันสองมือ, (7) ชุดปรับปรุงคุณภาพลมอัด (service unit) ทำหน้าที่กรองสิ่งสกปรกในลมอัด ปรับตั้งค่าความดันใช้งานของลมอัด และผสมน้ำหล่อลื่นให้กับลมอัดเพื่อไปหล่อลื่นอุปกรณ์ที่มีการเคลื่อนที่, (8) ตู้ควบคุม ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในวงจรไฟฟ้าของเครื่องอัดกลีบ, และ (9) แหล่งจ่ายลมอัด ทำหน้าที่ผลิตและจ่ายลมอัดให้กับระบบนิวแมติกของเครื่องอัดกลีบ



(1) กระบอกสูบลม 1A, (2) กระบอกสูบลม 2A, (3) แท่นอัดกลีบ, (4) แกนอัดกลีบ, (5) ชุดป้อนกระดาษ, (6) สวิตช์ปุ่มกด, (7) ชุดปรับปรุงคุณภาพลมอัด, (8) ตู้ควบคุม, (9) แหล่งจ่ายลมอัด

Figure 1 The semi-automatic paper petal compression machine with a pneumatic system

สำหรับขั้นตอนการกำหนดลักษณะการทำงานของเครื่องอัดกลีบกระดาษ การเขียนแผนผังลำดับขั้นการทำงาน การออกแบบวงจรนิวแมติกและวงจรไฟฟ้า รวมถึงการคำนวณหาและการเลือกขนาดของอุปกรณ์นิวแมติกของเครื่องอัดกลีบกระดาษแบบกึ่งอัตโนมัติ สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

การกำหนดลักษณะการทำงานของเครื่องอัดกลีบกระดาษ

แนวคิดการออกแบบ คือการประยุกต์ใช้ระบบนิวแมติกเพื่อสร้างเครื่องอัดกลีบกระดาษแบบกึ่งอัตโนมัติ (semi-automation) และกำหนดลักษณะการทำงานของเครื่องอัดกลีบ ดังแสดงใน Figure 2 ซึ่งประกอบด้วยชุดป้อนกระดาษที่มีแกนอัดกลีบสำหรับสวมกลีบกระดาษม้วนจำนวน 4 แกน ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm และสูง 100 mm ติดตั้งในระยะรัศมี 95 mm รอบจุดศูนย์กลางของฐานชุดป้อนกระดาษที่ตำแหน่ง 0, 90, 180, และ 270 องศา ซึ่งทำให้แรงอัดสามารถกระจายไปยังแกนทั้ง 4 ได้เท่ากัน และยังสามารถผลิตกระดาษอัดกลีบได้ในปริมาณมากต่อครั้ง โดยมีกระบอกสูบ 1A ทำหน้าที่ควบคุมตำแหน่งของชุดป้อนกระดาษเพื่อดึงชุดป้อนกระดาษจากตำแหน่งบรรจุกระดาษเข้าไปยังตำแหน่งอัดกลีบ และผลักชุดป้อนกระดาษกลับตำแหน่งเดิมหลังการอัดกลีบเสร็จสิ้น (ระยะเลื่อน 200 mm) เพื่อความสะดวกในการบรรจุและนำกลีบกระดาษม้วนออกจากแกนอัดกลีบ ส่วนแท่นอัดกลีบทำหน้าที่อัดกลีบกระดาษม้วนซึ่งบรรจุไว้ที่ชุดป้อนกระดาษเพื่อทำให้กลีบกระดาษเกิดรอยย่นซึ่งมีกระบอกสูบ 2A (ระยะเลื่อน 250 mm) เป็นต้นกำลังในการอัดกลีบ โดยแท่นอัดกลีบจะมีรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 mm ที่ตำแหน่ง 0, 90, 180, และ 270 องศา อยู่ในระยะรัศมี 95 mm รอบจุดศูนย์กลางของตำแหน่งติดตั้งปลายก้านสูบ 2A ซึ่งรูเหล่านี้จะตรงกับตำแหน่งของแกนอัดกลีบทั้ง 4 แกน เพื่อให้แท่นอัดกลีบสามารถเคลื่อนตัวทะลุแกนอัดกลีบไปกดอัดกลีบกระดาษม้วนที่แกนอัดกลีบให้ยุบตัวลงไป ซึ่งจะก่อให้เกิดรอยย่นที่กลีบกระดาษ โดยเครื่องอัดกลีบได้ออกแบบให้มีช่องว่างในตำแหน่งอัดกระดาษระหว่างแท่นอัดกลีบกับฐานชุดป้อนกระดาษประมาณ 30 mm เพื่อเป็นพื้นที่ให้กับกลีบกระดาษม้วนหลังการอัด

หลักการการทำงานของเครื่องอัดกลีบกระดาษใน Figure 2 สามารถอธิบายได้ดังนี้ โดยให้ผู้ปฏิบัติงานทำการม้วนกลีบกระดาษเป็นทรงกระบอกกลวง (กลีบกระดาษม้วน) และสวมกลีบกระดาษม้วนเข้ากับแกนอัดกลีบในตำแหน่งบรรจุกระดาษ หลังจากนั้นกดปุ่มสั่งให้เครื่องอัดกลีบทำงาน โดยกระบอกสูบ 1A จะเลื่อนเข้าเพื่อดึงชุดป้อนกระดาษเข้าไปยังตำแหน่งอัดกลีบ ต่อมากระบอกสูบ 2A จะดันแท่นอัดกลีบเลื่อนลงมาอัดกลีบกระดาษม้วนที่แกนอัดกลีบ หลังจากนั้นกระบอกสูบ 2A

จะดึงแท่นอัดกลีบให้เลื่อนขึ้นกลับตำแหน่งเดิม และกระบอกสูบ 1A จะผลักชุดป้อนกระดาษกลับตำแหน่งบรรจุกระดาษ เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานนำกลีบกระดาษม้วนที่ผ่านการอัดกลีบออกจากแกนอัดกลีบ ซึ่งการทำงานตามลักษณะดังกล่าวนี้ จะก่อให้เกิดลักษณะการทำงานแบบกึ่งอัตโนมัติ นอกจากนั้นยังช่วยลดการใช้แรงงานคน และเพิ่มอัตราการผลิตได้อีกด้วย

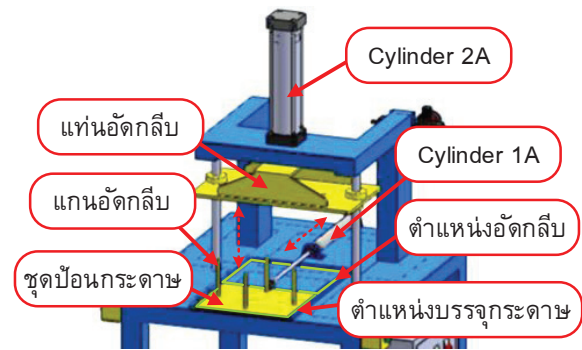


Figure 2 The positional sketch

จากการกำหนดลักษณะการทำงานของเครื่องอัดกลีบ สามารถแบ่งการทำงานของกระบอกสูบ 1A และ 2A ได้เป็น 4 จังหวะ (step) ถึงแม้ว่าการควบคุมการทำงานของกระบอกสูบในวงจรนิวแมติกมีหลายวิธี แต่การควบคุมด้วยไฟฟ้าเป็นวิธีที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย และอุปกรณ์ไฟฟ้าโดยทั่วไปจะมีราคาถูก และใช้งานได้หลากหลาย (ชัยนันทศรีสุภานานนท์, 2553) นอกจากนั้นการควบคุมด้วยระบบไฟฟ้าจะช่วยลดความซับซ้อนของวงจรนิวแมติกลงด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วงจรนิวแมติกที่ควบคุมการทำงานด้วยไฟฟ้า โดยกระบอกสูบ 1A และ 2A จะถูกควบคุมจังหวะการทำงานด้วยโซลินอยด์วาล์ว (solenoid valve) จำนวน 2 ตัว เพื่อให้กระบอกสูบสามารถทำงานอย่างต่อเนื่องกันตามลำดับขั้น 4 จังหวะ ด้วยการกดสวิตช์เพียงครั้งเดียว

สำหรับวิธีส่งสัญญาณสั่งโซลินอยด์วาล์วเพื่อบังคับให้กระบอกสูบทำงานในจังหวะต่อไปอย่างต่อเนื่องตามลำดับขั้นด้วยการส่งงานเพียงครั้งเดียวนั้น โดยปกติวิธีส่งสัญญาณสั่งมี 2 วิธี ได้แก่ การติดตั้งลิมิตสวิตช์ (limit switch) ที่ตำแหน่งเข้าสุดและออกสุดของปลายก้านสูบ และการติดตั้งสวิตช์แม่เหล็ก (magnetic switch) ที่ตำแหน่งหัวและท้ายของตัวกระบอกสูบ แต่ทั้งสองวิธีไม่สามารถทำได้ เนื่องจากวิธีแรกไม่มีตำแหน่งและพื้นที่เพียงพอต่อการติดตั้งลิมิตสวิตช์ เพราะตำแหน่งปลายก้านสูบของกระบอกสูบ 1A และ 2A ต้องเชื่อมต่อกับชุดป้อนกระดาษและแท่นอัดกลีบ ในขณะที่วิธีที่สองต้องใช้กระบอกสูบแบบพิเศษ ซึ่งมีราคาสูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้รีเลย์ตั้งเวลา (time relay) ควบคุมการทำงานของโซลินอยด์วาล์ว เพื่อควบคุมลำดับขั้นการทำงานของกระบอกสูบให้เป็นไปตามลักษณะการทำงานที่กำหนด

โดยวิธีนี้ทำให้สามารถเลือกใช้กระบอบสูบแบบธรรมดาได้และง่ายต่อการติดตั้ง

การเขียนแผนผังลำดับขั้นการทำงาน

แผนผังลำดับขั้นการทำงาน (function diagram) จะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับขั้นการเคลื่อนที่ของก้านสูบกับการเคลื่อนที่ของวาล์วควบคุมทิศทาง เพื่อกำหนดสัญญาณสั่งให้ไปกระทำที่วาล์วควบคุมทิศทางและสั่งให้กระบอบสูบทำงานในจังหวะต่อไปตามลำดับขั้น โดย Figure 3 แสดงแผนผังลำดับขั้นการทำงานของเครื่องอัดกลีบซึ่งประกอบด้วยแผนผังการเคลื่อนที่ของกระบอบสูบ 1A และ 2A (displacement-step diagram) และแผนผังการทำงานของวาล์วควบคุมทิศทาง 1V1 และ 2V1 (control chart) โดยวาล์ว 1V1 และ 2V1 จะทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการทำงานของกระบอบสูบ 1A และ 2A ตามลำดับ จาก Figure สามารถอธิบายได้ดังนี้ โดยแกนแนวตั้งของกระบอบสูบ คือความยาวช่วงชัก ซึ่งตำแหน่ง 0 หมายถึงตำแหน่งที่ก้านสูบเลื่อนเข้าสู่สุด และ 1 หมายถึงตำแหน่งที่ก้านสูบเลื่อนออกสุด ส่วนในกรณีของวาล์วควบคุมทิศทาง ตำแหน่ง 0 หมายถึงตำแหน่งปกติ (normal position) และ 1 หมายถึงตำแหน่งทำงาน (operated position) สำหรับแกนแนวนอนของแผนผังแสดงถึงจังหวะการทำงานของกระบอบสูบและวาล์วควบคุมทิศทาง ซึ่งมี 4 จังหวะ โดยตำแหน่งปกติก้านสูบของกระบอบสูบ 1A จะอยู่ที่ตำแหน่งออกสุด (1) ในขณะที่ก้านสูบของกระบอบสูบ 2A จะอยู่ที่ตำแหน่งเข้าสู่สุด (0) สำหรับการดำเนินงานเริ่มต้นหลังจากผู้ปฏิบัติงานสวมกลีบกระดาดเข้ากับแกนอัดกลีบเรียบร้อยแล้ว ทำการกดปุ่ม S2 และ S3 พร้อมกัน จะทำให้วาล์วควบคุมทิศทาง 1V1 ในแกนจังหวะที่ 1 เปลี่ยนตำแหน่งจาก 0 เป็น 1 ทำให้ก้านสูบ 1A เลื่อนเข้าจากแกนจังหวะที่ 1 ถึงแกนจังหวะที่ 2 (ระหว่างแกนจังหวะที่ 1 ถึงแกนจังหวะที่ 2 เรียกว่า 1 จังหวะ) ต่อมาที่แกนจังหวะที่ 2 ชุดรีเลย์ตั้งเวลา KT1 จะสั่งให้วาล์ว 2V1 เปลี่ยนตำแหน่งจาก

0 เป็น 1 ทำให้ก้านสูบ 2A เลื่อนออกจากแกนจังหวะที่ 2 จนสุดความยาวช่วงชักที่แกนจังหวะที่ 3 ต่อมาที่แกนจังหวะที่ 3 ชุดรีเลย์ตั้งเวลา KT2 จะสั่งให้วาล์ว 2V1 เปลี่ยนตำแหน่งจาก 1 กลับมาเป็น 0 ทำให้ก้านสูบ 2A เลื่อนกลับจากแกนจังหวะที่ 3 จนถึงแกนจังหวะที่ 4 หลังจากนั้นที่แกนจังหวะที่ 4 ชุดรีเลย์ตั้งเวลา KT3 จะสั่งให้วาล์ว 1V1 เปลี่ยนตำแหน่งจาก 1 กลับมาเป็น 0 ทำให้ก้านสูบ 1A เลื่อนกลับจากแกนจังหวะที่ 4 จนถึงแกนจังหวะที่ 5 ถือว่าครบ 1 รอบการทำงาน หลังจากนั้นให้ผู้ปฏิบัติงานนำกลีบกระดาดม้วนออกจากแกนอัดกลีบ ดังนั้นจาก Figure 3 จะทำให้ทราบถึงลำดับขั้นการทำงานของกระบอบสูบและวาล์วควบคุมทิศทาง รวมถึงการใช้รีเลย์ตั้งเวลาเพื่อกำหนดสัญญาณสั่งวาล์วควบคุมทิศทาง โดยขั้นตอนต่อไป คือการออกแบบวงจรนิวแมติกและวงจรไฟฟ้าสำหรับเครื่องอัดกลีบกระดาด เพื่อให้สามารถทำงานได้ตามแผนผังลำดับขั้นการทำงาน ดังจะอธิบายต่อไป

การออกแบบวงจรนิวแมติกและวงจรไฟฟ้า

วงจรของเครื่องอัดกลีบกระดาดแบบกึ่งอัตโนมัติสามารถแบ่งเป็น 2 วงจร ได้แก่ วงจรนิวแมติก (pneumatic circuit) และวงจรไฟฟ้า (electrical circuit) สำหรับ Figure 4 แสดงวงจรนิวแมติก โดยใช้สัญลักษณ์ (symbol) ตามมาตรฐาน DIN ISO 1219 (Croser & Ebel, 2002) ซึ่งประกอบด้วยกระบอบสูบทำงานสองทาง จำนวน 2 กระบอบ (1A และ 2A), วาล์วควบคุมอัตราการไหล จำนวน 4 ตัว (1V2, 1V3, 2V2, และ 2V3), วาล์วควบคุมทิศทางแบบ 5/2 ทาง ทำงานด้วยโซลินอยด์และลมช่วยทั้งสองด้าน จำนวน 2 ตัว (1V1 และ 2V1), ชุดปรับปรุงคุณภาพลมอัด (OZ2) และแหล่งจ่ายลมอัด (OZ1) ในขณะที่ Figure 5 แสดงวงจรไฟฟ้าสำหรับการดำเนินงานของวงจรนิวแมติก โดยใช้สัญลักษณ์ตามมาตรฐาน DIN EN 61082-2 (Prede & Scholz, 2002) ซึ่งประกอบด้วยวงจรไฟฟ้ากระแสตรง 24 V, สวิตช์ปิด-เปิด (on-off) วงจรไฟฟ้า (S1), สวิตช์ปุ่มกด จำนวน 2 ตัว (S2 และ S3), รีเลย์ (relay) จำนวน 4 ชุด (K1, K2, K3, และ K4), รีเลย์ตั้งเวลา (time relay) แบบหน่วงเมื่อมีสัญญาณเข้า (on delay timer) จำนวน 4 ชุด (KT1, KT2, KT3, และ KT4) ซึ่งรีเลย์แต่ละชุดต่างมีหน้าสัมผัส (contact) ติดตั้งอยู่ในทางเดินไฟฟ้า (path) ต่างๆ ในวงจรไฟฟ้า มีทั้งแบบปกติปิด (normally closed) และปกติเปิด (normally open) และขดลวดโซลินอยด์ (solenoid coil) จำนวน 4 ชุด (1Y1, 1Y2, 2Y1, และ 2Y2) ซึ่งขดลวดโซลินอยด์เหล่านี้จะติดตั้งอยู่ที่ตัวของวาล์วควบคุมทิศทาง 1V1 และ 2V1 ดัง Figure 4

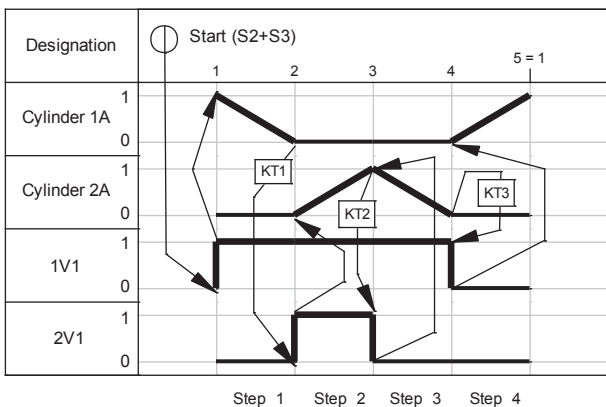


Figure 3 The function diagram

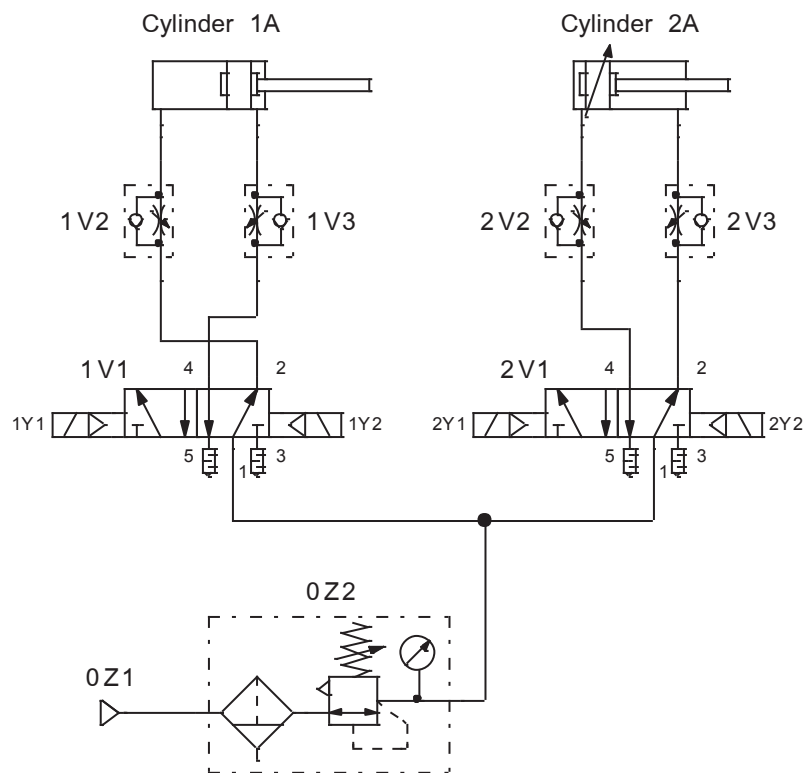


Figure 4 The pneumatic circuit diagram

หลักการทำงานของระบบนิวแมติกของเครื่องอัดกลีบกระดาษ จะต้องพิจารณา Figure 4 และ 5 พร้อมกัน โดยเริ่มต้นด้วยการเปิดสวิตช์ S1 (on-off) เพื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 24 V เข้าวงจรไฟฟ้า ต่อมาวงจรนิวแมติกจะเริ่มต้นการทำงาน โดยกดสวิตช์ S2 และ S3 พร้อมกัน ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านชุดรีเลย์ K1 ทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กไฟฟ้าดึงดูดหน้าสัมผัส K1 (ปกติเปิด) ให้ปิดลง และต่อวงจรให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านไปยังขดลวดโซลินอยด์ 1Y1 (path 13) ทำให้วาล์วควบคุมทิศทาง 1V1 เปลี่ยนเป็นตำแหน่งทำงาน (เลื่อนสลับตำแหน่งไปด้านขวา) และจ่ายลมอัดไหลผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหล 1V3 ไปดันก้านสูบ 1A ให้เลื่อนเข้าและดึงชุดป้อนกระดาษเลื่อนเข้าสู่ตำแหน่งอัดกลีบ ในขณะที่เดียวกันก็มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปยังชุดรีเลย์ตั้งเวลา KT1 เพื่อหน่วงเวลาหน้าสัมผัส KT1 (ปกติเปิด) เป็นเวลา 5 วินาที เมื่อครบกำหนดหน้าสัมผัส KT1 จะปิดลง และต่อวงจรให้กระแสไฟฟ้าไหลไปยังชุดรีเลย์ K2 ทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กดึงดูดหน้าสัมผัส K2 (ปกติเปิด) ให้ปิดลง และต่อวงจรให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปยังขดลวดโซลินอยด์ 2Y1 (path 14) สั่งให้วาล์วควบคุมทิศทาง 2V1 เปลี่ยนเป็นตำแหน่งทำงาน ส่งผลให้มีลมอัดไหลผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหล 2V2 ไปดันก้านสูบ 2A ให้เลื่อนออกและดันแท่นอัดกลีบลงมาอัดกลีบกระดาษผ่าน (ในขณะที่เดียวกันหน้าสัมผัส K2 (ปกติปิด) ในทางเดินไฟฟ้า 1 (path 1) จะเปิดออก เพื่อตัดวงจรไม่ให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านชุดรีเลย์ K1 ซึ่งจะทำให้หน้าสัมผัส K1 ทุกตัวกลับสู่สภาพปกติ

และเป็นการตัดวงจรขดลวดโซลินอยด์ 1Y1 รวมถึงตัดวงจรของชุดรีเลย์ตั้งเวลา KT1 ด้วย ทั้งนี้เพื่อป้องกันการลัดวงจร (short circuit) และในเวลาเดียวกันก็จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปเข้าชุดรีเลย์ตั้งเวลา KT2 เพื่อหน่วงเวลาหน้าสัมผัส KT2 เป็นเวลา 10 วินาที เมื่อครบกำหนดหน้าสัมผัส KT2 จะปิดลง ต่อวงจรให้กระแสไฟฟ้าไหลไปยังขดลวดรีเลย์ K3 ทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กดึงดูดหน้าสัมผัส K3 ให้ปิดลง ต่อวงจรให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปยังขดลวดโซลินอยด์ 2Y2 (path 15) สั่งให้วาล์วควบคุมทิศทาง 2V1 เปลี่ยนกลับตำแหน่งปกติ (เลื่อนกลับไปตำแหน่งเดิม) ส่งผลให้มีลมอัดไหลผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหล 2V3 ไปดันก้านสูบ 2A ให้เลื่อนกลับ (เลื่อนขึ้น) และดึงแท่นอัดกลีบกลับตำแหน่งเดิม (ในขณะที่เดียวกันหน้าสัมผัส K3 (ปกติปิด) ในทางเดินไฟฟ้า 4 (path 4) จะเปิดออก เพื่อตัดวงจรไม่ให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านชุดรีเลย์ K2 จะทำให้หน้าสัมผัส K2 ทุกตัวกลับสู่สภาพปกติ ซึ่งเป็นการตัดวงจรขดลวดโซลินอยด์ 2Y1 รวมถึงตัดวงจรของชุดรีเลย์ตั้งเวลา KT2} และในเวลาเดียวกันก็จะมีกระแสไฟฟ้าผ่านไปเข้าชุดรีเลย์ตั้งเวลา KT3 เพื่อหน่วงเวลาหน้าสัมผัส KT3 เป็นเวลา 10 วินาที เมื่อครบกำหนดหน้าสัมผัส KT3 จะปิดลง ต่อวงจรให้กระแสไฟฟ้าไหลไปยังขดลวดรีเลย์ K4 ก่อให้เกิดอำนาจแม่เหล็กดึงดูดหน้าสัมผัส K4 ให้ปิดลง ต่อวงจรให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดโซลินอยด์ 1Y2 (path 16) ทำให้วาล์วควบคุมทิศทาง 1V1 เปลี่ยนกลับตำแหน่งปกติ ส่งผลให้มีลมอัดไหลผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหล 1V2 ไปดันก้านสูบ

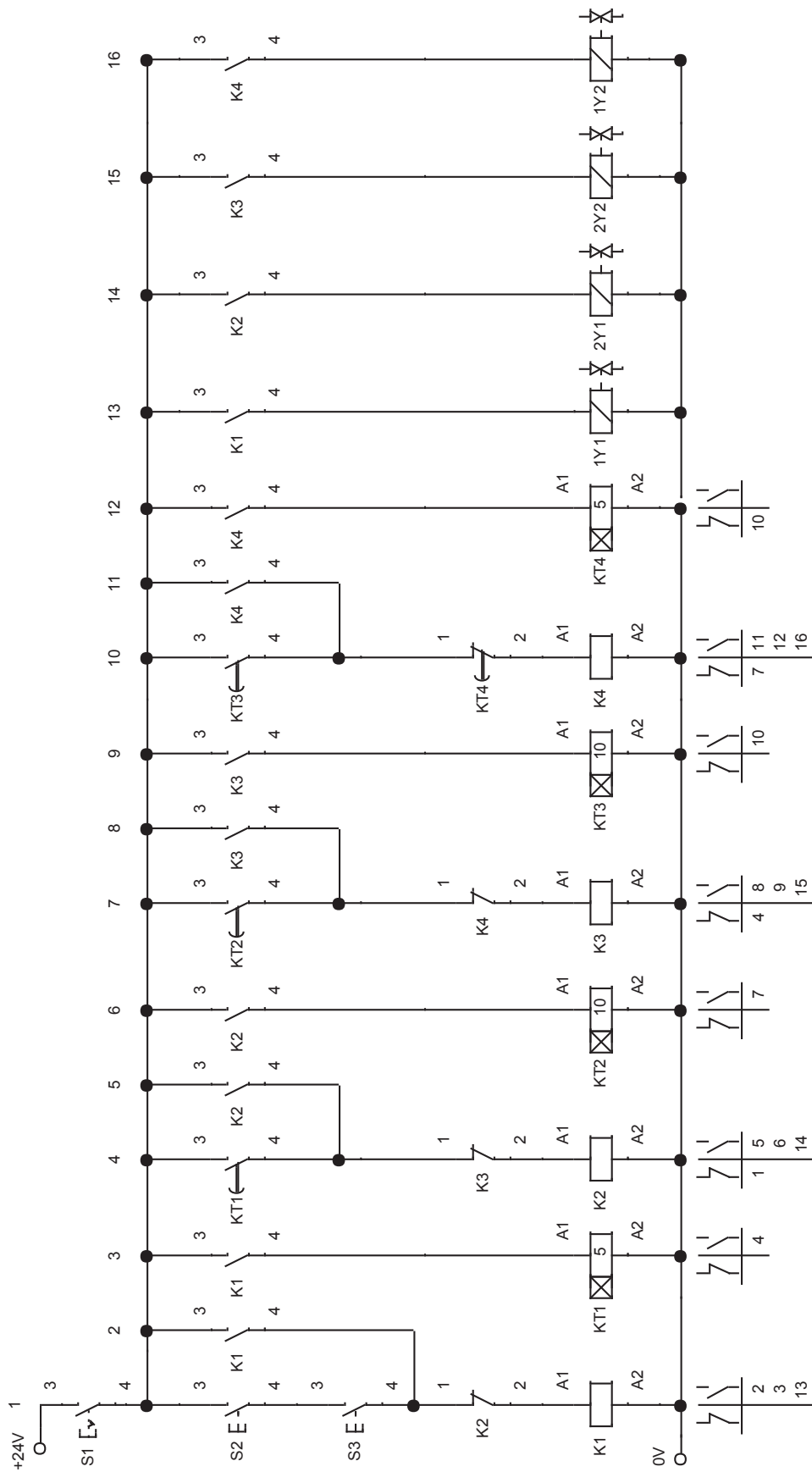


Figure 5 The electrical circuit diagram

1A ให้เลื่อนออกและผลักชุดป้อนกระดาษกลับตำแหน่งบรรจุกระดาษ {ในขณะที่เดียวกันหน้าสัมผัส K4 (ปกติปิด) ในทางเดินไฟฟ้า 7 (path 7) จะเปิดออก เพื่อตัดวงจรไม่ให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านชุดรีเลย์ K3 จะทำให้หน้าสัมผัส K3 ทุกตัวกลับสู่สภาพปกติ ซึ่งเป็นการตัดวงจรขดลวดโซลินอยด์ 2Y2 รวมถึงตัดวงจรของชุดรีเลย์ตั้งเวลา KT3} และในเวลาเดียวกันกระแสไฟฟ้าง่ายไปยังชุดรีเลย์ตั้งเวลา KT4 เพื่อหน่วงเวลาหน้าสัมผัส KT4 เป็นเวลา 5 วินาที เมื่อครบกำหนดหน้าสัมผัส KT4 (ปกติปิด) จะเปิดออก เพื่อตัดวงจรไม่ให้มีกระแสไฟฟ้าจ่ายไปยังชุดรีเลย์ K4 ทำให้หน้าสัมผัส K4 ทุกตัวกลับสู่สภาพปกติ ถือว่าครบหนึ่งรอบการทำงาน

การคำนวณหาและการเลือกขนาดของอุปกรณ์นิวแมติก

จากการออกแบบวงจรนิวแมติกและวงจรไฟฟ้าข้างต้น ทำให้ทราบถึงชนิดและจำนวนของอุปกรณ์นิวแมติกที่ต้องใช้ แต่ยังไม่สามารถระบุถึงขนาดของอุปกรณ์ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะนำเสนอวิธีการคำนวณหาและการเลือกขนาดของอุปกรณ์นิวแมติก ดังต่อไปนี้

(1) ขนาดของกระบอกสูบลม 1A ที่ถูกต้องสามารถหาได้โดยใช้สมการ

$$F_{eff} = (A_p \times p) \times \mu \quad (1)$$

โดย F_{eff} คือแรงประสิทธิผลที่ได้จากลูกสูบ (effective piston force) (N), A_p คือพื้นที่หน้าตัดของลูกสูบ (useful piston area) (mm^2), p คือความดันลมอัดใช้งาน (operating pressure) (MPa หรือ N/mm^2), และ μ คือประสิทธิภาพของกระบอกสูบ (cylinder efficiency) ซึ่งมีค่าประมาณ 90% เนื่องจากขณะทำงานแรงจะลดลงอันเป็นผลมาจากแรงเสียดทานประมาณ 10% (Croser & Ebel, 2002 ; ปานเพชร ชินินทร และขวัญชัย สันทิพย์สมบูรณ์, 2531) ดังนั้นขนาดของกระบอกสูบจะหาได้จาก

$$d_p = \sqrt{\frac{4 \times F_{eff}}{0.9 \times \pi \times p}} \quad (2)$$

โดย d_p คือเส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกสูบ (mm) ซึ่งในที่นี้กำหนด $F_{eff} = 200$ N และ $p = 0.6$ MPa (6 bar) ซึ่งเป็นความดันใช้งานที่ให้ประสิทธิผลดีที่สุด (Croser & Ebel, 2002) โดยขนาดของกระบอกสูบ 1A คือ

$$d_{p, 1A} = \sqrt{\frac{4 \times 200}{0.9 \times \pi \times 0.6}} = 21.8 \text{ mm}$$

ต่อมาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบที่คำนวณได้ไปเลือกขนาดมาตรฐานของกระบอกสูบที่มีจำหน่ายจากบริษัทผู้ผลิต โดยต้องเลือกกระบอกสูบที่มีขนาดใกล้เคียงแต่ต้องมีขนาดที่ใหญ่กว่า เพื่อให้กระบอกสูบสามารถทำงานได้ตามข้อกำหนด ซึ่งในที่นี้ได้เลือกกระบอกสูบลม ยี่ห้อ CXF รุ่น MAL 25X200-S ที่มีขนาด $d_p = 25$ mm, เส้นผ่านศูนย์กลางก้านสูบ = 10 mm, และความยาวช่วงชัก = 200 mm โดยมีรูทางลมเข้าและออก (port size) ขนาด 8 mm

เมื่อมีการใช้ก้านสูบไปผลักชิ้นงานจนถึงตำแหน่งสูงสุดของความยาวช่วงชัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการใช้งานที่มีระยะชักที่ยาว จะต้องมีการตรวจสอบแรงกดสูงสุดที่ก้านสูบสามารถยอมรับได้ โดยไม่เกิดการโก่งงอ (Beater, 2006) ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$F_k = \frac{\pi^3 \times E \times d_r^4}{64 \times l_k^2 \times f} \quad (3)$$

โดย F_k คือแรงโก่งงอที่ยอมรับได้ (permissible buckling force) (N), E คือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของก้านสูบ (modulus of elasticity of rod) (MPa) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 210,000 MPa สำหรับเหล็ก, d_r คือเส้นผ่านศูนย์กลางของก้านสูบ (mm), f คือค่าความปลอดภัย โดยทั่วไปใช้เท่ากับ 5, และ l คือความยาวประสิทธิผล (effective length) (mm) ซึ่งจะขึ้นกับลักษณะติดตั้งกระบอกสูบ (cylinder mounting) และ S คือความยาวช่วงชัก (mm)

สำหรับแรงโก่งงอที่ยอมรับได้ของกระบอกสูบ 1A ที่ติดตั้งแบบนอน ซึ่งมีลักษณะการจับยึดกระบอกสูบแบบฐานยึดด้านหน้าและหลัง (foot mounting) และปลายก้านสูบติดตั้งแบบข้อต่อและมีปลอกนำ (pivoted and rigidly guided) ซึ่งมี $l_k = 0.7S$ (Barber, 1997) จะได้

$$F_k = \frac{\pi^3 \times 210,000 \times 10^4}{64 \times (0.7 \times 200)^2 \times 5} = 10,381.6 \text{ N}$$

จากผลการคำนวณจะพบว่า F_k มากกว่า F_{eff} ซึ่งถือว่าก้านสูบนี้สามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัย

(2) ขนาดของกระบอกสูบลม 2A สามารถหาได้โดยกำหนด $F_{eff} = 1,600$ N ซึ่งเป็นแรงที่ใช้สำหรับอัดกลีบกระดาษม้วน และ $p = 0.6$ MPa ดังนั้นขนาดของกระบอกสูบ 2A คือ

$$d_{p, 2A} = \sqrt{\frac{4 \times 1,600}{0.9 \times \pi \times 0.6}} = 61.5 \text{ mm}$$

ต่อมาทำการเลือกกระบอกสูบที่มีขนาดใกล้เคียงแต่ต้องโตกว่า ซึ่งในที่นี้ได้เลือกกระบอกสูบลมยี่ห้อ CXF รุ่น SC 63X250-S ที่มีขนาด $d_p = 63$ mm, $d_r = 20$ mm, และ $S = 250$ mm ที่มีรูทางลมเข้าและออกขนาด 8 mm โดยเป็นกระบอกสูบแบบมีเบาะลมกันกระแทก (cushioned cylinder) เพราะว่ากระบอกสูบมีขนาดใหญ่จะก่อให้เกิดเสียงดัง อันเนื่องมาจากการเคลื่อนเข้าและออกของก้านสูบจะทำให้เกิดการกระแทกระหว่างลูกสูบกับผนังหัวท้ายของกระบอกสูบ และส่งผลให้กระบอกสูบชำรุด (เด่น ดอกพิมาย, 2552) ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวและยืดอายุการใช้งาน กระบอกสูบแบบมีเบาะลมกันกระแทกจึงเป็นสิ่งจำเป็น

สำหรับแรงโก่งงอที่ยอมรับได้ของกระบอกสูบ 2A ที่ติดตั้งแบบตั้ง ซึ่งมีลักษณะการจับยึดกระบอกสูบแบบยึดหน้าแปลนด้านหน้า (front flange mounting) และปลายก้านสูบติดตั้งแบบบังคับเคลื่อนและมีปลอกนำ (fixed and rigidly guided) ซึ่งมี $I_k = 0.5S$ (Barber, 1997) คือ

$$F_k = \frac{\pi^3 \times 210,000 \times 20^3}{64 \times (0.5 \times 250)^2 \times 5} = 208,362.2 \text{ N}$$

จากผลการคำนวณจะพบว่า F_k มากกว่า F_{eff} ซึ่งถือว่าก้านสูบนี้สามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัย

(3) อัตราความสิ้นเปลืองลมอัด (air consumption) ในระบบ คืออัตราการไหลของลมอัดของกระบอกสูบ 1A และ 2A โดยทั่วไปจะระบุในรูปของปริมาณลมอิสระ (free air delivery) ซึ่งอัตราความสิ้นเปลืองลมอัดจะเป็นตัวกำหนดขนาดของเครื่องอัดลมและถังพักลมอัด ทั้งนี้เพื่อให้ระบบนิวแมติกมีลมอัดเพียงพอต่อการใช้งาน ดังนั้นอัตราความสิ้นเปลืองลมอัดสำหรับกระบอกสูบแบบทำงานสองทิศทาง (Croser & Ebel, 2002) คือ

$$q_b = 2S \times n \times A_p \times \frac{0.1013 + p}{0.1013} \times 10^{-6} \quad (4)$$

โดย q_b คืออัตราความสิ้นเปลืองลมอัด (L/min), S คือความยาวช่วงชักของกระบอกสูบ (mm), n คือจำนวนครั้งที่ลูกสูบเคลื่อนเข้าออกต่อนาที (1/min), และ p คือความดันลมอัดใช้งาน (MPa) ซึ่งสุดท้ายอัตราความสิ้นเปลืองลมอัดจะถูกนำไปเลือกขนาดเครื่องอัดลมและถังพักลมอัดต่อไป โดยในที่นี้กำหนด $n = 2$ ครั้งต่อนาที และ $p = 0.6$ MPa ดังนั้นอัตราความสิ้นเปลืองลมอัดของกระบอกสูบ 1A และ 2A สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$q_b = 2(200) \times 2 \times \frac{\pi}{4} (25)^2 \times \frac{0.1013 + 0.6}{0.1013} \times 10^{-6} = 2.8 \text{ L/min}$$

$$q_{b, 2A} = 2(250) \times 2 \times \frac{\pi}{4} (63)^2 \times \frac{0.1013 + 0.6}{0.1013} \times 10^{-6} = 21.6 \text{ L/min}$$

ดังนั้น อัตราความสิ้นเปลืองลมอัดทั้งระบบ คือ

$$q_b = 2.8 + 21.6 = 24.4 \text{ L/min}$$

(4) ขนาดของเครื่องอัดลม (air compressor) มีเกณฑ์ที่ใช้พิจารณาในการเลือกขนาด คือเครื่องอัดลมต้องสร้างความดันลมอัดได้มากกว่าความดันใช้งาน โดยในที่นี้กำหนดความดันสูงสุดที่ 0.8 MPa และสามารถผลิตลมอัดได้ในปริมาณที่เพียงพอต่ออัตราความสิ้นเปลืองลมอัดของกระบอกสูบ คือ 24.4 L/min โดยทั่วไปเครื่องอัดลมที่วางขายในท้องตลาดมักมาพร้อมชุดต้นกำลัง คือมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีกำลังขับเหมาะสมกับขนาดของเครื่องอัดลมอยู่แล้ว เพราะฉะนั้นในที่นี้จึงไม่ได้กล่าวถึงวิธีกำหนดขนาดของมอเตอร์ไฟฟ้าดังกล่าว ในขณะที่อุปกรณ์สำคัญอีกอย่างที่ต้องพิจารณาก่อนที่จะตัดสินใจเลือกขนาดของเครื่องอัดลม คือขนาดของถังพักลมอัด ซึ่งต้องมีขนาดสอดคล้องกับอัตราความสิ้นเปลืองลมอัด และขนาดของเครื่องอัดลม ดังจะอธิบายต่อไป

(5) ขนาดของถังพักลมอัด (receiver) จะต้องคำนึงถึงความดันลมอัด อัตราความสิ้นเปลืองลมอัดที่ต้องการของระบบ ความสามารถของเครื่องอัดลม รวมถึงรูปแบบของการทำงาน (ชยันนท์ ศรีสุภินานนท์, 2553) สำหรับในกรณีนี้ที่ต้องการออกแบบให้ถังพักลมอัดทำงานแบบไม่มีการส่งลมอัดเข้าสู่ถังพักลมอัดในขณะที่ลมอัดถูกดูดไปใช้งาน ซึ่งขนาดของถังพักลมอัด (Jagadeesha, 2015) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$V_r = \frac{0.1013 \times t \times q_b}{p_{max} - p_{min}} \quad (5)$$

โดย V_r คือขนาดของถังพักลมอัด (L), t คือเวลาที่ถังพักลมอัดสามารถส่งลมอัดได้ตามปริมาณที่ต้องการ (min), q_b คืออัตราความสิ้นเปลืองลมอัดของระบบนิวแมติก (L/min), p_{max} คือความดันสูงสุดในถังพักลมอัด (MPa), และ p_{min} คือความดันต่ำสุดในถังพักลมอัด (MPa) โดยในที่นี้กำหนด $t = 3$ min, $p_{max} = 0.8$ MPa, $p_{min} = 0.65$ MPa, และ $q_b = 24.4$ L/min ซึ่งจะได้

$$V_r = \frac{0.1013 \times 3 \times 24.4}{0.8 - 0.65} = 49.5 \text{ L}$$

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นระบบนิวแมติกขนาดเล็ก ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้เครื่องอัดลมที่มีถังพักลมอัดในตัวยี่ห้อ ETOP รุ่น XH-60050L (oil free) ซึ่งเป็นเครื่องอัดลมพร้อมถังพักลมขนาด 50 L โดยมีอัตราการผลิตลมอัด (q_b)

220 L/min, ความดันลมอัดสูงสุดที่ 0.8 MPa และใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลังขนาด 1,200 W ซึ่งเพียงพอต่ออัตราความสิ้นเปลืองลมอัดที่ระบบต้องการและสามารถจ่ายลมอัดได้ตามเวลาที่กำหนด

(6) ชนิดของวาล์วควบคุมทิศทาง (directional control valve) จะขึ้นกับลักษณะการทำงานของกระบอกสูบและวิธีควบคุม ซึ่งในที่นี้เลือกใช้กระบอกสูบทำงานสองทางและควบคุมด้วยระบบไฟฟ้า ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้วาล์วแบบ 5/2 ทาง ทำงานด้วยโซลินอยด์และลมช่วยทั้งสองด้าน (pilot controlled 5/2-way double solenoid valve) ยี่ห้อ KLQD รุ่น 4V220-08 ที่มีช่วงความดันใช้งาน (working pressure) ระหว่าง 0.15-0.8 MPa และมีรูทางลมเข้าและออกขนาด 8 mm จำนวน 2 ตัว เพื่อใช้เป็นวาล์วควบคุมทิศทางการทำงานของกระบอกสูบ 1A และ 2A

(7) ขนาดของวาล์วควบคุมทิศทาง จะขึ้นกับอัตราการไหลของลมอัดที่ต้องการ และความดันตกคร่อมที่ยอมรับได้ของลมอัดที่ผ่านวาล์ว โดยทั่วไปบริษัทผู้ผลิตจะให้ค่าพื้นที่หน้าตัดใช้งานจริงของวาล์ว เพื่อใช้สำหรับการกำหนดขนาดของวาล์วควบคุมทิศทางในรูปของอัตราการไหลของลมอัดที่ผ่านวาล์ว ซึ่งจะแปรผันไปตามความดันลมอัด (SMC Corporation, 1997) โดยสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$q_v = 222 \times A_v \times \sqrt{(p_2 + 0.1013) \times \Delta p} \times \sqrt{\frac{273}{273 \times T_1}} \quad (6)$$

โดย q_v คืออัตราการไหลของลมอัดที่ผ่านวาล์ว (flow rate of valve) (L/min), A_v คือพื้นที่หน้าตัดใช้งานจริงของวาล์ว (effective section area) (mm^2), p_2 คือความดันลมอัดขาออกที่ต้องการ (MPa), Δp คือความดันตกคร่อมที่ยอมรับได้ (permissible pressure drop) (MPa), และ T_1 คืออุณหภูมิลมอัด ($^{\circ}\text{C}$) โดยในที่นี้กำหนด $p_2 = 0.6$ MPa, $\Delta p = 0.002$ MPa, $T_1 = 30^{\circ}\text{C}$, และ $A_v = 16$ mm^2 สำหรับวาล์ว รุ่น 4V220-08 ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากบริษัทผู้ผลิต โดยอัตราการไหลของลมอัดที่ผ่านวาล์ว คือ

$$q_v = 222 \times 16 \times \sqrt{(0.6 + 0.1013) \times 0.002} \times \sqrt{\frac{273}{273 \times 30}} \\ = 126.3 \text{ L/min}$$

จากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าวาล์วดังกล่าวสามารถใช้งานได้ เพราะมีอัตราการไหลของลมอัดที่ผ่านวาล์วเพียงพอต่ออัตราความสิ้นเปลืองลมอัดของกระบอกสูบ 1A และ 2A แต่อัตราการไหลมีค่ามากกว่าความต้องการลมอัดของกระบอกสูบ ซึ่งจะส่งผลให้ลูกสูบของกระบอกสูบเคลื่อนที่เร็วเกินไป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องติดตั้งวาล์วควบคุมอัตราการไหล (flow control valve) เข้าไปในวงจร จำนวน 4 ตัว โดยติดตั้งระหว่างกระบอกสูบและวาล์วควบคุมทิศทาง

(8) ชุดปรับปรุงคุณภาพลมอัด จะต้องพิจารณาถึงความละเอียดในการกรองลมอัด ช่วงการปรับลดความดันใช้งาน และการหล่อลื่นลมอัด ในที่นี้เลือกใช้ชุดปรับปรุงคุณภาพลมอัด ยี่ห้อ DKCN ซึ่งประกอบด้วยตัวกรองลมอัด (air filter) รุ่น BFR-2000 ที่มีไส้กรองขนาด 40 μm และสอดคล้องกับความละเอียดของลมอัดที่กำหนดของวาล์ว, วาล์วปรับลดความดัน (pressure regulator) ซึ่งสามารถปรับลดความดันได้ในช่วง 0.05-0.9 MPa และมีเกจวัดความดัน (pressure gauge) ที่มีสเกลสูงสุดอ่านได้ 1.0 MPa, และอุปกรณ์ผสมน้ำมันหล่อลื่น (oil lubricator) รุ่น BL-2000 โดยมีรูทางลมเข้าอยู่ที่ตัวกรองลมอัดและรูทางลมออกอยู่ที่อุปกรณ์ผสมน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งมีขนาด 8 mm

(9) ท่อลมที่ใช้ในการส่งถ่ายลมอัดเข้าระบบนิวแมติก ในที่นี้ได้เลือกใช้ท่อลมชนิดอ่อน (tube) ทั้งระบบเพื่อให้เกิดความสะดวกในการติดตั้ง และง่ายต่อการซ่อมบำรุงรักษา โดยท่อลมที่ใช้มีขนาด 8x5 mm (มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 8 mm และภายใน 5 mm) ทำมาจากวัสดุโพลียูรีเทน (polyurethane, PU) มีช่วงความดันใช้งาน 1.0 MPa โดยมีขนาดที่สอดคล้องกับรูทางลมเข้าและออกของอุปกรณ์นิวแมติก และใช้ข้อต่อสวมเร็ว (push-in fitting) สำหรับการเชื่อมต่อท่อลม แต่อย่างไรก็ตามท่อลมขนาดใหญ่จะช่วยลดความเร็วการไหลของลมอัดภายในท่อลม และส่งผลให้ความดันตกคร่อมในท่อลมลดลงด้วย

ขั้นตอนการทดลองอัดกลีบกระดาษ

กระดาษที่ใช้ในการทดลองอัดกลีบด้วยเครื่องอัดกลีบกระดาษแบบกึ่งอัตโนมัติ เป็นกระดาษที่ตัดเป็นรูปกลีบดอก (petal) และสามารถนำมาประดิษฐ์เป็นดอกไม้จันทน์ได้ทันทีหลังอัดกลีบ โดยมีรูปร่างและขนาดแสดงดัง Figure 6 สำหรับกระดาษที่ใช้ในการทดลอง คือกระดาษที่มีน้ำหนัก 55 และ 65 gsm (grams per square meter หรือ กรัมต่อกระดาษ 1 ตารางเมตร) ซึ่งเป็นน้ำหนักที่นิยมนำมาประดิษฐ์เป็นดอกไม้จันทน์

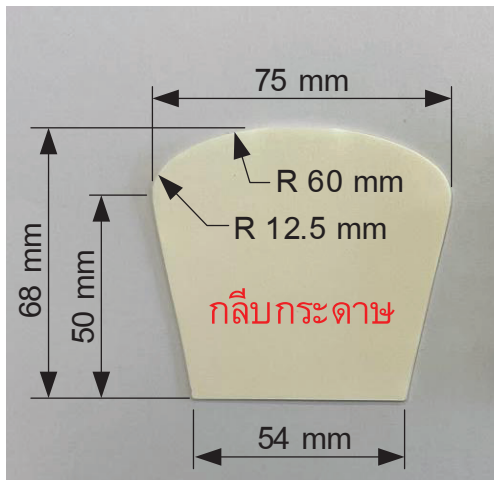


Figure 6 Dimensions of the paper petal

การศึกษาทำโดยการทดลองอัดกลีบกระดาษ 55 และ 65 gsm ที่มีจำนวน 6, 8, 10, 12, 14, และ 16 แผ่นต่อม้วน มาอัดกลีบที่ตำแหน่งแกนอัดกลีบต่างๆ โดยใช้ความดันลมอัด 0.6 MPa สำหรับขั้นตอนการทดลองเริ่มต้นโดยนำกลีบกระดาษ 55 gsm ที่ตัดเป็นรูปกลีบดอก จำนวน 6 แผ่น มาม้วนเป็นทรงกระบอกกลวง ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณ 12 mm โดยให้เริ่มม้วนกลีบกระดาษจากด้านบนลงมาด้านล่างแล้วติดเทปกาวยึดทรงรูป ซึ่งจะได้อัดเป็นกลีบกระดาษม้วน โดยให้ทำจำนวน 4 ม้วน ดังแสดงใน Figure 7 (a) ต่อมานำกลีบกระดาษม้วนดังกล่าวสวมเข้ากับแกนอัดกลีบ 1, 2, 3, และ 4 ที่ชุดป้อนกระดาษ ซึ่งเป็นตำแหน่งบรรจุกระดาษ ดังแสดงใน Figure 7 (b) หลังจากนั้นกดสวิตช์ปุ่มกดพร้อมกัน เพื่อเริ่มการทำงานของวงจรนิวแมติก ซึ่งก้านสูบ 1A จะดึงชุดป้อนกระดาษเลื่อนเข้าสู่ตำแหน่งอัดกลีบ ต่อมาก้านสูบ 2A จะดันแท่นอัดกลีบเลื่อนลงมาอัดกลีบกระดาษม้วนจนยุบตัวลงไป ดังแสดงใน Figure 7 (c) หลังจากนั้นก้านสูบ 2A จะเลื่อนขึ้นเพื่อดึงแท่นอัดกลีบกลับตำแหน่งเดิม และต่อมาก้านสูบ 1A ก็ดันชุดป้อนกระดาษเลื่อนออกมาด้านหน้า (ตำแหน่งบรรจุกระดาษ) ดัง Figure 7 (d) และขั้นตอนสุดท้ายคือนำกลีบกระดาษม้วนที่ผ่านการอัดกลีบแล้วออกจากแกนอัดกลีบ ถือเป็นารสิ้นสุดการทำงาน โดยกลีบกระดาษที่ผ่านการอัดกลีบจะมีลักษณะรอยย่น ดังแสดงใน Figure 7 (e) และทำในลักษณะเดียวกันกับกลีบกระดาษจำนวน 8, 10, 12, 14, และ 16 แผ่นต่อม้วน ตามลำดับ หลังจากนั้นให้ทำการอัดกลีบในลักษณะเดียวกันกับกลีบกระดาษ 65 gsm จนครบทุกจำนวนกลีบกระดาษ ในที่นี้จะนำลักษณะรอยย่นของกลีบกระดาษที่ผ่านการอัดกลีบ มาใช้เพื่อศึกษาอิทธิพลของจำนวนกลีบกระดาษ น้ำหนักต่อพื้นที่ของกลีบกระดาษ และตำแหน่งแกนอัดกลีบที่มีต่อความสม่ำเสมอของรอยย่น ดังจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

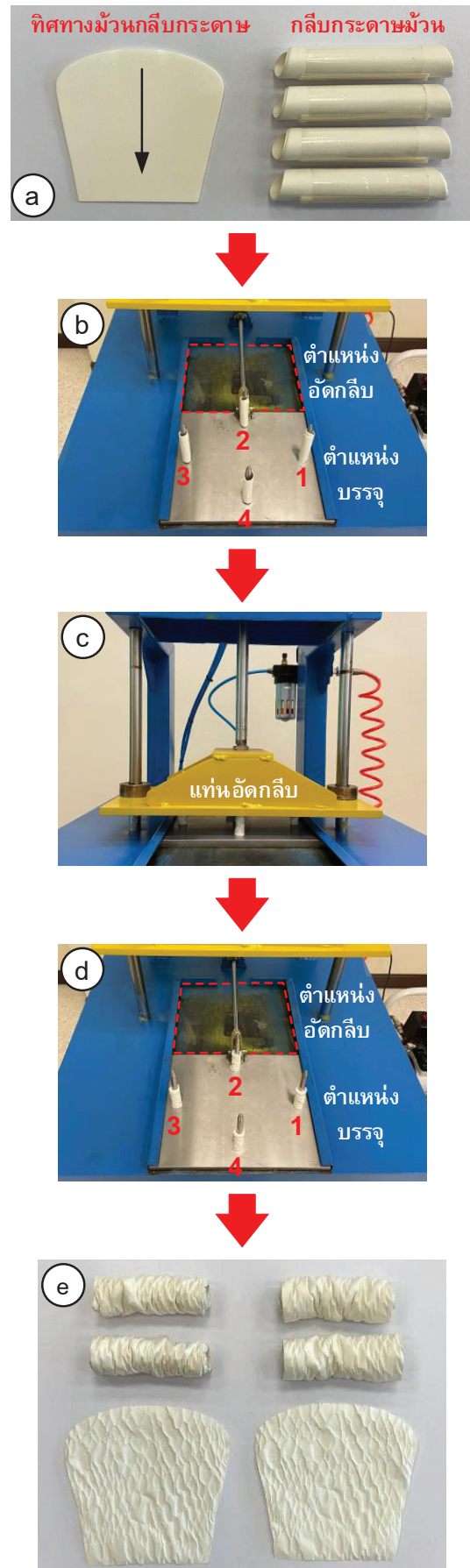


Figure 7 Procedures for compressing to crease the paper petals

ผลการทดลองและวิจารณ์

Table 1 แสดงลักษณะรอยย่นของกลีบกระดาษ 55 gsm หลังการอัดกลีบที่ความดันลมอัด 0.6 MPa ของกลีบกระดาษจำนวน 6, 8, 10, 12, 14, และ 16 แผ่นต่อม้วนที่ตำแหน่งแกนอัดกลีบ 1, 2, 3, และ 4 โดยผลการอัดกลีบกระดาษจำนวน 6 แผ่นต่อม้วน พบว่ารอยย่นค่อนข้างชัดเจนและสม่ำเสมอ แต่ที่แกนอัดกลีบ 3 และ 4 พบว่าพื้นที่บางส่วนมีรอยย่นขนาดใหญ่ ต่อมาการอัดกลีบกระดาษจำนวน 8 แผ่นต่อม้วน พบว่ารอยย่นโดยทั่วไปค่อนข้างชัดเจนและกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วพื้นที่ของกลีบกระดาษทั้ง 4 แกน และยังพบว่า มีผลที่คล้ายคลึงกันกับการอัดกลีบกระดาษจำนวน 10 แผ่นต่อม้วน ต่อมาการอัดกลีบกระดาษจำนวน 12 แผ่นต่อม้วน พบว่ารอยย่นโดยทั่วไปค่อนข้างชัดเจนและสม่ำเสมอ แต่ที่แกนอัดกลีบ 2, 3, และ 4 พบว่าพื้นที่บางส่วนมีรอยย่นขนาดใหญ่ บริเวณส่วนบนและส่วนล่างของกลีบกระดาษ ในขณะที่การอัดกลีบกระดาษจำนวน 14 แผ่นต่อม้วน พบว่ารอยย่นโดยทั่วไปค่อนข้างชัดเจนและสม่ำเสมอ แต่บางพื้นที่ของกลีบกระดาษมีรอยย่นขนาดใหญ่บริเวณส่วนบนและส่วนล่าง และสุดท้ายการอัดกลีบกระดาษจำนวน 16 แผ่นต่อม้วน พบว่ารอยย่นที่เกิดขึ้นค่อนข้างชัดเจน แต่เกิดขึ้นไม่ทั่วพื้นที่ของกลีบกระดาษ โดยที่แกนอัดกลีบ 1, 2, และ 3 พบว่ามีพื้นที่ขนาดใหญ่ที่ไม่มีรอยย่นบริเวณส่วนกลางและยาวตลอดความสูงของกลีบกระดาษ ในขณะที่แกนอัดกลีบ 4 พบว่ามีรอยย่นขนาดใหญ่บริเวณส่วนกลางกลีบกระดาษ

Table 2 แสดงลักษณะรอยย่นของกลีบกระดาษ 65 gsm หลังการอัดกลีบที่ความดันลมอัด 0.6 MPa ของกลีบกระดาษจำนวน 6, 8, 10, 12, 14, และ 16 แผ่นต่อม้วนที่ตำแหน่งแกนอัดกลีบ 1, 2, 3, และ 4 โดยผลการอัดกลีบกระดาษจำนวน 6 แผ่นต่อม้วน พบว่ารอยย่นค่อนข้างชัดเจนและสม่ำเสมอ แต่ที่แกนอัดกลีบ 4 พบว่าบางพื้นที่ของกลีบกระดาษมีรอยย่นขนาดใหญ่ ต่อมาการอัดกลีบกระดาษจำนวน 8 แผ่นต่อม้วน พบว่ารอยย่นโดยทั่วไปค่อนข้างชัดเจนและสม่ำเสมอทั่วพื้นที่ของกลีบกระดาษ และเมื่อพิจารณาการอัดกลีบกระดาษจำนวน 10 แผ่นต่อม้วน พบว่ารอยย่นโดยทั่วไปค่อนข้างชัดเจนและกระจายสม่ำเสมอทั่วบริเวณของกลีบกระดาษ ส่วนการอัดกลีบกระดาษจำนวน 12 แผ่นต่อม้วน พบว่ารอยย่นโดยทั่วไปค่อนข้างชัดเจนและสม่ำเสมอ แต่มีรอยย่นขนาดใหญ่บริเวณพื้นที่ส่วนบนและส่วนล่างของกลีบกระดาษ ในขณะที่การอัดกลีบกระดาษจำนวน 14 แผ่นต่อม้วน พบว่ารอยย่นโดยทั่วไปค่อนข้างชัดเจน และพบว่าที่แกนอัดกลีบ 1, 2, และ 3 มีรอยย่นขนาดใหญ่บริเวณพื้นที่ส่วนบนและส่วนล่าง ในขณะที่แกนอัดกลีบ 4 พบว่ามีรอยย่นขนาดใหญ่บริเวณด้านขวาและยาวตลอดความสูงของกลีบกระดาษ และสุดท้ายการอัดกลีบกระดาษจำนวน 16 แผ่นต่อม้วน

พบว่ารอยย่นค่อนข้างชัดเจน แต่เกิดขึ้นไม่ทั่วพื้นที่กลีบกระดาษ และพบว่าพื้นที่ขนาดใหญ่ที่ไม่มีรอยย่นเกิดขึ้นบริเวณส่วนกลางและยาวตลอดความสูงของกลีบกระดาษ โดยที่แกนอัดกลีบ 1 พบว่ามีพื้นที่ที่ไม่มีรอยย่นน้อยที่สุด รองลงมาคือแกนอัดกลีบ 4 และมากที่สุดคือแกนอัดกลีบ 2 และ 3

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของจำนวนกลีบกระดาษที่มีต่อความสม่ำเสมอของรอยย่น พบว่าจำนวนกลีบกระดาษมากจะทำให้เกิดความสม่ำเสมอของรอยย่นลดลงและต้องใช้แรงอัดกลีบมากขึ้น ดังจะเห็นได้จากเปรียบเทียบผลการอัดกลีบกระดาษ 65 gsm จำนวน 14 และ 16 แผ่นต่อม้วน พบว่ากลีบกระดาษจำนวน 14 แผ่นต่อม้วน มีรอยย่นเกิดขึ้นเกือบทั่วพื้นที่ของกลีบกระดาษ โดยบางพื้นที่ของกลีบกระดาษมีรอยย่นขนาดใหญ่ ในขณะที่กลีบกระดาษจำนวน 16 แผ่นต่อม้วน พบว่ามีรอยย่นเกิดขึ้นไม่ทั่วพื้นที่ของกลีบกระดาษอย่างชัดเจน โดยพื้นที่บริเวณส่วนกลางของกลีบกระดาษจะไม่มีรอยย่น ในขณะที่รอยย่นจะเกิดขึ้นด้านซ้ายและด้านขวาของกลีบกระดาษ เหตุการณ์นี้เป็นผลมาจากจำนวนกลีบกระดาษที่แตกต่างกัน ทำให้กลีบกระดาษที่มีจำนวนกลีบมากกว่าจะมีความหนาแน่นกว่าและมีพื้นที่รับแรงอัดกลีบมากกว่า ซึ่งหมายความว่ากลีบกระดาษม้วนจะมีแรงต้านการอัดมากกว่า ดังนั้นเมื่อใช้แรงอัดกลีบเท่ากันจึงทำให้การอัดกลีบกระดาษจำนวน 16 แผ่นต่อม้วน มีพื้นที่เรียบมากกว่าการอัดกลีบกระดาษจำนวน 14 แผ่นต่อม้วน ส่วนรอยย่นจะที่เกิดขึ้นด้านซ้ายและด้านขวาของกลีบกระดาษ 65 gsm ที่มีจำนวน 16 แผ่นต่อม้วน เป็นผลมาจากรูปร่างของกลีบกระดาษที่คล้ายกับสี่เหลี่ยมคางหมู และเมื่อนำกลีบกระดาษม้วนก็จะทำให้บริเวณส่วนปลายของกลีบกระดาษม้วน (ด้านซ้ายและด้านขวาของกลีบกระดาษ) มีความหนาน้อยกว่าส่วนกลาง จึงส่งผลให้มีแรงต้านการอัดน้อยกว่า ทำให้แท่นอัดกลีบสามารถอัดกลีบกระดาษม้วนให้ยุบตัวลงไปได้ แต่แรงอัดกลีบที่ใช้ไม่เพียงพอต่อการอัดบริเวณส่วนกลางของกลีบกระดาษม้วน เพราะเป็นส่วนที่มีความหนาแน่นมากที่สุด ซึ่งเป็นบริเวณที่มีแรงต้านการอัดสูงสุดของกลีบกระดาษม้วน โดยจากปรากฏการณ์นี้ทำให้ทราบว่าแรงอัดกลีบที่เกิดขึ้นจากกระบอกสูบ 2A ที่ความดันลมอัด 0.6 MPa ไม่สอดคล้องกับจำนวนกลีบกระดาษม้วนดังกล่าว และเกิดขึ้นในทำนองเดียวกันกับการอัดกลีบกระดาษ 55 gsm จำนวน 16 แผ่นต่อม้วน แต่อย่างไรก็ตาม หากแรงอัดกลีบที่ใช้มากพอที่จะอัดกลีบกระดาษม้วนให้ยุบตัวลงไปตามแนวแกนอัดกลีบจนเหลือความสูงตามที่กำหนดไว้ในการออกแบบ ซึ่งเป็นความสูงที่ทำให้กลีบกระดาษเกิดการยุบตัวได้ทั้งหมด ก็จะทำให้ได้กลีบกระดาษที่มีรอยย่นที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ ดังจะเห็นได้จากผลการอัดกลีบกระดาษ 55 gsm จำนวน 6 ถึง 14 แผ่นต่อม้วน และการอัดกลีบกระดาษ 65 gsm จำนวน 6 ถึง 12 แผ่นต่อม้วน ซึ่งรอยย่นมีขนาดค่อนข้างใกล้เคียง

Table 1 Appearances of creases on the paper petals of 55 gsm at operating pressure of 0.6 MPa

จำนวนแผ่นต่อม้วน	แกนอัดกลีบ 1	แกนอัดกลีบ 2	แกนอัดกลีบ 3	แกนอัดกลีบ 4
6				
8				
10				
12				
14				
16				

เคียงกันและสม่ำเสมอทั่วพื้นที่ของกลีบกระดาษ

ต่อมาหากพิจารณาถึงอิทธิพลของน้ำหนักต่อพื้นที่ (กรัมต่อตารางเมตร) ของกลีบกระดาษที่มีต่อความสม่ำเสมอของรอยย่น พบว่าน้ำหนักต่อพื้นที่ของกลีบกระดาษมากจะทำให้ความสม่ำเสมอของรอยย่นลดลงและต้องใช้แรงอัดกลีบมากขึ้น ดังจะเห็นได้จากการเปรียบเทียบผลการอัดกลีบ

ระหว่างกลีบกระดาษ 55 และ 65 gsm ที่จำนวน 16 แผ่นต่อม้วน ซึ่งจะพบว่ามิลักษณะรอยย่นที่คล้ายกัน กล่าวคือรอยย่นเกิดขึ้นไม่ทั่วพื้นที่ของกลีบกระดาษอย่างชัดเจน โดยมีพื้นที่บริเวณส่วนกลางของกลีบกระดาษไม่มีรอยย่น โดยกลีบกระดาษ 65 gsm จะมีพื้นที่ที่ไม่มีรอยย่นมากกว่า เหตุผลที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากน้ำหนักต่อพื้นที่ของกลีบกระดาษที่

แตกต่างกัน ทำให้กลีบกระดาษที่มีน้ำหนักต่อพื้นที่มากกว่า จะมีความหนาแน่นมากกว่า และส่งผลให้กลีบกระดาษมีพื้นที่รับแรงอัดกลีบมากกว่า ซึ่งหมายความว่ากลีบกระดาษมีพื้นที่รับแรงอัดมากกว่า ดังนั้นเมื่อใช้แรงอัดกลีบเท่ากันจึงทำให้กลีบกระดาษ 65 gsm มีพื้นที่เรียบมากกว่ากลีบกระดาษ

55 gsm แต่อย่างไรก็ตาม หากแรงอัดกลีบที่ใช้มีค่ามากกว่า แรงต้านการอัดของกลีบกระดาษมีพื้นที่ และสามารถอัดให้กลีบกระดาษมีรอยยุบตัวลงไปได้ตามระยะที่กำหนดไว้ ก็จะทำให้กลีบกระดาษมีรอยย่นที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ

Table 2 Appearances of creases on the paper petals of 65 gsm at operating pressure of 0.6 MPa

จำนวนแผ่นต่อม้วน	แกนอัดกลีบ 1	แกนอัดกลีบ 2	แกนอัดกลีบ 3	แกนอัดกลีบ 4
6				
8				
10				
12				
14				
16				

สำหรับอิทธิพลของตำแหน่งแกนอัดกลีบที่มีต่อความสม่ำเสมอของรอยย่น พบว่าตำแหน่งแกนอัดกลีบไม่มีผลต่อความสม่ำเสมอของรอยย่นอย่างมีนัยสำคัญ ดังจะเห็นได้จากลักษณะรอยย่นที่ตำแหน่งแกนอัดกลีบต่างๆ จะมีขนาดและความสม่ำเสมอของรอยย่นใกล้เคียงกัน เหตุผลที่เป็นเช่นนี้เพราะตำแหน่งที่ติดตั้งแกนอัดกลีบจะอยู่ในแนวระยะรัศมี 95 mm ที่ตำแหน่ง 0, 90, 180, และ 270 องศา รอบจุดศูนย์กลางของแท่งอัดกลีบซึ่งเป็นจุดที่ยึดติดกับปลายก้านสูบ 2A ดังนั้นจึงส่งผลให้แรงอัดกลีบสามารถกระจายไปยังแกนอัดกลีบต่างๆ ใกล้เคียงกัน และทำให้แรงอัดกลีบที่กระทำกับกระดาษม้วนในแต่ละแกนอัดกลีบมีค่าใกล้เคียงกัน จึงทำให้รอยย่นของกลีบกระดาษค่อนข้างสม่ำเสมอใกล้เคียงกัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงความสม่ำเสมอของรอยย่นที่เกิดขึ้นกับกลีบกระดาษแต่ละแผ่นในม้วนเดียวกัน พบว่ากลีบกระดาษม้วนเดียวกันจะมีความสม่ำเสมอของรอยย่นใกล้เคียงกัน เนื่องจากการม้วนกลีบกระดาษและใช้เทปกาวยึดให้คงรูป จะทำให้กลีบกระดาษแต่ละแผ่นติดแน่นเหมือนเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งส่งผลให้รอยย่นที่เกิดขึ้นจากการอัดกลีบมีลักษณะคล้ายคลึงกันทั้งหมด

สรุปผล

เครื่องอัดกลีบกระดาษแบบกึ่งอัตโนมัติด้วยระบบนิวแมติก ประกอบด้วยวงจรวอร์วอร์นิวแมติกแบบสองกระบอกสูบสำหรับป้อนและอัดกลีบกระดาษ และวงจรไฟฟ้าควบคุมการทำงานของวงจรวอร์วอร์นิวแมติก โดยมีรีเลย์ตั้งเวลาทำหน้าที่ควบคุมลำดับขั้นการทำงานของกระบอกสูบผ่านโซลินอยด์วาล์ว และมีระบบสั่งงานด้วยการกดสวิทช์ปุ่มกดพร้อมกันสองมือ เพื่อความปลอดภัยขณะปฏิบัติงาน โดยผู้ปฏิบัติงานจะมีหน้าที่สวมกลีบกระดาษม้วนเข้ากับแกนอัดกลีบ หลังจากนั้นกดสวิทช์สั่งให้เครื่องอัดกลีบทำงาน และนำกลีบกระดาษม้วนออกหลังการอัดกลีบเสร็จสิ้น โดยเครื่องอัดกลีบสามารถอัดกลีบได้พร้อมกันครั้งละ 4 ตำแหน่ง และมีความดันลมอัดใช้งานสูงสุดอยู่ที่ 0.8 MPa

จากผลการอัดกลีบกระดาษที่ความดันลมอัด 0.6 MPa พบว่ากลีบกระดาษ 55 gsm จำนวน 6 ถึง 14 แผ่นต่อม้วน และกลีบกระดาษ 65 gsm จำนวน 6 ถึง 12 แผ่นต่อม้วน มีลักษณะรอยย่นค่อนข้างชัดเจนและสม่ำเสมอทั่วพื้นที่ของกระดาษ ส่วนการอัดกลีบกระดาษ 65 gsm จำนวน 14 แผ่นต่อม้วน พบว่ารอยย่นค่อนข้างชัดเจนแต่ขนาดไม่สม่ำเสมอ ในขณะที่การอัดกลีบกระดาษ 55 และ 65 gsm ที่มีจำนวน 16 แผ่นต่อม้วน พบว่ารอยย่นเกิดขึ้นไม่ทั่วพื้นที่ของกลีบกระดาษ นอกจากนี้พบว่าจำนวนกลีบกระดาษและน้ำหนักต่อพื้นที่มากจะทำให้ความสม่ำเสมอของรอยย่นลดลงและต้องใช้แรงอัดกลีบที่มากขึ้น ส่วนตำแหน่งของแกนอัดกลีบพบว่าไม่มีผล

ต่อความสม่ำเสมอของรอยย่นอย่างมีนัยสำคัญ และสุดท้ายพบว่ากลีบกระดาษม้วนเดียวกันจะมีลักษณะรอยย่นที่คล้ายคลึงกัน แต่อย่างไรก็ตาม หากแรงอัดกลีบที่ใช้มากพอที่จะอัดให้กลีบกระดาษม้วนยุบตัวลงไปตามระยะที่กำหนด ก็จะทำให้ได้กลีบกระดาษที่มีรอยย่นที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ได้สนับสนุนการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- ชัยนนท์ ศรีสุภินานนท์. (2553). *นิวแมติกและไฮดรอลิก (ระบบอัตโนมัติแบบประหยัด)*. ไอกรุป เพรส.
- เด่น ดอกพิมาย. (2552). *การควบคุมนิวแมติกสำหรับอุตสาหกรรมอัตโนมัติ*. ท้อป.
- ปานเพชร ชินินทร และขวัญชัย สินิกพิทยสมบูรณ์. (2531). *นิวแมติกอุตสาหกรรม*. ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- วรวงศ์ บุญช่วยแทน. (2558). *มทร.ศรีวิชัย มอบ "เครื่องอัดกลีบดอกไม้จันทร์" แก่ชุมชน เพิ่มผลผลิต เพิ่มรายได้*. <https://talung.gimyong.com/index.php?topic=397397.0>
- วรวงศ์ บุญช่วยแทน, วรธนพร ชีววุฒิพงศ์, วีรวัฒน์ มีแสง และคณะ. (2560). การพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการอัดกลีบดอกไม้กระดาษ. ใน: *การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2560* (น. 238-246). คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- อำนาจ ทองคำ. (2556). *การพัฒนาเครื่องผลิตดอกไม้จันทร์เพื่อวิสาหกิจชุมชนวัดไร่ไสมนรินทร์*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ.
- Barber, A. (1997). *Pneumatic handbook*. Elsevier.
- Beater, P. (2006). *Pneumatic drives-system design, modelling and control*. Springer.
- Croser, P. & Ebel, F. (2002). *Pneumatics: Basic Level*. Festo Didactic.
- Jagadeesha, T. (2015). *Pneumatics: Concepts, Design and Applications*. Universities Press.
- Prede, G. & Scholz, D. (2002). *Electropneumatics: Basic Level*. Festo Didactic.
- SMC Corporation. (1997). *Basic Pneumatics: a manual for fluid power components and practical applications*. SMC Pneumatics.

ผลกระทบของอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อหน้าไอระเหยต่อสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอนวงจรถัดภายใต้สภาวะสุญญากาศ

Effect of the length to inner diameter ratio of vapor tube on the performance of a vacuum closed loop thermosyphon

สรารวุฒิ สิริเกษมสุข¹, ธนาพล สุขชนะ^{1*}

Sarawut Sirikasemsuk¹, Thanaphol Sukchana^{1*}

Received: 8 February 2022 ; Revised: 3 March 2022 ; Accepted: 23 March 2022

บทคัดย่อ

การศึกษาผลกระทบขนาดของท่อหน้าไอระเหยที่มีผลต่อสมรรถนะในการทำงานของเทอร์โมไซฟอนวงจรถัดภายใต้สภาวะสุญญากาศ เพื่อตรวจสอบสมรรถนะโดยรวมของเทอร์โมไซฟอนวงจรถัด โดยเทอร์โมไซฟอนวงจรถัดทำด้วยท่อทองแดงทรงกระบอกมีปริมาตรความจุ 3000 ซีซี เติมน้ำกลั่นเป็นสารทำงานในปริมาณ 10% (300 ซีซี) ของปริมาตรความจุ ต้มน้ำด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาด 530, 1085, 1640, 2210 2780 และ 3350 W ทดสอบกับท่อหน้าไอระเหยที่ทำด้วยท่อทองแดงชนิด L (Type L) 7 ขนาด ตามมาตรฐาน ASTM B88 โดยมีความยาวส่วนการทดสอบคงที่เท่ากับ 400 mm คิดเป็นอัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน (L/d) เท่ากับ 82.82, 49.94, 36.63, 28.90, 23.65, 20.05 และ 17.50 ทดลองโดยภายในเทอร์โมไซฟอนอยู่ภายใต้สภาวะเริ่มต้นเป็นสุญญากาศ คอนเดนเซอร์ระบายความร้อนด้วยน้ำอุณหภูมิคงที่ 25°C และอัตราการไหลคงที่เท่ากับ 1 kg/min ผลการทดลองพบว่าค่า L/d มีผลกระทบต่อสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอนวงจรถัดเมื่อให้ความร้อนในปริมาณคงที่อุณหภูมิอิ่มตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่อ L/d มากกว่า 20 นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความต้านทานความร้อนรวมลดลงเมื่อ L/d ลดลง โดยค่าความต้านทานความร้อนรวมมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.0343°C/W เมื่อปริมาณความร้อนเท่ากับ 2780 W ด้วย L/d เท่ากับ 17.50

คำสำคัญ: ไอหน้า เทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรถัด อุณหภูมิอิ่มตัว สภาวะสุญญากาศ การควบคุมอุณหภูมิ

Abstract

The effect of steam pipe size on the performance of closed loop thermosyphon under vacuum condition was studied to determine the relationship of heat load to pipe size affecting the saturation temperature and overall performance of the boiler. A closed loop thermosyphon was made of cylindrical copper pipes with a capacity of 3000 cc. Distilled water was used as the working fluid at 10% (300 cc) of capacity volume. The water was boiled by electric heaters of 530, 1085, 1640, 2210, 2780 and 3350 W. The steam pipes for testing were made of type L copper pipes of 7 sizes in accordance with ASTM B88 STD with a test section length of 400 mm. Length to the inside diameter (L/d) of pipe was in the ratio of 82.82, 49.94, 36.63, 28.90, 23.65, 20.05 and 17.50. The boiler was under vacuum initial condition in the experiment, the water cooled condenser had a constant temperature of 25°C and constant flow rate of 1 kg/min. The results showed that the L/d value had an effect on the closed loop thermosyphon performance and when heated at a constant volume, the saturation temperature increased with the L/d and was greater than 20. The total thermal resistance was also decreased with a decrease in L/d . The lowest total thermal resistance of 0.0343°C/W was when the heat load content was 2780 W with L/d of 17.50.

Keywords: steam, close loop thermosyphon, saturated temperature, vacuum condition, temperature controlling

¹ อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ตำบลหันตรา อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000

* ติดต่อ: ton0019@hotmail.com, thanaphol.s@rmutsb.ac.th

¹ Lecture, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Tambon Hantra, Phranakhon Si Ayutthaya 13000 Thailand

* Corresponding author: e-mail: ton0019@hotmail.com, thanaphol.s@rmutsb.ac.th

บทนำ

น้ำเป็นสารทำงานที่สามารถถ่ายโอนความร้อนไปใช้งานได้ด้วยการเปลี่ยนสถานะด้วยการรับความร้อนจนเป็นไอน้ำ และสามารถเคลื่อนที่ไปด้วยความดันไอโดยไม่ต้องใช้พลังงานภายนอกในการขับเคลื่อน สำหรับเทอร์โมไซฟอนวงจรถัดทั่วไปมักสร้างขึ้นเพื่อเป็นอุปกรณ์ระบายความร้อน หากใช้น้ำเป็นสารทำงานที่อยู่ภายในระบบ น้ำจะทำหน้าที่รับและถ่ายโอนความร้อนด้วยการเดือดระเหยและความดันไอลอยเวียนเป็นวงจรรอบอยู่ในระบบปิด จากการศึกษาทางานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรถัดใช้น้ำเป็นสารทำงาน เทอร์โมไซฟอนขนาดจิ๋วรวมถึงการประยุกต์ใช้งานสำหรับงานวิจัยเทอร์โมไซฟอนที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน ของ (Aghel *et al.*, 2017 ; Jafari *et al.*, 2017 ; Lataoui & Jemni, 2017 ; Naresh & Balaji, 2017 ; Kim *et al.*, 2018) ผลการศึกษาโดยสรุปพบว่าปริมาณการเติมน้ำที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 20 - 50% ของปริมาตรส่วนทำระเหย (ฮีวโปเรเตอร์) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับรูปร่างลักษณะในการออกแบบ โดยพิจารณาจากความต้านทานความร้อนรวมต่ำสุด นอกจากอัตราการเติมน้ำที่เหมาะสมแล้วยังพบว่าการออกแบบคอนเดนเซอร์แบบไหลขวา (Aghel *et al.*, 2017) และครีบบภายในคอนเดนเซอร์ (Kim *et al.*, 2018) ช่วยเพิ่มสมรรถนะได้ 10-17% นอกจากนี้ (Kiseev & Sazhin, 2019) ได้ทดสอบเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรถัดที่มีส่วนทำระเหยรูปทรงเป็นหม้อต้มโดยใช้สารทำงานหลักเป็นน้ำกลั่น ซึ่งรูปแบบของเทอร์โมไซฟอนระบบปิดนั้นมีลักษณะใกล้เคียงกันจึงมั่นใจได้ว่าจะสามารถถ่ายโอนความร้อนได้เช่นเดียวกัน ในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวกับเทอร์โมไซฟอนและการประยุกต์ใช้งานในประเทศไทยนั้นพบว่า (Dangton *et al.*, 2018) ได้ออกแบบสร้างหม้อต้มเทอร์โมไซฟอนกำเนิดไอน้ำเร็ว สามารถใช้ในการผลิตไอน้ำได้รวดเร็วกว่าเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดาและแบบท่อไฟ โดยใช้เทคนิคการพ่นน้ำให้เป็นฝอยละอองด้วยหัวฉีด (Cansee, 2020) พบว่าการผลิตไอน้ำสำหรับนึ่งก้อนเชื้อเห็ดด้วยเทอร์โมไซฟอนที่มีท่อรับความร้อนด้านล่างและท่อรับความร้อนบริเวณปล่องไฟ มีประสิทธิภาพในการผลิตไอน้ำและประหยัดเชื้อเพลิงได้มากกว่าแบบไม่มีท่อรับความร้อนบริเวณปล่องไฟก่อนหน้านั้น (Sa-adchom *et al.*, 2013) ได้ประยุกต์ใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดอุณหภูมิ 120-140°C เพื่ออบแห้งเนื้อปลาบดแผ่นซึ่งพบว่าอุณหภูมิของไอน้ำมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการลดลงของความชื้น ต่อมา (Nuthong & Uengkimbuan, 2014) ได้ศึกษาการอบพริกไทยด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 120-160°C ซึ่งได้ผลเช่นเดียวกันกับ (Sa-adchom *et al.*, 2013) จากงานวิจัยในอดีตจะเห็นได้ว่าการประยุกต์ใช้ไอน้ำในการอบแห้งเป็นการใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 100°C โดยตรง ซึ่งการใช้ไอน้ำโดยตรงนั้นมีความอันตรายมีความซับซ้อนใน

การควบคุมระบบการทำงานและสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงถึงแม้ว่าจะสามารถใช้กับเชื้อเพลิงที่มีความหลากหลายก็ตาม

การศึกษาวิจัยผลกระทบของขนาดท่อนำไอระเหยนี้เป็นงานวิจัยต่อยอดจากงานวิจัยของ (Sukchana, 2020 ; Jaiboonma and Sukchana, 2022) ที่ได้ออกแบบสร้างระบบการไหลเวียนของไอน้ำที่ระเหยและของเหลวที่เกิดจากการควบแน่นของเทอร์โมไซฟอนในระบบปิดที่มีส่วนการทำระเหยเป็นหม้อต้ม พร้อมทั้งได้ศึกษาหาปริมาณการเติมสารทำงานที่เป็น น้ำ เอทานอล และแอซิโตน ที่เหมาะสมเพื่อใช้เป็นสารทำงาน ในการวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาทดสอบตัวแปรขนาดของท่อนำไอระเหยที่จะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอนวงจรถัด ในรูปแบบของอุณหภูมิมีตัวและค่าความต้านทานความร้อนรวม นอกจากการทดสอบตัวแปรขนาดของท่อนำไอระเหยที่เหมาะสมแล้ว ยังมีวัตถุประสงค์ในการประยุกต์ใช้งานเพื่อการออกแบบระบบการอบแห้งแบบสัมผัสผนังท่อโดยตรง และอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิต่ำโดยการแลกเปลี่ยนความร้อนกับไอน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C ไปใช้งานได้ เนื่องจากระบบเป็นแบบปิดอยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศ จะช่วยให้ประหยัดพลังงานและใช้ได้กับแหล่งพลังงานได้หลากหลายยิ่งขึ้น เช่น เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานความร้อนทิ้งจากกระบวนการผลิต เป็นต้น

การทดลอง

1. อุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์ทดลองเทอร์โมไซฟอนวงจรถัดดัง Figure 1 ประกอบด้วย ส่วนการทำระเหย (Evaporator) ทำด้วยท่อทองแดงหนา 3 mm ขนาดความจุ 3,000 cc มีฮีทเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V สำหรับให้ความร้อนในการทดลอง โดยมีท่อสำหรับสอดใส่เพื่อไม่ให้สัมผัสกับน้ำโดยตรงและสามารถเปลี่ยนขนาดกำลังของฮีทเตอร์ได้สะดวกในการทดลอง ติดตั้งท่อนำไอระเหย (Vapor line) และท่อของเหลวไหลกลับ (Liquid line) เป็นท่อทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 25.4 mm (1 นิ้ว) ให้อยู่ในแนวตั้ง (90°) โดยต่อให้เป็นระบบปิด มีข้อต่อ (Fitting) สำหรับการปรับเปลี่ยนขนาดของท่อนำไอระเหยในการทดลอง มีความยาว 400 mm ซึ่งท่อนำไอระเหยในการทดลองเป็นท่อทองแดงชนิด L (Type L) ตามมาตรฐานของ ASTM B88 ดัง Table 1 โดยคิดเป็นขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน (Inner diameter, ID) จากขนาดมาตรฐาน (Standard size) ลบด้วยสองเท่าของความหนามาตรฐานของท่อทองแดง Type L ในการทำงานของเทอร์โมไซฟอนวงจรถัดจะมีอุปกรณ์ควบแน่น (Condenser) เป็นแบบท่อสองชั้น (Double pipe heat exchanger) ที่ระบายความร้อนด้วยน้ำเย็นอุณหภูมิคงที่ เพื่อให้เกิดการระเหยและ

การควบคุมเป็นวงจรรออยู่ภายใต้ระบบปิดที่เป็นสุญญากาศ โดยน้ำเย็นจะถูกส่งมาจากชุดทำน้ำเย็น (Cold water unit) สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ ($\pm 0.2^{\circ}\text{C}$) ได้ตลอดการทดลอง

Table 1 The ratio of inner diameter to the length of the seam pipe (ASTM B88)

Standard size (mm)	ID (d), (mm)	L/d
6.35	4.83	82.82
9.53	8.01	49.94
12.70	10.92	36.63
15.88	13.84	28.90
19.05	16.91	23.65
22.23	19.95	20.05
25.40	22.86	17.50

2. เครื่องมือวัดและการวัด

ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในการทดลองประกอบด้วย อุณหภูมิ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำหล่อเย็น และปริมาณความร้อนจากฮีตเตอร์ไฟฟ้า และมีค่าความไม่แน่นอนสูงสุด (Uncertainty) ของพารามิเตอร์ที่ได้จากเครื่องมือวัดดัง Table 3 โดยวัดอุณหภูมิด้วยสายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ที่มีค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดเท่ากับ (Error) $\pm 0.1\%$ ร่วมกับเครื่องบันทึกอุณหภูมิแบบตัวเลข (Data logger) ยี่ห้อ GRAPHTEC รุ่น GL820 ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 0.05\%$ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำหล่อเย็น วัดด้วยวิธีการตวงและชั่งด้วยเครื่องชั่งแบบตัวเลขรุ่น BL-01 ที่มีย่านการวัดสูงสุด 3,000 g และมีค่าความละเอียด 1 กรัม ในส่วนของปริมาณความร้อนของฮีตเตอร์วัดกระแสไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าแบบตัวเลขยี่ห้อ MASTECH รุ่น M9805G ซึ่งมีย่านการวัดกระแส 200 แอมแปร์ แล้วคำนวณเป็นกำลังของฮีตเตอร์ไฟฟ้าด้วยสมการที่ (1) ซึ่งได้ค่าในการวัดและคำนวณดัง Table 2

Table 2 The heater power test values

Power according (W)	Power test (W)
500	530
1000	1085
1500	1640
2000	2210
2500	2780
3000	3350

Table 3 The uncertainty of the parameters from the measurements in the experiment

Parameters	Maximum uncertainties
Temperature	$\pm 0.14^{\circ}\text{C}$
Cooling water mass flow rate	$\pm 0.166 \text{ g/s}$
Heat load	$\pm 4.02\%$

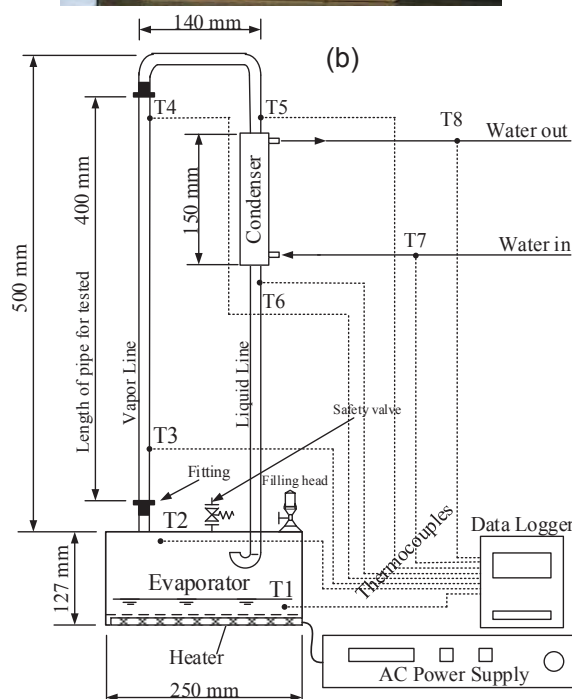


Figure 1 (a) A vacuum closed loop thermosyphon for tested (b) Experimental equipment diagram

3. การวัดอุณหภูมิ

ในการวัดอุณหภูมินั้นวัดด้วยสายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K โดย T1 เป็นการวัดอุณหภูมิของของเหลวอิมิตัวโดยมีหัววัด (Probe) สัมผัสกับของเหลว และ T2 วัดอุณหภูมิของไออิมิตัวเพื่อตรวจสอบการเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่ง จะทำให้ทราบว่ามีปริมาณน้ำที่เติมในระบบนั้นเพียงพอหรือไม่ จุดวัดอุณหภูมิ T3, T4, T5 และ T6 เป็นการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลที่ผิวด้านนอกของท่อทองแดง เพื่อใช้สำหรับสังเกตพฤติกรรมการไหลของไอน้ำ ซึ่งจุดวัด T3, T4 และ T5 ใช้สังเกตการเคลื่อนที่ของไอน้ำภายในท่อไอระเหย จุดวัด T6 ใช้สังเกตการควบแน่นไอน้ำเป็นของเหลว และสังเกตสภาวะคงตัวของระบบการถ่ายโอนความร้อนเมื่ออุณหภูมิ T1-T8 คงที่ทั้งหมด ก่อนบันทึกผลการทดลอง สำหรับจุดวัดอุณหภูมิ T7 และ T8 เป็นการติดตั้งให้ส่วนปลายของเทอร์โมคัปเปิลสัมผัสกับน้ำหล่อเย็นโดยตรงเพื่อใช้ผลต่างอุณหภูมิ ($\Delta T = T8 - T7$) คำนวณหาปริมาณความร้อนที่สามารถถ่ายโอนความร้อนจากการเดือดไปยังคอนเดนเซอร์ด้วยสมการที่ (2)

4. เงื่อนไขในการทดลอง

การทดลองเป็นการหาความสัมพันธ์ของปริมาณความร้อนและขนาดของท่อไอระเหยที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอนวงจรปิด ทั้งอุณหภูมิอิมิตัว ความดันอิมิตัว และค่าความต้านทานความร้อนรวมของการถ่ายโอนความร้อน โดยใช้ Vacuum compressor รุ่น VE125N ทำระบบของเทอร์โมไซฟอนให้เป็นสุญญากาศ ซึ่งได้แรงดันสุญญากาศในระบบตอนเริ่มต้นครั้งแรกเท่ากับ 2 kPa จากนั้นเติมน้ำกลั่นเป็นสารทำงานด้วยปริมาตร 300 ซีซี หรือเท่ากับความจุ 10% ของปริมาตรเทอร์โมไซฟอน (Sukchana, 2020) แล้วปิดระบบให้อยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศ ทดลองโดยให้ความร้อนแบบคงที่ (Heat load) ด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าเท่ากับ 530, 1085, 1640, 2210, 2780 และ 3350 W ไอน้ำจะไหลผ่านท่อไอระเหยที่มีช่วงทดสอบยาว 400 mm และมีขนาดดัง Table 1 จะได้อัตราส่วน L/d ที่ใช้ในการทดลอง เท่ากับ 82.82, 49.94, 36.63, 28.90, 23.65, 20.05 และ 17.50 คอนเดนเซอร์หล่อเย็นด้วยน้ำเย็นอุณหภูมิคงที่ 25°C ด้วยอัตราการไหลเชิงมวล (\dot{m}) เท่ากับ 16.66×10^{-3} kg/s โดยการทดลองในแต่ละเงื่อนไขนั้นจะทำการทดลองซ้ำจำนวน 5 ครั้ง แล้วตัดผลการทดลองที่มีค่าอุณหภูมิอิมิตัวสูงสุดและต่ำสุดออก จะเหลือผลที่ได้จากการทดลองจำนวน 3 ครั้ง จากนั้นนำมาเฉลี่ยเป็นผลการทดลองและนำเสนอเป็นผลในการวิจัย

5. การคำนวณผลการทดลอง

ในการคำนวณผลที่ได้จากการทดลองตามเงื่อนไขการทดลองนั้น สามารถคำนวณโดยเริ่มจากการตรวจสอบ

กำลังของฮีตเตอร์ไฟฟ้า (P_E) ที่ใช้เป็นแหล่งความร้อนด้วยสมการที่ (1) (Sukchana, 2020) โดยการวัดแรงเคลื่อน (V) และกระแสไฟฟ้า (I) ทั้งนี้ไม่รวมพลังงานจาก Vacuum compressor เนื่องจากเป็นการทำสุญญากาศเพียงครั้งเดียวในช่วงการเติมสารทำงาน และสามารถคำนวณหาปริมาณความร้อนที่สามารถถ่ายโอนจากฮีวาโปรเตอร์ไปยังคอนเดนเซอร์ (Q_{cond}) ด้วยสมการที่ (2) (Sukchana, 2020) โดยใช้ผลต่างอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น ($T8 - T7$) จากนั้นตรวจสอบประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนของชุดเทอร์โมไซฟอน (η_{th}) ด้วยสมการที่ (3) (Sukchana, 2020) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของปริมาณความร้อนที่ถ่ายโอนได้ต่อปริมาณความร้อนที่ให้ โดยไม่พิจารณากำลังไฟฟ้าสำหรับหมุนเวียนของน้ำหล่อเย็น เนื่องจากการตรวจสอบการป้องกันการสูญเสียความร้อนเพื่อปรับปรุงก่อนทดลองจริง และสุดท้ายคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อนรวมของระบบ (R) ด้วยสมการที่ (4) (Kiseev & Sazhin, 2019) เพื่อประโยชน์ในการออกแบบสร้างหรือประยุกต์ใช้อุปกรณ์ที่มีลักษณะเดียวกันกับอุปกรณ์ที่ทำการทดลอง โดยใช้ผลต่างของอุณหภูมิที่เป็นค่าเฉลี่ยดังสมการที่ (5)

$$P_E = VI \quad (1)$$

$$Q_{cond} = \dot{m}c_p(T8 - T7) \quad (2)$$

$$\eta_{th} = \frac{Q_{cond}}{P_E} \times 100 \quad (3)$$

$$R = \frac{\Delta T}{Q_{cond}} \quad (4)$$

$$\Delta T = [T1 - \frac{T7 - T8}{2}] \quad (5)$$

โดยที่ คือกำลังของฮีตเตอร์ไฟฟ้า (W) V คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดได้ (Volt), I คือกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ (Ampere), Q_{cond} คือปริมาณความร้อนที่ได้จากการหล่อเย็น (W), \dot{m} คืออัตราการไหลเชิงมวลของน้ำหล่อเย็น (kg/s), C_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg°C), ($T8 - T7$) คือผลต่างของอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น (°C), η_{th} คือประสิทธิภาพความร้อนของชุดทดลอง (%), R คือค่าความต้านทานความร้อนรวมของระบบ (°C/W), ΔT คือผลต่างของอุณหภูมิฮีวาโปรเตอร์กับอุณหภูมิเฉลี่ยของคอนเดนเซอร์ (°C), $T1$ คืออุณหภูมิของฮีวาโปรเตอร์ (°C) และ $\frac{T8 - T7}{2}$ คืออุณหภูมิเฉลี่ยของคอนเดนเซอร์ (°C)

ผลการทดลองและอภิปรายผล

จากเงื่อนไขในการทดลองที่ประกอบด้วยท่อนำไอระเหยทั้งหมด 7 ขนาด และการให้ความร้อนด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้า 6 ระดับ ทดลองกับน้ำหล่อเย็นด้วยอุณหภูมิและอัตราการไหลแบบคงที่ ทำการทดลองโดยในระบบเป็นสุญญากาศเพื่อให้เกิดไออิ่มตัวและสามารถนำเอาพลังงานความร้อนไปใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิอิ่มตัวที่ความดันบรรยากาศเนื่องจากน้ำจะสามารถระเหยเป็นไอได้ที่อุณหภูมิต่ำเมื่ออยู่ในสภาวะสุญญากาศเริ่มการทดลองโดยการทดสอบการทำงานของเทอร์โมไซฟอนระบบปิดและประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนของอุปกรณ์ทดลอง ตรวจสอบการสูญเสียความร้อนให้แก่สิ่งแวดล้อมจากประสิทธิภาพในการหุ้มฉนวนของอุปกรณ์ทดลอง เมื่อตรวจสอบพร้อมทั้งปรับปรุงการหุ้มฉนวนแล้วจึงทำการทดลองตามเงื่อนไขต่างๆ ดังผลการทดลองต่อไปนี้

1. ประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนของวงจรถือโมไซฟอน

เป็นการทดลองเพื่อตรวจสอบการทำงานเป็นวงจรถือโมไซฟอนในระบบปิด และการหุ้มฉนวนป้องกันการสูญเสียความร้อนของเทอร์โมไซฟอนวงจรถือ โดยปริมาณความร้อนที่ให้อยู่ในช่วง 530-3350 W และมีขนาดท่อนำไอระเหยที่มี L/d เท่ากับ 17.50 (ขนาดท่อ 25.4 mm หรือ 1 นิ้ว) คำนวณหาปริมาณความร้อนที่สามารถถ่ายโอนไปยังคอนเดนเซอร์ด้วยสมการที่ (2) เปรียบเทียบเป็นประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนด้วยสมการที่ (3) ดัง Figure 2 จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์ทดลองมีประสิทธิภาพความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 97.28% แสดงให้เห็นว่าน้ำภายในเทอร์โมไซฟอนวงจรถือเกิดการระเหยและควบแน่นเป็นวัฏจักรอยู่ภายในได้อย่างต่อเนื่อง รวมทั้งการหุ้มฉนวนนั้นสามารถป้องกันการสูญเสียความร้อนให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมของอุปกรณ์ในการทดลองเชิงวิศวกรรมทางความร้อน (Sukchana and Pratinthong, 2017 ; Sukchana, 2020) โดยสามารถถ่ายโอนความร้อนไปยังคอนเดนเซอร์ได้ไม่น้อยกว่า 90% ในขณะที่เดียวกันพบว่าประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนมีแนวโน้มลดลงเมื่อจุดเดือดของสารทำงานเพิ่มขึ้นด้วยปริมาณความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากมีการสูญเสียความร้อนในรูปแบบการแผ่รังสีความร้อนมากขึ้นตามจุดเดือดที่เพิ่มขึ้น รวมทั้งการทดลองเป็นแบบอุณหภูมิและอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นคงที่ซึ่งคอนเดนเซอร์จะมีข้อจำกัดในการแลกเปลี่ยนความร้อน

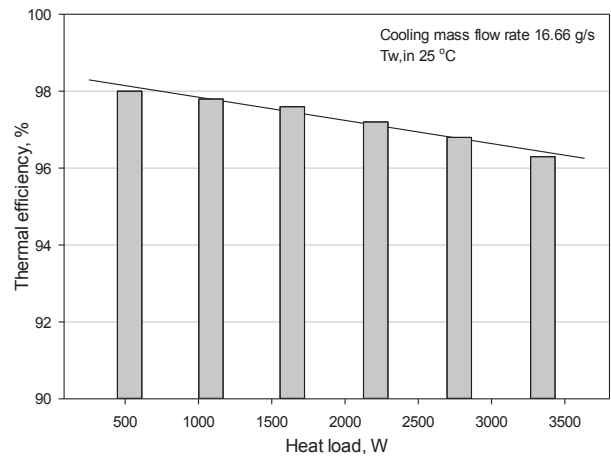


Figure 2 Thermal efficiency of experimental equipment

2. อุณหภูมิอิ่มตัวภายใต้สุญญากาศในระบบปิด

การทดลองเพื่อตรวจสอบอุณหภูมิอิ่มตัวหรือจุดเดือดดังรูปที่ 3 ของน้ำในเทอร์โมไซฟอนวงจรถือภายใต้สุญญากาศในเงื่อนไขเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.1 เพื่อให้ได้ข้อมูลสำหรับเปรียบเทียบหลังทำการปรับเปลี่ยนขนาดท่อนำไอระเหยตามเงื่อนไขการทดลอง จะเห็นได้ว่าเมื่อในระบบของเทอร์โมไซฟอนเป็นสุญญากาศน้ำสามารถเดือดได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าการต้มน้ำที่ความดันบรรยากาศ (Sukchana, 2020 ; Jaiboonma & Sukchana, 2022) ซึ่งจะสามารถถ่ายโอนความร้อนไปยังคอนเดนเซอร์เพื่อนำไปใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C และพบว่าอุณหภูมิอิ่มตัวสูงขึ้นเมื่อปริมาณความร้อนที่ให้เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณความร้อนที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณของไอระเหยเพิ่มมากขึ้นภายในปริมาตรคงที่ของเทอร์โมไซฟอนจึงเป็นผลทำให้ความดันภายในเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากความหนาแน่นของไอน้ำที่ระเหย จึงส่งผลให้อุณหภูมิอิ่มตัวหรือจุดเดือดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นความสัมพันธ์โดยตรงกับความดันที่เกิดการเปลี่ยนแปลงตามหลักทางเทอร์โมไดนามิกส์

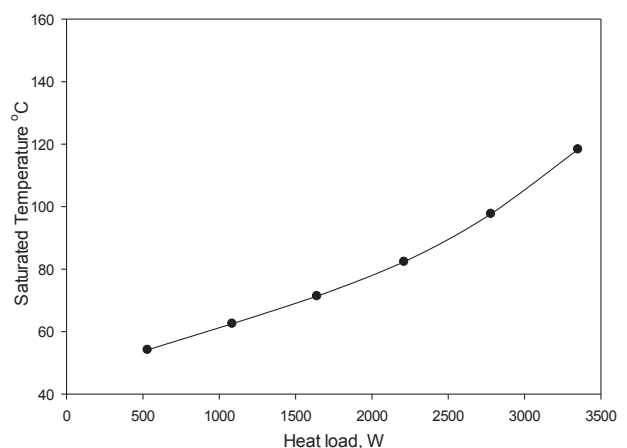


Figure 3 Saturation temperature under vacuum condition with L/d ratio of vapor tube of 17

3. ขนาด L/d ของท่อนำไอระเหยต่ออุณหภูมิอิ่มตัว

ผลกระทบจาก L/d ของท่อนำไอระเหยต่ออุณหภูมิอิ่มตัวเมื่อปริมาณความร้อนในการทดลองสูงสุด 3350 W ดัง Figure 4 จะเห็นได้ว่าในขณะที่ปริมาณความร้อนคงที่ เมื่อ L/d ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้อุณหภูมิอิ่มตัวเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลจากความต้านทานการไหลของไอน้ำเพิ่มขึ้นในท่อที่มีขนาดของพื้นที่ภาคตัดเล็กซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียความดัน จึงส่งผลให้ความดันภายในระบบปิดเพิ่มมากขึ้น โดยความดันที่เพิ่มขึ้นในระบบนั้นจะมีความสัมพันธ์กันทางเทอร์โมไดนามิกส์โดยตรงกับอุณหภูมิอิ่มตัวหรือจุดเดือดของน้ำเช่นเดียวกับผลการทดลองจากหัวข้อ 3.2 ในขณะเดียวกันนั้นจะเห็นได้ว่าเมื่อค่า L/d ลดลงมีผลทำให้อุณหภูมิอิ่มตัวของน้ำลดลงเมื่อได้รับปริมาณความร้อนเท่ากัน แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของท่อนำไอระเหยโดยมีความยาวคงที่เท่าเดิมเพื่อกำหนดให้มีค่า L/d เพิ่มขึ้นหรือลดลงนั้นจะสามารถประยุกต์ใช้ในการกำหนดหรือควบคุมอุณหภูมิของไออิ่มตัวสำหรับเทอร์โมไซฟอนวงจรปิดเมื่อได้รับปริมาณความร้อนแบบคงที่ได้ หรือสามารถกำหนดขนาดของท่อขั้นต่ำที่จะช่วยให้ไม่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิของไออิ่มตัวของสารทำงานได้ ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่า ค่า L/d จะเริ่มส่งผลต่ออุณหภูมิอิ่มตัวของสารทำงานในระบบให้เพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีค่าอัตราส่วนมากกว่า 20

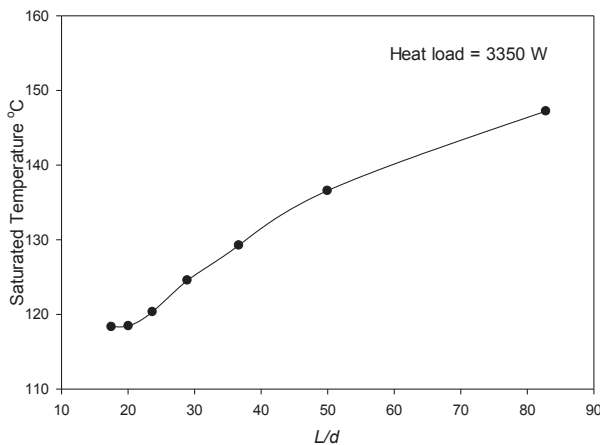


Figure 4 Effect from L/d ratio on the Saturation temperature with heat load of 3350 W

เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของขนาดท่อนำไอระเหยในรูปของ L/d กับอุณหภูมิอิ่มตัวเมื่อได้รับปริมาณความร้อนที่แตกต่างกันดังรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าหากกำหนดอุณหภูมิไออิ่มตัวที่ต้องการจะสามารถเลือกใช้ L/d ของท่อ

นำไอระเหยและปริมาณความร้อนที่เหมาะสมได้จากกราฟผลการทดลอง เช่น หากต้องการอุณหภูมิของไออิ่มตัวไม่เกิน 80°C ด้วยปริมาณความร้อน 2210 W จะพบว่าขนาด L/d ของท่อนำไอระเหยต้องไม่เกินกว่า 23.65 หรือถ้าต้องการอุณหภูมิไออิ่มตัวเกินกว่า 80°C ด้วยปริมาณความร้อนเดียวกัน จะสามารถทำได้ด้วยการเพิ่ม L/d ให้มากกว่า 23.65 นอกจากนี้ยังพบว่า L/d ของท่อนำไอระเหยไม่เกิน 20.05 จะไม่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิอิ่มตัวน้ำในช่วงของปริมาณความร้อนที่ทำการทดลอง ซึ่งผลการทดลองที่ได้นั้นเป็นปรากฏการณ์ในการทำงานของเทอร์โมไซฟอนระบบปิดภายใต้สภาวะสุญญากาศที่มีข้อจำกัดในการแลกเปลี่ยนความร้อนของคอนเดนเซอร์ในการทดลองแบบคงที่ ซึ่งมีสิ่งที่แตกต่างจากเทอร์โมไซฟอนทั่วไปคือการเกิดไอน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C และสามารถนำเอาความร้อนไปใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำ เหมาะแก่การประยุกต์ใช้ในงานอบแห้งหรือการฆ่าเชื้อด้วยอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 100°C โดยการอาศัยกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อนำความร้อนไปใช้งานเนื่องจากเทอร์โมไซฟอนเป็นระบบปิด และสามารถควบคุมหรือกำหนดอุณหภูมิของไออิ่มตัวได้ด้วยการเลือกใช้ขนาดของ L/d ที่เหมาะสมกับปริมาณความร้อนที่ใช้งาน

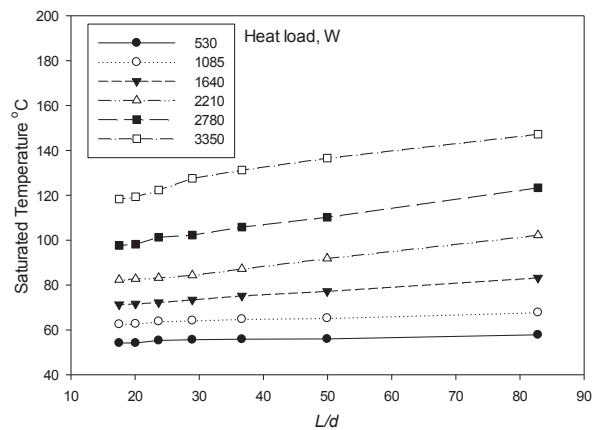


Figure 5 Relationship of L/d ratio of the vapor tube on saturation temperature with heat load is different

4. ความสัมพันธ์ของ L/d อุณหภูมิอิ่มตัว และปริมาณความร้อน โดยวิธีการประมาณค่า

ความสัมพันธ์ของตัวแปรจากการทดลองทั้ง 3 ตัวแปร โดยมีปริมาณความร้อนกับขนาดของ L/d เป็นตัวแปรต้น และอุณหภูมิของน้ำอิ่มตัวในระบบสุญญากาศเป็นตัวแปรตาม ดัง Figure 6

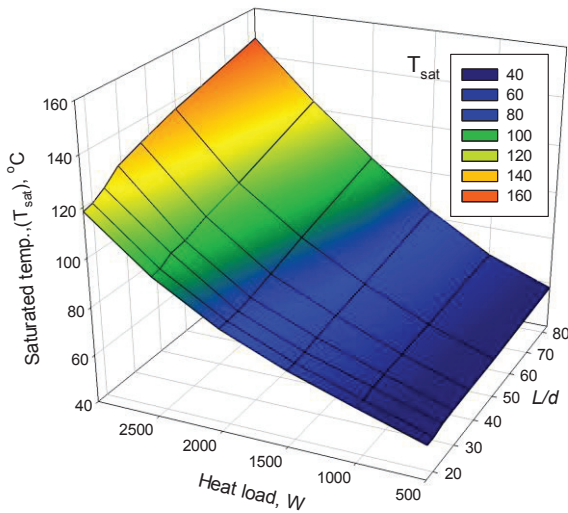


Figure 6 3D Relationship of L/d ratio of the vapor tube on saturation temperature with heat load of a close loop thermosyphon

จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิอิ่มตัวมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นกับปริมาณความร้อนและขนาดของ L/d ซึ่ง

สามารถสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่าย (3D, Paraboloid equation) เพื่อใช้ในการประมาณค่าของตัวแปร อุณหภูมิอิ่มตัว ปริมาณความร้อน และค่า L/d ที่ต้องการเลือกใช้ได้ดังสมการที่ (6) โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.98 โดยกำหนดตัวแปรต้นอย่างน้อย 2 ตัวแปร เพื่อคำนวณหาตัวแปรที่ต้องการ และเมื่อทดสอบสมการโดยการคำนวณแล้วเปรียบเทียบกับผลการทดลองดัง Figure (7) จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิอิ่มตัวที่คำนวณได้จากสมการนั้นมีผลต่างจากการทดลองมากขึ้นเมื่อค่า L/d เพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกันเมื่อปริมาณความร้อนสูงขึ้นจะมีผลทำให้ผลต่างของอุณหภูมิอิ่มตัวมากขึ้นเช่นกัน โดยพบว่ามีความผิดพลาด (Error) อยู่ในช่วง 0.14-28.02% ซึ่งพบว่าค่าความผิดพลาดสูงเมื่อได้รับปริมาณความร้อนสูงและค่า L/d สูง

$$T_{sat} = 42.489 + (0.3196L/d) + (0.0032Q) + (-0.0008(\frac{L}{d})^2) + ((7.2951 \times 10^{-6})Q^2) \quad (6)$$

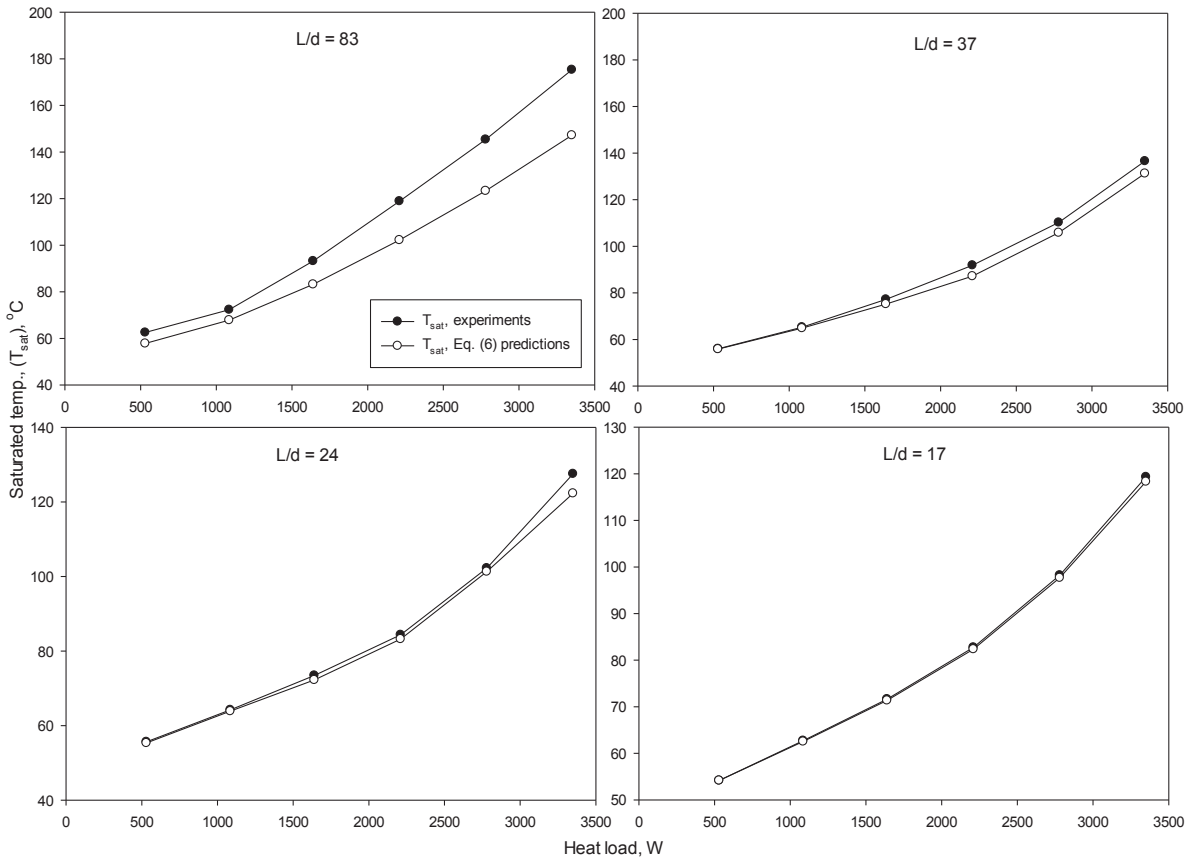


Figure 7 Compare the saturation temperature from experimental results with mathematical model calculations

5. ค่าความต้านทานความร้อนรวม

หลักการการทำงานของเทอร์โมไซฟอนระบบปิดภายใต้สภาวะสุญญากาศนั้นต้องอาศัยการไหลกลับของของเหลวด้วยแรงโน้มถ่วง ซึ่งมีลักษณะการทำงานเช่นเดียวกันกับเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจร จึงสามารถพิจารณาสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนของเทอร์โมไซฟอนระบบปิดในรูปของค่าความต้านทานความร้อนรวมของระบบ (R) ด้วยสมการที่ (4-5) ซึ่งเป็นคุณลักษณะในการถ่ายโอนความร้อนอย่างหนึ่งของเทอร์โมไซฟอน เพื่อให้สามารถใช้ในการพิจารณาเลือกใช้ปริมาณความร้อนที่เหมาะสมกับอุณหภูมิอิ่มตัวที่ต้องการในการออกแบบสร้าง โดยจะได้ค่าความต้านทานความร้อนรวมดังรูปที่ 8 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณความร้อนที่ให้เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าความต้านทานความร้อนรวมลดลง ในขณะที่เดียวกันพบว่าค่าความต้านทานความร้อนรวมจะเพิ่มมากขึ้นด้วยค่า L/d ที่เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความร้อนที่ได้รับเท่ากันในการทดลองพบว่าค่าความต้านทานความร้อนรวมมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.0343°C/W เมื่อท่อไอระเหยมีค่า L/d เท่ากับ 17.50 ด้วยปริมาณความร้อนที่ให้เท่ากับ 2780 W

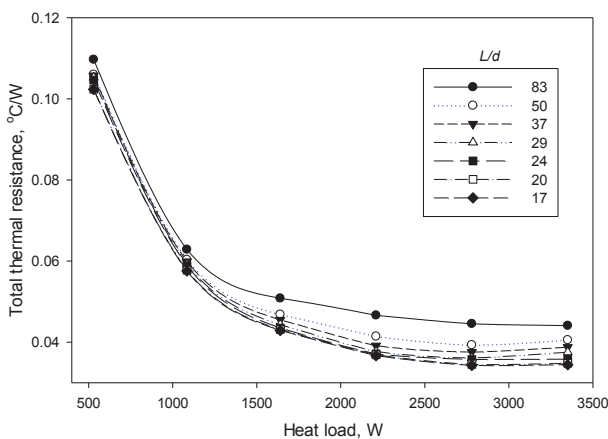


Figure 8 Relationship of total thermal resistance and heat load with L/d ratio is different

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การศึกษาทดลองผลกระทบจากขนาดของท่อไอระเหยต่อสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอนวงจรปิดภายใต้สภาวะสุญญากาศ ในรูปแบบอัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน หรือ L/d ด้วยปริมาณความร้อนแบบคงที่ 6 ระดับ ขนาดของ L/d 7 ขนาด ทดลองโดยภายในเทอร์โมไซฟอนอยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศ คอนเดนเซอร์ระบายความร้อนด้วยน้ำอุณหภูมิและอัตราการไหลเชิงมวลคงที่ และของเหลวควบแน่นไหลกลับด้วยแรงโน้มถ่วง ผลการทดลองพบว่าขนาดของ L/d และปริมาณความร้อนที่ให้ มีผลกระทบต่อสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอนทั้งในด้านอุณหภูมิอิ่มตัว และค่าความต้านทานความร้อนรวมของ

ระบบ โดย L/d ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้อุณหภูมิอิ่มตัวเพิ่มขึ้น และค่าความต้านทานความร้อนรวมลดลงเมื่อขนาดของ L/d ลดลง เมื่อปริมาณความร้อนคงที่ ในขณะที่อุณหภูมิอิ่มตัวแปรผันโดยตรงกับปริมาณความร้อนเมื่อขนาดของ L/d คงที่ นอกจากนี้ยังพบว่าค่า R ต่ำสุดสำหรับ L/d ทุกขนาดเมื่อปริมาณความร้อนที่ให้เท่ากับ 2780 W และยังพบอีกว่าเมื่อขนาดของ L/d น้อยกว่า 20.05 จะไม่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิอิ่มตัวและค่าความต้านทานความร้อนรวม จากผลการทดลองที่ได้สามารถประยุกต์ใช้ในการเลือกขนาดท่อและปริมาณความร้อนที่เหมาะสมกับอุณหภูมิอิ่มตัวของไอน้ำที่ต้องการสำหรับสร้างเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่สามารถประหยัดพลังงานได้เนื่องจากการถ่ายโอนความร้อนด้วยการเดือดภายใต้ระบบที่เป็นสุญญากาศ โดยขนาดของ L/d นั้นสามารถใช้เป็นตัวแปรในการกำหนดอุณหภูมิอิ่มตัวของไอน้ำได้เมื่อปริมาณความร้อนมีค่าคงที่

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณกองทุนส่งเสริมงานวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2564

เอกสารอ้างอิง

- Aghel, B., Rahimi, M. & Almasi, S. (2017). Heat transfer enhancement of two-phase closed thermosyphon using a novel cross-flow condenser. *Heat Mass Transfer*, 53, 765-773.
- Cansee, S. (2020). Effected heat pipe and chimney to performance of boiler for steamed mushroom bag. *Prawarun Agr. J*, 17(1), 89-98.
- Dangton, W., Boothaisong, S. & Sangiamsuk, S. (2018). The Thermosyphon boiler prototype for fast generate vapor. *proceeding in the 14th Mahasarakham university research conference* (pp. 399-408). Mahasarakham University.
- Jafari, D., Marco, P.Di., Filippeschi, S. & Franco, A. (2017). An experimental investigation on the evaporation and condensation heat transfer of two-phase closed thermosyphons. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 88, 111-123.
- Jaiboonma, C. & Sukchana, T. (2022). The heat transfer performance of a close loop thermosyphon boiler. *The Journal of KMUTNB*, 32(1), 108-117. (In Thai).

- Kiseev, V. & Sazhin, O. (2019). Heat transfer enhancement in a loop thermosyphon using nanoparticles/water nanofluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 132, 557-564.
- Kim, Y., Shina, D.H., Kim, J.S., Youb, S.M. & Leea, J. (2018). Boiling and condensation heat transfer of inclined two-phase closed thermosyphon with various filling ratios. *Applied Thermal Engineering*, 145, 328-342.
- Lataoui, Z. & Jemni, A. (2017). Experimental investigation of a stainless steel two-phase closed thermosyphon. *Applied Thermal Engineering*, 121, 721-727.
- Naresh, Y. & Balaji, C. (2017). Experimental investigations of heat transfer from an internally finned two phase closed thermosyphon. *Applied Thermal Engineering*, 112, 1658-1666.
- Nuthong, O. & Uengkimbuan, N. (2014). Study on drying behavior of pepper using superheated steam drying. *Burapha Science Journal*, special issue, 340-347. (In Thai).
- Sa-adchom, P., Swasdisevi, T., Thomthong, T., Rattanapanya, P. & Soponronnarit, S. (2013). Drying of Ground Fish Slices Using Superheated Steam. *RMUTP Research Journal*, 7(2), 74-86. (In Thai).
- Sukchana, T. (2020). Design, construction and testing of a horizontal thermosyphon boiler. *KMUTT Research and Development Journal*, 43(1), 67-78. (In Thai).
- Sukchana, T. (2020). Optimum water filling ratio for a closed loop thermosyphon with evaporator as a boiler. *J Sci Technol MSU*, 39(2), 645-652. (In Thai).
- Sukchana, T. (2020). Study of heat transfer performance of a loop thermosyphon using an environment-friendly refrigerant as a working fluid. *The Journal of KMUTNB*, 30(2), 199-208. (In Thai).
- Sukchana, T. & Pratinthong, N. (2017). Effect of bending position on heat transfer performance of R-134a two-phase close loop thermosyphon with an adiabatic section using flexible hoses. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 114, 527-535.

คำแนะนำสำหรับผู้พิมพ์

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม กำหนดพิมพ์ปีละ 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) ผู้พิมพ์ทุกท่านสามารถส่งบทความวิจัยเพื่อรับการพิจารณาลงตีพิมพ์ได้ โดยไม่ต้องเป็นสมาชิกและไม่จำเป็นต้องสังกัดมหาวิทยาลัยมหาสารคาม ผลงานที่ได้รับการพิจารณาในวารสารจะต้องมีสาระที่น่าสนใจ เป็นงานที่ทบทวนความรู้เดิมหรือองค์ความรู้ใหม่ ที่ทันสมัย รวมทั้งข้อคิดเห็นทางวิชาการที่เป็นประโยชน์ต่อผู้อ่าน และจะต้องเป็นงานที่ไม่เคยตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารอื่นมาก่อน รวมถึงไม่อยู่ระหว่างพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารใด บทความอาจถูกดัดแปลงแก้ไข เนื้อหา รูปแบบ และสำนวน ตามที่กองบรรณาธิการเห็นสมควร ทั้งนี้ เพื่อให้วารสารมีคุณภาพในระดับมาตรฐานสากล และนำไปอ้างอิงได้

การเตรียมต้นฉบับ

1. ต้นฉบับพิมพ์เป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ แต่ละเรื่องจะต้องมีบทคัดย่อทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ การใช้ภาษาไทยให้ยึดหลักการใช้คำศัพท์การเขียนทับศัพท์ภาษาอังกฤษตามหลักของราชบัณฑิตยสถาน ให้หลีกเลี่ยงการเขียนภาษาอังกฤษร่วมกับภาษาไทยในข้อความ ยกเว้นกรณีจำเป็น เช่น ศัพท์ทางวิชาการที่ไม่มีทางแปล หรือคำที่ใช้แล้วทำให้เข้าใจง่ายขึ้น คำศัพท์ภาษาอังกฤษที่เขียนเป็นภาษาไทยให้ใช้ตัวเล็กทั้งหมด ยกเว้นชื่อเฉพาะ สำหรับต้นฉบับภาษาอังกฤษ ควรได้รับการตรวจสอบความถูกต้องของภาษาจากผู้เชี่ยวชาญด้านภาษาอังกฤษก่อน

2. ขนาดของต้นฉบับ ใช้กระดาษขนาด A4 (8.5x11 นิ้ว) และพิมพ์โดยเว้นระยะห่างจากขอบกระดาษด้านละ 1 นิ้ว จัดเป็น 2 คอลัมน์

3. ชนิดของขนาดตัวอักษร ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษให้ใช้ตัวอักษร **Browallia New**

3.1 ชื่อเรื่องให้ใช้อักษรขนาด **18 pt.** ตัวหนา

3.2 ชื่อผู้พิมพ์ใช้อักษรขนาด **16 pt.** ตัวปกติ

3.3 หัวข้อหลักใช้อักษรขนาด **16 pt.** ตัวหนา

3.4 หัวข้อรองใช้อักษรขนาด **14 pt.** ตัวหนา

3.5 บทคัดย่อและเนื้อหาใช้ตัวอักษรขนาด **14 pt.** ตัวบาง

3.6 เชิงอรรถอยู่หน้าแรกที่เป็นรายละเอียดชื่อตำแหน่งทางวิชาการ และที่อยู่ของผู้พิมพ์ใช้อักษรขนาด 12 pt. ตัวบาง และใส่ Corresponding author

4. ผู้พิมพ์จะต้องจัดเตรียมต้นฉบับในรูปแบบของไฟล์ “.doc” (MS Word) และ “.pdf” (Portable Document Format)

5. จำนวนหน้า ความยาวของบทความไม่ควรเกิน 12 หน้า รวมตาราง รูป ภาพ และเอกสารอ้างอิง

6. รูปแบบการเขียนต้นฉบับ แบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ประเภทบทความรายงานผลวิจัยหรือบทความวิจัย (research article) และบทความจากการทบทวนเอกสารวิจัยที่ผู้อื่นทำเอาไว้ หรือบทความทางวิชาการ หรือบทความทั่วไป หรือบทความปริทัศน์ (review article)

7. การส่งบทความ ส่ง online ผ่านระบบ ThaiJo โดยสามารถเข้าไปดูรายละเอียดที่ www.scjmsu.msu.ac.th

8. หากจัดรูปแบบไม่ถูกต้องทางวารสารจะจัดส่งคืนผู้พิมพ์เพื่อปรับแก้ไข ก่อนเสนอผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณา ซึ่งอาจทำให้กระบวนการตีพิมพ์ล่าช้า

บทความวิจัย/บทความวิชาการ ให้เรียงลำดับหัวข้อดังนี้

ชื่อเรื่อง (Title) ชื่อเรื่องให้มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรสั้น กระชับ และสื่อเป้าหมายหลักของงานวิจัย ไม่ใช่คำย่อ ความยาวไม่เกิน 100 ตัวอักษร

ชื่อผู้พิมพ์ [Author (s)] และที่อยู่ ให้มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ และระบุตำแหน่งทางวิชาการ หน่วยงาน หรือสถาบันที่สังกัด และ E-mail address ของผู้พิมพ์ไว้เป็นเชิงบรรณของหน้าแรก เพื่อกองบรรณาธิการสามารถติดต่อได้

บทคัดย่อ (Abstract) เป็นการย่อเนื้อความงานวิจัยทั้งเรื่องให้สั้น และมีเนื้อหา ประกอบด้วย วัตถุประสงค์ ผลการค้นพบที่สำคัญ และสรุป มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยบทคัดย่อภาษาอังกฤษมีความยาวไม่เกิน 300 คำ สำหรับบทคัดย่อภาษาไทยให้สอดคล้องกับบทคัดย่อภาษาอังกฤษ

คำสำคัญ (Keywords) ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ไม่เกิน 5 คำ ให้ระบุไว้ท้ายบทคัดย่อของแต่ละภาษา

บทนำ (Introduction) เป็นส่วนเริ่มต้นของเนื้อหา ที่บอกความเป็นมา เหตุผล และวัตถุประสงค์ ที่นำไปสู่งานวิจัยนี้ ให้ข้อมูลทางวิชาการที่เกี่ยวข้องจากการตรวจสอบเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีรายงานการศึกษาก่อนหน้า

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการศึกษา (Materials and Methods) ให้ระบุรายละเอียด วัสดุอุปกรณ์ สิ่งื่อนำมาศึกษา จำนวน ลักษณะเฉพาะของตัวอย่างที่ศึกษา อธิบายวิธีการศึกษา แผนการทดลองทางสถิติ วิธีการเก็บข้อมูลการวิเคราะห์และการแปลผล

ผลการศึกษา (Results) รายงานผลที่ค้นพบ ตามลำดับขั้นตอนของการวิจัย อย่างชัดเจนได้ใจความ ถ้าผลไม่ซับซ้อน และมีตัวเลขไม่มากควรใช้คำบรรยาย แต่ถ้ามีตัวเลข หรือ ตัวแปรมาก ควรใช้ตารางหรือแผนภูมิประกอบการรายงานผลการศึกษา

วิจารณ์และสรุปผล (Discussion and Conclusion) การอภิปรายผลการศึกษาว่าตรงกับวัตถุประสงค์และเปรียบเทียบกับสมมติฐานของการวิจัยที่ตั้งไว้ หรือแตกต่างไปจากผลงานที่มีผู้รายงานไว้ก่อนหรือไม่ อย่างไร เหตุผลใดจึงเป็นเช่นนั้น และมีพื้นฐานอ้างอิงที่เชื่อถือได้ ผู้พิมพ์อาจมีข้อเสนอแนะที่นำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ หรือตั้งประเด็นคำถามการวิจัย ซึ่งเป็นแนวการสำหรับการวิจัยต่อไป

ตาราง รูป ภาพ แผนภูมิ (Table, Figures, and Diagrams) ควรคัดเลือกเฉพาะที่จำเป็น แทรกไว้ในเนื้อเรื่อง โดยเรียงลำดับให้สอดคล้องกับคำอธิบายในเนื้อเรื่อง และมีคำอธิบายเป็นภาษาอังกฤษ ที่สื่อความหมายได้สาระครบถ้วน กรณีที่เป็นตาราง คำอธิบายอยู่ด้านบน ถ้าเป็นรูป ภาพ แผนภูมิ คำอธิบายอยู่ด้านล่าง

กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements) ระบุงานวิจัยได้รับการสนับสนุนงบประมาณ หรือสนับสนุนด้านอื่นๆ รวมถึงความช่วยเหลือจากองค์กรใดหรือผู้ใดบ้าง

เอกสารอ้างอิง (References) ระบุงานการเอกสารที่นำมาใช้อ้างอิงให้ครบถ้วนไว้ท้ายเรื่อง โดยใช้ APA Style ดังตัวอย่าง สามารถดูรายละเอียดและตัวอย่างเพิ่มเติมได้ที่ www.scjmsu.msu.ac.th

เอกสารอ้างอิงให้เขียนตามรูปแบบ “Publication Manual of the American Psychological Association” (7th Edition)

1. หนังสือ (ในรูปแบบรูปเล่ม)

ชื่อ-สกุล. (ปีพิมพ์). ชื่อเรื่อง (พิมพ์ครั้งที่). สำนักพิมพ์.

ตัวอย่าง:

วิธาน ฐานะวุฑฒ์. (2547). หัวใจใหม่-ชีวิตใหม่. ปิติศึกษา.

2. บทความในวารสารอิเล็กทรอนิกส์

ชื่อ-สกุล. (ปีพิมพ์). ชื่อบทความ. ชื่อวารสาร, เลขของปีที่ (เลขของฉบับที่), เลขหน้า. /<https://doi.org/เลขdoi>

ตัวอย่าง:

มานะ สินธุวงษานนท์. (2549). ปัจจัยส่งเสริมการจัดการศึกษาที่ส่งผลต่อคุณภาพนักเรียนในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. *วารสารครุศาสตร์*, 18 (2), 115-116.

3. รายงานการประชุมเชิงวิชาการ (Proceeding)

ชื่อ-สกุล. (ปี). ชื่อบทความ. ใน/ชื่อบรรณาธิการ (บ.ก.), ชื่อหัวข้อการประชุม. ชื่อการประชุม (น. เลขหน้า). ฐานข้อมูล.

ตัวอย่าง:

พัชรภา ดันดิชูเวช. (2553). การศึกษาทั่วไปกับคุณลักษณะบัณฑิตที่พึงประสงค์ในประเทศมาเลเซีย และสิงคโปร์ ศึกษาโดยเปรียบเทียบกับประเทศไทย. ใน ศิริชัย กาญจนวาสี (บ.ก.), *การขับเคลื่อนคุณภาพการศึกษาไทย. การประชุมวิชาการและเผยแพร่ ผลงานวิจัยระดับชาติ* (น. 97-102). คณะครุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

4. หนังสือพิมพ์และหนังสือพิมพ์ออนไลน์

ชื่อสกุล. (ปี, /วัน/เดือน). ชื่อคอลัมน์. ชื่อหนังสือพิมพ์, เลขหน้า.

ตัวอย่าง:

พงษ์พรรณ บุญเลิศ. (2561, 15 สิงหาคม). เดลินิวส์ว่าไรดี: 'สื่อพิพิธภัณฑ' เชื่อม ยุคสมัย เข้าถึงด้วย 'มิติใหม่' อินเทอร์เน็ต. *เดลินิวส์*, 4.

5. หนังสือ (ในรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์)

ชื่อ สกุล. (ปีพิมพ์). ชื่อเรื่อง (พิมพ์ครั้งที่). URL

ตัวอย่าง:

กระทรวงศึกษาธิการ. (2560). *หลักสูตรการศึกษาปฐมวัย พุทธศักราช 2560 สำหรับเด็กอายุ ต่ำกว่า 3-5 ปี*. http://drive.google.com/file/d/1HiTWiRh1Er73h VYIMh1cYWzQiaNI_Vc/view

Instruction for Authors

Research manuscripts relevant to subject matters outlined in the objectives are **Accepted** from all institutions and private parties provided they have not been preprinted elsewhere. The context of the papers may be **Revised** as appropriate to the standard. The manuscript must be interesting topic, review knowledge, modern knowledge, and academic comments that are beneficial to readers. The journal publishes 6 issues a year. Vol.1 (January-February) Vol.2 (March-April) Vol.3 (May-June) Vol.4 (July-August) Vol.5 (September-October) Vol.6 (November-December).

Preparation of manuscripts:

1. Manuscripts can be written in either Thai or English with the abstract in both Thai and English. The use of Thai language adheres to the principles of vocabulary, transliteration in English according to the principles of the Royal Society of Thailand. Manuscript should be specific, clear, concise, accurate, and consistent. Mixing Thai and English should be avoided except for the case of necessity, such as academic vocabulary with no translation or mixing words for easier understanding. English vocabulary written in Thai must use all lowercase except for unique names. English language manuscripts should be checked by an English language editor prior to submission.

2. Manuscript should be on A4 standard size paper. Each side must have 1" margins with 2 columns.

3. Browallia New font is required with font size as follows:

3.1 Title of the article: **18 pt. Bold**

3.2 Name (s) of the authors: **16 pt. Unbold**

3.3 Main Heading: **16 pt. Bold**

3.4 Sub-heading: **14 pt. Bold**

3.5 Body of the text: **14 pt. Unbold**

3.6 Footnotes for authors and their affiliations: **12 pt. Unbold**, must be cited at the bottom of the first page. Academic position and corresponding author must be added at footnotes.

4. Manuscripts should be typed in MS word ".doc" and ".pdf" (Portable Document Format)

5. The number of pages are limited to 12 pages, including references, tables, graphs, or pictures.

6. Types of manuscripts: research articles and review articles.

7. Manuscript submission: online submission via www.scjmsu.msu.ac.th.

8. Manuscript with uncorrected format will be sent back to the author before review process which can delay the publication process.

Research article / review article must be in sequence as follows:

Title: denoted in both Thai and English, must be concise and specific to the point, normally less than 100 characters.

Name (s) of the author (s) : denoted with affiliation must be in Thai and English, academic position must be specified, and email address for contact the author.

Abstract: This section of the paper should follow an informative style, concisely covering all the important of findings. The abstract must include objectives, findings, and conclusion. Thai and English abstract is required. The English abstract is restricted to **300 words**. Thai abstract should be relevant to English version.

Keywords: Give 4-5 concise words to specify your article

Introduction: This section is the initial part of the article, contain information about background, reasons, purposes, and review section.

Materials and Methods: A discussion of the materials used, and a description clearly detailing how the experiment was undertaken, e.g., experimental design, data collection and analysis, and interpretation

Results: Present the output. Li the information in complicated, add tables, graphs, diagrams etc., as necessary.

Discussion and Conclusion: Discuss how the results are relevant/oppose to the objective and hypothesis. How the result is different/relevant when comparing to the former findings. Give us your reason why result is like that base on reliable researches. This part should end with suggestions for research utilization or providing questions for future studies.

Tables, figures, diagrams: Selected only necessary objects to insert in the body of manuscript in accordance with the description in the text. The short description is required in English with completely meaningful. For figures and diagrams, the description is below the picture. But, for table, the description is on top of the table.

Acknowledgement: the name of the persons, organization, or funding agencies who helped support the research are acknowledged in this section.

References: listed and referred in APA.

Reference are written in “Publication Manual of the American Psychological Association” (7th Edition)

1. Book

Mertens, D.M. (2014). *Research and evaluation in education and psychology: Integrating diversity with quantitative, qualitative, and mixed methods* (4th ed.). SAGE.

2. Academic Journal

Herbst-Damm, K.L., & Kulik, J.A. (2005). Volunteer support, marital status, and the survival times of terminally ill patients. *Health Psychology*, 24, 225-229. <https://doi.org/10.1037/0278-6133.24.2.225>

3. Conference Proceeding

Katz, I., Gabayan, K., & Aghajan, H. (2007). A multi-touch surface using multiple cameras. In J. Blanc-Talon, W. Philips, D. Popescu, & P. Scheunders (Eds.), *Lecture notes in computer science: Vol. 4678. Advanced concepts for intelligent vision systems* (pp. 97-108). Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74607-2_9

4. Newspaper / Online Newspaper

Brody, J.E. (2007, December 11). Mental reserves keep brain agile. *The New York Times*. <http://www.nytimes.com>

5. E-book

Dahlberg, G., & Moss, P. (2005). *Ethics and politics in early childhood education*. <https://epdf.tips/ethics-and-politics-in-early-childhoodeducation-contesting-early-childhood.html>

Aim and Scope:

The Journal of Science and Technology aims to disseminate of scientific knowledge in the discipline of Mathematics, Science, Technology, Engineering, Agriculture, Medicine, Health Science, Interdisciplinary in science and technology. The journal publishes both research article and review article.

Ownership

Maharakham University
Editorial Office
Division of Research Facilitation and Dissemination,
Khamriang Sub-distict, Kantharawichai District,
Maha Sarakham Province 44150
Tel & Fax: 0 4375 4416 ext. 1754

Advisors

President of Maharakham University
Professor Dr.Visut Baimai
Professor Dr.Vichai Boonsaeng
Professor Dr.Peerasak Srinives

Editor-in-Chief

Professor Dr.Preecha Prathepha

Assistant Editors

Professor Dr.Pairot Pramual
Maharakham University
Professor Dr.Sirithon Siriamornpun
Maharakham University
Associate Professor Dr.Worapol Aengwanich
Maharakham University
Associate Professor Dr.Vallaya Sutthikhum
Maharakham University

Editorial Board

Professor Dr.Thaweesakdi Boonkerd
Chulalongkorn University
Professor Dr.La-orsri Sanoamuang
Khon Kaen University
Professor Dr.Pranee Anprung
Chulalongkorn University
Professor Dr.Niwat Sonoamuang
Khon Kaen University
Professor Dr.Anongrit Kangrang
Maharakham University
Professor Dr.Wongsa Laohasiriwong
Khon Kaen University
Associate Professor Dr.Sunan Saikrasun
Maharakham University
Associate Professor Dr.Suwanna Boonyaleepun
Khon Kaen University
Associate Professor Dr.Kwanjai Kanokmedhakul
Khon Kaen University
Associate Professor Dr.Chantana Aromdee
Khon Kaen University

Associate Professor Dr.Boonchong Chawsithiwong
National Institute of Development Administration
Associate Professor Dr.Porntep Tanonkeo
Khon Kaen University
Associate Professor Dr.Narumon Sangpradub
Khon Kaen University
Associate Professor Dr.Orawich Goompol
Maharakham University
Associate Professor Dr.Sirikasem Sirilak
Naresuan University
Associate Professor Dr.Chawalit Boonpok
Maharakham University
Associate Professor Terdsak Khammeng
Khon Kaen University
Associate Professor Yuen Poovarawan
Kasetsart University
Assistant Professor Dr.Napparat Buddhakala
Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assistant Professor Dr.Anucha Pranchana
Ubon Ratchathani Rajabhat University
Assistant Professor Dr.Seckson Sukhasena
Naresuan University
Assistant Professor Dr.Walaiporn Tongjaroenbuengam
Maharakham University
Assistant Professor Dr.Alongkorn Lamom
Maharakham University
Assistant Professor Dr.Natapol Pumipuntu
Maharakham University
Assistant Professor Dr.Somnuk Puangpronpitag
Maharakham University
Dr.Rakjinda Wattanalai
Siam University
Dr.Adrian Roderick Plant
Maharakham University

Secretary

Chaweewan Akkasesthang

Assistant secretary

Phakwilai Rungwisai
Jirarat Puseerit

Six issues per year

Number 1 January-February
Number 2 March-April
Number 3 May-June
Number 4 July-August
Number 5 September-October
Number 6 November-December