วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์
THE JOURNAL OF APPLIED SCIENCE

ISSN 1513-7805 ปีที่ 15 ฉบับที่ 2 [2559] Vol.15, No. 2 [2016]

บทความวิจัย **หน้า**

1. On the approximation of particular solution of nonhomogeneous linear differential equation with Legendre series 1-19

2. Harvesting indices of Chi-fah Yai pepper (*Capsicum annuum L.*) fruit 20-23

3. การเอนแคปซูเลตสารเมทิลซาลิไซเลตในไมโครแคปซูลของพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ 24-38
   Methyl salicylate encapsulation in biodegradable polymer microcapsule

4. การวัดประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุมคุณภาพสัดส่วนของเสียฟัซซี 39-51
   A performance measurement of fuzzy-p control chart

5. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการมีหนี้สินของครอบครัวข้าราชการพลเรือนสามัญ ในกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล 52-67
   Factors influencing on family's debt of civil servants in bangkok and metropolitan area

6. การพัฒนาระบบฐานข้อมูลการเข้าฝึกอบรมผ่านทางอินเทอร์เน็ต 68-78
   Development of training database management system via internet

7. การออกแบบและพัฒนาถังขยะฆ่าเชื้อโรคด้วยโอโซนระบบพลาสมาความดันสูง 79-89
   Design and development of disinfected bin using ozonization with high pressure plasma system

8. ผลของภาวะอ้วนต่อระบบประสาทอัตโนมัติที่ควบคุมหัวใจของผู้ป่วยที่บำบัดด้วยการฟอกไต ทางหน้าท้องอย่างต่อเนื่อง 90-102
   Effect of obesity on cardiac autonomic nervous system of continuous ambulatory peritoneal dialysis patients

บทความวิชาการ

9. บทบาทของ Verrucomicrobia ในลำไส้ปลวกชั้นต่ำ 103-119
   Roles of Verrucomicrobia in lower termite hindgut

วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์
THE JOURNAL OF APPLIED SCIENCE
ISSN 1513-7805 ปีที่ 15 ฉบับที่ 2 [2559] Vol.15, No. 2 [2016]

วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ เป็นวารสารที่ตีพิมพ์และเผยแพร่บทความวิจัยและบทความทางวิชาการเพื่อเป็นสื่อกลางในการเผยแพร่ความรู้และวิทยาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และเพื่อเป็นแหล่งแลกเปลี่ยนเรียนรู้ระหว่างคณาจารย์ นักวิชาการและนักศึกษา ทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บทความที่เสนอมาอาจเขียนเป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษก็ได้ วารสารจัดตีพิมพ์ปีละ 2 ฉบับ ผู้สนใจสามารถส่งต้นฉบับแบบออนไลน์ได้โดยตรงที่ http://www.journal.sci.kmutnb.ac.th โดยบทความดังกล่าวจะต้องไม่เคยตีพิมพ์เผยแพร่ในการประชุมวิชาการหรือวารสารวิชาการอื่นใดมาก่อน และเป็นข้อคิดเห็นของผู้ส่งบทความเท่านั้น

- **วัตถุประสงค์**

เพื่อเผยแพร่/พัฒนาผลงานจากการวิจัยและผลงานทางวิชาการที่เกี่ยวข้องทางวิทยาศาสตร์พื้นฐาน วิทยาศาสตร์ประยุกต์ และเทคโนโลยี ที่เกี่ยวข้องกับคณิตศาสตร์ สถิติ ฟิสิกส์อุตสาหกรรม เทคโนโลยีสารสนเทศ เทคโนโลยีชีวภาพ อุตสาหกรรมเกษตร สิ่งแวดล้อม เคมีอุตสาหกรรม สถาปัตยกรรม และวิศวกรรมศาสตร์

- **กำหนดการเผยแพร่วารสาร** ปีละ 2 ฉบับ คือ ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม

"บทความทุกบทความจะต้องผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิ อย่างน้อย 2 ท่าน ก่อนที่จะตอบรับการตีพิมพ์"

"เมื่อวารสารส่งบทความไปให้ผู้นิพนธ์แก้ไขแล้ว หากไม่มีการติดต่อกลับมาภายใน 4 สัปดาห์ ทางวารสาร ขอปฏิเสธการตีพิมพ์บทความนั้น"

- **การเผยแพร่วารสาร**

จัดส่งให้หน่วยงานห้องสมุด บริการวิชาการและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทั่วประเทศและสามารถค้นหาได้ในเว็บไซต์นี้

- **การส่งบทความ**

ส่งไฟล์บทความ .doc และ pdf
ที่ **http://www.journal.sci.kmutnb.ac.th**

- **ที่ปรึกษา**

รศ.ดร.สุรพันธ์	ยิ้มมั่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.วิไล	รังสาดทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ดร.โดม	โล่ห์เพ็ชร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

- **บรรณาธิการ**

รศ.ดร.สมโภชน์	น้อยจินดา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

- **บรรณาธิการร่วม**

รศ.ดร.กิตติ	โพธิปัทมะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

- **ผู้ช่วยบรรณาธิการ**

รศ.ดร.เสาวณิต	สุขภารังษี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.วีระศักดิ์	อัศววงศ์อารยะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.วลัยพร	ปฤษณารุณ เอื้อใจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ดร.ชัชวาล	สิงหะพล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ดร.อัครา	ประโยชน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ดร.อภิชาต	ศุรธณี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ดร.สุกัญญา	แพรสมบูรณ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

- **ผู้ทรงคุณวุฒิในกองบรรณาธิการ**

ศ.ดร.ประนอม	จันทรโณทัย	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศ.ดร.ยงค์วิมล	เลณบุรี	มหาวิทยาลัยมหิดล
รศ.ดร.มนตรี	มาลีวงศ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.ดุษฎี	อุตภาพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.สอาด	ริยะจันทร์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร.สิทธิวัฒน์	เลิศศิริ	มหาวิทยาลัยมหิดล
รศ.ดร.เยาวดี	เต็มธนาภัทร	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร.มารินา	เกตุทัต-คาร์นส์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผศ.ดร.วราฤทธิ์	พานิชกิจโกศล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผศ.ดร.เสน่ห์	รุจิวรรณ	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ผศ.ดร.ศุภกานต์	พิมลธเรศ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ดร.นพดล	นันทวงศ์	ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
ดร.มลฤดี	เรณูสวัสดิ์	สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ
ดร.ศรารัตน์	มหาศรานนท์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
พ.อ.หญิง ผศ.ดร.ปนัดดา	หัตถโชติ	วิทยาลัยแพทยศาสตร์ พระมงกุฎเกล้า
Dr. Elvin James	Moor	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

- **ฝ่ายประสานงานและจัดการ**

นางภควรรณ	สีสวย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
นายภิรมย์	พาบุ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
นายปิยะวัฒน์	สุธา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
นางสาววิลัยพร	ขันแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

- **สำนักงาน**

งานวิจัยและประกันคุณภาพการศึกษา สำนักงานคณบดี คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถ.ประชาราษฎร์ 1 บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800 โทรศัพท์ 02-5552000 ต่อ 4217

**"บทความที่ลงพิมพ์ เป็นข้อคิดเห็นของผู้เขียนเท่านั้น
และจะต้องเป็นผู้รับผิดชอบต่อผลทางกฎหมายใดๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นจากบทความนั้น"**

The Journal of Applied Science **Vol. 15 No. 2: 1-19 [2016]**
วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ doi: 10.14416/j.appsci.2016.08.001
ISSN 1513-7805 Printed in Thailand

Research Article

On the approximation of particular solution of nonhomogeneous linear differential equation with Legendre series

Nichaphat Patanarapeelert[1]* and Klot Patanarapeelert[2]

[1]Department of Mathematics, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bang Sue district, Bangkok 10800 Thailand
[2]Department of Mathematics, Faculty of Science, Silpakorn University, Mueang district, Nakhon Pathom 73000 Thailand
***E-mail**: nichaphat.p@sci.kmutnb.ac.th

Abstract

In this study, we propose an approximation method for particular solutions of the nonhomogeneous second-order differential equations by truncated Legendre series. Particulary, the govern problem is a linear differential equation with constant coefficients. The choice of series solutions depends upon the complementary solutions and the approximate nonhomogeneous terms. An upper bound for the approximation error is formulated. Some examples are presented to demonstrate the validity of the proposed method.

Keywords: nonhomogeneous differential equations, particular solutions, Legendre polynomials, series, error bound

Introduction

Many problems in natural science such as physics, engineering and mathematical modeling are governed by differential equations (Jung et al., 2014). Solving such equations will lead to understanding the behaviors of the systems. Although solutions are known to be exist, there is an only few problems that can be solved for analytic solution. Several attempts are devoted to numerical method or approximation techniques to obtain the high accuracy of approximations (Jung et al., 2014).

Taylor series and orthogonal functions such as Chebyshev and Legendre polynomials are powerful tools for functions approximations in terms of polynomials (Gulsu et al., 2006; Wang and Xiang, 2012; Patanarapeelert and Varnasavang, 2013). As a by-product they can be used for approximating the solution of ordinary differential equations. Sezer and Gulsu (2010) proposed a numerical method based on the hybrid Legendre and Taylor polynomials for solving the high-order linear differential equations. Olagunju and Olaninejum (2012) formulated a trial solution for nonhomogeneous differential equations where Legendre polynomials are used as basis functions. Recently, Jung et al. (2014) proposed the method to solutions of second-order differential equations by using Tau method based on Legendre operational matrix.

In this paper, we present a method for approximating the particular solutions of nonhomogenous linear second-order differential equations. Rather than approximating as a whole we focus on in part, approximating particular solution by which the complementary solution is prior known. In doing so, we transfer the original problem into an approximate one

by approximating the nonhomogeneous term with a truncated Legendre series expansion and hence assume a particular solution of the approximated problem in terms of finite Legendre series. Since the nonhomogeneous term and the particular solution are approximated as polynomials, we consider the cases in which they can be dependent on the corresponding complementary solution. We hypothesize that the accuracy of approximation depends on the highest degree of polynomial used in the series; the more number of terms are used, the more decreasing in error magnitude. To verify this we investigate the upper bound for the error between the exact solution and the estimation.

Method of Finding Approximate Solution Based on Legendre Series

Consider a nonhomogeneous linear second-order differential equation

$$L[y] = ay''(t) + by'(t) + cy(t) = f(t) \tag{1}$$

with the initial conditions

$$y(0) = \alpha_0,\ y'(0) = \beta_0 \tag{2}$$

where $a \neq 0$, b, c are constants and $f(t)$ is a continuously differentiable function up to order n. The general solution for (1) is given by $y = y_c + y_p$ where y_c is the complementary solution obtained from the associated homogeneous differential equation while y_p is a particular solution. In order to find the approximation of y_p, we first approximate the nonhomogeneous term $f(t)$ as the truncated Legendre series as

$$f(t) = \sum_{m=0}^{n} a_m P_m \tag{3}$$

where $P_0 = 1$,

$P_1 = t$,

$P_{m+1} = \frac{1}{m+1}\left[(2m+1)tP_m - mP_{m-1}\right]$; $m = 2, \ldots, n$

are the Legendre polynomials and the coefficients are denoted by

$$a_m = \frac{2m+1}{2}\int_{-1}^{1} f(t)P_m(t)dt$$

where $-1 \le t \le 1$. Noting for generality that even $f(x)$ is defined on $\tau_1 \le x \le \tau_2$, we can transform into $-1 \le t \le 1$ by using the relation $x = \frac{1}{2}\left[(\tau_1 - \tau_0)t + \tau_1 + \tau_0\right]$ (Ascher, 2008). We then obtain an approximated problem for equation (1) as

doi: 10.14416/j.appsci.2016.08.001

$$L[\hat{y}] = a\hat{y}''(t) + b\hat{y}'(t) + c\hat{y}(t) = \sum_{m=0}^{n} a_m P_m \tag{4}$$

with the initial conditions

$$\hat{y}(0) = \gamma_0,\ \hat{y}'(0) = \eta_0 . \tag{5}$$

For this problem we suppose its solution in the form $\hat{y} = \hat{y}_c + \hat{y}_p$. It should be noted that the form of complementary solutions of equations (1) and (4) are similar. In order to solve for particular solution we assume that

$$\hat{y}_p = \sum_{i=0}^{n+l} b_i P_i - (AP_0 + BP_1) \tag{6}$$

where the unknown parameters l, A and B depend on the form of complementary solution. The reason behind this is that the linearly independence of two solutions must be preserved (Rice and Do, 2012). To illustrate this clearly, we classify l, A and B as follows.

Case I. If there is no any term of polynomials appearing in homogeneous solution, then

$$l = A = B = 0 \tag{7}$$

Case II. If there is a polynomial consisting of only constant term appearing in homogeneous solution, then

$$l = 1, B = 0, A = \sum_{m=0}^{\left[\frac{n}{2}\right]} \frac{(-1)^m (2m)!}{2^{2m}(m!)^2} b_{2m} \tag{8}$$

where $\left[\frac{n}{2}\right] = \frac{n}{2}$ for $n = 0, 2, 4, \ldots$ and $\left[\frac{n}{2}\right] = \frac{n+1}{2}$ for $n = 1, 3, 5, \ldots$.

Case III. If there is a polynomial of degree one appearing in homogeneous solution, then

doi: 10.14416/j.appsci.2016.08.001

$$l=2,\ A=\sum_{m=0}^{\left[\frac{n+2}{2}\right]}\frac{(-1)^m(2m)!}{2^{2m}(m!)^2}b_{2m},\ B=\sum_{m=0}^{\left[\frac{n}{2}\right]}\frac{(-1)^m(2m+2)!}{2^{2m+1}m!(m+1)!}b_{2m+1} \tag{9}$$

where $\left[\frac{n+2}{2}\right]=\frac{n+2}{2}$ for $n=0,2,4,\ldots$ and $\left[\frac{n+2}{2}\right]=\frac{n+1}{2}$ for $n=1,3,5,\ldots$.

In order to determine the coefficients b_i, we substitute (6) into (4), so that

$$a\sum_{i=0}^{n+l}b_iP_i''+b\left(\sum_{i=0}^{n+l}b_iP_i'-BP_1'\right)+c\left(\sum_{i=0}^{n+l}b_iP_i-AP_0-BP_1\right)=\sum_{m=0}^{n}a_mP_m\ . \tag{10}$$

The derivatives of Legendre polynomials can be written in the form of Legendre polynomials as

$$P_n'=\sum_{m=0}^{n}(2n-4m-1)P_{n-2m-1}\ \ ;n\geq 0\ (P_n=0\ ;\ n\leq 0)\,, \tag{11}$$

$$P_n''=\sum_{m=0}^{n}(2n-4m-1)\sum_{k=0}^{n-2m-1}(2n-4m-4k-3)P_{n-2m-2k-2}. \tag{12}$$

Employing (11) and (12), we observe that equation (10) becomes the algebraic equation of Legendre polynomials. Finally, the values of b_i are accomplished by equating the corresponding coefficients of P_i and solving the system of algebraic equations.

Upper Bound for Approximation Error

In this section, we investigate an upper bound for the error between the exact solution and the approximated solution obtained from the method mentioned above.

Let $z=y-\hat{y}$ denotes the error of approximated solution, this quantity is then satisfied the differential equation

$$L[z]=az''(t)+bz'(t)+cz(t)=E(t) \tag{13}$$

where

$$E(t) = f(t) - \sum_{m=0}^{n} a_m P_m = \sum_{m=n+1}^{\infty} a_m P_m \,. \tag{14}$$

We note that $E(t)$ is an error for approximating nonhomogeneous term. In order to determine the bounds for solution of (13), we follow the theory developed in previous work (Brauer, 1963). To be proceed, we first rewrite (13) in the form of system of first-order equations by letting $u(t) = z$ and $v(t) = dz/dt$. The resulting system is given by

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} &= v \\ \frac{dv}{dt} &= \frac{E(t) - cu - bv}{a}. \end{aligned} \tag{15}$$

The above equations can be written in matrix notation by denoting $\mathbf{X}(t) = (u \;\; v)^T$ as a vector function. Equation (16) then becomes

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{f}(t, \mathbf{X}) = A\mathbf{X} + \mathbf{e} \tag{16}$$

where

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{c}{a} & -\frac{b}{a} \end{pmatrix}, \; \mathbf{e} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{E(t)}{a} \end{pmatrix}. \tag{17}$$

Next, we will determine a scalar function that is bounded above the right hand side of (17). Since

$$\left\| \mathbf{f}(t, \mathbf{X}) \right\| \le \left\| A \right\| \left\| \mathbf{X} \right\| + \left\| \mathbf{e} \right\| \tag{18}$$

where $\left\| . \right\|$ is a vector norm, and

$$\|\mathbf{e}\| = \left|\frac{E(t)}{a}\right| \le \frac{1}{|a|}\sum_{m=n+1}^{\infty}|a_m P_m(t)| \le \frac{1}{|a|}\sum_{m=n+1}^{\infty}|a_m| \tag{19}$$

because $|P_m(t)| \le 1$ [10], it follows that

$$\|\mathbf{f}(t,\mathbf{X})\| \le \|A\|\|\mathbf{X}\| + \frac{1}{|a|}\sum_{m=n+1}^{\infty}|a_m|. \tag{20}$$

Define a function

$$\omega(r) = \|A\| r + \frac{1}{|a|}\sum_{m=n+1}^{\infty}|a_m| \tag{21}$$

and noting that $r \equiv r(t) > 0$ is a positive function. From (20), it is true that

$$\|\mathbf{f}(t,\mathbf{X})\| \le \omega(\|\mathbf{X}\|) \tag{22}$$

Solving for $r(t)$ of an equation

$$r' = \omega(r) \tag{23}$$

with $r(0) = \|\mathbf{X}(0)\|$ and $\omega(r)$ is given in (21), we have

$$r(t) = \frac{e^{\|A\|t}}{|a|}\left(\frac{1-e^{-\|A\|t}}{\|A\|}\right)\sum_{m=n+1}^{\infty}|a_m| + e^{\|A\|t}r(0). \tag{24}$$

From the theory of upper bound for solutions of ordinary differential equations (Brauer, 1962), we can conclude that

$$\|\mathbf{X}(t)\| \le r(t) \tag{25}$$

for all t. By means of vector norm, we arrive at the main result

$$\left|y-\hat{y}\right| \le r(t) \tag{26}$$

The expression of $r(t)$ can be determined explicitly following (24). The difficulty arises however when attempting to calculate the summation $\sum |\, a_m \,|$. To facilitate the calculation some properties of truncated Legendre series expansion is introduced (Wang and Xiang, 2011). Since $f, f', f'', \ldots, f^{(n-2)}$ are continuous on $[-1,1]$ and if $\left\| f^{(n-1)} \right\|_T = V_{n-1} < \infty$ where

$$\left\| \xi \right\|_T = \int_{-1}^{1} \frac{\left|\xi'(t)\right|}{\sqrt{1-t^2}}\, dt \tag{27}$$

for some $n \ge 2$, we apply the error bounds of truncated Legendre series expansion derived by Wang and Xiang (2011) to get that

$$\sum_{m=n+1}^{\infty} \left|a_m\right| \le \sum_{m=n+1}^{\infty} \frac{V_{n-1}}{\left(m-\frac{1}{2}\right)\left(m-\frac{3}{2}\right)\ldots\left(m-\frac{2n-3}{2}\right)} \sqrt{\frac{\pi}{2(m-n)}}\,. \tag{28}$$

Thus,

$$\left|y(t)-\hat{y}(t)\right| \le ERB(t) \tag{29}$$

where

$$ERB(t) = \frac{e^{\|A\|t}}{|a|}\left(\frac{1-e^{-\|A\|t}}{\|A\|}\right)\sum_{m=n+1}^{\infty}\left[\frac{V_{n-1}}{\left(m-\frac{1}{2}\right)\left(m-\frac{3}{2}\right)\ldots\left(m-\frac{2n-3}{2}\right)}\sqrt{\frac{\pi}{2(m-n)}}\right] + e^{\|A\|t} r(0) \tag{30}$$

with $n \ge 2$, is the upper bound for approximation error as desired.

Examples

Here, we provide some examples to illustrate our method presented in the previous section.

Example 1 In this example, we find the general solution of the nonhomogeneous linear second order differential equation

$$y'' - y' = \sin^{-1} t \,. \tag{31}$$

The complementary solution of (31) is $c_1 + c_2 e^t$. Employing the proposed method, we rewrite the nonhomogeneous term in the form of Legendre series expansions as

$$\sin^{-1} t = a_0 P_0 + a_1 P_1 + a_2 P_2 + a_3 P_3 \tag{32}$$

where $a_0 = 0,\ a_1 = \frac{3\pi}{8},\ a_2 = 0,\ a_3 = \frac{\pi}{8}$ (Patanarapeelert and Varnasavang, 2013).

From (32), the problem (31) is rewritten as

$$\hat{y}'' - \hat{y}' = a_0 P_0 + a_1 P_1 + a_2 P_2 + a_3 P_3 \,. \tag{33}$$

From case II, we have $l = 1,\ B = 0$ since the complementary solution has a constant term. Therefore,

$$\hat{y}_p = \sum_{i=0}^{4} b_i P_i - A P_0 \tag{34}$$

where

$$A = \sum_{m=0}^{2} \frac{(-1)^m (2m)!}{2^{2m} (m!)^2} b_{2m} \quad . \tag{35}$$

After substituting (34) and (35) in (33), we have $b_1 = -\frac{9\pi}{4},\ b_2 = -\frac{41\pi}{56}, b_3 = -\frac{\pi}{8}, b_4 = -\frac{\pi}{56}$.

The expression of the particular solution (34) after rearranging terms in increasing powers of t is

$$\hat{y}_p = -\frac{7\pi}{4} t - \frac{33\pi}{32} t^2 - \frac{5\pi}{6} t^3 - \frac{5\pi}{64} t^4 \,. \tag{36}$$

Therefore, we finally obtain the approximate solution as

$$\hat{y} = c_1 + c_2 e^t - \frac{7\pi}{4}t - \frac{33\pi}{32}t^2 - \frac{5\pi}{6}t^3 - \frac{5\pi}{64}t^4. \quad (37)$$

We note that the method of undetermined coefficients is not applicable to linear equation (31) with such nonhomgeneous term. In addition, we could not find its particular solution by employing the method of variation of parameters analytically as well. Therefore, the above procedure can be used as alternative way to approximate the solution.
We further illustrate the results of an upper bound for the error between the exact solution and the approximated solution by the given following examples.

Example 2 Consider the nonhomogeneous linear second order differential equation

$$y''(t) = e^t \quad (38)$$

with the initial conditions

$$y(0) = 2,\ y'(0) = 1. \quad (39)$$

We start with the approximation

$$e^t = a_0 P_0 + a_1 P_1 + a_2 P_2 \quad (40)$$

where the coefficients of Legendre polynomials $a_0 = 1.1752, a_1 = 1.1036, a_2 = 0.3578$ are obtained from the orthogonal relation $a_m = \frac{2m+1}{2}\int_{-1}^{1} e^t P_m(t)dt$. Hence, we now solve the problem

$$\hat{y}''(t) = a_0 P_0 + a_1 P_1 + a_2 P_2 \quad (41)$$

with the initial conditions

$$\hat{y}(0) = 2,\ \hat{y}'(0) = 1. \quad (42)$$

Equations (41) has a complementary solution

$$\hat{y}_c = c_1 + c_2 t \quad (43)$$

 doi: 10.14416/j.appsci.2016.08.001

where c_1, c_2 are arbitrary constants.

Since there is the polynomials with degree one appeared in (43), we assume the particular solution for (41) as

$$\hat{y}_p = \sum_{i=0}^{4} b_i P_i - (AP_0 + BP_1) \tag{44}$$

where

$$\begin{aligned} A &= \sum_{m=0}^{2} \frac{(-1)^m (2m)!}{2^{2m}(m!)^2} b_{2m} = b_0 - \frac{1}{2} b_2 + \frac{3}{8} b_4 \\ B &= \sum_{m=0}^{1} \frac{(-1)^m (2m+2)!}{2^{2m+1} m!(m+1)!} b_{2m+1} = b_1 - \frac{3}{2} b_3. \end{aligned} \tag{45}$$

Substituting (44) in (41) and employing (12), we get

$$(3b_2 + 10b_4)P_0 + 15b_3 P_1 + 35b_4 P_2 = a_0 P_0 + a_1 P_1 + a_2 P_2 . \tag{46}$$

Comparing the coefficients of P_i ; $i = 0,1,2$, we obtain

$$b_2 = \frac{1}{3} a_0 - \frac{2}{21} a_2, \; b_3 = \frac{1}{15} a_1, \; b_4 = \frac{1}{35} a_2. \tag{47}$$

After rearranging, we find the particular solution (44) in the form

$$\hat{y}_p = \left(\frac{a_0}{2} - \frac{a_2}{4} \right) t^2 + \frac{a_1}{6} t^3 + \frac{a_2}{8} t^4 . \tag{48}$$

Therefore, the general solution of equation (41) is

$$\hat{y} = c_1 + c_2 t + \left(\frac{a_0}{2} - \frac{a_2}{4} \right) t^2 + \frac{a_1}{6} t^3 + \frac{a_2}{8} t^4 . \tag{49}$$

Under the conditions (42), the approximate solution for the original equation (38) is

$$\hat{y} = 2 + t + 0.4981t^2 + 0.1839t^3 + 0.0447t^4. \quad (50)$$

While, the exact solution of (41) is

$$y = 1 + t + e^t. \quad (51)$$

Next, we find the upper bound for the absolute error between (50) and (51) by using (30). For the problem (38), $a = 1, b = c = 0$. Therefore, $A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ and $\|A\| = 1$. Calculating numerically under the tolerance of order 10^{-5}, we find that

$$\sum_{m=3}^{\infty} \frac{V_1}{\left(m - \frac{1}{2}\right)} \sqrt{\frac{\pi}{2(m-2)}} = 8.2260$$

where $V_1 = \int_{-1}^{1} \frac{e^t}{\sqrt{1-t^2}} dt = 3.9775$. Here, $r(0) = 0$. Therefore, the upper bound is

$$ERB(t) = 8.2260e^t(1 - e^{-t})$$

We then conclude that $\left|y(t) - \hat{y}(t)\right| \le 8.2260e^t(1 - e^{-t})$.

Table 1 shows the accuracy of approximations including with errors and error bounds. The plots of the exact solution, the approximate one, and $\hat{y}(t) \pm ERB(t)$ are shown in Figure 1. In this example we eliminate the effect of initial condition by choosing the same values as the original problem. However, the magnitude of errors is quite large. This may be caused by the number of terms used in approximation is low. We observe that order in magnitude of errors does not agree with the order of magnitude of errors in function approximation (see Table 2). This result implies that the accuracy of approximate nonhomogeneous term does not necessarily guarantee the accuracy of approximate solutions.

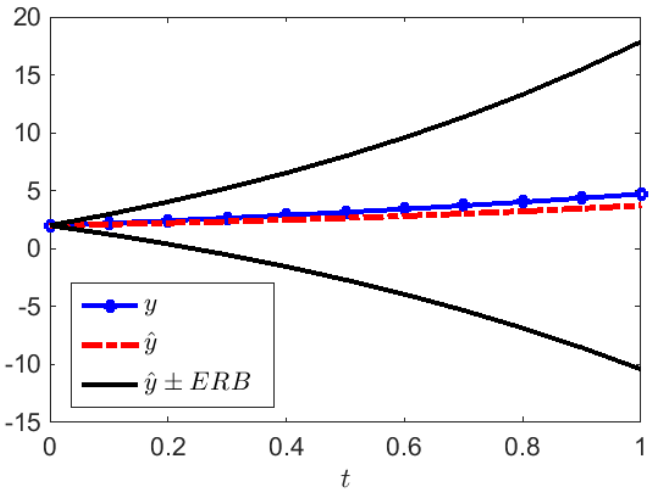


Figure 1. Plots of $y, \hat{y}, \hat{y} + ERB,$ and $\hat{y} - ERB$ of Example 2.

Table 1. The comparisons between the exact solution and the approximation for Example 2.

t	y	$\hat{y}$	$\lvert y - \hat{y} \rvert$	ERB
0	2	2	0	0
0.2	2.4214	2.2215	0.1999	1.8213
0.4	2.8918	2.4926	0.3992	4.0457
0.6	3.4221	2.8248	0.5973	6.7627
0.8	4.0255	3.2312	0.7943	10.0813
1	4.7183	3.7267	0.9916	14.1346

doi: 10.14416/j.appsci.2016.08.001

Table 2. The errors between the nonhomogeneous term and the truncated Legendre series expansion for Example 2.

t	e^t	$\sum_{m=0}^{2} a_m P_m$	$\left\lvert e^t - \sum_{m=0}^{2} a_m P_m \right\rvert$
0	1.0000	0.9963	0.0037
0.2	1.2214	1.2385	0.0171
0.4	1.4918	1.5236	0.0318
0.6	1.8221	1.8517	0.0296
0.8	2.2255	2.2227	0.0029
1	2.7183	2.6366	0.0817

Example 3 Consider the following differential equation

$$y'' - 5y' + 6y = \sin t \tag{52}$$

with the initial conditions

$$y(0) = 1,\ y'(0) = \frac{1}{2}. \tag{53}$$

Here, we set

$$\sin t = \sum_{m=0}^{5} a_m P_m \tag{54}$$

where $a_0 = a_2 = a_4 = 0, a_1 = 0.9035, a_3 = -0.0630, a_5 = 0.0010$. Therefore, we have the approximate problem as

$$\hat{y}'' - 5\hat{y}' + 6\hat{y} = a_0 P_0 + a_1 P_1 + a_2 P_2 + a_3 P_3 + a_4 P_4 + a_5 P_5 \tag{55}$$

with the initial condition

$$\hat{y}(0)=1,\ \hat{y}'(0)=\frac{1}{2}. \tag{56}$$

A complementary solution for (55) is given by

$$\hat{y}_c = c_1 e^{2t} + c_2 e^{3t} \tag{57}$$

where c_1, c_2 are arbitrary constants.
Since there has no any polynomial term in (57), we assume the particular solution for (55) as

$$\hat{y}_p = \sum_{i=0}^{5} b_i P_i \tag{58}$$

To find b_i, we substitute (58) and use (11), (12) to (55) and then equate the coefficients of P_i ; $i=0,1,...,5$, to get a linear system of equations. After some calculations, we have

$$\begin{aligned} b_5 &= \frac{a_5}{6},\ b_4 = \frac{a_4+45b_5}{6},\ b_3 = \frac{a_3+35b_4-63b_5}{6}, \\ b_2 &= \frac{a_2+25b_3-35b_4+25b_5}{6},\ b_1 = \frac{a_1+15b_2-15b_3+15b_4-42b_5}{6}, \\ b_0 &= \frac{a_0+5b_1-3b_2+5b_3-10b_4+5b_5}{6}. \end{aligned} \tag{59}$$

The solution of initial value problem (55)–(56) is

$$\begin{aligned} \hat{y} = c_1 e^{2t} + c_2 e^{3t} + b_0 - \frac{1}{2}b_2 + \frac{3}{8}b_4 + \left(b_1 - \frac{3}{2}b_3 + \frac{15}{8}b_5\right)t \\ + \left(\frac{3}{2}b_2 - \frac{15}{4}b_4\right)t^2 + \left(\frac{5}{2}b_3 - \frac{35}{4}b_5\right)t^3 + \frac{35}{8}b_4 t^4 + \frac{63}{8}b_5 t^5 \end{aligned} \tag{60}$$

where

$$c_1 = -3b_0 + b_1 + \frac{3}{2}b_2 - \frac{3}{2}b_3 - \frac{9}{8}b_4 + \frac{15}{8}b_5 + \frac{5}{2}$$
$$c_2 = 2b_0 - b_1 - b_2 + \frac{3}{2}b_3 + \frac{3}{4}b_4 - \frac{15}{8}b_5 - \frac{3}{2}. \quad (61)$$

To see how accurate the approximation is, we find the exact solution of (52)–(53). It is given by

$$y = \frac{23}{10}e^{2t} - \frac{7}{5}e^{3t} + \frac{1}{10}\sin t + \frac{1}{10}\cos t\,. \quad (62)$$

The upper bound for the absolute error for this example can be obtained in similar way. We first determine $A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -6 & 5 \end{pmatrix}$ and $\|A\| = \sqrt{61}$ and

$$V_4 = \int_{-1}^{1} \frac{\cos t}{\sqrt{1-t^2}}\,dt = 2.4039\,.$$

By calculating numerically under the tolerance of order 10^{-5}, we find that

$$\sum_{m=6}^{\infty} \frac{V_4}{\left(m-\frac{1}{2}\right)\left(m-\frac{3}{2}\right)\left(m-\frac{5}{2}\right)\left(m-\frac{7}{2}\right)} \sqrt{\frac{\pi}{2(m-5)}} = 0.0207\,.$$

We note that $r(0) = 0$. Therefore, the upper bound is

$$ERB(t) = \frac{0.0207}{\sqrt{61}} e^{\sqrt{61}t}(1 - e^{-\sqrt{61}t})\,.$$

Thus, $\left|y(t) - \hat{y}(t)\right| \le \frac{0.0207}{\sqrt{61}} e^{\sqrt{61}t}(1 - e^{-\sqrt{61}t})$.

We present the accuracy of approximations including with errors and error bounds in Table 3. The plots of the exact and the approximate solutions, and $\hat{y}(t) \pm ERB(t)$ are shown in Figure 2. Here, we choose similar initial conditions for both problems. As opposed to previous example, the number of terms used in approximation is larger. This results in the small errors presented in approximate nonhomogeneous term (see Table 4). Also, the errors of approximate solution are low comparing with the previous example.

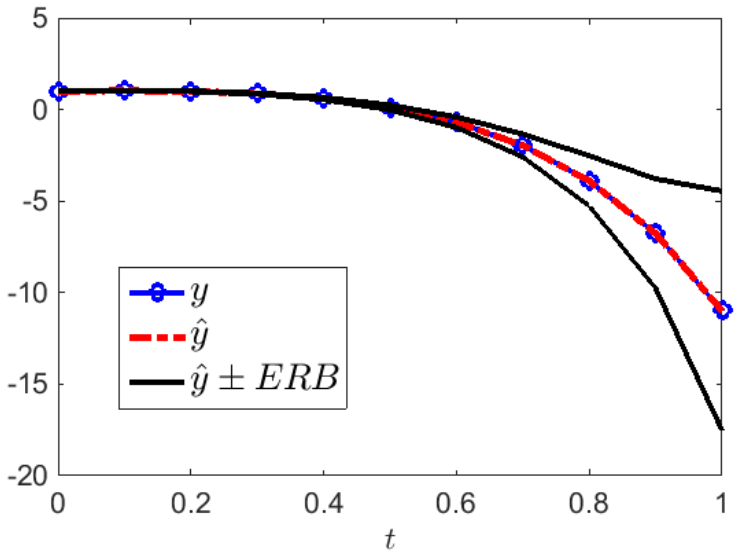


Figure 2. Plots of $y, \hat{y}, \hat{y} + ERB,$ and $\hat{y} - ERB$ of Example 3.

Table 3. The comparisons between the exact solution and the approximation for Example 3.

t	y	$\hat{y}$	$\lvert y - \hat{y} \rvert$	ERB
0	1	1	0	0
0.2	0.9981041	0.9981039	0.0000002	0.0099881
0.4	0.6016284	0.6016264	0.0000020	0.0576174
0.6	-0.6942397	-0.6942475	0.0000078	0.2847415
0.8	-3.8990661	-3.8990875	0.0000214	1.3678025
1	-10.9867453	-10.9867951	0.0000498	6.5324726

Table 4. The errors between the nonhomogeneous term and the truncated Legendre series expansion for Example 3.

t	$\sin t$	$\sum_{m=0}^{5} a_m P_m$	$\left\lvert \sin t - \sum_{m=0}^{5} a_m P_m \right\rvert$
0	0	0	0
0.2	0.1986693	0.1986475	0.0000218
0.4	0.3894183	0.3893906	0.0000277
0.6	0.5646425	0.5646274	0.0000151
0.8	0.7173561	0.7173605	0.0000044
1	0.8414710	0.8415000	0.0000290

Conclusion

In summary, we proposed an approximation technique for solving the linear second-order differential equation with nonhomogeneous term. The method presented here is different from previous works since it aims to approximate only the particular solution. It is believed that approximation in part may confine potentially the propagation of errors. The present method takes an advantage from approximating function with Legendre series by assuming series solution with the same degree as of approximate nonhomogeneous term. Since we are approximating the particular solution we improve the method by classifying the forms of series according to its complementary solution. This is possible in general when solving the equation with the traditional technique. To insure that the approximating results should not be divergent from the exact solution we derived the bound of approximation errors.

The expression of error bound shows the dependency of initial conditions and the degree of constructed series. We observe that however the derived error bound is exponentially increased with t (the independent variable). This effect dominates all other dependent factors if t is large. We argue that the reason behind this is that the method used for derivation is based upon the initial value problem (see Brauer (1963)). Thus, under the derived error bound, the approximation is locally (small interval of t) rather than globally. Importantly, we see that the error bound indicates how the precise approximation depends on the number of terms in constructed series. In the provided examples, the error bounds are exponentially increased with t. However, by increasing the number of terms of series we can expect the reduction in magnitude of errors (see Figure 3). It is observed that if V_n in (27) is nonincreasing with n, the dependence on number of terms is only present by the series

$$\sum_{m=n+1}^{\infty} \frac{1}{\left(m-\frac{1}{2}\right)\left(m-\frac{3}{2}\right)\ldots\left(m-\frac{2n-3}{2}\right)}\sqrt{\frac{\pi}{2(m-n)}} \tag{63}$$

which is decreased with n.

The proposed method can be extended to the higher order of nonhomogeneous differential equations with constant coefficients and could be the first step of error analysis for the more complex problem. As mentioned, solving for analytic solution of differential equations is difficult even for linear nonhomogeneous problem. The method present here is as alternative, especially when the nonhomogeneous term is given in complex form. Nevertheless, there are some gaps that can be considered for the possible future work such as the derivation of error bounds for boundary value problems, the use of numerical interpolations for approximate function based on both Legendre and Chebyshev series. In addition, based on this method the possible extension should be the approximation for the differential equations with variable coefficients.

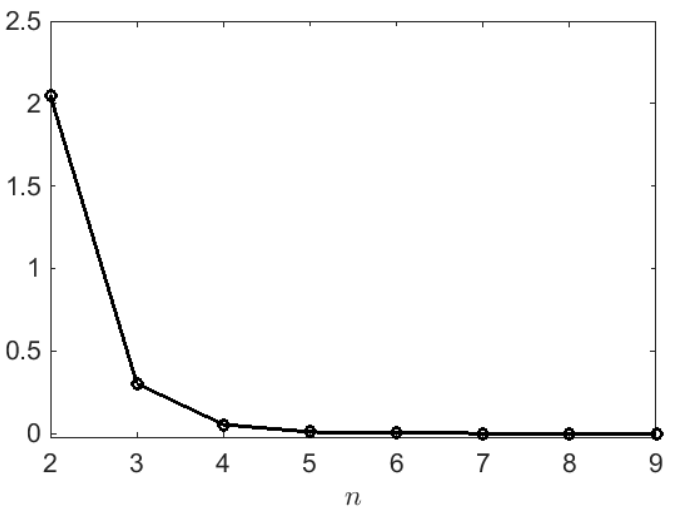


Figure 3. Plot of series (63) with respect to n.

References

Andrews L.C., (1992) Special Functions of Mathematics for Engineers, 2nd edition, McGraw-Hill, New York, U.S.A., 275 P.

Ascher U., (2008) “Methods and Concepts for ODEs”, pp. 77–79, In: Ghattas O. (Ed), Numerical Methods for Evolutionary Differential Equations, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, U.S.A.

Brauer F., (1963) Bounds for Solutions of Ordinary Differential Equations. Proc. Amer. Math. Soc., 14: 36–43.

Gulsu M., Sezer M. and Tanay B., (2006) A Matrix Method for Solving High-Order Linear Difference Equaitons with Mixed Argument Using Hybrid Legendre and Taylor Polynomials. J. Franklin Inst., 343: 647–659.

Jung C.Y., Liu Z., Rafiq A., Ali F. and Kang S.M., (2014) Solution of Second Order Linear and Nonlinear Ordinary Differential Equations using Legendre Operational Matrix of Differentiation. Int. J. Pure Appl. Math., 93(2): 285–295.

Olagunju A.S. and Olaniregun D.G., (2012) Legendre-Coefficients Comparison Methods for the Numerical Solution of a Class of Ordinary Differential Equations. IOSR-JM., 2(2): 14–19.

Patanarapeelert N. and Varnasavang V., (2013) Comparison Study of Series Approximation and Convergence between Chebyshev and Legendre Series. Appl. Math. Sci., 7(65): 3225–3237.

Rice G.R. and Do D.D., (2012) Applied Mathematics and Modeling for Chemical Engineers, 2nd edition, John Wiley & Sons Inc., New Jersey, U.S.A., 400 P.

Sezer M. and Gulsu M., (2010) Solving High-Order Linear Differential Equations by a Legendre Matrix Method Based on Hybrid Legendre and Taylor Polynomials. NUMER. METH. PART. D. E., 26(3): 647–661.

Wang H. and Xiang S., (2011) On the Convergence Rates of Legendre Approximation. Math. Comput., 81(278): 861–877.

The Journal of Applied Science **Vol. 15 No. 2: 20-23 [2016]**
วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ doi: 10.14416/j.appsci.2016.11.001
ISSN 1513-7805 Printed in Thailand

Research Article

Harvesting indices of Chi-fah Yai pepper (*Capsicum annuum* L.) fruit

Sompoch Noichinda[1]*, Kitti Bodhipadma[1], Daranee Moungjomprang[1], Nutjaree Thongnurung[1] and Hattachai Kasiolarn[2]

[1]Division of Agro-Industrial Technology, Faculty of Applied Science, King Mongkut' University of Technology North Bangkok, Bangsue, Bangkok 10800 Thailand
[2]Department of Plant Production Technology, Faculty of Agricultural Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520 Thailand

***E-mail**: snd@kmutnb.ac.th

Abstract

Maturity of chili and pepper fruits can be predicted from the peel color. The mature green stage of Chi-fah Yai pepper fruit contained highest amount of chlorophyll (0.42 g/gFW) and the chlorophyll declined in red stage (0.1 g/gFW). Conversely, chlorophyllase activity increased when pepper fruit turned from green (0.18 unit/min/mg protein) to reddish-green (0.61 unit/min/mg protein). For anthocyanin accumulation, synthesis of this pigment began at the mature green stage and elevated until fully red stage. Similar to fruit ripening pattern, total sugar content raised from mature green to reddish-green stages and slightly declined in fully red stage. In case of ascorbic acid, this antioxidant content increased throughout fruit developmental stage. For capsaicin, the hot or pungency taste, it was found in both of inner wall pericarp and placenta and this compound slightly increased during fruit ripening on plant. Thus, we suggested that Chi-fah Yai pepper fruit should be harvested from stage 3 because it riches of nutritional value such as total sugar, ascorbic acid and capsaicin.

Keywords: chilli, fruit ripening, maturity index

Introduction

There are so many kinds of chili and pepper grown in Thailand but Chi-fah Yai was classified as a "pepper" (*Capsicum annuum*) due to its fruit having a moderate hot taste which contained 13 and 15 mg/gFW capsaicin in the pulp and placenta, respectively, (Noichinda et al., 2012) that suitable for cooking Thai curry. Recent research showed that the different fruit maturity stages of Chi-fah Yai pepper fruit had antioxidant substances and free radical scavenging ability (Naisupab et al., 2015).

Normally in immature stage of *Capsicum* fruit, the peel color stays green which contains high content of chlorophyll and then this photosynthetic pigment declines in accompany with the synthesis of carotene (orange-red pigment) or xanthophyll (yellow pigment) during fruit ripening. However, anthocyanin which showing the color character from red to purple was also discovered as the main pigment in chili fruit (Lightbourn et al., 2007; Lightbourn et al., 2008; Aza-Gonzalez et al., 2012).

Hence, in this research, we investigated the nutritional value of different color stages of pepper fruit to establish the "maturity index" of Chi-fah Yai pepper fruit.

Materials and methods

The different stages (green, 25% red, 50% red, 75% red and fully red as shown in figure 1A) of Chi-fah Yai pepper fruits were harvested from a commercial pepper grower garden in Nakorn Pathom province. Quality of each maturation fruit group was investigated as the following:

(1) Chlorophyll content in acetone extraction solution was measured with a spectrophotometer method at 652 nm (Witham et al., 1971).

(2) Chlorophyllase was extracted and assayed according to the method of Shimokawa et al. (1978).

(3) Anthocyanin content in ethanol extraction (95% ethanol + conc. HCl + H_2O in the ratio of 85:2:13) of fruit pulp was measured with a spectrophotometer at 540 nm (Weaver and Pool, 1971).

(4) Sugar content in the extraction solution of 80% phenol plus conc. H_2SO_4 was measured with a spectrophotometer at 490 nm (Dubois et al., 1956).

(5) Ascorbic acid was analyzed by AOAC (1984) method.

(6) Capsaicin content was measured by thin layer chromatography according to Spanyar and Blazovich (1969) which slightly modified by using Kiesel G layers model F254 silica gel coating 0.25 mm chromatography.

Results and discussion

The fully mature of pepper fruits are differ among its peel color, green or dark-green. Normally the harvesting index of pepper depends on the utilizing purpose, particularly for salad, stir fry or curry paste. Most of pepper fruits are classified as a non-climacteric respiration since they do not undergo ripening after harvested from the pepper plant. The fruit peel color simply changes from green to red (Lockwood and Vines, 1972). This phenomenon is well occurred when fruit still stays on plant. For the beneficial of fruit color improvement, we must spay ethylene releasing solution (ethephon) during fruit maturation on tree (Krajayklang et al., 1999).

Mature green stage of Chi-fah Yai pepper fruit contained chlorophyll (0.42 g/gFW) and slightly declined in more mature stage fruit until nearly stable (0.1 g/gFW) at fully red (Fig. 1A and 1B) which was correlated to the increasing chlorophyllase (chlorophyll degradation enzyme) activity that reached to the peak (0.61 unit/min/ug protein) at red stage (Fig. 1B).

For red color in Chi-fah Yai pepper fruit, it was the combination two red pigments such as carotene a kind of carotenoid that represent orange-red color and anthocyanin (red-purple color). In our experiment, anthocyanin was investigated as a red color. At mature green stage, anthocyanin already appeared in pepper fruit pulp but it was dominated by chlorophyll until it dramatically increased at stage 3 (Fig. 1C). As we known, pepper fruit is a good source of ascorbic acid. It held high content of ascorbic acid about 0.5-0.8 g/100ml of fruit juice (Fig. 1D). Our result indicates that the more maturity stage the higher ascorbic acid content. Besides, we also found that the total sugar content rose during red pad developing on fruit peel (Fig. 1E), then declined when peel color completely red which means that sugar was utilized in the respiratory process.

Capsaicin is a hot taste substance in *Capsicum* fruits. The degree of pungency is depending on species and variety. Most of *C. frutescence* fruits are hotter than *C. annum* (Noichinda et al., 2012). In different parts of *Capsicum* fruit, it holds different contents of capsaicin. Red stage of pepper fruit which contained high amount of capsaicin was hotter than green stage (Fig. 1F). Interestingly, the parcenta contained high amount of capsaicin than those of fruit pulp. Since capsaicin is a subclass of phenolics that almost located in the seed and parcenta of *Capsicum* fruit (Noichinda et al., 2012). Therefore, capsaicin might be more synthesized in seed and parcenta than fruit pulp.

Because of the different in many compounds from various stages of fruit, we can conclude from our experiment that Chi-fah Yai pepper fruit should be started to be harvested from stage 3 since it contained high nutritional values such as total sugar, ascorbic acid and capsaicin content.

References

AOAC., (1984) Official Method of Official Analytical Chemists, 14th edition, Association Official Analytical Chemists, Washington D.C., 1141 P.

Aza-Gonzalez C., Nunez-Palenius H.G. and Ochoa-Alejo N., (2012) Molecular biology of chili pepper anthocyanin biosynthesis. J. Mex. Chem. Soc., 56(1): 93-98.

Dubois M., Gilles K.A., Hamilton J.K., Rebers P.A. and Smith F., (1956) Colorimetric method for determination of sugars and related substances. Anal. Chem., 28(3): 350-356.

Krajayklang M., Klieber A., Wills R.H.B. and Dry P.R., (1999) Effect of ethephon on fruit yield, colour and pungency of cayenne paprika pepper. Aust. J. Exp. Agric., 39: 81-86.

Lightbourn G.J., Stommel J.R. and Griesbach R.J., (2007) Epistatic interactions influencing anthocyanin gene expression in *Capsicum annuum*. J. Amer. Soc. Hort. Sci., 132(6): 824-829.

Lightbourn G.J., Griesbach R.J., Novotny J.A., Clevidence B.A., Rao D.D. and Stommel J.R., (2008) Effect of anthocyanin and carotenoid combinations on foliage and immature fruit color of *Capsicum annuum* L. J. of Heredity, 99(2): 105-111.

Lockwood D. and Vines H.M., (1972) Red color enhancement of pimiento peppers with (2-chloroethyl) phosphonic acid. J. Amer. Soc. Hort. Sci., 97(2): 192-197.

Naisupab K., Roythin A., Sawangchart T. Luangsriumporn P., Bodhipadma K. and Noichinda S., (2015) Effect of different maturity stages and storage time on antioxidants of Chi-fah Yai (*Capsicum annuum*) fruits. Agricultural Sci. J., 46(3/1 special): 157-160.

Noichinda S., Bodhipadma K., Lerksaen P. and Ketsa S., (2012) Difference in Capsaicin content among Thai *Capsicum*. J. App. Sci., 11(1): 1-4.

Shimokawa K., Shimada S. and Yeao K., (1978) Ethylene-enhanced chlorophyllase activity during degreening of *Citrus unshiu* Marc. Sci. Hortic., 8: 129-135.

Spanyar P. and Blazovich M., (1969) A thin-layer chromatographic method for the determination of capsaicin in ground paprika. Analyst., 94: 1084-1089.

Weaver R.J. and Pool R.M., (1971) Effect of (2-chloroethyl) phosphonic acid (ethephon) on maturation of *Vitis vinifera* L.. J. Am. Soc. Hort. Sci., 96: 725-727.

Witham F.H., Blaydes B.F. and Devlin R.M., (1971) Experiments in plant physiology, Van Nostrand Reinhold, New York, USA, p. 245.

Vol. 15 No. 2: 20-23 [2016]
doi: 10.14416/j.appsci.2016.11.001

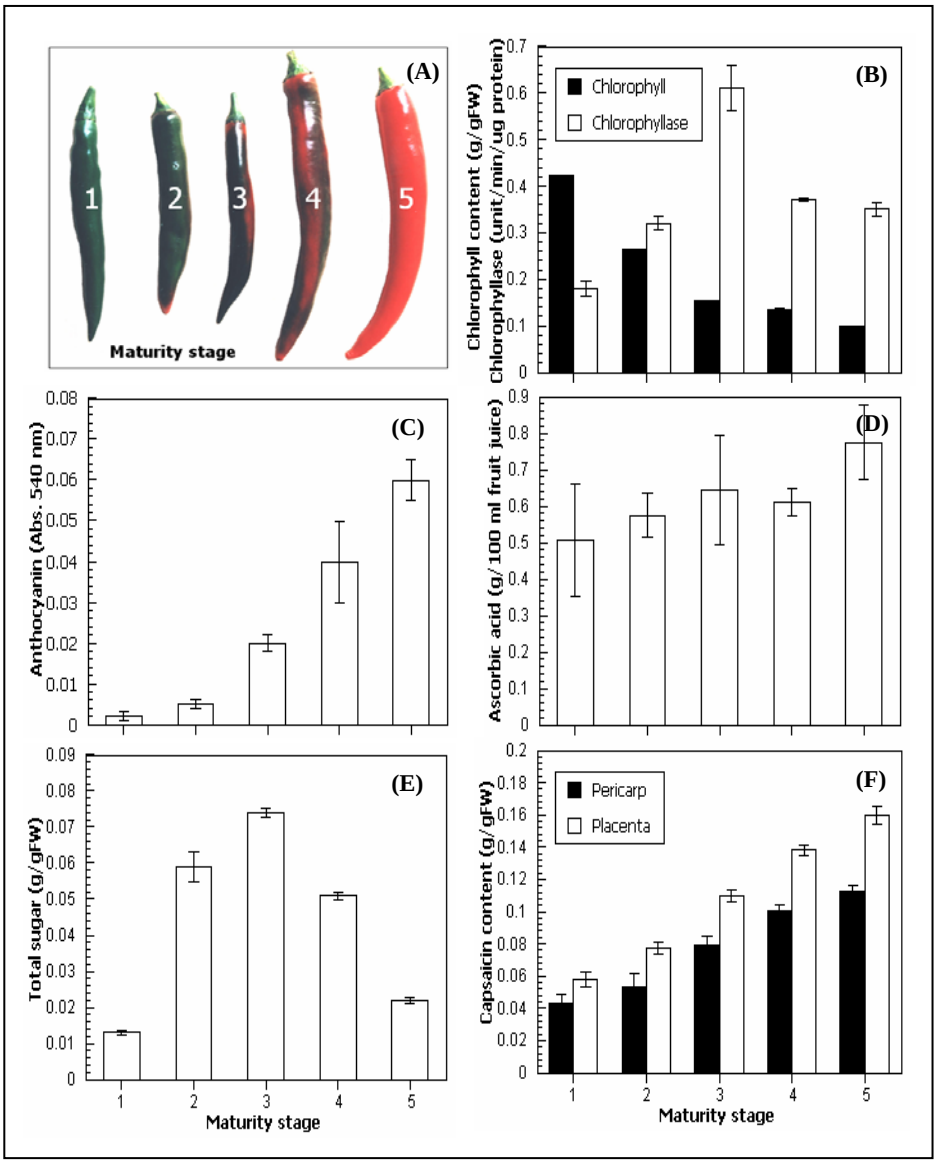


Figure 1. Maturity stage of Chi-fah Yai pepper fruit (A) and its compounds in each stage (B-F)

The Journal of Applied Science **Vol. 15 No. 2: 24-38 [2016]**
วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ doi: 10.14416/j.appsci.2016.06.002
ISSN 1513-7805 Printed in Thailand

Research Article

การเอนแคปซูเลตสารเมทิลซาลิไซเลตในไมโครแคปซูลของพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

Methyl salicylate encapsulation in biodegradable polymer microcapsule

ธารา มานะงาน และสรินญา ชวพันธ์*

Thara Manangan and Sarinya Shawaphun*

ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangsue, Bangkok 10800

***E-mail**: sarinya.s@sci.kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของพอลิ(ไวนิลแอลกอฮอล์-*โค*-ไวนิลอะซิเทต) (P(VA-*co*-VAc) อิมัลซิฟายเออร์ที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ไฮโดรไลซิส (%HD) แตกต่างกันในการเตรียมพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลจากพอลิเอสเทอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ 2 ชนิด คือ พอลิแลคติกแอซิด (PLA) และพอลิ(บิวทิลีนอะดิเพท-*โค*-เทเรฟธาเลท) (PBAT) เพื่อใช้ในการห่อหุ้มตัวยาเมทิลซาลิไซเลต (MS) ในการทดลอง P(VA-*co*-VAc) อิมัลซิฟายเออร์ที่มีค่า %HD แตกต่างกัน คือ 35.95, 67.89 และ 82.64 ได้ถูกใช้ในการเตรียมสารแขวนลอยของ PLA และ PBAT ไมโครแคปซูล โดยใช้วิธีการอิมัลชัน/ระเหยตัวทำละลาย พบว่า P(VA-*co*-VAc) ที่ค่า %HD ในช่วง 67.89 และ 82.64 มีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นอิมัลซิฟายเออร์ในการเตรียม PLA และ PBAT ไมโครแคปซูลตามลำดับ เนื่องจากให้ขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูลที่เล็กกว่าและมีการกระจายตัวในน้ำได้ดีกว่า นอกจากนี้ทั้ง PLA และ PBAT ไมโครแคปซูลมีความสามารถในการห่อหุ้มตัวยาเมทิลซาลิไซเลตได้ค่อนข้างสูง โดยพบว่าตัวยาเมทิลซาลิไซเลตที่ถูกห่อหุ้มในไมโครแคปซูลของ PLA และ PBAT มีค่า 93.5 และ 86.6% ตามลำดับ

คำสำคัญ: พอลิเมอร์ไมโครแคปซูล วิธีอิมัลชัน/ระเหยตัวทำละลาย เมทิลซาลิไซเลท พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

doi: 10.14416/j.appsci.2016.06.002

Abstract

This research aimed to study the effect of poly(vinyl alcohol-*co*-vinyl acetate) (P(VA-*co*-VAc) emulsifier at various degree of hydrolysis (%HD) on fabrication of polymer microcapsule containing 2 different biodegradable polyester matrices: polylactic acid (PLA) and poly(butylene adipate-*co*-terephthalate) (PBAT), to be used for encapsulation of methyl salicylate (MS). P(VA-*co*-VAc) emulsifier with 3 different percent hydrolysis at 35.95, 67.89 and 82.64 had been selectively used to prepare suspensions of PLA and PBAT microcapsules via emulsion/solvent evaporation method. P(VA-*co*-VAc) emulsifier with 67.89 and 82.64 %HD were found to provide smaller size of microcapsule particles with higher dispersion of water medium. In addition, both PLA and PBAT microcapsules were also gave high percent encapsulation of methyl salicylate up to 93.5 and 86.6 for PLA and PBAT microcapsules, respectively.

Keywords: polymer microcapsule, emulsion/solvent evaporation method, methyl salicylate, biodegradable polymer

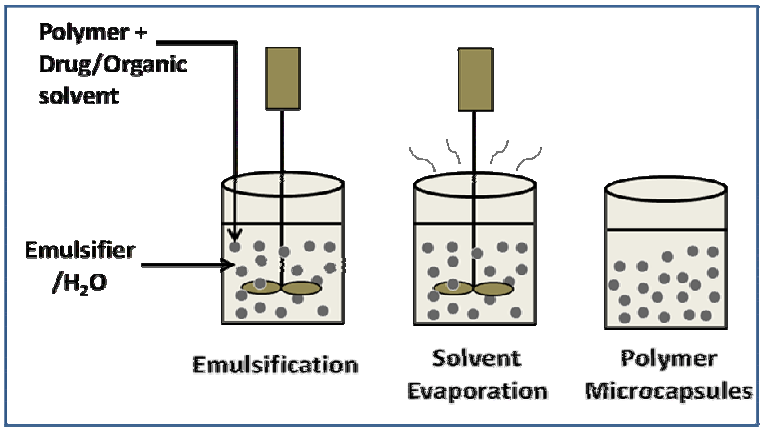
บทนำ

การเอนแคปซูเลต (encapsulation) หรือการห่อหุ้มตัวยาด้วยพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลเป็นกระบวนการซึ่งตัวยาที่เป็นหยดของเหลวหรืออนุภาคของแข็งถูกเคลือบด้วยชั้นฟิล์มของวัสดุพอลิเมอร์ ซึ่งขนาดอนุภาคของพอลิเมอร์ไมโคแคปซูลโดยทั่วไปอยู่ในช่วง 1 ถึง 1,000 ไมโครเมตร (Sinhaและ Trehan, 2003) พอลิเมอร์ไมโครแคปซูลมักถูกใช้ในทางการแพทย์และทางเภสัชกรรมเพื่อนำส่งและควบคุมการปลดปล่อยตัวยา โครงสร้างของพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลประกอบด้วยวัสดุแกน (core material) และวัสดุเปลือก (shell material) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลสามารถเป็นไปได้ 3 รูปแบบ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัสดุแกนและกระบวนการเตรียมพอลิเมอร์ไมโครแคปซูล โดยแบบที่ 1 โมโนนิวเคลียร์ (mononuclear) ประกอบด้วยวัสดุแกนตรงกลางอันเดียวที่มีวัสดุเปลือกล้อมรอบ แบบที่ 2 พอลินิวเคลียร์ (polynuclear) ประกอบด้วยวัสดุแกนหลายอันที่มีวัสดุเปลือกล้อมรอบ และแบบที่ 3 การห่อหุ้มภายในแมทริกซ์ (matrix encapsulation) ประกอบด้วยวัสดุแกนที่แทรกอยู่ในแมทริกซ์หรือในเนื้อของวัสดุเปลือก (Deepakและคณะ, 2013)

โดยทั่วไปพอลิเมอร์ชีวภาพมักนิยมนำมาใช้เป็นวัสดุเปลือกในระบบนำส่งยาที่เป็นแบบไมโครแคปซูล พอลิเมอร์ชีวภาพหมายถึงพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติและ/หรือสามารถถูกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ พอลิเมอร์ชีวภาพถูกแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ กลุ่มแรกเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่ได้จากวัตถุดิบที่สร้างขึ้นทดแทนใหม่ได้ ได้แก่ พอลิเมอร์ที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นจากพืชหรือสัตว์ เช่น แป้ง เซลลูโลส โปรตีน พอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid: PLA) และ

พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (polyhydroxyalkanoate: PHA) และกลุ่มที่ 2 เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่ได้จากปิโตรเลียม ได้แก่ พอลิเมอร์ที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นจากวัตถุดิบที่ได้จากปิโตรเลียม แต่สามารถถูกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเมื่อสิ้นสุดการใช้งานเช่น พอลิคาร์โพแลคโทน (polycarpolactone: PCL) และ พอลิ(บิวทีลีนอะดิเพต-*โค*-เทเรฟทาเลต) [poly(butylene adipate-*co*-terephthalate: PBAT] เป็นต้น (Mauraliและคณะ, 2013)

พอลิเมอร์ไมโครแคปซูลสามารถเตรียมขึ้นได้โดยใช้กระบวนการที่หลากหลายเช่น วิธีการแยกเฟส (phase separation) วิธีการอิมัลชัน/ระเหยตัวทำละลาย (emulsion/solvent evaporation) วิธีการพ่นแห้ง (spray drying) เป็นต้น (Beboitและคณะ, 1999) อย่างไรก็ตามวิธีอิมัลชัน/ระเหยตัวทำละลายเป็นวิธีที่นักวิจัยเลือกใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลในระดับห้องปฏิบัติการ เนื่องจากวิธีนี้เตรียมได้ง่ายและใช้อุปกรณ์ที่ไม่ซับซ้อน วิธีอิมัลชัน/ระเหยตัวทำละลายประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลักดังต่อไปนี้ (1) พอลิเมอร์ที่เป็นวัสดุเปลือกถูกละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ที่ไม่เข้ากันกับน้ำ โดยตัวยาอาจถูกเติมลงไปในขั้นตอนนี้โดยละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ร่วมกับพอลิเมอร์หรือกระจายตัวอยู่ในสารละลายของพอลิเมอร์ในรูปของแข็ง (2) เฟสน้ำมัน (สารละลายของพอลิเมอร์และตัวยา) ถูกเติมเข้าไปในเฟสน้ำ (สารละลายของอิมัลซิฟายเออร์ในน้ำ) ทีละหยด หรือในคราวเดียว พร้อมกับทำการกวนด้วยอัตราเร็วที่เหมาะสมเพื่อทำให้เกิดเป็นอิมัลชันของเฟสน้ำมันที่กระจายตัวอยู่ในเฟสน้ำ (3) การกำจัดตัวทำละลายอินทรีย์ออกจากเฟสน้ำมันเกิดขึ้นใน 2 ขั้นตอนต่อเนื่องกัน เริ่มจากขั้นแรก ตัวทำละลายอินทรีย์ที่อยู่ในเฟสน้ำมันจะแบ่งเฟสหรือแพร่เข้าไปในเฟสน้ำ ในขั้นนี้พบว่าความเข้มข้นของพอลิเมอร์ในหยดของเหลวที่เป็นเฟสน้ำมันจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งพอลิเมอร์เกิดการตกตะกอนแล้วเปลี่ยนสภาพไปเป็นของแข็งในที่สุด ขั้นที่สอง ตัวทำละลายอินทรีย์ที่แพร่ออกมาผสมกับเฟสน้ำจะถูกกำจัดออกไป โดยการปล่อยให้ระเหยผ่านทางผิวหน้าของเฟสต่อเนื่อง สุดท้ายจะได้อนุภาคของพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลแขวนลอยอยู่ในน้ำที่เป็นเฟสต่อเนื่อง (รูปที่ 1) (Sergioและคณะ, 2005)



รูปที่ 1. การเตรียมพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลด้วยวิธี อิมัลชัน/ระเหยตัวทำละลาย

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่ามีปัจจัยหลายอย่างที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลโดยวิธีการอิมัลชัน/ระเหยตัวทำละลาย เช่น ชนิดและความเข้มข้นของพอลิเมอร์ที่เป็นวัสดุเปลือก ชนิดของตัวทำละลายอินทรีย์ ชนิดและความเข้มข้นของอิมัลซิฟายเออร์ และอัตราเร็วในการกวน เป็นต้น โดยปัจจัยเหล่านี้ส่งผลต่อขนาด สัณฐานวิทยา รวมทั้งสมบัติในการห่อหุ้มตัวยาของพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลที่เตรียมได้ ยกตัวอย่างได้แก่ ควรเลือกวัสดุเปลือกที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับตัวยาได้ดีจึงจะให้ประสิทธิภาพในการห่อหุ้มตัวยาที่สูง พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง หรือความเข้มข้นสูงจะให้ประสิทธิภาพการห่อหุ้มที่สูงกว่าพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำหรือความเข้มข้นต่ำ เนื่องจากสามารถเกิดการตกตะกอนเป็นของแข็งได้เร็วจึงทำให้สูญเสียตัวยาไปในระหว่างการเตรียมน้อยกว่า ตัวทำละลายอินทรีย์ควรเลือกชนิดที่สามารถละลายน้ำได้บ้างและมีจุดเดือดต่ำ จะทำให้ได้ประสิทธิภาพในการห่อหุ้มตัวยาที่สูง เนื่องจากทำให้พอลิเมอร์เกิดการตกตะกอนได้เร็วและมีตัวทำละลายอินทรีย์หลงเหลือในพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลในปริมาณที่ต่ำ เนื่องจากถูกกำจัดออกไปโดยการระเหยได้ง่าย สารลดแรงตึงผิวที่ถูกใช้เป็นอิมัลซิฟายเออร์ได้ถูกเติมเข้าไปในเฟสน้ำหรือเฟสต่อเนื่อง เพื่อป้องกันการรวมตัวกันของหยดของเหลวที่เป็นเฟสน้ำมันในระหว่างที่กระจายตัวอยู่ในเฟสน้ำ การเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างส่วนที่ไม่มีขั้วของสารลดแรงตึงผิวกับพอลิเมอร์ที่เป็นวัสดุเปลือกหรือความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวจะส่งผลทำให้ขนาดของอนุภาคพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลมีขนาดเล็กเนื่องจากจะทำให้โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวมาเคลือบที่ผิวหน้าของหยสารละลายพอลิเมอร์ที่เป็นเฟสน้ำมันได้ในปริมาณมากจึงไปลดการรวมตัวของหยดน้ำมันในน้ำ การเพิ่มความเร็วรอบของการกวนจึงเป็นการเพิ่มแรงเฉือน ส่งผลทำให้ขนาดหยดของเฟสน้ำมันที่กระจายตัวในเฟสต่อเนื่องมีขนาดที่เล็กลง นอกจากนี้การเพิ่มความหนืดของเฟสน้ำหรือเฟสต่อเนื่อง ก็ส่งผลทำให้ขนาดของอนุภาคพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลเล็กลงด้วยเช่นกัน เนื่องจากความหนืดที่เพิ่มขึ้นในเฟสต่อเนื่องไปลดอัตราการชนกันหรือการรวมตัวกันของหยดของเหลวที่เป็นเฟสน้ำมันที่กระจายตัวอยู่ในเฟสต่อเนื่อง (Christianและ Steven, 2008)

จะเห็นได้ว่า มีปัจจัยหลายอย่างที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลโดยวิธีอิมัลชัน/ระเหยตัวทำละลายดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น อย่างไรก็ตามผู้วิจัยสามารถแบ่งปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมดออกได้เป็น 2 กลุ่มด้วยกันคือ กลุ่มแรกเป็นปัจจัยหลัก ปัจจัยที่อยู่ในกลุ่มนี้มีความสำคัญอย่างมากต่อการเกิดเป็นพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลและสมบัติของพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลที่เตรียมได้ ปัจจัยที่อยู่ในกลุ่มนี้ได้แก่ ชนิดของตัวยาที่เป็นวัสดุแกน ชนิดของพอลิเมอร์ที่เป็นวัสดุเปลือก และชนิดของอิมัลซิฟายเออร์ที่ใช้ โดยการเลือกปัจจัยเหล่านี้ควรพิจารณาในภาพรวม เนื่องจากปัจจัยเหล่านี้มีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กันในแง่ของความสามารถในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างกัน เช่นระหว่างตัวยากับพอลิเมอร์ที่เป็นวัสดุเปลือกหรือระหว่างพอลิเมอร์ที่เป็นวัสดุเปลือกกับอิมัลซิฟายเออร์ เป็นต้น และกลุ่มที่ 2 เป็นปัจจัยรองซึ่งไม่ส่งผลต่อการเกิดเป็นพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลแต่อาจส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลบ้างแต่ไม่มากเท่ากลุ่มแรก ปัจจัยที่อยู่ในกลุ่มนี้ได้แก่ ความเข้มข้นของตัวยาที่เป็นวัสดุแกน ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ที่เป็นวัสดุเปลือก ความเข้มข้นของอิมัลซิฟายเออร์ และความเร็วรอบในการกวน เป็นต้น ซึ่งปัจจัยที่อยู่ในกลุ่มนี้สามารถปรับแต่งภายหลังจากที่เลือกปัจจัยหลักแล้ว โดยในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เน้นไป

ที่ผลของปัจจัยหลักที่มีต่อการเตรียมพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลเท่านั้น

เมทิลซาลิไซเลต (methylsalicylate: MS) เป็นสารอินทรีย์ที่มีฤทธิ์ในการรักษาโรคปวดเมื่อยหรือเคล็ดขัดยอกโดยในสูตรโครงสร้างมีหมู่เอสเทอร์และวงแหวนเบนซีนซึ่งทำให้สามารถดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเลตได้จึงทำให้สามารถวิเคราะห์หาปริมาณที่แน่นอนได้ง่ายโดยวิธีสเปกโตรสโกปี จึงถูกกำหนดให้เป็นตัวยาที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ โดยผู้วิจัยจะทำการปรับเปลี่ยนปัจจัยหลัก 2 ปัจจัยได้แก่ ชนิดของพอลิเมอร์ที่เป็นวัสดุเปลือกและชนิดของอิมัลซิฟายเออร์ พอลิเอสเทอร์ชีวภาพได้ถูกเลือกให้เป็นวัสดุเปลือกเนื่องจากมีหมู่เอสเทอร์ซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยากับตัวยา MS และเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพจึงสามารถเข้ากันได้ดีกับสิ่งมีชีวิต โดยผู้วิจัยจะทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างพอลิเอสเทอร์ 2 ชนิดคือ PLA และ PBAT ถึงแม้ว่าทั้งคู่จะเป็นพอลิเอสเทอร์เหมือนกันแต่ทั้งคู่ก็มีสมบัติในแง่ของความมีขั้วที่แตกต่างกันซึ่งอาจส่งผลต่ออันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์กับตัวยา MS นอกจากนี้สารลดแรงตึงผิวชนิด P(VA-*co*-VAc) ได้ถูกเลือกมาเป็นอิมัลซิฟายเออร์เนื่องจากส่วนที่ไม่มีขั้วของ P(VA-*co*-VAc) ประกอบด้วยหมู่ไวนิลอะซิเทต (vinylacetate: VAc) ซึ่งมีหมู่เอสเทอร์ซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยากับ PLA และ PBAT ที่ใช้เป็นวัสดุเปลือก นอกจากนี้ P(VA-*co*-VAc) ยังสามารถถูกปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของส่วนที่มีขั้ว (VA) ต่อส่วนที่ไม่มีขั้ว (VAc) ได้ง่ายโดยการควบคุมปริมาณการเกิดไฮโดรไลซิสของพอลิไวนิลอะซิเทต (polyvinyl acetate: PVAc) ที่ใช้เป็นสารตั้งต้น จึงทำให้ผู้วิจัยได้อิมัลซิฟายเออร์ที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ไฮโดรไลซิสที่แตกต่างกันหรือมีปริมาณส่วนที่ไม่มีขั้วหรือมีปริมาณของหมู่ VAc ที่แตกต่างกัน หากผู้วิจัยปรับส่วนที่ไม่มีขั้วหรือปริมาณของหมู่ VAc ให้เหมาะสมกับพอลิเมอร์ชีวภาพแต่ละชนิดซึ่งมีความมีขั้วแตกต่างกัน จะทำให้ไปเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์กับอิมัลซิฟายเออร์ซึ่งจะทำให้ได้อนุภาคของพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลที่มีขนาดเล็กและมีการกระจายตัวที่ดี ดังนั้นผู้วิจัยจึงทดลองใช้ P(VA-*co*-VAc) อิมัลซิฟายเออร์ที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ไฮโดรไลซิส (%hydrolysis: %HD) แตกต่างกัน 3 ค่า ดังนี้คือ 35.9, 67.6 และ 82.8 ซึ่งเป็นตัวแทนของค่าอิมัลซิฟายเออร์ที่มีค่า %HD ที่อยู่ในช่วงต่ำ กลาง และสูงตามลำดับในการเตรียมสารแขวนลอยของอนุภาค PLA และ PBAT ไมโครแคปซูล แล้วทำการวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคและการกระจายตัวในน้ำเพื่อพิจารณาว่า P(VA-*co*-VAc) อิมัลซิฟายเออร์ที่ค่า %HD ใดที่มีความเหมาะสมในการใช้เป็นอิมัลซิฟายเออร์สำหรับ PLA และ PBAT ไมโครแคปซูลตามลำดับ

วิธีการทดลอง

การสังเคราะห์ P(VA-co-VAc) อิมัลซิฟายเออร์ที่สามารถปรับเปลี่ยน %HD

ชั่งพอลิไวนิลอะซิเทต (PVAc) ปริมาณ 1 กรัม มาละลายในเมทานอลปริมาตร 30 มิลลิลิตร ปั่นกวนจนพอลิไวนิลอะซิเทตละลายหมด จากนั้นเติมสารละลาย KOH ที่มีความเข้มข้น 0.029โมลต่อลิตรลงไปในขวดก้นกลมที่มีสารละลายของพอลิไวนิลอะซิเทตในเมทานอล จากนั้นทำการรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสโดยปรับเปลี่ยนเวลาตั้งแต่เวลา 0 ถึง 80 นาที เมื่อครบเวลาที่กำหนด นำของผสมที่ได้ไประเหยตัวทำละลายออกที่อุณหภูมิห้องด้วย

เครื่องระเหยสาร เทส่วนที่เหลือลงในจานเพาะเชื้อวางทิ้งไว้ให้เมทานอลระเหยจนแห้งแล้วเก็บในโถดูดความชื้นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

การวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ไฮโดรไลซิส (%HD) ของ P(VA-co-VAc)

นำฟิล์ม P(VA-*co*-VAc) ที่เตรียมได้มาบดผสมกับ KBr จากนั้นกดอัดให้เป็นแผ่นบาง นำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR สเปกโตรสโคปี แล้วนำสเปกตรัมของฟิล์ม P(VA-*co*-VAc) แต่ละอันมาวิเคราะห์หาพื้นที่ใต้พีคของการดูดกลืนในช่วงเลขคลื่น 1640-1840 cm^{-1} ซึ่งเป็นช่วงของการดูดกลืนของหมู่คาร์บอนิลในโหมดการสั่นแบบยืด (C=O stretching) และโหมดการสั่นแบบงอ (C=O bending) ทั้งหมด นำมาเทียบกับค่าการดูดกลืนแสงที่ช่วงเลขคลื่น 1350-1470 cm^{-1} ซึ่งเป็นช่วงของการดูดกลืนแสงในโหมดการสั่นแบบงอของ C-H bending เพื่อคำนวณหาค่าดัชนีคาร์บอนิล (carbonyl index: CI) ได้จากสมการ (1)

$$Carbonyl\ index\ (CI) = \frac{A_{1640-1840}}{A_{1350-1470}} \quad (1)$$

ค่าเปอร์เซ็นต์ไฮโดรไลซิส (%HD) ของ P(VA-*co*-VAc) สามารถคำนวณได้จากค่า CI ของ P(VA-*co*-VAc) เทียบกับค่า CI ของ PVAc ตามสมการ (2)

$$\%HD = \left(1 - \frac{CI_{P(VA-co-VAc)}}{CI_{PVAc}}\right) x\ 100 \quad (2)$$

การเตรียมพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลที่ห่อหุ้มตัวยาเมทิลซาลิไซเลต

ชั่งพอลิเมอร์ PLA หรือ PBAT 2.00 กรัมและตัวยาเมทิลซาลิไซเลต 0.10 กรัม ละลายในไดคลอโรมีเทน 200 มิลลิลิตร จากนั้นชั่ง P(VA-*co*-VAc) อิมัลซิฟายเออร์ที่มีค่า %HD ตามต้องการมา 5.6 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 120 มิลลิลิตร โดยกวนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสจนละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำสารละลาย P(VA-*co*-VAc) ในน้ำมาปั่นกวนด้วยเครื่องกวนที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที จากนั้นค่อย ๆ หยดสารละลายของ PLA หรือ PBAT ที่มีตัวยาเมทิลซาลิไซเลตในไดคลอโรมีเทนที่เตรียมไว้ลงไปจนหมด จากนั้นทำการกวนที่อุณหภูมิห้องต่อจนครบเวลา 8 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาจะได้สารแขวนลอยของ PLA หรือ PBAT ไมโครแคปซูลที่ห่อหุ้มตัวยาเมทิลซาลิไซเลต

การหาขนาดอนุภาคและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ไมโครแคปซูล

นำสารแขวนลอยในน้ำของ PLA หรือ PBAT ไมโครแคปซูลมาทำให้เจือจางด้วยน้ำกลั่นแล้วนำไปหยดบนกระจกสไลด์ จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์โดยใช้แสงธรรมดาหรือแสงโพลาไรซ์ จากนั้นทำการบันทึกภาพด้วยกล้องดิจิตอล ภาพถ่ายที่ถูกบันทึกด้วยกล้องดิจิตอลจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยซอฟท์แวร์วิเคราะห์ภาพ (ScopeImage 9.0) เพื่อหาจำนวนและขนาดอนุภาคเฉลี่ยของอนุภาคต่อไป

การวิเคราะห์หาปริมาณตัวยาเมทิลซาลิไซเลทที่ถูกห่อหุ้มในพอลิเมอร์ไมโครแคปซูล

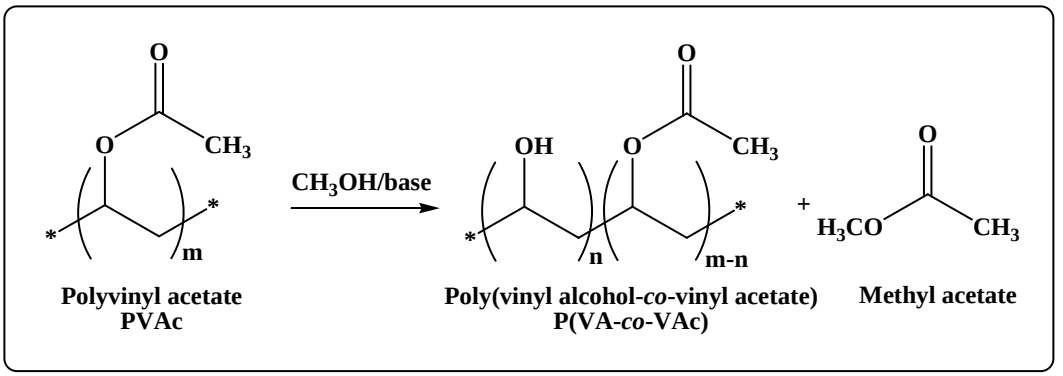
ตัวยาเมทิลซาลิไซเลตที่ถูกห่อหุ้มใน PLA หรือ PBAT ไมโครแคปซูลได้ถูกวิเคราะห์หาปริมาณตามขั้นตอนดังนี้ ขั้นแรกอนุภาค PLA หรือ PBAT ไมโครแคปซูลที่ห่อหุ้มตัวยาเมทิลซาลิไซเลตได้ถูกแยกออกจากสารแขวนลอยโดยใช้เครื่องหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 9,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที แยกเอาสารละลายส่วนใสออก นำอนุภาค PLA หรือ PBAT ไมโครแคปซูลมาล้างด้วยน้ำกลั่นอีก 2 ครั้ง เพื่อแยกเอาตัวยาเมทิลซาลิไซเลตที่ไม่ได้ถูกห่อหุ้มภายในไมโครแคปซูลออกไป จากนั้นนำส่วนที่เป็นอนุภาคไมโครแคปซูลมาทำให้แห้งในโถดูดความชื้นเป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง ตัวยาเมทิลซาลิไซเลตที่ถูกห่อหุ้มในไมโครแคปซูลได้ถูกแยกออกจากไมโครแคปซูลโดยการสกัดด้วยเมทานอล 200 มิลลิลิตรโดยใช้เครื่องสกัดซอกห์เลตเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ความเข้มข้นของตัวยาเมทิลซาลิไซเลตในสารละลายที่สกัดได้ ถูกนำมาวิเคราะห์หาความเข้มข้นโดยนำเอาสารละลายตัวยาเมทิลซาลิไซเลตที่สกัดได้มากทำปฏิกิริยากับสารละลายเฟอริกคลอไรด์ (ferric chloride: $FeCl_3$) 0.01 M เพื่อให้เกิดสารเชิงซ้อนระหว่าง Fe^{3+} กับตัวยาเมทิลซาลิไซเลตและบ่มไว้เป็นเวลา 5 นาทีที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นความเข้มของสีที่เกิดขึ้นได้ถูกวัดที่ความยาวคลื่นแสง 595 nm โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (โดยค่า molar absorptivity (ε) ของสารละลายตัวยาเมทิลซาลิไซเลตมาตรฐานที่มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.0001 ถึง 0.0008 M มีค่าเท่ากับ 0.866 $M^{-1}.cm^{-1}$) จากนั้นทำการคำนวณหาความเข้มข้นของตัวยาเมทิลซาลิไซเลตในสารละลายจากค่าการดูดกลืนของแสง เปอร์เซ็นต์การห่อหุ้ม (% encapsulation) ตัวยาเมทิลซาลิไซเลตของพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลถูกคำนวณโดยการนำเอาน้ำหนักของตัวยาเมทิลซาลิไซเลตที่ถูกห่อหุ้มภายในไมโครแคปซูล (ซึ่งถูกสกัดแยกออกมาจากไมโครแคปซูล) หารด้วยน้ำหนักของตัวยาเมทิลซาลิไซเลตที่เติมเข้าไปทั้งหมดจากนั้นคูณด้วย 100

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์ปริมาณ %HD ของ P(VA-co-VAc)

พอลิไวนิลอะซีเทต (PVAc) สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับเมทานอลในสภาวะที่เป็นเบส เมื่อควบคุมสภาวะในการเกิดปฏิกิริยาให้เกิดไฮโดรไลซิสเพียงบางส่วนผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นโคพอลิเมอร์ P(VA-*co*-VAc) ดังปฏิกิริยาที่ถูกแสดงในรูปที่ 2 ส่วนการเพิ่มขึ้นของส่วนที่ชอบน้ำหรือสภาพความเป็นขั้วขึ้นอยู่กับ %HD ซึ่งสามารถควบคุมได้จากสภาวะที่ใช้ในการทดลอง จากการทดลองก่อนหน้านี้ผู้วิจัยได้ปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของ

KOH โดยพบว่าความเข้มข้นของ KOH ที่ต่ำที่สุดซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้คือ 0.029 M (ไม่ได้แสดงผลการทดลอง) ดังนั้นในการทดลองนี้ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ความเข้มข้นของตัวเร่ง KOH เป็น 0.029 M ทั้งนี้เพื่อความสะดวกต่อการควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาและหลีกเลี่ยงขั้นตอนในการกำจัดสารเร่งปฏิกิริยาโดยใช้อุณหภูมิคงที่ที่ 60 องศาเซลเซียสทุกการทดลองแต่ปรับเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจาก 0 ถึง 80 นาที เพื่อให้ได้ P(VA-*co*-VAc) ที่มีค่า %HD แตกต่างกัน ตั้งแต่ 20 – 90 % ดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 2. ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ Poly(vinyl acetate) ที่ใช้ในการเตรียม Poly(vinyl alcohol-*co*-vinyl acetate)

ตารางที่ 1. ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาและค่าเปอร์เซ็นต์ไฮโดรไลซิสของ P(VA-*co*-VAc)

เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (นาที)	**เปอร์เซ็นต์ไฮโดรไลซิส (%HD) ของ P(VA-*co*-VAc)**
20	35.95
30	48.56
40	60.45
50	67.58
60	71.09
70	77.50
80	82.82

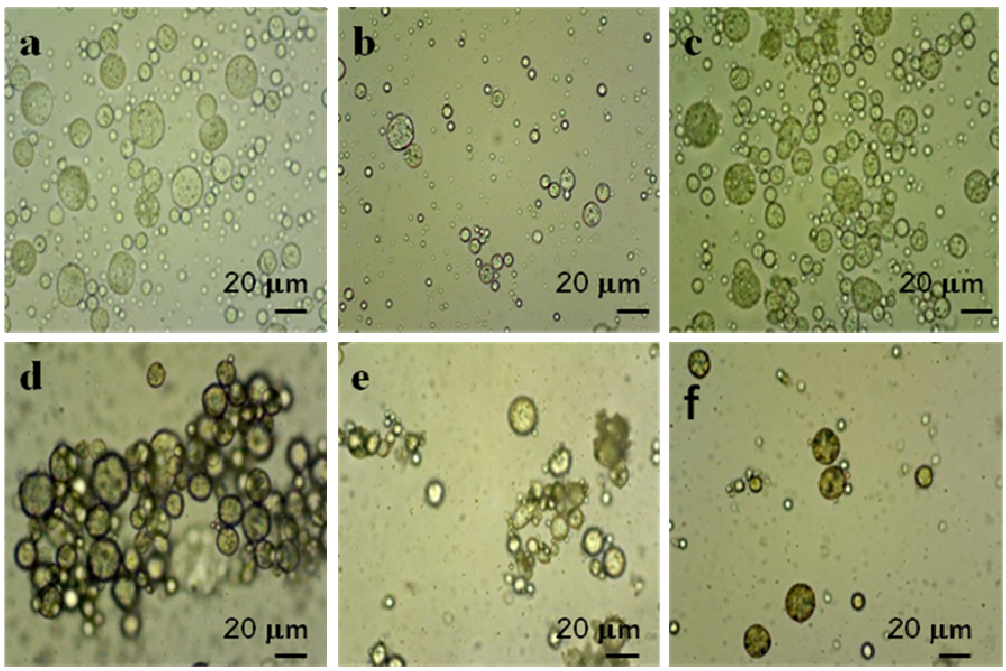
จากผลการทดลองในตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาพบว่าค่า %HD ของ P(VA-*co*-VAc) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ผลการทดลองนี้ทำให้ผู้วิจัยสามารถเลือกเตรียม P(VA-*co*-VAc) ที่มีค่า %HD

ตามที่ต้องการได้ โดยปรับเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เพื่อเปรียบเทียบ %HD ของ P(VA-co-VAc) อิมัลซิฟายเออร์ที่มีต่อสมบัติของพอลิเมอร์ไมโครแคปซูล ในขั้นต้นนี้ ผู้วิจัยได้ใช้ P(VA-*co*-VAc) อิมัลซิฟายเออร์ที่มีค่า %HD แตกต่างกัน 3 ค่า ดังนี้คือ 35.9, 67.6 และ 82.8% ซึ่งเป็นตัวแทนของค่าอิมัลซิฟายเออร์ที่มีค่า %HD ที่อยู่ในช่วงต่ำ กลาง และสูงตามลำดับ

ผลของ %HD ของ P(VA-co-VAc) อิมัลซิฟายเออร์ที่มีต่อสัณฐานวิทยาของอนุภาค PLA และ PBAT ไมโครแคปซูล

เพื่อเลือกค่า %HD ของ P(VA-*co*-VAc) อิมัลซิฟายเออร์ที่มีเหมาะสมต่อการเตรียมพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลแต่ละชนิด ผู้วิจัยจึงเตรียมพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลของทั้ง PLA และ PBAT โดยใช้ P(VA-*co*-VAc) อิมัลซิฟายเออร์ที่มีค่า %HD ที่แตกต่างกัน 3 ค่าคือ 35.95% 67.89% และ 82.64% โดยที่ยังไม่มีการห่อหุ้มตัวยาเมทิลซาลิไซเลตจากผลการทดลองในรูปที่ 3 พบว่าสัณฐานวิทยาของอนุภาค PLA และ PBAT ไมโครแคปซูลไม่แตกต่างกัน คือมีลักษณะกลม การกระจายตัวในเฟสน้ำของอนุภาค PLA ค่อนข้างดีกว่า โดยพบการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนน้อยกว่า โดย P(VA-*co*-VAc) ที่ทำให้อนุภาค PLA กระจายตัวได้ดีที่สุด มีค่า %HD เท่ากับ 67.89% ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงกลาง ส่วน P(VA-*co*-VAc) ที่ทำให้อนุภาค PBAT กระจายตัวได้ดีที่สุด มีค่า %HD เท่ากับ 82.64% ซึ่งอยู่ในช่วงสูง เมื่อพิจารณาขนาดอนุภาคของ PLA และ PBAT ไมโครแคปซูลในตารางที่ 2 ก็ให้ผลที่สอดคล้องกัน โดยค่า %HD ของ P(VA-*co*-VAc) ที่ทำให้อนุภาค PLAไมโครแคปซูลมีขนาดเล็กที่สุดคือ 67.89% และ%HD ของ P(VA-*co*-VAc) ที่ทำให้อนุภาค PBAT ไมโครแคปซูลมีขนาดเล็กที่สุดคือ 82.64% ซึ่งผลอันนี้น่าจะเกิดจากอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์กับส่วนที่ไม่มีขั้วของ P(VA-*co*-VAc) เพื่อที่จะอธิบายผลอันนี้ ผู้วิจัยจึงได้ทดลองละลาย PLA และ PBAT ในตัวทำละลายเอทิลอะซิเทต (ethylacetate: EA) ซึ่งมีความมีขั้วใกล้เคียงกับหมู่ไวนิลอะซิเทต หรือ VAc ใน P(VA-*co*-VAc) อิมัลซิฟายเออร์ก็พบว่า PLA สามารถละลายใน EA ได้ดี ในขณะที่ PBAT ละลายใน EA ได้เล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่า PLA สามารถเข้ากันได้กับหมู่ VAc ใน P(VA-*co*-VAc) อิมัลซิฟายเออร์ได้ดีกว่า PBAT หากพิจารณาจากความสามารถในการเกิดอันตรกิริยาระหว่าง PLA กับหมู่ VAc ใน P(VA-*co*-VAc) เพียงอย่างเดียว เมื่อ P(VA-co-VAc) มีค่า %HD อยู่ในช่วงต่ำหรือมีปริมาณหมู่ VAc มากที่สุด ควรจะทำให้ PLA ไมโครแคปซูลมีขนาดเล็กที่สุด แต่จากผลการทดลองกลับพบว่า P(VA-*co*-VAc) ที่มีค่า %HD อยู่ในช่วงกลางกลับทำให้ขนาดของ PLA ไมโครแคปซูลเล็กที่สุด นั่นแสดงให้เห็นว่ากลไกการทำหน้าที่ของ P(VA-*co*-VAc) ไม่ได้มีแค่การเกิดอันตรกิริยาระหว่าง P(VA-co-VAc) กับพอลิเมอร์เพียงแค่อย่างเดียวเท่านั้น เนื่องจากใน P(VA-co-VAc) ยังมีหมู่ VA ซึ่งสามารถละลายน้ำได้ดีและสามารถทำหน้าที่เพิ่มความหนืดให้กับสารละลายน้ำได้เหมือนอย่างในกรณีของ PVA ที่ถูกใช้เป็นสารเพิ่มความหนืดในน้ำ ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลที่เกิดจากการเพิ่ม %HD ของ P(VA-*co*-VAc) หรือการเพิ่มปริมาณหมู่ VA จะส่งผลให้ความหนืดของเฟสน้ำเพิ่มขึ้นจึงไปลดการรวมกันของหยดของเหลวที่เป็นเฟสน้ำมันหรือสารละลายพอลิเมอร์ จึงทำให้ได้ขนาดของอนุภาคไมโครแคปซูลที่เล็กลงเมื่อ P(VA-*co*-VAc) มี %HD เพิ่มขึ้น ซึ่งให้ผลในทางตรงกันข้ามกับกรณีที่เกิดจากหมู่ VAc ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลของทั้งหมู่ VAc และหมู่ VA ใน P(VA-*co*-VAc) ที่มีต่อขนาดอนุภาคของ PLA ไมโครแคปซูล จึงพบว่าค่า %HD ของ P(VA-*co*-VAc) ที่ทำให้ PLA ไมโครแคปซูลมี

ขนาดเล็กที่สุดมีค่าอยู่ในช่วงกลาง แต่เมื่อเปลี่ยนวัสดุเปลือกเป็น PBAT ซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยากับหมู่ VAc ใน P(VA-*co*-VAc) ได้น้อยกว่า ดังนั้นการเพิ่มปริมาณหมู่ VAc จึงไม่เกิดประโยชน์ในการลดขนาดอนุภาคของ PBAT ไมโครแคปซูล แต่การเพิ่มหมู่ VA ใน P(VA-*co*-VAc) ที่มีค่า %HD อยู่ในช่วงสูงจึงส่งผลทำให้อนุภาคของ PBAT ไมโครแคปซูลมีขนาดที่ลดลงมากที่สุด



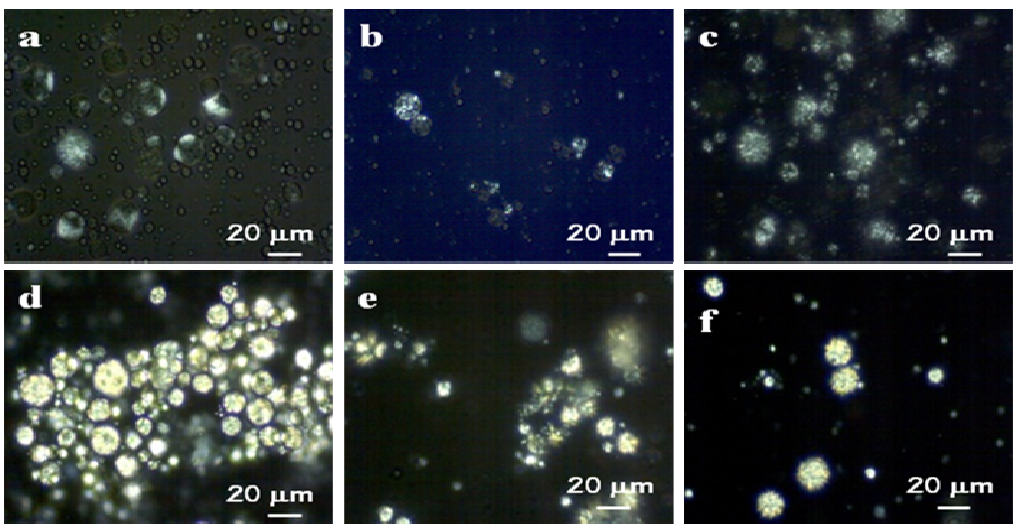
รูปที่ 3. ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสงธรรมดาของอนุภาค PLA (บน) ที่เตรียมโดยใช้ P(VA-*co*-VAc) ที่มีค่า %HD แตกต่างกันดังนี้ a) 35.95%HD b) 67.89%HD และ c) 82.64 %HD และ PBAT (ล่าง) เมื่อใช้ P(VA-*co*-VAc) ที่มีค่า %HD แตกต่างกันดังนี้ d) 35.95%HD e) 67.89%HD และ f) 82.64 %HD

ผลของ %HD ของ P(VA-co-VAc) อิมัลซิฟายเออร์ที่มีต่อการเกิดผลึกในอนุภาค PLA และ PBAT ไมโครแคปซูลที่แขวนลอยในน้ำ

เมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสงแบบโพลาไรซ์ทำการวิเคราะห์อนุภาคของพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลทั้ง 2 ชนิดที่แขวนลอยในน้ำจะสังเกตเห็นผลึกของพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นภายในอนุภาคได้อย่างชัดเจน โดยบริเวณที่เป็นผลึกจะเห็นเป็นสีขาว ดังที่ถูกแสดงในรูปที่ 4 จากการใช้ P(VA-*co*-VAc) ที่มีค่า %HD อยู่ใน 3 ช่วงคือ ต่ำ(35.95%) กลาง (67.89%) และสูง(82.64%) ในการเตรียม PLA ไมโครแคปซูล พบว่า P(VA-*co*-VAc) ที่มีค่า %HD ต่ำและกลางพบการเกิดผลึกภายในอนุภาค PLA ไมโครแคปซูลต่ำกว่าที่เตรียมโดยใช้ P(VA-*co*-VAc) ที่มีค่า %HD อยู่ในช่วงสูง

ตารางที่ 2. ขนาดอนุภาคของ PLA และ PBAT ไมโครแคปซูลในน้ำ ที่เตรียมโดยใช้ P(VA-*co*-VAc) อิมัลซิฟายเออร์ที่มีค่า %HD อยู่ในช่วงต่ำ กลาง และสูง

เปอร์เซ็นต์ไฮโดรไลซิส (%HD)	ขนาดอนุภาค (μm)		จำนวนอนุภาคต่อพื้นที่ (μm^{-2})	
	PLA	PBAT	PLA	PBAT
35.95	11.40± 3.56	14.98± 3.28	85	85
67.89	6.30 ±1.85	8.92 ±2.75	67	69
82.64	10.60± 2.98	7.94± 3.01	82	43



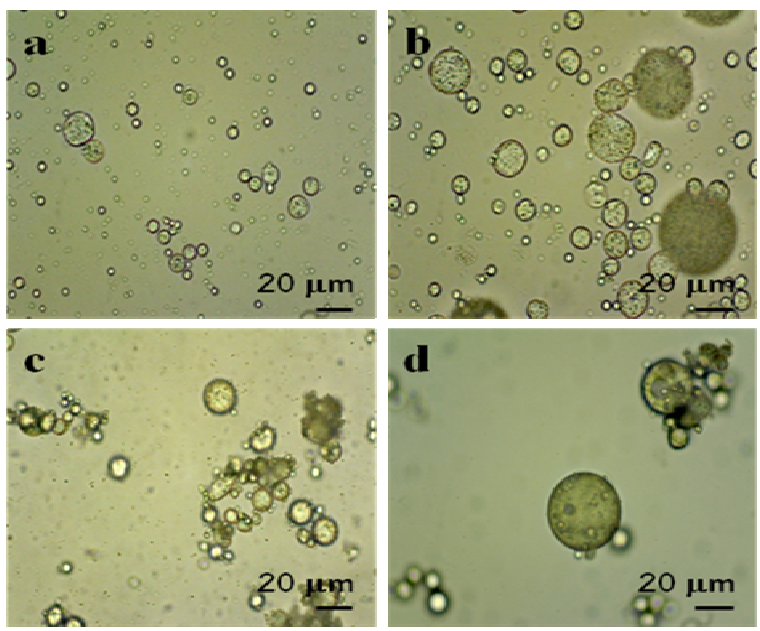
รูปที่ 4. ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสงโพลาไรซ์ซึ่งแสดงปริมาณผลึกที่เกิดภายในอนุภาคของ PLA ไมโครแคปซูล (ภาพบน) ที่เตรียมโดยใช้ P(VA-*co*-VAc) อิมัลซิฟายเออร์ที่มีค่า %HD แตกต่างกันดังนี้ a) 35.95%HD b) 67.89%HD และ c) 82.64 %HD และปริมาณผลึกที่เกิดภายในอนุภาคของ PBAT ไมโครแคปซูล (ภาพล่าง) เมื่อใช้ P(VA-*co*-VAc) อิมัลซิฟายเออร์ที่มีค่า %HD แตกต่างกันดังนี้ d) 35.95%HD e) 67.89%HD และ f) 82.64 %HD

ดังที่อธิบายไปก่อนหน้านี้แล้วว่า การที่ P(VA-*co*-VAc) มีหน่วย VAc อยู่มาก จะทำให้เกิดอันตรกิริยากับ PLA ได้ดี จึงไปลดการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่ของ PLA ด้วยกันเอง ดังนั้นเมื่อใช้ P(VA-*co*-VAc) ที่มี %HD อยู่ในช่วงต่ำและกลางจึงทำให้มีปริมาณผลึกใน PLA ไมโครแคปซูลน้อยกว่า เมื่อใช้ P(VA-*co*-VAc) ที่มี %HD อยู่

ในช่วงสูง เนื่องจากใน P(VA-*co*-VAc) ที่มี %HD อยู่ในช่วงต่ำและกลางมีปริมาณหมู่ VAc ในปริมาณมากจึงสามารถเกิดอันตรกิริยากับ PLA ได้มากด้วยจึงไปรบกวนการเกิดผลึกใน PLA ในกรณีของ PBAT พบการเกิดผลึกใกล้เคียงกันเมื่อใช้ P(VA-*co*-VAc) ในทุกช่วงของ %HD ทั้งนี้เนื่องจากหมู่ VAc ใน P(VA-*co*-VAc) สามารถเกิดอันตรกิริยากับ PBAT ได้น้อย ดังนั้นการปรับเปลี่ยนปริมาณหมู่ VAc ใน P(VA-*co*-VAc) จึงไม่มีผลกระทบกับการเกิดผลึกภายในอนุภาค PBAT เลย ดังนั้น จึงพบว่าที่ %HD ของ P(VA-*co*-VAc) เท่าใดก็ตาม ก็ยังคงพบปริมาณการเกิดผลึกในอนุภาค PBAT ไมโครแคปซูลใกล้เคียงกัน

ผลการวิเคราะห์ขนาดและสัณฐานวิทยาของอนุภาค PLA และ PBAT ไมโครแคปซูลที่ห่อหุ้มและที่ไม่ได้ห่อหุ้มตัวยาเมทิลซาลิไซเลต

จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นสัณฐานวิทยาของทั้ง PLA และ PBAT ไมโครแคปซูลทั้งที่ห่อหุ้มและที่ไม่ได้ห่อหุ้มตัวยาเมทิลซาลิไซเลต พบว่ามีลักษณะที่เป็นทรงกลมเหมือนกัน โดยทั้ง PLA และ PBATไมโครแคปซูลที่มีการห่อหุ้มตัวยาเมทิลซาลิไซเลตพบว่ามีขนาดที่ใหญ่ขึ้นกว่าแบบที่ไม่ได้ห่อหุ้มตัวยา เมื่อพิจารณาขนาดอนุภาคของ PLA และ PBAT ไมโครแคปซูล



รูปที่ 5. ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสงแบบธรรมดาของอนุภาค PLA ไมโครแคปซูล (ภาพบน) a) ที่ไม่ได้ห่อหุ้มตัวยา และ b) ที่ห่อหุ้มตัวยา และของอนุภาค PBAT ไมโครแคปซูล (ภาพล่าง) c) ที่ไม่ได้ห่อหุ้มตัวยา และ d) ที่ห่อหุ้มตัวยาเมทิลซาลิไซเลตเตรียมโดยใช้ P(VA-*co*-VAc) ที่มีค่า %HD เท่ากับ 67.89% เป็นอิมัลซิฟายเออร์

ในตารางที่ 3 พบว่าทั้ง PLA และ PBAT ไมโครแคปซูลมีขนาดเพิ่มขึ้นเกือบ 2 เท่า ภายหลังจากมีการห่อหุ้มตัวยาเมทิลซาลิไซเลต ขนาดที่เพิ่มขึ้นอาจเนื่องมาจากตัวยาเมทิลซาลิไซเลตสามารถเกิดอันตรกิริยาได้ดีกับทั้ง PLA และ PBAT จึงทำให้พอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด เกิดการบวมตัวหลังจากที่มีการห่อหุ้มตัวยาเข้าไปในเนื้อของพอลิเมอร์ ทั้งนี้ปริมาณการบวมตัวขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาของตัวยาเมทิลซาลิไซเลตกับพอลิเมอร์แต่ละชนิด ซึ่งเมื่อพิจารณาจากการบวมตัวของพอลิเมอร์พบว่าทั้ง PLA และ PBAT สามารถเกิดอันตรกิริยากับตัวยาเมทิลซาลิไซเลตได้ดีใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 3. ขนาดอนุภาคของ PLA และ PBAT ไมโครแคปซูลที่ไม่ได้ห่อหุ้มและที่ห่อหุ้มตัวยาเมทิลซาลิไซเลต

ตัวยาที่ถูกห่อหุ้ม	PLA		PBAT	
	ขนาดอนุภาค (μm)	จำนวนอนุภาคต่อพื้นที่ (μm^{-2})	ขนาดอนุภาค (μm)	จำนวนอนุภาคต่อพื้นที่ (μm^{-2})
ไม่มี	6.30$\pm$1.85	67	8.92$\pm$2.75	69
เมทิลซาลิไซเลต	11.22 $\pm$4.95	65	12.43 $\pm$3.21	69

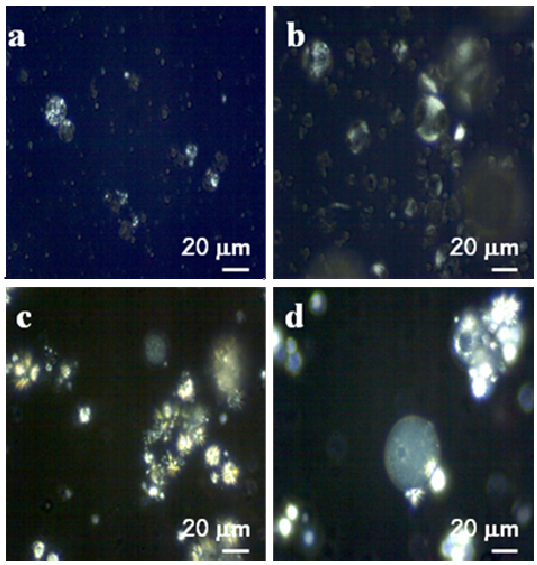
ผลของการห่อหุ้มตัวยาเมทิลซาลิไซเลตที่มีต่อการเกิดผลึกในอนุภาค PLA และ PBAT ไมโครแคปซูลที่แขวนลอยในน้ำ

จากผลการทดลองในรูปที่ 6 พบว่าการเกิดผลึกในอนุภาคของ PLA ไมโครแคปซูลทั้งที่มีการห่อหุ้มตัวยาและที่ไม่ได้ห่อหุ้มตัวยาเมทิลซาลิไซเลตแทบไม่แตกต่างกันมากนัก ทั้งนี้เนื่องจาก PLA ที่ไม่ได้ห่อหุ้มตัวยาก็มีปริมาณผลึกน้อยอยู่แล้วแต่เดิมเนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่าง PLA กับหน่วย VAc ใน P(VA-*co*-VAc) อิมัลซิฟายเออร์ ดังนั้นเมื่อมีการห่อหุ้มตัวยาเมทิลซาลิไซเลตจึงไม่ส่งผลมากนักต่อปริมาณการเกิดผลึกใน PLA ไมโครแคปซูล แต่ในกรณีของอนุภาค PBAT ไมโครแคปซูลก่อนและหลังจากห่อหุ้มตัวยาเมทิลซาลิไซเลตพบว่ามีการลดลงของปริมาณผลึกที่เกิดภายในอนุภาคของ PBAT ไมโครแคปซูลสังเกตจากอนุภาคที่มีการบวมตัวมีปริมาณผลึกภายในลดลงทั้งนี้เนื่องมาจากการละลายของตัวยาเมทิลาลิไซเลทเข้าไปในเนื้อพอลิเมอร์ไปรบกวนการเกิดผลึกใน PBAT เนื่องจากโมเลกุลของ PBAT จะเกิดอันตรกิริยากับตัวยาแทนที่จะเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่ของ PBAT ด้วยกันเอง ดังนั้นจึงทำให้การเกิดผลึกในอนุภาค PBAT ไมโครแคปซูลลดลง

ผลการหาเปอร์เซ็นต์การห่อหุ้มตัวยาเมทิลซาลิไซเลตของอนุภาค PLA และ PBAT ไมโครแคปซูล

จากตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่า พอลิเอสเทอร์ทั้ง 2 ชนิดสามารถใช้ห่อหุ้มตัวยาเมทิลซาลิไซเลตได้ดีพอกันทั้งคู่ เพราะสามารถห่อหุ้มตัวยาเมทิลซาลิไซเลตได้เกือบ 100% โดยไมโครแคปซูลที่ใช้ PLA เป็นวัสดุเปลือก

สามารถห่อหุ้มตัวยาเมทิลซาลิไซเลตได้ 93.5% ในขณะที่ไมโครแคปซูลที่ใช้ PBAT เป็นวัสดุเปลือก สามารถห่อหุ้มตัวยาเมทิลซาลิไซเลตได้ 86.6% ซึ่ง อนุภาคของ PLA ไมโครแคปซูลสามารถห่อหุ้มตัวยาเมทิลซาลิไซเลตได้ดีกว่าอนุภาคของ PBAT ไมโครแคปซูลเล็กน้อย ทั้งมื้อาจเนื่องมาจากความมีขั้วของ PLA ที่มากกว่า PBAT เล็กน้อยหรือปริมาณผลึกใน PLA ไมโครแคปซูลมีปริมาณน้อยกว่าใน PBAT ไมโครแคปซูลจึงทำให้เนื้อพอลิเมอร์มีความหนาแน่นต่ำกว่าจึงมีช่องว่างที่มากกว่าจึงทำให้ตัวยาเมทิลซาลิไซเลตสามารถแทรกตัวอยู่ในเนื้อ PLA ได้ในปริมาณที่มากกว่าในเนื้อ PBAT



รูปที่ 6. ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสงโพลาไรซ์ซึ่งแสดงปริมาณการเกิดผลึกของอนุภาค PLA ไมโครแคปซูล (บน) a) ที่ไม่ได้ห่อหุ้มตัวยา และ b) ที่ห่อหุ้มตัวยา และของอนุภาค PBAT ไมโครแคปซูล (ล่าง) c) ที่ไม่ได้ห่อหุ้มตัวยา และ d) ที่ห่อหุ้มตัวยาเมทิลซาลิไซเลต

ตารางที่ 4. เปอร์เซ็นต์การห่อหุ้มตัวยาเมทิลซาลิไซเลตในอนุภาค PLA และ PBAT ไมโครแคปซูล

พอลิเมอร์แมทริกซ์	ปริมาณเมทิลซาลิไซเลตที่เติม (กรัม)	ปริมาณเมทิลซาลิไซเลตที่ถูกห่อหุ้ม (กรัม)	เปอร์เซ็นต์การห่อหุ้ม
PLA	4.80	4.49	93.5
PBAT	4.79	4.15	86.6

สรุปผลการทดลอง

อิมัลซิฟายเออร์ที่เหมาะสมต่อการเตรียมอนุภาค PLA ไมโครแคปซูลคือ P(VA-*co*-VAc) ที่มีค่า %HD อยู่ในช่วงกลางคือ 67.89% เนื่องจากทำให้ได้ขนาดอนุภาคเล็กที่สุดและมีการกระจายตัวดีที่สุด เนื่องจากมีอัตราส่วน VAc ต่อ VA ที่เหมาะสมต่อการเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ VAc กับโมเลกุลของ PLA จึงช่วยให้หยดของสารละลาย PLA มีความเสถียรและการเพิ่มความหนืดเนื่องจากหมู่ VA ใน P(VA-*co*-VAc) ช่วยให้เฟสน้ำมีค่าความหนืดมากพอจึงไปลดการรวมกันของหยดสารละลาย PLA ที่กระจายตัวในเฟสน้ำ แต่ในกรณีของ PBAT หน่วย VAc ใน P(VA-*co*-VAc) สามารถเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุล PBAT ได้ต่ำ ดังนั้น P(VA-*co*-VAc) ที่มี %HD อยู่ในช่วงสูงคือ 82.64% หรือมีปริมาณหมู่ VA มากจึงทำให้อนุภาค PBAT ไมโครแคปซูลมีขนาดเล็กที่สุดและกระจายตัวได้ดีที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มความหนืดของเฟสน้ำเนื่องจากหมู่ VA ใน P(VA-*co*-VAc) เพียงอย่างเดียว ทั้ง PLA และ PBAT ไมโครแคปซูลมีความสามารถในการห่อหุ้มตัวยาเมทิลซาลิไซเลตได้มากใกล้เคียงกัน โดยอนุภาค PLA ไมโครแคปซูลสามารถห่อหุ้มตัวยาเมทิลซาลิไซเลตได้ 93.5% และ อนุภาค PBAT ไมโครแคปซูลสามารถห่อหุ้มตัวยาเมทิลซาลิไซเลตได้ 86.6%

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากคณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ประจำปีงบประมาณ 2556 เลขที่สัญญารับทุน 5641101

เอกสารอ้างอิง

Beboit M.A., Baras B. and Gillard J., (1999) Preparation and characterization of protein-loaded poly(ε-caprolactone) microparticles for oral vaccine delivery. Int. J. Pharm., 184: 73-84.

Christian W. and Steven P.S., (2008) Principles of encapsulating hydrophobic drugs in PLA/PLGA microparticles. Int. J. Pharm., 364: 298-327.

Deepak K.M., Ashish K.J. and Prateek K.J., (2013) A Review on various techniques of microencapsulation. Int. J. Pharm. Chem. Biol. Sci., 2(2): 962-977.

Murali M. R., Singaravelu V., Manjusri M., Sujata K.B. and Amar K.M., (2013) Biobased plastics and bionanocomposites:current status and future opportunities. Prog. Polym. Sci., 38: 1653-1689.

Sergio F., Hans P.M. and Bruno G., (2005) Microencapsulation by solvent extraction/evaporation: reviewing the state of the art of microsphere preparation process technology. J. Control. Release, 102: 313-332.

Sinha V.R. and Trehan A., (2003) Biodegradable microsphere for protein delivery. J. Control. Release, 90: 261-280.

The Journal of Applied Science **Vol. 15 No. 2: 39-51 [2016]**
วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ doi: 10.14416/j.appsci.2016.06.001
ฝISSN 1513-7805 Printed in Thailand

Research Article

การวัดประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุมคุณภาพสัดส่วนของเสียฟัซซี

A performance measurement of fuzzy-p control chart

ศุภิสรา พลอยครุฑ* และฐิตนนท์ จารุโรจน์กีรติ

Supissara Ploykrut*and Thitanont Charurotkeerati

ภาควิชาสถิติประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

Department of Applied Statistics, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangsue, Bangkok 10800

***E-mail**: yoyeyoye.sp@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสียฟัซซี (fuzzy-p control chart) กับแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสีย (p-chart) สำหรับจำนวนของเสียที่ข้อมูลอยู่ในรูปแบบฟัซซี ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ค่า α ที่ระดับต่างกัน ตามลักษณะของผลิตภัณฑ์และกระบวนการ ที่ $0 < \alpha < 1$ เกณฑ์ที่ใช้วัดประสิทธิภาพของแผนภูมิ คือ ค่าความยาววิ่งเฉลี่ย (average run length : ARL) โดยการจำลองด้วยวิธีมอลติคาร์โล (Monte Carlo simulation: MC) ที่ตัวแปรสุ่มมีการแจกแจงทวินาม (binomial distribution) มีจำนวนทำซ้ำ 50,000 รอบ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสียฟัซซีและแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสียไม่แตกต่างกันที่ α เข้าใกล้ 1 แต่เมื่อ α มีขนาดลดลงทำให้ช่วงความกว้างของแผนภูมิควบคุมจะมีขนาดกว้างขึ้น นอกจากนี้ ARL_0 และ ARL_1 ยังมีค่าเพิ่มขึ้นอีกด้วย

คำสำคัญ: ระดับแอลฟ่า, ความยาววิ่งเฉลี่ย, แผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสียฟัซซี, แผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสีย

Abstract

The objective of this research was to study a performance measurement of fuzzy-p control chart and p-chart when the numbers of nonconforming was fuzzy data. In this research, different α levels were chosen by characteristics of products and processes at $0 < \alpha < 1$. The performance of control chart was measured by the average run length (ARL) using Monte Carlo simulation (MC) when observations were binomial distribution repeating 50,000 times. The results showed that a performance measurement of fuzzy-p control chart and p-chart was not different when α approached to 1 but when α was reduced, the width of control chart larger. Additionally, ARL_0 and ARL_1 also increased.

Keywords: α level, average run length, fuzzy–p control chart, p-chart

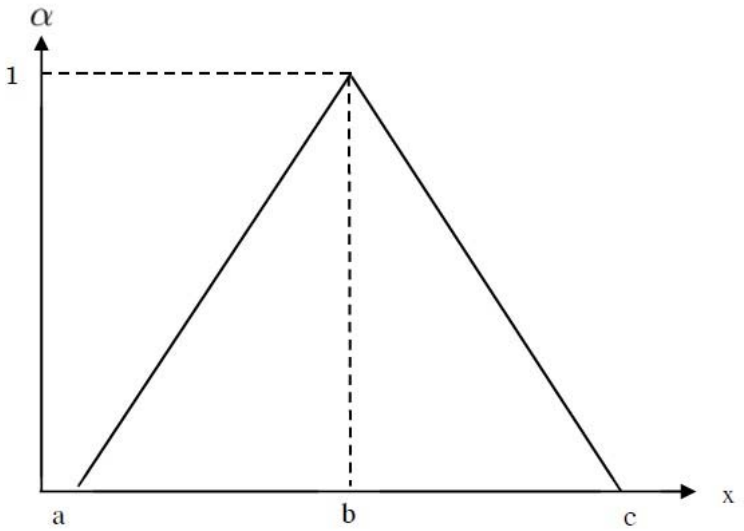
บทนำ

ในปัจจุบันการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพให้เป็นที่พอใจและน่าเชื่อถือต่อผู้บริโภค เป็นปัจจัยที่ส่งผลให้ธุรกิจและอุตสาหกรรมนั้นประสบความสำเร็จ วิธีการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์จึงถูกพัฒนาขึ้นอย่างมีระบบเพื่อควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์แต่ละประเภท แผนภูมิควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ (statistical process control: SPC) เป็นการนำเอาวิธีการทางสถิติมาใช้ในการควบคุมการผลิต ทำให้กระบวนการผลิตมีความสามารถในการผลิตให้ได้ผลดีมากยิ่งขึ้น และยังทำให้ความผันแปรในการผลิตลดลง จนได้คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ใกล้เคียงตรงตามมาตรฐานที่ต้องการ โดย Shewhart (1931) เป็นผู้พัฒนาแผนภูมิควบคุมเป็นคนแรก ได้แบ่งแผนภูมิออกเป็น 2 ประเภท คือ แผนภูมิควบคุมเชิงแปรผัน (control chart for variables) และแผนภูมิควบคุมเชิงลักษณะ (control chart for attribute) แผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสีย (p-chart) เป็นแผนภูมิควบคุมเชิงลักษณะที่นิยมใช้กันมาก และสามารถประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวาง โดยทั่วไปข้อมูลคุณลักษณะนี้ถือว่าเป็นข้อมูลที่คลุมเครือและไม่สามารถตรวจวัดได้อย่างแม่นยำ มีหลายสิ่งหลายเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างไม่เที่ยงและไม่แน่นอน อาจเป็นสิ่งที่คลุมเครือ (fuzzy) ไม่ชัดเจน และเซตของเหตุการณ์ที่ไม่แน่นอนเช่นนี้เรียกว่า ฟัซซีเซต (fuzzy Set) (พยุง, 2555) จึงมีการนำทฤษฎีอื่นมาช่วยในการจัดการปัญหาเหล่านี้ โดย Zadeh (1965) เป็นคนนำเสนอทฤษฎีฟัซซีเซตเป็นคนแรก ฟัซซีเซตนี้จะช่วยสร้างขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสียฟัซซี (fuzzy-p control chart) โดย Gülbayและคณะ (2004) ได้เสนอแผนภูมิแอลฟ่า-คัทฟัซซี (α-cut fuzzy control chart for attribution) ที่ใช้สำหรับแผนภูมิควบคุมเชิงลักษณะ วิธีนี้สามารถกำหนดความเข้มงวดของการตรวจสอบกระบวนการผลิตได้ โดยใช้ α ที่ระดับต่าง ๆ กันตามความเหมาะสม Shuและ Wu (2010) ได้ทำการวิเคราะห์แผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสียฟัซซี (fuzzy-p control chart) ซึ่งมีประสิทธิภาพสามารถจัดการกับข้อมูลที่คลุมเครือที่เก็บได้จากกระบวนการผลิตและตรวจสอบกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน และ Sorooshian (2013) ได้เสนอวิธีการใหม่ในการควบคุมคุณภาพ

สำหรับกระบวนการที่มีความคลุมเครือเกิดขึ้น สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กและขนาดของกลุ่มตัวอย่างขนาดเล็กได้ดีกว่าวิธีการในปัจจุบัน สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการวัดประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสียฟัซซี กับแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสียซึ่งมีทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

1. แผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสียฟัซซี (fuzzy-p control chart)

ภายหลังจาก Zadeh (1965) เป็นคนนำเสนอทฤษฎีฟัซซีเซต ซึ่งทฤษฎีนี้ได้ช่วยสร้างขีดจำกัดของแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสียฟัซซี ต่อมา Fonsecaและคณะ (2007) ได้พัฒนาเทคนิคการสร้างแผนภูมิควบคุมฟัซซีสำหรับจำนวนของเสียที่ข้อมูลอยู่ในรูปแบบฟัซซีซึ่งเป็นการผลิตในระยะสั้น โดยแบ่งข้อมูลเป็นจำนวนกลุ่มย่อยและขนาดกลุ่มย่อย ทำให้ขีดจำกัดของแผนภูมิควบคุมการผลิตมีโอกาสผิดพลาดน้อยกว่าแผนภูมิแอลฟ่า-คัทฟัซซี Sogandiและคณะ (2014) ได้พัฒนาแผนภูมิควบคุมฟัซซีที่ขึ้นอยู่กับค่ากึ่งกลาง (midrange) ซึ่งมีค่าระหว่างค่าคลุมเครือสูงที่สุดกับค่าต่ำที่สุด สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ค่า α ระดับต่าง ๆ โดยจำนวนของเสียที่ข้อมูลจะอยู่ในรูปแบบของฟัซซี ซึ่ง a, b และ c จะเป็นตัวแทนของชุดข้อมูล โดยข้อมูลจะถูกเรียงจากค่าน้อย กลาง และมากตามลำดับ สามารถแสดงอยู่ในรูปแบบของตัวแบบฟัซซีแบบสามเหลี่ยม (triangular fuzzy number: TFN) ได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1. Triangular fuzzy number: TFN

doi: 10.14416/j.appsci.2016.06.001

ในการสร้างแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสียฟัซซี จะมีตัวสถิติดังต่อไปนี้

$$CL = (CL_a^a, CL_b, CL_c^a) = (\overline{P}_a^a, \overline{P}_b, \overline{P}_c^a) \tag{1}$$

$$\left(\overline{P_a}^{\alpha}, \overline{P_b}, \overline{P_c}^{\alpha}\right) = \left(\frac{\sum x_a^a}{mn}, \frac{\sum x_b}{mn}, \frac{\sum x_c^a}{mn}\right) \tag{2}$$

กำหนดให้ (x_a^a , x_b , x_c^a) แทนจำนวนของเสียตามตัวแบบฟัซซีแบบสามเหลี่ยมชุดที่ a, b และ c ตามลำดับ

m คือ จำนวนตัวอย่าง

n คือ ขนาดตัวอย่าง

โดย $\overline{P}_a^a$ และ $\overline{P}_c^a$ คำนวณได้จาก

$$\overline{P_a}^{\alpha} = \overline{P_a} + \alpha(\overline{P_b} - \overline{P_a}) \tag{3}$$

$$\overline{P_c}^{\alpha} = \overline{P_c} - \alpha(\overline{P_c} - \overline{P_b}) \tag{4}$$

กำหนดให้ค่า x คือ ตัวแปรสุ่มที่มีการแจงแจงทวินาม และ α มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ($0 < \alpha < 1$) โดยเส้นกลาง (center line: CL) ขีดจำกัดควบคุมบน (upper control limit: UCL) และขีดจำกัดควบคุมล่าง (lower control limit: LCL) ของแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสียฟัซซี คือ (Sogandiและคณะ, 2014)

$$CL_{f-p}^a = \frac{1}{2}(\overline{P}_a^a + \overline{P}_c^a) \tag{5}$$

$$UCL_{f-p}^a = CL_{f-p}^a + 3\sqrt{\frac{CL_{f-p}^a(1-CL_{f-p}^a)}{n}} \tag{6}$$

$$LCL_{f-p}^a = CL_{f-p}^a - 3\sqrt{\frac{CL_{f-p}^a(1-CL_{f-p}^a)}{n}} \tag{7}$$

กระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุม เมื่อ $LCL_{f-p}^{\alpha} \le S_{f-p}^{\alpha} \le UCL_{f-p}^{\alpha}$ มิฉะนั้นจะถือว่ากระบวนการไม่อยู่ภายใต้การควบคุม เมื่อ $LCL_{f\text{-}p}^a > S_{f\text{-}p}^a > UCL_{f\text{-}p}^a$

doi: 10.14416/j.appsci.2016.06.001

เมื่อ $$S_{f-p}^{\alpha} = \frac{\left(x_{a_j} + x_{c_j}\right) + \alpha\left[\left(x_{b_j} - x_{a_j}\right) - \left(x_{c_j} - x_{b_j}\right)\right]}{2n} \quad (8)$$

กำหนดให้ $(x_{a_j}, x_{b_j}, x_{c_j})$ แทนจำนวนของเสียตามตัวแบบฟัซซีแบบสามเหลี่ยม ชุดที่ a, b และ c ลำดับที่ j

n คือ ขนาดตัวอย่าง

2. แผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสีย (p-chart)

เป็นแผนภูมิที่ใช้ควบคุมสัดส่วนผลิตภัณฑ์เสียจากกระบวนการผลิต ไม่ให้เกิดสัดส่วนของเสียมากเกินไป จนมีผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ แล้วยังใช้ในการเปรียบเทียบและควบคุมการทำงานของคนงาน หน่วยการผลิตแต่ละหน่วย เครื่องจักรแต่ละเครื่องจักร เป็นต้น การจะทราบสัดส่วนผลิตภัณฑ์เสียที่แท้จริงของกระบวนการผลิต (p') ซึ่งในทางปฏิบัติต้องทำการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ 100% ในการตรวจสอบทั้งหมดบางครั้งการตรวจสอบ 100% นั้นทำได้ยาก อาจทำการเก็บข้อมูลผลิตภัณฑ์เสียจากกระบวนการผลิตมาส่วนหนึ่งก่อนเพื่อนำมาสร้างแผนภูมิควบคุม ทำการปรับปรุงแก้ไขแผนภูมิจนกระทั่งกระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุม ซึ่งในกรณีไม่ทราบค่า p' นี้ จะประมาณด้วย $\overline{p}$ เมื่อ $\overline{p} = \frac{\sum_{i=j}^{n} x_i}{mn}$

กำหนดให้ค่า X คือ จำนวนผลิตภัณฑ์เสียที่ตรวจพบ X จะเป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจงแจงแบบทวินาม ด้วยพารามิเตอร์ n และ p' และ m คือ จำนวนตัวอย่าง

โดยเส้นกลาง (center line : CL) ขีดจำกัดควบคุมบน (upper control limit: UCL) และขีดจำกัดควบคุมล่าง (lower control limit: LCL) ของแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสีย คือ

$$CL = \overline{p} \quad (9)$$

$$UCL = \overline{p} + 3\sqrt{\frac{\overline{p}(1-\overline{p})}{n}} \quad (10)$$

$$LCL = \overline{p} - 3\sqrt{\frac{\overline{p}(1-\overline{p})}{n}} \quad (11)$$

 doi: 10.14416/j.appsci.2016.06.001

3. ค่าความยาววิ่งเฉลี่ย (average run length: ARL)

ค่าความยาววิ่งเฉลี่ย (average run length: ARL) คือ จำนวนตัวอย่างเฉลี่ยที่ตกอยู่ในขีดจำกัดควบคุมก่อนที่กระบวนการส่งสัญญาณออกนอกขีดจำกัดควบคุมเป็นครั้งแรก โดยค่า ARL แบ่งออกเป็น 2 สถานะ คือ

- เมื่อกระบวนการผลิตอยู่ภายใต้การควบคุม (in–control process) ค่าความยาววิ่งเฉลี่ยเขียนสัญลักษณ์แทนด้วย ARL_0

$$ARL_0 = \frac{1}{P_I}$$

เมื่อ P_I คือ ค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดประเภทที่ 1 หมายถึง ค่าความน่าจะเป็นที่พบว่า กระบวนการออกนอกขีดจำกัดควบคุม เมื่อกระบวนการไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ARL_0 ควรมีค่าสูง ๆ

- เมื่อกระบวนการผลิตไม่อยู่ภายใต้การควบคุม (out-of-control process) ค่าความยาววิ่งเฉลี่ยเขียนสัญลักษณ์แทนด้วย ARL_1

$$ARL_1 = \frac{1}{1-P_{II}}$$

เมื่อ P_{II} คือ ค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดประเภทที่ 2 หมายถึง ค่าความน่าจะเป็นที่พบว่ากระบวนการอยู่ในขีดจำกัดควบคุม เมื่อกระบวนการเกิดการเปลี่ยนแปลง ARL_1 ควรจะมีค่าต่ำๆ

วิธีการดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยนี้ได้แบ่งงานวิจัยออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 สร้างแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสียฟัซซี (fuzzy-p control chart) และคำนวณหาค่า ARL ด้วยวิธีมอลติคาร์โล ในแต่ละระดับ α เมื่อตัวแปรสุ่มมีการแจกแจงทวินาม และเปรียบเทียบค่า ARL ในแต่ละระดับ α ส่วนที่ 2 สร้างแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสีย (p–chart) และคำนวณหาค่า ARL เมื่อตัวแปรสุ่มมีการแจกแจงทวินาม ส่วนที่ 3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสียฟัซซีกับแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสีย ทั้งกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงและไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. วิธีการหาค่าความยาววิ่งเฉลี่ย

ประมาณค่าความยาววิ่งเฉลี่ย (average run length: ARL) โดยการจำลองด้วยวิธีมอลติคาร์โล (Monte Carlo simulation: MC) 50,000 รอบ เพื่อประมาณค่า ARL

$$ARL = \frac{\sum_{t=1}^{n} RL_t}{n} \tag{12}$$

 doi: 10.14416/j.appsci.2016.06.001

เมื่อ RL_t คือ จำนวนตัวอย่าง ที่ถูกตรวจสอบก่อนที่จะพบว่า กระบวนการออกนอกขีดจำกัดควบคุมเป็นครั้งแรก ในการจำลองข้อมูลรอบที่ t

n คือ จำนวนรอบของการทำซ้ำของการทดลอง ในที่นี้กำหนดให้ n = 50,000

2. ขั้นตอนการจำลองและสร้างแผนภูมิควบคุม

2.1 สร้างแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสียฟัซซี (fuzzy-p control chart) ในแต่ละระดับ α และสร้างแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสีย (p–chart) มีขั้นตอนดังนี้

2.1.1 จำลองข้อมูลที่มีการแจกแจงทวินาม (binomial) เมื่อกระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุม กำหนดค่าพารามิเตอร์ p_0 = 0.01, 0.05, 0.1, m = 1,200, n = 3,500 โดยข้อมูลอยู่ในรูปแบบฟัซซี

2.1.2 กำหนดค่า α ตั้งแต่ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 0.95, 0.96, 0.97, 0.98, 0.99

2.1.3 กำหนดค่าความยาววิ่งเฉลี่ย (ARL_0) เมื่อกระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุม เท่ากับ 370

2.1.4 คำนวณค่าสถิติของแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสียฟัซซี และแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสีย

2.1.5 คำนวณหาขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสียฟัซซี ในทุกระดับของ α และแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสีย ที่สอดคล้องกับค่า ARL_0 ที่กำหนด

2.1.6 เมื่อกระบวนการไม่อยู่ภายใต้การควบคุม กำหนดระดับการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ p เพิ่มขึ้นทีละ 0.001 เท่ากับ 0.011–0.019, 0.05–0.059 และ 0.101–0.109

2.1.7 คำนวณหาค่าความยาววิ่งเฉลี่ย ARL_1 ด้วยวิธีมอลติคาร์โล (MC) ในทุกระดับของ α

2.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสียฟัซซีกับแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสีย ทั้งกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงและไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

2.2.1 เปรียบเทียบค่า ARL_0 และ ARL_1 ของแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสียฟัซซีและพิจารณาขีดจำกัดควบคุมในทุกระดับของ α

2.2.2 เปรียบเทียบค่า ARL_0 และ ARL_1 ของแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสีย ในทุก ๆ การเปลี่ยนแปลงของกระบวนการ

2.2.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสียฟัซซี โดยพิจารณา α ในทุกระดับ กับแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสีย

doi: 10.14416/j.appsci.2016.06.001

ผลการวิจัย

ผลการวิจัยจะแบ่งการเปรียบเทียบออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

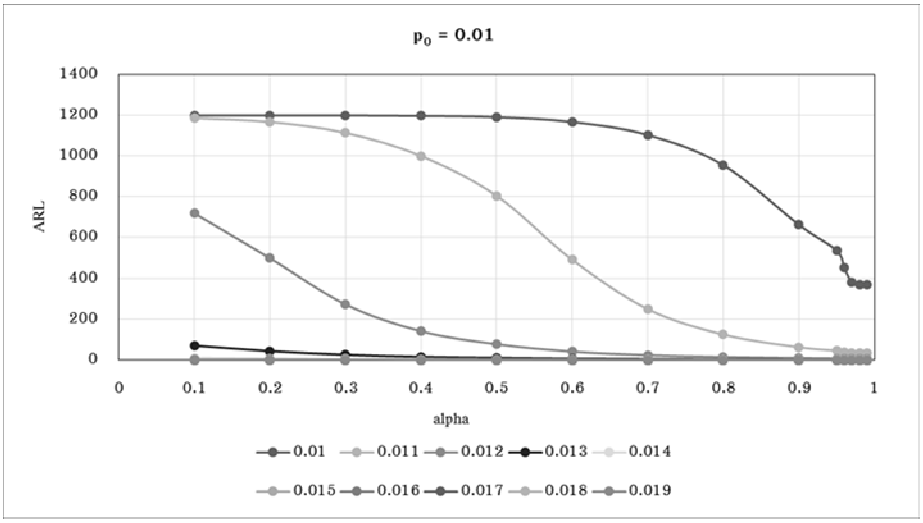
1. การเปรียบเทียบค่าความยาววิ่งเฉลี่ยของแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสียฟัซซี (fuzzy-p control chart) โดยเปรียบเทียบค่า ARL ของ α ที่ระดับต่าง ๆ กัน ทั้งกรณีที่กระบวนการเกิดการเปลี่ยนแปลงและไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

2. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสีย (p–chart) กับแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสียฟัซซี (fuzzy-p control chart) ที่ α ระดับต่าง ๆ ทั้งกรณีที่กระบวนการเกิดการเปลี่ยนแปลงและไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

การวัดประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสียฟัซซี (fuzzy-p control chart) ที่ α ระดับต่าง ๆ กับแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสีย (p–chart) โดยการประมาณค่า ARL ที่หาได้จากการจำลองด้วยวิธีมอลติคาร์โล ประมาณค่า $ARL_0 = 370$ เมื่อกระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุม และการประมาณค่า ARL_1 เมื่อกระบวนการไม่อยู่ภายใต้การควบคุม ได้ผลดังต่อไปนี้

ตารางที่ 1. เปรียบเทียบค่า ARL ของแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสียฟัซซี ที่ α ระดับต่าง ๆ กับแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสีย เมื่อกำหนด $p_0 = 0.01$ และ p = 0.011-0.019

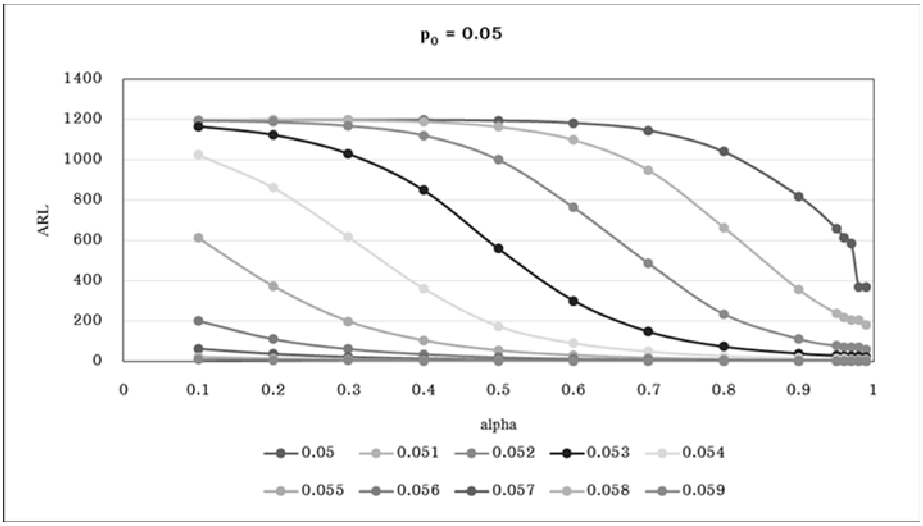
a	p / p_0= 0.01	0.011	0.012	0.013	0.014	0.015	0.016	0.017	0.018	0.019
0.99	370.2301	34.8045	5.95856	1.50048	0.44326	0.12292	0.02826	0.00534	0.00078	0.00004
0.98	370.2301	34.8045	5.95856	1.50048	0.44326	0.12292	0.02826	0.00534	0.00078	0.00004
0.97	378.9571	35.00688	5.96984	1.50088	0.44332	0.12292	0.02826	0.00534	0.00078	0.00004
0.96	450.7331	38.5872	6.22522	1.52754	0.4473	0.1234	0.02834	0.00534	0.00078	0.00004
0.95	535.2445	45.51280	6.9091	1.63632	0.46994	0.12752	0.02918	0.00548	0.00078	0.00004
0.9	662.2552	62.56312	9.21616	2.16974	0.63344	0.18012	0.04564	0.00926	0.00114	0.00012
0.8	953.8586	124.3506	14.46942	2.96666	0.8233	0.2326	0.05854	0.01256	0.00154	0.00018
0.7	1101.722	249.3754	23.3612	4.22488	1.11494	0.31902	0.08376	0.0187	0.00294	0.00036
0.6	1165.508	490.7536	40.65118	6.31394	1.55658	0.44484	0.1219	0.02838	0.00492	0.00062
0.5	1188.774	803.8845	77.42128	10.04978	2.25156	0.62994	0.17814	0.04404	0.00838	0.00116
0.4	1195.358	998.7158	140.757	15.45622	3.15804	0.8568	0.24702	0.0638	0.01352	0.00184
0.3	1197.746	1112.019	272.4773	25.34836	4.60078	1.19834	0.34786	0.09496	0.02098	0.00328
0.2	1198.07	1165.444	498.6718	43.56646	6.9742	1.70758	0.49502	0.14204	0.03332	0.00618
0.1	1198.786	1183.965	718.465	70.4874	10.07494	2.3174	0.67182	0.19844	0.04986	0.0097
p Chart	370.2301	34.8045	5.95856	1.50048	0.44326	0.12292	0.02826	0.00534	0.00078	0.00004



รูปที่ 2. แสดงค่า ARL_0 และ ARL_1 ที่ α ระดับต่าง ๆ

ตารางที่ 2. เปรียบเทียบค่า ARL ของแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสียฟัซซี ที่ α ระดับต่าง ๆ กับแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสีย เมื่อกำหนด p_0= 0.05 และ p = 0.051-0.059

a	p / p_0= 0.05	0.011	0.012	0.013	0.014	0.015	0.016	0.017	0.018	0.019
0.99	370.2393	180.7591	59.82914	22.76548	9.92424	4.6663	2.3656	1.2551	0.6737	0.3632
0.98	370.2365	205.1761	68.76502	26.29094	11.42734	5.3938	2.7358	1.4523	0.7867	0.4272
0.97	585.6547	205.4224	68.82982	26.29362	11.42982	5.3939	2.7358	1.4523	0.7867	0.4272
0.96	614.254	215.9807	71.0872	26.8077	11.5631	5.4314	2.7468	1.4556	0.7876	0.4276
0.95	659.1326	238.503	76.94134	28.4537	12.07446	5.5948	2.8080	1.479	0.7969	0.4321
0.9	819.0973	356.0745	111.2986	39.01238	15.7958	7.1014	3.4833	1.8215	0.9653	0.5256
0.8	1039.754	663.9166	234.841	73.06184	26.53366	11.007	5.0897	2.5459	1.3157	0.7140
0.7	1145.582	947.4542	486.0489	147.0203	48.3101	18.1379	7.8404	3.7251	1.884	0.9972
0.6	1182.377	1097.733	763.0654	300.9888	89.64908	30.872	12.242	5.504	2.6846	1.3927
0.5	1193.568	1162.384	999.2326	558.56	174.1964	54.6622	19.8443	8.3188	3.8725	1.966
0.4	1197.084	1187.712	1120.781	849.2796	361.7613	104.66	34.9450	13.6178	5.9485	2.8981
0.3	1197.515	1194.956	1167.272	1029.294	616.0377	198.953	60.9470	22.0282	9.0823	4.2019
0.2	1196.698	1197.278	1186.714	1123.233	860.2	373.475	109.973	36.87	14.2257	6.2955
0.1	1198.06	1197.908	1194.208	1164.934	1023.761	612.2737	200.5153	62.3046	22.7782	9.4369
p Chart	370.987	150.084	52.25728	20.57596	9.20882	4.42098	2.27568	1.21504	0.66002	0.35626

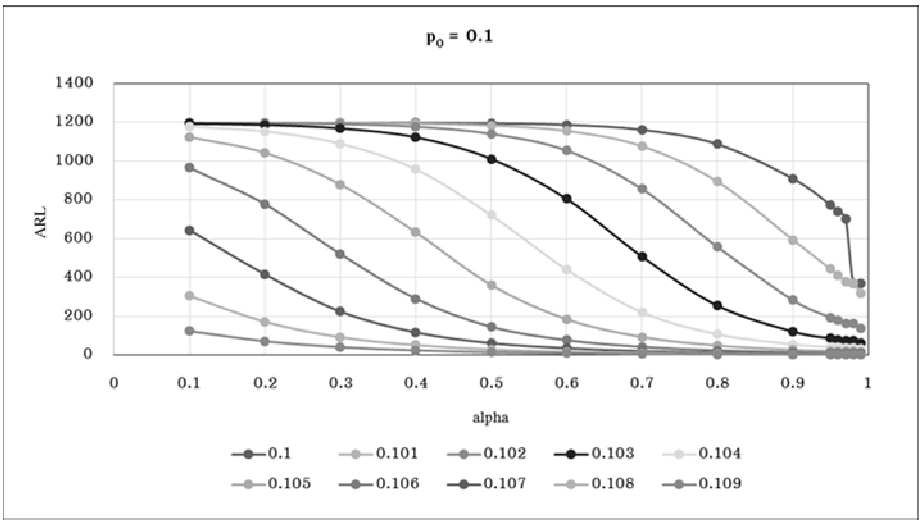


รูปที่ 3. แสดงค่า ARL_0 และ ARL_1 ที่ α ระดับต่าง ๆ

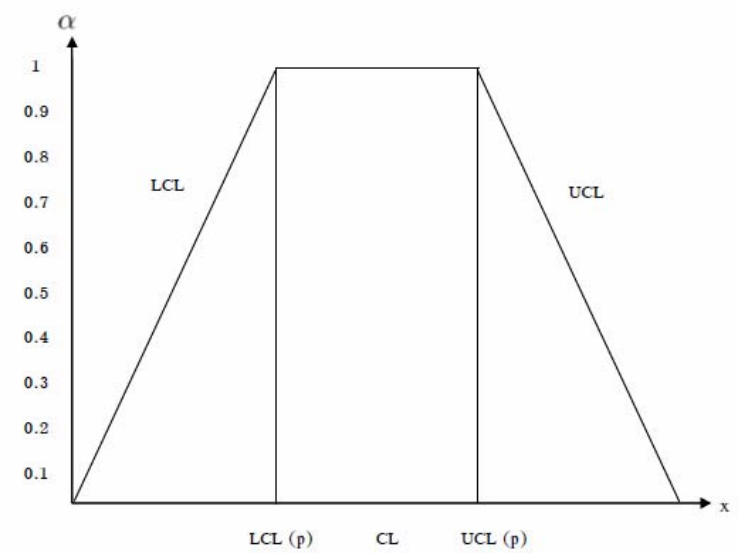
ตารางที่ 3. เปรียบเทียบค่า ARL ของแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสียฟัซซี ที่ α ระดับต่าง ๆ กับแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสีย เมื่อกำหนด p_0= 0.1 และ p = 0.101-0.109

a	p / p_0= 0.1	0.011	0.012	0.013	0.014	0.015	0.016	0.017	0.018	0.019
0.99	370.4997	318.8596	136.9539	62.49368	30.9223	16.1367	8.99832	5.2497	3.1438	1.9629
0.98	370.6917	370.6486	161.2143	73.72572	36.08746	18.5546	10.2937	5.9188	3.5215	2.191
0.97	703.8077	379.1623	164.4704	75.00584	36.72894	18.862	10.4720	6.0225	3.5897	2.2409
0.96	741.6326	411.1155	177.7141	79.58814	38.53766	19.5678	10.7526	6.1379	3.6466	2.2655
0.95	773.9045	442.9803	193.6357	85.7458	41.14328	20.7702	11.3005	6.4013	3.7066	3.3373
0.9	909.7744	594.5861	282.9994	120.6942	55.15842	27.0967	14.2986	7.9103	4.5827	2.7814
0.8	1087.771	894.3626	557.7243	254.5414	106.8073	48.8204	23.9576	12.463	6.8913	4.0381
0.7	1161.894	1077.319	856.3798	507.3344	220.4401	92.7463	41.685	20.3453	10.7268	5.9763
0.6	1187.646	1155.898	1054.763	805.466	440.5945	184.4727	76.8025	35.1246	17.3125	9.1927
0.5	1194.838	1184.108	1140.732	1011.718	721.0338	361.2393	145.1885	61.2472	28.7410	14.405
0.4	1197.226	1193.685	1177.664	1123.22	957.9692	633.0406	290.656	116.5746	51.035	23.9024
0.3	1197.484	1197.206	1191.488	1168.807	1090.206	880.3788	521.5008	224.4973	91.7364	40.4504
0.2	1198.072	1197.899	1196.157	1187.486	1153.372	1043.253	778.6811	416.266	171.361	71.202
0.1	1198.171	1197.207	1197.543	1194.2	1178.392	1123.763	965.5047	644.5099	304.76	123.317
p Chart	370.3945	299.9223	130.5094	60.34284	30.1666	15.8521	8.89212	5.2053	3.1247	1.95546

doi: 10.14416/j.appsci.2016.06.001



รูปที่ 4. แสดงค่า ARL_0 และ ARL_1 ที่ α ระดับต่าง ๆ



รูปที่ 5. แสดงขีดจำกัดควบคุมที่ α ระดับต่าง ๆ

วิจารณ์และสรุปผลการวิจัย

จากตารางที่ 1 ถึง 3 แสดงการเปรียบเทียบค่าความยาววิ่งเฉลี่ยของแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสียฟัซซี กับแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสีย ที่ได้จากการจำลองด้วยวิธีมอลติคาร์โล กำหนดค่าพารามิเตอร์ $p_0 = 0.01, 0.05, 0.1$ พบว่า ค่าความยาววิ่งเฉลี่ย ARL_0 และ ARL_1 ที่ α เข้าใกล้ 1 จะมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสีย และ จากรูปที่ 2 ถึง 4 ซึ่งแสดงค่า ARL_0 และ ARL_1 ที่ α ระดับต่าง ๆ ของแต่ละกระบวนการที่เกิดการเปลี่ยนแปลง จะเห็นได้ว่า เมื่อค่า α มีขนาดลดลง ขนาดของความกว้างของช่วง control chart จะกว้างขึ้น ซึ่งทำให้ ARL_0 และ ARL_1 มีค่ามากขึ้นด้วย จากรูปที่ 5 แสดงขีดจำกัดควบคุมที่ α ระดับต่างๆ ซึ่งทำให้เห็นว่าเมื่อ α เข้าใกล้ 1 ขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสียฟัซซี (fuzzy-p control chart) จะมีค่าไม่ต่างจากแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสีย (p-chart) ในการกำหนดค่า α เพื่อใช้ในแผนภูมิควบคุมนั้นจะถูกกำหนดตามลักษณะของผลิตภัณฑ์และกระบวนการ เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและเพิ่มประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุมในการตรวจสอบกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน และ Gülbayและคณะ (2004) ได้กำหนดค่า α สำหรับอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น สำหรับโรงงานของเล่น อาจจะกำหนดค่า α ระหว่าง 0.6 ถึง 0.8 โรงงานผลิตมอเตอร์ เครื่องยนต์ ควรกำหนด α อยู่ระหว่าง 0.95 ถึง 1 เป็นต้น

นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่า เมื่อ α เข้าใกล้ 1 ขีดจำกัดควบคุมด้านบน (UCL) และขีดจำกัดควบคุมด้านล่าง (LCL) จะมีค่าไม่แตกต่างกับ แผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสีย (p-chart) และที่ α มีค่าลดลง ขอบเขตในการยอมรับสินค้าของแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสียฟัซซี ก็จะมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งเป็นความเหมาะสมของข้อมูลที่มีลักษณะคลุมเครือ หากข้อมูลเป็นแบบปกติธรรมดา และเราใช้แผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสียฟัซซี ในการตรวจสอบสินค้าจะทำให้โอกาสในการยอมรับสินค้าที่ผิดปกติมีมากขึ้น ทั้งนี้ผู้ที่สนใจศึกษาต่ออาจศึกษาจากหลาย ๆ กระบวนการผลิต หรือใช้ข้อมูลจริงในการทดลองกับแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสียฟัซซี

เอกสารอ้างอิง

พยุง มีสัจ, (2555) ระบบฟัซซีและโครงข่ายประสาทเทียม, พิมพ์ครั้งที่ 1, ศูนย์ผลิตตำราเรียนมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพ, 338 หน้า.

Fonseca D.J., Elam M.E. and Tibbs L., (2007) Fuzzy short-run control charts, Mathware Soft Comput., 14: 81-101.

Gülbay M., Kahraman C. and Ruan D., (2004) α-Cut fuzzy control chart for linguistic data, Int. J. Intell. Syst., 19(12): 1173-1195.

Shewhart W.A., (1931) Economic control of quality of manufactured product, D. Van Nostrand Company, New York, 501 P.

Shu M.-H. and Wu H.-C., (2010) Monitoring imprecise fraction of nonconforming items using p control charts, J. Appl. Stat., 37(8): 1283-1297.

Sogandi F., Mousavi S.M. and Ghanaatiyan R., (2014) An extension of fuzzy P-control chart based on α-level fuzzy midrange. Adv. Comput. Tech. Electromagn., Article ID acte-00177, 8 P. (doi: 10.5899/2014/acte-00177)

Sorooshian S., (2013) Fuzzy approach to statistical control charts, J. Appl. Math., Article ID 745153, 6 P. (http://dx.doi.org/10.1155/2013/745153)

Zadeh L.A., (1965) Fuzzy Set. Inform. Contr., 8(3): 338-353.

The Journal of Applied Science **Vol. 15 No. 2: 52-67 [2016]**
วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ doi: 10.14416/j.appsci.2016.06.004
ISSN 1513-7805 Printed in Thailand

Research Article

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการมีหนี้สินของครอบครัวข้าราชการพลเรือนสามัญ ในกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล

Factors influencing on family's debt of civil servants in bangkok and metropolitan area

สมใจ ชวนละคร* และน้อมจิต กิตติโชติพาณิชย์

Somjai Chounlakorn and Nomchit Kittichotipanit

ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

Department of Statistics, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok 10520

***E-mail:** kerng157@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการมีหนี้สินของครอบครัวข้าราชการพลเรือนสามัญ จำนวน 3 ประเภทได้แก่ ประเภททั่วไป ประเภทวิชาการ และประเภทอำนวยการและประเภทบริหาร โดยใช้ข้อมูลทุติยภูมิจากสำนักงานสถิติแห่งชาติ เรื่องการสำรวจภาวะการครองชีพของข้าราชการพลเรือนสามัญ พ.ศ. 2555 ในงานวิจัยนี้จะศึกษาเฉพาะการมีหนี้สินของครอบครัวข้าราชการพลเรือนสามัญทุกตำแหน่งประเภทในเขตกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล (สมุทรปราการ นนทบุรี และปทุมธานี) เท่านั้น ตัวแปรอิสระที่ใช้มีทั้งหมด 26 ตัวแปร ใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (multiple linear regression analysis) ในการวิเคราะห์ข้อมูล โดยเลือกตัวแปรอิสระด้วยวิธีเพิ่มตัวแปรอิสระแบบขั้นตอน (stepwise regression procedure) และใช้การวิเคราะห์ปัจจัย (factor analysis) ด้วยวิธีวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก และหมุนแกนปัจจัยร่วมให้ตั้งฉากกัน (orthogonal rotation) ด้วยวิธีวาริแมกซ์ (varimax) ในการรวมตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กัน ผลการวิจัยพบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการมีหนี้สินของครอบครัวข้าราชการพลเรือนสามัญประเภททั่วไป ประกอบด้วยปัจจัยร่วม 3 ปัจจัย คือ ความสามารถในการผ่อนชำระ จำนวนสมาชิกในครอบครัว และค่าใช้จ่ายเพื่อการครองชีพ และตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปรหลัก คือ ค่าจ้างบุคคลที่ให้บริการแก่ครอบครัวและค่าใช้จ่ายสมทบ ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการศึกษา และวุฒิการศึกษาที่ใช้ในการบรรจุเข้าทำงานในประเภทและระดับตำแหน่งปัจจุบัน สามารถอธิบายความผันแปรของตัว

 doi: 10.14416/j.appsci.2016.06.004

แปรตามได้เท่ากับร้อยละ 57.7 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการมีหนี้สินของครอบครัวข้าราชการพลเรือนสามัญประเภทวิชาการ ประกอบด้วยปัจจัยร่วม คือ ความสามารถในการผ่อนชำระ และตัวแปรอิสระ 2 ตัวแปรหลัก คือ ค่าจ้างบุคคลที่ให้บริการแก่ครอบครัวและค่าใช้จ่ายสมทบ และค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการศึกษา สามารถอธิบายความผันแปรของตัวแปรตามได้เท่ากับร้อยละ 50.1 สำหรับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการมีหนี้สินของครอบครัวข้าราชการพลเรือนสามัญประเภทอำนวยการและประเภทบริหาร ประกอบด้วยปัจจัยร่วมคือ ความสามารถในการผ่อนชำระ และตัวแปรอิสระ 2 ตัวแปรหลัก คือ ค่าใช้จ่ายเพื่อการสะสมทุน และเพศ สามารถอธิบายความผันแปรของตัวแปรตามได้ เท่ากับร้อยละ 63.5

คำสำคัญ: หนี้สิน, การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ, การวิเคราะห์ปัจจัย

Abstract

The objective of this research was to study factors influencing the family debts of civil servants of three types, namely, general officials, academic officials, and administrative and management officials, by using secondary data from National Statistics Office, under the title of the 'Survey on Living Conditions of Civil Servants in 2012'. In this research, the focus was put on the family debts of civil servants of all ranks and positions in Bangkok and metropolitan area (Samut Prakan province, Nonthaburi province and Pathum Thani province). The number of independent variables in this study was 26. The data were analyzed with multiple linear regression analysis technique by selecting the independent variables with stepwise regression procedure, and factor analysis technique by main factor analysis and orthogonal rotation with varimax method for gathering the correlated variables. The results revealed that there were three common factors that affected the general officials to incur family debts: the capability of making installed payments, the number of family members, and the cost of living. The three main independent variables were wages and supportive money for personnel serving the families, educational expenses, and educational backgrounds using as the bases for job positioning and current positions. The variation of the dependent variables could be explained to be 57.7. The common factor that influenced the academic officials to incur family debts was the capability of making installed payments. The two main independent variables were wages and supportive money for personnel serving the families, and educational expenses. The variation of the dependent variables was able to explain to be 50.1. The common factor that involved the administrative and management officials to incur family debts was the capability of making installed payments. The two main independent variables were expenses related to savings, and genders. The variation of the dependent variables could be described to be 63.5.

Keywords: debts, multiple linear regression analysis, factor analysis

บทนำ

จากการเติบโตทางเศรษฐกิจในช่วง 1 ทศวรรษที่ผ่านมาส่งผลให้ภาคครัวเรือนมีสภาพความเป็นอยู่ที่ดีขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากข้อมูลการสำรวจภาวะเศรษฐกิจและสังคมของครัวเรือน ของสำนักงานสถิติแห่งชาติ พบว่าในระหว่างปี 2545 - 2554 ครัวเรือนมีระดับรายได้ที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากที่มีรายได้เฉลี่ย 13,736 บาทต่อเดือนต่อครัวเรือน ในปี 2545 เพิ่มเป็น 23,236 บาทต่อเดือนต่อครัวเรือน ในปี 2554 ซึ่งหมายถึงครัวเรือนจะมีอำนาจการซื้อสินค้าอุปโภคบริโภคที่สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ดีนโยบายการกระตุ้นเศรษฐกิจของภาครัฐ และเอกชน ไม่ว่าจะเป็นการเปิดการค้าเสรี การปล่อยสินเชื่อให้แก่ครัวเรือน และการเพิ่มโอกาสในการเข้าถึงแหล่งเงินทุน กลับส่งผลให้ภาคครัวเรือนประสบกับปัญหาหนี้สินที่สูงขึ้นตามไปด้วย จากที่มีปริมาณหนี้สินเฉลี่ย 82,485 บาทต่อครัวเรือนในปี 2545 เพิ่มเป็น 134,900 บาทต่อครัวเรือนในปี 2554 สอดคล้องกับผลการสำรวจภาวะการครองชีพของข้าราชการพลเรือนสามัญ พ.ศ. 2555 ของสำนักงานสถิติแห่งชาติ ซึ่งเก็บรวบรวมข้อมูลจากข้าราชการ (ในสังกัด ก.พ.) ที่ตกเป็นตัวอย่าง พบว่า ครอบครัวข้าราชการทุกตำแหน่งทั่วประเทศ มีรายได้เฉลี่ยเดือนละ 49,915 บาท มีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยเดือนละ 41,081 บาท และมีหนี้สินเฉลี่ย 1,111,425 บาทต่อครอบครัวที่มีหนี้ คิดเป็นร้อยละ 83.2 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการสำรวจในปี 2553 พบว่า หนี้สินมีอัตราการเพิ่มขึ้นร้อยละ 12.9 ต่อปี (สำนักงานสถิติแห่งชาติ, 2556)

จากอัตราการเพิ่มขึ้นของหนี้สินของครอบครัวข้าราชการพลเรือนสามัญ ทำให้หลายฝ่ายเกิดความกังวลว่าหนี้สินที่เพิ่มสูงขึ้นนี้อาจจะนำไปสู่ปัญหาภาวะเศรษฐกิจในอนาคตได้ เนื่องจากข้าราชการพลเรือนสามัญเป็นส่วนหนึ่งของภาคครัวเรือน ซึ่งเป็นหน่วยทางเศรษฐกิจที่มีจำนวนมาก และเป็นหน่วยที่มีผลต่อการตัดสินใจที่สำคัญอันจะส่งผลต่อระบบเศรษฐกิจได้ ผู้วิจัยจึงเกิดความสนใจศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการมีหนี้สินของครอบครัวข้าราชการพลเรือนสามัญ โดยเฉพาะข้าราชการพลเรือนสามัญที่ปฏิบัติงานในพื้นที่กรุงเทพมหานคร และปริมณฑล เนื่องจากเป็นเมืองใหญ่มีข้าราชการปฏิบัติงานอยู่เป็นจำนวนมาก ทั้งนี้เพื่อได้ทราบปัญหาที่แท้จริง และหาแนวทางในการแก้ไขปัญหาให้ตรงจุดเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาหนี้สินรุงรังในอนาคตต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาในงานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลทุติยภูมิ (secondary data) จากสำนักงานสถิติแห่งชาติ เรื่องการสำรวจภาวะการครองชีพของข้าราชการพลเรือนสามัญ พ.ศ. 2555 ซึ่งเก็บรวบรวมข้อมูล ระหว่างวันที่ 1 - 31 พฤษภาคม 2555 โดยใช้แบบสอบถามทำการสัมภาษณ์ข้าราชการพลเรือนที่ตกเป็นตัวอย่าง หรือในกรณีที่ไม่สามารถสัมภาษณ์ได้ จะทอดแบบไว้ให้ผู้ตอบสัมภาษณ์เป็นผู้กรอกแบบสอบถามเอง ในงานวิจัยนี้จะศึกษาเฉพาะครอบครัวข้าราชการพลเรือนสามัญทุกตำแหน่งประเภทที่มีหนี้สิน ในเขตกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล (สมุทรปราการ นนทบุรี และปทุมธานี) เท่านั้น ไม่รวม ข้าราชการส่วนท้องถิ่น อัยการ ตุลาการ ทหาร ตำรวจ ครู ข้าราชการการเมือง แผนการสุ่ม

ตัวอย่างที่ใช้เป็นแผนการสุ่มตัวอย่างแบบแบ่งชั้นภูมิ (stratified random sampling) โดยแบ่งกลุ่มตามประเภทและระดับตำแหน่ง ทำการเลือกข้าราชการพลเรือนสามัญตัวอย่างในแต่ละกลุ่มด้วยวิธีการสุ่มตัวอย่างแบบง่าย (simple – random sampling) โดยให้กระจายไปตามระดับตำแหน่ง และเพศ (สำนักงานสถิติแห่งชาติ, 2556) ซึ่งขนาดตัวอย่างที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้เท่ากับ 183 โดยมีตัวแปรตามคือ หนี้สินของครอบครัวข้าราชการพลเรือนสามัญ 3 ประเภท คือ ประเภททั่วไป ประเภทวิชาการ และประเภทอำนวยการและประเภทบริหาร มีตัวแปรอิสระ คือปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อการมีหนี้สินของครอบครัวข้าราชการพลเรือนสามัญ จำนวน 26 ตัวแปร ได้แก่ เพศ (X_1) อายุ (X_2) อายุราชการ (X_3) วุฒิการศึกษาที่ใช้ในการบรรจุเข้าทำงานในประเภทและระดับตำแหน่งปัจจุบัน (X_4) สถานภาพสมรส (X_5) จำนวนสมาชิกในครอบครัว (X_6) จำนวนสมาชิกในครอบครัวที่ทำงานและมีรายได้ (X_7) จำนวนผู้ที่อยู่ในความอุปการะเลี้ยงดูของข้าราชการ (X_8) ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับที่อยู่อาศัย (X_9) ค่าอาหารและเครื่องดื่ม (X_{10}) ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับเครื่องตกแต่งบ้าน ของใช้เบ็ดเตล็ด และการดำเนินการในครอบครัว (X_{11}) ค่าจ้างบุคคลที่ให้บริการแก่ครอบครัวและค่าใช้จ่ายสมทบ (X_{12}) ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับเสื้อผ้าและเครื่องแต่งกาย (X_{13}) ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับรองเท้า (X_{14}) ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับของใช้และบริการส่วนบุคคล (X_{15}) ค่าเวชภัณฑ์และค่าตรวจรักษาพยาบาล (X_{16}) ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับยานพาหนะ การเดินทาง และการสื่อสาร (X_{17}) ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการศึกษา (X_{18}) ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับคอมพิวเตอร์ การบันเทิง และกิจกรรมทางศาสนา (X_{19}) ค่าใช้จ่ายที่ไม่เกี่ยวกับการอุปโภคบริโภค (X_{20}) ค่าใช้จ่ายเพื่อการสะสมทุน (X_{21}) เงินออม/เงินฝาก (X_{22}) เงินเดือน/ค่าตอบแทนจากการทำงาน (X_{23}) เงินอื่น ๆ (X_{24}) ค่าใช้จ่ายเพื่อการผ่อนชำระหนี้สิน (X_{25}) และจำนวนอุปกรณ์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารในครัวเรือน (X_{26})

การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการมีหนี้สินของครอบครัวข้าราชการพลเรือนสามัญในแต่ละระดับตำแหน่งทั้ง 3 ประเภท ใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (multiple linear regression analysis) โดยทำการเลือกตัวแปรอิสระด้วยวิธีเพิ่มตัวแปรอิสระแบบขั้นตอน (stepwise regression procedure) (ทรงศิริ, 2548) และเนื่องจากตัวแปรอิสระมีจำนวนมากจึงใช้การวิเคราะห์ปัจจัย (factor analysis) โดยวิธีวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (principal component analysis) และหมุนแกนปัจจัยร่วมให้ตั้งฉากกัน (orthogonal rotation) ด้วยวิธีวาริแมกซ์ (varimax) เพื่อลดจำนวนตัวแปรอิสระและแก้ปัญหาตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กัน (multicollinearity) (สุชาติ, 2540)

ผลการวิจัย

1. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ปัจจัย

ตัวแปรอิสระที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้มีจำนวนทั้งหมด 26 ตัวแปร จำแนกเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ 23 ตัวแปร และตัวแปรเชิงคุณภาพ 3 ตัวแปร แต่เนื่องจากตัวแปรอิสระที่เป็นตัวแปรเชิงปริมาณมีจำนวนมาก และบางตัวมีความสัมพันธ์กัน ผู้วิจัยจึงใช้การวิเคราะห์ปัจจัยเพื่อลดจำนวนตัวแปรอิสระ โดยการรวมตัวแปรอิสระหลาย ๆ ตัวที่มีความสัมพันธ์กันให้อยู่ในปัจจัยเดียวกัน ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กัน (multicollinearity)

doi: 10.14416/j.appsci.2016.06.004

แต่เนื่องจากตัวแปรอิสระ (X_i) มีหน่วยแตกต่างกันจึงนำตัวแปรอิสระเชิงปริมาณ (X_i) มาทำการแปลงค่าให้อยู่ในรูปค่าคะแนนมาตรฐาน (standardized) (Z_i) เพื่อให้ข้อมูลมีหน่วยเดียวกันก่อนทำการวิเคราะห์ปัจจัย

1.1 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการมีหนี้สินของครอบครัวข้าราชการพลเรือนสามัญ ประเภททั่วไป

พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ($|r|$) ของตัวแปรอิสระที่เป็นตัวแปรเชิงปริมาณ 23 ตัวแปร พบว่าตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอิสระอื่น ๆ มาก นั่นคือมีค่า $|r| \geq 0.5$ มีจำนวน 13 ตัวแปร ได้แก่ $Z_2, Z_3, Z_6, Z_8, Z_{11}, Z_{13}, Z_{15}, Z_{16}, Z_{17}, Z_{19}, Z_{21}, Z_{23}$ และ Z_{25} ดังนั้น จึงนำตัวแปรอิสระ 13 ตัวแปรไปทำการตรวจสอบความเหมาะสมโดยพบว่า ได้ค่า KMO ของตัวแปรอิสระ 13 ตัวแปรเท่ากับ 0.691 ซึ่งมากกว่า 0.5 แสดงว่าข้อมูลมีความเหมาะสมที่จะใช้การวิเคราะห์ปัจจัยได้ โดยการสกัดปัจจัยวิธีวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (principal component analysis) และหมุนแกนปัจจัยร่วมให้ตั้งฉากกัน (orthogonal rotation) ด้วยวิธีวาริแมกซ์ (varimax) ปรากฏว่าได้ปัจจัยร่วม 4 ปัจจัย ซึ่งสามารถอธิบายความผันแปรได้ร้อยละ 74.535 ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1. แสดงค่า factor loading เมื่อมีการหมุนแกนปัจจัย

ตัวแปรอิสระ	factor			
	1	2	3	4
Z_{15}	.882			
Z_{13}	.773		.350	
Z_{11}	.770	.256		
Z_{19}	.697	.231		
Z_{16}	.643			
Z_2		.951		
Z_3		.944		
Z_{23}	.265	.856		
Z_{25}			.892	
Z_{17}			.802	
Z_{21}			.672	
Z_8				.907
Z_6				.904
eigenvalue	3.035	2.745	2.138	1.772
% of variance	23.346	21.114	16.444	13.631
cumulative % of variance	23.346	44.460	60.905	74.535

และค่าของปัจจัยร่วม หรือค่าคะแนนปัจจัย (factor score) คำนวณได้จากสมการดังนี้

$$F_1 = 0.261\ Z_{11} + 0.257\ Z_{13} + 0.361\ Z_{15} + 0.224\ Z_{16} + 0.230\ Z_{19} \quad (1)$$

$$F_2 = 0.387\ Z_2 + 0.376\ Z_3 + 0.328\ Z_{23} \quad (2)$$

$$F_3 = 0.408\ Z_{17} + 0.326\ Z_{21} + 0.476\ Z_{25} \quad (3)$$

$$F_4 = 0.521\ Z_6 + 0.517\ Z_8 \quad (4)$$

1.2 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการมีหนี้สินของครอบครัวข้าราชการพลเรือนสามัญ ประเภทวิชาการ

พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ($|r|$) ของตัวแปรอิสระที่เป็นตัวแปรเชิงปริมาณ 23 ตัวแปร พบว่าตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอิสระอื่น ๆ มาก นั่นคือมีค่า $|r| \geq 0.5$ มีจำนวน 15 ตัวแปร ได้แก่ $Z_2, Z_3, Z_6, Z_8, Z_{10}, Z_{11}, Z_{13}, Z_{15}, Z_{17}, Z_{19}, Z_{21}, Z_{22}, Z_{23}, Z_{24}$ และ Z_{25} ดังนั้น จึงนำตัวแปรอิสระ 15 ตัวแปร ไปทำการตรวจ สอบความเหมาะสมโดยพบว่า ได้ค่า KMO ของตัวแปรอิสระ 15 ตัวแปรเท่ากับ 0.692 ซึ่งมากกว่า 0.5 แสดงว่าข้อมูลมีความเหมาะสมที่จะใช้การวิเคราะห์ปัจจัยได้ โดยการสกัดปัจจัยวิธีวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (principal component analysis) และหมุนแกนปัจจัยร่วมให้ตั้งฉากกัน (orthogonal rotation) ด้วยวิธีวาริแมกซ์ (varimax) ปรากฏว่าได้ปัจจัยร่วม 5 ปัจจัย ซึ่งสามารถอธิบายความผันแปรได้ร้อยละ 78.343 ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2. แสดงค่า factor loading เมื่อมีการหมุนแกนปัจจัย

ตัวแปรอิสระ	factor				
	1	2	3	4	5
Z_{11}	.808				
Z_{17}	.787			.263	
Z_{19}	.779	.228			
Z_{13}	.771		.232		
Z_{10}	.697	.433			
Z_{15}	.668		.363		
Z_{21}	.225	.941			
Z_{25}		.920		.452	
Z_{23}	.214	.716	.209		

ตารางที่ 2. แสดงค่า factor loading เมื่อมีการหมุนแกนปัจจัย (ต่อ)

ตัวแปรอิสระ	factor				
	1	2	3	4	5
Z_3	.207		.938		
Z_2	.201		.913		
Z_{22}				.909	
Z_{24}	.205			.832	
Z_6					.870
Z_8					.869
eigenvalue	3.676	2.621	2.018	1.868	1.568
% of variance	24.508	17.475	13.451	12.454	10.456
cumulative % of variance	24.508	41.983	55.434	67.888	78.343

และค่าของปัจจัยร่วม หรือค่าคะแนนปัจจัย (factor score) คำนวณได้จากสมการดังนี้

$$F_1 = 0.171Z_{10} + 0.307Z_{11} + 0.221Z_{13} + 0.170Z_{15} + 0.268Z_{17} + 0.244Z_{19} \quad (5)$$

$$F_2 = 0.403\,Z_{21} + 0.270\,Z_{23} + 0.416\,Z_{25} \quad (6)$$

$$F_3 = 0.516\,Z_2 + 0.535\,Z_3 \quad (7)$$

$$F_4 = 0.514\,Z_{22} + 0.466\,Z_{24} \quad (8)$$

$$F_5 = 0.560\,Z_6 + 0.569\,Z_8 \quad (9)$$

1.3 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการมีหนี้สินของครอบครัวข้าราชการพลเรือนสามัญ ประเภทอำนวยการและประเภทบริหาร

พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ($|r|$) ของตัวแปรอิสระที่เป็นตัวแปรเชิงปริมาณ 23 ตัวแปร พบว่ามีตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอิสระอื่น ๆ มาก นั่นคือมีค่า $|r| \geq 0.5$ มีจำนวน 9 ตัวแปร ได้แก่ $Z_2, Z_3, Z_6, Z_8, Z_{13}, Z_{14}, Z_{15}, Z_{24}$ และ Z_{25} ดังนั้น จึงนำตัวแปรอิสระ 9 ตัวแปร ไปทำการตรวจสอบความเหมาะสมโดยพบว่า ได้ค่า KMO ของตัวแปรอิสระ 9 ตัวแปรเท่ากับ 0.568 ซึ่งมากกว่า 0.5 แสดงว่าข้อมูลมีความเหมาะสมที่จะใช้การวิเคราะห์ปัจจัยได้ โดยการสกัดปัจจัยวิธีวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (principal component analysis) และหมุนแกนปัจจัยร่วมให้ตั้งฉากกัน (orthogonal rotation) ด้วยวิธีวาริแมกซ์ (varimax) ปรากฏว่าได้ปัจจัยร่วม 4 ปัจจัย ซึ่งสามารถอธิบายความผันแปรได้ร้อยละ 81.530 ดังแสดงในตารางที่ 3

doi: 10.14416/j.appsci.2016.06.004

ตารางที่ 3. แสดงค่า factor loading เมื่อมีการหมุนแกนปัจจัย

ตัวแปรอิสระ	factor			
	1	2	3	4
Z_{13}	.854			
Z_{14}	.814			
Z_{15}	.702	-.291		
Z_{2}		.942		
Z_{3}		.934		
Z_{25}			.940	
Z_{24}			.914	
Z_{8}				.911
Z_{6}				.845
eigenvalue	1.954	1.945	1.820	1.619
% of variance	21.713	21.606	20.227	17.985
cumulative % of variance	21.713	43.319	63.545	81.530

และค่าของปัจจัยร่วม หรือค่าคะแนนปัจจัย (factor score) คำนวณได้จากสมการดังนี้

$$F_1 = 0.469\,Z_{13} + 0.463\,Z_{14} + 0.350\,Z_{15} \quad (10)$$

$$F_2 = 0.515\,Z_2 + 0.493\,Z_3 \quad (11)$$

$$F_3 = 0.519\,Z_{24} + 0.562\,Z_{25} \quad (12)$$

$$F_4 = 0.526\,Z_6 + 0.614\,Z_8 \quad (13)$$

2. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ

ทำการตรวจสอบการแจกแจงของตัวแปรตาม Y_1, Y_2 และ Y_3 ว่ามีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ โดยใช้การทดสอบของ Lilliefors ได้ผลดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4. ผลการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของตัวแปรตามด้วยวิธีการทดสอบของ Lilliefors

ตัวแปรตาม	statistic	df	*p*-value
Y_1	.166	60	.000
Y_2	.198	60	.000
Y_3	.194	63	.000

ผลจากตารางที่ 4 พบว่า ตัวแปรตามทั้ง 3 ตัวแปร ไม่มีการแจกแจงแบบปกติ จึงทำการแปลงข้อมูลของตัวแปรตามด้วยวิธี Box - Cox transformation (Neterและคณะ, 1990) ผลการแปลงข้อมูลตัวแปรตามแต่ละตัวแปรได้ผลดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5. ผลการแปลงข้อมูลตัวแปรตามด้วยวิธี วิธี Box - Cox transformation

ตัวแปรตาม	ค่า λ	ค่าประมาณของ λ	ตัวแปรตามที่แปลงค่าแล้ว
Y_1	.31	.50	$\sqrt{Y_1}$
Y_2	- .03	.00	$\ln Y_2$
Y_3	.25	.50	$\sqrt{Y_3}$

ผลจากตารางที่ 5 ได้ค่า $\lambda = 0.31$, $\lambda = -0.03$ และ $\lambda = 0.25$ ของตัวแปรตาม Y_1, Y_2 และ Y_3 จึงประมาณค่า $\lambda = 0.5$, $\lambda = 0$ และ $\lambda = 0.5$ ตามลำดับ ดังนั้น จึงทำการแปลงข้อมูลของตัวแปรตาม Y_1 ด้วย $\sqrt{Y_1}$ แปลงตัวแปรตาม Y_2 ด้วย $\ln Y_2$ และแปลงตัวแปรตาม Y_3 ด้วย $\sqrt{Y_3}$ แล้วนำตัวแปรตามที่แปลงค่าแล้วมาทำการตรวจสอบว่ามีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ ได้ผลดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6. ผลการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของตัวแปรตามด้วยวิธีการทดสอบของ Lilliefors

ตัวแปรตาม	statistic	df	*p*-value
$\sqrt{Y_1}$	.101	60	.200
$\ln Y_2$	.099	60	.200
$\sqrt{Y_3}$	.101	63	.181

พบว่าตัวแปรตามที่แปลงข้อมูลแล้วทั้ง 3 ตัวแปร มีการแจกแจงแบบปกติ จึงใช้ค่าตัวแปรตามที่แปลงข้อมูลแล้วในการวิการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณต่อไป

2.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการมีหนี้สินของครอบครัวข้าราชการพลเรือนสามัญ ประเภททั่วไป

ตัวแปรตาม ได้แก่ หนี้สินของครอบครัวข้าราชการพลเรือนสามัญประเภททั่วไป กำหนดให้ $\sqrt{Y_1} = Y_1'$ โดยมีตัวแบบการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ คือ

$$\begin{aligned} Y_1' &= \beta_0 + \beta_1 F_1 + \beta_2 F_2 + \beta_3 F_3 + \beta_4 F_4 + \beta_5 Z_7 + \beta_6 Z_9 + \beta_7 Z_{10} + \beta_8 Z_{12} \\ &\quad + \beta_9 Z_{14} + \beta_{10} Z_{18} + \beta_{11} Z_{20} + \beta_{12} Z_{22} + \beta_{13} Z_{24} + \beta_{14} Z_{26} + \beta_{15} D_1 \\ &\quad + \beta_{16} D_4 + \beta_{17} D_{5_1} + \beta_{18} D_{5_2} + \varepsilon \end{aligned} \quad (14)$$

จากการเลือกตัวแปรอิสระด้วยวิธีเพิ่มตัวแปรอิสระแบบขั้นตอน (stepwise regression procedure) ได้ผลดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7. ผลการเลือกตัวแปรอิสระเข้าสมการโดยวิธีเพิ่มตัวแปรอิสระแบบขั้นตอนของ Y_1'

model	B	std. error	t	*p*-value	ค่า VIF
(constant)	955.651	48.448	19.725	.000	
F_3	289.111	39.883	7.249	.000	1.024
F_4	152.689	40.125	3.805	.000	1.037
Z_{12}	110.528	40.098	2.756	.008	1.036
F_1	109.480	40.191	2.724	.009	1.040
Z_{18}	- 111.190	41.442	- 2.683	.010	1.106
D_4	182.851	85.927	2.128	.038	1.075

ผลจากตารางที่ 7 จะได้สมการถดถอย ดังนี้

$$\hat{Y}_1' = 955.651 + 289.111 F_3 + 152.689 F_4 + 110.528 Z_{12} + 109.480 F_1 - 111.190 Z_{18} + 182.851 D_4 \quad (15)$$

โดยมีค่า adjusted $R^2 = 0.577$ หมายความว่า ปัจจัยร่วมที่ 3 ความสามารถในการผ่อนชำระ (F_3) ปัจจัยร่วมที่ 4 สมาชิกในครอบครัว (F_4) ค่าจ้างบุคคลที่ให้บริการแก่ครอบครัวและค่าใช้จ่ายสมทบ (Z_{12}) ปัจจัยร่วมที่ 1 ค่าใช้จ่ายเพื่อการครองชีพ (F_1) ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับกับการศึกษา (Z_{18}) และวุฒิการศึกษาที่ใช้ในการบรรจุเข้าทำงานในประเภทและระดับตำแหน่งปัจจุบัน (D_4) มีอิทธิพลต่อหนี้สินของครอบครัวข้าราชการพลเรือนสามัญประเภททั่วไป คิดเป็นร้อยละ 57.7 ที่เหลืออีกร้อยละ 43.3 เป็นอิทธิพลจากตัวแปรอื่น

ผลการตรวจสอบข้อตกลงเบื้องต้นของการวิเคราะห์การถดถอย พบว่า

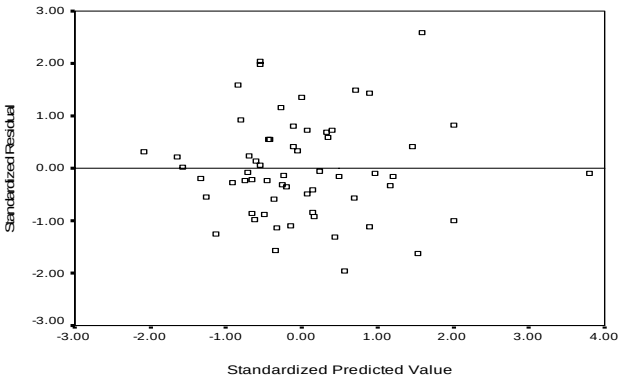
doi: 10.14416/j.appsci.2016.06.004

(1) ตรวจสอบตัวแปรอิสระแต่ละตัวเป็นอิสระกัน พิจารณาจากค่า VIF จากตารางที่ 7 พบว่าค่า VIF ของตัวแปรอิสระทุกตัวในสมการ มีค่าไม่เกิน 10 แสดงว่า ตัวแปรอิสระในสมการแต่ละตัวเป็นอิสระกัน

(2) ตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ โดยการทดสอบด้วยวิธีของ Lilliefors ได้ค่า D = 0.093 และค่า *p*-value = 0.200 แสดงว่า ค่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ

(3) ตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละตัวเป็นอิสระกัน พิจารณาจากค่าสถิติ Durbin-Watson ได้ค่า d = 1.858 สรุปได้ว่า ค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละตัวเป็นอิสระกัน

(4) ตรวจสอบค่าความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนคงที่ จากรูปที่ 1 จะเห็นว่าค่า e_i มีการกระจายอยู่รอบค่า 0 อย่างสุ่มและขนานไปกับแกนนอน สรุปได้ว่า ค่าความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่



รูปที่ 1. แผนภาพการกระจายของค่าคะแนนมาตรฐานของค่าพยากรณ์กับคะแนนมาตรฐานของค่าเศษเหลือของ $\hat{Y}_1'$

และเพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้พยากรณ์จะได้สมการถดถอยที่ดีที่สุดสำหรับการพยากรณ์ ดังนี้

2.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการมีหนี้สินของครอบครัวข้าราชการพลเรือนสามัญ ประเภทวิชาการ

ตัวแปรตาม ได้แก่ หนี้สินของครอบครัวข้าราชการพลเรือนสามัญประเภทวิชาการ กำหนดให้ $\ln Y_2 = Y_2'$ โดยมีตัวแบบการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ คือ

$$\begin{aligned} Y_2' = {} & \beta_0 + \beta_1 F_1 + \beta_2 F_2 + \beta_3 F_3 + \beta_4 F_4 + \beta_5 F_5 + \beta_6 Z_7 + \beta_7 Z_9 + \beta_8 Z_{12} \\ & + \beta_9 Z_{14} + \beta_{10} Z_{16} + \beta_{11} Z_{18} + \beta_{12} Z_{20} + \beta_{13} Z_{26} + \beta_{14} D_1 + \beta_{15} D_4 \\ & + \beta_{17} D_{5_1} + \beta_{18} D_{5_2} + \varepsilon \end{aligned} \quad (16)$$

doi: 10.14416/j.appsci.2016.06.004

จากการเลือกตัวแปรอิสระด้วยวิธีเพิ่มตัวแปรอิสระแบบขั้นตอน (stepwise regression procedure) ได้ผลดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8. ผลการเลือกตัวแปรอิสระเข้าสมการโดยวิธีเพิ่มตัวแปรอิสระแบบขั้นตอนของ Y_2'

model	B	std. error	t	*p*-value	ค่า VIF
(constant)	14.002	0.096	146.434	.000	
F_2	.775	.189	4.091	.000	1.358
Z_{12}	.377	.111	3.393	.001	1.328
Z_{18}	- .362	.180	-2.012	.049	1.479

ผลลัพธ์จากตารางที่ 8 จะได้สมการถดถอย ดังนี้

$$\hat{Y}_2' = 14.002 + 0.775\ F_2 + 0.377\ Z_{12} - 0.362\ Z_{18} \quad (17)$$

โดยมีค่า adjusted $R^2 = 0.501$ หมายความว่า ปัจจัยร่วมที่ 2 ความสามารถในการผ่อนชำระ (F_2) ค่าจ้างบุคคลที่ให้บริการแก่ครอบครัวและค่าใช้จ่ายสมทบ (Z_{12}) และค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับกับการศึกษา (Z_{18}) มีอิทธิพลต่อหนี้สินของครอบครัวข้าราชการพลเรือนสามัญประเภทวิชาการ คิดเป็นร้อยละ 50.1 ที่เหลืออีกร้อยละ 49.9 เป็นอิทธิพลจากตัวแปรอื่น

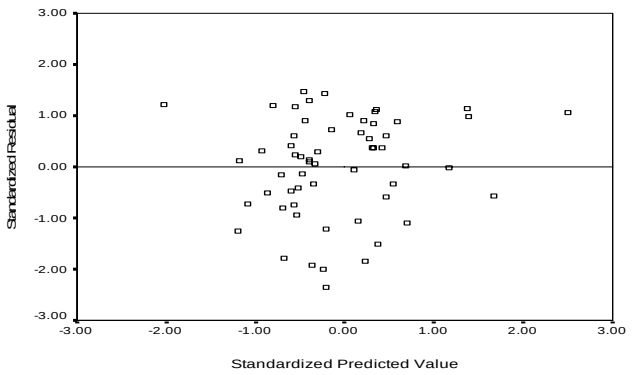
ผลการตรวจสอบข้อตกลงเบื้องต้นของการวิเคราะห์การถดถอย พบว่า

(1) ตรวจสอบตัวแปรอิสระแต่ละตัวเป็นอิสระกัน พิจารณาจากค่า VIF จากตารางที่ 8 พบว่าค่า VIF ของตัวแปรอิสระทุกตัวในสมการ มีค่าไม่เกิน 10 แสดงว่า ตัวแปรอิสระในสมการแต่ละตัวเป็นอิสระกัน

(2) ตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ โดยการทดสอบด้วยวิธีของ Lilliefors ได้ค่า $D = 0.079$ และค่า *p*-value = 0.200 แสดงว่า ค่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ

(3) ตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละตัวเป็นอิสระกัน พิจารณาจากค่าสถิติ Durbin-Watson ได้ค่า $d = 2.204$ สรุปได้ว่า ค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละตัวเป็นอิสระกัน

(4) ตรวจสอบค่าความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนคงที่ จากรูปที่ 2 จะเห็นว่าค่า e_i มีการกระจายอยู่รอบค่า 0 อย่างสุ่มและขนานไปกับแกนนอน สรุปได้ว่า ค่าความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่



รูปที่ 2. แผนภาพการกระจายของค่าคะแนนมาตรฐานของค่าพยากรณ์กับคะแนนมาตรฐานของค่าเศษเหลือของ $\hat{Y}_2'$

2.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการมีหนี้สินของครอบครัวข้าราชการพลเรือนสามัญ ประเภทอำนวยการและประเภทบริหาร

ตัวแปรตาม ได้แก่ หนี้สินของครอบครัวข้าราชการพลเรือนสามัญประเภทอำนวยการและประเภทบริหาร กำหนดให้กำหนดให้ $\sqrt{Y_3} = Y_3'$ โดยมีตัวแบบการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ คือ

$$\begin{aligned} Y_3' = {} & \beta_0 + \beta_1 F_1 + \beta_2 F_2 + \beta_3 F_3 + \beta_4 F_4 + \beta_5 Z_7 + \beta_6 Z_9 + \beta_7 Z_{10} + \beta_8 Z_{11} + \beta_9 Z_{12} \\ & + \beta_{10} Z_{16} + \beta_{11} Z_{17} + \beta_{12} Z_{18} + \beta_{13} Z_{19} + \beta_{14} Z_{20} + \beta_{15} Z_{21} + \beta_{16} Z_{22} + \beta_{17} Z_{23} \\ & + \beta_{18} Z_{26} + \beta_{19} D_1 + \beta_{20} D_4 + \beta_{21} D_{5_1} + \beta_{22} D_{5_2} + \varepsilon \end{aligned} \quad (18)$$

จากการเลือกตัวแปรอิสระด้วยวิธีเพิ่มตัวแปรอิสระแบบขั้นตอน (stepwise regression procedure) ได้ผลดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9. ผลการเลือกตัวแปรอิสระเข้าสมการโดยวิธีเพิ่มตัวแปรอิสระแบบขั้นตอนของ Y_3'

model	B	std. error	t	*p*-value	ค่า VIF
(constant)	1,150.354	78.358	14.681	.000	
F_3	336.438	53.986	6.232	.000	1.180
Z_{21}	289.412	53.368	5.423	.000	1.170
D_1	208.305	102.675	2.029	.047	1.051

ผลจากตารางที่ 9 จะได้สมการถดถอย ดังนี้

$$\hat{Y}_3' = 1150.354 + 336.438\,F_3 + 289.412\,Z_{21} + 208.305\,D_1 \quad (19)$$

โดยมีค่า adjusted $R^2 = 0.635$ หมายความว่า ปัจจัยร่วมที่ 3 ความสามารถในการผ่อนชำระ (F_3) ค่าใช้จ่ายเพื่อการสะสมทุน (Z_{21}) และเพศ (D_1) มีอิทธิพลต่อหนี้สินของครอบครัวข้าราชการพลเรือนสามัญประเภทอำนวยการและประเภทบริหาร คิดเป็นร้อยละ 63.5 ที่เหลืออีกร้อยละ 36.5 เป็นอิทธิพลจากตัวแปรอื่น

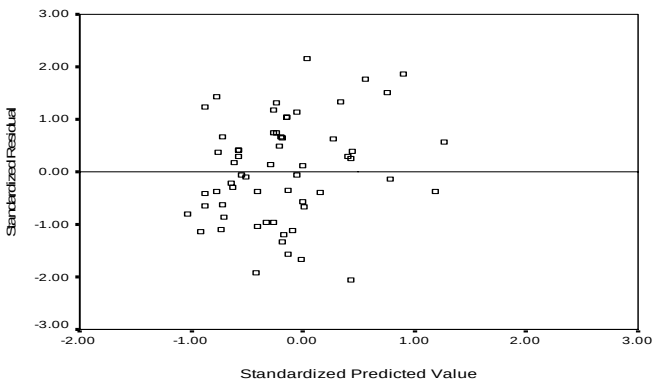
ผลการตรวจสอบข้อตกลงเบื้องต้นของการวิเคราะห์การถดถอย พบว่า

(1) ตรวจสอบตัวแปรอิสระแต่ละตัวเป็นอิสระกัน พิจารณาจากค่า VIF จากตารางที่ 9 พบว่าค่า VIF ของตัวแปรอิสระทุกตัวในสมการมีค่าไม่เกิน 10 แสดงว่า ตัวแปรอิสระในสมการแต่ละตัวเป็นอิสระกัน

(2) ตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ โดยการทดสอบด้วยวิธีของ Lilliefors ได้ค่า D = 0.046 และค่า *p*-value = 0.200 แสดงว่า ค่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปปกติ

(3) ตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละตัวเป็นอิสระกัน พิจารณาจากค่าสถิติ Durbin-Watson ได้ค่า d = 2.280 สรุปได้ว่า ค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละตัวเป็นอิสระกัน

(4) ตรวจสอบค่าความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนคงที่ จากรูปที่ 3 จะเห็นว่าค่า e_i มีการกระจายอยู่รอบค่า 0 อย่างสุ่มและขนานไปกับแกนนอน สรุปได้ว่า ค่าความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่



รูปที่ 3. แผนภาพการกระจายของค่าคะแนนมาตรฐานของค่าพยากรณ์กับคะแนนมาตรฐานของค่าเศษเหลือของ $\hat{Y}_3'$

วิจารณ์และสรุปผลการวิจัย

การหาสมการพยากรณ์หนี้สินของครอบครัวข้าราชการพลเรือนสามัญในแต่ละระดับตำแหน่ง ทั้ง 3 ประเภท โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (multiple linear regression analysis) ทำการเลือกตัวแปรอิสระด้วยวิธีเพิ่มตัวแปรอิสระแบบขั้นตอน (stepwise regression procedure) และเนื่องจากตัวแปรอิสระมีจำนวนมากและมีความสัมพันธ์กัน จึงใช้การวิเคราะห์ปัจจัย (factor analysis) ด้วยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก

(principal component analysis) หมุนแกนปัจจัยร่วมให้ตั้งฉากกัน (orthogonal rotation) ด้วยวิธีวาริแมกซ์ (varimax) เพื่อรวมตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กันเข้าด้วยกัน ได้ผลการวิเคราะห์ข้อมูล ดังนี้

สมการพยากรณ์หนี้สินของครอบครัวข้าราชการพลเรือนสามัญ ประเภททั่วไป ได้ตัวแบบสำหรับการพยากรณ์ คือ

$$\hat{Y}_1' = \sqrt{\hat{Y}_1} = 955.651 + 289.111F_3 + 152.689F_4 + 110.528Z_{12} + 109.480F_1 - 111.190Z_{18} + 182.851D_4 \quad (20)$$

โดยมีค่า adjusted $R^2 = 0.577$ นั่นคือ ปัจจัยร่วมที่ 3 ความสามารถในการผ่อนชำระ (F_3) ปัจจัยร่วมที่ 4 สมาชิกในครอบครัว (F_4) ค่าจ้างบุคคลที่ให้บริการแก่ครอบครัวและค่าใช้จ่ายสมทบ (Z_{12}) ปัจจัยร่วมที่ 1 ค่าใช้จ่ายเพื่อการครองชีพ (F_1) ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับกับการศึกษา (Z_{18}) และวุฒิการศึกษาที่ใช้ในการบรรจุเข้าทำงานในประเภทและระดับตำแหน่งปัจจุบัน (D_4) มีอิทธิพลต่อหนี้สินของครอบครัวข้าราชการพลเรือนสามัญประเภททั่วไป คิดเป็นร้อยละ 57.7 ที่เหลืออีกร้อยละ 43.3 เป็นอิทธิพลจากตัวแปรอื่น และเพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้พยากรณ์ จะได้สมการถดถอยที่ดีที่สุดสำหรับการพยากรณ์ ดังนี้

$$\hat{Y}_1 = (955.651 + 289.111\,F_3 + 152.689\,F_4 + 110.528\,Z_{12} + 109.480\,F_1 - 111.190\,Z_{18} + 182.851\,D_4)^2 \quad (21)$$

สมการพยากรณ์หนี้สินของครอบครัวข้าราชการพลเรือนสามัญ ประเภทวิชาการ ได้ตัวแบบสำหรับการพยากรณ์ คือ

$$\hat{Y}_2' = \ln\hat{Y}_2 = 14.002 + 0.775\,F_2 + 0.377\,Z_{12} - 0.362\,Z_{18} \quad (22)$$

โดยมีค่า adjusted $R^2 = 0.501$ นั่นคือ ปัจจัยร่วมที่ 2 ความสามารถในการผ่อนชำระ (F_2) ค่าจ้างบุคคลที่ให้บริการแก่ครอบครัวและค่าใช้จ่ายสมทบ (Z_{12}) และค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับกับการศึกษา (Z_{18}) มีอิทธิพลต่อหนี้สินของครอบครัวข้าราชการพลเรือนสามัญประเภทวิชาการ คิดเป็นร้อยละ 50.1 ที่เหลืออีกร้อยละ 49.9 เป็นอิทธิพลจากตัวแปรอื่น และเพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้พยากรณ์ จะได้สมการถดถอยที่ดีที่สุดสำหรับการพยากรณ์ ดังนี้

$$\hat{Y}_2 = e^{14.002 + 0.775\,F_2 + 0.377\,Z_{12} - 0.362\,Z_{18}} \quad (23)$$

สมการพยากรณ์หนี้สินของครอบครัวข้าราชการพลเรือนสามัญ ประเภทอำนวยการและประเภทบริหาร ได้ตัวแบบสำหรับการพยากรณ์ คือ

$$\hat{Y}_3' = \sqrt{\hat{Y}_3} = 1150.354 + 336.438\,F_3 + 289.412\,Z_{21} + 208.305\,D_1 \quad (24)$$

โดยมีค่า adjusted $R^2 = 0.635$ นั่นคือ ปัจจัยร่วมที่ 3 ความสามารถในการผ่อนชำระ (F_3) ค่าใช้จ่ายเพื่อการสะสมทุน (Z_{21}) และเพศ (D_1) มีอิทธิพลต่อหนี้สินของครอบครัวข้าราชการพลเรือนสามัญประเภทอำนวยการและประเภทบริหาร คิดเป็นร้อยละ 63.5 ที่เหลืออีกร้อยละ 36.5 เป็นอิทธิพลจากตัวแปรอื่น และเพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้พยากรณ์ จะได้สมการถดถอยที่ดีที่สุดสำหรับการพยากรณ์ ดังนี้

$$\hat{Y}_3 = (1150.354 + 336.438\ F_3 + 289.412\ Z_{21} + 208.305\ D_1)^2 \qquad (25)$$

จากการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการมีหนี้สินของครอบครัวข้าราชการพลเรือนสามัญพบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการมีหนี้สินของครอบครัวข้าราชการพลเรือนสามัญในแต่ละระดับตำแหน่งทั้ง 3 ประเภท ได้แก่ ประเภททั่วไป ประเภทวิชาการ ประเภทอำนวยการและประเภทบริหาร คือ ความสามารถในการผ่อนชำระ ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรอิสระคือ ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับยานพาหนะ การเดินทาง และการสื่อสาร (Z_{17}) ค่าใช้จ่ายเพื่อการสะสมทุน (Z_{21}) เงินเดือน/ค่าตอบแทนจากการทำงาน (Z_{23}) เงินอื่น ๆ (Z_{24}) และค่าใช้จ่ายเพื่อการผ่อนชำระหนี้สิน (Z_{25}) ซึ่งผลการศึกษาสะท้อนให้ทราบถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการมีหนี้สินของข้าราชการ ที่จำเป็นต้องแก้ไขปัญหาในระดับนโยบาย เพื่อช่วยเหลือให้ข้าราชการมีรายได้และสวัสดิการ ที่เพียงพอกับความต้องการขั้นพื้นฐานสำหรับการดำรงชีพในปัจจุบัน และเพื่อป้องกันไม่ให้ข้าราชการประสบปัญหาหนี้สินรุงรังในอนาคตต่อไป

เอกสารอ้างอิง

ทรงศิริ แต้สมบัติ, (2548) การวิเคราะห์การถดถอย, พิมพ์ครั้งที่ 3, สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, กรุงเทพฯ, 294 หน้า.

สุชาติ ประสิทธิ์รัฐสินธุ์, (2540) เทคนิคการวิเคราะห์ตัวแปรหลายตัวสำหรับการวิจัยทางสังคมศาสตร์และพฤติกรรมศาสตร์, พิมพ์ครั้งที่ 4, โรงพิมพ์เลี่ยงเชียง, กรุงเทพฯ, 413 หน้า.

สำนักงานสถิติแห่งชาติ, (2556) การสำรวจภาวะการครองชีพของข้าราชการพลเรือนสามัญ พ.ศ. 2555, บริษัท เท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัล พับลิเคชั่น จำกัด, กรุงเทพฯ, 60 หน้า.

Neter J., Kutner M.H., Nachtsheim C.J. and Wasserman W., (1996) Applied linear statistical models, 4th edition, Irwin, Chicago, 1408 P.

The Journal of Applied Science **Vol. 15 No. 2: 68-78 [2016]**
วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ doi: 10.14416/j.appsci.2016.09.001
ISSN 1513-7805 Printed in Thailand

Research Article

การพัฒนาระบบฐานข้อมูลการเข้าฝึกอบรมผ่านทางอินเทอร์เน็ต

Development of training database management system via internet

ปฏิพัทธ์ จันทร์รุ่งเรือง* และสุธีรา อัมพาผล

Patipat Chanrungruang* and Suthira Amphaphon

สำนักพัฒนบริหารทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม สำนักงานปลัดกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เขตพญาไท กรุงเทพฯ 10400

Office of Natural Resoures and Environment Development Administation, Office of Permanent Secretary Ministry of Natural Resources and Environment, Phayathai district, Bangkok 10400

***E-mail**: patipat.research@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบฐานข้อมูลการเข้าฝึกอบรมผ่านทางอินเทอร์เน็ตสำหรับใช้ในการแก้ไขปัญหาการทำงานที่ซ้ำซ้อนในการบันทึกข้อมูล รวมถึงความล่าช้าที่เกิดจากการสืบค้นข้อมูลผู้เข้าฝึกอบรม โดยกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้คือ บุคลากรในสังกัดสำนักงานปลัดกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม โดยวิธีสุ่มตัวอย่างเป็นแบบตามความสะดวกจำนวน 30 คน เครื่องมือที่ใช้ได้แก่ ระบบฐานข้อมูลการเข้าฝึกอบรมผ่านทางอินเทอร์เน็ต และแบบประเมินความพึงพอใจในการใช้งานระบบที่พัฒนาขึ้น ผลการวิจัยพบว่าความพึงพอใจของผู้ใช้งานอยู่ในเกณฑ์ดี (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.21 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.62) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าระบบฐานข้อมูลการเข้าฝึกอบรมผ่านทางอินเทอร์เน็ตที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวข้างต้นได้

คำสำคัญ: ระบบสารสนเทศเพื่อการจัดการ, เว็บแอพพลิเคชั่น, ระบบฐานข้อมูล

Abstract

The purpose of this research was to develope a training database management system via internet for solving the communication problems in duplication of records as well as the delay in searching for the trainee. Sample in this research was randomly selected by convenience sampling for 30 persons from employees in Office

of Permanent Secretary Ministry of Natural Resources and Environment. The research tools were the training database management system via internet and system usage satisfaction questionnaires. The results showed that user satisfaction was at good level ($\overline{X}$ = 4.21, S.D. = 0.62). Therefore, it could be concluded that the developed system for training database management was able to solve the above mentioned problems.

Keywords: management information system, web application, database system

บทนำ

เทคโนโลยีในปัจจุบันเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์เป็นอย่างมาก ซึ่งเทคโนโลยีสามารถแก้ปัญหาในด้านต่าง ๆ มากมาย อีกทั้งเทคโนโลยีในปัจจุบันได้มีการแผ่ขยายครอบคลุมเกือบทั่วทุกมุมโลก ทำให้การสื่อสารมีความรวดเร็วแม่นยำมากขึ้น (สุรเกียรติและณัฐวี, 2558) ในปัจจุบันหน่วยงานทางราชการได้นำเอาเทคโนโลยีเข้ามาใช้เพื่อแก้ปัญหาในเรื่องต่าง ๆ ภายในหน่วยงาน ทำให้เกิดประโยชน์ทั้งต่อผู้รับบริการและเจ้าหน้าที่ที่ให้บริการ

เทคโนโลยีเว็บ (web technology) ถือเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย (วุฒิพงษ์ และศิริวรรณ, 2558) เนื่องจากคนส่วนใหญ่ใช้งานอินเทอร์เน็ตทำให้สามารถเข้าถึงข้อมูลได้ง่ายและรวดเร็ว ซึ่งเทคโนโลยีที่นำมาใช้กับหน่วยงานทางราชการมีหลายรูปแบบซึ่งทุกรูปแบบจะต้องอาศัยการจัดเก็บข้อมูลลงในระบบเพื่อเป็นประวัติในการรับบริการและการให้บริการของหน่วยงานนั้นๆ อย่างไรก็ตามระบบที่นำมาใช้งานนั้นต้องออกแบบมาเพื่อรองรับข้อมูลในอนาคตซึ่งมีจำนวนมากขึ้นเรื่อย ๆ (วีณาและสุรัตนา, 2555) หากระบบไม่ได้ออกแบบมาในระยะยาวอาจทำให้ระบบที่ใช้งานนั้นไม่ก่อให้เกิดประสิทธิภาพในการทำงานเท่าที่ควร (ศิริวรรณและจิรพันธุ์, 2556) และอาจทำให้เกิดความซ้ำซ้อนอีกด้วย (พัชริดาและมาลีรัตน์, 2558)

สำนักพัฒนบริหารทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เป็นหน่วยงานในสังกัดสำนักงานปลัดกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมมีภารกิจในการพัฒนาศักยภาพของข้าราชการและบุคลากรในสังกัดกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาระบบราชการ, 2558) ทางสำนักพัฒนบริหารทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมได้ดำเนินการจัดฝึกอบรมเป็นหน้าที่หลัก โดยทางสำนักพัฒนบริหารทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ได้เปิดหลักสูตรฝึกอบรมจำนวน 4 หลักสูตร ได้แก่ หลักสูตรข้าราชการที่ดี หลักสูตรภาษาอังกฤษเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการปฏิบัติงาน หลักสูตรภาษาอังกฤษเพื่อการศึกษาค้นคว้าและการสื่อสารสำหรับใช้ปฏิบัติงาน และหลักสูตรพัฒนานักบริหารทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ซึ่งในการจัดอบรมในแต่ละหลักสูตรนั้น ทางสำนักฯ ต้องมีการจัดเก็บข้อมูลผู้เข้ารับการฝึกอบรมลงในระบบฐานข้อมูล แต่เนื่องจากระบบฐานข้อมูลเดิมมีการใช้งานค่อนข้างจำกัดและไม่ครอบคลุมทำงานด้านอื่น เช่น ระบบเดิมอยู่ในรูปแบบโปรแกรมสำเร็จรูป ใช้งานได้เฉพาะเครื่องที่ติดตั้งโปรแกรมเท่านั้น ระบบไม่สามารถนำข้อมูลมาสรุปผลต่อ

ผู้บริหารได้ ผู้เข้าฝึกอบรมไม่สามารถดูประวัติการฝึกอบรมที่เคยผ่านมาแล้วได้ จึงทำให้ระบบเดิมไม่เหมาะสมกับการใช้งานเมื่อเทียบกับความต้องการจากผู้ใช้งาน เป็นต้น จึงทำให้เกิดความช้าล่าในการดำเนินงานและระบบเดิมยังไม่สามารถลดภาระการทำงานบางขั้นตอนของเจ้าหน้าที่ได้ เช่น ต้องกรอกข้อมูลจากใบสมัครที่ส่งมาจากผู้สมัครเข้าสู่ระบบทำให้เจ้าหน้าที่ต้องทำการซ้ำซ้อน เป็นต้น

จากปัญหาดังกล่าวจึงเป็นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือเพื่อพัฒนาระบบฐานข้อมูลผู้เข้ารับการฝึกอบรมผ่านทางอินเทอร์เน็ต เพื่อปรับปรุงระบบเดิมให้มีประสิทธิภาพในการจัดเก็บข้อมูลผู้เข้าฝึกอบรมที่มากขึ้น ซึ่งจะช่วยในการจัดเก็บข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบเชิงสัมพันธ์ทำให้สะดวกในการค้นหาข้อมูลผู้เข้าฝึกอบรม เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในด้านการรายงานสรุปต่อผู้บริหาร รวมทั้งเป็นการลดระยะเวลาลดความซ้ำซ้อนและภาระงานของการทำงานมากขึ้น

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง จำนวน 2 ส่วน ดังนี้

1. ฮาร์ดแวร์ระบบ

เครื่องคอมพิวเตอร์ จำนวน 2 เครื่อง เพื่อใช้ในการทดสอบ โดยมีความสามารถขั้นต่ำดังนี้

1.1 เครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย

1) หน่วยประมวลผลกลาง Intel Xeon E7-4809 v3 ความเร็วสัญญาณนาฬิกา 2.0 GHz

2) หน่วยความจำหลัก ชนิด ECC DDR3 ขนาด 8 GB

3) หน่วยจัดเก็บข้อมูล ชนิด SATA ความเร็วรอบ 7,200 รอบต่อนาที ขนาดความจุ 500 GB

1.2 เครื่องคอมพิวเตอร์ลูกข่าย

1) หน่วยประมวลผลกลาง Intel Core 2 Duo E4400 ความเร็วสัญญาณนาฬิกา 2.0 GHz

2) หน่วยความจำหลัก ชนิด DDR2 ขนาด 2 GB

3) หน่วยจัดเก็บข้อมูล ชนิด SATA ความเร็วรอบ 7,200 รอบต่อนาที ขนาดความจุ 250 GB

2. ซอฟต์แวร์ระบบ

ระบบปฏิบัติการ CentOS, ภาษา PHP, HTML5, CSS และ jQuery ใช้ในการพัฒนาระบบ, โปรแกรม Apache 2.4 ใช้ในการสร้างเว็บเซิร์ฟเวอร์ และโปรแกรม MySQL ใช้ในการสร้างฐานข้อมูล

ขั้นตอนในการทดลอง

1. ศึกษาโครงสร้างของระบบงานเดิม

ในการศึกษาระบบงานเดิมโดยใช้วิธีการสัมภาษณ์ ศึกษาจากระบบงานเดิม และศึกษาจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง พบว่ามีข้อจำกัดในการจัดเก็บข้อมูลผู้ใช้งาน ได้แก่

1.1 ระบบฐานข้อมูลเดิมไม่สามารถสมัครสมาชิกผ่านทางอินเทอร์เน็ต ทำให้ผู้ใช้ไม่สามารถกรอกข้อมูลการสมัครด้วยตนเอง โดยขั้นตอนผู้สมัครต้องกรอกข้อมูลในใบสมัครและส่งให้กับเจ้าหน้าที่ผ่านทางแฟกซ์หรือ

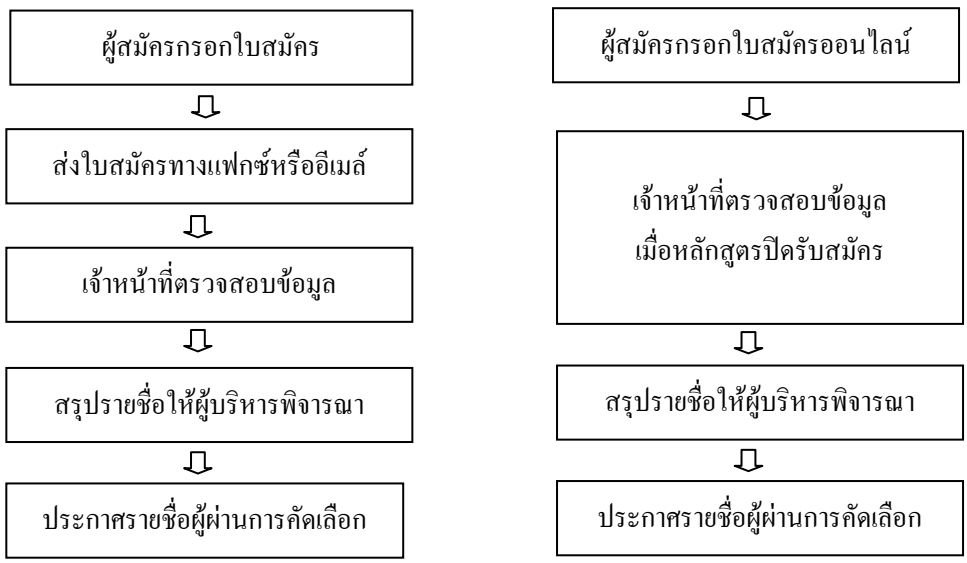
อีเมล์ จากขั้นตอนดังกล่าวทำให้เจ้าหน้าที่เป็นผู้บันทึกข้อมูลลงในระบบฐานข้อมูลเดิม ทำให้เพิ่มภาระการทำงานของเจ้าหน้าที่

1.2 ระบบฐานข้อมูลเดิมไม่สามารถรายงานผลจำนวนผู้เข้าฝึกอบรมในแต่ละหน่วยงาน เจ้าหน้าที่ต้องค้นเอกสารที่เกี่ยวข้องเพื่อจัดทำรายงานผลดังกล่าวให้แก่ผู้บริหาร ทำให้ใช้เวลาในการค้นหาข้อมูลมาก

1.3 รูปแบบฐานข้อมูลเป็นรูปแบบตารางเดียว ในกรณีที่ต้องแก้ไขข้อมูลหรือมีการนำข้อมูลไปใช้ในด้านการแสดงผลที่ซับซ้อนทำได้ยาก

2. ศึกษาความต้องการของระบบงานใหม่

จากการศึกษาระบบเดิมผู้วิจัยได้สอบถามความต้องการในการใช้งานของระบบจากผู้บริหารและเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้อง ได้ข้อสรุปว่า ต้องการระบบสมาชิกเพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถสมัครหลักสูตรอื่นๆ ที่ประสงค์จะเข้าฝึกอบรม กรณีที่เป็นผู้ที่เคยเข้าฝึกอบรมไม่จำเป็นต้องทำการกรอกข้อมูลซ้ำอีก และกรณีที่เป็นผู้ที่ไม่เข้ารับการฝึกอบรมก็สามารถใช้บริการได้ และต้องการทราบจำนวนผู้เข้าฝึกอบรมในแต่ละหลักสูตร เพื่อให้ผู้บริหารใช้ในการตัดสินใจ



รูปที่ 1. การเปรียบเทียบขั้นตอนการทำงานของระบบเดิม (ซ้ายมือ) และระบบใหม่ (ขวามือ)

หลังจากศึกษาข้อมูลและทำการเปรียบเทียบระหว่างระบบเดิมและระบบใหม่ ดังรูปที่ 1 พบว่าระบบใหม่สามารถลดขั้นตอนการทำงานทั้งทางด้านเจ้าหน้าที่ในการบันทึกข้อมูลและสรุปข้อมูลและด้านผู้ใช้งานมีระบบสมาชิกที่สามารถดูสถานะในการสมัครอบรมหลักสูตรได้ และสามารถดูประวัติการฝึกอบรมที่เคยผ่านมาได้

ขั้นตอนต่อไปผู้วิจัยจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้แผนภาพ data flow diagram (dfd) และแผนภาพ entity relationship diagram (er diagram)

3. การวิเคราะห์

ขั้นตอนนี้ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อกำหนดขอบเขตการทำงานของระบบทั้งหมด โดยการเขียนแผนภาพ dfd แสดงรายละเอียดของแต่ละกระบวนการ ดังรูปที่ 2 ซึ่งระบบฐานข้อมูลผู้เข้ารับการฝึกอบรมที่พัฒนาขึ้น แบ่งเป็นระบบย่อยออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่

3.1 ระบบสืบค้นข้อมูลผู้เข้ารับการฝึกอบรม โดยแบ่งการทำงานออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

1) สำหรับแสดงรายละเอียดข้อมูล

2) สำหรับแก้ไขข้อมูล

3) สำหรับเพิ่มข้อมูลผู้เข้าฝึกอบรม

3.2 ระบบสมาชิก โดยแบ่งการทำงานออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

1) สำหรับการลงทะเบียนเพื่อเป็นสมาชิก

2) สำหรับแก้ไขข้อมูล

3) สำหรับเปลี่ยนรหัสผ่าน

3.3 ระบบยื่นสมัครหลักสูตรเพื่อเข้าฝึกอบรม โดยแบ่งการทำงานออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่

1) สำหรับดูรายละเอียดในแต่ละหลักสูตร

2) สำหรับยื่นความประสงค์สมัครเข้ารับการฝึกอบรม

3) สำหรับดูสถานะการฝึกอบรมที่เคยผ่านมา

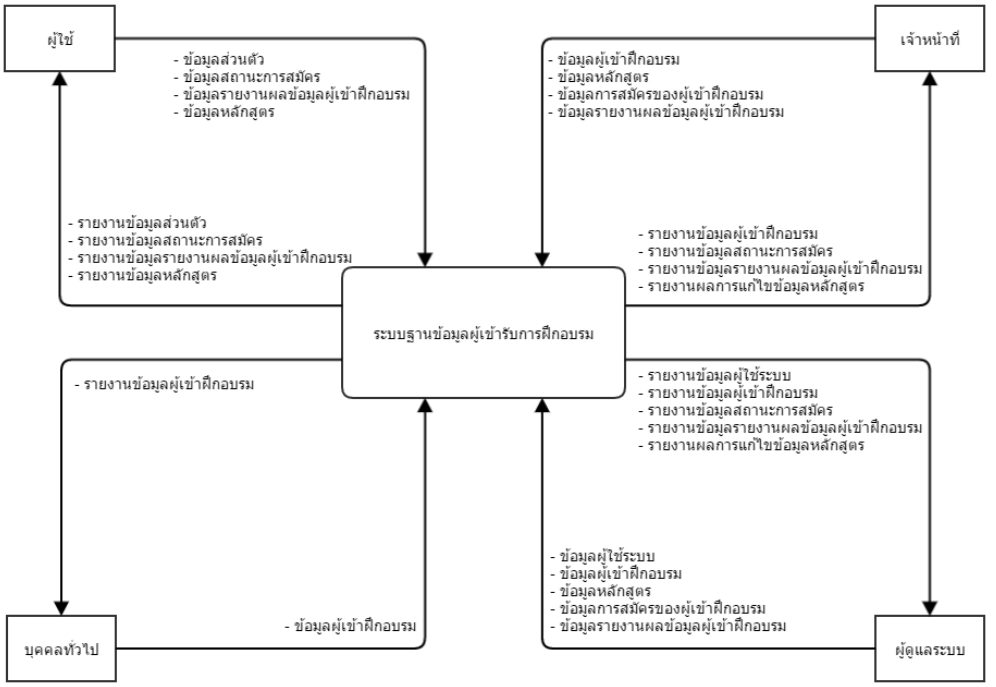
4) สำหรับพิจารณาคัดเลือกผู้สมัคร

3.4 ระบบรายงานผล สำหรับแสดงผลสถิติข้อมูลในแต่ละหลักสูตรที่เคยจัดอบรมในแต่ละปีงบประมาณ

ในการจัดทำ Entity Relationship Diagram ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบฐานข้อมูลตามโครงสร้างของฐานข้อมูลที่เขียนออกมาในลักษณะของแผนภาพ ดังรูปที่ 3 หลังจากได้ขอบเขตของระบบจากการวิเคราะห์ข้อมูลขั้นตอนจะทำการออกแบบระบบตามที่ได้วิเคราะห์ทั้งหมด

4. การพัฒนาระบบ

4.1 ด้านการพัฒนาระบบ พัฒนาให้รองรับหน้าจอคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์พกพา ระบบปฏิบัติการได้แก่ CentOS ระบบเซิฟเวอร์ใช้ในการบริการได้แก่ Apache ภาษาที่ใช้ในการพัฒนาได้แก่ PHP, jQuery, CSS และ HTML5 ระบบฐานข้อมูลใช้ MySQL และโปรแกรมจัดการฐานข้อมูลใช้ phpMyAdmin โดยได้เปิดใช้งานระบบที่ http://www.onreda.mnre.go.th/onredasystem



รูปที่ 2. Context Diagram ระบบฐานข้อมูลผู้เข้ารับการฝึกอบรม

4.2 ด้านการทดสอบระบบได้ทดสอบแบบแอลฟา (alpha testing) โดยผู้วิจัยได้ใช้ทดสอบระบบด้วยตัวเอง โดยมีขั้นตอนการทดสอบระบบโดยใช้เครื่องที่ใช้พัฒนาระบบเป็นเครื่องเซิฟเวอร์ และทำการทดสอบระบบจากเครื่องคอมพิวเตอร์เครื่องอื่น เนื่องจากความไม่พร้อมของระบบ ยังต้องทำการแก้ไขจุดบกพร่อง โดยมีการทดสอบระบบหลายครั้งจนมั่นใจว่าระบบมีความพร้อมที่จะใช้งาน เพื่อนำไปทดสอบระบบต่อไป หลักจากนั้นได้ทดสอบแบบเบต้า (beta testing) โดยทำการทดสอบระบบในสถานการณ์จริงเพื่อการยอมรับของระบบที่พัฒนาขึ้น ในการประเมินประสิทธิภาพของระบบ ผู้วิจัยได้นำระบบไปประเมินประสิทธิภาพกับผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 ท่าน ได้แก่

4.2.1 อาจารย์ประจำภาควิชาคอมพิวเตอร์ธุรกิจ คณะวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

4.2.2 เจ้าหน้าที่ระบบงานคอมพิวเตอร์ ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานปลัดกระทรวงกระทรวงทรัยพากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

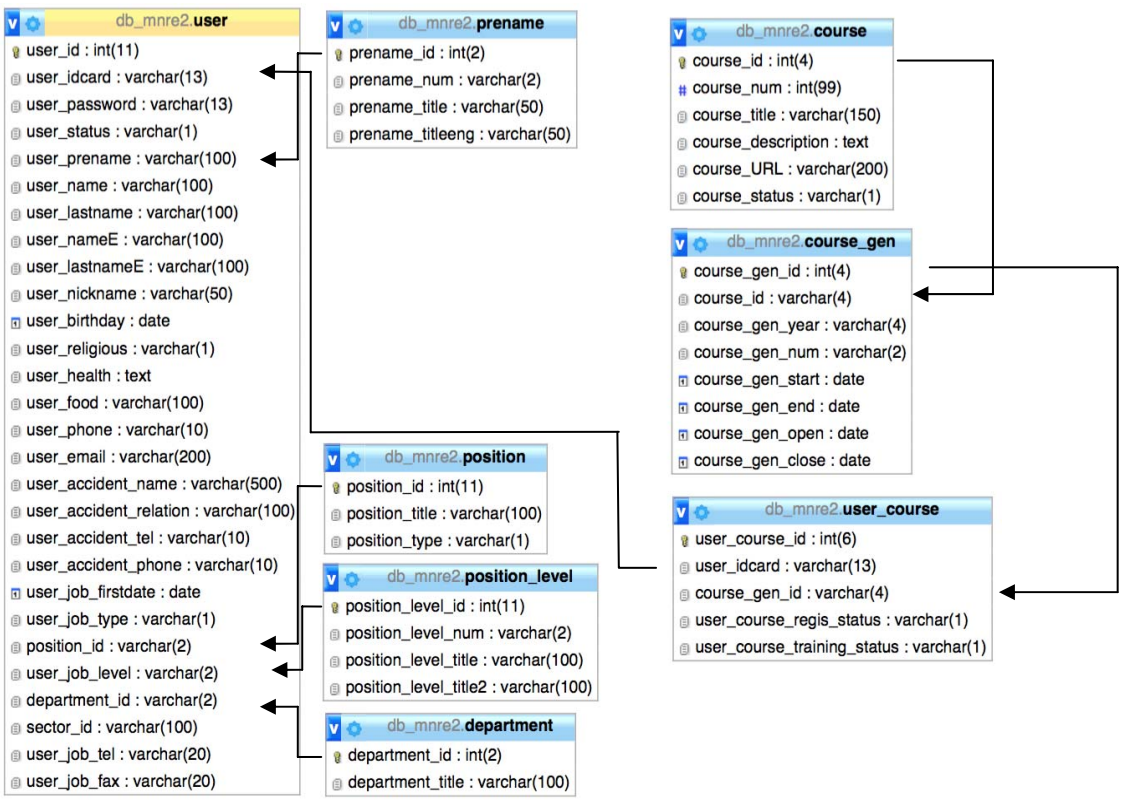
4.2.3 นักวิเคราะห์นโยบายและแผนชำนาญการ กลุ่มพัฒนาระบบบริหาร สำนักงานปลัดกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

4.2.4 ผู้อำนวยการส่วนแผนและพัฒนาบุคลากร สถาบันพัฒนาทรัพยากรบุคคล สำนักงานปลัดกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

4.2.5 ผู้อำนวยการส่วนฝึกอบรม สถาบันพัฒนาทรัพยากรบุคคล สำนักงานปลัดกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

หลังจากที่ผู้เชี่ยวชาญได้ทำการประเมินระบบเรียบร้อยแล้ว ผู้วิจัยจะนำระบบไปทำการทดสอบกับผู้ใช้งานต่อไป

4.3 ด้านการประเมินผล ได้สร้างแบบประเมินความพึงพอใจในของผู้ใช้งานระบบฐานข้อมูลผู้เข้าฝึกอบรมที่พัฒนาขึ้น ได้กำหนดเกณฑ์การให้คะแนนโดยใช้มาตรวัดของลิเคิร์ท (likert scale) ประมาณค่า 5 ระดับ จากระดับน้อยมากถึงดีมากตามลำดับ



รูปที่ 3. Entity Relationship Diagram ระบบฐานข้อมูลผู้เข้ารับการฝึกอบรม

ผลการทดลอง

ผลการพัฒนาระบบฐานข้อมูลผู้เข้าฝึกอบรมที่พัฒนาขึ้น โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้ ส่วนที่ 1 ส่วนของหน้าหลักสำหรับบุคคลทั่วไป สามารถใช้งานด้านการค้นหาข้อมูลและการรายงานผลได้ ส่วนที่ 2 ส่วนของหน้าหลักสำหรับผู้ใช้งาน ซึ่งสามารถใช้งานด้านข้อมูลสมาชิก ด้านยื่นสมัครหลักสูตร ด้านติดตามการสมัคร



รูปที่ 4. ส่วนของหน้าหลัก



รูปที่ 5. ส่วนของหน้าหลักสำหรับผู้ใช้

ผลการประเมินประสิทธิภาพของระบบ

จากตารางที่ 1 ผลการประเมินประสิทธิภาพของระบบฐานข้อมูลผู้เข้าฝึกอบรมที่พัฒนาขึ้นจากผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 ท่าน ได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.45 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.50 สรุปว่าผลการประเมินประสิทธิภาพจากผู้เชี่ยวชาญอยู่ในเกณฑ์ดี จากตารางที่ 2 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานจำนวน 30 คน ได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.21 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.62 สรุปว่าผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานอยู่ในเกณฑ์ดี และจากตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบระยะเวลาการทำงานระหว่างระบบงานเดิมและระบบงานใหม่ แสดงให้เห็นว่าสามารถลดภาระการทำงานของเจ้าหน้าที่ได้ 19 วัน โดยเฉพาะขั้นตอนการบันทึกข้อมูลผู้เข้าฝึกอบรมจากใบสมัคร ระบบใหม่สามารถดำเนินการบันทึกข้อมูลผู้สมัครได้ตั้งแต่เริ่มต้น สามารถลดภาระการบันทึกข้อมูลของเจ้าหน้าที่และลดความซ้ำซ้อนในการบันทึกข้อมูลในกรณีที่ผู้สมัครคนเดิมมีความประสงค์จะเข้ารับการฝึกอบรม ผู้สมัครสามารถลงทะเบียนผ่านทางอินเทอร์เน็ตด้วยตนเอง

ตารางที่ 1. ผลการประเมินประสิทธิภาพของระบบจากผู้เชี่ยวชาญ

รายการประเมิน	ค่าเฉลี่ย	S.D.	ระดับเกณฑ์
ด้านการทำงานได้ตรงตามความต้องการของระบบ (functional requirement test)	4.70	0.48	ดีมาก
ด้านการทำงานได้ตามฟังก์ชันงานของระบบ (functional test)	4.47	0.51	ดี
ด้านการใช้งานของระบบ (usability test)	4.37	0.49	ดี
ด้านความมั่นคงปลอดภัยของระบบ (security test)	4.30	0.48	ดี
สรุปผลการประเมิน	**4.45**	**0.50**	**ดี**

ตารางที่ 2. ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

รายการประเมิน	ค่าเฉลี่ย	S.D.	ระดับเกณฑ์
มีความเข้าใจในกระบวนการจัดการด้านฝึกอบรม	4.07	0.58	ดี
การจัดการในระบบสมาชิก สามารถทำได้และเข้าใจง่าย	4.07	0.58	ดี
ขั้นตอนการยื่นความประสงค์เพื่อสมัครหลักสูตรต่างๆ สามารถทำได้และเข้าใจง่าย	4.13	0.73	ดี
สามารถดูประวัติการฝึกอบรม และติดตามผลการคัดเลือกได้ตลอดเวลา	4.33	0.61	ดี
รายงานผลในรูปแบบกราฟ มีความสวยงาม มีความชัดเจน	4.13	0.57	ดี
การจัดวางตำแหน่งต่างๆ ของหน้าเว็บไซต์ มีความเหมาะสม	4.17	0.75	ดี
ขนาดและรูปแบบของตัวอักษรของหน้าเว็บไซต์ มีความสวยงามและอ่านง่าย	4.23	0.68	ดี
องค์ประกอบสีของหน้าเว็บไซต์ มีความเหมาะสม กับการใช้งาน	4.20	0.71	ดี
โดยภาพรวมทั้งหมดของหน้าเว็บไซต์ มีความสวยงาม และน่าใช้งาน	4.27	0.58	ดี
ระบบที่พัฒนาขึ้นนี้ มีประโยชน์กับหน่วยงานและสามารถจะนำไปใช้งานจริงได้	4.53	0.63	ดี
สรุปผลการประเมิน	**4.21**	**0.62**	**ดี**

ตารางที่ 3. ผลการเปรียบเทียบระยะเวลาการทำงานระหว่างระบบงานเดิมและระบบงานใหม่

ขั้นตอนการทำงาน	ระยะเวลา (วัน)	
	ระบบงานเดิม	ระบบงานใหม่
ดำเนินงานเปิดรับสมัคร	30	30
รวบรวมข้อมูลและตรวจสอบคุณสมบัติของผู้สมัคร	5	1
สรุปรายชื่อผู้สมัครให้แก่ผู้บริหารพิจารณาคัดเลือก	2	1
ประกาศรายชื่อผู้ผ่านการคัดเลือก	1	1
บันทึกข้อมูลผู้เข้าฝึกอบรมจากใบสมัครในแต่ละหลักสูตร ประจำปีงบประมาณนั้นๆ	10	-
รายงานผลจำนวนผู้เข้าฝึกอบรมในแต่ละหลักสูตร ประจำปีงบประมาณนั้นๆ	5	1
รวมระยะเวลาทั้งหมด	**53**	**34**

วิจารณ์และสรุปผลการทดลอง

จากปัญหาการทำงานของเจ้าหน้าที่ในการบริหารจัดการข้อมูลผู้เข้าฝึกอบรม ทำให้เกิดความล่าช้าและซ้ำซ้อนในการทำงาน ซึ่งเป็นการเพิ่มภาระให้กับเจ้าหน้าที่ค่อนข้างมาก ผู้วิจัยจึงได้มีการพัฒนาระบบฐานข้อมูลผู้เข้ารับการฝึกอบรมขึ้น โดยพัฒนาระบบให้อยู่ในลักษณะของเว็บเบส (web-based) จะสามารถใช้งานผ่านทางอินเทอร์เน็ตได้ทุกที่ ดังเช่นในงานวิจัยของ วีณาและสุรัตนา (2555) ระบบฐานข้อมูลอยู่ในลักษณะของโปรแกรมสำเร็จรูปใช้งานได้เฉพาะเครื่องที่ติดตั้งโปรแกรมไว้เท่านั้น ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงพัฒนาระบบให้อยู่ในลักษณะของเว็บไซต์ ทำให้สามารถใช้งานได้ทุกที่ผ่านทางอินเทอร์เน็ต โดยระบบที่พัฒนาขึ้นจะต้องรองรับการใช้งานและการแสดงผลบนอุปกรณ์พกพาได้ ดังเช่นในงานวิจัยของ พัชริดาและโสดานิล (2558) จะไม่สามารถรองรับการใช้งานและการแสดงผลบนอุปกรณ์พกพา ทำให้การใช้งานค่อนข้างยาก เนื่องจากหน้าจอหลักไม่สามารถปรับรูปแบบตามอุปกรณ์พกพาได้ ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงพัฒนาในส่วนของการแสดงผลให้มีความเหมาะสมกับอุปกรณ์พกพาที่แตกต่างกัน เพื่อช่วยให้ผู้ใช้สามารถใช้งานกับอุปกรณ์ทุกประเภท จากการประเมินผลทางด้านประสิทธิภาพของระบบโดยผู้เชี่ยวชาญ สรุปว่าผลการประเมินประสิทธิภาพอยู่ในระดับเกณฑ์ที่ดี และจากการประเมินผลความพึงพอใจจากผู้ใช้งาน สรุปว่าผลการประเมินประสิทธิภาพอยู่ในระดับเกณฑ์ที่ดี ผลที่ได้จากการพัฒนา สามารถเป็นแนวทางประยุกต์ใช้กับหน่วยงานได้ สามารถสืบค้นข้อมูลผู้เข้าฝึกอบรม สามารถติดตามสถานะการสมัคร และสามารถดูประวัติการเข้าฝึกอบรมได้ ดังนั้นการพัฒนาระบบที่ได้ จะช่วยลดระยะเวลาในการค้นหาข้อมูล ลดขั้นตอนการทำงานของเจ้าหน้าที่ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของศิริวรรณและจิรพันธุ์ (2556) กับ วุฒิพงษ์และศิริวรรณ (2558)

ข้อเสนอแนะ ในการพัฒนาระบบครั้งต่อไปผู้วิจัยมีความเห็นว่า ควรปรับปรุงขั้นตอนการจัดการในระบบสมาชิก ให้ครอบคลุมในเรื่องอายุราชการและประวัติการเข้ารับการฝึกอบรมจากหน่วยงานภายนอกของผู้เข้าฝึกอบรม เพื่อให้สามารถช่วยเพิ่มการตัดสินใจในการพิจารณาคัดเลือกของผู้สมัครต่อไป

เอกสารอ้างอิง

พัชริดา วิสัยเกตุ และมาลีรัตน์ โสดานิล, (2558) “การพัฒนาระบบบริหารจัดการและสนันสนุนการทำโครงงานของนักศึกษา หมวดศึกษาทั่วไป”, หน้า 475-480, ใน : การประชุมทางวิชาการระดับชาติ ด้านคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ ครั้งที่ 11, 2-3 กรกฎาคม 2558, คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ.

วีณา เนตรสว่าง และสุรัตนา สังข์หนุน, (2555) การพัฒนาโปรแกรมระบบฐานข้อมูลการจัดเก็บเอกสารสำหรับหน่วยงานการศึกษา, วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์, 11(2) : 9-23.

วุฒิพงษ์ ชินศรี และศิริวรรณ วาสุกรี, (2558) การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสำหรับการวิเคราะห์ข้อสอบปรนัย . วารสารวิจัยและพัฒนาวไลยอลงกรณ์ในพระบรมราชูปถัมภ์ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 10(1) : 1-17.

ศิริวรรณ ลาภสมิทธิ์ และจิรพันธุ์ ศรีสมพันธุ์, (2556) การพัฒนาโปรแกรมฐานข้อมูลของผู้ขอมีตำแหน่งทางลูกเสือสำนักงานลูกเสือแห่งชาติ. วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ฉบับพิเศษ, 1(1) : 97-109.

สุรเกียรติ รัตนรอด และณัฐวี อุตกฤษฎ์, (2558) “การนำแนวทางการบริการเบ็ดเสร็จมาบริหารจัดการแบบสอบถามออนไลน์”, หน้า 668-673, การประชุมทางวิชาการระดับชาติ ด้านคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ ครั้งที่ 11, 2-3 กรกฎาคม 2558, คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ.

สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาระบบราชการ, (2558) พระราชบัญญัติระเบียบบริหารราชการแผ่นดิน (ฉบับที่ 5) พ.ศ. 2545, ที่มา : http://www.opdc.go.th, สืบค้น 1 พฤษภาคม 2558.

The Journal of Applied Science **Vol. 15 No. 2: 79-89 [2016]**
วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ doi: 10.14416/j.appsci.2016.06.003
ISSN 1513-7805 Printed in Thailand

Research Article

การออกแบบและพัฒนาถังขยะฆ่าเชื้อโรคด้วยโอโซนระบบพลาสมาความดันสูง

Design and development of disinfected bin using ozonization with high pressure plasma system

หทัยรัตน์ เจตนา[1*] มงคล จงสุพรรณพงศ์[1] ฐกฤต ปานขลิบ[1] และปรีดา จันทวงษ์[2]

Hathairus Jatana[1*], Mongkol Jongsuphanphong[1], Thakrit Pankrib[1] and Preeda Chantawon[2]

[1]สาขาการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม 46 ถนนจรัญสนิทวงศ์ เขตบางกอกใหญ่ กรุงเทพฯ 10600

[1]Energy and Environment Management, Graduate School, Siam Technology College, 46 Jarunsanitwong Road, Bangkok-yai district, Bangkok 10600

[2]วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 1518 ถนนประชาราษฎร์ สาย 1 เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

[2]College of Industrial Technology , King Mongkut's University of Technology North Bankok, 1518 Pracharat Sai 1 Road, Bangsue, Bangkok 10800

***E-mail**: Jhathairus@yahoo.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการจัดการมูลฝอยติดเชื้อที่เกิดจากสถานพยาบาลขนาดเล็กและห้องปฏิบัติการทดลอง ในช่วงแรกของงานวิจัยนี้ได้ออกแบบถังขยะและสร้างเครื่องผลิตโอโซนระบบพลาสมาความดันสูงในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งได้ตรวจสอบประสิทธิภาพสามารถผลิตปริมาณโอโซนได้ 600 mgO_3 /hr ที่ความถี่ไฟฟ้า 10.5 KHz กระแสไฟฟ้า 0.3 A มีประสิทธิภาพมากขึ้นและเป็นเครื่องที่ใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยแต่ได้โอโซนในปริมาณที่มาก และเครื่องสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง 5 ชั่วโมง อย่างปกติ ช่วงที่ 2 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่โอโซนสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* (*E. coli*) และ *Salmonella* sp. และความสามารถในการฆ่าเชื้อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยใช้ปริมาณโอโซนที่มีปริมาณเท่ากันที่ 600 mgO_3/hr เมื่อหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* พบว่าเท่ากับ 0.9588 และ *Salmonella* sp. เท่ากับ 0.9864

แสดงว่าความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่โอโซนสัมผัสกับเปอร์เซ็นต์ในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* และ *Salmonella* sp. มีความสัมพันธ์กันอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก ดังนั้นจากผลการทดลองใช้ถังขยะฆ่าเชื้อโรคด้วยโอโซนในระบบพลาสมาความดันสูงสามารถช่วยฆ่าเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* และ *Salmonella* sp. ได้ร้อยละ 100 เมื่อใช้ปริมาณโอโซนที่ 600 mgO_3/hr นาน 120 นาที

คำสำคัญ: โอโซนระบบพลาสมาความดันสูง มูลฝอยติดเชื้อ *Escherichia coli Salmonella* sp.

Abstract

This research aimed to study a method to handle infectious waste from small hospitals and laboratories. The first section of this research was designed to create the waste tank disinfecting by high pressure plasma system of ozone technology in the laboratory scale. The waste bin could produce ozone of 600 mgO_3/hr at frequency of 10.5 KHz and 0.3 A electrical current. This was more efficient and consumed less energy power. The disinfected bin could be smoothly operated for 5 hours continuously. The next part was to study the relationship between contact time of ozone and the percentage of bacterial reduction using *Escherichia coli (E. coli),* and *Salmonella sp*. as test organisms. When applying 600 mgO_3/hr of ozone to both *E. coli* and *Salmonella sp.*, the correlation analysis (R^2) between contact time and percent bacterial reduction was 0.9588 and 0.9864 for *E. coli* and *Salmonella sp.,* respectively. This result indicated that the ozonization bin with high pressure plama system could be used to disinfect *E. coli,* and *Salmonella sp*. up to 100 percent when using ozone 600 mgO_3/hr for 120 minutes.

Keywords: high pressure plasma system of ozone, infectious waste, *Escherichia coli*, *Salmonella* sp.

บทนำ

ปัจจุบันปัญหาเกี่ยวกับมูลฝอยติดเชื้อมีแนวโน้มที่ทวีความรุนแรงมากขึ้นหากไม่ได้รับการจัดการที่เหมาะสม เนื่องจากแหล่งกำเนิดมูลฝอยติดเชื้อมีการเพิ่มจำนวนและกระจายไปอยู่ในทุกภูมิภาคของประเทศ โดยปริมาณการเกิดมูลฝอยติดเชื้อทั่วประเทศในปี 2556 จากแหล่งกำเนิดประเภทต่าง ๆ เกิดขึ้นประมาณ 50,481 ตันต่อปี แยกได้เป็น โรงพยาบาลรัฐ 26,597 ตันต่อปี (ร้อยละ 57) โรงพยาบาลเอกชน 9,172 ตันต่อปี (ร้อยละ 19) คลินิก 7,850 ตันต่อปี (ร้อยละ 17) โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลหรือสถานีอนามัย 3,206 ตันต่อปี (ร้อยละ 6) สถานพยาบาลสัตว์ 135 ตันต่อปี (ร้อยละ 0.4) และห้องปฏิบัติการเชื้ออันตราย 157 ตันต่อปี (ร้อยละ 0.6) (กรมควบคุมมลพิษ, 2557) และในปี 2557 จากข้อมูลของกรมควบคุมมลพิษพบว่ามีมูลฝอยติดเชื้อเกิดขึ้นทั่วประเทศประมาณ 52,000 ตัน เพิ่มขึ้นจากปี 2556 ประมาณ 1,500 ตัน หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 3 โดยร้อยละ 57 เป็นมูลฝอยติดเชื้อ

ในโรงพยาบาลสังกัดกระทรวงสาธารณสุข ที่เหลือร้อยละ 43 เป็นของโรงพยาบาลเอกชนและสถานบริการสาธารณสุขขนาดเล็ก (กองแผนงานและประเมินผล, 2558)

เมื่อมูลฝอยติดเชื้อได้ถูกทิ้งออกสู่สิ่งแวดล้อมไปปะปนร่วมกับมูลฝอยชุมชนเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดอัตราความเสี่ยงในการแพร่กระจายเชื้อโรคเพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีผลต่อสุขภาพอนามัยของประชาชน โดยเฉพาะสุขภาพอนามัยของเจ้าหน้าที่ปฏิบัติงานเก็บขนหรือผู้ทำงานในสถานที่กำจัดซึ่งทำให้เกิดการเจ็บป่วยด้วยโรคต่าง ๆ ได้ เช่น โรคไวรัสตับอักเสบ โรคระบบทางเดินหายใจ วัณโรค อหิวา บาดทะยัก ไทฟอยด์ บิดมีตัว แผลริมอ่อน หนองในไข้หวัดใหญ่ การติดเชื้อในเยื่อหุ้มสมองและไขสันหลัง โรคพยาธิหรือแม้แต่การติดเชื้อโรคเอดส์ ทำให้มีผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนและสิ่งแวดล้อมในเขตเมืองทั่วไป (กรมอนามัย, 2546; กรมควบคุมมลพิษ, 2551)

ปัจจุบันมีเทคโนโลยีการกำจัดขยะมูลฝอยติดเชื้อที่มีใช้อยู่ในประเทศ เช่น การทำลายเชื้อด้วยสารเคมี (chemical disinfection) การเผาด้วยเตาเผา (incineration) การทำลายเชื้อด้วยไอน้ำ (steam sterilization/autoclaving) และการทำลายเชื้อด้วยความร้อน (thermal inactivation) ส่วนใหญ่เป็นเทคโนโลยีขนาดใหญ่ที่ต้องใช้เงินลงทุนสูง ต้องมีพื้นที่รองรับ และต้องใช้บุคลากรที่มีความรู้ในการควบคุมดูแลและซ่อมบำรุง เหมาะสำหรับสถานพยาบาลขนาดใหญ่และกลุ่มนักธุรกิจผู้ลงทุน ส่วนเทคโนโลยีการทำลายเชื้อด้วยสารเคมีถึงแม้จะมีการใช้ฆ่าเชื้อเบื้องต้นและมีการใช้แพร่หลาย แต่สุดท้ายจะมีสารเคมีตกค้างก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (กรมควบคุมมลพิษ, 2558)

โอโซนได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการกำจัดเชื้อโรคเนื่องจากการมีประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์โดยการเกิดออกซิเดชันของเยื่อหุ้มเซลล์ โอโซนมีค่าศักย์ออกซิเดชัน (oxidation potential) ที่สูงกว่าคลอรีนถึง 1.5 เท่า จึงสามารถฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ได้กว้างกว่าคลอรีนและสารฆ่าเชื้อโรคอื่น ๆ โดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาสารเคมีตกค้างและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Xu, 1999) กลไกการทำงานของโอโซนเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะคือ โอโซนเข้าทำปฏิกิริยาโดยตรง (direct attack) หรือโดยทางอ้อม (indirect attack) ซึ่งเกิดจากอนุมูลไฮดรอกซิล (hydroxyl radical: •OH) ที่เกิดจากการแตกตัวของโอโซนเป็นตัวเข้าทำปฏิกิริยา (Gómez-Ramosและคณะ, 2011) โดยโอโซนจะยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์อย่างรวดเร็วด้วยการเข้าไปทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ภายในเซลล์ (intracellular enzyme) และกรดนิวคลิอิก (nucleic acid) อีกทั้งยังไปทำลายสภาพของส่วนที่หุ้มเซลล์แบคทีเรียโดยการเกิดออกซิเดชันของฟอสโฟลิพิด (phospholipids) และลิโพโปรตีน (lipoprotein) (Khadreและคณะ, 2001; ElvisและEkta, 2011)

จากการศึกษาระบบการผลิตโอโซนในปัจจุบันมีอยู่หลายแบบ แต่ที่นิยมใช้มี 2 แบบคือ แบบความต่างศักย์สูง (discharge high voltage) และแบบระบบพลาสมาความดันสูง (high pressure plasma) สำหรับงานวิจัยนี้จะเลือกใช้แบบระบบพลาสมาความดันสูง เนื่องจากเป็นระบบที่ใช้พลังงานในการผลิตโอโซนต่ำและได้โอโซนในปริมาณที่มากกว่าจึงมีความเหมาะสมกว่าในการผลิตโอโซนเชิงอุตสาหกรรม การออกแบบและพัฒนาสร้างเครื่องผลิตโอโซนระบบพลาสมาความดันสูงจากเดิมที่มีอยู่สามารถทำได้โดยใช้แหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงจากคอยล์รถยนต์ที่หาได้ทั่วไป นำมาติดตั้งกับมอเตอร์เพื่อให้สามารถปรับความถี่ได้ ส่วนหลอดผลิตโอโซนได้ออกแบบเป็นท่อสแตนเลสแบบกลวงบางเพื่อลดกระแสไฟฟ้าที่มาสัมผัสกับผิวท่อ โดยใช้เทคนิคพลาสมาดิสชาร์จ ซึ่งมีส่วนประกอบ 3

ส่วน คือ ระบบเตรียมอากาศ เซลล์โอโซไนเซอร์ และระบบจ่ายไฟฟ้าแรงสูง จึงทำให้เกิดการดิสชาร์จไฟฟ้าผ่านอากาศหรือแก๊สออกซิเจนเพื่อกำเนิดโอโซน ผลผลิตโอโซนจะขึ้นอยู่กับการปรับความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วง 6-18 กิโลโวลต์ ความถี่ 50-10^3 เฮริต์ ระยะขั้วดิสชาร์จ 2 มิลลิเมตร ซึ่งระบบผลิตโอโซนพลาสมาความดันสูงเป็นการเกิดแก๊สโอโซนจากสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มข้นสูง (ความเข้มข้นสูงเนื่องจากระยะห่างของขั้วบวกและลบอยู่ใกล้กันมาก ประมาณ 2 – 3 มิลลิเมตร) และภายในหลอดผลิตโอโซนที่ออกแบบจะมีแรงดันของอากาศ จึงทำให้เกิดโอโซนในระบบความดันสูง และได้ปริมาณที่มาก (มงคล, 2550)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงมีแนวคิดในการออกแบบถังขยะฆ่าเชื้อโรคด้วยโอโซนระบบพลาสมาความดันสูงสำหรับฆ่าเชื้อโรคในมูลฝอยติดเชื้อจากแหล่งกำเนิดก่อนจะนำไปกำจัดเพื่อลดอัตราเสี่ยงในการติดเชื้อกับผู้ที่สัมผัสถูกหรือผู้เกี่ยวข้อง

วัสดุและวิธีการทดลอง

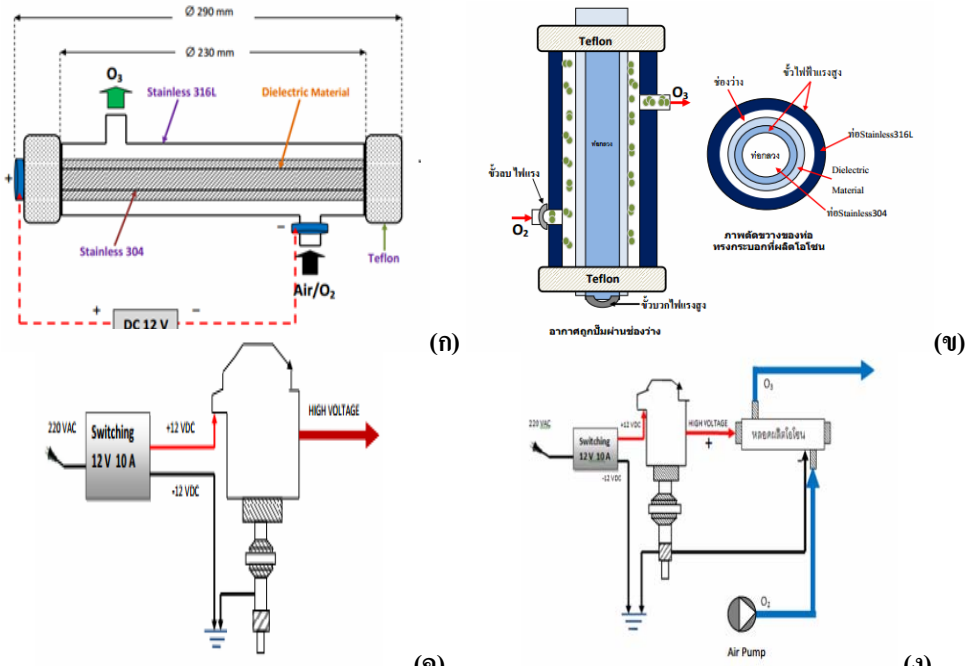
การออกแบบและสร้างวงจรผลิตโอโซนระบบพลาสมาความดันสูง

เครื่องผลิตโอโซน ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ หลอดผลิตโอโซน, วงจรสร้างแรงดันไฟฟ้าแรงดันสูง, ความถี่สูง, ปั๊มจ่ายอากาศ โดยหลอดผลิตโอโซนหรือส่วนผลิตโอโซน ออกแบบโดยใช้วัสดุอุปกรณ์ ที่ทนต่อการกัดกร่อน ซึ่งหลอดผลิตโอโซนที่ออกแบบนั้น ประกอบด้วยท่อทรงกระบอก 3 ชั้น ชั้นนอกสุดเป็นท่อสแตนเลส 316 L ขนาด Ø 16 mm ยาว 290 mm ชั้นที่ 2 เป็น dielectric material ขนาด Ø 12 mm ส่วนชั้นที่ 3 เป็นชั้นในสุด เป็นท่อสแตนเลสบาง ขนาด Ø 10 mm และท่อสำหรับทางเข้าของอากาศถูกปั๊มเข้าหลอดผลิตโอโซน ส่วนอีกด้านหนึ่งเป็นด้านทางออกของโอโซนที่เกิดขึ้นในหลอดผ่านออกมาขนาด Ø 0.6 mm และช่องว่างภายในระหว่างท่อสแตนเลสกับ dielectric material มีขนาด Ø 2 mm ท่อและความยาวของหลอดจะเป็นตัวกำหนดความเข้มของโอโซนที่หลอดผลิตได้ โดยปลายทั้งสองข้างของหลอดผลิตโอโซนระหว่างท่อทั้งสามชั้นจะถูกปิดไว้ไม่ให้เกิดรอยรั่ว เพื่อให้เกิดแรงดันขณะที่โอโซนผ่านออกมาตามช่องว่างระหว่าง dielectric material กับหลอดภายนอก ดังแสดงในรูปที่ 1 ก. และ ข.

การออกแบบวงจรไฟฟ้าแรงดันสูงที่จ่ายให้หลอดผลิตโอโซน (รูปที่ 1 ค.) ทำได้โดยการประยุกต์ใช้อุปกรณ์แทนหม้อแปลงไฟฟ้าเพิ่มแรงดันไฟฟ้าสูงแบบ switching power supply ที่ทำการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V, 50 Hz ให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1-10 kV 1-10 kHz voltage และใช้ชุดปรับความถี่โดยใช้มอเตอร์ 12 VDC และใช้ switching 12 VDC 10 A เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้า เพื่อให้เกิดเป็นวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง

ในแง่ของวงจรผลิตโอโซนแรงดันสูง ความถี่สูง (รูปที่ 1 ง.) มีหลักการทำงานของการผลิตก๊าซโอโซนคือเป็นการผลิตโอโซนโดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีแรงดันสูง ความถี่สูง ซึ่งมีผลต่อปริมาณโอโซนที่เกิดขึ้น ส่วนระบบพลาสมาความดันสูงอยู่ที่การออกแบบหลอดผลิตโอโซน ซึ่งหลักการเกิดโอโซนคือ โอโซนจะเกิดขึ้นได้โดยอาศัย

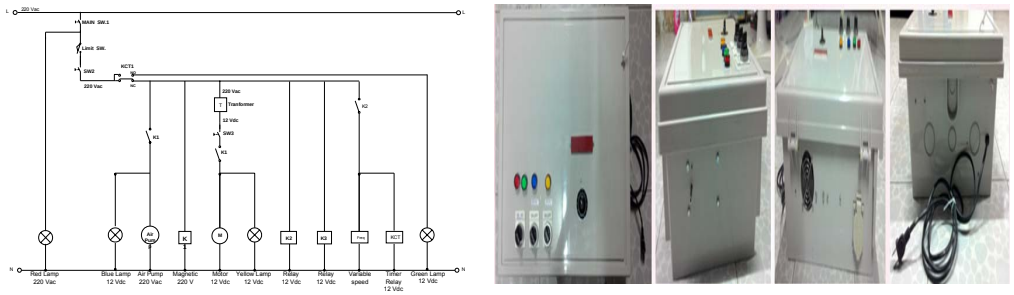
การแตกตัวของโมเลกุลของแก๊สออกซิเจน ซึ่งจะทำให้เกิดโอโซนได้จากสมการคือ $O_2+O \longrightarrow O_3$ โดยโอโซนจะมีความสามารถในการทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้ค่าหนึ่งและความร้อนก็มีผลต่อปริมาณโอโซนที่เกิดขึ้น ดังนั้นเพื่อให้ได้ปริมาณการผลิตโอโซนที่เหมาะสมจึงจำเป็นที่จะต้องควบคุมปริมาณแรงดันและความถี่ไฟฟ้าให้เหมาะสม



รูปที่ 1. แสดงลักษณะวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้า หลอดผลิตโอโซน และวงจรผลิตโอโซนแรงดันสูง ความถี่สูง (ก) หลอดผลิตโอโซน (ข) ลักษณะการเกิดโอโซน (ค) วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง และ (ง) วงจรผลิตโอโซน

การออกแบบวงจรการทำงานของเครื่องผลิตโอโซนและประกอบเครื่องผลิตโอโซนระบบพลาสมาความดันสูง

ออกแบบโดยใช้ limit switch เป็นตัวควบคุมการทำงานของเครื่องผลิตโอโซน และทำงานตามเวลาที่ตั้งไว้จาก timer relay (รูปที่ 2 ก.) เมื่อมีการเปิดฝาถังขยะเพื่อทิ้งขยะโดยการเหยียบ เมื่อปล่อยขาเหยียบแล้วฝาถังขยะจะปิด เครื่องโอโซนจะเริ่มทำงานทันทีตามเวลาที่ตั้งไว้จนจบ เครื่องจึงจะหยุดทำงาน หรือระหว่างเครื่องกำลังทำงานอยู่ มีการเปิดฝาถังขยะขึ้น เครื่องผลิตโอโซนก็จะหยุดทำงานทันที และจะเริ่มทำงานเมื่อปิดฝาถังขยะลงมา จึงทำให้แน่ใจว่าโอโซนจะไม่รั่วไหลออกมา มีความปลอดภัยสำหรับผู้ใช้งาน จากนั้นจึงได้ประกอบลงกล่อง control box แบบพลาสติก กันน้ำ ความชื้น และน้ำหนักเบาขนาด 35x48x18 cm3 เป็นเครื่องผลิตโอโซนระบบพลาสมาความดันสูง (รูปที่ 2 ข.)



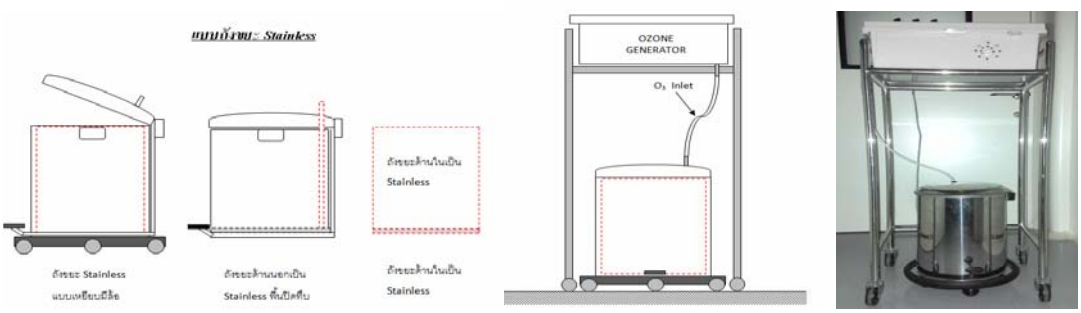
(ก) **(ข)**

รูปที่ 2. (ก) วงจรการทำงานของเครื่องผลิตโอโซน และ (ข) เครื่องผลิตโอโซนระบบพลาสมาความดันสูง

การออกแบบถังขยะติดตั้งเครื่องผลิตโอโซน

ใช้วัสดุสแตนเลสทำเป็นถังขยะทั้ง 2 ชั้น แบบใช้เท้าเหยียบเพื่อเปิด ขนาดตัวถังด้านใน 30.5x38.1 cm^2 โดยด้านฝาล่างของถังชั้นนอกเป็นแบบทึบปิดสนิท ส่วนบริเวณขอบบนถังใช้ท่อยางซิลิโคนครอบปิด เพื่อป้องกันไม่ให้โอโซนผ่านออกมาได้ มีทางเข้าโอโซนอยู่ด้านบนฝา ดังรูปที่ 3 ก. แล้วติดตั้งเข้ากับเครื่องผลิตโอโซนระบบพลาสมาความดันสูง ตามรูปที่ 3 ข.

ถังขยะฆ่าเชื้อโรคด้วยโอโซนระบบพลาสมาความดันสูงซึ่งติดตั้งเครื่องผลิตโอโซนนี้ สามารถผลิตโอโซนที่ความเข้มข้น 0–600 mgO_3/hr ประกอบติดตั้งบนรถเข็นสแตนเลส ขนาด 40x50x84 cm^3 มีสายซิลิโคนต่อเข้าถังขยะด้านบนเพื่อส่งโอโซน



(ก) **(ข)**

รูปที่ 3. (ก) ถังขยะสแตนเลสแบบเท้าเหยียบ และ (ข) ถังขยะฆ่าเชื้อโรคด้วยโอโซนระบบพลาสมาความดันสูง

การทดสอบประสิทธิภาพของถังขยะในการฆ่าเชื้อโรค

เตรียมเชื้อที่ต้องการทดลองโดยใช้ไม้พันสำลีที่ผ่านการฆ่าเชื้อ เขี่ยแบคทีเรีย *Escherichia coli* (*E. coli*) และ *Salmonella* sp. มาป้ายลงในจานเพาะเชื้อ ที่มีอาหารเลี้ยงเชื้อ โดยแบ่งเป็น 1 ช่อง ๆ ละ 2 ตารางนิ้ว โดยให้ช่องซ้าย (1) เป็นเชื้อ *E. coli* และช่องขวา (2) เป็น *Salmonella* sp. หลังจากนั้นวางลงในถังขยะฆ่าเชื้อโรคด้วยโอโซนระบบพลาสมาความดันสูงที่สามารถผลิตโอโซนที่ความเข้มข้นได้ 0–600 mgO_3/hr

ทำการทดลองฆ่าเชื้อทั้ง 2 ชนิด เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่โอโซนสัมผัสกับร้อยละในการฆ่าเชื้อโรคที่ปริมาณโอโซน 600 mgO_3/hr โดยปรับเปลี่ยนเวลาในการสัมผัสตั้งแต่ 0 ถึง 120 นาที ทำการทดลองทีละจาน เริ่มทดลองตามระยะเวลากำหนด คือ 20, 40, 60, 80, 100, 120 นาที ซึ่งในแต่ละครั้ง หลังจากครบกำหนดเวลา นำจานเพาะเชื้อไปบ่มที่ตู้บ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำออกมาวัดปริมาณเชื้อที่เหลือ โดยดูจากปริมาณโคโลนีที่ขึ้นต่อพื้นที่ 1 ตารางนิ้ว โดยในจานควบคุมซึ่งเป็นแบคทีเรียขึ้นเต็มพื้นที่คิดเป็นร้อยละ 100 คำนวณหาร้อยละของแบคทีเรียที่โอโซนสามารถฆ่าได้ในระยะเวลากำหนด และทำการทดลอง 3 ครั้ง โดยครั้งที่ 1 วางที่ด้านซ้ายของถัง ครั้งที่ 2 วางที่ด้านขวาของถัง และครั้งที่ 3 วางที่ด้านบนของถังซึ่งเป็นจุดที่อยู่ใกล้โอโซนมากที่สุด

ผลการทดลอง

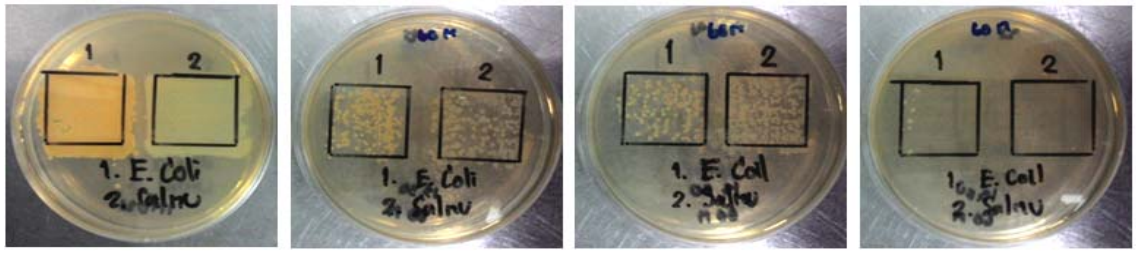
ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ *E. coli* และ *Salmonella* sp.

จากการทดลองฆ่าเชื้อด้วยถังขยะฆ่าเชื้อโรคด้วยโอโซนระบบพลาสมาความดันสูงในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* และ *Salmonella* sp. โดยกำหนดความเข้มข้นโอโซนที่ 600 mgO_3/hr ใช้ระยะเวลาที่โอโซนสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* และ *Salmonella* sp. กำหนดให้เริ่มจาก 0, 20, 40, 60, 80, 100, 120 นาที ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 1 โดยพบว่าที่ 100 นาทีโอโซนสามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ได้ร้อยละ 99.9 และ *Salmonella* sp. ได้ร้อยละ 95.9 ที่เวลา 120นาที โอโซนสามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* และ *Salmonella* sp. ได้ร้อยละ100 จะเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้นโอโซน 600 mgO_3/hr สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* และ *Salmonella* sp.ได้ร้อยละ100 ที่เวลา 120 นาที อย่างไรก็ตาม มีข้อสังเกตว่าหากวางจานเพาะเชื้อไว้ใกล้แหล่งกำเนิดโอโซนที่ติดตั้งด้านบนของถังขยะ (ครั้งที่ 3) (รูปที่ 4–7) จำนวนเชื้อจะลดลงมากว่าการวางไว้ทางด้านซ้ายหรือด้านขวาของถังขยะ จึงทำให้ความแปรปรวนของการลดลงของแบคทีเรียที่แสดงในตารางที่ 1 มีค่าสูงในบางช่วงเวลา

จากการทดลองฆ่าเชื้อด้วยถังขยะฆ่าเชื้อโรคด้วยโอโซนระบบพลาสมาความดันสูงกับเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* และ *Salmonella* sp. นั้น ได้นำมาเขียนเป็นกราฟดังรูปที่ 8 เพื่อวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) พบว่าระยะเวลาที่เชื้อสัมผัสกับโอโซนมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับร้อยละการตายของเชื้อ โดยค่า R^2 ของแบคทีเรีย *E. coli* เท่ากับ 0.9588 และค่า R^2 ของแบคทีเรีย *Salmonella* sp. เท่ากับ 0.9864

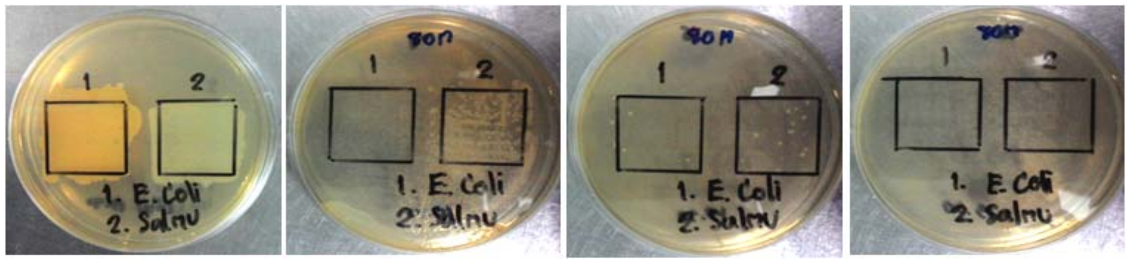
ตารางที่ 1. ร้อยละการลดลงของแบคทีเรียทดสอบ ซึ่งวางในถังขยะและสัมผัสโอโซนความเข้มข้นที่ 600 mgO_3/hr เป็นระยะเวลาต่าง ๆ ข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ยของการทดลอง 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

เวลาในการสัมผัสโอโซน (นาที)	**ร้อยละการลดลงของ *E. coli***	**ร้อยละการลดลงของ *Salmonella* sp.**
0	0 ± 0.00	0 ± 0.00
20	20.37 ± 0.10	14.92 ± 0.19
40	39.00 ± 0.35	30.10 ± 0.22
60	56.23 ± 38.49	50.63 ± 43.38
80	90.10 ± 0.12	72.10 ± 35.02
100	99.93 ± 0.12	95.90 ± 0.36
120	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00



(ก) **(ข)** **(ค)** **(ง)**

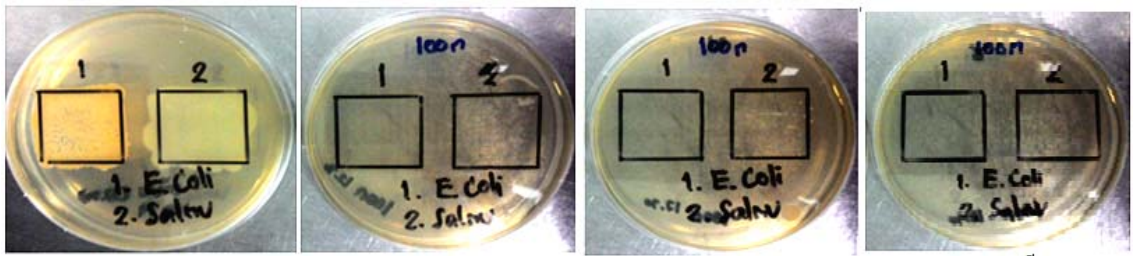
รูปที่ 4. แสดงผลการฆ่าเชื้อโรคด้วยถังขยะฆ่าเชื้อโรคด้วยโอโซนระบบพลาสมาความดันสูงที่เวลา 60 นาที (ก) จานควบคุม (ข) ครั้งที่ 1 (ค) ครั้งที่ 2 และ (ง) ครั้งที่ 3



(ก) **(ข)** **(ค)** **(ง)**

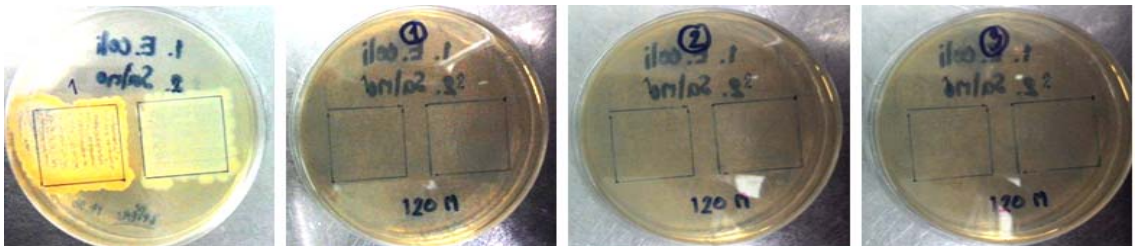
รูปที่ 5. แสดงผลการฆ่าเชื้อโรคด้วยถังขยะฆ่าเชื้อโรคด้วยโอโซนระบบพลาสมาความดันสูงที่เวลา 80 นาที (ก) จานควบคุม (ข) ครั้งที่ 1 (ค) ครั้งที่ 2 และ (ง) ครั้งที่ 3

Vol. 15 No. 2: 79-89 [2016]
doi: 10.14416/j.appsci.2016.06.003



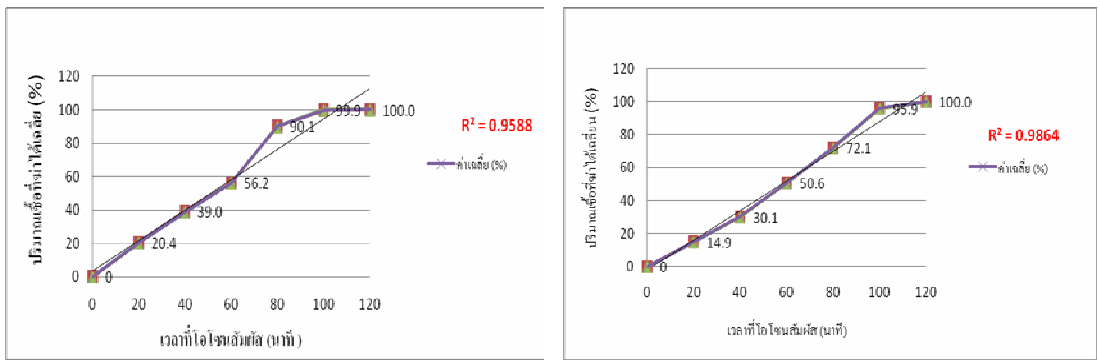
(ก) **(ข)** **(ค)** **(ง)**

รูปที่ 6. แสดงผลการฆ่าเชื้อโรคด้วยถังขยะฆ่าเชื้อโรคด้วยโอโซนระบบพลาสมาความดันสูงที่เวลา 100 นาที (ก) จานควบคุม (ข) ครั้งที่ 1 (ค) ครั้งที่ 2 และ (ง) ครั้งที่ 3



(ก) **(ข)** **(ค)** **(ง)**

รูปที่ 7. แสดงผลการฆ่าเชื้อโรคด้วยถังขยะฆ่าเชื้อโรคด้วยโอโซนระบบพลาสมาความดันสูงที่เวลา 120 นาที (ก) จานควบคุม (ข) ครั้งที่ 1 (ค) ครั้งที่ 2 และ (ง) ครั้งที่ 3



(ก) **(ข)**

รูปที่ 8. กราฟแสดงประสิทธิภาพการใช้โอโซนในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย (ก) *E. coli* และ (ข) *Salmonella* sp.

วิจารณ์และสรุปผลการทดลอง

มีการประยุกต์ใช้โอโซนหลากหลายประการในอุตสาหกรรมในฐานะเป็นตัวออกซิไดส์ (oxidising agent) ที่แรง รวมถึงการนำไปบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแบตเตอรี่และการฆ่าเชื้อโรคอีกด้วย (ไพโรจน์และคณะ, 2559) ทั้งนี้เนื่องจากโอโซนมีคุณสมบัติที่โดดเด่นในการฆ่าเชื้อโรคได้ทุกชนิด ทั้งไวรัส แบคทีเรีย ยีสต์ รา และโพรโทซัว รวมถึง สปอร์ ซิสต์ และไข่พยาธิ โดยโอโซนจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารประกอบที่ห่อหุ้มเซลล์ทำให้เซลล์แตก ถ้าเป็นไวรัส โอโซนจะสลายกรดนิวคลีอิก ส่วนซิสต์หรือโพรโทซัว โอโซนจะทำลายเยื่อหุ้มชั้นในไปจนถึงส่วนประกอบที่อยู่ภายในเซลล์ (มงคลและสันทัด, 2552)

จากรายงานที่ผ่านมา พบว่าโอโซนมีประสิทธิภาพสูงมากในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำดื่ม เนื่องจากสามารถต้านการปนเปื้อนของ *Escherichia coli*, *Salmonella*, *Giardia* และ *Cryptosporidium* ในอาหารและน้ำได้ (Lamarre, 1997; Khadreและคณะ, 2001) ดังนั้นเมื่อสามารถสร้างเครื่องผลิตโอโซนระบบพลาสมาความดันสูง ผนวกเข้ากับการออกแบบถังขยะฆ่าเชื้อโรค แล้วนำมารวมกัน จึงเป็นการประยุกต์ใช้คุณประโยชน์ของโอโซนให้กว้างขวางออกไป ซึ่งผลจากการศึกษาในครั้งนี้สรุปได้ว่า สามารถออกแบบถังขยะฆ่าเชื้อโรคโดยใช้โอโซนระบบพลาสมาความดันสูงได้ และเมื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียก่อโรคด้วยถังขยะที่ออกแบบนี้ พบว่าการลดลงของแบคทีเรียมีความสัมพันธ์ไปในทางเดียวกับระยะเวลาในการสัมผัสโอโซน โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ซึ่งนับว่าอยู่ในเกณฑ์ดีมาก และที่เวลา 120 นาที สามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรียได้หมด ดังนั้นถังขยะฆ่าเชื้อโรคโดยใช้โอโซนระบบพลาสมาความดันสูงจึงสามารถนำไปใช้ในการฆ่าเชื้อโรคจากมูลฝอยติดเชื้อได้จริง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ของบัณฑิตวิทยาลัย วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม ทุกท่านที่ให้ความรู้ในด้านต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบคุณ คุณพรหมฉัตร เจริญพัฒน์ นักวิทยาศาสตร์การแพทย์ สถานเสาวภา สภากาชาดไทย ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำตลอดจนสอนวิธีการเพาะเชื้อ เลี้ยงเชื้อและทดลองเชื้อ และขอขอบคุณ สถานเสาวภา สภากาชาดไทยที่เอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ และอำนวยความสะดวกในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ, (2551) คู่มือแนวทางการจัดการมูลฝอยติดเชื้อขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น, กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ, หน้า (1-4)–(1-7).

กรมควบคุมมลพิษ, (2557) รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2556, กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ, หน้า 2–14.

กรมควบคุมมลพิษ, (2558) เทคโนโลยีการกำจัดมูลฝอยติดเชื้อ, ที่มา: http://www.pcd.go.th/info_serv/waste_infectious.htm#s4, สืบค้น 7 มีนาคม 2558.

กรมอนามัย, (2546) คู่มือการดำเนินงานตามกฎกระทรวงว่าด้วยการจัดการมูลฝอยติดเชื้อ พ.ศ. 2545, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, กรุงเทพฯ, หน้า 15-20.

กองแผนงานและประเมินผล, (2558) สถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2557 . ข่าวสารสิ่งแวดล้อม, ฉบับที่ 1/2558, กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ, หน้า 4.

ไพโรจน์ หอมอ่อน มงคล จงสุพรรณพงศ์ ฐกฤต ปานขลิบ และปรีดา จันทวงษ์, (2559) การพัฒนาและออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแบตเตอรี่ด้วยเทคโนโลยีโอโซนระบบพลาสมาความดันสูง. วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์, 15(1): 21-33.

มงคล จงสุพรรณพงศ์, (2550) การผลิตโอโซนในระบบพลาสมาความดันสูงสำหรับบำบัดน้ำเสียในบ่อเลี้ยงกุ้งและชุมชน, ที่มา: http://tdc.thailis.or.th/tdc//browse.php?option=show&browse_type=title&titleid=53759&query=โอโซน&s_mode=any&d_field=&d_start=0000-00-00&d_end=2559-03-04&limit_lang=&limited_lang_code=&order=&order_by=&order_type=&result_id=25&maxid=244, สืบค้น 7 มีนาคม 2558.

มงคล จงสุพรรณพงศ์ และสันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์, (2552) การผลิตโอโซนระบบพลาสมาความดันสูงสำหรับบำบัดน้ำเสีย. วารสารวิทยาศาสตร์ มศว., 25(1): 133-145.

Elvis A.M. and Ekta J.S., (2011) Ozone therapy: a clinical review. J. Nat. Sc. Biol. Med., 2(1): 66-70.

Gómez-Ramos M.d.M., Mezcua M., Agüera A., Fernández-Alba A.R., Gonzalo S. et al., (2011) Chemical and toxicological evolution of the antibiotic sulfamethoxazole under ozone treatment in water solution. J. Hazard. Mater., 192(1); 18–25.

Khadre M.A., Yousef A.E. and Kim J.-G., (2001) Microbiological aspects of ozone applications in food: a review. J. Food Sci., 66(9): 1242–1252.

Lamarre L. (1997) A fresh look at ozone. EPRI J., 22(4): 6-15.

Xu L., (1999) Use of ozone to improve the safety of fresh fruits and vegetable. Food Technol., 53(10): 58-62

The Journal of Applied Science **Vol. 15 No. 2: 90-102 [2016]**
วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ doi: 10.14416/j.appsci.2016.07.001
ISSN 1513-7805 Printed in Thailand

Research Article

ผลของภาวะอ้วนต่อระบบประสาทอัตโนมัติที่ควบคุมหัวใจของผู้ป่วยที่บำบัดด้วยการฟอกไตทางหน้าท้องอย่างต่อเนื่อง

Effect of obesity on cardiac autonomic nervous system of continuous ambulatory peritoneal dialysis patients

วีระศักดิ์ อัศววงศ์อารยะ[1*] ภัทรวีรินทร์ วรรัฐสุนทร[1] ณัฏชนน พรหมประสิทธิ์[1] นันทนา ชปิลเลส์[2] สมชัย ชีวินศิริวัฒน์[3] และชิษณุทัศน์ บรรลือโชคชัย[1]

Weerasak Ussawawongaraya[1*], Pattaraweerin Woraratsoontorn[1], Natchanon Promprasit[1], Nuntana Spilles[2], Somchai Cheewinsiriwat[3] and Chissanuthat Bunluechokchai[1]

[1]ภาควิชาฟิสิกส์อุตสาหกรรมและอุปกรณ์การแพทย์ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

[2]หน่วยไตเทียม โรงพยาบาลนพรัตนราชธานี เขตคันนายาว กรุงเทพฯ 10230

[3]กองแพทย์หลวง พระบรมมหาราชวัง สำนักพระราชวัง เขตพระนคร กรุงเทพฯ 10200

[1]Department of Industrial Physics and Medical Instrumentation, Facluty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangsue, Bangkok 10800

[2]Dialysis Unit, Nopparatrajathanee Hospital, Khanna Yao district, Bangkok, 10230

[3]Royal Medical Department, Bureau of Royal Household, Phra Nakhon district, Bangkok 10200

***E-mail**: weerasaku@kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

ภาวะอ้วนและโรคไตเรื้อรังระยะสุดท้ายที่บำบัดด้วยการฟอกไตทางหน้าท้องอย่างต่อเนื่องต่างก็มีผลต่อการทำงานที่บกพร่องของระบบประสาทอัตโนมัติที่ควบคุมการทำงานของหัวใจ แต่ยังไม่มีการศึกษาถึงผลร่วมกันของภาวะอ้วนในผู้ป่วยที่บำบัดด้วยการฟอกไตทางหน้าท้องอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการศึกษาครั้งนี้คือศึกษาการเสริมฤทธิ์ของภาวะอ้วนในผู้ป่วยโรคไตเรื้อรังระยะสุดท้ายที่บำบัดด้วยการฟอกไตทางหน้าท้องอย่างต่อเนื่องต่อระบบประสาทอัตโนมัติที่ควบคุมการทำงานของหัวใจ การทดสอบระบบประสาทอัตโนมัติที่ควบคุมการทำงานของหัวใจแบบไม่รุกล้ำได้ถูกนำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ จากผลการศึกษาพบว่าระดับของความดันโลหิตขณะหัวใจบีบตัว และอัตราการเต้นของหัวใจขณะพักในผู้ป่วยที่บำบัดด้วยการฟอกไตทางหน้าท้องอย่างต่อ

เนื่องมีค่าสูงกว่าค่าปรกติ แต่ไม่พบความแตกต่างระหว่างกลุ่มที่มีภาวะอ้วนและไม่มีภาวะอ้วน แสดงว่าภาวะอ้วนไม่มีผลเสริมฤทธิ์ต่อการทำงานที่เพิ่มขึ้นของระบบประสาทซิมพาเทติกในผู้ป่วยที่บำบัดด้วยการฟอกไตทางหน้าท้องอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม กลับพบว่าการตอบสนองของอัตราการเต้นของหัวใจต่อการหายใจอย่างลึกมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.048$) ในกลุ่มที่มีภาวะอ้วนแสดงว่าภาวะอ้วนมีผลต่อการทำงานที่ลดลงของระบบประสาทพาราซิมพาเทติก แต่ในการทดสอบด้วย orthostatic test, valsava ratio, และ 30/15 ratio ไม่พบความแตกต่างระหว่างกลุ่มที่มีภาวะอ้วนและไม่มีภาวะอ้วน นอกจากนี้ในกลุ่มผู้ป่วยที่บำบัดด้วยการฟอกไตทางหน้าท้องอย่างต่อเนื่องที่มีภาวะอ้วนพบว่าการตอบสนองของอัตราการเต้นของหัวใจต่อการหายใจอย่างลึกมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับค่าดัชนีมวลกายอย่างมีนัยสำคัญ ($r = -0.377$, $p = 0.030$) ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าภาวะอ้วนมีส่วนที่ทำให้เกิดความบกพร่องต่อการทำงานของระบบประสาทพาราซิมพาเทติกในผู้ป่วยที่บำบัดด้วยการฟอกไตทางหน้าท้องอย่างต่อเนื่อง

คำสำคัญ: การฟอกไตทางหน้าท้องอย่างต่อเนื่อง ภาวะอ้วน ระบบประสาทอัตโนมัติ อัตราการเต้นของหัวใจ

Abstract

Both the obesity and end stage renal disease (ESRD) treated with continuous ambulatory peritoneal dialysis (CAPD) had been known as an adverse effect to the cardiac autonomic nervous system. However, previous study did not conduct that obesity deteriorated cardiac autonomic nervous system in CAPD patients. Accordingly, the objective in this study was to investigate whether obesity can reinforce the deteriorated effect on cardiac autonomic nervous system in CAPD patients. Non-invasive techniques for evaluating the cardiac autonomic nervous system were used in this study. The results showed that resting systolic blood pressure (SBP) and heart rate (HR) of both CAPD patient groups were higher than normal values but there was not significant difference between obese and non-obese groups. The results also demonstrated that obesity was unable to augment the sympathetic hyperactivity in CAPD patients. However, there was significantly decreased of the heart rate responses to deep breathing ($p = 0.048$). Thus, obesity could induce the parasympathetic hypoactivity in CAPD patients. Unfortunately, the test of orthostatic, valsava ratio, and 30/15 ratio did not show any significant difference in cardiac autonomic nervous system. Besides, for the CAPD patients with obesity, the heart rate responses to deep breathing was inversely correlated with body mass index (BMI) ($r = -0.377$, $p = 0.030$). Therefore, the outcome from this study indicated that obesity may induce the impairment of parasympathetic activity in CAPD patients.

Keywords: continuous ambulatory peritoneal dialysis, obesity, autonomic nervous system, heart rate

บทนำ

ภาวะอ้วน (obesity) คือ ภาวะที่ร่างกายมีการสะสมของไขมันจนทำให้มีน้ำหนักตัวเพิ่มมากกว่าปรกติ (Yakinciและคณะ, 2000) การสะสมของไขมันที่เพิ่มขึ้นนี้อาจเนื่องมาจากการรับประทานอาหารที่มากเกินความจำเป็นหรือการขาดการออกกำลังกาย (Olefsky, 1994) ดังนั้นภาวะอ้วนจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเป็นสาเหตุหนึ่งที่สำคัญต่อการเจ็บป่วย ข้อมูลจาก international obesity task force (IOTF) ระบุว่าผู้ที่มีน้ำหนักปรกติจะมีดัชนีมวลกายอยู่ที่ประมาณ 18.5-24.9 kg/m^2 ผู้ที่มีน้ำหนักเกินจะมีดัชนีมวลกายอยู่ที่ 25.0-29.9 kg/m^2 และผู้ที่อยู่ในภาวะอ้วนจะมีดัชนีมวลกายมากกว่า 29.9 kg/m^2 (Jamesและคณะ, 2001) จากการศึกษาพบว่าภาวะอ้วนมีผลทำให้เกิดความแตกต่างในการทำงานที่ผิดปรกติของระบบประสาทอัตโนมัติที่ควบคุมการทำงานของหัวใจ โดย HAและคณะ (2012) พบว่าภาวะอ้วนมีผลทำให้ระบบประสาทซิมพาเทติกมีการทำงานเพิ่มขึ้น ในขณะที่ระบบประสาทพาราซิมพาเทติกมีการทำงานลดลง แต่ Yakinciและคณะ (2000) พบว่าภาวะอ้วนมีผลทำให้ระบบประสาทพาราซิมพาเทติกมีการทำการลดลงอย่างเดียว ในขณะที่ GrewalและGupta (2011) เสนอว่าภาวะอ้วนมีผลทำให้เกิดการบกพร่องเฉพาะระบบประสาทซิมพาเทติกเท่านั้น

โรคไตเรื้อรังระยะสุดท้าย (end stage renal disease: ESRD) คือ ภาวะที่ไตไม่สามารถทำหน้าที่กำจัดของเสียและน้ำส่วนเกินได้อย่างเพียงพอจึงทำให้ผู้ป่วยต้องได้รับการบำบัดทดแทนไต (renal replacement therapy: RRT) ในปัจจุบันนอกจากวิธีการผ่าตัดเปลี่ยนไต (kidney transplantation: KT) และการฟอกเลือดด้วยเครื่องไตเทียม (hemodialysis: HD) แล้ว การฟอกไตทางหน้าท้องอย่างต่อเนื่อง (continuous ambulatory peritoneal dialysis: CAPD) ก็เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ได้รับความนิยม เนื่องจากระบบประกันสุขภาพแห่งชาติ (สปสช.) ของประเทศไทยให้ความคุ้มครองต่อค่าใช้จ่าย ดังนั้นจำนวนผู้ป่วยกลุ่มนี้จึงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม อัตราการเสียชีวิตของผู้ป่วยที่บำบัดด้วย CAPD ก็ยังคงอยู่ในระดับที่สูง ซึ่งสาเหตุหนึ่งที่พบบ่อยของการเสียชีวิตมักเกิดจากภาวะหัวใจเต้นผิดจังหวะ (SidhuและDellsperger, 2010) โดยอาจเกิดจากการทำงานของระบบประสาทอัตโนมัติที่ไปควบคุมการทำงานของหัวใจมีความผิดปรกติมากขึ้น (Chrapkoและคณะ, 2014) จากการศึกษาพบว่าผลของการบำบัดด้วย CAPD เป็นระยะเวลาที่ยาวนาน มีแนวโน้มทำให้ผู้ป่วยอ้วนขึ้นจากดัชนีมวลกาย (body mass index) และเปอร์เซ็นต์ไขมัน (percentage body fat) มีปริมาณเพิ่มขึ้นแปรผันตรงตามระยะเวลาของการบำบัด (Jagerและคณะ, 2001; Kramerและคณะ, 2006; Zoccali, 2009) โดยอาจเป็นผลจากระดับน้ำตาลเด็กซ์โตรสในเลือดที่เพิ่มสูงขึ้นจากการดูดซึมน้ำยาล้างไตผ่านทางผนังหน้าท้อง (Manjiและคณะ, 1990) จากที่กล่าวมาพบว่าผู้ป่วยที่บำบัดด้วย CAPD มีแนวโน้มที่จะเกิดภาวะอ้วนได้ง่าย อีกทั้งภาวะอ้วนและการบำบัดด้วย CAPD ต่างมีผลต่อการทำงานที่ผิดปรกติของระบบประสาทอัตโนมัติที่ควบคุมการทำงานของหัวใจเช่นเดียวกัน จึงมีความเป็นไปได้ว่าภาวะอ้วนอาจมีผลเสริมต่อความผิดปรกติของระบบประสาทอัตโนมัติที่ควบคุมการทำงานของหัวใจเพิ่มมากขึ้นในผู้ป่วยโรคไตเรื้อรังระยะสุดท้ายที่ได้รับการบำบัดด้วย CAPD อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีการศึกษาถึงผลของภาวะอ้วนในผู้ป่วยโรคไตเรื้อรังระยะ

สุดท้ายที่ได้รับการบำบัดทดแทนไตด้วยวิธี CAPD ต่อความบกพร่องของการทำงานของระบบประสาทอัตโนมัติที่ควบคุมหัวใจ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือศึกษาผลของภาวะอ้วนในผู้ป่วยโรคไตเรื้อรังระยะสุดท้ายที่ได้รับการบำบัดด้วยการฟอกไตทางหน้าท้องอย่างต่อเนื่องต่อการทำงานของระบบประสาทอัตโนมัติที่ควบคุมหัวใจ

วิธีการทดลอง

1. อาสาสมัคร

ในงานวิจัยนี้ศึกษาผู้ป่วยโรคไตเรื้อรังระยะสุดท้ายที่ได้รับการบำบัดด้วยการฟอกไตทางหน้าท้องอย่างต่อเนื่องจำนวน 53 คน เป็นชาย 28 คน และเป็นหญิง 25 คน จากโรงพยาบาลนพรัตนราชธานี โดยขั้นตอนต่าง ๆ ของการทดลองได้รับการพิจารณาโดยคณะกรรมการการทำวิจัยในมนุษย์ของโรงพยาบาลนพรัตนราชธานี (IRB/IEC reference number 5/2015) อาสาสมัครได้รับรู้ข้อมูลและขั้นตอนของการวิจัยและได้ลงลายมือชื่อยินยอมเข้าร่วมการศึกษา นอกจากนี้อาสาสมัครสามารถขอออกจากการศึกษาวิจัยได้ตลอดเวลาที่ต้องการ โดยเกณฑ์การคัดเลือกอาสาสมัครเข้าศึกษาในการทดลองนี้มีดังต่อไปนี้ 1) อาสาสมัครที่เป็นผู้ป่วยซึ่งได้รับการล้างไตทางหน้าท้องด้วยการใช้น้ำยาแบบสองถุงที่บรรจุด้วย 1.25 % เด็กซ์โตรสจำนวน 2 ลิตร (Baxter, ประเทศสหรัฐอเมริกา) เพื่อใช้สำหรับกระบวนการดึงน้ำส่วนเกินออกจากร่างกายหรือ ultrafiltration (UF) และได้รับการฟอกไต 4 รอบต่อวัน 2) อาสาสมัครที่เป็นผู้ป่วยที่มีค่าความพอเพียงของการล้างไต (dialysis adequacy index: Kt/V) มากกว่า 1.7 ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์ของ NKF-DOQI (national kidney foundation dialysis outcomes quality initiative) 3) อาสาสมัครที่เข้าร่วมต้องไม่มีภาวะของการติดเชื้อหรือการอักเสบของร่างกาย เช่นการเกิดการอักเสบของเยื่อบุช่องท้อง เป็นต้น ส่วนอาสาสมัครที่ถูกคัดออกจากการศึกษาในครั้งนี้ได้แก่ 1) อาสาสมัครที่เป็นผู้ป่วยที่มีประวัติภาวะความดันโลหิตสูงที่ควบคุมไม่ได้ (มีค่าความดันโลหิตที่มากกว่า 140/90 มมปรอท แบบไม่คงที่) ภาวะกล้ามเนื้อหัวใจตาย ภาวะโรคหัวใจ ภาวะหัวใจเต้นผิดจังหวะ ภาวะหัวใจเต้นก่อนเวลา (premature contraction) และภาวะ heart block เป็นต้น 2) อาสาสมัครที่เป็นผู้ป่วยซึ่งมีประวัติของการดื่มสุราและสูบบุหรี่อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ข้อมูลทางคลินิกต่าง ๆ ของผู้ป่วยที่ถูกบันทึก ได้แก่ อายุ เพศ และระยะเวลาของการฟอกไต เป็นต้น

การศึกษาครั้งนี้อาสาสมัครที่เข้าร่วมการศึกษาจะได้รับการตรวจวัดส่วนสูง น้ำหนัก และการวัดเส้นรอบเอว (waist circumference) แล้วจึงแบ่งกลุ่มด้วยดัชนีมวลกาย โดยแบ่งเป็น 1) กลุ่มอาสาสมัครซึ่งเป็นผู้ป่วยที่ฟอกไตทางหน้าท้องซึ่งมีดัชนีมวลกายปรกติ (CAPD normal: CN) จำนวน 32 คน (ชาย 18 คน หญิง 14 คน) และ 2) กลุ่มอาสาสมัครซึ่งเป็นผู้ป่วยที่ฟอกไตทางหน้าท้องซึ่งมีดัชนีมวลกายเพิ่มขึ้นมากกว่า 120 เปอร์เซ็นต์ของดัชนีมวลกายปรกติ (CAPD obese: CO) จำนวน 21 คน (ชาย 10 คน หญิง 11 คน) อาสาสมัครที่ได้รับการคัดเลือกแล้วทั้งหมดได้รับการตรวจวัดสัญญาณชีพ ได้แก่ อุณหภูมิกาย ชีพจร อัตราการหายใจ ความดันโลหิต การตรวจวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจแบบมาตรฐาน 12 ลีด จากนั้นอายุรแพทย์โรคหัวใจหรืออายุรแพทย์โรคไตจะเป็นผู้ประเมินความผิดปรกติของ

คลื่นไฟฟ้าหัวใจ หากพบความผิดปรกติ อาสาสมัครนั้นก็จะถูกตัดออกจากการศึกษา จากนั้นอาสาสมัครจะได้รับการตรวจเลือดเพื่อทำการวิเคราะห์ผลเลือดต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับโรคไตเรื้อรังระยะสุดท้ายและภาวะอ้วน

ในวันก่อนการทดลอง อาสาสมัครจะได้รับคำแนะนำให้งดยารับประทานภายหลังรับประทานยามื้อก่อนนอนเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จาก 20.00 – 8.00 น. เพื่อหลีกเลี่ยงผลของยาที่อาจมีผลกระทบต่อการทำงานของหัวใจ แต่อย่างไรก็ตาม การงดยาเป็นระยะเวลานานกว่านี้อาจส่งผลต่ออาสาสมัครได้ ดังนั้นหลังจากทำการเก็บข้อมูลเรียบร้อยแล้วอาสาสมัครจะได้รับคำแนะนำให้รับประทานยาตามปรกติทันที

2. การบันทึกคลื่นไฟฟ้าหัวใจ

การบันทึกสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจของอาสาสมัครทั้งสองกลุ่มถูกเก็บบันทึกในช่วงเช้า เวลาประมาณ 8.00 น ของวันที่ทำการทดลอง โดยเป็นวันที่อาสาสมัครสะดวกต่อการมาโรงพยาบาล ซึ่งได้จัดให้อาสาสมัครนั่งพักผ่อนในห้องพักที่เงียบสงบ และห้องถูกควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ประมาณ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 20 นาที จากนั้นอาสาสมัครจึงได้รับการวัดสัญญาณชีพด้วยเครื่อง vital sign monitor (Nihon Korden, ประเทศญี่ปุ่น) หลังจากทำการติดอิเล็กโทรดที่ตำแหน่งต่าง ๆ การวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจของอาสาสมัครได้ถูกบันทึกด้วยเครื่องวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ (Fukuda 800, ประเทศญี่ปุ่น) และถูกวิเคราะห์โดยแพทย์ หากพบความผิดปรกติอาสาสมัครต้องถูกตัดออกจากการทดลอง

3. การวัดการทำงานของระบบประสาทอัตโนมัติที่ควบคุมหัวใจ

ในการทดสอบประกอบด้วยสี่การทดสอบ ซึ่งอาสาสมัครได้รับการทดสอบในวันเดียวกัน โดยก่อนเริ่มการทดสอบในขั้นต่อไป อาสาสมัครจะได้รับการพักเป็นเวลาอย่างน้อย 10 นาที

3.1 วิธี orthostatic test อาสาสมัครได้รับการวัดความดันโลหิตหลังจากนอนราบในท่าที่สบาย เป็นเวลาประมาณ 15 นาที จากนั้นจึงทำการวัดความดันโลหิตผู้ป่วยอีกสามครั้งหลังจากที่อาสาสมัครลุกขึ้นยืน โดยวัดทันทีที่ลุกขึ้นยืน ที่สามนาที และที่ห้านาทีตามลำดับ ความดันขณะยืนทั้งสามครั้งจะถูกนำไปคำนวณหาค่าเฉลี่ย จากนั้นนำผลมาคำนวณหาผลต่างระหว่างค่าความดันโลหิตขณะหัวใจบีบตัว ขณะนอนราบกับขณะยืนเฉลี่ย (difference of systolic blood pressure between supine and standing position: DSBP) และผลต่างระหว่างค่าความดันโลหิตขณะหัวใจคลายตัว ขณะนอนราบกับขณะยืนเฉลี่ย (difference of diastolic blood pressure between supine and standing position: DDBP) ดังสมการที่ 1 และ 2 โดยวิธี orthostatic test เป็นการประเมินการทำงานของระบบประสาทซิมพาเทติก (Yakinciและคณะ, 2000)

$$\text{orthostatic test (DSBP)} = \text{SBP}_{\text{supine}} - \text{mean SBP}_{\text{standing}} \qquad \text{สมการที่ 1}$$

$$\text{orthostatic test (DDBP)} = \text{DBP}_{\text{supine}} - \text{mean DBP}_{\text{standing}} \qquad \text{สมการที่ 2}$$

3.2 วิธี valsalva ratio ทำการทดลองโดยการนำอิเล็กโทรดของเครื่องวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจ (Biopac system MP 36, ประเทศสหรัฐอเมริกา) ติดให้กับอาสาสมัครเพื่อทำการวัดลีด II โดยอิเล็กโทรดจะถูกติดที่บริเวณข้อมือขวา ที่บริเวณข้อเท้าซ้าย และที่ข้อเท้าขวาตามลำดับ หลังจากนั้นหนีบจมูกอาสาสมัครด้วย nose clip และให้อาสาสมัครทำการเป่าลมที่บริเวณปลายของ mouth piece เข้าสู่เครื่องวัดความดันแบบ aneroid manometer ให้ได้ระดับความดันที่ 40 มิลลิเมตรปรอท เป็นเวลานาน 10 วินาที ต่อมาให้อาสาสมัครหายใจเข้า-ออกตามปรกติ เป็นเวลา 30 วินาที คลื่นสัญญาณไฟฟ้าหัวใจที่บันทึกได้จะถูกนำไปวิเคราะห์ค่า valsalva ratio โดยวิเคราะห์จากอัตราส่วนระหว่าง R-R interval (ระยะจากคลื่นอาร์ถึงคลื่นอาร์ถัดไป) ที่มีค่ามากที่สุดหารด้วย R-R interval ที่มีค่าน้อยที่สุดในช่วง 30 วินาทีของการหายใจปรกติ ดังสมการที่ 3 โดยวิธี valsava ratio เป็นการประเมินการทำงานของระบบประสาทพาราซิมพาเทติก (Yakinciและคณะ, 2000)

$$\text{valsalva ratio} = \frac{R - R_{\text{max within 30s}}}{R - R_{\text{min within 30s}}} \qquad \text{สมการที่ 3}$$

3.3 วิธี heart rate responses to deep breathing ภายหลังจากการนั่งพักเป็นเวลาอย่างน้อย 5 นาที อาสาสมัครจะได้รับคำแนะนำให้หายใจเข้า-ออกแบบลึกสุด ด้วยอัตราการหายใจหกครั้งต่อนาทีในท่านั่ง ในขณะที่ทำการบันทึกคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่ความเร็ว 50 มิลลิเมตรต่อนาที จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์หาการตอบสนองของอัตราการเต้นของหัวใจต่อการหายใจเข้า- ออกแบบลึกสุด ด้วยค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างอัตราการเต้นของหัวใจสูงสุดกับอัตราการเต้นของหัวใจต่ำสุดในแต่ละรอบของการหายใจ ตามสมการที่ 4 โดยวิธี heart rate responses to deep breathing เป็นการประเมินการทำงานของระบบประสาทพาราซิมพาเทติก (Yakinciและคณะ, 2000)

$$\text{heart rate responses to deep breathing} = \text{mean of six [heart rate (max - min)]} \qquad \text{สมการที่ 4}$$

3.4 วิธี 30/15 ratio ภายหลังจากการนอนพักเป็นเวลา 15 นาที สัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจของอาสาสมัครที่ถูกบันทึกภายหลังจากเปลี่ยนจากท่านอนเป็นท่ายืน โดยคลื่นไฟฟ้าหัวใจขณะยืนจะถูกนำไปวิเคราะห์หาอัตราส่วนของระยะเวลาระหว่าง R-R interval ของอัตราการเต้นของหัวใจครั้งที่ 30 กับช่วงระยะเวลาระหว่าง R-R interval ของอัตราการเต้นของหัวใจครั้งที่ 15 ตามสมการที่ 5 โดยการทดสอบได้ทำสองครั้ง ผลการทดสอบครั้งที่มีค่า 30/15 ratio สูงสุดจะถูกบันทึกไว้ โดยวิธี 30/15 ratio เป็นการประเมินการทำงานของระบบประสาทพาราซิมพาเทติก (Yakinciและคณะ, 2000)

$$30/15\,\text{ratio} = \frac{(R - R)\,\text{interval}_{\text{at beat 30}}}{(R - R)\,\text{interval}_{\text{at beat 15}}} \qquad \text{สมการที่ 5}$$

4. การวิเคราะห์ทางสถิติ

ข้อมูลถูกแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย (mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation: SD) และถูกวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ การวิเคราะห์หาความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของตัวแปรต่าง ๆ ระหว่างสองกลุ่มใช้สถิติ Mann Whitney U test เนื่องจากข้อมูลไม่เป็นการแจกแจงแบบปรกติ (normal distribution) ในขณะที่การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ของการทดสอบการทำงานของระบบประสาทอัตโนมัติที่ควบคุมหัวใจกับตัวแปรต่าง ๆ ของภาวะอ้วน เช่นน้ำหนัก ดัชนีมวลกาย และความยาวเส้นรอบเอว เป็นต้น และตัวแปรต่างๆ ของการบำบัดด้วย CAPD ใช้สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson correlation coefficient) ที่ระดับนัยสำคัญ $p < 0.05$

ผลการทดลอง

คุณลักษณะและผลการตรวจต่าง ๆ ของอาสาสมัครได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 โดยตัวแปรของภาวะอ้วนได้แก่ น้ำหนักร่างกาย (body weight), ความยาวเส้นรอบเอว (waist circumference), body mass index, triglyceride, cholesterol, high density lipoprotein (HDL) และ low density lipoprotein (LDL) ตัวแปรของการบำบัดด้วยการฟอกไตทางหน้าท้องได้แก่ hematocrit (Hct), hemoglobin (Hb), albumin concentration, ค่าความพอเพียงของการฟอกไต (Kt/V) และ normalized protein nitrogen appearance (nPNA) และตัวแปรของสัญญาณชีพได้แก่ ความดันโลหิตขณะบีบตัว (systolic blood pressure: SBP), ความดันโลหิตขณะหัวใจคลายตัว (diastolic blood pressure: DBP), ความดันโลหิตของหลอดเลือดแดงเฉลี่ย (mean arterial blood pressure: mABP) และอัตราเต้นของหัวใจ (heart rate: HR) จากการศึกษาพบว่าน้ำหนักร่างกาย ความยาวเส้นรอบเอว และดัชนีมวลกาย ในกลุ่มอาสาสมัครที่มีภาวะอ้วนมีค่าสูงกว่ากลุ่มที่ไม่มีภาวะอ้วนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติดังนี้: body weight (kg) (CN; 57.44 ± 11.41 และ CO; 72.93 ± 10.57, $p = 0.000$), waist circumference (inch) (CN; 33.98 ± 4.11 และ CO; 40.29 ± 3.24, $p = 0.000$) และ body mass index (kg/m^2) (CN; 21.56 ± 2.75 และ CO; 28.97 ± 4.26, $p = 0.000$) แต่เมื่อเปรียบเทียบอายุ ส่วนสูง ค่า Kt/V, nPNA, cholesterol, LDL, hematocrit, hemoglobin, albumin, SBP, DBP, mABP และ HR ระหว่างกลุ่ม CN และกลุ่ม CO พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ แต่กลับพบว่า triglyceride ในกลุ่ม CO มีค่าสูงกว่ากลุ่ม CN (CO: 178.19 ± 111.66 และ CN: 138.28 ± 67.28, $p = 0.039$) ในทางตรงข้าม high density lipoprotein ในกลุ่ม CO มีค่าต่ำกว่าในกลุ่ม CN (CO: 41.86 ± 13.75 และ CN: 48.38 ± 14.80, $p = 0.047$)

ตารางที่ 1 แสดงคุณลักษณะและผลการตรวจทางคลินิกต่าง ๆ ของผู้ถูกทดลอง

Parameters	**CN (n = 32)**	**CO (n = 21)**
Age (years)	49.68 ± 12.09	52.76 ± 10.35
Gender (M/F)	18/14	10/11
Body Weight (Kg)	57.44 ± 11.41	72.93 ± 10.57***
Height (cm)	162.09 ± 19.68	159.82 ± 9.75
Waist circumference (inch)	33.98 ± 4.11	40.29 ± 3.24***
Body mass index (Kg/m^2)	21.56 ± 2.75	28.97 ± 4.26***
SBP (mmHg)	150.31 ± 25.42	155.76 ± 21.63
DBP (mmHg)	76.31 ± 13.53	79.19 ± 11.65
mABP (mmHg)	100.98 ± 13.25	104.71 ± 11.74
Heart rate (beats/min)	113.31 ± 15.25	117.47 ± 13.39
Kt/V	2.10 ± 0.62	2.30 ± 0.17
nPNA	1.11 ± 0.38	1.02 ± 0.05
Triglyceride (mg/dl)	138.28 ± 67.28	178.19 ± 111.66*
Cholesterol (mg/dl)	176.06 ± 50.56	176.90 ± 53.44
HDL (mg/dl)	48.38 ± 14.80	41.86 ± 13.75*
LDL (mg/dl)	115.88 ± 42.91	108.62 ± 36.36
Hct (%)	34.35 ± 7.96	30.90 ± 6.74
Hb (g/dl)	12.06 ± 5.24	10.20 ± 2.19
Albumin (g/dl)	3.48 ± 0.62	3.56 ± 0.63

ค่าถูกแสดงในรูปของ mean ± SD.

*, **, และ *** หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p< 0.05$, 0.01, และ 0.001 ตามลำดับ

จากตารางที่ 2 แสดงผลของการเปรียบเทียบตัวแปรของระบบประสาทอัตโนมัติที่ควบคุมการทำงานของหัวใจโดยพบว่า orthostatic test DSBP (difference of systolic blood pressure between supine and standing position: mmHg), orthostatic test DDBP (difference of diastolic blood pressure between supine and standing position: mmHg), valsava ratio, และ 30/15 ratio ของทั้งสองกลุ่มไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ผลของ heart rate responses to deep breathing (beats/min) พบว่ากลุ่ม CO มีค่าน้อยกว่ากลุ่ม CN อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (CO: 6.26 ± 5.74 และ CN: 8.95 ± 7.86, $p = 0.048$)

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบการทำงานของระบบประสาทอัตโนมัติที่ควบคุมหัวใจของผู้ถูกทดลอง

Test	CN (n = 32)	CO (n = 21)
orthostatic test DSBP (mmHg)	8.92 ± 4.93	10.60 ± 5.87
orthostatic test DDBP (mmHg)	6.41 ± 4.39	9.19 ± 5.79
valsava ratio	1.22 ± 0.37	1.19 ± 0.28
heart rate responses to deep breathing (beats/min)	8.95 ± 7.86	6.26 ± 5.74*
30/15 ratio	1.22 ± 0.11	1.19 ± 0.13

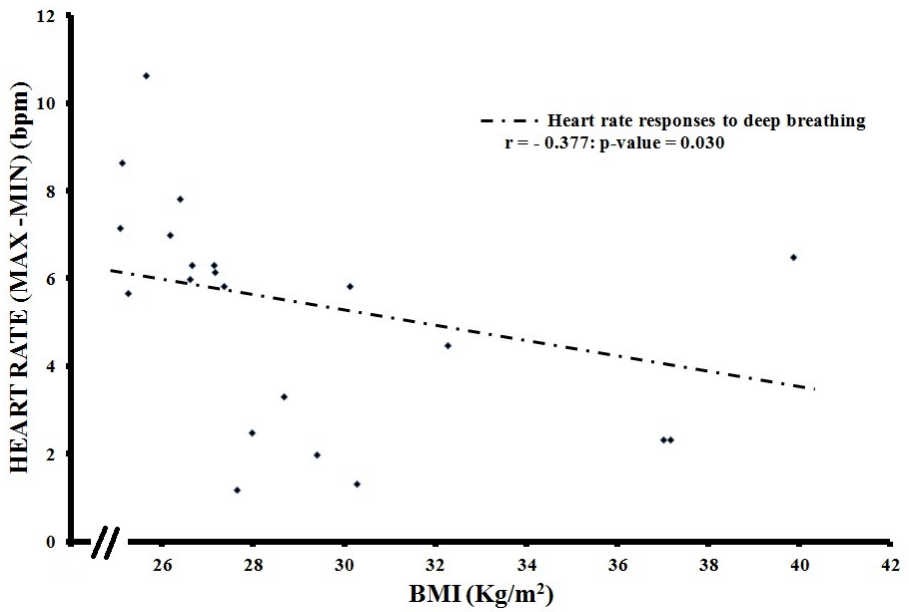
DSBP = difference of systolic blood pressure between supine and standing position (ผลต่างของความดันโลหิตขณะหัวใจบีบตัวระหว่างท่านอนและท่ายืน)

DDBP = difference of diastolic blood pressure between supine and standing position (ผลต่างของความดันโลหิตขณะหัวใจคลายตัวระหว่างท่านอนและท่ายืน)

ค่าถูกแสดงในรูปของ mean± SD

* หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$

เมื่อทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรของระบบประสาทอัตโนมัติที่ควบคุมการทำงานของหัวใจกับตัวแปรต่าง ๆ ของภาวะอ้วนและกับตัวแปรต่าง ๆ ของการบำบัดด้วย CAPD พบว่ามีเพียง heart rate responses to deep breathing ในกลุ่มผู้ป่วยที่ได้รับการบำบัดด้วย CAPD ที่มีภาวะอ้วนหรือกลุ่ม CO มีความสัมพันธ์แบบผกผันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับดัชนีมวลกาย ($r = -0.377$; $p = 0.030$) ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1. ความสัมพันธ์ระหว่าง heart rate responses to deep breathing กับดัชนีมวลกายของผู้ที่บำบัดด้วยการฟอกไตทางหน้าท้องอย่างต่อเนื่องที่มีภาวะอ้วน (CO)

วิจารณ์ผลการทดลอง

ในการศึกษาครั้งนี้ในกลุ่มอาสาสมัครที่มีภาวะอ้วนมีค่าของดัชนีมวลกาย ความยาวเส้นรอบเอวและน้ำหนักร่างกายที่สูงกว่ากลุ่มอาสาสมัครที่มีน้ำหนักปรกติ โดยพบว่าระดับของ triglyceride ในกลุ่ม CO มีค่าสูงกว่ากลุ่ม CN แต่ในทางกลับกัน HDL ในกลุ่ม CO กลับมีค่าต่ำกว่ากลุ่ม CN ซึ่งผลการศึกษานี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Paschoalและคณะ (2009) พบว่าในผู้ที่มีภาวะอ้วนจะมีระดับของ triglyceride สูงกว่าและ HDL ต่ำกว่าผู้ที่ไม่มีภาวะอ้วนอย่างมีนัยสำคัญโดยที่ไม่พบความแตกต่างของระดับ cholesterol ระหว่างทั้งสองกลุ่มเช่นเดียวกับการศึกษาในครั้งนี้ ซึ่งการมีระดับของไขมันในเลือดสูงสามารถส่งผลต่อการเพิ่มการสะสมของไขมันไว้ตามส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย ทำให้มีน้ำหนัก ดัชนีมวลกาย และความยาวเส้นรอบเอวที่เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้การมีไขมันในเลือดสูงสามารถนำไปสู่การเกิดภาวะ atherosclerosis (Paschoalและคณะ, 2009) ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการทำงานที่ผิดปรกติของระบบประสาทอัตโนมัติผ่านทางการทำงานที่บกพร่องของ baroreceptor reflex activity ยิ่งไปกว่านั้นจากการศึกษาของ Guptaและคณะ (2016) พบว่าผู้ป่วย CAPD จะมีอุบัติการณ์ของการเกิด arterial stiffness เพิ่มมากขึ้น โดยมีความสัมพันธ์กับการลดลงของ baroreceptor reflex activity และการทำงานที่ลดลงของระบบประสาทอัตโนมัติ เมื่อพิจารณาผลของภาวะอ้วนต่อค่าของความดันโลหิตและอัตราการเต้นของหัวใจกลับไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างกลุ่มที่มีภาวะอ้วนและไม่มีภาวะอ้วน แต่อย่างไรก็ตาม อาสาสมัครทั้งสองกลุ่มนี้กลับมีระดับของความดันโลหิตขณะหัวใจบีบตัวและอัตราการเต้นของหัวใจขณะพักที่สูงมากกว่าค่าปรกติ (ความดันโลหิตปรกติคือ 120/80 มมปรอท และอัตราการเต้นของหัวใจปรกติคือ 60-100 ครั้งต่อนาที) ซึ่งอาจเป็นผลจากการมีโรคไตเรื้อรังระยะสุดท้ายทำให้มีการเพิ่มการหลั่งของฮอร์โมน renin ที่สามารถกระตุ้นการทำงานของระบบ renin angiotensin aldosterone และอาจเป็นผลจากภาวะ sympathetic hyperactivity ที่มีการสร้างและหลั่งเพิ่มขึ้นของสารสื่อประสาท catecholamine ทำให้มีผลต่อการเพิ่มความแรงและความเร็วของการบีบตัวของหัวใจ และเพิ่มการหดตัวของหลอดเลือด (Bianchi, 2000) นอกจากนี้ได้มีการเสนอว่า uremic toxin ที่พบในผู้ป่วยเหล่านี้มีผลยับยั้งการทำงานของทั้ง endothelial และ neuronal nitric oxide synthase ทำให้เกิดการหดตัวของหลอดเลือดเพิ่มสูงขึ้นและอาจนำไปสู่การเกิดภาวะบกพร่องของระบบประสาทอัตโนมัติ (Neumannและคณะ, 2004; Flanigan, 2007)

งานวิจัยครั้งนี้ใช้วิธีการประเมินระบบประสาทอัตโนมัติที่ควบคุมการทำงานของหัวใจแบบชนิดไม่รุกล้ำประกอบด้วย valsava ratio, heart rate responses to deep breathing และ 30/15 ratio ถูกนำมาใช้ในการประเมินการทำงานของระบบประสาทพาราซิมพาเทติก (parasympathetic) ขณะที่การทดสอบด้วยวิธี orthostatic test เป็นการประเมินการทำงานของระบบประสาทซิมพาเทติก (sympathetic) (Yakinciและคณะ, 2000) จากการศึกษาของ Jassal และคณะ (1998) ได้พบว่าในผู้ป่วย CAPD มีการลดลงของ heart rate responses to deep breathing มากกว่าคนปรกติ ยิ่งไปกว่านั้นยังได้เสนอว่าวิธีการนี้สามารถใช้เป็นดัชนีในการบอกถึงภาวะบกพร่องของระบบประสาทอัตโนมัติที่มาควบคุมการทำงานของหัวใจ (cardiac autonomic nervous system) ได้เป็นอย่างดี จากผลการทดลองนี้พบว่าผลการประเมินการทำงานของระบบประสาทซิมพาเทติก โดยผลของการทดสอบด้วย orthostatic test ไม่พบความ

แตกต่างระหว่างกลุ่ม CN และ CO แสดงว่าภาวะอ้วนไม่มีการเสริมภาวะบกพร่องของระบบประสาทซิมพาเทติกในผู้ป่วย CAPD แต่กลับพบว่า heart rate responses to deep breathing ของกลุ่ม CO มีค่าน้อยกว่ากลุ่ม CN นั้นแสดงให้เห็นว่าในผู้ป่วยที่มีภาวะอ้วนจะมีผลเสริมต่อการเกิดภาวะ parasympathetic hypoactivity (การทำงานที่ลดลงของระบบพาราซิมพาเทติก) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Birchและคณะ (2012) กับ HAและคณะ (2012) โดยพบว่าภาวะอ้วนจะมีผลทำให้เกิดการทำงานที่ลดลงของตัวแปรของพาราซิมพาเทติกที่ถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนของอัตราการเต้นของหัวใจ (heart rate variability) ทั้งในผู้ใหญ่และในเด็ก ได้แก่ HF (high frequency) power, RMSSD (root-mean square of differences between adjacent normal R-R intervals in a time interval) และ pNN50 (percentage of adjacent R-R intervals with a difference of duration greater than 50 ms) กลไกที่เสนอไว้คือการที่มีไขมันในปริมาณสูงมีผลต่อการลดการตอบสนองของตัวรับรู้ (receptor) ของระบบประสาทอัตโนมัติ นอกจากนี้ ภาวะอ้วนยังอาจมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของ sympathetic outflow (Tentolourisและคณะ, 2006) โดยการเพิ่มการสร้างและหลั่งของ norepinephrine (Karasonและคณะ, 1999) แต่อย่างไรก็ตามในการศึกษาครั้งนี้กลับไม่พบความแตกต่างของการทำงานของระบบประสาทซิมพาเทติกจากการประเมินด้วย orthostatic test ระหว่างกลุ่ม CO และ CN ดังนั้นผลจากงานวิจัยนี้สามารถกล่าวได้ว่าในผู้ป่วยโรคไตเรื้อรังระยะสุดท้ายที่บำบัดด้วย CAPD จะมีการทำงานที่เพิ่มขึ้นของระบบประสาทซิมพาเทติก แต่หากในผู้ป่วยกลุ่มนี้มีภาวะอ้วนร่วมด้วย จะมีผลทำให้มีการทำงานที่ลดลงของระบบประสาทพาราซิมพาเทติก โดยผลที่พบว่า heart rate responses to deep breathing มีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับค่าดัชนีมวลกาย สามารถนำมาช่วยในการยืนยันสมมติฐานในครั้งนี้ได้ จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า ถึงแม้ว่าภาวะอ้วนอาจไม่ใช่สาเหตุหลัก (เนื่องจากค่า r = -0.377) แต่ภาวะอ้วนก็มีแนวโน้มเสริมการเกิดภาวะบกพร่องของระบบประสาทพาราซิมพาเทติกที่ควบคุมหัวใจ (cardiac parasympathetic system) ดังนั้นประโยชน์ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้คือ เมื่อมีการปรับเปลี่ยนขนาดและชนิดของยาในกลุ่มที่มีผลต่อระบบประสาทอัตโนมัติ โดยเฉพาะระบบประสาทพาราซิมพาเทติก ควรต้องมีการเฝ้าระวังด้วยการติดตามระดับของความดันโลหิตและอัตราการเต้นของหัวใจอย่างใกล้ชิดมากกว่าผู้ป่วยที่ไม่มีภาวะอ้วน เพื่อป้องกันความผิดปรกติของความดันโลหิตและอัตราการเต้นของหัวใจที่อาจเกิดขึ้นได้ แต่อย่างไรก็ตามในการศึกษาครั้งนี้มีข้อจำกัดคือในกลุ่มอาสาสมัครที่มีภาวะอ้วนที่ทำการคัดเลือกจากค่าดัชนีมวลกายที่มากกว่า 120 เปอร์เซ็นต์ของดัชนีมวลกายปรกติ (Yakinciและคณะ, 2000) ทำให้กลุ่มอาสาสมัครบางส่วนมีค่าดัชนีมวลกายอยู่ในช่วงที่มีน้ำหนักเกิน

สรุปผลการทดลอง

ในผู้ป่วยโรคไตเรื้อรังระยะสุดท้ายที่ได้รับการบำบัดด้วยการฟอกไตทางหน้าท้องอย่างต่อเนื่องมีการเพิ่มขึ้นของระดับความดันโลหิตขณะหัวใจบีบตัวและอัตราการเต้นของหัวใจที่เกิดจากการทำงานที่เพิ่มขึ้นของระบบประสาทซิมพาเทติกที่ควบคุมหัวใจ ในขณะที่ภาวะอ้วนไม่มีผลต่อภาวะดังกล่าว แต่กลับพบว่าภาวะอ้วนใน

ผู้ป่วยโรคไตเรื้อรังระยะสุดท้ายที่ได้รับการบำบัดด้วยการฟอกไตทางหน้าท้องอย่างต่อเนื่องมีผลเสริมต่อการทำงานที่ลดลงของระบบประสาทพาราซิมพาเทติกที่ควบคุมหัวใจ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ประจำปีงบประมาณ 2559

เอกสารอ้างอิง

Bianchi G., (2000) Hypertension in chronic renal failure and end-stage renal disease patients treated with haemodialysis or peritoneal dialysis. Nephrol. Dial. Transplant., 15 (5): 105-110.

Birch S.L., Duncan M.J. and Franklin C., (2012) Overweight and reduced heart rate variability in British children: an exploratory study. Prev. Med., 55: 430-432.

Chrapko B., Grzebalsaka A., Nocun A., Ksiazek A. and Drop A., (2014) Cardiac sympathetic hyperactivity in chronic kidney disease — a comparison between haemodialysis and peritoneal dialysis patients. Nucl. Med. Rev., 17(2): 75-82.

Flanigan M.J., (2007) Vasopressin: A look at dialysis hypertension and autonomic dysfunction. Kidney Int., 71: 285-287.

Grewal S. and Gupta V., (2011) Effect of obesity on autonomic nervous system. Int. J. Cur. Bio. Med. Sci., 1(2): 15-18.

Gupta A., Jain G., Kaur M., Jaryal A.K., Deepak K.K. et al., (2016) Association of impaired baroreflex sensitivity and increased arterial stiffness in peritoneal dialysis patients. Clin. Exp. Nephrol., 20(20): 302-308.

HA C., Murthy N. and K B., (2012) Comparative study of heart rate variability in normal and obese males. Int. J. Biol. Med. Res., 3(2): 1621-1623.

Jame P.T., Leach R., Kalamara E. and Shayeghi M., (2001) The worldwide obesity epidermic. Obese Res., 9(4): 228s-233s.

Jager K.J., Merkus M.P., Huisman R.M., Boeschoten E.W., Dekker F.W. et al., (2001) Nutritional status over time in hemodialysis and peritoneal dialysis. J. Am. Soc. Nephrol., 12: 1272-1279.

Jassal S.V., Allen J.A., Douglas J.F. and Stout R.W., (1998) Autonomic function in patients on continuous ambulatory peritoneal dialysis. Perit. Dial. Int., 18: 46-51.

Karason K., Molgaad H., Wikstrand J. and Sjostrom L., (1999) Heart rate variability in obesity and the effect of weight loss. Am. J. Cardiol., 83: 1242-1247.

Kramer H.J., Saranathan A., Luke A. and Durazo-Arvizu R.A., (2006) Increasing body mass index and obesity in the incident ESRD population. J. Am. Soc. Nephol., 17: 1453-1459.

Manji S., Shikora S., McMahon M., Blackburn G.L. and Bistrian B.R., (1990) Peritoneal dialysis for acute renal failure: overfeeding resulting from dextrose absorbed during dialysis. Crit. Care. Med., 18: 29-31.

Neumann J., Ligtenberg G., Klein I.I., Koomans H.A. and Ankestun P.J., (2004) Sympathetic hyperactivity in chronic kidney disease: Pathogenesis, clinical relevance, and treatment. Kidney Int., 65: 1568-76.

Olefsky J.M., (1994) "Obesity", pp. 446-452, In: Isselbacher K.J., Martin J.B., Braunwald E., Fauci A.S., Wilson J.D. and Kasper D.L. (Eds), Harrison's principles of internal medicine, McGraw-Hill Inc, New York.

Paschoal M.A., Trevizan P.F. and Scodeler N.F., (2009) Heart rate variablilty, blood lipids and physical capacity of obese and non-obese children. Arq. Bras. Cadiol., 93(3): 223-229.

Sidhu M.S. and Dellsperger K.C., (2010) Cardiovascular problems in dialysis patients: Impact on survival. Adv. Perit. Dial., 26: 47-52.

Tentolouris N., Liatis S. and Katsilambros N., (2006) Sympathetic system activation in obesity and metabolic syndrome. Ann. N. Y. Acad. Sci., 1083: 129-152.

Yakinci C., Mungen B., Karabiber H., Tayfun M. and Everekliogluc C., (2000) Autonomic nervous system functions in obese children. Brain Dev., 22: 151-153.

Zoccali C., (2009) The obesity epidemic in ESRD: from wasting to waist?. Nephrol. Dial. Trasplant., 24: 376-380.

The Journal of Applied Science **Vol. 15 No. 2: 103-119 [2016]**
วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ doi:10.14416/j.appsci.2016.12.001
ISSN 1513-7805 Printed in Thailand

Academic Article

บทบาทของ Verrucomicrobia ในลำไส้ปลวกชั้นต่ำ

Roles of Verrucomicrobia in lower termite hindgut

จันทิยา อิสณพงษ์

Jantiya Isanapong

ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร อาหาร และสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

Department of Agro-Industrial, Food and Environmental Technology, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, 10800

E-mail: jantiya.i@sci.kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

ปลวกมีบทบาทสำคัญทางนิเวศวิทยา โดยทำหน้าที่ย่อยสลายอินทรีย์วัตถุที่พบในเนื้อไม้และสารที่ย่อยสลายได้ยาก เช่น ลิกโนเซลลูโลส (lignocellulose) ที่พบในผนังเซลล์พืชให้กลายเป็นสารประกอบคาร์บอนกลับคืนสู่สิ่งแวดล้อม โดยทั่วไประบบย่อยอาหารของปลวกชั้นต่ำประกอบด้วยลำไส้ส่วนหน้า ส่วนกลาง และส่วนหลังที่ขยายออกเป็นกระเปาะ (dilated hindgut) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีจุลินทรีย์หลากหลายชนิดอาศัยอยู่ โดยในของเหลว 1 ไมโครลิตร สามารถพบจุลินทรีย์ได้ทั้ง 3 โดเมน (domain) คือ ยูคาร์ยา อาร์เคีย และแบคทีเรีย โดยจุลินทรีย์เหล่านี้จะหลั่งเอนไซม์ในกลุ่มเซลลูเลสและเฮมิเซลลูเลสเพื่อย่อยสลายลิกโนเซลลูโลสให้เป็นแอซีเทต (acetate) ซึ่งเป็นสารเมแทบอไลต์หลักที่ปลวกสามารถนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงาน นอกจากนี้จุลินทรีย์ยังมีบทบาทสำคัญในเมแทบอลิซึมของไนโตรเจนโดยทำการตรึงไนโตรเจนให้แก่ปลวก เนื่องจากในเนื้อไม้ซึ่งเป็นอาหารของปลวกนั้นแทบจะไม่มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบ รวมทั้งช่วยควบคุมความเข้มข้นของออกซิเจนภายในกระเปาะหลังให้มีสภาวะแบบไร้ออกซิเจนที่บริเวณกลางกระเปาะ และมีความเข้มข้นในระดับต่ำ (microoxic) ที่ขอบกระเปาะ จากการศึกษาจีโนม (genome) mRNA และโปรตีนของแบคทีเรียในไฟลัม Verrucomicrobia หลายสายพันธุ์ที่คัดแยกมาจากลำไส้ส่วนหลังของปลวก *Reticulitermes flavipes* พบว่า แบคทีเรียกลุ่มนี้มีศักยภาพในการย่อยสลายลิกโนเซลลูโลสโดยตรวจพบจีน (gene) ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายลิกโนเซลลูโลส เช่น xylanase, acetyl xylan esterase, cellulase (glycoside hydrolase family 5) เป็นต้น รวมทั้งตรวจพบจีนที่เกี่ยวข้องกับการตรึงไนโตรเจน (*nif*) และจีนที่ช่วยกำจัดออกซิเจน

ที่แพร่เข้าไปในลำไส้ปลวกให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมคือ *cbb3*-type cytochrome oxidase ซึ่งแสดงถึงบทบาทของแบคทีเรียกลุ่มนี้ในการช่วยให้ปฏิกิริยาชีวเคมีต่าง ๆ และสังคมชีวิตของลำไส้ปลวกสามารถดำเนินต่อไปได้

คำสำคัญ: ปลวก, ลำไส้ส่วนหลังของปลวก, ลิกโนเซลลูโลส, Verrucomicrobia*, Diplosphaera colotermitum*

Abstract

Termites play an important ecological role in degrading organic matters and recalcitrant compounds like lignocellulose in wood materials and releasing the carbon compounds back to the environment. In general, the digestive tract of lower termites consists of the foregut, midgut and dilated hindgut. The dilated hindgut composes of abundant and diverse microorganisms covering 3 domains of life which are Eukarya, Archaea and Bacteria. These microbes secrete cellulase and hemicellulase enzymes to degrade lignocellulosic materials into acetate. Then, acetate can be further absorbed by termites as their energy source. Moreover, microbes play an essential role in the nitrogen metabolism by providing nitrogen for the termites because termite's diet contains no nitrogen content. Microbes can also help maintain anoxic condition at the gut core and microoxic concentrations at the gut periphery. Studies of genome sequences, mRNA and proteins in several strains of bacteria in the phylum "Verrucomicrobia" isolated from the hindgut of termites *Reticulitermes flavipes* reveal that the bacteria have a potential role in degrading lignocellulose because of the presence of several lignocellulose genes, such as xylanase, acetyl xylan esterase, cellulase (glycoside hydrolase family 5). Moreover, the availability of nitrogen fixing genes (*nif*) indicates a potential role in fixing nitrogen for the termite. Besides, the presence of *cbb3*-type cytochrome oxidase, an enzyme that has high affinity to oxygen, reveals a vital role of the bacterial strains in controlling oxygen level in the hindgut in order to sustain biochemical reactions and microbial community living in the hindgut.

Keywords: termite, termite hindgut, lignocellulose, Verrucomicrobia*, Diplosphaera colotermitum*

บทนำ

ปลวก (termites) จัดเป็นแมลงชนิดหนึ่งที่มีความเป็นอยู่แบบสัตว์สังคมคล้ายกับผึ้งหรือมด คือ ประชากรประกอบด้วยวรรณะ (castes) ต่าง ๆ ได้แก่ วรรณะสืบพันธุ์ (reproductive termites) วรรณะกรรมกร (workers) และวรรณะทหาร (soldiers) ปลวกมักสร้างรังอยู่ในที่มืดและอับชื้น เช่น อาศัยอยู่ในเนื้อไม้ ใต้ดิน หรืออาศัยอยู่ตามจอมปลวก เป็นต้น ปลวกแต่ละชนิดจะกินอาหารแตกต่างกันไป โดยทั่วไปแหล่งอาหารของปลวกแบ่งเป็น 4 ประเภท

ได้แก่ ไม้ ดินและฮิวมัส (humus) ใบไม้ และไลเคน (จารุณีและขวัญชัย, 2551) เป็นที่ทราบกันดีว่าปลวกสามารถทำให้เกิดความเสียหายทางเศรษฐกิจในหลายด้าน เช่น กัดกินวัสดุอุปกรณ์และอาคารบ้านเรือนที่สร้างจากไม้ กัดกินกล้าไม้ รากพืชผลทางการเกษตร หรือไม้ยืนต้นในป่า เป็นต้น อย่างไรก็ตาม หากไม่นับความเสียหายทางเศรษฐกิจดังกล่าวแล้ว ในแง่นิเวศวิทยาสามารถกล่าวได้ว่า ปลวกมีบทบาทสำคัญในวัฏจักรคาร์บอน (carbon cycle) โดยทำหน้าที่ย่อยสลายอินทรียวัตถุ หรือสารประกอบคาร์บอนที่พบในเนื้อไม้ให้กลายเป็นฮิวมัสหรือธาตุอาหารในดิน รวมทั้งปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กลับคืนสู่สิ่งแวดล้อม

ลักษณะพิเศษที่ทำให้ปลวกได้รับความสนใจในการศึกษาวิจัยคือ ระบบย่อยอาหารของปลวกสามารถย่อยสลายสารที่ย่อยสลายได้ยาก เช่น ลิกโนเซลลูโลสที่พบในเนื้อไม้หรือเศษวัสดุเหลือทิ้งจากพืช ลิกโนเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบหลักของผนังเซลล์ ประกอบด้วยเซลลูโลส (20-50%) เฮมิเซลลูโลส (15-35%) และลิกนิน (18-35%) (Niและ Tokuda, 2013) โครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลสเป็นฮอมอพอลิเมอร์ (homopolymer) ประกอบด้วยมอนอเมอร์ของน้ำตาลเพียงชนิดเดียวคือ น้ำตาลกลูโคสเชื่อมต่อกันเป็นสายยาวด้วยพันธะบีตาไกลโคซิดิก (β-1,4 glycosidic linkage) ส่วนเฮมิเซลลูโลสหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ไซแลน (xylan) มีลักษณะเป็นเฮเทอโรพอลิเมอร์ (heteropolymer) ประกอบด้วยน้ำตาลหลากหลายชนิด ส่วนใหญ่เป็นน้ำตาลที่มีคาร์บอนห้าอะตอม เช่น ไซโลส อะราบิโนส เป็นต้น เกาะกับหมู่โซ่ข้าง เช่น acetyl, arabinofuranosyl, และ 4-O-methyl glucuronyl เป็นต้น (Blumและคณะ, 1999) ทั้งนี้ ปลวกจะใช้คาร์บอนในเนื้อไม้เป็นแหล่งอาหารและพลังงานในการดำรงชีวิต อย่างไรก็ตาม ปลวกจะไม่สามารถย่อยสลายลิกโนเซลลูโลสในเนื้อไม้ได้เลย หากปราศจากกลุ่มของจุลินทรีย์หลากหลายชนิดที่อาศัยอยู่ในลำไส้ปลวก

ความสัมพันธ์ระหว่างปลวกและจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในลำไส้ปลวก มีความสัมพันธ์แบบภาวะพึ่งพากัน (mutualism) คือ สิ่งมีชีวิตทั้งสองชนิดได้ประโยชน์จากการอาศัยอยู่ร่วมกัน ไม่สามารถแยกกันดำรงชีวิตได้ โดยปลวกทำหน้าที่ย่อยสลายไม้ให้เป็นชิ้นเล็กๆ เมื่อเศษไม้เหล่านี้เคลื่อนไปที่ลำไส้ จุลินทรีย์ที่อาศัยในลำไส้ปลวกจะทำหน้าที่ย่อยสลายเซลลูโลสให้กลายเป็นแอซีเทต (Nakashimaและคณะ, 2002) ซึ่งเป็นสารเมแทบอไลต์หลักที่ปลวกสามารถนำไปใช้ในการเติบโตและดำรงชีวิต ในขณะเดียวกันจุลินทรีย์ก็ได้รับประโยชน์จากสารอาหารหรือเศษไม้ที่ปลวกกินเข้าไป นอกจากบทบาทหน้าที่ในการย่อยสลายลิกโนเซลลูโลสแล้ว จุลินทรีย์ยังมีบทบาทสำคัญในเมแทบอลิซึมของไนโตรเจน เนื่องจากในเนื้อไม้ซึ่งเป็นอาหารของปลวกนั้น แทบจะไม่มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบ ดังนั้นปลวกสามารถได้รับไนโตรเจนจากจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ตรึงแก๊สไนโตรเจนจากอากาศหรือหมุนเวียนไนโตรเจนจากของเสีย เช่น กรดยูริก รวมทั้งบทบาทของจุลินทรีย์ในการกำจัดออกซิเจนที่แพร่เข้าไปในลำไส้ปลวกให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม เพื่อให้ปฏิกิริยาต่างๆ ทั้งที่ใช้และไม่ใช้ออกซิเจนสามารถดำเนินต่อไปได้ ปัจจุบันได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับจุลินทรีย์ที่อาศัยในลำไส้ปลวกมากขึ้น เนื่องจากเป็นกลุ่มของจุลินทรีย์ที่สามารถผลิตเอนไซม์เพื่อย่อยสลายเซลลูโลส ซึ่งอาจเป็นประโยชน์ในการคัดแยกจุลินทรีย์มาใช้ในการย่อยสลายเซลลูโลสเพื่อใช้ในกระบวนการหมัก

ให้ได้น้ำตาลหรือเอทานอล หรือแยกบริสุทธิ์เอนไซม์เซลลูเลส ซึ่งอาจนำมาพัฒนาเพื่อใช้ประโยชน์ในด้านเกษตรกรรม อุตสาหกรรมหรือใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

ลักษณะของลำไส้ปลวกชั้นต่ำ (lower termites)

ปลวกมีจำนวนทั้งหมดประมาณ 2,600 สปีชีส์ (Eggleton, 2010) สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทหลักคือ ปลวกชั้นต่ำ (lower termites) และปลวกชั้นสูง (higher termites) โดยจากปลวกจำนวนทั้งหมด 7 วงศ์ (family) จัดเป็นปลวกชั้นต่ำ 6 วงศ์ ได้แก่ Mastotermitidae, Hodotermitidae, Kalotermitidae, Rhinotermitidae, Serritermitidae และ Termopsidae ส่วนปลวกชั้นสูงได้แก่ Termitidae (LoและEggleton, 2010) สิ่งที่ใช้จำแนกปลวกชั้นต่ำและปลวกชั้นสูงคือ ในกระเปาะหลังของปลวกชั้นต่ำจะมีโพรโทซัวกลุ่มที่มีแฟลเจลลัม (flagellated protist) เช่น Oxymonads และ Parabasalids แต่ในปลวกชั้นสูงจะไม่พบโพรโทซัวดังกล่าว (LoและEggleton, 2010) โพรโทซัวกลุ่มนี้มีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายเซลลูโลสที่ปลวกกินเข้าไป โดยในกระบวนการย่อยสลายเซลลูโลสนั้นอาศัยเอนไซม์ทั้งจากตัวของปลวกเองซึ่งเป็นเอนไซม์ในกลุ่มเอนโดเซลลูเลส (endocellulase) และเอนไซม์ที่หลั่งจากกลุ่มของจุลินทรีย์ที่อาศัยในลำไส้ส่วนหลังของปลวก (Brune, 2014) โดยเอนไซม์ที่สามารถย่อยส่วนประกอบของคาร์โบไฮเดรต เช่น เซลลูเลสและเฮมิเซลลูเลส เป็นต้น จัดอยู่ในกลุ่มไกลโคไซด์ไฮโดรเลส (glycoside hydrolase, GH) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่สามารถไฮโดรไลซ์ (hydrolyse) พันธะไกลโคซิดิก (glycosidic bond) ในโครงสร้างของคาร์โบไฮเดรตได้ เอนไซม์กลุ่มนี้แบ่งเป็นหลายแฟมิลี่ (family) ดังนั้น จึงเรียกชื่อเอนไซม์แต่ละชนิดเป็น glycoside hydrolase family (GHF) โดยทั่วไประบบย่อยอาหารของปลวกชั้นต่ำมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนเท่าปลวกชั้นสูง สามารถแบ่งระบบย่อยอาหารของปลวกชั้นต่ำได้เป็น 2 ส่วนหลัก คือ

1) ลำไส้ส่วนหน้าและส่วนกลาง (foregut and midgut) เป็นบริเวณที่มีการย่อยสลายเศษไม้ที่ถูกบดให้มีขนาดเล็กประมาณ 20 ถึง 50 ไมโครเมตร (Yoshimuraและคณะ, 1996) เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการย่อยสลาย ซึ่งการย่อยสลายเซลลูโลสในบริเวณนี้อาศัยเอนไซม์เอนโดเซลลูเลสที่หลั่งมาจากต่อมน้ำลาย (salivary gland) และลำไส้ส่วนกลางของปลวกเอง เช่น endo-β-1,4-glucanase (endoglucanase, EG) และ β-glucosidase เป็นต้น อย่างไรก็ตามการย่อยสลายในลำไส้ส่วนนี้จะเกิดขึ้นเฉพาะในบริเวณอสัณฐาน (amorphous region) ของเซลลูโลส จึงยังไม่เกิดการย่อยสลายที่สมบูรณ์

2) ลำไส้ส่วนหลังซึ่งขยายออกเป็นกระเปาะ (dilated hindgut) มีความยาวประมาณ 4-5 มิลลิเมตร (Ohkuma, 2008) การที่ลำไส้ส่วนหลังมีการขยายออกเป็นกระเปาะ ทำให้เซลลูโลสมีระยะเวลาที่อยู่ในลำไส้นานขึ้น ส่งผลให้การย่อยสลายเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์และปลวกสามารถดูดซึมสารอาหารไปใช้ได้จากบริเวณนี้ ทั้งนี้ เป็นที่ทราบกันดีว่า จุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในลำไส้ส่วนหลังทำหน้าที่ในการย่อยสลายเซลลูโลส Todakaและคณะ (2007) ได้ศึกษายีน (gene) ของโพรโทซัวที่คัดแยกมาจากลำไส้ส่วนหลังของปลวกชั้นต่ำ *Reticulitermes speratus* พบว่า

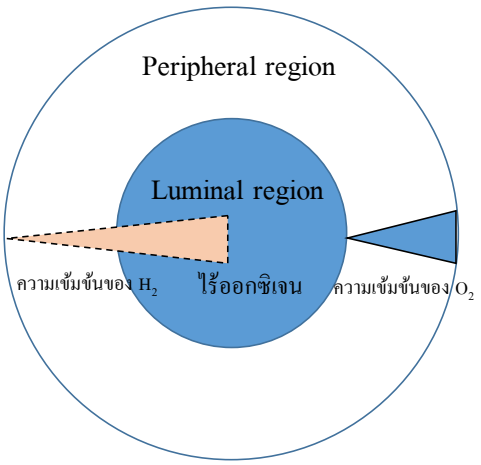
โพรโทซัวมีจีนที่เกี่ยวข้องกับการสร้างเอนไซม์ที่ย่อยสลายเซลลูโลส เช่น GHF5, 7, 45, β-glucosidase และเอนไซม์เฮมิเซลลูเลสและไซแลนเนสหลายชนิด เช่น xylanases (GHF8 และ 11), arabinosidases (GHF43), α-arabinofranosidase (GHF62), และ endo-1,4-β-mannanase (GHF26) เป็นต้น (Todakaและคณะ, 2007) โดยโพรโทซัวจะย่อยสลายเซลลูโลสโดยวิธีเอนโดไซโทซิส (endocytosis) และย่อยสลายต่อโดยเอนไซม์ในกลุ่มเซลลูเลส

Nakashimaและคณะ (2002) ได้ศึกษาการย่อยสลายเซลลูโลสในระบบย่อยอาหารส่วนกลางและส่วนหลังของปลวกชั้นต่ำ *Coptotermes formosanus* Shiraki (Rhinotermitidae) โดยใช้การวัดเชิงคุณภาพและวิธีทางชีวโมเลกุล พบว่า เอนไซม์ที่พบในลำไส้ส่วนกลางและส่วนหลังเป็นคนละชนิดและไม่ซ้ำซ้อนกัน โดยในต่อมน้ำลาย ลำไส้ส่วนหน้า และลำไส้ส่วนกลางพบเอนไซม์ที่ผลิตจากตัวปลวกเอง ได้แก่ endo-β-1,4-glucanase หรือ (GHF9) โดยกิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสในลำไส้ส่วนกลางจะน้อยกว่าในต่อมน้ำลาย โดยมีค่าเท่ากับ 8.9% และ 80.8% ตามลำดับ ส่วนในลำไส้ส่วนหลังจะไม่พบเอนไซม์ GHF9 แต่พบเอนไซม์ GHF7 ที่ผลิตมาจากโพรโทซัวที่อาศัยในบริเวณดังกล่าว เมื่อทำการสกัดเอนไซม์หยาบ (crude extract) ออกมาจากทั้งสองบริเวณเพื่อทดสอบการย่อยสลายโครงสร้างผลึกของเซลลูโลส (crystalline cellulose) พบว่า เอนไซม์ที่สกัดจากลำไส้ส่วนหลังมีกิจกรรมในการย่อยเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาลกลูโคสได้ 25.15 ยูนิตต่อปลวก ซึ่งมากกว่ากิจกรรมเอนไซม์ที่สกัดจากต่อมน้ำลาย ลำไส้ส่วนหน้า และส่วนกลางรวมกันซึ่งมีค่าเท่ากับ 14.29 ยูนิตต่อปลวก (Nakashimaและคณะ, 2002) ทั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Fujitaและคณะ (2010) ซึ่งพบเอนไซม์ endoglucanase (GHF9) สูงถึง 6% จากปริมาณโปรตีนทั้งหมดที่หลั่งจากลำไส้ส่วนกลางของปลวก *C. formosanus* (Fujitaและคณะ, 2010)

ระดับแก๊สออกซิเจนและไฮโดรเจนและปฏิกิริยาในลำไส้ส่วนหลัง

จากการตรวจวัดระดับออกซิเจนในกระเปาะหลังของปลวก *R. flavipes* โดยใช้ออกซิเจนไมโครอิเล็กโทรด พบว่า บริเวณส่วนกลางของกระเปาะ (luminal region) ประมาณร้อยละ 40 มีสภาวะแบบไร้ออกซิเจน และรัศมีจากส่วนกลางของกระเปาะออกไป ความเข้มข้นของออกซิเจนจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น โดยระยะจากจุดกึ่งกลางออกไปประมาณ 0.5 และ 1 มิลลิเมตร มีความเข้มข้นของออกซิเจนประมาณ 45 และ 130 ไมโครโมลาร์ ตามลำดับ ซึ่งบริเวณที่มีความเข้มข้นของออกซิเจนในระดับต่ำ (microoxic) จะอยู่บริเวณขอบของกระเปาะ (peripheral region) คิดเป็นร้อยละ 60 (Bruneและคณะ, 1995) แสดงให้เห็นว่าภายในกระเปาะหลังมีสภาวะแบบไร้ออกซิเจนเฉพาะส่วนกลางของกระเปาะเท่านั้น และระดับความเข้มข้นของออกซิเจนมีค่าเพิ่มขึ้นจากบริเวณส่วนกลางไปยังขอบกระเปาะ ดังแสดงในรูปที่ 1 ในส่วนของความดันพาร์เชียลของแก๊สไฮโดรเจน (hydrogen partial pressure) ซึ่งเป็นแก๊สอีกชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของปลวก พบว่า ปลวกแต่ละสปีชีส์มีปริมาณแก๊สไฮโดรเจนแตกต่างกันไป ทั้งนี้ ปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนในกระเปาะหลังมีทิศทางตรงข้ามกับระดับออกซิเจน นั่นคือไฮโดรเจนมีความเข้มข้นสูงที่สุดบริเวณส่วนกลางของกระเปาะและมีค่าลดลงเมื่อเข้าใกล้ขอบกระเปาะ โดยใน

Zootermopsis nevadensis, Reticulitermes santonensis, และ *Cryptotermes secundus* มีความดันพาร์เชียลที่บริเวณตอนกลางของกระเปาะเท่ากับ 55, 25, 2 kPa ตามลำดับ (PesterและBrune, 2007) การที่บริเวณกลางกระเปาะมีแก๊สไฮโดรเจนสูงเมื่อเทียบกับบริเวณอื่น ๆ เนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายเซลลูโลส รวมทั้งโพรโทซัวและแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในกระเปาะมีการผลิตแก๊สไฮโดรเจน Inoueและคณะ (2007) ได้ตรวจพบจีนที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไฮโดรเจนคือ Fe-hydrogenase ในกระเปาะหลังของปลวกชั้นต่ำ *C. formosanus* ซึ่งเป็นจีนของโพรโทซัว *Pseudotrichonympha grassii* (Inoueและคณะ, 2007) อย่างไรก็ตาม การมีปริมาณไฮโดรเจนเกิดขึ้นมากเกินไป อาจทำให้กระบวนการหมักไม่สามารถดำเนินต่อไปได้ จึงต้องมีปฏิกิริยาที่ช่วยลดปริมาณไฮโดรเจนลง เพื่อช่วยให้กระบวนการหมักสามารถเกิดขึ้นได้



รูปที่ 1. ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจน ( ) และแก๊สไฮโดรเจน( )ในกระเปาะหลังของปลวก โดย luminal และ peripheral region คือบริเวณส่วนกลางและขอบของกระเปาะ ตามลำดับ

เนื่องจากขนาดที่เล็กมากของปลวก ทำให้มีโอกาสที่ออกซิเจนจะแพร่เข้าไปในลำไส้ปลวกจนถึงระดับที่สมดุลกับความเข้มข้นของออกซิเจนในบรรยากาศ แต่จากการตรวจวัดพบว่าเฉพาะบริเวณขอบโดยรอบกระเปาะเท่านั้นที่ยังคงมีความเข้มข้นของออกซิเจนในระดับต่ำ โดยเชื่อว่าจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่บริเวณขอบกระเปาะมีบทบาทในการป้องกันและกำจัดออกซิเจนที่แพร่เข้ามาในบริเวณกระเปาะหลังโดยใช้ออกซิเจนที่แพร่เข้ามาในกระบวนการหายใจ (BreznakและPankratz, 1977) ทั้งนี้มีการประมาณว่าออกซิเจนที่จุลินทรีย์ใช้ในกระบวนการหายใจคิดเป็น 21% ของออกซิเจนที่ปลวกใช้ในการหายใจ (Bruneและคณะ, 1995) ทำให้บริเวณส่วนกลางกระเปาะมีสภาวะแบบไร้ออกซิเจน นอกจากนี้การที่ความเข้มข้นของออกซิเจนในบริเวณต่าง ๆ ของกระเปาะหลังมีความเข้มข้นต่างกัน ถือว่ามีความสำคัญมากต่อการดำรงชีวิตของปลวกและจุลินทรีย์ที่อาศัยในลำไส้ปลวก เนื่องจากช่วยให้ปฏิกิริยาต่าง ๆ

ทั้งที่ใช้และไม่ใช้ออกซิเจนสามารถเกิดขึ้นได้ตามปกติ โดยปฏิกิริยาเหล่านี้เกี่ยวข้องกับการผลิตสารเมแทบอไลต์หลักคือ แอซีเทตที่ปลวกสามารถดูดซึมไปใช้ได้ ตัวอย่างเช่น

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน

- การย่อยสลายเซลลูโลสและการหมัก

เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่ถูกย่อยบางส่วนแล้วจากลำไส้ส่วนกลาง จะเคลื่อนที่มายังกระเปาะหลังและถูกย่อยสลายต่อโดยเอนไซม์เซลลูเลสที่หลั่งมาจากจุลินทรีย์ เช่น โพรโทซัวและแบคทีเรีย ซึ่งโอลิโกแซ็กคาไรด์ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายจะถูกหมักต่อไปจนกระทั่งได้แอซีเทต แก๊สไฮโดรเจน (H_2) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ดังปฏิกิริยาที่ 1 ซึ่งปลวกจะดูดซึมแอซีเทตที่เกิดขึ้นเพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานต่อไป

$$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 4H_2 + 2CO_2 \qquad \text{ปฏิกิริยาที่ 1}$$

- รีดักทีฟ แอซีโทเจเนซิส (Reductive acetogenesis) และเมทาโนเจเนซิส (methanogenesis)

ทั้งรีดักทีฟ แอซีโทเจเนซิสและเมทาโนเจเนซิสเป็นกระบวนการที่จุลินทรีย์ใช้แก๊ส H_2 และ CO_2 จุลินทรีย์ที่ผลิตแอซีเทตผ่านปฏิกิริยารีดักทีฟ แอซีโทเจเนซิส (ปฏิกิริยาที่ 2) เรียกว่า แอซีโทเจน (acetogen) ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจน เช่น สไปโรคีท (spirochetes) โดยเฉพาะ *Treponema primitia* (Leadbetterและคณะ, 1999) โดยทั่วไปปฏิกิริยานี้ทำให้มีแอซีเทตเกิดขึ้น 1 ใน 3 ของแอซีเทตที่ผลิตได้ทั้งหมด (PesterและBrune, 2007) ส่วนเมทาโนเจนคือ จุลินทรีย์ที่สามารถผลิตแก๊สมีเทนโดยใช้ H_2 และ CO_2 เป็นซับสเตรต (ปฏิกิริยาที่ 3) โดยทั่วไปเมทาโนเจนจะอาศัยอยู่บริเวณที่มีไฮโดรเจนต่ำกว่าแอซีโทเจน เช่น บริเวณใกล้ขอบกระเปาะหรืออาศัยอยู่ในโพรโทซัว ตัวอย่างเช่น เมทาโนเจนิกอาร์เคีย (methanogenic archaea) ที่คัดแยกออกมาจากกระเปาะหลังของปลวก *R. flavipes* ได้แก่ *Methanobrevibacter filiformis* (Leadbetterและคณะ, 1998)

$$4H_2 + 2CO_2 \rightarrow CH_3COOH + 2H_2O \qquad \text{ปฏิกิริยาที่ 2}$$

$$4H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O \qquad \text{ปฏิกิริยาที่ 3}$$

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในสภาวะใช้ออกซิเจน

- การผลิตแอซีเทตจากแลคเตท

แบคทีเรียที่สามารถผลิตกรดแลคติก (lactic acid bacteria) ทำการย่อยสลายเซลโลไบโอสและไซโลสได้เป็นแลคเตท (lactate) โดยนอกเหนือจากแอซีเทตที่มีปริมาณมากที่สุดในกระเปาะหลังคิดเป็น 86% โมลของสารเมแทบอไลต์ทั้งหมดแล้ว แลคเตทจะมีปริมาณรองลงมาคิดเป็น 1 ใน 3 ของคาร์บอนที่หมุนเวียนอยู่ในกระเปาะ (TholenและBrune, 2000) การมีออกซิเจนที่ขอบของกระเปาะทำให้แบคทีเรีย *Lactococci* และ *Enterococci*

สามารถเปลี่ยนแลคเตทเป็นแอซีเทตได้ ทำให้ความเข้มข้นของแลคเตทในกระเปาะหลังไม่สูงมากนัก ดังนั้น การที่ขอบของกระเปาะมีออกซิเจนอยู่ จึงมีความสำคัญมากกล่าวคือ ทำให้ จุลินทรีย์สามารถผลิตแอซีเทตให้แก่ปลวกได้

สังคมของจุลินทรีย์ในลำไส้ปลวก

การที่ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและไฮโดรเจนในกระเปาะหลัง มีความเข้มข้นแตกต่างกันไปในแต่ละบริเวณ ทำให้พบจุลินทรีย์หลากหลายชนิดในลำไส้ปลวก ไม่ว่าจะเป็นจุลินทรีย์ใช้และไม่ใช้ออกซิเจนในการเติบโต (anaerobic and aerobic microbes) และจุลินทรีย์ไม่ใช้ออกซิเจนไม่แท้ (facultative anaerobic microbes) สังคมของจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในลำไส้ส่วนหลังของปลวกชั้นต่ำมีหลากหลายชนิดและมีความหนาแน่นสูง โดยในของเหลว 1 ไมโครลิตร ที่สกัดจากลำไส้ปลวกสามารถพบจุลินทรีย์ได้ถึง 3 โดเมน คือ ยูคาร์ยา (Eukarya) เช่น โพรโทซัวที่สามารถย่อยเซลลูโลส, อาร์เคีย (archaea) และแบคทีเรีย (Petersonและ Scharf, 2016) โดยในปลวก *R. speratus* พบโพรโทซัว เช่น *Trichonympha agilis*, *Trichonympha mirabilis* (Ohtokoและคณะ, 2000) โพรโทซัวที่พบในปลวก *C. formosanus* เช่น *Pseudotrichonympha grassii*, *Holomastigotoides mirabile* (Watanabeและคณะ, 2002) เป็นต้น

นอกจากโพรโทซัวที่มีบทบาทในการย่อยสลายเซลลูโลสแล้ว สิ่งมีชีวิตกลุ่มโพรแคริโอตก็มีบทบาทสำคัญต่อการดำรงชีวิตของปลวกด้วยเช่นกัน เนื่องจากเศษไม้ซึ่งเป็นอาหารของปลวกนั้น มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบหลักและแทบจะไม่มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบเลยหรือมีก็น้อยมาก ทำให้เศษไม้มีอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงมาก อย่างไรก็ตาม ปลวกสามารถได้รับไนโตรเจนโดยอาศัยจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในกระเปาะหลัง ทำหน้าที่ตรึงไนโตรเจนและเปลี่ยนให้เป็นแอมโมเนีย ดังปฏิกิริยาที่ 4 นอกเหนือจากการตรึงไนโตรเจนจากอากาศแล้ว จุลินทรีย์ยังช่วยในการหมุนเวียนไนโตรเจนจากของเสีย เช่น แอมโมเนีย โดยอาศัยเอนไซม์ glutamine synthetase เพื่อนำไปสังเคราะห์เป็นกรดแอมิโน โดยแบคทีเรียที่สามารถหมุนเวียนไนโตรเจนมาใช้มักจะมีจีนที่เกี่ยวข้องกับ dinitrogenase reductase (Nodaและคณะ, 2002), ammonium transporter, urease และ urea transporter เป็นต้น (Hongoh, 2010)

$$N_2 + 8H^+ + 8e^- + 16ATP \rightarrow 2NH_3 + H_2 + 16ADP + 16\ Pi \qquad \text{ปฏิกิริยาที่ 4}$$

โพรแคริโอตที่อาศัยในกระเปาะหลังของปลวกประมาณ 90% ไม่สามารถคัดแยกได้ ซึ่งอาจเป็นเพราะมีความสัมพันธ์แบบภาวะพึ่งพากันกับปลวก จึงอาจส่งผลต่อความสำเร็จในการคัดแยกแบคทีเรีย ดังนั้น การศึกษาสังคมชีวิตในลำไส้ปลวกส่วนใหญ่จะใช้วิธีทางชีวโมเลกุล เช่น ศึกษาโดยใช้จีน 16S rRNA โดยทั่วไปโพรแคริโอตที่อาศัยอยู่ในลำไส้แบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ โพรแคริโอตที่อาศัยอยู่ร่วมกับโพรโทซัว ได้แก่ กลุ่มที่อาศัยอยู่ภายในโพรโทซัวเรียกว่า endosymbionts เช่น แบคทีเรียในไฟลัม Bacteroidetes, Proteobacteria (Nodaและคณะ, 2005;

Satoและคณะ, 2009) และกลุ่มที่อาศัยอยู่ที่ผิวของโพรโทซัว เรียกว่า ectosymbionts เช่น Spirochaetes, และ Synergistetes (Hongohและคณะ, 2007; Nodaและคณะ, 2003) โดยทั่วไป โพรแคริโอตที่อาศัยบริเวณส่วนกลางกระเปาะมีจำนวนมากกว่ากลุ่มที่อาศัยบริเวณขอบกระเปาะประมาณ 5 เท่า โดยโพรแคริโอตที่อยู่ร่วมกับโพรโทซัวและโพรแคริโอตที่อาศัยอย่างอิสระมีจำนวน 2.71 x 10^7 เซลล์ ส่วนกลุ่มที่อาศัยบริเวณขอบกระเปาะมีจำนวน 5.35 x 10^6 เซลล์ (Nakajimaและคณะ, 2005) โดยกลุ่มของแบคทีเรียที่พบมากที่ขอบกระเปาะของปลวก *R. speratus* คือ Actinobacteria, Firmicutes และ Bacteroidetes ส่วนที่พบมากในบริเวณกลางกระเปาะ เช่น Spirochaetes และ Termite group 1 (Nakajimaและคณะ, 2005) ต่อมาเมื่อมีการศึกษาโดยใช้เทคนิคที่ทันสมัยมากขึ้นคือ next generation sequencing พบว่า มีโพรแคริโอตในลำไส้ส่วนหลังของปลวก *R. flavipes* มากกว่า 4,761 สปีชีส์ และในจำนวนนั้น 99.9% เป็นแบคทีเรีย และ 0.11% เป็นอาร์เคีย โดยสัดส่วนที่พบมากที่สุดคือ ไฟลัม Spirochaetes (24.9%) รองลงมาคือ Elusimicrobia (19.8%), Firmicutes (17.8%), Bacteroidetes (14.1%), Proteobacteria (11.4%), Fibrobacteres (5.8%), Verrucomicrobia (2.0%), Actinobacteria (1.4%) และ Tenericutes (1.3%) (Bouciasและคณะ, 2013) ส่วนอาร์เคียที่พบว่าสามารถผลิตแก๊สมีเทนได้ เช่น *M. filiformis* (Leadbetterและคณะ, 1998)

แบคทีเรียในไฟลัม Verrucomicrobia ที่พบในลำไส้ปลวก

แบคทีเรียในไฟลัม Verrucomicrobia เป็นแบคทีเรียที่พบในสิ่งแวดล้อมที่หลากหลาย เช่น น้ำจืด น้ำทะเล ในดิน นาข้าว บ่อน้ำพุร้อน และลำไส้ปลวก เป็นต้น ข้อมูลจากการสำรวจทางเมทาจีโนมิก (metagenomics) โดยใช้จีน 16S rRNA พบว่า มีแบคทีเรียในไฟลัมนี้ประมาณ 500 สปีชีส์ แต่มีเพียงไม่กี่สปีชีส์เท่านั้นที่สามารถถูกคัดแยกได้ (Leeและคณะ, 2009) ไฟลัม Verrucomicrobia จัดเป็นไฟลัมใหม่ที่ยังมีการศึกษาไม่มากนัก จากการสำรวจทางเมทาจีโนมิกได้มีการตรวจพบแบคทีเรียในไฟลัม Verrucomicrobia ในลำไส้ปลวกหลายสปีชีส์ โดย Nakajimaและคณะ (2005) ได้ศึกษาแบคทีเรียกลุ่มนี้ในกระเปาะหลังของปลวก *R. speratus* พบว่า มี Verrucomicrobia จำนวนน้อยมากที่ขอบกระเปาะคิดเป็น 1-2% และบริเวณกลางกระเปาะประมาณ 5% สำหรับกลุ่มที่พบมากที่สุดบริเวณขอบและกลางกระเปาะ คือ Firmicutes คิดเป็น 33% และ Spirochaetes คิดเป็น 40% ตามลำดับ นอกจากนี้ Bouciasและคณะ (2013) ได้ตรวจพบแบคทีเรียในไฟลัม Verrucomicrobia ประมาณ 2% ในกระเปาะหลังของปลวก *R. flavipes* อย่างไรก็ตาม บทบาทหน้าที่ของแบคทีเรียชนิดนี้ยังไม่ชัดเจนนัก ซึ่งส่วนหนึ่งมาจากข้อจำกัดในเรื่องของการคัดแยกแบคทีเรีย จนกระทั่ง Stevensonและคณะ (2004) ได้คัดแยกแบคทีเรียในไฟลัม Verrucomicrobia สำเร็จ จึงได้เรียกแบคทีเรียกลุ่มนี้ว่า *Termite Associated Verrucomicrobium* (TAV) ซึ่งมีจำนวนทั้งหมด 5 สายพันธุ์คือ TAV1 – TAV5 โดยได้คัดแยกแบคทีเรียกลุ่มนี้จากลำไส้ส่วนหลังของปลวก *R. flavipes* วรรณะกรรมกร ด้วยการนำสารสกัดจากลำไส้ปลวกมาเจือจางแบบอนุกรมโดยใช้อาหารเหลว basal salts พีเอช 7.0 สภาวะที่ใช้บ่มเชื้อคือ ที่ความเข้มข้นของออกซิเจน 2%, CO_2 5%, N_2 93% และแสงน้อย ทำการบ่มที่อุณหภูมิห้องนานประมาณ 30 วัน แล้วนำโคโลนีที่เติบโตบนอาหารแข็งไปศึกษาโดยใช้เทคนิค Plate Wash Polymerase Chain Reaction (PWPCR) และเพิ่มจำนวนจีน

โดยใช้ไพรเมอร์ (primer) ที่จำเพาะเจาะจงกับจีน 16S rRNA ของไฟลัม Verrucomicrobia ผลการทดลองพบว่าสายพันธุ์ TAV1 และ TAV2 สามารถคัดแยกได้จากอาหารแข็ง basal medium ที่เติมสารสกัดจากยีสต์ เพปโทนและแอซีเทต ส่วนสายพันธุ์ TAV3 และ TAV4 คัดแยกได้จากอาหารชนิดเดียวกันแต่ไม่เติมแอซีเทต (Stevensonและคณะ, 2004) ดังนั้น การที่สามารถคัดแยกแบคทีเรีย Verrucomicrobia ซึ่งมีจำนวนไม่มากนักออกจากลำไส้ปลวกได้สำเร็จทำให้สามารถศึกษาคุณสมบัติของแบคทีเรียได้เพิ่มเติม โดยได้มีการจัดแบคทีเรียกลุ่มนี้ให้อยู่ในวงศ์ *Opitutaceae* แบคทีเรียเหล่านี้จึงได้ชื่อว่า *Opitutaceae bacterium strain TAV1, Diplosphaera colotermitum (TAV2)* และ *Opitutaceae bacterium strain TAV5* ปัจจุบันนี้วงศ์ *Opitutaceae* ประกอบด้วย 3 จีนัส คือ *Opitutus* (Chinและคณะ, 2001), *Alterococcus* (Shiehและ Jean, 1998) และ *Diplosphaera* (Wertzและคณะ, 2012) โดยจำนวนแบคทีเรียในวงศ์นี้คิดเป็น 2.4% ซึ่งถือว่ามีจำนวนไม่มากนักเมื่อเทียบกับวงศ์อื่น (Coleและคณะ, 2009) ตารางที่ 1 แสดงลักษณะจีโนมของแบคทีเรียในวงศ์ *Opitutaceae*

ตารางที่ 1. ลักษณะจีโนมของแบคทีเรียในวงศ์ *Opitutaceae* (Rodriguesและ Isanapong, 2014)

Species	***Size (Mb)***	***GC %***	***Number of Genes***	***Number of Proteins***	***NCBI accession***
Opitutus terrae	*5.96*	*65.3*	*4,704*	*4,632*	NC_010571
Diplosphaera colotermitum	*5.22*	*60.8*	*4,896*	*4,826*	NZ_ABEA00000000
Alterococcus agarolyticus	*ND**	*65.8*	*ND**	*ND**	-
Opitutaceae bacterium strain TAV1	*7.07*	*63.4*	*6,051*	*5,987*	NZ_AHKS02000000
Opitutaceae bacterium strain TAV5	*7.41*	*63.9*	*6,056*	*6,006*	NZ_AGJF00000000

*ND = ไม่ได้ถูกตรวจสอบ (not determined)

จากการศึกษารายละเอียดจีโนมของแบคทีเรียในวงศ์ *Opitutaceae* ที่คัดแยกได้จากลำไส้ปลวก โดย Isanapongและคณะ (2012) ได้ศึกษาจีโนมของแบคทีเรีย *Opitutaceae bacterium* strain TAV1 ด้วยวิธี Illumina sequencing และ 454 pyrosequencing พบว่า สายพันธุ์ TAV1 มีจีนที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายเซลลูโลสและคาร์โบไฮเดรต ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่จัดอยู่ในกลุ่มไกลโคไซด์ไฮโดรเลสหลายชนิด เช่น GHF5, cellulase, endo-1,4-β-

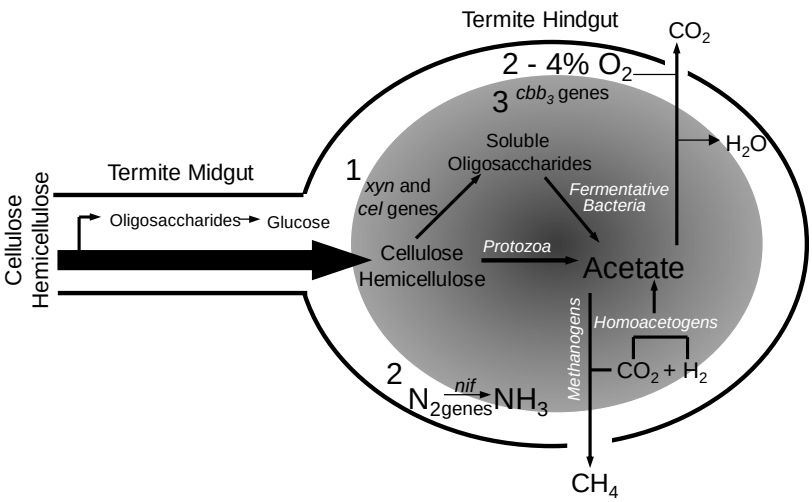
xylanase, N-acetylglucosamine-6-phosphate deacetylase, peptidoglycan glycosyltransferase, และ 1,4-α-glucan branching enzyme เป็นต้น (Isanapongและคณะ, 2012) ต่อมา Kotakและคณะ (2015) ได้ศึกษาจีโนมของแบคทีเรีย *Opitutaceae bacterium* strain TAV5 ด้วยวิธี Illumina sequencing (HiSeq 2000) และ 454 sequencing (FLX Titanium) พบว่า สายพันธุ์ TAV5 จัดเป็นแบคทีเรียในกลุ่มเมทิโลโทรฟ (methylotroph) เนื่องจากมีจีนที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายสารประกอบที่มีคาร์บอนหนึ่งอะตอม เช่น จีนที่เกี่ยวข้องกับเมแทบอลิซึมของฟอร์เมท เช่น formate dehydrogenase, formate transporter เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบจีนที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายเซลลูโลสคือ GHF5, GHF9 และเฮมิเซลลูโลส คือ GH8, 10, 26, 28 และ 53 รวมทั้งจีนที่เกี่ยวข้องกับการย่อย protocatechuate ซึ่งมีต้นกำเนิดมาจากลิกนิน เช่น 3-carboxymuconate cyclase (EC 5.5.1.5) และ 4-carboxymuconolactone decarboxylase (EC 4.1.1.44) หรือจีนที่เกี่ยวข้องกับการเปิดวงแหวนอะโรมาติก เช่น dioxygenases และ dienelactone hydrolase (EC 3.1.1.45) และมีการตรวจพบจีนที่เกี่ยวข้องกับการรวมแอมโมเนียและซัลเฟต (ammonia and sulfate assimilation) รวมทั้งจีนที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ในวัฏจักรยูเรียและการตรึงไนโตรเจน เป็นต้น (Kotakและคณะ, 2015)

ฟีโนไทป์ (phenotype) ของ *Diplosphaera colotermitum* (TAV2)

แบคทีเรีย *Opitutaceae bacterium* อีกหนึ่งสายพันธุ์ที่ได้รับการศึกษามากที่สุดคือ *Diplosphaera colotermitum* (TAV2) โดย Wertzและคณะ (2012) ได้ศึกษาฟีโนไทป์ของแบคทีเรียสายพันธุ์นี้และได้เรียกชื่อแบคทีเรียชนิดนี้ว่า *Diplosphaera colotermitum* เนื่องจากลักษณะเด่นที่มักจะพบเซลล์ที่มีลักษณะกลมอยู่เป็นคู่หรือเป็นกลุ่ม (*Diplosphaera*) และระบุแหล่งที่มาจากลำไส้ปลวก (*colotermitum*) แบคทีเรียชนิดนี้เป็นแบคทีเรียแกรมลบ เซลล์มีขนาดเล็กประมาณ 0.5 ไมครอน เคลื่อนที่ไม่ได้ โคโลนีบนอาหารแข็งมีสีครีมขนาดประมาณ 2-4 มิลลิเมตร โคโลนีมีลักษณะฉ่ำ คล้ายมีเมือก ขอบเรียบ จากการศึกษาพบว่า เซลล์ไม่มีกิจกรรมของเอนไซม์ catalase และ peroxidase มีจีนที่เกี่ยวข้องกับการตรึงไนโตรเจน (*nif*) และสามารถเติบโตได้บนอาหารที่ไม่มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบ (nitrogen-free medium) และเติบโตได้ดีในสภาวะความเข้มข้นของออกซิเจนต่ำ (microaerobic condition) ประมาณ 2-8% โดยมีเวลาที่ใช้ในการเติบโตเป็นสองเท่า (generation time) เท่ากับ 7.7 – 8.3 ชั่วโมง ในขณะที่ใช้เวลาในการเติบโตที่สภาวะออกซิเจน 12 - 20% มีค่าเท่ากับ 9.2 – 11.7 ชั่วโมง อย่างไรก็ตาม แบคทีเรียไม่สามารถเติบโตได้ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนแม้จะทดสอบโดยใช้ตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายหลายชนิด อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดต่อการเติบโตคือ 30^{o}C (มีช่วงอุณหภูมิที่สามารถเติบโตได้คือ 15 ถึง 35^{o}C) และพีเอชที่เหมาะสมที่สุดต่อการเติบโตคือ 7.0 (มีช่วงพีเอชที่สามารถเติบโตได้คือ 5.5 ถึง 7.5) ซับสเตรตที่เซลล์สามารถใช้ในการเติบโต เช่น กลูโคส กาแลกโทส (galactose) มอลโทส (maltose) เซลโลไบโอส (cellobiose) และแป้ง (starch) เป็นต้น ส่วนซับสเตรตที่เซลล์ไม่สามารถใช้ในการเติบโต เช่น ฟรุกโตส ไรโบส ซูโครส gluconic acid, xanthine และ tannic acid เป็นต้น (Wertzและคณะ, 2012)

บทบาทของ *Diplosphaera colotermitum* (TAV2) ในลำไส้ปลวก

Isanapongและคณะ (2013) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการสร้าง mRNA โดยใช้วิธี microarray hybridization และโปรตีนโดยใช้วิธี LC-MS/MS ของแบคทีเรีย *D. colotermitum* TAV2 ใน 2 สภาวะคือ ที่ความเข้มข้นของออกซิเจน 2% และ 20% โดยที่ออกซิเจน 2% เป็นการจำลองสภาวะความเข้มข้นออกซิเจนในลำไส้ปลวก และออกซิเจน 20% เป็นความเข้มข้นของออกซิเจนในบรรยากาศทั่วไป ผลการทดลองพบว่า แบคทีเรียชนิดนี้น่าจะมีศักยภาพในการย่อยสลายไซแลน สามารถตรึงไนโตรเจนและผลิตกรดแอมิโนและมีส่วนช่วยในการกำจัดออกซิเจนในลำไส้ปลวก โดยอาศัยอยู่บริเวณขอบของกระเปาะหลังซึ่งบทบาทของแบคทีเรียชนิดนี้ในลำไส้ปลวกสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองดังรูปที่ 2 และสามารถอธิบายรายละเอียดในแต่ละประเด็นได้ดังนี้ (Isanapongและคณะ, 2013)



รูปที่ 2. แบบจำลองแสดงบทบาทหน้าที่ของ *D. colotermitum* ในกระเปาะหลังของปลวก โดย 1 คือ การย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส 2 คือ การตรึงไนโตรเจน และ 3 คือ ศักยภาพในการกำจัดออกซิเจน (Isanapongและคณะ, 2013)

เมแทบอลิซึมของคาร์บอน จากการศึกษาจีโนมของ *D. colotermitum* พบว่ามีจีนหลายชนิดที่เกี่ยวข้องกับเมแทบอลิซึมของคาร์บอน เช่น จีนที่เกี่ยวกับการย่อยสลายไซแลนและเซลลูโลส เช่น xylanase, acetyl xylan esterase, cellulase (glycoside hydrolase family 5), 1,4-β-glucanase และ α-L-arabinofuranosidase เป็นต้น จากการศึกษาการสร้าง mRNA และโปรตีน พบว่า *D. colotermitum* อาจมีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายโครงสร้างของไซแลน เนื่องจากเซลล์ได้มีการสร้างทั้ง mRNA และโปรตีนหลายชนิดในสภาวะออกซิเจน 2% เช่น acetyl xylan

esterase, xylan α-1,2-glucuronosidase และ xylose isomerase ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของไซแลนมีลักษณะเป็นเฮเทอโรพอลิเมอร์ จึงต้องการเอนไซม์หลายชนิดที่ทำงานร่วมกันเพื่อย่อยสลายโครงสร้างดังกล่าว (Brune, 2014)

เมแทบอลิซึมของไนโตรเจน มีความสำคัญมากต่อการเติบโตของปลวก เนื่องจากแหล่งอาหารของปลวกนั้นประกอบด้วยคาร์บอนเกือบทั้งหมดและแทบจะไม่มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบ ดังนั้น ปลวกจึงต้องอาศัยจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในลำไส้ในการจัดหาไนโตรเจนให้ ทั้งนี้จากการศึกษาพบว่า *D. colotermitum* มีศักยภาพในการตรึงไนโตรเจน เนื่องจากตรวจพบเพปไทด์ (peptide) ที่เกี่ยวข้องกับการตรึงไนโตรเจน เช่น dinitrogenase reductase (*nifH*) ในสภาวะออกซิเจน 2% ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Wertzและคณะ (2012) ที่พบว่า *D. colotermitum* สามารถเติบโตได้ดีในอาหารที่ไม่มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบ เนื่องจากมียีนที่เกี่ยวข้องกับการตรึงไนโตรเจน (*nif*) นอกจากนี้จากผลการศึกษาเกี่ยวกับการสร้าง mRNA และโปรตีน พบว่า *D. colotermitum* สามารถสังเคราะห์กรดแอมิโนได้หลายชนิด รวมทั้งในสภาวะออกซิเจน 2% ยังตรวจพบเอนไซม์ glutamate dehydrogenase และ glutamate synthase ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่มีความสำคัญในเมแทบอลิซึมของไนโตรเจน นอกจากนี้ยังตรวจพบเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์กรดแอมิโนออร์นิทีน (ornithine) และเอนไซม์ยูรีเอส (urease α-subunit domain protein) แสดงให้เห็นถึงการหมุนเวียนไนโตรเจนจากของเสีย จากการตรวจพบ mRNA และโปรตีนที่เกี่ยวข้องกับเมแทบอลิซึมของไนโตรเจนในด้านต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่า แบคทีเรียชนิดนี้น่าจะมีศักยภาพในการจัดหาไนโตรเจนให้แก่ปลวกได้ หรือมีการหมุนเวียนแลกเปลี่ยนไนโตรเจนระหว่างแบคทีเรียและปลวก แม้ว่าจำนวนประชากรของ Verrucomicrobia ในลำไส้ปลวกจะมีจำนวนไม่มากนัก แต่ก็มีบทบาทสำคัญในสิ่งแวดล้อมที่แทบจะไม่มีไนโตรเจนอยู่เลย (Isanapongและคณะ, 2013)

ศักยภาพในการกำจัดออกซิเจน จากการศึกษาจีโนมของ *D. colotermitum* แสดงให้เห็นว่าแบคทีเรียชนิดนี้น่าจะอาศัยอยู่บริเวณขอบของกระเปาะหลัง และมีบทบาทในการช่วยควบคุมความเข้มข้นออกซิเจนในกระเปาะหลังของปลวก เนื่องจากในขั้นตอนการคัดแยกแบคทีเรียสามารถคัดแยกได้ในสภาวะที่ออกซิเจน 2% นอกจากนี้ ในสภาวะออกซิเจน 2% เซลล์มีการสร้างโปรตีน *cbb3*-type cytochrome oxidase ซึ่งเป็นโปรตีนที่สามารถจับกับออกซิเจนได้ดี ทั้งนี้ จากการศึกษาอัตราการเติบโตของ *D. colotermitum* ที่สภาวะออกซิเจน 2% และออกซิเจน 20% พบว่า ที่สภาวะออกซิเจน 2% มีอัตราการเติบโตเท่ากับ 0.0368 ชั่วโมง$^{-1}$ ซึ่งสูงกว่าอัตราการเติบโตที่สภาวะออกซิเจน 20% ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.0313 ชั่วโมง$^{-1}$ ทำให้เวลาในการเพิ่มจำนวนเป็นสองเท่าที่สภาวะออกซิเจน 2% เร็วกว่าสภาวะออกซิเจน 20% ประมาณ 4 ชั่วโมง (Isanapongและคณะ, 2013) ทั้งนี้ ข้อมูลดังกล่าวเป็นการยืนยันฟีโนไทป์ของแบคทีเรียซึ่งเติบโตได้ดีที่ความเข้มข้นของออกซิเจนต่ำ การที่เซลล์เติบโตได้ช้าที่สภาวะออกซิเจน 20% อาจเป็นเพราะเกิดความเครียดจากความเข้มข้นของออกซิเจนที่มากเกินไป (oxidative stress) จึงต้องใช้เวลาในการปรับสภาพเพื่อให้เซลล์สามารถเติบโตได้ ส่งผลให้ใช้เวลาในช่วง lag phase นานขึ้น นอกจากนี้ในสภาวะออกซิเจน 20% ยังพบเพปไทด์ที่ได้มาจาก superoxide dismutase ซึ่งเกี่ยวข้องกับการกำจัดออกซิเจน และพบโปรตีนที่เกี่ยวข้อง

กับการสร้าง [Fe-S] clusters ซึ่งเป็นโปรตีนซ่อมแซมในช่วงที่เกิดสภาวะ oxidative stress ผลิตมากขึ้นด้วย (Isanapongและคณะ, 2013)

สรุป

สังคมชีวิตในลำไส้ส่วนหลังของปลวกประกอบด้วยจุลินทรีย์หลากหลายชนิดซึ่งมีความหนาแน่นแตกต่างกันไป จุลินทรีย์แต่ละชนิดอาจมีบทบาทหน้าที่ซ้ำซ้อนหรือแตกต่างกันไป แต่มีวัตถุประสงค์ร่วมกันคือเพื่อทำให้สังคมชีวิตในลำไส้ปลวกสามารถดำรงอยู่ได้ ปลวกไม่สามารถย่อยสลายลิกโนเซลลูโลสในเนื้อไม้ได้อย่างสมบูรณ์ หากปราศจากกลุ่มของจุลินทรีย์หลากหลายชนิดที่อาศัยอยู่ในลำไส้ปลวกช่วยในการย่อยสลายลิกโนเซลลูโลส และเปลี่ยนเป็นแอซีเทต ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานหลักของปลวก นอกเหนือจากโพรโทซัวที่อาศัยในลำไส้ปลวกที่ทำหน้าที่ย่อยสลายลิกโนเซลลูโลสแล้ว แบคทีเรียก็อาจมีบทบาทหน้าที่ในการย่อยสลายลิกโนเซลลูโลสได้ด้วยเช่นกัน เนื่องจากการศึกษาจีโนม mRNA และโปรตีนของแบคทีเรียในไฟลัม Verrucomicrobia คือ *D. colotermitum* ที่สกัดจากลำไส้ปลวกชั้นต่ำ พบว่า มีจีนและการผลิตโปรตีนหลายชนิดที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายลิกโนเซลลูโลส มีศักยภาพในการจัดหาไนโตรเจนให้แก่ปลวก และมีบทบาทช่วยควบคุมความเข้มข้นของออกซิเจนภายในกระเปาะหลัง ในด้านการใช้ประโยชน์ อาจนำแบคทีเรียกลุ่มนี้ไปประยุกต์ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ เช่น การโคลนจีนและผลิตเอนไซม์ที่สามารถย่อยสลายพอลิแซ็กคาไรด์ เซลลูโลสและ เฮมิเซลลูโลส เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

จารุณี วงศ์ข้าหลวง และขวัญชัย เจริญกรุง, (2551) ปลวกการป้องกันและกำจัด, พิมพ์ครั้งที่ 1, อักษรสยามการพิมพ์, กรุงเทพฯ, 104 หน้า.

Blum D.L., Li X.L., Chen H. and Ljungdahl L.G. (1999) Characterization of an acetyl xylan esterase from the anaerobic fungus *Orpinomyces* sp. strain PC-2. Appl. Environ. Microbiol., 65(9), 3990-3995.

Boucias D.G., Cai Y., Sun Y., Lietze V.U., Sen R et al., (2013) The hindgut lumen prokaryotic microbiota of the termite *Reticulitermes flavipes* and its responses to dietary lignocellulose composition. Mol. Ecol., 22(7): 1836-1853.

Breznak J.A. and Pankratz H.S., (1977) In situ morphology of the gut microbiota of wood-eating termites [*Reticulitermes flavipes* (Kollar) and *Coptotermes formosanus* Shiraki]. Appl. Environ. Microbiol., 33(2): 406-426.

Brune A., Emerson D. and Breznak J.A., (1995) The termite gut microflora as an oxygen sink: microelectrode determination of oxygen and pH gradients in guts of lower and higher termites. Appl. Environ. Microbiol., 61(7): 2681-2687.

Brune A., (2014) Symbiotic digestion of lignocellulose in termite guts. Nat. Rev. Micro., 12(3): 168-180.

Chin K.J., Liesack W. and Janssen P.H., (2001) *Opitutus terrae* gen. nov., sp. Nov., to accommodate novel strains of the division 'Verrucomicrobia' isolated from rice paddy soil. Int. J. Syst. Evol. Microbiol., 51: 1965-1968.

Cole J.R., Wang Q., Cardenas E., Fish J., Chai B et al., (2009) The ribosomal database project: improved alignments and new tools for rRNA analysis. Nucleic Acids Res., 37: 5 pages, doi: 10.1093/nar/gkn879

Eggleton P., (2010) "An introduction to termites: biology, taxonomy and functional morphology", pp. 1-26, In: Bignell D.E., Roisin Y. and Lo N. (Eds), Biology of Termites: a Modern Synthesis, Springer, Netherlands.

Fujita A., Hojo M., Aoyagi T., Hayashi Y., Arakawa G et al., (2010) Details of the digestive system in the midgut of *Coptotermes formosanus* Shiraki. J. Wood Sci., 56(3): 222-226.

Hongoh Y., Sato T., Dolan M.F., Noda S., Ui S et al., (2007) The motility symbiont of the termite gut flagellate *Caduceia versatilis* is a member of the "synergistes" group. Appl. Environ. Microbiol., 73(19): 6270-6276.

Hongoh Y., (2010) Diversity and genomes of uncultured microbial symbionts in the termite gut. Biosci. Biotechnol. Biochem., 74(6): 1145-1151

Inoue J.I., Saita K., Kudo T., Ui S. and Ohkuma M., (2007) Hydrogen production by termite gut protists: characterization of iron hydrogenases of Parabasalian symbionts of the termite *Coptotermes formosanus*. Eukaryot. Cell., 6(10): 1925-1932.

Isanapong J., Goodwin L., Bruce D., Chen A., Detter C et al., (2012) High-quality draft genome sequence of the *Opitutaceae* bacterium strain TAV1, a symbiont of the wood-feeding termite *Reticulitermes flavipes*. J. Bacteriol., 194(10): 2744-2745.

Isanapong J., Hambright W., Willis A.G., Boonmee A., Callister S.J et al., (2013) Development of an ecophysiological model for *Diplosphaera colotermitum* TAV2, a termite hindgut Verrucomicrobium. The ISME J., 7(9): 1803-1813.

Kotak M., Isanapong J., Goodwin L., Bruce D., Chen A et al., (2015) Complete genome sequence of the *Opitutaceae* bacterium strain TAV5, a potential facultative methylotroph of the wood-feeding termite *Reticulitermes flavipes*. Genome Announc., 3(2): 2 pages, doi: 10.1128/genomeA.00060-15

Leadbetter J.R., Crosby L.D. and Breznak J.A., (1998) *Methanobrevibacter filiformis* sp. nov., A filamentous methanogen from termite hindguts. Arch. Microbiol., 169(4): 287-292.

Leadbetter J.R., Schmidt T.M., Graber J.R. and Breznak J.A., (1999) Acetogenesis from H_2 plus CO_2 by spirochetes from termite guts. Science, 283(5402): 686-689.

Lee K.C., Webb R.I., Janssen P.H., Sangwan P., Romeo T et al., (2009) Phylum Verrucomicrobia representatives share a compartmentalized cell plan with members of bacterial phylum *Planctomycetes*. BMC Microbiol., 9: 5.

Lo N. and Eggleton P., (2010) "Termite phylogenetics and co-cladogenesis with symbionts", pp. 27-50, In: Bignell D.E., Roisin Y. and Lo N. (Eds), Biology of Termites: a Modern Synthesis, Springer, Netherlands.

Nakajima H., Hongoh Y., Usami R., Kudo T. and Ohkuma M., (2005) Spatial distribution of bacterial phylotypes in the gut of the termite *Reticulitermes speratus* and the bacterial community colonizing the gut epithelium. FEMS Microbiol. Ecol., 54(2): 247-255.

Nakashima K., Watanabe H., Saitoh H., Tokuda G. and Azuma J.I., (2002) Dual cellulose-digesting system of the wood-feeding termite, *Coptotermes formosanus* Shiraki. Insect Biochem. Molec., 32(7): 777-784.

Ni J. and Tokuka G., (2013) Lignocellulose-degrading enzymes from termites and their symbiotic microbiota. Biotechnol. Adv., 31(6): 838-850.

Noda S., Iida T., Kitade O., Nakajima H., Kudo T. and Ohkuma M., (2005) Endosymbiotic bacteroidales bacteria of the flagellated protist *Pseudotrichonympha grassii* in the gut of the termite *Coptotermes formosanus*. Appl. Environ. Microbiol., 71(12): 8811-8817.

Noda S., Ohkuma M. and Kudo T., (2002) Nitrogen fixation genes expressed in the symbiotic microbial community in the gut of the termite *Coptotermes formosanus*. Microbes Environ., 17(3), 139-143.

Noda S., Ohkuma M., Yamada A., Hongoh Y. and Kudo T., (2003) Phylogenetic position and in situ identification of ectosymbiotic spirochetes on protists in the termite gut. Appl. Environ. Microbiol., 69(1): 625-633.

Ohkuma M., (2008) Symbioses of flagellates and prokaryotes in the gut of lower termites. Trends Microbiol., 16(7): 345-352.

Ohtoko K., Ohkuma M., Moriya S., Inoue T., Usami R. and Kudo T., (2000) Diverse genes of cellulase homologues of glycosyl hydrolase family 45 from the symbiotic protists in the hindgut of the termite *Reticulitermes speratus*. Extremophiles., 4(6): 343-349.

Pester M. and Brune A., (2007) Hydrogen is the central free intermediate during lignocellulose degradation by termite gut symbionts. The ISME J., 1(6): 551-565.

Peterson B.F. and Scharf M.E., (2016) Lower termite associations with microbes: synergy, protection, and interplay. Front. Microbiol., 7: Article ID 422, 7 pages, http://dx.doi.org/10.3389/fmicb.2016.00422.

Rodrigues J. and Isanapong J., (2014) "The family *Opitutaceae*", pp. 751–756, In: Rosenberg E., DeLong E., Lory S., Stackebrandt E. and Thompson F. (Eds), The Prokaryotes—Other Major Lineages of Bacteria and the Archaea, 4th edition, Springer, Berlin Heidelberg.

Sato T., Hongoh Y., Noda S., Hattori S., Ui S. and Ohkuma M., (2009) *Candidatus Desulfovibrio* trichonymphae, a novel intracellular symbiont of the flagellate *Trichonympha agilis* in termite gut. Environ. Microbiol., 11(4): 1007-1015.

Shieh W.Y. and Jean W.D., (1998) *Alterococcus agarolyticus*, gen. nov., sp. nov., a halophilic thermophilic bacterium capable of agar degradation. Can. J. Microbiol., 44(7): 637-645.

Stevenson B.S., Eichorst S.A., Wertz J.T., Schmidt T.M. and Breznak J.A., (2004) New strategies for cultivation and detection of previously uncultured microbes. Appl. Environ. Microbiol., 70(8): 4748-4755.

Tholen A. and Brune A., (2000) Impact of oxygen on metabolic fluxes and in situ rates of reductive acetogenesis in the hindgut of the wood-feeding termite *Reticulitermes flavipes*. Environ. Microbiol., 2(4): 436-449.

Todaka N., Moriya S., Saita K., Hondo T., Kiuchi I et al., (2007) Environmental cDNA analysis of the genes involved in lignocellulose digestion in the symbiotic protist community of *Reticulitermes speratus*. FEMS Microbiol. Ecol., 59(3): 592-599.

Watanabe H., Nakashima K., Saito H. and Slaytor M., (2002) New endo-beta-1,4-glucanases from the parabasalian symbionts, *Pseudotrichonympha grassii* and *Holomastigotoides mirabile* of *Coptotermes termites*. Cell. Mol. Life Sci., 59(11): 1983-1992.

Wertz J.T., Kim E., Breznak J.A., Schmidt T.M. and Rodrigues J. L.M., (2012) Genomic and physiological characterization of the Verrucomicrobia isolate *Diplosphaera colitermitum* gen. nov., sp. nov., reveals microaerophily and nitrogen fixation genes. Appl. Environ. Microbiol., 78(5): 1544-1555.

Yoshimura T., Fujino T., Itoh T., Tsunoda K. and Takahashi M., (1996) Ingestion and decomposition of wood and cellulose by the protozoa in the hindgut of *Coptotermes formosanus* Shiraki (Isoptera: Rhinotermitidae) as evidenced by polarizing and transmission electron microscopy. Holzforschung., 50(2): 99-104.